

「生活支援ロボット実用化プロジェクト」

事後評価報告書

表紙

平成26年11月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

研究評価委員会

平成26年11月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
理事長 古川 一夫 殿

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会 委員長 西村 吉雄

NEDO技術委員・技術委員会等規程第33条の規定に基づき、別添のとおり評価結果について報告します。

「生活支援ロボット実用化プロジェクト」

事後評価報告書

平成26年11月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

研究評価委員会

目 次

はじめに	1
分科会委員名簿	2
審議経過	3
評価概要	4
研究評価委員会におけるコメント	7
研究評価委員会委員名簿	8
第1章 評価	
1. プロジェクト全体に関する評価結果	1-1
1. 1 総論	
1. 2 各論	
2. 評点結果	1-20
第2章 評価対象プロジェクト	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会における説明資料	2-2
参考資料1 評価の実施方法	参考資料 1-1
参考資料2 分科会議事録	参考資料 2-1

はじめに

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される研究評価分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「生活支援ロボット実用化プロジェクト」の事後評価報告書であり、NEDO技術委員・技術委員会等規程第31条に基づき、研究評価委員会において設置された「生活支援ロボット実用化プロジェクト」（事後評価）研究評価分科会において評価報告書案を策定し、第40回研究評価委員会（平成26年11月27日）に諮り、確定されたものである。

平成26年11月
独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

「生活支援ロボット実用化プロジェクト」

事後評価分科会委員名簿

(平成26年9月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	むかいどの まさお 向 殿 政男	明治大学 名誉教授
分科会長 代理	おおみち たけお 大道 武生	名城大学 理工学部 メカトロニクス工学科 教授
委員	ごしま きよくに 五島 清国	公益財団法人 テクノエイド協会 企画部長
	ごないかわ ひろし 五内川 拓史	株式会社 ユニファイ・リサーチ 代表取締役社長
	すぎもと のぼる 杉本 旭	明治大学 理工学部 機械工学科 教授
	ながたけ かずお 長竹 和夫	株式会社 ADTech 代表取締役社長
	はせがわ つとむ 長谷川 勉	熊本高等専門学校 校長

敬称略、五十音順

審議経過

● 第1回 分科会（平成26年9月17日）

公開セッション

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明

非公開セッション

6. プロジェクトの詳細説明
7. 全体を通しての質疑

公開セッション

8. まとめ・講評
9. 今後の予定、その他
10. 閉会

● 現地調査会（平成26年9月9日）

CYBERDYNE 株式会社、生活支援ロボット安全検証センター（茨城県つくば市）

● 第40回研究評価委員会（平成26年11月27日）

評価概要

1. 総論

1. 1 総合評価

生活支援ロボットの安全検証手法を開発したこと、パーソナルケアロボットの国際安全規格 ISO13482 の発行を主導したこと、安全検証センターを発足させたこと、複数の企業が実際に認証を取得あるいは取得準備していること、さらにプロジェクトメンバーが開発した製品が同規格の認証を得て商品化されたことは高く評価できる。

生活を支援するロボット開発の今後の羅針盤的な役割を果たすとともに、ロボット介護機器開発が政府の掲げる日本成長戦略へ位置付けられるきっかけとなるなどの波及効果をもたらした。ただし、開発した技法や手法を他に応用できるような共通化と情報共有を積極的に行う視点がほしかった。

生活支援ロボットに関し、安全規格発行、安全性検証・認証については世界をリードしているといえ、引き続きこれを維持発展させる方策を望む。その際、今後のビジネス展開を予測しておくこと、中小企業が開発成果を適用するための資金・人材の確保等に、留意する必要があると思われる。

1. 2 今後に対する提言

ISO13482 に従ってわが国から多くのロボットが安全認証されて社会に導入されることで、ISO13482 の確実な普及を図るとともに、欧州での法規化動向を把握すること等に留意しながら、各分野における個別規格の在り方を検討することが重要である。なお、ロボットによってもたらされるベネフィットとともに、安全の限界と事故を許容するための基準を示して、社会的な受容の拡大とともに普及を図る必要がある。

本プロジェクトを切掛けとして、グローバルな製品流通のための認証システムがわが国でも展開されようとしていることは大きな意義がある。それを継続発展させていくために、安全検証センターの着実な運営について必要に応じてフォローし、認証機関の充実等を検討して頂きたい。

生活支援ロボット開発に関しては、技術サイドの視点よりは、利用者サイド、現場サイドの視点を重視した今後の更なる発展を期待したい。また、身近な機器として実用的に活用されるためには、一般的な製品情報に留まらず、使用方法や使用環境に関する広い情報提供が必要になるとともに、使いこなすための教育・訓練等、人材養成を行うことも重要である。ただし、安全性向上の観点から、技術的に改良すべき点が未だあることも忘れてはならない。

認証取得がビジネス化に有効である例を一つでも増やすことが肝要である。ただし、安全性の確保・実証が直ちにロボットの普及につながるとはいえず、ロボット産業を支援する他の方策も検討頂きたい。

2. 各論

2. 1 事業の位置付け・必要性について

本プロジェクトは、世界的な規模で高齢化が進展する中において、今後の国際競争にリードするとともに、国際貢献の観点からも大変評価できるものである。

生活支援ロボットの安全認証は、同ロボットの実用化に不可欠なものであり、世界に先駆けて日本が確立すべき最重要課題である。その性格および現状から、公的機関が中心になる必要があり、これまでに多くのロボット技術開発を行ってきた NEDO の関与が最も適切である。

リスクマネジメント等の安全検証実施の組織化については、国の推進事業であるが故に実現できたものであると判断する。

2. 2 研究開発マネジメントについて

国際標準規格をリードする、リスクアセスメントを製品化前の実機で行う、安全確保の支援を行う仕組みを作る、という目標は明確であり妥当である。安全検証手法の研究開発と安全技術を導入した生活支援ロボットの開発の連携を可能とした計画であった。

予算に対する成果の妥当性、予算の配分の適切性に関しては、定性的な説明に留まった。

現段階で国内にて活動できる民間を含む公的機関が網羅された体制で進められた。プロジェクトリーダーのもとに、各分野の生活支援ロボットの開発グループと安全性検証手法の開発グループが互いに連携して、リスクアセスメント及び安全性試験や適合性評価の項目策定等を、組織的にかつ戦略的に実施した。

事業化の進め方は一部を除き明確化されていた。なお、認証効果追跡調査の内容をあらかじめ明確にして追跡調査を行うことが望ましい。

研究開発の進捗にあわせた処置が実施されていた。

2. 3 研究開発成果について

リスクアセスメントの手法、安全性検証の手法を開発して安全認証を確立したこと、国際標準規格である ISO13482 を我が国主導で成立させたこと、複数の民間参加企業がこの認証を取得したことは大きな成果であり、目標を達成している。

安全検証センターの設立により、既に市場化がなされている分野だけでなく、介護・移乗などの新たな分野での市場拡大の可能性を築いた。安全性検証と標準確立が目的のためやむを得ないが、ライセンス化や権利防衛の観点から、特許提案の活動を積極的に実施することが望ましい。

ロボット開発企業への認証取得や安全検証センター利用の推進、一般に向けた情報発信が今後の課題である。

2. 4 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

今回のプロジェクトで、いくつかの安全認証の実例を通して実用の可能性が明確化した。

複数の参加企業が国際標準規格を取得あるいは取得の準備を行い、市場にそれらの製品を

投入あるいは投入準備を進めていること、また、各企業の事業としての計画も提示されていることから、実用化という目標は達成した。国際認証という武器を得たことで、今後生活支援ロボットの市場拡大が期待できるが、その実現性には認証を受けた製品の実績や認証自体のブランド価値向上へ取り組みが望まれる。

生活支援ロボットは多岐にわたることから、安全性検証・認証でカバーされていないものがあり、商用化前までには検証・認証できるよう継続的研究開発が望まれる。

研究評価委員会におけるコメント

第40回研究評価委員会（平成26年11月27日開催）に諮り、以下のコメントを評価報告書へ附記することで確定した。

- 開発したロボットを認証して市場に投入し、実績を積み上げて認知度を高めて頂きたい。また、開発した技術をプラットフォーム化して、国際競争力につなげる取り組みに期待する。

研究評価委員会

委員名簿（敬称略、五十音順）

職 位	氏 名	所 属、役 職
委員長	西村 吉雄	技術ジャーナリスト
委員長 代理	吉原 一紘	オミクロンナノテクノロジージャパン株式会社 最高顧問
委員	安宅 龍明	独立行政法人産業技術総合研究所 つくばイノベーション アーリーナ推進本部 共用施設調整室 招聘研究員
	伊東 弘一	学校法人早稲田大学 理工学術院 招聘研究員 公立大学法人大阪府立大学 名誉教授
	稲葉 陽二	学校法人日本大学 法学部／大学院 法学研究科 教授
	小林 直人	学校法人早稲田大学 研究戦略センター 副所長／教授
	佐久間一郎	国立大学法人東京大学大学院 工学系研究科 附属医療 福祉工学開発評価研究センター センター長／教授
	佐藤 了平	国立大学法人大阪大学 産学連携本部 名誉教授／特任 教授
	菅野 純夫	国立大学法人東京大学大学院新領域創成科学研究科 メディカルゲノム専攻 教授
	宮島 篤	国立大学法人東京大学 分子細胞生物学研究所 教授
	吉川 典彦	国立大学法人名古屋大学 大学院工学研究科 マイク ロ・ナノシステム工学専攻 教授

第1章 評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の箇条書きは、評価委員の主な指摘事項を、参考として掲載したものである。

1. プロジェクト全体に関する評価結果

1. 1 総論

1. 1. 1 総合評価

生活支援ロボットの安全検証手法を開発したこと、パーソナルケアロボットの国際安全規格 ISO13482 の発行を主導したこと、安全検証センターを発足させたこと、複数の企業が実際に認証を取得あるいは取得準備していること、さらにプロジェクトメンバーが開発した製品が同規格の認証を得て商品化されたことは高く評価できる。生活を支援するロボット開発の今後の羅針盤的な役割を果たすとともに、ロボット介護機器開発が政府の掲げる日本成長戦略へ位置付けられるきっかけとなるなどの波及効果をもたらした。ただし、開発した技法や手法を他に応用できるような共通化と情報共有を積極的に行う視点がほしかった。

生活支援ロボットに関し、安全規格発行、安全性検証・認証については世界をリードしているといえ、引き続きこれを維持発展させる方策を望む。その際、今後のビジネス展開を予測しておくこと、中小企業が開発成果を適用するための資金・人材の確保等に、留意する必要があると思われる。

〈肯定的意見〉

- ・わが国ではこれまで確立されていなかった生活支援ロボットの安全認証について、積極的に挑戦し、リスクアセスメント、試験方法等をはじめとした各種の安全検証手法を開発することにより、その道筋をつけたことは高く評価できる。
- ・生活支援ロボットに関し、本プロジェクト以前には存在しなかった安全性検証と認証の仕組みができた。これにより、安全の観点から生活支援ロボットの実用化・産業化に向けた道筋をつけたことの意義は大きい。
- ・生活支援ロボット事業化の大きな障害と言われていた、安全性の保障に対し、認証という概念をとりあげ、その権威づけとして国際標準を活用することで、認証の価値を示したことは、今後のロボット開発の指針づくりに革新をもたらすと判断できる。
- ・少子・高齢化の進む我が国において、生活を支援するロボット開発の今後の羅針盤的な役割を果たしたといえる。
- ・1998年以降、NEDOが取り組んできた実績に基づき、計画的に実施されている。安全技術を導入したロボット開発を通じて取り組んだ今回の「安全性検証手法の研究開発」は、ロボット介護機器開発が、政府の掲げる日本成長戦略へ位置付けられるきっかけとなるとともに、地方における地域活性化や産業振興に関する取り組み及び産学官の連携推進、特区の実施等への波及効果をもたらしている。
- ・ロボットの安全に関する国際標準規格を作るという目標を掲げ、ISO13482としてそれを実現し、複数の企業が実機でリスクアセスメントを行って、実際に認証を取得しあるいは取得準備している点で、当初の目標は達成されたと考える。
- ・本プロジェクトの経験と成果をベースに、日本が中心となってパーソナルケアロボットの

国際安全規格 ISO13482 の発行に至ったこと、そしてプロジェクトメンバーの開発した製品が同規格の認証を得て商品化されたことは画期的である。

- わが国主導で、パーソナルケアロボットの国際安全規格 ISO13482 の発行に漕ぎ着けたことは高く評価できる。
- 三つの生活支援ロボットに関して認証の発行を実施したことは高く評価できる。
- 世界に先駆け、生活支援ロボット普及に向け重要な課題である対人安全性基準、基準適合性評価手法を構築した上で国際安全 ISO13482 策定を主導し、正式発行に導いたことは非常に評価できる。また、安全検証センターを設立し4つのカテゴリー8つの製品開発プロジェクトを検証事例として安全性試験を通して実証試験の実施、環境の整備・運営開始出来たことも評価できる。
- 安全検証センターを発足させ、順調に機能していることは高く評価できる。
- 安全検証センターの稼働も、安全性の不安というロボット産業普及上のボトルネックを軽減しており、人間に接触する・近接するロボットの市場開拓に貢献することが期待できる。
- 法規制・規格は、安全に関わる一般化された内容を持つ規定であって、重要なのは、あくまでも個々の技術に係わる個別的な安全である。「安全」は、規格等を参考にして最善の危害防止をユーザーに委託するための説明責任として策定される。完全な事故防止を約束することはできない。安全は、その限界で不可避とされる被害の可能性を被害者（ユーザー）が受け容れるための説明責任として技術の提供者の責任で生ずる概念である。安全の限界を補完するために提示される使用の条件でなお生じうる事故を受け容れるか否かは、提供者の説明責任に基づいてユーザーが判断する。設計者の安全に対する方法論（説明責任）を基本 A 規格によって正当化し、これに準拠したことを「認証」することによってユーザーに対し事故の受容を事前に達成しようとするのがグローバルな安全認証制度である。本プロジェクトの最大の成果は、グローバルな安全認証制度を正式に実行しようとしている点である。
- 生活支援ロボットに関し、安全規格発行、安全性検証・認証については世界をリードしているといえる。引き続き、これを維持発展させる方策を望む。
- 個別テーマでの認証を推進し、その事例を明示することによって、後発開発者の開発指針づくりの具体化に貢献できると判断する。
- 今後、更にこの分野におけるロボット開発を推進する必要があると、計画的かつ戦略的に取り組む必要があると思われる。
- 認証を受けた製品を増やし、それらが今後の安全を実証しかつ市場規模が拡大するという実績をあげることが不可欠だし、また規格認証自体のブランド価値を向上させるための啓蒙も必要と考えられる。
- 本格的な普及はこれからである。今後の継続が重要と考える。

〈問題点・改善すべき点〉

- 現実に必要と思われる生活支援ロボットの内容は多岐に渡っている。今回開発されたロボットもかなり個別的であるという印象が強い。（いくつかの事例はあるが）あるプロジェ

クトで開発した技法や手法を他のプロジェクトでも使用できるような共通化と情報共有を積極的に行う視点が欲しかった。

- ・安全認証の事業としての採算性・継続性の確保が問題として残っている。また、手作業を行うロボットに関する安全検証手法は手が付けられていない。

〈その他の意見〉

- ・今回のプロジェクトメンバーが、一部を除き大企業（組織と資金を有する）であり、中小企業が開発成果を適用するには、資金、人材の確保に工夫が必要に思える。
- ・個別の開発については、濃淡があるが、いくつかのパターンに整理し、今後のビジネス展開を予測しておくことで、事業化の新たな予測知見が高まっていくと考える。
- ・全体的な目標、体制、成果等について大きな問題は無かったと見受けられる。ただし、国際標準の認証を得たことが、即、顧客からの信頼や認知度につながって製品の売上増大につながる、というシナリオの実現性については、期待は持てるものの、現段階では未知数である。
- ・高齢者介護は国民誰しも避けては通れない課題あり、成長戦略にも掲げられている。厚生労働省を始め、総務省が進める「ICTを活用した自立行動支援システムの研究会」などとも連携することが求められる。
- ・安全は、事故を防ぐ目的を持つが、その方法を一般化して規定するには限界がある。安全は無条件であるわけではなく、ユーザーに託する使用の条件（制約）と、なお（小さな確率で）起こり得る事故の被害に対する認識を、提供者と使用者の間で共有することが何よりも重要である。“本質安全”とは、ノーマライゼーションに伴って生ずるノーマルな事故を安全と見なして受け容れることであり、もし、ノーマルな事故が人（例えば高齢者や術後の患者）によって過大とされるのであれば、福祉工学の原則に基づいて管理基準を作り、ノーマルな事故を受け容れてノーマルな被害となるよう如何に管理していくか等（例えば、介助計画）、人間支援が消極的にならないよう考えていくべきである。そういう意味で、福祉の目的で行う人間支援の基本的な考え方は、基本規格を安全の原理とするのではなく、人間を機械で支援する場合の基本的な考え方を最上位の福祉工学の原理で決めるべきと思われる。支援機能として受け入れる条件を福祉の原理として合意を得、事故の可能性がノーマルと言える被害を受け容れるとする福祉工学の原理に従って、福祉機器に対する受容の判断が得られるとする体系に基づいて、福祉機器が広く受けられるようにしてほしいものである。

1. 1. 2 今後に対する提言

ISO13482 に従ってわが国から多くのロボットが安全認証されて社会に導入されることで、ISO13482 の確実な普及を図るとともに、欧州での法規化動向を把握すること等に留意しながら、各分野における個別規格の在り方を検討することが重要である。なお、ロボットによってもたらされるベネフィットとともに、安全の限界と事故を許容するための基準を示して、社会的な受容の拡大とともに普及を図る必要がある。

本プロジェクトを切掛けとして、グローバルな製品流通のための認証システムがわが国でも展開されようとしていることは大きな意義がある。それを継続発展させていくために、安全検証センターの着実な運営について必要に応じてフォローし、認証機関の充実等を検討して頂きたい。

生活支援ロボット開発に関しては、技術サイドの視点よりは、利用者サイド、現場サイドの視点を重視した今後の更なる発展を期待したい。また、身近な機器として実用的に活用されるためには、一般的な製品情報に留まらず、使用方法や使用環境に関する広い情報提供が必要になるとともに、使いこなすための教育・訓練等、人材養成を行うことも重要である。ただし、安全性向上の観点から、技術的に改良すべき点が未だあることも忘れてはならない。

認証取得がビジネス化に有効である例を一つでも増やすことが肝要である。ただし、安全性の確保・実証が直ちにロボットの普及につながるとはいえず、ロボット産業を支援する他の方策も検討頂きたい。

〈今後に対する提言〉

- 本プロジェクトで成果を上げた ISO13482 は総括的な要求事項のみの規定であり、認証需要を掘り起こすためには、更なる企業における開発促進を促す必要がある。
- ISO13482 の確実な普及を図るとともに、各分野における個別規格の在り方検討が喫緊の課題である。
- パーソナルケアロボットの国際安全規格 ISO13482 に従って、わが国から多くのロボットが安全認証されて社会に導入されることで、ISO13482 の具体的な実質化と共に、世界の生活支援ロボットをリードして行って欲しい (ISO13482 の具体化)。
- ISO13482 に関する欧州での法規化の動向を継続的にウォッチすることが必要である。本格的に欧州が乗り出して自地域内で有利な法規制を制定するのを阻止するのは、一企業では限界があり、本プロジェクトの延長の位置づけとして NEDO 等の公的機関が主導して行くべきと考える。
- 国際安全規格は、ISO/IEC-Guide51 を最上位に、大変まとまった規格体系が構築されている。事故は、人の傷害や命に関係し、強く責任を伴うから、ISO12100 (基本 A 規格) はモノづくり (設計者) の理念にグローバルな合意を求めてきており、また、方法論を規定するグループ B 規格は、事後の責任が問われるような (取り返しのつかないと言える) 事故防止を認証しないための条件を規定すると言える。安全は限界があって「最善」でし

がなく、人間支援の禁止／停止は容易にはできない。事故を防ぐ使用を実行するのはユーザーであり、事故の被害を受けるのはユーザーである。福祉ベネフィット（ノーマライゼーション）を獲得するためにトレードオフすべき対象は、使用の条件（制約）と被害（リスクではない）である。過失による事後の混乱（業務上過失等、賠償）を回避するための条件に対する「受容」の判断は福祉工学の原理に基づくものである。改めて、人間支援ロボットの福祉工学の原理がグローバルな整合性をもって構築され、社会的に整合された判断基準が得られることを期待したい。

- ・人間支援ロボットの福祉工学の原則に期待したい。福祉機能は、それを求めるハンディキャップのある人にとっては、場合によっては掛け替えのない機能であり、単に危険だから禁止するというわけにはいかない。被害の大きさを最小に抑え、そのため受け容れるべき使用条件、それでさえも残る被害の可能性について十分理解してもらう必要がある。福祉工学の原則は、安全の限界と事故を受け容れる判断を正当に行うための基準を与える原則だという見方もできる。すでに述べたように、ノーマライゼーションの条件で生ずる事故は、ノーマルな事故として「受容」の判断が福祉工学の原則に基づいて整合されることが期待される。
- ・認証取得とリスクアセスメントによって事故がなくなるわけではない。残存リスク及び責任の所在を利用者が理解できるよう、利用者への啓発啓蒙が引き続き必要となる。
- ・100%安全の文化を、如何にして、ユーザーの利益の視点とのバランスに持っていけるか、すなわち、確率リスクに持って行けるかが、継続して社会の理解を得るべき大きな課題である。
- ・現実にはリスクはゼロにはならないので、ベネフィットを考えて、リスクの存在を許すという安全文化を、生活支援ロボットの開発がわが国に広げるきっかけとなって欲しい。そのためには、社会が、利用者のベネフィットを考えて、リスクを許容する風土になるように、関係者が全員で協力をする必要がある。
- ・リスクマネジメントは、自らが受けるリスクをヘッジするマネジメントの立場であるが、製品安全、特に人間支援を機能とするロボットの場合、ベネフィットと共にやむを得ずリスクを付帯させるのであって、リスクを低減／分散／保持するのはユーザーであり、そのための正しい情報と被害の大きさなどリスクヘッジ戦略をユーザーが計画するための情報を提供するのが提供者（Guide-51 の安全体系では設計者）の立場だという正しい理解が必要である。
- ・使用側の個別の事情、個性、主体性（やる気、生きがい）等が重要な要因となる。両者を含んだ生活支援ロボットの安全思想（リスクとベネフィットとコストの兼ね合い）を新しく確立して行く必要がある（人間と機械と一緒に生活する場合の安全思想の確立）。
- ・安全認証事業の継続性の確保が最大の課題である。当面、経産省の他プロジェクトの成果の認証などでつないでいくようであるが、それに並行して恒久的な仕組みづくりをすべきである。
- ・人間支援ロボットを切掛けとして、グローバルな製品流通のための認証システムがわが国も展開されようとしている事実は大変重要な意味を持つ。欧米の工業先進諸国はいずれも、

大規模の安全認証機関を擁し、絶対安全はないとする“安全の限界”で生ずる事故リスクを予測し、グローバルな認証によって事故の被害に伴う過大な責任問題を回避しようとしている。製品事故の混乱は、提供者と使用者の事前の正当な関係（契約）でのみ回避可能である。製品安全は提供者の事前の安全確認に対する説明責任に依拠し、グローバルな整合規格に準拠することをデータをもって示すことが基本となる。メイドイン Japan の優秀さは必ずしも認証を得るデータによって保障されていない。わが国は認証の歴史が浅く、データを蓄積の遅れを取り戻すための積極的努力が必要である。本プロジェクトが、グローバルな立場からの認証制度を開始させた意義は大変大きいと言える。

- 生活支援ロボット開発に関しては、技術サイドの視点よりは、使用者サイド、現場サイドの視点を重視した今後の更なる発展を期待したい。
- 社会還元加速プロジェクトの成果は、リスクアセスメントによって安全に対する説明責任の制度（認証制度）を人間支援ロボットに関わる NEDO の制度を通して現実のものとなった点である。本来、事故は責任を伴い、しかも事故を絶対には避けられない。そのため、その時代の最善の対策を行って事前に事故の受容を求めるというのがリスクアセスメントを基本とするグローバルな認証制度である。安全に関わる技術の公正性を求める認証制度は、民間ベースでボランティアに行うことはできない。公的制度の形態で人間支援ロボットを切掛けに開始された認証制度が技術一般に拡大して、認証を産業とする規模の拡大化（欧州認証機関は 2 万人を超える従業員を擁する）を目指すべきである。
- リスクマネジメント検証施設の運営については、国が今後も関与し、施設の更新や最新の技術を取り入れられよう工夫して欲しい。アメリカには、国が運営を民間に委託し、民営化している組織が多くある。そのようなシステムを導入するのも一策と思える。
- 生活支援ロボットの市場が立ち上がっていない状況下で、安全検証センターを維持・発展させることのむずかしさは理解できる。当面、国の予算による支援も必要であろうが、戦略的な意義を国民的コンセンサスにする努力を望みたい。
- 認証を JQA（わが国の認証機関）に委託しているが、できるなら、例えば、UL や TUV などグローバルな立場で実際に認証業務を行っている認証機関に開放して、本プロジェクトに関わる認証制度に参加できるようにするのが好ましい。
- 安全認証センターは今後きちんと運営して検証実績、検証例の DB 化（知的資産化）、収支含めた経営の安定につなげるべき。そのため、部品、モジュール、海外製品の取扱などを進めることが望ましい。
- 引き続き 26 年度から始まっている新規重点分野（在宅）に関しても、本プロジェクトで得られた知見、安全検証センターの運営、ISO13482 認証機関の充実等を図って戴きたい。
- 安全検証センターは、ロボットに限らず、多くの機械の安全性に関する検証、実験が出来る施設、設備なので、一刻も早く広く、開放できるように、予算と人員の配置を柔軟に行えるように規制を改定するのが望ましい。
- 安全検証センターが設備というハードウェアを揃えただけに留まらず、今後は検証データをきちんと蓄積し、検証方法のノウハウを不断に改善して知的資産化していくことを希望する。完成品だけでなく、部品やモジュール、プラットフォームの検証を行うこと、必要

に応じて海外からの検証を請負うことなども視野に入れることが望ましい。

- 安全検証センターは、関係者の間においては以前から望まれていたものでもあり、本来、我が国としてはもっと早く設立すべきものだった。安全性がボトルネックになって事業機会が狭まっていた可能性もあり、今回のプロジェクト成果でようやくアイデアに現実が追いついてきた段階といえる。
- 安全評価試験センターの運営については、結果のデータ化だけでなく、試験センターの自立のためのデータとして、負の側面も含めた手続き、運用、費用等、本プロジェクトでの活用事例を通じて、データを整理しておくことが望ましい。
- 「生活支援ロボット安全検証センター」の積極的な活用を促すとともに、地方における公的試験機関とのノウハウの共有や連携が求められる。
- 生活支援ロボットの共通部分を抽出して分類、体系化して、幅広く、今後の生活支援ロボットを開発していくことを期待したい。そのためには、安全検証センター、またはその付属機関により、今後も、生活支援ロボットの開発を継続して支援する機能が重要と考える
- 今後は、何が出来るかよりは、実際の現場で何を欲していて、そこで実際に使えるという視点からの更なる開発をお願いしたい（使用者視点の重視）。
- 開発側の安全の組み込みに関しては、基本的には機械安全の思想の下に統一して行えるかもしれないが、生活支援ロボットは、開発側と使用側との協調とコミュニケーションが本質的である。
- これまで何回も挑戦しても遅々として進まなかった大きな理由は、技術サイドからの技能の高度化等に重きがあったためで、現場サイドが何を望んでいるか知って、それに沿った技術開発が行われてこなかったからではないかと思われる。今回のプロジェクトのいくつかは現場重視の方向に向いつつあるが、全体的にまだ、支援を受ける側を重視する視点が弱かったのではないだろうか。
- ユーザーあつてのロボット安全であるとの考えは、極めて重要で、関係者が一体となって浸透させていくことが肝要である。
- 福祉分野の機器については、高齢者や障害者の身近な生活支援から介護者の負担軽減、社会環境の整備等、極めて多義にわたる。障害当事者や介護職員を交えた研究開発が必要である。
- 生活支援ロボットは、高齢者等の日常生活の不便さを解消するものであり、困難を克服するための一つの手段である。身近な機器として実用的に活用されるためには、製品情報のみならず、正しい活用方法や使用環境に関する情報提供が必要になるとともに、上手に使いこなすための教育・訓練等、人材養成を行うことも重要である。また、現場のニーズと乖離しない製品開発を進めるとともに、ロボットを活用するための制度や環境を整備する必要がある。
- 生活支援ロボットは身体的にも虚弱な高齢者や障害者に適用するものであり、臨床的な側面（人と機器の適用、利便性等）から製品評価を行う仕組み重要であり、本件については厚生労働省を交えて評価スキームを検討する必要がある。
- 製造物責任（PL）の観点から開発した製品による事故と認定されると企業にとっては致

命的であり、小規模のメーカーは会社の存続が危ぶまれ、大規模メーカーであってもブランドイメージが著しく低下するため及び腰になる恐れがある。したがってロボット普及も福祉等の限られた範囲に限定され、本格的に人の生活空間でロボットが受け入れられるには、NEDO を代表とする公的機関主導による環境整備、使用範囲の限定ガイドラインの設置や法の改正が必要となると考える。

- ・プロジェクト全体を見ると、人間と共存共栄と言う観点からロボットの安全に対する考え方が多少甘かったのではないかと思う。事故を恐れているのは前に（普及が）進まないという意見もあるが、例えばビークル系のロボットに関しては使用者に対する配慮は十分取り入れられているが、対人に向けては衝突はやむなし、けがの度合いに対する許容はどの程度許されるか？ の観点で進められた様に見える。最近自転車においても重大事故が発生しており、補償の問題から人車分離の要求や環境整備が行われている。一度事故を起こすと否定的な意見が勝ち、ロボットの普及に大きな障害になる可能性があると思う。評価会議では事前での議論はあり、難しい問題との認識が示されていたが、別途継続して議論を進めて行く必要があると感じた。
- ・成果の普及という点で、ロボット開発企業が次々と ISO13482 の取得に動いてくるのか、安全検証センターを利用するのか、という点は、今後の課題となる。認証も安全検証センターの利用も義務ではないので、それらを企業に促すための活動が別途必要になると思われる。
- ・既に事業になっている、事業化が近い、遠い等、いくつかのパターン分析を行い、認証取得がビジネス化に有効である例を一つでも増やすことが肝要である。
- ・国際認証は、その価値を高め、企業に取得を促すような宣伝、啓蒙等が必要となる。
- ・安全は、ロボット産業の育成には必要条件だが、十分条件というわけではない。安全性の確保・実証が直ちにロボットの普及につながるとまでは断言できない。ロボット産業を後押しする他の支援策も必要であり、本プロジェクトだけを取り出して評価するのでは無く、政策プログラム全体の中に位置づけて評価されるべきと考える。
- ・生活支援ロボットは広範囲にわたるものであり、一般的には多品種小ロットになるケースが推測される場所であり、製品開発の継続的な支援とそうした現状を踏まえた基準策定プランの構築が必要となる。
- ・開発者の自助努力はもちろん、サイバーダイナミクス社方式のようなやり方、あるいは、日本社会になじみやすい手法を広く周知できるような支援スキームづくりが望まれる。
- ・サイバーダイナミクス社の取り組みは、技術だけでなく、資金集め、人材投入、商品展開等、ベンチャー企業や中小企業の生活支援ロボット事業展開に参考になることが多い。この成功例を何らかのやり方で関係者に伝えること、また、今後のプロジェクトあり方に織り込みたいものである。

1. 2 各論

1. 2. 1 事業の位置付け・必要性について

本プロジェクトは、世界的な規模で高齢化が進展する中において、今後の国際競争にリードするとともに、国際貢献の観点からも大変評価できるものである。

生活支援ロボットの安全認証は、同ロボットの実用化に不可欠なものであり、世界に先駆けて日本が確立すべき最重要課題である。その性格および現状から、公的機関が中心になる必要があり、これまでに多くのロボット技術開発を行ってきた NEDO の関与が最も適切である。

リスクマネジメント等の安全検証実施の組織化については、国の推進事業であるが故に実現できたものであると判断する。

〈肯定的意見〉

- ・今回のプロジェクトは、少子高齢化のなかで避けて通れない継続必要な研究開発事業であったと認識する。
- ・生活支援ロボットに関する本プロジェクトは、世界的な規模で高齢化が進展する中において、今後の国際競争にリードするとともに、国際貢献の観点からも大変評価できるものである。
- ・この目標の重要性は、将来とも大きくは変わらないと思われる。
- ・「ロボット・新機械イノベーションプログラム」や「社会還元加速プロジェクト」の目標達成のために十分寄与できたと評価できる。
- ・ロボット普及にとって「安全」確保の手続きは必要不可欠の要素ではあるが、民間企業にとっては、基準が不明確でコストも見積りにくい。これに対して、国または公的機関が安全に関わる規格作りとリスクアセスメントの手続きを整備し、安全検証を支援するインフラを運営することは、民間企業の助けになるという意味で公共性が高く、NEDO の関与すべき事業として適切と考えられる。
- ・生活支援ロボットの安全認証は、同ロボットの実用化に不可欠なものであり、世界に先駆けて日本が確立すべき最重要課題である。その性格および現状から、民間ではなく、公的機関が中心になる必要がある。これまでに多くのロボット技術開発を行ってきた NEDO の関与が最も適切である。事業目的についても、内外の技術開発動向、国際競争、政策動向、および国際貢献という点から、妥当である。
- ・本プロジェクトは、民間では困難なロボット開発におけるリスクアセスメント手法の開発及び、ロボットの試験・評価手順等の策定が行われた。その結果、世界に先駆けて ISO13482 が発行されたことは極めて意義のあることである。
- ・ロボット普及にとって「安全」確保の手続きは必要不可欠の要素ではあるが、民間企業にとっては、基準が不明確でコストも見積りにくい。これに対して、国または公的機関が安全に関わる規格作りとリスクアセスメントの手続きを整備し、安全検証を支援するインフラを運営することは、民間企業の助けになるという意味で公共性が高く、NEDO の関

与すべき事業として適切と考えられる。

- ・生活支援ロボットプロジェクトの目指すところ、特に、対人安全性技術の開発、社会に安心して使ってもらうための安全認証体制の確立、そのために必要な安全基準・安全規格の確立は、世界の中でわが国は果たすべき役割として、極めて重要であり、適切な目標である。
- ・新規開拓分野においては民間のメーカーの足並みをそろえることは困難であり、特に安全基準の策定や評価法・試験環境の整備構築は中立的機関でなければ成し得なかったものと考えられ、その意味で NEDO が旗振り役を行うことでベクトルが定まったと言える。
- ・新規ビジネスに対する認証評価の有効性仮説を個別な企業が実施することは、企業リスクが大きく、大変困難である。ましてや、リスクマネジメント等の安全検証実施の組織化については、国の推進事業であるが故に実現できたものであると判断する。

〈その他の意見〉

- ・わが国では、安全とは事故を防ぐことであり、しかも、法規制で強制される最低基準に準拠することが安全の責任だと見なされてきた。しかし、本来、安全は、危険に関わる立場から危害防止規定を作り管理責任体制によって行う自主的活動だと規定する(労働安全衛生法第1条)。人間支援ロボットの安全も完全ではない。支援を受ける以上使用は自由ではなく、使用の条件が規定され、それが使用者側の管理で可能かどうかの判断、そして、可能性の残る事故の被害が受け入れられるか否かの判断がなされて、「受容」と判断されるなら、自主的安全管理がユーザーによって実行される。ロボットのベネフィットでトレードオフされるのは“リスク”でなく、使用者の使用基準と被害の可能性である。今後の問題として、繰り返すが、残留リスクからハンディキャップを持つ利用者を守るだけでなく、ベネフィットのために、上の2つの条件を如何に受け入れるかの判断基準が、安全基準や認証を超えて、福祉工学の原則に委ねられることである。これを準備していくことが今後の重要な課題だと言うことである。

1. 2. 2 研究開発マネジメントについて

国際標準規格をリードする、リスクアセスメントを製品化前の実機で行う、安全確保の支援を行う仕組みを作る、という目標は明確であり妥当である。安全検証手法の研究開発と安全技術を導入した生活支援ロボットの開発の連携を可能とした計画であった。

予算に対する成果の妥当性、予算の配分の適切性に関しては、定性的な説明に留まった。

現段階で国内にて活動できる民間を含む公的機関が網羅された体制で進められた。プロジェクトリーダーのもとに、各分野の生活支援ロボットの開発グループと安全性検証手法の開発グループが互いに連携して、リスクアセスメント及び安全性試験や適合性評価の項目策定等を、組織的にかつ戦略的に実施した。

事業化の進め方は一部を除き明確化されていた。なお、認証効果追跡調査の内容をあらかじめ明確にして追跡調査を行うことが望ましい。

研究開発の進捗にあわせた処置が実施されていた。

(1) 研究開発目標の妥当性

〈肯定的意見〉

- ・国際標準規格をリードする、リスクアセスメントを製品化前の実機で行う、安全確保の支援を行う仕組みを作る、という目標は明確であり、最終結果から推測する限り、プロジェクト遂行中に大きなぶれがあったようには見受けられない。
- ・ISO等の規格認証という明確な目標があり、目標設定は妥当である。また、事業化の有無も明確な目標設定といえる。
- ・開発項目ごとに、目標とその根拠を明確にしてマネジメントしていることは評価できる。

〈その他の意見〉

- ・リスクマネジメントについて考えると、まず、信頼性で言うと、支援機能自体の信頼性、つまり、故障やノイズなどによる誤動作と、人間のミスによる誤動作で生ずる危険性であるが、これはあくまでも確率の問題である。しかし、安全にとって問題となるのは事故の被害であり、また、事故に対する責任である。安全性と信頼性の基本的な違いは、信頼性は、故障の確率等、正常を逸脱する要因を均しく問題とするが、一方、安全性は、故障やミスが危険側（事故になる側）であるかどうか問題となる。安全機能のSIL2の故障率は単なる故障ではなく、危険側故障の発生確率だという正しい理解が必要である。故障しても安全側であるか、あるいは故障しても被害が小さい場合は安全性の問題にならないとされる。「安全」に関係するのは単なる故障やミスでなく、故障やミスが危険側であるという正しい理解が必要である。NEDOの本プロジェクトによって信頼性と安全性の違いを体験することは、グローバルな安全の正しい理解のために大変好ましいことである。

(2) 研究開発計画の妥当性

〈肯定的意見〉

- ・安全検証手法の研究開発と安全技術を導入した生活支援ロボットの開発の連携が出来、ロボットの開発段階でリスクアセスメント、安全試験、適合性評価が成されるようにマネジメントされたと言える。
- ・開発企業の協力のもと、計画的に実施されている。

〈問題点・改善すべき点〉

- ・全体の予算については、総額しか明らかになっていない。配分が適切であったか判断できない。
- ・最終目標に対する研究開発成果・達成度が示されているが、仕組みの構築、技術成果はいずれも定性的なものであり、評価の内容については特に異論はないが、開発予算（5年間74.05億円）に対する成果の妥当性も何らかの形で入れるべきではなかったか。
- ・評価資料の多さ等から判断して、各プロジェクトは書類作りの大変さ、規制による縛り等、少し形式化を重視して柔軟性を失わせていたのではないかと危惧される。

〈その他の意見〉

- ・算出は非常に難しい課題ですが、今後予算を増やして活性化させる意味で、物差しを作り、今回のプロジェクトは限られた予算で、予想以上の成果が得られたとPRすべきと考える。

（3）研究開発実施の事業体制の妥当性

〈肯定的意見〉

- ・「安全検証手法の研究開発」については、現段階で国内で活動できる民間を含む公的機関が網羅された体制で進められたと言える。
- ・しっかりした組織を有する企業や団体が、PJのなかで有効に機能していたと判断する。
- ・本プロジェクトでは、産業技術研究所の比留川研究部門長をプロジェクトリーダーに置き、組織的かつ戦略的に実施されている。
- ・各分野の生活支援ロボットの開発グループと安全性検証手法の開発グループが互いに連携して、リスクアセスメント及び安全性試験や適合性評価の項目策定を行ったところは大変評価できる。
- ・開発目標、計画、事業体制については、国際規格、第三者認証機関、第三者試験機関を軸とする体制が確立されたことから、結果的におおむね妥当であったといえる。
- ・安全検証手法の確立と生活支援ロボットの開発（移動作業型（操縦）、移動作業型（自動）、人間着装方、搭乗型）に分類してプロジェクトリーダーの下に適切にマネジメントされていた。

〈問題点・改善すべき点〉

- ・ステージゲートの本来の趣旨から言って、途中で企業が離れることには問題が無いと考えるが、今後も同様の形態のプロジェクトがありうることを考えると、離れた理由の検証を

きちんと行っておくことが必要と思われる。

(4) 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

〈肯定的意見〉

- ・新規事業であるので、時間的な制約もあったと思うが、事業化の進め方は一部を除き明確化されている。

〈問題点・改善すべき点〉

- ・開発されたセンサなどのデバイスが個別的であり、その反面革新的ともいえず、中心的成果と比べると見劣りする。

〈その他の意見〉

- ・認証取得の製品については、認証がどのように事業に貢献するかの追跡調査等が継続的に行われること、また、認証効果追跡調査の内容について、ビジネスモデルの根幹として、あらかじめ明確にしておくことが望ましい。

(5) 情勢変化への対応

〈肯定的意見〉

- ・進捗に応じて、ロボットの開発の対象を変えたことは適切なマネジメントであった。
- ・研究開発の進捗にあわせた処置が実施されている。

1. 2. 3 研究開発成果について

リスクアセスメントの手法、安全性検証の手法を開発して安全認証を確立したこと、国際標準規格である ISO13482 を我が国主導で成立させたこと、複数の民間参加企業がこの認証を取得したことは大きな成果であり、目標を達成している。

安全検証センターの設立により、既に市場化がなされている分野だけでなく、介護・移乗などの新たな分野での市場拡大の可能性を築いた。安全性検証と標準確立が目的のためやむを得ないが、ライセンス化や権利防衛の観点から、特許提案の活動を積極的に実施することが望ましい。

ロボット開発企業への認証取得や安全検証センター利用の推進、一般に向けた情報発信が今後の課題である。

(1) 目標の達成度と成果の意義

〈肯定的意見〉

- ・安全認証の確立という点は、すべての生活支援ロボットの共通点であり、ここを重視した開発は評価される。安全認証の確立という点は、すべての生活支援ロボットの共通点であり、ここを重視した開発は評価される。安全検証センターを発足させ、リスクアセスメントの手法を明らかにし、各種の高度な実験設備を設置して、順調に機能していることは評価できる。
- ・将来に向けて生活支援ロボットの、普及が期待され、人間とロボットの共存共栄が進み、生活の中に溶け込んでいく中で、世界に先駆けて本プロジェクトを企画し実践してきたことは評価できる。特に安全性検証手法の研究開発や安全実証センターの設立、実運用での活動はロボット開発共通インフラの整備として成功したと評価できる。
- ・ISO13482 の国際標準規格を我が国主導で成立させ、複数の民間参加企業がその認証を取得したことは、成果として評価できる。あわせて安全検証センターの稼働は、ロボット産業における安全面の不安を取り除くことに貢献しており、市場拡大のための大きなボトルネックを軽減している。これにより、掃除ロボットなど既に市場化がなされている分野だけでなく、人間に密着あるいは近接して使用される介護・移乗などの分野で市場拡大の可能性を拓いたことも、評価に値する。
- ・成果は目標を達成している。認証については ISO を取得できたことで、事業の拡大が望める成果のあり、大きな成果といえ、現段階では世界最高水準になっていると判断する。
- ・対人安全性基準の確立及び、適合性評価手法の開発は、今後、間違えなく必要とされるロボット介護機器の研究開発に活用されるものである。
- ・リスクアセスメント手法も確立できたので、コストを別にすれば、本プロジェクトで開発した以外のロボットへの適用も手作業ロボットなど一部を除き、可能であろう。
- ・わが国主導で、パーソナルケアロボットの国際安全規格 ISO13482 を発行の努力したことは評価できる ISO13482 に従い、すでに、三つの生活支援ロボットに関して認証の発行を実施した

- ・ISO13482 を国際提案する過程において蓄積された多くのノウハウは、国内産業界にとって大きな財産となる。
- ・国際規格 ISO13482 を日本が中心になって議論をリードし発行できたことは特筆に値する。併せて認証機関である JQA、試験機関である安全検証センターを軸とする体制が確立できたことは評価できる。

〈問題点・改善すべき点〉

- ・一般に向けた情報発信は十分とは言えない。

(2) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

〈問題点・改善すべき点〉

- ・安全検証や製品開発・評価を進める上で出てくる課題とその対策には多くの工夫、アイデアが出た筈であり、特許提案の活動が積極的に行われて居なかったように見える。論文や展示会、対外発表の中で公知例化する手段もあるが、少なくとも公的機関で行われた「安全検証手法の研究開発」の範囲においては提案・権利化し、実施を希望する企業に広くライセンスすべきである。後から追って研究開発して来る海外の国・企業が権利化して日本企業が実施できない、実施のために多額のライセンス費用を請求されないように防御すべきと思う。
- ・知的財産権の取得は、十分とは言えないが、安全性検証と標準確立を目的とした性格上やむを得ない面もある。
- ・知的財産権については、プロジェクト全体としてのポートフォリオ等を作成し、知財の戦略性を明確にできることが望ましい。

(3) 成果の普及

〈その他の意見〉

- ・成果の普及という点で、ロボット開発企業が次々と ISO13482 の取得に動いてくるのか、安全検証センターを利用するのか、という点は、今後の課題となる。認証も安全検証センターの利用も義務ではないので、それらを企業に促すための活動が別途必要になると思われる。
- ・生活支援ロボットの市場が十分立ち上がっていないため、安全検証センターの永続性と事業性は不十分である。
- ・人間支援ロボットの福祉工学の原則に期待したい。福祉機能は、それを求めるハンディキャップのある人にとっては、場合によっては掛け替えのない機能であり、単に危険だから禁止するというわけにはいかない。被害の大きさを最小に抑え、そのため受け容れるべき使用条件、それでさえも残る被害の可能性について十分理解してもらう必要がある。福祉工学の原則は、安全の限界と事故を受け容れる判断を正当に行うための基準を与える原則だという見方もできる。すでに述べたように、ノーマライゼーションの条件で生ずる事故は、ノーマルな事故として「受容」の判断が福祉工学の原則に基づいて整合されることが

期待される。

- **SIL2** の安全機能は、故障の発生確率が小さいことの要求と比べて、故障が危険側であるという要求はそれほど厳しくないという内容を持つと言っていい。人間支援ロボットに関わる安全機能は信頼性を上げて、安全性（故障が安全側）は強く求めないとする機能安全レベルで合意されている。信頼性が高いことは製品として当然だが、故障が安全側と言う要求が強いと、安全技術がいつぺんに複雑化／高度化、そして効果になることが避けられない。人間支援ロボットは、安全性よりも信頼性を優先して、機能停止の可能性を皆無と言えるような状況にしないと意味がない。人間の支援を故障で断念することは容易には認められないからである。安全を優先しないとするためには、本質安全を実現して、ロボットがたとえ誤操作しても、その誤動作が人間に大きな被害を与えないこと、そのような被害の事故が必ずしも避けられないことを、説得力を持って説明することが重要である。ノーマルな事故を受容するのは、福祉工学の原則に基づくコンセンサスの形成を前提としているのである。

1. 2. 4 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

今回のプロジェクトで、いくつかの安全認証の実例を通して実用の可能性が明確化した。

複数の参加企業が国際標準規格を取得あるいは取得の準備を行い、市場にこれらの製品を投入あるいは投入準備を進めていること、また、各企業の事業としての計画も提示されていることから、実用化という目標は達成した。国際認証という武器を得たことで、今後生活支援ロボットの市場拡大が期待できるが、その実現性には認証を受けた製品の実績や認証自体のブランド価値向上へ取り組みが望まれる。

生活支援ロボットは多岐にわたることから、安全性検証・認証でカバーされていないものがあり、商用化前までには検証・認証できるよう継続的研究開発が望まれる。

〈肯定的意見〉

- ・ 今回のプロジェクトでいくつかの安全認証の実例を通して、実用の可能性が示された。
- ・ 複数の参加企業が国際標準規格を取得し、あるいは取得の準備を行い、また市場にこれらの製品を投入しあるいは投入の準備を進めているということで、実用化という目標は達成していると考えられる。
- ・ 4 カテゴリーの 8 つの製品開発に関しては、一部 ISO13482 の認証取得され、その他もメーカーにおいても安全試験項目に対する実証試験活動や事業としての計画も提示されていることから見てプロジェクトとして成果が出せたと言える。
- ・ 生活支援ロボットの現市場は決して大きくないが、国際標準の認証という武器を得たことは大きな飛躍を期待できる。すでに、それを活用している製品も販売の段階にあり、今後が期待できる。
- ・ 平成 25 年度から経済産業省が実施している「ロボット介護機器開発・導入促進事業」において本プロジェクトの成果が活用されている。高齢化は世界各国、共通の課題であり、本プロジェクトの成果を活かした製品開発をより一層促し、良質かつ安全な日本製品が海外へ進出することを期待する
- ・ リスクアセスメントの手続きを行い、国際的な認証を受けるという活動を他国に先駆けて行ったことは、海外の競合製品に対する優位性確立の面からも評価できる。
- ・ 介護福祉、産業用ビークル、パーソナルビークルと分野も事業規模の面でも限られているため分野および対象製品の拡大が必要である。
- ・ 設計コンセプトシート、リスクアセスメントシート雛形など、安全性を確立し認証に進めるための成果が明確化され、公表されているのは良い。
- ・ 一部のロボットが事業化された。それらについては、市場やユーザーのニーズにも合致している。他のロボットについても、事業化の可能性が高いものもある。

〈問題点・改善すべき点〉

- ・生活支援ロボットは多岐にわたるバリエーションがあり、現在の安全性検証・認証でカバーされていないものがあるのではないかと。今後でてくるロボットについて、商用化される前までには検証・認証できるよう、継続的研究開発が必要である。
- ・安全検証の手続きを整備することが、様々な製品の「実用化」に資することは理解できたが、市場を拡大する「事業化」にまでつながるかどうかは、まだ自明とは言えない。国際認証を得たことが、即、顧客からの信頼や認知度につながって製品の売上増大につながる、というシナリオの実現性については、期待は持てるものの、現段階では未知数と言える。認証を受けた製品の今後の実績にも依存するし、認証自体のブランド価値向上の取り組みも必要と考えられる。
- ・安全検証施設の運用については、ロードマップを作って、広く周知し、大いに活用できいくことを期待したい。
- ・各社から出てきている製品化、事業化の規模が小さいように見える。ロボット普及のパイオニアとして何らかの支援・フォロー等が必要である。
- ・事業化の進み具合に、若干の濃淡があるので、事業化遅れているものについては、早い段階での結論（事業化撤退もふくめて）を出すように期待する。プロジェクトのすべてが、事業化しなければならないという観点でなく、全体として顕著な成果がでておれば、うまく事業化できないものについては、その原因を成果が出ているものと比較することで、次につながる重要な情報となる。
- ・認証を取得し、標準的なリスクアセスメントを行ったからといって、ロボット製品が絶対的に安全になったわけではない。一般の利用者に誤解を与えないよう、残存リスク及び責任の所在についての啓蒙を疎かにすることはできないと考えられる。
- ・認証の事業化の目標体制は明確になっているが、認証事業の市場は、立ち上がる以前の状況である。

〈その他の意見〉

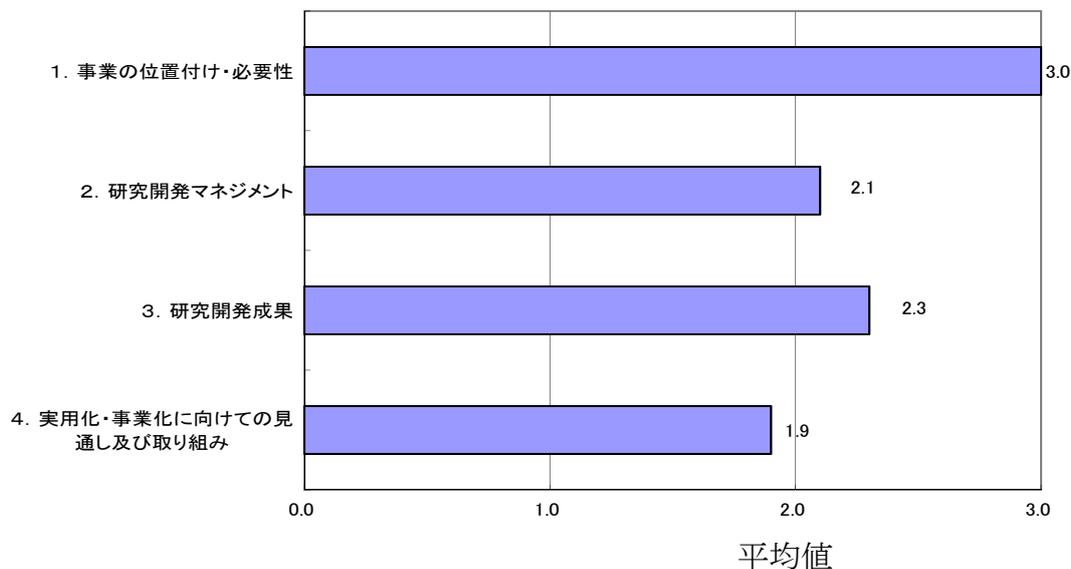
- ・機械が直接人間を支援するという人間機械システムが、柵などガードなしに安全が可能だとすれば、人間の物理的強度を考慮して、ロボットの有するストレス以上のストレングス（強度）を持てばいいというわけにはいかない。安全は、材料の安全率のような考え方では判断できない。小さな事故でも、ちょっとした流血は、それだけでアブノーマルな事態であり、もともと許されないだろう。また逆に、人間が通常生じて、容易に謝って済むような事態を事故として重大な過失責任が問われるのであれば、人間支援ロボットと言えども容易には提供できないだろう。福祉と言う観点から人間支援ロボットを社会が受け容れるための合意が広く検討され、できればグローバルな合意形成が必要である。本質安全を単に優先するというだけでなく、それを確保する必要があるのである。考え方として、人間型ロボットは、機械であっても物理的能力は人間と同じであり、ロボットから受ける支援は、通常人間から受ける支援と同じエネルギーレベルである。支援で生ずる危険動作は、ノーマルな事故として受け入れるという考え方で福祉工学の原則が合意されると改めて

期待される。

- 規格は、基本 A 規格が最上位にあつて、その理念に準拠して方法論が規定される。人間支援ロボットの場合、安全が目的なのではなく、目的は支援であり、あくまでもそれを受けるハンディキャップのある人が主体である。つまり、ロボットは人間を安全に支援するという関係であり、安全は事故を防ぐのは当然だが、それよりもむしろ、事故による責任トラブルに事前に対処することだと言っている。本プロジェクトは安全を根本的に見直して、グローバルな整合を果たす良い機会となっている。
- リスクを受容するか否かの判断する根拠を安全の原理は持っていない。持っているのは福祉工学の原則だということである。絶対安全はないという安全の現実を、いかに適切に人間支援に適用するか、福祉工学の原則が頼りだが、福祉工学の原則に偏見は許されない。国際的な立場から、また多方面の立場からの参加によって、客観的に決められる必要があり、その場合、スチュワードシップの考え方が参考になるかもしれない。

2. 評点結果

2. 1 プロジェクト全体



評価項目	平均値	素点 (注)							
1. 事業の位置付け・必要性について	3.0	A	A	A	A	A	A	A	A
2. 研究開発マネジメントについて	2.1	B	B	B	B	B	A	B	
3. 研究開発成果について	2.3	A	A	B	A	C	B	B	
4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて	1.9	B	A	B	B	C	C	B	

(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

1. 事業の位置付け・必要性について 3. 研究開発成果について

- | | | | |
|----------------|----|-----------|----|
| ・非常に重要 | →A | ・非常によい | →A |
| ・重要 | →B | ・よい | →B |
| ・概ね妥当 | →C | ・概ね妥当 | →C |
| ・妥当性がない、又は失われた | →D | ・妥当とはいえない | →D |

2. 研究開発マネジメントについて 4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

- | | | | |
|-----------|----|----------------|----|
| ・非常によい | →A | ・明確 | →A |
| ・よい | →B | ・妥当 | →B |
| ・概ね適切 | →C | ・概ね妥当であるが、課題あり | →C |
| ・適切とはいえない | →D | ・見通しが不明 | →D |

第2章 評価対象プロジェクト

1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

複製禁止

「生活支援ロボット実用化プロジェクト」

事業原簿

公開部

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 ロボット・機械システム部
-----	---

目次

I 事業の位置づけ・必要性について	I-1
1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	I-1
1.1 NEDO が関与することの意義	I-1
1.2 実施の効果(費用対効果)	I-2
2. 事業の背景・目的・位置づけ	I-2
2.1 事業の背景	I-2
2.2 政策への適合性	I-4
2.3 国のプログラムとの関連性	I-4
2.4 研究開発の目的	I-5
II 研究開発マネジメントについて	II-1
1. 事業の目的	II-1
1.1 最終目標(平成 25 年度)	II-1
1.2 中間目標(平成 23 年度)	II-1
2. 事業の計画内容	II-1
2.1 研究開発の内容	II-1
2.2 研究開発の実施体制	II-15
2.3 研究開発の運営管理	II-20
2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性	II-21
3. 情勢変化への対応	II-21
4. 中間評価結果への対応	II-23
5. 評価に関する事項	II-27
III 研究開発成果について	
1. 事業全体の成果	III-0
2. 研究開発項目毎の成果	
2.1 研究開発項目① 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発 【(一財)日本自動車研究所、(独)産業技術総合研究所、(独)労働安全衛生総合研究所、 名古屋大学、(一財)日本品質保証機構、日本認証(株)、(一社)日本ロボット工業会、 (一財)製造科学技術センター】	III-1
2.2 研究開発項目② 安全技術を導入した移乗・移動支援ロボットシステムの開発 【パナソニック(株)、国立障害者リハビリテーションセンター】	III-2
2.3 研究開発項目③ 安全技術を導入した配送センター内高速ビークルシステムの開発 【(株)ダイフク】	III-3-1
2.4 研究開発項目③ 安全技術を導入した配送センター内のフォーク型物流支援ロボットの開発 【(株)日立産機システム、(株)日立製作所】	III-3-2
2.5 研究開発項目④ 安全技術を導入した人間装着型生活支援ロボットスーツ HAL の開発 【CYBERDYNE(株)、筑波大学】	III-4-1
2.6 研究開発項目④ 安全技術を導入した歩行アシストの開発 【(株)本田技術研究所】	III-4-2
2.7 研究開発項目⑤ 搭乗型生活支援ロボットにおけるリスクアセスメントと安全機構の開発 【トヨタ自動車株式会社】	III-5-1
2.8 研究開発項目⑤ 搭乗型生活支援ロボットにおけるリスクアセスメントと安全機構の開発 【独立行政法人国立長寿医療研究センター】	III-5-2
2.9 研究開発項目⑤ 安全要素部品群と安全設計に基づく搭乗型移動ロボットの開発 【アイシン精機株式会社、日本信号株式会社、オプテックス株式会社、株式会社ヴィッツ、 学校法人千葉工業大学】	III-5-3
2.10 研究開発項目⑤ 屋外移動支援機器における安全エンジニアリング技術の研究開発 【IDEC株式会社(共同実施先:大阪大学)】	III-5-4

IV 実用化の見通しについて.....(非公開部)
別に作成

添付資料

- ・添付資料1 ロボット新機械イノベーションプログラム基本計画
- ・添付資料2 生活支援ロボット実用化プロジェクト基本計画
- ・添付資料3 事前評価書
- ・添付資料4 特許論文リスト

概 要

最終更新日 平成26年8月25日

プログラム（又は施策）名	ロボット・新機械イノベーションプログラム						
プロジェクト名	生活支援ロボット実用化プロジェクト	プロジェクト番号	P09009				
担当推進部/担当者	ロボット・機械システム部 菅原 淳（平成25年4月～平成26年9月現在） 機械システム部 貞本敦史（平成23年1月～平成25年3月） 機械システム部 宮川豊美（平成21年8月～平成22年12月）						
0. 事業の概要	我が国では、少子高齢化が急速に進展しており、このままでは我が国の社会を支える人材が不足することが懸念されている。一方、我が国は、産業用ロボットをはじめ、国際的にもトップレベルのロボット技術を蓄積してきた。これらのロボット技術を活用して、製造業の生産工程やサービス業の作業工程における一層の効率化・自動化の促進が必要となっている。また、ロボット技術は産業分野のみならず、介護・福祉、家事、安全・安心等の生活分野においても、社会的課題の解決策の一つとして活用することが期待されており、生活支援ロボットの活用により、生活の質や利便性向上が可能となる。しかしながら、不特定多数の人が関与する等、条件や状況が変化する実際の使用環境下で稼働する生活支援ロボットは、対人安全技術が確立されておらず残留リスクの高いものが多く、民間企業の独自の取組のみに委ねては本格的な産業化が期待できない。このため、国等の一定の関与により、安全性検証を行う認証機関・試験機関、安全性基準に関する国際標準等を整備することが求められている。本プロジェクトは、生活支援ロボットとして産業化が期待されるロボットを対象に関係者が密接に連携しながら安全に係る試験を行い、安全性等のデータを取得・蓄積・分析し、具体的な安全性検証手法の研究開発を実施することを目的とする。						
I. 事業の位置付け・必要性について	不特定多数の人が関与する等、条件や状況が変化する実際の使用環境下で稼働する生活支援ロボットは、対人安全技術が確立されておらず残留リスクの高いものが多く、民間企業の独自の取組のみに委ねては本格的な産業化が期待できない。このため、国等の一定の関与により、安全性検証を行う認証機関・試験機関、安全性基準に関する国際標準等を整備することが求められている。						
II. 研究開発マネジメントについて							
事業の目標	生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を確立し、生活支援ロボットの開発者に提供可能となること。対人安全性に関する指標、機械・電気安全、機能安全の試験・評価方法や手順について、国際標準提案を行えること。生活支援ロボットに関する安全性基準適合性評価手法を確立すること。研究開発の対象とした生活支援ロボットに関して、安全性検証のための安全性試験を完了し、ロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示され、実証試験が完了していること。						
事業の計画内容	主な実施事項	H21fy	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	
	生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発	→					
	安全技術を導入した生活支援ロボットの研究開発	→					
	安全技術を導入した生活支援ロボットの研究開発（グループⅡ）			→			

開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載)(単位:百万円) 契約種類: ○をつける	会計・勘定	H21fy	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	総額
	一般会計	1600	1525	1150	1350	940	6565
	特別会計 (電源・需給の別)						
	加速予算 (成果普及費を含む)		840				
	総予算額	1600	2365	1150	1350	940	7405
開発体制	経産省担当原課	製造産業局産業機械課					
	プロジェクトリーダー	独立行政法人 産業技術総合研究所 知能システム研究部門 研究部門長 比留川 博久					
	委託先(*委託先が管理法人の場合は参加企業数および参加企業名も記載)	<p>【H21~H25】 (独)日本自動車研究所、(独)産業技術総合研究所、(独)労働安全衛生総合研究所、名古屋大学、(一財)日本品質保証機構、日本認証(株)、(社)日本ロボット工業会、(財)製造科学技術センター、パナソニック(株)、国立障害者リハビリテーションセンター、CYBERDYNE(株)、筑波大学、トヨタ自動車(株)、(独)国立長寿医療研究センター</p> <p>【H21~H23】 富士重工業(株)、総合警備保障(株)、北陽電機(株)、三菱電機特機システム(株)、(株)フォー・リンク・システムズ</p> <p>【H23~H25】 (株)ダイフク、(株)日立産機システム、(株)日立製作所、(株)本田技術研究所、アイシン精機(株)、日本信号(株)、オプテックス(株)、(株)ヴィッツ、千葉工業大学、IDEC(株)</p>					

<p>情勢変化への対応</p>	<p>■平成23年度末、総合警備保障(株)、北陽電機(株)、三菱電機特記システム(株)のコンソ、及び(株)フォーリンクシステムが、本プロジェクトを卒業。警備ロボットや安全回路に関し、技術開発の目処がたったため。</p> <p>■平成23年度末、富士重工業(株)の掃除ロボットについては研究開発に目処がつきプロジェクトを卒業した。</p> <p>■行政公開プロセス(仕分け)</p> <p>【平成24年】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・研究開発項目①～⑤の中で、より公共性の高い①に対し予算を重点的に割り振ると。 ・研究開発項目②～⑤に関しては、各タイプのロボットについて、パイロットスディーを行いリスクアセスメントを完成させ、①が行う各タイプの認証スキーム開発に協力すること。これに関して予算を重点的に使い、企業固有の問題については、各企業の負担で開発すること。 <p>⇒平成25年度予算の割り振りで、上記意向を反映。</p> <p>【平成25年】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・安全標準については幅広い知見を募るため、オープンに議論していくこと ・国内試験機関が海外のロボットの安全試験を請け負える環境を整備すること ⇒講演会、セミナー、国際学会での発表で、国内外にアピール。海外案件も検討中。 	
<p>中間評価結果への対応</p>	<p>Ⅱ-4に記載</p>	
<p>評価に関する事項</p>	<p>事前評価</p>	<p>平成21年度 2月実施</p>
	<p>中間評価</p>	<p>平成23年度 8月実施</p>
	<p>事後評価</p>	<p>平成26年度 9月実施</p>

<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p>(1) 研究開発の概要 生活支援ロボットとして産業化が期待されるロボットを対象に関係者が密接に連携しながら安全に係る試験を行い、安全性等のデータを取得・蓄積・分析し、具体的な安全性検証手法の研究開発を実施することを目的とする。 生活支援ロボットの安全性検証手法の開発と安全技術を導入した生活支援ロボットの開発を行う。</p> <p>(2) 研究開発目標 (最終目標) 平成25年度 生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を確立し、生活支援ロボットの開発者に提供可能となること。対人安全性に関する指標、機械・電気安全、機能安全の試験・評価方法や手順について、国際標準提案を行えること。生活支援ロボットに関する安全性基準適合性評価手法を確立すること。 研究開発の対象とした生活支援ロボットに関して、安全性検証のための安全性試験を完了し、ロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示され、実証試験が完了していること。</p> <p>(中間目標) 平成23年度 生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を開発するとともに、人間工学実験等による対人安全性に関するデータをロボット開発実施者に提供すること。研究開発の対象とした生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に必要な試験装置を開発し、ロボット安全性試験項目、各タイプのロボットの試験・評価方法や手順の策定を行うこと。これらに基づき、対象としたロボットの安全性検証を完了していること。</p> <p>(3) 研究開発成果(中間目標に対する成果) 生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を開発し、ロボット開発実施者に提供した。開発対象ロボットの試験装置を開発し、ロボット安全性試験項目、各タイプのロボットの試験・評価方法や手順の策定を行った。これらに基づきロボットの安全性検証を完了させる見込みである。</p> <table border="1" data-bbox="422 1097 1396 1254"> <tr> <td>投稿論文</td> <td>「査読付き」141件、「その他」53件</td> </tr> <tr> <td>特許</td> <td>「出願済」40件</td> </tr> <tr> <td>その他の外部発表 (プレス発表等)</td> <td>1687件</td> </tr> </table>	投稿論文	「査読付き」141件、「その他」53件	特許	「出願済」40件	その他の外部発表 (プレス発表等)	1687件
投稿論文	「査読付き」141件、「その他」53件						
特許	「出願済」40件						
その他の外部発表 (プレス発表等)	1687件						
<p>Ⅳ. 実用化の見通しについて</p>	<p>1. 安全性検証手法の開発(開発項目①) 1) リスクアセスメント手法を確立 2) 機械・電気安全、機能安全等ロボットの安全性試験評価方法を確立 3) 生活支援ロボットの安全性基準に関する適合性評価手法を確立 4) 生活支援ロボットの安全性に関する情報の蓄積・提供手法を作成 5) 国際標準化</p> <hr/> <p>→・国際標準 ISO13482 を2014年2月に正式発行。 ・ロボット開発者へ手法の提供を開始 ・認証事業を開始 ・安全検証センターの「受託試験・研究」を開始</p> <p>2. 安全技術を搭載した生活支援ロボットの開発(開発項目②～⑤) →・提供された安全性検証手法を元に、安全性検証と安全技術の改良を行った。 ・すべてのロボットに関し安全性の実証試験を実施 ・第三者認証を取得 ISO13482: パナソニック(株)「リショーネ」、 (株)ダイフク「エリア管理システム」 ISO/DIS13482: CYBERDYNE(株) ロボットスーツ HAL ・安全技術を導入し、安全性検証を実施したロボットを市場に供給開始。 パナソニック(株)「リショーネ」、CYBERDYNE(株) ロボットスーツ HAL など ・本田の歩行アシストに関しては、有償の実証試験を開始(50セット100台を配布) ・富士重工の掃除ロボットは、CYBERDYNEで事業化検討中。</p>						

	<ul style="list-style-type: none"> ・ダイフクの「エリア管理システム」については、JIS への提言を行っている。 ・日立産機は、安全技術を導入した搬送システム「Lavi」を事業化。 	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成 21 年 3 月 作成
	変更履歴	平成 22 年 1 2 月、平成 22 年補正予算（第 1 号）に伴い、研究開発の実施方式の一部内容を改訂。

I 事業の位置づけ・必要性について

1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDOが関与することの意義

不特定多数の人が関与する等、条件や状況が変化する実際の使用環境下で稼働する生活支援ロボットは、対人安全技術が確立されておらず残留リスクの高いものが多く、民間企業の独自の取組のみに委ねては本格的な産業化が期待できない。このため、国等の一定の関与により、安全性検証を行う認証機関・試験機関、安全性基準に関する国際標準等を整備することが求められている。

高齢者、要介護者、身体障害者等から、介護者支援、移動支援等の生活支援分野で役立つロボットの活用に強い要請がある。しかし、生活支援分野は人との接触度が高く、より一層の安全性が求められるため、安全の技術や基準・ルールを世界に先んじて整備する必要がある。

生活支援ロボットの実用化については、具体的な対人安全技術や安全性検証手法の確立、ロボット導入に適した規制など、安全に関する技術や社会システムが整理されていないことがボトルネックとなっている。また、過度な安全基準や規制は、ロボットの有効性が極端に損なわれたり、ロボットの開発コストが著しく増加するなど実用化の阻害要因となる。

このため、ニーズの高い具体的な生活支援ロボットを、中立的機関が実証試験において安全データを収集・分析し、メーカー・ユーザー・サービスプロバイダーが協力しながら適切な安全基準・検証手法を開発、さらに関係省庁と連携し、制度検討の必要がある。

このように、ユーザー、サービスプロバイダー、安全検証の専門家、関係省庁も一体となった体制は、個別企業では構築できず、関係者とのネットワークを有する経済産業省が実施する必要がある。

また、欧州のロボット工学プラットフォーム（EUROP）や欧州各国による産学協同の研究開発体制づくり、米国の国防総省国防高等研究事業局によるトップダウンの産学連携、韓国のロボットに関する品質保証機関やロボット産業振興院の設置など、各国で生活支援ロボットの実証データの蓄積、安全規格、社会ルール等の環境整備が加速されている。さらに、ISOにおいては安全基準についての議論も進展している。

また、欧州の認証機関やその関連企業では、基準策定の段階からメーカーと検討をすすめ、結果的に構築した基準や認証制度が市場での自国の優位性が確保される形になっている。また、他国から製品の認証を依頼する場合、製品の技術情報を含む設計情報を認証機関に提出する必要があることから、技術ノウハウの流出につながることを懸念されている。

さらに対人安全性に比較的問題が無いと考えられている福祉用ロボット（知能システム「パロ」等）が、デンマークの医療・福祉現場で実証試験を行う事例が出始めており、他国への技術流出が懸念され、国内に同様のロボットの実証試験の場が求められている。

したがって、我が国における生活支援ロボットの実用化を早め、我が国の強みであるロボット産業の国際競争力強化・海外市場開拓のため、安全性の確保されたロボットの実証試験の拡充及び事業の早期実施が必要である。

技術戦略マップ 2010（ロボット分野）においては、「介護者支援や移動支援等の人との接触度が高

い生活支援ロボットの実用化のため、対人安全性技術の開発・実証と、安全基準設定等に向けた安全性・有効性データの集約・分析」を行うことと位置づけている。

1.2 実施の効果(費用対効果)

ロボットによる生活支援サービスの付加価値や生産性の向上が関係者で共有されることで、有効性と安全性を両立するようなロボットの活用方策と、そのために必要な制度改革の検討が促される。

また、これまで安全の基準やルールが未整備なために実施困難であった民間企業等による生活支援ロボットの技術開発が加速される。また、ロボットのハードウェアのみだけでなくサービスと複合した産業の発展が波及効果として期待される。

ロボットの市場は、2015年には1.6兆円、2035年には9.7兆円にまでに拡大すると予想される(図I-1)が、実現には本事業により安全の技術や基準・ルールが整備されることが前提となる。

本事業で蓄積される実証データにより国際標準化活動の強化が期待される。

中立的機関が機密情報の管理をしながら実証データの集約・分析を行うことで、民間企業の知見が集約される。

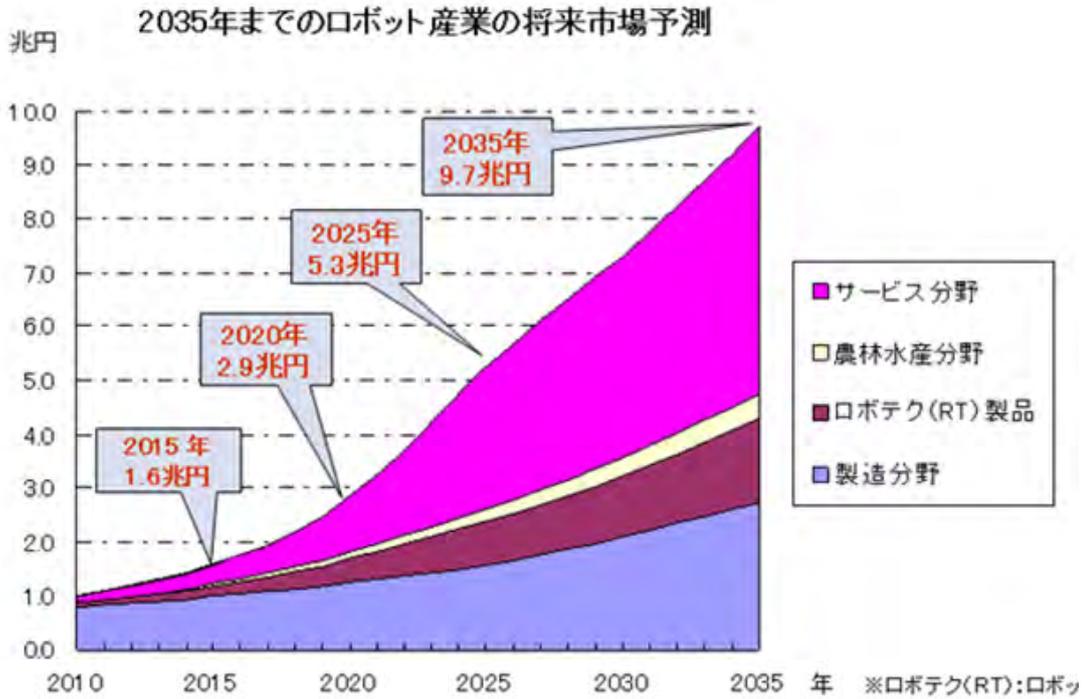
2. 事業の背景・目的・位置づけ

2.1 事業の背景

我が国では、1980年代以降、自動車や電機・電子産業の成長や人手不足を背景に、産業用ロボットの本格的な導入ができた。現在、我が国は、国際的にもトップレベルのロボット技術を有するとともに、生産現場においても、全世界で稼働している産業用ロボットの約4割が日本で稼働している等、自他ともに認める「ロボット大国」といえる。ただし、1990年代以降リーマンショックまで、産業用ロボットの市場規模は緩やかな成長にとどまり、用途も特定の産業分野に限られていた(図I-2)。

しかし、ロボットを巡る状況は、着実に変わりつつある。製造業においては、ロボット・セルのように、さらに高度化した産業用ロボットが生産現場に投入されつつある。また、サービス業の分野においても、2005年の愛知万博では、サービスロボットの実用化に向けた実証実験が行われるとともに、実際のビジネスにおいても、清掃ロボットや食事支援ロボット、災害復旧作業を行う遠隔操作型ロボット等の導入が進んでいる。このように、我が国のロボット産業・技術は、次の成長段階に踏みだしている。

他方、我が国は、少子高齢化・人口減少、アジア諸国の台頭等を背景とした国際競争の激化や、地震や水害等大規模災害に対する不安といった社会的課題に直面している。我が国に蓄積された基盤的なロボット技術(RT)を活用・高度化することにより、これらの諸課題を解決することが期待されている。



出典:平成 21 年度NEDO機械部調査報告書(委託先:三菱総研)

図 I - 1 2035年までのロボット産業の将来市場予測

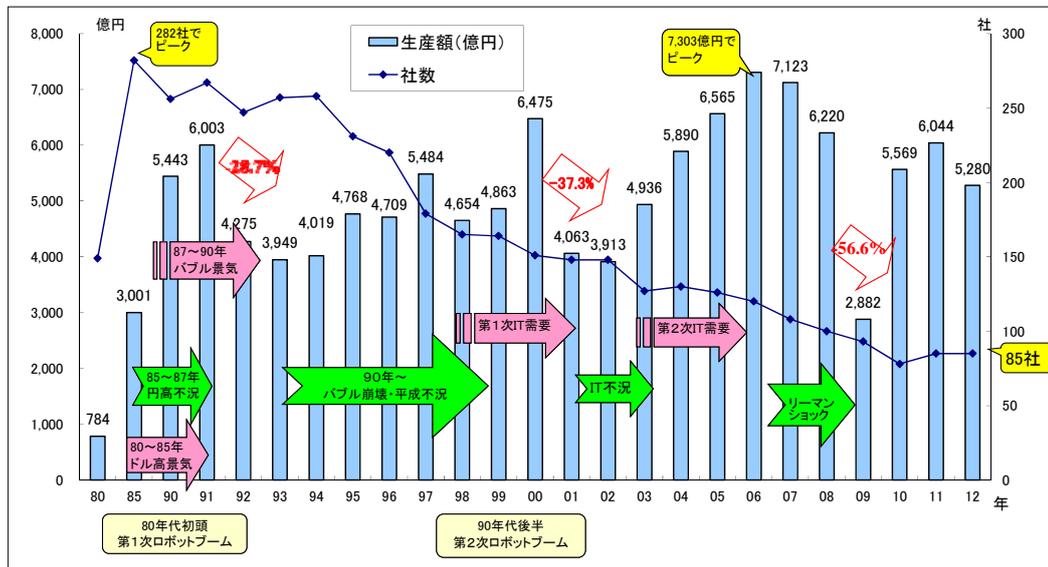


図 I - 2 ロボット出荷台数の推移 (出展:ロボット工業会)

2.2 政策への適合性

「科学技術基本計画」（2006年3月閣議決定）では、ロボット・新機械技術は、特に重点的に研究開発を推進すべき分野（重点推進4分野）の一つである情報通信分野や、推進分野であるものづくり技術分野、社会基盤分野に位置づけられている。

「経済成長戦略大綱」（2006年7月財政・経済一体改革会議。2007年6月改訂版を経済財政諮問会議に報告）の中で、ロボット技術は産学官連携による世界をリードする新産業群の一つとして位置づけられ、次世代ロボットの市場の拡大に向けて、サービスロボット市場の整備、ロボットの認識技術の開発等必要な取組を継続することとしている。

「イノベーション25」（2007年6月閣議決定）では、ロボット・新機械技術は、生涯健康な社会生活や多様な人生を送れる社会の実現に向け、中長期的に取り組むべき課題として、新たな走行車等の普及促進のための環境整備、高度みまもり技術導入のためのルール作りなどの安全・安心な社会形成、また、ユビキタスネットワークや民生用ロボットの本格普及に向けた環境整備、低侵襲診断・治療技術の実現、安全・安心な社会のための将来デバイスの実現、さらに世界的課題解決に貢献する社会のための新しいものづくり技術など、今後の研究開発の進展等によって、その成果を社会に適用していく施策が必要であるとともに、随時見直しをし、その取組を加速・拡充していくことが必要とされている。

「経済財政改革の基本方針2008」（2008年6月閣議決定）では、経済成長戦略の3本の柱、革新的技術創造戦略のうち、革新的技術戦略のひとつとしてロボット技術が位置付けられた。

「ロボット産業政策研究会」報告書（2009年3月とりまとめ）

近い将来に、次世代ロボットが実際に役立つものになるよう、特に技術開発・事業開発、安全確保、社会ルールの整理・策定のための取組等についてまとめられている。

2.3 国のプログラムとの関連性

このような状況を踏まえ「ロボット・新機械イノベーションプログラム」では、我が国の製造業を支えてきたロボット技術・機械技術を基盤とし、IT技術・知能化技術など先端的要素技術との融合を促進することにより、家庭、医療・福祉、災害対応など幅広い分野で活躍する次世代ロボットや新機械技術の開発・実用化を促進し、生産性の向上と人間生活の質の向上を実現するとともに、我が国経済社会の基盤である製造業の競争力の維持・強化を目指している。

このロボット・新機械イノベーションプログラムの中で、「生活支援ロボット実用化プロジェクト」は生活支援分野のロボットを開発し、対人安全技術と安全検証手法の確立を行うと共に、安全性、有効性検証のための実証試験を行う。さらに得られた安全性や有効性に関するデータを集約・分析し、ロボット活用のための具体的安全基準、社会ルール等の環境整備や国際標準化の強化へとつなげる手

法を確立する。

2.4 研究開発の目的

我が国では、少子高齢化が急速に進展しており、このままでは我が国の社会を支える人材が不足することが懸念されている。

一方、我が国は、産業用ロボットをはじめ、国際的にもトップレベルのロボット技術を蓄積してきた。これらのロボット技術を活用して、製造業の生産工程やサービス業の作業工程における一層の効率化・自動化の促進が必要となっている。

また、ロボット技術は産業分野のみならず、介護・福祉、家事、安全・安心等の生活分野においても、社会的課題の解決策の一つとして活用することが期待されており、生活支援ロボットの活用により、生活の質や利便性向上が可能となる。

しかしながら、不特定多数の人が関与する等、条件や状況が変化する実際の使用環境下で稼働する生活支援ロボットは、対人安全技術が確立されておらず残留リスクの高いものが多く、民間企業の独自の取組のみに委ねては本格的な産業化が期待できない。このため、国等の一定の関与により、安全性検証を行う認証機関・試験機関、安全性基準に関する国際標準等を整備することが求められている。

本プロジェクトは、生活支援ロボットとして産業化が期待されるロボットを対象に関係者が密接に連携しながら安全に係る試験を行い、安全性等のデータを取得・蓄積・分析し、具体的な安全性検証手法の研究開発を実施することを目的とする。

また、これらの試験においてはロボット研究開発実施者と安全性検証手法の研究開発実施者が連携し、リスクアセスメント技術、危険予防技術の検討や実際の使用環境下で幅広い参加者による実証試験を集中的に実施する。さらに、生活支援ロボットの安全性基準等の国際標準化を念頭に置きつつ研究開発を進める。

Ⅱ 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

「生活支援ロボット実用化プロジェクト」基本計画で以下のように定めている。

1. 1 最終目標(平成25年度)

生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を確立し、生活支援ロボットの開発者に提供可能となること。対人安全性に関する指標、機械・電気安全、機能安全の試験・評価方法や手順について、国際標準提案を行えること。生活支援ロボットに関する安全性基準適合性評価手法を確立すること。研究開発の対象とした生活支援ロボットに関して、安全性検証のための安全性試験を完了し、ロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示され、実証試験が完了していること。

1. 2 中間目標(平成23年度)

生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を開発するとともに、人間工学実験等による対人安全性に関するデータをロボット開発実施者に提供すること。研究開発の対象とした生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に必要な試験装置を開発し、ロボット安全性試験項目、各タイプのロボットの試験・評価方法や手順の策定を行うこと。これらに基づき、対象としたロボットの安全性検証を完了していること。

2. 事業の計画内容

2. 1 研究開発の内容

上記目標を達成するために、次の5つの研究開発項目について研究開発を実施する。

[委託事業]

研究開発項目① 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発

研究開発項目② 安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの開発

研究開発項目③ 安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発

研究開発項目④ 安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットの開発

研究開発項目⑤ 安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発

以下に研究開発項目ごとの研究開発目標を示す。

2. 1. 1 研究開発項目①：生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発

2. 1. 1. 1 研究開発の必要性

生活支援ロボットは少子高齢化の課題に対して大きな支援力になると期待されている。しかし、生活支援ロボットは不特定多数の人が関与する使用環境で稼働することが考えられ、安全を保証する方式が確定していない。特に、対人安全技術が確立されていないため残留リスクの高いものが多く、早急にリスクを低減し安全性を保証する方式を策定することが求められている。このため、本研究開発

項目では生活支援ロボットの安全性や信頼性等のデータの取得・蓄積・分析を行い、具体的な安全性基準を含む実務的な安全性検証手法の策定に必要な技術を開発する。

2. 1. 1. 2 研究開発の具体的内容

(1) 生活支援ロボットの安全性検証方法の開発

生活支援ロボットの安全性を検証するには、まずロボット開発実施者が自らリスクアセスメントを行った後、これに基づいて安全性検証を行う認証機関及び試験機関により客観的に安全性を検証する手順となる。リスクアセスメントに関しては、我が国でいち早く策定された「次世代ロボットのための安全確保ガイドライン」に則り、ISO-12100 に規定されているリスクアセスメントを実行する方針とする。しかし、生活支援ロボットのリスクアセスメントに関しては、本質安全設計のための定量指標等がほとんどなく、社会的にも方法論が確立していない。このため、生活支援ロボットに関するリスクアセスメント手法を開発する。

他方、生活支援ロボットにおける安全性の評価試験方法については、生活支援ロボットの普及のためにはその枠組みを早急に設定する必要がある。機械・電気・機能安全の側面からの試験は既存の関連規格が存在するため、これらを参考に安全性・信頼性等に関するデータを取得・蓄積・分析することにより定める。

① リスクアセスメント手法の開発

生活支援ロボットに関する各応用分野、あるいは使用されるフィールドにおいて標準となるリスクアセスメント手法を開発する。具体的には、まず自動車等の機械安全分野を広く調査し、また必要に応じて適切な装置の開発及び試験体による耐性試験・人間工学実験等を行って、安全性に係わる耐性値をはじめとした対人安全性に関するデータを取得・蓄積・分析する。次に、これらのデータや類似機械の事故やトラブル履歴等の情報の効率的フィードバックが可能なリスクアセスメント手法を開発する。

② 機械・電気安全、機能安全等ロボットの安全性試験評価方法の開発

耐環境試験、電磁環境試験等、生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全の観点における安全性試験評価方法を開発する。そのため、産業用ロボット等の類似機械装置・コンポーネントに関する安全規格等を調査し、それらの試験基準や方法に関して、既存の試験装置を利用、あるいは必要に応じて新規に試験装置を開発して、安全性・信頼性等に関する試験データを取得・蓄積・分析する。なお、対人安全に関する各種試験・評価手順に関しては、現状では参照すべき規格等が確立されていないため、その試験装置の開発を含めた安全度水準の定量化等に関する研究開発を行う。

これらの結果に基づいて、安全性能の定量化、評価指標等についての研究を行い、試験・評価方法を開発する。

以下に、安全性試験項目の例を挙げる。

- a) ロボット運動性能試験（制御安定性、加速・減速、変動負荷安定性及び各項目における耐久性・信頼性）
- b) ロボット動作性能試験（動作安定性、操作性、及び各項目における耐久性・信頼性）
- c) ロボット耐環境性試験（EMC 特性、低・高温環境信頼性、防滴特性、防塵特性、振動耐久性、感電防止、及び各項目における耐久性・信頼性）
- d) 安全停止特性（非常停止、故障検出時の安全停止）及び予期せぬ再起動防止

（２）生活支援ロボットの安全性基準に関する適合性評価手法の研究開発

安全技術を導入して開発された生活支援ロボットを対象として、コンセプト段階から製品段階までについて、安全性基準に関する適合性評価手法の研究開発を実施する。

2. 1. 1. 3 達成目標

（１）最終目標（平成25年度）

- ①各タイプのロボットのリスクアセスメント手法を確立すること。並びに、それを各タイプのロボット開発実施者に対して提供する。さらに対人安全性に関して取得したデータに基づき、耐性指標等の国際標準提案を行えること。
- ②各タイプの生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に関し安全性試験評価方法を確立すること。さらに策定した試験・評価方法や手順について、国際標準化提案を行えること。
- ③各タイプの生活支援ロボットに関する安全性基準適合性評価手法を確立する。

（２）中間目標（平成23年度）

- ①リスクアセスメント手法を開発すること。さらに人間工学実験等による対人安全性に関するデータをロボット開発実施者に提供すること。
- ②各タイプの生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に必要な試験装置を開発し、ロボット安全性試験項目、各タイプのロボット毎の試験・評価方法や手順の策定を行うこと。

2. 1. 1. 4 特記事項

（１）試験・認証方法については国際標準化の推進のため、必要な情報を提供しつつ、関係機関と連携し、安全規格の確立に向け努力すること。特に、生活支援ロボットに関する安全性・信頼性等のデータ取得・蓄積・分析に際しては、（社）日本ロボット工業会にて審議中の ISO/TC 184/SC 2/WG 7 Robots in personal care (Robots and robotic devices - safety requirements - Non-medical personal care robot)の議論と連携して進めること。

（２）国際的な評価が得られる安全認証拠点が我が国に形成されるように、その中核をなすべく、ISO/IEC Guide 65（JIS Q 0065）「製品認証機関に関する一般要求事項」に、準拠した認証機関、ISO/IEC 17025（JIS Q 17025）「試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項」に準拠した試験機関が、本研究開発の実施期間終了後に設立・継続できるような体制の構築を実施期間中から目指すこと。さらに、PL法を見据えた法的責任の確認も行うこと。

(3) 制度設計の観点から、安全認証拠点基盤がより強固かつ広範に発展するように、例えば事故情報の提供に関し保険機関の関与が、さらに、規格提案に向けて学会の関与が、それぞれ提案に含まれることを目指すこと。また、様々な使用者の協力を得ることが可能な地域に根ざした施設を整備することを目指すこと。

(4) 各種試験装置は、プロジェクトの中間目標年度（平成23年度）までに試験機関候補場所に可能な限り集約することを目指す。

2. 1. 2 研究開発項目②：安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの開発

2. 1. 2. 1 研究開発の必要性

少子高齢化が急速に進展しており、介護を必要とする高齢者・障害者が増え、その人たちを支える体制の整備が急務となっている。そのため、この分野への新しい技術であるロボット技術による支援の強化が求められている。しかし、このような介護・福祉分野へのロボット技術の活用は、利用者に加えて家族等の人との共存が必須となるため安全性の確保が必要なこと、作業内容が多様であること等から困難となっている。

このため、本研究開発項目では、人とロボットを積極的に連携させることで、これらの課題を克服するための要求仕様や運用ルールを明確にし、多様な作業を、安全に行うことができる移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの安全技術を開発する。

2. 1. 2. 2 研究開発の具体的内容

(1) 移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットにおける安全技術の開発

安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットを開発する。移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットとは、人の生活環境下で、ユーザーの指示によって、安全かつ効率よく生活に必要な作業を行う機能を実現するロボットである。

ロボットの使用目的、使用環境及び運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する。リスクアセスメントは研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や検証手順を開発しながら進めるものとする。

以下に安全な移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットを実現するための安全技術の例を挙げる。

a) 移動・作業技術

生活環境下において、ユーザーの指示より、移動や作業（マニピュレーション等）を効率よく安全に行うための技術。

b) ユーザーインタフェース技術

直感的に操作可能で、利用者の負担の少ないユーザーインタフェース技術により操縦動作の安全性の確保、ユーザーに適切な情報を提示することによりロボットが周囲の人を含む作業環

境に対して安全性を確保する技術。

c) ユーザーへの適用(フィッティング)技術

利用方法が簡便であり、様々な身体状況のユーザーが、安全に利用できる適用技術。

d) 安全な退避技術

ロボットへの供給電源(バッテリー等)が、突然遮断された場合でも、ロボット本体が安全に停止、退避がなされる技術。

e) ユーザー拘束時の安全開放技術

ロボットが故障等によって、ユーザーや第三者の身体を拘束するような状態に陥った場合でも、安全かつ容易に開放できる技術。

(2) 移動作業型(操縦が中心)生活支援ロボットの安全性検証

①安全性試験

上記2. 1. 2. 2 (1)に該当する安全技術をその用途、使用シーンに応じて一部、またはすべてを搭載した移動作業型(操縦が中心)生活支援ロボットの安全性試験を、研究開発項目①において開発する安全性検証手法を用いて行う。この安全性試験の結果は、研究開発項目①の開発に対してフィードバックしつつ実施する。

②実証試験

想定ユーザーによる、実環境あるいは模擬した環境において、上記2. 1. 2. 2 (1)で開発されたロボットの実証試験を行い、各安全性試験項目について検証を行う。

2. 1. 2. 3 達成目標

(1) 最終目標(平成25年度)

①上記2. 1. 2. 2 (1)に該当する安全技術を一部またはすべてを搭載した移動作業型(操縦が中心)生活支援ロボットが2. 1. 2. 2 (2)項の安全性検証のための安全性試験を完了していること。

②上記2. 1. 2. 2 (1)で開発されたロボットの安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。

③2. 1. 2. 2 (2)②項の実証試験が完了していること。

(2) 中間目標(平成23年度)

①上記2. 1. 2. 2 (1)で開発されたロボットのリスクアセスメントを終了し、安全性試験項目がすべて示されていること。

②実施計画に予定されている安全技術の開発が終了し、その一部またはすべてが上記2. 1. 2. 2 (1)項で開発されたロボットに搭載されていること。

③上記2. 1. 2. 2 (2)①に該当する安全性試験のうち、研究開発項目①で策定済みの安全性検証手法を用いて試験を完了していること。

2. 1. 2. 4 特記事項

(1) 安全技術として、共有可能なロボット安全要素部品の開発を含めることを推奨する。これら要素部品は、生活支援ロボットに使用される構成部品であり、安全度水準（SIL）等の標準規格に適合するものの取得を目指して開発されるものであり、本プロジェクト内外に提供することが望ましい。

(2) 安全性検証に用いるロボットは、安全技術も含め開発済みのロボットを用いても良い。

(3) 実証試験を実施できる施設を有する機関を、協力機関として確保すること。

(4) 実証試験は、倫理問題に配慮して行うこと。

2. 1. 3 研究開発項目③：安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発

2. 1. 3. 1 研究開発の必要性

次世代ロボットの大きな特徴の一つは、自ら環境を認識してその情報に基づき、物理的移動を伴う作業を行う「自律性」であり、これによって複雑な環境下においても人に代わって様々な作業を行うことができる。我が国の社会が直面している少子高齢化社会に伴う労働力不足や、家庭における高齢者の生活支援等の大きな問題を解決する鍵を握る。しかし、この自律性を有する移動作業型のロボットは、従来の安全規格、概念への適合が難しく、また技術的にも確立されていない部分がある。

このため、本研究開発項目では、自律性を有する移動作業型ロボットの安全に関する課題を洗い出し、安全を実現するための要求仕様や運用ルールを明確にし、その課題を解決する安全技術を開発する。

2. 1. 3. 2 研究開発の具体的内容

(1) 移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットにおける安全技術の開発

安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットを開発する。移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットとは、周囲の環境を認識し、自律的な判断に基づいて安全かつ効率よく生活に必要な作業を行う機能を実現するロボットである。

ロボットの使用目的、使用シーン及び運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する。リスクアセスメントは、研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や検証手順を開発しながら進めるものとする。

以下に安全な移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットを実現するための安全技術の例を挙げる。

①リスク低減技術

a) 安定走行技術

自律での走行速度指令による駆動力制御に加え、走行加減速や外力、凹凸や斜面等がある路面環境に対して自律的に姿勢を安定化し、安全に走行する技術。

b) 人・障害物回避技術

静止障害物の位置及び人等の移動障害物の位置・動きを検知する機能、またこれらとの衝突リスクを見積もり回避する等安全に走行する技術。

c) 自律走行技術

自己位置認識技術や地図情報生成技術、動的経路計画技術等の安全性要素技術を使い安全に自律走行する技術。

d) 自己診断技術

ロボットの各機能が正常に動作していることを常時確認して、故障や異常を自動的に検出して通報又は修復することにより、安全に運用する技術。

e) 危険予防技術

ロボットの動作や行動を人に事前に認識させることや人の行動を予測することにより安全に運用する技術。

②安全要素技術

a) 自己位置認識技術

周囲環境のセンシングによる環境地図情報や、ロボットの移動及び動作の履歴情報を活用し、正確な自己位置を推定する機能を持つことで安全な移動や作業動作を確保するためのセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

b) 安全環境認識技術

ロボットやその作業環境に配置された各種センサを用い、人の移動、及び作業の障害となる環境変化を検出する機能を持つことで、環境地図生成と動的動作計画機能を成立させ、安全な移動や作業動作を確保するためのセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

c) 環境地図生成技術

ロボットやその作業環境に配置された各種センサを用い、移動や作業に必要な地図等の環境記述を生成する機能を持つことで、自己位置認識と動的動作計画機能を成立させ、安全な移動や作業動作を確保するためのセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

d) 動的動作計画技術

目的地への移動や目的作業を実現するための動作を計画する技術において、人の移動、及び作業の障害となる環境変化による動作変更の必要性があっても、補正、再計画を自律的に行うことで安全な移動や作業動作を確保するためのセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

(2) 移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの安全性検証

①安全性試験

上記2. 1. 3. 2 (1) に該当する安全技術をその用途、使用シーンに応じて一部、またはすべてを搭載した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの安全性試験を、研究開発項目①において

開発する安全性検証手法を用いて行う。この安全性試験の結果は、研究開発項目①の開発に対してフィードバックしつつ実施する。

②実証試験

想定運営先を模擬した環境において、上記2. 1. 3. 2 (1) で開発されたロボットの安全性の実証試験を行い、各安全性試験項目について検証を行うこと。

2. 1. 3. 3 達成目標

(1) 最終目標 (平成25年度)

- ①上記2. 1. 3. 2 (1) に該当する①リスク低減技術及び②安全要素技術を一部またはすべて搭載した移動作業型 (自律が中心) 生活支援ロボットが2. 1. 3. 2 (2) 項の安全性検証のための安全性試験を完了していること。
- ②上記2. 1. 3. 2 (1) で開発されたロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。
- ③2. 1. 3. 2 (2) ②項の実証試験が完了していること。

(2) 中間目標 (平成23年度)

- ①上記2. 1. 3. 2 (1) で開発されたロボットのリスクアセスメントを終了し、安全性試験項目がすべて示されていること。
- ②実施計画に予定されている安全技術の開発が終了し、その一部またはすべてが上記2. 1. 3. 2 (1) 項で開発されたロボットに搭載されていること。
- ③上記2. 1. 3. 2 (2) ①に該当する安全性試験のうち、研究開発項目①で策定済みの安全性検証手法を用いて試験を完了していること。

2. 1. 3. 4 特記事項

(1) 安全技術として、共有可能なロボット安全要素部品の開発を含めることを推奨する。これら要素部品は、生活支援ロボットに使用される構成部品であり、安全度水準 (SIL) 等の標準規格に適合するものの取得を目指して開発されるものであり、本プロジェクト内外に提供することが望ましい。

(2) 安全性検証に用いるロボットは、安全技術も含め開発済みのロボットを用いても良い。(3) 実証試験を実施できる施設を有する機関を、協力機関として確保すること。

(4) 実証試験は、倫理問題に配慮して行うこと。

2. 1. 4 研究開発項目④：安全技術を導入した人間装着 (密着) 型生活支援ロボットの開発

2. 1. 4. 1 研究開発の必要性

少子高齢化社会では、高齢者・障害者の自立と生き甲斐が重要な点であり、生活支援、活動の質の

向上が課題である。高齢者・障害者においては、身体機能が低下する傾向にあり、それが高齢者・障害者の自立を制限している。さらに、一層の身体機能低下への悪循環を加速している。また、要介護者の急増は介護者不足、介護労働負担を増加させている。これらの課題を解決するために人間の身体機能を拡張・増幅・支援する技術の開発が必要である。

このため、本研究開発項目では、人に装着して人間の身体機能を拡張・増幅・支援する人間装着（密着）型生活支援ロボットの安全に関する課題を洗い出し、安全を実現するための要求仕様や運用ルールを明確にし、その課題を解決する安全技術を開発する。

2. 1. 4. 2 研究開発の具体的内容

(1) 人間装着（密着）型生活支援ロボットにおける安全技術の開発

安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットを開発する。人間装着（密着）型生活支援ロボットとは、人間に装着し、装着者の意思を反映した随機的、自律的機能によって制御される実用的なロボットである。

ロボットの使用目的、使用環境及び運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する。リスクアセスメントは研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や認証手順を開発しながら進めるものとする。

以下に安全な人間装着（密着型）型生活支援ロボットを実現するための安全技術の例を挙げる。

a) 装着時機能安定技術

人に装着して人間の身体機能を拡張・増幅・支援するための駆動力制御に加え、歩行や作業に付随して生じる負荷変動、外力、障害物衝突などに対して自律的に対処し安全に人の動作を支援する技術。

b) 制御技術

装着者の意思を反映し、随機的、自律的機能によって制御する技術。

c) 安全管理技術

動作支援中の環境情報を取得し、この情報を用いて安全確保を行うための管理技術。

d) 自己診断技術

ロボットの各機能が正常に動作していることを常時確認して、故障や異常を自動的に検出して通報または対処することにより安全に運用する技術。

e) 安全要素技術

モータ、バッテリー、センサ等の人間装着（密着型）型生活支援ロボットを構成する基盤部品に関する安全技術・リスク低減技術。

(2) 人間装着（密着）型生活支援ロボットの安全性検証

①安全性試験

上記2. 1. 4. 2 (1) に該当する安全技術をその用途、使用シーンに応じて一部、またはすべてを搭載した人間装着（密着）型生活支援ロボットの安全性試験を、研究開発項目①において開発する安全性検証手法を用いて行う。この安全性試験の結果は、研究開発項目①の開発に対してフィードバックしつつ実施する。

②実証試験

想定ユーザーによる、実環境あるいは模擬した環境において、上記2. 1. 4. 2 (1) で開発されたロボットの実証試験を行い、各安全性試験項目について検証を行う。

2. 1. 4. 3 達成目標

(1) 最終目標（平成25年度）

- ①上記2. 1. 4. 2 (1) に該当する安全技術を一部またはすべてを搭載した人間装着（密着）型生活支援ロボットが2. 1. 4. 2 (2) 項の安全性検証のための安全性試験を完了していること。
- ②上記2. 1. 4. 2 (1) で開発されたロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。
- ③2. 1. 4. 2 (2) ②項の実証試験が完了していること。

(2) 中間目標（平成23年度）

- ①上記2. 1. 4. 2 (1) で開発されたロボットのリスクアセスメントを終了し、安全性試験項目がすべて示されていること。
- ②実施計画に予定されている安全技術の開発が終了し、その一部またはすべてが上記2. 1. 4. 2 (1) 項で開発されたロボットに搭載されていること。
- ③上記2. 1. 4. 2 (2) ①に該当する安全性試験のうち、研究開発項目①で策定済みの安全性検証手法を用いて試験を完了していること。

2. 1. 4. 4 特記事項

- (1) 安全技術として、共有可能なロボット安全要素部品の開発を含めることを推奨する。これら要素部品は、生活支援ロボットに使用される構成部品であり、安全度水準（SIL）等の標準規格に適合するものの取得を目指して開発されるものであり、本プロジェクト内外に提供することが望ましい。
- (2) 安全性検証に用いるロボットは、安全技術も含め開発済みのロボットを用いても良い。
- (3) 実証試験を実施できる施設を有する機関を、協力機関として確保すること。
- (4) 実証試験は、倫理問題に配慮して行うこと。

2. 1. 5 研究開発項目⑤：安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発

2. 1. 5. 1 研究開発の必要性

人間の行動の範囲及び自由度を拡大する移動手段として、現在、自動車から自転車まで各種移動体が存在するが、少子高齢化の進展や CO2 ガス発生削減等の社会的課題を解決していくため、今後、高齢者や環境に配慮した移動体が求められてくる。具体的には、商業施設、駅・空港等の交通施設、オフィス、家庭に至るまで、不特定多数の歩行者や家族、他の移動体や障害物と同一空間内に共存し、搭乗者による操作または自律走行が可能な搭乗型生活支援ロボットが必要となる。

このため、本研究開発項目では、人や障害物が混在する状況において、人を乗せて移動する機能を備えた搭乗型生活支援ロボットの安全に関する課題を洗い出し、安全を実現するための要求仕様や運用ルールを明確にし、その課題を解決する安全技術を開発する。

2. 1. 5. 2 研究開発の具体的内容

(1) 搭乗型生活支援ロボットにおける安全技術の開発

安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットを開発する。搭乗型生活支援ロボットとは、人を乗せて、操縦者の指令により、または自律的に安全かつ自在に移動する機能を実現するロボットである。ロボットの使用目的、使用環境及び運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する。リスクアセスメントは研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や認証手順を開発しながら進めるものとする。

以下に安全な搭乗型生活支援ロボットを実現するための安全技術の例を挙げる。

①リスク低減技術

a) 安定走行技術

搭乗者または、自律での走行速度指令による駆動力制御に加え、走行加減速や外力、凹凸や斜面等がある路面環境に対して自律的に姿勢を安定化し、安全に走行する技術。

b) 人・障害物回避技術

静止障害物の位置及び人等の移動障害物の位置・動きを検知する機能、またこれらとの衝突リスクを見積もり回避する等安全に走行する技術。

c) 自律走行技術

操縦者不在時の自律走行及び操縦アシストを含めた半自律走行時、②に記述する自己位置認識技術や地図情報生成技術、動的経路計画技術等の安全要素技術を使い安全に自律・半自律走行する技術。

d) 操縦者の意図推定、操縦支援技術

広範囲な利用者にとって簡便に操縦できるものとするために、短時間での習熟により操作できるような操縦者の意図推定、操縦支援技術を備え、安全に走行する技術。

e) 協調走行技術

ロボット間及びロボットと使用者間の相対位置・方位検出機能に基づき、追従制御等による協調走行を安全に実施する技術。

f) 自己診断技術

ロボットの各機能が正常に動作していることを常時確認して、故障や異常を自動的に検出して通報または修復することにより安全に運用する技術。

②安全要素技術

a) 自己位置認識技術

周囲環境のセンシングによる環境地図情報や移動履歴情報を活用することで自己位置を認識し安全な走行を確保するセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

b) 地図情報生成技術

ロボットに搭載されたセンサを用い、移動に必要な地図等の環境記述を生成する機能を持つことで、自己位置認識と動的経路計画機能を成立させ、安全な走行を確保するセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

c) 動的経路計画技術

目的地に到達するための経路を計画する技術において、動的障害物による経路変更等があっても、補正、再計画を自律的に行い、安全な走行を確保するセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

d) 姿勢安定化技術

ロボット自身の姿勢を検出し、外部環境から影響を受けても常に安定を保持し、安全な走行を確保する機構、センサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

(2) 搭乗型生活支援ロボットの安全性検証

①安全性試験

上記2. 1. 5. 2 (1) に該当する安全技術をその用途、使用シーンに応じて一部、またはすべてを搭載した搭乗型生活支援ロボットの安全性試験を、研究開発項目①において開発する安全性検証手法を用いて行う。この安全性試験の結果は、研究開発項目①の開発に対してフィードバックしつつ実施する。

②実証試験

想定運営先を模擬した環境において、上記2. 1. 5. 2 (1) で開発されたロボットの安全性実証試験を行い、各安全性試験項目について検証を行うこと。

2. 1. 5. 3 達成目標

(1) 最終目標 (平成25年度)

①上記2. 1. 5. 2 (1) に該当する安全技術を一部またはすべてを搭載した搭乗型生活支援ロボットが2. 1. 5. 2 (2) 項の安全性検証のための安全性試験を完了していること。

②上記2. 1. 5. 2 (1) で開発されたロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。

③2. 1. 5. 2 (2) ②項の実証試験が完了していること。

(2) 中間目標（平成23年度）

- ①上記2. 1. 5. 2 (1) で開発されたロボットのリスクアセスメントを終了し、安全性試験項目がすべて示されていること。
- ②実施計画に予定されている安全技術の開発が終了し、その一部またはすべてが上記2. 1. 5. 2 (1) 項で開発されたロボットに搭載されていること。
- ③上記2. 1. 5. 2 (2) ①に該当する安全性試験のうち、研究開発項目①で策定済みの安全性検証手法を用いて試験を完了していること。

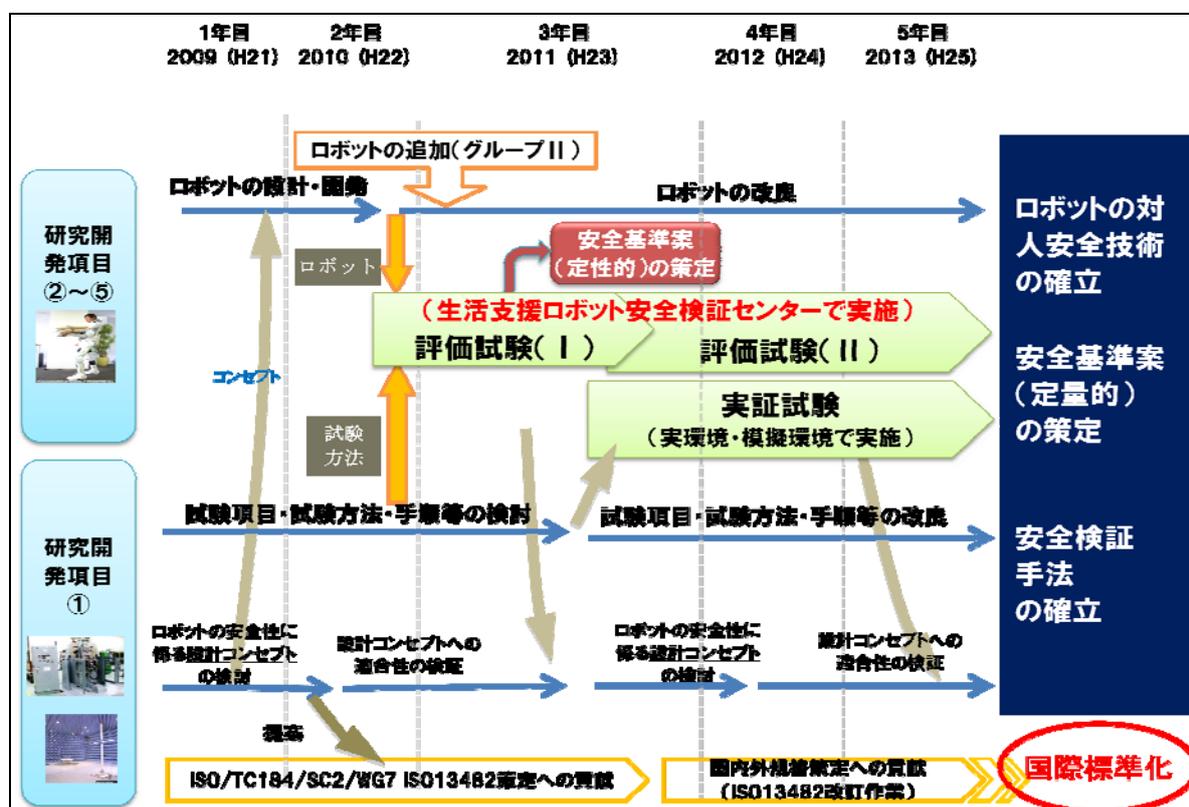
2. 1. 5. 4 特記事項

- (1) 安全技術として、共有可能なロボット安全要素部品の開発を含めることを推奨する。これら要素部品は、生活支援ロボットに使用される構成部品であり、安全度水準（SIL）等の標準規格に適合するものの取得を目指して開発されるものであり、本プロジェクト内外に提供することが望ましい。
- (2) 安全性検証に用いるロボットは、安全技術も含め開発済みのロボットを用いても良い。
- (3) 実証試験を実施できる施設を有する機関を、協力機関として確保すること。
- (4) 実証試験は、倫理問題に配慮して行うこと。

研究開発マイルストーンを図Ⅱ－１に、開発予算を表Ⅱ－１に示す。

安全検証手法の研究開発（研究開発項目①）と安全技術を搭載したロボット開発（研究開発項目②～⑤）を並行して行う計画である。２年度目からは検討された試験方法をもとに整備される生活支援ロボット安全検証センターでロボットの評価試験を実施した。得られた試験結果を安全性検証手法の検討へフィードバックし、試験方法の改良、認証手法の構築を行った。また、初期の段階から生活支援ロボットの安全基準の国際標準化を目指す活動をISO/TC184/SC2/WG7を通して行った。2012年（予定）にISO13482の発行と、その後の改訂作業において、日本発の安全性基準を構築すべく研究開発成果をもとにした提案を行った。

なお、２年度目の末にロボットをグループⅡとして追加した。グループⅡの実施者は１年度目からプロジェクトで検討された安全性検証手法を用いて評価試験とロボットの改良に比較的早い段階からとりかかる。



図Ⅱ－１ 研究開発マイルストーン

表Ⅱ－1 開発予算

(単位：百万円)

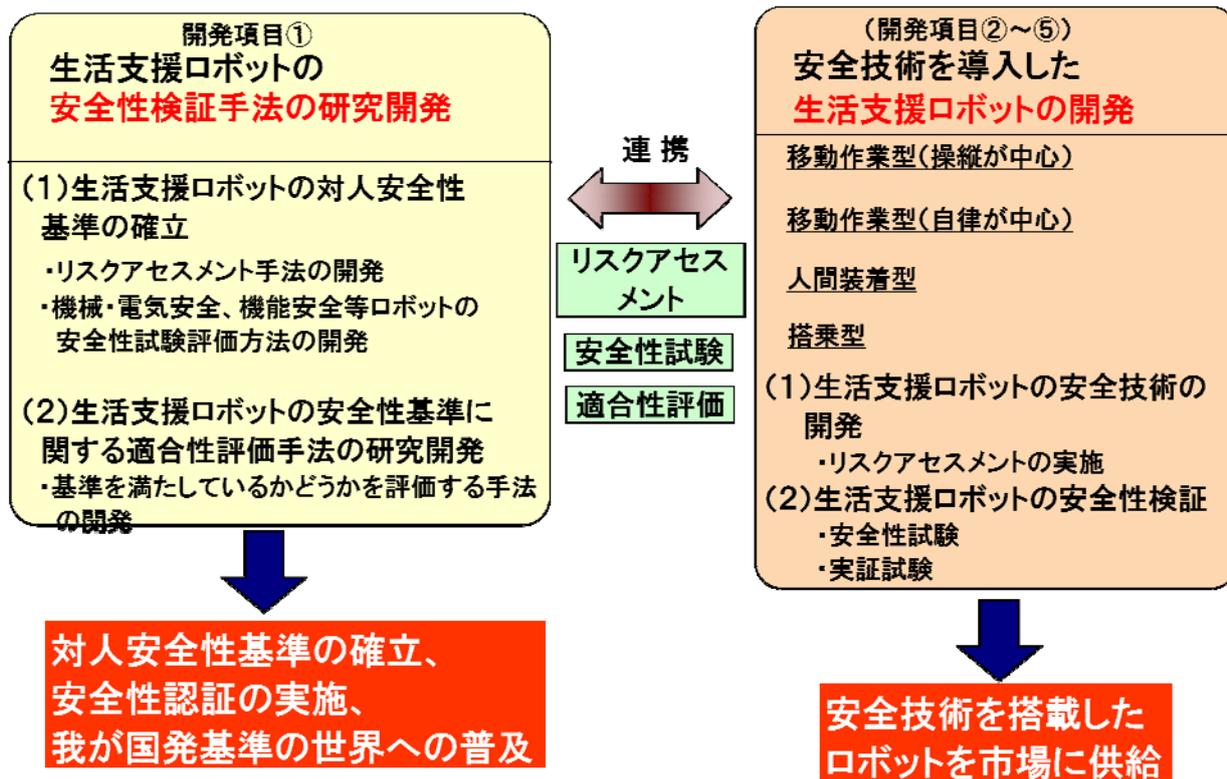
	1年目 H21(20 09)	2年目 H22(20 10)	3年目 H23(20 11)	4年目 H24(20 12)	5年目 H25(20 13)
一般会 計	1600	1525	1150	1350	940
補正予 算	—	840	—		

2.2 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDOが実施者を公募により選定し、委託により実施した。本研究開発の推進にあたって、NEDOが研究開発責任者（プロジェクトリーダー）として独立行政法人産業技術総合研究所 知能システム研究部門 研究部門長 比留川 博久氏を任命した。

安全性検証手法を開発する実施者とロボットメーカーの実施者が連携してプロジェクトを実施する体制として、図Ⅱ－2に示すように安全性検証手法を開発する開発項目①と、安全技術を導入したロボットを開発する開発項目②が、各々の研究開発を進めながら、リスクアセスメント、安全性試験および適合性評価の手法検討や試行において連携することとした。

なお、研究開発項目①を実施する体制は国際標準化を推進できるものとし、研究開発項目②～⑤を実施する体制は、ロボットのハードウェアまたはソフトウェアの開発者、及び実証試験施設提供者の参加を得ることとした。



図Ⅱ－２ プロジェクトの実施体制（概念図）

各研究開発項目の実施者は以下の通りである。図Ⅱ－３(1)に平成23年度末と、図Ⅱ－３(2)に平成25年度末のプロジェクト実施体制を示す。また、図Ⅱ－４に当プロジェクトで開発するロボットの外觀イメージを示す。

なお、研究開発の段階的推進として研究開発項目②～⑤の実施は、安全性に係る試験方法の検討段階であるプロジェクトの初年度から参加する「グループⅠ」と、開発された安全性に係る試験手法を用いて2年度目から試験を行う「グループⅡ」に分けて段階的に推進する。「グループⅡ」については、各タイプのロボットの試験・評価方法や手順が策定される2年度目に公募により実施者を選定する。「グループⅡ」の実施者には中間目標の達成は求めていないため、プロジェクトの中間評価の評価対象に含めないこととした。

研究開発項目① 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発：

- 財団法人日本自動車研究所
- 独立行政法人産業技術総合研究所
- 独立行政法人労働安全衛生総合研究所
- 国立大学法人名古屋大学
- 一般財団法人日本品質保証機構
- 日本認証株式会社
- 社団法人日本ロボット工業会

財団法人製造科学技術センター

研究開発項目② 安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの開発

(A) 安全技術を導入した移乗・移動支援ロボットシステムの開発：

パナソニック株式会社

国立障害者リハビリテーションセンター

研究開発項目③ 安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発

(A) 安全技術を導入した生活公共空間及びビルの移動作業型ロボットシステムの開発：

富士重工業株式会社（平成23年度で終了）

(B) 安全技術を導入した警備ロボットシステムの開発：

総合警備保障株式会社（平成23年度で終了）

北陽電機株式会社（同上）

三菱電機特機システム株式会社（同上）

(C) 安全技術を導入した配送センター内高速ビークルシステムの開発： [グループⅡ]

株式会社ダイフク（平成22年度末から）

(D) 安全技術を導入した配送センター内のフォーク型物流支援ロボットの開発： [グループⅡ]

株式会社日立産機システム（平成22年度末から）

株式会社日立プラントテクノロジー（平成22年度末から）

研究開発項目④ 安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットの開発

(A) 安全技術を導入した人間装着型生活支援ロボットスーツ HAL の開発：

CYBERDYNE株式会社

国立大学法人筑波大学

(B) 安全技術を導入したリズム歩行アシストの開発： [グループⅡ]

株式会社本田技術研究所（平成22年度末から）

研究開発項目⑤ 安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発

(A) 搭乗型生活支援ロボットにおけるリスクアセスメントと安全機構の開発：

トヨタ自動車株式会社

独立行政法人国立長寿医療研究センター

株式会社フォー・リンク・システムズ（平成23年度で終了）

(B) 安全要素部品群と安全設計に基づく搭乗型移動ロボットの開発： [グループII]

アイシン精機株式会社（平成22年度末から）

日本信号株式会社（同上）

オプテックス株式会社（同上）

株式会社ヴィッツ（同上）

学校法人千葉工業大学（同上）

(C) 屋外移動支援機器における安全エンジニアリング技術の研究開発： [グループII]

I D E C株式会社（同上）

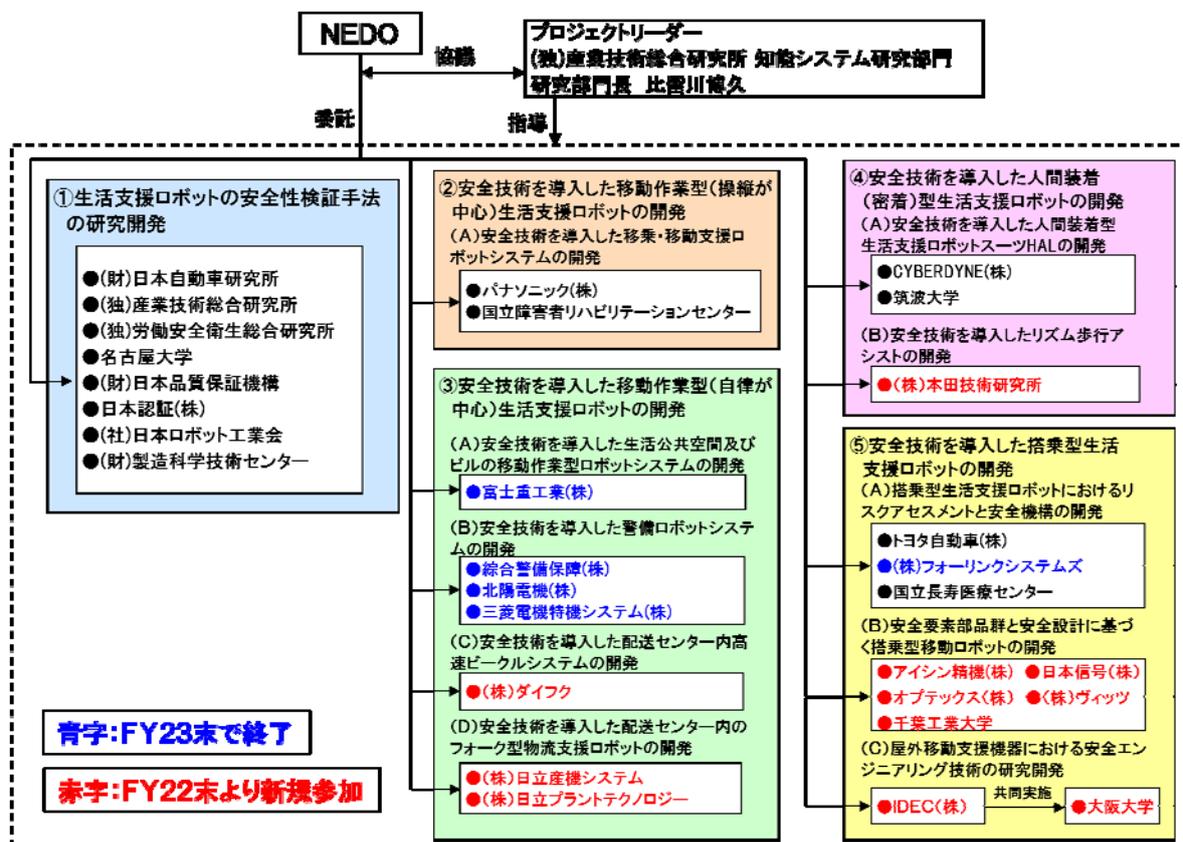
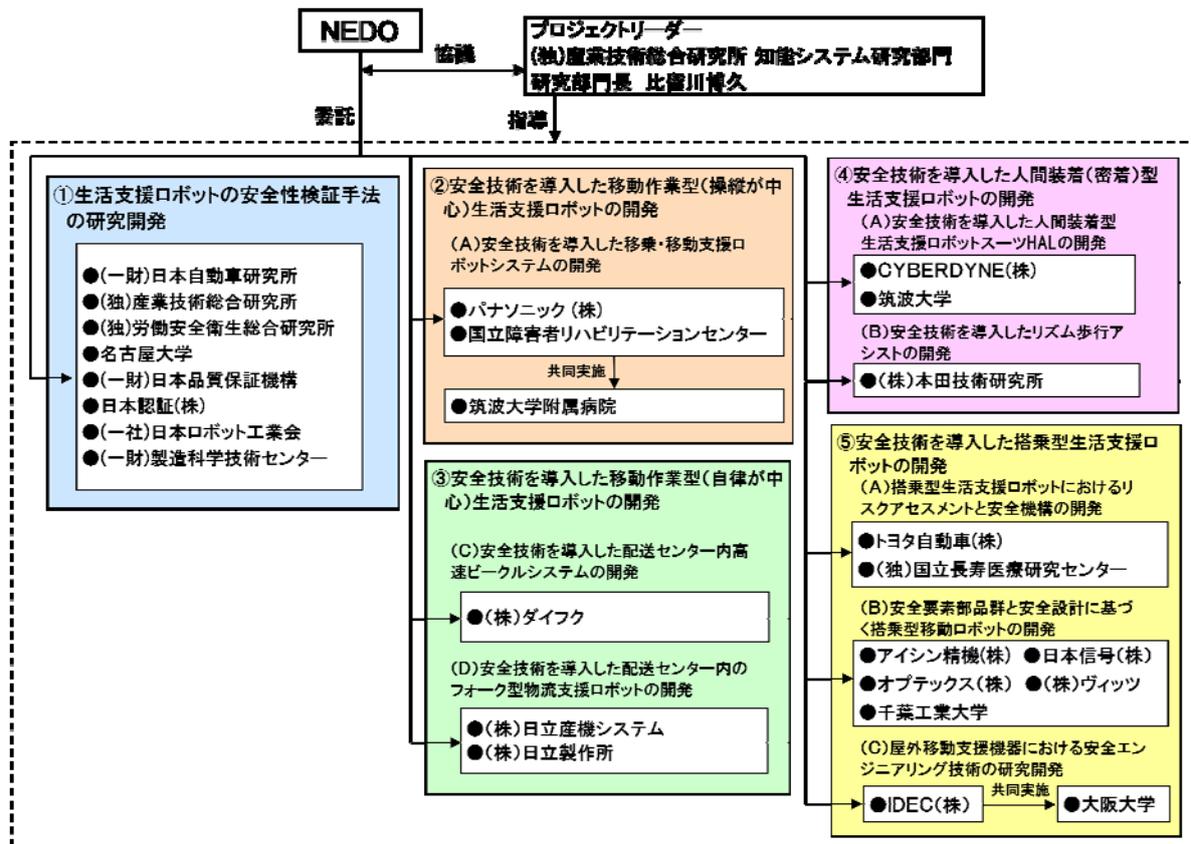


図 II - 3 (1) プロジェクト実施体制 (平成23年度)



図Ⅱ-3 (2) プロジェクト実施体制(平成25年度)



図Ⅱ-4 プロジェクトで開発するロボット

2.3 研究開発の運営管理

研究開発の進捗管理を行うため、実施者が一堂に会す連絡会や半期に一度の進捗報告会の実施また、4半期に一度の進捗確認シートの作成を行っている。その概要は以下の通り。

2.3.1 安全性検証全体連絡会

実施者が一堂に会しプロジェクト全体のスケジュールおよび課題の確認、安全性検証手法の開発状況や開発した手法の紹介、またロボット開発事業者からの情報提供依頼などを行っている。

主催：NEDO、PL、 運営協力：開発項目①ステアリングコミッティー

開催頻度：1年に3回

2.3.2 進捗報告会と研究進捗確認シート

各実施者から半年間の研究進捗の説明、課題と今後のスケジュールを確認。

出席者：PL、NEDO、METI

報告者：各研究開発実施者

開催頻度：進捗報告会は1年に3回。進捗報告会を行わない四半期に研究進捗確認シートを提出。

2.3.3 安全検証手法開発実施者が主催する各種WG

安全検証手法の開発では、開発分野毎にWGを設け定期的に打ち合わせを行っている。その場には議題に応じてロボット開発実施者が参加している。また、安全性や制度に関連する専門家を外部委員として招き助言をいただいている。NEDOおよびMETIはオブザーバーとして参加。

2.3.4 アウトリーチ活動

2013年11月に東京ビックサイトで行われた国際ロボット展において、生活支援ロボット実用化プロジェクト参画企業のロボットを展示。併せて講演会でこれらロボットを紹介。2014年2月17日には、機械振興会館において、生活支援実用化プロジェクトの成果報告会を行い、同時に記者発表会を行った。ここで、IS013482を世界で初めて取得したパナソニック（株）の「リショーネ」および（株）ダイフクの「エリア管理システム」の紹介を行った。さらに、2014年6月18日には、つくば市役所において、プロジェクト外の一般者を対象に、生活支援実用化プロジェクトの成果発表会を行った。この際、生活支援ロボット安全検証センターの見学会も行った。

2.3.5 秘密情報の管理について

研究開発を行っている複数の企業がプロジェクトに参加しており、技術情報を扱うにあたり、秘密

保持に関するルールを定めている。

(1) 安全性検証全体連絡会における秘密保持誓約について

2 か月に 1 回実施している安全性検証全体連絡会は、その議題が各実施者において秘密情報として扱いたい技術情報や営利活動に必要な情報が含まれる場合があるため、これらの秘密情報を安全性検証全体連絡会の出席者のみにその開示範囲を限定するため、各参加者から秘密保持誓約書を提出してもらっている。

作成元：安全性検証全体連絡会に出席する各実施者

提出先：NEDO

(2) 安全性検証手法の開発者とロボット開発者間の秘密保持契約（NDA）について

安全性検証手法の開発では、各ロボット開発者から、ロボットの設計情報などの技術情報を入手する場合があります、その情報が他のロボット開発者に開示されると、情報の発信元の開発者の不利益になることが予想される。そのため、安全性検証手法開発者とロボット開発者の間で秘密保持契約を締結している。なお、安全性検証手法の開発者側に各ロボット開発者と連絡を取り合う窓口担当者を個別に設けている。これにより、他のロボット開発者の秘密情報が漏えいすることを防いでいる。

秘密保持契約の契約当事者： 安全性検証手法開発実施者（日本自動車研究所等）およびプロジェクト内ロボット開発実施者のうち 1 コンソ。

2. 4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

本プロジェクト参画企業のロボットには、移動型、装着型、搭乗型等のタイプがあり、それぞれのタイプに対して各社がリスクアセスメントを行うとともに、認証機関が認証スキームを作成した。これをもとに Personal care robot の国際安全規格 IS013428 の策定に大きく貢献。NEDO は、参画企業のロボットに対し、認証取得を促し、各ロボットの安全性を担保していく仕組みを作った。これにより、実際に実用化・事業化を後押しすることができ、サイバーダインの「ロボットスーツ HAL」、パナソニック（株）の「リショーン」の事業化につながったと考える。

3. 情勢変化への対応

■平成 23 年度末、総合警備保障(株)、北陽電機(株)、三菱電機特記システム(株)のコンソ、及び(株)フォーリンクシステムが、本プロジェクトを卒業。警備ロボットや安全回路に関し、技術開発の目処がたったため。

■平成 23 年度末、富士重工業(株)の掃除ロボットについては研究開発に目処が付きプロジェクトを卒業したが、その後、公的資金の不正利用が判明した。NEDOは同社から資金を回収済み（平成 2

5年1月)。

■行政公開プロセス（仕分け）

【平成24年】

- ・研究開発項目①～⑤の中で、より公共性の高い①に対し、予算を重点的に割り振ること。
- ・研究開発項目②～⑤に関しては、各タイプのロボットについて、パイロットスタディーを行いリスクアセスメントを完成させ、①が行う各タイプの認証スキーム開発に協力すること。これに関して予算を重点的に使い、企業固有の問題については、各企業の負担で開発すること。

⇒ 平成25年度予算の割り振りで、上記意向を反映。

【平成25年】

- ・安全標準については幅広い知見を募るため、オープンに議論していくこと
- ・国内試験機関が海外のロボットの安全試験を請け負える環境を整備すること

⇒ 講演会、セミナー、国際学会での発表で、国内外にアピール。海外案件も検討中。

4. 中間評価結果への対応

	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点	対処方針・計画等への反映
総合評価	<p>高齢化社会を迎えている状況下、生活支援ロボット実用化プロジェクトは経済産業省が推進する「ロボット・新機械イノベーションプログラム」および内閣府が推進する「社会還元加速プロジェクト」の目的達成に貢献する非常に時宜に適ったものである。生活支援ロボットを実用化するためには、対人安全基準、基準適合性評価法を確立する必要があり、本プロジェクトは重要な意味を持つ。また、基準作成、適合性評価法の確立は、その性質上、特定の企業が担当できないため、NEDOの支援で実施することは妥当である。NEDO、産業技術総合研究所、委託先機関（JARI など）の三者の協力によって、効率よく運営されている。多少の温度差はあるが、各個別テーマはそれぞれこの目標に向かって努力しており、中間時点の評価は概ね順調と判断される。</p>	<p>【1】本プロジェクトの成否は、安全性検証手法の確立と認証制度の整備にかかっていると見てよいだろう。今後この点に関して、今一步の方向性の明確化とこのことを各個別テーマが統一的に理解すること、更に、プロジェクト全体としての纏まりが必要である。</p> <p>【2】個別の安全基準の注目項目が、やや独善的であるので、担当研究者の視点での安全性の研究のみならず、一般人が安心感を持てるような項目の検討する必要がある。また、本プロジェクトの内容・成果についてユーザーに向けて、ロボット安全設計の新しい考え方（リスクアセスメントと限界、想定外の対応等）の啓蒙活動に努めていただきたい。</p> <p>【3】国際標準化への取り組みには基準認証と機能標準の二本柱に基づく戦略性を持った活動が求められる。</p>	<p>【1】安全検証手法の開発実施者とロボット開発実施者が連携して取り組んでいる「パイロットスタディ※」通じて方向性の明確化と統一的な理解を深めた。 ※認証制度の構築を目的として安全性認証の一連のプロセスを試行的に行うもの。</p> <p>【2】安全検証手法の開発実施者が開発するリスクアセスメント手法と試験方法を用いて客観的な安全性検証に努めた。またロボット安全設計の考え方については学会やセミナー等を通じて啓蒙活動を行い、一般使用者にも安心を与えられるように努めた。</p> <p>【3】国際標準化への取り組みについては戦略的な検討を進め、ISO13482 発行に至った。</p>
事業の位置付け・必要性	<p>生活支援ロボットは日本が世界的に最も進んでいる分野であるが、いまだ、本格的産業・実用化に結びついていない。少子高齢化が進む日本においての生活支援ロボットの必要性はいうまでもなく、社会的重要性は極めて大きい。安全性の基準作りとその評価法は、生活支援ロボットの市場化に際して、必須である。また、安全規格やその認証構造の構築は民間だけでは、その実現が困難で有り、公共性が高く、NEDOの関与が必要とされる事業である。経済産業省が推進する「ロボット・新機械イノベーションプログラム」および内閣府が推進する「社会還元加速プロジェクト」にも本プロジェクトは大きく寄与している。</p>		

	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点	対処方針・計画等への反映
研究開発マネジメント	<p>生活支援ロボットが、いまだ市場が立ち上がっていない現段階で、世界に先駆けてその対人安全性に関する指標や試験・評価方法に関する研究開発を行うことの意義は大きい。研究開発計画、事業体制はおおむね妥当で、プロジェクトリーダーは全体をよく統括し、妥当な研究開発目標が設定されている。定量目標の設定、質の判断、達成度判断という点で不明確な部分もあるが、テーマの性質上やむをえないと考える。</p>	<p>【4】安全基準を総合的に構築する方針の個別テーマ①のチームと個別の先進的なロボットを中心に安全基準を検討する個別テーマ②～⑤とのチームの整合性を取るべきである。また、各個別テーマは個別性が強いので、自分のテーマのみに目を向けがちであるが、各チームは、安全設計技術、安全検証や認証制度に関して、交流を盛んにすべきである。</p> <p>【5】個別テーマ②～⑤チームの対象とするロボットがなくとも、個別テーマ①のチームは、生活支援ロボットの主だった対象に関する安全技術とその評価方法を確立することが必要となる。この点を考慮したマネジメントが望まれる。</p> <p>【6】目的としている、「ロボットの安全に関する国際標準規格」、「関連する試験機関」、「規格認証機関の整備」は、妥当であるが、作っただけで終わる可能性を否定できない。すなわち、それらが、真に国際的にも認知され、実現するための戦略が欠けている。そのために、何が必要で、どのように実現していくかが明示されていない。</p> <p>【7】国際標準化については、会議開催日程や会議開催頻度など、その進捗が国際標準化機関のルールで縛られているので、安全関係技術の国際標準化タイムスケジュールを明確に決めて、その計画どおりに実行することを心がけてほしい。その際、日本として国際競争力を強化する領域と、実用化・普及のための国際規格整備や社会情勢づくりで国際協調する領域との切り分けや戦略を明確にすべきである。</p>	<p>【4】生活支援ロボット安全検証センターでの安全性検証試験とパイロットスタディを通じて方針の整合性を取った。また安全性検証全体連絡会において方向性についての議論を深めるとともに、②～⑤チームが開発した安全要素技術の他コンソへの展開を図るなど技術的な交流を促進した。但し、交流は秘密情報の管理を前提として行った。</p> <p>【5】直近に実用化が有望な生活支援ロボットが網羅されていると考えているが、実施者に入っていない例えばマニピュレータタイプのロボットについては、ニーズが高いものと認識しており、安全検証手法の開発実施者による主体的な検討を行った。</p> <p>【6】策定する国際標準規格が、実用的なロボットの安全性基準をとして有用なものとなることはもちろんのこと、試験機関および認証機関の整備については持続的な運営が可能となるよう体制した。具体的には、安全検証センターの受託試験事業、JQAによる認証事業等がある。</p> <p>【7】国際標準化については、国際協調と国際競争力強化策とを整理して戦略的に進め、ISO13482発行に貢献した。</p>

	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点	対処方針・計画等への反映
研究開発成果	<p>広範で多様な生活支援ロボットに関し、実用化・事業化が近いと思われる分野が抽出され、その中心課題の成果が得られつつあり、一般的に目標はほぼ達成している。チームによっては、当初の予定よりも早く成果が出ているところも散見される。また、生活支援ロボット安全検証センターがオープンし、個別の安全認証のための基礎実験が積み重ねられており、着実な成果が期待できる。今回のプロジェクトでは、物理的接触における安全規格が中心であり、その意味では成果の汎用性は高い。</p>	<p>【8】今後、リスク分析からリスク因子を抽出するところを、再検討する必要がある。また、市場規模は余り大きくないため、ビジネスモデルの戦略化の強化が必要なテーマもある。</p> <p>【9】本プロジェクトの内容・成果については、一般国民はもとより、ロボットに関する学会の専門家にも十分理解されているとはいえない。情報発信を強化することが望まれる。</p> <p>【10】国際的な基準作りは、プロジェクトの後半に集中的に活動することが予想されるが、より戦略的な国際標準化の実現が期待される。</p>	<p>【8】個別テーマ①が開発するコンセプト検証とリスクアセスメント手法を活用して客観的な安全性検証を行い、一般使用者にも安心を与えられるように努めた。</p> <p>【9】学会発表やセミナー等を通じてプロジェクト活動・成果の紹介や安全技術の啓蒙に努めた。</p> <p>【10】ISOの改訂作業を見据えて戦略を練りながら進めた。</p>

	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点	対処方針・計画等への反映
実用化の見通し	<p>全体として概ね開発している安全性検証手法はその目的に則した妥当な内容となっており、また、安全検証センターにおいて、着実に実験が進められているので、成果の実用化は期待できる。また、第三者認証にむけた体制案も具体的にできており、国際規格化も本研究開発の成果を反映しうる体制で活動がなされている。安全関連データの収集・蓄積ならびに再利用法に関する研究開発も行われている。</p>	<p>【11】安全に関する認証制度の未整備と認証技術の未経験が、我が国で芽の出ている生活支援ロボットが世界に出るチャンスを失っているという事実に基づく本プロジェクトの目的を各個別チームがそれぞれ理解して、研究開発を進めて欲しい。そして、現実実用化・市場化に耐えうる安全標準化作りを本プロジェクトに期待する。その意味で、これまで得られた成果を、より一層実用的な視点、一般人の安心感での視点等から精査することが重要である。</p> <p>【12】安全関連データの収集・蓄積については、プロジェクト途中であってもデータを公表し、再利用法の研究開発も進捗を明らかにして、進行中の関連研究開発で活用できるようにするとともに、プロジェクト内外のフィードバックをいれることが望ましい。</p>	<p>【11】本プロジェクトの目的を全体連絡会等を通じて改めて周知させた。安全技術の開発と安全標準化作りにおいては、より実用的な視点を意識して進め、安全についての啓蒙活動と併せて一般利用者の安心感が得られるよう努めた。</p> <p>【12】学会やセミナー等を通じてプロジェクトの進捗および途中の成果を公開した。データの公開方法については、安全検証手法の実施計画にも含まれている研究内容の一つである。但し公表する内容については国際標準化の戦略に基づいたものである。</p>

中間審査時の今後に対する提言	対応
<p>【13】人間の多様性、ロボットの多様性、利用環境の多様性のために、生活支援ロボットの安全基準作成は極めて多様な項目を対象とせざるを得ない。しかし、細かく数多くの基準が増え続ける方向の研究には、基準としての意味がない。そこで、専門家のみならず一般人が安心できる安全基準の骨格を作ることが重要である。</p> <p>【14】また、本プロジェクトに参加している全員が性能基準や機能安全に基づく安全認証に対する理解を深める必要がある。更に、安全性の検証、認証に関する能力、及び、安全設計に関する基礎知識を持つ人材の育成は喫緊の課題である。我が国に適した認証制度のあり方を、個別のテーマの成果を踏まえつつ、早急に検討し、実施して行く必要がある。</p> <p>【15】生活支援ロボット特有の安全規格を発見するうえで、実際の社会の現場での実証実験も必要である。並行して、そのための法整備（特区構想など）を積極的に提案していくべくではなからうか？本プロジェクトで得られたデータの体系的保管、公開方法について、今から対応を講じ、せっかくのデータがPJ終了後、散逸しないよう努力してほしい。</p> <p>【16】国際標準化に関しては、ISO/TC184/SC2/WG7 関係だけでなく国際標準化の世界を ISO/IEC/ITU を含めて、広い視野で捉えて対応してほしい。また、欧米諸国の標準化動向にも、今以上に注意するべきだろう。</p>	<p>【13】指摘のように、生活支援ロボットの安全基準は自動車等とは異なり、用途や対象者によって異なるタイプのロボットに対応した多様なものとなるが、一般利用者が理解しやすく、さらにサービスロボット市場の成長を促進するような骨格作りを行った。</p> <p>【14】認証制度の整備のため安全検証手法の開発実施者とロボット開発実施者が連携して進める「パイロットスタディ」の取り組みを通じて理解を深めた。</p> <p>【15】本プロジェクトでは、実環境での実証試験を行った。データの公開についても、学会発表や Web (RT-SIC) を通じて可能な範囲で行った。</p> <p>【16】国際標準化については、WG7 が他の規格を参考・引用して構築が進められているため、他の標準化活動（例えば医療機器、物流機械、光学式センサ）を視野に入れて進めた。</p>

中間審査時の研究評価委員会コメント	対応
<p>国際標準規格を作成することは重要であるが、規格とか認証機関をつくっても市場での実績がなければ全く役にたたなくなってしまう。今後、どのように運用していくのかも考慮しながら安全規格、試験機関および認証機関を構築していただきたい。</p>	<p>【1】安全検証手法の開発実施者とロボット開発実施者が連携して取り組んでいる「パイロットスタディ※」を通じて方向性の明確化と統一的な理解を深めた。 ※認証制度の構築を目的として安全性認証の一連のプロセスを試行的に行うもの。</p> <p>【2】安全検証手法の開発実施者が開発するリスクアセスメント手法と試験方法を用いて客観的な安全性検証に努めた。またロボット安全設計の考え方については学会やセミナー等を通じて啓蒙活動を行い、一般使用者にも安心を与えられるように努めた。</p> <p>【3】国際標準化は戦略的に進め、ISO134821 発行に至った。</p>

5. 評価に関する事項

① 評価の実施時期

プロジェクト期間（2009年7月～2014年2月）

中間評価2011年8月25日

② 評価手法

外部評価

③ 評価事務局

NEDO 評価部

④ 評価基準

NEDO「標準的評価項目・基準」

⑤ 評価委員

立場	氏名	所属	役職
分科会長	川村 貞夫	立命館大学 理工学部 ロボティクス学科	教授
分科会長代理	大道 武生	名城大学 理工学部 機械システム工学科	教授
委員	浅田 稔	大阪大学大学院 工学研究科 知能・機能創成工学専攻	教授
委員	来海 雅俊	オムロン(株)技術本部 テクノロジーコラボレーションセンター	参事
委員	小菅 一弘	東北大学 大学院 工学研究科 バイオロボティクス専攻	教授
委員	長谷川 勉	九州大学 システム情報科学研究所 知能システム学部門	教授
委員	原田 節雄	(財)日本規格協会 国際標準化支援センター	技術顧問
委員	向殿 政男	明治大学 理工学部 情報科学科	教授

Ⅲ 研究開発成果について

1.事業全体の成果

最終目標に対する研究開発成果は以下の表のとおりである。

最終目標(平成25年度末)	研究開発成果	達成度
<p>プロジェクト全体の目標 生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を確立し、生活支援ロボットの開発者に提供可能となること。対人安全性に関する指標、機械・電気安全、機能安全の試験・評価方法や手順について、国際標準提案を行えること。生活支援ロボットに関する安全性基準適合性評価手法を確立すること。 研究開発の対象とした生活支援ロボットに関して、安全性検証のための安全性試験を完了し、ロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示され、実証試験が完了していること。</p>	<p>生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を開発し、ロボット開発実施者に提供した。 開発対象ロボットの試験装置を開発し、ロボット安全性試験項目、各タイプのロボットの試験・評価方法や手続の策定を行った。 Personal Care Robot の国際安全規格 ISO13482 の策定に貢献し、2014年2月に正式発行となった。 研究開発の対象とした生活支援ロボットに関して、安全性検証のための安全性試験を完了した。 安全性試験項目に関し、リスクアセスメントに基づいた評価基準を示し、各タイプのロボットに関し実証試験が完了した。</p>	○
<p>研究開発項目①：生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発 ①各タイプのロボットのリスクアセスメント手法を確立すること。並びに、それを各タイプのロボット開発実施者に対して提供する。さらに対人安全性に関して取得したデータに基づき、耐性指標等の国際標準提案を行えること。 ②各タイプの生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に関し安全性試験評価方法を確立すること。さらに策定した試験・評価方法や手順について、国際標準化提案を行えること。 ③各タイプの生活支援ロボットに関する安全性基準適合性評価手法を確立する。</p>	<p>①各タイプのリスクアセスメントシート雛形を完成し、それらを開発者に提供した。また耐性指標等の国際標準化案を、ISO/TC199 に新規作業項目として提案した。 Personal Care Robot の国際安全規格 ISO13482 の策定に貢献し、2014年2月に正式発行となった。 ②各タイプの生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に関し安全性試験評価方法を確立した。ISO/TC184/SC2/WG7 に試験方法案を提案し、標準化作業を行った。 ③各タイプの生活支援ロボットに関して認証スキームを確立し、3件の認証を発行した</p>	◎
<p>研究開発項目②～⑤：安全技術を導入した生活支援ロボットの開発 ①安全技術を一部またはすべて搭載した各種生活支援ロボットが安全性検証のための安全性試験を完了していること。 ②開発されたロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。 ③各種タイプの生活支援ロボットについて、実証試験が完了していること。</p>	<p>①各タイプ生活支援ロボットに関し、安全性確保のための必要技術を開発し、それを搭載したロボットのリスクアセスメントを終了した。また各タイプの生活支援ロボットに関し、安全性検証試験を行った。 ②リスクアセスメントに基づき、各タイプの安全基準を設定した。 パナソニック(株)の「リショナー」、(株)ダイフクの「エリア管理システム」については、ISO13482 の認証を取得し、サイバーダインのロボットスーツ HAL については、ISO/DIS13482 の認証を取得した。 ③各タイプのロボットについて、用途、使用シーン、想定ユーザーを考慮し、安全試験項目に関する実証試験を行った。</p>	○

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

2.1 研究開発項目① 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発

(一財) 日本自動車研究所、(独) 産業技術総合研究所、(独) 労働安全衛生総合研究所、名古屋大学、(一財) 日本品質保証機構、日本認証(株)、(一社) 日本ロボット工業会、(一財) 製造科学技術センター

1. 生活支援ロボットの安全に関する総説

報告書の構成に沿って、生活支援ロボットの安全について総説する。

2. 生活支援ロボットの認証スキームの研究開発

生活支援ロボットの安全性を定めた国際規格にもとづき、第三者の立場で客観的かつ公平に適合性評価活動を行うための認証スキームを検討し、併せてそのスキームが国際的に通用するよう適合性評価の国際規格 ISO/IEC 17067 のシステム 5 に従って設計した。この認証スキームは、フェーズ I 評価プロセス（設計段階の評価）とフェーズ II 評価プロセス（製品の評価）で構成され、評価に必要となる資料の例を検討してロボット開発者の参考となるように整理した。さらに、この認証スキームによる 3 件の認証書を発行した。

3. 生活支援ロボットの安全設計支援ツールの研究開発

機械安全の思想を生活支援ロボットに適用するために、ロボットタイプごとの設計コンセプト自己チェックシートおよびリスクアセスメントシートの雛形を開発した。さらに、安全方策配置方法の例を検討してロボット開発者の参考となるように整理した。また、安全設計の際に用いる機能安全設計支援ツールとして、ハードウェアの部品データから安全整合性水準（SIL）を計算するソフトウェアを開発した。さらに、コンピュータシミュレーションで仮想的に事故を起こして可視化できるシミュレータの技術を開発した。

4. 生活支援ロボットの安全性検証試験方法の研究開発

4.1 試験項目の検討結果

機械安全の国際規格 ISO13849 の危険源リストから、生活支援ロボットに関連しそうな危険源を選択して開発項目とした。

4.2 人体への危険に関する安全性検証試験

既存の試験規格を参考にして、生活支援ロボットの感電試験、騒音試験、表面温度試験の方法を開発した。また、生活支援ロボットの衝突を再現する試験方法を開発するとともに、自動車分野のデータを整理することで、試験結果から危害を算定するための指標を提案した。生活支援ロボットのマニピュレータが人体を挟圧した場合の危害については、保護方策の有効性を検証するための狭圧安全性試験の方法を開発し、文献の痛覚耐性値データに基づく判定指標を提案した。また、装着型ロボットによる装着箇所への創傷を対象とする接触安全性試験の方法を開発し、垂直荷重およびせん断力に基づく評価指標を検討した。

4.3 ロボットの耐久性に関する検証試験

生活支援ロボットの悪環境下での使用や長時間使用を想定した場合、ロボット本体構造や内蔵された制御装置、保護装置等が何らかのダメージを受けることが危惧される。その

ため、温湿度および振動環境耐久性、走行耐久性、耐荷重性、耐衝撃性を検証するための試験装置を開発し、開発実施者から提供されたロボットによる各種試験の試行結果をフィードバックすることにより、試験方法を開発した。

4.4 ロボットの安定性に関する検証試験

ロボットの移動も含めた使用中の安定性の欠如によるリスクへの保護法策を検証するため、静的安定性試験および動的安定性試験の方法を開発した。

4.5 安全関連機能の検証試験

生活支援ロボットには、本質安全では対処しきれないリスクに対する防護方策として、安全関連機能が実装されていることが多い。これらの機能検証のため、安全関連光学センサの機能試験、障害物検知対応性能試験、操作・情報提示機能検証試験、EMC 試験に関する各種試験装置開発や設備導入を行い、開発実施者から提供されたロボットによる各種試験の試行結果をフィードバックすることにより、試験方法を開発した。国際規格として制定されている IEC 61508 等の機能安全規格に準拠した機能安全文書テンプレートを作成した。電氣的な故障注入試験装置を用いて、ロボットの統合状態での故障注入試験を試行し、妥当性確認計画に沿った機能安全の妥当性確認の事例を示した。

5. 国際標準化活動

プロジェクトで得られた知見を生活支援ロボットの安全に関する国際規格 ISO13482 策定活動に提供し、同規格の発行に貢献した。また、開発した安全性検証試験方法を基に安全性試験に関する国際標準化原案が我が国から提案された。

6. 生活支援ロボットの安全に関する法規制等の調査

生活支援ロボットを実用化するために考慮すべき法律と社会制度を、欧州と日本を中心に国内外の公開情報を基に調査、検討した。その詳細を付属書に整理した。

7. 生活支援ロボットの安全に関する情報データベースの開発

プロジェクト成果の普及と安全関連データの蓄積・再利用のために、インターネットサイト「生活支援ロボット安全情報センター (RT safety Information Center)」を開発した。

8. 第三者認証および第三者試験体制の構築

生活支援ロボットという新たな製品分野の第三者認証を実現にあたっては、安全評価に特化した試験方法、試験設備の開発、評価者育成を進めている第三者の試験機関や研究機関等の相互協力ならびに運営体制が不可欠であることが明らかになった。

9. ディペンダブルロボティックカートを使った ISO 13482 評価の実例

本事業で開発した認証スキームにそって、安全検証と認証手順を実施することで、今後のロボット開発者が ISO13482 適合認証を取得する場合に参考となる事例を提供する。

事業全体の成果

目 標	研究開発成果	達成度	課題と解決方針 ※未達の場合のみ
各タイプのロボットのリスクアセスメント手法の確立	リスクアセスメントシート雛形を完成	100%	
リスクアセスメント手法をロボット開発実施者に提供	リスクアセスメントシート雛形を開発者に提供	100%	
耐性指標等の国際標準提案を行える	ISO/TC199 に新規作業項目として提案	100%	
安全性試験評価方法の確立	試験法を確立した	100%	
試験方法等について国際標準提案を行える	ISO/TC184/SC2/WG7 に試験方法案を提案し、標準化作業を開始した	100%	
安全性基準適合性評価手法の確立	認証スキームを確立し、3件の認証を発行した	100%	

特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文・記事		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発 表・講演	報道（新聞・ 雑誌等への 掲載）	その他展 示会等
H21FY	0件	0件	0件	0件	2件	0件	0件	0件
H22FY	0件	0件	0件	0件	0件	8件	7件	0件
H23FY	1件	0件	0件	0件	3件	16件	3件	1件
H24FY	0件	0件	0件	1件	3件	30件	1件	1件
H25FY	0件	0件	0件	1件	3件	19件	0件	2件

目次

1. 生活支援ロボットの安全に関する総説	1
1.1 生活支援ロボットの安全性をいかに保証するか	1
1.2 リスクアセスメントに基づく安全設計の原則と支援ツール	1
1.3 試験とこれに基づく認証スキーム	2
1.4 国際安全規格策定への主導的参加の効果と成果	3
1.5 本報告書の構成	4
2. 生活支援ロボットの認証スキームの研究開発	5
2.1 認証スキーム設計	5
2.2 ISO 13482 の要求事項の解釈	14
3. 生活支援ロボットの安全設計支援ツールの研究開発	17
3.1 設計コンセプト自己チェックシート	17
3.2 リスクアセスメントシートと保護方策配置方法	100
3.3 機能安全設計支援ツール	119
3.3.1 ハードウェア支援ツールの開発	119
3.3.2 ソフトウェアのひな形（決定論的原因故障）	120
3.3.3 状態遷移図による SIL 計算	120
3.4 物理演算による事故シミュレーションツール	122
4. 生活支援ロボットの安全性検証試験方法の研究開発	132
4.1 試験項目の検討結果	132
4.2 人体への危険に関する安全性検証試験	134
4.2.1 感電試験	134
4.2.2 騒音試験	138
4.2.3 表面温度試験	143
4.2.4 衝突安全性試験	147
4.2.5 挟圧安全性試験	165
4.2.6 接触安全性試験	175
4.3 ロボットの耐久性に関する検証試験	186
4.3.1 温湿度および振動環境耐久性試験	186
4.3.2 走行耐久性試験	193
4.3.3 耐荷重試験	201
4.3.4 耐衝撃試験	203

4.4 ロボットの安定性に関する検証試験	205
4.4.1 静的安定性試験	205
4.4.2 動的安定性試験	207
4.5 安全関連機能の検証試験	217
4.5.1 安全関連光学センサの機能試験	217
4.5.2 障害物検知対応性能試験	219
4.5.3 操作・情報提示機能検証試験	230
4.5.4 EMC 試験	233
4.5.5 機能安全文書テンプレート	247
4.5.6 故障注入による機能安全の確認試験実施例	248
4.6 試験の実績	252
5. 国際標準化活動	253
6. 生活支援ロボットの安全に関する法律と制度の調査	257
7. 生活支援ロボットの安全に関する情報データベースの開発	261
8. 第三者認証および第三者試験体制の構築	265
9. ディペンダブルロボティックカートを使った ISO 13482 評価の実例	270
10. 研究開発成果の発信実績	272

1. 生活支援ロボットの安全に関する総説

1.1 生活支援ロボットの安全性をいかに保証するか

製品が安全であるということを立証するためには、当該製品に係る規格が存在し、これに適合していることが第三者によって認証されなければならない。根拠をもたずして、自ら開発した製品を傍らに、「わが社のロボットは、安全です」と自慢しても、ビジネス上は意味をもつことができないのである。たとえば、自社開発した産業用ロボットを欧州に向けて輸出し、彼らに使うてもらおうと思えば、CEマーキングを取得しなければならない。そのためには、機械指令のモジュール Aa の適合性手順に従う必要があるとされている。これは具体的には、国際規格 ISO10218 に沿って外部認証機関により必要に応じ試験を実施してもらい、その適合証明をもって自己宣言書を作成してはじめて、マーキング取得申請が可能となるのである。つまり、安全性を保証するには、第三者の関与と公に定められた手順に従う立証が必要になる、ということである。

では、わが国の事情はどうであろうか。上記の産業用ロボットを例にとると、労働安全事情が欧州とは異なっていることから、国内では労働安全衛生法にしたがって労使ともに、リスクアセスメントを実施し、許容できないリスクに対するリスク低減方策を実施する必要がある。その際、労働安全衛生規則や産業用ロボットの使用等の安全基準に関する技術上の指針の当該条項各項への準拠が求められる。近年は、ISO10218 のたとえば Part1 に対応する JISB8433-1 が、キーワードとして指針の中に掲げられていることもあって、これらがたとえ任意規格としての位置付けであっても、これに準拠しようとするコンプライアンス意識が関与する企業の間で醸成されつつあるというのが実態である。

では、開発製品が歩道において歩行速度で搭乗できるロボットであったらどうであろうか？本事業がスタートした 2009 年の時点において、国内には、電動車いすの JIS 規格がある程度で、搭乗型ロボットを対象とした生活支援ロボットのための国際安全規格 ISO13482 の策定が始まったばかりで、JIS 規格もなかった。これは、搭乗型を含む人間共存型の移動ロボット全般について言えることであり、さらに、実用化に向けて開発機運が高まり、注目を集め始めている装着型ロボットについても、同様であった。

当時は、わが国を含め世界が、次世代指向の、すなわち人間共存型の生活支援ロボットの製造や使用に対し、適合性手順が存在しない状態に置かれていたのである。加えて、わが国には、ロボットの安全性について妥当性を確認するための試験方法も認証スキームもなく、そもそも第三者認証制度を支える社会構造が存在してこなかった。

1.2 リスクアセスメントに基づく安全設計の原則と支援ツール

その後、ISO13482 は FDIS が 2013 年 9 月に出版されるまでに至った。つまり、過去の 4 年余が、生活支援ロボットのための国際安全規格策定に費やされてきたことになる。これはちょうど、本事業期間と重なるものであり、本事業では、予めこの機会に合わせて、先

に述べた安全性を立証するための試験方法や認証スキームの確立をはじめとする国内の社会的な責任分担構造を構築することを目標に計画立案がなされてきた。

ISO13482 は、他の安全規格と同様で、リスクアセスメントをベースにして、ハザードの抽出からリスク低減方策まで、「パーソナルケア・ロボット」と呼ぶ移動ロボットおよび人間装着型ロボットをとくに対象とした設計原則を論じている。その詳細は、あとの第3章で明らかにされるが、生活支援ロボットに特有の典型的なリスクシナリオが取り上げられ、これに対処するための手順とプロセスが、本事業を通じて掲げられた。

さらに、本事業でとくに参画企業にとり主要な論点であるリスク低減方策については、「機能安全」と呼ばれる概念に基づく安全技術が、近年体系化されてきている。電気電子プログラマブル電子系のデバイスを対象とするこの技術体系は、デバイスの故障を、ハードウェアに起因する偶発的故障と、主にソフトウェアやアーキテクチャに起因する系統的故障とに分類した上で、それぞれについて詳細に方策論を展開するものである。しかしながら、その実践には一般に多労が伴い、ときに技術的な理解ですら困難が付きまとうことから、その概念的な本質さから適用分野も広いと期待されているにもかかわらず、社会的な浸透に時間がかかっている現状にある。

そこで本事業では、機能安全のための設計支援ツールの開発を行うことにした。これは、安全技術構築のコンセプトづくりにはじまり、機能的な安全性を達成するために要求される SIL (Safety Integrity Level) と呼ばれる安全性の基準を満たすための具体的な安全技術の構築までを支援するものである。これにより、従来、膨大な時間とコストを所要する懸念がもたれた機能安全技術構築が高効率にできるようになった。

1.3 試験とこれに基づく認証スキーム

同時に本事業では、ここまで ISO13482 の適用範囲では詳細に取り上げられることのなかった、パーソナルケア・ロボットに関わる技術の安全性立証のための試験方法を考案してきた。老人子供を含めた移動ロボットによる衝突時の傷害耐性値の集積に始まり、複合環境下での同ロボットの耐環境試験や移動ロボットに固有な安全機能の試験、さらに装着型ロボットの耐久性や接触安全性が試験の対象であるとして、試験装置を含む方法の構築を行ってきた。のみならず、必要と想定される試験項目については、むしろ、国際規格の中にこれに対応する安全要求事項を整備する旨、国際標準化の会合の場で提案も行った。

安全に関わる試験の目的は、一般には V&V、すなわち Verification & Validation と呼ばれる2つの側面がある。前者 Verification は、安全検証と日本語に訳されるもので、安全性を達成するために満たさなければならない数値目標を試験的あるいは論理的に見出す行為である。これに対し、後者 Validation は、妥当性確認と訳され、検証された安全数値目標が、実際に技術によって達成されているか否かを確認・判断するものである。

他方、ロボットを対象とした認証スキームに関する技術も、これまでわが国では蓄積がなされてきていなかったことを先に述べた。一言で認証スキームの開発と言っても、サンプル

リングに始まり特性の確定からレビュー，さらに認証可否の判断およびライセンス授与までの一連のプロセスを確定する必要がある．ここで，サンプリングとは，評価の対象と適用すべき規格の選択を行う行為である．また，特性の確定とは，正味の認証スキームのことで，評価手法と基準の確定，および評価活動の規定を指す．

欧米と同じスタートラインに立つということは，開発競争に関する時間的・歴史的なハンディがないというメリットがあるが，模倣すべき先事例がないので，開発活動には困難が多く伴う．生活支援ロボットの場合は，サンプリング対象がすでに定まっているとはいえ，評価手法の骨子をなす評価項目やそれぞれの項目に対する安全基準をいかに定めるかは，先事例が存在しないゆえに，独自の判断基準を持たなくてはならないが，評価値はアプリケーションに依存する．本事業では，パイロットスタディという形で，メーカーの開発品を具体的な対象とした認証スタディが実施された．その結果，ISO 13482 の委員会原案（CD）をベースとして，同業界で世界発の認証マークを装着型ロボットに対して与える活動を成功裏に導いた．

1.4 国際安全規格策定への主導的参加の効果と成果

ここまでの議論で，本事業において，生活支援ロボットの安全要求事項を議論する上で，好都合に ISO 13482 の規格が利用できる準備ができていたことは，特筆すべきことと判断される．すなわち，2009年の時点で，パーソナルケア・ロボットの安全規格策定を開始した当初に，わが国でその後市場創出・展開を見るであろう重点ロボット分野を特定し，これらをパーソナルケア・ロボットの具体的な製品として安全要求事項を規定して行くように，標準化会議で求めたのは，チームジャパンの功績であった．その結果，次世代型人間共存型の生活支援ロボットの事業化を推進する企業が，彼らの高い関心の下に，数多く本事業に参加し，あるいはさらに，JARA がオーガナイズするサービスロボットの安全性に関する標準化ワーキングやビジネス協議会に出席して議論に加わった結果，国際的にも大きな力をもつ結果となった．

のみならず，1.3 で述べた数々の生活支援ロボットのための主要な安全試験方法の開発と並行して，これまで，ISO13482 の策定後のパーソナルケア・ロボットに関する標準化動向として，試験方法を標準化する方向性を国際会議で提案し，主導しつつある．この活動に対しても，本事業でコンソーシアム # 1 を構成する研究機関や大学が積極的に国際会議に足を運んで，実績を残してきた．過去 20 年余にわたる審議団体主導の国際標準化活動においても，このように国家的な事業と連携して戦略的に標準化を進めた実績はなく，まさに本事業の，そしてこれに参加する各組織の尽力の賜物と位置づけられ，今後ますます，その成果の国際的な影響に期待がもたれる．

1.5 本報告書の構成

本報告書では、以下まず2章を「生活支援ロボットの認証スキームの研究開発」と題して、「認証スキームの設計」プロセスの構築および「ISO 13482 の要求事項の解釈」の仕方について成果を報告する。

第3章は、「生活支援ロボットの安全設計支援ツールの研究開発」であり、コンセプト設計上重要な役割を担う「設計コンセプト自己チェックシート」や、具体的な事例に基づいてリスクアセスメントへの導入に貢献した「リスクアセスメントシートと安全方策配置方法」の開発成果について報告する。さらに、本事業に参画する企業向けに機能安全技術の効率的導入を趣旨として開発された「機能安全設計支援ツール」を紹介し、最後に、種々の産活支援ロボットのリスクアセスメントを実施する上で高い有用性の期待できる「物理演算による事故シミュレーションツール」について報告する。

第4章は、「生活支援ロボットの安全性検証試験方法の研究開発」について開発成果を述べる。はじめに、本事業で検討した試験項目を掲げ、「人体への危険に関する安全性検証試験」「ロボットの耐久性に関する検証試験」「ロボットの安定性に関する検証試験」「安全関連機能の検証試験」に大分類して、それぞれ開発した試験方法につき詳述した後、「試験の実績」を概述する。

第5章では、コンソーシアムの成果のひとつと位置づけ、戦略的に取り組んだこれまでの「国際標準化活動」を国際会議への参加報告の形でまとめる。

第6章では、「生活支援ロボットの安全に関する法規制等の調査」として、生活支援ロボット関連の国内法制度の調査を皮切りに、欧米と日本における安全の考え方の違いを考察し、アジアと欧米の安全認証制度の差異を分析して、わが国主導の安全認証制度のアジア展開に言及する。

第7章では「生活支援ロボットの安全に関する情報データベースの開発」として、これまでの事業の諸活動によって蓄積されてきた成果物をデータ活用の観点で整備してきたデータベースシステム RT-SIC の概要について報告する。

第8章では、「第三者認証および第三者試験体制の構築」と題して、ここまでの事業活動で何が達成でき、さらに、今後のわが国においてロボット安全を支えるための準備について報告する。そしてに、本事業のコンソーシアム#1の到達目標に対して、その趣旨を汲んで詳細技術開発に注力した CYBERDYNE 株式会社の装着型ロボットの第三者認証の実例を紹介する。

第9章では、特定の搭乗型生活支援ロボットを例にとり、本事業で開発した認証スキーム（第2章）にそって、安全検証と認証手順を実施することで、今後のロボット開発者が ISO13482 適合認証を取得する場合に参考となる事例を提供する。

2. 生活支援ロボットの認証スキームの研究開発 [JQA]

2.1 認証スキーム設計

2.1.1 背景

(1) 国際規格における適合性評価と適合性評価機関の位置付け

国際規格 ISO/IEC 17000:2004 (JIS Q 17000:2005)「適合性評価—用語及び一般原則」では、適合性評価機関の認定を含めて、適合性評価に関する一般用語及び定義、並びに貿易を容易にする目的での適合性評価の利用に関する一般用語及び定義を規定しており、適合性評価 (Conformity assessment) とは、「製品、プロセス、システム、要員又は機関に関する規定要求事項が満たされていることの実証」であると規定し、適合性評価機関 (Conformity Assessment Body) は「適合性評価サービスを実施する機関」と規定している。適合性評価サービスを実施する機関には「認証機関」、「試験・校正機関」及び「検査機関」などがあり、とくに「認証機関」には、製品、プロセス、サービスに関わる規定要求事項への適合性を評価する「製品認証機関」、組織などの品質や環境などのマネジメントシステムへの適合性を評価する「マネジメントシステム認証機関 (登録機関と呼ぶ場合がある)」及び溶接技能者などの要員の力量に関する適格性を評価する「要員認証機関」に大別される。この場合の認証 (Certification) とは「製品、プロセス、システム又は要員に関する第三者証明」であると規定している。

(2) 第三者適合性評価の概念と認証の意義

適合性評価の社会的役割は、適合性評価の力量をもつ実施者が客観的な方法で評価活動を行い、その結果を「証明 (Attestation) : レビューに従った決定に基づく、規定要求事項の充足が実証されたと言う表明の発行」として提供することにある。適合性評価の実施主体については、適合性評価の対象の性質などに応じて、第一者、第二者及び第三者があり、実施した適合性評価はそれぞれ、第一者証明、第二者証明及び第三者証明と呼ばれている。これらの中で、特に社会的懸念 (安全、健康、環境の保護など) に係る場合やその客観性を求められる場合は、供給者や購入者とは無関係で中立的な立場にある第三者によって行われることが多い。また、製品認証システムに関する指針である国際規格 ISO/IEC 17067 では「製品 (プロセス及びサービスを含む) が規定要求事項を満たしていることの書面による保証を第三者が与える活動」と定義されており、その目的は、消費者や使用者に対しては「製品の規定要求事項を満たしていることの信頼性の提供」や「よりよい購入判断のため」であり、供給者・市場管理者に対しては「製品が市場に受け入れ易くするため」とされている。このように製品、プロセス又はサービスなどが規定要求事項を満足しているかを確認することが適合性評価と定義されている。

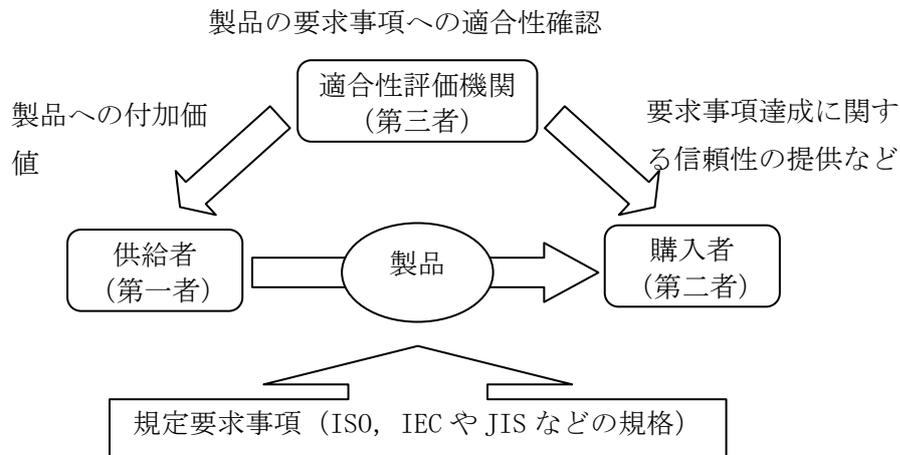


図 2.1.1-1 適合性評価の概要

(3) 国際的に通用する制度設計

1995年に発効したWTO/TBT協定では、各国に対し強制規格や適合性評価手続きの作成等を行う際には、原則として国際規格を基礎とすることが義務付けられている。このことにより、各国の適合性評価を国際的に調和させることによって貿易の技術的障害を低減させることができるとされている。CASCOは(Committee on Conformity Assessment)は、適合性評価委員会と呼ばれており、ISOの中に3つある政策開発委員会のうちの一つであり、適合性評価の原則と実施に関する問題を扱っている機関である。1970年に発足し、現在、Pメンバー(Participating countries)として73カ国、Oメンバー(Observing countries)として47カ国が参加しており、規制当局、規格開発機関、認定機関及び認証機関など幅広い規格ユーザの専門家が参加している。CASCOの委任事項は、次に示したとおりであり、その使命は、適合性評価のための整合的なガイド、規格の維持・開発、そのグローバルな普及並びに、それらを使った適合性評価結果のグローバルな受入れの促進である。

<CASCOの委任事項>

- ・製品、プロセス、サービス及びマネジメントシステムの適合性を評価する方法についての検討
- ・製品、プロセス、サービスの試験、検査、認証の実施並びに管理システムの認証機関、認定機関の評価及びそれらの運用と採用に関する国際的な規格及び指針の作成
- ・国及び地域レベルの適合性評価システムの相互承認、並びに試験、検査、認証、評価及び関連目的のための国際規格の適切な使用の促進

認証スキームの開発に当たって、CASCO で作成された国際規格に準拠させることで、WTO/TBT 協定の要件を満たし、国際的に通用し得る認証スキームが構築されることになる。

具体的には、CASCO において、製品認証システムを設計するための手法に関して規定した ISO/IEC 17067（製品認証の基礎）が作成されていることから、ISO/IEC 17067 に準拠させることで国際的に通用する認証スキームを構築することができる。ISO/IEC 17067 では、認証スキームは適合性評価の該当する各機能について具体的な活動を規定することで構築されるとされており、表 2.1.1-1 において ISO/IEC 17067 で規定されている、製品認証が採用されている様々な分野において用いられている活動の組合せと認証スキームのタイプについて示す。

表 2.1.1-1 製品認証スキームの構築

製品認証スキームにおける適合性評価の機能及び活動		製品認証スキームのタイプ							
		1a	1b	2	3	4	5	6	N
I	選択 該当する場合、計画及び準備の活動、基準文書などの要求事項の特定、ならびにサンプリングを含む	X	X	X	X	X	X	X	X
II	特性の確定 該当する場合、次による a) 試験 b) 検査 c) 設計評価 d) サービス又はプロセスの評価 e) その他の特定活動（例えば、検査）	X	X	X	X	X	X	X	X
III	レビュー 規定要求事項が満たされたかどうかを実証するための、確定段階で得た適合性の証拠の調査	X	X	X	X	X	X	X	X
IV	認証の決定 認証の授与、維持、拡大、縮小、一時停止又は取消し	X	X	X	X	X	X	X	X
V	証明, ライセンスの授与								
	a) 認証書又はその他の適合の表明の発行（証明）	X	X	X	X	X	X	X	X
	b) 証明書又はその他の適合の表明の使用権の授与	X	X	X	X	X	X	X	
	c) 製品のパッチに対する認証書の発行		X						
	d) サーベイランス（VI参照）又はパッチの認証に基づく適合マークの使用権の授与（ライセンスの授与）		X	X	X	X	X	X	
VI	サーベイランス 適用可能な場合、次による								
	a) 市場からのサンプルの試験又は検査			X		X	X		
	b) 工場からのサンプルの試験又は検査				X	X	X		
	c) 製品の生産、サービスの提供又はプロセスの運用の評価				X	X	X	X	
	d) 無作為試験又は無作為検査と組み合わせたマネジメントシステム監査						X	X	

（出典：JIS Q17067）

2.1.2 国際ガイドを適用した国内の製品認証スキームの事例

(1) JIS マーク表示制度の事例

JIS マーク表示制度は、工業標準化に基づいた制度であり、製品が該当する日本工業規格の基準を満たしていることを示すものであり、適合していることの証明として JIS

マークを表示することができる任意の認証制度である。JIS マーク表示制度自体は工業標準化法制定（昭和 24 年）以来の歴史があるが、適合性評価制度の国際統合化などを図るため、平成 16 年に工業標準化法が改正され、新しい JIS マーク表示制度が開始された。この国際統合化に対応するため、JIS マーク表示制度にも国際規格が導入されている。JIS マーク表示制度における適合性評価の機能及び活動を図 2.1.2-1 に示す。なお、システム 5 について、ISO/IEC 17067 では「よく使用されている実証済みの認証システム」として例示されており、JIS マーク表示制度においてもシステム 5 が活用されている。

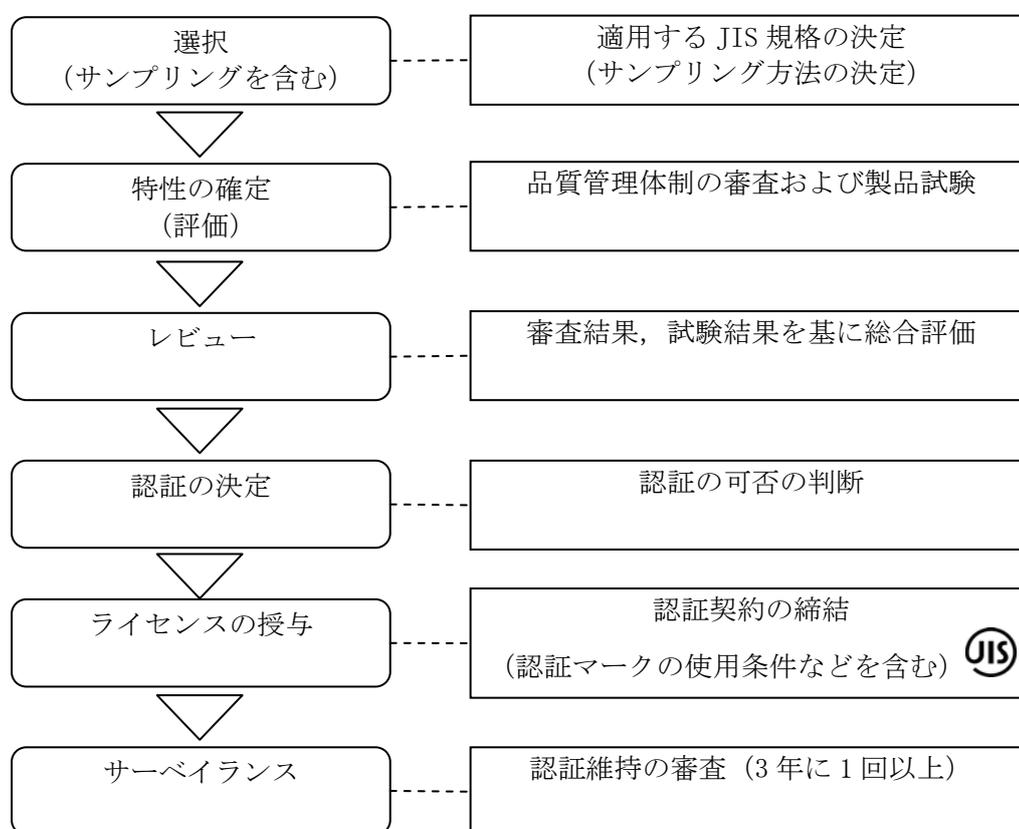


図 2.1.2-1 JIS マーク表示制度の認証スキームの例

(2) 電気用品安全法の事例

電気用品安全法は、電気用品の製造、輸入、販売等を規制するとともに、電気用品の安全性の確保につき民間事業者の自主的な活動を促進することにより、電気用品により危険及び障害の発生を防止するものであり、適合性の確認は、品目により、製造者など自身が自ら確認する製品（特定電気用品以外の電気用品）と、経済産業大臣の

登録を受けた登録検査機関と呼ばれる機関による確認が必要な製品（特定電気用品）の2通りがあるが、図2.1.2-2では、特定電気用品の適合性評価の機能及び活動を示す。なお、特定電気用品及び特定電気用品以外の電気用品ともに技術基準への適合性の証明としてマーク表示を付さないと販売することはできない。サーベイランスについては、JISマーク表示制度のように定期的な審査ではないが、必要に応じて経済産業大臣が製造者などから報告を徴取や立ち入り検査を実施することができ、本制度についても国際規格（ISO/IEC 17067）に準拠したスキームであると言える。このように国際規格（ISO/IEC 17067）に準拠したスキームを構築していることの最大のメリットとして、電気用品安全法（含む改正）と電気機器に関する欧州理事会指令73/23/EEC（含む改正）並びに電磁両立性に関する欧州理事会指令89/336/EECに関して、2001年4月に「日・欧州共同体と相互承認協定（相互承認に関する日本国と欧州共同体との間の協定）」に署名し、2002年1月に同協定が発効している。

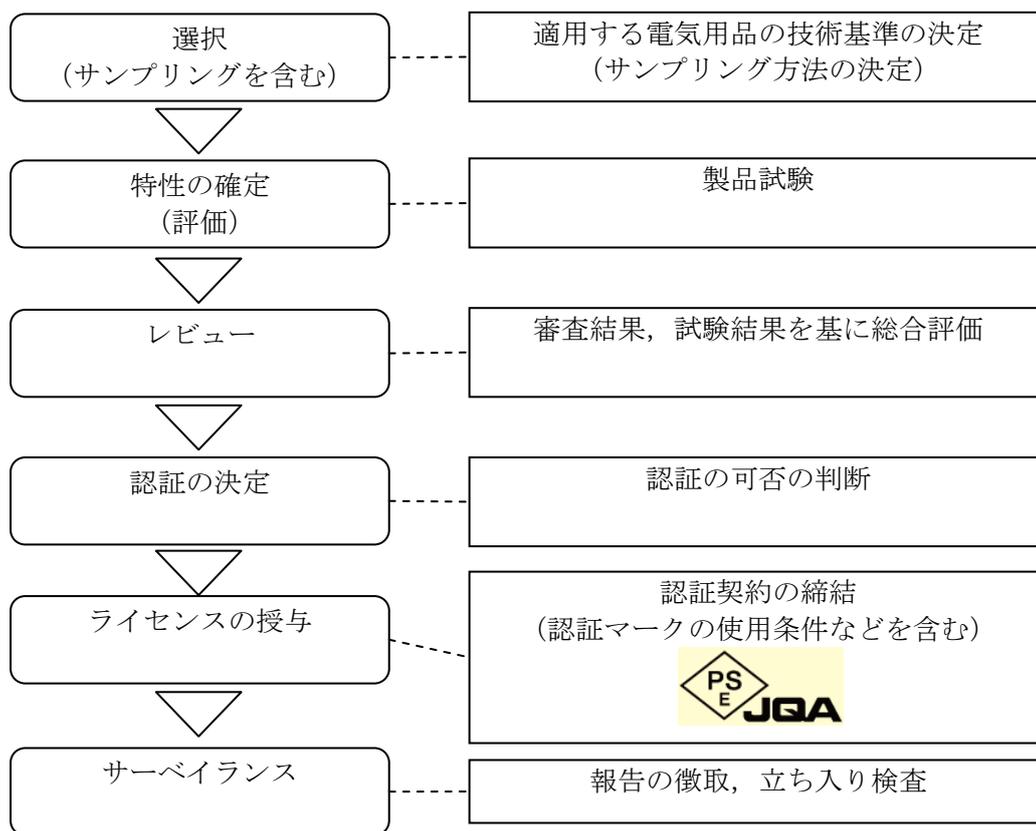


図2.1.2-2 電気用品安全法の認証スキームの例

(3) S マークの事例など

S マークとは、電気用品安全法を補完し、電気製品の安全のための任意の第三者認証制度であり、この制度を協議している団体は電気製品認証協議会で、製造者団体、流通団体、消費者団体、認証機関等 48 団体及び学識経験者により構成される。同協議会は平成 6 年 12 月に発足し、翌平成 7 年から認証機関による業務が開始されている。S マークの適合性評価の機能及び活動を図 2.1.2-3 に示す。S マークの認証スキームも前述の JIS マーク表示制度及び電気用品安全法の認証スキームと同様、国際規格 (ISO/IEC 17065) に準拠したスキームとすることができる。

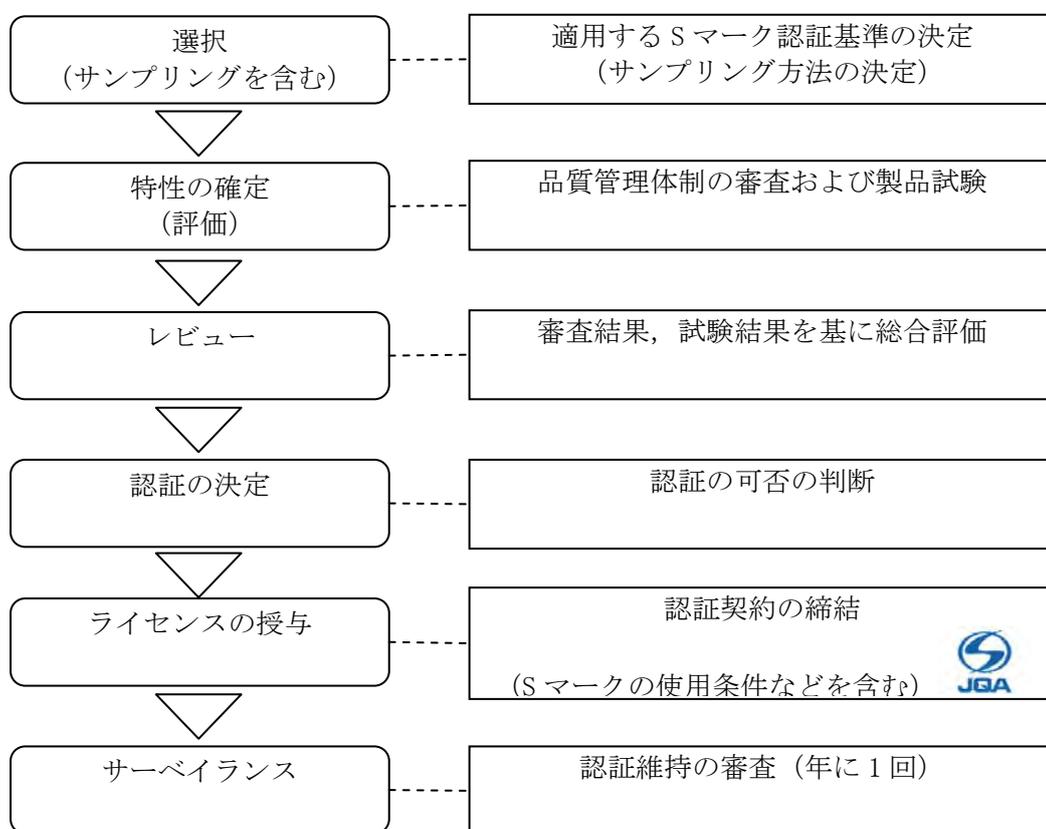


図 2.1.2-3 S マークの認証スキームの例

2.1.3 生活支援ロボットの認証スキームの解説

(1) ISO/IEC 17067 の製品認証スキーム (システム 5) の適用

製品認証スキームには多くの一般的共通要素があり、表 2.1.1-1 で示したようなマトリクスとして形態が示されている。このマトリクスでは、特定の製品認証スキームを確立するためにこれらの要素をどのように組み合わせて使用することができるかを提示

してある。今回の生活支援ロボットの認証スキームを構築するにあたっては、システム5を採用した。この理由は、ISO/IEC 17067では「システム5が、よく使用されている実証済みの認証システム」として例示されていることは既に説明したが、この他の要素として、新しい製品分野の認証スキームであることから、未知数も多く、様々な状況にも対応できるようにするためである。構築した生活支援ロボットの認証スキームを図2.1.3-1に示す。

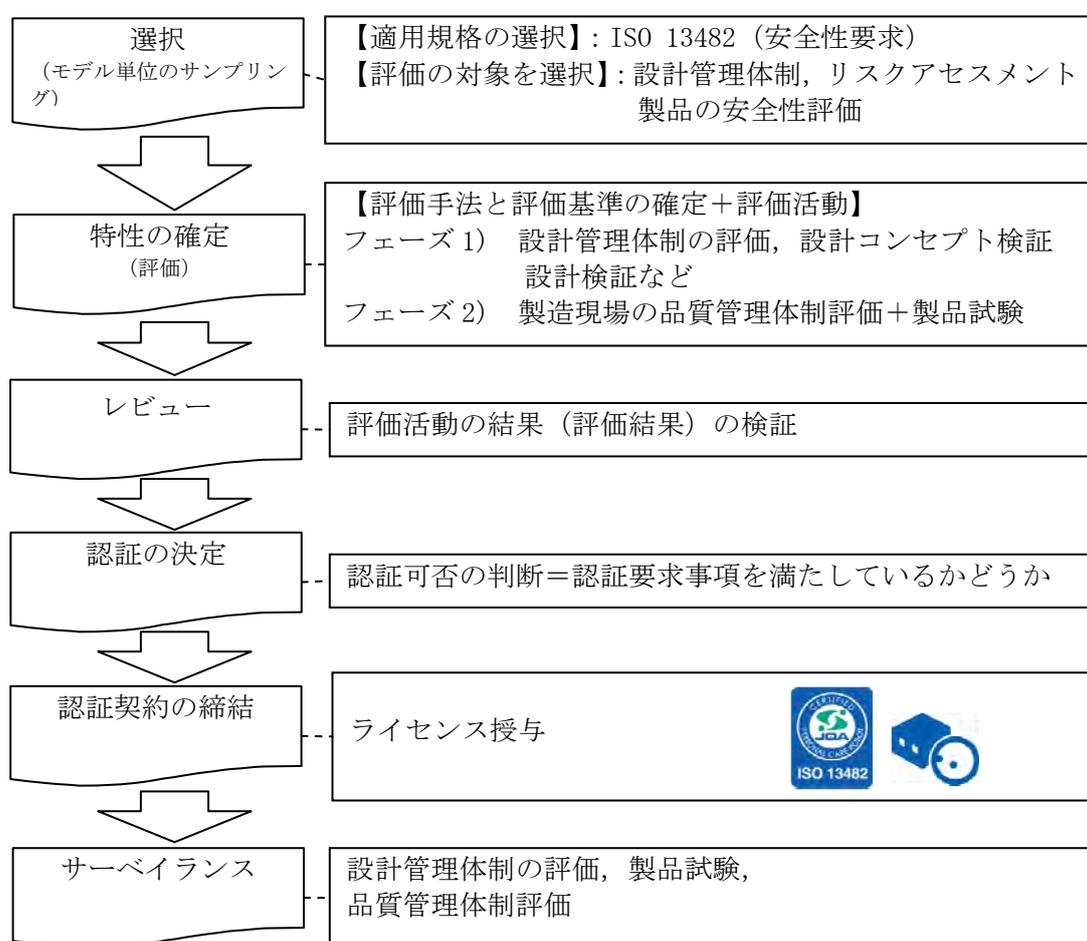


図 2.1.3-1 生活支援ロボットの認証スキーム

(2) 認証までの各プロセスの解説

認証までには、図2.1.3-1で示した「選択(モデル単位のサンプリング)」から「サーベイランス」までの6つのステップがある。「サンプリング(選択)」では認証のために適用する規格を選択し、評価の対象を選択する。生活支援ロボットの場合、適用

規格は ISO 13482 が選択され、評価の対象には設計管理体制、リスクアセスメント及び製品の安全性評価が選択されることになる。次のステップである「特性の確定」では「サンプリング（選択）」で選択された評価対象に関する評価手法と評価基準の確定を行い、実際の評価を実施する。生活支援ロボットの場合、フェーズ 1 とフェーズ 2 に区分し、フェーズ 1 では設計管理体制の評価、設計コンセプト検証及び設計検証など、製品になる前の段階について評価を実施し、フェーズ 2 では製造現場の品質管理体制の評価と製品試験を実施することになる。「レビュー」では、それまでに行ってきた評価活動について検証が行われる。そして、「認証に関する決定」において、「レビュー」の結果などを基に認証可否の判断が行われることとなる。この後、認証マークのライセンス授与のため、「認証契約の締結」が行われる。さらに、認証には有効期限が設けられており、この間、認証要求事項が維持されているかどうかを確認するために「サーベイランス」が行われる。「サーベイランス」では、設計管理体制の評価、製品試験及び製造現場の品質管理体制の評価を行う。

2.1.4 課題

(1) 特性の確定の重要さと難しさ

「特性の確定」においては、評価手法と評価基準の確定を行い、実際の評価を実施することは既に説明したところではあるが、例えば家電製品などは長い歴史の中で事故や危険事象などの蓄積情報を基に、製品ごとに要求事項における評価基準が作成されている。このため、適用する製品安全規格には具体的な数値などによる評価基準が明示されている。しかし、生活支援ロボットの場合、新しい製品分野であるため、事故や危険事象などの蓄積情報が少ないことや、使用環境や使用条件などが一律でないことから、要求事項と評価基準の設定に際しては、製造者によるリスクアセスメントに依存しなければならない。この結果、リスクアセスメントをベースに求められた基準がリスクを許容レベル内にするものとなっているか、許容レベルが安易に引き下げられていないか、また、製造者によるばらつきが大きくなってしまいう可能性もある。今後は具体的な数値基準を適用できるよう、試行評価や、事故・危険事象事例などのデータベースを充実させていくことが重要になる。

(2) 認証取得におけるメリット

製造者が自ら製品の安全性を確認することは当然のことであるが、更に中立的立場にある第三者による確認により認証を取得することで、製造者（供給者）には製品への付加価値などを付与し、購入者には要求事項達成に関する信頼性を提供するなどのアピールをすることができると考えられる。また、購入者にとっては、安全な製品を選択する際の目安となり、安心して製品を使用することができると考えられる。更に、

製造者にとっては、賠償責任保険などへの加入審査において、一定の評価を得ることができることが期待される。

第三者機関（認証機関）に対しても、守るべき要求事項を規定した国際規格（ISO/IEC 17065：製品認証とプロセス認証を提供する機関のための要求事項）が存在する。この規格では、認証機関の独立性、公平性及び力量など、認証機関が中立的な第三者として活動するための要求事項が定められている。認証機関がこの国際規格（ISO/IEC 17065）に準拠することで、中立的な立場で活動できる根拠となる。

2.2 ISO 13482 の要求事項の解釈

2.2.1 背景

(1) 標準化委員会の組織概要と活動

ISO 13482 の正式名称は、「Robots and robotic devices - Safety requirements for personal care robots」であり、ISO/TC184/SC2/WG7 において検討されてきた規格である。ISO/TC/184 の組織は図 2.2.1-1 に示すとおりである。ISO/TC184 は主に産業用の自動化システムについて取り扱う委員会であることから、ISO 13482 は産業用ロボットの安全性規格である ISO 10218 がベースとなって作成されている。

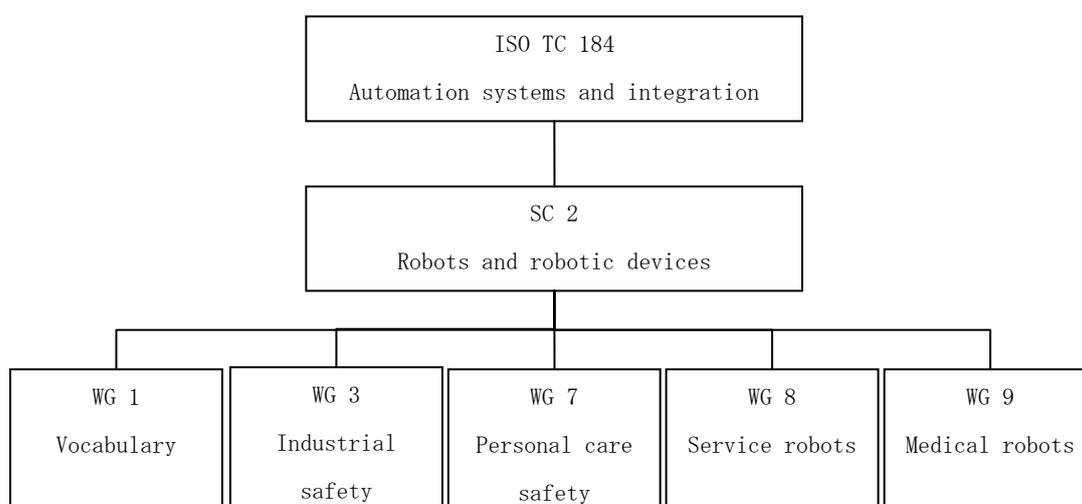


図 2.2.1-1 標準化委員会の組織概要

2.2.2 ISO 13482 要求事項の概要と解釈

(1) スコープや構成内容

ISO 13482 の適用範囲は、年齢や能力に関係なく、意図した機能を利用者の生活の質の向上のためタスクを実行するロボットであり、代表的なタイプとして、mobile servant robot（移動作業型）、physical assistant robot（装着型）及び person carrier

robot（搭乗型）の3タイプがフューチャーされている。ただし、20 km/hr より速い速度で移動することができるロボット、おもちゃのロボット、海自又は飛行するロボット、産業用ロボット、医療用ロボット及び軍事・治安に供されるようなロボットは適用外とされている。

規格は、主に、リスクアセスメントの手法、安全要求事項、安全関連制御システムに関する要求事項、検証と妥当性確認及び使用上の情報の5項目から構成されている。規格の構成概要については図2.2.2-1で示した通りである。

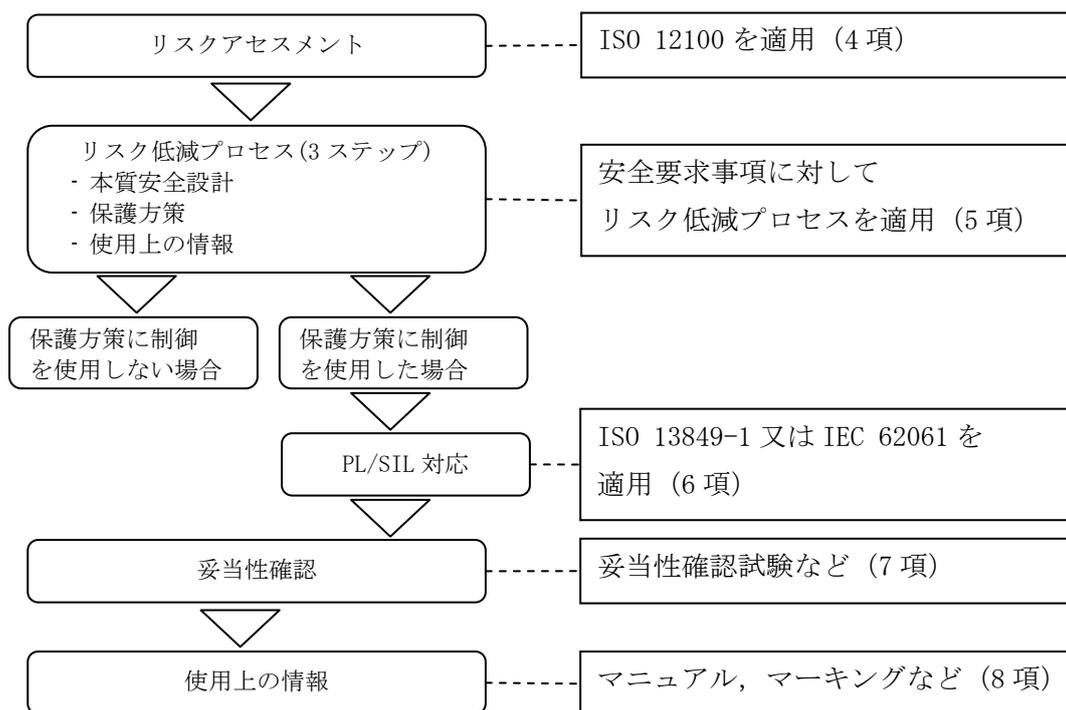


図 2.2.2-1 ISO 13482 要求事項の概要

(2) リスクアセスメントの重要性とリスクアセスメントシートの活用

2.1.4 の課題の項でも触れたように、ISO 13482 では様々なタイプの生活支援ロボットを取り扱っているため、要求事項と評価基準については、具体的に数値化されたものはほとんどなく、製造者によるリスクアセスメントをベースに基準を定めるよう規定されているため、それぞれの製造者が行うリスクアセスメントの手法や基準については、各社独自のものが使用されることになり、ばらつきが生じてしまうこととなる。そのため、リスクアセスメントは、この規格においては最も重要な項目と言える。そこで、これらの課題の対策として、(独)労働安全衛生総合研究所において、生活支援ロボットに使用できる標準的なリスクアセスメントシートを開発した。各社がこのシートを活用してリスクアセスメントを実施することで、ばらつきが少なくなり、リス

クアセスメントをベースに求められた基準がリスクを許容レベル内にするものとなる
と考えられる。

2.2.3 課題

ISO 13482 は様々なタイプの生活支援ロボットを取り扱っているため、要求事項と評価基準については具体的な数値化をされているものはほとんどない。より具体的な要求事項と評価基準を作成していくためには、家電製品の規格のようにロボットのタイプごとに検討していく必要があると考えられる。これにより、ロボットのタイプに応じた適切な基準を策定することができ、製造者にとっては設計・製造し易くなると共に、利用者にとっては、どの製造者が作ったロボットも一定水準以上の安全性を持って設計・製造されたことによる安心感につながると考えられる。さらに、ロボットに認証マークを付与することで、利用者には、使用するロボットの選択する際の基準とすることができるとともに、より安心感を与えることにつながると考えられる。

3. 生活支援ロボットの安全設計支援ツールの研究開発

3.1 設計コンセプト自己チェックシート [安衛研]

3.1.1 目的

人間にサービスを提供するような人間共存型ロボットには、従来の産業用ロボットで適用される「人間とロボットの隔離」による安全防護を適用することは難しい。また、人間共存型ロボットの目的のタスクを実行するためには、そのロボットが発する力や速度を本質的に抑えることには限界があるので、安全制御ベースの保護方策を導入せざるを得ない。ロボットがE/E/PE（電気/電子/プログラマブル電子）安全制御系を構成する場合、機能安全規格（IEC 61508[1]等）で規定される安全要求事項に適合することが求められる。

機能安全の考え方が導入された安全制御系を含むロボットの開発プロセスは、基本的にライフサイクルプロセスとして考えられる。これは、設計から運用、保全に至るまでの開発フェーズ毎に、計画、仕様、試験、検証に関連する文書を準備して、それらに従って開発を進めるという形態である。図3.1.1は、機能安全に基づくロボット開発フェーズと各フェーズに必要な関連文書との対応を示している。前半の設計フェーズでは、設計コンセプトを分析、検証するタスクとして、開発計画立案後、安全に関する基本的・詳細仕様を決定する（検証第1段階）。後半のフェーズでは、製作されたロボットに対する試験の結果に基づき、安全妥当性を評価して認証する（検証第2段階）。

以上の開発プロセスは、機能安全による安全関連部の設計において求められる過程であるが、機能安全を導入しなくとも前半の設計コンセプトに関わる過程は必須である。特に、安全の仕様を決定する上で必要な文書や開発体制の整備は対象ロボットの品質を確保する点からも重要な要素である。

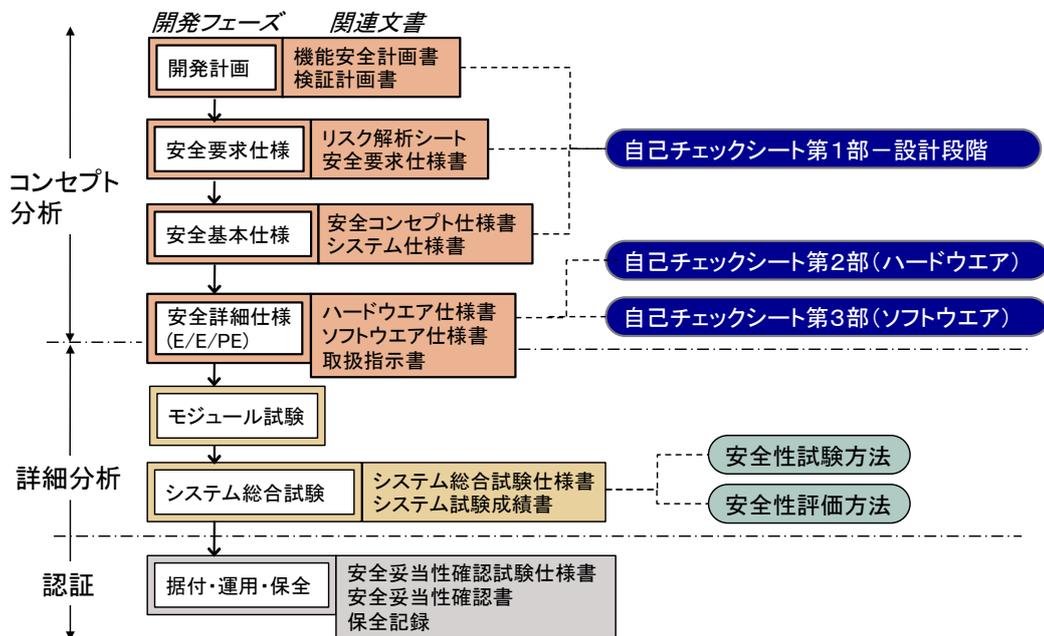


図 3.1-1 機能安全設計のフェーズ/関連文書とチェックシート

図 3.1.1 では前半の検証第 1 段階をコンセプト分析と呼び、ロボット設計者は、対象ロボットに対する安全要求事項を明確にし、それらを満足するために実施する保護方策とその実施体制、及びプロセスを準備、文書化しておかねばならない。特に、検証第 2 段階の認証を想定した場合に、以下の関連文書は重要となるため、十分な内容と品質が求められる。

- a. 機能安全計画書：関連する人・組織・技術の管理
- b. 安全コンセプト仕様書：安全設計概念，設計方針
- c. 安全要求仕様書：必要な安全要求仕様

なお、安全性の管理や文書管理については、品質管理規格（ISO 9001[2]等）に準拠していれば、従来の通常開発プロセスで準備する文書内容や様式等を利用することができる。

さらに、一部詳細分析にも含まれるが、安全詳細仕様を述べる次の仕様書についても、過不足ない安全要求事項の選択と十分な記述が必要である。

- d. ハードウェア仕様書：IEC61508-2[3]に基づく安全要求事項（本質的安全設計要件を含む）
- e. ソフトウェア仕様書：IEC61508-3[4]に基づく安全要求事項

以上の 5 つの重要文書をロボット設計者が作成するためには、機能安全規格を始めとした規格内容を理解し、必要とされる文書の記載項目を網羅しなければならない。

3.1.2 シートの構成と位置付け

ロボットの設計開発において必要な上述の 5 つの重要関連文書について、これらの必要事項の過不足と内容記述の適正さを設計者が自己確認するためのツールとして、3 部構成のチェックシートを作成した。図 3.1.1 では、これらのチェックシートと重要関連文書との対応付けを示している。これらのチェックシートの位置付けは、安全コンセプト認証を念頭に置いたコンセプト分析内容と必要文書の確認、及び機能安全規格で規定されている安全インテグリティレベル SIL2 または SIL3 を満足するハードウェア及びソフトウェアの安全要求事項を確認することである。

各チェックシートは MS エクセル上で作成し、設計段階と実現段階で確認すべき項目を設問として記述する形態であり、各設問はジャンル別に分類されている。各シートのチェック方法は、共通ルールとして各設問に対する達成度を表 3.1.1 のように定義し、該当するチェック記号を選択入力すると、表 3.1.1 の採点ルールに従ってジャンル別に得点が自動集計される仕組みである。基本的に、設問の配点（最大 3 点）に対して、チェック記号 A は 1 倍、B は 0.5 倍、C は 0 倍の計算を行った結果が得点欄に自動挿入される。なお、チェ

表 3.1-1 チェックシートのチェック方法

チェック入力		チェック欄の配点ルール	
記号	意味	色分け	意味
A	取り組み完了(設問をほぼ満足している)		同 No. 項, 又は他 No. 項目の点数に影響する
B	取り組み中(設問を一部満足している)		同 No. 項内の項目の点数に影響する
C	未取り組み(設問はほとんど実現されていない)		- (関係なし) をいれても良い
-	関係なし		A の数によって他の項目の点数が影響する

ック記号-はロボットタイプや機能により設問自体が該当しない場合であり、採点から除外するようにしている。

各シートの最終得点結果は、ジャンル毎の達成度を比較できるように得点を結んだレーダーチャートで示される。得点結果に対する判定は、ジャンル毎に配点満点の8割以上の得点を合格の目安とした。なお、各ジャンル間の判定相関はないため、ジャンル毎に完成度（進捗度）の目安として、あるいは弱点項目の把握に利用することができる。

表 3.1-2 チェックシート第1部の主要項目

No	大項目	主要な小項目	趣旨(抜粋)
I	安全確保の方針	ロボットの形態, 安全設計方針, 人とロボットの役割	安全に配慮した設計準備の確認
II	リスクアセスメント	使用環境・条件の設定, 実施体制, 再リスク評価	想定使用条件の確認, リスク軽減効果を考慮した再リスク評価の確認
III	リスク低減	本質的安全化, 保護装置(停止, 制御, 人体検出), 機能安全の導入, 付加保護方策, 残留リスク対応, 管理方策	設計図面上の危険源抑制の確認, 保護方策とその機能の確認, ユーザへの使用上の情報提供の確認
IV	安全性の管理	組織の校正・運営, 責任体制, 文書化, 管理, 監督	組織・要員の位置付けと責任の明確化, 業務・情報の管理の確認
V	文書管理	一般文書作成管理計画	全ての文書共通の基本要件の確認
VI	安全関連業務に関わる文書	必要情報, 安全要求に関わる計画書・仕様書, ハードウェア/ソフトウェアの試験に関する計画書・仕様書	情報の文書化の確認, 必要文書の確認

3.1.3 第1部の概要

第1部のチェックシートは、表 3.1.2 に示すように、主に設計コンセプトに関する6ジャンルについて、合計59項目の設問が記述されている。本シートの設問の一部抜粋を図 3.1.2 に示すが、チェック欄が色つきの場合は他の設問配点に影響する（例えば、チェック記号に応じて他の設問配点が変わる）。なお、ジャンルII、IIIの設問は、主に基本機械安全規格 ISO 12100[5]、IEC 60204[6]及び産業用ロボット安全規格 ISO 10218-1[7]の要求事項を参照しており、ジャンルIV、VIの設問は、主に IEC 61508 の規定から引用している。

第1部の最終得点結果は、6ジャンルのレーダーチャートで判定され、8割以上の得点をA判定、4割以上の得点をB判定としてA判定を合格の目安としている。実際のロボット設計時に本シートを試用した結果を図 3.1.3 に示すが、リスク低減方策が十分施されていないことと、安全性の管理が十分満足していないことが分かる。

Ⅲ. リスク低減

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
9	リスク低減手法	リスク低減の方法について準拠している規格・基準の確認	1 リスク低減はJIS B9700-1 (ISO12100-1)の3ステップ方式に従って実施している。	A	3		3
			2 他の規格(社内基準も含む)を参照している。規格名を備考に記載するか、別紙で示してその文書番号を記載してください。	-	1		

A, B, C, -

(重み付けされた点数)
×
(チェック記号に対応する割合)

18	保護装置(停止)	停止により安全確保するために適用される保護方策の確認	1 人が操作する緊急停止装置を装備している。	A	2		2
			2 保護停止(インタロックによる停止)機能を有している。	B	2		1
			3 停止後意図しない起動を考慮している	C	2		0

図 3.1-2 チェックシート第1部の記入例

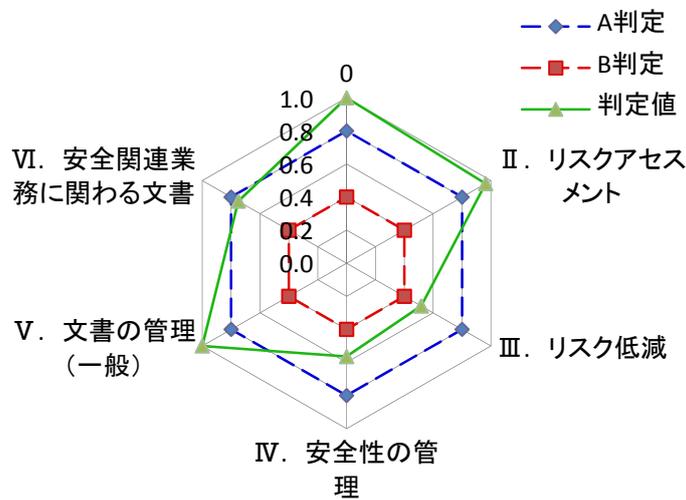


図 3.1-3 チェックシート第1部の判定結果例

3.1.4 第2部の概要

第2部のシートは、IEC61508-2に従ってロボットの安全制御関連部のハードウェアを対象とし、単一〜2重化アーキテクチャを想定する。そのため、これら以外のアーキテクチャやそもそも機能安全を導入していない場合は該当しない。安全インテグリティレベル SIL2

表 3.1-3 チェックシート第2部の安全性能想定範囲（タイプBサブシステムの場合）

安全側故障率比 (SFF)	ハードウェアのフォールトトレランス (N)		
	0	1	2
SFF < 60%	許されない	SIL1	SIL2
60% ≤ SFF < 90%	SIL1	SIL2	SIL3
90% ≤ SFF < 99%	SIL2	SIL3	SIL4
99% ≤ SFF	SIL3	SIL4	SIL4

～3のレベルを実現しているかを設問によりチェックされる。ただし、制御システムにより必要な安全要求事項は異なるため、設問の全てが SIL3 の必須要件ではない。実際、産業用ロボットの安全規格 IS010218-1 では、安全関連部の目標安全性能はリスクアセスメント結果に基づいて決定することを求めており、対象ロボット毎に異なってよい。ただ、本規格では標準レベルとして SIL2 程度を設定しているため、チェックシート第2部もこのあたりのレベルを設定した。本シートで想定しているハードウェアの障害/故障に対する処置は表 3.1.3 の色付きセルの部分である。なお、想定 SIL に非該当な設問は、ロボットの構造や機能に関する関連設問により無効化して採点しないよう配慮した。

表 3.1-4 チェックシート第2部の主要チェック対象

項目番号	構成要素	主な要求事項の対象障害/故障
1	電気機械式装置	非通電状態にする接点溶着
2.1	デジタル I/O, アナログ I/O	ドリフト, 発振
2.2	電源	ドリフト, 発振
2.3	電源電圧監視回路	ドリフト, 発振
3	バス	タイムアウト故障, アービトレーション故障
4	CPU	データ/アドレスの直流化障害
5,6	不変メモリ/可変メモリ	データ/アドレスの直流化障害, セル干渉
7	クロック	低調波, 超高調波
8	通信バス及び大容量記憶	データ/アドレス誤り, 伝送時間誤り
9	センサの障害/故障	ドリフト, 発振
10	最終要素	ドリフト, 発振

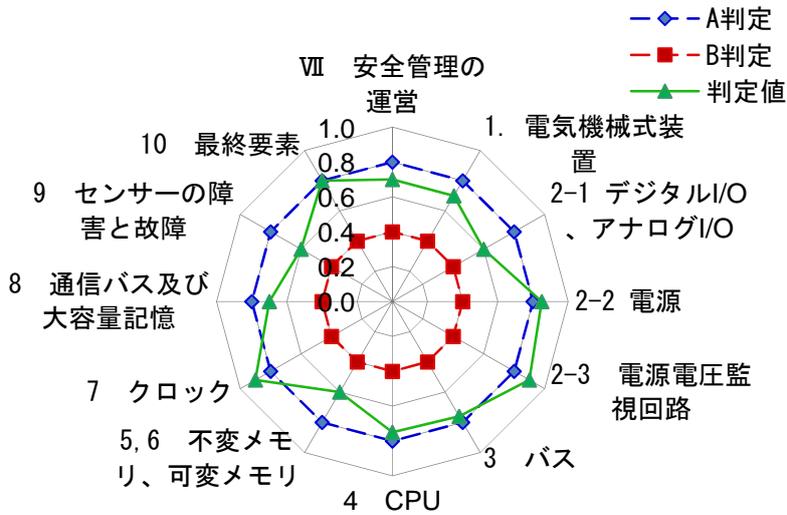


図 3.1-4 チェックシート第2部の判定結果例

本シートは、表 3.1.4 に示すように、ハードウェアの9ジャンルについて設問を設定しており、最終結果はサブジャンルと管理関連を含めて12項目のレーダーチャートで判定される。実際のロボット設計時に本シートを試用した結果を図 3.1.4 に示すが、全体的にA判定までもう一步といった実現度になっている。

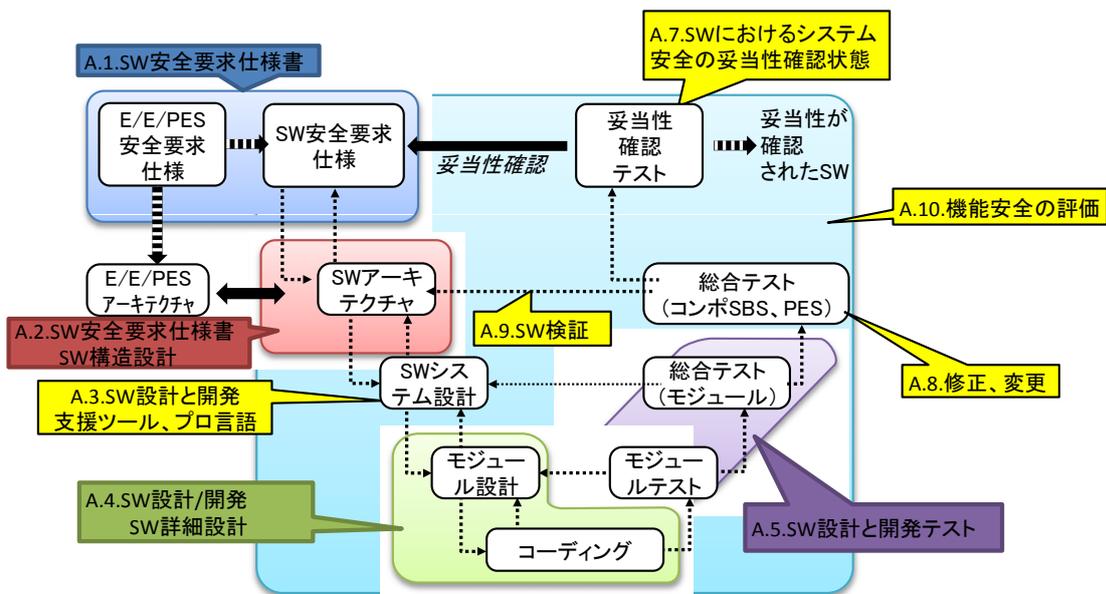


図 3.1-5 ソフトウェア開発におけるライフサイクルモデル (Vモデル)

3.1.5 第3部の概要

第3部のシートは、ソフトウェアに関する安全要求事項を網羅しており、安全制御に関わるソフトウェアの仕様決定から始まり詳細設計、その後続くテスト（設計目標が達成されたかの妥当性を確認）までのいわゆる「Vモデル」（図3.1.5参照）に従っている。IEC 61508-7[8]で規定される技法に関してはSIL2～3のレベルにおいて「強く推奨」とされる項目を設問としている。本シートは第1, 2部のシートとは異なり、先ずハードウェアと関連して目標設定されるソフトウェアのSILを最初に選択すると、選択したSIL(2または3)に対応して各設問の配点が変わり、該当するセルのみが有効となって採点するように計算される。

ソフトウェアの要求事項は多岐にわたるが、チェックのポイントは整理して回答しやすい設問として記述している。例えば、ソフトウェアの構造設計の大項目では、次の8項目に整理して設問化した。

- ① 故障診断
- ② 故障とその処理の優先順位
- ③ 信頼性のあるSW要素の使用
- ④ 安全要求仕様からSW構造への論理的関連
- ⑤ 4の逆方向の関連
- ⑥ 図を使った分かり易い説明
- ⑦ コンピュータ支援ツールの使用
- ⑧ 処理時間

本シートではソフトウェアの10ジャンルについて採点し、レーダーチャートにより各ジャンルの実現度合いが示される。本シートを試用した結果を図3.1.6に示すが、ソフトウェア開発テストがやや規格に適合していないことが分かる。

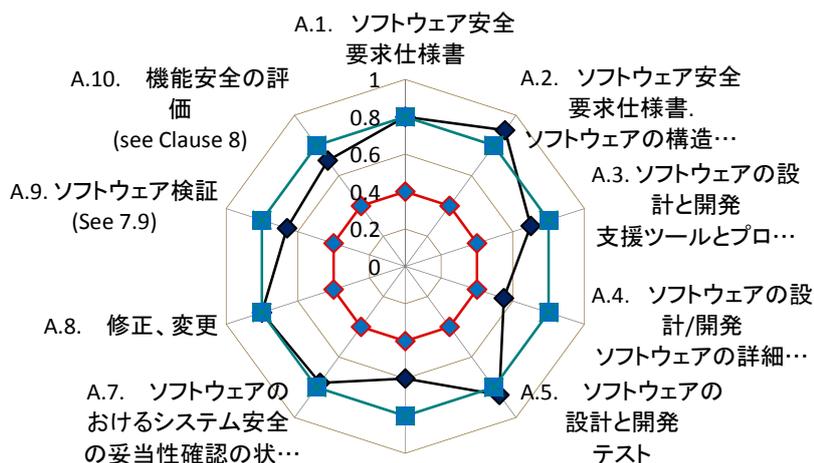


図 3.1-6 チェックシート第3部の判定結果例

3.1.6 レビュー結果

作成した第1部自己チェックシートを3タイプ（自律移動型，搭乗型，装着型）5機種の生活支援ロボットの設計者に提供し，その時点での安全コンセプトの達成度合いを自己チェックいただいた．ロボット開発体制の準備具合により最終判定結果はばらついたが，設計者自身がコンセプト検証をクリアするために，どのジャンルが弱点かを把握してもらうことができた．また，生活支援ロボットの安全性を事前検証するために，模擬コンセプト検証の形態をとり，本シートの判定結果からロボット開発者に有用なアドバイスを提供した．

第2部，第3部のチェックシートもロボット開発者に提供したが，機能安全を導入した安全制御系を構築した事例が少なかったためか，これらのシート活用した事例は報告されず，有益なフィードバック情報は得られなかった．ただし，膨大なページ数の該当規格を読みこなして運用するのに時間がかかるところを，本シートの使用により容易に達成度合いを確認できることはメリットとして理解されたようである．

公表しているチェックシート第1部，第2部，第3部を各々図3.1.7，図3.1.8，図3.1.9として示す．第1部と第2部のシートは各設問の配点を記載済みであり，第3部のシートはSIL選択前の初期状態のため，配点は表れていない．

参考文献

- [1] IEC 61508-1 Ed. 2.0 : 2010 (b), Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 1: General requirements.
- [2] JIS Q 9000:2006, Quality management systems - Fundamentals and vocabulary.
- [3] IEC 61508-2 Ed. 2.0 : 2010 (b), Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 2: Requirements for electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems.
- [4] IEC 61508-3 Ed. 2.0 : 2010 (b), Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 3: Software requirements.
- [5] ISO 12100 : 2010, Safety of machinery -- General principles for design - Risk assessment and risk reduction.
- [6] IEC 60204-1 Ed. 5.1 : 2009 (b), Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements.
- [7] ISO 10218-1:2011, Robots and robotic devices -- Safety requirements for industrial robots - Part 1: Robots.
- [8] IEC 61508-7 Ed. 2.0 : 2010 (b), Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 7: Overview of techniques and measures.

設計段階におけるコンセプト検証自己チェックシート第1部

ロボットの名称		製作者	
型式		シート記入者	
		シート記入日	

【回答方法】

各設問毎に、主観にてA、B、C、-をチェック欄に記入して下さい(プルダウンメニューから選択)。自己チェックの判断基準は次の通りです。

- A: 取り組み完了(設問をほぼ満足している)
- B: 取り組み中(設問を一部満足している)
- C: 未取り組み(設問はほとんど実現されていない)
- : 関係なし(ただし、No.1, 3のみ該当する場合に✓を記入)

なお、備考欄への記入指定の項目は、記載がないと得点加算がありません。補足説明や特記事項がある場合は、適時備考欄を拡張して記入して下さい。別途、補足資料や該当文書を添付される場合は、その資料(文書)に番号付けして備考欄に番号のみ記入して下さい。

【チェック欄の色分けの意味】

- : 同No.項、又は他No.項目の点数に影響するチェック
- : 同No.項内の項目の点数に影響するチェック
- : - (関係なし)をいれても良いチェック
- : Aの数によって他の項目の点数が影響する

【大項目毎の判定基準】

- S判定: 取り組み状況が満足である。(得点率100%)
- A判定: 取り組みがほぼ満足である。(得点率80%以上100%未満)
- B判定: 取り組みを更に進める必要がある。(得点率40%以上80%未満)
- C判定: 取り組みが不十分である。(得点率40%未満)

I. 安全確保の方針

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1	ロボットの形態	ロボットの型別の確認	ロボットの型は以下のどれですか	/	/		
			1 移動作業型(自律中心)				
			2 移動作業型(操縦中心)				
			3 搭乗型				
			4 人間装着型				
5 その他(ロボット型を記載してください)							
2	安全設計方針	安全に配慮した設計準備の確認	1 安全設計コンセプト又は方針を策定している。		3		
			2 安全仕様を決定している。		3		
3	人とロボットの役割	安全確保の主体の確認(安全設計方針として人とロボットの役割分担の考え方)	1 ロボット主体 危険事象への対応(検知、回避を含む)は、多くはロボット側で対応する。		3		
			2 人主体 危険事象への対応(検知、回避を含む)は、主に人で対応し、ロボット側は補足的である。		2		
				判定	合計(009点満点)		

図 3.1.7 チェックシート第1部 (第2版)

II. リスクアセスメント

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
4	リスクアセスメントの基準	準拠している規格・基準の確認	1	リスクアセスメントは関連国際規格または国内規格に準拠して実施している(規格名を備考欄に記入)。		3	
			2	他の規格(社内基準も含む)を参照している(規格名を備考欄に記入)。		1	
5	使用環境・使用条件の設定	ロボットの適切な使用制限が考慮されているかの確認	1	ロボットの仕様(動作機能、運用を含む)が決定している。		2	
			2	ロボットの想定使用環境が明確である。		2	
			3	ロボットのライフサイクル(寿命)が考慮されている。		2	
			4	ロボットの想定使用条件(対象となる人など)が明確である。		3	
6	実施体制	チームとして実施しているか、又レビュー後、承認しているかの確認	1	設計者を中心として複数人で実施している。		3	
			2	結果についてレビューを行っている。		3	
			3	責任者(チームの管理者など)が最終承認している。		2	
7	重大な危険源	人に対して重篤となり得る危険源の有無と対応	1	抽出又は同定され危険源は、軽微な陰源だけである。		3	
			2	危害が致命的(重傷以上)となり得る危険源に対して、何らかのリスク低減方策をリストアップしている。		3	
8	リスク低減後の再リスク評価	初期リスク評価後、リスク低減方策を考慮した再リスク評価まで実施しているかの確認	1	初期リスク評価の結果、リスク低減の必要性がないと判断される。		3	
			2	リスク低減方策の導入によるリスク低減効果を考慮した再リスク評価を行っている。		3	
				判定		合計(027点満点)	

Ⅲ. リスク低減

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
9	リスク低減手法	リスク低減の方法について準拠している規格・基準の確認	1	リスク低減はJIS B9700-1 (ISO12100-1)の3ステップ方式に従って実施している。		3	
			2	他の規格(社内基準も含む)を参照している(規格名を備考欄に記入)。		1	
10	本質的安全性(ロボット自体の設計)	設計図面上で改善したロボットの仕様や機能の変更の確認	1	ロボットの形状に鋭利部、突出部、挟圧部等がない。		2	
			2	ロボット部品の材質等が人や環境に影響を与えないよう配慮している。(RoHS対応、ハロゲンフリー等)		2	
			3	パワー、速度等の性能を必要最小限に制限している。		2	
			4	その他(防爆構造等、設計上配慮した項目がありましたら備考欄に記載して下さい。(記入がないと得点0です。))		1	
11	本質的安全性(人間工学原則の遵守)	人に対する精神的・肉体的ストレスや誤操作の防止が配慮されているかの確認	1	ロボットの色、形状などの外観、大きさ、質量(装着型の場合)、構造が人に対して肉体的、精神的ストレスを与えないよう配慮されている。		2	
			2	マン・マシンインタフェースは、人が誤操作や誤解しないよう配慮されている。		2	
			3	保守保全作業を含め、無理な姿勢でのロボット操作(重量物の人による交換、移載や人の動作を極端に規制する装置など)や搭乗姿勢などが無い。		2	
12	本質的安全性(制御システムの安全原則の適用)	安全関連部の安全制御のための基本技術が適用されているかの確認	1	制御システムにおいて安全に関連する部分を定義(仕様書などに記載など)している。(安全部と非安全部が明確に区別されている。)		2	
			2	制御システムの安全関連部に高信頼化技術(冗長化、多様化を含む)を適用している。		2	
			3	制御システムの安全関連部には、自動監視(自己診断)技術を適用している。		2	
13	本質的安全性(電氣的危険源の防止)	感電や静電気による影響に対して設計上配慮されているかの確認	1	保護特別低電圧(AC25V(実効値)、DC60V以上)以上になる露出部がない。		3	
			2	金属露出部の絶縁性、耐環境性を配慮している。		2	
			3	帯電者からの静電気放電による誤動作のないよう配慮されている。		2	
14	本質的安全性(熱的危険源の防止)	高・低温部が人に及ぼす影響や火災に対して設計上配慮されているかの確認	1	人が触れる可能性のあるロボット部位には、極端な高温部又は低温部はない。		2	
			2	ロボット部品は、想定使用条件下で発火等を起こさないよう選定されている。		2	

図 3.1.7 チェックシート第1部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
15	本質的安全化(放射による危険源の防止)	音や光等が人に及ぼす影響に対して設計上配慮されているかの確認	1	発生する騒音又は振動は、想定使用条件下で規定されるレベル以下である。		2	
			2	ロボット周囲へ発光されるレーザー光等は、人に対して危害を与えない出力である。		2	
			3	ロボットが発生する電磁気の放射は、想定使用条件下で周囲の人及び電気・電子機器に影響を与えない。		2	
16	本質的安全化(安定性の確保)	走行・停止・乗降・脱着時の安定性に配慮しているかの確認	1	仕様上の走行条件下(最高速度、最高登坂角度、最短転回半径、最大段差等)で転倒しない。		2	
			2	停止時に転倒しない、又は安定した状態に移行できる。		2	
			3	ロボットへの乗降時やロボット脱着時には、ロボットは安定してこれらの動作に支障はない。		2	
17	本質的安全化(その他)	その他の設計上の配慮の確認	1	人体に接触可能性のある機器表面の材質や塗料に対して、衛生上の配慮をしている。		2	
			2	他の本質的な安全設計を実施している(具体的な項目を備考欄に記入)。		1	
18	保護装置(停止)	停止により安全確保するために適用される保護方策の確認	1	人が操作する緊急停止装置を装備している。		2	
			2	保護停止(インタロックによる停止)機能を有している。		2	
			3	停止後意図しない起動を考慮している		2	
			4	停止以外の方法で安全な状態に移行する。(具体的な項目を記載してください。)		1	
19	保護装置(停止方法)	緊急停止の実現方法の確認	1	アクチュエータの動力を遮断して停止する。		3	
			2	制動して停止後にアクチュエータの動力を遮断する。		3	
		緊急停止でない場合の停止方法	3	アクチュエータの動力を遮断して停止する。		3	
			4	制動して停止後にアクチュエータの動力を遮断する。		3	
			5	制御により停止し、アクチュエータの動力は遮断しない。		3	
20	保護装置(停止の制御方法)	停止に至るまでの制動の実現方法の確認	1	機械的制動装置により制動する。(機械的ブレーキ、ロック機構等)		3	
			2	電氣的制動機能により制動する。(サーボロック等)		2	
			3	制動装置・機能を持たずに、制御により減速させる。(速度0制御等)		1	

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
21	保護装置 (動力供給)	動力遮断と蓄積エネルギーの消散のために適用される保護方策の確認	1 アクチュエータの動力遮断後、ロボットの動作を伴わずにエネルギーがゼロとなる。 (油空圧の残圧、蓄電等の消散)		2		
22	人体検出時の制御方法 (装着型等設問に該当しない場合は“-”を記入)	衝突回避の実現方法の確認	1 障害物(人を含む)の非接触検知後、制動、停止する。(装着型は“-”記入)		3		
			2 障害物(人を含む)の非接触検知後、回避動作をする。		3		
			3 その他(別の方法を備考欄に記入が必要。)		3		
		接触に対する安全確保方法の確認	4 障害物(人を含む)の接触検知後、制動、停止する。(装着型は“-”記入)		3		
			5 障害物(人を含む)の接触検知後、回避動作をする。		2		
			6 接触状態のまま、一定の条件下で動作を継続する。		1		
			7 その他(別の方法を備考欄に記入が必要。)		2		
		検出情報の通報方法の確認	8 安全状態をアクティブに通報する。		3		
			9 危険状態をアクティブに通報する。		2		
			10 対象機器の正常状態を監視・通報できる。		3		
23	機能安全の配慮	機能安全制御の導入の確認	1 制御システムの安全関連部に安全認証取得済プログラマブル機器を使用している。		2		
			2 制御システムの安全関連部には機能安全を配慮した設計をしている。		3		
24	付加保護方策	動力源異常時の対応の確認	1 主動力源異常時は、直ちに停止又は安全な状態へ移行する。		3		
			2 主動力源異常時は、予備電源に切り替えて一定の条件下で機能を維持する。		3		
		停止により人が捕捉された時の対応の確認	3 停止時に人が捕捉された場合、手動で脱出又は救助できる。		2		
			4 停止時に人が捕捉された場合、別動力源により脱出のための動作を行う。		1		
25	残留リスク対応	使用上の情報の呈示方法の確認	1 ロボットに警報や表示をして、危険情報を人に伝達できる。		2		
			2 ロボットに警告ラベルを貼付している。		2		
			3 取扱説明書に残留リスクに関する情報を記載している。		3		
			4 残留リスクをユーザが低減する場合、その低減効果の条件(保護具、資格、運用管理等)を定めている。		2		

図 3.1.7 チェックシート第1部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
26	管理	ロボットの想定する保守方法の確認	1 ユーザが行うべき保守項目を取扱説明書に記載している。		3		
			2 ユーザができない保守作業等への対応策が示されている。		2		
		ユーザへの教育、資格の確認	3 ユーザへ運用に関する教育を行っているか、資格制度を設けている。		3		
		廃棄対応の確認	4 廃棄方法がユーザに指示されている。		2		
			5 廃棄は、メーカーが引き取って、メーカー責任で行う。		2		
			判定		合計(134点満点)		

IV. 安全性の管理

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
27	組織構成	開発組織の位置付けの明確化、開発フェーズの流れと担当部門間の相互関係の明確化	1 業務全体の中で、開発フェーズと担当部門が明確になっている。		2		
			2 業務全体における各フェーズの責任者が規定されている。		3		
			3 業務全体における各フェーズの入力と出力が明確になっている。		3		
28	組織の責任および権限	各フェーズに関わる要員の責任と権限の明確化	1 関連する部門や要員の責任と権限が全て規定されている。		3		
29	構成メンバー	組織にとって必要な力量の明確化	1 要員に必要な力量が明確に規定されている。		3		
30	安全性達成の方針と戦略	安全性に関する方針を示すことと、その実行意思の伝達の確認	1 安全性の方針が達成されたことを評価・確認することが明確に規定されている。		3		
			2 安全性の方針は文書化して管理している。		3		
			3 安全性の方針は関係する要員全てに周知されている。		3		
31	組織の運営の仕組み	情報が組織内で滞りなく交換されることの確認	1 下部組織の意見・意向などを吸い上げ、活用している。		2		
			2 業務の有効性について情報交換を行っている。		2		
32	文書の範囲	必要な情報の文書化の確認	1 安全性の遂行に必要な業務について、文書化する情報の範囲が明確に規定されている。		3		
33	各フェーズごとに使用する技術と方策	安全性のレベルを確保する方策の確認	1 業務全体における各フェーズに必要な技術と方策が明確に規定されている。		3		

図 3.1.7 チェックシート第1部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
34	以前の勧告、指摘事項	経験の活用と改善対応の確認	1 過去に開発した安全機能の監査時の勧告、指摘事項の対応を考慮している。		2		
35	責任ある活動の訓練の手順書	要員が業務遂行に必要な力量を持つこと	1 要員に必要な力量が備わるような教育・訓練計画が作成されている。		2		
36	部品管理 (部品の識別、未認可部品の識別)	必要な部品等の調達間違いの防止	1 部品等の調達についての手順が明確に規定されている。		2		
37	安全性に関する監査の仕組み	内部監査により、業務のPDCAサイクルと適合性及び有効性を評価	1 監査の計画及び実施、結果の報告、記録の維持に関する手順が明確に規定されている。		3		
38	監査員の選定(独立性)	(研究段階等で組織化されていないため、内部監査が行えない場合は、37-1項に“-”を記入)	1 監査員の(独立性も含めた)資格基準が明確に規定されている。		2		
39	勧告書の形式		1 監査の計画、実施、結果の報告、対応措置、記録の維持に関する責任並びに要求事項について明確に規定されている。		2		
40	変更・変更許可の仕組み	不適合に対する管理の詳細や責任の所在の明確化	1 不適合を、どのように識別、評価、処置し、関係会社、関係部門へ連絡するかの手順が明確に規定されている。		2		
			2 不適合が修正された場合、要求事項に適合するかを再検証している。		2		
41	情報管理の仕組み	情報管理の確認	1 設計・開発時における危険源や安全関連情報を管理する仕組みがある。		3		
42	進行状況の管理	責任者による業務進行管理の確認	1 業務の経過を監視・測定する手順が明確に規定されている。		2		
43	見直しの仕組み・デザインレビュー	変更に対する検証と妥当性確認	1 設計・開発の変更の手順が明確に規定されている。		3		
			2 使用する文書を常に現在有効な版に保つための更新時の手順が明確に規定されている。		2		
44	担当者の責任担当者への役割、責任の通知	要員の責任と権限の決定と各要員による理解	1 規定された運用に関連する部門や要員の責任と権限(体制)を、関連する全ての要員に周知している。		2		
				判定	合計(062点満点)		

図 3.1.7 チェックシート第1部(第2版) 続き

V. 文書の管理(一般)

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
45	文書の見易さ	業務全体において、作成、運用される全ての文書に共通の基本要件の確認	1	文書は見易い構成になっている。		1	
			2	文書は、正確、簡潔である。		1	
			3	文書は目的に沿っており、理解しやすい。		1	
			4	文書は保全し易い。		1	
46	文書のタイトル、見出し		1	文書には内容の範囲が分かるような表題や見易いタイトル、小見出しがつけられている。		1	
			2	経時的变化、変遷に対応している。		1	
47	文書作成のルール		1	文書作成手順、保管手順(保管場所、保管責任者、保管期限、持ち出し、閲覧)がある。		1	
			2	文書が改訂された際、関連する全ての部門への配付管理に関する手順がある。		1	
48	版管理		1	文書の変更の識別及び現在有効な版の識別が確実にできるようになっている。		1	
49	情報の検索		1	文書は関連情報の検索ができるように構成されている。		1	
50	改訂、修正、見直し承認		1	文書の改訂、修正及び見直し手順がある。		1	
51	適切な文書管理計画		1	業務において関連する全文書を明確にして、文書の改訂、承認などの手順に従って適切に管理している。		1	
				判定		合計(012点満点)	

VI. 安全関連業務に関わる文書

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
52	次フェーズに必要な情報	安全関連業務において、必要な情報の文書化の確認	1 安全性の遂行に必要な業務の各フェーズにおいて、次のフェーズへ引き渡す情報を文書化している。(No27-3が3点であることが条件)		3		
53	管理情報		1 安全性の管理に必要な情報を文書化している。(No27~44の得点により点数重み付け)		X		
54	安全性検証に必要な情報		1 安全性の遂行に必要な業務の各フェーズにおいて、設定目標未達成時の処理後に行う検証に必要な情報を文書化している。		3		
55	安全性評価に必要な情報		1 安全性の仕様を定性的、定量的に表現して文書化している。		2		
56	安全性評価結果		1 安全性の評価から得られる情報と結果について文書化している。		3		
57	安全性の遂行に必要な業務に関わる文書	安全設計一般として必要な基本関連文書の確認 (1-8はNo.23-2が該当する場合、機能安全設計で必要)	1 概念に関する説明書		1		
			2 全ての適用範囲の定義に関する説明書		1		
			3 危険源及びリスク解析に関する説明書		1		
			4 全ての安全要求事項(安全機能、安全度水準を含む)に関する仕様書		1		
			5 安全要求事項の割り当てに関する説明書		1		
			6 全フェーズの安全性に関する計画書		1		
			7 全フェーズの検証に関する計画書		1		
			8 全フェーズの機能安全評価に関する計画書		1		
58	電気・電子プログラマブル電子系の安全性の遂行に必要な業務に関わる文書	機能安全設計ベースで要求される詳細関連文書の確認 (No.23-2が該当する場合、機能安全設計で必要)	1 全ての安全要求事項(安全機能、安全度水準を含む)に関する仕様書		1		
			2 妥当性確認に関する計画書		1		
			3 ハードウェア及びソフトウェアアーキテクチャ設計に関する計画書		1		
			4 ハードウェアアーキテクチャ設計に関する説明書		1		
			5 ハードウェアアーキテクチャ統合テストに関する仕様書		1		
			6 ハードウェアモジュール計画に関する仕様書		1		
			7 ハードウェアモジュールテストに関する仕様書		1		

図 3.1.7 チェックシート第1部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
59	ソフトウェアの安全性の遂行に必要な業務	機能安全設計ベースで要求される詳細関連文書の確認 (No.23-2が該当する場合、機能安全設計で必要)	1	ソフトウェア安全要求事項(安全機能、安全度水準を含む)に関する仕様書		1	
			2	妥当性確認に関する計画書		1	
			3	ソフトウェアアーキテクチャ設計に関する説明書		1	
			4	ソフトウェアシステム設計に関する説明書		1	
			5	ソフトウェアシステム統合テストに関する仕様書		1	
			6	ソフトウェアモジュール設計に関する仕様書		1	
			7	ソフトウェアモジュールテストに関する仕様書		1	
			判定		合計(036点満点)		

判定結果のまとめ

	A判定	B判定	判定値	A判定境界値	B判定境界値	満点
I. 安全確保の方針	0.8	0.4	0.0	7.2	3.6	009
II. リスクアセスメント	0.8	0.4	0.0	21.6	11	027
III. リスク低減	0.8	0.4	0.0	107	54	134
IV. 安全性の管理	0.8	0.4	0.0	49.6	25	062
V. 文書の管理(一般)	0.8	0.4	0.0	9.6	4.8	012
VI. 安全関連業務に関わる文書	0.8	0.4	0.0	28.8	14	036

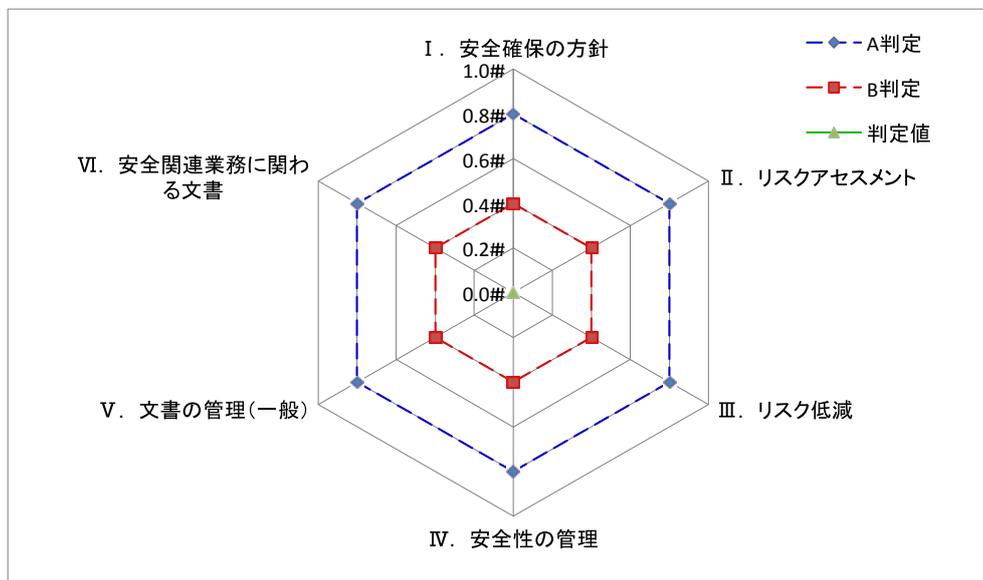


図 3.1.7 チェックシート第1部(第2版) 続き

実現段階におけるコンセプト検証自己チェックシート第2部(HW編)第3版

ロボットの名称		製作者	
型式		シート記入者	
		シート記入日	

【回答方法】

各設問毎に、主観にてA、B、C、Nをチェック欄に記入して下さい。設問毎にチェック欄に記入できる記号の種類はプルダウンメニューで例示されますので、選択して下さい。入力ルールは一部メッセージとして表示されますので参考にして下さい。尚、備考欄への記入指定の項目は、記載がないと得点加算がありません。補足説明や特記事項がある場合は、適時備考欄を拡張して記入して下さい。別途、補足資料や該当文書を添付される場合は、その資料(文書)に番号付けて備考欄に番号のみ記入して下さい。

-  : 同No.項、又は他No.項目の点数に影響するチェック。
-  : 同No.項内の項目の点数に影響するチェック。
-  : N(関係なし)をいれても良いチェック
-  : Aの数によって他の項目の点数が影響する

自己チェック

- A : 取り組み完了(設問をほぼ満足している)
- B : 取り組み中(設問を一部満足している)
- C : 未取り組み(設問はほとんど実現されていない)
- N : 関係なし

Ⅶ 安全管理の運営(チェックシート第1部の補足)

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1	安全性の評価活動	達成された安全性を調査し、判定する	1 達成された安全性を評価する担当者が任命されている		3		
			2 安全性を評価する担当者が業務全体の各フェーズの活動と出力事項を検討し、要求が満たされている度合を判定している		2		
			3 安全性を評価する計画が作成され承認されている		2		
			4 安全性を評価する担当者の資格基準が明確にされている		3		
			5 安全性評価終了時に合格、条件付合格又は不合格について指示している		3		
2	フォローアップ体制	要求事項に適合しない製品の誤使用等の防止や不適合の是正及び予防処置	1 不適合処置及び是正処置における責任と権限が明確に規定されている		3		
			2 フォローアップが迅速に活動できる		2		
3	不適合管理	不適合の根本原因の除去	1 不適合を除去するための処置手順が明確に規定されている		3		
			2 誰が不適合の判定を行うか明確に規定されている		3		
			3 不適合の基準が明確に規定されている		3		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版)

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
4	妥当性確認	是正処置の有効性確認	1	誰が是正処置の結果について判断を行うか明確に規定されている		3	
			2	是正処置の有効性を確認し、その結果を記録している		3	
5	業務構成管理	不適合の原因追跡	1	構成管理に関する手順が明確に規定されている		3	
6	責任ある活動の訓練の実施	要員が業務遂行に必要な力量を持つこと	1	要員に必要な力量が備わるような教育・訓練計画に基づき教育・訓練を実施及び評価し、記録している		2	
7	故障検出の仕組み	要求事項が満たされていることの評価	1	レビューする組織体やメンバーが予め決められている		2	
			2	レビューする項目が決められている		2	
8	監査の実施周期	内部監査による業務のPDCAサイクルと適合性及び有効性を評価	1	予め定められた間隔で監査を行っている		3	
9	見直しの仕組みとデザインレビュー	変更に対する検証と妥当性確認	1	変更が製品を構成する要素に及ぼす影響の評価結果を記録している		2	
			2	関連部署に影響がある場合、検証、妥当性確認を行った後に権限者から承認を受けたことを記録している		2	
			3	変更に伴う情報を関連部門に伝えている		2	
10	供給者の管理	供給者の評価、選定	1	供給者の技術レベルや製品の重要度に応じた管理方法が明確に規定されている		2	
			2	選定・評価者、その方法及び基準が明確に規定されている		3	
11	故障の検知、修理、試験の訓練	要員が故障等に対する必要な力量を持つこと	1	故障対応に必要な力量が備わるような教育・訓練計画が作成されている		3	
			2	故障対応に必要な力量が備わるような教育・訓練計画に基づき教育・訓練を実施及び評価し、記録している		2	
12	運転の訓練	要員が運転に対する必要な力量を持つこと	1	運転に必要な力量が備わるような教育・訓練計画が作成されている		2	
			2	運転に必要な力量が備わるような教育・訓練計画に基づき教育・訓練を実施及び評価し、記録している		2	
				判定		合計(065)点満点	

図 3.1.8 チェックシート第2部 (第3版) 続き

以降の章は、IEC61508-2 表A.1(運転中に検出されるか、安全故障率の導出の際に解析される障害又は故障)を参照

1. 電気機械式装置(原則:電流が流れない状態になった時、安全状態に移行する。)

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点		
1	リレー	安全機能部に使用しているリレーの使い方	1	安全機能部のリレーに直接開路動作機構(強制開離機構)方式の安全リレーを使用している。		3			
				イ	安全リレーのコイルの電流が切れた時、リレー接点は開放される。		3		
			2	イ	安全リレーの正常状態を監視するため常時閉(B)接点のON/OFFを監視している。(図1-1)		3		
					常時閉(B)接点の監視をソフトウェアで行っている。		3		
					① 監視は常時または定期的に行っている		2		
					② 監視は、常時閉(A)接点がONする時、行っている。		2		
					ロ	常時閉(B)接点の監視をハードウェアで行っている。		2	
						① 監視を常時、又は定期的に行っている		3	
			② 監視は、常時閉(A)接点がON/OFFする時、監視している。		2				
			3	イ	その他 安全リレーの正常を監視するため、他の方法を使っている。 その方法を簡潔に備考に記述ください。		3		
					監視は、安全関連部のソフトウェア、又はハードウェアで行っている。		3		
					① 監視は常時または定期的に(1時間以内)行っている		2		
					② 監視は、常時閉(A)接点がONする時、行っている。		2		
			4	イ	安全機能部のリレーに一般方式のリレーを使用している。(安全リレーを使用していない)		1		
					リレーのコイルの電流が切れた時、リレー接点は開放される。		1		
5	イ	一般リレーの正常状態を監視するため、接点の溶着を電氣的に監視している。(例えば、接点電流、接点間の電位測定など)(図1-2)		3					
		接点の動作の監視をソフトウェアで行っている。		3					
		① 監視を常時または定期的に(1時間以内)行っている		3					
		② 監視は、常時閉(A)接点がON/OFFする時、行っている。		3					

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文書 の番号)	得点			
2	ブレーキ	安全機能に使用しているブレーキの使い方	1	ブレーキ機構は、電源遮断でブレーキが利くようになっている。 モータ、油圧、空圧などの動力源の電源遮断と連動し、これら動力源で可動する駆動部に対してブレーキを掛けている。		3				
				イ	ブレーキは、電源遮断と同時にバネ機構などの機械的機構によって動作する。		3			
				ロ	ブレーキは、駆動部の動作タイミング制御が必要のため、ソフトウェアで制御している。		2			
				ハ	その他の方法でブレーキをかけている		2			
		ブレーキの監視方法	2	ブレーキの動作を監視している。	イ	始業時と電源投入している時も含め、定期的(一定の時間間隔、又は一定の使用回数ごと)にブレーキテストをしている。		3		
					ロ	電源投入をした始業時、ブレーキテストしている。		1.5		
					ハ	保守点検の時、ブレーキの動作点検をしている。点検の間隔は、決めている。		1.5		
					ニ	その他別の方法でブレーキテストしている。		3		
					ブレーキの動作監視の方法					
					イ	ブレーキを掛け、駆動部をONし、動かないことを監視する。		3		
					ロ	ブレーキの動作範囲をスイッチやポテンシオメータで検出している。		2		
					ハ	ブレーキの動作力を歪ゲージや圧力センサーで検出している。		1		
		ニ	その他他の方法で動作監視している。		3					
						判定	合計(043)点満点			

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

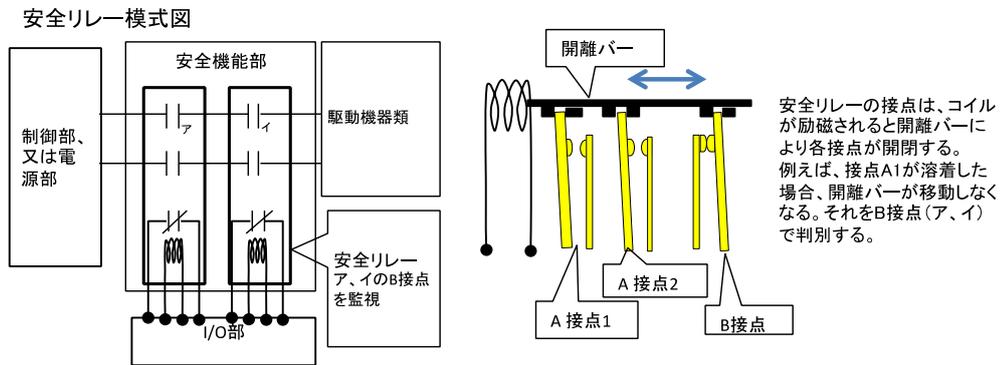


図1-1

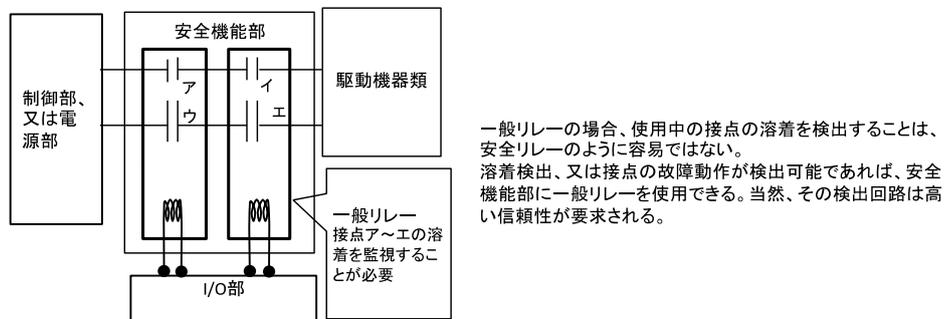


図1-2

2 個別のハードウェア
2-1 デジタルI/O、アナログI/O

障害、故障ケースは、回路のオープン、ショート、ドリフト、発振を想定。その場合でも安全状態を損なわない。

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点		
1	入出力回路	安全回路方式	1 安全に関する信号の入力回路は2重化、冗長化している。		3				
2	入力回路 (入力回路が正常であることを定期的に監視する。 検証はソフトウェアで実行)	デジタル回路	1	デジタル入力の場合					
			イ	2系統で入力し、データ比較し入力回路の正常を検証している。		3			
			ロ	入力データにチェックビットを設け、データの正しさを検証している。		3			
			ハ	各入力回路ごとに各部品が故障がわかる仕組み(例えば、冗長化または2重化回路の値比較)により回路が正常であることを検証している。		3			
			ニ	その他の方法で故障を検出している。		3			
		アナログ回路	2	アナログ入力の場合(A/D変換回路)					
			イ	リファレンス入力信号、又は基準信号を入力し、変換値の妥当性を確認している。妥当性確認用入力信号は、定期的に変動させている。(妥当性確認用のリファレンス入力アナログ信号は、自装置の安全関連部のアナログ出力を使用し、出力値と入力値の比較を定期的に行う方法もある。この時、出力値は変化させる。安全関連部が2重化されている場合、入力部と出力部の系統を入れ替えるとよい。)		3			
			ロ	急激な入力値の変化等を監視し、入力信号の正常さを監視している		3			
			ハ	各入力回路(アナログ入力部からA/D変換部周り)ごとに各部品が故障がわかる仕組みにより回路が正常であることを検証している。		3			
			ニ	その他の方法で故障を検出している。		3			

図 3.1.8 チェックシート第2部 (第3版) 続き

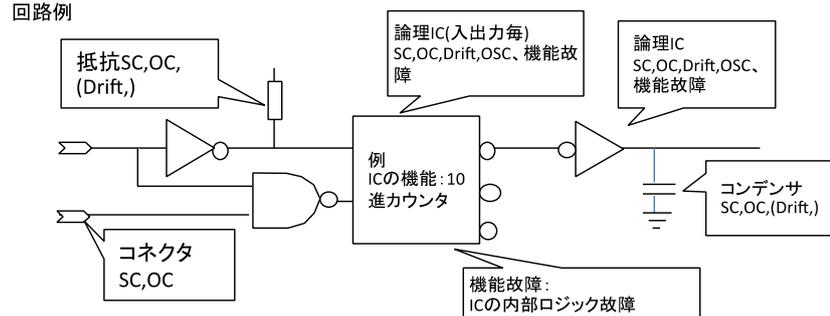
No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
3	出力回路 (出力回路が正常であることを定期的に監視している。)	デジタル回路	デジタル出力					
			イ	出力データを最終段の出力回路を経由して入力し、そのデータと比較し、出力回路のデータが正しいことを検証している。		3		
			ロ	出力データの出力経路と出力値監視のため読み取った入力データの経路、データ形式が異なっていて、出力データに関わらないマイコンで検証している。(注:下記2項の図参照)		3		
			ハ	出力データには、パリティ、CRCなどのコード化データが付いている。		3		
			ニ	各出力回路ごとに各部品の故障がわかる仕組み(例えば、正常時の回路内の信号パターンを読み取る)により回路が正常であることを検証している。		3		
			ホ	その他の方法で故障を検出している。		3		
		アナログ回路	アナログ出力					
			イ	アナログ出力値をフィードバックし、入力回路に入れ、A/D変換し、そのデータと出力データと比較し、出力回路の値が正しいことを検証している。		3		
			ロ	検証は、出力データの通った経路と異なった経路、出力に関係しなかったマイコンで行っている。		3		
				ハ	その他の方法で故障を検出している。		3	
4	出力機器用電源の遮断	安全関連のアクチュエータ部の電流遮断の処置	1	アクチュエータの駆動電流は、リレーやコンタクタ等の接点を介して遮断している。		3		
			2	駆動用のトランジスタをOFFすることにより駆動電流を遮断している。トランジスタが短絡した時でも、アクチュエータは動作しない。		2		
			3	アクチュエータの駆動電流は、制御部がOFFしなくても別の異常処置制御回路が優先的にOFFにしている。電源遮断手段が2つ以上ある。		2		
			4	その他の方法で駆動用電源を遮断している。		3		

図 3.1.8 チェックシート第2部 (第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
5	安全状態	出力回路の電源遮断	1	異常が発生した時、出力信号は、ソフトウェアでOFFにする。		1	
			2	異常が発生した時、出力部の信号は、ハードウェアで電源供給部を遮断し、信号出力を無効化する。ソフトウェアでも信号出力をOFFする。		3	
6	診断部分の故障	診断回路、診断方式の正常の判別	1	2重化、冗長化した回路の信号のチェック回路の故障を判別できる。 例えば、同じ信号を2重化、又は冗長化した回路で読み取り比較する。不一致の場合、診断の経路に異常があることがわかる。		3	
7	安全係数	出力容量	1	出力回路の許容電流、電圧の安全係数は、0.67(2/3)より優位な安全係数を持っている。(IEC61508-2,7.4.2.13)又は、最大定格の状態のままで十分動作することができる。		3	
					判定	合計(56)点満点	

1.安全回路部の部品について故障解析を行う。

回路例



デジタルI/O部	故障状態
入力部	DC障害モデル ・短絡状態の継続——SC ・オープン状態の継続——OC
	ドリフト——Drift
出力部	発振——OSC

2. データの流れ経路について

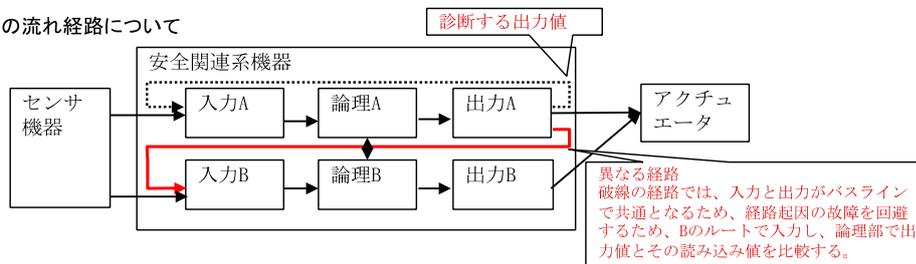


図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

2 個別のハードウェア

2-2 電源

安全機能を制御する装置へ供給される電源。
 安全装置が駆動するアクチュエータや信号入力するセンサーなどのI/O機器を駆動する電源(I/O電源)。
 電源の故障や障害時、安全機能を安全状態へ移行することが必要。

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点			
1	装置へ供給する電源	感電の危険のない電源電圧の使用	1	使用している電源電圧は、保護特別低電圧(AC25V(実効値)、DC60V以上)以下である。		3				
			1	イ	過電圧を検出すると装置への電源供給を遮断する。		3			
				ロ	過電圧を検出し、電源遮断を行うまでの間に過電圧となった電源電圧が、装置内の耐許容電圧(最大定格)を超えない。 この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。最大定格とは部品が破損しない上限の定格である。電源異常が除去された時、正常な動作を保障する。		3			
			2	1	供給電源を別電源(第2電源)に切り替える場合。 (図2-2-1.2の左端“電源”を“電源2”に切り替える)					
				イ	過電圧を検出すると装置への電源供給を第2電源に切り替える。		2			
				ロ	過電圧を検出し、第2電源への切り替えを行うまでの間に過電圧となった電源電圧が、装置内の耐許容電圧(最大定格)を超えない。 この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。最大定格とは部品が破損しない上限の定格である。電源異常が除去された時、正常な動作を保障する。		1			
				ハ	切り替えた第2電源の過電圧を監視している。		1			
			ニ	第2電源も過電圧であった場合は、電源供給を遮断している。		1				
				過電圧によって安全機能が保護されていること						

No	項目	主旨	設問		チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
1		過電圧によって安全機能が保護されていること	2	ホ	第2電源の過電圧であった場合は、電源供給を遮断するまでの時間で過電圧となった第2電源電圧が、装置内の耐許容電圧(最大定格)を超えない。この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。最大定格とは部品が破損しない上限の定格である。電源異常が除去された時、正常な動作を保障する。		1		
			3	イ	その他 過電圧を検出した時、1項,2項の方法とは別の方式を取っている。		3		
2	装置へ供給する電源	電圧低下によって安全機能が保護されていること			供給電源が単一の場合。 (図2-2-1.2の左端の第2電源のない場合:この場合は"電源切り替え回路"は不要となる。)				
			1	イ	電圧低下を検出すると装置内へ報知し、処理途中のタスクを終了し、出力をOFFにし、必要があれば、データを保存して、装置を安全状態に移行する。		3		
				ロ	電圧低下を検出し、電源OFFに備える処理をしている間に電源電圧が各部品の正常動作を保障する定格値より低下しない。電源OFFに備える処理の時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		3		
					供給電源を別電源(第2電源)に切り替える場合。 (図2-2-1.2の左端電源部の電源より電源2に切り替える)				
			2	イ	電圧低下を検出すると装置への電源供給を第2電源に切り替える。		2		
				ロ	電圧低下を検出し、第2電源への切り替えを行うまでの間に電圧低下となった電源電圧が、装置内の部品が正常動作を行う最電圧低下定格以下にならない。この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		1		
				ハ	切り替えた第2電源の電圧低下を監視している。		1		
				ニ	第2電源も電圧低下になった場合、電圧低下を装置内へ報知し、処理途中のタスクを終了し、出力をOFFにし、必要があれば、データを保存して、装置を安全状態に移行する。		1		

No	項目	主旨	設問		チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
2	装置へ供給する電源	電圧低下によって安全機能が保護されていること	2	ホ	第2電源が電圧低下であった場合は、電源OFFに備える処理をしている間に電源電圧が各部品の正常動作を保障する定格値より低下しない。電源OFFに備える処理の時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		1	
			3	イ	その他 電圧低下を検出した時、1項,2項の方法とは別の方式を取っている。		3	
3	装置内の論理部の電源電圧	正常電源電圧の検出	1		電源ON時、論理部の電源電圧の正常値を検出し、その値に達するまで、または達した以後一定時間、装置内にリセットを掛け、初期状態にしている。		3	
			2		論理部電源ON時の論理部回路のリセットの時間は、システム全体が運動して正常に動作を開始するに十分な時間である。		3	
			3		初期状態では、すべての出力はOFFの状態である。		3	
			4		電源投入から正常電圧の検出し、リセットが終わるまでの間、いかなる出力信号も出ずことはない。		3	
			5		論理部電源が複数ある場合、電源間の同期がとれていること。 ・電源オン時、遅い立ち上がりの遅い電源に合わせて、システムが動作を開始すること。 ・電源オフ時、電源断の早い電源に合わせて、電源シャットダウン処理を完了すること。		3	
			6		電源相互間で電源の正常状態が把握できること。どれかが異常の場合は、決められた処置を行い、安全状態を損なわないこと。		3	
			7		その他 電源電圧の正常範囲を検出には、1項から6項の方法とは別の方式を取っている。		3	

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文書 の番号)	得点	
4	装置内の論 理部の電源 電圧	論理部の電源の 過電圧の検出	論理部電源が単一の場合。 (図2-2-1の左側中央寄りの“論理部電源 2”のない場合:この場合は“電源切り替え 回路”は不要となる。)					
			イ 過電圧を検出すると論理部への電源 供給を遮断する。		3			
			1	過電圧を検出し、電源遮断を行うまで の間に過電圧となった電源電圧が、 論理部内の耐許容電圧(最大定格) を超えない。 この切り替え時間は、部品のばらつき を考慮し、最長時間で考える。最大定 格とは部品が破損しない上限の定格 である。電源異常が除去された時、正 常な動作を保障する。		3		
			2	論理部の電源を別電源に切り替る場合。 (図2-2-1の左側の中央寄りの“論理部電 源1”から“論理部電源2”に切り替える)				
			イ 過電圧を検出すると論理部への電源 供給を第2電源に切り替える。		2			
			2	過電圧を検出し、第2電源への切り替 えを行うまでの間に過電圧となった電 源電圧が、論理部内の耐許容電圧 (最大定格)を超えない。 この切り替え時間は、部品のばらつき を考慮し、最長時間で考える。最大定 格とは部品が破損しない上限の定格 である。電源異常が除去された時、正 常な動作を保障する。		1		
			ハ 切り替えた第2電源の過電圧を監視し ている。		1			
			ニ 第2電源も過電圧であった場合は、電 源供給を遮断している。		1			
			ホ 第2電源の過電圧であった場合は、電 源供給を遮断するまでの時間で過電 圧となった第2電源電圧が、論理部内 の耐許容電圧(最大定格)を超えな い。 この切り替え時間は、部品のばらつき を考慮し、最長時間で考える。最大定 格とは部品が破損しない上限の定格 である。電源異常が除去された時、正 常な動作を保障する。		1			

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文書 の番号)	得点
4	装置内の論 理部の電源 電圧	論理部の電源の 過電圧の検出		論理部の電源がチャンネルごとに別々になっている場合。			
			イ	1つの電源で過電圧を検出すると他の電源供給先の各チャンネルの論理部へ過電圧を知らせる。		3	
			ロ	過電圧を検出された電源は、その電源を供給する論理部の部品破損に至る電圧(絶対定格)になる前に遮断され、その論理部は電源遮断前に安全状態を損なわない処置を行う。		2	
			ハ	過電圧検出から電源シャットダウンまでの時間は、最悪条件を考慮してできるだけ短時間とする。例えば、部品の絶対最大定格のばらつき(最も低い絶対定格電圧に合わせる)、電源の電圧上昇のバラツキ、電源の負荷状態(電源の出力電流値、容量負荷等で電源の上昇時間が変わる)を考慮する。 電源異常が除去された時、正常な動作を保障する。		1	
			4	その他 電源電圧の過電圧検出には、1項から3項の方法とは別の方式を取っている。		3	
5	論理部の電源の 電圧低下の検出		論理部電源が単一の場合。 (図2-2-1.2の左側中央寄りの“論理部電源2”のない場合:この場合は“電源切り替え回路”は不要となる。)				
		イ	電圧低下を検出すると論理部内の中央制御部へ報知し、処理途中のタスクを終了し、出力をOFFにし、必要があれば、データを保存して、装置を安全状態に移行する。		3		
		ロ	電圧低下を検出し、電源OFFに備える処理をしている間に電源電圧が各部品の正常動作を保障する定格値より低下しない。電源OFFに備える処理の時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		3		
		2	論理部への電源を別電源に切り替える場合。 (図2-2-1.2の左側の中央寄りの“論理部電源1”から“論理部電源2”に切り替える)				

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
5	装置内の論理部の電源電圧	論理部の電源の電圧低下の検出	イ	電圧低下を検出すると論理部への電源供給を第2電源に切り替える。		2		
			ロ	電圧低下を検出し、第2電源への切り替えを行うまでの間に電圧低下となった電源電圧が、論理部内の部品が正常動作を行える最電圧低下定格以下にならない。 この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		1		
			ハ	切り替えた第2電源の電圧低下を監視している。		1		
			ニ	第2電源も電圧低下になった場合、電圧低下を論理部内の中央部へ報知し、処理途中のタスクを終了し、出力をOFFにし、必要があれば、データを保存して、装置を安全状態に移行する。		1		
			ホ	第2電源の電圧低下でなかった場合は、電源OFFに備える処理をしている間に電源電圧が各部品の正常動作を保障する定格値より低下しない。電源OFFに備える処理の時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		1		
			3	論理部の電源がチャンネルごとに別々になっている場合。				
			イ	1つの電源で電圧低下を検出すると他の電源供給先の各チャンネルの論理部へ電圧低下を知らせる。		3		
			ロ	電圧低下を検出された電源は、その電源を供給する論理部の部品の電圧低下定格電圧になる前に、電源シャットダウン処理にて、安全状態を損なわない。		2		
			ハ	電圧低下検出から電源シャットダウンまでの時間は、最悪条件を考慮してできるだけ短時間とする。例えば、部品の絶対最大定格のばらつき(最も低い絶対定格電圧に合わせる)、電源の電圧下降のバラツキ、電源の負荷状態(電源の出力電流値、容量負荷等で電源の下降時間が変わる)を考慮する。 電源電圧が正常値に戻った時、正常な動作を保障する。		1		
			3	その他 論理部の電源電圧の電圧低下の検出には、1項から3項の方法とは別の方式を取っている。		3		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点		
6	I/O電源(機能安全部につながる入出力機器用電源)	過電圧になっても安全機能が保護されていること	1	使用している電源電圧は、保護特別低電圧(AC25V(実効値)、DC60V以上)以下である。		3			
			1	I/O部への供給電源が単一の場合。					
				イ	過電圧を検出すると検出した電源が供給されている入力部または出力部の電源供給を遮断する。		3		
			ロ	過電圧を検出し、電源遮断を行うまでの間に過電圧となった電源電圧が、入力部または出力部内の耐許容電圧(最大定格)を超えない。 この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。最大定格とは部品が破損しない上限の定格である。電源異常が除去された時、正常な動作を保障する。		3			
			2	I/O部への供給電源を別電源に切り替る場合。					
				イ	過電圧を検出すると装置への検出した入力部または出力部へ供給している電源を第2電源に切り替える。		2		
				ロ	過電圧を検出し、第2電源への切り替えを行うまでの間に過電圧となった電源電圧が、入力部または出力部内の耐許容電圧(最大定格)を超えない。 この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。最大定格とは部品が破損しない上限の定格である。電源異常が除去された時、正常な動作を保障する。		1		
				ハ	切り替えた第2電源の過電圧を監視している。		1		
				ニ	第2電源も過電圧であった場合は、電源供給を遮断している。		1		
			ホ	第2電源の過電圧であった場合は、電源供給を遮断するまでの時間で過電圧となった第2電源電圧が、入力部または出力部内の耐許容電圧(最大定格)を超えない。 この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。最大定格とは部品が破損しない上限の定格である。電源異常が除去された時、正常な動作を保障する。		1			
3	その他 I/O部の電源電圧の過電圧の検出には、1項から3項の方法とは別の方式を取っている。		3						

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点		
6	I/O電源(機能安全部につながる入出力機器用電源)	電圧低下になっても安全機能が保護されていること	I/O部への供給電源が単一の場合。						
			イ	電圧低下を検出すると装置内へ報知し、I/O関係の処理が電圧低下時の安全状態移行処理に移り、出力をOFFにして、装置を安全状態に移行する。		3			
			ロ	電圧低下を検出し、電源OFFに備える処理をしている間に電源電圧が各 부품の正常動作を保障する定格値より低下しない。電源OFFに備える処理の時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		3			
			I/O部への供給電源を別電源に切り替える場合。						
			イ	電圧低下を検出すると検出した入力部または出力部への電源供給を第2電源に切り替える。		2			
			ロ	電圧低下を検出し、第2電源への切り替えを行うまでの間に電圧低下となった電源電圧が、入力部または出力部内の部品が正常動作を行う最電圧低下定格以下にならない。この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		1			
			2	ハ	切り替えた第2電源の電圧低下を監視している。		1		
			ニ	第2電源も電圧低下になった場合、電圧低下を装置内へ報知し、I/O関係の処理が電圧低下時の安全状態移行処理に移り、出力をOFFにして、装置を安全状態に移行する。		1			
			ホ	第2電源の電圧低下であった場合は、電源OFFに備える処理をしている間に電源電圧が各 부품の正常動作を保障する定格値より低下しない。電源OFFに備える処理の時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		1			
			3	その他	I/O部の電圧の電圧低下の検出には、1項、2項の方法とは別の方式を取っている。		3		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文書 の番号)	得点	
7	過電流検出	過電流によって起 きる事象から安全 機能が保護されて いること	供給電源が単一の場合 (図2-2-1.2の左端の“電源2”のない場合: この場合は“電源切り替え回路”は不要と なる。)					
			イ 過電流を検出すると論理部への電源 供給を遮断する。		3			
			1	過電流を検出し、電源遮断を行うま での間に過電流による部品損傷や発 火、発煙などの事象にならない。 遮断までの時間は、部品のばらつき を考慮し、最長時間で考える。最大定 格とは部品が破損しない上限の定格 である。最大定格を超える前に、電源 遮断を行う。過電流の原因が除去さ れた時、正常な動作を保障する。		3		
			2	供給電源を別電源(第2電源)に切り替 る場合。 (図2-2-1.2の左端“電源”を“電源2”に切 り替える)				
			イ 過電流を検出すると装置への電源供 給を第2電源に切り替える。		2			
			ロ 過電流を検出し、第2電源への切り替 えを行うまでの間に過電流となった装 置内の耐許容電流(最大定格)を超え ない。 この切り替え時間は、部品のばらつき を考慮し、最長時間で考える。最大定 格とは部品が破損しない上限の定格 である。最大定格を超える前に、電源 遮断を行う。過電流の原因が除去さ れた時、正常な動作を保障する。		1			
			ハ 切り替えた第2電源の過電流を監視し ている。		1			
			ニ 第2電源も過電流検出した場合は、電 源供給を遮断している。		1			
			ホ 第2電源も過電流であった場合、電源 供給を遮断するまでの時間で過電流 となった第2電源が、装置内の耐許容 電流(最大定格)を超えない。 この切り替え時間は、部品のばらつき を考慮し、最長時間で考える。最大定 格とは部品が破損しない上限の定格 である。最大定格を超える前に、電源 遮断を行う。過電流の原因が除去さ れた時、正常な動作を保障する。		1			
			3	その他 I/O部の電圧の過電流の検出には、1項、2 項の方法とは別の方式を取っている。		3		
			判定		合計(117)点満点			

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

論理部が単一電源の場合

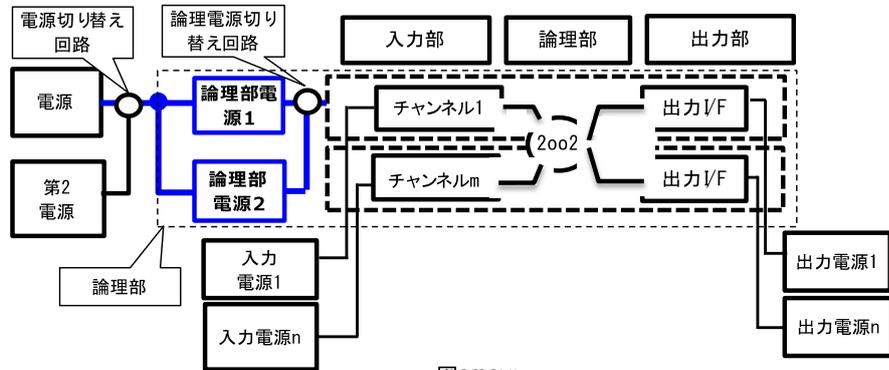


図23231#

論理部が複数電源の場合

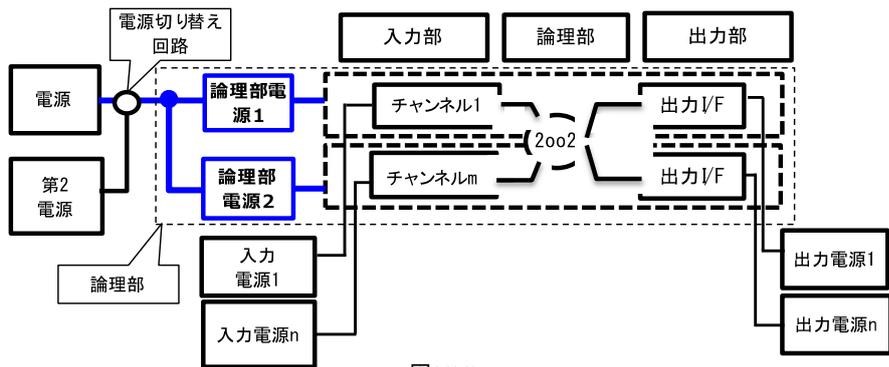


図23232#

2 個別のハードウェア

2-3 電源電圧監視回路

- * 1 供給電源や論理部の電源の過電圧、電圧低下の監視回路がランダム故障で機能しなくなった時、安全機能が働かず危険状態になることが考えられる。これを防止するため、電源電圧の監視回路を2重化、または冗長化することが求められる。
- * 2 供給電源とは、AC100VからDC24へ変換する電源ユニットのDC24V出力、DC24V,12V出力のバッテリーなどが相当する。
- * 3 論理部電源は、論理部への電源供給を行う。例えば、論理部がDC3.3Vであれば、供給電源DC24VからDC3.3Vに変換するDC/DC電源装置が相当する。

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点		
1	安全機能制御部本体の電圧監視回路	供給電源電圧監視回路(図1参照) 過電圧監視 電圧低下が、論理部のみに影響する場合は、論理部の電源出力で監視する方法もある。	1	電源監視回路を2重化している。	■	3			
				イ 過電圧監視回路を2重化している		3			
				ロ 電圧低下監視回路を2重化している		3			
			2	別の方法で過電圧、電圧低下を監視している		3			
				監視回路の2重化の方式	/	/	/		
				図1の場合 供給電源は1つ。監視回路が2重化され、監視状態をチャンネル_1,2の論理部へ送っている。		3			
				片側の供給電源監視回路の故障の場合	/	/	/		
			イ	他方は、回路方式が異なるため、正常に働いている。共通原因故障による故障にならない。	■	3			
			3	ロ	1つ目の監視回路の監視信号はチャンネル_1側へ入力、2つ目はチャンネル_2へ入力している。同じチャンネルに入れていない。 監視回路異常でも、監視信号が不一致となるので、異常判定できる。 過電圧になった時、1つ目がOFF故障していても、2つ目がONすれば、2oo2の判定で不一致になるので異常として処理する。また、一方の応答が遅くなくても、早く入力した信号で不一致処理がされ、結果的に異常として処理される。		3		
				ハ	他方は、回路方式が同じであるため、故障原因によっては、他方も故障している。共通原因故障により両方も故障になる。	■	1		
ニ	論理部電源監視は2重化しているが、同じ回路で構成している。監視信号は、それぞれチャンネル_1,2に入力している。 監視回路が同じである共通原因での故障(ノイズ、部品のロット不良など)により、2つの回路が同時に故障し、正常に回路監視できない可能性が排除できない。			1					

図 3.1.8 チェックシート第2部 (第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1		供給電源電圧監視回路(図1参照) 過電圧監視 電圧低下が、論理部のみに影響する場合は、論理部の電源出力で監視する方法もある。	監視回路の動作				
			監視回路で異常を検出したら論理回路電源からの供給ラインを直ちに遮断する。		3		
			イ ソフトウェアを介さず、ハードウェアで行う。監視信号はチャンネル_1,2に送っている。この信号で、異常処理を行い、供給電源のシャットダウンを行う。ソフトウェアは補助であり、供給電源の異常時は、ハードウェアで供給電源が論理部電源に投入する間で遮断する。論理部電源がシャットダウンされるので、シャットダウンされたチャンネルでは、電圧低下検出が働き、電圧低下(電源オフ)処理が行われる。		3		
			ロ 監視信号を受け、ソフトウェアで供給電源遮断処理を行う。供給電源の過電圧によって論理部電源が破損する絶対定格に至る前に遮断を行う。		2		
2	安全機能制御部本体の電圧監視回路	論理部電源電圧監視回路	電源監視回路を2重化している。		3		
			1 イ 過電圧監視回路を2重化している		3		
			ロ 電圧低下監視回路を2重化している		3		
			2 別の方法で過電圧、電圧低下を監視している		3		
			監視回路の2重化の方式				
			図2の場合、論理部電源は1つ。監視回路が2重化され、監視状態をチャンネル_1,2の論理部へ送っている。		3		
			片側の電源の監視回路の故障の場合				
			イ 他方は、回路方式が異なるため、正常に働いている。共通原因故障による故障にならない。		3		
3 ロ 1つ目の監視回路の監視信号はチャンネル_1側へ入力、2つ目はチャンネル_2へ入力している。同じチャンネルに入れていない。監視回路異常でも、監視信号が不一致となるので、異常判定できる。過電圧になった時、1つ目がOFF故障していても、2つ目がONすれば、2oo2の判定で不一致になるので異常として処理する。また、一方の応答が遅くなくても、早く入力した信号で不一致処理がされ、結果的に異常として処理される。		3					
ハ 他方は、回路方式が同じであるため、故障原因によっては、他方も故障している可能性がある。監視回路が同じであると共通原因での故障(ノイズ、部品のロット不良など)により、2つの回路が同時に故障し、正常に回路監視できない可能性が排除できない。		1					

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
2	安全機能制御部本体の電圧監視回路	論理部電源電圧監視回路	監視回路の動作					
			イ	①	監視回路で異常を検出したら論理回路電源からの供給ラインを直ちに遮断する。		3	
				②	ソフトウェアを介さず、ハードウェアで行う。ソフトウェアは電圧低下監視回路からの信号を受け、電圧低下処理を行い、安全状態に移行する。		3	
			ロ	①	監視信号を受け、ソフトウェアで電源遮断処理を行う。		1	
				②	監視回路で異常を検出したら供給電源からの供給ラインを直ちに遮断する。		3	
			③	ソフトウェアを介さず、ハードウェアで行う。		3		
④	監視信号を受け、ソフトウェアで電源遮断処理を行う。		1					
3		2重化によらない論理部電源監視	イ	その他電圧低下、過電圧電源監視を2重化以外の方法で行い、その回路の部品のどれが故障しても安全関連系を安全状態に移行できる。		3		
4	I/O部電源電圧電流監視	入力信号の電源監視(I/O用電源)	1	過電圧監視を行っている。		3		
			2	過電圧が検出されると入力部信号の電源供給を遮断する。		3		
			3	過電圧検出し、電源を遮断するまでに過電圧によって入力部回路が破損しないようになっている。		3		
			4	電圧低下監視を行っている		3		
			5	電圧低下になると信号信頼性が落ちるので、電源を遮断するか、異常を報知し、システムまたは設備を停止する。		3		
			6	電圧低下を報知し、停止するまで、電圧低下で偽信号となった信号の影響を受けない仕組みができています。		3		
		7	入力信号用電源の過電流監視	7	過電流検出を行っている。		3	
				イ	ヒューズで過電流保護をおこなっている。		0	
				ロ	半導体ヒューズを使用している。		0	
				ハ	半導体組み合わせの過電流検出回路により電流を遮断している。		0	

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
4	I/O部電源 電圧電流監視	出力信号の電源監視	1	過電圧検出を行っている。		3	
			2	過電圧が監視されると出力部信号の電源を遮断する。		3	
			3	過電圧検出し、電源を遮断するまでの間に過電圧によって出力部回路が破損しないようになっている。		3	
			4	電圧低下監視を行っている		3	
			5	電圧低下になると信号信頼性が落ち、また電流が減少するので、安全機能用アクチュエータが駆動できなくなるため、電源を遮断するか、異常を報知し、システムまたは設備を停止する。		3	
			6	電圧低下を報知し、停止するまで、電圧低下で安全機能を損なわない仕組みができています。		3	
		出力信号用電源の過電流監視	7	過電流検出を行っている。		3	
			イ	ヒューズで過電流保護をおこなっている。		3	
			ロ	半導体ヒューズを使用している。		3	
			ハ	半導体組み合わせの過電流検出回路により電流を遮断している。		3	
				判定	合計(060)点満点		

注1: 出力部の電源を落とすことで安全機能用のアクチュエータの動作を停止することができる。この時、同時に入力信号用の電源を遮断する必要はない。

図1. 電源系統図

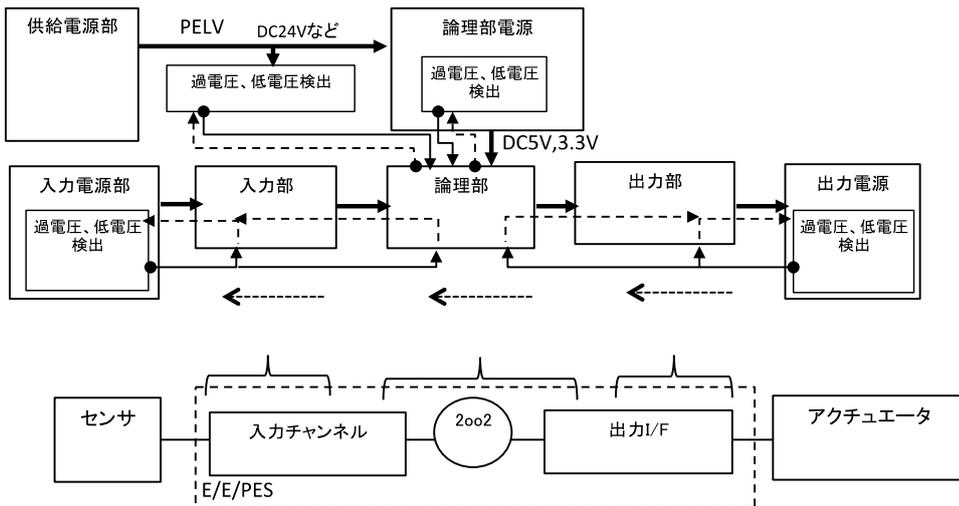


図 3.1.8 チェックシート第2部 (第3版) 続き

図2. 電源異常検出を2重化した論理部電源供給:論理部電源は単一

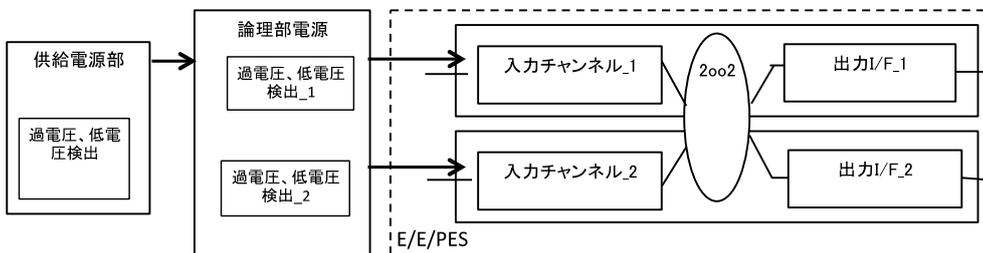
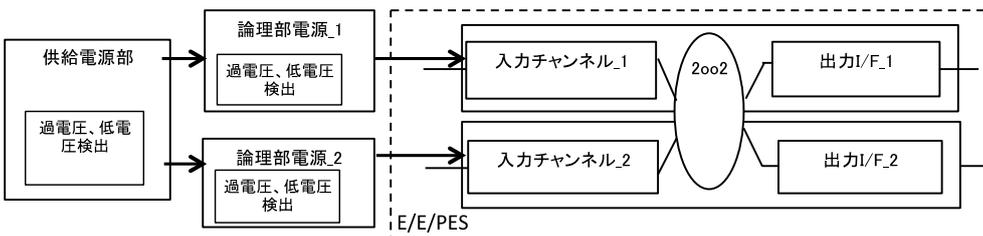


図3. 2重化した論理部電源供給:それぞれの電源に電源異常検出部を持つ



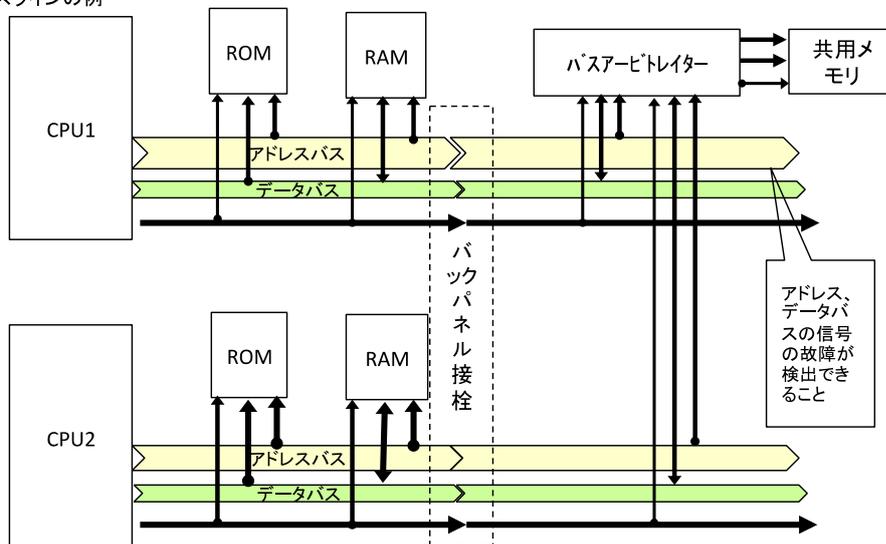
3 バス

3-1 一般、メモリ管理ユニット、直接メモリアクセス、バスアービトレーション

バスラインのデータ、バスアービトレーション(調停管理)回路、メモリのデータ、アドレスなどの障害、故障が検出でき、安全状態に移行できる/安全機能に使用しているメモリ領域

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1	バスライン	アドレスバスラインの故障がないこと	1	マイコンのアドレスバスの欠損(あるアドレスラインが"1"のままになっている状態)を検出することができる。		3	
			2	マイコンのアドレスバスの欠損(あるアドレスラインが、"0"のままになっている状態)を検出することができる。		3	
		データバスラインの故障がないこと	1	マイコンへ入出力するバスライン上のデータの欠損(あるデータラインが"1"のままになっている状態)を検出することができる。		3	
			2	マイコンへ入出力するバスライン上のデータの欠損(あるデータラインが"0"のままになっている状態)を検出することができる。		3	
		バスアービレーターが正しくバスラインの調停を行っていること	1	バスアービレーターのバス切り替え等の制御状態を監視、または試験により故障が検出できる。		3	
2	メモリアクセス	安全機能の実行プログラム領域又は安全関連データの存在する領域メモリに正しくアクセスできている。	1	メモリのアドレスライン、データラインが"0"のままになり、目的のデータを読み出せない状態が検出できる。		3	
			2	メモリのアドレスライン、データラインが"1"のままになり、目的のデータを読み出せない状態が検出できる。		3	
					判定	合計(021)点満点	

図3 バスラインの例



4 CPU

4-1 マイコンの故障検出

同一のマイコンで安全機能と一般機能を行う場合は、原則的に安全機能と一般機能を実行する制御プログラムもメモリエリアも混在してはならない。例えば、マイコン内部のメモリエリアで安全機能を実行した場合は、一般制御のメモリエリアは外部メモリを使用するような工夫が必要となる。

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1	マイコンの採用	マイコンの採用	安全機能の実現にマイコンを使用している。		3		
2	マイコンの不具合と内部故障の検出	マイコンの不具合の確認	1	マイコンのバグリストをメーカーから入手している。		3	
			イ	不具合のあるマイコンの命令はバグを回避して使用している。		3	
			ロ	コンパイラにもこの不具合が反映されていることを事前に評価している。		3	
			ハ	コンパイラのバージョンをばらばらでなく、プログラム開発中も変更時と同じものを使用している。(新バージョンに切り替えていない)		3	
			ニ	マイコンの不具合の解消は、または、新バージョンへの切り替えは常にメーカーと連絡を取り、安全機能が損なわれないことを確認している。これらは、文書で残している。(メーカーよりの変更通知、変更後の妥当性確認計画書、確認結果等)		3	
2	マイコンの不具合を上記方法以外で入手し、対策を行って、使用している。		3				

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
2	マイコンの不具合と内部故障の検出	内部が破損し、演算関係が正しく行われない故障の検出	内部のデータ、アドレスの故障を検出している		3			
			イ	安全機能に使用しているメモリエリアの読み出し/書き込み試験し、メモリの故障がないことを検証している。		3		
				① RAM 特定パターンを書き込み、それを読み出し、書き込んだ値が変化していないことを確認している(セルチェック)		3		
				② RAM 特定パターンを書き込み、それを読み出し、書き込んだエリア以外が変化していないことを確認している。(アドレスチェック)		3		
				③ ROM 安全機能に使用しているエリアの内容を読み出し、チェックパターンを計算し、予め計算済の値と比較している。(セルチェック)		3		
			ロ	マイコンの演算命令を定期的に試験し、マイコンが正しい演算をしていることを確認している。		3		
			ハ	マイコン内部のスタックポインタの試験を行っている。		3		
			ニ	マイコン内部のプログラムカウンタの試験を行っている。		3		
			ホ	マイコン内部のレジスタ、フラグの試験を行っている。		3		
			ヘ	マイコンに付属の演算器(浮動小数点演算、高速専用機能演算器)の機能試験を定期的に行い、演算機能の正しさを検証している。		3		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
3	暴走検出	暴走検出の方法	1	マイコンの暴走はマイコン外部のハードウェアのタイマーでチェックしている。 例えば、マイコンのクロックと異なる発振器を使用し、カウンターでタイマーを設定する。タイムアップで暴走と検知する。マイコンは、タイムアップ前にカウンター値を再セットする。又は、リトリガーICによりCRで時間設定する。リトリガーICがタイムアップする前にリセットする。		3		
			2	マイコンは、2重化、又は冗長化しており、マイコンのタイマーで相互監視している。 例えば、決められた時間に相互確認をし、返事がなければ、暴走とし、検出した側のマイコンでシステムを安全状態へ移行する。		3		
			3	2つ以上のマイコンをネットワークで結合し、定期的に情報交換を行い、定期的な情報交換が途絶えた時、暴走と見なし、異常処置を行う。		2		
			4	その他の方法で暴走検知している。		3		
4	入出力ポート	入出力ポートのデータの異常の検出		マイコンにI/Oポートがあり、使用している。		/	/	/
			1	マイコンの入力ポートが"0"になりっ放し(0縮退故障)がわかる。		3		
			2	マイコンの入力ポートが"1"になりっ放し(1縮退故障)がわかる。		3		
			3	マイコンの出力ポートが"0"になりっ放し(0縮退故障)がわかる。		3		
	4	マイコンの出力ポートが"1"になりっ放し(1縮退故障)がわかる。		3				
	通信ポート	通信ポート		マイコンに通信ポートがあり、使用している。		/	/	/
			1	マイコンのシリアル通信ポートの受信部が"0"になりっ放し(0縮退故障)がわかる。		3		
			2	マイコンのシリアル通信ポートの受信部が"1"になりっ放し(1縮退故障)がわかる。		3		
3			マイコンのシリアル通信ポートの送信部が"0"になりっ放し(0縮退故障)がわかる。		3			
4	マイコンのシリアル通信ポートの送信部が"1"になりっ放し(1縮退故障)がわかる。		3					

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
5	割り込み	割り込み信号の状態検査	マイコンに割り込みポートがあり、使用している。				
			1 マイコンの割り込み信号入力部が“0”になりっ放し(0縮退故障)がわかる。		3		
			2 マイコンの割り込み信号入力部が“1”になりっ放し(1縮退故障)がわかる。		3		
			3 マイコンの割り込み優先順位が正しいことがわかる		3		
				判定	合計(084)点満点		

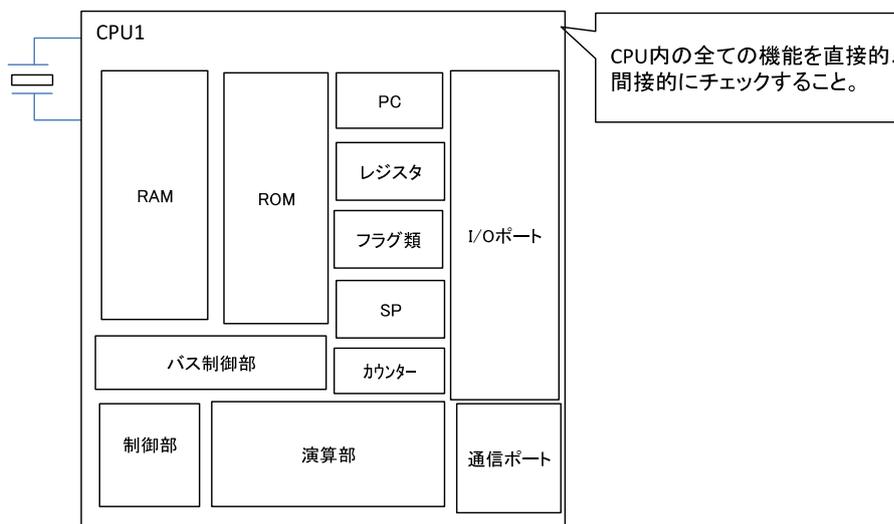


図 3.1.8 チェックシート第2部 (第3版) 続き

5.6 不変メモリ、可変メモリ

メモリ領域のビットデータ、バイト/ワードデータが意図しない事象で破損、故障していないことを試験する。
メモリノバスライン、アドレスラインの故障により正しいデータが読み出し/書き込みできなくなる。これらの故障を検出する試験を行う。

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
1	RAMエリア	RAMのビット故障の検出	1	RAMのメモリセル単位(1ビット)で故障を検出している。		3		
			2	RAMの記憶ビットをアクセスするアドレスラインの故障の検出をしている。 (データを書き込み、読み出し時、書き込みデータが指定以外のエリアに書き込まれていないことを確認する。)		3		
		RAMのデータバスの故障検出	1	データの欠損が無いことを確認している。		3		
			2	データのビットが混線していないことを確認している。		3		
		データバックアップ	1	イ	安全関連データの最新データ(カレントデータ)をRAM領域でバックアップしている。(安全関連データは、バックアップしないほうがよい。)		3	
				ロ	電源投入時システムがスタートする前にRAM内容の確認を行っている。バックアップ用の電池の不具合によって内容が破損した場合の対策を決めている。		2	
			2	イ	安全関連データの最新データ(カレントデータ)を書き換え可能なROM領域でバックアップしている。(安全関連データは、バックアップしないほうがよい。)		3	
				ロ	電源断時、書き換え可能ROMへの書き込み時間を十分確保できる回路を採用している。		3	
				ハ	電源投入時システムがスタートする前にROM内容の確認を行っている。バックアップ時の不具合によって内容が破損した場合の対策を決める。		3	
				ニ				
2	ROMエリア	ROMのビット故障の検出	イ	ROMに書き込まれたデータが変化していることを検出している。(ROMは電荷で記憶している。絶縁膜が破損すると電荷リークする。それがメモリ消えになる。)		3		
			ロ	ROMの記憶ビットをアクセスするアドレスラインの故障の検出をしている。(データの読み出し時、指定以外のエリアから読み出されていないことを確認する。)		3		
	ROMのデータバスの故障検出	イ	データの欠損が無いことを確認している。		3			
		ロ	データのビットが混線していないことを確認している。		3			
				判定		合計(030)点満点		

ROM/RAMの故障について、IEC61508-2では、「メモリに影響を及ぼす全て故障」考慮するとある。故障として、ハードウェアの故障(内部素子の破損、配線の断線、クロストーク、外乱等)以外にソフトウェアの発生がある。これも考慮に入れる必要がある。ソフトウェアは、宇宙線や地球上の微量な放射性原子によるアルファ線や中性子線、陽子線、重イオン線などの粒子線が半導体チップに突入することで引き起こされる。粒子線の突入によって電荷および電流が発生するため、データが書き換えられてしまう現象である。

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

7 クロック

回路が1や0に固定されたり、中途半端な状態や発振状態(クロック関連を除く)になった時、安全状態に移行する。

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1	クロック部	ウォッチドッグタイマー	1	マイコンの動作周波数及びプログラムシーケンスを監視するため、マイコンの外にマイコンと異なる発振源でカウントされるWDT回路、またはリトリガー回路を設けている。		3	
			2	ウォッチドッグタイマーはマイコンによって、制御プログラムの適切な箇所周期的に起動、又はクリアされる。		3	
			3	起動、又はクリアを掛けるマイコンの周期は正確である。		3	
			4	タイマーの時間設定は、温度など周囲の環境条件の影響を考慮している。		3	
			5	ウォッチドッグタイマーの設定時間は、安全機能を損なわないように十分短い時間である。 例えば、マイコンの制御周期が10msとすれば、11msであるように。(11ms-10ms=1msの1msは制御周期、及びアクチュエータが動作する時間よりより十分小さく、誤出力をださない)また、時間設定は、設定理由が明確に明確になっている。		3	
			6	ウォッチドッグタイマーに下限が設定されている。 下限を7msとすると下限より前の6ms後にウォッチドッグを再設定すると異常となる。		3	
			ウォッチドッグタイマーが不正にクリアされるようなマイコンの暴走モードに対し対策を考慮している。例えば、マイコンが冗長化されていれば、相手側のマイコンがウォッチドッグ部を制御する、ノンマスク割り込みを使用しているなど。		3		
2	マイコン間の相互監視	2重化、冗長化されたマイコン間での時間監視	1	2つのマイコンプログラム間で時間監視ポイントを決め、そのポイントごとに相互チェックを行い、相互に正しく動いていることを確認する。 チェックポイントで相互連絡できなくなれば異常になる。		3	
			2	チェックポイントがずれない仕組みを持っている。		3	
3	その他		1	その他の方法で、マイコンのクロックの正確さ、動作状態を監視している。		3	
				判定	合計(027)点満点		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

8 通信バス及び大容量記憶

通信バスで、安全情報を1つでも送っている場合、下記チェックをしてください。
 安全情報とは、その情報が正しく伝わらないと機械、設備、装置が危険な状態になる信号類です。(例えば、非常停止信号を通信バスで送っている場合は、安全情報を通信バスしていることに該当します。)
 短い距離(30cm程度)で、プリント基板上で安全情報を通信バスする場合は、バスラインチェックに該当します。内部での通信バスチェックは設問2のチェックを行ってください。

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1	通信バスにより安全信号を送受信している。	安全信号の通信バスによる送受信	安全信号を通信バスで送受信している。				
			イ すでに安全通信バスとして認証を得られたものを利用している。		3		
			ロ 独自の通信バス方式である。		2		
			ハ 一般的な国際規格になっている通信バス方式(USB、イーサネット、等)を採用している。安全に関する認証は取得していない。		2		
2	通信データの故障の検出(バスラインでの通信、大容量メモリとのやり取りも含む)	外部機器とのデータ交換	1 テストパターンを定期的に挿入し、入力/出力値の比較を行い、故障を検出する。テストパターンは、予め決めた値を入れる。外部の接続機器、その他に影響を与えないこと。		3		
			2 入出力データを2重化して、監視することによって、そのデータを送信、受信する入出力回路の故障を検出する。この方式は、ハードウェアのランダム故障と決定論的故障に有効。		3		
			3 多チャンネル並列出力の中に制御に依存しない出力を行い、この出力結果を比較することで、故障を検出する。		3		
			4 出力値を別の入力でモニターし、決められた値であるか比較することで故障を検出する。外部の装置や環境によってデータが影響を受けたことをしるのによい。		3		
			5 入力値の故障を検出するため、入力回路を冗長化(1oo2、2oo2、2oo3など)し、比較している。		3		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文書 の番号)	得点	
2	通信データの故障の検出(バスラインでの通信、大容量メモリとのやり取りも含む)	内部のデータ交換(パソコンと安全関連機器へプログラムやパラメータを書き込むときも含む;この時はケーブル長は1m以内、これ以上長い時は、ケーブルのノイズテストが必要)	1	8ビット単位の通信の場合、パリティビットを使用している。データの50%の間違い検出率がある。		3		
			2	バスラインなどに2bit以上のbitを追加し、ハミングコード技法でbitの故障検出を行う。		3		
			3	ハードウェアの2重化による故障の検出。2つのバスラインで通信を行い、一方のバスラインは故障検出のために使用する。		3		
			4	テストパターンを定期的挿入し、入力/出力値の比較を行い、故障を検出する。テストパターンは、予め決めた値を入れる。外部の接続機器、その他に影響を与えないこと。		3		
			5	送信されたデータを送信側に送り返し、データが正しいことを確認する方法。これは、データを何度かに分けて送ったり、何回かデータ送受信を繰り返す時に有効な技法。		3		
			6	通信情報をブロックに分け、各ブロックごとにCRCやチェックサムを生産して付ける。受信側は、データ比較とともにCRCやチェックサムを再計算して、比較する。		3		
3	通信時間の監視(バスラインでの通信、大容量メモリとのやり取りも含む)	通信時間を監視しているか	1	一定時間で返信が無いと送信側または通信バス監視部で受信側が故障、又は障害が発生したとし、安全状態に移行する。		3		
			2	一定時間で通信バスが完了しない時、受信側又は通信バス監視部は、送信部が故障、又は障害が発生したとし、安全状態に移行する。		3		
			3	送信権を持つ通信バス局より一定時間後に通信バスが開始されない時、受信権を持つ局、または通信バス監視部は、その局が故障または、障害が発生したとし、安全状態に移行する。		3		
4	誤情報の送信、受信	情報伝達の誤情報送信を考慮しているか?	1	通信情報は、発信元が相手に正しく届いたことを相手から再送信させて確認している。この時、送信データと受信データの形式を変えている。(データの反転、ブロック数、チェックサム方式など)		3		
			2	1つのデバイスに2局持たせ、同じ情報を形式を変えて送り、受信デバイス側で受信情報を照合し、正しい情報が送られてきたことを確認している。(2-2に準拠)		3		
			3	オール0、オール1の情報が続いた時、CRCもパリティも変化しない。受信側は通信情報の正常/異常の判定ができなくなる。判定できる方策を使用している。		3		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文書 の番号)	得点		
5	通信情報の信頼性が確保されているか(妥当性の確認)	外乱(電氣的ノイズ)による影響の考慮(メモリの内容に影響を与える要因の1つ)	外乱による誤動作のない通信方法を採用している。誤動作のないことは、自らEMC,EMS等の信頼性試験で妥当性確認している。		3				
			イ	通信ケーブルを接続して、通信をしながら、電源供給ラインに外乱ノイズ(EMC,EMS等)を入れた試験を行っている。		3			
				① 試験仕様書があり、試験方法、試験機器が決められている。		3			
			② パースト試験、伝導性イミュニティ、放射電磁界イミュニティ、静電気試験、サージ試験、電源変動試験を実施		3				
			1	通信ケーブルを接続して、通信をしながら、I/Oの信号を変化させながら、I/Oの電源ライン、信号線に外乱ノイズ(EMC,EMS等)を入れた試験を行っている。		3			
				ロ	① 試験仕様書があり、試験方法、試験機器が決められている。		3		
			② パースト試験、伝導性イミュニティ、放射電磁界イミュニティ、静電気試験、電源変動試験を実施			3			
			ハ	温度(高温、低温、温度変化サイクル)や湿度試験によって、これらの影響がないことを確認している。		3			
				① 試験仕様書があり、試験方法、試験機器が決められている。		3			
			2	EMC,EMS等の妥当性確認をしていない理由				Max:-3点;設問1のチェック結果によりマイナス点が配分される。	
				イ	外乱の影響試験はやっていないが、今までトラブルがないので大丈夫と思っている。		-1		
				ロ	市販のセットを組み込んだもので信頼性試験は行っていない。供給側のメーカーが信頼性を確保していると思っている。		-1		
				ハ	通信媒体が異なるが、ハードもソフトも実績のある通信方法であり、信頼性試験の必要はないと思っている。		-1		
				ニ	今まで使用してきた通信バス方式で試験も行われ、信頼性が確保されている。このシステムでは、過去と同じであり、信頼性試験は必要ないと思っている。		-1		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問		チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
5	通信情報の信頼性が確保されているか(妥当性の確認)	外乱(電氣的ノイズ)による影響の考慮(メモリの内容に影響を与える要因の1つ)	ホ	通信情報はリトライを行うようにしているので、データの信頼性は十分であると思っている。		-1		
			ヘ	このシステムは、金属箱(制御盤)に入り、オフィスや病院で使用される仕様である。外乱のある環境では使用しない。そのため、外乱の考慮は必要ないと思っている。		-1		
			ト	その他		-1		
					判定	合計(083)点満点		

9 センサーの障害と故障

センサー信号の出力、又はセンサー信号の入力部が1または0のままになる。または、センサーの働きのとは無関係に0,1の間を振れたり、中途半端な出力状態、入力状態になっても安全状態に移行できる。

No	項目	主旨	設問		チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1	センサーの仕様と種類	安全機能部に使用しているセンサーの安全レベル 安全機能部:リスク低減のための安全機能を有している部分。 逆に言えば、その機能部が故障すると危険な状態になる部分。	1	安全機能に使用しているセンサーはすべて安全仕様である。		3		
			2	センサーの安全仕様は、第3者機関(TUV、BGマークなど)がついており、認証されている		3		
			3	又は、メーカーの自己宣言の製品である。自己宣言の書類がある。		2		
			3	そのセンサーの安全仕様レベルは、以下のどれですか？			複数個のセンサーの場合は原則最悪評価とする	
			イ	カテゴリ4、又はSIL3		3		
			ロ	カテゴリ3、またはSIL2		2		
			ハ	レベル仕様が明示されていない		1		
ニ	第3者認証はないがメーカーの自己宣言		1					

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
1	センサーの仕様と種類	安全機能部に使用しているセンサーの安全レベル 安全機能部:リスク低減のための安全機能を有している部分。 逆に言えば、その機能部が故障すると危険な状態になる部分。	安全機能に使用しているセンサーの種類 イ～ネ項のチェック欄にセンサー用途の各記号を記入してください。 センサーの用途 A:人、B:障害物、C:人又は障害物、D:速度、E:加速度、F:回転角、G:距離、H:移動量、I:可動領域又は可動不可領域、J:境界、K:段差、L:凸凹、M:荷重、N:体重、O:体温、P:気温、Q:高温、R:火事、S:空間の明暗、T:ガス、U:塵埃、V:音、W:騒音、X:物体(人)識別、Y:色、Z:その他 *得点には無関係					
			イ	接触検知スイッチ(バンパースイッチ)		-		-
			ロ	マットスイッチ		-		-
			ハ	タッチセンサー		-		-
			ニ	ロードセル		-		-
			ホ	ストレインゲージ		-		-
			ヘ	加速度センサー		-		-
			ト	ライトカーテン		-		-
			チ	人感センサー		-		-
			リ	距離センサー(超音波)		-		-
			ヌ	距離センサー(レーザ、赤外線)		-		-
			ル	距離センサー(電波)		-		-
			ヲ	磁気センサー		-		-
			ワ	温度センサー		-		-
			カ	火災検知センサー		-		-
			ヨ	ロータリエンコーダ		-		-
			タ	煙センサー		-		-
			レ	ポテンシオメータ		-		-
			ソ	タコジェネレータ		-		-
			ツ	カメラ		-		-
			ネ	その他		-		-
			5	センサーは、安全仕様を守って使用している。	3			
			安全機能に使用したセンサーが安全仕様の場合					
			6	センサー出力は、2本とも使用している。	3			
			イ	センサーの2つ出力を直列にし、入力部は1チャンネルとしている	2			
			ロ	センサー出力の2本を別々の入力チャンネルに接続している。	3			
2	センサーの使い方	安全機能用のセンサーの2重化について (1つの安全機能に使用したセンサーの数について:冗長化)	1	同じセンサーを2個使用している (共通原因で故障する可能性がある。Ex./サイズ、部品のロット不良等)		2		
			2	同じ機能のセンサーをメーカーを別々にして使用している。 (センサーの共通原因故障での故障はない。ただし、入力後の回路、ソフトが同じになるので、信号入力後の処理系の共通原因故障が考えられる。)		2		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点		
2	センサーの使い方	安全機能用のセンサーの2重化について(1つの安全機能に使用したセンサーの数について:冗長化)	3	目的機能のため異なった方式のセンサーを2個使用している。(距離センサーとして赤外線と超音波等→共通原因故障はない)		3			
			4	安全機能を制御するセンサーの2重化、冗長化の割合					
				イ	安全機能部分のセンサーの100%が安全用センサー		3		
				ロ	安全機能を制御するセンサーの約50%以上が安全用センサー		2		
				ハ	安全機能部分を制御するセンサーの約50%以下が安全用センサー		1		
ニ	安全機能を制御するセンサーに安全用センサーを使用していない		0						
3	センサーの故障モニタ	センサーの故障の監視	使用しているセンサーの故障が検知可能						
			1	イ	入力信号をオンラインで監視している。		3		
				ロ	アナログ信号の監視をしている。		3		
				ハ	テストパターンを発生させている。診断期間に行っている。		3		
				ニ	センサーを冗長化し、入力と比較している。		3		
				ホ	センサーの出力、あるいは入力値を定期的に参照センサ値と比較する。		2		
				ヘ	ポジティブ機構のスイッチを使用している。		3		
			2	具体的方法(故障検出)					
				イ	内部制御回路のマイコンでセンサー活性の信号を常時チェックしている		3		
				ロ	短いテスト信号を入れてセンサーの動作を確認している		3		
				ハ	始業時に動作確認をし、正常でないと通常動作にならないようにしている。		3		
				ニ	取扱説明書、又は、教育訓練時、作業者に決められた間隔で動作確認するように指示している		3		
				ホ	何もしていない。		0		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問		チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
3	センサーの故障モニタ	故障時の対応	1	イ	故障発見時、故障ログを取っている。		3	
				ロ	エラーコードをセンサ毎に付け、どのセンサーが壊れたかわかる。		3	
				ハ	故障時刻も記録している		3	
				ニ	故障記録は、複数個記録/記憶でき、後からでも追跡できる。		3	
				ホ	エラーコードを見れば、故障発見したソフトウェアが特定できる。		3	
				ト	エラーコードを取り扱説明説で見れば、故障原因と対策がわかる。		3	
					判定		合計(077)点満点	

10 最終要素

2-1の出力回路部と重複する部分は省く。出力値は、正しい値だけが出力される。途中で情報が間違った場合は、出力値はシステムが安全状態に移行できるように安全機能によって制御される。

No	項目	主旨	設問		チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1	アクチュエータの監視	動作の診断	1	出力値のオンライン監視。		1		
			2	安全リレー接点の監視。		3		
			3	テストパターンを発生させ、それを読み取り、診断を行っている。		3		
			4	冗長化した回路で出力を監視している。		3		
			5	動作しているアクチュエータの動作時を示す信号を2つ以上の別々の入力回路に入れ、クロスチェックを行っている。		3		
2	論理回路	論理動作のチェック	1	結果を比較することで論理回路を診断する。論理回路の入力部に値を入れ、その出力値と期待値を比較することで論理回路の動作をチェックする。		3		
			2	論理回路を2重化し、同入力時の結果を相互比較して同じことをチェックする。		3		
3	部品チェック	受動部品のチェック	1	回路内使用の部品の故障がわかる。診断プログラムや実動作中の演算結果の比較、チェックによって部品故障がわかる。		3		
			2	部品の故障による装置、システムの挙動はFMEAですべて把握している。危険な挙動は対策をしている。		3		
		能動部品のチェック	1	回路内使用の部品の故障がわかる。診断プログラムや実動作中の演算結果の比較、チェックによって部品故障がわかる。		3		
			2	部品の故障による装置、システムの挙動はFMEAですべて把握している。危険な挙動は対策をしている。		3		
					判定		合計(031)点満点	

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

判定結果のまとめ

	A判:B判:	判定値	A境界	B境界値
1. 電気機械式装置(原則:電流が流れない状態になった時、安全状態に移行する。)	0.8 0.4		52	26
2-1 デジタルI/O、アナログI/O	0.8 0.4		34.4	17
2-2 電源	0.8 0.4		X	X
2-3 電源電圧監視回路	0.8 0.4		93.6	47
3 バス	0.8 0.4		48	24
4 CPU	0.8 0.4		16.8	8.4
5, 6 不変メモリ、可変メモリ	0.8 0.4		67.2	34
7 クロック	0.8 0.4		24	12
8 通信バス及び大容量記憶	0.8 0.4		21.6	11
9 センサーの障害と故障	0.8 0.4		66.4	33
10 最終要素	0.8 0.4		61.6	31
			24.8	12

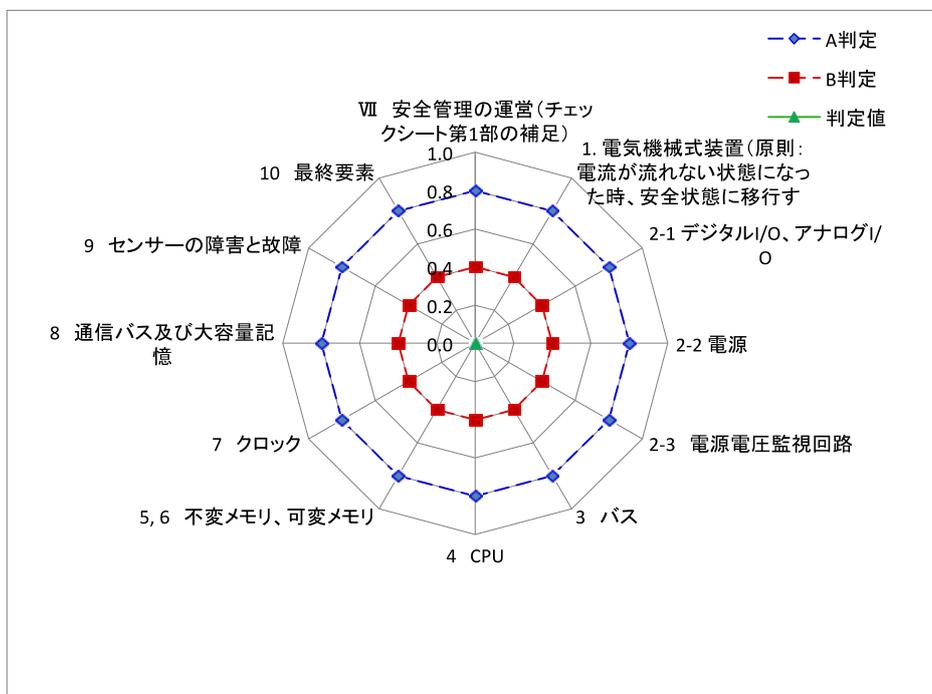


図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

実現段階におけるコンセプト検証自己チェックシート第3部(SW編)第2版

ロボットの名称		製作者			
型式		シート記入者			
		シート記入日			

【回答方法】

本チェックシートは、IEC61508におけるソフトウェアに関する安全要件として、SIL2及びSIL3でHR(強く推奨)とされる項目を対象としたものです。
 最初に目標とする安全性能を選択するため、どちらのSILを対象とするかチェックを入れてください。選択したSILに応じて配点が変わり、その列のみチェックは有効となります。
 各設問毎に、主観にてA、B、C、Nをチェック欄に記入して下さい。得点は、基本的にAは配点満点、Bは配点の1/2、Cはゼロです。尚、備考欄への記入指定の項目は、記載がないと得点加算がありません。
 補足説明や特記事項がある場合は、適時備考欄を拡張して記入して下さい。
 別途、補足資料や該当文書を添付される場合は、その資料(文書)に番号付けて備考欄に番号のみ記入して下さい。

-  : 選択SILにより同No.項、又は他No.項目の点数に影響するチェック。
-  : 選択SILで要求される項目 (HR項目を意味し、該当しないSILでは入力不要)
-  : 選択SILで要求される言語 (該当言語にチェックA又はBを入力)

自己チェック

- A : 取り組み完了(設問をほぼ満足している)
- B : 取り組み中(設問を一部満足している)
- C : 未取り組み(設問はほとんど実現されていない)
- N : 関係なし
- ✓ : チェック

A.1. ソフトウェア安全要求仕様書									
No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
				SIL2	SIL3				
1	ソフトウェアのライフサイクル適応について	ソフトウェアの開発/設計工程が決められている。(例えば、IEC61508-3、7.1.2.4項のVモデル) その工程の中でソフトウェア仕様書が作成されている。	1	ソフトウェアの設計及び開発工程が規定され、文書化されている。					
			2	ソフトウェアの設計及び開発工程における、入力情報、出力情報が規定され、それらは文書化されている。					
			3	工程ごとに入力情報、出力情報と文書化が決められている。ソフトウェア仕様書は、工程に定められた入力情報によって作成されている。					
			4	ソフトウェア仕様書は、手順どおり作成され、定められた形式になっている。					
			5	このソフトウェア仕様書は、定められた関係者を入れ、デザインレビューが行われ、責任者が承認している。					
			6	ソフトウェアライフサイクルで文書化される文書には、すべて作成方法の規定、変更方法の規定がある。					

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版)

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	ソフトウェア安全要求事項仕様書の記載内容	設計の目標、設計方法は仕様書に記載されている。 (仕様書記載内容が後のソフトウェア設計の成否を左右する)	1	仕様書の要件管理 安全要求事項がもれなくソフトウェア仕様書に反映されているか？ (SIL3では、安全要求事項から安全機能を行うソフトウェアへのトレーサビリティ(要件から個別安全機能へ、また、個別安全機能から安全要件への相互行き来)が必要)				
				仕様書に記載された内容は、「安全設計方針」(第1部 I-2項)に合致しているか。				
				① 安全設計方針を分析し、ハード要求事項、ソフトウェア要求事項に分類し、ソフトウェア仕様書に関連付けを行っている				
				② 安全機能の要件をリストアップし、その要件ごとにソフトウェア仕様書に関連付けている。				
				③ 要件のまとめには、要件管理ソフトを使用し、ソフトウェア仕様書との関連付けを要件管理ソフトで行っている。				
				④ 要件のまとめには、専門の要件管理ソフトを使用せず、エクセルを使用し、要求事項を網羅し、それに関連するソフトウェア仕様書の管理番号を関連付けて、管理している。				
				⑤ 要件のまとめには、専門の要件管理ソフトを使用し、要求事項を網羅し、それに関連するソフトウェア仕様書の関連付けを定義し、管理している。				
				⑥ ソフトウェアの設計基準は、決められているか？(コーディングルール、モジュールのコーディング量、設計者の技量レベル)				A.2で再質問
			ロ	ソフトウェアによって処理される安全要求事項は、適応するシステム、又は装置に対し、それらに関連する専門家が使用する方法や表記によってその実現方法や適応方法、仕様が明確になっているか。				

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	ソフトウェア 安全要求 事項仕様 書の記載 内容	設計の目標、設計 方法は仕様書に 記載されている。 (仕様書記載内容 が後のソフトウェ ア設計の成否を左 右する)	1	ソフトウェアによって処理される安全 要求事項の正しさ				
				ハ ① 適応するシステム、又は装置に 対し、それらに関連する専門家 が使用する方や表記によっ てその実現方法や適応方法、 仕様が記述されるが、それは、 正しいか。				
				仕様のあいまいさをなくす方法が取 られている。				
				二 ① 仕様書の表記は、仕様書内で 仕様の矛盾(一方の仕様書で は、OKで他の仕様書ではNGに なっているような。)を避ける工 夫(2重表現、表現の分散などし ない)をしているか。				
				② ある仕様が何らかの原因で働 かない状況になった時、その処 置について明確にしている。				
				③ 仕様書の表記は、数学的(公 式や制御関数など)矛盾を避け る工夫(2重表現、表現の分散 などしない)をしているか。				
				ホ 安全機能の要件は、わかりやすくま とめられているか？例えば、要件ご とにグループ化されているか？				
				ヘ 要件の変更、追加のルールは明確 にされ、追加、変更は、要件管理と ソフトウェア仕様書と連動している か？				
				ト 安全設計要件の仕様書への関連付 けは、責任者の承認が行われてい る。追加、変更も同様に責任者の承 認が行われている。				

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	ソフトウェア 安全要求 事項仕様 書の記載 内容	仕様書内容がブ レークダウンされ ている	ソフトウェア仕様書の内容					
			イ 仕様記述の誤解を防ぎ、わかりやす くするため、ソフトウェアの仕様者 には、この仕様を対象とする安全関 連系での用語、動作などの定義が されている。					
			ロ 仕様書には、ソフトウェアのアプリ ケーションの複雑さを避けるため、 仕様書作成の規定がある。					
			ハ 機能ごとに仕様がまとめられ、機能 の構成単位ごとに仕様分けられて いる。(ここでいう構成単位は、ある 機能を実行するために必要となる 単一の機能を持ったソフトウェア要 素である。機能仕様が単一機能を 記述していれば、構成単位はその 機能仕様に一致する。)					
			ニ 機能の構成単位ごとに仕様書があ る。					
			ホ 安全要求事項によって要求される 安全度(SIL)に対し、安全機能を実 現するソフトウェアは、適切な方策、 構成を持っているか？例えば、安全 要求事項がSIL3を要求していれば、 個々の安全機能は、すべてSIL3 の要求に従って設計方策、検証、妥 当性確認が計画されねばならない。					
			ヘ 仕様書で情報(その機能体に入力 する情報、出力される情報、機能体 内で処理される情報)の流れを明確 に記述している。					
			ト 各機能仕様ごとに関連する別の仕 様、構成単位について実行順序、実 行時間が明確になっている。これら は、関係する各仕様書に明記され ている。					
			チ 各機能ごとにその機能の実行に制 約がある場合は、その条件が関連 の仕様書に明記されている。					
			リ 各機能、各構成単位に必要な情報 の形式が明確にされている。					
ヌ 各機能、各構成単位に必要な情報 の形式が明確にされている。構成 単位は、要求される安全機能の中 の位置づけ、関連付けが明確に なっているか？								

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問		チェック		配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
					SIL2	SIL3				
1	ソフトウェア安全要求事項仕様書の記載内容	ソフトウェアの仕様の検証と妥当性確認	3	イ	ソフトウェア仕様ごとにの入力情報、出力情報の下限、上限が明記されている。					
				ロ	ソフトウェアで実現する安全機能の検証、妥当性確認方法が明確化されている。(測定装置、確認ツール、安全機能をインストールしたシステムやサブシステムの振る舞いが明確であり、客観的に評価、判定できる)					
				ハ	この安全関連系のシステム、又は装置がカバーする範囲に適した妥当性確認であるか。					
	安全機能と非安全機能との分離			4		安全機能を処理するソフトウェアと非安全機能を処理するソフトウェアは、物理的(ハードウェア構成上)に分離されている。仕様書に明確に記述してある。				
						安全機能と非安全機能を処理するマイコンは同一である。				
					イ	安全機能を実行するソフトウェアと非安全機能を実行するソフトウェアは、独立しており、非安全機能を処理するソフトウェアや関連ハードウェアが故障しても安全機能に影響を与えないことが客観的に証明できる。				
					ロ	安全機能のソフトウェアが使用するメモリ領域は、非安全機能のソフトウェアが使用する領域と物理的に異なったメモリ素子を使用し、アドレス空間も重複がない仕様である。				
2	ソフトウェア仕様書(モジュール仕様書)	仕様内容について(曖昧な記述になっていないか。動作はすべて定義されているか、異常検出に漏れはないか、異常の処理は適切か、システム特有の安全機能は定義されているかなど。)			ソフトウェアの仕様書設計、開発工程が規定されている。					
				1	社内ルール(規定)に従った用紙、形式を使用している。					
				2	ソフトウェア作成工程はVモデルに従っている。					
				3	ソフトウェア作成工程ごとに作成する文書が決まっている。					
				4	文書には、保存、変更ルール規定されている。					
	5	文書の最新版管理のため、管理表又はそれに類するものがあり、最新版は常にわかるようになっている。								
	モジュール仕様の図式化				1	フローチャートは社内ルールに従う。				
2					一般に良く使われるPADを使用する。					
						判定	満点			

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

A.2. ソフトウェア安全要求仕様書 ソフトウェアの構造設計								
No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	故障検出	故障検出/診断	故障検出はソフトウェアの最小単位、又は、単一機能単位で行っている。					
			1 故障検出のため、自己診断手法を使用している。					
			2 故障検出のため、冗長化方法を使用している。 (冗長化はハードウェア故障の検出のためである)					
			3 故障検出のため、多様化(ダイバーシティ)方法を使用している。 (多様化はソフトウェアのエラー検出のためである)					
			サブシステムが組み合わさった複雑なシステムの場合、故障検出は、最小のサブシステム単位(安全機能の単一機能レベル)で行っている。					
			発生した故障は文書化され、同じ故障、類似故障の時、この情報が活用できるシステムがある。					
2	低機能性能維持方法	エラーログソフトは、故障が起きてもロギングを続ける。	安全機能の故障が検出された時、事前の優先順位に従い、下位の動作は、運転を続ける。					
3	ソフトウェアの規定	ソフトウェアの品質を高めるため、ソフトウェア作成ルールがある。	1 ソフトウェアモジュールの大きさが決まっている。(例えば、コーディング400行以内/モジュール、またはA4で2から4枚程度など)					
			2 ソフトウェアモジュールの複雑度が決まっている。分岐プログラムの数、ジャンプするプログラム数、間接データの使用方法など					
		情報の隠蔽/カプセル化しているか	1 偶然、または、誤って修正されることがないように、オブジェクト内部のデータを隠蔽(データ隠蔽)、オブジェクトの振る舞いを隠蔽(オブジェクトの実際の型を隠蔽)している。					
		モジュールへの出入り	1 ソフトウェアモジュール/関数は、必ず入口が1つ、出口が1つになっている。					

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点	
				SIL2	SIL3				
3	ソフトウェア の規定	インターフェイス仕 様が定義されてい る。	1	ソフトウェアモジュールは、その機能を すべて定義しなければならない。					
				イ	モジュールの全体説明がある。関連 するモジュールの状態遷移図、構成 関連全体図など。				
				ロ	関連する個々のモジュールの説明 がある。				
				ハ	入力データが定義されている。どこ から情報が来るのか、データ長、 データの形式、入力タイミング、入力 条件など				
				ニ	出力データが定義されている。どこ へデータを出力するのか、データ 長、データ形式、出力タイミング、出 力条件など。				
				ホ	入力データごとの説明と処理方法 が記載されている。				
				ヘ	入力データの異常検出がされてい る。 (あり得ない組み合わせの検出、 ビット落ち、あり得ない数値、急激な 変化、バリディ異常、通信異常、設 計装置での固有な異常検出など)				
				ト	達成されるべき安全機能に必要な モジュールの組み合わせが明確に 示され、文書化されている。				
				チ	異常処理が決められている。 異常のランク付け、異常コード付 け、処理プログラムなど。				
				リ	検出した異常は、すべて処理方法 が定義されている。				
				ヌ	モジュールで実行する事象の処理 時間が定義されている。(通信制御 モジュールであれば、通信時間： データブロック単位の送信時間、受 信待ち時間、データ受信時間、通信 中断検出時間、リトライ時間など)				
				ル	仕様書の変更履歴がわかるように なっている。いつ、誰が、何のため に、どんな理由で、どこを追記、変 更したかがわかるようになっている。				
				ヲ	その他、安全機能実現に必要な仕 様が、明確になっており、文書化さ れている。				

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
				SIL2	SIL3				
4	実績あるソフトウェアを流用	ソフトウェアの信頼性を高めるため、実績あるソフトウェアを流用している	1	流用したソフトウェア要素が使用実績があり「proven-in-use」、正しく動作することを証明する証拠がある。 システムに組み込まれていても動作を伴わないことがあるので、その動作の正しさを証明するのに十分な注意が必要である。(エラー検出プログラム:エラーが出なければ動作しない)					
			2	イ	ソフトウェア仕様が不変。				
				ロ	別のシステムでも使用されている。(10以上の異なったシステムで使用されている)				
				ハ	ソフトウェアの使用は1年以上になる。(10万回/時間動作し、1年以上は動作し続けた実績)				
				ニ	使用実績の経歴の全ては、ソフトウェア要素の機能が正しい動作要求によって動作していなければならない。この実績が多ければ多いほど、流用しようとしているソフトウェアの信頼性が向上する。				
			2	流用の経歴の明確化					
				イ	使用実績のあるシステムとそこで使用しているソフトウェア要素とそれが組み込まれているハードウェアの正確なバージョン番号。				
				ロ	使用実績のあるシステムのユーザとそこで使用されている時間				
				ハ	システムでの動作時間				
				ニ	いくつかのユーザーでのシステムで応用されている実例の説明				
ホ	故障が発見されて、それが認識され、記録(記憶)され、故障が取り除かれるまでの手順								
5	図表を使用した方法(基本的には図表使用方法は、系統的に考えるための道具である)	論理的思考:管理しやすくするため、大項目から細項目に分ける方法	1	システム要求する環境を含んだシステムのトータルな解析とその記述					
			2	システムの要求する情報や機能の分析					
			3	解析に必要な項目を書いたチェックリスト					
			4	誰でもわかる見出し的項目:簡単で、直観的で、実践的な表現					
			5	強調的に書かれた意図するシステムの開発に関するモデル図と全般的に使用するCASEツール					

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
6	半公式手 法	よく知られた方法 を使用して仕様を 記述する。	1	論理/機能ブロックダイアグラムによる記 述がある				
			2	シーケンス回路による記述がある				
			3	機械の限られた状態記述/状態遷移図 の使用して使用条件を明確にしている。				
			4	時間ベトリネットで遷移を数学的に明確 にしている。				
			5	真値表を使用している				
7	コンピュ ータ支援ツ ール	CAD	1	コンピュータ支援ツールを使用し、仕様 書作成、設計を行い、精度の高い作業を 行っている。				
	動作状態 の定義	サイクリック(ス キャン)方法	1	最大サイクル(スキャン)時間を明確にし ている。(最大とは最悪と考えても良い)				
			イ	サイクリック(スキャン)時間は、時計 によって管理されている。				
		ロ	ソフトウェアの機能は、内部時計に 関連付けられ、スケジュールが決め られている。					
	タイムトリガードシ ステム	1	内部の時計によってスケジュール化され た機能が起動される方式。					
	イベントドリブン方 式	1	ソフトウェア機能の起動は、ある事象の 発生によって予測できない時間で行われ る。応答の最大値を保障することが必要 である。					
8	静的なメモ リ割り付け		1	静的な状態でメモリエリアが他のプログ ラムと重複していないことを確実にする。 仕様で範囲を明確にする。他のプログラ ムと同じ変数名を使用しないなど。ソフト ウェア検証にても確認が必要。				
					判 定	満 点		

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

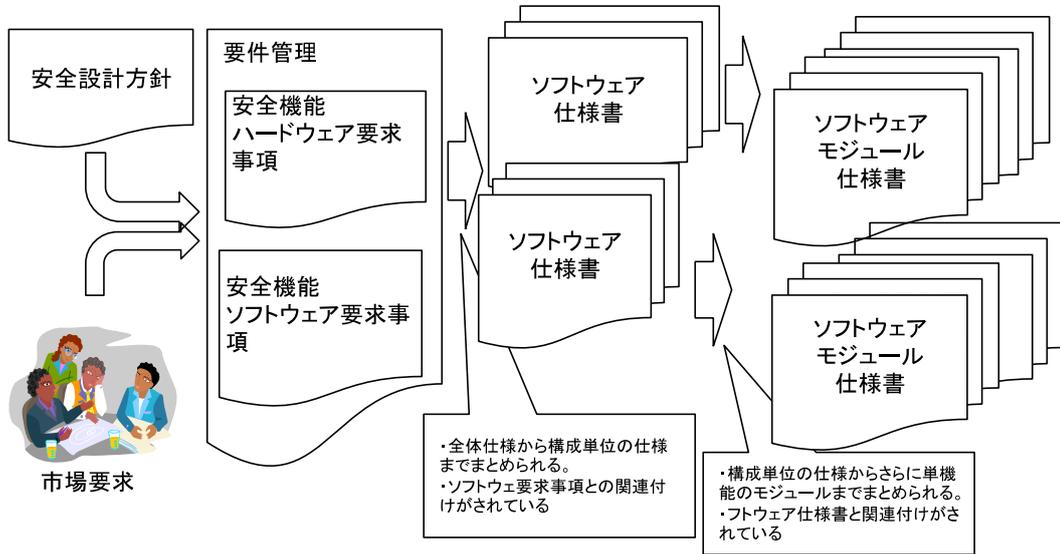


図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

A.3. ソフトウェアの設計と開発 支援ツールとプログラミング言語								
No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	開発言語	安全機能に適した 開発言語の選択	1	プログラムは構造化言語である。又は、 構造化記述のできる言語である。				
			2	開発する安全機能アプリケーションに適 した言語である。 開発/設計に対し、不要な機能のないプ ログラム言語のサブセットである。				
		1	ADA					
		2	ADA with subset					
		3	Java					
		4	Java with subset (including either no garbage collection or garbage collection which will not cause the application code to stop for a significant period of time). See Annex G for guidance on use of object oriented facilities.					
		5	PASCAL (see Note 1)					
		6	PASCAL with subset					
		7	FORTRAN 77					
		8	FORTRAN 77 with subset					
		9	C	-				
		10	C with subset and coding standard, and use of static analysis tools					
		11	C++ (see Annex G for guidance on use of object oriented facilities)	-				
		12	C++ with subset and coding standard, and use of static analysis tools (see Annex G for guidance on use of object oriented facilities)					
		13	Assembler		-			
		14	Assembler with subset and coding standard					
15	Ladder diagrams							
16	Ladder diagram with defined subset of language							

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点	
				SIL2	SIL3				
2	コンパイラ (トランス レータ)	コンパイラ(トラン スレータ)	1	認証されたツールやコンパイラを使用している。 例えば、Adaやパスカルは国際規格になっている。この規格に準拠しているツールであることを国や認証機関で認証している。					
			2	使用するコンパイラはよく普及している。					
			3	コンパイラのバグは、公開され、それを入手してプログラミングの時、バグに影響されないようにプログラミングの規定をしている。					
			4	使用するコンパイラはエラー検出機能は強力であるか。					
			5	コンパイラのバージョンは固定して使用している。(新しいバージョンが出ても採用していない。コンパイル出力に差異が発生することを避ける。)					
			6	コンパイラのバージョンは、仕様書、又はプログラムのコメント欄に記載し、文書化している。					
			7	複数安全機能のプログラム設計及び開発に際し、コンパイラのバージョンは、統一している。					
							判定		満点

A.4. ソフトウェアの設計/開発 ソフトウェアの詳細設計 ソフトウェアの構造設計									
No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点	
				SIL2	SIL3				
1	プログラム 構成方法	構造化方式	1	プログラム構成は構造化方式である。					
			2	プログラム構成はわかりやすく説明している。			A2.6項参照		
2	コンピュ ータ支援設計 ツール		1	コンピュータ支援(CAD)ツールをハードウェア、ソフトウェア設計に使用している。これらのツールは広く使用され、その出力の妥当性確認がすでに行われている。					
			2	支援ツールは、安全度レベル(SIL)に合わせて選択されている。設計/開発に使用する他の支援ツールとの関連付けされ、情報移植、取り出し等で間違いが行いことが確認されている。					
3	防御手段 のプログラ ミング	変数の誤使用の 防止	1	プログラム内で使用する変数は、その有効範囲をチェックしてからプログラムで使用している。					
			2	変数は、最もふさわしい場所(プログラムの実行工程)でチェックされている。					
			3	実行変数は、その変数が実行される時に、形式、次元、範囲等がチェックされている。					
		1	ソフトウェアの間違 いの予防方法	イ	不用意なミスを避ける方策を取っている。 読み出し専用変数と読み書きできる変数は、領域を分けて格納している。				
				ロ	関数の変数は、すべて読み出し専用で使用している。				
				ハ	文字常数は読み出し専用である。				
	2	ソフトウェアの間違 いの予防方法	イ	故障に強いソフトの方策 入力変数と中間変数は、その有用性が最もふさわしいところでチェックされている。					
			ロ	出力された変数の影響は、その出力に関連する状態の変化を直接観察することによってチェックする					
			ハ	ソフトウェアによって必要とされるハードウェアの構成、ソフトウェアの構成をチェックしている。(保守等で必要なハードウェアが取り除かれることはないか、ハードウェア/ソフトウェアのバージョンの組み合わせは良いか)					

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点		
				SIL2	SIL3					
4	モジュール構成の確認	モジュールのルール		仕様書、ソフトウェアの機能単位はモジュールごとになっている。						
			1	イ	モジュールに対し、「ローカル」関数のサイズと複雑さ基準の仕様を決めている。					
				ロ	モジュールの全体構成に対し、「グローバル」関数のサイズと複雑さ基準の仕様を決めている。					
				ハ	変数の数字制限/サブプログラム変数の固定数値化					
		2		情報の隠蔽/カプセル化 例えば、特定の言語仕様を使用促進、全インターフェース仕様定義						
5	プログラム、変数名称	誤解しない名称	1		曖昧な又は間違えやすい記号を使用していない。(例えば、IO,10の様な)					
				イ	数値にはシンボリック名をつける					
					ソースコードでの実施事項					
			2	イ	何をするのかばかりでなく、なぜ行うのか、その意味は、などを説明する。					
				ロ	利害関係を記述する。関連するプログラムへの波及効果や、他から受ける影響。					
			ハ	副効果を記述する。						
			ニ	どこに使用されるのか						
		1	管理情報と外部仕様			ソースコードに記載する項目				
					イ	責任者、責任部署、などの記載				
					ロ	仕様概要説明				
	ハ			入力情報と出力情報						
			ニ	管理履歴が記入できるようにしている。						

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点	
				SIL2	SIL3				
6	プログラミング/コーディングのルール	コーディングルール	1	コーディングでは、今までのコーディング慣行をルール化し、規定している。例えば、今までの不具合、ケアレスミスなどの事例からルール化をしている。					
				イ	ダイナミックオブジェクトを使用しない				
				ロ	ダイナミック変数を使用しない				
				ハ	ダイナミック変数が入れ込まれる場合、そのメモリアreaは、変数が入られる前、後でチェックをし、他に影響がないことを確認する。				
				ニ	割り込み制御の制限 割り込み処理は、詳細に仕様書に記述している。 重要な処理中は、割り込み禁止。最長割り込み待ち、処理時間の管理。				
				ホ	ポインタ使用の制限 ポインタでデータ交換や伝達を行う場合、タスク間で直接アドレス指定が行われない。予期しないエリアをアクセスする可能性がある。				
				ヘ	プログラムループの制限 ループによって実行時間が変動する。永久ループの恐れがある。				
				ト	より上位の言語レベルのプログラムの制御フローも構造化されていること				
				チ	データ形式変換が自動でないこと。 変換の仕方がわかること。				

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
6	プログラミング/コーディングのルール	追加のルール、規定	1	更に、一般則として、コーディングの規則を決めている。例えば、Cであれば、MISRA-C、C++であれば、MISRA-C++などに準拠、またはその規定。				
			2	プログラムの複雑さを避けるため、1つのモジュールのコーディング長は、例えば、200行以内と決めている。				
			3	MISRA-C++に規定があるが、モジュール内に「go to」文、JUMPがない。				
			4	コメントは、各行に必ず記述することに規定している。				
			5	コーディング後、フローチャート、PAD化し、仕様書の論理と同じであることをチェック確認している。				
			6	仕様書が間違っている場合、仕様書に記述がない項目があった場合は、責任者の承認のもと、仕様書の追加/変更を行っている。この変更手順は、規定化されている。				
			7	変更の際し、変更理由、日付、担当者、承認者が明確にされ、文書は、バージョン管理されている。管理とは、例えば、文書一覧表があり、変更実施に伴い、一覧表の該当文書の項目が更新され、責任者承認があるということである。				
7	プログラムの構造	構造化プログラミング	1	プログラムを適切に小さいモジュールにわけること。それらは、できるだけバラバラにし、その相互関係を明確にする。				
			2	組み合わせられたソフトウェアモジュールのフローは、構造化された構造(順序制御、繰り返しと選択)を使用する。				
			3	小さなソフトウェアモジュールの可能な経路と入出力パラメータの関係の数をできるだけ単純にしておく。				
			4	複雑に分岐することを避け、特に、より上位レベルの言語への無条件ジャンプ(goto)を避ける。				
			5	可能な所で、パラメータを入力することでループの制約と分岐を関連付けする。				
			6	分岐やループのため、複雑な計算しないこと。				
				判定		満点		

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

A.5. ソフトウェアの設計と開発 テスト								
No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	テスト条件	ダイナミック解析と テスト	1	テスト対象をモデル化し、自動的にブラックボックステストを行う。テストケースはソースコードから自動的発生するテストプログラムを使用する。				
				テストの方法 -モデルはシステムの要求事項から作る。 入力期待値を作る -出力の期待値を作る -プログラム実行 -実際の出力値と出力期待値を比較する -更にモデルやテスト条件を変更したりして、ソフトウェアの信頼性を確認する。 この経過や解析、結果を文書化する。				
			2	ターゲットシステムにソフトウェアを組み込み、実際に動作させ、ハードウェアと組み合わせ、ソフトウェアの検証を実施する。				
				イ 試験機器類、使用する各種ソフトウェアの名称、バージョン、メーカーがテスト仕様書に明記している。				
				ロ テスト機器類の配置配線を明記している。				
				ハ ダイナミックテストを行うソフトウェアのバージョンを明記している。				
ニ	ダイナミックテスト後発見された不具合や機能不足などを修正、追加する変更手順が決まっている。また、それら手順は、社内規定があり、変更は責任者の承認が必要となっている。							

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点	
				SIL2	SIL3				
1	テスト条件	プログラム一行ごとの全ての検証	1	モジュール内の全てのプログラムが検証されている。 これは、ソフトウェア検証時、コーディングされたソフトウェアの全ての行、コンパイルされた場合は、すべての機械語が実行されことを意味する。					
				イ	テストするプログラムのなかのサブルーチンや関数は最低限一度はアクセスされなければならない。				
				ロ	安全関連系の全ての命令文(ソースコードレベル)は、最低1回は実行しなければならない。				
				ハ	全ての分岐命令は実行しなければならない。				
				ニ	安全機能ソフトウェア内の全てのプログラムが検証されている。 これは、ソフトウェア検証時、コーディングされたソフトウェアの全ての行、コンパイルされた場合は、すべての機械語が実行されことを意味する。				
				ホ	ソフトウェアモジュール検証試験でプログラムを実行したソフトウェアカバレッジは明確である。				
			ヘ	実行されない部分がある場合は、その理由を明確にし、文書化している。					
		再検査が同じ条件で出来ること	1	検証に用いる機器、ソフトウェアの名称、バージョン、機器の場合は校正データが明確にされ、それらが文書化されている。					
		入力する変数値	1	テストの入力は、テストされるプログラムに対し、適切な値が選ばれている。					
	イ			入力値は、テスト対象プログラムに対し、適切にいくつかに分けて、入力している。例えば、入力の時間タイミングや入力値の範囲。					
	ロ			入力値は、入力制限値の近傍の値を与えるテストもしている。					
		2	ハ	以下の特殊データテストが行われている。 ・ゼロでの割り算 ・ASCII文字の空白 ・空白やALLゼロの入力処理 ・表入力などの空白処理 ・全組み合わせ(配列) ・表が全部ゼロの処理					

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
				SIL2	SIL3				
1	テスト条件	具体的には	1	安全機能ソフトウェアの入力変数(パラメータ)が明確になっている。(モジュール仕様書⇒ソースプログラム)					
			2	入力変数の最大値、最小値、中間値を検証値として正常に動作することを確認している。					
			3	入力変数の最大値を超えたデータ、最小値より小さいデータを検証値とし、エラー、または異常処理がされることを確認している。					
			4	安全機能ソフトウェア特有の特異な変数を入力して検証している。変数は、正常動作、異常動作とも確認されている。特異な変数とは、例えば、キー入力されるASCIIコードの組み合わせや暗号データなど、モジュールに固有な値。					
			5	イ	キー入力信号は、キー入力シーケンスから外れた組み合わせを検証している。				
				ロ	暗号化されたデータは、セキュリティとの関連を検証している。				
2	テストの内容	性能、型式試験	1	仕様に基づいた入力値、変数を入れ、仕様通りの出力値、タイミング、処理を確認することを確認する。					
			2	異常処理についても仕様通りであることを確認する。					
			3	重負荷試験の実施をしている					
			4	イ	入力値の変化(時間当たり変化)を通常の条件より厳しくする。				
				ロ	ソフトウェアへの動作要求指令の頻度(時間当たり頻度)を通常の条件より厳しくする。				
			4	ハ	データベースや内部テーブルを参照するプログラムに対し、そのアドレスを超えるような値を入力する。				
				ニ	テスト対象プログラムに影響を与える要因を可能な限り極端な状態にし、境界値近傍の入力データを与える。				
				ホ	テスト対象プログラムに影響を与える機器の応答を最大限速くしたり、遅くしたりする。				
			5	仕様で決めたそれぞれの安全機能の応答時間の確認を行う。テストの解析、結果はすべて文書化する。					
			6	応答時間の平均値と最悪値を求める。					

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
2	テストの内容	インターフェーステスト	1	仕様の基づく入力値に対し、処理、出力値が正しい。また、インターフェースしている側の処理も仕様通りである。				
				イ 極端な値を入力してその処理の正しさを確認している。				
				ロ 極端な値を入れた時、他のインターフェースや処理に影響がないことを確認している。				
				ハ 他のインターフェースは通常値とし、変数を入れること。				
				ニ 小さなインターフェースであれば、全変数の組み合わせをテストする。				
				ホ インターフェースに特殊データを入力するとサブルーチン呼び出し行うものは、それに関する条件をテストする。				
	テストのための管理と自動化ツール	1	テストの効率向上、テスト者の負荷軽減、間違いやテストし残しの抑制のため、テストの自動化を図り、進捗を管理できるツールを使用している。					
				判定		満点		

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

A.6. ソフトウェアをプログラム可能な電子装置にセット(ハードウェアとソフトウェア)									
No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点	
				SIL2	SIL3				
1	実機テスト	機能確認テスト	1	仕様で決めた機能をすべてテストし、仕様と食い違っていないことを確認する。					
			ブラックボックステスト	1	テスト対象をダイナミックに試験するため、仕様から入力条件、出力期待値を決め、通電動作させ、確認する。				
		イ		許容範囲データで動作確認する。					
		ロ		仕様通り異常処理をするかも含めて、許容範囲外のデータで動作確認する。					
		ハ		許容範囲の限界データで動作確認する。					
		ニ		極端な値を与える。オール0やオール1、データ順序の入れ替え、タイミングを無視した入力など。					
		ホ		上記イからニを組み合わせたテスト					
		性能、型式試験	1	仕様に基づいた入力値、変数を入れ、仕様通りの出力値、タイミング、処理を確認することを確認する。					
			2	異常処理についても仕様通りであることを確認する。					
			3	重負荷試験の実施をしている					
				イ	入力値の変化(時間当たり変化)を通常の条件より厳しくする。				
				ロ	ソフトウェアへの動作要求指令の頻度(時間当たり頻度)を通常の条件より厳しくする。				
				ハ	データベースや内部テーブルを参照するプログラムに対し、そのアドレスを超えるような値を入力する。				
				ニ	テスト対象プログラムに影響を与える要因を可能な限り極端にして、境界値近傍の入力データを与える。				
				ホ	テスト対象プログラムに影響を与える機器の応答を最大限速くしたり、遅くしたりする。				
			4	仕様で決めたそれぞれの安全機能の応答時間の確認を行う。テストの解析、結果はすべて文書化する。					
				イ	応答時間の平均/最悪値を求める。				
2	要求仕様の出所の関連付け(トレーサビリティ)	システムと統合化されたハード/ソフトウェアの間で安全要求事項の関連付けの追跡	1	安全要求事項の仕様項目が、ハードウェアとソフトウェアのテスト要素又はモジュールからこれらの上位レベルのハード/ソフトウェア機能まで関連付けが明確になっている。					
				判定		満点			

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

A.7. ソフトウェアにおけるシステム安全の妥当性確認の状態 (See 7.7)								
No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	ソフトウェア の安全妥 当性確認	統合試験 (実機試験)	1	妥当性確認は、ソフトウェアの安全要求事項、それから作成されたソフトウェア安全要求仕様書に基づいて計画されているか？				
			2	統合試験に使用する試験設備が明確に仕様書に記述され、文書化されている。				
			3	統合試験の試験方法、手順が仕様書に記述され、文書化されている。 実機の完成度合いに応じ、統合試験内容の順序付けを規定しても良い。				
			4	統合試験を行う安全機能が明確にされている。				
				統合試験の試験順序や対応できる設備に応じて、試験する安全機能を組み込んだソフトウェアは、管理(試験単位、変更対応、機能実行のしやすさ、試験優先順位など)を考慮して分割されている。				
			5	統合試験にシミュレータを使用する場合、そのハードウェアには入力と出力があることが望ましい。				
			6	統合試験に使用した、または使用する設備、試験装置、ソフトウェアの名称、型(形)式、バージョン、校正データを記載し、文書化している。後で同じ設備、機器で試験ができる。				
7	統合試験を行った開発ソフトウェアのバージョンは、明確にされ、文書化されている。							

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点	
				SIL2	SIL3				
1	ソフトウェア の安全妥 当性確認	統合試験 (実機試験)		統合試験における入力変数、出力変数が仕様書で規定されている。					
			イ	入力変数の最大値、最小値、中間値を検証値として正常に動作することを確認している。					
			ロ	入力変数の最大値を超えたデータ、最小値より小さいデータを検証値とし、エラー、または異常処理がされることを確認している。					
			ハ	モジュール特有の特異な変数を入力して検証している。変数は、正常動作、異常動作とも確認されている。特異な変数とは、例えば、キー入力されるASCIIコードの組み合わせや暗号データなど、モジュールに固有な値。					
			9	統合試験を行ったソフトウェアのカバレッジは明確である。					
				試験を行っている時、または、行う時、被試験体は状態が変化する。この状態変化を事前に明確にする。					
			10	イ	有限状態機械(ゆうげんじょうたいきかい、finite state machine、FSM)手法で状態遷移を記述する。				
				ロ	時間ペトリネットで状態遷移を記述する。				
				機能確認テ スト	ブラックボックス テスト	1	仕様で決めた機能をすべてテストし、仕様と食い違っていないことを確認する。		
	テスト対象を動的に試験するため、仕様から入力条件、出力期待値を決め、通電動作させ、確認する。								
イ	許容範囲のデータで動作確認する。								
ロ	仕様通り異常処理をするかも含めて、許容範囲外のデータで動作確認する。								
ハ	許容範囲の限界データで動作確認する。								
ニ	極端な値を与える。オール0やオール1、データ順序の入れ替え、タイミングを無視した入力など。								
	ホ	上記イからニを組み合わせたテスト							

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	機能確認テスト	システムと統合化されたハード/ソフトウェアの間で安全要求事項の関連付けの追跡	1	安全要求事項の仕様項目が、ハードウェアとソフトウェアのテスト要素又はモジュールからこれらの上位レベルのハード/ソフトウェア機能まで関連付けが明確になっている。				
		システムと統合化されたハード/ソフトウェアの間で安全要求事項の関連付けの逆方向追跡	1	安全要求事項の仕様項目が、上位レベルのハード/ソフトウェアで実施されている安全機能から個別要素のハードウェアとソフトウェアまで逆方向の関連付けが明確になっている。				
					判定	満点		

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

A.8. 修正、変更											
No	項目	主旨	設問		チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点		
					SIL2	SIL3					
1	影響の確認	影響確認試験	1	ソフトウェアを変更した時、変更したソフトウェアの及ぼす影響を確認する。							
				イ	影響を及ぼすソフトウェアモジュール、システムを明確にする。						
				ロ	変更されたソフトウェアは、再度テストをする。						
				ハ	影響を受けるソフトウェア、再度テストをする。						
				2	ニ	システム全体を再度テストする。					
					ホ	システム全体ととして再度完全に妥当性確認を行う。(A.7参照)					
					ヘ	妥当性確認は、システムの状況を考慮し、影響する部分に関係するところに限定することができる。					
					ト	これらは、文書化する。					
2	管理	ソフトウェア管理	1	ソフトウェアの構成管理として、文書化、バージョンごとのプログラム、製作日、製作者などが管理されている。規定とおり文書化され、保管されている。							
		システムと統合化されたハード/ソフトウェアの間で安全要求事項の関連付けの追跡	1	安全要求事項の仕様項目が、ハードウェアとソフトウェアのテスト要素又はモジュールからこれらの上位レベルのハード/ソフトウェア機能まで関連付けが明確になっている。							
		システムと統合化されたハード/ソフトウェアの間で安全要求事項の関連付けの逆方向追跡	1	安全要求事項の仕様項目が、上位レベルのハード/ソフトウェアで実施されている安全機能から個別要素のハードウェアとソフトウェアまで逆方向の関連付けが明確になっている。							
					判定		満点				

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

A.9. ソフトウェア検証 (See 7.9)								
No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	ソフトウェアの検証	静的な解析	1	境界値付近の変数の解析				
				データフロー解析				
			イ	変数は値が割り付けられる前に読まれているか				
			ロ	変数は読み出される前に一回以上書かれていないか。				
			ハ	変数は読み出されずに書き込まれていないか。				
			ニ	データフローに曖昧、未定義なところはないか。				
2	監査	公式(社内の特定の閉鎖された関係者だけでない組織)の調査	1	検査官によってソフトウェア要素を調査する。この検査は、ソフトウェア工程のどの工程でもよい。検査の範囲とやり方は予め決めておく。発見された不適合は、検査官とその修正手順を合意すること。				
3	デザインレビュー	デザインレビュー	1	関係者を交えて仕様の合意、試験方法、試験結果をレビューし、相互に専門家の立場で内容を協議し、不適合な項目は適宜修正、変更を合意して加える。				
4		ダイナミック解析とテスト	1	試作品(プロトタイプ)かそれ以上のもので実動に近い動作の確認を行って、故障の調査を行っている。				
5	管理	システムと統合化されたハード/ソフトウェアの間で安全要求事項の関連付けの追跡	1	安全要求事項の仕様項目が、ハードウェアとソフトウェアのテスト要素又はモジュールからこれらの上位レベルのハード/ソフトウェア機能まで関連付けが明確になっている。				
		システムと統合化されたハード/ソフトウェアの間で安全要求事項の関連付けの逆方向追跡	1	安全要求事項の仕様項目が、上位レベルのハード/ソフトウェアで実施されている安全機能から個別要素のハードウェアとソフトウェアまで逆方向の関連付けが明確になっている。				
6	数値処理の検証	オフラインによる数値確認	1	曖昧な数値はエラーの元になる。数字の丸め、浮動小数点計算などがある場合、その検証をオフラインでおこなう。				
					判定	満点		

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

A.10. 機能安全の評価 (see Clause 8)									
No	項目	主旨	設問		チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
					SIL2	SIL3			
1	評価方法	故障解析	1	規格に従った機能安全の完全な評価					
				イ 原因と結果の関係図					
				ロ 事象によるツリー解析					
				ハ 故障の木による解析					
				ニ ソフトウェア機能の故障解析					
			2	設計仕様に従った機能安全の正しさの評価					
				イ 原因と結果の関係図					
				ロ 事象によるツリー解析					
				ハ 故障の木による解析					
				ニ ソフトウェア機能の故障解析					
2	共通原因故障の対応	多様性ソフトウェアの共通原因故障解析	1	冗長化されていることで共通の原因で完全な故障にならない。					
3	要求仕様の出所の関連付け (トレーサビリティ)	システムと統合化されたハード/ソフトウェアの間で安全要求事項の関連付けの追跡	1	安全要求事項の仕様項目が、ハードウェアとソフトウェアのテスト要素又はモジュールからこれらの上位レベルのハード/ソフトウェア機能まで関連付けが明確になっている。					
					判定		満点		

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

	得点率	80%	40%	判定	得点	満点
1 A.1. ソフトウェア安全要求仕様書	1	0.8	0.4	0	0	0.0
2 A.2. ソフトウェア安全要求仕様書.	1	0.8	0.4	0	0	0.0
3 A.3. ソフトウェアの設計と開発	1	0.8	0.4	0	0	0.0
4 A.4. ソフトウェアの設計/開発	1	0.8	0.4	0	0	0
5 A.5. ソフトウェアの設計と開発	1	0.8	0.4	0	0	0
6 A.6. ソフトウェアをプログラム可能な電子	1	0.8	0.4	0	0	0.0
7 A.7. ソフトウェアにおけるシステム安全	1	0.8	0.4	0	0	0.0
8 A.8. 修正、変更	1	0.8	0.4	0	0	0.0
9 A.9. ソフトウェア検証	1	0.8	0.4	0	0	0.0
10 A.10. 機能安全の評価	1	0.8	0.4	0	0	0.0

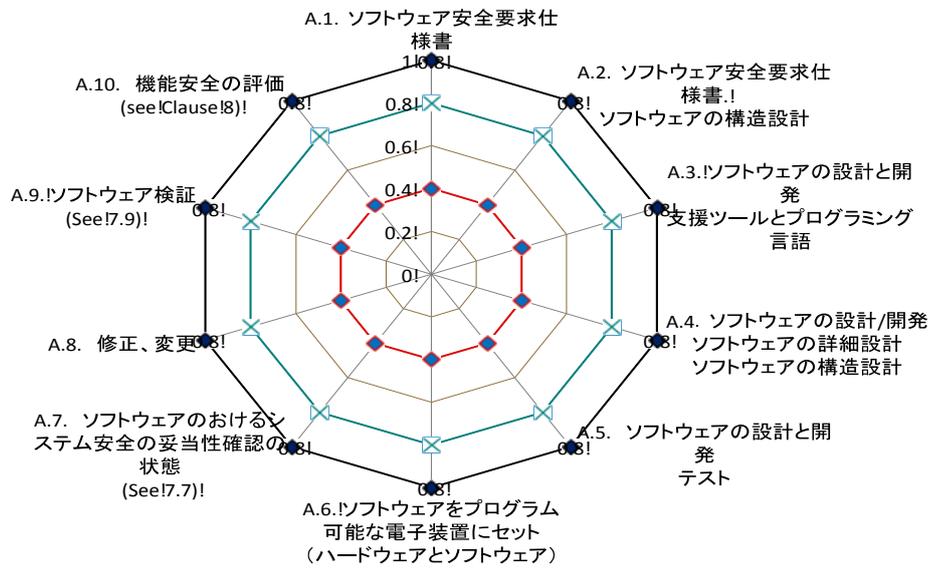


図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

3.2 リスクアセスメントシートと保護方策配置方法 [安衛研]

3.2.1 目的

産業用機械設備においては、機械の安全性はリスクという言葉を用いて定義される。結局、安全性はリスクがほとんどない状態で本来の機能（仕事）を実行できることと解釈される。一般にこのような安全（状態）を合目的的安全（状態）と呼ぶ。それに対して、機械が本来の機能ができない（一般には停止）状態だが人に対して安全を確保することを無条件安全（状態）と呼ぶ。

機械の安全化は以上の2つの安全を実現することであり、リスクアセスメントはそのための手段とその手段の安全性能を求めるためのツールである。リスクアセスメントを実施することにより、対象機械の安全仕様書が作成できる。また、前節3.1で説明したチェックシート第1部でも、リスクアセスメントは実施すべき必須項目として挙げられている。

ここでは、生活支援ロボット開発者が容易にリスクアセスメントを実施できるようにロボットタイプ別にひな形シートを開発して提供する。特に、リスク低減のための保護方策のリスク低減効果まで検証できるように、再リスク評価まで実施、記録できる形式とする。

3.2.2 リスクアセスメントに基づく安全設計手順

機械の基本安全規格（JIS B 9700[1]）によれば、リスクは基本的に4つのリスク要素（危害の酷さ、暴露頻度/時間、危険事象発生確率、危害回避可能性）の組み合わせとして定義し、定性的あるいは定量的に評価する。この組み合わせの方法（関数）は様々であり、指定された方法はない。なお、「人が危険源に晒される頻度及び時間」、「人が危害回避又は制限できる可能性」、「危険事象の発生確率」の3つをまとめて、「危害の起こりやすさ（発生確率）」と言い換えることもでき、実際に「危害の酷さ」と「危害の起こりやすさ」の2要素のみでリスクを評価している例もある。ちなみに、国内の労働災害統計では強度率（危害の酷さ）と度数率（危害の発生頻度）が用いられている。

最終的にリスクとして評価するには、原則4つのリスク要素毎の見積もり結果を統合的に判断することになり、個々のリスク要素は時系列的に独立した関数として扱う。各リスク要素の定義や解釈によってはリスク要素間の従属関係を考慮するかもしれないが、独立して扱うことが定量的な評価を容易にする。

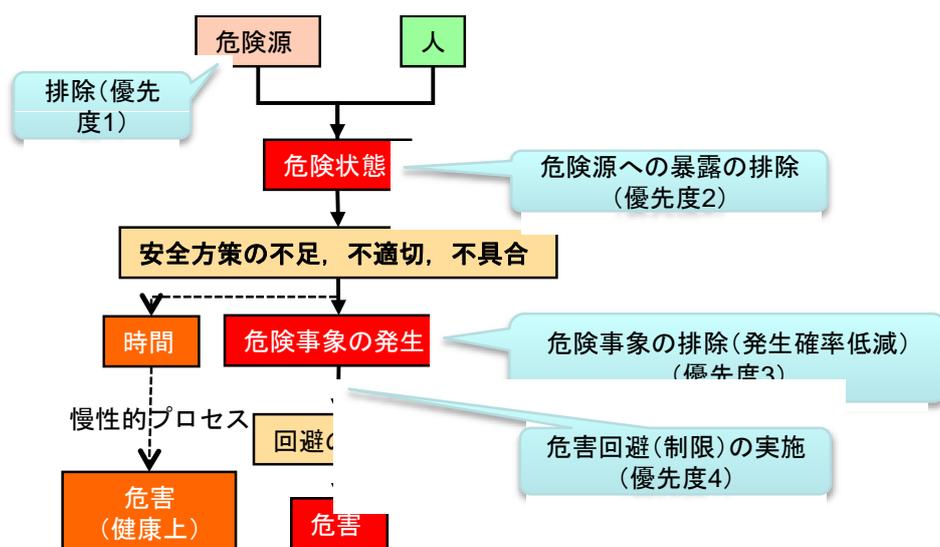


図 3.2.1 危険源から危害に至るプロセス

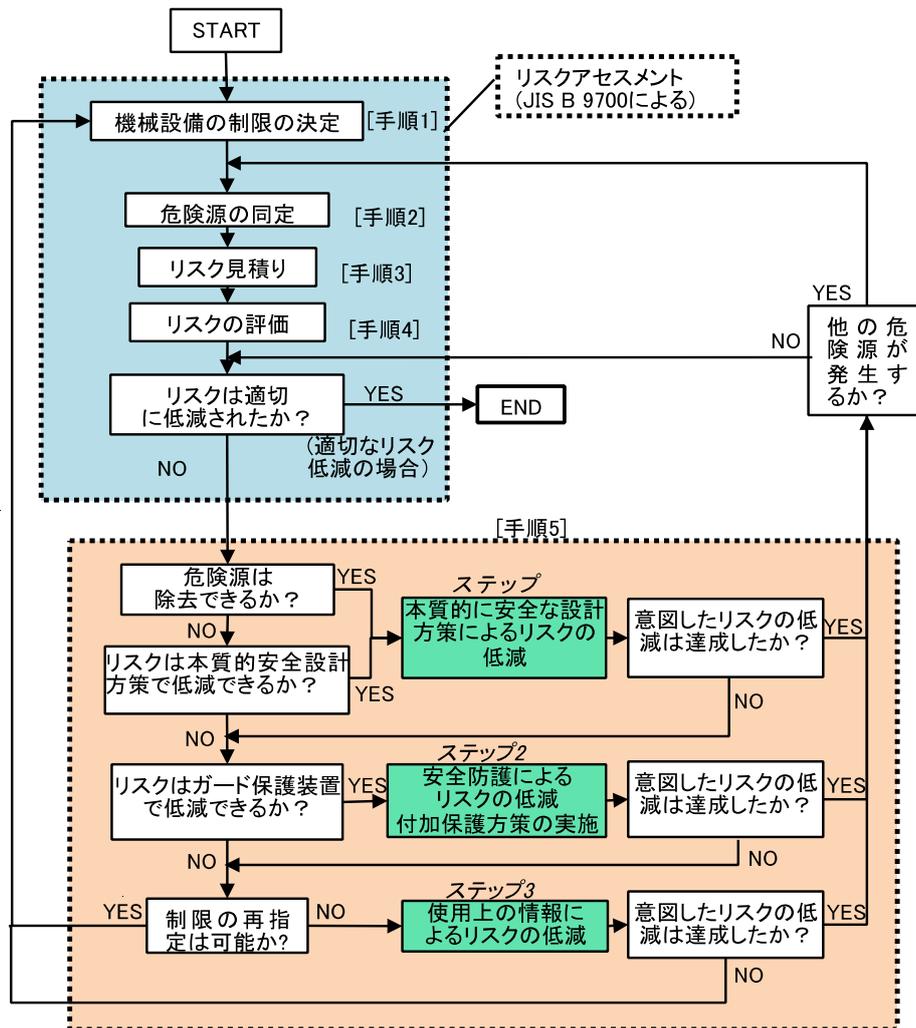


図 3.2.2 リスクアセスメントとリスク低減のフロー

4つのリスク要素は前出の危険源から危害に至るプロセス(図3.2.1)で示すように、各々の要素に主に対応するリスク低減の手段と関連付けられる。これは個々のリスク要素への各手段の効果を考慮したものであり、例えば、本質的安全設計により過度な速度や力を抑制したり、突起や鋭利部をなくすことにより、想定される危害を小さくすることが可能となる。同様に、ガードによる人と危険源との隔離は晒される頻度を減らし、保護装置による機械のインタロック(近接時に停止等)は人への機械の危険なエネルギー伝達をなくすることができる。各リスク要素に対して主なリスク低減効果をもたらす方策は、関連安全規格でその要件が規定されている。

設計者が行うべきリスクアセスメントの手順は、図3.2.2に示すように対象機械の条件(制限)を決めた上で、危険源一つ一つに対して分析とリスクの評価を行い、目標に到達(適切な低減の実施)したかを判断する。JIS B 9700で説明されるリスクアセスメントは破線内の手順1~4であるが、この規格ではこのリスクアセスメント後に続くリスク低減プロセス(手順5)を含めて安全設計手順として示されている。手順4の最後の判断がYESであれば、それまでの分析・評価過程を文書化して終了するが、判断がNOならばリスク低減を施して、その結果(リスク低減効果)が目標に到達したかを再度評価することを繰り返

す。このような回帰的なプロセスを行うことがリスクアセスメントに基づく安全設計の特徴である。

なお、手順5は「3ステップメソッド」と呼ばれ、ステップ1→2→3の順に実施しなければならない。すなわち、本質的方策や保護装置が講じられるにもかかわらず、ユーザに委ねる方策（警告表示や管理訓練等）を優先してはならない。また、手順4における最後の判断「リスクは適切に低減されたか？」とは、この3ステップを正直に実施して破綻なく成立し、ユーザへの残留リスク通知が十分行われている場合とされる。加えて、対象機械と類似する機械とのリスク比較が可能であれば、その比較結果により容易にリスク評価を行える。例えば、搭乗型移動ロボットの場合、電動車いすの安全規格を参照比較可能である。

3.2.3 リスクアセスメントひな形シートの概要と記入方法

3.2.3.1 ひな形作成の目的

リスクアセスメントはあくまでも事前評価であり、リスクアセスメントシートは設計者が安全の仕様を決めることを支援する。ひな形シートは4シートから構成され、対象機器の基本仕様書、使用条件や環境等の制限の規定事項や評価ルールを記載する表紙、初期分析結果とリスク評価書、リスク低減方策とその低減効果の再評価書となる。このうち、最後の再評価書は図3.2.2の手順5を含んでいる。

なお、リスクアセスメントシートはあくまでも安全の事前評価書であるため、基本的に設計時に安全仕様を確立する段階で用いる。そのため、対象ロボットの基本機能（動作、構造等）の仕様が決まっておき、安全機能がない（基本機能のみ装備された）状態でひな形シートを使用することが前提である。特に、本質的安全設計を施す場合、基本機能と安全機能は相反する場合が多くなるため、基本機能の確定は必須である。また、ひな形シートに記載の分析手法や見積もり・評価のルール、さらにシート構成や記述方法については、あくまでも一例であるのでこの書式に限定する必要はない。

3.2.3.2 リスク見積ルール

ひな形シートは基本の4リスク要素を用いて、加算と積算を組み合わせたハイブリッド方式を採用し、次式によりリスクRを数値として算出する。

$$R = S \times (F + A + Ps)$$

ここで、積算は「危害の酷さS」と「危害の発生確率Ph」で行い、後者を分解した「暴露頻度F」、「危険事象の発生確率Ps」、「回避可能性A」の3要素は加算で見積もっている。「危害の酷さS」を単一の積算項としたのは、本質的安全方策の適用を重要と考えてその効果を反映しやすくする意図がある。反面、後者の3つのリスク要素パラメータは、顕著な重み付けをしない限り、各々の差異が最終的なリスクの点数に反映しにくい傾向がある。

なお、算出ルールの厳密さは重要ではなく、各リスク要素のパラメータも数値で表しているが、あくまでも定性的表現を数字の目盛りに当てはめただけである。したがって、3リスク要素をまとめた危害の発生確率の点数は、あくまでも危害の起こりやすさのランク付けの意味しかない。結局、このランクによって安全機能（特に保護装置の安全性能）が決められることになるため、リスクアセッサでもある設計者が、このランクをどのような方針で扱うかによって製品のロボットの安全性が決まる。すなわち、リスクアセスメントにより得られた結果（リスク点数）は、設計者が安全の責任の重さを宣言した結果と見なせる。

表 3.2-1 危害の発生確率に関わるリスク要素の見積もりパラメータ

晒される頻度又は時間: F		危険事象の発生確率: P_s		危害を回避又は制限できる可能性: A	
連続的/常時	4	高い	4	困難	3
頻繁/長時間	3	起こり得る	3	可能	1
時々/短時間	2	起こり難い	2		
まれ/瞬時的	1	低い(まれ)	1		

ハイブリッド法による各リスク要素のパラメータは、表 3.2.1 と表 3.2.2 に示すように基

表 3.2-2 危害の酷さの見積もりパラメータとリスクマトリクス表現

危害の酷さ: S		危害の発生確率: $F + P_s + A$								
		3	4	5	6	7	8	9	10	11
重大傷害(長期間治療)	4	12	16	20	24	28	32	36	40	44
医療措置(短期間治療)	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33
応急手当で回復	2	6	8	10	12	14	16	18	20	22
無傷/一時的痛み	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11

本的に 4 段階の目盛りに比例配分の点数を割り付けている（回避可能性のみ 2 段階重み付け）。数値計算法を採用する利点の一つは目盛りを細かく設定することが可能なことだが、初心者向けのひな形として最大 4 段階に抑えた。また、基本的な事例としたため、点数の重み付けは行っておらず、必要に応じて点数の重み付けを検討してもよい。

この計算ルールにより、リスク見積値 R は表 3.2.2 に示すように 3~44 点の範囲をとる（各リスク要素の配点，リスク見積値ともに数が多い方が高リスクを意味する）。同表ではマトリクス表としてリスク見積値を表しているが、これは点数分布を明示するためのもので、マトリクス法を採用しているわけではない。表のセルの色分けの意味は後述する。

3.2.3.3 リスク要素の見積基準例

「危害の酷さ」の見積もり目盛りは表 3.2.3 に示す 4 段階であるが、一般産業機械設備のリスクアセスメントで使用される多くの目盛りよりは厳しくしている。すなわち、産業用機械では $S=1$ は通常設定せずに $S=2$ から始まる例が多いが、このひな形シートでは対象ロボットが家庭用途、介護福祉用途であることを踏まえ、 $S=1$ を新たに設定した。 $S=1$ の場合、実際怪我として記録されない場合もあるかもしれないが、人との接触を求めるサービスロボットでは必要な目盛りとして設定した。逆に、重大傷害には産業用機械では中程度の傷害とされていた骨折も含んでおり、一般用途の目盛りの高い側を圧縮して低い側を伸ばした形となっている。ただし、高齢者や身体障がい者など、危害の対象者によっては傷害耐性が大きく異なるため、目盛りを変える、あるいは重み付け等の考慮が必要となるか

もしれない。複数の対象者の場合も、重み付けか副要素としての追加見積もりを検討する必要がある。

表 3.2-3 危害の酷さ基準例

S	酷さ	例
4	重大傷害(長期間治療)	死亡, 手足切断, 骨折, 永久傷害, 入院が必要, 全治 1 週間以上
3	医療措置(短期間治療)	要診察, 縫合伴う切傷, 完治可能, 通院, 全治 1 週間未満
2	応急手当で回復	通院不要, 赤チン(切傷・打撲)
1	無傷／一時的痛み	痣の残らない圧迫・打撲

表 3.2-4 暴露頻度基準例

F	頻度／時間	例
4	連続的／常時	1 回超/時の頻度で晒される, 1 回に晒される時間が 60 分超
3	頻繁／長時間	1 回以下/時の頻度で晒される, 1 回に晒される時間が 60 分以下
2	時々／短時間	10 回以下/日の頻度で晒される, 1 回に晒される時間が 30 分以下
1	まれ／瞬間的	1 回以下/日の頻度で晒される, 1 回に晒される時間が 10 分以下

なお、表の危害の酷さの具体症例はあくまでもひな形の設定例である。

「危険源への暴露頻度/時間」は、定性的表現で表 3.2.4 に示す 4 段階に目盛りを設定した。頻繁、時々、まれなどはよく用いられる定義であるが、このような定性的表現は頻度や時間の判断が曖昧となる傾向にあるため、可能な限り具体的な数値で示した方が理解しやすい。ただし、そのためには、対象ロボットの基本仕様（使用条件）が明確となっているという前提である。この表では、人が危険源に晒される頻度は具体的な時間を例示したが、これらはあくまでも一例である。暴露時間も同様である。なお、暴露頻度/時間は個々の危険源に対して設定される。例えば、危険源が対象ロボットの機械的危険源（押しつぶし等）の場合は、一般に想定タスクの 1 サイクル（あるいは 1 日当たりのタスク）における対象ロボットの使用回数や使用時間から設定する。装着型ロボットの場合は、例えば危険源が装着時常時存在するならば装着時間で、動作時のみ存在するならば稼働時間で考える。

「危険事象の発生確率」も定性的に表 3.2.5 に示す高いから低いまでの 4 段階で目盛りを振っているが、危険事象の要因となるのはロボット側と人（ユーザ）側の両面が考えられる。ロボット側の技術的要因とは機器の不具合や故障（危険側）によるもので、具体的に危険側故障発生率等で見積もることは可能である。ただし、危険側故障発生率は単に信頼性ではなく、故障の内容により異なり、具体的な数値で単純に表現することは難しい。安全関連部のシステム規模が大きくなればなるほど、それは現実的ではなくなる。そこで、

一般的な認識として、安全関連部の独立性が高く、その構成要素が安全関連規格へ準拠しているほど危険側の故障は発生しにくいと考えられるため、定性的表現ではあるが具体的

表 3.2-5 危険事象の発生確率基準例

Ps	発生確率	技術的要因の例	人的要因の例
4	高い	安全関連部が非安全関連部から明確に分離していない	類似ロボットや類似機械で事故がある／ヒヤリハットが度々ある
3	有り得る	安全関連部に非安全関連部要素が混じっている	類似ロボットや類似機械でヒヤリハットの報告がある
2	起こりにくい	安全関連部は非安全関連部から分離して、多くは関連安全規格に準拠している	非定常な作業や複雑な作業において、注意が行き渡らない／散漫になりやすい
1	低い(まれ)	安全関連部は全て関連安全規格に準拠して構成される	日常ではミスはほとんど起こりにくい

表 3.2-6 回避可能性の基準例

A	回避又は制限の可能性	例	加味条件
3	困難	動作速度が高速 死角が多い	非常停止装置が設置されていない又は操作できない 保護具が装備されていない
1	可能	可動部が十分な低速度 以下で動作し、かつ、可動部を認識でき、回避のための十分な空間がある	非常停止装置が操作可能位置に設置されている 指定された保護具の着用が遵守される

目盛りの例として示した。一方、人が要因となる危険事象は、その発生確率（例えばヒューマンエラーの生起確率）を定量的に見積もることは難しい。プラント等で一定タスクの条件下で大まかに数字を見積もった例はあるが、多様なロボットにはそのまま適用できない。そこで、人が携わるタスクの内容（複雑、煩雑さ）や過去の類似事故件数あるいは類似のヒヤリハット件数を目安として判断するとした。類似機器の使用実績に基づくデータがあれば、見積もりの参考になるが、人の属性により変わる場合もあり、使用には注意が必要である。

「危害の回避可能性」はできるかできないかの2択とし、確率的評価とはしていない。すなわち、ユーザが危害から回避できるかを設計者が説明できるか否かで判定し、曖昧な根拠は排除している。また、一般に人による危害の回避あるいは制限は、その人の能力や知識、経験、リスク認知度などの人側の主要因と、対象ロボットの動作速度などのロボッ

ト側の副要因の両面から影響を受ける。これらの要因は多岐にわたり、人の関与も様々であるため、定量的な目盛りを設定することは難しい。産業用ロボットでは、ロボット側の回避可能性の目安として 250mm/s が規定されているが、これはあくまでも熟練教示者がロボットアームを動作を認識したという限定条件である。この数値の他用途への引用には注意を要する。なお、加味条件はあくまでも副次的な見積もり要素と見なしており、この条件の合致のみで A=1 と見積もることはできない（非常停止装置と保護具の直接のリスク低減効果は、各々、危険事象の発生確率を下げることでと危害の程度を緩和することである）。

3.2.3.4 リスク評価基準と解釈

ひな形シートのリスク見積値 R は最終的に 3 段階でランク付けした（表 3.2.7 参照）。原則、R が 7 点以上ではリスク低減を必要とし、リスク低減目標は 6 点以下とした。ただし、R が 7～14 点の場合は ALARP（合理的に実行可能な低さ）[2]の考え方を取り入れ、適用すべきとされた方策が技術的に実現困難、機器本来の機能を喪失、コストの過大な突出等の合理的な理由があれば、メーカーによるさらなるリスク低減を求めないという条件付き許容とした。ただし、条件付き許容の場合は、ユーザの運用上のリスク低減を支援することが必要である。

3 段階のランクしきい値の設定は、産業用機械に比較するとかなり厳しめに設定したが、救済措置として表 3.2.2 のマトリクスで分かるように、危害の酷さが重大（S=4）であれば危害の発生確率を最低（Ph=3）まで下げれば条件付きで許容できるとした。同様に、S=3 ならば Ph=3 または 4 が許容の限界である。一方、危害の発生確率が高い（Ph=8 以上）場合は危害の程度は最低（S=1）でなければならない。

表 3.2-7 リスク評価基準

見積値 R	評価	リスク低減の必要性
15 以上	リスクは高く、受入れられない。	必須、技術的方策が不可欠
7～14	リスクの低減が必要。ただし、条件付(他に方策がない、低減が現実的でない)で許容可能。	必要、技術的方策が困難な場合は警告表示及び管理的方策を講じる * ALARP として考慮もありえる
6 以下	リスクは十分低い。	不要

3.2.3.5 ひな形シートの記入方法

3.2.3.5.1 基本仕様シート

ひな形シートの基本仕様シートのページ（図 3.2.3）は、対象ロボットの名称と型式、外観図又は写真、基本仕様を記述することにより、アセスメント対象のロボットの基本仕様や機能を把握する目的で作成される。基本仕様の項目は例示であるが、通常取説書に記載される基本仕様の項目をそのまま記載すればよい。特に留意すべき項目は、リスクアセスメントの最初の段階である使用上の制限の決定に関連する仕様であり、動作機能、構造、想定使用環境（最悪条件）、想定使用者（属性、操作形態等）はもれなく抽出して記述する。なお、安全機能は本来リスクアセスメントの結果としてその仕様（安全性能等）が決定さ

れるべきものであるが、例えば、ナビゲーションのための障害物検知センサが周囲の人検知も兼用する場合、詳細仕様は記入せずに機能の目的を追記する。

対象ロボット名称	型式	基本仕様
車いす型ロボット	XXX-XXXX	ロボットタイプ:高齢者及び身体障がい者向け搭乗型移動ロボット(自律移動機能有り) 外寸:700W×800D×1200H、質量:90kg(バッテリー含む) 駆動源:DC24Vバッテリー(プラグイン充電又は充電済みバッテリーと交換) 走行機構:2輪駆動輪(独立駆動200WACサーボモータ×2、専用ドライバ)+2輪自由輪、保持用メカブレーキ有り 走行機能:前後進、左右旋回、速度調整 走行能力:最高速度6km/h、登坂最大5度、段差乗り越え最大20mm、旋回半径最小0.5m 走行モード:搭乗者による操縦/自律走行の自動切り替え、ブレーキ解除 自律走行機能:限定通路のみプログラム走行+超音波ビーコンによる位置補正 他のアクチュエータ:シートクライニング用100WACサーボモータ アクチュエータ駆動方式:専用ドライバ 操縦インターフェース:ジョイスティックによる操舵と速度調整(ホールドトゥラン操作)、ホールドトゥボタンによるリクライニング調整、緊急停止ボタン、電源ボタン 安全機能:レーザースキャナセンサ(前後)で障害物検出後減速、全周囲/バンパセンサで接触検知後停止、赤外線センサ(前後)で走行路段差検出後停止 表示機能:走行モード、速度、バッテリー残量、緊急停止、異常、後退時警報 その他の機能:跳ね上げ式肘掛け(手動) 想定使用者:自力歩行に支障のある高齢者及び身体障がい者
		

図 3.2-3 基本仕様シート記入例 (車いす型ロボット)

3.2.3.5.2 表紙シート

ひな形シートの表紙(図 3.2.4)には、先ず左段落に対象ロボットのライフサイクル(リスクアセスメントの範囲)を宣言した上で、使用上の制限(意図した使用、予見できる誤使用、意図した空間/時間制限)を簡潔に記入する。対象ロボットの基本仕様が固まっている

対象ロボット名称	実施者	実施日																																																																							
車いす型ロボット	(担当者の所属) 立案者、チーム参加者、リーダー、承認者等	初回: 第1回改訂:																																																																							
ライフサイクル該当段階	設定、運転、保守	分析方法(ツール) 積算法(一部加算法を適用)																																																																							
意図した使用	①ロボットは搭乗した特定操作者の片手操縦により動作する(少なくとも片腕と視力の機能は正常の人が対象)。 ②施設内特定通路内のみ、ロボットは自動的に自律走行に切り替わる(操縦は停止以外無効)。 ③ロボットのバッテリー充電/交換・保守等は、訓練された成人(介護者/メーカ要員)のみ行う。 ④ロボット搭乗者は、ベッドやトイレ等への移乗を自力又は補助により行う。 ⑤ロボット搭乗者は運転中身体を拘束されない。	リスクの見積/評価基準 $R = S \times (F + P_S + A)$ リスク見積値: $R = S \times (F + P_S + A)$																																																																							
使用上の制限	①ロボット走行中に、第三者(介護者)がジョイスティックに触れる。 ②ロボット背面の第三者に気付かず後退させる。 ③第三者が特定搭乗者に成り代わって、ロボット操縦を行う。 ④ロボットを走行領域外へ操縦してしまう。 ⑤自律走行路上に物を落とす/他の障害物が存在している。 ⑥エレベータ搭乗に時間がかかり、ドアに挟まれる。 ⑦ロボットへ移乗時の着座位置不完全のまま操縦/自律移動する。 ⑧移乗時に身体の一部がジョイスティックに触れる。	<table border="1"> <tr> <td>晒される頻度又は時間:F</td> <td>危険事象の発生確率:P_S</td> <td>危害を回避又は制限できる可能性:A</td> </tr> <tr> <td>連続的/常時 4</td> <td>高い 4</td> <td>困難 3</td> </tr> <tr> <td>頻繁/長時間 3</td> <td>起こり得る 3</td> <td>可能 1</td> </tr> <tr> <td>時々/短時間 2</td> <td>起こり難い 2</td> <td></td> </tr> <tr> <td>まれ/瞬間的 1</td> <td>低い(まれ) 1</td> <td></td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td>危害の酷さ:S</td> <td colspan="11">危害の発生確率:F + P_S + A</td> </tr> <tr> <td>回復に長期治療(1月以上)を要す</td> <td>4</td><td>12</td><td>16</td><td>20</td><td>24</td><td>28</td><td>32</td><td>36</td><td>40</td><td>44</td> </tr> <tr> <td>回復に医療措置を要す</td> <td>3</td><td>9</td><td>12</td><td>15</td><td>18</td><td>21</td><td>24</td><td>27</td><td>30</td><td>33</td> </tr> <tr> <td>応急手当て回復可能</td> <td>2</td><td>6</td><td>8</td><td>10</td><td>12</td><td>14</td><td>16</td><td>18</td><td>20</td><td>22</td> </tr> <tr> <td>対処不要(一時的な痛み等)</td> <td>1</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td> </tr> </table>	晒される頻度又は時間:F	危険事象の発生確率:P _S	危害を回避又は制限できる可能性:A	連続的/常時 4	高い 4	困難 3	頻繁/長時間 3	起こり得る 3	可能 1	時々/短時間 2	起こり難い 2		まれ/瞬間的 1	低い(まれ) 1		危害の酷さ:S	危害の発生確率:F + P _S + A											回復に長期治療(1月以上)を要す	4	12	16	20	24	28	32	36	40	44	回復に医療措置を要す	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33	応急手当て回復可能	2	6	8	10	12	14	16	18	20	22	対処不要(一時的な痛み等)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11
晒される頻度又は時間:F	危険事象の発生確率:P _S	危害を回避又は制限できる可能性:A																																																																							
連続的/常時 4	高い 4	困難 3																																																																							
頻繁/長時間 3	起こり得る 3	可能 1																																																																							
時々/短時間 2	起こり難い 2																																																																								
まれ/瞬間的 1	低い(まれ) 1																																																																								
危害の酷さ:S	危害の発生確率:F + P _S + A																																																																								
回復に長期治療(1月以上)を要す	4	12	16	20	24	28	32	36	40	44																																																															
回復に医療措置を要す	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33																																																															
応急手当て回復可能	2	6	8	10	12	14	16	18	20	22																																																															
対処不要(一時的な痛み等)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11																																																															
意図制限した空間/	①ロボットは病室内及び特定通路の屋内平坦路のみ移動する(トイ4回/日、浴室1回/日、リハビリ回/日)が、エレベータにも2回/日搭乗する(特定通路以外は操縦運転)。 ②病室や通路には介護者、見舞客(第三者)が存在する可能性がある。 ③ロボットはトイレや浴室等にも移動するが、直接に水がかかることはない。 ④バッテリー充電は特定場所で行うが、バッテリー交換は任意の場所で停止時に実行可能。 ⑤ロボットの運転寿命は20,000時間とし、ブレーキは1週間毎に点検する。																																																																								

図 3.2-4 表紙記入例 (車いす型ロボット)

れば、この項目は多く埋めることができるはずであり、ここの内容を充実させれば危険源の抽出（同定）が容易となる。右段落には、アセスメント実施者（複数名）、作成日と改訂履歴、分析方法とリスク見積のルール（該当するリスク要素とパラメータ及びその目盛り、総合リスク評価基準）を記入する。このページの内容が以降のアセスメントの出来を左右するため、ページ分量にこだわらずに丁寧に作成することが望ましい。なお、スタイルはこの書式に基づく必要はないが、記入項目はもれなく挙げるようにする。

使用上の制限の内、「意図した使用」については、基本仕様の記載内容を参考にして、誰がどのように使用するかという観点で宣言したライフサイクルで想定されるタスク（主として人が関わる動作、機能）を記述する。タスクに応じて、対象ロボットのユーザが操作者、単なる搭乗者、操作しない被介護者、バッテリー交換やトラブル処理をするユーザ管理者、点検保全をするメーカ SE、周囲の第三者など様々な属性が考えられるため、もれなく抽出しておく。特に、トラブル処理等の非定常のタスクは見落としがちである。

「合理的に予見できる誤使用」は、前述したようにユーザにメリットがあるために行う、容易に予測しうる人の挙動であり、明確な違反行為を除いて抽出しておく必要がある。特にサービスロボットの場合は、第三者の関与も忘れてはならない。また、直接のユーザ以外は誤使用の想定は難しいと思われ、可能であればアセッサには設計者以外の様々な立場の方の参加が望ましい。一般的に、ロボットのユーザビリティの配慮が不足すると、誤使用する可能性が高くなると言われ、マン・マシンインタフェースの仕様が重要となる。また、ユーザビリティへの影響は、ロボットの自動化が高度であるほど非定常時の人の関与への配慮が不足して起こる恐れがあり、注意を要する。

「意図した空間/時間制限」には、対象ロボットの動作環境や稼働時間（寿命、メンテナンス期間）を記述する。動作環境は設計者が想定する条件であるが、最悪の動作環境も想定しておく必要がある。また、時間制限は意外と見落とされがちな項目であり、アセスメントの有効期間を宣言しておかないと、メーカの責任範囲が拡大することになり、現実的ではない。例えば、部品の劣化や消耗に伴う危険源を限定するためにも、寿命あるいはメーカが介入してリセットできる稼働時間を決定しておく（リセット後の改めてのリスクアセスメントは必要）。

3.2.3.5.3 初期リスクアセスメントシート

ひな形シートの初期リスクアセスメントのページ（図 3.2.5）は、表紙で記入した分析方法とリスク見積のルールに従って、宣言したライフサイクル毎に危険源一つ一つに対して分析と評価を行ってゆく。危険状態/危険事象の項目は、危険源が危害に至るまでのシナリオを記述するが、危険状態と危険事象が明確に分離して記述しなくとも、危害に至る理由と経緯が説明できればよい。また、危害の程度の見積もり対象と危害の起因物を明確化するために、危険区域と対象者を記述しておく。なお、危害の酷さの見積もり根拠のために、上記シナリオの最後に危害を記入しておく（別欄記入でもよい）。

リスクの見積もりには、ひな形のルールであるハイブリッド法の計算が迎れるように全てのリスク要素の点数と加算結果（Ph）も記入する。例として No. 1, 5, 12 の危険源について初期見積もり結果例を示しているが、No. 1 は無条件にリスク低減が必要（目標は 6 点以下）、No. 5, 12 は原則 6 点以下に下げるが、条件付き許容可とするレベルとなっている。

なお、この事例の車いす型ロボットにおける見積もりの解釈は以下の通りとした。

- ・危害の酷さは基準例に同じ
- ・暴露頻度は、使用上の条件により、通常運転時（8 回/日あるいは 30 分/回）F=2、設定、故障（1 回/日以下）F=1

段階	No.	危険源	危険状態/危険事象	危険区域	対象者	リスク見積					備考	
						危害の酷さ S	危害の発生確率 Ph	頻度 F	確率 Ps	回避 A		リスク点数 R
設定	1	経路設定ミス	自律走行路の設定誤りにより、スロープ上で急旋回をして、搭乗者が転落して腕を骨折	周辺・乗車部	搭乗者	4	6	1	2	3	24	
	2		自律走行路の設定誤りにより、屋外の路上へ経路を逸脱し、自動車と衝突して死亡	周辺・乗車部	搭乗者							
運転 (手動操縦)	5	本体と壁間での身体押しつぶし	誤操作または脇見により、壁の前にいる人を押しつぶし打撲	周辺	第三者	2	5	2	2	1	10	
	6	障害物乗り上げによる転倒(ロボットの重心)	障害物乗り上げによる転倒で周囲の人を押しつぶし骨折	周辺	第三者							
	7	車輪に挟まれる、踏まれる	旋回時の内輪差により、旋回内側にいる人の足を踏過し骨折	周辺	第三者							
	8	車輪に衣服が巻き込まれる	回転する車輪に搭乗者または周囲にいる人または搭乗者の衣服が巻き込まれ窒息	周辺・乗車部	搭乗者 第三者							
	9	スイッチ類の非人間工学的設計	介護者が誤ってジョイスティックに触れて、急加速したため衝突して打撲	周辺	第三者							
運転 (自律走行)	12	制御システムの故障により暴走	障害物を検知せず、減速しないまま周囲の人へ衝突し打撲	周辺(経路上)	第三者	2	6	1	2	3	12	
	13	制御システムの故障により不意起動	位置補正に失敗し、自律走行路外で急発進して周囲の人の足を踏過し骨折	周辺(経路上)	第三者							
	14	外部からの電磁波等によるセンサの誤動作	電磁ノイズによる段差検出の失敗で、階段から転落して搭乗者および階下の人が骨折	周辺・乗車部	搭乗者 第三者							
	15	ソフトウェアのバグによる暴走	ソフトウェアのバグによる暴走で、走行経路から逸脱し、階段から転落し、搭乗者および階下の人が骨折	周辺	第三者							

図 3.2-5 初期リスクアセスメント記入例 (車いす型ロボット)

- ・危険事象の発生確率は、非常常又は散漫な作業 Ps=2, 安全関連部の独立設計 (内部はチェック不完全として) Ps=2
- ・回避可能性は、衝突と転落はその過程で回避不可能として A=3, 押しつぶしは極低速度のため回避可能 A=1

図 3.2.6 は初期リスクアセスメントの続きであるが、No. 18 の危険源を図示してある。このように、危険状態/危険事象のシナリオが分かりにくい場合は図や写真が有効である。

運転 (乗降・移乗)	18	搭乗者の落下	ベッドへの移乗時に搭乗者が浅く腰掛けて滑り、落下して骨折 	乗車部	搭乗者	4	7	2	2	3	28	
	19	アーム/ステップの破損	搭乗者が荷重を掛けた際、アームおよびステップが破損により転倒して骨折	乗車部	搭乗者							
	20	転倒	移乗時保持能力不足でロボット本体が動き、搭乗者が足を払われて転倒し打撲	乗車部	搭乗者							
保守等	23	充電部分への直接接触	充電器の通電部分へ直接接触し、感電	周辺または内部	搭乗者 第三者 要員	4	6	1	2	3	24	
	24	内部回転部品への巻き込み	動作確認時に、ギヤ部に手指を巻き込み骨折	内部	保守要員							
	25	内部熱源への接触	モータドライバ筐体へ接触して火傷	内部	保守要員							
	26	突起部による突き刺し	制御部筐体のバリによる手指の裂傷	内部	保守要員							

図 3.2-6 初期リスクアセスメント記入例続き (車いす型ロボット)

No. 18, 23 の事例は共にリスク低減が必須と評価されたが、基本的にリスク要素毎の見積もり根拠は前述の通りである。ただし、No. 23 の感電による危害の程度は充電器が昇圧して大電流を急速充電するタイプとして、感電により入院したと想定して S=4 とした。

3.2.3.5.4 再リスクアセスメントシート

ひな形シートの再リスクアセスメントシート（図 3.2.7）には、初期リスクアセスメントシートで原則リスク低減が必要と判定された危険源に対して、工学的手段による保護方策の適用とそのリスク低減効果を記述する。左の列から、初期リスクアセスメント結果のコピー、リスク低減のための方策と適用の優先順位、方策適用後の再リスクアセスメント（見積もりと評価結果）、残留リスク方策、備考の項目を記述する。

保護方策の適用順位は前出スライドで説明したとおり、1 番目は危険源除去又は酷さの低減、2 番目は暴露排除又は頻度低減、3 番目は事象発生確率低減、4 番目は回避又は危害の制限を行う。また、リスク低減効果の再見積りに当たっては、原則、適用の優先順位に対応したリスク要素のパラメータに作用するが、複数の方策の適用時はそれらの方策が同時に（重複して）機能するとして、各リスク要素の最低値をとるとしている（図 3.2.7 の太線枠）。例えば、No. 1 では再リスク評価で 20 点と 16 点となるが、経路自己診断機能の効果で Ps を 2→1、警告音の効果で A を 3→1 を採用すると、R=12 となる。同様に、No. 18 は 14 点止まりなところを R=8 に、No. 24 は 6 点止まりのところを R=5 とする。ただし、同一リスク低減効果の複数手段によるシナジー効果は原則表現されないため、別途検討する必要がある。

再リスク評価の結果、条件付き許容（R=7~12）の場合は残留リスク方策としてユーザによるリスク低減に委ねるための準備（情報提供等）を記入する。リスクアセスメント事例では、この残留リスク分までメーカー側に見積もる場合も多いが、このひな形ではユーザ依存の効果とは一線を引き、あくまでもメーカーの努力を求めている。

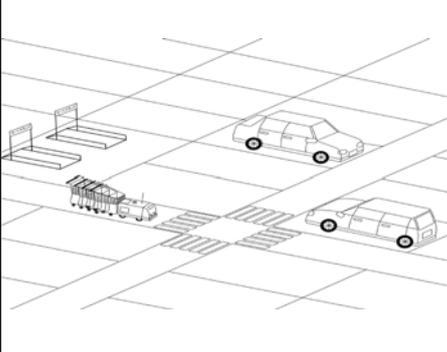
なお、安全機能の安全性能については、別紙で安全性能目標と妥当性確認を記述する。

初期リスク分析結果			リスク低減			再リスク見積								
段階	No.	危険源	リスク 点数 R	優先 順位	保護方策（メーカーによる工学的手段）	危害の 酷さ S	危害の発生確率 Ph			リスク 点数 R	保護方策 組合せ時 の R	残留リスク 方策（ユー ザに依存）	備考（参照規格等）	
							頻度 F	確率 Ps	回避 A					
設定	1	経路設定ミス	24	3	経路自己診断機能の付加	4	5	1	1	3	20	12	取説書教育	診断の安全性能は別途検討 経路確認運転時の注意喚起
				4	傾斜センサによる警告音・表示	4	4	1	2	1	16			
運転	18	搭乗者の落下	28	1	ロボット本体又はベッドにスライド式補助板の装備	2	7	2	2	3	14	8	取説書教育	補助板の仕様説明 着座確認機能の安全性能は別途検討
				3	ロボット本体又はベッドに着座確認機能を付加	3	6	2	1	3	18			
				4	ロボット本体とベッド間隔監視による警告	3	5	2	2	1	15			
保守	23	充電部分への直接接触	24	1	充電可能性部位の内蔵/カバーの付加	1	6	1	2	3	6	5	取説書	カバー仕様の説明
				3	充電ケーブル接続確認による通電	4	5	1	1	3	20			

図 3.2-7 再リスクアセスメント記入例（車いす型ロボット）

3.2.3.5.5 ロボットタイプ別リスクアセスメントひな形シート

搭乗型移動ロボット(車いす型ロボット)のひな形シートを図3.2.3~図3.2.7に示した。他のロボットタイプ用として、非搭乗型自律移動ロボット(ショッピングカートロボット)用ひな形シートを図3.2.8に、装着型ロボット(立ち上がり動作支援スーツ)用ひな形シートを図3.2.9に示す。これらのひな形シートは、ロボット開発者をはじめロボットビジネス協議会のWGメンバーへ提供された。

対象ロボット名称	型式	基本仕様
ショッピングカート運搬ロボット	XX-XXX	ロボットタイプ:ショッピングカート自動回収用自律移動型ロボット
		外形:800W×1000D×900H、質量:120kg(バッテリー含む) 駆動源:DC24V/バッテリー(充電ステーションで4h自動充電) 走行機構:4輪の内2輪駆動輪(400Wサーボモータ)、メカブレーキあり 走行機能:前後進、左右旋回、速度可変 走行能力:最高速度6km/h、登坂最大5度、連続走行6時間 けん引機能:専用カート(前後連結器あり)10台まで、押し込みによる自動連結、ロボットによる一斉連結解除 走行モード:マップデータと磁気マーカ(床面埋め込み)補正による自律走行、手動低速走行 通信機能:内蔵カメラ画像・連結情報・走行位置情報の通知 安全機能:超音波センサ(前後)で障害物検出後減速、全周囲バンパセンサで接触検出後停止、遠隔緊急停止 表示器等:走行時メロディとランプ点滅、旋回・後退時のアラーム、緊急停止アラーム、異常アラーム

(a) 基本仕様シート

対象ロボット名称	実施者	実施日																																																																																																							
ショッピングカート運搬ロボット	(担当者の所属) 立案者、チーム参加者、リーダー、承認者等	初回: 第1回改訂:																																																																																																							
ライフサイクル該当段階	設定、運転、清掃、トラブル処理・修理、保守、処分	分析方法(ツール) 積算法(一部加算法を適用)																																																																																																							
使用上の制限 意図した使用 合理的に予想できる誤使用 時間間隔制限された空間/	①ロボットは回収場所からカート回収・連結して、所定の集積場所へ自動的に運搬する。 ②ロボットの手动操作・経路設定・保守等は、訓練された成人要員(店員)のみ行う。 ③ロボットの電源投入は訓練された要員が持つキー解除により行う。 ④ロボットは所定のカートのみ専用治具で連結できる。 ⑤要員はロボット運転中にカートの整理をする場合がある。	リスクの見積/評価基準 算出式:リスク点数(R)=危害の酷さ(S)×危害の発生確率(Ph) 判定基準:3≦R≦6 十分低い/無視できる(リスク低減は不要) 7≦R≦14 低い~中程度/条件付き受容/検討を要する(リスク低減を推奨) 15≦R≦44 高い/受容できない(リスク低減が必要)																																																																																																							
	①駐車場に残った客又は他の店員が、ロボット上に乗る/経路上に存在する/ロボット直前に飛び出す。 ②他の店員がキーを持ち出してロボット操作を行う。 ③要員の経路設定間違え/設定確認の未実施。 ④所定外のカートの混在。 ⑤要員が非常停止ボタンを押さずにバンパを蹴飛ばして停止させる。	<table border="1"> <tr><th colspan="2">危害の酷さ(S)</th></tr> <tr><td>4</td><td>重大障害(長期間治療)</td></tr> <tr><td>3</td><td>医療措置(短期回復)</td></tr> <tr><td>2</td><td>応急手当て回復</td></tr> <tr><td>1</td><td>無傷/一時的な痛み</td></tr> </table> <p>注:晒される頻度とは、一般的にロボットと人の接近する度合いとなる。晒される時間は、ロボットのアクティブ状態(通電時)に対して見積もる。</p> <table border="1"> <tr><th colspan="3">危害の発生確率(Ph=F+Ps+A)</th></tr> <tr><th>晒される頻度/時間(F)</th><th>危険事象の発生確率(Ps)</th><th>回避可能性(A)</th></tr> <tr><td>4 連続的/常時</td><td>4 高い(起こりやすい)</td><td></td></tr> <tr><td>3 動作中頻繁/長時間</td><td>3 ありえる</td><td>3 不可能</td></tr> <tr><td>2 動作中数回/短時間</td><td>2 可能性あり</td><td></td></tr> <tr><td>1 まれ/瞬間的</td><td>1 低い(まれ)</td><td>1 条件付きで可能性あり</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th colspan="2"></th><th colspan="11">危害の発生確率(Ph)</th></tr> <tr><th colspan="2"></th><th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>6</th><th>7</th><th>8</th><th>9</th><th>10</th><th>11</th><th colspan="2"></th></tr> <tr><th rowspan="4">危害の酷さ(S)</th><th>1</th><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td></td><td></td></tr> <tr><th>2</th><td>6</td><td>8</td><td>10</td><td>12</td><td>14</td><td>16</td><td>18</td><td>20</td><td>22</td><td></td><td>← リスク低減推奨</td></tr> <tr><th>3</th><td>9</td><td>12</td><td>15</td><td>18</td><td>21</td><td>24</td><td>27</td><td>30</td><td>33</td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td>12</td><td>16</td><td>20</td><td>24</td><td>28</td><td>32</td><td>36</td><td>40</td><td>44</td><td></td><td>← リスク低減必要</td></tr> </table>	危害の酷さ(S)		4	重大障害(長期間治療)	3	医療措置(短期回復)	2	応急手当て回復	1	無傷/一時的な痛み	危害の発生確率(Ph=F+Ps+A)			晒される頻度/時間(F)	危険事象の発生確率(Ps)	回避可能性(A)	4 連続的/常時	4 高い(起こりやすい)		3 動作中頻繁/長時間	3 ありえる	3 不可能	2 動作中数回/短時間	2 可能性あり		1 まれ/瞬間的	1 低い(まれ)	1 条件付きで可能性あり			危害の発生確率(Ph)													3	4	5	6	7	8	9	10	11			危害の酷さ(S)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11			2	6	8	10	12	14	16	18	20	22		← リスク低減推奨	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33			4	12	16	20	24	28	32	36	40	44		← リスク低減必要
	危害の酷さ(S)																																																																																																								
4	重大障害(長期間治療)																																																																																																								
3	医療措置(短期回復)																																																																																																								
2	応急手当て回復																																																																																																								
1	無傷/一時的な痛み																																																																																																								
危害の発生確率(Ph=F+Ps+A)																																																																																																									
晒される頻度/時間(F)	危険事象の発生確率(Ps)	回避可能性(A)																																																																																																							
4 連続的/常時	4 高い(起こりやすい)																																																																																																								
3 動作中頻繁/長時間	3 ありえる	3 不可能																																																																																																							
2 動作中数回/短時間	2 可能性あり																																																																																																								
1 まれ/瞬間的	1 低い(まれ)	1 条件付きで可能性あり																																																																																																							
		危害の発生確率(Ph)																																																																																																							
		3	4	5	6	7	8	9	10	11																																																																																															
危害の酷さ(S)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11																																																																																															
	2	6	8	10	12	14	16	18	20	22		← リスク低減推奨																																																																																													
	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33																																																																																															
	4	12	16	20	24	28	32	36	40	44		← リスク低減必要																																																																																													
①ロボットは店舗入り口と屋内駐車場内回収場所間の平坦な通路を移動する。 ②駐車場は施設されないため、客(乳児は除く)又は店員が経路上に存在する可能性がある。 ③ロボットは閉店後駐車場の車が退出後に経路を1周する。 ④ロボットは経路へ出発前に所定の充電場所へ移動する。 ⑤ロボットの運転寿命は20,000時間とし、ブレーキは1週間毎に点検する。																																																																																																									

(b) 表紙シート

危険源同定						リスク見積						
段階	No.	危険源	危険状態/危険事象	危険区域	対象者	危害の 酷さ S	危害の発生確率 Ph			リスク点 数 R	備考	
							頻度 F	確率 Ps	回避 A			
設定	1	専用治具とカート間で手指の押しつぶし	手で押さえているカートへロボットの専用治具が挿入/押さえ位置不全による専用治具との接触	専用治具周り(進行方向)	要員(訓練された店員)	3	6	2	3	1	18	
	2		ロボットの専用治具が挿入中カート位置ずれ/専用治具に衣服が挟み込まれて専用治具に接触			3	8	2	3	3	24	
運転	3	本体(移動機構)と身体との衝突	経路上への急な進入/ロボットが減速しきれずに身体へ接触	経路上(ロボット直前)	要員	3	4	1	2	1	12	
	4		第三者	3	7	1	3	3	21	幼児、高齢者ではSを再検討		
保守/修理	5	車輪に足首が巻き込まれ	ブレーキ試験中に停止状態から動き出す/つま先を車輪と本体の隙間に引き込まれ	ロボット周辺	要員	2	7	2	2	3	14	



No.1の想定作業

(c) 初期リスクアセスメントシート

初期リスク分析結果			リスク低減			再リスク見積								
段階	No.	危険源	リスク点数 R	優先順位	保護方策(メーカーによる工学的手段)	危害の 酷さ S	危害の発生確率 Ph			リスク点 数 R	制御関連 部の安全 性能目標	残留リスク 方策(ユーザに依存)	備考(参照規格等)	
							頻度 F	確率 Ps	回避 A					
設定	1	専用治具とカート間で手指の押しつぶし	18 / 24	1	専用治具を挿入方式から引っかけ式に変更	2	2	3	1	6		JIS B9711 JIS C0508, ISO/DIS13856		
				2	専用治具にカバー付加	3	3	1	3				1	
				3	挟み込み防止センサ設置	3	2	1	3				1	
	2			1	専用治具を挿入方式から引っかけ式に変更	2	5	2	3	3			10	IEC60947-5-8 手順書 方策併用による受容
				2	カート位置決め用ガイドの設置	3		1	3	3				
				4	イネーブル装置の利用	3		2	3	1				
運転	3 / 4	本体(移動機構)と身体との衝突	12 / 21	1	移動速度の制限	2	1	3	3	6	手順書	幼児、高齢者ではS及びAの低減効果を再検討		
				3	前方以外の人の検出装置設置、速度監視機能	3	3	1	1				3	
				4	警告音・表示器	3	1	3	1				1	
				保守	5	車輪に足首が巻き込まれ	14	1	本体の軽量化、本体内に車輪が内蔵				1	5
3	過負荷リミッタの装備	2	2					1	3	3				

(d) 再リスクアセスメントシート

図 3.2-8 非搭乗型自律移動ロボット(ショッピングカートロボット)用ひな形シート

対象ロボット名称	型式	基本仕様
立ち上がり動作支援スーツ	XXX-XXXX	<p>ロボットタイプ:高齢者及び身体障がい者向け下肢装着型ロボット(立ち上がりアシスト)</p> <p>外寸:500W×350D×1000H、質量:30kg(空気圧源除く)</p> <p>駆動源:0.5MPaコンプレッサ(別置き)又は圧縮タンク(椅子に付帯)、DC24Vバッテリー(電磁弁、制御用)</p> <p>関節機構:股関節屈伸、膝関節屈伸、足首屈曲(各々左右下肢)</p> <p>アクチュエータ:ゴム人工筋(マッキベン型)の拮抗配置(股、膝)、単独配置(足首)</p> <p>アクチュエータ駆動:小型電磁弁によるPWM駆動</p> <p>アシスト能力:股関節30Nm,90deg、膝関節20Nm,90deg</p> <p>アシストモード:立ち上がりパターン自動再生/マニュアル再生の切り替え、姿勢固定時のアシスト量可変</p> <p>制御方式:力制御モード、ハイブリッド制御モード</p> <p>装着方法:ベルト(腰部、大腿部、膝下、足首、足甲)、人工筋と関節部にはカバー</p> <p>安全機能:トルクセンサ+エンコーダによる関節角度とトルク監視(股、膝)、エンコーダによる関節角度監視(足首)、接触センサによる足裏接地確認</p>
		

(a) 基本仕様シート

対象ロボット名称		実施者	実施日																																																																											
立ち上がり動作支援スーツ		(担当者の所属) 立案者、チーム参加者、リーダー、承認者等	初回: 第1回改訂:																																																																											
ライフサイクル該当段階	装着、運転、保守	分析方法(ツール)	積算法(一部加算法を適用)																																																																											
使用上の制限	意図した使用	<p>リスクの見積/評価基準</p> <p>算出式:リスク点数(R)=危害の酷さ(S)×危害の発生確率(Ph)</p> <p>判定基準:3≤R≤6 十分低い/無視できる(リスク低減は不要) 7≤R≤14 低い~中程度/条件付き受容/検討を要する(リスク低減を推奨) 15≤R≤44 高い/受容できない(リスク低減が必要)</p>																																																																												
	合理的に予見できる誤使用	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2">危害の酷さ(S)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4</td> <td>重大障害(長期間治療)</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>医療措置(短期回復)</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>応急手当て回復</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>無傷/一時的な痛み</td> </tr> </tbody> </table> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-left: auto; margin-right: auto; width: fit-content;"> <p>注:晒される頻度は、危険源の性質と経過時間を考慮する。装着時に発生する危険源に対しては、装着時間に対する運用時間に対して見積もる。</p> </div>		危害の酷さ(S)		4	重大障害(長期間治療)	3	医療措置(短期回復)	2	応急手当て回復	1	無傷/一時的な痛み																																																																	
	危害の酷さ(S)																																																																													
4	重大障害(長期間治療)																																																																													
3	医療措置(短期回復)																																																																													
2	応急手当て回復																																																																													
1	無傷/一時的な痛み																																																																													
時意図制した空間/	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="4">危害の発生確率(Ph=F+Ps+A)</th> </tr> <tr> <th>晒される頻度/時間(F)</th> <th>危険事象の発生確率(Ps)</th> <th colspan="2">回避可能性(A)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4 連続的/常時</td> <td>4 高い(起こりやすい)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3 動作中頻繁/長時間</td> <td>3 ありえる</td> <td>3</td> <td>不可能</td> </tr> <tr> <td>2 動作中数回/短時間</td> <td>2 可能性あり</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>1 まれ/瞬間的</td> <td>1 低い(まれ)</td> <td>1</td> <td>条件付きで可能性あり</td> </tr> </tbody> </table>		危害の発生確率(Ph=F+Ps+A)				晒される頻度/時間(F)	危険事象の発生確率(Ps)	回避可能性(A)		4 連続的/常時	4 高い(起こりやすい)			3 動作中頻繁/長時間	3 ありえる	3	不可能	2 動作中数回/短時間	2 可能性あり			1 まれ/瞬間的	1 低い(まれ)	1	条件付きで可能性あり																																																				
危害の発生確率(Ph=F+Ps+A)																																																																														
晒される頻度/時間(F)	危険事象の発生確率(Ps)	回避可能性(A)																																																																												
4 連続的/常時	4 高い(起こりやすい)																																																																													
3 動作中頻繁/長時間	3 ありえる	3	不可能																																																																											
2 動作中数回/短時間	2 可能性あり																																																																													
1 まれ/瞬間的	1 低い(まれ)	1	条件付きで可能性あり																																																																											
	<p>①高齢者や身体障がい者が、椅子やベッドに腰掛けた状態から立ち上がり動作を訓練するために使用する。歩行は空気ホースの届く範囲で最小限可能。</p> <p>②立ち上がりパターンの設定、装着は介護者が行い、運転時も介護者が立ち会う。介護者は緊急停止(位置保持またはアシスト停止)が可能。</p> <p>③バッテリー充電/交換・保守等は、介護者が習得して行う。</p> <p>④装着者の立ち上がり訓練は有資格者による指導のもとに実施される。</p>																																																																													
	<p>①装着不完全のままの運転。</p> <p>②介護者が誤った立ち上がりパターンを設定して運転する。</p> <p>③運転中に空気ホースが抜けてアシストがオフとなる。</p> <p>④介護者以外の第三者が装着あるいは停止させる。</p> <p>⑤立ち上がりパターン以外の動作や姿勢をとる。</p> <p>⑥歩行アシスト時の片足状態でバランスを失う。</p> <p>⑦アシスト力に抵抗して身体に負荷がかかる。</p> <p>⑧アシストがない状態で立ち上がり動作を行う。</p>																																																																													
	<p>①屋内の病室内またはリハビリ用室内で、最大30分/日使用する。</p> <p>②使用場所には介護者以外の第三者が存在する可能性がある。</p> <p>③空気圧源は施設内配管口からホースで接続するが、小型独立コンプレッサまたは圧縮タンクから供給することもある。使用した空気は電磁弁からサイレンサを通して排出される。</p> <p>④バッテリー充電は特定場所で行い、充電済みバッテリーを交換する。</p> <p>⑤使用期間は20,000時間とし、人工筋と電磁弁は1ヶ月毎に点検する。</p>																																																																													
		<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="11">危害の発生確率(Ph)</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>6</th><th>7</th><th>8</th><th>9</th><th>10</th><th>11</th> <th colspan="2"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="4">危害の酷さ(S)</th> <th>1</th> <td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td> <td colspan="2">← リスク低減推奨</td> </tr> <tr> <th>2</th> <td>6</td><td>8</td><td>10</td><td>12</td><td>14</td><td>16</td><td>18</td><td>20</td><td>22</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <th>3</th> <td>9</td><td>12</td><td>15</td><td>18</td><td>21</td><td>24</td><td>27</td><td>30</td><td>33</td> <td colspan="2">← リスク低減必要</td> </tr> <tr> <th>4</th> <td>12</td><td>16</td><td>20</td><td>24</td><td>28</td><td>32</td><td>36</td><td>40</td><td>44</td> <td colspan="2"></td> </tr> </tbody> </table>				危害の発生確率(Ph)													3	4	5	6	7	8	9	10	11			危害の酷さ(S)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	← リスク低減推奨		2	6	8	10	12	14	16	18	20	22			3	9	12	15	18	21	24	27	30	33	← リスク低減必要		4	12	16	20	24	28	32	36	40	44		
		危害の発生確率(Ph)																																																																												
		3	4	5	6	7	8	9	10	11																																																																				
危害の酷さ(S)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	← リスク低減推奨																																																																			
	2	6	8	10	12	14	16	18	20	22																																																																				
	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33	← リスク低減必要																																																																			
	4	12	16	20	24	28	32	36	40	44																																																																				

(b) 表紙シート

危険源同定					リスク見積							
段階	No.	危険源	危険状態/危険事象	想定危害	対象者	危害の 酷さ S	危害の発生確率 Ph			リスク点 数 R	備考	
							頻度 F	確率 Ps	回避 A			
装着	1	本体の落下	固定用ベルトが緩くて、動作確認中に本体がずり落ちて足に衝突	足部の打撲	装着者	2	9	4	2	3	18	
	2	不適切な長さで装着	人体寸法にフィットせずに装着して、動作確認中に関節に過負荷がかかる	膝のねん挫	装着者	3	9	4	2	3	27	
	3	アシスト量の誤入力	介護者がアシスト量を過大設定して、動作確認中に急に立ち上がり転倒して手を着く	手首の骨折	装着者	4	9	4	2	3	36	
運転	4	本体フレームのこすれ	立ち上がり繰り返し動作中にベルトがずれて、本体ステータ部が膝部にこすれる	膝の擦過傷	装着者	2	7	4	2	1	14	
	5	空気ホースに引っかかり転倒	空気ホースに足が引っかかり、転倒して手を着く	手首の骨折	装着者	4	6	2	3	1	24	
	6	制御システムの故障により過大アシスト	制御装置の異常により、アシスト力が過大となり、関節に過負荷がかかる	膝のねん挫	装着者	3	7	2	2	3	21	
	7											装着により絶えず危険源に晒されるとした
保守	8	空気ホースによる衝撃	空気ホースコネクタ点検中に、加圧状態のホースが外れて目に当たる	眼球打撲	介護者、装着者	3	6	1	2	3	18	
	9	残留空気圧力の放出	残留圧力により膝下の不意の振り上げにより、顔を蹴り上げられる	顔面打撲	介護者	2	6	1	2	3	12	
	10	関節機構部への巻き込まれ	カバーを外して関節角度調整中、指を巻き込まれる	指の骨折	介護者	4	6	1	2	3	24	
	11											

(c) 初期リスクアセスメントシート

初期リスク分析結果				リスク低減			再リスク見積						
段階	No.	危険源	リスク点数 R	優先順位	保護方策(メーカーによる工学的手段)	危害の 酷さ S	危害の発生確率 Ph			リスク点 数 R	保護方策 組み合わせ時のR	残留リスク 方策(ユーザに依存)	備考(参照規格類等)
							頻度 F	確率 Ps	回避 A				
装着	1	本体の落下	18	1	テンションベルトの併用	1	9	4	2	3	9	4	過大なテンションに対する制限が必要
				4	落下防止帯の併用	2	4	1	2	1	8		
<p>1は危険源除去又は酷さの低減、2は暴露排除又は頻度低減、3は事象発生確率低減、4は回避又は危害の制限を行う。</p> <p>方策が同時に(重複して)機能するとして、各リスク要素の最低値をとる</p>													
運転	4	本体フレームのこすれ	14	1	テンションベルトの使用	1	7	4	2	1	7	4	過大なテンションに対する制限が必要 トルク監視の安全性能は要検討
				3	適切な安全制御性能を持つ関節のトルク監視	2	4	2	1	1	8		
<p>安全制御性能はPsを1ランク下げるとして、危険側故障率を10-6未満にするという前提。 ただし、解説案のこの故障率の値とSIL PLとの関係は改めて検討。また、人的要因の含め方(重み付け)も必要に応じて考慮。</p>													
保守	8	空気ホースによる衝撃	18	1	逆止弁の付加	1	5	1	1	3	5	3	(保護眼鏡の着用)
				4	ホースの結束	3	4	1	2	1	12		

(d) 再リスクアセスメントシート

図 3.2-9 装着型ロボット(立ち上がり動作支援スーツ)用ひな形シート

参考文献

- [1] JIS B 9700:2013, 機械類の安全性—設計のための一般原則—リスクアセスメント及びリスク低減, 日本規格協会
- [2] JIS T 14971:2012, 医療機器—リスクマネジメントの医療機器への適用, 日本規格協会

3.2.4 保護方策配置方法の概要

初期リスクアセスメント結果からリスク低減の必要が生じた場合, 図 3.2.2 の手順 5 の順序に従ったリスク低減方策の適用を行い, 適用するリスク低減手段のリスク低減効果はリスクアセスメントシートの再リスク評価により確認する. リスクを低減させる各種保護方策の適用順位は, 図 3.2.1 の優先度によることが合理的な戦略[1]とされており, 産業用ロボットを含めた一般産業用機械設備では, 図 3.2.10 に示すような保護方策の分類がされている.

同図において, ロボットメーカーが施すべき保護方策 (A~D) のうち, A, B, C は主に工学的的手段として実現する手段であり, メーカーは必要な方策を選定しなければならない. 既に機械安全規格[1]では標準方策が網羅されており, 主に B に属する安全防護物が規格適合品として市販されている. これらの安全防護物は, 図 3.2.10 に示すように人と機械の「隔離」と, 人が機械に近接したら「停止」という安全原則に則っている. B に属する主要な装置類は図 3.2.11 のように分類され, 防護の目的別に選択される. このうち, 隔離目的のガード類は, 移動ロボットのように設けることが困難 (走行エリア全体をカバーできる場合を除く) であるため, 停止による安全防護 (主に人の接近を検知するセンサ類) に委ねざるを得ない. 一方, 作業者固定による安全防護は, 機械を手動操作する場合に適用され, 意図しない操作や無意識の誤操作による機械への動作指令を減らすための装置を使用する.

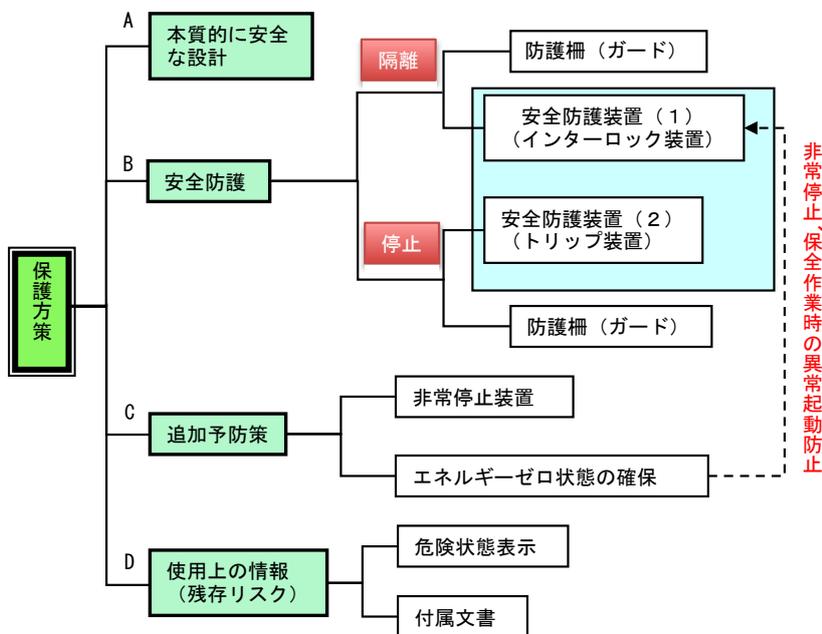


図 3.2-10 保護方策の種類と分類

これらはロボットの教示作業や手動操縦用に使用されている。

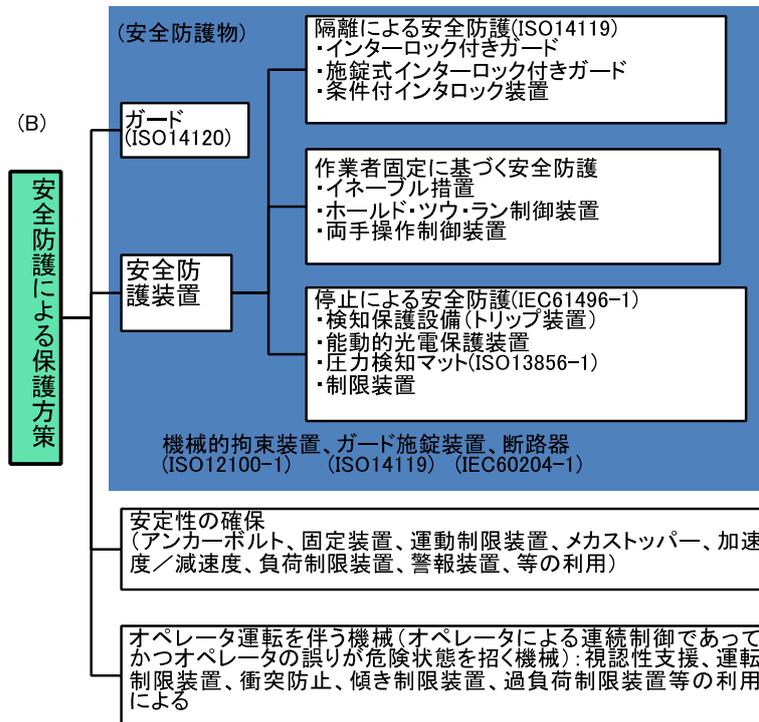


図 3. 2-11 安全防護物の種類と分類

なお、以上の安全防護のための装置(保護装置という)については、電気的安全要件[2]、電気機械システム安全要件[3]、電気/電子/プログラマブル電子システム要件[4]などに該当する場合、これらの安全要求事項を満足する構造や安全性能が規定されている。対象機械に適用すべき保護装置類の構造や安全性能は、基本的にリスクアセスメント結果により目標が決定され選択する。

次に、本質的安全方策をふくめたリスク低減方策の系統的な分類を行い、各種方策、汎用基準値、適用例を包括的に把握するために一覧表を作成した。これは、対象危険源が危険事象、危害へと遷移する条件をFTA(故障樹解析)等を用いて要素に分解し、それらの要素の成立条件を明らかにすることにより、一般的方策の位置付けと分類を行う手法[5]を利用した。そして、規格や文献等から成立条件となる汎用基準値を求め、その値を満足する方策として本質的安全設計方策と安全防護物(保護装置類等)を挙げていくものである。

ここでは、人体に対して直接物理的作用を生じる一般的機械的危険源を対象にして作成した保護方策の一覧表を表3.2.8に示す。構成要件は全ての要素が成立しなければ危害に至らないというAND条件で結びつけられる。したがって、各構成要件に対する一般的保護方策は、いずれか1つでも成立すれば(OR条件)危害には至らないことになる。リスク低減方策の例はロボットに適用可能な手段のみリストアップした。なお、汎用基準値はロボット以外の機械設備も想定して記載したが、対象対象とする機械や人の属性により幅があり、全てのロボットに参考となるわけではないことに注意が必要である。また、この一覧表では保護方策を分類して当てはめただけであるので、該当する保護方策がない場合は使用条件の変更か運用段階での対応に委ねることになる。

表 3.2-8 主な機械的危険源に対する保護方策一覧表

No.	危険源	定義	構成要件 (AND関係)	一般的な保護方策	汎用基準値	リスク低減方策例		
						本質的安全設計方策	安全防護および補完的保護方策	
1	押しつぶし	人体を間において、2つの可動部が向き合って動く。または、1つの可動部が固定部に向かつて動くことにより、その最小間隔が、挟んだ人体より小さくなること	押し力	押し力排除				
				押し力軽減	1)可動ガードの基準値(保護有)150N 2)可動ガードの基準値(保護無)75N 3)電車のドア開め力50~500N以下 4)エレベータードア開め力150N 5)自動回転ドア残留閉じ力80N 6)アシストロボック225N 7)人体痛覚耐性値97.5N(上腕)	(過剰な)力出力抑制 バラッサ機構 逃げ機構(クラッチ等)	力出力制御(監視)	
				対抗力	対抗力排除 対抗力軽減	(押し力と同様)	(押し力と同様)	
				間隔が人体より小さくなる	間隔を確保する	最小隙間(指25mm~胴体500mm) 通路の安全隙間(幅0.5m以上、高さ2.1m以上)	可動部との間隔確保 移動体通路間隔確保 アクチュエータのストローク抑制	可動部カバー メカストップ ロックピン 相対位置監視
				人体が間にある	押しつぶしの区域に、人体を間に入れない	機械プレス安全金型8mm シュレッダー開口部4mm以下(刃先距離2mm) 安全距離(最小隙間と関連)	形状効果(隙間と距離関係)	可動部カバー ガード、フェンス オブスタクル
	人存在との相互インタロック(押し力、対抗力、間隔)	安全性能(カテゴリ、PL、SIL)	多重化、診断機能	ガードインタロック トリップ装置(センサ) 力・位置制御(停止・回避)				
2	せん断	互いに逆向きで平行な2つの力(せん断力)が作用し、人体を挟むこと	せん断力	せん断力排除 せん断軽減	自動回転ドア残留閉じ力80N	(過剰な)力出力抑制 逃げ機構(クラッチ等)	力出力制御(監視)	
			2つの力の間隔	力の間隔を十分に広げる	25mm以上(指)			
			挟み開口間隔が人体より小さくなる	開口間隔を確保する	最小隙間(指25mm~胴体500mm)	可動部との間隔確保	可動部カバー メカストップ ロックピン 相対位置監視	
			人体が間にある	人体を間に入れない	安全距離(最小隙間と関連)		可動部カバー ガード、フェンス オブスタクル	
	人存在との相互インタロック(せん断力、2つの力間隔、開口間隔)	安全性能(カテゴリ、PL、SIL)	多重化、診断機能	ガードインタロック トリップ装置(センサ) 力・位置制御(停止・回避)				
3	切断	鋭利なエッジまたはエッジ状のものがあ る 人体と接触	エッジを丸める		R加工、面取り			
			エッジ高さを削減		面取り	スリーブ		
			エッジを動かさない 人体と接触させない 人体を動かさない	安全距離(最小隙間と関連)	内蔵化	カバー、ガード		
	人存在との相互インタロック(エッジの存在)	安全性能(カテゴリ、PL、SIL)	多重化、診断機能	ガードインタロック 力・位置制御(停止・回避)				
4	引き込み	回転部と固定部、または引き込み部と固定部の摩擦効果や形状効果により、人体や衣服を掴み、引込むこと	1つの回転部あるいは直進運動力	接線力軽減:回転トルクを軽減 接線力軽減:回転半径を拡大 直進力軽減		(過剰な)力出力抑制	力出力制御(監視)	
			移動側(回転部、直進運動部)の拘束点	摩擦軽減		(過剰な)力出力抑制	力出力制御(監視)	
			固定部(移動部と合わせて、拘束と損傷の補助)	凹凸排除	ローラ溝(8mm幅、4mm深さ)	スライド可動部フラット化		
				十分小さい隙間	印刷機ローラ6mm		カバー、ガード	
				十分大きい隙間	最小隙間(指25mm~胴体500mm) 印刷機ローラ120mm	可動部の配置		
				固定部排除				
				固定力軽減				
人体または衣服の端の接触	人体、衣服を接触させない	安全距離(最小隙間と関連) IPコード	可動部の配置	カバー、ガード、オブスタクル				
	人(衣服)存在との相互インタロック(2つの移動部、拘束点、固定部の存在)	安全性能(カテゴリ、PL、SIL)	多重化、診断機能	ガードインタロック トリップ装置(センサ) 力・位置制御(停止・回避)				
	運動する物体が人体に衝突し、物体の運動エ	運動エネルギー低減:速度低減 運動エネルギー低減:質量低減	1)可動ガードの閉運動エネルギー(保護有:10J以下) 2)可動ガードの閉運動エネルギー(保護無:4J以下) 3)安全帯:5kN以下 4)人体転落5kN(1m高さ) 5)自動車衝突AIS、HIC	(過剰な)速度抑制	減速制御(監視)			
				軽量化 飛散物の細粒化(安全ガラス等)	カバー ガード			

表 3.2-8 の続き

5	衝撃	エネルギーにより人体等に傷害や損傷を与えること(ここでは人の方から物体に衝突する場合は含まない)	人への衝突	立	衝突回避	総合システム停止性能		落下防止チェーン、ネット、止め具 ガイド機構
				常時成立	エネルギー伝達の遮断	頭蓋骨損傷: 6kN以上(保護帽衝撃伝達: 5kN以下)	クラッシュアブルシャーシ トルクリミッタ、クラッチ	パンパ、保護帽、緩衝材
6	突き刺し	固定または可動する尖った部位で、人体を突き刺すこと	尖り部位	常時成立	尖りを丸める 断面積を拡大する 尖り点数増加 押し力排除 押し力軽減	(エッジと同様に考えられるが、具体的な数字なし)		
				常時成立	人体との接触排除 対抗力排除 対抗力軽減	安全距離(最小隙間と関連) 安全靴の踏抜き強度: 1.1kN以上		カバー、ガード、フェンス
			常時成立	人存在(運動)との相互インタロック(尖り部運動)	安全性能(カテゴリー、PL、SIL)	多重化、診断機能	ガードインタロック シートベルト、エアバッグ トリップ装置(センサ) 力・位置制御(停止・制動・回避)	
			常時成立	摩擦係数を軽減 表面粗さ軽減 運動軽減 押し力軽減				
7	こすれまたは擦りむき	人体が擦られ、熱的または物理的に損傷を受けること(エッジは切断に含む)	擦る物体	常時成立	摩擦係数を軽減 表面粗さ軽減 運動軽減 押し力軽減			
			擦る物体	常時成立	人体との接触排除	安全距離(最小隙間と関連)		カバー、ガード、フェンス
			擦る物体	常時成立	人存在(運動)との相互インタロック(擦る物体の存在・運動)	安全性能(カテゴリー、PL、SIL)	多重化、診断機能	ガードインタロック トリップ装置(センサ) 力制御

参考文献

- [1] JIS B 9700:2013, 機械類の安全性—設計のための一般原則—リスクアセスメント及びリスク低減, 日本規格協会
- [2] JIS B 9960-1:2008, 機械類の安全性—機械の電気装置—第1部: 一般要求事項, 日本規格協会
- [3] JIS B 9705-1:2011, 機械類の安全性—制御システムの安全関連部—第1部: 設計のための一般原則, 日本規格協会
- [4] IEC 61508 series:2010, Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related system.
- [5] 機械・リスク低減方策技術, 安全技術応用研究会, 2012

3.3 機能安全設計支援ツール [JC]

3.3.1 ハードウェア支援ツールの開発

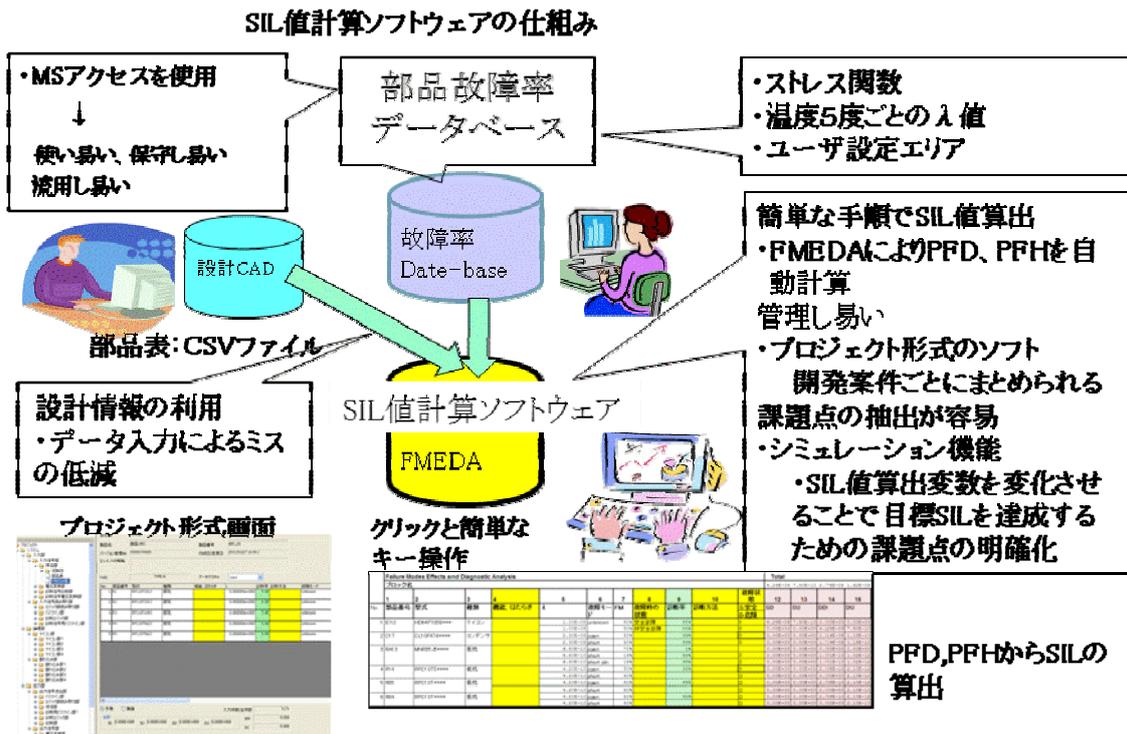
3.3.1.1 目的

生活支援ロボット実用化プロジェクトにおいて、安全関連系に組み込まれるハードウェアの安全度水準 (SIL ; Safety Integrity Level) が要求される安全度水準を満たしていることを、確率論的に故障確率の評価を行って検証する必要があるが、この作業は、煩雑な検証評価作業でもある。この作業の省力化を支援し、安全度水準(SIL)の算出の標準化を行うため、ソフトウェア「PROH-SIL」の研究開発を行った。

3.3.1.2 概要

本ツールでは、電子部品等の1つ1つの故障率データのデータベースを作成し、故障率データを共通化フォーマットに標準化した。

本ツールは、本データベースと電子回路設計CADの部品リストとをリンクし、自動的にFMECA表を作成し、FMECA作業を行うことで生活支援ロボットの安全部の危険側故障率を自動的に計算できるソフトウェア構成とした。この結果、安全度(SIL値)の計算の信頼性が上がり、その精度の向上を図ることができた。



安全度(SIL値)の計算には、いくつかのパラメータが関連している。計算の過程で、これらパラメータの値を決定すると、安全度水準(SIL値)が算出されてくる。本ソフトウェアの付加機能として、SIL計算に関連するパラメータを変化させることで、安全度(SIL値)の変化をシミュレートする機能を設けた。これを利用し、各種パラメータの変化と安全度(SIL値)の関係付けを行い、それらを図表等で表示することで、安全度(SIL値)のシミュレーションを行うことができる。

3.3.2 ソフトウェアのひな形（決定論的原因故障）

3.3.2.1 目的

本研究開発は、ソフトウェアの SIL 対応の技術と方法のひな形を示し、ソフトウェアの信頼性を確保するための決定論的原因故障の低減策のひな形を研究開発することを目的とする。

3.3.2.2. 特長

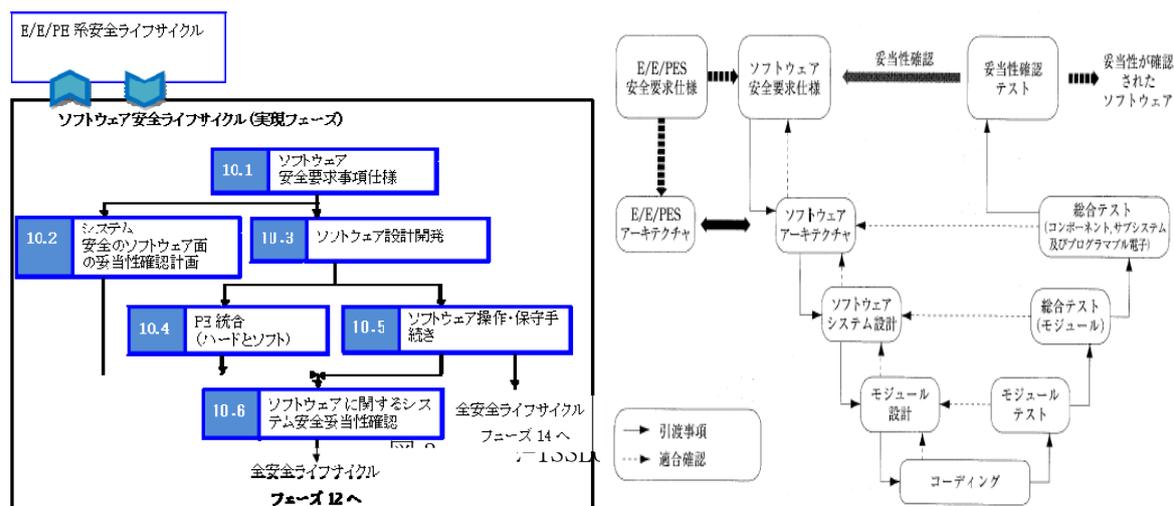
ソフトウェアの目標安全度を達成するため、その安全度レベルに応じた技術や方法を選択することを IEC61508 は求めている。ここでは、SIL2 レベルを達成するため必要な技術や方法のひな形を提示する。また、一部 SIL3 レベルの技術や方法も提示する。本ひな形は、パソコンを使用した事例である。

3.3.2.3 ドキュメントのひな形

(1) 文書(ドキュメント)の解説

a) ソフトウェア安全ライフサイクル

各ソフトウェア安全ライフサイクルで要求される文書をひな形として作成し、提示する。



左上の図がソフトウェア SSLC である。

b) Vモデル

ソフトウェアの開発工程は、右上図のようなV字型のブロック図で表される。これは、Vモデルと呼ばれる。IEC61508-3では、この工程でソフトウェアを開発することが推奨されている。文書は、ソフトウェア開発時における決定論的原因故障の対策の証拠である。その文書の内容は、規格で要件として規定されている。ひな形では、その要件に従った文書を作成している。

3.3.3 状態遷移図による SIL 計算

3.3.3.1 目的

ハードウェアの危険側故障率は、IEC61508-6に提示されるモデル式に従って計算する。このモデルは、冗長チャンネルが同じ危険側故障率であることが前提になっている。状態遷移図による SIL 計算は、多様化冗長系に使用するためのものである。状態遷移図によるマ

マルコフモデルでの PFD, PFH の算出の研究開発を行い, そのソフトウェアの実用化を行った.

3.3.3.2 特長

状態遷移図による SIL 計算は, IEC61508-6 で提示されるハードウェア構成モデルの冗長化チャンネルにおいて, チャンネルごとに危険側故障率が異なるとして, 指定時間経過後の危険側故障率を状態遷移図を用いてマルコフモデルで計算する.

マルコフモデルは以下の 6 つのモデルについて作成した.

- ①. 1oo1 ②. 1oo2 ③. 2oo2 ④. 2oo3 ⑤. 1oo3 ⑥. 1oo2D

3.3.3.3 状態遷移図 1oo2 の例

1oo2 は, IEC61508 の信頼性ブロック図モデルを基に作成すると左した図になる.

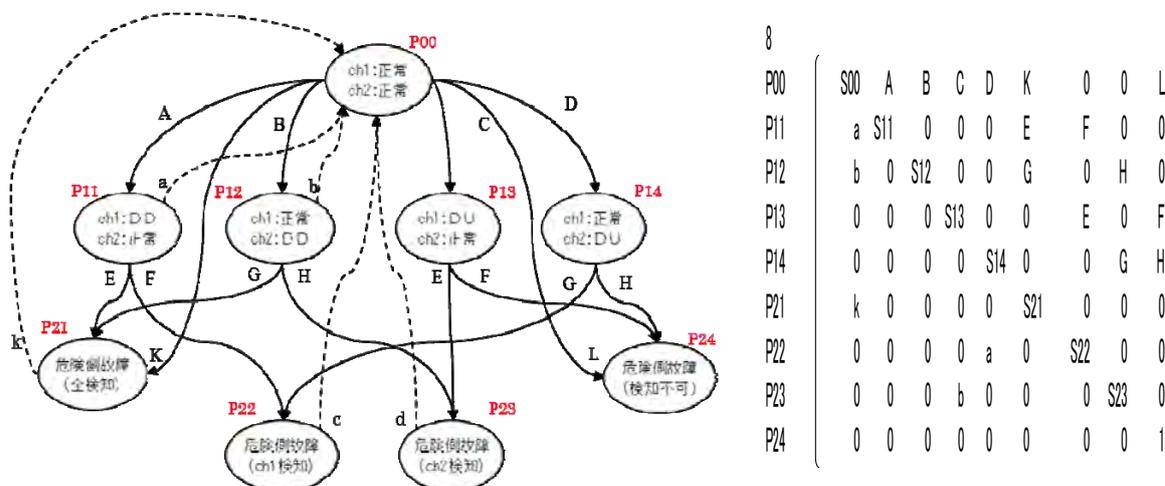


図 3.3.3.3-1 1oo2 状態遷移図とその行列式

P00 の正常状態から, チャンネル 1 が正常でチャンネル 2 が故障になる場合とチャンネル 2 が正常でチャンネル 1 が故障になる場合に分けて状態遷移図を作成する. この時, チャンネル 1 とチャンネル 2 の危険側故障率は異なるとして遷移を展開する. この状態遷移図より 1oo2 の行列式が求められる. この式を解いて PFD, PFH を算出する.

詳細は付属書 E.1 から E.3 及び E.3.1 を参照のこと.

3.4 物理演算による事故シミュレーションツール [産総研]

3.4.1 目的

生活支援ロボットは萌芽段階にあるロボット分野であり、その事故については知見が十分に得られていないので、事故のリスクを評価することに特有の困難さがあると考えられる。この問題を解決するために、コンピュータシミュレーション上で仮想的に事故を起こしてみることができるシミュレータ（以下「インタラクティブ事故シミュレータ」）を構築して、今後起こり得る事故を可視化できるようにする。この研究開発の成果物はプロジェクトで整備するデータベースに入力されデータベースの公開条件の範囲で利用可能になる。

3.4.2 仕様概要

商用のゲームシミュレータ「Unity」上でロボット使用環境などのモデルを統合して「インタラクティブ事故シミュレータ」を構築する。Unityに内蔵されているシミュレーションエンジンは仮想世界ゲーム「SecondLife」のバックエンドに使われているもので、機構解析系シミュレータやFEM強度シミュレータよりもシミュレーション精度に劣る反面、リスク評価者に高いインタラクティブ性と直感的な事故の体験を提供できる。データとして、6パタンの想定使用環境、3パタンの属性のユーザモデルと4タイプのロボット、11種の事故発生のイベントと200種の物品のデータを用意した。シミュレータ上で自律動作するロボットはそれぞれの想定環境内で一定の繰り返し動作をし、人が操作するロボットはリスク評価者が操作するアバターとの間の拘束条件に従って動作する。全てのオブジェクトは運動時に周囲との接触判定をしており、接触時には反力で挙動が変わるか、あるいは接触物の組み合わせに対応付けられた事故のイベントが発生する。搭乗型のスリップ転倒時の挙動モデルは自動車事故シミュレータ「PC-Crash」で物理シミュレーションを行った結果を読み込んでシミュレーション精度を向上している。

シミュレータ上ではユーザが仮想空間でロボットを操作する事ができ、その結果はリアルタイムで計算されて仮想世界とのインタラクションが可視化される。その中で以下のような事故が起こり得る。

- (1) 生活安全ロボットが、住宅の内装（カーペット・カーテン等）を巻き込み身動きが取れなくなる。
- (2) 生活安全ロボットが、室内の階段昇降時にバランスを崩して転倒する
- (3) 生活安全ロボットが、暖房器具と接触・転倒し、倒れた暖房器具から出火する
- (4) 生活安全ロボットが、棚と衝突して、落ちてきた棚上の置物（本・花瓶など）で怪我をする
- (5) 生活安全ロボットが、人が着座中の椅子をひっかけ、椅子に着座中の人物を巻き込んで転倒する
- (6) 生活安全ロボットが、高速で柔らかい路面に侵入したとき、スタックして身動きが取れなくなる
- (7) 生活安全ロボットが屋外で水たまり等の路面に差し掛かったとき、スリップして転倒する
- (8) 生活安全ロボットが、公園の側道を走行中に飛び出してきた子供と衝突して転倒する
- (9) 生活安全ロボットが、公園の建造物に引っ掛かって転倒する
- (10) 生活安全ロボットが、柔らかい路面（土、砂場など）に侵入時、足を取られてバランスを崩して転倒する
- (11) 生活安全ロボットが、縁石を乗り越えようとしてバランスを崩して転倒する

- (12)生活安全ロボットが、坂道を下るとき、自重による加速が制動能力を超えてしまい、暴走する
- (13)生活安全ロボットが、バスへの搭乗時にバランスを崩して転倒する
- (14)生活安全ロボットが、急勾配の坂道に侵入したとき、パワー不足でバランスを崩して転倒する
- (15)生活安全ロボットが、小さな足場（脚立などの上）に立ったときにバランスを崩して落下・転倒する
- (16)生活安全ロボットが、オフィス内の配線に引っかかって転倒する
- (17)生活安全ロボットが、街角の人混みの中で通行人と接触して転倒する
- (18)生活安全ロボットが、エレベータ搭乗時に床との溝に引っ掛かり転倒する
- (19)視覚障害者が、障害物を認識できずに足を取られて転倒する

3.4.3 実装

実装の詳細は以下である。

- **プラットフォーム**：米ユニティ・テクノロジーズ社製 3D ゲームエンジン「Unity」ver. 4.0.1（図 3.4.3-1）
- **ロボット使用環境モデル**：6 パタン（図 3.4.3-2）
和風住居，洋風住居，オフィス，病院，公園，市街地（バス，電車含む）
- **ロボットユーザモデル**：3 パタン（図 3.4.3-3）
成人男性，成人女性，老人男性，ただし関節障害と歩行障害のバリエーションとして腰関節不自由，下半身片麻痺，肘関節不自由のパラメータ調整を含む
- **タイプ別のロボットモデル**：4 パタン（図 3.4.3-4）
搭乗型，装着型，移動作業型（操縦中心），移動作業型（自律中心）
- **事故発生イベント**：11 種
 - 搭乗型
 - ・ 走行時に自分から重量物にぶつかる
 - ・ 走行時にバスマットなど， μ が低い物体を轢いてスリップする
 - ・ 走行時に 10 c m以上の高さから落ちて転倒する
 - ・ 走行時に横からぶつけられる
 - ・ 走行時に他人を撥ね飛ばす
 - ・ 装着型
 - ・ 歩行時に自己，他者の影響で転倒する
 - ・ 歩行時に自分から重量物にぶつかって転倒する
 - ・ 歩行時に μ の低い物体に載って転倒する
 - ・ 歩行時に段差を踏み外して転倒する
 - ・ 移動作業型（操縦中心）
 - ・ 人や物と衝突して跳ね飛ばす
 - ・ 移動作業型（自律中心）
 - ・ 人や物と衝突して跳ね飛ばす

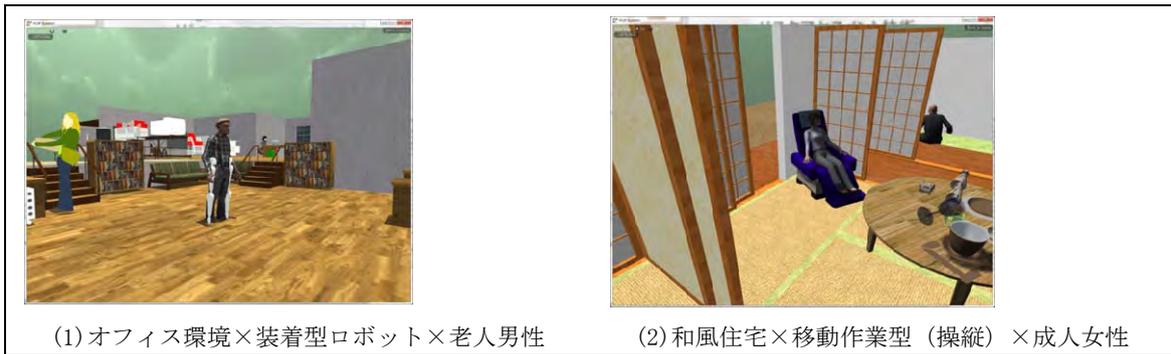


図 3.4.3-1 インタラクティブ事故シミュレータ実行例



図 3.4.3-2 ロボット使用環境モデル



図 3.4.3-3 ロボットユーザモデル



搭乗型



装着型



移動作業型（操縦中心）



移動作業型（自律中心）

図 3.4.3-4 生活支援ロボットのロボットタイプ（4タイプ）

3.4.4 メーカー評価結果

3.4.4.1 中間技術評価

2012年にプロジェクト参加全開発メーカーに対してアンケートによる中間技術評価を依頼し、表3.4.4.1-1、表3.4.4.1-2、表3.4.4.1-3に示すような回答を得た。この結果、ロボット使用環境モデル、ロボットユーザモデル、事故イベント数の3項目の評価について相対的に得点が低いことが分かった。また自由記述からはパラメトリックなシミュレーションのニーズやより多様な事故シナリオの作り込みのニーズがあることが伺える。この後の改修により評価の得点が低い3項目について拡充を行った。自由記述の指摘事項については今回の開発計画で対応できない物もあるが、一部は改修で対応した。

表 3.4.4.1-1 中間技術評価アンケート調査の回答の概要

属性	値
実施日	2012/12/10
有効回答数	8
回答者の開発経験年数（平均）	7.1年（1名無回答）
回答者の安元開発経験	全員有り

表 3.4.4.1-2 中間技術評価アンケート調査の結果

質問番号	質問文	結果
質問項目1 (5段階評価)	将来の生活支援ロボットのリスクを評価するに当たって、シミュレーション環境が整備されていると役に立つと考えられるでしょうか？	3.625
質問項目2 (記述)	シミュレーションを用いたリスク評価について改善点やコメントがありましたら教えて下さい	別記 次表項目2
質問項目3 (5段階評価)	物体の質感のシミュレーション精度は3Dゲームのレベルで十分でしょうか？	3.375
質問項目4 (5段階評価)	挙動のシミュレーションの精度は3Dゲームのレベルで十分でしょうか？	3.125
質問項目5 (記述)	ゲームシミュレーションの計算について、改善点やコメントがありましたら教えて下さい	別記 次表項目5
質問項目6 (5段階評価)	用意している想定使用環境（5場面）は十分でしょうか？	2.375
質問項目6 (記述)	十分ではない場合、どのような想定使用環境の追加が考えられるでしょうか？	別記 次表項目6
質問項目7 (5段階評価)	用意しているロボットユーザ属性（3パターン）は十分でしょうか？	2.125
質問項目7 (記述)	十分ではない場合、どのようなユーザ属性の追加が考えられるでしょうか？	別記 次表項目7
質問項目8 (5段階評価)	用意している事故発生のイベント（11イベント）は十分でしょうか？	2.375
質問項目8 (記述)	十分ではない場合、どのようなイベントの追加が考えられるでしょうか？（ご示唆を頂けますと幸いです）	別記 次表項目8
質問項目9 (5段階評価)	用意しているロボット以外の物品の種類（約200種）は十分でしょうか？	3.625
質問項目9	十分ではない場合、どのような種類の物品の追加が考えられるでしょうか？	別記

(記述)	か？ (リスクアセスメントの経験などを踏まえましてご示唆を頂けますと幸いです)	次表項目 9
質問項目 10 (記述)	シミュレーションに使われているデータについて、改善点やコメントがありましたら教えてください	別記 次表項目 10
質問項目 11 (記述)	要望やご提案、コメントなどありましたらお聞かせ下さい	別記 次表項目 11

表 3.4.4.1-3 中間技術評価アンケート自由記述欄のコメント

項目	記述
2	<ul style="list-style-type: none"> ● 車輪型で環境を移動するロボットの場合：リスク評価よりもリスク教育に利用できないか。 装着型で脚移動するロボットの場合：このシミュレータは移動時のシミュレーションを意図しているが、装着型ロボットは人の四肢の動きと一緒に動くため、移動にまつわるリスクは装着型ロボットが無い状態と大きく変わらない。ただし装着型ロボットの総重量が体重を大きく上回る場合などは、他者や障害物との衝突力の見積りがシミュレーションできた方が良い。(現状ではそのようなロボットは無い) 肉骨筋とその動的な特性が含まれた人体の力学シミュレータと、傷害に至る可能性のある負荷のデータベースがあれば、装着型ロボットの意図する動きをしたときのシミュレーションができて有用と思える。 ● シミュレーションと現実の相関が取れない限りは、危害の酷さに関してでも、指標に用いることもできません ● 実際発生するリスクと同程度であるという相関関係をはっきりしていれば役に立つと思われる ● 使用していないので分からない ● ロボットのモデルを反映させる手間が非常にかかるようであれば、使用しにくい物になると思われる。CAD からシミュレーション環境へ簡易にモデルを反映できると良い。 ● 高齢者や身体障害者の身体/認知特性(皮膚、運動能力、判断能力等)を考慮したリスク評価 ● 操縦でも自律でもない自動ロボットがありません ● 装着型については、対環境の要因以外に装着者そのものの要因があり、シミュレーション可能なか疑問である。
5	<ul style="list-style-type: none"> ● 精度がどのくらいか見積もられていれば良いと思える。スケールが合っていれば、シミュレーションを利用して当たりを付けることができる(衝突やスピン、空転、脱輪の程度が分かるというレベル)。実際の安全性評価のために利用するならば、ボーダーに近いロボットをゲーム用のもので評価して良いかは課題。また表面に弾性体を貼った場合の挙動や、接触による制御やストップを正しく模擬できるかも課題があるとおもわれる。 ● 目的がわからない。例えば転倒にしる、倒れ方を再現したいのか、転倒時の頭部などの加速度を再現したいのか。どちらにしても、現実と相関が取れない以上はイメージ絵と大差がない。 ● リスク評価の方法が各種選択できればよい。(リスクグラフ法、加算法、積算法・・・) ● ゲームとかではなく、きちんとシミュレーションできていることが大事 ● 上記ユーザ特性に加え、ロボットの動作や変形に伴う挟み込みや生活パターンを考慮した計算が望ましい ● 衝突された歩行者の、地形による挙動、危害について計算されているのでしょうか。
6	<ul style="list-style-type: none"> ● 斜面、凹凸のある路面など、屋外を意図したものが少ない。 子供が駆けまわる、寄ってくる、触ってくる、タックルしてくるなど、子供の動作パターンが含まれたエージェントが複数いる場合を模擬できないか。

	<ul style="list-style-type: none"> ● 各ロボットの適用範囲によるので、生活支援ロボットが広いため不足かと ● 屋外であれば、道路や歩道、踏み切りなど多様な環境がある。 ● 想定環境は、多い方が良い（シミュレーションで作れるだけ） ● 上記ユーザ特性に加え、ロボットの動作や変形に伴う挟み込みや生活パターンの考慮が必要 ● 都心、公共機関へのアクセスや、乗降
7	<ul style="list-style-type: none"> ● 外見だけが異なるのであれば、特に3パターンもいらぬ。装着型で言えば、複数の歩容を再現できるエージェントが入れば良い。 ● 実際の環境では、障害者や子供、ペットなども必要。 ● 想定環境は、多い方が良い（シミュレーションで作れるだけ） ● 高齢者や障害者を想定した場合に、拘縮や、円背等により、リスクが増加する可能性がある。左記のようなユーザを選択できるとよい ● 高齢者や身体障害者の身体／認知特性を考慮したモデル（高齢者の場合要介護度別のモデルなど） ● 年齢性別の他に、耳が遠い、何かに熱中している、といった付加的な状態 ● 高齢者の特性には幅があり、細分化が必要
8	<ul style="list-style-type: none"> ● 運動にばかり指向しすぎているように思える。例えばコンロに衝突したらコンロ側のハザードを起こし得る。あるいは挟み込み、低EMC性能、発熱、漏電するロボットを使った場合に、どういう事象が起こるかをシミュレートできないか。（おそらく既知のパターンを作りこむことになるので、シミュレーションというよりは教材としての意味合いが強くなると思われる。それはそれで重要と思う） ● リスク評価のどこに用いるのかわからないのでコメントできません ● 事故発生イベントが ● 想定環境は、多い方が良い（シミュレーションで作れるだけ） ● ロボティックベッドの場合、移動だけではなく、車いすが変形する可能性がある。こういった場合のシミュレーションも出来ると良い。 ● ロボット変形に伴う挟み込みなど ● 衝突以外で、例えば乗降時、または急減速時といったイベント ● 装着型では、対環境の要因ではないが、ロボットの許容動作以外の動作を装着者が行った場合なども事故の要因になると思う
9	<ul style="list-style-type: none"> ● 物品数でなくて、角があるか、重量はどのくらいか、等の属性がリスク評価には重要なのではないでしょうか ● 想定環境は、多い方が良い（シミュレーションで作れるだけ） ● 実際に使用してみないと分からない。 ● わかりません
10	<ul style="list-style-type: none"> ● ロボット側の制御の影響をどう入れ込むか？実際のロボットのソフトウェアやファームウェア、センサ、電気回路をそのまま入れ込むことは難しいように思える。 ● きちんとシミュレーションできていることが大事 ● 同上 ● 少なくとも数例については具体的な商品で当てはめてツールの有用性・妥当性を確認し、実用視点で必要な改善・フィードバックを行うことが望ましい。
11	<ul style="list-style-type: none"> ● 既知のハザードのデータベースを環境中にすべて詰め込めると、ロボットにかぎらず教育用のシミュレータとして良いと考える。このようなシミュレータで学習した人材がリスクアセスメントをすると効果が高いのではないか。 ● 下記をどのように算出するのかをしっかりと考えて開発することが必要である。・リスクをどのよ

<p>うに算出するのか？（例：リスク＝危害の大きさ×発生頻度×暴露頻度）・危害の大きさや発生頻度，暴露頻度等をどのように算出するのか？</p> <ul style="list-style-type: none"> ● きちんとシミュレーションできていることが大事です ● 最終的に，危害のひどさや，発生頻度までシミュレーションである程度出せるようになると良いと思う。 ● 類似のカテゴリ商品の過去のヒヤハット・事件事例およびそれらの統計データが簡単に参照できると良い ● 生活支援分野でのロボット開発に関わる者としては，このようシミュレータが開発されることに非常に期待しています。将来発生する可能性のある現象を可視化することでより危害を実感でき，安全対策のモチベーションを上げるとともに，必然的にその精度も向上するものと考えます。できればシミュレータが安全防護の過不足を指摘したり，危険事象発生確率や SIL レベルに基づいたリスクを可視化することで，より具体的な開発支援ツールとなれば良いかと思えます。 ● シミュレーションはロボットを活用するのに適した環境をわかり易く提示するのには有用であると思う。

3.4.4.2 最終技術評価

2013年にプロジェクト参加全開発メーカーに対してアンケートによる最終技術評価を依頼し，表 3.4.4.2-1，表 3.4.4.2-2，表 3.4.4.2-3 に示すような回答を得た。定量的評価については平均ですべて肯定的な値 (>3) となった。今後の課題として生活支援ロボットの具体的な使用状況を具体的に実装する必要性を挙げることができる。

表 3.4.4.2-1 最終技術評価アンケート調査の回答の概要

属性	値
実施日	2013/11/20
有効回答数	4
回答者の開発経験年数（平均）	14.25
回答者の安元開発経験	全員有り

表 3.4.4.2-2 最終技術評価アンケート調査の結果

質問番号	質問文	結果
1. シミュレーションを用いた危険源の同定について:	【質問】将来の生活支援ロボットの危険源を同定するに当たって、シミュレーション環境が整備されていると役に立つと考えられるでしょうか？	3.750
	【コメントのお願い】シミュレーションを用いた危険源の同定についてコメントがありましたら教えて下さい	別記 次表項目 1
2. シミュレーションを用いた事故の重篤度の評価について:	【質問】将来の生活支援ロボットの事故の重篤度を評価するに当たって、シミュレーション環境が整備されていると役に立つと考えられるでしょうか？	4.000
	【コメントのお願い】シミュレーションを用いた重篤度の評価についてコメントがありましたら教えて下さい	別記 次表項目 2
3. シミュレーションを用いた事故の頻度の評価について:	【質問】将来の生活支援ロボットの事故の頻度を評価するに当たって、シミュレーション環境が整備されていると役に立つと考えられるでしょうか？	3.250
	【コメントのお願い】シミュレーションを用いた頻度の評価についてコメントがありましたら教えて下さい	別記 次表項目 3
4. シミュレーションを用いたリスク低減方策の検討について:	【質問】将来の生活支援ロボットのリスク低減方策を検討するに当たって、シミュレーション環境が整備されていると役に立つと考えられるでしょうか？	3.000
	【コメントのお願い】シミュレーションを用いたリスク低減方策の検討についてコメントがありましたら教えて下さい	別記 次表項目 4
5. (全般)シミュレーションを用いたリスクアセスメントの実施について:	【質問】将来の生活支援ロボットのリスクアセスメントをするに当たって、シミュレーション環境が整備されていると役に立つと考えられるでしょうか？	3.750
	【コメントのお願い】シミュレーションを用いたリスクアセスメントについてコメントがありましたら教えて下さい	別記 次表項目 5
6. その他、自由記述:	【コメントのお願い】要望やご提案、コメントなどありましたらお聞かせ下さい	別記 次表項目 6

表 3.4.4.2-3 最終技術評価アンケート自由記述欄のコメント

項目	記述
1	<ul style="list-style-type: none"> ● 直感的な気づきのためであれば、リアルでなければならず、状況を提供するだけなら写真でよいと思います。また、いずれにしても皆が共通の映像を見れば、RAの個人差は幾分か減るのかなと思いました。 ● 結局、転倒と衝突のハザード以外に無いように見える。動画では、様々な転倒と衝突のシチュエーションが出てきたが、その多くはメーカーが技術的に制御できない部分が多く、ロボットの有無に関わらず、生活空間におけるリスクを3Dグラフィクスによって提示しているだけに見える。
2	<ul style="list-style-type: none"> ● 衝突時や転倒時のHICのシミュレータとしては使えるかもしれない。その他、特に圧力が問題になるケースなどの事故の重篤度は評価できないのではないかな？
3	<ul style="list-style-type: none"> ● シミュレーションだと、既知の頻度を事前に組み込まねばならず、頻度の評価にはならない。障害物の密度なども同様のことが言えると思う。
4	<ul style="list-style-type: none"> ● ただし、受け身になって画一的に対策しようとする、状況や環境が異なる場合に対策が新しい危険源を生み出すことに気づかないケースがあるかもしれない。 ● シミュレータにリスク低減方法を組み込め、かつ、そのリスク低減方法のfailure modeをうまく組み込めるだろうか？例えば障害物センサから、ブレーキ始動、静止まで考えたとき、それぞれにかかる時間を設定したり、どれかがfailするモードを設定することになるだろう。これらが

	設定できるのであれば、そのリスク低減が有効かは、シンプルなモデルを使って手計算で解けるレベルではないのか？
5	<ul style="list-style-type: none"> ● 問2, 3とほぼ同じ質問だと思います。 ● このシミュレーションはロボットの有無にかかわらず、生活空間にあるリスクを理解するには役立つと思う。なので、生活支援ロボット特有のリスクアセスメントには役に立たない可能性がある。
6	<ul style="list-style-type: none"> ● リスクアセスメントを全くしらない初心者向けには良いかもしれません。対策されたものが新しい危険源を生み出す事例も表現し、そのようなことがあることを知らせる方が良いと思います。 ● 開発 ご苦労様です。シミュレーションは、ご存知の通り条件をどの様に設定するかです。画像を見る限り回りの条件（道路の現実の写真を取り込み等）が出来れば何が危険を発生させているかを社会に問うことが出来ます。日本の歩行者が歩く所は、ゴミ箱、自転車、車等が置かれ危険を増長しています。建屋内は、条件設定が明確に出来ますが、外は条件設定が明確に出来ませんのでこの様な事を申し上げております。当方が開発しているのは、配送センター、工場内ですので確実に条件が設定可能です。頑張ってください。 ● シミュレーションは将来役立つレベルになるかもしれないが、ロボット毎に使用環境や使用者の身体・認知状況がまちまちであるため、こうしたものがモデルとして実装できるかがポイントになると感じる。シミュレータの守備範囲を明確にし、人によるアセスメントの役割分担が必要になるのでは無いか？シミュレータ構築には、信頼できる事故事例などのハザードのデータベース構築が肝要と思われるが、これまでの状況からするとこうしたデータの収集が難しいのではないかと感じるので、ここの道筋がつき、データベースが提供されれば、これだけでもかなり役に立つように思う。

3.4.5 研究成果

研究成果に関しては、シミュレーションの結果得られた事故動画のアーカイブをDVDへ記録し、さらに同DVDフォーマットのデータを当研究プロジェクトで整備するデータベースに入力して公開した。これらは今後のロボット開発で行うリスクアセスメントのための資源として利用できる。

シミュレーションの結果得られた事故動画は、ロボットの使用環境モデル別、ユーザモデル別、ロボットタイプ別のシミュレーションに事故発生イベントを挿入して起こした事故の全155シーンを撮影した物である。これらは階層化して整理された。大項目はロボットの使用環境モデルの分類、中項目はユーザモデル及びロボットタイプの分類、小項目は事故発生イベントである。

データを入力したデータベースは当研究プロジェクトで整備する「生活支援ロボットの安全に関する情報データベース」である。

4. 生活支援ロボットの安全性検証試験方法の研究開発

4.1 試験項目の検討結果 [JARI]

4.1.1 計画時の開発項目の選定

生活支援ロボットは、市場導入実績がないために、そのリスクが明確になっていない、このため、どのような危険源に対して安全検証試験を実施すべきかが明確でない。そこで、本研究の計画にあたっては、機械安全の国際規格 ISO13849 の危険源リストから、生活支援ロボットに関連しそうな危険源を選択して開発項目とした。開発項目には、すでに類似機器の試験法が存在するが試験法の改良が必要な項目と全く新たな試験法開発に必要な項目が見られた。前者については、類似機器の試験規格を詳細に検討して、改良を加えることとした。後者については、機械安全、電気安全、機能安全の考え方をベースに試験法を開発することとした（表 4.1-1）。

表 4.1-1 当初計画した項目

	類似機器の試験法または手順の改良が必要な項目	新たな試験法開発が必要な項目
感電試験	レ	
騒音試験	レ	
表面温度試験	レ	
衝突安全性試験	レ	
接触安全性試験		レ
温湿度および振動環境耐久性試験	レ	
走行耐久性試験	レ	
耐荷重試験	レ	
耐衝撃試験	レ	
静的安定性試験	レ	
動的安定性試験	レ	
安全関連光学センサの機能試験 (環境認識性能試験)		レ
障害物検知対応性能試験		レ
軌道追従性試験		レ
操作・情報提示機能試験	レ	
EMC試験	レ	
故障注入試験 (機能安全確認試験)		レ
緊急停止試験		レ

4.1.2 研究開発過程での試験項目追加・変更・削除

研究開発過程で、本プロジェクトに参加するロボット開発者の試作ロボットの試験および類似機器等の試験を実施しすることで、実際の生活支援ロボットに必要な試験項目に関する情報を得た。また、本プロジェクトのメンバーが ISO/TC184/SC2/WG7 におけるパーソ

ナルケアロボットの安全規格 ISO13482 の策定作業に参画することで、生活支援ロボット安全要求事項について議論し、安全検証試験に関する国際的な認識について情報を収集した。これらの情報（表 4.1-2）を参考にして、初期に計画した開発項目の取捨選択および追加を行った。

表 4.1-2 試験項目検討に資する情報

	試作ロボットおよび類似機器等の試験による情報	ISO/TC184/SC2/WG7 での議論による情報
感電試験		法規上必要となる場合がある
騒音試験		欧州の規格では重視されている
表面温度試験		火傷のリスクについて試験が必要
衝突安全性試験	一部の類似機器で酷い危害が予想される	試験結果から危害の酷さを算定するデータの国際的検討が必要
接触安全性試験	ロボットの設計によっては、危害が予想される	
温湿度および振動環境耐久性試験	ロボットの使用環境によっては、危害が予想される	
走行耐久性試験	ロボットの使用環境によっては、危害が予想される	
耐荷重試験	ロボットの設計によっては、危害が予想される	
耐衝撃試験	試験条件として実際にロボットが受ける衝撃を想定することが困難（ロボットの仕様が多岐にわたるため）	
静的安定性試験	ロボットの使用環境によっては、危害が予想される	
動的安定性試験	ロボットの使用環境によっては、危害が予想される	床（路面）の摩擦係数を規定する必要がある
安全関連光学センサの機能試験（環境認識性能試験）	ロボットの使用環境によっては、危害が予想される	
障害物検知対応性能試験		安全距離、安全速度について議論された
軌道追従性試験	障害物検知対応試験の際に軌道追従性を評価できる	
操作・情報提示機能試験		使用者にとって重要な項目
EMC試験	ロボットの使用環境によっては、危害が予想される	
故障注入試験（機能安全確認試験）	モジュールでの試験が必要	試験以外の方法による確認も必要
緊急停止試験	環境耐久性試験およびEMC試験において検証することが適切	安全要求として重要
挟圧試験		マニピュレータに挟まれることによる危害が予想される

(1) 他の試験法と統合した開発項目

軌道追従安定性については、それ単独で実施する必要はなく、走行安定性試験および障害物検知・対応試験の結果から安全性を評価できると判断した。

(2) 追加した開発項目

生活支援ロボットがマニピュレータを装備する場合には、人体が挟み込まれるリスクが想定される。そこで、挟圧試験を開発項目として追加した。

4.2 人体への危険に関する安全性検証試験

4.2.1 感電試験 [安衛研]

4.2.1.1 目的

生活支援ロボットの通常使用時及び保守・点検時に、人がロボットの接触可能部分に接触した際に感電の恐れがないことを確認する。そのための試験は、接触可能部分の調査、接触可能と判定された部分が充電部であるかの調査の順に実施する。また、装着型ロボットのように人体に常時ロボットの一部（外装等）が接触している場合に、人体に影響のある電流が発生していないかを確認する。この試験は漏れ電流試験として行う。移動型の生活支援ロボットでは保護接地が確実に確保できない場合が多く、ロボット外装等を経由して人体へ漏れ電流が流れてしまう恐れがないことの確認は重要である。

いずれの試験も電気を使用する機器では一般的に実施される項目であり、生活支援ロボットにおいても既存規格、基準に従って行う。

4.2.1.2 研究開発の経緯

4.2.1.2.1 適用規格

一般に機械設備の電气的安全要求事項は、JIS B 9960-1:2008（機械類の安全性-機械の電気装置-第1部：一般要求事項）に直接接触及び間接接触に対する感電保護が規定されており、さらに本質的に安全とされる電圧レベルが規定されている。本試験では安全性の判定基準にこの規格の規定を用いる。一方、試験方法はJIS C 1010-1:2014（測定用、制御用及び試験室用電気機器の安全性-第1部：一般要求事項）とJIS T 0601-1:2012（医用電気機器-第1部：基礎安全及び基本性能に関する一般要求事項）に規定があり、生活支援ロボットに対する試験方法はこれらの規定を適用する。

4.2.1.2.2 参考規格で用いる試験装置と試験基準

JIS C 1010-1 では、接触可能性部位の探索に標準テストフィンガの使用を求めており、関節を持つ接合型テストフィンガと関節のない一体型テストフィンガが規格適合品として市販されている。また、一体型は力を加えて部位へ押し込むことが可能で、本規格では10Nの押し力が規定されている。この押し力は荷重計等でモニタしながら加減することは可能であるが、規定値を超えないように手動で調整することは困難であるため、10Nで力の逃げ機構が機能してそれ以上の力を伝達しないような装置を開発した（後述）。

一方、充電部の電位測定は一般的な電位計（DMM テスタ等）が使用できるが、漏れ電流測定は医用機器における患者漏れ電流として測定回路ネットワークが指定されるため、専用試験装置を用いる。

感電保護のための規定値は、AC 実効値 33 V、AC ピーク値 46.7 V、DC 70 V であるが、湿った場所での使用を意図する機器に対しては、AC 実効値 16 V、AC ピーク値 22.6 V、DC 35 V となる（JIS C 1010-1）。医用機器では乾燥状態での許容値がこれらの数値より若干低い。なお、許容電流値は商用 AC 実効値 0.5 mA、DC 2mA である（測定回路に依存）。また、機器からの漏れ電流（接触電流）の許容値は 100 μ A である（JIS T 0601-1）。

4.2.1.3 成果

4.2.1.3.1 試験装置

(1) 充電部の調査と充電電圧の測定用



図 4.2.1.1 テストフィンガ

- テストフィンガ（プローブコードは IEC61032:1997 に準拠，図 4.2.1.1）
接合型（関節付，プローブコード B），一体型（関節なし，プローブコード 11），小児の場合必要に応じて細径接合型（関節付，プローブコード 18 又は 19）
 - 荷重計又は専用治具
20N までの圧縮力測定可能な荷重計，もしくは 10N±1N の圧縮力印加で外れるリミッタ等の治具（図 4.2.1.1 の標準径フィンガ根元に装着した黒グリップが今回開発した装置であり，溝に嵌まっている球体が 10N 印加で外れてフリーとなる）
 - 電圧計又は電流計（DMM 等）
- (2) 接触電流(漏れ電流)測定用
- 漏れ電流試験器 ST5540(日置電機) (図 4.2.1.2)



図 4.2.1.2 漏れ電流試験器 (ST5540)

4.2.1.3.2 試験条件

- 試験対象ロボットの想定使用環境の湿度を仕様書等により把握しておく。湿気のある環境を想定する場合は試験時の湿度設定が必要となる。
- ロボットに接触可能な小児を想定する場合は細径テストフィンガを使用する。
- ロボットユーザがロボットにアプローチする作業範囲はメーカー説明及び取説書記載

内容に基づく。

- 漏れ電流試験において、ロボット外装部に貼る金属箔（電極）は最大 100×200mm（手のひら想定）である。

4.2.1.3.3 試験方法

(1)接触可能部位の調査（ロボットの電源オフ）

対象ロボットのユーザが通常使用時及び保守・点検等で行う作業時に、ユーザが接触可能な金属等の導電部の範囲を以下の順序で特定する。

- a ユーザが工具や鍵等を用いずに開閉できるカバーやドアを開放する。
- b 接触できることが目視で明白な金属露出部範囲を特定する（位置をマークしておく）。
- c 接触可能かの判断を要する場合は、接合型テストフィンガを用いて関節角度を変えながら到達する部位がないかを判定する。金属部への到達判定には電源ライン（標準試験接地）との導通をテスト等により導通確認してもよい。力を加えれば接触可能となり得る個所では、一体型テストフィンガに荷重計あるいは治具を装着した状態で 10N±1N で押しつけて判定する。接触と判定された箇所にマークする。

(2)接触可能部位の充電電位測定（ロボットの電源オン、制御下で停止状態）

調査で接触可能性ありと特定又は判定された部位について、対象ロボットの電源をオンにした正常状態（必要に応じて稼働状態）で電圧を測定する。電位を生じた個所については、標準 2kΩ、高湿下の稼働が想定される場合は 500Ω の抵抗を接続して、抵抗に流れる電流又は抵抗間電圧を測定する。

(3)接触電流の測定（ロボットの電源オン）

漏れ電流試験器内蔵のネットワークと対象ロボットの外装に金属箔を貼った箇所を接続する（AC 電源の場合のみ試験機の AC アウトレットからロボットに給電）。試験器を外装-大地間測定モードにして、漏れ電流を測定、記録する。

4.2.1.3.4 評価基準

- 接触可能部位が充電部でないこと。
- 充電部の電位が許容値（DC70V、湿った環境では DC35V）を超えないこと。
- 充電部で計測された電流が DC2mA を超えないこと。
- 接触電流は 100μA を超えないこと。

4.2.1.4 試験結果の例

市販のハンドル型電動車いすを対象として、接触可能性部位のテストフィンガによる探索の様子と接触電流の測定の様子を各々図 4.2.1.3 と図 4.2.1.4 に示す。

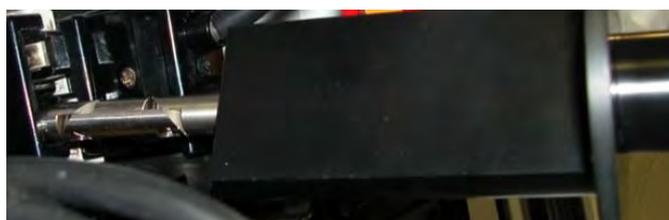


図 4.2.1.3 接合型標準テストフィンガを用いた接触可能性部位の探索

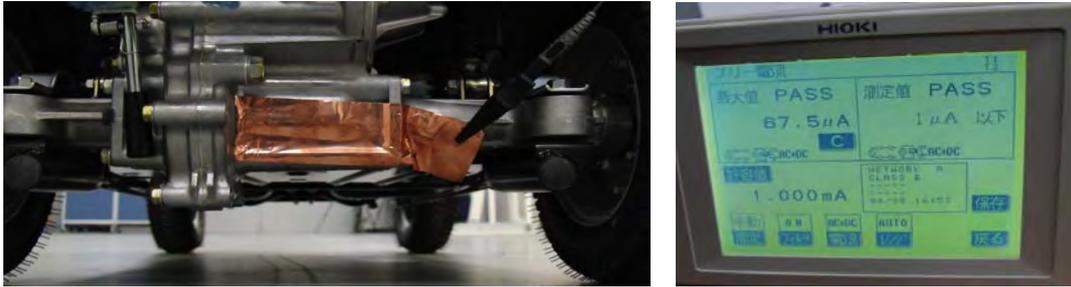


図 4.2.1.4 ギアケース外装の接触電流試験
(左は金属箔電極の貼り付け状況, 右は測定電流結果 $67.5 \mu\text{A}$ でパスしている)

4.2.2 騒音試験 [安衛研]

4.2.2.1 目的

生活支援ロボットから放射される危険源として騒音があり、関連規格 ISO13482 では「特別な保護具の装着を必要としない十分低い騒音レベル」が要求されている。しかし、この規格では騒音に晒される人の条件や騒音の測り方が規定されておらず、試験方法の標準化が求められている。そこで、自動車の騒音試験を参考にして、人がロボット動作時に晒される騒音を簡便に測定する方法を提案する。

4.2.2.2 研究開発の経緯

4.2.2.2.1 参考規格

- JIS D 1024:1999 (自動車の加速時車外騒音試験方法)
- 環境省自動車騒音測定方法及び自動車単体騒音規制値
- JIS Z 8731:1999 (環境騒音の表示・測定方法)
- JIS C 1010-1:2014 (測定用、制御用及び試験室用電気機器の安全性—第1部：一般要求事項)

4.2.2.2.2 試験装置と試験基準の開発

ロボットに関する騒音の測定方法は規定がなく、産業用ロボットの安全規格でも危険源の1つとして騒音が挙げられているが、測定に関する関連規格を参照するという記述のみである。工場内の産業用ロボットの騒音は、他の騒音の大きな機械（鍛圧機械等）に準じて工場内外騒音規制により制限されることになるが、ロボット単体の騒音測定は無響室内での音圧レベル測定方法に準じて行うしかない。ただし、移動ロボットのように固定できないロボットでは測定できず、実稼働環境下での測定がされてこなかった。

そこで、移動体の騒音測定として実績のある自動車騒音測定方法を参考に、移動するロボットの近傍の人が暴露される通過時の騒音とロボット搭乗者自身が暴露される騒音を同時に、なおかつ簡易に測定する方法を提案する。

なお、騒音基準は既存の自動車、二輪車の定常走行騒音規制値（65～83dB）は電気式移動ロボットには数値が高すぎると思われるが、環境騒音基準値（例えば施設内昼間で50dB以下）は長時間暴露の等価騒音であるため、1台のロボットの発生する騒音基準にはそぐわない。JIS C 1010-1では24時間暴露で80dBを超えないこととしており（医用機器も同様）、これを越える場合は防音手段の追加を求めている。

4.2.2.3 成果

4.2.2.3.1 試験装置

(1) 走行路

10m直線路に加減速区間を加えた屋内走行路はトンネル上の遮音テントで覆い、走行路両側面は吸音材を設置する。図4.2.2.1は生活支援ロボット安全検証センタ内に設置した走行路環境であり、可動式の遮音テント2張の中に可動式自立吸音パネルを10枚ずつテント内側面に沿わせて設置している。吸音パネルはフェルトーン（東京ブラインド）を用い、パネル面表裏で特性を変えている（反射特性に優れた面と吸音特性に優れた面）。ロボットの想定使用環境に合わせて、路面にはPタイル（標準）、カーペット、ウッドフロア、点字パネルなどを敷く。



図 4.2.2.1 走行路設置状況

(左面吸音パネル前は4マイクロホン, 右面吸音パネル前に通過速度計測用レーザーセンサを設置)

(2) マイクロホン

測定する騒音はロボット本体の音響パワーレベルでなく, 実環境下で動作中のロボットから人(1名)が晒される騒音を想定するため, 自動車の定常走行騒音の測定方法及び加速時車外騒音試験方法を参考にマイクロホンをロボット走行路に対して直角に向けて設置する. 通過騒音測定用マイクロホン(解析周波数:20Hz~20kHz)は, 地上高1.2mで間隔1mに2個(マイク1, 2), 地上高0.2mで間隔1mに2個(マイク3, 4)の計4個を, 直線走行路中央で, 移動するロボット側面から1m離れた位置に設置する(図4.2.2.2). 走行するロボットとマイクロホンとの位置関係を図4.2.2.3に示す. ただし, マイクロホンの高さ(0.2m)や間隔, 片側面のみを設置など, 屋外での自動車用試験とは異なる条件としている.

一方, 暴露騒音用マイクロホンは, ロボット搭乗者(装着者)が装着するヘルメットの左耳の位置に, 風防付きマイクロホンを1個設置する(図4.2.2.2).

(3) 騒音計

通過騒音測定用マイクロホンはプリアンプを介して, 4チャンネル分がFFT解析可能な騒音計(小野測器データステーションDS-3000計測システム)に入力される. 暴露騒音測定用マイクロホンは携帯型の精密騒音計(小野測器精密騒音計LA-5560, 図4.2.2.2)に接続する. いずれの騒音計も, A特性(当ラウドネス曲線に従った周波数重み付け), FAST特性(耳の時間応答に近似した時間重み付け)の音圧レベルを測定する.

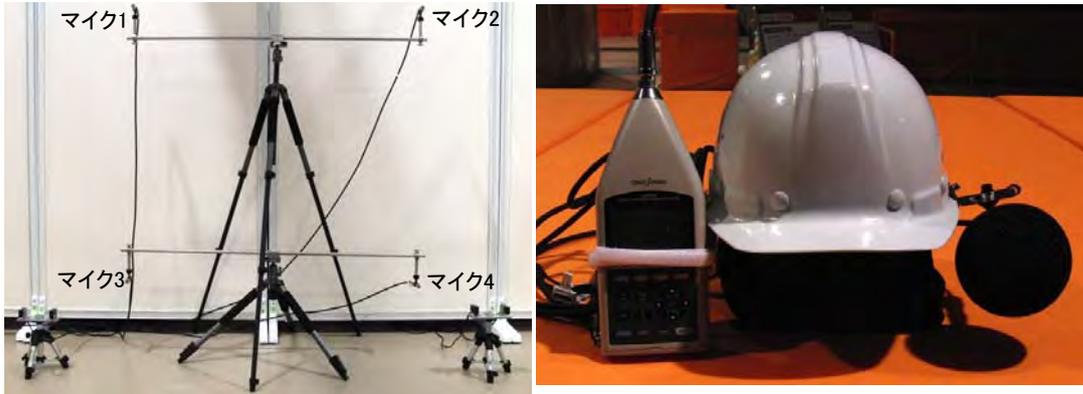


図 4.2.2.2 騒音測定用マイクロホン
(左は通過騒音測定用, 右は暴露騒音測定用)

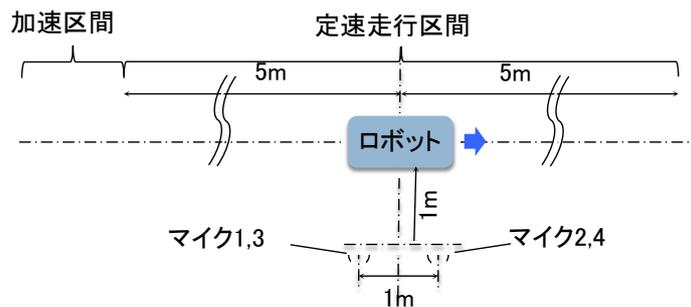


図 4.2.2.3 通過騒音測定用マイクロホンの設置条件

データステーションはPCに接続され、測定データの記録とFFT解析ソフトウェア(小野測器 Oscope2)がPC上で実行可能である。

4.2.2.3.2 試験条件

騒音試験は、屋内環境下で動作するロボットを対象に、図 4.2.2.1 の走行路環境下で次の2通りの騒音を対象とする。

通過騒音：自律移動型、搭乗型、装着型ロボットが静止している人の傍らを通る際に、人が受ける騒音レベルを測定する。

搭乗者(装着者)暴露騒音：ロボットに搭乗またはロボットを装着している人自身が晒される動作時の騒音レベルを測定する。

ロボットの通過騒音に周囲の人が晒される状況は対象ロボットや使用環境により様々であるが、標準条件として、ロボットが10m直線走行路を定速移動する間の騒音レベルを直線路の中間地点で計測する。走行路面はロボットの最悪想定路面とし、ロボット移動速度も想定最高速度とする。

搭乗者(装着者)が晒される騒音は左耳の位置で計測し、他の条件は通過騒音時と同様とする。ヘルメット装着者が携帯型騒音計を持つ。

なお、計測される騒音は走行路面からの反射音を含んで評価する。ただし、ロボットの警報等は無効にしておく。走行路上の暗騒音は計測騒音レベルより、少なくとも 10dB 以上低いことを確認する。

4.2.2.3.3 試験方法

(1) 通過騒音測定

自律移動型、搭乗型ロボットは、走行路上を最高一定速度パターンで 3 回（側面毎）、続いて走行路中間地点で急停止して約 1s 後に急加速するパターンで 3 回（側面毎）移動させ、各々走行路上にロボットが存在する間（10m 走行時間分）騒音計（データステーションのスループットディスク機能）で記録する。急停止・急加速パターンは自動車騒音の測定項目にはないが、生活支援ロボットでは頻繁に起こりえると想定して追加したものである。

各記録波形に通過速度をリンクさせて記録する。参考として、FFT 機能でも各パターンで 1 回リアルタイム分析をして、音圧と周波数分布を確認する。記録した騒音データは、パワースペクトルのオーバーオール値を算出し、同一高さのマイクロホンの 3 回平均値として騒音レベルを決定する。

なお、騒音データの FFT 分析結果は騒音レベルとしては反映しないが、騒音対策が必要な場合は活用可能である。

(2) 搭乗者（装着者）暴露騒音測定

通過騒音測定と同様の速度パターンで同じ測定時間分記録（携帯型騒音計のメモリカードへ）し、3 回記録値の平均値で騒音レベルを決定する。なお、通過騒音測定に支障がなければ、暴露騒音と通過騒音を同時に測定してよい。

4.2.2.3.4 評価基準

前述の通り、直接該当する判定の基準値は存在しないが、少なくとも 80dB を超えないことを最低条件とする。この値よりも低い騒音レベル（例えば、自動車騒音の最低レベル、類似機器の騒音レベル等）を用いる場合は、暴露環境と暴露時間に留意して設定しなければならない。

4.2.2.4 試験結果の例

対象ロボット（類似機器）として、市販のハンドル型電動車いすと電動立ち乗り二輪車で通過騒音と搭乗者暴露騒音を同時に測定した。図 4.2.2.4 に示すように、前者はドット点



図 4.2.2.4 模擬ロボットによる騒音試験の様子
（左がハンドル型電動車いす、右が電動立ち乗り二輪車）

表 4.2.2.1 ハンドル型電動車いすの騒音測定結果例

走行路	走行モード	通過騒音オーバーオール値	マイクNo		マイク1&2の 平均	マイクNo		マイク3&4の 平均	搭乗騒音	
			1	2		3	4			
Pタイル	高速一定	マイクの高さ 0.2m, 1.2m	1回目	42.10	42.99	42.5	45.11	45.00	45.1	43.69
			2回目	43.09	43.00	43.0	45.40	44.43	44.9	42.69
			3回目	43.44	45.88	44.7	43.56	44.56	44.1	43.67
				3回の平均		43.4	44.7		43.4	
	停止後急加速	マイクの高さ 0.2m, 1.2m	1回目	44.45	43.79	44.1	46.78	45.43	46.1	45.64
			2回目	44.67	46.20	44.9	46.98	46.78	46.9	46.78
3回目			43.89	45.33	44.6	47.78	47.11	47.4	45.44	
			3回の平均		44.5	46.8		46.0		
点字パネル	高速一定	マイクの高さ 0.2m, 1.2m	1回目	51.45	53.78	52.6	56.78	56.45	56.6	52.55
			2回目	52.76	51.77	52.3	54.99	56.44	55.7	52.77
			3回目	51.79	53.31	52.6	56.98	56.98	57.0	54.76
				3回の平均		52.5	56.4		53.4	
	停止後急加速	マイクの高さ 0.2m, 1.2m	1回目	53.77	53.66	53.7	56.92	56.78	56.9	57.78
			2回目	53.99	53.90	53.9	57.45	56.34	56.9	57.98
3回目			53.66	52.44	53.1	56.77	56.98	56.9	56.98	
			3回の平均		53.6	56.9		57.6		

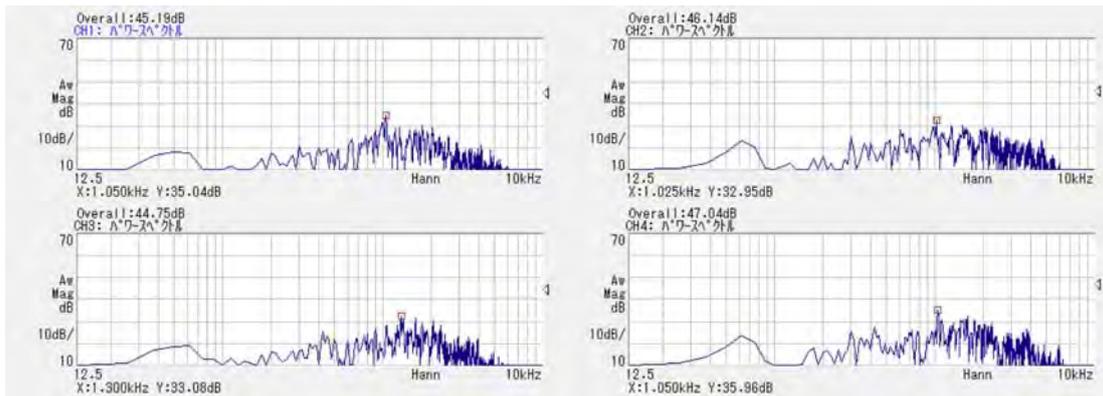


図 4.2.2.5 ハンドル型電動車いすの通過騒音スペクトラム例

字パネル走行路を，後者はPタイル走行路での測定の様子である．点字パネルはシート上になっており，Pタイル上に敷くことができる．

前者の騒音測定結果の1例を表4.2.2.1に示す．測定データはこのようなエクセルシートで集計されて平均値を算出する．なお，通過騒音測定用マイクロホンのFFT解析結果は図4.2.2.5のように表され，音圧レベルの高い周波数成分を把握することが可能である．

4.2.3 表面温度試験 [安衛研]

4.2.3.1 目的

生活支援ロボットの通常使用時及び保守・点検時に、人がロボットの接触可能部分に接触した際に火傷あるいは凍傷の恐れがないことを確認する。そのため、ロボットの表面や内部の接触可能部分の過度な温度上昇あるいは下降を調べるために、ロボットの通常使用時およびユーザによるメンテナンス（バッテリー交換，トラブル処理，清掃等を含む）時に，接触可能性部位の表面温度分布をサーモグラフィ等により測定する。

4.2.3.2 研究開発の経緯

4.2.3.2.1 参考規格

- JIS C 1010-1:2014（測定用，制御用及び試験室用電気機器の安全性—第1部：一般要求事項）
- 電気用品安全法
- ISO 13732 (all parts), Ergonomics of the thermal environment — Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces.

4.2.3.2.2 試験装置と試験基準の開発

本試験は，ロボット外装表面などの接触可能性が高く，なおかつ高温または低温の部位を同定した上でその部位の表面温度を測定するものである。そのため，高/低温のピーク値とその位置を同時に測定するために，非接触のサーモグラフィにより画像で温度分布を一括取得する方法が効率が良い。もし，ピーク温度位置が同定できていれば，接触式の温度センサ（サーモカップル等）も使用可能である（ただし，センサ接触による温度変化の影響は考慮しておく）。

JIS C 1010-1 では，容易に触れることができる表面温度として，
外装部及び内部：金属で 65℃，非金属で 80℃を超えるか，
操作部：金属で 55℃，非金属で 70℃を超えるか，
を限界として規定している（ただし，周囲温度 40℃）。さらに，接触時間による影響も考慮する場合もあり，人間の皮膚は 45℃以上の温度が 1 時間継続すると熱傷になり（ISO13732-1 では 1 分間で 51℃を超えない），接触部の温度が 44℃では約 6～10 時間で受傷（低温熱傷）するとされる。上記規格の限界温度は，機器の操作器や外装への接触は長時間継続されないという前提であり，操作機器の目安としては妥当と考えられる。

4.2.3.3 成果

4.2.3.3.1 試験装置

(1)サーモグラフィ（Apiste FSV-1100 シリーズ）（図 4.2.3.1）

測定温度レンジ：-40～500℃，有効画素 320（H）×240（V），レンズ交換式，コントローラ別体

(2)同上用制御ソフトウェア IR Manager，解析ソフトウェア FSV-S330

その他，測定範囲が狭くて特定できる場合は，スポット温度計あるいはサーモカップル等も使用できる。

4.2.3.3.2 試験条件



図 4.2.3.1 FSV-1100 と専用ソフトウェアをインストールしたノート PC の接続状態

本試験は、予め接触可能部位の調査を実施後、規定動作時間あるいは満充電されたバッテリー容量が空になるまで負荷連続運転した直後に、電源オフ状態でこれらの部位の表面温度を非接触で測定する。試験環境は通常の最高使用温度である 40℃が望ましいが、負荷連続運転中に高温環境を維持することは困難であるため、標準で 20～25℃の室温とする。

バッテリー搭載のロボットでは、充電あるいはバッテリー交換時には温度上昇は抑えられるため、バッテリー容量分の駆動時間後の状態を最高温度到達状態と見なす。

4.2.3.3.3 試験方法

(1)接触可能部位の調査

対象ロボットのユーザが通常使用時及び保守・点検等で行う作業時に、ユーザが接触可能な外装表面、底面、ユーザが工具や鍵等を用いずに開閉できるカバーやドアを目視確認する。(ユーザの作業範囲はメーカー説明及び取説書記載内容に基づく。)

(2)対象ロボットの負荷連続運転

対象ロボットのタイプに応じて、次のように設定・動作させる。

・自律型、搭乗型移動ロボット：想定される高負荷状態で、以下の条件いずれかを満たすまで連続運転する。

規定の連続運転時間に到達するまで、
温度が上昇して平衡状態に至るまで、
満充電された搭載バッテリーが空になるまで。

・装着型ロボット：装着者が通常使用時にメーカーが規定する動作を、非装着状態で再現して、温度が上昇して平衡状態に至るまでまたは満充電された搭載バッテリーが空になるまで連続運転する。

(3)表面温度測定

まず、対象ロボットの表面素材及び色に応じて放射率を設定しておく。素材等が同定できれば放射率表から決定できるが、不明あるいは表面処理されている場合は、別途黒色テープ等の標準検体を用いて校正取得しておく。

次に、対象ロボットの電源を切り、ロボットの各側面をサーモグラフィの赤外線カメラに向け、各面毎に温度分布画像を5秒間程度連続記録する。カバー等を開けて内部が暴露される場合は、同様に内部暴露面について記録する。対象ロボットの底面が接触可能部位と判定された場合、ロボットを吊り上げた状態で測定記録する。記録された各側面の連続温度分布画像のうち、中間の記録順の画像をオフラインで分析し、最高温度(必要に応じて最低温度)とその位置を求めて、温度分布画像にインポーズする。なお、この画像分析はMSエクセルのアドイン専用ソフトウェア FSV-S330 を用いて容易に実施できる。

4.2.3.3.4 評価基準

装着型以外のロボットでは、上記 JIS C 1010-1 の限界値に準じるとする。ただし、長時間の連続接触があり得る装着型の場合は、表面素材、接触時間、人の属性により異なるが、8時間の接触で43℃を越えないことが望ましい。

4.2.3.4 試験結果の例

対象ロボット(類似機器)として、市販のハンドル型電動車いすを用いて表面温度分布測定を行った。満充電のバッテリーを空にするまで連続負荷運転ができなかったため、室温21.7℃の環境で車輪を浮かせて、最高速度(6km/h)で前進空転を3時間実施した直後に測定した。予め、表面外装の温度上昇は僅かであることを把握していたため、底面(シャーシーカバー)のみサーモグラフィで測定記録した。図4.2.3.2は、電動車いすをクレーンで吊って、底面を撮影している状況である。なお、底面のモータハウジングの放射率は0.96(実測値)であった。

撮影後に FSV-S330 を用いて画像分析し、最高温度とその位置を特定した結果を図4.2.3.3に示す。



図 4.2.3.2 電動車いす底面の温度測定の様子
(床面上の三脚先端部がサーモグラフィのカメラ部)

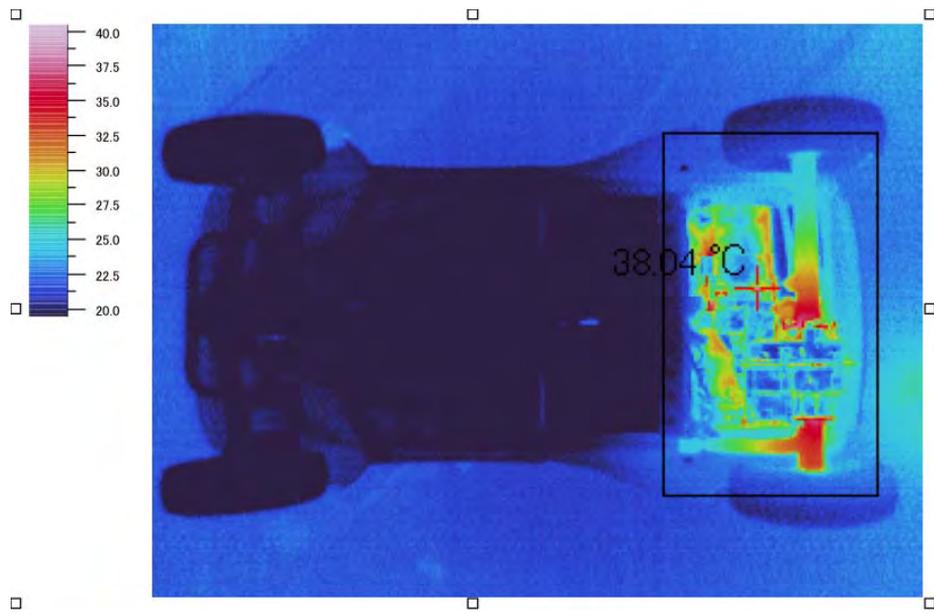


図 4. 2. 3. 3 電動車いす底面の表面温度分布分析結果

4.2.4 衝突安全性試験 [JARI]

4.2.4.1 目的

この試験は、ロボットが障害物と衝突したときの対人リスクを評価することを目的として、ロボットを障害物や人体ダミーに衝突させた時に、ロボットの搭乗者または歩行者を模擬した人体ダミーに及ぼす力、モーメント、変位、速度、加速度を測定する。この試験は、ロボットが移動する能力を有して、周囲の障害物や人と衝突することによって人の被害が予想される場合に適用できる。

4.2.4.2 研究開発の経緯

4.2.4.2.1 参考にした規格

- Japan Safety regulations for Road Vehicles Addendum 23,
- Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS) 208, FMVSS 213,
- Code of Federal Regulation, Title 49, Part 582, Subpart E
- ECE-R94

4.2.4.2.2 試験装置の開発

(1) 試験装置の仕様の検討

自動車に比べて、生活支援ロボットの使用目的、移動速度は多様であるため、試験時に設定すべき衝突速度、重量などの値も多様である。そこで、本プロジェクトに参加するロボット開発者ならびにロボットビジネス協議会会員のロボットメーカーに対して、自社で開発する可能性のある生活支援ロボットの仕様について調査した。その結果から、試験装置の仕様を検討した。

人体の傷害に関する物理量（衝突時の外力、モーメント、変形量、速度、加速度等）を測定するには、人体を再現した人体ダミーが必要である。国際的に標準化されているまたは公的な試験に広く使われている人体ダミーとして、自動車の衝突試験用の人体ダミーの中から、以下の3種を用いることとした。

• HYBRIDIII/AM50

米国の標準的成人男性の体格を再現したダミーで、国際的に標準化されており、自動車の認証試験に用いられている。傷害評価のためのデータが豊富に報告されている。生活支援ロボットに関わる成人男性の代表として選択した。

• HYBRIDIII/AF05

米国の小柄な女性の体格を再現したダミーで、国際的に標準化されており、自動車の認証試験に用いられている。生活支援ロボットに関わる成人の中で、傷害を受けやすい人の代表として選択した。

• Q6

欧州の標準的6歳児の体格を再現したダミーで、欧州で広く使用されている。生活支援ロボットが子供と共存する場合のリスク評価の対象として選択した。Qシリーズダミーには、6歳児の他に3歳児等を再現したモデルも存在するが、親の監視を離れて生活支援ロボットと接触する可能性の高い年齢として、6歳児を選択した。

(2) 試験の試行による検討

始めに、自動車の衝突試験法を参考に、自動車試験設備で試験を試行した。搭乗型生活支援ロボットのと壁の衝突を再現するために、車いすに自動車衝突試験用人体ダミーを搭乗させて、壁（衝突用バリア）に衝突させた。目標衝突速度は、上記(1)の検討結果を参考に、2 km/h, 6 km/h, 10 km/hとした。その結果、以下の課題が明らかになった。

- 速度 100 km/h を想定した自動車用の装置では、低速での速度設定の精度が得られない。
- 牽引ワイヤーを収納するための溝がロボットの幅方向中央にあるため、3輪のロボットのように車輪が中央にあるロボットを試験できない。

- ・現在の自動車衝突試験用人体ダミーには腕の傷害を評価するためのセンサーが装着されていない。
- ・以上の課題を解決するために、以下の方策を講じた。
- ・最高速を、上記(1)の検討結果を参考に、20km/hに制限することで、低速での速度精度を向上させた。
- ・牽引装置をロボットの全幅より外側に配する設計で、ロボットの多様な走行機構に対応した。
- ・必要に応じて腕の傷害を評価するための外力を測定するために、荷重形内蔵の腕を、ダミーに追加した。

4.2.4.2.3 自動車の衝突安全に関する研究にもとづく傷害基準の開発

4.2.4.2.3.1 自動車の衝突安全基準に関する調査

(1) 調査結果

生活支援ロボットは、市場への導入実績がないために、衝突時の傷害データが取得されていない。このため、傷害に関する基準は各国で開発途上にある(例えばHaddad等[1], [2])。そこで、本研究では、傷害に関するデータが充実している自動車分野の安全基準を参考にすることを想定して、調査を行った。表4.2.4.2.3-1に、代表例を示す。頭部、頸部、胸部、腰部、大腿部、下腿部などの安全基準が設定されている。

なお、表4.2.4.2.3-1において、頭部と頸部の傷害指標は、以下の様に定義されている。

a) 頭部：Head Injury Criteria (HIC)

$$HIC_{15} = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1)$$

ここに、 $a(t)$ は頭部加速度(単位は重力加速度g)、 t_1 および t_2 は15 msの間隔の加速度パルス積分範囲。

b) 頸部：頸部傷害指標 N_{ij} を次式により計算する

$$N_{ij} = F_z / F_{zc} + M_{ocy} / M_{yc}$$

ここに、 F_z は頸部軸力、 F_{zc} は頸部軸力を基準化するための臨界値。 M_{ocy} は頸部曲げモーメント、 M_{yc} は頸部曲げモーメントを基準化するための臨界値。

表 4.2.4.2.3-1 自動車の傷害基準の例

部位	傷害指標		基準		試験用 人体ダミー	出典
			標準的男性 米国男性 50パーセンタイル	小柄な女性 米国女性 5パーセンタイル		
頭部	Head Injury Criterion	HIC15	700	700	Hybrid III	FMVSS 208 前面衝突
頸部	Neck Injury Criterion	N_{ij}	1.0	1.0		
胸部	胸部加速度	a_{3ms}	60 g	60 g		
	胸部変位	s_{max}	63 mm	52 mm		
腰部	腰部横力		5.525 kN	-	SID IIs	FMVSS 214 側面衝突
大腿部	大腿部軸力	F_{max}	10 kN	6.805 kN	Hybrid III	FMVSS 208 前面衝突

(2) 課題

上記の基準を生活支援ロボットに適用するには、以下の課題がある。

- ・自動車分野の安全基準は、おもに重症以上（AIS3+）の発生を抑えることを目的としている。生活支援ロボットにおいて受容可能なリスクとして、より軽度の傷害の確率を評価する必要がある場合には、これらの基準は引用できない。
- ・上肢に関する基準は、自動車分野でも検討中であり、完成していない。
- ・大腿部および下腿部の基準は、骨の軸方向圧縮に関するものである。これは、自動車乗員の下肢が前方に伸ばされている場合に衝突によって軸方向に圧縮されるという傷害モードに対応した基準であるが、生活支援ロボットの場合には、傷害モードが異なると考えられ、曲げモーメントによる傷害を評価する必要がある。
- ・自動車の安全基準には、自動車と障害物の衝突による乗員の傷害に関する基準および自動車と歩行者の衝突による歩行者の傷害に関する基準がある。歩行者との衝突までは至らないが、自動車が歩行者の足を踏んでしまうという事故については、基準がない。生活支援ロボットが、人と接近した環境で使われることを想定すれば、足を踏むことによる傷害の評価も必要である。

これらの課題を解決するために、本研究では、2つの検討を行った。

- ・自動車の衝突安全に関する研究データの調査：自動車の衝突安全の安全基準を作成した際の研究データを調査することにより、安全基準にはなっていないが、生活支援ロボットの安全検証の参考となるデータをまとめる。
- ・自動車の衝突安全に関する研究データの調査：生活支援ロボットが人の足を踏んだ場合の傷害リスクについて、研究を行う。

4.2.4.2.3.2 自動車の衝突安全に関する研究データの調査

自動車基準を策定にあたっては、基準となる障害レベル以外の様々なデータが研究されている。これらのデータの中から生活支援ロボットに適用可能なデータを抽出するために、自動車の衝突安全に関する研究データの調査を実施した。

人体実験データ、動物実験データ、交通事故の実態データの取得の機会が限られているために、1970年代から蓄積されてきた研究データを、最新の手法で分析することで事故時に人体に加わる様々な物理指標（変位、速度、加速度、軸力、曲げモーメント等）と傷害レベルの関係の分析研究が実施されている。これらの研究の関係を調査整理した。その結果は、付属書C.1に掲載する。

4.2.4.2.4 自動車の衝突安全では研究されていない傷害基準の開発

自動車分野の傷害研究は、衝突による傷害に関するものが主である。このため、傷害部位は前項で検討した部位に限られており、足部の傷害についての研究は見られない。しかし、生活支援ロボットを人の近くで移動させた場合には、衝突のリスクに加えて、ロボットが人の足を踏むというリスクが想定される。そこで、以下のように、足を踏まれた場合の傷害を評価する指標を求める研究を実施した。その詳細は、付属書C.1に掲載する。

4.2.4.3 成果

前述の課題を解決した試験装置を設計、導入し、試験方法を確立した。また、4.2.4.2.3節および4.2.4.2.4節の検討の結果から、試験結果の評価基準を導出した。

4.2.4.3.1 試験装置

(1) 牽引装置および障害物（衝突用バリア）

牽引装置は、ロボットを牽引することで衝突速度を与える装置である。ロボットを支持する牽引台車をタイミングベルトを介してACサーボモータで駆動する。

衝突用バリアは、ロボットが障害物に衝突した場合にロボットおよび搭乗者に加わる衝撃を再現するための壁である。ロボットの衝突に耐えられる構造を有する壁で、ロボットの進路に対して直角な平面を持つ。衝突面は、衝突時の変形が無視できる剛性を持ち、衝突時の移動量が無視できるほど強固に床面に固定されている。

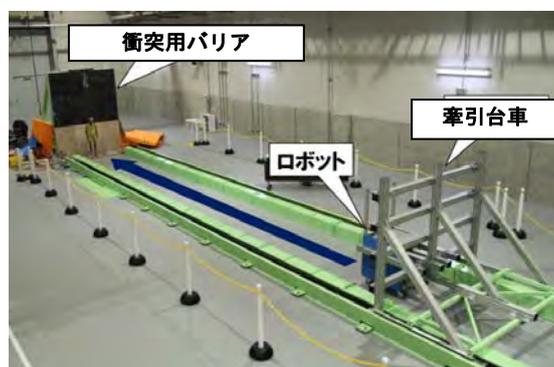


図 4. 2. 4. 3-1 牽引装置および障害物（衝突用バリア）

表 4. 2. 4. 3-1 牽引装置および障害物（衝突用バリア）の仕様

牽引装置	レール全長22000 mm, 有効牽引長 19000 mm
牽引台車	幅 1950 mm, 長さ 2350 mm, 高さ 1800 mm ロボットおよび人体ダミーの姿勢保持機構を装着
駆動方式	AC サーボモータ(7 kW)によるタイミングベルト駆動
牽引速度	1~20 km/h(0.1 km/hステップで設定可能)
衝突用バリア	平坦な面構造, 全体を34分割して, 衝撃力の分布を測定可能

(3) 人体ダミー

ロボットと衝突する第三者および搭乗型ロボットの搭乗者を再現するために、3種の人体ダミーを用いる。人体ダミーには靴を着用する。また、綿製のシャツ及びズボンを着用させてもよい。人体ダミーの手足の関節の硬さは、手足を水平にしたとき、それらの自重を支える程度に調整する。

これらの人体ダミーは、人体の各部位の寸法や重量が模擬されており、衝突による傷害のリスクが高い部位の障害を推定するために必要な力、モーメント、変位、速度、加速度を測定できる。

- ・ Code of Federal Regulation, Title 49, Part 582, Subpart Eに規定された Hybrid III ダミーで、成人男子の 50 パーセントの体型のものに、腕部の荷重計を付加したもの。
- ・ Code of Federal Regulation, Title 49, Part 582, Subpart Eに規定された Hybrid III ダミーで、成人女子の 5 パーセントの体型のものに、腕部の荷重計を付加したもの。
- ・ ISO/TS1349:2014 に記載された Q6 ダミー。
- ・ 上肢の障害を評価する必要がある場合には、人体ダミーの腕をロードセル内蔵の物に交換する。

4. 2. 4. 3. 2 試験条件

リスクアセスメントにおいて最も高いリスクが想定される条件で試験を行う。

- ・ 衝突速度：リスクアセスメントで想定される最高速度で試験を実施する。
- ・ ダミータイプ（搭乗者）：搭乗者の傷害を評価する場合には、設計仕様で想定する搭乗者の内で最もリスクの高いタイプの搭乗者を模擬した人体ダミーを用いる。例えば、成人を

対象とした搭乗型生活支援ロボットで、一般の女性が搭乗することを想定している場合には、AF05 人体ダミーを用いる。

・ダミータイプ（第三者）：第三者の傷害を評価する場合には、リスクアセスメントにおいて、ロボットと共存する可能性のある第三者の中で最もリスクの高いタイプの第三者を模擬した人体ダミーを用いる。例えば、子供のいる環境で使用する生活支援ロボットの場合には、Q6 人体ダミーを用いる。

・衝突形態：床面とロボット以外に衝突後の人体ダミーの挙動を拘束する障害物がない場合と、人体ダミーが障害物にあらかじめ接触している場合の両方について試験を行う。人が搭乗するロボットの場合は、障害物との衝突試験も行う。障害物には、リスクアセスメントで指定がない限り、衝突試験装置の衝突用バリアを用いる。

4.2.4.3.3 試験方法

(1) 試験

a) 試験室の温湿度環境は温度 $20 \pm 4^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 20\%$ とする。人体ダミーは、試験開始の 2 時間以上前から試験室の温湿度環境に曝露する。

b) ロボットは通電された状態で試験を行う。ただし、通電した状態で試験を行うことが困難な場合は、電源を遮断した状態で試験を行ってもよい。

c) ロボットの積載状態は、最大積載状態とする。搭乗型ロボットの場合は、製造者が定める搭乗方法に基づいて、人体ダミーを搭載する。荷物を搭載するロボットの場合は、製造者が定める方法で積載する。

d) 助走路を用いて所定の速度まで加速し、歩行者を模擬した人体ダミーに衝突させる。衝突条件は次の通りとする。

・床面とロボット以外に衝突後の人体ダミーの挙動を拘束する障害物がない場合と、人体ダミーが障害物にあらかじめ接触している場合の両方について試験を行う。

・歩行者を模擬した人体ダミーは、ロボットの走行軌道の中央に直立させ、ロボットが衝突する直前まで直立姿勢を保持する。衝突時の人体ダミーの向きは、ロボットに対して前向き、後ろ向き、横向きのそれぞれについて試験を行う。衝突後の人体ダミーの挙動は、障害物、床面、およびロボット以外によって拘束されない。

・ロボットの走行方向は、原則として前進方向とする。ただし、前進方向以外にも走行可能なロボットについては、ロボットの構造や形状、走行速度、および搭乗者の搭乗状態を考慮して、歩行者への負荷が前進方向と同等以上と考えられる衝突方向がある場合、その方向についても試験を行う。

e) 人が搭乗するロボットの場合は、障害物との衝突試験も行う。助走路を用いて、ロボットが衝突時に出し得る最高所定の速度まで加速し、障害物に衝突させる。ロボットの走行方向は、原則として前進方向とする。ただし、前進方向以外にも走行可能なロボットについては、ロボットの構造や形状、走行速度、および搭乗者の搭乗状態を考慮して、搭乗者への負荷が前進方向と同等以上と考えられる衝突方向がある場合、その方向についても試験を行う。

f) SAE 211 に従って、衝突時の人体ダミーの各部位に対する負荷を測定する。測定する負荷は次の通り：

- ・頭部加速度（前後方向、左右方向、上下方向）、
- ・頭部の回転角速度（重心まわり）、
- ・頸部の軸力、
- ・頸部のモーメント、
- ・胸部の変位（前後方向）、
- ・脚部荷重

(2) データ処理

測定したデータから各部位（頭部、頸部、胸部、脚部）の評価パラメータを算出する[8].

a) 頭部：Head Injury Criteria (HIC) を次式により計算する.

$$HIC_{15} = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (4.2.4.3-1)$$

ここに、 $a(t)$ は頭部加速度（単位は重力加速度 g ）， t_1 および t_2 は 15 ms の間隔の加速度パルス積分範囲.

b) 頸部：頸部傷害指標 N_{ij} を次式により計算する

$$N_{ij} = F_z / F_{zc} + M_{ocy} / M_{yc} \quad (4.2.4.3-2)$$

ここに、 F_z は頸部軸力、 F_{zc} は頸部軸力を基準化するための臨界値、 M_{ocy} は頸部曲げモーメント、 M_{yc} は頸部曲げモーメントを基準化するための臨界値.

c) 胸部および脚部：胸部変位および脚部曲げモーメントの最大値を求める.

4.2.4.3.4 評価基準

生活支援ロボットは、社会への導入実績がほとんど無いために、受容可能な傷害リスクに関するコンセンサスが形成されていない。このため、現時点では、受容可能な傷害リスクは製造者が設定する必要がある。ことで本研究では、衝突による傷害の評価基準を、「試験結果が、リスクアセスメントで設定した傷害レベル以下となること」とした。計測された評価パラメータから傷害レベルを推定する方法を、人体各部分について、以下に示す。

4.2.4.3.4.1 頭部傷害

(1) 頭部傷害レベル

自動車分野では、重症以上 (AIS3+) の頭部傷害について議論されることが多いが、生活支援ロボットにおいて受容可能なリスクとして、より軽度の傷害の確率を評価する必要がある場合に対応するために、以下のデータを利用することを提案する。なお、頭部傷害に関する AIS の大まかな定義は以下のとおりである。

- ・ AIS 1：頭部打撲，10 cm 以下の頭皮裂創
- ・ AIS 2：10 cm を超える頭皮裂創，閉鎖性の頭蓋骨骨折，脳震盪，脳神経損傷
- ・ AIS 3：開放性の頭蓋骨骨折，小さな脳挫傷など

(2) 大人の頭部傷害

表 4.2.4.3-2 に示す様に、米国 NHTSA は、過去の死体実験、動物実験、人体ダミーによる再現実験などのデータから、頭部傷害の発生確率の関数（リスクカーブ）を提案している[9]。軽症 (AIS 1) および中傷 (AIS 2) の発生確率は、AIS 3 等のデータから推測した確率であるが、軽症の発生確率に関する今後の研究成果が得られるまでの暫定値として使用することを提案する。

表 4. 3. 4. 3-2 NHTSA による大人の頭部傷害の発生確率[9]

HIC	MAIS 1	MAIS 2	MAIS 3
50	0.3%	0.1%	0.1%
150	8.7%	2.8%	1.2%
250	21.8%	7.4%	2.9%
350	33.8%	13.7%	5.1%
450	40.1%	21.5%	8.1%
550	39.1%	29.7%	11.9%
650	33.0%	36.7%	16.7%
750	25.2%	40.8%	22.2%
850	17.8%	41.3%	28.2%
950	12.0%	38.5%	33.9%
1050	7.8%	33.5%	38.4%

(3) 子供の頭部傷害

表 4. 2. 4. 3-3 ～表 4. 2. 4. 3-5 に示す様に、米国 NHTSA は、大人の頭部傷害発生確率の関数から頭部の寸法を基にした換算（スケーリング）により、子供の頭部傷害の発生確率の関数（リスクカーブ）を提案している[8]。軽症（AIS 1）の確率は、AIS 3 等のデータから推測した確率であるが、軽症の発生確率に関する今後の研究成果が得られるまでの暫定値として使用することを提案する。

表 4. 2. 4. 3-3 NHTSA による 12 ヶ月児の頭部傷害の発生確率[8]

HIC	MAIS 1	MAIS 2	MAIS 3
50	30.27%	0.62%	0.02%
100	52.75%	4.22%	0.47%
150	60.62%	9.49%	1.88%
200	61.28%	14.57%	4.09%
250	58.63%	18.66%	6.60%
300	54.56%	21.57%	8.99%
350	50.03%	23.44%	10.98%
400	45.52%	24.42%	12.47%
450	41.24%	24.73%	13.44%
500	37.27%	24.55%	13.95%
550	33.66%	24.00%	14.06%
600	30.42%	23.21%	13.85%
650	27.51%	22.26%	13.40%
700	24.89%	21.21%	12.79%
750	22.55%	20.12%	12.06%
800	20.47%	19.01%	11.25%

表 4.2.4.3-4 NHTSA による 3 歳児の頭部傷害の発生確率[8]

HIC	MAIS 1	MAIS 2	MAIS 3
50	18.94%	0.16%	0.00%
100	40.86%	1.60%	0.10%
150	53.44%	4.48%	0.52%
200	59.48%	8.06%	1.42%
250	61.49%	11.72%	2.74%
300	61.11%	15.06%	4.34%
350	59.34%	17.90%	6.07%
400	56.80%	20.18%	7.77%
450	53.86%	21.94%	9.33%
500	50.75%	23.21%	10.69%
550	47.64%	24.04%	11.83%
600	44.60%	24.53%	12.72%
650	41.67%	24.72%	13.37%
700	38.90%	24.67%	13.79%
750	36.29%	24.43%	14.01%
800	33.85%	24.03%	14.06%

表 4.2.4.3-5 NHTSA による 6 歳児の頭部傷害の発生確率[8]

HIC	MAIS 1	MAIS 2	MAIS 3
50	13.99%	0.07%	0.00%
100	33.88%	0.86%	0.04%
150	47.45%	2.73%	0.23%
200	55.51%	5.35%	0.71%
250	59.73%	8.33%	1.50%
300	61.40%	11.31%	2.57%
350	61.41%	14.10%	3.84%
400	60.33%	16.59%	5.22%
450	58.57%	18.71%	6.64%
500	56.39%	20.47%	8.00%
550	53.99%	21.87%	9.27%
600	51.47%	22.96%	10.40%
650	48.93%	23.74%	11.39%
700	46.41%	24.28%	12.21%
750	43.95%	24.60%	12.87%
800	41.59%	24.72%	13.38%

4.2.4.3.4.2 頸部傷害

(1) 頸部傷害レベル

頸部傷害に関する AIS の大まかな定義は以下のとおりである。

- ・ AIS 1：頸椎捻挫など
- ・ AIS 2：頸椎骨折，亜脱臼など
- ・ AIS 3：一過性の頸髄損傷など

(2) 大人および子供の頸部傷害

米国 NHTSA は，過去の動物実験 (Mertz 等[10]，Prasad 等[11]) のデータから，頸部傷害の発生確率の関数 (リスクカーブ) を，式 4.2.4.3-2 の様に提案している[12]．軽症 (AIS 1) の確率は，整備されていないが，AIS 2 のデータは，頭部傷害と異なり，重傷データのから推測ではなく，動物実験データから求めた値である。

$$p(\text{AIS} \geq 2) = \frac{1}{1 + e^{2.054 - 1.195N_{ij}}}$$

$$p(\text{AIS} \geq 3) = \frac{1}{1 + e^{3.227 - 1.969N_{ij}}}$$

$$p(\text{AIS} \geq 4) = \frac{1}{1 + e^{2.693 - 1.195N_{ij}}}$$

$$p(\text{AIS} \geq 5) = \frac{1}{1 + e^{3.817 - 1.195N_{ij}}}$$

(4.2.4.3-3)

ここに、 $p(\text{AIS} \geq n)$ は AIS n 以上の傷害が発生する確率、また、

$$N_{ij} = F_z / F_{zc} + M_{ocy} / M_{yc}$$

(4.2.4.3-4)

F_z は頸部軸力、 F_{zc} は頸部軸力を基準化するための臨界値。 M_{ocy} は頸部曲げモーメント、 M_{yc} は頸部曲げモーメントを基準化するための臨界値で、表 4.2.4.3-6 に定義される。

表 4.2.4.3-6 式 4.2.4.3-3 における頸部軸力および頸部曲げモーメントの臨界値[12]

ダミー	サイズ	F_{zc} Tension (N)	F_{zc} Compressions (N)	M_{yc} Flexion (Nm)	M_{yc} Extension (Nm)
CRABI	12ヶ月児	1465	1465	43	17
Hybrid III	3歳児	2120	2120	68	27
Hybrid III	6歳児	2800	2800	93	39
Hybrid III	小柄な女性	3370	3370	155	62
Hybrid III	中寸法の男性	4500	4500	310	125
Hybrid III	大柄な男性	5440	5440	415	166

NHTSA[8] は、上記とほぼ同一だが、軸力とトルクの臨界値が異なるデータも公表している（表 4.2.4.3-7）。

表 4.2.4.3-7 式 4.2.4.3-3 における頸部軸力および頸部曲げモーメントの臨界値
(NHTSA の異なる報告) [8]

ダミー	サイズ	F_{zc} Tension (N)	F_{zc} Compressions (N)	M_{yc} Flexion (Nm)	M_{yc} Extension (Nm)
CRABI	12ヶ月児	1460	1460	43	17
Hybrid III	3歳児	2340	2120	68	30
Hybrid III	6歳児	3096	2800	93	42

(3) 子供の頸部傷害に関する補完データ

NHTSAによる式(4.2.4.3-3)は、統計処理により導出されているために、頸部軸力と頸部曲げモーメントが零の場合にも傷害の発生確率は零とならないが、Palisson等[13]は、3歳児について、頸部軸力1450 N未満または曲げモーメント13 Nm未満では、子供の頸部傷害は確認されなかったことを、報告している。これは、欧州のCHILD projectの40例の子供の事故データからデータを3歳児に換算した結果によるものである。

4.2.4.3.4.3 胸部傷害

(1) 胸部傷害レベル

頭部傷害に関するAISの大まかな定義は以下のとおりである。

- ・ AIS 1：胸壁の創挫傷，肋骨1本の骨折
- ・ AIS 2：穿通創挫傷，肋骨2～3本の骨折など
- ・ AIS 3：肋骨4本以上の骨折など

(2) 大人の胸部傷害

Eppinger等[12]は、エアバッグとベルトによる胸部傷害について、過去のデータを再解析した結果、Hybrid III 50th percentile male dummyの胸の最大変位 D_{max} の関数として傷害発生確率を求めている

$$\begin{aligned}
 p(\text{AIS} \geq 2) &= \frac{1}{1 + e^{(1.8706 - 0.04439D_{max})}} \\
 p(\text{AIS} \geq 3) &= \frac{1}{1 + e^{(3.7124 - 0.0475D_{max})}} \\
 p(\text{AIS} \geq 4) &= \frac{1}{1 + e^{(5.0952 - 0.0475D_{max})}} \\
 p(\text{AIS} \geq 5) &= \frac{1}{1 + e^{(8.8274 - 0.0459D_{max})}}
 \end{aligned}
 \tag{4.2.4.3-5}$$

$p(\text{AIS} \geq n)$ はAIS n 以上の傷害が発生する確率。

(3) 大人の胸部傷害に関する補完データ

Eppinger等[12]の報告には、軽症(AIS 1)の確率が記載されていないが、ISO 13232-5:200のAnnex G (informative)には、胸骨の最大変位と傷害確立の関係が参考値として掲載されている(図4.2.4.3-4)。このデータの根拠であるKroell等[14]の報告には、AIS 1のデータは含まれておらず、傷害確率は推測値であると考えられるが、軽症の発生確率に関する今後の研究成果が得られるまでの暫定値として使用することを提案する。

表 4.2.4.3-8 大人の胸部最大変位と胸部傷害確率の推測値
(ISO 13232-5: 2005 Annex G informative の掲載図より読み取った概略値)

胸変形量	発生確率		
	AIS 1以上	AIS 2以上	AIS 3以上
10%	0%	0%	0%
20%	18%	2%	0%
30%	95%	50%	12%
40%	100%	100%	88%
50%	100%	100%	100%

(4) 子供の胸部傷害

米国 NHTSA は、大人の胸部傷害発生確率の関数から胸部の寸法を基にした換算（スケールリング）により、子供の胸部傷害の発生確率の関数（リスクカーブ）を提案している [8].

・ 12 ヶ月児 (12-month-old CRABI ダミー) の胸の傷害確率

$$p(\text{AIS} \geq 2) = [1 / (1 + \exp(1.8706 - 0.09322 d))] \times 100\%$$

$$p(\text{AIS} \geq 3) = [1 / (1 + \exp(3.7124 - 0.09975 d))] \times 100\%$$

$$p(\text{AIS} \geq 4) = [1 / (1 + \exp(5.0952 - 0.09975 d))] \times 100\%$$

$$p(\text{AIS} \geq 5) = [1 / (1 + \exp(8.8274 - 0.09639 d))] \times 100\% \quad (4.2.4.3-6)$$

・ 3 歳児 (3-year-old ダミー) の胸の傷害確率

$$p(\text{AIS} \geq 2) = [1 / (1 + \exp(1.8706 - 0.08225 d))] \times 100\%$$

$$p(\text{AIS} \geq 3) = [1 / (1 + \exp(3.7124 - 0.08802 d))] \times 100\%$$

$$p(\text{AIS} \geq 4) = [1 / (1 + \exp(5.0952 - 0.08802 d))] \times 100\%$$

$$p(\text{AIS} \geq 5) = [1 / (1 + \exp(8.8274 - 0.08505 d))] \times 100\% \quad (4.2.4.3-7)$$

・ 6 歳児 (6-year-old ダミー) の胸の傷害確率

$$p(\text{AIS} \geq 2) = [1 / (1 + \exp(1.8706 - 0.06991 d))] \times 100\%$$

$$p(\text{AIS} \geq 3) = [1 / (1 + \exp(3.7124 - 0.07481 d))] \times 100\%$$

$$p(\text{AIS} \geq 4) = [1 / (1 + \exp(5.0952 - 0.07481 d))] \times 100\%$$

$$p(\text{AIS} \geq 5) = [1 / (1 + \exp(8.8274 - 0.07229 d))] \times 100\% \quad (4.2.4.3-8)$$

ここに、 $p(\text{AIS} \geq n)$ は AIS n 以上の傷害が発生する確率、 d は胸の最大変位(mm).

(5) 胸部傷害に関する統合的な指標 CTI

衝突時に胸が高速で変形する自動車事故の場合には、胸部加速度も、傷害発生確率の重要な指標とした扱われている。NHTSA (Eppinger 等[12]) は、胸部傷害に関する統合的な指標 CTI を用いることにより、胸の最大変位と加速度の影響を同時に評価するとともに、子供から大人までの傷害発生確率を統合的に評価する方法を報告している (式 4.2.4.3-8).

$$p(\text{AIS} \geq 2) = \frac{1}{1 + e^{(4.847 - 6.036\text{CTI})}}$$

$$p(\text{AIS} \geq 3) = \frac{1}{1 + e^{(8.224 - 7.125\text{CTI})}}$$

$$p(\text{AIS} \geq 4) = \frac{1}{1 + e^{(9.872 - 7.125\text{CTI})}}$$

$$p(\text{AIS} \geq 5) = \frac{1}{1 + e^{(14.242 - 6.589\text{CTI})}}$$

$$\text{CTI} = \frac{A_{\max}}{A_{\text{int}}} + \frac{D_{\max}}{D_{\text{int}}} \quad (4.2.4.3-9)$$

ここに、 $p(\text{AIS} \geq n)$ は AIS n 以上の傷害が発生する確率、 A_{\max} は脊椎の 3 ms 間の最大加速度、 D_{\max} は、胸部最大変位、 A_{int} および D_{int} は、表 4.2.4.3-9 に示す臨界値。

表 4.2.4.3-9 式(4.2.4.3-8)における胸部変位および脊椎加速度の臨界値[12]

ダミー	サイズ	D_{int}	A_{Cnt}
CRABI	12 ヶ月児	50 mm	57
Hybrid III	3歳児	57 mm	74
Hybrid III	6歳児	64 mm	90
Hybrid III	小柄な女性(5th %ile Female)	84 mm	90
Hybrid III	中寸法の男性(50th %ile Male)	103 mm	90
Hybrid III	大柄な男性(95th %ile Male)	114 mm	83

4.2.4.3.4.4 腹部傷害

(1) 腹部傷害レベル

腹部傷害に関する AIS の大まかな定義は以下のとおりである。

- ・ AIS 1 : 挫傷, 20 cm 以下の裂創, 表面的刺創, 腰椎捻挫
- ・ AIS 2 : 20 cm を超える裂創, 皮下組織までの刺創, 椎体骨折, 胃・腸の非穿通の傷害など
- ・ AIS 3 : 腰椎骨折, 胃・腸の穿通傷害など

(2) 大人の腹部傷害

Newman 等[15]は, 大人の腹部傷害に関する Rouhana 等のデータ[16]から仮定により求めたリスクカーブを提案しており, ISO 13232-5 2005 の Annex G (informative) にも引用されている(表 4.2.4.3-10)。ただし, その導出過程が不明確であり, 生活支援ロボットに適用する場合ためには, さらなる調査が必要である。

表 4.2.4.3-10 シートベルトの進入量と腹部傷害確率の関係
(ISO 13232-5 2005 Annex G, informative の掲載図より読み取った概略値)

胸変形量 (インチ)	発生確率		
	AIS 1以上	AIS 2以上	AIS 3以上
1	21%	17%	3%
2	41%	32%	10%
3	62%	47%	22%
4	80%	63%	41%

(3) 子供の腹部傷害

欧州のプロジェクト CREST (Child Restraint System for Cars) [17]は, 子供の腹部傷害に関するデータを 3 歳児にスケーリングすることにより, 3 歳児の腹部傷害の発生確率を分析している(表 4.2.4.3-11)。ただし, この分析は, 特殊な人体ダミーを用いた結果であり, 一般に用いられる子供の人体ダミー(Q シリーズ)では, 腹部の圧縮力が測定できないために, この分析結果が利用できないとしている。本研究では, 今後, 生活支援ロボッ

トの安全評価に腹部の圧縮力が測定できる子供の人体ダミーが導入された場合に備えて、この分析結果を掲載しておく。

表 4.2.4.3-11 3歳児の腹部傷害の発生確率
(文献[17]の掲載図より読み取った概略値)

腹部荷重 (kN)	AIS 2 以上の傷害発生確率
0.5	24%
1.0	55%
1.5	82%

4.2.4.3.4.5 腰部傷害

(1) 腰部傷害レベル

腰部傷害に関する AIS の大まかな定義は以下のとおりである。

- ・ AIS 2：単純閉鎖性骨折
- ・ AIS 3：開放性骨折，仙腸骨骨折，恥骨結合離解

(2) 大人の腰部傷害

米国 NHTSA [18]は，Kuppa [19]のデータを再整理することにより，側面衝突時の骨盤に AIS2 以上の障害が発生する確率を，小柄な女性（5%タイルの米国女性，AF05）について，次式で表している。

$$p(\text{AIS} \geq 2) = [1 / (1 + \exp(6.3055 - 0.00094 F))] \times 100\% \quad (4.2.4.3-10)$$

ここに， $p(\text{AIS} \geq 2)$ は AIS 2 以上の傷害が発生する確率， F は，側面衝突用人体ダミー SID-II 人体ダミーに加わる骨盤横力（単位は N）である。

(3) 子供の腰部傷害

本研究の調査範囲では，子供の腰部傷害の発生確率に関するデータは見出されなかった。

4.2.4.3.4.6 上肢の傷害

(1) 上肢の傷害レベル

上肢の傷害に関する AIS の大まかな定義は以下のとおりである。

- ・ AIS 1：上肢捻挫，指骨骨折
- ・ AIS 2：手・上肢・肩・鎖骨骨折，上肢筋・腱断裂など
- ・ AIS 3：上肢の変位のある骨折・切断・クラッシュなど

(2) 大人の腕の傷害

上肢に関する傷害データは，自動車分野でも十分に研究されておらず，他の部位のような傷害発生確率の情報は提供されていない。本研究では，Duma 等[20]が死体の前腕と上腕の動的曲げ試験から求めた小柄な女性（5%タイル米国女性，AF05）の骨折限界 58.12 Nm_uを参照することを提案する。

Duma は，腕の骨の衝撃骨折試験（手のひらを下向きにした状態で上方から衝撃を与えた）における最大曲げモーメント 70.13 Nm Eppinger et al. (1984) の手法に従って 5 パーセントタイルの小柄な女性の腕の値 58.12 Nm に換算した。

(3) 子供の腕の傷害

本研究の調査範囲では、子供の上肢の傷害の発生確率に関するデータは見出されなかった。また、これまでのところ子供の上肢に加わる外力やモーメントを測定するための人体ダミーは普及しておらず、今後の課題となっている。

4.2.4.3.4.7 下肢の傷害

(1) 下肢の傷害レベル

下肢の傷害に関する AIS の大まかな定義は以下のとおりである。

- ・ AIS 1：足趾骨折・脱臼など
- ・ AIS 2：足・膝蓋骨・下腿骨骨折・脱臼など
- ・ AIS 3：大腿骨骨折，下肢切断（膝下）など

(2) 大人の下肢の障害

自動車分野では大腿部および下腿部の軸方向圧縮による傷害に関する基準が施行されてきたが、生活支援ロボットの場合には、曲げモーメントによる傷害を評価する必要がある。そこで、近年検討されている歩行者の下腿部障害に関するデータを用いることを提案する。Takahashi 等[21]は、過去の死体実験のデータを解析することで、下腿部の曲げモーメントによる骨折の発生確率を求めた。

$$p = 1 - \exp[-\exp\{5.77458 \cdot \ln(M) - 34.51175\}] \quad (4.2.4.3-11)$$

ここに、 p は骨折の発生確率、 M は曲げモーメント(Nm)。

(3) 子供の下肢の傷害

本研究の調査範囲では、子供の上肢の傷害の発生確率に関するデータは見出されなかった。また、これまでのところ子供の上肢に加わる外力やモーメントを測定するための人体ダミーは普及しておらず、今後の課題となっている。

4.2.4.3.4.8 足の傷害

ロボットが人の足を踏んだ場合の傷害について、本研究における熊の足を用いた検討結果（付属書 C.1）を引用する。同検討結果によれば、小柄な女性（5 percentile female）の足で最も骨折しやすいと考えられる中足骨の寸法換算因子は、3.20 であった。この値を用いて、熊足の骨折確率と寸法因子の関係を、人足の骨折確率と荷重の関係に換算すると、図 4.2.4.3-2 が求められる。この図は、より多くの実験データによる補強を要するが、当面、ロボットが人の足を踏んだ場合の足の傷害の発生確率として用いることを提案する。

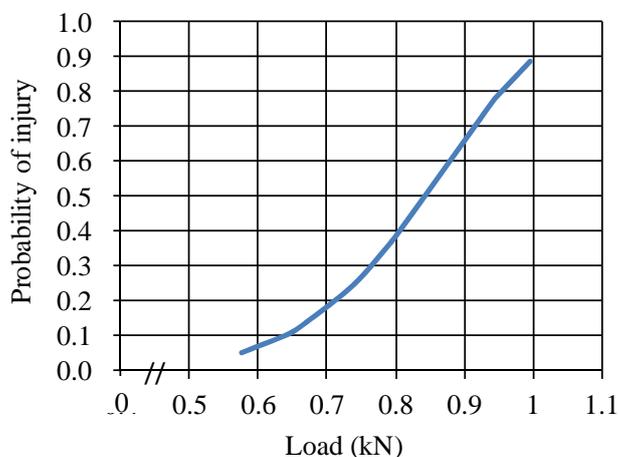


図 4.2.4.3-2 ロボットが人の足を踏んだ場合の足の傷害の発生確率（小柄な女性の骨折）

4.2.4.4 試験結果の例

生活支援ロボットの事故事例がないために、リスク算定の根拠となるデータが不足している。そこで、典型的な移動作業型ロボットを模した移動体を供試体とした衝突試験を実施して、データを取得した。

(1) 想定ケース

壁に面して倒立している6歳児に、移動作業型ロボットが正面から衝突するケースを想定した。予備試験の結果によると、壁に面して倒立したケースは、壁のない状態で衝突したケースよりも、頭部の加速度および胸の変形が大きかった。このため、最悪のケースを想定したリスクアセスメントに用いるデータとしては、壁に面して倒立したケースを想定することが適切であると考えた。

(2) 人体ダミー

子供は、大人に比べて危害が酷くなる傾向がある。その内、大人の監視を離れてロボットと接する可能性のある6歳児を対象とした。欧州で標準化が検討されているQ6ダミーを用いた。

(3) ロボット

移動作業型ロボットを模した移動体を用いた。外板に覆われた軟鋼製構造に4輪を差装着した物で、外板には、量産品に多く使われているポリスチレンを用いた。

(4) 試験条件

移動体（ロボット）の質量は、移動作業型ロボットに想定される範囲、20～200 kgとした。衝突速度は、電動車いすと同等の最高速度を含む2～6 km/hとした。



図 4.2.4.4-1 移動作業型ロボットを模した移動体

(5) 頭部傷害に関する試験結果

頭部加速度の時系列データと同時に撮影した高速度ビデオの比較から、以下の様に、頭部と壁（衝突用バリア）の衝突が、頭部傷害の主要な原因であることがわかった。図 4.2.4.4-2 の時間 = 0 s にいて、ロボットと頭部が最初に接触した際には、僅かな加速度変動が記録されたのみである。時間 = 0.09 s に頭部が壁と接触した際には、 1000 m/s^2 を超える加速度が発生している。その後、頭部とロボットは振動的な動きを呈するために、0.11 s 付近で再び加速度の上昇が見られるが、頭部の障害指標である HIC_{15} は、最大ピークの周辺 15 ms のみから算出されるために、この上昇は、傷害推定値には影響を及ぼさない。

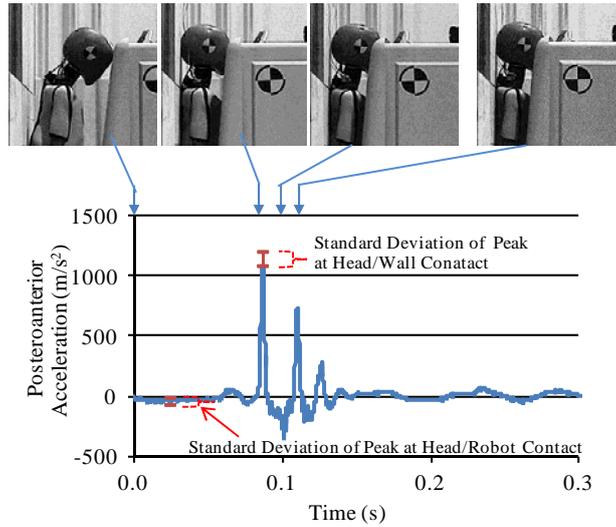


図 4.2.4.4-2 頭部加速度の測定結果

Haddadin 等は、ロボットのマニピュレータの質量と衝突速度が、人体傷害の重要なパラメータであると報告している [22, 23]. 図 4.2.4.4-3 は、本実験においてロボットの質量と衝突速度を変化させた場合の HIC_{15} の測定結果を示す. 質量 200 kg , 速度 6 km/h の場合には, HIC_{15} は 217 の値を示している. この値を, 前節の 6 歳児の頭部傷害確率のデータに当てはめると, 45% の確率で AIS 1 以上の傷害が発生することに相当する. また, 図 4.2.4.4-3 は, ロボット質量または衝突速度を減少させることで, HIC_{15} が低下できることを示している.

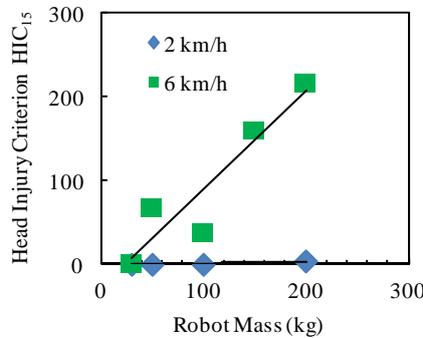


図 4.2.4.4-3 ロボットの質量および速度と HIC の関係

(6) 頸部傷害に関する試験結果

図 4.2.4.4-4 は、本実験においてロボットの質量と衝突速度を変化させた場合の N_{ij} の測定結果を示す. いずれの測定条件においても, N_{ij} は 0.32 以下である. これを前節の 6 歳児の頸部傷害確率データに当てはめると, AIS 2 以上の傷害発生確率は 20%未満であることがわかる. 前節のデータは, 統計処理の結果であるために, N_{ij} が零の場合にもにおいても, 傷害発生確率は零にならない. しかし, Palisson 等[13]は, 頸部張力 1450 N 未満または曲げモーメント 13 Nm 未満では, 子供の頸部傷害は確認されなかったことを, 3 歳児に換算した 40 例の子供の事故データから報告している. これらの力, 曲げモーメントを 6 歳児に換算すると, $N_{ij} < 0.34$ for に相当する. このことから, 今回実験した, 質量 200 kg 以下, 衝突速度 6 km/h 以下の条件では, 6 歳児の頸部傷害が発生する確率は, 僅かであると推定される.

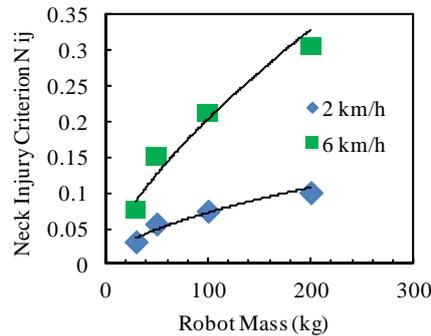


図 4.2.4.4-4 ロボットの質量および速度と N_{ij} の関係

(7) 胸部傷害に関する試験結果

図 4.2.4.4-5 は、本実験においてロボットの質量と衝突速度を変化させた場合胸部最大変位の測定結果を示す。いずれの測定条件においても、最大変位は 9 mm 未満である。これを前節の 6 歳児の胸部傷害確率データに当てはめると、AIS 2 以上の傷害発生確率は 20% 未満であることがわかる。前節のデータは、統計処理の結果であるために、胸部最大変位が零の場合にも、傷害発生確率は零にならない。しかし、Palisson 等は、胸部最大変位 20 mm 未満では、子供の胸部傷害は確認されなかったことを、3 歳児に換算した 24 例の子供の事故データから報告している [13]。このことから、今回実験した質量 200 kg 以下、衝突速度 6 km/h 以下の条件では、6 歳児の頸部傷害が発生する確率は僅かであると推定される。

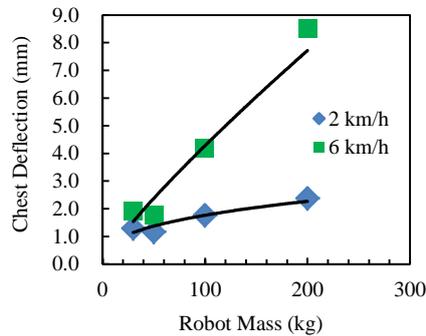


図 4.2.4.4-5 ロボットの質量および速度と胸部最大変位の関係

参考文献

- [1] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, and G. Hirzinger “Safety evaluation of physical human-robot interaction via crash-testing,” Robotics: Science and Systems Conference (RSS2007), Atlanta, USA, pp. 217-224, 2007.
- [2] S. Haddadin, A. Haddadin, S. Khoury, T. Rokahr, S. Parusel, R. Burgkart, A. Bicchi, and A. Albu-Schäffer, “On making robots understand safety: Embedding injury knowledge into control,” Int. J. of Robotics Research, 2012
- [3] David J. Gutekunst, Tarpit K. Patel, Kirk E. Smith, Paul K. Commean, Matthew J. Silva, David R. Sinacore : Predicting ex vivo failure loads in human matatarsals using bone strength indices derived from volumetric quantitative computed tomography, Journal of Biomechanics, (2012)

- [4] H. J. Mertz et. al., Injury risk curve for children and adults in frontal and rear collisions, SAE973318, 1997.
- [5] M. Kleinberger et. al., Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems, NHTSA, 1998.
- [6] ISO20501:2003
- [7] JIS R1625:2010
- [8] National Highway Traffic Safety Administration, Proposed Amendment to FMVSS No 213 Frontal Test Procedure, U.S. Department of Transportation, 2002.
- [9] National Highway Traffic Safety Administration, www.nhtsa.gov.
- [10] H. J. Mertz et. al., Response of animals exposed to deployment of various passenger inflatable restraint system concepts for a variety of collision severities and animal positions, SAE826047, PT31, 1982.
- [11] P. Prasad et. al., A biomechanical analysis of head, neck and torso acceleration, SAE841656, 1984.
- [12] R. Eppinger et. al., Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems -2, NHTSA Docket No 1999-6407-5, 1999.
- [13] Palisson et. al., Estimating Q3 dummy injury criteria for frontal impact using the child project results and scaling reference values, IRCOBI conference pp 263-276. Maastricht, 2007.
- [14] Kroel et. al., Impact tolerance and response of the human thorax II, SAE741187, 1974.
- [15] J. A. Newman et. al., Toward a comprehensive biomechanical injury cost model, 36th Ann. Proc. of AAAM Conf., 1992.
- [16] S.W. Rouhana et. al., Assessing submarining and abdominal injury risk in the Hybrid II family of dummies: part II - development of the small female frangible abdomen, SAE902317, 1990.
- [17] Child Restraint System for Cars.
- [18] National Highway Traffic Safety Administration, Consumer Information; New Car Assessment Program, Federal Register / Vol. 73, No. 134 / Friday, July 11, 2008 / Notices, Docket No. NHTSA-2006-26555.
- [19] S. Kuppa, Injury criteria for side impact dummies, NHTSA Biomechanics research center, 2004.
- [20] Duma et. al., Dynamic injury tolerances for long bones of the female upper extremity, J. Anat., 1999.
- [21] Takahashi et. al., Development of injury probability functions for the flexible pedestrian legform impactor, SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. 5(1):2012, doi:10.4271/2012-01-0277.
- [22] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, A. De Luca, and G. Hirzinger,, "Collision Detection and Reaction: A Contribution to safe physical human-robot interaction," in IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2008), Nice, France, 2008, pp. 22-26.
- [23] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, M. Frommberger, J. Roßmann, and G. Hirzinger, "The DLR Crash Report: Towards a standard crash-testing protocol for robot safety - part I: Results," in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2009), Kobe, Japan, 2009, pp. 272-279.

4.2.5 挟圧安全性試験 [安衛研]

4.2.5.1 目的

本試験では、生活支援ロボットのマニピュレータが人体を挟圧する状態に対して、危害の発生を防止するために講じられる保護方策の有効性（挟圧安全性）を検証する。主としてマニピュレータを具備した生活支援ロボットを対象にするが、4.2.5.3.1に述べる試験条件の範囲で、頭部もしくは上腕の挿入が予見されるロボット内部の挟圧部にも適用することが可能である。

4.2.5.2 研究開発の経緯（挟圧状態での安全を判定する指標）

現在、人との協働作業を意図した産業用ロボットの安全基準としてISOの技術仕様ISO/TS 15066[1]が策定されつつあり、その中で、静的に挟圧された場合での人体の特定部位ごとの疼痛発現レベルとして押し付け面圧の値と、傷害発現レベルとして押し付け力の値が提案されている。ただし、これらの値は、数年前からドイツで開始された研究[2, 3]に基づいたもので、現在もなお研究は継続されており、今後の改訂での変更が示唆されているといった位置付けの値であるうえ、測定結果の5パーセンタイル値／算術平均／中央値のいずれか明示されていないなどの問題もあることから、国際的な合意を得る見通しは必ずしも立っていない。

このため、試験方法の開発にあたり、本研究では、筆者らが過去に行った機械的刺激に対する体性感覚の限界（痛覚耐性値）の測定結果[4, 5]を、挟圧安全性の判定指標として仮定することとした。これは、健常な成人男性9名を被験者として、マニピュレータと接触する可能性が比較的高いと予測される図4.2.5-1に示す13部位を先端が球形の金属製プローブを押し込んだ際に、痛みを受容できる限界でのプローブ押し付け力を痛覚耐性値として、また、接触から痛みの限界までのプローブの押し込み量を許容最大変位量として測定したものである。各測定部位における痛覚耐性値と許容最大変位量の平均値、標準偏差及び測定値が正規分布に従うとしたときの5パーセンタイル値を各々表4.2.5-1と表4.2.5-2に示す。判定指標には、マニピュレータの形状や構造といった個別の理由から挟圧が特定の人体部位に限定される場合を除き、全身のうち最も小さい5パーセンタイル値を参照することとなるが、測定した範囲では上腕（肩峰点と橈骨点の中間高さにある上腕内側の点）の値が最も小さく57.7 Nであった。

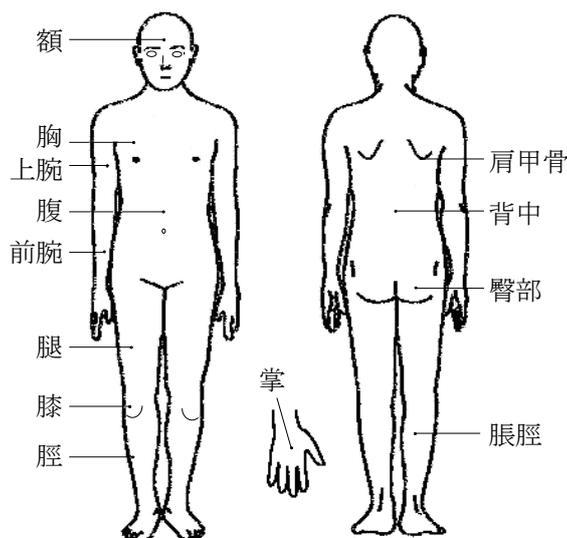


図 4.2.5-1 痛覚耐性値の測定部位 [4]

表 4.2.5-1 痛覚耐性値

単位：N

測定部位	平均	標準偏差	5パーセント値
額	150.7	32.2	97.6
胸	131.1	29.2	83.0
腹	130.5	37.4	68.8
肩甲骨	248.7	47.9	169.7
上腕	112.6	33.3	57.7
前腕	157.3	54.9	66.7
掌	200.8	47.4	122.5
背中	294.1	47.5	215.7
臀部	276.0	67.2	165.2
腿	226.6	33.4	171.6
膝	217.7	56.2	125.1
脛	185.1	67.0	74.5
脛脛	199.5	54.6	109.4

表 4.2.5-2 許容最大変位量

単位：mm

測定部位	平均	標準偏差	5パーセント値
額	3.1	0.7	2.1
胸	28.9	6.2	18.7
腹	52.2	18.8	21.1
肩甲骨	29.9	8.1	16.6
上腕	26.8	4.5	19.5
前腕	19.0	3.2	13.6
掌	7.2	1.4	4.9
背中	28.3	8.8	13.7
臀部	75.7	13.7	53.0
腿	39.0	4.4	31.7
膝	18.6	3.2	13.3
脛	8.6	3.3	3.2
脛脛	32.2	5.1	23.8

4.2.5.3 成果

4.2.5.3.1 試験条件（本試験の対象となる挟圧状態の明確化）

痛覚耐性値は、測定対象の各部位をそれよりも広い金属製の板の上に置いた状態で、先端が直径 10 mm の球形をしたステンレス製プローブを体表面から骨に向う一方から直線的に押し込む方法で測定された値であり[4, 5]、この測定条件と同等と見做される挟圧状態についてのみ安全の指標として適用できる。実際のマニピュレータと人との間で起こり得る人体の挟圧には様々な形態のものが考えられるが、これらを次の四つの観点から分類し、痛覚耐性値を判定指標とする本試験で対象になる挟圧の形態を明確にしておく。

なお、本 NEDO 生活支援プロジェクトでは、人と同じ環境にロボットが複数存在するとしても、同時に複数のロボットが危険事象をもたらす場合までは想定していない。このため、本試験も、人を挟圧するマニピュレータは一つであるとの仮定に立つ。

①発現する危害による分類：

人体の一部が挟まれた結果として被る危害を大別すると、図 4.2.5-2 に示す圧迫（押しつぶし）、せん断、曲げ、突き刺し、切傷、摘みが考えられる。このうち、せん断と曲げについては、人体に加わる荷重及びその結果生じる人体の変形の形態が静的な圧迫と明らかに異なるので、痛覚耐性値に基づいて安全を判定することは適切ではない。同様に、摘みも、皮膚表面に平行な方向での皮膚の挟み込みであることから痛覚耐性値を判定の指標とはできない。切傷と突き刺しは、これらが人体に接触するマニピュレータ部位の形状に依存して起こるものであるため、球面と平面との挟圧で得られた痛覚耐性値を適用は適切ではない。以上のことから、本試験では、その結果が人体部位の圧迫となる形態の挟圧状態のみが対象となる。特に、エンドエフェクタについては、それによる危害が突き刺しや切傷ではなく圧迫となる先端が直径 10 mm の球形をした金属製プローブと同等の面として扱える場合を対象とする。

②挟圧面の数による分類：

痛覚耐性値は二つの面の間での圧迫について測定されたものであり、三方向以上から複数の面が人体部位を圧迫（圧縮）するような状況には適用することはできない。

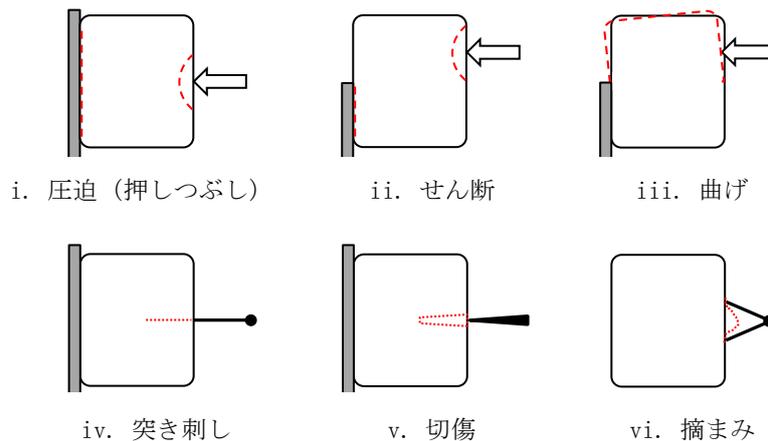


図 4.2.5-2 発現する危害による挟圧の分類

③挟圧面の移動速度による分類：

二つの面の間での圧迫について、各々の面の移動速度の組合せを考えると、両方の面が挟圧される人の立つ基準面に対して相対速度をもつ移動面である場合と、一方が移動面、他方が相対速度をもたない固定面である場合の二通りが考えられる。移動面にはマニピュレータの可動部分のみが該当するが、固定面にはマニピュレータ本体の一部である場合と壁や床などの周囲の障害物である場合とがある。なお、移動面の速度は、測定対象となるマニピュレータの仕様もしくはリスクアセスメントの結果から定めることになる。

④移動面の運動方向による分類：

すべてのマニピュレータは直線動作か回転動作を行う軸の組合せで構成されるので、移動面の動作は直線運動か円弧運動のいずれかで生成されることになる。ただし、痛覚耐性値はプローブを直線的に押し込む方法で測定された値であるため、後者の円弧運動の場合については、その曲率の大きさから圧迫がほぼ直線的であると見做せる場合のみが対象となる。具体的には、実際の痛覚耐性値の測定では、プローブに加わる人体の反力は三分力計によって計測されたが、プローブの移動方向に対して直角方向の成分（プローブと対峙する被験者から見て上下方向の成分と左右方向の成分の合力）がプローブの移動方向の成分よりも大きかった場合には、プローブが人体と正しく接触しなかったとして改めて再測定が行われることとされており[4, 5]、両成分の比をプローブの移動方向を 0°とする角度で表すと、採用された計測結果のうち、50%が 25°未満、90%が 37°未満であった。これに従い、移動面の動作が円弧運動である場合、力センサの主軸の方向が移動面に対して鉛直となるよう力センサを配置した上で、測定の開始から終了までの間、主軸方向の力成分と主軸方向以外の移動面に平行な力成分とがなす角度が 37°を超えない挟圧状態は、本試験の対象に含まれる。

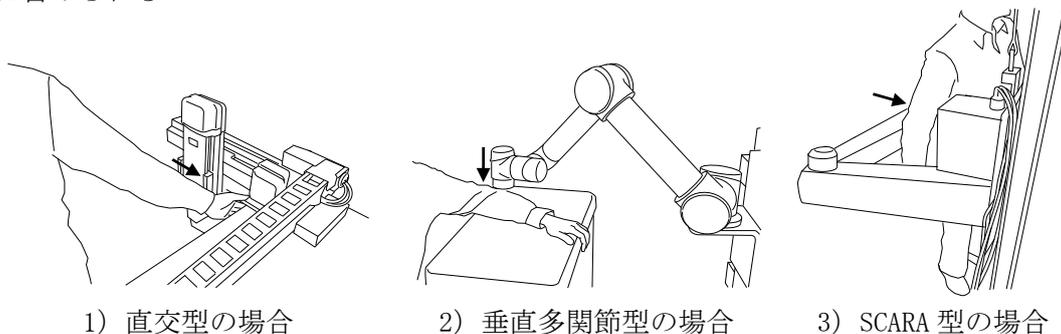


図 4.2.5-3 本試験の対象となる挟圧状態の例

4.2.5.3.2 試験装置

生活支援ロボットの一連の安全性検証では、挟圧防止のために採用された保護方策について、意図する機能が実行される確実性の高さは、方策の原理や構造の妥当性としてコンセプト検証など他の検証プロセスで評価されることとなっており、本試験では、あくまでも保護方策の有効性を評価する。ただし、マニピュレータの保護方策が、力センサや接触式スイッチなどのセンシング手段によって外部との干渉で生じる反力の情報を直接的に得て、あるいは、マニピュレータの動作に伴って発生した制御偏差の量あるいは駆動アクチュエータの消費エネルギー量などの情報から外部に及ぼしている力を推定して、マニピュレータの力出力を停止・調節するいわゆる制御による方策の場合には、単に生じる挟圧力を測定するだけでなく、現実の接触においてマニピュレータが人体部位を変形させていく過程で、どのように接触を検知し、そして挟圧力を抑えるか、講じられた保護方策の一連の挙動を抽出し、痛覚耐性値を超える可能性を検証する必要がある。

この点に関して、接触検知に基づいて可動部の動作を変更（典型的には反転又は停止）することで深刻な圧迫を回避する方策の採用が一般的に行われている機械の安全性試験においては、特定の弾性係数をもつ弾性体を介して力を測定するという方法を採用しているものがいくつかある。例えば、自動車のパワーウィンドウ及び電動ルーフパネルに対する米国自動車安全基準[6]では、それらの閉じ力が100 Nを超えてはならないと規定されているが、その検証試験では、ひずみゲージ式力センサをばね定数が65 N/mm（指の挟圧を模擬）又は20 N/mm（頭や腕などの人体部位の挟圧を模擬）のばねで支えた構造の基準計測器が使用されている（図4.2.5-4参照）。



図4.2.5-4 パワーウィンドウの挟圧安全性試験の例
（図は Sensor Developments, Model 10293）

また、自動回転ドアの安全性要求事項と試験方法を規定した JIS A 4721[7]では、ドア羽根回転力の測定方法として、圧縮形ロードセルで力を直接測定する方法ではなく、係数500 N/mm（±50 N/mm）の弾性（この値は指の剛性率の平均値から導かれたと説明されている[8]）をもつばね性受座を介して測定する方法を規定しており、図4.2.5-5に示すような基準計測器が使用されている。

以上のことから、ここで開発する挟圧安全性試験においても、人体部位との接触から挟圧に至る過程での挟圧防止機能の挙動を抽出し、痛覚耐性値を超える挟圧力が発生する可能性を検証するために、何らかの弾性要素を用いてマニピュレータが人体部位を変形させていく過程を模擬しつつ挟圧力を測定する方法で試験を行うこととした。

ただし、パワーウィンドウや自動回転ドアの試験では、挟圧力の測定に特定の一定の弾性係数をもつ弾性体（すなわち、線形なばね要素）を用いていたが、人体部位が実際に示す反



図 4.2.5-5 自動回転ドアの安全性評価で使用される基準計測器の例
(図は GTE Industrieelektronik, KMG-2000G)

力-変位特性は非線形なものである。例として、額（側頭点を通る頭部外縁と眉間点を通る顔の中心線との交点）、上腕（肩峰点と橈骨点の中間高さにある上腕内側の点）、背中（腰椎の上で最小腹部周と同じ高さの点）、臀部（右側臀部で側方から見て最も後ろに突出した点）について、痛覚耐性値が最小であった被験者と最大であった被験者について、プローブの押し込みに対して増加する反力の様子を図 4.2.5-6 に示す。痛覚耐性値と許容最大変位量自体は被験者ごとに異なるが、いずれの部位でも、プローブが進んでいく（内骨格に近づく）のに従ってプローブ変位に対する反力増加の比（見かけのばね定数）が増すという非線形な反力-変位特性が示されている。

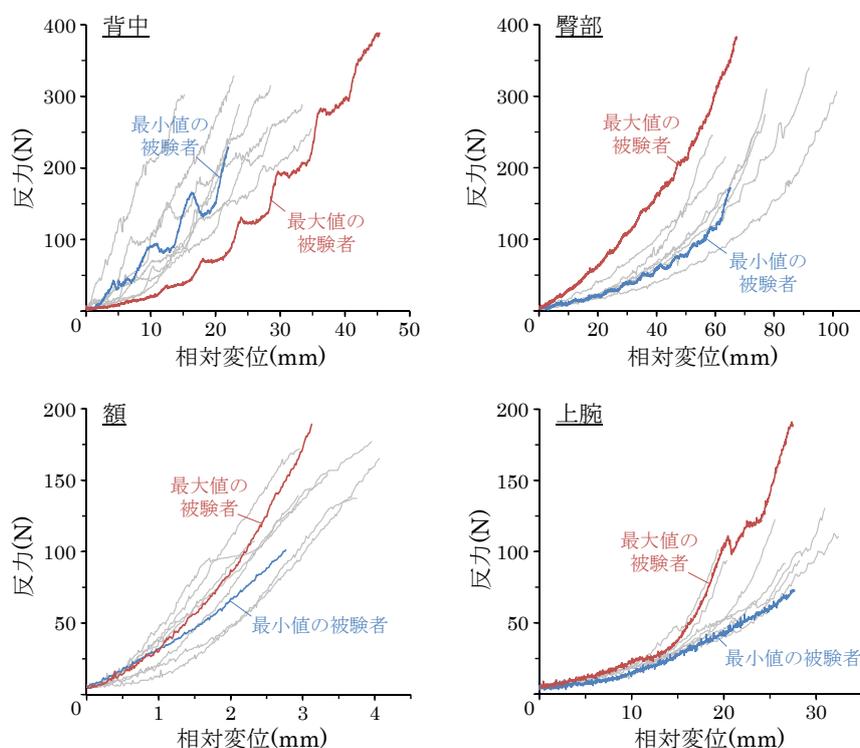


図 4.2.5-6 額、上腕、背中、臀部でのプローブ変位と挟圧部位が示す反力との関係

パワーウィンドウや自動回転ドアと異なり、生活支援ロボットが人間と接触中にマニピュレータがとる動作は直線的な軌道のものばかりではなく、また、仮に人体を挟圧した場合、人体部位を圧迫する力が複数のアクチュエータの駆動力の組合せの結果として発生する場合もある。このため、パワーウィンドウや自動回転ドアの安全性試験で使用される計測器のように人体部位の見掛けの弾性特性を一つのばね定数の弾性要素で代表するのではなく、ここで開発する挟圧安全性試験では、実際に人体が示す非線形な反力-変位特性を反映した条件で保護方策の一連の挙動を計測する必要があると考えられる。

以上のことから、挟圧安全性を評価するための試験装置には、挟圧力の計測に関して以下の機能が必要と言える。

仕様 1) 痛覚耐性値の測定では、人体の反力は三分力計で計測され、各成分の合力として評価された。このため、マニピュレータの挟圧部が人体に及ぼす力についても、移動面に対して鉛直方向の成分だけでなく、移動面に平行な鉛直方向以外の成分も計測し、それらの合力として評価できることが必要である。

仕様 2) 痛覚耐性値の測定では、人体への機械刺激の印加は先端が直径 10 mm の球形をしたステンレス製プローブを接触させることで行われた。このため、マニピュレータの試験対象部位と試験装置の力計測要素とは、直径 10 mm のステンレス球と同等の面積・硬度の条件で接触することが必要である。

さらに、人体の深厚な圧迫を回避するためにマニピュレータに実装される多様な保護方策に対して共通に使用できる試験装置とするために、

仕様 3) 人体部位が示す非線形な反力-変位特性を反映した条件で保護方策の一連の挙動を検証できるよう、挟圧力の測定中、接触開始から移動面の位置変化（押し込み）に応じてその増加率が増していく特性で大きくなる反力を移動面に加えられることが必要である。なお、このことを後のデータ解析において検証できるよう、挟圧力と併せて移動面の押し込み量が計測・記録できることが望ましい。

これらの要求仕様を満たす試験装置の構造として、図 4.2.5-7 に示す小型三分力計（テック技販、USL06-H5-200N）を先端に備えた可動部をばね定数もしくは自然長の異なる複数のコイルばねで支えた構造を提案する。三分力計の荷重受座は、仕様 2) を満たすよう、直径 10mm のステンレス製の突起としている。また、仕様 3) を満たすよう、コイルばねを、模擬しようとする人体部位の非線形な反力-変位特性に応じて異なるタイミングで可動部と接触して圧縮が開始するように前後の位置を設計し、同心軸上に配置している。なお、三分力計のデータと併せて、可動部の移動量を上部のリニアエンコーダ（ムトーエンジニアリング、DX-025 及び CNT-3921）で計測・記録できる。

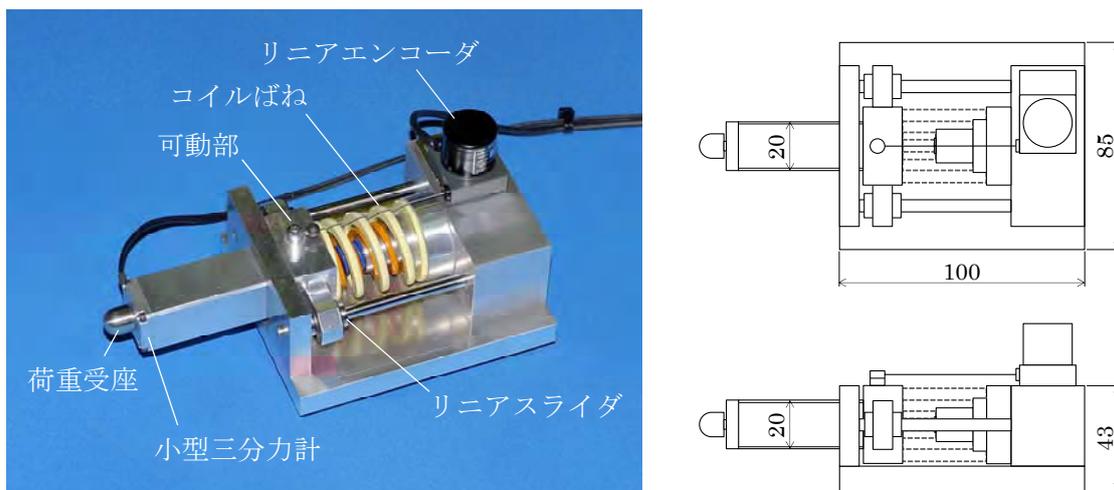


図 4.2.5-7 提案する試験装置の外観

4.2.5.3.1の④で述べたように、実際の痛覚耐性値の測定では、人体の変形はプローブの押し込み方向だけでなく、プローブと対峙する被験者から見て上下・左右の方向にも起こっていた。このため、ここで提案する一方向にのみ可動する三分力計を同軸上に配した複数のコイルばねで支える構造の試験装置は、必ずしも、痛覚耐性値測定時の人体の変形を忠実に再現するものではない。しかし、挟圧力と押し込み量を計測するという要求の下、工学的に比較的容易に任意の反力特性を実現でき、かつ、測定データ解析の際に装置の挙動の理解が容易であること、温度や湿度による特性の変動が少なく繰返し性の高い測定が行えることなどの利点から、挟圧安全性試験の基準測定器の基本モデルとして提案するものである。

なお、人体の特定部位の示す材料力学的特性については現在多くの研究が進められており、今後、挟圧安全性を判定する指標が押し付け力という形で国際的に合意されれば、該当する部位が変形する際に示す反力の特性を本測定装置で模擬することは可能であると考えている。その例として、痛覚耐性値を測定した13部位のうち、痛覚耐性値の5パーセント値が最も小さかった上腕と許容最大変位量の5パーセント値が最も小さかった額（側頭点を通る頭部外縁と眉間点を通る顔の中心線との交点）を対象に、痛覚耐性値の測定データから非線形な反力-変位特性を導き、これらを複数のコイルばねで模擬した結果を付属書C.2に示す。

4.2.5.3.3 評価基準

本試験では、挟圧による危害の発生を防止するために生活支援ロボットのマニピュレータに講じられた保護方策の妥当性を、「事前のリスクアセスメントの結果に基づき、挟圧が予見される人体部位の非線形な反力-変位特性を模擬できる試験装置によって測定した力の値が、当該部位の痛覚耐性値の5パーセント値を超えないこと」をもって判定する。

4.2.5.3.4 試験結果の例

付属書C.2に述べたように、本研究で試作した試験装置では、上腕と額の痛覚耐性値測定データ各々について、反力-変位特性を回帰式として同定し、その95%予測区間の上限と下限で与えられる二つの特性（すなわち、柔らかい特性と硬い特性）を複数のコイルばねの組み合わせで模擬することとした（便宜的に、以下では、上腕の回帰モデルの95%予測区間の上限/下限の特性を模擬したものを、各々、上腕(柔)タイプ/上腕(硬)タイプと、ま

た、額の回帰モデルの 95%予測区間の上限/下限の特性を模擬したものを、各々、額(柔)タイプ/額(硬)タイプと呼ぶ。これらを用いて、三自由度直交型マニピュレータ (IAI 社製 ICSPA3 シリーズ、以下では単に直交型マニピュレータという) を対象に試作した試験装置を用いて挟圧安全性試験を試行した。直交型マニピュレータは、リニアガイド、ボールネジ、AC サーボモータが一体となったリニアサーボアクチュエータを三台組み合わせた構成のもので、汎用多軸サーボコントローラ (IAI 社製 XSEL-K シリーズ) で制御される。主な諸元を表 4.2.5-3 に示す。ここでは、図 4.2.5-8 に示すように、第一軸が動作した時に第二軸の中央部分と周囲の障害物との間で挟圧が生じると想定し、第一軸が動作すると第二軸の中央に荷重受座が押し付けられる位置に、高さ調整のための台座を介して試験装置を固定した。

ただし、使用する直交型マニピュレータはあくまでも汎用のものであって、挟圧を防止するため特別な保護方策 (安全機能) は備えられていない。このため、図 4.2.5-9 に示すように、記録用の三分力計のデータを別途トリガ回路で処理し、力の測定値が設定した値に達したら、遮断回路によってロボットコントローラに擬似的に非常停止信号を入力するシステムを追加した。非常停止時、第一軸のリニアサーボアクチュエータは動力が遮断されてフリーの状態となり、このため、過大な押し付け力の発生が回避される。

表 4.2.5-3 直交型マニピュレータの主な諸元

	第一軸	第二軸	第三軸
型 式	ISA-LXM-I-400	ISA-MYM-I-200	ISA-MXM-I-200
ストローク	1000 mm	200 mm	100 mm
モータ出力	400 W	200 W	200 W
リード	20 mm	20 mm	10 mm
速度	1~1000 mm/s	1~1000 mm/s	1~500 mm/s
定格推力	340.1 N	169.5 N	340.1 N
可搬重量	80 kg (水平)	40 kg (水平)	19 kg (垂直)
コントローラ	プログラム運転多軸コントローラ汎用タイプ 型式: XSEL-K-3-400I-200I-200I B-N1		

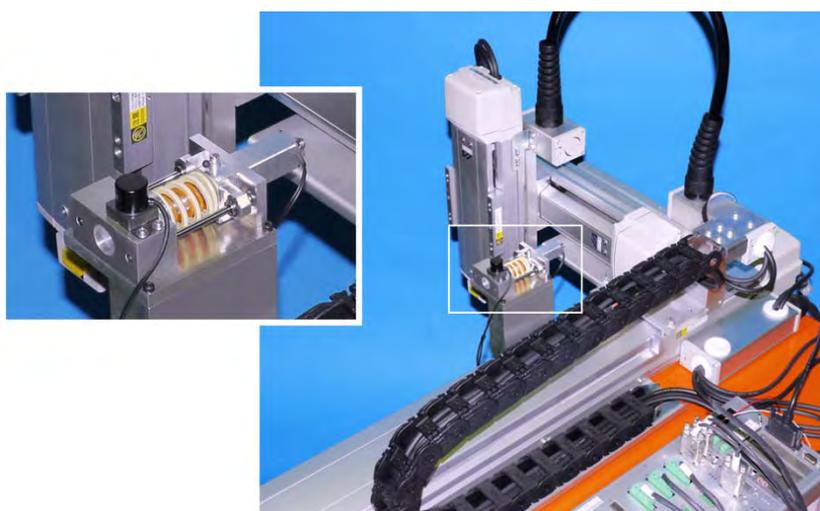


図 4.2.5-8 直交型マニピュレータに対する試験装置の固定位置

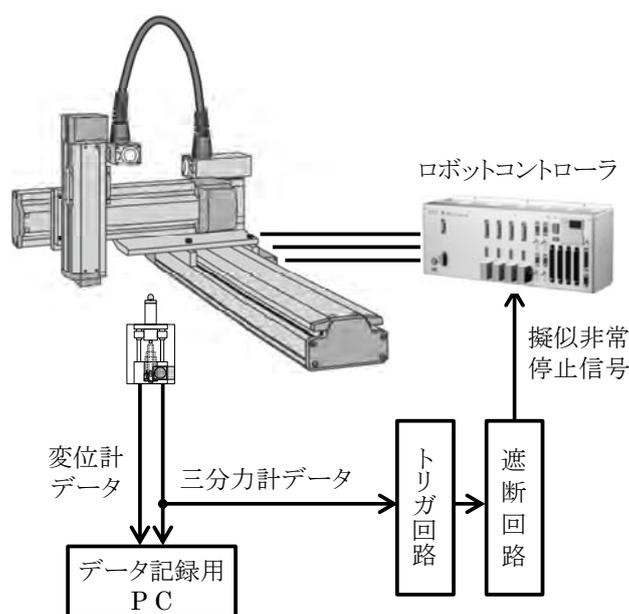


図 4.2.5-9 挟圧防止を模擬的に実行する機能を加えた試験システムの構成

まず、上腕(硬)(柔)タイプの試験装置に押し付ける試験を、三分力計のデータが 55.2 N を超えたときに擬似非常停止信号が入力されるようトリガ回路を設定し、第一軸の速度を 5 mm/s と設定して行った。三分力計からの計測データ及びリニアエンコーダからの変位データは、カットオフ周波数 750 Hz のローパスフィルタで処理し、サンプリング周期 1 msec で記録した。得られた結果として、測定された挟圧力のピーク値及び擬似非常停止信号が発せられてから第一軸が試験装置を圧縮した量(行き過ぎ)を表 4.2.5-4 に示す。上記のトリガ回路の設定で、(硬)と(柔)いずれのタイプでも評価基準を超える挟圧力は測定されなかった。また、擬似非常停止信号入力後、どちらもほぼ同じ行き過ぎを生じており、ばね定数の違いから、上腕(硬)タイプの場合により大きい挟圧力のピーク値が測定された。

表 4.2.5-4 上腕(硬)(柔)タイプの試験装置を使用した試験結果の例

想定挟圧部位	評価基準 (痛覚耐性値)	コイルばね の設定	試験結果(試験回数:5回)	
			挟圧力のピーク	行き過ぎ
上腕	57.7 N	上腕(硬)タイプ	最大 56.7 N (平均 56.65 N)	最大 0.17 mm (平均 0.166 mm)
		上腕(柔)タイプ	最大 55.7 N (平均 55.66 N)	最大 0.17 mm (平均 0.165 mm)

同様に、三分力計のデータが 81.2 N を超えたときに擬似非常停止信号が入力されるようトリガ回路を設定し、第一軸の速度を 5 mm/s と設定して、額(硬)(柔)タイプの試験装置に押し付ける試験を 5 回行った。得られた結果として、測定された挟圧力のピーク値及び行き過ぎ量を表 4.2.5-5 に示す。擬似非常停止信号入力後、どちらもほぼ同じ行き過ぎを生じており、ばね定数の違いから、このトリガ回路の設定では額(硬)タイプの場合に痛覚耐性値を超える挟圧力が測定される結果となった。

表 4.2.5-5 額(硬)(柔)タイプの試験装置を使用した試験結果の例

想定挟圧部位	評価基準 (痛覚耐性値)	コイルばね の設定	試験結果 (試験回数: 5回)	
			挟圧力のピーク	行き過ぎ
額	97.6 N	額(硬)タイプ	最大 100.7 N (平均 100.60 N)	最大 0.17 mm (平均 0.167 mm)
		額(柔)タイプ	最大 86.6 N (平均 86.60 N)	最大 0.17 mm (平均 0.166 mm)

4.2.5.3.5 まとめ

挟圧安全性の試験方法として、文献[4, 5]で報告した痛覚耐性値の5パーセンタイル値を判定指標と仮定した試験を提案し、対象とできる挟圧状態の条件について考察した。本試験で対象とできる挟圧状態は、痛覚耐性値の測定条件の制約を受けたもので、種々の構造をもつマニピュレータで予見される挟圧状態のすべてではない。ただし、このような制約が課せられることについては、今後、ISOなどで挟圧安全性の判定指標が国際的な合意を受けて別途確立したとしても同様のことが言える。すなわち、仮に新たな指標が公表されても、それを測定した際の測定方法や測定条件、計測装置の詳細が明示されなければ、挟圧安全性試験で活用することは極めて困難になると考えられる。

また、マニピュレータに講じられる多様な挟圧防止のための保護方策の有効性を検証するうえでは、挟圧力の測定において、人体部位が示す非線形な反力-変位特性を反映した条件で保護方策の一連の挙動を計測する必要があることを述べ、必要な仕様を満たす試験装置の実現例として、異なるばね定数をもつ複数のコイルばねを組み合わせて使用する構成を提案した。試作した試験装置を用いて汎用の直交型マニピュレータを対象に挟圧安全性試験を試行し、本試験の結果の例として示した。

参考文献

- [1] ISO TC184/SC2: “ISO/CDTS 15066 - Robots and robotic devices - Collaborative robots”, 2010
- [2] Institute for Occupational, Social and Environmental Medicine at the Johannes Gutenberg University of Mainz (Germany): Research project No. FP-0317, Collaborative robots - Investigation of pain sensibility at the Man-Machine-Interface, Interim report June 2013
- [3] DGUV (German Social Accident Insurance): BG/BGIA risk assessment recommendations according to machinery directive (Design of workplaces with collaborative robots), 2011
- [4] H. Ikeda and T. Saito: Proposal of pain tolerance index for the safe design of human-collaborative robots, Proceedings of 4th International Conference Safety of Industrial Automated Systems, Section 1, 2005
- [5] 齋藤剛, 池田博康: 人間協調型ロボットの機械的刺激に対する人体痛覚耐性値限界の測定, 労働安全衛生総合研究所特別研究報告, SRR-No33, pp.15-23, 2005
- [6] 米国運輸省道路交通安全局 FMVSS No.118, 2006
- [7] JIS A 4721:2005 - 自動回転ドア-安全性, 2006
- [8] D. Mewes, F. Mauser: Safeguarding crushing points by limitation forces, International journal of occupational safety and ergonomics, Vol.9, No.2, pp.177-191, 2003

4.2.6 接触安全性試験 [名古屋大]

4.2.6.1 目的

本試験は、装着型パワーアシストロボット(以下装着型ロボット)による装着箇所の創傷を対象とする。

免荷状態あるいは外部からの支持を使用上の制限条件とし、リスクアセスメントを実施した結果(付属書F3の表1および表2)の中で、ロボット装着の際の、カフ接触部位の皮膚に対する繰り返し荷重に伴い発生する可能性のある創傷を具体的な危害と定めた。

4.2.6.2 研究開発の経緯

4.2.6.2.1 参照規格

ISO 13482:2014 “Robots and robotic devices — Safety requirements for personal care robots”

その他関連する参考規格は、付属書F.3に掲載する。

4.2.6.2.2 試験装置の構成

目的に述べた創傷リスクを試験対象とする装置を以下のとおり構成した。すなわちまず、装着型ロボット使用時の皮膚、および装着カフの基準座標系に対する位置を計測するために、モーションキャプチャシステムを使用した。つぎに、カフ装着部位の皮膚に対する相対変位、およびカフと皮膚の間の接触力の両者の検出に装着部接触状態検出装置を用いた。さらに、これらの接触状態を人工皮膚上で再現するためのカフ動作再現装置を開発した。

4.2.6.3 成果

(1) 試験装置の仕様

a) 装着部接触状態検出装置

滑りセンサおよび相互作用力センサは、装置をカフーロボットリンク間に組み込むために十分に小型であることが望まれる。本研究開発で用いた装着型ロボットについて設定した要求仕様を一例とし表4.2.6-1に示す。

表 4.2.6 - 1 センサ要求仕様

項目	要求値	
	滑りセンサ	相互作用力センサ
空間分解能	0.1 mm 以下	0.1 N 以下
計測レンジ	30 mm 以上	100N 以上
時間的分解能	100 Hz 以上 (対象動作による)	100 Hz 以上 (対象動作による)
形状(滑り覚センサ)	30×30 mm (底面) 20 mm (高さ)	30×25 mm (底面) 15 mm (高さ)
備考		4 軸($F_{x/y/z}$, M_z)以上の力覚センサ

また、この要求事項を満たす滑り覚センサの一例として、滑り覚センサの概要図を図4.2.6-2に示す。このセンサはイメージセンサと集光レンズ(Avago technologies 製, ADNS-9500, ADNS-6190-002)を使用している。

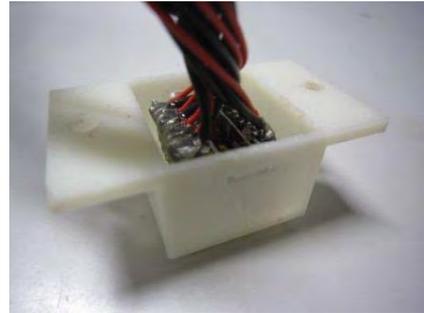
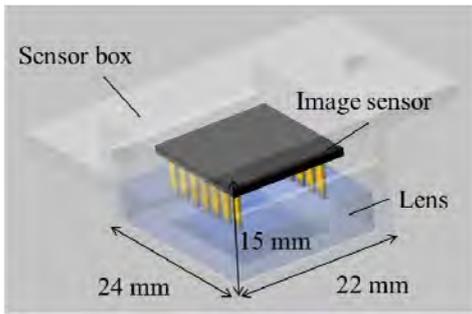


図 4.2.6 - 2 滑り覚センサ概観

次に、相互作用力計測センサを構成する力覚センサを図 4.2.6-3 に示す。本装置においては、3 軸力覚センサ(テック技販社製, USL06-H5-500N)を並列に固定することで 4 軸の計測を行った。



図 4.2.6 - 3 相互作用力センサ配置

上記のセンサを実際に装着型ロボット装着部に適用した際の様子を図 4.2.6-4 に、また、人体皮膚に対する装着部接触状態検出の様子を図 4.2.6-5 に示す。

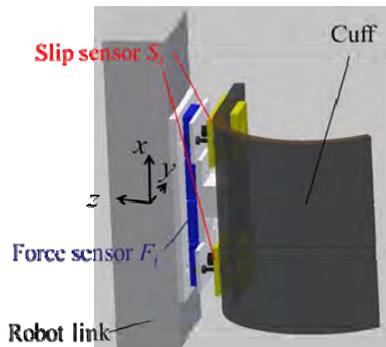


図 4.2.6 - 4 滑り覚センサ配置



図 4.2.6 - 5 計測装置概観

b) 皮膚特性計測装置

人工皮膚の特性取得には、レオメータを用いる。また、使用者の皮膚特性が明らかでない場合、同様にレオメータを用いて計測する。使用する機器は下記の仕様を満たすことが望ましい。

周波数	0.1 - 10 [Hz]
変位	10^{-2} [rad]
垂直力	5 [N]

また、一例として本研究開発で用いた機器(TA instruments 社製, Discovery Hybrid Rheometer)を示す。



図 4.2.6 - 6 レオメータおよび人体皮膚特性計測実験配置

c) 人工皮膚

人工皮膚は代表的使用者に合致した粘弾性特性および摩擦係数を有することが必要である。研究開発においては 20 代前半の成人男性を対象とした皮膚特性計測を行ったが、その際の代表的特性を下記に示す。

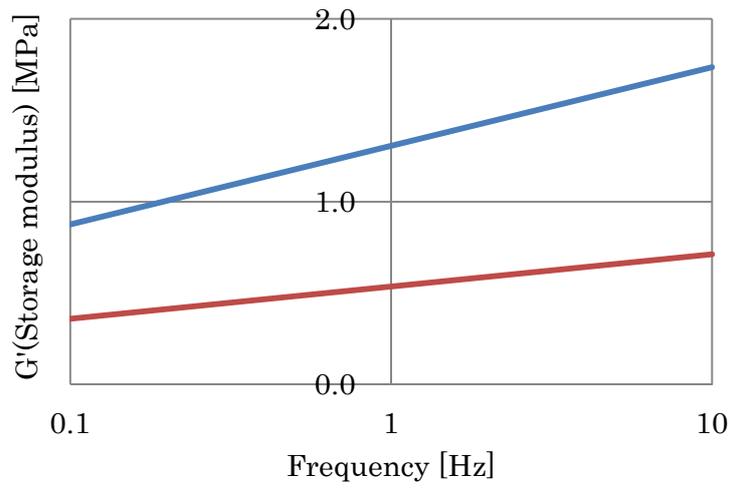


图 4.2.6 - 7 要求貯蔵弾性率

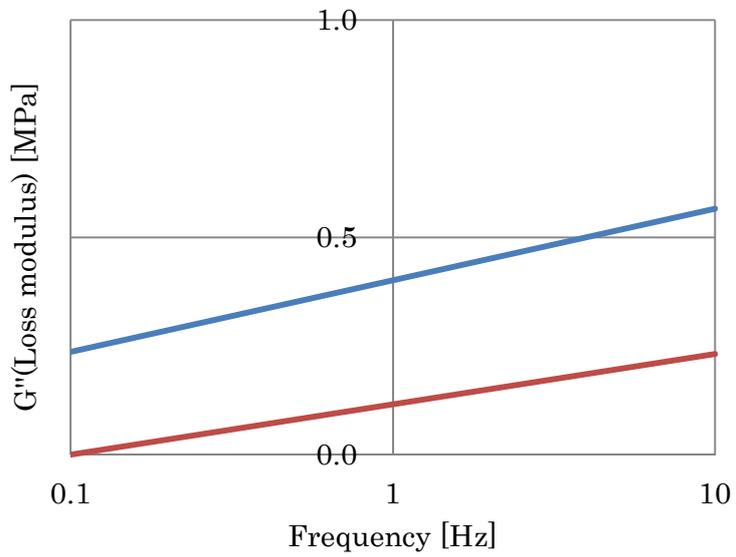


图 4.2.6 - 8 要求損失弾性率

表 4.2.6 - 3 要求摩擦係数

静摩擦係数	0.93
動摩擦係数	0.84

また、開発した人工皮膚を下記に示す。

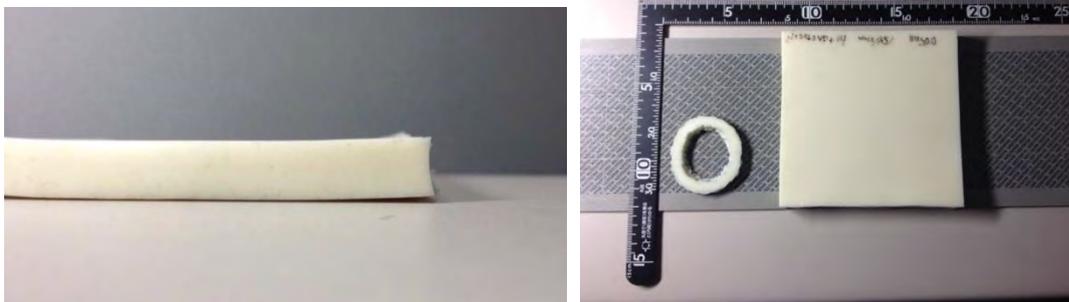


図 4.2.6 - 9 人工皮膚サンプル

d) カフ動作再現装置

本試験で用いるロボットマニピュレータ、力覚センサは、人体上で計測されるカフ運動（最大作用力：約 40N，最大変位：約 50[mm]）に冗長性を加味したカフ運動を再現せねばならない。したがって、本試験におけるロボットマニピュレータは作用力 60[N]、最大変位 80[mm]を十分満たす仕様、可動範囲である必要がある。以下にそれぞれに対する仕様条件と本研究開発で用いたロボットマニピュレータ、力覚センサを示す。

- ・ロボットマニピュレータ
- ・仕様条件

6 自由度

人体上のカフ変位を再現できる可動範囲
カフに生じる作用力によるトルクを十分許容する

- ・本試験に使用したロボットマニピュレータの仕様
名称：安川電機製・MOTOMAN-HP3J
外形・各軸名称：

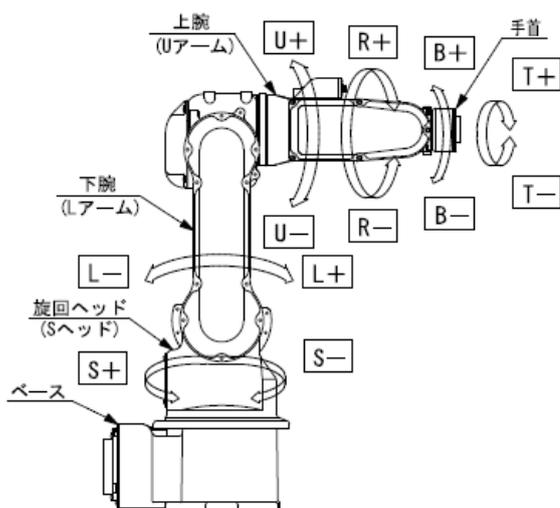


図 4.2.6 - 10 MOTOMAN-HP3J

- ・力覚センサ
 - ・仕様条件
 - 6 軸
 - 許容荷重 60N 以上
- ・本試験に使用した力覚センサー仕様
 - 名称：ニッタ製：6 軸力覚センサー・IFS シリーズ
 - 外形：



図 4.2.6 - 11 力覚センサ

(2) 試験条件

対象とする被験者の属性、動作は、試験対象の装着型ロボットの使用条件に準ずる。装着部位の位置、締め付けの調整についても同様とする。

ダミーの外形は代表的被験者に準じた形状とする。ダミーに取り付ける人工皮膚は、粘弾性、表面摩擦係数、垂直方向の応力-ひずみ特性が代表的被験者に近似したものを使用する。また、ダミーに対してロボットマニピュレータを用いた動作試験を行う際には、実際の使用における動作のばらつきを考慮し、被験者試験で計測された動作、作用力に対し安全率を適用して増幅した値を使用する。

(3) 試験方法

IS013482 に準拠し、本試験は対象となる装着型ロボットが有する不整合を以下の項目のいずれかもしくは複数を用いて試験する。

- ・文書
- ・外観検査
- ・ダミーを用いた動作試験

そのため、文書、外観の検査によって機構、構造等により十分に不整合を吸収可能であると考えられる場合、以降の試験を行わずに試験を終了できる。

次に、そうした不整合吸収が不十分であると考えられる機器のうち、前述の試験装置および試験条件に適合する機器については、ダミーを用いた試験を行う。試験に際しては、対象機器が想定する使用方法、使用者に対応する代表的条件を選定し、被験者、対象動作を決定する。また、滑り、作用力測定センサを内蔵する治具を製作し、使用する。その後、選定した代表的被験者、代表的動作について、安全に十分配慮したうえで相対変位、滑り、作用力の計測を行う。ただし、同様のロボット、動作条件に基づく既存の動作モデルが利用できる場合、新たに計測を行わず、既存動作モデルに基づいて想定変位、作用力パター

ンを定めることができる。最後に、被験者を対象とした動作計測結果をロボットマニピュレータによって再現し、装着部ダミー内部に作用する応力を計測する。計測された応力が想定する創傷リスク以下であれば、本試験に適合したと判断できる。創傷リスクの評価規範については後述する。

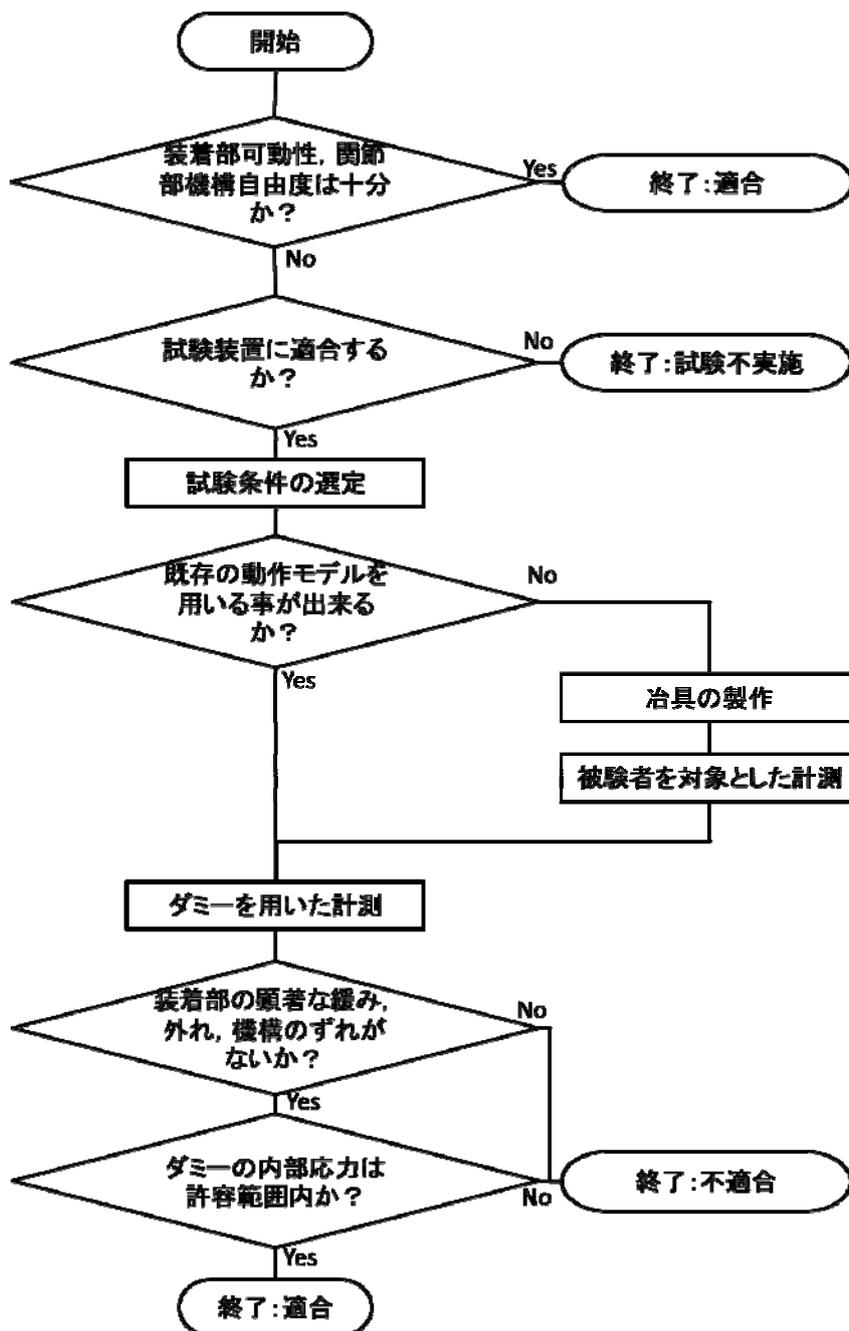


図 4.2.6 - 12 接触安全性試験流れ図

最後に、図 4.2.6 - 13 に、固定された人工皮膚付き下肢ダミーに対するカフ運動の再現の様子を示す。



図 4.2.6 - 13 接触安全性試験概観

i) 書面・外観検査

創傷の原因となる不整合が機構的に抑制、吸収される場合、以下の創傷リスクの詳細な評価は不要である。対象とされる機構の例を以下に挙げる。

- ・ 関節回転中心位置の初期調整
- ・ 膝関節屈曲時の関節回転中心位置の追従
- ・ 固定部位の柔軟性、遊び
- ・ 固定部位の摩擦低減

ii) 試験装置への適合

カフ、ベルト、靴等を用いて装着者の下肢に密着させて取り付けられ、関節部をその両端部を支持して他動的に駆動することで、装着者の動作を補助する機能を有する装着型ロボットが対象となる。

iii) 試験条件の選定

対象とする装着型ロボットの使用条件(使用者、動作)に沿って、試験条件を決定する。試験条件は、使用条件の中で最も創傷リスクが高い条件の組み合わせ(年齢、疾病、動作範囲、動作速度等)を抽出するが、起立と歩行等の大きく異なる使用条件を想定する装着型ロボットでは、それら各条件について代表的ケースで試験を行う。

iv) 既存動作モデルの利用

創傷につながる不整合の発生要因は、膝関節屈曲時の瞬間回転中心移動、回転中心の初期位置合わせ不良であり、それらに、腰部、足部等も含めた装着部位による拘束が作用することで装着部位の不整合が発生する。それらの要因は解析的な予想がある程度可能である^[1]。また、作用力は不整合量に加え、装着部の締め付け力、装着型ロボットおよび使用者の体重および姿勢等によって定まる。そのため、皮膚特性、装着方法、動作方法等の特性が近似した条件における被験者計測データが入手可能であれば、それらを基に動作モデルを構築することで、被験者を対象とした計測を省略することが可能である。

v) 治具の製作

被験者の相対変位，滑り，作用力を計測するため，滑り，作用力測定センサを内蔵する治具を製作する．治具は，本来の装着型ロボットの動作，機構へ与える影響を最小限に抑えるよう，特に接触面の形状，表面特性の変化に注意する．

vi) 被験者を対象とした計測

代表的使用者の条件に合致する被験者を選定し，代表的動作条件について下記の手順で計測を行う．

被験者に，滑り，作用力計測用治具を取り付けた装着型ロボットを装着する．被験者および装着型ロボットに，相対位置計測用の位置計測マーカを取り付ける．装着型ロボットを起動し，繰り返し動作を行う．(2)–(3)を必要な条件について行う．

vii) ダミーの製作

代表的被験者の特性を模擬した装着部ダミーを製作する．外形は，被験者の物を 3D スキャナ等により計測したものまたは適切なデータベースより抽出したものをを用いる．ダミー基部は剛体で製作し，表面に適切な人工皮膚を取り付ける．人工皮膚の特性は想定される被験者の属性に合わせて選定し，使用する．適切な人工皮膚が存在しない場合，合致する特性を実現できる人工皮膚を製作する．また，内部応力を計測するため，人工皮膚の基部下に小型 3 軸センサを挿入する．

viii) ダミーを用いた計測

固定された人工皮膚付き下肢ダミーに対して，人体で計測されたカフ運動，すなわち，カフの運動軌跡と，作用力の再現を行う．カフ運動再現のために，ロボットマニピュレータは変位，速度，作用力を入力とする．各入力パラメータは，上述の代表使用者に対する計測により得たものを使用する．

- a) 試験装置に力覚センサ，対象とする装着型ロボットのカフを取り付け，マニピュレータの可動範囲内に下肢ダミーを固定する．
- b) ロボットマニピュレータを起動し，カフを固定された下肢ダミーに接触させ，カフの固定を行う．この際，ダミーに対するカフの取り付け位置，姿勢，カフの押しつけによる作用力，カフベルトの締め付け力は，人体に対する計測の際の初期条件と同等にする．
- c) ロボットマニピュレータに対し，目標とするカフの運動情報，すなわち相対変位，相対速度，作用力の入力を行う．また，カフ運動の繰り返し回数も合わせて設定し，入力を行う．
- d) 入力したカフ運動を実行する．
- e) カフ運動により得られたダミーに対する作用力より，カフ運動の再現性を評価し，十分な再現が行っていた場合，ダミーに加わった内部応力の結果により，安全性の評価を行う．
- f) a～e を必要な条件について行う．

ix) 結果の評価

ロボットマニピュレータによる動作時のダミー内部応力を，後述の評価基準に基づいて評価する．

(4) 評価基準

人間の創傷に対する網羅的な指針は存在せず，倫理的問題から今後取得，公開される見込みも立たない．そのため，下記の文献調査により創傷リスクの評価を行うことが適当と考えられる．

装着型ロボットとの接触により生じる装着部の創傷は、初期には水泡および擦過傷として生じる。擦過傷は装着部が鋭利な形状および粗い表面を有する際に発生する創傷であり、検出は容易である。そのため、ここでは水泡の発生を創傷リスクとして扱う。摩擦による水泡は段階的に発生し、最初期には皮膚の角質層と顆粒層のせん断力により空隙を生じる。その後、時間経過に従って周辺組織よりの液体で空隙が満たされる。一般に、水泡の発生は下記の要因に支配される。

i) 皮膚の状態

ii) 皮膚表面に負荷される作用力

皮膚表面の作用力の影響については実験的に知見が得られている。

Naylor の研究^[2]では、脛骨の前方より 1/3 の点を一定速度で摩擦する実験を行っている。この実験では、皮膚と摩擦素材の摩擦力を、皮膚に水泡を生じ崩壊するまで計測した。実験は被験者あたり二回行い、それぞれの脚に一つずつの水泡を生じた。被験者は 19 人の 18-33 歳の男性で、摩擦部位の体毛の内、長いものをはさみで除去した。また、さらに 11 人の被験者について、摩擦部位にチョークの粉をまぶしたうえで同様の実験を行った。使用した摩擦体はポリエチレン製で、530g の垂直荷重をかけた状態で一往復 3 秒を要した。

その結果、図 4.2.6 - に示す水泡を生じるまでの摩擦回数と摩擦力の関係が明らかになった。摩擦力が増加するにつれ、少ない摩擦回数で水泡を生じ、低摩擦力では摩擦回数が増加する傾向が明らかにされた。

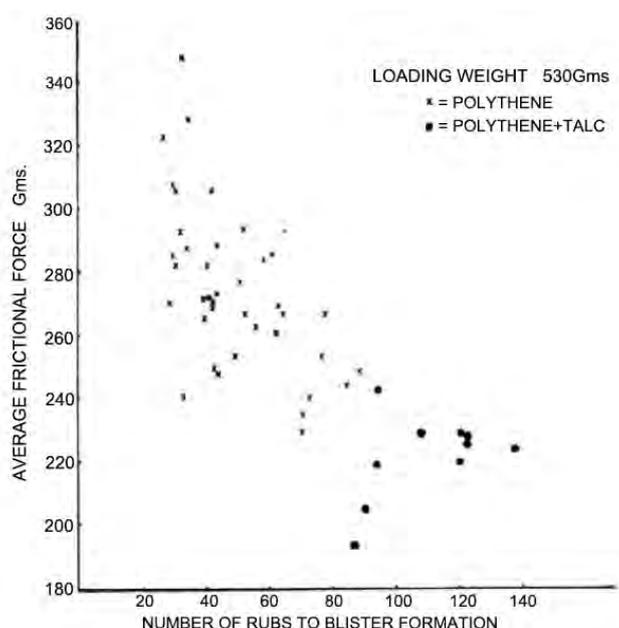


図 4.2.6 - 14 水泡形成に寄与する摩擦回数と摩擦力の関係

つぎに、人工皮膚の表面にさらに豚の皮膚を貼りつけ、これに摩擦力を加える目的で、屠殺直後の豚の皮膚に対して Naylor の報告した実験と同等の条件下において、繰り返し荷重する実験を行い、水泡が形成されるか否かを調べた。結果の一例を図 4.2.6 - 15 に示す。これは、2.4N のせん断力を 1200s の間継続的に加えたときに発生したマイクロ水泡を染色しスライスされた皮膚断面の顕微鏡観察によって得られた図である。このように、豚の皮膚に対しても、生体の場合と同等の機械刺激を加えることにより、水泡が発生することが本研究により初めて示された。

附属書 F3 の図 47 に、死豚の皮膚の場合で、創傷発生過程に寄与する摩擦力と摩擦回数との関係を示した。

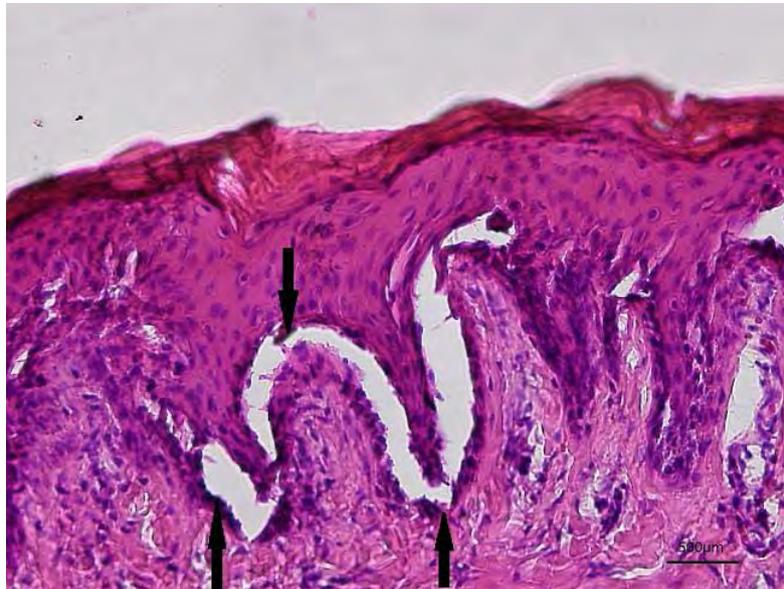


図 4.2.6 - 15 豚肉の皮膚に発生した水泡

最後に、カフ動作再現装置における人工皮膚表面に豚の皮膚を貼りつけ、これにロボットマニピュレータを用いて繰り返し荷重を加えることにより、創傷の発生リスクのうち、危害の程度を見積もることができる。

参考文献

- [1] P. F. D. NAYLOR, "The skin surface and friction", The British Journal of Dermatology, Vol. 67, No. 7, pp. 239-248, 1955.

4.3 ロボットの耐久性に関する検証試験

4.3.1 温湿度および振動環境耐久性試験 [安衛研]

4.3.1.1 目的

移動型、搭乗型ロボットの開発者が想定した最悪使用環境下（高温・高湿、あるいは低温）で、想定した最悪の走行路環境（段差、凹凸路面等）を走行した場合、ロボット本体構造や内蔵された制御装置、保護装置等が何らかのダメージを受けることが危惧される。ロボット開発者は、このような複合した最悪条件に対しても危険とならないように、十分な耐性を有するよう対象ロボットを設計、製作しなければならない。

提案する温湿度および振動環境耐久性試験は、上記の耐性に関する安全要件が実際の対象ロボットで実現されているかを検証するために行う。

4.3.1.2 研究開発の経緯

4.3.1.2.1 参考規格

- JIS C 60068-2-30:2011（環境試験方法—電気・電子—第2—30部：温湿度サイクル（12+12時間サイクル）試験方法）
- JIS C 60068-2-53:1997（環境試験方法—電気・電子—発熱供試品及び非発熱供試品に対する低温・高温／振動（正弦波）複合試験の指針）
- JIS C 1010-1:2014（測定用、制御用及び試験室用電気機器の安全性—第1部：一般要求事項）
- JIS Z 0232:2004（包装貨物—振動試験方法）

4.3.1.2.2 試験装置と試験基準の開発

本試験は、温湿度サイクル試験と振動試験、そしてこれらの複合試験であるが、全てに該当する規格類の対象はJIS（IEC）規定の電気・電子部品しかない。ロボットのようにシステム製品を対象とする類似試験は、輸送時の振動試験や自動車関連試験が規定されている程度である。

そこで、部品ではなくロボット本体を試験対象とした耐環境安全性試験を提案する。この試験は、品質・信頼性試験とは異なり、最悪想定使用環境下における機能の正常性及び安全性能への影響を評価するものである。したがって、基本的には電機・電子部品用規格のJIS C 60068-2シリーズの試験方法・手順を踏襲して、ロボット本体まで適用できるような試験設備を準備する。すなわち、ロボット本体を搭載して加振できる大型の振動試験機とこの振動試験機の加振テーブルごと調音・調湿できる大型の恒温恒湿槽が必要となる。このような大型の複合試験設備は自動車用としてラインアップされている程度で、特注仕様として準備する。

一方、電気・電子部品の温湿度及び振動の複合試験規格における結果の判断は、主に耐久信頼性の観点によるものであり、耐環境ストレスに対して安全性の判定基準を規定していない。ロボットのようなシステム製品に対しての同様の基準も存在せず、どの程度の温湿度ストレス、振動のストレスを与えて安全機能への影響を判定するかは新たに検討する必要がある。

4.3.1.3 成果

4.3.1.3.1 試験装置

(1) 大型恒温恒湿槽(室)

試験対象ロボットが格納できる容積を有し、少なくとも-10～60℃、30～95%RHの温湿度可変範囲と1℃/minの温度勾配を持つ。

(2) 大型加振機(振動試験装置)

大型恒温恒湿槽内に加振テーブルを持ち、垂直及び水平振動を生成できる(同時生成では

なく切り替え式)。試験対象ロボットの実走行振動波形を再現して繰り返し加振できるプログラミングが可能。

(3) 加速度計とデータロガー

試験対象ロボットの実走行時の振動波形を記録し、大型加振機の加振プログラムに取り込める。

(4) 瞬断検出システム

試験対象ロボットのコネクタ等の電気接合部の瞬間的な断線状態（イベント）を検出できること。このシステムは必要に応じて接続して使用する。

以上の装置をまとめて複合環境試験設備と呼び、その主要仕様を表 4.3.1.1 に、構成装置外観を図 4.3.1.1 に示す。

表 4.3.1.1 複合環境試験設備の主仕様

装置名称	型式（メーカー）	主要仕様
大型恒温恒湿室	AR24-412Y-DP2 B0-S-VM（アイテック）	室内寸法：4000W×2500H×2000D 温度範囲：-40～+120℃ 湿度範囲：30～95%RH 温度変化：1℃/min(-20～+80℃)
動電式振動試験装置	i260/SA7M (IMV)	垂直・水平テーブル(寸法:1500×1500, 最大搭載 600kg)を並列設置 垂直振動：5～100Hz(最大加速度 118m/s ²) 水平振動：5～300Hz(最大加速度 118m/s ²) 振動制御：SINE, RANDOM, SHOCK
瞬断検出システム	AES-200N(エスペック)	計測チャンネル：最大 200 定電流源：1～100mA 瞬断検出：10mΩ～2kΩ 最小検出時間：100ns
振動計	NP3574(小野測器) TMS868E(タスコ)	汎用 3 軸加速度センサ 加速度：～400 m/s ² 周波数：1～8000Hz(Z 軸) 1 軸ハンディ振動計 加速度：0.1～199.9 m/s ² 周波数：5～5000Hz
データロガー	DS-3000(小野測器) 8870(日置電機)	NP3574 用データステーション TMS868E 用メモリハイコーダ



図 4. 3. 1. 1 複合環境試験設備の構成装置

4. 3. 1. 3. 1 試験条件

本試験は、温湿度サイクル試験と振動環境耐久性試験およびそれらの複合試験を含み、いずれの試験も独立して実施できるが、複合試験が全ての試験内容を網羅するため、以降の試験条件と試験方法(手順)はこの複合試験を対象に説明する。

加振機の使用は、走行機能を有する自律型ロボットや搭乗操縦型ロボットの想定走行路が、石畳や点字ブロックのように連続的に走行時の振動が生じる場合、もしくは歩道や室内ドアの段差等の乗り越え時に単発的な走行振動が生じる場合を対象とする。また、対象ロボットの使用環境は温湿度のみを試験のパラメータとし、降雨や照度は考慮しない。なお、試験対象のロボットは大型恒温恒湿室内の加振テーブル上に設置するため、ロボットのサイズや重量により実施が困難となるか、試験条件の一部に制約を受ける場合がある。

また、試験対象ロボットの実際の走行時の振動は最悪路面状態とその路面を走行する頻度または走行時間に依存するため、加振機の加振目標生成のためには、ロボット設計時のリスクアセスメントにより条件設定しなければならない。この加振目標波形の設定のよう

にロボット毎に試験条件を設定する必要もあるが、生活支援ロボット安全検証センターでは本複合試験の標準条件として次の設定をした。

- A) 試験温湿度サイクルの上下限値は、試験対象ロボットの指定のないとき高温 40 または 55℃、低温-10℃、高湿 95%RH を標準値とする。
- B) 走行路面の指定のないとき、点字ドットパネル (5mm 高) の連続路面を最高速度で 10s 間走行した走行波形を記録するか、点字ライン (5mm 高) 2 本分を最高速度で乗り越えて通過した走行波形を記録する。
- C) 試験対象ロボットは、加振テーブル上に動輪が空転または駆動部が無負荷状態で連続駆動できる状態で固定し、連続外部給電が可能な場合、試験中は常時電源オンとする。連続外部給電ができない場合は、バッテリー電圧が動作不可電圧または充電の警告となるまで電源オンを維持した後、加振サイクル以外の期間内にバッテリー交換する。

4.3.1.3.2 試験方法

複合試験の実施は、試験対象ロボットの実走行波形の取得後、その波形を温湿度可変環境下のロボットに与え、試験前後の各機能の変化を調べるという手順で進める。図 4.3.1.2 に本試験全体の手順を示し、以降、各項目を説明する。

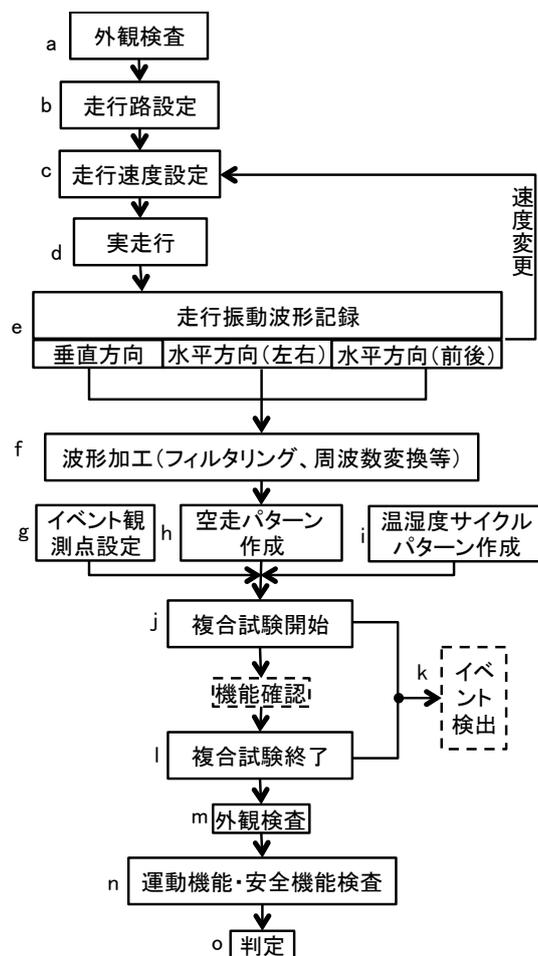


図 4.3.1.2 温湿度・振動複合試験のフロー

- a 外観検査：対象ロボットの機械的点検(目視確認)と必要に応じて電氣的測定(重要部位の抵抗値, 絶縁抵抗値)を事前に実施する。運動機能や安全機能が健全であることが前提である。
- b 走行路設定：対象ロボットの想定する最悪走行路面(凸凹や段差等, なければ前節の標準路面)を準備する。
- c 走行速度設定：最高速以外の速度の走行で大きな振動が見込まれる場合は, その速度も設定する。
- d 実走行：対象ロボットフレームに振動計を装着して, 連続走行または段差乗り越えを行う。
- e 走行振動波形記録：加速度計により振動波形(加速度)をデータロガーに記録する。
- f 波形加工：振動波形を振動試験装置用制御プログラム(SHOCK 振動制御システム)で使用できるように加工する。
- g イベント観測点設定：瞬断測定点(コネクタ, 重要接点・部品端子)に監視ケーブルを接続し, 監視測定ポイントと監視プログラムを設定する。
- h 空走パターン作成：f で加工した振動波形を基に繰り返しパターンを生成する。外部給電可能で連続走行を想定の場合, 振動と休止のサイクルを繰り返す。
- i 温湿度サイクルパターン作成：電気・電子部品の複合環境試験方法を参考に, 高温・高湿と低温の組み合わせパターンを生成する。また, h のパターンにおけるサイクル開始・終了ポイントや異常処理ルーチン等とリンクさせる。
- j 複合試験開始：対象ロボットを加振方向別のテーブル上に固定し, イベント観測と加振, 温湿度サイクルを開始する。ロボットの空走は温湿度サイクルの定常状態時に有効にする。
- k イベント検出：瞬断イベント(断線/復帰事象とそれらの発生期間)および抵抗トレンドは試験期間中自動的に記録される。
- l 複合試験終了：m, n の結果で異常がなければ, 加振方向を切り替えて j から再開する。
- m 外観検査：結露による影響等を調べるとともに, a の結果と比較する。
- n 運動機能・安全機能検査：対象ロボットを加振テーブルから下ろして, 通常走行や障害物検知による停止性能等に異常がないかを調べる。必要に応じて, 温湿度サイクルの切替静定時(25℃, 50%RH の1h 維持中)にも実施する。
- o 判定：試験開始前の状態と試験後の状態を比較して, 主に安全機能の喪失がないか確認する。表 4.3.1.2 に示すような機能確認シートを利用する。なお, 安全機能の確認項目としては, 障害物検知センサ(非接触式, 接触式)の検知エリア・感度・応答性, 保護停止・非常停止回路の応答性, 制動性能(応答性, 停止距離), 走行速度の変動(速度超

表 4.3.1.2 機能確認シート例

確認項目 確認時期	機構部	電源部	動作機能	安全機能	備考
サイクル試験前	健全	バッテリー電圧正常、電源-フレーム間絶縁正常	走行機能正常(許容差内)	全センサ正常、停止性能正常	
サイクル試験途中	健全				
サイクル試験後	健全	バッテリー電圧正常(想定消費)、電源-フレーム間絶縁正常	走行機能正常(許容差内)	全センサ正常、停止性能正常	目立った結露なし

過)等が考えられる。瞬断イベントが発生した場合は, 加振, 温湿度サイクルとの関連を調べる。

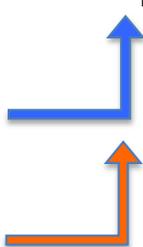
なお、温湿度サイクル試験、加振試験は該当ステップのみ実施すればよい。

4.3.1.3.3 評価基準

複数の判定ランクを設定して、ランク毎に要求されるロボットの各機能の挙動を、表 4.3.1.3 に定義する。ここで、機能の許容差とは、例えば、障害物検知用センサ (AOPD) の検出領域のずれが想定人体部位幅以内である場合が考えられる。また、安全状態とは移動ロボットではほとんどが停止状態と見なせる。なお、前提条件として、試験前の機構部や全機能は全て健全で正常であることが必要である。

安全機能に関しては、判定ランク A で自動診断や修復機能の効果を勘案しており、ランク B ではインタロック構造を求めている。したがって、一般的に、移動ロボットの安全機能は最低限ランク B 以上で合格と判定される。ただし、ランク B は移動ロボット本来の合目的性を損なうので、ランク A 以上が望ましい。なお、運動機能の判定については、別途性能試験で再評価する必要がある場合がある。

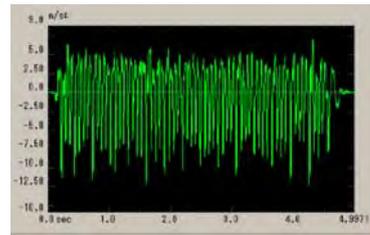
表 4.3.1.3 試験判定基準案



判定 ランク	試験中または試験後の要求動作	備考(許容差の例)
S	全て試験前の状態から不変	
A	試験中は一時的に許容差以内で変動するが、試験後は自動復帰 → 自動診断・修復	開口部のずれ・ひずみが想定IPコードに影響しない
B	試験中は一時的に許容差を超えて、継続される場合は安全状態(停止状態)を試験後まで維持する。 → インタロック	AOPD検出領域のずれが200mm以内(人体の場合)
C	試験中に許容差を超えて、それが検出されずに安全状態に遷移しない。	総合停止性能が10%以内

4.3.1.4 試験結果の例

搭乗型移動ロボットを模擬して、ハンドル型電動車いすを用いて複合環境振動試験を実施した。上述の標準試験条件から変更した項目は、高温 35℃、高湿 85%RH、低温 5℃、ライン点字パネル上を 4km/h で連続走行(図 4.3.1.3)の 4 点である。垂直加振テーブル上で空走状態の電動車いすを図 4.3.1.4 に示すが、前輪はテーブル上に接地して後輪のみ浮かせている。また、搭乗者の代わりに 60kg の重りをシート上に固定している。なお、全温湿度サイクル 37h 中、1h の加振パターン(図 4.3.1.5)は高温と低温の静定時に合計 3 回実施した。この試験結果は、表 4.3.1.2 と同様に 3 回の検査結果を記述して試験前後の内容を比較することで得られ、機構部、運動機能、安全機能の全てが異常ないことが確認できた。



実走行振動波形(4km/h走行時)

図 4. 3. 1. 3 電動車いすの実走行波形取得の様子



図 4. 3. 1. 4 加振テーブル上で空走する
電動車いす

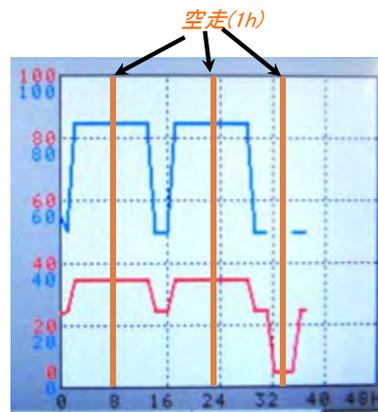


図 4. 3. 1. 5 温湿度サイクルと
加振タイミング

4.3.2 走行耐久性試験 [産総研]

4.3.2.1 目的

この試験はロボットが、人を乗せて移動する能力、あるいは人に装着した状態でその歩行を補助して移動する能力を持っていて、移動中の損壊によって使用者に危害を与える可能性がある場合に適用され、搭乗型、移動型および装着型ロボットの想定使用環境における長時間連続走行が、故障等により設計仕様と異なってしまうことを確認する。

4.3.2.2 研究開発の経緯

4.3.2.2.1 参考にした規格

移動型ロボットの走行に関する試験として、図 4.3.2-1 に示した日本工業規格 JIS T 9203-2010 電動車椅子の強度・耐久性性能規格と、図 4.3.2-2 に示した日本工業規格 JIS-D 6805-1994 の無人搬送車—特性・機能試験方法の中の定格速度試験を参考とし、試験装置の設計を行った。

装着型ロボットについては、負荷レベルの設定に関して JIS T 0111（義肢—義足の構造強度試験）を参考にした。

項目	性能	
	低速用(LS)	中速用(MS)
最高速度	4.5km/h以下	6.0km/h以下
登坂性能	10°の斜面を直進で登れること	
降坂性能	最高速度(実測値)の115%以内であること	
制動性能	平坦路制動性能1.5m以内で停止できること	
	降坂制動性能3m以内で停止できること	
	停止時の基準線からの変位量は0.5m以内であること	
機能	傾斜停止力	10°の斜面で静止できること
	静的安定性	前方・後方各20°、側方15°の傾斜に対して安定であること
	段差乗り越え	前進または後進により、助走なしで25mm、及び助走ありで40mmの段差乗り越えができること
	溝踏破走行性	幅100mmの溝を踏破できること
	坂道走行性	6°の傾斜面のS走路を逸脱及び異常なく登降できること
	斜面直進走行性	3°の傾斜面での幅1.2mの走路を逸脱しないこと
	回転性能	自操用標準型は幅0.9m、それ以外は1.2mの直角路を曲がること
	強制停止	車体、駆動システム、電気回路などに異常がないこと
	連続走行距離	表示された連続走行距離以上走れる
	強度・耐久性	垂直静荷重
走行耐久性		各部に破損、外れ及び使用上支障のある変形がないこと

図 4.3.2-1 日本工業規格 JIS-T 9203-1999 電動車椅子—強度・耐久性性能規格

D 6805-1994

付表 2 走行性能試験成績表

試験日 年 月 日

試験車

形式 _____

品名 _____

許容重量 _____kg

定格速度 _____m/min

製造年月 年 月

製造番号 _____

製造業者名 _____

(1) 定格速度試験

測定項目	試験回数(回)	結果		備考
		規定距離 L(m)	所要時間 T(s)	
無負荷時	低速	1		
		2		
		平均		
	中速	1		
		2		
		平均		
定常荷重時	低速	1		
		2		
		平均		
	中速	1		
		2		
		平均		

図 4.3.2-2 日本工業規格 JIS-D 6805-1994 無人搬送車—特性・機能試験方法 定格速度試験

4.3.2.2.2 試験方法の開発

試験目的に則した試験装置の設計と試験方法の設計を行い、各種移動型ロボットへの対応方法、試験装置の適応等の研究開発を実施した。

4.3.2.3 成果

4.3.2.3.1 試験装置

(1) ドラム式走行耐久性試験装置

車輪を用いて移動するタイプの移動型および搭乗型ロボットは、自動車や車椅子の試験装置と同様、ドラム上に車輪を乗せるタイプの試験装置が適している。

図 4.3.2-3 に実際のドラム式走行耐久試験装置の全景を示す。図 4.3.2-4 に示す通り、前後輪を有する車椅子や移動ロボットのために2本のドラムを備えている。ドラムには付

加を印加することが可能なパウダブレーキと、非駆動輪のためのモーターが装備されている。ドラムには付加を印加することが可能なパウダブレーキと、非駆動輪のためのモーターが装備されている。搭乗型ロボットをドラム式走行耐久試験装置に固定する際は、図 4.3.2-5 のように 1 本のドラム上に固定し、ハンドルと傾きも固定する。

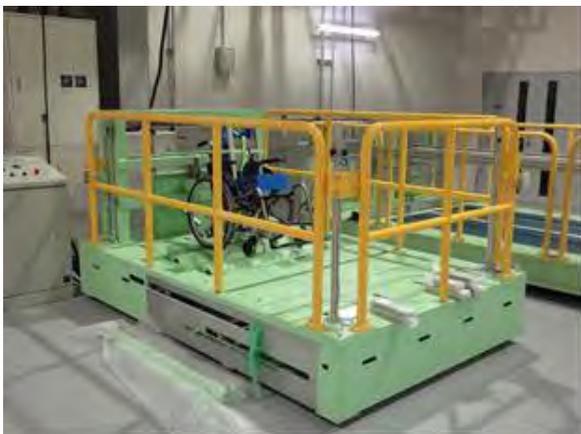


図 4.3.2-3 ドラム式走行耐久試験装置



図 4.3.2-4 車輪移動型ロボットの固定例



図 4.3.2-5 試験装置の搭乗型移動ロボット固定治具とレイアウト

(2) ベルト式走行耐久試験装置

歩行型、クローラー型、オムニホイールを用いた全方向移動型のロボットの場合、ドラム式試験装置は使用できない。このため、これらのタイプの移動ロボット用に図 4.3.2-6 のようなベルト式走行耐久試験装置が必要となる。実際に製作したベルト式走行耐久試験装置を図 4.3.2-7 に示す。全方向移動型の試験の場合は、ガイドを用いて直進性を確保する。ベルト式走行耐久試験装置では、ドラム式走行耐久試験装置のように、固定治具により固定することが困難なため、試験対象ロボットがベルト式走行耐久試験装置の中央付近の設定された位置に留まるようにベルトの速度を制御する。このため、ベルト式走行耐久試験装置には、図 4.3.2-7 の赤丸の箇所に、レーザー距離センサが搭載されており、必要に応じて試験対象ロボットとの距離を一定に保持する制御が行われる。このフィードバック制御により、電源電圧変動などによるロボット走行速度の変化や、停止時の減速にも装置からロボットが逸脱することなく安全に試験が実施できるようになっている。

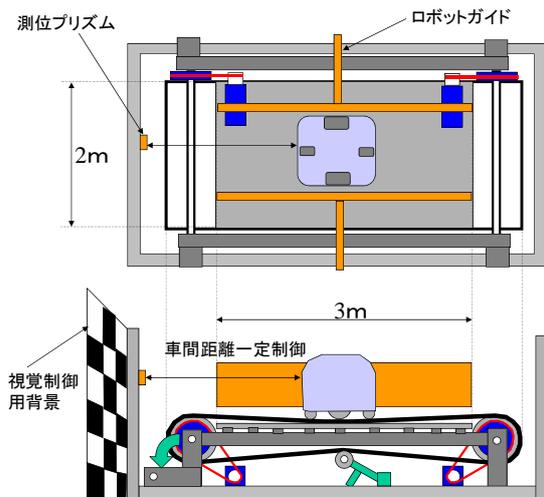


図 4.3.2-6 ベルト式走行耐久性試験装置初期案



図 4.3.2-7 ベルト式走行耐久性試験装置



図 4.3.2-8 位置制御装置の応答特性試験

表 4.3.2-1 ロボット走行速度と位置制御誤差

	Start	Cruise	Stop
0.4km/h	150mm	±5mm	100mm
2.0km/h	250mm	±5mm	200mm
4.0km/h	380mm	±5mm	300mm

このとき問題となるのは、制御応答時間に係る制御遅れである。このベルト式走行耐久性試験装置が試験する生活支援ロボットは、人の近傍を移動し生活の支援を行うロボットを想定しているため、想定移動速度は人の歩行速度程度の時速 4km 以下である。このことから、時速 4km での制御応答時間の遅れによる発進、制動の影響を図 4.3.2-8 に示す実験により調査した。その結果を表 4.3.2-1 と図 4.3.2-9 に示した。試験装置のベルト部分のロボット走行可能範囲が 2500mm であることから、最も位置ずれの大きかった時速 4km 発進時でも走行可能範囲の 15.2% にすぎず、この速度域であれば安全に試験が可能であることがわかる。また図 4.3.2-9 に示す通り比例関係にあることから、最大試験速度が想定可能であることがわかる。

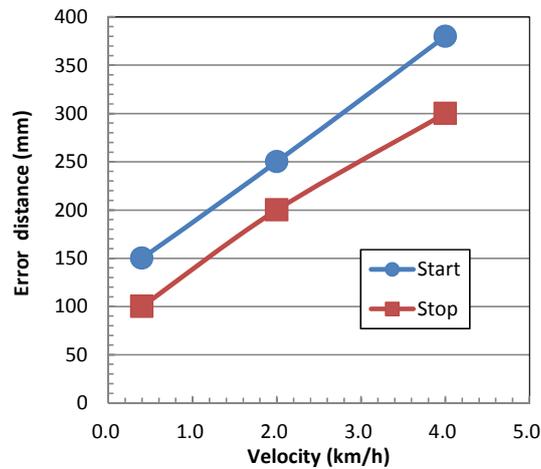


図 4. 3. 2-9 発進時と停止時における制御応答時間とロボット走行速度の関係

(3) 倒立振り子ロボット走行耐久性試験装置

倒立振り子ロボット走行耐久性試験装置は、倒立振り子型の搭乗型生活支援ロボットにおける走行系の機能と耐久性をシステムも含めた形で評価できる回転ドラム式走行耐久試験装置である。基本構成は倒立振り子ロボットを疑似走行させる試験装置であり、回転ドラム上に被評価ロボットの車輪が乗るようにして評価を行うものである。ドラムは受動的にロボットによって回転させられるのみならず、モーターで能動的に回転する機構が備えられている。また、倒立振り子ロボットの速度制御による前後方向移動量が個体差により大きいため、走行ドラム外径をφ500に拡大し、ドラム上移動時の姿勢変化を軽減するために走行ドラムの変更及び本体の改造を行った。これまでの実験の結果、図 4. 3. 2-10 のように、250mm のドラム径では径が足りず、試験可能速度が 4km 毎時以上増速不能となることが判明し、ドラム径を 2 倍の 500mm のものに入れ替える改造を実施した。

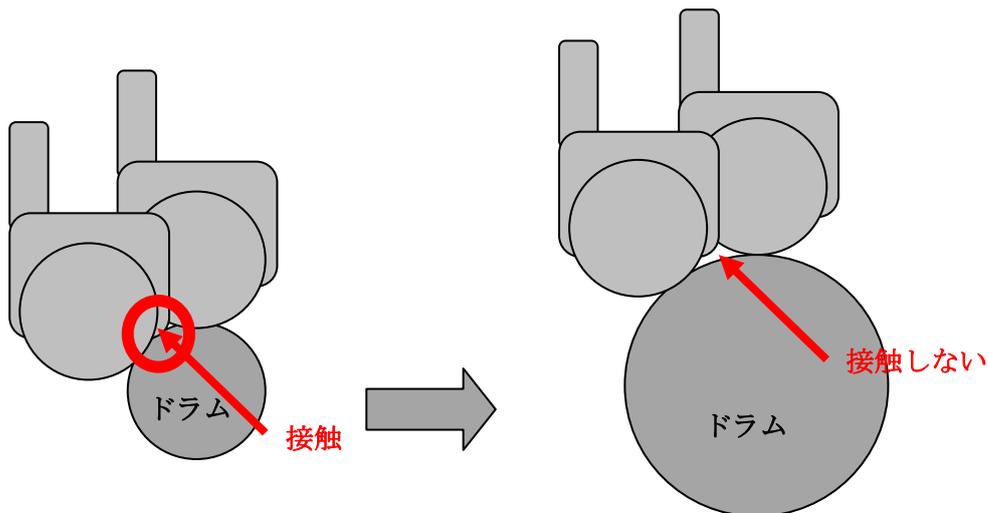


図 4. 3. 2-10 倒立振り子式ロボット試験のドラム径依存性

搭乗型倒立振り子ロボット用の走行耐久試験装置の基本構成は、図 1 1 に示す。基本構成図 4.3.2-11 に含まれている「①試験装置本体、②被評価ロボット、⑤制御盤、⑥データ表示・処理部」など装置各部の詳細は、以下の通りである。

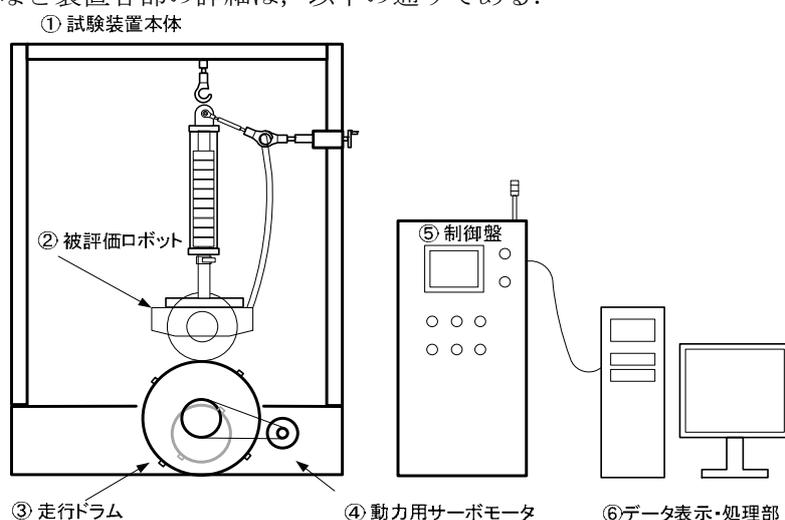


図 4.3.2-11 搭乗型倒立振り子ロボット用の走行耐久試験装置の基本構成図

搭乗型倒立振り子ロボット用の走行耐久試験装置各部の説明

- ① 試験装置本体：倒立振り子ロボットの評価を行うための試験装置で、現在は受動回転の可変負荷制御ができる状態となっている。この試験装置本体の中にドラム回転用モーターを設置し、現行 250mm のドラムを 500mm のドラムに交換し各部拡張工事を実施した。
- ② 被評価ロボット：評価対象となるロボット。（本装置および本件に含まれない）
- ③ 走行ドラム：ロボットのタイヤと接触して負荷を与える回転ドラムで、回転ドラム外径を $\phi 500$ に拡大し、動力用サーボモーターを接続して自発動作できるようにする。本件においてモーターからの動力を伝達するベルトを受ける部分も追加し、現行 250mm のドラムを 500mm のドラムに交換。
- ④ 動力用サーボモーター：本件において動力伝達装置等と共に追加を行う装置、
- ⑤ 制御盤：試験器の動作に対して次の機能が装置には含まれるが、本件において、制御盤に追加される機能と項目は以下の下線の部分。
 - 5-1 運転、停止、緊急停止、の各制御
 - 5-2 速度制御・設定・表示、（モーター制御であり、本件での主な追加項目）
 - 5-3 加減速・設定・表示（運転・停止時のドラム回転数制御）
 - 5-4 制動制御・設定・表示、
 - 5-5 積算回転数制御・設定・表示、
 - 5-6 制動・速度制御の切り替え表示、
 - 5-7 外部 LAN 接続
- ⑥ データ表示処理部：制御盤から LAN 接続された端末で、制御盤で表示する内容と同等の表示と操作が行えるようになっている。

（4）ドラム式走行耐久性試験装置用傾斜制御機構

倒立 2 輪搭乗型ロボットは、駆動輪 2 輪からなる構成となっているため、図 4.3.2-5 のようにドラム上に 2 輪が乗る状態で治具により固定する必要があるため、本体を傾けることにより前後に移動するために、図 4.3.2-12、図 4.3.2-13 のように傾斜を変化させる機構が必要となる。このことから、図 4.3.2-14 のように傾斜を変化させる機構を開発した。

図 4.3.2-14 に示す通り，ドラム上に 2 輪を乗せ，倒立 2 輪搭載型ロボットの後方にリンク機構により固定することで，倒立 2 輪搭載型ロボットは，ドラム上において，傾斜し，その傾斜角を車輪の出力により制御可能な状態を再現することができる．この固定方法により，固定された倒立 2 輪搭載型ロボットは，図 4.3.2-14 に示す通り，ハンドルを傾斜させる機構により，試験装置からの傾斜角の入力が可能となった．

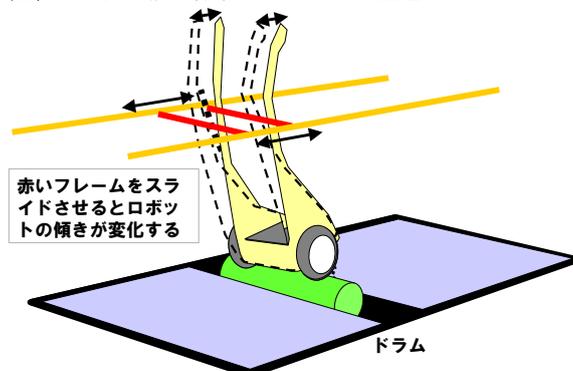


図 4.3.2-12 搭載型移動ロボットの試験方法

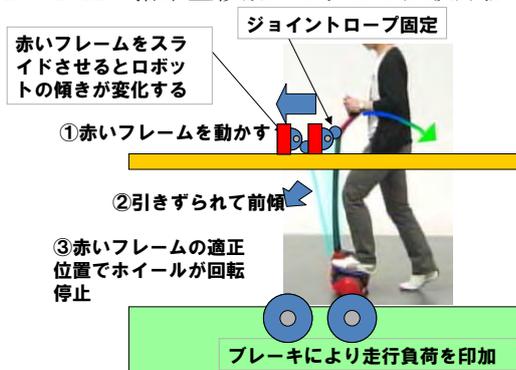


図 4.3.2-13 搭載型ロボットの傾き固定のレイアウト

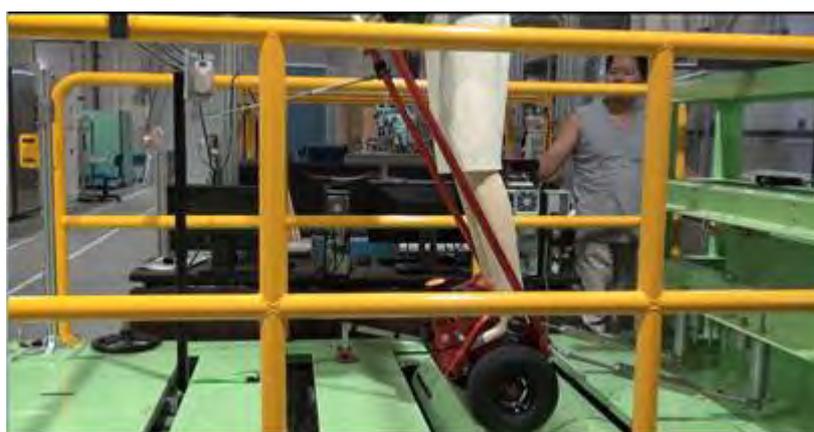


図 4.3.2-14 ドラム式走行耐久試験機の傾斜制御機構

(4) 装着型生活支援ロボット耐久性試験装置

装着型生活支援ロボット耐久性試験装置は，人に装着する生活支援ロボットの耐久性を試験するための装置である．この装置は図 4.3.2-15 に示すように，人の下肢を模した形状をしている．この装置にロボットを装着して一定時間ロボットを動かし，耐久性を確認する．この装置自体はアクチュエータを持たず，上に述べたベルト式走行耐久試験装置と併用する（図 4.3.2-7 を参照）．



図 4.3.2-15 装着型生活支援ロボット耐久性試験装置

4.3.2.3.2 試験条件

a) 試験体として、製品を代表する標本を一つサンプルする。

b) 試験路面は、無限長の平坦な路面、または想定する使用環境を模擬した路面とする。

「無限長の平坦な路面」は、(ア) テストドラム、(イ) トレッドミルのいずれかで模擬する：

(ア) テストドラム (ロボットが車輪で地面に接触するもので、ドラム表面のカーブが無視できる場合)

テストドラムの構成は、リスクアセスメントに基づいて製造者が規定するか、ISO 7176-8:1998 に規定された走行耐久性試験装置の構成を参照する。屋外での使用を想定するロボットに対しては、テストドラムに高さ $3\text{mm} \pm 1\text{mm}$ の段差を付けた状態で試験を行う。屋内のみでの使用を想定するロボットについては、段差のない状態で試験を行う。

(イ) トレッドミル (それ以外)

c) 人体ダミーはロボットの使用者の体重を模擬するウェイトである。人体ダミーの総重量は次の値とし、誤差は 10%以内とする。

(ア) 想定ユーザの最大体重、または

(イ) 次の 3 つの値のうち想定ユーザの体格から適切であると推定されるもの

i. 60kg.

ii. 80kg.

iii. 100kg.

なお、ロボットの移動のメカニズムによっては使用者のバイオメカニクスも模擬する必要がある。

d) 外骨格型ロボットや二輪走行型ロボットのようにそれ自体で姿勢を保てないロボットの場合は姿勢を保持するための支持装置を使用する。装置は、ロボット、あるいはロボットに結合した人体ダミーを支持し、耐久性に影響するロボットの動作および負荷を妨げないものとする。支持装置の使用は任意である。

4.3.2.3.3 試験方法

(1) ドラム式走行耐久性試験装置

ドラム式走行耐久性試験機上でロボットの実際の稼働時の総重量に合わせたバラストを搭載し時速 6km でバッテリーの持続時間分連続走行させる。平坦な路面上で人が搭乗し、時速 6km での消費電流を測定 (予備電流計測)。ドラム型走行耐久試験装置上にロボットを搭載し、予備電流値と同じになるまで走行負荷を印加する。

平坦な路面上でロボットを走行させて、時速 6km での消費電流を測定 (予備電流計測)。ドラム型走行耐久試験装置上にロボットを搭載し、予備電流値と同じになるまで走行負荷

を印加する。ドラム型走行耐久試験装置の印加走行負荷と消費電流値は比例関係を示すため、図 4.3.2-16 のように予備電流値から印加走行負荷が決定される。予備電流値から導出した走行負荷%を印加した状態で、バッテリー切れが発生するまで長時間走行試験を行う。長時間走行試験中は、電流値を計測し電流値の変動を評価する。(図 4.3.2-17)

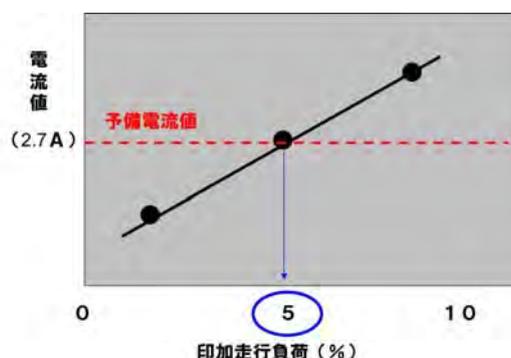


図 4.3.2-16 予備電流計測による印加走行負荷の決定例

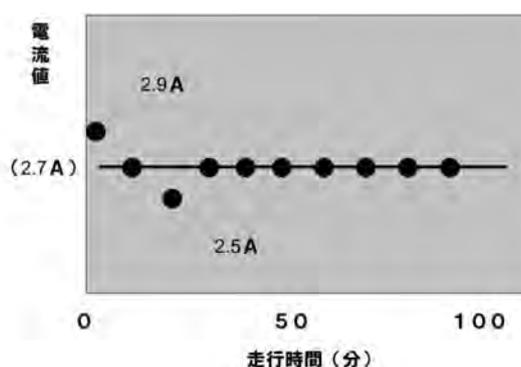


図 4.3.2-17 長時間走行試験の結果例

(2) ベルト式走行耐久性試験装置 (装着型生活支援ロボット耐久性試験)

- a) 想定使用条件を再現して移動動作をするように、ロボットと人体ダミーを結合して、支持装置でホールドして試験路面に載せる。
- b) ロボットを試験路面の上で、製造者の定める速度で、製造者の定める時間または距離に達するまで移動動作をさせる。駆動のための電源は外部電源を用いてもよい。
- c) 破損や変形やガタつき、部品のゆるみや脱落の有無、およびロボットの機能の動作を記録する。

4.3.2.3.4 評価基準

(1) ドラム式走行耐久性試験装置

評価基準としては、動力伝達系、駆動系の温度分布、破損の有無。ロボットの想定使用環境における長時間連続走行が、故障等により設計仕様と異なってしまうことがないことを確認する。ドラム型走行耐久試験装置上の走行負荷は、予備電流値と同じになるまで走行負荷を印加する。

(2) ベルト式走行耐久性試験装置 (装着型生活支援ロボット耐久性試験)

- a) 破損や変形、ガタつき、部品のゆるみや脱落がないこと。
- b) ロボットの機能に異常がないこと。

4.3.3 耐荷重試験 [JARI]

4.3.3.1 目的

この試験はロボットの搭乗者や積み荷を想定した試験荷重を負荷した後に、外観および機能の変化を記録する。この試験はロボットが搭乗者や積み荷を乗せる能力を持っていて、荷重によるロボットの破損や機能の変化が人に危害を与えると予想される場合に適用できる。

4.3.3.2 研究開発の経緯

4.3.3.2.1 参考にした規格

JIS T9201:2006 手動車いす, JIS T9203:2010 電動車いす, JIS T9208:2009 ハンドル型電動車いす, ISO 7176-8:1998 Wheelchairs-Part 8.

4.3.3.2.2 試験方法の開発

(1) 試験装置の仕様の決定と導入

車いすに比べて、生活支援ロボットの使用目的、形状は多様であるため、試験時に荷重を負荷すべき箇所や荷重の値も多様である。そこで、本プロジェクトに参加するロボット開発者ならびにロボットビジネス協議会会員のロボットメーカーに対して、自社で開発する可能性のある生活支援ロボットの仕様について調査した。その結果から、試験装置の最大ストロークおよび最大荷重を決定した。決定した仕様に基づいて、試験装置を導入した。

(2) 試験の試行による検討

本プロジェクトに参加するロボット開発者の試作ロボットの試験を試行し、以下の結果を得た。

- a) 立位で搭乗するタイプ等、車いすとは異なる箇所への荷重の負荷が必要な場合でも、導入した装置で試験可能である。ただし、倒立2輪型ロボットを試験中に倒立させておくジグなど、各々のロボットに適合した試験ジグの制作が必要な場合がある。
- b) 車いすの試験規格には試験荷重が定められているが、生活支援ロボットの場合には、使用時に負荷される荷重は多様であるため、試験荷重は、ロボットの設計仕様から個々に決定する必要がある。

4.3.3.3 成果

上記の検討の結果、装置を完成して、以下の試験法を確立した。

4.3.3.3.1 試験装置

導入した試験装置は、定盤に置かれたロボットの各部に、荷重子を押し付けることで、耐荷重性を試験する。荷重子は、インバータモータにより駆動され、荷重は荷重子に接続されたロードセルで測定する。本装置は、車いす用の装置と同様の機構を有するが、多様なロボットの試験を可能にするために、荷重子および定盤の可動範囲を大きく設計した。



図 4.3.3-1 耐荷重試験装置

表 4.3.3-1 耐荷重試験装置の仕様

試験装置寸法	幅約 4200 mm, 奥行約 2100 mm, 高さ約 3830 mm
負荷方式	インバータモータによるパワージャッキ方式(2軸独立)
負荷荷重	最大 10 kN(1軸につき)
負荷速度	0~60 mm/min
荷重子可動範囲	上下 2500 mm, 左右 ±600 mm, 回転 ±45°
定盤可動範囲	前後 ±1000 mm, 上下軸まわり回転角 ±180°

4.3.3.3.2 試験条件

リスクアセスメントにおいて最も高いリスクが想定される条件で試験を行うため、負荷条件を仕様上の最大荷重（搭乗者の体重および積載物の質量から決定する）とする。

4.3.3.3.3 試験方法

- 1) ロボットを水平面上に通常の使用状態と同様にして設置する。
- 2) 搭乗者または積み荷の重さを受ける部位に、仕様上の最大荷重を鉛直下方向に 10 分間連続して負荷する。
注：荷重によりロボットの姿勢が変化する設計である場合には、荷重に降伏した姿勢で試験する。
- 3) 荷重を除いた後にロボットを観察して、破損、変形、ガタつき、部品のゆるみや脱落の有無を記録する。
- 4) ロボットの機能の動作を観測し、荷重を付加する前からの変化を記録する。

4.3.3.3.4 評価基準

観察の結果、安全に関わる部位が破損していないこと。

4.3.4 耐衝撃試験 [JARI]

4.3.4.1 目的

この試験は、ロボットが衝突の衝撃にさらされた後に、外観および機能の変化を記録する。この試験は、衝突によるロボットの破損や機能の変化が、搭乗者や周囲の歩行者に危害を及ぼすと予想される場合に適用できる。

4.3.4.2 研究開発の経緯

4.3.4.3 参考にした規格

JIS T9201:2006 手動車いす, JIS T9203:2010 電動車いす, JIS T9208:2009 ハンドル型電動車いす, ISO 7176-8:1998 Wheelchairs-Part 8.

4.3.4.4 試験方法の開発

(1) 試験装置の仕様の決定と導入

始めに、車いすの規格を参考に、図 4.3.4-1 の装置を導入した。この装置は、振り構造で支えられた球状の衝撃子を車いすの所定の部位に衝突させることで、耐衝撃性を評価する。衝撃の強さは、振子の振り上げ角度で設定される。車いすの規格では、振り上げ角度を規定している。



図 4.3.4-1 衝撃耐久試験装置

表 4.3.4-1 衝撃耐久試験装置の仕様

試験装置寸法	幅約 4200 mm, 奥行約 2100 mm, 高さ約 4600 mm
加速方式	振りによる自由落下(空圧チャックによる切り離し)
振り上げ角度	0~90°
衝撃子	球状錘, 質量: 25±0.5 kg, 芯金: 鉄, 表皮: ポリウレタン
衝撃子可動範囲	上下 1300 mm, 左右 ±500 mm
定盤可動範囲	前後 ±1000 mm, 上下軸まわり回転角 ±180°

(2) 試験の試行による検討

本プロジェクトに参加するロボット開発者の試作ロボットの試験を試行し、以下の結果を得た。

車いす試験規格では、試験条件即ち衝撃の入力方向、入力位置、衝撃の大きさ(振り子の角度)が指定されている。車いすの場合には、その形状と使用方法がある程度限定されているため、外部からの衝撃の入力方向、入力位置、衝撃の大きさが、過去の不具合情報から推定され、その結果から、規格の試験条件を設定したものと考えられる。しかし、生

活支援ロボットの場合には、その形状と使用方法は千差万別であり、試験条件を画一的に決定することができない。

そこで、本研究では、実際の使用においてロボットに衝撃が加わる状況を再現する方法を採ることとした。使用者または第三者が故意にロボットに衝撃を加えない限り、ロボットに加わる最も大きな衝撃は、ロボットが障害物と衝突した際に発生すると考えられるため、衝突試験と同様の方法で衝撃を再現することで試験を実施することとした。

4.3.4.5 成果

上記の検討の結果、以下の試験法を確立した。

4.3.4.5.1 試験装置

衝突耐久試験装置を用いる。

4.3.4.2.5 試験条件

リスクアセスメントにおいて最も高いリスクが想定される条件で試験を行う。

- ・衝突速度：リスクアセスメントで想定される最高速度で試験を実施する。
- ・積載条件：搭乗者の体重および積載物の質量は、ロボットの仕様における最大値を用いる。
- ・衝突形態：・リスクアセスメントで指定がない限り、衝突試験装置の衝突用バリアにロボットを衝突させる。

4.3.4.5.3 試験方法

a) ロボットは通電された状態で試験を行う。ただし、通電した状態で試験を行うことが困難な場合は、電源を遮断した状態で試験を行ってもよい。

b) ロボットの積載状態は、最大積載状態とする。搭乗型ロボットの場合は、製造者が定める搭乗方法に基づいて、人体ダミーを搭載する。荷物を搭載するロボットの場合は、製造者が定める方法で積載する。

c) 助走路を用いて所定の速度まで加速し、歩行者を模擬した人体ダミーに衝突させる。ロボットの走行方向は、原則として前進方向とする。ただし、前進方向以外にも走行可能なロボットについては、ロボットの構造や形状、走行速度、および搭乗者の搭乗状態を考慮して、前進方向と同等以上のリスクがあると考えられる衝突方向がある場合、その方向についても試験を行う。

d) 衝撃を負荷した後のロボットを観察して、破損、変形、ガタつき、部品のゆるみや脱落の有無を記録する。

e) ロボットの機能の動作を観測し、衝突する前からの変化を記録する。

4.3.4.5.4 評価基準

観察の結果、安全に関わる部位が破損していないこと。

4.4 ロボットの安定性に関する検証試験

4.4.1 静的安定性試験 [産総研]

4.4.1.1 目的

この試験は、ロボットの移動・使用中、もしくは外部からの力などにより静的安定性が失われることで、搭乗者や周囲の歩行者等に危害を及ぼすと予想される場合に適用される。ロボットを傾斜台上に載せて傾斜台を傾けることで、転倒、積載物の落下がないことを観測する。

4.4.1.2 研究開発の経緯

主に人間共存環境における生活支援用途で使用される移動ロボットや搭乗型ロボットに近い移動体である電動車いすの JIS 規格 (JIS T 9203 電動車いす) の静的安定性試験を参考に、試験装置開発、試験方法開発を実施した。上記規格で定義されている静的安定性試験が実施可能な仕様の試験装置を開発し、開発した試験装置を用いて既存の電動車いすや研究開発実施者から持ち込まれたロボットを用いて試験を実施した。その過程において、ロボットの移動機構に応じた固定方向や滑り止め方法など、試験手順に関する検討を行い、手順書としてまとめた。

4.4.1.3 参考にした規格

JIS T 9203 電動車いす

4.4.1.4 試験方法の開発

(1) 試験装置の仕様の決定と導入

電動車いすの JIS 規格を参考に、図 4.1.1-1 の装置を導入した。この装置は、オペレータの操作により傾斜角度を変えられる傾斜台である。試験装置の仕様としては、上記 JIS 規格における規定値は、標準形電動車いすの場合、上向き、下向きが 20° 、側方が 15° 、簡易形電動車いすの場合、上向き、下向き、側方とも 10° の傾斜角度となっており、それらを満たす必要がある。さらに、上記 JIS 規格では、調整可能で最も不安定な位置に設定して最大傾斜角度を求めて開示することとなっており、上記規定値以上の傾斜角度が必要となる。以上の検討結果により、最大傾斜角度を 30° の仕様の電動傾斜台を開発した。仕様を表 4.4.1-1 に示す。



図 4.1.1-1 静的安定性試験装置

表 4.4.1-1 静的安定性試験装置の仕様

試験装置寸法	幅 2,670mm×奥行 3,410mm×高さ 1,874mm
最大積載重量	250kg
最大傾斜角度	30deg
傾斜分解能	0.1deg
傾斜駆動方式	電動式

(2) 試験の試行による検討

既存の電動車いすや研究開発実施者から持ち込まれたロボットの試験を試行し、以下の結果を得た。電動車いすの JIS 規格では、設置する方向が上向き、下向き、側方と指示されている。電動車いすの場合には、車輪の配置がある程度限定されているため、この 4 方向で良い。しかし、生活支援ロボットの場合には、例えば車輪の配置が複雑であり、上記の 4 方向以外の方向が転倒危険性が一番高い方向であるケースが考えられる。そのため、設置方向を画一的に決定することができない。

そこで、本研究では、ロボットの移動機構によっては上記 4 方向以外の設置条件において傾斜台を傾斜させることとし、転倒危険性が高い方向に漏れないようにロボット設置することとした。

4.4.1.5 成果

4.4.1.5.1 試験装置

静的安定性試験装置を用いる。

4.4.1.5.2 試験条件

ロボットの想定使用環境において、最も高い転倒リスクが想定される条件で試験を行う。

- ・傾斜角度：ロボットの想定使用環境における最大傾斜角度を考慮した設定角度で試験を実施する。
- ・積載・搭乗条件：搭乗者の体重および積載物の質量は、ロボットの仕様における最大値を用いる。

4.4.1.5.3 試験方法

- a) 傾斜台上にロボットを設置し、滑り止めやロープ等により転倒時の安全方策を施す。
- b) ロボットの積載条件は最大積載状態とし、ロボットの荷物積載部に荷物を積載する場合は、ロボットの製造者が指定する方法で積載する。搭乗型ロボットの場合、搭乗者はロボットの製造者が指定する方法で搭乗し、搭乗者は製造者が指定する最大重量とする。座乗型の場合は、ISO 7176-11 で規定するようなダミーを使用してもよい。
- c) 傾斜台を設定した最大角度まで傾斜させ、接地部分が傾斜台から離れることがないこと、ロボットの積載物の転落がないことを確認する。傾斜台から接地部分が離れた場合は、その角度を記録する。
- d) 前後左右など、ロボットの移動機構等を考慮して設置方向を変え、a), c) の手順を繰り返す。

4.4.1.5.4 評価基準

試験の結果、設定した最大角度において、接地部分が傾斜台から離れることがないことを確認。

なお、想定環境における最大角度で設定すると、例えば外力や加速・制動時の慣性力などによる転倒を考慮すると不十分である。走行環境を例えば施設内、屋外などに分類し、基準値を決めることが必要と思われる。

4.4.2 動的安定性試験 [JARI]

4.4.2.1 目的

この試験は、生活支援ロボットの走行中の不安定性を評価することを目的としている。ロボットが想定される走行環境を模擬した試験路を走行したときに、転倒、走路逸脱、積載物の落下の有無を観測する。この試験はロボットがタイヤを用いて走行する機能を有して、転倒、走路逸脱、積載物の落下が、搭乗者や周囲の人に危害を与えると予想される場合に適用できる。その他の走行機構を有するロボットについては、リスクアセスメントの結果により、想定される最も厳しい条件で試験を行う。

4.4.2.2 研究開発の経緯

4.4.2.2.1 参考にした規格

JIS T9201:2006 手動車いす, JIS T9203:2010 電動車いす, JIS T9208:2009 ハンドル型電動車いす, ISO 7176-2:2001 Wheelchairs-Part 2, ISO 7176-13: 1989 Wheelchairs-Part 13.

4.4.2.2.2 試験方法の開発

(1) 試験装置の仕様の決定と導入

車いすに比べて、生活支援ロボットの使用目的、形状は多様であるため、走行すべき環境や試験に必要な走路の寸法も多様である。そこで、本プロジェクトに参加するロボット開発者ならびにロボットビジネス協議会会員のロボットメーカーに対して、自社で開発する可能性のある生活支援ロボットの仕様について調査した。その結果から、試験装置の走行可能寸法、最大傾斜角、路面材料、耐荷重を決定した。決定した仕様に基づいて、試験装置を導入した。

(2) 試験の試行による検討

本プロジェクトに参加するロボット開発者の試作ロボットの試験を試行し、以下の結果を得た。

- a) 人を乗せない移動作業型、立位で搭乗する搭乗型、また、自律走行するロボット等、車いすとは異なるタイプの生活支援ロボットも、導入した装置で試験可能である。
- b) 走行装置に速度制御やトルク制御を用いる生活支援ロボットにおいては、走路の摩擦係数が低い場合に制御が不安定となる場合がある。このようなリスクについては、車いすの試験法にはない、低摩擦係数の走路での試験を検討する必要がある。
- c) 姿勢制御を用いる生活支援ロボットにおいては、傾斜路で自転した際に制御が不安定となる場合がある。このようなリスクについては、車いすの試験法における旋回試験を、自転でも実施する必要がある。
- d) 車いすの試験規格には走行すべき路面条件が定められているが、生活支援ロボットの場合には、想定される使用環境は多様であるため、走行条件は、ロボットの設計仕様から個々に決定する必要がある。また、その参考となる共通基準を提供する必要がある。

4.4.2.2.3 フィールド調査による試験条件の検討

ロボットの走行安定性を試験で検証するにあたって、傾斜角度、段差高さ、溝幅などといった、走行環境に関する試験条件の設定方法を検討する必要がある。現時点では、個々のロボットの開発者がリスクアセスメントで想定した範囲内で、最も厳しい条件を用いるという考え方で試験を実施するが、今後、モビリティロボットが幅広いユーザに様々な用途や場所で利用されていくことを想定すると、ロボットが具備すべき走行安定性の環境条件として、何らかの共通基準があることが望ましい。そこで、ロボットが実際に走行する環境を調査し、その結果と、類似機器の試験法や道路および建築物の施工基準を比較検討しながら、試験条件を導出することを検討している。以下に、ロボット実走行環境を調査した事例を示す。詳細は、付属書 C.4 に掲載する。

(1) 対象とする走行場面

ロボットが走行すると考えられる様々な環境の中でも、傾斜や段差といった路面形状の変化が比較的大きく、転倒した際に人へのリスクが大きい場面として、車いす型や倒立二輪型のようなモビリティロボットが道路脇の歩道を走行する状況を選択した。

(2) 調査地域

調査地域は茨城県つくば市、土浦市および我孫子市の市街地であり、いずれも交通バリアフリー法が施行される以前に道路や歩道が整備された地域である。

調査地点は、ユーザがロボットを利用して移動する機会が多くなると考えられる、公共施設や店舗の周辺、および集落間の移動経路の中から、以下に述べる横断勾配および段差が発生するマウンドアップ方式の歩道を抽出した。

(3) 調査した路面形状

ロボットが歩道を走行する際に転倒の要因となりやすい路面形状として、車両が車道から駐車場に乗り入れるために設けられた歩道の切り下げ部（図 4.4.2.4-1）を、ロボットが通過する際の横断勾配に着目した。

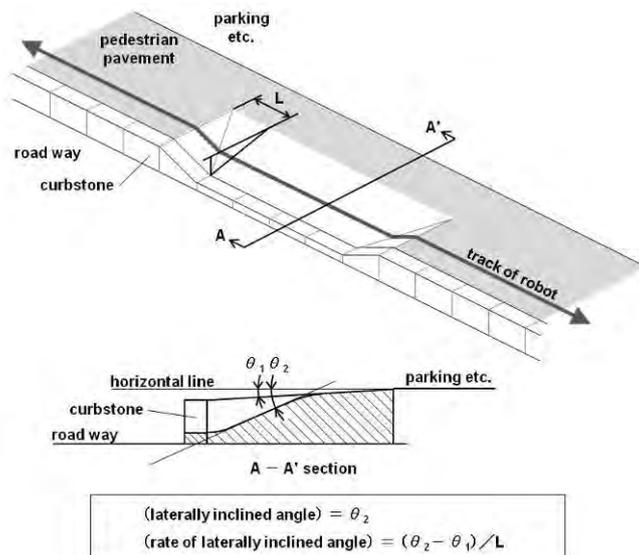


図 4.4.2.4-1 歩道切り下げ部の横断勾配

(5) 調査結果

今回調査した地点の歩道切り下げ部の最大横断勾配の分布を図 4.4.2.4-3 に示す。ここで最大横断勾配とは、図 4.4.2.4-1 に示す θ_2 に相当する。交通バリアフリー法では、切り下げ部の擦り付け角度を原則として 15%（約 8.5 度）以下と定めているが、今回の調査地点は同法施行以前に施工されているため、10 度を上回る角度まで分布が見られる。一方、本研究で走行安定性試験方法を開発する際に参考とした電動車いすの試験法では、試験項目によって異なる傾斜角度条件が定められており、最も角度が大きい条件では、10 度の斜面で安定性を確認する。今回の調査結果では、10 度以下の勾配が全体の約 85% を占めている。

したがって、今回の調査結果からは、屋外型モビリティロボットの横断勾配上での安定性について、10 度程度の角度を要件とすることが妥当と考えられる。

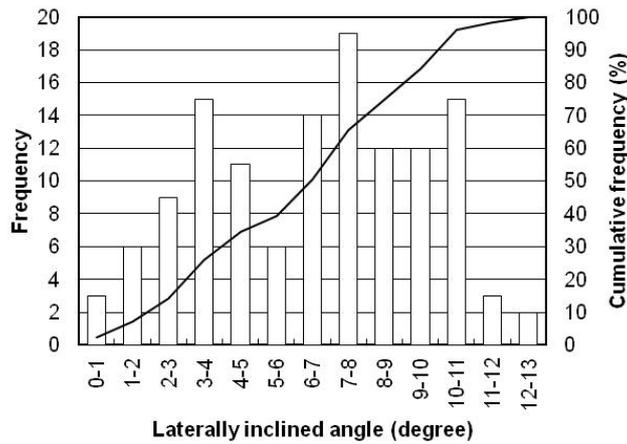


図 4.4.2.4-3 歩道切り下げ部の最大横断勾配の分布

4.4.2.5 成果

以上の検討の結果、試験装置と試験方法を確立した。

4.4.2.5.1 試験装置

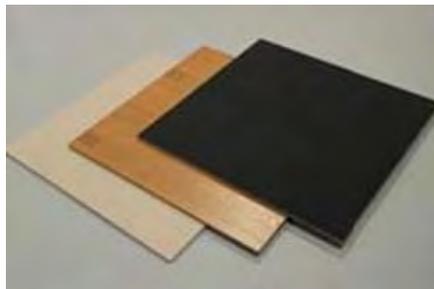
動的安定性試験用の設備として、平坦路走行試験設備と傾斜路走行試験設備を導入した。平坦路走行試験設備は、20 m の長さを有する直線走路であり、最高速度および制動距離の測定に用いる。傾斜路走行試験設備は、傾斜角度を最大 10° まで調整可能な走路であり、降坂時、登坂時および傾斜路横断時の動的安定性の評価に用いる。いずれの設備も、車いすの試験設備を参考に仕様を決定したが、ロボットの多様な使用条件を満たすために、路面の材料を交換できるように、路面セグメントを用意した。



(a) 平坦路走行試験設備



(b) 傾斜路走行試験設備



(c) 路面セグメント

図 4.4.2.5-1 動的安定性試験用試験設備

表 4.4.2.5-1 動的安定性試験用試験設備の仕様

平坦路走行試験設備	面積：160m ² 直線部最大長さ：20m 路面：プラスチックタイル，フローリング，カーペット 付加機能：プラスチックタイル湿潤路面機能
傾斜路走行試験設備	面積：94m ² 最大傾斜角度：10度 最大荷重：250kg 路面：プラスチックタイル，フローリング，カーペット，セーフティウオーク

4.4.2.5.2 試験条件

- ・ 走行路の傾斜：ロボットの使用環境における最大値を用いる。
- ・ 路面の段差および溝は：ロボットの仕様における想定環境の最大値を用いる。段差について仕様に規定がない場合，屋外を走行するロボットについては高さ 50mm とすることができる。
- ・ 走行路の摩擦係数：ISO 7176-13 による（0.75 から 1.0 の範囲に設定する）。ISO 7176-13 の規定よりも低い摩擦係数の路面を想定した試験を行う場合は，ISO 7176-13 に規定された方法で摩擦係数を測定する。
- ・ 積載条件：搭乗者の体重および積載物の質量は，ロボットの仕様における最大値を用いる。
- ・ 走行速度：走行速度は，ロボットの仕様における最高値を用いる。

4.4.2.5.3 試験方法

4.4.2.5.3.1 平坦路および降坂路最高速度試験

- a) 図 4.4.2.5-2 のように，ロボットを走行路の中心線に沿って走行させ，助走区間で最高速度まで加速する。
- b) 最高速度を維持した状態で測定区間を通過し，停止する。測定区間の長さは，通過時間が 1s 以上になるように設定する。
- c) 測定区間の通過時間を測定する。
- d) 3 回測定して，平均通過時間 (T) を求める。
- e) 最高速度 (V) は，次の式によって算出する。

$$V = \frac{L}{T}$$

ここに， V は最高速度 (m/s)， L は測定区間の長さ (m)， T は平均通過時間 (s)

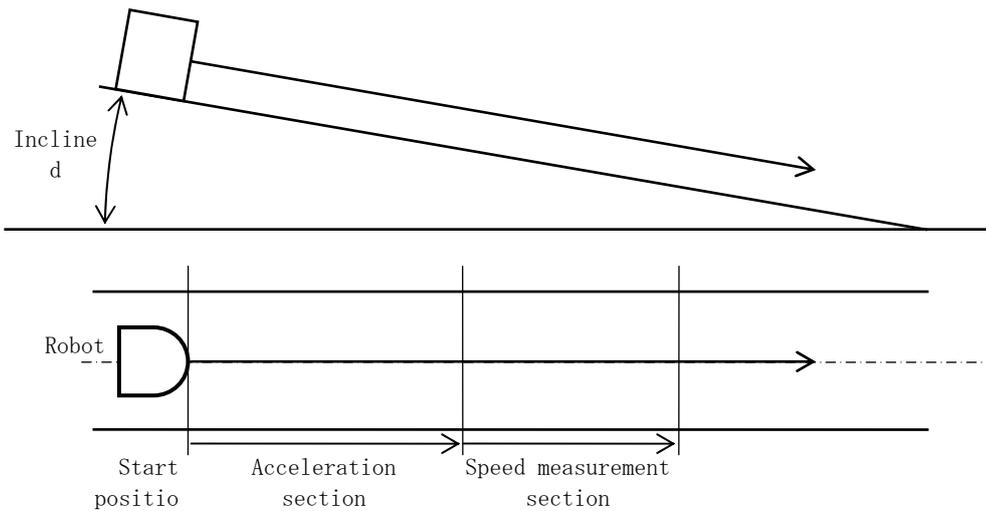


図 4.4.2.5-2 最高速度試験

4.4.2.5.3.2 平坦路および降坂路制動試験

- 図 4.4.2.5-3 のように、ロボットを傾斜路上のスタート位置に設置する。
 - ロボットを、降坂方向に向かって最大加速で発進させる。
 - 走行路の中心線に沿って走行させ、助走区間で最高速度まで加速する。
 - 最高速度を維持したまま、制動開始位置から最大制動力で制動し、停止する。このとき、ロボットの制動方法が複数ある場合は、それぞれの制動方法について試験を行う。
- NOTE: 例えば、通常の制動、障害物検知などのセンサ入力による制動、緊急停止による制動などが考えられる。
- ロボットの仕様上の停止距離に対して、ロボットの一部の逸脱の有無を記録する。
 - 制動開始から停止までについて、仕様上の許容走路幅に対するロボットの一部の逸脱の有無を記録する。
 - 発進から停止までにおけるロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。

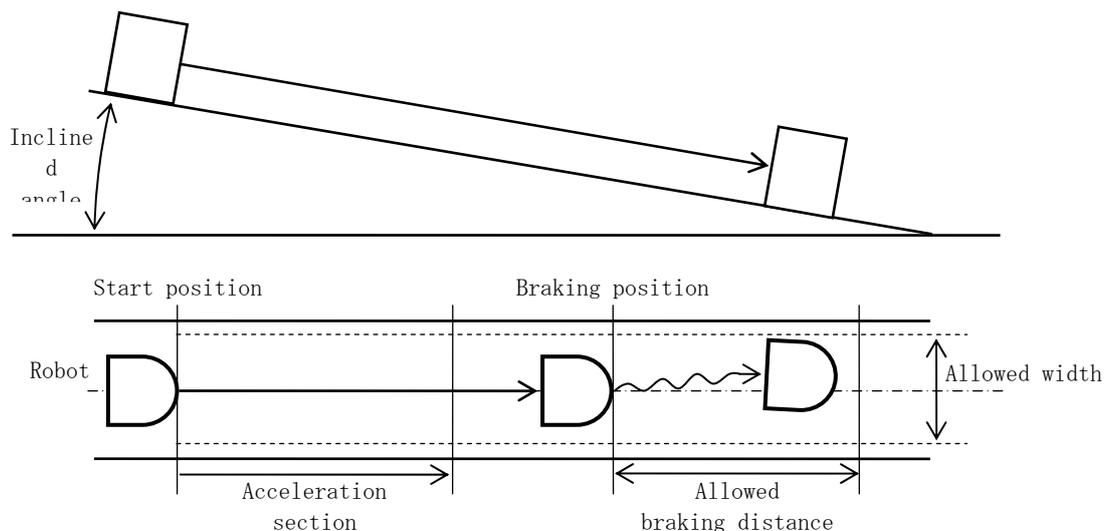


図 4.4.2.5-3 平坦路および降坂路加速制動試験

4.4.2.5.3.3 登坂路加速制動試験

- a) 図 4.4.2.5-4 のように、ロボットを傾斜路上のスタート位置に設置する。
- b) ロボットを、登坂方向に向かって最大加速で発進させる。
- c) 走行路の中心線に沿って走行させ、助走区間で最高速度まで加速する。
- d) 最高速度を維持したまま、制動開始位置から最大制動力で制動し、停止する。このとき、ロボットの制動方法が複数ある場合は、それぞれの制動方法について試験を行う。
注：例えば、通常の制動、障害物検知などのセンサ入力による制動、緊急停止による制動などが考えられる。
- e) 発進から停止までの間について、仕様上の許容走路幅に対するロボットの一部の逸脱の有無を記録する。
- f) 発進から停止までにおけるロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。

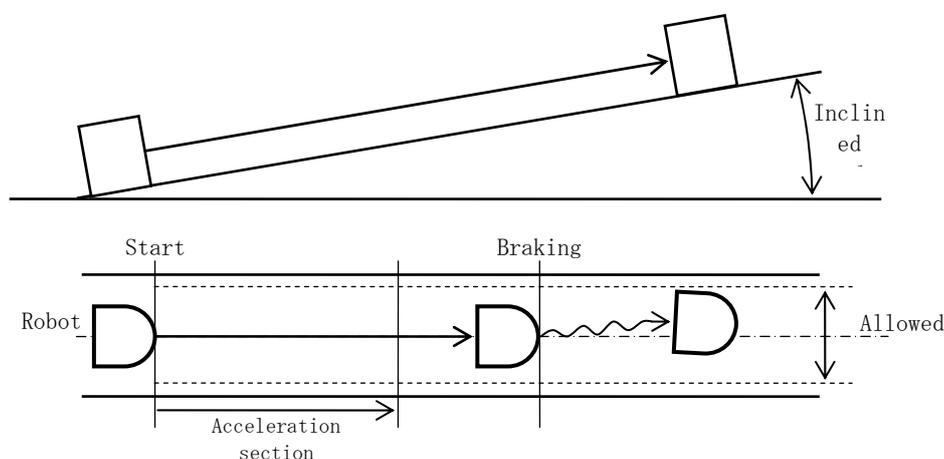


図 4.4.2.5-4 登坂路加速制動試験

4.4.2.5.3.4 降坂路急旋回試験

この試験は、走行しながら方向転換する機能を有するロボットに適用する。

- 1) 図 4.4.2.5-5 のように、ロボットを傾斜路上で降坂方向に走行させ、助走区間で最高速度まで加速する。
- 2) 最高速度を維持したまま、旋回開始位置を通過したら直ちに急旋回をし、半円程度旋回したら停止する。
- 3) 旋回中におけるロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。
- 4) 左右それぞれの旋回方向について試験を行う。

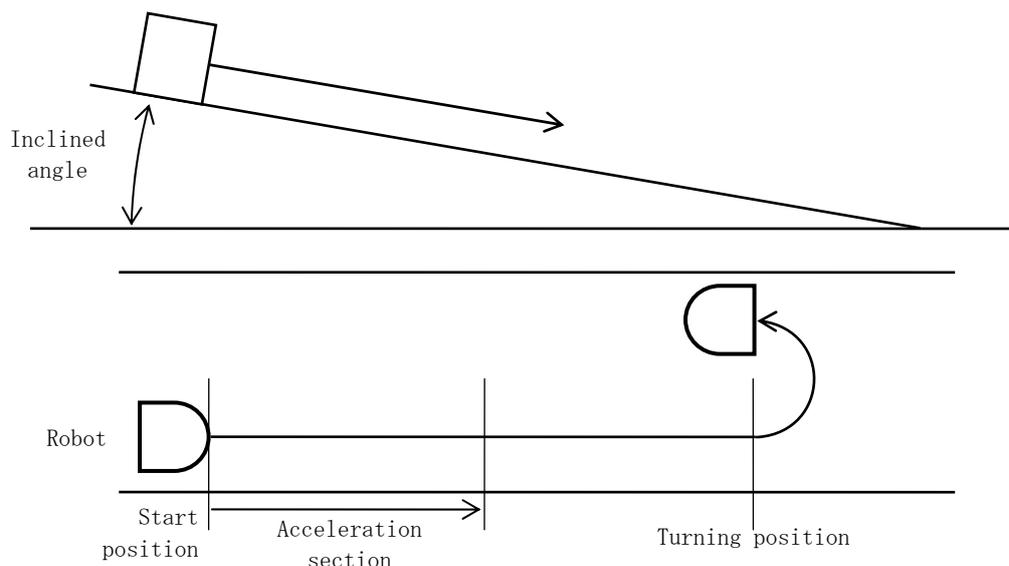


図 4.4.2.5-5 降坂路急旋回試験

4.4.2.5.3.5 傾斜路横断試験

- 1) 図 4.4.2.5-6 のように、傾斜路上でロボットを走行路の中心線に沿って走行させ、助走区間で最高速度まで加速する。
- 2) 最高速度を維持したまま、長さ 5m の観察区間を通過し、停止する。
- 3) 観察区間において、仕様上の許容走路幅に対するロボットの一部の逸脱の有無を記録する。
- 4) 発進から停止までにおけるロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。
- 6) 同一の走路を用いて反対方向についても試験を行う。

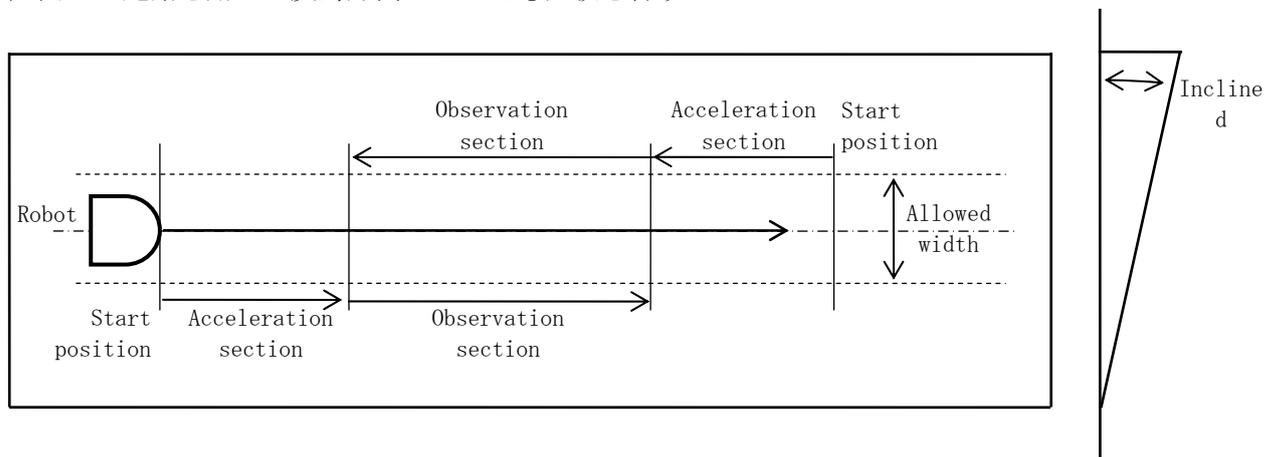


図 4.4.2.5-6 傾斜横断試験

4.4.2.5.3.6 段差および溝走行時の安定性試験

この試験は、ロボットの使用環境に段差および溝が想定される場合に行うことができる。段差の高さは、上り、降りのそれぞれについて、ロボットの仕様で走行可能な最大高さとする。仕様に規定がない場合、屋外を走行するロボットについては高さ 50mm とすることができる。

溝の幅と深さは、ロボットの仕様で走行可能な最大幅および最大深さとする。

4.4.2.5.3.7 段差上り試験

- 1) 図 4.4.2.5-7 (a)のように、ロボットを前輪が段差に接した状態で設置する。このとき、ロボットの進行方向と段差の角度は、ロボットの仕様で走行可能な角度のうち、安定性に最も影響の大きい角度とする。ロボットの仕様に段差との角度が規定されていない場合は、 $90^\circ \pm 5^\circ$ とすることができる。ロボットの車輪は進行方向に向いていること。
- 2) ロボットを最大出力で発進させて段差を上り、停止する。
- 3) 段差を通過するときの、ロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。
- 4) 図 4.4.2.5-7 (b)のように、ロボットをスタート位置から走行させ、助走区間で最高速度まで加速する。
- 5) 最高速度を維持したまま段差を上り、停止する。このとき、段差への進入角度は、ロボットの仕様で走行可能な進入角度のうち、安定性に最も影響の大きい角度とする。ロボットの仕様に進入角度が規定されていない場合は、 $90^\circ \pm 5^\circ$ 、および $10^\circ \pm 5^\circ$ とすることができる。
- 6) 段差を通過するときの、ロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。

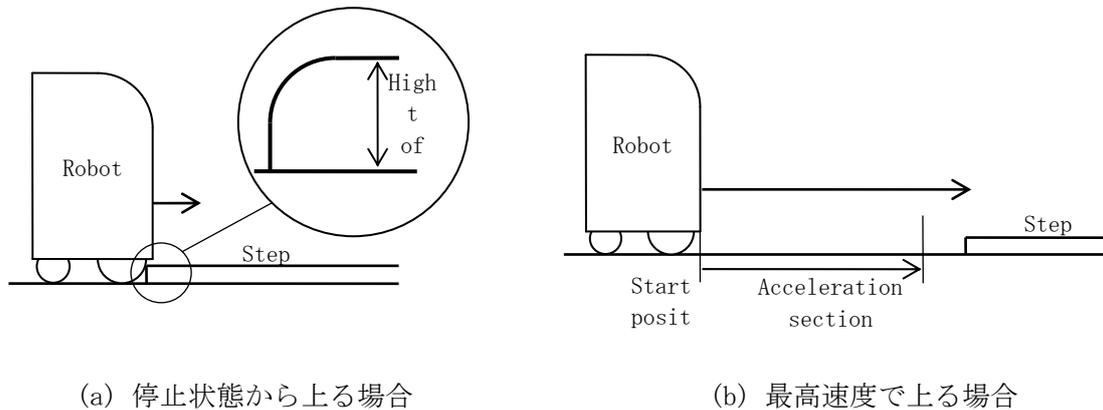
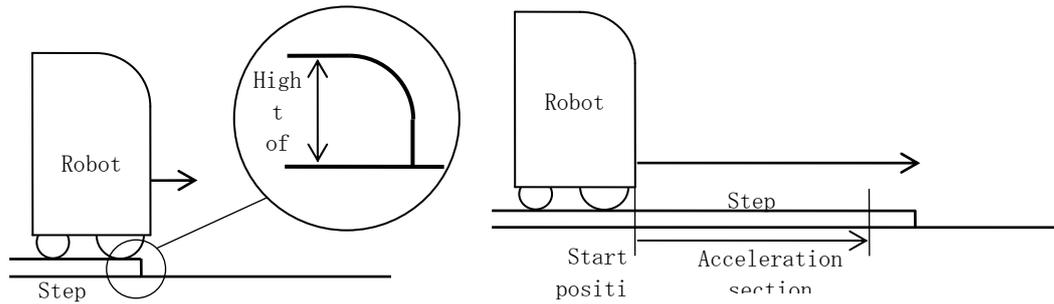


図 4.4.2.5-7 段差上り試験

4.4.2.5.3.8 段差降り試験

- 1) 図 4.4.2.5-8 (a)のように、ロボットの前輪が段差の端部にある状態で設置する。このとき、ロボットの進行方向と段差の角度は、ロボットの仕様で走行可能な角度のうち、安定性に最も影響の大きい角度とする。ロボットの仕様に段差との角度が規定されていない場合は、 $90^\circ \pm 5^\circ$ とすることができる。ロボットの車輪は進行方向に向いていること。
- 2) ロボットを微小な速度で走行させて段差を降り、停止する。
- 3) 段差を通過するときの、ロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。
- 4) 図 4.4.2.5-8 (b)のように、ロボットをスタート位置から走行させ、助走区間で最高速度まで加速する。
- 5) 最高速度を維持したまま段差を降り、停止する。このとき、段差への進入角度は、ロボットの仕様で走行可能な進入角度のうち、安定性に最も影響の大きい角度とする。ロボットの仕様に進入角度が規定されていない場合は、 $90^\circ \pm 5^\circ$ 、および $10^\circ \pm 5^\circ$ とすることができる。
- 6) 段差を通過するときの、ロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。



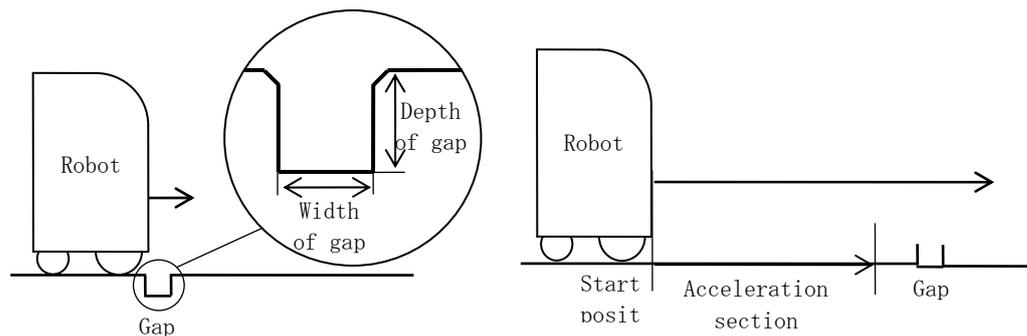
(a) 停止状態から降りる場合

(b) 最高速度で降りる場合

図 4.4.2.5-8 段差降り試験の試験方法

4.4.2.5.3.9 溝踏破試験

- 1) 図 4.4.2.5-9 (a) のように、ロボットを溝の近傍に設置する。このとき、ロボットの進行方向と溝の角度は、ロボットの仕様で走行可能な角度のうち、安定性に最も影響の大きい角度とする。ロボットの仕様に溝との角度が規定されていない場合は、 $90^\circ \pm 5^\circ$ とすることができる。ロボットの車輪は進行方向に向いていること。
- 2) ロボットを微小な速度で走行させて溝を踏破し、停止する。
- 3) 段差を踏破するときの、ロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。
- 4) 図 4.4.2.5-9 (b) のように、ロボットをスタート位置から走行させ、助走区間で最高速度まで加速する。
- 5) 最高速度を維持したまま溝を踏破し、停止する。このとき、溝への進入角度は、ロボットの仕様で走行可能な進入角度のうち、安定性に最も影響の大きい角度とする。ロボットの仕様に進入角度が規定されていない場合は、 $90^\circ \pm 5^\circ$ 、および $10^\circ \pm 5^\circ$ とすることができる。
- 6) 段差を踏破するときの、ロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。



(a) 停止状態から踏破する場合

(b) 最高速度で踏破する場合

図 4.4.2.5-9 溝踏破試験の試験方法

4.4.2.5.4 評価基準

試験の結果以下のことを満足することを評価基準とする。

- ・平坦路および降坂路最高速度試験で測定された最高速度が、設計仕様における最高速度を超えないこと。

- ロボットが転倒しないこと.
- ロボットの安全に関わる部品, 搭乗者および積載物が落下しないこと.

4.5 安全関連機能の検証試験

4.5.1 安全関連光学センサの機能試験 [産総研]

4.5.1.1 目的

この試験は、ロボットまたはその周囲環境に様々な外乱光を照射し、ロボットの環境認識性能を評価するものである。この試験は、光学的原理に基づく安全関連センサを備えたロボットが、直射日光を含む様々な外乱光に曝されることによって安全関連センサによる環境認識性能（特に人検知性能）が低下し、搭乗者や周囲の歩行者に危害を及ぼすと予想される場合に適用できる。

4.5.1.2 研究開発の経緯

4.5.1.2.1 参考にした規格

IEC 61496-1

IEC 61496-3

IEC/TR 61496-4

IEC/TS 61496-4-2 (2014 年公開予定)

IEC/TS 61496-4-3 (2014 年公開予定)

4.5.1.2.2 研究開発の流れ

研究開発の流れを付属書 C.5 に掲載する。

4.5.1.3 成果

4.5.1.3.1 試験装置

- ・ 環境認識性能試験装置の外乱光源（人工太陽灯、白熱電球、蛍光灯、ストロボ光）を用いる。
- ・ 照度計、データロガは校正有効期限内であること。

4.5.1.3.2 試験条件

- ・ リスクアセスメントにおいて最も高いリスクが想定される外乱光条件で試験を行う。
- ・ センサコンポーネントは、ロボットから取り外した状態でも、ロボットに装着した状態でもよい。
- ・ 開発試験においては、メーカーとの打合せ結果（試験項目・試験条件の表）に記載された条件による。

4.5.1.3.3 試験準備

- (1) センサコンポーネントの検出区域を、IEC 61496-3 または IEC/TS 61496-4-2, IEC/TS 61496-4-3 に準拠あるいは参照して設定する。
- (2) 検出区域の境界と交差するように自動 X ステージなどの移動プラットフォームを設置し、試験片を設置する。
- (3) 試験の様様を動画として記録するようビデオカメラを準備する。
- (4) センサコンポーネントの出力 (ON 状態・OFF 状態)、照度計の出力、(可能な場合は) 移動プラットフォームの位置出力、ビデオカメラの動画出力及びをデータロガ入力に接続する。

4.5.1.3.4 試験の実施

IEC 61496-3 または IEC/TS 61496-4-2, IEC/TS 61496-4-3 に準拠あるいは参照した光干渉試験を実施する。

以下、外乱光源としては人工太陽灯・白熱電球・蛍光灯・ストロボ光を、試験片と背景としては IEC 61496-3 または IEC/TS 61496-4-2, IEC/TS 61496-4-3 に準拠あるいは参照した試験片を使用して同様に実施する。

試験手順は、目的に応じて IEC 61496-3 または IEC/TS 61496-4-2, IEC/TS 61496-4-3 に準拠して実施すること。以下に基本となる手順例を示す。

- (1) センサコンポーネント（以下センサ）と照度計を三脚に設置し、背景板、自動 X ステージ等の試験片移動プラットフォームとの位置を調整する
- (2) 外乱光源を三脚に設置し、高さ調節する
- (3) 外乱光源をセンサから上記規格に準拠もしくは同規格を参照した位置に設置
- (4) 外乱光源がセンサの視野内にあることを確認
- (5) データロガを起動し、データ（センサ出力、照度、ビデオ動画）の記録開始
- (6) 外乱光源を点灯
- (7) センサを起動し、侵入物が存在しない状態で正常動作（オン状態）であることを確認
- (8) 外乱光源を点灯
- (9) センサが正常動作（オン状態）であることを確認
- (10) 移動プラットフォームにより試験片を検出区域内に侵入させ、センサの正常動作（オフ状態）を確認
- (11) 移動プラットフォームにより試験片を検出区域内で IEC 61496-3 に準拠した速度で移動させ、センサの正常動作（オフ状態）を確認
- (12) 移動プラットフォームにより試験片を検出区域外に退去させ、センサの正常動作（オン状態）を確認
- (13) 外乱光源を消灯し、センサの正常動作（オン状態）を確認
- (14) データロガを停止し、データの記録終了

なお、環境によっては暗所から明所への移動（またはその逆）時の明順応（暗順応）が最も過酷な光干渉条件となることがある。そのような場合には、上記試験手順において、外乱光源の灯体前方に遮光板を挿入するなどして、条件を再現することが可能である。

以上述べた試験のセットアップ例を図 4.5.1.9 に示す。

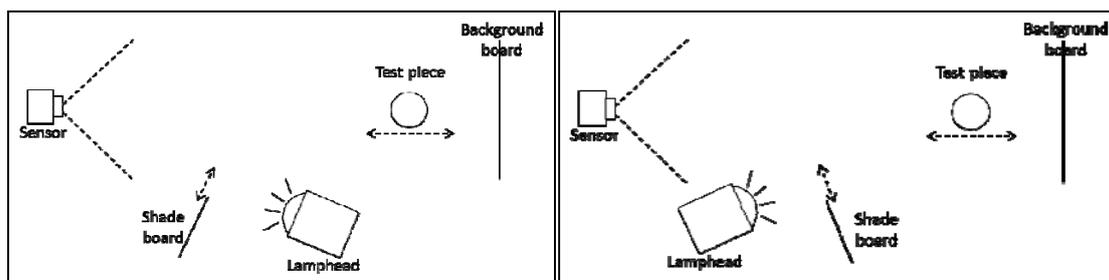


図 4.5.1.9 試験のセットアップ例

左：センサへの直接光，右：オブジェクトおよび背景への照射光

4.5.1.3.5 評価基準

試験の実施手順中の確認項目 4)7)9)10)11)12)13) すべてが確認されること。

4.5.2 障害物検知対応性能試験 [産総研]

(軌道追従安定性能の確認を含む)

4.5.2.1 目的

本試験では、走行型および搭乗型の生活支援ロボットが、想定される使用環境下で走行する際に、人や設備を含めた周辺の障害物（静止障害物、移動障害物）を検知し、それらに対応（減速、停止）する能力を検証する。また、試験対象ロボットと障害物との相対距離、相対速度、速度軌跡から、安全距離の維持、姿勢の安定性等の評価を行う。なお、本プロジェクトの当初計画では、軌道追従安定性試験法の開発を含んでいたが、直接安全性に関わらないことから独立した試験を行わず、本試験（障害物検知対応性能試験）で軌道追従安定性能の確認を行うこととした。

4.5.2.2 研究開発の経緯

本試験に対して、参考にした規格は、ISO13482:2014 “Robots and robotic devices – Safety requirements for personal care robots”であり、関連規格は、JISD6805, JIVASA05, JISB9707, JISB9708, JISZ9711 である。

研究開発の流れとしては、まず、対象となるロボットにおいて、想定される障害物や環境構造などを抽出し、それらに対するロボットの挙動を詳細に計測することで、適正な対応をとっているかの判断を行うものとした。そのため、想定する障害物や移動障害物の挙動の再現などを行う装置を開発し、さらに、移動軌跡や速度の解析による安全性の検証を行うものとした。また、実際に本プロジェクトに参加するロボット開発者からロボットの提供を受け、模擬的に試験を行い、試験方法の実検証を行った。これらに基づき、試験装置の改良や試験方法の見直しなどを行い、最終的に評価基準を策定した。

4.5.2.3 成果

①試験装置

この試験で使用する装置は次の表 4.5.1 に示す通りである。

表 4.5.2-1 使用する試験装置の一覧

試験装置	
走行路	走行路面用のゴムシートおよび各種タイル
障害物接近再現装置	障害物接近再現装置制御用 PC
三次元動作解析用カメラ	三次元動作解析用ビデオカメラ
三次元動作解析用 PC	三次元動作解析用マーカー
自動追尾動作解析用ビデオカメラ	自動追尾動作解析用 PC
搭乗者防具および機械転倒防止用吊具	防護用クッション
各種障害物（壁、円筒、人体ダミー）	ジブクレーン
ロボット走行状態模擬装置	ロボット走行状態模擬装置制御用 PC



図 4.5.2-1 障害物接近再現装置画面

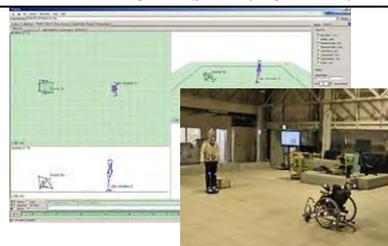


図 4.5.2-2 三次元動作解析カメラ他、解析 PC



図 4.5.2-3 各種障害物（壁，円筒，人体ダミー）の例



図 4.5.2-4 ロボット走行状態模擬装置

②試験条件

試験対象ロボットの想定される走行条件，環境条件を，メーカーとの打合せによって抽出し，試験条件を選定する．試験条件の選定にあたり，主要な試験条件を以下に示す．ただし，試験対象ロボットの開発過程における試験では，メーカーとの協議により変更してもよい．

a. 試験対象ロボットの走行条件

(1) 走行速度

想定される使用条件での，試験対象ロボットの代表的な速度を使用する．

(2) 走行方向

前進，後退，横方向への移動のうち，走行可能な方向を対象とする．

(3) 加重

試験対象ロボットが搭乗型ロボットの場合，想定される使用条件での代表的な加重をかけるものとする．

b. 環境条件

(1) 走行路面の種類

フローリング，カーペット，セーフティーウォーク，およびコンクリートの中で，想定される使用環境に最も近い路面を使用する．なお，想定される路面が複数ある場合には，最も制動距離が

延びる路面を使用する．

(2) 静止障害物

壁（木、布、鏡面、透明、柵状）、円筒（金属、樹脂）、人体ダミーの中で、想定される使用環境

のもとで試験対象ロボットが遭遇する可能性があるものを検知対象の障害物とする。

(3) 移動障害物

障害物が移動することが想定される場合には、試験対象ロボットが遭遇する可能性がある移動障

害物（円筒、人体ダミー）を検知対象の障害物に追加する。

(4) 凹凸段差

想定される使用環境に凹凸段差が存在する場合には、凹凸段差を検知対象の障害物に追加する。

c. 制限事項

- ・試験対象ロボットの大きさは、2mの立方体（縦横高さ）以内であること。
- ・試験対象ロボットの制動距離は、4m以下であること。
- ・相対距離、相対速度、速度軌跡の測定範囲が、試験検証機器の想定範囲内であること。
- ・用意できる走行可能エリアの広さ、形は、使用する路面の種類により異なるため、路面の種類を

選定する際に合わせて検討しておくこと。

- ・走行状態模擬装置を使用する場合は、試験対象ロボットの大きさは2m³の立方体（縦横高さ）以内、

重量 250kg 以下であること。

③ 試験方法

a. 試験項目の決定

障害物検知対応性能試験は次の3種類に分けられる。

- ・静止障害物検知対応性能試験
- ・移動障害物検知対応性能試験（障害物が移動することが想定される場合に実施）
- ・凹凸段差検知対応性能試験（使用環境に凹凸段差があることが想定される場合に実施）

上記3種類の試験と試験対象ロボットの設計仕様、想定される使用環境等をもとに選定した試験条件から、実施すべき試験項目を決定する。表 4.5.2 に基本的な試験項目を、図 4.5.5 に障害物との対峙方法を示す。なお、試験対象ロボットの開発過程における試験では、メーカーとの協議により、試験項目、対峙方法を変更してもよい。

表 4.5.2-2 基本的な試験項目

試験の種類	検知対象障害物 (表中の大きさは目安)		対峙方法
静止障害物 検知対応 性能試験	壁面 (90cm 四方)	木	<ul style="list-style-type: none"> ・壁正面 ・壁斜め 45 度前方
		黒フェルト布 (反射率 10%以下)	
		鏡 (反射率 90%以上)	
		透明ガラス (透光率 95%以上)	
		柵 (柵棒:直径 10mm, 間隔 100mm, 縦目方向)	
	円筒 (長さ 90cm)	PV13 (外径 20mm 水道管) 直径 200mm (バケツ)	<ul style="list-style-type: none"> ・円筒正面(円筒とロボット中央を結ぶ線上) ・円筒正面(円筒とロボット右端を結ぶ線上)
		直径 350mm (ごみ箱)	<ul style="list-style-type: none"> ・円筒正面(円筒とロボット左端を結ぶ線上)
		人マネキン	<ul style="list-style-type: none"> ・マネキン正面(マネキン中央とロボット中央を結ぶ線上) ・マネキン正面(マネキン左端とロボット右端を結ぶ線上) ・マネキン正面(マネキン右端とロボット左端を結ぶ線上) ・マネキン斜め 45 度前方(マネキン中央とロボット中央を結ぶ線上) ・マネキン斜め 45 度前方(マネキン左端とロボット右端を結ぶ線上) ・マネキン斜め 45 度前方(マネキン右端とロボット左端を結ぶ線上) ・マネキン真横(マネキン中央とロボット中央を結ぶ線上) ・マネキン真横(マネキン左端とロボット右端を結ぶ線上) ・マネキン真横(マネキン右端とロボット左端を結ぶ線上)
	成人 子供(7 歳)		
	移動障害物 検知対応 性能試験	円筒 (長さ 90cm)	PV13 (外径 20mm 水道管) 直径 200mm (バケツ)
直径 350mm (ごみ箱)			<ul style="list-style-type: none"> ・直進するロボットに, 障害物が真横から接近.
人マネキン			<ul style="list-style-type: none"> ・直進する障害物に, ロボットが斜め 45 度後方から接近.
成人 子供(7 歳)		<ul style="list-style-type: none"> ・直進する障害物に, ロボットが真後ろから接近. ・直進(急停止)する障害物に, ロボットが斜め 45 度後方から接近. ・直進(急停止)する障害物に, ロボットが真後ろから接近. 	
凹凸段差 検知対応 性能試験	凹段差 (幅はロボット 全幅以上)	ロボットが乗り越えることが 可能な深さよりもわずかに 深い段差	<ul style="list-style-type: none"> ・凹凸段差正面(凹凸段差中央とロボット中央を結ぶ線上) ・凹凸段差正面(凹凸段差左端とロボット右端を結ぶ線上) ・凹凸段差正面(凹凸段差右端とロボット左端を結ぶ線上)
	凸段差 (幅はロボット 全幅以上)	ロボットが乗り越えることが 可能な高さよりもわずかに 高い段差	<ul style="list-style-type: none"> ・凹凸段差左右斜め 45 度, 左右斜め 10 度 <p>※凹凸の高さ(深さ)を満たしていれば, 段差の作成方法は特に規定しない.</p>

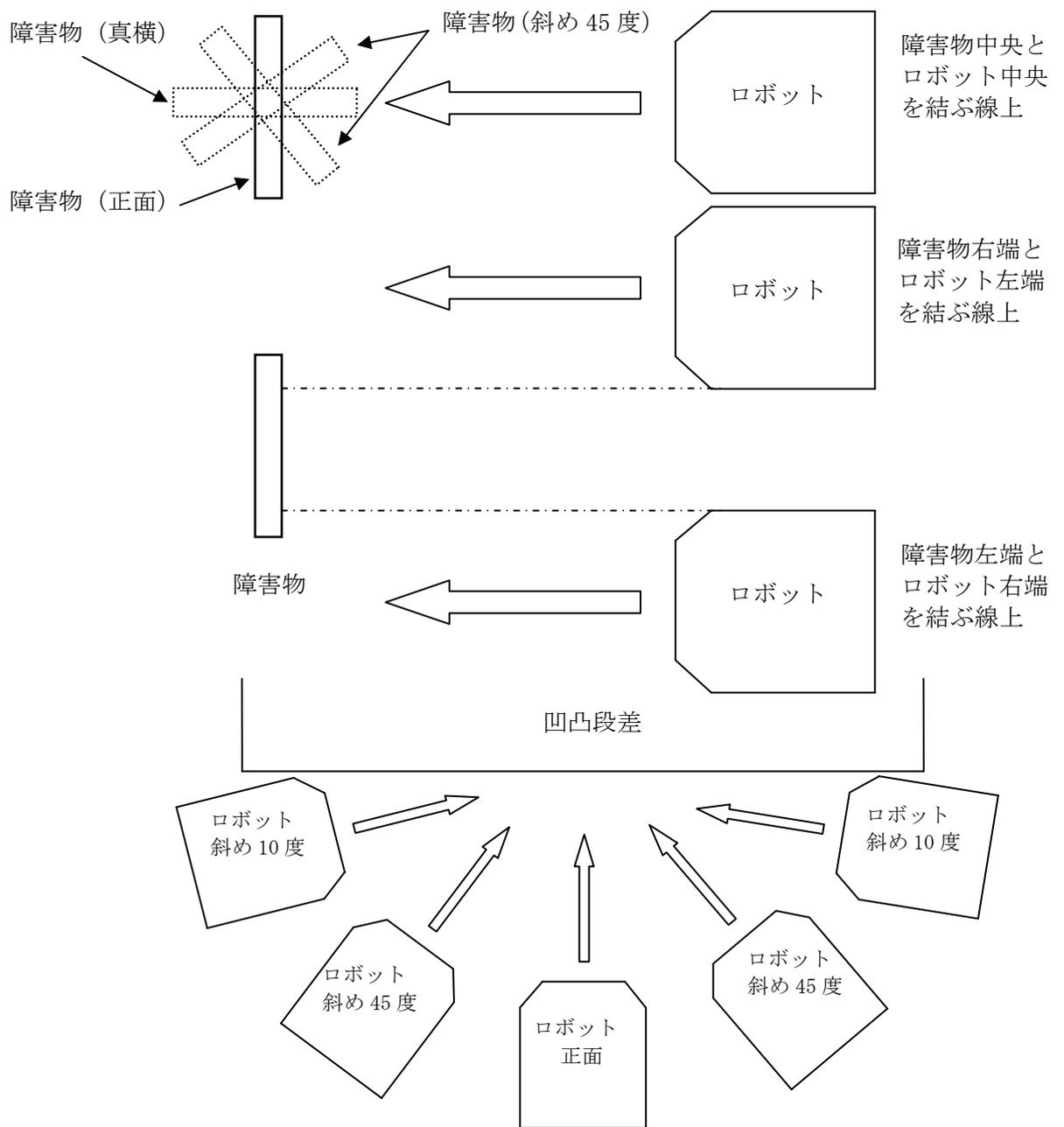


図 4.5.2-5 障害物との対峙方法

b. 試験準備

(1) 試験エリアの清掃

- ・試験エリア外周に置かれている物で、光を反射する物は覆い隠すか排除する。
- ・試験エリアが室内の場合は掃除機を、室外の場合は箒等を使用し、試験エリア内を掃除する。

(2) 計測装置の準備

計測装置の準備については以下を参照。

三次元動作解析を使用する場合：

「三次元動作解析装置 計測手順書 (モーションキャプチャー手順書)」

3章 計測範囲・カメラ配置決め

4章 カメラの設置と調整

5章 各装置の立上げ、終了

6章 キャリブレーション

自動追尾動作解析を使用する場合：

「ジブクレーン 取扱い手順書」(注) 試験エリアが室外の場合

「自動追尾動作解析装置 計測手順書」

(3) 試験対象ロボットの準備

- ・試験対象ロボットの電源を確認する。電源がバッテリーである場合には残量を確認し、必要に

応じ充電しておく。予備バッテリーがある場合は、予備バッテリーにも充電しておく。

- ・タイヤの空気圧をメーカーの指定圧力に調整する。
- ・外観を観察し、損傷がないことを確認する。
- ・走行機能に異常がないことを確認する。
- ・計測用のマーカを取り付ける。取り付け方法については以下を参照。

三次元動作解析を使用する場合：

「三次元動作解析装置 計測手順書 (モーションキャプチャー手順書)」

7章 ロボット等へのマーカ貼付け

8章 マーカセットの作成

自動追尾動作解析を使用する場合：

「自動追尾動作解析装置 計測手順書」

- ・試験対象ロボットの状態を記録するため、前後左右などからデジタルカメラで撮影をしておく。

(4) 走行路、凹凸段差の準備

試験の内容に応じ、必要な走行路、凹凸段差を準備する。

(5) 障害物接近再現装置の準備

- ・装置に障害物(マネキン等)を取り付ける。
- ・試験時間(障害物接近再現装置の稼動時間)に応じてバッテリーを準備し、充電しておく。

- ・遠隔操作(リモートデスクトップによる操作)を行う場合は、障害物接近再現装置制御用PC

のバッテリー残量を確認し、必要に応じ充電しておく。また、屋外での試験の場合には、遠隔

操作可能範囲を確認しておく。

(注) 障害物接近再現装置は、移動障害物を使用する場合に準備する。

(6) ロボット走行状態模擬装置の準備

- ・接近再現装置との連携ソフトを構築中につき、準備作業内容は現在未確定。
- ・非常停止スイッチのバッテリーをあらかじめ充電しておく。

(7) 安全の確保

- ・試験対象ロボットの走路逸脱や転倒に備えて、試験エリアの周囲にクッション材を設置する。
- ・搭乗型ロボットの試験を行う場合、搭乗者は保護具（頭用，肘用，膝用，手用）を装着する。
- ・各装置の非常停止スイッチを試験担当者の手元に用意し，すぐに停止できる状態にする。
- ・試験対象ロボットの設置および操作調整時以外，試験中にはエリア内に立ち入らないこと。
- ・各種配線が絡まないように注意する。

c. 試験の実施

試験では，各項目3回以上試行を繰り返し，有効データを3つ以上取得する。

試験実施手順を以下に示す。

①実施する試験項目に応じた準備を行う。以下は主な準備作業の例。

- ・試験対象ロボットをスタート地点へ移動。
- ・障害物（壁，円筒，人体ダミー，凹凸段差）を所定の位置へセット。
- ・安全確保（走行路の清掃，クッション材の再配置，転倒防止用のワイヤ確認など）。

②試験データの記録開始。

③試験対象ロボットの走行開始。（移動障害物試験の場合は，障害物の走行開始。）

④試験データの記録停止。

※①から④を3回以上繰り返した後，次の項目へ。

(注) 試験データの記録開始および停止の操作については以下を参照。

三次元動作解析を使用する場合：

「三次元動作解析装置 計測手順書（モーションキャプチャー手順書）」

8.2章 Cortex3による録画撮影

自動追尾動作解析を使用する場合：

「自動追尾動作解析装置 計測手順書」

d. 試験後の作業

- ・試験対象ロボットの取扱要領に沿って，外装の損傷確認，および充電等を行う。
- ・計測用のマーカーを外し，メーカーの定めた手順に基づいて元の状態に戻す。
- ・装置類，障害物等を撤収する。

e. データ処理

試験結果（試験データ）は，試験対象ロボットごとに，ノイズ除去などのデータ処理前のRAWデータ，処理後の加工データ，および，加工データから生成した試験成績書に分けてメディア（DVD等）に書き込み，生活支援ロボット安全検証センター内の規定にしたがって保存管理する。

(注) ノイズ除去などのデータ処理については以下を参照。

三次元動作解析を使用する場合：

「三次元動作解析装置 計測手順書（モーションキャプチャー手順書）」

11章 ポスト処理（計測データ補間）

自動追尾動作解析を使用する場合：

「自動追尾動作解析装置 計測手順書」

④評価基準

障害物検知対応性能試験において、評価の基準は、実施した全ての試験項目で、衝突（接触）や脱輪がないことを基本とする。

また、試験対象ロボットの動作（減速、停止）に対して、障害物との相対距離、相対速度、速度軌跡などがメーカーの設計仕様を外れていないことを、三次元解析装置により、定量的に評価する。

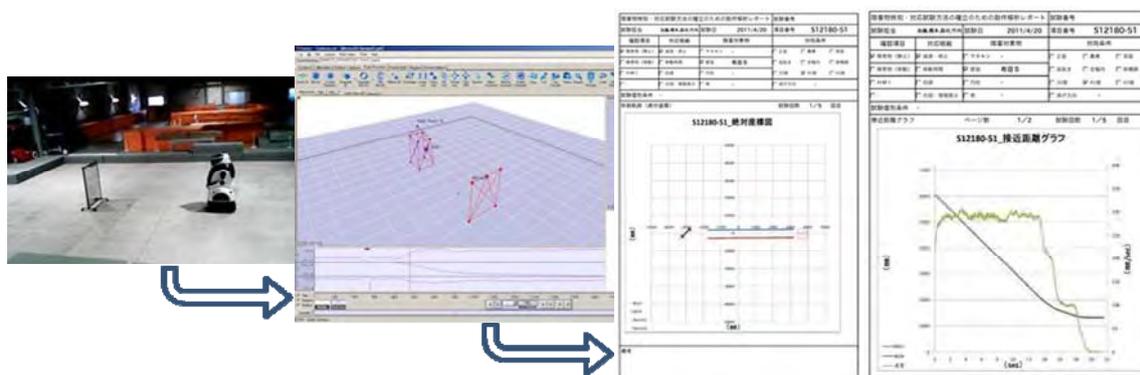


図 4.5.2-6 三次元動作解析装置を用いた操作解析の例（障害物に対する距離と減速度）

4.5.2.4 試験結果の例

- ・産総研のロボティックカートに対する試験の様子と試験結果を試験例として掲載する。



図 4.5.2-7 障害物（円筒 黒φ600）の試験の様子



図 4.5.2-8 障害物（円筒 白φ100）の試験の様子



図 4.5.2-9 障害物（壁 青布）の試験の様子



図 4.5.2-10 障害物（壁 透明プラスチック）の試験の様子

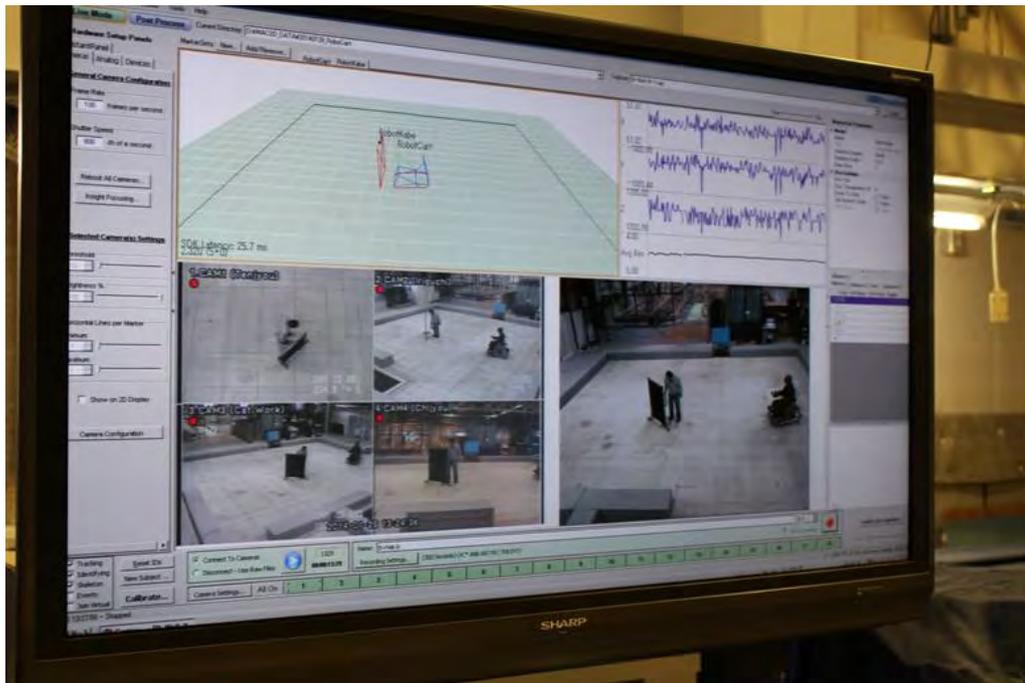


図 4.5.2-11 三次元動作解析装置による移動軌跡の記録の様子

表 4.5.2-3 試験成績書

試験日	2013年01月28日	試験者	加藤・石川	被試験品	ロボティックカート
試験場	検証センター走行エリア				

No	障害物 (ロボットとの位置)	回数	接触/衝突 の有無	障害物までの距離(cm) 減速度(m/s ²)			合否	備考
				警戒領域検知	危険領域検知	停止		
1	障害物③ (円筒黒φ600) 円筒中心とロボット中心 を結んだ線上	1	無し	61.4 (-0.83)	30.3 (-1.16)	25.2	合格	前進/前方障害
		2	無し	60.0 (-0.80)	30.7 (-1.34)	25.1	合格	前進/前方障害
		3	無し	60.3 (-0.73)	32.6 (-1.02)	26.6	合格	前進/前方障害
2	障害物③ (円筒黒φ600) 円筒右とロボット左を結 んだ線上	1	無し	48.3 (-1.18)	---	34.3	合格	前進/側方障害
		2	無し	47.7 (-0.86)	---	33.8	合格	前進/側方障害
		3	無し	49.2 (-0.78)	35.2 (-0.93)	32.4	合格	前進/側方障害
3	障害物③ (円筒黒φ600) 円筒左とロボット右を結 んだ線上	1	無し	47.8 (-1.22)	30.7 (-1.77)	29.1	合格	前進/側方障害
		2	無し	68.6 (-0.35)	31.6 (-1.05)	29.8	合格	前進/側方障害
		3	無し	46.3 (-0.95)	31.3 (-1.10)	28.5	合格	前進/側方障害
4	障害物④ (円筒白φ100) 円筒中心とロボット中心 を結んだ線上	1	無し	60.0 (-0.78)	32.0 (-0.85)	27.3	合格	前進/前方障害
		2	無し	61.0 (-0.81)	31.7 (-1.10)	25.4	合格	前進/前方障害
		3	無し	60.4 (-0.98)	30.3 (-1.04)	24.8	合格	前進/前方障害
5	障害物④ (円筒白φ100) 円筒右とロボット左を結 んだ線上	1	無し	41.6 (-1.41)	---	28.9	合格	前進/側方障害
		2	無し	41.1 (-1.16)	---	29.1	合格	前進/側方障害
		3	無し	47.5 (-0.93)	---	29.1	合格	前進/側方障害
6	障害物④ (円筒白φ100) 円筒左とロボット右を結 んだ線上	1	無し	53.0 (-0.73)	30.2 (-1.04)	26.7	合格	前進/側方障害
		2	無し	48.6 (-0.80)	30.4 (-0.98)	27.9	合格	前進/側方障害
		3	無し	50.6 (-0.83)	30.2 (-0.88)	26.1	合格	前進/側方障害
7	障害物⑤ (壁 青の布) 壁とロボットの角度が 90度	1	無し	63.3 (-0.74)	37.3 (-0.78)	31.0	合格	前進/前方障害
		2	無し	62.4 (-0.54)	36.7 (-1.05)	30.7	合格	前進/前方障害
		3	無し	65.9 (-0.60)	36.5 (-0.80)	30.7	合格	前進/前方障害
8	障害物⑤ (壁 青の布) 壁とロボットの角度が 左45度	1	無し	62.8 (-0.74)	36.5 (-0.91)	30.3	合格	前進/前方障害
		2	無し	64.4 (-0.77)	34.6 (-0.79)	27.9	合格	前進/前方障害
		3	無し	61.1 (-0.75)	35.4 (-0.93)	30.2	合格	前進/前方障害
9	障害物⑤ (壁 青の布) 壁とロボットの角度が 右45度	1	無し	63.3 (-0.65)	33.3 (-0.81)	27.1	合格	前進/前方障害
		2	無し	60.4 (-0.67)	31.5 (-1.16)	27.0	合格	前進/前方障害
		3	無し	60.0 (-0.71)	31.7 (-1.01)	25.9	合格	前進/前方障害
10	障害物⑥ (壁 黒のフェルト) 壁とロボットの角度が 90度	1	無し	71.4 (-0.59)	41.8 (-0.79)	34.4	合格	前進/前方障害
		2	無し	68.2 (-0.75)	39.1 (-0.88)	33.3	合格	前進/前方障害
		3	無し	71.0 (-0.70)	39.6 (-1.03)	33.3	合格	前進/前方障害
11	障害物⑥ (壁 黒のフェルト) 壁とロボットの角度が 左45度	1	無し	65.2 (-0.76)	37.6 (-0.96)	33.0	合格	前進/前方障害
		2	無し	63.1 (-0.79)	39.3 (-0.92)	34.7	合格	前進/前方障害
		3	無し	61.4 (-0.71)	37.6 (-1.07)	33.9	合格	前進/前方障害
12	障害物⑥ (壁 黒のフェルト) 壁とロボットの角度が 右45度	1	無し	65.2 (-0.85)	38.3 (-0.77)	32.8	合格	前進/前方障害
		2	無し	65.0 (-0.62)	38.7 (-0.93)	33.3	合格	前進/前方障害
		3	無し	65.9 (-0.49)	38.3 (-0.88)	32.1	合格	前進/前方障害
13	障害物⑦(壁透明ﾌﾞﾗ) 壁とロボットの角度が 90度	1	無し	62.6 (-0.76)	32.6 (-0.89)	25.5	合格	前進/前方障害
		2	無し	61.3 (-0.60)	30.3 (-1.12)	25.5	合格	前進/前方障害
		3	無し	60.5 (-0.84)	31.4 (-1.00)	25.6	合格	前進/前方障害
14	障害物⑦(壁透明ﾌﾞﾗ)	1	無し	68.9 (-0.60)	36.0 (-1.23)	31.5	合格	前進/前方障害

	壁とロボットの角度が左45度	2	無し	66.9 (-0.84)	37.7 (-1.09)	31.9	合格	前進/前方障害
		3	無し	65.2 (-0.84)	36.6 (-1.17)	31.6	合格	前進/前方障害
15	障害物⑦(壁透明 ^ア テ) 壁とロボットの角度が右45度	1	無し	60.5 (-0.66)	34.5 (-1.17)	30.2	合格	前進/前方障害
		2	無し	64.6 (-0.67)	34.4 (-1.02)	28.9	合格	前進/前方障害
		3	無し	63.2 (-0.77)	35.8 (-0.92)	30.0	合格	前進/前方障害
16	障害物③(円筒黒φ600) 円筒中心とロボット中心を結んだ線上	1	無し	60.0 (-0.72)	30.9 (-1.23)	26.6	合格	後退/後方障害
		2	無し	64.0 (-0.49)	33.9 (-0.85)	28.7	合格	後退/後方障害
		3	無し	60.0 (-0.58)	33.2 (-1.03)	27.3	合格	後退/後方障害
17	障害物④(円筒白φ100) 円筒中心とロボット中心を結んだ線上	1	無し	60.4 (-0.60)	38.2 (-1.03)	23.0	合格	後退/後方障害
		2	無し	60.5 (-0.82)	30.1 (-1.00)	22.8	合格	後退/後方障害
		3	無し	60.2 (-0.69)	30.2 (-0.88)	21.3	合格	後退/後方障害
18	障害物⑤(壁青の布) 壁とロボットの角度が90度	1	無し	87.0 (-0.39)	34.4 (-0.89)	27.6	合格	後退/後方障害
		2	無し	61.1 (-0.83)	33.0 (-1.01)	27.8	合格	後退/後方障害
		3	無し	63.6 (-0.70)	30.4 (-1.13)	25.0	合格	後退/後方障害
19	障害物⑥(壁黒のフェルト) 壁とロボットの角度が90度	1	無し	63.1 (-0.91)	38.4 (-0.85)	32.2	合格	後退/後方障害
		2	無し	68.9 (-0.72)	35.3 (-1.26)	29.9	合格	後退/後方障害
		3	無し	78.6 (-0.53)	36.2 (-0.86)	31.0	合格	後退/後方障害
20	障害物⑦(壁透明 ^ア テ) 壁とロボットの角度が90度	1	無し	60.2 (-0.54)	32.8 (-0.95)	26.9	合格	後退/後方障害
		2	無し	73.5 (-0.48)	30.3 (-0.94)	23.4	合格	後退/後方障害
		3	無し	86.8 (-0.26)	31.3 (-1.08)	25.0	合格	後退/後方障害

(注) 危険領域検知欄が“---”の試験は、警戒領域検知による減速から直接停止に至ったもの。

4.5.3 操作・情報提示機能検証試験 [産総研]

(1) 目的

本試験では、生活支援ロボットの想定使用環境における操作安全性と情報提示機能を検証する。

操作安全性検証としては、HMI（ヒューマンマシンインターフェース）による移動等の制御操作における、試験対象ロボットと操作者および試験対象ロボットと周辺との相対距離、軌跡から、安全距離の維持、姿勢の安定性等の評価を行う。

情報提示機能検証としては、試験対象ロボットが情報提示機能を有している場合に、ロボットの動作と事前の動作提示のタイミングや提示方法が妥当であるかを、試験対象ロボットと周辺との相対距離、軌跡と共に周辺者の視線データ等から評価する。

(2) 研究開発の経緯

参考にした規格は、ISO13482:2014 “Robots and robotic devices – Safety requirements for personal care robots” であり、関連規格は JISD6805, JIVASA05, JISB9707, JISB9708, JISZ9711, JISZ8500, JISC0447 等である。

研究開発の流れとしては、まず、対象となるロボットにおいて、操作時の安全性については、障害物検知対応性能試験と同様に、操作時のロボットの挙動を詳細に計測することで、安全であるかの判断をするものとした。また、ロボットの動作に合わせた動作提示のタイミングや提示方法などを計測記録し、妥当性を判断するものとした。この試験方法に合わせた試験装置としては、挙動やタイミングの計測装置として、障害物検知対応性能試験とほぼ、同様のものを用いることとした。当初、本プロジェクトに参加するロボット開発者からロボットの提供を受けて、模擬試験を行う予定であったが、対象となる機能をもったロボットが無く、実検証までは行わなかった。

(3) 成果

① 試験装置

この試験で使用する装置は、以下の表 4.5.3-1 の通りである。

表 4.5.3-1 使用する試験装置の一覧

試験装置	
走行路	走行路面用のゴムシートおよび各種タイル
障害物接近再現装置	障害物接近再現装置制御用 PC
三次元動作解析用カメラ	三次元動作解析用ビデオカメラ
三次元動作解析用 PC	三次元動作解析用マーカー
自動追尾動作解析用ビデオカメラ	自動追尾動作解析用 PC
搭乗者防具および機械転倒防止用吊具	防護用クッション
各種障害物（壁、円筒、人体ダミー）	ジブクレーン
アイマークカメラ	アイマークカメラ視線記録装置
ロボット走行状態模擬装置	ロボット走行状態模擬装置制御用 PC

② 試験条件

試験対象ロボットの想定される走行条件、環境条件、および情報提示トリガーとなるものを、メーカーとの打合せによって抽出し、試験条件を選定する。試験条件の選定にあたり、主要な試験条件を以下に示す。ただし、試験対象ロボットの開発過程における試験では、メーカーとの協議により変更してもよい。

a. 試験対象ロボットの走行条件

(1) 走行速度

想定される使用条件での、試験対象ロボットの通常使用する速度範囲内で走行させる。

(2) 走行方向

前進、後退、横方向への移動のうち、走行可能な方向を対象とする。

b. 環境条件

(1) 走行路面の種類

フローリング、カーペット、セーフティーウォーク、およびコンクリートの中で、想定される使用環境に最も近い路面を使用する。なお、想定される路面が複数ある場合には、最も制動距離が延びる路面を使用する。

(2) 障害物

壁（木、布、鏡面、透明、柵状）、円筒（金属、樹脂）、人体ダミーの中で、想定される使用環境のもとで試験対象ロボットが遭遇する可能性があるものを障害物とする。

c. 制限事項

- ・試験対象ロボットの大きさは、2mの立方体（縦横高さ）以内であること。
- ・試験対象ロボットの制動距離は、4m以下であること。
- ・相対距離、相対速度、速度軌跡の測定範囲が、試験検証機器の想定範囲内であること。
- ・用意できる走行可能エリアの広さ、形は、使用する路面の種類により異なるため、路面の種類を選定する際に合わせて検討しておくこと。
- ・走行状態模擬装置を使用する場合は、試験対象ロボットの大きさは2m³の立方体（縦横高さ）以内、重量250kg以下であること。）

③試験方法

a. 試験項目の決定

操作・情報提示機能検証試験は次の2種類に分けられる。

- ・操作機能試験
- ・情報提示機能試験

上記2種類の試験と試験対象ロボットの設計仕様、想定される使用環境等をもとに選定した試験条件から、実施すべき試験項目を決定する。表4.5.3-2、表4.5.3-3に基本的な試験項目を示す。なお、試験対象ロボットの開発過程における試験では、メーカーとの協議により、試験項目等を変更してもよい。

表 4.5.3-2 操作機能検証試験の基本的な試験項目

試験の種類	障害物	制御対象	HMI 操作
操作機能試験	壁面	—	・直進、右左折、後退後の障害物に対して 停止操作を行う。 ・直進、右左折、後退後の障害物に対して 回避操作を行う。
	円筒	—	
	人マネキン	—	
	—	自動充電	・制御対象の動作を行うためのボタン など の操作を行う。
	—	合体・分離(ロボットの一部)	
	—	変形(ロボット自身の形状変化)	

表 4.5.3-3 情報提示機能検証試験の基本的な試験項目

試験の種類	情報提示内容	情報提示方法	情報確認位置
情報提示機能試験	通常走行	音, 音声, 表示灯, 間面等	正面, 真横, 後方
	減速時 (制動灯)		
	停止時 (制動灯)		
	発進時		
	右左折時 (方向指示器)		
	回避時		
	緊急停止 (警告灯など)		
	自動動作 (自動充電, 合体・分離など)		

b. 試験準備

- (1) 試験エリアの清掃
障害物検知対応性能試験と同様. (4.5.2章 参照)
- (2) 計測装置の準備
障害物検知対応性能試験と同様. (4.5.2章 参照)
- (3) 試験対象ロボットの準備
障害物検知対応性能試験と同様. (4.5.2章 参照)
- (4) アイマークカメラの準備
被験者毎にキャリブレーションを行う. 事前にバッテリーを充電しておく.
- (5) ロボット走行状態模擬装置の準備
障害物検知対応性能試験と同様. (4.5.2章 参照)
- (6) 安全の確保
障害物検知対応性能試験と同様. (4.5.2章 参照)

c. 試験の実施

障害物検知対応性能試験と同様. (4.5.2章 参照)
 なお, アイマークカメラは目に赤外線を照射する為に, VDT 作業に準ずる取り扱いが必要である.
 試験担当者は, アイマークカメラ使用時は 30 分毎に休憩時間 (カメラを外す) を設けること.

d. 試験後の作業

障害物検知対応性能試験と同様. (4.5.2章 参照)

e. データ処理

障害物検知対応性能試験と同様. (4.5.2章 参照)

④評価基準

実施した全ての試験項目で, 評価の基準は, 衝突 (接触), 脱輪, 挟み込みなどを生じることなく (これらの発生要因となる死角などが操作者に生じることなく), 移動等の操作を完了できることとする. また, 試験対象ロボットと操作者および試験対象ロボットと周辺との相対距離, 軌跡などが, メーカーの設計仕様を外れていないこととする.

情報提示機能の評価基準は, 試験対象ロボットの動作と情報提示のタイミング, 位置, 内容が, メーカーの設計仕様を外れていないこととする. また, 周辺者から判断しやすく, 認識後に, 次の動作に円滑に移行できるための余裕時間があることとする.

4.5.4 EMC 試験（電磁妨害に対する生活支援ロボットの安全の確保） [安衛研]

4.5.4.1 目的

活支援ロボットは、使用される環境で想定される電磁妨害（静電気，無線電磁波，等）が印加された場合でも安全が確保される必要がある．この電磁妨害印加時においても，安全が確保されているかどうかの検証方法を明確化し，検証を行うための設備・環境の構築を行う．

特に，安全を確保するために生活支援ロボットに防護方策として使用される，障害物検知による停止，等の機能安全の機能（以下安全機能）に対する試験方法は明確化されておらず，この試験方法の構築が必要とされている．

さらに，ロボットに無線通信が組み込まれ動作する機能に対しても，安全性の確保が必要となる．この場合の安全性の検証方法の明確化と検証のための設備・環境構築を行う．

4.5.4.2 研究開発の経緯

現行の EMC 規格に対応する，電磁界印加設備，電磁界放射測定設備を生活支援ロボット検証センター内に構築した．さらに，プロジェクトの各ロボットに対応した治具・設備を整えることで，ロボットの電磁妨害印加の評価を可能とした．

安全を確保している安全機能の電磁妨害耐性の試験内容を明確化した．この試験内容を放射 RF 電磁界印加に対して適用し実施することは，従来の設備のままでは難しい．このため，この試験を行うための，治具・装置を導入し，生活支援ロボットの安全性の，電磁妨害に対する耐性の実用的な試験を可能とした．

無線通信を利用した機能の安全性検証の試験内容を明確化し，検証を可能な環境を構築した．

将来的に問題となると考えられる，ロボット自身の発生する雑音が，搭載された無線通信機能を劣化させる問題に対して，妨害を引き起こす雑音源を特定する方法を開発した．

4.5.4.3 成果

(1) 現行 EMC 規格対応の設備構築

現行の EMC 規格（IEC 61000 シリーズ），機械類の安全性規格－安全関連の電気・電子・プログラマブル電子制御システムの機能安全（IEC 62061），個別規格（車いす：ISO 7176-21，等）に対する測定が可能な 10 m 法電波暗室（TDK-EPC 社製）と測定機等の設備の導入を行った．

これらの設備・機器により上記規格の電磁妨害のロボットへの印加が可能となった．また，ロボットの放射する電磁雑音の評価も可能となった．

特徴としては，車いすの規格（ISO 7176-21）に対応した 26MHz~80MHz の周波数の放射 RF 電磁界印加が可能（IEC61000 シリーズでは，80MHz~）な設備となっている．また，電源周波数磁界印加試験のループの形状も 3×3 m の大型のものを導入し，ロボット全体への印加を可能としている．

車いすの規格（ISO 7176-21）で要求されている静電気試験である，帯電フレーム試験をロボットに対して適用するための，ロボット支持台，等の試験条件に付いても検討し，学会報告を行った． [1]

表 4.5.4-1 導入設備リスト

試験器名	対応規格	機種	仕様
静電気試験器	IEC61000-4-2	(メーカー名:ノイズ研, 型名:ESS-2000AX)	30 kV
放射免疫試験器	IEC61000-4-3	信号発生器 (メーカー名:Agilent, 型名: N5181A) アンプ (メーカー名: BONN Elektronik, 型名: BLWA0210-1800) アンプ (メーカー名: TESEQ, 型名: CBA1G-1000) アンプ (メーカー名: MILMEGA, 型名: AS0102-100, AS1860-100) バイコニカルアンテナ (メーカー名: Schwarzbeck, 型名: BBA9106) ログペリアンテナ (メーカー名: Schwarzbeck, 型名: UHALP9108A) ホーンアンテナ (メーカー名: Schwarzbeck, 型名: BBHA9120B)	26~100MHz, 1800W (20 V/m) 80~1000MHz, 1800W (30 V/m) 1~2GHz, 100W (30 V/m) 2~5GHz, 100W (30 V/m) ※1GHz超は独立ウィンドウ法で実施
バースト試験器	IEC61000-4-4	メーカー名:ノイズ研, 型名:FNS-AX3	4800V
雷サージ試験器	IEC61000-4-5	メーカー名:ノイズ研, 型名:LSS-F02	15KV,7500A
伝導免疫試験器	IEC61000-4-6	メーカー名:TESEQ, 型名:CBA230M-080	0.15~230MHz: 20V
電源周波数磁界試験器	IEC61000-4-8	協立電子工業特注品	100A/m, コイル寸法: 3×3m
電源電圧変動試験器	IEC61000-4-11	電源 (メーカー名: 菊水電子工業, 型名: PCR4000LA) ソフトウェア (メーカー名: 菊水電子工業, 型名: SD003-PCR-LA)	
放射エミッション試験器	CISPR 16-2-1	レシーバ (メーカー名: ROHDE&SCHWARZ, 型名: ESUS) バイコニカルアンテナ (メーカー名: Schwarzbeck, 型名: BBA9106) ログペリアンテナ (メーカー名: Schwarzbeck, 型名: UHALP9108A) ホーンアンテナ (メーカー名: Schwarzbeck, 型名: BBHA9120B)	20Hz~8GHz 30~300MHz 300MHz~1GHz 1~5GHz
伝導エミッション試験器	CISPR 16-2-1	LISN (メーカー名: METZNACHBERDUNG, 型名: ESH2-Z2) レシーバ (メーカー名: ROHDE&SCHWARZ, 型名: ESUS)	20Hz~8GHz

(2) ロボット測定のための治具・設備の構築

生活支援ロボットの EMC 評価のために必要な治具や専用設備を新たに作製・導入することで、これらの評価を行えるようにした。これらを使用して安全機能の検証手法の検討を行った。それらの治具の事例を以下に示す。

・樹脂製測定テーブル (ロボット用高耐荷重)

高さ 70 cm, 耐荷重 100 kg の, 樹脂製測定テーブル

・木製・樹脂製, 装着用ロボット動作治具

人体装着型ロボットを試験するための, 人体下半身を模し関節部が可動する樹脂製の治具。この治具にロボットを装着し, 動作させた状態で EMC 試験を行うことが可能となる。

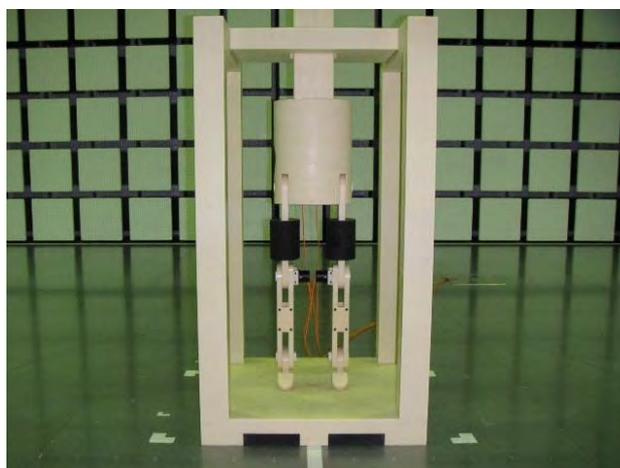


図 4.5.4-1 樹脂製ロボット装着治具

- ・人体ファントム（全体，胸部）

人体の誘電率に近い値を持つゴムを用いた人型のファントム。これを用いることで，人と共存する介護支援ロボットの EMC 試験における，人体の影響についての検討を行った。



図 4.5.4-2 人体ファントム

- ・カート型ロボット支持台

車輪で動作するカートを持ち上げ，車輪を空転させた状態で動作させる樹脂製の治具

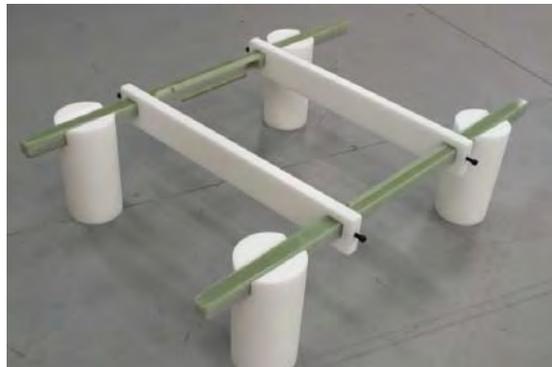


図 4.5.4-3 ロボット支持台

(3) 電磁妨害に対する安全機能の検証手法

従来の EMC のイミュニティ試験は，定常状態で動作している機器に電磁妨害を加えて，その定常状態を保持するかどうかを確認する方法が行われている。しかしながら，この試験では安全機能の動作を妨害印加時に行っていないため，電磁妨害印加において安全機能が維持されているかどうかの確認とはなっていない。このため，電磁妨害印加時に安全機能を動作させ，その機能が維持されていることを確認する試験が必要となる。

- ・検証装置

(1) で述べた電磁妨害印加装置と環境を用い電磁妨害を印加する。

検証に使用する，ロボットの支持治具，安全性機能を動作させる治具，安全性機能が働いたかの動作監視装置は，電磁界への影響を与えない様に，なるべく金属および導電体を使用しない構成とする．さらに，なるべくロボットに接触させないことが望ましい．必要であれば，安全機能動作，動作監視，電磁妨害印加，を制御し，自動測定を行うソフトウェアを使用する．特に，放射 RF 電磁界印加試験は，印加する妨害の数が非常に多いため，実用的な試験とするためには，自動化は必須となる．

・検証方法

印加する電磁妨害毎に，以下の手順で安全機能の動作を確認する．「」内に，障害物センサによる停止という安全機能を持つロボティクチェアの場合の具体例を示す．これにより，電磁妨害印加時においても，安全機能が正常に動作する．正常に動作しない場合でも，安全方向への誤動作であることを検証する．

- 1) ロボットを定常状態とする．「走行状態にする」
- 2) ロボットに電磁妨害を印加する．「放射 RF 電磁界，電源周波数磁界の場合は，3) ～ 7) の間，継続して印加する．」
- 3) ロボットの安全性機能を動作させる．「例えば，障害物センサに障害物を感知させる．」
- 4) 安全機能が正常に動作したかを確認する．「走行状態から停止状態になることを確認する．」
- 5) 電磁妨害印加を停止する．「障害物を，センサ感知域から取り除く．」
- 6) 定常状態に戻す．「例えば，安全確認ボタンを押す」
- 7) ロボットの定常状態を確認する．「停止状態から走行状態になることを確認する．」



図 4.5.4-4 安全機能の検証フロー

・安全機能動作・ロボット操作を行う治具

電波暗室内で試験を行う場合，暗室の外からロボットの操作を行うことで，測定・評価の効率が向上する．また，測定の自動化を行うためには，このような治具が必須となる．具体的には，暗室内に引かれた圧縮空気を電磁弁で切り替えて，ピストンを動かすことで，操作ボタン・レバーを操作したり，障害物を動作させたりする．電磁弁は，PC 等からの命令の電気信号で動作する．圧縮空気のホースやピストンは，すべて樹脂製となっており，印加電磁界への影響をなるべく小さくしている．

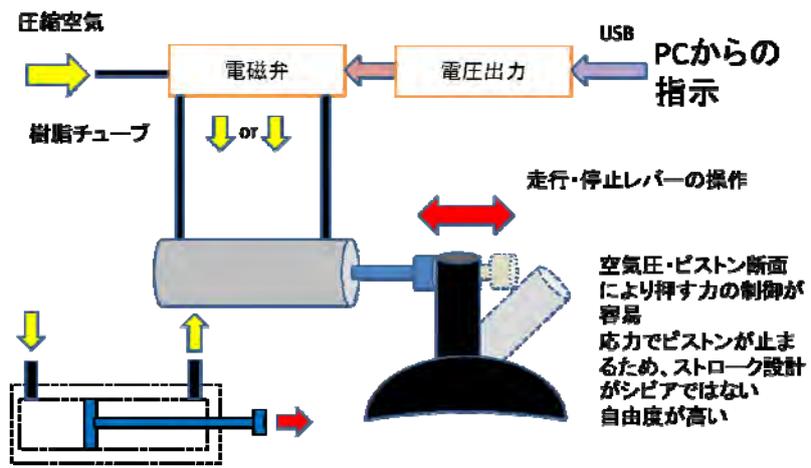


図 4.5.4-5 ロボット操作を行う治具（レバー操作）

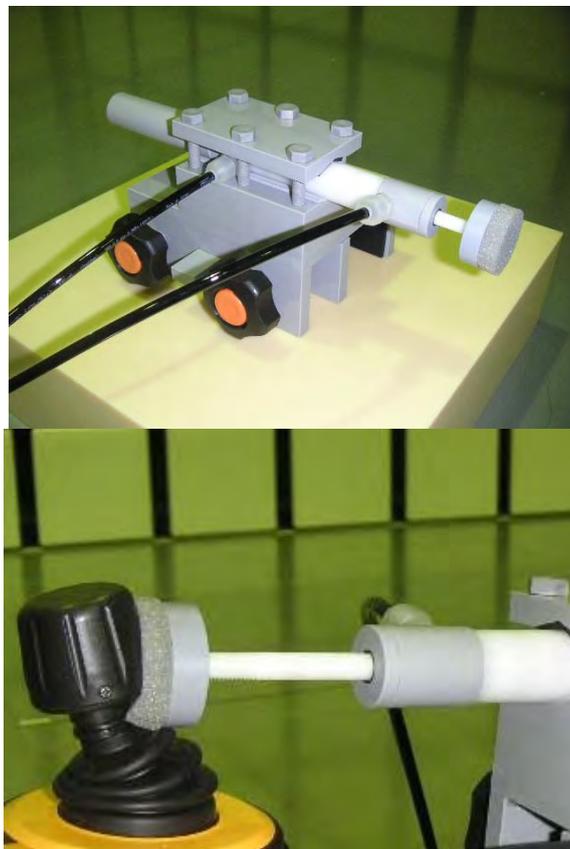


図 4.5.4-6 レバー操作の治具例

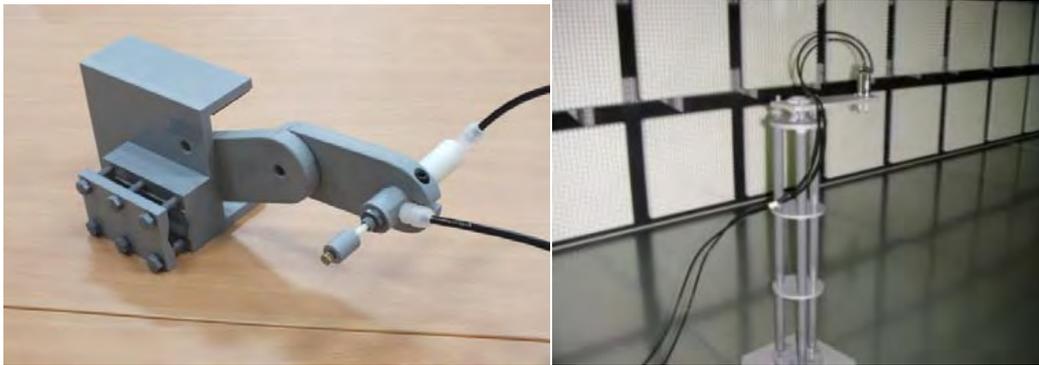


図 4.5.4-7 ボタン操作治具例

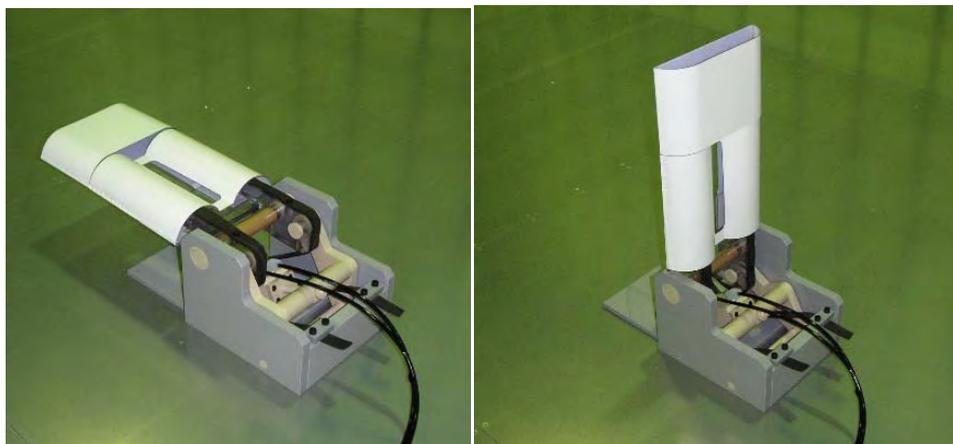


図 4.5.4-8 障害物センサ動作用障害物（左：感知域外位置，右：感知域位置）



図 4.5.4-9 倒立振り子型ロボット動作治具（上に乗せたロボットを前後に傾けることで、走行・停止を行う）

・安全機能の動作を確認する装置

安全機能が正しく動作したかどうかを自動判定する装置は、目視による判定と比較すると、正確性も効率も格段に向上する。また、測定の自動化の官邸からも必要な装置である。

この自動判定には、画像認識を用いた動作検出機能を使用した。この機能は、ロボットの車輪等の動作箇所にマーカーを付け、そのマーカーを含む範囲をカメラで撮影し、マーカーの速度を画像認識により求めるものである。このマーカー速度が、動作時や停止時に定められた範囲に入っているかどうかで、安全機能が動作したかどうかを判定する。カメラは、被測定物と離れた場所に設置されるため、妨害として印加される電磁界への影響は少ない。また、妨害として印加される電磁界によるカメラ等の誤動作が無いことは事前に確認している。この、画像認識機能、動作判定機能はPC上のソフトウェアとして動作している。



図 4.5.4-10 動作判定ソフトウェア

これらの動作検出は、測定されるロボットに応じて、最適なものを使用する。例えば、車輪がカバーされており画像検出による動作確認が難しいロボットの場合には、金属を用いない光ロータリーエンコーダーとローラーを用い作成された車輪速度センサを用いて測定された、速度情報を使用して動作判定を行う。

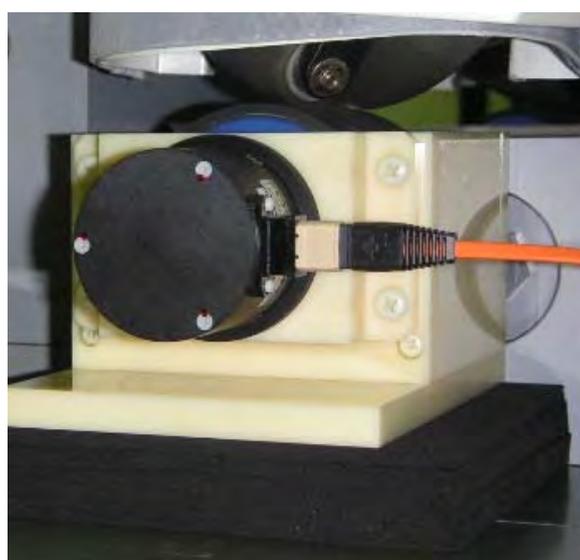


図 4.5.4-11 光ロータリーエンコーダーによる、車輪速度検出

・放射 RF 電磁界印加の試験の自動化

放射 RF 電磁界印加試験以外においては、印加する電磁妨害の数が多くないため、安全機能の動作・確認は、測定者により、その都度行っても、実用的には大きな問題は無い。しかしながら、放射 RF 電磁界印加試験は、印加する電磁妨害の数が非常に多いため、自動化を行わない場合、測定時間・測定者の関与が膨大となるため、実用的な評価ではない。このため、この評価の自動化を行った。

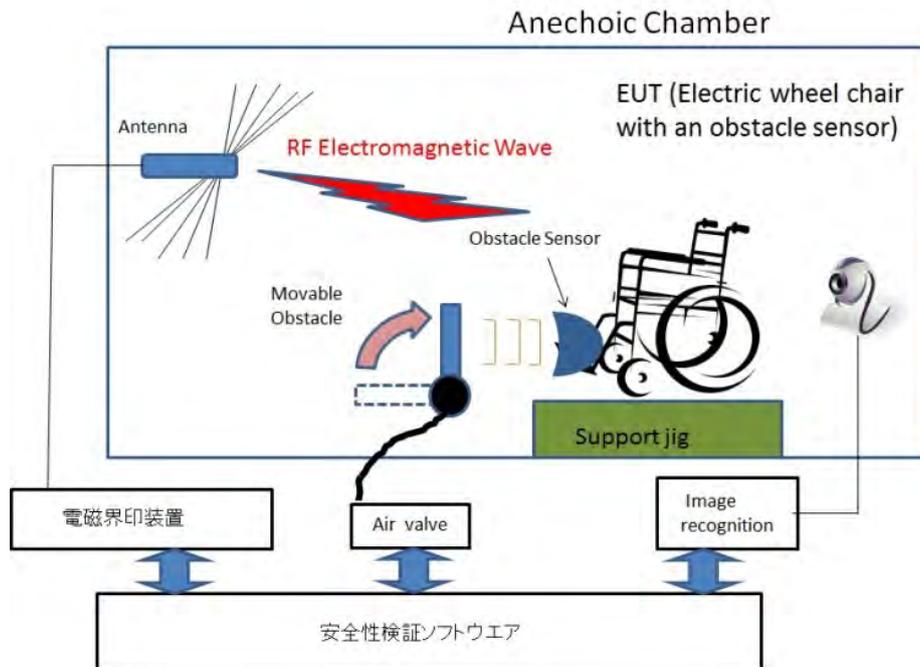


図 4.5.4-12 放射 RF 電磁界印加時の安全機能の検証測定の自動化

従来の放射 RF 電磁界印加試験は、PC ソフトウェア（東陽テクニカ製）を用いて、自動的に周波数を変え電磁妨害を印加するものが使用されている。このソフトウェアを、ロボット操作・安全機能動作確認と組み合わせて、自動化装置を構成する。

放射 RF 電磁界印加試験 PC ソフトウェアを、外部 PC からの制御を受け連動する機能を追加する改造を行った。これは、RS-232C により、放射 RF 電磁界の印加するタイミング・次の周波数の印加に進むタイミングを、外部 PC と共有・使用するものである。

この追加された機能を用い、放射 RF 電磁界印加試験装置、障害物センサを作動させるための可動障害物、ロボットの動作検出機能を、新たに作成した安全機能検証ソフトウェアで制御することで、放射 RF 電磁界印加試験において安全機能の検証フローを実現した。安全性機能の動作に問題が無ければ、印加する放射 RF 電磁界の周波数を次々に変化させ、安全機能の動作を確認する。もし、安全機能の動作に異常があった場合は、発生した周波数で測定を中断する。その時点で、異常の状況、発生周波数、等を確認・記録できる。その後、確認の継続または終了を行うことができる。

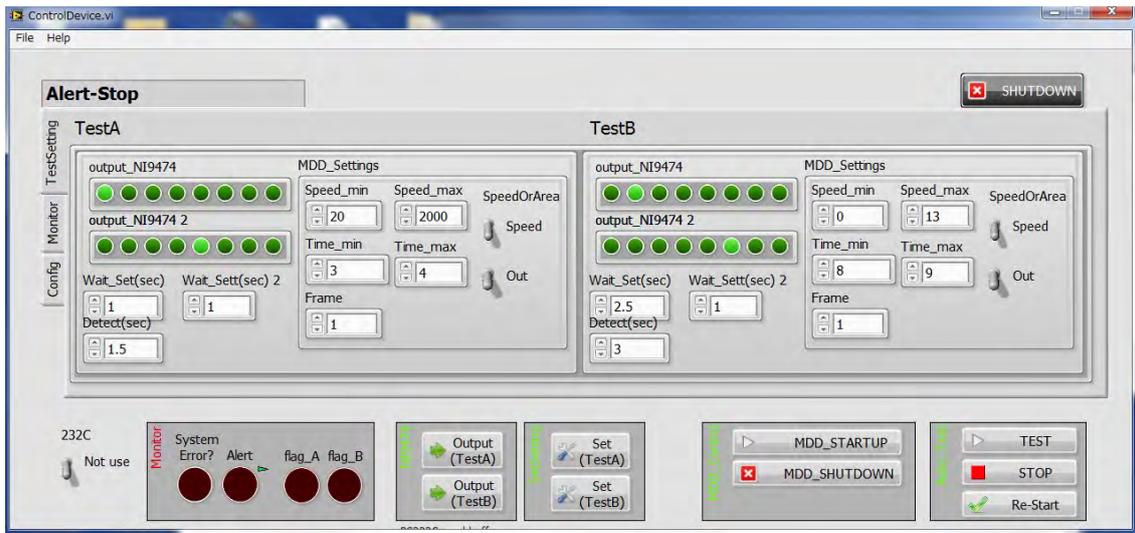


図 4.5.4-13 安全機能検証ソフトウェア

この自動化設備の構築により，放射 RF 電磁界印加の安全機能の検証が，実用的なものとして行う事が可能となった。

これらの安全機能の検証方法については，国内学会研究報告 3 件[2]-[4]，雑誌投稿 1 件[5]を行っている。

上述の様に構築した，測定手法・環境を用い，プロジェクトで開発したロボッテックチェアを用いた，安全機能の対電磁妨害耐性の検証事例を下記に示す。検証事例は，検証試験計画，検証試験結果の校正としてとしてまとめた。

4.5.4.4 無線通信を利用した機能の安全性検証

無線通信を利用した機能の安全性検証に関して、電磁妨害を主とするハザードに対する機能安全を評価する方法の検討を行った。基本的には、4.5.4.3 (2)で述べた方法を用い、安全機能の確認を行う。しかしながら無線通信を利用した場合、無線通信の機能停止・低下を新たなリスクとして考慮する必要がある。その原因として、無線通信に使用している周波数帯域の雑音による妨害、無線通信に使用している電波が距離や障害物により弱くなることによる通信停止、電池等の電圧低下による無線通信の機能停止がある。これらによって、無線通信の機能停止・低下の現象が起きた場合においても、安全性が保たれていることを検証する方法の検討と構築をおこなった。

・無線通信を用いた安全機能の検証方法

無線通信を用いた機器においては、無線通信に特有なリスク要因が存在する。それは、

1. 親機と子機の移動による相互の通信環境の変化
2. 周辺の機器から発生する電磁雑音等の通信妨害源の存在
3. 電源の電圧低下の影響

である。これらのリスク要因に対して、この装置の警報機能が維持されることを確認する。

(1) 親機と子機の移動による通信感度の変化

親機・子機の位置関係等により通信感度が変化して、通信できなくなり警報が動作しないリスクが想定される。

このため、

- ・既定の使用条件内では必ず通信が可能である
- ・あるいは通信できなくなった場合でも危険な状態にならない

ことの確認が必要である。

近接警報装置の親機から子機への30kHz帯の通信は、警報装置が使用される距離の範囲において、安定して機能することを電波暗室における30kHz帯の磁界強度の測定により検証できた。しかし、子機から親機への300MHz帯の通信では、壁や地面の反射波による干渉（フェージング）が存在し、警報の範囲（距離5m）においても、親機に近接感知の信号が通信できず距離が5m以下に近づき子機において近接警報が動作している場合においても、親機においては近接警報が動作しない場合がきわめて稀ではあるが存在した。

(2) 電磁雑音による通信妨害

無線通信を用いた機器では外来の電磁波による妨害によって、通信感度が低下して通信できなくなり、警報が動作しない危険性が想定される。このため、機器が使用される環境に存在する可能性のある電磁波に対して、近接警報装置の機能の喪失が無いことの確認が必要である。

この近接警報装置を使用が想定される環境で動作させたところ、子機が電力線やスイッチング電源の極めて近くにある場合では近接警報の範囲（5m）内でも近接警報が動作しない場合があった。これらの電力線やスイッチング電源の近くにおいては、親機から子機の通信に使用している30kHz帯の近傍の周波数の磁界が測定される。つまり、電力線やスイッチング電源からの電磁波が雑音となり、子機の受信感度が劣化し親機からの信号を受信できなくなるためである。雑音の無い電波暗室においてこの近接警報装置を動作させ、30kHz帯の電磁波を加えることによっても、警報が動作しない現象が起こることが実験で確認されている。（図4.5.4-2）

このように、実際の使用環境で存在する雑音により、近接警報が動作しない場合が存在する。

(3) 電源電圧低下による影響

電池で動作する無線通信を用いた機器では、使用により電池の残量が少なくなると電池の電圧低下によって通信機能が停止して、警報が動作しないリスクが想定される。

近接警報装置においては、動作をモニターするLEDが設けられており、電圧低下による機能停止の場合はそのLEDが消えるだけとなっている。このためこの近接警報機能の停止に気付かずにいる状態のまま使用して、近接時に警報が動作しない可能性がある。

以上の3種のリスク要因に対する検証の結果、実際に使用される環境においては、警報機能が損なわれる状況は稀であるにしても存在し、機能維持性能は十分ではないことが判明した。このため、これらの無線通信に特有なリスク要因に対しての機能維持能力を装置に組み込むことで、安全支援機能を向上させる必要がある。

(4) 安全支援機能の向上

一般に安全機能の維持のため、機能の正常性の確認が求められる。同様な考えで、以下のような機能を近接警報装置に組み込むことで、ロボット等の近接を確実に検出・通報し、安全支援機能を確保することが可能となる。

a) リスク要因の存在、あるいはリスク要因による無線通信の影響の状況を常時モニタリングする。

b) もし影響を受けていることを感知した場合“現在は警報が適切に動作しない状況である”ことを装置が警告する。

この近接警報装置において、具体的に考えられる安全支援機能の向上の案としては以下のものがある。

- ・近接警報装置が持っている300MHz帯の通信機能を用いて、親機と子機の間で相互に定期的な通信を、通信機能の維持の確認のために行う。この定期的な通信が確認できなくなった場合、警報が動作しない状況であることの警告を行う。

- ・子機が受信する30KHz帯の信号が、親機から送られてくるものと同じ特徴かどうかをモニタリングする。異なる特徴の信号であった場合それは雑音と考えられ、雑音が存在し警報が動作しない可能性があることの警告を行う。

- ・電池の電圧のモニタリングを行い、ある電圧以下になった場合に、電圧低下のため機能停止するとの警告を行う。

(5) 無線通信に関する安全性・信頼性試験方法の開発

将来的に無線通信が安全機能に使用されることを想定して、電磁妨害と無線通信感度の検討を行った。これにより、無線通信の感度に関わる測定装置の開発を行い、ロボット内の電磁雑音のなかで、無線通信に影響を及ぼす雑音の特定手法を構築した。

・無線通信の感度に関わる測定装置の開発と雑音源の特定方法

近年、無線通信を利用した制御機能が、生活支援ロボット等に組み込まれ実現されようとしている。このような機能は、組み込まれるロボット自身からの雑音の妨害を受け、制御機能の劣化やロボットの暴走等の問題を引き起こす恐れがある。これらの問題の対策を講じるためには、まず無線通信の妨害を引き起こす雑音源を特定する必要がある。

ロボット内に存在する雑音は、モーター等の大きな時間変動を伴う雑音源が存在し、無線で使用される周波数帯域には、複数の妨害源がある。この特定のため、無線通信に影響を与えている雑音信号と妨害源の信号を比較する方法を提案する。この比較のために雑音の大きさ・位相の時間変動を評価可能な2入力の測定装置を使用する。

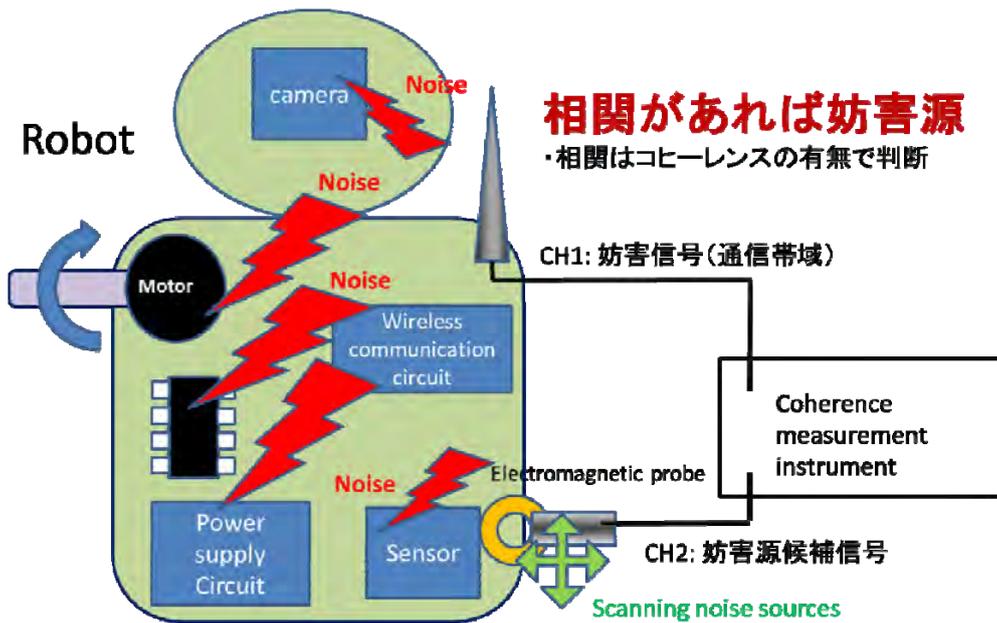


図 4.5.4-14 ロボットに組み込まれた無線通信機器が受ける妨害推定方法の概念図

具体的には、ロボットに搭載された無線通信機のアンテナに回り込んだ妨害信号と妨害源候補からの直接の信号を比較する。コヒーレンスを示せば、妨害源であることがわかる。コヒーレンスを示さなければ、妨害源候補のレベルが大きくても妨害源ではない。

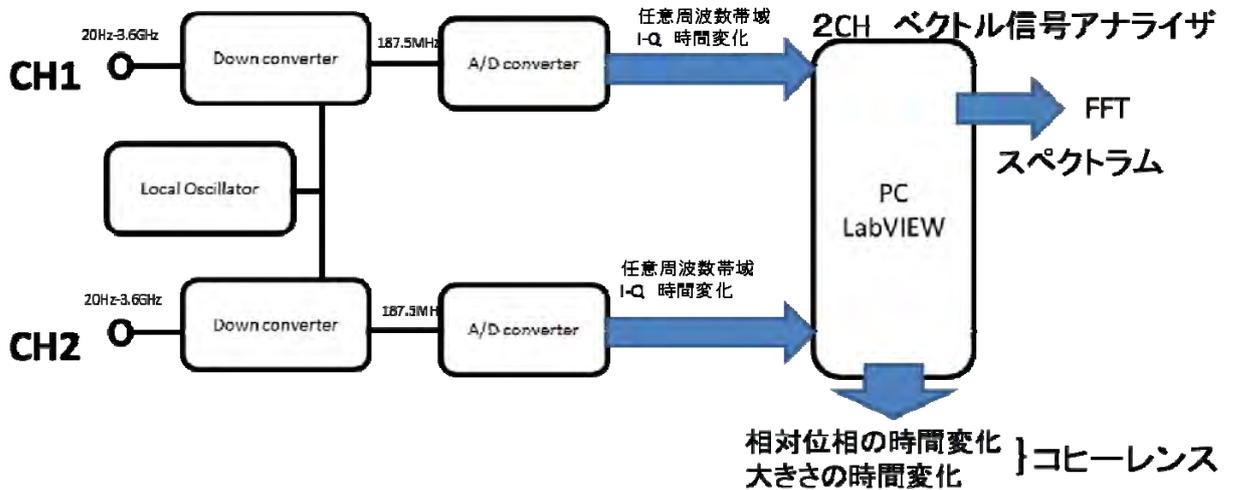


図 4.5.4-15 コヒーレンスを測定する装置の構成

コヒーレンスを測定する装置の構成は、2チャンネルのRF信号入力を、共通のローカル信号でダウンコンバートした後A/Dコンバータでデジタル化し、デジタル化されたデータを演算して、入力された信号の、大きさとその時間変化、位相とその時間変化、スペクトラム、等の信号の解析を行うものである。本研究のために開発した装置は、3.6GHzまでの周波数において、任意の最大25MHzの帯域幅の信号解析が可能である。ローカル発信器を共通とし、A/Dコンバータを並列に動作させることで、2チャンネルの入力(CH1.CH2)信号の位相差の測定と、大きさの時間変動比較が可能な測定装置となっている。

コヒーレンスの有無を確認する方法として、ある任意期間のサンプリング期間における、CH1 と CH2 の位相差のヒストグラムを用いる方法がある。コヒーレンスが無い場合、位相の相関が無い場合ヒストグラムは、 -180° ～ $+180^{\circ}$ の間で一様な分布となる。コヒーレンスが有る場合、位相相関があるため、位相差のヒストグラムはある値を中心とした最大値を持ち、すそ野が広がる分布を示す。(ある一定の値のみの分布にならないのは、熱雑音等の影響があるためである。) このヒストグラムの形状で、信号相関の大きさを定義することができる。たとえば、ヒストグラムの平均値と最大の比を相関係数として用いれば、この値が大きければ相関が高いと言える。



図 4.5.4-16 信号相関がない場合の位相差ヒストグラム 信号相関がある場合の位相差ヒストグラム

また、信号の大きさに時間変動がある場合、この時間変動の比較によっても信号相関の有無の推定が可能である。具体的には、CH1 と CH2 の大きさの時間変化を統計的にしらべて、変化の方向がランダムではない場合、コヒーレンスがあると推定できる。

この様にして、妨害源を推定することで、無線通信の通信感度劣化の問題対策を効果的に行う事が可能になる。

この件については、国際学会 1 件[6]、国内学会研究報告 1 件[7]、の報告を行っている。

参考文献

- [1] 村上 真之, 池田 博康, “生活支援ロボットにおける帯電フレームモデルの ESD イミュニティ試験法の検討 ～ロボット支持台の関する要件～”, 信学技報 vol. 112, no. 372, pp. 105-110, (EMCJ2012-120), 2013 年 1 月
- [2] 村上 真之, 池田 博康, “移動ロボットのイミュニティ評価用試験治具の作製”, 信学技報 vol. 111, no. 205, pp. 43-48, (EMCJ2011-79), 2012 年 9 月
- [3] 村上 真之, 池田 博康, “機能安全を導入した生活支援ロボットのための放射 RF 電磁界イミュニティ試験システムの開発”, 信学技報 vol. 112, no. 372, pp. 111-116, (EMCJ2012-121), 2013 年 1 月
- [4] 風間 智, 池田 博康, 村上 真之, “放射 RF 電磁界印加時のロボットの安全機能の検証”, 信学技報 vol. 113, no. 368, pp. 27-30, (EMCJ2013-105), 2013 年 12 月
- [5] 村上 真之, 池田 博康, “生活支援ロボットの安全とイミュニティ評価”, 月刊 EMC 第 26 巻 第 5 号, pp. 89-106, 2013 年 9 月
- [6] 風間 智, 池田 博康, “コヒーレンスを用いた無線通信に影響を与える雑音源の特定”, 信学技報 vol. 113, no. 218, pp. 31-34, (EMCJ2013-54), 2013 年 9 月

[7] Satoshi KAZAMA, Hiroyasu IKEDA, “Determination of Noise Sources Affecting Wireless Communications” , The IEEE Electrical Design of Advanced Packaging & Systems symposium (EDAPS) , IEEE Part Number: CFP13EDP-USB, ISBN: 978-1-4799-2312-0, pp. 209 - 212., 2013-12

4.5.5 機能安全文書テンプレート [産総研]

4.5.5.1 背景

生活支援ロボットの制御系に対してリスク低減のために機能安全への対応が求められる場合がある。制御系の誤作動が利用者および周囲にとってハザードとなる場合であり、制御系が生活支援ロボットの本来機能の一部を構成している場合、または、生活支援ロボットの安全状態の維持および達成のために設けられた機能である場合がある。

機能安全への対応には、国際規格として制定されている IEC 61508 等の機能安全規格に準拠した開発を行う必要となる。機能安全規格は、安全に配慮した開発プロセスを予め計画した上で、計画に則って設計および検証を行い、開発文書を作成していくことを求めている。しかしながら、規格の要求事項は膨大であったり、作成すべき文書が大量であったりして、機能安全規格への準拠は必ずしも容易ではない。

4.5.5.2 目的

機能安全文書テンプレートは、機能安全開発において必要となる主な 3 つの文書について、記述すべき内容を示すことで、作業の効率化を図るものである。

機能安全規格では通常的设计・開発に加えて特に、以下の作業を要求している：

- a) 安全ライフサイクルに従った計画的かつ段階的作業、
- b) 各ライフサイクルフェーズに対する検証および最終的な安全妥当性確認、
- c) 必要な安全要求および安全機構の設計における実装。

開発者はこれらのエビデンスとして、以下の文書を整備する必要がある：

- a) 機能安全管理計画
- b) システム検証および安全妥当性確認計画
- c) 機能安全コンセプト

機能安全テンプレートの目的は、

- a) これらの 3 つの文書において記載を検討すべき項目を示す。
- b) 記載例を示す。
- c) 個々のプロジェクトにおける開発文書のベースを与える。

なお、開発および規格準拠のために必要な記載項目は、開発プロジェクトの範囲によって異なるため、プロジェクトに合わせて見直す必要があることに留意されたい。

4.5.5.3 成果

上記に沿った機能安全文書テンプレートを作成した（付属書 D 参照）

4.5.6 故障注入による機能安全の確認試験実施例 [JARI]

4.5.6.1 目的

ロボットを構成するハードウェア及びソフトウェアを含む全ての要素が統合された状態において、妥当性確認計画に沿った機能安全の妥当性をハードウェアへの故障注入によって確認する。すなわち、部品の故障が発生した場合であっても、設計者が意図した動作を行うことを確認するものである。

4.5.6.2 研究開発の経緯

ソフトウェアまたはコンポーネント単体における故障注試験に加えて、両者を統合した状態での試験が必要となる。実際の生活支援ロボットの安全機能は多様であるために、試験の詳細な内容は製品ごとに異なるが、共通な手順は開発しておく必要がある。そこで、模擬ロボットを例にとりて、統合状態での故障注入試験を試行して、その手順を整理した。

4.5.6.3 試験装置

図 4.5.5-1 に試験装置を示す。電圧/電流発生器は、ロボットへの電源や、回路や配線への電圧または電流の故障注入に用いる。また、多チャンネル DMM は、回路や配線のショート/オープンを行う。これらの装置を作動させるタイミングを制御する装置として制御 PC を備える。

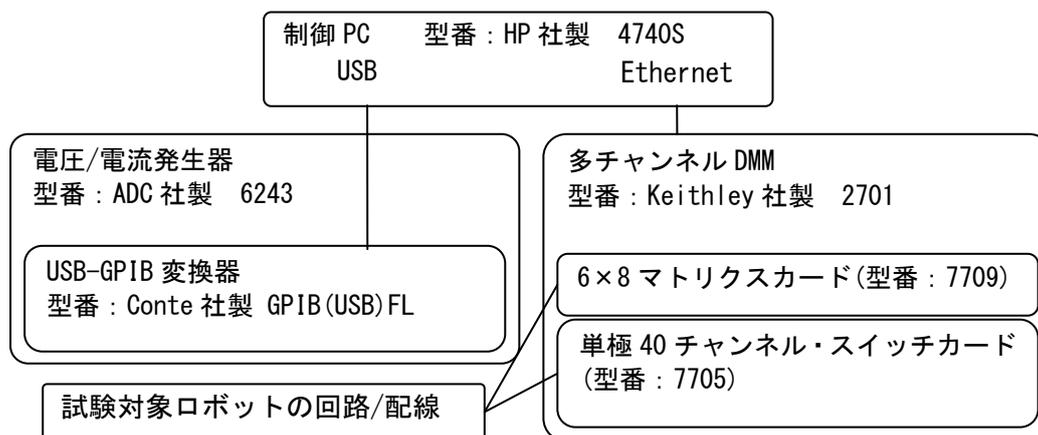


図 4.5.6-1 試験装置

4.5.6.3 試験方法

模擬ロボットを用いた試験の例示を交え、試験方法を説明する。なお、模擬ロボットの基本動作および回路は図 4.5.5-2 に示すとおりである。

ラインコース上を走るライトレースを行う際、
ロボットには4つの状況があります。

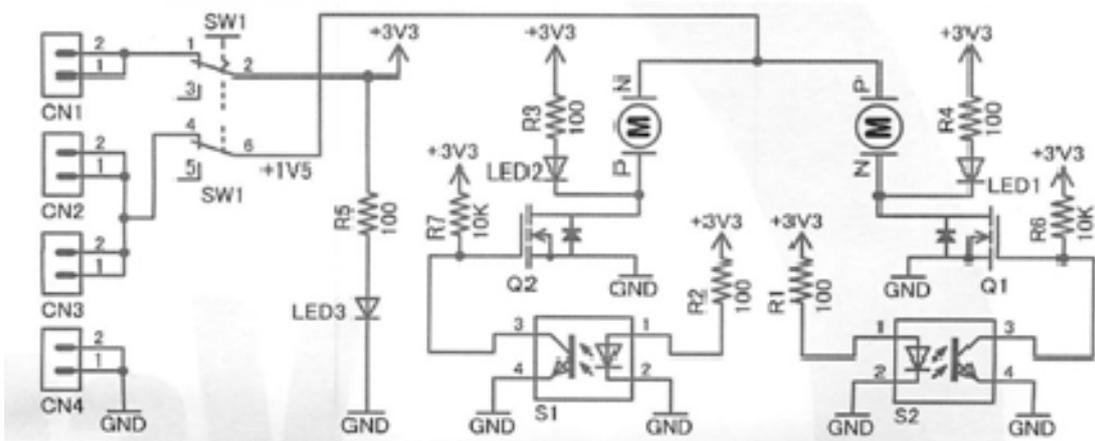
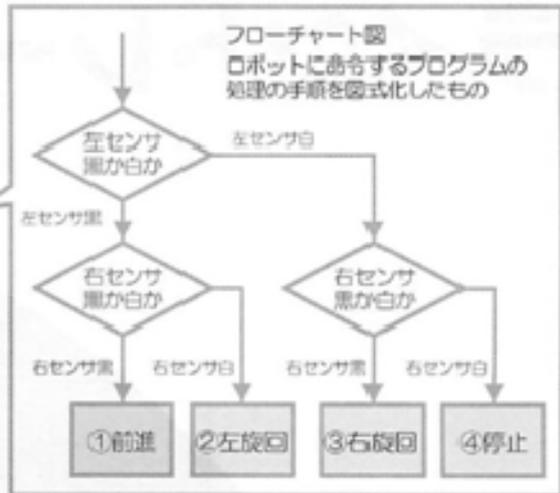
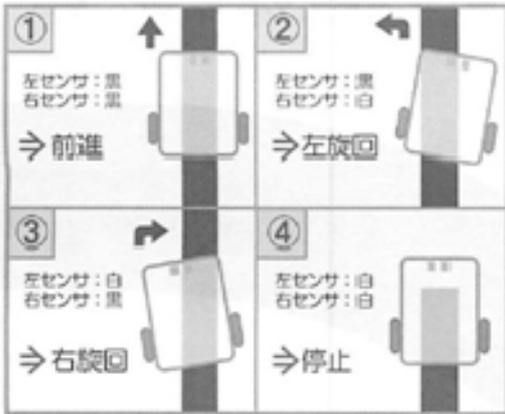


図 4.5.6-2 模擬ロボットの基本動作および回路図

①故障注入箇所の決定

FMEA による故障モードから故障注入箇所を決定する。表 4.5.5-1 に模擬ロボットの FMEA を例示する。赤外線センサによるライン検知から、左右モータの駆動までを安全関連系と考え、赤外線センサ(S1, S2), N型 FET(Q1, Q2)に関する FMEA を実施した。故障注入箇所は、FMEA において、安全側故障となる故障とした。

表 4.5.6-1 模擬ロボットの FMEA 例

部品	端子	故障	モータ電圧	ロボット動作	安全/危険側故障
S1	1	オープン	電圧1.5V固定	右カーブにおいて、左方に逸脱 M2駆動固定→S2左方逸脱(M1停止)	危険
	2	同上	同上	同上	危険
	3	同上	同上	同上	危険
	4	同上	同上	同上	危険
	1-2	ショート	同上	右方に逸脱した後、ラインに復帰 ①M2駆動低下→②S2右方逸脱(M1停止)→③S2ライン復帰(M1駆動) ②, ③の繰返し	危険
	3-4	同上	電圧ゼロV	右方に逸脱した後、停止 M2駆動停止→S2右方逸脱(M1停止)	安全
	1-3	同上	同上	同上	安全
	2-4	同上	影響なし	影響なし	安全
	1-4	同上	1-2ショートに同じ	1-2ショートに同じ	危険
	2-3	同上	3-4ショートに同じ	3-4ショートに同じ	安全

部品	端子	故障	モータ電圧	ロボット動作	
Q2	D	オープン	電圧ゼロV	右方に逸脱した後、停止 M2駆動停止→S2右方逸脱(M1停止)	安全
	G	同上	オープン前の状態を維持	オープン前の状態が、駆動中の場合、右カーブにおいて、左方に逸脱 M2駆動固定→S2左方逸脱(M1停止)	危険
	S	同上	電圧ゼロV	Dオープンに同じ	安全
	D-S	ショート	電圧1.5V固定	右カーブにおいて、左方に逸脱 M2駆動固定→S2左方逸脱(M1停止)	危険
	D-G	同上	電圧ゼロV	Dオープンに同じ	安全
	G-S	同上	電圧ゼロV	Dオープンに同じ	安全

②試験の実施

FMEA を元に、部品への故障注入と安全関連系の出力値の計測を行う。例として、模擬ロボットの部品 S1 の端子 3-4 間のショートの場合、単極 40 チャンネル・スイッチカードの IN 端子と OUT 端子をそれぞれ部品 S1 の端子 3 と端子 4 に接続し、制御 PC によってショート故障を模擬する。なお、モータの出力端子を 6×8 マトリクスカードの 1 行目の Hi および Low に接続し、出力電圧値を計測する。

試験は、路面の色を黒と白の二種類について行った。路面色が黒の条件は、ライン上に赤外線センサがある状況を想定し、通常状態では両輪のモータが駆動する。一方、路面色が白の条件は、ラインから赤外線センサが逸脱した状況を想定し、通常は逸脱したセンサと左右反対側のモータが減速しラインに復帰する動作を行う。

③結果の解析および判定

ロボットへの配線または回路への故障注入および出力値の計測を行ったのち、計測結果が FMEA による設計者の意図した動作であるか、を確認する。

模擬ロボットの例では、部品 S1 の端子 3-4 間のショートの場合、右側のモータ (M2) が停止し、ラインを逸脱した直後に左側のモータ (M1) も停止するため、ロボットとしては停止するとある。

図 4.5.5-3 にモータ出力電圧の計測結果を示す。2 秒時点で部品をショートさせた結果、路面色が黒の場合において、モータ出力電圧がゼロとなった。また、路面色が白の場合は、試験の開始時点から出力電圧がゼロであった。すなわち、実際のラインレースによる走行場面において、部品 S1 の端子 1-3 間がショートしても、ラインから逸脱すると同時にロボットが停止することを意味し、設計者の意図に沿ってロボットが動作することを確認した。

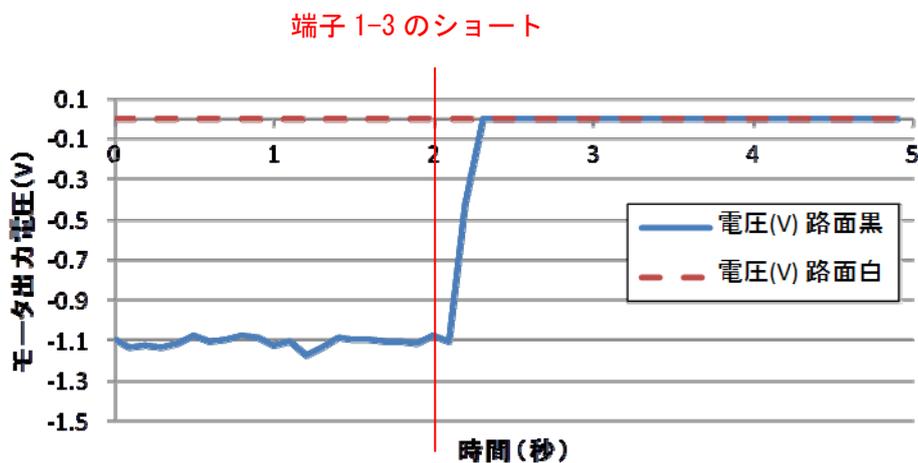


図 4.5.6-3 模擬ロボットの基本動作および回路図

4.6 試験の実績

プロジェクトに参加するロボット開発者のロボットについて、安全検証試験を実施した。その主な実績を、表 4.6-1 に示す。

表 4.6-1 安全検証試験の実績

	移動作業型	搭乗型	装着型
	5 機種	4 機種	2 機種
感電試験		✓	✓
騒音試験		✓	
表面温度試験	✓	✓	✓
衝突安全性試験	✓	✓	
接触安全性試験			✓
温湿度および振動環境耐久性試験	✓	✓	✓
走行耐久性試験	✓	✓	✓
耐荷重試験		✓	✓
耐衝撃試験	✓	✓	
静的安定性試験	✓	✓	
動的安定性試験	✓	✓	
安全関連光学センサの機能試験 (環境認識性能試験)	✓		
障害物検知対応性能試験	✓	✓	
EMC試験	✓	✓	✓
故障注入試験 (機能安全確認試験)	✓		

5. 国際標準化活動 [JARA・産総研]

5.1 国際標準化の目的

生活支援ロボットの安全性検証手法の国際標準化は、今後整備される安全性認証制度に我が国のロボット技術を最も効果的に反映させることを目的とする。このために国際標準化検討WGを設置して活動を行った。

標準規格は「ものの形状・寸法・性能・品質・試験法などを統一して、生産・使用の便を図るために公的に定められる規格」(大辞林 第二版)と定義される。「標準」、「規格」、「標準規格」の3つは同義であり、英語では standard である。標準規格を定める主な意義は以下であるとされる。

- (1) (取引での基準の統一による) 相互関係の促進
- (2) 互換性の確保やインタフェースの整合
- (3) (量産効果を期待した) 多様性の調整
- (4) 適切な品質の確保

特に(4)に関しては規格で規定される水準の品質が達成されているか否かが商取引上重要になるため、規格が定める品質は客観的に検証可能でなければならない。ここでいう品質には安全性が含まれる。品質が客観的に検証可能であるためには具体的な要件とその要件をテストする試験方法の両方が規格化されていなければならない。一般に安全認証と呼ばれるものは安全規格への適合性認証のことであり、従って安全認証システム確立のために安全性検証手法を開発する場合にはその基準や手順を形式的に 明文化した安全認証規格を整備しなくてはならない。

標準規格には様々な種類があるが、これらの関係には構造がある。国際規格には他の規格に優先する国際条約があるので、我が国による生活支援ロボットの標準規格化は国際規格に対して行うことができれば最も効果が高い。国際規格とは通常、ISO 規格と IEC 規格、ITU 規格の3つであると解釈されており、それぞれ国際標準化機構 (ISO)、国際電気標準会議 (IEC)、国際電気通信連合 (ITU) が策定団体である。

1995年にWTO(世界貿易機関)の加盟国間でWTO/TBT協定(貿易の技術的障壁に関する協定)が発効した。WTO/TBT協定は「強制規格は、気候上の理由など正当な理由が無い限り、国際規格を基礎として作成しなければならない」ことなどを定めている。WTOは貿易の自由化を推進する国際機関であり、日本を含め153カ国が加盟している。この結果、国際規格は非常に強い影響力を持つようになり、逆に国際規格に明らかに矛盾しているような各種規格は存在意義がほとんどなくなった。これを受けて日本では同年に閣議決定された「規制緩和推進計画」でJIS規格の国際標準への整合化が盛り込まれた。例えばロボットの安全規格をJIS規格として整備したとしても、ISO規格で同様の規格が制定された場合、速やかに修正して整合させることが求められる。従って国家間の技術競争があり得る分野で安全の認証規格を整備する場合は国際標準を目標とする事が有意義である。安全規格には安全要件と試験方法を一つの規格票にまとめる場合と、それぞれ別個の規格にまとめる場合があるが、本プロジェクトではISO 13482を安全要件の規格と位置づけ、試験方法はここに提案せずに別規格「NEDO試験方法TS」としてISOに国際標準化提案をした。

5.2 ISO 13482

ISO13482:2014 "Robots and robotic devices - Safety requirements for personal care robots" は生活支援ロボットの安全性に関するISO規格であり、NEDO生活支援ロボット実用化プロジェクトの研究開発成果を反映したものである。最終原案の段階で本文8章と5つの付属書からなり、英語版は全82ページからなる。

同規格でスコープに入っているものは以下の3タイプのロボットである。

- ・モバイルサーバントロボット
- ・搭乗型ロボット
- ・身体アシストロボット

この規格は機械安全の ISO 規格体系の中でタイプ C 規格に分類されるものである。タイプ C 規格は原則として上位のタイプ A 規格, B 規格に整合する形で, ある特定の種類の機械に関する全ての危険源について必要な保護方策を記述することを目的とする規格である。ただし生活支援ロボットの危険源は不確定要素が多く他の機械類と同じように全てを列挙する事はできないため, 本規格の構成はまず 4 章でリスクアセスメントに基づくスリーステップメソッドを要求して, 続く 5 章で典型的な危険源に対する適切な保護方策の要件を提示している。6 章では安全関連の制御系の安全要件を独立して記述している。

本規格案は 2006 年 6 月の SC2 総会でアドバイザリーグループの推奨に基づき規格策定作業開始が決議された。翌 2007 年 6 月に日本は目次案を提出し, これを基礎として英国を議長とするプロジェクトチーム ISO/TC184/SC2/PT2 にて検討が行われた。2009 年 2 月 19 日に新規作業項目提案 (NP) が承認され, ISO/TC184/SC2/WG7 での扱いとなった。2010 年 2 月 4 日に委員会原案 (CD) が承認され, 2012 年 9 月 26 日に 2 度目の規格原案 (DIS) が承認された。2013/12/03 に最終原案 (FDIS) が承認され, 2014 年に国際規格となる。同委員会に対応する国内の審議団体としては (社) 日本ロボット工業会が指定されている。

5.3 NEDO 試験方法 TS 原案

現在は ISO/TC 184/SC 2/WG 7 で NP 提案準備中のためまだ正式な規格番号が発行されておらず, 便宜的に「NEDO 試験方法 TS 原案」または単に“test methods”と呼ばれている。本プロジェクトで開発された安全性試験方法のうち新しい試験規格が必要だと判断された 18 の試験について, 原案を本プロジェクトで開発し 2013/06/25 の ISO/TC184/SC2/WG7 ブリストル会議において, 同 WG の次期作業項目として承認された。今後 ISO/TC 184/SC 2 から新規作業項目提案承認を受けて技術仕様書, 規格の順に発行される見込みである。

NEDO 試験方法 TS 原案は 2012/10/01 に第 1 版が完成し, 2012/12/17 に本プロジェクトの全体連絡会で提案が承認された。翌年 2013/01/08 に WG7 国内対策委員会で日本提案として提出する事が承認され, 2013/01/31 に WG7 サンフランシスコ会議にて WG7 に提出された。提出時の原案は全 14 章 34 ページ, タイトルは“Robots and robotic devices -- Safety-related test methods for personal care robots”である。

5.4 国際標準化の活動

本プロジェクトの国際標準化活動では安全性検証手法の開発について, 内容を安全性基準と安全性試験方法とに区別し, 前者を ISO13482 として, 後者を新規の安全性試験規格として標準化をしている。ISO13482 の審議はプロジェクト開始当時に進行中であったので, 進行中の議論の中で提案活動を行った。安全性試験規格は国内で合意形成をした上で 2013/01/31 の WG7 サンフランシスコ会議で日本提案として原案を提出した。いずれも今後国際標準として発行されて日本と世界のロボット技術の発展に貢献する見込である。

本プロジェクトの主な国際標準化活動を表 5.4-1 に示す。

表 5.4-1 本プロジェクトの主な国際標準化活動

日時	活動	内容
2010/02/15-17	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#11 (オランダ)	NEDO プロ全コンソよりコメントをとりまとめて提出
2010/02/24	NEDO プロ 国際標準化検討 WG	NEDO プロジェクトで機能安全技術への対応強化

	(機械振興会館)	することを検討
2010/06/01	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2010/06/21-23	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#12 (パリ)	研究開発中の安全性検証手法との整合性を確認 してコンソ 1 より修正コメントを提出
2010/08/30-31	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#13 (名古屋)	研究開発中の安全性検証手法との整合性を確認 してコンソ 1 より修正コメントを提出
2010/09/13	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2010/10/25-26	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#14 (ブダペスト)	研究開発中の安全性検証手法との整合性を確認 してコンソ 1 より修正コメントを提出
2010/12/21	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2011/01/24-26	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#15 (ウェリントン)	研究開発中の安全性検証手法との整合性を確認 してコンソ 1 より修正コメントを提出
2011/02/25	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2011/06/02	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2011/06/20-21	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#16 (ロサンゼルス)	研究開発中の安全性検証手法との整合性を確認 してコンソ 1 より修正コメントを提出
2011/08/03	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2011/09/26-28	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#17 (ベルリン)	研究開発中の安全性検証手法との整合性を確認 してコンソ 1 より修正コメントを提出
2011/12/16	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2012/02/6-10	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#18 (オランダ)	研究開発中の安全性検証手法との整合性を確認 してコンソ 1 より修正コメントを提出 各国の ISO 委員に日本での NEDO プロ活動を紹介
2012/02/10	ISO/TC184/SC2/WG8 MEETING#17 (オランダ)	安全性試験方法を提案するために調査
2012/02/21	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2012/04/23-27	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#19 (東京)	各国の ISO 委員の安全検証センター見学会を実施 見学会で WG7 (安全性), WG8 (試験方法) の両 議長に規格提案を打診
2012/6/7	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2012/07/09-13	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#20 (ミラノ)	WG7 で日本と独がそれぞれ安全性試験方法の提 案をすることを宣言
2012/07/11-12	ISO/TC184/SC2/WG8 MEETING#18 (ミラノ)	WG8 では安全関連の議題を扱わないことを確認
2012/08/30	試験方法検討 WG (つくば)	試験方法の規格化作業開始に関する内部向け説 明会を開催
2012/09/05	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2012/10/15-19	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#21 (ソウル)	FDIS 審議 研究開発中の安全性検証手法との整合性を確認 してコンソ 1 より修正コメントを提出 ISO13482 以降の新規作業項目提案 (NP) が募集さ れる 日本は試験方法を独と共同提案することを確認
2012/10/22-23	ISO/TC184/SC2/WG8 MEETING#19	提案する安全性試験方法と WG8 で策定する性能

	(ソウル)	試験方法規格との整合性を調査
2012/10/31	(国際標準化検討 WG 活動)	試験方法 TS 草案第 1 版 (NEDO コンソ 1 草案) 完成
2012/11/20	国際標準化検討 WG ISO 国際標準化セミナー	試験方法研究開発担当者を対象とした規格執筆要領の勉強会
2012/11/22	(国際標準化検討 WG 活動)	試験方法 TS 草案第 2 版完成 WG7 独委員に共同提案原案として送付
2012/11/28	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	試験方法 TS と 傷害耐性基準 TR の日独共同提案準備作業を動議して承認
2012/12/10	(国際標準化検討 WG 活動)	試験方法 TS 草案第 3 版完成 試験方法 TS 草案を NEDO プロ全体連絡会メンバーに回付 独委員に共同提案原案の更新版として送付
2012/12/18	NEDO プロ 全体連絡会	試験方法 TS 草案について全コンソから提出されたコメント 250 を処理 試験方法 TS 草案を NEDO プロ試験方法 TS 原案として国内対策委員会に提出する事を承認
2012/12/26		NEDO プロ試験方法 TS 原案の 250 コメントを解決 NEDO プロ試験方法 TS 原案を国内対策委員会に提出
2013/01/08	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	NEDO プロ試験方法 TS 原案のコメントを処理 試験方法 TS 日本原案として ISO 国際会議に提出する事を承認
2013/01/24	(国際標準化検討 WG 活動)	日本草案として WG7 事務局へ送付 独委員に共同提案原案の更新版として送付
2013/01/29-30	ISO/TC184/SC2/WG8 MEETING#20 (サンフランシスコ)	提案する安全性試験方法と WG8 で策定する性能試験方法規格との整合性を調査
2013/01/31-02/01	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#22 (サンフランシスコ)	試験方法 TS 日本原案プレゼン 5 つの新規作業項目提案 (NP) の提案が行われる
2013/06/25-26	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#23 (ブリストル)	試験方法 TS 日本原案プレゼン 5 つの新規作業項目提案のうち日本提案と英国提案の選択となり両者並行作業が議決される
2013/06/27	ISO/TC184/SC2/WG8 MEETING#21 (ブリストル)	提案する安全性試験方法と WG8 で策定する性能試験方法規格との整合性を調査
2013/10/08	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2013/10/18-19	ISO/TC184/SC2/WG8 MEETING#22 (北京)	提案する安全性試験方法と WG8 で策定する性能試験方法規格との整合性を調査
2013/10/21-23	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#24 (北京)	日本提案と英国提案の今後の進め方について協議 試験方法 TS 原案のコメント処理
2014/02/03	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2014/02/17-19	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#25 (サンセバスチャン)	(予定)

6. 生活支援ロボットの安全に関する法律と制度の調査 [MSTC]

6.1 調査研究の背景と目的

生活支援ロボットを実用化するために考慮すべき法律と社会制度を、欧州と日本を中心に国内外の公開情報を基に調査し、この調査の結果に基づいて法制度の検討を行った。本調査研究の詳細を付属書に整理した。付属書は下記の4分冊から構成される。

付属書 F.1 生活支援ロボットのための法律制度に関する需用調査

付属書 F.2 生活支援ロボットのための日本の法律制度の調査

付属書 F.3 生活支援ロボットのための海外の法律制度の調査

付属書 F.4 生活支援ロボットのための安全認証に要求される要件の調査

前期 (H21～H23) は、生活支援ロボットの安全性検証手法をグローバル展開する上で考慮しなければならない法律や社会制度の課題について、欧州と日本を中心に国内外の情報を基に調査した。欧米の安全の考え方と、そこから作り出された法制度を整理して、生活支援ロボットの安全認証制度が欧米やアジア諸国に与える意義を探った。その結果、世界は、” Tested Once Accepted Everywhere” に向けて動いており、日本のロボット技術に対する期待も大きいことから、当該分野においても相互認証協定に基づく認証手続きの合理化が望まれている事が分かって来た。

後期 (H24～H25) は、日本発で日本が先導していくべき生活支援ロボットの安全認証機関の運営に資すると共に、安全認証事業のグローバル展開を可能とする為には、果たして何が求められるかについて調査研究した。具体的には、生活支援ロボットの適用が期待されるサービス分野を対象として、我が国の安全認証制度が真に国際的にも認知され、デファクトスタンダードとなるための戦略を示した。その為に必要な、どのように実現していくかを示した。

6.2 各年度の成果

6.2.1 H21 年度

H21 年度は、調査研究委員会を設置すると共に、シンクタンクを活用して法制度に関する需用調査を行った。

(1) 調査研究委員会の設置と運営

当該分野の有識者で構成される調査研究委員会を設置して年6回の定例会議を開催し、調査研究に関する審議を行った。プロジェクト・コンソーシアムのメンバをオブザーバに加えて、コンソーシアムと一体化した運営を行った。また、ロボットビジネス推進協議会とも協力関係を持ちながら調査研究を実施した。

(2) 調査研究活動

調査研究委員会では、図 6. 2. 1-1 に示す調査研究の方法と、その成果を公開データベースで情報発信することを決定した。また、図 6. 2. 1-2 に示す調査研究の範囲を決めた。本調査研究の範囲は、図 6. 2. 1-2 に示す様に、保険制度、民事法、安全技術、安全規格、機能と安全性のトレードオフ、行政法、公的給付制度、社会的責任にまで及ぶ。そこで、本調査研究では、技術と社会制度の両面から、社会、官、メーカ、ユーザ各々の立場を配慮した多角的な検討を行うことが要求される。そこで、生活支援ロボットのメーカとユーザを対象として、実用化に向けた法律、制度、安全規格に対する需用を調査した。本調査の結果を付属書 F.1 に整理した。また、国内法制度の調査も開始した。

調査研究の方法と発信

- I 法律制度への需用調査
- II 日本の法律制度の調査
- III 海外機関への訪問調査
- IV 安全認証に要求される要件の調査



図 6.2.1-1 調査研究の方法と発信



図 6.2.1-2 調査研究の範囲

6.2.2 H22年度

H21年度に実施した、生活支援ロボットの法律、制度、安全規格に対する需用調査を参考情報として、生活支援ロボットと関係が深い日本の法律、制度（保険制度、導入助成制度等）、安全規格を調査して、生活支援ロボット関係法令集をまとめた。表 6.2.2-1 に法令集が取り上げた法律と制度を示す。これを、ロボットビジネス推進協議会のホームページにも掲載した。生活支援ロボット関連法の条文の選択と解釈にあたっては、誤りや誤解の無い様、ロボット関連法に詳しい弁護士を委員に迎えて監修を受けた。法律や制度には、生活支援ロボットの安全性を確保するための規制や基準の他、医療機器の承認審査制度、福祉機器を公的給付制度の対象種目にするための申請制度などがある。日本では、自動車や車いす等の機械の安全性を確保する為に、JIS規格を法律から引用したり、法施行規則や告示等で数値条件を示して安全に関する法的拘束力を高めたり、福祉機器が

障害者や高齢者向け福祉制度の貸与種目に認定される条件を設定するなど、様々な方法で安全を確保することが行われている。しかしながら、将来実用化される生活支援ロボットは、自動車の様に道路交通法施行規則で仕様や基準等を具体的な数値で示されたり、車いすのように告示により福祉用具貸与種目としての仕様を定めたりされていない。そこで、現行の法施行規則や告示等が、将来実用化される生活支援ロボットに与える影響を想定した前述の法令集を作成することにより、現行の法律や制度を活用し易くした。生活支援ロボットに関する国内の法律と制度を、付属書 F.2 に整理した。

表 6.2.2-1 付属書 F.2 に収録した生活支援ロボット関連法と制度

所轄省庁	種類	法律や制度の名称
経済産業省	民法	製造物責任法
	行政法	電気用品安全法と消費生活用製品安全法
厚生労働省	制度	玩具の安全基準と ST マーク
	行政法	労働安全衛生法
		薬事法
		介護保険法
		福祉用具の研究開発及び普及の促進に関する法律 障害者の日常生活及び社会生活を総合的に支援する為の法律
国土交通省	行政法	道路運送車両法
		高齢者、障害者等の移動等の円滑化の促進に関する法律
警察庁	行政法	道路交通法
		不正アクセス行為の禁止等に関する法律
消費者庁	行政法	個人情報保護法
総務省	行政法	電波法
	制度	電波法が定める無線局開局の免許制度

6.2.3 H23 年度

H23 年度は、日本と米国や欧州の法制度の比較調査を行った。現行の法律や制度の多くは、生活支援ロボットを想定されていない。想定されていない場合でも、一番近い現行法で規制された場合に、規制の対象となる生活支援ロボットが出てくる。このような法制度との関係が深いロボット分野について海外（EU 諸国、米国、アジア諸国）の状況を調査した。EU 諸国の調査は、国策として生活支援ロボットの実用化に取り組んでいるデンマーク王国、生活支援ロボットの法制度を研究しているドイツの法科大学、UL DEMKO、ドイツ Oldenburg リハビリセンタなどの訪問調査を行った。米国の調査は、日本に先行して生活支援ロボットを事業化している Segway Inc., Gecko Systems Inc., UL（認証機関）、RIA（ロボット業界団体）、2013 年から生活支援ロボットの展示を企画していたシカゴ科学博物館などの訪問調査を行った。さらに、欧米アジア諸国における安全の考え方を明らかにするために、調査機関を利用して、ドイツ、フランス、アメリカ、カナダ、韓国、中国、台湾、インドのヒアリング調査を行った。これらの海外調査の詳細を付属書 F.3 に整理した。

6.2.4 H24 年度

H24 年度は、アジア新興国における生活支援ロボットの潜在市場を分析した上で、世界各国の安全認証制度のポテンシャルを総合的に比較検討することを目的として、EU が実施した安全認証制度に関する調査レポート、企業の開発現場における安全設計事例、米国と EU の安全に関する法制度の比較論文などに基づく欧米と日本の比較調査を行った。調査結果から、日本と欧米の考え方の違いがある程度明確化できた。我が国の安全認証制度は、欧

米社会と比べると普及が遅れている。この遅れを如何にして取り戻すか、その対策を考えることが本調査の目的である。そこで、今、仮に、日本人、もしくは日本社会の安全認証制度への受容性を考えるとき、不確定因子となる文化的な違いの影響度が小さく、時間的な遅れの影響度が大きいと仮定できるならば、欧米の現状を見極めた後は、それを日本と比較して、良い点、悪い点を明確化した上で、良い点を伸ばし、悪い点を無くす施策を考えれば良い。それで、日本社会の安全認証制度への受容性を高めて、普及を加速できるはずである。そこで、付属書F.4の第1部をこの方針で整理した。

6.2.5 H25年度

欧米人と比べて日本人は、PLに縛られずに果敢にチャレンジするメンタリティが不足していると指摘される。これは、生活支援ロボットの産業振興を阻害する要因の一つだと考えられる。法制度の観点から、この問題を解決する方策は二つある。

一つ目の方策（以下では「方策A」と記載）は、H24年度に提案した方策であり、日本人を啓発して欧米的な考え方を身につけた上で、欧米の法体系に倣うことである。二つ目の方策「方策B」は、現在の日本人向けに現行の法体系を変えることである。

もしも、日本人の安全の考え方が、欧米人と比べて遅れていることが、メンタリティの違いを生み出す主要原因であり、欧米人のメンタリティに向かっているなら、方策Aを選択することができる。

一方、欧米人と日本人のメンタリティに、越え難い隔たりがあるとすれば、啓発は困難なので方策Bでなければならない。

欧米人のメンタリティには、安全に関する事前責任が果たされていれば、例え事故が発生したとしても、免責されるべきであるという「State of the artの信念」がある。すなわち欧米人は、その時代において十分に責任を果たしたと見なされるレベルの技術的配慮が行われていても、リスクが残留することを認めている。リスクが残留していれば、一定の確率で事前には想定不可能な事故が発生することになるが、その責任を問う事はできないという考え方が一般的通念となっている。これは法律専門用語で公正な手続きを取ることを優先し、その結果に問題があっても、それを認めて受け入れるという意味で、「手続き的正義」と呼ばれる。

前述の欧米人の通念は、日本人にも良く理解できる。日本のPL法第四条の免責事由にも「当該製造物をその製造者等が引き渡した時における科学又は技術に関する知見によっては、当該製造物にその欠陥があることを認識できなかったこと。」と記載されている。世界的にも、日本製品の品質と安全性は、安全認証を受けた欧米製品よりも信頼されている。それでも、日本人は、とにかく事故を防止しなければならないと考える。これは「結果的正義」と呼ばれる。「手続き的正義」を行動規範とするか、「結果的正義」を行動規範とするかにより、リスクがある製品との向き合い方が違ってくる。付属書F.4の第2部では、方策Bについて詳細に述べ、第3部では、方策Bを実践する際に、承認審査に対する社会的因子の影響を数理統計的に評価する方法論について述べた。

6.3 今後の課題と発展

我が国において、安全認証を取り巻く環境が整備され、適切な教育が行われ、欧米型のState of the artの信念が育まれるまでは、方策Aで指摘した問題が発生することもやむをえないと考える。粘り強く安全認証の意義を伝え続けなければならない。欧米人と日本人の考え方の違いを説明し、世界は、簡潔で低コストな認証制度の構築に向けて一歩ずつ前進し、認証スキームが目標とする“Tested Once, Accepted Everywhere”に向けて動いているという現実を伝え続けなければならない。

7. 生活支援ロボットの安全に関する情報データベースの開発 [JARA]

7.1 目的と目標

7.1.1 実施計画

実施計画書（平成 25 年度版）では、本項目は「生活支援ロボットの安全認証，評価基準策定につながる安全関連データの収集・蓄積ならびに再利用手法に関する研究開発を行う」ことをミッションとし、「4 タイプの生活支援ロボットについて 5 つの試験項目の基礎試験データの収集を行い，再利用性の観点から分析しデータベースを構築して，ロボット研究開発実施者に提供する。」ことを目標としている。

7.1.2 背景

課題設定の背景として，ロボット研究者間での以下のような要請ないし問題意識の存在が考えられる。

- ・ ロボットの使用による傷害発生状況を分析しロボットの安全設計に利用するために，ロボットに係る事故やインシデント（ヒヤリハット事例）の収集とデータベース化が必要である。
- ・ 過去の反省から，プロジェクト中に産出される安全に関する事項も含む種々の知見の散逸を防ぎ，その再利用を可能にするため，データベース化が必要である。

7.1.3 目標設定

7.1.3.1 開始時の問題点

プロジェクト開始時は，以下の問題があった。

- ・ 試験データのような開発されるロボットに直接かかわるデータは企業機密に属し，共有データベースへの蓄積に適さない。
- ・ 開発段階のロボットの事故・インシデント情報も，機密漏洩や風評被害への懸念から企業から提供を受けることが難しい。
- ・ 生活支援ロボットは新しい分野なので利用可能な既存データが少なく，データ蓄積はプロジェクトの他の研究開発活動の結果を待たざるを得ない。

7.1.3.2 現状に対応した目標設定

前節で示した問題点をふまえ，当初の計画設定を広く捉え，支援の重点をプロジェクト期間中の研究開発支援から今後生活支援ロボットの安全に関する情報を必要とする人々（特に，新規参入する中小企業の技術者等）の支援へと移し，安全な生活支援ロボットの普及に繋がるような安全関連情報提供サイトを開発することを最終的な目標とした。

7.2 開発コンセプトと利用法

システムの開発にあたっては，単にプロジェクトの成果物を掲載するだけでなく，多様な利用のされ方を想定して複数の機能を取り込むこととし，表 7.2-1 に示すような「知る，探す，繋がる」の 3 つのキーワードで提供する機能とコンテンツを整理した。

- ・ 「知る」としてまとめた部分は，情報の提供を行うもので，特に入門者，初級技術者を対象として生活支援ロボットの安全設計から製品認証にいたる事項について基本的知識を提供する。プロジェクトの成果発信もここで行う。
- ・ 「探す」の中核機能は，事故事例等の検索機能であり，事故シナリオの分析やリスクアセスメントの参考にするために中，上級技術者が使用することを想定している。ただし，現状では生活支援ロボットに特化した事故事例収集が困難なことから，生活支援ロボットの安全問題を考える上で参考となり得る既存関連機器，機械の安全関連の公開データベースを検索出来るようにした。

- ・ 「繋がる」の部分では、このサイトを介して生活支援ロボットの安全問題に関心のある人々（上級技術者や研究者など）の間の意見交換やネットワーク形成を支援することを意図している。

表 7.2-1 データ提供システムの基本構成

	知る	探す	繋がる
狙い	ロボットの安全を学ぶ	ロボットの危険を類推する	ロボットの安全を語る
用途	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基礎的知識を学ぶ ・ 情報を手に入れる 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 検索する ・ 詳しく調べる ・ 事故の因果を類推する 	<ul style="list-style-type: none"> ・ SNS 機能 ・ エキスパートが語る ・ エキスパートに尋ねる
コンテンツ	<ul style="list-style-type: none"> ・ プロジェクト成果 ・ 生活支援ロボット及びその安全に関する情報 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 総合検索機能 ・ 事故事例集 ・ リンク 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 掲示板 ・ 利用分析 ・ ブログ（登録者）
対象者	入門者	中級，上級者	全員（上級者がけん引）
全体比重	大	中	小

7.3 システムの実装

システムの構築にあたっては、以下の理由から市販の ECM（エンタープライズ・コンテンツ・マネジメント）ソフト^(注1)を基盤として利用し、不足する機能についてのみ付加的な開発を行った。

- ・ 市販ソフトの機能を利用することで、迅速なシステム立ち上げが可能となる。
- ・ 信頼性、保守性の点で個別開発ソフトよりも優れ、全体コストでも有利である。

（注1）機能面とサポート体制を考慮してマイクロソフト社の SharePoint システムを採用した。

7.4 成果

7.4.1 全体的な目標達成状況

7.2 で述べたコンセプトに基づくシステムを開発し、生活支援ロボットの安全に関する情報提供サイト「生活支援ロボット安全情報センター」（略称 RT-SIC [Rotobt Technology Safety Information Center]）と命名して平成 26 年 2 月末までにインターネット上での公開を実現し^(注2)目標を達成した。

（注2）サイトの URL：<https://www.rtsic.jp/jpn/pcr>

7.4.2 プロジェクト成果の掲載

コンソーシアム 1 で行われた「生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発」の成果物の提供を受け、解説記事とともにそれらをサイトで閲覧できるようにした。また、資料をダウンロードできるようにした。表 7.4.2-1 に研究開発項目「生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発」関係の成果物の概要を示す。なお、サイトではプロジェクトの成果物以外にも、独自に収集した生活支援ロボット関連の情報を掲載している。

表 7.4.2-1 掲載成果物（「生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発」関係）

研究開発／活動内容	掲載主要成果物
認証スキーム	概説，認証パイロットスタディ概要
安全設計支援ツール	設計コンセプト自己チェックシート，ロボットタイプ別リスクアセスメントひな形，機能安全対応ソフト事例（PROH-SIL），および関連解説書類
安全検証試験方法	生活支援ロボット安全検証センターで実施する試験の概要
国際標準化活動	国際標準化動向の概説
関連法規制等の調査	（一財）製造科学技術センターが実施した調査研究報告書

7.4.3 その他の開発事項

検索機能に関して，予め登録した外部データベースと本サイトの内の情報を同時一斉検索する機能を付加し（総合検索と命名），作業効率の向上を図るとともに，検索対象を限定することにより規格や法規の検索も可能とした。

データマイニング手法の検討については，現時点ではデータマイニングを必要とする固有データの蓄積が十分でないことを勘案し，固有手法の開発あるいは既存手法を用いた分析は行わず，文の形態素解析ツール^{（注3）}を用いて総合検索（S-Search）の検索キーワード文字列を解析し，同義語，類義語を自動蓄積する機能を開発した。十分なデータが蓄積されればユーザの関心の分析を行うことが可能になり，将来データマイニング応用に繋がることを期待される。

（注3）オープンソース形態素解析エンジン MeCab を使用。

7.5 今後の課題

当初目標は達成されたが，このようなシステムの開発と維持に関して重要と考える点を以下に示す。

7.5.1 システム構築の方法

近年，クラウド技術にも見られるように，データ蓄積あるいは各種データ処理に関してネットワークを経由してサービスを提供する技術が発展し，自前のシステムを保持することなく必要な機能を必要な分だけ比較的安価に利用できる環境が出現している。また，CMS（コンテンツ・マネジメント・システム）構築用のオープンソフトも充実し，それらを使用した実績も増え，有力な情報サイト構築手段となっている。今後同様のシステムを開発する場合には，経済性，開発効率の観点からこれらの利用も検討する必要がある。

7.5.2 データ収集体制

本システムのコンテンツで「生活ロボットの安全性検証手法の研究開発」テーマに関わるものは，コンソーシアム1参加メンバーより成果物の提供を受けることができた。しかし，プロジェクトの研究開発項目を超えたより広範なデータの収集は，その労力に見合うインセンティブが働かないので，自発的協力にたよるだけでは限界がある。インシデント情報の収集に関しては，ロボット特区等における実証実験との連携も検討したが，制度が異なることもあり具体的実施までには至らなかった。継続的にコンテンツを充実させ，またデータ更新を行って行くためには，異なるプロジェクト間での横断的協力や，業界団体，関連学会との連携も可能にする，体制構築が必要と考えられる。

7.5.3 システムの管理と維持

セキュリティ対策を含め質の高いデータサイトを維持するには，種々のランニングコストが発生する。また，データシステムが存在価値を保持するには，データの強化・更新が不可欠であり，データを収集し，収集したデータを分析・整理できる専門的知識を持つ要員の確保が必要となる。プロジェクト期間中は，要員を含めプロジェクトリソースの利用

が可能であったが、本データベースのように分野・業界を超える内容を扱うシステムの管理運営は、国等の公的機関あるいは業界横断的機関が行うことが期待される。あるいは、生活支援ロボットの市場が拡大し業界独自の対応が可能になるまでは、各種プロジェクト等を利用した国の支援が必要であろう。

7.5.4 活用のための検証

本システムの開発は、今後生活支援ロボットが普及・発展して行く流の中で、このような安全情報提供サイトが必ず必要とされるという、安全思想、安全技術を先導する側の理念に発している。日本ロボット工業会では、ロボットビジネス推進協議会の協力を得て、このようなサイトの必要性についてアンケート調査を行った。その結果によれば、安全情報提供サイトへの一般的な期待は示されたが、具体的あるいは逼迫した要求は十分には読み取れなかった。その理由としては、生活支援ロボットの市場がまだ広がっておらず、参入企業も少ないことが考えられる。我々は、想定されるニーズに幅広く対応できるようなシステムを構築したが、その有効性を判断するには十分な時間が必要である。そのためにも、先に述べたような支援体制の存在が不可欠であると考えている。

8. 第三者認証および第三者試験体制の構築 [JQA・JARI]

プロジェクト後の事業化に向けた認証機関と試験機関のあり方について検討した。

8.1 認証機関

8.1.1 役割を果たすための開発と成果

製品の適合性評価を行う認証機関に求められる国際規格である ISO/IEC 17065 に準拠したマニュアルと運用体制を構築し、ISO 13482 の第三者認証機関として運用を開始している。また、ISO 13482 発行の約 1 年前の 2013 年 2 月 27 日に、同規格のドラフト版である ISO/DIS 13482 に基づいて CYBERDYNE 株式会社の装着型ロボットである「ロボットスーツ HAL®福祉用」を認証した。更に、2014 年 2 月 17 日にパナソニック株式会社の移動作業型ロボットである「リショナー®」及び株式会社ダイフクの「エリア管理システム」については、生活支援ロボットに应用でき得る技術であることから、ロボティックデバイスとして、それぞれ ISO 13482 に基づいて認証した。

8.1.2 プロジェクト後の運用体制

2014 年 2 月 1 日付けで ISO 13482 が発行し、認証機関としてのマニュアル整備及び体制構築はでき、ISO 13482 に基づいた認証体制の構築はできたが、まだ緒に就いたばかりである。パーソナルケアロボットについては、今後も様々なタイプのロボットが出てくると考えられ、それらに応じた妥当性試験の開発や基準作り等も不可欠になってくる。このため、今後も、研究機関等の関係機関との相互協力による運営体制を維持していく必要がある。

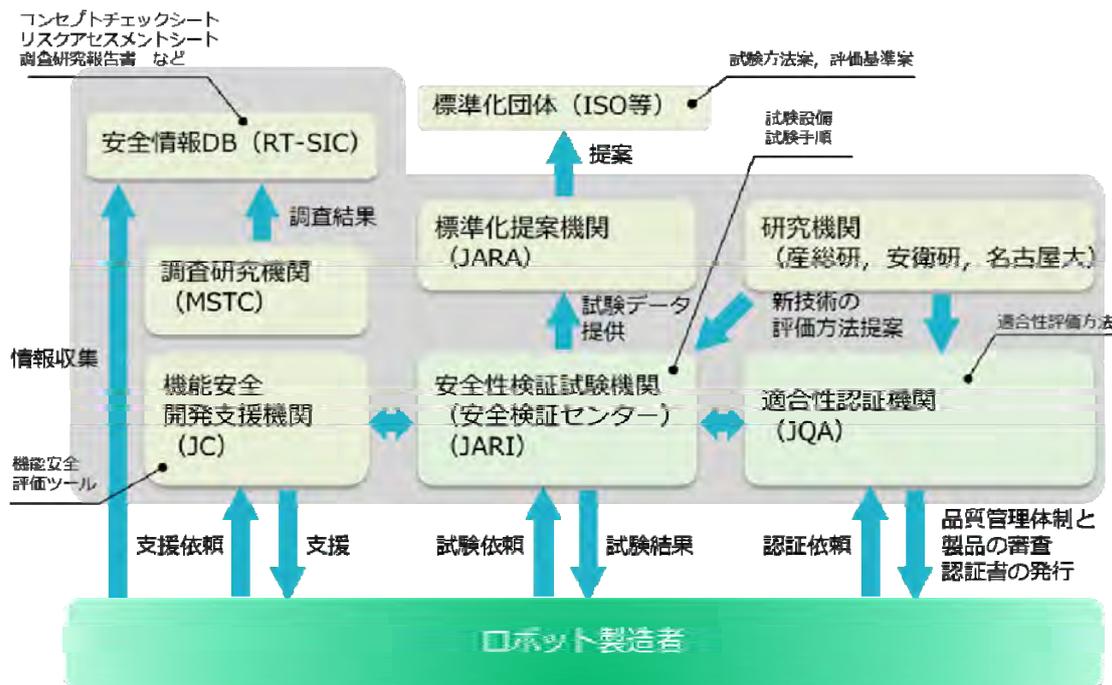


図 8.1.2-1 プロジェクト成果の運用体制

8.2 試験機関

8.2.1 役割

第三者認証における試験機関の役割は、以下の 2 点である。

- ・ 国際的に通用する試験結果取得を可能にする。
- ・ 複数のロボットを共通に試験できる設備を保有することで、メーカーが個別に設備投資するより、コストを削減する。

これらの役割を果たすための準備を、以下の様に実施した。

8.2.2 役割を果たすための開発と成果

(1) 国際的に通用する試験結果取得を可能にするための開発

生活支援ロボット安全検証センターでの試験結果によって第三者認証を得るには、試験結果が国際的に通用することが必要がある。そこで、試験所および校正機関の能力に関する規格である ISO17025 に同センターを適合させるための体制案を策定して構築を開始した(図 8.2.2-1)。

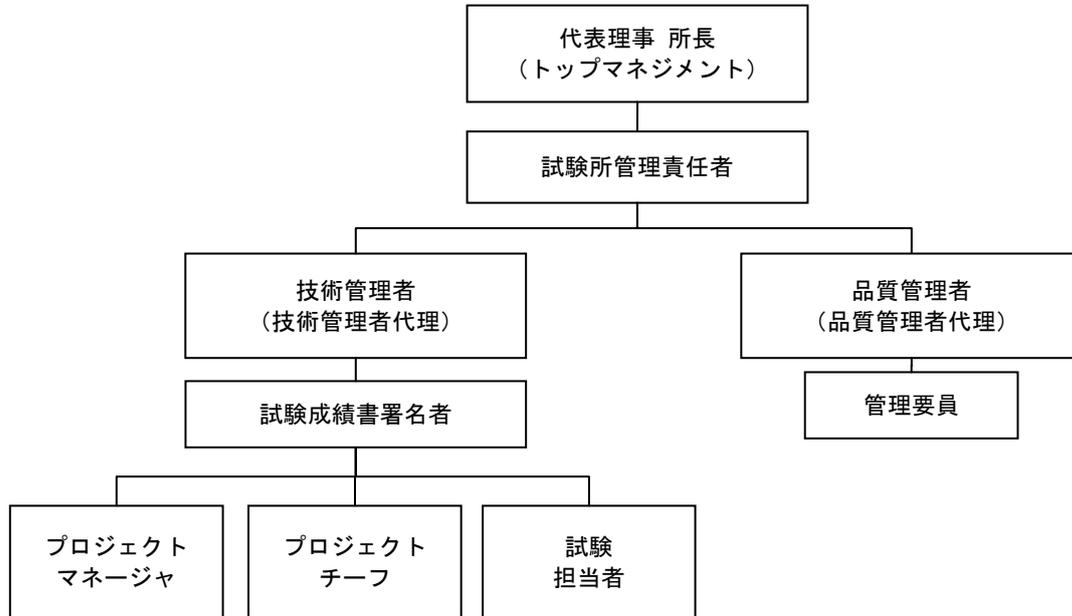


図 8.2.2-1 ISO17025 適合を目指した体制案

また、上記体制を維持するためおよび ISO17025 に適合したトレーダビリティを確保するために必要文書を表 8.2.2-1 の様に抽出し、作成を開始した。図 8.2.2-2 に、作成した文書の例を示す。

表 8.2.2-1 必要文書一覧

文書名
品質マニュアル
組織図
職員リスト
内部監査の記録
マネジメント・レビューの記録
測定の不確かさ推定手順及び算定結果
主要な試験設備のリスト及び配置図
校正証明書, リスト, 社内校正のトレーサビリティ一貫系図
ナンプリング手順書
技能試験結果報告書
試験報告書 (又は、校正証明書) の様式
試験方法手順書一覧
所内試験手順書

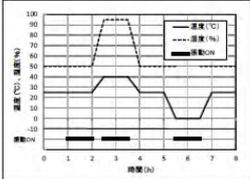
環境試験装置による耐久試験方法(高低温・振動複合試験) 詳細版	
<p>1. 目的</p> <p>槽内に入り得る大きさの、移動型構造体、静止型構造体、人体装着装置、及び、それらの構成部品など(以下、試験体と呼ぶ)の、使用環境(温度)下において、使用時に想定される振動を与えた場合の、性能及び、安全機能の正常性確認、安全性への影響を調べる。</p> <p>2. 適用範囲</p> <p>この規格は、試験体の耐環境安全性能を検証するにあたり、温度ストレスと振動を同時に与えた時の、影響を調べる場合に適用する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 引用規格 <ul style="list-style-type: none"> 直接はなし。I3482の要求事項に対する試験法規格。 関連規格 <ul style="list-style-type: none"> JIS C 60068-2-53、JIS C 60068-2-59 <p>3. 試験条件</p> <p>3.1 試験体</p> <p>試験体は原則電源オン状態で、槽内加振テーブル上に置く、又は吊り具で吊る。試験体が車輪等を有する場合、車輪が空転又は、駆動部が無負荷状態で連続運転できる状態とする。</p> <p>3.2 加振条件</p> <p>試験体に与える振動は、想定される最悪の使用環境において、最高速度で動作した場合に加わる振動波形とする。最悪の使用環境とは、特に指定がない限り、点字パネル(5mm高)を最高速度で定常走行した場合の振動波形とする。</p> <p>使用環境の指定がある場合、振動波形、周波数、振幅、加速度、について確認する。また、振動波形は、垂直、前後、左右方向に分け、加振テーブル上で、試験体の位置や向きを変えて与える。また、1サイクルにおいて、加振・休止のタイミングも決定する。</p> <p>3.3 環境条件</p> <p>温度、湿度の設定は委託元の指定をもとに、温度、湿度の変化速度、持続時間、許容範囲について決定する。指定の無い場合は、高温40又は55℃、低温-10℃、湿度95%を標準値とする。</p> <p>3.4 計測項目</p> <p>電気回路の断絶や、絶縁性を知りたい場合は、イベントデテクタ又は、絶縁抵抗計を接続する。</p> <p>4. 試験準備</p> <p>4.1 事前準備</p> <ul style="list-style-type: none"> 恒温恒湿槽は多大な電力を消費するため、電力使用届けを関係部署に提出する。 試験体の外観写真を撮影する(図1)。 	<ul style="list-style-type: none"> 温度度のステップごとに、指定の温度、湿度、持続時間を入力する。 加振機の運転設定(フラグ処理)を行うため、タイムシグナル(図7、○部)に「1」と入力すると、その期間、加振機が作動する。 温度勾配設定は1.0℃/minが最大なので、それ以上で設定しないこと。 過温度設定機を、試験上限温度の+15~20℃に設定すること(図8)。 <div style="text-align: center;">  <p>図8 過温度設定機</p> </div> <ul style="list-style-type: none"> 指定された温度プログラムがない場合、次を標準プログラムとする(図8)。 <p>高低温・振動複合試験(最高温度40℃、最低温度0℃、最高湿度95%の場合)</p> <p>①25℃、50%で静止(1h)、②25℃、50%(1h)、③40℃、95%まで上昇(0.5h)、④40℃、95%(1h)、⑤25℃、50%まで下降(0.5h)、⑥25℃、50%で静止(1h)、⑦0℃へ下降(0.5h)、⑧0℃(1h)、⑨25℃、50%まで上昇、静止(1h)</p> <p>必要に応じて、各温度パターン間には後処理1h(25℃)を行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> 上記②、④、⑥では振動パターンを再現するために、加振機プログラムとリンクするようにフラグ処理を行う。 <div style="text-align: center;">  <p>図8 温度プログラム例</p> </div> <p>4.4 試験体</p> <p>a) 試験体の事前機能確認</p> <ul style="list-style-type: none"> 試験体の外観に損傷がなく、動作機能、安全機能が正常であることを確認する。必要な場合は、パッ

図 8.2.2-2 作成した文書の例(試験手順書の抜粋)

(2) メーカーが個別に設備投資するより、コストを削減するための開発

a) ロボットメーカーとの協力による設備の選定

ロボットビジネス協議会会員のロボットメーカーに対して、自社のロボットに必要と考えられる試験装置を調査した。結果を表 8.2.2-2 に示す。また、プロジェクト期間中に、メーカーの試作ロボットの試験実施し、各々のロボットに必要な試験項目を検討した。これらの結果を参考に、複数のロボットを共通に試験できる設備を選定した。さらに、本プロジェクトに参加するロボット開発者のロボットの試験を試行することにより、試験に必要なジグなどの開発を行った。

表 8.2.2-2 ロボットメーカーが必要と考える試験装置の調査結果

	必要と考える試験項目（対象ロボットの型別・項目別件数）				
	移動作業型 （操縦）	移動作業型 （自律）	搭乗型	装着型	その他（マニ ピュレータ）
	回答3件	回答4件	回答1件	回答1件	回答1件
感電試験	調査対象外				
騒音試験					
表面温度試験					
衝突安全性試験	3	4		1	1
接触安全性試験	2	2	1	1	1
温湿度および振動環境耐久性試験	3	4	1	1	
耐久性試験	3	3	1	1	
耐荷重試験	1	4	1	1	
耐衝撃試験	1	4	1	1	
走行安定性試験 （静的安定性・動的安定性試験）	2	4	1		
安全関連光学センサの機能試験 （環境認識性能試験）	2	4	1	1	
障害物検知対応性能試験	2	4			
軌道追従性試験	1	3			
操作・情報提示機能試験	3	3	1	1	1
EMC試験	3	4		1	
故障注入試験 （機能安全確認試験）	2	4	1	1	1
緊急停止試験	2	4	1	1	1
挟圧試験	調査対象外				

b) ISO13482 への対応

生活支援ロボットの第三者認証では、パーソナルケアロボットの安全規格 ISO13482 への適合を確認するための試験が結果必要となる。このため本研究では、ISO/TC184/SC2/WG7 における ISO13482 の策定作業に参画することで、同規格の要求事項の決定と試験方法開発、試験装置の整備を同期させて遂行した。これにより、国際的に通用する試験データを得るために共通して必要な試験装置について検討した。

以上の検討から、事業化に必要な試験装置の候補を以下のように選定した。

- ・ 感電試験のためのプローブ
- ・ 騒音試験のための騒音測定系および測定ジグ
- ・ 表面温度測定のための表面温度測定器
- ・ 衝突安全性試験のための牽引装置，衝突用バリア，人体ダミー
- ・ 接触安全性試験のための接触力測定系
- ・ 温湿度および振動環境耐久性試験のための複合環境試験装置

- 走行耐久性試験装置およびロボット固定用ジグ
- 耐荷重試験装置
- 耐衝撃試験装置
- 静的安定性試験装置
- 動的安定性試験設備（平坦路走行試験設備，傾斜路走行試験設備）および走行速度等の測定系
- 安全関連光学センサの機能試験のための人工太陽および測定ジグ
- 障害物検知対応性能試験と装置および障害物
- EMC 試験のための電波暗室，測定装置および試験ジグ

9. ディペンダブルロボティックカートを使った ISO 13482 評価の実例

本事業で開発した認証スキーム（本報告書の第2章）にそって、安全検証と認証手順を実施することで、今後のロボット開発者が ISO13482 適合認証を取得する場合に参考となる事例を提供する。対象として、産業技術総合研究所が開発した搭乗型生活支援ロボットであるディペンダブルロボティックカートを選定した。

9.1 ディペンダブルロボティックカートの概要

ディペンダブルロボティックカート（図 9.1-1）は、研究所建屋内において歩行が不自由な外来者に対して本館内の移動を助けるための電動車いすとして貸し出されることを想定している。

以下の3つの走行モードを有する。

- a) 通常操縦モード：搭乗者が操縦し電動で駆動する、障害物の接近を検知した場合最高速が限定される。障害物に接触したことを検知すると自動で停車しブレーキを作動する
- b) 低速移動モード：障害物に接触しているときに低速で離脱できる。
- c) 手押しモード：動力を切断してブレーキのみ解除し、後ろから手で押して動かす。



図 9.1-1 ディペンダブルロボティックカート

9.2 ISO13482 認証に必要な文書の（リスト付属書 B.1）

安全ライフサイクルごとに、分析や確認などの作業を実施して、それを文書化する必要がある。付属書 B.1 に、作成すべき文書のリストを示す。以下では、ディペンダブルロボティックカートについて作業を実施して、代表的な文書を付属書に例示する。

9.3 安全ライフサイクル「コンセプト」「全体の範囲決定」- 製品企画書の例（付属書 B.2）

始めに、開発する製品のコンセプトを明確にして、製品がカバーする範囲を規定する。ディペンダブルロボティックカートについて、これを実施し、製品企画書の例（付属書 B.2）を作成した。なお、この段階では、事業で開発した設計コンセプト自己チェックシート（本報告書の 3.1 節）による確認が有効である。

9.4. 安全ライフサイクル「危害と危険の分析」- リスクアセスメントレポートの例

製品のコンセプトにしたがって、リスクアセスメントを実施して、その結果をリスクアセスメントレポートとして文書化する必要がある。

(1) 危険源分析書の例（付属書 B. 3. 1）

製品の危険源を抜け漏れなく同定するために、危険源分析を行った。製品企画書と機械安全規格 JIS B 9700 の「危険状態になり得るタスクのリスト」を付き合わせてディペンダブルロボティックカートのライフサイクルの各フェーズにおける人のタスクのリストを分析した。次に JIS B 9700 と生活支援ロボット安全規格 ISO13482 それぞれの危険源チェックリストを利用して DRC の原始的な危険源を網羅的に同定し、タスクと危険源を付き合わせてライフサイクルフェーズごとの危険源リスト（付属書 B. 3. 1）を作成した。

(2) リスクアセスメント書（付属書 B. 3. 2）

ディペンダブルロボットカート製品企画書およびディペンダブルロボティックカート危険源分析書をインプットとして、リスクアセスメントを行ない、その結果を記録した。具体的には危険源全てについてリスクを見積り、必要なリスク低減方策を決定し、リスクが許容水準以下にあるかどうかの評価をした記録である。例として、ライフサイクルフェーズのうち「使用」フェーズを抜粋して分析した結果を、付属書 B. 3. 2 にとしてまとめた。なお、この段階では、本事業で開発したリスクアセスメントシートの雛形（本報告書の 3. 2 節）が活用可能である。

9.5 安全ライフサイクル「全体の安全配置」「E/E/PE 系安全要求仕様」

ディペンダブルロボットカートについて、安全要求の配置を、例えば、「どの入力部分にどんな機能を割り当てるか」について決定した。また、コントローラ、センサやソフトウェアなど E/E/PE 安全関連系についても、システムの安全機能や安全要求を規定した。付属書には、文書例は掲載しないが、本事業で開発した機能安全設計支援ツール（本報告書の 3. 3 節）および機能安全文書テンプレート（本報告書の 4. 5. 5 節および付属書 D）が活用可能である。

9.6 安全ライフサイクル「全体の安全妥当性確認計画」-妥当性確認計画書の例（付属書 B. 4～B. 9）

安全要求仕様書への適合を確認するための妥当性確認では、その実施に先立って、いつどのような試験や評価を行うかなどを具体的に記載した妥当性確認計画を策定する必要がある。ISO13482 では、文書による確認など複数の確認手段を示しているが、その中から、試験を実施する項目について、本事業で開発した安全検証試験方法（本報告書の第 4 章）を参考に、以下の文書の例を作成した。

- a) 妥当性確認計画書の例 推進力の低減（付属書 B. 4）
- b) 妥当性確認計画書の例 障害物接触センサ（付属書 B. 5）
- c) 妥当性確認計画書の例 光学センサ（付属書 B. 6）
- d) 妥当性確認計画書の例 障害物回避（付属書 B. 7）
- e) 妥当性確認計画書の例 安全機能の電磁妨害耐性（付属書 B. 8）

9.8 安全ライフサイクル「全体の安全妥当性確認」-安全妥当性確認報告書の例（付属書 B. 9）

前節で作成した計画書にしたがって実際にディペンダブルロボティックカートの試験を実施して、その結果を、安全妥当性確認報告書の例として文書化した（付属書 B. 9）。

10. 研究開発成果の発信実績

研究発表、講演（2010年度）

発表年月日	発表先	発表タイトル	発表者
2010.9.22	日本ロボット学会学術講演会	NEDO 生活支援ロボット実用化プロジェクト	比留川博久(産業技術総合研究所), 宮川豊美(NEDO)
2010.9.22	日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットの安全性に関する国際標準化活動	尾暮拓也(産業技術総合研究所), 山田陽滋(名古屋大学)
2010.9.22	日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットの安全設計コンセプト検証の試み	池田博康(労働安全衛生総合研究所), 丹羽邦幸(日本認証), 清水雄一郎(日本品質保証機構)
2010.9.22	日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットの機能安全対応について	水口大知(産業技術総合研究所)
2010.9.22	日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットの安全性検証試験方法の開発	藤川達夫(日本自動車研究所), 松本治(産業技術総合研究所), 山田陽滋(名古屋大学), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2010.9.22	日本ロボット学会学術講演会	製品の適合性評価の概要	清水雄一郎, 浅田純男, 榎山哲郎, 神賀誠(日本品質保証機構)
2010.9.22	日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボット関連の法律と制度の調査	加藤雅弘, 間野隆久, 宮下朋子(製造科学技術センター), 松下俊夫(日本ロボット工業会)
2010.11.26	計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会	人間共存型ロボットにおける安全設計課題の論理解析	岡部康平, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)

研究発表、講演（2011年度）

発表年月日	発表先	発表タイトル	発表者
2011.5.28	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011	下肢人間装着型ロボットの安全性評価試験方法に関する研究 第1報: 膝ジョイント連動並進機構を有するダミーの提案	伊藤浩治, 山田陽滋, 大西惟史, 小田士朗, 原 進, 岡本正吾(名古屋大学)
2011.7.7	日本機械学会安全工学シンポジウム 2011	FMEDA によるハードウェア機能安全の SIL 評価支援ソフトウェアの研究開発	丹羽邦幸(日本認証), 山田陽滋(名古屋大学)

2011.7.7	日本機械学会安全工学シンポジウム 2011	生活支援ロボットの開発におけるマネジメントシステムの構築と第三者評価の意義と有効性	清水雄一郎, 浅田純男, 榎山哲郎, 神賀誠(日本品質保証機構)
2011.7.7	日本機械学会安全工学シンポジウム 2011	リスクアセスメントに基づく生活支援ロボットの安全設計に関する考察	岡部康平, 池田博康, 齋藤剛, 村上真之(労働安全衛生総合研究所)
2011.7.15	標準化と品質管理 2011年8月号	サービスロボットの安全設計の基本的考え方と手順	池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2011.7.15	標準化と品質管理 2011年8月号	サービスロボットの国際安全規格 ISO 13482「パーソナルケアロボット」概要紹介	山田陽滋(名古屋大学)
2011.9.8	第29回 日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットのリスクアセスメント雛形シートの作成	池田博康, 岡部康平, 齋藤剛, 村上真之, 芳司俊郎(労働安全衛生総合研究所)
2011.9.8	第29回 日本ロボット学会学術講演会	安全機能ハードウェアの SIL 評価支援ソフトウェア	丹羽邦幸(日本認証), 山田陽滋(名古屋大学)
2011.9.8	第29回 日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットの安全性試験方法の開発	藤川達夫, 小口誠(日本自動車研究所), 大場光太郎, 松本治, 加藤晋(産業技術総合研究所), 池田博康, 村上真之(労働安全衛生総合研究所)
2011.9.8	第29回 日本ロボット学会学術講演会	装着型ロボットの安全性評価試験方法の開発	山田陽滋(名古屋大学), 本間敬子(産業技術総合研究所), 秋山靖博, 岡本正吾, 原進(名古屋大学)
2011.9.8	第29回 日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボット関連の法律と制度の調査	加藤雅弘, 間野隆久, 宮下朋子(製造科学技術センター), 濱田彰一, 松下俊夫, 三浦敏道(日本ロボット工業会)
2011.9.12	電子情報通信学会 環境電磁工学研究会	移動ロボットのイミュニティ評価用試験治具の作製	村上真之, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2011.9.16	SICE Annual Conference 2011	A basis of safety design for cooperative human-machine system	岡部康平, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2011.11.10	2011 国際ロボット展「生活支援ロボット実用化プロジェクト～プロジェクト活動説明会～」	ロボットの安全とリスクアセスメント	池田博康(労働安全衛生総合研究所)

2011.11.10	2011 国際ロボット展 「生活支援ロボット実 用化プロジェクト～プ ロジェクト活動説明会 ～」	ロボットの安全に関す る海外と日本の視点	加藤雅弘(製造科学技術センタ ー)
2011.11.10	2011 国際ロボット展 「生活支援ロボット実 用化プロジェクト～プ ロジェクト活動説明会 ～」	安全検証試験の紹介	藤川達夫(日本自動車研究所)
2011.11.15	日本ロボット学会誌, Vol.29 No.09, pp.12-13	ロボットの障害物検知 技術と安全コンポーネ ント	加藤晋 (産業技術総合研究所)
2012.3.15	自動計測制御学会 第 39 回知能システムシ ンポジウム「コミュニ ケーション場のメカニ ズムデザイン」	サービスロボットの安 全設計を支援するデー タベースのシステム開 発	岡部康平(労働安全衛生総合研 究所), 松下 俊夫, 濱田 彰 一(日本ロボット工業会)
2012.3.15	第 17 回ロボティクス シンポジア	装着型ロボットの接触 安全性評価試験方法の 研究-膝関節部の不整 合についての下肢ダミ ーによる検討-	秋山靖博(名古屋大学), 山田陽 滋(名古屋大学), 伊藤浩治 (豊 田自動織機), 小田志朗 (トヨ タ自動車), 岡本正吾(名古屋大 学), 原 進(名古屋大学)

研究発表, 講演 (2012 年度)

発表年月日	発表先	発表タイトル	発表者
2012.5.27	ロボティクス・メカト ロニクス講演会 2012	下肢人間装着型ロボ ットの安全性評価試験 方法に関する研究” - 第 2 報: 人体形状の再 現を目的としたダミー 皮膚の提案-	石黒健次(名古屋大学), 秋山靖 博(名古屋大学), 山田陽滋(名 古屋大学), 原進(名古屋大学), 岡 本正吾(名古屋大学), 大西惟史 (名古屋大学), 伊藤浩治(名古屋 大学)
2012.7.6	安全工学シンポジウム 2012	サービスロボットのため の機能安全規格に基 づく安全コンセプト検 証用ツールの作成	池田博康(労働安全衛生総合研 究所), 丹羽邦幸(日本認証), 清 水雄一郎(日本品質保証機構)
2012.9.9	21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)	A Test Method for Contact Safety Assessment of the Wearable Robot -An Analysis of Load Caused by the Misalignment of the Knee Joint-	Yasuhiro Akiyama, Yoji Yamada(Nagoya Univ.), Koji Ito(Toyota Industries), Shiro Oda(Toyota Motor), Shogo Okamoto, Susumu Hara(Nagoya Univ.)
2012.9.19	日本ロボット学会第 30 回学術講演会	生活支援ロボット関連 の法律と制度の調査	加藤雅弘(製造科学技術センタ ー)
2012.9.19	日本ロボット学会第 30 回学術講演会	生活支援ロボットのリス クアセスメントにお ける保護方策実施後の リスク再見積に関する 考察	齋藤剛, 池田博康, 岡部康平(労 働安全衛生総合研究所)

2012.9.19	日本ロボット学会第30回学術講演会	SIL2,3の要求事項に対応したPROH-SILソフトウェアの事例	丹羽邦幸(日本認証), 山田陽滋(名古屋大学), 橋本慎也(エスクリエイト)
2012.9.19	日本ロボット学会第30回学術講演会	生活支援ロボット安全情報センター(RTSIC)の開発	松下俊夫(日本ロボット工業会), 岡部康平(労働安全衛生総合研究所), 濱田彰一(日本ロボット工業会)
2012.9.19	日本ロボット学会第30回学術講演会	移動ロボットの障害物検知・対応能力試験のための接近再現装置と走行状態模擬装置の開発	加藤晋, 竹内厚司, 児玉将人, 橋本尚久(産業技術総合研究所)
2012.9.19	日本ロボット学会第30回学術講演会	生活支援ロボットのセンサのための人工太陽灯による光干渉試験	角保志, 堀内英一, 松本治, 大場光太郎(産業技術総合研究所)
2012.9.19	日本ロボット学会第30回学術講演会	生活支援ロボットの走行安定性試験方法	小口誠, 神保浩之, 小林隆, 藤川達夫(日本自動車研究所)
2012.9.20	日本ロボット学会第30回学術講演会	搭乗型ロボット走行安定性基準策定のための重心移動制御装置の開発	松本治(産業技術総合研究所)
2012.9.20	日本ロボット学会第30回学術講演会	生活支援ロボットの温湿度・振動複合試験方法の提案	池田博康, 芳司俊郎(労働安全衛生総合研究所)
2012.9.20	日本ロボット学会第30回学術講演会	走行耐久性試験装置におけるロボットの位置および速度制御	岩田拓也, 松本治(産業技術総合研究所)
2012.10.11	The 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2012)	Development of a Self-Check Sheet for Safety Design of Human-Collaborative Robots	Hiroyasu Ikeda (JNIOOSH), Kuniyuki Niwa (JC), Yuichiro Shimizu (JQA)
2012.10.11	The 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2012)	Study on Law and Social Systems for the Safety of Social-care Robots	Masahiro Kato (MSTC)
2012.10.11	The 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2012)	Empirical Approach to Assessing Foot Injury Level Resulting from being Run Over by a Mobile Robot	Masami Kubota, Tatsuo Fujikawa (JARI)
2012.10.12	The 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2012)	Evaluation of Injury Level and Probability for Risk Assessment of Mobile Robots	Tatsuo Fujikawa, Masami Kubota (JARI), Yoji Yamada (Nagoya Univ.), Hiroyasu Ikeda (JNIOOSH)
2012.10.19	Japan Robot Week 2012 つくば国際戦略総合特区フォーラム	生活支援ロボット安全検証センターの紹介	小口誠(日本自動車研究所)
2012.11.2	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会(LIFE2012)	装着型ロボットの接触安全性評価試験にむけた下肢ダミーの開発	秋山靖博, 伊藤安海, 山田陽滋(名古屋大学), 伊藤浩治(豊田自動織機), 小田史朗(トヨタ自動車), 岡本正吾, 原進(名古屋大学)

2012.11.4	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2012)	生活支援モビリティの衝突時安全性の評価例	藤川達夫, 久保田正美(日本自動車研究所), 山田陽滋(名古屋大学), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2012.11.4	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2012)	生活支援モビリティロボットの走行安定性試験方法	小口誠, 神保浩之, 小林隆, 藤川達夫(日本自動車研究所)
2012.11.4	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2012)	生活支援モビリティの走行耐久性試験装置の開発	岩田拓也, 松本治(産業技術総合研究所)
2012.11.4	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2012)	生活支援ロボットの複合環境振動試験による安全性評価方法	池田博康, 芳司俊郎(労働安全衛生総合研究所)
2012.11.12	日本ロボット学会第74回ロボット工学セミナー 安全規格と開発プロセス	パーソナルケアロボットのための安全規格 ISO 13482 の動向	藤川達夫(日本自動車研究所)
2012.12.14	電子情報通信学会 環境電磁工学研究会 (EMCJ)	生活支援ロボットにおける帯電フレームモデルの ESD イミュニティ試験法の検討 ～電動車いすの製品規格で規定された試験法に関する考察～	村上真之(東京都立産業技術研究センター), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.1.11	電子情報通信学会 環境電磁工学研究会 (EMCJ)	生活支援ロボットにおける帯電フレームモデルの ESD イミュニティ試験法の検討 ～ロボット支持台に関する要件～	村上真之(東京都立産業技術研究センター), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.1.11	電子情報通信学会 環境電磁工学研究会 (EMCJ)	機能安全を導入した生活支援ロボットのための放射 RF 電磁界イミュニティ試験システムの開発	村上真之(東京都立産業技術研究センター), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.1.22	第44回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム	モーションキャプチャを用いた人体部位の3次元動作解析のための皮膚揺動誤差評価	石黒健次, 山田陽滋, 秋山靖博, 原進, 岡本正吾(名古屋大学)
2013.3	ロボット工業会誌, No. 211	サービスロボットの国際安全規格 (ISO13482 パーソナルケアロボット) 紹介	山田陽滋(名古屋大)
2013.3	ロボット工業会誌, No. 211	リスクアセスメントに基づくロボットの安全設計手順	池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.3	ロボット工業会誌, No. 211	生活支援ロボットの安全性検証	藤川達夫(日本自動車研究所)
2013.3.8	電子情報通信学会 環境電磁工学研究会 (EMCJ)	生活支援ロボットにおける帯電フレームモデルの ESD イミュニティ試験法の検討 ～ロボット使用者からの放電の模擬～	村上真之(東京都立産業技術研究センター), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)

2013.3.12	日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2013	無線式近接警報装置の性能評価	風間智, 岡部康平, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.3.14	第 18 回ロボティクスシンポジウム	装着型ロボットの接触安全性評価試験方法の研究 - 下肢ダミーを用いたロボット装着者への負担の再現方法に関する検討 -	秋山 靖博, 山田 陽滋(名古屋大学), 伊藤 浩治(豊田自動織機), 小田 志朗(トヨタ自動車), 岡本 正吾(名古屋大学)

研究発表, 講演 (2013 年度)

発表年月日	発表先	発表タイトル	発表者
2013.5.23	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	生活支援ロボット関連の法律と制度の調査	加藤雅弘 (製造科学技術センター)
2013.5.23	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	生活支援ロボットに関する安全情報データベース	岡部康平(労働安全衛生総合研究所), 松下俊夫(日本ロボット工業会), 濱田彰一(日本ロボット工業会)
2013.5.23	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	ロボットの車輪の轢過による中足骨損傷に関する検討	久保田正美, 藤川達夫(日本自動車研究所), 西本哲也(日本大学)
2013.5.23	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	マニピュレータの挟圧安全性とその試験方法について	齋藤剛, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.5.23	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	装着型ロボットの接触安全性試験方法	秋山靖博(名古屋大), 山田陽滋(名古屋大), 伊藤浩治(豊田自動織機), 小田志朗(トヨタ自動車), 岡本 正吾(名古屋大)
2013.5.24	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	装着型ロボットが装着者の転倒現象に与える影響に関する検討	秋山靖博(名古屋大), 山田陽滋(名古屋大)
2013.7.3	平成 25 年度国際標準推進戦略シンポジウム	安全認証のプロセス	浅田純男 (日本品質保証機構)
2013.8.22	生活支援ロボット安全技術研究会 (第 3 回)	生活支援ロボット関連の法律と制度	加藤雅弘 (製造科学技術センター)
2013.9.4	日本ロボット学会第 31 回学術講演会	生活支援ロボット関連の法律と制度の調査	加藤雅弘 (製造科学技術センター)
2013.9.4	第 31 回 日本ロボット学会学術講演会	装着型ロボットのための創傷リスクに対する安全性評価試験方法の開発	山田 陽滋(名古屋大), 吉田 剣吾(名古屋大), 石黒 健次(名古屋大), 秋山 靖博(名古屋大), 原 進(名古屋大), 岡本 正吾(名古屋大学)
2013.9.4	第 31 回 日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットの騒音試験方法の提案	池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.9.4	第 31 回 日本ロボット学会学術講演会	屋外環境シミュレータによる ビジョン安全センサの性能評価	角保志, 金奉根, 松本吉央(産業技術総合研究所)
2013.7.30	生活支援ロボット実用化促進セミナー	生活支援ロボットの安全規格と試験方法について	藤川達夫(日本自動車研究所)
2013.9	電磁環境工学情報, Vol. 26, No. 5	生活支援ロボットの安全とイミュニティ評価	村上真之, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)

2013.9.13	電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 113, No. 218	コヒーレンスを用いた無線通信に影響を与える雑音源の特定	風間 智, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
3013.11.3	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013) RAS-IARP Joint Workshop	Outdoor Environment Simulators for Evaluating Safety Sensors of Personal Care Robots — Artificial Sunlight Lampheads and Simulated-Snow Chamber —	Yasushi Sumi, Bong Keun Kim, Yoshio Matsumoto, Eiichi Horiuchi, Osamu Matsumoto, Kohtaro Ohba (AIST)
3013.11.3	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013) RAS-IARP Joint Workshop	Outdoor Environment Simulators for Evaluating Safety Sensors of Personal Care Robots — Artificial Sunlight Lampheads and Simulated-Snow Chamber —	Yasushi Sumi, Bong Keun Kim, Yoshio Matsumoto, Eiichi Horiuchi, Osamu Matsumoto, Kohtaro Ohba (AIST)
3013.11.3	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013) RAS-IARP Joint Workshopp	Study on Laws and Systems for Life-supporting Robots	Masahiro Kato (MSTC)
3013.11.5	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013)	Estimating Child Collision Injury Based on Automotive Accident Data for Risk Assessment of Mobile Robots	Tatsuo Fujikawa, Masami Kubota (JARI), Yoji Yamada (Nagoya Univ.), Hiroyasu Ikeda (JNIO SH)
2013.11.7	国際ロボット展 NEDO フォーラム	日本から始まるサービスロボットの普及と安全認証ビジネス	菅原淳 (NEDO) 藤川達夫 (日本自動車研究所), 浅田純男, 清水雄一郎 (日本品質保証機構)
2013.11.7	2013 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (IRSO2013)	Outdoor Environment Simulators for Vision-Based Safety Sensors - Artificial Sunlight Lampheads and Simulated-Snow Chamber	Yasushi Sumi, Bong Keun Kim, Yoshio Matsumoto, Eiichi Horiuchi, Osamu Matsumoto, Kohtaro Ohba (AIST)
2013.12.	日本赤外線学会誌, 第23巻第2号	生活支援ロボットのための赤外線ビジョン安全センサの性能評価について	角保志, 金奉根, 松本吉央(産業技術総合研究所)
2014.2.19	ロボットと法—ロボットと共生する社会に向けて—中央大学イタリア大使館共催シンポジウム	生活支援ロボット関連の法律と制度の調査	加藤雅弘 (製造科学技術センター)

展示会等

出展年月日	出展先	内容
2011.11.9～12	2011 国際ロボット展	NEDO 展示ブースにて生活支援ロボット安全検証センターを紹介
2012.10.17～19	Japan Robot Week 2012	つくば国際戦略総合特区展示ブースにて、生活支援ロボット安全検証センターを紹介
2013.11.6～9	2013 国際ロボット展	NEDO 展示ブースにて生活支援ロボット安全検証センターを紹介
2013.11.8	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS2013)	IROS2013 のテクニカルツアーを生活支援ロボット安全検証センターに招待

報道

年月日	媒体	内容
2010.12.27	時事ドットコム	生活支援ロボの安全確保＝検証センターがオープン
2010.12.27	NHK ニュース	生活支援ロボットの実験施設
2010.12.28	朝日新聞	介護・家事支援ロボの安全性試験 茨城に検証センター
2010.12.28	毎日新聞	家庭用ロボット：安全の「お墨付き」 検証センターが開所
2010.12.28	東京新聞	生活支援ロボ 安全性を認証
2011.1.4	ロボナブル（日刊工業新聞）	特集 生活支援ロボット安全検証センター始動！ 設立の背景と課題を探る
2011.2.11	ワールドビジネスサテライト（テレビ東京）	新ロボット大国へ 「サービスロボットが拓く」
2011.4.21	日本経済新聞 夕刊	「介護ロボット、実用化へ動き出す」の中で生活支援ロボット安全検証センターの一部が紹介された
2011.4.	日本経済新聞	「ロボットが拓く～柵を超えて～」の中で生活支援ロボット安全検証センターの一部が紹介された
2012.1.30	NHK ワールド NEWSLINE	「HIGH-TECH HELPERS」にて生活支援ロボット安全検証センターの一部が紹介された
2013.2.27	NHK 首都圏ニュース, 日本経済新聞ほか	日本品質保証機構が CYBERDYNE 株式会社の「ロボットスーツ HAL 福祉用」に対して ISO/DIS 13482 に基づく認証を発行したことを紹介

特許等

出願年月日	出願番号	名称	出願者
2011.7.1	特願 2011-147706	安全度水準評価支援装置	日本認証, 山田陽滋

2.2 研究開発項目② 安全技術を導入した移乗・移動支援ロボットシステムの開発 パナソニック(株)、国立障害者リハビリテーションセンター

目次

1.	はじめに	2
1.1.	研究開発の背景と目的	2
1.2.	事業概要	3
1.3.	研究開発体制	4
2.	研究開発の成果と達成状況	5
2.1.	研究開発の成果（要約）	5
2.1.1.	和文要約	5
2.1.2.	英文要約	6
2.2.	本文	7
2.2.1.	リスクアセスメントに関する研究開発（パナソニック株式会社）	7
2.2.2.	操作 I F / 操縦支援技術、動的動作経路生成技術の研究開発（パナソニック株式会社）	8
2.2.3.	安全変形 / 動作技術の研究開発（パナソニック株式会社）	9
2.2.4.	ロボットシステム自己診断技術の研究開発（パナソニック株式会社）	10
2.2.5.	機能 / システムユーザビリティの研究開発（国立障害者リハビリテーションセンター / パナソニック株式会社）	13
2.2.6.	安全環境センシング技術の研究開発（パナソニック株式会社）	16
2.3.	目的に照らした達成状況	18

1. はじめに

1.1. 研究開発の背景と目的

少子高齢化の急速な進展に伴い、医療や介護を必要とする高齢者が増加する一方、これらを担う若年者の比率が年々低下しており、労働力不足が懸念されている。介護の分野においては、こうした問題に加え、介護者自身の高齢化による老老介護の問題など、在宅介護／施設介護いずれにおいても、ますます介護の負担が増える傾向にあり、高齢者介護における大きな課題となっている。こうした背景のもと、弊社では、現在、高齢者や障害者の自立をサポートする移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）（図 1 (a)）、介護者が行う移乗介助をサポートする移乗・移動支援ロボットシステム（介助支援型）（図 1 (b)）の開発を進めている。

しかしながら一般家庭で使用される生活支援ロボットは、これまでの産業用ロボット、メカトロニクス機器とは異なり、不特定多数の人がロボットと直接接するなど同じ空間で活動を共に行うことを前提としているため、これまでとは異なる次元の安全性が求められ、より高いレベルの安全技術や新たな安全概念を必要とする。従って、これらの生活支援ロボットをはじめとする次世代のロボット産業を創出するためには、新たな安全技術と共に安全基準や安全関連の法律等の整備を進めることが急務となる。

そこで、本事業において、開発中の移乗・移動支援ロボットシステムについて、安全性検証手法研究開発実施者と一体となって安全技術開発および安全規格整備を推進することにより、早期実用化を実現することを目指す。



(a) 自立支援型

(b) 介助支援型

図 1：移乗・移動支援ロボットシステム

1.2. 事業概要

現在実用化を目指して開発している移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型、介助支援型）を対象として、実用化に必要な安全技術開発および安全規格整備を推進する。具体的には、総合的に安全な上記ロボットシステムを実現するために必要な次の項目を安全技術開発課題として設定する。

- 1) リスクアセスメントに関する研究開発
- 2) 操縦 I F / 操縦支援技術、動的動作経路生成技術の研究開発
- 3) 安全変形 / 動作技術の研究開発
- 4) ロボットシステム自己診断技術の研究開発
- 5) 機能 / システムユーザビリティの研究開発
- 6) 安全環境センシング技術の研究開発

各安全技術の位置づけ / 役割を図 2 に示す。安全に関する要因を外部（環境）要因、搭乗者（利用者）要因、内部（ロボット）要因に大別し、以下に説明する各安全技術の対応領域を明確化するとともに、各安全技術により全領域を漏れなくカバーできる位置づけとしている。

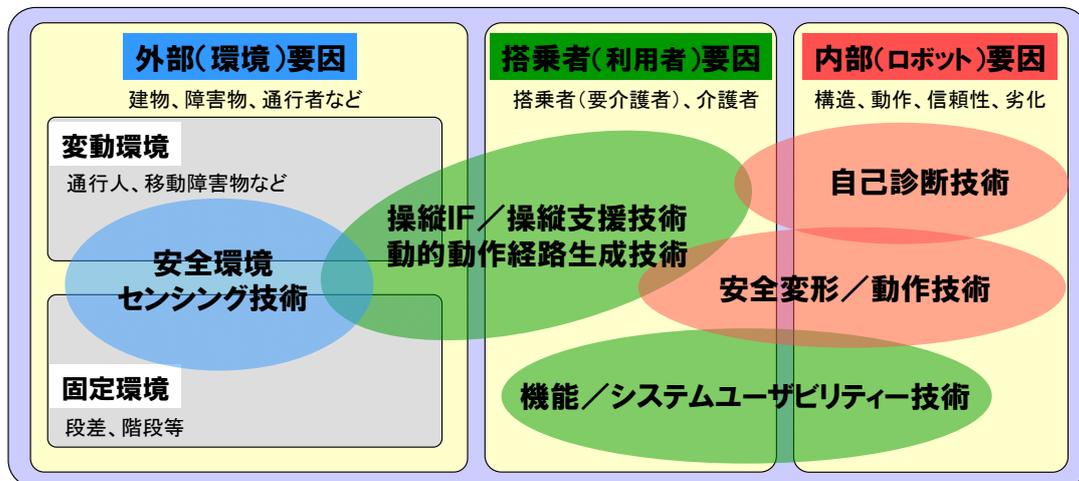


図 2 : 各安全技術の位置づけ / 役割

1.3. 研究開発体制

本事業は、図3に示す研究開発体制にて実施する。

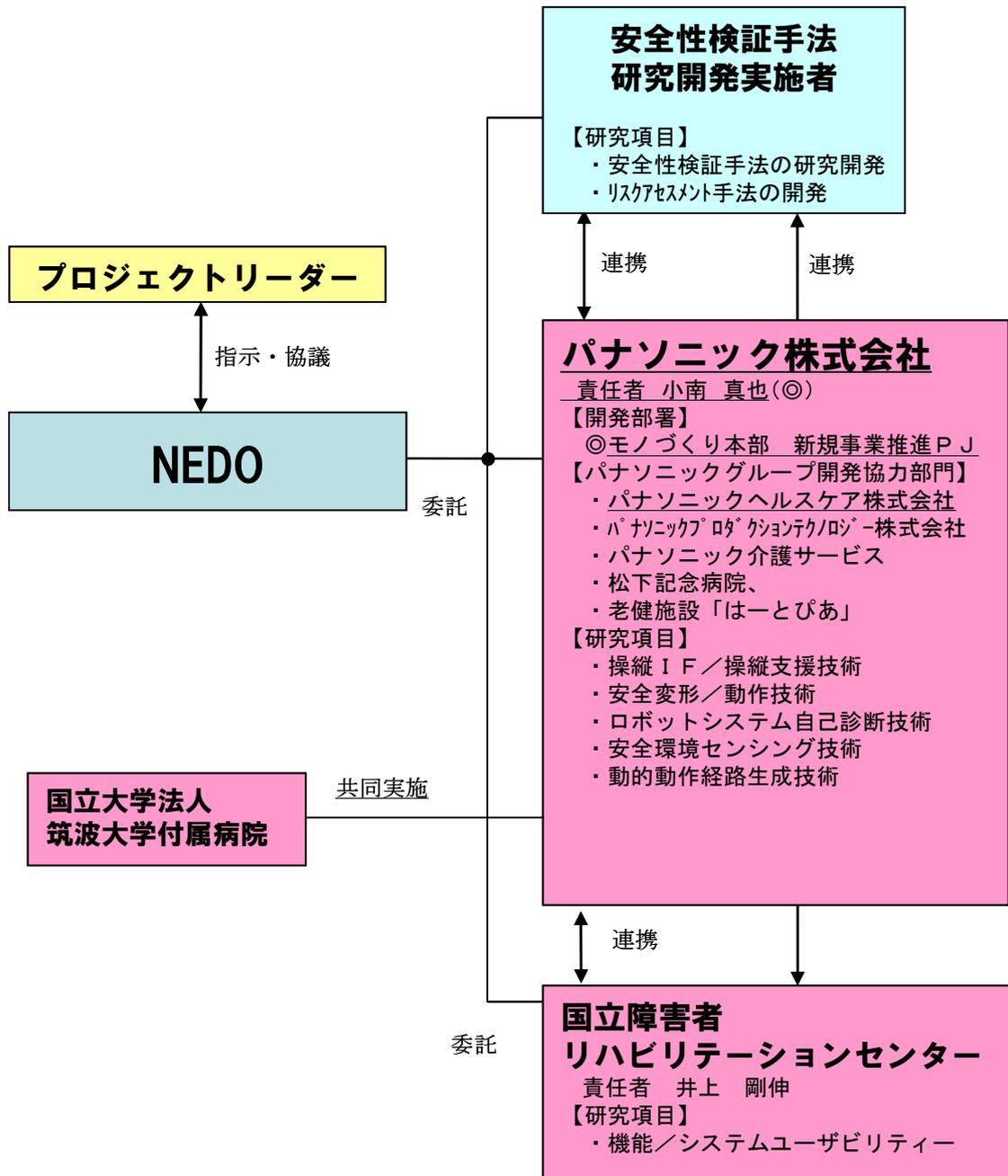


図3：研究開発体制

2. 研究開発の成果と達成状況

2.1. 研究開発の成果（要約）

2.1.1. 和文要約

電動ケアベッドと電動車いすを融合した移乗・移動支援ロボットシステムを対象として、実用化に必要な安全技術開発及び安全規格整備を推進した。安全技術開発に関しては、設定した安全技術開発項目の当初予定をすべて達成し、その取組み成果をベースに、介助支援型の移乗・移動支援ロボットシステムで、世界初の生活支援ロボット国際安全規格 ISO13482 の認証を取得した。安全規格整備に関しては、生活支援ロボット安全検証センターへのロボットシステムの貸し出し、試験実施協力等により、「移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボット」類型の安全基準策定及び試験ノウハウ構築に貢献した。以下に、安全技術開発に関する具体的な取組み成果を報告する。

1) リスクアセスメントに関する研究開発：

電動ケアベッドと電動車いすのリスクアセスメントをベースにリスクアセスメント（①機械類の制限の決定、②危険源の同定、③リスク見積り、④リスク評価）を行った。リスク評価の結果、リスク低減が必要な危険源に対しては、3ステップメソッドによるリスク低減方策（①本質的安全設計方策、②安全防護及び付加保護方策、③使用上の情報）を実施し、許容可能なレベルまでリスク低減を行った。

2) 操縦 I F / 操縦支援技術の研究開発：

誤操作を防止するわかりやすい操作インターフェースやユーザの操作を支援する操縦支援技術を開発した。

3) 安全変形 / 動作技術の研究開発：

柔軟導電体とメッシュ状の絶縁体からなる形状柔軟性を備えた挟み込みセンサを開発した。性能評価を実施した結果、人体等の柔軟体に対して高感度の特性を有し、指等の挟み込み検知や人体との接触検知に有効性が高いことが確認できた。

4) ロボットシステム自己診断技術の研究開発：

機能安全規格に基づき、安全操作を実現するホールドツーラン機能（安全関連制御システム）を開発した。V字モデル開発プロセスに基づくハードウェア及びソフトウェアの設計・検証・妥当性確認、FMEDAに基づく安全性能レベル評価により、ホールドツーラン機能が安全要求仕様を満たしていることを確認した。

5) 機能 / システムユーザビリティの研究開発：

ロボットシステムを用いて、想定ユーザに対する模擬環境実用性評価を行った。各評価結果から抽出された要改良点をロボットシステム改良仕様に反映し、実用性向上を図った。

6) 安全環境センシング技術の研究開発：

ロボット移動時にロボットの死角等から現れる人や障害物を事前に検知することで、ロボット単体では困難な出会い頭衝突等の防止を支援するシステムを開発した。

2.1.2. 英文要約

We have promoted the Research and development of safety technologies required for the practical use and the establishment of safety standards, targeting transfer/movement assist robotic systems integrating an electric care bed and an electric wheelchair. We have achieved all targets set for the safety technology development. Based on these achievements, our care support type robotic system became the world's first equipment certified according to ISO 13482, an international safety standard for personal care robots. As for the initiatives for establishing safety standards, we have contributed to the establishment of safety standards and test methods for manually operated mobile servant robots by cooperating with the Robot Safety Center, including lending of our robot system and providing assistance with test implementation. The following descriptions report on the specific achievements of our safety technology development.

1) **Risk assessment:**

We conducted a risk assessment based on the risk assessment for electric care beds and electric wheelchairs. We followed the three-step method for the hazards to be reduced.

2) **Control IF, control assist technologies:**

We developed an error-proofing user-friendly control interface and some control assist technologies.

3) **Safe transformation/motion technologies:**

We developed a flexible anti-pinch sensor comprising a flexible conductor and a mesh insulator, and evaluated its performance. The evaluation results showed that the sensor has high sensitivity to flexible objects, such as the human body, and is highly effective in detecting the possible pinching of fingers and other body parts and contact with the human body.

4) **Robot system self-diagnosis technologies:**

We developed a hold-to-run function (safety-related control system) that ensures the safe operation of the robotic systems based on the functional safety standards. We confirmed that the function meets all safety requirements by designing, verifying, and validating hardware and software based on the V-model development process, and evaluating the safety performance level based on FMEDA.

5) **Function/system usability:**

We conducted simulated environmental practicality evaluations with target users using transfer/movement assist robotic systems. We identified the points to be improved from each evaluation result, and incorporated them into the robotic system improvement specifications to enhance the product's practicality.

6) **Safety environment sensing technologies:**

We have developed a system to detect people and obstacles in the blind spots of moving robots in advance in order to prevent collisions at intersections, which cannot be avoided by robots alone.

2.2. 本文

以下、各安全技術開発に関する具体的な取組み成果を報告する。

2.2.1. リスクアセスメントに関する研究開発（パナソニック株式会社）

(1) リスクアセスメント及びリスク低減方策

GAMAB 原則（既存の類似製品と比較して「全体として少なくとも同様（Globalement Au Moin Aussi Bon）」のレベルまでリスクを下げる）（木村哲也：“サービスロボットのリスクアセスメントとその課題”，日本ロボット学会誌，vol.25, No.8, pp.1151-1154, 2007.）の考え方を参考に、電動ケアベッドと電動車いすのリスクアセスメントをベースに、リスクアセスメント（①機械類の制限の決定、②ハザードの同定、③リスク見積り、④リスク評価）を行った。自立支援型のリスクアセスメントの一例を図4に示す。

本ロボットシステムは、電動ケアベッドと電動車いすを融合したロボットシステムである。そこで、電動ケアベッド機能と電動車いす機能に関しては、既存商品のヒヤリハット事例や事故事例を参考にして、ハザードの同定を行った。また、その他の本ロボットシステム特有機能（例：合体・分離機能）に関しては、参考にできる事例がないため、想定される使用シナリオとハザードチェックリスト（ISO12100 等）を用いて、ハザードの同定を行った。

リスク評価の結果、リスク低減が必要な危険源に対しては、3ステップメソッドによるリスク低減方策（①本質的安全設計方策、②安全防護及び付加保護方策、③使用上の情報）を実施し、許容可能なレベルまでリスク低減を行った。

(2) 安全性評価

生活支援ロボット安全検証センター及び社内外の安全試験施設にてロボットシステムの安全性試験を実施し、それらの結果をリスクアセスメントにフィードバックすると共に、

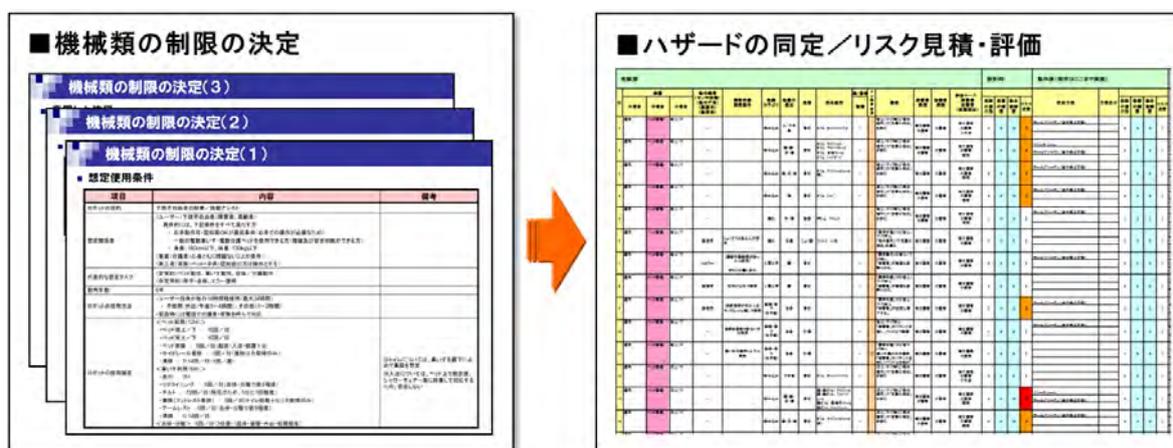
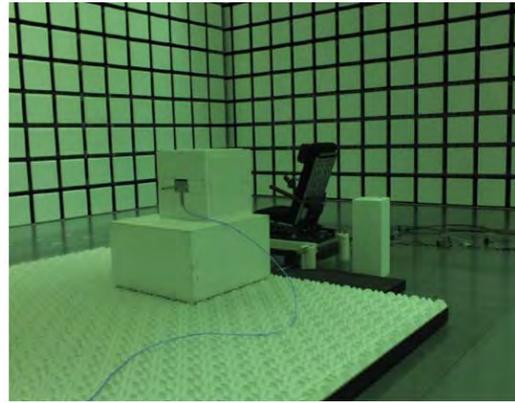


図4：移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）のリスクアセスメントの一例



(a) アームレスト荷重試験



(b) EMC 試験

図 5：移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）の安全性試験の様子

改良すべき項目に関しては、改良仕様に盛り込み、ロボットシステムの改良を行った。移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）の安全性試験の様子を図5に示す。

2.2.2. 操作 I F / 操縦支援技術、動的動作経路生成技術の研究開発 (パナソニック株式会社)

(1) 操作 I F の開発

誤操作を防止する分かりやすいインターフェースを備え、ユーザの好みに応じて9種類のジョイスティックハンドルを自由に選択可能な操作 I F（移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）向け）を開発した。開発においては、試作機開発⇒模擬環境評価⇒課題抽出⇒改良仕様策定⇒改良機開発を繰り返し、ターゲットユーザニーズに基づく改良を実施した。開発した操作 I F の外観を図6に示す。

(2) 操縦支援技術及び動的動作経路生成技術の開発

以下に示す障害物回避支援技術・操縦支援技術を開発／評価し、有効性を確認した。

- ① 操作した方向と実際に動作する方向の差異を小さくして、ユーザ操作の違和感や不安感を軽減する障害物回避制御技術
- ② 操作した方向に細長く伸び、操作力の大きさに比例した長さのサーチ領域を生成し、この領域に存在する障害物だけを回避すべき障害物と判断して回避動作を行うことにより、細い通路等も動作可能な障害物回避制御技術
- ③ 旋回動作時に回転中心を移動方向にずらし、曲がり角での旋回動作をしやすくすると共に、曲がり角と車いす内側との接触を回避する動作を行う旋回動作操縦支援技術

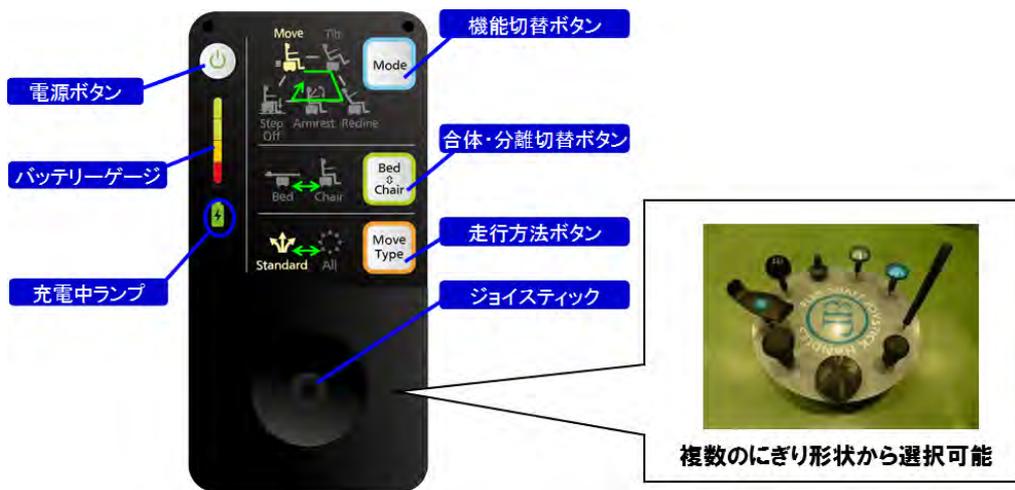


図 6：開発した操作 IF（移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）向け）

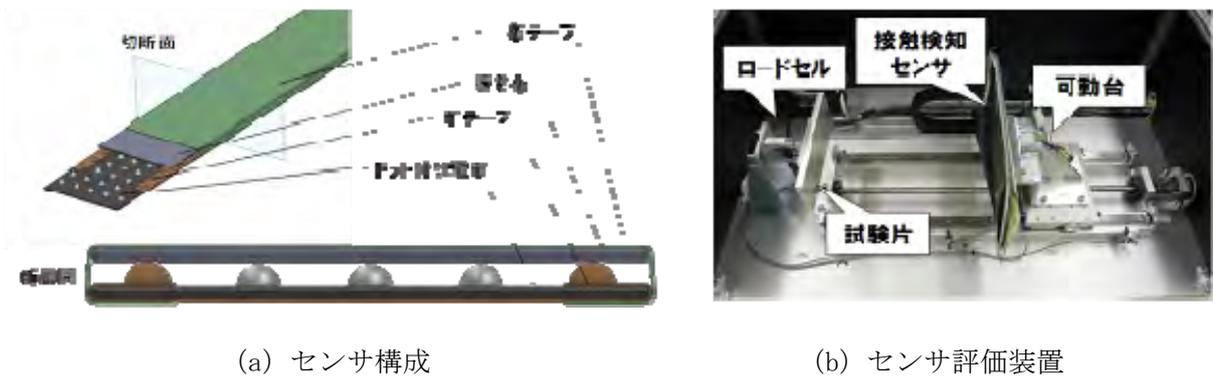


図 7：開発した接触検知センサ（移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）向け）

また、移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）のベッド・車いす間の合体・分離動作時に発生する可能性のある衝突・挟まれ等の危害発生確率を低減させるために、ユーザの操作意思（ホールドツーラン操作）に基づき合体・分離動作を安全に行うための合体・分離動作誘導制御技術を開発した。

2.2.3. 安全変形／動作技術の研究開発（パナソニック株式会社）

(1) 接触検知センサの開発／評価

柔軟導電体とメッシュ状の絶縁体からなる形状柔軟性を備えた接触検知センサを開発し

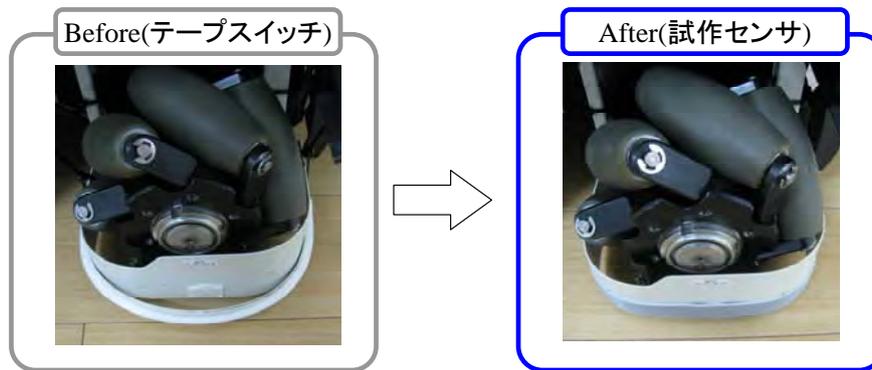


図 8：接触検知センサのロボットシステムへの搭載

た。開発したセンサは、導電布（導電耐を持たせた布）と、ドット付導電布から構成され、センサに対して外力が加わると、ドット付導電の導電部分と導電布とが接触し、導通することにより、接触を検知するものである。開発した接触検知センサの構成図を図 7 (a) に示す。

図 7 (b) に示す性能評価装置を用いて、試作したセンサの性能評価を実施した結果、人体等の柔軟体に対して高感度の特性を有し、指等の挟み込み検知や人体との接触検知に有効性が高いことが確認できた。

(2) 接触検知センサのロボットシステムへの搭載

試作した接触検知センサを、移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）の電動車いす部の車輪轢断防止用バンパーセンサとして搭載した。曲げ半径 40mm の車輪カバーに市販テープスイッチを貼り付けた場合、曲げ半径が仕様範囲外になってしまうが、試作したセンサは柔軟性が高いため、取付けでき、正常に機能することが確認できた（図 8）。

2.2.4. ロボットシステム自己診断技術の研究開発（パナソニック株式会社）

(1) 移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）の機能安全設計・評価

機能安全規格 ISO13849-1:2006 に基づき、移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）の安全操作を実現する合体・分離動作ホールドツーラン機能（安全関連制御システム）を開発した。基本機能として、操作入力があるときのみ、合体・分離動作を許可し、操作入力がないときは、合体・分離動作を禁止する機能を実装した。また、診断機能として、操作部・論理部・出力部における危険側故障を適切に自己診断する機能を実装した。

図 9 に示すように開発したホールドツーラン機能は、移乗・移動支援ロボットシステム

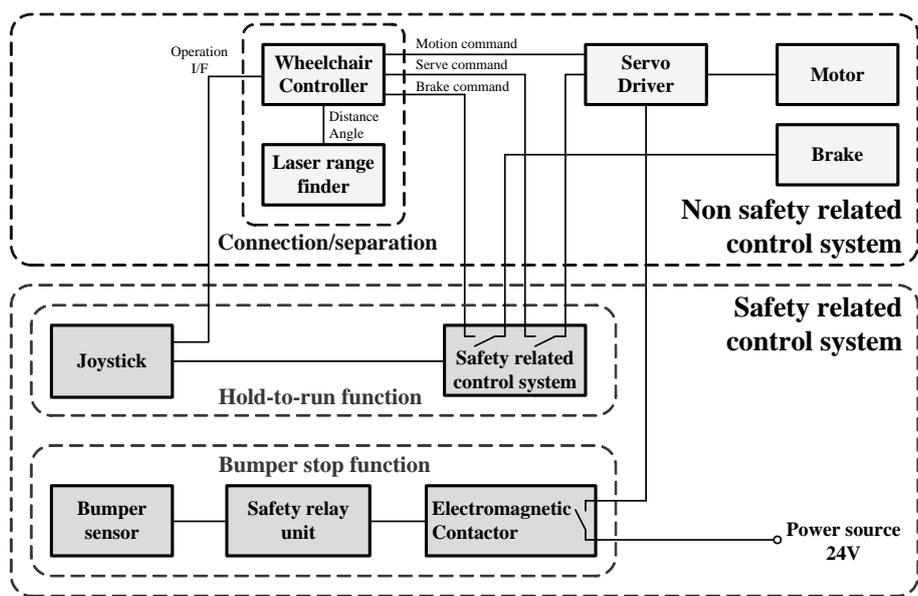


図 9： 移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型／車いす部）の制御システム構成

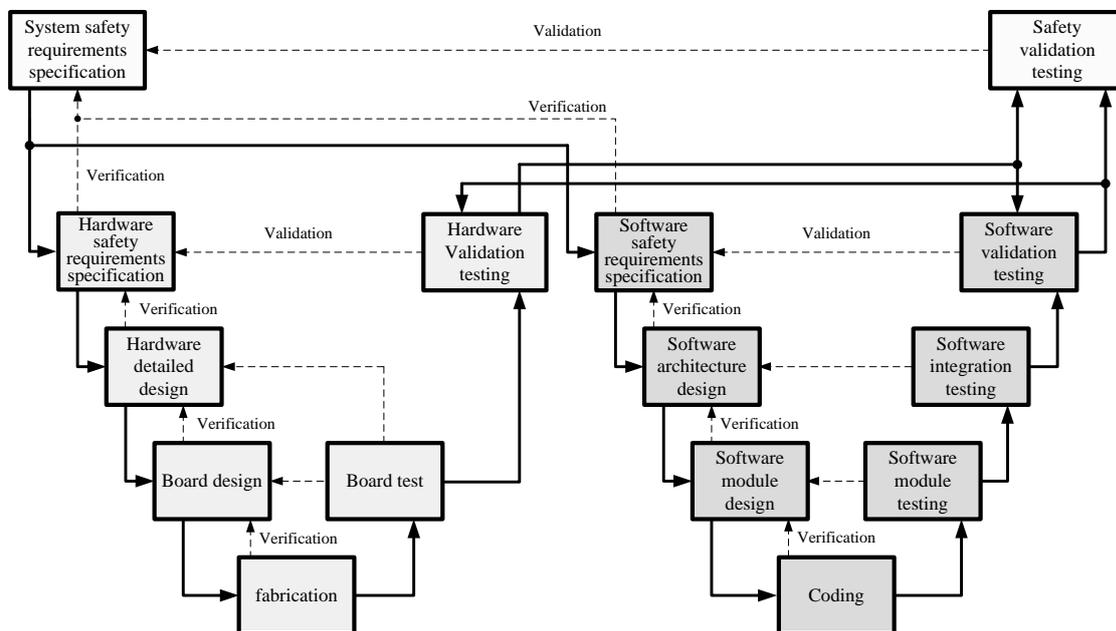


図 10： 移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）のホールドツーラン機能
に適用したハードウェア／ソフトウェア開発のV字モデル

最後に、ハードウェアの全コンポーネントに対するFMEDA (Failure Modes, Effects and Diagnostic Analysis) を行い、開発したホールドツーラン機能の安全性能レベルを評価した。その結果、ハードウェア及びソフトウェアとも、パフォーマンスレベルd ($10^{-7} \leq PFHd < 10^{-6}$ 、PFHd: 単位時間当たりの危険側故障発生率の平均確率[1/h]) (IEC62061:2005のSIL2相当) の要求事項を満足することを確認した。

(2) 移乗・移動支援ロボットシステム (介助支援型) の機能安全設計・評価

機能安全規格 ISO 13849-1:2006 に基づき、移乗・移動支援ロボットシステム (介助支援型) の安全操作を実現する「ホールドツーラン機能 (押しボタンスイッチを押している間だけ動作を許可し、押しボタンスイッチを離すと確実に動作を停止させる安全機能)」と「減速機能 (挟み込みの可能性のある高さからベッド下降動作を減速させる安全機能)」の2つの安全機能 (安全関連制御システム) を開発した。

開発した2つの安全機能は、移乗・移動支援ロボットシステム (介助支援型) の非安全関連制御システムと一体の構成となっている。移乗・移動支援ロボットシステム (介助支援型) の制御システムブロックを図11に示す。

開発においては、安全要求仕様が抜け漏れなく実現できるように、図12に示すV字モデル開発プロセスに基づくソフトウェアの設計・検証・妥当性確認を行い、安全要求仕様を実現した。ハードウェアに関しては、医用電気規格 IEC60601-1:2005 に基づき開発されたものを使用し、検証・妥当性確認を行い、安全要求仕様の実現を確認した。

最後に、ハードウェアの全コンポーネントに対するFMEDAを行い、開発した2つの安全機能の安全性能レベルを評価した。その結果、ハードウェア及びソフトウェアとも、パフォーマンスレベルd ($10^{-7} \leq PFHd < 10^{-6}$ 、PFHd: 単位時間当たりの危険側故障発生率の平均確率[1/h]) (IEC62061:2005のSIL2相当) の要求事項を満足することを確認した。

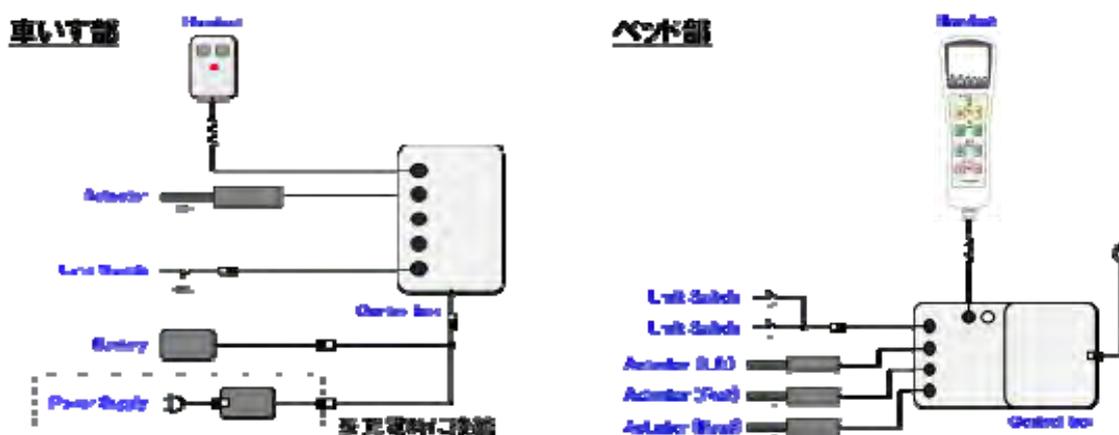


図 11 : 移乗・移動支援ロボットシステム (介助支援型) の制御システム構成

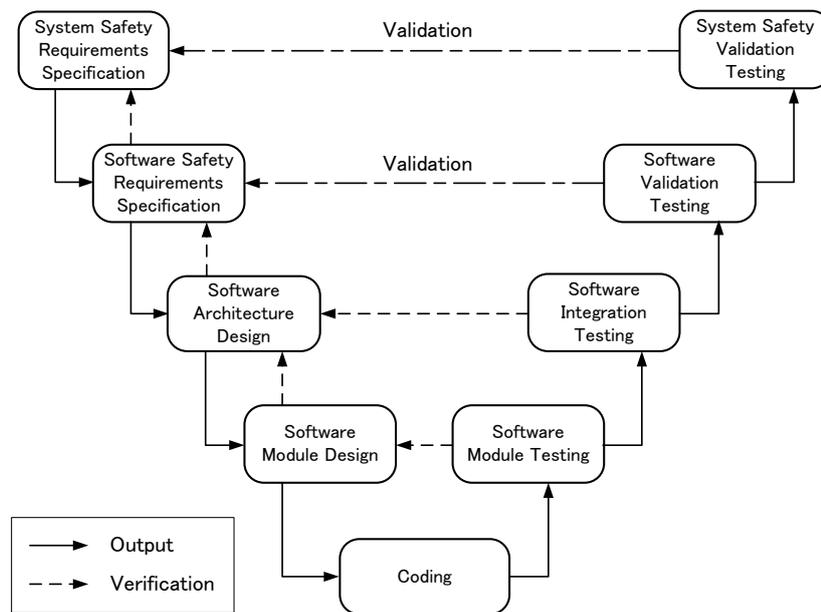


図 12：移乗・移動支援ロボットシステム（介助支援型）の安全機能に適用したソフトウェア開発のV字モデル

2.2.5. 機能／システムユーザビリティの研究開発（国立障害者リハビリテーションセンター／パナソニック株式会社）

(1) 障害当事者を対象としたシステム評価（国立障害者リハビリテーションセンター）

① 専門職と障害当事者への質的調査

ターゲットユーザを確定するために、医療／リハ専門職を対象として、ロボティックベッド（プロト機）を用いた試用評価実験及びインタビューを行った。エスノグラフィを基にした質的分析を行い、ターゲットユーザ像と機能要件を抽出し、安全評価機の仕様に反映した。試用評価実験の様子を図 (a) に示す。さらに、抽出されたユーザ像に基づいてロボティックベッドのターゲットとなりうる障害当事者を選定し、試用とインタビューから成る評価実験を実施した。試用時の行動解析とインタビュー分析から、利用者の身体状況や実生活場面での利用に関する問題点を抽出し、追加／改善すべき機能要件として整理した。試用評価実験の様子を図 (b) に示す。

② 模擬環境評価

障害当事者の質的調査結果から抽出された使用場面を基に模擬環境を構築し、そ



(a) 専門職評価実験



(b) ターゲットユーザ評価実験

図 13：試用評価実験の様子

の環境内でロボティックベッド@プロト機（6名）、安全評価機（10名）、安全実証機（11名）を用いた模擬環境評価を行った。その結果、生活自立度や姿勢修正回数が向上し、自立生活に向けた改良効果が示された。

③ リスクアセスメントの実施

模擬環境評価時の安全評価機と安全実証機の課題遂行結果から想定される危険源を抽出し、リスクアセスメントを行った。その結果、31項目の想定危険源を抽出し、身体のはみ出し・衝突・姿勢のずれ・操作不可・その他の5項目に整理した。安全評価機と安全実証機の想定危険源を比較すると、危険源項目数は変化しなかったが、発生件数が減少しており、試用改善の効果が確認された。

④ 居宅環境評価

1名の障害当事者（神経性ミオパチー、男性、64歳）を対象に安全実証機の実環境評価（日中6時間、モデルハウス）を実施した。その結果、6時間通して身体のはみ込みや臀部の発赤等は見られずに機器を使用することができ、日常生活動作は問題なく遂行可能であった（図14(a)）。リフトとロボティックベッド@の移乗動作を比較したところ、リフトに比べ移乗にかかる時間と介助数が減少した（図14(b)）。障害当事者の質的調査結果から抽出された使用場面を基に模擬環境を構築し、その環境内でロボティックベッド@プロト機（6名）、安全評価機（10名）、安全実証機（11名）を用いた模擬環境評価を行った。その結果、生活自立度や姿勢修正回数が向上し、自立生活に向けた改良効果が示された。



(a) 机上作業



(b) 移乗動作

図 14：実環境評価の様子

(2) ユーザビリティ向上のための要素技術開発（国立障害者リハビリテーションセンター）

① ベッド上での姿勢安定性に関する研究

低摩擦シートにより姿勢変換時の身体再配置を促進することで、接触圧の上昇や姿勢ずれを防止する手法を開発し、その有用性を検証した。健常成人9名を被験者とした仰臥位→ファーラー位への姿勢変換実験では、接触圧の上昇が低摩擦シートによって有意に抑制されていることが示された。また、同様の手法が、車いす上での姿勢変換時にも有用であることを確認した。

② 車いす上での体温調節のための冷却システムの開発

ペルチェ素子を車いすバックレストに搭載することで、接触面からの体温調節を実現する体温調節システムを開発した。特に、バッテリー・制御回路を実装したスタンドアロン駆動可能なシステムを試作し、一般的な試験走行路面の安定走行が可能であることを確認した。また、冷却効率を向上させるために、接触圧分布の測定結果から身体形状に沿った接触面を造形する手法を提案した。接触圧分布を接触面の形状に数値変換することで、圧分散性の高い接触面を製作できる。同手法で作成した形状データから、三次元積層造形機及び切削加工機を用いて背面サポートを試作した結果、体圧分散に有効であり、身体と冷却システムとの真実接触面積を増加させることで、高い熱伝達効率を実現し得ることを確認できた。

(3) 病院内安全性／実用性評価（パナソニック株式会社）

筑波大学附属病院と連携して、病院内における介助支援型ロボットシステムの安全性／実用性評価を実施した。安全性に関しては、マットレスの体圧分布試験を行い、褥瘡リス

クへの評価を行うと共に、危険源の抽出（分離時のベッド柵への身体の挟み込み、車いすリクライニング時の滑り落ち、車いす時の前方足元の視界不良など）を行った。実用性に関しては、車椅子移乗時の脳血流変化を計測し、ロボティックベッド使用時は病棟ベッド・車椅子使用時に比べて、脳血流の低下、副交感神経活動の変化が軽減されることを確認した。また、これらの得られた結果をロボットシステムの改良にフィードバックした。

2.2.6. 安全環境センシング技術の研究開発（パナソニック株式会社）

(1) 基本実験システムによる評価実験

システム構築に向け、基本実験システムを病院内に設置し、現場でのセンサ性能評価と歩行者の行動特性調査を行なった。この結果、センサは環境変化等に影響されず確実に人体を検出できることが確認できた。また、人の行動特性については、約 25%が出会い頭事故のリスクがある可能性が知見として得られた。

(2) 安全環境センサシステムの開発

ロボット移動時にロボットの死角等から現れる人や障害物を事前に検知することで、ロボット単体では困難な出会い頭衝突等の防止を支援するシステムを開発した。開発した環

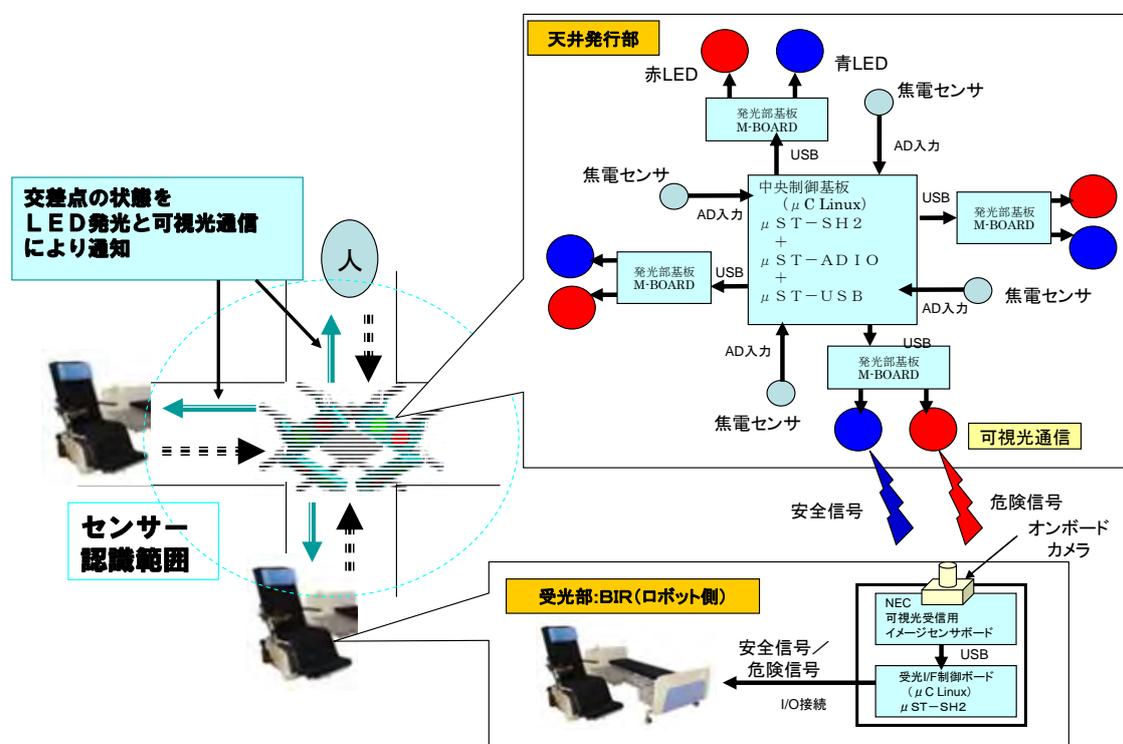


図 15：環境センサシステムの全体構成

境センサシステムの全体構成図を図 15 に示す。また、試作した安全環境センサシステム（出会い頭衝突等の防止支援システム）を用いて、ロボットシステム（プロト機）による模擬環境動作評価を実施した。交差点を模擬した環境において、ユーザと第三者が出会い頭で衝突しそうな状況になると、信号機による警告（青色から赤色に変化）及び移動速度制限が行われ、衝突回避支援が可能であることを確認した。

2.3. 目的に照らした達成状況

本事業の目標・成果・達成度を表 1に示す（◎：大幅達成、○：達成、△：未達、×：大幅未達）。

表 1：本事業に関する目標・成果・達成度

研究課題	研究開発の目標	成果	達成度
ロボットシステム開発	<p>■ 移乗／移動支援ロボットシステムの実用開発</p>		
	<p>安全技術を導入した移乗／移動支援ロボットシステムの実証試験を実施し、安全性および実用性評価を行い、この試験結果に基づき抽出された課題について、安全技術の改善／改良を図り、各技術および、ロボットシステムの実用化に目処をつける。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・移乗・移動支援ロボットシステムのプロトタイプを開発し、実証性評価及び安全性評価を実施 ・試験結果から抽出した課題に基づき、安全技術及びロボットシステムの改良仕様に反映 ・移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）に関しては、ISO13482 適合設計完了、移乗・移動支援ロボットシステム（介助支援型）に関しては、ISO13482 認証取得 	◎
安全技術開発	<p>■ リスクアセスメントに関する研究開発（パナソニック株式会社）</p>		
	<p>安全性検証手法研究開発実施者と連携して、ロボットシステムの安全性試験／評価を実施すると共に、リスクアセスメント及び3ステップメソッドに基づくリスク低減方策を実施し、安全性の実現に目途をつける。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・安全性検証手法研究開発実施者と連携し、ロボットシステムの安全性試験を実施（「移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボット」類型の安全基準策定及び試験ノウハウ構築に貢献） ・リスクアセスメント（①機械類の制限の決定、②危険源の同定、③リスク見積、④リスク評価）を実施すると共に、リスク低減が必要な危険源に対しては、3ステップメソッド（①本質的安全設計方 	◎

		策、②安全防護及び付加保護方策、③使用上の情報)に基づくリスク低減方策を実施し、許容可能なレベルまでリスク低減を実施	
<p>■ 操縦 I F / 操縦支援技術、動的動作経路生成技術の研究開発 (パナソニック株式会社)</p>			
	<p>不特定多数の利用者を対象として殆ど訓練や管理することを前提とすることなく、直感的に操作方法や機能を理解でき、安全にロボットを操縦することができる操縦 I F / 操作支援技術を開発する。また、その中で必要となる動的動作経路生成技術を開発する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・誤操作を防止する分かりやすいインターフェースを備え、ユーザの好みに応じて9種類のジョイスティックハンドルを自由に選択可能な操作 IF を開発 ・ユーザ操作を支援する操縦支援技術及びユーザの操作意思に基づき合体 / 分離動作を安全に行うための合体 / 分離動作誘導制御技術を開発 	○
<p>■ 安全変形 / 動作技術の研究開発 (パナソニック株式会社)</p>			
	<p>利用者の身体に直接作用し、変形・移動等を行なうロボットの動作における、人体の挟み込み等による被害を低減させる技術を開発する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・柔軟導電体とメッシュ状の絶縁体からなる形状柔軟性を備えた挟み込みセンサを開発 ・性能評価実験により、人体等の柔軟体に対して高感度の特性を有し、指等の挟み込み検知や人体との接触検知に有効性が高いことを確認 	○
<p>■ ロボットシステム自己診断技術の研究開発 (パナソニック株式会社)</p>			
	<p>ロボットのハード / ソフトの機能安全性を高めると共に、各機能が正常に動作していることを、ハード、ソフトの各階層を含めて複数のチェック機構で相互 / 多重に常時確認し、故障や異常を早期かつ自動的に検知して、</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・機能安全規格に基づき、ロボティックベッドの安全操作を実現するホールドツーラン機能 (安全関連制御システム) を開発 ・機能安全規格 ISO 13849-1 に基づく安全性能評価の結果、PLd (IEC62061 : SIL2 相当) となり、高い安全性でホールドツーラン 	◎

<p>安全に修復／停止する安全ロボットコントローラシステム技術を開発する。</p>	<p>機能が実現できていることを確認</p>	
<p>■ 機能／システムユーザビリティの研究開発（国立障害者リハビリテーションセンター／パナソニック株式会社）</p>		
<p>移乗・移動支援ロボットシステムの実用上の課題を、臨床評価を通じて調査／研究し、各安全技術、ロボットシステム設計にフィードバックすることで、想定される利用者の特性に適合した、実用的な安全技術を導く。</p>	<p>・移乗・移動支援ロボットシステムのプロトタイプを用いた模擬環境評価を行い、各安全技術やロボットシステムの改良仕様へのフィードバックを実施 ・接触圧の上昇／姿勢ずれを防止する手法や接触面からの体温調整を実現する冷却システムの開発を行い、その有効性を確認</p>	<p>◎</p>
<p>■ 安全環境センシング技術の研究開発（パナソニック株式会社）</p>		
<p>移乗・移動支援ロボットの周囲の環境（人や物、構造物など）の状態を動的に認識／推定し、ロボットの安全な動作を環境側から支援する安全環境センシングシステム技術の開発を行なう。</p>	<p>・ロボット移動時にロボットの死角等から現れる人や障害物を事前に検知することで、ロボット単体では困難な出会い頭衝突等の防止を支援するシステムを開発 ・模擬環境動作評価を実施し、信号機による警告及び移動速度制限により、衝突回避支援が可能であることを確認</p>	<p>○</p>

表 2：特許・論文・外部発表等の件数

区分 年度	特許出願（意匠含む）			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT 出願	査読付 き	その他	学会発 表・講演	新聞・雑 誌等へ の掲載	その他
H21FY	0	0	0	0	0	6	10	1
H22FY	7	0	0	0	2	6	7	2
H23FY	4	2	0	0	0	4	3	3
H24FY	4	0	0	1	0	5	0	2
H25FY	0	0	0	3	0	6	7	3

2.3 研究開発項目③ 安全技術を導入した配送センター内高速ビークルシステムの開発（株）ダイフク

本報告書は、経済産業省および独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO）が実施する「生活支援ロボット実用化プロジェクト」の一環として、株式会社ダイフクが実施した、「安全技術を導入した配送センター内高速ビークルシステムの開発(平成 23 年度-平成 25 年度)」の最終報告書である。

本件の始まりは、24 時間稼働の配送センターでフォーク運転手が集まらないといった状況や、海外でビークル(AGV : Automated Guided Vehicle)の案件の際、欧州勢が走行速度を日本メーカーの 2 倍程度 (120m/min) で走らせるといった日本メーカーに非常に不利な状況が多々発生してきたことに起因する。しかも、欧州勢のビークルの安全を確保しているのは、走行方向を見ているレーザセンサのみで、横からの人、フォークリフト等の飛び出しに対する配慮があまりなされていない状態である。

そこで本プロジェクトはこの状況を打開すべく、従来の AGV に比べ約 3 倍の最高速度 200m/min にて走行する高速 AGV を開発し、その安全防護システム・デバイスの開発を行った。さらに、開発品に対して安全テストを実行することで問題がないことを実証した。その結果、搬送処理能力が高く、作業者の安全を確保できる AGV システムの開発に成功した。

安全の中核技術である「エリア管理システム」の開発を行い、一般財団法人日本品質保証機構より ISO13482:2014 認証を取得し、その安全性能を示した。

本プロジェクトにより得られた知見から、JIS D 6802:1997 「無人搬送システムー安全通則」の追加防護策を一般社団法人日本産業車両協会に提言した。結果として、AGV を高速化した際の、日本国内における安全への考え方の確立に貢献し、今後の JIS、ISO に関する提言も、この知見を基に行われることになる。

本プロジェクトの成果が、日本国内における AGV システムの搬送高効率化、それに携わる作業者の安全性の向上、そして様々な産業・分野の物流効率化に貢献できれば幸いである。

最後に 味の素株式会社様、味の素物流株式会社様はじめ多くの企業、団体のご協力のもと今回のプロジェクトが完成いたしました。皆様の多大なるご協力、ご援助に対してプロジェクト一同、心より感謝申し上げます。

平成 26 年 4 月
株式会社 ダイフク

目次

内容

1. はじめに	14
1.1. 事業の背景	14
1.2. 事業目的	19
1.2.1. 本プロジェクトが取り組む技術的課題	19
1.3. 事業概要	19
1.4. 本報告書の構成	20
2. AGV 高速化による主要なリスク	21
2.1. リスク評価について	21
2.2. 高速 AGV システムでの主要な危険事象に対して	23
2.2.1. AGV との衝突	23
2.2.2. AGV との側面からの衝突	23
2.2.3. バッテリー充電時の漏電・火災	23
2.3. 安全への考え方	24
2.3.1. 3D 障害物センサ（安全防護技術）	24
2.3.2. エリア管理システム（安全防護技術）	24
2.3.3. ローカルエリアセンサ（安全サポート技術）	24
2.3.4. AGV 給電の非接触化（安全サポート技術）	24
3. 開発概要	25
3.1. 高速 AGV システムの概要	25
3.2. 高速 AGV	28
3.2.1. コンベヤタイプ	28
3.2.2. リアフォークタイプ	30
3.2.3. 高速 AGV の基本性能評価試験	32
3.3. 3D 障害物センサ	38
3.3.1. 仕様	38
3.3.2. 性能評価試験結果	43
3.4. エリア管理システム	49
3.4.1. 仕様	49
3.4.2. UWB 測位システム基本性能評価試験	58

3.4.3.	システム連動試験	65
3.5.	ローカルエリアシステム	69
3.5.1.	仕様	69
3.5.2.	性能評価試験結果	73
3.6.	非接触充電システム	78
3.6.1.	概要	78
3.6.2.	仕様	79
3.6.3.	基本性能評価試験	81
4.	検証試験	86
4.1.	物流センターにおける安全性検証テスト（協力：味の素株式会社、味の素物流株式会社、関東エース物流株式会社、株式会社オールユニール）	86
4.1.1.	まえがき	86
4.1.2.	テスト内容	86
4.1.3.	テスト結果	88
4.1.4.	まとめ	96
4.2.	AGV 衝突時の衝撃値（協力・執筆：JARI）	97
4.2.1.	試験概要	97
4.2.2.	試験結果	100
4.3.	UWB 性能評価試験（協力：生活支援ロボット安全検証センター）	105
4.3.1.	概要	105
4.3.2.	試験内容および試験方法	105
4.3.3.	性能評価試験結果	107
4.3.4.	考察	110
5.	成果	112
5.1.	エリア管理システムの安全認証取得	112
5.1.1.	目標とする安全要求性能	112
5.1.2.	評価規格（JQA より抜粋）	113
5.1.3.	文章一覧	114
5.1.4.	評価対象	116
5.1.5.	周辺機器に対する要求事項	116
5.1.6.	安全性能	117
5.2.	JIS D 6802 : 1997 追加防護策の改定案	118
5.2.1.	方針	118
5.2.2.	改定骨子案	118

5.3.	電波法 無線設備規則第 49 条の 27 の改正	120
5.3.1.	UWB 無線システム作業班の概要	120
5.3.2.	作業班でのダイフクの活動	120
6.	まとめ	122
7.	開発体制	123
7.1.	プロジェクトメンバー	123
7.2.	ご協力頂いた方々	123
8.	その他	125
8.1.	発表・講演・展示会	125
8.1.1.	発表	125
8.1.2.	講演	125
8.1.3.	展示会	125
8.2.	特許	126
8.3.	メディアへの掲載	126
9.	参考文献	127

図表目次

－図目次－

図 1-1	平置, パレットラック, フォークリフトの例.....	14
図 1-2	自動倉庫 (左) とソーター (右)	14
図 1-3	現状の自動化の例 (自動倉庫, ソーター以外は人が作業)	15
図 1-4	フォークリフトによる作業の様子	16
図 1-5	現状の配送センターの例 (写真: 人が AGV 前面を横断する様子)	18
図 3-1	高速 AGV システム概要.....	27
図 3-2	コンベヤタイプ AGV.....	29
図 3-3	リアフォークタイプ AGV.....	30
図 3-4	障害物センサの配置及び目的	31
図 3-5	測定機器設置時の全体風景	32
図 3-6	各測定箇所.....	34
図 3-7	引張圧縮	35
図 3-8	曲げ	36
図 3-9	非常停止時の AGV 走行位置と速度.....	36
図 3-10	測定ポイント	37
図 3-11	3D 障害物センサの概略図.....	38
図 3-12	機器の構成	41
図 3-13	AGV とテストピースの位置関係.....	44
図 3-14	白黒各テストピースのテスト風景	44
図 3-15	AGV とテストピースの位置関係.....	45
図 3-16	テスト風景	45
図 3-17	AGV とテストピースの位置関係.....	46
図 3-18	3D 障害物センサの取付位置の変更.....	47
図 3-19	3D 障害物センサ取付位置変更後の AGV 外観.....	48
図 3-20	エージェントの位置と進行方向	51
図 3-21	乗り状態と降り状態	51
図 3-22	安全判定	52
図 3-23	安全判定の二重化	52
図 3-24	危険判定エリア内にいるエージェントに対する音声警告.....	53
図 3-25	安全信号の二重化	53
図 3-26	リファレンスタグによる UWB センサ状態の監視	54
図 3-27	セル定員のチェック	54

図 3-28	AGV の位置情報の比較.....	55
図 3-29	エージェント数の比較	55
図 3-30	タグ間距離を監視	56
図 3-31	ゲートによる入退場者の管理	56
図 3-32	カメラによる画像認識を用いて許可のないエージェントの侵入を検知.....	57
図 3-33	電光掲示板に入退場時のエラーの原因を表示.....	57
図 3-34	タグを充電している様子	58
図 3-35	測定エリア	59
図 3-36	各格子点での測位の平均誤差	60
図 3-37	各歩行ラインからの平均誤差, 最大誤差, 誤差の標準偏差.....	60
図 3-38	走行ラインからの誤差の平均, 最大, 標準偏差.....	60
図 3-39	歩いた軌跡	62
図 3-40	各格子点での測位成功率	62
図 3-41	センサ数が測位精度に与える影響	64
図 3-42	テスト環境	66
図 3-43	安全距離の計算結果	67
図 3-44	すれ違いテストの環境	68
図 3-45	すれ違いテストの結果	68
図 3-46	ローカルエリアセンサの概略図	69
図 3-47	機器の構成	70
図 3-48	センサの構成	72
図 3-49	システムの構成	73
図 3-50	ローカルエリアセンサの測定位置	74
図 3-51	人体検出評価風景	76
図 3-52	ローカルエリアセンサ 1 の検出結果	76
図 3-53	ローカルエリアセンサ 2 の検出結果	76
図 3-54	ローカルエリアセンサの検出範囲	77
図 3-55	無接触充電の概略図	78
図 3-56	充電システムの基本構成	79
図 3-57	機器構成	82
図 3-58	充電時の電圧と電流	82
図 3-59	充電時の温度	83
図 3-60	Y・Z 軸に対する距離と磁束密度の関係.....	84
図 3-61	Z・X 軸に対する距離と磁束密度の関係.....	84
図 3-62	Y・X 軸に対する距離と磁束密度の関係.....	85
図 4-1	テストエリア	87

図 4-2	作業者への UWB タグの取り付け	88
図 4-3	判定領域	89
図 4-4	AGV とフォークリフトとの接触	95
図 4-5	AGV とフォークリフトとの接触 (AGV 前方方向)	95
図 4-6	台車とダミーの衝突	97
図 4-7	衝突方向 (正面、後面、頭部、尻部)	98
図 4-8	AGV を模擬した台車の外観	98
図 4-9	人体模型 (男性) とその仕様	99
図 4-10	人体模型 (女性) とその仕様	99
図 4-11	頸部の荷重及びトルクの感度方向	100
図 4-12	男性型ダミーを使用した速度別・衝突方向別の HIC 値	101
図 4-13	女性型ダミーを使用した速度別・衝突方向別の HIC 値	102
図 4-14	男性型ダミーを使用した速度別の頭部打撃時の HIC 値	102
図 4-15	男性型ダミーを使用した速度別の腰部打撃時の加速度	102
図 4-16	試験風景	106
図 4-17	発信機 (タグ) の設置角度	106
図 4-18	各角度の距離による電界強度の総計の推移	109
図 4-19	STD と HUR の距離による電界強度の総計の推移	110
図 4-20	センサまでの最大距離	111
図 5-1	IEC61508-5 に基づく要求 SIL	112
図 5-2	IEC62061 に基づく要求 SIL	113
図 5-3	ISO 13482-6:2014 認証スキーム	114
図 5-4	エリア管理システムブロック図	116
図 5-5	認証書	117

— 表目次 —

表 1-1	自動化搬送機器の速度と走行場所の比較	17
表 2-1	リスクの大きさを決める 4 つのパラメータ	22
表 2-2	RI の定義	22
表 3-1	高速 AGV システムの各機器の説明	27
表 3-2	コンベヤタイプ AGV の仕様	28
表 3-3	リアフォークタイプ AGV の仕様	30
表 3-4	AGV の評価内容	32
表 3-5	応力測定値	35
表 3-6	無負荷時の停止精度	37
表 3-7	負荷時の停止精度	37
表 3-8	3D 障害物センサの仕様値	40
表 3-9	各 AGV でのテストピース検出停止距離	44
表 3-10	各 AGV でのテストピース検出停止距離	46
表 3-11	高さ方向の検出可否	47
表 3-12	エリア管理システムの機能とその説明	50
表 3-13	各タイムスロット間隔における測位間隔	63
表 3-14	各タイムスロット間隔における測位遅れ	63
表 3-15	試験結果のまとめ	65
表 3-16	テスト結果	66
表 3-17	安全距離の計算条件	66
表 3-18	ローカルエリアセンサの仕様値	70
表 3-19	ローカルエリアセンサの検出精度評価	75
表 3-20	インバータ仕様	80
表 3-21	送電・受電パッド仕様	80
表 3-22	充電コントローラ仕様	81
表 4-1	テスト結果一覧	101
表 4-2	速度 200m/min で衝突した時の各衝撃値と衝突安全基準値	103
表 4-3	試験条件	107
表 4-4	UWB 測位システム（周波数帯：7.25～10.25GHz）のスペアナ測定結果	108
表 4-5	UWB 測位システム（周波数帯：6～8GHz）のスペアナ測定結果	108
表 4-6	電界強度の最大値 I_p と総計 I_t	109
表 4-7	タグからの距離による電界強度（推定値含む）	111
表 5-1	文章一覧	115

添付資料一覧

- 添付 1 平成 23 年度中間年報
- 添付 2 平成 24 年度中間年報
- 添付 3 リスクアセスメント v7.0
- 添付 4 AGV 衝突試験 結果（執筆：JARI）
- 添付 5 UWB 審議内容
- 添付 6 JIS 追加防護策 骨子＋詳細内容
- 添付 7 エリア管理システム プレスリリース
- 添付 8 エリア管理システム ISO13482 認証書
- 添付 9 作業記録写真

改定履歴

改定日	Ver	改定内容	承認	審査	作成
2014年4月25日	1.0.0	初版	辻本	高川	毬山

和文要旨

配送センター内で人・フォークリフトと共存できる高速ビークル（AGV）システムの安全技術を開発した。この高速 AGV システムは、従来の最高速度 60m/min の約 3 倍にあたる最高速度 200m/min で走行可能である。これにより、配送センターにおいて高速 AGV の安全運行が可能になるとともに、生産性の向上が期待できる。

プロジェクトの初年度にあたる平成 23 年度は、コンベヤタイプの高速度 AGV の開発、リスクアセスメントの実施、安全に関するデバイスおよびシステムの開発を行った。具体的にはリスクアセスメントの結果から、以下の 3 つの安全に関するデバイスおよびシステムを開発した。1 つ目は 3D 障害物センサ（安全デバイス）の開発。このセンサは、AGV の進行方向前方にある障害物を 3 次元的に検知し、走行経路上に障害物がある場合は AGV を安全に停止させる。2 つ目は、エリア管理システム（安全サポートシステム）の開発。このシステムは、人・フォークリフト・AGV の位置をリアルタイムに計測することで、ラックなどの物陰から AGV 進行方向前方への人・フォークリフトの飛び出しを検知し、AGV を減速・停止させる。最後に、エリア管理システムでは検知しにくいブラインドコーナー・交差点で人・フォークリフトを検知し、AGV を減速させるローカルエリアシステム（安全サポートシステム）を開発した。

プロジェクトの中年度にあたる平成 24 年度は、リアフォークタイプの高速度 AGV（最高走行速度 200m/min）の開発、前年度開発システムのブラッシュアップ、非接触充電システム（安全サポートシステム）の開発、安全検証試験を行った。初年度に開発した AGV と合わせて 2 台の AGV での走行試験が可能になり、2 台同時走行時の安全性評価を実施した。また、安全検証試験として、一般財団法人 日本自動車研究所（JARI）の全面協力のもと AGV の衝突試験を実施した。AGV とダミー人形を衝突させ、衝突時の衝撃値を計測する試験である。その結果、AGV が 60m/min で走行している際の人との衝突は、軽傷程度で済むと考えられる結論が得られた。2 つ目は生活支援ロボット安全検証センターの電波暗室にて実施した UWB 性能評価試験である。結果として、UWB タグから発信される電波の距離ごとの電界強度を推定できるようになったことで、UWB センサ受入電界強度やノイズによる UWB センサ受信限界距離について推定を行うことができるようになった。

プロジェクトの最終年度にあたる平成 25 年度は、実際の配送センターでの運用テスト、エリア管理システムの安全認証取得、JIS D 6802 の追加防護策の提言を行った。実際の配送センターでの運用テストとして、味の素株式会社・味の素物流株式会社・関東エース物流株式会社・株式会社オールユニールの協力のもと、高速 AGV システムの安全性を検証した。結果として、AGV に人・フォークリフトが近づいた際、AGV が安全速度 60m/min まで速度を十分に落としきれることがわかり、提案システムにより高速 AGV の安全性が確保できることを確認した。また、一般財団法人 日本品質保証機構（JQA）の協力のもとドキュメント作成を進め、エリア管理システムに対して ISO13482:2014 の認証を取得した。そして最後

に、この3年間のプロジェクトにて得た知見を基に、JIS D 6802:1997「無人搬送システムー安全規則」の追加防護策を一般社団法人 日本産業車両協会に提言し、AGVを高速化した際の、日本国内における安全への考え方の確立に貢献した。同協会では、当社の提案に基づき、業界内の意見をまとめた上で、JISの改定に向けて動く見込みである。

Abstract

This project developed safety technologies regarding High Speed AGV system which enable co-existence with AGVs, workers and forklifts at distribution centers (DCs). The maximum speed of developed AGVs is 200m/min which is about 3 times as much as the one of conventional AGVs. High productivity at DCs is expected by introducing these technologies.

In FY 2011, the initial year, risk assessments, development of a conveyor type AGV (Max speed = 200m/min), and development of safety related devices/systems were conducted. The risk assessments show that the following three safe related devices and system can realize the AGV safety. The first device is 3D obstacle sensor as a safety device. This sensor detects three-dimensionally obstacles which is located in the direction of forward AGV movement and stops AGVs when obstacles are detected. The second development item is Area Management System as a safety support system. This system locates workers, forklifts and AGVs on real time, so can detect workers and/or forklifts rapidly moving in front of AGV from the shadow and stops AGVs or controls the speed of AGVs to prevent such crash. The third development item is Local Area Sensor as a safety support device which detects workers and forklifts on cross points where Area Management System may have difficulties to detect them. These devices were developed and safety confirmation tests were conducted. The test results imply that our considering method can realize the safety.

In FY2012, development of a rear-forklift type AGV (Max speed = 200m/min), the modification of devices/system which were developed in the previous year, development of wireless power supply system and safety evaluation tests were conducted. A risk assessment was reviewed in the initial of this year and electrification in power supply was found as a new risk. A wireless power supply style was developed as a counterplan against this new risk. AGV crash tests and UWB performance tests were also done in this year. The crash tests measure the impact value of dummy dolls by working with JARI. The results imply that crash at 60m/min causes just mild injury and the justification that 60m/min is a safe speed. The radio strength of each distance between a sensor and a UWB tag could be estimated by UWB performance tests. The results estimated the limit of length from each noise level of sensor and made a construction rule of Area Management System.

In FY 2013, AGV performance tests in an operating DC, safety certification of Area Management System and proposals of JIS D 6802:1997 additional protection method were done. Tests at an operating DC (Tatebayashi distribution center of Ajinomoto

Logistics Corporation) show that the developed system decreases an AGV speed to 60m/min when workers or forklifts are near AGV, and our system can ensure the safety. Area Management System was modified to meet safety standard and ISO13482 was certified to this system by JQA. Finally, we proposed JIS 6802:1997 additional safety method to Japan Industrial Veicles Association based on our knowledge by this project. We are considering that this proposal contributes to establish Japanese safety starategy against high speed AGV. This association will surmarize the industry's opinion based on our proposal and amend the standard.

1. はじめに

1.1. 事業の背景

現状の配送センターの多くは、平置、パレットラック、フォークリフトの組み合わせにより運用されている（図 1-1 参照）。配送センターの中でも、倉庫業あるいは 3PL とされている業界では、ごく一部が自動化設備を導入して対応している。しかしながら、それ以外の多くの配送センターでは図 1-1 のようにまだまだ人手により作業を行っている。また、一部自動化（自動倉庫、ソーターなど：図 1-2 参照）ができている配送センター（図 1-3 参照）でも荷揃え場あるいは荷捌き場では多くの人が働き、フォークリフトが走り回っている（図 1-4 参照）。



図 1-1 平置、パレットラック、フォークリフトの例



図 1-2 自動倉庫（左）とソーター（右）

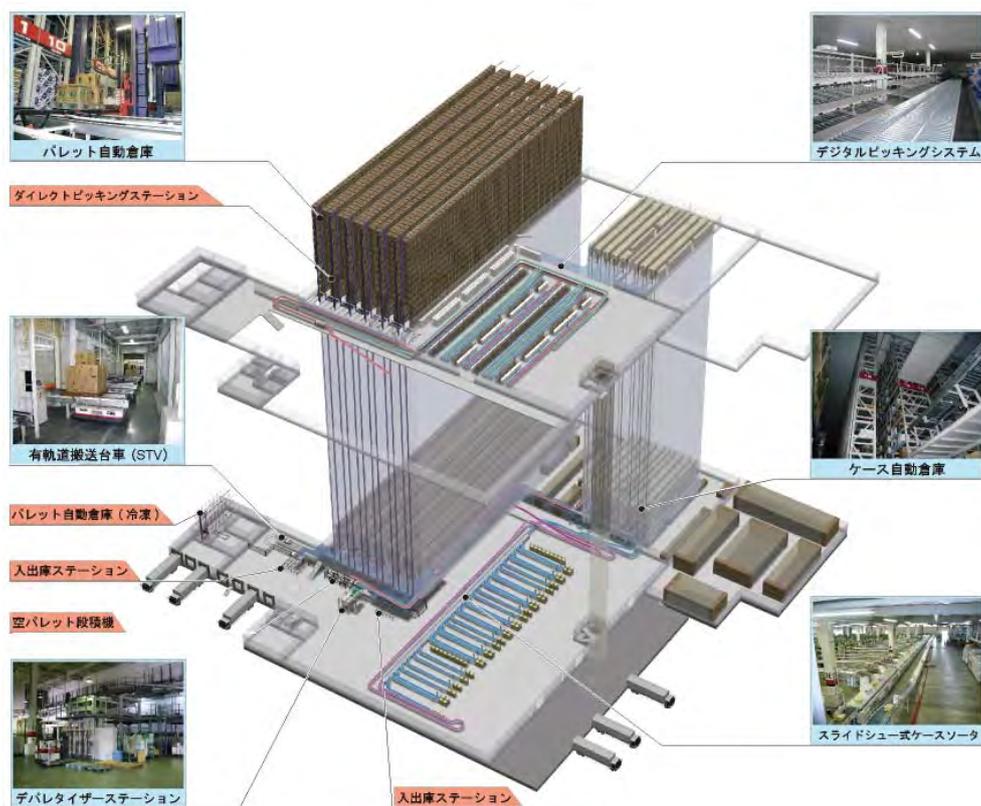
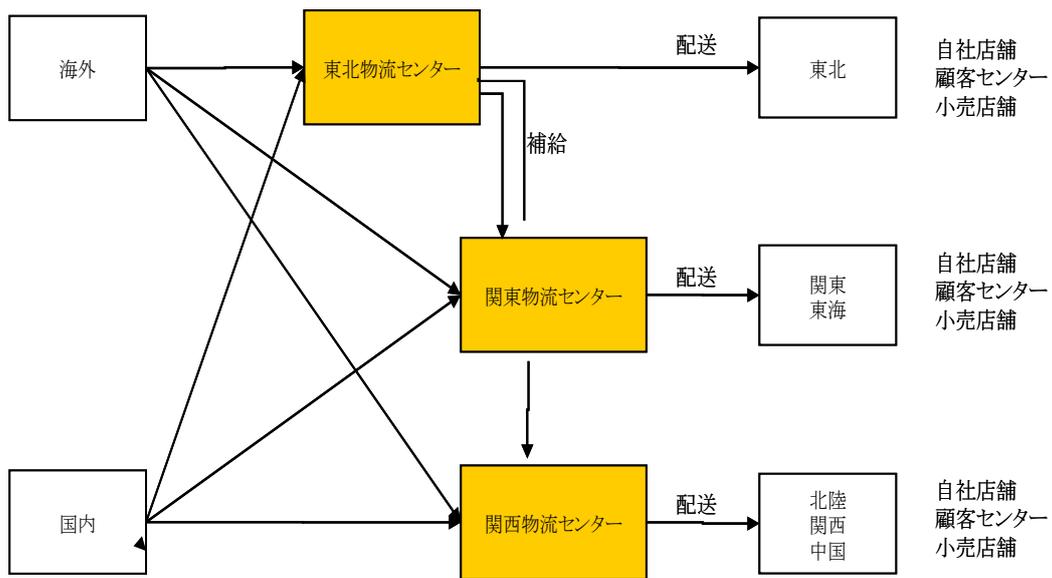


図 1-3 現状の自動化の例（自動倉庫，ソーター以外は人が作業）



a) 人手作業（トラックからの荷下ろし）



b) 人手作業（平置き）



c) トラックからの荷下ろし



d) 一時仮置き

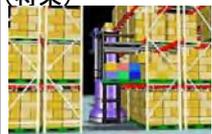


e) 自動倉庫に入庫

図 1-4 フォークリフトによる作業の様子

配送センターの作業の大半はフォークリフトを利用した人手により行っているため、生産性があがらない。配送センターの生産性が低いと製造の生産性をあげても日本全体の生産性はあがらず、国際競争力が劣ることになる。これらを解決する有力な方法として、既存の AGV（Automated Guided Vehicle：レールガイド無しビークル）を大きく進化させ、新しい荷揃え場あるいは荷捌き場に対応することが挙げられる。ここで、なぜ AGV に対応するかというと、RGV（レール付ビークル）、コンベアでシステムを構築すると固定設備がスペースを占拠し、変化に対して自由度が効かなくなるからである。処理能力は低い、自由度の高い AGV は、荷揃え場あるいは荷捌き場に対して非常に有効である。以前荷捌き場に納入した AGV は流量の変化（平均流量とピーク流量が 2 倍）に対応できず現存していない。そのため、流量の変化にも耐えうる能力を有し、安全を確保しつつ、自由度の高い新しい高速 AGV が必要である。参考に自動化搬送機器の速度と走行場所の比較を表 1-1 にまとめる。

表 1-1 自動化搬送機器の速度と走行場所の比較

項目	高速AGV	RGV	コンベア	現状AGV
イメージ図	(将来) 			
速度(m/分)	最高速200	空荷200、実荷160	20~30	最高速60
走行場所	フローを移動: 荷揃え場、荷捌き場 を安全を守り自由に 移動可能。将来は ラック内に入り入出 庫可能	レール上を移動: 荷揃え場、荷捌き場へ はフォークリフトが必 要	コンベア上面を移動 荷揃え場、荷捌き場へ はフォークリフトが必 要	フローを移動 荷揃え場、荷捌き場を 安全を守り自由に移 動可能。ただし能力 が不足する時がある

配送センターの荷揃え場あるいは荷捌き場は、AGV、人、フォークリフトが混在しているため、現存のAGVの最高走行速度を60m/minに制限することで安全を守っている。現状の配送センターでAGVが利用されている例を図1-5に、AGVと同じフロア上を人が横断している様子もあわせて示す。

近年の動向として、全体の在庫を圧縮する目的で配送センターを集約し、配送センターは大型化に向かっている。図1-5は多数のセンターを集約したことにより、建物の規模が幅350m×奥行200mにもなった例である。そこでは現状の最高走行速度60m/minのAGVでは能力的に不足し、リードタイムが長くなり、手待ちが発生している。この解決方法として、最高走行速度を200m/minとする対応方法があるが、AGVの総重量は約2t(本体約1t、荷約1t)であり、これに対する安全の確立が急務となる。AGVの移載装置は運ぶ対象物により異なり、移載形態によらない高速走行時の安全のためのシステムが特に必要となる。

リスク低減の現状の対策として、一般社団法人日本産業車両協会で作成したJISの追加防護策を基準とするが、これらはテストをもとに確立されたものではない。実機を用いたテストにより高速AGV本体とシステムの両方で安全方法の確立が必要となる。JIS、ISOの現状については別紙に記載するが、平成26年度よりJISの審議が開始される見込みである。そのため、平成26年度までに、審議団体 日本産業車両協会を通じて反映する必要がある。また、リスクアセスメントについても一般社団法人産業機械工業連合会(ロボット工業会も参加)にて本システムのリスクアセスメントシートを既に作成しており、そこから出された安全技術課題をこのプロジェクトで解決する。そしてAGVを高速化した際の安全

指針に関して検討する。

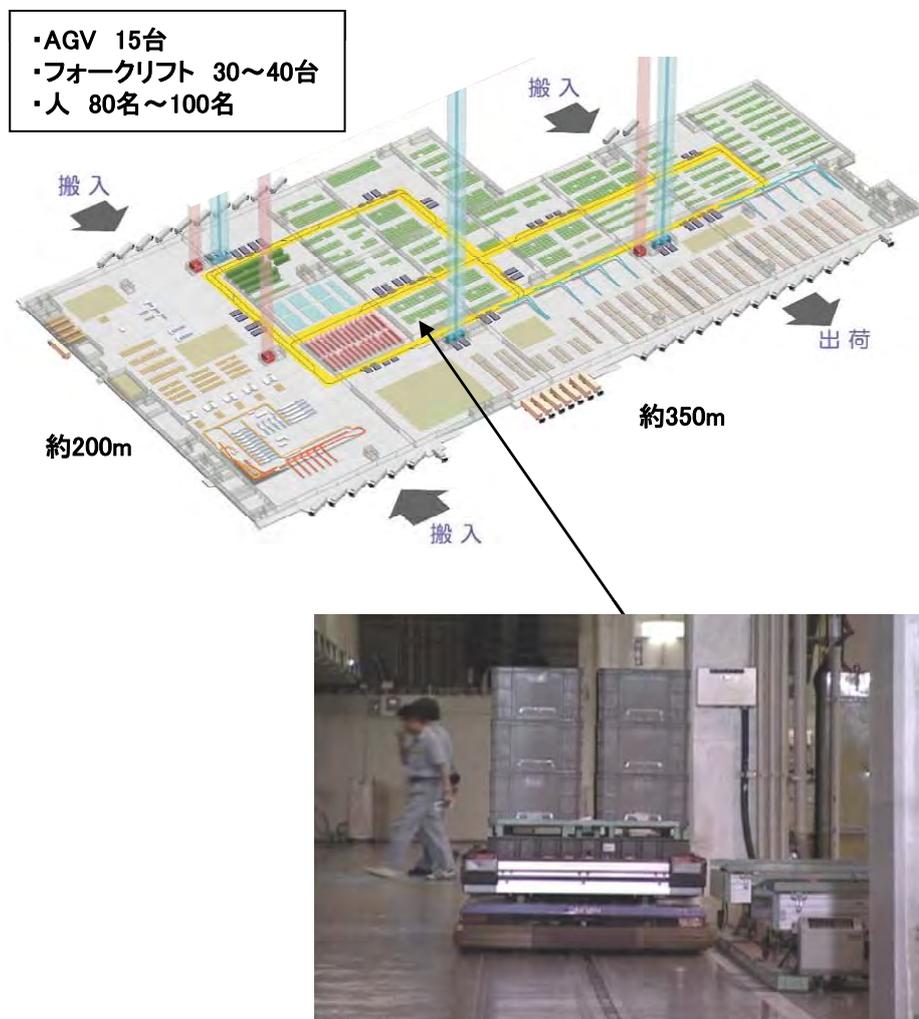


図 1-5 現状の配送センターの例（写真：人が AGV 前面を横断する様子）

1.2. 事業目的

上述の背景に基づき、本プロジェクトでは以下の2つを目的とする。

- 最高速度 200m/min の高速 AGV の開発と、そのリスク低減技術と安全要素技術の開発
- AGV を高速化した際の安全について、JIS D6802:1997（無人搬送台車—安全通則）の追加防護策の提言

1.2.1. 本プロジェクトが取り組む技術的課題

配送センター内で高速 AGV を活用するにあたっての技術的問題点として次の5つが挙げられる。

- 作業者、フォークリフトが働いているエリア（特定の場所）で AGV を 200m/min で走行させる安全方策が確立されていない。
- 総重量約 2t の AGV を 200m/min の走行状態から常に安全に停止状態に持っていくには AGV 本体の障害物検出だけでは限界がある。
- 現状の安全センサは単体では障害物を面で検出せず、線（2 次元的）でしか検出できない。
- ブラインドコーナーまたは物陰からの飛び出しに対して、安全方策が確立されていない。（システムによる安全確保ができない）
- 現状の JIS などには、安全規格に対して定量的な数字がない。

開発を通してこれらの問題点を解決していくことで、日本全体の生産性を上げるとともに新しい市場を想像していく。

1.3. 事業概要

平成 23 年度において、高速 AGV システムのリスクアセスメントを実施し、危険事象とその対策を明確化した。その上で、高速 AGV（コンベヤタイプ：最高速度 200m/min）を 1 台開発し、安全に関する 3 つのデバイス・システム：3D 障害物センサ（安全防護）・エリア管理システム（安全サポート）・ローカルエリアセンサ（安全サポート）の開発を実施した。

平成 24 年度では、2 台目の AGV（リアフォークタイプ：最高速度 200m/min）を開発し、AGV が 2 台走行した際の安全性を検証した。さらに、平成 23 年度開発した技術を検証・改造し、性能強化を行った。また、新たな技術として、AGV への給電を非接触化し、接触式充電によって起こりうる火災等の危険事象に対応した。

平成 25 年度は、実際に稼働中の配送センターにおいて、高速 AGV を走行させ、高速 AGV システムの安全性を検証した。また、開発技術のうち、エリア管理システムを安全化し、ISO13482:2014 を取得した。また、プロジェクトにおいて得られた AGV を高速化した際の安全の考え方を基に作成した JIS D 6802:1997 の追加防護策を、一般社団法人日本産業車両

協会に提出した。同協会では、この提言を基に同 JIS の改定に向けて進む予定である。

1.4. 本報告書の構成

本報告書では、第 1 章にプロジェクトの背景と目的をまとめた。第 2 章では、AGV システムを高速化した際のリスクアセスメントの手法とその結果の主要な危険事象をまとめた。第 3 章に開発した AGV、安全防护技術（3D 障害物センサ・エリア管理システム）、安全サポートシステム（ローカルエリアセンサ、非接触給電システム）の概要と試験結果をまとめた。第 4 章では、稼働中の物流センターでの検証試験、AGV 衝突時の衝撃値計測試験、UWB 電波強度計測試験の結果をまとめ、開発システムの妥当性を検証した。第五章では、本プロジェクトの成果として、エリア管理システムの ISO13482:2014 の認証、JIS 追加防護策の骨子、電波法 無線設備規則の改正について述べた。

2. AGV 高速化による主要なリスク

別紙 添付3に高速AGVシステムのリスクアセスメントを示す。リスクアセスメントは、プロジェクト開始時の2011年度から始まり、プロジェクト終了時までの間に7回の見直しを行った。このリスクアセスメントシートは、一般社団法人日本機械工業連合会が作成したガイドライン「メーカーのための 機械工業界リスクアセスメントガイドライン」にもとづいている（平成22年3月31日発行）。このシートの表の見方を以下に示す。

- ライフサイクル：搬入、据付、調整、運転、トラブル処理・修理、保守、処分に分類する。
- タスク／人：タスク名とリスクに関係する人物
- 危険区域：危険源の位置
- 危険源：危険を発生させる事象・原因・症状
- 危険状態：危険が発生する状態
- 危険事象：具体的な危険な状況
- リスク評価について：2.1節にて説明
- 方策：リスク低減のための保護方策
- 保護方策の分類：方策を、本質的安全設計による対策、安全防護及び付加保護による対策、使用上の情報による対策に分類した。
- 低減後リスク評価：保護方策にてリスクの低減を行った後のリスクの評価結果
- さらなる低減の要・不要：追加の低減策が必要か不要かの判断

2.1. リスク評価について

各危険事象のリスクの大きさは、表（「メーカーのための 機械工業界リスクアセスメントガイドライン」より抜粋）の4つのパラメータ（表 2-1 参照）から、表 2-2 のRI（リスクインデックス）によって定義される。このリスクアセスメントでは、RIが2以下を許容範囲内のリスクと考える。また、各リスクに対する、安全制御機構への要求PL（パフォーマンスレベル）も表 2-2 によって決定される。なお、PL_r（要求パフォーマンスレベル）に関しては、対象のRIが3以上であり、方策が制御的な手法を用いた時のみ記載した。

リスクアセスメントシートでは、まず、危険事象に対して、何も追加防護策を持たない状況からリスクの見積を開始する。防護策を用いた後の状態に対して、再度リスクの評価を行い、その結果、RI値が3以上であれば、更なる追加防護策を実施する。

表 2-1 リスクの大きさを決める4つのパラメータ

S	S1	軽微な傷害（通常は回復可能）、例えば、こすり傷、裂傷、挫傷、応急処置を要する軽い傷
	S2	深刻な障害（通常は回復不可能。致命傷を含む）、例えば、肢の粉碎又は引き裂かれる若しくは押しつぶされる、骨折、縫合を必要とする深刻な傷害、筋骨格障害（MST）、致命傷
F	F1	作業シフト（サイクル）あたり2回以下又は15分以下の暴露
	F2	作業シフト（サイクル）あたり2回超又は15分超の暴露
*暴露頻度については、主に「機械的危険源」を対象としている		
A	A1	いくつかの条件下で可能 ー 可動部分が0.25m/s以下の速度で動く場合、及び被暴露者がリスクに気づいており、また危険状態又は危険事象が迫っていることを認識している。 ー 特定の条件による（温度、騒音、人間工学等）
	A2	不可能
O	O1	安全分野で証明され、承認されている成熟した技術（ISO13849-2:2003参照）
	O2	過去2年間で技術的故障が発見されている ー リスクに気づき、また作業場で6ヶ月以上の経験を持つ十分に訓練を受けた人による不適切な人の挙動（人に依存する場合） ー 過去10年以上発生していない類似の事故（類似事故の有無の場合）
	O3	定期的に見られる技術的な故障（6ヶ月以下毎） ー 作業場で6ヶ月未満の経験を持つ十分に訓練を受けていない人による不適切な人の挙動（人に依存する場合） ー 過去10年間に工場で見られた類似の事故（類似事故の有無の場合）

表 2-2 RIの定義

ISO14121/ISO13849-1 リスクパラメータ			危険事象の発生確率* ^{注1}			優先順位	ISO13849-1
危害の程度	暴露頻度	回避の可能性	O1	O2	O3		PL _r 又はPL
S1 軽度	F1 稀	A1 可	1	1	2	3	a
		A2 不可	1	1	2		b
	F2 頻繁	A1 可	1	1	2	3	b
		A2 不可	1	1	2		c
S2 重度	F1 稀	A1 可	2	2	3	2	c
		A2 不可	2	3	4		d
	F2 頻繁	A1 可	3	4	5	1	d
		A2 不可	4	5	6		e

RI=リスクインデクス



2.2. 高速 AGV システムでの主要な危険事象に対して

リスクアセスメントから、60m/min から 200m/min へ高速化することによって発生する危険源が特定された。それぞれを以下にまとめる。

2.2.1. AGV との衝突

AGV 進行方向正面に作業員やフォークリフトが存在し、AGV が高速で衝突する場合は挙げられる。高速化に伴い、衝突時の衝撃値も上がるため、作業員との衝突を避けるための手法を考える必要がある。今回の開発において、次のようにリスクを低減する。まず、AGV に搭載する走行メロディ、ウィンカー、通路の区分け等を用いて、作業員に気づかれやすく、また通路上で作業する頻度などを落とし RI を 5 から 3 まで低減させる。ただし、この状況でも RI は 3 以上であるため、更なる追加防護策が必要となる。次に、AGV 正面につける障害物センサを用いて、進行方向に存在する作業員を検出し、停止させる安全センサを取り付ける。これにより、RI は 1 まで低下する。この時、PLr=d である。なお要求 SIL は、ISO13849-1:2006 に基づき、IEC61508-1:2010 や、IEC62061-1:2005 における SIL2 と考える。

2.2.2. AGV との側面からの衝突

高速化に伴い、最高速から停止するまでの制動距離が大幅に増加する。そのため、物陰から急に AGV の正面に飛出すような危険事象(例: 十字交差点に横から作業員が出てくる。)に対して何らかの防護策を考える必要がある。今までの 60m/min では受け入れ可能な危険事象であったが、高速化により、リスクが増大し、受入れることが出来ない危険事象となった。見積の結果、イニシャルの RI は 5 と評価される。正面からの衝突と同様に、走行メロディ、ウィンカー、通行区分や退避可能なスペースの確保によって、RI を 3 まで下げる。その上で、作業員やフォークリフトと AGV の位置をリアルタイムに検出し、AGV 付近に作業員・フォークリフトが近づいた場合には AGV の速度を減速させ、側面からの衝突を防護するシステム (エリア管理システム) を開発する。この結果、RI は 1 まで減少し、許容可能なリスクまで低減させることが出来た。エリア管理システムに求められる要求 PL は、d である。なお要求 SIL は、IEC61508-1:2010 や、IEC62061-1:2005 での評価を検討し、SIL2 とした (5.1 章を参照)。

2.2.3. バッテリー充電時の漏電・火災

AGV はバッテリーによる電力供給が行われる。高速化に伴い、走行モータの消費電力アップなどによりバッテリーは容量が大きくなる。それにともない、充電頻度も多くなる。充電はソケットによる接触型の充電になるため、年に数軒程度、火災の原因になる場合や火傷の事例も報告されている。そこで、充電部を非接触化し、火災や火傷を本質的に起こさないようにする。

2.3. 安全への考え方

リスクアセスメントの結果、以下の安全に関わる技術開発を実施した。AGV の高速化自体に対してのリスクの増大については、2.3.1, 2.3.2, 2.3.3 に記載する 3 つの安全技術を用いる。これら 3 つの防護技術が全て安全であると判定した時のみ、AGV は高速運行が可能とする。

2.3.1. 3D 障害物センサ (安全防護技術)

AGV の正面に付け、進行方向の障害物を発見するセンサを開発する。制動距離の増加に伴い、従来のセンサよりも障害物検出距離を伸ばし 20m とした。防護距離は 8m とする。要求安全性能は、リスクアセスメントの結果から、IEC61508-1:2010 の SIL2 とする。

2.3.2. エリア管理システム (安全防護技術)

作業員やフォークリフトの横からの飛出しに対応するためのシステムを作成する。UWB (Ultra Wide Band) の発信タグを作業員・フォークリフト・AGV に取り付け、リアルタイムにそれぞれの位置を計測する。位置情報を用いて、許容可能な AGV の最高速度を算出し、AGV 制御系に対してその最高速度を指示する。このシステムは、従来にはないシステムであるため、開発当初は安全サポート技術として開発を行った。最終年度には安全技術として確立させ、リスクアセスメントの結果から、要求安全性能は SIL2 とした。

2.3.3. ローカルエリアセンサ (安全サポート技術)

ブラインドコーナー部の横からの作業員・フォークリフトの飛出しに対応するため、ブラインドコーナー部天井に反射板を検知できるレーザーセンサを設置する。前提条件として、フォークリフト天井と作業員のヘルメットには反射板がついている。センサが反射板を検知し、かつ、AGV がコーナー部に侵入する際には、AGV に減速指示を出すようにする。このセンサに関しては、安全系をサポートする技術と考え、開発を実施する。

2.3.4. AGV 給電の非接触化 (安全サポート技術)

AGV への充電部を、通常のソケットによる接触方式から、電磁誘導を利用した非接触方式に変更する。

3. 開発概要

3.1. 高速 AGV システムの概要

最高速度 200m/min のコンベヤタイプ・フォークタイプの 2 種類の AGV を製作した。AGV への速度指示は VSM と呼ばれる地上制御コントローラから 2.4GHz の無線を介して送信される。VSM はプライマリーPC・セカンダリーPC の二台から構成されており、通常はプライマリーPC が動作している。プライマリーPC 側に異常が生じた時には、自動的にセカンダリーPC が動作し AGV の制御を行う。VSM は後述するエリア管理サーバーから定期的に速度指示信号を受信している。この信号が一定時間以上受信できない場合には、VSM は AGV に対して 60m/min にて運行するよう制御する。また、この速度指示信号以下の速度にて VSM は AGV が走行するよう制御している。また、作業エリアには安全柵が設置されており、このエリアに入場するためには、専用のゲートを通る必要がある。

AGV 前面には AGV 前方方向の障害物を検知するための 3D 障害物センサがつけられている。進行方向に障害物を検知した場合には、この 3D 障害物センサが AGV を停止（停止カテゴリ：0）させる。この 3D 障害物センサに対しても 5GHz の無線を介して停止指示が送信できるようにしてある。そのため、エリア管理サーバーからも非常停止指示が送れるようになっている。

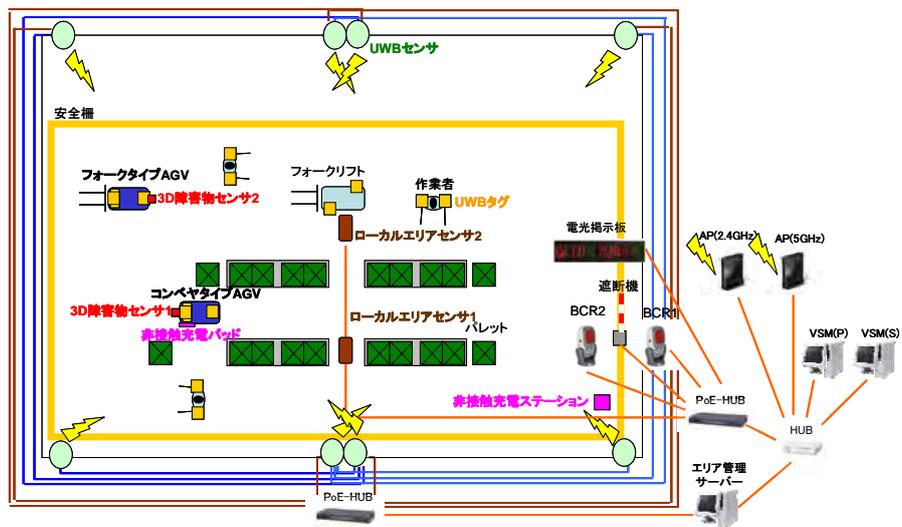
エリアに入る作業員・フォークリフト・AGV は UWB タグを 2 個ずつ所有しており、この UWB タグの位置を UWB センサにより計測することで作業員・フォークリフト・AGV の位置をリアルタイムに把握することができる。エリア管理サーバーではそれらの位置情報をもとに、AGV と作業員・フォークリフトの位置関係から VSM に対して減速指示を送信する。また、エリアに入場する際には、BCR に読み込ませたバーコード ID と入場者の UWB タグ ID とが一致する必要がある（事前に登録済み）。これにより、許可のない作業員・フォークリフトはエリアの中に入ることができない。なお、バーコード ID とタグ ID とが一致しないなどの入退場時のエラーが発生した場合は電光掲示板にエラー内容が表示される。エリア管理システムには各種の故障診断モジュールがあり、故障が検知された場合には、VSM に対して 60m/min の速度指示をあたえる。

ローカルエリアセンサは UWB では計測しにくいブラインドコーナーの天井部に設置されている。作業員のヘルメット・フォークリフトの天井部には反射板が取り付けられており、これらの位置を計測することができる。この位置データはエリア管理サーバーに送られ、AGV と作業員・フォークリフトの位置関係に応じて AGV の速度をエリア管理サーバーが VSM に指示する。

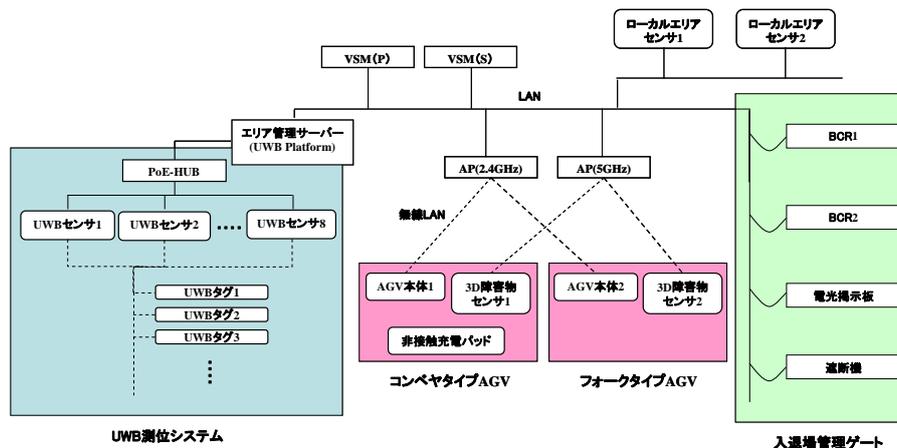
コンベヤタイプには非接触充電用のパッドが側面に取り付けられており、ステーションに停まることで自動的に充電が可能となる。



(a)テストエリア風景



(b)機器レイアウト



(c)機器構成

図 3-1 高速 AGV システム概要

表 3-1 高速 AGV システムの各機器の説明

	機器名	説明
AGV本体関係	コンベヤタイプAGV	コンベヤタイプの高速AGV 最高速度200m/minで走行する。
	フォークタイプAGV	フォークタイプの高速AGV 最高速度200m/minで走行する。
	VSM	AGVの地上制御コントローラ AGVに対して速度を指示する。
	3D障害物センサ	AGV前面に取り付けられたAGV進行方向前方の障害物を3次元的に検知するセンサ 障害物を検知するとAGVを停止させる。
	AP	2.4GHzあるいは5GHzの無線アクセスポイント VSMからの速度指示をAGV本体に送信する。
	非接触充電パッド	AGV側面に取り付けられた非接触充電用のパッド 非接触充電ステーションにAGVが止まることで、パッドを通してAGV本体に充電が行われる。
	非接触充電ステーション	非接触充電用のステーション
エリア管理関係	エリア管理サーバー	UWBセンサからの位置情報を用いて、作業員・フォークリフトとAGVとの位置関係からVSMに速度指示を送信する。
	UWBセンサ	UWBタグから電波を受信するセンサ 作業員・フォークリフト・AGVの位置を計測する。
	UWBタグ	UWB電波を発信するタグ 作業員・フォークリフト・AGVに対してそれぞれ2個ずつ取り付けられる。
	ローカルエリアセンサ	レーザー式のセンサで、作業員・フォークリフト・AGVに反射板をつけることで、それらの位置を計測する。
入退場ゲート関係	安全柵	許可のない作業員・フォークリフトとAGVとを物理的に分離し、安全を確保するための柵
	遮断機	許可のある作業員・フォークリフト以外を入れないための遮断機
	BCR	作業員が持つバーコードを読み込ませることで、バーコードIDを認識するバーコードリーダー
	電光掲示板	入退場時のエラー内容を表示する電光掲示板

3.2. 高速 AGV

本プロジェクトでは、高速 AGV としてコンベヤタイプのものと同タイプのものを開発した。以下に各タイプの仕様および安全回路の説明を行い、基本性能評価試験の結果についてもあわせて説明を行う。

3.2.1. コンベヤタイプ

3.2.1.1. 仕様

表 3-2 にコンベヤタイプ AGV の仕様を、図 3-2 にその外観を示す。

表 3-2 コンベヤタイプ AGV の仕様

コンベヤタイプ		
走行部	車体長	2740mm
	車体幅	1354mm
	車体高さ	1950mm
	フロアバンパ間	30mm
	ホイールベース	1455mm
	トレッド	906mm
	自重	1500kg
	直進速度	200m/min
	カーブ速度	60m/min
	クリープ速度	5m/min
	加速度	0.07G
	減速度	0.07G
	駆動方式	FF (Single Drive),
	ガイド方式	Laser guidance
停止精度	±10mm	
バッテリー	250AH,48V	
移載部	許容荷重	1050kg
	移載レベル	600mm
	搬送物	1100W x 1100L
	移載速度	12m/min
安全デバイス	3D障害物センサ	
	全周ソフトバンパ	
	方向指示器	
	非常停止 x 4pc	
	メロディ	



図 3-2 コンベヤタイプ AGV

3.2.1.2. 安全回路

AGV はセーフティコントローラを搭載しており、AGV 本体に搭載している 2 個の CPU を持ったコントローラの生存確認を含め、下記 5 つのデバイスがシリーズに接続された回路を 2 重で構成している。

<デバイス>

- 3D 障害物センサ
- 全周ソフトバンパ
- 非常停止ボタン (4 箇所)
- AGV コントローラ (CPU)
- AGV ナビゲーションコントローラ (CPU)

上記のデバイスのどれか 1 つでもダウンした場合、動力切断リレーを動作させる事で AGV に搭載している全てのモータ動力ライン (走行モータ・ステアリングモータ・移載機コンベヤモータ) である DC48V を切断する。

3.2.2. リアフォークタイプ

3.2.2.1. 仕様

表 3-3 にリアフォークタイプ AGV の仕様を、図 3-3 にその外観を示す。

表 3-3 リアフォークタイプ AGV の仕様

リアフォークタイプ		
走行部	車体長	3744mm
	車体幅	1299mm
	車体高さ	2417mm
	フロアバンパ間	30mm
	ホイールベース	1524mm
	トレッド	1018mm
	自重	4500kg
	直進速度	200m/min(前進)・60m/min(後退)
	カーブ速度	60m/min
	クリーブ速度	5m/min
	加速度	0.07G
	減速度	0.07G
	駆動方式	FR (Twin Drive)
	ガイド方式	Laser guidance
停止精度	±10mm	
移載部	バッテリー	600AH,48V
	許容荷重	1050kg
	移載レベル	Max 2566mm
	搬送物	1100W x 1100L
安全デバイス	昇降速度	30m/min
	3D障害物センサ + 2D障害物センサ x 3pc	
	全周ソフトバンパ	
	方向指示器	
	非常停止 x 4pc	
		メロディ



図 3-3 リアフォークタイプ AGV

3.2.2.2. 安全回路

AGV はセーフティコントローラを搭載しており、AGV 本体に搭載している 2 個の CPU を持ったコントローラの生存確認を含め、下記 6 つのデバイスがシリーズに接続された回路を 2 重で構成している。

<デバイス>

- 3D 障害物センサ
- 2D 障害物センサ 3PC
- 全周ソフトバンパ
- 非常停止ボタン (4 箇所)
- AGV コントローラ (CPU)
- AGV ナビゲーションコントローラ (CPU)

上記のデバイスのどれか 1 つでもダウンした場合、動力切断リレーを動作させる事で AGV に搭載している全てのモータ動力ライン (走行モータ・ステアリングモータ・移載機モータ) である DC48V を切断する。

リアフォークタイプ AGV は、前方向 (200m/min) に加え、後方 (60m/min) への走行、及び旋回 (60m/min) も出来るため、安全障害物センサ配置を追加している。また、フォーク昇降部分での動作も新たに加わり昇降中に於ける障害物センサでの監視も安全対策として行っている。

リアフォークタイプに設置した 3D 障害物センサ及び 2D 障害物センサの配置及び目的を図 3-4 に示す。

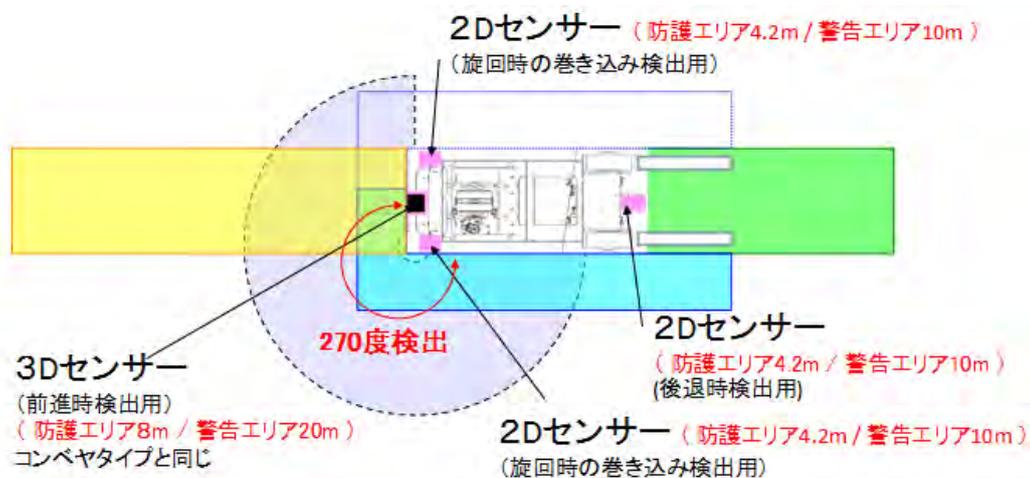


図 3-4 障害物センサの配置及び目的

3.2.3. 高速 AGV の基本性能評価試験

高速 AGV の安全技術を検証する上で、AGV 本体の基本評価及び寿命・耐久評価を実施した。表 3-4 に示す各評価項目を実施し設計基準値内にある事を確認した。

表 3-4 AGV の評価内容

項目		内容	詳細	
AGV 本体	基本評価	機械評価	強度(応力)	実機応力測定
			輪重	車体重量&輪重バランス評価
			トルク	電流測定にて評価
		電気評価	非常停止時の台車挙動(直線)	非常停止G&停止距離&ステアロック
			非常停止時の台車挙動(カーブ)	直線と併せて評価
	能力評価	各部電圧・電流	電流測定による稼働率の確認	
		速度特性	走行速度、加減速Gの確認	
	安全評価	バッテリー	走行可能時間の確認	
		バンパ	入力時動力切断の確認	
		3Dセンサ	開発製品の為、別途評価	
		非常停止	入力時動力切断の確認	
		音量	10m離れた位置でメロディ音が認識	
		ウインカ	10m離れた位置での視認性確認	
	操舵性評価	脱線	脱線検出距離	
直進性		50mm以内の振れ量で走行		
直線復帰距離		カーブ軌跡評価(R1200,R1000)		
停止精度評価	走行停止精度	STでの前後方向&傾きの精度		
寿命・耐久	振動	許容段差評価テスト	うねり・段差等の条件下での稼働	
		各制御パーツの振動評価	振動測定を行う	
耐久性	車輪	駆動&従動車輪の磨耗、磨耗測定方法		
		連続走行テスト	ループラインの連続走行テスト	

3.2.3.1. 強度の測定

3.2.3.1.1. 測定方法

応力が集中しそうな部分 24 か所に歪ゲージを貼付け (図 3-6 参照)、停止状態 (静的応力) 及び走行時 (動的応力) での応力を測定した (図 3-5 参照)。



図 3-5 測定機器設置時の全体風景



a)測定箇所 1,2



b)測定箇所 3,4



c)測定箇所 5,6



d)測定箇所 7,8



e)測定箇所 9,10



f)測定箇所 11,12



g)測定箇所 13,14



h)測定箇所 15,16



i)測定箇所 17



j)測定箇所 18



k)測定箇所 19



l)測定箇所 20



m)測定箇所 21



n)測定箇所 22



o)測定箇所 23



p)測定箇所 24

図 3-6 各測定箇所

3.2.3.1.2. 測定結果

表 3-5 (a)に停止状態（静的応力）に於ける 24 か所の応力測定値を、表 3-5(b)に走行時（動的応力）に於ける 24 か所の応力測定値を示す。

測定結果より図 3-7～図 3-8 に示すように、鉄（SS400）の引張圧縮及び曲げの許容限界値内である事を確認した。

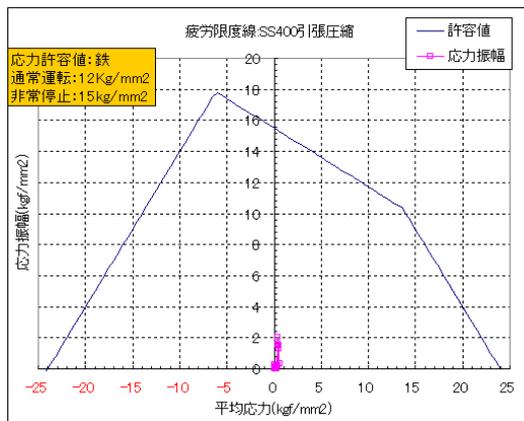
表 3-5 応力測定値

(a) 静的

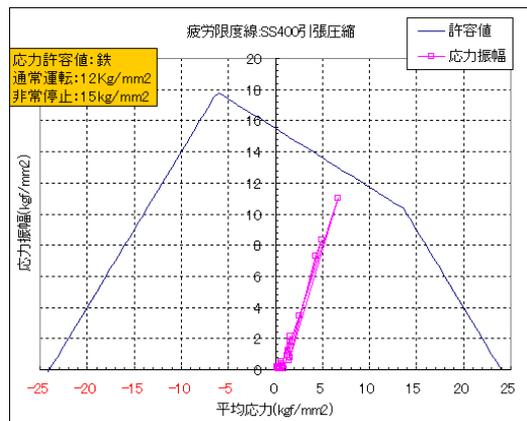
ゲージ No	発生応力(kgf/mm ²)		評価応力(kgf/mm ²)		許容値 (kgf/mm ²)	対許容 値比 (%)
	最大応力	最小応力	応力振幅	平均応力		
1	-0.10	-0.20	0.1	-0.1	15.5	0.3%
2	-0.27	-0.56	0.1	-0.4	15.5	0.9%
3	-0.19	-0.22	0.0	-0.2	15.5	0.1%
4	-0.19	-0.31	0.1	-0.2	15.5	0.4%
5	-0.26	-0.47	0.1	-0.4	15.5	0.7%
6	-0.26	-0.32	0.0	-0.3	15.5	0.2%
7	0.10	-0.21	0.2	-0.1	15.6	1.0%
8	0.27	0.07	0.1	0.2	15.6	0.6%
9	0.02	-0.06	0.0	-0.0	15.7	0.2%
10	0.12	-0.05	0.1	0.0	15.7	0.6%
11	0.30	-0.80	0.5	-0.3	15.6	3.5%
12	0.09	0.06	0.0	0.1	15.8	0.1%
13	0.06	-0.59	0.3	-0.3	15.4	2.1%
14	0.20	-0.45	0.3	-0.1	15.5	2.1%
15	-0.27	-0.63	0.2	-0.5	15.6	1.2%
16	-0.02	-0.52	0.2	-0.3	15.3	1.6%
17	-0.24	-1.23	0.5	-0.7	15.6	3.2%
18	1.51	0.61	0.4	1.1	15.1	3.0%
19	2.03	1.19	0.4	1.6	13.9	3.0%
20	0.18	-0.63	0.4	-0.2	15.8	2.6%
21	0.19	-0.52	0.4	-0.2	15.8	2.2%
22	1.30	0.41	0.4	0.9	14.3	3.1%
23	1.57	0.81	0.4	1.2	14.2	2.7%
24	0.20	-0.35	0.3	-0.1	15.7	1.7%

(b) 動的

ゲージ No	発生応力(kgf/mm ²)		評価応力(kgf/mm ²)		許容値 (kgf/mm ²)	対許容 値比 (%)
	最大応力	最小応力	応力振幅	平均応力		
1	0.19	-0.09	0.1	0.0	15.5	0.9%
2	0.15	-0.13	0.1	0.0	15.5	0.9%
3	0.19	-0.16	0.2	0.0	15.5	1.1%
4	0.10	-0.21	0.2	-0.1	15.5	1.0%
5	0.53	-0.56	0.5	-0.0	15.5	3.5%
6	0.18	-0.16	0.2	0.0	15.5	1.1%
7	0.07	-0.47	0.3	-0.2	15.6	1.7%
8	0.04	-0.51	0.3	-0.2	15.6	1.8%
9	0.12	-1.25	0.7	-0.6	15.7	4.4%
10	0.24	-1.37	0.8	-0.6	15.7	5.1%
11	0.13	-0.57	0.4	-0.2	15.6	2.3%
12	0.09	-1.64	0.9	-0.8	15.8	5.5%
13	1.77	-1.40	1.6	0.2	15.4	10.3%
14	1.25	-1.48	1.4	-0.1	15.5	8.8%
15	0.91	-1.65	1.3	-0.4	15.6	8.2%
16	2.15	-1.03	1.6	0.6	15.3	10.4%
17	0.40	-1.00	0.7	-0.3	15.6	4.5%
18	3.46	-1.57	2.5	0.9	15.1	16.6%
19	11.01	-2.35	6.7	4.3	13.9	48.2%
20	0.75	-2.47	1.6	-0.9	15.8	10.2%
21	0.57	-2.37	1.5	-0.9	15.8	9.3%
22	7.30	-1.20	4.3	3.0	14.3	29.6%
23	8.36	-1.55	5.0	3.4	14.2	34.9%
24	0.91	-1.76	1.3	-0.4	15.7	8.5%



a) 静的



b) 動的

図 3-7 引張圧縮

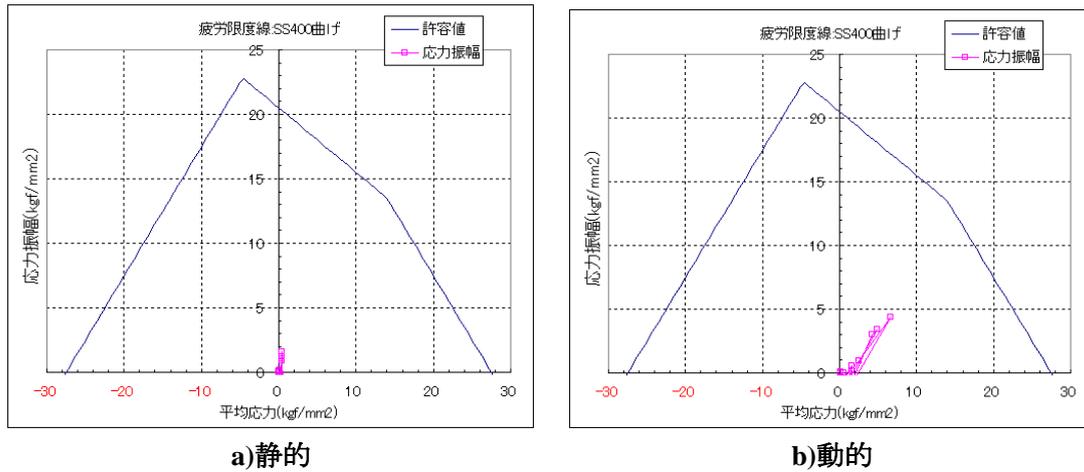


図 3-8 曲げ

3.2.3.2. 非常停止時における停止距離

AGV が最高速度 200m/min にて走行中に非常停止を動作させた時の AGV の走行位置（距離）と速度の関係を図 3-9 に示す。

AGV が 200m/min から非常停止するまでに必要な距離は 2323mm 必要である事が分かった。
 (減速 G : 0.244G ・ 減速時間 : 1.385 秒)

上記の結果から、200m/min で走行中は、障害物センサの防護エリアは、2500mm 以上に設定する必要がある。

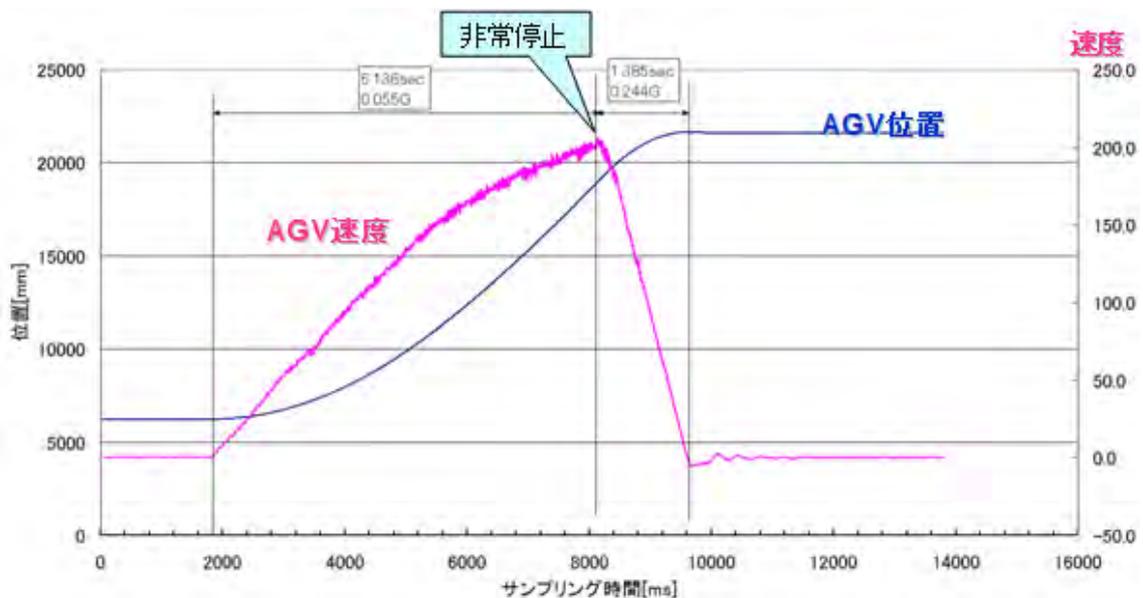


図 3-9 非常停止時の AGV 走行位置と速度

3.2.3.3. 停止精度

図 3-10 に AGV が自動で目標位置に停止した時の測定位置を示す。

表 3-6 に AGV が無負荷状態時の測定値を表 3-7 に負荷（1000Kg）状態時の測定値を記す。結果目標値である±10mm の停止精度は大きくクリアしている事が分かった。

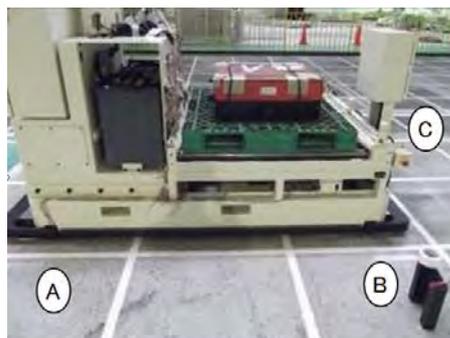
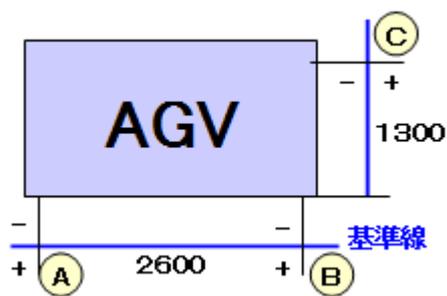


図 3-10 測定ポイント

表 3-6 無負荷時の停止精度

無負荷時				単位[mm]
回数	1	2	3	平均
A	0.0	3.0	0.0	1.0
B	0.0	1.5	0.0	0.5
C	0.0	3.0	2.0	1.7

表 3-7 負荷時の停止精度

負荷時(1000Kg)				単位[mm]
回数	1	2	3	平均
A	0.0	0.0	0.0	0.0
B	0.0	0.0	0.0	0.0
C	0.0	3.0	2.0	1.7

3.3. 3D 障害物センサ

3.3.1. 仕様

3.3.1.1. 概要

高速 AGV が自律走行する時の障害物センサである。距離 20m 先で上下方向 2m の検出エリアがあり、床に倒れている人の検出や、フォークリフトのフォークに積まれた障害物を、3 次的に検出し、AGV の走行の安全性を確保する。図 3-11 に 3D 障害物センサの概略図を示す。

安全性性能は IEC61496-1-3（レーザセンサの安全基準）の Type3、機能安全は IEC61508 の SIL2 に準拠された設計を行う。

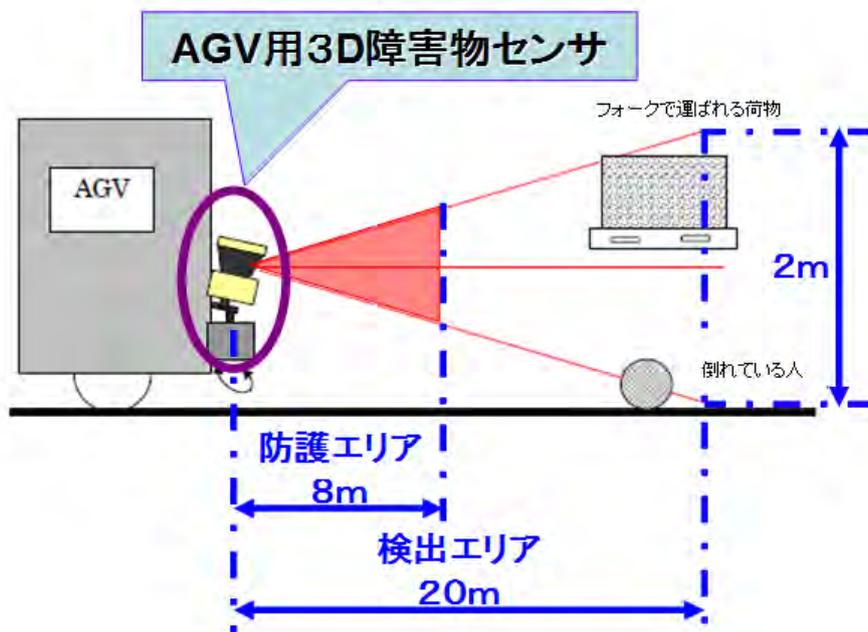


図 3-11 3D 障害物センサの概略図

3D 障害物センサは、水平検出角度 190 度・検出分解能 0.125 度の 2 次元のレーザレンジファインダと、垂直検出角度 7 度検出分解能 0.9 度のジンバル構造を持ったパルスモータにより、3 次元空間の距離画像を所得するセンサである。

パルスモータは フォトインタラプタで検出した原点板の位置を角度 0 として、1.8 度ピッチで送られてきたパルスに同期して回転する。各ポイントの垂直走査角 ξ は、パルスの数より演算して求める。パルスモータの軸に直結されたジンバル構造の垂直走査機構によりレーザセンサ全体を垂直走査する。

距離演算コントローラは、レーザセンサから USB で送られてきた水平走査角度 (θ) と距離データ (R) とパルスモータコントローラから USB 送られてきたパルス信号 (ξ) から、3 次元演算を行なう。

電源立ち上げ時、コントローラは CF のプログラムデータを内部 RAM に展開し、RAM に書かれたプログラムデータにより動作する。

CF に書かれたエリアデータも上記と同様に RAM に展開される。外部エリア信号により検出エリアの設定されたデータと、演算された 3 次元空間の検出ポイントを比較し、エリア内に上記検出ポイントがある場合障害物有信号を出力する。エリアは防護エリア（安全）と警報エリア 1 及び 2 がある。

レーザセンサは、半導体レーザの飛行時間から距離を計測するセンサである。半導体レーザから射出した 5ns のパルス幅のレーザ光は、DC モータに取り付けられたミラーにより水平方向に折り曲げられ、検出物に照射される。物体に当たって反射されたレーザ光は上記ミラーにより垂直方向に曲げられ、APD（アバランシェ・フォトダイオード）に導かれる。フォトダイオードで電気信号に変換された信号（アナログ信号）を AD コンバータでデジタル信号に変換し、距離演算回路(ASIC)に送られる。ASIC は信号の立ち上がり部をデジタル演算で求め、レーザ発光信号と検出信号の立ち上がり部の遅延時間をもとめ、遅延時間と光の速度から距離を演算する。DC モータに取り付けられたミラーは 360 度回転し、光を円周状に走査する。ミラー走査角度はモータの回転軸に取り付けられたエンコード板から角度を求め、角度 (θ) と検出下距離 (R) から 2 次元平面の距離画像データを取得する。この距離画像データはリアルタイムに USB 通信で外部に送られる。

3.3.1.2. 仕様値

表 3-8 に 3D 障害物センサの仕様値をまとめる。

3.3.1.3. 機器の構成

図 3-12 に 3D 障害物センサの機器の構成を示す。

図 3-12 の中で青線は制御回路の信号の流れを表し、橙線はモニタ回路の信号の流れを表している。電源回路は 3 個持っており、1 つは ASIC1, CPU1, 出力回路 1 の電源供給を行い、1 つは ASIC2, CPU2, 出力回路 2 の電源供給を行い、1 つはその他の回路に電源供給を行う構成である。

項目	仕様値
検出距離（安全）	8m 黒1.8%（防護エリア）
検出距離（非安全）	20m 黒10%（警報エリア）
検出距離（モニタ）	30m
水平走査角	190度
水平分解能	0.125度（20m分解能 44mm）
垂直走査角	6度
垂直分解能	0.75度
水平走査方法	回転ミラー（1200rpm） DCモータ
垂直走査方法	ジンバル（150rpm） パルスモータ
垂直方向検出エリア	距離20m 2000mm 距離8m 800mm 距離1m 100mm
検出物の大きさ	横方向 φ100mm(8mまで) φ150mm(20m)
応答速度	450ms
大きさ	200×160×160
重量	5.5kg以下
検出エリア	16パターン
電源	24V -30%/+20%
電流	0.8A(定常時)、起動時 2A
入力	エリア切り替え入力 その他制御入力
出力	OSSD（防護エリア内出力）
	WF1/2（警報エリア内出力）、その他 制御出力
外部通信	イーサネット 100BaseTX
使用環境	-10度～50度 湿度85%以下（結露しないこと）

表 3-8 3D 障害物センサの仕様値

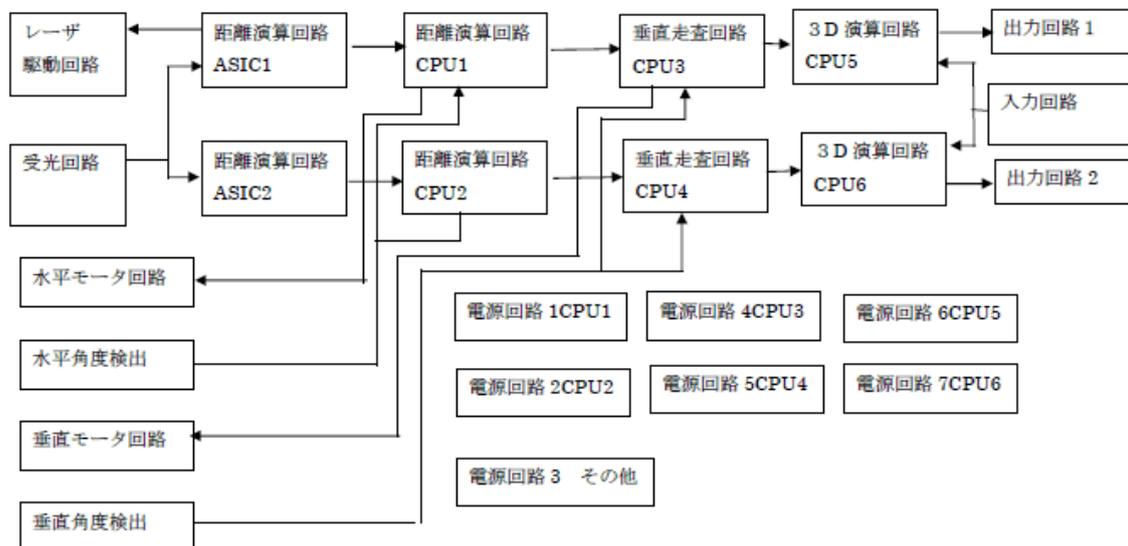


図 3-12 機器の構成

3.3.1.4. 各モジュールの機能及び安全設計

3.3.1.4.1. システム

複雑な構成の部品、及び安全に最も重要な出力回路は 2 重化する。
 また、2 重化された部品に供給する電源も 2 重化する。
 単純な部品で構成されたモジュールは 1 重化であるが、監視モニタは 2 重化する。
 エリアを切りかえる入力回路は回路的に 2 重化し、モニタは CPU 間のクロスチェックで行う。

3.3.1.4.2. レーザ駆動回路

レーザ発光のドライブ回路に於いて、レーザ異常は 2 重化されたレーザモニタ回路 (ASIC+CPU) で監視する。異常時は各 CPU がレーザ発光を停止する (レーザ制御信号、レーザ電源回路を遮断)。また、異常時は出力回路を OFF する。

3.3.1.4.3. 受光回路

レーザの受光信号の増幅回路に於いて、受光回路異常は 2 重化されたレーザモニタ回路 (ASIC+CPU) で監視する。
 異常時は出力回路を OFF する。

3.3.1.4.4. 水平モータ回路

1200rpm で回転する DC モータを使用し、モータの制御は水平角度検出のゼロ信号の間隔 (50ms) になるように行う。また、モータの監視は CPU1 及び 2 両方で監視する。異常時は出力回路を OFF する。

3.3.1.4.5. 垂直モータ

150rpm で回転するパルスモータを使用し、モータ制御は CPU1 のパルス発振回路で制御する。また、脱調等のモータ異常は CPU1 及び 2 両方で監視する。異常時は出力回路を OFF する。

3.3.1.4.6. 水平角度検出

0.25 度ピッチで出力するエンコーダとゼロ信号 (原点位置) を出力する回路で構成し、エンコーダ信号と同期してレーザを発光する。

従ってモータ回転停止の場合レーザ発光はしない (フェイルセーフ設計)。また、エンコーダ異常は 2 重化されたレーザモニタ回路 (ASIC+CPU) で監視する。異常時は出力回路を OFF する。

3.3.1.4.7. 垂直角度検出

モータのゼロ信号 (基準位置) を出力する事により垂直角を検出し、信号異常は CPU1 及び 2 両方で監視する。異常時は出力回路を OFF する。

3.3.1.4.8. ASIC1 及び 2

距離を演算する回路であり、回路の異常は内部のテストパターンで行う。(テストパターンは CPU にて書き込みチェックで行う)。また、監視は CPU1 及び 2 両方で行う。

異常時は出力回路を OFF する。

3.3.1.4.9. CPU1 及び 2

センサの距離演算回路であり、回路異常は SIL の定められた自己診断を行なう。

3.3.1.4.10. CPU3 及び 4

センサの垂直走査回路であり、回路異常は SIL の定められた自己診断を行なう。

3.3.1.4.11. CPU5 及び 6

3D の演算回路であり、回路異常は SIL の定められた自己診断を行なう。

3.3.1.4.12. 出力回路 1 及び 2

モニタは出力 ON 時に CPU5 及び 6 で出力 OFF チェックを行なう。

3.3.1.4.13. 入力回路

エリア切り替え入力は CPU5 には ActivH、CPU6 には ActivL 信号を入力する。

3.3.1.4.14. 電源回路 1, 2, 4, 5, 6, 及び 7

2 重化されたそれぞれの回路に電源を供給し、電源異常はそれぞれの CPU 間で監視する。

3.3.1.4.15. 電源回路 3

2 重化されていないモータやレーザ回路などに電源を供給する回路であり、入力電圧及び出力電圧監視は CPU1 及び 2 両方で行う。

異常時は出力回路を OFF する。

3.3.2. 性能評価試験結果

3.3.2.1. ISO3691-4.2(DIS)を参考にテストピースを検出できる事の確認

3.3.2.1.1. Φ70mmx400mm (足を想定) のテストピース

足を想定した大きさΦ70mmx400mm で反射率の違う白色・黒色のテストピースを図 3-13 に示す 3 か所の位置に設置して、コンベヤタイプ AGV とフォークタイプ AGV の両方で安全距離内の停止ができるか検証を行った。

200m/min の走行速度から、テストピースを検出して停止した時の距離を表 3-9 に示す。センサの応答速度は、450msec である事から 200m/min で走行している状態での検出精度は、約 1500mm の誤差が発生する事になる。今回の検証結果では最短距離でも 850mm という結果になり、安全性は十分確保できていると考えられる。

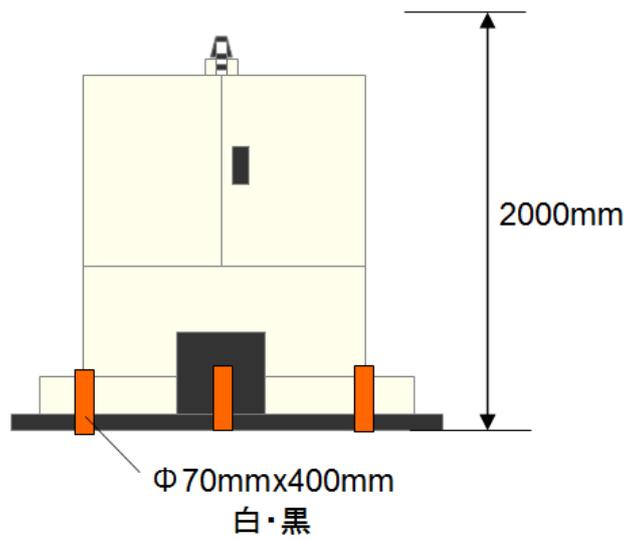


図 3-13 AGV とテストピースの位置関係

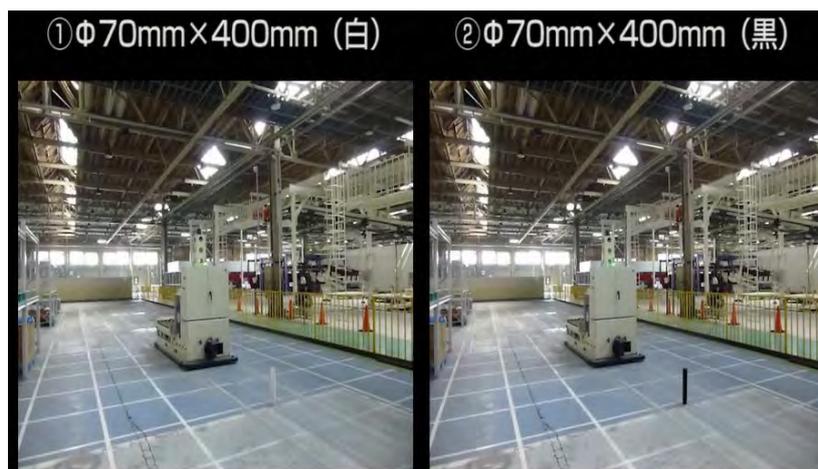


図 3-14 白黒各テストピースのテスト風景

表 3-9 各 AGV でのテストピース検出停止距離

単位:mm

AGVタイプ	黒(φ70)			白(φ70)		
	左	中	右	左	中	右
コンベヤ	2600	2100	2200	1350	1250	2550
	1900	2750	1950	2800	1800	2150
	2900	2000	1100	2400	1500	2750
フォーク	左	中	右	左	中	右
	850	2200	1450	1450	2300	2250
	850	2200	2100	1400	2250	2200
	850	2300	2000	1850	2300	2300

3.3.2.1.2. Φ200mmx600mm (胴体を想定) のテストピース

人が倒れている状態を想定した大きさΦ200mmx600mmで反射率の違う白色・黒色のテストピースを図 3-15 に示す 2 か所の位置に設置して、コンベヤタイプ AGV とフォークタイプ AGV の両方で安全距離内の停止ができるか検証を行った。

200m/min の走行速度から、テストピースを検出して停止した時の距離を表 3-10 に示す。

センサの応答速度は、450msec である事から 200m/min で走行している状態での検出精度は、約 1500mm の誤差が発生する事になる。今回の検証結果では最短距離でも 2200mm という結果になり、安全性は十分確保できていると考えられる。

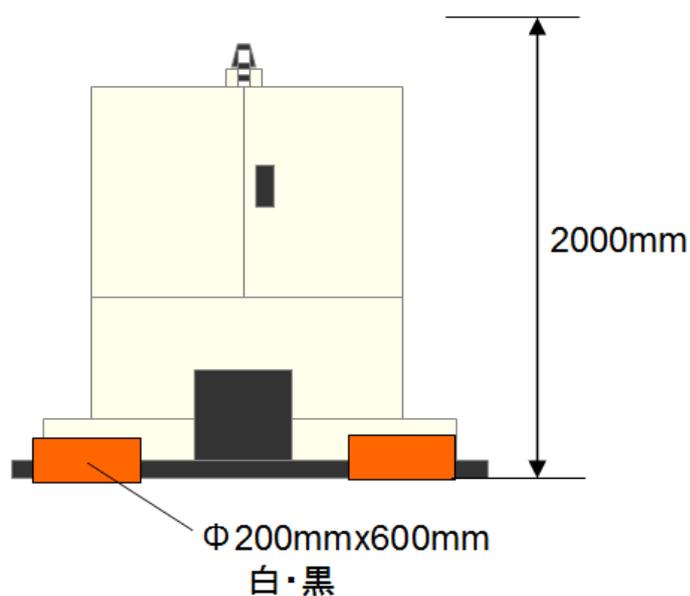


図 3-15 AGV とテストピースの位置関係



図 3-16 テスト風景

表 3-10 各 AGV でのテストピース検出停止距離

単位:mm

AGVタイプ	黒(φ200)		白(φ200)	
	左	右	左	右
コンベヤ	2500	2200	2850	2850
	2700	2500	2350	2200
	2400	2200	2600	2600
フォーク	左	右	左	右
	3150	3100	3400	2600
	2600	3000	3100	3500
	2800	2900	3100	3000

3.3.2.2. 高さ方向における障害物の検知・AGVの停止を確認

大きさΦ200mmx300mmで反射率の違う白色・黒色のテストピースを図3-17に示す2か所の位置に設置して、コンベヤタイプAGVで安全距離内の停止ができるか検証を行った。

200m/minの走行速度から、テストピースを検出しAGVと衝突する前に減速停止し、且つ、検出の安定性評価として5分間以上連続継続検出する事を判定基準とした。

全ての場合に於いてテストピースを検出して停止出来る事確認した。評価結果を表3-11に示す。

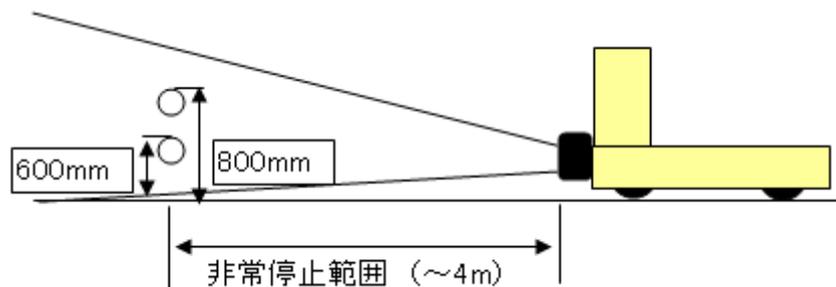


図 3-17 AGV とテストピースの位置関係

表 3-11 高さ方向の検出可否

設置高さ	テストピース	テスト結果	
		測定回数	停止可否判定
800mm	Φ200×300 白	1	○
		2	○
		3	○
	Φ200×300 黒	1	○
		2	○
		3	○
600mm	Φ200×300 白	1	○
		2	○
		3	○
	Φ200×300 黒	1	○
		2	○
		3	○

3.3.2.3. まとめ

AGV の走行速度 200m/min に於いて、テストピースを検出し安全に停止出来る事が確認出来た。

評価に於いては、3D 障害物センサは、水平に取り付ける事が必要である事が分かり、センサの取り付け位置を 230mm から 130mm に変更した (図 3-18、図 3-19 参照)。

この設置位置で物流センターにおける安全性検証テストを実施し、問題が発生しない事を確認しました。

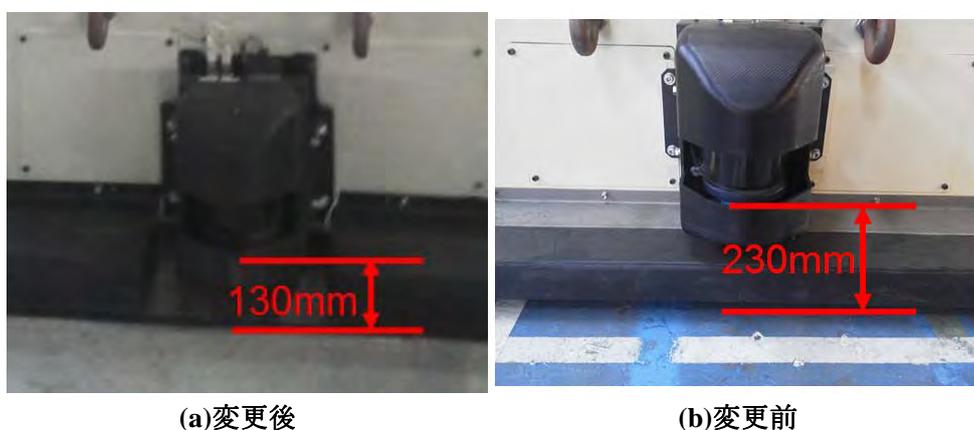


図 3-18 3D 障害物センサの取付位置の変更



(a)変更後



(b)変更前

図 3-19 3D 障害物センサ取付位置変更後の AGV 外観

3.4. エリア管理システム

本節ではエリア管理システムの開発概要について述べる。なお、エリア管理システムの認証については本節では述べずに、後の 5.1 節で述べることとする。本節の構成としては、3.4.1 項でエリア管理システムの仕様、3.4.2 項でエリア管理システムに用いられている UWB 測位システムの基本性能評価試験、3.4.3 項でエリア管理システムと他のシステムとの連動試験について述べる。

3.4.1. 仕様

3.4.1.1. 概要

エリア管理システムの主な役割は、作業員やフォークリフトが横から飛び出し AGV と衝突する状況を回避することである。特に、AGV に搭載されている障害物センサなどでは検知することが大変むずかしい、ブラインドコーナーなど、物陰からの飛出し対策である。

そのため、作業員・フォークリフト・AGV をリアルタイムに位置計測し、それらの位置関係から AGV の速度コントロールを行えるようにした。位置を計測する手法として、UWB (Ultra Wide Band) を使用した。位置を計測する手法には、その他にも WiFi・超音波などを利用する方法も存在するが、測位精度や環境変化への頑健性などから UWB が今回最も適切であると判断したためである。ちなみに、一般的に UWB による測位システムの測位精度は平均 30cm 程度とされており WiFi に比べて測位精度が高く、超音波のように布程度の遮蔽物で波形が届かなくなるようなことがないと言われている。

エリア管理システムの主な機能は、前述のとおり、それぞれの位置関係に応じて AGV の速度制御を行うことであるが、もう 1 つの大きな特徴は、各システムにて正常に動作していることが確認できない場合には、AGV の最高速度を 60m/min にまで落とすことにある。また、AGV 側も、エリア管理システムからの信号が一定時間以上こない場合には、60m/min 以上の速度が出ないようにしている。つまり、エリア管理システムがシステムが正常に動作することを確認し、その信号が AGV にまで届いた時のみ AGV は 200m/min で走行することが可能となる。

そのため、エリア管理システムを構成する各デバイスの故障診断の手法が豊富であれば、信頼性の高い安全なシステムとなる。それを実現するため、以下に述べる機能を実装した。なお、プロジェクトでは、平成 24 年度まではエリア管理システムを安全サポート系（制御系）と位置づけ基本的な機能を開発し、平成 25 年度では安全システムに適合させた（安全化については、5.1 を参照のこと）。この章では、主に安全サポートシステムとして位置づけた機能の開発について紹介する。

3.4.1.2. 機能説明

表 3-12 にエリア管理システムの機能の一覧とその説明をまとめる。また、さらに詳しい

説明が必要なものについては説明を行う。

表 3-12 エリア管理システムの機能とその説明

機能	機能説明
位置計測	測位情報から各エージェントの位置および進行方向を特定
	作業によるフォークリフトの乗り降りを判定
	VSMから定期的にAGVの情報(位置、進行方向、速度)を取得
	ローカルエリアの情報を取得
AGV速度指示/警告	AGVの適正速度を算出・送信
	ローカルエリアとの安全判定を実施
	安全判定を二重化
	危険判定エリア内のエージェントに対して音声警告
	安全信号を二重化
ウォッチドックタイマー	各デバイスから定期的に信号を受信し、デバイスの接続を診断
	リファレンスタグを用いてセンサの状態を監視
	セル定員のチェック
	UWBとVSMによるAGVの位置情報を比較
	実際のエージェント数と登録されたエージェント数を比較
	同一エージェントのタグ間距離を監視
	各タグの測位間隔をチェック
入退場管理	ゲートを通過するエージェントを記録し、エリア内に存在するタグ・エージェントを管理
	エージェントが適切なタグを保持しているのかを判定し、入退場の許可・拒否を決定
	カメラによる画像認識を用いて許可のないエージェントの侵入を検知
	電光掲示板に入退場エラーの原因を表示
	退場する作業が入場していたかを確認し、退場処理を実施
ログ管理	メモリ内の情報を定期的に外部ファイルへ移動
データ監視	定期的にメモリ上の情報をチェックし、全ての情報が適正に取得できているのかをチェック
画面表示	定期的にエージェントの位置を取得し画面に表示
	定期的に各デバイスの接続状態を表示
	タグのバッテリー情報やセンサ情報などを管理端末に表示
	センサの配置を自動で表示

3.4.1.2.1. エージェントの位置および進行方向の特定

各エージェントにタグを 2 個ずつ取り付け、それらの測位情報をもとにエージェントの位置と進行方向を特定する（図 3-20 参照）。

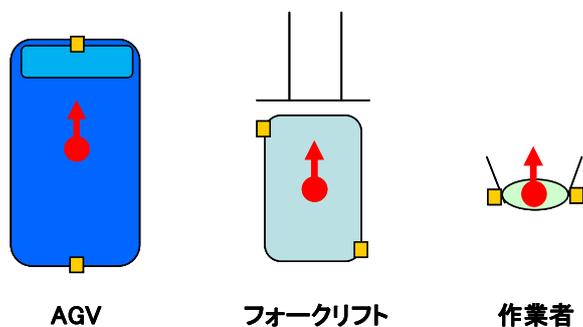


図 3-20 エージェントの位置と進行方向

3.4.1.2.2. フォークリフトの乗り降り判定

作業によるフォークリフトの乗り降りを判定する。具体的には、作業者とフォークリフトの位置関係から乗っている状態か降りている状態かを判定する（図 3-21 参照）。

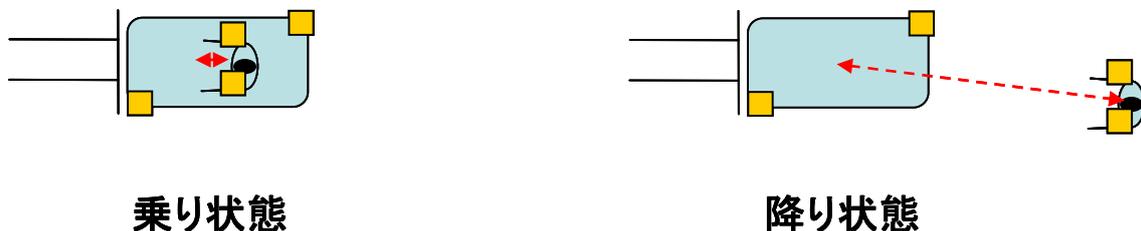


図 3-21 乗り状態と降り状態

3.4.1.2.3. AGV の適正速度を算出・送信

AGV の適正速度を算出する際のアルゴリズムについて説明する。まずは、楕円状の判定エリアをいくつか作成する。例えば図 3-22 を見ると、130m/min への減速指示を出す判定エリアが 1 個、60m/min への減速指示を出す判定エリアが 2 個となっている。なお、この判定エリアの大きさはパラメータ a , b , α , β で決まる。作業者あるいはフォークリフトが判定エリア内に入ったかどうかをそれぞれのエリアにて図中の式を用いて判定する。判定エリアに作業者あるいはフォークリフトが入ったと判定されると、その判定エリアに紐付けされた速度が指示速度として VSM に送信される。

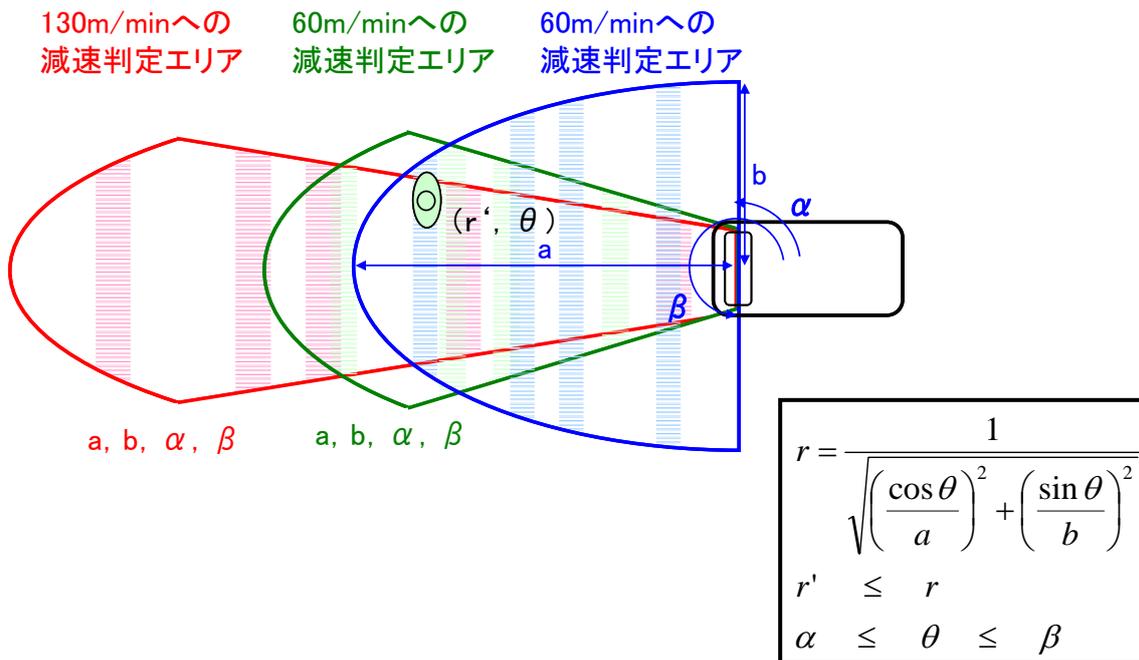


図 3-22 安全判定

3.4.1.2.4. 安全判定の二重化

2種類の安全判定を行い、それぞれの判定結果をクロスチェックし、安全な方の判定結果を出力する（図 3-23 参照）。

[安全判定1]

- ①VSMとUWB (AGV)との判定
- ②VSMと作業員、FLとの安全判定
- ③一番遅い速度を判定結果とする。

[安全判定2]

- ①UWB (AGV)とUWB (作業員)、UWB (FL)との安全判定
- ②一番遅い速度を判定結果とする。

安全判定1と安全判定2の結果で速度が遅い方を指示速度とする。

図 3-23 安全判定の二重化

3.4.1.2.5. 危険判定エリア内のエージェントに対して音声警告

危険判定エリア内にいるエージェントに対して携帯端末などを用いて音声警告を出す（図 3-24 参照）。

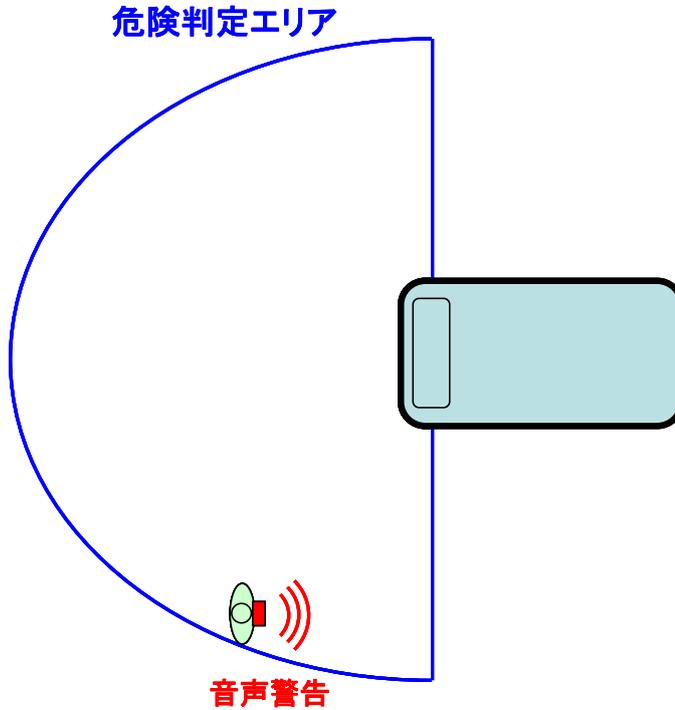


図 3-24 危険判定エリア内にいるエージェントに対する音声警告

3.4.1.2.6. 安全信号の二重化

VSM 経由と 3D 障害物センサ経由の 2 種類の方法で AGV に対して安全信号を送る（図 3-25 参照）。

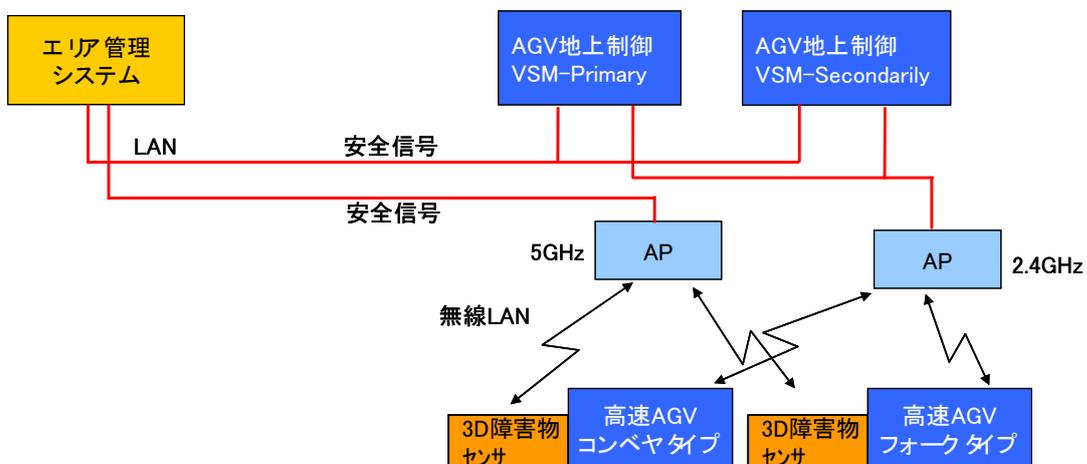


図 3-25 安全信号の二重化

3.4.1.2.7. リファレンスタグを用いて UWB センサの状態を監視

ある決められた座標に置かれたタグ（リファレンスタグ）の測位情報を監視することで、UWB センサが正常に動作しているかどうかを確認することができる（図 3-26 参照）。

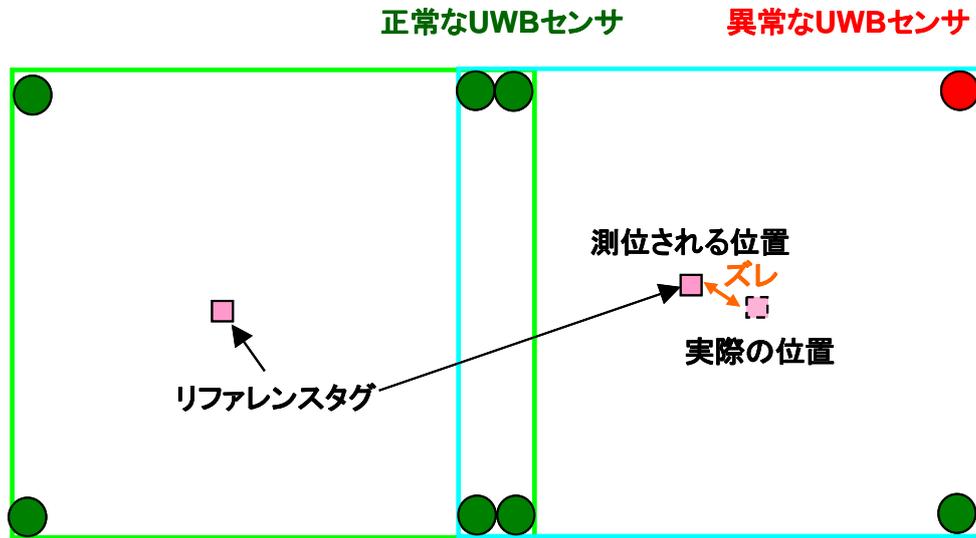


図 3-26 リファレンスタグによる UWB センサ状態の監視

3.4.1.2.8. セル定員のチェック

セルの定員をあらかじめ決めておいて、定周期でその定員を超えていないかチェックする（図 3-27 参照）。定員を超えていた場合は、VSM に低速走行指示が送信される。

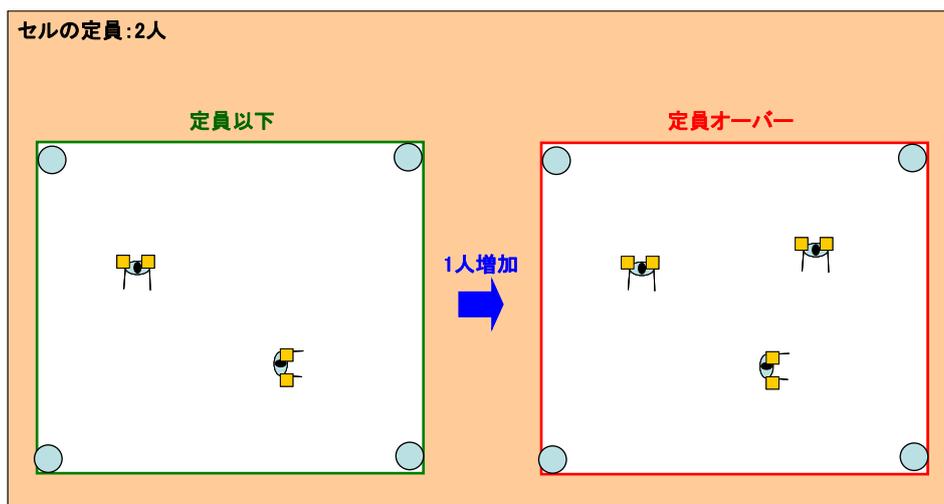


図 3-27 セル定員のチェック

3.4.1.2.9. UWB と VSM による AGV の位置情報を比較

UWB 測位システムから得られる AGV の位置情報と VSM から得られる AGV の位置情報を比較し、2つの位置情報にズレが発生している場合は VSM に低速走行指示が送信される (図 3-28 参照)。

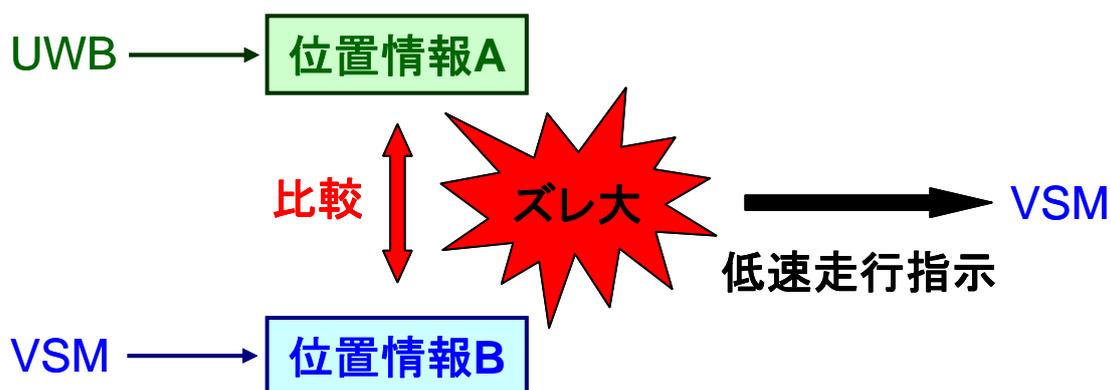


図 3-28 AGV の位置情報の比較

3.4.1.2.10. 実際のエージェント数と登録されているエージェント数を比較

実際にエリアにいるエージェントの数と登録されているエージェントの数を比較し、その数が一致しない場合は VSM に低速走行指示が送信される (図 3-29 参照)。

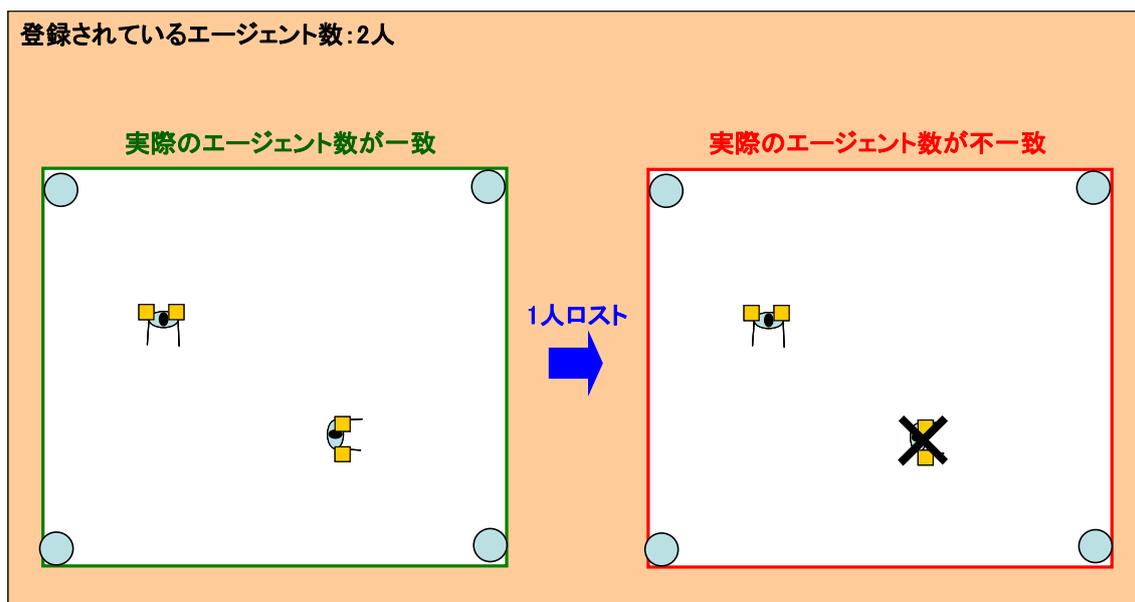


図 3-29 エージェント数の比較

3.4.1.2.11. 同一エージェントのタグ間距離を比較

同 1 エージェントのタグ間の距離を定期的に監視し、その距離が大きくなった場合はVSMに低速走行指示が送信される（図 3-30 参照）。

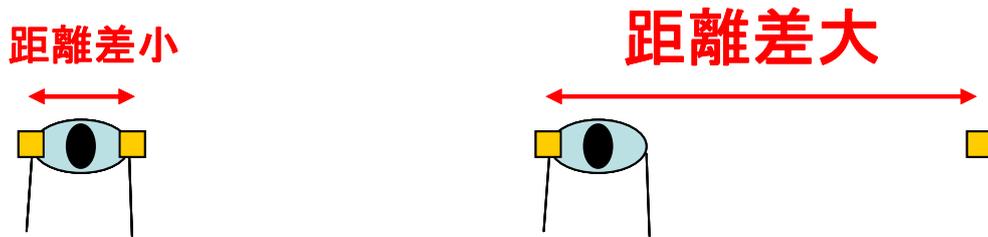


図 3-30 タグ間距離を監視

3.4.1.2.12. ゲートによる入退場者の管理

ゲートを通過するエージェントを記録し、エリア内に存在するタグ・エージェントを管理するとともに、エージェントが適切なタグを保持しているのかを判定し、入退場の許可・拒否を決定する（図 3-31 参照）。

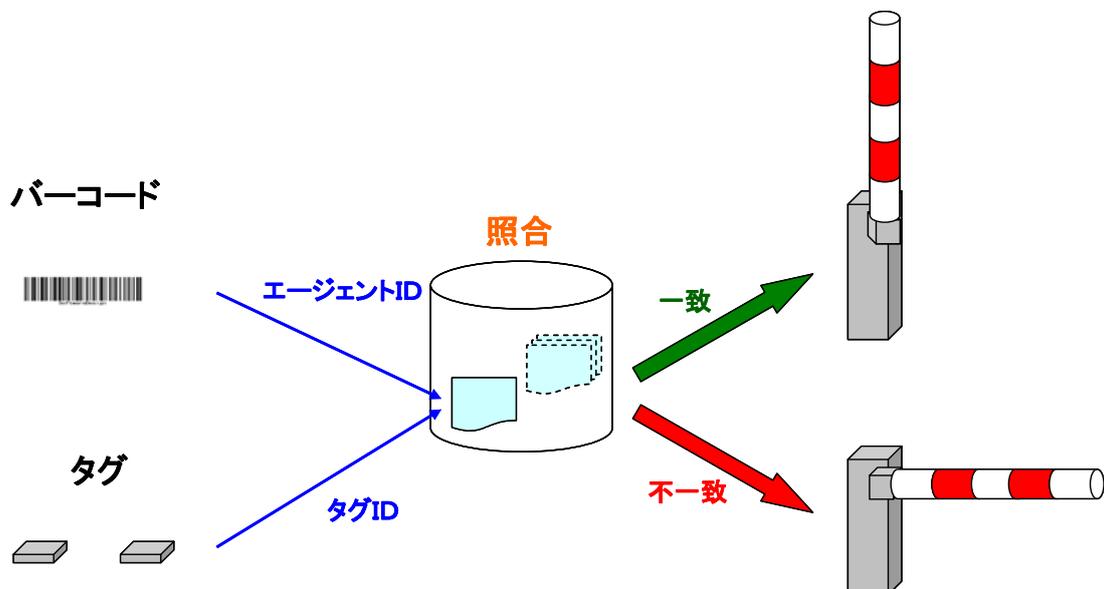


図 3-31 ゲートによる入退場者の管理

3.4.1.2.13. カメラによる画像認識を用いて許可のないエージェントの侵入を検知

カメラによる画像認識を用いて、タグ未所持者などの許可のないエージェントの侵入を検知し、VSM に低速走行指示を送信する。検知方法としては、入場処理が正常に終わったエージェントの数と画像認識により得られるエージェントの数を比較し、両者が一致しているかどうかを確認する（図 3-32 参照）。

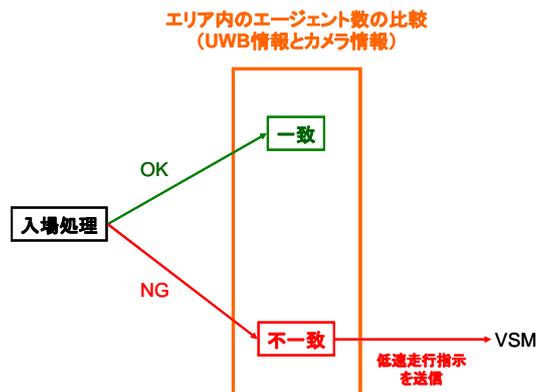


図 3-32 カメラによる画像認識を用いて許可のないエージェントの侵入を検知

3.4.1.2.14. 電光掲示板に入退場エラーの原因を表示

入退場時に何かしらのエラーがでてゲートがあがらない時、何もない状態ではなぜゲートがあがらないのか分からない。そこで、電光掲示板を用いてエラーの原因を表示することで、ゲートがあがらない理由を分かるようにする（図 3-33 参照）。

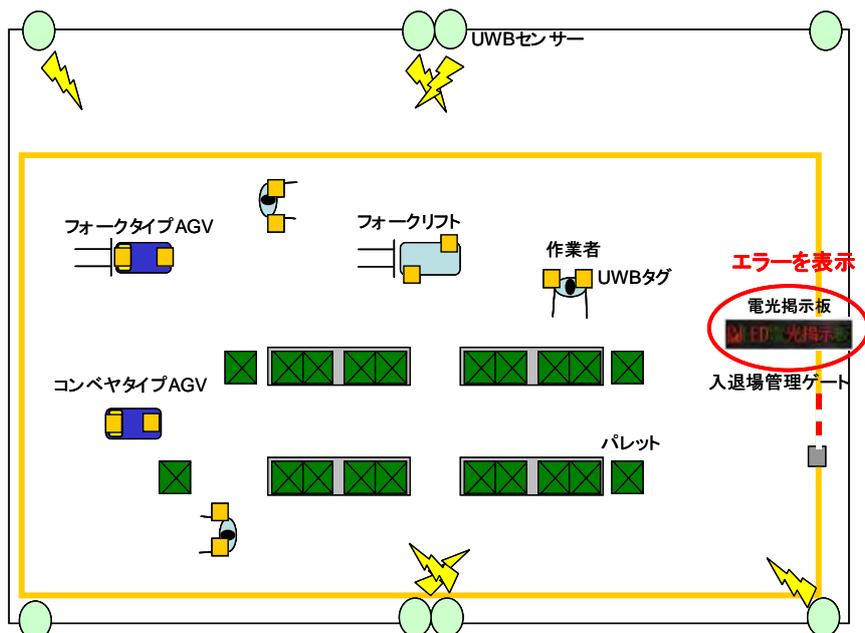


図 3-33 電光掲示板に入退場時のエラーの原因を表示

3.4.1.2.15. タグの非接触充電

UWB タグを非接触で充電するユニットを開発した。これにより、タグの電池交換の煩わしさを解消するとともに、タグの電池切れによる測位失敗の可能性を少なくすることができる。図 3-34 に実際にタグを充電している様子を示す。



図 3-34 タグを充電している様子

3.4.2. UWB 測位システム基本性能評価試験

以下に、UWB 測位システム（STD モード）の基本性能試験結果を述べる。

3.4.2.1. 測位精度の測定

3.4.2.1.1. 測定方法

図 3-35 の斜線で示されたエリアの 1m 格子ごとに測位精度を測定した。なお、各格子点の測位精度は、その格子点上で 250 回測位を行い、その格子点と測位点との平均誤差、X 方向の最大誤差、Y 方向の最大誤差、X 方向の標準偏差、Y 方向の標準偏差を求めた。

また、移動する人にタグをつけた時にどれくらい測位が乱れるかを見るために、タグを人の頭上に乗せて Y=3, 10m のラインを 15 往復し、各歩行ラインからの平均誤差、最大誤差、誤差の標準偏差を求めた。また、移動する AGV にタグをつけた時にどれくらい測位が乱れるかを見るために、AGV の前後 2 箇所タグをつけて AGV を周回させた。AGV の周回ルートの直線部分（X=10~30m の区間）のデータを用いて、走行ラインからの誤差の平均、最大、標準偏差を求めた。

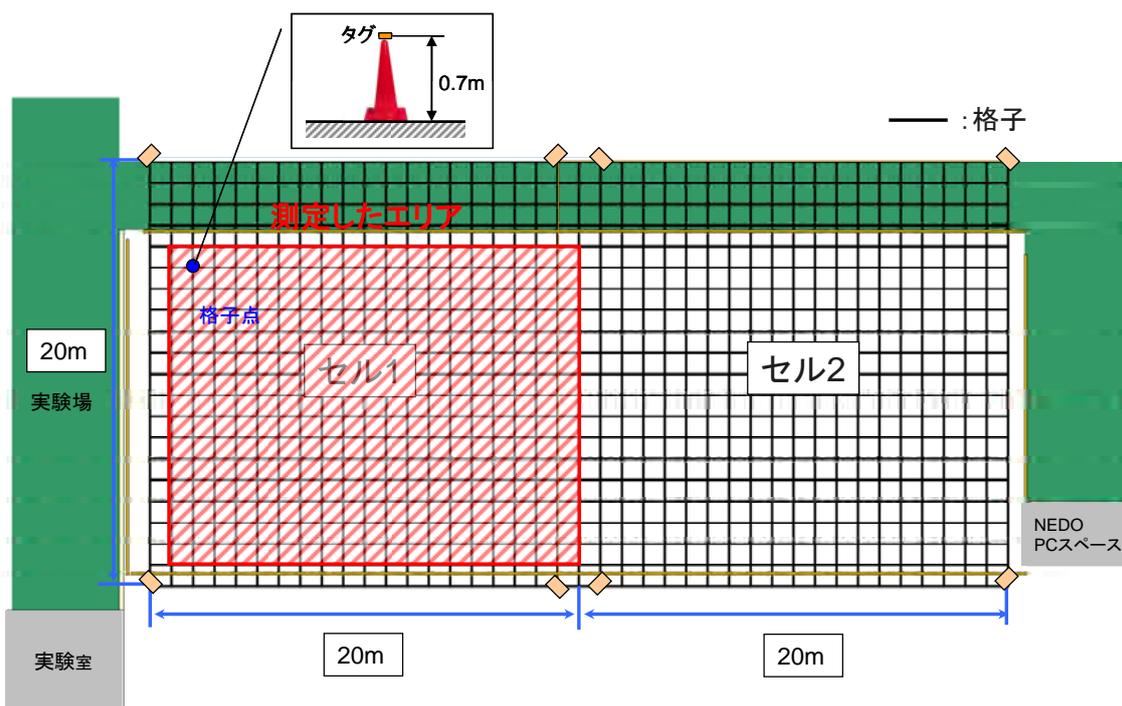


図 3-35 測定エリア

3.4.2.1.2. 測定結果

まず、図 3-36 に各格子点での測位の平均誤差を示す。平均誤差が 0.2m 以上 0.3m 未満のものをピンク色、0.3m 以上のものを赤色で示す。全格子点の平均誤差を平均したものは 0.11m となった。

次に、図 3-37 に移動する人にタグをつけた時の各歩行ラインからの平均誤差、最大誤差、誤差の標準偏差を示す。Y=3m のラインで平均誤差が 200mm、最大誤差が 1000mm、誤差の標準偏差が 160mm、Y=10m のラインで平均誤差が 180mm、最大誤差が 710mm、誤差の標準偏差が 160mm、Y=15m のラインで平均誤差が 230mm、最大誤差が 840mm、誤差の標準偏差が 190mm となった。

次に、図 3-38 に移動する AGV にタグをつけた時の走行ラインからの誤差の平均、最大、標準偏差を示す。水色のラインが AGV の左方に取り付けたタグの軌跡で、紫色のラインが AGV の右方に取り付けたタグの軌跡となる。上の走行ラインにて AGV の左方に取り付けたタグの走行ラインからの誤差の平均が 133mm、最大が 572mm、標準偏差が 86mm、AGV の右方に取り付けたタグの走行ラインからの誤差の平均が 115mm、最大が 680mm、標準偏差が 70mm となった。下の走行ラインにて AGV の左方に取り付けたタグの走行ラインからの誤差の平均が 128mm、最大が 858mm、標準偏差が 75mm、AGV の右方に取り付けたタグの走行ラインからの誤差の平均が 156mm、最大が 1000mm、標準偏差が 111mm となった。

16	0.23	0.19	0.11	0.08	0.17	0.07	0.10	0.10	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.11	0.12	0.14	0.15	0.12	
15	0.08	0.06	0.13	0.10	0.05	0.06	0.05	0.07	0.08	0.07	0.06	0.06	0.07	0.06	0.10	0.09	0.05	0.15	0.17	
14	0.20	0.12	0.26	0.27	0.06	0.07	0.07	0.06	0.05	0.07	0.05	0.05	0.02	0.05	0.08	0.06	0.06	0.07	0.08	
13	0.15	0.19	0.03	0.07	0.10	0.09	0.07	0.06	0.06	0.05	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07	0.14	0.11	0.11	0.07	0.17
12	0.08	0.08	0.06	0.06	0.10	0.08	0.05	0.06	0.05	0.05	0.07	0.05	0.06	0.05	0.05	0.11	0.12	0.13	0.13	0.11
11	0.04	0.04	0.06	0.16	0.05	0.03	0.05	0.05	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.10	0.10	0.12	0.20	0.12	
10	0.08	0.07	0.11	0.25	0.02	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06	0.05	0.04	0.05	0.06	0.09	0.11	0.22	0.26	0.23
9	0.24	0.17	0.03	0.05	0.21	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05	0.06	0.04	0.13	0.13	0.13	0.13	0.23
8	0.10	0.07	0.05	0.04	0.21	0.08	0.03	0.03	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.08	0.12	0.12	0.13	0.14	0.18
7	0.29	0.26	0.23	0.04	0.05	0.07	0.02	0.03	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.09
6	0.17	0.08	0.03	0.12	0.04	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.08	0.06	0.07	0.06	0.08	0.24	0.24	0.26
5	0.25	0.20	0.21	0.04	0.18	0.06	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.06	0.07	0.06	0.03	0.14	0.13	0.13	0.13	0.11
4	0.27	0.14	0.11	0.08	0.08	0.06	0.07	0.03	0.07	0.04	0.06	0.05	0.06	0.07	0.07	0.14	0.14	0.17	0.20	0.16
3	0.43	0.28	0.27	0.10	0.10	0.07	0.06	0.04	0.04	0.05	0.06	0.04	0.05	0.06	0.03	0.08	0.08	0.12	0.11	0.18
2	0.31	0.37	0.12	0.20	0.02	0.06	0.07	0.07	0.09	0.08	0.09	0.07	0.05	0.06	0.04	0.04	0.08	0.26	0.16	0.24
1	0.47	0.40	0.31	0.09	0.23	0.37	0.33	0.39	0.33	0.16	0.06	0.05	0.09	0.23	0.08	0.27	0.30	0.22	0.33	0.39
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

図 3-36 各格子点での測位の平均誤差

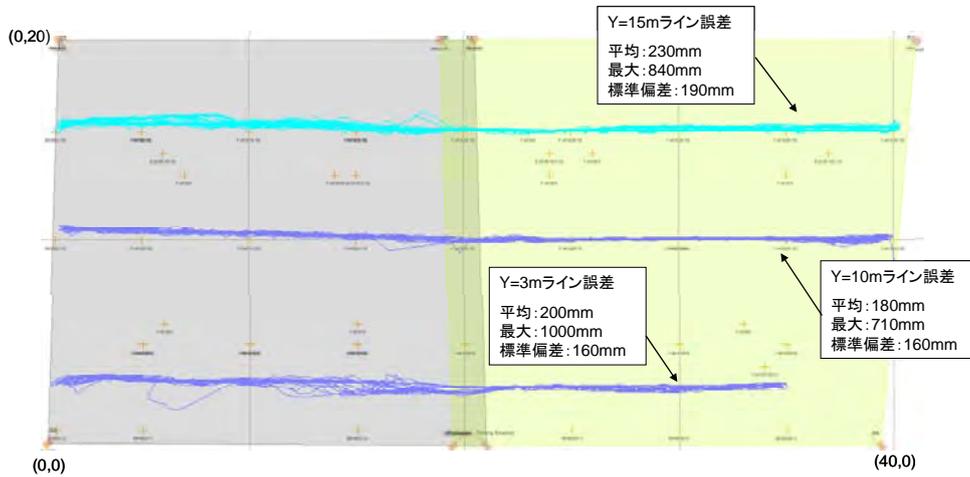


図 3-37 各歩行ラインからの平均誤差, 最大誤差, 誤差の標準偏差

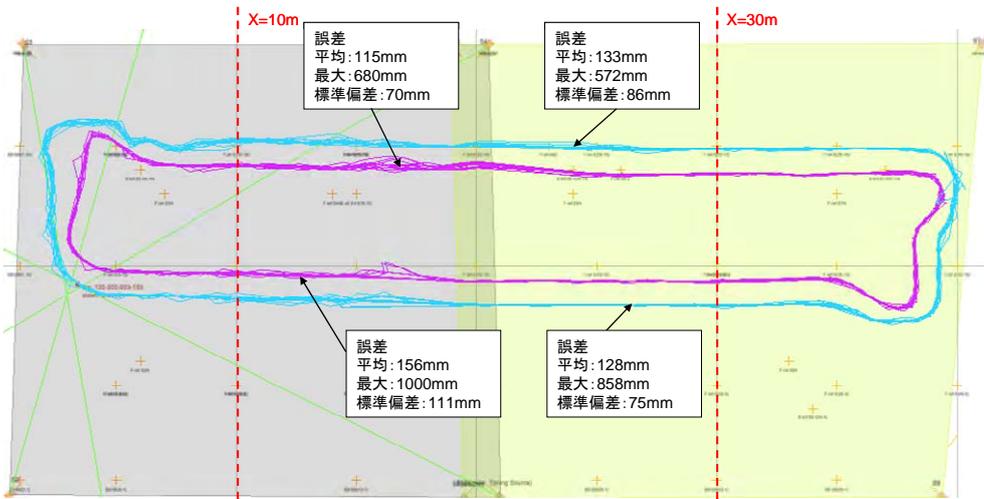


図 3-38 走行ラインからの誤差の平均, 最大, 標準偏差

3.4.2.2. 測位成功率の測定

3.4.2.2.1. 測定方法

図 3-35 の斜線で示されたエリアの 1m 格子ごとに測位成功率を測定した。なお、各格子点の測位成功率は、その格子点上で 250 回測位を行い、どれだけ測位が成功したかを求めた。

人の左肩右肩にタグを 1 個ずつ付け、図 3-39 のようにセル 1 の格子上を歩いて、それぞれのタグにおける測位の失敗確率と 2 つのタグを併せて考えた時の測位の失敗確率を求めた。

3.4.2.2.2. 測定結果

まずは、図 3-40 に各格子点における測位の成功率を示す。測位成功率が 99%以下 95%以上のものをピンク色、95%未満のものを赤色で示す。全格子点の測位成功率を平均したものは 99.7%となった。

次に、セル 1 の格子上を歩いた際の個々のタグにおける測位の失敗確率と 2 つのタグを併せて考えた時の測位の失敗確率を示す。個々のタグにおける測位の失敗確率について、左肩のタグにおける測位の失敗確率が 4.9% (494 回測定)、右肩のタグにおける測位の失敗確率が 3.2% (504 回測定) となった。そして、2 つのタグを併せて考えた時の測位の失敗確率は 0%となった。

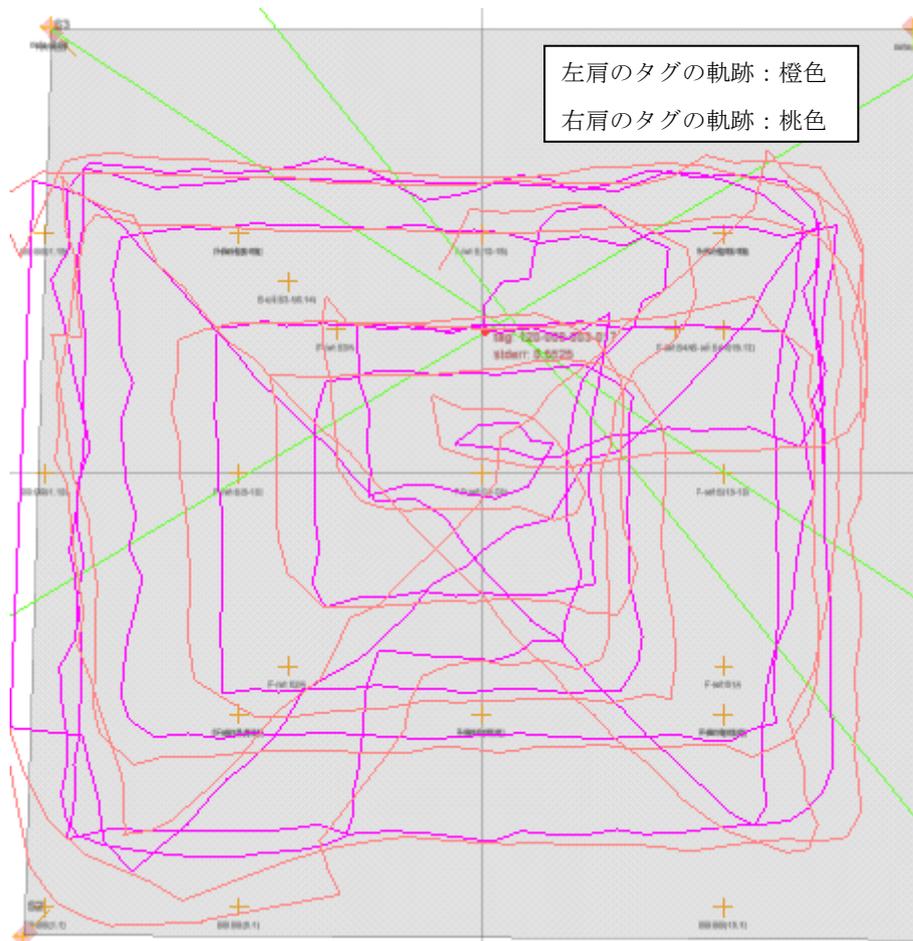


図 3-39 歩いた軌跡

16	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	88%	
15	100%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
14	96%	100%	100%	100%	100%	97%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
13	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
12	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	97%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	100%
11	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
10	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	96%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
9	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	97%	100%	100%	100%	100%	99%	100%	100%
8	97%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
7	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
6	100%	100%	96%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
5	99%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	97%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
4	100%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
3	94%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	97%	100%
2	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	97%	97%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		

図 3-40 各格子点での測位成功率

3.4.2.3. 測位間隔の測定

3.4.2.3.1. 測定方法

8, 16, 32 の各タイムスロット間隔における測位間隔を計測し、測位間隔の平均, 最大, 標準偏差を求めた。

3.4.2.3.2. 測定結果

表 3-13 に各タイムスロット間隔における測位間隔の平均, 最大, 標準偏差を示す。仕様で決まっている標準測位間隔と実際に計測した測位間隔の平均値を比較するとほぼ一致する結果となり、仕様通りの性能がでていることを確認できた。

表 3-13 各タイムスロット間隔における測位間隔

タイムスロット間隔	標準測位間隔[ms]	実測測位間隔平均[ms]	最大[ms]	標準偏差[ms]
4	108	108	125	10
8	216	216	219	5
16	432	432	499	9
32	864	865	874	8

3.4.2.4. 測位遅れの測定

3.4.2.4.1. 測定方法

8, 16, 32 の各タイムスロット間隔における測位遅れを計測し、測位遅れの平均, 最大, 標準偏差を求めた。なお、測位遅れとして、センサによる位置取得時刻とサーバーでの位置取得時間との差を計測した。

3.4.2.4.2. 測定結果

表 3-14 に各タイムスロット間隔における測位遅れの平均, 最大, 標準偏差を示す。

表 3-14 各タイムスロット間隔における測位遅れ

タイムスロット間隔	測位間隔[ms]	平均[ms]	最大[ms]	標準偏差[ms]
4	108	272	285	8
8	216	272	300	5
16	432	272	336	7
32	864	273	301	7

3.4.2.5. センサ数の影響

3.4.2.5.1. 測定方法

測位に用いるセンサの数を変えて、センサの数が測位精度に与える影響を求める。

3.4.2.5.2. 測定結果

図 3-41 に測位に用いるセンサの数を 2 個～4 個にした場合の 5 つの地点における測位の結果を示す。測位結果を見ると、センサ数が少なくとも 2 個あればある程度の測位精度で測位ができることがわかる。従って、この測位システムは 2o04 を満たす。

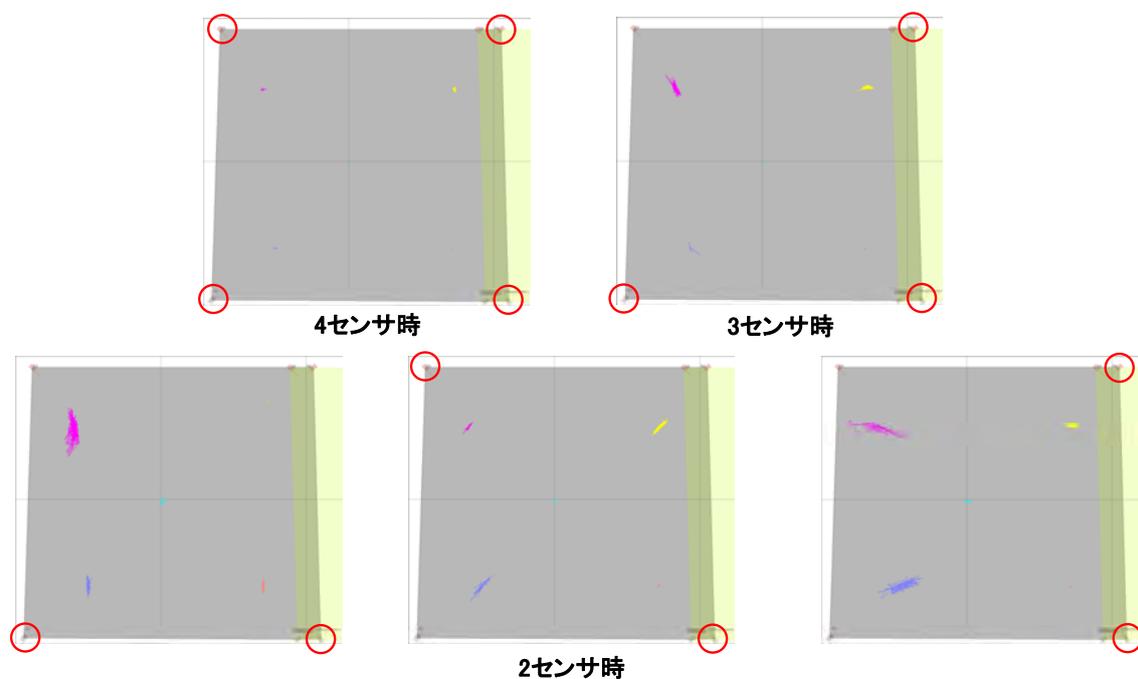


図 3-41 センサ数が測位精度に与える影響

3.4.2.6. 試験結果まとめ

上述した試験の結果を表 3-15 にまとめる。

表 3-15 試験結果のまとめ

測位精度	
静止時	平均 110mm
移動体取り付け時	平均200mm、最大1000mm
測位取得率(同一セル内)	
静止時	平均 99.7%
移動体取り付け時*(2タグ)	平均 100%
測位間隔 : 平均(最大)	AGV:216ms (219ms) フォークリフト:216ms (219ms) 作業者:432ms (499ms)
測位遅れ: 平均(最大)	272ms (336ms)

3.4.3. システム連動試験

システム連動試験として、AGV への指示遅れ時間を出すための停止テスト、安全距離の計算とそれに基づき AGV が減速しているのを確認するためのすれちがいテストを行った。

3.4.3.1. 停止テスト

AGV への指示遅れ時間を出すために停止テストを行った。まず、タグを 2 個 AGV の走行経路に対して対称に並べて、擬似的にエージェントが AGV の走行経路上にいるようにした (図 3-42 参照)。次に AGV の前後にタグを 1 個ずつつけた。AGV と擬似エージェントとの判定距離を 12m に設定し、AGV と擬似エージェントの距離が 12m 付近になった時点で、エリア管理システムから AGV へ停止指示を出すようにした。なお、停止開始時の AGV の速度として 200m/min と 130m/min の 2 種類を用いた。

表 3-16 にテスト結果として、停止開始速度ごとの停止距離を示す。なお、停止距離とは距離判定してから AGV が実際に停止するまでに進む距離のことである。また、その停止距離を用いて求めた停止指示遅れ時間も示す。なお、停止指示遅れ時間は距離判定してから AGV が停止を開始し始めるまでの時間のことである。

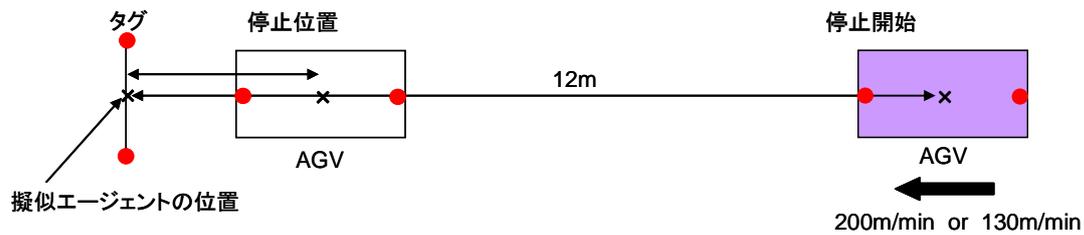


図 3-42 テスト環境

表 3-16 テスト結果

停止開始速度	停止距離※ 平均(最大)	停止指示遅れ時間※※ 平均±標準偏差 (最大)
200m/min	10.57m (11.6m)	843±138ms (1139ms)
130m/min	4.96m (5.24m)	775±82ms (906ms)

※:AGVが停止開始してから停止するまでに進む距離

※※:12mの距離判定してからAGVへ速度指示を出すまでの時間

3.4.3.2. 安全距離の計算

表 3-17 に安全距離の計算条件を示し、図 3-43 に安全距離の計算結果を示す。

表 3-17 安全距離の計算条件

速度	AGV	最高速度	200m/min
		中速度	130m/min
		低速度	60m/min
	フォークリフト最高速度		300m/min
	人最高速度		96m/min
応答遅れ	AGV		1.14s
	UWB(人)		0.83s
	UWB(フォーク)		0.56s
人・フォークリフト侵入角度			15度
UWB測位誤差			1m

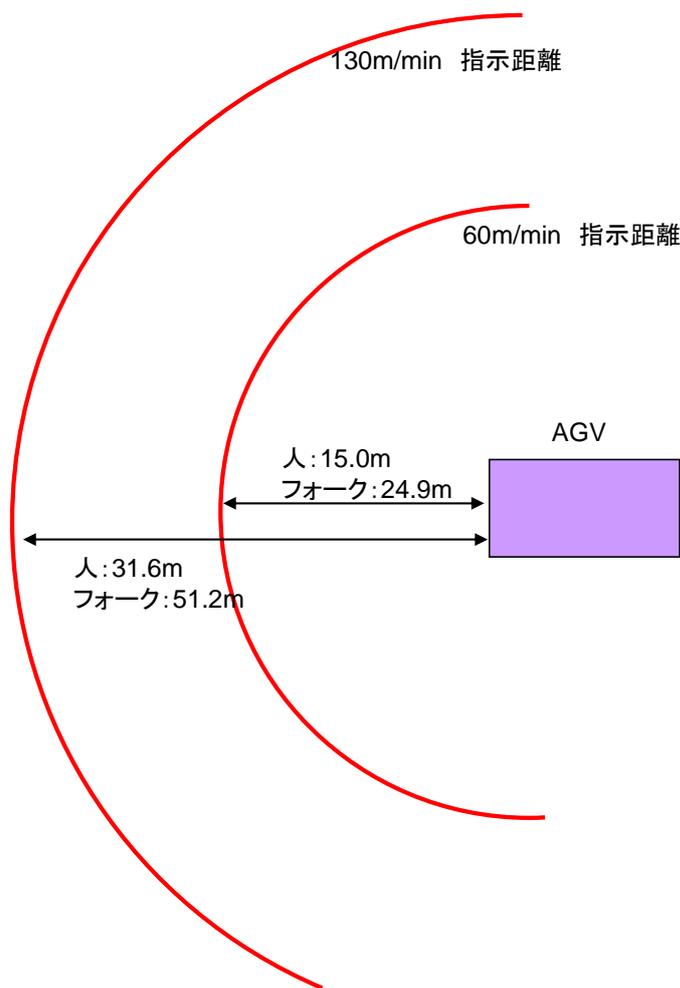


図 3-43 安全距離の計算結果

3.4.3.3. すれちがいテスト

3.4.3.2 の安全距離の計算に基づき、AGV が想定どおり減速しているかを確認するためにすれちがいテストを行った。以下にテスト条件を示す。また、図 3-45 にテスト結果を示す。テスト結果によれば、安全判定が行われ、AGV が適切に速度制御されていることがわかる。

- 中速（130m/min）の判定距離を 25m とし、タグをつけた人と AGV の距離が 25m 付近になると、中速の指示を開始した。
- 低速（60m/min）の判定距離を 15m とし、タグをつけた人と AGV の距離が 15m 付近になると、低速の指示を開始した。
- 図 3-44 のように AGV が 200m/min まで加速しきれるように人は十分に離れたところから歩行を始めた。

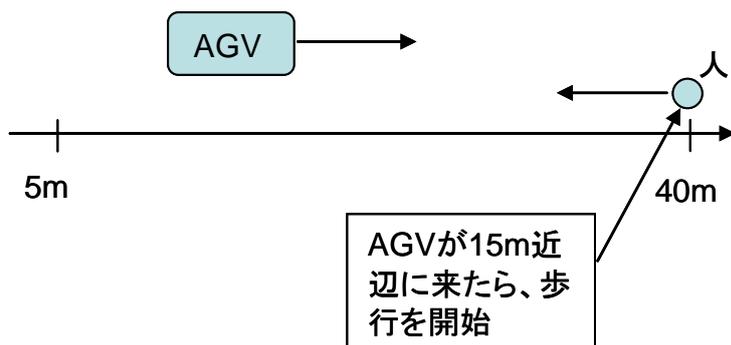


図 3-44 すれ違いテストの環境

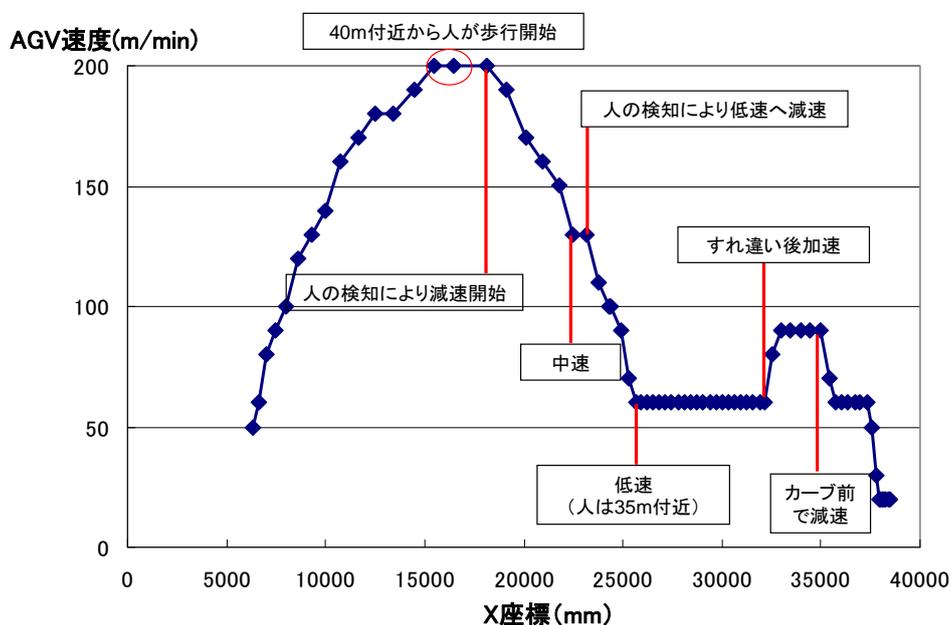


図 3-45 すれ違いテストの結果

3.4.3.4. 試験結果まとめ

まず、停止テストを行い、距離判定してから AGV が実際に停止するまでの時間を計測した。次に、その計測した時間を用いて安全距離の計算を行った。最後に、その計算した安全距離を用いてすれ違いテストを行ったところ、AGV の速度が適切に減速され、AGV と作業者がすれ違う際には AGV の速度が低速速度 60m/min になっていることがわかった。このように理論的な計算により安全距離を求めることで、AGV と作業者・フォークリフトが接近する際に AGV の速度を低速に落とした状態を作り出すことがある程度可能になる。ただし、ここで注意しないといけないのは、安全距離の計算をミスすると AGV と作業者・フォークリフトが接近する際に AGV の速度を低速に落とすきれないといった状況が考えられる。従って、計算した値が有効かどうか安全距離の設定後必ず検証する必要がある。

3.5. ローカルエリアシステム

3.5.1. 仕様

3.5.1.1. 概要

高速 AGV が稼働するエリア内で、人やフォークリフト等の共存しなければならない例えば交差点などのローカルエリアの安全を確認するための環境設置型の安全サポートセンサである。交差点の天井に取り付け、障害物が AGV の走行エリア内を移動している場合、接近する AGV に危険を知らせ、安全に停止する指示を与える。1 個のセンサがカバーするエリアは max10m 走行角 90 度×90 度である。

検出するフォークリフトの天井及び作業者のヘルメットに反射テープを貼り、センサは反射テープを検出して人かフォークリフトかを判断する。検出エリアは人用とフォークリフト用個別に設定可能である。図 3-46 にローカルエリアセンサの概略図を示す。

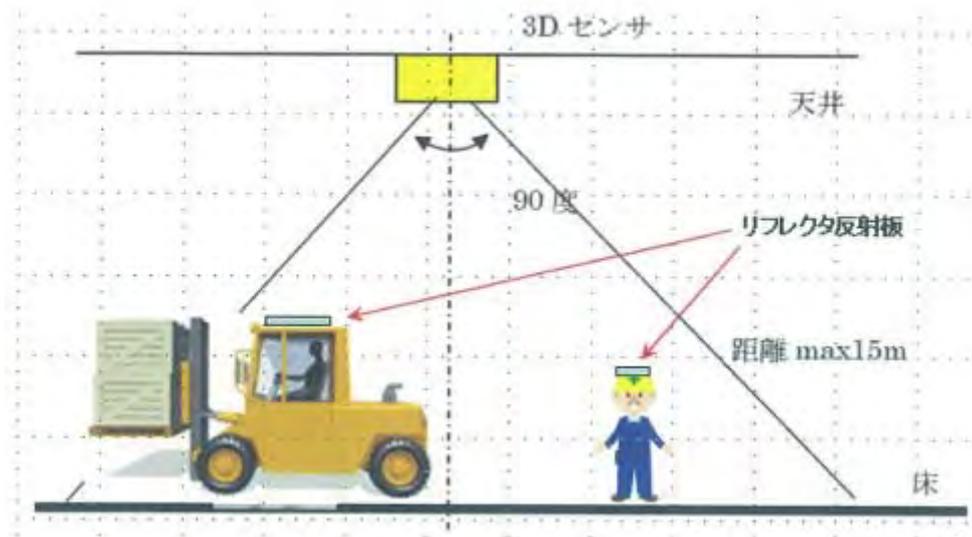


図 3-46 ローカルエリアセンサの概略図

3.5.1.2. 仕様値

表 3-18 にローカルエリアセンサの仕様値をまとめる。

表 3-18 ローカルエリアセンサの仕様値

項目	仕様値
検出距離 (安全)	16m (直線距離)
検出物	20×100mm (再帰反射板 3Mダイヤモンドグレード)
検出エリア	90度×158度 (150×88) ポイント
応答速度	700msec
電源	24V±10% 0.5A以下 (起動時2A以下)
形状	240L×80W×112Hmm
重量	3kg
出力	故障出力 (オープンコレクタ pnp max100mA/24V)
外部通信	イーサネット 100BaseTX
使用環境	屋内・天井
使用湿度/温度	-10度～50度 湿度85%以下 (結露しないこと)

3.5.1.3. 機器の構成

図 3-47 にローカルエリアセンサの機器の構成を示す。

図 3-47 の中で青線は制御回路の信号の流れを表している。また、入出力信号はイーサネットで行い、出力回路は故障出力のみである。

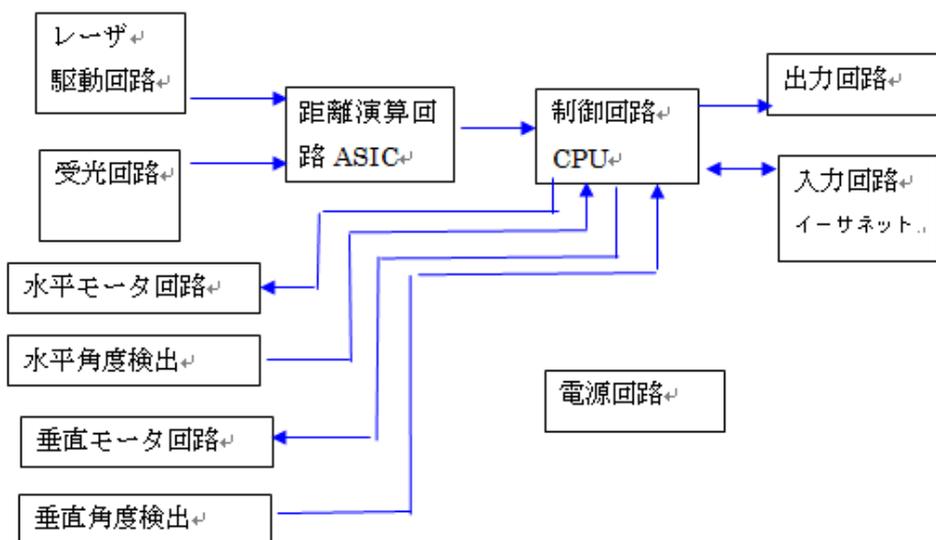


図 3-47 機器の構成

3.5.1.4. 各モジュールの機能

3.5.1.4.1. システム

全ての入出力、エリア設定などはイーサネットで行う。

検出物はヘルメットに貼られた再帰反射板、フォークリフト等に貼られた再帰反射板とし、再帰反射板が汚れる、はがれる等の事故があれば、人やフォークリフトを検出できない。故障出力は以下のエラーを検出した時に発生する。

- レーザレベルダウンエラー
- 水平モータ回転異常
- 垂直モータ回転異常

3.5.1.4.2. レーザ駆動回路

レーザ発光のドライブ回路を構成し、レーザ異常はレーザモニタ回路（ASIC+CPU）で監視する。また、異常時は故障出力をする。

3.5.1.4.3. 受光回路

レーザの受光信号の増幅回路を有する。

3.5.1.4.4. 水平モータ回路

5555rpm で回転する DC モータを使用し、モータの制御は水平角度検出のゼロ信号の間隔（10.8ms）になるように行う。

3.5.1.4.5. 垂直モータ

360ms で 158 度を往復回転するパルスモータを使用し、モータ制御は CPU のパルス発振回路で制御する。

3.5.1.4.6. 水平角度検出

0.25 度ピッチで出力するエンコーダとゼロ信号（原点位置）を出力する回路で構成し、エンコーダ信号と同期してレーザは発光する。

従ってモータ回転停止の場合レーザ発光はしない（フェイルセーフ設計）

ゼロ信号の間隔が 10.8ms 内に無い場合、異常と判断し故障出力する。

3.5.1.4.7. 垂直角度検出

モータのゼロ信号（基準位置）を出力する回路で構成し、ゼロ信号の間隔が 360ms 内に無い場合、異常と判断し故障出力する。

3.5.1.4.8. ASIC

距離を演算する回路である。

3.5.1.4.9. CPU

センサの制御回路である。

3.5.1.4.10. 出力回路

故障時に出力する。出力は PNP である。

3.5.1.4.11. 入力回路

イーサネットで出力し、エリア内の全ての検出物のアドレス「位置」と高さをデータで出力する。

また、パソコンに接続し生データのモニタ及び異常時のログ機能としても使用する。

3.5.1.4.12. 電源回路

24V 入力で回路に電源を供給する。

3.5.1.5. システム構成

3.5.1.5.1. ローカルエリアセンサ単体の構成

ローカルエリアセンサは、図 3-48 に示すように、90 度の 3 面ポリゴンセンサをパルスモータにより 158 度走査させ、3 次元空間の距離画像信号を入手する。

床から 2m (Z 軸) までにある検出物を人と判断し、2m 以上 3.5m 以下 (Z 軸) にある検出物はフォークリフトと判断して出力する。

人とフォークリフトを、個々に検出位置 (XY 軸平面アドレス) をつけて、イーサネットで出力する。

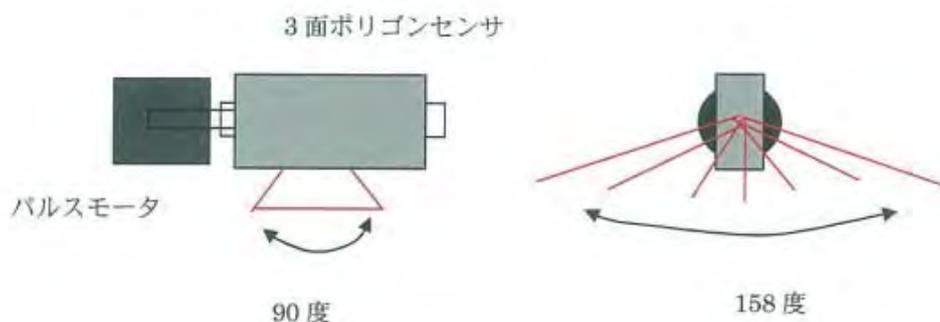


図 3-48 センサの構成

3.5.1.5.2. システムとしての構成

ローカルエリアセンサを天井高さ 6.5m に設置した場合、検出できるエリアは 30m×8m のエリアとなる。このセンサを 1 台で使用する場合は、通路幅が 8m 以下の細長いエリアを想定できる。また、交差点など広いエリアが必要な場合は、図 3-49 に示すようにセンサ複数台を 8m 以下の間隔で設置する事が必要である。

センサ 1 台の検出エリア

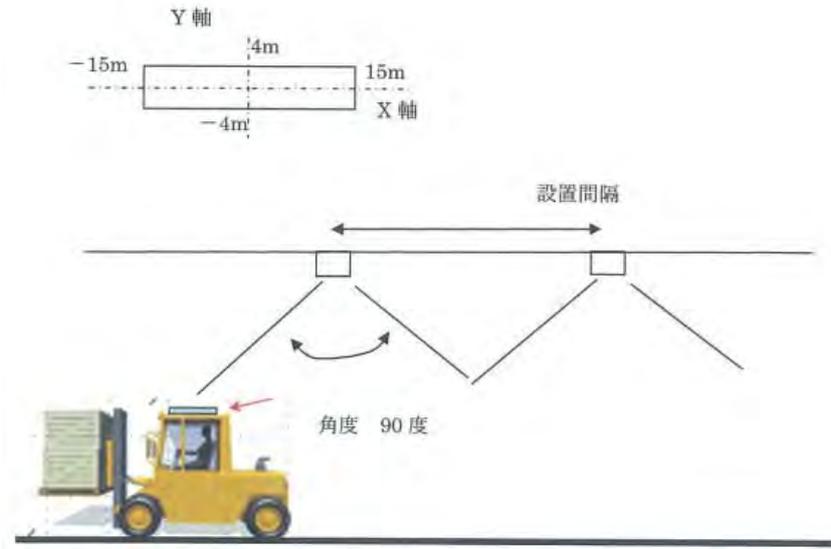


図 3-49 システムの構成

3.5.2. 性能評価試験結果

3.5.2.1. 位置認識性能評価

ローカルエリアセンサの検出位置精度を評価する為、図 3-50 に示す 8m×19m のエリア内 21 か所に於いて測定を実施した。

図中に於いて○印が測定位置であり、□又は△印がローカルエリアセンサの出力結果の位置を示している。

測定結果の詳細を表 3-19 に示す。評価結果よりセンサ中心部の精度は高く、エリアの端では精度が落ちることが分かる。

評価結果としては最大値±350mm の精度があり、この寸法は人の肩幅よりも小さい事から十分な精度で検出できている。

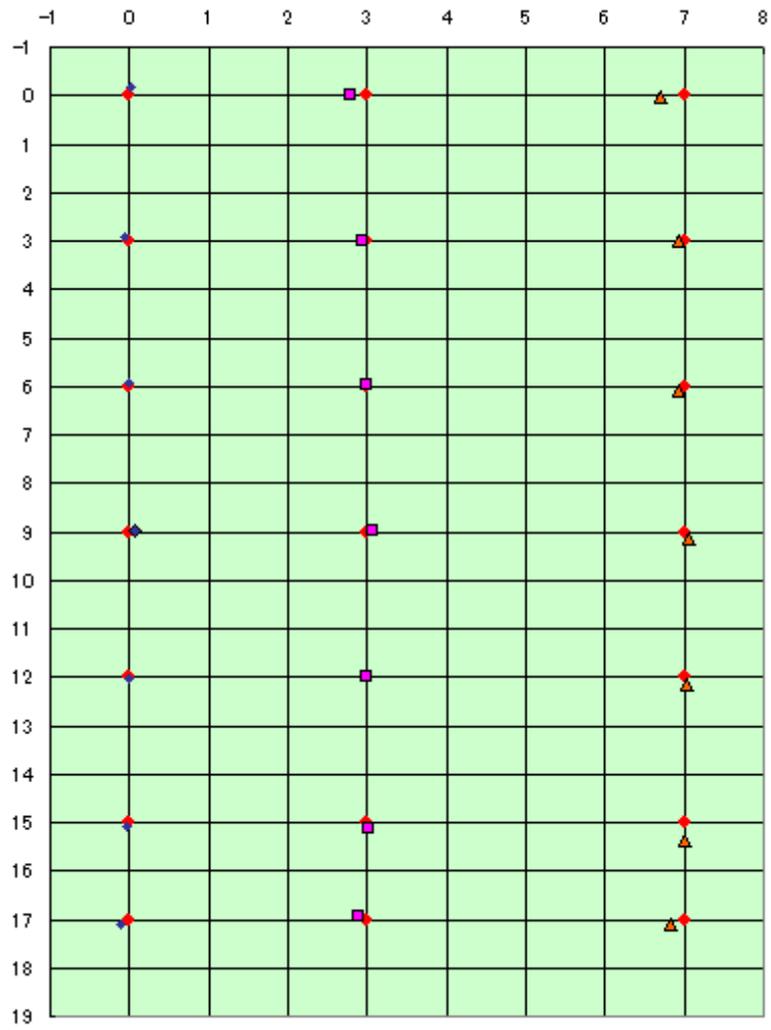


図 3-50 ローカルエリアセンサの測定位置

表 3-19 ローカルエリアセンサの検出精度評価

実座標(単位:m) (反射板を置いた位置)		ピクセル座標 (センサの戻値ave)		ピクセル座標を一次式で補正して 実座標値に近似(単位:m)		実座標との誤差 (単位:m)	
x	y	x	y	x'	y'	x	y
0	0	3.71	19.29	0.02	-0.17	-0.02	0.17
0	3	2.95	50.31	-0.05	2.93	0.05	0.07
0	6	3.49	80.33	0.00	5.93	0.00	0.07
0	9	4.19	110.90	0.07	8.99	-0.07	0.01
0	12	3.39	141.19	-0.01	12.02	0.01	-0.02
0	15	3.19	171.81	-0.03	15.08	0.03	-0.08
0	17	2.35	191.87	-0.11	17.09	0.11	-0.09
3	0	31.49	20.72	2.80	-0.03	0.20	0.03
3	3	32.90	50.98	2.94	3.00	0.06	0.00
3	6	33.35	80.66	2.99	5.97	0.01	0.03
3	9	34.15	110.91	3.06	8.99	-0.06	0.01
3	12	33.49	141.09	3.00	12.01	0.00	-0.01
3	15	33.79	172.13	3.03	15.11	-0.03	-0.11
3	17	32.43	190.37	2.89	16.94	0.11	0.06
7	0	70.49	21.41	6.70	0.04	0.30	-0.04
7	3	72.87	51.15	6.94	3.01	0.06	-0.01
7	6	72.90	81.98	6.94	6.10	0.06	-0.10
7	9	74.15	112.26	7.06	9.13	-0.06	-0.13
7	12	73.97	142.67	7.05	12.17	-0.05	-0.17
7	15	73.61	174.55	7.01	15.35	-0.01	-0.35
7	17	71.75	192.16	6.83	17.12	0.17	-0.12

3.5.2.2. 人検知性能評価

図 3-51 で示す反射テープ付きヘルメットを被った歩行者が、天井高さ 6.5m に設置された 2 個のローカルエリアセンサの検出エリアを、5 分間歩行した時の検知状態を評価した。

図 3-52 は、ローカルエリアセンサ 1 の検出結果を示したグラフである。

グラフの横軸は、5 分間歩行した時の時間を示し、その時にローカルエリアセンサが歩行者を検出した X 座標を左のグラフに Y 座標を右のグラフにプロットしたものである。

ローカルエリアセンサ 1 では歩行開始後、2490 秒と 2510 秒の 2 度未検出な状態が発生した。

また、図 3-53 は、図 3-52 と同様に設置場所が違うローカルエリアセンサ 2 の検出結果を示したグラフである。

ローカルエリアセンサ 2 では歩行開始後、20 秒・34 秒・124 秒・1700 秒・2080 秒・2090 秒と 2950 秒の 7 度未検出な状態が発生した。

ローカルエリアセンサ 1 及び 2 とともに、2 スキャン (1 スキャン : 700msec) 以上連続しての未検出状態は発生しなかった。

また、未検出の発生位置はエリア端に集中している事も分かった。



図 3-51 人体検出評価風景

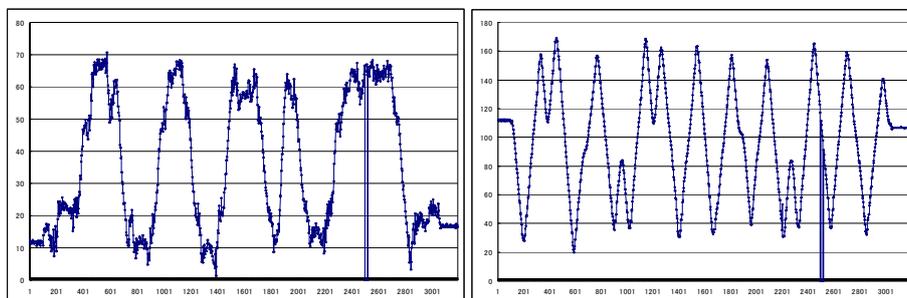


図 3-52 ローカルエリアセンサ 1 の検出結果

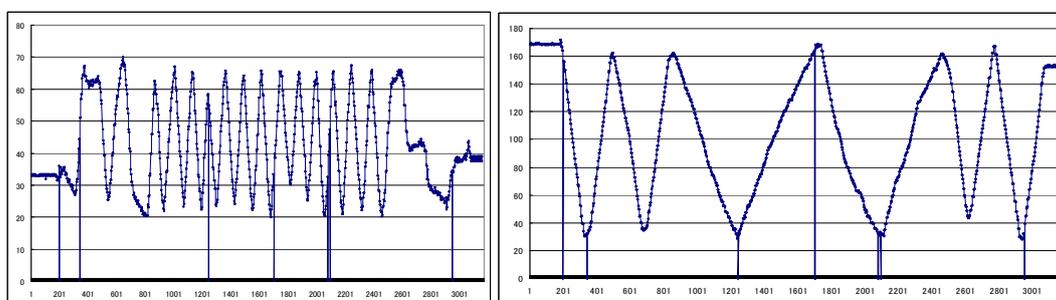


図 3-53 ローカルエリアセンサ 2 の検出結果

3.5.2.3. まとめ

ローカルエリアセンサは、エリア端に行くほど検知しにくくなる特性が見られた。

しかし、図 3-54 に示すように、1m 内側に入れば 100% 検出することも分かった。

99%以上検出可能な検知可能領域でも機能としては満足するが、100% 検知を保証できる検知保証領域のエリアも考慮に入れたシステム構築が理想である。

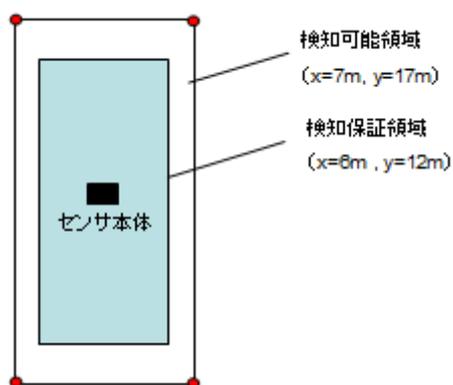


図 3-54 ローカルエリアセンサの検出範囲

3.6. 非接触充電システム

3.6.1. 概要

AGV のバッテリー充電の方式として、従来、人手によるコネクタ接続もしくは、コンタクタ（接触子）を用いた自動充電が主に採用されている。現行の充電システムでは、充電部に接続端子が露出されている為、感電の危険が存在する。また、充電電流が大きい急速充電の場合、接続端子部の接触不良等により、スパークが発生し火災が発生する危険も存在する。

今回、図 3-55 に示すように、無接触給電技術を用いた自動充電を開発することにより、以下の効果が見込まれる。

- 感電防止（充電部の露出がない。）
- 火災防止（機械的接触のないためスパークの発生がない。）
- メンテナンスフリー（非接点のため、接点部の磨耗や部品交換がない。）

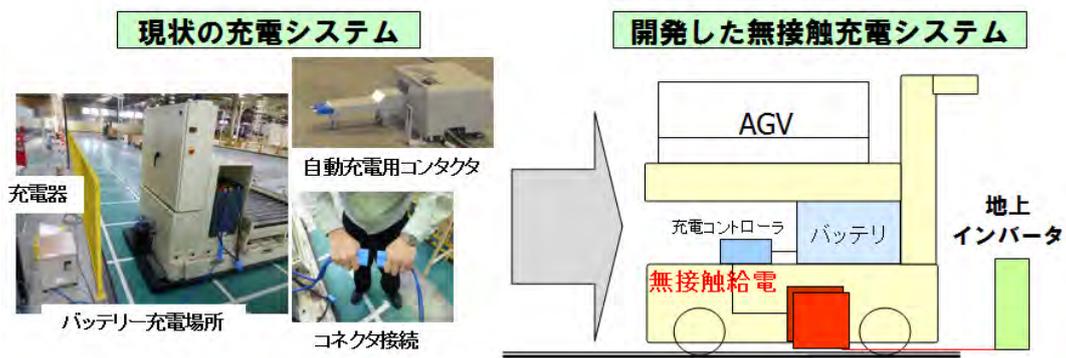


図 3-55 無接触充電の概略図

3.6.2. 仕様

3.6.2.1. 安全仕様

無接触給電技術を用いた充電システムをかいはずするにあたり、感電防止対策・電波防護指針・人体防護指針・バッテリー保護及び発熱対策を行わなければならない。

3.6.2.1.1. 感電防止対策

現状の接触式と比べ端子むき出しが存在しない為、本質的に感電の要因がなくなる。また、AGV とインターロック信号を有する為、AGV が在席している時のみ充電を行う。

3.6.2.1.2. 電波防護指針・人体防護指針

ICNIRP(国際非電離放射線防護委員会)が発行しているガイドラインを遵守する。

3.6.2.1.3. バッテリー保護

充電電圧を監視する事による過充電防止回路を内蔵する。

3.6.2.1.4. 発熱対策

感熱線及びサーモスタットにより異常発熱を検知する停止機能を内蔵する。

3.6.2.2. 充電システム仕様

充電システムは、図 3-56 に示すようにインバータ・送電パッド・受電パッド・充電コントローラの4種類の製品で構成される。以下の表 3-20～表 3-22 にそれぞれの仕様を記す。

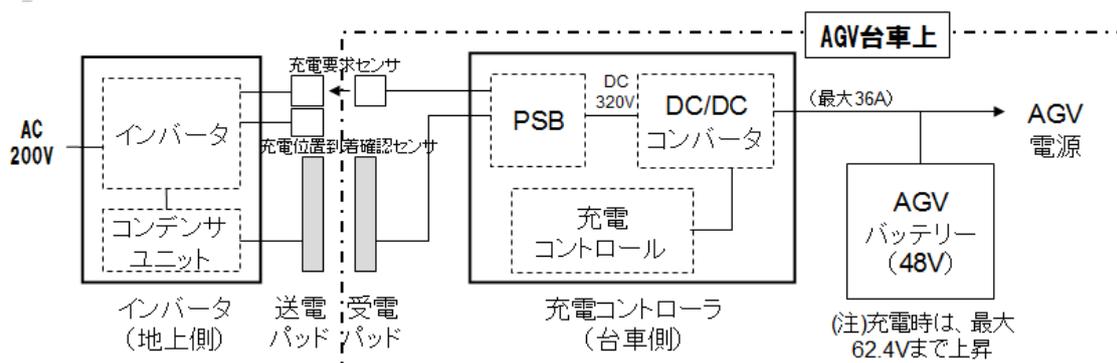


図 3-56 充電システムの基本構成

表 3-20 インバータ仕様

項目		内容
入力	定格入力(主回路)	AC三相180~240V (50/60Hz ±2%) 3.5KVA
	定格入力(制御回路)	AC 単相100~200V(DC85~264V 50/60Hz ±2%) 40VA
	接地種別	D種接地(100Ω以下)
出力	最大出力	3kW
	出力電圧	250Vrms以下
	出力電流	最大25Arms
	周波数	9.74KHz
保護回路、安全対策		過電流保護(商用電源側)、突入電流防止回路(商用電源側)、温度監視(IPM、トランス、出力用端子台、送電コイル)、過電流保護(スイッチング回路、送電コイル)、DCリアクトル接続監視、冷却ファン停止監視、ソフトスタート機能
入出力信号		外部入出力方式:フオトカプラ絶縁式シンク (停止命令・エラー出力・ワーニング出力のみB接点) 入力信号:停止命令、給電命令、エラー解除命令 出力信号:電源状態、給電中、エラー、ワーニング、エラーステータス 入力電流:24V 5mA (MAX) 出力電流:24V 100mA (MAX)
LED表示		電源、給電中、ワーニングステータス、エラーステータス
ネジ端子台(電力用)		ネジ式端子台(端子間ピッチ16mm) 推奨圧着端子:R8-5(絶縁被覆付)
コネクタ端子台(信号用)		2ピースコネクタ端子台(端子間ピッチ3.5mm 16ピン) 使用コネクタ: MC 1,5/16-STF-3,5(フェニックスコンタクト製) 推奨電線:AWG28~16、電線被覆剥き代:9~10mm
冷却方式		強制冷却(8cmファン2機搭載)
筐体寸法		W250mm×D130mm×H350mm(ファン、突起部を除く)
質量		約6.1kg

表 3-21 送電・受電パッド仕様

項目		内容
送受電コイル共通	設置環境	屋内
	使用周囲温度	0~40℃
	使用周囲湿度	90%RH以下(結露なき事)
	雰囲気	塵埃、腐食性ガス、可燃性ガス、オイルミスト、蒸気、水滴なき事。また塩分が含まれない事。
	冷却方式	自然空冷

表 3-22 充電コントローラ仕様

項目	内容
充電対象電池電圧	48V
適合バッテリー	鉛バッテリー
充電電圧上限(CV電圧)	デフォルト:64V
充電開始電圧下限	デフォルト:10V
充電電流(CC電流)	最大40A
充電方式	定電流・定電圧充電(CC・CV方式)
入力電圧範囲	DC260V~350V
保護回路、安全対策	出力過電流保護(監視・制御回路+ヒューズ)、出力過電圧保護、 バッテリー逆接続保護、無負荷運転保護、充電時間監視タイマー、 過放電保護、突入電流制限(バッテリー接続時)、冷却ファン回転数監視、 入力側スイッチング電流抑制回路、過熱保護(端子台、パワー半導体等)、CV充電時「へ」の字型「垂下」特性、制御電源回路異常監視
入出力信号	外部入出力方式:フォトカプラ絶縁式シンク 入力信号:充電停止指令、制御電源起動指令 出力信号:充電要求、充電中、エラー、
動作選択	制御電源の起動を外部機器から制御するか、常時起動とするかスイッチで選択可能
LED表示	電源、充電中、エラー、バッテリー電圧、エラーステータス
コネクタ(電力用)	ネジ式端子台(端子間ピッチ13mm 4ピン) 推奨圧着端子:R5.5-4(絶縁被覆付)
コネクタ(信号用)	ネジ式端子台(端子間ピッチ2.54mm 12ピン) 推奨電線:AWG28~22、電線被覆剥き代:8~9mm
冷却方式	強制空冷(8cmファン×1)、充電時のみ回転
筐体寸法	W120mm×D250mm×H100mm(突起部を除く)
動作環境	-10°C~50°C
質量	約2500g

3.6.3. 基本性能評価試験

3.6.3.1. 機器構成

図 3-57 で示すように、コンベヤタイプの高速度 AGV に受電パッドと充電コントローラを取り付け、地上側に送電パッドとインバータを設置し、AGV が電力供給可能範囲に停止した時、自動的にバッテリーに充電を開始し、AGV が走行を開始し離れると自動的に充電を停止する。

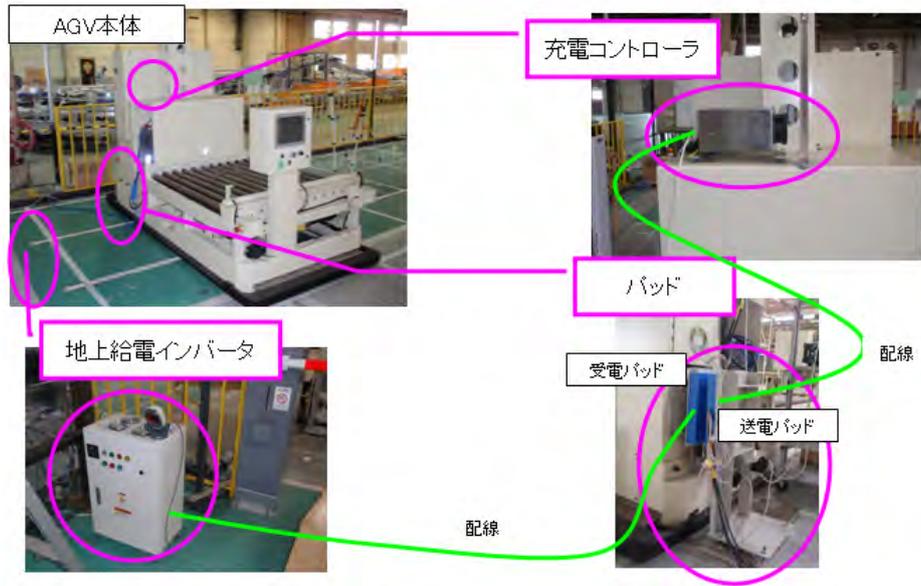


図 3-57 機器構成

3.6.3.2. 鉛バッテリーへの充電

AGV に搭載している鉛バッテリーへの充電は、充電開始時は CC (定電流) 充電を行い、バッテリーの電圧が 60V に達した時点で CV (定電圧) 充電に切り替わる事を確認した。また、総充電量 (230Ah) が総放电量 (206Ah) を上回る事を確認出来たので今回の充電シーケンスを行う事でバッテリーが満了状態になる事も確認出来た。

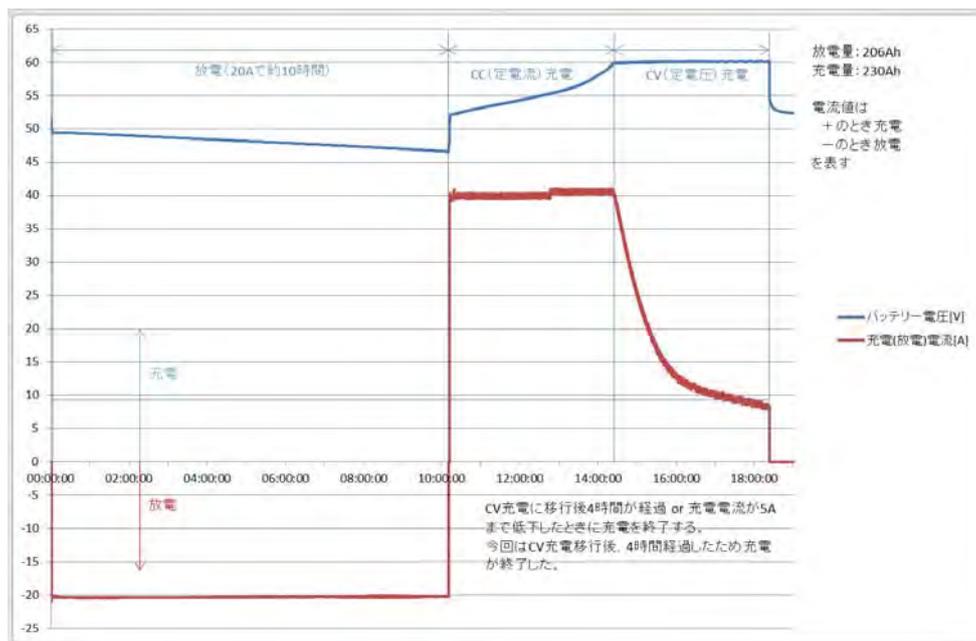


図 3-58 充電時の電圧と電流

3.6.3.3. 温度測定

AGV に搭載したバッテリー充電中に於ける送信・受信パッド内の温度上昇を測定した結果、温度上昇は最大で 30deg 以下である事が分かった。この結果より周囲温度 40°C まで使用可能である事が分かった。

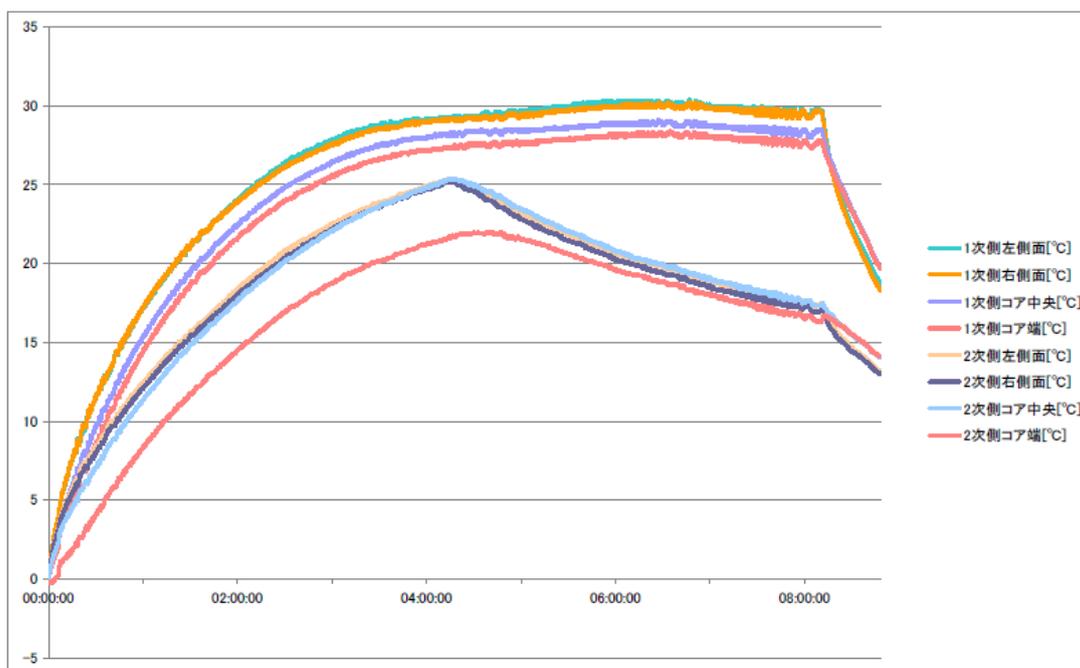


図 3-59 充電時の温度

3.6.3.4. 磁界測定

AGV のバッテリーを自動充電するに於いて、今回開発した送信・受信パッドの各軸のずれ量の許容範囲が AGV の停止精度より大きくなくてはならない。

受信パッドの位置を固定し、送信パッドを各軸 10mm ピッチで移動させ磁束密度を測定する事により、暴露基準（職業）を計算し ICNRP 磁界許容範囲であるずれ量を測定した。

図 3-60 では受信パッドに対して Y 方向±50mm 以内、Z 方向+26mm 以内が許容範囲である事が分かった。

図 3-61 では受信パッドに対して Z 方向+26mm 以内、X 方向+126mm 以内が許容範囲である事が分かった。

図 3-62 では受信パッドに対して Y 方向±60mm 以内、X 方向+126mm 以内が許容範囲である事が分かった。

以上の事から、AGV の停止許容範囲は進行方向（Y）に±60mm 以内・AGV 幅方向に（Z）に+26mm 以内である事が分かる。

よって、今回開発した高速 AGV は±10mm の停止精度があるので問題ない事が分かった。

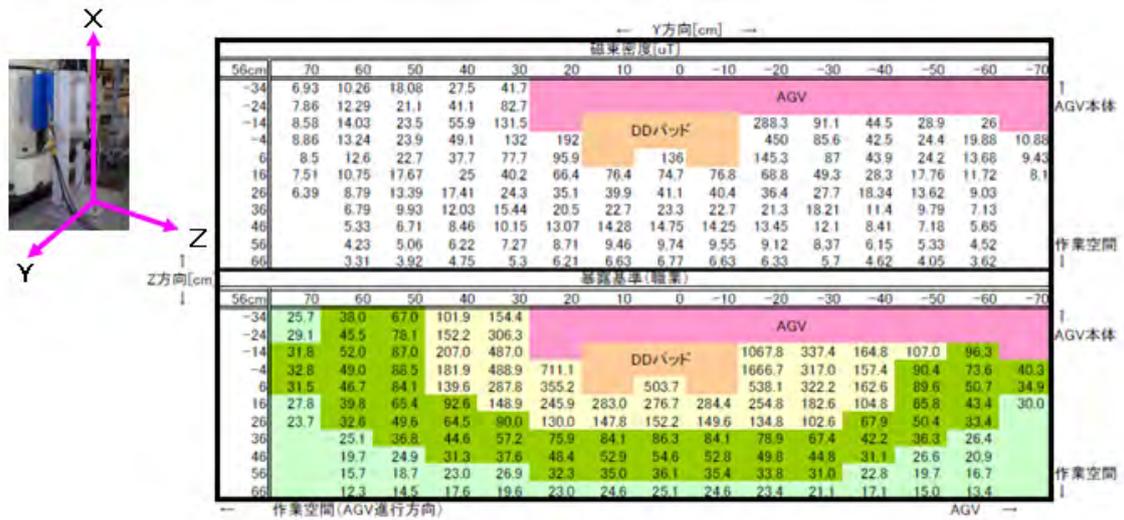


図 3-60 Y・Z軸に対する距離と磁束密度の関係

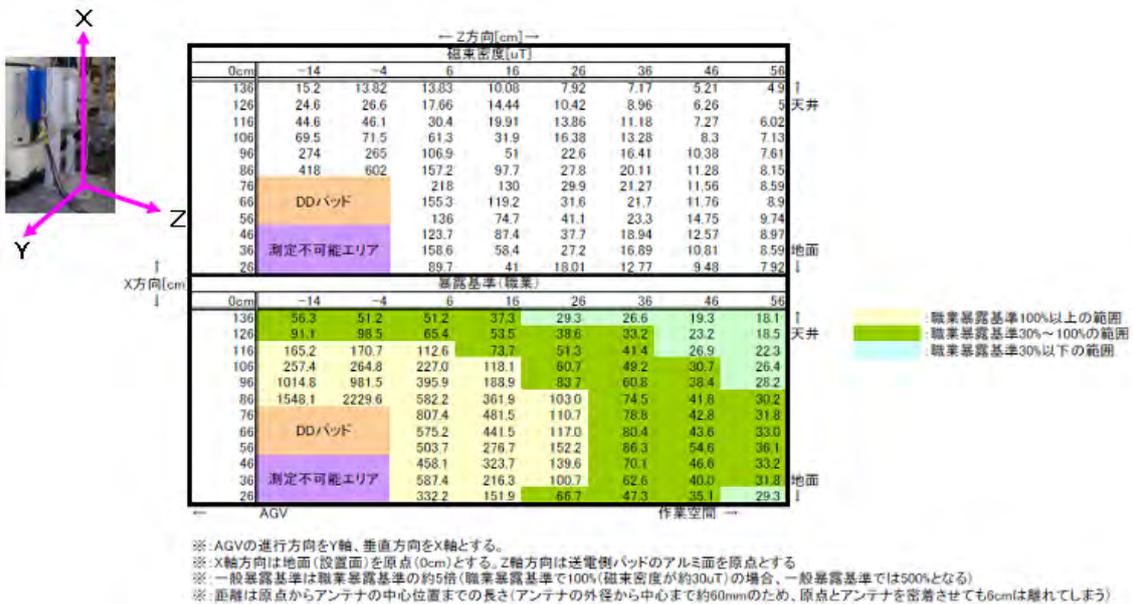
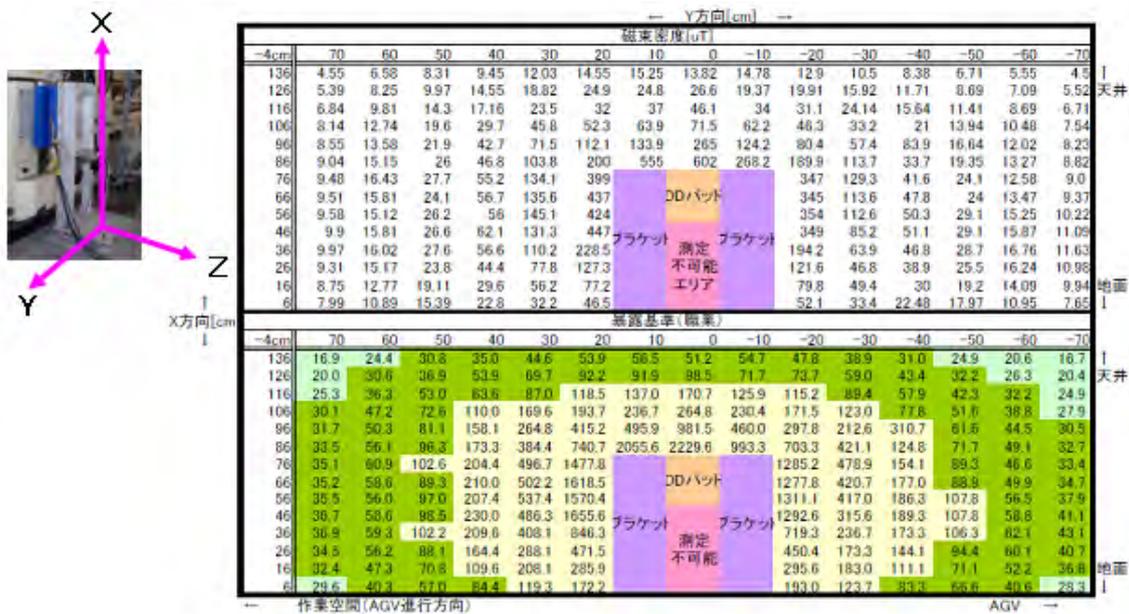


図 3-61 Z・X軸に対する距離と磁束密度の関係



※: AGVの進行方向をY軸、垂直方向をX軸とする。
 ※: Y軸方向の距離はパットの中心を原点(0cm)とする。X軸方向は地面を原点とする。
 ※: 一般暴露基準は職業暴露基準の約5倍(職業暴露基準で100%(磁束密度が約30uT)の場合、一般暴露基準では500%となる)

職業暴露基準100%以上の範囲
 職業暴露基準30%~100%の範囲
 職業暴露基準30%以下の範囲

図 3-62 Y・X軸に対する距離と磁束密度の関係

4. 検証試験

4.1. 物流センターにおける安全性検証テスト（協力：味の素株式会社、味の素物流株式会社、関東エース物流株式会社、株式会社オールユニール）

4.1.1. まえがき

本プロジェクトの最終年度にあたる平成 25 年度は、味の素株式会社の協力のもと実際の配送センターにて 10 月 21 日～25 日の 5 日間実運用テストを実施し、本システムの安全性の検証などを行った。まず、4.1.2 でテスト内容について説明し、次に 4.1.3 でテスト結果を示す。そして最後に 4.1.4 で本テストのまとめを行う。

4.1.2. テスト内容

テスト中、AGV は図 4-1 の走行路上を最高速度 130m/min で一定方向に常に自動巡回した。巡回ルートにはショートのものと同ロングのものがあり、センターの負荷状況にあわせて 2 つのルートを切り替えた。ここで AGV の最高速度を 130m/min にしたのは、センターで定められているフォークリフトの制限速度の規則に準拠したためである。なお、走行路上に作業員・フォークリフト・パレットなどの障害物がある場合は、3D 障害物センサ（3.2 節参照）などの安全装置にて AGV を停止させた。そして、危険源がなくなったことを確認した後、AGV が自動走行を開始するようにした。

本テストでは主に以下の 3 つの評価を行った。

- UWB センサ（配置は図 4-1 参照）・タグを用いて、作業員（UWB タグのついたジャケットを着用：図 4-2 参照）、フォークリフト、AGV の位置をリアルタイムに計測した。その位置計測情報をもとに AGV と作業員・フォークリフトとが接触の恐れがある場合は、AGV を減速・停止させ、安全を確保した。エリア管理システムのログを解析することで、その安全確保技術の性能を評価した。また、AGV の最高速度を 60m/min から 130m/min にあげた効果もあわせて評価した。
- エリア管理システムのログとカメラ（配置は図 4-1 参照）での撮影画像から、作業中の危険な状況の有無を評価した。
- 作業後、本テストエリアで実際に作業した作業員に本安全システムが有効に機能していたかどうかをアンケート調査にて評価した。

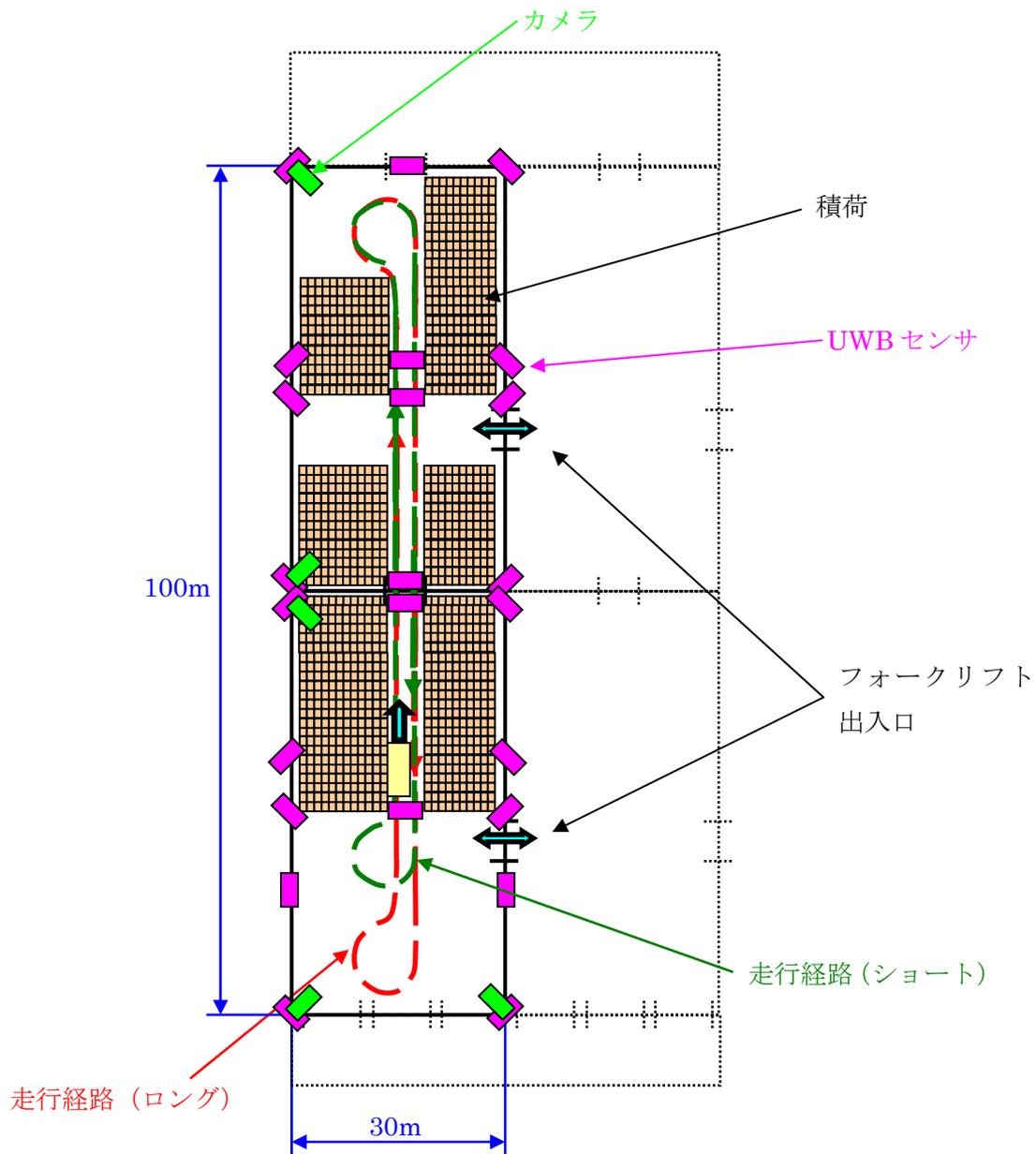


図 4-1 テストエリア



図 4-2 作業者への UWB タグの取り付け

4.1.3. テスト結果

以下に、4.1.2 の a)に関する集計結果、b)に関する解析結果、c)に関するアンケート結果を示す。

4.1.3.1. 集計結果

4.1.3.1.1. 安全速度への減速成功確率

AGV 進行方向前方の半径 a の半円状エリアに人・フォークリフトがいる時 (図 4-3 参照) に、AGV の速度が安全速度 60m/min になっている確率を求めた。その結果、半径が 3m 以内になった時、AGV の速度が 100%安全速度になっていることがわかった。

4.1.3.1.2. 走行時間の割合

AGV の各走行速度 (0m/min, 0~60m/min, 60m/min, 60m/min~130m/min, 130m/min) において、全体に占める走行時間の割合を求めた。走行経路 (ショート) または走行経路 (ロング) を理想的な条件で走った際のデータと 5 日間のデータとを比較すると、5 日間のデータの方が 60m/min と 0m/min の割合が増えて、130m/min の割合が減っていることがわかった。これはエリア管理システムによる減速・停止と 3D 障害物センサによる停止とが起こった結果であると推測される。また、0~60m/min で時間が多くかかっていることがわかったが、これは AGV の旋回時に時間がかかっているためである。従って、旋回速度をあげればもっと効率をあげることができると思われる。

4.1.3.1.3. 走行距離の割合

AGV の各走行速度 (130m/min, 130~60m/min, 60m/min, 60m/min~0m/min, 0m/min) において、全体に占める走行距離の割合を求めた。その結果、130m/min での走行距離の割合が 55~60%にもものぼっていることがわかり、130m/min で走行距離を多く稼いでいることが分かった。また、AGV の最高速度が 130m/min の時と 60m/min の時の効率を比較すると、AGV の最高速度が 130m/min の時の走行距離は 60m/min の時の走行距離の約 2 倍になっており、効率が約 2 倍にあがったことがわかった。なお、効率は AGV が 60m/min より速い速度で走行した際の走行距離の総和を AGV が 60m/min で走行した際の走行距離の総和で割ることで求めた。

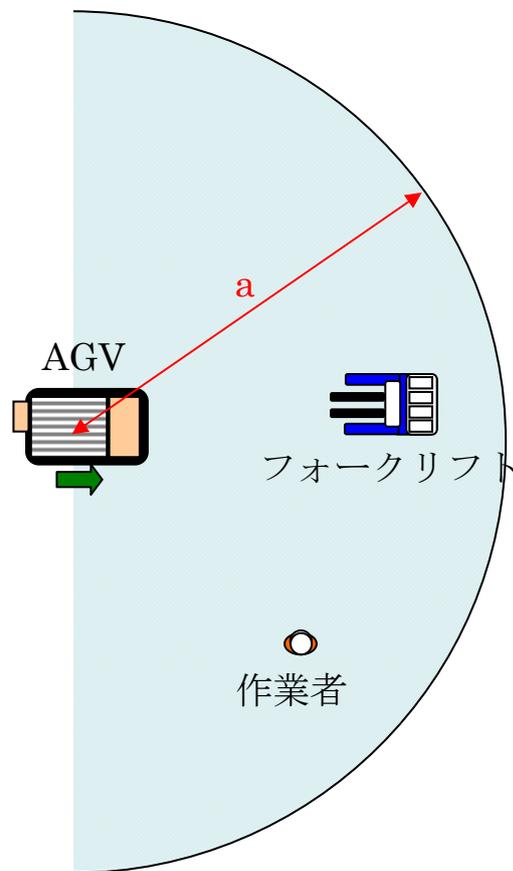


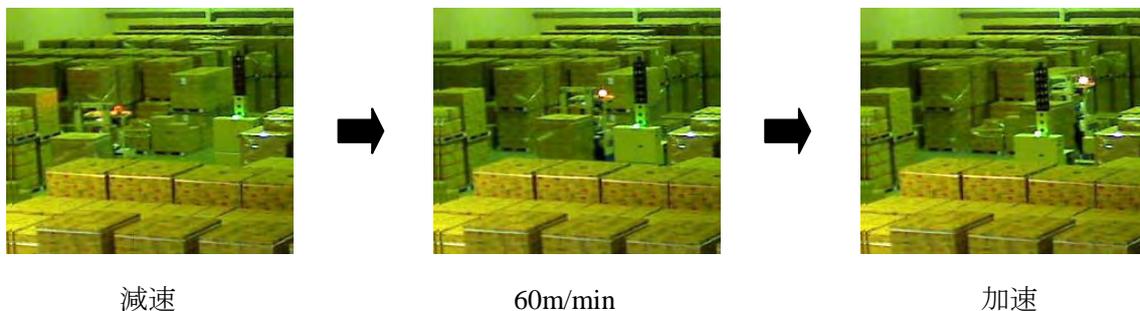
図 4-3 判定領域

4.1.3.2. 解析結果

エリア管理システムのログおよびカメラによる撮影画像を解析した結果、以下の 7 つの代表的なシーンが導出された。それぞれのシーンについてカメラ画像を示し、どういったシーンか説明を行う。

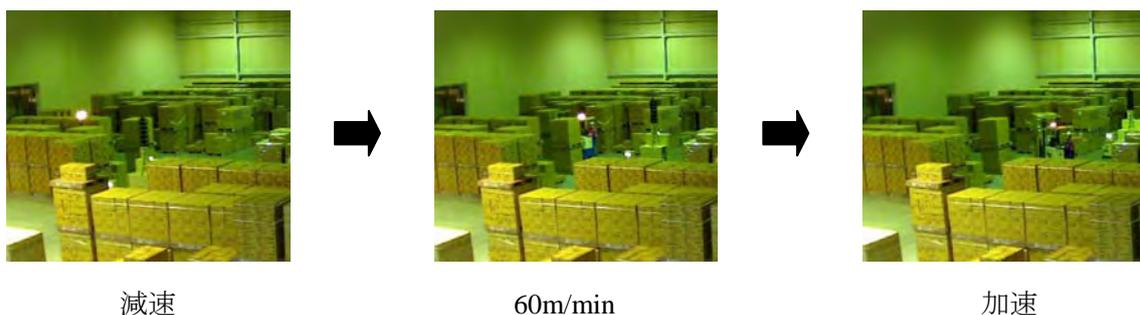
a) フォークリフトと AGV のすれ違い

フォークリフトがエリア管理システムの安全判定領域に入ると、AGV は減速を始め、60m/min まで速度を落とす。そして、すれ違いが終わると、AGV は 60m/min から加速を始める。



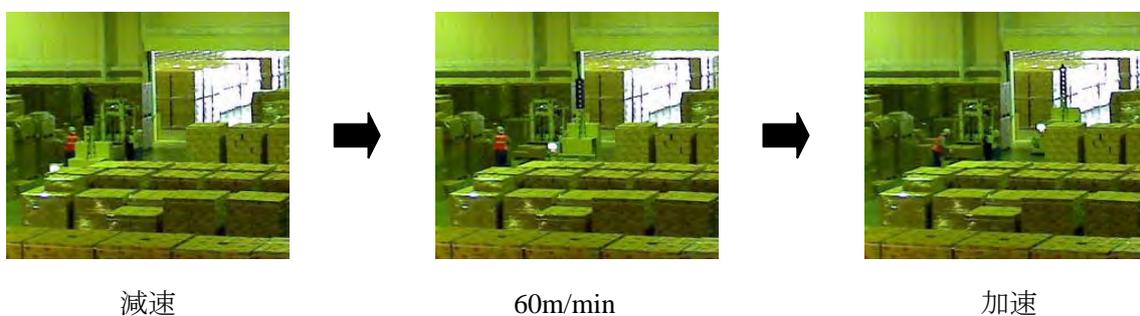
b) AGV の横からフォークリフトが進入

フォークリフトが AGV に対して横から近づく場合も、a)の時と同様の速度制御を行う。



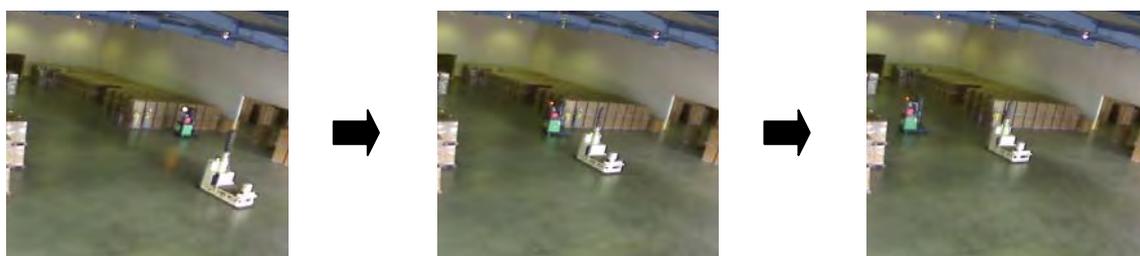
c) フォークリフトあるいは作業者が作業中に AGV がその横を通過

フォークリフトあるいは作業者が作業している横を AGV が通過する場合も、a)の時と同様の速度制御を行う。



d) AGV 前方をフォークリフトが通過

フォークリフトが AGV に対して横から近づいて AGV の前に飛び出す場合、飛び出す直前までにエリア管理システムにより AGV は 60m/min まで速度が落ちた状態になり、飛び出した瞬間 3D 障害物センサが検知して AGV を停止させる。停止後、フォークリフトが AGV の前方にいないことを確認した後、AGV は加速を始める。



60m/min

3D 障害物センサ検知

停止

e) フォークリフトによる AGV の追い越し

フォークリフトが AGV の後方から追い越しをかける場合、フォークリフトが AGV の前方にでた段階で、AGV は減速を開始し、その速度を 60m/min まで落とす。



130m/min

追い越し

60m/min

f) AGV 後方をフォークリフトが走行

AGV 後方をフォークリフトが走行する場合、エリア管理システムの安全判定が行われないため、AGV に対してエリア管理システムによる速度制御は行われない。



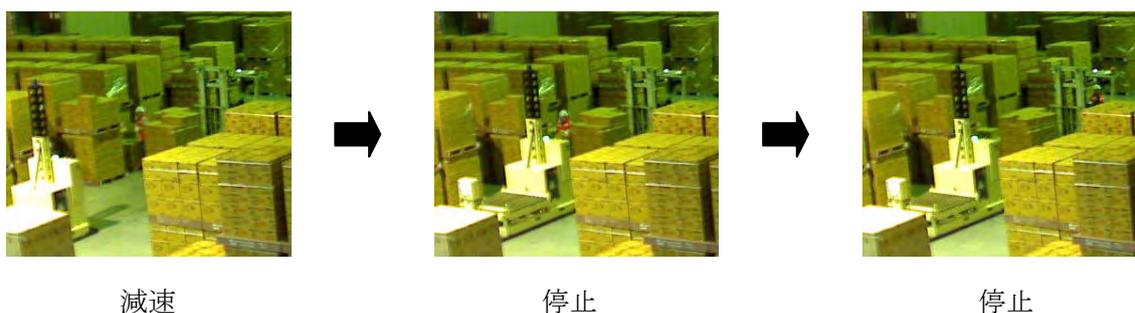
速度制御なし

速度制御なし

速度制御なし

g) フォークリフトあるいは作業者が AGV の走行路上で作業していて減速・停止

フォークリフトあるいは作業者が AGV の走行路上で作業している場合、エリア管理システムによりまず AGV の速度を 60m/min まで落とす。次に、3D 障害物センサの検知エリアにフォークリフトあるいは作業者が入ると、AGV はさらに減速を開始し、最終的にはフォークリフトあるいは作業者に AGV がぶつかる前に AGV を停止させる。フォークリフトあるいは作業者が走行路上にいなくなるまで AGV は停止を続け、いなくなったことを確認した後、加速を始める。



4.1.3.3. アンケート結果

以下にアンケートの内容とその集計結果を示す。アンケート結果を見るとわかるように概ね良い結果が得られた。ただし、AGV とフォークリフトが接触するような場面が 1 回あった。これは AGV 旋回時の 3D 障害物センサのエリア設定があまくて AGV を止めることができなかったためである。今一度 3D 障害物センサのエリア設定を見直す必要がある。また、ジャケットが作業の邪魔になったという意見やタグの音が気になったという意見もあり、タグの作業者への取り付けも見直す必要がある。

設問1(複数回答)
作業内容について

計 33回答

	入庫作業	出庫作業	ピッキング	無回答
行った作業内容について教えてください。	12	14	13	4

設問2
AGVについて

	速い	適当	遅い	無回答
AGVとすれ違う時の印象を教えてください。	0	25	4	4
AGVと並走する時の印象を教えてください。	0	26	2	5
AGVの後ろからついていく時の印象を教えてください。	0	25	4	4
フォークリフトから降りて作業している時の印象を教えてください。	4	21	2	6

	よくあった	あった	なかった	無回答
AGVに恐怖感はありましたか？	0	5	26	2
その時の状況 (あると答えた方)	<ul style="list-style-type: none"> ・必ず止まるのか疑問。 ・止まるか進むか分からない。 ・AGVが大きいため少し威圧感を感じた。 ・AGVが旋回中センサーの反応が悪いのか基本止まってくれず、恐怖感があった。 ・ぎりぎりの幅ですれ違う状況があった。 			

	よくあった	あった	なかった	無回答
AGVと接触しましたか？	0	1	30	2
その時の状況 (あると答えた方)	<ul style="list-style-type: none"> ・AGVが旋回する所でピッキング中、AGVが旋回してきて、死角があるのか、停止しているリーチフォークリフトにぶつかった。 			

	よくあった	あった	なかった	無回答
AGVが邪魔だと感じましたか？	5	3	23	2
その時の状況 (あると答えた方)	<ul style="list-style-type: none"> ・ピッキング作業中、通路をひたすら走ってるので邪魔だと感じた。 ・作業に時間がかかる。 ・荷揃えする所にAGVが通るため。 ・午後の時間帯でどうしても商品仮置の場面で感じた。 ・スピードが落ちてから立ち上がるまでが遅かったため。 ・通路が狭かったからだが、ピッキング中、停止しているリーチに反応して、真横で止まってしまう、リーチを旋回して避けなければいけないことがよくあった。 ・ピッキングの際、進行方向に停止している。 			

	すぐ気付く	たまに気付く	気付かない	無回答
AGVを遠くから見て気づきましたか？	24	4	2	3

	うるさい	適切	小さい	無回答
AGVの走行メロディはどうでしたか？	3	25	0	5

	良好	分からない	無回答
AGVの表示灯はどうでしたか？	13	16	4

設問3
ジャケットについて

	よくなった	なった	なかった	無回答
ジャケットが作業の邪魔になりましたか？	4	14	13	2

	大きい	許容範囲	小さい	無回答
ジャケットに取り付けたタグの大きさはどうでしたか？	1	28	1	3

設問4(自由記述)
意見・感想

<ul style="list-style-type: none"> ・AGVの稼働エリアでの作業が無かったので速度等については、よく分からない。 ・近くで作業してないので分からない。 ・X・Zエリアに作業を行っていないため特に無い。 ・当センターの業務内容では、AGVを使用出来ないと感じた。生産工場等の保管型倉庫では、大変便利な搬送車ではないかと感じた。 ・ジャケットのセンサーで服がすれた。 ・AGVの走行進路上に障害物(ノレット)等がある時、AGV自体は避けて通過できるのか？ ・センサーがシャカシャカ音になって気持ち悪くなった。 ・ジャケットがフォークのノブに少し、引っかかる時があった。 ・荷物を乗せてのスタート、ストップ搬送などテストしてもよかったのではないか？ ・実用的に見えなかったのなるべく近づかないようにした。 ・場所によっては作業効率が悪くなると思った。
--

4.1.3.4. AGV とフォークリフトの接触

4.1.3.4.1. 経緯

テスト中に AGV とフォークリフトの接触が起こった。以下にその時の経緯を説明する。AGV が旋回しようとしていた際に、フォークリフトが旋回経路の終端付近に停車していた。AGV は旋回を開始し、図 4-4 のように旋回の終端付近に停車していたフォークリフトに巻き込みのような形で接触した。図 4-5 は接触後 AGV 前方方向から撮ったものである。図 4-5 を見てもらうとわかるが、3D 障害物センサの検知範囲が車体幅のみであったため、フォークリフトを検出せず、ソフトバンパにて停止したことがわかる。また、図 4-5 ではわかりにくいですが、接触の際、フォークリフト下部のカバー下にバンパーが潜り込み、引っかくようにしてソフトバンパのカバーが破れた。



図 4-4 AGV とフォークリフトとの接触



図 4-5 AGV とフォークリフトとの接触 (AGV 前方方向)

4.1.3.4.2. 考察

今回接触が起こった原因として、AGV 旋回時の巻き込みを考慮した 3D 障害物センサの検知エリアの設定になっていなかったことが考えられる。また、AGV のバンパーが低い位置にあったためにフォークリフト下部にもぐりこんでしまった。

対策としては、AGV 旋回時の巻き込みを考慮した 3D 障害物センサの検知エリアを適切に設定するとともに、AGV のバンパーの高さを上げる必要がある。

4.1.4. まとめ

本プロジェクトの最終年度にあたる平成 25 年度は、味の素株式会社の協力のもと実際の配送センターにて実運用テストを実施し、本システムの安全性の検証などを行った。検証結果から、AGV に人・フォークリフトが近づいた際、AGV が安全速度 60m/min まで速度を十分に落としきれることがわかり、高速 AGV の安全性を確認できた。ただ、テストエリアの出入り口から人・フォークリフトが入った際に測位遅れが 1%未満の確率で発生し、安全速度に落ちるまで時間がかかる場面があった。この対策としては、ゲートを出入り口に設けることによって、測位がきちんとできたものしかテストエリアに入れないといった方法が考えられる。また、最高速度 60m/min で走行した時と最高速度 130m/min で走行した時では効率が 2 倍近く違うことがわかり、高速 AGV の有効性を確認できた。

4.2. AGV 衝突時の衝撃値（協力・執筆：JARI）

人が AGV に衝突したときに人が受ける危害の大きさを測定することを目的に、JARI の協力のもと、JARI の衝突実験場にて AGV と人（試験用ダミー）との衝突実験を行った。本項は、衝突実験についての JARI の報告書「フォークリフト型ロボットの対人安全性能評価試験 ―試験結果の報告―」（添付資料）を元に作成している。

4.2.1. 試験概要

4.2.1.1. 試験目的

今回開発したコンベヤタイプの AGV を模擬した台車（以下、台車）が、高速走行した状態で人と衝突した場合の人に与える影響を調査する。また、衝突される人の衝突方向の違いにおける頭部が受ける衝撃量についても比較する。

4.2.1.2. 試験条件

図 4-6 で示すように台車を 60、130、200 m/min の速度で、ダミーへ衝突させた。ダミーは、衝突直前にサポートワイヤを切り離し自立状態で衝突させた。

また、図 4-7 で示すようにダミーは、正面、後面、側面、頭部、尻部からの衝突試験を行った。頭部のみを衝突させる場合は、台座を用いて姿勢を保持させた。

また、路面へ転倒した際のダミーの損傷を考慮して、ダミーの転倒地点にウレタン製のマットを敷いて行った。

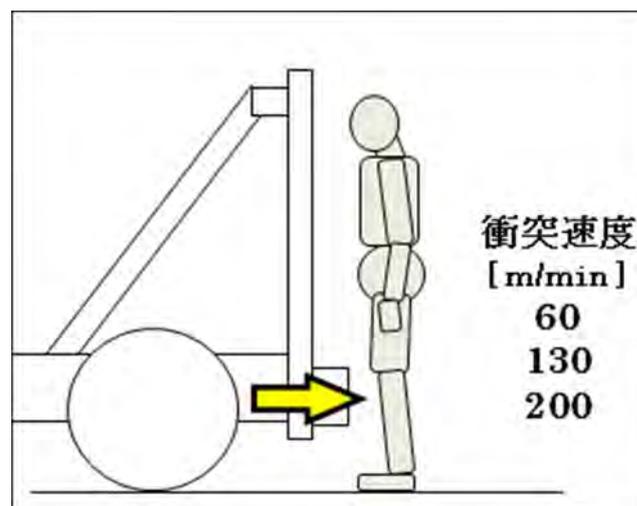


図 4-6 台車とダミーの衝突

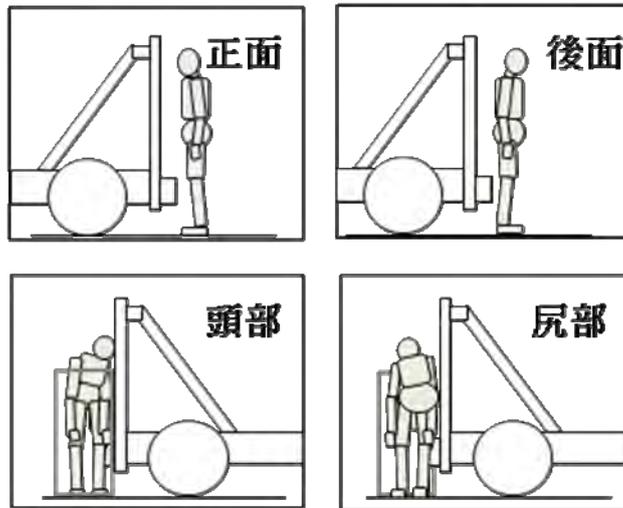


図 4-7 衝突方向（正面、後面、頭部、尻部）

4.2.1.3. 試験台車の外観

台車の正面は、コンベヤタイプの AGV と同じ大きさ・同じ材質のものを設置し、ダミーと衝突する部分は同等になるよう配慮した。

また、台車下部のバンパー部にテープスイッチを設置しダミーの脚部が接触後、0.5 ～ 1 秒後にブレーキが作動するようにした。

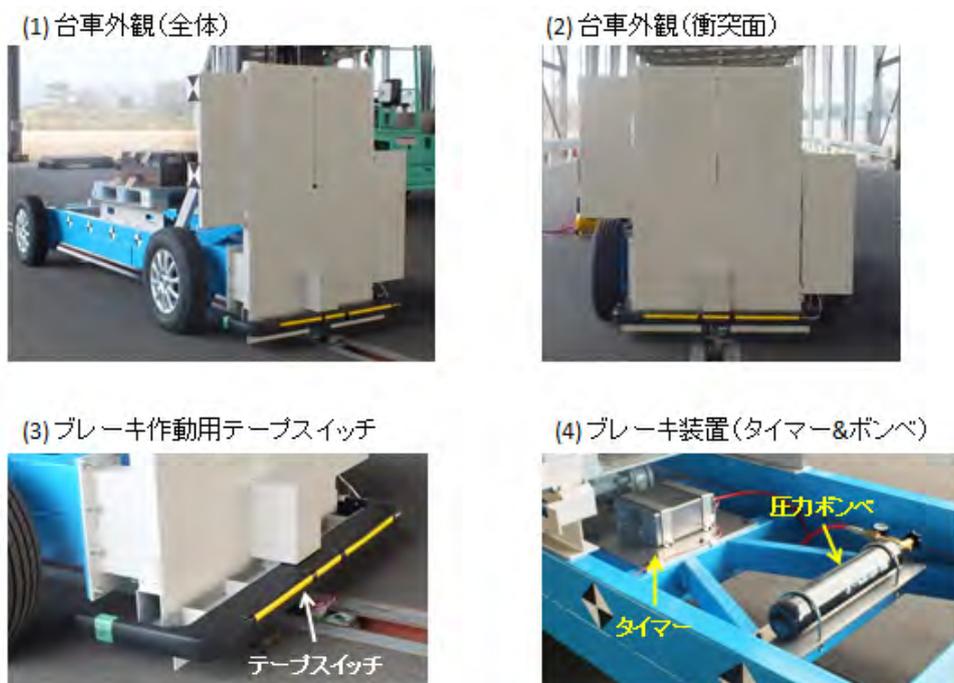


図 4-8 AGV を模擬した台車の外観

4.2.1.4. 試験に用いたダミー（人体模型）とその仕様

実験に使用するダミーは、図 4-9 に示す男性を対象にしたものと図 4-10 に示す女性を対象にした 2 種類で行った。

<名称&体格>

AM50: Hybrid III 50th Percentile Male
体格: 身長175cm、体重78kg

<計測部位と種別>

加速度: 頭部、胸部、腰部
荷重: 頸部、大腿部、下肢(上部、下部)
変位: 胸部

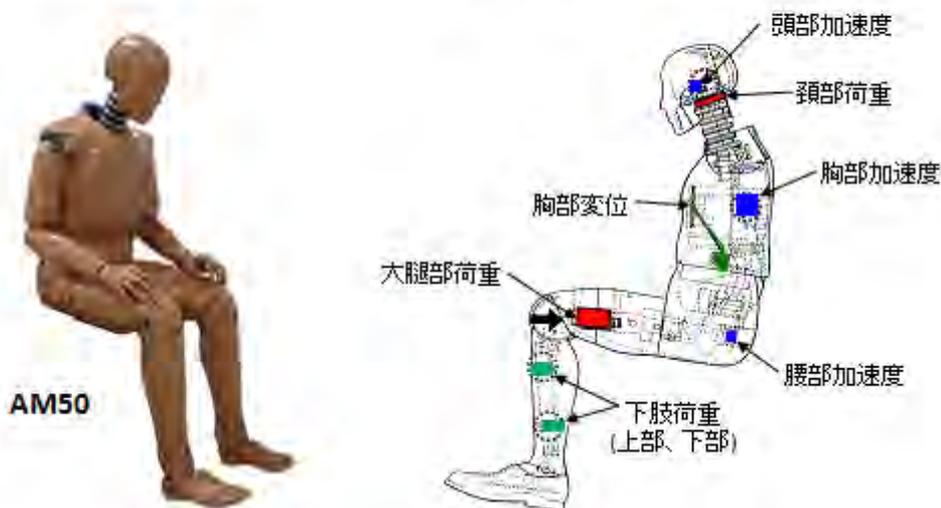


図 4-9 人体模型（男性）とその仕様

<名称&体格>

AF05: Hybrid III 5th Percentile Female
体格: 身長150cm、体重48kg

<計測部位と種別>

加速度: 頭部、胸部、腰部
荷重: 頸部上部、大腿部
変位: 胸部

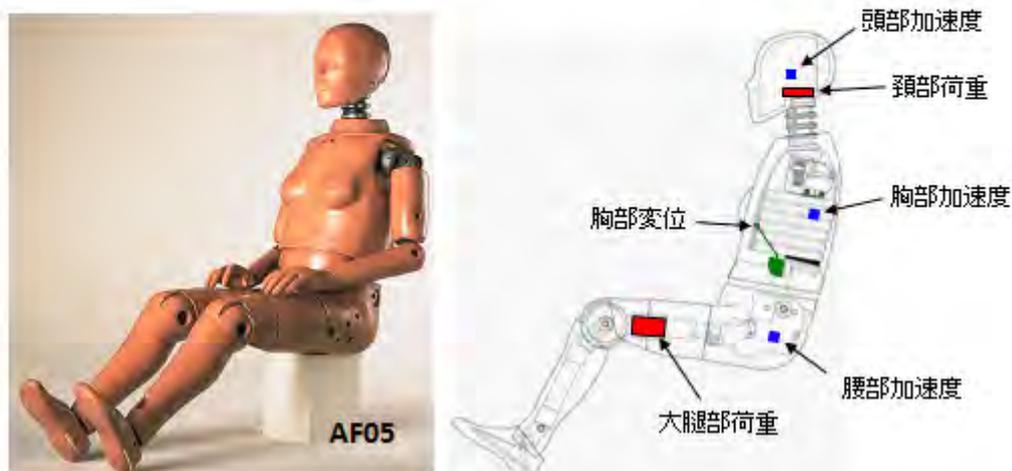


図 4-10 人体模型（女性）とその仕様

4.2.1.5. ダミーの頭部傷害基準値（HIC）と頸部の感度方向

HIC (Head Injury Criteria)とは頭部の傷害値基準であり、次式より算出する。

$$HIC = \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \frac{a(t)}{9.8} dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1)$$

ここで a は、頭部重心位置の合成加速度（m/s²）であり、次式より算出する。

なお、a_x は、頭部前後方向加速度、a_y は左右方向加速度、a_z は上下方向加速度である。

$$a(t) = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

また、頸部の荷重及びトルクの感度方向を図 4-11 に示す。

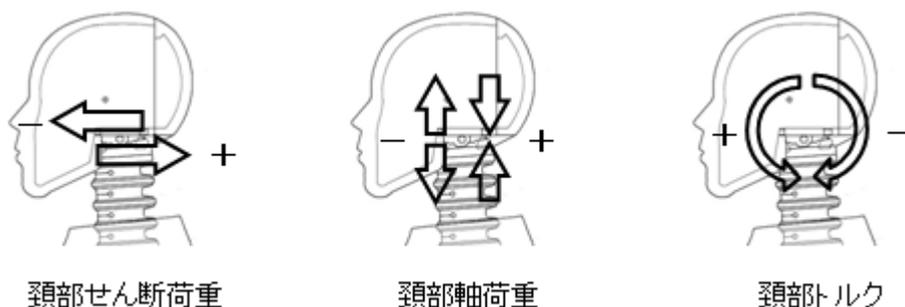


図 4-11 頸部の荷重及びトルクの感度方向

4.2.2. 試験結果

4.2.2.1. 試験結果の一覧

表 4-1 にテスト結果一覧を示す。

テスト 1～5 は 60m/min で男性型ダミーに色々な角度から衝突したデータである。

テスト 6～11 は 200m/min で男性型ダミーに色々な角度から衝突したデータである。

テスト 12～16 は 130m/min で男性型ダミーに色々な角度から衝突したデータである。

テスト 17 はテスト 2 との比較データで、ダミー損傷回避用のマットが無い状態で挙動が同じである事を確かめる為のデータである。

テスト 18・19 は、AGV 衝突後、路面等で発生する 2 次衝突時のデータを取る為にヘルメットが有る状態と無い状態での違いを見る為のデータである。

テスト 20～22 は、頭のみが衝突した場合の衝撃を 60・130・200m/min の各速度で行ったデータである。

テスト 23～25 は、尻のみが衝突した場合の衝撃を 60・130・200m/min の各速度で行ったデータである。

テスト 26～31 は男性型ダミーと女性型ダミーの違いを見る為に行ったデータである。

表 4-1 テスト結果一覧

	衝突速度 [m/min]		ダミーの種類	ダミー向き	HIC (頭部傷害値)	ダミー保護用 マットの有無	二次衝突の 有無(対路面)	備考	
	目標	実測							
Test 1	60	58.3	AM50	正面	12	マット有	有	マットから外れて路面へ転倒	
Test 2		53.3		後	1	マット有	無	フォークにもたれかかる	
Test 3		55.0		横	1	マット有	無	マット上へ転倒	
Test 4		55.0		後	1	マット有	無	フォークにもたれかかる	
Test 5		58.3		横	1	マット有	無	マット上へ転倒	
Test 6	200	201.7	AM50	正面	455	マット有	無	マット上へ転倒	
Test 7		200.0		後	260	マット有	無	マット上へ転倒	
Test 8		195.0		横	5	マット有	無	マット上へ転倒	
Test 9		195.0		後	157	マット有	無	マット上へ転倒	
Test 10		196.7		横	7	マット有	無	マット上へ転倒	
Test 11	195.0	後	251	無	無	有			
Test 12	130	131.7	AM50	後	313	マット有	無	マット上へ転倒	
Test 13		130.0		横	2	マット有	無	無	マット上へ転倒
Test 14		128.3		正面	156	マット有	無	無	マット上へ転倒
Test 15		128.3		後	397	マット有	有	有	マットから外れて路面へ転倒
Test 16		130.0		横	3	マット有	無	無	マット上へ転倒
Test 17	60	51.7	AM50	後	54	無	無	フォークにもたれかかる	
Test 18	自然転倒	—	AM50	後	313	無	有	ヘルメット着帽	
Test 19	自然転倒	—		後	5075	無	有	有	ヘルメット無し
Test 20	60	58.3	AM50	頭	2	/	/	/	
Test 21	130	133.3			13				
Test 22	200	201.7			110				
Test 23	60	56.7	AM50	尻	/	/	/	腰部加速度: 52m/s ²	
Test 24	130	130.0			/	/	/	腰部加速度: 124m/s ²	
Test 25	200	196.7			/	/	/	腰部加速度: 209m/s ²	
Test 26	60	73.3	AF05	後	1	マット有	無	フォークにもたれかかる	
Test 27		70.0		横	1	マット有	無	無	マット上へ転倒
Test 28	130	131.7		後	14	マット有	無	無	マット上へ転倒
Test 29		133.3		横	3	マット有	無	無	マット上へ転倒
Test 30	200	191.7		後	59	マット有	無	無	マット上へ転倒
Test 31		193.3	横	8	マット有	無	無	マット上へ転倒	

4.2.2.2. 速度による衝撃値の比較

図 4-12～図 4-15 に各速度における HIC 値又は、加速度値の結果を示す。

何れも最高速度時に於いても、衝突安全基準（欧州規格男性）である HIC 値 1000 以下を示した。

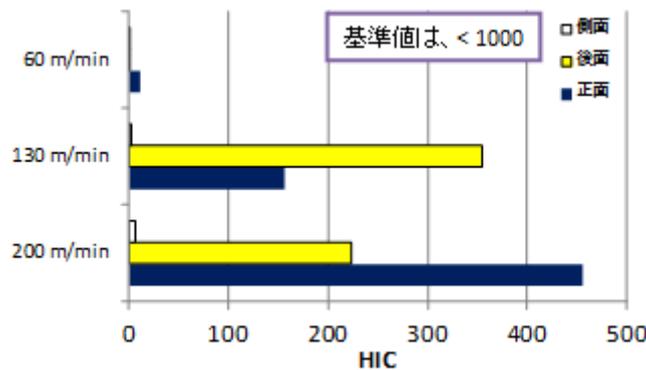


図 4-12 男性型ダミーを使用した速度別・衝突方向別の HIC 値

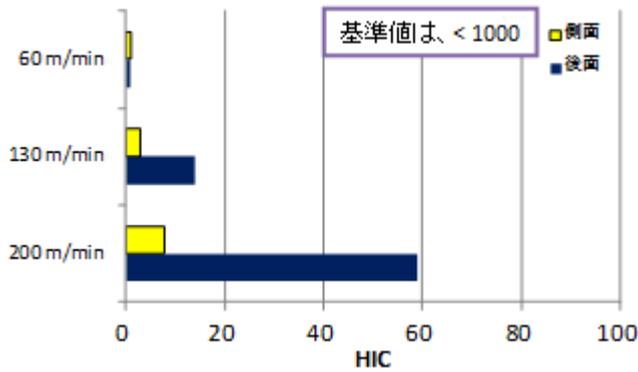


図 4-13 女性型ダミーを使用した速度別・衝突方向別の HIC 値

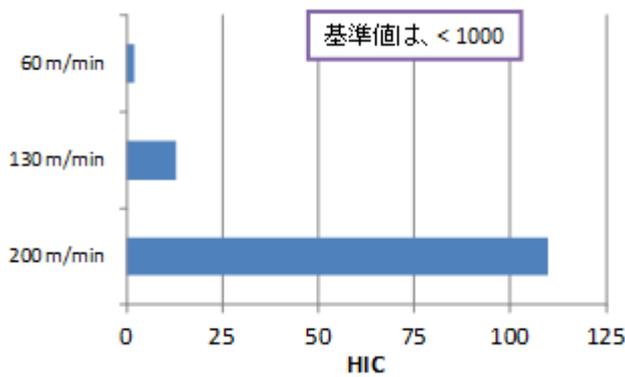


図 4-14 男性型ダミーを使用した速度別の頭部打撃時の HIC 値

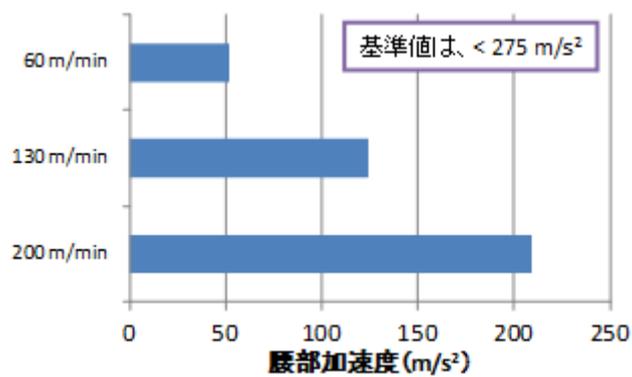


図 4-15 男性型ダミーを使用した速度別の腰部打撃時の加速度

4.2.2.3. 速度 200m/min での衝撃値

表 4-2 に速度 200m/min で衝突した時の各衝撃値と衝突安全基準値の比較表を示す。

テスト結果より、自動車の衝突時の乗員保護で定義されている傷害基準で比較すると、台車外板との衝突ではすべての項目で基準値よりも低い値となった。

台車がダミーに衝突した段階を一次衝突、ダミーが台車から飛ばされて路面へ転倒する段階を二次衝突と定義すると、自然転倒の結果よりヘルメットを着帽することで、路面への二次衝突時の HIC 値を低減できる事が分かった。

表 4-2 速度 200m/min で衝突した時の各衝撃値と衝突安全基準値

試験番号	試験条件 (ダミー、衝突方向)	HIC	頸部せん断荷重(N)	頸部軸荷重(N)	頸部トルク(Nm)	胸部加速度(m/s ²)	胸部変位(mm)
Test 6	AM50、正面衝突	455	-1722	-2022	-8	103	13
Test 7	AM50、後面衝突	260	381	1788	-26	93	2
Test 8	AM50、側面衝突	5	127	-395	-6	88	6
Test 9	AM50、後面衝突	157	410	1634	-34	142	3
Test 10	AM50、側面衝突	7	-77	321	-6	101	5
Test 11	AM50、後面衝突 (路面への二次衝突時点)	251 (18636)	517 (-7510)	1760 (-4305)	-40 (-40)	118 (225)	3 (26)
Test 18	自然転倒、ヘルメット有	313	-240	649	-16	111	1
Test 19	自然転倒、ヘルメット無	5075	5887	-1885	-11	634	1
Test 30	AF05、後面衝突	59	-220	-1923	-18	570	5
Test 31	AF05、側面衝突	8	125	433	-7	294	9
衝突安全基準 欧州法規(男性)		1000	3100	3300	-57		
衝突安全基準 米国法規(女性)		700		2520		588	52

4.2.2.4. 試験結果のまとめ

衝突中の挙動は、台車のバンパー部がダミーの足部に衝突、次いで胸部（肩）、頭部が外板に衝突する。また、ダミーの足首は、バンパー下部に巻き込まれる状態が見られた。衝突速度は速いほど、ダミーの飛ばされる距離は増加する。

ダミーの実測値は、衝突速度が速いほど頭部傷害値（HIC）も高くなるが、衝突時の姿勢によっても頭部と台車外板の衝突状況が異なり、正面と後面は外板との衝突が発生し易いが、側面衝突は、頭部と外板の距離が長い（肩幅）ため、衝突しないケースがあった。これにより HIC は他の衝突方向に比べ、低い値を示していた。

台車がダミーに衝突した段階を一次衝突、ダミーが台車から飛ばされて路面へ転倒する段階を二次衝突と定義すると、頭部、頸部、胸部のいずれも、二次衝突での衝撃が大きい。

一次衝突では、自動車の衝突時の乗員保護で定義されている傷害基準と比較すると、すべての項目で基準値よりも低い値となる。

また、二次衝突は、自然転倒の結果から、ヘルメットを着帽することで、路面への二次衝突時の HIC 値を低減できる事が分かった。

4.3. UWB 性能評価試験（協力：生活支援ロボット安全検証センター）

4.3.1. 概要

エリア管理システムにて使用している UWB 測位システム（周波数帯：7.25～10.25GHz）の基礎性能評価試験を生活支援ロボット安全検証センターにて実施した。また、国内では使用できない UWB 測位システム（周波数帯：6～8GHz）の基礎性能評価試験もあわせて行った。

4.3.2. 試験内容および試験方法

上述した UWB 測位システム（周波数帯：7.25～10.25GHz）基礎性能評価試験と UWB 測位システム（周波数帯：6～8GHz）基礎性能評価試験の試験内容および試験方法を以下に示す。なお、この 2 つのシステムには標準測位モード（STD）と高頻度測位モード（HUR）があり、両方のモードで試験を行った。

4.3.2.1. UWB 測位システム（周波数帯：7.25～10.25GHz）

この試験の前段階で行った弊社テストエリアでの試験により、定性的には電波の空中減衰率や発信機（タグ）の角度による電波特性はわかっていたが、定量的にはわかっていなかった。そこでスペクトラムアナライザ（略称：スペアナ）を用いて定量的な試験を実施した。具体的な試験方法としては、受信機（スペアナ付属アンテナ）から直近、5m、10m、15m の 4 つの地点（図 4-16 参照）のいずれかに、発信機（タグ）を床に対して 0 度、45 度、90 度と傾けた 3 種類の状況（図 4-17 参照）のいずれかを作って周波数特性を調べた（表 4-3 参照）。

4.3.2.2. UWB 測位システム（周波数帯：6～8GHz）

この周波数帯は、国内では電波暗室以外で使うことを禁止されているため、今回が初めての計測試験となる。3.3.1.4.1 と同様に電波の空中減衰率を調べた。具体的な試験方法としては、受信機（スペアナ付属アンテナ）から直近、5m、10m の 3 つの地点のいずれかに、発信機（タグ）を床に対して 0 度、90 度と傾けた 2 種類の状況のいずれかを作って周波数特性を調べた（表 4-3 参照）。

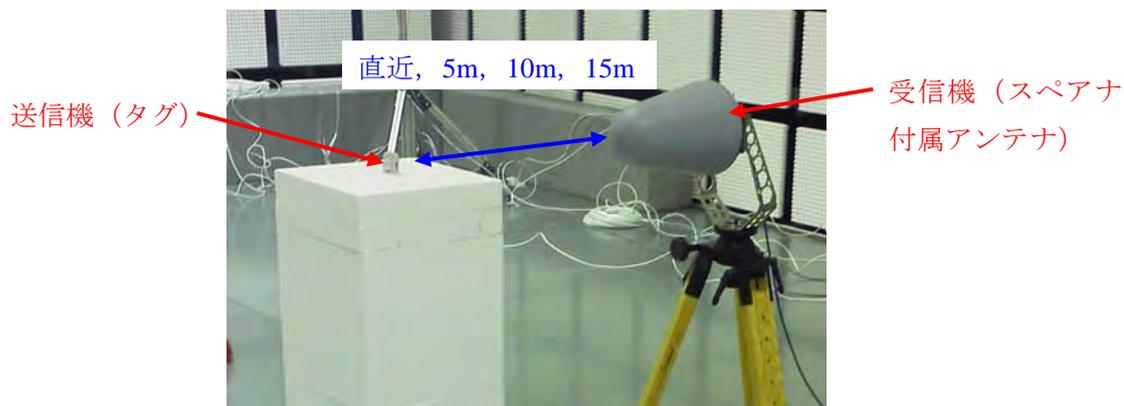


図 4-16 試験風景



0 度



45 度



90 度

図 4-17 発信機 (タグ) の設置角度

表 4-3 試験条件

周波数帯	モード	地点 (m)	タグの傾き(度)
7.25~10.25GHz	STD	0	0
			45
			90
		5	0
			45
			90
		10	0
			45
			90
		15	0
			45
			90
HUR	0	90	
	10		
6~8GHz	STD	0	0
		5	
		10	
	HUR	0	0
		0	
		5	90
		0	
		10	90

4.3.3. 性能評価試験結果

表 4-4 に UWB 測位システム（周波数帯：7.25~10.25GHz）でのスペアナによる測定結果を、表 4-5 に UWB 測位システム（周波数帯：6~8GHz）でのスペアナによる測定結果を示す。また、表 4-6 にそれぞれの場合の計測範囲内の電界強度の最大値 I_p と総計 I_t をまとめる。図 4-18 に各角度の距離による電界強度の総計の推移を示す。このグラフを見ると角度による減少傾向には大きな差がないことがわかる。また、図 4-19 に STD と HUR の距離による電界強度の総計の推移を示す。このグラフを見ると STD と HUR の減少傾向には大きな差がないことがわかる。

表 4-4 UWB 測位システム（周波数帯：7.25～10.25GHz）のスペアナ測定結果

	直近	5m	10m	15m
0度 (STD)				
45度 (STD)				
90度 (STD)				
90度 (HUR)		\		\

表 4-5 UWB 測位システム（周波数帯：6～8GHz）のスペアナ測定結果

	直近	5m	10m
0度 (STD)			
0度 (HUR)			
90度 (HUR)	\		

表 4-6 電界強度の最大値 I_p と総計 I_t

周波数帯	モード	地点 (m)	タグの傾き(度)	I_p (dBm)	I_t (dBm)
7.25~10.25GHz	STD	0	0	-81.4	-14.3
			45	-80.7	-14.1
			90	-83.8	-20.9
		5	0	-102.6	-37.9
			45	-107.1	-41.1
			90	-110.7	-44.2
		10	0	-113.6	-45
			45	-110.2	-44.3
			90	-111.1	-46.9
	15	0	-111	-44.9	
		45	-116.7	-51	
		90	-121.2	-55	
HUR	0	-86.6	-22.4		
	10	90	-114.4	-50.6	
6~8GHz	STD	0	-85.7	—	
		5	-100.7	—	
		10	-111.7	—	
	HUR	0	0	-83.8	—
		5	0	-108.7	—
			90	-108.1	—
		10	0	-115.9	—
			90	-115.9	—

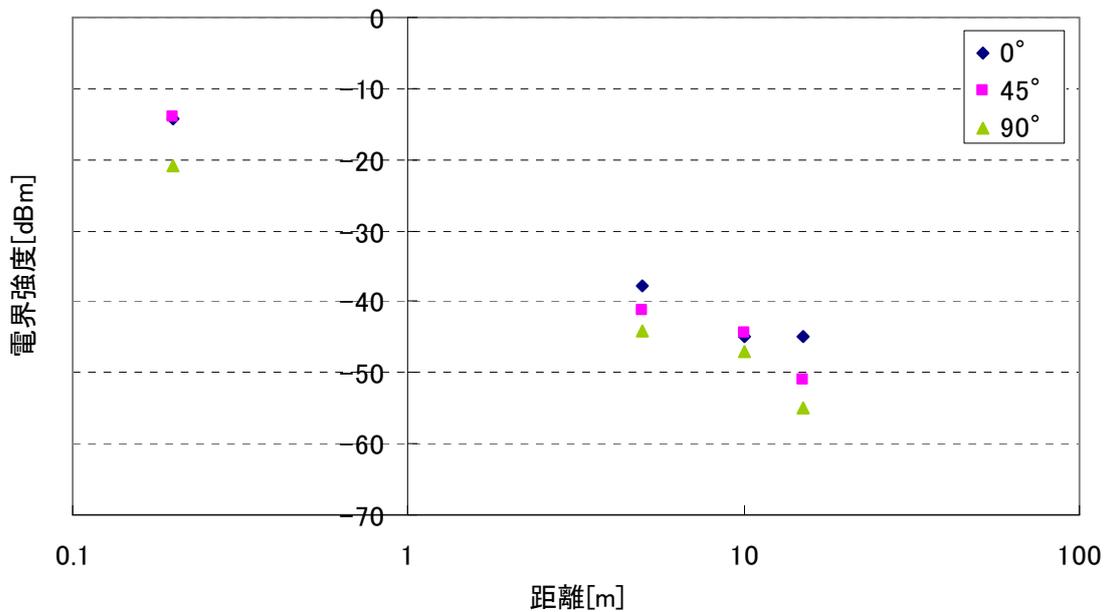


図 4-18 各角度の距離による電界強度の総計の推移

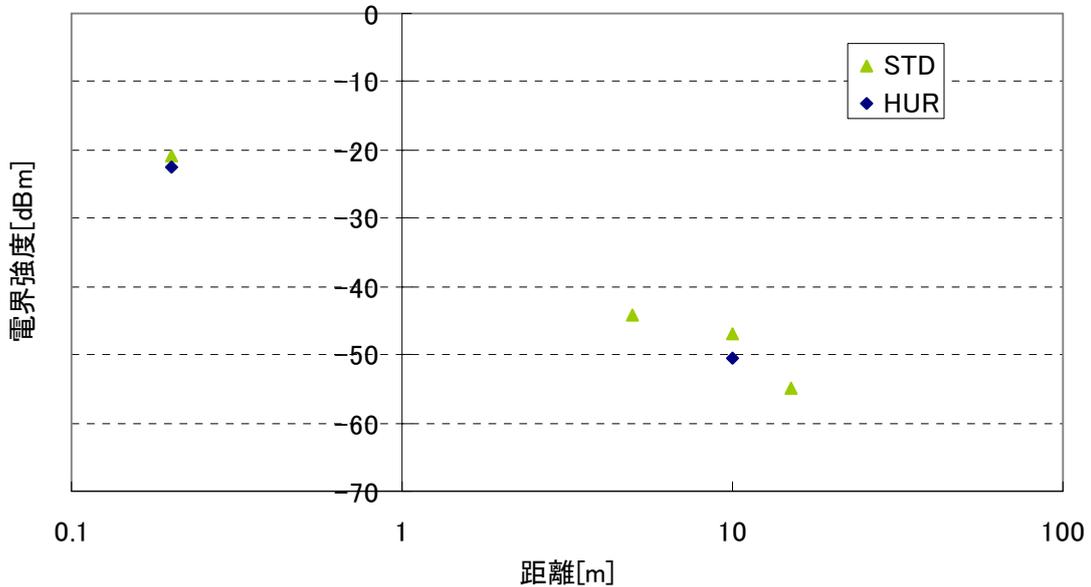


図 4-19 STD と HUR の距離による電界強度の総計の推移

4.3.4. 考察

4.3.4.1. センサの受入電界強度について

図 4-20 のように 20m×20m と 30m×30m のエリアでは、センサまでの最大距離はそれぞれ約 29m と 43m になる。今回の試験により得られた表 4-7 の電界強度の推定値を参照すると、センサの受入電界強度はアライアンスを含めると 20m×20m で-55dBm~-59dBm, 30m×30m で-60dBm~-65dBm 程度必要になると考えられる。

4.3.4.2. ノイズによるセンサ受信限界距離について

タグが発信した電波をセンサがきちんと受け取るためには、タグが発信した電波の電界強度がノイズ以上となる必要がある。例えば表 4-7 を使って考えると、計測する周波数帯と同じ周波数帯のノイズが-50dBm であった場合、センサがタグからの電波を受信できる距離は 20m 未満になると推測できる。

4.3.4.3. STD と HUR の差について

本試験では、STD と HUR に明確な差は見受けられなかったが、これはスペアナの特性上各周波数のピーク値を測定するため、差がでなかったと考えられる。

4.3.4.4. まとめ

今回の試験により、タグから発信される電波の距離ごとの電界強度を推定することができるようになった。これにより、センサの受入電界強度やノイズによるセンサ受信限界距離について推定を行うことができる。

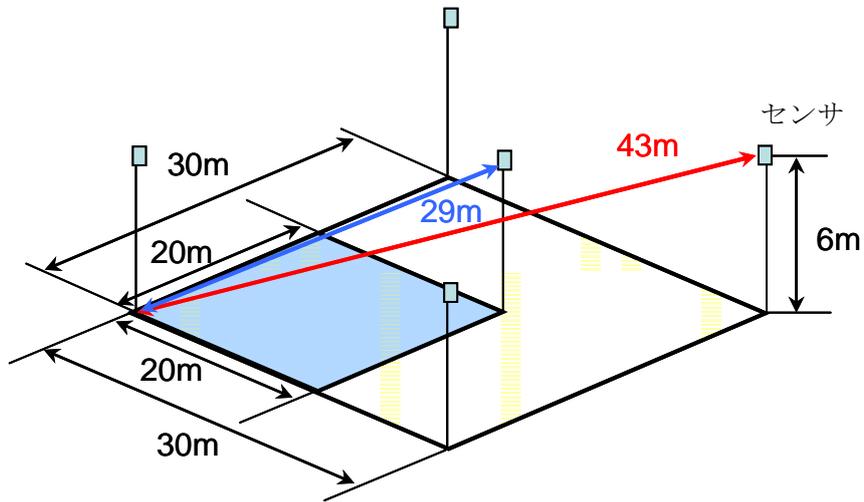


図 4-20 センサまでの最大距離

表 4-7 タグからの距離による電界強度 (推定値含む)

距離[m]	電界強度[dBm]
0.2	-14.2359
1	-27.301
10	-45.993
20	-51.6199
30	-54.9114
40	-57.2467
45	-58.2028
50	-59.0581

5. 成果

5.1. エリア管理システムの安全認証取得

5.1.1. 目標とする安全要求性能

エリア管理システムに求められる機能要求性能は、リスクアセスメントにより定義される。安全性能が最も要求される危険事象から、ISO 13849 -1:2006 $PLr = D$ の安全性能が要求されることが導き出される。

また、IEC61508-5:2010 に基づき、同危険事象に対して SIL に基づいた安全性の評価を行った場合、 $C = C_2, F = F_2, P = P_2, W = W_2$ と評価され、結果 SIL2 が必要となる (図 5-1 参照)。

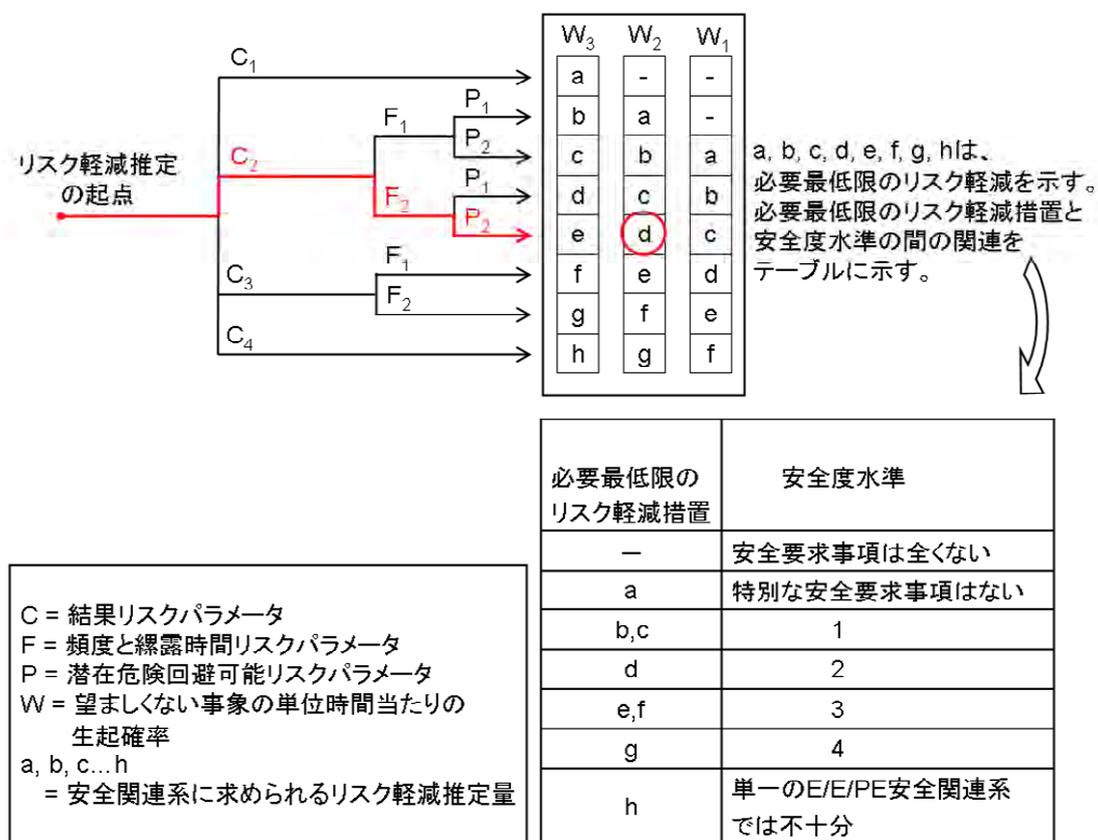


図 5-1 IEC61508-5 に基づく要求 SIL

また、IEC62061:2005 に基づき、同危険事象の要求 SIL を計算すると、過酷度 (Se) は 4、暴露レベル (Fr) は 5、発生確率 (Pr) は 2、危険を回避できる可能性 (Av) を 3 と評価する。クラスは 10 となり、SIL2 となる。

苛酷度	クラス				
	3 - 4	5 - 7	8 - 10	11 - 13	14 - 15
4	SIL2	SIL2	SIL2	SIL3	SIL3
3		B(OM)	SIL1	SIL2	SIL3
2			B(OM)	SIL2	SIL2
1				B(OM)	SIL1

図 5-2 IEC62061 に基づく要求 SIL

よって、エリア管理システムに求められる安全性能は、SIL2 または、PL=D となる。

5.1.2. 評価規格 (JQA より抜粋)

エリア管理システムの評価規格として、生活支援ロボットの安全に関する国際規格の ISO 13482-6:2014 がある。また、機械産業系の機能安全に関する規格として IEC62021 がある。ISO 13482-6:2014 は、ISO の認証スキーム (図 5-3 参照) を元に日本品質保証機構により製品が評価され、認証を受けることができる。認証を受けることにより、製品の安全性・信頼性が保証されることになる。



図 5-3 ISO 13482-6:2014 認証スキーム

5.1.3. 文章一覧

ISO 13482-6:2014 により評価を受けるために、設計管理体制、リスクアセスメント、製品の安全性評価が記載されている文書を用意した。表 5-1 は用意した文章の一覧である。

表 5-1 文章一覧

No.	文書名	文書番号	日付版
1	エリア管理システムの安全システム化開発企画書	DS-HE-AAMS-001	2013/08/01
2	エリア管理システム安全要求仕様書・安全要求配置仕様書	DS-HE-AAMS-002	2014/02/03
3	設計 FMEA	DS-HE-AAMS-003	2014/02/03
4	2013 年度版エリア管理システム安全性能計算書	DS-HE-AAMS-004	2014/02/04
5	エリア管理システム妥当性確認計画書	DS-HE-AAMS-005	2014/02/05
6	エリア管理システムシステム設計書	DS-HE-AAMS-006	2014/02/03
7	エリア管理システムの安全システム化外注発注依頼書	DS-HE-AAMS-007	2013/09/13
8	エリア管理システムソフトウェアモジュール設計書	DS-HE-AAMS-008	V 1.0
9	2013 年度版エリア管理システム妥当性確認報告書	DS-HE-AAMS-009	2014/02/04
10	エリア管理システムクラス図	DS-HE-AAMS-010	2013/01/01
11	安全 PLC モジュール設計図	DS-HE-AAMS-011	2013/12/01
12	高速ビークルシステムリスクアセスメント V.7	--	2013/03/25
13	2013 年度版エリア管理システムテスト要領書	---	2014/01/09

5.1.4. 評価対象

エリア管理システムの安全認証の範囲は図 5-4 のようになる。エージェントに取り付けられ位置を計測する UWB タグ、UWB センサ、UWB センサへの電力供給とエリア管理サーバとの通信に使用される POE ハブ、AGV システムに速度指示を行うエリア管理サーバが今回の認証の範囲となる。

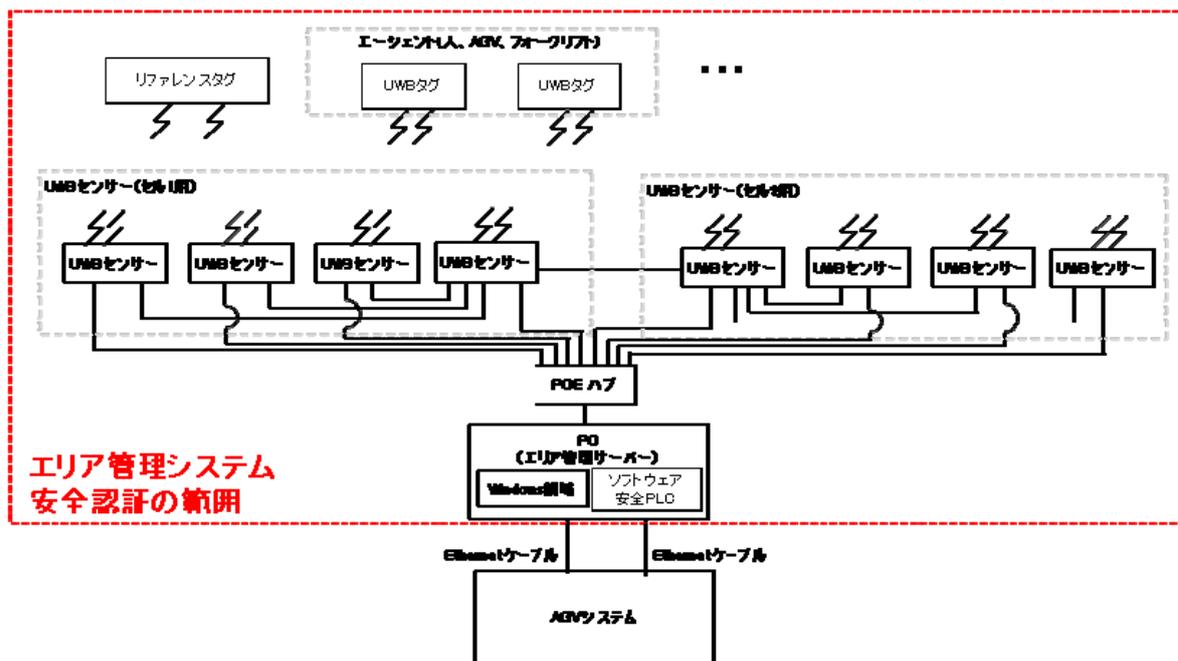


図 5-4 エリア管理システムブロック図

5.1.5. 周辺機器に対する要求事項

エリア管理システムには、周辺機器として AGV 制御機器と 3D 障害物センサがある。エリア管理システムは、PC 部イーサネットカードから、AGV 制御機器・3D 障害物センサへ指示速度を出力する。それぞれの要求性能は以下のとおりである。

A) AGV 制御機器

- エリア管理システムからの指示速度を、その時点の最高速度とする。
- エリア管理システムから通信が一定時間間隔以上ない場合は、60m/min 以下にて走行させる。
- エリア管理システムからの通信フォーマットに誤りがないか確認する。

B) 3D 障害物センサ

- 3D 障害物センサ自体は PL=d、または SIL2 以上の安全機能を持つ。
- 3D 障害物センサがエリア管理システムと通信が行えるようにする。
- エリア管理システムからの指示に基づき、本来の減速・停止信号を AGV へ働きかける。

- エリア管理システムから通信が一定時間間隔以上ない場合は、60m/min 以下にて走行させる。
- エリア管理システムからの通信フォーマットに誤りがないか確認する。
- エリア管理システムへの送信は、詳細仕様書のとおり行う。
- TCP/IP 以外のプロトコルを使用する場合には、必要に応じて CRC コードを追記する。

5.1.6. 安全性能

入力部・ロジック部の SFF を求め、各 SIL を求める。SFF は、検出不可能な危険側故障確率が占めない割合として求める。結果として、入力部・ロジック部・出力部共に SFF は 99% となり、SIL2 となる。なお、ソフトウェア安全 PLC (WinAC-RTX-F) は第三者認証により SIL3 と認められている。上記より、構成は SIL2 を満たすことが示された。

続いて、危険側ランダムハードウェア故障確率の観点から評価する。高頻度作動要求モード・プルーフ試験間隔 1 年・MTTR8 時間と仮定し PFH_d の値を求めた。この結果、システム全体 (入力部・ロジック部・出力部の合計) の PFH_d が 5.72E-07 となり、エリア管理システムが SIL2 であることが示された。なお、PFH_d の計算方法は IEC61508-5:2010 に基づく。これらのことから、システムの構成・ランダムハードウェア故障確率の双方の観点から、エリア管理システムが SIL2 を満たすことが示した。

以上の論拠を示した上で、エリア管理システムの安全性能や開発プロセスが ISO 13482:2014 の認証スキームを元に日本品質保証機構により評価が行われ、安全認証を取得するに至った。図 5-5 は、エリア管理システムの認証書である。



図 5-5 認証書

5.2. JIS D 6802 : 1997 追加防護策の改定案

JIS D 6802:1997「無人搬送車システムー安全通則」が現在国内にて用いられている AGV の安全に関する JIS 規格である。同規格では AGV を高速化した際の安全に関しては特に記載しておらず、各社が独自にリスクアセスメントを実施し、メーカー各社の責任において安全対策を実施しているのが現状である。

そこで、本プロジェクトにて得られた知見を元に、AGV を高速化した際の危険事象と、安全に関する考え方をまとめ、同規格の改定に関して以下の改定骨子案を一般社団法人日本産業車両協会に提言した。本提言をもとに同協会にて JIS の改定を検討する。

5.2.1. 方針

改定の方針は以下のとおりである。

- 当社追加防護策案を日本産業車両協会委員会で検討し、同協会の業界基準とする。
- 来期から現状 JIS に追加し、当社追加防護策案とリスクアセスメントを行うことで AGV 速度は各社が決定し責任を持つ方式とする。
- この基準は、次の JIS のベースとする。これを基本に、新しい ISO を提言する。
- 最高速度 60m/min 以下の簡易 AGV は、現在の JIS に基づき安全を守る。
- 上記は、運用しながら半年に 1 回見直しする。

5.2.2. 改定骨子案

改定の骨子案は以下のとおりである。

1. AGV 走行エリアには、制限事項として教育を受けた人の侵入のみを可能とする。一般の人や教育を受けていない人は侵入してはいけない。また、エリアの安全管理者を置くことが望ましい。
2. 走行エリアに侵入する際には、ヘルメットを着用すること。さらに、安全靴を着用することが望ましい。
3. AGV と人が衝突した際に、危険の大きさが軽症以下にてすむ AGV の速度を「安全速度」と考える。
4. 現 JIS の知見に基づき、「安全速度」は 60m/min 以下（仮）とする。
5. AGV が安全速度以下にて走行する場合には、現 JIS で考える制御的・機械的な手法を用いて安全性を確保してもかまわない。
6. AGV が安全速度より速く走行し、その安全を確保する場合には、非接触障害物検知センサーを使用すること。
7. 「6」非接触障害物検知センサーの安全要求レベルは、SIL（Safety Integrity Level）は SIL2, CAT（Category）は CAT.3 および PL（Performance Level）は PL d のい

ずれかとする。

8. 「6」の非接触障害物検知センサは、車体の幅と高さ方向の障害物も検知できることが望ましい。また、カーブを含む走行軌道上の障害物を検知することが望ましい。
9. 「6」の非接触障害物検知センサは、システムとして構成しても構わない。
10. 非接触障害物検知センサの試験方法は、検出体の寸法、位置などをISO要求事項(案)と整合させ、本規格にて別途規定する。システムとして構成した時は、別途試験方法を定める。
11. AGVが安全速度より速く走行し、人とAGVが交差するような場所については、なんらかの安全防護策を実施すること。
12. 「8」の実施例として、「エリア管理システム：人とAGVの位置を計測し、衝突する前にAGVを減速させるシステムの導入」、「ローカルエリアセンサ」によるAGV制御、「遮断機」などを紹介する。

本案は、ダイフクが案を作成し、ニチュ三菱フォークリフト株式会社（一般社団法人 日本産業車両協会 会員）殿にご意見修正を頂き作成しました。

5.3. 電波法 無線設備規則第 49 条の 27 の改正

今回の開発のポイントの1つである UWB 無線システム(エリア管理システムに利用)は、使用に制限があり、これを取り除くべく近畿総合通信局から総務省に働きかけて委員会の再開をお願いし、室内での利用が緩和された。その経緯は下記である。NEDO での事例も報告の中に入れた。

ダイフクは、委員会に参加し対応してきた。(出席：松村克彦 (株)ダイフク研究・研修センター 常務取締役：当時)

5.3.1. UWB 無線システム作業班の概要

以前(数年前)あった UWB 無線システム作業班の再開であり、今回の作業班の作業内容は以下のとおりである。

- 従来の「通信用途 UWB 無線システム」に加え、測位を中心とする「センサ用途 UWB 無線システム」カテゴリーの新規設置
- センサ用途 UWB 無線システムに対する干渉検討(共用条件)および、通信用途 UWB 無線システムの共用条件の見直し
- センサ用途 UWB 無線システム利用に適した技術的条件(法令)の検討
- 第4世代携帯電話との干渉検討と干渉軽減機能の創案(Low Band)

以上、1年半程度の作業班審議をへて、陸上無線通信委員会、電波監理審議会に上程、平成26年1月より以下のとおり技術的条件が変更された。(屋内 RTLS の解禁)

- 通信速度制限撤廃
- 交流電源接続規定撤廃

現在は、干渉軽減機能、実機測定、準天頂衛星など積残し分の検討が日立への委託の形で進行中である。屋外利用の審議は来期以降行う。

5.3.2. 作業班でのダイフクの活動

作業班でのダイフクの活動内容は以下のとおりである。

5.3.2.1. 審議導入

ユーザーの立場で、センサ UWB 無線システムの紹介、概要説明、技術的条件変更の提案を行った。

5.3.2.2. 利用シーンのとりまとめ・提示

工場・物流倉庫での RTLS 利用シーンの提示および説明を行った。

5.3.2.3. 普及予測

センサ UWB 無線システムの需要予測、普及密度の試算（総務省協力）を行った。

5.3.2.4. 干渉検討

利用シーンごとのタグの利用形態、構内での分布、システムを利用する業界による特性などの情報を提示した。RF の物理条件の検討、シミュレーションはベンダー（日立、ユビセンス、GIT）、被干渉側団体が担当した。なお、干渉検討資料は公開不可とする。

5.3.2.5. 交流電源接続規定撤廃

撤廃後の利用シーンを例示した。

6. まとめ

本事業では、配送センター内で作業員・フォークリフトと共存できる安全な高速 AGV システム（従来 AGV の最高速度の約 3 倍）を開発した。高速 AGV システムの安全防護策として、主に 3 つの技術；3D 障害物センサ（安全技術）、エリア管理システム（安全技術）、ローカルエリアシステム（安全サポート技術）を開発した。これら 3 つの安全技術の性能を評価するとともに、実運用テストを含めた安全検証試験を行うことで、本システムの安全性を確認することができた。また、3 つの技術の 1 つであるエリア管理システムについては、世界初となる ISO13482:2014 の JQA による認証を取得した。

本事業により得られた知見から、JIS D 6802:1997 「無人搬送システムー安全通則」の追加防護策を一般社団法人 日本産業車両協会に提言し、AGV を高速化した際の、日本国内における安全への考え方の確立に貢献した。

7. 開発体制

7.1. プロジェクトメンバー

本プロジェクトのメンバーを下記表に示す。

プロジェクトメンバー
辻本 方則
原 義正
高川 夏生
毬山 利貞
窪田 耕児
渡邊 義孝
辻本 和史
田中 宏明
吉永 和治
小出 浩之
尾上 慶太
水野 芳樹
加門 和司
森川 雅司
甲斐 信行
坪田 朋也
正田 和哉

7.2. ご協力頂いた方々

本プロジェクトを進めるにあたり、ご協力頂いた方々を以下に示す。この場をお借りして御礼申し上げます。

- ◆ 味の素株式会社様、味の素物流株式会社様、関東エース物流株式会社様、株式会社オールユニール様
・・・実運用テストを行う場所の提供およびテストへの協力をして頂いた。
- ◆ 一般財団法人 日本自動車研究所（JARI）様
・・・AGV 衝突試験の場所の提供、試験の実施および試験結果の解析をして頂いた。

- ◆ **一般財団法人 日本品質保証機構（JQA）様**
 - ・・・エリア管理システムの ISO13482 認証取得にあたり、ドキュメント作成の指導をして頂いた。

- ◆ **生活支援ロボット安全検証センター様**
 - ・・・UWB 性能評価試験の際にセンター内の電波暗室をお貸し頂いた。

- ◆ **一般社団法人 日本産業車両協会様**
 - ・・・JIS D6802 の改定案を提出について協力をして頂いた。

- ◆ **北陽電機株式会社**
 - ・・・3D 障害物センサ、ローカルエリアセンサの開発について協力して頂いた。

- ◆ **日立マクセル株式会社**
 - ・・・UWB タグの非接触システムの開発について協力して頂いた。

- ◆ **Daifuku Webb Holding Company**
 - ・・・高速 AGV の開発について協力して頂いた。

- ◆ **株式会社 コンテック**
 - ・・・AGV 非接触給電システムの開発について協力して頂いた。

- ◆ **株式会社 日に新た館**
 - ・・・2013 国際ロボット展でのデモンストレーションに協力して頂いた。

8. その他

8.1. 発表・講演・展示会

8.1.1. 発表

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2011年9月8日	第29回日本ロボット学会学術講演会	配送センター内高速ビークルシステムの安全技術開発	辻本方則、原義正、辻本和史、高川夏生、渡邊義孝、○嵯山利貞、窪田耕児
2012年9月20日	第30回日本ロボット学会学術講演会	配送センター内高速ビークルシステムの安全技術開発(第二報)	辻本方則、原義正、高川夏生、渡邊義孝、○嵯山利貞、窪田耕児
2013年3月12日	生産システム部門研究発表講演会2013	NEDO:生活支援ロボット実用化プロジェクト配送センター内高速ビークルの安全技術開発のご紹介	○嵯山利貞、辻本方則、原義正、高川夏生、渡邊義孝、窪田耕児
2013年5月23日	ロボティクス・メカトロニクス講演会2013	配送センター内高速ビークルの安全技術開発のご紹介	○嵯山利貞、辻本方則、原義正、高川夏生、渡邊義孝、窪田耕児
2013年9月4日	第31回日本ロボット学会学術講演会	配送センターにおける高速AGVの安全技術開発	○窪田耕児、辻本方則、原義正、高川夏生、渡邊義孝、嵯山利貞

8.1.2. 講演

講演年月日	講演媒体	講演タイトル	講演者
2012年9月11日	国際物流総合展2012プレゼンテーションセミナー	無人搬送車システムの新たな可能性	辻本方則
2013年12月12日	第22回交通・物流部門大会 (TRANSLOG2013)	特別企画③:物流を勉強するシンポジウム	辻本方則

8.1.3. 展示会

展示会名	場所	出展期間
2011国際ロボット展	東京ビックサイト	2011年11月9日～12日
2013国際ロボット展	東京ビックサイト	2013年11月6日～9日

8.2. 特許

No.	発明の名称	出願番号	出願日	発明者	外国出願
1	物品搬送設備における位置計測システム	2012-090592	2012/4/11	辻本 方則 原 義正 高川 夏生 毬山 利貞 窪田 耕児	
2	位置計測システム及びそれを備えた物品保管設備	2012-211551	2012/9/25		
3	位置計測システム及びそれを備えた物品保管設備	2012-211552	2012/9/25		
4	移動体の姿勢判別システム	2012-211553	2012/9/25		
5	移動体の姿勢判別システム	2012-211554	2012/9/25		
6	物品搬送設備	2013-047060	2013/3/8		米国(特願13/859233号)および中国(特願201310122369.5号)
7	搬送台車制御システム	2013-079873	2013/4/5		
8	走行車制御システム	2013-088631	2013/4/19		米国および中国に出願書類作成中。
9	移動体管理システム	2013-088632	2013/4/19		

8.3. メディアへの掲載

メディア名	掲載および放送日	見出し
日刊工業新聞社robonable	2011年9月12日掲載	ダイフク、無人搬送車の高速運行に向け安全技術を開発、13年に現地試験
日刊工業新聞朝刊	2012年9月12日付	無人搬送車システム、毎分200m走行を管理、産業車両協会、来年度めど実証実験
DAIFUKUNews203	2013年1月発行	安全技術を導入した配送センター内高速ビークルシステムの開発
日本経済新聞朝刊	2014年2月18日付	パナソニックとダイフク、生活支援ロボで国際安全規格
日経産業新聞朝刊	2014年2月18日付	パナソニックとダイフク、生活支援ロボ、国際認証、介護や物流拠点向け
日刊工業新聞朝刊	2014年2月18日付	パナソニック・ダイフクのロボ、国際安全認証を取得、JQA
日経産業新聞朝刊	2014年3月13日付	日本発 国際規格の重い責任

9. 参考文献

- 1 ISO9001 : 2008 Quality management systems
- 2 IEC61508 JIS D 6802:1997 無人搬送車システム 安全通則
- 3 ANSI/ITSDF B56.5-2012 Safety Standard for Driverless, Automatic Guided Industrial Vehicles and Automated Functions of Manned Industrial Vehicles.
- 4 ISO 12100:2010 Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction.
- 5 The Japan Machinery Federation (2010) Mechanical risk assessment guide line for makers.
- 6 ISO13849:2006 Safety of machinery - Safety-related parts of control systems.
- 7 IEC61508:2010 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems.
- 8 IEC62061:2005 Safety of Machinery Functional Safety of Safety-Related Electrical, Electronic and Programmable Electronic Control Systems.
- 9 IEC60204 Safety of Machinery - Electrical equipment of machines -
- 10 IEC61784-3:2010 Industrial communication networks.
- 11 ISO13482:2014 Robots and robotic devices -- Safety requirements for personal care robot.
- 12 ダイフクニュース 203号(2013) 安全技術を導入した配送センター内高速ビークルシステムの開発

事業全体の成果

目 標	研究開発成果	達成度
<p>プロジェクト全体の目標: 下記の3項目に分類される。</p> <p>(委託業務実施計画書 別表から抜粋)</p> <p>(1) 高速ビークルのリスク提言技術と安全要素技術の開発</p> <p>A) リスクアセスメントの実施</p> <p>B) 高速ビークルの開発(コンベヤタイプ・リアフォークタイプ)</p> <p>C) 安全に関するデバイス・システムの開発</p> <p>① 3D 障害物センサー</p> <p>② エリア管理システム</p> <p>③ ローカルエリアシステム</p> <p>④ AGV 非接触充電技術</p> <p>D) 安全検証試験</p> <p>① AGV 衝突時のエネルギー計測</p> <p>② UWB 性能評価試験</p> <p>(2) AGV 安全規格への提言</p> <p>(3) 想定ユーザーによる実現場実証試験</p>	<p>(記載例)</p> <p>目標に対する成果</p> <p>(出典:最終成果報告書)</p> <p>(1)全項目達成。</p> <p>A)各年度の期初と期末に実施</p> <p>B)平成23年度にコンベヤタイプ、平成24年度にリアフォークタイプを製作・運行試験の実施。いづれの最高速度も200m/min</p> <p>C)全項目開発し検証試験を実施。特に②エリア管理システムはISO13482を取得</p> <p>D)平成24年度に60m/min～200m/minにおける衝突時のエネルギーを計測。また、同年度にUWBの基本特性の試験も実施。</p> <p>(2)JIS6802 追加防護策の提案を産業車両協会に提出。</p> <p>(3)平成25年度に、味の素物流株式会社にて実施</p>	<p>(1) 全項目達成</p> <p>(2) 達成</p> <p>(3) 達成</p>

特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学 会 発 表・講演	新聞・雑誌等 への掲載	その他
H23FY	0件	0件	0件	0件	0件	2件	1件	0件
H24FY	6件	1件	0件	0件	0件	3件	2件	1件
H25FY	3件	1件	0件	0件	0件	4件	4件	2件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

2.4 研究開発項目③ 安全技術を導入した配送センター内のフォーク型物流支援 ロットの開発 (株) 日立産機システム、(株) 日立製作所

目次

要 約.....	4
ABSTRACT.....	5
1. 緒言	6
2. 目的	8
2.1 事業目的	8
2.2 事業概要	9
3. 研究体制	10
3.1 研究体制	10
3.2 研究の推進方法	10
3.2.1 推進方法	10
3.2.2 工程	11
4. 開発対象	12
4.1 開発対象	12
4.2 適用規格	14
5. 研究方法	16
5.1 リスクアセスメント	16
5.1.1 フォークリフト型無人搬送車について	16
5.2 本体設計	29
5.2.1 設計コンセプト	29
5.2.2 機構シミュレーション	35
5.2.3 運用シミュレーション	38

5.3	安全サポート系の設計	41
5.3.1	安全サポート系の機能の概要	41
5.3.2	自動走行に利用するセンサーの比較	41
5.3.3	安全サポート系センサーの開発目標仕様	44
5.3.4	安全サポート系の構成	46
5.3.5	安全サポート系のハードウェア	50
5.3.6	安全サポート系のソフトウェア	61
5.3.7	安全サポート系のインターフェース	63
5.3.8	安全サポート系センサーのハードウェアの改良	68
5.3.9	安全サポート系の3Dシミュレーションソフト（PCのソフト）	80
5.4	安全系の設計	92
5.4.1	非常停止回路	92
5.4.2	制御装置の相互監視	95
5.4.3	安全センサーによる停止	95
5.5	車両設計	102
5.5.1	ハードウェア設計	102
5.5.2	車体制御ソフトウェア設計	105
5.5.3	3D位置認識装置との連携ソフトウェア設計	106
5.5.4	ドキュメンテーション	107
5.6	付帯設備の検討	110
5.6.1	インドアGPSシステム	112
5.6.2	無線LAN	112
5.6.3	レーザーレーダビジョンシステム	113
5.6.4	その他の方法	114
6	評価試験	116
6.1	機能試験	116
6.1.1	動力性能	117
6.1.2	3次元位置認識の評価	119
6.1.3	安全系・安全サポート系の評価	121
6.1.4	安全サポート系センサーの単体試験	123
6.1.5	3次元障害物センサー単体試験の評価	134
6.2	模擬環境での試験	136

6.2.1 見直し事項	137
6.2.2 不具合事項	138
6.3 安全検証センターでの評価	138
6.3.1 衝突時の挙動	140
6.3.2 頭部傷害基準値（HIC）での評価	145
6.3.3 衝突試験に対する考察	147
7. 結果	149
7.1 安全サポート系	149
7.2 安全系	149
7.3 コスト	149
8. 総括	150
8.1 成果の達成状況	150

要 約

独立行政法人新エネルギー・産業総合開発機構では、生活支援ロボットとして産業化が期待されるロボットを対象に関係者が密接に連携しながら本質安全・機能安全に係る試験を行い、安全性等のデータを取得・蓄積・分析し、安全性検証手法の研究開発を平成 21 年度～平成 25 年度に生活支援ロボット実用化プロジェクトを実施した。

(株)日立産機システムと(株)日立製作所は平成 23 年度より自律運転を行う移動作業型ロボットの分野で、配送センターで使用するフォークリフト型物流支援ロボットの開発で参画した。(株)日立産機システムは 3 次元位置認識装置による安全サポート系を開発し、(株)日立製作所はフォークリフト型ロボットの設計製作、安全系の開発を担当した。

3 次元位置認識装置は 2 次元レーザー距離計をジンバル構造で支持し、縦方向走査を追加することで 3 次元にデータを拡張し、走査したデータから床と天井部分に相当する部分を排除したデータをリアルタイムに出力する。3 次元で障害物を検出することで遠方から近方までシームレスな障害物の検出ができ、自己位置推定による誘導制御の電子地図との照合を併用することで、狭小場所での高速搬送を行うことができる。安全系は 3 次元位置認識装置の死角を含む車体の周囲 360 度の対人接触を防護し、フォークリフトの走行中だけでなく、パレットの積み下ろしを含む荷扱い作業中の対人接触を防護する。安全サポート系と安全系を併用することで、通常制御の異常時にも動作する機能安全を実現することができ、その効果を検証することができた。

また安全機能を停止した条件下で衝突試験を実施し、対人接触におけるダメージを定量化した。車体とダミーとの一次衝突では従来から安全とされてきた 60m/分を高速化した 180m/分の速度での衝突でも直ちに重篤な結果には至らないことが確認された。一方、一次衝突の約 1 秒後に発生するダミーと床面との二次衝突はその衝撃が大きく、高速化は車体の設計だけでなく、運用面でのヘルメット着用、衝突後の人の挙動でダメージを受けるリスクを低減する車体形状などの対策が必要なことが判明した。

本プロジェクトの成果は(株)日立産機システムと(株)日立製作所でそれぞれ製品化すると共に、プロジェクトで得られた知見は無人搬送車の JIS 規格改定に反映する。

Abstract

In NEDO, industry of Personal care robot carried out personal care robot practical use project for the fields where it was expected becoming it for from 2009 to 2013.

Perform validation affecting functional safety and inherent safety, and the acquisition, storage analyzes safety data; of the safety verified methodology carried it out

Hitachi Industrial Equipment Systems Co.,Ltd. and Hitachi, Ltd. participated in it by development of the fork-lift typed AGV to use in a delivery center in autonomic mobile servant robots from 2011. Hitachi Industrial Equipment Systems Co.,Ltd. developed safe support system by 3D obstacle sensor, and Hitachi, Ltd. was in charge of development pro-design and manufacture, security of the fork lift type anthropomorphic dummy.

3D obstacle sensor supported 2D laser range finder by gimbal construction and expanded the data in the three dimensions by adding longitudinal scanning. It output the data that removed a part equivalent to a floor and a ceiling part from the data that scanned in real time. It can detect the seamless obstacle from a long distance to the short distance by detecting an obstacle in three dimensions and can convey the high speed at the narrowness place by using the check with the electron map of the guidance and control by the self-position estimate together. The safety system protects the interpersonal contact of all people of the car body including the blind spot of 3D obstacle sensor and, among the travel of the fork lift, protects handling freight work interpersonal contact including the loading and unloading of the pallet. We could realize functional safety to usually work at the time of abnormality of the control by using safety support system and a safety system together and was able to inspect the effect.

In addition, we performed the impact-test and quantified damage at the time of the impact with the human body. The primary impact with AGV and the dummy, it was confirmed conventionally that even the impact that speeded up 60m/min said to be safety in a rate of 180mm/min did not reach the effect serious promptly. On the other hand, as for the secondary impact with the dummy and the floor occurring approximately one second after primary impact, the bombardment is big. Speedup was not only a design of the AGV, and it became clear that measures such as the AGV body shape which reduced a risk to receive helmet wearing, damage at the time of the use were necessary.

The result of this project manufactures it in Hitachi Industrial Equipment Systems Co.,Ltd. and Hitachi, Ltd. In addition, the knowledge provided by a project reflects it for a JIS standards revision of the AGV.

1. 緒言

日本では急速に少子高齢化が進行し、国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口によると、総人口は、2030年の1億1,662万人を経て、2048年には1億人を割って9,913万人となり、2060年には8,674万人になるものと見込まれている。生産年齢人口（15～64歳の人口）は2010年の63.8%から減少を続け、2017年には60%台を割った後、2060年年には50.9%になるとなるのに対し、高齢人口（65歳以上の人口）は、2010年の2,948万人から、2042年に3,878万人とピークを迎え、その後は一貫して減少に転じ、2060年には3,464万人に減少し労働力の不足が懸念されている。このような社会情勢の下に、産業分野だけではなく、介護・福祉、家事、安全・安心等の生活分野へのロボット適用が期待されている。しかしながら背イカル支援ロボットの安全技術に関しては国内外の規格が未整備で、民間企業の独自の取組では技術開発も産業化も加速されないことから、国が一定の関与を行い、安全性基準に関する国際標準等の整備が求められている。

独立行政法人新エネルギー・産業総合開発機構（以下NEDOと略す）では、生活支援ロボットとして産業化が期待されるロボットを対象に関係者が密接に連携しながら本質安全・機能安全に係る試験を行い、安全性等のデータを取得・蓄積・分析し、安全性検証手法の研究開発を平成2009年度～平成2013年度に生活支援ロボット実用化プロジェクトを実施した。研究開発内容は以下の研究開発より構成される。

(1) 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発

生活支援ロボットに対するリスクアセスメントについて、特に機能安全に関して方法論を確立するために、リスクアセスメント手法の具体的計画を定める。また、生活支援ロボットにおける安全性検証方法や判断基準の定量化について検討する。また安全技術を導入して開発された生活支援ロボットにおけるコンセプト段階から製品段階までの安全性基準に関する適合性評価手法に係る研究開発計画を検討する。併行して、ロボット開発実施者が開発する安全管理技術と適合性評価結果を踏まえた生活支援ロボットの実証試験計画について検討する。

(2) 安全技術導入ロボットの開発

- 1.安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの開発
- 2.安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発
- 3.安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットの開発
- 4.安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発

(株)日立産機システムと(株)日立プラントテクノロジー（現：(株)日立製作所インフラシステム社）は日立産機グループコンソとして2011年度から3年間、「安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発」において、安全技術を導入した配送センター内

のフォーク型物流支援ロボットの開発に係るロボットの安全技術開発でプロジェクトに参画した。



図 1-1 生活支援ロボット実用化の概要 (出典：NEDO 資料)

日立産機システムは高速で走行するフォークリフト型ロボットの周囲を走査する 3 次元位置認識装置の開発を担当し、(株)日立プラントテクノロジー（現：日立製作所インフラシステム社）はフォークリフト型ロボットの開発を担当する、2 社の協力体制でプロジェクトを推進した。図 1-2 にプロジェクト全体の推進体制（平成 23 年度時点）を示す。

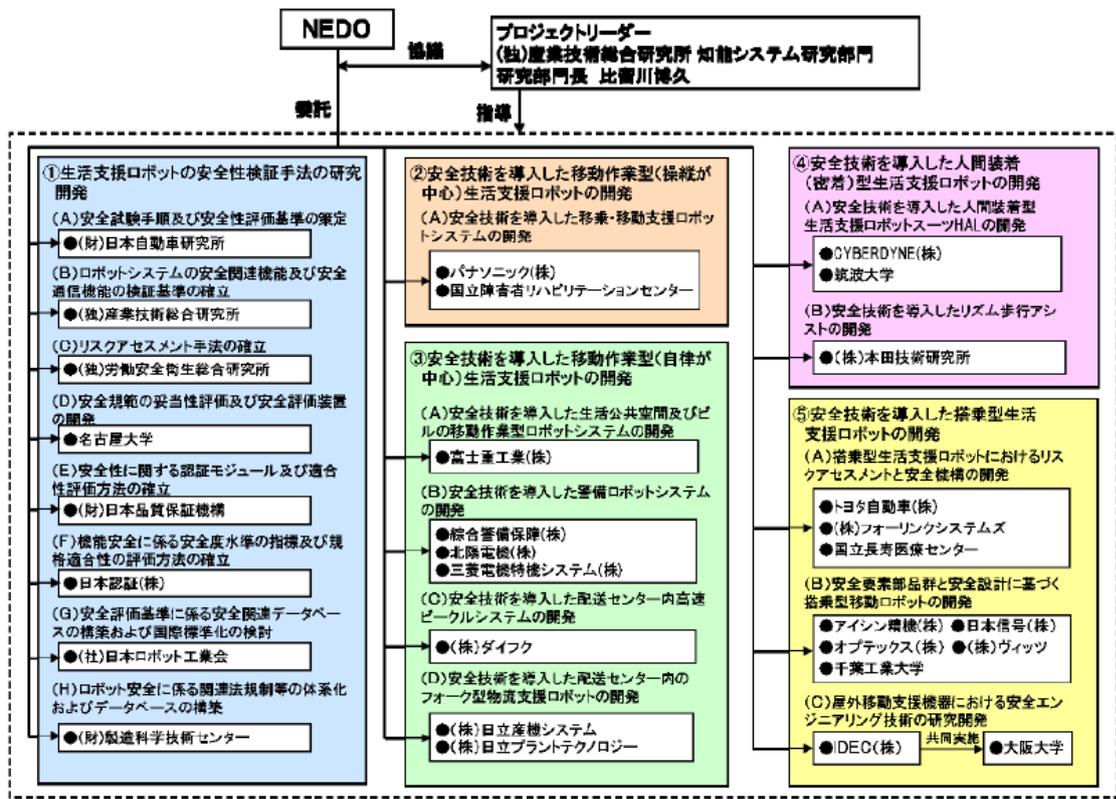


図 1-2 プロジェクト全体の実施体制 (出典：NEDO 資料)

2. 目的

2.1 事業目的

近年、製造業における国内空洞化や、今後の少子高齢化に伴う単純労働力の低下への懸念が高まってきている。その解決策の一つとして、労働者の最適配置を目指した物流センターや生産工場の物流の自動化が注目を浴びている。物流センターや生産工場には、製品を保管する倉庫や部品組立てを行う製造現場、また、生産に必要な素材や部品の入荷、製品出荷を行うための物流・配送センターが存在する。

図 2.1-1 に、倉庫・製造現場と物流・配送センターにおける自動搬送手段の現状と導入課題を示す。一般産業の倉庫や製造現場には、安全教育を受講した特定作業員しか存在しないため、AGV (Automatic Guided Vehicles) や物流支援ロボットの導入による物流の自動化が進んでいる。一方、物流・配送センターは、倉庫や製造現場に比べて、外部に開かれた環境があるため、特定作業員の他に安全教育を受けていない搬送業者や部外関係者が立ち入る可能性が高い。従って、対人安全の確保が難しいため自動化が遅れている。一部には自動フォークリフトが導入されているが、特定作業員しかいない環境や、完全に人と分離した環境にしか導入されていない。また、制御の信頼性不足と安全確保のために低速で運用されている事例が多い。物流・配送センターは、倉庫や製造現場に比べて搬送物が多く、要求される搬送速度や頻度が高いため、搬送作業の自動化が強く望まれている。

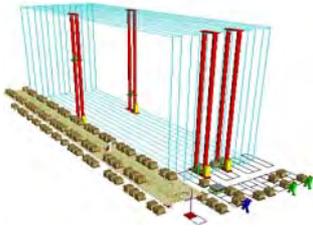
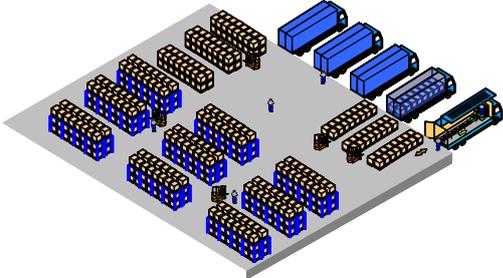
場所	倉庫や製造現場	物流・配送センター
イメージ		
人	特定作業員(安全教育受講者)	特定作業員(安全教育受講者) 搬送業者や部外関係者(安全教育未受講者)
搬送手段	AGVや物流支援ロボットの導入 	特定環境にのみ自動フォークの導入 
導入課題	・低コスト化 ・使い勝手向上	・搬送速度の向上 ・対人安全性能の向上

図 2.1-1 物流・配送センターの自動搬送手段の現状と導入課題

以上より、物流分野の自動化の進展を図るためには、物流・配送センターで作業する、搬送能力と対人安全性の高いフォーク型物流支援ロボットの実用化が重要であり、このための技術開発を本プロジェクト事業にて実施する。

2.2 事業概要

本事業にて開発する技術の概要を説明する。図 2.2-1 は、フォーク型物流支援ロボット（以下フォーク型ロボットと略す）の走行時と荷扱い時の対人安全の課題と対策（開発すべき技術）と、それらの開発分担を表している。

走行時の対人安全に対する課題は、走行時の人との接触である。安全対策としては、「3次元障害物検出」と「対人安全制御」との2つがある。

「3次元障害物検出」では、フォーク型ロボットの車体上部に設けた3次元障害物検出センサーで、フォーク型ロボット近傍の障害物を検出する。

「対人安全制御」では、3次元障害物検出によって検出された障害物の位置情報に基づき、ロボットと障害物との相対位置関係や車体速度とに応じて減速及び停止制御を行う。

荷扱い時の対人安全に対する課題は、フォークリフト作動時の人との接触である。「3次元障害物検出」では、3次元障害物検出センサーで荷物とロボットのフォーク部付近の障害物を検出する。「対人安全制御」では、検出された障害物の位置情報等に応じてフォークリフト部の停止制御を行う。

「3次元障害物検出」の開発は、日立産機システムが担当し、「対人安全制御」の開発は、日立製作所が担当する。

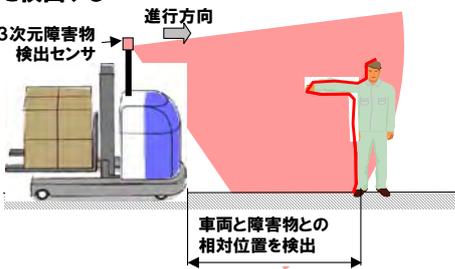
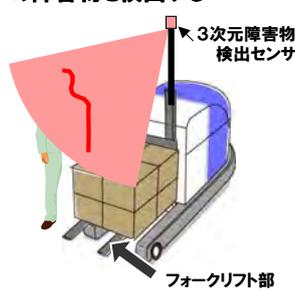
項目	走行時	荷扱い時	開発分担
課題	走行時の人の接触	フォークリフト作動時の人との接触	—
対策	<p>3次元障害物検出センサーで進行方向の障害物を検出する</p> 	<p>3次元障害物検出センサーで荷扱いエリアの障害物を検出する</p> 	株式会社 日立産機 システム
	対人安全制御	<p>障害物候補からの制御対象の切り出しと、相対位置/車体速度とに応じて減速及び停止を行う</p>	

図 2.2-1 フォーク型物流支援ロボットの対人安全への課題と対策

3. 研究体制

3.1 研究体制

研究体制は、(株)日立産機システムと(株)日立製作所で、それぞれ以下の体制で実施した。プロジェクト参画時点では(株)日立産機システムと(株)日立プラントテクノロジーであったが、(株)日立プラントテクノロジーは2013年4月1日に(株)日立製作所と経営統合し、実施場所も千葉県松戸市から茨城県土浦市に移転した。図3.1-1に日立産機システム・グループ・コンソシアムの研究体制を示す。

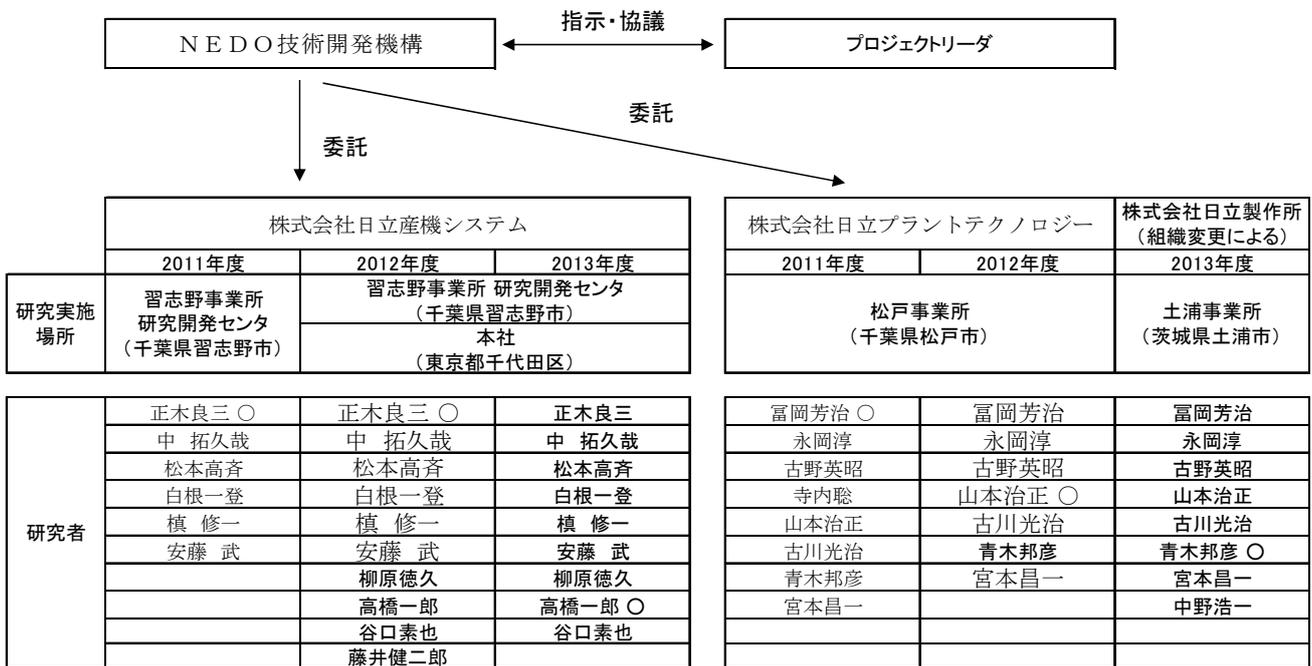


図 3.1-1 研究体制

3.2 研究の推進方法

3.2.1 推進方法

研究の推進方法は、リスクアセスメント等の両者が合同で実施する事項については合同で検討する。(株)日立産機システムは高速で走行するフォークリフトの周囲の障害物を検出する3次元位置認識技術を主として担当し、この設計と製作を行った。(株)日立製作所はフォークリフト型物流ロボットの設計、製作、安全系の設計製作と、評価試験を担当する。フォークリフト型ロボットは、既に実用化しているレーザー距離計により位置認識を行い電子地図に基づいた誘導制御を行う無人搬送車(製品名:インテリジェントキャリア)をベースモデルとし、走行速度180m/分の高速化と、3次元位置認識装置の実装、安全系の追加を実装する方法をとった。

3.2.2 工程

本プロジェクトは平成 22 年度の補正予算による一部期間と平成 23 年度、24 年度、25 年度の実質 3 年間で実施した。

H23 年度はリスクアセスメント、3 次元位置認識装置、安全系の開発を主として行い、H24 年度は開発した装置の動作確認、単体での評価を実施。H25 年度は実使用環境での総合的な評価を行う計画とした。その概略工程を表 3.2.2-1、表 3.2.2-2 に示す。

表 3.2.2-1 H22 年度、H23 年度概略工程

事業項目	22年度				23年度			
	第1 匹半期	第2 匹半期	第3 匹半期	第4 匹半期	第1 匹半期	第2 匹半期	第3 匹半期	第4 匹半期
①安全性検証手法に基づいたリスクアセスメントと 具体的検証方法の策定 a) リスクアセスメント b) 検証方法の策定					リスクアセスメント		検証方法の策定	
②自律走行時の3次元障害物検出技術の開発 a) 検出方式の検討 b) 揺動機構の開発 c) コントロール回路の開発 d) 検出アルゴリズムの開発 e) 動作検証					方式検討	各種設計	ハードウェア	動作検証
③走行・荷扱い時の対人安全制御技術の開発 a) 方式の検討 b) アルゴリズムの開発 c) 動作検証					方式検討	各種設計	実装	動作検証
④安全検証センタおよび自社模擬現場での安全評価 a) 安全評価実験								選定
⑤安全技術を実装したロボットの流通サービス業の現場での実証試験 a) 実証試験場所の調査					現場環境調査と実証試験場所候補選定 実証場所の交渉			

表 3.2.2-2 H24 年度、H25 年度概略工程

事業項目	24年度				25年度			
	第1 匹半期	第2 匹半期	第3 匹半期	第4 匹半期	第1 匹半期	第2 匹半期	第3 匹半期	第4 匹半期
①安全性検証手法に基づいたリスクアセスメントと 具体的検証方法の策定 a) リスクアセスメント b) 検証方法の策定	パイロット スタディ							
②自律走行時の3次元障害物検出技術の開発 a) 検出方式の検討 b) 揺動機構の開発 c) コントロール回路の開発 d) 検出アルゴリズムの開発 e) 動作検証 f) システム検証 g) 実運用からのフィードバック	動作検証	統合試験・検証				対策		
③走行・荷扱い時の対人安全制御技術の開発 a) 方式の検討 b) アルゴリズムの開発 c) 動作検証 d) システム検証 e) 実運用からのフィードバック	動作検証	システム検証				対策		
④安全検証センタおよび自社模擬現場での安全評価 a) 安全評価実験 b) 動作検証-対策	設置準備	日立プラントテクノロジーで実施 動作検証-対策						
⑤安全技術を実装したロボットの流通サービス業の現場での実証試験 a) 実証試験場所の調査 b) 設置・検証評価 c) まとめ			実証試験 場所選定		設置	検証評価		まとめ

4. 開発対象

4.1 開発対象

開発対象のフォーク型ロボットは、配送センターでの使用を前提に、リーチ式電動フォークリフトを使用し、小物搬送で使用頻度の多い一貫輸送用平パレットとして JIS 規格化されている T11 型(1,100×1,100×144mm)パレットを運搬し、高速搬送のため最大 180m/分の走行速度をもつ可搬質量 1,000kg の機種をベースモデルとして安全系を開発する。

フォーク型物流支援ロボットのフォークリフトの形状と主要寸法を図 4.1-1 に、仕様を表 4.1-1 に示す。

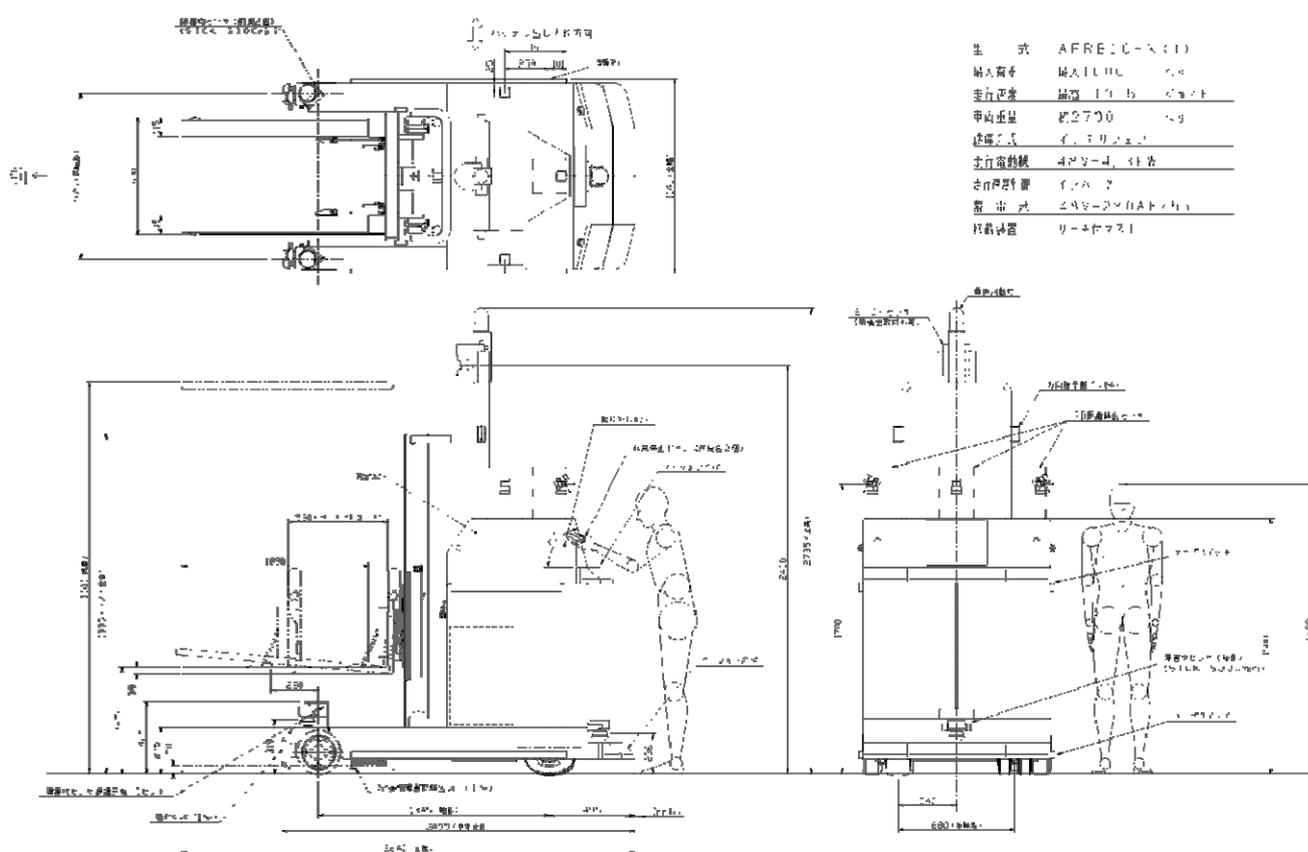


図 4.1-1 車体の主要寸法

表 4.1-1 フォーク型物流支援ロボットのフォークリフト仕様

項目		機械の制限仕様等	
機械の名称		安全技術を導入した移動作業型(自律が中心)生活支援ロボット	
機械の主な仕様	製品型式		
	設計寿命		
	構成部品の交換間隔	バッテリー 2~3年、油圧ホース1~2年、リフトチェーン2~4年	
	原動機出力(kW)		
	運転方式(モード)	無人運転(自動走行, 自動移載, レーザセンサによる位置検出), 有人運転, 保守運転	
	加工能力	---	
	送りスピードまたは回転数	最高走行速度 11km/h (180m/min)	
製品寸法	W1130×L2920×H2735(mm)		
製品重量	車体重量 約2600kg, 積載荷重 最大1000kg		
機械の使用目的と用途(使用上の制限)			
・意図する使用, 予見可能な誤使用		過去の災害事例, リスクアセスメントにより抽出する	
・予期しない起動			
機械の可動範囲等(空間上の制限)			
・動作範囲		リフト上限は仕様用途の範囲から逸脱する1m以上の動作範囲を制限する	
・インターフェース			
・作業環境			
機械の設置条件		屋内, 走行路面は平坦なコンクリートとする。	
・屋内/外		温度 0~40℃, 湿度 45~85%	
・温度, 湿度			
・保安管理物件			
機械のライフサイクル		通常の製品と同一	
危害の対象者	オペレータ	資格の要否	有人運転時は運転特別教育または技能講習の運転資格が必要
	周囲の作業員		床上に人通路とロボット通路を表示し, 通路を分離する。
	サービスマン(補給, 保全)	資格の要否	有人運転時は運転特別教育または技能講習の運転資格が必要
	第三者		床上に人通路とロボット通路を表示し, 通路を分離する。
その他			
通信機能		地上の搬送コントローラとの通信は無線LAN(802.11b)通信	
安全機能		バンパスイッチ, サイドバンパ, 非常停止スイッチ, アウトリガ下センサ, 3D位置認識	
表示器等		警報音, ナフライト	

基本仕様として重要部品であるブレーキ性能を図 4.1-3 に示す。ブレーキはモーター軸に直結し、制動トルク 80N・m 以上のトルクを持つ電磁ブレーキを使用している。モーターの回生制動、モーター動力を遮断し、無負荷状態でブレーキ停止した場合、定格負荷状態でブレーキ停止した場合を示す。モーターでの減速では 10.6m の減速距離を要し、障害物の認識はこの距離に検出処理と制御系の遅延時間に走行する空走距離、停止したときに障害物との距離余裕を加算した点から減速開始する必要がある。非常停止は無負荷運転において 3.3m、定格負荷運転において 4.0m で停止するため、安全系の検出点はこの値に空走距離、距離余裕を加算した位置で検出を行う。

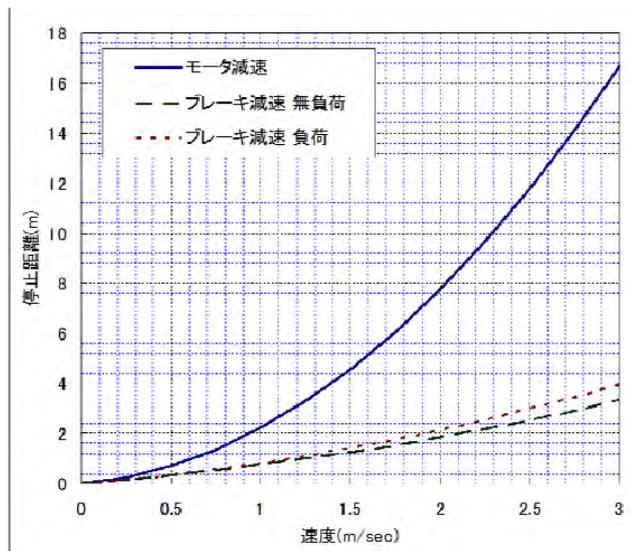
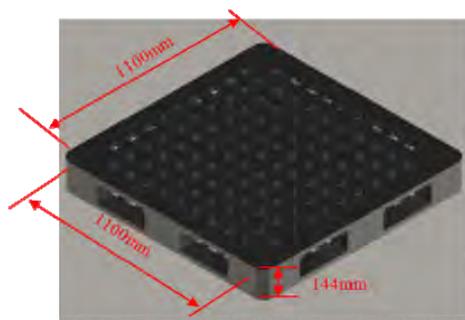
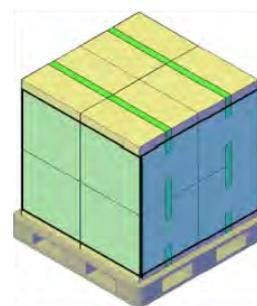


図 4.1-2 減速特性

搬送物は T11 と呼ばれる 1 辺が 1,100mm の正方形、厚みが 114mm、2 カ所のフォーク挿入口をもつパレットを想定する。パレットおよび搬送物の主要寸法を図 4.1-3 に示す。搬送物質量は最大 1,000kg とする。



T11型パレット



複数の段ボール箱を1つのパレットに積み場合は、
フォークの先端などにより破損しないよう
しておく。

図 4.1-3 搬送物の主要寸法

4.2 適用規格

フォーク型ロボットは産業車両の扱いで、これをベースとして機能安全を組み込む。その適用規格を示す。一般的な無人搬送車の規格は JIS D6802 : 1997 無人搬送車システム-安全通則で規定される。日本産業車両協会では、中央労働災害防止協会のガイドライン³⁾で示された最大速度 60m/min では市場の拡大が見込めないことから、JIS D6802 の追加防護策を策定した。追加防護策の実施、リスクアセスメントの実施と残留リスクの開示等により、必要能力を出

し、より安全に運用できる信頼性の高い無人搬送車を目指し活動している。本プロジェクトではベースとなるフォークリフト型無人搬送車はこれらの規格、ガイドラインに従う。安全系の部分に関しては本プロジェクトの要求事項である ISO13482 を部分適用する。

表 4.2-1 フォークリフト型無人搬送車の適用規格

No.	項目	タイトル	ISO/IEC規格	対応するJIS規格	備考
1	基本安全規格 (A規格)	機械類の安全性-基本概念, 一般設計原則規格)	ISO12100 Ed1:2010	JIS B 9700:2013	ISO12100-1,-2とISO14121-1を2010年に統合。
2		リスクアセスメント規格	ISO14121	JIS B 9702	廃止
3	グループ安全規格 (B規格)	インタロック規格	ISO 14119 Amd1:2007	JIS B 9710:2006	
4		ガードシステム規格	ISO 14120 Ed1:2002	JIS B 9716:2006	
5		制御システム安全/設計	ISO13849-1 Ed2:2006	JIS B 9705-1:2011	
6		機械類の安全性/設計のための一般原則	ISO 13849-1 Ed2:2006	JIS B 9705-1:2011	
7		制御システム安全/妥当性	ISO13849-2 Ed1:2003		JIS原案作成予定
8		安全距離規格	ISO 13857 Ed1:2008	JIS B 9718:2013	IS B 9707とJIS B 9708を統合しJIS B 9718
9		予期しない起動防止規格	ISO 14118 Ed1:2000	JIS B 9714:2006	
10		非常停止規格	ISO13850 Ed2:2006	JIS B 9703:2011	
11		両手操作制御装置規格	ISO13851 Ed1:1996	JIS B 9712:2006	
12		圧力検知保護装置規格	ISO 13856-2 Ed2:2013	未発行	
13		常設接近手段の規格	ISO14122 Amd1:2010	JIS B 9713-1,2,3,4:2004	
14		電気設備安全規格	IEC60204 Ed5.1:2009	JIS B 9960:2008	
15		電氣的検知保護設備(センサ)	IEC 61496-1 Ed3:2012-04	JIS B 9704:2006	JIS原案作成中
16		人検知用保護設備(センサ応用)	IEC/TS 62046 Ed2:2008-02	未発行	2013-05廃止
17		電氣的機能安全規格	IEC61508	JIS C 0508	
18		スイッチ類規格	IEC60947	JIS C 8201	
19		EMC規格	IEC61000-4	JIS C 61000-4	
20	トランス規格	IEC60076	未発行		
21	防爆安全規格	IEC60079	JIS C 60079		
22	個別機械安全規格 (C規格)	無人搬送車システム-用語		JIS D 6801:1994	
23		無人搬送車システム-安全通則		JIS D 6802:1997	
24		無人搬送車-設計通則		JIS D 6803:1994	
25		無人搬送車システム-設計通則		JIS D 6804:1994	
26		無人搬送車システム-特性・機能試験方法		JIS D 6805:1994	
27		動力付産業車両に関する安全規格	ISO3691-4		2013年2月25日 ISO TC110 SC2によるISO 3691-4改訂作業はキャンセルされた
28		SAFETY STANDARD FOR DRIVERLESS, AUTOMATIC GUIDED INDUSTRIAL VEHICLES AND AUTOMATED FUNCTIONS OF MANNED INDUSTRIAL VEHICLES	ANSI/ITSDF B56.5-2012		

表 4.2-2 その他のガイドライン

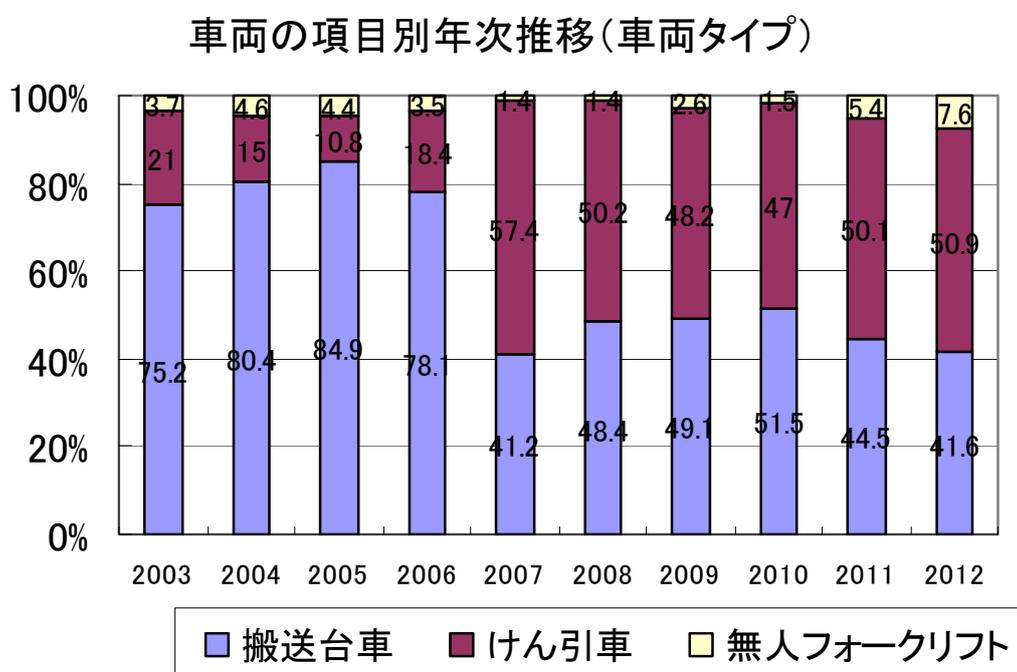
No.	項目	タイトル	備考
1	日本産業車両協会規格	無人搬送車の安全確保のための表示に関するガイドライン	JIVAS A05, H9年5月制定
2	日本産業車両協会 無人搬送車システム委員会	JIS D6802(無人搬送車システム-安全通則) 解説補足(無人フォークリフト安全対策実施例)	2002年12月18日
3	日本産業車両協会 無人搬送車システム委員会	速度制限の変更に対する変更案 (JIS D6802に追加防護方策)	2008年以降AGV最大速度の制限を変更するためのガイドライン
5	中央労働災害防止協会	無人搬送車の安全 - 安全対策ガイドラインと解説 - (ISBN4-8059-0351-1 C3060 P1300E 1990年4月25日 発行)	2007年以前のAGV最大速度60m/minを規定したガイドラインで、現在は適用外

5. 研究方法

5.1 リスクアセスメント

5.1.1 フォークリフト型無人搬送車について

フォークリフト型無人搬送車は年間約 1,300 台強の無人搬送車の業界において、一般的な AGV である搬送台車、けん引車タイプと比較し台数が少なく 100 台強の生産台数で、近年、その台数は増加傾向にある。これは、従来は手動運転でしか扱えなかったフォークリフト搬送の分野で制御技術の向上により自動化が進んでいることを示している。無人フォークリフトは主として製造業での材料・原料搬送の重量物の分野で使用されている。図 5.1.1-1 に無人搬送車の車両タイプ別出荷数の推移を示す。



出典：日本産業車協会統計資料

図 5.1.1-1 無人フォークリフト出荷統計

(1) リスクの事前調査

リスクアセスメントを実施する上で、想定される事象以外に過去の事例を参考にすることは重要である。リスクアセスメントの実施に先立ち、過去のフォークリフト事故、ヒヤリハットの事例を収集した。当社社内、当社納入先でのフォークリフト型無人搬送車での事故が無事故で、有効な事例はなかった。無人搬送車自体が事故率の低い設備で、無人搬送車の業界団体である一般社団法人日本産業車両協会での事例もない。このため有人運転のフォークリフトの事例を参考にした。調査した主な団体を表 5.1.1-1 に示す。表

中の団体以外にフォークリフトのレンタル事業者等も調査した。しかしながら結果は事例が少なく、他の団体の事例と重複していたため省略する。

表 5.1.1-1 事例を参考した事故・ヒヤリハットの公開団体

No.	団体	URL	代表的な事例
1	一般財団法人 東京都産業廃棄物協会	http://tosankvo.or.jp/hivari/hivari_index.htm	<ul style="list-style-type: none"> ・パレット上の荷物の荷崩れ ・死角のある場所での人(自転車)との接触 ・リフトアップ時の転倒 ・歩行者の車両直近での横断 ・バック、方向転換時の周囲の歩行者との接触 ・他の設備(建屋)との接触
2	社団法人 建設荷役車両安全協会	http://www.sacl.or.jp/	<ul style="list-style-type: none"> ・車両転倒
3	厚生労働省 職場のあんぜんサイト	http://anzeninfo.mhlw.go.jp/hivari/anrd/h00.htm	ヒヤリハットの事例と多数の死亡災害DBが公開されている
4	中央労働災害防止協会 安全衛生情報センター	https://www.jaish.gr.jp/	<ul style="list-style-type: none"> ・旋回状態での歩行者との接触 ・点検整備不備車両による走行中の転倒 ・荷と一緒にパレットに乗った作業者の事故(禁止行為) ・無資格者の運転による事故
5	日本財団 図書館	http://nippon.zaidan.info/index.html	<ul style="list-style-type: none"> ・荷崩れ ・不正な運転操作による制動不足

これらは有人運転と無人運転で異なる安全上の要求事項、運転状況、制約事項もあるが、人と共存する場合に、十分な訓練・教育を受けていない人が自動運転する設備との共存を考える上での予見可能な災害ポテンシャルとみなせる。

中央労働災害防止協会が運営する厚生労働省の「職場のあんぜんサイト」はヒヤリハット事例(事故に至る前段階の危険事象の事例)だけでなく、多数の労働災害の死亡事例を公開しておりデータが充実している。フォークリフトの関係した事例だけを選択すると、死亡災害は平成 17～20 年の調査期間で 5,612 件の事例に対し 2.7%の 154 件にフォークリフトが関係している。死傷災害では調査期間平成 19～20 年の事例数 37,432 件に対しフォークリフトは 1.8%の 673 件が報告されている。尚、産業車両としての一般の無人搬送車、フォークリフト型無人搬送車の事故事例は報告されておらず、フォークリフト型ロボットのリスクの抽出に際しては、有人運転の固有の問題点、周囲の人が巻き込まれる災害の相違点を考慮の上リスク抽出を行った。

ヒヤリハット事例は事故に至る前段階の潜在的な事故要因であり、死亡事例・障害事例は実際に発生した事例である。ヒヤリハット事例が死亡事例・障害事例に含まれている例もあったが、その両方の事例を参考にした。事例は運転者の運転に起因する事象、フォークリフト自体に起因する事象、歩行者や他の作業者との関係に起因するものの他に、フォークリフト固有の運動特性に起因するもの、荷を乗せるパレットに起因するもの等多岐に渡る事例が公開されている。

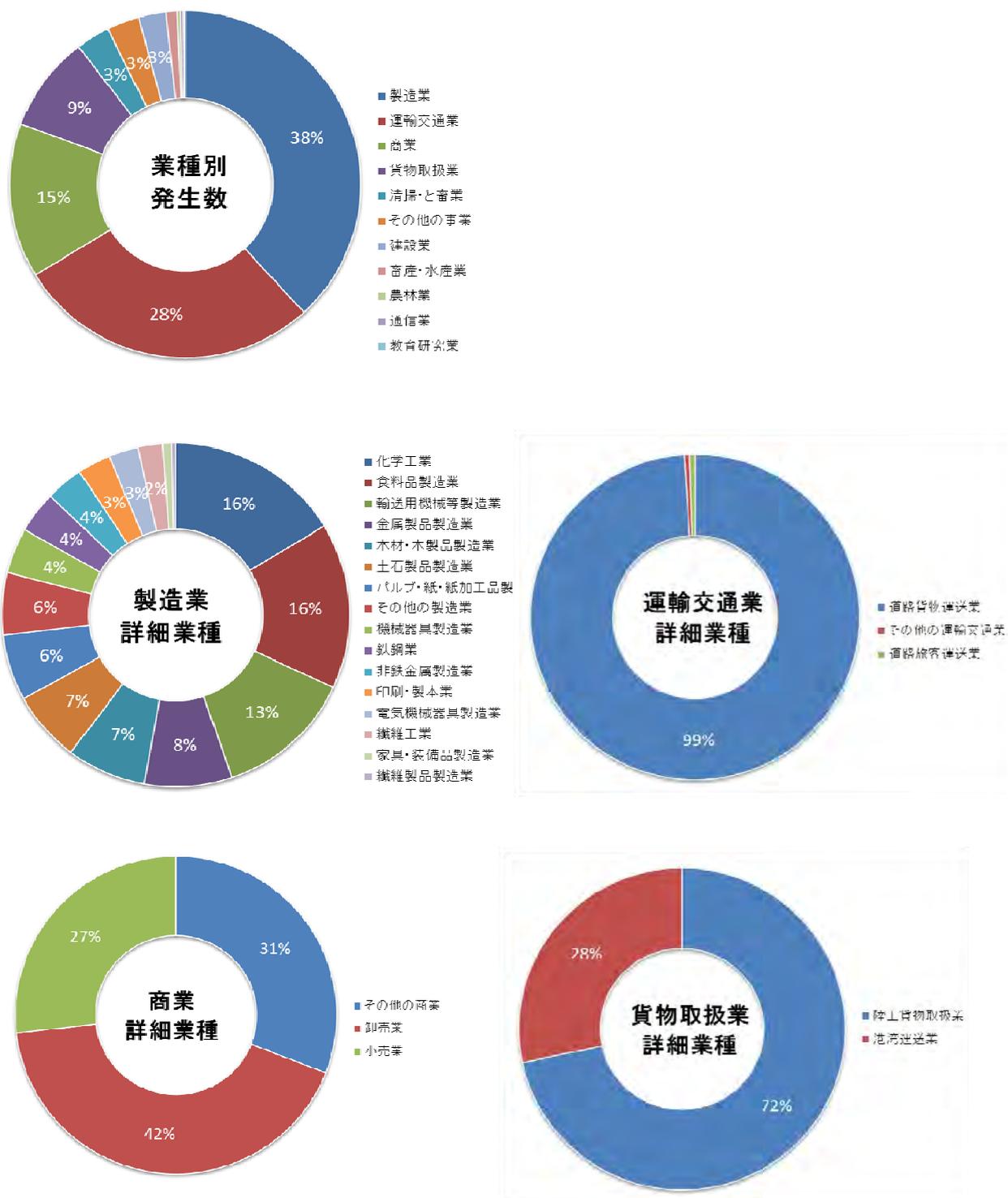


図 5.1.1-2 有人フォークリフトの業種別死傷件数の割合

発生件数として最も多いのが製造業で、運輸交通業、商業、貨物取扱い業がこれに続く。製造業では資材の荷受業務から製造現場での材料、部品、半製品の重量物運搬から製品の発送までの様々な職場で使用されており、事故も多く発生している。

一方、事故の型に着目すると、業種に関係なく事故の型として「はさまれ・巻き込まれ」が圧倒的に多く、次いで「激突され」が多く、この2つの要因で全体の発生件数の

70%を占める。さらに「飛来・落下」「激突」を含めると 86%となり主要な事故の要因を網羅している。図 5.1.1-2、図 5.1.1-3 に事故の要因別集計を示す。

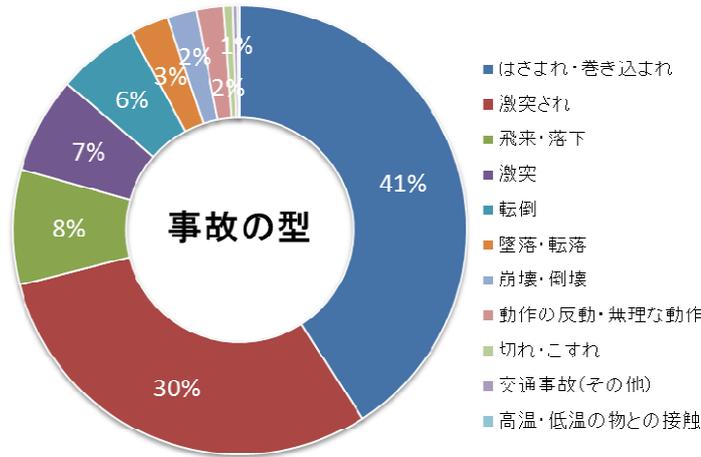


図 5.1.1-3 有人フォークリフトの事故の型

リスクアセスメントの事前調査として、H17年からH20年の有人フォークリフト災害事例を参考に、自動運転を行うフォークリフト型ロボットと人との関係を精査した。

表 5.1.1-2 に死傷データベースの中から起因物（小分類）をフォークリフトに限定した一部抜粋を示す。また巻末の付表-2 にフォークリフトのみを抽出した事故事例集を示す。

表 5.1.1-2 死傷事故データベース（H19年12月、フォークリフト関連）の一部抜粋

ID	年	月	発生時間	災害状況	業種(大分類)			業種(中分類)			業種(小分類)			事業場規模	起因物(大分類)			起因物(中分類)			起因物(小分類)			事故の型	年
					分類名	コード	分類名	分類名	コード	分類名	コード	分類名	コード		分類名	コード	分類名	コード	分類名	コード	分類名	コード	分類名		
71	平成	20	12	13~14	鋼鉄製長尺物をフォークリフトの爪に載せて荷降ろし作業中、鋼材がずれた為、もとに戻そうとリフトから降り鋼材を動かした時、爪及び鋼材が面で滑っていた為、鋼材が床に落下し、手動になったフォークリフトでトラックに荷物を積み込み中、フォークリフト運転手の携帯電話が鳴った。電話に出るためフォークリフトを止めたが、電話を取り出そうとした時に、誤って足が動き、クラッチが入って前進してしまっただけで、トラックの前で作業していた被災者の右足首が、トラックとバレットの間に挟まれた。	4	運輸交通業	403	道路貨物運送業	40301	一般貨物自動車運送業	100~299	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	4	飛来・落下	32				
175	平成	20	12	9~10	倉庫内でフォークリフト作業中、リフトが転倒しそうになった為飛び降りたところ、乗っていたリフトに右足を踏かれた。	8	商業	801	卸売業	80109	その他の卸売業	1~9	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	7	はさまれ・巻き込まれ	36				
430	平成	20	12	11~12	倉庫内でフォークリフト作業中、リフトが転倒しそうになった為飛び降りたところ、乗っていたリフトに右足を踏かれた。	5	貨物取扱業	501	陸上貨物取扱業	50101	陸上貨物取扱業	10~29	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	7	はさまれ・巻き込まれ	34				
461	平成	20	12	15~16	工場内で、材料を抱えリフトを横断中、リフトが荷物運搬の為前進し、接触して転倒し、リフト後部に高さなげられた。	1	製造業	108	化学工業	10805	プラスチック製品製造業	300~499	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	7	はさまれ・巻き込まれ	61				
656	平成	20	12	16~17	フォークリフトの点検作業中、右後ろ足回りのグリスアップをする為、しゃがんで作業をしていた。その際、フォークリフトが後方にいる被災者に気付かず後進し、後輪に右足を踏かれ、右足首を骨折した。	8	商業	804	その他の商業	80409	その他の商業-その他	10~29	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	7	はさまれ・巻き込まれ	56				
779	平成	20	12	13~14	フォークリフトを使用し、ダンボールを手積み作業中、下に降りる際に誤って足を滑らせ、右脚をフォークリフトと屋根部に強くぶつけてしまった。	1	製造業	101	食料品製造業	10102	水産食料品製造業	10~29	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	1	墜落・転落	28				
790	平成	20	12	14~15	フォークリフトに作業指示を出すのに夢中で周囲の安全確認をせずに動いていた為、後方で作業していたフォークリフトの後輪に左足を踏かれた。	8	商業	804	その他の商業	80401	倉庫業	50~99	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	6	激突され	43				
800	平成	20	12	11~12	選別機へ原料を投入していたところ、後ろでフォークリフトにより選搬中のバレットに積まれた魚缶が滑り落ち、右足首に当たった。	1	製造業	101	食料品製造業	10102	水産食料品製造業	300~499	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	4	飛来・落下	43				
814	平成	20	12	18~19	商品にシートを掛けようとして、商品とフォークリフトバレットに足を掛けていた際、リフトが動き出した為バランスを崩し、フォークリフトバレットにしがみ付いた手が外れ、フロアに落下し後頭部を強打した。	5	貨物取扱業	501	陸上貨物取扱業	50101	陸上貨物取扱業	100~299	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	1	墜落・転落	58				
833	平成	20	12	13~14	フォークリフトで荷物の取り降ろし作業中、BOX内の荷物が落ちてきた為、マストの間から手を入れ荷物を置こうとした際、上着がレバーに引っ掛かり、レバーが作動し上がった為、マストに右腕を挟まれた。	4	運輸交通業	403	道路貨物運送業	40301	一般貨物自動車運送業	30~49	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	7	はさまれ・巻き込まれ	37				
956	平成	20	12	13~14	倉庫内にてフォークリフトで荷物の箱出し中、荷物に掛けた埃避けのビニールシートを、リフトの上にとり、マストに足を掛けて持ち上げた。荷物を出した後、リフト運転手がリフトを下降させた為、マストに足を挟まれた。	17	その他の事業	1702	その他の事業	170209	その他の事業-その他	1000~9999	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	7	はさまれ・巻き込まれ	74				
958	平成	20	12	15~16	集塵機の清掃のため蓋をリフトの爪で上げようとした際、蓋が爪に上手く掛らないまま持ち上げた為、蓋が滑り落ち、蓋と集塵機の間に清掃員(被災者)の指が挟まれた。	1	製造業	117	その他の製造業	11709	その他の製造業-その他	30~49	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	4	飛来・落下	67				
979	平成	20	12	11~12	倉庫にて、リフトを使用し、コンテナから荷物を降ろしている際、リフトのホック部に積載されていた荷物が不安定な状態だった為、手で押さえて後退させたところ、荷崩れをおこし、落下した荷物と地面に足を踏まれ、負傷した。	1	製造業	113	機械器具製造業	11301	機械(精密機械を除く)器具製造業	10~29	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	4	飛来・落下	45				
1039	平成	20	12	13~14	フォークリフトでトラックにパイプを積み込み中、載せたパイプのバランスが悪く、転がってフォークリフトに当たった。危険を感じてトラックの荷台から飛び降りようとしたところ、足が引っ掛かり、転落して負傷した。	8	商業	801	卸売業	80109	その他の卸売業	10~29	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	2	転倒	34				
1190	平成	20	12	1~2	ドライバーがバレットへ荷降した商品を手動リフトで移動したが、段差が違っていた為やり直そうと押し戻したところ、入荷機作業中の被災者の右腕部にバレットが接触した。	4	運輸交通業	403	道路貨物運送業	40301	一般貨物自動車運送業	50~99	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	6	激突され	35				

出典：中央労働災害防止協会安全衛生情報センター・死傷事故 DB

(2) リスクアセスメントの実施

本プロジェクトは生活支援ロボットを対象としており、対象者は成人男性に限定されることはなく、その中には高齢者や子供、女性といった体格、運動能力のことなる対象者が含まれている。リスクアセスメントの実施にあたっては全てを対象とすることは現実的でなく、フォークリフト型ロボットの使用環境に即したものとした。当初は本プロジェクトの基準で実施したが、自重 2,600kg の産業車両であり運動特性にも限界があり有効なリスク低減ができない状況となった。図 5.1.1-4 に示すように障害の酷さ S は、本プロジェクトでは軽症領域をフォーカスした内容になっているが、稼動する空間も教育を受けた作業員であることから機会工業会のガイドライン¹⁾に準拠し、回復可能な障害を細分化することで機能安全を実現する方法を得た。

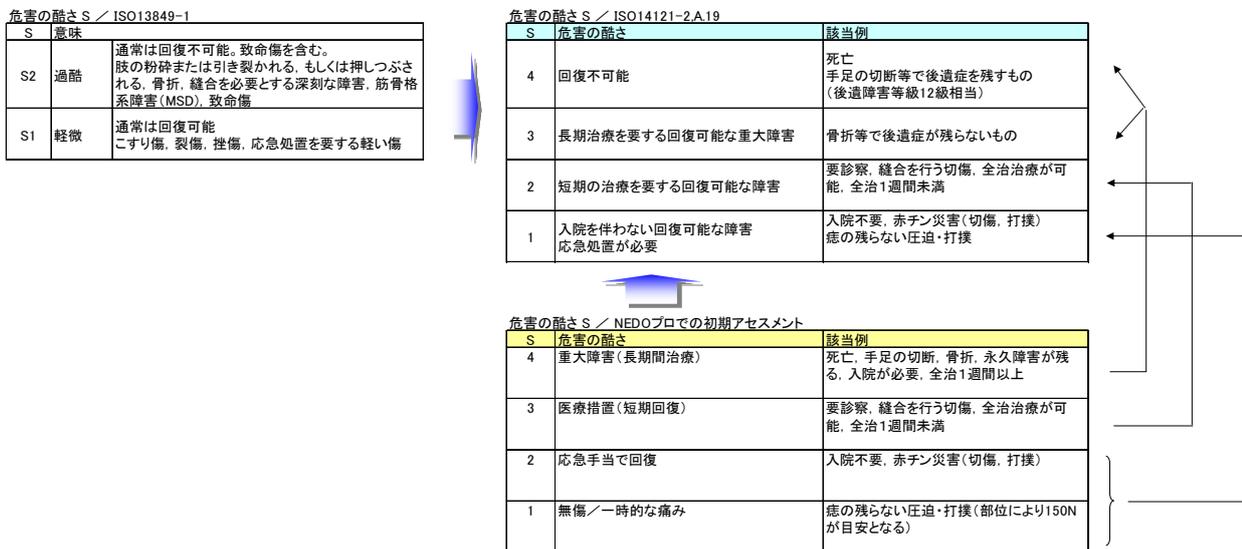


図 5.1.1-4 障害の酷さ S の見直し

フォーク型ロボットのベースモデルとなる無人搬送車の規格は国内では JIS D6802 があるが制定されてから相当期間が経過しており業界団体である一般社団法人日本産業車両協会では当該 JIS に対する追加防護策を策定している。リスクアセスメントとの関連を図 5.1.1-5 に示す。基本的な考え方は AGV と人が同一の通路を共有するか、あるいは分離しているが交差する場合を想定し、リスクアセスメントを実施する。完全に通路が分離されている環境、あるいは柵で囲われている環境は本質安全措置がとられている運用空間で、対人接触のリスクは少なく、人と混在する環境に包含されるためリスクアセスメント対象から除外する。また想定する環境は安全教育を受けた特定作業員の作業する場所で、不特定多数の一般来場者は想定しない。

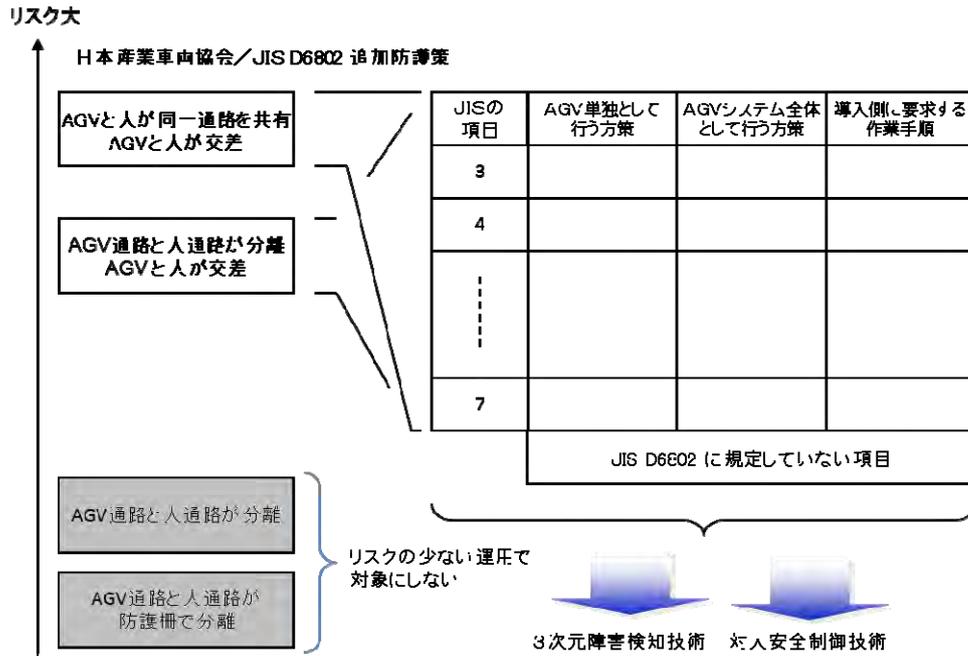


図 5.1.1-5 JIS 追加防護策との関連

使用上の制約事項として表 5.1.1-3 に示す条件を設定した。一般的な無人搬送車では上位 CPU からのオンラインの自動運転であるが、起動処理は人が操作する。またバッテリーは1日の作業終了後に有人操作で充電を行う。使用環境では物流センターのプラットフォームでの運用も考慮し屋内であるが路面の汚損と悪化は範囲に含める。また本来なら禁止されている運用上の誤使用も想定する。

表 5.1.1-3 使用上の制限

意図した使用	(1) フォークリフト型ロボットは初期設定された走行路に従って走行する。 (2) 人の通行するエリアとフォークリフト型ロボットの通行するエリアは分離されている。 (3) フォークリフト型ロボットは自律的に走行し、運転中に人と接近することはない。 (4) 運転時間は1日8時間とし、運転終了後は電源を自動で切って停止する。 (5) 充電は人がプラグを接続して行う。 (6) 充電中はPC, PLCなどの電源はOFFする。 (7) 起動は人がスイッチを入れ、操作パネルを操作する。
誤合理的に見てできる	(1) フォークリフト型ロボットの走行路に人が侵入する。 (2) 移載場所に人が侵入する。 (3) 充電のし忘れによる走行中のバッテリー切れ。 (4) 立ち上げ時の経路設定ミスによる意図しない動作。 (5) 立ち上げ、保守中の操作ミスによる衝突。 (6) ロボットに人が載った状態で操作、起動する。 (7) ゴミ、雨水の浸入などによる路面状態の悪化。 (8) パレット上に不安定な荷の置き方をする。

リスクパラメータの危険源に晒される頻度、危害の発生確率、障害の酷さについては表 5.1.1-4～表 5.1.1-6 に従う。

表 5.1.1-4 危険源に晒される頻度

危険源に晒される頻度 F

F	危険源に晒される頻度／継続時間	基準例
4	連続的／常時	動作中ほとんど晒される又は1の晒される時間が5分以上継続
3	動作中頻繁／長時間	1動作中に5回以上晒される又は1回の晒される時間が5分未満継続
2	動作中数回／短時間	1動作中に1回以上晒される又は1回の晒される時間が1分未満継続
1	まれ／瞬時的	晒される頻度が5回動作で1回以内又は1回の晒される時間が3秒未満

表 5.1.1-5 危険事象の発生確率

危険事象の発生確率 Ps

Ps	危険事象の発生確率	技術的要因の基準例	人的要因の基準例
4	高い(起こりやすい)	危険側故障率 10^{-4} 以上 類似ロボットや類似機械で事故があった 又はヒヤリハットが度々あった 安全関連部が非安全関連部から明確に分離していない	類似ロボットや類似機械でヒヤリハットが度々あった
3	あり得る	危険側故障 10^{-4} 未満 類似ロボットや類似機械でヒヤリハットの報告がある 安全関連部に非安全関連部要素が混じっている	類似ロボットや類似機械でヒヤリハットがある 連続運転時間が長い又は身体的・心理的ストレスを受けやすい作業である
2	可能性あり	危険側故障 10^{-5} 未満 安全関連部は非安全関連部から分離して、多くは関連安全規格に準拠している	非定常な作業や複雑な作業において、注意が行き渡らない又は散漫になりやすい
1	低い(まれ)	危険側故障 10^{-6} 未満 安全関連部は全て関連安全規格に準拠して構成している	日常ではミスはほとんど起こりにくい

表 5.1.1-6 障害の酷さ

危害の酷さ S / 見直し

S	危害の酷さ	該当例
4	回復不可能	死亡 手足の切断等で後遺症を残すもの (後遺障害等級12級相当)
3	長期治療を要する回復可能な重大障害	骨折等で後遺症が残らないもの
2	短期の治療を要する回復可能な障害	要診察, 縫合を行う切傷, 全治治療が可能, 全治1週間未満
1	入院を伴わない回復可能な障害 応急処置が必要	入院不要, 赤チン災害(切傷, 打撲) 痣の残らない圧迫・打撲

リスクの算出は積算法（一部加算法を適用）を適用し、次式により算出する。

算出式：リスク点数（R）＝危害の酷さ（S）×危害の発生確率（Ph）

算定したリスクに対する対策は下記の判定により、リスクの大きいものに対して対策を実施する。

判定基準：3 ≤ R ≤ 6 十分低い/無視できる（リスク低減は不要）

7 ≤ R ≤ 14 低い～中程度/条件付き受容/検討を要する（リスク低減を推奨）

15 ≤ R ≤ 44 高い/受容できない（リスク低減が必要）

表 5.1.1-7 判定マトリックス

		危害の発生確率 (Ph)								
		3	4	5	6	7	8	9	10	11
危害の酷さ(S)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	2	6	8	10	12	14	16	18	20	22
	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33
	4	12	16	20	24	28	32	36	40	44

危険源の同定は立ち上げ中、自動運転中、チョコ停復旧中、メンテ中の4つのフェーズで機械的危険源、電気的危険源、ソフトウェアエラー、材質から起こる危険源を中心に初期分析段階で126ケースを想定した。しかしながら、今回のフォーク型ロボットでは安全サポート系として後述する3次元位置認識装置を搭載することで、初期リスクの範囲が大幅に減少する。見直しの結果は53ケースが残り、その内50ケース（94%）が機械的危険源の作業者が「作業者がはねられる」に、1ケースが「作業者が押しつぶされる」として残った。こ

の中には通常の QA 活動、製品の保全活動で低減可能なリスクを含んでいる。表 5.1.1-8 に主として作業者に起因するリスクアセスメントの結果のうち、リスクの大きいものを示す。この中には作業者が原因になっていない製品の故障で重篤な結果を及ぼす項目も一部含まれる。本ロボットの誘導制御は 2 次元レーザー距離計を使用した電子地図とリアルタイムに計測した位置情報の照合により自己位置推定を行う誘導制御を採用しており、位置推定系の故障も重大な結果を招く。今回、開発する技術は、安全サポート系の 3 次元位置推定では床面よりも 200mm 以上の障害物を対象物が静止状態、移動状態に関わりなく検出する。また制御装置間の相互監視、自己監視も行う。安全系では通常の無人搬送車の安全対策の他に、胸部位置のバンパー、サイドバンパー、アウトリガー下への足の侵入検知に加え、非接触の安全センサーにより車体の全周囲を監視することでリスクを低減する。

表 5.1.1-8 リスクアセスメント (1/2)

初期リスク分析結果				リスク低減				再リスク見積				
段階	No.	危険源	リスク 点数 R	優先 順位	保護方策(メーカによる工学的手段)	危害の 酷さ S	危害の発生確率 Ph			リスク 点数 R	保護方策 組み合わせ 時のR	
							頻度 F	確率 Ps	回避 A			
自動 運転中	1	作業者がはねられる。 /機械的危険源	14	1	カーブでは速度を20m/minまで下げる。 2 後方のバンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもバンパをつける。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	2	作業者がはねられる。 /機械的危険源	14	1	定格速度を出すのは確実に人と分離できるエリアのみとする。人が接近する場合には速度を下げる。 2 後方のバンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもバンパをつける。 3 3D距離検出センサ 3個と障害物センサ 3個とし、十分な検出範囲が得られるようにした。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	3	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	路面の状況(油、水溜り)により操縦制御の追従性が悪くなった。操縦が効かず、コースから外れ、作業者に衝突する。	2	7	2	2	3	14	14
自動 運転中	4	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	異物を踏みつけた。操縦、ブレーキが効かず、コースから外れ、作業者に衝突する。	2	7	2	2	3	14	14
自動 運転中	5	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	経路管理系(SLAM)のセンサが汚れた。自己位置が検出できずコースから外れ、作業者に衝突する。	2	7	2	2	3	14	6
自動 運転中	6	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	経路管理系(SLAM)のセンサに、日光、他の装置のレーザなどの外乱光が入射した。自己位置が検出できずコースから外れ、作業者に衝突する。	3	6	2	1	3	18	5
自動 運転中	7	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	経路管理系(SLAM)のセンサにフタが研磨された板、他の装置のミラーなどの反射光が入射した。自己位置が検出できずコースから外れ、作業者に衝突する。	3	6	2	1	3	18	6
自動 運転中	8	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	障害物を踏みつけた。日光、他の装置のレーザなどの外乱光が入射した。作業者を検出できず衝突する。	3	6	2	1	3	18	6
自動 運転中	9	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	壁などがあり先が見えないカーブを曲がる。カーブの先にいる作業者に衝突する。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	10	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	1日1回、電源のON/OFFを行う。 2 車体制御系でプロセスが動いていることを監視し、プロセスが停止したら非常停止する。 3 3D距離検出センサにより検出して停止する。	3	6	2	1	3	18	6
自動 運転中	11	作業者がはねられる。 /機械的危険源	28	1	ロボットの通路に人が倒れている。ロボット通路内に人が倒れこんで近くにはロボットに横切られる。	2	7	2	2	3	14	6
自動 運転中	12	作業者がはねられる。 /機械的危険源	28	1	バンパスイッチの配置されていない場所が人に当たった。作業者を検出できず衝突する。	2	6	2	1	3	12	6
自動 運転中	13	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	運用上の都合で障害物センサを無効化しているエリアに入ってきた。作業者を検出できず衝突する。	2	7	2	2	3	14	8
自動 運転中	14	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	検出困難だが巻き込む位置に人がいる。カーブ近傍にいる作業者を巻き込む。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	15	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	検出対象が動いている。作業者の位置を正しく検出できず衝突する。	2	6	2	1	3	12	6
自動 運転中	16	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	障害物センサの死角に人が入った。作業者を検出できず衝突する。	3	6	2	1	3	18	6
自動 運転中	17	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	積みに行く荷の近くの人に人がいた。移動先にいる作業者に衝突する。	2	7	2	2	3	14	8
自動 運転中	18	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	積んでいる荷による死角に人が入る。移動先にいる作業者に衝突する。	3	6	2	1	3	18	8
自動 運転中	19	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	物陰から人が飛び出してきた。ロボットと人が衝突する。	2	7	2	2	3	14	12
自動 運転中	20	作業者がはねられる。 /機械的危険源	14	1	腕、脚など体の一部だけが走行範囲内に入っている。作業者の腕、脚などがロボットに巻き込まれる。	3	6	2	1	3	18	6
自動 運転中	21	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	DC-DCコンバータが故障した。(一部の機器は停電、一部の機器は正常)自己位置が検出できずコースから外れ、作業者に衝突する。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	22	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	PCが熱暴走した。作業者を検出できず衝突する。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	23	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	PCの温度監視プログラムで定期的に監視し、温度異常の際には停止する。 2 車体制御系でプロセスが動いていることを監視し、プロセスが停止したら非常停止する。 3 PCの温度監視プログラムで定期的に監視し、温度異常の際には停止する。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	25	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	コンタクトフラッシュが故障した。ロボットが起動時に暴走する。	3	6	2	1	3	18	5

表 5.1.1-8 リスクアセスメント (2/2)

初期リスク分析結果				リスク低減				再リスク見積				
段階	No.	危険源	リスク 点数 R	優先 順位	保護方策(メーカによる工学的手段)	危害の 脆さ S	危害の 発生確率 頻度 F	Ph 障害 Ps	回避 A	リスク 点数 R	保護方策 組み合わせ 時のR	
自動 運転中	26	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	プログラム起動時にタスク、プロセスの状態確認を行う。 OFの異常による影響を受けるのは、起動時の読み込みの時だけなので頻度は1日1回と考える。	3	6	2	1	3	18	5
自動 運転中	27	発火する。 /材質から起こる危険源	21	1	図面および実機から、ネジが緩みそうな箇所がないか確認する。 車体組立後に最終検証する。	1	7	2	2	3	7	
自動 運転中	28	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	車体制御系でプロセスが動いていることを監視しているため、通信が出来なければ非常停止する。 2 障害物検知系で障害物を検出して停止する。	1	7	2	2	3	7	6
自動 運転中	29	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	障害物検知系でプロセスが動いていることを監視しているため、通信が出来なければ非常停止する。 2 障害物センサで障害物を検出して停止する。	1	7	2	2	3	7	6
自動 運転中	30	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	経路管理系(SLAM)のセンサが断線した。自己位置が検出できずコースから外れ、作業者に衝突する。 2 障害物検知系で障害物を検出して停止する。	1	7	2	2	3	7	6
自動 運転中	31	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	ハンズスイッチが接触不良になった。作業者を検出できず衝突する。 2 動力線と信号線を分離した配線経路をとる。配線の余長を取らないなどノイズの乗りにくい配線を行う。 3 エンコーダの断線検知機能。指令値に対する偏差拡大時の停止機能などの有無を確認する。 4 後方のパンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもパンパをつける。	3	6	2	1	3	18	6
自動 運転中	32	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	操舵ドライバのアナログ指令値にノイズが乗った。誤った操舵角でカーブを曲がってコースから外れ、作業者に衝突する。 2 動力線と信号線を分離した配線経路をとる。配線の余長を取らないなどノイズの乗りにくい配線を行う。 3 エンコーダの断線検知機能。指令値に対する偏差拡大時の停止機能などの有無を確認する。 4 後方のパンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもパンパをつける。	3	6	2	1	3	18	6
自動 運転中	33	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	操舵ドライバのエンコーダ信号にノイズが乗った。誤った操舵角でカーブを曲がってコースから外れ、作業者に衝突する。 2 動力線と信号線を分離した配線経路をとる。配線の余長を取らないなどノイズの乗りにくい配線を行う。 3 エンコーダの断線検知機能。指令値に対する偏差拡大時の停止機能などの有無を確認する。 4 後方のパンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもパンパをつける。	3	6	2	1	3	18	6
自動 運転中	34	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	操舵時に走行のエンコーダケーブルが断線した。定格以上の速度で走行し、カーブを曲がりきれずコースから外れ、作業者に衝突する。 2 経路管理系(SLAM)で断線を検出して非常停止する。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	35	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	操舵時に走行の動力線が断線した。定格以上の速度で走行し、カーブを曲がりきれずコースから外れ、作業者に衝突する。 2 経路管理系(SLAM)で断線を検出して非常停止する。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	36	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	走行ドライバのアナログ指令値にノイズが乗った。定格以上の速度で走行し、カーブを曲がりきれずコースから外れ、作業者に衝突する。 2 動力線と信号線を分離した配線経路をとる。配線の余長を取らないなどノイズの乗りにくい配線を行う。 3 エンコーダの断線検知機能。指令値に対する偏差拡大時の停止機能などの有無を確認する。 4 後方のパンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもパンパをつける。	3	6	2	1	3	18	6
自動 運転中	37	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	走行ドライバのエンコーダ信号にノイズが乗った。定格以上の速度で走行し、カーブを曲がりきれずコースから外れ、作業者に衝突する。 2 動力線と信号線を分離した配線経路をとる。配線の余長を取らないなどノイズの乗りにくい配線を行う。 3 エンコーダの断線検知機能。指令値に対する偏差拡大時の停止機能などの有無を確認する。 4 後方のパンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもパンパをつける。	3	6	2	1	3	18	6
自動 運転中	38	作業者がはねられる。 /機械的危険源	14	1	電池切れにより停止した。急ブレーキがかかり、コースから外れ、作業者に衝突する。 2 車体制御系、経路管理系(SLAM)、障害物検知系でそれぞれ相互監視しており、いずれかが停止したとき非常停止する。	1	7	2	2	3	7	6
立上げ 中	40	作業者がはねられる。 /機械的危険源	18	1	経路設定の際に走行速度を誤って設定した。カーブを曲がりきれずコースから外れ、作業者に衝突する。 2 初期設定を間違えと無効化することを考慮し、安全な位置から動作を監視する。 3 障害物センサを完全に無効化する設定は出来ないようにする。 4 後方のパンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもパンパをつける。	3	6	1	2	3	12	6
立上げ 中	41	作業者がはねられる。 /機械的危険源	18	1	障害物センサが誤って無効化された。作業者を検出できず衝突する。 2 立ち上げ中は立上げ員以外の走行エリア内への立ち入りは禁止する。 3 初期設定を間違えと無効化することを考慮し、安全な位置から動作を監視する。 4 後方のパンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもパンパをつける。	3	6	1	2	3	12	6
チョコ 停復旧 中	47	作業者がはねられる。 /機械的危険源	18	1	人が通路内に侵入し、3D距離検出センサが反応して非常停止した。メンテ員が復旧作業を行ったが、自動運転再開後に作業員に向かって動き出し、衝突 2 3D距離検出センサで検知して停止する。	3	4	1	2	1	12	3
チョコ 停復旧 中	48	作業者がはねられる。 /機械的危険源	18	1	ハンド操作の際には低速で動作するので回避できる可能性がある。 2 接触スイッチ。障害物検出レバーが足を検出できる高さになっている。 3 手動操作の際には低速で動作するので回避できる可能性がある。	3	5	1	1	3	15	9
チョコ 停復旧 中	49	作業者がはねられる。 /機械的危険源	18	1	ハンド操作の際には低速で動作するので回避できる可能性がある。 2 接触スイッチ。障害物検出レバーが足を検出できる高さになっている。 3 手動操作の際には低速で動作するので回避できる可能性がある。	3	5	1	1	3	15	9
チョコ 停復旧 中	50	作業者がはねられる。 /機械的危険源	18	1	荷前したが、在荷検知がOFFせず、フォークを引き抜けなかった。手動操作で荷の位置を直そうとした際に足を踏まれる。 2 接触スイッチ。障害物検出レバーが足を検出できる高さになっている。 3 手動操作の際には低速で動作するので回避できる可能性がある。	3	5	1	1	3	15	9
チョコ 停復旧 中	51	作業者がはねられる。 /機械的危険源	18	1	路面の状況による振動で走行中に在荷検知がOFFになった。手動操作で荷の位置を直そうとした際に足を踏まれる。 2 接触スイッチ。障害物検出レバーが足を検出できる高さになっている。 3 手動操作の際には低速で動作するので回避できる可能性がある。	3	5	1	1	3	15	9
チョコ 停復旧 中	52	作業者がはねられる。 /機械的危険源	18	1	ハンド操作の際には低速で動作するので回避できる可能性がある。 2 接触スイッチ。障害物検出レバーが足を検出できる高さになっている。 3 手動操作の際には低速で動作するので回避できる可能性がある。	3	5	1	1	3	15	5
チョコ 停復旧 中	53	作業者が押しつぶされる。 /機械的危険源	18	1	前方には接触スイッチ、後方にはハンズスイッチを取り付ける。 2 前方にはタッチパネルから操作する。タッチパネルはフォークと逆側にあるため、覗き込む事はできない。 3 手動操作の際にも車体近傍を障害物センサで監視する。	1	5	1	1	3	5	---

ブレーキに関しては、操舵を兼用した動輪の1輪だけで制動するため、ブレーキは重要な部品であり、この部分だけに焦点をあてたりリスクアセスメントを実施した。結果は最も大きいリスクがバネの折損であった。しかしながらブレーキディスクを加圧するバネは複数存在し、毎日の始業点検、定期点検の間隔の中で発生する一本のバネの折損は致命的な結果には至らないため、対策は不要である。

表 5.1.1-9 ブレーキのリスクアセスメント

段階	No.	危険源	危険状態/危険事象	危険区域	対象者	危害の 酷さ S	危害の発生確率 Ph			リスク 点数 R	備考	
							頻度 F	確率 Ps	回避 A			
自動 運転中	1	作業者がはねられる。 機械的危険源	バネの一部が折損し、ブレーキトルクが低下する。非常停止の際に制動距離が延び、作業者と衝突する。	走行路付近 走行中	周辺の作 業者	1	5	1	1	3	5	バネが複数存在するので、 ブレーキトルクは低下する が衝突までに大幅に減速で きる。

リスクアセスメントは第1 コンソシアム/コンセプト検証 WG で審議いただいた。主な指摘内容を表 5.1.1-10 に示す。

表 5.1.1-10 リスクアセスメントの主な指摘事項

No.	コメント	対応
1	想定される利用条件が明確 (どこで、どういう状況で使用されるのか(屋内とか)、作業者は教育された人だけなのか等)	安全仕様書に追記
2	危険の程度が「軽度」と「重度」の2種類しかなく、それぞれが具体的にどれくらいのレベルなのかが不明。 また許容できるリスクがどれくらいなのかが不明。	当初、RAは機械工業会の指針で実施した。 NEDOプロのフォーマットで再実施。
3	リスク評価のために使用しているリスクグラフと、制御による要求 PL の算出のためのリスクグラフを混同。	
4	低速にすることで危険の程度が重度から軽度になっているが、押しつぶしによる危険の程度は変わらない。 ⇒変わるの、回避の可能性と危険事象の発生確立	速度を下げ運動エネルギーを下げ危険の程度を下げる。 ウレタンバンパのクッションで被害低減。
5	危険状態・危険事象に対応する方策に矛盾。	設計段階で潰す問題や、検討したが実際にはリスクではなかった事項も入っている
6	最高速で走行中に、機械ブレーキによる非常停止をかけた場合、その制動距離 4m 未満で飛び出された場合の安全性。	最高速度で走行するのは人と接触リスクの少ない限定した領域。検出できない所は安全柵や踏み切り等の地上設備で実施。(プロジェクト範囲外)
7	ソフトウェアが安全関連系に含まれている。これらの方策を実現するためには、「判断」を行っていると思われる PC の信頼性保証が必要。	3D障害物検知は通常制御系とする。 安全系の範囲、ソフトウェアの介在の有無を明確する
8	チョコ停の際の復旧が最も人身事故につながりやすい。 チョコ停の要因を洗い出す必要がある。	
9	ブレーキが故障した場合をリスクアセスメントの項目に含んでいない。ブレーキもバネやワイヤーの断裂などにより故障する可能性がある。	ブレーキだけに着目した RA を別途実施する。 。

最後に図 5.1.1-6 にリスクアセスメントでフォーカスしている生活支援ロボットと機械工業会のガイドラインの主要な相違点を示す。障害の酷さの細分化と危険に晒される頻度が細分化され重症に至る前の軽症段階のリスクまでをフォーカスしていることが読み取れる。

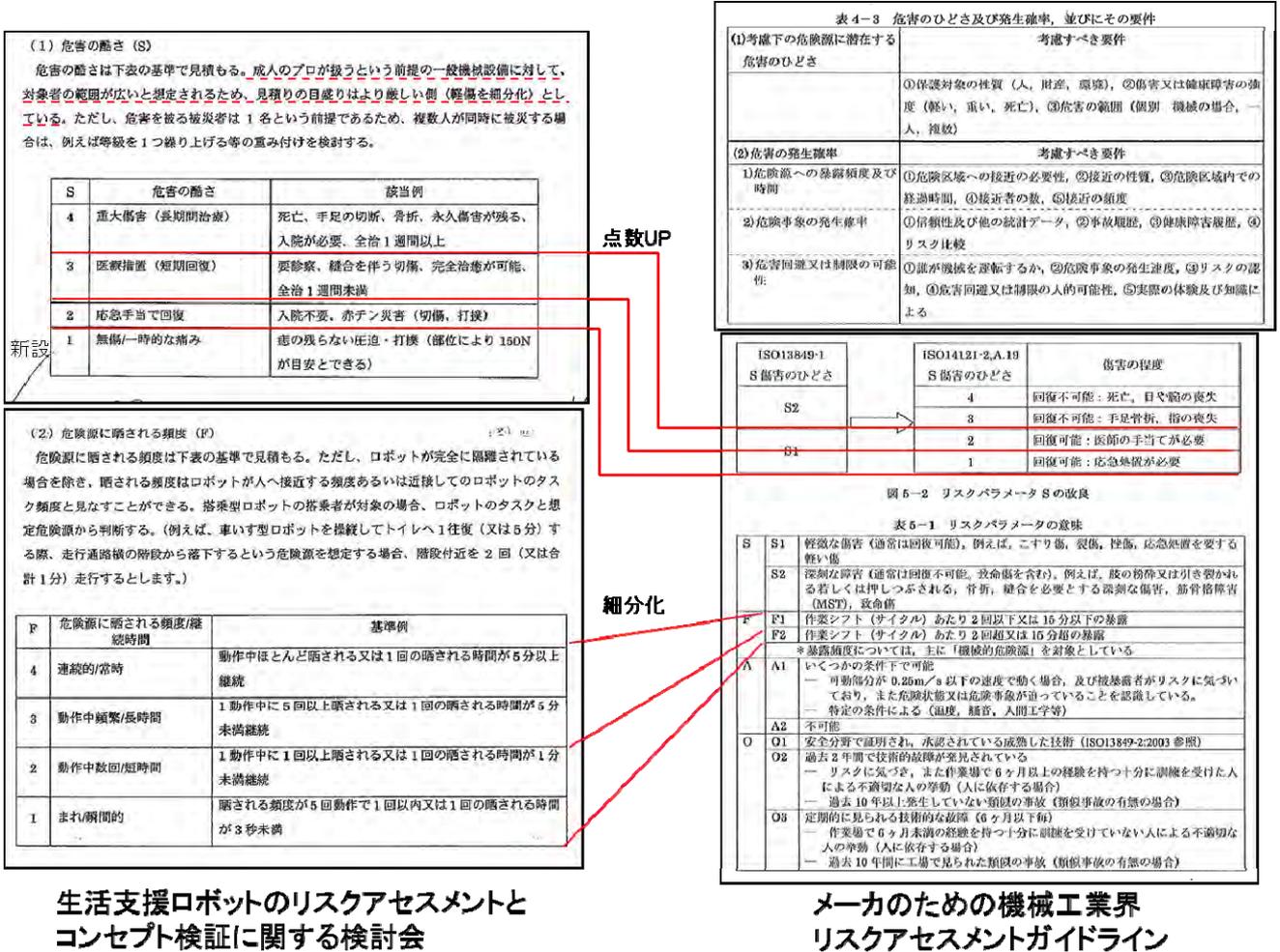


図 5.1.1-6 リスクアセスメントガイドラインの相違点

5.2 本体設計

5.2.1 設計コンセプト

(1) コンセプト

フォーク型ロボットのベースモデルは T11 パレット搬送を行う有人運転リーチ形フォークリフトを自動化したもので、走行モーター、走行モーター駆動インバータ、フォークを駆動する油圧ポンプ、バッテリーは有人運転のフォークリフトからの転用している。自動化する際に 2次元レーザー距離計を使用した自己位置推定の制御装置、電動ブレーキ、その他の安全装置を装備し自動化した無人搬送車である。

ベースとなった無人搬送車は 2次元レーザー距離系で周囲の構造物との距離測定結果と電子地図の照合により自己位置を推定する、いわゆる SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)技術を使用している。SLAM 技術で障害物を認識することも一般的には行われているが、フォークリフトで荷物の搬送を行った場合、搬送した荷物の移動により地図データが更新され、これが 20~30 台の多大数運用になった場合に、他の搬送車が搬送した結果による周囲状況の変化が大きく地図照合の信頼性が低下するため、自己位置推定の 2次元距離計は歩行者と荷物よりも高い位置に設置する。このため自己位置推定の計測データを対人の障害物回避には使えない。

リスクアセスメントの結果、本体に装備する安全装置を決定した。通常の後進走行動作に対しては 3次元位置認識による障害物の検知で対応する。無人搬送車の車体の上面に設置するため、同装置では図 5.2.1-1 に示すように車体の陰になる死角が存在する。また 3次元位置認識の制御系に工業用 PC コントローラを使用する関係で安全系よりも信頼度の低い安全サポートとする。このため 3次元位置認識の死角での安全の担保のため IEC61508 の安全規格で規定した SIL(Safety Integrity Level) 認証を受けた障害物センサーと併用する。3次元位置認識では空間を面として障害物を検知し、安全系の障害物センサーでは空間の特定高さにおける障害物を線として検出する。

バンパーやサイドバンパーは通常でも装備する。これらの装備する安全装置を、装置の配置や数量追加、形状変更で対応する。

表 5.2.1-1 実施マトリックス

区分		項目	1	2	3	4	5	6	7	8	実現手段	制御系の区分	
車体装備	非常停止ボタン	後面							△		非常停止押しボタン	通常制御系	
		側面							△		車体後面×2ヶ所、車体側面×2ヶ所		
	接触スイッチ		前面下部(アウトリガー先端)	△								バンパースイッチ	通常制御系
			前面下部(アウトリガー下部)	○								排障機能+接触検知スイッチ	
			後面上部	○							△	ウレタンバンパ+テープスイッチ	
			後面下部	○							△		
			側面上部	○							△	テープスイッチ	
			側面下部	○							△		
	障害物センサ		前方			○	○				○	セーフティレーザスキャナ	安全系
			後方			○	○				○	前方：SICK S300 mini Remote x2	
			側方			○	○				○	後方：SICK S3000 x1	
	SLAM		前方								△	レーザ距離計 + データ処理	通常制御系
			後方			○					△	走行路近傍の地図にない障害物検知	
			側方			△					△		
	3D距離検出		前方			○					○	レーザ距離計 北陽 UTM-30LX	安全サポート系
後方					○					○	+ 3D揺動機構 + データ処理		
側方					○					○			
警告音		警告音								△	メロデー	通常制御系	
		動作の音声ガイダンス								△	音声合成		
		動作モードの表示									△		バトライト
		動作方向の表示									△		ウインカ(表示灯)
地上設備	安全策の開検知	歩行者横断部						△			柵の開検知+無線	安全サポート系	
	安全策のロック	歩行者横断部						△			柵区間の閉塞区間通過中の電磁ロック		
通常制御系の処理	SLAM	脱線検知								△		通常制御系	
	CPU間通信	周期データ更新								△			
	ウオッチドックタイマ	リンケージ異常								△			
		タイムアウト								△			

【凡例】

○	本PJで実施する事項
△	製品として機能は既に存在する。本PJでの追加の安全策は実施しない事項

また制御に複数の制御装置を使用するために、制御装置の自己診断と相互の生存確認も行うことで通常制御系の制御装置は単体としては検知できない危険側故障を複数のいずれかで検知し装置停止させる。

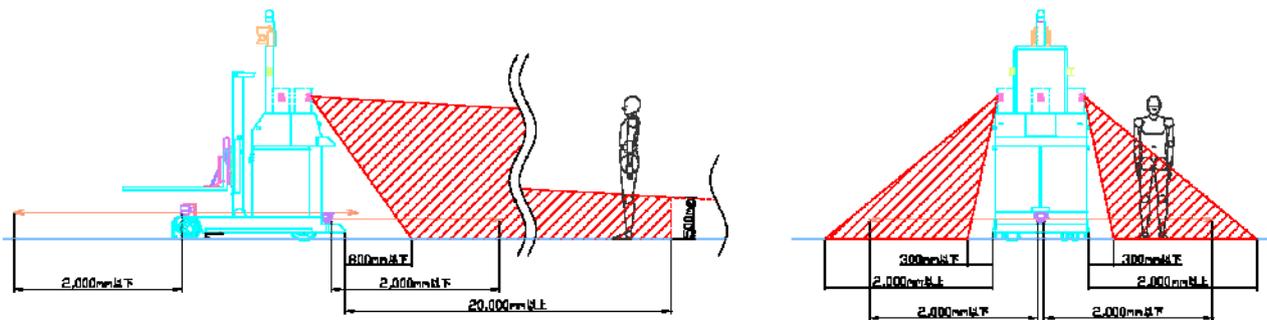


図 5.2.1-1 3次元位置認識装置の走査範囲

床面に倒れている人の検出に関しては、4.2 節にも示した規格で求めている検出の床上高は 200mm よりも上方にある障害物の検出が求められる。日本建築学会標準仕様書(JASS5)によれば、コンクリートの精度は 3m につき 7mm 以下の凹凸とする。この凹凸とセンサーの精度を考慮すると、20m 先では±57mm の高さの検出誤差が発生しうる。このため、固定の角度範囲で閾値を設ける床レベルと障害物の判別では地面から 120mm 以下の高さにあるものは床と区別できない。また無人搬送車はスロープになった床面での運用も想定される。一方、人間の頭幅は 160mm 程度であるので、20m 先の倒れている人を検出するためには、3次元位置認識の床面認識は距離データの連続性に着目し、水平の床だけでなく、傾斜のついたスロープでも判別するアルゴリズムで床レベルを同定し、床レベルからの偏差で障害物を判別する。天井に関しても同様に車体よりも上側は天井として排除する。

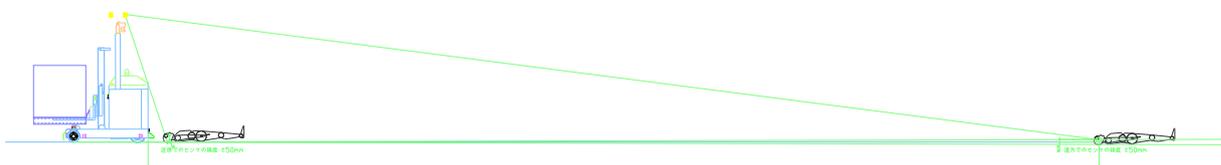


図 5.2.1-2 床上物体の認識

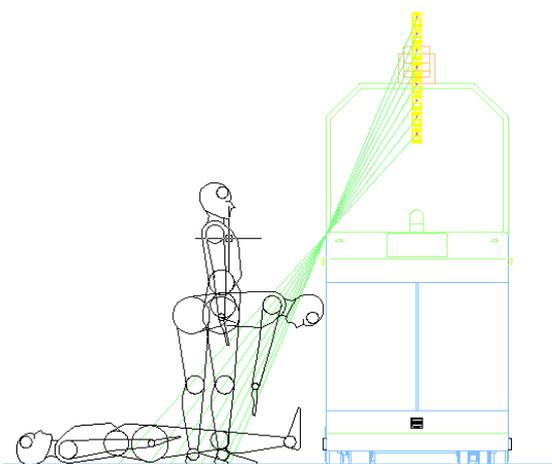


図 5.2.1-3 3D 位置検出センサーが 1 個の場合の検知範囲

図 5.2.1-1 は 3D 位置検出センサーを 3 個使用した場合の検出範囲を示している。中央に 1 つだけ配置した場合には図 5.2.1-3 に示すように車体側面の不感領域は大きくなり、取り付け高さに不感領域の大きさが依存する。この場合は側面検出よりも車体後方の進行方向の検出を専ら行うことになる。

3次元位置認識装置のデータの扱いは、3次元位置認識装置では静止物体、移動物体に関係なく、距離データの集合体として検出し、それが人であるか、物であるかは区別がつかない。一方、自己位置推定の誘導制御では地図情報を持っており、誘導制御側では地図上に登録された物体かどうかは、3次元位置認識のデータと、誘導制御の車体の方向を考慮した地図データの矩形領域を選択し、選択された領域と3次元位置認識データを2次元に高さ方向で圧縮したデータとを照合することで、地図上に登録されたものかを判別することができる。地図に登録されたものと見なされれば障害物として扱わない。地図に無いものであれば障害物と見なし減速なり停止の処理を行う。この照合の処理は3次元位置認識装置ではなく、車体の誘導制御の側で行う。3次元位置認識装置が完全な独立装置として対人安全の処理を行うのではなく、通常の制御系とのソフトウェア上の制御連携が必要なことも、これが安全サポート系となる一因である。3次元位置認識のデータの関連性を図5.2.1-4に示す。

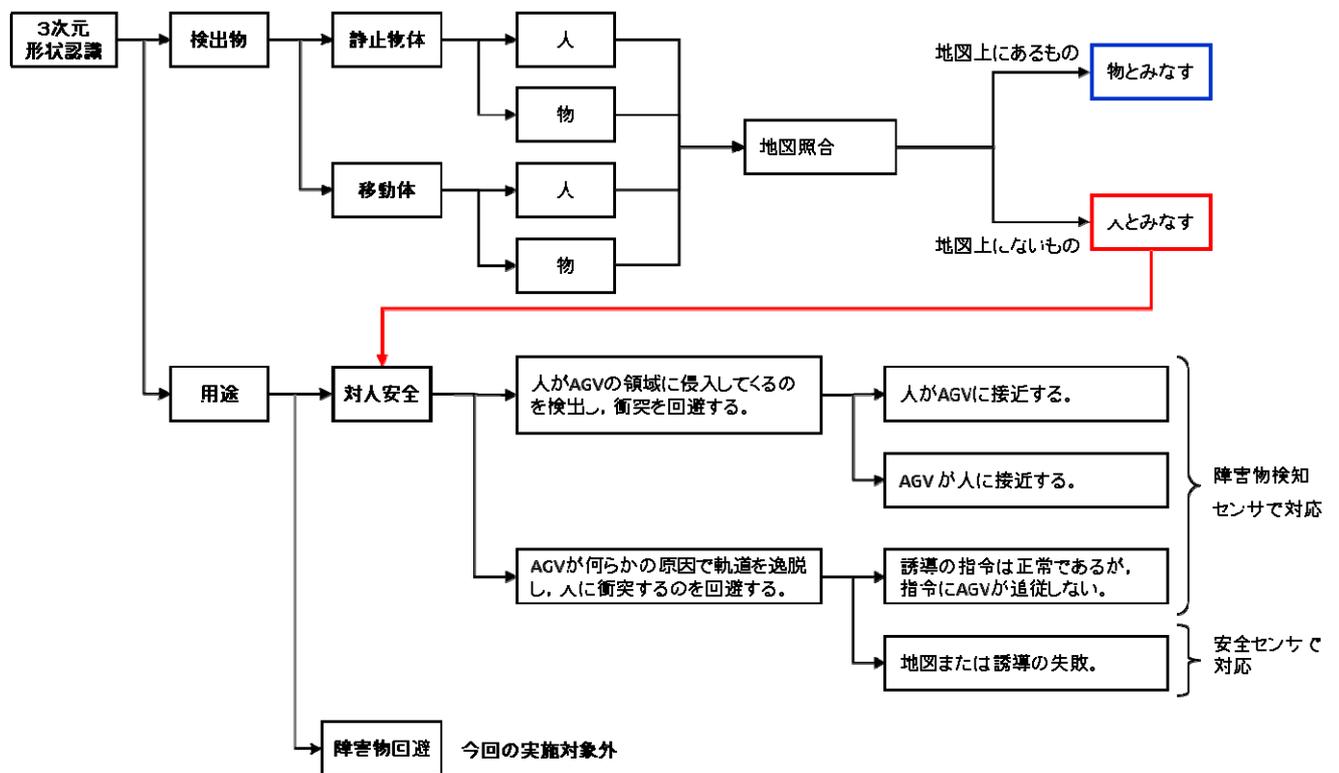


図 5.2.1-4 3次元位置認識装置のデータ

(2) 安全設計の原則

走行中、移載中の安全設計についての原則を表 5.2.1-2、表 5.2.1-3 に示す。この設計原則に従い開発を行った。

表 5.2.1-2 走行中の対人安全

状況	状況に対する安全策
(1)後進走行中の後方に対する障害物検知と減速・停止	後進走行中は車体の後面の車体投影面積内に障害物を検出した場合、障害物を回避できる距離で減速し、障害物と衝突することが予想される場合は、その手前で停止する。減速を始める障害物との距離は走行モーターで減速する減速度と走行速度に依存する。
(2)後進走行中の後方に対する障害検知と非常停止	後進走行中は、車体の後面の車体投影面積内に障害検知した場合は、障害物を回避できる距離で減速する。既に衝突回避のための減速を開始する距離の余裕がない距離で障害物を検出した場合には、障害物を検出した時点で機械ブレーキにより非常停止をする。
(3)後進走行中の車体側面に対する障害検知と減速・停止	(a) 車体の後方での軌道側面 後方走行中の車体投影面積よりも広い範囲で障害物の検知を行い、自己位置推定の地図に登録されていない物体が走行軌道の近傍に検出した場合は車体後面の障害物検知と同様に、衝突を回避できる距離で減速し、その手前で停止する。 (b) 旋回中の車体側面 最小旋回半径、あるいは最小旋回半径の近傍で低速で旋回中に車体側面近傍で障害を検出した場合は減速停止する。車体近傍の走行軌道近辺で、旋回中に軌道に立ち入っている人を巻き込むことを想定し、減速停止する。
(4)前進走行中の前方に対する障害検知と減速・停止	前進走行中は車体前面の車体投影面積内に障害物を検出した場合、障害物を回避できる距離で減速し、障害物と衝突することが予想される場合は、その手前で停止する。減速を始める障害物との距離は走行モーターで減速する減速度と走行速度に依存する。 前進は車体姿勢の制御安定性が後進方向よりも劣り、3D 位置認識による障害検知の範囲も限定されるため、減速度による減速距離以外に、センサー類の検出できる範囲で減速距離が決ることがある
(5)前進走行中の車体側面での障害検知と減速・停止	最小旋回半径、あるいは最小旋回半径の近傍で低速で旋回中に車体側面近傍で障害を検出した場合は減速停止する。車体近傍の走行軌道近辺で、旋回中に軌道に立ち入っている人を巻き込むことを想定し、減速停止する。

表 5.2.1-3 移載中の対人安全

状況	状況に対する安全策
(1)車体前面	<p>移載中は車体の車体前部で障害物を検出した場合、移載シーケンスを中断し、障害要因が排除された前に移載シーケンスを再開する。</p> <p>車体前面は移載シーケンスの途中でフォークや積載物の陰になるシーケンスが存在する。センサーの視界が陰らないシーケンスだけセンサーによる監視を有効にする。</p>
(2)車体側面	<p>移載中は車体側面で障害物を検出した場合、移載シーケンスを中断し、障害要因が排除された後に移載シーケンスを再開する。</p> <p>車体側面は車体側面に設けた距離センサーと3D 位置認識センサーを併用しても死角をなくすることに限界がある。検出可能な範囲で行う。</p>

走行中、移載中の両方で3D位置認識センサーを使用するためには複数個の設置が必須となり、安全系と安全サポート系の分担範囲を見直し、安全系で行う範囲を拡大し、安全サポート系は専ら進行方向での監視を行うこととした。

5.2.2 機構シミュレーション

本プロジェクトのフォーク型ロボットは運搬能力の向上策として、従来の製品で実用化している走行速度 80m/分を 180m/分まで従来比 2.3 倍と大幅に速度を上げている。フォーク型ロボットの設計検討として誘導制御の位置制御系が安定動作するかの事前評価を実施した。シミュレーションは MATLAB で行う。

AGV モデルは重心周りの遠心力と舵の操舵による操舵輪と従動輪の操舵角に対する滑り角で発生するコーナリングフォースの釣合い、走行の慣性力、モーメントバランスの運動方程式でモデリングする²⁾。自己位置推定の自車の位置と誘導の仮想目標点を設定し、応答を評価する。

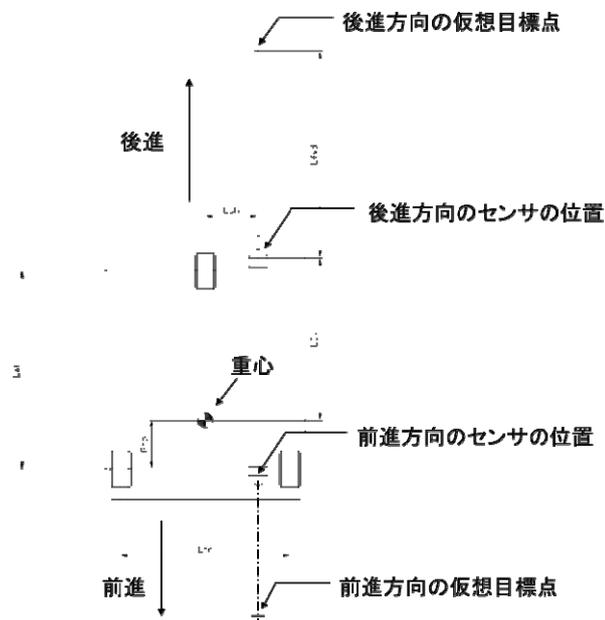


図 5.2.2-1 制御モデル

図 5.2.2-2 にシミュレーションモデルのモデルを示す。このモデルは本プロジェクトのフォーク型ロボットに限定せず、他の無人搬送車製品でも使用しているモデルを流用し、自己位置推定による操舵評価を追加している。

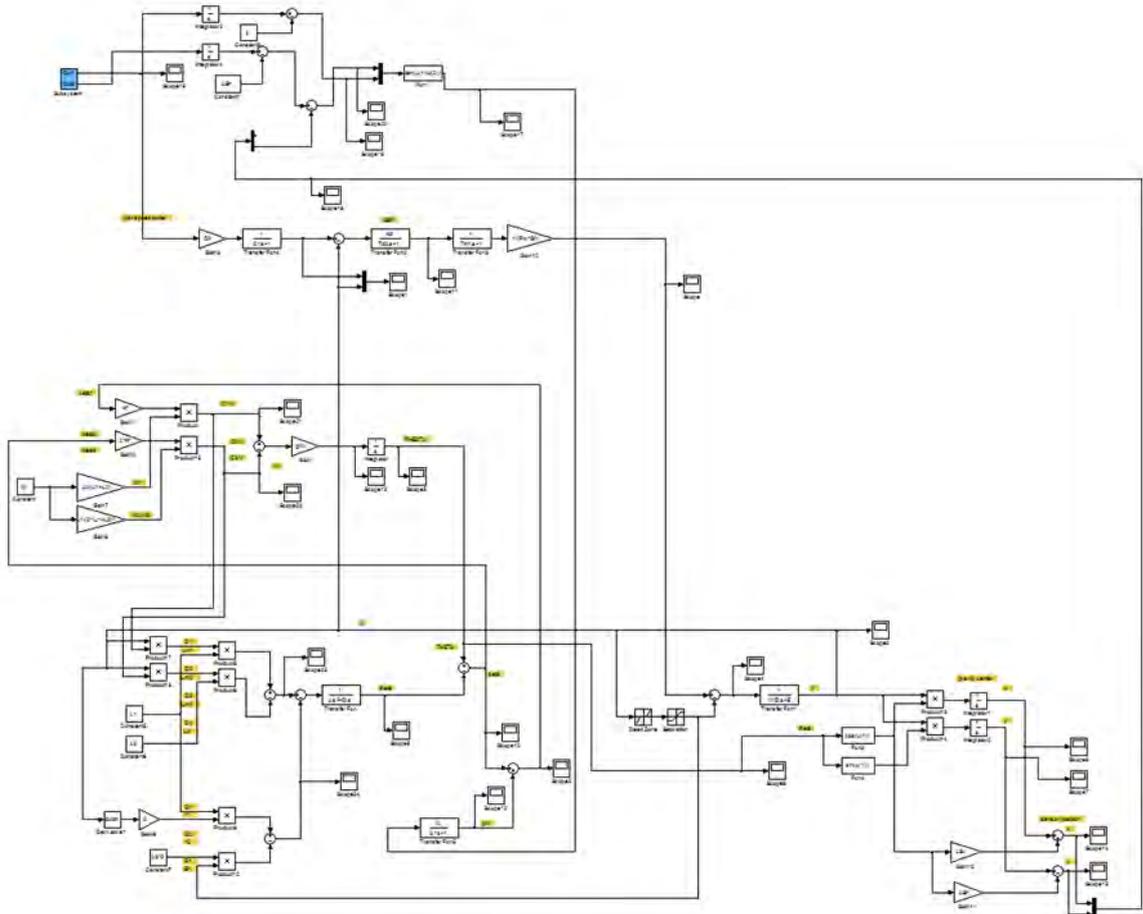


図 5.2.2-2 シミュレーションモデル

図 5.2.2-3 に評価項目を示す。評価としては操舵の指令が変化したときの収束時間と位置のオーバーシュートで評価する。

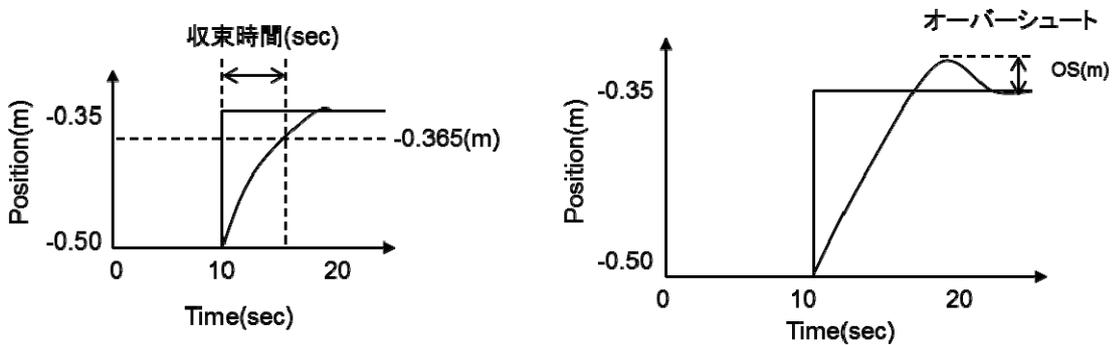


図 5.2.2-3 評価項目

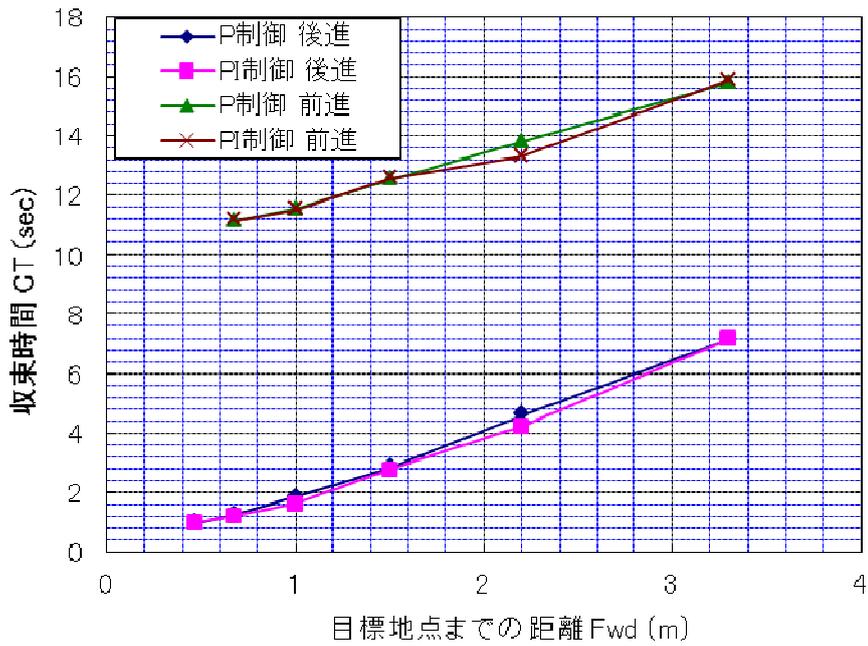


図 5.2.2-4 制御の収束

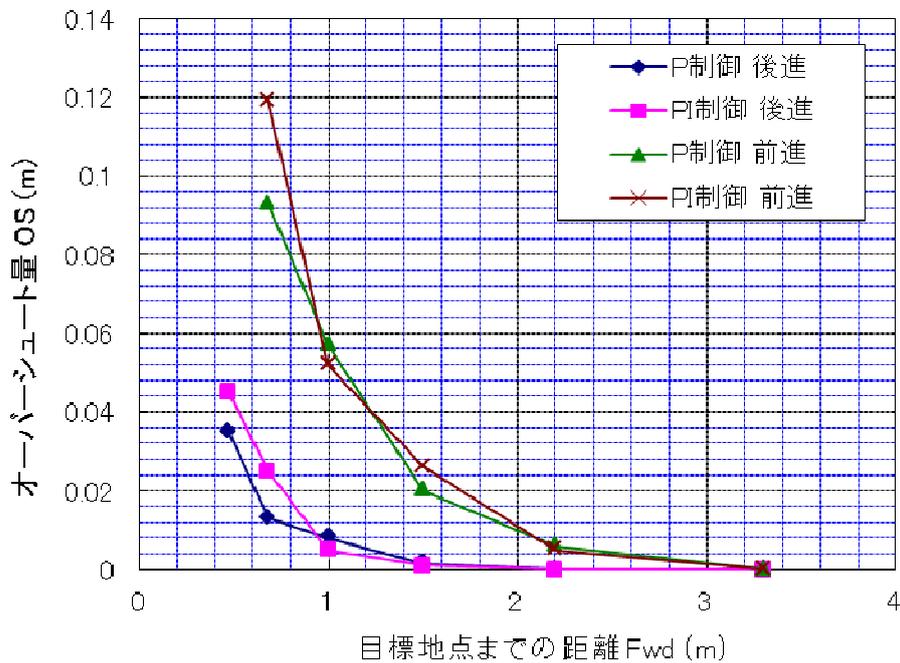


図 5.2.2-5 オーバーシュート

走行の軌道の指令値に外乱となるステップ状の指令変化を与えたときの位置制御系の応答は、車体の進行方向と直交する方向の位置の収束で評価する。結果は図 5.2.2-4、5.2.2-5 に示す。従来製品化している機種に比較し、後進では約 1 m 目標点を車体よりも遠方に移動し

、制御ゲインを調整することで高速走行でも制御が安定する。前進方向では反進行方向の操舵のため制御は非対称となり、同一速度に対し安定性が大幅に低下する。制御の安定する条件は従来よりも範囲が狭くなり、調整時に適切な制御パラメータを設定していない、制御が発散し事故を起こすリスクが高くなる。前進方向（移載するときの方向）では低速走行しか行わないため問題にはならない。収束時間は目標位置を遠方にずらすことで収束時間がながくなるが、これは目標点までの移動時間を含むため、移動時間を相殺した収束時間はほぼ一定になり運用上の問題は生じない。

非量産の産業機器の生産では、調整ミスによる事故リスクを低減するために、低速運転で調整し、不安定な現象が発生した場合、早期にそれを見つけ出し対策することが調整段階で重要になる。またこれらのシミュレーションによる特性推定と試作評価での試験データは試験調整員に対する教育データとして整備することが高速化には必須となる。

この結果は従来から知られていた経験則とも一致する。またこのシミュレーションは前進と後進の制御特性の差を示しているが、本来、高速搬送を行うためには高速走行は欠かせない要素であるが、制御が安定している後進方向で目的位置まで走行し、切返しの方向転換を行った後に前進方向で積み下ろし作業を行うのは、搬送能力としては非常に無駄が多い。目指すべき姿としては、荷を持ったフォークのある前進方向で高速にかつ安全に走行できるのが目指すべきフォークリフトの姿となる。

本シミュレーションは走行制御の安定性についてであるが、実際の運用においては車体や荷の振動も重要な要素で、これは床面の平坦度や状態に大きく依存する。これについてはシミュレーションではなく実機で確認し、シミュレーションは行わない。

5.2.3 運用シミュレーション

運用シミュレーションはフォーク型ロボットを安全性向上のため、AGV と歩行者がすれ違うときに歩行者が危険を感じない程度の速度まで減速することで、搬送能力にどの程度影響するかをシミュレーションで検証する。無人搬送車の走行速度を大幅に速度アップしても衝突回避のために最高速度で走ることができず、最高速度と平均速度の乖離が大きくなったシステムでは最高速度を上げるメリットが活かせないために事前検証を行う。シミュレーションソフトは AutoMod (Applied Materials 社) を使用した。AutoMod は工場の搬送システムや配送センターなどの物流システムをモデリングし、動作状況などの定量評価を行う 3D 物流シミュレーションソフトウェアで、物流機器メーカーで広く使われている。

軌道を走行する AGV と AGV の軌道と並行する通路を歩行、あるいは AGV 通路を横断する箇所を複数箇所設け、歩行者の有無での搬送能力を比較する。搬送能力シミュレーションはレイアウトとジョブの発生頻度に依存する案件対応のシミュレーションで一般化は困難であるが、傾向を把握する一助になる。AGV の走行経路 136m に対し、歩行者の通行する経路を 36m (AGV 走行路の 22%)、横断箇所を 5 箇所として計算した。減速は、従来より安全

といわれている歩行者と同程度の 60m/分まで減速する。交差点では人がいる場合には停止し、歩行者の横断後に AGV は走行を再開する。歩行者と AGV の優先順位は対等とし、先に交差点に進出した方が優先する。

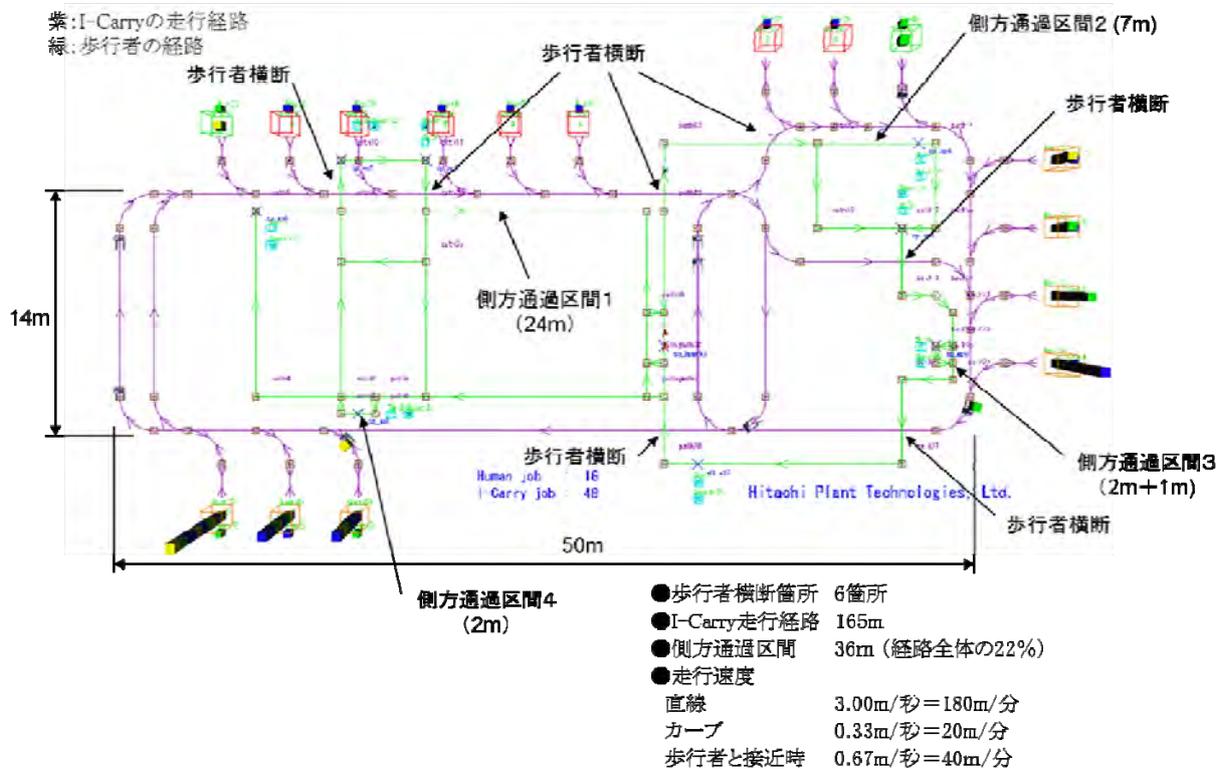


図 5.2.3-1 運用シミュレーションに使用した物流センターモデル

8 台の AGV 運行では各 AGV の特性値の平均値で比較すると、歩行者接近時の減速制御をすることで迎車時間、搬送時間が若干増加する。AGV の平均速度は 1.1% 低下する。マクロ的な搬送能力は AGV の速度にほぼ比例するので、速度から類推すると能力の低下は 1% 程度で大勢には影響ない。元々、5 分に 1 回しか歩行者との接近が発生しないシステムでは、安全のために歩行者の横を通過するときには走行速度を一時的に下げる処理をいれても、能力の低下は僅かである。本モデルでの安定時間は 1 時間程度である。表 5.2.3-1 に 5 時間運転の運用シミュレーションの結果のサマリーを示す。

表 5.2.3-1 運用シミュレーション結果

差異			歩行者減速 あり	歩行者減速 なし	差	備考
Delivering	percent total time	%	26.2	25.9	0.3	微増
	number of trips made	times	37.3	37.3	0.0	
	average time per trip	s	126.4	125.0	1.4	
Retrieving	percent total time	%	25.3	24.7	0.6	微増
	number of trips made	times	37.6	37.6	0.0	
	average time per trip	s	108.5	118.2	-9.7	
Going to Park	percent total time	%	29.2	29.6	-0.4	微減
	number of trips made	times	38.0	38.0	0.0	
	average time per trip	s	126.3	140.4	-14.1	
Parking	percent total time	%	19.3	19.8	-0.5	微減
Motion	Total time	s	18000.0	18000.0	0.0	
	percent time in motion	%	55.7	55.2	0.5	
	total distance traveled	m	5229.0	5241.1	-12.1	
	Average velocity in motion	m/s	0.521	0.527	-0.006	1.1%

評価指標として、荷を搬送している Delivering、荷を積むために荷のあるステーションに走行する Retrieve、ジョブの割り当てがなく停車している Parking の時間比率、回数、平均の移動時間を示し、歩行者近傍での減速の有無を比較した。

5.3 安全サポート系の設計

5.3.1 安全サポート系の機能の概要

(1) 安全サポート系と安全系のセンサー

フォーク型物流支援ロボットが自動で走行するために、安全に関するセンサーとして安全サポート系センサーと安全系のセンサーを利用した。安全サポート系のセンサーは、フォーク型物流支援ロボットが効率良く走行するように、通路上の遠くにある障害物を発見して、経路を変更、あるいは速度を減速されるように利用する。これに対して、安全系のセンサーは、フォーク型物流支援ロボットが障害物に接触する前に非常停止させる非接触の検出デバイスとして使用する。

安全サポート系センサーと安全系のセンサーは両方の機能を合わせて、自動走行する物流支援ロボットの効率を向上させる走行を実現するようにするものである。この章では、そのうちの安全サポート系センサーの設計について述べる。

安全サポート系センサーと安全系センサーの両方の機能により自動走行は効率化されるが、センサーのコスト低減のため、また、走行の効率を向上するため、センサー単体のコストの低減とセンサーの応答の高速化が求められる。本開発においてもセンサー単体のコスト低減と応答の高速化を課題として開発を進めた。

(2) 安全サポート系センサーの機能

フォーク型物流支援ロボットに使用する安全サポート系のセンサーとして、3次元障害物検出装置を開発した。3次元障害物検出装置はフォーク型ロボットに取り付け、走行通路上およびその近傍に3次元的に障害物を検出し、フォーク型ロボットの走行をサポートする。従来より市販されているレーザースキャナは、レーザ光をスキャンするスキャン面（距離を測定する測定面）が2次元の平面に限定されているため、レーザースキャナ単体をフォーク型物流ロボットに取付けて使用する場合には、床面から一定の高さの平面内だけの障害物検出装置として使用する。一方、本プロジェクトで開発した3次元障害物検出装置は、フォーク型ロボットの通路を3次元的に測定し、その3次元内に存在する障害物を検出する。3次元センサーを利用すると、通路内に手だけをだした場合のような2次元だけの障害物検出では不十分な検出も可能になる。このため、人と自動走行装置が共存するような様々なパターンで障害物が置かれる、または、通路上に移動するような環境の生活支援を実践する場で安全サポート系のセンサーとして、使用することが可能になる。

5.3.2 自動走行に利用するセンサーの比較

(1) レーザーセンサーと画像処理センサーの比較

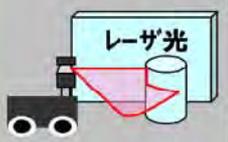
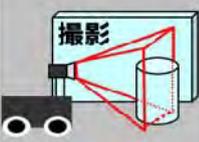
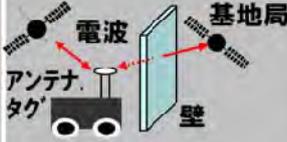
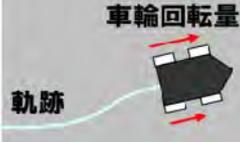
レーザーセンサーと画像処理センサー、および他の方式のセンサーを比較し表 5-3-1 にまとめた。自動走行システムでは、その性能とコストからレーザー距離センサーを使う方式

とカメラを利用する画像センサーが主要な方式である。それ以外に、自動走行するルートを判別する方式として、電波やロボット本体の動きを利用するものがある。しかしながら、電波やロボット本体の動きを利用するものは、大学等の研究機関では研究が継続されているが、生活の場や物流のような様々な動作が存在する中では、実用化には遠い。

表 5.3.2-1 ではレーザーセンサーとカメラを比較している。レーザーセンサーは、数 10m の距離測定のレンジを持ち、その距離の中で数 cm の位置精度を達成することが可能である。カメラの場合は、位置精度は 10 数 cm 程度に限られ、また立体視する原理から、遠くになればあるほど、位置精度が劣化する。また、走行路上の照明が変化すると、位置の測定が困難になる場合が多い。

一方、レーザーセンサーは、位置精度が高く、照明の変化に強いという利点がある。ただし、現状ではレーザーセンサーのコストが高いという課題がある。今後の技術改良や、レーザーセンサー単体のコストを低減するだけでなく、レーザーセンサーを利用したシステム全体の運用コストを低減するなどして、レーザーセンサーを利用したシステムのコスト低減を図ることが重要である。

表 5.3.2-1 レーザーセンサーと各種センサーの比較

	光の利用		電波の利用	動きの利用
	レーザ距離センサ	カメラ	GPS*1), UWB*2) など	ジャイロ, 加速度, 車輪
代表例				
方法	地図比較など		三角測量	動き量の時間積分
位置精度	◎ (数cm)	○ (十数cm)	△ (数十cm~数十m)	× (数十cm@100m)
検出安定性	○	△ (照明変化)	× (電波の遮蔽)	○
コスト	△	○	△	○

(2) 自動走行用3次元センサー

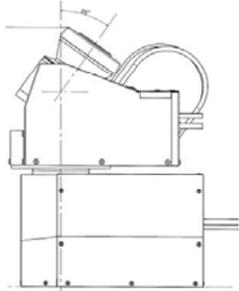
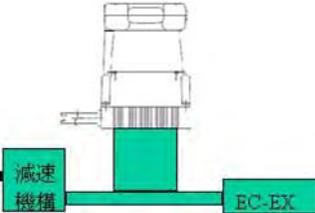
これまで、大学などのアカデミックな分野や市場の製品において発表されているレーザー スキャナ（レーザーセンサーのこと。この後は、本開発で使用するレーザーセンサーの スキャンの方式から、レーザー スキャナという言葉を用いる。）を使用した 3 次元センサーの仕様を比較する。

表 5.3.2-2 に 3 種類の 3 次元センサーを比較した。自動走行用のロボットに使用するために、センサーに要求される仕様には、小型、軽量で、バッテリーで動作することにより、移

動体で使用することが可能であること、また、高速で障害物を検出することにより、高速でロボットが走行可能とすること、さらに、3次元の計測の精度が高いことが挙げられる。

現状では、自動走行用のロボットに搭載して動作可能で、高速に3次元の計測が可能なタイプは2リンク揺動方式と1リンク揺動方式である。測量用に使用されている3次元のレーザーセンサーは、長距離の3次元測定が可能で精度も高い。しかし、表 5-3-2 に示す測量用の3次元センサーは、1回の3次元スキャンを完了するのに1,700秒という長時間がかかるとともに、移動体への取り付けする場合には、測定精度が保障されない。このため、本開発では、2リンク揺動式、および1リンク揺動式のセンサーを開発して、フォーク型物流支援ロボットに搭載することとした。

表 5.3.2-2 3次元センサーの仕様比較

No.	項目	方式		
		2リンク揺動機構	1リンク揺動機構	測量用3次元センサ
1	センサ方式	2リンク揺動機構	1リンク揺動機構	測量用3次元センサ
2	外観			
3	製作元・提供元	日立産機システム	日立産機システム	リーグルジャパン
4	寸法	H363mm × W285mm × D239mm	H263mm × W102mm × D250mm	H308+アンテナ長mm × W200mm × D200mm
5	用途	走行ロボット用3次元センサ	走行ロボット用3次元センサ	測量用3次元センサ
6	測定範囲	H2.0m × W1.2m × D20m	H2.0m × W1.2m × D20m	測定長: 1200m (100kHz測定時) 水平レンジ: 360° 垂直レンジ: 100°
7	測定精度	100mm	100mm	8mm
8	測定周期 (水平スキャン)	14400° /sec	14400° /sec	最大60° /SEC
9	測定周期 (3次元)	500msec/測定	200msec/測定	1700秒/測定
10	移動体への 取り付け	精度: 移動体で確保 電源: バッテリ	精度: 移動体で確保 電源: バッテリ	精度: 床面固定が必要 電源: バッテリ可能

5.3.3 安全サポート系センサーの開発目標仕様

(1) 安全サポート系センサーの利用方法

安全サポート系センサーは、自動で走行するフォーク型物流支援ロボットに搭載され、走行通路の障害物を検出して、自動走行に必要なデータをロボットの制御装置に提供する。この利用方法を満足させるために、以下に示すような開発の目標仕様を定めた。

(2) 安全サポート系センサーの開発目標仕様

フォーク型物流支援ロボットの安全サポート系センサーとして利用するために、障害物の検出範囲、測定精度、フォーク型ロボットの最大走行速度に適用するための障害物検出性能を目的として開発目標機能を設定した。表 5-3-3 にその仕様を示す。

2リンク揺動機構では、X軸周りにレーザースキャナを揺動させる機構となる（図 5-3-2 参照）。この方式では、レーザースキャナの揺動の中央点付近でレーザースキャナが床面に水平になる位置がある。このレーザースキャナが水平になる位置では、レーザースキャナが計測するデータを2次元の平面内で2次元の地図とマッチングさせられるため、フォーク型ロボットが2次元内（たとえば、部屋の平面図の中）で現在どの位置にいるかを推定することが可能となる。このような特長を利用するため、表 5.3.3-1 に示す2リンク揺動機構を持つ3次元センサーの開発を実施した。

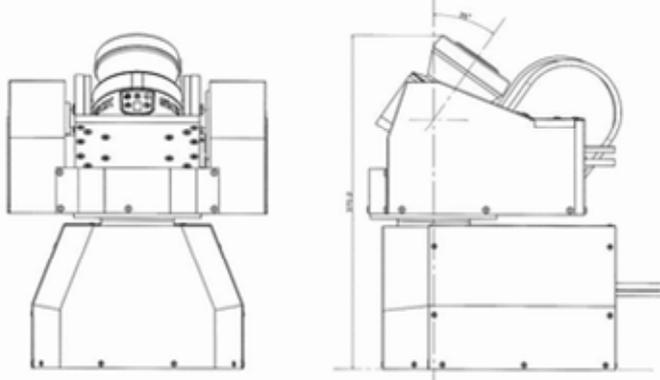
ここで、寸法は走行するロボットにとって小型であることが有利なため、なるべく小さいほうが良い。また寸法を小さくすることにより重量を低減することができる。

測定範囲は、フォーク型物流支援ロボットが高速で走行する場合は、遠くにある障害物を検出して速度を低下させ、低速で走行する場合には、近くの障害物に反応するようにする。ロボットの応答性と速度を考慮し、測定長を最大で20mとした、

障害物検出の条件によっては、最大の測定長20mで障害物を検知できるか、性能を確認することとする。測定精度は、走行の精度と人や物流の現場にある物品を検出できる100mmの精度を目標とした。

測定時間は、1秒間にロボット周辺全体の認識を更新する仕様とした。移動式でロボットに搭載され走行する条件で3次元の計測ができるものとした。

表 5.3.3-1 3次元センサーの開発目標仕様

No.	項目	方式
1	センサ方式	2リンク揺動機構
2	外観	
4	寸法	H363mm × W285mm × D239mm
5	用途	フォーク型物流ロボット用3次元センサ
6	測定範囲	H2.0m × W1.2m × D20m
7	測定精度	100mm
8	測定周期 (水平スキャン)	14400° /sec (25msec/スキャン)
9	測定周期 (3次元)	500msec/測定(1秒間に2回測定)
10	フォーク型 ロボット走行速度	最大 175m/分
11	停止指令出力位置	フォーク型ロボットより指定可能とする
12	移動体への 取り付け	精度:移動体で確保 電源:バッテリー

(3) 2次元の平面を計測するレーザースキャナの揺動について

今回の開発では、2次元の平面をレーザー光でスキャンするレーザースキャナを揺動させ、3次元的に測長することによって、3次元の障害物検知センサーとする。レーザースキャナをどのように揺動させるかを図 5.3.3-1 に図示した。ロボットが走行する平面を $x-y$ 平面、高さ方向を Z 軸とすると、図 5.3.3-1 のようにレーザースキャナの方向を合わせると x 軸まわりにレーザースキャナを揺動させる方式とした。これは、モーターの回転でなく広く広い範囲の立体の測定をしようとした場合に、このような構成となった。

サーボモーターを利用して、レーザースキャナの位置をリアルタイムで検出しつつ、リアルタイムで3次元測定をする。

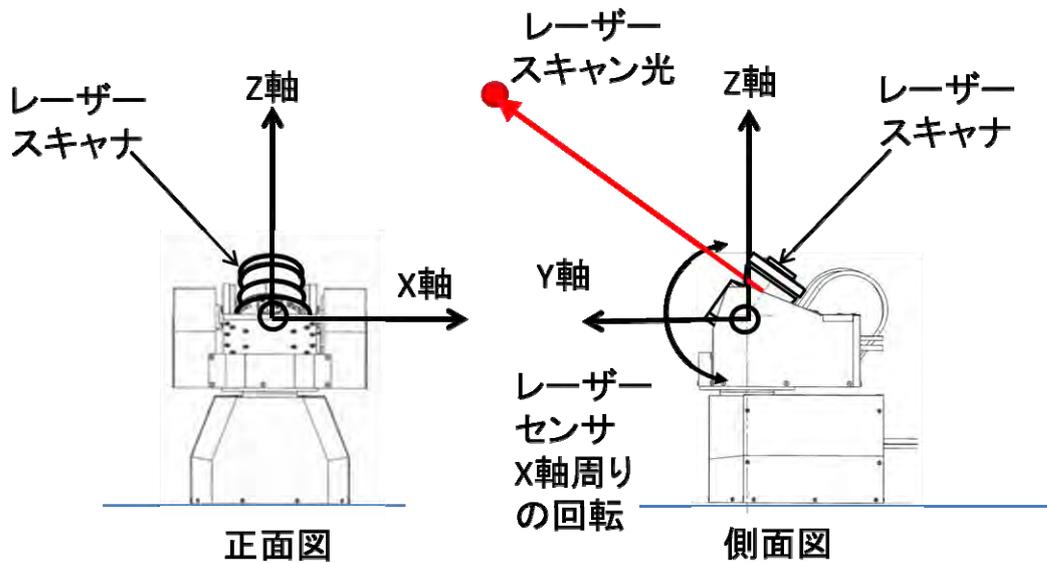


図 5.3.3-1 2リンク揺動機構の回転軸

5.3.4 安全サポート系の構成

図 5.3.4-1 に開発した安全サポート系の構成図を示す。この図には、どのような部品をどのように組み合わせて3次元測定器としたかを示している。

安全サポート系はフォーク型物流支援ロボットの制御装置とイーサネット、入出力信号線（I/O ケーブル）により接続される。安全サポート系を提供するメーカーとフォーク型ロボットを製造するメーカーが異なる場合は、安全サポート系を製造するメーカーから、ここに示す接続方式を提示して、フォーク型物流支援ロボットを製造するメーカーとインターフェースを調整する必要がある。今回は、日立産機システムが製作する3次元センサーと日立製作所が製作するフォーク型物流支援ロボットを両メーカーの製作する装置の仕様に合わせて両者が対応するインターフェースを決めた。このインターフェースの基本は、他社のメーカーと接続する場合でもその原理は共通で利用できる方式である。

安全サポート系は、図 5-3-2 の右側に点線で示される範囲の部品から構成される。2次元のレーザースキャナを使用し、これをX軸周りに揺動させて、レーザー光を3次元的にスキャンし、3次元の距離測定を行う。フォーク型物流支援ロボットが走行する通路に障害物があればそれを検出する。

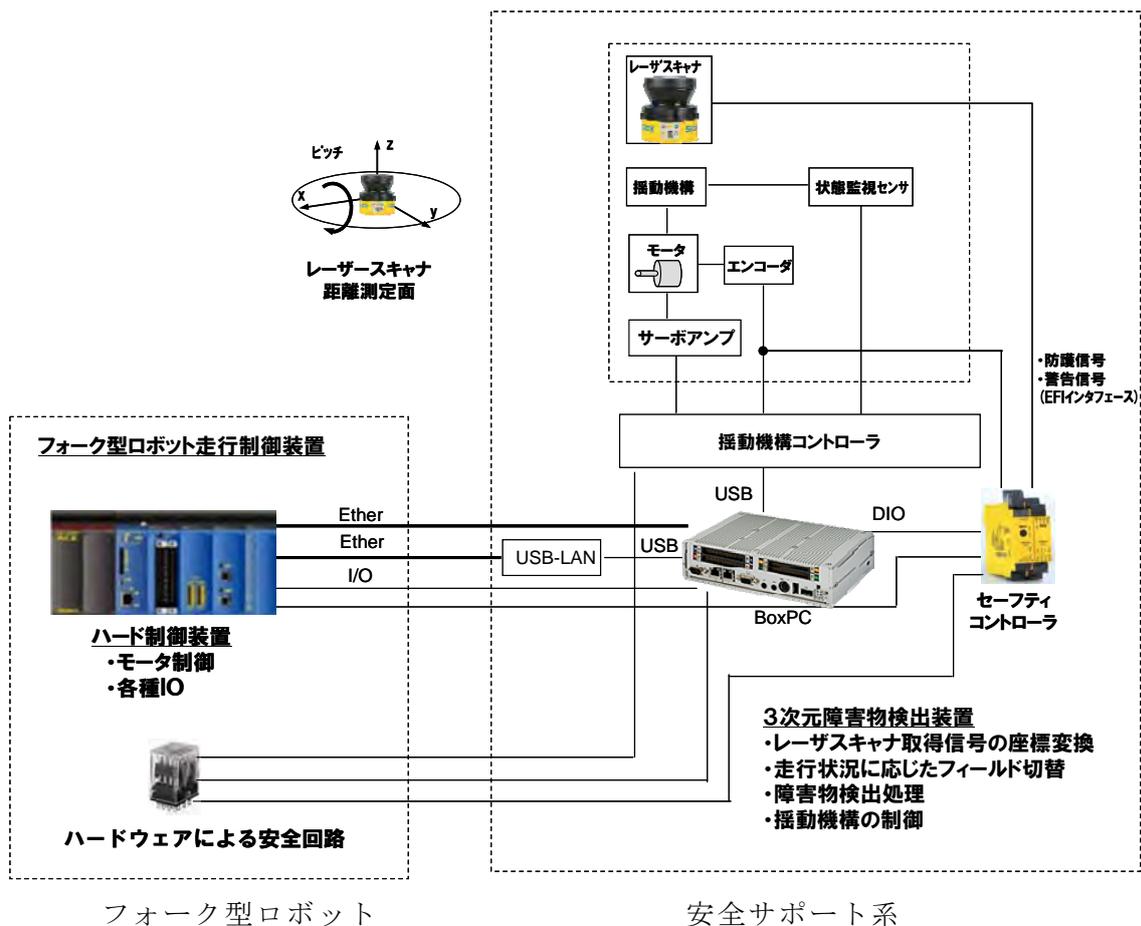


図 5.3.4-1 安全サポート系の構成

図で示すように、x 軸周りにモーターでレーザーキャナを回転させる、ピッチ回転動作をする。この動作により、3 次的に周囲の環境への距離を測定し、その距離データを元にして、ソフトウェアによって、3 次元の空間内に障害物が存在すること、および、3 次元空間のマップを作成することが可能となる。そのソフトウェアを今回開発し、図の Box PC 内で動作させる。

図 5.3.4-2 に完成した安全サポート系センサーの外観を示す。また、図 5.3.4-3 に安全サポート系センサーをフォーク型物流支援ロボットに取り付けた状態を示す。安全サポート系センサーは、フォーク型物流支援ロボットが走行中に走行路上の障害物をリアルタイムで検出して、フォーク型物流支援ロボットの走行制御装置にリアルタイムで情報を提供する。このため、3 次元の座標変換の計算の高速化が必要となる。



図 5.3.4-2 安全サポート系の外観



図 5.3.4-3 安全サポート系の取り付け

図 5.3.4-4 にフォーク型物流支援ロボットのシステム全体の要素をまとめる。

フォーク型物流支援ロボットは、その前方にあらかじめ計画されて走行する通路を持つ。遠方では、通路上に人などの障害物を検出した場合は、安全サポート系センサーから徐行の指令をロボット用の制御装置に送信する。障害物がさらに遠方にある場合は、徐行信号を出さない。

ロボットの近傍では、障害物の検出範囲を通路に対して広げ、通路上ではなく通路の近くに障害物があればこの場合も徐行信号を送信する。ロボットの近傍でかつ、走行路上に障害物があれば、安全サポート系センサーからロボットのコントローラに停止信号を送信する。

一方、安全系センサーは、より接近した障害物を検出して車体を非常停止する機能を構成するために利用する。

【3次元障害物センサ:安全サポート系】
 3次元障害物検出装置を用いて、歩行者近傍の徐行あるいは停止を行う。
 走行路遠方の歩行者検出時は、徐行。

【安全系】
 走行速度、制動距離を考慮して、障害物を検出し、車体を停止する機能を有する。

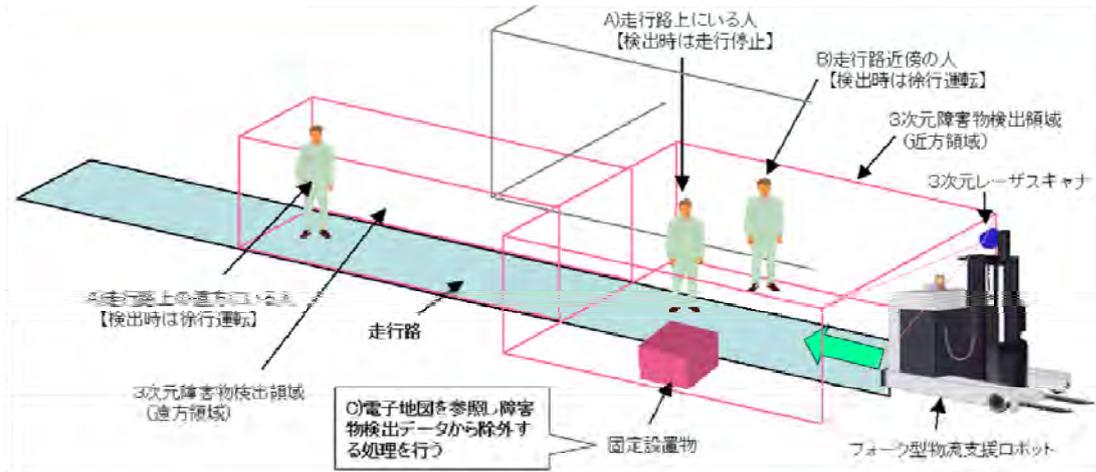


図 5.3.4-4 安全サポート系を使用するフォーク型物流支援ロボット

表 5.3.4-1 安全サポート系センサーと安全系センサーの役割分担

分類	内容	安全サポート系センサ	安全系センサ
センサの利用目的	走行経路生成	○	-
	減速・停止データ生成	○	-
	非常停止	-	○
提供するデータ	障害物の有無	○	○
	3次元空間内の位置	○	-
	3次元空間内の地図	○	-
出力信号	位置データ	○	-
	減速信号(高速走行時)	○	-
	減速信号(低速走行時)	○	-
	停止信号	○	-
	非常停止信号	-	○

表 5.3.4-1 には、安全サポート系センサーと安全系センサーの利用目的、提供するデータの種類、出力信号の種類でその役割を整理した。安全サポート系センサーは、走行経路生成、減速停止のデータ生成に用いるが非常停止のためには安全系センサーを使用する。

安全サポート系センサーの提供するデータは、障害物の有無を伝えることが主目的であるが、その構成上、3次元空間内のどこにセンサーが位置するか、また3次元空間の地図データを提供することが可能である。

出力する信号には、位置データ、高速走行時の減速信号、低速走行時の減速信号、停止信号がある。

5.3.5 安全サポート系のハードウェア

この節では、安全サポート系センサーで利用しているハードウェアの仕様について述べる。

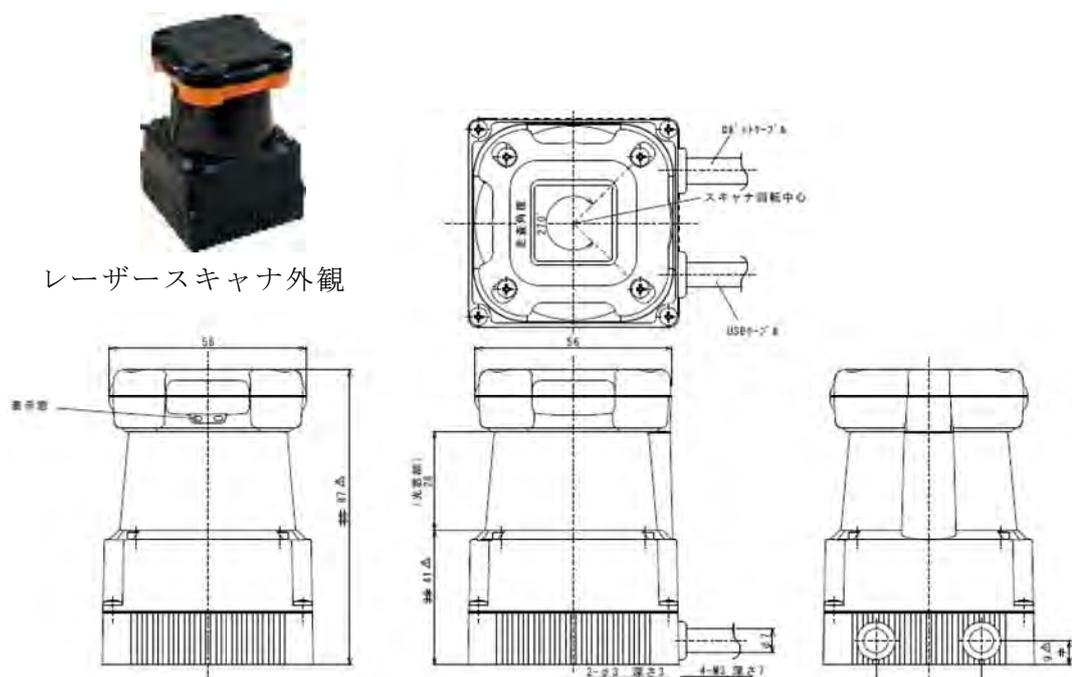


図 5.3.5-1 レーザーセンサーの外観、寸法

表 5.3.5-1 レーザースキャナの仕様

品名 型式	測域センサ	
	UTM-30LX	UTM-30LN
光源	半導体レーザー $\lambda=870\text{nm}$ 905nm 3、FDA レーザ安全クラス1	
電源電圧	DC 12V $\pm 10\%$	
電源電流	パワーON時 max 1A 定常時 0.7A 以下	
消費電力	8W 以下	
検出距離及び 検出体	検出保障値 0.1~30m (白ケント紙) * ² : 最大検出距離 60m (出力限界値) 最小検出物 130mm (10m) : 距離により変動する	
測距精度	0.1~10m : $\pm 30\text{mm}$, 10~30m : $\pm 50\text{mm}$ (白ケント紙) * ² 周囲照度 3000lx 以下 白ケント紙 0.1~10m : $\pm 30\text{mm}$ * ¹ 周囲照度 100000lx 以下 白ケント紙 0.1~10m : $\pm 50\text{mm}$ * ¹	
測距分解能及 び繰返し精度	1mm 単位 0.1~10m : $\sigma < 10\text{mm}$, 10~30m : $\sigma < 30\text{mm}$ (白ケント紙) * ² 周囲照度 3000lx 以下 : $\sigma < 10\text{mm}$ (白ケント紙 10m まで) 周囲照度 100000lx 以下 : $\sigma < 30\text{mm}$ (白ケント紙 10m まで)	
走査角度	270 度	
角度分解能	約 0.25 度 (360° / 1440 分割)	
走査時間	25ms (モータ回転数 2400rpm)	
インターフェース	USB Ver2.0 FS モード (12Mbps)	
出力	OUTPUT 1 点 同期出力、	OUTPUT 1 点 警報出力
使用周囲 温度、湿度	-10°C ~ +50°C 85%RH 以下 (但し、結露、凍結がない事)	
保存温度	-25 ~ 75°C	
耐候性	雨や雪や太陽光により検出距離が短くなる* ²	
耐振動	10~55Hz 複振幅 1.5mm X、Y、Z 方向 各 2 時間 55Hz~200Hz 49m/s ² スイープ 2 分 X、Y、Z 方向 各 1 時間	
耐衝撃	196m/s ² X、Y、Z 方向 各 10 回	
保護構造	IP64	
絶縁抵抗	10M Ω DC500V メガー	
重量	210g (ケーブルを除く)	
材質	ポリカーボネート	
外形寸法 (W×D×H)	60mm×60mm×85mm MC-40-3127	

(1) レーザースキャナ

① レーザースキャナの原理

レーザースキャナの外觀を図 5.3.5-1 に示す。また、レーザースキャナの仕様を表 5-3-5 に示す。安全サポート系は、レーザースキャナが重要な構成要素であり、安全サポート系センサーの主要な仕様は、レーザースキャナの仕様が根底にあって決まっている。

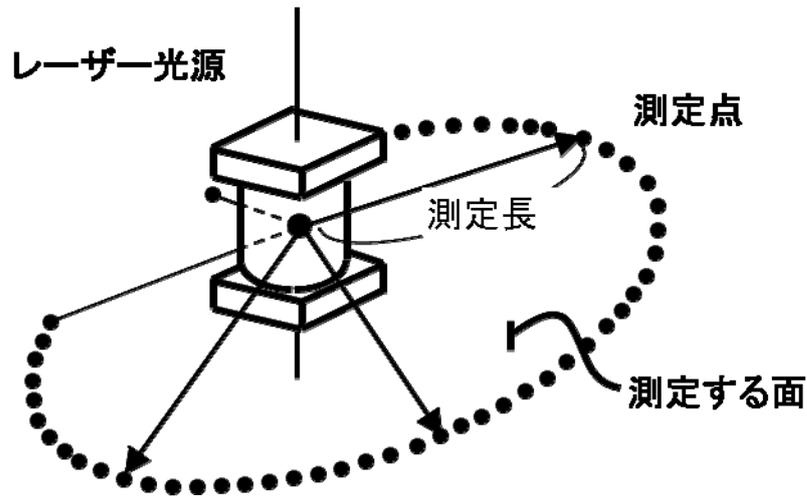


図 5.3.5-1 レーザースキャナの測定点

以下にレーザースキャナの原理と 3 次元の測長方法について示す。

図 5-3-7 にレーザースキャナの測定点と測定する面の原理図を示す。ここで使用したレーザースキャナは、スキャン面に 1,024 個の測定点があり、測定点は 270° の範囲になり、後方方向の 90° は測定しない範囲になっている。これらの測定点を 1 回スキャンするのに 25ms の時間を要する。

このレーザースキャナを 3 次元の測定に用いる原理を図 5.3.5-2 に示す。

この図は、3 次元センサーが廊下状の通路を走行している様子を示す。レーザースキャナを揺動させることにより、この図のスキャナ面がピッチ回転して上下動する。この際に、3 次元センサーは、廊下とレーザー光が交わる 3 次元位置測定点までの距離データを測定する。この距離データとレーザースキャナの姿勢データから、座標計算を行い、廊下の 3 次元形状を計測する。計測されたデータは、廊下の壁と床面状にある測定点のポイントデータの集合体となる。すなわち、廊下の形状は、3 次元的に測定された細かいピッチのポイントのデータからなる。

廊下に円柱状の障害物があれば、円柱の表面がスキャナ面と交差した点の測長データが取得され、廊下の空間内に、円柱状の障害物があることがわかる。

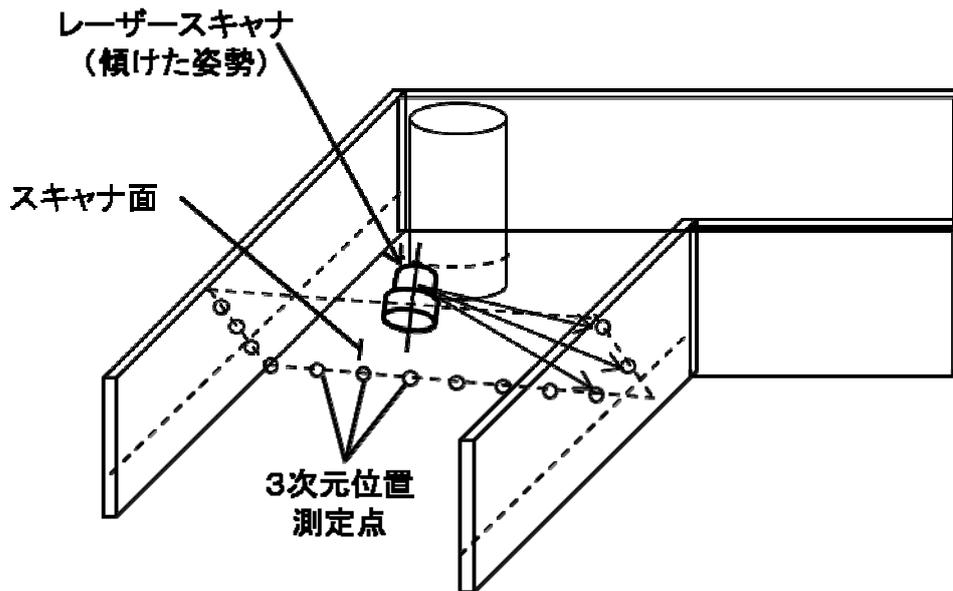


図 5.3.5-2 レーザーキャナを回転させて 3 次元計測

② 3次元センシングの回転速度と距離測定の分解能について

レーザーキャナのピッチ方向の回転速度を上げると、3次元の測定の1回の周期を速めることができ、高速に空間のデータを測定することが可能となる。ただし、1秒間に測定するポイント数が決まっているため、高速でピッチ回転させると、測定面と測定面の角度の間隔が広がって、上下方向の測定の分解能が低下する。

フォーク型物流支援ロボットが移動している場合、レーザーキャナも移動して行くが、走行方向には 25ms 後に、同一方向の水平面の測定が実施される。すなわち、25ms の間にロボットが移動するため、走行方向の測定の分解能もロボットの走行速度に影響される。

レーザーキャナと安全サポート系のコントローラの通信と3次元の計測、計算の処理時間を考慮すると、25ms の時間内にレーザーキャナの 1024 ポイントの測定点の計算処理を完了する必要があるため、高速で座標変換するソフトウェアを開発した。

③ レーザーキャナの比較

レーザーキャナには、ドイツの Sick が製造するセンサーと国産の北陽電機が製造するセンサーとがある。今回の開発では、当初 Sick 製のレーザーキャナを採用する設計を進めていたが、安全サポート系全体を小型化するために、北陽電機製の UTM-30LX を採用した。これにより、レーザーキャナが体積比で 4 分の 1 になり、安全サポート系センサー全体の小型化に寄与した。

後の章で安全サポート系センサーの評価試験の結果を報告するが、レーザーキャナの単体の仕様としては、Sick、北陽電機ともセンサーの基本性能は同等で、開発当初の

期待に十分に答えたと考える。

④ 3次元センシングの方式

今回の開発では、フォーク型物流支援ロボットの最大の走行速度を 175m/分と設定して開発した。将来これ以上の走行速度に対して満足する安全サポート系センサーを構築する場合、レーザースキャナの1スキャンの測定ポイント数（現状では 1024 点）とスキャン時間（現状では 25ms）をセンサーの性能向上のために高速化して行く必要がある。

ただし、25ms は短時間であるため、その間にレーザースキャナとコントローラが通信を完了させ、3次元の演算を完了させるためには、コントローラの通信速度の向上と計算速度の向上とが必要になるため、安全サポート系のハードウェアの根本的な性能向上が必要となる。現時点では、レーザースキャナと安全サポート系のコントローラの性能のバランスが良く取れていると考える。すなわち現在利用している標準的な FA コントローラで、25ms 周期で座標変換を完了することができた。

⑤ レーザースキャナの振動試験について

自動走行するフォーク型物流支援ロボットに3次元センサーを搭載するために、耐振動の性能が必要になる。今回採用したコントローラは車載用の製作された、耐振動性能のあるコントローラとした。中心の部品となるレーザースキャナについては、単体での評価のため、振動試験を実施した。

ここに振動試験の内容について、記載する。振動試験は次のような仕様で実施した。

(i) 振動試験機に位置同定コンポーネント一式を接続状態で設置する。

(ii) 通電状態とする。（+12V 給電）

(iii) 振動条件 JIS D1601 1種 B種 準拠

振幅幅：0.5mm(全振幅)、 加速度：45m/s² 、 周波数：67Hz

（共振点がある場合はその共振周波数を用いる。）

試験時間：上下 4h、左右 2h、前後 2h

(iv) 試験中、正常に動作することを確認する。

(v) 試験終了後に外観検査を行う。

図 5-3-9 に振動試験の状況を示す。振動試験の結果、「異常なし」と判定した。



図 5.3.5-3 レーザースキャナの振動試験

(2) Box PC の仕様

Box PC は、3次元障害物センサーのデータを収集して3次元の座標計算をし、障害物を検知したら、フォーク型物流支援ロボットの走行スピード、検知エリアと照らし合わせて、減速指令や停止指令を出力する。すなわち3次元障害物センサーのソフト処理をする中心の装置である。

OSには、組み込み装置に使用される Windows Embedded を使用し、Box PC のハードウェアは、振動や温度に対して耐環境性のある車載用の Box PC を採用している。

図 5.3.5-4 にその外観を示す。この装置は、内部のボードから国産で製作しており、汎用の PC に比較してハードウェアの信頼性が高い点を考慮して選定した。また、車載用として移動体に搭載して使用することを前提としており、電源も DC 電源を使用している、このために 24V バッテリー搭載の AGV と組み合わせて使用しやすい。



図 5.3.5-4 Box PC の外観

表 5.3.5-1 には、その仕様を示す。車載用のため、ハードディスクは内蔵せず、CF(Compact Flash)カードを使い、システム用の CF とアプリケーション用の CF を別に設定することができる。また、Windows 動作中に突然電源を遮断してもシステムにダメージを受けない構成になっている。電源 ON によりプログラムが自動で始動し、電源断によりシステムを終了することができ、PC 用画面がなくとも使いやすい仕様となっている。

表 5.3.5-1 Box PC の仕様

メーカー		InterFace
型式	車載 II モデル ETC-A913 http://www.interface.co.jp/sfc_etc/sfc_etc2.asp	
CPU	Intel Atom Processor Z520PT (FSB533MHz)	
CPU FAN	無し	
チップセット	Intel US15WPT	
メモリ	1GB	
カレンダー時計	電池搭載 BR-1/2AA(パナソニック) (10年程度保持)	
OS 対応OS	Windows Embedded Standard 2009 Interface Linux System	
動作確認OS	Android MeeGo INtime RedHawk	
ストレージ	起動デバイス	SSD 4GB: ※3
	補助デバイス1	CFスロット
	補助デバイス2	SDカードスロット×1
グラフィック	出力形式	アナログRGB
	コントローラ	チップセット内蔵
インタフェース	ディスプレイ	1ポート(15ピンD-subコネクタ), アナログRGB
	PS/2	1ポート(6ピン丸形ミニDINコネクタ) ※別売スプリッタケーブルによりキーボードとマウスが併用できます。
	LAN	2ポート(RJ-45コネクタ), Intel WG82574ITコントローラ 1000BASE-T, Wake On LAN対応
	USB	3ポート(Series A) USB2.0準拠
	RS-232C	2ポート(9ピンD-subコネクタ) 16550互換 通信速度: ~115.2kbps
	RS-485	1ポート(15ピンD-subコネクタ), TIA/EIA-485, 通信 速度: 8bps~2Mbps
	CAN	1ポート(9ピンD-subコネクタ) 高速CAN 通信速度: 60kbps~1Mbps
	HDLC	カスタム対応
	IEEE1394	無し
	外部入出力	4ピンコネクタ(e-CON) 電源ON/OFF×1点 RAS出力×1点
	デジタル入出力	16ピンフラットケーブルコネクタ 絶縁型デジタル入力×4点(割り込み機能付き)・リ レー接点(1a接点)出力×4点
	Express Card/54	無し
	光拡張コネクタ	無し
	スイッチ	電源スイッチ
	RAS	ウォッチドッグタイマ
ハードウェアモニタ		基板温度 CPU温度 電源電圧
RAS出力		出力形式: リレー1a接点出力×1 出力条件はソフトウェアで選択(ウォッチドッグタイマ 基板温度 CPU温度 電源電圧)
	筐体FAN	無し
電源	定格入力電圧	DC+7V~DC+27V
	最大定格電圧	DC+6V~DC+36V
	消費電力	DC+12V時: 13.6W(TYP) DC+24V時: 15.2W(TYP) ※DC+27V時
	外部機器供給電源容量	CFカードスロット: 3.3V 500mA, USB I/F: 5V 最大供給電流1A(1ポートあたり)
	セキュリティスロット	有り
外形寸法[mm] (突起部含まず)	211.2(W) × 151.6(D) × 48(H)	
設置方向	横置き・縦置き	
重量	1.5kg	
使用周囲温度/湿度	温度: -30°C~+80°C(始動時) -30°C~+70°C(連続動作時) 湿度: 10%~90%(非結露)	
保存周囲温度/湿度	温度: -40°C~+85°C 湿度: 10%~90%(非結露)	
耐ノイズ性	静電気→接触: ±6kV, 気中: ±8kV, 放射電磁界 10V/m, 伝導→10V/m, FTB→信号: 1kV, 電源: 2kV	
耐振動性	耐振動性: ~5.0G 振動周波数 10Hz~150Hz 変位振幅 0.35mm(片振幅) 加速度振幅 50m/s ² (5G) 時間 40min	
耐衝撃性	耐衝撃性: ~100G 作用時間6ms(非動作時)	

(3) サーボモーター・アンプの仕様

サーボモーターは、軽量のレーザースキャナを揺動させるために使用する。そのために小型で軽量のサーボモーターから選定した。小型であればあるほど、3次元障害物センサー全体が小型軽量化されるためにメリットがある。

国産のモーターに最適なモーターが見つからなかったため、海外製の MAXON の 250W と 150W のモーターを採用した。250W のモーターは、レーザースキャナを X 軸周りに揺動させて、3次元の Z 軸（縦方向）の計測をするために使用する。150W モーターは試作の意味で Z 軸周りの揺動をするように構成した。ただし、開発の段階で Z 軸周りの揺動はなくともレーザースキャナ自体のスキャン速度でフォーク型物流支援ロボットの走行速度に対応できることがわかったため、最終段階では、Z 軸周りの回転は使用していない。



図 5.3.5-5 サーボモーターの外観

サーボアンプは、Box PC からの高速な制御やエンコーダの信号を Box PC に高速で送信できる性能が要求される。このため、サーボアンプ自体の通信性能が要求される。図 5.3.5-6 に示すサーボアンプは MAXON のモーターとセットで使用するものであるが、そのような通信性能の要求を満足するものである。



図 5.3.5-6 サーボアンプの外観

表 5.3.5-2 サーボモーターの仕様

項目		仕様	
モーター出力		250Wモーター	150Wモーター
データ (公称電圧時)	公称電圧	18 V	12 V
	無負荷回転数	3420 rpm	7500 rpm
	無負荷電流	721 mA	250 mA
	最大連続トルク時の回転数	3150 rpm	6370 rpm
	最大連続トルク	442 mNm	94.9 mNm
	最大連続電流	10 A	6 A
	停動トルク	14000 mNm	1680 mNm
	起動電流	296 A	102 A
	最大効率	80%	88%
モータ固有値	端子間抵抗	0.0609 Ω	0.117 Ω
	端子間インダクタンス	0.023 mH	0.025 mH
	トルク定数	47.5 mNm/A	16.4 mNm/A
	回転数定数	201 rpm/V	581 rpm/V
	回転数/トルク勾配	0.258 rpm/mNm	4.15 rpm/mNm
	機械的時定数	3.74 ms	6.03 ms
	ロータ慣性モーメント	1380 gcm ²	140 gcm ²
熱特性	熱抵抗(ハウジング/周囲間)	1.3 K/W	4.65 K/W
	熱抵抗(巻線/ハウジング間)	1.85 K/W	1.93 K/W
	巻線熱時定数	127 s	42.3 s
	モータ熱時定数	960 s	736 s
	使用温度範囲	-30...+100 ° C	-30...+100 ° C
	最高巻線許容温度	+125 ° C	+155 ° C
機械的特性	ベアリング・タイプ	ボールベアリング	ボールベアリング
	最大許容回転数	5500 rpm	12000 rpm
	スラストがた	0 - 0.1 mm	0.05 - 0.15 mm
	ラジアルがた	0.03 mm	0.025 mm
	最大スラスト荷重(ダイナミック)	70 N	5.6 N
	最大挿入力(スタティック)	420 N	110 N
	(スタティック、シャフト支持)	12000 N	1200 N
	最大ラジアル荷重	350 N、フランジから 15 mm	28 N、フランジから 5 mm
その他の仕様	永久磁石磁極ペア数		2
	コミュテータ・セグメント数		26
	回転方向	時計回り(CW)	時計回り(CW)
	オートクレーブ・サイクル数		0
	質量	2100 g	480 g

表 5-3-7 と表 5-3-8 にサーボモーターとサーボアンプの仕様をまとめた。モーターは小型で高速回転が可能なタイプである。サーボアンプは、USB 通信が高速タイプのバージョン 2.0 の規格で動作するとともにさらなる同期制御用の EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology)通信も可能である。今回は Box PC との通信では、USB 通信を主に利用した。

表 5.3.5-3 サーボアンプの仕様

項目	仕様
電源電圧	VCC 11…70 VDC
最小入力電圧	VCC 10 VDC
最大入力電圧	VCC 75 VDC
最大出力電圧	0.9・VCC
最大出力電流 I _{max} (<1 sec)	25 A
最大連続電流 I _{cont}	10 A
スイッチング周波数	50 kHz
最大効率	94%
PI 電流制御・サンプリングレート	10 kHz
PI 回転数制御・サンプリングレート	1 kHz
PID 位置制御・サンプリングレート	1 kHz
最大回転数 (1 磁極ペアモータ、正弦波整流時)	25 000 rpm
最大回転数 (1 磁極ペアモータ、矩形波整流時)	100 000 rpm
ホールセンサ信号	Hall sensor 1, Hall sensor 2, Hall sensor 3
エンコーダ信号	A, A \bar{V} , B, B \bar{V} , I, I \bar{V} (max. 5 MHz)
内蔵ラインレシーバEIA	RS422 Standard
デジタル入力1 (“汎用”)	フォトカプラ \pm 9…24 VDC
デジタル入力2 (“汎用”)	フォトカプラ \pm 9…24 VDC
デジタル入力3 (“汎用”)	フォトカプラ \pm 9…24 VDC
デジタル入力4 (“原点スイッチ”)	フォトカプラ \pm 9…24 VDC
デジタル入力5 (“正リミット・スイッチ”)	フォトカプラ \pm 9…24 VDC
デジタル入力6 (“負リミット・スイッチ”)	フォトカプラ \pm 9…24 VDC
デジタル入力7	(“High Speed Command”)
内蔵ラインレシーバEIA	RS422 Standard
又は (“Sin/Cos 入力”), 分解能	12-bit, \pm 1.8 V(differential)
デジタル入力8	(“High Speed Command”)
内蔵ラインレシーバEIA	RS422 Standard
又は (“Sin/Cos 入力”), 分解能	12-bit, \pm 1.8 V(differential)
デジタル入力9	RS422 Standard
デジタル入力10	RS422 Standard
デジタル入力11	フォトカプラ+9…+24 VDC
アナログ入力1 分解能	12-bit 12-bit \pm 10 V (differential)
アナログ入力2 分解能	12-bit \pm 10 V (differential)
デジタル出力1 (“汎用”),	フォトカプラmax. 24 VDC
デジタル出力2 (“汎用”)	フォトカプラmax. 24 VDC
デジタル出力3 (“汎用”)	フォトカプラmax. 24 VDC
デジタル出力4 (“ブレーキ”),	フォトカプラmax. 24 VDC
デジタル出力5	RS422 Standard
アナログ出力	周波数20 kHz, 分解能 12-bit 0…10 V (I _L = <1 mA)
エンコーダ電源	+5 VDC (I _L <100 mA)
ホールセンサ電源	+5 VDC (I _L <30 mA)
補助電源	+5 VDC (I _L <150 mA)
インターフェイス	USB 2.0(full speed)
Data+, Data-	max.12 Mbit/s
EtherCAT (2 x RJ45)	100 Mbit/s (100 Base Tx)
質量	約 442 g
寸法 (L x W x H)	150 x 120 x 29 mm
温度範囲(使用時/ 保存時)	-10…+45° C / -40…+85° C
湿度範囲	20…80% (結露しないこと)

5.3.6 安全サポート系のソフトウェア

(1) 安全サポート系ソフトウェアの概要

図 5.3.6-1 に安全サポート系のソフトウェア構成について示す。

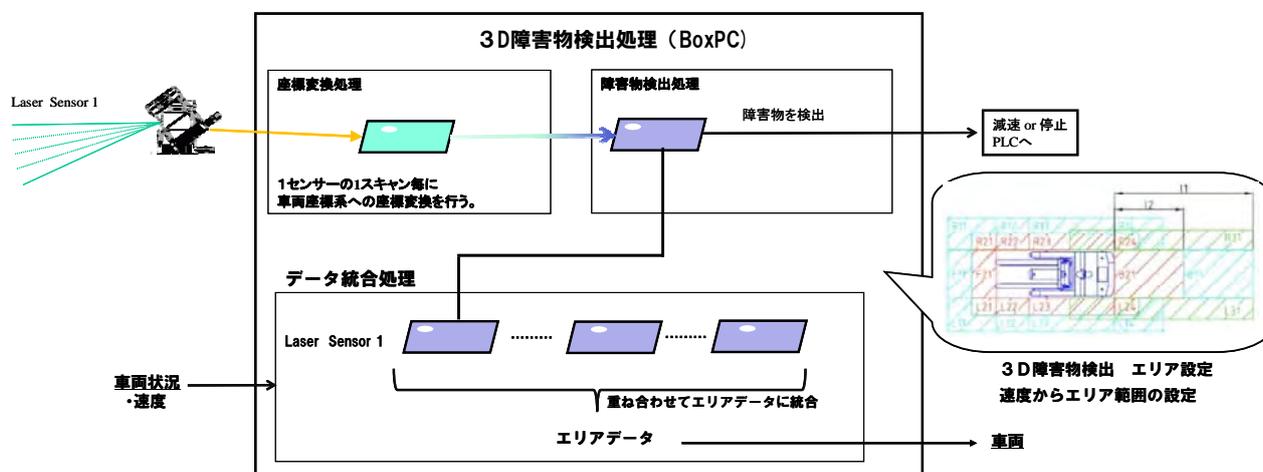


図 5.3.6-1 安全サポート系のソフトウェア構成

安全サポート系のソフトウェアは、3D障害物検出装置の中のBox PC（組み込み用のコンピュータ）の中で動作する。また、安全サポート系全体の中でのBox PCの位置付けは5.3.4節の図5.3.6-1の安全サポート系の構成図で示した。

(2) 安全サポート系ソフトウェアの機能

3次元障害物検出装置は、次の働きをする。

①座標変換

レーザースキャナから取得する距離データを座標変換して、3Dデータとする。

座標変換のソフトウェアは、レーザースキャナと通信して得られる、1スキャンで1,024ポイントの距離の計測データをレーザースキャナの揺動によってなす角度を使用して、座標変換する。この処理は、レーザースキャナの25mのスキャンタイム以内に実施する必要がある。

このために、座標変換の高速化を考慮したソフトウェアとしている。座標変換を実施するためには、レーザースキャナの水平面となす角度をリアルタイムで取得する必要がある。このために、揺動機構のコントローラとBox PCが通信し、揺動の角度を常に取得する構成としている。本機構では、揺動機構コントローラにサーボモーター用のアンプを使用し、サーボアンプから信号を取得できるようにしている。

②フォーク型物流支援ロボットの走行状況取得

走行状況をフォーク型物流支援ロボット走行制御装置から取得し、障害物を検出するエリアを切り替える。

フォーク型物流支援ロボットの走行状況（走行速度）はイーサネットを利用して、フォーク型物流支援ロボットの走行制御装置から通信で得る。走行速度により、障害物を検出する範囲をフォーク型物流支援ロボットの仕様に従って変化させ、そのエリアの長さを伸ばしたり、縮めたりしている。

また、フォーク型物流支援ロボットの速度により、障害物の検出範囲の設定値は、フォーク型ロボット走行制御装置からイーサネット経由で初期設定時に取得する。

③障害物の検出

障害物を検出するために、Box PC は 3 次元の計測データから物体のデータを認識し、走行経路上の立方体の中に物体が存在するかどうかを検出する。検出した結果、走行通路上のフォーク型物流支援ロボットの近くに障害物がある場合、Box PC からフォーク型物流支援ロボットの制御装置に信号を送信する。

減速する範囲に障害物が存在する場合は、イーサネット通信で Box PC からフォーク型物流支援ロボットの制御装置に減速指令データを送信する。

停止が必要な範囲に障害物が存在する場合は、Box PC から I/O 信号（入出力信号）で停止指令を出力する。

④揺動機構を制御する。

揺動機構の動作開始と終了、および、揺動機構の揺動速度を Box PC から揺動機構コントローラを経由してサーボアンプに送信して制御する。また、揺動の角度データをサーボアンプから入手する。これらの制御は走行中常時行い、走行速度により揺動速度を変化させることの可能である。すなわち、フォーク型物流支援ロボットが低速走行時には、揺動速度を低速にすると、周囲の 3 次元の形状データを細かい精度で収集するようなアプリケーションを作ることも可能である。

以上のような安全サポート系のソフトウェアにより、図 5-3-14 のようなフォーク型物流支援ロボットのエリア設定に対して、減速の指令や停止の信号を出力することができる。

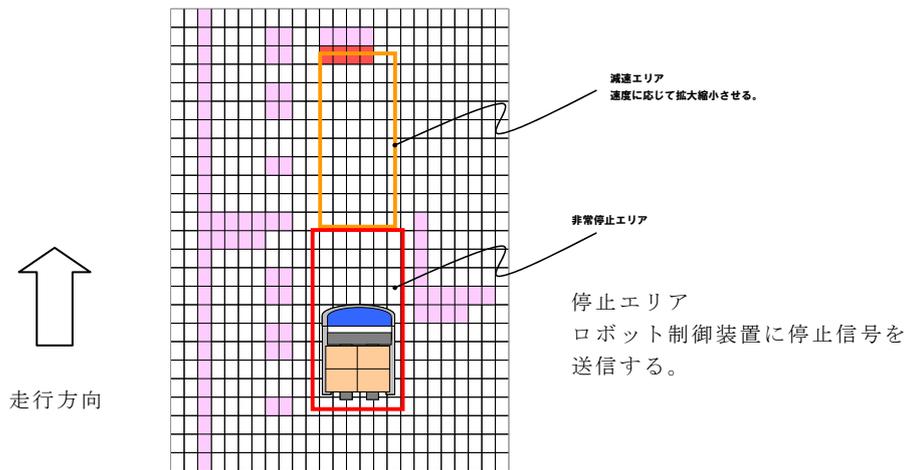


図 5.3.6-2 安全サポート系のエリア設定

5.3.7 安全サポート系のインターフェース

(1) 通信の方式

5.3.4 節の図 5-3-2 に安全サポート系の構成について示した。安全サポート系の Box PC は、フォーク型物流支援ロボット制御装置とイーサネットと I/O を利用して通信する。本節ではその仕様について述べる。

安全サポート系とフォーク型物流支援ロボット間の通信時のコマンドの種類を表 5-3-9 に示す。これらのコマンドでフォーク型物流支援ロボットのコントローラから 3次元障害物センサーに対して、動作の指令を出すことができる。走行型物流支援ロボット全体の状態の把握、起動、停止のタイミングの生成などフォーク型物流支援ロボットのシステム全体のモードの設定は、フォーク型物流支援ロボットが実施し、3次元障害物センサーはその指令で動作をするようにする。

初期化コマンドをフォーク型物流支援ロボットから 3次元障害物センサーに送信すると揺動装置の機構部の初期化、原点合わせを 3次元障害物センサーの Box PC が実施する。

計測開始コマンドをフォーク型物流支援ロボットから 3次元障害物センサーに送信すると、3次元の計測を開始する。この動作によって、計測がロボットの制御の元で正常に実施されているかどうか、コマンド、レスポンスの形で確認することが可能となる。

フォーク型物流支援ロボットが走行動作を終了する際に、3次元障害物センサーに計測終了を指令することにより、システムを停止する。

シャットダウン指令は、PC や通信に何らかの異常が発生し、初期状態からリスタートしたい場合に使用する。PC と制御装置が複数台で全体の制御システムを形成する時にはこのようなりカバリーの指令による動作が必要になる場合がある。

3次元障害物センサーの動作パラメータをパラメータ設定コマンドでフォーク型物流支援ロボットからも実施できる。3次元障害物センサー単体の機能によっても動作パラメータ

を設定することは可能であるが、システムの実運用段階になった時には、設定が常に一か所からできることが望ましい。

表 5.3.7-1 通信コマンド一覧

No	送信メッセージ タイトル	概要	コマンド コード	送信メッセージ	応答メッセージ
				データ部	データ部
1	初期化	振動装置を初期位置に移動させ、 角度の原点調整を実行する。	‘P’	時間 (*1)	・時間 (*1) ・ステータス ・結果
2	計画開始	振動装置待機状態にて本コマンド 受付時に、計画動作を開始し、割 定状態に移す。	‘MS’	・時間 (*1) ・動作モード	・時間 (*2) ・ステータス ・測定データ
3	計画終了	割定状態にて本コマンド受付時に、 計画動作を停止し、振動装置待機 状態に移す。	‘ME’	時間 (*1)	・時間 (*1) ・ステータス
4	シャットダウン	装置の終了、再点動の指示	‘SD’	動作モード	
5	状態通知	振動装置の状態通知の指示	‘ST’	時間 (*1)	・時間 (*1) ・ステータス ・バージョン情報
6	パラメータ設定	振動装置の各種パラメータ設定	‘PS’	・時間 (*1) ・設定パラメータ	・時間 (*1) ・設定されたパラメータ
7	パラメータ抽出	振動装置のパラメータ抽出	‘PG’	・時間 (*1)	・時間 (*1) ・各種パラメータ
8	位置推定データ	車両制御装置と推定した位置/ 姿勢の通知用。	‘PE’	・時間 (*2) ・位置推定データ (x, y, θ)	—
9	時刻同期	車両制御装置とBOXPCとの 時刻を同期させる。	‘CS’	時刻 (*1)	時刻 (*1)
10	PLC制御指令	PLCに対する制御指令	‘PC’	—	・時間 (*1) ・制御指示内容
11	異常通知	BOXPCにて異常が生じた場合に通 知する	‘EM’	—	・時間 (*1) ・ステータス

パラメータ読み出しコマンドは、パラメータ設定コマンドと対をなすものである。

位置推定データ通知用のコマンドは、3次元障害物センサーの初期の位置合わせや、特殊な走行環境において、フォーク型物流支援ロボットが位置データをより詳しく認識している場合が生じ、3次元障害物センサーにその情報がない場合に使用する。この位置推定データを受信後に、3次元障害物センサーは、そのデータを元にして内部の地図データと現在地をマッチングさせる。マッチング後は、3次元障害物センサー側が位置を推定し、フォーク型物流支援ロボットに位置情報を提供する側になる。

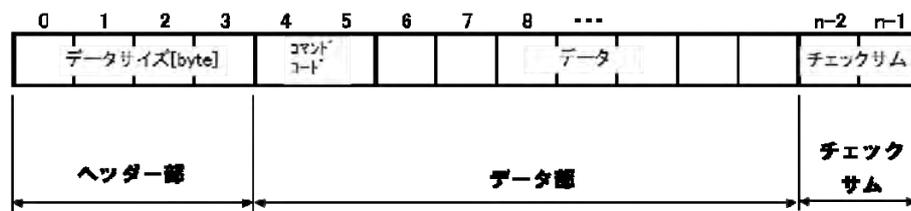
複数のコンピュータシステムで動作の同期を取るために、時刻データを合わせる事が重要である。このため、より人間に近い側で操作されるフォーク型物流支援ロボットから3次元障害物センサー側へ時刻データを送信して、時刻合わせをする。コンピュータ間の時刻が正確にあっていると、動作ログを解析する場合に、フォーク型物流支援ロボットがどのような走行を行った時に、3次元障害物センサーの動作はどうだったのか、2つのCPUの関連の動作を調べることが可能になる。

異常通知コマンドは、Box PC側で異常があった場合にその状態を通知するものである。

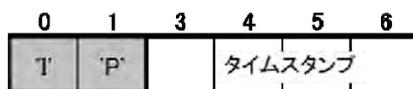
これにより、3次元障害物センサーに異常が発生した場合に、ロボットを操作するオペレータにその状態を表示することが可能となる。

(2) 通信伝文の送受信

以上のようなコマンドを通信するためのデータ形式の構造を図 5.3.7-3 に示す。この形式は、コンピュータ間のデータ通信などに良く使われる形式である。



(1) データ構造



(2) 時刻設定コマンド

図 5.3.7-3 通信伝文の形式

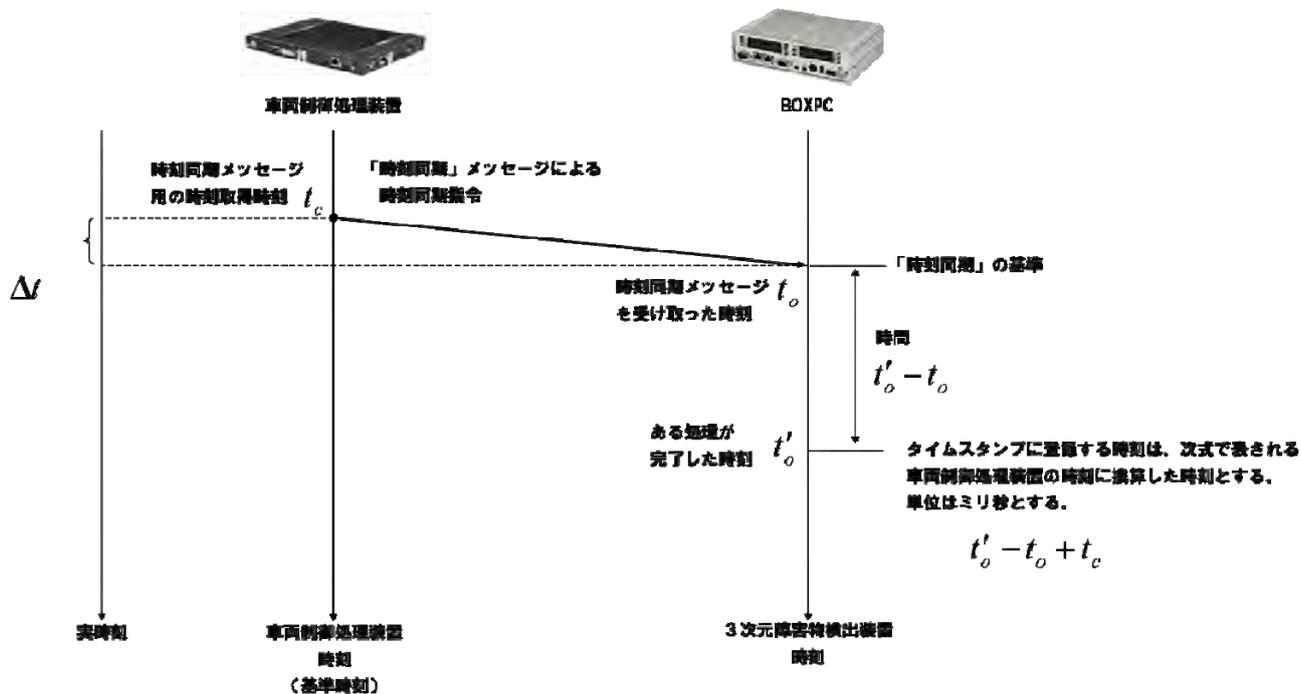


図 5.3.7-4 通信の手順

フォーク型物流支援ロボットと3次元障害物センサー間での通信は、コマンド・レスポンス型の通信を行う。図 5-3-16 はその通信の動作を示す。フォーク型物流支援ロボットがコマンドを送信すると、その通信時間がかかり、通信時間 Δt 後に、3次元障害物センサーの Box PC にコマンドが届く。そのコマンドを受け取った後、 $t'0 - t0$ 時間後に Box PC が処理を実行して、そのログをタイムスタンプ（いつどんな処理を実行したかを記録する時の時刻）と共に記録する。

通信により、Box PC がどのように状態遷移するかを図 5.3.7-5 に示す。Box PC は起動した後に、フォーク型物流支援ロボットの初期化コマンドを受け取った後、初期化動作を実施して揺動装置を原点の位置へ移動させる。初期化完了後に待機状態で停止し、フォーク型物流支援ロボットの計測開始コマンドを受け取った後、計測を開始する。計測を開始すると揺動装置が動作し、障害物の検出を実行し、3D形状の距離データを連続して出力する。この状態が動作中の状態になる。

安全サポート系に異常が発生した場合は、いずれの状態においても、異常の種類を特定してその原因をフォーク型物流支援ロボット側へ送信する。フォーク型物流支援ロボットは、安全サポート系センサーが異常の場合は、動作停止状態（サーボがオフで走行するパワーが出力されない状態ではあるが、知能部分である制御ソフトが動作している状態）になる。

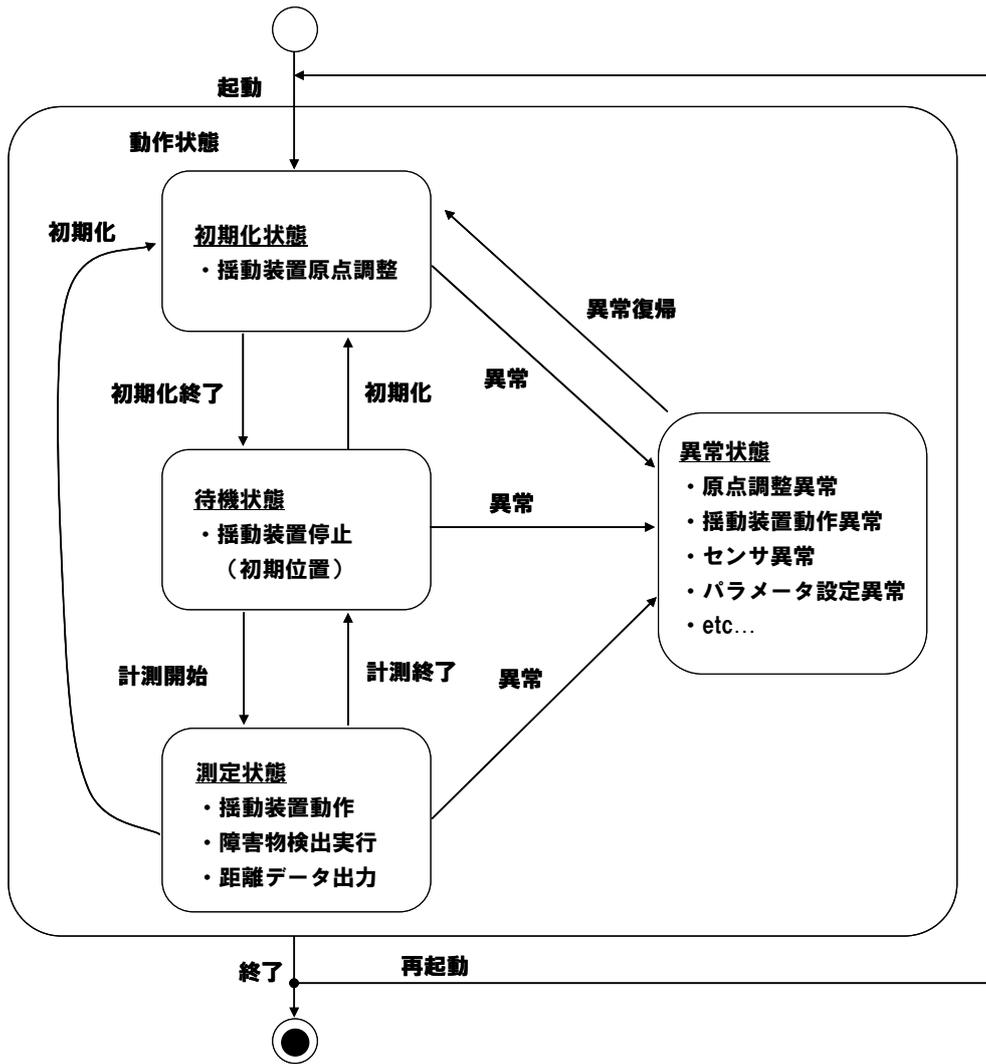


図 5.3.7-5 安全サポート系とフォーク型ロボット間の通信の方式

5.3.8 安全サポート系センサーのハードウェアの改良

安全サポート系センサーのハードウェア改良について以下に説明する。

(1) 安全サポート系センサーハードウェア改良の経緯

これまで述べたように、2リンク揺動機構を採用した3次元障害物センサーを開発することにより、安全サポート系センサーとしてフォーク型物流支援ロボットから要求される3次元障害物センサーを提供した。安全サポート系センサーの開発は2リンク揺動機構により、当初に目的とした性能を達成し、フォーク型物流支援ロボットの安全サポート系として動作した。一方、3次元障害物センサーの実用化、事業化を進めるためにコストを低減するとともに、3次元計測の速度を向上させ、フォーク型物流支援ロボットが高速で走行中にも高精度な障害物検出を提供する課題があった。このために、1個のモーターとリンク機構でレーザースキャナを揺動させて高速に3次元計測するセンサーを開発した。

2リンク揺動機構の場合は、制御や座標計算がしやすいという特長があるが、揺動にストロークエンドで動作を折り返す運動をするため、回転動作の高速化には制約がある、また、その機構系の寸法もベアリング構造を両持ちにするため不利な面がある。

(2) 安全サポート系センサーハードウェア改良の目的

安全サポート系センサーハードウェア改良の経緯で述べたように3次元障害物センサーには次の課題があった。

- ① 小型の物流支援ロボットに採用できる小型の安全サポート系センサーを提供する。
- ② 3次元の計測の高速化を図るために、安全サポート系センサーの3次元の動作を連続回転動作とするとともに、制御の動作時間を高速化する。

以上の課題に対応するために、1リンク揺動機構の構造をした3次元障害物センサーの開発を行った。1リンク揺動機構はすでに他の研究機関の研究、開発においても採用されている構造である。本開発では、1リンク揺動機構の構造を高速化する構造とするとともに、物流の現場環境で長期間の使用に耐える耐久性を持つ構造を開発する。

(3) 安全サポート系センサーハードウェア開発の仕様

表 5.3.8-1 に1リンク揺動機構を使った3次元センサーの開発仕様を示す。

寸法は、2リンク揺動機構より、体積比で3.5分の1以下を目指し、測定周期は、200msとして、2リンク機構より、2.5倍高速にする機構とする。また、リンクを支持するために使用するベアリングを従来の1リンク機構で使用されていたすべり軸受けから、ボールベアリングに変更して、物流の現場環境での長寿命化を図った。

さらに、2リンク機構と比べて駆動機構のモーターの数を1個に減らし、コストの低減を図った。

表 5.3.8-1 1リンク揺動機構 3次元センサー開発仕様

No.	項目	方式
1	センサ方式	1リンク揺動機構
2	外観	
4	寸法	H263mm × W102mm × D250mm 従来比の体積:3.5分の1以下
5	用途	フォーク型物流ロボット用3次元センサ
6	測定範囲	H2.0m × W1.2m × D20m
7	測定精度	100mm
8	測定周期 (水平スキャン)	14400° /sec (25msec/スキャン)
9	測定周期 (3次元)	200msec/測定(1秒間に5回測定) 従来比:2.5倍の速度
10	フォーク型 ロボット走行速度	最大 175m/分以上
11	停止指令出力位置	フォーク型ロボットより指定可能とする
12	移動体への 取り付け	精度:移動体で確保 電源:バッテリー

(4) 安全サポート系センサーハードウェアの構造

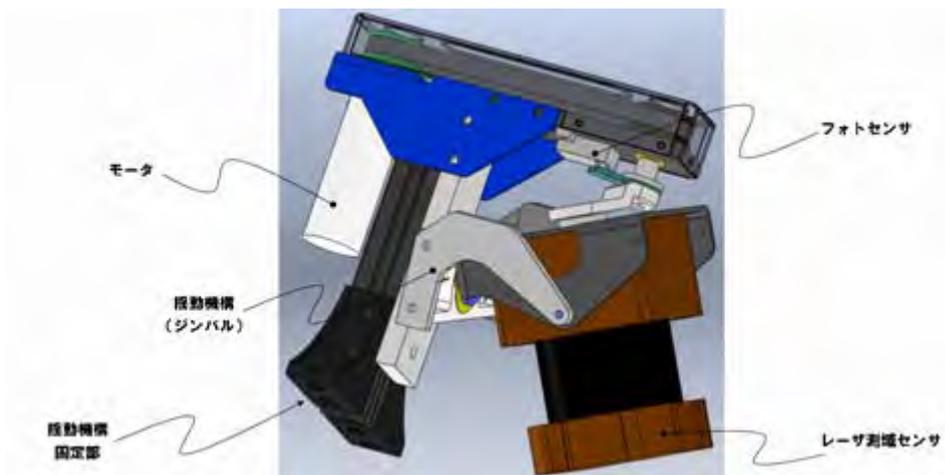


図 5.3.8-1 1リンク揺動機構 3次元センサーの構造

図 5.3.8-1 に1リンク揺動機構の構造を示す。1個のモーターでジンバル構造の揺動機構を回転させることにより、レーザースキャナのスキャン面が上下に揺動する。これにより、3次元のレーザー測長が可能になる。

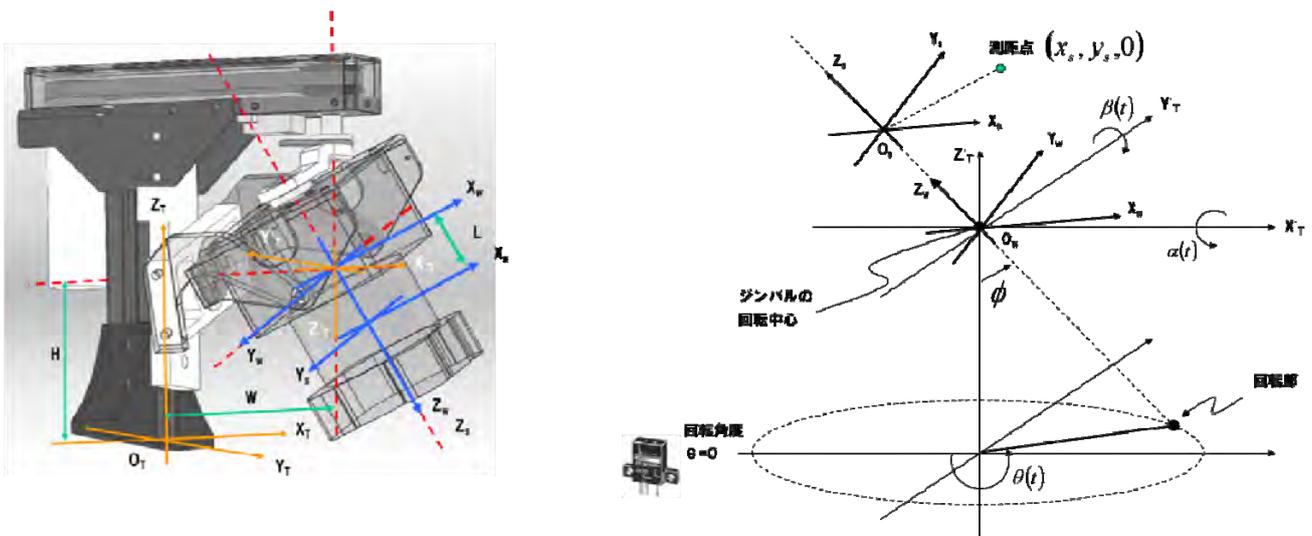


図 5.3.8-2 1 リンク揺動機構 3次元センサーの座標

(5) 安全サポート系センサー座標系

図 5.3.8-2 に 1 リンク揺動機構の回転と揺動角の説明を示す。モーターの回転により、ジンバルの中心を回転の中心としてレーザースキャナを回転させる。図で回転部が θ だけ回転すると、 ϕ の角度だけ傾いたレーザースキャナの中心軸の回りにレーザースキャナが回転する。これにより、 $\pm\phi$ の角度だけ、レーザースキャナのスキャン面の角度が揺動することになる。この間、モーターの回転は一定速で折り返しの回転により停止時間がないため、レーザースキャナを高速で揺動させることが可能になる。本開発の 1 リンク揺動機構では、 $\pm\phi$ の角度を 60° とするように、機構部品を設計した。

(6) 揺動機構とレーザースキャナの時刻同期

1 リンク揺動機構では、時間とともに、回転角度 $\theta(t)$ が変化する。これと同期して、レーザースキャナによる測長が実施される。このため、時刻 t における回転角度 θ とレーザースキャナのスキャンの周期の開始時刻を両方とも同時に検出することが必要になる。回転角度 θ とレーザースキャナの測定長のデータは、別々の測定ルートから 3次元障害物センサーの Box PC に入力されて来る。これらのデータを時刻で同期データを使って同期する精度が 3次元の測定精度に非常に重要になる。

図 5.3.8-3 にこの時刻同期によるデータの取り扱いの方式を示す。レーザースキャナは 25ms 周期で 1 回転し、1 回転のタイミングを示すために 1ms 幅の同期信号を出力する。この同期信号により、レーザースキャナのスキャンの初期位置のタイミングが分かる。一方、揺動機構では、揺動機構が 1 回転するごとに機構内に取り付けたフォトセンサーが信号を出力して、揺動機構の初期位置を伝える。これらの 2 つの信号により、レーザースキャナと揺動機構の 3 次元的位置と姿勢が特定される。これによりレーザースキャナの測定長が 3 次

元上のどの方向の距離であるかが判定される。この距離データを座標変換計算することにより、3次元の形状データを取得することが可能となる。

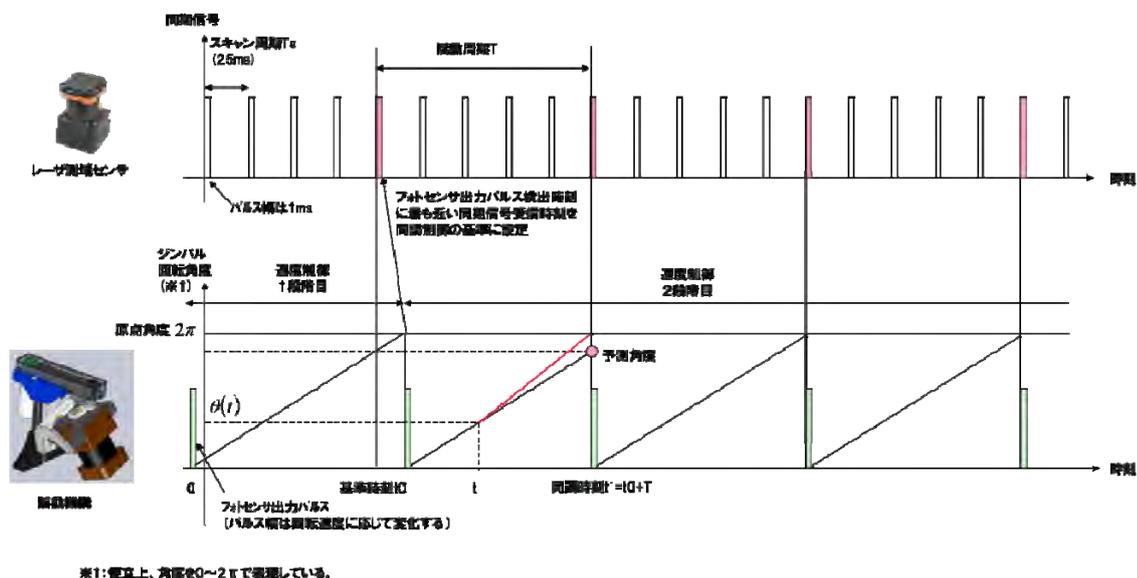


図 5.3.8-3 1リンク揺動機構 同期タイミング

図 5.3.8-4 は、レーザースキャナ単体の仕様書からの抜粋である。レーザースキャナは、連続的に回転しながら、スキャン光の測長データを出力する。360° の 1 回転中、270° のエリア内で測長データを出力し、残りの 90° は測長しないエリアである。レーザースキャナが出力する同期信号により、レーザースキャナが初期位置にあることが分かる。同期信号は 25ms に 1 回出力される。また、25ms に 270° の計測を実施した結果、1,024 ポイントの測長データを出力する。

(1) 同期出力 UTM-30LX

スキャンに同期して、1 スキャンに 1 パルス=約 1msec の信号を出力する、出力タイミングはスキャンに対して、下図タイミングで出力されています。

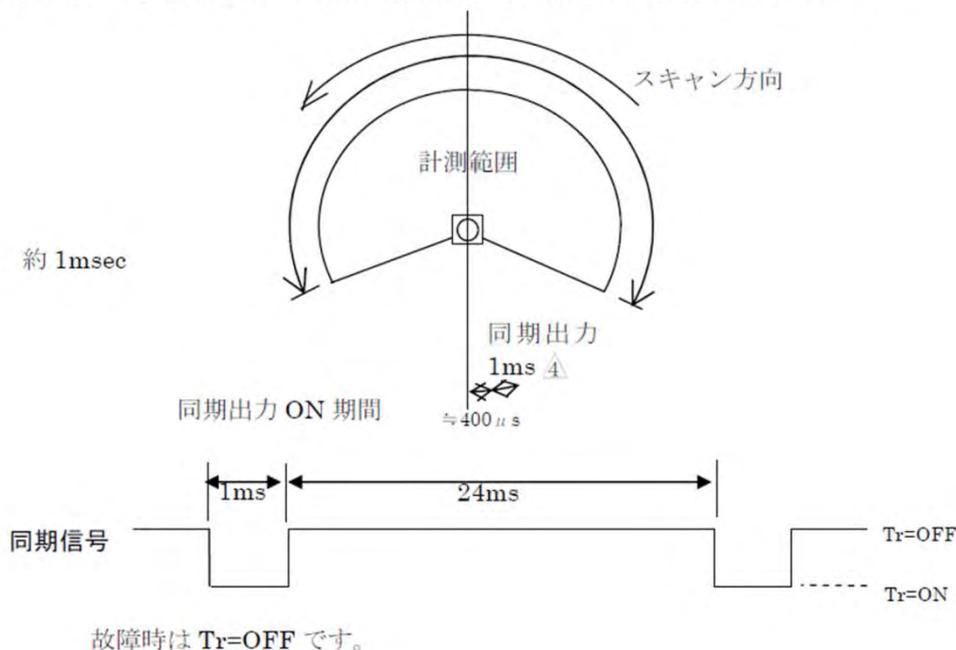


図 5.3.8-4 レーザースキャナ同期出力の仕様

図 5.3.8-5 にこの 2 個の同期信号の時刻の測定が精度良く取れない場合の 3 次元スキャンデータのイメージ画を示す。2 個の同期信号の時刻が正確に測定されると、3 次元の計測精度が向上し、3 次元画像を取得すると、ピントが合って、クリアなデータになる。一方 2 個の同期信号の時刻測定の精度が悪い場合は、ピントが合わない画像になる。図 5.3.8-5 は左側にピントの合った画像、右側にピントの合わない画像のイメージ画を示した。



同期タイミングずれがない場合

同期タイミングのずれがある場合

図 5.3.8-5 同期タイミングによる 3 次元データのブレ

(7) システム構成

図 5.3.8-6 に 1 リンク揺動機構の制御ユニットのシステム構成を示すブロック図を示す。フォーク型物流支援ロボットの制御装置から安全サポート系の Box PC に動作指令を送信するのは、2 リンク揺動機構の場合と同じである。Box PC から制御基板に動作指令を送信する。制御基板は、レーザースキャナの同期信号、レーザースキャナの測定データ、揺動機

構のフォトセンサーの信号（揺動機構の同期信号）を取り込み、これらのデータの同期を取る。制御基板から揺動機構のモーターを回転するサーボアンプに動作指令を送信する。サーボアンプからは、モーターの角度、状態データが戻り、そのデータを Box PC へと送信する。Box PC は 3 次元の座標変換の計算を実施して、フォーク型物流支援ロボットに必要なデータを送信する。

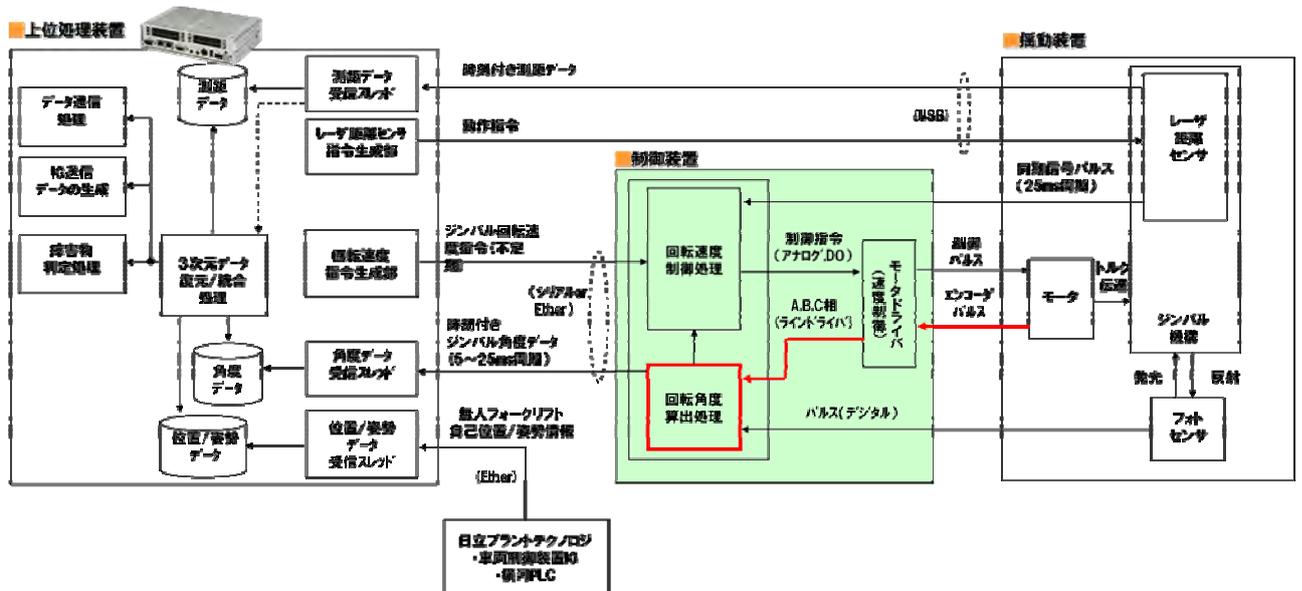


図 5.3.8-6 レーザースキャナ同期出力の仕様

図 5.3.8-7 は、1 リンク揺動機構に使用されるコンピュータの間のデータの流れを示す。一番左側がフォーク型物流支援ロボットの制御コントローラ、次に、3 次元障害物センサーの Box PC、その次に、今回時刻同期を取るために利用した制御基板、最後にサーボアンプがある。

右から左へのデータの流れでは、サーボアンプの角度、状態データが制御基板により、角度、状態通知のデータになり、3 次元障害物センサーの Box PC がフォーク型物流支援ロボットの制御コントローラへ最終のデータを送信する。



図 5.3.8-7 1 リンク揺動機構 制御信号の流れ

(8) レーザースキャナの仕様

レーザースキャナは、2リンク揺動機構と1リンク揺動機構で同じ型式のレーザースキャナを使用した。そのため、ここではその仕様についての記載を省略する。

(9) Box PC の仕様

Box PC は、2リンク揺動機構と1リンク揺動機構で同じ型式の Box PC を使用した。そのため、ここではその仕様についての記載を省略する。

(10) サーボモーター・アンプの仕様

サーボモーターには、次の要求事項がある。これらの要求事項から、サーボモーターを選定した。

- ①小型軽量であること。レーザースキャナを揺動させるために必要で十分出力があればよい。
- ②通信によりモーターのエンコーダのデータを Box PC で高速に取得できること。
- ③DC 電源駆動できること。これにより自動走行に使用するバッテリーと整合する。



図 5.3.8-8 サーボモーターの外観



図 5.3.8-9 サーボアンプの外観

表 5.3.8-2 にサーボモーターの仕様を示す。DC24V で駆動でき、24V バッテリー使用の AGV ではロボットのバッテリーで電源を供給できる。20W の小型モーターがシリーズ中にあり、軽量のレーザースキャナを揺動させるのに十分な出力がある。このモーターは、3次元レーザースキャナの上部に取り付けるため、このモーターがセンサー本体の外形寸法に影響する。このため、揺動に余裕のあり過ぎるモーター出力とならず、最適な設計が可能となった。

表 5.3.8-3 にサーボアンプの仕様を示す。13ビットのインクリメンタルシリアルエンコーダの出力を通信で Box PC が取得でき、このデータを座標計算に使用する。このアンプは最大で 50W まで出力できるため、20W 出力のモーターの制御に使用する。

表 5.3.8-2 サーボモーターの仕様

項目		仕様
時間定格		連続
振動階級		V15
絶縁抵抗		DC500 V、10 MΩ 以上
周囲温度		0~40°C
励磁方式		永久磁石形
取付け方式		フランジ形
耐熱クラス		B
絶縁耐圧		AC1000 V 1分間
保護方式		全閉・自冷
周囲湿度		20~80%(結露しないこと)
連結方式		直結
電源電圧		DC 24 V
サーボモータ形式 SGMMJ-		A2C
定格出力	W	20
定格トルク*	N・m	0.0638
瞬時最大トルク	N・m	0.191
定格電流	A(rms)	2
瞬時最大電流	A(rms)	5.7
定格回転速度	min ⁻¹	3000
最高回転速度	min ⁻¹	5000
トルク定数	N・m/A(rms)	0.0358
回転子慣性モーメント	× 10 ⁻⁴ kg・m ²	0.00548
インクリメンタル(絶対値)		-0.00466
定格パワーレート	kW/s	7.41
定格角加速度	rad/s ²	116000

表 5.3.8-3 サーボアンプの仕様

項目	仕様
入力電源	DC24 V \pm 15%
制御方式	MOSFET-PWM方式
フィードバック	13 ビット インクリメンタルシリアルエンコーダ
使用/周囲温度	0 \sim 40 $^{\circ}$ C(盤内使用も含む)
保存温度	-20 \sim +85 $^{\circ}$ C
使用保存湿度	90%RH以下(結露なきこと)
耐振動/耐衝撃	周波数 : 10 \sim 55 Hz 振幅 : 0.075 mm
電源電圧	DC24 V
最大適用モータ容量 W	50
定格/最高回転速度	SGMMJ形3000/5000 min $^{-1}$
適用エンコーダ	インクリメンタルエンコーダ(13 ビット)
許容負荷慣性モーメント	各回転子慣性モーメントの30 倍以内 ^{*3}
負荷変動率	0 \sim 100% : 0.01%以下(定格回転速度で運転した場合)
電圧変動率	0%
温度変動率	25 \pm 25 $^{\circ}$ C : \pm 0.1%以下(定格回転速度で運転した場合)
周波数特性	400 Hz($J_L=J_M$ の場合)
トルク制御(再現性)	\pm 2.0%
加減速時間設定	0 \sim 10 s
速度定格指令電圧	DC \pm 6 V(プラス指令でモータ正転)
	可変設定範囲 : DC \pm 2 \sim \pm 10 V \pm 12 Vmax
速度入力インピーダンス	約14 k Ω
トルク定格指令電圧	DC \pm 3 V(プラス指令でモータ正転)
	可変設定範囲 : DC \pm 1 \sim \pm 10 V \pm 12 Vmax
トルク入力インピーダンス	約14 k Ω
トルク回路時定数	約47 μ s
位置出力形態	A相、B相、C相ラインドライバ出力
	S相 : ラインドライバ出力(絶対値エンコーダ使用時のみ)
位置分周比	任意分周

(11) 開発した1リンク揺動機構



図 5.3.8-10 1リンク揺動機構 機構部

図 5.3.8-9 は、開発した 1 リンク揺動機構の機構部である。1 個のモーターの回転を使って、レーザースキャナを 60° 揺動させることが可能になった。

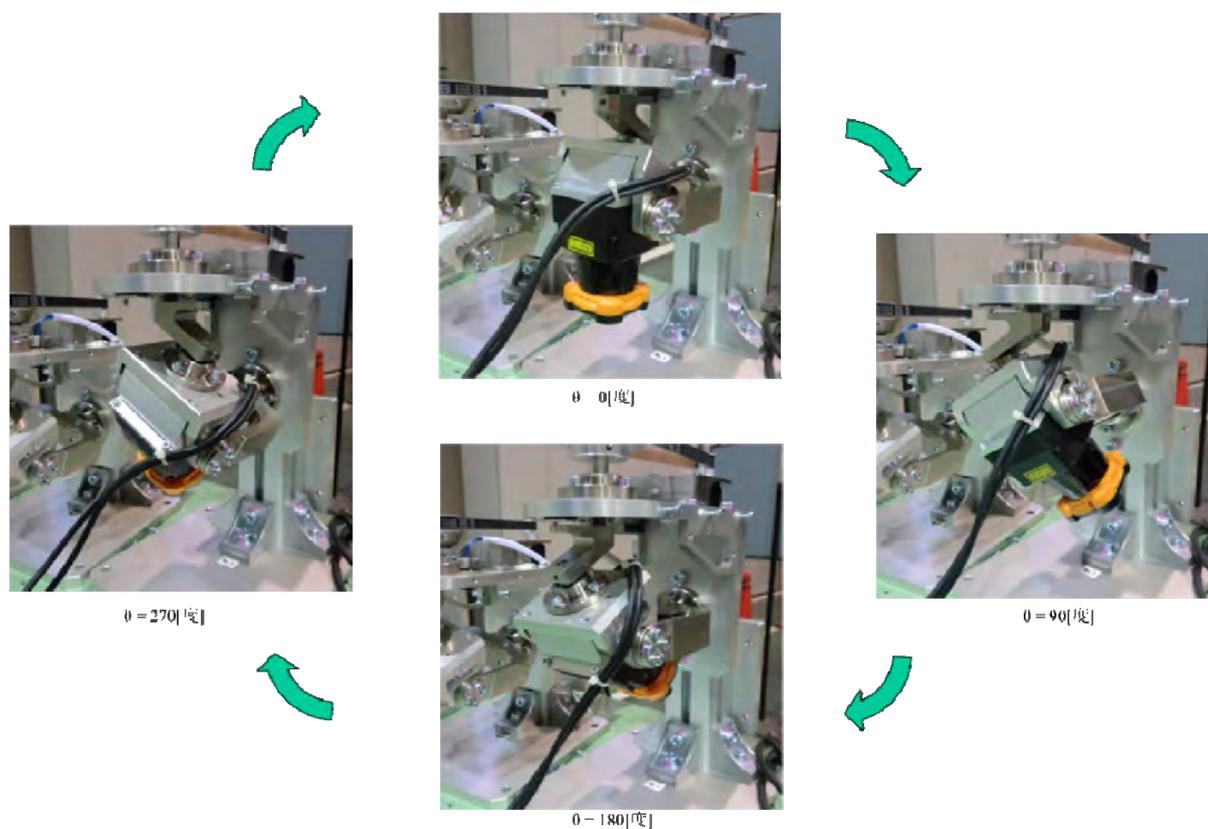


図 5.3.8-11 1リンク揺動機構 機構部の動作

図 5.3.8-11 に 1 リンク揺動機構の機構部の動作を動画で表示している画面である。揺動機構のモーターは一定速度で一定方向に回転するため、2 リンク揺動機構のように動作の折り返しがなく、高速で回転することが可能になった。

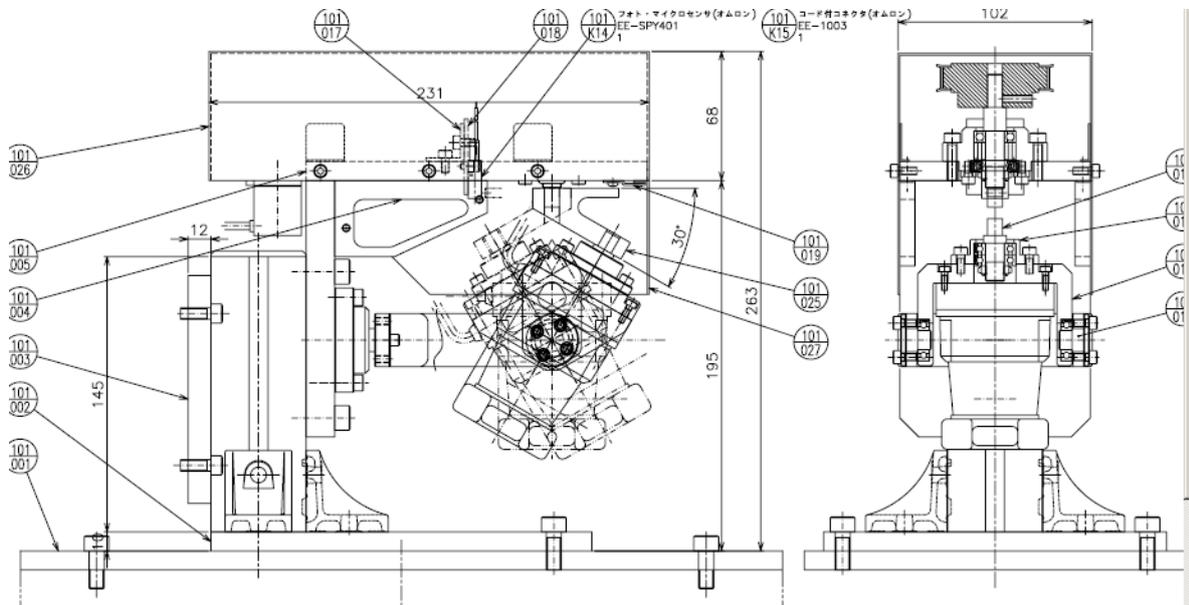
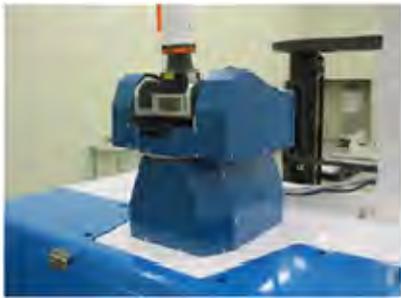


図 5.3.8-12 1 リンク揺動機構 機構部完成図

図 5.3.8-12 は 1 リンク揺動機構の完成組立図である。揺動機構のレーザースキャナの支持とリンク機構の支持にボールベアリングを採用する寸法にして、物流の人と共存する環境下での長寿命化を図っている。

(12) 開発結果

3次元障害物検出装置の小型化



寸法: H363mm × W245mm × D239mm

2リンク揺動機構

➡



寸法: H263mm × W162mm × D190mm

1リンク揺動機構

図 5-3-30 2 リンク揺動機構と 1 リンク揺動機構の比較

図 5-3-30 に 2 リンク揺動機構と 1 リンク揺動機構の比較を示す。外形寸法が小型し H363×W285×D239mm の機構を、H263×W102×D250mm と小型化することができた。

表 5.3.8-4 に 2 リンク揺動機構と 1 リンク揺動機構の開発品の比較を示す。4 項に示すように体積比で 3.9 分の 1 に小型化することができた。測定範囲、測定精度の仕様は同等としている。水平方向のスキャン速度は、レーザースキャナの仕様から決まるため、同等である。揺動の結果、周囲の 3 次元データを 1 回測長するために要する時間は、500ms に 1 回の速度だったのが 200ms に 1 回の測定となり、測定的高速化を図ることができた。

表 5.3.8-4 2 リンク揺動機構と 1 リンク揺動機構の比較

No.	項目	仕様	
1	センサ方式	2リンク揺動機構	1リンク揺動機構
2	製作元・提供元	日立産機システム 開発内容	日立産機システム 改良版の開発内容
4	寸法	H363mm × W285mm × D239mm	H263mm × W102mm × D250mm
4	体積比	3.9	1 【小型化】
6	測定範囲	断面積：H2.0m × W1.2m の矩形 測定長：20m	断面積：H2.0m × W1.2m の矩形 測定長：20m 【測定範囲は同等】
7	測定精度	100mm以内	100mm以内
8	測定周期 (水平スキャン)	14400° /sec	14400° /sec
9	測定周期 (3次元)	500msecに1回、3次元データ測定	200msecに1回、3次元データ測定 【高速】

5.3.9 安全サポート系の3Dシミュレーションソフト（PCのソフト）

(1) 3Dシミュレーションソフト ソフトウェアの構成

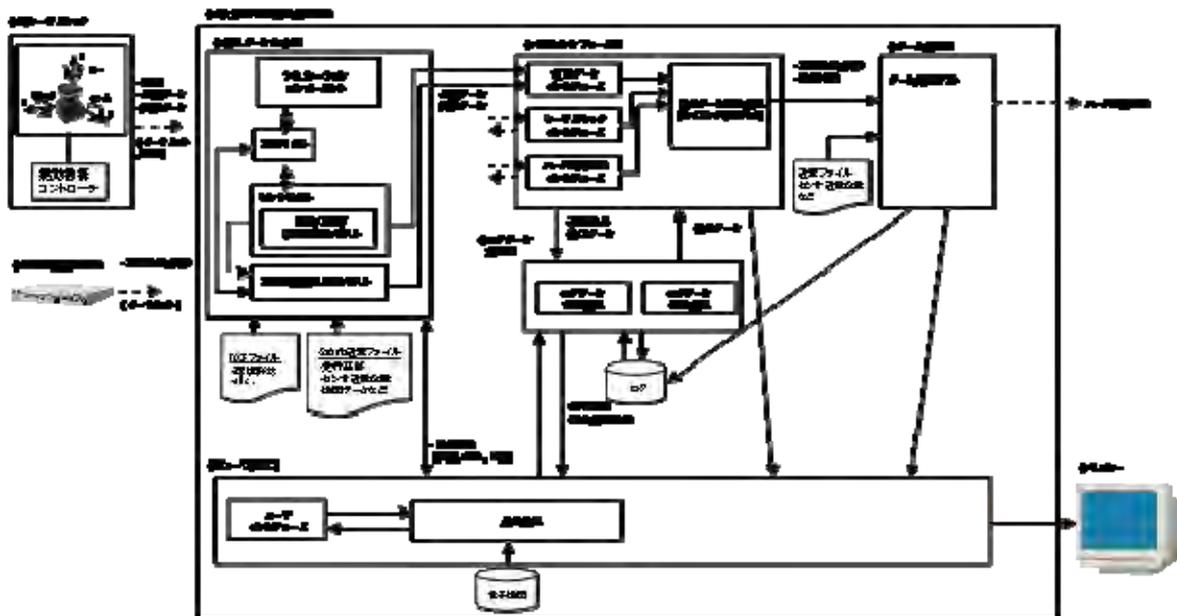


図 5.3.9-1 安全サポート系 PC 側のソフトウェアの構成

安全サポート系を利用するためには、3次元障害物センサーのユーザーインターフェースとなる PC 側のソフトウェアが必要になる。図 5.3.9-1 に安全サポート系を利用するために使用する PC 側（パソコン側）のソフトウェアの構成を示す。レーザースキャナデータを無線 LAN または、イーサネットに取り込み、3次元障害物センサーに使用している Box PC のデータを PC に無線 LAN またはイーサネットに取り込み、PC 内でログを解析、あるいは事前のシミュレーションをしてモニター画面上の図形で表示するソフトウェアとなる。

図 5.3.9-1 の中央の大きな四角い枠で囲まれた部分が PC 内のソフトウェア部分を示す。PC 内のソフトウェアには、3次元障害物センサーの Box PC 内で動作するソフトと同一のソフトウェアを同じプログラムソースの形で取り込んでおり、これにより、PC の仮想空間の中で3次元障害物センサーと同一の動きをすることができる。これにより3次元障害物センサーのログの解析、あるいは事前に3次元障害物センサーの動作をシミュレーションをすることができる。

この開発では、2リンク揺動機構と1リンク揺動機構の2種類を開発したが、機構の違いの部分だけを PC 内に記述することにより、両方の揺動機構ともこのソフトウェアで同等にログ解析とシミュレーションをすることが可能である。

(2) 3D シミュレーションソフトの目標とする最終形

図 5.3.9-2 には、本ソフトウェアのシミュレータの最終形のイメージ画を示す。3次元でフォーク型物流支援ロボットの動作をシミュレーションし、作業者が危険エリアに入り込んだ場合に、どのような動作をするか、実際にロボット内で動作するソフトウェアをシミュレーションし、その動作を作業者の位置、形状も含めて3次元表示することを目指している。このためには、3D シミュレーションソフトの中に、ロボットの走行ソフトウェアの取り込みが今後の課題となる。また、動作のログを本ソフトウェアで操作しログを使ったシミュレーションすることにより、過去の動作の中から、作業者が障害物検出エリアに入った時の動作を3次元画面で再現することができる。



図 5.3.9-2 安全サポート系 PC 側のソフトウェアの構想

表 5.3.9-1 には、3D シミュレーションソフトをどのような人がどのような段階で利用するのかをまとめた。このシミュレーションソフトでは、計画段階でのシミュレーションから、実際にフォーク型物流支援ロボットの走行用に地図を作成し、走行経路を設定し、走行するプログラムを作成し、さらに走行ログを解析するまでの走行ロボットの各段階で共通に使用することが可能となる。

その原理は、3D シミュレータ内に、3D 障害物センサーや走行ロボットのソフトそのものを取り込み、実物が動作するのと同じの入出力を与えることにある。このように利用することで、計画段階で作成したデータがその後の運用、保守の段階でも共通に利用できるようになり物流システム全体の構築運用コストの低減を図ることを目標とする。

表 5.3.9-1 3D 障害物センサ用 シミュレーションソフトの利用形態

No.	分類	ソフトウェア利用者	内容
1	計画段階	<ul style="list-style-type: none"> ・(ユーザー)計画立案者 ・(メーカー)ロボットの提案者 	<ul style="list-style-type: none"> ・通路の寸法確認(通行の可否) ・運用効率のシミュレーション (走行時間検討、待ち時間検討)
2	地図作成	<ul style="list-style-type: none"> ・(ユーザー)生産技術担当 ・(メーカー)システム構築担当 技術者 	<ul style="list-style-type: none"> ・走行経路の3次元地図を生成
4	走行経路設定		<ul style="list-style-type: none"> ・PC画面上で走行経路を指定
4	走行プログラム作成		<ul style="list-style-type: none"> ・走行プログラムを作成 (信号待ちの設定、データ入出力のプログラミング)
5	走行ログの解析	<ul style="list-style-type: none"> ・(ユーザー)管理運用担当者 	<ul style="list-style-type: none"> ・物流の効率を確認 (無駄時間、停止時間の原因分析)

図 5.3.9-3 で示す 3D シミュレーションソフトウェアには大きく 4 つのブロックがある。

- ① レーザースキャナのデータを取り込み、座標変換するブロック
- ② ロボットの動作をシミュレーションするブロック
- ③ シミュレーションした結果を 3 次元表示するブロック
- ④ これらのデータを保存、参照するブロック

からなる。これらのブロックから本ソフトは構成される。

(3) パソコンに必要とされる仕様

表 5.3.9-2 に本ソフトウェアを動作させるために必要なパソコンの仕様を示す。ハードウェアは一般的な仕様のパソコンを使用し、ソフトウェア上はオープンソースの OpenGL を動作させ、開発環境は Microsoft 社の Visual Studio を使用する。

表 5.3.9-2 PC 側ソフト動作のための PC ハードウェア要求仕様

No.	項目	内容
1	OS	Windows XP SP3 以上
2	種類	PC/AT 互換機
3	メモリ	2GB 以上
4	ビデオカード	OpenGL1.4 以上をサポートしていること
5	開発環境	Visual Studio 2008 Professional

(4) 障害物検出のシミュレーション機能

図 5.3.9-3 に PC 側ソフトウェア内にフォーク型物流支援ロボットの周囲に持たせる防護エリア、警告 1 エリア、警告 2 エリアを示す。フォーク型物流支援ロボットの動作をシミュレーションするために、本体と同じく、これらのエリアを PC 内に持たせてシミュレーションする。

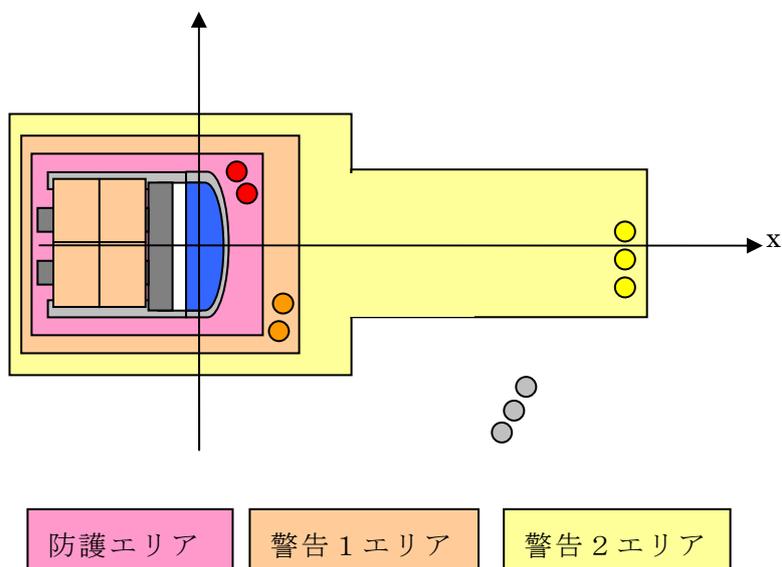


図 5.3.9-3 安全サポート系 PC 側ソフトウェアの管理エリア

図 5.3.9-4 にこれらの管理エリアの構成を示す。これらのエリアを小さなエリアの合成から構成して、ロボット本体と同じくなるように、柔軟にエリア設定ができるように複数のサブエリアの組合せでエリアを表現する。

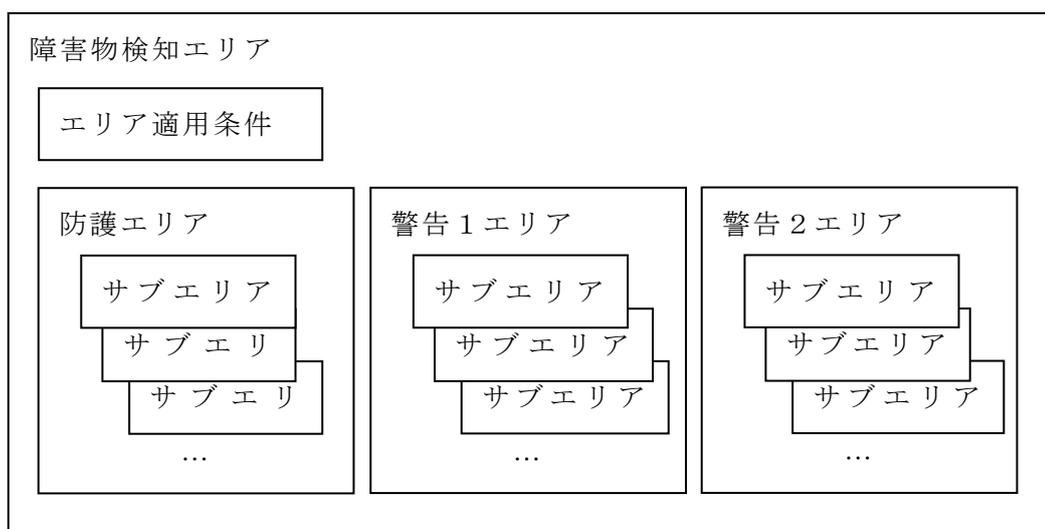


図 5.3.9-4 安全サポート系 PC 側ソフトウェアの管理エリアの構成

(5) 障害物のモデリング

図 5.3.9-5 には、本 PC ソフトウェア内で障害物をモデリングして、シミュレーションする 3次元空間内に設置する方式を示す。障害物の形状を入力するために頂点の座標を入力し、障害物の大きさ、位置を設定する。この障害物を本ソフトウェアの 3D 空間内に設置すると、シミュレーション内のレーザーセンサーがこの障害物を検出して、管理エリア内に入ると、シミュレーション上の安全サポート系センサーが防護動作、警告 1 動作、警告 2 動作を実施することが分かる。

安全サポート系センサーのソフトウェアは、実物と本ソフトで同一のソフトを利用しているため、障害物のモデリングが現物に忠実であれば、現物と同じシミュレーションを本ソフト内で実施することが可能となる。

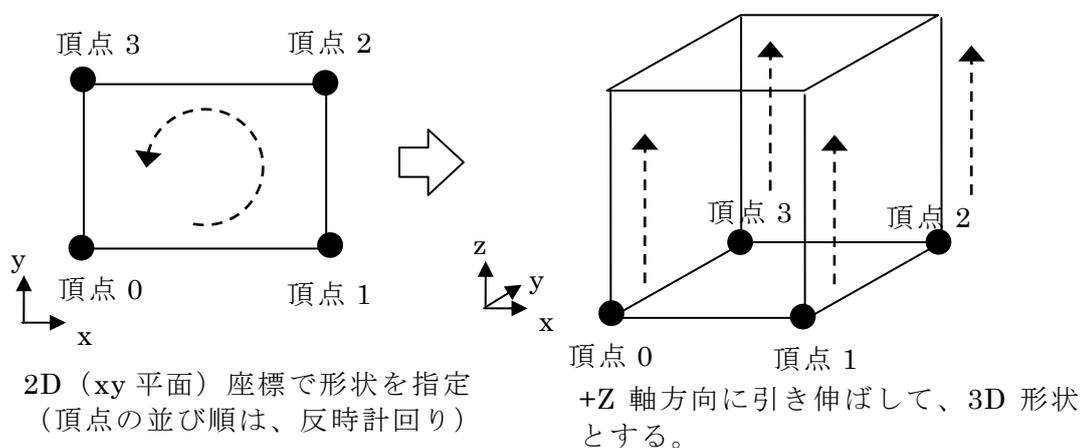


図 5.3.9-5 安全サポート系 PC 側ソフトウェア 物体のモデリング

(6) シミュレーションの例

図 5.3.9-6～図 5.3.9-9 に完成した本ソフトのパソコン画面上での表示した例を示す。図 5.3.9-6 は、平面図でフォーク型物流支援ロボットとその周りの障害物検出のための管理エリアを描いた例である。実際のフォーク型物流支援ロボットで設定する管理エリアに合わせて、これらのエリアを設定する。

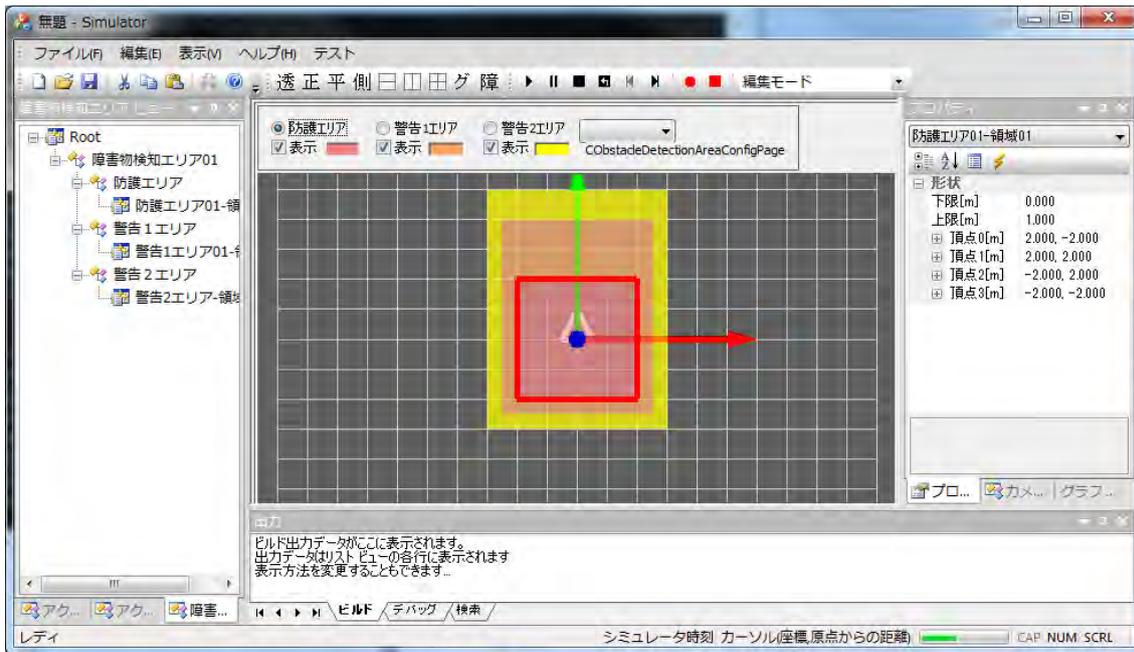


図 5.3.9-6 安全サポート系 PC 側ソフトウェア シミュレーション画面 1
(管理エリア (減速エリア、停止エリア) の設定)

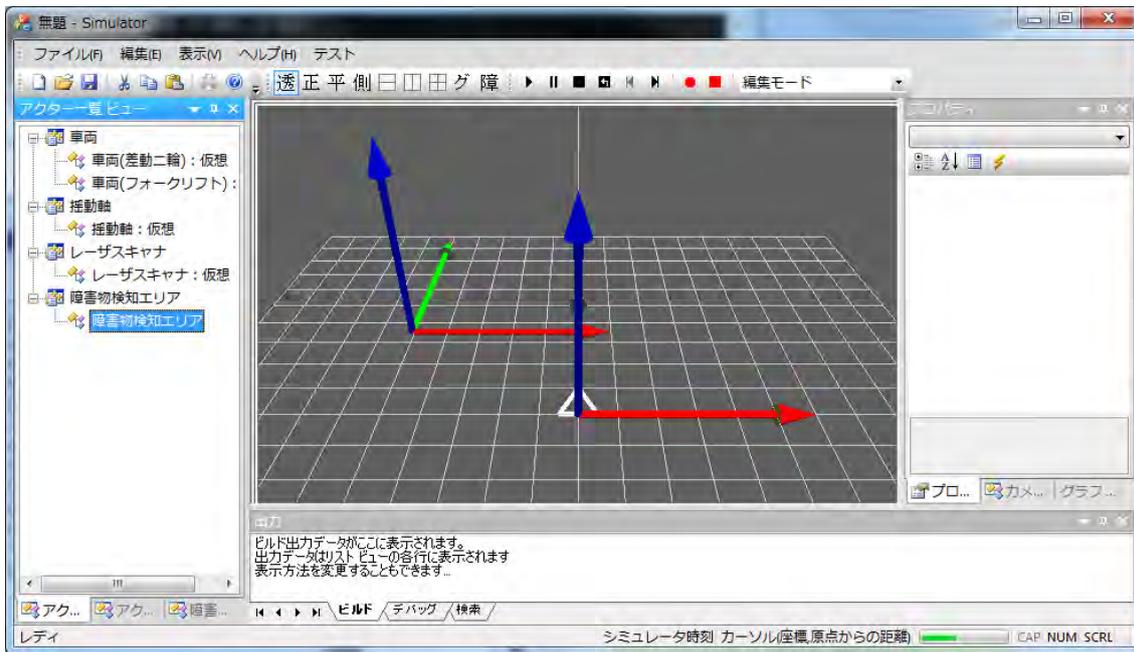


図 5.3.9-7 安全サポート系 PC 側ソフトウェア シミュレーション画面 2
(フォーク型物流支援ロボットの位置の設定、障害物位置の設定)

図 5.3.9-7 はロボットと障害物を画面内に設定する作業の様子を示す。ロボットと障害物の位置を縦の矢印状の直線で示す。この後、ロボットの形状、障害物の形状を入力すると画面内にそれらが表示され、シミュレーションすることが可能となる。

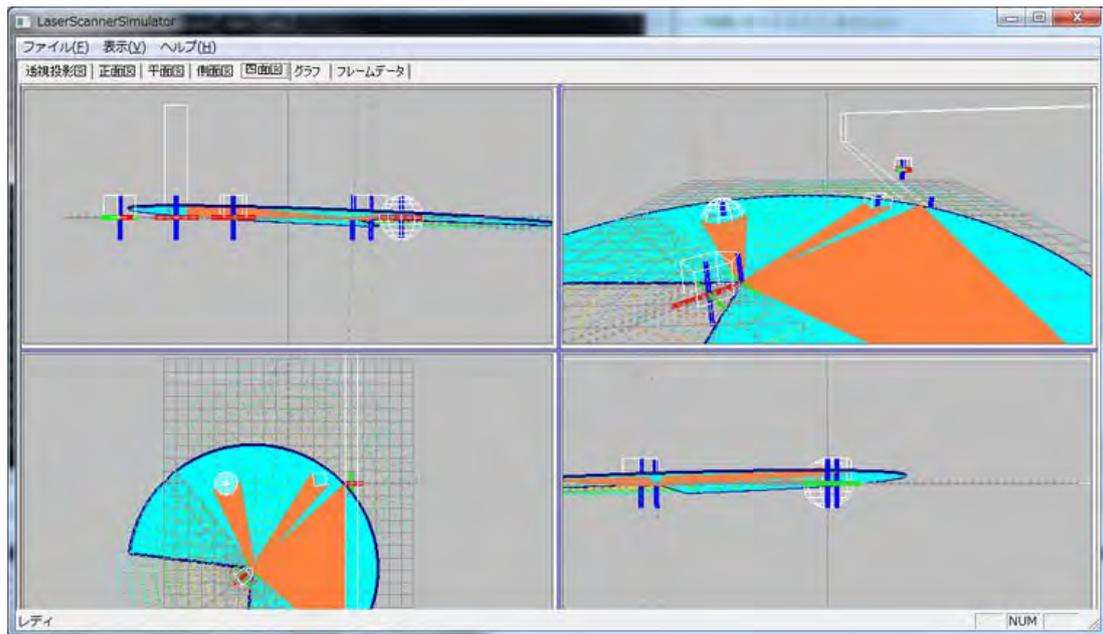


図 5.3.9-8 安全サポート系 PC 側ソフトウェア シミュレーション画面 3
(走行中のロボットを 4 方向の視点からの表示)

図 5.3.9-8 はシミュレーションを実施してロボットを動作させる画面を示す。3次元モデリングした結果の画面であるため、同じ状態を表示する方向から 4 種類の画像としている。これらの図は同じ状態を異なる視点から表示したもので、同じ内容の位置関係を示している。

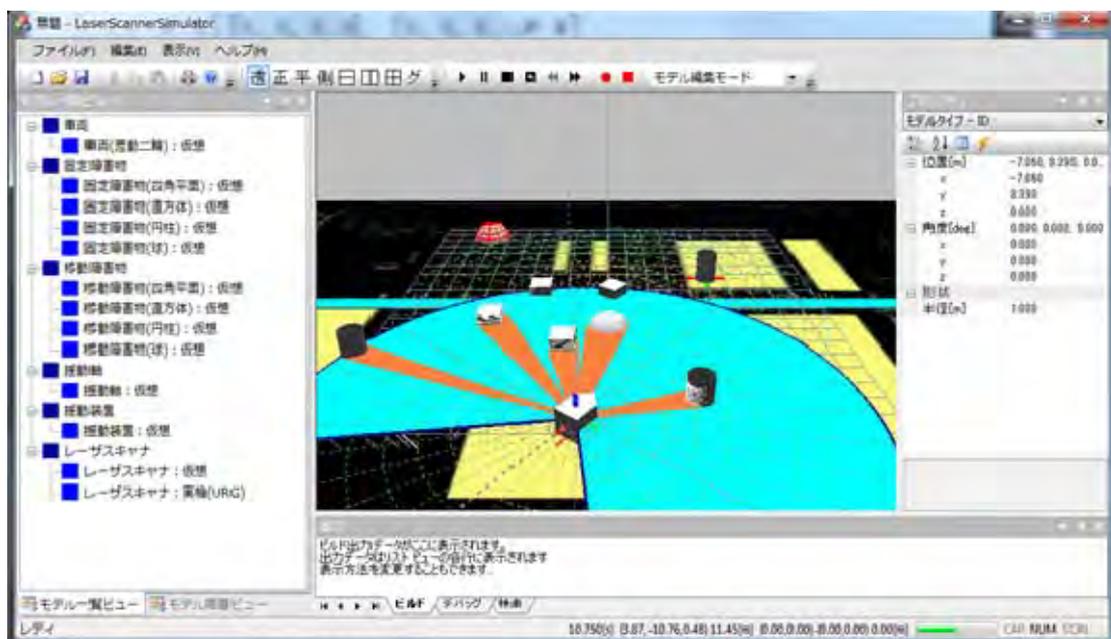


図 5.3.9-9 安全サポート系 PC 側ソフトウェア シミュレーション画面 4
(総合のシミュレーション画面)

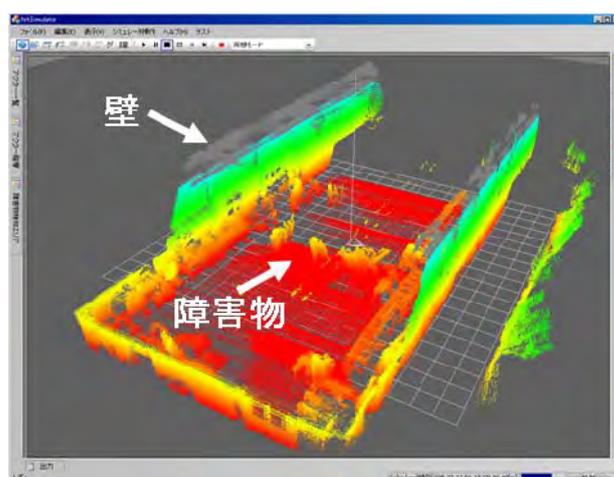
図 5.3.9-9 は、ロボット動作のシミュレーションを実施中の画面を操作画面とともに表示している。安全サポート系センサーのシミュレーション結果を図示している。すなわち、画面内の障害物を検出してその障害物までの距離を認識している。

(7) 走行ログの解析



図 5.3.9-10 安全サポート系 PC 側ソフトウェア 走行ログ解析

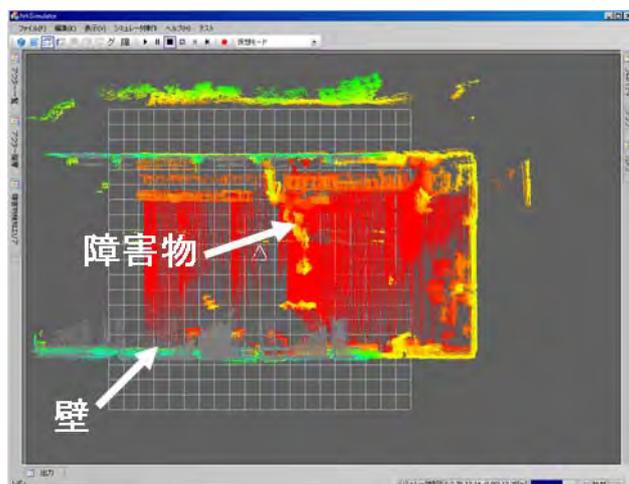
安全サポート系 PC 側のソフトウェアは、走行動作中にとった安全サポート系の動作ログを解析して、その結果を PC 画面に表示できる。図 5.3.9-11 はその表示内容を示す。



**検出データ:障害物立体表示
(高さを色分けして表示)**

図 5.3.9-11 安全サポート系 PC 側ソフトウェア 3次元計測ログ解析結果 1
(走行ルートの屋内形状の表示 (実測データ))

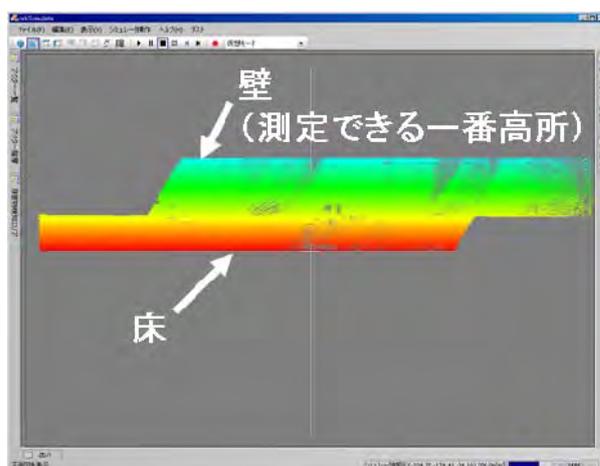
図 5.3.9-11 は安全サポート系センサーのログを解析して 3 次元表示した時の画面である。フォーク型物流支援ロボットの周囲に存在した、壁は障害物の形状が 3 次元で表示されている。



検出データ:平面図

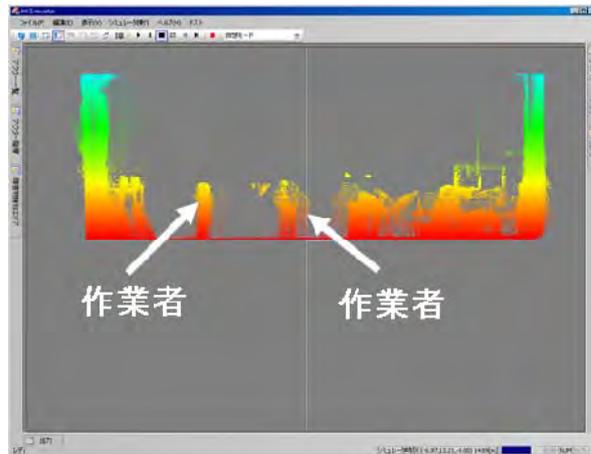
図 5.3.9-12 安全サポート系 PC 側ソフトウェア 3 次元計測ログ解析結果 2
(走行ルート of 屋内形状の表示 (平面図))

図 5.3.9-12 は 3 次元計測ログの解析結果を平面図で表示したものである。壁の形状が四角の部屋を示している。障害物も検出されていることが分かる。また、フォーク型ロボットの走行通路外の物体の形状も記録されていることが分かる。



**検出データ:側面図
(試験場の壁面)**

図 5.3.9-13 安全サポート系 PC 側ソフトウェア 3 次元計測ログ解析結果 3
(走行ルート of 屋内形状の表示 (側面図、壁側))



検出データ:平面図(作業者など)

図 5.3.9-14 安全サポート系 PC 側ソフトウェア 3次元計測ログ解析結果 4
(走行ルートの屋内形状の表示(側面図、部屋の中央))

図 5.3.9-15 は、3次元計測ログの解析結果である。作業者の形状がわかるように表示されているのが分かる。

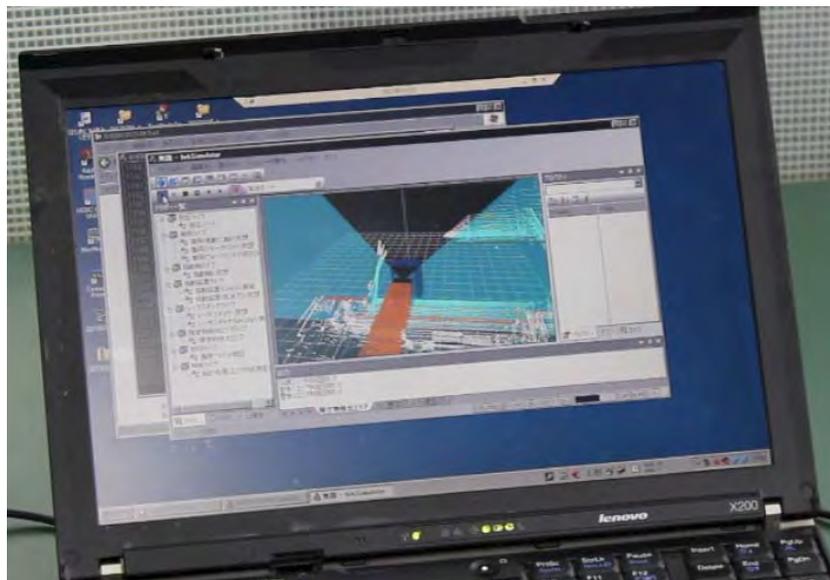


図 5.3.9-15 安全サポート系 PC 側ソフトウェア パソコン表示

図 5.3.9-15 は安全サポート系の PC 側ソフトウェアをノートパソコンにインストールし、走行中のフォーク型物流支援ロボット上に搭載されている安全サポート系のセンターとノートパソコンを無線 LAN で接続して時の画面である。

3次元の計測結果は、動作ログだけでなく、このようにリアルタイムで3次元表示することが可能である。

(8) シミュレーション

図 5.3.9-16 と図 5.3.9-17 は PC 画面上でロボット動作をシミュレーションしアニメーションで表示した画面の例である。シミュレーション画面内で、走行地図データを入力し、ロボットの形状と通路を指定し、通路上に障害物を設置して走行させる。その結果、ロボットの走行動作がシミュレーションされるとともに、障害物が安全サポート系センサーにどのように検出されるかをシミュレーションできる。

障害物は、PC 上でモデリングする。実測のログデータから障害物のモデルを抽出してシミュレーション画面で使用することが今後の課題となる。

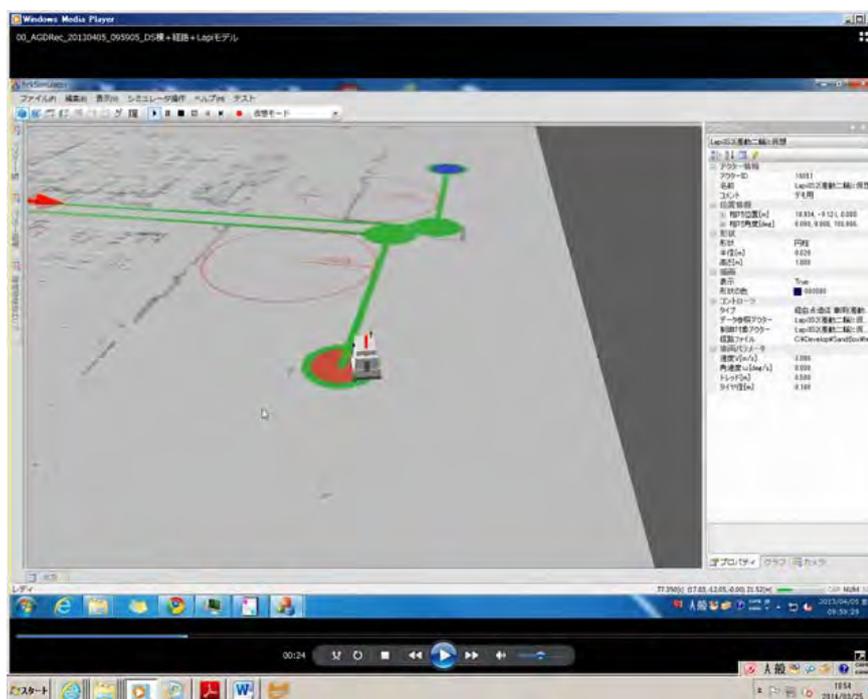


図 5.3.9-16 安全サポート系 PC 側ソフトウェア シミュレーション機能
(走行開始地点 (サークル) から走行開始動作)

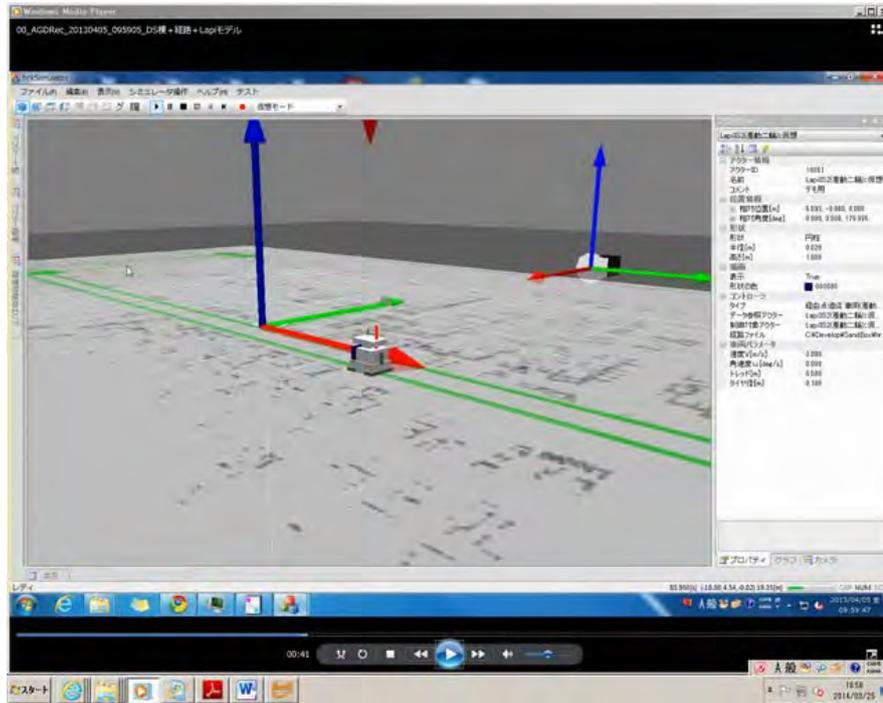


図 5.3.9-17 安全サポート系 PC 側ソフトウェア シミュレーション機能
(コーナーを回った後の走行動作)

5.4 安全系の設計

5.4.1 非常停止回路

非常停止回路は入力源として非常停止スイッチ、バンパー、サイドバンパー、安全 PLC からの出力回路、通常制御系の動作可否信号の直列回路で、非常停止信号で走行モーター、油圧ポンプ駆動モーターの駆動インバータの電源供給を遮断するとともに、電磁ブレーキの励磁を遮断し、走行の動力遮断をしたうえでブレーキ停止する。後面バンパーとサイドバンパーには検出素子としてテープスイッチを使用している。テープスイッチは2端子接続ではノーマリーオフ（A接点）の感圧スイッチ素子であるが、4端子接続で使用し常時微弱な電流を流し、通常状態の循環電流の減少でテープスイッチ内の断線を検知し、循環電流の増加で接触検知の両方を行えるインターフェース回路でノーマリーオン化（B接点化）して対人接触を検知する。

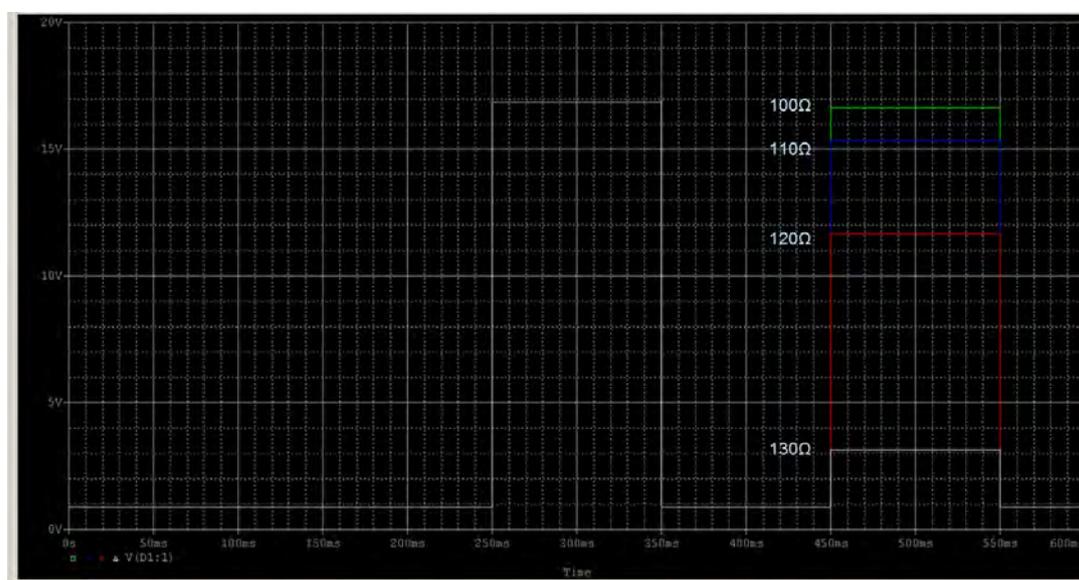


図 5.4.1-1 テープスイッチのオン時の挙動

テープスイッチのオン時の4端子接続回路の挙動は、閾値は100Ω強の点にあり、電源電圧やインターフェース回路の回路常数を変動したパラメトリック解析でも100Ω以下の接触抵抗でオンを認識し、安定に動作する。

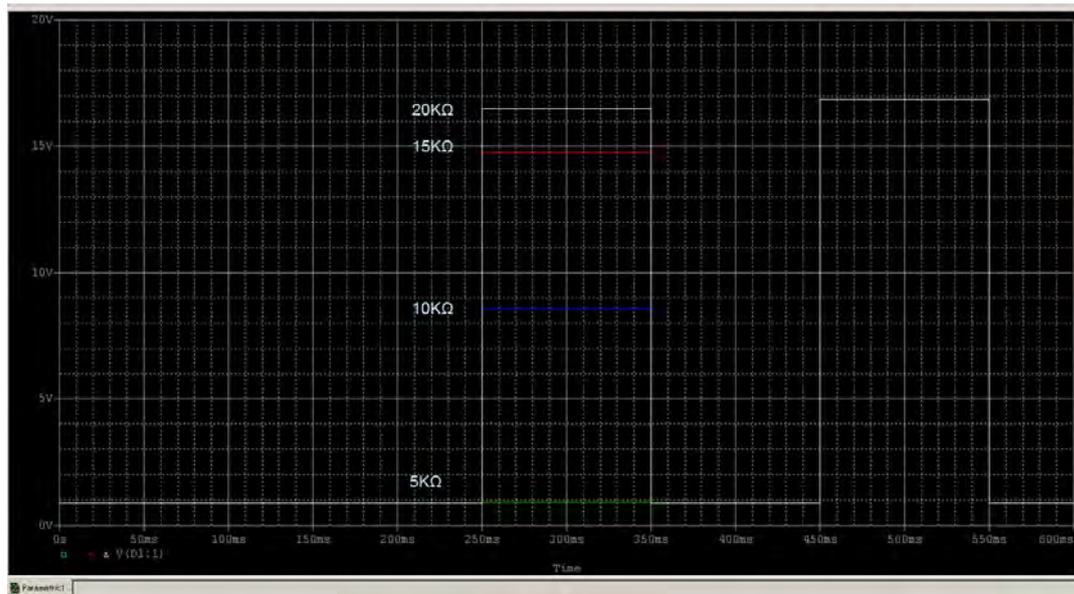


図 5.4.1-2 テープスイッチの断線時の挙動

一方、テープスイッチは実フィールドの運用では運転中あるいは停車中に様々な理由によりバンパーやテープスイッチが接触し、バンパーやテープスイッチの外装が破れ破損した状態をガムテープ等で応急補修しただけで運用することは往々にしてある。生産と止められない顧客サイドの事情や修理部品が届くまでの応急処置などであろうが重要な安全の機器となるバンパーやテープスイッチの危険側故障である断線は検出する必要がある。テープスイッチ断線やコネクタの接触不良に対しては、検出の閾値は数 $k\Omega$ にあり、 $10k\Omega$ 以上の抵抗で安定して断線を検知する。この技術は、無人搬送車の分野では従来から使用されている4端子接続の技術であり、従来からの評価試験結果に加え、今回、改めて解析しなおすことでその有効性を再確認した。

非常停止スイッチは車体の側面の左右、後面の左右、車体後面の操作コンソールに1ヶ所の合計5ヶ所に設置する。バンパーは車体後面の車体下部と車体後面の成人男性の胸部位置の合計2ヶ所に設置する。車体側面は、車体後面のバンパーのように厚みのあるものは車体幅を増やしてしまうために、センサーの厚みが少ないテープスイッチにラバープロテクタを被せたサイドバンパーを、車体側面の左右の下部と胸部位置で合計4ヶ所に設置する。車体側面は車体後面の走行速度と異なり、万一接触することがあってもその側面方向の速度は小さく、ストロークの小さいセンサーでもストローク範囲内で車体を停止することができる。

表 5.4.1-1 テープスイッチの仕様

接点寿命	300 万回	耐電圧	DC250V 1 分間
定格電圧	5～24V	使用温度範囲	0 ～ 50℃
定格電流	10mA～300mA	保存温度湿度	0 ～ 60℃
絶縁抵抗	100MΩ 以上		90%RH 以下

テープスイッチは無人搬送車では一般的に使用されているセンサーで、先に示した4端子接続をすることで信頼性の高い接触検出を行えるデバイスである。(株)東京センサ製のテープスイッチの仕様を表 5.4.1-1 に示す。表 5.4.1-2 に非常停止要因となる安全関係のセンサーの一覧を示す。また図 5.4.1-1 に非常停止要因となるセンサー類、スイッチ類の設置場所を示す。

表 5.4.1-2 非常停止要因

No.	非常停止の要因	数量
1	コンソール脇非常停止スイッチ	1
2	車体後面非常停止スイッチ	2 (左右各 1)
3	車体側面非常停止スイッチ	2 (左右各 1)
4	車体後面下部バンパー	1
5	車体後面上部バンパー	1
6	アウトリガー先端バンパー	2 (左右各 1)
7	アウトリガー下足背検出	2 (左右各 1)
8	車体側面下部サイドバンパー	2 (左右各 1)
9	車体側面上部サイドバンパー	2 (左右各 1)
10	障害物検出	複数要因
11	制御装置異常	1

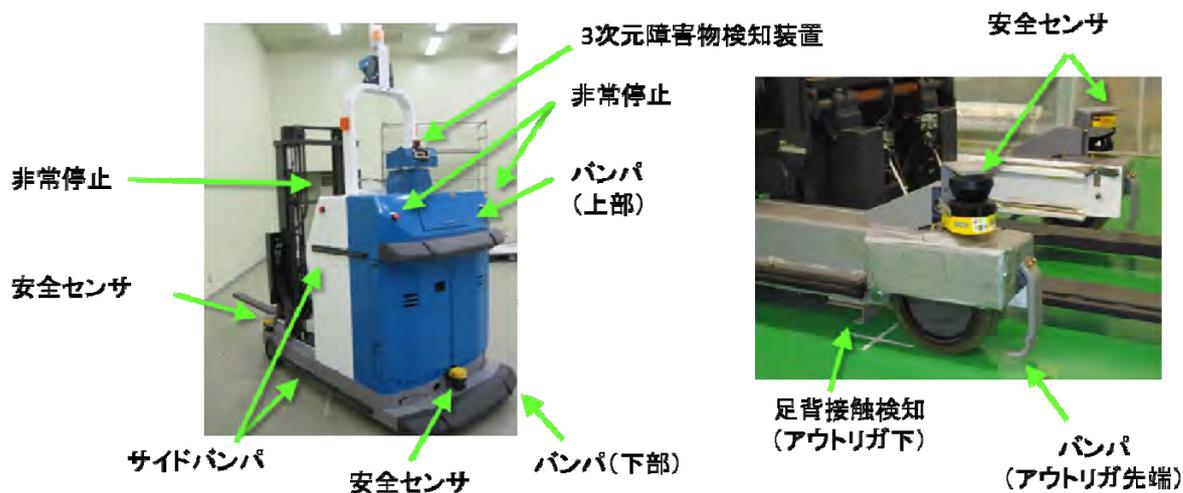


図 5.4.1-1 非常停止要因

5.4.2 制御装置の相互監視

通常制御系の制御装置、3次元位置認識の制御装置が、特定の内部 I/O について周期的に ON/OFF を繰り返し、この状態変化を制御装置間で相互監視する。更に通常制御系の信号を安全系の安全 PLC に入力する。

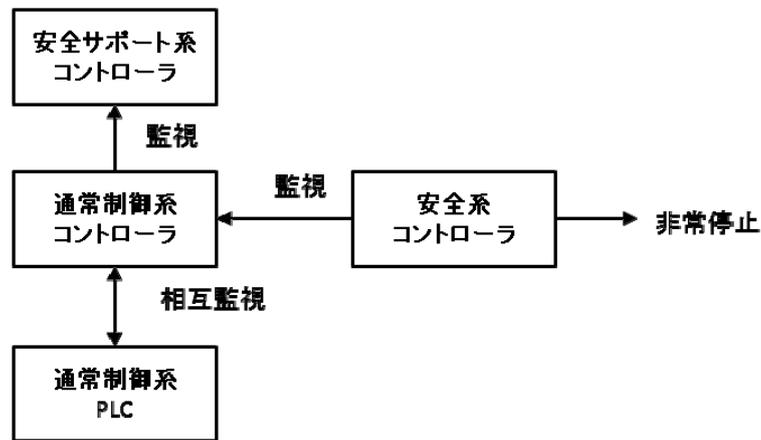


図 5.4.2-1 制御の相互監視

5.4.3 安全センサーによる停止

(1) 動作シーケンスの分解

安全センサーによる防護の前提となるフォークリフト型ロボットの動作シーケンスは以下のようなになる。

- ① 荷降ろしを行う位置の手前まで走行し停止する。フォークリフトは後方走行が基本のため、この前段階で後方走行から一旦停止し、90度の旋回あるいは据え切りに近い操舵を行うスピターンで前進に切り返しをこの直前に行い方向転換を行う。
- ② 荷降ろしを行う位置に物が置かれていないかあるいは障害物（人あるいは物）が無いことを確認の上、荷降ろしを行う位置まで前進する。
実運用では①②は途切れなく行うこともある。
- ③ リーチ機構を前進し、荷をアウトリガーよりも外に出す。
- ④ チルト機構を操作し、荷（フォーク）を水平にする。
- ⑤ リフト機構を操作しフォークを下げ、パレットを着床する。
- ⑥ リーチ機構を操作し、フォークをリーチ後端まで戻しパレットから引き抜く。
- ⑦ 後進する。
- ⑧ リフト機構を操作し、フォークを上げる。

一連のシーケンスを図 5.4.3-1 に示す。このシーケンスは降ろし作業のシーケンスであり、積み作業は上記シーケンスを逆にしたものとなる。積み作業の場合、走行中のパレット上の荷の移動を防止するため、チルト機構を操作し、フォーク先端を持ち上げる操作が最後に入る。

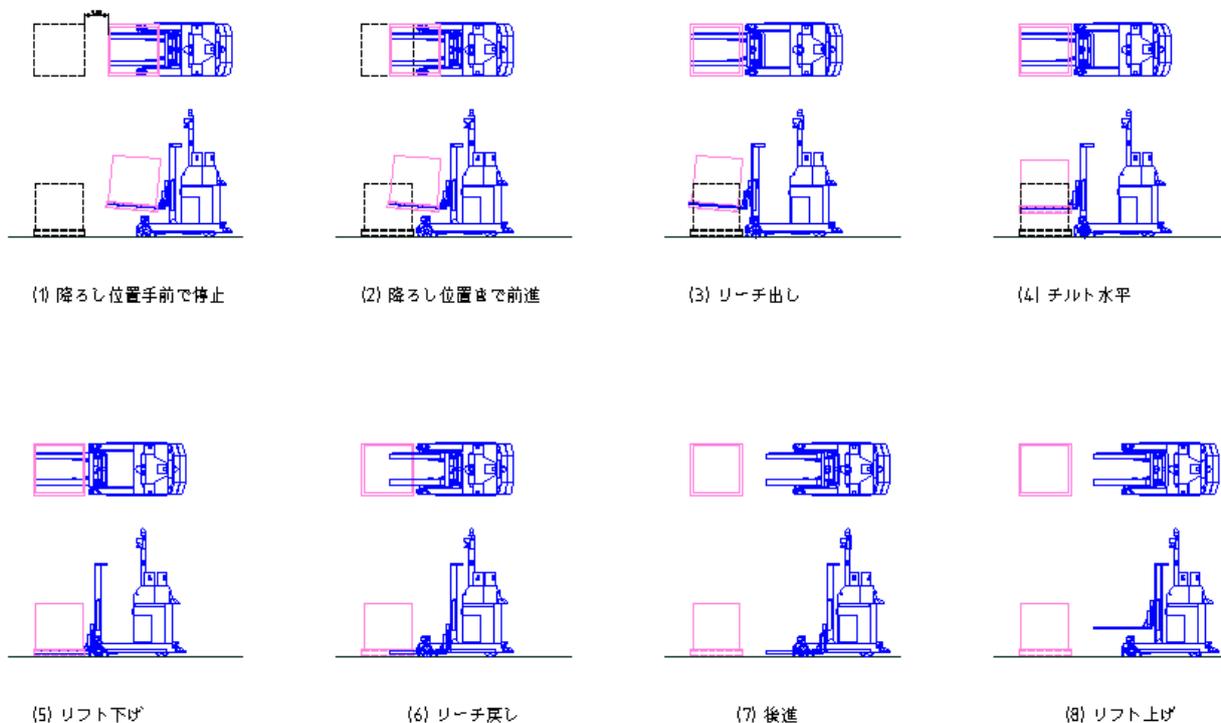


図 5.4.3-1 動作シーケンスの分解

(2) 基本シーケンス防護

非接触の安全センサーは SICK 社製の SIL2 認証を受けている S3000 型と S300mini 型の 2 種類のセンサーを使用し、速度と運転モードにより検出する領域を切り替える。速度に対応した設定距離範囲の例を図 5.4.3-1 に示す。

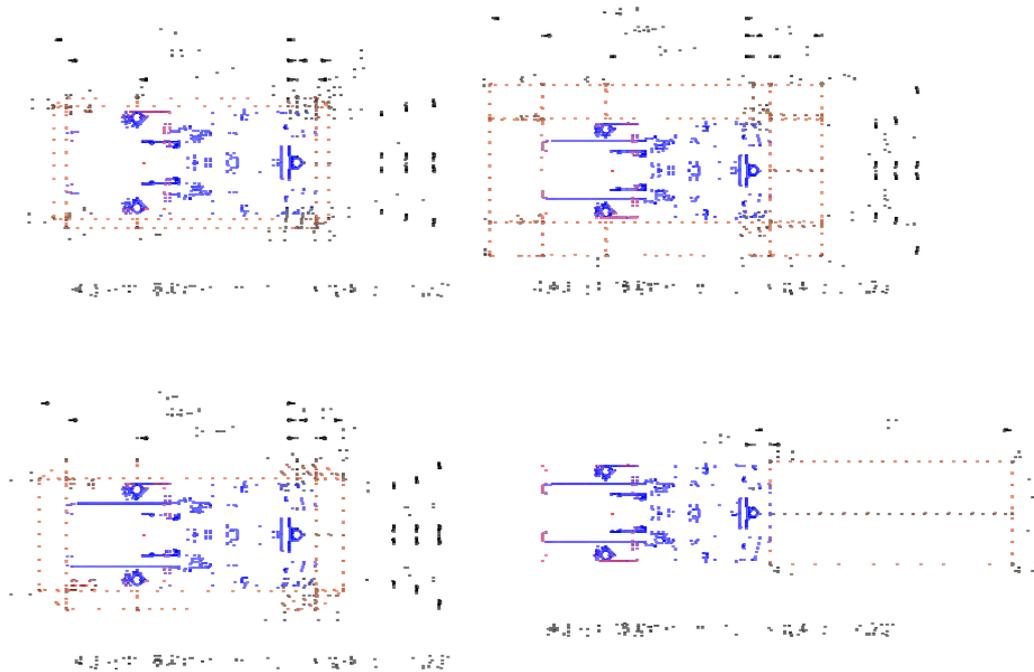
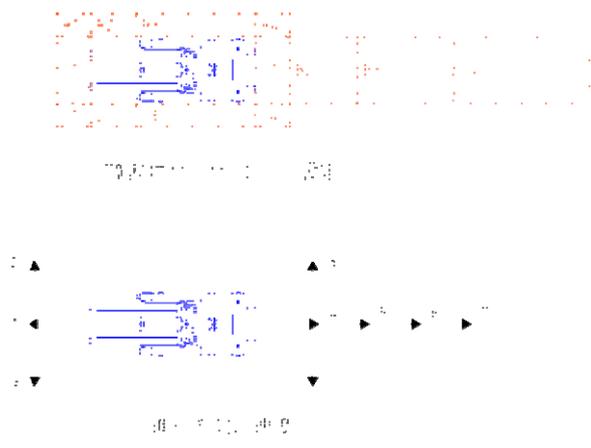


図 5.4.3-2 速度に対応した車体周囲の検出距離設定範囲

ノッチ速度に対応した停止領域はブレーキ性能と運用上の作業性、対人接触リスクから決定した。後方の高速走行では広い範囲をカバーする。低速では車体幅と運搬物であるパレットの幅に対して僅かな余裕のところに整列して荷の積み下ろしを行う空隙と、移載あるいは移載動作に入る前の方向転換動作での人の巻き込みに対しても停止できる距離範囲を設計値に対し、現場で試行錯誤的に調整し検出範囲を決定した。このようにして決定した物理寸法に対応した検出範囲と検出範囲を代表する論理的な領域を運転状況のマトリックスからセンサーの使用可否、使用パターンを決定する。決定マトリックスを図 5.4.3-3 に示す。

安全系の判断の中に通常制御系からの運転状況を示す速度信号、操舵信号が入るが、機能安全を実現する上で代替手段のない不可避な信号であり、安全系の入力信号として使用する。この対策としていかなる条件でも防護範囲がゼロにならない組み合わせを条件設定に入れている。

尚、ここで示す後進右折、後進左折とは当該の進行方向（この場合後進）に対する左右ではなく、車体の前進方向に対する左右の方向を示す。産業機械では安全のため車体への表示として前後方向、左右方向を車体に表示することがあり、この表示内容との整合性のため車体の対する方向で説明する。



		F1	R1	R2	R3	R4	L1	L2	L3	L4	B1	B2	B3	B4
(1)	前進 1速	有効	無効											
(2)	前進 1速 右折	有効	有効	有効	無効	無効	無効	無効	有効	無効	無効	無効	無効	無効
(3)	前進 1速 左折	有効	無効	無効	有効	無効	有効	有効	無効	無効	無効	無効	無効	無効
(4)	後進 1速 (1.2km/h)	無効	有効	無効	無効	無効								
(5)	後進 2速 (2.4km/h)	無効	有効	無効	無効									
(6)	後進 3速 (3.6km/h)	無効	有効	有効	有効	無効								
(7)	後進 4速 (10.5km/h)	無効	有効	有効	有効	有効								
(8)	後進 1速 右折	無効	無効	無効	有効	有効	無効	有効	無効	無効	有効	無効	無効	無効
(9)	後進 1速 左折	無効	無効	有効	無効	無効	無効	無効	有効	有効	有効	無効	無効	無効

	F1	R1	R2	R3	R4	L1	L2	L3	L4	B1	B2	B3	B4
右前方 障害物センサ	○	○	○	○	x	x	x	x	x	x	x	x	x
左前方 障害物センサ	○	x	x	x	x	x	○	○	x	x	x	x	x
後方 障害物センサ	x	x	x	x	○	○	x	x	○	○	○	○	○

図 5.4.3-3 センサー使用決定マトリックス

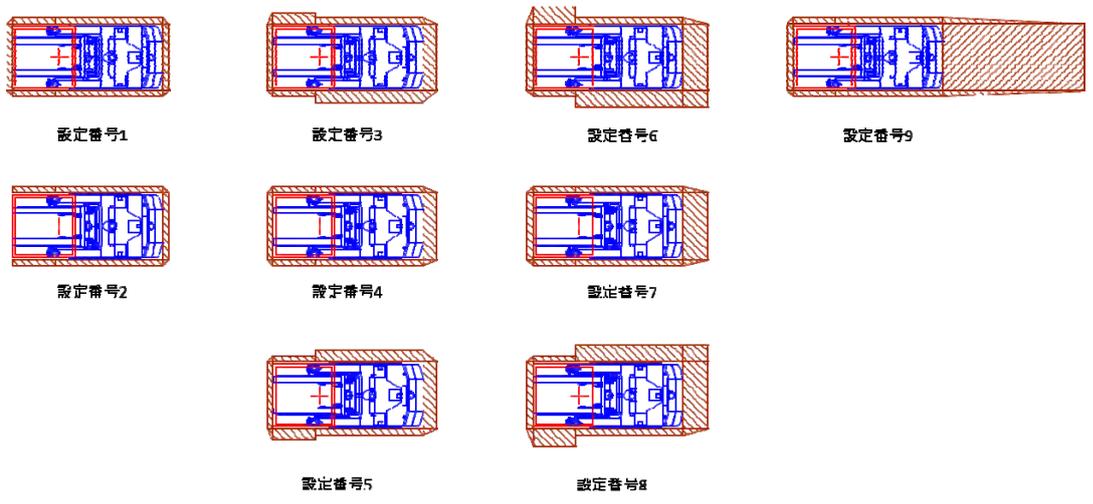


図 5.4.3-4 防護エリアの一覧

図 5.4.3-4 に基本的な防護エリアの一覧を示す。これらの防護エリアの設定をセンサー使用決定マトリックスに従い選択する。

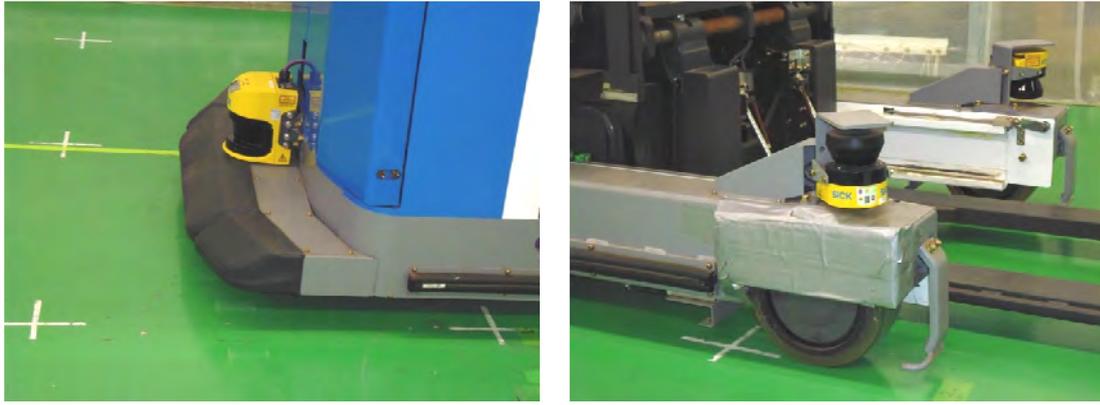


図 5.4.3-5 車体下部の安全センサー

S3000 型と S300mini 型の 2 種類のセンサーの取り付け状態を図 5.4.3-5 に示す。当初の計画では 3 箇所とも S300mini 型であったが、評価段階で安全サポート系とのサポート範囲の拡大から、後方側は S3000 型に変更した。

(3) 防護シーケンスの拡張

今回の評価は荷の形状、運用は自動運転がしやすいパレット上の単一形状の荷で評価をした。しかし一般的には複数形状を扱い、また荷をパレット上に置いたとき、前方側のセンサーに搬送するかしないか、運用する場所の制約、荷を並べて置くピッチが異なるため、防護エリアは更に多くのバリエーションを持つ。図 5.4.3-6 にそのバリエーションを示す。

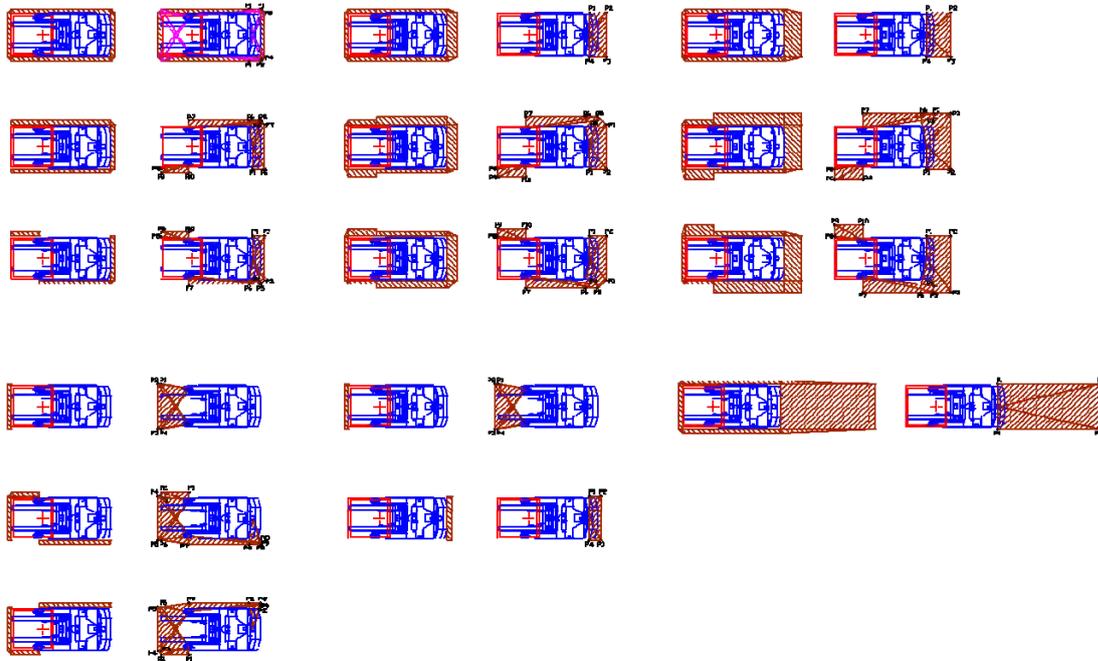


図 5.4.3-6 防護エリアのバリエーション

運用としては走行から停止、切返しによる方向転換、移載動作を連続して行う。誘導制御を行う地図上に無人搬送車が通過、速度変更、停止、移載を行う点を番地として登録し、その番地か次の番地までの区間に対する修飾情報として設定する速度情報と、制御の結果として得られる操舵角度のような情報が存在し、走行中の防護エリア決定は速度に関しては区間の修飾データとして設定されている設定値と実際の制御の結果として得られる制御データの両方を使用する。移載に関しては区間データとして積みや降ろしの作業内容と防護エリアの選択を登録する。表 5.4.3-1 にセンサーの仕様を示す。

表 5.4.3-1 SICK 社製安全センサー S3000 の仕様

項目	仕様
スキャニング角度	190°(-5°~185°)
フィールドセット数	1~8
防護フィールド(半径)	ミディウム/ロングレンジ 最大 5.5m/7.0m
警告フィールド(半径)	反射率 20%の検出物体 : 約 20m
供給電源	24V(16.8~28.8V)
残留リップル	最大: ±5%
安全カテゴリー	IEC61496 : Type3
	IEC61508 : SIL2
使用周囲温度	-10 °C~55°C
保管周囲温度	-25°C~70°C
周囲湿度	IEC61496-1:5.1.2 と 5.4.2 章、IEC61496-3, 5.4.2 章による
保護構造	IEC60529
保護クラス	DIN VDE0106,DIN , EN 50178 II
対衝撃	IEC60068-2-27 単一衝撃: 15g,11ms
	IEC61496-1:5.1.2 と 5.4.4.2 章/IEC61496-3:5.4.4.2 章による連続衝撃: 10g,16ms
重量	S3000:3.3kg
投光 / 測定データ	
レーザー保護クラス	21 CFR 1040.10 と 1040.11,DIN EN 606825:2001(パルス,レーザー・ダイオード)
波長	905 nm
光軸径	フロントスクリーンから投光時 φ12mm
	検出距離 5.5m/7.0m φ27nm・φ32nm
反射率	1.8%~数 1000%
測定距離範囲	49m

表 5.4.3-2 SICK 社製安全センサーS300 Mini Remote の仕様

項目	仕様
スキャン角度	270°
防護フィールドレンジ	半径 2m (最大)
フィールドセットの数	16
フィールドの種類	3 フィールド(1防護フィールドと 2 警告フィールド)
モニタリングケース数	32
検出対象物反射率	1.8 % ... > 1.000 %, リフレクター
レスポンスタイム	80 ms
分解能	30 mm, 40 mm, 50 mm, 70 mm, 設定可能
角度分解能	0.5°
防護フィールドの追加の距離	100mm
警告フィールドレンジ	半径 8m (最大)
距離測定レンジ	30m
マルチプルサンプルの数	2,,16 設定可能
自動リセットのディレイ	2 s,,60 秒 設定可能

図 5.4.3-7 は走行から停止し切返しを行った後に積み作業を行い、積み作業後に本線に入るまでの一連のシーケンスのモードを示す。この一連のシーケンスを基本シーケンスに分解し、シーケンス毎に防護エリアを切り替える。

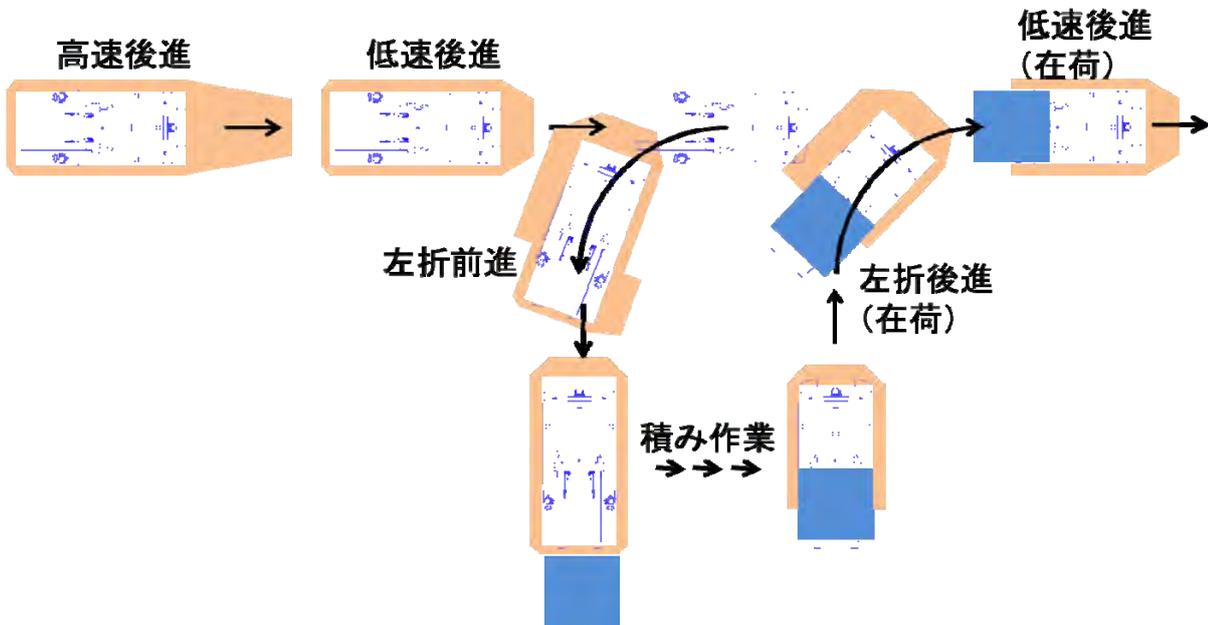


図 5.4.3-7 防護エリアの切替えイメージ

5.5 車両設計

5.5.1 ハードウェア設計

車両本体はT11パレットを搬送する運搬質量1,000kgタイプの車体をベースに主として安全系、安全サポート系を追加装備する設計とした。バッテリーは従来通り鉛バッテリーとした。フォークリフトでは高性能なリチウムイオンやニッケル水素電池で急速充電も可能であるが、鉛バッテリーはカウンタウェイトを兼用しており高性能バッテリー使用時にはカウンタウェイトが別途必要になり車体全体の軽量化には寄与しないため、8時間運転可能な鉛バッテリーを搭載し、コンベンショナルなオフライン充電の電源構成とした。この構成での車体重心位置は、空車状態では水平位置は前輪から1,016mm、垂直位置はFLから568mmになる。1,000kg積載状態ではリーチ機構が前端で最も条件の悪くなる状態で、水平位置は前輪から764mm、垂直位置はFLから667mmになり、転倒に対しては問題ない。

また自動運転で段積みのない床面平置き用途に限定する。このため、フォーク昇降の揚程は原設計機種では3,000mmであるが、本プロジェクトでは900mmに制限し、通常では人がフォークの下(荷の下)に入れない高さに制限し、リスク要因を減らした。制御系の概略構成を図5.5.5-1、図5.5.5-2に示す。制御装置、制御機器は走行駆動のモーターやインバータ、昇降の油圧ポンプなどフォークリフト固有の機能を有する特殊な電機品は専用品を使用している。コントローラ関係については特殊仕様のもものは使用せずに汎用品を使用して構成している。

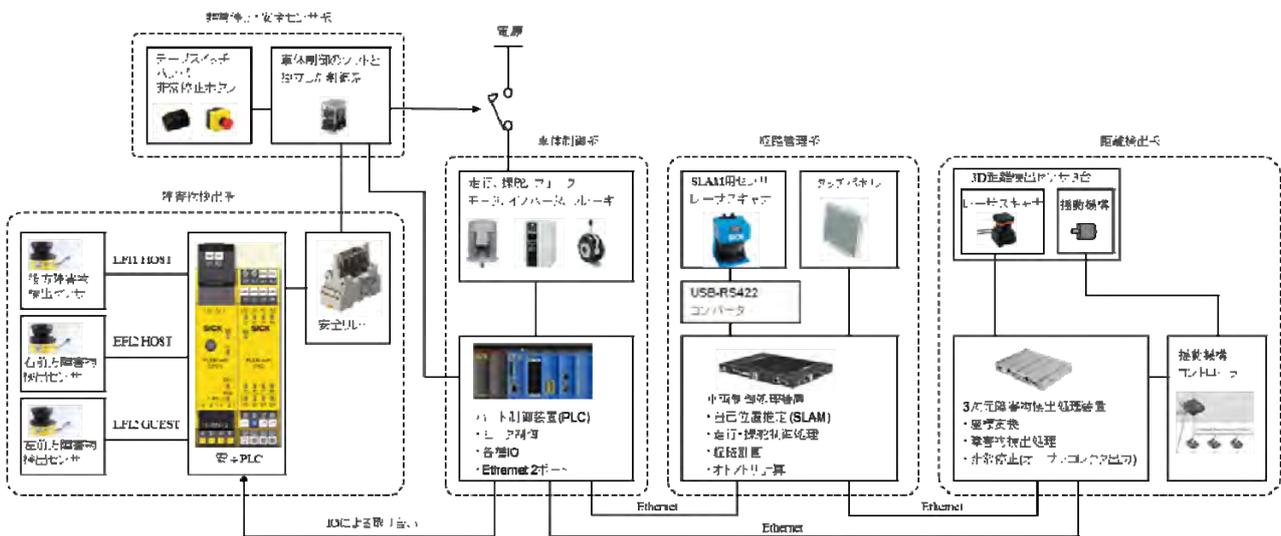


図 5.5.1-1 制御系の概略構成

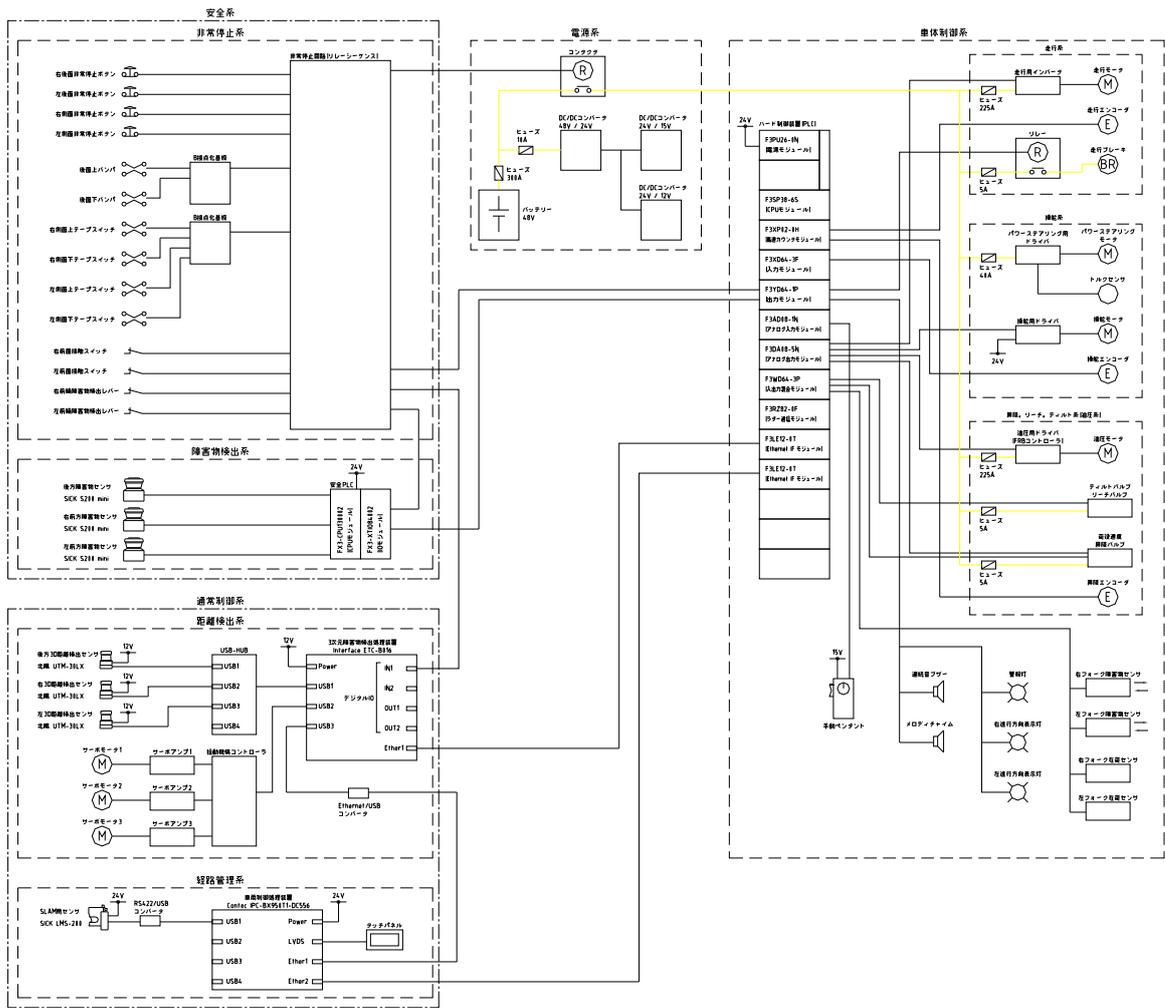


図 5.5.1-2 制御系の構成



図 5.5.1-3 車体の前方（フォーク側）外観



図 5.5.1-4 車体の後方（走行方向）外観

図 5.5.1-3、図 5.5.1-4 に完成したフォーク型ロボットの外観を示す。

安全にかかわる重要な寸法関係として、人が足先を車輪に巻き込まれるリスクがある。その位置関係を図 5.5.1-5、図 5.5.1-6 に示す。後輪に関しては成人男性の体格であれば側面からは足は後輪に届かない。後面からはバンパースイッチが先に動作する位置関係になる。前輪は前バンパーとアウトリガー下のレバーで足を接触検知し非常停止する。

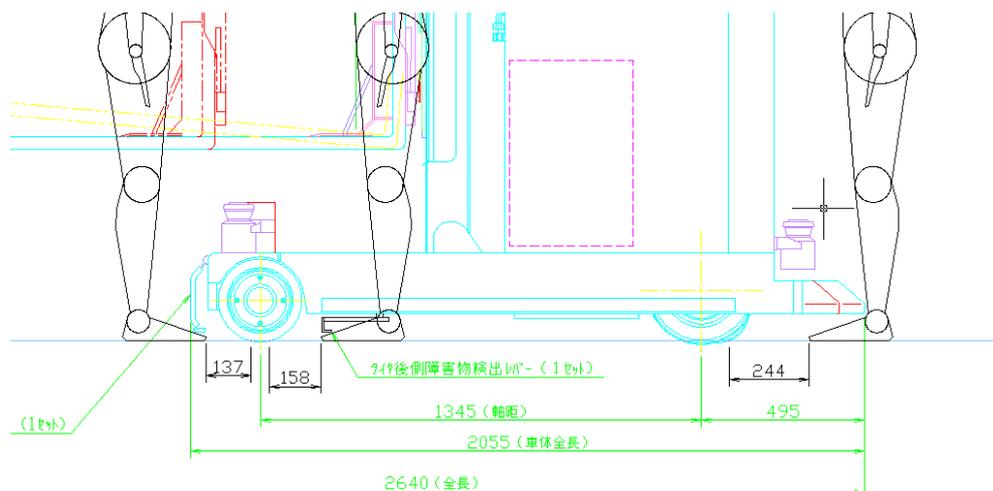


図 5.5.1-5 車輪と人が接近した場合の位置関係 1 (側面視)

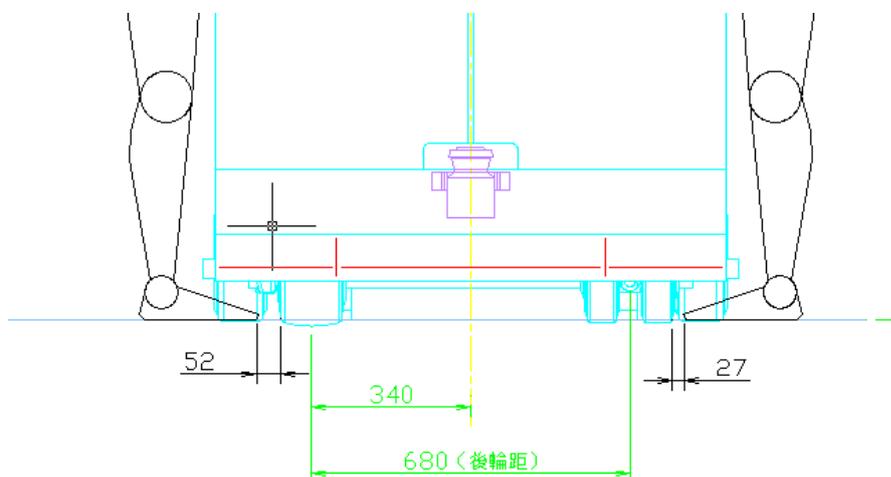


図 5.5.1-6 車輪と人が接近した場合の位置関係 2 (後面視)

5.5.2 車体制御ソフトウェア設計

車体制御ソフトウェアは従来から運用している自己位置認識誘導制御を今回のプロジェクトに使用する。

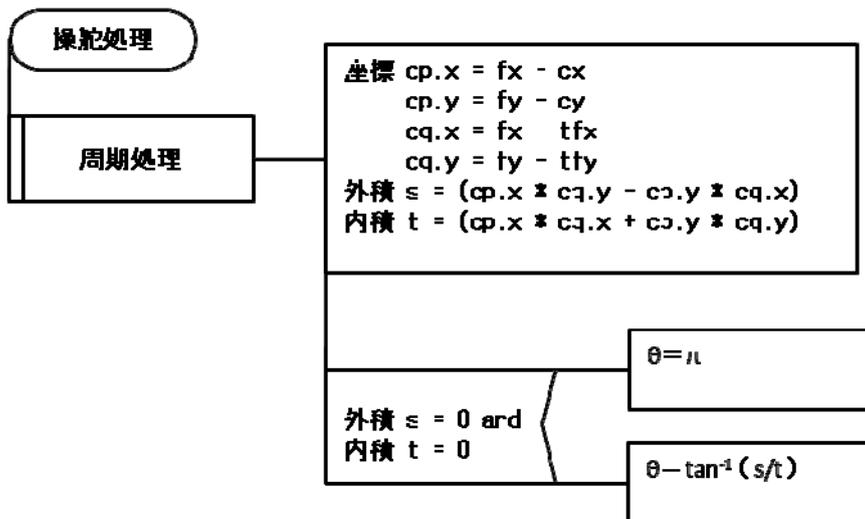
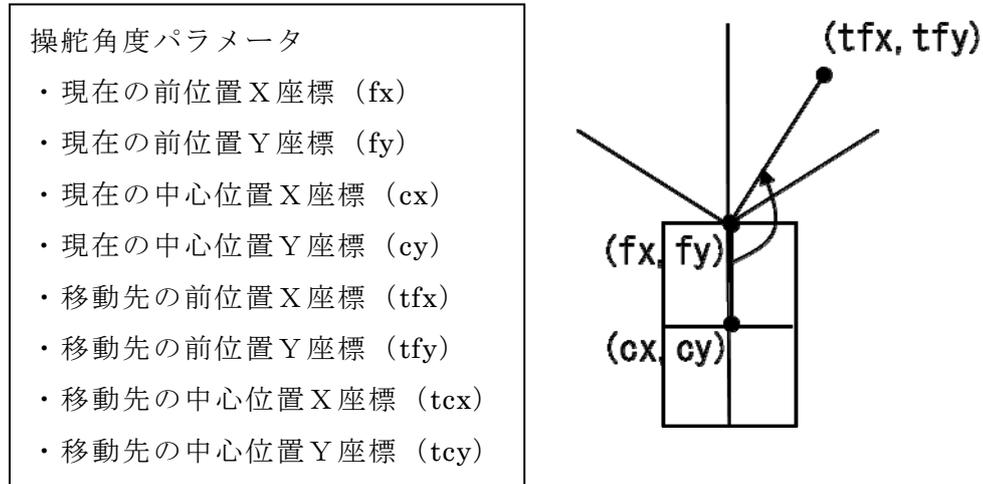


図 5.5.2-1 目標位置に対する搬送車の操舵

2次元レーザー距離計でスキャンした電子地図と、走行中の現在位置から周囲を走査した距離データをパターンマッチング処理することで得られる現在位置の座標情報に対して、操舵は目標座標に対するベクトルの内積と外積から操舵角度を決定する。図 5.5.2-1 に操舵決定の概略を示す。

5.5.3 3D 位置認識装置との連携ソフトウェア設計

3次元位置認識の測定データは車体の自己位置認識によるSLAM制御データの地図データと互換性を持たせ、3次元位置認識の障害物と地図データの比較を行う。3次元位置認識の測定データは、2値画像の左上から右下に向かって順にデータありの画素位置を並べたデータとする。測定データは、走行路面に平行の2次元平面をグリッドマップで分割し、グリッド内に測定データが含まれる場合1、含まれない場合0とする2値の画像データとして扱う。測定データが存在する画素の座標値のみ送信することでデータ量を減らすことにする。SLAMのプロセスと障害物処理のプロセスは別プロセスで実行し、障害物処理では走行速度を考慮した3次元位置認識の1スキャンデータの重ね合わせ合成処理を行い、1スキャン毎に障害物座標と地図座標の照合を行う。障害物が地図データの同じ座標に出現する場合には当該の障害物をマスクして減速・停止の判定を行う。3次元位置認識による減速処理は減速要因が排除されたあとは元の速度に復帰する処理となっているため、突発的な障害物の場合、車体の加速・減速の時定数が長いためこれがローパスフィルタとなり、制御ソフトでのフィルタリング処理は最低限の移動平均だけに留める。フィルタ処理が極端に少ない場合には細かい加速・減速の繰り返しになり走行駆動のモーター電流が不安定になる。一方フィルタ時定数が長いと検出の定常的な遅れを発生する。データの重ね合わせを行う前の距離データの段階でスキャンの仰角データとレーザー距離計のデータの位相遅れを最小にし、同期の取れたデータで床面と天井面のデータのリジェクトを行った後のデータを3次元位置認識装置からイーサネット経由で受信するソフトウェア構成を実装した。

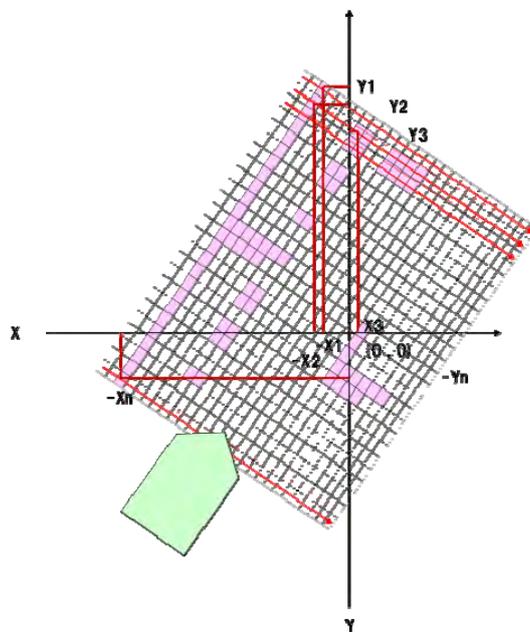


図 5.5.3-1 座標系

5.5.4 ドキュメンテーション

ドキュメンテーションについては、本プロジェクトでの特別な管理はせずに、通常の社内規定に従った。表 5.4.1-1 にドキュメント体系の本プロジェクトに関連した部分の抜粋を示す。尚、日立産機システムと日立製作所では業態が異なり、一部のドキュメント体系で異なっている部分がある。

表 5.4.1-1 ドキュメント体系

区分	フェーズ	ドキュメント	関連する社内基準等	文書のレベル
I. プロジェクト管理	1. 目的と方針			
	1.1. 本書の目的と位置付け			
	1.2. 記述の方法			
	1.3. Ver1.1での変更点			
	5. 作番の監視と制御		ドキュメント・ファイル管理要領 作番ファイル管理要領 DR実施規程 製品安全管理規程	部規程 部規程 事業所規程 事業所規程
	5.1. 概要			
	5.2. 工程管理			
	5.3. 視える化			
	5.4. 懸案管理			
	5.5. リスク管理			
5.6. 進捗管理				
5.7. 機密情報管理				
5.8. 作業成果物				
5.9. 重要作番におけるプロセス検査の実施				
5.10. 作番完了				
5.11. 改善情報の公開				
6. 構成管理と変更点管理				
6.1. 概要				
6.2. 構成管理と変更点管理の手順	B票、変更仕様書			
6.3. ドキュメント管理				
6.4. リリースしたプログラムの管理	開発実績書、メディア一覧表			
6.5. 構成管理変更点管理の監視				
6.6. 作業成果物				
II-I. ハードウェア制御	1. 要求分析	機能仕様書	製品安全規則 製品業務システム設計標準(ハード)	事業部門 事業部門
	1.1. 要求分析と定義			
	1.2. 作番計画策定			
	1.3. 作番管理留意点			
	2. 設計	システム機能仕様書、ハード基本構成図、概略機器配置図、ハードウェア仕様書、I/O割付表、各種インターフェース仕様書、制御機器配置図、取り扱い説明書、変更仕様書	製品安全性評価実施基準 電気設計一般 リレー寿命基準 電気品選定基準 電子部品 コネクタ選定基準 インターロック運用基準 配線設計手順 遮断器の協調基準 電気品選定基準	事業所規程 部規程 部規程 部規程 部規程 部規程 部規程 部規程 部規程
	2.1. システム設計			
	2.2. 詳細設計			
	2.3. 設計完結	回路図(単線結線図、展開接続図、回路図、ネットリスト、部品表)		
	3. 検査			
	3.1. 製品検査			
3.2. プロセス検査				
3.3. QAによる作番監視				
II-II. ソフトウェア制御	1. 要求分析		製品業務システム設計標準 ソフトウェア設計要領 ドキュメント作成要領 ソフト外注注文仕様書	事業所規程 部規程 部規程 部規程
	1.1. 要求分析と定義			
	1.2. 作番計画策定			
	1.3. 作番管理留意点			
	2. システム設計	システム機能仕様書、ソフト基本構成図、画面操作仕様書、操作仕様書、帳票仕様書、テーブルフォーマット、タイマー一覧表、アラーム一覧表	メディア管理要領 元図管理要領 ドキュメント体系 ソフト作業分析 開発工数分析 FAST連絡書 設計助成員の業務 制御システム構築	部規程 部規程 部規程 部規程 部規程 部規程 部規程 部規程
	2.1. 基本設計			
	2.2. データ設計			
	3. ソフトウェア方式設計	サブシステム機能仕様書、モジュール構成図、モジュール仕様書、各種インターフェース仕様書、インターロック仕様書、通信仕様書、伝文フォーマット、異常処理仕様書、起動/停止処理仕様書、処理仕様書(処理フロー)、取り扱い説明書、変更仕様書		
	3.1. 詳細方式設計			
	3.2. 機能設計			
	4. ソフトウェア詳細設計	シミュレーション環境仕様書、インストール手順書、プログラム(ソースコード、ロードモジュール、開発環境)、シミュレータ(シミュレーション仕様書、シミュレーション環境)		
	4.1. 開発環境構築			
	4.2. 構造設計			
	5. プログラミング&単体テスト	テスト計画書、B票		
	6. 組合せテスト	組合せテスト仕様書・兼報告書、B票		
7. システムテスト/運用テスト	総合テスト仕様書・兼報告書、B票	現地DailyReport 現地改造要領	部規程 部規程	
8. 検査	実機テスト仕様書・件報告書、現地テスト仕様書・兼報告書、B票			
8.1. 製品検査				
8.2. プロセス検査				
8.3. QAによる作番監視				
9. 保守・運用				

(1) ハードウェア

ハードウェア関係の主なドキュメントには以下のものがある。

システム機能仕様書、ハード基本構成図、概略機器配置図、ハードウェア仕様書、I/O 割付表、各種インターフェース仕様書、制御機器配置図、取り扱い説明書、変更仕様書、回路図（単線結線図、展開接続図、回路図、ネットリスト、部品表）などがある。

ドキュメントの一例として I/O 割付表を図 5.5.4-1 に示す。

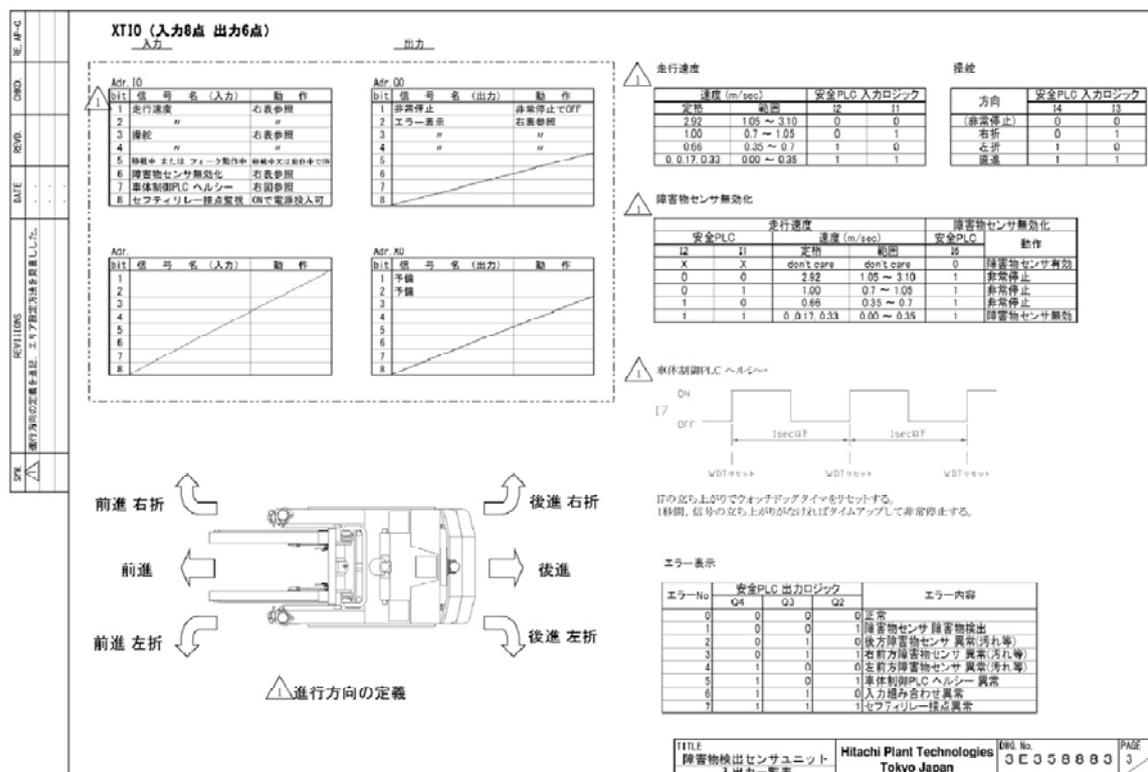


図 5.5.4-1 I/O 割付表

(2) ソフトウェア

ハードウェア関係の主なドキュメントには以下のものがある。

システム機能仕様書、ソフト基本構成図、画面操作仕様書、操作仕様書、帳票仕様書、テーブルフォーマット、タイマー一覧表、アラーム一覧表、サブシステム機能仕様書、モジュール

構成図、モジュール仕様書、各種インターフェース仕様書、インターロック仕様書、通信仕様書、伝文フォーマット、異常処理仕様書、起動／停止処理仕様書、処理仕様書（処理フロー）、取り扱い説明書、変更仕様書、シミュレーション環境仕様書、インストール手順書、プログラム（ソースコード、ロードモジュール、開発環境）、シミュレータ（シミュレーション仕様書、シミュレーション環境）、テスト計画書、B票、組合テスト仕様書・兼報告書、総合テスト仕様書・兼報告書、実機テスト仕様書・兼報告書などがある。
ドキュメントの一例としてモジュール仕様書を図 5.5.4-2 に示す。

モジュール仕様書		クラス名	クラス名前	クラス名	クラス名																																																																																																																																																																																																																												
モジュール名	エリア防犯子コード	モジュール名																																																																																																																																																																																																																															
機能	入力番号の組み合わせから障害物センサの設定にデコードする。		コーディング	シーケンス																																																																																																																																																																																																																													
備考	仕様および特記事項																																																																																																																																																																																																																																
項目	番号	名称	型	I/O	内 容																																																																																																																																																																																																																												
	走行速度 1		Boolean	1	同期化した速度情報 1																																																																																																																																																																																																																												
	走行速度 2		Boolean	1	同期化した速度情報 2																																																																																																																																																																																																																												
	編成 1 X10[1..3]		Boolean	1	上位 PLC からの編成情報 1																																																																																																																																																																																																																												
	編成 2 X10[1..4]		Boolean	1	上位 PLC からの編成情報 2																																																																																																																																																																																																																												
	フオーク動作中 X10[1..5]		Boolean	1	上位 PLC からの稼働中またはフオーク動作中情報																																																																																																																																																																																																																												
	障害物センサ無効化 X10[1..6]		Boolean	1	上位 PLC からの障害物センサ無効化情報																																																																																																																																																																																																																												
	解除		Boolean	0	障害物センサ無効化																																																																																																																																																																																																																												
	設定 No1		Boolean	0	障害物センサエリア設定 No1																																																																																																																																																																																																																												
	設定 No2		Boolean	0	障害物センサエリア設定 No2																																																																																																																																																																																																																												
	設定 No3		Boolean	0	障害物センサエリア設定 No3																																																																																																																																																																																																																												
	設定 No4		Boolean	0	障害物センサエリア設定 No4																																																																																																																																																																																																																												
	設定 No5		Boolean	0	障害物センサエリア設定 No5																																																																																																																																																																																																																												
	設定 No6		Boolean	0	障害物センサエリア設定 No6																																																																																																																																																																																																																												
	設定 No7		Boolean	0	障害物センサエリア設定 No7																																																																																																																																																																																																																												
	設定 No8		Boolean	0	障害物センサエリア設定 No8																																																																																																																																																																																																																												
	設定 No9		Boolean	0	障害物センサエリア設定 No9																																																																																																																																																																																																																												
	入力組み合わせ異常		Boolean	0	入力の組み合わせが不正																																																																																																																																																																																																																												
<p>【尚書】 下記の表に従った値を返す。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>設定 No</th> <th>設定 No1</th> <th>設定 No2</th> <th>設定 No3</th> <th>設定 No4</th> <th>設定 No5</th> <th>設定 No6</th> <th>設定 No7</th> <th>設定 No8</th> <th>設定 No9</th> <th>備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2進</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2進</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2進</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2進フオーク動作</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2進フオーク動作</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2進</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>3進右折</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>3進左折</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>3進直進</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>4進右折</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>4進左折</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>4進直進</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>8進直進</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>無効</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>無効</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>無効</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>無効</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>無効</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>無効</td></tr> </tbody> </table> <p>上表に存在しない組み合わせに対しては、設定異常を返す。</p>						設定 No	設定 No1	設定 No2	設定 No3	設定 No4	設定 No5	設定 No6	設定 No7	設定 No8	設定 No9	備考	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2進	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	2進	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2進	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	2進フオーク動作	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	2進フオーク動作	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2進	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	3進右折	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	3進左折	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	3進直進	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	4進右折	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	4進左折	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	4進直進	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	8進直進	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	無効	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	無効	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	無効	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	無効	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	無効	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	無効
設定 No	設定 No1	設定 No2	設定 No3	設定 No4	設定 No5	設定 No6	設定 No7	設定 No8	設定 No9	備考																																																																																																																																																																																																																							
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2進																																																																																																																																																																																																																							
0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	2進																																																																																																																																																																																																																							
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2進																																																																																																																																																																																																																							
0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	2進フオーク動作																																																																																																																																																																																																																							
0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	2進フオーク動作																																																																																																																																																																																																																							
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2進																																																																																																																																																																																																																							
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	3進右折																																																																																																																																																																																																																							
0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	3進左折																																																																																																																																																																																																																							
0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	3進直進																																																																																																																																																																																																																							
0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	4進右折																																																																																																																																																																																																																							
0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	4進左折																																																																																																																																																																																																																							
0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	4進直進																																																																																																																																																																																																																							
1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	8進直進																																																																																																																																																																																																																							
1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	無効																																																																																																																																																																																																																							
1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	無効																																																																																																																																																																																																																							
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	無効																																																																																																																																																																																																																							
1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	無効																																																																																																																																																																																																																							
1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	無効																																																																																																																																																																																																																							
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	無効																																																																																																																																																																																																																							

図 5.5.4-2 ドキュメント例（モジュール仕様書）

5.6 付帯設備の検討

ロボットを含む配送センターのシステム全体の安全性を高めるためにはロボット単体の安全対策と、運用する環境側での安全対策の併用でシステムとしての安全設計が重要になる。プロジェクト公募の時点ではフォーク型ロボットの単体での機能安全を検討していたが、プロジェクトを進めていく過程で、安全サポート系の一部として付帯設備での安全サポート系の実現の可否についても検討した。検討の結果、IEC61508 の適用範囲とせず、一般の産業機器としての扱いであれば、日立製作所あるいは日立グループ内で製品化されている技術の組み合わせで実現できることから本プロジェクトでの要素開発は必要ないと判断し、試作と検証は実施しなかった。検討した内容は作業者の位置の把握である。車体側からの歩行者・作業者の位置の同定は物陰に隠れている人の把握には限界がある。この歩行者・作業者の位置を同定する技術をして特定の RFID のようなタグを持たせ、タグ位置を同定する方法と、位置を同定しようとする範囲を走査しタグの有無に関わらずその位置に存在するものを検知する方法がある。図 5.6-1 にその特性要因図を示す。

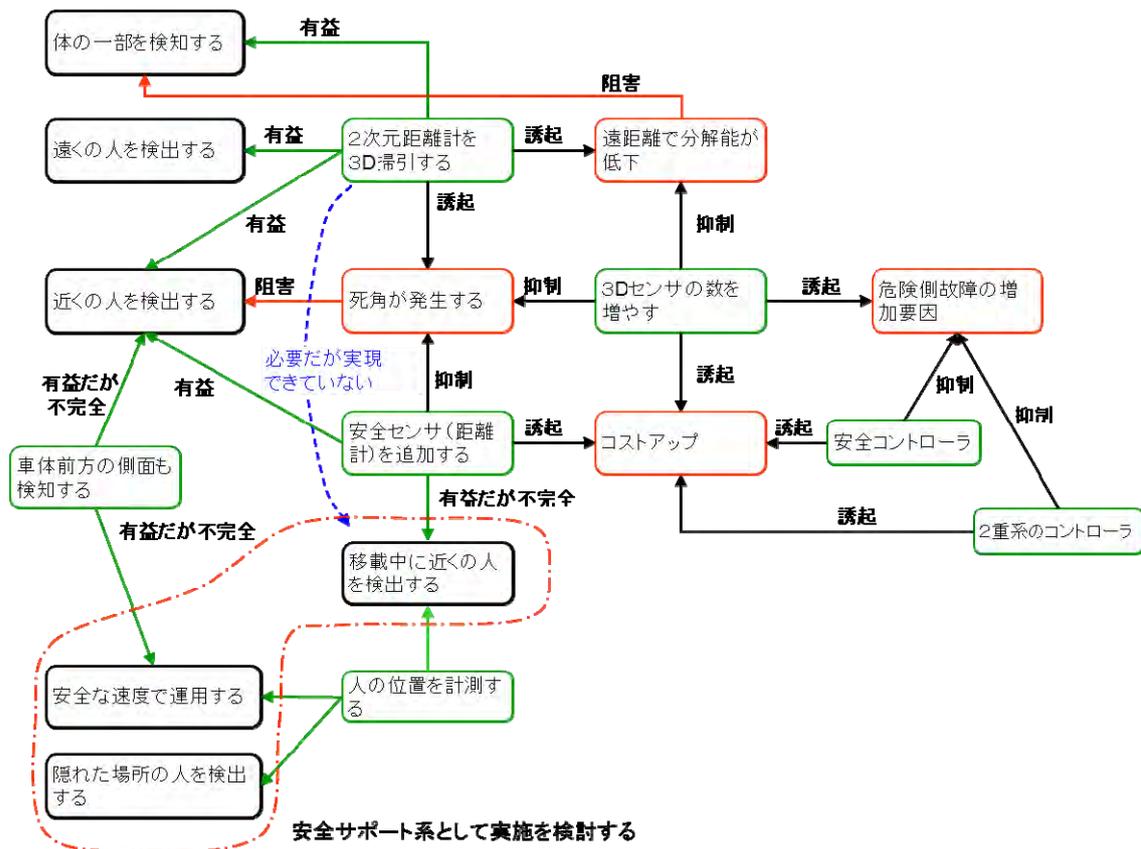


図 5.6-1 地上サポート系と安全系、安全サポート系の関連

表 5.6-1 に地上サポート系での適用範囲を示す。地上サポート系は近距離で建物や装置の影に隠れている人との衝突回避、移載動作時に効果がある。

表 5.6-1 地上サポート系の適用範囲

フォークリフト型ロボットの運転状態		現状	計画変更
走行状態	前進	○	○
	後進	○	○
	横行	対応不要	対応不要
	スピントーン	対応不要	対応不要
	ピボットターン	○	○
車両側での人の検出	走行中/遠距離	○(3D位置認識)	○(3D位置認識)
	走行中/近距離	○(安全センサ)	○(安全センサ)
	カーブ/進行方向の近傍	○(安全センサ)	○(安全センサ)
	走行中/車体近傍	○(安全センサ)	○(安全センサ)
	移載中/車体近傍	○(安全センサ)	○(安全センサ)
地上システムでの歩行者検知	入退室管理		不要
	検出手段を具備した歩行者の検出		○
	検出手段を具備しない歩行者の検出		検出不可

対応する事象			
歩行者の飛び出しの検知	遠距離	○	○
	近距離	不完全	○
安全な速度での運行	遠距離	○	○
	近距離	不完全	○
移載時の安全	移載時	不完全	○
	移載のための走行時	不完全	○

これらの運用イメージを図 5.6-2 に示す。表 5.6-1 にも示すように最も顕著に効果を発揮するのは枠で囲った部分の建物の影からの出会い頭の接触、物陰からの歩行者飛び出しである。

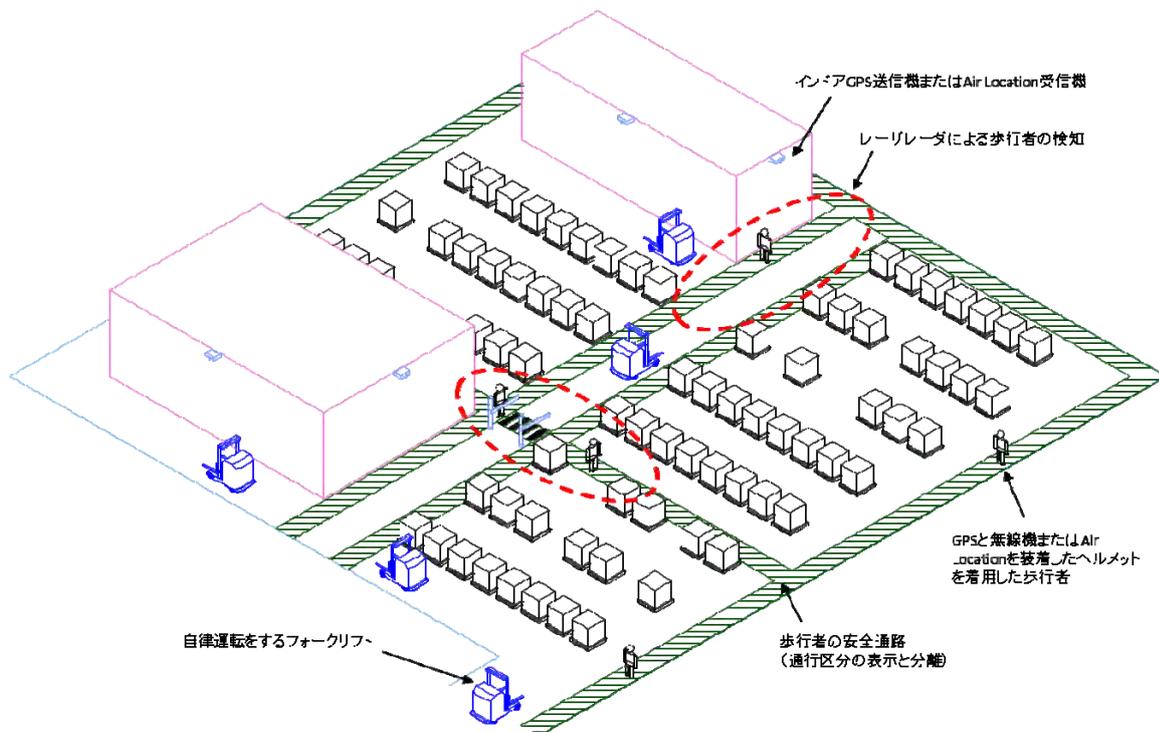


図 5.6-2 地上サポート系の運用イメージ

以下、検討内容について述べる。

5.6.1 インドア GPS システム

屋内から屋外にシームレスに位置計測を行う方法として、独立行政法人宇宙航空研究開発機構によって仕様提案されている屋内 GPS 測位（Indoor Messaging System 方式）である。屋内 GPS 測位では、屋内 に設置する送信機に位置情報を登録し、GPS 互換信号に乗せて位置情報を送信する。他の屋内測位方式では、専用の端末が必要であるのに対し、屋内 GPS 測位では、GPS 互換信号を使用しているため、GPS 受信機のソフトウェアの軽微な変更によって測位が可能である。日立グループでは経済産業省「平成 21 年度 IT とサービスの融合による新市場創出促進事業（異種測位技術間における共通処理基盤構築事業）」に参画し、屋内 GPS 測位に対応した GPS 携帯電話（試作機）に歩行者ナビゲーションのアプリケーションをダウンロードすることで、屋外では GPS 測位、屋内では屋内 GPS 測位によるシームレスな測位の実証実験を行った。インドア GPS システムは日立産機システムのより製品化し、数m以下の誤差で人の位置を測位することが可能な汎用技術である。港湾でのコンテナ位置の管理、や地下街や大型商業施設での位置の案内などで使用されている。



図 5.6.1-1 日立産機システム製インドア GPS

5.6.2 無線 LAN

IEEE 規格に準拠の無線 LAN（Local Area Network）を活用した位置検出技術。複数の基地局により、対象者と紐（ひも）付けられた無線タグを検知することで、対象者の位置を検出する。建築構造や歩行者の動線を勘案し、検知エリアの特性に合わせて、（a）無線タグから発信される電波を複数の基地局で受信して電波の到着時間の時間差に基づく三辺計測にて無線タグの位置を算出する「二次元測位方式」、（b）この原理を応用した一辺計測にて位置を算出する「一次元測位方式」、（c）無線タグの接続情報や電界強度に基づき当該ゾーン内の所在検

知を行う「信号強度測位方式」の3方式の使い分けが可能である。200回/秒の測位をおこなうため、フォークリフトのリアルタイムトラッキングも可能である。検出精度は屋内・屋外ともに平均1～3m程度である。日立製作所では Air Location-II の製品名で製品化している。本システムの一例としては2007年4月から美祿社会復帰促進センターで運用している。最近ではショッピングセンターや大型商業施設内の案内や位置表示にも応用されている。この方式でも無線タグのあることを検出することはできるが、あるべきところに無線タグがないことを検出することはできない。

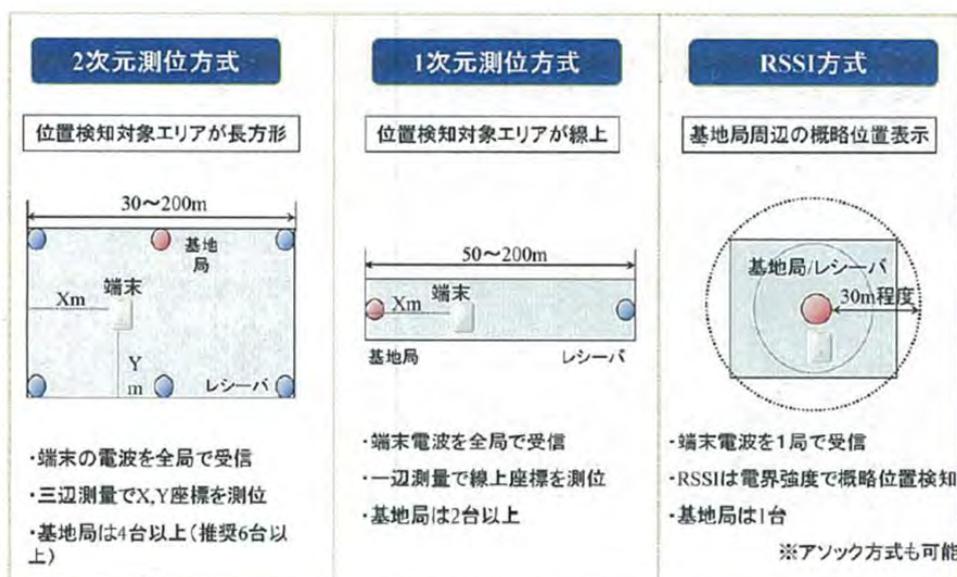


図 5.6.2-1 Air Location II 測位方式

5.6.3 レーザーレーダビジョンシステム

Laser Radarvision II は日立情報通信エンジニアリング（株）により製品化した測位システムで、床面近傍にセンサー（2次元レーザー距離計）を設置し、水平方向にスキャンする。主な用途は、セキュリティ関係、歩行者の移動軌跡を検知し追跡することでの人の流れを動的に調査するシステム、危険場所・進入禁止エリアへの人の進入検知システムである。

クラス1のレーザーを使用し誤差30cmの高精度で検出する。屋内・屋外の両方で使用可能。1つのセンサーの守備範囲は半径30mの領域を270度の範囲でカバーする。歩行者の飛び出しが想定される場所や接触のリスクの大きい領域に設置する。複数のセンサーで広範囲な領域を検出する。間仕切りで区切られた空間や、設備の陰でセンサーの死角が発生する場合にはセンサーの設置数が多くなりコストが増加する。検討した3つの方式の中では信頼性の高い検出となっているが、対人安全のために開発された装置でないため SIL 認証には対応していない。

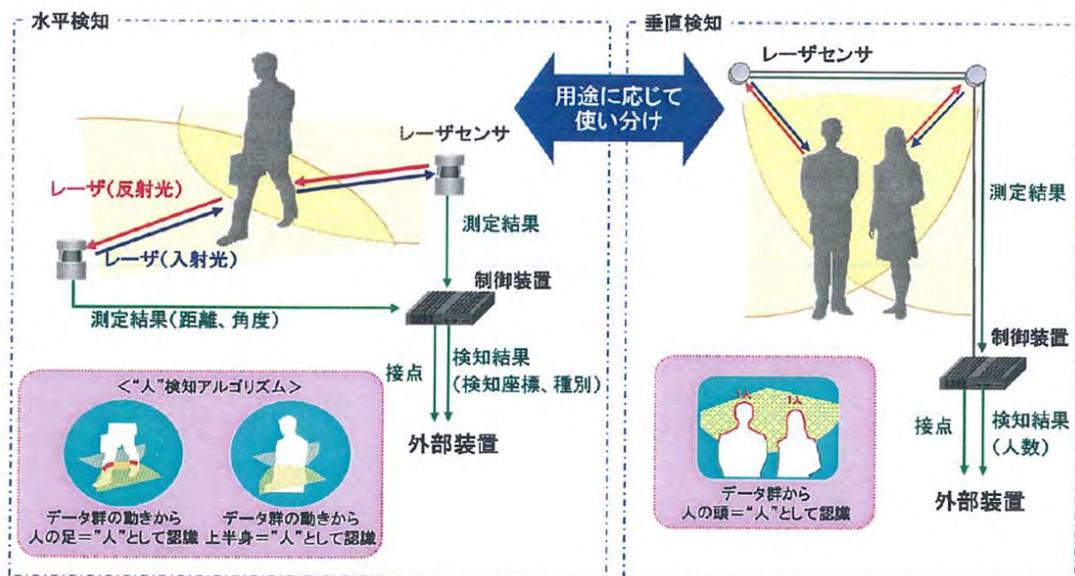


図 5.6.3-1 レーザーレーダビジョンシステムによる歩行者検知

地上サポート系はこれらを適宜組み合わせる構成とする。従来から行われている遮断器や信号灯、入退場扉開閉によるインターロック、フラッパーゲートでの人の入退場の制限や管理を行うこととの組み合わせも有効である。

5.6.4 その他の方法

日立グループではないがユニキャリア（株）ではフォークリフトに接近する人を検出する無線タグシステムを市販している。



図 5.6.4-1 ユニキャリア製接近警報装置

トヨタ L&F では超音波を使用し、後方への指向性を持たせた後方作業者の検知装置を市販している。他のフォークリフトメーカ、重機メーカーでも同様の装置を市販している。

これらの方法に共通するのはタグを持たない人を検出できないこと、動作範囲内に他のフォークや重機が入った場合の干渉や検知もれなどの信頼性に関する検討を要する事項がある。



図 5.6.4-2 トヨタ L&F 製後方作業者検知装置

6. 評価試験

6.1 機能試験

機能試験は一般的な性能試験の他に安全系、安全サポート系について実施した。試験項目の概要を表 6.1-1 に示す。

表 6.1-1 試験項目の概要

分類	試験項目	概略内容	回数, 時間 etc.	所要時間
A 検出と挙動	(1) 揺動機構	電源ONからの起動時間	回数	2 時間
	(2)	電源電圧が変動時の挙動	1回	4 時間
	(3)	車体振動の揺動への影響 ・車体振動で揺動機構のぶれ, 共振 ・性能, 精度への影響	これは単独では実施しない	
	(4)	経時変化 ・基準方向の安定性 ・メカ的な消耗, 寿命	これは単独では実施しない	
	(5) 3D位置認識	認識精度 ・対象物までの距離依存 ・対象物までの速度依存 ・移動方向(縦移動, 横移動, 斜め移動) ・形状依存(平面, 柱状, 分解能近傍の物体) ・表面の性状(反射率, 色 etc)	距離, 速度の組合せ, 各組合せでN=5以上	24 時間
	(6)	床面認識 ・床の認識 ・床でない異物の認識 ・床と壁の境界	N=5以上	24 時間
	(7)	応答時間 ・応答時間の距離依存性 ・応答時間の速度依存性 ・応答時間のその他の要因の依存性	N=5以上	24 時間
	(8)	シチュエーションに対する挙動の妥当性(移載シーケンスを含む) ・走行→減速 ・走行→停止 ・走行→非常停止 ・減速→再加速 ・停止中の要因発生 ・要因の解除	各状況に対して N=10以上	40 時間
	(9)	SLAM地図とのマッチング ・SLAMで認識している位置と3Dでの位置認識の形状の相違 ・マッチングができるか ・精度	指定コース3周以上	8 時間
	(10) 安全系	対象物までの距離と認識精度	N=5以上	8 時間
	(11)	応答時間	N=5以上	8 時間
	(12)	状況に対する挙動の妥当性(移載シーケンスを含む) ・走行→非常停止 ・停止中の要因発生 ・要因の解除	各状況に対して N=10以上	24 時間
	(13)	外乱 ・変調のかからない光(太陽光) ・低周波の輝度変調のかかった光 (高圧水銀灯, ナトリウムランプ, 蛍光灯, HF蛍光灯) ・高周波の変調のかかった光(LED, レーザ光, 光電スイッチ)	各要因に対して N=1以上	8 時間
	(14) バンパ、	応答する変形圧力, ストローク	N=1以上	4 時間
	(15) テープSW	非感知部分の存在の有無	N=1以上	4 時間
	(16)	挙動	N=1以上	4 時間
	(17) 非常停止SW	挙動	N=1以上	4 時間
	(18) 装置間I/F	3D距離認識からSLAM側の制御状態変化までの応答時間	N=1以上	4 時間
	(19)	SLAM側の状態変化から車両制御までの応答 (PLC系の応答時間)	N=1以上	4 時間
	(20)	作為的に発生させた通信エラーに対する挙動	N=1以上	8 時間
B 一般性能	(1) 走行速度		N=1以上	4 時間
	(2) 走行加速度		N=1以上	4 時間
	(3) 走行停止精度		N=1以上	4 時間
	(4) ブレーキ性能	非常停止距離	N=5以上	4 時間
	(5)	非常停止をかけた後の挙動, 姿勢変化 ・直線 ・カーブ ・前進/後進	N=5以上	8 時間
	(6) 昇降速度		N=1以上	4 時間
	(7) 昇降停止精度	・精度 ・バラツキ ・床面との関連	N=5以上	16 時間
C 実環境試験	(1) 走行中	走行中のランダムな障害発生による3D位置認識による減速, 停止で危険な状態にならないこと		4hr × 14day
	(2) 移載中	移載中のランダムな障害発生による安全計での非常停止で危険な状態にならないこと		

動作中の挙動を確認するものは、挙動を目視で確認する項目、内部ログで動作を確認する方法、外部から速度や位置を計測する方法を適宜組み合わせる。外部から挙動を観測するのは図 6.1.1 の方法で行う。個々の機能確認が取れた後の総合的な組合せ試験段階ではもっぱら目視で危険状態の確認を行い、問題となる事象が発生したあとで、ログなどによって詳細の解析を行い、その対応を検討する。また図 6.1-2 のように車体に 3 軸の加速度センサーを設置し、車体振動等の走行時の挙動も観測する。これは従来よりも最大速度 180m/分と大幅に速度を増速しているが、動力性能は高速化を達成しても車体振動が許容できるレベルを超え、実用に適するかを判断する基礎データとする。

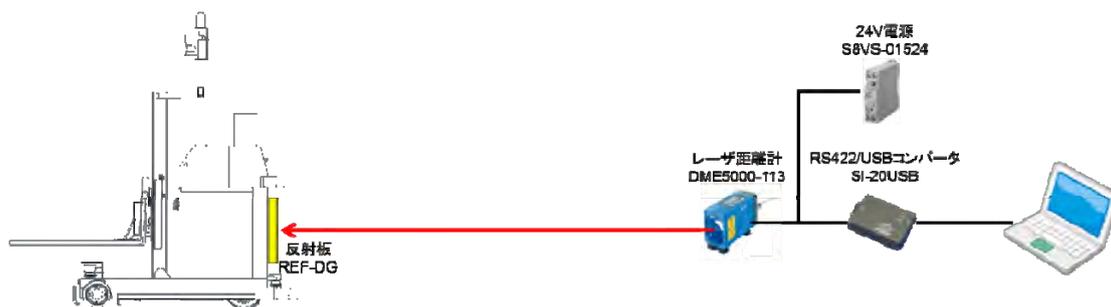


図 6.1-1 挙動の観測

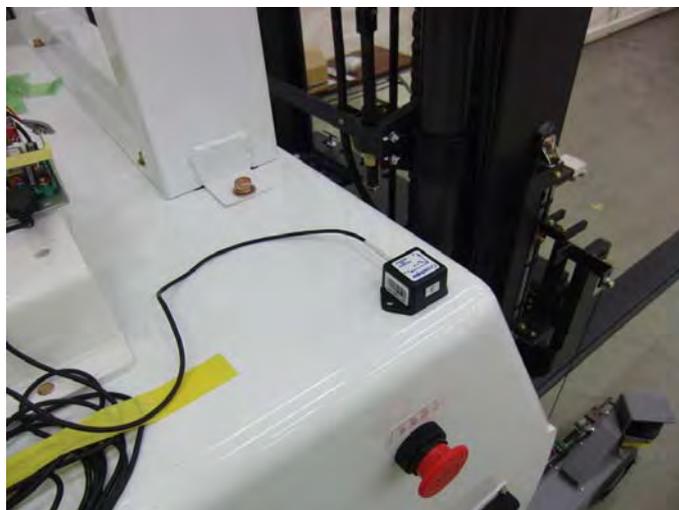


図 6.1-2 加速度センサーによる挙動の確認

6.1.1 動力性能

フォーク型ロボットの静的な動力性能特性を示す。

(1) 加速特性

代表的な設定速度 60m/分 (秒速 1.0m/s)、117m/分 (秒速 1.94m/s)、150m/分(秒速 2.5m/s)、180m/分(秒速 3.0m/s)における加速特性を示す。速度が秒速 2.5m/s までは設定

した一定加速度 0.3m/s^2 で直線的に加速することができる。それ以上の速度領域では徐々に加速度が下がり 2.8m/s 以上の速度では 0.05m/s^2 まで低下する。設定速度 180m/分 については評価試験場所の関係で、狭小場所で加速距離を短縮するため、加速度を通常の使用条件よりも大きくして計測している。

減速についても同様に、設定速度 180m/分 については減速距離を短縮するために -1.4m/s^2 で減速している。他の速度については加速と同じ一定加速度 -0.3m/s^2 で直線的に減速する。減速はインバータの回生制動で行い、回生電力はバッテリーに戻している。

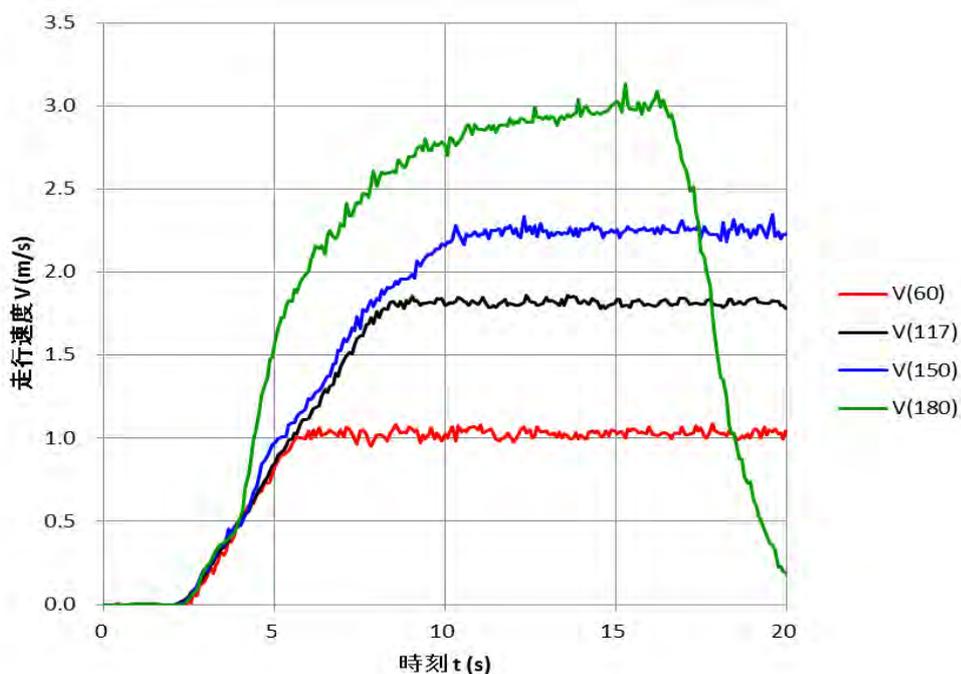


図 6.1.1-1 加速特性

(2) 減速特性

非常停止でモーターの動力を遮断しブレーキで停止した場合の減速特性を示す。ブレーキの減速は車輪と床面との摩擦に依存する部分が多く、摩擦係数の安定した状態で定格速度 (180m/分) から停止した場合は約 1.4m で停止するが、何回かの繰り返しではその値がばらつく。

プロジェクトの初期段階では走行速度 190m/分 で計画したが、動力性能の評価と振動試験の結果、 190m/分 の運用は安定したデータが得られず、実用上好ましくないと判断し、最高速度は 180m/分 とした。

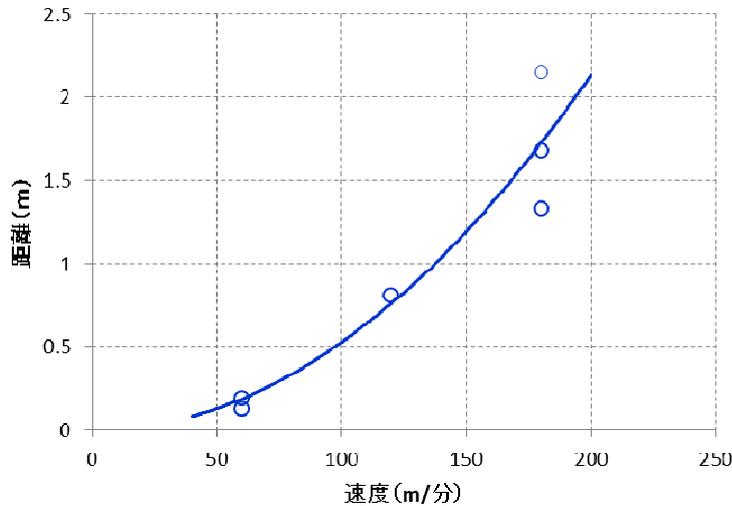


図 6.1.1-2 非常停止距離

6.1.2 3次元位置認識の評価

(1) 安全サポート系の評価基準

安全サポート系の評価は、障害物検出の評価については複数の規格が存在するが、現在の JIS 規格である JIS D6802:1997 は非接触の障害物センサーが実用化される以前に制定された規格であり、これらの事項が規定されていないこともあり、次期 JIS 改定のベース規格案となる ISO3691-4 のテストピースで試験を行っている。尚、非接触障害物検出のテストピースの B 規格としては JIS B9704-3:2011 (IEC61496-3:2008) があるが、これを反映した C 規格が個別製品の規格となっている。

表 6.1.2-1 各種規格のテストピース

ISO/FDIS 3691-4(2011)	(1)縦置き円柱ピース 直径 70mm、高さ 400mm (2)横置き円柱ピース 直径 200mm、長さ 600mm
ANSI B56.5-2012 (2012)	(1)縦置き円柱ピース 直径 70mm、高さ 400mm (2)横置き円柱ピース 直径 200mm、長さ 600mm (3)平板ピース 500mm×500mm
JIS D6802 : 1997	規定なし
JIS D6802 改定(案) (2014/産業車両協会)	(1)縦置き円柱ピース 直径 70mm、高さ 400mm (2)横置き円柱ピース 直径 200mm、長さ 600mm

(2) 認識精度

安全サポート系の評価はフォーク型ロボットに搭載しての機能確認と並行して3次元位置認識装置の性能評価を行った。代表的な結果を示す。位置認識装置は2次元の2次元レーザー距離計を揺動するその揺動速度で対象物の位置認識精度が変化する。x方向（車体の進行方向）とy方向（車体の横方向）ではオフセット値が異なるが最大でも0.15mの範囲に入り、認識性能は満足した。

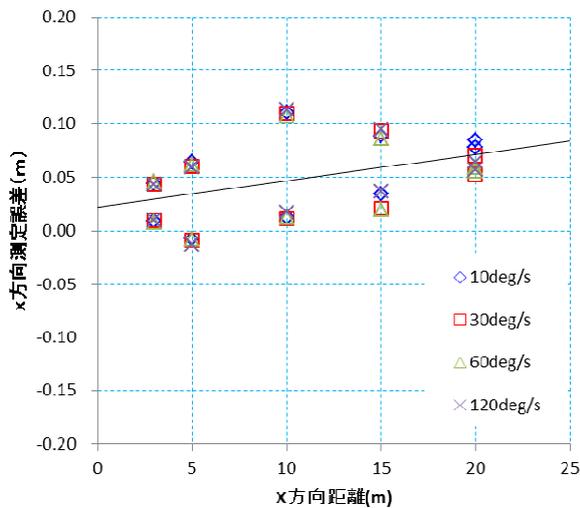


図 6.1.2-1 x 方向認識精度

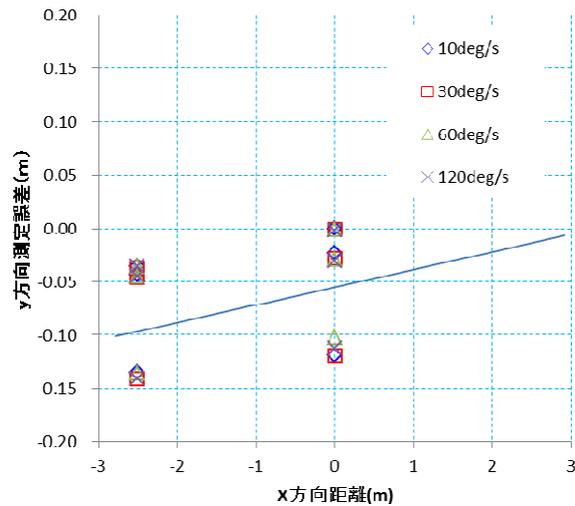


図 6.1.2-2 y 軸方向認識精度

(3) 検出距離

認識距離については物体の反射率で大きく異なる。概略反射率は白ケント紙 70~80%、ケント紙 5~10%（いずれも参考値）では、黒ケント紙では直径 50mm、直径 100mm の円柱物体は 10m の距離までが検出距離となった。これは概ね成人の腕 1 本に相当する。各規格では衝突する前に停止することを求めており、フォーク型ロボットではインバータで減速停止する停止距離 10.6m に余裕を持たせた値として 16m とする。結果 20m 以上まで検出可能で、フォーク型の減速距離を十分に満足する。規格参考にダミー人形（表面は肌色の布地）では 20m 以下で検出可能である。規格の中では ANSI B56.5-2012 では 6% 以下の反射率での試験を規定しているため白と黒の検出体を使用している。

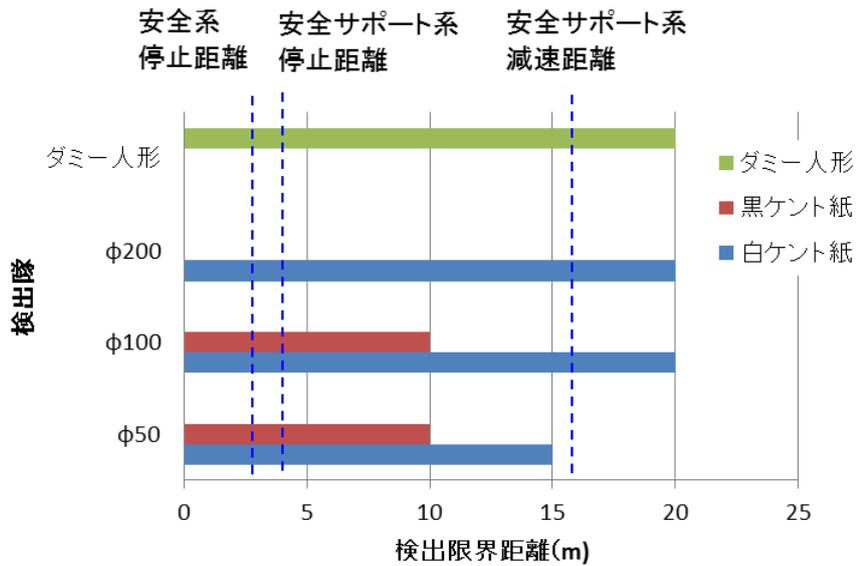


図 6.1.2-3 検出限界距離

6.1.3 安全系・安全サポート系の評価

試験場所は当初は図 6.1.3-1 に示すように、一般工場レベルの環境で実施した。評価試験の過程で安全センサーの動作上の問題が発生し、試験場所を変更した。試験項目を表 6-1-2 に示す。

表 6.1.3-1 試験場所

実施期間	実施場所	実施内容	備考
2012年1月 ～2013年6月	15m×28m エリア 床面他に砂塵の多い一般工場レベルの環境	各種機能の検証	安全センサーが空気中の塵や浮遊粒子を誤検知
2013年7月 ～2014年1月	15m×15m エリア 屋内のクリーンな工場環境	実環境を想定した動作検証	空気中の塵や浮遊粒子を誤検知するため場所を変更



(1)外観

(2)床面の状態

図 6.1.3-1 試験場所

機能試験は安全系、安全サポート系は各種の想定したシナリオ通りに動作するかを中心に試験を行った。従来から使用している車体のため、個々のパーツや機能を網羅的に評価するのではなく、本プロジェクトで新規に開発した機能の評価した。シナリオ自体の妥当性については実稼動を想定した試験の中で修正を行った。

表 6.1.3-2 機能試験

試験項目		概略内容
安全サポート系	3D位置認識	認識精度 <ul style="list-style-type: none"> ・対象物までの距離依存 ・対象物までの速度依存 ・移動方向(縦移動, 横移動, 斜め移動) ・形状依存(平面, 柱状, 分解能近傍の物体) ・表面の性状(反射率, 色etc)
		床面認識 <ul style="list-style-type: none"> ・床の認識 ・床でない異物の認識 ・床と壁の境界
		応答時間 <ul style="list-style-type: none"> ・応答時間の距離依存性 ・応答時間の速度依存性 ・応答時間のその他の要因の依存性
		各種シナリオに対する挙動の妥当性 <ul style="list-style-type: none"> ・走行-->減速 ・走行-->停止 ・走行-->非常停止 ・減速-->再加速 ・停止中の要因発生 ・要因の解除
安全系	安全センサ	状況に対する挙動の妥当性(移載シーケンスを含む) <ul style="list-style-type: none"> ・走行-->非常停止 ・停止中の要因発生 ・要因の解除
ブレーキ	非常停止	<ul style="list-style-type: none"> ・非常停止をかけた後の挙動, 姿勢変化 ・停止距離

6.1.4 安全サポート系センサーの単体試験

(1) 安全サポート系センサー(3次元障害物センサー)の単体試験の項目

表 6.1.4-1 に 3 次元障害物センサーを単体で試験する上で実施する試験項目を挙げる。本稿では、この表の項目中、今回の開発の課題に関連する No.6 の最小検出サイズ検査と No.7 の障害物検出エリア検査について報告する。

最小検出サイズ検査では、直径 50mm から 200mm の試験片を 3 次元障害物センサーから何段階かの距離に置き、直径何 mm まで検出できるかを確認する。障害物検出エリア検査では、障害物検出エリアの境界で障害物を検出するかを確認する。

表 6.1.4-1 3次元障害物センサー 単体試験項目

No	分類	評価項目	内容
1	一般試験	外観検査	設計図面通りに組立てられているか確認する
2		重量測定	各装置の重量を測定する。
3		基本動作確認	揺動装置、制御装置、電源装置の全ての装置が正常動作することを確認。
4		揺動速度測定	指定揺動速度への到達時間を測定する。
5		同調制御動作確認	揺動角度原点にてスキャンが正常に開始されているか確認する。
6	精度試験	最小検出サイズ検査	障害物の最小検出サイズと距離との確認
7		障害物検出エリア検査	<ul style="list-style-type: none"> ・揺動装置が停止した状態での評価。 ・高さ1.5m程度の人サイズの障害物の検出。 ・防護エリア、警告エリア1、警告エリア2の各検出エリアでの検出機能動作を確認する。
8	信頼性試験	異常処理機能確認	<ul style="list-style-type: none"> ・通信遮断、レーザ距離センサ異常、モータドライバ異常、etcなどの異常発生時に揺動装置が正常に停止することを確認する。
9		連続動作試験	<ul style="list-style-type: none"> ・5日24時間連続での稼働試験。 ・揺動装置の動作部に不具合が生じないか確認。
10		突入電流測定	揺動装置、制御装置の突入電流を測定する。
11		消費電流測定	揺動装置、制御装置の各動作での消費電流を測定する。
12		振動試験	揺動装置、制御装置の振動耐久試験

(2) 3次元障害物センサー単体 精度試験(最小検出サイズ、障害物検出エリアの試験)

① 3次元障害物センサー単体の試験時の座標系

最小検出サイズと障害物検出エリアを試験するための試験仕様について以下に記載する。図 6.1.4-1 は安全サポート系センサー単体の座標系である。

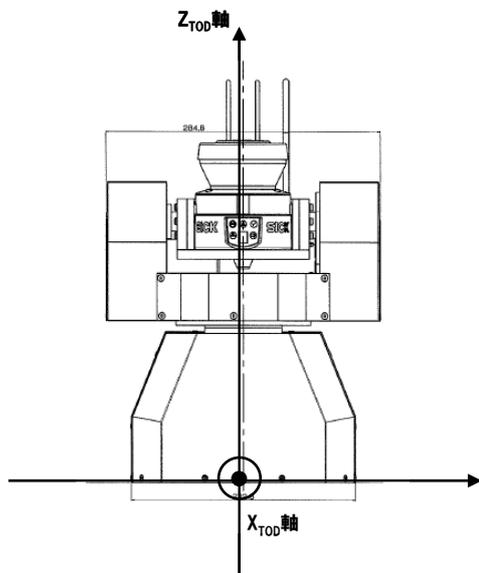


図 6.1.4-1 3次元障害物センサー 単体試験時の座標系

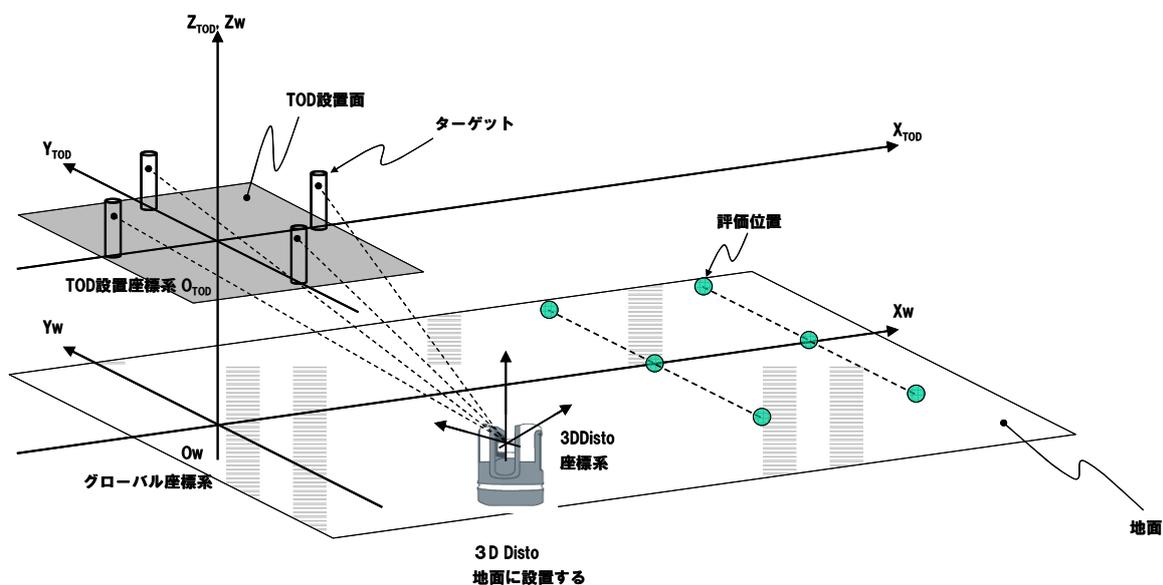


図 6.1.4-2 3次元障害物センサー 試験時の座標系

図 6.1.4-2 には、試験環境の座標系を示す。この試験場での安全サポート系センサーの最小検出サイズの評価試験、障害物検出エリア検査の試験を実施する。3次元障害物セ

ンサーの障害物検出の長手方向（フォーク型物流支援ロボットの走行方向）を X 軸にとる。X 軸に直行する平面のもう 1 軸を Y 軸、高さ方向を Z 軸とする。

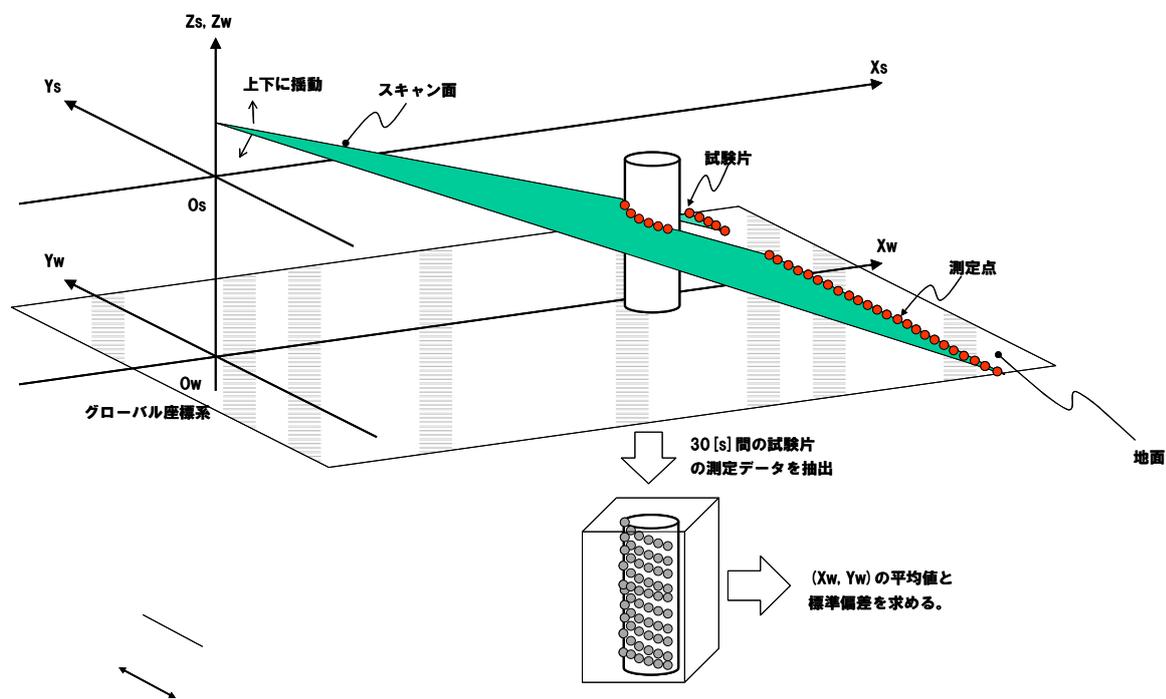


図 6.1.4-3 3次元障害物センサー 試験片上のレーザーセンサー測定点

図 6.1.4-3 に、試験片にレーザーสキャン光がどのように当たるかを示した。3次元障害物センサーは、レーザーสキャナをこの座標系では、Y 軸周りに揺動しているため、この図のようにスキャン面は上下に揺動し、レーザーสキャン光は床面に対して斜めに交差する。また、試験片に当たるレーザー光は、試験片上で斜めにあたるスキャンポイントとなる。試験片に当たらなかったレーザー光は、床面に当たる。床面は障害物として検出せず、試験片だけを障害物とする。

図に示すように、スキャン面が揺動すると試験片に対して、何回か距離を測定することになる。本試験の測定では、30 秒間に試験片までの距離を複数回測定し、その距離の値と、その距離測定値の変動を見るために、測定値の標準偏差を求める。

② 試験片の仕様

図 6.1.4-4 には 3次元障害物センサーの単体試験に使用する試験片の仕様についてまとめた。試験片は、直径 50mm～200mm で、長さを 2m とし、表面に白色のケント紙、または、黒色紙を貼りつけ、異なる反射率の物体の検出性能を確認する。

表 6.1.4-2 に本試験で使用した試験片の形状仕様をまとめた。

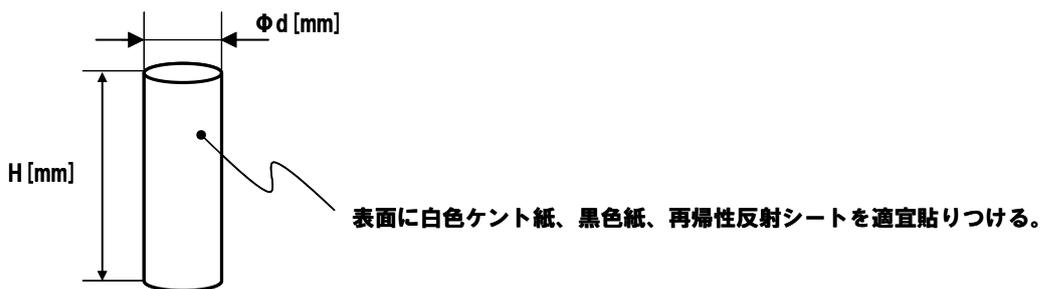


図3.1.1 試験片

図 6.1.4-4 安全サポート系センサー 単体試験片の仕様

表 6.1.4-2 安全サポート系センサー 単体試験片の仕様

品番	品名	仕様
1	発泡スチロール試験片	(1)直径 50 mm 長さ 2m (1 m + 1 m で OK) × 4 個 (2)直径 100mm 長さ 2m (同上) × 4 個 (3)直径 150mm 長さ 2m (同上) × 4 個 (4)直径 200mm 長さ 2m (同上) × 4 個 (注 1)加工時にできる溝などの傷があっても良い (1mm 程度まで)。 (注 2)材質は、標準的な発泡スチロール。

図 6.1.4-6 に安全サポート系センサーの単体試験時の試験片の状態を写真で撮影した結果を示す。発泡スチロール製の試験片を試験場に設置して、検出精度や最小検出サイズを試験した。



試験片
 ϕ 50、100、200
 長さ:2000mm
 白ケント紙
 黒紙

反射率 (参考値)
 白ケント紙 : 70~80%
 黒ケント紙 : 5~10%

図 6.1.4-5 3次元障害物センサー単体試験 (位置精度試験)

図 6.1.4-6 に試験中の 3 次元シミュレータの PC の画面を示す。3 次元シミュレータには、3 次元障害物センサーの動作状況をリアルタイムで表示するために、試験中に 3 次元障害物センサーを操作するために使用する。画面中の赤色の直方体が障害物検知エリアである。この直方体の内部に障害物が入ると、障害物を検出するとともにその位置を検出する。

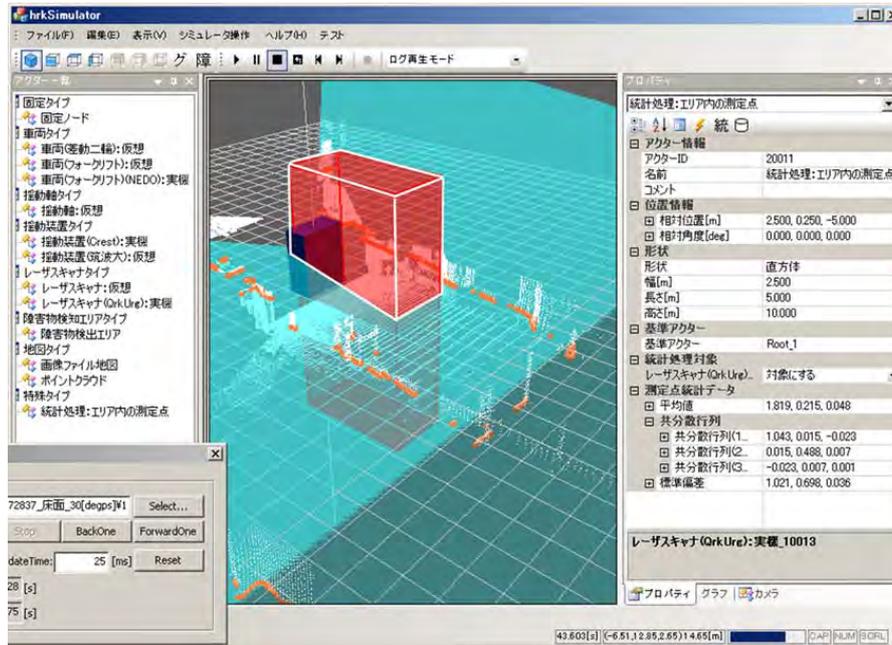


図 6.1.4-6 3次元障害物センサー 試験中のシミュレータ画面

③ 位置検出精度の試験

図 6.1.4-7 に試験片を置く位置を示す。3次元障害物センサーの最大の検出距離は20m、検知エリア幅の標準は±1.2m であるのに対して、検知エリア内の精度を評価するのに必要な図 6.1.4-7 で示す試験位置とした。試験位置に直径の異なる試験片を置き、障害物として検出するかどうかを確認した。

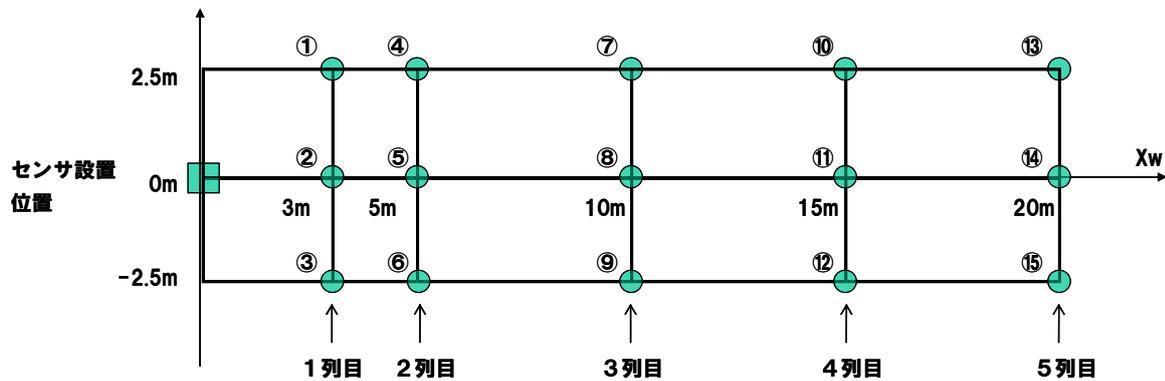


図 6.1.4-7 3次元障害物センサー 試験片の設置位置

表 6.1.4-3 に位置精度試験の結果を示す。揺動速度は低速の $10^{\circ}/s$ 、中速の $60^{\circ}/s$ 、高速の $120^{\circ}/s$ の3種類の速度で測定している。測定精度の誤差は、 $10^{\circ}/s$ の時で、X軸方向の誤差が $0.05m \sim 0.085m$ 、Y軸方向の誤差が $0.00m \sim 0.27m$ だった。高速で測定して場合でも精度は悪化せず、 $120^{\circ}/s$ で X軸方向の誤差が $0.04m \sim 0.06m$ 、Y軸方向の誤差が $0.002m \sim 0.27m$ だった。揺動速度にかかわらず、X軸方向の距離精度は、目標の $100mm$ を達成した。Y軸方向では誤差が大きい場合があるが、これは、レーザースキャナのスキャン方向に対する誤差になっている。

試験前には、揺動速度によって測定誤差が悪化すると想定していたが、揺動速度に関わらず、ほぼ一定の位置精度が出るのがわかった。また X座標の値が大きい時に、Y軸方向に誤差が大きくなる傾向がある。これはレーザースキャナの水平スキャン方向の角度測定誤差が X軸に長くなることにより、図形的に拡大されているためと考える。一方、X軸の距離が短い、フォーク型物流支援ロボットと障害物の距離が短い場合は、 $100mm$ 以内の誤差という目標をクリアしている。

表 6.1.4-3 3次元障害物センサー 位置精度試験の結果

No.	測定位置 (m)		位置測定値(m)											
			揺動速度 10° /s (低速)				揺動速度 60° /s (中速)				揺動速度 120° /s (高速)			
	X	Y	平均値		標準偏差		平均値		標準偏差		平均値		標準偏差	
			X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	3	0	2.956	0	0.03	0.042	2.954	0.001	0.026	0.043	2.957	0.002	0.027	0.043
2	3	-2.5	2.991	-2.464	0.038	0.026	2.992	-2.464	0.037	0.028	2.99	-2.464	0.042	0.025
3	5	0	4.936	0.023	0.021	0.047	4.938	0.029	0.022	0.049	4.941	0.031	0.024	0.05
4	5	-2.5	5.008	-2.457	0.036	0.046	5.008	-2.455	0.038	0.051	5.013	-2.455	0.034	0.05
5	10	0	9.889	0.119	0.013	0.063	9.893	0.102	0.013	0.069	9.887	0.112	0.022	0.052
6	10	-2.5	9.988	-2.365	0.021	0.061	9.988	-2.364	0.018	0.065	9.983	-2.359	0.031	0.06
7	15	0	14.911	0.222	0.012	0.078	14.914	0.225	0.013	0.08	14.905	0.219	0.017	0.076
8	15	-2.5	14.966	-2.271	0.009	0.033	14.98	-2.274	0.017	0.033	14.963	-2.271	0.024	0.033
9	20	0	19.922	0.225	0.049	0.075	19.941	0.206	0.017	0.056	19.936	0.217	0.007	0.043
10	20	-2.5	19.915	-2.226	0.079	0.044	19.944	-2.229	0.019	0.044	19.943	-2.228	0.007	0.044
平均値			-	-	0.0308	0.0515	-	-	0.022	0.0518	-	-	0.0235	0.0476

床面の測定精度を表 6.1.4-4 に示す。揺動速度が小さい場合には、目標の測定精度 100mm を達成している。揺動速度が大きい場合に、X 軸の距離が 10m 以上になった場合は、Z 軸の誤差が 100mm を超える場合がある。この条件は、揺動が高速で下端に近づいた位置で Z 軸方向の測定データを出力した場合に相当する。揺動が上から下に切り替わる位置での測定データであり揺動軸の速度やタイミングを取りにくい条件であるとする。

表 6.1.4-4 安全サポート系センサー 位置精度試験 (Z 方向精度) の結果

No.	測定位置 (m)	揺動速度(° /s)					
		10° /S		60° /s		120° /s	
	距離	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
		Z(m)	Z(m)	Z(m)	Z(m)	Z(m)	Z(m)
1	5	0.053	0.017	0.066	0.026	0.085	0.038
2	10	-0.034	0.022	0.077	0.159	0.113	0.014
3	15	-0.084	0	0	0	0	0
4	20	0.083	0.222	0.33	0.155	0.98	0.082
平均		0.0045	0.06525	0.11825	0.085	0.2945	0.0335

④ 最少検出サイズの試験

図 6.1.4-8 に最小検出サイズの試験の状態を撮影した写真を示す。3次元障害物センサーの X 軸上に直径が異なり、白と黒のケント紙を貼った試験片移動させて設置し、検出する距離を測定する。図 6.1.4-9 に試験片を設置する方式を示す。

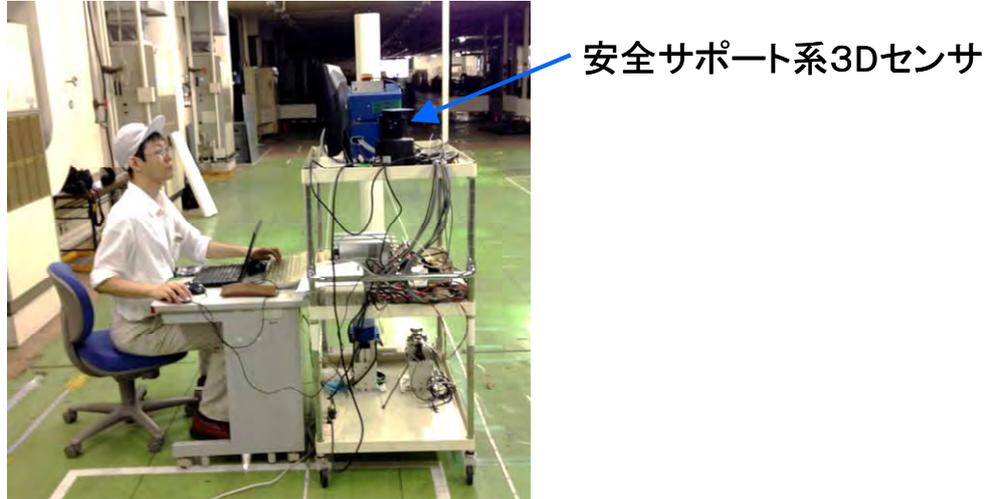


図 6.1.4-8 3次元障害物センサー単体試験の方式（最少検出サイズ試験）

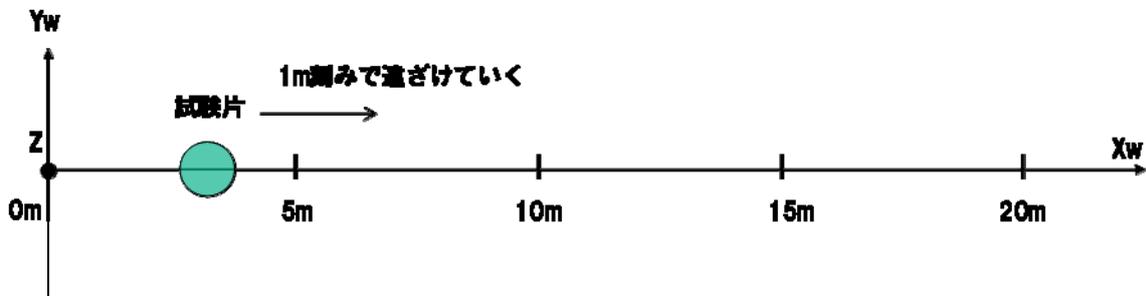


図 6.1.4-9 3次元障害物センサー単体試験の方式（最少検出サイズ試験）

表 6.1.4-5 に白ケント紙を使用した時の最少検出サイズの結果を示す。揺動速度が低速の場合も、高速の場合も試験片の直径 $\phi 50\text{mm}$ ～ $\phi 200\text{mm}$ において、 3m ～ 15m で 100% 障害物の検出が可能だった。距離が 20m の場合、試験片 $\phi 50\text{mm}$ では障害物を検出できなかったが、試験片 $\phi 100\text{mm}$ と $\phi 200\text{mm}$ では 100% 障害物を検出することができた。

表 6.1.4-5 3次元障害物センサー 最少検出サイズ試験（白ケント紙）の結果

距離(m)	検出割合(%) (白ケント紙)					
	揺動速度 10° /s			揺動速度 120° /s		
	試験片 φ 50mm	試験片 φ 100mm	試験片 φ 200mm	試験片 φ 50mm	試験片 φ 100mm	試験片 φ 200mm
3	100	100	100	100	100	100
5	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100
15	100	100	100	100	100	100
20	0	100	100	0	100	100

表 6.1.4-6 には黒ケント紙を使用した時の最少検出サイズの結果を示す。3m～10mの距離では、揺動速度が低速の場合も高速の場合も試験片 φ50mm～φ200mm で障害物を検出できた。距離が 15m以上では、試験片の直径が φ50mm～φ200mm の範囲で障害物を検出しなかった。

表 6.1.4-6 安全サポート系センサー 最少検出サイズ試験（黒ケント紙）の結果

距離(m)	検出割合(%) (黒ケント紙)					
	揺動速度 10° /s			揺動速度 120° /s		
	試験片 φ 50mm	試験片 φ 100mm	試験片 φ 200mm	試験片 φ 50mm	試験片 φ 100mm	試験片 φ 200mm
3	100	100	100	100	100	100
5	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100
15	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0

⑤ 障害物検知エリアの試験

図 6-1-4 - 10 に障害物検知エリアの試験方法を示す。3次元障害物センサーの位置を基準として、X軸方向に走行方向の長さを設定し、Y軸方向に検知エリアの幅方向を設定する。試験片を検知エリアの境界に設置して障害物を検知するかどうかを試験する。

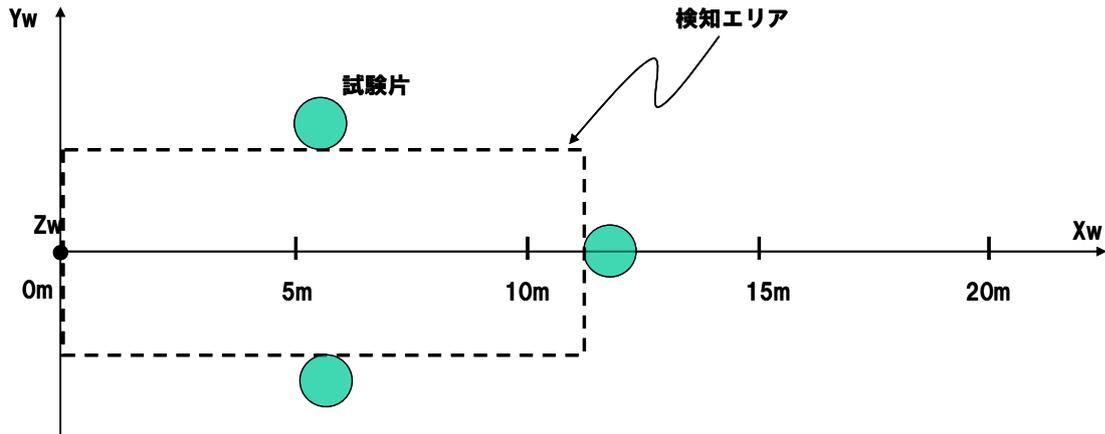


図 6.1.4-10 3次元障害物センサー 障害物検知エリアの試験

図 6.1.4 - 11 にフォーク型物流支援ロボットの障害物検知エリアの設定を示す。本試験は、フォーク型物流支援ロボットの障害物検知エリアと同等に範囲を設定して、3次元障害物センサー単体でどのような性能があるかを確認するものである。

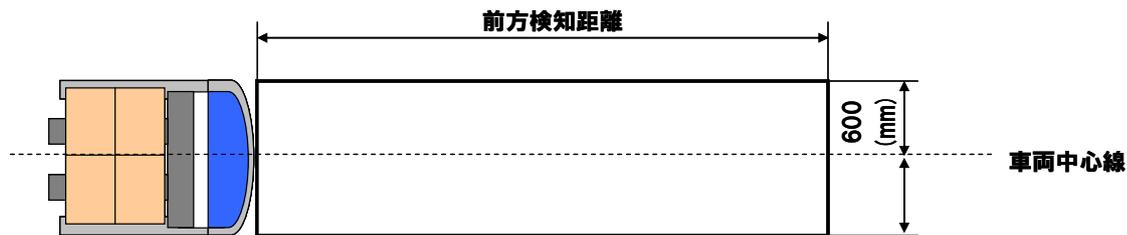


図3.3.3 検知エリアの定義

図 6.1.4-11 3次元障害物センサー 障害物検知エリア

図 6.1.4-12 には、障害物検知エリアに人間が近づいてくる場合の状態を示す。障害物検知エリアに人間の移動速度 v (m/min) で近づくとする。このような場合に障害物検知エリアはどうなるかを試験する。

図 6.1.4-13 には障害物検知エリアの試験の様子を撮影した写真を示す。ダミー人形を台車に載せて、台車をロープでけん引することにより、人の移動に対応する動きとした。

。

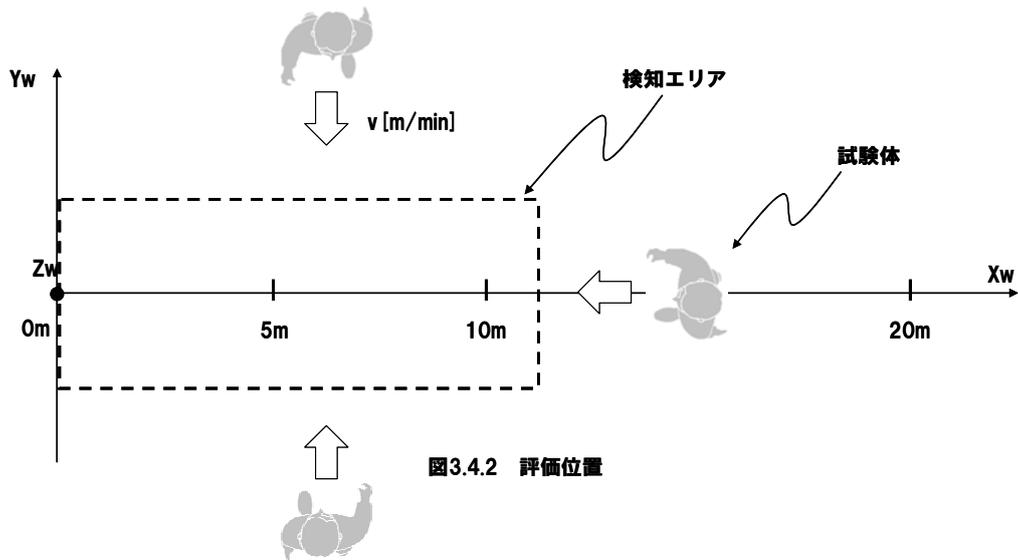


図 6.1.4-12 3次元障害物センサー 障害物検知エリアへのダミー人形の接近

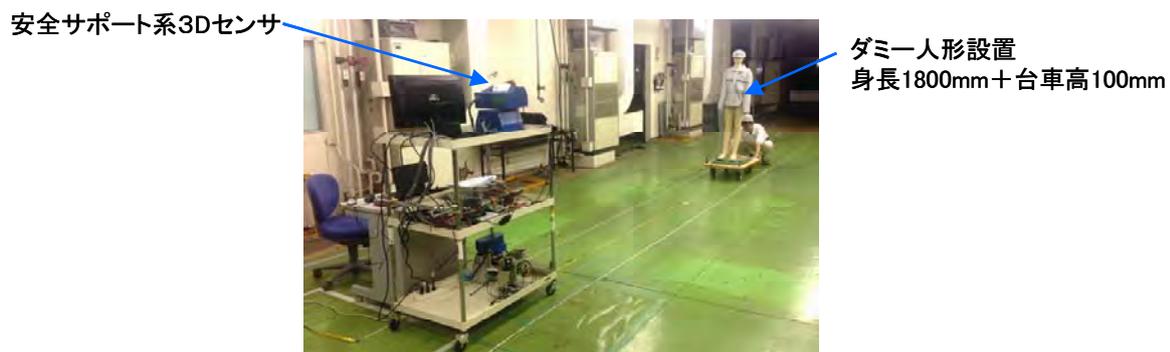


図 6.1.4-13 3次元障害物センサー単体試験（障害物検出エリア検査）

表 6.1.4-7 に障害物検知エリア試験の結果（静止時）を示す。検出距離 10mまでは安定して障害物を検出した。検出距離 15m以上では、障害物を検出はするが、検出までにかかる時間が不安定になる場合があった。

表 6.1.4-8 に障害物検知エリア試験（障害物が移動する場合）の結果を示す。検出距離 5mまでは安定しているが、10m以上の距離の場合、左右の境界での障害物検出が不安定になる場合があった。

表 6.1.4-7 3次元障害物センサー 障害物検知エリア試験（静止時）の結果

	障害物検知エリア境界での検出 (障害物、静止時)		
検出距離 (m)	前方	右側	左側
3	OK	OK	OK
5	OK	OK	OK
10	OK	OK	OK
15	検出不安定	OK	検出不安定
20	検出不安定	検出不安定	検出不安定

表 6.1.4-8 3次元障害物センサー 障害物検知エリア試験（移動時）の結果

	障害物検知エリア境界での検出 (障害物、移動時)		
検出距離 (m)	前方	右側	左側
3	OK	OK	OK
5	OK	OK	OK
10	OK	検出不安定	検出不安定
15	OK	検出不安定	検出不安定
20	OK	検出不安定	検出不安定

6.1.5 3次元障害物センサー 単体試験の評価

3次元障害物センサーの単体試験の結果を表 6.1.5-1 にまとめる。

測定範囲内で障害物の検出は、試験片の直径がφ100mmの試験片では、長さ20mまでの距離で試験片を検出した。試験片の直径がφ50mmの場合は、長さ15mまでの距離で試験片を検出した。

水平のスキャン周期は、14400°/sec、測定周期は500msに1回と設計値通りだった。

測定精度は長さ方向（X軸方向）の測定精度は目標の100mmの精度を達成することができた。幅方向（Y軸方向）と高さ方向（Z軸方向）では、長さが5mまでは測定精度は100mmだった。長さが20mでは、測定精度が100mmに達しない場合があった。

最少検出サイズは、白ケント紙で15mの距離までφ50mm、黒ケント紙では距離10mまでφ50mmを検出した。

障害物検知エリアは、静止している障害物では、10mまでの距離で障害物を検出し、移動する物体では、10mまでの距離で障害物を検出し、左右方向で10mの場合により検出が不安定なばあいがあった。

測定誤差の原因としてレーザースキャナの揺動タイミングとレーザースキャナのスキヤンタ

イメージの同期精度の問題が原因と考えられる。画像がぶれるように精度が出ないため、3次元画像の精度に制約が出ていると考える。今後のタイミングの同期回路の精度向上によりこれらの精度は改善ができると考えている。

表 6.1.5-1 3次元障害物センサー単体試験 単体試験の結果

No.	項目	目標性能	測定結果
1	測定範囲	H 2.0m × W 1.2m X D 20m	<ul style="list-style-type: none"> ・試験片φ100mm: 長さ20mまで障害物検出 ・試験片φ50mm: 長さ15mまで障害物検出
2	測定周期 (水平スキャン)	14400° /sec (25msec/スキャン)	14400° /sec (25msec/スキャン)
3	測定周期 (3次元)	500msec/測定 (1秒間に2回測定)	500msec/測定 (1秒間に2回測定)
4	測定精度	100mm	<ul style="list-style-type: none"> ・X軸方向 100mm ・Y軸方向 長さ5mの位置で、100mm 長さ20mの位置で、目標範囲外 ・Z軸方向 長さ5mの位置で、100mm 長さ20mで、目標範囲外
5	最少検出サイズ	φ50mm	<ul style="list-style-type: none"> ・白ケント紙 15mまでφ50mm ・黒ケント紙 10mまでφ50mm
6	障害物検知エリア	1.2m × 10m	<ul style="list-style-type: none"> ・静止時 10mまで障害物検出 ・移動時 10m前方方向で障害物検出 10m左右で障害物検出で 場合により不安定な場合あり。

6.2 模擬環境での試験

実環境を想定した使用環境での稼動試験を社内で行った。実施場所は 15m×28m エリア、床面はコンパネ貼り（コンクリート床の凹凸対応）で一般的な機械加工工場の一画で行った。実施内容は、安全サポート系（3次元位置センサー）との連携による衝突回避の挙動、安全系の挙動を確認した。試験の過程で安全センサーの誤検知が見つかり、その後、図 6.2-1 に示す屋内の清浄な環境で試験を実施した。結果は走行中、荷扱い中のその他の動作に関して、当初の計画通りに安全系、安全サポート系が機能し、動作を停止することを確認した。一部の見直し事項、不具合事項が発生した。



図 6.2-1 試験の実施状況

また社内行事の際にデモ運転を行い一般の方の意見も聴取した。約 200 名が参加した社内行事でデモ運転を行い、普段、このような機器に接していない方の意見から問題点の抽出を行った。



図 6.2-2 社内でのデモ運転

6.2.1 見直し事項

評価試験の結果、設計見直しを行った事項について説明する。

障害物の近傍を高速で通過する際に、地図上に設定された構造物を障害物と誤認識することが発生した。実際の運用ではフォーク型ロボットの走行路を設定したあとで、一時的に物を置いた場合などは減速すべきであるが、設備や構造物で永続的かつ局所的に障害物との間隔が狭くなる場合、この部分は地図として認識できるのであればそのまま通過する。搬送能力対策として人を含む一時的な障害物でない場合に対人安全機能が本来機能を阻害することがないように、安全サイドで減速する方向に誤動作する事例であるが、仕様と異なる挙動であり、搬送能力は低下するため修正をした。

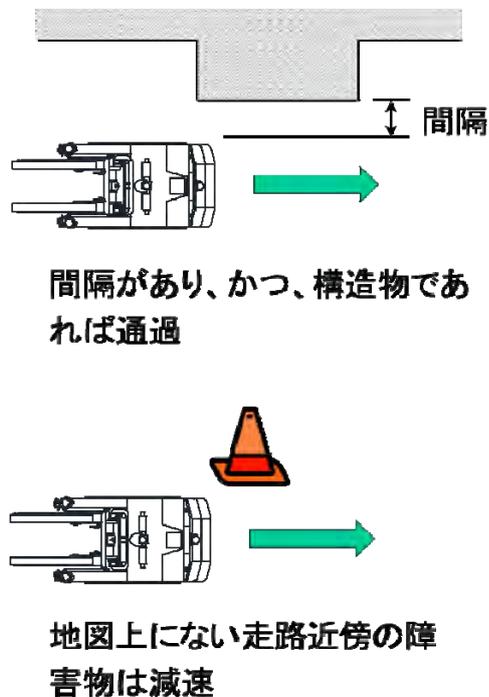
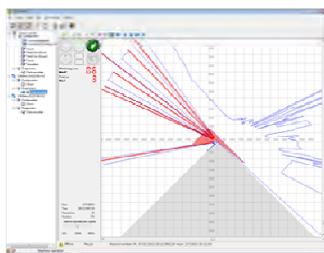


図 6.2.1-1 地図情報と 3 次元位置認識の認識不一致

6.2.2 不具合事項

障害物の車体下部に取り付けた安全センサー（SICK 社製）が空気中に舞う埃（微粒子）で誤動作し、予期しない非常停止をすることがある。試験環境が埃の多い場所であったために見つかった事象である。原因は走行で生じる乱流による埃の舞い上がり、床に敷いたコンパネ（合板）の上を車体が通過する際に、車体重量によりコンパネが変形し、コンパネ（合板）と床面の間に堆積した微粒子が隙間から噴出し、その微粒子を安全センサーが誤認識したことであった。原因の確定に時間を要した。



センサの直近に障害物を誤認識

図 6.2.2-1 安全センサーの誤認識

コンパネの隙間



図 6.2.2-2 床面の状態

この事象については取り付け位置を走行による乱流の影響の少ない 800mm 以上に移動すれば発生頻度は大幅に減少する。それでは当初の安全仕様を満たさなくなり、試験場所の清掃等の対応だけでは解決できず、試験環境を埃の少ない場所に変更し評価を継続した。

6.3 安全検証センターでの評価

フォーク型物流支援ロボットの車体が大きく安全検証センターの設備能力を逸脱し、安全検証センターで行えないため(一財)日本自動車研究所（JARI）で衝突安全の衝突試験を実施した。フォーク型物流支援ロボットを走行させ、ロボットとの衝突（一次衝突）と衝突後の床面との衝突（二次衝突）において走行速度、ヘルメットの有無によって衝突時の衝撃を評価した。評価は自動車分野で使用されている指標であるダミーの頭部傷害基準値（HIC：Head Injury Criteria）で行った。また衝突時の挙動を高速度ビデオ撮影し、その挙動、衝突後のダミーの状態から車体形状等の課題を検討した。尚、試験は安全バンパー、非常停止スイッチ以外の安全系、安全サポート系による衝突回避機能は停止し、衝突した後の挙動を評価した。試験の方法としては図 6.3-1 に示すように直立状態のロボットをダミーに衝突させ、そのときの挙動を観測する。

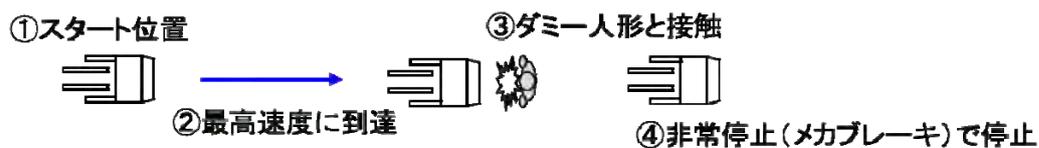


図 6.3-1 衝突試験要領

試験場所は図 6.3-2 に示す (一財) 日本自動車研究所の自動車用の衝突試験場所 (屋内) の一部をお借りして約 40m の走行距離で実施した。

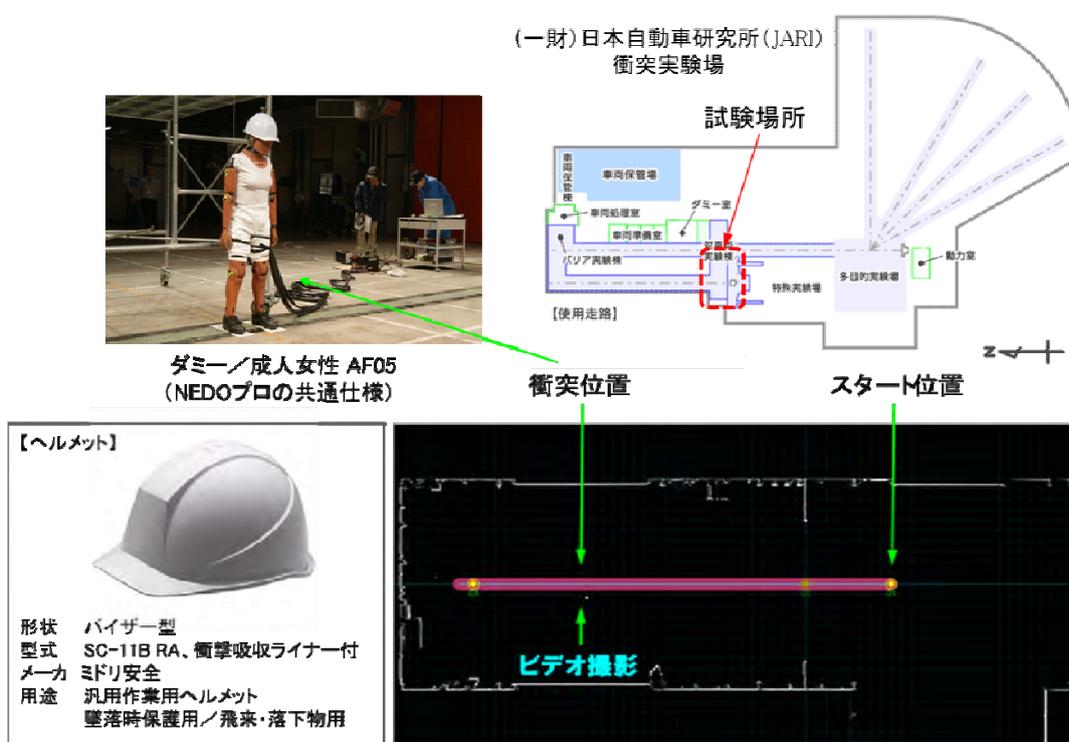


図 6.3-2 衝突試験要領

試験としては表 6.3-1 に示す条件で行った。試験は衝突したダミーの応力を開放する休止時間が必要で、1日の作業では当初計画していた側面衝突は行うことができなかった。

表 6.3-1 衝突試験

試験番号	試験条件（衝突速度、ヘルメット有無）
Test 1	180m/min、ヘルメット有
Test 2	180m/min、ヘルメット無
Test 3	180m/min、ヘルメット無
Test 4	60m/min、ヘルメット有
Test 5	120m/min、ヘルメット有
Test 6	60m/min、ヘルメット無

6.3.1 衝突時の挙動

衝突試験でダミーと車体を衝突させた結果、以下のような挙動となった。衝突時の挙動は、合計6回の衝突において一定の傾向が見られた。

- ① ロボットは車体下部に設置したバンパースイッチでダミーとの衝突を検知し、走行モーターの電力を遮断し、電磁ブレーキにより停止する。
- ② ダミーは車体上部のバンパーで後ろに押され、転倒する。このとき頭部はロボットの車体に額部分が衝突する。
- ③ 足は床面との摩擦が大きく、車体下部バンパーで押されながら減速し、頭部は一次衝突時の速度で車体から離れ、後頭部から床面に衝突する。後頭部の床面衝突に遅れて背中、臀部が床に衝突する。
- ④ 一次衝突から約1秒で2次衝突に至る。
- ⑤ 走行速度が120m/分、180m/分と高速で衝突したとき、足首に近い下腿部分でダミーを押し、停止に足首から下腿の一部が車体の下に挟まれることがある。ダミーが車体に押されて移動する距離は、移動速度180m/分時に最大1.86m引きずられ、0.29mが車体の下に巻き込まれた。
- ⑥ 低速でのダミーの移動は、移動速度60m/分時は0.11m引きずられ、180m/分の高速走行よりも短距離である。

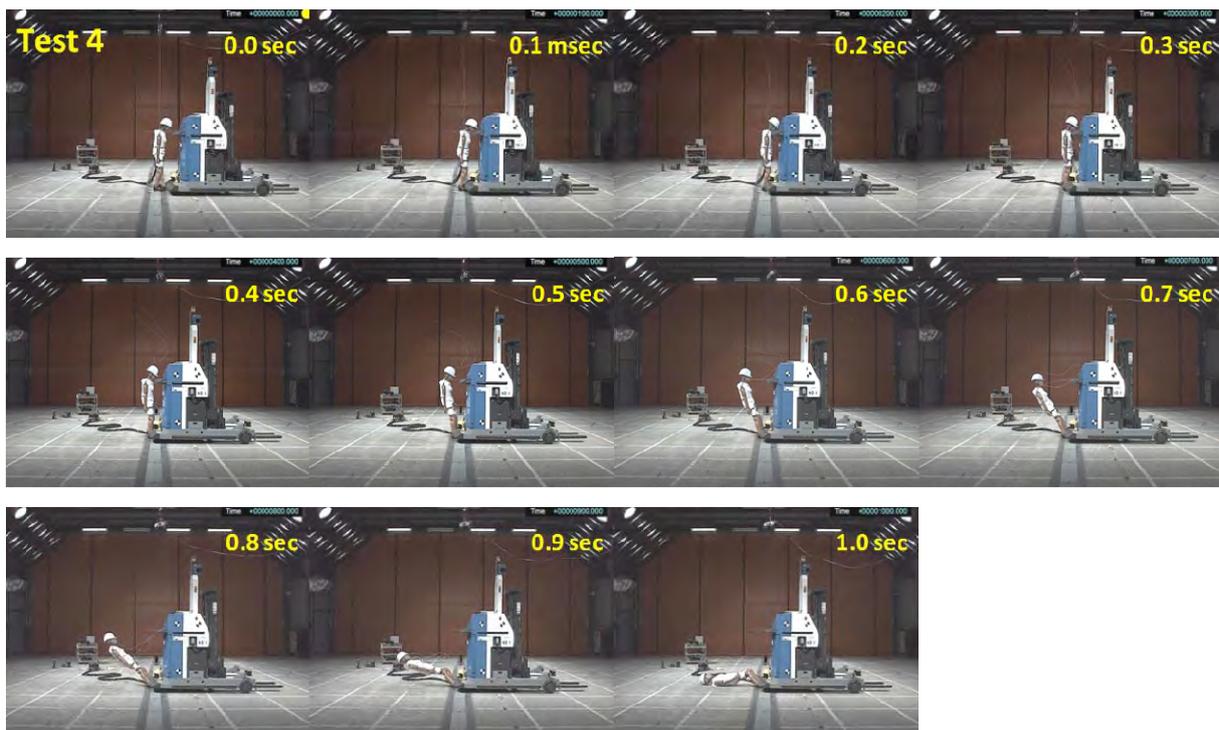


図 6.3.1-1 衝突時の挙動 1 (条件：衝突速度：60 m/min、ヘルメット着用)

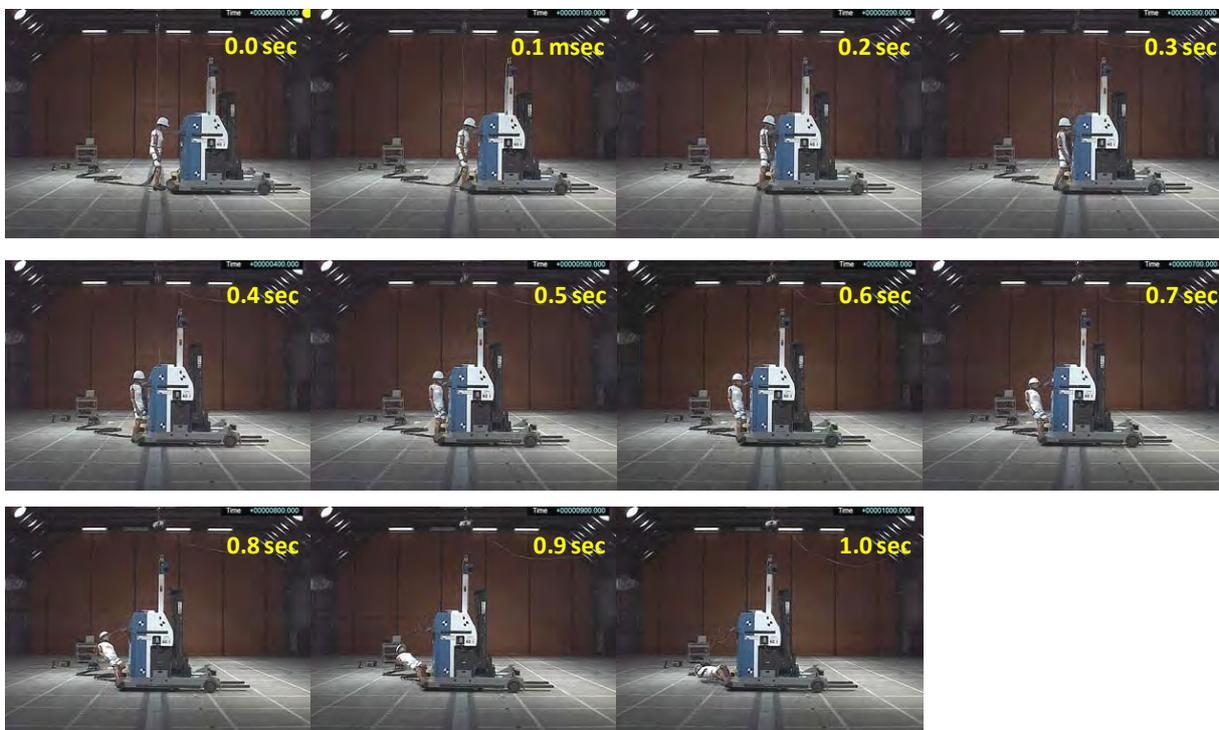


図 6.3.1-2 衝突時の挙動 2 (条件：衝突速度：120 m/min、ヘルメット着用)

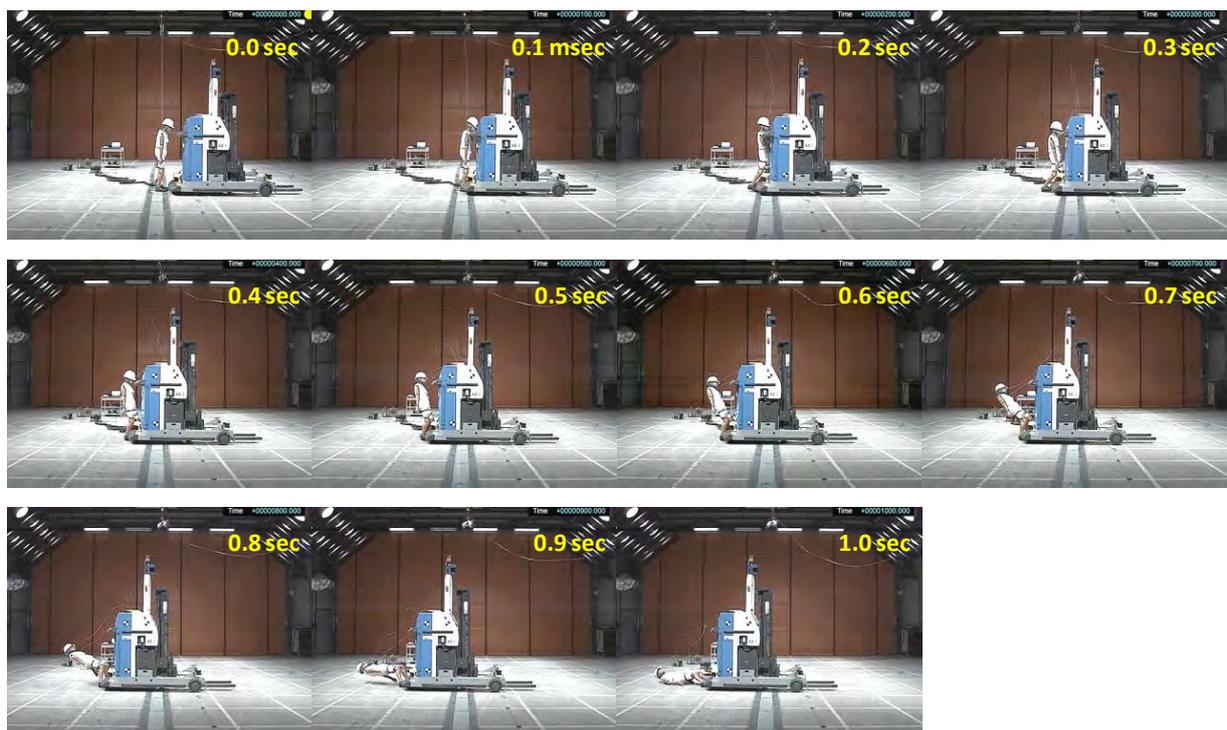


図 6.3.1-3 衝突時の挙動 3 (条件：衝突速度：180 m/min、ヘルメット着用)

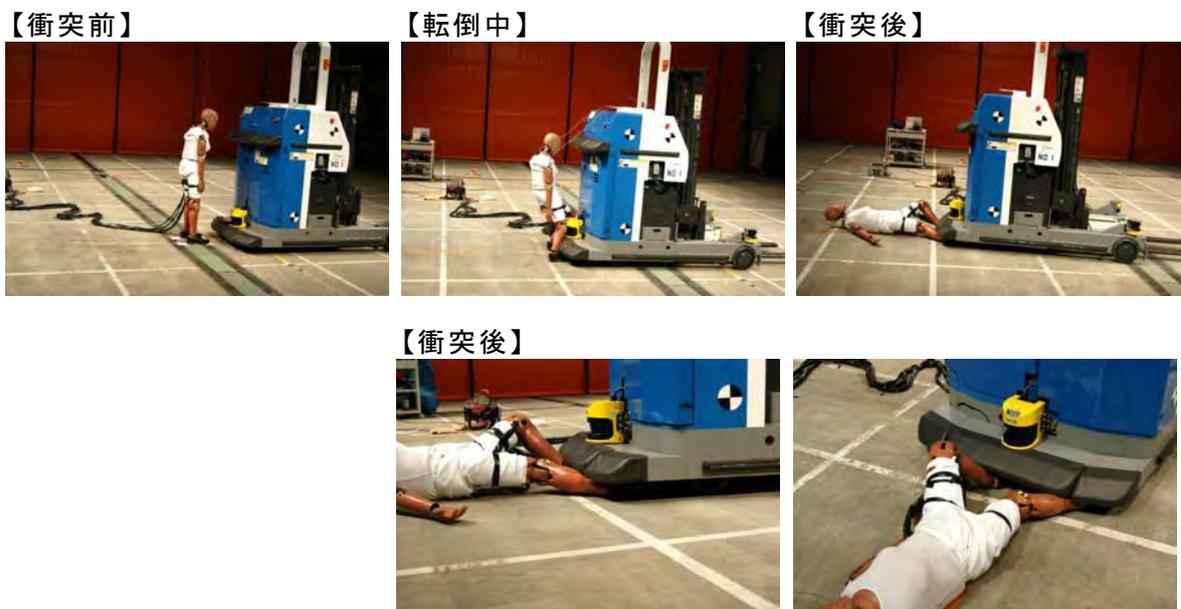


図 6.3.1-4 180m/分での衝突時の挙動



図 6.3.1-5 衝突後のヘルメットの変形

試験に使用したヘルメットは、内部に発泡スチロールの衝撃吸収ライナーを装着した汎用作業用ヘルメット（バイザー型ヘルメット、型式 SC-11B RA、衝撃吸収ライナー付、メーカー：ミドリ安全）を使用した。衝突試験時の1回の二次衝突衝撃で後頭部が変形し、内部の衝撃吸収ライナーまで変形した。ヘルメットは試験ごとに新品を使用した。ヘルメットが車体に接触した箇所に塗装表面に傷は発生したが、車体のへこみや変形は見られなかった。また試験中にダミーが非常停止スイッチに衝突したことがあったこのときはスイッチのプラスチックの押しボタンが破損した。車体には図 6.3.1-6 に示すように金属製の取っ手もあり、この構造に関しては見直しが必要である。



図 6.3.1-6 衝突後のヘルメットによる車体の塗装傷

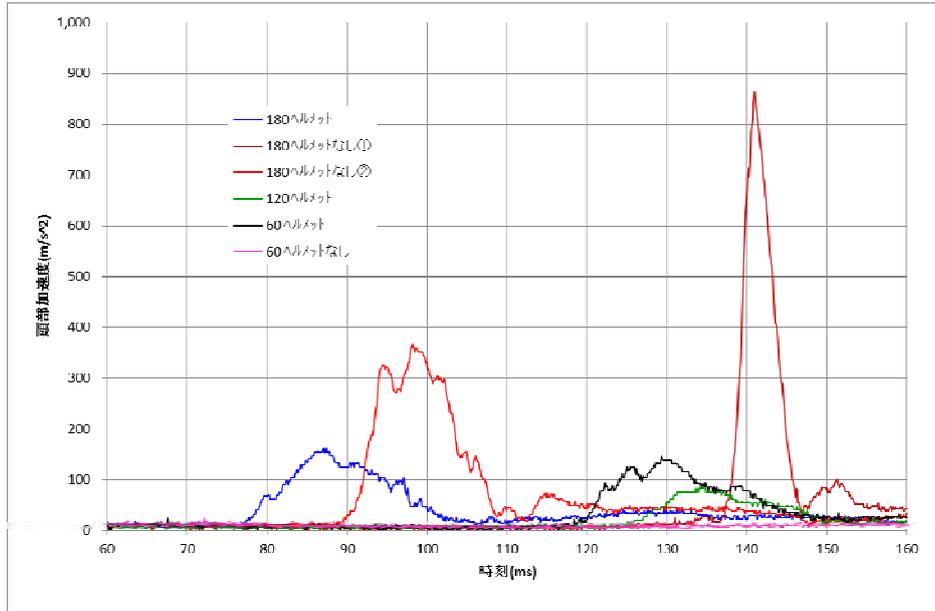


図 6.3.1-7 一次衝突時の加速度

車体とダミーの衝突した一次衝突は速度 180m/分（赤線）において 362m/s^2 、180m/分（茶色線）で 962m/s^2 とヘルメットを着用していない場合が最も高い加速度を示している。ヘルメットを着用した場合は、速度 180m/分（青線）の場合に 155m/s^2 と非着用と比較して $1/2\sim 1/5$ に低減されている。

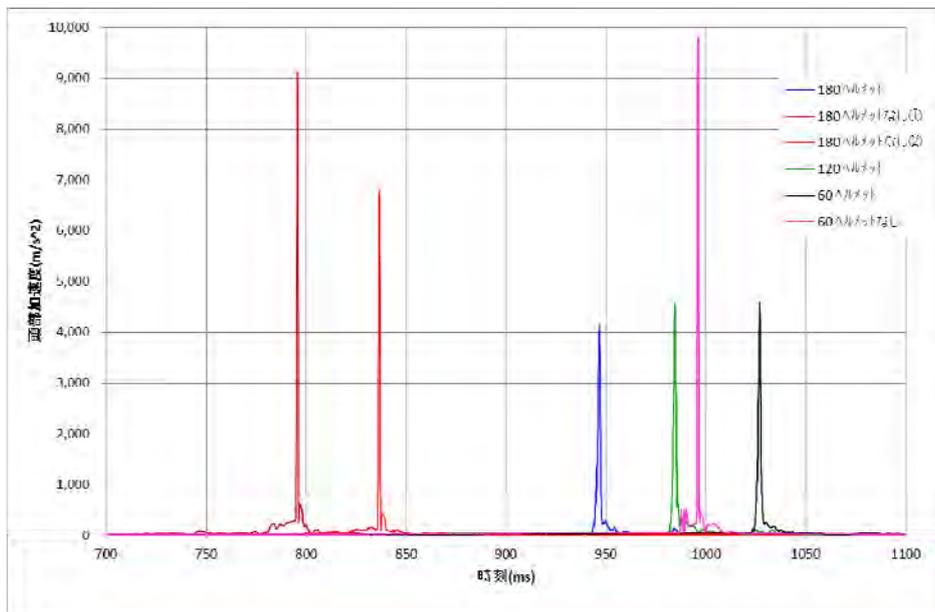


図 6.3.1-8 二次衝突時の加速度

一方、ダミーが床面と衝突する二次衝突では、ヘルメット着用では衝突速度に関わらず加速度が $4,200\sim 4,600\text{m/s}^2$ であるのに対し、ヘルメット非着用では $6,800\sim 9,800\text{m/s}^2$ と大きな値

を示し、短時間で大きな衝撃が発生する。2次衝突部分の拡大チャートを図 6.3.1-9 に示す。

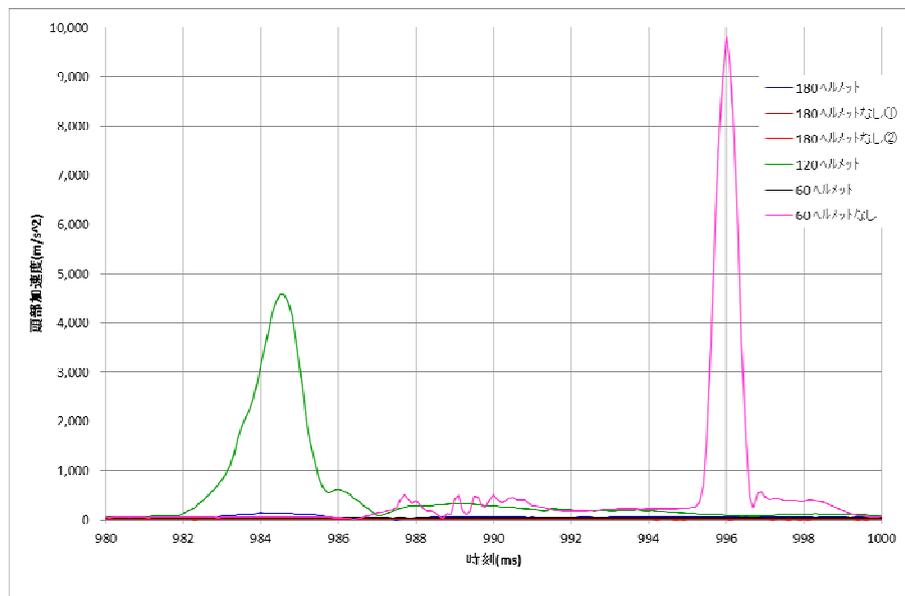


図 6.3.1-9 二次衝突部分の拡大

6.3.2 頭部傷害基準値（HIC）での評価

車体とダミーが衝突した一次衝突のときの衝撃は走行速度が 180m/分でヘルメットを着用しない場合が最も高い値を示す。米国法規（自動車衝突時の乗員保護）における小柄な女性ダミーの傷害基準値である HIC=700、体格が異なるが参考として、欧州における成人男性ダミーの傷害基準値である HIC=1,000 と比較しても十分に低い値であり、一次衝突は重篤な結果を生じるものではない。最も HIC の大きいケースはヘルメット非着用での高速走行 180m/分での衝突で約 40%の確率で AIS1（軽症）の負傷が発生する。ヘルメット着用はこれをさらに低減するのに有効で安全に寄与する。

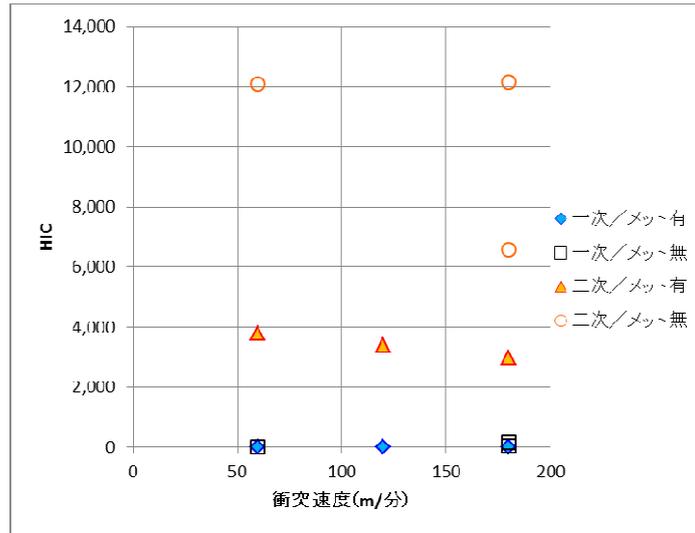


図 6.3.1-10 HIC に比較

表 6.3.2-1 車体衝突時（一次衝突）の衝撃度

試験番号	試験条件 (衝突速度、ヘルメット有無)	HIC	頸部せん断荷重(N)	頸部軸荷重(N)	頸部トルク(Nm)	胸部加速度(m/s ²)	胸部変位(mm)
Test 1	180m/min、ヘルメット有	9	-318	-217	-22	39	0
Test 2	180m/min、ヘルメット無	161	-732	-1479	-26	91	0
Test 3	180m/min、ヘルメット無	54	-817	-713	-24	89	1
Test 4	60m/min、ヘルメット有	2	-227	-176	-3	20	0
Test 5	120m/min、ヘルメット有	6	-307	-258	-4	34	0
Test 6	60m/min、ヘルメット無	1	-198	-239	-3	24	0

一方、床面に衝突する二次衝突のときの衝撃はヘルメット装着状態で HIC=3,000 前後、ヘルメット装着なしで HIC=6,600~12,000 と非常に大きな値を示す。走行速度が 60m/分でも大きい値を示す。

表 6.3.2-2 対床面衝突時（二次衝突）の衝撃度

試験番号	試験条件 (衝突速度、ヘルメット有無)	HIC	頸部せん断荷重(N)	頸部軸荷重(N)	頸部トルク(Nm)	胸部加速度(m/s ²)	胸部変位(mm)
Test 1	180m/min、ヘルメット有	2989	1695	1356	-23	394	5
Test 2	180m/min、ヘルメット無	12174	3063	1025	-68	433	2
Test 3	180m/min、ヘルメット無	6594	1953	433	-29	261	0
Test 4	60m/min、ヘルメット有	3790	1912	-1010	-46	273	7
Test 5	120m/min、ヘルメット有	3397	2055	1004	-29	381	6
Test 6	60m/min、ヘルメット無	12113	2570	-1579	-23	475	10

6.3.3 衝突試験に対する考察

衝突試験では、ヘルメットの選定は運用する対象が配送センターでの運用であることを考慮し、一般に入手可能な墜落時保護用／飛来・落下物用の作業用ヘルメット SC-11B RA 衝撃吸収ライナー付（ミドリ安全製）を使用した。これらを整理すると下記となる。

- ① 一次衝突は重篤な結果をもたらす衝撃のレベルではない。
- ② 頭部、頸部、胸部のいずれも、二次衝突での衝撃が大きい。
- ③ ヘルメット着用は衝撃緩和に効果はある。
- ④ 二次衝突ではヘルメット着用は HIC=1000 を下回るまでの衝撃緩和には不十分である。

産業用ヘルメットでは飛来や落下物からの防護を目的としているため、自転車やバイク用の転倒保護用ヘルメットに比較し、衝撃吸収性能は低い。構造、クッション部分の厚み、衝撃力の分散性能が大きくことなる。

尚、二次衝突はフォーク型ロボット以外でも大きな値になり、今後、これをどのように評価するか、あるいは評価の有無を含めて試験コンソシアムで検討中である。

車体形状に関しては、今回はダミーと車体が正対する正面からの衝突試験を行った。その結果バンパーで足背（つま先）を押さえるとダメージが大きくなる。足背を拘束して状態を押すことで、足の接地面（足の裏）を中心とした回転運動で後頭部から床面に衝突する。従来は安全とされていたガイドライン³⁾で示された走行速度 60m/分においてもこの状況は発生する。

速度 180m/分で衝突した場合、車体の停止までの移動距離が 1.38m あり、ダミーは車体に押されて踵をコンクリート床に擦り擦過痕を残しながら 1.2m 移動し、靴の踵は擦過により破損していた。これは踵、足首にも大きな力がかかることを示している。ダミーは AF05 を使用し膝や足首にはセンサーが無いいため下肢の衝撃の定量評価はできていない。

この結果から分かる望ましい車体形状は、足背を車体下に巻き込まないようにするためには、バンパー位置を床面ギリギリまで下げることが求められる。また従来はスポンジや発泡ウレタンのような柔らかい素材のバンパーが使用されてきたが、バンパーで足を押せる硬い材質の使用の検討も今後の検討課題となる。バンパーの直下の空間を塞ぐための、排障器の使用も有効である。更にバンパーの接触と上体（胸部）接触のタイムラグがあれば低速での押し倒しは回避可能であり、これらは今後の車体形状設計に反映する。現状のバンパーと床面との間隔を図 6.3.1-12 に示す。



図 6.3.1-11 ダミー移動時の踵の擦過痕と破損した靴の踵

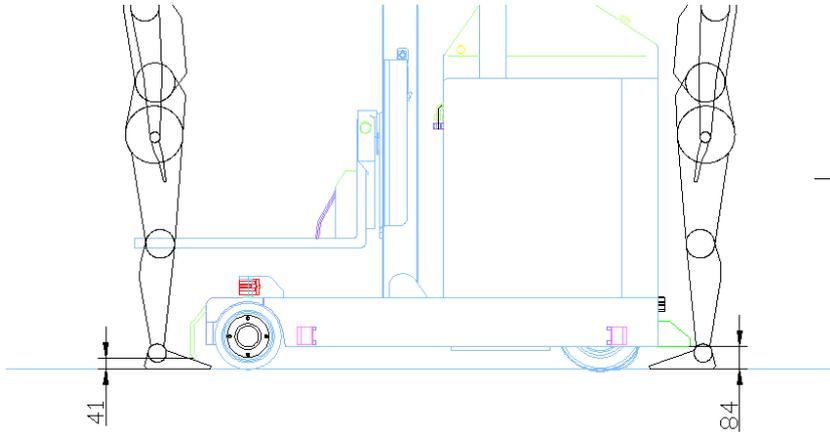


図 6.3.1-12 車体と床面との間隔

7. 結果

7.1 安全サポート系

(1) 対人衝突回避

フォーク型ロボットで行う、3次元位置認識装置と通常制御系を組み合わせた安全サポートは、不安全な事象に至る前にフォーク型ロボットを減速あるいは停止し、対人接触あるいは対人衝突事故リスクを減らすことに有効である。

3次元で位置認識をする範囲は車体後方（走行方向）の床上 200mm から 1,200mm の正面から側面を含む 270 度の空間での障害物を認識する。

(2) 安全サポート系としての地上システム

地上システムで行う歩行者検知等の方法は有効性が期待される。検出に使用するセンサー類は日立グループ内で製品化されたものも多く、技術開発要素が少なく、本プロジェクトの委託事業範囲内から外れるため、検討だけに留めたが、有効性は期待できる。

7.2 安全系

非接触の安全センサーを使用した安全系は機能安全として有効である。

市販の安全センサーは使用環境により安定して動作しないこともあり、取り付け方法、運用する環境により設置方法を適切に選択する必要がある。

7.3 コスト

安全系、安全サポート系の両方について、機能安全の実現には大きなコストが発生する。状態のセンシングに使用する2次元レーザー距離計や走査機構、データ処理の制御装置を信頼性確保のため2重化を行うためのコストを製品コストに転嫁することは、価格競争の激しい産業車両のカテゴリーでは、全車装備には無理がある。JIS規格他の安全に対する取り組みに対して、使用環境の拡大や顧客要求で更に追加の安全対策を行う場合には、有償オプション扱いとして製品適用する。

8. 総括

8.1 成果の達成状況

本プロジェクトにおける成果の達成状況を表 8.1-1 に示す。

表 8.1-1 成果の達成状況

No.	目標	成果	達成度	
1. 安全性検証手法に基づいたリスクアセスメントと具体的検証方法の策定				
(1)	安全性検証手法に基づき、リスクアセスメントを実施する	過去の手動フォークリフトの事故事例を調査の上、リスク抽出しアセスメントを実施。	◎	
2. 自律走行時の3次元障害物検出技術の開発				
(1)	走行時と荷扱い時におけるロボット周辺の障害物を検出する技術仕様を策定する	(i)3次元位置認識装置の設計において、複数のデバイス、コントローラが IEC61508 に適合できず、安全サポート系として仕様を策定した。 (ii)荷扱い時の障害物検出は装置コストが大幅に増加するため対象から外し、安全系で処理する仕様に変更した。	○	
(2)	仕様に基づいた開発を行う			
	(a)	距離データをロボット座標へ変換する処理を行う	ロボットの持つ地図の座標系に座標変換したデータを受け渡した。	○
	(b)	3次元データクラウドを生成する	3次元データから車体の誘導制御系で処理可能な2次元データの圧縮を行った。	○
	(c)	車両制御処理装置に障害物の位置を出力する	周期的にデータ転送し、データ欠落についても処理を追加した。	○
	(d)	揺動モーターの制御状態を変更するための制御指令値を生成する	揺動制御を行った。	○
	(e)	3次元障害物検出処理装置の動作状況を診断する処理を行う	動作開始時の自己診断を行った。	○
3. 走行・荷扱い時の対人安全制御技術の開発				
(1)	ロボット走行時の対人安全技術			
	(a)	制動距離に適合した走行路上の障害物(人または人の手など)を検出して停止する	(i)安全サポート系と安全系の2つの系で停止する制御系とした (ii)直線だけでなくフォークリフト固有のカーブ運転、切替し運転にも防護範囲を拡大した。	○

	(b)	走行路近傍に人がいる場合は徐行運転もしくは停止する	安全サポート系で減速・停止処理を行った。	○
	(c)	対人安全と作業効率を低下させない運用の両立	障害物検出データと電子地図を照合し地図登録されている障害物は除外した。	○
(2)	荷扱い時の対人安全技術			
	(a)	荷扱い時は荷扱い領域に障害物(人、または人の手など)がないことを検出する	車体周囲 360 度を移載シーケンスに応じて監視し接触前に停止する。	○
	(b)	荷扱い作業で占有される空間を認識して障害物検出を適正に行う	荷の占有空間の認識を3次元位置認識装置から外し、安全系の防護範囲を移載シーケンスに応じて監視した。	○
4. 安全評価				
(1)	安全検証センターおよび自社模擬現場での安全評価		(i)安全検証センターでは車体重量、サイズの制約から、衝突試験のみを日本自動車研究所(JARI)で実施した。 (ii)その他の試験については社内環境で行える試験を実施した。	○
(2)	流通サービス業の現場での実証試験		物流センターの了解が得られず、社内模擬環境での検証を実施した。	△

◎：大幅達成 ○：達成 △：概ね達成 ×：未達成

(1) 安全設計について

対人安全についてのリスクの抽出、リスクアセスメントに基づいた評価とリスクの低減を実施し、リスクを許容できる範囲まで低減し、当初の目標を達成した。

安全サポート系は3次元位置認識装置が既に製品に使用している制御装置の転用から ICE61508 に適合することができず、安全系から外し、安全サポート系とした。安全系を既に SIL2 認証を受けたセンサーで構成したことで、安全性については要求を満たすがコスト的には高い構成となった。AGV は顧客毎の個別仕様対応の製品が量産には向かない製品であるが、今後、機種間の標準化を進めた上でコスト低減が必要である。

(2) 製品化・製品適用

① フォーク型ロボットの安全システム

日立製作所ではフォーク型ロボットのベースモデルとなったリーチ型フォークリフトの AGV を製品化している。今回のプロジェクトで開発した安全システムは、従来モデルに対し、高速化と安全強化対応機種のオプション扱いとし、2014 年度から受注拡販を行う。

② 3次元位置認識装置

日立産機システムの3次元位置認識装置は、小型化、外観デザイン、他社メーカーの制御装置とのインターフェースを見直した上で製品化し、AGVメーカー向けに供給する。また日立産機システムで製品化している電子地図マッチング方式の誘導制御装置 Ichdas との連携機能も装備した上で2015年度に製品化する。

(3) 成果の普及

① プロジェクトで得られた知見の活用

本プロジェクトで得られた知見、特に衝突試験の結果は、無人搬送車の業界内でも前例がなく非常に貴重な資料である。本結果は日本産業車両協会内で共有する。また、JIS規格（JIS D6802）改定にも反映する。高速走行時の衝突時の挙動、ヘルメットの効果、衝撃の定量評価の知見を活かし、JIS規格改定案では人の転倒を誘発しにくい車体下部の形状の提案、作業者のヘルメットの着用義務、安全速度の規定などに反映し、日本産業車両協会内で予備審議中である。表8.1-2にその案の骨子の一部抜粋を示す。

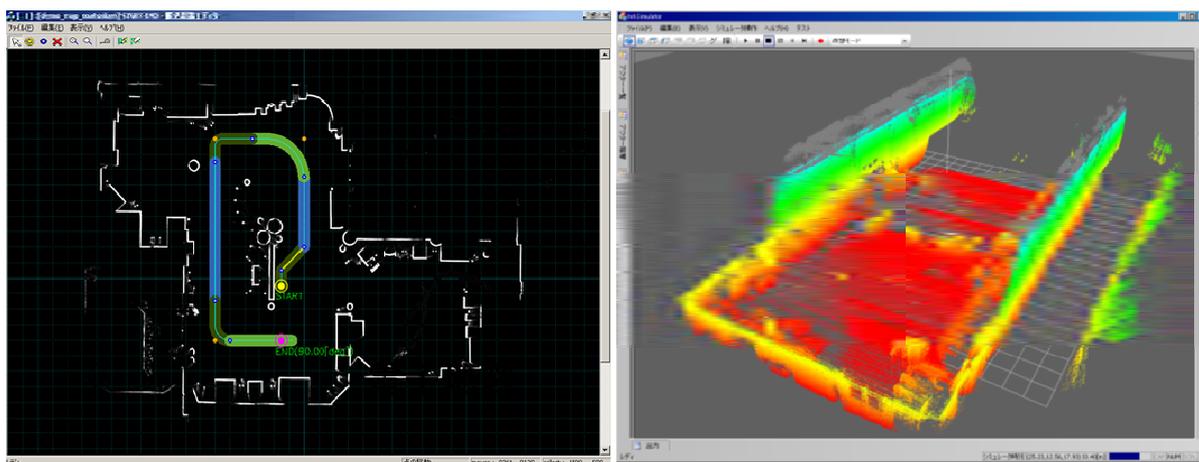
表 8.1-2 JIS 改定案の骨子（一部抜粋）

- | |
|---|
| <p>1. AGV 走行エリアには、制限事項として教育を受けた人の侵入のみを可能とする。
一般の人や教育を受けていない人は侵入してはいけない。また、エリアの安全管理者を置くことが望ましい。</p> <p>2. 走行エリアに侵入する際には、ヘルメットを着用すること。さらに、安全靴を着用することが望ましい。</p> <p>(中略)</p> <p>6. AGV が安全速度より速く走行し、その安全を確保する場合には、非接触障害物検知センサーを使用すること。</p> <p>7. 「6」非接触障害物検知センサーの安全要求レベルは、SIL は SIL2, CAT は CAT.3 および PLPL-d のいずれかとする。</p> <p>(以下、省略)</p> |
|---|

② 3次元位置認識技術の誘導制御への展開

日立グループ内での無人搬送車等のレーザー誘導制御は既に日立製作所インフラシステム社のインテリジェントキャリア、日立産機システムの Lapi に搭載している。これらの製品は2次元の距離データで周囲環境の位置認識を行っている。3次元位置認識による誘導に関しては、つくばチャレンジ（主催：つくばチャレンジ実行委員会、つくば市）に日立製作所機械研究所から Sofara-T でエントリーし、その後、日立搭乗型移動支援ロボットを開発し、つくばモビリティロボット実験特区(搭乗型移動支援ロボット公道実証実験)で走行実験を行っている。

今回開発した 3 次元位置認識は産業車両の誘導にも応用可能であり、低コストで 3 次元位置認識することにより一般産業用の無人搬送車を含む自律移動作業を行うロボットの利用シーンの拡大に繋がる。これは安全面だけでなく、二次元データでは地図とリアルタイムで計測した距離データの相関が低い凹凸の多い壁面や装置が存在する工場環境や配送センターで、安定した誘導を行うことに寄与する。日本産業車両協会が無人搬送車のユーザに実施したアンケートで、無人搬送車の改善を要する事項の上位にある信頼性向上のためにも有効な手段となる。



2次元位置認識

3次元位置認識

図 8.1-1 2次元位置認識マップと3次元位置認識マップの相違

(4) その他

コンセプト認証のためリスクアセスメントの結果を第1コンソシアムに提出し、その内容についてレビューしていただいた。

Draft		Report No. _____
JQA JAPANESE QUALITY ASSURANCE PERSONNEL ASSOCIATION		
評価報告書 ISO/DIS 13482		
Robots and robotic devices – Safety requirements for non-industrial robots – Non-medical personal care robot		
評価報告書		
報告書 No.:		
作成(+署名):		
作成(+署名):		
作成(+署名):		
承認(+署名):		
発行日:	2013年XX月XX日	
頁数:	27	
評価基準		
基準:	ISO/DIS 13482:2011	
報告書作成者:	一般財団法人日本品質保証機構 認証制度開発普及室	
製造者:		

図 8.1-2 品質評価レポート (Draft)

日立産機システム G コンソシアムとしては設計コンセプト認証を取得した。Phase1/Phase2 を含めた本認証は、今後必要に応じて取得を検討する。

9. 特許、論文、外部発表等の件数

特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文・記事		その他外部発表		
	国内	外国	PCT ※ 出願	査読 付き	その他	学会発表 ・講演	報道（新聞 ・雑誌等へ の掲載）	その他展 示会等
H23FY	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件
H24FY	1 件	0 件	0 件	0 件	3 件	3 件	2 件	1 件
H25FY	1 件	0 件	0 件	1 件	0 件	0 件	1 件	0 件

2.5 研究開発項目④ 安全技術を導入した人間装着型生活支援ロボットスーツ HAL の開発 CYBERDYNE（株）、筑波大学

まえがき

2012年1月の国立社会保障・人口問題研究所の発表によると、2010年から2030年までに我が国の総人口は約1,144万人減少し、特に15～64歳までの生産年齢人口は約1,400万人減少する一方、65歳以上の高齢者人口は、約737万人増加し、総人口比で31.6%を占めるようになると推計されている。つまり、高齢者や障害者の生活支援ニーズが今後もより増加する一方で、そのニーズに対応すべき労働者の数が大きく減少してしまうことが予測されている。テクノロジーによって高齢者や障害者の生活支援ニーズを可能な限り受け止め、生活支援に必要な労働者の数や負荷を低減することができれば、我が国が直面する超高齢化社会にまつわる困難の一部を緩和できると考えられる。

高齢者や障害者の生活支援のために、筑波大学の山海嘉之教授は、自身が推進するサイバニクス研究を通じて、人間装着型のロボット“ロボットスーツ HAL”を開発した。1991年に基礎研究が開始され、小動物による実験を経て、1995年から1997年頃にプロトタイプが制作された。1998年のHAL-1を皮切りに、HAL-2、HAL-3、HAL-4と研究開発を進められ、2005年の愛・地球博でHAL-5の第1号機が披露された。

CYBERDYNE 株式会社は、ロボットスーツ HAL を始めとするサイバニクス研究の成果を実用化し、社会に広く貢献すべく2004年に筑波大学発ベンチャー企業として設立された。設立以降、CYBERDYNE 株式会社はロボットスーツ HAL の実用化に向けて研究開発を進め、2008年には、CYBERDYNE 株式会社の初の製品となる“ロボットスーツ HAL 福祉用”のレンタル・リース販売を開始した。CYBERDYNE 株式会社は当初より、安全を最優先にロボットスーツ HAL の開発・製造・販売に取り組んでいたが、人間装着型のロボットに適した安全標準が存在しなかったために、製品の安全性について第三者評価を受けられずにいた。

このような背景から、当該研究開発プロジェクトでは、CYBERDYNE 株式会社の有する安全性に係る知見に基づいて、国際安全規格 ISO 13482 の策定に貢献するとともに、人間装着型生活支援ロボットの安全性に係る諸課題をさらに深化し、安全性を高度化・高信頼化する技術および運用ルールの研究開発を実施した。また、それらの技術の妥当性を評価するための安全性試験および実証試験を実施した。

当該研究開発プロジェクトの研究開発項目と、その主な成果は、以下の通りである：

- 1) 装着機能安定技術：人の力に合わせる出力制限・調整機能および、人の体形に合わせる調整機構の高度化と高信頼化
- 2) 制御技術：人の意図に従うサイバニクス随意制御およびサイバニクス随意制御の高度化
- 3) 安全管理技術：使用時間や異常等のイベントを自動的に記録する機能の高度化と、それによる高信頼化
- 4) 自己診断技術：各種センサを監視し、自己診断する機能の高度化と、それによる高信頼化
- 5) 安全要素技術：国際標準に準拠する安全バッテリーの開発および、強化絶縁された電極の開発
- 6) 安全性試験：人間装着型生活支援ロボットに適した試験法および合格基準の開発と、試験の実施、国際安全規格に定められた試験の実施、法令および国際安全規格の要求を網羅した安全性評価の実施
- 7) 実証試験：71名を対象とした実運用中の安全性検証の実施

当該研究開発プロジェクト全体の主な成果として、ロボットスーツ HAL 福祉用が、世界初の ISO/DIS 13482 の認証取得および国内 400 台 160 施設を超える普及を果たした。成果を応用したロボットスーツ HAL 医療用は、世界初のロボット治療機器として CE マーキングを取得し、医療機器として欧州で 40 台が稼働するに至った。また、CYBERDYNE 株式会社は、ISO 13482 の策定への貢献だけでなく、IEC における医療ロボットの安全標準の検討委員会でも積極的な貢献を果たした。

当該研究開発プロジェクトの成果は一般にも大きな関心を持って迎えられ、プロジェクト期間中の基調講演・特別講演・招待講演は延べ 198 件、新聞・雑誌・インターネット上の公開は 871 件、テレビ放映等は 62 件、展博への出展は 121 件、受賞等は 7 件に上った。

当該研究開発プロジェクトの成果を利用し、CYBERDYNE 株式会社は事業を精力的に進めている。ロボットスーツ HAL 福祉用は国内でのフィットネス事業を進め、ロボットスーツ HAL 医療用は欧州での事業展開を進めている。

当該研究プロジェクトの成果は、CYBERDYNE 株式会社の事業だけでなく、より一般の人間装着型生活支援ロボットの実用化および産業化へ貢献するものである。

目次

1. 研究開発の背景と目的	6
1.1. 背景	6
1.2. 目的	6
2. 研究開発の内容と成果	7
2.1. 機器概要	7
2.2. リスクアセスメント	8
2.3. 装着機能安定技術	11
2.3.1. 駆動力制御に伴う安全技術	11
2.3.2. 負荷変動・環境外乱に対する自動的状態認知・安全動作支援技術	11
2.3.3. 装着者の特性変動に対する機能安定技術	11
2.4. 制御技術	11
2.5. 安全管理技術	12
2.5.1. 環境認知によるリスク低減技術	12
2.5.2. サイバニックカーネル	12
2.5.3. 安全運用ルール	12
2.6. 自己診断技術	12
2.6.1. 動作状況の自己診断機能	12
2.6.2. 異常検知・報知機能	13
2.6.3. ログデータベース	13
2.7. 安全要素技術	13
2.7.1. 安全パワーユニット	13
2.7.2. 安全バッテリー	13
2.7.3. EMC 対策	14
2.8. 安全性試験	14
2.8.1. 機械的な関節角度制限の強度試験	15
2.8.2. 連続着床に対する構造全体の耐久性試験	17
2.9. 実証試験	18
2.9.1. 研究デザイン	19
2.9.2. 試験参加者の選択・除外基準	19
2.9.3. 評価項目	19
2.9.4. HAL を利用した運動訓練	19
2.9.5. 安全対策	20
2.9.6. 統計解析	20
2.9.7. 試験結果	20
2.9.8. まとめ	21
2.10. 認証取得	21
2.11. 国際標準化への貢献	22
3. 研究開発の総括	23

(要約)

件名：平成21年度～平成25年度成果報告書、生活支援ロボット実用化プロジェクト、安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットの開発、安全技術を導入した人間装着型生活支援ロボットスーツHALの開発

ロボットスーツ HAL (Hybrid Assistive Limb) は、サイバニクス技術をコアとして開発された、人の運動機能を支援・拡張する装着型のロボットである。当該研究開発プロジェクトは、高齢者や障害者の生活を支援するロボットスーツ HAL の安全性をより高めるための安全技術および運用ルールを研究開発し、また、人間装着型生活支援ロボットを実用化させるための基盤を構築することを目的として実施された。当該研究開発プロジェクトでは、以下の項目ごとに研究開発を実施した：1) 装着時機能安定技術、2) 制御技術、3) 安全管理技術、4) 自己診断技術、5) 安全要素技術、6) 安全性試験、7) 実証試験。各研究開発項目について、それぞれ以下の成果を達成した：1) 人の力に合わせる出力制限・調整機能および、人の体形に合わせる調整機構の高度化と高信頼化、2) 人の意図に従うサイバニクス随意制御およびサイバニクス随意制御の高度化、3) 使用時間や異常等のイベントを自動的に記録する機能の高度化と、それによる高信頼化、4) 各種センサを監視し、自己診断する機能の高度化と、それによる高信頼化、5) 国際標準に準拠する安全バッテリーの開発および、強化絶縁された電極の開発、6) 人間装着型生活支援ロボットに適した試験法および合格基準の開発と、試験の実施、国際安全規格に定められた試験の実施、法令および国際安全規格の要求を網羅した安全性評価の実施、7) 71名を対象とした実運用中の安全性検証の実施。より発展的な成果として、ロボットスーツ HAL 福祉用について ISO/DIS 13482 の世界初の認証を取得し、また、当該研究開発プロジェクトの成果を応用したロボットスーツ HAL 医療用について世界初のロボット治療機器として CE マーキングを取得した。当該研究開発プロジェクトの成果は、CYBERDYNE 株式会社の事業を加速するだけでなく、生活支援ロボットの産業化を促進するものである。

(Summary)

Title: Project for practical application of service robots, Development of physical assistance robots based on safety technology, Development of physically assistive robot suit HAL based on safety technology (FY2009-FY2013) Final Report

The Robot Suit HAL (acronym for "Hybrid Assistive Limb") is a wearable robot, which enhances and supports human motor functions by using Cybernics technologies. Our goal was to make the HAL more reliable for elder or disabled people by research and development of safety technologies: mechanical, electro-magnetic, functional, and applicational techniques. In this project, we proceeded 1) functional safety technique while wearing, 2) control technique, 3) safety management technique, 4) self-examination technique, 5) elemental technique for safety, 6) safety examination and 7) actual application and trials. Our major progresses were 1) improvement of limiting function of output and adjusting function and mechanics for shapes of individuals, 2) improvement of the "Cybernic Voluntary Control" and "Cybernic Autonomous Control" endowing HAL with function following its wearer's intension, 3) improvement of logging function recording operating time and events such as detected failures, 4) improvement of self-diagnosis function which assures HAL's operating condition based on embedded sensors, 5) development of safety battery compliant with an international safety standard and electrodes with reinforced insulation, 6) development of testing method and acceptance criteria based on risk assessment and conducting exhaustive verifications (including testing) covered all requirements of related regulations and standards, 7) validation of safety in practical use with 71 participants. As advanced achievement, we obtain the world-first certificate of ISO/DIS 13482 and CE-marking as the world-first therapeutic robot; moreover, we made a huge contribution to working groups of ISO and IEC establishing ISO 13482 and a safety standard for medical robots. These achievements accelerate our challenges towards industrialization of service robots helping our lives as a leading company.

1. 研究開発の背景と目的

1.1. 背景

2012年1月の国立社会保障・人口問題研究所の発表によると、2010年から2030年までに、我が国における65歳以上の高齢者人口は、約737万人増加し、総人口比で31.6%を占めるようになると推計されている。一方で、我が国の生産年齢人口（15～64歳）は約1,400万人に減少することが見込まれており、高齢者や障害者の生活支援ニーズを引き受けるべき労働力の不足が懸念される。

この問題は、我が国が直面する超高齢化社会にまつわる困難の一つであり、解決ないしは緩和しなければならない。高齢者や障害者の生活を支援し、生活支援に必要な労働者の数や負荷を低減できる生活支援ロボットの実用化および普及は、達成可能な解の一つと考えられる。特に人間装着型生活支援ロボットは、直接的に装着者の動作を支援できる点で有力な候補の一つと言える。下肢型の人間装着型生活支援ロボットであれば、立ち座りや歩行の動作支援に利用できる。また、上肢型であれば、食事や把持の動作支援に、全身型であれば、介護や重作業の動作支援に利用できる。

CYBERDYNE 株式会社は、筑波大学の山海嘉之教授が推進するサイバニクス研究に端を発する人間装着型ロボット“ロボットスーツ HAL”の実用化および、普及を目指して2004年に設立され、2008年には同社初の製品となる下肢型の人間装着型ロボット“ロボットスーツ HAL 福祉用”を上市した。CYBERDYNE 株式会社は当初より、安全を再優先に開発・製造・販売に取り組んでいたが、人間装着型ロボットに適した安全標準が存在しなかったため、社会的要請としてどこまでの安全性が必須であるかが明らかでなく、また、その安全性について第三者評価を受けられずにいた。

我が国の超高齢化社会の到来は切迫しており、人間装着型生活支援ロボットの実用化および普及は迅速に果たされなければならない。そのためにも、人間装着型生活支援ロボットに必須の安全技術の確立、安全性評価法の確立、第三者認証の体制構築は急務となっている。人間装着型生活支援ロボット分野で世界をリードするCYBERDYNE 株式会社が先導的にこれらの研究開発に取り組むことで、人間装着型生活支援ロボットの実用化および普及が加速されることが期待できる。また、人間装着型生活支援ロボットの実用化と普及を世界に先駆けて達成できれば、来るべき生活支援ロボットの国際的な産業化において、我が国の主導的な役割を果たすための重要な成果になると考えられる。

1.2. 目的

CYBERDYNE 株式会社がこれまでに取り組んだロボットスーツ HAL の開発から得られた知見に基づいて、人間装着型生活支援ロボットの安全性に係る諸課題をさらに深く抽出し、ロボットスーツ HAL の安全性をより高度化・高信頼化する技術および運用ルールの研究開発を目的とする。また、本研究開発で得られた技術および運用ルールの妥当性評価方法も開発し、必要な安全性試験および実証試験を実施する。

本研究開発にあたっては、生活支援ロボットの安全標準を議論する国内外での会議へ参加し、そこで得た最新動向に沿って行う。また、本研究開発の成果は適宜、ISO 13482 を始めとする国際安全規格に反映すべく提案する。

2. 研究開発の内容と成果

2.1. 機器概要

本研究開発は、平成 21 年度当時に初期モデルとして出荷が始まっていた下肢型のロボットスーツ HAL 福祉用（以下、HAL 福祉用）を中心に進められた。HAL 福祉用の特徴を以下に示す。

HAL 福祉用は、装着者の下肢運動の支援を意図した外骨格型の人間装着型ロボットであり、歩行や立ち座りの際の主要な関節（股関節と膝関節）に沿う形で能動軸を有している。装着の様子および外観を図 1 ロボットスーツ HAL 福祉用に、構造の模式図を図 2 ロボットスーツ HAL 福祉用の構造に示す。HAL 福祉用のフレームは足裏で床面に接地しており、HAL 福祉用の重量が装着者の負荷にならないと同時に、装着者の体重がフレームの負荷にならない構造となっている。



図 1 ロボットスーツ HAL 福祉用

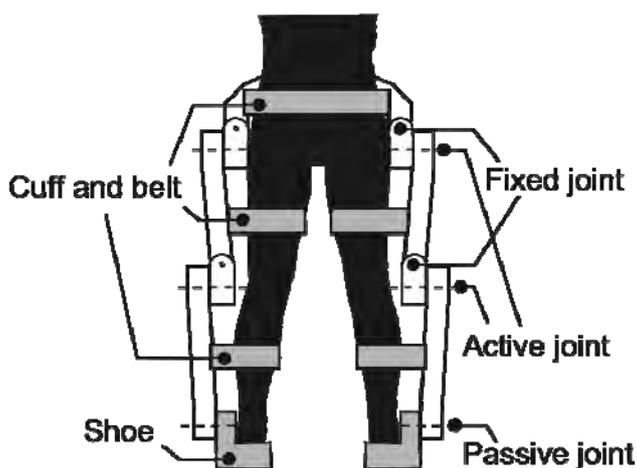


図 2 ロボットスーツ HAL 福祉用の構造

HAL 福祉用では、装着者の膝と大腿に貼り付けられた電極から読み取った生体電気信号を利用し、装着者の筋肉が動くより早くモーターを駆動することでアシストを行う“サイバニク随意制御”と、装着者の関節角度、姿勢、体重移動の情報から推定した歩行フェーズに基づくアシストを行う“サイバニク自律制御”を混合した制御方式が用いられて

いる。

以上の特徴から、HAL 福祉用はその意図する使用において、装着者と電氣的に接続されるだけでなく、互いに接触し、力学的エネルギーをやりとりする。つまり本質的に、機械的、電氣的、熱的、音響的なハザード源となる機器を装着者から隔離できない。これは産業用ロボットで一般的な“隔離の原則”を単純には適用できないことを意味しており、特に装着型ロボットにおいては、その安全性が懸念される原因となっている。

2.2. リスクアセスメント

本研究開発では、リスクアセスメントを実施し、特定されたハザードごとに必要なリスク低減方法の検討を行なった。このリスクアセスメントに基づき、2.3～2.11の研究開発項目に取り組んだ。

平成21年度当時はISO 13482の審議が始まったばかりであり、リスクアセスメントには、後にISO 13482が要求することになるISO 12100でなく、医療機器へのリスクマネジメントの適用を定めたISO 14971を用いた。医療機器にはすでに身体装着型の機器が存在していたため、これを適用することが適切と考えられた。

下肢型のリスクアセスメントはHAL 福祉用で以前から行なっていたリスク管理表をベースに、開発、製造、販売および市場からのフィードバックを反映し、再構築・再評価する形式で行なった。上肢型、全身型のリスクアセスメントは下肢型のリスク管理表をベースに行なった。本研究開発で再構築・再評価されたHAL 福祉用のリスクアセスメントの方法と結果を以下に示す。

当初は初期リスクの推定のために加算法を用いていたが、リスク低減方法の効果を表現しやすいマトリクス法に改めた。リスクアセスメントのために定義したリスクマトリクスを表1と表2に示す。なお、通常マトリクス法では、危害の重大さと危害の頻度のマトリクス(表2)のみを用いるが、危害に至る事象の発生と遷移を表現できなかったため、表1を追加した。

表1と表2では、加算法や積算法を用いずにレベルを割り当てている。これは、

- 一度死亡に至る危害が特定された場合、リスク低減をいくら講じても、リスクを受容可能にできない
- 算出されたリスクの値が、必ずしもリスク低減の優先度に一致しない
- 発生頻度や遷移可能性に割り当てた数値自体に任意性があり、加算あるいは積算によって求められる数値に対して、実質的な意味付けが難しい

といった、数値化に起因する問題を避けるためである。また、リスクグラフは、加算法や積算法と同様にリスクの値にリスク低減の優先度を反映しにくく、さらに、事象の遷移を表現すると複雑化することから、不採用とした。実際の製品開発では、ALARP原則に従って網羅的にリスク低減を講じるため、その指針となる、直感に合ったレベル付けができれば十分と言える。そのため、HAL 福祉用では、表1と表2から構成されるマトリクス法に改めることとした。

表1は、発生頻度 F_x の{ハザード, 危険状態}が発生した結果として、遷移可能性 T_x で別の{ハザード, 危険状態, 危害}が発生するときの発生頻度 F_x' を割り当てるマトリクスである。表2は、発生頻度 F_x で危害が発生するとして、その危害の重大さが S_x であった場合のリスクレベルを、IからIVの4段階で割り当てるマトリクスである。HAL 福祉用では、リスクレベルがIなら受容可能なリスク、IIなら受容可能だが追加のリスク低減を検討するリスク、IIIまたはIVなら受容できないリスクとした。

表 1と表 2のリスクマトリクスに対応して、HAL 福祉用のリスク管理表は、危険状態表とハザード表の 2 表構成に改めた。HAL 福祉用に関するリスクの構造として、危害に至る事象の遷移（ハザード ⇒ 危険状態 ⇒ 危害）を想定した場合、

- 危害は、必ず危険状態、すなわち“有害なエネルギーが人体にさらされる状況”を経て発生する
- 危険状態の種類はそれほど多くないが、危険状態に遷移するハザードの種類は多い

という特徴があったため、リスク管理表を 2 表構成とすることで、リスクの構造を活かし、見通しの良いリスク管理表へと更新できた。なお、ISO/DIS 13482:2011 の認証取得（2.10 参照）の際のリスク管理表には、危険状態が 16 種、ハザードが 170 種程度記載されていた。

2 表構成のリスク管理表を適用したことで、以下の利点があった：

[利点 1] ある一つのリスク低減方法が、

- ハザードが起こるのを防ぐ
- ハザードが危険状態に遷移するのを防ぐ、または、危険状態が起こるのを防ぐ
- 危険状態が危害に遷移するのを防ぐ
- 危害の重大さを下げる

のいずれの効果を持つかを検討しやすい。

[利点 2] 危害に至る事象の遷移において、

- 故障や誤使用など、異なるハザードが 1 つの危険状態に遷移する場合
 - 故障検出などが機能して、ハザードが危険状態に遷移しない場合
 - 危険状態が生じても、人が容易に回避できる場合
 - 危険状態でも人に印加されるエネルギーが低い場合
- などを表現しやすい。

[利点 3] 安全規格で言及されている危険状態、ハザード、リスク低減方法の対応関係を表現しやすい。

リスク管理表全体では、危害をトップノードとしたツリー構造を成すため、FTA のようなトップダウンの性質を有し、また一方では、ソフトウェアと電気系に対してシステムレベルの FMEA を行い、故障や機能失敗のハザードをハザード表に列挙したため、ボトムアップの性質も同時に有することになった。

上述のリスクアセスメントの方法を含む、リスク管理表の具体例および、CYBERDYNE 株式会社のリスク管理体制に係る情報は、[文献 1]および[文献 2]として発行されている。

[文献 1] Cota Nabeshima, Hiroaki Kawamoto and Yoshiyuki Sankai: "Typical Risks and Protective Measures of Wearable Walking Assistant Robots," Proceedings of 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2011), pp.914-919, Kyoto, Japan, Dec, 2011.

[文献 2] 鍋島厚太, 新宮正弘, 河本浩明, 山海嘉之: "装着型歩行補助ロボットのリスク管理方法: ロボットスーツ HAL@福祉用の事例," 日本ロボット学会誌, Vol.32, No.5, 2014. (in press)

表 1 ハザード、危険状態、危害の発生頻度と、それらの間の遷移可能性

		Transfer possibility			
		T1	T2	T3	T4
Occurrence frequency	F1	F1'	F1'	F2'	F2'
	F2	F1'	F2'	F2'	F3'
	F3	F2'	F2'	F3'	F3'
	F4	F2'	F3'	F3'	F4'

F_x, F_x' are the occurrence frequencies of {hazard, hazardous situation, harm} as,

- $x=1$: “never,”
- $x=2$: “rare,”
- $x=3$: “occasional,”
- $x=4$: “often.”

T_x is the transfer possibility (avoidability) from {hazard, hazardous situation} to {hazard, hazardous situation, harm} as,

- $x=1$: “never” (“easy to avoid”),
- $x=2$: “rare” (“possible to avoid”),
- $x=3$: “occasional” (“difficult”),
- $x=4$: “often” (“impossible”).

表 2 リスクレベルの定義

		Severity of harm			
		S1	S2	S3	S4
Occurrence frequency of harm	F1	I	I	I	II
	F2	I	I	II	III
	F3	I	II	III	IV
	F4	II	III	IV	IV

I, II, III, IV are the risk levels.

S_x is the severity of harm as,

- $x=1$: “no injury,”
- $x=2$: “curable or minor injury”
e.g. cut or scrape of skin,
- $x=3$: “incurable or serious injury”
e.g. loss of fingers or limbs,
- $x=4$: “mortal injury.”

2.3. 装着機能安定技術

人間装着型生活支援ロボットは、駆動力を装着者に伝達することで動作支援を行う。装着時の動作支援機能をより安定化させるために、2.3.1～2.3.3の研究開発に取り組んだ。

2.3.1. 駆動力制御に伴う安全技術

駆動力制御に伴う安全技術として、自動的な駆動力制限機能の高信頼化、強度部品の高信頼化、外装の安全化に取り組んだ。

自動的な駆動力制限機能は、アクチュエータに電力を供給する最終的な出力段における出力制限機能だけでなく、複数の基板で監視し、電力を遮断できる機能を開発した。

人間装着型ロボットの機構部は、より自由度の高い装着者の身体運動によって、設計時には予期されていなかった、さまざまな負荷を受けることになる。主に市場からのフィードバックによって、強度不足が判明した部分について、構造変更および強度向上を図った。

外装はより体重の大きな装着者の使用にも耐えられるよう、強度向上を図った。また、難燃性に優れた材料を用いることで、より安全性を高めた。

2.3.2. 負荷変動・環境外乱に対する自動的状態認知・安全動作支援技術

一般に、人間装着型ロボットに生じる主な負荷変動・環境外乱の要因は、装着者とロボット間の力学的なインタラクションと、ロボットと環境間の力学的なインタラクションに大きく分けることができる。一方で、歩行補助を意図する下肢型のロボットスーツ HAL では、ロボットを構成するシューズの部分で、装着者-ロボット-環境の力学的なインタラクションが発生する。ロボットスーツ HAL は、シューズの中敷き部分に圧力センサ(足裏センサ)が組み込まれており、これを歩行状態の認識に用いている。認識された歩行状態を用いることで、ロボットスーツ HAL は、安定した歩行支援を行えるようになる。

本研究開発では、装着者の様々な足裏形状や歩容、体重に合わせ、自動的に足裏センサの補正を行う機能を改良し、より広い範囲の装着者に対応できるよう高度化した。

2.3.3. 装着者の特性変動に対する機能安定技術

人間は日毎の体調の違いや疲労によって、身体の力学的な特性が変動する。このような変動に対して、動作支援機能を安定させるために、ロボットスーツ HAL には、装着者あるいは周囲のトレーナーが調整できる機構的な調整自由度および、出力調整機能(チューナー)が備わっている。

本研究開発では、これまでに市場から得られたフィードバックをもとに、より直感的に調整可能なインターフェースを、より信頼性の高い手段で提供するための開発を行った。また、機構的な調整自由度をより柔軟に、かつ強固に固定できる仕組みを開発した。

2.4. 制御技術

ロボットスーツ HAL の制御は、装着者の運動意思を反映した動作を実現するサイバニクク随意制御と、人間の運動特性を反映した基本運動パターンを再合成して一連の運動を生成するサイバニク自律制御から構成される(2.1 参照)。

本研究開発では、ソフトウェアによって実行されるこれらの制御について高信頼化を図るべく、基板間の動作を相互に監視するシステムを構築した。また、基板間の通信の切断を素早く検知し、すばやく電力供給を遮断できる仕組みを開発した。

動作パターンごとに適した制御パラメータを利用するために、動作パターンの推定が必要になる。本研究開発では、動作パターンの推定のために組み込まれている装着者の身体モデルを改良した。この身体モデルは、足裏センサに基づく歩行状態の認識（2.3.2 参照）にも用いられた。

2.5. 安全管理技術

人間装着型生活支援ロボットの安全を管理するための技術として、2.5.1～2.5.3 の研究開発に取り組んだ。

2.5.1. 環境認知によるリスク低減技術

動作支援中に、ロボットの動作の確実性を損なう環境の変化を自動的に認識し、ロボット自身の安全化を図るとともに、音や光を利用して装着者および周囲のトレーナーが認知することを助ける機能の研究開発を行なった。

ロボットスーツ HAL の動作の確実性を損なう環境の変化として、各部の高温や、生体電位信号を計測するための電極の剥がれが挙げられる。これらの変化を検出し、報知する機能の開発を実施するとともに、様々なエラーを自動的に記録するログ機能を開発した。

2.5.2. サイバニックカーネル

本研究開発で得られた安全技術を、一つの専用 IC に集約可能かを検討し、FPGA を用いた試作、研究を行なった。その結果、特に基板間通信の高速化および高信頼化が可能となり、基板間での相互監視によるシステムとしての高信頼化を図れることが明らかとなった。

2.5.3. 安全運用ルール

人間装着型生活支援ロボットの安全は、ロボット本体に施せる安全対策だけでなく、使用者の適切な使用が必要不可欠となる。装着者の身体にフィットさせるための適切な調整手順や、安全な範囲から徐々に調整すべきパラメータの設定手順、転倒を防ぐための補助動作や補助具の併用の遵守が、リスクアセスメント（2.1 参照）の結果からより明確になった。

最低限の安全運用ルールは、従来から取扱説明書の中に注意や警告とともに記載されていたが、本研究開発の成果として、その記述がより拡充され、整理されたものとなった。

2.6. 自己診断技術

人間装着型生活支援ロボットは、多くの電子・電気部品で構成されており、また、これらの部品はそれぞれ確率的に故障ないしは機能不全を起こすことが知られている。電子・電気部品の故障や機能不全が発生した場合であっても、ロボットが適切に検出し、能動的に対処することで、安全性を高めることができる。本研究開発では、2.6.1～2.6.3 の研究開発に取り組んだ。

2.6.1. 動作状況の自己診断機能

動作状況の自己診断機能として、各種基板が正常に機能しているか、ソフトウェアが適切に機能しているか、設定ファイルや実行ファイルが正常かを各種センサから推定・検出する機能を開発した。

また、ロボットスーツ HAL 福祉用は、装着者の体形や能力の違いに対応するため、両脚型だけでなく、左右別の単脚型があり、それぞれ複数のサイズが存在している。さらに、

足のサイズの違いに対応するため、複数サイズのシューズが存在し、ロボット本体に適宜接続して利用される。本研究開発では、全体として多様となる構成に対応するための自動判定機能を開発した。

2.6.2. 異常検知・報知機能

本研究開発では、主に電氣的な異常の検知機能を開発した。また、想定された単一故障に対し、装着者および周囲の人に光あるいは音で報知するアーキテクチャを設計し、実現した。

電氣的な異常は、各基板の電圧、電流、温度を監視することで検出できる設計とした。単一故障の検出は、基板内での検出だけでなく、基板間の通信監視も利用して実現した（2.4参照）。

2.6.3. ログデータベース

各種の異常検知機能によって検出された異常は、自動的にログに書き出す仕組み（2.5.1参照）によって、本体に組み込まれた記憶領域に蓄えられる。この記録は安全に係る重要な情報であり、これをメーカーが一元的に収集し、データベース化できれば、よりの確なロボットの改良・改善を行うことができる。

本研究開発では、インターネット網を利用したログの収集・データベース化システムを構築した。具体的には、CYBERDYNE 株式会社にあるデータベースサーバーに、ログを本体から自動的にアップロードする機能を開発した。

2.7. 安全要素技術

人間装着型生活支援ロボットは、多くの要素から成る複合したシステムであり、その安全性は、使用者までを含めたシステム全体で担保すべきものである。しかしながら、一部の構成要素の故障あるいは機能不全は、受容できない危害に直結してしまう。このような構成要素の安全性を高めることは、依然として重要である。本研究開発では、主に 2.7.1～2.7.3 の安全要素技術の開発に取り組んだ。

2.7.1. 安全パワーユニット

人間装着型生活支援ロボットを構成する電気・電子部品のうち、装着者に力学的エネルギーを与えるパワーユニットの安全性は、システム全体の安全性に大きく寄与する。ロボットスーツ HAL のパワーユニットは、モーターおよびモータードライバから構成される。

本研究開発では、最大出力が装着者の最大発揮力を下回るパワーユニットを採用し、本質的安全設計を行なった。また、装着者の力によって生じる、非定常かつ非一様なバックドライブがパワーユニットの負荷となることから、パワーユニットの信頼性向上を図った。具体的には、急激な負荷変動に対する挙動を改良した。

2.7.2. 安全バッテリー

人間装着型生活支援ロボットでは、その重量自体が装着者とロボットへの負荷となってしまうため、小型軽量かつ高率放電可能なバッテリーが必要となる。そのため、ロボットスーツ HAL 福祉用では、リチウムイオンポリマーバッテリーを採用している。リチウムイオンポリマーバッテリーは、その他のバッテリーよりも危険性が高いため、当初より、安全性試験である UN 38.3 に合格したバッテリーを利用していたが、本研究開発では、UN 38.3 の改定版へ対応するための追試と、IEC 62133 への適合性評価を実施した。さらに、よ

り安全性を高めるために保護回路の改良や、高寿命化接点の開発を行なった。

2.7.3. EMC 対策

人間装着型生活支援ロボットは、装着者の身体に沿う構造の都合上、分散制御系になる可能性が高い。すなわち、基板間通信のためのケーブルがアンテナとなって、電磁両立性（EMC）を満たす上で不利な条件となっている。

本研究開発では、EMC 対策のために、ノイズ抑制材料の利用、導電塗料の利用、強化シールドケーブルの利用、様々なトロイダルコアの利用を試行し、十分な EMC 性能を達成できた。

2.8. 安全性試験

人間装着型生活支援ロボットの安全性を評価するためには、試験を含む検証を網羅的に行うことが必要となる。電気的な安全性の評価については、既存の国際安全規格で確立されている検証方法が適用できた一方で、機械的な安全性の評価方法は人間装着型生活支援ロボットに適した検証方法が確立されていなかったため、適宜、検証方法と基準を定め、検証を行なった。本研究開発では、リスクアセスメント（2.2 参照）の結果および、規制要求に対応すべく、主に以下の検証を実施した。

- 強度計算（部材、アセンブリ）
- 強度試験（外装、ストッパー、材料）
- 耐久性試験（温湿度、振動、着地、洗浄、ケーブル屈曲、基板、接点）
- 電気安全性試験（漏れ電流、耐電圧、ヒューズ、表面温度）
- EMC 試験
- 騒音試験
- FMEA 計算（電装系）
- ソフトウェアシステムの機能検証
- 故障検出機能の検証
- ユーザビリティの検証
- 高齢者を模擬した装着試験
- アクチュエータ出力試験
- 輸送試験
- バッテリー、充電器の安全性試験
- 難燃性試験
- 材料の化学的安全性の検証（RoHS 対応含む）
- 要求仕様に対する充足性の検証
- リスク低減方法実施の充足性の検証
- 附属文書（取扱説明書、サービスマニュアル）、技術文書の検証
- 規制・規格の再調査および適合性調査

振動試験の様子、EMC 試験の様子を図 3 および図 4 に示す。また、強度計算に用いる負荷推定のために用いた使用シナリオを図 5 に示す。本研究開発では、人間装着型生活支援ロボットに特有の強度試験方法を新たに開発した。これらの試験の概要を 2.8.1 と 2.8.2 に示す。なお、試験に係るリスクアセスメントの結果や、試験結果は、[文献 3] および [文献 4] として発行されている。

[文献 3] 鍋島厚太, 河本浩明, 山海嘉之: "装着型歩行補助ロボットのリスク分析と安全性試験法," 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.8, pp.752-758, 2012.

[文献 4] Cota Nabeshima, Hiroaki Kawamoto and Yoshiyuki Sankai: "Strength Testing Machines for Wearable Walking Assistant Robots based on Risk Assessment of Robot Suit HAL," Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2012), pp.2743-2748, Minnesota, USA, May, 2012.



図 3 EMC 試験の様子



図 4 振動試験の様子

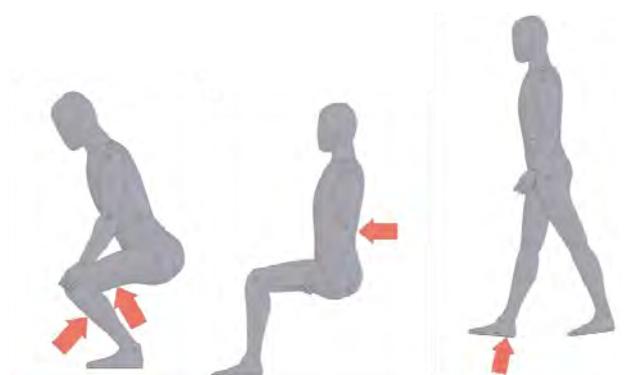


図 5 強度計算に用いる負荷推定のために用いた使用シナリオ

2.8.1. 機械的な関節角度制限の強度試験

機械的な関節角度制限は、動作支援中の装着者の関節運動を許容範囲に制限するための本質的なリスク低減方法である。本研究開発では、この関節角度制限の信頼性を検証する試験方法を開発した。この強度試験方法では、試験対象の関節部について、関節角度制限の衝突面を水平にした状態で一端を固定し、もう一端に錘を取り付ける（図 6）。

試験は、錘を上昇、自由落下させることで行われる。この試験において、関節角度制限に生じる撃力は、位置エネルギーに対して単調増加するため、持ち上げ高さ（持ち上げ角度および、軸から錘までの長さ）と錘の質量が試験パラメータとなる。これらのパラメータは、最大関節角速度や、装着者とロボットの（部分的な）質量に依存して定められる。

膝関節用の制限の場合は、質量として膝下質量を想定し、最大関節角速度としては高々 π [rad/sec] 程度を想定すれば良い。アクチュエータが十分な関節角速度を出力できない場

合であっても、必要なエネルギーや角運動量を持ち上げ高さに換算して試験すれば良い。

成否の判定基準には、規定回数を繰り返した後の角度の行き過ぎの程度などが利用できる。繰り返し回数は、ロボットの使用方法に依存して定められる。

本研究開発では、この強度試験のために、強度試験機を開発した（図 7）。図中の試験機には、ロボットスーツ HAL 福祉用の膝関節が試験対象として取り付けられている。この試験機はウィンチによって駆動され、錘の端点を持ち上げ、クラッチを外すことで、錘を自由落下させる。試験対象に破壊が起こった場合に備え、行き過ぎを検出し、自動で試験を停止させる機能を有している。

ロボットスーツ HAL 福祉用では、錘の質量を 20 [kg]、持ち上げ角度を $\pi/4$ [rad] に設定して強度試験を 2 度実施した。試験後、破壊や行き過ぎは生じておらず、合格した。

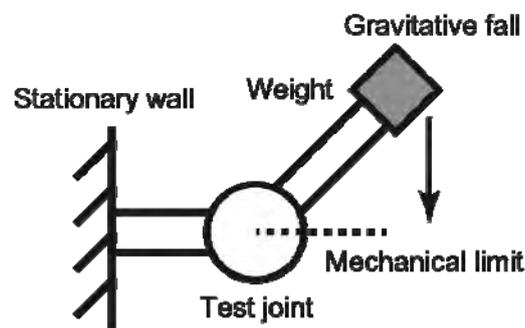


図 6 関節角度制限の強度試験方法

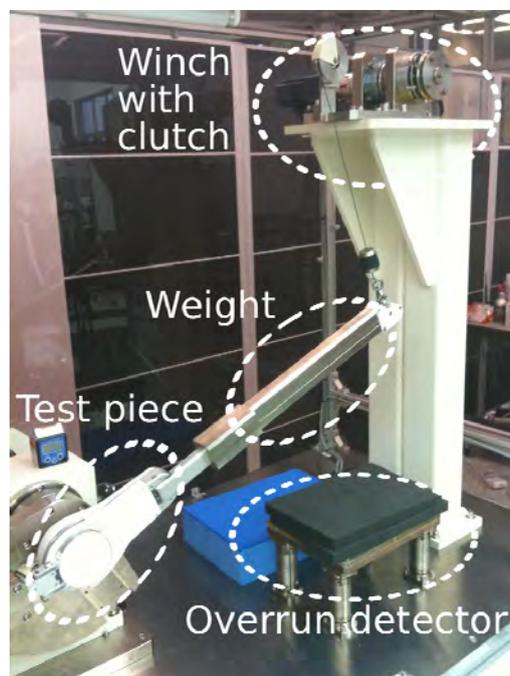


図 7 関節角度制限の強度試験機

2.8.2. 連続着床に対する構造全体の耐久性試験

歩行動作を支援する下肢型の人間装着型生活支援ロボットの機械的な構造は、足首用装具のような、歩行のために装着する装具に類似している。しかしながら、歩行中に連続して生じる衝撃に対する装具の耐久性を評価する標準的な試験法は未だ無い。これは、着地による衝撃力が装着者と構造に非一様に分散することが原因と考えられる。

一方で、継手付き義足では、国際安全規格 ISO 10328 に、耐久性試験が定められている。ISO 10328 では、継手の角度制限に曲げモーメントが掛かる配置で、1-4 [Hz] の繰り返し圧縮荷重を義足に印加する試験を要求している。体重 80 [kg]の装着者を想定した場合、1180-1230 [N]の圧縮力を 3,000,000 回加えた後の、変形と破壊の有無によって適合性が判定される。

装着者の全体重を支えて歩行する機構であった場合には、ISO 10328 の試験条件は妥当である。ISO 10328 の試験条件は、歩行時の着床による荷重を体重の 1.6 倍と見積もり、さらに信頼度 90%での 2 ヶ月間の稼働を要求していることに相当する（片足が 1 日に 5,000 回着床するとし、信頼度関数が指数分布になると仮定した場合）。

人間装着型生活支援ロボットの場合、装着者の身体とロボットの構造に荷重が分散するため、ロボット自体に必要な強度は、装具に要求される強度より小さいことが期待できる。しかしながら、身体とロボットの荷重分散の比率は自明でなく、単純な圧縮力試験を適用できないという問題があった。

直感的には、人体の構造を模したドールにロボットを装着させ、歩行をさせられれば試験が可能であると思われた。しかしながら、この試験を実施するためには、ドールを安定して長時間歩行させる必要があり、これは現在の技術レベルにおいて極めて困難であると思われた。

本研究開発では、ドールにロボットを装着させ、直立状態で連続的に着床させる試験方法を開発した（図 8）。この試験方法において、ロボットは通常と同様の方法でドールに装着される。ドールの体重、サイズ、主な自由度は意図する装着者を模擬する。

試験ではドールを持ち上げ、重力により落下させ、着床させる。再現性のために規定されたドールを利用する場合、試験パラメータは持ち上げ高さのみとなる。この持ち上げ高さは、校正によって定められる。

校正は、試験開始前に様々な持ち上げ高さから数回着床させて行う。床反力のピーク値が、ドールの重量の 1.6 倍程度となる高さを確認し、この高さを用いて繰り返し試験に用いる。

この試験の成否は、既定回数の着床を行ったあとの故障や不具合の有無によって判定できる。既定回数を何回とするかは、ロボットの使用方法に依存して決定できる。

本研究開発で、実際に製作した試験機を図 9 に示す。試験機には、ロボットスーツ HAL 福祉用が試験対象として取り付けられている。この試験機は直動ガイドを利用して試験対象ごとダミーを持ち上げ、クラッチを外すことで自由落下させる。持ち上げ高さは調整可能で、床面に備えられた力センサによって、着床時の床反力をモニターすることかできる。

ロボットスーツ HAL 福祉用を対象とした試験では、持ち上げ高さを 20 [mm] に設定して行なった。校正プロセスにおいて、20 [mm] から着床させた時の床反力のピーク値は、2.8 [kN] であった。このときの各脚への負荷は 1.4 [kN] と推定され、これは、ドールとロボットを含めた重量の 1.8 倍に相当した。試験において、30,977 回の着床を実施した後もロボットに故障は無く、部品間を固定するネジの緩みも無かった。この試験における、床反力値ごとの頻度分布の平均は 2.88 [kN]、標準偏差は 0.106 [kN] であった。最小値は 2.58 [kN] であり、これはドールとロボットを含めた重量の 1.6 倍を超えていた。この試験によって、

ロボットスーツ HAL 福祉用の耐久性を検証できただけでなく、歩行中の負荷を（少なくとも床反力のピーク値の上では）模擬できたという点で、試験方法自体の妥当性を示せたと言える。

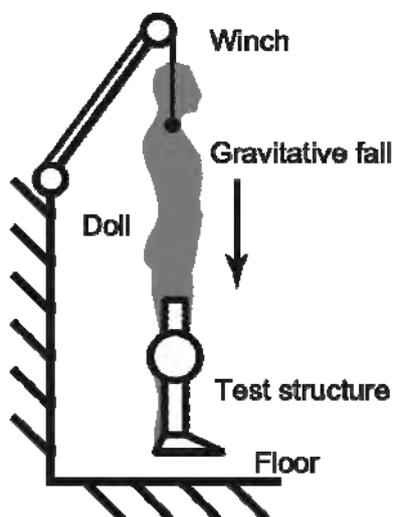


図 8 連続着床に対する構造全体の耐久性試験方法

Lifting slider with clutch

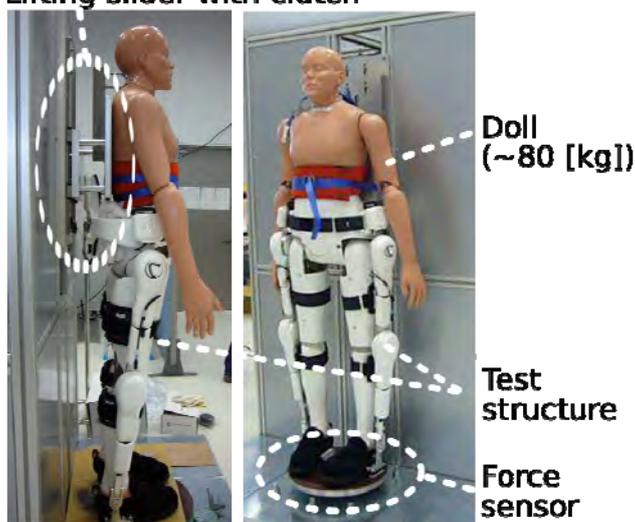


図 9 連続着床に対する構造全体の耐久性試験機

2.9. 実証試験

ロボットの開発段階にあわせた実環境での実証試験は、本研究開発を効果的に推進する上で、極めて重要な役割を果たす。本研究開発によって、安全技術が組み込まれたロボットスーツ HAL を実環境である臨床現場に適用し、運用方法の開発と共に、機器の不具合、有害事象に関する安全性評価を実施した。ここでは、当該実証試験で実施した医師主導による HAL の探索的臨床試験に関して、試験プロトコルおよび、その試験成果となる安全性を報告する。

2.9.1. 研究デザイン

運動器不安定症患者およびその基礎疾患を有する患者を対象として、HAL を利用した運動機能改善に関する実現可能性を検討した。本実証試験では、探索的研究と位置付け、比較対照群は設定せず、HAL を用いた運動訓練に伴う 8 週目の運動機能改善効果を評価することで、リハビリテーション医療における HAL 適用の実現可能性を検討する。また、安全性についての検証として、被験者に好ましくない症状や検査値の異常などの有害事象が生じていないかを確認する。

2.9.2. 試験参加者の選択・除外基準

運動器不安定症患者およびその基礎疾患を有する患者で、以下の選択規準をすべて満たし、除外規準のいずれにも該当しない男女とした。

【選択基準】

- 日常生活において歩行、起立・着座動作のいずれかに補助具や介助を要すること
- 説明を理解し、同意が確認できる成人あるいは小学生以上の小児であり、未成年者においては、代諾者の同意が得られること
- HAL を装着可能な体格であること
- 理学療法、作業療法、装具療法など通常のリハビリテーション医療が実施可能な状態であること

【除外基準】

- コントロールされていない循環器疾患あり
- コントロールされていない呼吸器疾患あり
- 中等度以上の関節拘縮などの関節障害あり
- 中等度以上の不随意運動・運動失調・姿勢反射障害あり
- 重度の痙縮あり
- 説明や指示の理解が困難な認知機能障害あり

2.9.3. 評価項目

本実証試験では、主要評価項目として、歩行能力とバランス能力を評価した。歩行能力は 10m 歩行テストでの快適歩行条件下における、速度、歩数、歩行率で評価した。一方、バランス能力では、日常生活動作に関連する静的なバランス能力評価として、Berg らによる 14 項目からなる Berg balance scale (BBS) を用い、また、動的なバランス能力として、椅子から立ち上がり、3m 歩行し、方向転換後 3m 歩行して戻り、椅子に座る動作するまでの時間を評価する 3 m timed up and go (TUG) を用いた。

2.9.4. HAL を利用した運動訓練

HAL を装着した運動訓練を、週に 2 回の頻度で、8 週間（全 16 回）実施した。実施内容は、対象者毎に必要なと判断された起立・歩行などの動作や四肢の運動を、HAL を装着した状態でおこなう運動訓練である。通常運動訓練に準じて、身体機能の向上、可及的維持、装置による特定の動作の自立度向上など、個別に目的（目標）を定め、基本的には医師や理学療法士、作業療法士とともに平行棒や歩行器、杖類など、必要と判断される補助具を適宜選択しながら訓練を進めた。HAL による歩行訓練の様子を図 1 に示す。何らかの苦痛や有害事象が発生した際には、訓練を中止し、適切な処置をおこなう。具体的

な訓練内容としては、以下の項目を実施した。

1. 単関節運動

座位姿勢にて膝関節の伸展・屈曲、手すりなどにつかまり、片脚立位姿勢にて股関節屈曲・伸展、膝関節屈曲・伸展を行う。

2. 股関節・膝関節の複合運動による屈曲・伸展

手すりなどにつかまり、片脚立位にて股関節・膝関節屈曲、及び股関節・膝関節伸展を行う。

3. 起立・着座動作

手すりなどにつかまって実施する。

4. 段差昇降

手すりなどにつかまって実施する。難しい症例では、その場での前進後退または足踏み運動などに変更する。

5. 歩行

平行棒、歩行器、杖など必要と判断される補助具を対象者に応じて選択し、歩行能力が低い対象者にはトレッドミルを使用する。

2.9.5. 安全対策

実証試験を安全に実施するため、リスクアセスメントに基づく安全評価を行い、残ったリスクに対しては運用技術によってリスク低減を行うこととした。HALによる運動訓練では立位動作や歩行動作を伴うため、想定されるハザードの一つとして、転倒があげられる。転倒の恐れがある被験者に対しては、理学療法士、作業療法士による介助以外にハーネスと免荷装置を利用することにより転倒リスクの低減化を行った。その他、装着にかかる時間、HALと装着者の密着部の状態管理なども手順化し、運用技術によってリスク管理を実施した。

2.9.6. 統計解析

HALの適用に伴う運動機能改善効果の検討については、実証試験実施前と後の主要評価項目に対して、対応のあるt検定（有意水準5%）を行った。

2.9.7. 試験結果

実証試験参加者は71名であった。疾患別内訳は、脳血管障害29例、脊髄損傷13例、運動器疾患9例、神経・筋疾患11例、頭部外傷4例、その他5例であった。16回を基本とするHAL適用を実施できた症例は64例であった。脱落7例の内訳は、4例が個人的な理由で実証試験に通えなくなり、3例は持病の再発で実証試験を中止した。いずれもHAL適用に直接の関与はなかった。

HALの適用を完遂した64例の16回の試行を通して、有害事象は認められず、使用機器の異常もなかった。さらに、64例のうち10m歩行テストが可能な52例において、速度、歩行率、歩数とも実証試験前後で有意差が認められた。速度は18%増加、歩行率は8%増加、歩数は9%減少していた。一方、バランス能力に関しても、訓練前後のBBGとTUGに対して有意な変化が認められた。BBSは4%、TUGは12%の改善を示した。



図 10 実証試験の様子

2.9.8. まとめ

臨床現場での活用を考慮した本実証試験プロトコルに基づいて実証試験を実施した。安全性評価として、試験参加者 71 名に対して有害事象がないこと、及び、機器に異常が認められなかったことを確認した。

2.10. 認証取得

本研究開発期間中に ISO/TC184/SC2/WG7 で策定が進んでいた ISO 13482 の原案 ISO/DIS 13482 “Robots and robotic devices—Safety requirements for non-industrial robots—Non-medical personal care robot” が 2011 年に発行、公開された。これにより初めて、ロボットスーツ HAL 福祉用の安全性について第三者評価が可能となった。CYBERDYNE 株式会社は、本研究開発における、2.2～2.9 の成果を用いて、ロボットスーツ HAL 福祉用に対する適合性評価を、一般財団法人 日本品質保証機構 (JQA) に依頼し、2013 年 2 月 27 日に世界初の ISO/DIS 13482 認証をいち早く取得することができた。

2013 年 6 月 20 日には、本研究開発の成果を応用して開発した“ロボットスーツ HAL 医療用”について、世界初のロボット治療機器として欧州医療機器指令への適合が TÜV Rheinland により認められ、CE マーキングを取得した。ロボットスーツ HAL 医療用はドイツにおいて公的な労災保険の対象となり、今後ドイツをはじめとする欧州圏での普及が見込まれている。



図 11 ISO/DIS 13482 認証書授与式の様子 (左)、JQA より発行された認証マーク (右)



図 12 ロボット治療機器として世界初の CE マーキング取得を果たしたロボットスーツ HAL 医療用（左）、認証書授与式の様子（中）、TÜV Rheinland から認証されたことを表す CE マーキング（右）

2.11. 国際標準化への貢献

CYBERDYNE 株式会社は、本研究開発の一環として、2010 年 6 月のパリ会議から ISO 13482 の策定委員会 ISO/TC184/SC2/WG7 に参加し始めて以来、積極的に国際会議および国内会議に出席し、人間装着型生活支援ロボットのリーディングカンパニーとして貢献を果たしてきた。2014 年 2 月に正式発行された ISO 13482 には、CYBERDYNE 株式会社は本研究開発で発展させた安全技術や安全コンセプトが反映されている。ISO/TC184/SC2/WG7 で現在策定作業が進行しているガイダンス文書および試験仕様書についても積極的に関係しており、今後も国際標準化におけるプレゼンスを維持していく予定である。

ISO/TC184/SC2/WG7 における ISO 13482 策定の議論の過程で、人間装着型生活支援ロボットが、国や地域によって医療機器と見なされる可能性があることが指摘されたことが発端となり、IEC の医療機器の安全標準を策定する IEC/TC62/SC62A の中に、ISO との協同ワーキンググループ IEC/TC62/SC62A/JWG9 が、2011 年 6 月のロサンゼルス会議から始まった。CYBERDYNE 株式会社は本研究開発の一環として、IEC/TC62/SC62A/JWG9 の立ち上げ当初から参加しており、現在も継続して積極的に貢献を続けている。

IEC/TC62/SC62A/JWG9 は当初、医用電気機器の安全通則 IEC 60601-1 の副通則として、医療用ロボットの安全規格が作れるかという議論が行われた。しかしながら、最終的に通則の IEC 60601-1 で十分対応可能だという結論となり、ロボットに特有の Autonomy を利用する機器のリスクマネジメント上の注意点を記載したガイダンス文書を Technical report として作成することで決着した。現在、Technical report の策定作業中である。

また、IEC/TC62/SC62A/JWG9 では Technical report の策定に並行して、装着型ロボットを医療機器として用いた場合の個別規格が作成可能かについて議論が進められている。CYBERDYNE 株式会社は、世界初のロボット治療機器を実用化したリーディングカンパニーとして、個別規格の議論についても主導的な役割を果たしている。

3. 研究開発の総括

本研究開発では、人間装着型生活支援ロボットの実用化および普及、ひいては産業化に必須となる安全技術の研究開発を、ロボットスーツ HAL をプラットフォームに用いて実施した。

本研究開発における当初目標の各項目について、達成度を表 3 **研究開発項目の達成度**に示す。本研究開発においては、当初の目的をすべて達成し、さらに、これらの成果を利用して、認証取得（2.10 参照）および、国際標準化への貢献（2.11 参照）を達成しており、当初計画を大きく超えた発展的な成果を得ることができた。

本研究開発の成果は、すでに人間装着型生活支援ロボットの安全基準の確立に大きく貢献しており、生活支援ロボット全体の産業化に資するものと考えられる。また、成果が導入されたロボットスーツ HAL は、CYBERDYNE 株式会社の事業において重要な役割を果たし、同社がプロジェクト終了直後の 2014 年 3 月 26 日に、生活支援ロボットを製販するベンチャー企業として初めての上場を東証マザーズ市場に果たしたことに大きく影響を与えた。

CYBERDYNE 株式会社は、引き続き、人間装着型生活支援ロボットメーカーのリーディングカンパニーとして、生活支援ロボットの産業化を牽引していくとともに、我が国の超高齢化社会にまつわる困難の解決、緩和にむけて貢献していく予定である。

表 3 研究開発項目の達成度

目標	研究開発成果	達成度
1) 装着時機能安定技術		
1a) 駆動力制御に伴う安全技術の開発	機構系、電装系、ソフトウェアによる駆動力制限と安全化	達成 (2.3.1 参照)
1b) 負荷変動・環境外乱に対する自動的状態認知・安全動作支援技術の開発	床反力センサの自動補正と歩行判定	達成 (2.3.2 参照)
1c) 装着者の特性変動に対する機能安定技術の開発	ソフトウェアによるパラメータ調整と機構系の調整自由度	達成 (2.3.3 参照)
1d) 機能安定技術に関する評価	リスクアセスメントに基づく評価方法の開発	達成 (2.2 および 2.9 参照)
2) 制御技術		
2a) 制御技術に伴う安全技術	サイバニック随意制御則とサイバニック自律制御、通信を用いた分散制御、歩行のフェーズ判定	達成 (2.4 参照)
3) 安全管理技術		
3a) 環境認知によるリスク低減技術	温度センサ、電極剥がれ推定、イベントログ機能	達成 (2.5.1 参照)
3b) サイバニックカーネル	安全コンポーネント化を目指した電装系の再設計・試作	達成 (2.5.2 参照)
3c) 安全運用ルール	リスクアセスメントに基づく運用条件の明確化、マニュアル整備	達成 (2.5.3 参照)
4) 自己診断技術		
4a) 動作状況の自己診断機能	機器の構成、設定、角度、実行周期、出力、床反力の正しさを自己診断する機能	達成 (2.6.1 参照)
4b) 異常検知・報知	生体電位センサ、電流、電圧、温度の監視・診断・異常検知と報知機能	達成 (2.6.2 参照)
4c) ログデータベース	イベントログ、エラーログのリモートサーバーへの自動アップロード機能	達成 (2.6.3 参照)

5) 安全要素技術		
5a) 安全パワーユニット	駆動時間、パラメータ、イベントを記録する機能	達成 (2.7.1 参照)
5b) 安全バッテリー	安全規格対応 LiPo パッケージ、高寿命接点	達成 (2.7.2 参照)
5c) EMC 対応	電極の絶縁化、シールド外装・ケーブル、低ノイズ素子	達成 (2.7.3 参照)
6) 安全性試験		
6a) リスクアセスメント	国際安全規格に従ったリスクアセスメントの実施	達成 (2.2 および 2.8 参照)
6b) EMC 試験	CISPR 規格に従った試験の実施	達成 (2.8 参照)
6c) 安全性試験	国際安全規格に定められた試験、リスクアセスメントから導かれた試験、研究開発項目①で開発された試験の実施	達成 (2.8 参照)
7) 実証試験		
7a) 実証試験	実証試験の実施	達成 (2.9 参照)

特許、論文、外部発表等の件数 (内訳)

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発表 ・講演	新聞・雑誌 等への掲載	その他
H21FY	0 件	0 件	2 件	8 件	0 件	22 件	63 件	28 件
H22FY	3 件	0 件	0 件	8 件	0 件	35 件	153 件	6 件
H23FY	0 件	0 件	0 件	13 件	0 件	40 件	155 件	29 件
H24FY	0 件	0 件	0 件	8 件	2 件	45 件	234 件	62 件
H25FY	0 件	0 件	0 件	12 件	2 件	56 件	266 件	58 件

(※Patent Cooperation Treaty :特許)

2.6 研究開発項目④ 安全技術を導入した歩行アシストの開発 (株)本田技術研究所

まえがき

少子高齢化の急速な進展に伴い、介護・福祉を支える人材不足への対応や、高齢者自身の自立した生活を支える手立てとして、産業分野で蓄積したロボット技術を活用した生活支援ロボットの実用化が期待されている。これらの生活支援ロボットは、産業ロボットのような人と隔てられた空間での稼働ではなく、不特定多数の人が関与する生活環境で使われることが前提となり、対人安全技術の確立が実用化を図るうえでの鍵となる。

Honda がリハビリテーション領域での活用に向け開発を進めている歩行アシストは、左右の股関節軸に配置したアクチュエータが歩くタイミングに合わせて脚の振出をアシストし、歩幅が少し広がることによって楽に歩くことを可能とする人間装着型生活支援ロボットである。

本プロジェクトでは歩行アシストを高齢者支援に適用することを想定し、実用化に向けて必要な安全性評価、安全性検証、安全技術、実証試験をプロジェクト参加機関と連携して行い、生活支援ロボットの実用化を目指す開発者の参考となることを期待し一連のプロセスを示した。

目次

まえがき	1
要約	4
Summary	6
本編	
1. 研究概要	
1. 1 研究の背景	7
1. 2 研究の目的	8
1. 3 歩行アシストの概要	8
2. 研究成果	
2. 1 歩行アシストのリスクアセスメント	11
2. 1. 1 高齢者の使用を想定したシーン	11
2. 1. 2 運動教室でのハザード源	17
2. 1. 3 リスク評価が必要な項目	20
2. 2 転倒リスク評価	21
2. 2. 1 衝突実験用ダミー人形を用いた転倒衝撃の計測	21
2. 2. 2 大腿骨に加わる転倒衝撃の計測	24
2. 2. 3 装置の異常が人に及ぼす影響	27
2. 3 安全技術を導入した歩行アシストの開発	44
2. 3. 1 安全検証用記録モジュール	44
2. 3. 2 課題の解決手法	48
2. 3. 3 安全技術を導入した歩行アシスト	49
2. 3. 4 実証データ	49
2. 4 安全検証試験	54
2. 4. 1 ISO13482 安全要求項目	54
2. 4. 2 試験項目と試験結果	56
2. 5 実証実験	59
2. 5. 1 実環境実証実験概要	59
2. 5. 2 誤使用及び想定していない使用方法の事例	61
2. 5. 3 介護施設での実証実験	73
2. 5. 4 実証実験のまとめ	75

2. 6 結び	76
2. 6. 1 成果まとめ	76
2. 6. 2 成果の意義	77

要約

本研究では、高齢者支援、特に介護予防の運動教室での適用を想定し、人間装着型生活支援ロボットである歩行アシストの対人安全性を確立するための課題の抽出、安全評価、安全技術の開発を行う。対人安全性を確立するための課題の抽出はリスクアセスメントにより行い、その結果に基づいて安全技術を開発し、安全検証試験及び実環境での実証実験に依る検証を行った。

リスクアセスメントは高齢者運動教室で運用することを想定し、作業フローや運動教室が実施される環境からハザード源を抽出し、リスクについての評価を行った。その結果、参加者の近くに介助者がいないため、転倒しそうになった時に助けられないことが分かり、転倒した時に機器の装着が人へのダメージの増減に与える影響と、転倒に関して機器の異常が人に与える影響を評価することとした。リスクアセスメントの妥当性の検証や、実証実験で想定外の事象が起きた際に分析してリスク低減の方策を決めるためには、発生した事象と歩行の状態や機器の内部データを記録し分析することが必要である。そのため、安全技術として安全検証用記録モジュールと解析システムを開発することとした。

転倒した時に機器の装着が人へのダメージの増減に与える影響を評価するため、生活支援ロボット安全検証センターと共同で衝突実験用ダミー人形を使用した転倒衝撃値の測定を行った。装着の有無による荷重の変化を比較した結果、骨折のリスクが上がっていないことを確認した。また、錘落下式の衝撃試験機を製作し、骨に加わる荷重が減少していることを確認した。

機器の異常が人に与える影響の評価として、転倒に繋がる可能性のある装置の異常動作を洗い出し、装着者が歩行中に任意の異常動作を機器に引き起こし転倒に至る事象の有無を確認するため、名古屋大学の協力で転倒のリスクに十分配慮された環境で実験を行った。歩行アシストを装着した被験者が歩行中に、(a)アシストがなくなる、(b)アシストが大きくなる、(c)アシストタイミングがずれる、(d)可動軸が回らなくなる、の何れかを機器に発生させることで通常歩行との比較を行った。実験の結果、4 ケースとも被験者が転倒する事象や、転倒に繋がる大きなバランスの崩れも発生しなかった。

安全技術として安全検証用記録モジュールと解析システムを開発し、この技術を導入した歩行アシスト 45 台を製作した。記録モジュールは既存のシステムに機能的な障害を起こさないために、記録後のデータ分析により算出できる値は記録せずデータのシンプル化を行うことで課題を解決した。この技術は、開発済みの機器に対して軽度のハード改修とソフトウェアの改修のみで付加できる点で、今後開発される様々な装着型生活支援ロボットにも適用できる安全技術であると考えられる。

安全検証試験として、ISO13482 の安全要求項目から歩行アシストに適用する試験項目の選定し、その試験の基準を示した。安全検証試験を行った結果、歩行アシストが要求される安全性を満たしていることが確認された。

安全技術を導入した歩行アシストの実環境での検証として、介護予防のための高齢者運動教室での実証実験を行った。期間中 55 回の運動教室が開催され、延べ 2977 回の運用実績とリスクアセスメント時に検討すべき項目が得られ、機器が原因となる転倒や、怪我など装着者へダメージを与える事象は発生しなかった。別に介護施設での実証実験も行い、1137 回の運用実績が得られ転倒などの事象が発生しなかったことも確認された。

以上により、本プロジェクトの基本計画で予定されていた成果を達成したものである。

Summary

In this project, while assuming the application of the Stride Management Assist System or SMAS to exercise seminars for the elderly support, particularly the care prevention, the extraction of the safety issues, the safety evaluation and then the development of the safety technology have been studied to establish the safety of SMAS, a human wearable type life support robot.

The extraction of the safety issues to establish the safety has been performed by the risk assessment and based on those results, the safety technology was developed and it has been verified through the safety inspection examinations in the real environment. The risk assessment has been done by the extraction of hazard sources from the work flow and from the environment where exercise seminars are held. As a result, it became known that the participants cannot be kept away from falling down mainly because there was not always a person of assistance near the participant, then it was considered important to evaluate the influence on whether the wearing of the device gives the increase or the decrease of the damage to a person when he falls down and what effect the malfunction of the device gives to a person wearing it. It was necessary to record and analyze the phenomenon occurred and the detailed data of the device itself for inspection of the validity of the risk assessment. Therefore a recording module and analysis system have been developed as the safety technology. The experiments in which the fall shock levels have been measured using the dummy doll are conducted in cooperation with Robot Safety Center and these experiments are to evaluate the influence on what effect the wearing of the device gives to the damage to a person when he falls down. As a result of having observed the change of the load to the bone when he wears the walk assist and when doesn't, it was found that the risk of the bone fracture remains the same between two cases. Among safety requirements of ISO13482, the items applicable to SMAS were selected and the device was tested for those requirements. Then, it has been confirmed that SMAS meets those safety requirements. As the inspection in the real environment for the device having the safety technology, proof experiments on the elderly person at exercise seminars for the care prevention have been conducted followed by additional proof experiments in the nursing facilities. By the above, the objectives of this project have been achieved.

本編

1. 研究概要

1. 1 研究の背景

少子高齢化の急速な進展に伴い、高齢者の自立と生きがいが重要な課題である。高齢化社会での問題の一つに身体能力の低下があり、加齢などによる歩行機能の低下が外出の不安といった心理面も影響し、日々の活動範囲が狭くなる要因と言われている。

活動が減ったために筋力が弱まり、さらに歩行機能が低下する。というマイナスの循環に陥る危険性があると考えられ、このようなマイナスの循環は歩行機能の低下によるところが大きいと考える。歩行機能の低下の特徴的なものが、歩幅の狭いこきごみな歩き方であり、この歩き方を、歩く速度と歩幅を調整する歩行の「アシスト」により、楽に、より速く、遠くまで歩く支援ができると考えている。

歩行アシストを使うことで、[活動範囲の拡大→自ら歩くことでトレーニングとなる→身体機能が向上→さらに活動範囲が拡大する。] というプラスの循環を作り出せ、より活動的な生活を取り戻して体力の低下を防ぐことができるのではないかと期待している。(Figure 1.1-1)



Figure 1.1-1 歩行アシストに期待するプラスの循環

1. 2 研究の目的

歩行アシストは、リハビリテーション用に開発されたため、運動教室のような医療機関外での単独使用に対しては、十分に考慮されていない。

本研究では、歩行アシスト試作機を使用して、高齢者支援、特に介護予防の運動教室での適用を想定し、人間装着型生活支援ロボットである歩行アシストの対人安全性を確立するための課題の抽出、安全評価、安全技術の開発を行う。

また、安全技術を搭載した歩行アシストの安全性検証試験、実環境での実証試験を行い、安全性を確認する

1. 3 歩行アシストの概要

Figure 1.3-1 に歩行アシストの構成を、Table 1.3-1 に主要諸元を示す。腰フレームは M, L の 2 サイズがあり、日本人の 95% に装着が可能となっている。腰フレームは腰ベルトで装着者の腰に固定され、バッテリーと制御コンピュータを内蔵し、左右の端部は外転可能な軸を介してモータが配置される。モータ部は股関節角度をセンシングするための角度センサも配置されている。モータ部からは装着者の大腿部にアシスト力を伝える大腿フレームが伸びており、パッドと大腿ベルトにより装着者の大腿に固定される。

歩行アシストの動作を Figure 1.3-2 に示す。人は二人で平行して歩く時に無意識に歩調が揃ってしまうようなことがあり、この相互適応現象⁽¹⁾を参考としている。人の脚の動きは大腿フレームを介して股関節角度センサ値に変換され制御コンピュータが読み取る。制御コンピュータは角度センサ値と内部に持っている歩行モデルとのずれ量などを比較して、どのようなアシストを与えるかを決定する。決定したアシスト力は人の歩行タイミングに合わせ、腰の部分のモータがトルクとして出力する。脚を前に振り出す時（屈曲時）と、脚を後ろに蹴り出す時（伸展時）の双方で、大腿フレーム先端のパッド部分にアクチュエータのトルクを加え、歩く速度や歩幅を調整する。これにより非装着時より歩幅を広げ、より楽な歩行を可能とする。

歩行アシストはリハビリテーションにおける歩行訓練での活用を目指して開発が進められている。

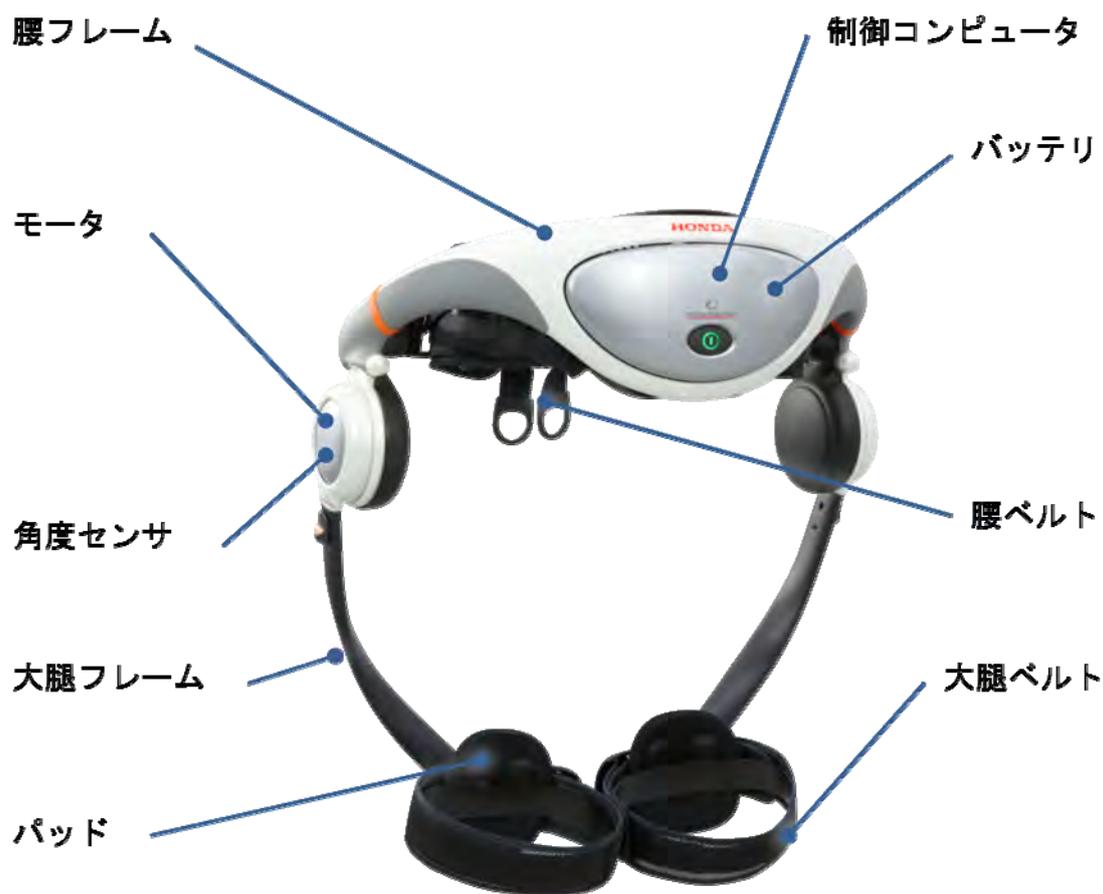


Figure 1.3-1 歩行アシストの構成

Table 1.3-1 歩行アシスト諸元

腰フレームサイズ	M (腰幅 340mm) L (腰幅 380mm)
重量	2.6kg 以下 (バッテリー含む)
稼働時間	60 分以上
バッテリー	リチウムイオン電池 22.2V
アクチュエータ	最大トルク 4N・m 2 軸
使用場所	平坦な床や路面 (屋内または雨天を除く屋外)

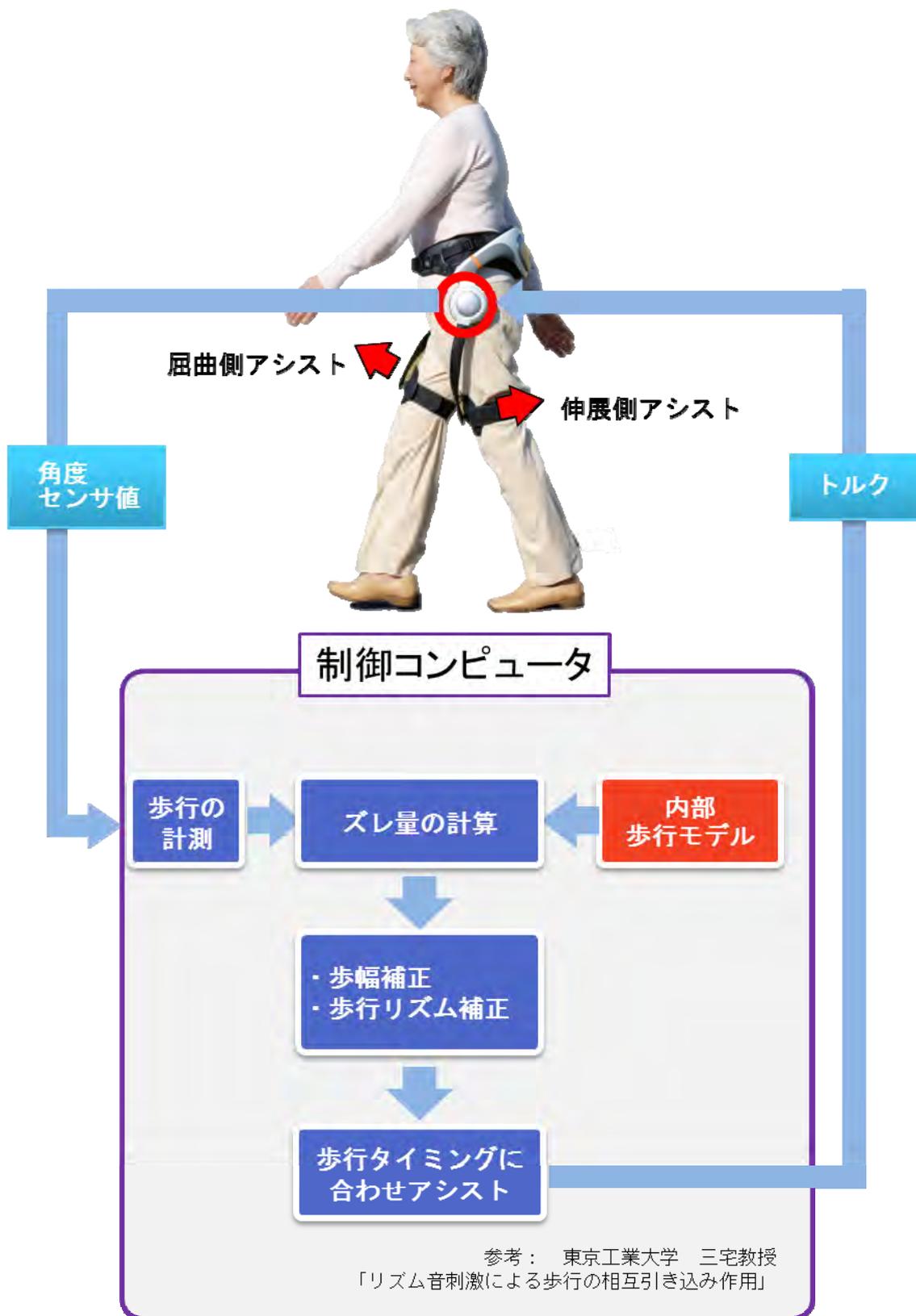


Figure 1.3-2 歩行アシストの動作

2. 研究成果

2. 1 歩行アシストのリスクアセスメント

2. 1. 1 高齢者の使用を想定したシーン

前章で述べたように歩行アシストはリハビリテーションにおける歩行訓練での使用を目的に開発された機器である。この機器を高齢者支援の目的で介護予防のための運動教室などに適用する場合は、医療機関で行われていたリハビリテーションでの運用と異なる点があり、安全性の面での検討が必要である。

そこで、高齢者支援での運用を介護予防のための運動教室に絞り、具体的な運用シーンを想定したうえでハザード源の抽出を行った。

高齢者運動教室は、介護予防を目的とした運動能力向上のトレーニングと位置づけ、市町村や保険団体などが主催し、体力が衰えてきた虚弱高齢者などに対して行うものと想定した。

参加者は体力が衰え始めている、または衰えているが自力で歩行可能な高齢者であり、30人程度を1クラスとして実施することとした。運動教室のプログラムは、屋内教室で体力トレーニングの知識を得る座学と実際の歩行訓練で構成される。歩行訓練の場所は、屋内のホールや体育館、屋外の運動場や公園、遊歩道などで行われるものとし、指導を行うトレーナーが5～6人のグループを受け持つこととした。

1回の運動訓練は90分程度の時間で、運動座学、バイタルチェック、ウォーミングアップ、クールダウン、振り返りなどが行われる。トレーナーは事前に歩行アシストについてのレクチャーを受け、どのような機器であるか、取り扱い方法や禁止事項、さらに残留リスクについての説明を受け理解しているものとする。

機器の移動、取出し、装着はトレーナーが行い、トレーナーの監視のもと歩行訓練が行われる。訓練後の脱装、片づけ、保管もトレーナーが行うものとする。

歩行訓練が行われる場所は事前にリスクアセスメントを行い、不要のハザードを回避する。具体的には段差、階段、狭路、滑りやすい床や道などである。

歩行訓練自体は参加者のレベルに合わせた速度で歩行できるようグルーピングなどに配慮がなされ、疲労や便意などが起きた場合は訓練を中止し、休憩などを行うことができる。

歩行アシストを使用するシーンは保管場所から運動教室に移動したところから、歩行トレーニングを挟んで保管場所に移動するまでの間を対象とした。具体的な流れを Figure 2.1-1 から Figure 2.1-5 に示す。

歩行アシスト運用時の作業手順はリハビリテーションでの歩行訓練を参考としているが、図の赤ハッチング部は運動教室特有の作業や動作、状態を示している。この項目については運動教室特有の項目としてリハビリテーション用途で行われたリスクアセスメントに追加して分析を行う必要がある。

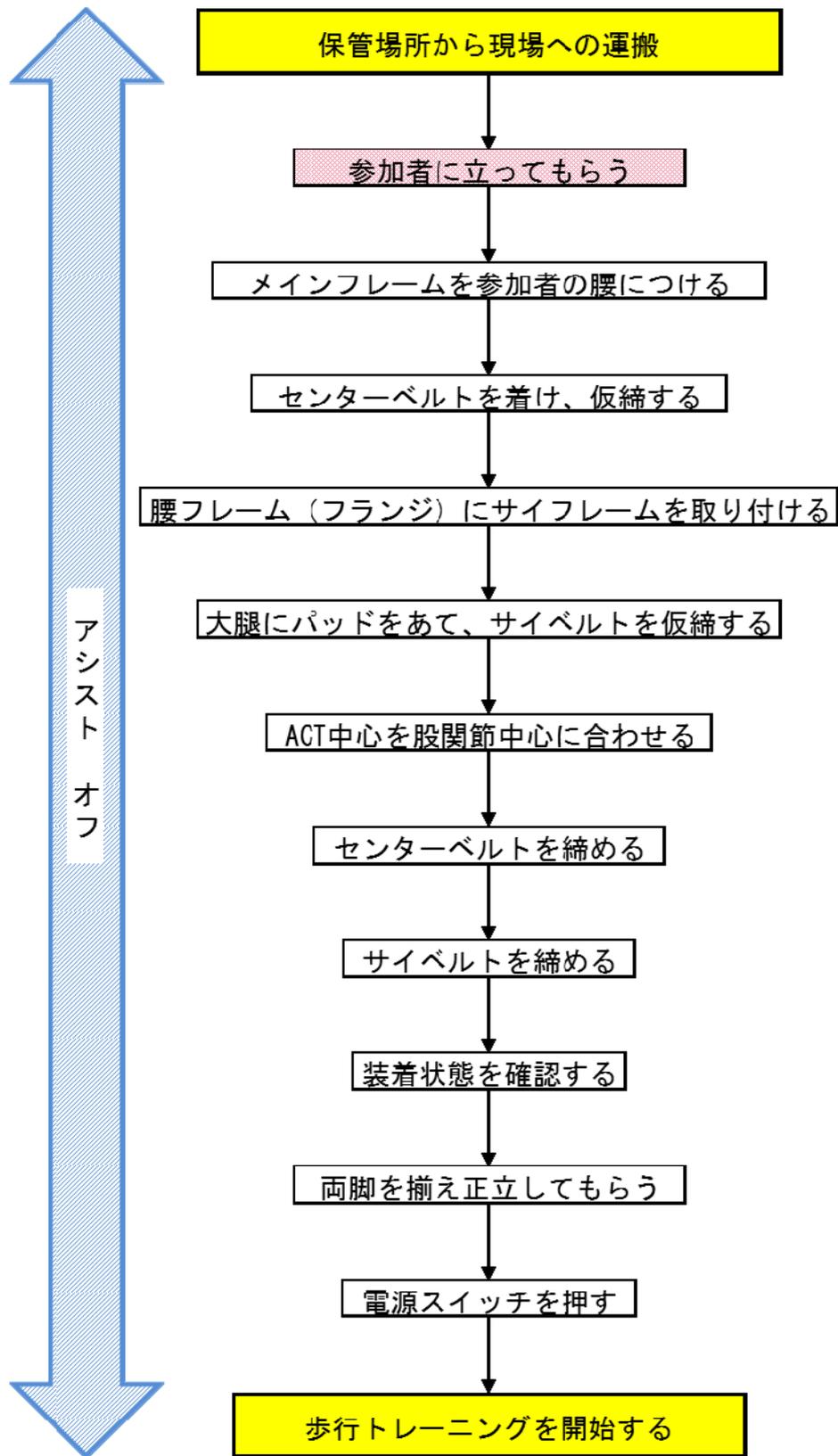


Figure 2.1-1 運用作業フロー（運搬－装着）

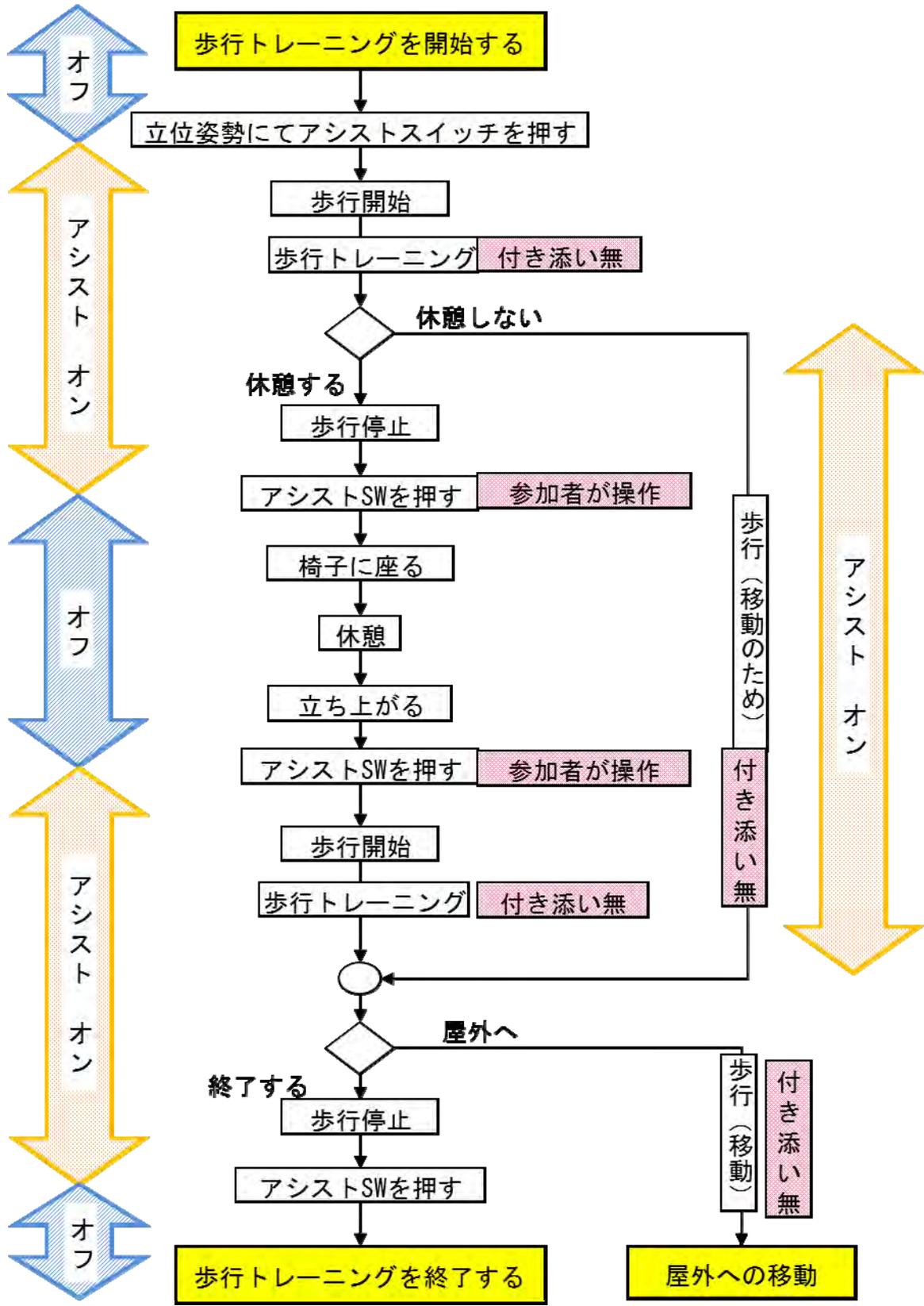


Figure 2.1-2 運用作業フロー（屋内トレーニング）

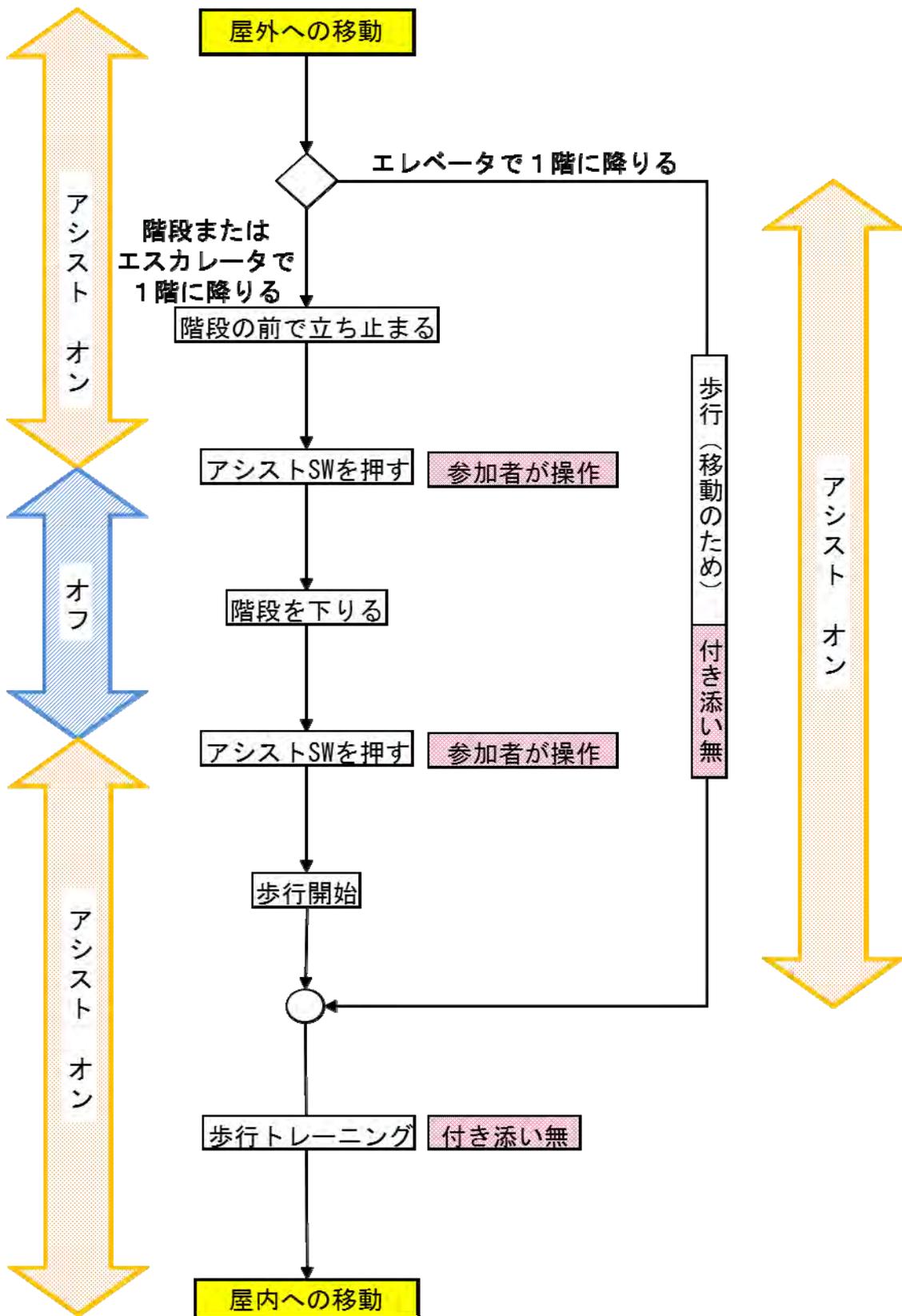


Figure 2.1-3 運用作業フロー（屋外への移動）

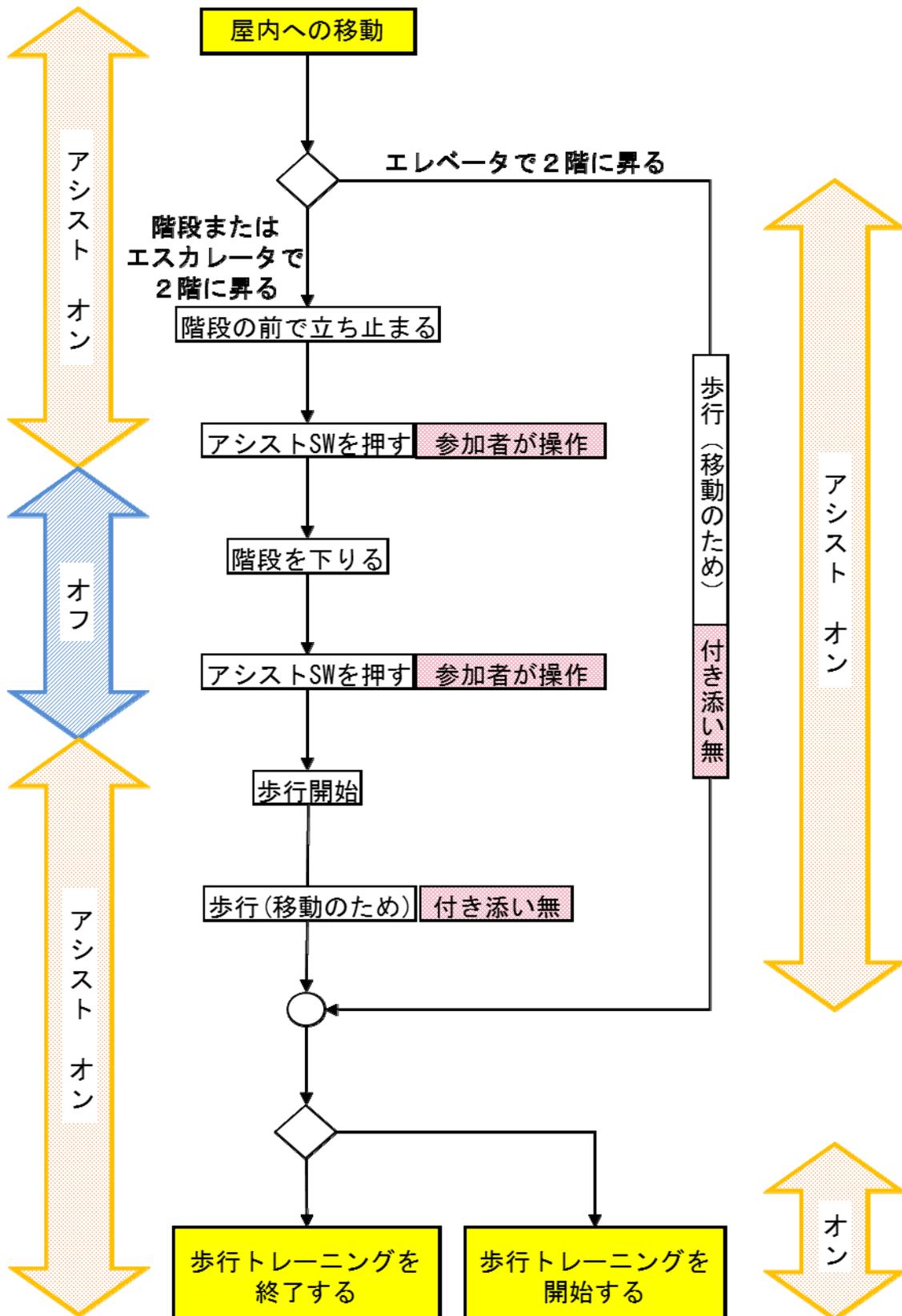


Figure 2.1-4 運用作業フロー（屋内への移動）

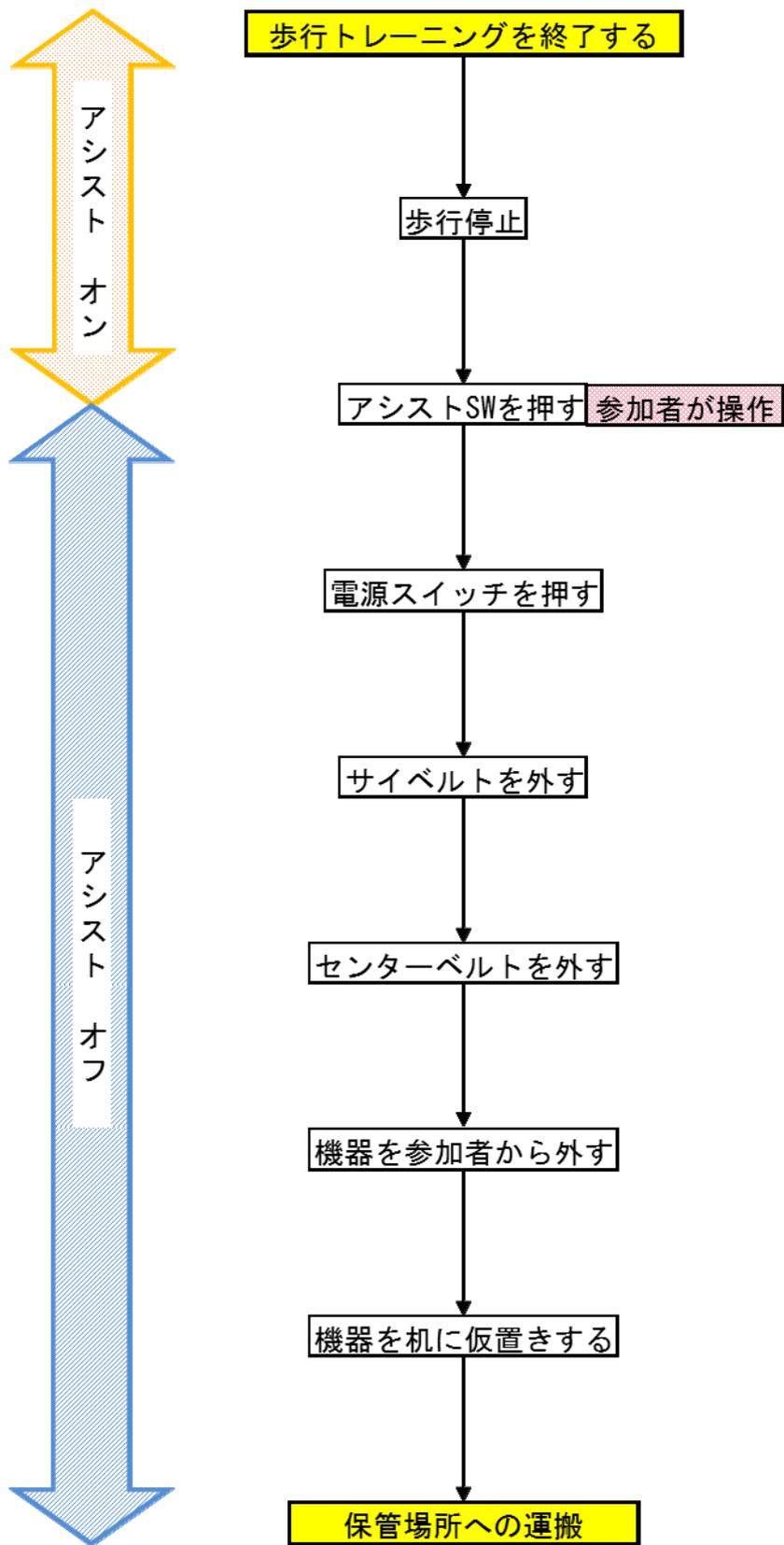


Figure 2.1-5 運用作業フロー（終了－保管）

2. 1. 2 運動教室でのハザード源

運動教室が行われる環境や、運用作業フローからリハビリテーションでの運用と異なる点は以下の4点であることが分かった。

- 1) 歩行トレーニング時に、常時付き添い介助する人がいない。
- 2) エスカレータや階段、縁石など平坦な路面・床以外の歩行路が存在する。
- 3) 机や椅子、歩道の車止めなど障害物が存在する。
- 4) 装着や脱装、アシストの ON/OFF などを参加者が行う場合がある。



Figure 2.1-6 歩行訓練コースのリスクマップ

2)、3)の項目については環境に大きく依存するので、歩行トレーニングに使用するコースで事前にリスクアセスメントを行い、不要なハザード源は排除することが大切である。以下は後述する実証実験のフィールドで行ったリスクアセスメントで抽出されたハザードである。(Figure 2.1-6、Table 2.1-1)

Table 2.1-1 歩行訓練コースのハザード源

	ハザード項目	予見リスク内容	対応案
①	自動ドアでの出入り	開ききる前に衝突	自動ドアの動きに注視するとともに歩行速度を落とすように指導・トレーナーの注意喚起
②	階段昇降	階段での転落	極力エレベータによる移動とするやむを得ず使用する場合は手前で停止、アシスト OFF
③	エスカレータ移乗	エスカレータに乗るタイミングが合わず転倒	極力エレベータによる移動とするやむを得ず使用する場合は手前で停止、アシスト OFF
④	歩道—道路との段差	段差による転倒	歩道と駐車場面との段差のある部分の通過（ショートカット）を禁止する
⑤	車止め間の狭路通過	衝突し転倒	狭路通行では歩行速度を落とすように指導・トレーナーの注意喚起

リスクアセスメントは、使用上の制限や使用者の誤使用の見込みなど前提条件を定めて行っている。Table 2.1-2 にリスクアセスメントの前提条件を示した。

実証実験ではこれらの前提条件が妥当であったか、予期しない使用者の誤使用が無いかなど妥当性の検証を行うことで、事前の検討で漏れているリスクアセスメント項目を抽出する。抽出された項目は合理的に可能であれば機器の安全機能として対策をとることが望ましい。また、機器側で対策が不可能、あるいは困難である項目については、リスクアセスメントの結果許容できないリスクであった場合には運用方法の見直しや環境の改善など許容可能なレベルまでリスクを下げる対処をすることが必要である。

Table 2.1-2 リスクアセスメントの前提条件

ライフサイクル 該当段階		準備、装着、歩行訓練、保管
使用上の制限	意図した使用	<ul style="list-style-type: none"> ①運動公園などの歩行者通路上を、リズム歩行アシストを装着した高齢者が、体力向上のために歩行する。 ②高齢者が装着する前の準備として、機器の調整に習熟した「機器管理者」が、機器の準備、電池の準備を行う。 ③装着は、歩行訓練の「サポート」担当が主として行う。 ④体形別に、機器のサイズの選定は、「サポート」が行う
	合理的に予見できる誤使用	<ul style="list-style-type: none"> ①歩行者通路上以外の歩行 ②サイズの異なった機器の装着 ③アシスト（電源）を起動しない状態での歩行 ④装着した機器の脱落 ⑤歩行中のアシストの OFF ⑥屈伸などの歩行以外の動作 ⑦歩行中の転倒 ⑧他の歩行者との衝突 ⑨間違った設定によるアシスト
	意図した空間／時間制限	<ul style="list-style-type: none"> ①機器を装着し、運動公園等の歩行者通路上を歩行する ②歩行時間は、連続 30～40 分程度 ③機器の保管は、管理室等の屋内とし、関係者以外の勝手な操作は行わない ④電池の保管、充電も、機器の保管と同様 ⑤運動公園内では、一般の通行人（子供含む）と混在して歩行する ⑥機器の使用期間は 5 年を想定し、1300 万歩以上の耐久性を有する。定期点検を 6 ヶ月ごとに実施し、装着部布製品などは定期交換部品として、交換する。

2. 1. 3 リスク評価が必要な項目

ハザード源の洗い出しより浮き上がった、“1) 歩行トレーニング時に、常時付き添い介助する人がいない。”という点は参加者が転びそうになった場合に介助ができないことに繋がっている。歩行トレーニングの性質として参加者が普段以上に運動をする前提であることから、転倒に至る事象は機器の装着有無に依らず一定の割合で発生すると考えるのが妥当である。よって、機器の装着時に転倒した場合、装着していること自体が人へのダメージを増加させないことが重要と考える。機器の装着時に転倒した場合に装着していない時よりも衝撃が増加していないことが安全を評価する上での一つの指標であると考ええる。

さらに、転倒に至る要因が機器側にあることも考慮しなければならない。機器の故障や設定の誤りなど、予見可能な誤使用により転倒に繋がる事象が無いか確認する必要がある。転倒に繋がると予想される事象があった場合は、発生頻度や被害の大きさを加味して、合理的な範囲でのリスク低減方策が必要となる。

上記 2 つの安全評価は外乱を排除するために実験室や、再現性のある試験装置で行われるべき計測である。限定的な条件で行うために実環境での使われ方では想定外の事象が起きる可能性も考えられるため実証実験が必要である。想定外の事象が実証実験で起きた際にこれを分析してリスク低減の方策を決定するためには、歩行の状態、機器の内部状態、発生した事象での関連付けが必要である。このような関連付けはリスクアセスメントの妥当性検証にも有効である。

そのためには稼働時間中の機器の内部状態を記録し、後から分析できるシステムが必要となるのでこれを開発することとした。安全技術として開発した記録モジュールと分析システムについて 2.3 章で詳しく述べる。

高齢者の運動教室を想定して行ったリスクアセスメントは、その使用環境に依存するため、用途・環境が変わる都度実施し、装置の仕様と運用をあわせて、全体で適切な対応を取る必要があることが分かった。

2. 2 転倒リスク評価

前章で述べたようにリスクアセスメントから安全性の評価が必要な項目が選定された。本章では計測と評価、安全技術として開発を行った安全検証用記録モジュールの歩行アシストへの導入、安全検証試験についての成果を述べる。

2. 2. 1 衝突実験用ダミー人形を用いた転倒衝撃の計測

歩行アシスト装着時に装着者が転倒に至った場合、非装着時に比べて衝撃値がどのように変化するのかを明らかにする手法として、自動車の衝突試験などに用いられる衝突実験用ダミー人形を用いた比較を行うこととした。人間装着型生活支援ロボットの試験・評価手法が確立していないため、先行して試験・検証手法が開発されている搭乗型や自走型のロボットの「対人安全性」の試験・評価手法を参考とした。

試験方法の策定及び計測については「生活支援ロボット実用化プロジェクト 研究開発項目① 生活支援ロボットの安全検証手法の研究開発」に参画している独立行政法人産業技術総合研究所、財団法人日本自動車研究所、独立行政法人労働安全衛生総合研究所と共同で行っており、実際の計測は生活支援ロボット安全検証センターで行った。



Figure 2.2-1 歩行アシストを装着した衝突実験用ダミー人形

Figure 2.2-1 は本計測で用いた衝突実験用ダミー人形に歩行アシストを装着した様子である。主要諸元を Table 2.2-2 に示す。

Table 2.2-2 衝突実験用ダミー人形諸元

TYPE	Hybrid III Small Female Test Dummy
全高(身長)	145cm
重量(体重)	49kg
腰幅	30.7cm
加速度センサ位置	頭部、胸部、腰部

リファレンスとなるダミー人形単体での試験条件は、高齢者が骨折に至る転倒衝撃荷重を目標にして決定することとした。Robinovitchら^{(2),(3)}の文献を参考として転倒時の速度 2.75m/s は自由落下 0.385m 相当であるので、衝撃力ピークを女性（弛緩）3.8kN、（緊張）4.7kN、（平均）4.25kN とする。高齢者大腿骨骨折平均衝撃荷重（平均 4.2kN）として、ダミー人形単体での衝撃荷重が 4.2kN 以上の条件で計測を行うこととした。

まず、リファレンスとなる値を再現させるため衝突実験用ダミー人形単体での衝撃値の測定をした結果、ダミー人形に可動部が多く姿勢が安定しない点や、倒す際に接地した脚位置がずれてしまうなど狙った値を出すことが難しく、繰り返し精度の確保が課題であることが判明した。

脚部の接地点を回動自由に拘束することで不要な方向にずれるのを防止し、腰部に加わる力の再現性を持たせるため上腕部は腰部より先に接地しないように拘束を施した。

これにより繰り返し精度が向上したため、装着の有無による比較を行った。計測の状況と結果を Table 2.2-3 に示す。背面と側面の 2 方向についてダミー人形を落下させ、高齢者の大腿骨骨折平均衝撃荷重（平均 4.2kN）を上回る衝撃値を発生させリファレンスとした。歩行アシスト装着後の衝撃は背面で 1.5kN、側面では 1.9kN と大きく減少していることが確認できた。

歩行アシストを装着することで腰部全体に加わる衝撃値が減少することにより骨折のリスクは非装着時に対して増加しないと考えられる。

しかし、本歩行アシストの構成が大腿骨転子部付近にアクチュエータを配置していることから、腰全体の荷重は減少したものの大腿骨自体に加わる荷重が増えている可能性が考えられる。原田⁽⁴⁾の文献によれば大腿骨骨折は頻度と重篤性から最も恐れられており、大腿骨骨折の閾値は 2.1kN であるとしているため、大腿骨転子部に加わる転倒時の衝撃荷重を計測する手段が必要であると考え計測することとした。

Table 2.2-3 転倒時の衝撃測定結果

	衝撃実験用ダミー単体	歩行アシスト装着
背面衝撃		
	<p>フォスプレート荷重 6400N</p> <p>腰部加速度 267m/s²</p>	<p>フォスプレート荷重 1530N</p> <p>腰部加速度 80m/s²</p>
側面衝撃		
	<p>フォスプレート荷重 4400N</p> <p>腰部加速度 172m/s²</p>	<p>フォスプレート荷重 1900N</p> <p>腰部加速度 68m/s²</p>

2. 2. 2 大腿骨に加わる転倒衝撃の計測

要介護認定を受けた障害を有する高齢者を対象として転倒と骨折状況を調査した鈴川ら⁽⁵⁾によると、転倒により骨折した者は9.7%であった。骨折部位は大腿骨頸部(20.1%)、橈骨・尺骨(15.7%)、肋骨(12.7%)、脊椎骨(10.8%)であり、転倒による骨折が最も多い部位は大腿骨頸部である。(Figure 2.2-2) 特に高齢者は骨粗鬆症に伴う骨密度の低下が関節近くの大腿骨頸部に著しく生じるため、骨折しやすい部位と言える。また、大腿骨は股関節付近の部位という点で新しい骨の形成が行われにくく、くっつきにくい部位である。大腿骨頸部を骨折した場合股関節に強い痛みが生じ、自力では立ち上がれなくなるため、骨折により長期間寝たきりの状態になり、持病の悪化や合併症を起こす危険性が高まるなど重篤な病状につながりやすい。

歩行アシスト機は人体の腰部に装着する装置である。脚部へのアシスト力を発生させているアクチュエータが足の回転軸である骨頭と同軸に来るように設計されていて、ベルトで腸骨付近を締めることで装着している。(Figure 2.2-3)

普段何もない箇所にアシスト機を装着することにより、下半身(腰部)の怪我のリスクが変化すると考えられる。その理由として、大腿骨は大転子が凸になっている上、歩行アシスト機のアクチュエータ部分が転子部に位置するためである。したがって、非装着時の転倒で最も骨折しやすく、装着の有無により骨折リスクが変化する可能性の高い大腿骨頸部にかかる荷重の計測が必要と考えた。

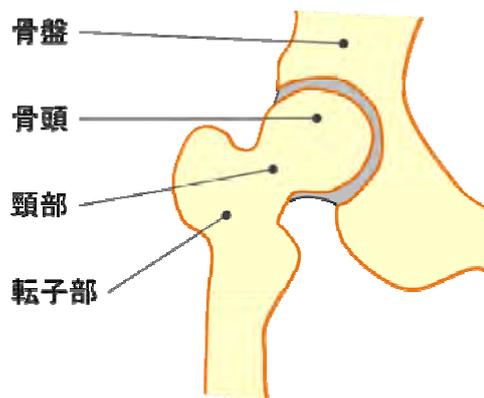


Figure 2.2-2 大腿骨と骨盤

Figure 2.2-3 歩行アシストの装着状態

歩行アシスト機の転倒試験の参考としてヒッププロテクターの評価試験のコンセンサス⁽²⁾に着目した。このコンセンサスはRobinovitchをはじめ、バイオメカニクスに携わる学者等14名がヒッププロテクターのクッションの大きさや形状の評価を行うために作成したものである。ヒッププロテクターとは、大腿骨と大転子を守るために腰部を覆うクッション材のことである。このコンセンサスでは、腰部周り

の骨や生理組織などの構造体を模擬している上、大腿骨にかかる荷重を評価しており、使用材料・衝突速度・フィルタリングなど試験方法に関して記している。バイオメカニクスに携わる複数の学者らが作成した点と実際に商品の評価に使用しているテストコンセンサスである点から、このテストコンセンサスを元に試験方法を検討することとした。

コンセンサスは2種類の試験方式を推奨している。2種類とも錘を落下させる方式になっており、錘を垂直に落下させる方式と円弧の軌跡を描いて落ちる振り子方式がある。

本研究では作りの点などから垂直落下式の装置とした。歩行アシストを装着する腰部や大腿に相当する装着用ダミーは人の皮膚や筋肉といった生理組織を模したケミカルウッドやウレタンゲルで形作られており、内部に大腿骨の形状を金属で模した大腿骨ダミーが埋め込まれている。大腿骨ダミーの骨頭部に当たる部分がロードセルの載荷台に接していて、他端はピンジョイントで固定されている。落下する錘についてはコンセンサスの要件をほぼ再現したものとなっている。

この装置を用いてリファレンスとなる値を計測したところ、 3.51kN ～ 3.61kN の計測範囲に収まり再現性良く測定が可能であることが検証できた。

歩行アシストを装着しての計測値は、 2.94kN ～ 3.02kN であり非装着状態よりも減少していることが明らかとなった。以上の結果から歩行アシストは大腿骨転子部付近にアクチュエータを配置している構造であるが、大腿骨自体に加わる荷重を増加させていないことが分かった。よって、歩行アシストの装着により転倒時の骨折リスクは増加していないと考えられる。



Figure 2.2-4 落下試験装置の錘部分

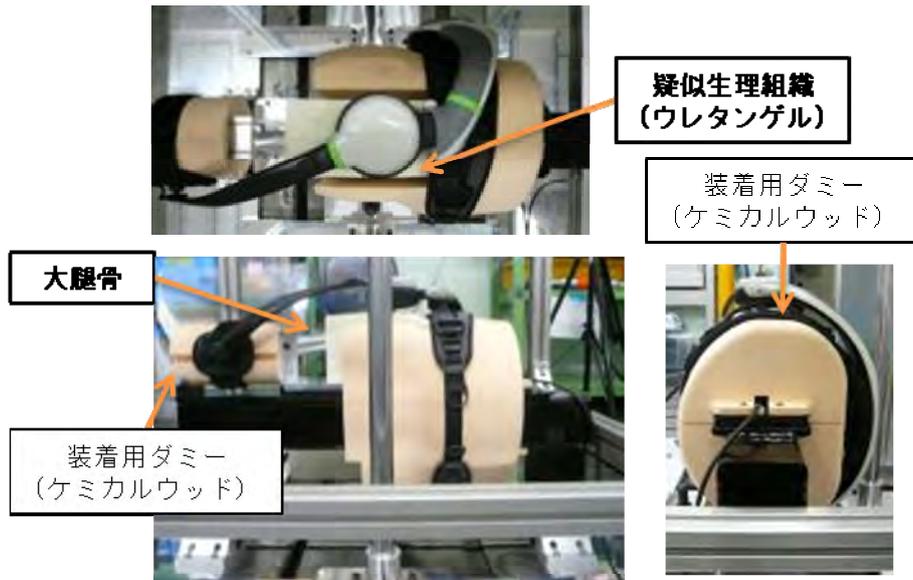


Figure 2.2-5 歩行アシスト取付け部分



Figure 2.2-6 衝撃試験装置

2. 2. 3 装置の異常が人に及ぼす影響

装置の異常が人に及ぼす影響を安全性の観点で評価するために、転倒に繋がる可能性のある装置の異常動作を洗い出し、装着者が歩行中に任意の異常動作を機器に引き起こし転倒に至る事象の有無を確認する実験を行うこととした。

実験方法の策定及び実施については「生活支援ロボット実用化プロジェクト 研究開発項目① 生活支援ロボットの安全検証手法の研究開発」に参画している国立大学法人名古屋大学の大学院工学研究科山田研究室と共同で行った。

実験に先立ち転倒に繋がる機器の異常動作を特定するために、転倒の要因となる人の動きと同様な効果を与える動作を抽出した。転倒経験のある在宅高齢者が転倒に至った要因が近藤ら⁽⁶⁾により調査されている。これをもとに作成したグラフを Figure 2.2-7 に示す。転倒の要因は「つまずき」が最も多く、「ふらつき」、「踏み外し」、「すべり」の順であったことが報告されている。

これらの要因を機器の異常動作に当てはめたものを Table 2.2-4 に示す。

Table 2.2-4 転倒の要因に関する機器の異常

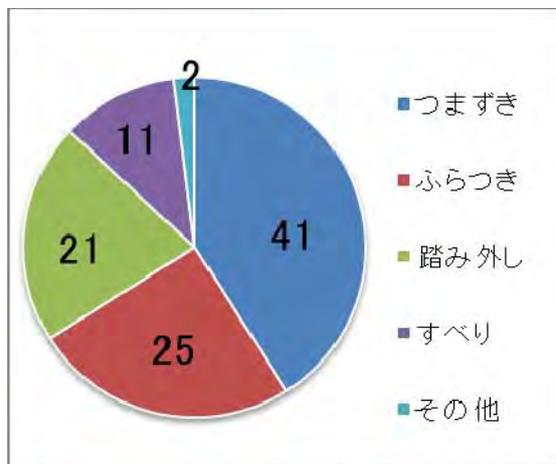


Figure 2.2-7 転倒の要因

転倒要因	関係する機器の異常動作
つまずき	可動軸が回らなくなる アシストタイミングがずれる
ふらつき	アシストが無くなる アシストタイミングがずれる
踏み外し	
すべり	アシストが大きくなる

つまずきは脚を前に振り出す時（屈曲時）に屈曲動作が制限されることで起こる事から大腿の動きを制約する可動軸、すなわちアクチュエータ軸のロック事象が該当する。また、アシストのタイミングがずれる事で屈曲時に伸展側のアシスト力が発生すると、装着者の反射動作に依って屈曲動作が妨げられる可能性もあるためにアシストタイミングがずれる事象も実験の対象とした。

ふらつきを起こす事象としてはアシスト力が無くなる、アシストタイミングがずれる、の2つの事象が該当すると考えられる。アシスト力により筋力を節約する歩行を行っているとは仮定すると、アシスト力の喪失は一時的に筋力の弱った状態を作り出していると考えたためである。また、タイミングずれにより伸展、あるいは屈曲動作を妨げる向きにアシスト力が働くと筋力に負荷をかけるのと同様な効果があると考察し該当すると事象とした。

すべりについては靴底が滑った結果として股関節の拡大に通じる現象で、屈曲、進展どちらの状態でも起こりうるものである。脚の動作方向に加わっているアシスト力が急に大きくなった場合には、装着者の脚の動きも連れられて大きくなる可能性が考えられるため、アシスト力が大きくなる事象がすべりに相当するとした。

4項目のうち踏み外しについては段差や側溝、穴などの外部の環境因子により引き起こされるものであり、機器装着の有無に依らずリスクが存在することから運用上のリスクとして取り上げられ排除されるべきものであるため本実験では対象外とした。

歩行実験は被験者の安全に考慮した環境で行われる。環境の概要を Figure 2.2-8 に示す。転倒に繋がる事象が発生しても床に頭部などを衝突させないために、被験者にベルトで装着した吊ハーネスが、倒れきる前に被験者を吊り下げるようになっている。吊ハーネスは天井部に配置したスライドレールに取り付けられ歩行の妨げにならないよう考慮してある。歩行の計測は光学式3次元モーションキャプチャシステム、足裏設置型フォースプレート(足圧センサ)、ビデオ画像により行っている。

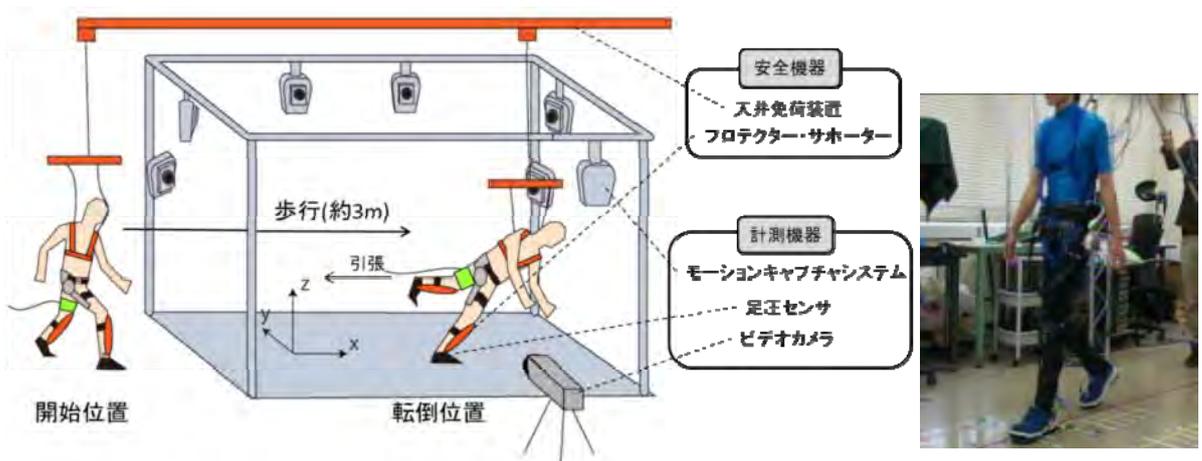


Figure 2.2-8 計測環境概要

装置の異常を故意に機器に発生させるために、実験に使用する歩行アシストに改

修を加え実験専用機を開発した。可動軸が回らなくなる事象はロックキーを回転板のロック溝に嵌めあうことで強制的に回転を止める構造とした。アクチュエータの出力では脚の動きを拘束する十分な制動力を与えることができないためである。ロックキーはソレノイドで駆動され、外部の PC から無線操作で動作させることができる仕様である。歩行中は取り付けフランジを介して連結された大腿フレームが回転自由に保持されており、アシスト力が掛かっていない状態を再現し、PC から指令を与えたところで直近のロック溝にロックキーが嵌り可動軸を固定して異常動作状態を発生させる。(Figure 2.2-9)

アシストが無くなる、アシストタイミングがずれる、アシスト力が大きくなる事象についてはソフトウェアの変更により行っている。アシストタイミングがずれる場合はアシスト力を与える位相を 180 度ずらし本来与えるアシスト力とは逆向きの力を発生するようにした。アシスト力が大きくなる事象は同様にアシスト力のゲインを 1.5 倍にしてアクチュエータの出力最大値が掛かるようにした。いずれの場合も PC からの無線操作で行い、ロックのタイミングをモーションキャプチャなどの計測機器に出力できるようになっている。

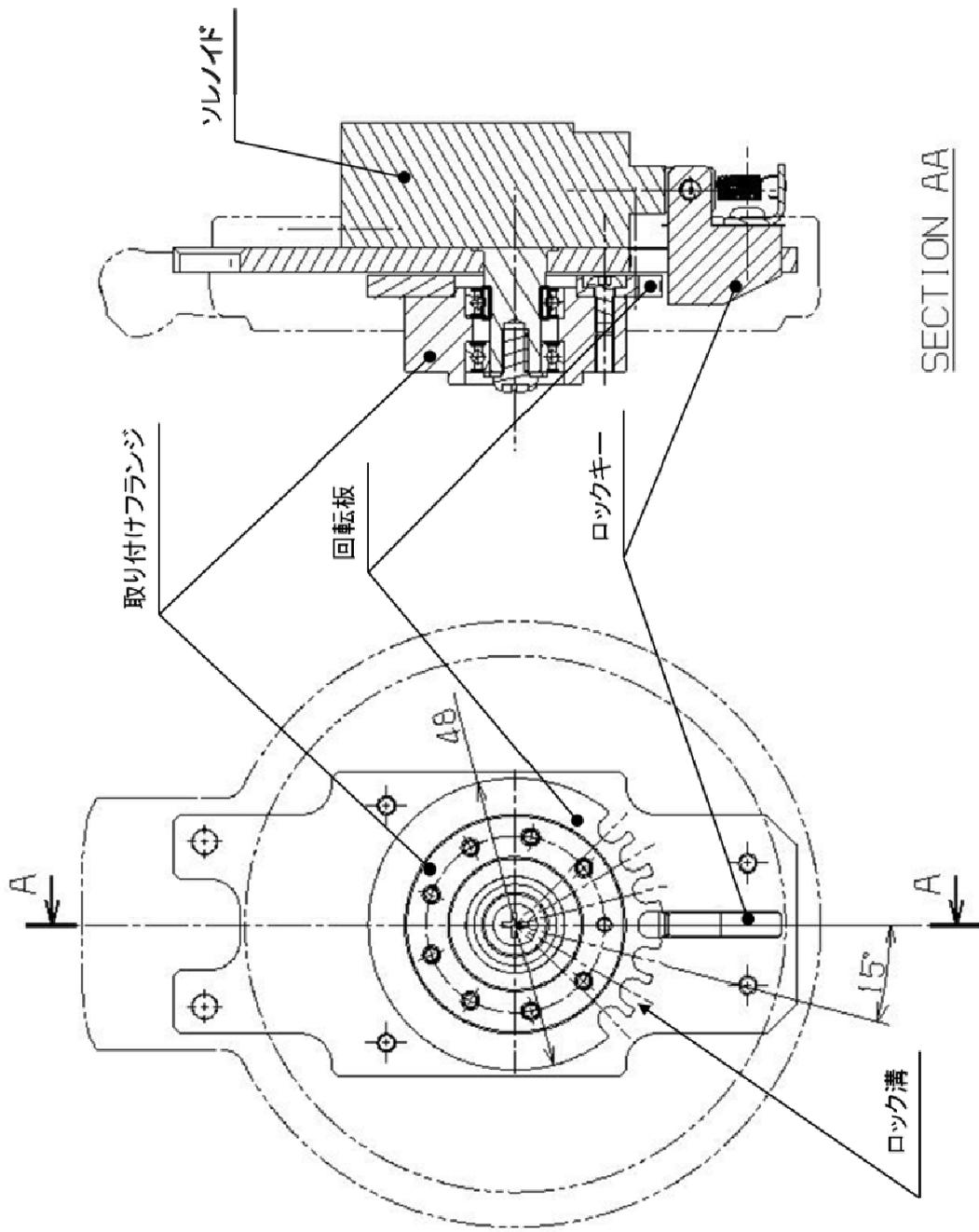


Figure 2.2-9 可動軸の

(a)アシストが無くなる事象の実験

通常のアシスト状態（アシスト ON）で被験者が3 mを歩行する。カメラ前の計測エリア内をそのまま通過する場合と、PC から指令を与えアシストを OFF とする場合の比較を行った。

左脚踵接地から次に左脚踵接地するまでをゲートサイクル 100%とし、0~50%に異常を発生させ観察を行ったが、特徴的な差異は認められなかった。アシスト OFF の異常は左右のアクチュエータに同様に起こるため、右脚は遊脚期、左脚は立脚期にあたり歩容の全てのタイミングで異常を起こしたことになる。

さらに詳しく観測するために、接地していないために股関節角度に変化が起こりやすい遊脚期に絞り股関節角度の比較を行った。異常を発生させるタイミングは Figure 2.2-10 に示す左脚踵接地から左爪先離床までを測定し、ゲートサイクル 0~30%でアシスト OFF を発生させて、通常歩行のケースを 5 件、アシスト OFF のケースを 10 件計測した。アシストを OFF にしたタイミングでもバランスを崩すなどの変化はなく、ビデオ映像からも通常歩行の場合と比べて変化は見られなかった。アシスト OFF の異常を発生させた時の股関節角度の変化を Figure 2.2-11 に、通常歩行時の股関節角度の変化を Figure 2.2-12 に示す。縦軸は股関節の角度、横軸は Figure 2.2-10 の計測区間の時間を 1 とした値であり、各グラフのラインはそれぞれ 1 回の計測を表す。

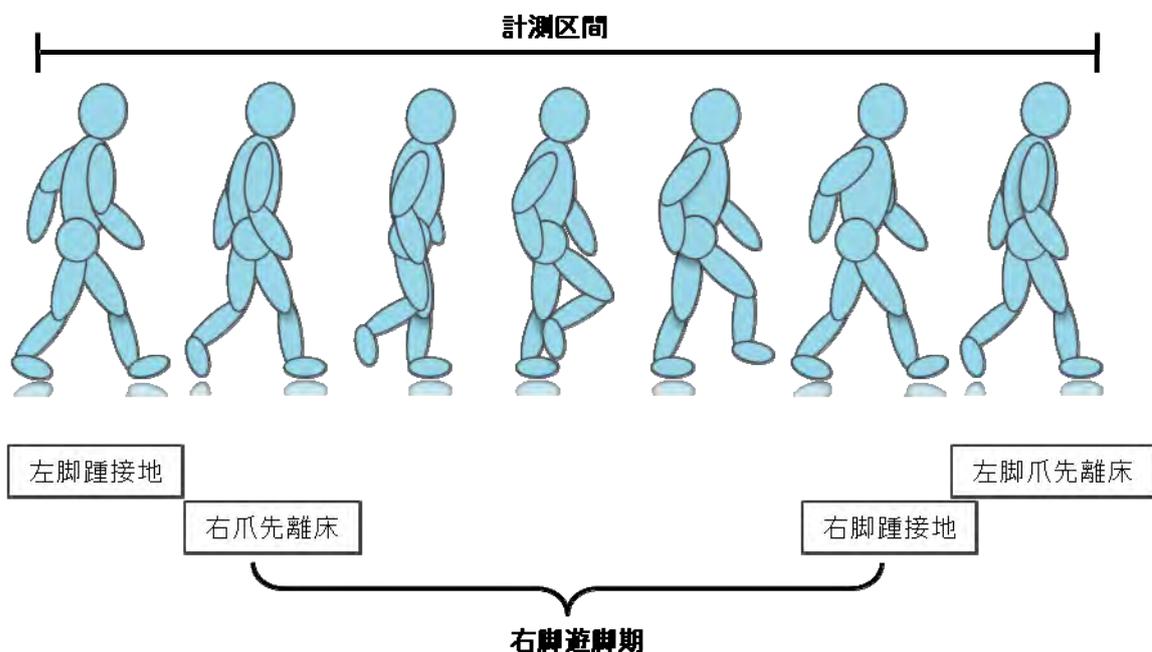


Figure 2.2-10 アシストが無くなる事象の計測区間

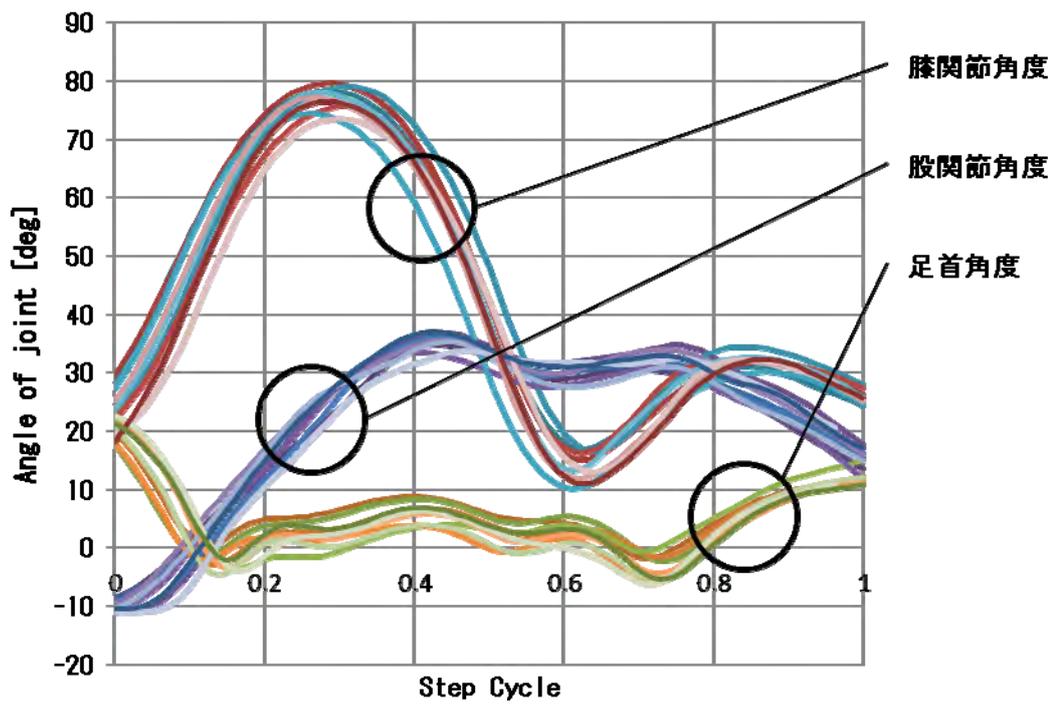


Figure 2.2-11 異常発生時の右脚関節角度

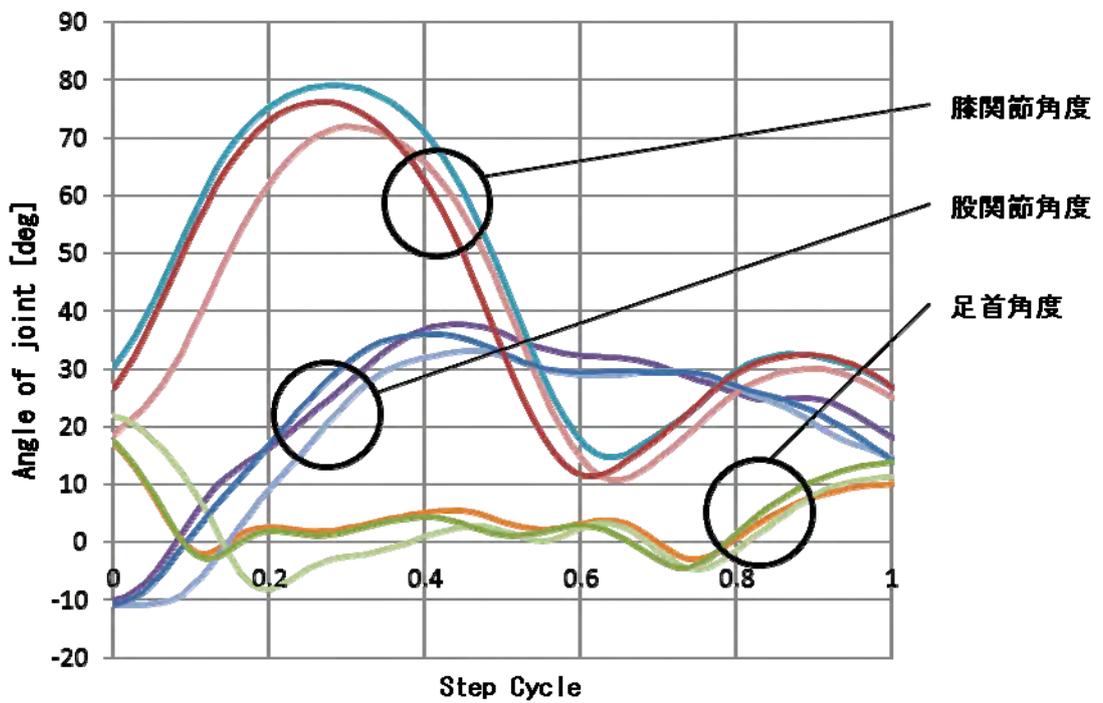


Figure 2.2-12 通常歩行時の右脚関節角度

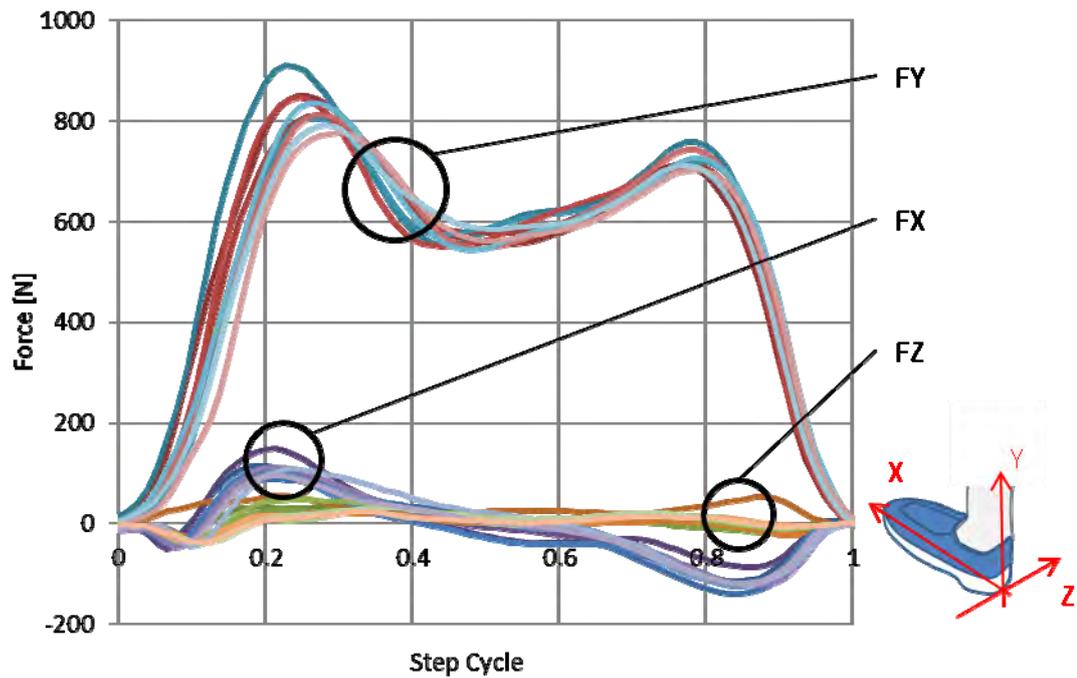


Figure 2.2-13 異常発生時の足圧

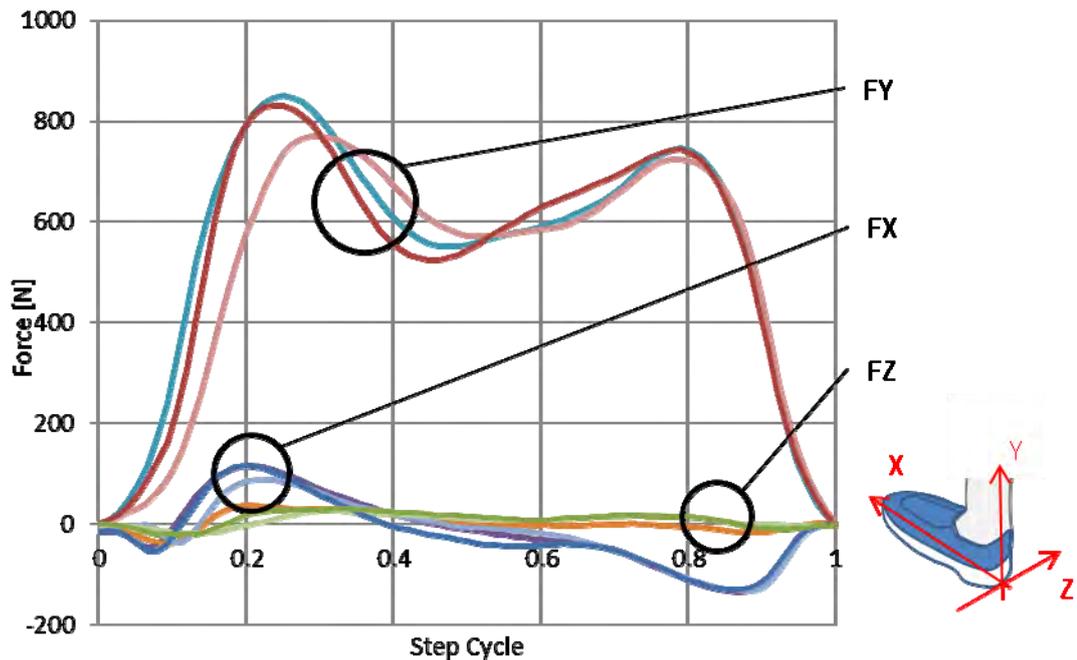


Figure 2.2-14 通常歩行時の足圧

異常の発生は前半部分、特にゲートサイクルの10~20%に集中しているが、同タイミングでの関節角に明確な変化は現われていない。通常歩行のケースと比較しても歩行のばらつきの方が大きく、異常発生時においても特徴的な角度の変化は見られ

ない。

同様に足圧センサの値を Figure 2.2-13、Figure 2.2-14 に示す。股関節角と同様に特徴的な差は見られなかった。

「アシストが無くなる」ケースの実験結果は、異常発生時に転倒や転倒に繋がる大きなバランスの崩れは認められず、アシスト異常後に共通した挙動の変化を確認することもできなかった。「アシストが切れる」という異常については歩行への影響は観測されずリスクであるとは言えないことが分かった。

(b)アシストが大きくなる

通常のアシスト状態（アシスト ON）で被験者が 3 m を歩行する。カメラ前の計測エリア内をそのまま通過する場合と、PC から指令を与えアシストを 1.5 倍とする場合の比較を行う。

(c)アシストタイミングがずれる

通常のアシスト状態（アシスト ON）で被験者が 3 m を歩行する。カメラ前の計測エリア内をそのまま通過する場合と、PC から指令を与えアシストの位相を 180 度ずらす場合の比較を行う。

(b) (c) の実験は条件を混在させ、3 名の被験者で行った。被験者 1 の (b) のケースについての股関節角度の変化を Figure 2.2-15 に、(c) のケースの股関節角度を Figure 2.2-16 に示す。横軸にゲートサイクル、縦軸に股関節角を示している。ゲートサイクル前半の縦のラインは異常を発生させたタイミングを示し、それぞれ同色の股関節角に対応している。(a) のケースと同じく異常は左右のアクチュエータに発生するので、左脚が立脚期、右脚が遊脚期となっており、ほぼすべての歩行のタイミングで異常を発生させている。赤色の中太線で示されたラインは通常歩行での股関節角度の平均値を示している。(a) のケースと同様に通常歩行からの差異は認められず、「アシストが大きくなる」「アシストタイミングがずれる」という異常についても歩行への影響は観測されずリスクであるとは言えないことが分かった。

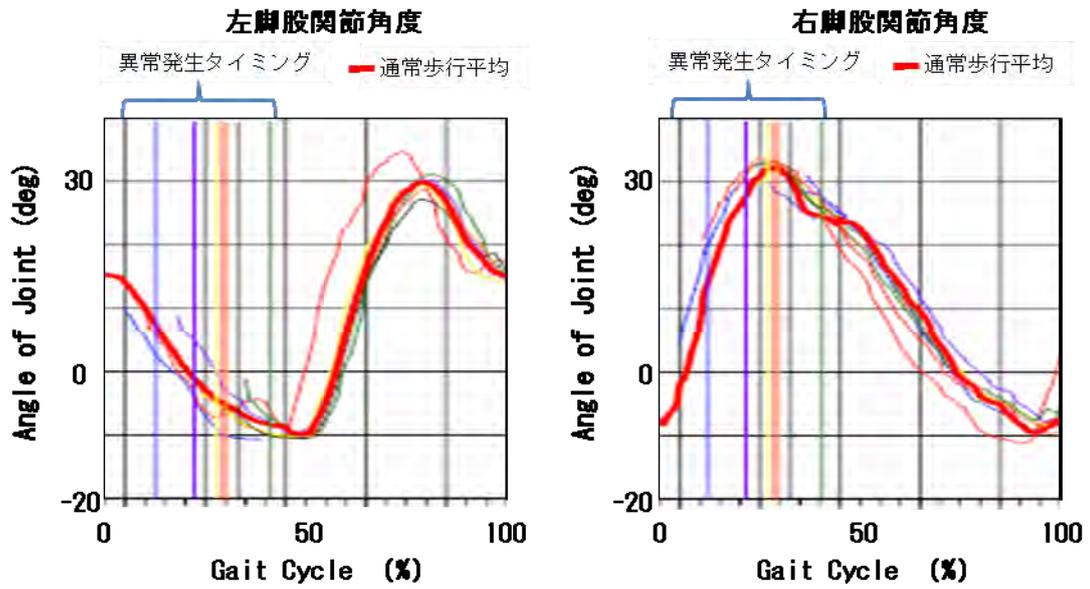


Figure 2.2-15 ケース (b) の股関節角度

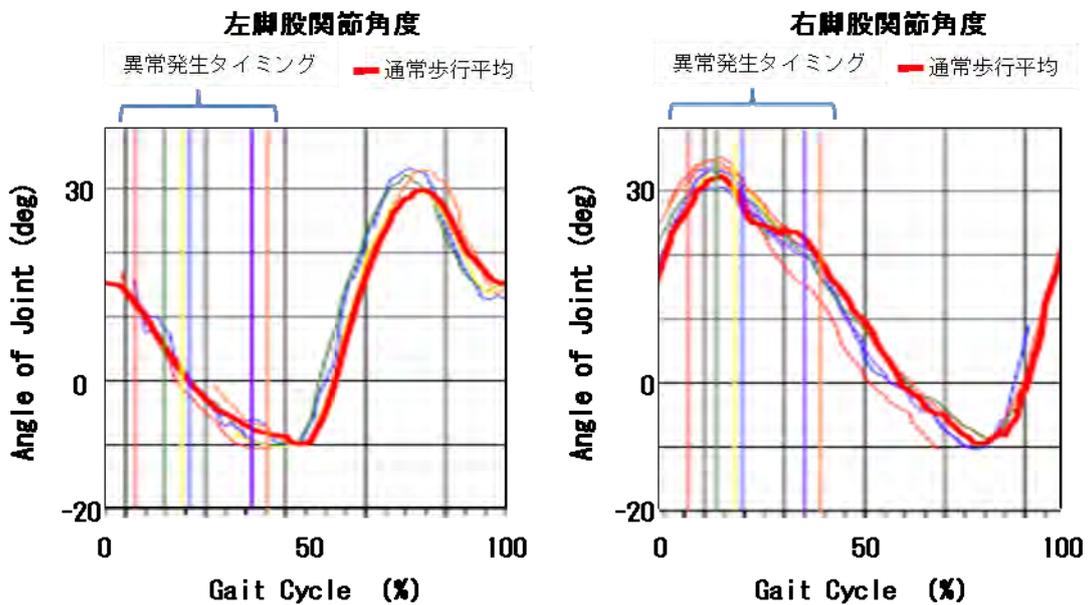


Figure 2.2-16 ケース (c) の股関節角度

(d) 可動軸のロック

アシストなしの状態（アシスト OFF）で被験者が 3 m を歩行する。カメラ前の計測エリア内をそのまま通過する場合と、PC から指令を与え可動軸をロックした場合の比較を行った。

3 名の被験者に対して実験を行った結果、歩行に変化は現われるが転倒に至る事象は起きなかった。可動軸はロックキーによって動きが固定されていることで股関節の動きが拘束され動けなくなるため、大きくバランスを崩すなどの事象を予測していたが、転倒につながるような大きなバランスの崩れはなく歩行を続けることができた。2 名はビデオ画像での歩行観察からも、明らかな歩行変化は見られないが、装着した機器の動きから稼働軸のロックが起きたタイミングは判別可能であった。1 名については上体姿勢が後傾することが見て取れ、何らかの異常が発生したことが観察からも判別可能であった。被験者 1 の股関節角度の変化を Figure 2.2-17 に示す。横軸はゲートサイクルで縦軸に股関節角度を示している。70%付近にある縦線は異常を起こしたタイミングを示し、太い赤線は通常歩行時の股関節角度平均値を示している。異常発生後の股関節角度に変化が見られるが、股関節の動きが完全には拘束されず動作が可能であったことが分かる。このため可動軸が回らなくなっても転倒に至らなかったものと推察される。

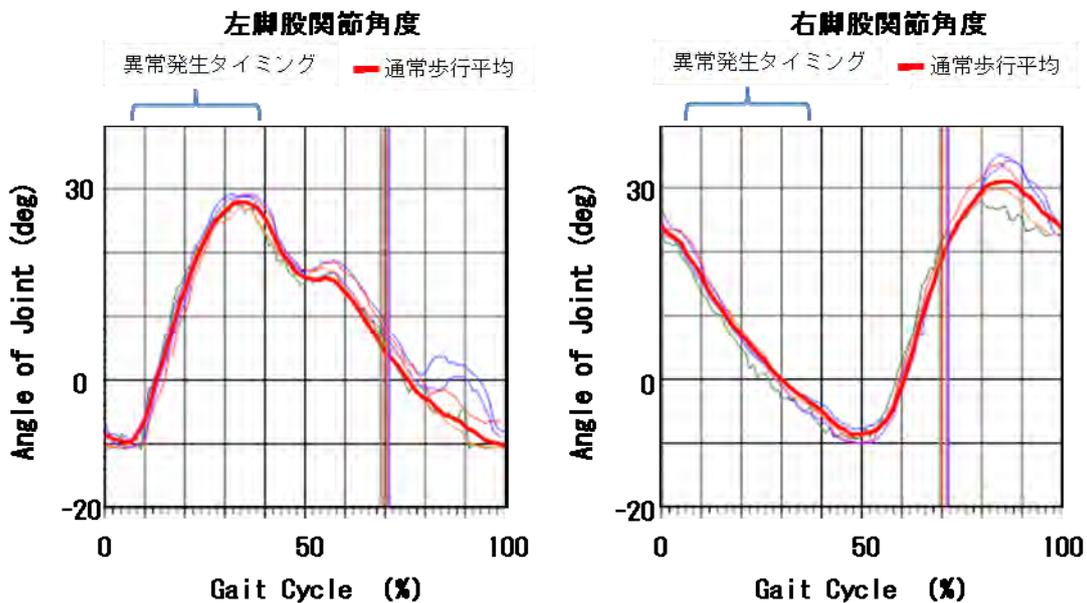


Figure 2.2-17 ケース (d) の股関節角度

さらに詳しい分析を行うため、床反力計と光学式 3 次元モーションキャプチャシステムを組み合わせた計測を研究者で行った。Figure 2.2-18 異常（ロック）発生時の可動軸と股関節角度を、Figure 2.2-19 に通常歩行時の可動軸と股関節の角度を示す。異常が起こった時から右側の可動軸はほとんど動いていない。股関節角度は最大角が 20 度減少しているが股関節の動作角が 20 度以上確保されていることが分

かる。また、左足の伸展角の拡大がみられることから上体を後ろに反らすことで歩幅を確保していることがうかがえる。歩行アシストは腰の部分にベルトで装着されているため、大腿フレームによって屈曲動作を拘束されると反力を腰フレームが受けて体に対する取り付け位置がずれる。これはベルトという柔軟性のある素材弾性と、人の体の持つ皮膚や皮下組織の弾性により起こるもので、ロックキーを解除した後はほぼ元の位置に復帰する。

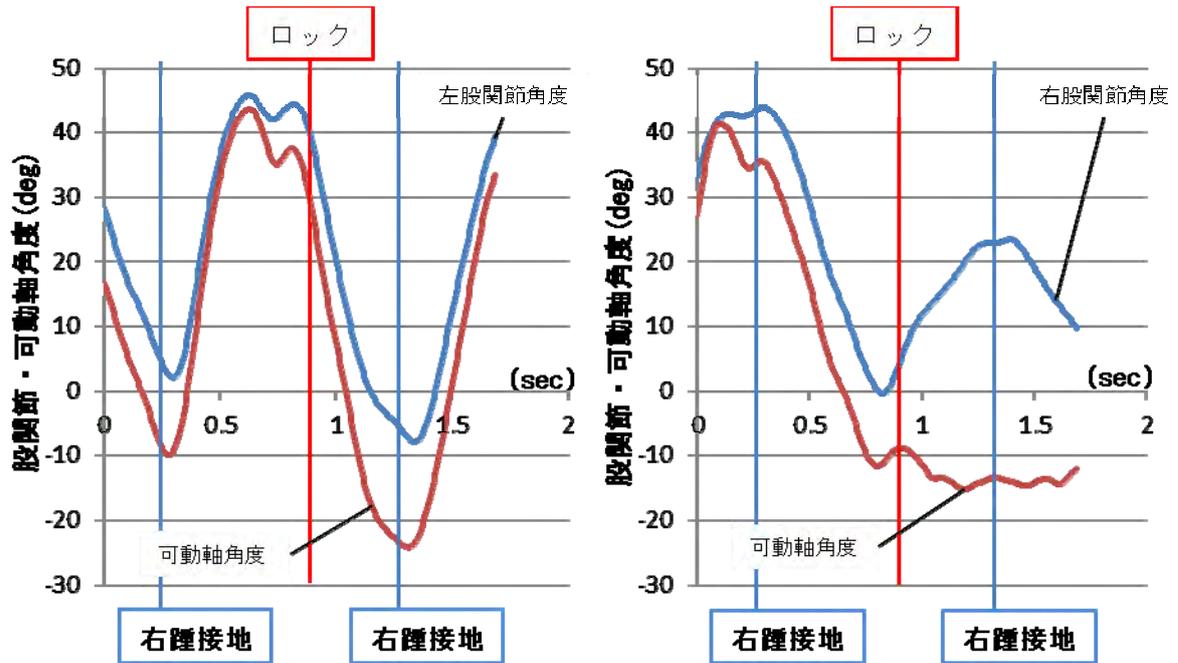


Figure 2.2-18 ロック発生時の股関節角度

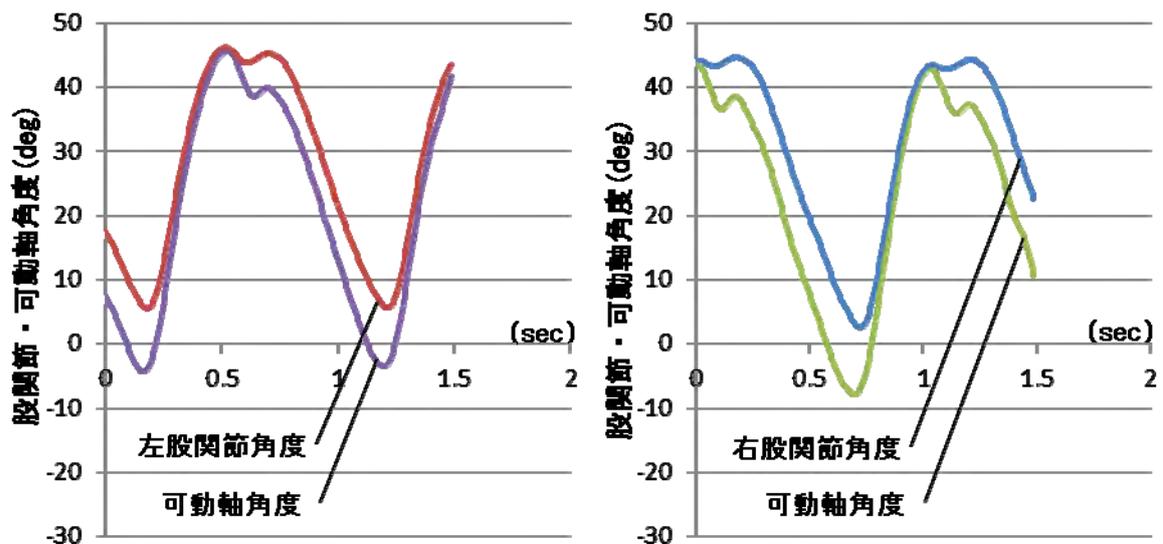


Figure 2.2-19 通常歩行時の股関節角度

この実験で使用した歩行アシストと可動軸をロックさせた位置を Figure 2.2-20 に示す。追加の実験ではロックするタイミングを変えて実験を行ったが (Table 2.2-5) 転倒に繋がるような大きくバランスを崩すタイミングは確認できなかった。



Figure 2.2-20 改造した歩行アシストとロック位置

Table 2.2-5 可動軸をロックさせた位置と回数

異常を発生させた脚	ロック位置	回数
左脚	伸展 15°	1
左脚	屈曲 15°	3
左脚	屈曲 30°	2
右脚	伸展 15°	2
右脚	正立 0°	4
右脚	屈曲 15°	1
右脚	屈曲 30°	1

ロック

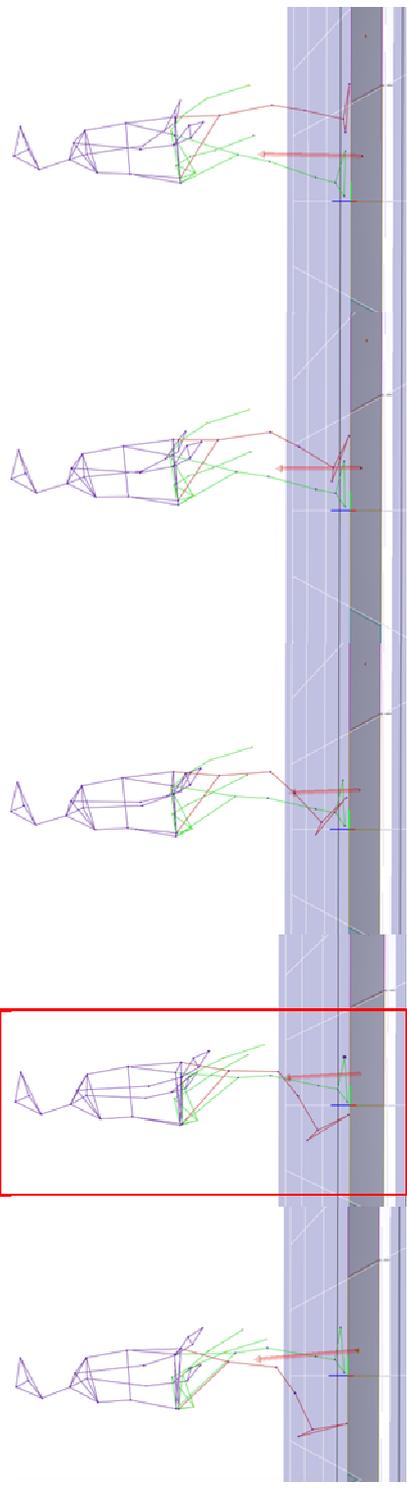


Figure 2.2-21 ロック発生時の

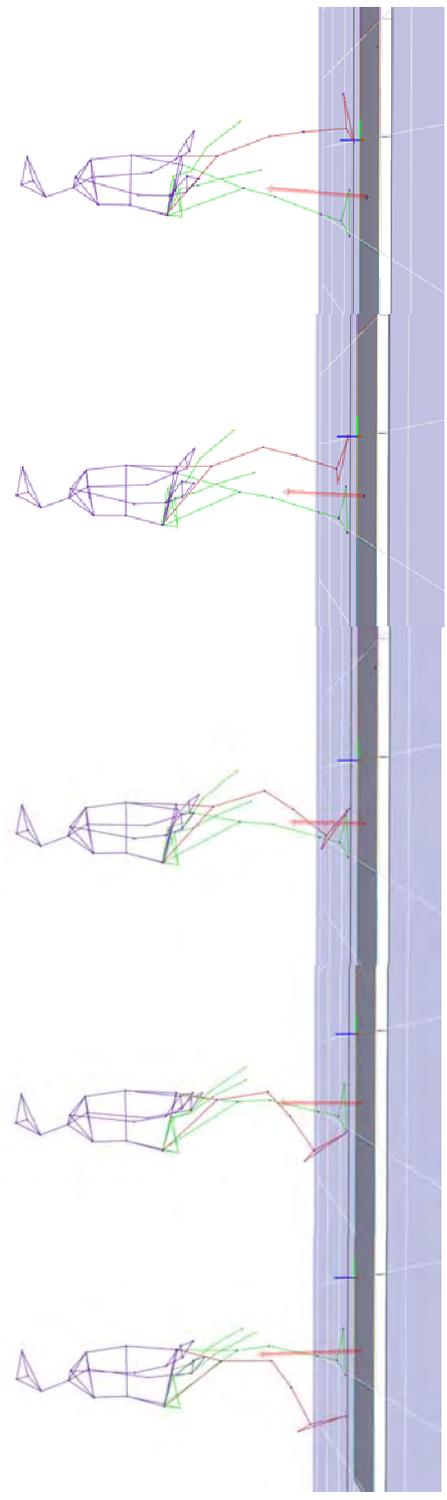


Figure 2.2-22 通常歩行時の

Figure 2.2-21、Figure 2.2-22 はモーションキャプチャのデータから Motion Analysis 社 Cortex 5.0.1 を用いて姿勢を表したスティック図で足部の矢印は床反力の向きと大きさを表している。通常歩行と屈曲 30° で異常（ロック）を発生させたケースである。異常発生以降を、通常歩行とロック有りで比較をすると、床反力ベクトルの向きが、ロック有りの方が直立しており、前方への加速成分が減少していることが分かる。不意の加速度成分の増加は、転倒にいたる可能性を高めると考えられるが、このケースではその逆の反応が観察された。

また、床反力の作用点（ベクトルと床面の交点）の位置に、急激な変動は見られないことから、バランスを調整するような反応が起きていないことも分かる。よって、ロック発生では、転倒にいたるようなバランスの崩れは発生していないと言えることが出来る。

後者についてはつまずきが脚の末端、爪先近傍の動きを止めるのに比較して、股関節を固定しても脚の持っている慣性はそのまま動き続けようとする。股関節は可動軸のロックによりある程度は拘束されるが、脚を前方に振り出す動きは慣性によって止まらず、大腿フレーム、腰フレームを介して上体を後傾させるモーメントとなる。逆側の脚には拘束がないため、伸展角が拡大し上体を後傾させることができる。これにより遊脚の股関節角が拘束されていても、脚を前方に着き歩幅が確保できるために大きくバランスを崩さないで済むと考えられる。

別のタイミングでロックしたケースとして屈曲 30° でロックした時の股関節角を Figure 2.2-23、正立 0° でロックした時の股関節角を Figure 2.2-24、比較として伸展 15° のケースも Figure 2.2-25 に示す。正立 0° 、伸展 15° では歩行はロック後も股関節が 20° 以上動作することが確認でき、同様な理由でバランスを崩さなかったと考えられる。

屈曲 30° の時はロックした右脚の可動角が 15° 程度となっているが、右脚伸展時に左脚の屈曲が広がっている。左右脚のはさみ角で見ると、どのケースも 30° 以上が確保できていることが分かる。特に屈曲時のロックはつまずきとは異なるケースで、屈曲した脚が伸展側で拘束されることになる。この場合は脚を前方に接地することができるので大きなバランス崩れは起こさないと考えられる。

Figure 2.2-26 にそれぞれのケースの歩行を表したスティック図を示す。最上段に異常を発生させなかった通常歩行を示している。縦線間は 0.1 秒で一コマが 0.2 秒ごとのピクチャとなっている。通常歩行と比較して床反力の向きや大きさに目立った差異はなく、バランスを崩さずに歩行できたことが読み取れる。

以上の結果から可動軸が回転しなくなった場合でも、つまずいた時のように大きくバランスを崩さない理由を考察すると、歩行アシストがベルトで人に装着されている点と、拘束されるのが片側の股関節である点が影響していると考えられる。前者はベルトや皮下組織の柔軟性によって股関節が完全には拘束されない事に依る。

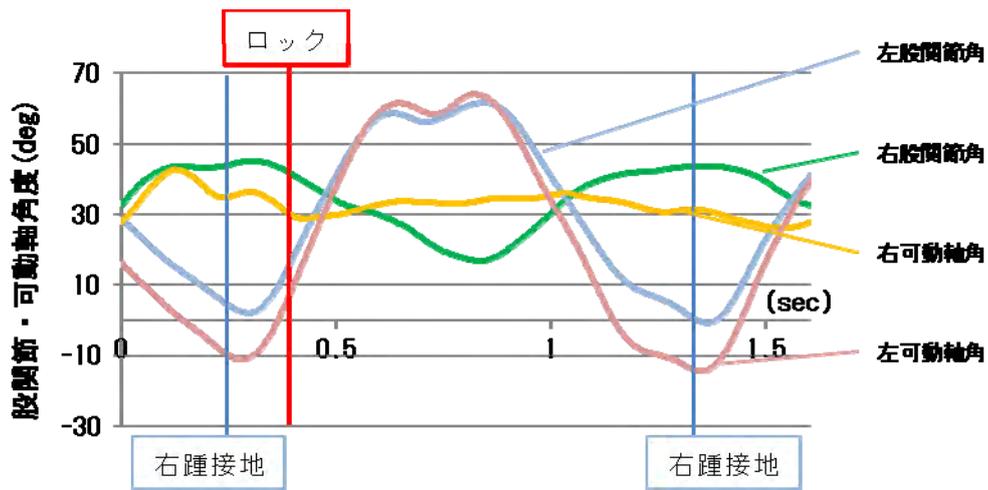


Figure 2.2-23 ロック位置屈曲 30° の股関節角度

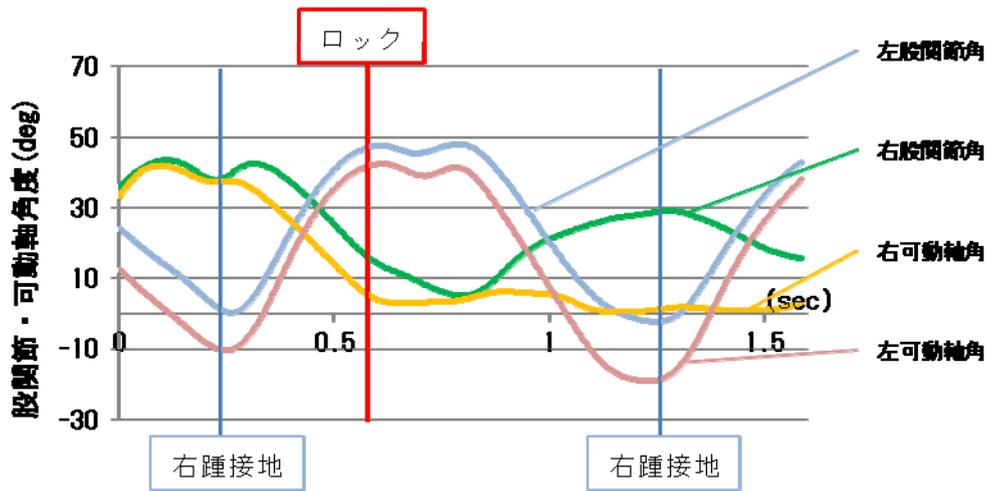


Figure 2.2-24 ロック位置正立 0° の股関節角度



Figure 2.2-25 ロック位置伸展 15° の股関節角度

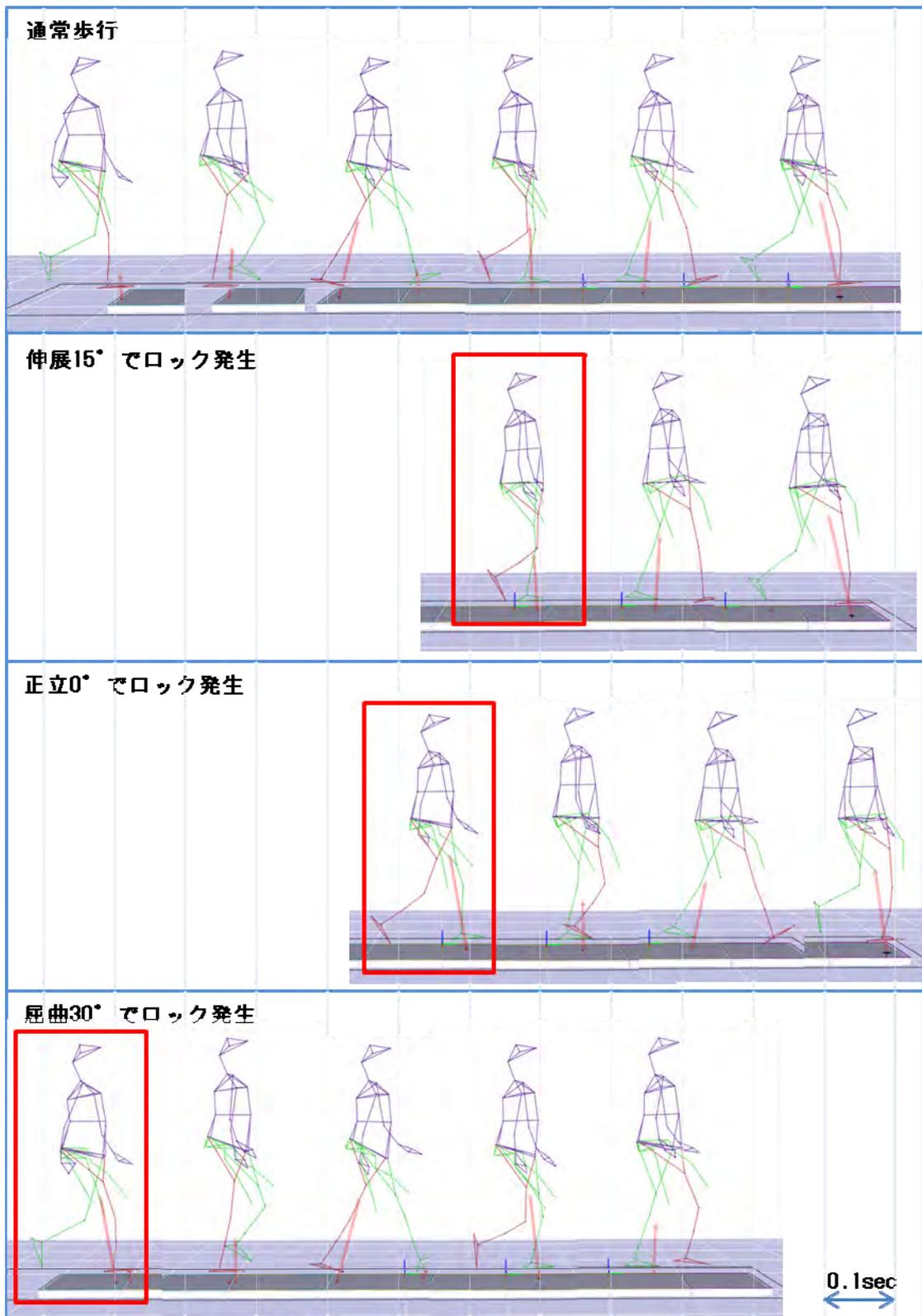


Figure 2.2-26 各ロック位置での歩容

被験者は 40 歳以下の若年～青年層であったが上記の考察に依れば、可動軸がロックした状態でも慣性により受動的に脚が振り出されるので筋力や反射が衰えていても脚の動きをある程度維持することができると考えられる。さらに岡田⁽⁷⁾が行った男性高齢者の歩行分析によると高齢者は若年層に比べ歩行速度が低く歩幅が少ないという結果が有意に出ている。歩行速度が低い点は慣性エネルギーが低く、異常が起こった場合にもバランスの崩れを起こしにくい方向である。可動軸がロックした場合も 20 度以上の股関節の可動角が記録されていることから、歩幅が狭い歩容は阻害される影響が相対的に小さいと考えられる。

本章では装置の異常が人に及ぼす影響の実験を行った。

- (a)アシストが無くなる、
- (b)アシストが大きくなる、
- (c)アシストタイミングがずれる、
- (d)可動軸が回らなくなる

の 4 項目のケースで転倒事象と転倒に繋がる大きなバランスの崩れは発生しなかった。この結果と運用のリスクアセスなどを総合的に見た結果、高齢者の運動教室での運用に耐える安全性を有していると判断した。

2. 3 安全技術を導入した歩行アシストの開発

歩行アシストの装着により転倒時のリスクが増加しないことや、装置の異常が人へ及ぼすリスクが許容可能であることが分かった。これらの安全評価は高齢者運動教室での運用を想定したリスクアセスメントから予想されたリスクであり、実環境での実証試験を行うことにより予期しなかったリスクが判明することが考えられる。市場での運用実績がある製品の場合には、過去の不具合や事故、ユーザーの誤使用など様々なデータが蓄積された結果に基づきリスクアセスメントを行うことができる。一方、本歩行アシストのような製品化されていない新しいジャンルの機器については実際に起きた不具合などの事例が少なく、リスクの洗い出しは多面的に行うことが必要である。限られた期間に比較的少数で行われる実証実験でリスク低減の方策を見出すためには、外部からの観察では判別できない不具合や、ヒューマンエラーなどを検出するために長時間の内部データを収集する必要がある。

装着型の生活支援ロボットは、人が装着して移動等を行うためにその大きさや重量に制約があり、検証用の記録装置を内蔵させることが難しい場合が多い。実環境での検証時に十分な内部データが記録できないために、不具合や誤使用が起きた場合に原因の究明が困難で十分なリスク対策ができない恐れがある。このような事態を回避するために、開発済みの機器に対して軽度のハード改修とソフトウェアの改修のみで付加できる安全検証用記録装置は、今後開発される様々な装着型生活支援ロボットにも適用できる安全技術である。

2. 3. 1 安全検証用記録モジュール

安全検証用として記録すべきデータは

- 1) 装着者の歩行状態を示すデータ
- 2) 歩行アシストの制御コンピュータ内部のデータ
- 3) トレーナーや装着者による事象の観察

である。1) は装着者の股関節の動きのことを示し、歩行アシストは装着者の股関節角度を股関節の回転中心に合わせて配置された股関節角度センサで読み取っている。通常歩行時の股関節角度データを時系列に示したイメージ図を **Figure 2.3-1** に示す。

縦軸は股関節の角度を示し直立時の姿勢を角度 **0** としている。脚を前に振り出す時を屈曲、脚を後ろに蹴り出す時を伸展とし左右それぞれの股関節の動きを示している。図の 1 サイクルは前方に振り出した右脚が降ろされて踵が接地 (**Heel Contact**: 図中の緑の円内) して立脚となった時から伸展して蹴り出し遊脚 (脚が接

地せず宙に浮いた状態) を経て再び立脚の状態なるまでを示している。

歩行距離や歩行速度の算出等を行う際には、股関節角度の他に脚長が必要である。しかし、機器の動作と歩行の状態を比較する場合には装着者が同一であるため相对比较が可能であり、脚長データは重要な値ではなく、股関節角度の値を歩幅の代用値とすることができる。同様に歩行速度についても1サイクルあたりの所要時間を比較することにより歩行速度の変化量を比較することができる。左右の股関節角を比較することで歩容の対称性や、つまずきなどによる外力の影響も推察することができる。また、立ち止まりや椅子に腰かけたなどの状態も歩行と区別することが可能である。

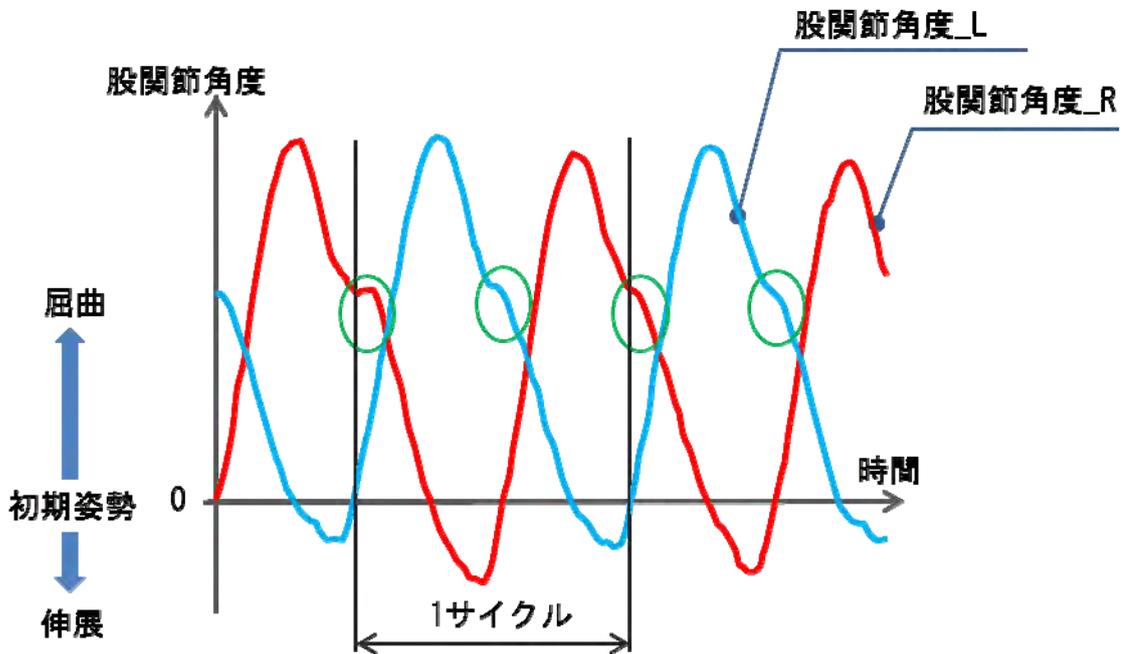


Figure 2.3-1 歩行時の股関節角の変化

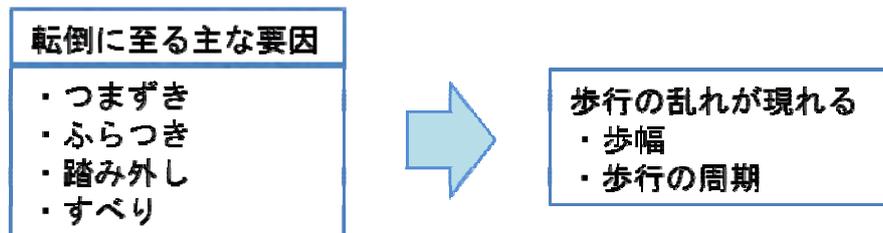


Figure 2.3-2 転倒に繋がる股関節角の変化

実装実験でのリスクでは転倒が最も大きなリスクである。転倒に至る要因は Figure 2.3-2 にある 4 つの要因が主だったものである。これらの事態が起こった場合には、歩幅や歩行の周期に乱れが現れる。つまずきを起こした場合を例にすると、つまずくのは遊脚の屈曲時であるため、屈曲フェーズにある脚の歩幅すなわち股関節角度が急に狭くなる事象が観測できるはずである。また、逆側の脚はバランスを保つために歩幅が大きくなるか、歩行の周期が急に早くなることから考えられる。転倒が起こった場合には、以上のように股関節の角度データを用いることにより歩行状態を判別することができる。

一方、2) の歩行アシストの内部データは主にアシスト力とステータスである。アシスト力はアクチュエータの出力トルクの形で表すことができる。アクチュエータが出力したトルクは、大腿フレームを介して先端部のパッドやベルトにより大腿に伝えられ、アシスト効果を得ることができる構造となっている。股関節角度と同様にアクチュエータの出力トルク値を時系列で表すことにより、歩行のどのタイミングでアシスト力を加え、その大きさや左右差などを知ることができる。アシスト力は腰フレームに内蔵された制御コンピュータが装着者の歩容に合わせて、歩幅や歩行周期を最適に調整するように決定している。そのため股関節角度データとアシスト力データを同一の時間軸で比較することにより、機器が正常に動作しているかを判別することができる。

また、ステータスデータはアシストの ON/OFF やフェイルステータス、さらに過度の衝撃を受けた場合の衝撃値記録などがあり、後から機器の状態を判別することができる。

転倒する事象が起きた場合には、1) のデータから分析された歩行の乱れと、アシスト力の関係から転倒が歩行アシストに起因する物か否かの解析ができると考える。

1) 及び 2) のデータと共に重要なのは 3) の観察データである。外部から見て、あるいは装着者どのように感じたのか、どのようなシチュエーションで起こった事態なのか把握できなければ分析すべき内容が不明となってしまう対策の要否すら決められなくなる。観察データはトレーナーや装着者が起こった事象を書き留めることで得ることができる。

上述の詳細データを全て記録するとデータ容量が膨大となり、大きな記録容量を必要とする。さらに歩行アシストの内部データを記録するために、歩行アシストのシステム側からデータを送信しなければならない。通信容量が膨大であると既存のシステムに機能的な障害を起し、実証実験ができなくなる。安全検証のためには検証する機器のシステム自体を大きく変更するわけにはいかないため、通信量を抑えることが必要であり、必要とするすべてのデータを記録するのではなく、通信データのシンプル化が課題であることが分かった。

安全検証用記録モジュールの機能概要を以下に示す。

【機能概要】

- ・安全検証用記録モジュールは、アシスト機使用時に常時装着、通信接続する。
- ・安全検証用記録モジュールは、アシスト機起動時に、日時、ユーザー情報、アシスト設定データを送信する。
- ・安全検証用記録モジュールのセレクト SW により、アシスト [強] [中] [弱] の調整が可能。
- ・アシスト機稼働中は、ユーザーの動作情報、異常発生情報などを、定期的なイベントデータとして安全検証用記録モジュールに送信し、安全検証用記録モジュール内蔵メモリに記録する。
- ・安全検証用記録モジュールをパーソナルコンピュータに接続し、アシスト機セットデータの初期化を行う。
- ・安全検証用記録モジュールをパーソナルコンピュータに接続し、記録データをパーソナルコンピュータに蓄積（ファイル生成）する。
- ・安全検証用記録モジュール単体は、内蔵バッテリーにより、リアルタイムクロック (RTCC) を常時稼働させる。
- ・アシスト機/PC 接続時は、接続先からの電源供給により、全回路が稼働する。
- ・アシスト機/PC に接続した時点で、安全検証用記録モジュールは Wakeup し、所定の機能を実行開始する。
- ・アシスト機/PC から接続解除となった時点で、安全検証用記録モジュールは Sleep 状態となり、RTCC の稼働のみ継続する。



Figure 2.3-3 安全検証用記録モジュール仕様の歩行アシスト

2. 3. 2 課題の解決手法

データをシンプル化するためには歩行状態を表す特徴点に絞り込むことが求められる。踵の接地時 (Heel Contact)、屈曲 (伸展) 時の股関節角度ピーク値、遊脚時間、左右の脚の交差時角度、股関節角度 0 の時刻、歩行周期など歩容を分析する点は多数存在するが、記録後のデータ分析により算出できる値は記録しないこととし (Figure 2.3-4)、最もシンプルなデータに絞り込むこととした。Figure 2.3-5 は歩行時の股関節角度のピーク値とその時刻を記録することで算出可能なデータを示したもので、①～⑩の値が算出可能であることが明らかである。一步毎に股関節角度のピーク値と時刻を記録すれば歩行状態を分析するためのデータが算出できるので、データをスリム化しても歩行状態を記録する目的が果たせることが分かった。

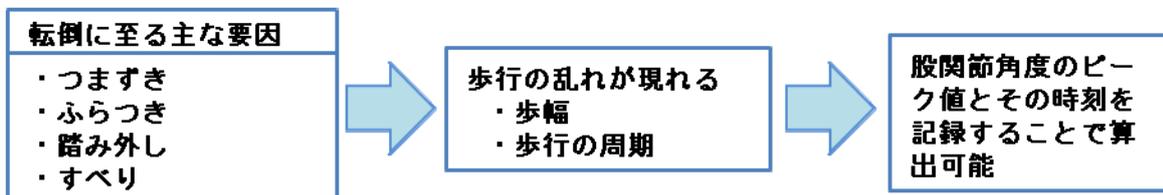


Figure 2.3-4 データのシンプル化

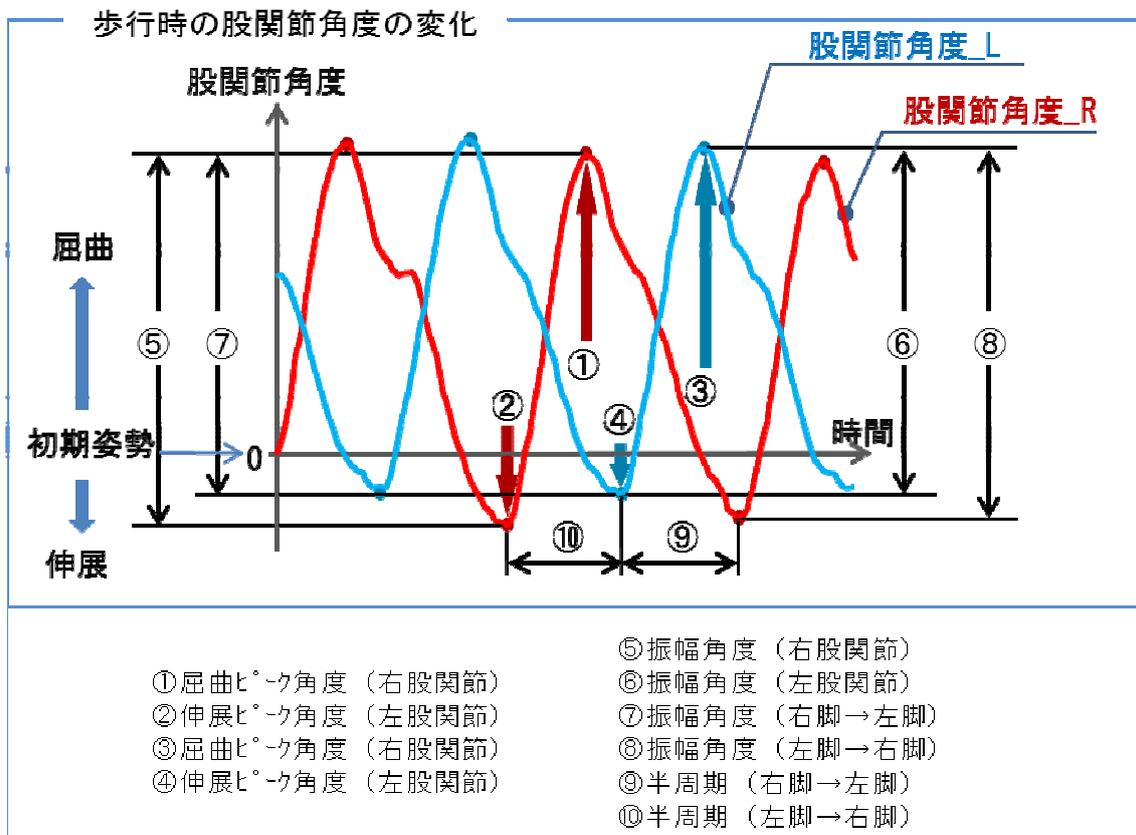


Figure 2.3-5 シンプル化したデータからの算出

2. 3. 3 安全技術を導入した歩行アシスト

データのシンプル化により構築した安全検証用記録モジュールとデータ解析用のソフトウェアにより構成した安全検証用データ解析システムをFigure 2.3-6に示す。2.5章に後述する実環境での実証実験に用いるため、開発した安全検証用記録モジュールを導入した歩行アシスト 45 台を製作した。

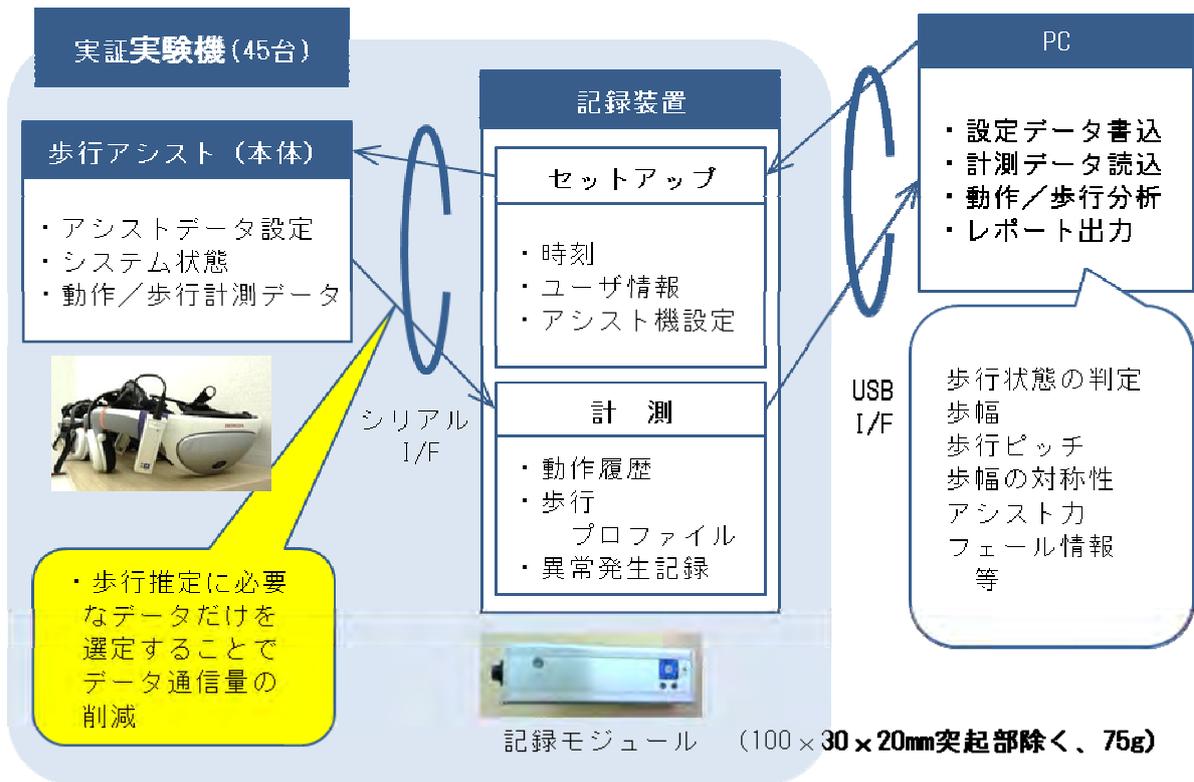


Figure 2.3-6 安全検証用データ解析システム

2. 3. 4 実証データ

記録したデータにより歩行状態を分析した結果をFigure 2.3-7に示す。遊歩道を歩行した際の歩行データを示したもので、歩行コースの途中でアシスト ON とアシスト OFF の両方の状態が含まれている。上段のグラフは横軸を歩数、縦軸を角度及びアシスト力を示している。左右の股関節角度は伸展時と屈曲時のピーク値を一步ごとに示している。アシスト力についても同様に一步毎のアクチュエータ出力トルクのピーク値を示している

図に示したアシスト ON 区間とアシスト OFF 区間はこのトルク値から判定が可能である。歩行の状態をより詳しく分析するために、アシスト ON/アシスト OFF の区間それぞれから 100 歩分の平均値として表したものが下部のグラフである。アシスト ON の時には左右の歩幅や周期において対称性が良くなっていることが分かり、シンプル化したデータから歩行状態の変化が解析可能であることが検証できた。

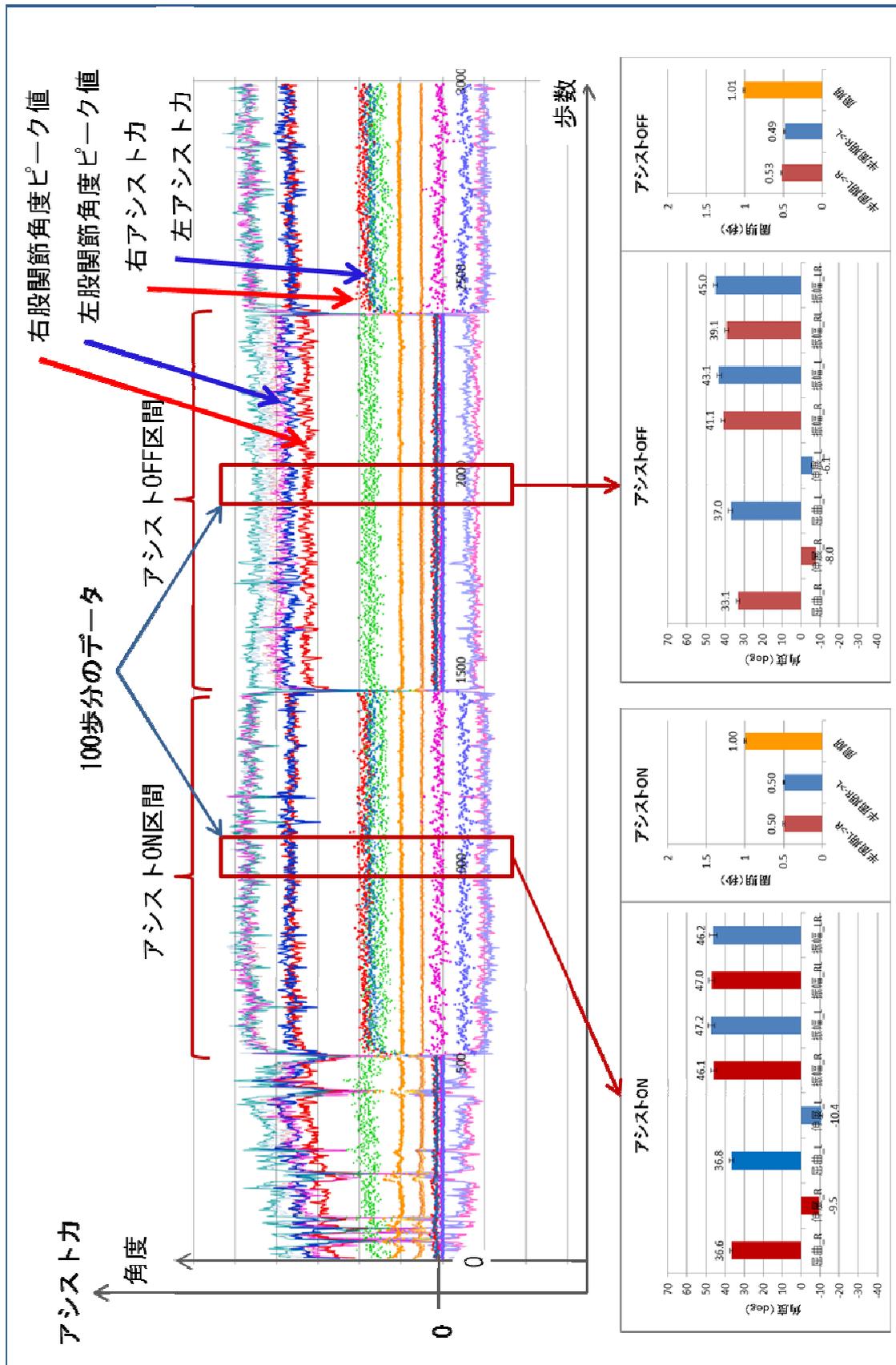


Figure 2.3-7 記録

実証データの 2 例目として「突然アシスト力が無くなった」事象の解析フローを Figure 2.3-8 に、記録データ分析結果を Figure 2.3-9 に、示す。

「突然アシスト力が無くなった」という事象に対し、装着者及びトレーナーのコメントからアシストが突然無くなったが、その後正常に動いていたことが分かる。アシストしなくなる事象としてはバッテリー切れや電装基板の故障などが考えられるが、記録モジュールのデータからモータ温度が通常よりも上昇したことを示すステータスが確認された。これはモータやハーネスなどの過熱保護機能ではなく、誤使用などによる通常とは異なる使用条件や、正しくアシスト力を発生していないことに対して設けられたフェールセーフ機能である。この機能が働いたため、制御コンピュータがモータへの動力供給を OFF にしたことがアシスト切れの直接原因であったことが分かる。Figure 2.3-9 の記録モジュールのデータを示したグラフは横軸に歩数、縦軸に一步毎の股関節角度やアシスト力が示されている。グラフからフェール発生の前にアシスト力の左右差が確認される。この左右差により、片側のモータにのみ大きめの電流が流れ続けていたために、通常よりもモータ温度が上昇しフェールセーフの閾値を超えたものであることが分かる。また、電源を入れ直した後からはアシストトルクの左右差が解消されているのでアシスト機自体の故障ではないことが確認できる。さらにフェール発生以前のアシスト力は、アシスト ON した時点から常にアシスト力の左右差が発生している点と、さらにそれ以前にはアシスト力の左右差がないことから、アシスト機の初期姿勢指定間違いが原因であることが判明した。歩行アシストの初期姿勢指定方法は電源投入時の姿勢が原点となるようにプログラムされており、使用手順として直立の姿勢を保ったまま電源を入れることが定められている。初期姿勢の指定を行うユーザーのオペレーションの誤りで、本来は脚をそろえた姿勢ではなく、左右の脚を開いた状態で電源を投入し、誤った位置を初期姿勢として歩行アシストに指定してしまったことが要因であることが判明した。

この結果から、初期姿勢の指定が「電源を入れる」という別の目的の動作と一緒にになっていることがユーザーの混乱を招きやすく、アシスト力がユーザー自身に不快感を与えるほど大きくないことが直ちに気づきにくくしていることが判明した。直ちに安全を害するものではないが、歩行アシストの効果を損なうものであるため対策を行った。初期姿勢指定の手順を見直し、ユーザーが意識して取り組むように初期姿勢指定のモードを追加することとし、運用などのソフト面だけではなく装置側で対策を行うことができた。

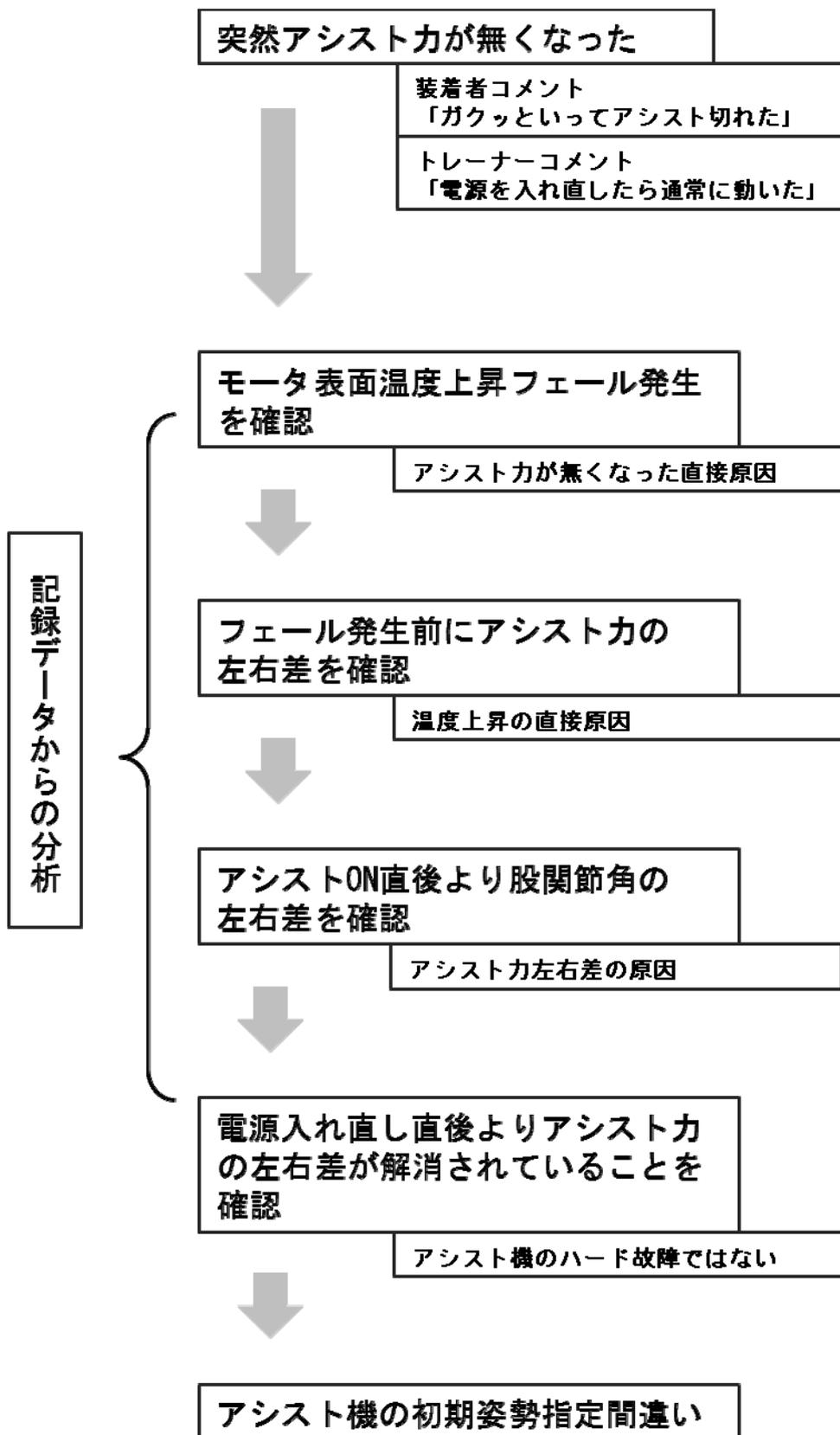


Figure 2.3-9 アシストオフ事象分析フロー

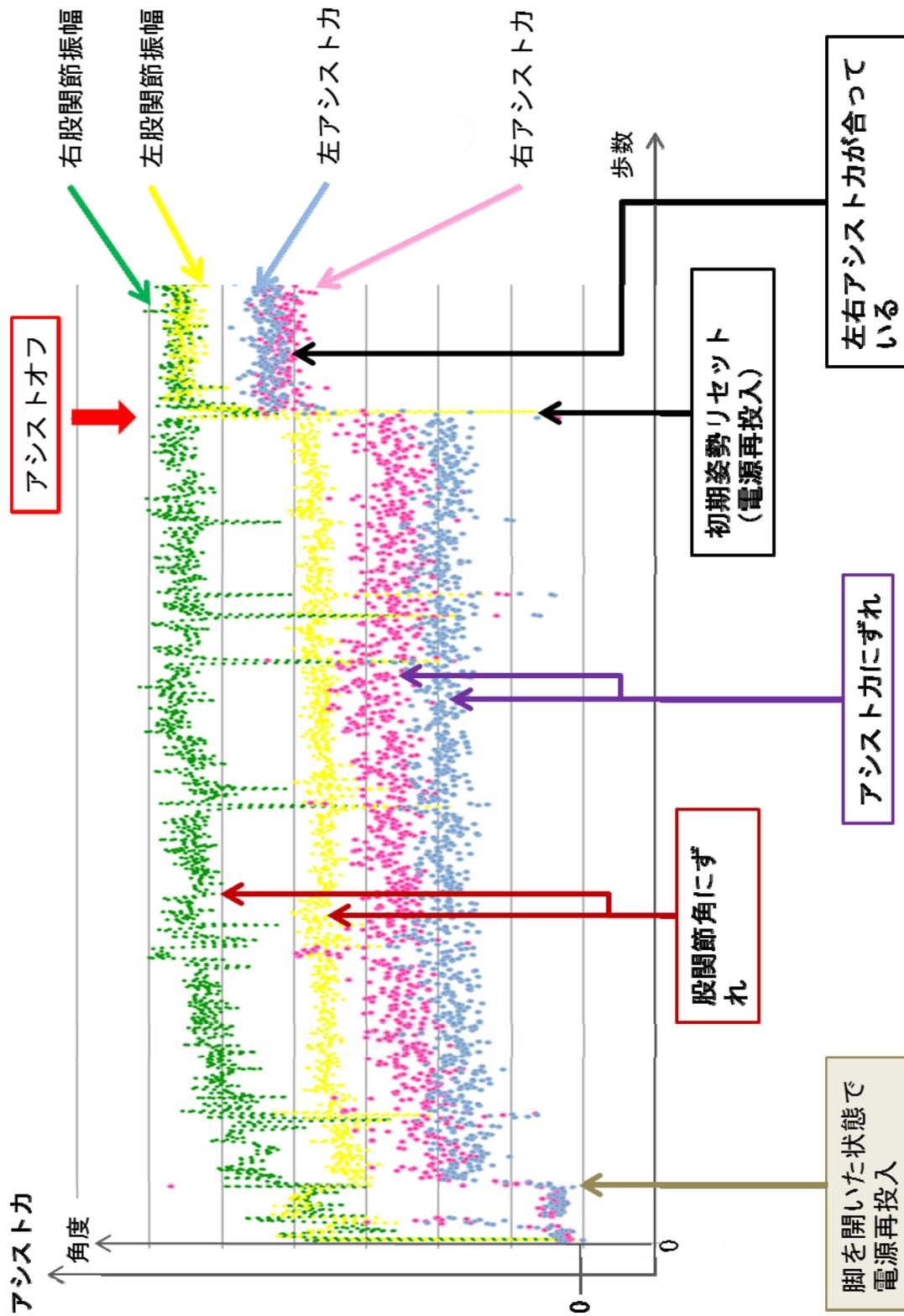


Figure 2.3-9 アシス

2. 4 安全検証試験

歩行アシストはパーソナルロボットの国際安全規格 **ISO13482** の認証プロセスのパイロットスタディーとして設計コンセプト認証を行っている。選定した安全性試験について述べる。

2. 4. 1 ISO13482 安全要求項目

歩行アシストのリスクアセスメントにより、転倒に繋がる事象について安全評価を行ってきた。転倒以外の安全にかかわる検証項目はパーソナルロボットの国際安全規格 **ISO13482** とその参照規格を用いることとした。**ISO13482** の「5 項. 安全要求事項と保護方策」は、それぞれ「本質安全設計」「安全防護策」「使用上の情報」に関しての手法と要求事項を示しており、その中から人間装着型生活支援ロボットに適用する要求事項を明らかにするため、各項目についての適用可否の確認を行い検証すべき試験項目を決定した。(Table 2.3-1)

Table 2.3-1 歩行アシストに適用する

ISO13482 「5 項. 安全要求事項と保護方策」 項目

試験項目		適用
耐環境性	耐環境性試験 (温湿度・振動)	○
	感電試験	
	放射温度測定試験	○
	騒音測定試験	○
耐荷重衝撃性	耐荷重試験	○
	耐衝撃試験	
安全性	走行安定性試験	
	静的安定性試験	
耐久性	走行耐久性試験	
	耐久性試験 (装着型)	○
	縁石落下耐久試験 (野外型が対象)	
制御性能	環境認識性能試験 (センサ単体を対象)	
	軌道追従安定性試験	
	障害物(移動・静止) 検知・対応試験	
	緊急停止性能試験	
対人安全性	衝突安全性試験	
	対人安全性接触安全性試験	
	操作・情報提示機能検証試験	
通信の信頼性	有線・無線通信に関する安全性・信頼性試験	○
機能安全性	機能安全性確認試験	

2. 4. 2 試験項目と試験結果

前章で適用とした安全検証試験のうち、有線・無線通信に関する安全性・信頼性試験方法についての詳細を示す。この試験は外部からの電磁妨害により歩行アシストが異常動作して人体に影響を及ぼすリスクがないことを検証するものである。

試験方法の策定及び計測については「生活支援ロボット実用化プロジェクト 研究開発項目① 生活支援ロボットの安全検証手法の研究開発」に参画している(独)労働安全衛生総合研究所と共同で行っており、実際の計測は生活支援ロボット安全検証センター行った。

有線・無線通信に関する安全性・信頼性試験の判定は電磁妨害下の歩行アシストの動作に異常がないことを目視にて観察するとともに、安全検証用記録モジュールに記録したデータを分析することで、アシストが誤動作していないことを確認することで行った。

IEC62061:2005Annex E を参照して決定したレベルを以下に示す。

- ・ 静電気放電(ESD) IEC61000-4-2
±2kV , ±4kV , ±8kV
- ・ 放射電磁界 IEC61000-4-3
20V/m(80 MHz～1GHz) , 6V/m (1.4GHz～2GHz) , 3V/m (2GHz～2.7GHz)
- ・ 電源周波数の磁界 IEC 61000-4-8
30A/m

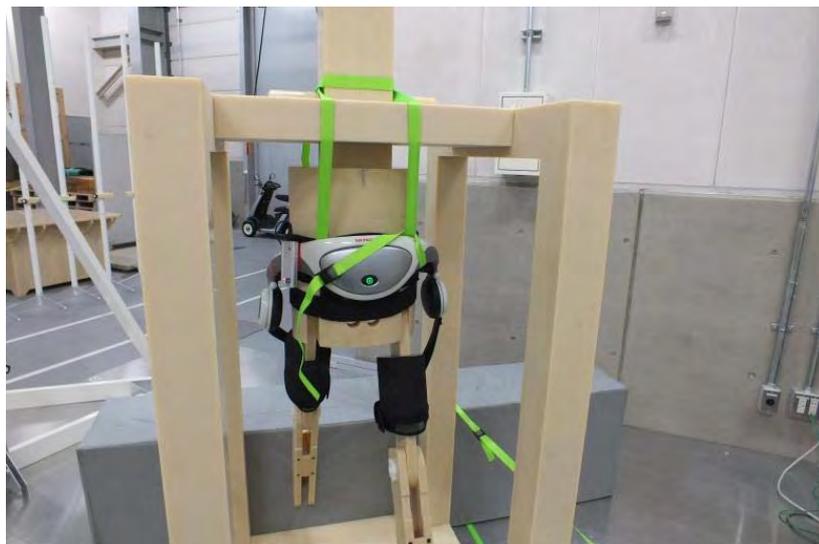


Figure 2.4-1 ダミーに装着した歩行アシスト

評価試験は歩行アシストを樹脂製のダミーに装着(Figure 2.4-1)し、メイン電源 ON での待機状態と、メイン電源 ON でアシスト機能を働かせ歩行動作継続中の 2 つ

の状態で行った。静電気放電試験は Figure 2.4-2 に示す 5 ポイント（気中放電）と垂直結合板（4 方向）印加を行った。本体は絶縁された構造のため気中放電で正負の印加を交互に行った。本体を計測する電位計は歩行動作中において+9kV 程度の帯電を測定したが、歩行アシストの誤動作は観察されなかった。また、安全検証用記録モジュールのデータ分析からも誤動作が無いことが確認された。

アシストスイッチ周辺（左右）



Figure 2.4-2 気中放電ポイント

放射電磁界試験はダミーごと電波暗室内に設置して規定の照射を行った。電源投入のみの状態ではどの照射条件でも誤動作は観察できなかった。メイン電源 ON でアシスト機能を働かせ歩行動作継続中の状態では 20V/m (80 MHz~1GHz) の条件の時にフェイルステータスを表示し動作が停止した。フェイルステータスは最低で 11.25V/m の出力で起こっており 10V/m は超えていることが分かった。この誤作動は動作停止となるため人体に影響を及ぼすリスクとはならない安全側での停止である。

電源周波数磁界試験は放射電磁界試験と同様に行い水平 2 方向、垂直 1 方向から電磁波を照射したが、何れの場合でも誤作動は観察されず安全検証用記録モジュールのデータ解析でも誤作動が無いことが確認された。

生活支援ロボット安全検証センターでは、有線・無線通信に関する安全性・信頼性試験の他、大型高温高湿室での温湿度サイクル試験や、パッシブ人型ダミーに装着しての動作耐久試験、放射温度試験を行った。歩行アシストで行った安全検証試験とその結果を Table 2.4-2 に示す。

これらの安全検証試験の結果、歩行アシストは実環境での実証試験で運用できるだけの安全性を備えていることが確認できた。

試験項目	試験内容	結果
耐環境性試験 (温湿度・振動)	最悪想定使用環境(温度、湿度、振動)下における機構部、電源部、動作機能の劣化を確認 高温(40°C,85%RH)⇒常温⇒高温⇒ 常温⇒低温(0°C)⇒常温	○ 試験前、試験途中、試験後で状態に変化なし
放射温度測定試験	満充電バッテリー稼働時間分の稼働を行った後、装置表面の温度を計測	○ 室温+10°C以内であり装着者への影響なし
騒音測定試験	動作中に騒音レベル(80dB(A)以下)であることを確認する	○
対荷重試験	通常使用状態で想定される静的荷重に対する機械的耐性と機能への影響を評価する	○ フレームの破壊試験を行い強度余裕を確認
耐久性試験(装着型)	長時間連続使用による耐久性を評価する	○ 200万歩(2年相当)の作動耐久で故障なし
有線・無線通信に関する安全性・信頼性試験	IEC62061:2005水準の電磁妨害印加テストを実施 静電気放電、放射電磁界、電源周波数の磁界	○ 目視・内部ログ解析より想定したリスクは発生せず

Table 2.4-2 実安全検証試験とその結果

2. 5 実証実験

2. 5. 1 実環境実証実験概要

生活支援ロボットの実用性、安全性の評価を行う上で、想定する環境、ユーザーなど、利用形態に則した実環境での評価実験は重要な位置づけとなる。本実験では独立行政法人国立長寿医療研究センターと共同で、愛知県大府市在住高齢者の中から虚弱リスクのある高齢者を募集し、歩行アシストを装着した運動介入効果検証を実施することとした。本プロジェクトでは、安全検証用記録モジュールを搭載した歩行アシスト 45 台を製作・提供することで、介護予防のための高齢者運動教室という実環境での機器の安全性の確認と事前のリスクアセスメントでは想定できなかったリスクの把握を目的とする。

実施期間は 2012 年 8 月末から翌年 5 月までの 9 か月間、11 月までは週 2 回、その後は週 1 回の、計 48 回を予定する。実験参加者の募集は、長寿研が大府市在住高齢者に対して実施した「脳とからだの健康チェック」という高齢者機能健診において、「体重減少」「疲労感」「身体活動」「握力」「歩行速度」の検査項目の 2 項目以上に「虚弱」リスク有と判定された高齢者を対象とした。

・虚弱高齢者

下記 5 項目のうち、2 つ以上の虚弱リスクを有する

- ①体重減少： この 2 年間で体重が 5%以上減少したか（はい）
- ②疲労感： 自分は活力が満ち溢れていると感じるか(いいえ)
- ③身体活動： 軽い運動、体操（していない） & 定期的な運動、スポーツ（していない）
- ④握力： 男性 26kg 未満、女性 17kg 未満
- ⑤歩行速度： 男性 1.0m/s 未満、女性 1.0m/s 未満

(Fried ら⁽⁸⁾の基準を一部改変)

ただし、次に該当するものは対象外とする

- a. 神経疾患（脳卒中、パーキンソン病など）
- b. 介護認定者
- c. うつ病
- d. 重度の視覚、聴覚障害
- e. 杖なしでの歩行が困難
- f. ペースメーカー着用
- g. 歩行速度 0.6m/s 以下、1.2m/s 以上

対象者の選定の結果、参加高齢者は男性 48 名、女性 30 名の計 78 名となった。年齢の割合と参加時の歩行体力を示す 6 分間の歩行距離をそれぞれ Figure 2.5-1、

Figure 2.5-2 に示す。

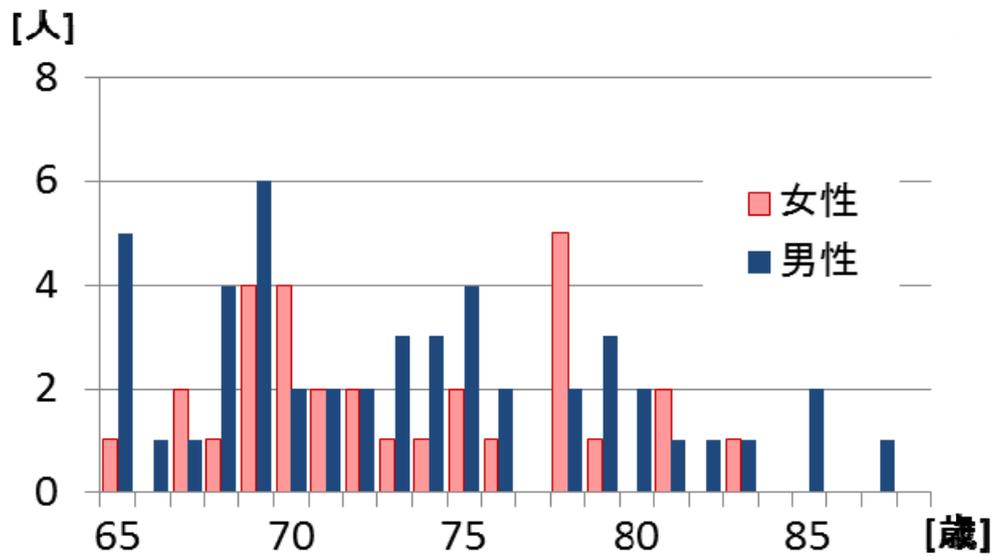


Figure 2.5-1 参加者の年齢構成

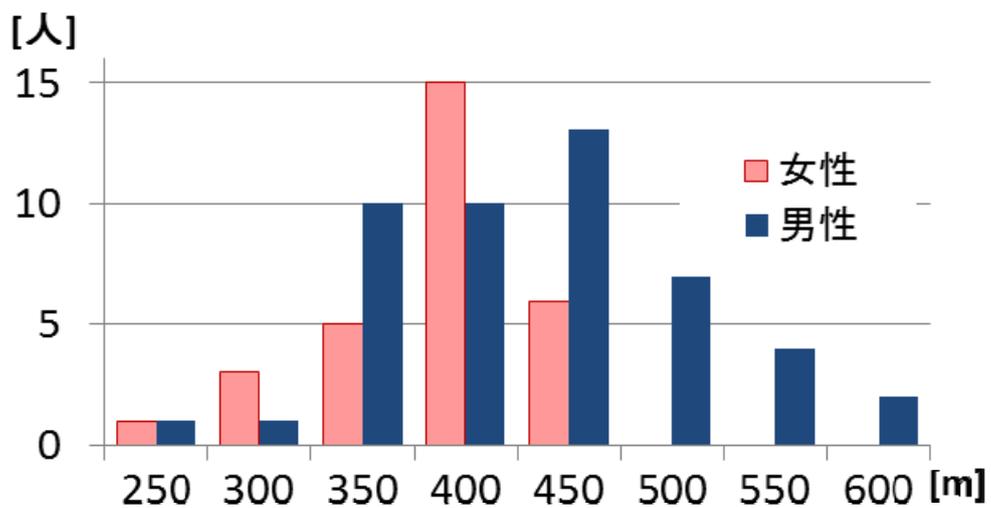


Figure 2.5-2 参加者の6分間歩行距離

実施形態としては、ショッピングモールの一角にスペースを設け、ここに1日3クラスに分けた高齢者が集合する。この場所で受付、準備運動などを行いアシスト機器を装着し、屋外の遊歩道まで移動し30～40分約5000歩の歩行訓練後、再びショッピングモールのスペースに戻り、整理体操などを行う、トータルで1.5時間程

度の活動を設定した。クラス別の参加人数を Table 2.5-1 に示す。各クラスにはトレーナーとして、理学療法士などの指導員 2～3 名、装着や誘導などのサポート要員 5～6 名を配置し、運動指導及び安全管理の体制としている。また Honda から機器の準備、計測対応として 1 名が参加している。

Table 2.5-1 運動教室のクラス

	アシスト機器利用群	アシスト機器利用群
期間	前半	後半
回数	週 2 回（月曜、木曜）	週 1 回（木曜）
拘束時間	90 分（歩行 60 分以下）	90 分（歩行 60 分以下）
クラス人数	30 名程度	30 名程度
運動教室 開催時間帯	10:00～11:30 13:00～14:30 15:00～16:30	10:00～11:30 13:00～14:30 15:00～16:30
スタッフ数	10 名	8 名

期間中 55 回の運動教室が開催され、延べ 2977 回の歩行アシスト使用実績が得られた。この期間中で機器が原因となる転倒や、怪我など装着者へダメージを与える事象は発生していない。

2. 5. 2 誤使用及び想定していない使用方法の事例

実証実験に先立って行ったリスクアセスメント(2. 1.2 参照)では、前提条件として運用におけるユーザーの誤使用を予測している。(Table 2.1-2)

当初の予測以外に考慮すべき事象の有無を検証するために、本実証実験では、運動教室で運用した際に発生した通常の想定と異なる事象について記録している。ユーザーの誤使用、機器や運用の不具合、設計時に想定していない使用方法など、人に対してダメージを与えるハザード源と直接つながらない事象も記録している。

記録した誤使用／不具合／想定外事象の要因が観察や当事者の証言から特定できない場合は、安全検証用記録モジュールのデータを用いて装置の状態や前後の歩行状態から分析を行い、歩行アシストに起因するか否かの判断を行った。Figure 2.5-3 に実施した日ごとの参加者と誤使用／不具合／想定外事象の件数を示している。運動教室開始当初に 5 件あった誤使用／不具合／想定外事象が一度観測されなくなるが、歩行訓練や機器の取り扱いになれる 1 か月後位から再び件数が増加している。

運動教室が終盤に入ると日に1、2件と前半に比べ件数は少なくなっている。

誤使用／不具合／想定外事象の詳細についてはTable 2.5-2～Table 2.5-8に示す。表中で示した分類番号は当初のリスクアセスで想定していた環境ハザード源と合理的に予見できる誤使用の他、新たにリスクとして考慮すべき内容を示している。番号と分類をTable 2.5-9に示す。それぞれの件数は誤使用／不具合／想定外事象の要因から重複してカウントしている。

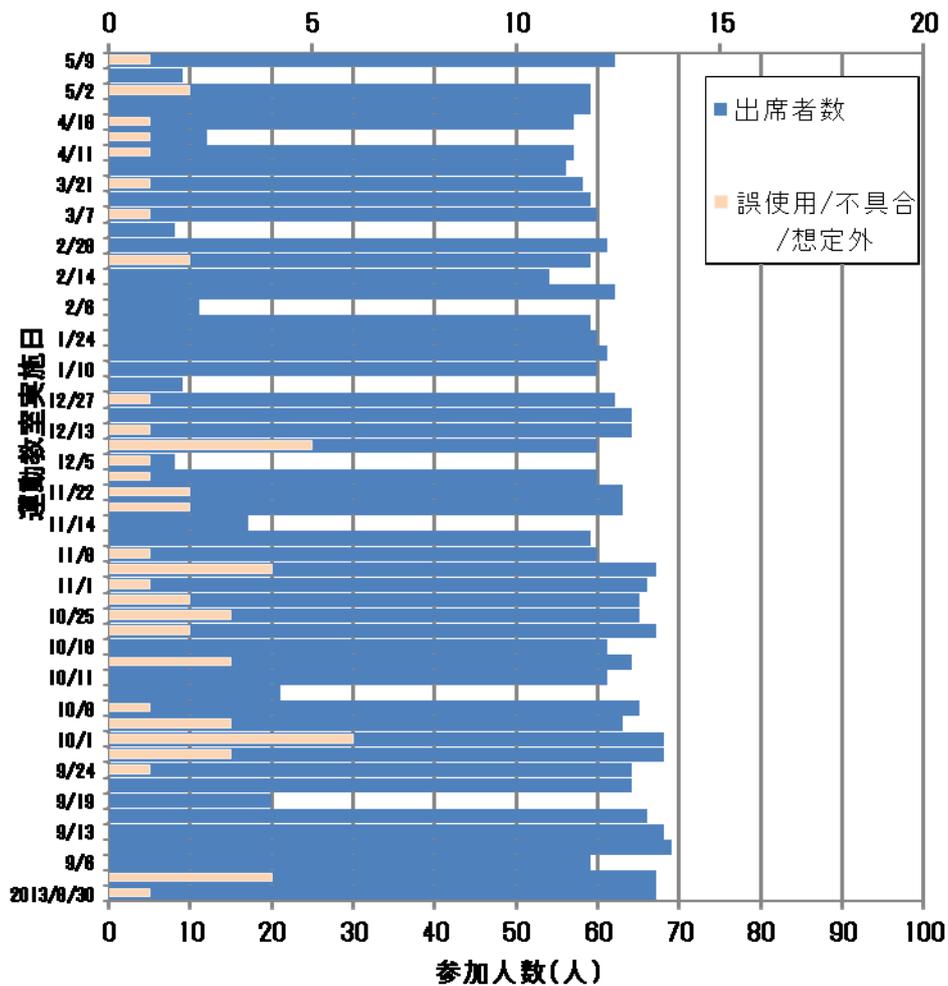


Figure 2.5-3 参加人数と誤使用／不具合／想定外件数

No.	発生日	誤使用／不具合／想定外事象	人へのダメージにつながる可能性を検討	要因	分類 No.
1	8/30 (木)	体型が細すぎ機器の装着フィット性が悪く機器の固定が不十分	—	機器がサポートしていない動作／使用方法	15
2	9/3 (月)	教室内コースで歩行中に、追越しのために外を大回りし、教室のドアの取っ手に機器をぶつけた。	○	歩行の仕方／歩行ルートが守られない	10
3	9/3 (月)	着席中に意図せず肘をアシスト SW に接触させ、アシスト ON したためにアシスト SW Fail が発生	—	通常の使用で起こりうる誤使用	13
4	9/3 (月)	教室内コース歩行時、歩行速度の遅い人を避けるために蛇行歩行する	○	歩行の仕方／歩行ルートが守られない	6
5	9/3 (月)	人のざわめき、BGM により、ブザー音に気付かない	—	環境条件の想定不足	15
6	9/24 (月)	想定と異なる姿勢で座ろうとしたらパッドがはずれた	—	機器がサポートしていない動作／使用方法	4
7	9/27 (木)	歩道からショートカットして段差のある車道に降りた。	○	歩行の仕方／歩行ルートが守られない	1 10
8	9/27 (木)	ショッピングモール駐車場の横断歩道脇のパイロンに足をぶつけた。	○	歩行の仕方／歩行ルートが守られない	10
9	9/27 (木)	屋外では LED (緑) が視認できず、アシスト ON/OFF の判別ができない	—	環境条件の想定不足	15

Table 2.5-2 実証実験における誤使用／不具合／想定外事象 (1/7)

No.	発生日	誤使用／不具合／想定外事象	人へのダメージにつながる可能性を検討	要因	分類 No.
10	10/1 (月)	エレベータに乗るために小走りになった	○	歩行の仕方／歩行ルートが守られない	6
11	10/1 (月)	疲労により足元がふらつく	○	歩行の仕方／歩行ルートが守られない	14
12	10/1 (月)	機器初期姿勢の指定間違いによるパッド外れ	—	装着方法／使用手順の誤り	9
13	10/1 (月)	一人で装着し、スタビライザを折り込んだままベルトを締め付け、腰に違和感	○	装着方法／使用手順の誤り	11
14	10/1 (月)	一人で装着し、腰ベルトのリング部分を本体フックに引掛けて装着していた	—	装着方法／使用手順の誤り	11
15	10/1 (月)	教室入り口に二人で並んで入ろうとしてモータを入りにぶつけた	○	歩行の仕方／歩行ルートが守られない	8 10
16	10/4 (木)	サイベルトをきつめに締め、座るとパッド外れる。	—	装着方法／使用手順の誤り	4
17	10/4 (木)	サイベルトをきつく締めようとしてパッドが外れた	—	装着方法／使用手順の誤り	4 11
18	10/4 (木)	腰ベルトのリング部分を本体フックに引掛けて装着していた	—	装着方法／使用手順の誤り	11

Table 2.5-3 実証実験における誤使用／不具合／想定外事象 (2/7)

No.	発生日	誤使用／不具合／想定外事象	人へのダメージにつながる可能性を検討	要因	分類 No.
19	10/8(月)	機器初期姿勢の指定間違いによるパッド外れ	-	装着方法／使用手順の誤り	9
20	10/15(月)	機器初期姿勢の指定間違いによるアシスト OFF	-	装着方法／使用手順の誤り	5 9
21	10/15(月)	機器初期姿勢の指定間違いによるアシスト過大	-	装着方法／使用手順の誤り	9
22	10/15(月)	外に出る時に、会場の出入り口にモータをぶつけた	○	歩行の仕方／歩行ルートが守られない	10
23	10/22(月)	装着者同士が歩行中に接触し、大腿フレームが本体から脱落、大腿フレームとパッドも外れた。事故の発生はなし。	○	歩行の仕方／歩行ルートが守られない	8
24	10/22(月)	アシストON時、長時間押し続けアシストSWフェイル発生	-	通常の使用で起こりうる誤使用	13
25	10/25(木)	腰ベルトのリング部分を本体フックに引掛けて装着する事例が複数(3件)発生	-	装着方法／使用手順の誤り	11
26	10/29(月)	遊歩道で風で帽子が飛ばされ、拾うために小走りになった。	○	歩行の仕方／歩行ルートが守られない	6
27	10/29(月)	遊歩道の車止めにモータを接触させた	○	歩行の仕方／歩行ルートが守られない	10

Table 2.5-4 実証実験における誤使用／不具合／想定外事象 (3/7)

No.	発生日	誤使用／不具合／想定外事象	人へのダメージにつながる可能性を検討	要因	分類 No.
28	11/1 (木)	機器初期姿勢の指定間違いによるアシスト OFF	—	装着方法／使用手順の誤り	9
29	11/5 (月)	着席中に意図せず肘をアシスト SW に接触させ、アシスト ON したためにアシスト SW Fail が発生	—	通常の使用で起こりうる誤使用	13
30	11/5 (月)	自動ドアにモータをぶつけた	○	歩行の仕方／歩行ルートが守られない	10
31	11/5 (月)	公園の休憩エリアの側溝に足をとられてふらついた	○	歩行の仕方／歩行ルートが守られない	1 7
32	11/5 (月)	腰ベルトのリング部分を本体フックに引掛けて装着。サイベルトのベルクロを外回りで留めていた。	—	装着方法／使用手順の誤り	11
33	11/8 (木)	アシストを脱ぐ時、電源はオン状態で腰ベルトをはずす (3 件)	○	装着方法／使用手順の誤り	12
34	11/15 (木)	アシストを装着していると、防寒コートの前が閉められない	—	機器がサポートしていない動作／使用方法	15
35	11/15 (木)	冬物になり、サイベルトが短く装着しづらい	—	機器がサポートしていない動作／使用方法	15
36	11/22 (木)	大腿フレームの取り付け不良	—	装着方法／使用手順の誤り	11

Table 2.5-5 実証実験における誤使用／不具合／想定外事象 (4/7)

No.	発生日	誤使用／不具合／想定外事象	人へのダメージにつながる可能性を検討	要因	分類 No.
37	11/22 (木)	アシスト機装着時に、背パッドが開いてしまい、そのままベルトを締めて、背パッドが脱落、ヒンジ破損	—	通常の使用で起こりうる誤使用	4
38	11/29(木)	機器を脱ぐときに誤って床に落下。左モーターランジにひび割れ発生。	—	装着方法／使用手順の誤り	4
39	12/5 (木)	着席中に意図せず肘をアシストSWに接触させ、アシストONしたためにアシストSWF ailが発生	—	通常の使用で起こりうる誤使用	13
40	12/6 (木)	遊歩道歩行中に転倒。前のグループに追いつこうとして足がもつれた。スタップが支えたが、支え切れずに路面に膝、手をつき、転倒。路面／機器の要因はなし。	○	歩行の仕方／歩行ルートが守られない	7
41	12/6 (木)	アシストSWをオフのまま遊歩道歩行。防寒着により目視しにくく、スタップ、本人の確認もれ。	—	装着方法／使用手順の誤り	3
42	12/6 (木)	外気温が低い(10℃程度)と大腿フレームのアルミパイプが非常に冷たくなる。	—	機器がサポートしていない動作／使用方法	15
43	12/6 (木)	サイベルトをはずすときに、フックをはずさずベルクロベルトをはずす	—	機器がサポートしていない動作／使用方法	15
44	12/6 (木)	高齢者には、フックをねじって外すということが身に付かない。	—	機器がサポートしていない動作／使用方法	15
45	12/6 (木)	腰囲大の人には、食い込んだメインベルトのフックのところが良く見えない。	—	機器がサポートしていない動作／使用方法	15

Table 2.5-6 実証実験における誤使用／不具合／想定外事象 (5/7)

No.	発生日	誤使用／不具合／想定外事象	人へのダメージにつながる可能性を検討	要因	分類 No.
46	12/13 (木)	アシスト機装着時に、背パッドが開いてしまい、そのままベルトを締めて、背パッドが脱落、ヒンジ破損	-	通常の使用で起こりうる誤使用	4
47	12/27 (木)	躓いて転倒しかかり、右サイベースはずれた。サイベース部に接触傷あり	○	歩行の仕方／歩行ルートが守られない	7
48	2/21 (木)	アシスト SW オンのまま大腿フレームのベルトをはずし、大腿フレームが暴れた	○	装着方法／使用手順の誤り	12
49	2/21 (木)	記録モジュールが腕を振るときにあたるので正しい位置に固定しなおした	○	装着方法／使用手順の誤り	11
50	3/7 (木)	機器初期姿勢の指定間違いによるパッド外れ	-	装着方法／使用手順の誤り	4 9
51	3/21 (木)	途中で電源が入っていないことに気付いた。電源入れ直して歩行継続。	-	装着方法／使用手順の誤り	3
52	4/11 (木)	着席中に意図せず肘をアシスト SW に接触させ、アシスト ON したためアシスト SW Fail が発生	-	通常の使用で起こりうる誤使用	13
53	4/17 (水)	機器初期姿勢の指定間違いによるパッド外れ	-	装着方法／使用手順の誤り	4 9
54	4/18 (木)	着席中に意図せず肘をアシスト SW に接触させ、アシスト ON したためアシスト SW Fail が発生	-	通常の使用で起こりうる誤使用	13

Table 2.5-7 実証実験における誤使用／不具合／想定外事象 (6/7)

No.	発生日	誤使用／不具合／想定外事象	人へのダメージにつながる可能性を検討	要因	分類 No.
55	5/2 (木)	集合場所の木の根に足を引掛けつんのめってしまった	○	歩行の仕方／歩行ルートが守られない	7
56	5/2 (木)	腰ベルトのリング部分を本体フックに引掛けて装着していた	—	装着方法／使用手順の誤り	11
57	5/9(木)	背パッドヒンジ破損→終了時機器を床面に置く時に背パッドが開きヒンジ部を床面に衝突した模様	—	通常の使用で起こりうる誤使用	4

Table 2.5-8 実証実験における誤使用／不具合／想定外事象 (7/7)

“分類1：歩行者通路上以外の歩行”では定められた歩行訓練コースの曲がり角をショートカットして段差を降りた事象と休憩の為に公園に立ち寄った事例があった。

“分類2：サイズの異なった機器の装着”はトレーナーの管理が行渡っており発生はなかった。

“分類3：アシスト（電源）を起動しない状態での歩行”はアクチュエータが駆動できないため安全側での誤使用であるが、2件起きておりアシストスイッチまたは電源スイッチの入れ忘れが原因となっている。

“分類4：装着した機器の脱落（離脱）”歩行アシスト本体を落下させる事象が1件起きている。アクチュエータ近傍のフレームにひびが入り機器自体は故障したが部品の飛散や発煙発火などの事象は起きていない。件数の殆どが大腿フレーム先端のパッドの離脱であった。パッド自体は一定以上の力が加われば外れる構造となっているため特に故障に至る事象ではない。

“分類5：歩行中のアシストのOFF”は2.3.4章で述べたフェールセーフ発生の際に起きている。アシストが無くなるためハザード源には当たらない。

“分類6：屈伸などの歩行以外の動作”風に飛ばされた帽子を拾おうとして小走りになったなど、つい行ってしまう行動が現われた。歩行アシストとは直接関係のない要因で起こる事象であるが、人の特性として予見しておく事柄と言える。

“分類7：歩行中の転倒（つまずき）”については4件発生している。いずれも装着者自身のつまずきや、足のもつれなどが要因で、歩行アシストとは無関係に発生した事象であった。1件については怪我などのダメージはないが転倒に至っている。前方のグループに追いつこうとして速度を上げようとしたときに足がもつれたことが要因となっている。他に、つまずいて街路樹にしがみつき転倒には至らなかったケースがあった。このケースでもアシスト機は正常に動作していたが、前傾してかなり速い速度で歩行していたためにつまずいた際に体勢を立て直せなかったことが要因であると考えられる。

“分類8：他の歩行者との衝突”2件発生し、怪我や転倒には至らなかった。1件は狭い入口に対して二人で並んで入ろうとしたことが要因。

“分類9：間違った設定によるアシスト”機器立ち上げの際に行う初期姿勢の指定の手順を誤っていることで、正立時の姿勢と異なる値で機器が初期化されたためにアシスト過大などが起こっている。アシスト効果は不良となるがバランスを崩すことや転倒に至る事象は起きていない。機器の扱いに慣れてきた1か月後に多く起きている。

“分類10：建物や障害物への衝突”事前のリスクアセスで階段やエスカレータは歩行コースに含めないなど歩行訓練コースの設定に配慮はなされていたが、コースからの逸脱などもあり7件発生している。

“分類11：誤った装着（サイズ以外）”腰フレームを装着する際に用いる腰ベルトの端部に取り付けられている指を入れて引っ張るためのリングを誤って本体フックに掛けてしまう事象が多く発生した。その他にも既定の装着方法と異なる例が発

生している。

“分類 1 2：非装着時のアシスト起動”装着前に起動するケースは無かったが、歩行アシストを脱装する際にアシスト ON のまま行った例が 1 件発生した。大腿フレームのベルトを先に外した場合には動き出してしまうことがあり、注意をしなければならない事象である。他にこの事象に繋がる可能性が高いアシストは OFF だが電源が切られていないケースが 3 件確認されているため合わせて 4 件のカウントとした。

“分類 1 3：通常の使用で起こりうる誤使用”ハザードにはつながらないと考えるが予測していなかった誤使用としてアシストスイッチの誤操作が 6 件起きている。アシストスイッチは腰フレーム先端の上側に配置されているため、椅子に座って休憩をとっている際に肘を掛けてしまい無意識にスイッチ操作を行ってしまうことが要因である。スイッチは故障検知としてフェールセーフが組み込まれているため、休憩中にエラーとなる事態が発生した。

“分類 1 4：装着者の疲労”歩行訓練を頑張ってしまう疲れて足元がふらつく事象が 1 件発生した。運動が目的であるために疲労した場合はいつでも休憩できる配慮がなされているが、本人の自覚とのギャップがあると考えられる。

“分類 1 5：機器が考慮していない動作／使用方法”運動時でのコート着用など機器の想定範囲外の使用方法があった。直接ハザードとなる事象ではないが、使用者のニーズを捕えるうえでは有益な情報である

これら誤使用／不具合／想定外事象のうち人へのダメージにつながる可能性を検討すべき事象として 20 件を選定した。殆どが歩行の仕方／歩行ルートが守られないことが要因である。つまずきや足のもつれなど歩行者自身の動作が要因で転倒につながる恐れのある事象など、機器側では対策のできない内容であり、運動教室などでは運用面でのリスクアセスメントが重要であると考え。他の要因は装着方法や使用手順の誤りであり、マニュアル等への掲載や、合理的な範囲でのリスク低減を検討するためにリスクアセスメントでの検討項目に加えることが必要と考える。

Table 2.5-9 誤使用／不具合／想定外事象分類と件数

	分類 NO.	分類	件数
事前に予測した 合理的に予見可能な 誤使用	1	歩行者通路上以外の歩行	2
	2	サイズの異なった機器の装着	0
	3	アシスト（電源）を起動しない状態での歩行	2
	4	装着した機器の脱落（離脱）	9
	5	歩行中のアシストの OFF	1
	6	屈伸などの歩行以外の動作	3
	7	歩行中の転倒（つまずき）	4
	8	他の歩行者との衝突	2
	9	間違った設定によるアシスト	6
事前に予測した 環境ハザード	10	自動ドアでの出入り	1
		階段昇降	0
		エスカレータ移乗	0
		歩道－道路との段差	1
		車止め間の狭路通過	2
		ドア/入口の出入り	3
予測していなかった 誤使用	11	誤った装着（サイズ以外）	11
	12	非装着時のアシスト起動	4
	13	通常の使用で起こりうる誤使用	6
	14	装着者の疲労	9
	15	機器が考慮していない動作／使用方法	1

2. 5. 3 介護施設での実証実験

高齢者運動教室での実証実験終了後に異なる環境での運用実績と安全性の検証を行うために通所型介護施設での実証実験も実施した。介護施設での実証実験は先進的自立支援機器を用いた介護予防の効果検証として、運動教室での実証実験を行った独立行政法人国立長寿医療研究センターが主体で行った。本プロジェクトは運用所上の課題やリスクの有無を確認することを目的とし、歩行アシスト 20 台を提供した。対象者は通所介護サービスを利用する要支援 1~2、あるいは要介護 1~2 に該当する者で、重篤・不安定な疾病を有する、著しい認知機能障害を有する、歩行が著しく困難であるなどの他、担当理学療法士、作業療法士が不適格と認めた者は除外している。

実験に先立ち個別の施設において運用のリスクアセスを行った。一部の例を Table 2.5-10 に示した。歩行訓練のプログラムは歩行能力によってはリハビリテーション施設での運用と同様にマンツーマンでの付き添いの上歩行訓練を行うなど、施設環境、対象者の身体能力などによって個別に設定されているため、ここでは各施設で共通に行われた内容についてのみ示した。

実証実験は 10 箇所の介護施設で計 72 名の対象者を選定し、2013 年 9 月末から 2014 年 2 月末の期間に行われた。訓練プログラムは個別に設定されているが、1 回の歩行訓練は平均で約 17 分（約 1700 歩）であり、期間中延べ 1137 回の運用実績を得ることができた。実証実験では転倒や、怪我などの人へのダメージを与える事象は発生しなかった。また、歩行者のもともとの身体能力差によりふらつきやつまずきが観測されたが理学療法士、作業療法士の付き添いで行われたため危険な事象には繋がらなかった。機器側の課題としてはデータ記録のユーザーインターフェースやマニュアルに取り扱いが分かりづらい点があるなど、ユーザビリティについての項目が確認されたが、安全にかかわる故障などは起きなかった。

Table 2.5-10 リスクと対策方法

No.	内容	対策方法
1	荷物受け取り・発送場所と保管場所の間の移動障害	荷物受け取り/発送は 1F の受付にて行い、ケースのまま運搬。自動ドアを通過し、保管場所のスタッフルームまでは段差無し。 経路の通路幅は余裕があり障害の影響を回避できる。 保管場所はスタッフルーム内で障害とならないデスク脇とする。

2	保管場所からの盗難 および機材の無断使用	保管場所はスタッフルーム内とする。 スタッフルームの出入りは、常時スタッフが監視できる状態にあり、夜間は施錠される。
3	保管場所における作業に伴う傷害の発生	保管場所で、保管ケースからの部品取り出し作業を行う。 保管場所は人通りの少ない部屋の奥であり、平らでケースを広げられるくらいのスペースがあるため、つまずき等は発生しにくい。
4	保管場所における機材の故障	保管場所は、施設内であり、熱や水による機材への悪影響はない。
5	運搬手段の転倒	機材のみを手で直接持って装着場所まで移動する。 移動経路に物を置かない
6	運搬手段による傷害	機材本体は滑らない位置で、片手でしっかりと握る。片手で不安定な場合は両手で持ち、落下等に注意する
7	保管・収納・装着場所の間の移動障害	保管場所・装着場所は同一フロアで段差なし。 運搬時の通路幅は、余裕があり障害は排除する。 保管場所で機材のみを持ち運び、ケースは保管場所に置いておく。
8	装着場所での転倒	装着場所は、ベンチ（畳プラットフォーム）での装着を基本とする。椅子を使う場合は、肘掛けの無いものまたはソファを使う
9	装着に伴う立ち座りでの転倒	装着場所となるベンチには十分な広さがある。理学療法士が必ずサポートにつく
10	歩行練習に伴う傷害の発生	通常リハビリで使用する経路「病棟通路歩行」で歩行訓練を行う。接触のリスクについては予め説明を行い、他の部屋の出入り口など衝突の可能性がある場所については、出入り口より 2m 程度離れた場所を歩行する。通行人はサポートする理学療法士およびスタッフがチェック。 施設の外で使う場合は段差が無く、人通り車通りの少ない施設周囲のみとする
11	歩行中の転倒	練習中は常時理学療法士の立会いの下で行う。 必要な補助具を使用する。 階段は存在しない。万が一階段歩行をする際は歩行アシストのアシスト SW を OFF とする。

12	休憩場所での転倒	安定したイス、ソファーやプラットフォームを使用する。 背もたれの無いイスは使用しない。 椅子は肘掛けのないタイプを使用する。
13	充電機警告の不達	スタッフルームにて充電する。業務中はスタッフが常駐し、常にスタッフの出入りがある。 警告に気がついたスタッフが直ちに管理担当者へ連絡できるように連絡先の掲示を行う。
14	監督者のリスク不知	歩行アシストの使用に関して係わる理学療法士は、使用前講習を受ける。

2. 5. 4 実証実験のまとめ

高齢者運動教室および通所型介護施設における2件の実証実験を通し延べ4100回の歩行訓練を行ったが、歩行アシストに起因する転倒や怪我など使用者へダメージを与える事象は起こらなかったことが確認された。歩行アシストについて行ってきた安全評価の妥当性を示す1つの結果であると考え。また、誤使用／不具合／想定外事象からはリスクアセスメント時にリスクの可能性を考慮すべき項目が抽出され、今後、新たに生活支援ロボットの開発者にとって有益なデータであると考え。

2. 6 結び(統括及び結論)

2. 6. 1 成果まとめ

本プロジェクトの成果を基本計画に沿ってまとめた。

Table 2.6-1 プロジェクトの成果

基本計画		プロジェクトの成果	達成度
(1) 人間装着（密着）型生活支援ロボットにおける安全技術の開発	ロボットの使用目的、使用環境及び運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する	実証実験の現場となる介護予防のための高齢者運動教室を想定したリスクアセスメントを行い、転倒に関する安全性評価項目を明らかとし、安全の検証に必要な技術である記録モジュールと解析システムを開発し、この技術を搭載した歩行アシスト 45 台を製作した。	○
	リスクアセスメントは研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や認証手順を開発しながら進める	リスクアセスの最初の段階である機器の設計コンセプト確認から研究開発項目①と連携して進め、安全評価手法、安全試験項目の手法や計測についても協力して行った。認証手順として ISO13482 パイロットスタディーとして設計コンセプト認証を行った。	○
(2) ①安全性試験	安全技術を搭載した人間装着型生活支援ロボットの安全性試験を完了し、評価基準が示されている	ISO13482 の安全要求項目に従い安全検証試験の項目を選定し、評価基準を明らかにしたうえで試験を行い基準を満たしていることを確認した。	○
(2) ②実証試験	想定ユーザーによる、実環境あるいは模擬した環境において実証実験が完了している	介護予防のための運動教室で実証試験を行い機器に起因する怪我や転倒などの事象が無かったことを確認した。	○

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

2. 6. 2 成果の意義

生活支援ロボットは新しい分野の産業として期待されるが、市場での運用実績に乏しく安全性の担保について各事業者が個別に行っていることが現状であり、生活支援ロボットの実用化の加速を妨げる要因となっている可能性がある。

本プロジェクトでは歩行アシストを高齢者支援に適用することを想定し、実用化に向けて必要な安全性評価、安全性検証、安全技術、実証試験の一連のプロセスを示した。これらの安全に対する取り組み方が生活支援ロボットの実用化を目指す開発者の参考となることを期待し、生活支援ロボットの産業が活性化し、人々の生活が豊かになることを願っている。

特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT ※ 出願	査読付 き	その他	学 会 発 表・講演	新聞・雑 誌等への 掲載	その他
H23FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H24FY	0件	0件	0件	0件	0件	1件	11件	2件
H25FY	0件	0件	0件	0件	0件	3件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

2.7 研究開発項目⑤ 搭乗型生活支援ロボットにおけるリスクアセスメントと安全機構の開発 トヨタ自動車株式会社

内容

1. はじめに	2
1.1. 事業の背景と目的	2
1.2. 事業の概要	2
2. 研究開発の内容	3
2.1. 立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの転倒シミュレータによる安全データ取得	3
2.1.1. Winglet 搭乗者モデル開発	3
2.1.2. 人体ダミーの機構解析モデル化と Matlab/Simulink による解析環境の開発	6
2.1.3. 人体ダミー傷害値算出プログラム開発	10
2.2. 立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの屋外実証評価による安全データ取得	12
2.2.1. 産総研外勤、イーアスつくば従業員による公道実証	12
2.2.2. つくば市役所勤務利用による公道実証	17
2.2.3. 公道実証まとめ	24
2.3. 立ち乗り搭乗型生活支援ロボットのダミー試験による安全データ取得	31
2.3.1. 実験方針および計画	31
2.3.2. 衝突姿勢の違いによる対物衝突検証	34
2.3.3. 対物衝突に関する競合製品との差別化検証	36
2.3.4. 対人衝突における1次衝突の検証	38
2.4. 立ち乗り搭乗型生活支援ロボットのリスクアセスメント	41
2.4.1. 目的	41
2.4.2. 実施内容	41
2.4.3. 結果	41
2.4.4. 結論	47
2.5. 北米のサービスロボット研究開発機関、実証機関での取り組みについての調査	48
2.5.1. 調査目的	48
2.5.2. 調査必要性	48
2.5.3. 調査期間	48
2.5.4. 調査地	48
2.5.5. 「生活支援ロボット、安全機能」についての具体的調査内容	48
2.5.6. 各調査地で得られた調査結果	48
3. 成果の普及	52
4. 結論	54

1. はじめに

1.1. 事業の背景と目的

人間の行動の範囲及び自由度を拡大する移動手段として、現在、自動車から自転車まで各種移動体が存在するが、少子高齢化の進展や CO2 ガス発生削減等の社会的課題を解決していくため、今後、高齢者や環境に配慮した移動体が求められてくる。具体的には、商業施設、駅・空港等の交通施設、オフィス、家庭に至るまで、不特定多数の歩行者や家族、他の移動体や障害物と同一空間内に共存し、搭乗者による操作または自律走行が可能な搭乗型生活支援ロボットが必要となる。

このため、本研究開発項目では、人や障害物が混在する状況において、人を乗せて移動する機能を備えた搭乗型生活支援ロボットの安全に関する課題を洗い出し、安全を実現するための要求仕様や運用ルールを明確にし、その課題を解決する安全技術を開発する。

1.2. 事業の概要

「本質安全」、「衝突安全」、「予防安全」を実施した搭乗型生活支援ロボットによる、実際のユースケースを使用した実証実験の実施また、実証実験結果および「安全性検証手法研究開発実施者」の安全評価項目の評価の実施。

上記、結果のフィードバックによる安全機構、ソフトウェアにより安全を施した搭乗型生活支援ロボットによる実装実験の再実施と実施結果の報告。

本プロジェクトの成果の反映については、2010年代にトヨタ自動車株式会社にて、搭乗型生活支援ロボットの生産と販売を予定している。

トヨタ自動車では、車の分野において、生産、販売、アフターマーケットのビジネスモデルを構築しており、すでに搭乗型生活支援ロボットに関しても「パートナーロボット」という名称にて、研究開発、実証実験を実施している。本プロジェクトでの安全基準、リスクアセスメントを反映することにより、人と共存するパートナーロボットの安全性が強化されるとともに、世界的に通用する安全基準をクリアしたパートナーロボットの開発が可能となると考えられる。

本プロジェクトのもう一つの成果としては、生活支援ロボットのソフトウェアプラットフォームがあげられる。現在の多くのシステムにおいては、ハードウェア、ソフトウェアをシステムとして扱い認証がとられるケースが多く存在している。ソフトウェアに関する安全認証において、プラットフォームとして、SIL などの安全認証がクリアされており、仕様、サンプル実装などが公開されていることにより、生活支援ロボットに対する参入障壁が低減されるとともに、開発コストの低減にもつながっていくと考えられる。また、本プロジェクトの安全基準が世界的にスタンダードとなった場合、ソフトウェアプラットフォームのビジネスも世界規模となりうる。

本プロジェクトの成果の事業化については、一般公開した仕様のベースとしたオープンプラットフォームの維持、標準化におけるロボットにおけるプラットフォームビジネス、開発環境を含んだ、仕様、安全基準を満たしたソフトウェアプラットフォームの販売、サポート、受託開発などが早期にスタートできるビジネスであると考えられる。

2. 研究開発の内容

2.1. 立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの転倒シミュレータによる安全データ取得

2.1.1. Winglet 搭乗者モデル開発

2.1.1.1. 目的

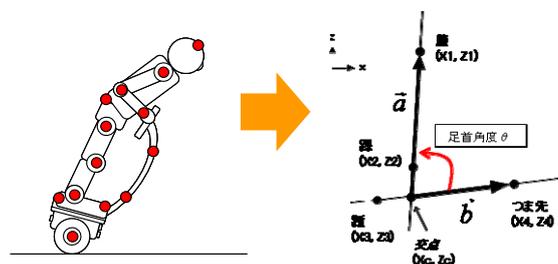
Winglet シミュレータは制御ソフトと機構解析モデルの閉ループ解析により Winglet の前後動作を再現する。シミュレータへの入力は搭乗者重心変化であり、これまではステップ波形で搭乗者重心変化を与えていた。ソフトウェアの動作確認では問題無いが、実験の事前検討やリスクアセスメントなどでは、車体の速度、ピッチ角、トルクには精度が求められる。Winglet 質量 (約 20kg) に対して、搭乗者体重 (成人男性約 70kg) が相対的に大きいため、精度の良い解析結果を得るためには、搭乗者重心変化を正確に再現する必要がある。

以下、Winglet の加速時挙動を精度良く再現する搭乗者加速動作モデルの開発結果について報告する。

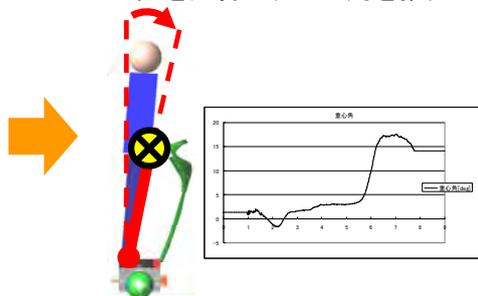
2.1.1.2. 内容

加速時 Winglet 挙動再現手順

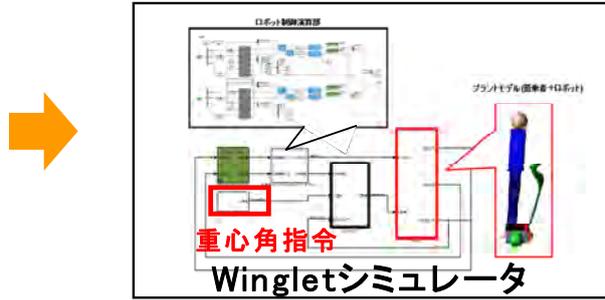
モーションキャプチャによる加速動作実測 ベクトル計算により関節角度を算出



搭乗者の時刻ごとの姿勢での重心位置を計算し、重心角を推定

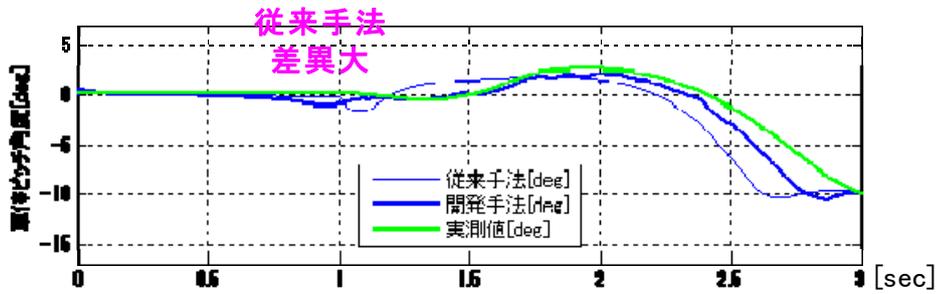


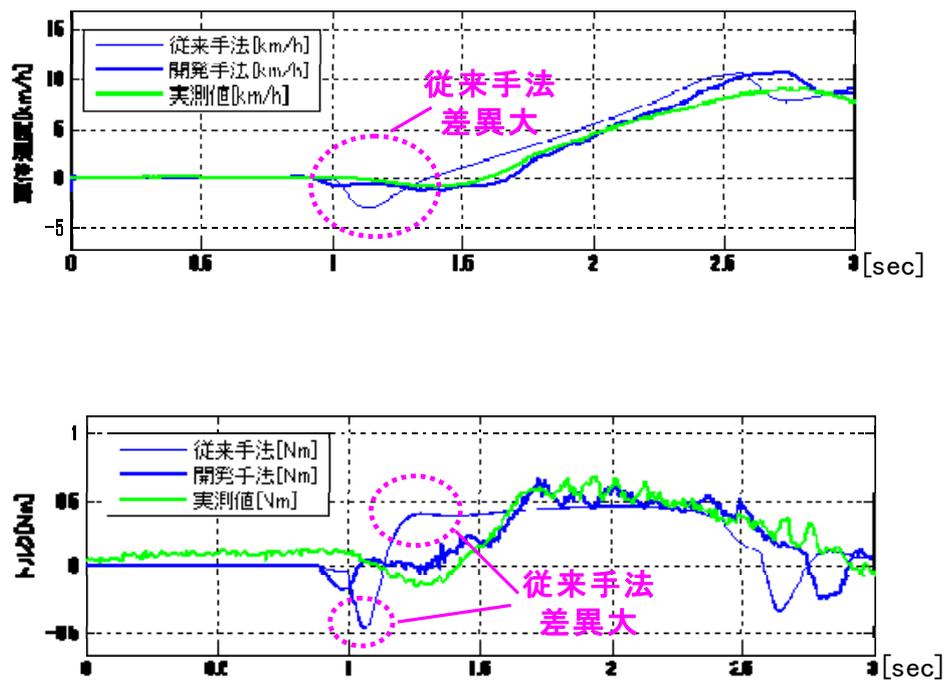
Wingletシミュレータに対して推定した搭乗者重心角を指令値として与え、Wingletの加速時挙動を再現する



加速時 Winglet 挙動再現精度

	実測	解析	精度	
			開発手法	従来手法
車体加速時間[sec] (0⇒6km/h)	0.61	0.49	80.3%	113.1%
最大車体ピッチ角[deg]	2.64	2.13	80.7%	70.5%
モータピークトルク[Nm]	0.68	0.67	98.5%	69.0%





2.1.1.3. 結論

- (a) モーションキャプチャを用いて実測した搭乗者加速動作に基づき、搭乗者加速動作モデルを開発した
- マーカ座標から搭乗者の姿勢を算出、人体データベースに基づきし重心角を推定
 - 推定した重心角を Winglet シミュレータに指令値として与え、Winglet 加速動作をモデル上で再現
- (b) 再現結果と実測結果を比較し、定性的、定量的（精度 80%以上）に一致していることを確認した

2.1.2. 人体ダミーの機構解析モデル化と Matlab/Simulink による解析環境の開発

2.1.2.1. 目的

人体ダメージを推定する方法として人体ダミーを用いた実験がある。人体ダミーは人体と同等の自由度を持ち、狙った通りの挙動をさせることが困難である。このため実験のやり直しや、方法の見直しが発生し、実験回数が予定よりも増加してしまう傾向にある。そこで、シミュレータを用いて実験結果を事前に予測し、実験方法の問題点を洗い出し対策を実施しておくことが望まれている。

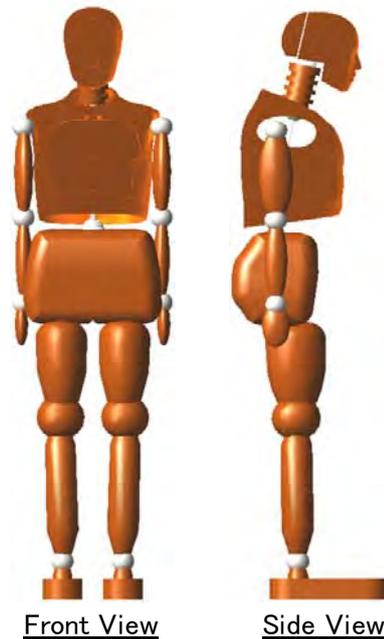
以下、Wingletの安全検証において実験回数を減らすことを目的に開発した、人体ダミーモデルとその解析環境、および活用実績を報告する。

2.1.2.2. 内容

①機構解析モデル製作⇒②モデル制御部と結合⇒③実験の事前検⇒④実験結果と比較を実施した。

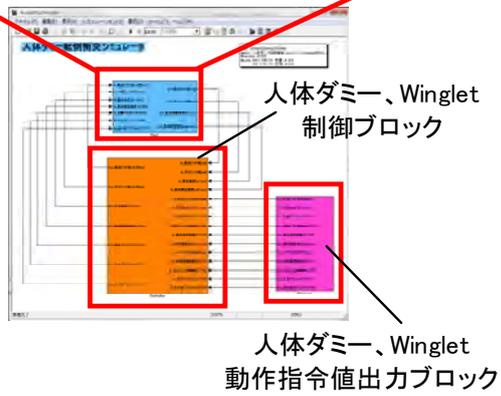
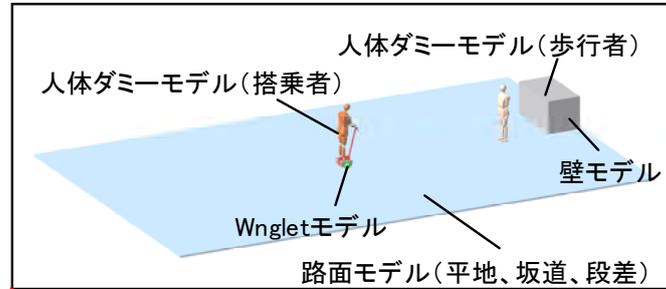
①人体ダミーモデル

- ・人体ダミー：HybridⅢ 50th 立姿勢
- ・形状：衝突する頭部、胸部はCAD形状をインポート。その他部位は簡易形状にて製作
- ・慣性：実測に基づき算出
- ・寸法：実測に基づき算出
- ・剛性：首部及び胸部検定結果と適合



②解析環境

- ・RecurDynモデルとSimulinkモデルにより構成
- ・搭乗者対壁、対歩行者、対路面の衝突を解析可能
※搭乗者と歩行者は同一モデル



③活用実績（壁衝突実験）

実験時の課題を明らかにし、対策を検討

課題(1):意図した姿勢より前方に倒れる

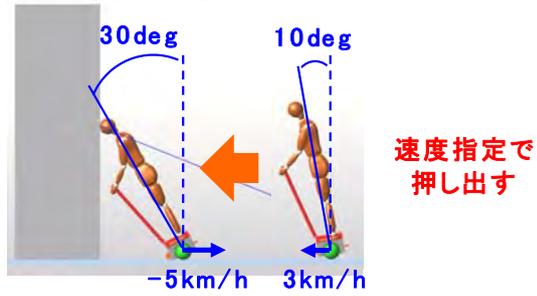
(2):意図した速度より減速する

対策(1):キャストの取り付け

(2):減速を考慮した初速設定

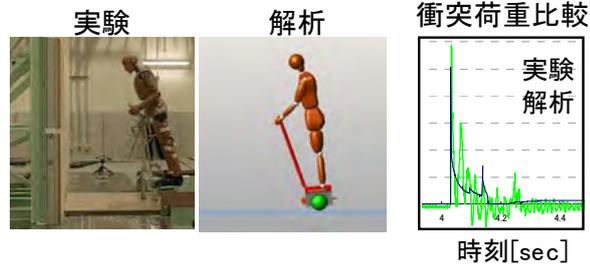
速度計による速度確認

衝突時の状態 狙った条件



④実験結果との比較（壁衝突実験）

壁衝突時の荷重[N]を実験と解析で比較
⇒定性的に一致することを確認



2.1.2.3. 結論

(a) 人体ダミーモデルとその解析環境を開発

- HybridIII 50th 立姿勢を機構解析ソフト R e c u r D y n を用いてモデル化（下図①参照）
- 人体ダミー、W i n g l e t の制御は MATLAB/Simulink 上でコントローラを製作し W i n g l e t は速度、姿勢を直接指定する台車としてモデル化

(b) 開発モデルを用いた実験の事前検討を実施

- W i n g l e t 搭乗者の壁衝突ダメージ測定実験の事前検討を実施。想定していた方法では狙った条件で人体ダミーが壁に衝突しないことが明らかとなり、事前に効果的な対策を検討・実施したことで実験回数を減らすことができた（下図③参照）
- 実験後、解析結果と実験結果を比較し定性的に傾向が一致していることを確認

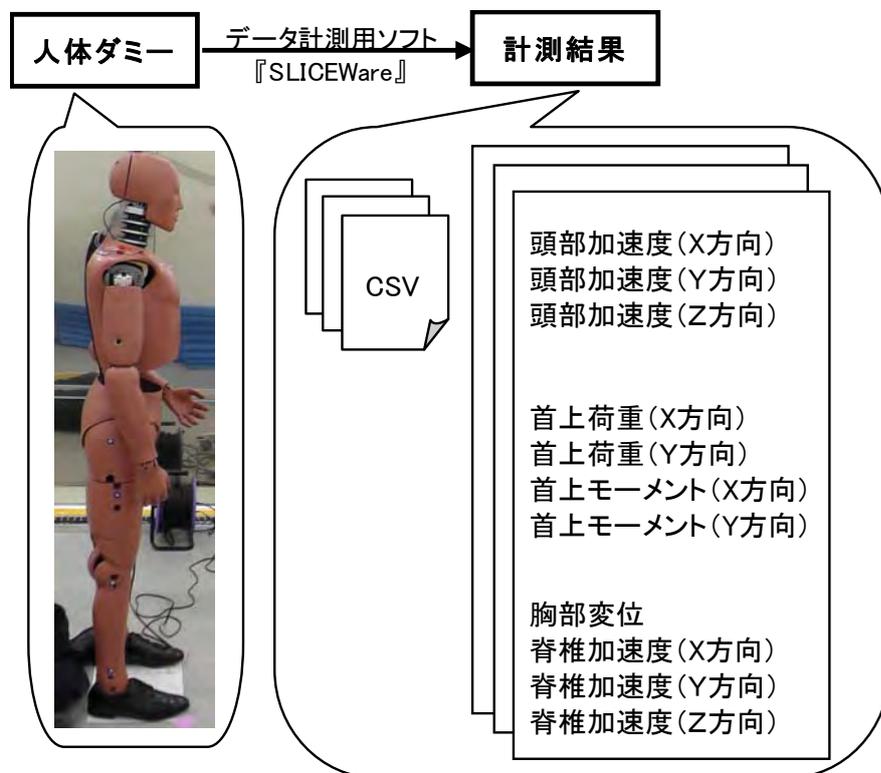
2.1.3. 人体ダミー傷害値算出プログラム開発

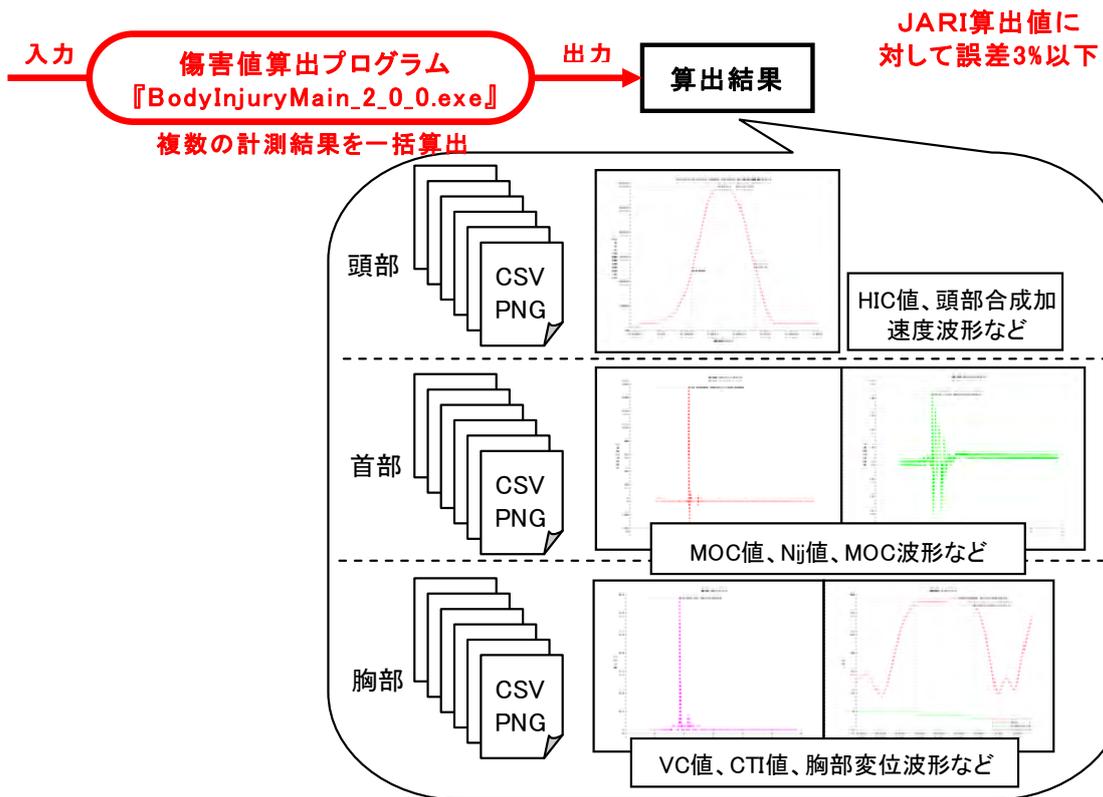
2.1.3.1. 目的

人体ダミーには加速度計、角速度計、荷重計、変位計が頭部、首部、胸部、腰部、大腿部に内蔵されており、人体ダメージ推定実験では人体ダミーを衝突・転倒させて、これらセンサ値の計測結果を数値演算することにより各部位の傷害値を推定する。

従来は傷害値を部内にて簡易計算式で概算する、あるいは第三者機関（JARI）などノウハウを所有する組織に計算を依頼する必要があり手間が掛かっていた。以下、傷害値算出に掛かる手間を削減するため、第三者機関（JARI）と同等の結果を算出可能な傷害値算出プログラムの開発結果について説明する。

2.1.3.2. 内容





JARI 算出結果に対する誤差

実験	人体ダミー		データ数	頭部	首			胸部	
				HIC	MOCx	MOCy	Nij	VC	CTI
				誤差[%]	誤差[%]	誤差[%]	誤差[%]	誤差[%]	誤差[%]
転倒	JARI 男性ダミー	HybridIII Male 50%	37	0.15	/	/	0.06	/	/
	JARI 女性ダミー	HybridIII Female 5%	34	0.15	/	/	0.16	/	/
壁衝突	JARI 男性ダミー	HybridIII Male 50%	10	-0.8	0.11	0.31	0.22	0.27	0.58
	JARI 女性ダミー	HybridIII Female 5%	8	2.54	/	/	-0.03	/	/

誤差 3%以下

2.1.3.3. 結論

- (a) 頭部、首、胸部の代表的な傷害値 (※1) を算出するプログラム (※2) を開発した
 - (※1) 頭部・・・H I C、首・・・MOC、Nij、胸部・・・VC、CTI
 - (※2) 本プログラムは全ての実験端末で利用可能
- (b) 第三者機関 (J A R I) の解析結果と比較し誤差が十分小さいこと (誤差 3 %以下) を確認した

2.2. 立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの屋外実証評価による安全データ取得

2.2.1. 産総研外勤、イーアスつくば従業員による公道実証

2.2.1.1. 本実証の位置づけ

公道実証は、ロボット（Winglet R401C）が公道を走行できる法制度環境の整備を目指し、「安全性」「普及性」、「必然性」の観点を実証項目として計画した。

本年度（2013年度）の実証は、特に「安全性」の検証に主眼を置き、StepA、StepB、StepCの3段階での実証を、つくば市の「ロボット実証実験特区」にて実施した。

StepAは「ロボット単体での走行安全性評価」を目的に、特区内の公道環境調査、ロボット開発技術者による試験走行を実施。ロボット仕様条件と比較し実公道環境下の危険箇所を抽出した。その危険箇所に応じて、ロボットの公道利用の運用ルールの見直し、及びロボット操作・操縦教育・トレーニングのカリキュラムの見直しへ反映した。

StepBでは、「歩行者等との混在環境での安全性評価」を目的に、被験者層を拡大し、教育・トレーニングを実施した上での公道利用実証を実施した。被験者は、産総研（産業技術総合研究所）の職員、及びつくば市役所職員を主な対象とした。以下、このStepBのうち、産総研職員及び商業施設（イーアスつくば）従業員を被験者とした実証結果を報告する。

なお、StepCはStepA及びStepBを通してPDCAを実践した、ロボット公道利用時の利用ルール、交通ルールの妥当性・受容性の評価である。

表1 公道実証における実証ステップ

視点	実施事項(案)	実施体制	使用機体数
A. Winglet単体での走行安全性検証	1) 走行環境調査 2) 技術者による実走行(試験走行) 3) 安全に走行するために必要なメンテナンス内容と頻度の検証	・TMC	5台
B. 歩行者との混在環境での交通安全性	他の交通の安全を阻害しないことを、Winglet利用実証を通して確認 1) 歩行者等との安全性・親和性を有することの評価 2) ヒヤリ事象の収集	・つくばロボット特区実証実験推進協議会(つくば市) ・産総研 ・TMC	5台
C. 利用ルール、交通ルールの妥当性・受容性	1) Wingletの利用ルール、交通ルールの受容性・要望のアンケート調査 2) 利用ルール・交通ルール案の検討	※Wingletの管理を一部、TMCから協議会へ移管させて頂きます。	5～22台

2.2.1.2. 本実証の目的

「歩行者等との混在環境での安全性評価」として、以下の評価項目を設定した。

表2 産総研職員を対象とした実証における評価項目

評価項目	評価結果の活用	
①公道での安全利用実績	重大事故無しでの走行実績	1)現ロボット仕様の実証 2)特区内規制緩和要望の際の安全性主張項目として活用
②ヒヤリ事例評価	ヒヤリ事例の収集(アンケート)	1)現ロボット仕様の実証 2)ロボット仕様の改善 3)運用ルール、教育・トレーニングカリキュラムの更新により、安全性を高める 4)特区内規制緩和要望の際の安全性主張項目として活用
③見直した教育・トレーニングカリキュラムの妥当性	受講者による受容性評価(ヒヤリング) トレーナーによる評価(ヒヤリング)	1)教育・トレーニングカリキュラムの更新

2.2.1.3. 実証実施内容

本実証は、産総研「スマートモビリティ研究グループ」が運用主体として実施した。

実証は、被験者属性の違いにより2種類実施した。

第1の実証は、産総研職員を被験者対象とし、当該職員の外勤のため産総研中央とつくば市サイエンスインフォメーションセンター間を移動する際の利用実証である。

第2の実証は、つくば市内に立地するショッピングセンター「イーアスつくば」の協力を得て、施設内に勤務する男女を被験者対象とした、施設周辺の公道での試験である。

2.2.1.3.1.

産総研職員による外勤利用実証

通行ルートは、産総研つくば中央事業所敷地内からつくば市サイエンスインフォメーションセンターまでの約4.5kmの区間である。

当該ルートの産総研敷地外は、歩行者・自転車専用道である。

つくば市のロボット実証実験特区でのローカルルールにより、歩行者と自転車の通行帯が分離されている区間では、搭乗型移動支援ロボットは自転車通行帯を通行することとされている。

また、途中の一般道路と交差する横断歩道では、StepAでの調査結果から、車道へのアプローチ部の勾配が、ロボットの仕様を超えていたため、ロボットから降り、ロボットを手押して横断歩道を通行する運用ルールを適用した。

被験者は30名、全員が予めライセンス取得教育を受けた。

ライセンス取得後にロボットを利用する際は、事前に利用予約を入れる。

利用時には、運用主体である「スマートモビリティ研究グループ」の職員が「保安要員」として自転車で伴走した。また、搭乗者はヘルメットを装着した。

表2 産総研職員による外勤利用実証概要

実施期間	2013年8月2日～10月28日
区間	産総研つくば中央～つくば市サイエンスインフォメーションセンター：片道約4.5km
実験モニター	産総研職員 拠点トレーナー；3名 ドライバー；30名
Winglet利用方法	事前予約制、産総研職員が保安要員として並走
利用回数	64回

2.2.1.3.2.

イーアスつくば従業員による公道利用実証

通行ルートは、イーアスつくばと、つくばエクスプレス「研究学園駅」間の 700mの区間を主としたイーアスつくば周辺道路である。

当該ルートは一般道路の自転車歩行者道である。

つくば市のロボット実証実験特区でのローカルルールにより、一般の自転車歩行者道の区間では、搭乗型移動支援ロボットは車道側 2m の部分を通行することとされている。

被験者は 6 名、全員が予めライセンス取得教育を受けた。

ライセンス取得後にロボットを利用する際は、事前に利用予約を入れる。

利用時には、運用主体である「スマートモビリティ研究グループ」の職員が「保安要員」として自転車で伴走した。また、搭乗者はヘルメットを装着した。

2.2.1.4. 実証結果

2.2.1.4.1.

利用結果の概要

被験者は 36 名（産総研 30 名、イーアスつくば従業員 6 名）。

利用回数は 106 回（産総研 64 回、イーアスつくば 42 回）。

走行距離は約 261km（産総研 213km、イーアスつくば 48km）。

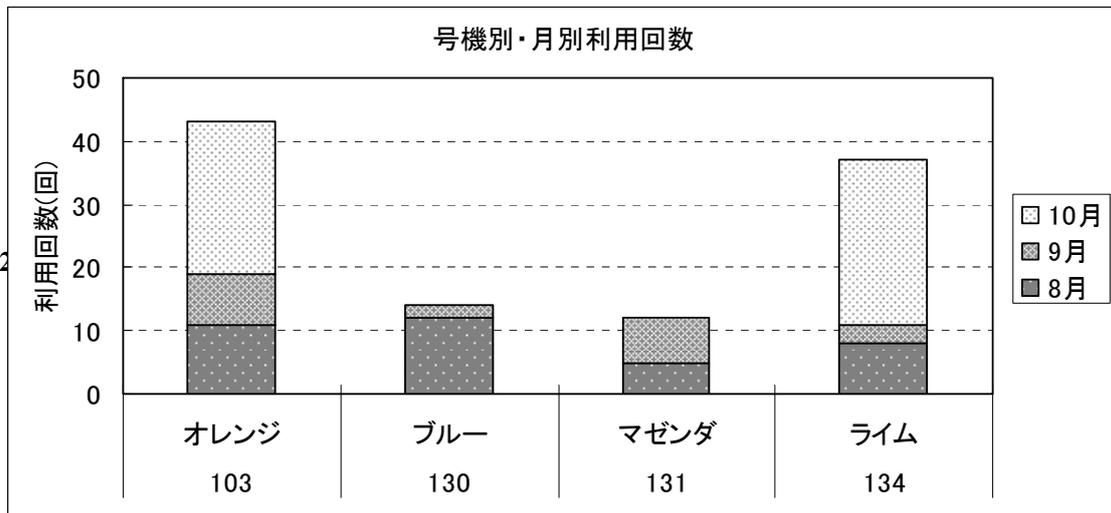


図2 本実証でのロボット利用実績(利用回数)

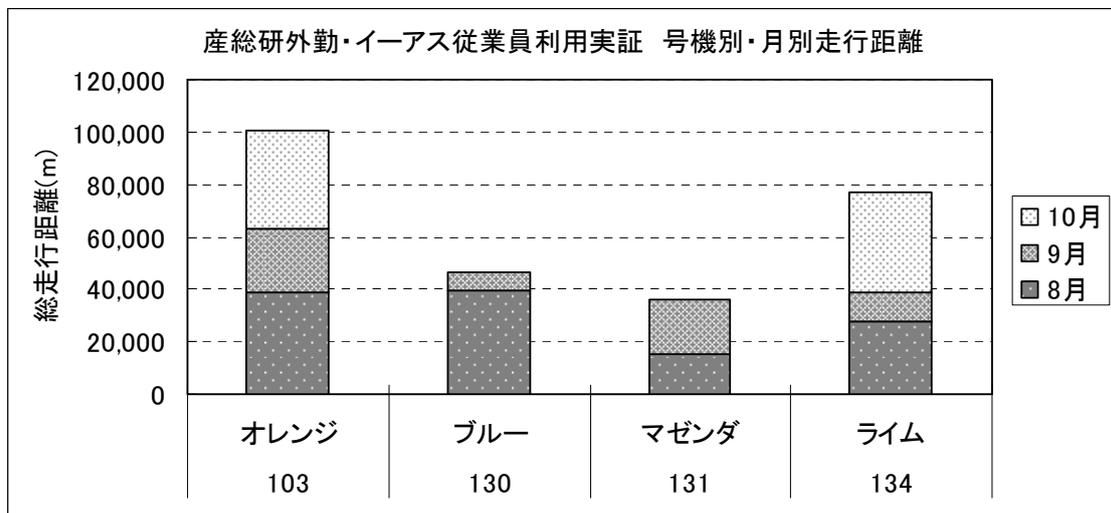


図3 本実証でのロボット利用実績(走行距離)

2.2.1.4.3.

評価結果

① 公道でのロボット安全利用実績

総走行距離 261km、延べ利用者数 106 回に及ぶ公道利用実証では、ロボット本体に起因する事故のみならず、周囲を通行する歩行者との事故及び自転車、自動車との交通事故は 1 件も発生しなかった。

ただし、ロボット実証実験特区では、保安要員の配置が義務付けられている。この条件下での事故ゼロであることに留意する必要がある。

i) 現ロボットの仕様の妥当性評価

・今回用いたロボットの仕様は、つくば特区内の公道環境でも安全に利用できる仕様となっているものと判断できる。

(降りて横断しなければならない横断歩道は、バリアフリーの観点での設計基準を超えている)

・特に、歩行者・自転車専用道区間の多くの部分が、凸凹の激しい石畳であったにも関わらず、安全に利用できた。このことは、他の公道でも安全に利用できる可能性が高いことを示唆している。

ii) 特区内での規制緩和要望での活用

・保安要員を配置していたとはいえ、200km を超える公道利用実証にて事故ゼロの安全実績を得た。

② ヒヤリ事例の収集と分析、対応策の検討

重大なヒヤリは発生していないが、軽微なヒヤリ事象が 7 件発生した。

内訳は、「路面凸凹、段差によるロボットの振動でバランスを崩しそうになった」(4 件)、「横断歩道通行中の自動車の接近」「路肩への乗り上げまたは脱輪」「途中での充電切れ」(各 1 件)であった。

i) 現ロボットの仕様の妥当性評価

・本実証の評価の視点である、「歩行者等との混在環境」での安全性に関わるヒヤリは、極少数であったため、当該ロボットは他者・他車との親和性を有するものと示唆される。

・充電切れは、ロボットの充電管理方法の周知不足が原因であると考えられる。そのため、今後は充電管理の注意点を喚起する必要がある。(本実証でも、当該ヒヤリ発生後に運用管理者に注意喚起を実施した。)

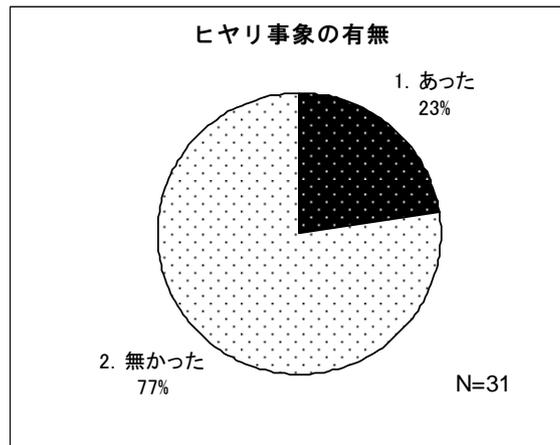


図4 産総研職員利用時のヒヤリ事象の有無

③ 安全性を担保する教育・トレーニングカリキュラムの試行

実証に先立ち、被験者に対するロボットの操作・操縦の教育・トレーニングを実施した。

教育・トレーニングカリキュラムには、被験者に対し、利用する公道環境において、特に注意が必要なリスクを把握してもらうため、実地教習（自動車運転免許における路上教習に相当）を付加した。

この結果、事故及び重大なヒヤリは発生しておらず、現地公道環境のリスクを教習する本教育・トレーニングカリキュラムは一定の効果があったものと考えられる。

2.2.1.5. 実証結果

① 延べ利用者数 106 人、総走行距離 260km 利用し、重大ヒヤリ・事故無しの実績を得た。（但し、道路交通法に基づき、ロボットの近傍にロボットに搭乗していない「保安要員」を配置している）

② 軽微なヒヤリとして、利用途中のバッテリー切れ、縁石への乗り上げ、といった事象がアンケート結果より得られた。

ロボット管理者に対し、利用前の充電管理の注意喚起を実施した。

③ 既存の教育カリキュラムに、利用地域内の公道環境にて特に注意すべき点を教習すべく、路上教習カリキュラムを追加導入した

重大なヒヤリ・事故が無かったため、導入効果は有ったものと考えられる。

2.2.2. つくば市役所勤務利用による公道実証

2.2.2.1. 本実証の位置づけ

公道実証は、ロボット（Winglet R401C）が公道を走行できる法制度環境の整備を目指し、「安全性」「普及性」、「必然性」の観点を実証項目として計画した。

本年度（2013年度）の実証は、特に「安全性」の検証に主眼を置き、StepA、StepB、StepCの3段階での実証を、つくば市の「ロボット実証実験特区」にて実施した。

StepAは「ロボット単体での走行安全性評価」を目的に、特区内の公道環境調査、ロボット開発技術者による試験走行を実施。ロボット仕様条件と比較し実公道環境下の危険箇所を抽出した。その危険箇所に応じて、ロボットの公道利用の運用ルールの見直し、及びロボット操作・操縦教育・トレーニングのカリキュラムの見直しへ反映した。

StepBでは、「歩行者等との混在環境での安全性評価」を目的に、被験者層を拡大し、教育・トレーニングを実施した上での公道利用実証を実施した。被験者は、産総研（産業技術総合研究所）の職員、及びつくば市役所職員を主な対象とした。以下、このStepBのうち、つくば市役所職員の方を被験者とした、通勤時の利用実証結果を報告する。

なお、StepCはStepA及びStepBを通してPDCAを実践した、ロボット公道利用時の利用ルール、交通ルールの妥当性・受容性の評価である。

表1 公道実証における実証ステップ

視点	実施事項(案)	実施体制	使用機体数
A. Winglet単体での走行安全性検証	1) 走行環境調査 2) 技術者による実走行(試験走行) 3) 安全に走行するために必要なメンテナンス内容と頻度の検証	・TMC	5台
B. 歩行者との混在環境での交通安全性	他の交通の安全を阻害しないことを、Winglet利用実証を通して確認 1) 歩行者等との安全性・親和性を有することの評価 2) ヒヤリ事象の収集	・つくばロボット特区実証実験推進協議会(つくば市) ・産総研 ・TMC	5台
C. 利用ルール、交通ルールの妥当性・受容性	1) Wingletの利用ルール、交通ルールの受容性・要望のアンケート調査 2) 利用ルール・交通ルール案の検討	※Wingletの管理を一部、TMCから協議会へ移管させていただきます。	5～22台

2.2.2.2. 本実証の目的

「歩行者等との混在環境での安全性評価」として、以下の評価項目を設定した。

表2 産総研職員を対象とした実証における評価項目

評価項目		評価結果の活用
①公道での安全利用実績・ヒヤリ事例評価	重大事故無しでの走行実績 ヒヤリ事例の収集(アンケート)	1)現ロボット仕様の実証 2)特区内規制緩和要望の際の安全性主張項目として活用 3)運用ルール、教育・トレーニングカリキュラムの更新により、安全性を高める
②鉄道駅構内への乗り入れと駐機による連携実証評価	安全な駅構内通行実績 安全な駅構内での駐機実績 ヒヤリ事例の収集	1)鉄道等の公共交通機関との連携利用時の課題抽出
③見直した教育・トレーニングカリキュラムの妥当性	受講者による受容性評価(ヒヤリング) トレーナーによる評価(ヒヤリング)	1)教育・トレーニングカリキュラムの更新

2.2.2.3. 実証実施内容

本実証は、「つくば市科学技術振興課」が運用主体として実施した。

被験者は、つくば市役所職員であり、当該職員の朝夕の通勤のために、つくばエクスプレス（以下、TX）「研究学園駅」とつくば市役所庁舎間を移動する際の利用実証である。

2.2.2.3.1.

つくば市役所職員による通勤時利用実証

通行ルートは、TX「研究学園駅」からつくば市役所での約0.7kmの区間である。

駅前から主要道路までは、駅前広場から連続する歩行者・自転車専用である。

主要道路と市役所庁舎にアプローチする道路は、自転車歩行者道が併設されており、ロボットはそこを通行する。

被験者は12名、全員が予めライセンス取得教育を受けた。

1週間を1クールとして、各週2名の被験者が通勤時に利用した。その間はTXを利用して通勤する（通常は自動車通勤）。

利用時には、運用主体であるつくば市「科学技術振興課」の職員が「保安要員」として自転車で伴走し、搭乗者はヘルメットを装着した。

2.2.2.3.2.

TX「研究学園駅」構内への乗り入れと夜間駐機

通勤時の移動であるため、TX の協力により、「研究学園駅」構内へ乗り入れ、以下のように運用した。

○自動改札の通過：

ロボットの幅員が 50cm であるため、車椅子の通過が可能な自動改札を利用

○夜間駐機：

帰宅時に利用し、翌朝出勤時に利用するまで、駅構内で駐機。駅施設にワイヤーロープで括り施錠。

2.2.2.3.3.

市役所庁内への乗り入れ

被験者は、市役所出入り口から自席まで、市役所庁内でもロボットに搭乗して移動した。

- ・エレベータ：搭乗したまま利用
- ・自席での駐機：出勤時から帰宅時まで、自席脇にて充電を兼ね駐機

2.2.2.4. 実証結果

(1) 利用結果の概要

被験者は9名。

走行距離は約30km。

(2) 評価結果

① 公道でのロボット安全利用実績

【安全利用実績】

実証期間中の公道利用実証では、ロボット本体に起因する事故のみならず、周囲を通行する歩行者との事故及び自転車、自動車との交通事故は1件も発生しなかった。

ただし、ロボット実証実験特区では、実証実験を実施するために取得する道路使用許可の要件に、保安要員の配置が義務付けられている。この条件下での事故ゼロであることに留意する必要がある。

【ヒヤリ事例】

重大なヒヤリは発生していないが、アンケートより、「走行中不安に思うこと」について、以下の回答を得た。

<公道走行中に不安に感じた点（自由回答）>

■周りを良く見るようになり、足元の段差（マンホール等）に気づかず、不意にバランスを崩しそうになることがあった。

■バッテリーの容量が小さいため、途中で止まらないか不安になった。

■後から急いでいる人、自転車がこないか気になってよく後ろをふりむいていたので、バックミラーがあれば良いですね。

■荷物を方から下げて乗車しましたが、万が一のことを考え荷物は完全に体から離れ手が空くようにした方が良いと思いました。リュックでないカバンも使用できるよう、荷物置きがあるといいのではないのでしょうか。（雨対策のためフタがかぶせられるようなもの）

- 途中で電気がきれたら・・・と少し不安に感じました。替えのバッテリー等を持ち歩けるようになれば少し安心だと思います。
- 雨でぬれた道路の段差に多少不安を感じていたが、実際は不安なく走行できた。ので、特にない。
- 走行速度を 6km/h に制限する趣旨は分かるが、列走の際に、遅れてしまった場合や、横断歩道など、一時的に 6km/h 以上のスピードが必要になる場面が見受けられた。

【公道での安全なロボット利用に必要な制度・保安装置へのニーズ】

被験者に対し、公道で安全にロボットを利用するために必要な制度、及び装置についてアンケートによって意見を収集した。

◇ ロボットで公道を通行する際の望ましい通行場所

アンケート回答者（9名）のうち、8名が「歩道」と回答した。

その主な理由は、歩行者以外の自転車等他モードとの速度差が大きく、速度 6km/h の当該ロボットと同じ空間を利用するのは危険、との意見が多く見られた。

<公道走行での安全を確保するため、ロボットの走行場所として「歩道」を適切と回答した理由>

- 歩道だからこそ安心して乗れるから。
- 自転車との共存は危険。スピードが歩行と同等であれば、歩行者との共存に問題は無いと考えます。
- 「車道」は、幹線道路を除く。（歩道のない住宅街の道路等）住宅街の道路であれば車もスピードを出さず、危険が少ないため。
- 歩道・・・広い歩道であればこちらの方が安全
 - 車道・・・白線と歩道の間に十分なスペースがあって、そこを走ればよい。
 - たまに高齢者が 1 人乗りの小型自動車！？に乗って車道のすみを走っているときがあるが、かなりあぶない。
- 走行速度が速いつくばの車道では危険なため
- モビリティロボットは、車や自動車とは比較できないくらい速度が遅いのでロボットの運転車にとっては車道走行は怖いと思います。また速度の問題から、車と同じように信号箇所で進むのは難しく、歩行者と同じように横断歩道を走行するのが良いと思いました。
- より人に近い場所なので、コミュニケーションがとれる。車道では、ウイングレットタイヤがぶつかったりする危険性が高く感じる。
- 最高速度が、自動車、バイク等と比べると著しき低いため、車道の走行は危険である。

◇ ロボットを公道で安全に利用する際に必要だと思う装置

回答者の半数以上が「必要」と回答した装置は、「後部反射器」「警音器」「ロボットに鋭い突起を有していないこと」の 3 点であった。

なお上記 3 点のうち、本実証にて装備していなかった装置は「後部反射器」のみであり、また、日中のみの実証実施であった。

重大なヒヤリ事象も発生していない点を踏まえると、これらのニーズは、利用者の安心感を得るためにニーズが高いものと考えられる。

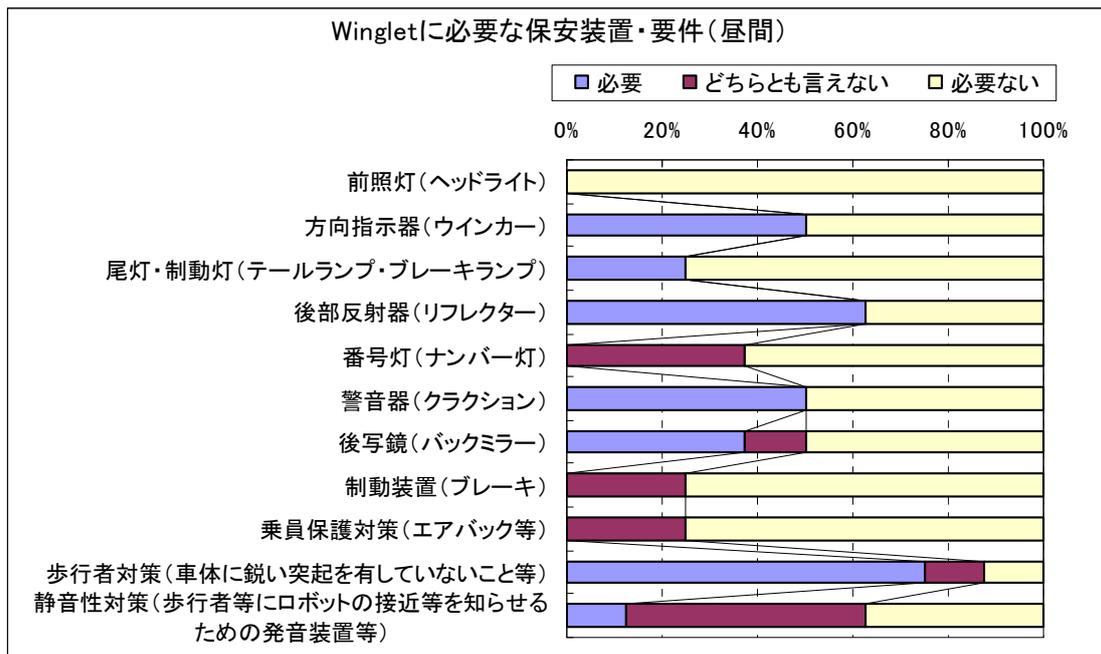


図3 Wingletに必要な保安装置・要件(昼間の利用)

i) 現ロボットの仕様の妥当性評価

- ・今回用いたロボットの仕様は、つくば特区内の公道環境及び駅構内の通行において、安全に利用できる仕様となっているものと判断できる。
- ・「歩行者等との混在環境」での安全性に関わるヒヤリは、極少数であったため、当該ロボットは他者・他車との親和性を有するものと示唆される。
- ・日中にロボットを利用するにあたっては、現在のロボットの仕様(装備)で十分であると考えられる。

ii) 特区内での規制緩和要望での活用

- ・現在の規制下では、安全に利用できる実績を得た。
- ・速度(6km/h)のロボットでは、歩行者との親和性が高いこと、及び他車両との速度差が大きく危険であることから、歩道通行ニーズが高いという結果を得ることができた。

② 鉄道駅構内への乗り入れと駐機による、連携実証

鉄道駅構内という公共性が高く、歩行者専用の空間への乗り入れと、夜間駐機を実施し、重大な事故及びヒヤリ事象は発生しなかった。

③ 安全性を担保する教育・トレーニングカリキュラムの試行

実証に先立ち、被験者に対するロボットの操作・操縦の教育・トレーニングを実施した。

教育・トレーニングカリキュラムには、被験者に対し、利用する公道環境において、特に注意が必要なリスクを把握してもらうため、実地教習（自動車運転免許における路上教習に相当）を付加した。

この結果、事故及び重大なヒヤリは発生しておらず、実地リスクを教習する本教育・トレーニングカリキュラムは一定の効果があったものと考えられる。

2.2.3. 公道実証まとめ

2.2.3.1. 本実証の位置づけ

本実証は、立ち乗り搭乗型移動支援ロボットの安全データ取得のための、屋外実証評価である。

立ち乗り搭乗型移動支援ロボットの屋外での安全性は、利用者の安全性に着目した「単体での走行安全性」と、利用者以外の周囲歩行者や他交通との安全性に着目した「歩行者との混在環境での交通安全性」の2つの視点で捉えた。

また、上記2つの観点での安全性を横断的に捕捉する仕組みとして、「利用ルール・交通ルール」を位置づけている。

StepAは「ロボット単体での走行安全性評価」を目的に、特区内の公道環境調査、ロボット開発技術者による試験走行を実施。ロボット仕様条件と比較し実公道環境下の危険箇所を抽出した。その危険箇所に応じて、ロボットの公道利用の運用ルールの見直し、及びロボット操作・操縦教育・トレーニングのカリキュラムの見直しへ反映した。

StepBでは、「歩行者等との混在環境での安全性評価」を目的に、被験者層を拡大し、教育・トレーニングを実施した上での公道利用実証を実施した。被験者は、産総研（産業技術総合研究所）の職員、及びつくば市役所職員を主な対象とした。

StepCは、「利用ルール・交通ルールの妥当性・受容性評価」である。

屋外にて、ロボットを安全に利用して頂くには、利用者と周囲の歩行者等との間のルール（運用ルール・交通ルール）が必要である。

そこで、StepAの結果を踏まえて運用ルール・交通ルールを設定し、ロボット搭乗者へのそれらの教育カリキュラムを構築し、StepBの実証での被験者に適用した。

表1 公道実証における実証ステップ

視点	実施事項(案)
A. Winglet単体での走行安全性検証	1) 走行環境調査 2) 技術者による実走行(試験走行) 3) 安全に走行するために必要なメンテナンス内容と頻度の検証
B. 歩行者との混在環境での交通安全性	他の交通の安全を阻害しないことを、Winglet利用実証を通して確認 1) 歩行者等との安全性・親和性を有することの評価 2) ヒヤリ事象の収集
C. 利用ルール、交通ルールの妥当性・受容性	1) Wingletの利用ルール、交通ルールの受容性・要望のアンケート調査 2) 利用ルール・交通ルール案の検討

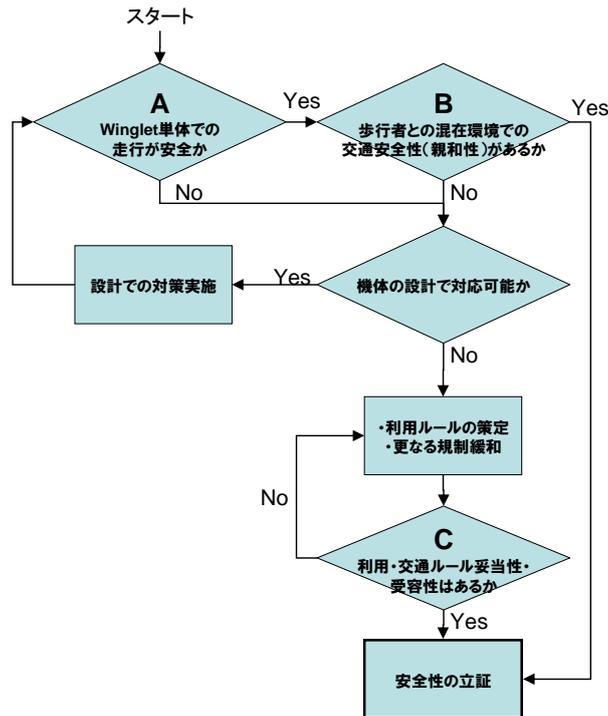


図1 公道実証における評価フロー

2.2.3.2. 公道での利用安全性データ取得結果

(1) StepA ロボット単体での安全性評価データの取得

ロボット単体での安全性評価に必要なデータとして、以下の項目のデータを取得した。

① ロボットの仕様項目に該当する屋外公道環境データ

- ・ロボットの登坂能力や段差乗り越え条件等の仕様項目に該当する公道環境データ

② 試験走行による安全実績データ

- ・ロボットの仕様条件内の環境にて、ロボットが安全に走行できる実績として、ロボットに起因する事故、重大ヒヤリ実績無しでの走行距離、利用者数

・アンケート、ヒヤリングによる、顕在化した軽微なヒヤリ、及び潜在的なヒヤリを試験走行実施者よりヒヤリング事例

① ロボットの仕様項目に該当する屋外公道環境データ

ロボットの仕様項目に該当する屋外公道環境データとして、表2に整理した6項目のデータを取得し、ロボットの仕様条件と比較した。

比較の結果、以下の項目において、本実証にて使用したロボットの仕様を満たさない以下の箇所の存在を確認した。

- ・段差：橋梁接続部、交差点等での縁石
- ・路面 μ ：鉄板、格子状鉄板、水溜り跡の砂利
- ・勾配：交差点等での縁石、交差点等でのアプローチ部

表2 ロボット仕様項目に対応した公道環境データ

◎:仕様を超える条件無し
 △:通路・道路の一部に仕様を超える条件の路面有(回避した通行可能)
 ×:通路・道路の幅員全てにわたり、仕様を超える条件の路面有(回避不可、降車必要)

項目		要求仕様内容	1. 産総研ルート	2. 産総研敷地内ルート	3. 市役所周辺ルート
1	明るさ(照度)	運転に支障なきこと	97,700lux(イースに面する大通り(屋外))		
2	周囲音量(騒音)	商業施設60~80dB 住宅地:40~70dB	71.2dB(イースに面する大通り(屋外))		
3	路面段差	20mm以上の段差無き事	× 橋梁部接続部のゴム	× 交差点部の縁石	◎
4	路面摩擦	$\mu > 0.5$	× 排水用鉄格子 △ 網目状鉄板・ペイント 路面・WETでのマンホール・水溜り跡の砂利	△ 水溜り跡の砂利	△ 水溜り跡の砂利
5	坂路(路面傾斜)	勾配 $< 6^\circ$	× 交差点部の縁石	× 交差点部の縁石	× 交差点部の縁石
6	歩行者等通行量(人口密度)	運転に支障なきこと(※)	◎ 61人・台/時/幅員1m	◎ (ほとんど0)	◎ 9~119人・台/時/幅員1m
距離			2.5km	1.1km	1.9km
障害が必要な箇所			11箇所	7箇所	9箇所

※ロボット実験特区内にて、6km/hを超える速度を出すことのできるロボットは、最混雑時の歩行者等の通行量が、幅員1mあたり120人・台/h以下であることが定められている。

②試験走行による安全実績データ

①で抽出したロボットの使用を超える危険箇所以外の公道環境において、ロボット開発技術者による試験走行を実施し、以下の安全性データを取得した。

【技術者による試験走行】

- 1) 使用するロボットの仕様条件を満たす公道環境での試験走行
- 2) ロボットの加速度、トルク値、そのほかエラー値を取得
- 3) 官能的な評価として、被験者が「怖い」と思ったか否かの判断

表3 試験走行により得た安全実績データ

試験走行実施日		2013年4月22日～25日						
搭乗者属性		性別:男性 身長:179.2cm 体重:90kg						
想定したヒヤリ箇所		環境調査結果	乗り方	実走行データ分析の結果			怖いかな	判断 走行への支障の有無
				T-N	急動作	他エラー		
①マンホール上	産総研ルート	ウェットの状態でμが仕様の範囲外である路面の代表	発進・停止	異常なし	異常なし	なし	否	無
②トンネル前後の傾斜路(石畳)	産総研ルート	勾配、段差共に仕様の範囲内だが、上記2つを有する複合路面(石畳)	巡航 発進・停止	異常なし	異常なし	なし	否	無
③産総研裏門→つくばサイエンスインフォメーションセンター	産総研ルート	距離が2.5kmあるため、電力が不足する場合も想定	巡航	異常なし	異常なし	なし 完走後の電池残量50%	否	無
実走により仕様条件を満たしているか否かを判断する項目		環境調査結果	乗り方	仕様条件		結論	判断 走行への支障の有無	
④周囲明るさ	産総研・市役所ルート	97,700lux(イースに面する大通り(屋外))	通常走行	運転に支障なきこと		安全に走行可能であったため、要求は満たしている ※ただし、LEDの視認性、悪い。	無	
⑤天候	産総研・市役所ルート	Wingletで走る領域に雨、雪、風に晒される場合がある	通常走行	雨天、雪、強風時は、搭乗しないこと		運用制限(雨天時中止)を設ける条件付で運用可能	無	

続いて、上記試験走行による安全性確認後、①での公道環境データの取得結果、仕様を満たさない箇所を踏まえた以下のような運用ルールを設け、複数のロボット開発技術者による利用実証を実施した。

- ・ 通路、道路の一部に存在する場合：それらを避けて通行するよう注意喚起
- ・ 通路、道路の全幅員に渡る場合：降車して通行

技術者による利用実証より、以下の安全利用実績、アンケートによるヒヤリ事例データといった安全性データを所得した。

【複数のロボット技術者による実走行安全実績データ】

- 1) 利用実証被験者(開発技術者)数：70人
- 2) 総走行距離＝約400km
この間、ロボットの故障、事故無し

【顕在化したヒヤリ、潜在的なヒヤリ事例の収集】

試験走行時に体験したヒヤリ、及び走行してみて想定したヒヤリに関する回答を194件得た

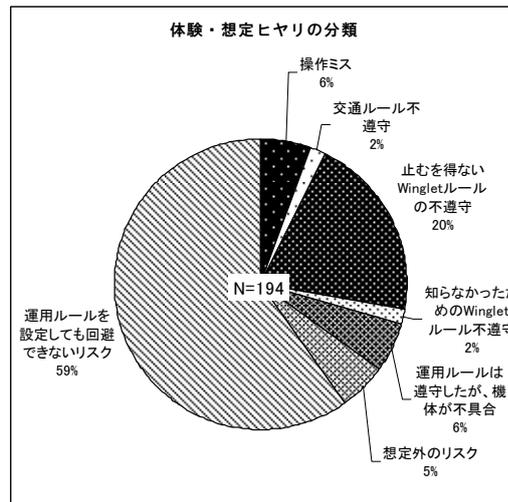


図2 収集したヒヤリデータの分類結果

これらのデータを踏まえ、運用ルールの改善を実施し、開発技術者以外の一般者を被験者とした屋外利用実証へ移行可能である、との判断をした。

(2) StepB 歩行者等との混在環境での安全性評価データの取得

StepA でのロボット単体での安全性評価結果を踏まえ、被験者属性を広げ、屋外利用での安全性データの取得した。

取得したデータ項目は以下の通りである。

- ・ロボットの仕様条件内の環境にて、ロボットが安全に走行できる実績として、交通事故、交通事故に繋がる重大ヒヤリ実績無しでの走行距離、利用者数

- ・ヒヤリング、アンケートによる、交通事故に繋がるヒヤリ事例

上記のデータを取得するために、つくばロボット実証実験特区にて、産業総合技術研究所及びイーアスつくば（商業施設）、つくば市役所の職員・従業員の方を限定した一般者被験者として、公道での利用実証実験を実施した。

実証実験の結果取得したデータを以下に整理する。

【歩行者等との混在環境での安全性データ】

- ・搭乗被験者数：延べ約 120 人、総走行距離＝約 300km
- ・重大なヒヤリ事象、及び事故事例無し（但し、保安要員を配置）
- ・軽微なヒヤリ事例：7件

「路面の凹凸、段差による振動でバランスを崩しそうになる」：4件

その他「路肩への乗り上げ・脱輪」「横断歩道での自動車の接近」

- ・潜在的なヒヤリとして、「走行中に不安に感じた点」を、被験者へのアンケートにより収集

表4 限定した一般者被験者の利用実証により得た安全利用実績

実証名称	実証区間	区間距離	備考	延利用人数	総走行距離
1) 産総研外勤利用	産総研 つくば中央事業所 ~ つくばサイエンスインフォメーションセンター(つくば駅前)	約3.5km		64人	213 km
2) つくば市役所通勤利用	つくば市役所 ~ TX研究学園駅	約0.7km	市役所庁舎内乗り入れ 研究学園駅構内で夜間駐機	12人	30 km
3) イーアス従業員通勤利用	イーアスつくば ~ TX研究学園駅	約0.7km		42人	48 km
				118人	291 km

表5 限定した一般者被験者の利用実証により得た安全実績データ

	開発技術者試験利用	産総研職員外勤利用	つくば市職員通勤利用
実証利用場所	①つくばサイエンスイノベーションセンター～洞峰公園(約2.5km) ②研究学園駅～つくば市役所～イースつくば(約2.1km)	①つくばサイエンスイノベーションセンター～産総研(約4.0km) ②研究学園駅～イースつくば(約0.7km)	②研究学園駅～つくば市役所(約0.7km)
			・市役所庁内への乗り入れ実施 ・つくばエクスプレス「研究学園駅」構内への乗り入れと夜間駐機を実施
利用結果 (利用回数または人数、総走行距離)	延べ70回 400km	延べ106回 261km	12名 28km
評価事項	①安全利用実績	ロボットの故障無し 事故・重大ヒヤリ無し(但し、保安要員を配置)	←
	②事故・ヒヤリ事例収集	・後方から来る自転車に接近、追い越されるときに追突されそうになる ・横断歩道での自動車が接近	・路面の凸凹、段差による振動でバランスを崩しそうになる ・路肩への乗り上げ・脱輪 ・横断歩道での自動車が接近
	③利用・運用ルール評価	走行環境に存在するリスクを、実地教習により教育するカリキュラムを、搭乗者へのトレーニングカリキュラムに導入すべきと判断した	・実地教習を備えたカリキュラムにて搭乗者トレーニングを実施 ・事故、重大ヒヤリ無しの実績より、導入効果が認められる
	④鉄道駅との連携課題抽出		駅構内への乗り入れ、構内での夜間駐機時に事故、ヒヤリ無し

<公道走行中に不安に感じた点（自由回答）>

■周りを良く見るようになり、足元の段差（マンホール等）に気づかず、不意にバランスを崩しそうになることがあった。

■バッテリーの容量が小さいため、途中で止まらないか不安になった。

■後から急いでいる人、自転車がこないか気になって よく後ろをふりむいていたので、バックミラーがあれば良いですね。

■荷物を方から下げて乗車しましたが、万が一のことを考え荷物は完全に体から離れ手が空くようにした方が良いと思いました。リュックでないカバンも使用できるよう、荷物置きがあるといいのではないのでしょうか。（雨対策のためフタがかぶせられるようなもの）

■途中で電気がきれたら・・・と少し不安に感じました。替えのバッテリー等を持ち歩けるようになれば少し安心だと思います。

■雨でぬれた道路の段差に多少不安を感じていたが、実際は不安なく走行できた。ので、特にない。

■走行速度を 6km/h に制限する趣旨は分かるが、列走の際に、遅れてしまった場合や、横断歩道など、一時的に 6km/h 以上のスピードが必要になる場面が見受けられた。

(3) StepC 運用・交通ルールの妥当性・受容性に係るデータの取得

StepA の結果より、運用・交通ルールを定め、搭乗者教育にてそれらを教育するカリキュラムを導入した。StepB の実証にて、上記の運用・交通ルールを適用し、被験者には上記カリキュラムでの搭乗者教育を実施した。

実証では教育内容の妥当性評価として安全利用実績を、受容性評価として被験者へのアンケートから運用・交通ルールに対する要望データを取得した。

【運用・交通ルールの妥当性・受容性データ】

- ・ 52名に対して、ロボット搭乗者教育を実施
 - StepB の利用実証にて、無事故・重大ヒヤリ無しの安全実績を得た
- ・ 運用・交通ルールに対する要望：歩道の通行要望、自転車と混在時の速度差による不安)

2.2.3.3. まとめ

(1) 本実証で取得した安全性データ

- ・ ロボット仕様項目に該当する公道環境条件として、明るさ、周囲の音量、段差高さ、勾配、路面摩擦係数、歩行者通行量を取得
- ・ 仕様条件下での技術者による走行実験にて、ロボットの最大トルク値、急動作
- ・ 安全走行実績の蓄積として、事故・ヒヤリ無しでの被験者（搭乗者）数、走行距離データを取得
- ・ 交通事故に繋がるヒヤリ事例の被験者（搭乗者）へのアンケート、ヒヤリングによる意見データを取得

2.3. 立ち乗り搭乗型生活支援ロボットのダミー試験による安全データ取得

2.3.1. 実験方針および計画

2.3.1.1. 目的

二輪倒立ロボット Winglet では、NEDO プロジェクトにて人体ダミーを使った安全性検証を予定している。

今回試験計画を立案するにあたり、下記 2 点の切口で RA を分析したので報告する。

1. 未検証項目・・・RA に列挙されているリスクの危険性（酷さ、頻度）が検証されていない項目
2. 計測可能性・・・人体ダミーを使って計測が可能な項目

2.3.1.2. 概要

2.3.1.2.1.

観点

観点の考え方を下記 1, 2 に示す。

1. RA に列挙されているリスクの危険性（酷さ、頻度）が検証されているか？
 - ・低く見積もっていないか？対策が不十分な場合、規格標準に適合しないリスク、訴訟リスクあり
 - ・運用時（事前トレーニング等）で実際のリスクに対する説明責任が果たしているか？
2. 人体ダミーを使って計測が可能なか？
 - ・人体の傷害等、人体ダミーを使って計測することが有効な項目か？

2.3.1.2.2.

リスク（酷さ、頻度）検証の方法

表 1 に、リスクマトリックスを示す。酷さ(Se)及び頻度(CI)の算出方法を下記に示す。

酷さ (Se) : ①から②を算出

- ①計測装置による物性値（加速度等）の定量化
- ②医学的知見に基づき傷害予測（AIS 値、ISS 値等）及び部基準の割り当て（1～5）

頻度 (CI) : 実環境の利用結果から算出

- ・実証試験を通したログデータ収集

現状、頻度は不明（データ不十分）であるが、酷さは計測可能である。酷さ 2 以上の項目について試験を選定する。

表1 リスクマトリックス

①物性値の計測 ②実環境の利用結果(ログデータ)

危害の酷さ(Se)		危害の頻度(CI)				
部基準	AIS	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12
5	5	B1	B2	A	A	A
4	3,4	C	B1	B2	A	A
3	2	C	B1	B1	B2	A
2	1	C	C	B1	B1	B2
1	0	C	C	C	C	B1

また、表 2 に評価試験に関する参照規格の有無のリストを示す。参照規格のない項目は、競合製品との差別化につながりやすいと考えられる。

実験により、定量的なデータに基づいて、競合製品よりも安全に関する優位性があると訴求できる可能性がある。

酷さ (部基準)	評価試験に関する参照規格の有無	
	有り	無し
5	電子機器誤動作(ペースメーカー等) 電子機器誤動作(ロボット誤動作)	転落、転倒
4	感電	
3	切断(エッジ)、爆発、火傷、 突き刺し(目)	引きずり(骨折)、挟まれ(動力あり)、 衝撃(動力あり、周囲の人)
2		転倒(強制降車→打撲)、 転倒(乗車/降車→打撲)、押しつぶし 等
1		(省略)

人体の傷害 ⇒人体ダミーで計測可能
参照規格無し⇒未検証であり、
競合製品との差別化につながり易い

2.3.1.2.3.

人体ダミーで試験すべきリスクの選定、優先順位付け

表 3 に実施要否の判断リストを示す。必ずしも酷さの検証が十分にできていると言い切れない項目は【未検証項目】の列に○を、人体ダミーで計測可能な項目は【計測可能性】の列に○をしている。2つの切り口で実施要否を選定している。

表3 実施要否の判断

危険現象	酷さ	RA項目数	選定の切口		総合判断 (優先度)	結論 (実施要否)	
			未検証項目	計測可能性			
転倒	前方	5	158	○	○	2位	要:12月
	側方			—	○	—	転倒モード なし、不要
	後方			—	○	—	(3月実施済)
転落	5	1	—	○	—	—	
電子機器誤動作	ペースメーカー等	5	1	—	—	—	—
	ロボット誤動作	5	2	—	—	—	—
感電	(低電圧以外)	4	1	—	—	—	—
引きずり		3	1	—	—	—	—
挟まれ(動力あり)		3	2	—	—	—	—
衝撃(動力あり、 周囲の人に衝突)	走行中(有人)	3	99	○	○	1位	要:6月11月
	降車後(無人)	2	4	—	○	—	—
切断		3	1	—	—	—	—
突き刺し		3	1	—	—	—	—
爆発(電池)		3	12	○	—	—	—
火傷(通院要)		3	7	—	—	—	—
押しつぶし		2	37	○	○	—	衝撃結果 より判断
転倒	強制降車中(打撲)	2	1	—	○	—	—
	乗車/降車中(打撲)	2	93	—	○	—	後方転倒結 果に内包

2.3.1.3. 結論

RA を分析した結果、【Winglet での走行中の衝突実験】を最優先で実施する必要があることが判明した。

2.3.2. 衝突姿勢の違いによる対物衝突検証

二輪倒立ロボット Winglet では、NEDO プロジェクトにて人体ダミーを使った安全性検証を実施している。今回、壁へ衝突した際に搭乗者が受ける頭部への衝撃（HIC）について、姿勢の違いによる影響を確認をするために、衝突実験を実施したので結果を報告する。

2.3.2.1. 試験概要

条件の絞り込み

Winglet の速度、乗車姿勢、進行方向、搭乗者の身長・体重等、組合せが膨大になるため、事前にシミュレーション解析や知見者へのヒアリングにて条件の絞り込みを行った。

表 1 に優先度を考慮して絞り込んだ因子および水準を示す。

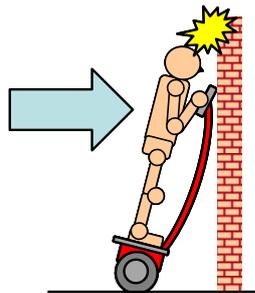
また、SQC 手法（実験計画）を用いて、実験回数を 16 回（最小限）に抑えて実験した。

表1 因子および水準

因子	水準			
	1	2	3	4
A 時速[km/h]	3	6	9	12
B ダミー姿勢	前傾(3deg)	直立	後傾(10deg)	
C 性別(体重)	男性	女性		

実験手順

- ①ホイストで人体ダミー人形を Winglet に立たせる
- ②Winglet を押し出し装置にセットする
- ③押し出し装置の速度を設定する
- ④押し出し装置を発車する
- ⑤壁へ衝突させる
- ⑥人体ダミーを PC につなぎ、
頭部障害データを解析する



試験日時

2013年6月24日（月）～28日（金）

試験場所

生活支援ロボット安全検証センター

結果

図 1 に試験結果を示す。頭部への衝撃（HIC）の結果は、A) 速度が 1%有意となり、B)

姿勢や C) 性別（身長、体重）の違いによる影響は小さいことが判明した。

HICは自動車安全基準に正規化した値。

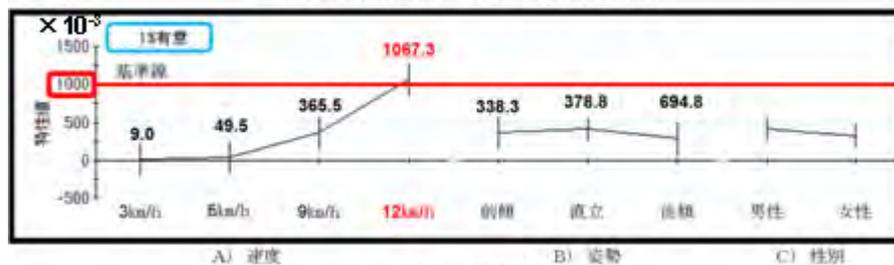


図1 HIC結果

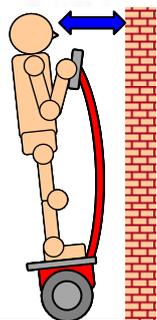


図2 後傾姿勢と壁との距離

2.3.2.2. 考察

1次衝突の頭部への衝撃（HIC）は、速度に依存している。

前傾、直立に比べて後傾の方がやや低い値になっているのは、図2に示した通り頭部と壁との間の距離が広くなり、ハンドルによって衝撃吸収されたためと考えられる。

2.3.2.3. 結論

頭部への衝撃（HIC）は速度に依存していることが分かった。

前傾（加速中）、直立（定常走行）、後傾（急ブレーキ）という姿勢の違いによる HIC への影響はほぼ発生しない。

2.3.3. 対物衝突に関する競合製品との差別化検証

2.3.3.1. 目的

二輪倒立ロボット Winglet では、NEDO プロジェクトにて人体ダミーを使った安全性検証を実施している。

今回、壁へ衝突した際に搭乗者が受ける頭部への衝撃（HIC）について、競合製品と比較するために衝突実験を実施したので結果を報告する。

2.3.3.2. 試験概要

試験条件

表 1 に因子および水準を示す。

Winglet の最高速度は 6km/h であるが、競合製品を模擬するために 12km/h まで速度を上げて実験を行った。

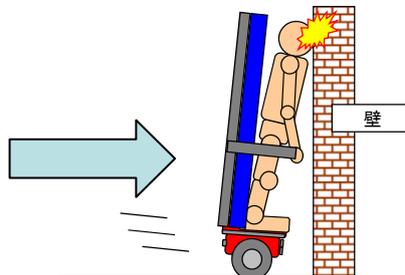
また小走りを模擬するために、ハンドルなしの台車も条件に追加した。

表1 因子および水準

因子	水準			
	1	2	3	4
A 時速[km/h]	3	6	9	12
B 性別(体重)	男性	女性		
C ハンドル有無	有り	なし		

実験手順

- ①ホイストで人体ダミー人形を台車に立たせる
- ②Winglet を押し出し装置にセットする
- ③押し出し装置の速度を設定する
- ④押し出し装置を発車する
- ⑤壁へ衝突させる
- ⑥人体ダミーを PC につなぎ、
頭部障害データを解析する



2.3.3.3. 結果

図 1 に試験結果を示す。頭部への衝撃（HIC）の結果は、A) 速度と、B) 性別（身長、

体重)が1%有意となり、C) ハンドル有無(ロボット乗車、小走り)の違いによる影響は小さいことが分かった。また寄与率をみると、A) 速度が92%、B) 性別は2%となっており、ほとんどが速度に依存している。 ※【人体ダミー実験報告 2/4】と同等の結果速度は、12km/hを超えるとHICは自動車安全基準の>1倍となることが分かった。

HICは自動車安全基準に正規化した値。

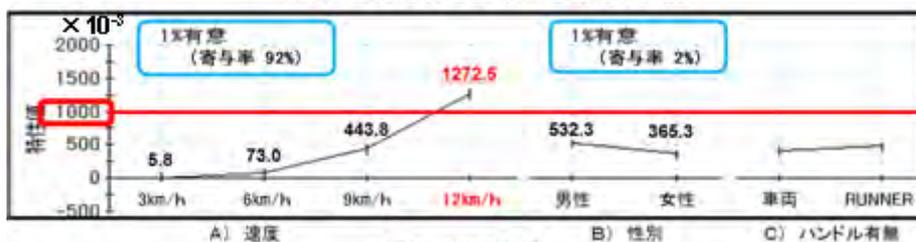


図1 HIC結果

HICは自動車安全基準に正規化した値。

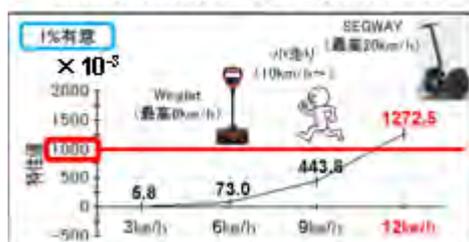


図2 衝突時のHIC比較

2.3.3.4. 考察

図2に示した通り、Wingletのほうが競合製品(6km/h以上で移動する二輪倒立モビリティロボット)や小走り状態よりも安全に関して優位であると言える。

2.3.3.5. 結論

頭部への衝撃(HIC)は速度に依存していることが分かった。 ※【人体ダミー実験報告 2/4】と同等の結果となった

Wingletのほうが競合製品(6km/h以上で移動する二輪倒立モビリティロボット)よりも安全に関して優位であると言える。

例)・Wingletの最高速度 [6km/h]で壁に衝突した場合、HICは自動車安全基準の0.0073倍

・競合製品 Segway の最高速度 [20km/h]で壁に衝突した場合、HICは自動車安全基準の>1倍

2.3.4. 対人衝突における1次衝突の検証

2.3.4.1. 目的

二輪倒立ロボット Winglet では、NEDO プロジェクトにて人体ダミーを使った安全性検証を実施している。

今回、Winglet 乗車状態で人と衝突した際に、ぶつかられた側の人を受ける頭部への衝撃（HIC）を確認するために、対人衝突実験を実施したので結果を報告する。（1次衝突のみ確認、床等への2次衝突は考慮しない。）

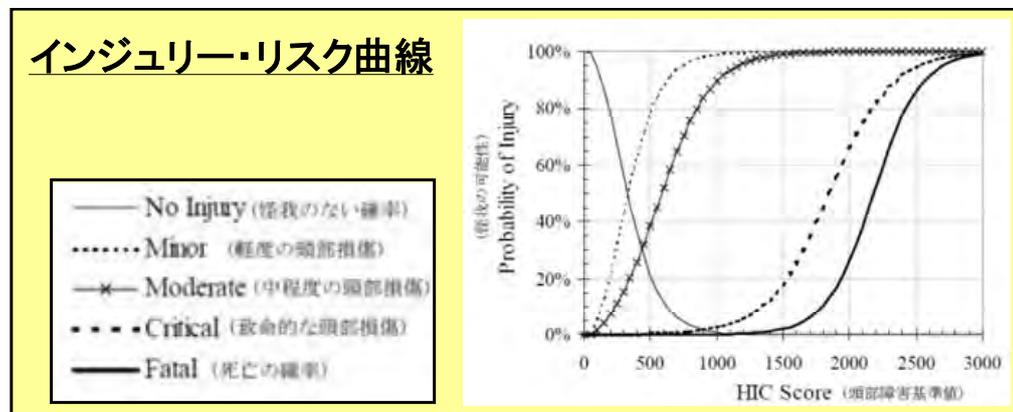
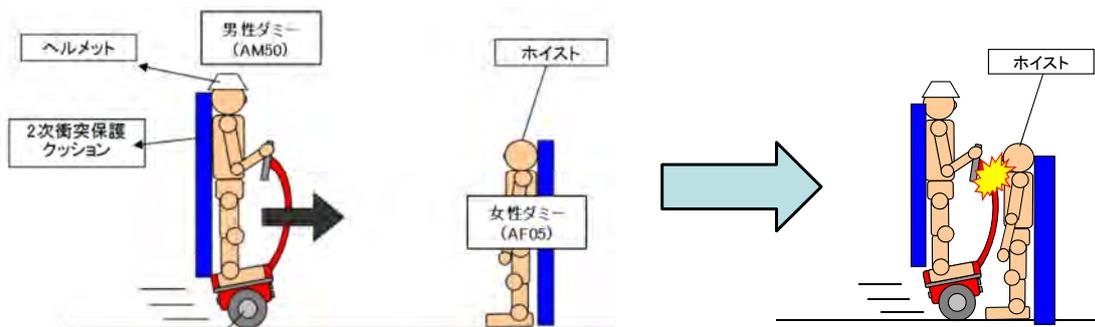
2.3.4.2. 試験概要

試験条件

- ・速度 3, 6, 9, 12km/h の4水準（各 N=1）
- ・人体ダミー役割（2体）
 - AM50) Winglet 乗車状態で AF05 へ衝突
 - AF05) 直立状態で衝突される ※測定対象

実験手順

- ①ホイストで AM50 を Winglet に立たせる
- ②Winglet を押し出し装置にセットする
- ③AF05 をホイストで吊り上げて自立させる
- ③押し出し装置の速度を設定し、発車する
- ④AF05 へ衝突させる
- ⑤AF05 を PC につなぎ、頭部障害データを解析する



2.3.4.3. 結果

表1に試験結果を示す。頭部への衝撃（HIC）の結果は実験した12km/hまでの速度であれば、小さく問題ない事が分かった。この結果をインジュリー・リスク曲線に当てはめた場合、

全く怪我のない確率が95%以上、
致命傷になる確率は限りなくゼロとなっている。

表1 HIC結果

No.	試験日	時速 [km/h]	HIC結果 ×10 ⁻³	モード（人体ダメージ種類）
1	11/25 AM	3	1	1次衝突（AF05）
2	11/25 AM	6	4	1次衝突（AF05）
3	11/25 PM	9	14	1次衝突（AF05）
4	11/25 PM	12	22	1次衝突（AF05）

HICは自動車安全基準に正規化した値。

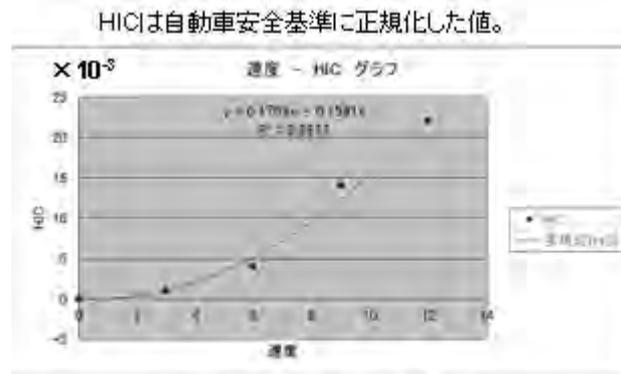


図1 速度-HICグラフ

表2 速度-HICの関係

	速度	HIC
実験値	0	0 × 10 ⁻³
	3	1
	6	4
	9	14
	12	22
予想値	20	64.956
	40	266.152
	60	603.588
	70	823.396
	80	1077.264

HICは自動車安全基準に正規化した値。

2.3.4.4. 考察

試験結果から作成した速度-HIC グラフを図1に示す。図1の近似式より予想した速度-HICの関係リストを表2に示す。

表2より、70km/h以上の速度でぶつかられた場合に、HICは自動車安全基準の>1倍となる可能性があると考えられる。

2.3.4.5. 結論

Winglet 乗車中の人（最高時速 6km/h）にぶつかられても、1 次衝突の値は小さく問題ないことが分かった。※

HIC が自動車安全基準の>1 倍となるのは、衝突速度が 70km/h を超えるときである。

※ 事前にヒアリングした知見者の見解と同じ結果である。

2.4. 立ち乗り搭乗型生活支援ロボットのリスクアセスメント

2.4.1. 目的

立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの転倒シミュレータによる安全データ取得，立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの屋外実証評価による安全データ取得，立ち乗り搭乗型生活支援ロボットのダミー試験による安全データ取得，北米のサービスロボット研究開発機関、実証機関での取り組みについての調査を踏まえてより実践的なリスクアセスメントを立ち乗り搭乗型生活支援ロボットに対して開発する。

2.4.2. 実施内容

立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの転倒シミュレータによる安全データ取得，立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの屋外実証評価による安全データ取得，立ち乗り搭乗型生活支援ロボットのダミー試験による安全データ取得の結果及び，北米のサービスロボット研究開発機関、実証機関での取り組みについての調査で明らかになったリスク低減の観点を Winglet リスクアセスメントにフィードバックした。

2.4.3. 結果

Purpose:	Transport a person from one location to another
Size and mass of robot:	1.2 – 1.4 m high (adjustable) and approximately 25 kg
Affected user groups:	Mobility passenger, trainer, people around mobility robot (bystanders, walkers, etc.)
Environmental conditions:	Limited to environments with limited unevenness and small slopes.
Other limits/assumptions:	All manoeuvres are handled by a passenger on board, only certified (or trained) person with no physical disability can be on board, recommended passenger age is 14 – 50 years old with weight less than 100 kg. The maximum travel speed is limited to 6 km/h.
Scenario:	Transport a person from one location to another indoors on a flat surface without any gaps <ol style="list-style-type: none">1) User turns the power on the personal transport robot2) User embarks on to the mobility robot3) User travels around or stops still on the mobility robot4) User disembarks from the mobility robot5) User connects the mobility robot to its charging equipment

Table X.Y.Z — Risks associated with people carrier robots - personal transport robot

NOTE 1. It is necessary to determine appropriate and practical SIL levels, based upon the potential cost to reduce risks and its effect (benefit), although a robot product would become widely acceptable to the society so long as an estimated SIL satisfies its target value.

NOTE 2. The SIL and PL values as well as the “Risk estimation” shown in the following table are ONLY EXAMPLES, and thus these values would most likely vary in accordance with a robot design and specifications, use scenario, and other conditions and limitations.

Hazard		Risk estimation	Risk reduction		Residual risk
Potential consequence	Hazard source	Significance of risk reduction	Inherent measures	Safeguarding measures	Information for use
Collision (Mobility crushing to walls, pillars, etc.) (Scenario 3) (Table A.2-1)	Mobility and its environment	a) Minor b) Frequent c) Low d) Likely e) High	5.8.7.2: Restriction of speed (use of low-power/ speed motors) 5.8.2.2: Light weight design 5.4.2: No sharp projections / edges on outer covers	5.8.7.3: Speed restriction and Safety-related speed control (PL c / SIL 1)	5.8.7.4: Training on system information 8.2.4: Training on any limitations and requirements 8.2.7: Training on emergency situations & procedures
Impact (Passenger getting crushed between mobility and ground / walls) (Scenario 3) (Table A.2-2)	Mobility and its environment	a) Minor b) Frequent c) Low d) Unlikely e) High	5.8.7.2: Restriction of speed (use of low-power/ speed motors) 5.8.2.2: Light weight design	5.8.7.3: Speed restriction and Safety-related speed control (PL c / SIL 1)	5.8.7.4: Training on system information 8.2.4: Training on any limitations and requirements 8.2.7: Training on emergency situations & procedures

Hazard		Risk estimation	Risk reduction		Residual risk
Potential consequence	Hazard source	Significance of risk reduction	Inherent measures	Safeguarding measures	Information for use
Falling from mobility due to sudden acceleration / deceleration (Impact) (Scenarios 2, 3, 4) (Table A.2-3)	Mobility (cabin or foot board)	a) Minor b) Infrequent c) Low d) Likely e) Ordinary	5.8.7.2: Restriction of speed (use of low-power/ speed motors)	5.8.7.3: Speed restriction and Safety-related speed control (PL c / SIL 1)	5.8.7.4: Training on system information 8.2.4: Training on any limitations and requirements 8.2.7: Training on emergency situations & procedures
Object drawing-in (Scenario 3) (Table A.2-4)	Wheels and mobility body	a) Minor b) Frequent c) Low d) Likely e) High	5.11.2: Mechanical design with as little holes or gaps as possible	5.11.3: Use of fixed/movable guards around wheels	5.11.4: System information and Warning labels 8.2.4: Training on any limitations and requirements 8.2.7: Training on emergency situations & procedures
Slipping (Scenarios 2, 3, 4) (Table A.2-5, A.2-29)	Wheels	a) Minor b) Frequent c) Low d) Likely e) High	5.8.3.2: Use of high-friction tires	5.8.3.3: Physical restriction and control to avoid sudden acceleration (PL b / SIL 1)	5.8.3.4: information for use with environmental conditions under the mobility can operate

Hazard		Risk estimation	Risk reduction		Residual risk
Potential consequence	Hazard source	Significance of risk reduction	Inherent measures	Safeguarding measures	Information for use
Tripping or Falling (Scenarios 2, 4) (Table A.2-6)	Mobility (cabin or foot board)	a) Minor b) Frequent c) Low d) Likely e) High	5.8.6.2 (a): Mechanical (mobility shape) design for easy embarkation & disembarkation 5.8.6.2 (b): Design of braking performance of the mobility platform to prevent runaway during embarkation/ disembarkation	5.8.6.3 (a): Controlled stop (active stability) control during embarkation / disembarkation (PL c / SIL 1)	5.8.6.4: Warning labels on steps and Proper training and instructions
Electrical shock (Scenario 1) (Table A.2-9)	Electrical terminals (connectors, battery)	a) Minor b) Frequent c) Low d) Likely e) High	5.2. 2 and 5.3.1.2: Low power circuit design	5.2.3 and 5.3.1.3: Enclose all electrical terminals with guards	5.3.1.4: Warning labels
Electrical shock (Scenario 5) (Table A.2-9)	Electrical terminals (connectors, battery)	a) Minor b) Frequent c) Low d) Likely e) High	5.2.2 and 5.3.1.2: Isolation of charging contacts or appropriate guards over charging contacts	5.2.3: Activation of charging power only when the mobility is connected (PL b / SIL 1)	5.2.4: Charging instructions 5.3.1.4: Warning labels
Fire (or Excessive Heat) (Scenarios 1, 2, 3) (Table A2-12)	Electrical terminals (short circuit on connectors, battery)	a) Major b) Infrequent c) Low d) Unlikely e) Very high	5.5.4.2: Elimination or avoidance of extreme heat sources	5.5.4.3: Application of guards around electrical terminals	5.3.1.4: Warning labels 5.5.4.4: Instructions for handling and maintenance

Hazard		Risk estimation	Risk reduction		Residual risk
Potential consequence	Hazard source	Significance of risk reduction	Inherent measures	Safeguarding measures	Information for use
Burn (Scenario 3) (Table A.2-13, A.2-31)	Circuit or motor driver (with high temperature)	a) Major b) Infrequent c) Low d) Unlikely e) Very high	5.5.4.2: Use of material and its texture with appropriate thermal conductivity / dissipation	5.5.4.3: Heat dissipation mechanism (heat sinks, air flows with fan control) (PL d / SIL 2)	5.3.1.4: Warning labels 5.5.4.4: Instructions for handling and maintenance
Continuous Vibrations (Scenario 3) (Table A.2-15)	Mobility (cabin or foot board)	a) Minor b) Frequent c) Low d) Unlikely e) High	5.5.2.2: Use vibration absorbing materials and mechanical components	5.5.2.3: Shock absorbing (suspension or cushion) mechanism	5.5.2.4: Specification of the vibrating mobility parts
Discomfort (posture) (Scenario 3) (Table A.2-22)	Mobility (cabin or foot board)	a) Minor b) Frequent c) Low d) Likely e) High	5.7.2.2: Design mobility cabin without excess physical stress or discomfort	5.7.2.3: Shock absorbing (suspension or cushion) mechanism	5.7.2.4: Proper training to avoid traveling more than recommended time
Stress / Fear (over speed) (Scenario 3) (Table A.2-25)	Mobility (cabin or foot board)	a) Minor b) Frequent c) Low d) Likely e) High	5.8.7.2: Restriction of speed (use of low-power/ speed motors)	5.8.7.3: Speed restriction and Safety-related speed control (PL c / SIL 1)	5.8.7.4: Proper training and instructions
Hit / Step over (bystander's foot or body part within a proximity of mobility wheels) (Scenario 3) (Table A.2-35)	Mobility body (wheels)	a) Minor b) Frequent c) Low d) Likely e) High	5.8.7.2: Restriction of speed (use of low-power/ speed motors) 5.8.2.2: Light weight design 5.4.2: No sharp projections / edges on outer covers	5.8.7.3: Speed restriction and Safety-related speed control (PL c / SIL 1)	5.8.7.4: Proper training and instructions 8.2.4: Training on any limitations and requirements 8.2.7: Training on emergency situations & procedures

Hazard		Risk estimation	Risk reduction		Residual risk
Potential consequence	Hazard source	Significance of risk reduction	Inherent measures	Safeguarding measures	Information for use
Unintended start / move (due to vandalism) (Scenarios 2, 3, 4) (Table A.2-36)	Mobility body	a) Minor b) Frequent c) Low d) Likely e) High	5.3.3.2: Measures to avoid unexpected start-up 5.8.2.2: Light weight design 5.4.2: No sharp projections / edges on outer covers	5.3.3.3: Notification of status change 6.8.6: Use of anti-vandalism circuitry (key start or password protection) (PL b / SIL 1)	8.2.3: Instruction and training on prohibited usages
Falling (from mobility cabin/ foot board) (Scenarios 2, 3, 4) (Table A.2-38)	Mobility (cabin or foot board)	a) Minor b) Frequent c) Low d) Likely e) High	5.8.2.2, 5.8.3.2, and 5.8.6.2: Design of mass distribution and shape of the robot for easy embarkation & disembarkation (e.g. Low step design)	5.8.6.3 (a): Controlled stop (active stability) control during embarkation / disembarkation (PL c / SIL 1)	5.8.6.4: Warning labels on boarding steps 5.8.6.4: Proper training and instructions for safe embarkation & disembarkation
Falling (due to imbalance) (Scenarios 2, 3, 4) (Table A.2-39)	Mobility (cabin or foot board)	a) Minor b) Frequent c) Low d) Unlikely e) High	5.8.2.2, 5.8.3.2, and 5.8.6.2: Design of mass distribution 5.7.2.2 and 5.8.5.2: shape of the robot	5.8.6.3: Active mobility balance control (PL b / SIL 1)	5.8.6.4: Proper training and instructions for safe operation 8.2.3: Training on range of applications and prohibited usages 8.2.4: Training on any limitations and requirements 8.2.7: Training on emergency situations & procedures

Hazard		Risk estimation	Risk reduction		Residual risk
Potential consequence	Hazard source	Significance of risk reduction	Inherent measures	Safeguarding measures	Information for use
Impact (collision / falling due to abnormal operation / maneuver) (Scenarios 2, 3, 4) (Table A.2-41)	Mobility and its environment	a) Minor b) Frequent c) Low d) Unlikely e) High	5.8.7.2: Restriction of speed (use of low-power/ speed motors) 5.8.2.2: Light weight design 5.4.2: No sharp projections / edges on outer covers	5.8.7.3: Speed restriction and Safety-related speed control 5.7.6.3: Active mobility balance control (PL c / SIL 1)	5.8.7.4: Training and instructions 8.2.4: Training on any limitations and requirements 8.2.7: Training on emergency situations & procedures
Impact (collision / falling due to brake malfunction) (Scenario 3) (Table A.2-41)	Mobility and its environment	a) Minor b) Frequent c) Low d) Unlikely e) High	5.8.7.2: Restriction of speed (use of low-power/ speed motors) 5.8.2.2: Light weight design 5.4.2: No sharp projections / edges on outer covers	5.8.7.3: Speed restriction and Safety-related speed control 6.2.2.3: Secondary independent brake control / protective stop to bring mobility a safe stand-still stop and induce a passenger to safely disembark from the mobility (PL c / SIL 1)	5.8.7.4: Training and instructions 8.2.7: Training on emergency situations & procedures

2.4.4. 結論

立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの転倒シミュレータによる安全データ取得，立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの屋外実証評価による安全データ取得，立ち乗り搭乗型生活支援ロボットのダミー試験による安全データ取得の結果及び，北米のサービスロボット研究開発機関、実証機関での取り組みについての調査で明らかになったリスク低減の観点を反映した Winglet の実践的なリスクアセスメントが作成できた。

サービスロボットのリスク低減のため安全関連電子制御系を用いる場合，その設計に要求される安全度水準は最大 SIL2 であることが確認できた。

2.5. 北米のサービスロボット研究開発機関、実証機関での取り組みについての調査

2.5.1. 調査目的

「生活支援ロボット」が実際の介護、福祉、医療機関で使われる場合や、研究開発段階でリスクに対する対策が、どのように織り込まれているか、欧米のサービスロボット研究開発機関、実証機関での取り組みについての海外調査を実施した。

2.5.2. 調査必要性

当社が開発している、「生活支援ロボット」：①人搭乗型ロボット、②ベッド移乗支援ロボットなどに於いて対人安全機能を付与した形で開発を実施しているが、医療分野で使われる場合や、介護現場で使われる場合に、各国により付加される規格、基準などが多々存在しており、これらを調査することで安全技術へフィードバックすると共に、ISO の国際標準化提案にもつなげていく。

将来、当社「生活支援ロボット」が北米などでの使用を考えた時、研究開発段階でそのような規格、基準に対応した機能を織り込んでおく必要があり、今回、同様の「生活支援ロボット」を開発している北米研究機関、開発期間と情報交換をすると同時に、北米での医療機器の安全認証を担当している FDA の見解を調査した。

2.5.3. 調査期間

2012年7月22日－29日

2.5.4. 調査地

- (1) San Francisco, CA
- (2) Berkeley, CA
- (3) Mountain View, CA
- (4) Silver Spring, MD
- (5) Atlanta, GA

2.5.5. 「生活支援ロボット、安全機能」についての具体的調査内容

- (1) ユーザー医療機関調査；医療現場からの院内、人搭乗ロボットの移動安全に関わる懸念、要望事項
*EL Camino Hospital (CA), *ICI (CA)
- (2) ロボット開発、研究機関調査；研究開発機関としての移動、人搭乗ロボットでの安全機能に関する考え方
*ICSI (CA), *Georgia Tech (Atlanta), *ITC (CA)
- (3) 認証機関調査；認証機関としての施設、院内での人搭乗ロボットの移動安全に関する着眼ポイント
*FDA (Washington)

2.5.6. 各調査地で得られた調査結果

- (1) ユーザー医療機関調査

(1)-1 1 El Camino Hospital (CA)

医療現場での院内、自律移動ロボットの移動安全に関わる運用状況と課題。
血液などの倦怠を自律移動ロボットが院内運搬。

Aethon 社の TUG ロボット 19 台が稼動中。

- 要点1 障害物回避。手前 1 [m]でまず停止少し考えてから回避するしバックもする。
- 要点2 管理サーバーで現在位置、ロボットからの画像、ステータスなどが見れる。
- 要点3 自動巡回、自動充電（充電時間 40 分ぐらい）。
- 要点4 180 度旋回が必要な場所には、人が入らないようにテープ（Keep It Out）で囲まれている。
- 要点5 EV の利用はできるが、人と一緒に乗れないので、人が居なくなるまで待つ必要がある。ロボット単体になるように人が居なくなるまで待つ必要がある。ロボット単体になるように EV コントローラーが監視している。
- 要点6 病院のエントランスやロビーなどではロボットは稼動していない。

(1)-2 ICI (CA)

高齢者、特に認知症患者の介護を受け入れている、病院、ケアハウスでの自律移動ロボットの機能、安全必要要件について、現地観察、調査結果について議論。

- 要点1 人に対する衝突回避機能、ぶつかった時の転倒回避形状は必要。
外皮も弾性のある、柔らかい表皮が望ましい。
形状も突起の少ない、滑らかな形状が望ましい。
- 要点2 見守り機能について。
徘徊、施設からの無許可外出について、見守り、注意喚起、自室へのガイド機能が望ましい。
注意喚起は、音声もあるが、柔らかい光などによる注意喚起が望ましい。

(2) ロボット開発、研究機関調査

(2)-1 ICSI (CA), Prof. Trevor Darrell

ロボットの環境認識とその後の行動、自律移動、物体把持行動での認識アルゴリズムと行動安全の関係について議論。

- 要点1 物体把持に関する物体認識での、カテゴリー認識と絵柄によるマッチング認識の 2 方式の可能性がある。
その場合、物体の姿勢を変えた時（横にするなど）の認識率への影響と、この状態で把持し、自律走行したときの周囲の環境物との干渉回避について議論。
当面はロボット自体の占有する領域と、その前方にロボットの腕とある程度の把持物体の占有する領域を想定しておき、その範囲内に腕、把持物体をおさめる様にする腕の動きのアルゴリズムで、他の物体や人との干渉回避に対応することになる。

(2)-2 Gerogia Tech (Atlanta), Prof. Mike Stilman

ロボットの環境認識とその後の行動、自律移動、物体把持行動での認識アルゴリズムとロボットの行動安全のアルゴリズムについて議論。

- 要点1 ロボット経路計画後の人の腕などの介入時の安全回避方法。
前方より暫時、接近して来る物体については、従来の 3D レーザセンシングによ

り、認識、回避行動演算できるが、瞬間的に出てくる腕などについては、3D レーザでは今は間に合わず、超音波又は、画像による検知と瞬時停止が、今の技術では対応できる範囲。ただし、物体の手渡しでは、手の正確な位置検出は必要になってくる。

- 要点2 物体把持後の移動中での環境障害物との干渉回避のための、行動形成アルゴリズムと把持計画時の物体の持ち方などの関係について議論。
当面はロボット自体の占有する領域と、その前方にロボットの腕とある程度の把持物体の占有する領域を想定しておき、その範囲内に腕、把持物体をおさめる様にする腕の動きのアルゴリズムで、他の物体や人との干渉回避に対応することになる。

(2)-3 ITC (CA)

ISO13482 のミラノ会議での要検討項目について検討。

- 要点1 UK から追加提案のあった、**Restraint-Free Physical Assistant** の PL 表には従来ウェアラブルタイプが対象であったが、「移乗ロボット」についても PL 対応提案があり、PL 値の妥当性について検討。
「移乗ロボット」PL 対応については、英国側の日本での移乗作業、ロボット導入の動きに対する、横槍、ブレーキ的な動きとしての懸念もあるので、「移乗ロボット」PL 対応が国際委員会で上程されたのであれば、「移乗ロボット」は従来のウェアラブルと異なり外力を人体に動的に与えるものでないで、(どちらかと言えば静的にしかも、繰り返し数が少ない) よりリスクの少ないカテゴリーとしての対応になる様に提案すべき。
- 要点2 **Clause 6,11 (Operation Mode)** についての UK からの **Maintenance Mode** 追加提案に対し、**Autonomous, Semi-Autonomous, Manual, Maintenance** の 4 モードに対し各モードの **Input, Output, Logic** の観点からの対案について検討。
確かに「**Maintenance Mode**」は必要になると考えられるので、条項に加える事は OK。ただし、監視者による非常停止などの安全対策実施を前提とした、ある程度、異常動作解析などが取り組める様な条項とすべき。
- 要点3 **WG8** の **Performance** 規格策定について、**Safety-related** から **Nonsafety-related** をメインとする一般性能についての規格化同行に対する対抗案を議論。
規格化すると言っても安全と言った明確な評価軸が無いのに規格化ができるのか疑問。もし、評価軸として産業機械や電化製品の様に耐久性を軸とするならば、まず、サービスロボットとしての耐久性の必要性から議論必要。また、商品性から機能の特性を論じるならば、商品の嬉しさから評価軸を作っていく必要あり。ただし、サービスロボットは、今は市場創出しながら、商品性、耐久性を探っている段階。規格化の議論をするにはまだ早い。

(3) 認証機関調査

(3)-1 FDA (Washington)

認証機関としての施設、院内での人搭乗ロボットの移動安全に関する着眼ポイント。

- 要点1 基本スタンス：北米では患者をユーザーとして医療施設内で扱うロボットは FDA の認証の対象となる可能性が高い。

要点2 対象ロボットによる認証判断のステップは以下の通り。

- (a) 対象のロボットが認証対象となるかは、新領域になるものが多いと考えるため、FDA513(g)への申請により審査、判断される。
- (b) Class II (non-invasive) で駆動源を伴う機器による治療、治癒が行われる場合) の場合は FDA510 (k)又はそれよりはるかに厳しい PMA (Pre-Market Approval)が必要となる。
- (c) 認証プロセス期間はおよそ日本の 1/5 以下との印象：要因は2万人を超え、認証業務だけでなく、将来必要となる、機器に対する評価試験方法についての、積極筋骨格モデルを使ったシミュレーションを開発。

FDA は将来リハビリ訓練機器やパワーアシストスーツ等が実用化し世の中で使われる様になる事、また FDA としての認証が必要になる事を推定し、人体に対する影響評価を筋骨格シミュレーションなどを使って実施していた。(詳細は FDA との機密保持契約のため記載不可)

3. 成果の普及

表 3-1 公表

公開月	イベント名称	場所
2010/02/10 -2010/02/20	人とロボットのスペシャルコンサート	アムラックス、メガウェブ
2010/02/27	豊田市発明クラブ	愛・地球博記念公園
2010/03/01 -2010/03/02	次世代モビリティフォーラム	名古屋国際会議場
2010/10	豊田市実証実験	豊田市駅前
2011/04/19 -2011/04/28	上海モーターショー	中国上海
2011/06/05	HUREAIday	トヨタスポーツセンター
2011/07/22 -2011/07/31	インドネシアモーターショー	インドネシア
2011/08/22 -2011/10/14	Winglet 実証実験	カラフルタウン岐阜
2011/09/23 -2011/09/25	モリコロパーク秋祭り	愛地球博記念公園
2011/10/02	TES フェスティバル	トヨタスポーツセンター
2011/10/17 -2011/10/28	Winglet 実証実験	豊田市交通安全センター
2011/11/01	ロボット発表会	メガウェブ
2011/11/14	ロボット発表会	ラスベガススピードウェイ
2011/11/27	ガズレーシングフェスティバル	富士スピードウェイ
2011/11/30 -2011/12/11	東京モーターショー	東京ビッグサイト
2011/12/06 -2011/12/07	プリウスカップ	富士スピードウェイ
2012/01/04 -2012/01/22	タイBOIフェア	バンコク
2012/01/25	ロボット発表会	ポートメッセ名古屋
2012/03/31 -2012/04/01	サイクリングロード完成	モリコロパーク

公開月	イベント名称	場所
2012/04/19 -2012/04/21	EV・PHV サミット	朱鷺メッセ（新潟）
2012/04/23 -2012/05/02	北京モーターショー	中国北京
2012/06/14	AFFITN（医学学会）	ANA クラウンプラザ（金山）
2012/09/20 -2012/09/30	インドネシアモーターショー	インドネシア
2012/10/17 -2012/10/19	JAPAN ROBOT WEEK	東京ビックサイト
2012/11/15 -2012/11/16	明知スキルアップセミナー	豊田市
2012/11/16 -2012/11/18	あいち次世代ロボットフェスタ	モリコロパーク
2012/11/30 2012/12/01	ものづくり博2012 IN 東三河	豊橋総合体育館
2013/02/14 2013/02/15	くまもと産業ビジネスフェア	グランメッセ熊本
2013/05/11 2013/05/12	ドライブ王国2013in 福島	ビッグパレットふくしま
2013/10/02 -2013/11/15	Winglet 実証評価	ららぽーと TOKYO-BAY
2013/10/06	T E S フェスタ	トヨタスポーツセンター
2013/10/12 2013/10/13	にしお産業物産フェア	西尾市文化会館
2013/10/24 -2013/11/08	Winglet 業務利用追従	ヴィーナスフォート
2013/11/21 -2013/11/22	海外メディアトリップ対応（Winglet 試乗対応）	西浦モーターパーク

4. 結論

本プロジェクトの達成度を表 4-1 に示す。

表 4-1 達成度

項目	目標	成果	達成度
立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの転倒シミュレータによる安全データ取得	<p>Winglet シミュレータは制御ソフトと機構解析モデルの閉ループ解析により Winglet の前後動作を再現する。シミュレータへの入力は搭乗者重心変化であり、これまではステップ波形で搭乗者重心変化を与えていた。ソフトウェアの動作確認では問題無いが、実験の事前検討やリスクアセスメントなどでは、車体の速度、ピッチ角、トルクには精度が求められる。Winglet 質量(約 20kg)に対して、搭乗者体重(成人男性約 70kg)が相対的に大きいため、精度の良い解析結果を得るためには、搭乗者重心変化を正確に再現する必要がある。</p> <p>人体ダメージを推定する方法として人体ダミーを用いた実験がある。人体ダミーは人体と同等の自由度を持ち、狙った通りの挙動をさせることが困難である。このため実験のやり直しや、方法の見直し</p>	<p>(c) モーションキャプチャを用いて実測した搭乗者加速動作に基づき、搭乗者加速動作モデルを開発した</p> <ul style="list-style-type: none"> • マーカ座標から搭乗者の姿勢を算出、人体データベースに基づきし重心角を推定 • 推定した重心角を Winglet シミュレータに指令値として与え、Winglet 加速動作をモデル上で再現 <p>(d) 再現結果と実測結果を比較し、定性的、定量的(精度 80%以上)に一致していることを確認した</p> <p>(c) 人体ダミーモデルとその解析環境を開発</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hybrid III 50th 立姿勢を機構解析ソフト R e c u r D y 	◎

項目	目標	成果	達成度
	<p>が発生し、実験回数が予定よりも増加してしまう傾向にある。そこで、シミュレータを用いて実験結果を事前に予測し、実験方法の問題点を洗い出し対策を実施しておくことが望まれている。</p> <p>人体ダミーには加速度計、角速度計、荷重計、変位計が頭部、首部、胸部、腰部、大腿部に内蔵されており、人体ダメージ推定実験では人体ダミーを衝突・転倒させて、これらセンサ値の計測結果を数値演算することにより各部位の傷害値を推定する。</p> <p>従来は傷害値を部内にて簡易計算式で概算する、あるいは第三者機関（JARI）などノウハウを所有する組織に計算を依頼する必要があり手間が掛かっていた。以下、傷害値算出に掛かる手間を削減するため、第三者機関（JARI）と同等の結果を算出可能な傷害値算出プログラムの開発</p>	<p>nを用いてモデル化（下図①参照）</p> <ul style="list-style-type: none"> • 人体ダミー、Wingletの制御はMATLAB/Simulink上でコントローラを製作しWingletは速度、姿勢を直接指定する台車としてモデル化 <p>(d)開発モデルを用いた実験の事前検討を実施</p> <ul style="list-style-type: none"> • Winglet搭乗者の壁衝突ダメージ測定実験の事前検討を実施。想定していた方法では狙った条件で人体ダミーが壁に衝突しないことが明らかとなり、事前に効果的な対策を検討・実施したことで実験回数を減らすことができた（下図③参照） <p>実験後、解析結果と実験結果を比較し定性的に傾向が一致していることを確認</p> <p>(c)頭部、首部、胸部の代表的な傷害値（※1）を</p>	

項目	目標	成果	達成度
		<p>算出するプログラム（※2）を開発した （※1）頭部・ ・・H I C、首部・ ・・・MOC、Nij、胸部・ ・・・VC、CTI （※2）本プログラムは全ての実験端末で利用可能 第三者機関（J A R I）の解析結果と比較し誤差が十分小さいこと（誤差3%以下）を確認した</p>	
<p>立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの屋外実証評価による安全データ取得</p>	<p>ロボット公道利用時の利用ルール、交通ルールの妥当性・受容性の評価</p>	<p>① 延べ利用者数 106人、総走行距離 260km 利用し、重大ヒヤリ・事故無しの実績を得た。（但し、道路交通法に基づき、ロボットの近傍にロボットに搭乗していない「保安要員」を配置している） ② 軽微なヒヤリとして、利用途中のバッテリー切れ、縁石への乗り上げ、といった事象がアンケート結果より得られた。 ロボット管理者に対し、利用前の充電管理の注意喚起を実施した。 ③ 既存の教育カリキュラムに、利用地域内の公道環境にて特に注意すべき点を教習すべく、路上教習カリキュラムを追加導</p>	<p>◎</p>

項目	目標	成果	達成度
		<p>入した 重大なヒヤリ・事故が無かったため、導入効果は有ったものと考えられる。</p> <p>i) 現ロボットの仕様の妥当性評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回用いたロボットの仕様は、つくば特区内の公道環境及び駅構内の通行において、安全に利用できる仕様となっているものと判断できる。 ・「歩行者等との混在環境」での安全性に関わるヒヤリは、極少数であったため、当該ロボットは他者・他車との親和性を有するものと示唆される。 ・日中にロボットを利用するにあたっては、現在のロボットの仕様（装備）で十分であると考えられる。 <p>ii) 特区内での規制緩和要望での活用</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現在の規制下では、安全に利用できる実績を得た。 ・速度(6km/h)のロボットでは、歩行者との親和性が高いこと、及び他車両との速度差が大きく危険であることから、歩道通行ニーズが高いという結果を得ることができた。 <p>②鉄道駅構内への乗</p>	

項目	目標	成果	達成度
		<p>り入れと駐機による、 連携実証</p> <p>鉄道駅構内という公共性が高く、歩行者専用の空間への乗り入れと、夜間駐機を実施し、重大な事故及びヒヤリ事象は発生しなかった。</p> <p>③ 安全性を担保する教育・トレーニングカリキュラムの試行</p> <p>実証に先立ち、被験者に対するロボット の操作・操縦の教育・ トレーニングを実施した。</p> <p>教育・トレーニングカリキュラムには、被験者に対し、利用する公道環境において、特に注意が必要なリスクを把握してもらうため、実地教習（自動車運転免許における路上教習に相当）を付加した。</p> <p>この結果、事故及び重大なヒヤリは発生しておらず、実地リスクを教習する本教育・トレーニングカリキュラムは一定の効果があったものと考えられる。</p> <p>(1) 本実証で取得した安全性データ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ロボット仕様項目に該当する公道環境条件として、明るさ、周囲の音量、段差高さ、勾配、路面摩擦 	

項目	目標	成果	達成度
		<p>係数、歩行者通行量を取得</p> <ul style="list-style-type: none"> ・仕様条件下での技術者による走行実験にて、ロボットの最大トルク値、急動作 ・安全走行実績の蓄積として、事故・ヒヤリ無しでの被験者（搭乗者）数、走行距離データを取得 ・交通事故に繋がるヒヤリ事例の被験者（搭乗者）へのアンケート、ヒヤリングによる意見データを取得 	
<p>立ち乗り搭乗型生活支援ロボットのダミー試験による安全データ取得</p>	<p>二輪倒立ロボット Winglet では、NEDO プロジェクトにて人体ダミーを使った安全性検証を実施している。今回、壁へ衝突した際に搭乗者が受ける頭部への衝撃（HIC）について、姿勢の違いによる影響を確認</p> <p>壁へ衝突した際に搭乗者が受ける頭部への衝撃（HIC）について、競合製品と比較</p> <p>Winglet 乗車状態で人と衝突した際に、ぶつかられた側の人受ける頭部への衝撃（HIC）を確認</p>	<p>頭部への衝撃（HIC）は速度に依存していることが分かった。</p> <p>前傾（加速中）、直立（定常走行）、後傾（急ブレーキ）という姿勢の違いによる HIC への影響はほぼ発生しない。</p> <p>頭部への衝撃（HIC）は速度に依存していることが分かった。 ※【人体ダミー実験報告 2/4】と同等の結果となった</p> <p>Winglet のほうが競合製品（6km/h 以上で移動する二輪倒立モビリティロボット）よりも安全に関して優位であると言える。</p> <p>例）・Winglet の最高速度 [6km/h] で壁に衝突した場合、</p>	<p>◎</p>

項目	目標	成果	達成度
		<p>HIC=73.0</p> <ul style="list-style-type: none"> ・競合製品 Segway の最高速度 [20km/h] で壁に衝突した場合、HIC は自動車安全基準の >1 倍 <p>Winglet 乗車中の人（最高時速 6km/h）にぶつかられても、1 次衝突の値は小さく問題ないことが分かった。※</p> <p>HIC が自動車安全基準の >1 倍となるのは、衝突速度が 70km/h を超えるときである。</p> <p>※ 事前にヒアリングした知見者の見解と同じ結果である。</p>	
立ち乗り搭乗型生活支援ロボットのリスクアセスメント	立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの転倒シミュレータによる安全データ取得, 立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの屋外実証評価による安全データ取得, 立ち乗り搭乗型生活支援ロボットのダミー試験による安全データ取得, 北米のサービスロボット研究開発機関、実証機関での取り組みについての調査を踏まえてより実践的なリスクアセスメントを立ち乗り搭乗型生活支援ロボットに対して開発す	立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの転倒シミュレータによる安全データ取得, 立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの屋外実証評価による安全データ取得, 立ち乗り搭乗型生活支援ロボットのダミー試験による安全データ取得の結果及び、北米のサービスロボット研究開発機関、実証機関での取り組みについての調査で明らかになったリスク低減の観点を反映した Winglet の実践的なリスクアセスメントが作成できた。	◎

項目	目標	成果	達成度
	る。	サービスロボットのリスク低減のため安全関連電子制御系を用いる場合,その設計に要求される安全度水準は最大 SIL2 であることが確認できた。	
北米のサービスロボット研究開発機関、実証機関での取り組みについての調査	「生活支援ロボット」が実際の介護、福祉、医療機関で使われる場合や、研究開発段階でリスクに対する対策が、どのように織り込まれているか、欧米のサービスロボット研究開発機関、実証機関での取り組みについての海外調査	以下の調査ができた (4) ユーザー医療機関調査;医療現場からの院内、人搭乗ロボットの移動安全に関わる懸念、要望事項 *EL Camino Hospital (CA), *ICI (CA) (5) ロボット開発、研究機関調査;研究開発機関としての移動、人搭乗ロボットでの安全機能に関する考え方 *ICSI (CA), *Georgia Tech (Atlanta), *ITC (CA) (6) 認証機関調査;認証機関としての施設、院内での人搭乗ロボットの移動安全に関する着眼ポイント *FDA (Washington)	○

欧州において環境への配慮の観点から、小型電動車両の普及に向けた法規の整備が始まっておりすでにイギリス、フランスでは一般人がセグウェイを公道で使用できるようにする法律の策定作業が進んでいる。また、セグウェイの発祥地であるアメリカ合衆国ではすで

にセグウェイを公道で使用できるよう法規の整備が完了している。

日本は小型電動車両の普及に向けた法規の整備の点で欧米に遅れをとっており、小型電動車両の産業により多くの国内メーカーが参入しやすいように、又、日本社会が小型電動車両の安全性や歩行者との親和性を受け入れやすく、小型電動車両の普及がしやすい環境を作るため、本プロジェクトでは小型電動車両の1つである搭乗型生活支援ロボットの実践的なリスクアセスメントを開発した。

特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文・記事		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発表 ・講演	報道（新聞 ・雑誌等へ の掲載）	その他展 示会等
H21FY	0件	0件	0件	1件	0件	1件	4件	0件
H22FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	9件	4件
H23FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	8件	12件
H24FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	1件	11件
H25FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	5件	7件

2.8 研究開発項目⑤ 搭乗型生活支援ロボットにおけるリスクアセスメントと安全機構の開発 独立行政法人国立長寿医療研究センター

目次

まえがき	3
要約	6
1. 研究開発の成果と達成状況	
(1) 研究開発の成果	
1. はじめに	8
2. 研究の概要	
2. 1 実証試験	8
2. 2 人体損傷リスクの基礎検討	8
3. 各年度の研究課題	9
4. 研究の成果	
4. 1 病院・介護施設内でのユースケース検討	1 0
4. 2 生活支援ロボットが活動中に人体へ接触した際のリスク評価法の研究開発	1 1
4. 3 介護施設スタッフによる生活支援ロボットの予備実証試験	1 2
4. 4 生活支援ロボットが活動中に人体へ接触した際のリスク評価法の研究開発	1 2
4. 5 若年健常患者による生活支援ロボットの実証試験	1 5
4. 6 人体損傷データベースからのパラメータの充実とその活用を通してコンピュータシミュレーションによってハイリスクイベントを外挿・推定する方法を検討	1 7
4. 7 実際の患者を含む試験乗員の吊り下げるサスペンションの設置および実証試験	
4. 7. 1 乗員の安全性を担保したサスペンション装置の設置および試験プロトコールおよび計測システムの構築	2 4

4. 7. 2	高齢者に対するロボットを使ったバランス訓練の効果の検討	26
4. 8	頭在化されたハイリスクイベントについて、この状態を再現する人体ダミー vs 模擬ロボットの衝突実験等から解剖学的重症度 (AIS)、HIC、損傷確率論に基づく多面的な医学的評価を推進	
4. 8. 1	ダミーを用いた人体損傷に関する研究	28
4. 8. 2	頭部の撃力に対する応答関係	31
4. 8. 3	転倒や転落の帰納的数理モデル	32
4. 8. 4	総合的なアウトカム分析	34
5.	本研究の成果	36
6.	まとめ	37

まえがき

ロボットと人が共存する環境下で、想定し起こりうるリスクの評価に有効な基礎的研究を実施し、その具体的なリスク値の計算法や個人・社会の許容レベル（リスクアクセプタブル）を推定する事を研究目的とした。上記に述べたように、リスク評価には4つの要素を考慮する必要がある。

1. 想定しうるリスクは何か？.そして、その予測される最大の傷害レベルはどの程度か。(想定リスクと傷害レベル)
2. そのリスクが現実化して、問題化する可能性は如何ほどか.そして、どういう仕組みで現実化するか？.仮に甚大な被害をもたらすような事象であっても現実化しなければ全く問題となることはない。(発生リスク確率)
3. 全ての事象はリスクを伴という認識を持ち、その上で、個人や社会的構成員が受け得る可能なレベルは、如何ほどであるか？(リスク認識と許容レベル)
4. ある事件が発生した場合に、社会の構成員の集団が、誤った恐怖や認識が支配的となるレベルは何処なのか？.つまり、リスクに対する耐性(リスク耐性)の問題である。

これまで、ヒトの傷害に関しては、許容リスクの受け入れ問題は、一種のタブー視する傾向にあり、さらに、東日本大震災に伴う原子力発電所からの放射線漏れ事故に対する農作物の風評被害がクローズアップされるまでは、あまり重視されてこなかった。

生活支援ロボットは、従来の工業用ロボットとは、ヒトとの関係に置いて対照的といえる。ヒトがロボットの作業領域にはみだりに立ち入らないことが前提であり、この危険領域にヒトが侵入した場合、ロボットは緊急停止を行う。言わば棲み分けの思想に基づく。仮に、ヒトとロボットの接触が想定されているケースでは、ロボットが動作する限界速度は、25cm/sと制限されており、人と棲み分けができない場倍には、この動作速度を超えることは許されない。しかし、生活支援ロボットの活躍する場面は、ヒトの接触や密着等により両者の活動領域が重なるのが常である。つまり、ヒトとロボットの共存・共生が前提とされている。さらに、車椅子の走行速度は6km/h(1.67m/s)であり、ヒトや物体に接触や衝突する可能性があるにも関わらず先ほどの数値25cm/sを遥かに超えている。これらの理由から、生活支援ロボットは、従来の産業用ロボットのリスク評価基準の枠では捉えきれず、新しいアセスメントの手法と観点が求められる所以である。

ロボットがヒトと共存・共生する場面では、ヒトはロボットに対して、肉体的な弱者であることを認識する必要がある。従来の安全基準や品質保証に置いては、例えば、機械部品の精度、耐久性、腐食性等の構成部品としての品質、さらに、それらの部品を用いて作

られた製品の強度や性能など機械に対する要求であり、「この機械・製品は、大丈夫だから、購入、使用してください」という機械が主役であり、機械の要求にヒトが合わせてゆく、ヒトの冗長性や可塑性に期待した設計思想であった。しかし、生活支援ロボットは、肉体的弱者であるヒトが主役であり、中心のヒトから周辺に配置されたロボットに対して、「ロボットはヒトに対して、この様にあるべきだ」という命令や思考を機械に対して突きつけてゆく立場であり、機械が人の特性に合わせるのである。機械が人の特性に合わせるためには（人から見た安全性）、人体の有する物性や心理などの自然的性質を理解する事が求められるが、世界的にも十分なデータが存在しておらず、特に、医療・看護の現場で問題となるような弱い傷害に関する数値データは皆無に等しく、傷害リスクとそのレベル予測手法の開発は、人とロボットが共存して行く上で急務と言える。

我々は、外力の印加速度と生体反応の依存性、筋活動と骨折などの物理生理学特性の取得と評価を中心に、リスク許容レベルの探索、重症度指標(HIC, AIS, N_{ij} など)と総合リスクアジャスタ、ダミー実験とその動作解析、傷害組織の病理、および、計算機シミュレーションを実施した。さらに、ロボットとヒトとの衝突や転倒モデルの妥当性を検討するために、病院側が行う臨床実証実験と比較して、傷害発生機序の適合性や限界・問題点を探し出し、補正を行った。さらに、総合リスクアジャスタを用いることで、予測される傷害の重症度判定と共に、安全性を確保するための医療用、介護看護用、および、スポーツ用などの各種のプロテクタの有用性や、衝撃緩和効果などの数値的予測が可能となった。

上記の内容を実現するために、便宜的に研究所と病院側との役割分担が行われた。

【研究所】基礎的な外傷の重症度判定と容認リスクのレベルの探求

1. 福祉ロボットが活動中に人体に接触した際のリスク評価法の開発研究
 - 1-2. 高速接触(10mm~2m/s)時の傷害の諸相
 - 1-3. 接触時の影響・外傷との関連、応力・傷害関係
2. 人間工学的に見た接触時の影響とリスクアセスメント
 - 2-2. 人間工学的モデリングとリスクアセスメント
3. 傷害と傷害レベルの計測と応答、そして評価
 - 3-1. 音響特性や電気生理学的応答の変化
 - 3-2. 基礎付けと数理モデリング
4. 総合的考察
 - 4-2. 安全指標および基準数値や目標などの提案

【病院側】生活支援ロボットの実証実験

- 1-1. 低速接触(0mm~25mm/s)時の皮膚への影響と筋肉組織から骨組織までの応力伝播
- 2-1. 福祉ロボット利用時の影響とリスクアセスメント

4-1. 臨床データ，病院部実証結果の比較と考察

である。上記の項目は，互いに関連しており，各項目単位に個別に切り出して記述することは困難である。従って，これらの内容をまとめて一連の流れとして成果を報告とする。

要約

生活支援ロボットは、商業施設、駅・空港等の交通施設、オフィス、家庭に至るまで、不特定多数の人や、他の移動体や障害物と同一空間内で共存が可能なこと求められる。そこで、本研究では生活支援ロボットが至近距離で人と同居するという状況下で人に与える危険性やリスク、皮膚等の人体損傷の可能性を予測・評価して、安全性確保に益する資料を提供するため、生活支援ロボットの安全性の実証実験を病院・介護施設等の諸施設で実施し、顕在化された人体損傷リスク評価の基礎検討を行った。なお、本研究の遂行に際しては、病院が生活支援ロボットの病院・介護施設における実証試験を担当し、研究所が生活支援ロボットに係る人体損傷リスクの基礎検討を行った。

平成21年度は、ユースケース検討では、トヨタ自動車開発者で検討し、立ち乗り搭乗型生活支援ロボットでは杖的な外出サポートなど、座り乗り搭乗型生活支援ロボットでは自律移動の電動車いす進化型が提案された。立ち乗りと座り乗り搭乗型生活支援ロボットを国立長寿医療センターに持ち込んで、試乗後にアンケートを実施し、適応対象者の絞り込みと利用拡張性について明らかにした。

人体損傷の評価では、1. 転倒の機序と人体機構の連関、2. 人間の心理的かつ緊急時の回避行動の可能性と妥当性、3. ロボットの安定性特性の評価、4. 人体の物性値の取得と欠損データの取得実験、及び動的な物性値の推定、5. 損傷のシミュレーションなどが重要点であり、人体数値データや静的物性値は既存データベースなどで比較的良くデータが取得できた

平成22年度は、加齢による機能低下を考慮した立ち乗り搭乗型生活支援ロボットの予備実証試験を実施し、操作の安全性評価を行い、高齢者が操作した場合の問題点を検討した。高齢者の運動機能、感覚機能、知覚機能の低下は、高齢者体験セットによって再現し、ロボット使用による安全性を比較した。ロボットの適応者の条件は、立位、歩行、踏み台昇降、視力、聴力、排泄の各能力がすべて日常生活に支障のない状態の者となり、今後の臨床患者の試験参加条件となると思われた。

自動車研究所と本ロボットを想定した模擬台車を作成し、ダミー人形を搭乗させ出会い頭に衝突の状況を想定し、諸条件を組み合わせる衝突実験を実施した。損傷評価には自動車追突試験に用いられる頭部損傷基準値(HIC)を利用した。病院等で使用されるリノリウムは転倒時の頭部損傷を1/2—1/3に低減する効果が示された。ダミー人形を用いた実験より、模擬台車からの転倒は複数の過程から存在することが判明した。それは、ダミーが搭乗者・模擬台車に衝突する、台車の片輪が浮き上がる、台車の回転運動とダミーが慣性により姿勢を保持したまま傾いた台上を滑落する、ダミーの下肢が捻れた後、大地に踵が接地する、踵を回転中心として、頭部が回転自由落下する、という一連の流れである。この過程を逐次数理モデル化すれば、幾つかの方程式群が得られた。この数理モデリングとダミー実験データより衝突、転倒、受傷過程の詳細吟味が可能となった。

平成23年度は、患者が日々使用するコースを移動してデータ収集して評価し、その後に健常患者による見学参加が計画された。医療従事者6名による本ロボット搭乗に関して、内科データと速度の測定、ビデオ撮影、安全アンケート調査を実施した。血圧、脈拍、心拍出量などの循環器データは本ロボット搭乗による影響はなかった。見学した健常患者5名は、20%が「本ロボットが入院患者を介助できる」と回答し、座椅子、荷物置き、安定感などの改良点があげられた。危ないという印象との回答率は80%で、理由に操作困難、スピード、乗降時、不安定性、転倒不安があげられた。患者の搭乗による実証試験を十分に実現するには、懸垂装置等の安全確保を病院内に設置することが必要と考えられた。

自動車研究所と本ロボットを想定した模擬台車を作成し、ダミー人形を搭乗させ、ダミ

一が正面から 5km/h で衝突したケースと双方が 5km/h 出合い頭に衝突した場合等の実験を行った。転倒時には、最初にロボットが接地して相当の衝撃を吸収し、その後、四肢等、そして、最後に頭部、胸部などの重要部位の接地が望ましいことがわかった。

平成 24 年度は、より实际的に搭乗時のリスクを明確にするために、患者等の乗員安全性を担保した実証路と姿勢衝撃応力計測を合わせた実証試験システムを設置し、ロボット訓練を行い、顕在化されたハイリスクイベントを再現するダミーvs 模擬ロボット実験等から解剖学的重症度、HIC、損傷確率論に基づく多面的な医学的評価を推進した。平成 21～23 年度で得られた実証試験および周辺技術を総合し、より实际的に搭乗時のリスクを明確にするために、乗員の安全性を担保したサスペンション装置を設置した。このサスペンション装置を利用して実際の患者を含む実証試験のための試験プロトコールおよび計測をあわせたシステムの構築を行った。また、ロボット訓練を行う前の先行研究として、フレーム内の限定されたスペースでロボットを使ったバランス訓練を行い、その効果を検証して、走行ライセンス付与のためのガイドラインの基礎的なデータの収集を図った。

日本自動車研究所と共同で、小ダミーを台車、車椅子、自転車等に搭乗させた状態から転倒や相互に衝突を起こさせた場合や、救命用エアージャケット、ヘルメット、そして、医療用カラー等の防具を小ダミーに装着させることによる保護具の有効性を含む身体への影響についての評価を、撃力、加速度等の物理的要因を身体的重症度に読み替える目的で、総合的なアウトカム分析である TRISS を導入して人体損傷が発生した際の予後生存率や許容レベル評価の有用性について明らかにした。

平成 25 年度は、サスペンション式実証試験路を設置し、障害物が介入した際のリスク発生への推定、走行ライセンス付与のためのガイドラインを策定について検討を行った。その結果、サスペンション式実証試験路を用いて、若年健常者 6 名、高齢健常者 4 名について実証試験を実施し、本装置を使用したことによる改善等の効果を確認した。このことから走行ライセンスの要件として、実地教習が普及技術として効果をしめすことが明らかにされた。

基礎研究では、ロボットと人の接触速度やエネルギー負荷から、身体部位別の傷害リスク評価で用いるパラメータを衝突実験 (JARI において) から取得した。この結果から数値人体モデルや衝撃荷重の人体組織の伝搬過程を解析し、ハイリスクイベントに関しては、ダミーvs 模擬ロボットの衝突実験等に落とし込み、解剖学的重症度 (AIS)、HIC 等の傷害水準による評価を、また、生物試料による組織衝撃試験から微弱な損傷 (AIS0～1) 評価を行い多面的な医学的評価を行った。これらの知見を総合し社会的許容リスク水準を検討して、生活支援ロボットに共通に潜在するリスクと必要な安全検証モデルを提案した。上記の研究開発により生活支援ロボットの社会実装における普及技術の一考察、および人体損傷に基づく必要安全の構築法を開発した。

以上から本研究の結果、ロボットが至近距離で人と同居するという状況下で人に与える危険性やリスク、人体損傷の可能性を予測・評価して、安全性確保に益する、医学的見地に基づく安全評価 (人体損傷評価) 法の確立のための評価体系を構築することができた。これらの成果 (TRISS-NCGG) を用いることにより、病院・介護施設に絞った実証試験、安全かつ有効なロボット搭乗訓練、または、ロボットの利用状態に即した人体損傷評価プロトコールの提案などの提供が可能となった。

1. はじめに

ロボットが至近距離で人と同居するという状況下で人に与える危険性やリスク、人体損傷の可能性を予測・評価して、安全性確保に益する資料を提供するため、生活支援ロボットの安全性の実証実験を病院・介護施設における実証試験と研究所における生活支援ロボットに係る人体損傷リスクの基礎検討の組み合わせで行った。

2. 研究の概要

2. 1 実証試験

実証試験では、病院・施設は、全期間を通じて高齢患者の機能と安全に関するデータを面接、質問紙調査、行動観察等により収集してロボット開発者に伝え、開発者は必要な改良等を行うとともに、安全性検証手法開発者へのフィードバックを行った。それが反映された安全性検証手法による実証試験を行った。高齢患者の安全最優先の観点から段階的に試験を進めた。平成 21、22 年度は、医療・介護スタッフを被験者とした模擬実証試験で高齢患者を想定した改善点を抽出した。この間に人体損傷リスク検討と連携してロボット接触等による皮膚、骨等の応力を実測やFEMにより評価した。平成23年度は、非高齢患者を被験者として同様な改善点を収集しながら、安全性検証手法による実証試験を実施し、対象とすべき高齢患者の選定基準を決定した。決定された対象高齢患者の仕様に合わせ、安全かつ実効的な搭乗試験とするための安全装置の基本設計、および効果検証に設計・設置を平成23年下期～平成24年上期において速やかに着手した。平成24～25年度は、平成21～23年度で得られた実証試験および周辺技術を総合し、より实际的に搭乗時のリスクを明確にするために、患者を含む乗員の安全性を担保した実証路を設置し、ロボット訓練を行い、障害物が介入した際のリスク発生のクライテリア（人体損傷データベースによる人体損傷の推定）から回避のためのシステムと、リスクの顕在化と、さらには院内における患者共存の安全評価・仕様ガイドライン基準案を提案した。

2. 2 人体損傷リスクの基礎検討

人体損傷リスクの基礎検討では、ロボット開発に資する「1. 生活支援ロボットが活動中に人体へ接触した際のリスク評価法の研究開発」「2. 人間工学的にみた接触時の影響とリスクアセスメント」、「3. 損傷や損傷の計測と応答」および、各種の実験やモデリングから得られた実験・実証データを統合する「4. 総合的考察」の技術的確立を目指した。

平成 21～23 年度は、生活支援ロボットでは避けられないロボットと人の接触について、接触速度とそのエネルギー負荷等の影響を明らかにするとともに、病院医師と連携した人体損傷とのすりあわせを行った。また、体の部位の特徴（頭部と胴部の違いなど）や動きとその筋活動から、種々のケースでのリスクアセスメントを行った。より有効なシミュレ

ーションパラメータを取得する衝突試験を日本自動車研究所（JARI）等の実験施設で実施すべく、コンピュータシミュレーションに基づく人体モデルおよび衝撃荷重が人体材料を伝搬する過程を反映したダミー人形モデルを早急に構築し、このモデルを用いた安全性評価プロトコールから次年度以降の衝突実験デザインを確定した。平成 24～25 年度は、平成 23 年に構築したプロトコールから、シミュレーションおよび実証試験から得られたハイリスクイベントについて、人体ダミーvs 模擬ロボットの衝突実験等から解剖学的重症度（AIS）、HIC、損傷確率論等に基づく多面的な医学的評価を推進した。

3. 各年度の研究課題

[平成 21 年度]

- ・ 病院・介護施設内でのユースケース検討
- ・ 生活支援ロボットが活動中に人体へ接触した際のリスク評価法の研究開発
 - 健常者での人体データ取得法及びデータベース化の検討と考察
(計算法、データベースプロトタイプの構想)
 - 既存データの見極めと、不足データの取得法の考察：非侵襲データの取得
 - 接触速度の損傷の模擬実験：低速接触（0～10mm/s）と高速接触（10mm/s～2m/s）時の皮膚への影響と筋組織から骨組織までの応力伝播等損傷評価

[平成 22 年度]

- ・ 介護施設スタッフによる生活支援ロボットの予備実証試験
- ・ 生活支援ロボットが活動中に人体へ接触した際のリスク評価法の研究開発
 - 計測・測定データの力学変数への変換法の開発と衝撃の推定

[平成 23 年度]

- ・ 若年健常患者による生活支援ロボットの实証試験
- ・ 生活支援ロボットが活動中に人体へ接触した際のリスク評価法の研究開発
- ・ 健常者データベース化と人体モデリングの作製
(人体組織のレンダリングと実験との比較)
 - シミュレーションの開始
 - 臨床データとの比較の開始
 - 高齢者データの取得とプロトタイプモデルへの適応と修正
- ・ 人体損傷データベースからのパラメータの充実とその活用を通してコンピュータシミュレーションによってハイリスクイベントを外挿・推定する方法を検討
- ・ 試験乗員を吊り下げるサスペンションシステムを有した安全装置の基本設計・

設置準備

[平成24年度]

- ・ 実際の患者を含む試験乗員の吊り下げるサスペンションの設置および実証試験
- ・ 車イス対応の大型トレッドミル（既存）およびストレッチャー等の障害物からなる実証路と姿勢・衝撃応力計測を合わせた実証試験システムの構築
- ・ 患者に安全に行えるロボット訓練を実施
- ・ 転倒・転落の防止システムおよび障害物の回避システムの検討
- ・ 顕在化されたハイリスクイベントについて、この状態を再現する人体ダミーvs 模擬ロボットの衝突実験等から解剖学的重症度（AIS）、HIC、損傷確率論に基づく多面的な医学的評価を推進

[平成25年度]

- ・ リスクアセスメントから搭乗型生活支援ロボットに安全機構を実装化し、実証試験および衝突試験（JARIにおいて）を実施

4. 研究の成果

4. 1 病院・介護施設内でのユースケース検討

生活支援ロボットによる高齢者医療支援に関するExpert Opinionを少数の専門性の高い医師及び看護師等とトヨタ自動車開発者で検討し、立ち乗り搭乗型生活支援ロボットでは杖的な外出サポートなど、座り乗り搭乗型生活支援ロボットでは自律移動の電動車いす進化型が提案された。高齢患者は複数の併存疾患を有し、身体的及び精神的機能低下を来していることが多く、その医療内容や現場のニーズは複雑多岐にわたる。それに対応できる支援をロボットが提供するには、前記想定に加えて、幅広い診療科の医師や多様な職種から多くの意見を聴取することが不可欠と考え、予備実証試験として国立長寿医療センターで生活支援ロボット持ち込みによる医療スタッフのロボット体験とそれに基づくユースケースに対する適用患者、改良点、想定リスク、ユースケースの新しい提案等を収集した。

立ち乗りと座り乗り搭乗型生活支援ロボットを国立長寿医療センターに持ち込んで、試乗後にアンケートを実施した。参加者は総数48名で、その内訳は、医師(循環器科、呼吸器科、消化器科、老年科、神経内科、内分泌科、外科、整形外科、脳外科、泌尿器科、皮膚科)、看護師、理学療法士、薬剤師、検査技師、放射線技師、臨床工学士などが参加した。

アンケート内容は事前にトヨタ自動車と協議したものを使用し、43名から回答を得た。立ち乗り搭乗型生活支援ロボットについて、対象患者の条件として、認知機能については正常、身体機能は健常、適応疾患は心肺機能低下が最多であった。使用目的は移動が最多

でほかに歩行支援、訓練、レクリエーション、運搬、スタッフ移動があった。改良点は乗降、想定リスクは転倒・転落があげられた。

座り乗り搭乗型生活支援ロボットについて、対象患者の条件として、認知機能については正常、身体機能は座位保持可能、適応疾患は対麻痺・片麻痺が最多であった。使用目的は移動が最多でほかに運搬があった。改良点は背もたれ、想定リスクで転倒・転落があげられた。

4. 2 生活支援ロボットが活動中に人体へ接触した際のリスク評価法の研究開発

1. 転倒の機序と人体機構の連関、2. 人間の心理的かつ緊急時の回避行動の可能性と妥当性、3. ロボットの安定性特性の評価、4. 人体の物性値の取得と欠損データの取得実験、及び動的な物性値の推定、5. 損傷のシミュレーションなどが重要点と考えられる。人体数値データや静的物性値は既存データベースなどで比較的良くデータが取得できたが、動的物性値はほとんど見受けられない。また、人体の強い異方性により強く影響される。さらに、衝撃力に対する生体の応答は大きく異なる。豚とロードセルを用いた撃力・応答実験では、撃力作用時間、撃力伝播速度は、頭部で0.001s、20m/s程度と見積もられるが、筋肉組織では0.007s、2.8m/sと低下する。原因は、撃力に対して比較的早く応答する骨成分と、ソフトマターである筋肉成分が混在し、2峰性の応答曲線を示す。これは、同じ撃力であっても身体部位により、その応答が異なり、損傷程度に差が生じることを示唆する。筋肉に関しても、入力撃力と応力の比率に相当なばらつきを生じ、減衰率は0.6から0.4程度となり、転倒時やロボットとの衝突時のプロテクタ作成時の目安を与える。転倒や撃力応答に関する数値シミュレーションの初期値探索を実施した。

モデルは、男性と女性が転倒して直接的に頭部を地面で叩打した場合を想定している。そのときの頭部と地面の接触面積は、1cm²と仮定した。その時の頭部打撲速度は約5m/sほどだが、動いている状況から転倒した際には、約8m/sにも達する。頭部受傷面積を1cm²と仮定すると転倒時に頭部に加わる力と圧力が推定され、静止していた人の転倒時衝撃力は39200～49000Nで、頭部圧力は400～500MPaにも達する。また、走っていて転倒や追突され転倒した時にはその圧力は500～600MPaになる。一般的に骨の降伏点は、引っ張り応力で170MPa、圧縮応力で280MPaであることを考えると、転倒に対する何らかの保護措置は必要である。保護措置の目安として、筋肉のようなソフトマターを考えてみる。

撃力の減衰率は0.5程度であれば、骨の圧縮応力の降伏点280MPaを下回る。どのようなソフトマターがこの数値を下回るかは、筋組織の脂肪対筋線維の割合と組織構造が手掛かりになると考えられる。同様に、胸郭は0.2と低値であり極端に衝撃吸収力に富んでいる。これは、胸郭の肋軟骨部分、それを構成する肋骨が作り出すバネ状の構造に関連している。以上のことより、保護材はスプリングとソフトマターの複合体であることが望ましい。

4. 3 介護施設スタッフによる生活支援ロボットの予備実証試験

高齢者医療に従事する医師・看護師に加齢による機能低下を考慮した立ち乗り搭乗型生活支援ロボット(以下、本ロボット)の予備実証試験を実施し、本ロボットの操作の安全性評価を行い、高齢者が本ロボットを操作した場合の問題点を検討した。トヨタ自動車と綿密な事前検討を経て広瀬工場にて実施した。

高齢者の運動機能、感覚機能、知覚機能の低下は、高齢者体験セットによって再現し、健常者(高齢者体験セット非装着)と模擬高齢者(高齢者体験セット装着)の条件でロボット使用による安全性を比較した。本セットの内容は、脊柱後彎具、膝と肘の拘束具、手首と足首の重り、手袋、エルダーゴーグル、耳栓で、これを装着すると搭乗者の転倒等の危険が増すので安全のため懸垂装置を使用した上で、乗車、直進、Uターン、下車の操作を行い、乗車時、走行時、下車時の危険度をアンケートで調査した。さらに、模擬高齢者の試乗体験から想定される本ロボットの適応者の条件も聴取した。

その結果、健常者条件と模擬高齢者条件の運動機能比較で高齢者体験セットは前期高齢者の運動機能を再現できていた。本ロボットへの乗車時間は模擬高齢者条件で平均2.8秒延長した。走行時間と下車時間には明らかな延長はなかった。各操作に関する安全性評価は、乗車操作では模擬高齢者条件でバランスを崩しやすくなるような姿勢や操作が多いため安心感が低下した。走行操作では模擬高齢者条件でも直進でスピードが遅いため安心感が保たれたが、左折、右折、Uターンで不安感が増加した。下車操作では、模擬高齢者条件でボタンの片手操作は安心感が低下し、ステップから後向きに降りる動作は不安感が増加した。表示類では、模擬高齢者条件で緑色ランプが識別しにくく、各種音が聴き取りにくくなった。

本ロボットの適応者の条件は、立位、歩行、踏み台昇降、視力、聴力、排泄の各能力がすべて日常生活に支障のない状態の者となり、今後の臨床患者の試験参加条件となると思われる。

4. 4 生活支援ロボットが活動中に人体へ接触した際のリスク評価法の研究開発

＝計測・測定データの力学変数への変換法の開発と衝撃の推定＝

自動車研究所と本ロボットを想定した模擬台車を作成し、小ダミー人形を搭乗させた。大ダミー人形が静止ロボットに正面から5km/hで正面衝突と双方が5km/hで出会い頭に衝突の状況を想定した。衝突後、小ダミーが転倒で受ける衝撃力を評価した。実験条件は無制御の本ロボットを想定した。小ダミーにはプロテクター、転倒条件は3種類を用意した。

ダミーが衝撃を受ける地面はコンクリートとリノリウム2種類として、上記条件を組み合わせて衝突実験を実施した。損傷評価には自動車追突試験に用いられる頭部損傷基準値(HIC)を利用した。以下に各衝突時のHICを示す。

表 4. 4. 1 コンクリート床の正面衝突

HIC	無防備	自転車用ヘルメット	プラスチック安全帽
自然立位	5475	466	-
模擬台車	9282	1009	6070
自転車	7600	320	-
(参考)単純転倒	6771	-	-

表 4. 4. 2 コンクリート床で出会い頭衝突

HIC (コンクリート)	無防備	自転車用ヘルメット	プラスチック安全帽
自然立位	4746	666	-
模擬台車	7567	1222	6966
自転車	9560	562	-
(参考)単純転倒	6771	-	-

全事例で自転車用ヘルメットで HIC は著明に低下し、さらにリノリウム床の実験では、下表のようになった。

表 4. 4. 3 リノリウム床

HIC	無防備	無防備	自転車用ヘルメット	自転車用ヘルメット
リノリウム床	停止対ヒト 5km/h	出会い頭双方 5km/h	ヘルメット停止対ヒト 5km/h	ヘルメット 出会い頭双方 5km/h
模擬台車	4054	4863	394	509

表 4. 4. 4 模擬台車や立位からリノリウム床に単純転倒

HIC リノリウム	無防備	自転車用ヘルメット
自然立位	2250	372
模擬台車	2834	322

このように、病院等で使用されるリノリウムは転倒時の頭部損傷を 1/2—1/3 に低減する効果が示された。自転車用ヘルメット装着するとこの床との相乗効果により HIC が 1000 以下となり頭部外傷が大きく低減される。全頭式オートバイ用ヘルメットはこれと比較すると低速衝突で硬さや重量から HIC が上昇し模擬台車による転倒実験では HIC=808 を示した。

自転車用ヘルメットを装着しリノリウム床なら重大損傷を生じない可能性が高い。今年度は数値モデル解析用数値取得も課題で、今後は必要データ取得の実験を追加する。数値解析用データベースに必要な 3D 人体数値データ・物性値を協力施設より入手し、そこから臓器・組織別の切出し分離を行い我々のデータベースを構築している。破壊過程の動的粘性率やヤング率の推定法開発では Mooney-Rivlin 法以外にも豚組織を用いた衝突荷重波形と阻止加速度波形による経時的ヤング率・粘弾性率の逆推定法を考案し、既波形取得のための実験系を設計しており、逆推定アルゴリズムプログラミング化を実現する。骨等の応力解析は CT 値とメカニカルファインダーを利用して概略的分析を実施している。

今後はこの概略図を基に人体臓器を再配置して人体画像の再構成を実現する。この後、LS-DYNA により衝撃による臓器変形等を動的に研究する。また、ダミーデータを分析して簡略数理的転倒モデルと簡便 HIC 推定法を開発し、ダミーの衝撃波形はガウス関数で優れた近似が可能である事が示された。次の表はダミー実験値と開発したガウス関数を用いた HIC 予測法の比較である。

この近似モデルの根底には“転倒は体のある接地点を中心として回転・自由落下する”という仮説が存在し、ダミー実験値とガウス関数近似法の著しい一致は我々の仮説の正当性を主張している。さらに、衝撃緩和材料であるヘルメット効果はガウス関数近似法より“仮に頭部に加わる撃力の総量が一定の時でもガウス関数の波高を低下させ、標準偏差を広げる”作用として解釈され、HIC 低下には力の作用時間を延長する材質を探せばよい。

JARI のダミー人形を用いた実験より、模擬台車からの転倒は複数の過程から存在することが判明した。それは、大ダミーが搭乗者・模擬台車に衝突する、台車の片輪が浮き上がる、台車の回転運動と小ダミーが慣性により姿勢を保持したまま傾いた台上を滑落する、ダミーの下肢が捻れた後、大地に踵が接地する、踵を回転中心として、頭部が回転自由落

下する、という一連の流れである。この過程を逐次数理モデル化すれば、幾つかの方程式群が得られた。この数理モデリングとダミー実験データより衝突、転倒、受傷過程の詳細吟味が可能となる。

表 4. 4. 5 ダミー実験値と開発したガウス関数を用いた HIC 予測法の比較

HIC の実験値	6028	2184	1192	774	554	422
近似の HIC	6170	2181	1187	771	551	419

4. 5 若年健常患者による生活支援ロボットの実証試験

健常患者による生活支援ロボットの実証試験を以下のように行った。まず、実際の病棟に立ち乗り搭乗型生活支援ロボット(以下、本ロボット)を搬入し、本物の患者が参加する前に、高齢者医療に従事の医師・看護師による高齢患者を想定した安全を患者が日々使用するコースを移動してデータ収集して評価し、その後に健常患者による見学参加が計画された。医療従事者 6 名による本ロボット搭乗に関して、内科データと速度の測定、ビデオ撮影、安全アンケート調査を実施した。

血圧、脈拍、心拍出量などの循環器データは本ロボット搭乗による影響はなかった。安全に関して「とても危険」と回答された動作場面は、「乗車したまま病室の扉を開く」、「廊下を U ターンする」、「ハンドル手前に引きながら後ろ向きに片足ずつ降りる」であった。このほかに、「どちらかと言えば危険」も含めて危険という回答率が 50%以上になったのは、「食堂で降車して椅子に座る」、「乗車時にハンドルを持ち、傾いているステップに片足を置く」、「ステップが平行になるまでハンドルを前に押して片足で乗る」、「病室で右折し病室内の通路に出る」、「廊下移動時、乗車したまま一時停止する」、「段差を越える」、「ベッドサイドで乗降車する」であった。見学した健常患者 5 名は、20%が「本ロボットが入院患者を介助できる」と回答し、座椅子、荷物置き、安定感などの改良点があげられた。危ないという印象との回答率は 80%で、理由に操作困難、スピード、乗降時、不安定性、転倒不安があげられた。「とても危険」と回答された動作場面は、「病室に戻ってベッドサイドで降りる」、「エレベーターに乗る」であった。「どちらかと言えば危険」も含めて危険という回答率が 50%以上になったのもこの 2 つであった。入院生活で現実に行われている病棟内移動をロボット搭乗して行い、患者が見学参加した。

今後、患者の搭乗による実証試験を十分に実現するには、懸垂装置等の安全確保を病院内に設置することが必要と考えられた。

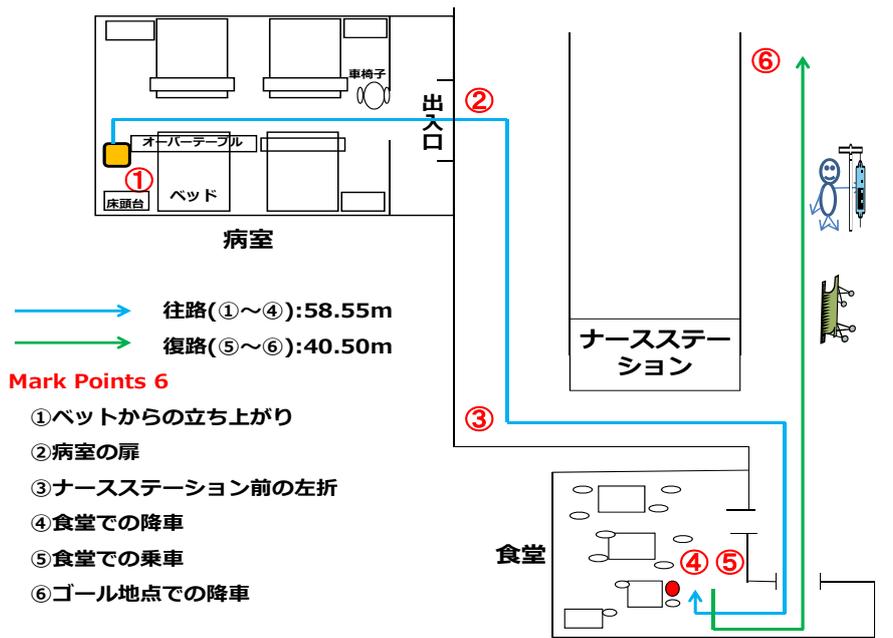


図4. 5. 1 試乗コース



図4. 5. 2 ナースステーション前の左折後の廊下走行

4. 6 人体損傷データベースからのパラメータの充実とその活用を通してコンピュータシミュレーションによってハイリスクイベントを外挿・推定する方法を検討

自動車研究所と本ロボットを想定した模擬台車を作成し、小ダミー人形を搭乗させ、大ダミーが正面から 5km/h で衝突したケースと双方が 5km/h 出会い頭に衝突した場合等の実験を行った。下記のグラフは、ヘルメットを着用していない小ダミーが、1. 自然転倒（自然に後方転倒）、2. 立位衝突転倒（台車無し）、3. 台車上立位衝突転倒（台車有り、静止 vs 5km/h）、そして、4. 出会い頭衝突転倒（台車有り、5km/h vs 5km/h）等の頭、胸、骨盤等が受ける経時的な加速度変化を示している。

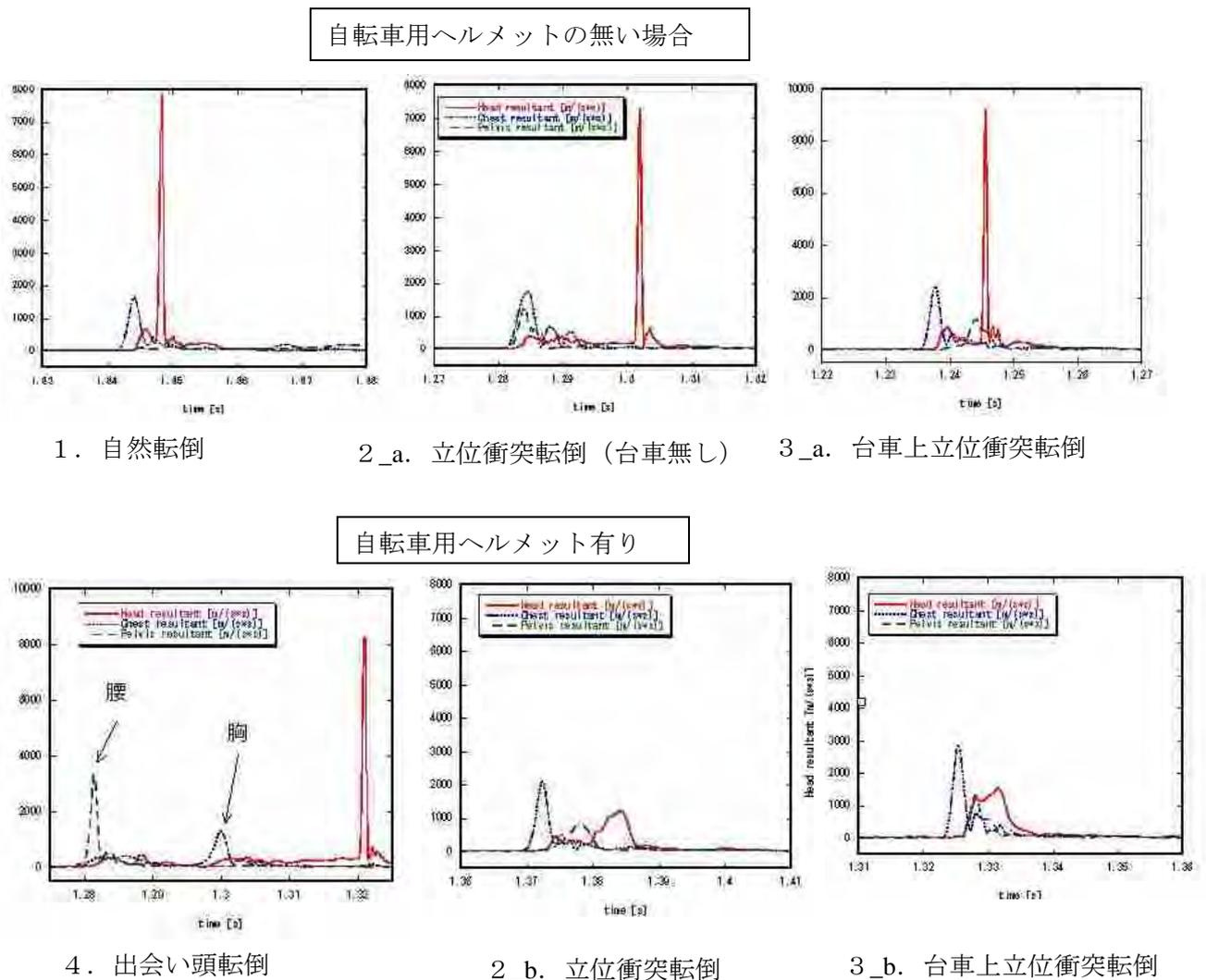


図 4. 6. 1 衝突時に人体が受ける加速度

ヘルメット無着用の場合は、全てのケースで頭部加速度は 7000m/s^2 を超えている。逆に、ヘルメットを着用する事で、頭部の最大加速度が 2000m/s^2 以下に減少可能となる。さらに、自然転倒、立位衝突転倒、そして台車上立位衝突転倒では、身体打撃を受ける順序は、胸→骨盤→頭であり、出会頭衝突では腰→骨盤→頭の順序となる。前者は後方転倒が主体となり、後者（出会い頭）では体幹部に回転運動が加わるために骨盤が第1受傷部位となる。また、後者の場合は、身体各部（頭、胸、骨盤）に加わる撃力に時間的なずれが生じているが、逆に、後方転倒では頭、腰、骨盤への衝撃はほぼ同時に発生する。最も致命的である頭部外傷のケース（ダミー実験の結果）をコンクリート床とリノリウム床に分けて比較実験を実施した。

図4. 6. 2 床の違いによるHICの値

HIC	防具なし	自転車用ヘルメット	プラスチックヘルメット
立位衝突転倒(コンクリート)	5475	466	-
台車上衝突転倒 (コンクリート)	9282	1090	6070
自転车上衝突(コンクリート)	7600	320	-
自然転倒(コンクリート)	6771	-	-
台車上衝突転倒(リノリウム床)	4054	394	-
自然転倒(リノリウム床)	2250	372	-
台車上立位自然転倒(リノリウム床)	2834	322	-

JARI との実験から計算された正面衝突の HIC (頭部損傷クライテリア)。自然転倒以外は、大ダミーが 5km/h で、静止した小ダミーに衝突した後、転倒して床より受ける加速度を経時的に計測した。

上記の数値が示すように、病院や事務所などに用いられているリノリウムは、転倒時に頭部に与える損傷を $1/2$ から $1/3$ に低減する効果が示された。しかし、実験に用いるリノリウム床の厚み、材質、経年変化による歪み等の影響が大きく効果が余り期待できない事がある。

搭乗者に自転車用ヘルメットを装着させた場合は、この床とヘルメットの相乗効果が期待でき、HICが1000を大きく下回り頭部外傷が大きく低減される。全頭式オートバイ用ヘルメットは自転車用ヘルメットに比較すると、 5km/h 程度の低速度の衝突では、その材質の硬さや重量の大きさから、逆にHICが上昇して台車による転倒実験ではHIC=808を示した。身体の各点の動きをモーションキャプチャーを用いて追跡した。

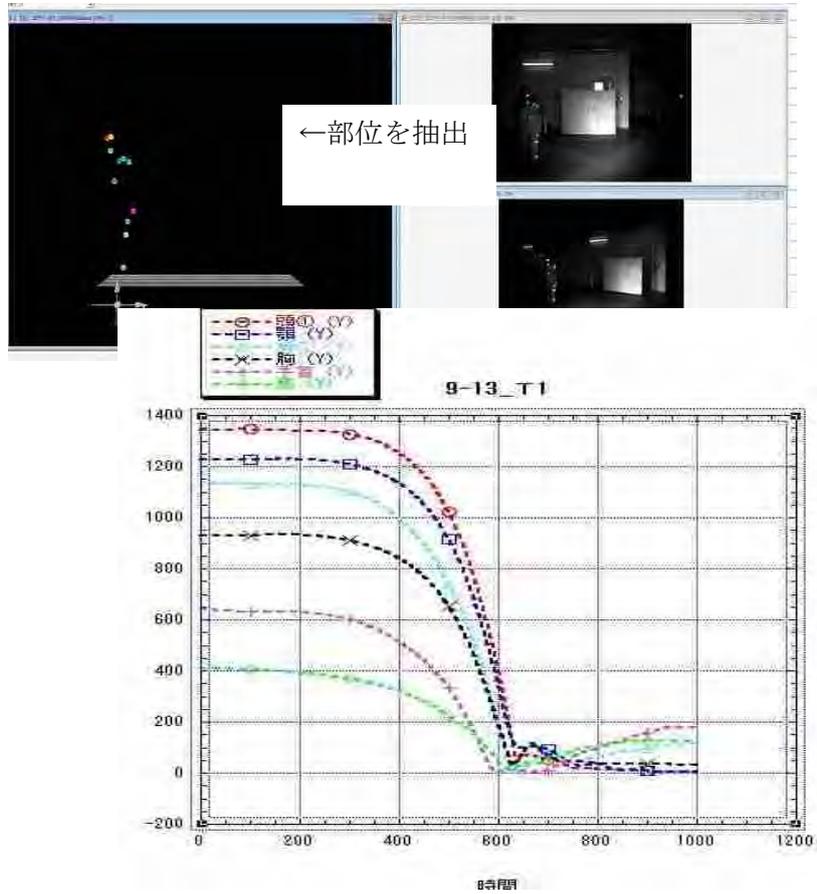


図4. 6. 2 衝突実験時の人体の各部位の位置変化

ダミーの各点に赤外線マーカーを付けて頭、首、肩、胸、腰、骨盤、そして大腿部等の軌跡を追跡した。その結果、転倒・転落時の身体各部位の軌跡は、グラフに示されるように楕円関数で近似できる事が判明した。この運動は、転倒・転落過程は身体と床との接触点を中心とする剛体振り子（回転運動と落下運動）として近似可能である。この仮説を採用すると、高さHの位置に存在する身体部位の転倒・転落の運動方程式は、

$$I \frac{d\omega}{dt} = -m_H g \cdot H \cos \beta$$

であり、床に衝突する直前の加速度の大きさは、

$$\mathbf{a}^2 = g^2 + 3g^2 \sin^2 \beta + \left(\frac{v_f^2}{H} + 2g \right)^2 - 4g \left(\frac{v_f^2}{H} + 2g \right) \sin$$

部位の軌跡は、

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \operatorname{sn} \left(k \sqrt{\frac{g}{H}} t, \frac{1}{k} \right)$$

と楕円関数を用いて記述できる。転倒・転落運動が人体に与える効果は、外力・撃力を記述する物理的側面と、年齢、性別等個人差を規定する生物・医学的側面とに大別される。物理的要因による平均的損傷程度は、衝突時間(物性値を反映、応答時間)、衝突面積、高さ、そして、受傷部分の質量という4因子で規定される。我々は、衝突直前の速度→平均制動加速度→最大制動加速度→力と圧力という一連のプロセスを踏むことにより包括的な重症度判定が予測可能となってきた。

物理的要因は、衝突直前の速度→平均制動加速度→最大制動加速度→力と圧力、という一連のプロセスを踏むことにより包括的に見積もることが出来る。以下に、平均的な日本人女性(身長 160cm、50kg)に平均的な日本人男性(身長 170cm、63kg)が正面より衝突し、女性が、エスカレータの段差(20cm)から転倒・転落する場合の見積もりの一部を示す。

表 4. 6. 3 女性が 20cm の台より自然転倒

	制動加速度 (G)	衝撃力 (kN)	圧力(MPa)
頭	580 (925)	43 (69)	433 (691)
胸	272 (170)	15 (23)	15 (24)
腹	92 (57)	5.2 (8.3)	1.3 (2.1)
大腿	78 (126)	4.6 (7.3)	0.46 (0.73)
下腿	70 (119)	4.1 (6.4)	8.6 (13)
上腕	107 (171)	3.7 (5.9)	7.4 (11.9)

表 4. 6. 4 女性が 20cm の台より自然転倒

	平均数値	最大数値
HIC	8112	26087
P(AIS>4, 胸部)	0.998	0.999
P(AIS>2, 大腿)	0.038	0.13

(この時の平均的 HIC、最大 HIC、そして胸部と大腿部での AIS を計算。胸部障害リスク AIS > 4、(severe 重篤) {血胸または気胸を伴う 4 本以上の肋骨骨折、動揺胸郭}、大腿

部は、AIS >2 (moderate、中等症、){大腿骨、頸骨、骨盤、膝蓋骨の単純骨折} に対する発生確率リスク) を計算した)

表4. 6. 5 女性が20cmの台より自然転倒
(防具有り)

	制動加速度 (G)	衝撃力 (kN)	圧力(MPa)
頭	45 (71)	3.3 (5.3)	33 (53)
胸	39 (63)	3.6 (5.7)	3.6 (5.7)
腹	36 (57)	3.2 (5.1)	0.81 (1.3)
大腿	30 (48)	1.8 (2.8)	0.16(0.28)
下腿	27 (43)	1.5 (2.4)	3.1 (4.9)
上腕	41 (66)	1.4 (2.3)	2.8 (4.5)

表4. 6. 6 女性が20cmの台より自然転倒
(防具有り)

	平均数値	最大数値
HIC	173	557
P(AIS>4, 胸部)	0.056	0.23
P(AIS>2, 大腿)	0.009	0.016

防具を用いることにより、頭部のHICは、8000ほどから大きく低下して、最大でも500前後の安全圏に落ち着いた。また、自転車用ヘルメットと同じ素材である発泡スチロールを胸や大腿部に装着することで、重篤であった胸部のAIS>4を生じる確率が、P(AIS>4) = 1から、最大でも23%まで著しく低下した。次に男性ダミーに女性ダミーが、速度を持って衝突された後、20cmの段差の場所から転落した場合を見積もる(表4. 6. 7)。防具無しで女性が自然転倒した場合は、

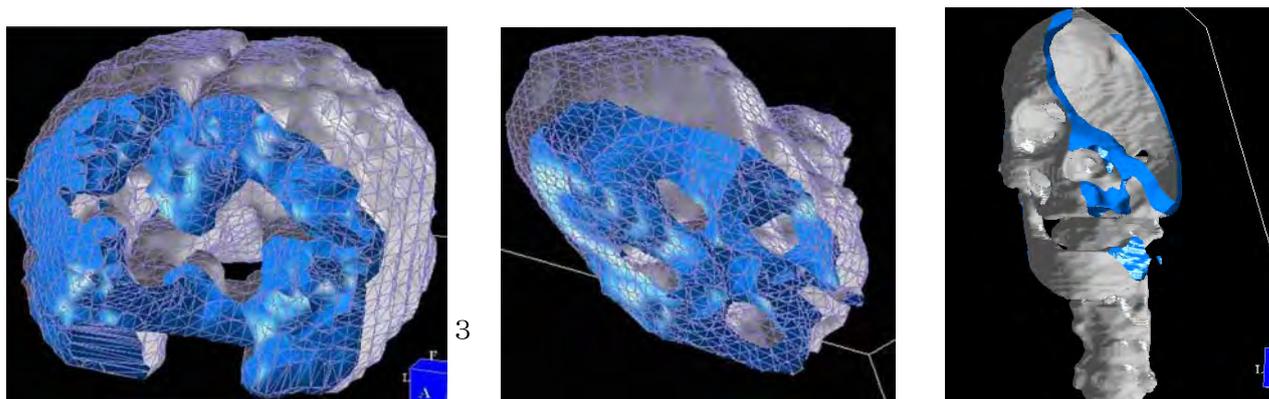
表4. 6. 7 女性の20cmが台に5km/hで衝突
(防具あり)

	平均数値	最大数値
HIC	181	582
P(AIS>4, 胸部)	0.060	0.25
P(AIS>2, 大腿)	0.010	0.017

表4. 6. 8 女性が立位・大地への自然転倒
(防具無し)

	平均数値	最大数値
HIC	6901	22196
P(AIS>4, 胸部)	0.999	0.995
P(AIS>2, 大腿)	0.008	0.014

上記よりダミー実験の結果を考慮して作成された「回転・落下運動の仮説」に基づく物理的要因モデルからも、防具の著しい有効性が示された。生物・医学的要因モデルの作成には、有限要素法を用いて人体損傷の粘性弾性モデルを作成する準備を行っている。



上記の写真は、左から大脳、心臓、頭蓋等を任意の平面での切断面である。小脳や心臓の内空にも4面体メッシュが作成されているのが確認できる。現在、身体を60以上の部分に分解して、臓器別にメッシュの作成が可能になってきている。次年度以降は、有限要素法や多体モデルに基づく運動解析と解析に求められる情報を得るための実験を実施する。



図4. 6. 4 ダミーによる車いすの転倒試験

相対的な安全度、人体への撃力強度を比較検討する目的で、電動車椅子からの転倒ダミー実験を実施した。左の写真は大ダミーが車椅子の前で転倒して小ダミー上に乗ってきた状況を想定して。右の実験は、坂で大ダミーが車椅子の側面に衝突した状況を想定して実施した。左の場合は頸部に0.75秒という長期間に渡り回転モーメント(60.4Nm)が作用した。この数値は、許容値57Nmを上回っている。また、左の衝突・実験では、床に接地する順序が車椅子の車輪、ダミーの肩、そして頭部である。頭部を最初に強打しない事が、横転時での側頭部への衝撃を極端に軽減している。ヘルメット無しの場合、HIC=1122とやや基準値を超えるものの、ヘルメット着用時にはHIC=5と極端に低下する。

以上のことは、転倒時には、最初にロボットが接地して相当の衝撃を吸収し、その後、四肢等、そして、最後に頭部、胸部などの重要部位の接地が望ましい。

4. 7 実際の患者を含む試験乗員の吊り下げるサスペンションの設置および実証試験

より实际的に搭乗時のリスクを明確にするために、患者等の乗員安全性を担保した実証路と姿勢衝撃応力計測を合わせた実証試験システムを設置し、ロボット訓練を行い、顕在化されたハイリスクイベントを再現するダミーvs 模擬ロボット実験等から解剖学的重症度、HIC、損傷確率論に基づく多面的な医学的評価を推進した。以下に事業内容および結果について示す。

これまでに得られた実証試験および周辺技術を総合し、より实际的に搭乗時のリスクを明確にするために、乗員の安全性を担保したサスペンション装置を設置した。このサスペンション装置を利用して実際の患者を含む実証試験のための試験プロトコールおよび計測をあわせたシステムの構築を行った。

また、ロボット訓練を行う前の先行研究として、フレーム内の限定されたスペースでロボットを使ったバランス訓練を行い、その効果を検証して、走行ライセンス付与のためのガイドラインの基礎的なデータの収集を図った。

4. 7. 1 乗員の安全性を担保したサスペンション装置の設置および試験プロトコールおよび計測システムの構築

ロボットでの走行実験を行うため、当センターの理学療法訓練室内の三次元測定用実験スペースに、走行実験用の天井走行レールを設置した。この天井走行レールに懸垂したハーネスに被検者を吊り下げることにより、転倒事故が起こった場合の安全を確保する。同時に、転倒を引き起こすような事象が、どのような障害物の存在下、あるいは搭乗者がどのような操作を行った時に起こるかをシミュレーションすることができる。

懸吊装置を取り付ける天井走行レールは、当センターの三次元動作分析装置であるVICONがカバーする領域の中央線上に位置するようにして、走行中のロボットの傾きや速度を計測出来るようにした。また同じく理学療法訓練室内の三次元測定用実験スペース内の床反力計測装置の上にも天井走行レールが位置するようにして、その上をロボットが走行することによって、走行中に重心位置の偏位に関するデータの収集を可能とした。

また、将来的に患者を含む実証試験を行うために、平成21~23年度までに得られた実証試験結果から「試験・計測・調査」を総合的に評価するシステムの構築を検討した。

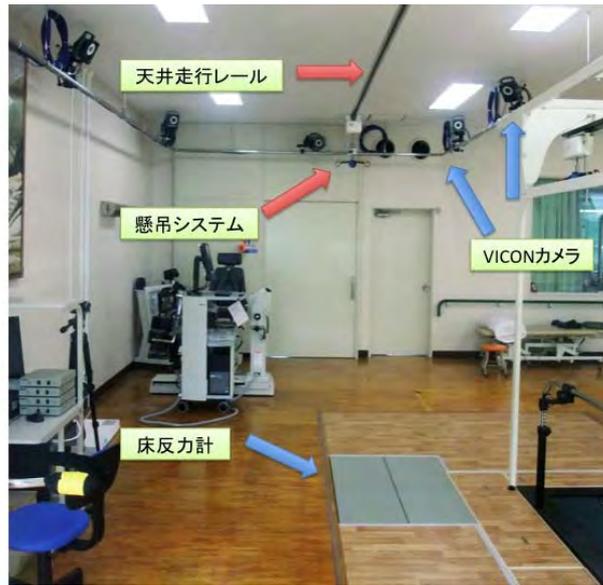


図4. 7. 1 乗員の安全性を担保したサスペンション装置

4. 7. 2 高齢者に対するロボットを使ったバランス訓練の効果の検討

ロボット訓練を行う前の先行研究として、フレーム内の限定されたスペースでロボットを使ったバランス訓練を行い、その効果を検証して、走行ライセンス付与のためのガイドラインの基礎的なデータの収集を行った。

当センター外来通院中のサルコペニア症例を対象とした。選択基準として、全身状態が安定し、歩行可能であるがバランス能力低下を認め、今回の研究に関するインフォームド consent が得られた患者とした。除外基準としては、コントロール不良の高血圧者(収縮期血圧 180mmHg 以上あるいは拡張期血圧 120mmHg 以上)、安静時心拍 120/分以上の者、心機能・呼吸機能障害により運動制限のある者、訓練に支障のある程度の聴力・視力障害のある者、説明内容の理解が不十分な認知症者とした。

クロスオーバー比較試験を用い、対象をロボット訓練群と従来バランス訓練群にわけ、無作為的に配置した。両群は訓練期間が終了後に交差配置され、それぞれ他の訓練を受けるデザインとした。サンプルは逐次投入式であり、現時点で総計 10 名がリクルートされ、3 名で交通手段が得られないなどの事情でドロップアウトが生じたが、7 名(男性 4 名、女性 3 名) 年齢 61~78 歳(平均、73.1±7.78 歳)が訓練中ないし訓練を終了している。

対象者に対して、1回20分、週2回の立ち乗りモビリティを利用して開発した訓練を6週間行った。立ち乗りモビリティはPCと無線LANで接続され、PC側にインストールされた専用プログラムでCRTへの映像の掲示が行われた。負荷はテニスゲームの形で与えられ、使用者は自身の重心を移動させることで、ラケットを操作し、相手のコートに打ち返す。訓練の前後で、つぎ足歩行速度、Functional Reach Test (FRT)、重心動揺計上でのCross test、下肢の関節トルク(Kin-com を使用して計測)、Timed Up and Go test (TUG) などの評価を行った。訓練を終了した3名の結果を以下に示す。

表4. 7. 1 高齢者に対するロボットを使ったバランス訓練

Cross test (cm)の変化

	ロボット訓練時	従来訓練時
Case 3	2.78	0.31
Case 5	1.64	0.62
Case 7	6.98	-0.64

FRT(cm)の変化

	ロボット訓練時	従来訓練時
Case 3	4.5	2
Case 5	2	-0.5
Case 7	3	-1

tandem gait speed(cm/s)の変化

	ロボット訓練時	従来訓練時
Case 3	4.2	-4.2
Case 5	6.9	6.5
Case 7	8.4	0.1

TUG(s)の変化(減少した方が効果あり)

	ロボット訓練時	従来訓練時
Case 3	-0.8	-0.3
Case 5	0.1	0.2
Case 7	-0.17	-0.4

わずか3名の結果からではあるが、少なくとも使用者が高齢である場合は、一定期間のバランス訓練を行った方が、バランス能力が通常訓練に比べても格段に向上する傾向があることが読み取れた。現時点で進行中の4名の他、今後さらに来年度もリクルートを進め、20名の被検者が完了することを目的に検討を進める。この結果を実際に走行練習および経時的にロボットを使った場合のバランス能力の変化と比較し、走行ライセンス付与のためには、実際の走行練習を行うべきかそれともフレーム内でのバランス訓練で十分なのか等、ガイドライン作成ために必須の基礎的なデータとして利用できる。

4. 8 顕在化されたハイリスクイベントについて、この状態を再現する人体ダミーvs 模擬ロボットの衝突実験等から解剖学的重症度 (AIS)、HIC、損傷確率論に基づく多面的な医学的評価を推進

日本自動車研究所と共同で、小ダミーを台車、車椅子、自転車等に搭乗させた状態から転倒や相互に衝突を起こさせた場合や、救命用エアージャケット、ヘルメット、そして、医療用カラー等の防具を小ダミーに装着させることによる保護具の有効性を含む身体への影響についての評価を、撃力、加速度等の物理的要因を身体的重症度を読み替える目的で、総合的なアウトカム分析である TRISS を導入して人体損傷が発生した際の予後生存率や許容レベル評価の有用性について明らかにした。

4. 8. 1 ダミーを用いた人体損傷に関する研究

日本自動車研究所と共同で小ダミーを台車、車椅子、自転車等に搭乗させた状態から転倒や相互に衝突を起こさせた。この場合の加速度、モーメント等の物理量を計測し、小ダミーが自然転倒を起こした場合の数値と相互の比較を行った。さらに、救命用エアージャケット、ヘルメット、そして、医療用カラー等の防具を小ダミーに装着させることにより保護具の有効性を含む身体への影響を測定を試みた。また、大ダミーと小ダミーを車椅子、台車、そして自転車等に乘せた後、互いに衝突を起こさせて衝撃を評価を行った。撃力、加速度等の物理的要因を身体的重症度を読み替える目的で、総合的なアウトカム分析である TRISS を導入した。この TRISS は、解剖学的重症度の HIC や AIS を基にした ISS と、呼吸や意識等の生理学的指標を用いた RTS を統合するリスクアジャスタである。TRISS の導入により人体損傷が発生した際の予後生存率や許容レベル評価が可能となる。

日本自動車研究所の協力のもとに交通外傷の検証などに用いられる衝突モデルダミー Hybrid-III AF05 を使って実験を行った。評価方法の指標として、解剖学的重傷度である HIC、AIS、 N_{ij} 、そして胸部への指標は $60G$ ($588m/s^2$) を基準とした。実験は、側方転倒かつヘルメットの有無、後方転倒かつヘルメットの有無、自転車対車椅子などの実際に起こりうる危険な場面を想定して、頭部と胸部合成加速度を計測した。図 4. 8. 1 と図 4. 8. 2 に車椅子による転倒時の加速度の計測データと様子を掲載した。

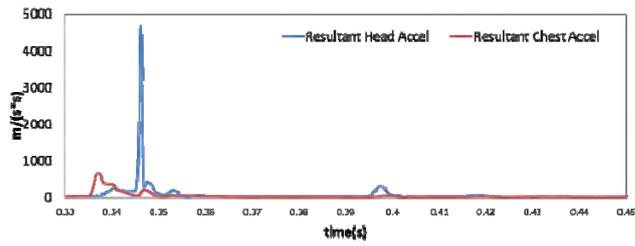


図4. 8. 1 側面転倒 ヘルメット無し

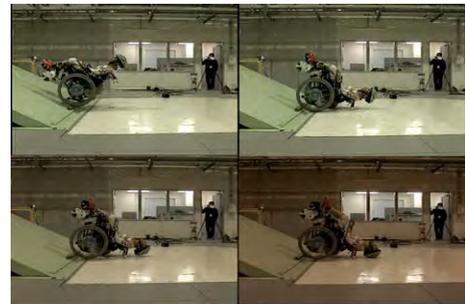
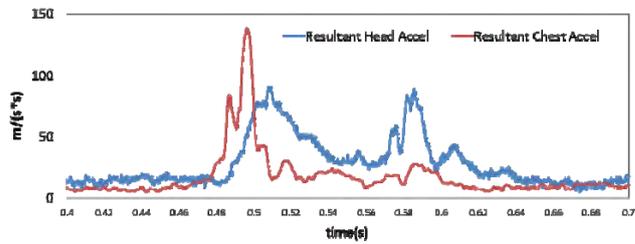


図4. 8. 2 後方転倒 ヘルメット有り

また、転倒方向による頭部や頸部への衝撃評価の結果を図4. 8. 3と図4. 8. 4に示した。

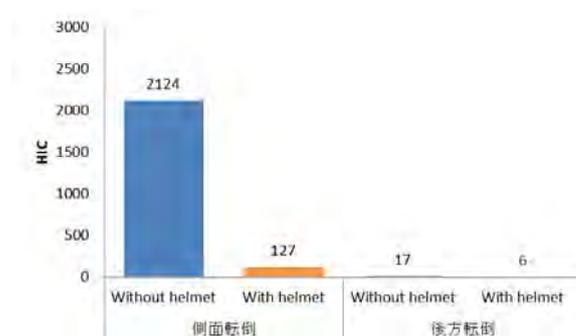


図4. 8. 3 ヘルメットと転倒方向
頭部 HIC

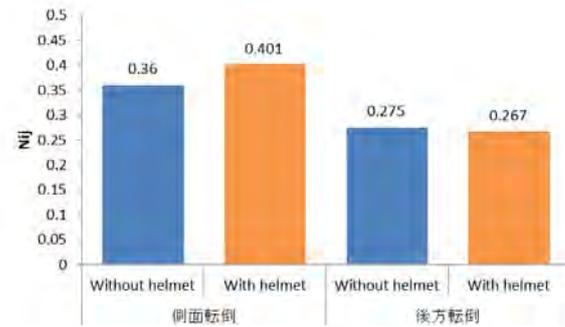


図 4. 8. 4 ヘルメットと転倒方向
頸部 N_{ij}

側方転倒の場合は、ヘルメットの装着の有無により値が大きく異なった。ヘルメットが装着されている時には、HIC2124、AIS6（ほぼ死亡）を示したが、ヘルメットの装着によりHIC127、AIS0となり、解剖学的重傷度が大きく改善された。ヘルメットを装着することで加速度は約6分の1程度に減少し、逆に地面との接触時間は0.002sから0.013sとなり6.5倍長い数値を示した。これはヘルメットの緩衝材が転倒時に変形・破壊されることにより地面との接触時間が伸び、ダミーの頭部が受ける力積が大きく減少したことによる。

側方転倒では、最大胸部合成加速度値はヘルメットの装着の有無により変化するが、どちらの場合も基準値である60Gを上回る 664.5 m/s^2 、 858.3 m/s^2 を数値を示した。一般に、車内胸部への限界加速後は60Gとされている。しかし、日常生活内での転倒・転落時に、胸部に加わる衝撃加速度は、この基準を超えるのが一般的だ。このために、頭部・HICはロボット等の衝突や転落等の外傷評価基準として妥当性は維持される（車の安全基準を採用してよい）。他方、胸部損傷に関しては、「人が事故を起こす環境や状況を含めた基準策定」が要求される（車の基準をそのまま適用することに疑問が残る）。頸部に関しては、ヘルメットの有無に関係なく、同程度の負荷が頸部に掛かることが判明した。この傾向は、転倒や転落方向を変化させても保持される。これは、頸部以外の部分（肩、肘、車椅子のハンドル）が最初に地面と接触して一定のエネルギーの吸収する。そこで、結果的には頸部に伝播される撃力が同レベルとなると思われる。頸部損傷基準 N_{ij} は側方、後方転倒時でも1以下の値を示し、頸部に関する安全基準を満たしている。さらに、車椅子による後方転倒時の胸部合成加速度は、ヘルメットの有無により 125.3 m/s^2 と 137.8 m/s^2 となり基準値内であった。これは撃力が胸部に直接的に伝播せず、車椅子のハンドグリップを介して衝撃が胸部に伝播した事による。この間接的な衝撃の伝播という観点からは、側方転倒のケースと同様の理由が考えられる。

4. 8. 2 頭部の撃力に対する応答関係

頭部が受ける衝撃値は、ヘルメットの装着の有無により大きく異なり、自転車用のヘルメットの使用により大幅に HIC が低下し、頭部損傷に有効であることが示された。この効果は、頭部と地面との接触時間の大幅な増加に起因する。ヘルメットを装着していない頭部に衝撃が負荷されたケースでは、頭部に加わる衝撃波形は類似した形状を示す(図 4. 8. 4)。しかし、ヘルメットの着用は、ガウス関数型をした衝撃波形をヘルメットの材質特性に依存して大きく歪ませる。この歪み効果により衝突時間を延長して撃力の緩和が生じる。

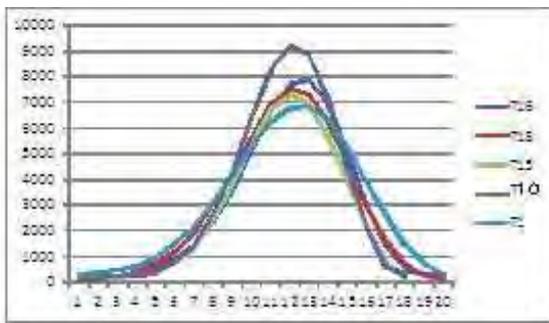


図 4. 8. 4 衝撃波形が類似性

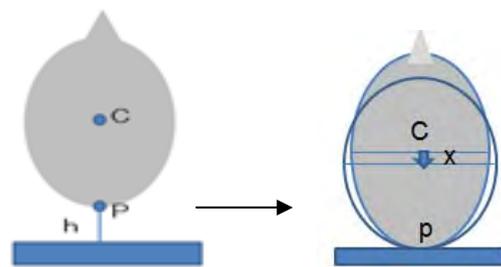


図 4. 8. 5 大地に衝突時の頭部変形

頭部は、大地との衝突時に最大の衝撃を受けるのではない。頭の着地点 P の位置を (図 4. 8. 5)、加速度データから逆解きした。P 点の座標は衝突の間 0 であり、負にはなり得ない。しかし、センサー位置 (C 点) は、さらに x の負の方向に沈み込み、その時間変化は急激なものになる。ダミー頭部の弾性が、人体頭部の値に近いと仮定すれば、この際、頭は高さ 1.02cm の点で減速運動を始める (この高さが h)。さらに、衝突によって頭蓋が変形・ゆがみ、センサー位置が約 2mm ほど沈むことが分かる。この頭蓋のゆがみが、頭を上方へ反発させる強い弾性力となる。この弾性力は、ひずみの 1 次に比例している通常のパネとは異なり、ひずみの高次に比例している。

ヘルメットの装着により点 C の運動状態が変化する。高さ h は 20 mm 前後であり変化が見られない。他方、最大沈みは 6~7mm と他より長くてゆっくりとした減速となる。結局、床からの衝突時間 1.8 msec のピークの時間間隔の間に、頭部は強い変形を受ける。この時、1 msec の時間間隔中に約 24kN の強い撃力が働くと評価された。さらに、センサー位置の沈む深さは、ヘルメットを装着しない実験では約 2~3mm と評価される。この結果は、脳に非常に大きなマイクロ移動を起こさせ脳内の出血を引き起こす原因と考えられる。また、ヘルメットを装着した実験では、センサー位置の沈む深さは、ヘルメットなしの約 3 倍も大きく変位するために、ヘルメットの内部の発泡スチロールが大きく変形し強い衝動を吸収すると考えられる。

4. 8. 3 転倒や転落の帰納的数理モデル

ダミーの身体部位にマーカーを装着し、転倒・転落等、衝突実験を行った。その様子を赤外線カメラで撮影し、身体各部のマーカーの軌跡を分析した。

計測の結果、各点の運動は剛性棒の転倒に類似しており、その軌跡は楕円関数で記述可能である事が判明した（「4. 6 人体損傷データベースからのパラメータの充実とその活用を通してコンピュータシミュレーションによってハイリスクイベントを外挿・推定する方法を検討」参照）。この知見から「人の転倒や落下の様式は、転倒動作に至れば、回転運動と自由落下の合成運動と見做せる」という理論モデルを提案できた。

1. 首のカラーの効果(自然転倒)
有り: $32 \sim 42 \text{Nm} < 57 \text{Nm}$
無し: $69 \text{Nm} \Rightarrow$ 基準を超える
2. ヘルメットの首への効果
有り: 91.4Nm
無し: 81.4Nm
ヘルメットは、高々 10Nm 以下
3. 車椅子は、後方転び方で大差
二人乗り $63 \text{Nm} \sim 223 \text{Nm}$
4. 肘うち 上腕 6.3kN
(参考: 頭部 24kN)

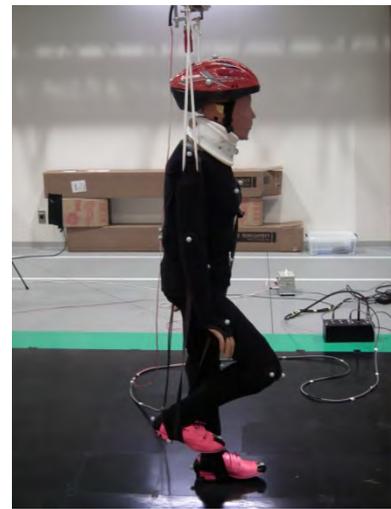


図4. 8. 6 各種条件下での衝撃値

また、有限要素法に基づくシミュレーションでは、人の頭部のMRの数値データから、頭蓋、小脳、大脳等を別々に切り出した後、整合性のあるメッシュを生成した。メッシュに分けられた部位の調整を取りながら互いにはめ込み、再度、頭部を再構成した。

再構築された頭部を用いて、下顎に秒速 60cm/s の物体が衝突した場合の衝撃の伝播に関する解析を行った。その結果、衝撃が下顎関節部位に集中して、脳内部に放散する様子が見られた。さらに、解析は、頭蓋骨内部が空洞として水で満たされた場合と、図4. 8. 7に示されたように、脳実質が存在するケースに対して行われた。

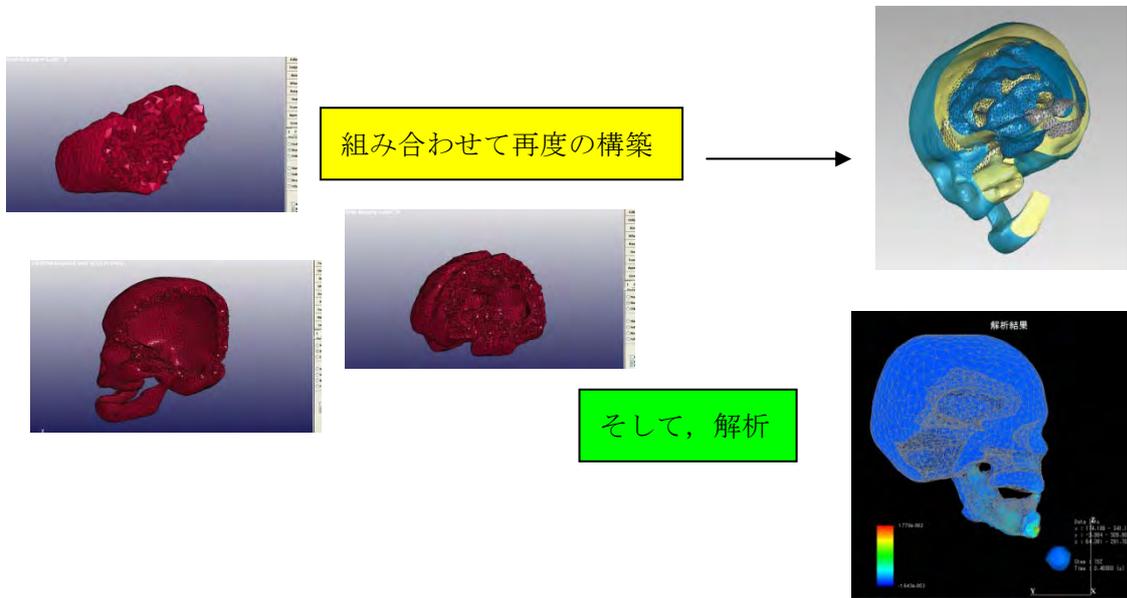


図4. 8. 7 有限要素法に使用するモデル構築

4. 8. 4 総合的なアウトカム分析

医学的立場から、外傷の重症度評価は、発生した外傷からの機転と生存確率として位置づけられる。それは、臨床医学的な知見と膨大な統計データ解析が結びついた産物である。

重症の判定には大別すると3つの形式が存在する。つまり、解剖学的重傷度 (HIC、AIS、 N_{ij} など)、生理学的重傷度 (意識レベル、収縮期血圧、呼吸数など)、そして現病歴や既往歴等の合併に基づく方式である。興味のある問題は「どれだけの力を受ければ、如何ほどの外傷が生じるか?」という損傷予測と、さらに「最終的な目標とすべき AIS レベル (許容 AIS)」のクライテリアの選定基準である。前者は、外力、圧力、応力等の物理的要因と生物・医学的要因との間の因果の対応関係の決定問題であり、他方、後者はレベルアクセプタブルの推定問題と言える。我々は、アウトカム分析の TRISS (Trauma and Injury Severity Score)を用いて、外傷に伴う生存率の見積もりを実施した。最初に解剖学的重傷度 (HIC、AIS など)を用いて、NISS (New Injury Severity Score)を計算した。その後、臨床症状に伴う生理学的重傷度を想定して、RTS(Revised Trauma Score)の推定を行い、最終的に TRISS を用いて生存確率を計算した。総合指標としての TRISS を段階的に積み上げて検討することで、AIS1 以下の傷害が発生する確率曲線を物理量・計測量を用いて表現する事に還元できた。つまり、人体の各領域に対する AIS1 以下の傷害発生確率曲線が求めれば、この曲線を許容レベルに設定することにより、TRISS の生存率 100%がほぼ確保される。実際、 $TRISS > 0.980$ (この時 $NISS < 4$ 、 $RTS > 7.8408$ となる) は、 $\max TRISS = 0.98404$ ($NISS = 0$ 、全ての $AIS = 0$) と大差を生じていない。つまり、全ての AIS 1 以下が想定許容レベルとして妥当だと考える。今後の実験目標は、頭部の AIS 1、頸部の AIS1、胸部の AIS1 等を具体的な物理量で表現することに焦点が絞られる。注意すべきことは、AIS1 は軽症が発生している状態であり、人体は既に損傷を受けているという点である。(捻挫や打撲等が生じる)。

AIS1 は生存率から眺めた基準であり、生存率 100%を保障する基準であるに過ぎない。目標はあくまで無傷 AIS0 である。しかし、人とロボットの生活空間で共存が日常化になる事が予想され、高齢者の増加による転倒、転落や事故が、今後さらに増加する事が懸念される。このために人体損傷が避けて通れない現状であるならば、リスク管理の基準 (許容リスクレベル)として AIS1 以下を想定する必要があると述べているに過ぎない。また、TRISS は、多発性外傷を評価するが、それは、受傷した身体部位ごとの最大3つの AIS スコアのみを勘案しているに留まっている。つまり、同一領域に多発的に存在する外傷と、最大3つ以外の AIS も全て棄却される。さらに、年齢区分が55歳以下とそれ以上というよう区分は大雑把過ぎるという印象を抱かせる。これでは、後期高齢者と前期高齢者では身体機能や状態に存在する大きな運動・生理機能的な変化を無視していると言える。

TRISS は、標準的な予後判定スコアであるが、上記の欠点を補正するためにも最新の予後予測法を用いて、上記の結果を再度、考察する必要性が生じてくる。

表4. 7. 2 アウトカム分析を用いた外傷に伴う生存率の見積もり

NISS = $\Sigma(\text{maxAIS})^2$ 最大のAISの組 ;(1st,2nd,3ed AIS)	鈍的外傷 生存率 P(s) RTS=7.8408	鋭的外傷 生存率 P(s) RTS=7.8408
NISS ; 0;(0,0,0)	0.9847	0.9843
1; (1,0,0)	0.9834	0.9833
2; (1,1,0)	0.9820	0.9822
3; (1,1,1)	0.9804	0.9810
4; (2,0,0)	0.9788	0.9798
8; (2,2,0)	0.9706	0.9739
9; (2,2,1)	0.9681	0.9722
12; (2,2,2)	0.9594	0.9664
17; (3,2,2)	0.9397	0.9541

5. 本研究の成果

生活支援ロボットは、商業施設、駅・空港等の交通施設、オフィス、家庭に至るまで、不特定多数の人や、他の移動体や障害物と同一空間内で共存が可能と求められる。そこで、本研究では生活支援ロボットが至近距離で人と同居するという状況下で人に与える危険性やリスク、皮膚等の人体損傷の可能性を予測・評価して、安全性確保に益する資料を提供するため、生活支援ロボットの安全性の実証実験を病院・介護施設等の諸施設で実施し、顕在化された人体損傷リスク評価の基礎検討として、リスクアセスメントから搭乗型生活支援ロボットに安全機構を実装化し、実証試験および衝突試験（JARI において）を実施し、以下の2点の最終成果を得た。

5. 1 サスペンション式実証試験路によるリスク発生のクライテリアおよび走行ライセンス付与のためのガイドラインを策定についての検討

非高齢患者による試験対象高齢患者の仕様（安全対策）を決定した後、サスペンション式実証試験路を設置し、障害物が介入した際のリスク発生のクライテリア（人体損傷データベースによる人体損傷の推定）、走行ライセンス付与のためのガイドラインを策定について検討を行った。

その結果、当センター病院リハビリテーション科内に設置したサスペンション式実証試験路を用いて、若年健常者6名、高齢健常者4名について実証試験を実施し、本装置を使用したことによる改善等の効果を確認した。このことから走行ライセンスの要件として、実地教習が普及技術として効果をしめすことが明らかにされた。

5. 2 ロボットと人の接触速度やエネルギー負荷から、身体部位別の傷害リスク評価で用いるパラメータを衝突実験（JARI において）から取得

数理人体モデルや衝撃荷重の人体組織の伝搬過程を解析し、ハイリスクイベントに関しては、ダミーvs 模擬ロボットの衝突実験等に落とし込み、解剖学的重症度（AIS）、HIC等の傷害水準による評価を、また、生物試料による組織衝撃試験から微弱な損傷（AIS0～1）評価を行い多面的な医学的評価を行った。これらの知見を総合し社会的許容リスク水準を検討して、生活支援ロボットに共通に潜在するリスクと必要な安全検証モデルを提案した。上記の研究開発により生活支援ロボットの社会実装における普及技術の一考察、および人体損傷に基づく必要安全の構築法を開発した。

6 まとめ

本研究は、ロボットが至近距離で人と同居するという状況下で人に与える危険性やリスク、人体損傷の可能性を予測・評価して、安全性確保に益する、医学的見地に基づく安全評価（人体損傷評価）法の確立を目指し、当初の計画の履行、および当初計画を補完する技術を開発することができた。その結果、図1に示すような評価体系を構築することができた。

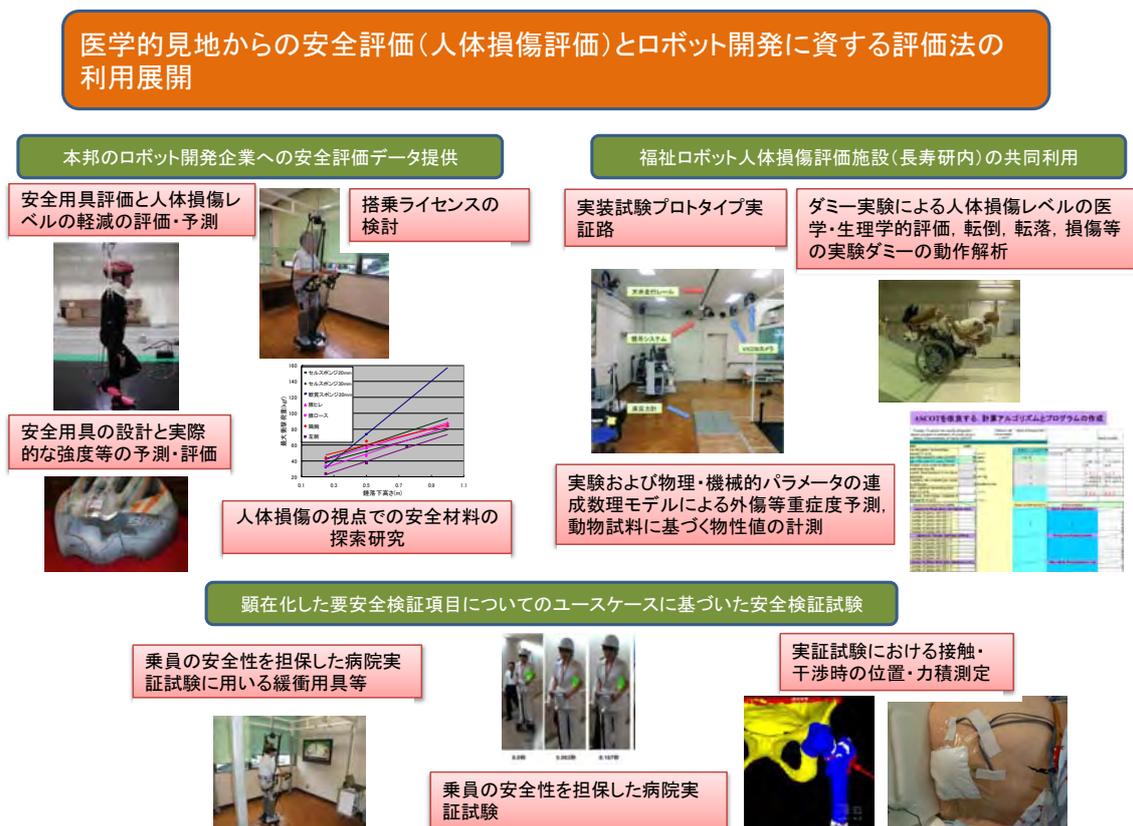


図1 医学的見地からの安全評価（人体損傷評価）とロボット開発に資する評価法の利用展開

特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文・記事		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発表 ・講演	報道（新聞 ・雑誌等へ の掲載）	その他展 示会等
H21FY	0件	0件	0件	0件	0件	1件	0件	1件
H22FY	0件	0件	0件	14件	3件	4件	0件	1件
H23FY	0件	0件	0件	25件	8件	38件	11件	0件
H24FY	0件	0件	0件	39件	9件	87件	1件	1件
H25FY	0件	0件	0件	0件	0件	7件	2件	0件

期待されるアウトカム

1. 生活支援ロボットの安全性の実証試験フィールドとして病院・介護施設に絞った実証試験によるリスクアセスメントの構築

⇒本邦で製作されたロボットのより実際的评价

2. 安全かつ有効なロボット搭乗訓練方法の構築

⇒ユーザーサイドとしては訓練やライセンス講習

ロボット製作においては、危険因子の洗い出し等の検証

3. ISO13482の安全評価基準を踏襲し、さらに当該ロボットの状態に即した評価プログラムの開発

⇒リスクアセスメントシートへの活用

4. 各企業の安全評価からの結果との連携を想定した人体損傷評価プロトコルの提案

⇒人体損傷という視点での安全性評価および機能性評価

2.9 研究開発項目⑤ 安全要素部品群と安全設計に基づく搭乗型移動ロボットの開発 アイシン精機株式会社、日本信号株式会社、オプテックス株式会社、株式会社ヴィッツ、学校法人千葉工業大学

目 次

本 文

1. 事業背景と目的（アイシン精機）	4
1-1. 事業背景	4
1-2. 事業目的	5
2. 事業概要（アイシン精機）	6
2-1. 対象とする搭乗型移動ロボットについて	6
2-2. 開発する安全技術について	6
2-3. 開発ロボットの利便性と安全性の検証について	6～7
2-4. 実施体制と開発計画	7
3. 事業内容（アイシン精機、日本信号、オプテックス、ヴィッツ、千葉工業大学）	8
3-1. 生活空間内での「許容リスク以下安全移動支援技術」 （アイシン精機、ヴィッツ、千葉工業大学）	8
3-1-1. リスクアセスメントの実施（アイシン精機、ヴィッツ）	8～9
3-1-1-1. 開発ロボットの安全分析	9～15
3-1-1-2. TAO-Aicle-Safety への安全分析	16
3-1-1-2-1. 対象となるシステム構成の説明	16～17
3-1-1-2-2. HAZOP ガイドワード、通信驚異の故障モード説明	17～18
3-1-1-2-3. 安全分析の実施結果	18～19
3-1-1-2-4. ハードウェア安全分析の実施結果	20～21
3-1-2. 安全コンセプト／システム設計（パイロットスタディ）	21
3-1-2-1. システム構成と機能概要	21～22
3-1-2-1-1. リスク低減制御ブロック	22～24
3-1-2-1-2. 通信制御ブロック	24～25
3-1-2-1-3. ロボットと周辺環境の環境センサ	25～26
3-1-2-2. 安全目標とコンセプト	26
3-1-2-2-1. 安全目標	26～27
3-1-2-2-2. コンセプト	28
3-1-2-3. システム故障における故障検出機能	29～31
3-1-2-4. 通信驚威における故障検出機能	31～33

3-1-2-5. 安全対策	33
3-1-2-5-1. サブマイコン①	33
3-1-2-5-2. デュアルポートメモリ	33~34
3-1-2-5-3. SRAM	34
3-1-2-5-4. 駆動電源リレーIF	34
3-1-2-5-5. 分圧モニタ (12v,24v)	34
3-1-2-5-6. 電源回路	34
3-1-2-6. ハードウェア要件	34
3-1-2-6-1. 基本アーキテクチャ	34
3-1-2-6-2. クロック	34
3-1-2-6-3. ウォッチドック	35
3-1-2-7. 通信制御ブロックへの要求事項	35
3-1-2-8. 外部ユニットへの要求事項	35
3-1-2-8-1. 操作ユニットへの要望	35
3-1-2-8-2. モータドライバユニットへの要望	35~36
3-1-2-8-3. 各センサへの要望	36
3-1-2-9. リスク計算ユニットの仕様概要	36
3-1-2-9-1. リスク算出アプリケーション	36~45
3-1-2-9-2. 安全通信モジュール	46~53
3-1-3. リスク低減アルゴリズム開発 (千葉工業大学)	54
3-1-3-1. アルゴリズム概要	54~56
3-1-3-2. 2次元占有極座標マップ生成	56~57
3-1-3-3. 速度制限値算出	57~59
3-1-3-4. 開発支援ツール	59~60
3-1-4. 検証機の試作 (アイシン精機)	61~64
3-1-5. 検証機の性能評価 (アイシン精機)	65~66
3-1-5-1. 衝突安全性能試験	67~72
3-1-5-2. 走行安定性試験	73~78
3-1-5-3. 障害物検知・対応試験	79~88
3-1-5-4. 環境認識性能試験	89~90
3-2. 安全要素モジュール: 3次元レーザ測域センサ (日本信号)	91
3-2-1. 概説	91
3-2-2. ロボットシステムのセンサ要求仕様	91
3-2-2-1. 検知対象物	91~92
3-2-2-2. 環境条件	92
3-2-2-3. 開発仕様	92

3-2-3.	3Dセンサ方式の特性比較と方式選択	93~95
3-2-4.	安全機能の向上	96
3-2-4-1.	FTA/FMEAによる故障解析	96~109
3-2-4-2.	セルフチェック機能	109~110
3-2-4-3.	上位とのインターフェース	111~115
3-2-4-4.	検知性能の向上	116~117
3-2-4-5.	窓ガラスコートの耐環境性/耐候性向上	118
3-2-5.	安全センサの評価	119
3-2-5-1.	機器仕様	119~120
3-2-5-2.	検知距離と距離精度	120~121
3-2-5-3.	角度分解能	122~123
3-2-5-4.	耐環境性能・耐久性能	124~129
3-2-6.	まとめ	130
3-3.	安全要素モジュール：3次元距離画像カメラ（オプテックス）	131
3-3-1.	概説	131~132
3-3-2.	距離画像カメラの改良	133~141
3-3-3.	障害物検知センサ	141~145
3-3-4.	障害物検知センサの試作・評価	145~158
3-3-5.	TOF3次元距離画像カメラを用いた障害物検出センサのまとめ	158
3-4.	安全要素モジュール：無線通信（ヴィッツ）	159
3-4-1.	通信の安全に対する要求事項	159~160
3-4-2.	通信脅威の分析	160~184
3-4-3.	通信脅威の対策	184~196
3-4-4.	安全通信プロトコル	197~208
3-4-5.	安全通信の性能確認	209~212
4.	つくばモビリティロボット実験特区での実証実験（アイシン精機）	
4-1.	実験計画	212~216
4-2.	実験準備	217~218
4-3.	実験及び実験結果	218~223
4-4.	結果の分析	223~225
5.	総括（アイシン精機）	225
5-1.	開発した搭乗型移動ロボットとその安全技術のまとめ	225~226
5-2.	開発成果のアウトリーチ活動	226~227
5-3.	今後の事業展開について	227

1. 事業背景と目的（アイシン精機）

1-1. 事業背景

日本をはじめ、世界的にも高齢化問題、環境問題、エネルギー問題が深刻な社会問題となっている。特に日本では、高齢化率が高く、他国よりいち早く超高齢社会を迎える。国の高齢社会白書によれば、日本の総人口は2010年の1億2千8百万人をピークに減少に転じ、65歳以上の高齢者人口は23%であった。また、将来推計人口でみる50年後の日本は、総人口が9000万人を割り込み、高齢者人口は実に40%に近くまで上昇すると推計されている。これは、国民の約2.5人に1人が65歳以上の高齢者になる事を意味している。また、この高齢化を地域別にみるとすでに秋田県など地方では高齢化率30%を越す県もある一方で、今後は首都圏での高齢化が顕著になってゆく傾向がある。日本の高齢化は大都市圏を含め、全国的な広がりになるとの予測がなされている。

さらに高齢化社会における高齢者の環境について目をむけると、1980年では三世帯世帯が全体の半分程度を占めていたものが30年後には、夫婦のみの世帯が3割程度と最も多く、単独世帯とあわせると半数を越す状況となっている。これらの状況は、単に高齢化が進むだけでなく、高齢者を支える家族の減少と共に、社会全体での支援負担の上昇につながってゆく。また、経済的には暮らし向きに心配ないとしている高齢者は約7割ほどの割合となっている一方で、健康不安から病気・介護への備えとして貯蓄している。高齢者の健康不安に関するデータとして、東京大学で全国高齢者の自立度に関する20年の追跡調査があげられる。これによれば、男性19%、女性12%の高齢者は、65歳を過ぎると日常生活において、何かしらの援助が必要となってくる。男性の10%に生涯援助を必要としない元気な高齢者もいるが、男性70%、女性87%の高齢者は70歳を過ぎたあたりから徐々に身体能力の低下を招き、80歳を過ぎるとやはり支援が必要となる。このように、高齢者の健康や身体能力からみた生活能力は65歳を過ぎたあたりから低下が始まり、支援レベルもまちまちとなる。これは、画一的な支援ではなく、個々人に適したものが求められる事を意味する。また高齢者の身体能力は、何かしらの原因で外出機会が減り、寝たきり状態となると急速に低下することが知られている。

以上の日本における高齢化問題を考えると、高齢者の自立した日常生活の移動を支援し、外出機会低下を防ぐ事が一つの解決の糸口となる。このため、日常生活の移動手段のあり方について様々な検討や技術開発、実証実験などが進められている。その一つに、超小型で低速な新しい移動手段の導入に向けたガイドラインの報告もされている。

1-2. 事業目的

このような背景から、我々は、特に都市部における日常生活に必要な移動を支援する新しい移動手段を開発している。特に日常生活の移動に重要な移動空間は、公道を含む屋内外の歩行者空間と考えており、すでにこの空間をシームレスに移動できる唯一の移動手段として、障がい者を利用者層とした電動車いすが規格化され認可を受けている。またアイシン精機も介護福祉事業として簡易電動車いすを製造・販売している。

この簡易電動車いすは、歩行困難な障がい者の歩行支援の目的で設計されており、操作性が良く、軽量かつコンパクトであり、歩行者との親和性も高く、市場利用実績もあることから、障がい者だけでなく、高齢者の日常生活の移動手段として有望な選択肢になりうると考える。また高齢者の日常生活の移動目的は、食品・日用品の買い物、通院、散歩、習い事などであり、一回の移動（1トリップ）が2～3kmの移動距離であると想定している。しかしながら、簡易電動車いすは時速6kmを速度上限として認可・製造されており、想定した移動距離の移動に要する時間は約30分程度となる。国土交通省による都市内交通手段の移動時間に関する調査研究によれば、自転車が5km未満の移動に良く利用されているが、自転車で2～3kmの移動をする場合、その所要時間は約15分程度と簡易電動車いすの場合の半分の時間で移動できる。そこで、我々は都市部における2～3kmの生活圏内において、屋内外の歩行者空間をシームレスに移動でき、自転車と同等の機動性を持つ電動車いすをベースとした搭乗型移動ロボットを開発する事で、高齢者の自立した日常生活を支援できると考えている。

ただし、自転車と同等の機動性を持たせるために、現状の最高速度を時速6kmから、時速10kmに速度拡張する必要があると同時にロボットの搭乗者に対する安全と、周囲歩行者に対する安全を確保する必要がある。しかし、歩行者との混合交通における移動体の安全基準や検証方法は無く、一企業による基準作り・安全性検証には限界があった。そこで本プロジェクトで開発される安全規格 ISO 13482 とそれに基づく生活支援ロボット安全検証センターでの第三者評価試験に準じた安全技術の開発とロボットへの実装を実施し、実用に供する搭乗型移動ロボットを開発する。

2. 事業概要 (アイシン精機)

2-1. 対象とする搭乗型移動ロボットについて

アイシン精機では福祉関連機器として簡易電動車いす“タオライトⅡ-m”を製造販売している。タオライトⅡ-mは、軽量・コンパクトで折りたたみも可能であり可搬性にすぐれ、また静寂性も高い事から、人と共存する日常生活の移動に適した近距離移動手段である。本ロボットはこの特性を活かすべく、タオライトⅡ-mをベースとし、最高速度を時速10kmまで拡張した搭乗型移動ロボットである。

2-2. 開発する安全技術について

2005年の愛・地球博では、同じくタオライトⅡをベースとした自律走行可能なロボットTAO-Aicleを開発し、半年間の自律操縦デモを達成し、コンピュータ制御による安全の基本的機能を開発した。しかしながら、その機能は、万博会場という特定移動空間を対象として実現しており、実用化にあたり想定するユーザとその利用場面から再度リスクアセスメントを実施した。想定する利用ユーザは、都市部に在住する高齢者であり、衰えはあるものの、電動車いすを操作することが可能な、認知・判断能力と操作能力を有している。従って、本ロボットは、利用者(搭乗者)の操作指示(速度指示、停止指示、操舵指示)に忠実に動作するものとし、走行中における衝突などのリスク回避はあくまで、搭乗者の判断とロボット操作により回避されるものとした。ただし、利用者が高齢である点、ロボットの最高速度が時速10kmである点を考慮すると、搭乗者がリスク回避をするに必要な“危険状態の認知”“回避判断”“回避操作”にかかる時間的余裕が十分で無い状況が発生する。このため、ロボットには、ロボットの周囲環境を取込む環境センサを配置し、その状況下でのリスクをリアルタイムに判定する。検知したリスクを搭乗者が十分に回避操作可能となるように速度制限や、注意喚起をおこなう機能を安全機能として実装した。

さらに、前述の安全機能を実現するため、ロボット周囲の環境情報を獲得する目的で、安全要素部品群である、3次元レーザ測域センサ、距離画像カメラ、安全無線通信モジュールを開発した。また取得した環境情報から周辺リスクとリスクを低減する制御を実行するリスク低減ソフトウェアについても、IEC61508 SIL2に準拠した機能安全ソフトウェア開発プロセスに基づき構築した。

2-3. 開発ロボットの利便性と安全性の検証について

開発した安全機能を搭載したロボットの利便性と安全性について2つの評価を通し検証した。ロボットの性能試験に関する評価を生活支援ロボット安全検証センターにて実施した。生活支援ロボット安全検証センターにて性能を満たす事を確認した上で、実際の利用環境における走行実験を通しロボットの利便性と安全性について検証した。実環境にお

る走行は、屋外の公道走行となるため、運輸局の特区基準緩和認定を受け、つくば市の「つくばモビリティロボット実験特区」にて実施した。

2-4. 実施体制と開発計画

安全技術の開発にあたり、四つの開発課題を設定した。すなわち①生活空間内での「許容リスク以下安全移動支援技術」の開発、②安全要素モジュール：3次元レーザ測域センサの開発、③安全要素モジュール：距離画像カメラの開発、④安全要素モジュール：緊急停止信号等の安全情報の無線通信の開発 である。

これらの開発を推進するため、アイシン精機はじめ、日本信号、オプテックス、ヴィッツ、千葉工業大学の5法人にてコンソーシアムを組み、実施した。また、ロボットシステム全体をアイシン精機が見ながら、①の開発はアイシン精機、ヴィッツ、千葉工業大学、②の開発は日本信号、③の開発はオプテックス、④の開発はヴィッツがそれぞれ分担する事とした。初年度は、リスクアセスメントを通し、徹底した利用場面のリスク分析と、安全対策の立案。それに基づく安全機能の要求仕様と安全要素モジュールへの要求仕様の抽出を計画した。次年度では、要求仕様に従い設計した安全機能の開発・実装を進め、最終年度では、生活支援ロボット安全検証センターでの性能試験を通し、技術改良及び、性能検証を行い、つくばモビリティロボット実験特区での実証実験を通し、開発ロボットの利便性と安全性の検証を実施する計画とした。尚、安全機能の開発にあたり、開発プロセスの妥当性について日本品質保証機構殿のパイロットスタディを受審しながら進めるものとした。

3. 事業内容（アイシン精機、日本信号、オプテックス、ヴィッツ、千葉工業大学）

開発ロボットの安全機能の開発にあたり、「許容リスク以下安全移動支援技術」「3次元レーザ測域センサ」「3次元距離画像カメラ」「無線通信」の四つの開発課題を設定し推進した。それぞれの開発について以下に記す。

3-1. 生活空間内での「許容リスク以下安全移動支援技術」

（アイシン精機、ヴィッツ、千葉工業大学）

本ロボットは、高齢社会における日常生活の自立した移動を支援する事を目的とし、屋内・屋外の歩行者空間をシームレスに移動可能な搭乗型移動ロボットである。本ロボットは、現在歩行者空間での利用が唯一認められている電動車いすをベースとし、さらに利便性を高めるべく、その最高速度を時速10kmまで拡張し、行動範囲を広げられるよう開発された。しかしながら、速度を拡張することによる安全性、社会的受容性については現在十分な知見を持ち合わせていない。

そこで、まずは開発ロボットのユースケースレベルのリスクアセスメントを実施し、十分な安全分析と必要な安全機能について抽出し、その安全機能をロボットに実装する事で電動車いすに比べ、より利便性が高く、安全で社会的にも受け入れられるロボットの実現を目指した。開発した安全機能は、ロボットの周囲状況を検知し、搭乗者及び周囲歩行者に重大な危害（許容できないリスク）が発生する状況を判断する。この判断結果に基づき、危害低減をはかるべく、ロボットの最高速度を制限し、注意を喚起する事で搭乗者及び周囲歩行者に気付きを与え、危険な状態を回避させるよう支援するものである。

3-1-1. リスクアセスメントの実施（アイシン精機、ヴィッツ）

安全分析を進めるにあたり、2段階の安全分析を実施した。まずはロボット全体の利用場面におけるリスクアセスメントを実施し、必要な安全対策について抽出した。続いて、その中で機能安全に関する安全機能とそのシステムについて安全分析を実施し、要求仕様としてまとめ、それに基づき安全システムの設計を進めた。設計の開発プロセスフローを図3-1-1に示す。

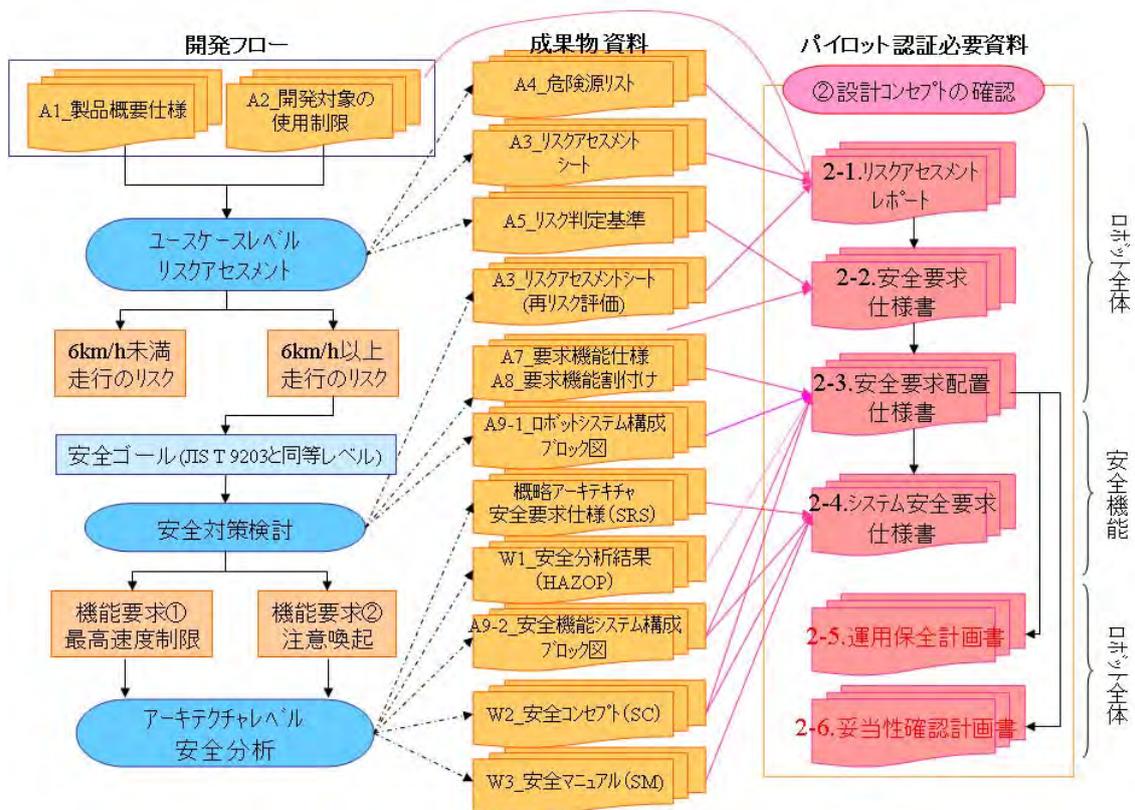


図 3-1-1. 開発プロセスフロー

3-1-1-1. 開発ロボットの安全分析

開発ロボット全体についてリスクアセスメントの実施とリスク低減方策の抽出を実施した。リスクアセスメントは安全分析の基本的な手法であり、ISO 12100に代表される機械安全規格でも規定されている。また、すでに生活支援ロボット実用化プロジェクトの成果としてリスクアセスメント実施の雛形シートが提供されており、それらを活用し安全分析を進めた。

安全分析に必要なロボットに関する情報を収集し、整理した。ロボットの製品概要を図3-1-1-1-1に示す。利用者は、電動車いすの利用者及び、高齢者を想定している。基本機能はアイシン精機にてすでに製品化されている電動車いすTAOLight II同等であり、ジョイスティック操作により、ロボットの加速・減速・停止、及び操舵が可能である。通常は、電動で走行するが、手動/電動切替クラッチ操作により、必要に応じ手動での走行も可能である。決定的に異なるのが、電動走行時の最高速度であり、本ロボットは時速10kmまで速度域が拡張されている。

対象ロボットシート

対象ロボット名称	型式	No.	項目	基本仕様
TAO Aicle Safety	*****			
 <p>サービス車体: TAO Light II 型式: PC20M-6024N</p>		1	タイプ	高齢者及び簡易電動車いす使用者(単独外出可)向け搭乗型移動ロボット
		2	外寸	66×95×87 cm(幅×長×高) ※24インチ仕様
		3	重量	22kg(バッテリー:3kg)・・・バッテリー2個搭載時 28kg
		4	最大積載重量	75kg(搭乗者+積載物)
		5	駆動源	・DC24V、3A ニッケル水素バッテリー (プラグイン充電又は充電済みバッテリーと交換)
		6	走行機構(電動)	2輪駆動機構独立駆動DCブラシモータ:90W、24V出力、30分定格)+2輪自由輪 保持用電磁ブレーキ有り
		7	走行機能	前後進、左右旋回、速度調整
		8	走行能力	・最高速度:(前進)10km/h、(後進)9km/h ※自律速度制御切の場合、最高速度は6km/hに制限 ・登坂最大:6度 ・段差乗り越え時最大40mm(助走必要)、旋回半径最小0.9m(JIS T 9203より推定) ・連続走行距離:20km
		9	走行モード	・搭乗者による手動操縦/ジョイスティックによる電動操縦 ・自律速度制限機能の入り
		10	操縦インターフェース	ジョイスティックによる操縦と速度調整+緊急停止ボタン+電源ボタン
		11	表示機能	速度、バッテリー残量、異常、速度制限状態
		12	安全機能	環境センサ及びインフラとの無線通信で周辺リスク演算をし、適切速度を算出。適切速度を超える操作はなし。速度制限をかける(自律速度制限機能)
		13	その他の機能	折たたみ機構、反射板

図3-1-1-1-1. A1_製品概要仕様

次に、ロボットの使用制限についてまとめた。まとめたものを図3-1-1-1-2に示す。ここでは、通常使用だけでなく、考えうる誤った使用も想定した。また使用する空間や時間などについても明記した。続いて、A1_製品概要仕様で示すロボットをA2_開発対象の使用制限の中で利用する際の危険事象とそのリスクについて検討を進める。

対象ロボット名称	実施者	実施日																																																																																																								
TAO Aicle Safety	(担当者の所属) アイシン精機株式会社、日本信号株式会社、オプテックス株式会社、株式会社、千葉工業大学	初回:2011年5月16日 改訂:2011年7月10日																																																																																																								
ライフサイクル リスク評価 設定、運転、保守	分析方法(ツール) 積算法<一部加算法を適用>																																																																																																									
使用上の制限	<p>①ロボットは使用時は折たたみ状態から展開し使用する。 ②クランチ切換え操作により、手動・電動のモード切換えをする。 ③電動モード時は、ジョイスティックにより片手操縦により動作する。 ④搭乗者のロボットへの乗降は自力又は、介助者による補助により行う。 ⑤ロボット搭乗者は運転中身体を拘束されない。 ⑥ロボットのバッテリー充電/交換・保守は、使用者もしくは介助者が行う。 ⑦ロボットの搬送引口は、折たたみ状態にし運搬車に積載する。 ⑧搭乗者は、操縦しながら携帯電話を利用したり、歩行者と話しながら並走する。</p> <p>合理的に見て見られる誤使用 ①ロボット走行中に、第三者がジョイスティックに触れる。 ②ロボット後方の第三者及び障害物に気づかず後進させる。 ③ロボットを走行領域外へ操作してしまう。 ④段差、溝に車輪を脱輪させる。 ⑤センサー部にカバー等してしまう。 ⑥衝撃により、センサー等のアイテムがずれる。 ⑦立ち上がった状態で重心が不安定な状態(搭乗姿勢)で操作する。 ⑧照明を持参せず、夜間走行、暗闇走行をする。 ⑨交差点で信号が赤である時や踏切で遮断機が下がっている時に横断しようとする。 ⑩積載重量をこえて使用する。 ⑪坂道でのクランチ操作</p> <p>意図した使用空間/時間制限 ①ロボットは施設屋内(ショッピングセンター、病院、駅構内、エレベータの搭乗有り)及び歩道(横断歩道、踏切含む)のみ移動する。 ②施設屋内内は、歩行者、ショッピングカート、車椅子、台車が混在する可能性がある。 ③歩道では、歩行者、自転車、車椅子が混在する可能性がある。 ④晴天・曇天・小雨の天候下及び夜間での屋外走行。 ⑤ロボットは水気、大量の水(豪雨、洗浄)がかかることのない。 ⑥バッテリー充電は特定場所で実施するが、バッテリー交換は任意の場所で停止時に実施が可能。 ⑦ロボットの連続走行距離は最大20km</p>	<p>リスクの見積/評価基準</p> <p>■算出式: リスク点数(R) = 危害の酷さ(S) × 危害の発生確率(Ph)</p> <p>■判定基準: 3 ≤ R ≤ 12 十分低い / 無視できる(リスク低減は不要) 13 ≤ R ≤ 17 低い / 中程度 / 条件付き受容 / 検討を要する(リスク低減を推奨) 18 ≤ R ≤ 44 高い / 受容できない(リスク低減が必要)</p> <table border="1"> <tr><th colspan="2">危害の酷さ(S)</th></tr> <tr><td>4</td><td>重大障害(長期間治療)</td></tr> <tr><td>3</td><td>医療措置(長期回復)</td></tr> <tr><td>2</td><td>応急手当で回復</td></tr> <tr><td>1</td><td>無傷/一時的な痛み</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th colspan="3">危害の発生確率(Ph=F+Ps+A)</th></tr> <tr><th>曝される頻度/時間(F)</th><th>危険事象の発生確率(Ps)</th><th>回避可能性(A)</th></tr> <tr><td>4</td><td>連続的/常時</td><td>4 高い(起こりやすい)</td></tr> <tr><td>3</td><td>動作中継続/長時間</td><td>3 ありえる</td></tr> <tr><td>2</td><td>動作中数回/短時間</td><td>2 可能性あり</td></tr> <tr><td>1</td><td>まれ/時間的</td><td>1 低い(まれ)</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th colspan="11">危害の発生確率(Ph)</th></tr> <tr><th rowspan="2">危害の酷さ(S)</th><th colspan="10">曝される頻度/時間(F)</th></tr> <tr><th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>6</th><th>7</th><th>8</th><th>9</th><th>10</th><th>11</th><th></th></tr> <tr><td>1</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>6</td><td>8</td><td>10</td><td>12</td><td>14</td><td>16</td><td>18</td><td>20</td><td>22</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>9</td><td>12</td><td>15</td><td>18</td><td>21</td><td>24</td><td>27</td><td>30</td><td>33</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>12</td><td>16</td><td>20</td><td>24</td><td>28</td><td>32</td><td>36</td><td>40</td><td>44</td><td></td></tr> </table> <p>■: リスク低減推奨 ■: リスク低減必要</p>	危害の酷さ(S)		4	重大障害(長期間治療)	3	医療措置(長期回復)	2	応急手当で回復	1	無傷/一時的な痛み	危害の発生確率(Ph=F+Ps+A)			曝される頻度/時間(F)	危険事象の発生確率(Ps)	回避可能性(A)	4	連続的/常時	4 高い(起こりやすい)	3	動作中継続/長時間	3 ありえる	2	動作中数回/短時間	2 可能性あり	1	まれ/時間的	1 低い(まれ)	危害の発生確率(Ph)											危害の酷さ(S)	曝される頻度/時間(F)										3	4	5	6	7	8	9	10	11		1	3	4	5	6	7	8	9	10	11		2	6	8	10	12	14	16	18	20	22		3	9	12	15	18	21	24	27	30	33		4	12	16	20	24	28	32	36	40	44	
	危害の酷さ(S)																																																																																																									
4	重大障害(長期間治療)																																																																																																									
3	医療措置(長期回復)																																																																																																									
2	応急手当で回復																																																																																																									
1	無傷/一時的な痛み																																																																																																									
危害の発生確率(Ph=F+Ps+A)																																																																																																										
曝される頻度/時間(F)	危険事象の発生確率(Ps)	回避可能性(A)																																																																																																								
4	連続的/常時	4 高い(起こりやすい)																																																																																																								
3	動作中継続/長時間	3 ありえる																																																																																																								
2	動作中数回/短時間	2 可能性あり																																																																																																								
1	まれ/時間的	1 低い(まれ)																																																																																																								
危害の発生確率(Ph)																																																																																																										
危害の酷さ(S)	曝される頻度/時間(F)																																																																																																									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11																																																																																																	
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11																																																																																																	
2	6	8	10	12	14	16	18	20	22																																																																																																	
3	9	12	15	18	21	24	27	30	33																																																																																																	
4	12	16	20	24	28	32	36	40	44																																																																																																	

図3-1-1-1-2. A2_開発対象の使用制限

検討される危険事象のリスクを定量化するにあたり、その算出方法や許容可能なリスクレベルについて事前に設定しておく。その計算式や許容リスクレベルについても図3-1-1-1-2. A2_開発対象の使用制限の中で明記した。これらのリスクアセスメントに

必要な情報を整理し、第1回目のリスクアセスメントを実施した。尚、リスクアセスメントは開発メンバー全員で実施し、全員の合議にて確定した。またリスクアセスメント実施にあたり、電動車いすの事故事例、関連規格なども準備し活用した。リスクアセスメントの結果を図3-1-1-1-3. A3__リスクアセスメントシート(初期)に示す。危険事象を網羅的に抽出すべく、ロボットの利用段階、利用場所、路面状態、動き・速度などに条件分けし、その状況における危険源を特定した上で、考えられる危険事象を抽出しシートに記入した。

抽出した危険事象										点数化					
段階	移動環境	路面材質 の想定	危険 状態	動 作	速度	危険源	危険事象 大項目	危険事象 小項目	発生 頻度	対策 の有無	発生 時の 被害	検出 の 容易さ	回避 の 容易さ	リスクの 評価	
運転(高速)	歩道	敷いている自転車			10km/h	不十分な21. 操作を誤り、障害(階段、溝、溝、用水路)に転落する		前から来る自転車を避けようとして、溝に落ちる。 転落(事故)	発生	対策あり	4	3	3	3	32
運転(高速)	歩道	人			10km/h	制動センサー15. 制動力が足りず、障害物(静止物/移動体)と衝突する		路面状況によっては、高速で走り、人と衝突	発生	第三者	4	3	3	2	32
運転(高速)	歩道	アスファルト	階段ノミ	走り前進	10km/h	乗り上げ高さ10段差に気づかず、タイヤが乗り上げて転倒する		片輪乗り上げにより、転倒	発生	対策あり	4	3	3	3	32
運転(高速)	歩道	アスファルト	階段ノミ	走り前進	10km/h	車輪脱輪23. 姿勢バランスを崩し、搭乗者が転倒する		段差を降りるときに転倒	発生	対策あり	4	7	3	3	28
運転(高速)	歩道	壁	突き		10km/h	不十分な28. 障害物(人/自転車/車/車イス)に気づかず、衝突する		壁の角(見通しの悪い)と交差する、出会い頭衝突	発生	第三者	4	3	3	3	32
運転(高速)	歩道	敷いている自転車			10km/h	不十分な20. 操作を誤り、姿勢バランスを崩し、転倒する		前から来る自転車を避けようとして、二つまたがって、転倒。	発生	対策あり	4	3	3	3	32
運転(高速)	歩道	アスファルト	昇り	走り前進	10km/h	11. 急な加速により、搭乗者が落下する		急に最高速度を出すと、前につんのめって転落する	発生	対策あり	4	5	1	3	20
運転(高速)	歩道	アスファルト	下り	走り前進	10km/h	制動力不足11. 急な加速により、搭乗者が落下する		下っている途中でスティックを覗いて、急制に止まり、転倒/転落する	発生	対策あり	4	5	1	2	20
運転(高速)	歩道	石	段々		10km/h	不十分な10 段差に気づかず、タイヤが乗り上げて転倒する		小さく気づかず、衝突して転倒	発生	対策あり	4	3	2	3	24
運転(高速)	歩道	土	突き		10km/h	車輪脱輪23. 車輪のスタックによる急停止で、搭乗者がつんのめ		土が片輪、あるいは、キャスターだけが車輪に絡まって、転倒する	発生	対策あり	4	5	1	2	20
運転(高速)	歩道	立止っている人	前進		10km/h	車輪のスタック。砂利/凍結/濡れた路面で車輪がスリップして、障害物(スリッパ)による急制不能状態が発生し、人にぶつかる			発生	第三者	4	5	1	2	20

図3-1-1-1-3. A3__リスクアセスメントシート(初期)

抽出した危険事象は、約300件程であった。この抽出した各危険事象について図3-1-1-1-2. A2__開発対象の使用制限で決めた見積方法に従いリスクの点数化を実施した。尚、リスクの点数化の際、リスクの評価項目に対する点数付けのバラツキを押さえるため、点数化の作業の前に、図3-1-1-1-4. リスク点数化の指針に示す点数付けの基準を決め実施している。

用語	定義	備考	
危険源	危害を引き起こす潜在的根源。JIS B 9702 Appendix A の機械安全の危険源リストがベース。 今回の対象に適合するように、危険源を抽出し、あてはめた。		
危険事象	危険源から、危害が起こる際のシナリオ。		
危害	対象者が受ける、怪我の種類を表す。 又は、文言相等の怪我をする。		
対象者	搭乗者、第三者(歩行者、自転車、自動車)		
リスク	酷さ	※同シート内、「リスクの酷さ採点基準」参照。	※1. 07/05 での指播をもとに(議事録参照)、酷さのレベル付けについて、曖昧さをなくす。 現状、「1/2」という任意な項目があるので、できれば、明確な線引きを行いたい。
	頻度	※(条件設定) 歩道・アスファルトの項目は、アイシン本社と刈谷駅の往路を想定。天気は「晴れ」。時間帯は、朝 8:00。 田舎の農道、ショッピングモールは、具体的に指定していない。 以下、レベル設定の内容 4: 5回以上、危険源に遭遇する。又は常に晒されている。 3: 2, 3~5回程度、危険源に遭遇する。 2: 1~2回程度、危険源に遭遇する。 1: あまり考えられない。	
	確率	確率は、「危険事象 → 危害」について、危害の起こりえる確率を評価した。危険事象の発生確率ではない。 4: 日常的に頻繁に発生する 3: 過去に、実際の事故事例/類似の事故事例がある(人、自転車等) 2: ありえそうと思える。 1: 可能性はあまりないと感じる。	※1. 確率について、「3」に「過去の事故事例」を含めることとした。「4」は、リコールが起こるほど日常的に頻繁に起こるレベルとした。
	回避可能性	危険状態になった時、対象者が危険事象の発生を回避できる可能性があるかどうか。 3: 対象者が、「危険源に気づいていない」もの、危険事象が「操作ミス」によるものは、搭乗者が回避不可能と定義する。 2: 対象者が、「危険事象の発生」を回避できる手段を持つが、実際に回避を行うことが困難なもの。車イスが「10km/h」のものが該当する。 1: 対象者が、「危険事象の発生」を回避できる手段を持ち、容易に回避を行えるもの。従来車イス(6km/h)が該当する。	※1. 速度がさがれば、回避できる余地ができるので、回避可能性は高まる。 ※2. 危険事象が「搭乗者が気づいていない」「操作ミス」によるもの場合、搭乗者が回避手段を持っていても、事象を回避できないので、「回避不可能」と評価する。 ※3. 対象者に「危険事象の発生を回避できる手段」があるならば、回避可能と評価する。 ※4. 対象に「気づいている」かつ「速度低減済み」ならば、レベル1。「気づいていない」かつ「速度低減済み」ならば、レベル2。「気づいていない」かつ「速度制限されていない」ならば、レベル3。「気づいている」かつ「速度制限されていない」ならば、レベル1。
	結果	頻度、確率、回避可能性の和 結果 = 頻度 + 確率 + 回避可能性	
	リスク点数	リスクの「酷さ」と「結果」の積 リスク点数 = リスク酷さ × リスク結果 ※今回は社会に受容されるための安全機能の開発が主眼のため、対象者(搭乗者/第三者)毎にリスク点数を算出し、この合計を最終的なリスク点数と定義する。	

(a) リスク点数化基準

対象	乗車/転落	歩み込み				衝突														
		低速 ~2km/h	~6km/h	~2km/h ・起動時 ・停止時	~6 km/h	後ろから 追突		気づかない 静止物		後ろから 追突		気づかない 静止物		自転車との 衝突	列車との 衝突	車との 衝突				
搭乗者	骨折 4	無傷 1	骨折/打撲 3	無傷 1	無傷 2	打撲 2	打撲 2	打撲 3	打撲 3	打撲 2	打撲 2	無傷 2	打撲 3	骨折 3	骨折 1	骨折 4	骨折 3	骨折 4	死亡 4	死亡 4
第三者	歩行者	-	-	-	無傷 2	打撲 2	打撲 3	打撲 3	打撲 3	打撲 3	打撲 3	骨折 3	骨折 4	骨折 4	骨折 4	骨折 4	骨折 4	-	-	-
	自転車	-	-	2	-	打撲 3	-	-	-	-	-	-	-	骨折 4	-	-	-	-	-	-
	車イス	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(b) リスクの酷さの基準

図3-1-1-1-4. リスク点数化の指針

図3-1-1-1-2. A2__開発対象の使用制限でリスク低減が必要なリスク点数を18点と設定した。これは、本ロボットの類似規格であるJIST9203で規定される電動車いす相当の点数であると仮定した。すなわち、電動車いすはすでに実用化され、その利用場面で生じる多くの事象は社会的にも許容されるとの考えに基づく。実際にリスク点数化したA3__リスクアセスメントシート(初期)を基にその考え方と点数が合致するか

の確認を実施した。本ロボットの電動車いすとの差異は、最高速度が異なる点である。リスクアセスメントでは危険事象抽出のための条件として速度による違いを設定していた。この速度条件の違いにより抽出した危険事象を層別し、それぞれの事象におけるリスク評価点の出現割合を分析した。分析した結果を図3-1-1-1-5に示す。これによれば、時速6km以下の条件、すなわち電動車いす相当である条件下では、リスク点数が12点のところにピークを持つ。また、時速10kmでの条件、すなわち本ロボット特有の条件下では、18点以上のリスク点数の事象が急激に増えている。さらに、時速6km以下の条件では18点以下のリスク点数の事象はその7割を占めている。従って、電動車いすの条件で発生する危険事象と本ロボットの条件で発生する危険事象はおよそ18点を境に分布していると考えられる。先に述べた、リスク評価基準の考え方に従えば、全ての危険事象のリスク点数を18点より低くすることが電動車いす相当の安全レベルであると言え、リスク低減が必要なリスク点数を18点と設定したことは妥当であると考えられる。

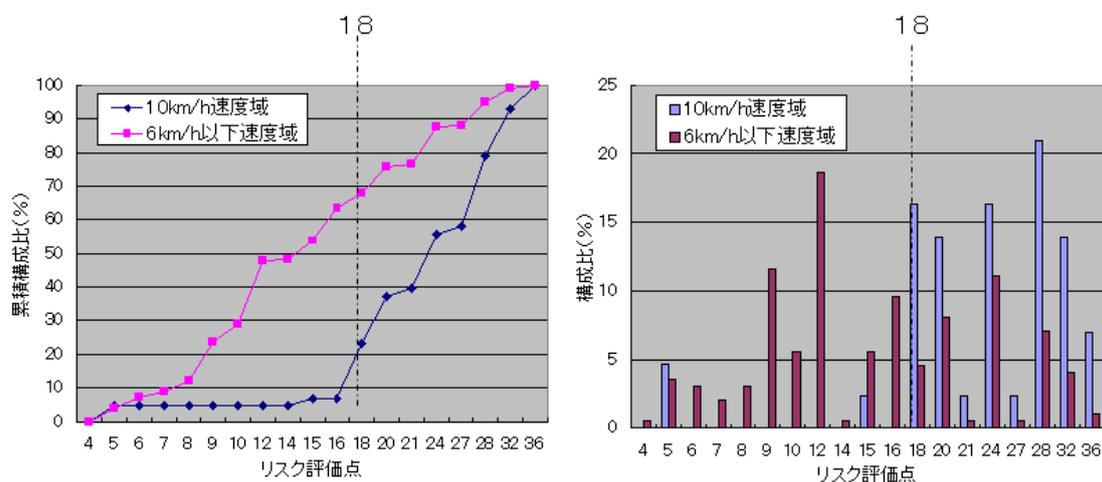


図3-1-1-1-5. リスク評価基準点数の妥当性確認

このリスク評価基準に従い、A3__リスクアセスメントシート（初期）にて抽出した約300件の危険事象からリスク低減が必要な危険事象を抽出した。抽出されたリスク低減が必要な危険事象は約100件であった。

この約100件の危険事象に対し、リスク低減策を適用し、各危険事象に対するリスク低減効果を再度見積る（再リスクアセスメント）。まず、再リスクアセスメントを実施する前に、有効なリスク低減策について抽出を行った。抽出のプロセスを図3-1-1-1-6. リスク低減策の検討に示す。

リスク低減が必要なリスク値の高い危険事象

6.	車輪のスタックによる急停止で、転倒する
1.	障害物(ドレン/安全コーン/電柱/扉)に気づかず、衝突する
19.	障害物(人/自転車/車/車イス)が、こちらに気づかず衝突してくる
21.	操作を誤り、段差(階段、側溝、用水路)に転落する
4.	砂利/凍結/ドブ板/レール/濡れた路面で車輪がスリップして、転倒する
2.	急に飛び出す障害物(人/自転車/車/車イス)と、衝突する
10.	段差(道路の築き目/石/階段)に気づかず、タイヤが乗り上げて転倒する
9.	車輪のスタックによる急停止で、搭乗者がつんのめって飛び出す
20.	操作を誤り、姿勢バランスを崩し、転倒する
18.	操作を誤り、障害物(人/自転車/車/車イス)に衝突する
8.	障害物(人/自転車/車/車イス)に気づかず、衝突する
26.	障害物(階段/段差/溝/穴)に気づかず、転落する
5.	砂利/凍結/濡れた路面で車輪がスリップして、障害物に衝突する
15.	車輪のスタックによる急停止で、障害物(人/自転車/車)と衝突する
27.	操作を誤り、車両と障害物の間に挟まれる
92.	誤操作/誤使用により、車両の意図しない動きによる転倒/転落
28.	姿勢バランスを崩し、搭乗者が転倒する
17.	危険領域(車道/踏切)への不適切な進入により障害物(車/電車)と衝突
19.	姿勢バランスを崩し、搭乗者が落車する

リスク低減を実現する対策案検討
※リスク低減策一覧より抜粋

The diagram illustrates the process of selecting countermeasures for high-risk incidents. It starts with a list of 28 high-risk incidents (e.g., wheel lockup, collisions, falls). A green arrow points to a table of countermeasures categorized into three levels: **本質安全** (Inherent Safety), **機能安全** (Functional Safety), and **運用** (Operation). The countermeasures include actions like 'avoidance of sharp corners', 'reducing speed', and 'early evasive maneuvers'.

- リスク低減が必要なリスク値の高い危険事象に対する**リスク低減策を考案**
- 現実的な**リスク低減策を選別**

図3-1-1-1-6. リスク低減策の検討

リスク低減策を検討するにあたり、およそ20件程度のリスク点数の高い危険事象を抜粋し、それぞれの事象に有効な方策アイデアを一覧表にした。この方策アイデアは、本質的な対策から機能安全的対策、運用方法での対策に区分し層別した。さらに、この方策アイデアの中で、実際に商品化・実用化を考えた時、採用可能であるかの視点を入れて選別した。こうして選別された有効なリスク低減策を準備し、A3__リスクアセスメントシート(初期)におけるリスク点数18点以上の危険事象に対し準備したリスク低減策を適用し、再度リスク点数化を実施した。再リスクアセスメントを実施した結果を図3-1-1-1-7. A3__再リスクアセスメントシートに示す。

例えば、時速10kmで屋外(歩道)を走行中、視界が良くない状況の中、前から来る自転車を避けようとして操作を誤り、溝に落ちるといった危険事象がある。これはリスク点数化の指針に従いリスク点数化すると32点というリスク低減が必要な危険事象である。これに対し、準備したリスク低減策の中で妥当なもの、例えば、転びにくくする本質安全対策としてキャンパー角をつけたり、時速10kmという速度を出す推奨場所など取り扱い説明書に明記し注意をするなどの対策や、ロボット側で減速したり、注意を喚起する事で早めに回避行動を促す機能安全的な対策を適用する。これらの個々の対策を適用することで、その頻度や確率、回避性の点数が下げられる。この危険事象の場合、機能安全対策によりリスク点数は16点まで下げる事ができ目標とする安全レベルに到達した。この様な作業をリスク低減が必要な約100件の危険事象に対し実施した。結果として、全てのリスク低減が必要な約100件の危険事象のリスク点数は18点未満となり、適用したり

リスク低減策を安全機能として開発ロボットに適用する事で、開発ロボットは安全ゴールである、電動車いすと同等の安全レベルになると考える。

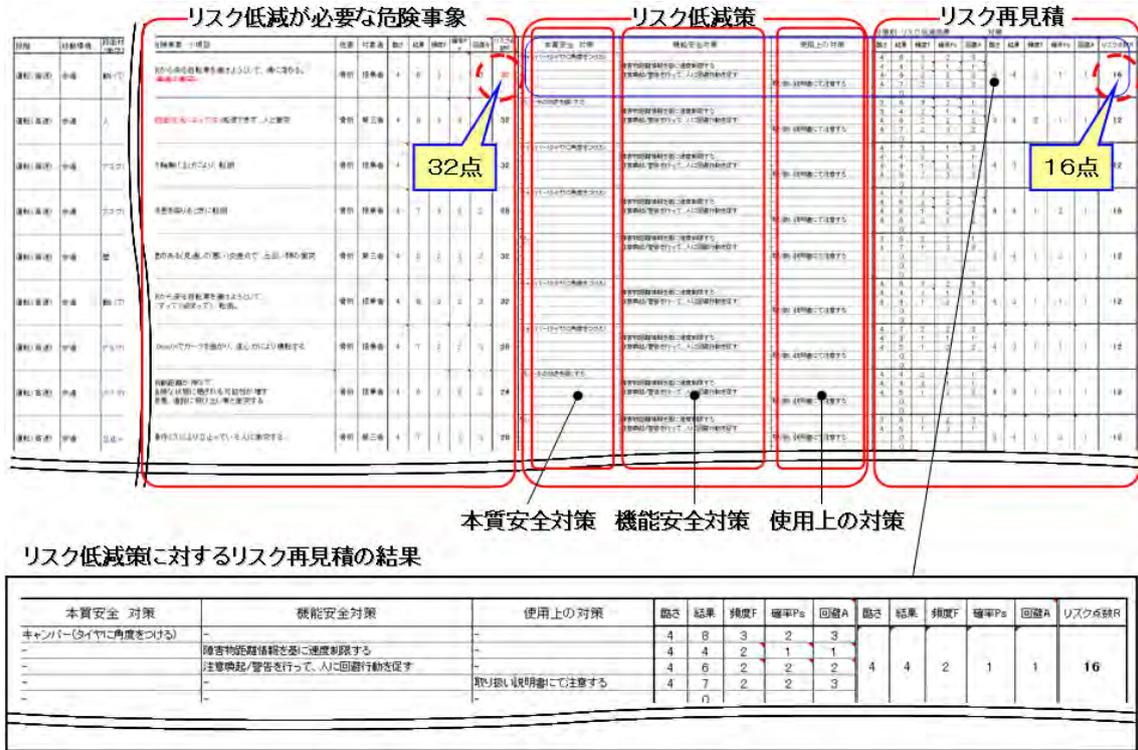


図 3-1-1-1-7. A3_再リスクアセスメントシート

適用したリスク低減策の機能安全的な対策をまとめたものを表 3-1-1-1 に示す。抽出したリスク低減策に基づき、安全機能の開発に着手した。

表 3-1-1-1. 抽出したリスク低減策 (機能安全対策)

区分	機能	具体策
機能安全	①速度制限	①-1.障害物距離情報を基に速度を制限する
		①-2.路面状況(段差、溝)により速度を制限する
		①-3.車体の傾き角度から速度を制限する
		①-4.インフラ情報を基に速度を制限する
	②注意喚起	②-1.速度制限状態を搭乗者に知らせる
		②-2.障害物距離情報を基に近接警報を出す

3-1-1-2. TAO-Aicle-Safety への安全分析（ヴィッツ）

TAO-Aicle-Safety への安全分析を進めるにあたり、次の内容を前提条件と規定した。

- 前提条件 1

操作ユニット、モータドライバユニットの障害はリスク計算ユニット（安全系ブロック）で担保できるように分析を行う。リスク計算ユニットへの入力情報として、CAN 通信から得られる情報で故障を検出した場合は、直ちにモータの停止及びユーザへの注意喚起を行う。前述以外の Ether または無線モジュールからの入力情報は、リスク演算が出来ないだけであるためモータへの停止をせず 6km/h 制限とする。

- 前提条件 2

電動車椅子の定期メンテナンスは必須とする。

3-1-1-2-1. 対象となるシステム構成の説明

TAO-Aicle への安全分析の結果、導出された安全機能を TAO-Aicle-safety の一次試作へ盛り込んだ。次に、安全機能を盛り込んだ一次試作に対して、再度 HAZOP¹分析を実施した。対象としている TAO-Aicle-safety システムブロック図（一次試作版）を下記に示す。

¹ HAZOP : Hazard and Operability

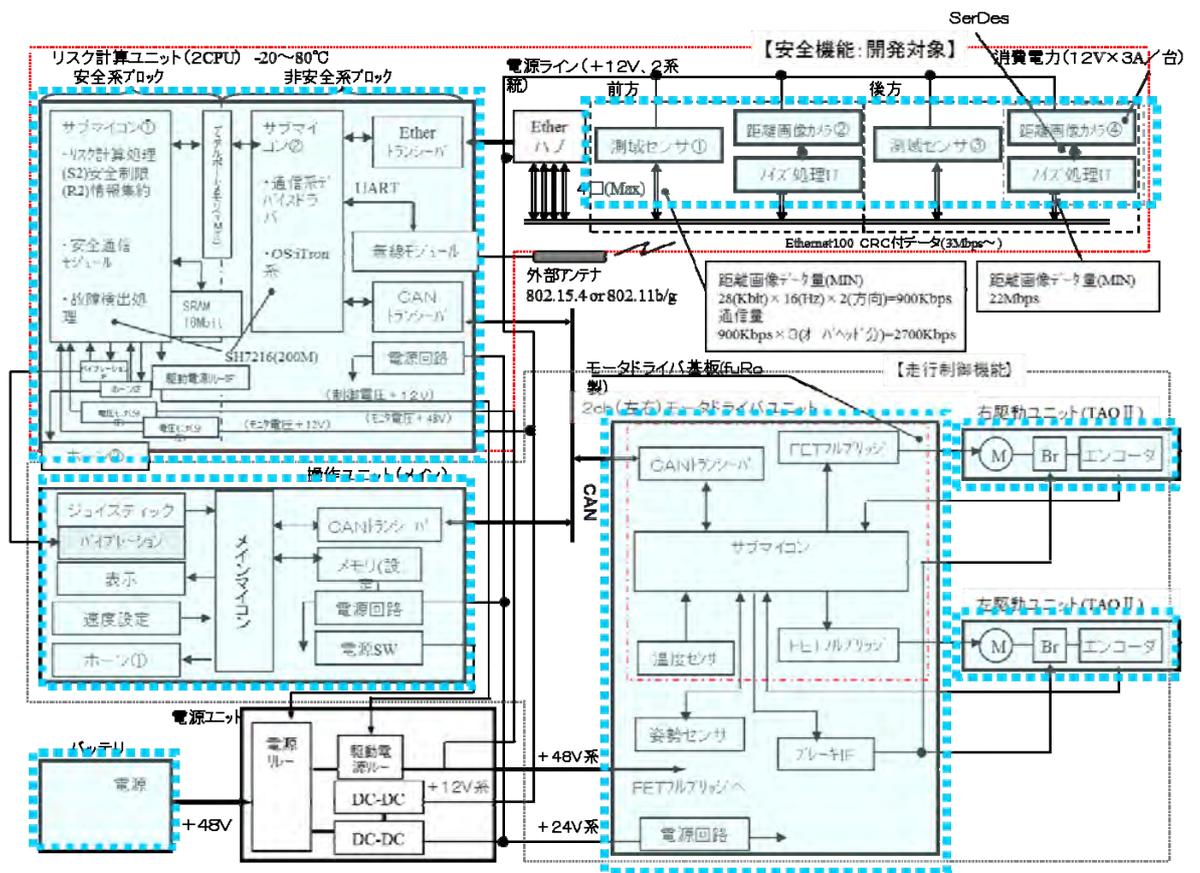


図 3-1-1-2. 1 TAO-Aicle-safety システムブロック図

3-1-1-2-2. HAZOP ガイドワード、通信驚異の故障モード説明
安全分析で使用する HAZOP ガイドワードを以下に列挙する。

表 3-1-1-2. 2 HAZOP ガイドワード一覧

ガイドワード	解釈
None	意図したことが起こらない
More	意図した量を超える
Less	意図した量を欠ける
as well as	意図したことは達成するが、余分なことをした
part of	意図した一部のみ達成した
Reverse	意図したことと反対のことが起きる
other than	意図したこととまったく異なることが起きる
early	意図したより早く起こった
Late	意図したより遅く起こった

before	意図したより前に起こった
after	意図したより後に起こった

上記 HAZOP ガイドワードに加え、通信に関わる部分に関しては、ISO 61784 規格の通信エラーをガイドワードに当てはめて分析を実施した。通信エラー定義を下記に示す。

表 3-1-1-2. 3 通信エラー対応表

通信エラー	ガイドワード
くずれ	More, less, part of, reverse
予想外の繰り返し	After
誤ったシーケンス	Other than, early, late, before, after
損失	No
受け入れがたい遅れ	Late
挿入	Other than
自己を偽る/変装	Other than
アドレス指定	Other than

3-1-1-2-3. 安全分析の実施結果

HAZOP 分析を実施するにあたり下記フォーマットを定義した。

- ブロック名称：システムブロック図に従いブロック名称を定義する。例えば、リ
スク計算ユニット、センサー、モータドライバユニットなど
- モジュール：ブロックに含まれる枠線で囲われた単位を指す
- 属性：モジュールにおける入力データ・出力データに分類
- ガイドワード：HAZOP ガイドワード
- 故障モード：入力出力データが通信に関わるものであれば、通信エラー分類に該
当するものを記載する
- 解釈：ガイドワードや通信エラー分類では抽象的であるため、具体的に現システ
ムに合わせた解釈を記載する
- 原因：解釈から恒久故障・一時故障に分類して記載する。
- 結果：モジュール単体で発生する結果を記載する。
- 全体への影響：システム全体への影響を記載する。また、影響が安全か危険かの
判断結果も記載する。
- 対策案：全体への影響に対する対策案を記載する。

ブロック名称	モジュール	属性	ガイドワード	故障モード (故障モード発生時の状態を明示)	解釈	原因	結果	全体への影響 (安全・危険の判断結果を)	対策		
リスク低減制御ブロック	サブマイコン①	入力データ	no		入力データがない	・デュアルポートメモリの故障 ・SRAMの故障 ・電圧モニタの故障 ・ハイブリッドチップの故障 ・ホーンDの故障 ・バスの断線	入力データを利用したサブマイコン①の制御が出来ない	・リスク算出が出来ない ・操作ユニットやモーターライユニットの故障を検出出来ない可能性があり危険である	入力データの検出かであるROM/RAMの故障検出機能を搭載する		
			more		入力データが多い(データの値が大きい)	・電圧モニタの故障 ・ノイズ	・耐圧を超える電圧によりサブマイコン①が故障する ・不正な入力データによる制御を行う	・サブマイコン①が故障した場合検出がないため危険に陥ることは無い ・不正な入力データより演算されたリスク算出結果や操作ユニットとモーターライユニットの故障検出結果では検出しない事象となる可能性があり危険である	ノイズによる入力データの過剰に対してはデータの出力側で出力データに対してCRCやパリティを付加することで対応する		
		出力データ	no		出力データがない	・サブマイコン①の故障 ・サブマイコン①のソフトウェアバグ	サブマイコン①の制御結果が出力されない	・異常者への注意喚起ができないため危険である ・駆動電圧リレーを制御できないため危険である ・リスク算出の結果を通知出来ない	・機能安全プロセス(SIL2)に準拠した開発を行う ・不正な処理順序、実行タイミングをチェックするためのSW付き実行シーケンスモニター機能を搭載する ・CPUの故障検出チェック機能を搭載する ・リスク算出の結果が通知されない場合は800msで制御するよう操作ユニットにて対応する	・機能安全プロセス(SIL2)に準拠した開発を行う ・不正な処理順序、実行タイミングをチェックするためのSW付き実行シーケンスモニター機能を搭載する	
			as well as		出力データと別のデータが同時に検出される	・サブマイコン①, ②の断線 ・バスの断線	デュアルポートメモリにデータを書き込めない	デュアルポートメモリを復元しないためサブマイコン①の演算処理が出来ない(検出しない危険に陥る可能性がある)	危険ではないため対策を講じない	危険ではないため対策を講じない	
		デュアルポートメモリ	入力データ	no		入力データがない	入力データがない	・サブマイコン①, ②の断線 ・サブマイコン①, ②のソフトウェアバグ	他のデータ領域への書き込みになる	デュアルポートメモリに不正なデータが書き込まれたことによりサブマイコン①の演算処理が影響しない結果になる可能性があり危険である	・機能安全プロセス(SIL2)に準拠した開発を行う ・不正な処理順序、実行タイミングをチェックするためのSW付き実行シーケンスモニター機能を搭載する
				less		入力データが少ない(データサイズが小さい)	・サブマイコン①, ②の断線 ・サブマイコン①, ②のソフトウェアバグ	部分的に過剰データが検出	同上	同前	危険ではないため対策を講じない
	デュアルポートメモリ	入力データ	no		入力データがない	データがない	・デュアルポートメモリの故障 ・バスの断線	デュアルポートメモリからデータを読み取れない	SRAMを復元しないためサブマイコン①の演算処理が出来ない(検出しない危険に陥る可能性がある)	危険ではないため対策を講じない	
			more		入力データが多い(データサイズが大きい)	・サブマイコン①, ②の断線 ・サブマイコン①, ②のソフトウェアバグ	他のデータ領域への書き込みになる	デュアルポートメモリに不正なデータが書き込まれたことによりサブマイコン①の演算処理が影響しない結果になる可能性があり危険である	危険ではないため対策を講じない		
		出力データ	no		出力データがない	データがない	・デュアルポートメモリの故障 ・バスの断線	デュアルポートメモリからデータを読み取れない	SRAMを復元しないためサブマイコン①の演算処理が出来ない(検出しない危険に陥る可能性がある)	危険ではないため対策を講じない	
			more		出力データが多い(データサイズが大きい)	・サブマイコン①, ②の断線 ・サブマイコン①, ②のソフトウェアバグ	他のデータ領域への書き込みになる	デュアルポートメモリに不正なデータが書き込まれたことによりサブマイコン①の演算処理が影響しない結果になる可能性があり危険である	危険ではないため対策を講じない		
		通信制御ブロック	CANトランスシーブフレーム (フレーム2.5.6.7)	入力データ	no	損失	入力データがない	・メッセージが飛んできていない ・送信ユニットの故障 ・断線(ループコンタクト) ・リスク算出ユニットの故障	・モーターの回転数不明 ・モーターの回転方向不明 ・モーターの電流値不明	・実行状態が不明 ・指令値と実際の値が合っていないか確認できないため、安全/危険の判断ができないことによる危険となる。	冗長構成にする。 通信シーケンスを変更し、通信ができていないことが判断できるようにする。 断線にSense機能(フレームを受信するのことで、一定時間Sense機能でフレームを受信できなかった場合は、システムエラーとする)。
					more	くずれ	入力データが大きい	・ノイズの付いたため ・送信ユニットの故障 ・断線(ループコンタクト) ・リスク算出ユニットの故障	・リスク算出ユニットへ通知するデータの値が実際より大きい値となる	・指令値を下回るため、システム異常と判断する。 断線はない。	危険ではないため対策を講じない ・入力データにCRCやチェックサムを付与させる ・ノイズに強いバスにする
less	くずれ				入力データが小さい	・ノイズの付いたため ・送信ユニットの故障 ・断線(ループコンタクト) ・リスク算出ユニットの故障	・リスク算出ユニットへ通知するデータの値が実際より小さい値となる	・指令値を下回るため、システム異常と判断する。 断線はない。	危険ではないため対策を講じない		
出力データ	no			損失	出力データが無い	・Ehnetトランスシーブの故障 ・バスの断線	サブマイコン②へセンサからのデータが出力できない	センサからのデータを受信できないためリスク算出ユニットでは判断が付き危険である	入力データにCRCやチェックサムを付与させ		
	more			くずれ	出力データの値が大きくなる	・Ehnetトランスシーブの故障 ・通信経路の干渉(ノイズなど)	Ehnetトランスシーブからの出力データの値が大きくなる	センサから通知されたデータが不正なため判断が付き危険である	同上		
	less			くずれ	出力データの値が小さくなる	・Ehnetトランスシーブの故障 ・通信経路の干渉(ノイズなど)	Ehnetトランスシーブからの出力データの値が小さくなる	同上	同上		
無線モジュール	入力データ		no	損失	入力データがない	無線ユニット側がデータを送信していない 無線ユニット側の故障	最大速度許可情報が無線ユニットから通知されない	最大速度許可情報が無線ユニットから通知されないため判断が付き危険である	入力データにCRCやチェックサムを付与させる		
			more	くずれ	入力データが想定より大きい	・ノイズ ・送信ユニットの故障	最大速度許可情報は受信可能だが、入力データが大きい	最大速度許可情報が無線ユニットから通知されたがデータが不正なため判断が付き危険である	同上		
			less	くずれ	入力データが想定より小さい	・ノイズ ・送信ユニットの故障	最大速度許可情報は受信可能だが、入力データが小さい	同上	同上		
	出力データ		no	損失	出力データがない	無線モジュールの故障	最大速度許可情報(データは未定)を送信できない	最大速度許可情報が無線ユニットから通知されないため判断が付き危険である	入力データにCRCやチェックサムを付与させる		
			more	くずれ	出力データが想定より大きい	無線モジュールの故障	最大速度許可情報を送信できるがデータは不確定	最大速度許可情報が無線ユニットから通知されたがデータが不正なため判断が付き危険である	同上		
			less	くずれ	出力データが想定より小さい	無線モジュールの故障	最大速度許可情報を送信できるがデータは不確定	同上	同上		

図3-1-1-2. 4 HAZOP分析実施結果(抜粋)

3-1-1-2-4. ハードウェア安全分析の実施結果

TAO-Aicle-Safety システムで使用するハードウェアの安全分析を実施した。ハードウェア安全分析の実施手順としては以下の通りである。

1. システム構成（1重系、2重系、3重系の選択）の決定する
2. システムで使用する部材の種類ごとに故障モードを決定する
3. 全ての部材について故障原因（ISO 13849を一部引用）、故障の影響、DC判断、判断根拠を定義し、FMEDA²を実施する

部品名	故障原因	ISO13849参照元英文	備考	fraction	故障原因参照元	fraction参照元
R 抵抗	open	open-circuit	抵抗なので入出力の区別は不要	80%	ISO13849-2 D.14	B9961 表D.1 抵抗器
	short	short-circuit	二端子間のショート	10%		
	drift	Random change of value $0.5R_n < R < 2R_n$ where R_n is the nominal value of resistance (see remark 2)	fault mode考慮時は、値の範囲を考慮しない 他の故障と同じ影響であれば不要。	10%		
CN コネクタ	Short-circuit between connection 1 and 2	short-circuit between any two adjacent pins	隣り合ったピンのみ。 関連するピンのみ必要	10%	ISO13849-2 D.7	B9961 表D.1 プラグ、ソケット及び多極コネクタ
	Interchanged or incorrectly inserted connector when not prevented by mechanical means	Interchanged or incorrectly inserted connector when not prevented by mechanical means	コネクタが逆方向にささらないようになっている場合不要			
	Short-circuit of conductor 1 to earth	Short-circuit of any conductor(see remark 3) to earth or a conductive part or to the protective conductor	全ての導線に対して洗い出す			
	Short-circuit of conductor 1 to conductive part	Short-circuit of any conductor(see remark 3) to earth or a conductive part or to the protective conductor	全ての導線に対して洗い出す	10%		
	Short-circuit of conductor 1 to the protective conductor	Short-circuit of any conductor(see remark 3) to earth or a conductive part or to the protective conductor	全ての導線に対して洗い出す			
	Open-circuit of individual connector pins 1	Open-circuit of individual connector	全て洗い出す	80%		
IC CPUなど	Open-circuit of connection	open-circuit of any connection	全て洗い出す必要あり	20%	ISO13849-2 D.21	等分で計算 プログラマブル集積
	Short-circuit between connection	short-circuit between any two connection	入出力ピンの全組み合わせについて必要 (バッファの場合はハブピン間の隣の端子のみでよい) 安全関連の端子のみ必要	20%		
	stuck-at HIGH of connection	Stuck-at-fault		20%		
	stuck-at LOW of connection	Stuck-at-fault		20%		
	oscillation	Parasitic oscillation of outputs	oscillation回路で可能性のある異常発振。 隣接する違う周波数のものがあつた場合に、その影響を受けた場合のこと。 EMC、振動についても考慮。 安全関連のみ必要	20%		
	Changing value	Changing value	他の故障と同じ影響であれば不要。	20%		
PC フォトカプラ	Open-circuit of connection 1	open-circuit of individual connection		30%	ISO13849-2 D.19	B9961 表D.1 光結合素子 フォトカプラ
	Short-circuit between any two input connections	short-circuit between any two input connection		30%		
	Short-circuit between any two output connections	short-circuit between any two output connection		30%		
	Short-circuit between any two connections of input 1 and output 1	short-circuit between any two connections of input and output	IEC60249に準拠し、IEC60864-1:1992に従った寸法になっている場合は考慮しない	10%		
近接スイッチ	出力経路の抵抗が永久的に過小	Permanently low resistance at output		25%	ISO13849-2 D.10	B9961 表D.1 近接スイッチ
	出力経路の抵抗が永久的に過大	Permanently high resistance at output		25%		
	電源系の不良	Interruption in power supply		30%		
	機械的故障によるスイッチ機能不能	No operation of switch due to mechanical failure		10%		
	切替接点において3接点が同時にショート	Short-circuit between the three connections of a change-over switch		10%		
スイッチ	Contact will not open	Contact will not close			ISO13849-2 D.8	B9961 表D.1 スイッチ を参考に等分で計算 電気機械式ポジションスイッチ、手動スイッチ
	Contact will not close	Contact will not open	非常停止スイッチのみ除外可能			
	Short-circuit between connection 1 and 2	Short-circuit between adjacent contacts insulated from each other	安全スイッチなら除外可能			
	Simultaneous short-circuit between three terminals of change-over contacts	Simultaneous short-circuit between three terminals of change-over contacts	切り替えスイッチの場合は考慮			
水晶発振子	Open-circuit of pin 1	open-circuit of any connection	使用していない端子は考慮しないこと		ISO13849-2 D.18	B9961 表D.1 ディスクリート半導体を参考しているが、故障原因が異なるため等分で計算
	Short-circuit between connection 1 and 2	short-circuit between any two connection				
	Short-circuit between all connections	short-circuit between all connection				
	sub-harmonic(低周波(Change in characteristics))	(IEC61508)				
	super harmonic(高周波(Change in characteristics))	(IEC61508)				
	Change in characteristics	Change in characteristics	他の故障と同じ影響であれば不要。			
コンデンサ	open	open-circuit		40%	ISO13849-2 D.17	B9961 表D.1 キャパシタ
	short	short-circuit		40%		
	drift	Random change of value $0.5C_n < C < C_n + tolerance$ where C_n is nominal value of capacity (see remark 1)	fault mode考慮時は、値の範囲を考慮しない 他の故障と同じ影響であれば不要。(ハイパスコンデンサの場合不要。)	10%		
	Changing value tan δ	Changing value tan δ	共振	10%		

図 3-1-1-2. 5 FMEDA 故障モード (抜粋)

² FMEDA : Failure Modes Effects and Diagnostics Analysis

部品	故障原因	故障の影響	λ (total)	S	D	Fraction	DC	DC判断情報	λ (frac)	λ S	λ D	λ DD	λ DU	備考
G12	open	影響なし	6.00E-09	1	0	40%	99%		2.40E-08	2.40E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	short	モータ駆動電源48Vのモニタ値が0Vになる	6.00E-09	0.5	0.5	40%	99%	モータドライバユニットがリスク計算ユニットへ速度情報を通知している。リスク計算ユニットでは速度情報とモニタ値を比較確認し乖離があれば車両を停止させる。	2.40E-08	1.20E-08	1.20E-08	1.19E-08	1.20E-11	
	drift	影響なし	6.00E-09	1	0	10%			6.00E-10	6.00E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	Changing value tan δ	モータ駆動電源48Vのモニタ値が0V \leftrightarrow 3Vを繰り返す。	6.00E-09	0.5	0.5	10%	99%	モータドライバユニットがリスク計算ユニットへ速度情報を通知している。リスク計算ユニットでは速度情報とモニタ値を比較確認し乖離があれば車両を停止させる。	6.00E-10	3.00E-10	3.00E-10	2.97E-10	3.00E-12	
CN1	Short-circuit between connection 1 and 2	過電流により電源がおちる。駆動電源が切られブレーキが動作しシステムが停止するので安全	5.57E-13	1	0	10%			5.57E-14	5.57E-14	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin配置から全てのショートを洗い出す
	Short-circuit of conductor 1 to earth	過電流により電源がおちる。駆動電源が切られブレーキが動作しシステムが停止するので安全	5.57E-13	1	0	2%			9.28E-15	9.28E-15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Short-circuit of conductor 2 to earth	影響なし	5.57E-13	1	0	2%			9.28E-15	9.28E-15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Short-circuit of conductor 1 to conductive part (12V)	影響なし	5.57E-13	1	0	0%			2.32E-15	2.32E-15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Short-circuit of conductor 1 to conductive part (48V)	H/Wが破損し、システムが機能しないので安全	5.57E-13	1	0	0%			2.32E-15	2.32E-15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Short-circuit of conductor 1 to conductive part (5V)	H/Wが破損し、システムが機能しないので安全 ただし内部回路により電源を生成しており、物理的にありえない	5.57E-13	1	0	0%			2.32E-15	2.32E-15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Short-circuit of conductor 1 to conductive part (3.3V)	H/Wが破損し、システムが機能しないので安全 ただし内部回路により電源を生成しており、物理的にありえない	5.57E-13	1	0	0%			2.32E-15	2.32E-15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Short-circuit of conductor 2 to conductive part (12V)	影響なし(過電流によりセンサー電源がおちる)	5.57E-13	1	0	0%			2.32E-15	2.32E-15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Short-circuit of conductor 2 to conductive part (48V)	H/Wが破損し、システムが機能しないので安全	5.57E-13	1	0	0%			2.32E-15	2.32E-15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Short-circuit of conductor 2 to conductive part (5V)	過電流により電源がおちる。駆動電源が切られブレーキが動作しシステムが停止するので安全 ただし内部回路により電源を生成しており、物理的にありえない	5.57E-13	1	0	0%			2.32E-15	2.32E-15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
X1	Short-circuit of conductor 2 to conductive part (3.3V)	過電流により電源がおちる。駆動電源が切られブレーキが動作しシステムが停止するので安全 ただし内部回路により電源を生成しており、物理的にありえない	5.57E-13	1	0	0%			2.32E-15	2.32E-15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Short-circuit of conductor 1 to the protective conductor	影響なし	5.57E-13	1	0	2%			9.28E-15	9.28E-15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Short-circuit of conductor 2 to the protective conductor	影響なし	5.57E-13	1	0	2%			9.28E-15	9.28E-15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Open-circuit of individual connector pins 1	システム停止状態と同様の状態となるので安全	5.57E-13	1	0	40%			2.23E-13	2.23E-13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Open-circuit of individual connector pins 2	システム停止状態と同様の状態となるので安全	5.57E-13	1	0	40%			2.23E-13	2.23E-13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Open-circuit of connection 1	システム停止状態と同様の状態となるので安全	5.78E-09	1	0	6%			3.61E-10	3.61E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Open-circuit of connection 4	システム停止状態と同様の状態となるので安全	5.78E-09	1	0	6%			3.61E-10	3.61E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Open-circuit of connection 5	システム停止状態と同様の状態となるので安全	5.78E-09	1	0	6%			3.61E-10	3.61E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Open-circuit of connection 8	システム停止状態と同様の状態となるので安全	5.78E-09	1	0	6%			3.61E-10	3.61E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin数分追加
	Short-circuit between connection 1 and 4	過電流により電源がおちる。駆動電源が切られブレーキが動作しシステムが停止するので安全	5.78E-09	1	0	6%			3.61E-10	3.61E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin配置から全てのショートを洗い出す
Short-circuit between connection 4 and 5	システム停止状態と同様の状態となるので安全	5.78E-09	1	0	6%			3.61E-10	3.61E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin配置から全てのショートを洗い出す	
Short-circuit between connection 5 and 8	システム停止状態と同様の状態となるので安全	5.78E-09	1	0	6%			3.61E-10	3.61E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin配置から全てのショートを洗い出す	
Short-circuit between connection 8 and 1	影響なし	5.78E-09	1	0	6%			3.61E-10	3.61E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	pin配置から全てのショートを洗い出す	
Short-circuit between all connections	過電流により電源がおちる。駆動電源が切られブレーキが動作しシステムが停止するので安全	5.78E-09	1	0	25%			1.45E-09	1.45E-09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00		
Change in characteristics	システム停止状態と同様の状態となるので安全	5.78E-09	1	0	25%			1.45E-09	1.45E-09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00		

図 3-1-1-2. 6 FMEDA 実施結果 (抜粋)

3-1-2. 安全コンセプト/システム設計 (パイロットスタディ)

3-1-2-1. システム構成と機能概要

リスク計算ユニットでは、操作ユニットからの操作情報、レーザレンジセンサからの環境情報、モータドライバユニットからの車両情報を考慮し、リスク低減アルゴリズムにて上限速度値を決定する。機能安全の開発対象をコンパクトにするために、リ

リスク計算ユニット内をアプリケーションやアルゴリズムといった制御情報を扱うリスク低減制御ブロックと、外部ユニットとのデータ授受を扱う通信制御ブロックに分割する。リスク低減制御ブロックに対しては機能安全開発対象とし、通信制御ブロックに関しては機能安全開発対象外であるが、通信が主目的であるため IEC 61784 規格の対策を行うことで故障検知を行う。

詳細については、安全目標及びコンセプトに記載する。

リスク計算ユニットは、サブマイコン①を含むリスク低減制御ブロックと、サブマイコン②を含む通信制御ブロックの 2CPU で構成されている。それぞれのサブマイコンをブリッジする機構としてデュアルポートメモリを用いる。リスク計算ユニットと外部ユニット（外部ブロック）を繋ぐ手段として EtherNet、CAN 通信を用いる。

以下にリスク計算ユニットのブロック図を示す。

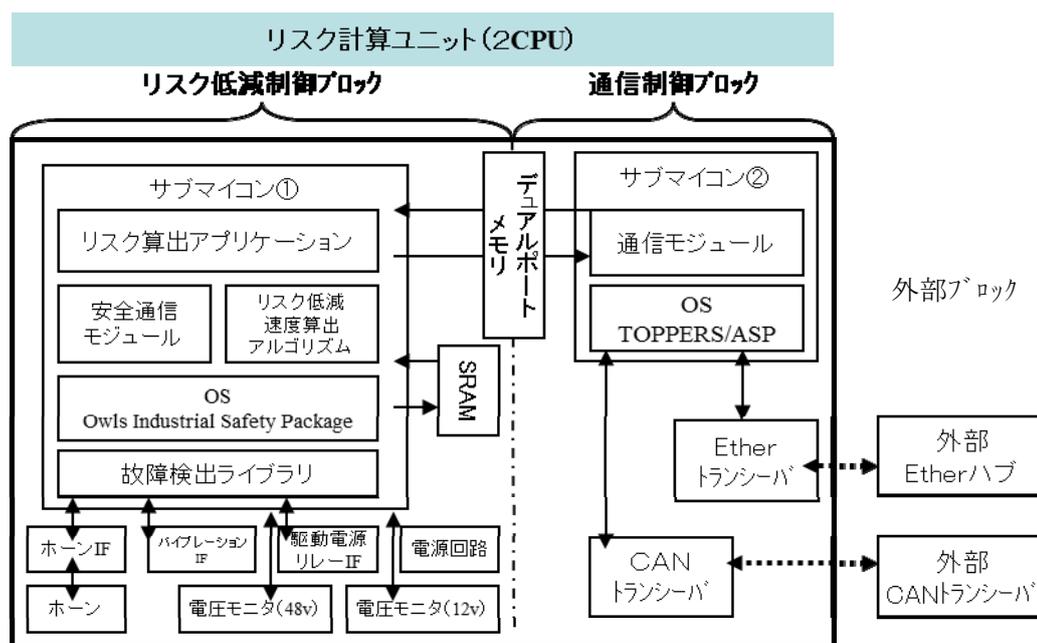


図 3-1-2-1. 1 リスク計算ユニット（ブロック図）

3-1-2-1-1. リスク低減制御ブロック

機能安全開発対象となるリスク低減制御ブロックの構成要素を記載する。

- サブマイコン①
 - リスク低減速度算出アルゴリズム
リスク低減速度算出アルゴリズムは、生活空間内移動リスク算出アルゴリ

ズム・環境認識アルゴリズム・リスク低減動作パターン算出アルゴリズムの3つから構成されている。生活空間内移動リスク算出アルゴリズムは Ether トランシーバ経由で接続されているセンサデバイスから取得される各パラメータ（混合率・距離）をもとに生活空間内移動リスクを算出する。環境認識アルゴリズムはセンサデバイスから取得される各パラメータにより環境をセンシングし、密集度・移動空間内物体相対速度・距離を算出する。リスク低減動作パターン算出アルゴリズムは、生活空間内移動リスク算出アルゴリズムが算出した結果を用いて TAO-Aicle-safety の進行方向別の最高速度を決定する。

➤ 安全通信モジュール

安全通信モジュールは、デュアルポートメモリや SRAM に対して通信データの取得（受信）と設定（送信）を行う。取得の際には通信データを解析し、正常であればリスク算出アプリケーションへ引き渡す。設定の際にはリスク算出アプリケーションから引き渡された通信データに対して付加情報を付与する。

通信データの付加情報については、IEC61784-3 の通信脅威と安全対策を元に行ったリスク分析結果から確定する。

➤ リスク算出アプリケーション

リスク算出アプリケーションは、外部ユニット（メイン操作ユニット、モータドライブユニット）からの情報取得を行い、速度制御に矛盾が発生していないか監視を行う。情報取得の手段は、CAN 通信経由で電圧モニタにて行う。速度制御に矛盾が発生している場合は、下記モジュールインターフェース（IF）を動作させる。

◇ 駆動電源リレーIF

- 駆動電源リレーの ON/OFF によりモータへの電源供給を通電/遮断制御する。

◇ バイブレーション IF

- システムに異常を検出した場合にバイブレーションを ON にして搭乗者に通知する。

◇ ホーン IF

- システムに異常を検出した場合にホーンを鳴らして搭乗者に通知する。

➤ OS Owls Industrial Safety Package

サブマイコン①の制御を目的として、リアルタイム OS である Owls Industrial Safety Package を使用する。本 OS は安全関連系に必要な機能を実現するカーネル（TOPPERS/ASP カーネルをベースにしたもの）と、アプ

リケーションによりハードウェアの故障検出を支援するライブラリを併せ持つ。Owls -Industrial Safety Package は、IEC61508 の第 3 部で規定される SIL3 の HR 手法を用いて開発されている。

➤ 故障検出ライブラリ

安全系では故障検出ライブラリを使用する。故障検出ライブラリは、ハードウェアの故障検出（ランダムハードウェア故障、システムティックエラー）に対応している。また、故障検出ライブラリは IEC61508 の第 3 部で規定される SIL3 の HR 手法を用いて開発されている。

● デュアルポートメモリ

サブマイコン①とサブマイコン②のデータをブリッジするためのメモリである。外部から通知されるセンサ情報、CAN データ、サブマイコン①の演算結果がデータとして扱われる。双方のマイコンで利用するため、メモリ領域は重ならないように分割して管理する。

● SRAM

リスク低減速度算出アルゴリズムで扱うセンサ情報は、データ量が膨大であるためバッファメモリとして使用する。

● ホーン・ホーン IF

リスク算出アプリケーションがシステム異常を検知した際に、ユーザへの注意喚起として使用する。

● バイブレーション

リスク算出アプリケーションがシステム異常を検知した際に、ユーザへの注意喚起として使用する。

● 駆動電源リレーIF

リスク算出アプリケーションがシステム異常を検知した際に、モータへの駆動電源を遮断するために使用する。

● 電圧モニタ

モータ及びセンサへの電圧状態をモニタリングするために使用する。

● 電源回路

リスク計算ユニットへの電源供給回路である。

3-1-2-1-2. 通信制御ブロック

機能安全開発対象外ではあるが、通信制御ブロックの構成要素を記載する。

● サブマイコン②

➤ 通信モジュール

通信モジュールでは、デュアルポートメモリへの読み書きや外部への送受信を行う。

➤ OS (TOPPERS/ASP)

サブマイコン②の制御を目的としてリアルタイム OS を使用する。

• Ether トランシーバ

センサデバイスのデータ授受の機構として使用する。

• CAN トランシーバ

CAN 通信のデータ授受の機構として使用する。

3-1-2-1-3. ロボットと周辺環境センサ

本プロジェクトでは、ロボット周辺の環境センサとして特性の異なる 2 種類の立体検知センサ、3次元測域センサと、3次元距離画像カメラが試されることになった。図3-1-2-1. 2に、各センサの仕様比較をまとめたがその特性から、遠距離は3次元レーザ測域センサが適しており、近距離の細かい物体の検出には3次元距離画像カメラが適している。

図3-1-2-1. 3の取り付け方法をセンサ仕様検討のための案とした。

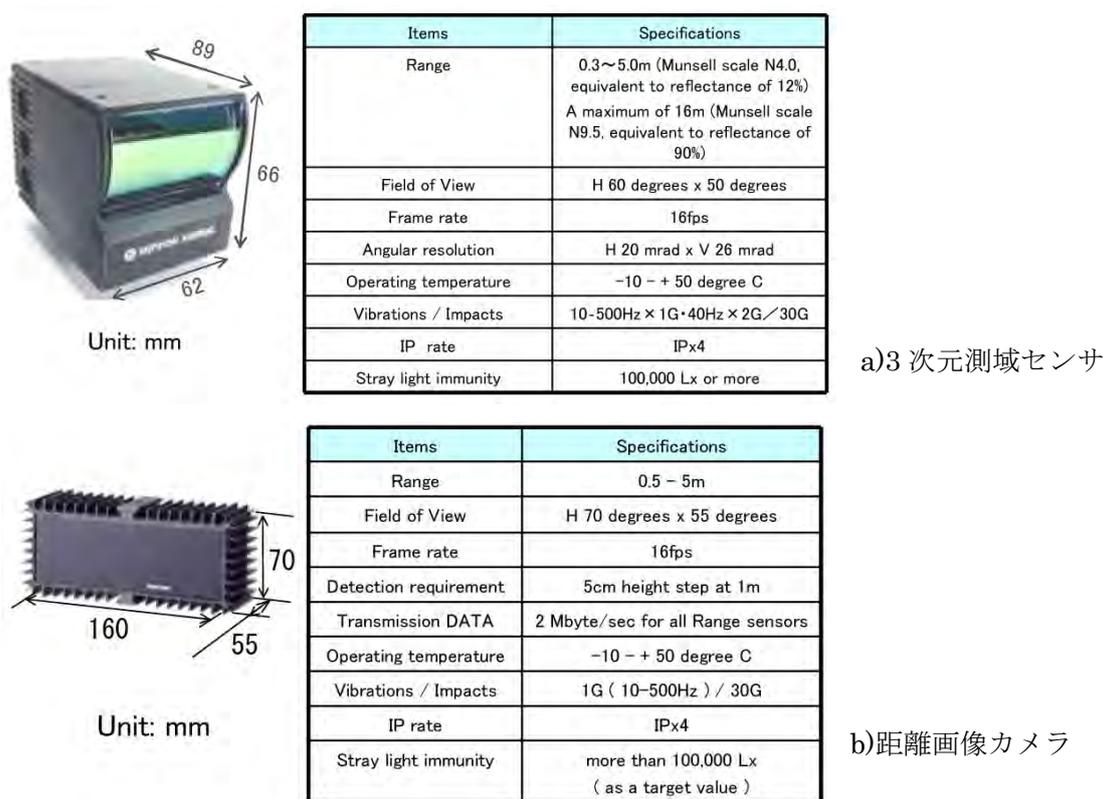


図3-1-2-1. 2 障害物検知センサの仕様比較



図 3-1-2-1. 3 障害物検知センサの仕様比較

初期の構想では、両センサを Ethernet HUB を介してリスク計算ユニットに距離計測データを入力し、障害物検出はリスク計算ユニットで行う予定だった。

3-1-2-2. 安全目標とコンセプト

3-1-2-2-1. 安全目標

リスク計算ユニットは、リスク低減制御ブロックと通信制御ブロックで構成されている。本プロジェクトでは機能安全開発対象であるリスク低減制御ブロックのみで、IEC 61508 SIL2 に準拠させる。

リスク低減制御ブロックでは、IEC 61508 SIL2 に対応したソフトウェア開発プロセスで開発する。また、タイプ B3 のサブシステムに対して安全故障割合 (Safe Failure Function) が 90% 以上 99% 未満の診断方法を含む故障検出ライブラリを用いる。

表 3-1-2-2. 1 ランダムハードウェア故障に対する故障検出の診断方法

³ IEC 61508 Part2 の 7.4.3.1.3 で規定される一般的なマイコンを使用するシステムは、「すべての構成要素について、故障モードが正しく定義されていないサブシステム」と分類され、タイプ B であると判断される。なぜなら、MCU を使用することで構成要素の組み合わせによる複雑度が増す為、全ての故障モードを定義することができないと判断する為である。

安全故障割合 (Safe Failure Function)	ハードウェアのフォールトトレラント(備考2を参照)		
	0	1	2
SFF < 60%	許容されていない	SIL1	SIL2
60% ≤ SFF < 90%	SIL1	SIL2	SIL3
90% ≤ SFF < 99%	SIL2	SIL3	SIL4
SFF ≥ 99%	SIL3	SIL4	SIL4

備考1 この表の解釈についての詳細は、7.4.3.1.1～7.4.3.1.4を参照。
備考2 ハードウェアフォールトトレラントは、N+1の障害が安全機能の喪失を引き起こす恐れがなくなることを意味する。
備考3 安全故障割合の算出方法についての詳細は、付録Cを参照のこと。

また、リスク計算ユニットへの入出力メッセージ（通信データ）は、IEC 61784 にて規定されている手法を適用する。

このとき、通信の残余誤り率を $10^{-9}/h$ 以下となるようにする。

表 3-1-2-2. 2 残余誤り率と SIL の関係

安全機能に適用可能な SIL	機能安全通信システムにおける 1時間あたりの故障率	機能安全通信システムにおける 最大許容残余誤り率
4	$< 10^{-8}/h$	$< 10^{-10}/h$
3	$< 10^{-7}/h$	$< 10^{-9}/h$
2	$< 10^{-6}/h$	$< 10^{-8}/h$
1	$< 10^{-5}/h$	$< 10^{-7}/h$

リスク計算ユニットにて CAN 通信から得られる情報で異常や故障を検出した場合は、直ちに駆動電源リレーIF を使い左右の駆動モータの停止、及びホーンやバイブレーションを使いユーザへの注意喚起を行う。前述以外の Ether モジュールから得られる情報で異常や故障を検知した場合は、モータへの停止は行わず障害物の 1m 手前までに 1km/h 未満に速度を抑える。

3-1-2-2-2. コンセプト

リスク計算ユニットのシステム構成図を示す。

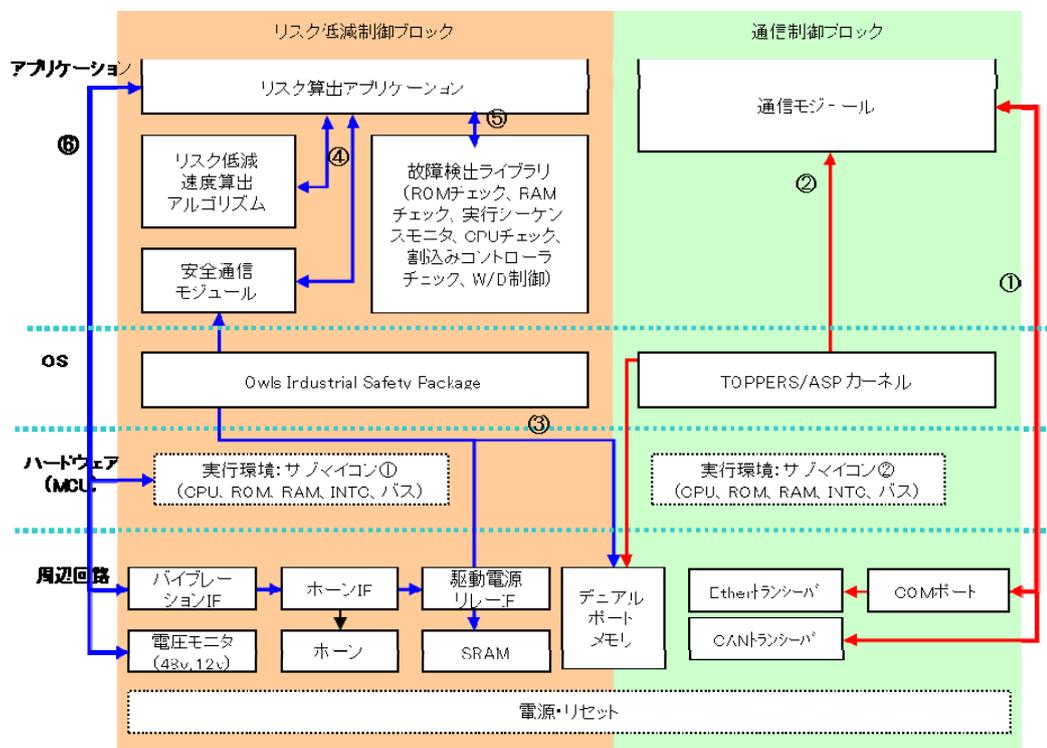


図 3-1-2-2. 3 システム構成図

- ① リスク計算ユニットからのデータ発信や外部ユニットのデータ受信は通信制御ブロックの Ether/CAN トランシーバや COM ポートを介して行う。
- ② 通信制御ブロックでは、データは通信モジュールによってデュアルポートメモリからの読み込み書き込みが行われる。
- ③ リスク低減制御ブロックでは、データは安全通信モジュールによってデュアルポートメモリや SRAM からの読み込み書き込みが行われる。
- ④ リスク算出アプリケーションは、安全通信モジュールから得られたデータを基に TAO-Aicle-safety の制御を行う。この他に、リスク計算ユニットから出力されたデータと他のユニットの制御情報と比較し、矛盾が無いかを監視する。
- ⑤ リスク算出アプリケーションは、故障検出ライブラリの実行シーケンスモニタを呼び出し、システムティック故障検出を行う。故障検出ライブラリはリスク算出アプリケーションから要求された故障検出を実施する。異常を検出した場合は、全てリスク算出アプリケーションへ通知する。また、リスク算出アプリケーションは、実行シーケンスモニタ以外の故障検出ライブラリの機能呼び出し、ランダムハードウェア故障検出を行う。

- ⑥ リスク算出アプリケーションは、電源電圧 12v、48v 系の電圧モニタ監視を行う。また、搭乗者への注意喚起を促す手段としてバイブレーション IF やホーン IF を制御する。リスク算出アプリケーションにて車両の停止と判断した場合には駆動電源リレーIF を制御して駆動モータへの電源供給を停止させる。

上記安全目標及びコンセプトを実現するために必要なハードウェアの条件をハードウェア要件にて規定する。

3-1-2-3. システム故障における故障検出機能

本システムでは以下の故障検出に対応する。

- ランダムハードウェア故障
- システムティック故障

ランダムハードウェア故障に対しては IEC 61508 の第 2 部の表 A.1 から、システムティック故障に対しては IEC 61508 の第 2 部の表 A.16 から、安全故障割合が 90% 以上 99%未満となる故障検出の診断方法を選択して実装する。

以下に IEC 61508 の第 2 部の表 A.1 と提供する故障検出機能の関連表を示す。

表 3-1-2-3. 1 故障検出機能一覧

IEC 61508 第2部 表A.1 コンポーネント	故障検出機能	DC	実施タイミング
Electromechanical devices	※リスク低減制御ブロックでは対象外	—	—
Discrete hardware	※リスク低減制御ブロックでは対象外	—	—
Digital I/O			
Analogue I/O			
Power supply			
Bus	故障検出ライブラリのROM故障検出機能（ダブルワード[16bit]署名）やRAM故障検出機能 ⁴ を用いる	ROM : 99% RAM : 90%	起動時／実行中
General			
Memory management unit			
Direct memory access			
Bus-arbitration			
CPU	故障検出ライブラリの下記機能を用いる。 ・ CPU故障検出機能 ・ 実行シーケンスモニタ機能 ・ W/Dタイマ故障検出機能	90%	CPU/W/D : 起動時 シーケンスモニタ : 実行中
Register, internal RAM			
Coding and execution including flag register			
Address calculation			
Program counter, stack pointer			
Interrupt handling	※故障検出ライブラリの割込みコントローラ故障検出機能を用いるが本システムでは不要	—	—
Invariable memory	※故障検出ライブラリのROM故障検出機能を用いるが本システムではCRC演算機能が搭載されていないため不要	—	—
Variable memory	故障検出ライブラリのRAM故障検出機能を用いる。	90%	起動時／実行中
Clock(quartz)	故障検出ライブラリの実行シーケンスモニタ機能を用いる。	90%	実行中
Communication and mass storage	※リスク低減制御ブロックでは対象外	—	—

⁴ ROM/RAM 故障検出により、内部バスの故障検出のみ対応する。

IEC 61508 第2部 表A.1 コンポーネント	故障検出機能	DC	実施タイミング
Sensors	※リスク低減制御ブロックでは対象外	—	—
Final elements	※リスク低減制御ブロックでは対象外	—	—

3-1-2-4. 通信脅威における故障検出機能

本システムでは IEC61784 で定義されている通信脅威に対して検出を行う。

検出には、IEC61784 に規定されている安全対策を全て実現する。

以下に通信脅威と安全対策の関係を記載する。

表 3-1-2-3. 1 通信脅威と安全対策の関係

通信エラー	安全対策							
	シーケンス番号	タイムスタンプ	時間予想	接続認証	フィードバックメッセージ	データの完全性の保証	冗長による伝送チェック	異なるデータの完全性の保証システム
くずれ					x	x	only for serial bus(d)	
予想外の繰り返し	x	x			※x		x	
誤ったシーケンス	x	x			※x		x	
損失	x				x		x	
受け入れがたい遅れ		x	x(c)					
挿入	x			x(a, b)	x(a)		x	
自己を偽る/変装				x(a)	x(a)			x
アドレス指定				x				

a: アプリケーションの仕様による。

b: 送信者の識別のため、不正な挿入を見抜く。

c: 全てのケースで必要。

d: 残余エラー率の要求を満たした場合のみ、データの信頼性が保証される。

具体的な安全対策を以下に記載する。

表 3-1-2-3. 2 安全対策一覧

安全対策	具体的対策
1. シーケンス番号	送信側でシーケンス番号を付加したデータを送信し、受信側で、シーケンス番号順に受信できることを確認する。
2. タイムスタンプ	送信側でメッセージに時刻、又は日付を付ける。受信側は、前回受信したデータのタイムスタンプ（時刻、日付データ）を元に、到着想定時間を越えた場合、遅れとみなす。この到着想定時間は、仕様で決定する必要がある。
3. 時間予想	受信側で連続して受け取ったメッセージの時間間隔が指定時間より遅れていないかを調べる。送信側の送信タイミング時間、及び受信側の到着想定時間を仕様で決定しておく必要がある。
4. 接続認証	送信側は送信元、送信先の論理アドレスをメッセージに付加する。接続認証の方法は実装依存とする。 受信側で、送信先アドレスが自身のアドレスであるかを確認する。また、受信側で、送信元アドレスが自身が通信している相手のものであるかを確認する。
5. フィードバックメッセージ	受信側がメッセージを受信できたことを送信側に知らせる為、フィードバックメッセージを返すようにする。送信側は、送信元（自身の）アドレス、送信先（通信相手の）アドレスをメッセージに付加する必要がある。
6. データ保全の保証	メッセージに冗長性を持たせる為、送信側は複数回のメッセージ送信を行う。
7. 冗長による伝送チェック	同じデータを 2 回送る方法。シーケンス番号、タイムスタンプに冗長性を持たせる為、異なる CRC を付加するか、又はビット反転したデータを送信する。

8. 異なるデータ保全性の保証システム	安全関連(SR)、及び非安全関連(NSR)のデータが同じバスによって送られる場合、データ保全性の保障システムやメッセージの符号化(異なるCRCを使用)を行い、NSRメッセージがSRレシーバーに影響を与えないようにする。(SR: Safety relevant の略。安全関連。NSR: Non-safety relevant の略。非安全関連。)
---------------------	---

3-1-2-5. 安全対策

リスク低減制御ブロックに対する安全分析は、安全分析の実施結果で実施した。分析結果は、システム故障における故障検出機能にて規定した各故障検出機能により、異常を検出、対策することができる。また、故障検出機能以外にも必要となる安全機能を抽出したため以下に合わせて記載する。

3-1-2-5-1. サブマイコン①

サブマイコン①にはリスク低減速度算出アルゴリズム・安全通信モジュール・リスク算出アプリケーションのモジュールが含まれる。

- 入力データの格納先である ROM/RAM の故障検出機能を搭載する
- ノイズによる入力データの改ざんに対してはデータの出力基で出力データに対して、CRC やパリティを付加させることで対応する
- W/D タイマの故障検出チェックや W/D 付き実行シーケンスモニタを用いることでサブマイコン①のクロック故障による影響に対応する
- 機能安全プロセス (SIL2) に準拠した開発を行う
- 不正な処理順序、実行タイミングをチェックするために W/D 付き実行シーケンスモニタ機能を搭載する
- CPU の故障検出チェック機能を搭載する
- リスク算出の結果が通知されない場合は 6km/h で制御するよう操作ユニットにて対応する
- センサやモータ側へ電源が供給されていない場合は念のためリスク算出ユニットから停止制御を各ユニットへ通知する

3-1-2-5-2. デュアルポートメモリ

- 不正な処理順序、実行タイミングをチェックするために W/D 付き実行シーケンスモニタ機能を搭載する
- デュアルポートメモリの不具合を検出するために RAM の故障検出チェック機能

を搭載する

3-1-2-5-3. SRAM

- 不正な処理順序、実行タイミングをチェックするために W/D 付き実行シーケンスモニタ機能を搭載する
- SRAM の不具合を検出するために RAM の故障検出チェック機能を搭載する

3-1-2-5-4. 駆動電源リレーIF

- 駆動電源リレーIF はマイコンの出力電圧以上の耐圧機能を持つ部品を採用する
- コネクタの形状を変える

3-1-2-5-5. 分圧モニタ (12v, 24v)

- 12v ラインと 24v ラインでコネクタの形状を変える
- サブマイコン①が受け入れることが可能な規定電圧以上にならないようにハードウェアで制限をかける

3-1-2-5-6. 電源回路

- 電圧値が異なった場合による接続ミスが無い様に、電圧値ごとにコネクタ形状を変える
- プラスマイナスが逆に接続できない様に、コネクタの形状を考慮する

3-1-2-6. ハードウェア要件

システム故障における故障検出機能にて規定した各故障検出機能が有効に動作するため、またリスク低減制御ブロックにて SIL2 を満たすためのハードウェア要件を以下に規定する。

3-1-2-6-1. 基本アーキテクチャ

MCU は中央処理演算処理装置 (CPU)、割込みコントローラ (INTC)、アドレスバス (Bus)、内蔵 ROM (ROM)、内蔵 RAM (RAM)、タイマ、ウォッチドッグ機能 (MCU 内蔵である場合) を有する。

3-1-2-6-2. クロック

周辺回路としてはメインクロック、サブクロック、内蔵クロック、電源、ウォッチドッグ (MCU 内蔵でない場合) を有する。

3-1-2-6-3. ウォッチドッグ

ウォッチドッグは、MCU 内蔵機能または外部部品のいずれかを用いる。フォールトトレランス 1 となるハードウェアを用いる。

3-1-2-7. 通信制御ブロックへの要求事項

通信モジュールは、各デバイスから受け取るデータやデュアルポートメモリから受け取るデータに対して加工を行わない。通信制御ブロックを経由する各種データは、送信元であるユニットにて冗長による伝送チェック、タイムスタンプ、異なるデータ保全性の保証システムを施しているためである。

3-1-2-8. 外部ユニットへの要求事項

リスク計算ユニットを含む TAO-Aicle-safety のシステムブロック図（ユニット間のインターフェースに着目）を下記に示す。外部ユニットへの要望を以下に記載する。

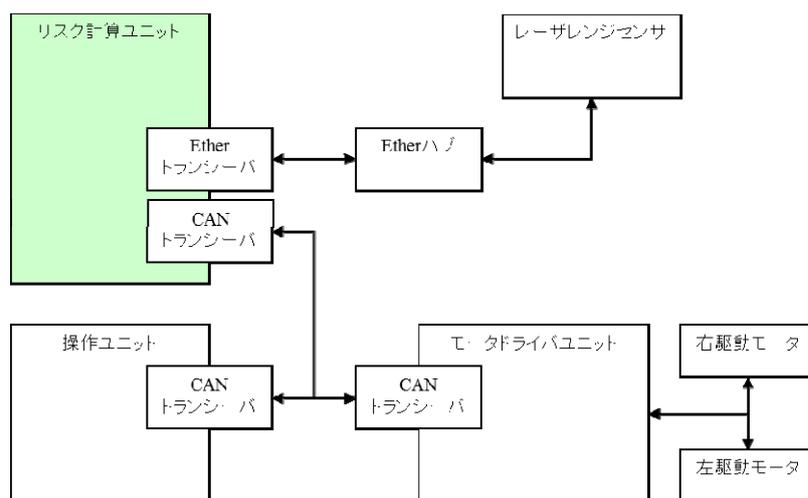


図 3-1-2-8. 1 TAO-Aicle-safety システムブロック図

3-1-2-8-1. 操作ユニットへの要望

ジョイスティックの操作量を CAN 経由でリスク計算ユニットへ通知する。その際、送信データに対して、冗長による伝送チェックやタイムスタンプ付メッセージとするなど安全対策を行う。また、安全分析の結果、以下の機能が挙げられた。

- ジョイスティックからのデータ（電圧値）において、0V や 5V は断線また異常値として扱う

3-1-2-8-2. モータドライバユニットへの要望

エンコーダの計測値を CAN 経由でリスク計算ユニットへ通知する。その際、送信

データに対して、冗長による伝送チェックやタイムスタンプ付メッセージとするなどの安全対策を行う。

3-1-2-8-3. 各センサへの要望

センサの計測値を Ether ネット経由でリスク計算ユニットへ通知する。その際、送信データに対して、冗長による伝送チェックやタイムスタンプ付メッセージとするなどの安全対策を行う。

3-1-2-9. リスク計算ユニットの仕様概要

3-1-2-9-1. リスク算出アプリケーション

システム状態定義

リスク算出アプリケーションでは、以下のシステム状態を規定している。

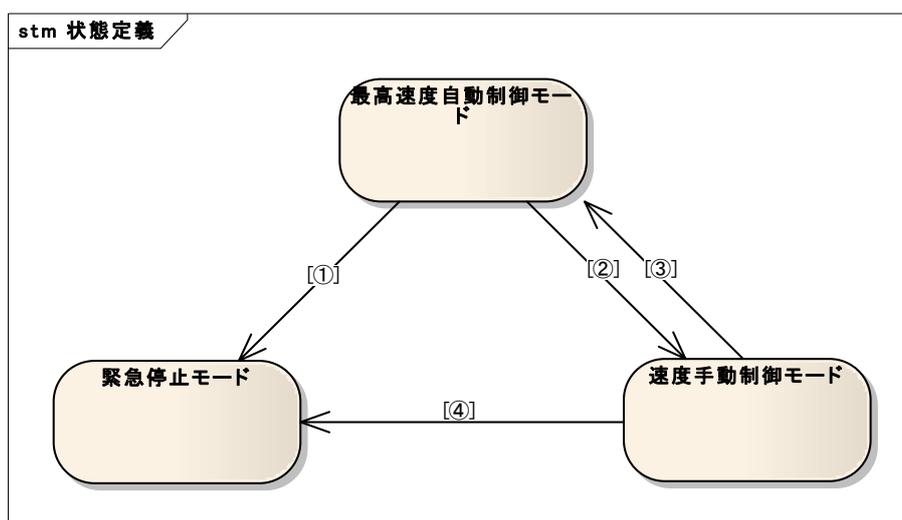


図 3-1-2-9. 1 システム状態

- 最高速度自動制御モード

センサやリスク計算ユニットから情報を取得し、リスク低減速度算出アルゴリズムを用いて最高速度制御を行う。速度手動制御モードと同様に外部ユニット及び電圧モニタリングも行う。

- 速度手動制御モード

外部ユニット（リスク計算ユニット、左右モータドライブユニット）からの情報を取得し、速度制御に矛盾が発生していないか監視を行う。また、TAO-Aicle-safety のシステムで使用している電圧が規定電圧通りかの監視を行う。

- 緊急停止モード

車両の停止制御や搭乗者への注意喚起を行う。

- 状態遷移

リスク算出アプリケーションで規定した状態は以下の条件の場合に遷移を行う。記載の番号はシステム状態参照のこと。

- ① 最高速度自動制御モードにおいてシステム異常を検知
- ② 搭乗者操作による制御モード遷移、又はセンサデータの異常を検知
- ③ 搭乗者操作による制御モード遷移
- ④ 速度手動制御モードにおいてシステム異常を検知

システム異常へのトリガーは以下の内容を指す。

- 外部ユニット（リスク計算ユニット、左右モータドライブユニット）から送信されたデータに対して、CRC チェックを行った結果不整合となる
- 監視対象の電圧が規定電圧から逸脱している

- データ定義

リスク算出アプリケーションでは以下のデータを扱う。

- センサデータ
- 最高速度
- 電圧モニタ値
- 操作ユニットデータ
- モータドライバユニットデータ
- 駆動電源 ON/OFF

電圧モニタ値を除く上記データの情報取得の手段は、CAN 通信を用いて DPRAM 経由にて行う。DPRAM からの取得の際には、取得データを CRC16 で解析し、取得データが不整合（異常）であれば取得対象データに応じた対策を行う。DPRAM への情報設定の際には、設定データに対して CRC16 を付加する。

- センサデータ

レーザレンジセンサから送られるデータである。リスク低減速度算出アルゴリズムが最高速度を算出する際の入力データとして用いる。

表 3-1-2-9. 2 センサデータ

No	データ名	データ値範囲	From
1	前方の障害物との距離	0 ~ 10 (m)	レーザレンジセンサ

■最高速度

センサデータ、操作ユニットデータを入力データとし、リスク低減速度算出アルゴリズムが算出する。

表 3-1-2-9. 3 最高速度

No	データ名	データ値範囲	From
1	最高速度値	1 ~ 10 (km/h)	リスク計算ユニット

■電圧モニタ値

駆動電源 (48V) とセンサ電源 (12V) の電圧をリスク算出アプリケーションがデバイスドライバを用いてデータ値として計測する。

表 3-1-2-9. 4 電圧モニタ値

No	データ名	データ値範囲	From
1	駆動電源のモニタ電圧(48V)	48±10% (V)	電源回路
2	センサ電源のモニタ電圧(12V)	12±10% (V)	電源回路

■操作ユニットデータ

メイン操作ユニットから送られるデータである。ジョイスティック XY 軸操作量は、リスク低減速度算出アルゴリズムが最高速度を算出する際の入力データとして用いる。メイン操作ユニット異常フラグは、メイン操作ユニットの状態を示すリスク算出アプリケーションがメイン操作ユニットの状態監視で用いる。

表 3-1-2-9. 5 操作ユニットデータ

No	データ名	データ値範囲	From
1	ジョイスティック X 軸操作量(AD 値)	0 ~ 5 (V)	メイン操作ユニット
2	ジョイスティック Y 軸操作量(AD 値)	0 ~ 5 (V)	メイン操作ユニット
3	メイン操作ユニット異常フラグ	0 ~ 1	メイン操作ユニット

■モータドライバユニットデータ

モータドライバユニットから送られるデータである。左右エンコーダのパルスカウント値はリスク計算アプリケーションが、速度制御の矛盾監視する際の入力データとして用いる。モータドライバユニット（左右）異常フラグは、モータドライバユニットの状態を示すリスク算出アプリケーションがモータドライバユニットの状態監視で用いる。

表3-1-2-9. 6 モータドライバユニットデータ

No	データ名	データ値範囲	From
1	右エンコーダのパルスカウント値	-314 ~ 537 Pulse/100msec	モータドライバユニット(右)
2	左エンコーダのパルスカウント値	-314 ~ 537 Pulse/100msec	モータドライバユニット(左)
3	モータドライバユニット(右) 異常フラグ	0 ~ 1	モータドライバユニット(右)
4	モータドライバユニット(左) 異常フラグ	0 ~ 1	モータドライバユニット(左)

■駆動電源 ON/OFF

リスク計算ユニットが駆動電源制御に用いる。

表3-1-2-9. 7 駆動電源ON/OFF

No	データ名	データ値範囲	From
9	駆動電源ON/OFF信号	0 ~ 1	リスク計算ユニット

■ リスク低減速度算出アルゴリズムを使用した速度制御

安全通信モジュールを介してセンサデータの取得を行い、最高速度自動制御モードにおける最高速度の決定を行う。決定した最高速度は安全通信モジュールを介して DPRAM に記録される。

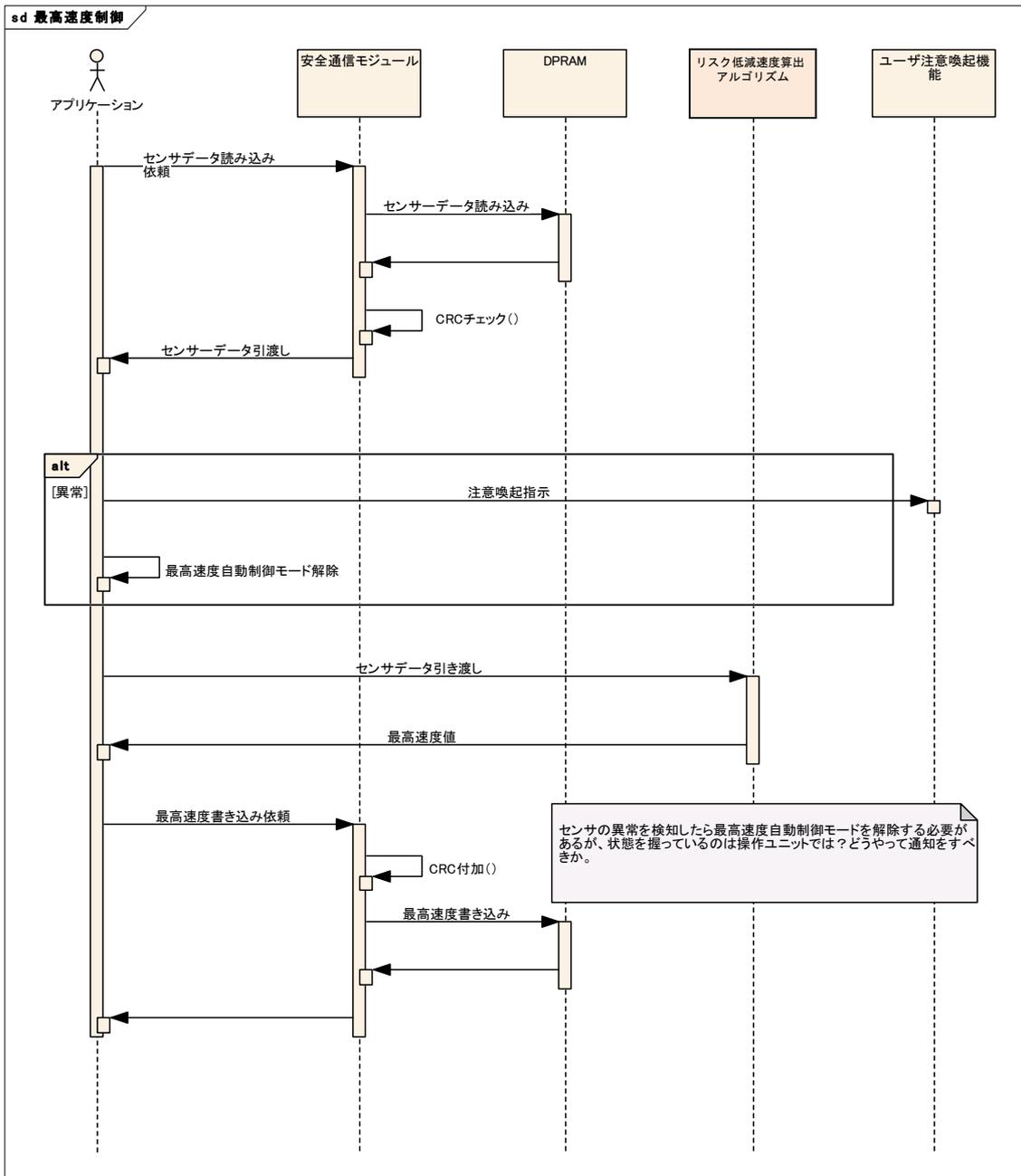


図 3-1-2-9. 8 速度制御シーケンス

■ 電圧モニタリング機能

駆動電源電圧 12v、48v 系の電圧モニタ監視を行う。監視の結果、電圧値に異常を検知した場合、搭乗者への注意喚起指示を行う。また、駆動電源遮断機能を用いて駆動モータへの電源供給を停止させる。

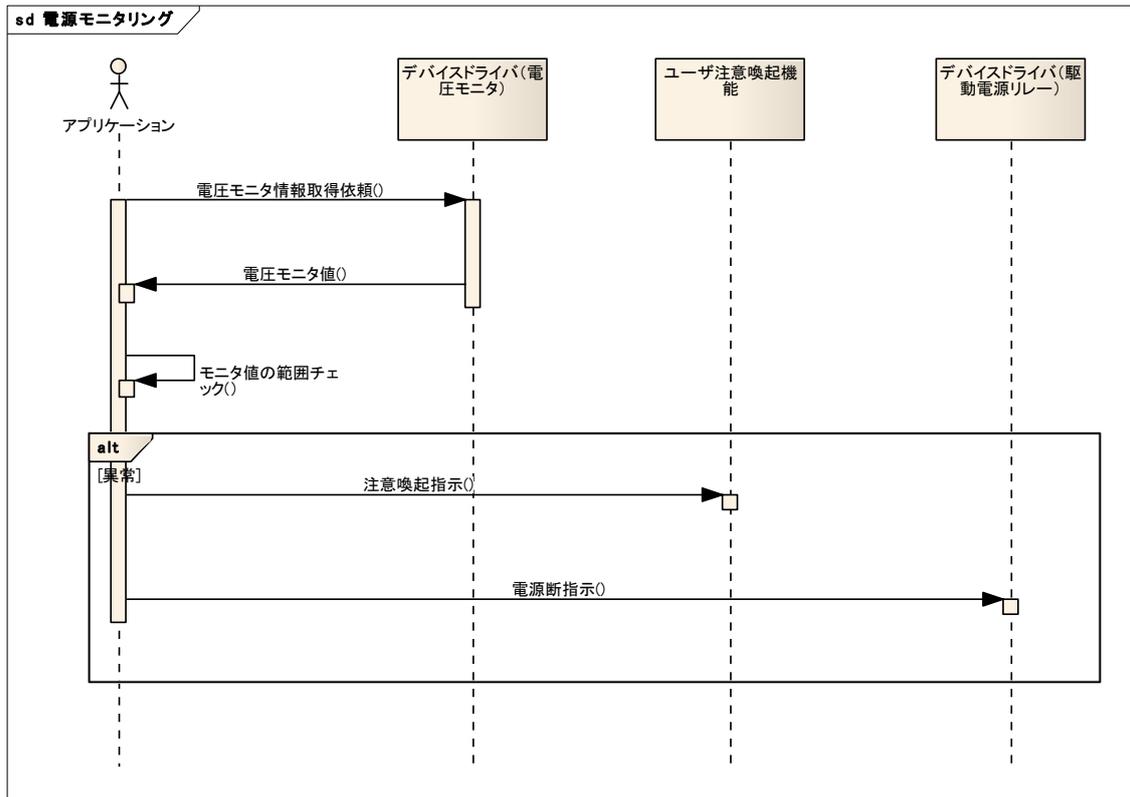


図 3-1-2-9. 9 電圧モニタリングシーケンス

■DPRAM への読み込み書き込み機能

リスク低減制御ブロックにおけるデータの授受は DPRAM を介して行う。DPRAM へのアクセスは安全通信モジュールが行うため、アプリケーションでは読み書き対象のデータに CRC 付加や CRC チェックを施す。

CRC チェックの際、センサからの情報に CRC エラーを検出した際は、ユーザへの注意喚起とシステム状態を変更する。それ以外のユニットからのデータに CRC エラーを検出した際は、ユーザへの注意喚起と駆動電源を遮断する。

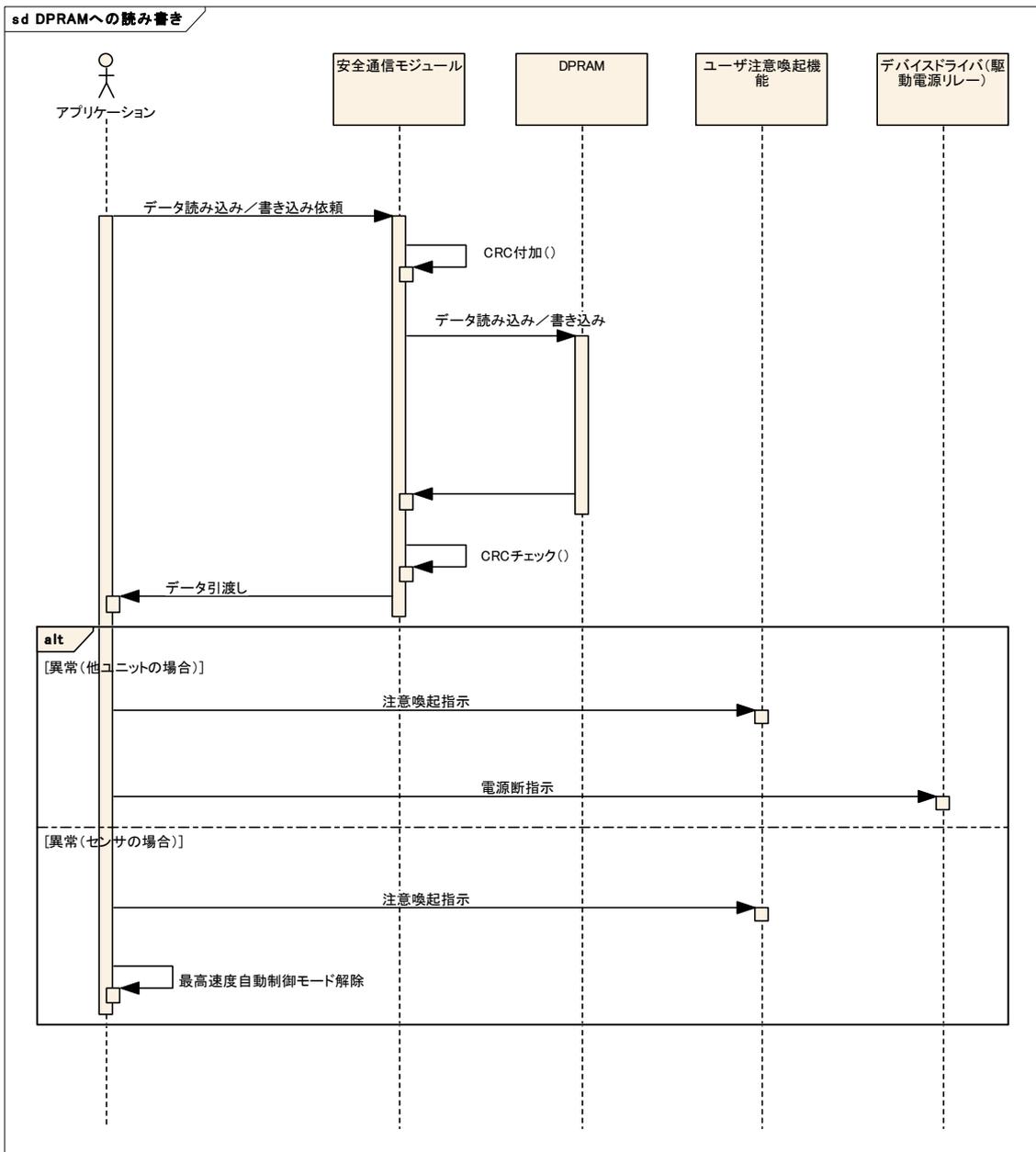


図 3-1-2-9. 10 DPRAM 読み込み書き込みシーケンス

■操作ユニット、及びモータドライバユニットの矛盾監視

安全通信モジュールを介して操作ユニット及びモータドライバユニットからの出力データを取得する。操作ユニットデータのジョイスティック X/Y 軸操作量とモータドライバユニットの左右エンコーダパルスカウントから導き出される値に差異が無いかを監視する。差異を検出した際は、ユーザへの注意喚起と駆動電源を遮断する。

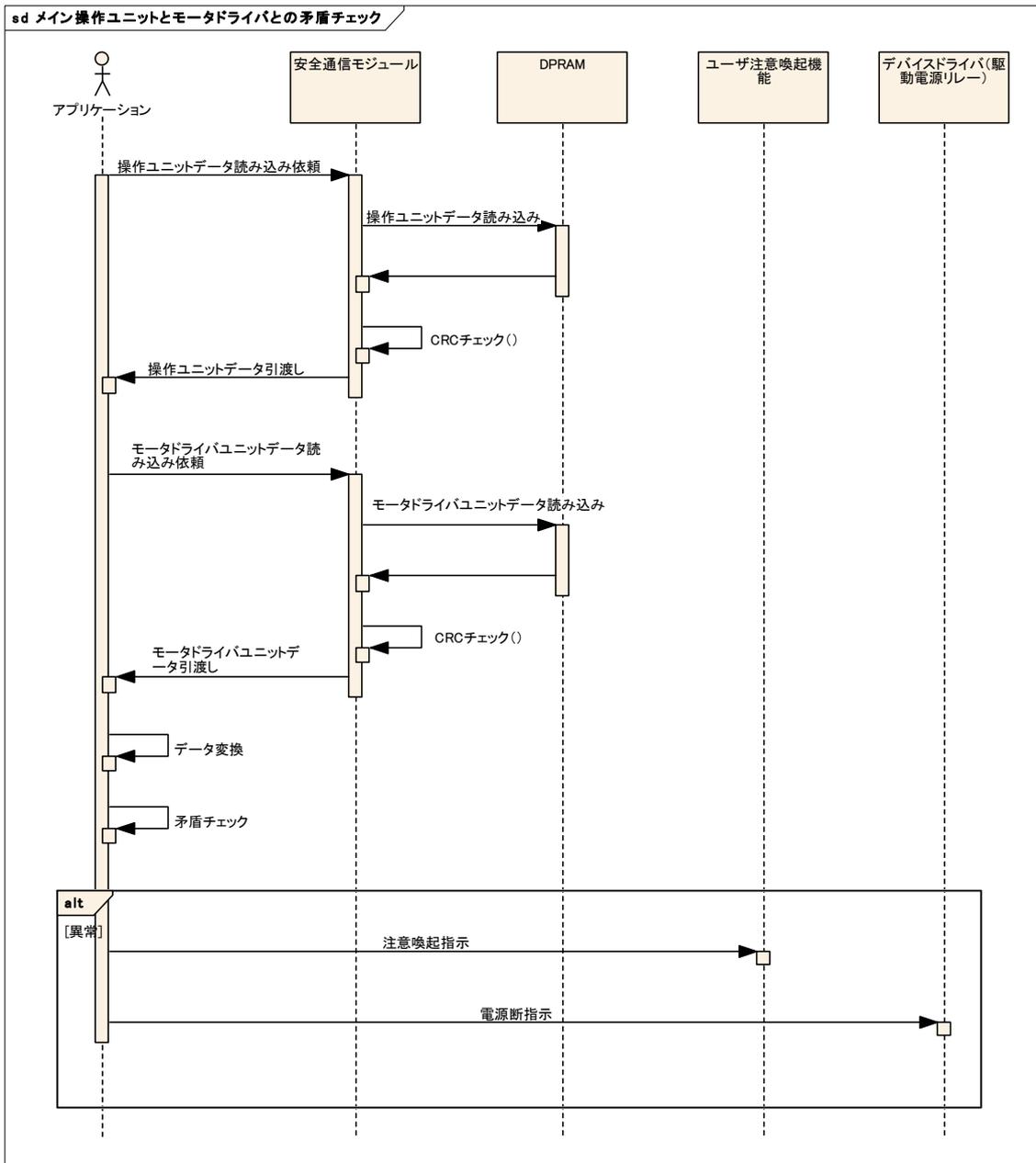


図 3-1-2-9. 11 矛盾監視シーケンス

■ ユーザ注意喚起機能

ユーザへの注意喚起としてホーン、バイブレーション、LED を用いる。ユーザ注意喚起は、リスク低減速度算出アルゴリズムにより減速制御を行っている場合とセンサデータの解析の結果異常（エラーコード）が見つかった場合の2通りがある。

- リスク低減速度算出アルゴリズムにより減速制御
 - ホーン：
 - バイブレーション：
- センサ異常
 - ホーン：
 - バイブレーション：

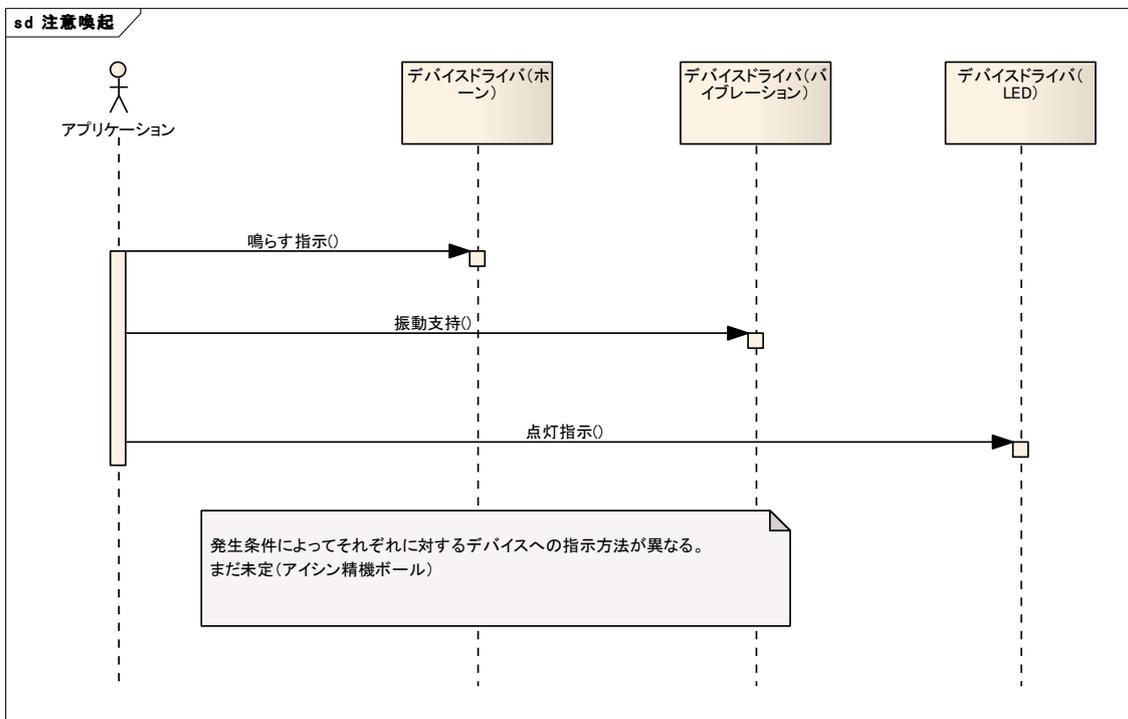


図 3-1-2-9. 12 注意喚起シーケンス

■ 駆動電源遮断機能

センサを除く、システム全体にエラーを検知した際は、駆動電源を遮断する。

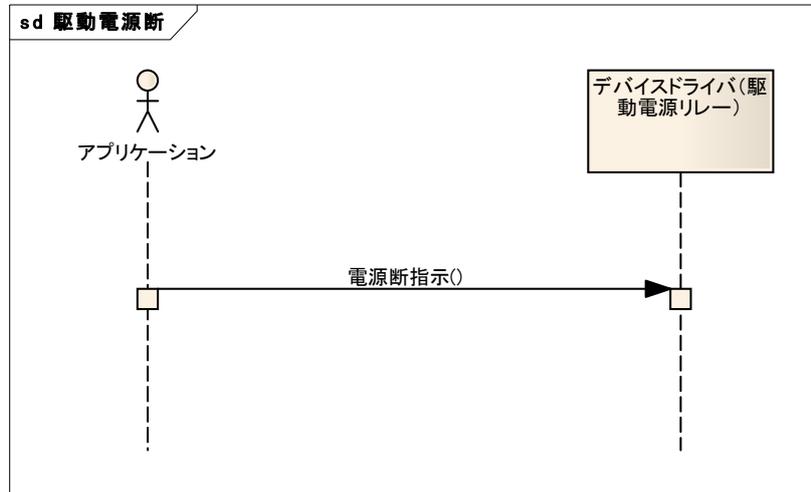


図 3-1-2-9. 13 電源駆動遮断シーケンス

■ 初期化

各デバイスドライバやライブラリの初期化処理を行う。

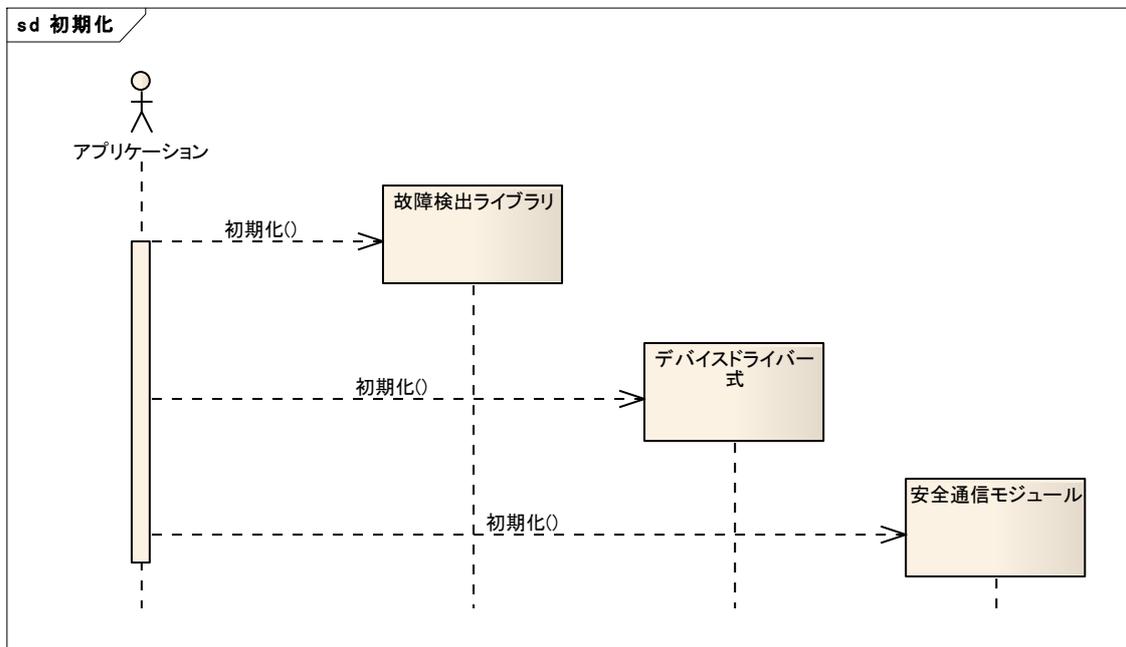


図 3-1-2-9. 14 初期化シーケンス

3-1-2-9-2. 安全通信モジュール

安全通信モジュールは、以下の4つの処理からなる。

- 安全通信ライブラリ
- DPRAM I/F 処理
- CAN バス通信処理
- レーザレンジセンサ通信処理

これら4つの処理により、DPRAMを経由してセンサ間通信、CAN通信を行う。

安全通信ライブラリ

安全通信ライブラリは通信脅威に対する6つの対策を提供する。

■シーケンス番号

シーケンス番号とは、各メッセージの送信した順番を通信相手に通知するための値である。シーケンス番号は、初期値0から変化量(送信データサイズ+1)をメッセージ送信ごとに変化させていく。

送信メッセージへのシーケンス番号の付加、および、受信メッセージ内のシーケンス番号のチェックを行う。

受信メッセージ内のシーケンス番号のチェックは、安全通信モジュールで保持している受信予定のシーケンス番号と受信メッセージ内のシーケンス番号を比較することで処理する。

■タイムスタンプ

送信メッセージにタイムスタンプを付加する。

また、受信メッセージのタイムスタンプを確認し、不正な値、受け入れがたい遅延のチェックを行う。

通信先との時刻を同期するため、時刻同期を行う。

■到着想定時間

到着想定時間を越えることがないように、メッセージ送信間隔の時間を提供する。受信したメッセージが、アプリケーション側により指定された到着想定時間を越えているかのチェックを行う。

■接続認証

接続認証に必要なIDの情報を送信メッセージ内にセットする。

ID とは自分と他の通信相手を識別できる、アプリケーション側により指定されたユニークな値を指す。

受信メッセージ内の ID をチェックし、メッセージの送信元が正しいかのチェックを行う。

■フィードバックメッセージ

受信メッセージに対してフィードバックメッセージの送信を行う。

フィードバックメッセージには、他のメッセージと区別できるようにメッセージ種別を含める。メッセージ種別の詳細については「安全通信プロトコル仕様書 Ver 0.01 3.1 章 時刻同期」を参照すること。

メッセージ送信後、フィードバックメッセージの受信待ちを行い、フィードバックメッセージを受信できない場合は、メッセージの再送を行う。

■データの完全性

データの完全性を保証するために、BCH 符号化、および、CRC32 を提供する。

● BCH 符号

- 送信メッセージを BCH 符号化する。
- 受信メッセージの BCH 符号をチェックする。

● CRC

- 送信メッセージに CRC を付加する。
- 受信メッセージの CRC チェックを行う。

■DPRAM I/F 処理

DPRAM へのメッセージの書き込み、および DPRAM からのメッセージの引き取りを行う。

DPRAM へのメッセージの書き込みは、各通信処理からの要求により行い、メッセージの書き込み後、通信制御ブロックにメッセージの書き込みを通知する。

DPRAM からのメッセージの引き取りは、通信制御ブロックからのメッセージの通知により対応する通信タスクにメッセージの受信を通知する。メッセージ受信を通知された各通信処理は、DPRAM よりメッセージを引き取る。

■ CAN バス通信処理

▽メッセージ送信

DPRAM I/F 処理を使用して、アプリケーションより要求されたメッセージの送信を行う。

送信したメッセージは、DPRAM を通して通信制御ブロックより CAN 上に送信される。

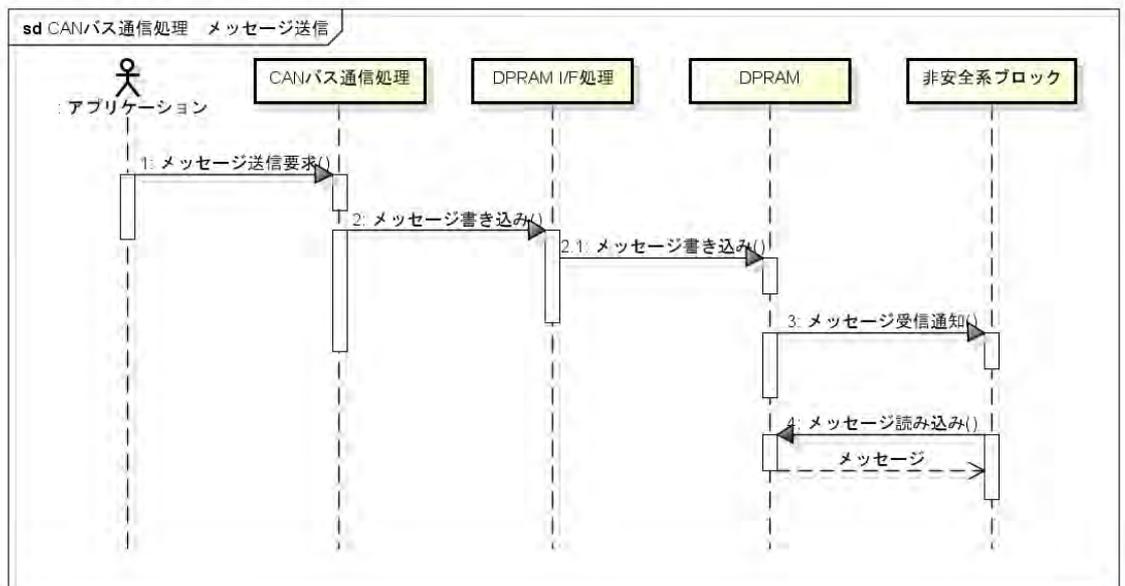


図 3-1-2-9. 15 CAN メッセージ送信シーケンス

▽メッセージ受信

通信制御ブロックにて CAN より受信したメッセージは、DPRAM を通して DPRAM I/F 処理経路で CAN 通信処理に通知される。

CAN 通信処理に渡されたメッセージは、アプリケーションに通知される。

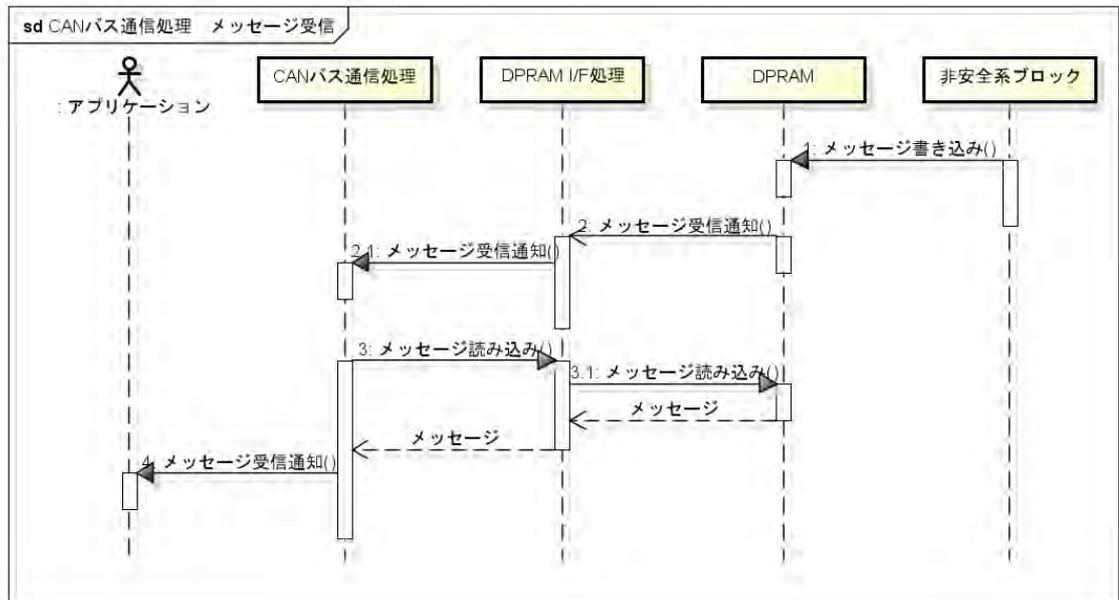


図 3-1-2-9. 16 CAN メッセージ受信シーケンス

■ レーザレンジセンサ通信処理

▽ コマンド送信

レーザレンジセンサへのコマンド送信は、レーザレンジセンサ通信処理が、コマンドを作成し、DPRAM I/F 処理を使用して行う。コマンドとはレーザレンジセンサと通信するための通信メッセージを指す。メッセージの詳細についてはレーザレンジセンサが用意するコマンド (FX8 型測距センサ通信インタフェース仕様書) を参照すること。

コマンドは DPRAM を通して、通信制御ブロックに実装された TCP/IP プロトコルスタックにより、Ethernet によりレーザレンジセンサに送信される。

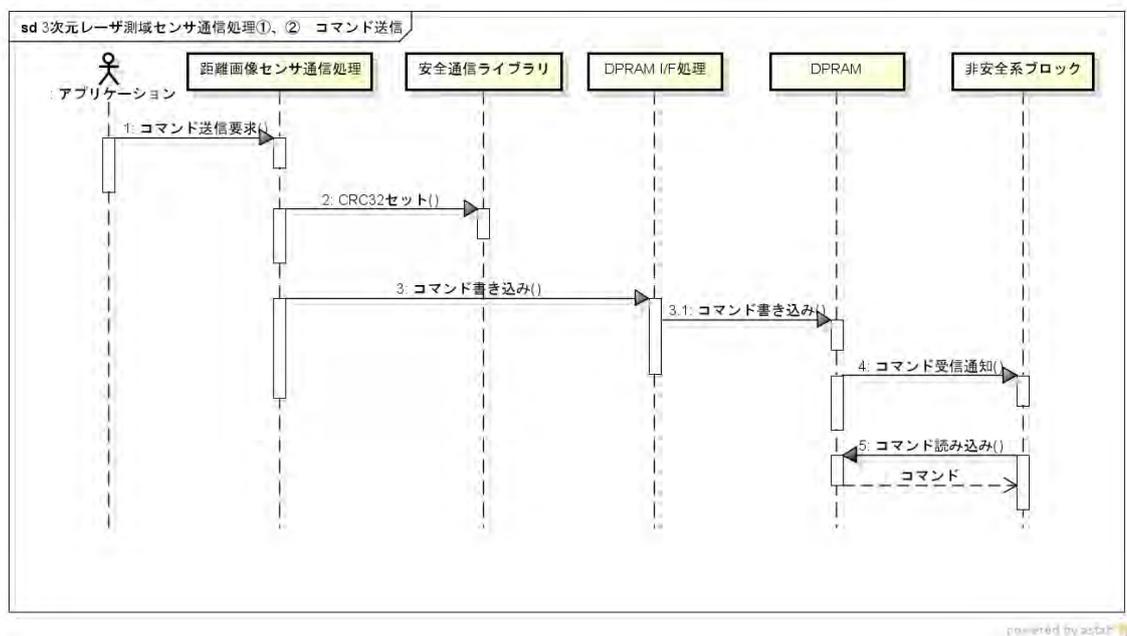


図 3-1-2-9. 17 レーザレンジセンサコマンド送信シーケンス

▽測域データ受信

通信制御ブロックにて受信した測域データは、DPRAM を通して DPRAM I/F 処理経路でレーザレンジセンサ通信処理に通知される。

レーザレンジセンサ通信処理は、安全通信ライブラリを利用して、CRC チェック、および、タイムスタンプのチェックを行う。

レーザレンジセンサ通信処理に渡された測域データは、アプリケーションに通知される。

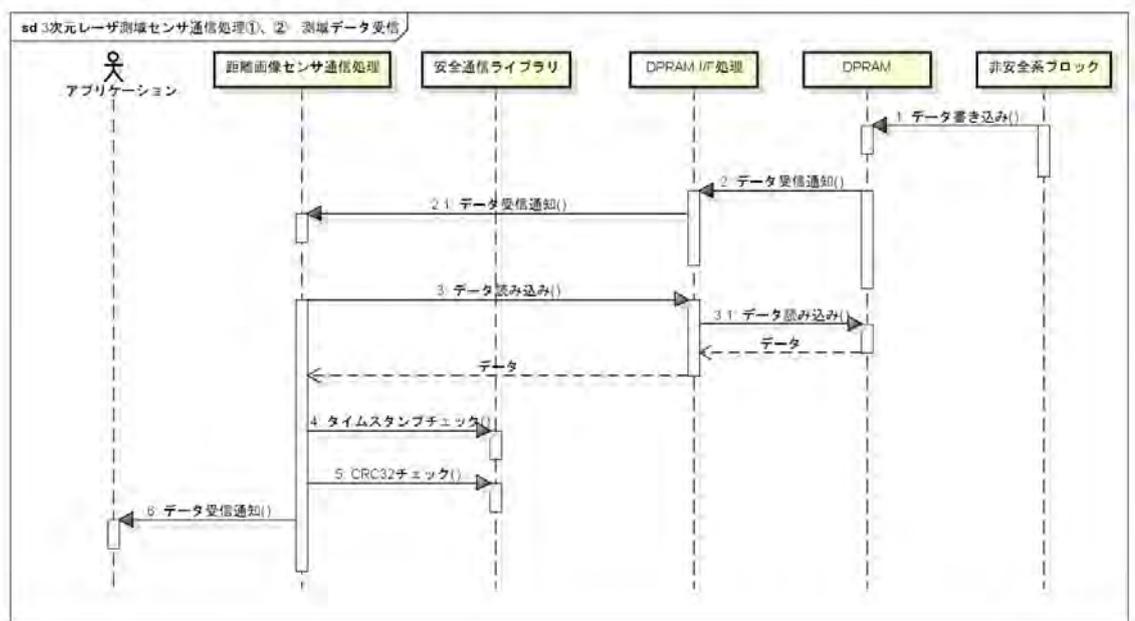


図 3-1-2-9. 18 測域データ受信シーケンス

▽時刻同期

レーザレンジセンサ通信処理が、時刻同期タイミングにて、レーザレンジセンサに対して、時刻同期コマンドを送信する。

時刻同期コマンドはリスク算出ユニットとレーザレンジセンサで時刻同期を行うためのメッセージを指す。メッセージの詳細についてはレーザレンジセンサが用意するコマンド（FX8 型測距センサ通信インタフェース仕様書）を参照すること。

レーザレンジセンサは、時刻同期コマンドを受信すると、時刻同期メッセージを送信する。この時刻同期メッセージに対して、応答を行う事で、レーザレンジセンサの時刻同期が完了する。

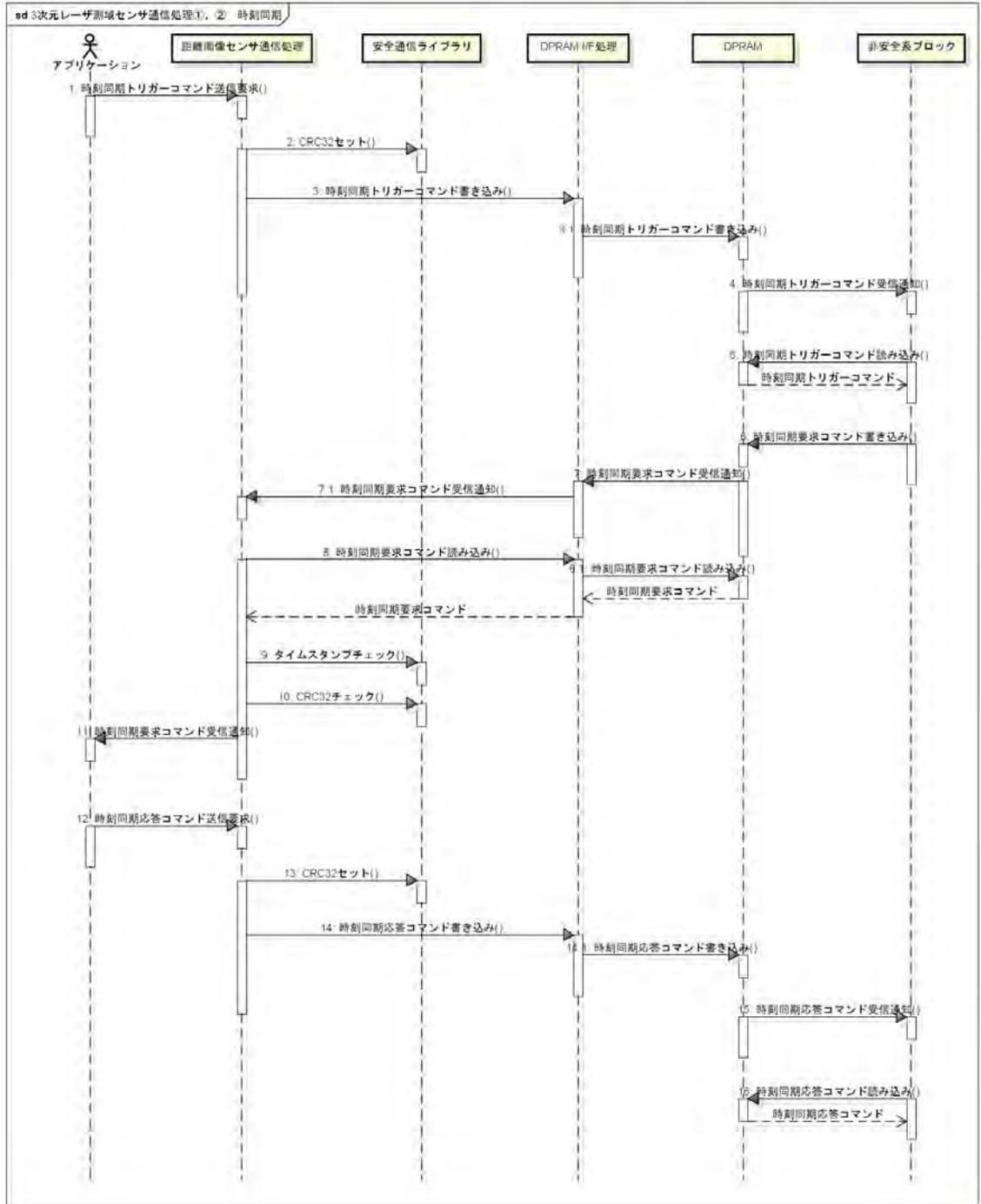


図 3-1-2-9. 19 時刻同期シーケンス

3-1-3. リスク低減アルゴリズム開発（千葉工業大学）

許容リスク以下安全移動支援技術の基本理念は、安全性を確保したうえで最大限操縦者の意思に即した移動を実現することである。そのため、リスク低減アルゴリズムは他の自律移動ロボットにみられるような自動操縦機能を提供するものではない。搭乗型移動ロボットはあくまで操縦者によりコントロールされ、移動に伴うリスクが規定値以上になったときにだけ速度制限が適用される。つまり、リスク低減アルゴリズムが介入する操作は減速のみであり、ロボットの操舵と加速は操縦者によってのみ行われる。

以上の基本理念のもと、時々刻々と変化する生活空間内における搭乗型移動ロボットの許容リスク以下での走行を実現するため、ロボットの速度制限値を出力するリスク低減アルゴリズムを構築した。ここでの許容リスクとは、開発した搭乗型移動ロボットのリスクアセスメント結果（3-1-1節）および各種安全性試験結果（3-1-5節）に基づいて決定したものである。具体的には以下の条件を満足する限りにおいては許容できるリスクであるものとし、この条件をベースとしてアルゴリズム設計を行った。

- 回避対象への搭乗型移動ロボットの突入速度が1 [km/h]以下であること
- 回避対象から3 [m]以上の距離をもって搭乗型移動ロボットの減速を開始すること

なお、本アルゴリズムは商用化へ向けた低コスト・低リソースなプラットフォームを想定しており、比較的安価なマイコンへの実装も考慮して設計されている。以下、リスク低減アルゴリズムについて説明する。

3-1-3-1. アルゴリズム概要

本アルゴリズムの目的は、搭乗型移動ロボットが生活空間内を移動するにあたり、その利便性を損なわない範囲内で「許容リスク」以下、すなわち一定の安全性が確保される速度制限値を出力することである。例えば、開けた場所では緩やかに、込み入った空間では厳しくロボットに速度制限をかけることによって、利用者は安全かつ快適な走行をすることが可能となる。

リスク低減アルゴリズムを実装した搭乗型移動ロボットの機能ブロック図を図3-1-3-1. 1に示す。リスク低減アルゴリズムを実装した搭乗型移動ロボットの制御システムは、周囲環境をスキャンするための3次元距離センサ、ロボットを操縦用のジョイスティック、および両車輪を駆動するモータドライバと、それらを統合的にコントロールするリスク計算ユニットで構成される。このリスク計算ユニットはロボットの基本的な走行制御を行うメインコントローラと、移動時のリスクに応じて速度制限値を出力する機能安全コントローラからなる。

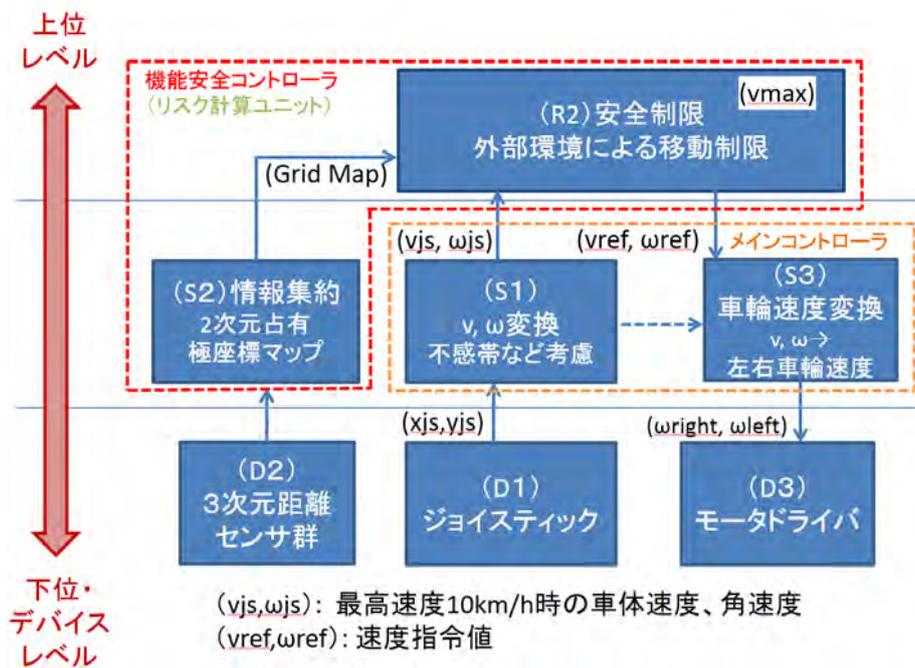


図3-1-3-1. 1 搭乗型移動ロボット機能ブロック

メインコントローラは、ジョイスティックの操作入力 (x_{js} , y_{js}) を図3-1-3-1. 2に示すような変換規則に従って直進速度 v 、回転速度 ω に変換する。図3-1-3-1. 2ではジョイスティックの中立位置には不感帯を設けるなど変換規則の一例を示しているが、別途、車両特性に応じたパラメータ調整を施している。ジョイスティック入力から変換された車両速度 (v 、 ω) はそれを実現するロボットの左右車輪速度に置き換えられ、モータドライバによってそれぞれの車輪を駆動し搭乗型移動ロボットが走行する。

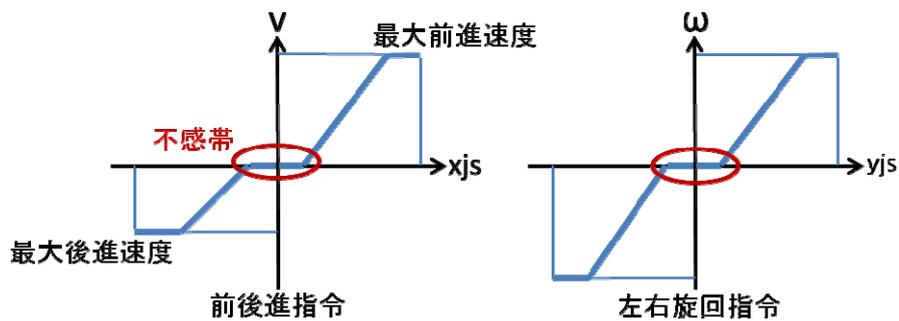


図3-1-3-1. 2 操作入力 - 速度 変換

一方、機能安全コントローラは2次元占有極座標マップ生成ブロックと速度制限値算出ブロックからなり、3次元距離センサより得られる周囲環境情報とメインコントローラを介したジョイスティック操作量 (x_{js} , y_{js}) が入力される。走行時の安全性を確保するため

に速度制限が必要と判断された場合には、機能安全コントローラがメインコントローラの車体速度制御に介入し、ロボットの速度が制限される。

以上のような構成により、何らかの理由で機能安全コントローラが正しく働かない場合にも、メインコントローラのみによってシステムが通常の電動車椅子（最大速度が6 [km/h]）として機能するように設計されている。

次節以降では、機能安全コントローラの内部処理について述べる。

3-1-3-2. 2次元占有極座標マップ生成

周囲環境は、3-2節で述べる TOF タイプのレーザレンジファインダ FX-8 を用いて3次元位置情報を持った点群データとして取得する。得られた点群データは次に述べる「環境情報統合アルゴリズム」により、図3-1-3-1. 3に示すような、ロボットの真上から見た2次元占有極座標マップとして集約される。マップは図3-1-3-1. 4に示すようにグリッド分割され、各グリッドは回避対象の有無を示す占有／非占有情報を持つ。なお、図中では障害物形状を黒で示すとともに、占有と判別されたグリッドを青色で示している。



図3-1-3-1. 3 2次元占有極座標マップ

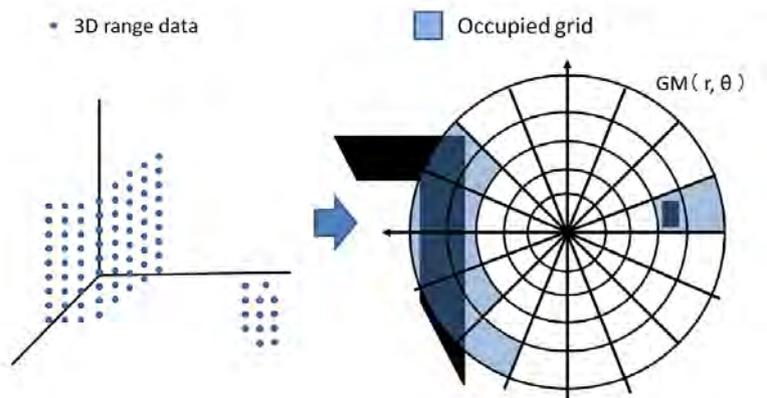


図 3-1-3-1. 4 2次元占有極座標マップの生成

2次元占有極座標マップの生成手順を以下に示す。

【環境情報統合アルゴリズム】

1. 3次元点群データを鉛直方向に重ね合わせ極座標マップ上に投影
2. マップの各グリッド内に投影された点データの数をカウント
3. 閾値処理により各グリッドの占有／非占有を判定

なお、環境情報統合アルゴリズムにおける閾値を「占有判定閾値」とよび、この値は使用するセンサの性能、ロボットの走行環境などにより適宜設定する。

このように3次元位置情報を2次元占有極座標マップへ落とし込むことにより、ロボットを中心とした路面に対応付けて扱いやすくなることに加え、マップ中のグリッドは点群データよりも粗く分割されているため、周囲環境データの大幅な圧縮がおこなわれる。グリッド分割はロボットのサイズやセンサの性能などにも依存するが、マップ化によるデータ圧縮によりロボット実装時のリソース節約、低コスト化が図られ、比較的安価なマイコンをプラットフォームとするシステム実装が容易となっている。

3-1-3-3. 速度制限値算出

「生活空間内移動リスク算出アルゴリズム」とその出力に基づいた、「リスク低減速度算出アルゴリズム」について述べる。

生活空間内移動リスク算出アルゴリズムでは、生活空間内の移動リスクを障害物や歩行者との接触に伴うリスクと捉え、得られた2次元極座標マップ上にロボットの予測進路を重ね合わせ、進路近傍の占有グリッドの有無を判別することで、回避対象と接触する可能性を判別する。例として、図3-1-3-1. 5にロボットの予測進路を重ね合わせた2次元占有極座標マップを示す。

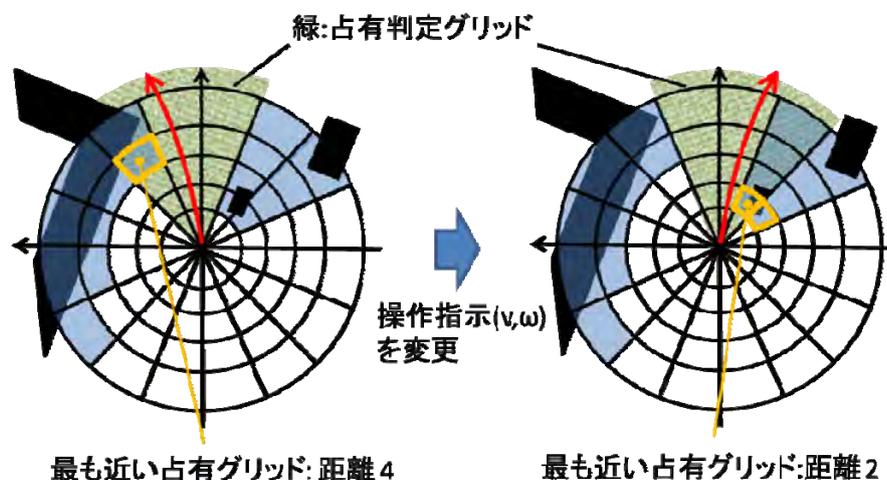


図3-1-3-1.5 ロボットの予測進路を重ね合わせた2次元占有極座標マップ

以下に生活空間内移動リスク算出アルゴリズムの算出手順を示す。

【生活空間内移動リスク算出アルゴリズム】

1. ロボット予測進路の算出

ジョイスティック操作量から求めたロボット予測進路を算出する（図3-1-3-1.5 赤矢印）

2. 占有検索グリッドの決定

ロボットの車幅や予測進路の誤差を考慮して、ロボットの予測進路が横切るグリッドに加えその円周方向両側のグリッドを占有検索グリッド（緑色グリッド）として設定する

3. 最も近傍にある占有グリッドの検出

占有検索グリッド内で最も近傍にある占有グリッドを検出するとともにその占有グリッドまでの距離を求め、生活空間内移動リスクとする

上記の通り、リスク低減アルゴリズムでは、占有検索グリッド内で最も近傍にある占有グリッドまでの距離をその瞬間における生活空間内移動リスクとして扱う。

続いて、リスク低減速度算出アルゴリズムについて述べる。リスク低減速度算出アルゴリズムは上記の生活空間内移動リスクに応じて適切なロボットの制限速度を算出する。出力された制限速度はメインコントローラへと引き渡され、操縦者によって制限速度を超えるジョイスティック入力が行われた場合にはその操作に介入してロボットの速度を制限する。

生活空間内移動リスク（占有検索グリッド内においてロボットに最も近い占有グリッド

までの距離) に対するリスク低減速度の決定ルールの一例を図 3-1-3-1.6 に示す。リスク低減速度の決定ルールは加速・減速性能をはじめとするロボットのスペックや利用用途などによって異なるため、ロボット実装時に適宜設定する。

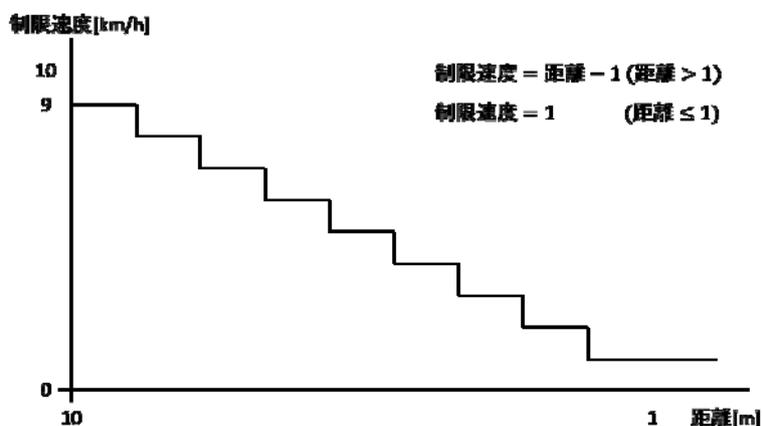


図 3-1-3-1.6 生活空間内移動リスクに応じたリスク低減速度の決定ルール

なお、開発した検証機は、最大速度 10[km/h]で走行時に制動距離 3[m] (搭乗者の体重 75[kg]時) となっており、3次元距離センサは、およそ 10[m]先の物体を検出可能 (検出距離は対象物に依存。3-2節参照。) を搭載している。システムの制御周期は 66[ms]となっており、この車体を用いる限りにおいては、理論上、回避対象に対し 3[m]以上手前から速度制限がかかるとともに、突入速度を 1[km/h]以下に抑えることが可能であり、十分な安全性を担保することができる。なお、検証機を用いた評価結果については生活支援ロボット安全検証センターにおける評価を 3-1-5節に、つくばロボット特区における公道走行実験の結果を 4章に示す。

3-1-3-4 開発支援ツール

リスク低減アルゴリズムを開発するにあたり、システム内部を可視化し、開発サイクルの効率化をはかるためにアルゴリズムの開発と並行して「リアルタイム状態ビューア」を開発した。開発したリアルタイム状態ビューアの GUI を図 3-1-3-1.6 に示す。

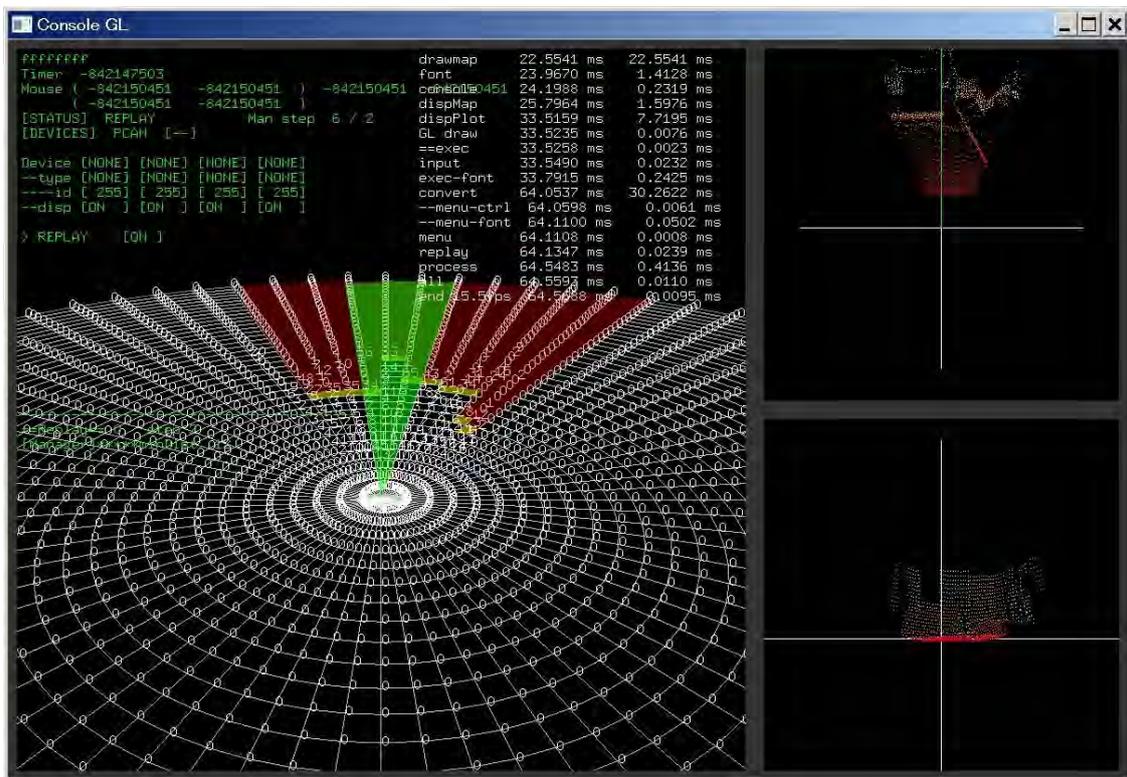


図 3-1-3-1. 6 リアルタイム状態ビューア GUI

図 3-1-3-1. 6 の左側は 2 次元占有極座標マップをロボットの後方斜め上から見下ろしたものであり、緑のグリッドは占有検索グリッド、黄色のグリッドは占有グリッド、そして赤のグリッドは死角領域を示している。右側の上下に並んだ表示は 3 次元距離センサから得られる点群を異なる視点で表示したものであり、各点はそれぞれ 3 次元座標を持ち、高さに応じて色付けされている（赤：低い ~ 緑：高い）。これら 3 画面の視点はそれぞれマウス操作により自在に変更できる。

また、画面左側上部には、ジョイスティック入力、ロボットへの速度指令値、リスク低減アルゴリズムより出力される制限速度が示されるとともに、2 次元占有極座標マップの各グリッドには、そのグリッドに投影された検出点の数がリアルタイム表示されており、占有グリッドとして判定されないグリッドについても、そのグリッドに検出点が投影されているかどうかを確認できるようになっている。さらに、このリアルタイム情報ビューアはデータの記録・再生機能に加えてリスク低減アルゴリズム実行機能を備えており、ロボットの実機を使うことなく、ビューア単体で容易に実験データの再現が可能となっている。加えて、本ビューアは各機器からのブロードキャスト通信によりデータを取得可能であるため、実機を用いた実証実験時においても実機と競合することなく完全に並列に機能する。

3-1-4. 検証機の試作（アイシン精機）

ロボットの安全機能のアルゴリズム開発、安全要素部品群の搭載検討、性能検証、実用性検証を実施するため、4種類の検証機を試作した。それぞれの試作ロボットについて図3-1-4-1から図3-1-4-4に示す。アルゴリズム開発用の0号機は、安全要素部品群のセンサレイアウトとアルゴリズムとの整合性検証を優先し、ロボット中央にセンサ位置調整が可能な調整具を設け搭載している。また、安全機能の制御はLinuxベースのノートパソコンにて実現した。これにより、単に安全機能の機能確認だけでなく、センサからの取込情報分析や、アルゴリズムの動作分析などを実行する解析ツールや解析結果の表示が容易となり、スムーズにアルゴリズム開発を進める事ができた。

1号機では、安全機能を制御する制御部を図3-1-4-5に示すマイコンボードにて実現した。この制御部は、リスク計算ユニットと称し、その設計と安全分析については前述した通りである。1号機は、A、B、Cの三種類を試作している。Aはロボット搭乗者の乗降性とセンサの搭載性を加味し可動式のプレート上に安全要素部品群のセンサを配置した。B、Cはさらに実用化を意識し、更なる乗降性の改善と安全要素部品群の再選定を行いロボット片側に操作系と安全機能部をコンパクトにまとめた搭載構造とした。

1号機の仕様を図○に示す。ロボットのサイズは、全幅66cm、全長94cm、全高85cmとなっており、JIS T9203で示される電動車いすの最大寸法におさめている。駆動源は、主に90WのDCモータ、減速機、クラッチ、電磁ブレーキ、駆動制御回路から構成されており、これを左右の車輪に配置してある。搭乗者が、操作部に設けられたジョイスティックを操作すると、操作部はそれに適した左右駆動源の出力を計算し、CAN通信を通して、出力制御の指示を出す。この左右の駆動源の出力を制御する事で、ロボットの速度と進路の制御を実現する。

安全機能部は、センサからの情報を元に、リスクを計算し、その時々状況に応じた適切な最高速度を計算し、その速度以下になるようCAN通信を通して操作部に速度指示を出す。同時に、安全機能部には、直接警告音を出すホーンとジョイスティックを振動させるバイブレーション機構を設けてあり、最高速度制限と同様に判定リスクに基づき、周囲歩行者及び搭乗者に対し、音と振動によりリスク回避のための注意喚起を行う。



(a)アルゴリズム開発

(b)正面

(b)背面

図 3-1-4-1. 0号機 (アルゴリズム開発用)

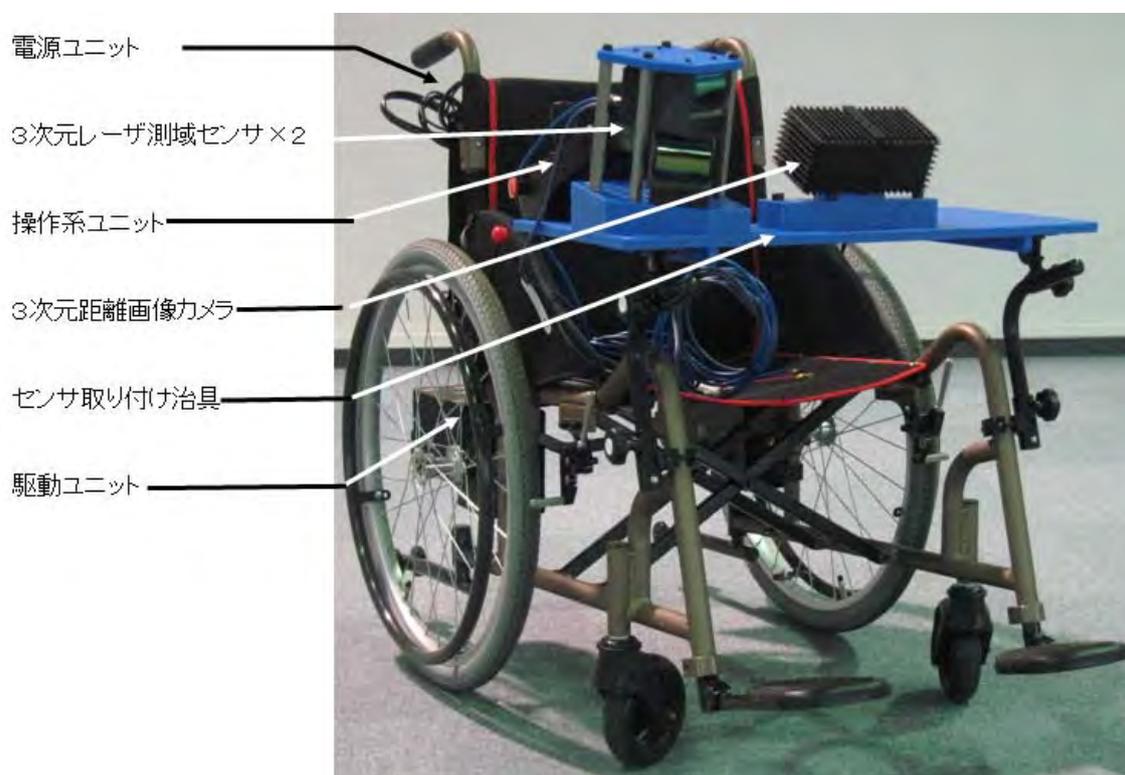


図 3-1-4-2. 1号機 A (センサ搭載検討用)

搭乗型生活支援ロボット
 車名:アイシン 型式:PC20M10022L
 車台番号:ZJ1132001
 登録番号:TSUKUBA MR117

標識



諸元表

項目		仕様
サイズ	全幅	66cm
	全長	94cm
	全高	85cm
車輪	車輪径	22インチ
	輪距	56cm
重量(バッテリー無し)		30kg
駆動源	DCモータ	90W×2
	方式	後輪直接駆動
	切換	手動クッチ操作による電動/手動切替可能
最高速度		10km/h
速度制限機能		周囲環境により車両側で速度制限(減速)をかける
最大使用者体重		75kg



外観図



図3-1-4-3. 1号機B (実証実験用、特区基準緩和認定・標識取得済み)



図 3-1-4-4. 1号機C (実用化検討)

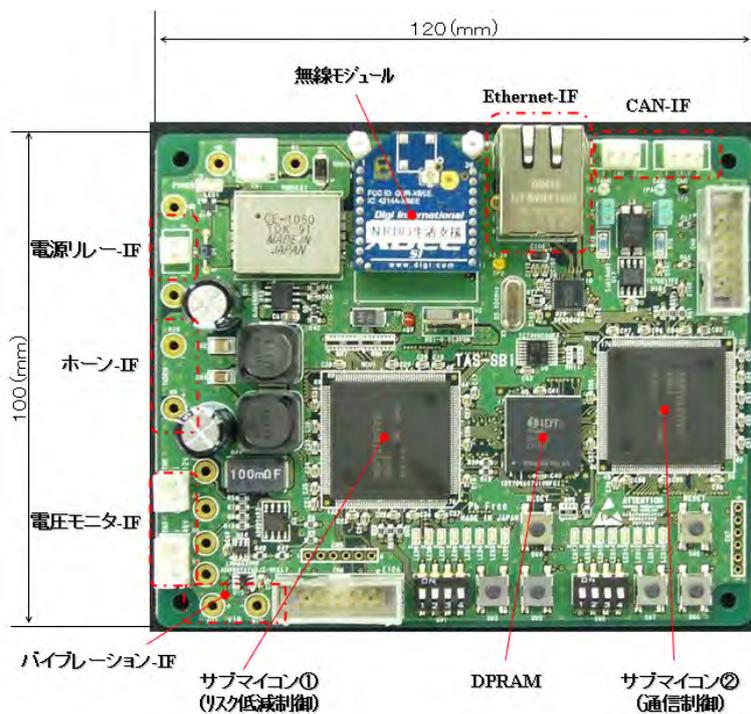


図 3-1-4-5. リスク計算ユニット (制御回路)

3-1-5. 検証機の性能評価（アイシン精機）

試作した検証機の性能について、つくば市にある生活支援ロボット安全検証センターにて評価を実施した。生活支援ロボット安全検証センターでは、すでに生活支援ロボット特有の性能評価を実施すべく、専用設備導入と試験項目が設定されており、開発ロボットの安全性検証に妥当な試験項目を選定し性能評価を実施できる。ロボットが設定された要求仕様を満足しているかを確認し、未達であれば、達成するまで技術改良を施し、仕様を満足する事を確認した上で、実証実験のステップへ進む。

生活支援ロボット安全検証センターでは、表3-1-5に示す、17項目の試験項目があり、当開発ロボットの評価に関係する試験項目の選定を行った。さらに、関係する試験項目の内、開発ロボットが持つ新しい機能・性能に関係する試験項目を絞り込み、実際に生活支援ロボット安全検証センターにて性能評価を実施した。

当開発ロボットは、電動車いすJIS T9203規格をベースとし、その最高速度を時速10kmまで拡張したものである。またベース規格を超越する速度域での安全対策として周囲環境状況に基づく最高速度の制限と注意喚起の機能が実装されている。従って、ベース規格で規定される最高速度である時速6kmを超越する領域と超越する領域における安全対策の性能評価に関する試験項目に絞り、試験内容の立案・計測・評価を実施した。具体的には、対人安全性項目である衝突安全性能試験、安定性項目である走行安定性試験、制御性能項目である環境認識性能試験及び障害物検知・対応試験である。それぞれの試験内容・評価結果について以下に示す。

表3-1-5. 生活支援ロボット安全検証センター試験項目一覧

試験項目				使用する検証センターの装置	アイシ ン コソ
分類	試験No.	項目	概要		
耐環境性	1	耐環境試験(温湿度+振動)	ロボット本体及び構成部品の最悪想定使用環境(温度・湿度・振動)下における機能の正常性及び安全性への影響を評価する	複合環境振動試験装置	○
機械的強度・耐久性	2	耐荷重試験	運用中に想定される最大静的荷重に対して十分な機械的耐性をもち、安全機能に影響のないことを確認する	耐荷重試験機	○
			装着型ロボットの使用中に単発的に起こりうる大きな負荷に対して、構造部位が強度的に耐えられることを確認する	装着型ロボット強度試験機	—
	3	耐衝撃試験	運用中に想定される衝撃的荷重のうち、衝突試験では実現できないものについて、十分な機械的耐性をもち、安全機能に影響のないことを確認する	耐衝撃試験機	○
	4	走行耐久性試験	搭乗型・移動型ロボットが長時間連続走行したときの、安全系の耐久性を評価する	走行耐久性試験機(ドラム式)	○
			装着型ロボットを長時間連続稼動したときの、安全系の耐久性を評価する	装着型ロボット耐久性試験機(トレッドミル)	—
環境への放射物	5	感電試験	通常使用時およびメンテナンス時に、人がロボットに接触した際に感電しないことを確認する	感電試験装置(テストフィンガー)	○
	6	放射温度測定子権	通常使用時およびメンテナンス時に、ロボットの露出部位にやけどの恐れがないことを確認する	放射温度測定装置	○
	7	騒音試験	ロボットの周囲の人、および搭乗者が暴露される騒音レベルを確認する	騒音測定装置 走行試験路(平坦路)	○
安定性	8	静的安定性試験	ロボットの静止時の転倒に対する安定性を評価する	静的安定性試験機	○
	9	走行安定性試験	ロボットが走行する時に、転倒、走路逸脱、搭乗者や積載物の落下がないことを確認する	走行試験路(平坦路)	○
				走行試験路(傾斜路)	○
				重心移動制御装置	—
制御性能	10	環境認識性能試験	想定される外乱光の中でもロボットが環境を認識できるかどうか(特に人を確実に検出できるかどうか)を評価する	環境認識性能試験装置 人工太陽装置	○
	11	軌道追従性能試験	自律移動機能をもつロボットが、設定された移動経路に対してどの程度正確に追従できるかを評価する		—
	12	障害物検知・対応試験	非接触式センサによる障害物の検知および対応性能が仕様通りに機能することを確認する	三次元動作軌跡解析装置(モーションキャプチャ) ロボット走行状態模擬装置	○
対人安全性	13	挟圧安全性性能試験	接触式センサによるロボットの緊急停止時の停止特性と押し付け力を評価する	衝突試験装置	△
	14	衝突安全性性能試験	ロボットが衝突や転倒した際の、周囲の人や搭乗者の傷害を評価する	衝突試験装置 人体ダミー	○ (衝突)
	15	接触安全性試験	装着型ロボットについて、歩行時の膝関節の負担を評価する	下肢ダミー	—
	16	操作・情報提示機能試験	ロボットのHMI機能である、人による操作や人への情報提示の安定性や安全性を評価する	三次元動作軌跡解析装置(モーションキャプチャ)	△(ロボット仕様による)
EMC性能	17	EMC試験	ロボット本体、およびロボットと周辺環境との無線通信を対象として、EMC性能を評価する	EMC試験装置	○

○:安全検証センターにて試験を行う △:安全検証センターの装置を使用できるが条件付き
×:試験を行いたい、安全検証センターの装置を使用できない —:試験が該当しない

3-1-5-1. 衝突安全性能試験

開発対象のロボットのユースケースレベルでのリスクアセスメントについては前述した通りである。リスクレベルの算出には、危害の酷さ、危害の発生確率から算出式を用いて点数化した。その点数を基準点と比較する事でリスク低減の要否を判断し、安全対策を選定・実装した。特にリスク点数の高い危険事象は、衝突や転倒による搭乗者及び周囲歩行者に過大な衝撃が加わる事象である。

従って、リスクアセスメントで見積もった衝突時の危害の妥当性を評価すべく、想定し衝突の衝撃について定量化すると同時に、転倒に至るモードを把握した。設定した評価項目と評価条件、評価方法は、以下の通りである。

【評価項目】

- 1) 衝突時の搭乗者への衝撃力 (印加加速度)
- 2) 衝突時のロボット・搭乗者の転倒、転落モード
- 3) 衝突時の第三者 (歩行者) に対する衝撃力 (印加加速度)
- 4) 衝突時の第三者の転倒モード
- 5) 衝突時のロボットの破損状況

尚、ISO 13482の関連要求項目は以下の通り、

5. 4 Hazards due to robot shape
5. 5. 3 Hazardous substances and fluid
5. 8. 3 Instability during travel
5. 8. 5 Instability in case of collision
5. 8. 8 Hazardous physical contact during human-robot interaction
6. 7 Force restriction and safety-related force control

【評価条件】

- 1) ロボットの衝突速度：1 km/h、6 km/h、10 km/h
- 2) 衝突対象：障害物 (壁、縁石)、歩行者
- 3) 衝突条件：正面、オフセット、歩行者の向き (前、横、後)
- 4) 搭乗者：女性相当 (40 kg)、男性相当 (75 kg)、無人
- 5) 路面：平坦路

【評価方法】

- 1) ロボットの走行：1 km/h時は自走、6 km/h、10 km/h時は牽引装置を使用
- 2) 衝撃力の測定①（搭乗者）：ダミー人形2種類（男性、女性）の加速度及び荷重
- 3) 衝撃力の測定②（歩行者）：ダミー人形1種類（子供）の加速度及び荷重
- 4) 衝撃力の測定③（障害物）：バリア（壁）の荷重
- 5) 転倒モード測定：高速ビデオ画像

実際の試験は、生活支援ロボット安全検証センター内の対人試験関連エリアに設置された牽引装置、牽引台車、衝突用バリア、人体ダミーを使用し実施した。その実験の様子を図3-1-5-1-1に示す。また、実施した試験の組合せを表3-1-5-1に示す。

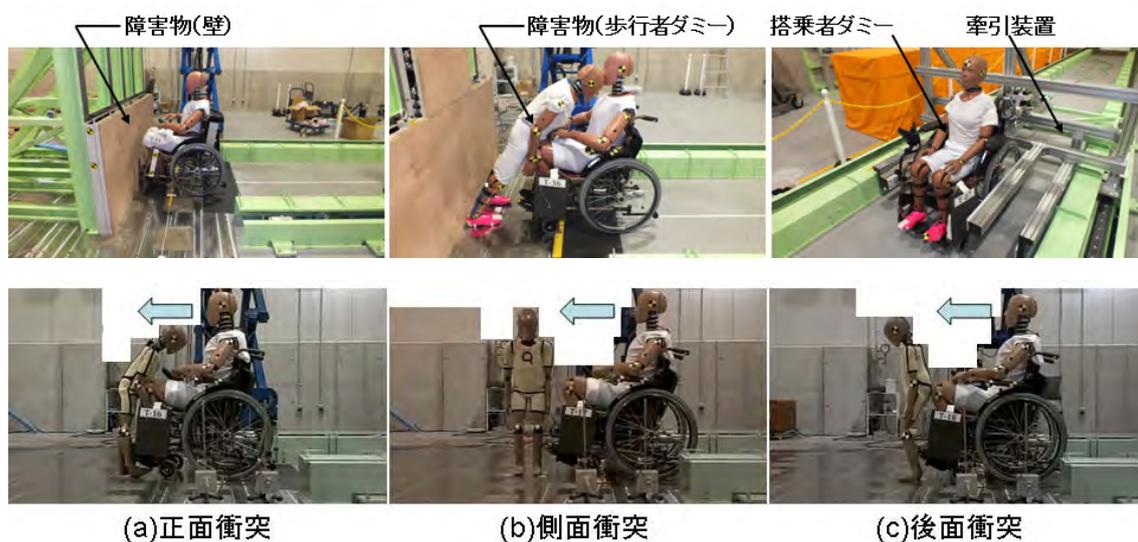


図3-1-5-1-1. 衝突安全性能試験の様子

表3-1-5-1. 衝突安全性能試験組合せ

試験番号	衝突形態	目標衝突速度(km/h)	衝突速度(km/h)	ロボット搭乗者	第三者(歩行者)	
					種類	向き
T-01	バリアフルラップ	1.0	0.85	無		
T-02	↑(挟まれ)	1.0	0.95	男性	子供	正面
T-03	↑(挟まれ)	1.0	0.84	↑	子供	正面
T-04	↑(挟まれ)	1.0	0.89	↑	女性	正面
T-05	↑(挟まれ)	1.0	0.92	↑	女性	正面
T-06	バリアフルラップ	6.0	—	無	—	—
T-07	↑	6.0	6.33	女性	—	—
T-08	↑	6.0	6.36	男性	—	—
T-09	バリアオフセット	6.0	6.12	↑		
T-10	↑	6.0	6.11	女性		
T-11	↑	6.0	6.00	無		
T-12	縁石	6.0	6.01	↑		
T-13	↑	6.0	6.01	女性		
T-14	↑	6.0	6.17	↑		
T-15	↑	6.0	6.33	男性		
T-16	歩行者衝突	6.0	6.25	↑	子供	正面
T-17	↑	6.0	6.24	↑	↑	側面
T-18	↑	6.0	6.22	↑	↑	後面
T-19	↑	10.0	10.16	↑	↑	正面
T-20	↑	10.0	10.14	↑	↑	側面
T-21	↑	10.0	10.16	↑	↑	後面
T-22	↑	6.0	6.16	↑	女性	正面
T-23	↑	6.0	6.16	↑	↑	側面
T-24	↑	6.0	6.15	↑	↑	後面
T-25	歩行者衝突	10.0	10.19	↑	↑	正面
T-26	↑	10.0	—	↑	↑	側面
T-27	↑	10.0	10.16	↑	↑	後面
T-28	縁石	10.0	9.71	↑	—	—
T-29	↑	10.0	9.35	無	—	—
T-30	バリアオフセット	10.0	9.43	↑	—	—
T-31	↑	10.0	9.66	男性	—	—
T-32	バリアフルラップ	10.0	9.63	↑	—	—
T-33	↑	10.0	9.58	女性	—	—
T-34	↑	10.0	9.50	無	—	—
T-35	挟まれ	10.0	10.20	男性	子供	正面
T-36	↑	10.0	10.08	男性	女性	正面

衝突時の搭乗者及び第3者への衝撃については、人体ダミーに設置された各加速度計の加速度値をもとに、頭部障害基準値（HIC：Head Injury Criterion）を算出した。さらに、重症度を表すコード体系であるAIS（Abbreviated Injury Scale）を衝突安全性評価の指標として用い、算出したHICとの対応付けを行うことで、安全性の一つの基準とした。尚、本試験及び、計測したデータ解析（HIC、AIS算出）は財団法人日本自動車研究所殿に実施していただいた。試験の結果を図3-1-5-1-2～図3-1-5-1-10に示す。

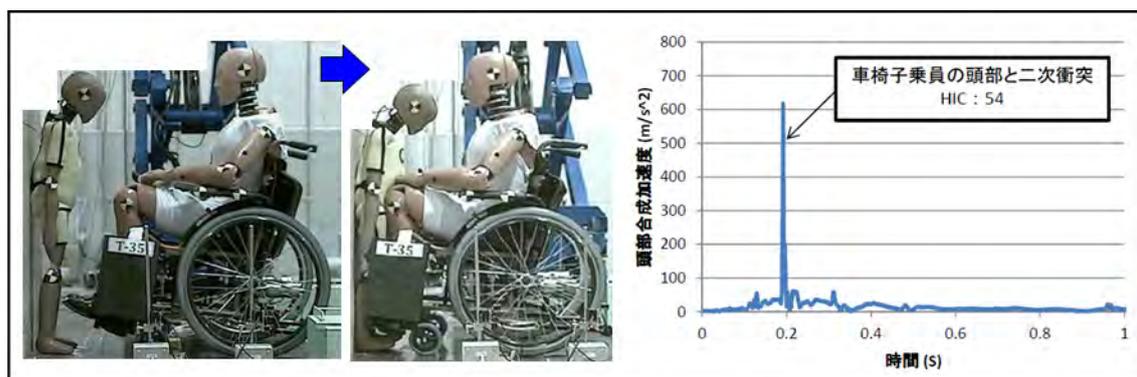


図3-1-5-1-2. T-35試験結果（挟まれ：子供）

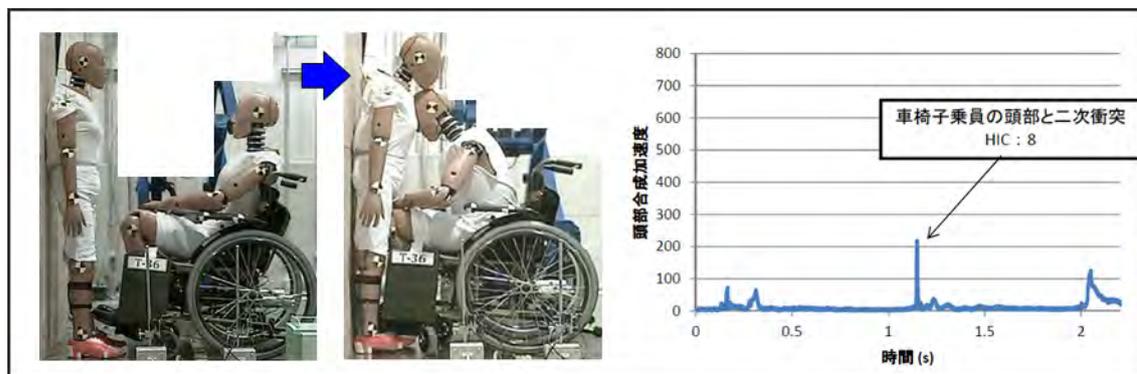


図3-1-5-1-3. T-36試験結果（挟まれ：女性）

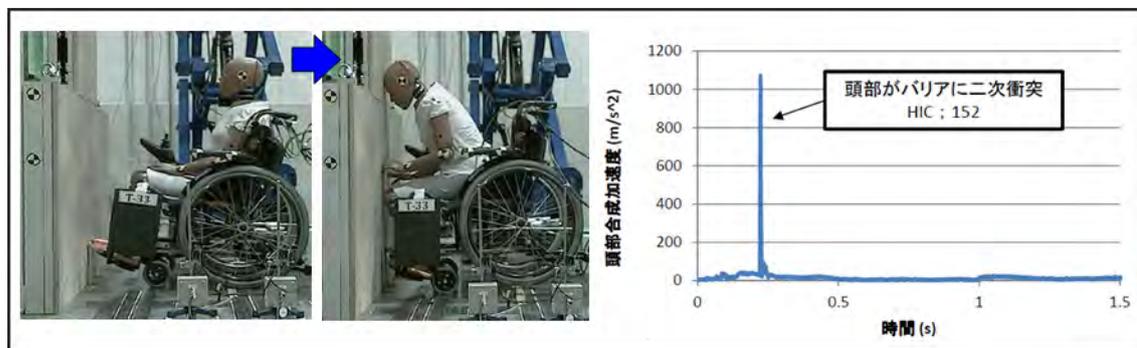


図3-1-5-1-4. T-33試験結果（バリアフルラップ：女性）

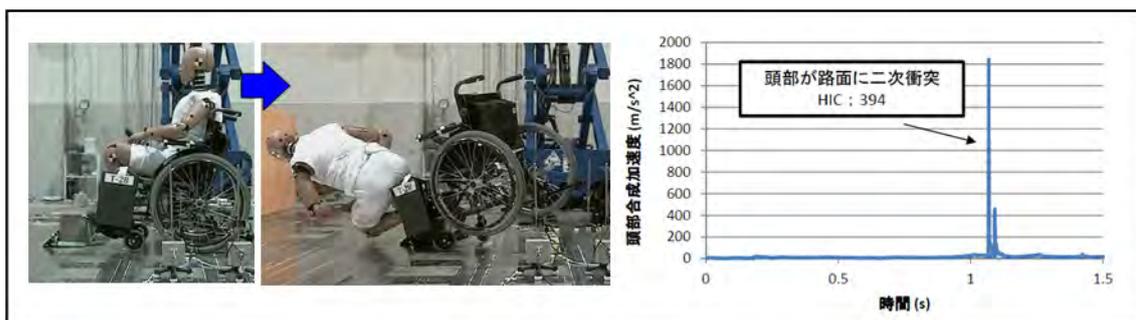


図 3-1-5-1-5. T-28 試験結果 (縁石: 男性)

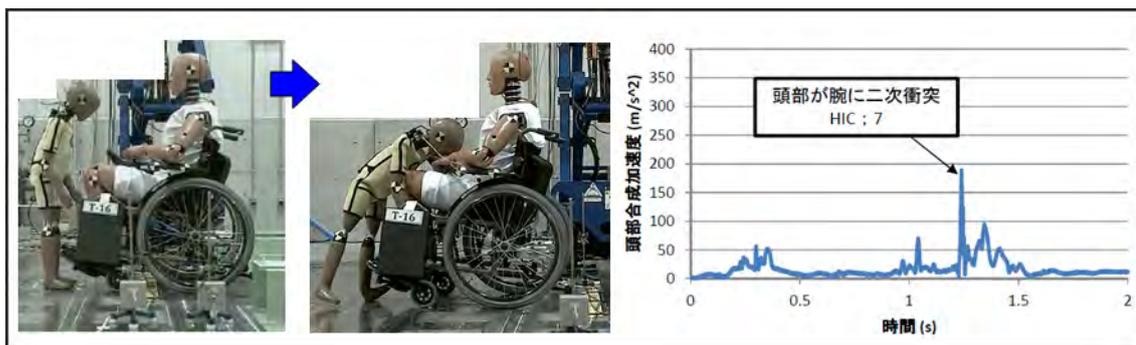


図 3-1-5-1-6. T-16 試験結果 (子供正面: 時速 6 km)

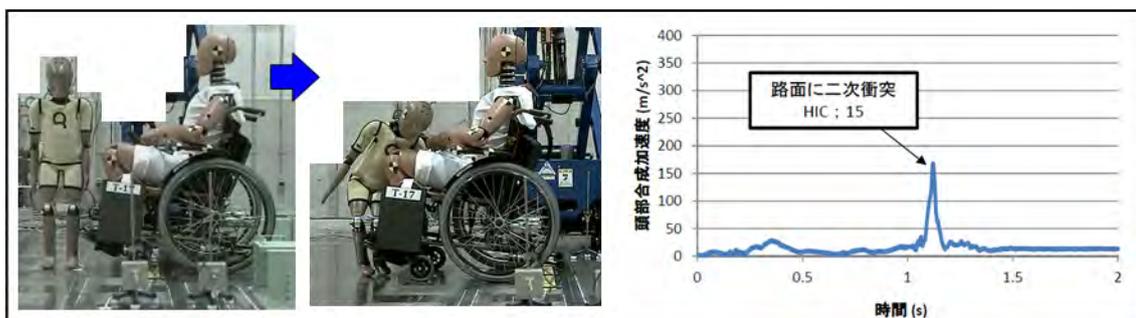


図 3-1-5-1-7. T-17 試験結果 (子供側面: 時速 6 km)

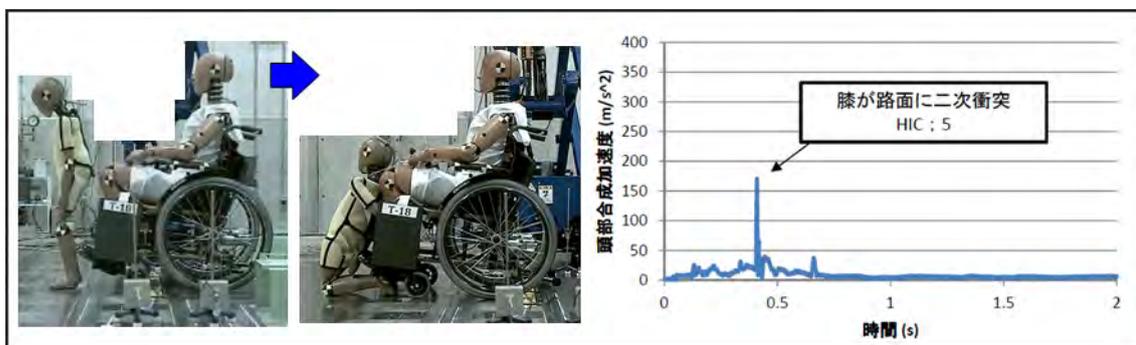


図 3-1-5-1-8. T-18 試験結果 (子供後面: 時速 6 km)

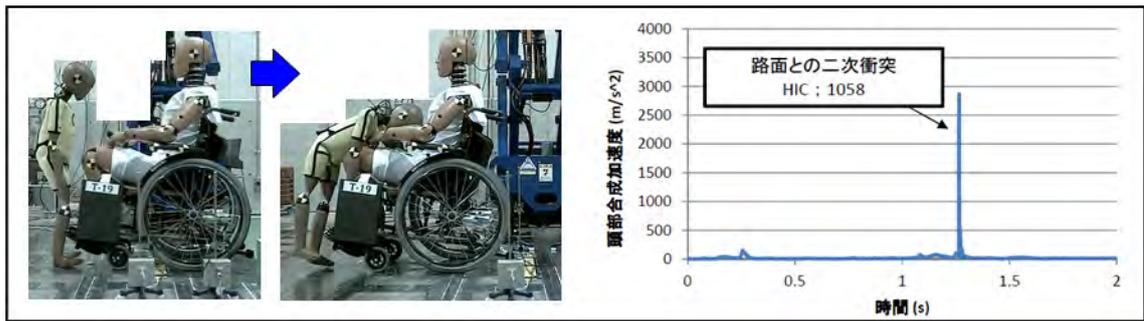


図 3-1-5-1-9. T-19 試験結果 (子供後面：時速 10 km)

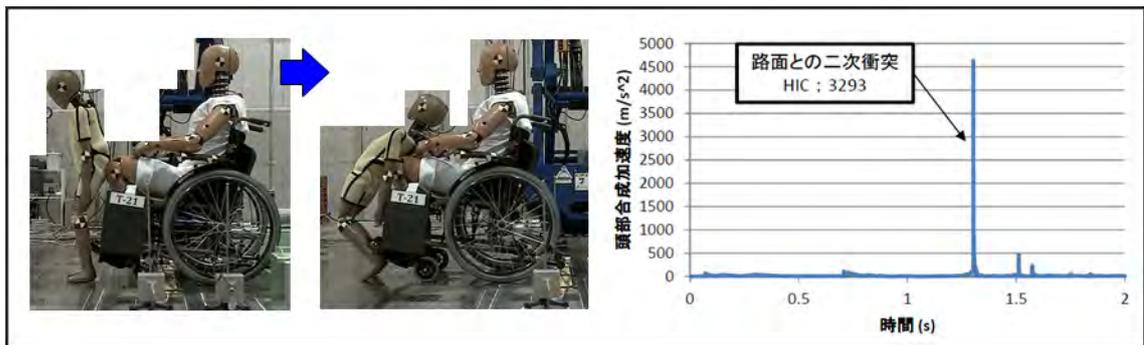


図 3-1-5-1-10. T-21 試験結果 (子供後面：時速 10 km)

まず、衝突安全性能試験において印加される衝撃力を区別する必要がある。衝撃力には大きく 2 つある。すなわち、ロボットが障害物及び第 3 者と衝突した時点での直接的な衝撃力と、その衝突によりロボット及び第 3 者の転倒、ロボットからの搭乗者の転落、が発生することで、第 3 者及び搭乗者が地面などと衝突する際の衝撃力である。前者を一次衝突、後者を二次衝突として区別した。一次衝突については、全ての条件で重症につながる様な衝撃力として測定はされなかった。また、最もロボットの転倒につながり易い、縁石に対する衝突においてもロボットの速度が時速 6 km 以下の条件では、ロボットが転倒するモードは発生していない。一方、二次衝突については第 3 者及び搭乗者の双方で重傷につながる衝撃力が測定される場合が発生した。特にロボットの衝突速度が時速 10 km の条件下では、第 3 者に対する衝撃力の上昇が見られた。またロボットの衝突速度が時速 10 km で縁石に対し衝突する条件では、ロボットの転倒が見られた。二次衝突の衝撃力は、第 3 者の転倒姿勢やロボットからの搭乗者の転落姿勢に依存するためバラツキがある。このことから、一次衝突の衝撃力がある閾値以下であれば、二次衝突の衝撃力が許容可能（重症に至らない）な範囲におさまると言った見方はできない。

ただし、ロボットの衝突速度が時速 6 km 以下の場合、二次衝突の突発生そのものや、重症につながる衝撃力の発生確率はおさえられ、リスクアセスメントにて見積もった結果の妥当性を確認できた。

3-1-5-2. 走行安定性試験

ロボットの走行安定性を把握すべく、表3-1-5-2-1に示す14項目の安定性試験を実施した。性能試験の目的は、安全機能開発に必要なロボットの走行性能を定量的に把握する事と、利用環境への適用度として走行可否を判断する事である。試験項目の設定、性能試験の実施にあたり、電動車いすの規格であるJIS T9203を参照規格として用いた。

走行路条件として走路の傾き、路面種類を変え評価する必要がある。そのため、生活支援ロボット安全検証センター内の走行試験関連エリアに設置された平坦路走行試験装置及び傾斜路走行試験装置を使用し実施した。各試験装置の床材パネルは、変更可能であり、これにより異なる床材質における走行安定性能の評価が可能である。尚、床材パネルは、Pタイル床とセーフティウォーク床を評価対象とした。これは、リスクアセスメントにて想定した利用シーンの中で施設内(屋内)、歩道(屋外)の路面に近いものとして選定した。また、路面摩擦の管理として、電動車いす関連の国際規格ISO-7176-13の中で規定されている試験表面の摩擦係数の試験法を参考とした。路面摩擦係数の管理は、規格で規定される0.75~1.0の範囲としている。評価対象の2つの床に対し、規定の摩擦係数測定法にて計測した結果、Pタイル床は0.91、セーフティウォーク床は0.98である事を確認している。尚、本試験に関しては、財団法人日本自動車研究所殿にご協力いただき実施した。

14項目の性能試験に対する測定の様子を図3-1-5-2-1~図3-1-5-2-5に、測定結果を表3-1-5-2-2に示す。性能試験の中で重要な性能値は制動距離である。最高速度である時速10kmからの制動距離は平坦路で3.4m(Pタイル)、降坂路で4.5m(Pタイル)であった。この事から、安全機能に求められるシステム及びセンサの要求性能の妥当性が確認できる。

各走行条件における走行可否については、傾斜10°の坂道での走行と、40mmの段差については走行不可能であった。これらについては、使用マニュアルの中で使用環境条件として記載し、その利用範囲を明確にしておく。

表3-1-5-2-1. 走行安定性試験項目

項目	試験方法	測定値/評価値
1 最高速度試験	・試験路面: セーフティウォーク ・最大出力状態で、10m程度助走後、2m区間の通過時間を測定し、速度を測定する。	・2m区間の平均速度
2 登坂最高速度試験	・試験路面: セーフティウォーク ・傾斜角度: 10° ・最大出力状態で、10m程度助走後、2m区間の通過時間を測定し、速度を測定する。	・2m区間の平均速度
3 降坂最高速度試験	・試験路面: セーフティウォーク ・傾斜角度: 10° ・最大出力状態で、10m程度助走後、2m区間の通過時間を測定し、速度を測定する。	・2m区間の平均速度
4 制動試験(平坦)	・試験路面: セーフティウォーク、ピータイル、ピータイル湿潤 ・最高速度で、10m程度助走後、2m区間の通過時間を測定し、速度を測定する。 ・制動ランプ点灯後、最大性能で停止する。 ・停止位置までの距離を測定する。	・2m区間の平均速度 ・ランプ点灯から停止までの距離
5 登坂路加速制動試験	・試験路面: セーフティウォーク、ピータイル ・傾斜角度: 10° ・最大出力状態で、10m程度助走後、2m区間の通過時間を測定し、速度を測定する。 ・制動ランプ点灯後、最大性能で停止する。 ・停止位置までの距離を測定する。	・2m区間の平均速度 ・ランプ点灯から停止までの距離
6 降坂路加速制動試験	・試験路面: セーフティウォーク、ピータイル ・傾斜角度: 10° ・最大出力状態で、10m程度助走後、2m区間の通過時間を測定し、速度を測定する。 ・制動ランプ点灯後、最大性能で停止する。 ・停止位置までの距離を測定する。	・2m区間の平均速度 ・ランプ点灯から停止までの距離
7 急旋回試験	・試験路面: セーフティウォーク、ピータイル、ピータイル湿潤 ・最大出力状態で、10m程度助走後、急旋回し、半円程度旋回したら停止する。 ・旋回方向は、左右実施。	・旋回開始時速度 ・挙動観察(目視)
8 降坂路急旋回試験	・試験路面: セーフティウォーク、ピータイル ・傾斜角度: 10° ・最大出力状態で、10m程度助走後、急旋回し、半円程度旋回したら停止する。 ・旋回方向は、左右実施。	・旋回開始時速度 ・挙動観察(目視)
9 坂道走行性試験	・試験路面: セーフティウォーク、ピータイル ・傾斜角度: 10°、6° ・斜面に幅1.2mのS字路(曲率半径5m)を設け、前進最高出力状態で登坂及び降坂走行を行う。	・走行可否 ・斜線逸脱(目視) ・挙動観察(目視)
10 傾斜路と平坦路の移行試験	・試験路面: 傾斜路はピータイル、平坦路はコンクリート ・傾斜角度: 10°、6° ・最高速度を維持したまま、傾斜路から平坦路に進入し、停止する。 ・同じ走行路をもちいて、平坦路から傾斜路への移行についても行う。	・走行可否 ・移行前速度 ・挙動観察(目視)
11 段差上り試験	・試験路面: ベニア板 ・段差: 20mm、40mm ・助走無し、前進のみ実施	・走行可否(段差上りの可否) ・挙動観察(目視)
12 段差降り試験	・試験路面: ベニア板 ・段差: 20mm、40mm ・助走は、段差50cm手前から最大出力状態で進入。 ・助走し、最大出力状態を維持したまま段差を降り、停止する。 ・前進のみ実施	・走行可否(段差降りの可否) ・挙動観察(目視)
13 溝踏破走行性試験	・試験路面: ベニア板 ・溝: 幅100mm、深さ100mm ・進入角度: 溝に対し直角に進入。 ・助走条件: 助走無し、溝の手前2mより最高出力状態で助走、最高速度に到達するまで助走 ・前進のみ実施	・走破の可否 ・挙動観察(目視)
14 回転性能試験	・高さ: 1.5m、幅: 90cm、直進長: 1.8mの直角路を停止から前進で、切り返しは行わずに往復走行する。	・走行可否 ・接触有無(目視)



(a) 試験時重量測定



(b) 坂道走行試験

図3-1-5-2-1. 測定の様子①



降坂路急旋回試験

図3-1-5-2-2. 測定の様子②



回転性能試験

図3-1-5-2-3. 測定の様子③



溝路破走行試験

図3-1-5-2-4. 測定の様子④



(a) 段差上り試験



(b) 段差降り試験

図3-1-5-2-5. 測定の様子⑤

表3-1-5-2-2. 走行安定性試験結果

項目		条件	測定値/評価値	
1	最高速度試験	平坦路	平均速度	11.3 (km/h)
2	登坂最高速度試験	傾斜路登坂10°	平均速度	3.7 (km/h)
3	降坂最高速度試験	傾斜路降坂10°	平均速度	9.3 (km/h)
4	制動試験(平坦)	セーフティウオーク	停止距離	3.3 (m)
		Pタイル	停止距離	3.4 (m)
		Pタイル湿潤	停止距離	3.8 (m)
5	登坂路加速制動試験	セーフティウオーク	停止距離	0.6 (m)
		Pタイル	停止距離	0.7 (m)
6	降坂路加速制動試験	セーフティウオーク	停止距離	4.3 (m)
		Pタイル	停止距離	4.5 (m)
7	急旋回試験	セーフティウオーク	旋回挙動	安定
		Pタイル	旋回挙動	安定
8	降坂路急旋回試験	セーフティウオーク	旋回挙動	安定
		Pタイル	旋回挙動	安定
9	坂道走行性試験	登坂10° セーフティウオーク	走行可否	走行不可 安定走行
		登坂10° Pタイル	走行可否	走行不可 安定走行
		降坂10° セーフティウオーク	走行可否	走行不可 コースアウト
		降坂10° Pタイル	走行可否	走行不可 コースアウト
		登坂6° セーフティウオーク	走行可否	走行可能 安定走行
		登坂6° Pタイル	走行可否	走行可能 安定走行
		降坂6° セーフティウオーク	走行可否	走行可能 安定走行
10	傾斜路と平坦路の移行試験	降坂6° ⇒平坦路	走行可否	走行可能
		平坦路 ⇒登坂6°	走行可否	走行可能
		降坂10° ⇒平坦路	走行可否	走行可能
		平坦路 ⇒登坂10°	走行可否	走行可能
11	段差上り試験	段差:20mm	走行可否	走行可能
		段差:40mm	走行可否	走行不可
12	段差降り試験	段差:20mm	走行可否	走行可能
		段差:40mm	走行可否	走行可能
13	溝踏破走行性試験	助走無し	走行可否	走行不可 前輪脱輪
		助走2m	走行可否	走行可能
		最高速度まで助走	走行可否	走行可能
14	回転性能試験	左クランク	走行可否	走行可能 通過時間8.76秒
		右クランク	走行可否	走行可能 通過時間8.31秒

ただし、本測定法では、制動距離に制動開始タイミング（制動ランプ点灯タイミング）から実際にロボットの減速が開始するまでの空走距離が含まれている事。車輪のスリップの有無の確認が十分でない事から、3次元動作解析装置を用いた平坦路（路面はセーフティウオーク床を使用）での制動特性を別途計画した。測定方法を図3-1-5-2-6に示す。ロボットを最大出力で直進加速させ、最大速度に達した事を確認した後、通過センサとランプにより制動タイミングを搭乗者に伝える。搭乗者はランプ点灯を確認後、ジョイスティックを直ちに中立点に戻し、ロボットを最大減速させ停止させる。3次元動作解析装置によりランプ点灯少し前の位置からロボット停止位置までのロボットの動作を測定する方法とした。測定は5回行いその結果を表3-1-5-2-3、図3-1-5-2-7に示す。これによれば、平均するとおよそ、0.9mの空走距離があり、減速加速度は -2.57 m/s^2 であった。また、減速時には、若干の車輪のスリップが発生しており、ほぼ限界の減速加速度である。

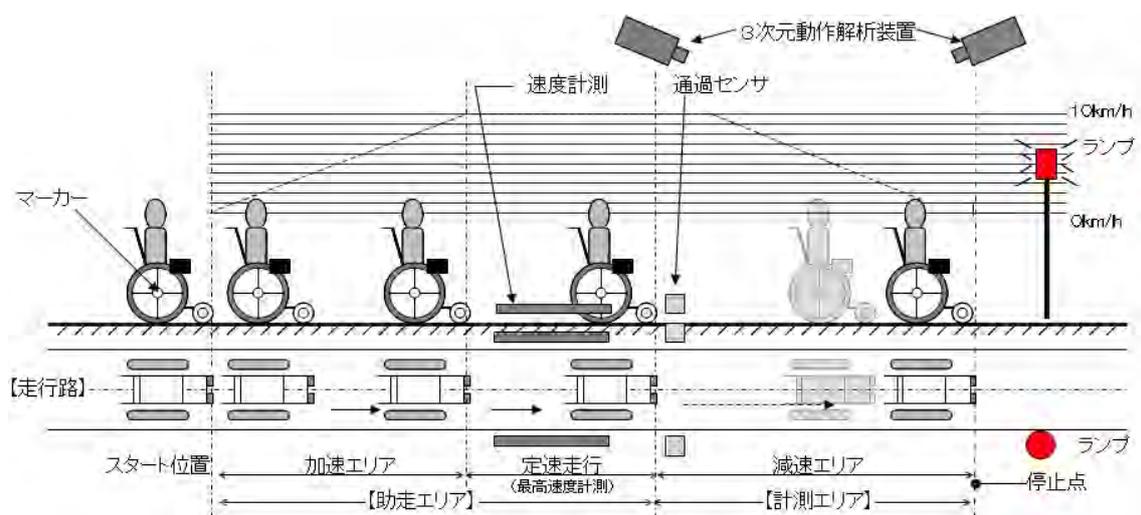


図3-1-5-2-6. 3次元動作解析装置による制動特性計測方法

表 3-1-5-2-3. 制動特性の計測結果

試験番号	最大速度 (km/h)	停止距離 (m)	空走距離 (m)	減速加速度 (m/s ²)
1	10.1	2.69	0.86	-2.57
2	10.1	2.56	0.86	-2.59
3	10.1	2.29	0.83	-2.58
4	10.1	2.61	0.86	-2.57
5	10.1	2.52	1.1	-2.55
平均	10.1	2.53	0.90	-2.57

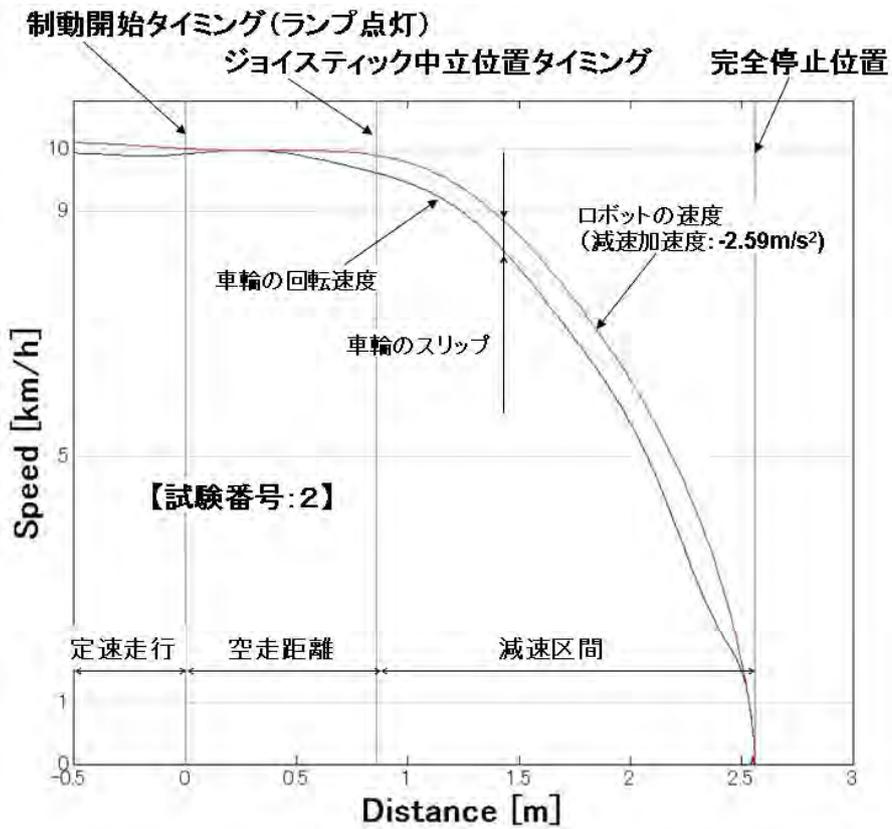


図 3-1-5-2-7. 制動特性の計測結果 (試験番号2のグラフ)

3-1-5-3. 障害物検知・対応試験

安全機能の性能を評価するため、障害物検知・対応試験を実施した。安全機能は、ロボットの走行中における周囲障害物との衝突リスクを搭乗者が回避操作（操舵操作などによる回避操作）により回避するための十分な余裕を担保する目的で、適切な時点で適切な速度以下になるよう最高速度を制限する事と、搭乗者及び第3者（歩行者など）に衝突リスクに対する注意を喚起する事であった。障害物検知・対応試験では、この機能の性能を検証すべく、実際に障害物に対してロボットを接近させ、その際に十分な回避余裕として設定した状態、すなわち障害物とロボットの距離に応じて設定した速度以下であるかを評価する。

検出対象となる障害物は、測定の再現性を重視し、模擬検出対象を専用に設計した。設計・試作した模擬検出対象を図3-1-5-3-1に示す。歩行者空間における検出物として、車止め、看板、電柱、歩行者、自転車などを想定している。この中で、主な検出対象として車止めと歩行者（子供）を選定し、それぞれをφ100mm、φ600mmで高さ900mmの円筒形状として定義した。さらに、センサが光学的センサである事から、それぞれの表面反射率を高いものと低いものの2種類を用意した。また、実験の安全上、万が一ロボットとの接触があっても衝撃力が抑えられるよう、模擬検出対象の材料を発砲スチロールとしている。

型番	名称	仕様	備考
T17-OB-001	φ600円柱ークロ	・主材料:発砲スチロール ・寸法:φ600×H900(mm) ・表面反射率:12% ・重量:3.0kg	・歩行者(子供)を模擬 ・暗めの服装(冬服など)を想定
T17-OB-002	φ600円柱ーシロ	・主材料:発砲スチロール ・寸法:φ600×H900(mm) ・表面反射率:80~90% ・重量:3.0kg	・歩行者(子供)を模擬 ・明るめの服装(夏服など)を想定
T17-OB-003	φ100円柱ークロ	・主材料:発砲スチロール ・寸法:φ100×H900(mm) ・表面反射率:12% ・重量:0.1kg	・路面車止めボールを模擬 ・暗めのボール、反射ラベル無しを想定
T17-OB-004	φ100円柱ーシロ	・主材料:発砲スチロール ・寸法:φ100×H900(mm) ・表面反射率:80~90% ・重量:0.1kg	・路面車止めボールを模擬 ・明るめのボール、反射ラベル無しを想定

※評価の再現性、他評価との関係のとやすさから、模擬【試作例】する対象物を円筒形に抽象化し、代表寸法として径と高さで規定。
 ※光学的センサを意識し、表面を既知の反射率のシートでコートする。反射率は、高いものと低いものを用意。
 ※表面形状を保持するため、剛性はあるが、衝突時の安全を加味し、主材料は発砲スチロールとする。



図3-1-5-3-1. 模擬検出対象

障害物は、静止物と移動体について評価する必要がある。想定する移動体は、主に歩行者である事から、 $\phi 600\text{ mm}$ 、高さ 900 mm の模擬検出対象を障害物接近再現装置に取付け、指定の動き再現をする事で歩行者を再現した。障害物接近再現装置への取付けを図3-1-5-3-2に示す。

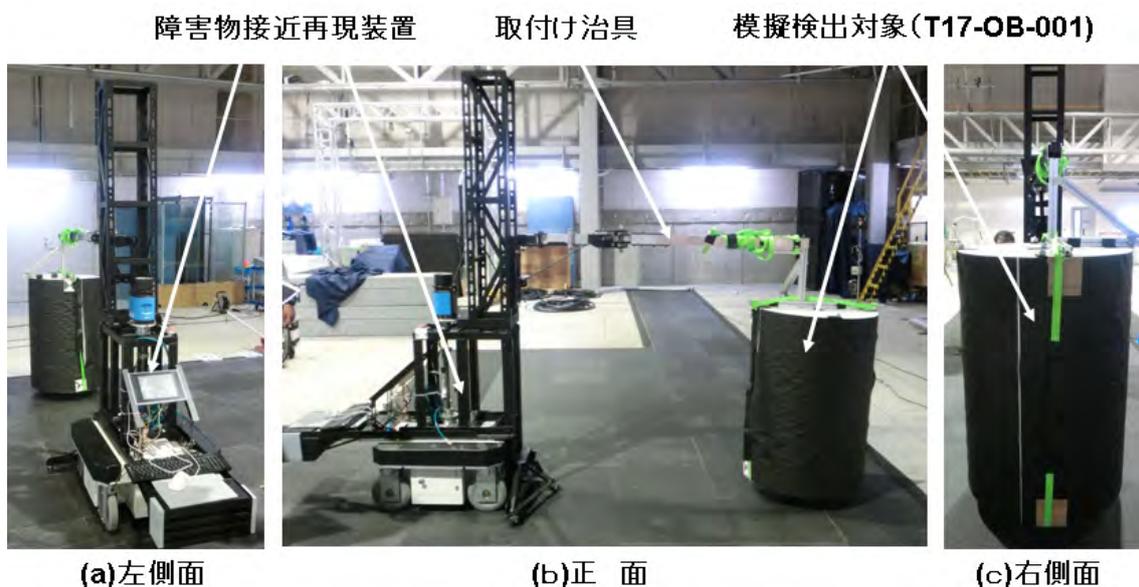
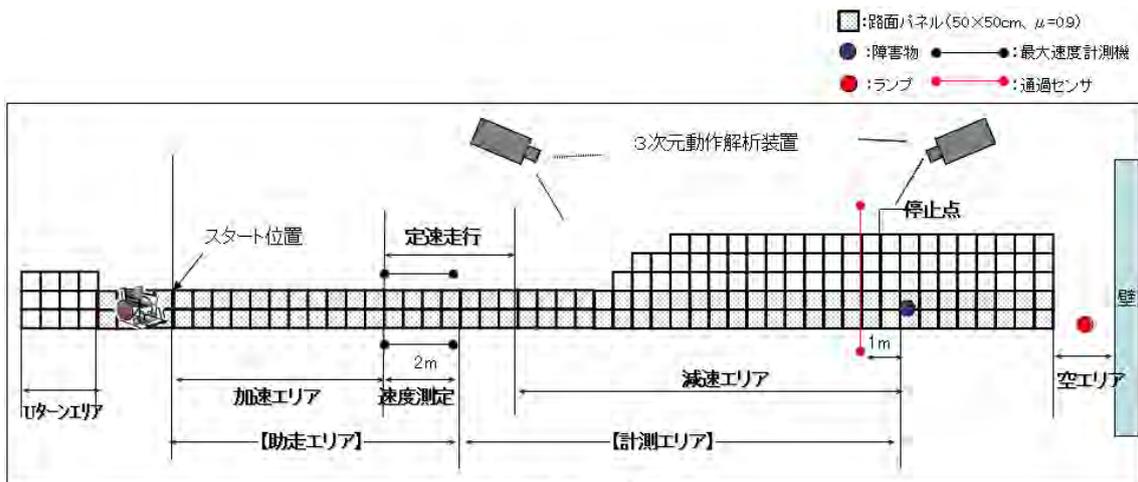


図3-1-5-3-2. 模擬検出対象の移動方法（障害物接近再現装置への取付け）

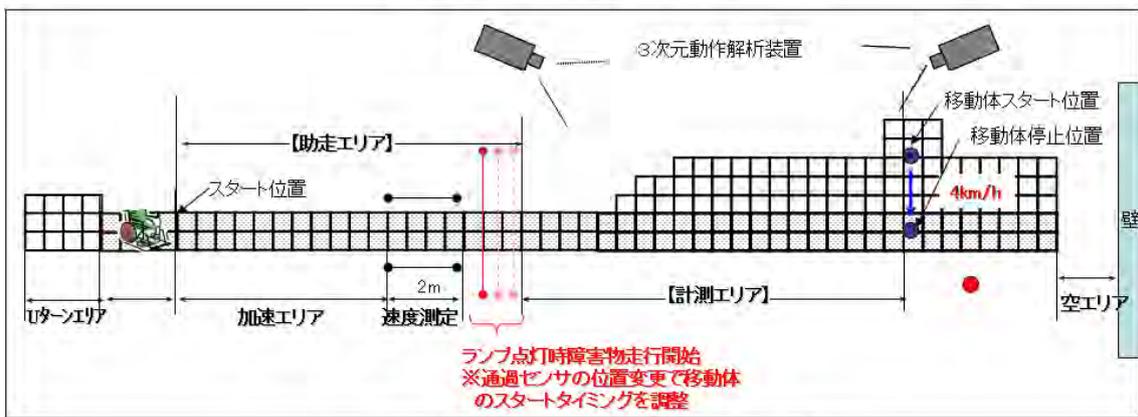
準備した障害物に対する、ロボットの速度制限性能を評価すべく、平坦路走行試験装置と3次元動作解析装置、障害物接近再現装置を組合せ図3-1-5-3-3に示す評価セットを準備した。

障害物に対するロボットの接近は、最も厳しい条件である最高速度（時速 10 km ）で接近させ、その条件で、障害物との衝突を回避するために必要な回避余裕確保の判断として、障害物の手前 1 m 以内でロボットの速度が時速 1 km 以下であることを確認する。

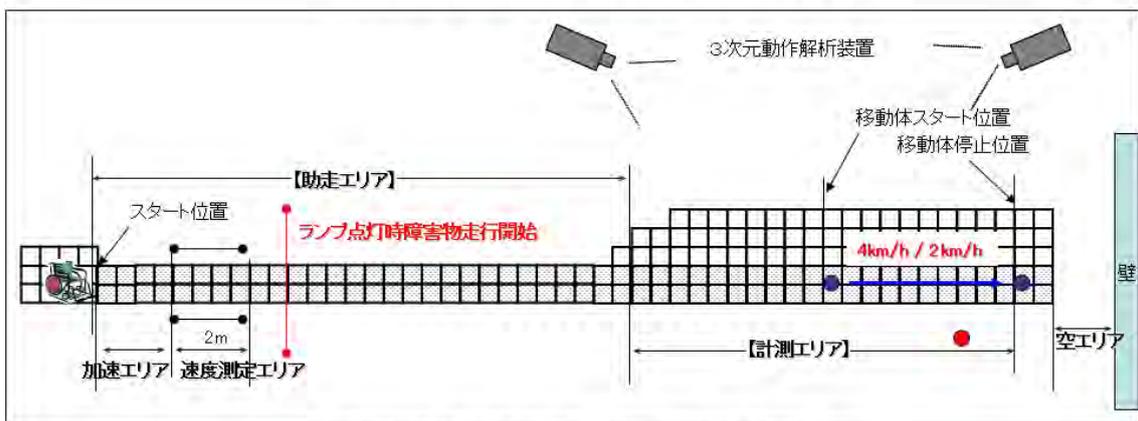
測定のための走路を設計した。走路には、ロボットが最高速度まで加速する加速エリア、走行を安定させ、最高速度を確認する定速走行エリア、障害物を検知し、速度制限がかかる減速エリアが必要である。これらのエリアに必要なスペースを設計値及び走行安定性試験で得られた特性を加味し設定した。さらにセンサの誤検知による影響をさけるため、走路左右と、障害物後方に十分なスペースを確保し実験を実施した。また、走路は段差の無い平坦路とし、減速の再現性を確保するため、少なくとも減速エリアの走路路面はセーフティウォーク床を使用する。



(a)静止物評価用の評価セット



(b)移動体評価用の評価セット（飛出し試験）



(c)移動体評価用の評価セット（後突試験）

図 3-1-5-3-3. 評価セット

静止物に対する評価として、4種類の模擬検出対象全てについて試験を実施した。模擬検出対象は、ロボット正面に配置し、ロボットを模擬検出対象に向けて最大出力を維持し直進させる。定速走行エリア内では2 m区間の通過時間から最高速度を求め、時速9 km以上である事を確認する。最高速度が時速9 km未満であれば、速度不十分として実験をやり直す。模擬検出対象の1 m手前にはロボットの通過検知センサが配置されており、ロボットが通過すると走路右前方に配置されたランプが点灯する。このランプ点灯を確認した後、ロボットが模擬検出対象と衝突する前に搭乗者（評価者）は、ロボットを停止させる。

移動体に対する評価として、φ600 mmで表面反射率の低い模擬検出対象（T17-OB-001）に対し試験を実施した。歩行者がロボットの進路上に飛び出す場面（飛出し試験）と、先行する歩行者に対し、ロボットが後方から衝突する場面（後突試験）を想定し、2種類の衝突状態を再現し、回避余裕を満たす条件を明らかにする。1つ目の衝突状態は、走路脇から走路に直行する方向で模擬検出対象を走路に移動（飛出し）させ、ロボット正面位置で停止させる。この移動する模擬検出対象に対し、回避余裕を確保できる飛出しの条件を数値化し、飛出しに対する安全機能の性能とする。2つ目の衝突状態は、走路前方にロボットの進路と同方向に模擬検出対象を移動させ、指定距離移動したら停止させる。この模擬検出対象に対し、後方からロボットを最大速度で接近させ、回避余裕を確保できる事を確認する。尚、模擬検出対象の移動速度は、歩行者の平均的な移動速度として時速4 kmにて移動する事とした。

以上の試験にてロボットと模擬検出対象の位置を正確には把握するため、図3-1-5-3-4に示すようにロボット及び模擬検出対象にマーカを配置し、3次元動作解析装置にて位置測定をおこなった。



図3-1-5-3-4. マーカの配置

またロボットの内部情報については、データロガーをロボットに設置し収集した。試験の様子を図3-1-5-3-5に示す。尚、本試験に関しては、独立行政法人産業技術総合研究所殿にご協力いただき実施した。

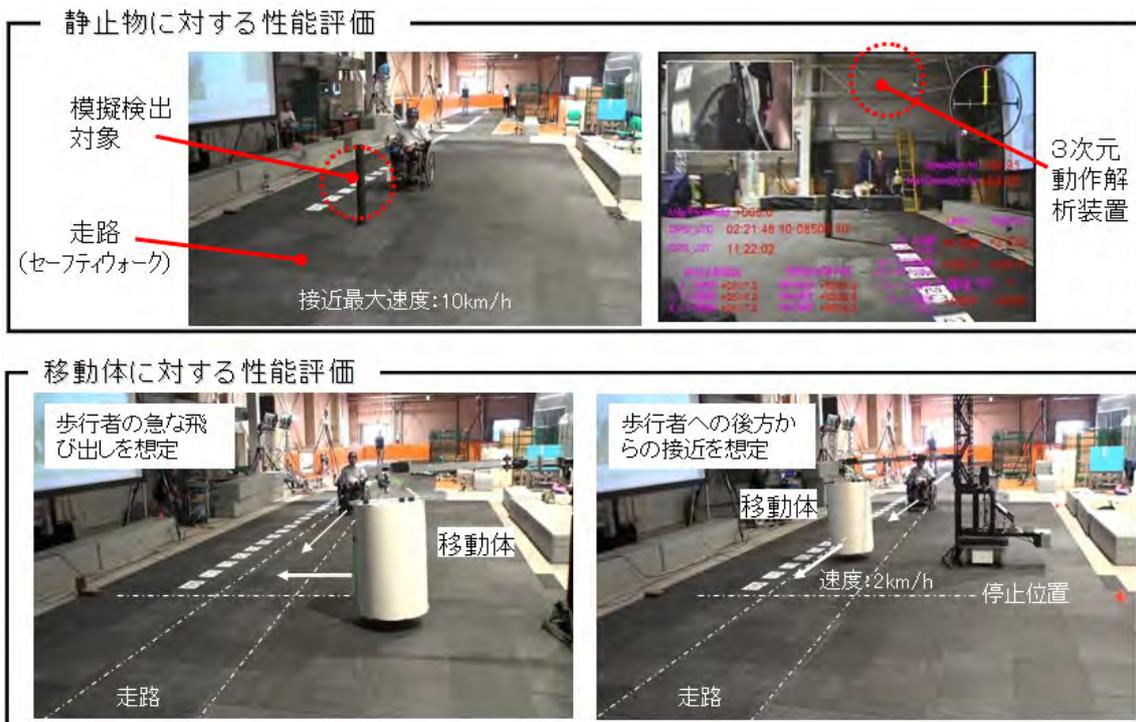


図3-1-5-3-5. 試験の様子

静止物に対する安全機能の性能評価結果を表3-1-5-3-1、図3-1-5-3-6に示す。設定した4つの模擬検出対象に対し、ロボットは検出に成功し、全ての模擬検出対象の1m手間で速度が時速1km以下となる事を確認した。実際に、この状態であれば、搭乗者は障害物との衝突回避操作を十分な余裕を持って実行可能であると考ええる。

表3-1-5-3-1. 安全機能の性能評価結果（静止物）

試験条件		結果[速度(km/h)]		判定
模擬検出対象:型番・名称	試験番号	最高速度	1m地点	
T17-OB-003 φ100円柱-ク口	1	10.0	0.6	○
	2	10.0	0.6	○
	3	10.0	0.6	○
	4	10.0	1.0	○
	5	10.0	0.9	○
	6	10.0	1.0	○
	7	9.8	1.0	○
	8	10.0	1.0	○
T17-OB-004 φ100円柱-シ口	9	10.0	0.5	○
	10	10.0	0.6	○
	11	10.0	0.6	○
T17-OB-001 φ600円柱-ク口	12	9.9	0.6	○
	13	9.9	0.6	○
	14	9.9	0.6	○
T17-OB-002 φ600円柱-シ口	15	10.0	0.6	○
	16	9.9	0.6	○
	17	10.0	0.6	○
	18	10.0	0.9	○
	19	10.0	1.0	○
	20	10.0	1.0	○
	21	10.0	1.0	○
	22	10.0	1.0	○

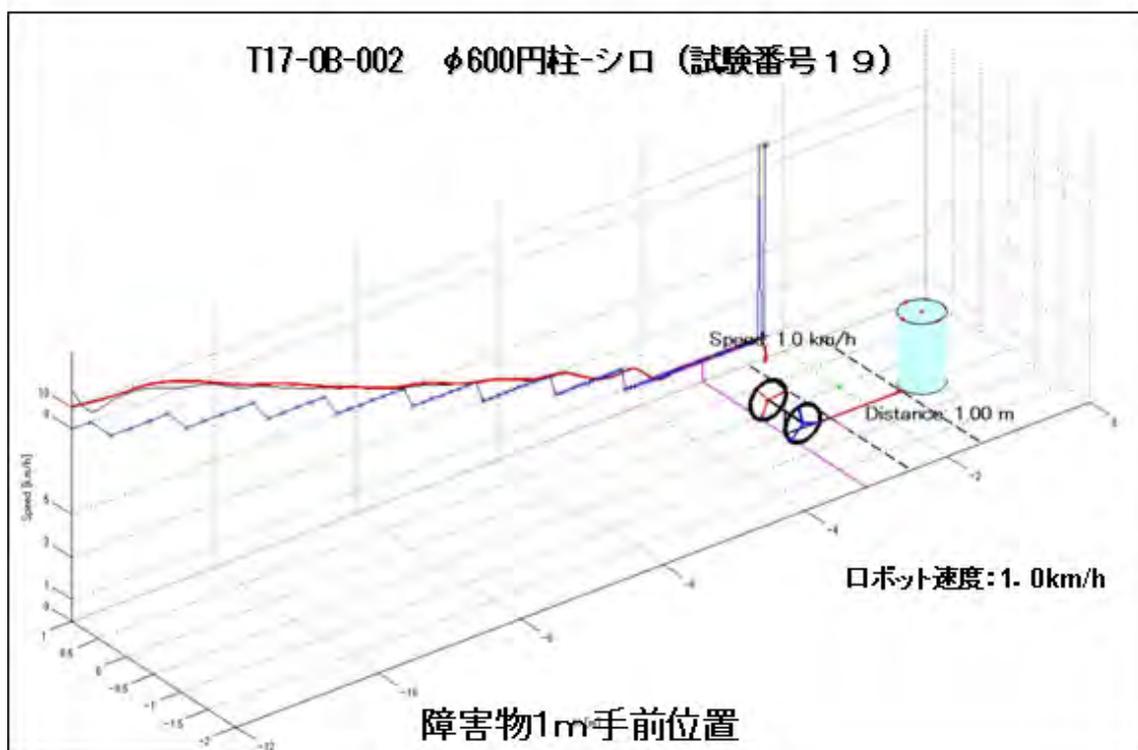
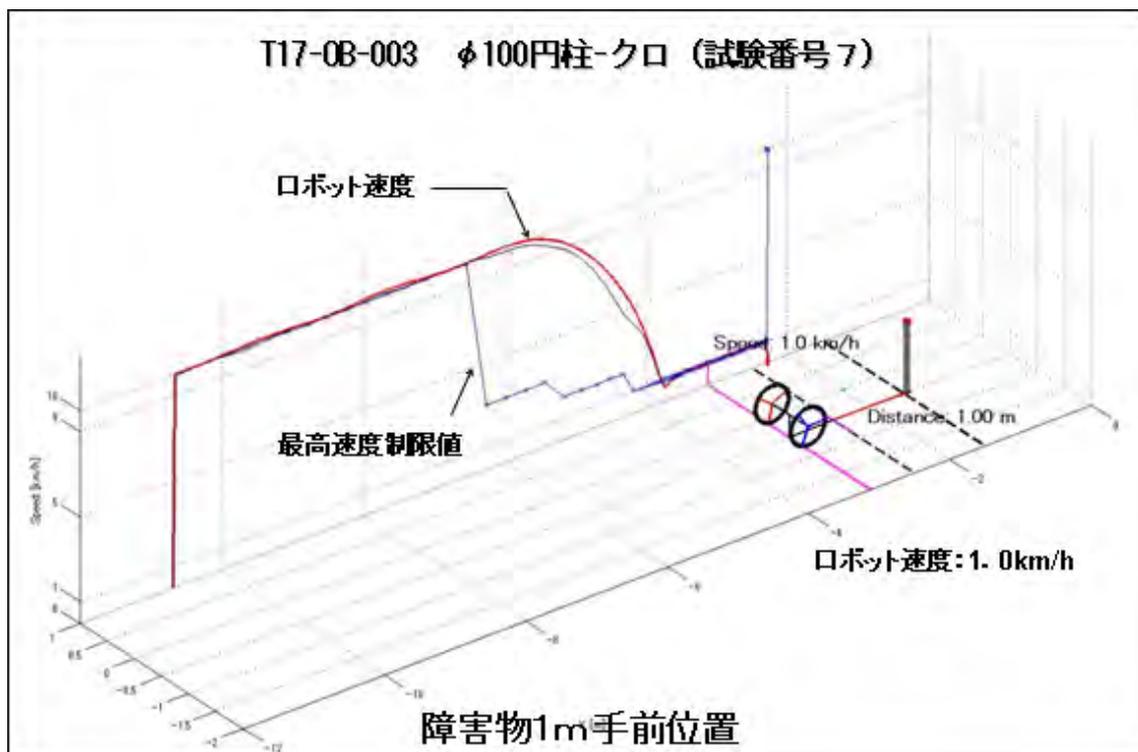


図3-1-5-3-6. 静止物に対する安全機能の性能評価結果 (代表)

移動体に対する安全機能の性能評価において、模擬検出対象の走路への飛出し試験（飛出し試験）の結果を図3-1-5-3-7に示す。また、9回のすべての飛出し試験における検知距離と障害物1m手前におけるロボット速度をまとめたものを図3-1-5-3-8に示す。ロボット進路前方約4.2mの前方の飛び出しに対し、ロボットは模擬検出対象を検知し、模擬検出対象の1m手前で速度を時速1km以下に制御できる事を確認した。

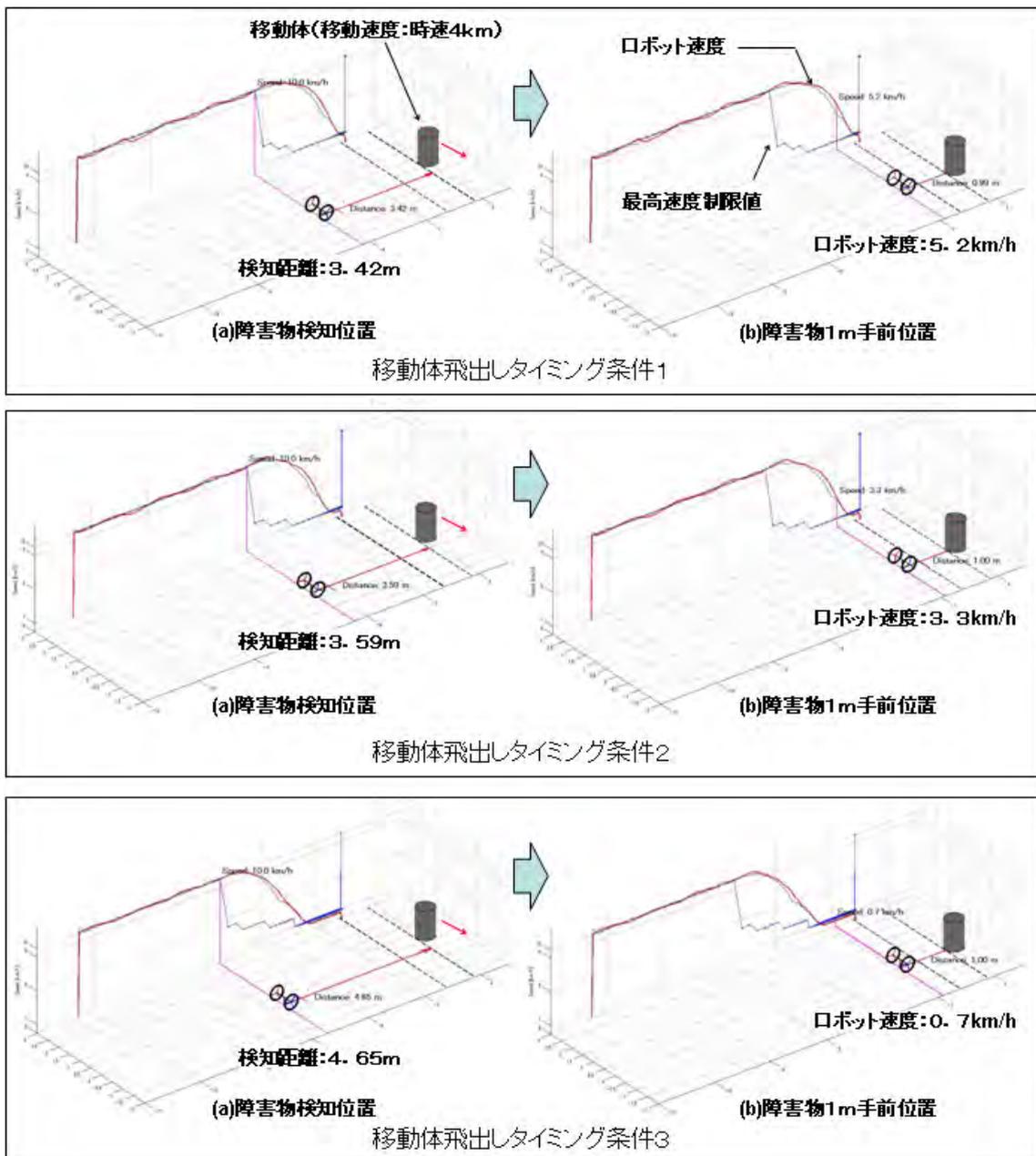


図3-1-5-3-7. 移動体の飛出し試験結果

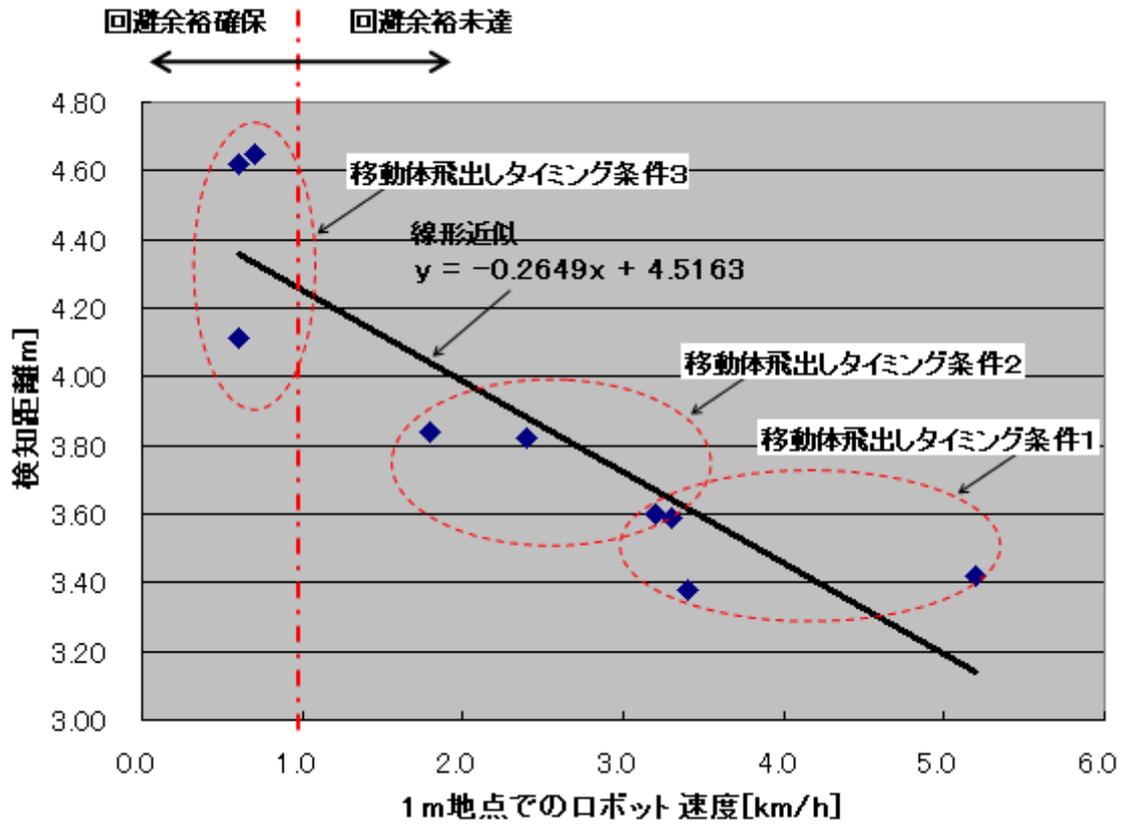


図 3-1-5-3-8. 移動体の飛出し試験結果

模擬検出対象に対し後方よりロボットを接近させた試験（後突試験）では、模擬検出対象がロボット前方で停止した際、模擬検出対象の1 m手前で速度を時速1 km以下に制御できる事を確認した。試験の結果を図3-1-5-3-9に示す。

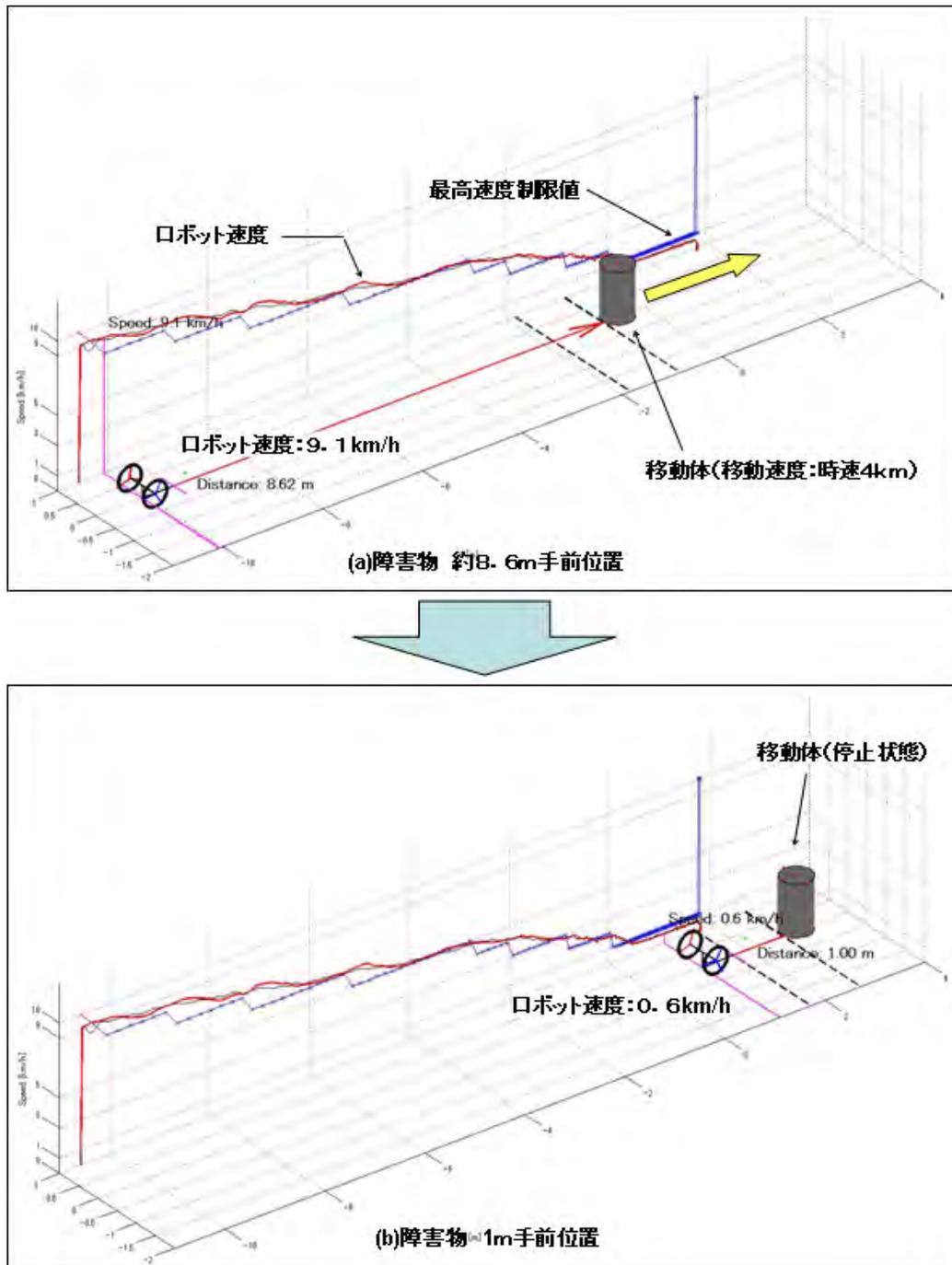


図3-1-5-3-9. 移動体の後突試験結果

3-1-5-4. 環境認識性能試験

本ロボットは、歩行者空間を利用範囲としており、施設内（屋内）と歩道（屋外）でのシームレスな移動支援を実現する。屋内環境と屋外環境の違いの一つに、照度の違いがあげられる。特に、日中において屋外では太陽光の影響を強く受ける。屋内の照度レベルとして、照明基準 J I S Z 9 1 1 0 を見ると、利用場所・作業内容にもよるが、高くても 1 5 0 0 ~ 3 0 0 0 l x 程度の照度である。一方屋外の日中における照度は、天候にもよるが、晴天下では 1 0 0 0 0 0 l x 程度の照度となる。5 0 倍程度の違いがあり、光学的な手段により環境をセンシングするセンサへの影響を評価する必要がある。また、このセンサに対する影響が安全機能のシステム全体に対し、どの程度影響があるかを把握すべく、高照度下におけるロボットの障害物検知・対応性能について試験を実施した。

生活支援ロボット安全検証センターでは、高照度の環境を人工的に作り出す事が可能な人工太陽灯を保有している。本装置を用いる事で、再現性のある高照度環境を実現できる事と、その環境下でロボットの障害物検知・対応性能を定量的に把握する事が可能である。この人工太陽灯を用い、ロボットを条件設定した高照度環境下に晒し、4種類の模擬検出対象全てに対して、3-1-5-3. 障害物検知・対応試験で示した静止物への試験と同様の評価試験を実施した。尚、本試験において、3次元動作解析装置を利用する事ができない。これは、3次元動作解析装置が光学的手段によりマーカの位置を検出するため、高照度環境下においてはその検出精度が確保できない事による。従って、ロボットの位置とロボットの速度の計測は、ロボットに搭載したデータロガーを用い、ロボットの内部情報から判断する。データロガーを用いたロボットの内部情報と、3次元動作解析装置によるロボットの位置・速度情報とは、すでに3-1-5-2. 走行安定性試験及び、3-1-5-3. 障害物検知・対応試験において対応付けができており、ロボットの内部情報からロボットの速度を判断する事は問題ないと考える。

試験の様子を図3-1-5-4-1に示す。ロボットは各模擬検出対象に向かい、最高速度にて接近させる。この時、ロボットの進行方向前方から人工太陽灯を照射し、模擬検出対象の設置位置にて最大照度となる設定を逆光条件、同じくロボットの進行方向後方から照射する設定を順光条件とした。また、最大照度は、1 0 0 0 0 0 l x にて行った。模擬検出対象の1 m手前にはロボットの通過を検知する通過センサを配置し、ロボットが模擬検出対象1 m手前の位置に入ると、ロボット前方のランプが点灯し、この点灯をロボットに搭載したデータロガーが記録する事で、ロボットの位置を特定する。

試験の条件とその結果を表3-1-5-4-1に示す。全ての条件において、ロボットは模擬検出対象を検知し、模擬検出対象の手前1 mの地点で、速度が時速1 k m以下である事を確認できた。この結果により、晴天時の屋外走行においてもロボットの安全機能は問題なく働くものと考えられる。



図 3-1-5-4-1. 試験の様子

表 3-1-5-4-1. 試験条件と試験の結果

照射方向	試験条件		結果[速度(km/h)]		判定
	模擬検出対象:型番・名称	試験番号	最高速度	1m地点	
逆光	T17-OB-003 φ100円柱-ク口	1	10.1	0.6	○
		2	10.1	0.6	○
		3	10.1	0.6	○
	T17-OB-004 φ100円柱-シ口	4	10.1	0.6	○
		5	10.1	0.6	○
		6	10.1	0.5	○
	T17-OB-001 φ600円柱-ク口	7	10.0	0.6	○
		8	10.1	0.6	○
		9	10.1	0.6	○
	T17-OB-002 φ600円柱-シ口	10	10.1	0.6	○
		11	10.0	0.6	○
		12	10.1	0.6	○
順光	T17-OB-003 φ100円柱-ク口	13	10.0	0.6	○
		14	10.0	0.6	○
		15	10.0	0.6	○
	T17-OB-004 φ100円柱-シ口	16	9.2	0.6	○
		17	9.2	0.6	○
		18	9.3	0.6	○
	T17-OB-001 φ600円柱-ク口	19	9.8	0.6	○
		20	9.9	0.6	○
		21	10.0	0.6	○
	T17-OB-002 φ600円柱-シ口	22	9.2	0.6	○
		23	9.2	0.6	○
		24	9.0	0.4	○

以上の3つの試験を通し、開発したロボットは、設定した要求仕様を満たすものと考え、実際に設定した要求仕様が、実場面において妥当であるかを確認すべく、実環境での利用評価に進む事とした。

3-2. 安全要素モジュール：3次元レーザ測域センサ（日本信号）

3-2-1. 概説

公道を含む屋外の歩行者空間での使用を想定した搭乗型移動ロボットのリスクアセスメントを実施し、環境センシングの要件を導き出した。その結果、ロボット周辺の段差・溝・支柱などの固定支障物、並びに人・自転車など移動支障物との距離・相対速度・方向などに対応した「リスク低減速度」を計算して、ロボットの移動速度を制限する機能が必要なことが分かった。この機能を実現するために、刻々と変化する周辺環境の状況をセンシングする安全要素部品群の1つとして、3次元レーザ測域センサ（以下、3Dセンサ）を開発した。

本項では、ユーザレベルのリスクアセスメントの結果から3Dセンサの開発仕様を設定し、それらの実現手段を検討して、試作機の製作・評価・改良を重ねて安全機能を向上した結果について述べる。

3-2-2. ロボットシステムのセンサ要求仕様

ロボットシステムが環境センサに要求する仕様を決定するにあたって想定する利用シーンを抽出し、①検知対象物と②環境条件を定義した。これらの条件を踏まえて、センサの検知性能、通信インターフェース等を含む機能仕様や、ロボットへの搭載性を考慮した機器仕様を設定して開発仕様を決定した。

3-2-2-1. 検知対象物

表3-2-2-1に、想定する検知対象物を示す。歩道やショッピングモール、公園などにおける支障物を固定物と移動物に分類した。各物には、その最小サイズを示した。

実際の利用シーンを見ると、これらよりも小サイズの物や、物体表面の状態（光沢の有無、微細な形状、反射率など）により検知の難易が異なる多様な支障物が存在するが、本開発では、検知対象物を定義してセンサの検知性能を評価・検討した。

表 3-2-2-1. 検知対象物

区分	検知対象物 (最小サイズ)
固定物	電柱 (φ 200 mm)、ポール (φ 100 mm)、 扉 (500 mm□)、衝立・看板 (500 mm□)、 段差 (100 mm)、溝 (100 mm)、 路面、など
移動物	歩行者 (900 mm)、自転車 (1000 mm)、 車椅子 (900 mm)、ショッピングカート (800 mm)、 台車 (800 mm)、など

3-2-2-2. 環境条件

表 3-2-2-2 に、想定する環境条件を示す。屋外で人が往来する通常的气象条件で、移動ロボットに搭載したときの環境条件を想定した。

環境条件において仕様の機能・性能を満足するとともに、環境条件による外乱が対象物検知に影響を与えて誤検知するか否かも評価の観点となる。

表 3-2-2-2. 環境条件

項目	仕様
温度・湿度	-10~+50℃ / 20~85%RH
振動／衝撃	10~500Hz×1G、40Hz×2G ／ 30G×6ms
外乱光	太陽光 10万 lx ストロボ光 5~200Hz
降雨	1mm/h 未満 (小雨)
保護等級	IP55 相当 (防塵・防滴)
ロボット移動速度	最高 10km/h
その他	同類のセンサ間干渉

3-2-2-3. 開発仕様

想定する利用シーンでの検知対象物、環境条件、移動ロボットの制動距離、速度制御の処理時間等を考慮して、表 3-2-2-3 のように開発仕様を設定した。本開発は、既開発の 3D センサをベース (以下、ベース機と記す) に開発仕様の達成を目指した。検知距離の拡大や角度分解能の実効的向上、及び測距データ出力のリアルタイム性と同期性を考慮して外部インターフェースの最適化を図った。

表 3-2-2-3. 開発仕様

区分	項目	仕様
機能	検知距離	0.3～7m @拡散反射率12% (最大20m @拡散反射率90%)
	距離精度	±100mm @距離5m・拡散反射率12%
	画角	H60 deg×V50 deg
	画素数	H53×V33
	角度分解能	H20×V27 mrad
	フレームレート	16 fps
	耐外乱光	太陽光10万lx以上
機器	外形寸法	62×66×89 mm
	質量	0.6kg以下
	動作温度	-10～+50℃
	耐振動/耐衝撃	10～500Hz×1G / 30G
	保護等級	IP55
	外部インターフェース	Ethernet・UDP/IP 上位との時刻同期機能

3-2-3. 3Dセンサ方式の特性比較と方式選択

開発仕様を達成するための方式選択を検討した。ここでは、3次元距離センサのキー技術である距離計測方式と面走査方式について、それぞれベンチマークした。

3Dセンサは奥行方向の距離計測方式と、水平・垂直方向の面走査方式によって、表3-2-3-1のように分類できる。距離計測方式において、光飛行時間計測(TOF=Time of Flight)は検知対象物に投射した光の飛行時間に基づいた計測のため、長距離においても高精度が得易い。他方、視差計測は投受光器や複眼カメラの視差に基づいた計測のため、短距離の精度は得易いが長距離は難しい。面走査方式において、機械的方式は可動部を要するため長期の耐久性が課題となるが、単結晶シリコン材を使ったMEMS光スキャンミラーは、潜在的にそれらの課題を解決できる方式である。他方、電子的方式は機械的な可動部がないため小型・堅牢である。

表 3-2-3-1. 3Dセンサの方式分類

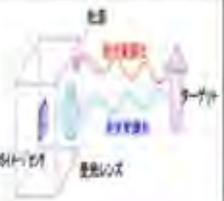
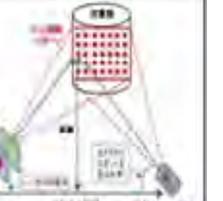
距離計測 方式	光飛行時間計測 (TOF)	光パルス法
		位相差法
	視差計測	ステレオ法
		三角法
面走査 方式	機械的	1軸ポリゴンミラーと モータ遥動の組合せ
		2軸MEMS光スキャンミラー
	電子的	CMOS/CCDビジョンチップ

これらの方式を組合せて、3Dセンサとして各機関で開発され、市場投入されている。このうち移動ロボットの周辺環境センサに適用可能な主な事例をあげ、その特性比較をした結果を表3-2-3-2にまとめた。

距離計測方式は、5m以上の遠距離を計測するにはTOF方式が優れているため、多くの3Dセンサは同方式を採用している。面走査方式との組合せでは距離計測の原理に関連して、最適な方式が採用される。光パルス法はモータ駆動のポリゴンミラーやMEMS光スキャンミラーによる機械的方式を、位相差法はCMOS/CCDビジョンチップによる電子的方式をそれぞれ採用している。前者の組合せでは、画素毎に放射する光パルスを空間的・時間的に分離する必要性があり、後者の組合せでは、画素毎に距離計測する光電機構の集積化とCMOS製造プロセスによるビジョンチップとの親和性が高いことをそれぞれ理由に選択されている。

対象物の検知性能・環境条件、特に屋外での耐外乱光性を重視して、我々は、同軸光学系を使った2軸MEMS光スキャンミラーによる面走査と、光パルスTOF方式によって3Dセンサを構成した。ここで同軸光学系とは、図3-2-3-1のように、1枚の光スキャンミラーで投光/受光の両ビームを同軸で走査する光学系のことである。投光ビームを照射して対象物の反射光を狭角で受光するため、外乱光に対して高いロバスト性のセンサが構成できる。他方、分離光学系は、受光が常に広角のため外乱光の影響を受けやすい。

表 3-2-3-2. 3Dセンサの特性比較

距離計測方式	光パルス法	←	光位相差法	三角法(パターン照射)
面走査方式	2軸MEMS光スキャンミラー	1軸ポリゴンミラー + 機械的運動	CCD/CMOSビジョンチップ	←
原理図	 2軸MEMS光スキャンミラー	 1軸走査センサ	 CMOSイメージセンサ	 パターン照射
	・レーザー+2軸MEMS共振スキャナによる投受同軸光学系で面走査	・レーザー+ポリゴンミラー(1軸走査)による投受同軸光学系に、機械的運動を組合せて面走査	・LED+カメラ(CMOSイメージセンサ)による電子的面走査	・ドット照射パターンの投受同軸光学系を結核処理により測距 ・CMOSカメラで電子的面走査
サイズ	独自の投受同軸光学系のコンパクト設計で小型化 ○	1次元スキャンは小型だが機械的運動部が× ×	受光(カメラ)は小型だが投光(LED複数個)が× △	受光(カメラ)は小型だが一定長以上の基線が× △
消費電力	画素毎のレーザー照射と低消費電力のMEMSスキャナ ○	レーザー照射は画素毎だがミラー駆動部のモータが× ×	複数搭載したLEDの一括照射が× ×	レーザーとCMOSカメラは低消費電力 ○
距離精度	支障物検知には十分(±10cm @12%黒、5m) ○	← ○	光パルスTOF(左記2方式)に比べ原理的に劣る ○	TOF(左記3方式)に比べ長距離の精度が劣る △ ×
面解像度	カメラに比べ画素少ないが支障物検知には十分 ○	← ○	受光部はカメラのため画素多い ◎	← ◎
ロバスト性(耐太陽光)	独自の狭開口の投受同軸で優れる(直射20万lx) ○	投受同軸で優れるが開口大きく左記より劣る △	波長選択・投光配光の工夫も受光開口広く外乱は× ×	← ×
耐久性	長寿命のMEMS共振スキャナで10年(連続運転)を達成 ○	モータが寿命は~5年間欠作動等の工夫;要 ×	可動部なし・部品点数;少で長寿命 ○	← ○

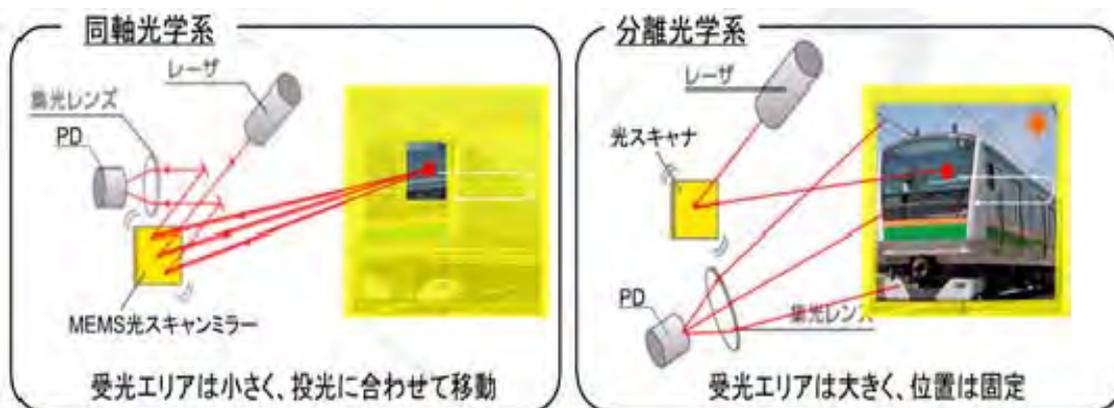


図 3-2-3-1. 同軸光学系と分離光学系

3-2-4. 安全機能の向上

3-2-4-1. FTA/FMEAによる故障解析

開発仕様を達成すべく既開発のベース機の改良設計品を前提として、ロボットシステムにおける部品レベルのリスクアセスメントを実施し、安全機能の向上と開発課題の抽出を行った。そのために、FTA (Fault Tree Analysis)、ならびにFMEA (Failure Mode and Effects Analysis) による故障解析を実施した結果を、図3-2-4-1～3-2-4-5、並びに、表3-2-4-1～3-2-4-8にそれぞれ示す。

FTAでは、3Dセンサの基本機能である(1)MEMS光スキャナによるレーザ走査機能、(2)測距機能、および(3)レーザ放射機能において異常が発生する原因解析を実施した。解析ツリーの各枝の最終端ブロックに処置方法を記載しているが、3-2-4-2. 項で述べるセルフチェック機能によって不良への対応を行っている。すなわち、それらの不良事象を検出して3Dセンサの異常状態を上位に知らせるとともに測距データの出力を停止して、信頼性の低いデータを出力しないようにしている。また、本3Dセンサは「クラス1レーザ製品」^[*1]であるが、これを保証するために、(3)レーザ放射機能についてFTA解析を実施した。その結果、3D距離画像を取得するフレーム周期ごとに、4つのチェック項目からなる自己診断サイクルによって安全を確認してからレーザ放射することにした。

[*1] 「クラス1レーザ製品」：合理的に予見可能な運転条件において安全なレーザで、人が被曝しても障害はない。

FMEAでは、3Dセンサの構成要素(1)投光部、(2)走査部、(3)受光部、(4)測距部、(5)データ処理部、(6)通信部、(7)制御部、(8)電源部、および(9)筐体部の各部の部品に故障が発生したときに、センサ機能への影響解析を実施した。その結果、重要度^[*2]の高い項目を抽出し、重要度を下げる処置を実施して設計・製作に反映した。

[*2] 重要度：各故障事象について【発生度合】、【影響度合】、および【検出度合】の観点から評点をつけ、3者の乗算により算出して影響評価する。基準点以上の事象は何らかの処置をして重要度を下げる。

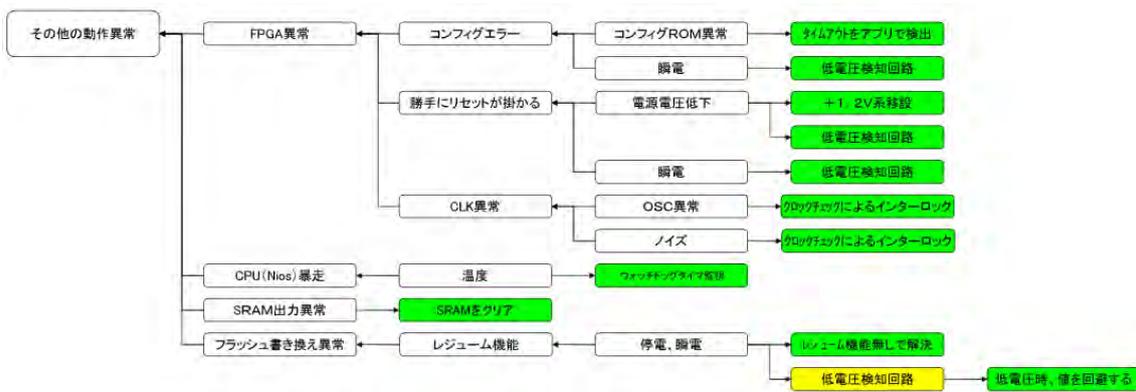


図 3-2-4-3. FTAによる故障解析 (3/5)

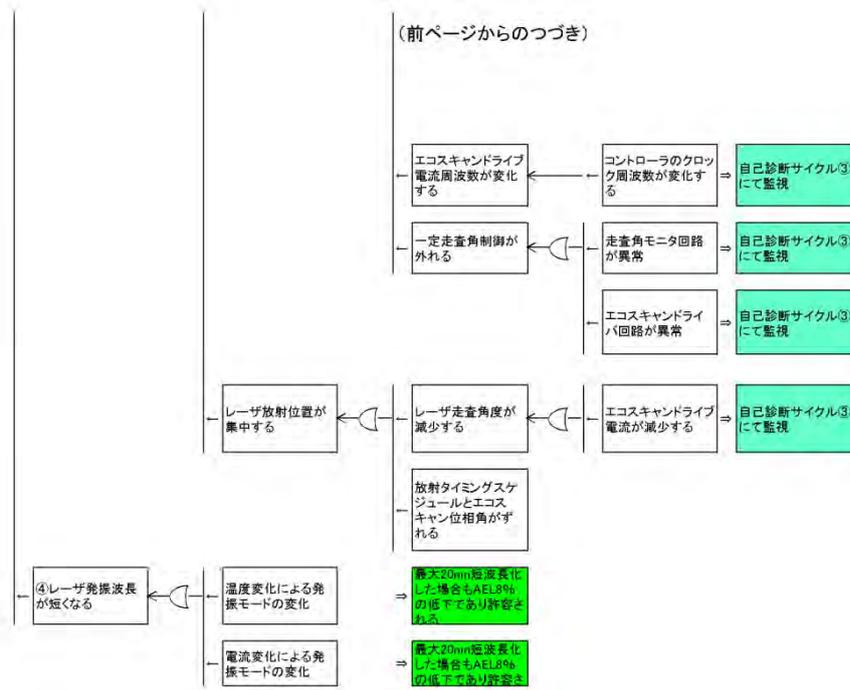


図 3-2-4-5. FTAによる故障解析 (5/5)

表3-2-4-1. FMEAによる故障解析 (1/8)

部品名		機能/仕様	不良モード	不良の影響	不良の原因/メカニズム	現状または原案 現状の管理方法 (設計の考え方)	現案		置換の結果	
メイン	サブ1						サブ2	発生頻度		検出頻度
30レーザ新 機センサ	光学系	レーザ素子	発火せず	測定不能	機殻故障 ・温度低下 ・初期不良	発火しないように設計 ・温度低下防止対策 ・初期不良防止対策	1	4		
			パワー変化	測定精度低下	温度変化	発火防止回路 ・温度変化防止回路	1	1		
			10年以上測定できなくなる	測定不能	材料故障		1	4		
			正しい測定値が得られない	測定精度悪化	タイミングエラー/ノイズ		1	4		
			測定値が変動する	測定精度悪化	タイミングエラー/ノイズ		1	5		
			測定値がゼロになる	測定精度悪化	初期不良		1	5		
			測定値が最大値になる	測定精度悪化	初期不良		1	5		
			測定値が最小値になる	測定精度悪化	初期不良		1	5		
			測定値が最大値と最小値の間で変動する	測定精度悪化	初期不良		1	5		
			測定値が最大値と最小値の間で変動する	測定精度悪化	初期不良		1	5		
			測定値が最大値と最小値の間で変動する	測定精度悪化	初期不良		1	5		
			測定値が最大値と最小値の間で変動する	測定精度悪化	初期不良		1	5		

表 3-2-4-2. FMEAによる故障解析 (2/8)

メイン 3Dレーザ測 域センサ	部品名		機能/仕様	不良モード	不良の影響	不良の原因 /メカニズム	現状または原案				処置の結果			
	サブ1 投光系	サブ2 発光モニタ					現状の管理方法 (設計の考え方)	発生頻度	検出 頻度	重要 度	推奨処置 ※重要度が2以上の 項目を赤字表示(加重 の検案が効果的となっ たら赤字に染る)	実施処置	発生頻度	検出 頻度
		○基本機能 スタートパルスを生感する	スタートパルスが生感されない	測距不能	発光モニタ故障 レーザ故障	フレイムごとの発光回数をか ウントする	1	4	1	4				
		○故障、異常検出 レーザの故障を検出可能か 発光確認	レーザの故障を判断できない	測距動作停止	PD発光軸ズレ	OOTでの検出と出荷検査	1	4	1	4				
		○基本機能 1mm x 50mmのSMOS投光部 に集光する	光軸ずれ	測距性能低下	振動、衝撃	指定条件での振動・衝撃試験 に耐える構造設計と、試験要 求検証	1	4	3	12	【要処置】 光学系機構の耐振動・ 衝撃設計			
		規定の投光ビーム拡がり角	広くなる	測距性能低下 角度分解能低下			1	2	1	2				
			狭くなる			理論的に狭くなることはない (回折限界)	1	2	1	2				
		○測距精度 センサ周囲温度-10℃~ +70℃の範囲で投光パワー 8Wを下回らないこと	パワー低下(約8Wを下回る)	測距性能低下	温度変化による光軸ずれ		1	4	1	4				
		所定の透過率(70%以上)を 満たすこと	透過率低下	測距性能低下			1	4	1	4				
		所定の射出角度	射出角度がずれる	設置に影響	・光学系の取り付け精度 ・エッジキャンチップの取り付 け精度		1	4	1	4				
		○寿命、耐久性 耐久性は十分か	ミラー、レンズ汚れ、反射率、 透過率の劣化	測距性能低下	耐久性不足	所定耐久性のある部材を使 用して設計保証する 加速試験を実施	1	4	3	12	【要処置】 所要耐久性のある部材 を使用して設計保証で きるアーク極える			

表3-2-4-3. FMEAによる故障解析 (3/8)

部品名		機能/仕様	不良モード	不良の影響	不良の原因 /メカニズム	現状または原案 現状の管理方法 (設計の考え方)	現置の結果							
サブ1	サブ2						検出 可能性 %	発生 可能性 %	発生 頻度 %					
メイン 3Dレーザ測 定センサ	サブ1 走査系	MEMS 光スキャナ	走査角不足	走査範囲が狭わり、判定アルゴリズムに影響する。 「クラス」を減らさなくなる。			3	4	12					
			検出信号が特定の値より小さくなる	走査範囲が狭わり、判定アルゴリズムに影響する。			3	4	12					
			温度特性	温度特性										
			センサ周囲温度-10℃～+50℃の範囲で特性係数が所定の値で出力される	センサ周囲温度-10℃～+50℃の範囲で検出信号が所定の値で出力される										
			温度特性	温度特性										
			センサ周囲温度-10℃～+50℃の範囲で検出信号が所定の値で出力される	センサ周囲温度-10℃～+50℃の範囲で検出信号が所定の値で出力される										
	サブ2	MEMS 光スキャナ	測定値らばらつきが大きくなる	測定値らばらつきが大きくなる										
			所定の長さ、角安定性	所定の長さ、角安定性										
			角安定性	角安定性										
			角安定性	角安定性										
			角安定性	角安定性										
			角安定性	角安定性										
サブ1	MEMS 光スキャナ	検出信号が特定の値より大きくなる	検出信号が特定の値より大きくなる											
		検出信号が特定の値より大きくなる	検出信号が特定の値より大きくなる											
		検出信号が特定の値より大きくなる	検出信号が特定の値より大きくなる											
		検出信号が特定の値より大きくなる	検出信号が特定の値より大きくなる											
		検出信号が特定の値より大きくなる	検出信号が特定の値より大きくなる											
		検出信号が特定の値より大きくなる	検出信号が特定の値より大きくなる											

表3-2-4-5. FMEAによる故障解析 (5/8)

部品名		機能/仕様	不良モード	不良の影響	不良の原因 (メカニズム)	現状または原案				処置の結果					
メイン	サブ1					サブ2	現象の管理方法 (設計の考え方)	発生度	影響度	検出度	重要度	発生度	影響度	検出度	重要度
3Dレーザ測 域センサ	測距部	光量検知回路 光量を検知する	光量値の増大		外乱によるプリアンプの飽和	異常として出力する 後段処理にて対応	1	4	3	12	1	4	1	4	
			光量値の低下		外乱によるAPD増倍率低下	出力データ外にて異常を表示	5	4	1	20					
		共振測距回路 共振測距回路でストップハル スを生成する	正常なストップハルスの生成 されない		光量による飽和	飽和するほどの変光レベル は立上り測距となる	1	4	3	12					
			外乱による誤検知を起こさ ない		ノイズ耐性不足 外乱光の影響	外乱ノイズ耐性強化 受光視野角、プリアンプ 低減	3	4	1	12					
		立上り測距回路 立上り測距回路でストップハ ルスを生成する	正常なストップハルスの生成 されない		立上り測距回路異常	判定ロジック見直し	1	4	3	12					
			測距精度 スケーリング時間差を算出する		測定レンジ外 TDCモード設定異常 ゲート遅延はらつき	TDC仕様に乗った使い方	1	4	3	12					
		A/D		測距精度 ストップハルスの生成 検出	測距不能値である情報が伝 達されない		測距のレンジは1.8usまでで、 それ以上は不能として出力さ れる	1	4	1	4				
					異常測距を検出		回路不良	正確な距離が出力されなけ れば判断可能	1	4	1	4			
					TDCの故障を判断する		判断するための機能が無い	TDC単独の故障を判断でき る機能を実装する	1	4	1	4			
					温度特性 周囲温度+10℃~+70℃の範 囲にて正しい距離が出力され る		温度公差設計不適切	予備試験にて確認済み	1	4	1	4			

表3-2-4-6. FMEAによる故障解析(6/8)

メイン	部品名		機能/仕様	不良モード	不良の影響	不良の原因/メカニズム	現状または原案			処置の結果							
	サブ1	サブ2					現状の管理方法(設計の考え方)	重要性	検出可能性	発生度	実施処置	発生度	検出可能性	発生度			
3Dレーザ測 域センサ	距離補正、 処理部	測距方式選択	○測距精度 光量により距離測距、立上り 測距方式を選択する	正しい測距方式を選択しない	誤測距(距離異常)	光量検知回路異常 光量検知回路出力のばらつき		1	4	3	12	推奨処置 ※重要度が7以上の項目を赤字表示(処置の効果が7未満となったら赤字に渡る)					
		補正計算	○測距精度 光量測距、立上り測距から得られた時間差より、距離を計算する	測距値の精度悪化	誤測距(距離異常)	測距方式切り替えによる誤差	共振/立上り切替しきい値の 適正化後討	1	2	3	5	【要処置】 等光量/パルス見直し FMEA補1	光量値が一定に なるよう調整	1	3	3	
		処理部	○基本機能 CRC計算を行う	CRC計算値の誤り	測距値異常	回路不良	受信側でCRCチェックを行い データの正当性判定	1	4	1	4	【要処置】 補正式の見直しを検討					
			○基本機能 データ転送する	データが出力されない	センサ停止	回路不良	受信側でタイマーチェック	1	4	1	4						
			○データ信頼性 異常データ出力しないか	正しいタイミングで出力されない	異常距離面検出	回路不良	面フラグで切り替わりを確認	1	4	1	4	(DMA転送タイミング 直し) FMEA補2	DMA転送タイミ ングを見直し、 ファームウェアに 変更	2	2	1	4
		○寿命(信頼性) 寿命は10年以上か(FPGA)	10年に満たずに故障	センサ異常動作、またはセン サ停止	センサ異常状態を通知しない (インターロック動作時に SRAM内のデータが書き換わ らずに同じデータ出力し続 ける)	面切替タイミングで送信	5	2	1	10	インター ロック動作時は 測距データを出力しな い(インターロック解除セ ルブチェック機能としてファーム ウェアに実装)	センサ異常動作、またはセン サ停止	1	4	1	4	
			動作せず	センサ停止	偶発故障		1	4	1	4							

表3-2-4-7. FMEAによる故障解析(7/8)

メイン 3Dレーザ測 域センサ	部品名		機能/仕様	不良モード	不良の影響	不良の原因 /メカニズム	現状または原案				処置の結果							
	サブ1 通信部	サブ2 Ether通信					現 状 の 管 理 方 法 (設 計 の 考 え 方)	重 要 度	検 出 可 能 性	発 生 確 率	検 出 可 能 性	重 要 度	実 施 処 置	検 出 可 能 性	重 要 度			
			通信エラー	測定異常によるデータ切断	ハード的なノイズに対する設計不適切	通信ラインのノイズ耐性強化	5	2	1	10	3	2	1	6	ケーブルにノイズ対応策(フェライト実装)			
				センサ停止	ソフト的なノイズに対する設計不適切	CRCチェックによりエラーデータは排除	1	2	1	2								
				センサ動作不安定	ハード的なノイズに対する設計不適切	通信ラインのノイズ耐性強化	5	4	1	20								
				センサ動作不安定	ソフト的なノイズに対する設計不適切	WDTにて対応	5	4	1	20								
				他機器へ悪影響を与える	瞬停により発生	瞬停リカバリシーケンス	5	4	1	20								
				他機器へ悪影響を与える	放射ノイズ設計不適切	使用環境考慮してクラス選定(ークラスA?) エミッション低減設計	5	4	1	20								
				測定データ出力する	測定異常によるデータ切断	CRCチェック 通信部のノイズ耐性強化	1	4	1	4								
				正常な電圧が生成されない	レーザ光量が大きくなる	温度特性、公差を考慮した設計	1	5	5	25								
				正常な電圧が生成されない	センサ異常動作、またはセンサ停止	電源回路部品のテラレティンク設計	1	4	1	4								
				監視回路の故障	電圧が低下しても異常を感知しない	監視回路の設計 故障率は低い	1	4	1	4								
				所定範囲外の電圧になる	測定性能低下 センサ動作不安定	IC等のジャンクコンデンサ125℃の使用を考慮した放熱設計	5	4	4	80								
				10年に満たずに故障	センサ停止	コンデンサを長寿命品に変更	1	4	1	4								
				誤動作	ノイズ耐性不足	コンデンサ選択不良によるリップル電流大	5	4	5	100								
				外部へノイズを放射する	他機器へ悪影響を与える	放射ノイズ設計不適切	5	4	5	100								

表3-2-4-8. FMEAによる故障解析(8/8)

部品名		機能/仕様	不良モード	不良の影響	不食の原因 /メカニズム	現状または原案 現状の管理方法 (設計の考え方)	優先度 発生頻度 検出率 影響度	優先度 発生頻度 検出率 影響度	処置の結果 実施処置		
メイン	サブ1									サブ2	
3Dレーザ測 域センサ	筐体	<ul style="list-style-type: none"> ○防水からの水進入を防ぐ (IP67) ○結露防止 ○ガス、取付、導通、取り付け難直を低減 ○ガス、取付、導通、基本強度を確保 ○騒音、振動、ノイズ、各種ユニットを低減する ○耐熱、耐寒、ノイズ、低電圧動作を保持する ○寿命、耐久性能、耐久性を十分 ○安全性、耐燃性の材料を使用している、人工産物 ○安全性、強度確保 ○投光部に対する取り付け位置を適切にする ○ユーザ操作性、設置、くもりを低減 ○ユーザ操作性、開風の付着を防ぐ ○寿命、耐久性、防水コートでの耐久性能を十分 	水が進入する	センサ故障	設計不適切	機体の寿命を、維持標準のシミュレーション	1	4	4		
			温度の昇降により光学部品に結露する	結露(湿度/露点)	想定より低い湿度での動作		5	4	1	20	
			取付け時に気泡がはいる	取付不可能、またはセンサ故障	公差設計不適切		2	4	1	8	設計完了
			真直にて取付故障	センサ故障	強度設計不適切		1	4	1	4	
			水漏れ	測距性能低下	振動・衝撃		1	4	1	4	
			取付故障	測距性能低下、測距不能	振動・衝撃		1	4	1	4	
			安全光線の位置、角度がずれる	反射光による検出の発生	固定強度不足		1	4	1	4	
			安全光線が照射する	外乱光の侵入	固定強度不足		1	4	1	4	
			筐体の歪み	水、ほこり等の侵入	耐久性能低下		1	4	1	3	
			人工産物	火花	材料強度不足		1	0	1	5	
			強度確保	水、ほこり等の侵入	強度不足		1	4	1	4	
			取付時の取り付け位置を適切にする	取付不能	公差設計不適切		1	2	1	2	
			ユーザ操作性、くもりを低減	設置、くもりを低減	内外温度差による結露		2	4	1	8	
			ユーザ操作性、開風の付着を防ぐ	開風が多量付着	コーティングの性能劣化		3	3	1	18	
			寿命、耐久性、防水コートでの耐久性能を十分	耐久性能低下	樹脂不能部拡大		5	3	1	18	コーティングの方式を検討中

3-2-4-2. セルフチェック機能

センサ内の機能・動作に異常がないか監視し、異常発生時には直ちに測距を停止し、代わりにエラーコードを出力する。表3-2-4-8に、セルフチェック機能の概要を示す。各項目のチェックは、一部の制御データ内容確認^[*]を除いてすべて3D距離画像を取得するフレーム周期（フレームレート16fpsであれば、62.5ms）の頻度で実施する。

^[*]Flash ROMに格納されている一部制御データは、制御レジスタ等に転送・展開する電源起動時にチェックする。

表3-2-4-8. セルフチェック機能

チェック項目	内容
レーザー安全（インタロック）に関すること	レーザー放射制御に関わる機能が損なわれ、クラス1レーザー製品の状態を満足できない恐れがないかチェックする（クラス1レーザー製品の状態を満足している場合に、レーザー放射許可）。
MEMS光スキャナ制御に関すること	走査振幅、走査位相を所定の値に保つ制御回路・制御ロジックの異常がないかチェックする。 スキャナ駆動電圧の経年変化を監視し、制御限界に至る前に警告する機能をもつ。
測距制御に関すること	レーザーの放射タイミング、放射パワーを所定の値に保つ制御回路・制御ロジックに異常がないかチェックする。 測距値の妥当性を確認して出力する。
センサ内通信制御に関すること	測距データ転送、制御信号転送に誤りがないか、制御回路に異常がないかチェックする。
メモリ制御に関すること	測距データ、制御データ等を取扱う FlashROM、SRAM等のメモリのアクセス制御が正しく行われているかモニタする。

3-2-4-3. 上位とのインターフェース

ロボットシステム（以下、ホスト）と3Dセンサ間のデータ授受の安全性・信頼性を確保するために、両者のインターフェースの仕様を以下のように設定した。

(1) UDP/IPプロトコルの採用

ロボットシステム内のデータ通信ネットワーク環境や、3Dセンサの測距データ転送速度、並びにデータ処理のリアルタイム性を考慮して、ホストとのインターフェースは、Ethernet（100Base-TX）を物理的伝送媒体としたUDP（User Datagram Protocol）をベースに構築した。TCP（Transmission Control Protocol）と比べ、パケット損失の頻度が高いなどデータ転送の信頼性は劣るが、刻々と変わるロボット周辺環境センシングには、多くのデータを遅延なく転送する方が安全性が高まると考えた。

図3-2-4-6に、UDP/IP層の上位層のホストと3Dセンサ間の通信フォーマットを示す。



図3-2-4-6. 通信フォーマット

また、表3-2-4-9に、通信コマンド/レスポンスのデータ種別一覧を示す。コマンドはホストから3Dセンサへの送信、レスポンスは3Dセンサからホストへの送信にそれぞれ使う。

表 3-2-4-9. 通信コマンド/レスポンスのデータ種別

	名称	データ種別		機能
		コマンド	レスポンス	
1	開始	0x0101	0x0111	FX8 の測距動作を開始 ¹ <small>1: 成功</small>
2	停止	0x0102	0x0112	FX8 の測距動作を停止 ¹ <small>1: 成功</small>
3	インジケータ設定	0x0104	0x0114	インジケータ点灯制御を設定 ¹ <small>1: 成功</small>
4	測距モード切り替え	0x0105	0x0115	測距モードを切り替え ¹ <small>1: 成功</small>
5	センサ情報要求	0x0121	0x0131	FX8 の設定情報を要求、取得 ¹ <small>1: 成功</small>
6	XY データ要求	0x0122	0x0132	XY データを要求、取得 ¹ <small>1: 成功</small>
7	測距モード指定センサ情報要求	0x0123	0x0133	測距モードを指定して FX8 の設定情報を要求、取得 ¹ <small>1: 成功</small>
8	測距モード指定 XY データ要求	0x0124	0x0134	測距モードを指定して XY データを要求、取得 ¹ <small>1: 成功</small>
9	センサ時刻設定	0x0141	0x0151	センサ時刻を設定 ¹ <small>1: 成功</small>
10	センサ時刻取得	0x0142	0x0152	センサ時刻を取得 ¹ <small>1: 成功</small>
11	時刻同期	0x0143	0x0153	ホストとの時刻同期 ¹ <small>1: 成功</small>
		0x0144	0x0154	

(2) CRC-32-IEEE802.3によるデータ誤り検出

UDP/IP層においてもデータ誤り検出を行っているが、当層においてさらに検出精度の高いCRC-32-IEEE802.3^[*]を採用して、データの信頼性を高めた。

[*]生成多項式：

$$x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$$

(3) 3Dセンサ異常状態の検出とエラーコードの転送

3-2-4-2項で述べたセルフチェック機能で3Dセンサが異常状態を検出した場合は、測距を停止してホストに向けてエラーコードを送信する。表3-2-4-10のように、通信フォーマットにおいて「データ種別」フィールドを、「測距データ(0x0171)」から「エラーコード(0x0191)」に切り替えて、エラーコードの内容を送信する。

このように、3Dセンサが異常状態にあるときは直ちにエラーコードをホストに通知して、不確かな測距データが使われないような仕組みとしている。

表 3-2-4-10. データ種別の測距データとエラーコード

データ種別		機能
項目名称	コード	
測距データ	0 x 0 1 7 1	測距データを出力する
エラーコード	0 x 0 1 9 1	3Dセンサの異常発生、並びに異常状態の内容を通知する

なお、3Dセンサからホストにレスポンスを送信するときに、表 3-2-4-11 のレスポンスコードを設定して返答する。

表 3-2-4-11. 3Dセンサのレスポンスコード

コード	判定識別	内容と要因
0x00	ACK	処理が正常に完了
0x01	NAK_01	処理異常
0x02	NAK_02	パラメータ、設定値異常
0x10	NAK_10	CRC 異常
0x11	NAK_11	通信フォーマットサイズ異常
0x80	BUSY	測距動作中に処理できないコマンドを受信

(4) ロボットシステムと3Dセンサの時刻同期

3Dセンサが出力する各測距データ流の測距・取得タイミングをホストと共有するために、以下の手順にて互いの時刻同期、並びに測距データにタイムスタンプを付与した。

①センサ時刻設定 (ホスト→3Dセンサ) :

ホストから3Dセンサの時刻を設定する。西暦2000年1月1日0時0分0秒0ミリ秒を起点として、1ミリ秒単位で経過時間を6バイトで表す。

例) 「2010年11月17日 12時0分0秒0ミリ秒」は、

$$\begin{aligned}
 & ((3973日 \times 86400秒) + (12時 \times 3600秒)) \times 1000 \text{ ミリ秒} \\
 & = 343,310,400 \text{ ミリ秒} = (004FE4FA00) \text{ h ミリ秒} \\
 & \rightarrow 0x00, 0x4F, 0xEE, 0xE4, 0xFA, 0x00 \text{ と設定}
 \end{aligned}$$

②センサ時刻取得 (ホスト←3Dセンサ) :

①で設定した時刻を確認するために、3Dセンサに設定した時刻をホストが取得する。

③時刻同期 (ホスト⇄3Dセンサ) :

図 3-2-4-7 のシーケンスで、ホストの時刻と3Dセンサの時刻を同期 (時刻

合わせ) する。

ホストから「時刻同期コマンド」送信し、3Dセンサはこれを受信したら直ちに「 A_{s1} : メッセージ送信時刻」を付して「メッセージ」(レスポンス)を送信する。これを受けてホストはさらに、「 B_{R1} : メッセージ受信時刻」「 B_{S1} : フィードバック送信時刻」を付して「フィードバック」(コマンド)を送信する。最後に3Dセンサは、このフィードバックを受信したら、さらに「 A_{R1} : フィードバック受信時刻」を付して「時刻同期レスポンス」を送信する。このとき、「メッセージ」と「フィードバック」の転送時間が同じならば、

$$(B_{R1} + B_{S1}) / 2 = (A_{S1} + A_{R1}) / 2$$

となり、時刻同期が可能となる。実際には「メッセージ」と「フィードバック」の転送時間は若干異なるので同期誤差は生じるが、実用上問題にはならない誤差である。

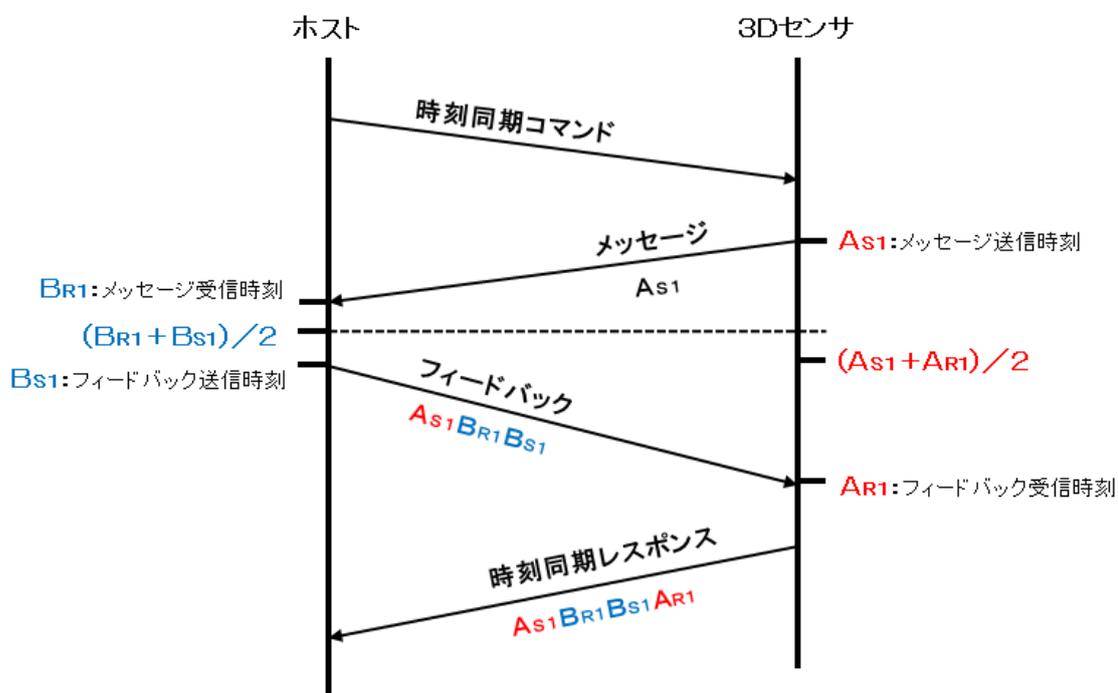


図 3-2-4-7. 時刻同期のシーケンス

④タイムスタンプ付き測距データ（ホスト←3Dセンサ）：

測距データ（距離値・光量値）は、3D距離画像の1フレーム分（水平53×垂直33=1749画素）を1パケットとして出力されるが、各パケット（フレーム）にタイムスタンプ（③で同期した時刻）を付している（図3-2-4-8参照）。



図3-2-4-8. 測距データの通信フォーマット

3-2-4-4. 検知性能の向上（検知距離の拡大と角度分解能の向上）

ロボットが10 km/hで走行中に安全に減速するためには、走行系の制動時間や検知の処理時間等を考慮すると、5～10 m先の障害物まで検知することが必要になる。また、5～10 m先の障害物の最小サイズがφ100 mmとすると、角度分解能の最小は10～20 mradに相当する。ベース機の検知距離の最大は5 m（@拡散反射率12%）、角度分解能の最小は20～27 mradであるため、遠方・細径の障害物を検知漏れする恐れがある。

これらの検知性能の向上を図るために、以下の方策を検討した。

（1）検知距離の拡大

レーザ投光ビームのフォーカス位置の最適化による受信信号の向上や、レーザ投光/受光回路の雑音低減によって受信信号/雑音比（S/N比）の向上と、検知しきい値の低減によって受信感度を向上する。

受信信号レベルは、レーザ投光ビームのスポットサイズが小さいほど高くなる。図3-2-4-9のように、受信信号レベルが低下する長距離側に投光系のフォーカス位置をシフトして、長距離側の受信信号レベルを向上する。また、高速・大電流の電流パルスによるパルスレーザ駆動に伴ってパルス状の雑音が発生し、空間放射/基板・ケーブル伝導により受光回路に雑音が混入する。空間放射雑音は、レーザ駆動回路と受光回路の各基板に電磁シールド板を装着して低減する。基板・ケーブル伝導雑音は、受光回路に伝導しないような雑音経路を設ける。

以上によって、受信S/N比を約3 dB改善と、検出しきい値低減を図る。

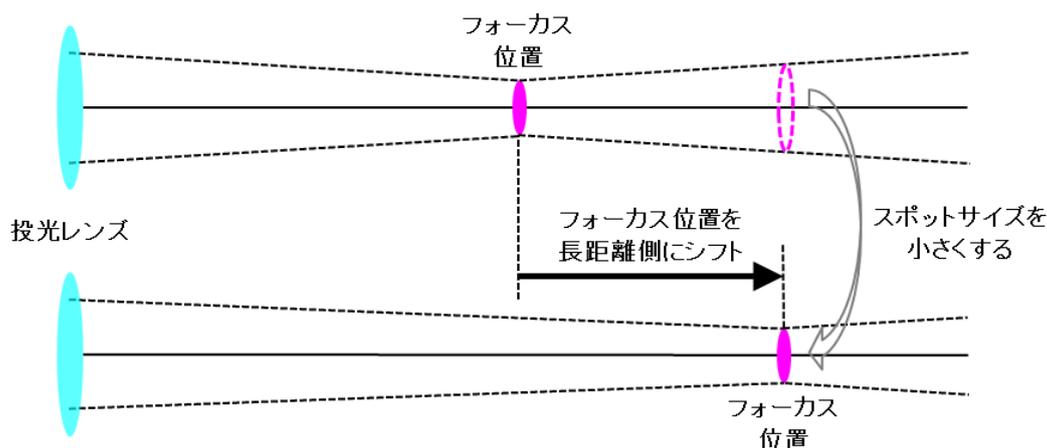


図3-2-4-9. 投光ビームのフォーカス位置シフト

(2) 角度分解能の向上

レーザ投光ピッチやレーザ投光ビームプリファイル、投光パターンの最適化によってレーザ投光の隙間を低減する。

角度分解能向上のために、図3-2-4-10のように画素数を変えないでレーザ投光ピッチ、投光パターンを工夫して、実効的に検知漏れの低減を図る。[ベース機]では、円柱状の障害物の長手方向と、偏平の投光ビームスポットの偏平方向がそろった場合に、投光パターンの隙間に障害物が入り込んで検知不能になることがある。[パターン案1]ではビームスポットを投光軸周りに45°回転して隙間を狭くする。[パターン案2]では相隣り合うビーム列を市松パターンに半ピッチシフトすることで、一方方向のみ投光ピッチを2倍にできる。ここでは、[パターン案2]を採用して角度分解能の向上を図る。

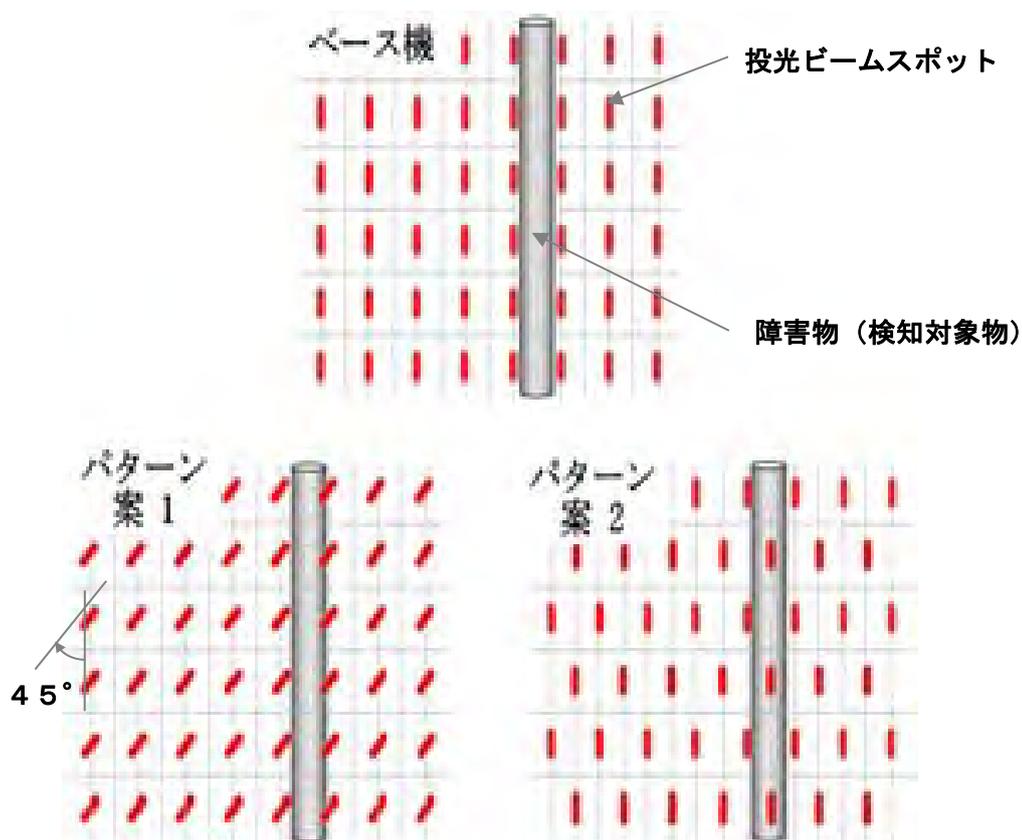


図3-2-4-10. レーザ投光パターンによる角度分解能向上

3-2-4-5. 窓ガラスコートの耐環境性/耐候性向上

本3Dセンサの窓ガラスは、センサ内部と外部を分離して、外部からの粉塵の侵入を防ぎ内蔵物の保護をする役割がある。同時に、投光/受光ビームを効率よく透過させる必要があり、所要のセンサ性能を達成するために、使用レーザ波長で高い透過率が要求される。通常のシリカ系のガラスの場合、最高でも約90%程度の透過率にしかならないため、窓ガラスの両面には無反射コート（反射率1%以下）等の成膜を施して透過率アップを図っている。

しかし、外気等に曝される窓ガラス外部面には、図3-2-4-11のように外部からの異物、特に水滴等が付着したり、油脂等が付着することがある。この状態の窓ガラスの光学特性は、透過率が低下するだけでなく、付着部位で投光ビームが反射・散乱してセンサ出力にノイズ（フレア）が発生することがある。このフレアは、光源からレーザビーム投光、並びに受光器の直近で発生するため、わずかな反射・散乱光でも大きなノイズレベルとなる。これらの付着の影響を緩和する目的で、窓ガラス外部面に親水性コートを施している。親水性コートは水滴等が付着しても、いわゆる玉状になりにくく水滴が潰れて薄い膜状になるため、反射・散乱光によるフレアが抑えられる。

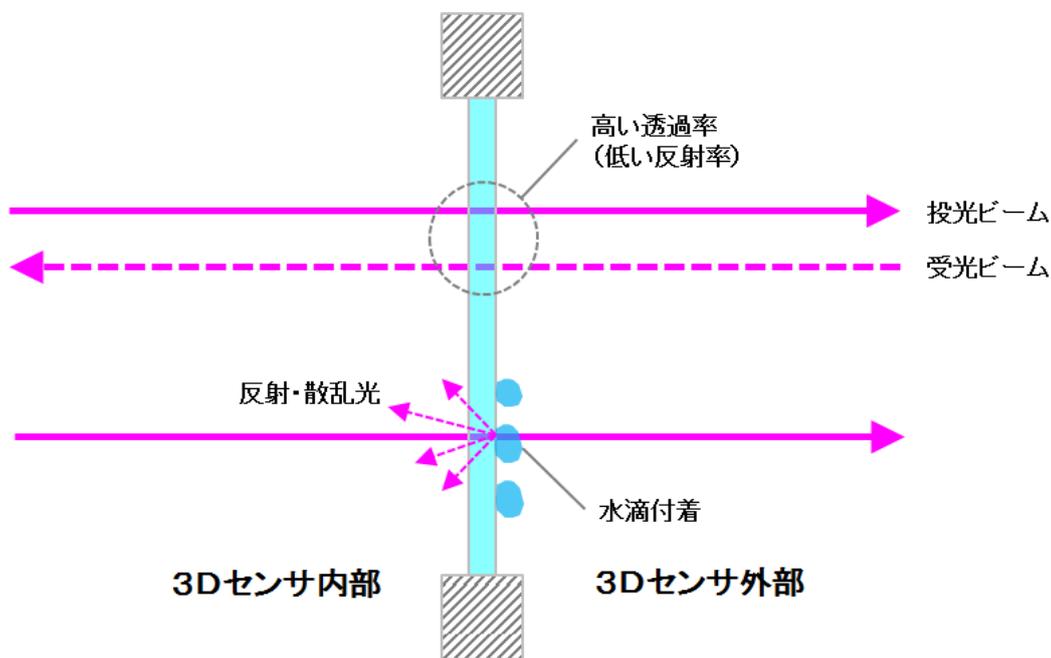


図3-2-4-11. 窓ガラスに要求される機能・特性

以上のコーティングを施すことで、屋外等の環境下でも所要性能を達成しているが、外気等に曝される窓ガラス面は、太陽光や水滴、油脂等の汚れ、クリーニング時の摩擦等によって、初期特性から徐々に劣化することが予想される。これらの耐候性・耐久性の向上のために耐性の高いコーティングを採用している。

3-2-5. 安全センサの評価

本項では、開発した3Dセンサ単体の機器仕様や、検知性能を中心とした機能仕様、並びにそれらの耐環境性・耐久性を評価した結果について述べる。

3-2-5-1. 機器仕様

図3-2-5-1に、開発した3Dセンサの外観、および三面図を示す。

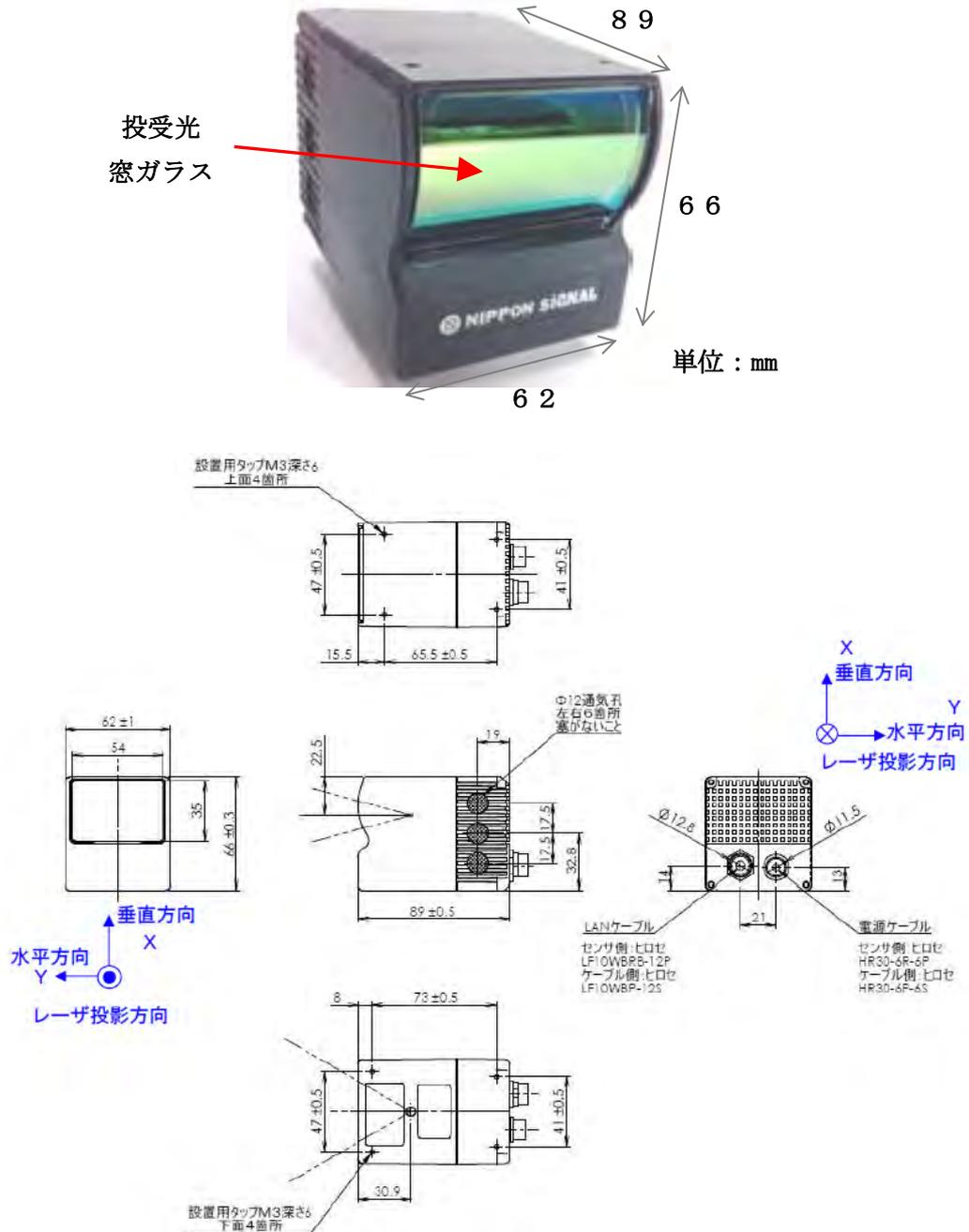


図3-2-5-1. 開発した3Dセンサ外観・三面図

コネクタ等の突起部を除く外形寸法:W62×H66×D89mm、体積:350cm³、質量:520gと、開発仕様どおりに作製できた。投受光窓ガラス部は開口:W54×35mmに、円筒面状の強化ガラス、無反射コート・親水性コートを施した。筐体は表面にアルマイト加工をしたアルミ材で、保護等級IP55、放熱、EMC(電磁界ノイズ両立性)をそれぞれ確保している(耐環境性評価を参照)。筐体背面に、電源(DC12~24V)と通信(Ethernet)の各ケーブルを接続するコネクタを配している。

3-2-5-2. 検知距離と距離精度

図3-2-5-2に、距離出力特性を示す。ターゲットは拡散反射率12%(マンセル・ニュートラル・デンシティ・スケール:N4.0)と同90%(N9.5)で、室内照明下(500~1000ルクス)で測定した。

反射率90%では、15m超まで精度の高い距離出力が得られる(約20mまで検知できることを確認済)。反射率12%では、8m超で検知不能になった。受光回路のS/N改善によって、開発のベース機(検知可能距離限界6m@反射率12%)と比べ検知可能限界距離が向上し、開発仕様を達成した。

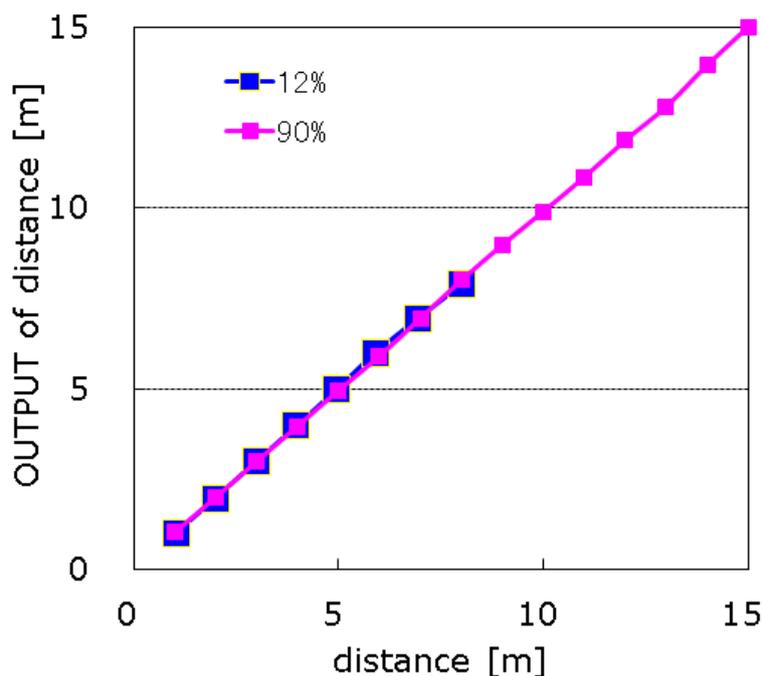


図3-2-5-2. 距離出力特性 (T_a = 25℃、室内照明下)

図3-2-5-3に、距離精度特性を示す。ここでの距離精度は、測定の繰り返し精度で、 $\pm 3\sigma$ (σ :標準偏差)にて表した。ターゲットの拡散反射率は、図3-2-5-2. 距離出力特性の測定時と同じだが、ハロゲンランプを使ってターゲットに10万ルクス相当の外乱光を照射して特性を評価した(図3-2-5-4)。

反射率12%では、距離精度が開発仕様の ± 100 mmを満足するのは5~6m以下の範囲であるが、7~8mでも ± 150 mm程度のため、5m超の障害物検知には問題ない精度と判断する。また、外乱光照射によって距離精度は低下するが、反射率90%の方が外乱光反射レベルが大きく、その影響は大きい、信号光の反射レベルも大きいので受信S/Nも高く、測定性能への影響はむしろ小さい。

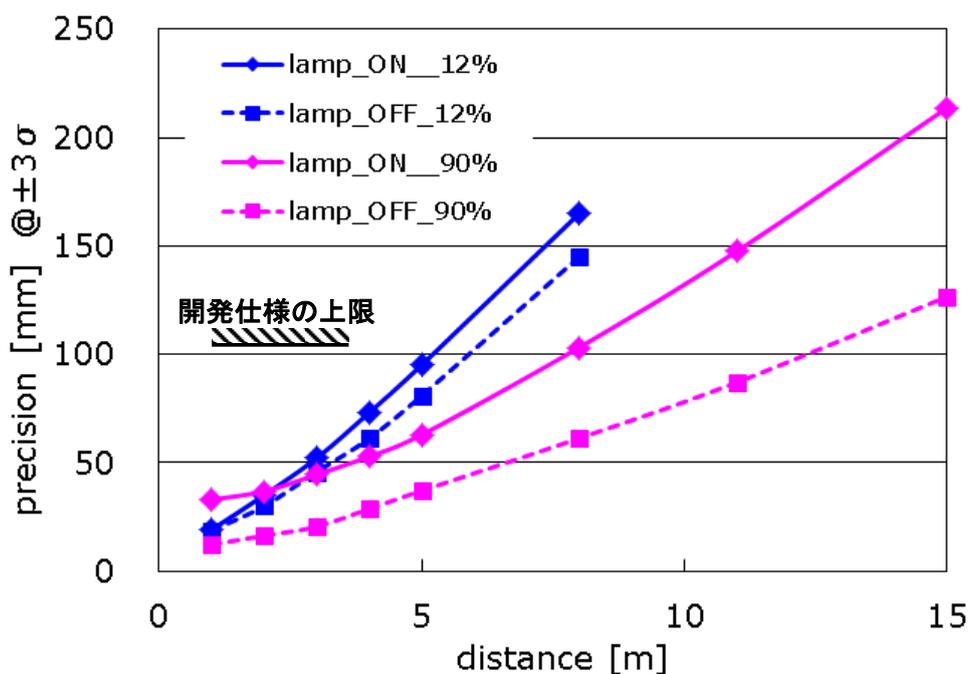


図3-2-5-3. 距離精度特性 (耐外乱光性能)

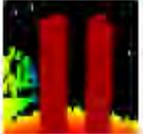
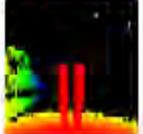
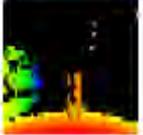
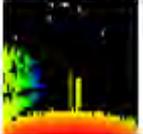
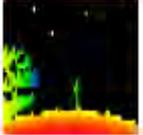
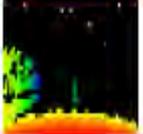
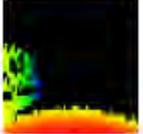


図3-2-5-4. 耐外乱光性能の測定系

3-2-5-3. 角度分解能

表3-2-5-1に、角度分解能の評価結果を示す。ターゲットはφ200mm×高さ900mmの円柱状のポールで、その表面は拡散反射率12%と90%の2種類をとし、距離1～16mの間で検知可否を測定・評価した。

表3-2-5-1. 角度分解能の評価

設定距離 [m]	角度分解能 [mrad]	距離画像 0m 16m  (黒は検知不能)	検知可否	
			反射率12%	反射率90%
(*)角度分解能は、 φ200/(設定距離) で定義		模擬検知物  12% 90%	—	—
1	200		○	○
3	67		○	○
5	40		○	○
7	28		○	○
9	22		×	○
11	18		×	○
16	13		×	△

ここで、水平方向の角度分解能は、

$$\phi 200 / \text{設定距離}$$

で定義した。

【数値例】設定距離 5 m のとき、 $\phi 200 \text{ mm} / 5 \text{ m} = 40 \text{ mrad}$

以下、設定距離を角度分解能に換算して表記する。

反射率 12% では 28 mrad (設定距離 7 m) まで、同 90% では 13 mrad (同 1.6 m) までそれぞれ検知可能であったが、前者の角度分解能は検知可能距離限界 (8 m) による制限が支配的である。レーザービームの投光パターンによる制限を検証するには、反射率 90% の結果から判断した方が良いので、本 3D センサの角度分解能は、13 mrad と評価できる。開発のベース機 (角度分解能、水平方向 20 mrad × 垂直方向 27 mrad) に対して改善したが、期待した 2 倍アップ (10 mrad) に至っていない。これは、以下のような理由によるものである。

すなわち、図 3-2-5-5 のように、平板面に比べ円筒面は、投光ビームが面に垂直入射するポールの径方向、または幅方向中心部から外れるほど 3D センサ受光部に戻る反射・散乱光のレベルが低くなる (円筒面の径方向エッジ部は、ほとんど反射・散乱光が戻って来ない)。このため、円筒面のポールは、見かけ上のポール幅 (径) が狭くなるためである。

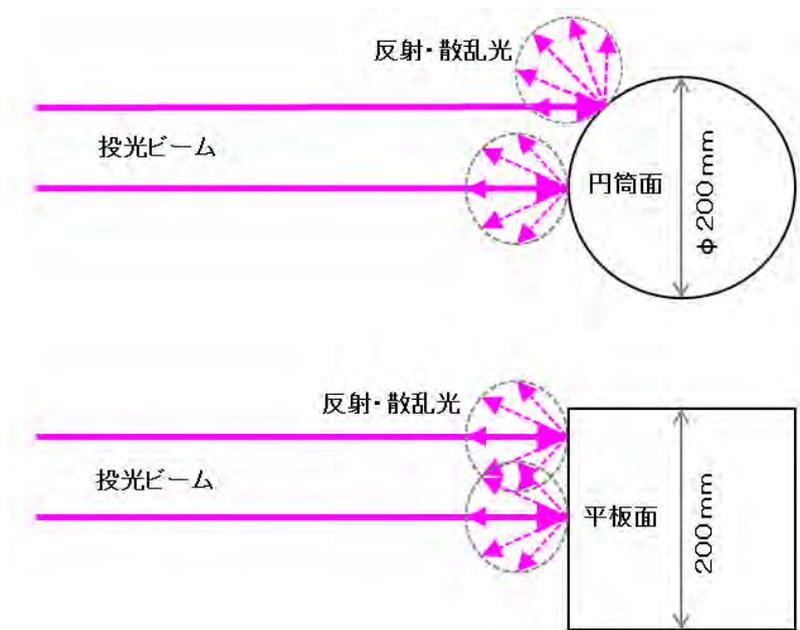


図 3-2-5-5. 円筒面と平板面の反射・散乱光と見かけの幅

3-2-5-4. 耐環境性能・耐久性能

(1) 耐太陽光性能

図3-2-5-6に、3Dセンサの画角内に太陽光が直接入射するアングルで測定した結果を示す。太陽光の照度は11万ルクスで、ほぼ快晴の上空に向けて測定した。距離画像ではカラースケールで距離を表し、黒色は測距不能、またはレンジオーバーである。

上空より手前の構造物は正しく測距している。上空は太陽光の位置に対応する画素に、10数個の異常な距離を示すノイズが発生しているが、それ以外はレンジオーバーを示す黒色の画素となり正常な動作をしている。このように、太陽光の影響をほとんど受けずに測距できるので、ノイズが発生してもホスト側の検知判定処理で十分除去できる。

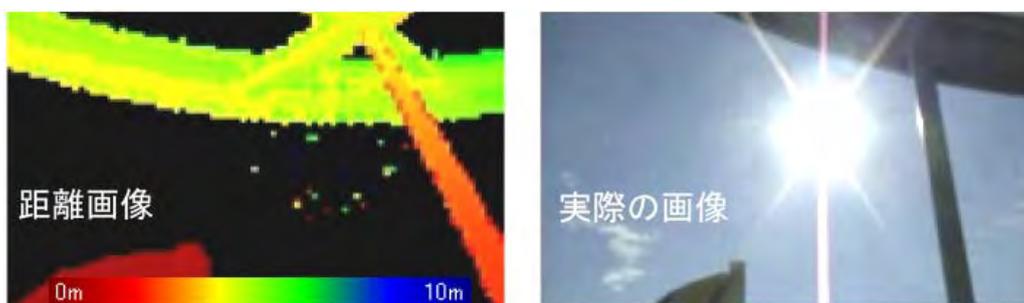


図3-2-5-6. 太陽光11万ルクスの直射による影響

(2) 温度試験（耐久性能を含む）

図3-2-5-7に、距離出力の温度特性を示す。ターゲットの拡散反射率12%、設定距離2～5mとして、3Dセンサ周囲温度を-10～50℃と変化させたときの距離出力を測定した。いずれの設定距離においても、-0.08mm/℃以下の温度係数を持っていて、 $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ の温度変化で距離出力が最大約50mm変動する。通常はこれほど温度変化はないので、温度による距離出力変動は問題にならない。

図3-2-5-8に、距離精度の温度特性を示す。ターゲット・温度変化は、距離出力の温度特性のときと同じ条件で測定した。距離精度の温度依存性はほとんどないが、4m以上の長距離側において低温側で距離精度が低下する傾向がみられ、今回のサンプルでは5mの距離精度が±100mm超となった。

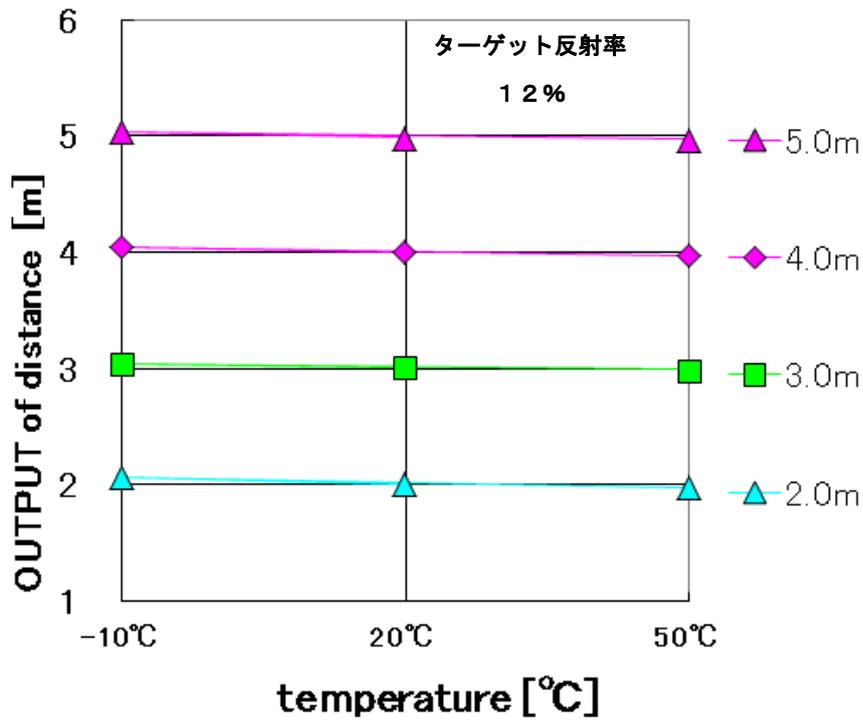


図3-2-5-7. 距離出力の温度特性

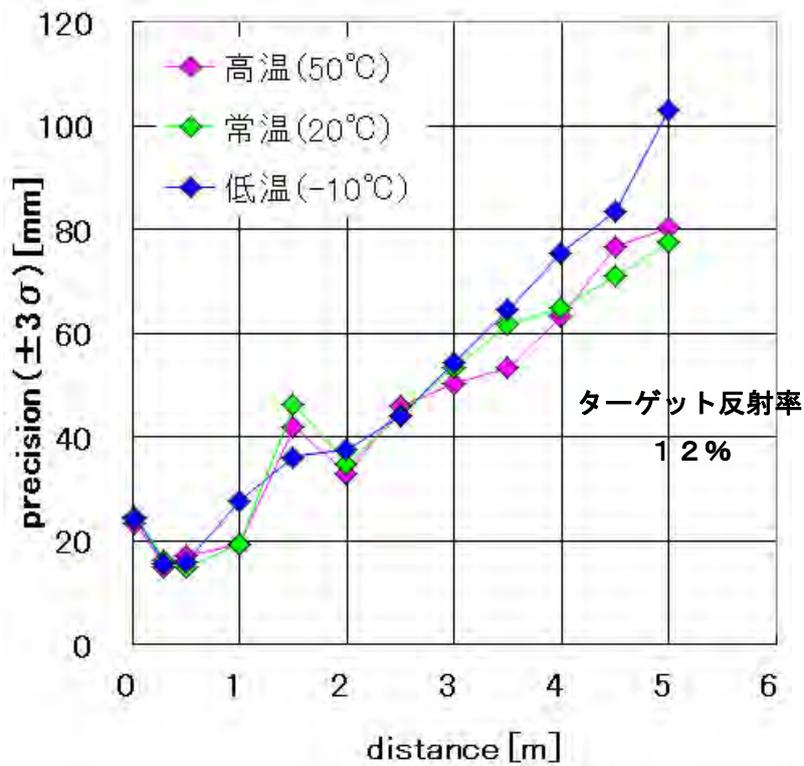


図3-2-5-8. 距離精度の温度特性

また、上記の温度環境試験とは別に、表 3-2-5-2 のような高温・低温の各耐久試験を実施し、問題ないことを確認している。 判定基準にある【性能保証】【動作保証】とは、以下のとおりである。

【性能保証】 負荷印加時も仕様の性能を維持する

【動作保証】 負荷印加時の性能は問わないが、解放したら仕様の性能を維持する

表 3-2-5-2. 高温・低温連続動作耐久試験

試験項目	試験条件	規格	判定結果
高温連続動作試験	50℃×1000hで連続動作	温度負荷印加時も所定性能を満足すること 【性能保証】	OK
低温連続動作試験	-10℃×1000hで連続動作		OK
高温保存試験	70℃×240hで保管放置	温度負荷印加を解放し、常温に1h放置した後、正常動作すること 【動作保証】	OK
低温保存試験	-20° ×240hで保管放置		OK
温度サイクル試験	-10℃×3h ↑↓(10サイクル) 50℃×3h		OK

(3) 振動・衝撃試験

表3-2-5-3に、振動・衝撃試験の条件、規格、判定結果を示す。いずれも問題ないことを確認した。

表3-2-5-3. 振動・衝撃試験

試験項目	試験条件	規格	判定結果
振動試験 (共振点探索)	周波数10～500Hz 加速度複振幅1G 1掃引8分を、XYZ各方向に4掃引実施	振動負荷印加時も所定性能を満足すること。 共振点がないこと。 【性能保証】	OK
振動試験 (耐久性能)	周波数40Hz 加速度複振幅2G XYZ各方向に15分間実施	振動負荷印加時も所定性能を満足すること。 【性能保証】	OK
衝撃試験	加速度30G 作用時間6±3ms XYZ各方向に1回実施	衝撃負荷印加後、正常動作すること 【性能保証】	OK

(4) ノイズエミッション試験

表3-2-5-4に、放射性ノイズエミッション試験と伝導性ノイズエミッション試験の条件、規格、判定結果を示す。いずれも問題ないことを確認した。

表3-2-5-4. ノイズエミッション試験

試験項目	試験条件	規格	判定結果
放射性ノイズエミッション試験	3Dセンサから発する妨害波を、10m離れた所定のアンテナで受信。 3Dセンサを水平・垂直の各方向に一回転して実施。	VCCIークラスA 妨害波の電界強度 30～230MHzで 40dB以下 230～1000MHzで 47dB以下 (それぞれ要3dB余裕)	OK
伝導性ノイズエミッション試験	3Dセンサの電源ケーブルを所定の配線・引き回して電源供給。 電源ポートを伝導して3Dセンサから発する妨害波を受信。	VCCIークラスA 妨害波の電界強度 0.15～0.5MHzで 79dB以下 0.5～30MHzで 73dB以下 (それぞれ要3dB余裕)	OK

(5) ノイズイミュニティ試験

表3-2-5-5に、放射性ノイズイミュニティ試験、電源周波数磁界イミュニティ試験、および静電気試験の条件、規格、判定結果を示す。いずれも問題ないことを確認した。

表3-2-5-5. ノイズイミュニティ試験

試験項目	試験条件	規格	判定結果
放射性ノイズイミュニティ試験	レベル3 80~1000MHzで 10V/m以上 1.4~2.0GHzで 3V/m 2.0~2.7GHzで 1V/m 1kHzの正弦波による80%の振幅変調 水平/垂直偏波	左記条件で正常動作すること	OK
電源周波数磁界イミュニティ試験	50Hz 30A/m 180秒で XYZ各方向	左記条件で正常動作すること	OK
静電気試験(接触放電)	3Dセンサの所定の導体部に直接放電 電圧±2~±12kVを印加	電圧負荷±4kV以上で、正常動作すること	OK
静電気試験(気中放電)	3Dセンサの所定の導体部に気中放電 電圧±2~±15kVを印加	電圧負荷±8kV以上で、正常動作すること	OK

3 - 2 - 6. まとめ

搭乗型移動ロボットの周辺環境をセンシングする3次元レーザ測域センサ（3Dセンサ）を開発した。ロボットの利用シーンを想定し、10万ルクスを超える太陽光や小雨が降り注ぐ屋外の自然環境条件を含めたユーザレベルのリスクアセスメントを実施し、安全に移動するための要件から開発仕様を導き出した。開発仕様の実現に向けて、3Dセンサの各種方式検討とその選択をし、既開発のベース機を元に安全機能・性能を向上するべく、

- ①ロボットシステム上位とのインターフェースの強化
- ②検知性能の向上
- ③投光・受光窓ガラスの耐久性・耐候性の向上

を図った。これらの開発過程において、FTA/FMEAによる故障解析から3Dセンサの機能・性能の健全性を担保するセルフチェックなど仕組みを設計・実装した。その解析プロセス、並びに仕組みを開示した。

また、開発した3Dセンサ単体の性能評価を実施し、その結果を開示した。

3-3. 安全要素モジュール：3次元距離画像カメラ（オプテックス）

3-3-1 概説

1) 障害物検知センサへの要求仕様

距離画像カメラは、電動車イスの近傍の路面の突起物の検出に使うこととした。リスクアセスメントから、路面の突起物に片車輪だけが衝突した場合、搭乗者が回転しながら投げ出される可能性があり、危険度が高い。路面の突起物としては、車道から舗道へ上がる場合の段差を検知対象とした。

低い段差であれば、乗り越えることができるため、20cm 高さの段差を対象とした。車道-舗道間の段差は、20cm 程度のものがあり、日常的な走行条件を考えると、障害物としては一般的なものと考えられる。

長距離側の障害物検出は、3次元測域センサにより行うこととし、TOF3次元距離画像カメラでは、2m 先の障害物検出を行うこととする。

したがって、検知要求仕様は、以下となる。

TOF3次元距離画像カメラの検知要求仕様：

- ・ 検知距離 2m
- ・ 検知物体 路面から 20cm 高さの段差

当初の予定では、2種類の障害物検知センサは、各画素の距離計測データを同時にリスク計算ユニットに入力し、リスク計算ユニットで障害物の検出を行うことになっていた。しかし、センサからリスク計算ユニットへのデータ伝送量は数10Mbpsとなり、組み込み系のCPUでは現実的ではないことが分かった。そこで、距離画像カメラに追加のプロセッサを実装し、データ量の大きい距離画像カメラのデータ圧縮を行った。通信の安全性を確保するためCRCを付加して安全に通信する仕様とした。低容量の回線を使った場合でも、障害物の位置情報が伝わるフォーマットを作成し、データを圧縮しても冗長性を保つことができるように提案を行った。

その後、時間的な制約もあり、リスク計算ユニットへのデータ伝送も次回のテーマとなり、距離画像カメラは、障害物検出センサとして自立することになった。カメラ内に実装したプロセッサに障害物検出アルゴリズムを実装し、検出出力をDIO（デジタル・インプット・アウトプット）として追加した。搭乗者の注意喚起用としてブザー、LEDを接続し、DIO出力から駆動して、最終的な仕様のイメージを作った。

この出力は、検知タイミングの確認用として、実験で利用した。

最終的な要求仕様を、表3-3-1.1に示す。仕様は、距離画像カメラとしてのものと、障害物検出センサとしての仕様を分けて示した。

TOF3次元距離画像カメラ仕様		
仕様項目	仕様 (XZC2-1050L-HP)	備考
視野角(水平/垂直/対角)	50° / 37° / 59°	
電源電圧	DC12V	
消費電力	15-20W(Typ.)、30W(最大)	
動作温度/湿度	0~50°C / 85%以下	
有効画素(出力画素)	160×120 ピクセル (176×132 ピクセル)	
光源	近赤外線LED(850nm)	
測定レンジ	0.3-2.0m 反射率7%以上	
変調周波数	10MHz	
フレームレート	15fps	
サイズ	160mm(幅)×65mm(高さ)×55mm(奥行き) →小型化	
質量	600g以下 →軽量化	
固定方法	電動車いす本体側面に取り付け	
障害物検知センサ仕様		
障害物検出	障害物が 2m以内に入ったら、注意喚起出力	
最小検知障害物	20cm高さ段差検知 @2m	
インターフェース	Ethernet 100BASE-TX UDP	リスク計算ユニットに接続する場合
障害物検知出力	距離方向 25cm毎/水平方向 5° 毎 ブロック出力	リスク計算ユニットに接続する場合
障害物検知データ	ブロック内 存在画素数、平均位置、平均反射光量	リスク計算ユニットに接続する場合
注意喚起用出力	発音体(ブザー)、発光体(LED)	

< 表 3-3-1.1 TOF3 次元距離画像カメラ、障害物検知センサの要求仕様 >

2) 安全規格の認証への取組み

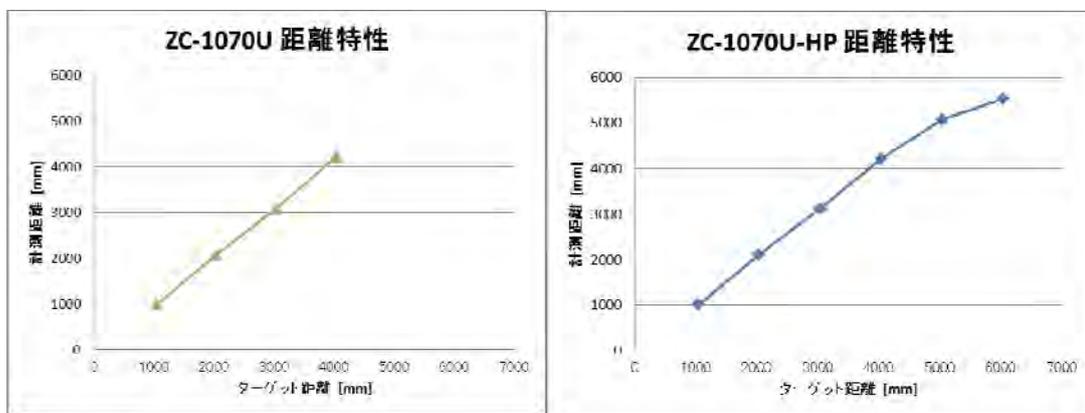
立体的な検知エリアを有する障害物検出センサの安全規格は存在しないが、類似センサの規格として IEC61496 を、参考にすることができる。認証機関に対して、テスト方法を合議して決める手法で、規格の一般要求事項 (IEC61496-1 Safety of machinery - Electro-sensitive protected equipment - Part 1: General requirements and tests、JIS B 9704-1 機械類の安全性 - 電氣的保護設備 - 第一部: 一般要求事項及び試験) を踏襲しながら、要求事項を決める。認証機関の合意の基で、型式認証を得ることができる。拡散反射型のセンサの規定、試験方法に関しては、レーザースキャンの安全規格 (IEC61496-3 Safety of machinery - Electro-sensitive equipment - Part 3 : Particular requirements for Active Opto-electronic Protective Devices responsive to Diffuse Reflection (AOPDDR)) を参考にすることができる。3次元の物体検出に関しては、現在 IEC の TC44 委員会で審議されているステレオカメラの技術を用いたセンサの安全規格 (prIEC/TS61496-4-3 Safety of machinery - Electro-sensitive equipment - Part 4-3 : Particular requirements for equipment using vision based protective devices (VBPD) - Additional requirements when using stereo vision techniques (VBPDEST)) を基に試験方法を提案することができる。これらの規格を総合して、認証機関と試験方法、認証のための基準値を設定することができる。

3-3-2 距離画像カメラの改良

1) 投光出力の向上

TOF方式の3次元距離画像カメラは、画素1つ1つが、距離計測をしているが、その精度は、距離計測用の投光出力が高いほど向上する。また、長距離まで距離計測ができるようになる。

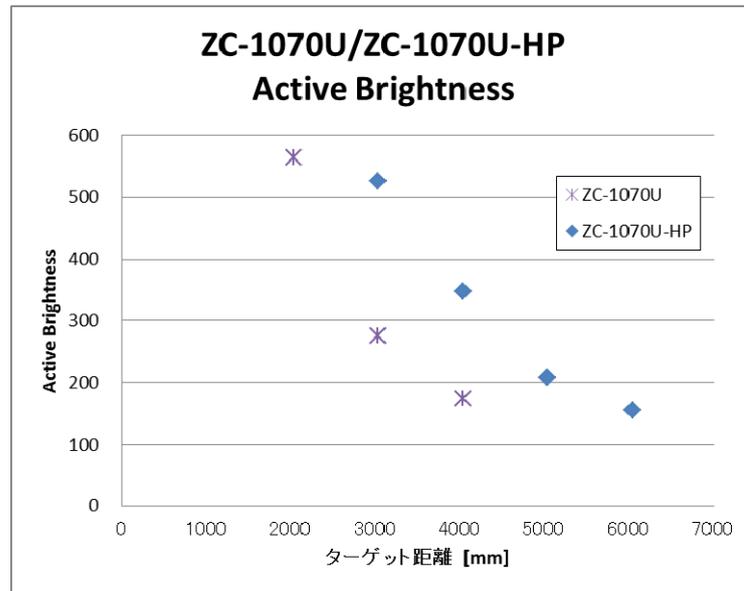
TOF3次元距離画像カメラの既存機種 ZC-1070U の投光出力を倍増することにより、距離精度の向上と、計測可能距離を伸長した。結果を、図 3-3-2.1 に示す。高出力化した機種を ZC-1070U-HP とした。既存機種である ZC-1070U では、4mまで距離計測値が直線性を保っているが、ZC-1070U-HP では、6mで直線性が失われている。



<図 3-3-2.1 投光量向上した場合の距離計測比較>

計測条件 : 反射率 86%の白反射ターゲット、距離計測値は 100 回計測の平均値

図 3-3-2.2 に、反射光量の比較を示す。これは、ターゲットに反射率 86%の白反射ターゲットを用いた反射光量である。この数値を Active Brightness と称す。数値は受光素子の画素からの出力値をデジタル値で表現したもので単位はない。高出力化したことで、同一距離で、2 倍弱の反射光量が得られている。

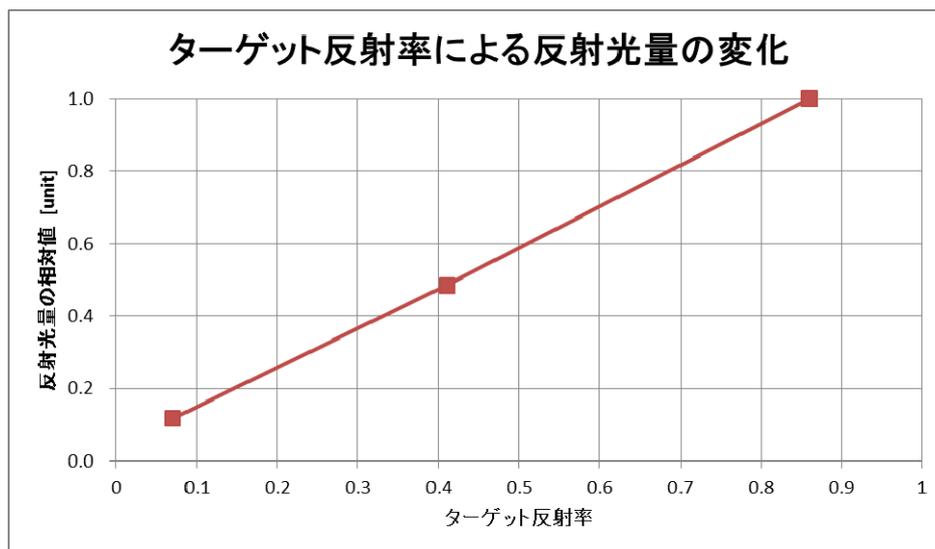


< 図 3-3-2.2 投光量向上した場合の反射光量の比較 >

反射光量が向上すると、距離計測時のばらつきが少なくなる。3-4m の同一距離では、既存製品の距離ばらつきが 10mm 程度であるのに対して、投光量を倍増させたものでは、4-5mm 程度となった。これらのことから、既存製品 ZC-1070U に比べて、精度高く計測ができるということが出来る。ここで、「距離計測値のばらつき」とは、同一箇所を 100 回計測した時の標準偏差である。移動体に搭載する用途では、1 回、あるいは、数回の計測データから距離を算出する必要がある。真値に対する計測誤差は、標準偏差の関数となる。

2) 反射率の設定と画角の決定

現実のターゲットでは、反射率の低いターゲットも存在する。ターゲットの反射率の違いによる反射光量の変化を図 3-3-2.3 に示す。反射光量は、投光量、伝搬減衰、ターゲット反射率により決まる。ターゲット反射率に対して、直線的に変化する。

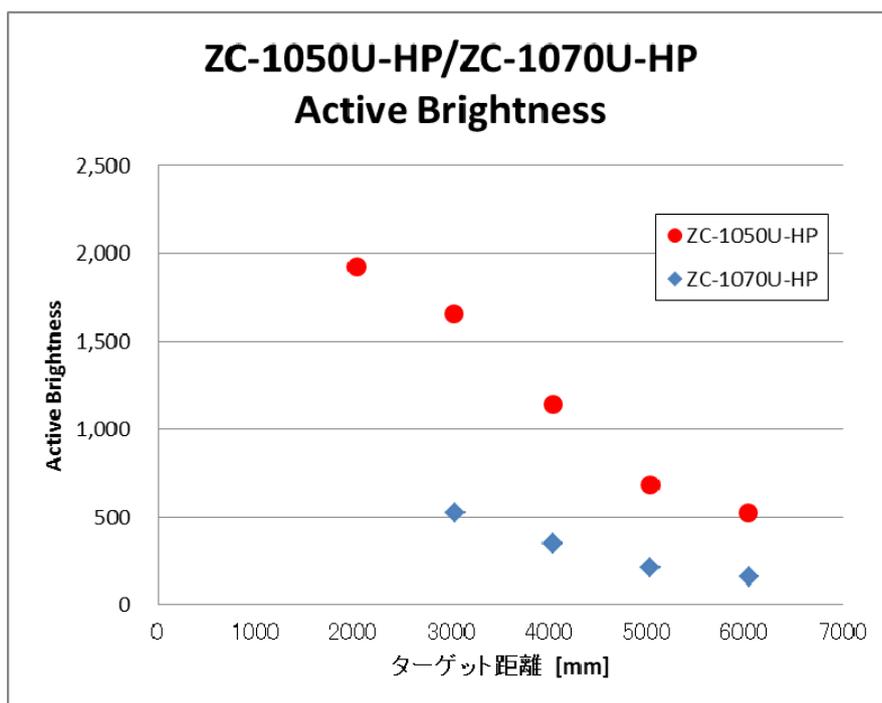


＜図 3-3-2.3 反射率の違いによる反射光量＞

IEC61496-3 では、拡散反射を使った安全センサの検知試験として、1.8%の反射率のターゲットを使用することを求めている。今回の応用では、コンクリートやアスファルトなどの比較的反射率の高いものと、人が対象となる。衣服の反射率は材質や色などにより異なるが、一般的な材質では10%内外である。今回は、7%反射のターゲットを利用して検知実験を行うものとする。

ここで、距離計測限界における反射光量の検討を行う。図 3-3-2.1 では、6m において距離計測値が近距離側にずれている。この時の反射光量 Active Brightness を、図 3-3-2.2 から読み取ると、150unit 程度である。つまり、反射光量が 150unit 程度では、距離計測誤差が大きくなると考えられる。5m では距離計測値が妥当な値を保っていることを考えると、反射光量 Active Brightness は、200unit 以上が適当である。

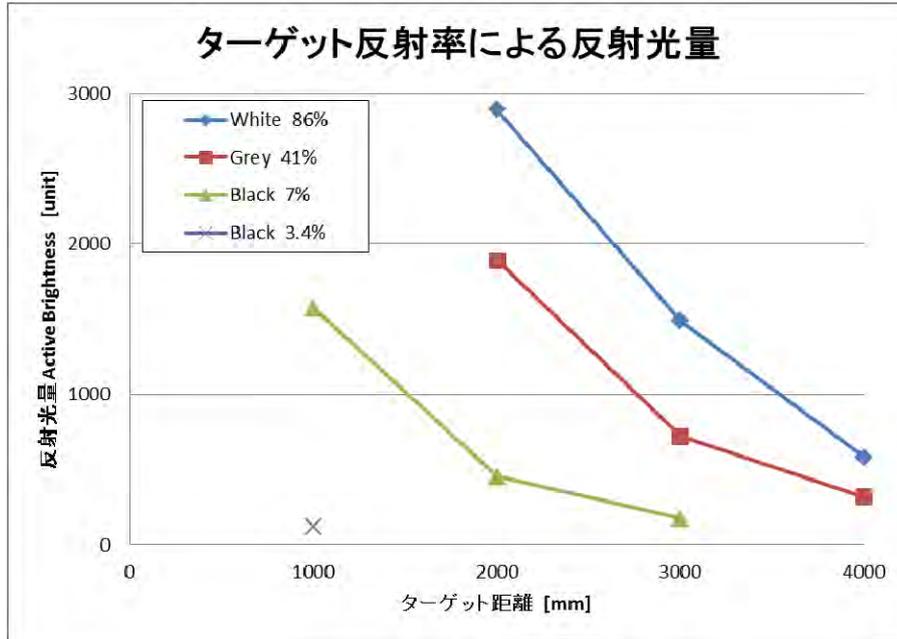
ターゲットの反射率が7%と考えると、図 3-3-2.1 で使用した 86%の反射率のターゲットと比較すると反射光量は 1/10 となる。投光出力を向上したにも関わらず、現状では、2m 先の7%反射のターゲットを検出することは難しい。短期間に投光出力をより向上させることは難しいため画角の狭いタイプ (ZC-1050U-HP) に変更する。図 3-3-2.4 に、画角による反射光量の違いを示す。両機種とも、投光量は同一である。



<図 3-3-2.4 画角の違いによる反射光量>

ZC-1050U-HP は、水平画角 50° であり、ZC-1070U-HP の水平画角 70° と比較すると前方の障害物を見る幅は狭くなるが、2m での反射光量は、2000 程度である。同型の機体で屋外での反射光量の実験結果を示す（図 3-3-2.5）

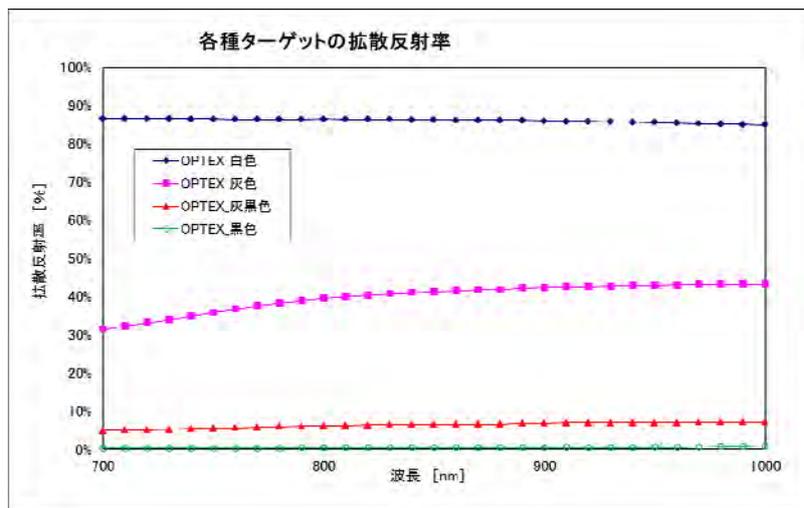
反射率 3.4% のターゲットに対しては、1m の距離でも 200 を超える反射光量が得られなかったが、7% 反射のターゲットに対しては、2m において、200 を超える反射光量を得ることができた。



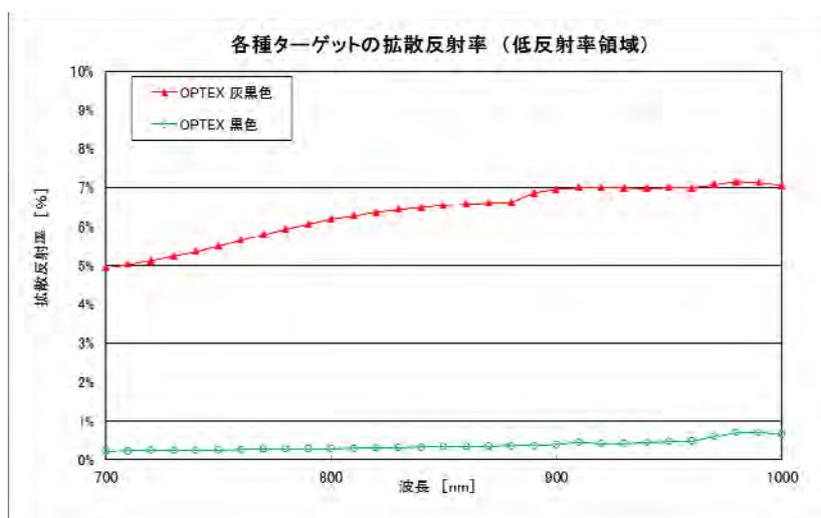
<図 3-3-2.5 ターゲット反射率による反射光量>

試験条件：屋外 100,000Lx 環境下

尚、使用した反射ターゲットは、コンソ1の協力を得て、分光拡散反射率の計測を行った。拡散反射率の計測には、ランバートの余弦則に沿った反射を考えるが、鏡面反射成分を分離除去する必要がある。計測結果を、図 3-3-2.6、3-3-2.7 に示す。



<図 3-3-2.6 分光拡散反射率>



< 図 3-3-2.7 分光拡散反射率（低反射領域） >

TOF3 次元距離画像カメラは、中心波長 850nm の LED を光源に利用している。ターゲットの拡散反射率は、850nm の分光拡散反射率を用いた。

3) 投光ミラーの改良

距離画像カメラは、下向きに設置するため画面の下端は、近距離数 10cm 先、画面の上端は数 m 先の路面を見ることになる。画面の場所により、検知すべき距離が異なる。従来の投光パターンは、画面全域に均質に投光出力を配光させていたが、今回の用途に特化して、画面の上端に投光出力を集光する光学系を試作した。従来の光学系では、長距離側では届く光が弱くなり距離精度や、障害物検知精度が低下する。近距離側では、投光量が多くなりすぎ乱反射や、入光レベルの飽和現象が生じる。

画面全体で均質な距離計測用のパルス光を照射するためには、場所により投光量を変えてやるとよい。投光にはミラー光学系により集光しているため、このミラーを改良し、路面に均質なパルス光が当たるように調整を行った。その結果が、表 3-3-2.1 である。



< 図 3-3-2.8 ミラー比較実験 >

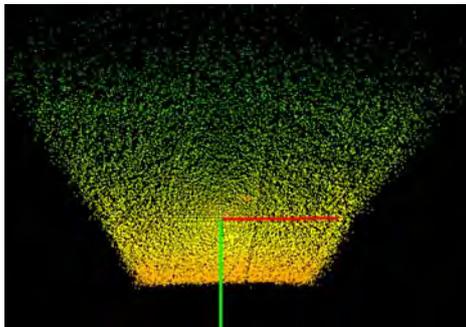
計測条件 :

- ・画角 水平 50° × 垂直 40°
- ・ターゲット コンクリートブロック
- ・照度 100,000Lx
- ・カメラ高さ 50cm
- ・カメラ仰角 下向き 25°
- ・カメラモード Fine、30fps

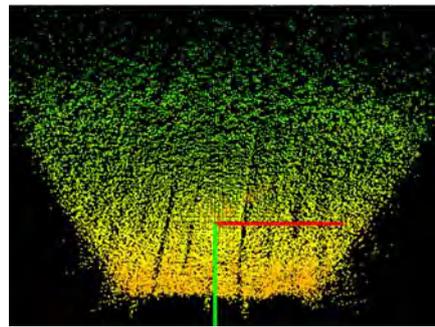
ミラー種類	計測項目	近距離側	長距離側
修正ミラー	反射光量 [unit]	1,945	476
	距離 [mm]	834	1,840
	距離の標準偏差 [mm]	13.8	64.1
既存ミラー	反射光量 [unit]	2,982	330
	距離 [mm]	924	1,859
	距離の標準偏差 [mm]	10.1	71.7
計測画素位置		(88, 126)	(88, 27)

<表 3-3-2.1 投光ミラー改造前後の距離計測データ比較>

修正ミラーでは、近距離の投光量を下げることにより、反射光量は30%程度減少している。距離計測値の標準偏差 $Z\sigma$ は悪化しているが、反射光量は最適である2,000程度に収まっている。長距離側は、反射光量が40%程度改善されており、距離計測値のばらつき（標準偏差）は、12%改善している。

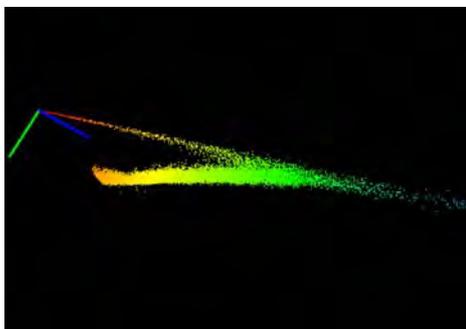


a) 修正ミラー

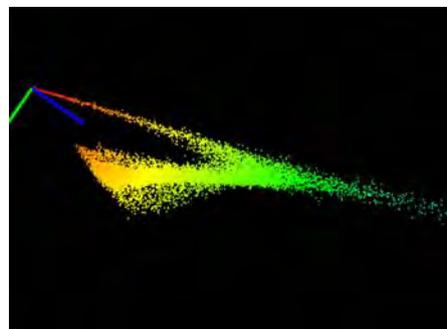


b) 既存ミラー

<図 3-3-2.9 投光ミラーによる距離画像比較 — 上から見た路面 >



a) 修正ミラー



b) 既存ミラー

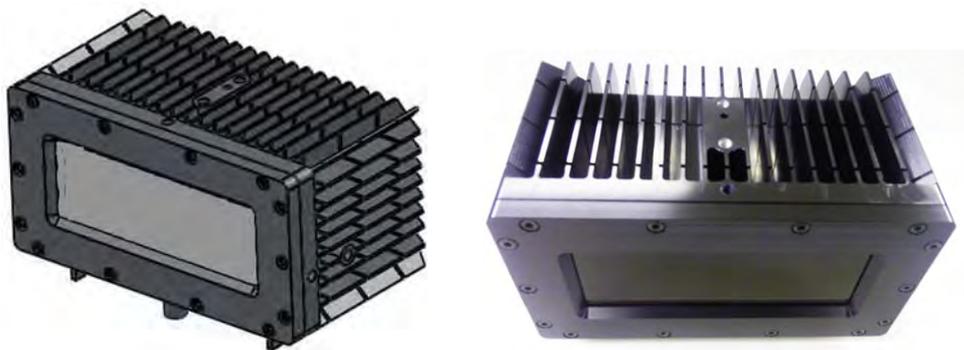
<図 3-3-2.10 投光ミラーによる距離画像比較 — 横から見た路面 >

距離画像として見た場合も、修正ミラーの場合は、近距離の飽和現象もなく画面全体に均質な距離画像が得られている。既存ミラーでは、近距離での投光量が高く飽和によるものと思われるノイズが発生している。また、長距離側では投光量が少なくなり、計測値の標準偏差が大きくなり、十分な距離精度が得られていない。

尚、図 3-3-2.10 の上部の直線は、折り返し雑音による画面端部に発生するもので、ミラーの特性には左右されない。路面からの反射は、下部の直線で、修正ミラーを使用した方が、ばらつきが少ない。折り返し雑音は、3-3-4 で対策の説明を行う。

4) 防水ケース

現状の製品は、防水仕様ではないため、屋外で使用するためには、防水ケースが必要である。IPx5 を目標に、試作を行った。



a) 防水ケース試作図面

b) 試作した防水ケース

<図 3-3-2.11 防水ケース試作>

防水試験の結果、IPx5 を満足した。この後、防水ケースの小型化試作を行う予定だったが、要求仕様の変更などがあり、その作業を優先した。現時点では、防水ケースの量産設計は、完了していない。

5) 振動・衝撃試験

電動車いすへの搭載のためには、振動・衝撃試験に耐えられることが条件である。設計指標を得るために、1 回目の試作品（3-3-4 参照）において、振動・衝撃試験を行った。自動車向けの規格には JASO 規格がある。これを参考に試験を行った。搭載する場所により試験レベルは異なるが、ショックアブソーバのない電動車いすに搭載する場合、センサへの振動・衝撃は減衰することなく電子機器に伝達される。それぞれの試験では、事前に共振周波数の計測を行い、共振周波数での通電試験を行う。掃引スイープ試験で、10Hz から、1kHz までのテストを 3 軸で行い共振点を見つけることはできなかった。非共

振の試験を行った。

衝撃試験は、2種類行い、製造時の問題としてコンクリートへの落下テスト、使用時の耐久性として3軸の衝撃試験を行った。最終品で再度行う必要があるが、今回のプロジェクトでは、電動車いすへの実装は行わなかったため、今後の課題とした。設計への知見は得られているため、実用化設計時の課題は明確である。

試験結果を、表 3-3-2.2 に示す。試験前後で性能劣化は認められなかった。

試験名	テスト条件	結果
共振点探査試験	通電 掃引 10-1kHz 加圧 1-3G	共振点なし
振動試験 (非共振)	通電、3G 上下 4時間、前後 2時間 左右 2時間	試験前後で、性能変化無し
落下試験	1m高さよりコンクリート面に自由落下 3軸 各1回	試験前後で、性能変化無し
衝撃試験	通電 水平方向 10G, 50G, 100G, 200G 垂直方向 75G, 100G, 200G 3軸 各1回	試験前後で、性能変化無し

<表 3-3-2.2 振動・衝撃試験結果>

3-3-3 障害物検知センサ

1) 伝送データの縮小

TOF3 次元距離画像カメラは、1フレーム 1.5Mbit の情報量がある。これを、15fps で伝送すると、22.3Mbps の伝送容量が必要である。数 10MHz のクロック周波数で動作するリスク計算ユニットでは、受信することも難しい。当初の予定では、すべての障害物検知センサをリスク計算ユニットに接続し、障害物検知はリスク計算ユニットで行う予定であった。スケジュール面を考慮し、分散処理とすることで伝送量を下げることとした。

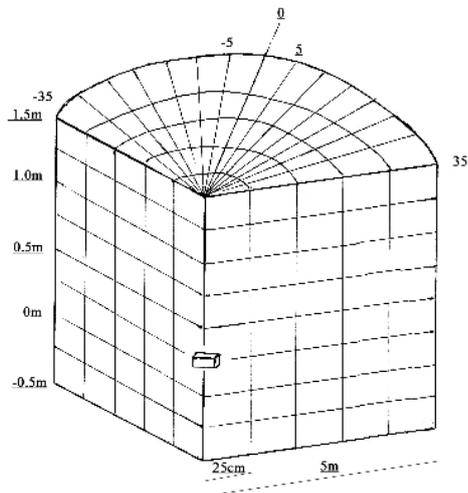
距離画像カメラの出力に Sub-CPU を追加し、この中で伝送データの削減を行う。

距離画像カメラは、約 2 万点の画素で距離計測を行っているが、ここに立体ブロックによる空間のブロック化を適用し、ブロック単位に障害物の有無を伝送する。このような方式により、伝送データを 100kByte/sec まで削減する。

従来、千葉工業大学で構想していた障害物検知ブロックの考え方を踏襲する。距離画像カメラを中心とした距離 25cm 毎、角度 5° 毎の立体ブロックを想定する。図 3-3-3.1 に立体ブロックの概念を示す。距離画像カメラの取り付け高さを 25-50cm と想定し、-50cm から、1.5m までの空間を考える。水平の角度は、最大 70° の水平面角を想定し、±35°

の扇形の空間をブロックの外縁とする。遠方側は、5m を最大距離とする。円柱座標を用い、センサを中心とした仮想的な空間ブロックを想定する。

高さのマイナス側は、下りの坂道や、溝などを想定したものである。



<図 3-3-3.1 データ削減のための立体ブロックの概念>

方向	記号	単位	最小	最大	分割数	備考
水平角度	θ	° 毎	-35°	+35°	14	
距離方向	R	cm 毎	0cm	500cm	20	$R = \sqrt{X^2 + Z^2}$
高さ	Y	cm 毎	-50cm	+150cm	8	

<表 3-3-3.1 立体ブロック構成と分割数>

ここで、データ量について考察する。

各ブロック内の物体存在判定は、ブロック内に障害物が存在したとき、最大となる画素数に対する割合を閾値として判定する。この閾値より、ブロック内に存在する画素数が多いければ、このブロックに何かが存在すると判定する。各ブロック毎に、画素の最大値は異なるため、その値を各ブロックの最大値データとする。水平方向に14分割するため、センサ付近のブロックが最大値となる。最大画素数は1ブロックあたり、以下となる。

$$176 \text{ 画素} \times 132 \text{ 画素} / 14 \text{ 分割} = 1,659 \text{ 画素/ブロック}$$

これは、11bit で表現することができる。1ブロックあたりの画素数は、他の属性やパラメータのことも考え、16bit の障害物の情報とする。

次に距離値である。障害物検出用途の場合、移動体から障害物の距離により速度制限を行う。ブロックまでの距離はブロックを特定した時点で算出できるが、25cm のどの位置に障害物があるか分かったほうが、制御に余裕ができる。あるブロックに存在判定し

た場合、データの平均値を距離値とする。25cm を mm 単位で分割することを考え、250mm に対応する 8bit を距離の情報とする。

存在確定の精度を上げるため反射光量もブロックごとに算出する。反射光量が大きければ存在する確率が向上する。この数値により、雑音との分離を行う。反射光量には、詳細な数値は必要ないので、8bit とする。ブロック内に存在する画素の平均値をブロックの反射光量とする。

2240 ブロックあるが、近距離の一部は、画角外となるためデータを削除する。

フレームレートは、走行速度から 15fps とする。

以下にブロック毎のデータ量をまとめる。

16bit (存在判定) + 8bit (ブロック内距離データ) + 8bit (反射光量) = 16bit/block

実測すると、118kByte/sec となり、伝送データの削減を実現することができた。

2) 安全通信

距離画像カメラからリスク算出ユニットへのデータ伝送は、リアルタイム性を要求される。移動しながら障害物を検出するためリスク計算ユニットには、現在のセンサのデータが入力される必要がある。

このため、通信には同期機能を追加し、送信するデータにはタイムスタンプを付加する。また通信には UDP を利用し、受信確認や再送要求は行わない。これは距離画像の情報は冗長であり、情報量が多いため複数のフレームを受信することができなくても、衝突前に障害物を認識することができるとの仮定からである。受信確認や再送要求を行う TCP/IP 通信の場合、再送要求を何度も行うと、最新のデータバケットを受信することができない。複数のデータバケットを受信できなくても、UDP により常に最新の情報を得る方が安全と考えた。

表 3-3-3.1、表 3-3-3.2、表 3-3-3.3 にデータ送信するためのデータ量と、フレーム構成を示す。送信容量は、1 フレームが、9 個の送信単位に分かれており、それぞれの送信単位は、

$8\text{byte (Line ヘッダ)} + 1120\text{byte (平面データ)} + 4\text{byte (CRC)} = 1132\text{Byte}$

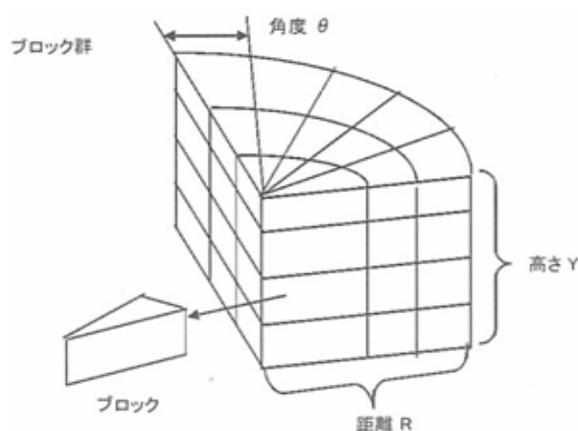
となる。平面データの 1120byte は、先頭の送信単位だけフレームヘッダになる。したがって、これを、9 倍したものがフレーム単位の送信容量になる。

$1132\text{byte (送信単位)} \times 9 \text{送信単位} = 10,188\text{byte (1 フレーム)}$

15fps を要求されているので、総合した送信容量は以下になる。

$$10,188\text{byte} (1 \text{ フレーム}) \times 15\text{fps} = 152,820\text{Byte/sec}$$

目標の 100kByte/sec 以下にはならなかったが、障害物の位置、存在の確からしさ、mm 単位の距離情報を損なうことなく、データ量の削減を実現することができた。不要ブロックを削除することで、よりデータ量を削減することができる。今回は、最終的にリスク計算ユニットに接続することはなくなったためすべてのブロックを送信するフォームを提案する。



<図 3-3-3.2 立体ブロック群>

データ			備考
画素数	n	16bit	ブロック内に入るZC出力の画素数の集計
最近接点距離	r	8bit	ブロック内の最近接点の距離値(相対値)
最近接点照度	a	8bit	ブロック内の最近接点の照度(0~255)

<表 3-3-3.2 立体ブロックのプロパティ>

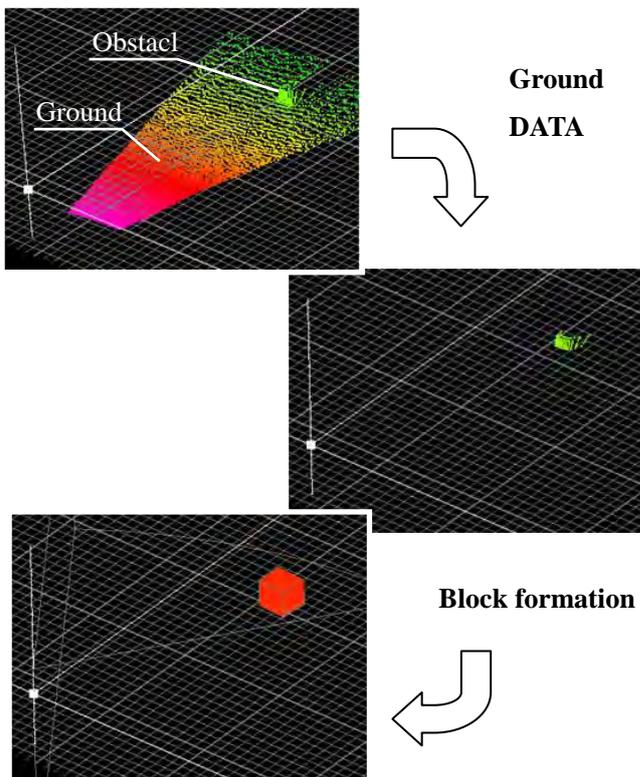
Lineヘッダ 8 byte	フレームヘッダ (1120Byte)	CRC (4Byte)
Lineヘッダ 8 byte	平面データ (14 * 20 * 4 = 1120Byte) (Y=0)	CRC (4Byte)
Lineヘッダ 8 byte	平面データ (14 * 20 * 4 = 1120Byte) (Y=1)	CRC (4Byte)
⋮		
Lineヘッダ 8 byte	平面データ (14 * 20 * 4 = 1120Byte) (Y=7)	CRC (4Byte)

<表 3-3-3.3 ブロックデータ伝送のための送信フレーム構成>

3) 障害物検知アルゴリズム

TOF3次元距離画像カメラから出力される距離画像には雑音が含まれており、これを除去する。距離画像カメラは下向きに取り付けられているので、算出した距離画像を3次元で座標変換し、回転して路面を作成する。路面から飛び出しているものを障害物として検出する。障害物は、3次元をブロック化しているため、ブロック単位で検出される。

図3-3-3.3に、障害物検知アルゴリズムの概念を画像処理の結果で表す。



< 図 3-3-3.3 障害物検出 >

3-3-4 障害物検知センサの試作・評価

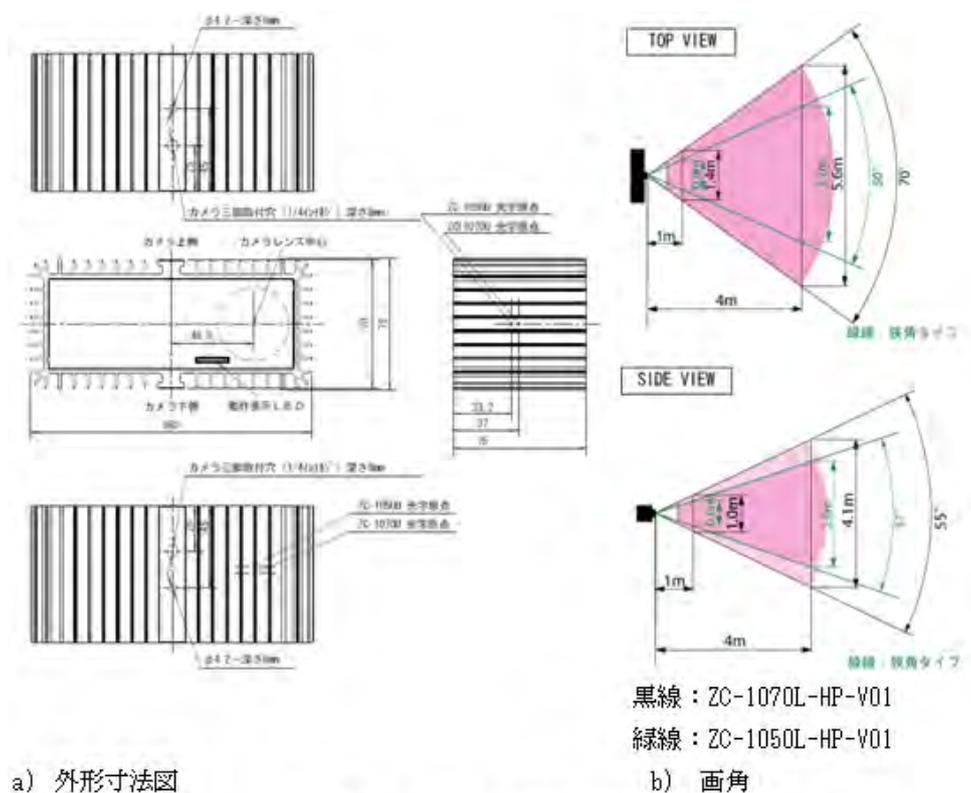
1) 障害物検知センサの試作

障害物検知センサの試作は、3段階で行った。1回目の試作は、投光量を向上した試作品で、インターフェースをEthernetとした。画角により検出距離が異なるため2機種種の試作を行った。Linuxドライバーの試作を行ったのは、センサとリスク計算ユニットの結合テストをPCで行うためである。

1回目の試作仕様を 表 3-2-4.1 に、外形寸法、画角を 図 3-2-4.1 に示す。

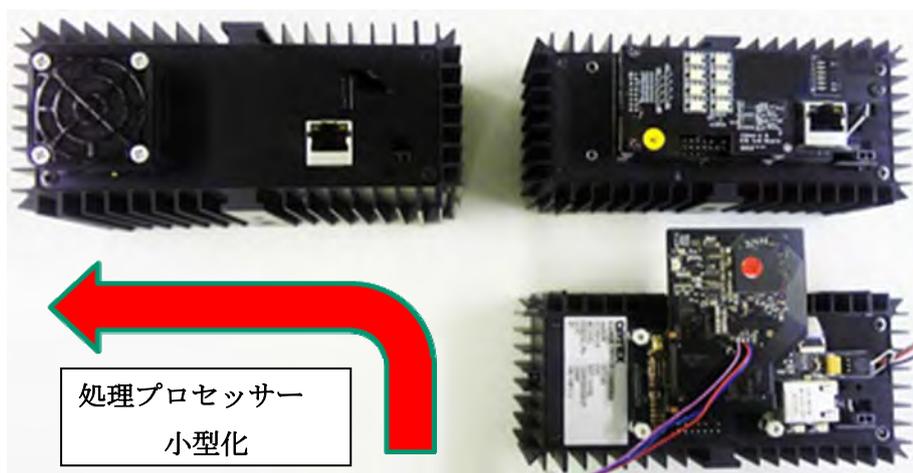
型式		ZC-1070L-HP-V01	ZC-1050L-HP-V01	備考
FOV	水平/垂直/対角	70° / 55° / 90°	50° / 37° / 59°	出力画素 176×132 の場合。数値は目安。画角図面参照。
出力画素数	水平/垂直	176 × 132 画素		
有効画素数	水平/垂直	160 × 120 画素		
光源		IR-LED 850nm		
距離検出距離	[m]	0.5m - 4m		数値は、計測条件や、設定モードにより異なる。
距離精度	[%]	X、Y軸 ±5%(Typical) Z軸 ±2%(Typical)		25°C 距離1.5m 反射率>90% 画面中央 Fineモード
距離σ	[%]	Z軸 ±2%(Typical)		25°C 距離1.5m 反射率>90% 画面中央 Fineモード
光変調周波数	[Hz]	20MHz (20/30MHz LongRangeモード)		
フレームレート	[fps]	30fps.max		シャッター時間との調整。1fps毎に選択可能。
電源		12VDC 3A		電源ケーブル付属
消費電力	[W]	15-20W.Typical 30W.max		最大電力は、ピーク値
表示LED		前面(青、赤、緑) 背面(緑)		
インターフェース		Ether NET : 100BaseT TCP/IP		POE給電は不可。
出力フォーマット		B,Z,X,Y(16bit) あるいは、B,Z(16bit) 選択可能		選択は、コマンドによる
接続コネクタ		電源プラグ RJ45		
取り付け		カメラマウント 1/4インチ 筐体の上下に2箇所		
寸法	[mm]	160 × 72 × 75mm		突出部は含まず。外形図面参照。
本体質量	[kg]	0.7kg 以下		
ファン		風量: 0.15m ³ /min 回転数: 6,500rpm 期待寿命: 60,000hr		電源接続時 常時送風
動作温度範囲	[°C]	0 - 50°C		
使用周囲湿度	[%RH]	80%RH以下 結露なきこと		
使用周囲照度	[Lux]	100,000 Lux 以下		
PC側対応OS		Linux		
カメラ起動時間		20秒以下		起動中は、前面 赤色LED点滅。

< 表 3-2-4.1 1回目試作品仕様 >



< 図 3-2-4.1 1回目試作品外形寸法と画角 >

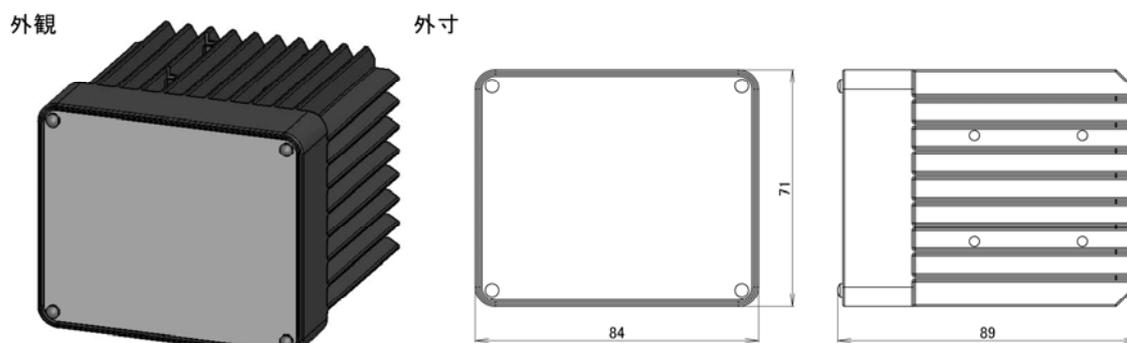
2回目の試作で、データ圧縮用プロセッサを追加し、障害物検知アルゴリズム開発を行った。アルゴリズム開発を優先するためプロセッサ試作は、難易度の低い大型のものから始め基板の小型化を行いケースに収めた。走行試験は、主にこの試作品を用いた。走行試験のために、リレー出力を追加し、障害物検知時には、ブザーやLEDを点灯させ検知タイミングの確認用に利用した。外形寸法、画角は、1回目の試作品と同一とした。



< 図 3-2-4.2 2回目試作品写真 >

3回目の試作では、投光部や距離演算部の小型化を実施し、最終仕様とした。ただし、中間品に取り付けていたブザーや、LEDは小型化試作では取り付けていない。ロボット用途としては、より小型化のものが望まれており、サイズ縮小にチャレンジした。1回目の試作品と比較して、容積比で1/2以下となっている。

画角は、水平画角 50° の1機種とした。カメラの性能は、1回目の試作 ZC-1050L-HPと同一であり、画像処理能力は、2回目の試作と同一である。



< 図 3-2-4.3 3回目試作品外観と外形寸法図 >

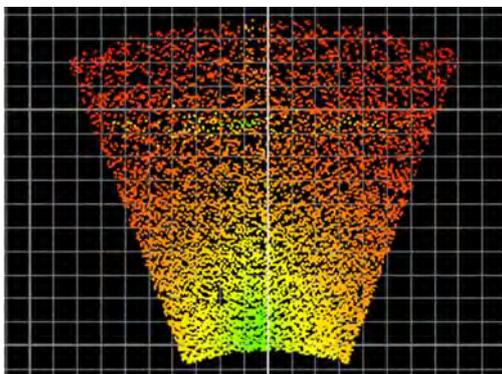
型式		XZC2-1050L-HP	備考
FOV	水平/垂直/対角	50° /37° /59°	出力画素 176×132 の場合、数値は目安。 画角図面参照。
出力画素数	水平/垂直	176 × 132 画素	
有効画素数	水平/垂直	160 × 120 画素	
光源		IR-LED 850nm	
距離検出距離	[m]	0.5m - 4m	数値は、計測条件や、設定モードにより異なる。
距離精度	[%]	X, Y軸 ±5%(Typical) Z軸 ±2%(Typical)	25℃ 距離1.5m 反射率>90% 画面中央 Fineモード
距離σ	[%]	Z軸 ±2%(Typical)	25℃ 距離1.5m 反射率>90% 画面中央 Fineモード
光変調周波数	[Hz]	20MHz	Mode : Normal
フレームレート	[fps]	30fps	シャッター時間との調整。1fps毎に選択可能。
電源		12VDC 3A	電源ケーブル付属
消費電力	[W]	15-20W.Typical 30W.max	最大電力は、ピーク値
インターフェース		Ether NET : 100Base-TX UDP	POE給電は不可。
出力フォーマット		ブロック検出力	
取り付け		カメラマウント 1/4インチ 筐体の上下に2箇所	
寸法	[mm]	84 × 71 × 89mm	突出部は含まず。外形図面参照。
本体質量	[kg]	0.7kg 以下	
ファン		風量:0.15m3/min 回転数:6,500rpm 期待寿命:60,000hr	電源接続時 常時送風
動作温度範囲	[°C]	0 - 50°C	
使用周囲湿度	[%RH]	80%RH以下 結露なきこと	
使用周囲照度	[Lux]	100,000 Lux 以下	
カメラ起動時間		20秒以下	

< 表 3-2-4.2 3回目試作品仕様 >

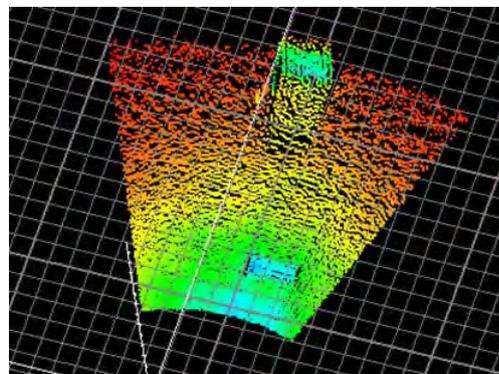
2) 障害物検知センサの評価

試作した TOF3 次元距離画像カメラを使った障害物検知センサにて、路面、障害物、溝、階段など、いくつかの場所にて、距離画像の取得を行った。

図 3-2-4.4 は、カメラを 85cm 高さに設置し、下向き 35° にて室内で床面を撮影したものである。a) では、床には一面カーペットが敷かれており、十分な反射光量が得られており、均質な床面を取得できている。b) は、P タイルの上に、白色の反射率 86% の 20cm 高さのブロックを置いたものである。カメラから 2m 離れた位置であるが、障害物として検出している。



a) 室内床面



b) P タイル上の 20cm 高さの障害物

< 図 3-2-4.4 室内床面と障害物 >

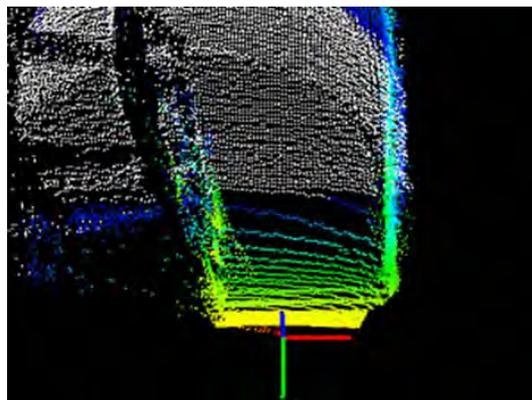
計測条件 : 室内、カメラ高さ 85cm、下向き 35°、床面カーペット

図 3-2-4.5 は、室内の階段の距離画像である。カメラの取り付け高さ 89cm、下向き 30° の画像である。カメラ画面の下端を、階段の始まりの位置に設定した。この角度では階段のステップも見えており、円形をしている壁の形状も 3 次的に取得できている。カメラの仰角は下を向けた方が階段のステップが見え、階段の特徴を掴むことができるが、長距離側の視野が狭くなる。30° 下向きで、画面上端の床面の距離は 4m となる。

電動車いすの障害物検出の応用には、階段のように落下の危険を検出することも危険回避の面で重要である。障害物の検出ロジックとは逆に、床面を検出しなくなった時に警告をするシステムである。今回はアルゴリズム開発が間に合わなかったが、電動車いすのリスク分析では、重要な検討課題である。



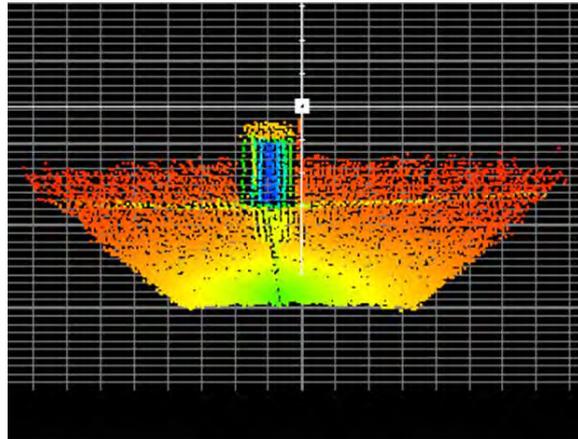
a) 室内階段 カラー写真



b) 階段の距離画像

< 図 3-2-4.5 室内階段 >

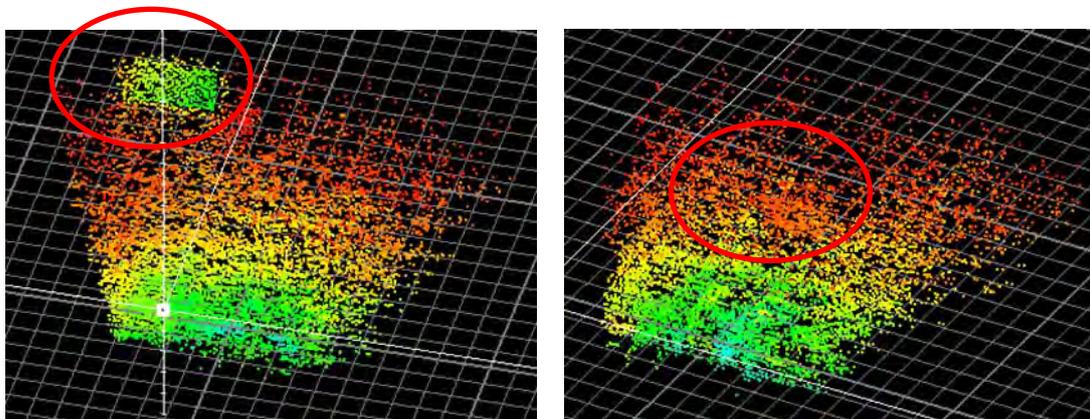
図 3-2-4.6 は、P タイル上にある円柱の障害物である。反射率 86%の白紙で包んでいる。カメラの設置高さは、85cm、下向き 35° の距離画像である。円形の形状が見えているが、側面は反射強度が低く、雑音処理の手法によっては、側面が消えることもある。



< 図 3-2-4.6 円柱 >

図 3-2-4.7 に、屋外太陽光下での計測結果を示す。20cm 高さの段差検出を想定し、歩道に 20cm 高さのブロックを置き、検知実験を行った。カメラの設置高さは、85cm、下向き 35° の設置条件である。太陽光の照度は、100,000Lx を超えている。

a) では、白色の 86% 反射のブロックを用い、カメラからの距離 2,200mm で検出している。目標 2m なので目標値に近い。b) は黒色の 7% 反射ブロックである。画面上での存在も見えにくくなり、検出距離も 1,600mm と目標を下回った。



a) 86% 反射ブロック

b) 7% 反射ブロック

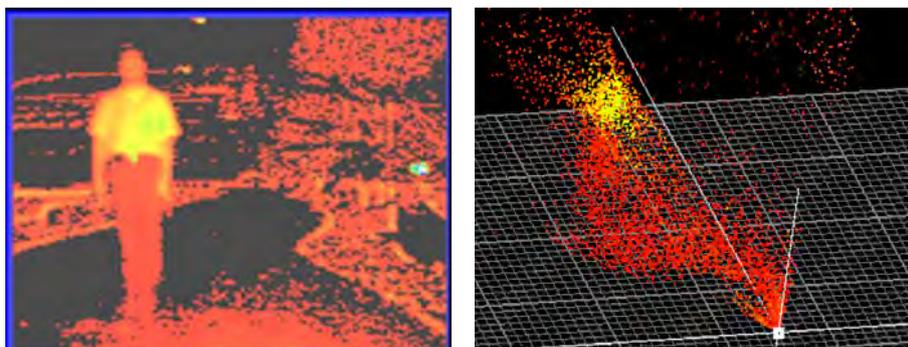
< 図 3-2-4.7 屋外 20cm 高さ段差検知 >

計測条件 : 屋外 100,000Lx、カメラ高さ 85cm、下向き 35°、コンクリート

距離画像カメラは、TOF (Time Of Flight) の原理を利用しているが、実時間として反射時間を計測しているわけではなく、周期的なパルス光に対する位相差を計測して距離に換算している。したがって、折り返しと呼ばれる距離までしか正確な距離を計測することができない。ここまでの計測には、20MHz の変調周波数を用いたため、折り返し距離

は7.5mであった。

この場合、7.5mより長距離側での反射光が返ってきたとき、雑音となる。この折り返し雑音を防ぐため、変調周波数を10MHzまで下げて、計測を行った。10MHzでは折り返し距離は、15mとなるため、長距離の反射による折り返し雑音の影響を受けにくい。



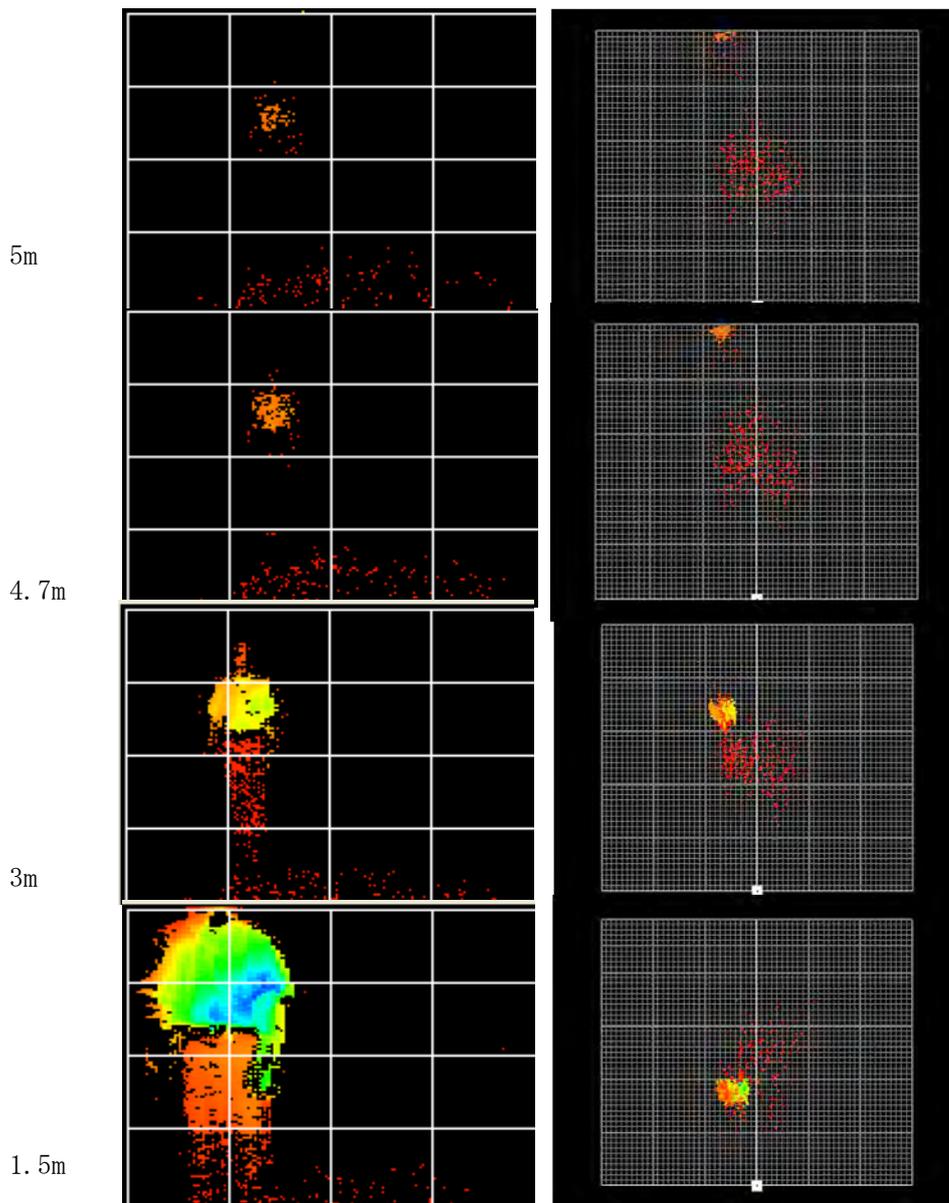
a) 距離4mの人体（反射強度画像） b) 距離4mの人体（距離画像）

< 図3-2-4.8 変調周波数10MHzの屋外人体検出 >

計測条件 : 屋外 100,000Lx、カメラ高さ 85cm、下向き 35°、10MHz

4mの距離では人体の形状は、3次元的に復元することができないが、反射画像では反射強度の強い部分がある。ターゲットの人体は、身長170cm、白シャツの反射率56%、ズボンの反射率14%である。反射率の計測は、基準反射板と比較した簡易的な測定方法である。

反射率の高い、上半身と反射率の低い下半身で、検知確率は異なる。



a) 人体反射強度画像

b) 人体距離画像（上から見た図）

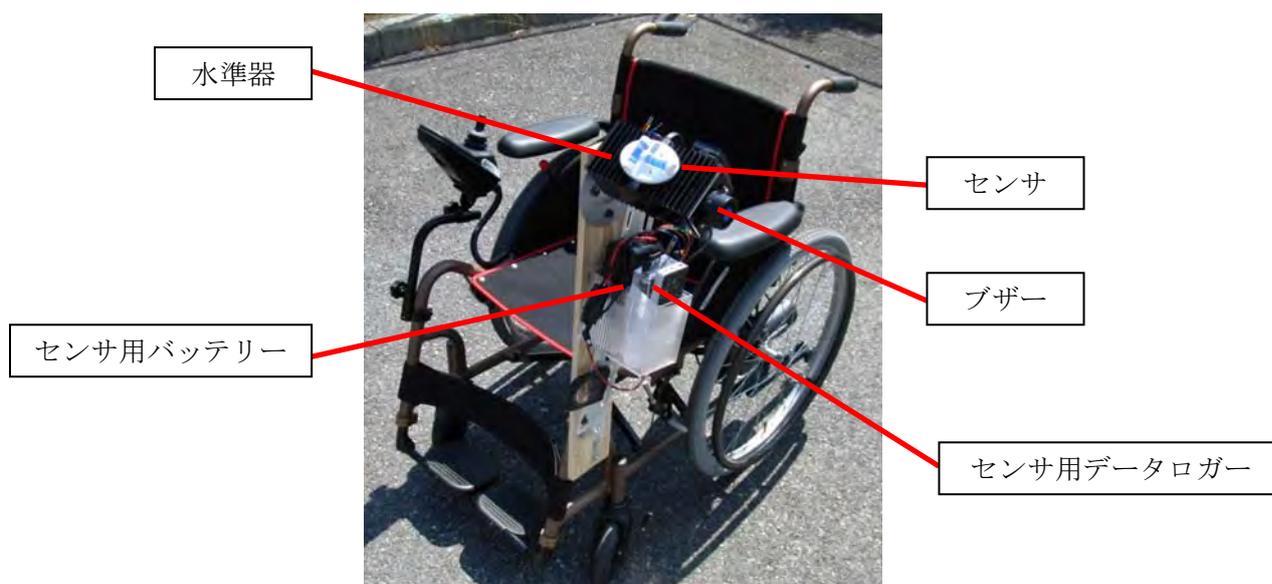
< 図 3-2-4.9 変調周波数 10MHz の屋外人体検出 >

計測条件 : 屋外 100,000Lx、カメラ高さ 85cm、下向き 35°、10MHz

雑音処理を行い、人体検知の限界距離を求めた。雑音を減少させると、反射画像も暗くなり、長距離側では検出が難しくなる。4.7m で検出することができたが、距離画像は鮮明ではない。3m では、反射強度画像でも人の形を認識することができる。

3) 走行実験

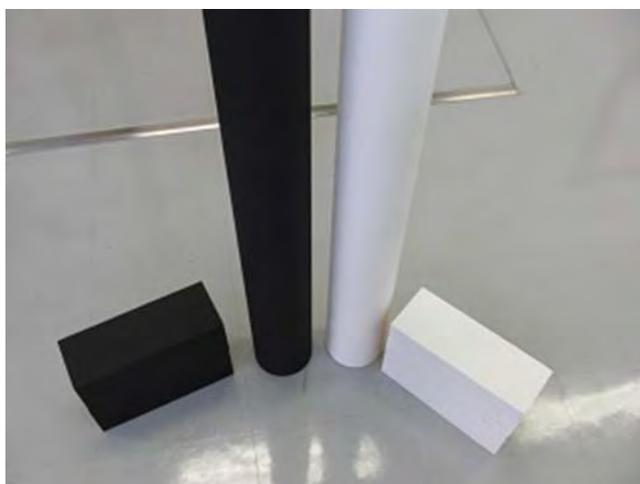
ここで、ターゲットの形状、反射率、床面の材質を変更し、障害物検出の走行実験を行った。市販のタオライトーⅡに、障害物検知センサを取り付けた。障害物検出センサとして、2回目の試作品で、障害物検出アルゴリズムを実装済みのものを利用した。画角は、水平50°のものを利用した。センサからは、デジタル出力が出ており、ブザーとLED 2個に接続されている。障害物を検出するとブザーが鳴り、LEDが点灯する。これにより、移動しながらでも、検知タイミングを計測することができる。



< 図 3-2-4.10 走行実験用電動車イス >

計測条件 : カメラ高さ 85cm、下向き 35°、最高時速 6km/h

使用したターゲットは、円柱(φ100mm×1,100mm高さ)と、高さ20cmのブロック(100mm×200mm×200mm高さ)である。それぞれ、反射率86%、7%とした。



< 図 3-2-4.11 走行実験に利用するターゲット類 >

床面は、黒いカーペットと、P タイルと呼ばれる光沢の床を使った。各ターゲットに衝突コースで向い、側方からビデオカメラで録画する。LED が点灯したタイミングを画像から解析し、ターゲットまでの距離を計測する。ターゲットまでの計測誤差を考慮し、結果は、100mm 単位の数値とした。走行速度は、市販の電動車いすの最高速度 6km/h 一定とした。

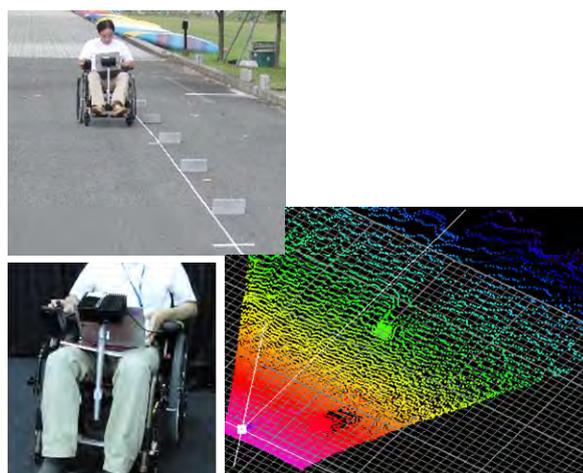


< 図 3-2-4.12 P タイル上の走行実験 >

室内の走行実験の結果を、表 3-2-4.3 にまとめる。20cm 高さのブロックでは、2m 以上の距離で検出しているが、円柱では、2m 以内の検出となった。これは円柱側面の角度により、反射光量が低下するためである。

形状		検出距離 [mm]	
		黒色カーペット	Pタイル
円柱	白 86%	1,500	1,200
	黒 7%	1,600	1,500
ブロック	白 86%	2,100	2,100
	黒 7%	2,100	2,300

< 表 3-2-4.3 室内走行実験結果 >



< 図 3-2-4.13 屋外での障害物検知センサ走行実験 >

次に、屋外で太陽光下での検知実験を行った。カメラに対して太陽の位置により結果が変わったため、2種類の方向で実験を行った。ターゲットに対して、太陽が正対する場合を順光状態と呼び、太陽光がカメラから見ているターゲット表面に当たらない方向を逆光状態と呼ぶ。ターゲットは、白色(反射率 86%)、黒色(反射率 7%)の2種類の表面状態とし、高さも、200mm、300mmと変化させた。

結果を、表 3-2-4.4 に示す。

ブロック		路面環境	検知距離 [mm]	
反射率	高さ		逆光	順光
白 (86%)	200mm	コンクリート	2,200	1,100
		アスファルト	2,300	1,000
	300mm	コンクリート	2,300	1,200
		アスファルト	2,300	1,700
黒 (7%)	200mm	コンクリート	1,800	非検知
		アスファルト	2,000	1,400
	300mm	コンクリート	2,000	1,300
		アスファルト	1,700	非検知

< 表 3-2-4.4 屋外走行実験結果 >

太陽光は、距離画像カメラにとっては、雑音となる。順光状態で太陽光がターゲットに当たると、カメラからの投光と混合され受光部に入光する。これが画面上のノイズと

なる。逆光の場合は、ブロックの高さを、200mm, 200mm と変えて検出距離の計測を行った。ブロックは、白色（反射率 86%）を使い、測定中の照度は、90,000lx であった。

また、溝についての検知実験を行った。溝検知の場合には、路面の下の障害物を検知するようにアルゴリズムを変更して行った。溝の側面を障害物と想定し、路面高さよりも下にある場合を溝と判定する。したがって、側面のある溝を想定している。

実験には、屋外に溝深さ（20cm）だけ路面から持ち上げた板を 2 枚用意し、2 枚の板の間隔を溝とした。溝側面を作るため白色の板で側面を覆った。溝の幅を変化させて、検知できる距離を測定した。

結果を表 3-2-4.5 に示す。1m 以上の距離で検知しているが、溝側面の反射の角度などにより検知距離は安定しなかった。アルゴリズムとしての可能性は示したが、実用的でレベルではない。実験時の照度は、14,000lx であった。



< 図 3-2-4.14 屋外溝検出実験 >

検知距離 [mm]		
溝幅 [mm]	速度	
	3km/h	6km/h
100	700	1,000
200	1,000	1,000
300	1,300	1,300
400	1,000	2,000

< 表 3-2-4.5 屋外溝検出実験結果 >

4) 安全検証センターによる人口太陽実験

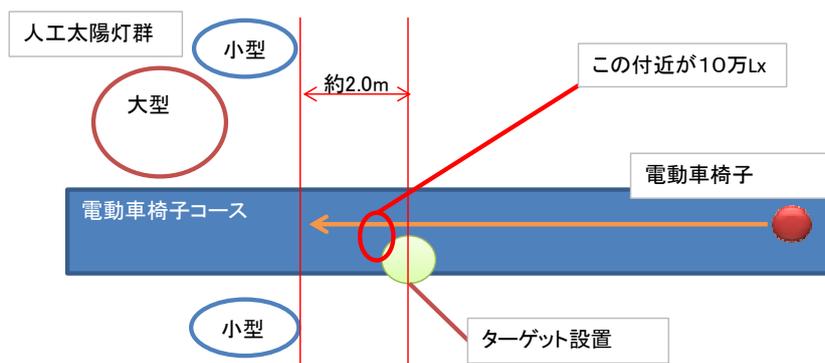
屋外で、100,000lx の太陽照度下での実験は天候に左右され、安定した条件で長時間実験を行うことができない。安全検証センターには、人口太陽灯があり、安定した照度を保ち、長時間同一条件で計測を行うことができる。大型太陽灯 1 台と、小型 2 台で設定するが、100,000lx が得られる領域はスポットである。位置をずらすと、急激に照度が低下する。

太陽と、センサの位置関係を、カメラの照明に擬えて順光、逆光と称する。順光がカメラの見ている方向と同じ方向に人工太陽灯の光が向かう場合である。逆光は、カメラの方向に向かって人工太陽灯を設置する場合である。

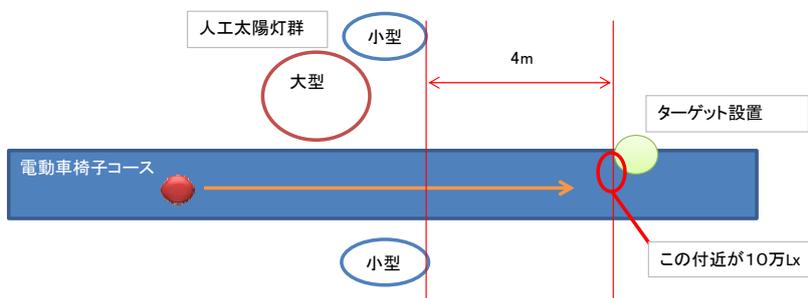
距離画像カメラの太陽光の影響は、順光の方が大きい。太陽光がターゲットに当たっ

て、反射光がカメラに入光する。この時、カメラからの投光による反射光と、太陽光の反射が、カメラの受光部で混合される。これが雑音の原因になる。

図 3-2-4.14、図 3-2-4.15 に逆光と、順光の人工太陽灯の配置と、電動車いすの走行方向を示した。走行速度は、10km/h 一定とした。



< 図 3-2-4.14 逆光の場合の人工太陽灯の配置と走行方向 >



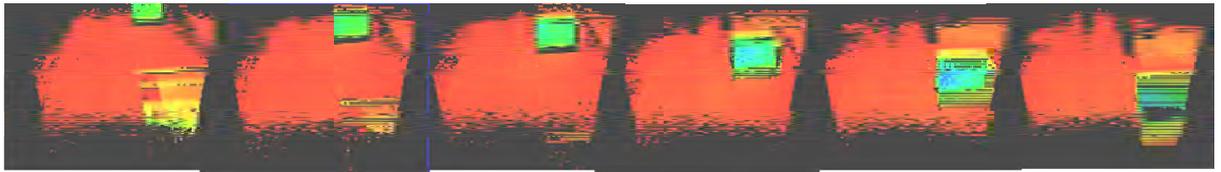
< 図 3-2-4.15 順光の場合の人工太陽灯の配置と走行方向 >

逆光	検知距離	順光	検知距離
白20cm高	2.1m	白20cm高	非検知
黒20cm高	非検知	黒20cm高	非検知

< 表 3-2-4.6 人工太陽実験結果 >

逆光では 20cm 段差を検出したが、それ以外の条件では検出しなかった。白ターゲットが、86%反射率であり、黒が 7%反射率である。

図 3-2-4.7 の実験では、100,000Lx 環境下で、黒ターゲットも 1.3m で検出していた。人工太陽灯を使うと、太陽の高さを高くすることができないので、より厳しい条件となっている。



< 図 3-2-4.16 人工太陽実験結果 ～ 順光の場合の反射強度画像 >

図 3-2-4.16 は、順光の場合のターゲットに接近しているときの画像である。時速 10km で走行すると、30fps 水平画角 50° のカメラで、6 コマ撮影されている。距離画像では、距離のばらつきが大きくターゲットを補足できないが、反射強度画像ではターゲットが鮮明に映っている。

3-3-5. TOF3 次元距離画像カメラを用いた障害物検出センサのまとめ

TOF 位相差方式の 3 次元距離画像カメラを用いて、障害物検出センサを試作した。3 段階の試作は、それぞれ以下に記載した目的で行った。

当初の目標と異なり、距離画像カメラではなく、障害物検出のための 3 次元画像処理機能を有する距離画像カメラを試作した。これは、搭乗者への注意喚起としての障害物検出出力も有しており、ブザーや、LEDなどを付加すると、自立して利用することができる。組み込み系のロボットへの追加機能として付加する場合を想定して、小型化の試作も実施した。

障害物検出センサの試作と目的：

- 1 回目 投光量の増加、路面検出用の投光光学系の作成
- 2 回目 通信量の削減のための CPU 追加、安全通信フォーマットの提案.
障害物検出センサの検出アルゴリズム開発・評価
安全検証センターでの人工太陽を使った検出試験
- 3 回目 搭載スペース確保のための小型化 (2 回目試作品の容積で約半分)

2 回目試作品を使って、障害物検出実験を行った。目標 2m 先、20cm 高さの段差と仮定して評価を行った。100,000lx 逆光の条件で、20cm 高さの白ブロック (反射率 86%) を 2m 以上の距離で検出したが、順光では 1m 程度の検出距離となった。安全検証センターの人工太陽実験では、実際の太陽よりも低い仰角で光が当たるため、屋外で行う試験より厳しい条件となり、100,000lx では黒ブロック (7%) では検出できず、白ブロック (86%) 逆光のみの検出となった。

リスクアセスメントで提起された溝への落下を防ぐための溝検出機能の確認も行った。溝の壁を路面より低い位置で検出する論理を利用してアルゴリズムを作成した。

画像処理回路付の小型化の試作は、当社製品と比較して 1/2 の容積となった。

3-4. 安全要素モジュール：無線通信（ヴィッツ）

3-4-1. 通信の安全に対する要求事項

本研究において、搭乗型移動ロボットで利用可能な超低通信エラー率を実現する頑強な無線通信手段を実現する。無線通信手段の実現のために、通信プロトコルスタックとアプリケーションの間に、機能安全通信モジュールレイヤとして安全通信モジュールを設ける。安全通信モジュールでは機能安全規格 IEC61508 と安全通信規格 IEC61784 を参考にして安全通信を実現する。

無線通信では、搭乗型移動ロボットが必要とする安全度水準と同等の安全度水準を満たすために、機能安全規格 IEC61508 より SIL2 相当の安全度水準を満たすように実現する。IEC61508 SIL2 ではシステムで許容できる残余誤り率が $10^{-9}/h$ 未満となることを要求している。そのため、無線通信における残余誤り率は $10^{-9}/h$ 未満とする。

また、安全通信規格 IEC61784 で提唱している安全性を阻害する通信脅威への対策を取り入れる。IEC61784 には以下の 8 つの通信脅威が記載されている。

- ・ くずれ
 - バス通信範囲内での通信対象のエラー等により、通信メッセージが崩れてしまうこと。
- ・ 繰り返し
 - エラー、故障、または干渉により、古い未更新のメッセージが、誤って繰り返し送信されること。
- ・ 誤ったシーケンス
 - エラー、故障、または干渉により、メッセージに関連付けられるシーケンスが不正となること。
- ・ 損失
 - エラー、故障、または干渉により、メッセージが受信されない、または、認識されないこと。
- ・ 遅延
 - メッセージが、伝達媒体、混雑した通信線、干渉におけるエラーのために、許された到着時間を越えて遅れてしまうこと。
- ・ 挿入
 - 故障、または干渉により、予想外もしくは不明なソースが付け加えられること。
- ・ なりすまし
 - 故障、または、干渉により、メッセージが付け加えられ、非安全なメッセージが安全関連対象に受信され、安全なメッセージとみなしてしまうこと。
- ・ アドレス指定
 - 故障、または干渉により、安全関連メッセージが、別の安全関連対象に送られ、正常として受信されてしまうこと。

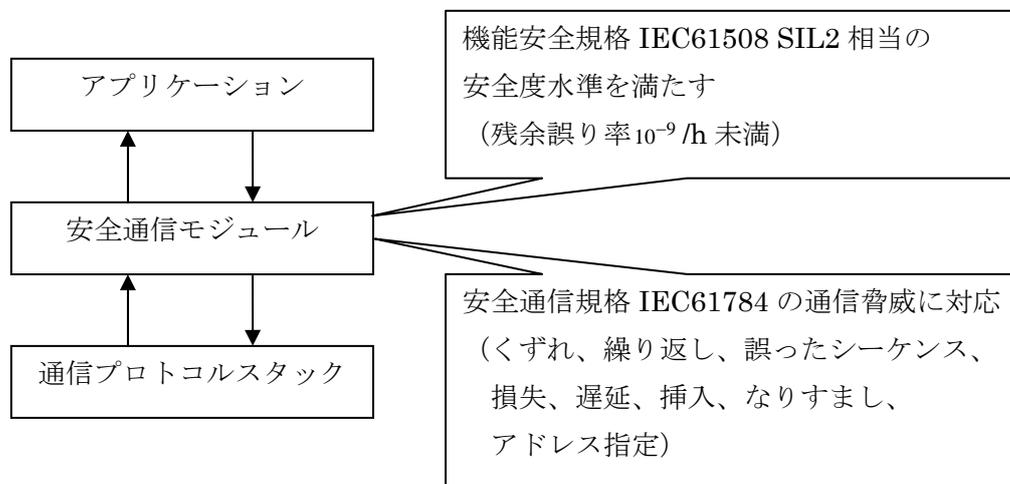


図 3-4-1-1 無線通信に対する要求事項

3-4-2. 通信脅威の分析

IEC61784 にて規定されている通信脅威とその対策について述べる。

3-4-2-1. 通信脅威

各通信脅威について述べる。

- くずれ

メッセージが、バス通信範囲内での通信対象のエラーのため、伝達手段のエラーのため、または、メッセージ干渉により、くずれてしまう脅威である。くずれ発生時の例を下記に示す。正常時では送信側が用意したデータ 1 が受信側に正しく伝達される。一方、くずれ発生時にはデータ 1 がデータ 2 にくずれ、受信側に意図しないデータが伝達される。

- 繰り返し

エラー、失敗、または干渉により、古い未更新のメッセージが、誤って繰り返し送信される脅威である。繰り返し発生時の例を下記に示す。正常時では送信側から 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 2、3 回目にデータ 3 が受信側に伝達される。一方、繰り返し発生時には 1 回目にデータ 1 が送信された後、2 回目に送信したデータ 2 が繰り返される。そして 3 回目にデータ 3 が伝達される。そのため、受信側には意図しないデータが伝達される。

- 誤ったシーケンス

エラー、失敗、または干渉により、特定の情報源からのメッセージに関連付けられる、あらかじめ定義されたシーケンス(たとえば、時間引用した自然数など)が不正となる脅威である。誤ったシーケンス発生時の例を下記に示す。正常時では受信側に 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 2、3 回目にデータ 3 が伝達される。一方、誤ったシーケンス発生時には受

信側に 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 3、3 回目にデータ 2 が伝達され、意図しない順番でデータが伝達される。

- 損失

エラー、失敗、または干渉により、メッセージが受信されない、または、認識されない脅威である。損失発生時の例を下記に示す。正常時では送信側から 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 2、3 回目にデータ 3 が伝達される。一方、損失発生時では送信側から 1 回目にデータ 1 が伝達されるが、2 回目にデータ 2 が損失する。そして 3 回目にデータ 3 が伝達される。そのため、受信側では意図しないデータが伝達される。

- 遅延

メッセージが、伝達媒体、詰まった伝送線、干渉におけるエラーのために、許された到着時間を越えて遅れる脅威である。遅延発生時の例を下記に示す。正常時では送信側から時刻 0 に送信されたデータ 1 が時刻 1 までに受信側に伝達される。一方、遅延発生時では送信側から時刻 0 に送信されたデータ 1 が時刻 1 を過ぎて受信側に伝達される(ここでは許される到着時間を 1 とする)。

- 挿入

失敗、または干渉により、予想外もしくは不明な送信源からメッセージが付け加えられる脅威である。挿入の例を下記に示す。正常時では送信側から 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 2、3 回目にデータ 3 が伝達される。一方、挿入発生時には送信側から 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 2 が伝達された後、不明な送信源からデータ 4 が伝達される。そして 3 回目にデータ 3 が伝達される。そのため、受信側には意図しないデータが伝達される。

- なりすまし

失敗、または干渉により、明らかに有効な情報源からメッセージが付け加えられることにより、非安全なメッセージが受信され、それを安全なメッセージとみなしてしまう脅威である。なりすましの例を下記に示す。正常時では送信側から 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 2、3 回目にデータ 3 が伝達される。一方、なりすまし発生時には送信側から 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 2 が伝達された後、非安全な送信源からデータ 4 が付け加えられる。そして 3 回目にデータ 3 が伝達される。そのため、受信側には意図しないデータが伝達される。

- アドレス指定

失敗、または干渉により、安全関連メッセージは間違った安全関連対象に送られることにより、正しいように受信される脅威である。アドレス指定の脅威を下記に示す。正常時では送信側から送信されたデータ 1 は受信側 1 に伝達される。一方、アドレス指定発生時では送信側から送信されたデータ 1 は受信側 2 に伝達され、受信側 2 では正常なデータとして受信する。



正常時



異常時

図 3-4-2-1-1 くずれの例

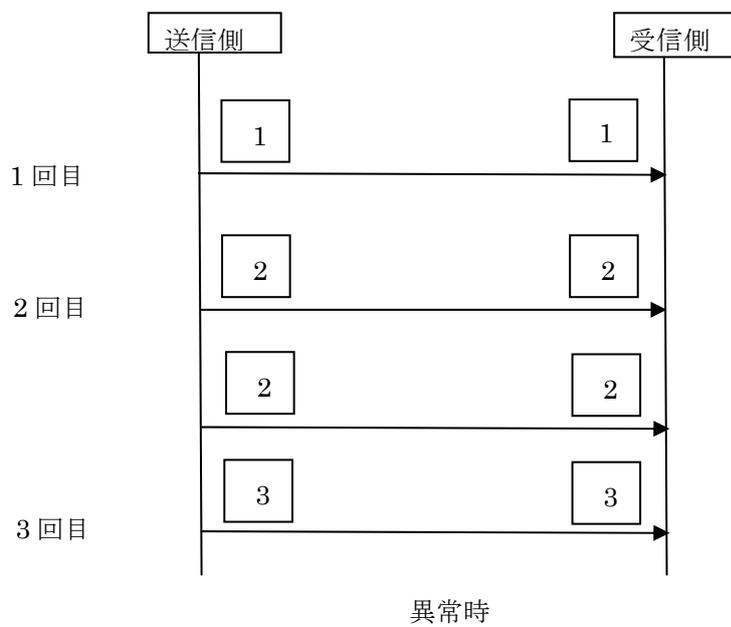
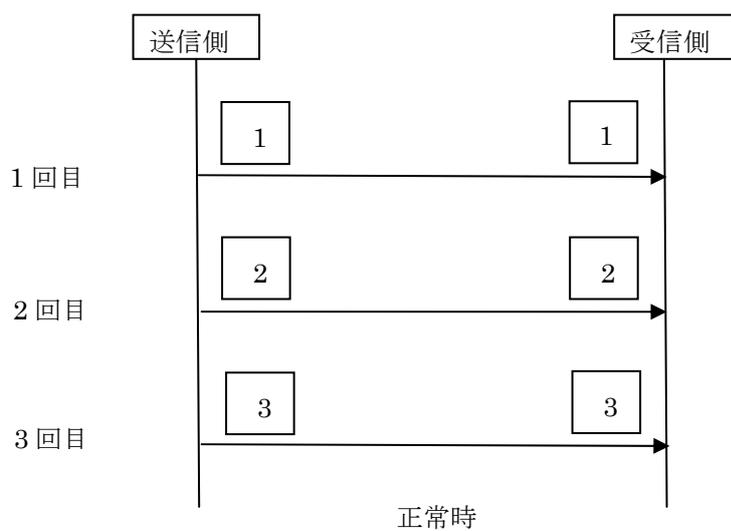


図 3-4-2-1-2 繰り返しの例

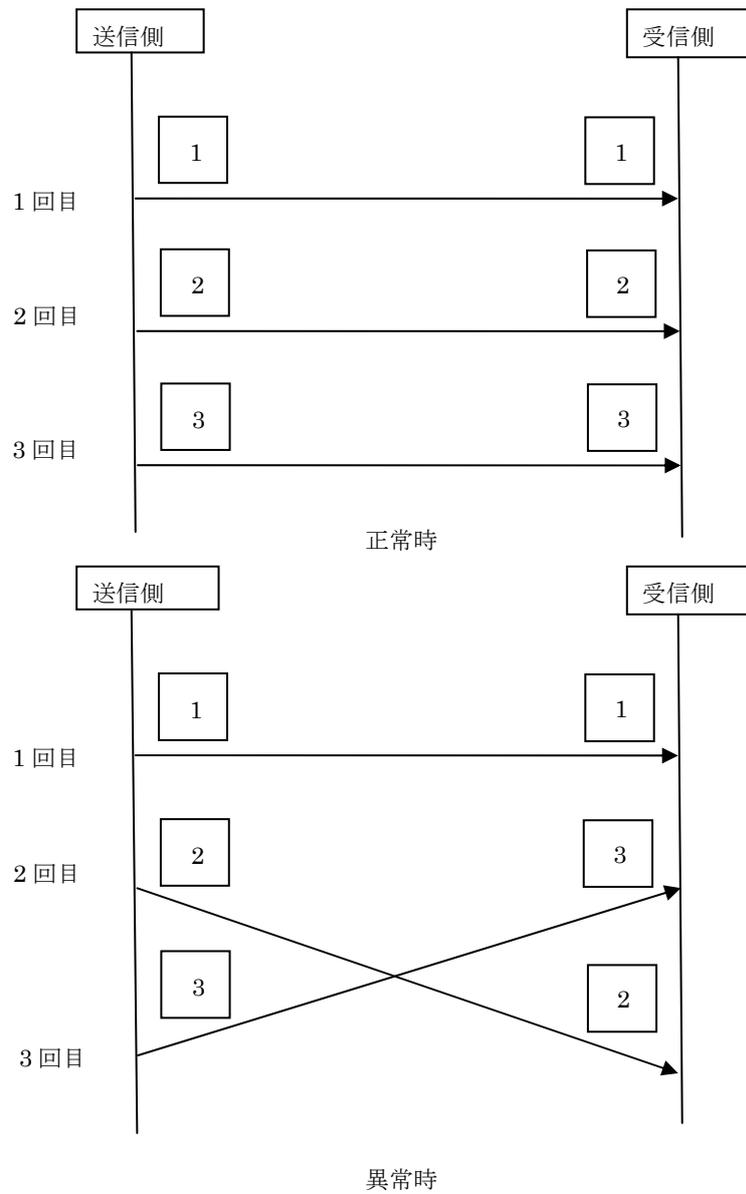


図 3-4-2-1-3 誤ったシーケンスの例

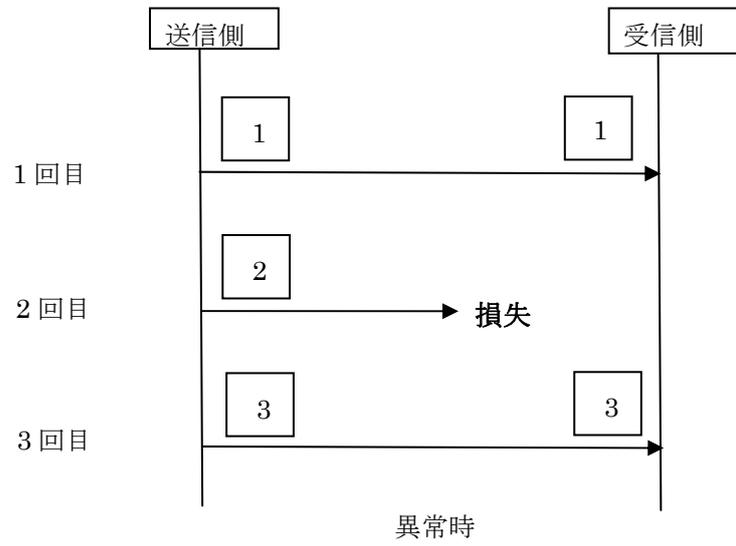
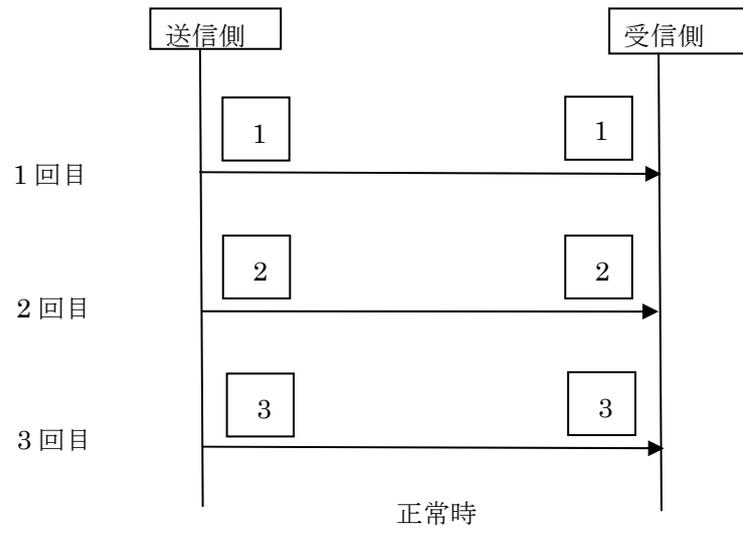


図 3-4-2-1-4 損失の例

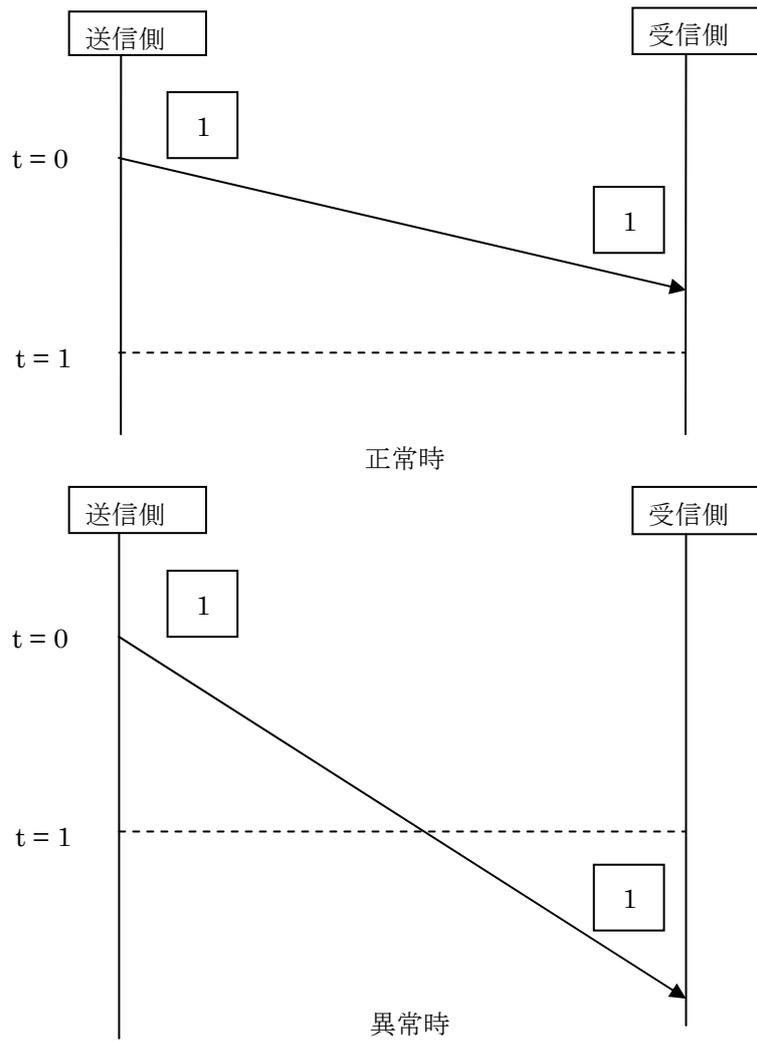


図 3-4-2-1-5 遅延の例

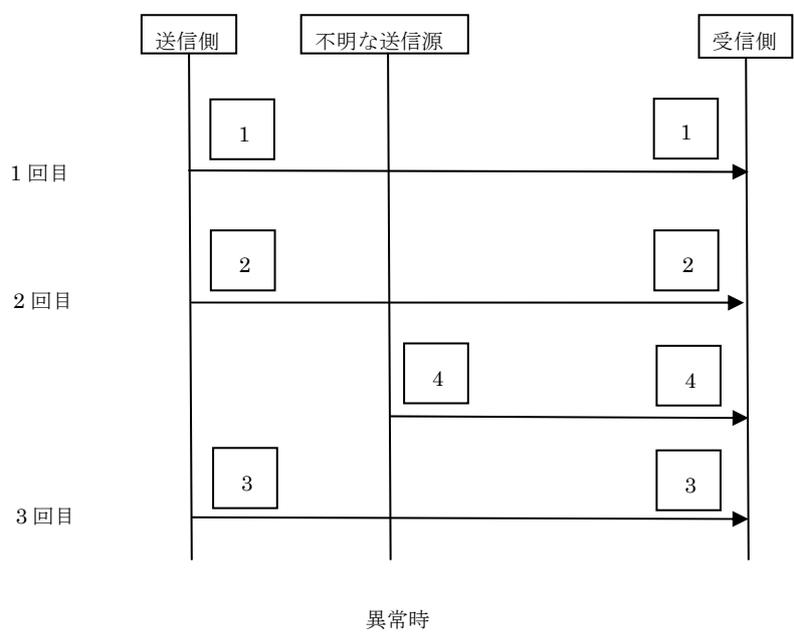
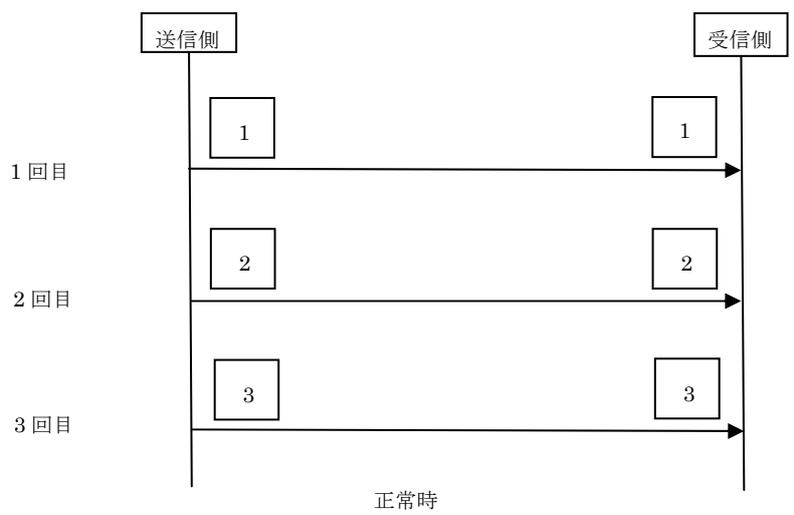


図 3-4-2-1-6 挿入の例

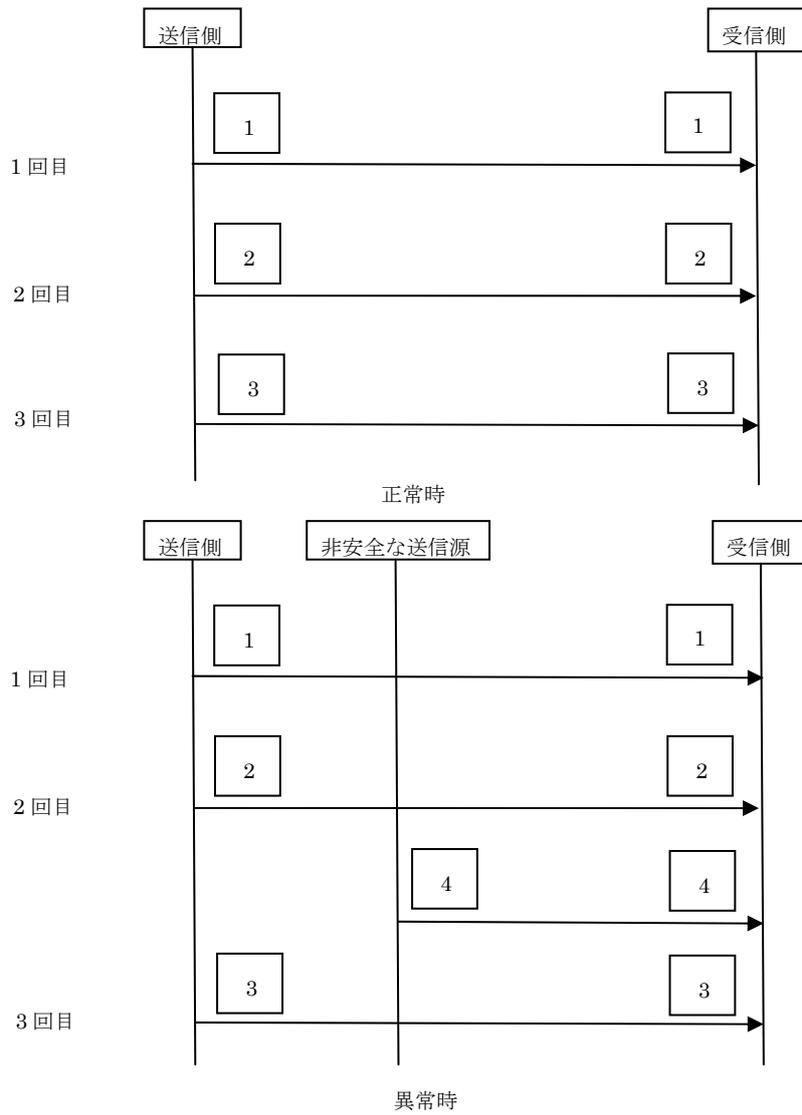


図 3-4-2-1-7 なりすましの例

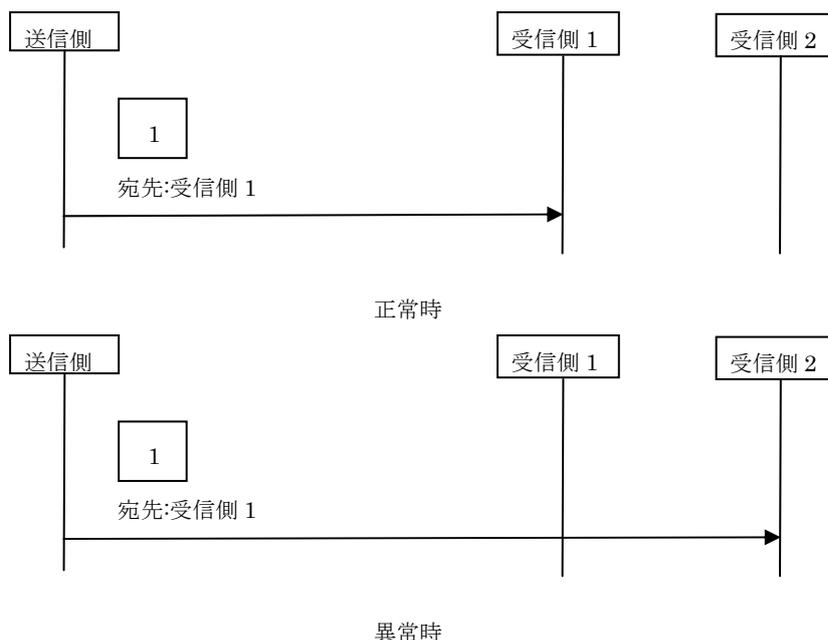


図 3-4-2-1-8 アドレス指定の例

3-4-2-2. 通信脅威への対策

各通信脅威への対策について述べる。

3-4-2-2-1. シーケンス番号による対策

送信側と受信側の間でやりとりされるメッセージに、シーケンス番号を付け加えることで通信脅威への対策を行う。シーケンス番号で対策可能な通信脅威をそれぞれの例を用いて示す。

- 繰り返し

繰り返しの対策例を下記に示す。送信側が1回目にデータ1、2回目にデータ2、3回目にデータ3を送信する場合を考える。未対策時には1回目にデータ1、2回目にデータ2を受信し、3回目にデータ2を繰り返し受信する。そして4回目にデータ4を受信する。一方、シーケンス番号による対策時には、受信側は1回目にシーケンス番号S1が付加されたデータ1を受信し、2回目にシーケンス番号S2が付加されたデータ2を受信する。そして3回目に再度シーケンス番号S2が付加されたデータ2を受信する。これにより同じデータを繰り返し受信したことを認識可能となる。

- 誤ったシーケンス

誤ったシーケンスの対策例を下記に示す。送信側が1回目にデータ1、2回目にデータ2、3回目にデータ3を送信する場合を考える。未対策時には1回目にデータ1、2回目にデータ3を受信し、3回目にデータ2を受信する。一方、シーケンス番号による対策時には、受信側は1回目にシーケンス番号S1が付加されたデータ1を受信し、2回目にシーケンス番

号 S3 が付加されたデータ 3 を受信する。そして 3 回目にシーケンス番号 S2 が付加されたデータ 2 を受信する。これにより誤ったシーケンスによってデータを受信したことを認識可能となる。

- 損失

シーケンス番号による損失の対策例を下記に示す。送信側が 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 2、3 回目にデータ 3 を送信する場合を考える。未対策時には 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 3 を受信し、データ 2 を受信しない。一方、シーケンス番号による対策時には、受信側は 1 回目にシーケンス番号 S1 が付加されたデータ 1 を受信し、2 回目にシーケンス番号 S3 が付加されたデータ 3 を受信する。これによりデータを損失したことを認識可能となる。

- 挿入

シーケンス番号による損失の対策例を下記に示す。送信側が 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 2、3 回目にデータ 3 を送信する場合を考える。未対策時には 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 2 を受信し、3 回目に挿入されたデータ 4 を受信し、4 回目にデータ 3 を受信する。一方、シーケンス番号による対策時には、受信側は 1 回目にシーケンス番号 S1 が付加されたデータ 1 を受信し、2 回目にシーケンス番号 S2 が付加されたデータ 2 を受信する。そして 3 回目にシーケンス番号が付加されていないデータ 4 を受信する。これによりデータが挿入されたことを認識可能となる。

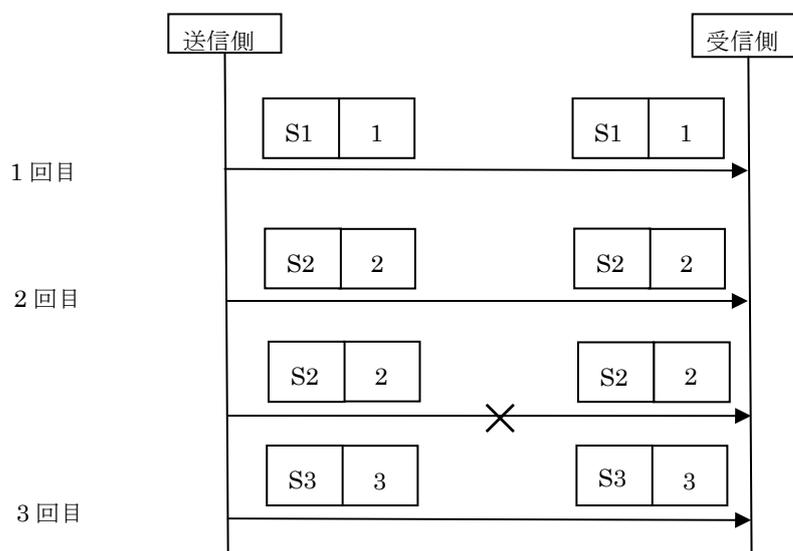


図 3-4-2-2-1-1 シーケンス番号による繰り返しの対策例

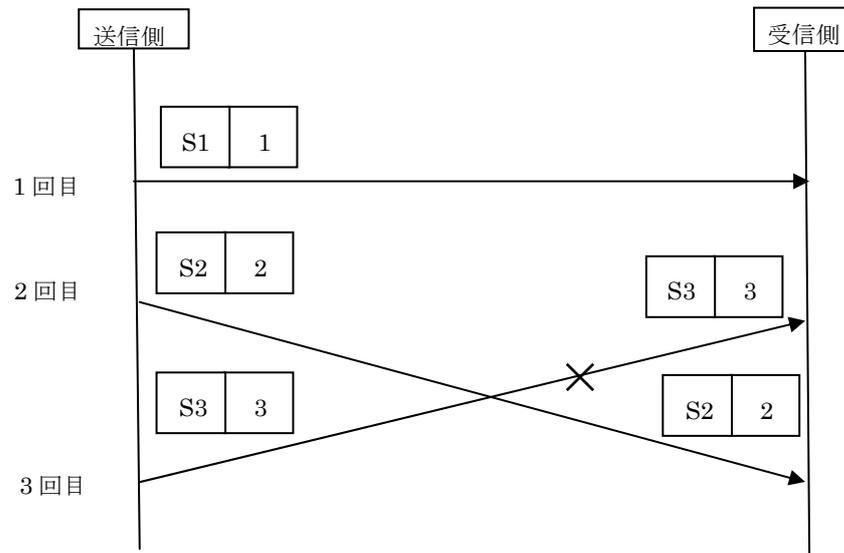


図 3-4-2-2-1-2 シーケンス番号による誤ったシーケンスの対策例

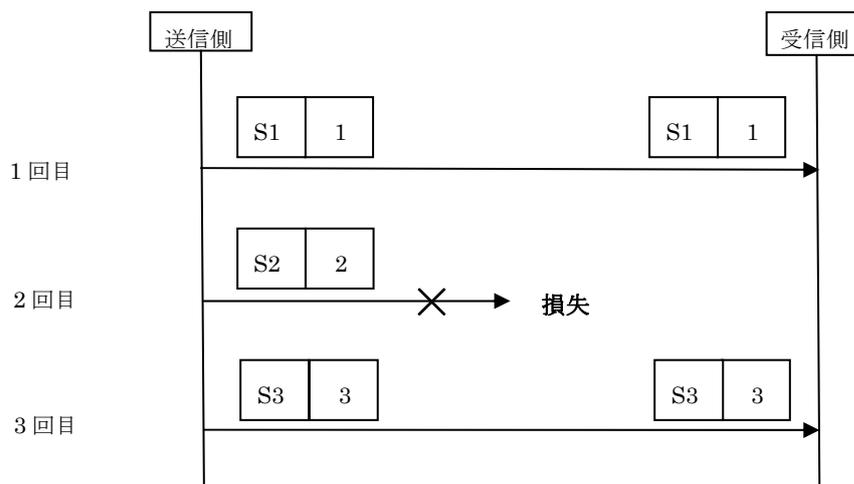


図 3-4-2-2-1-3 シーケンス番号による損失の対策例

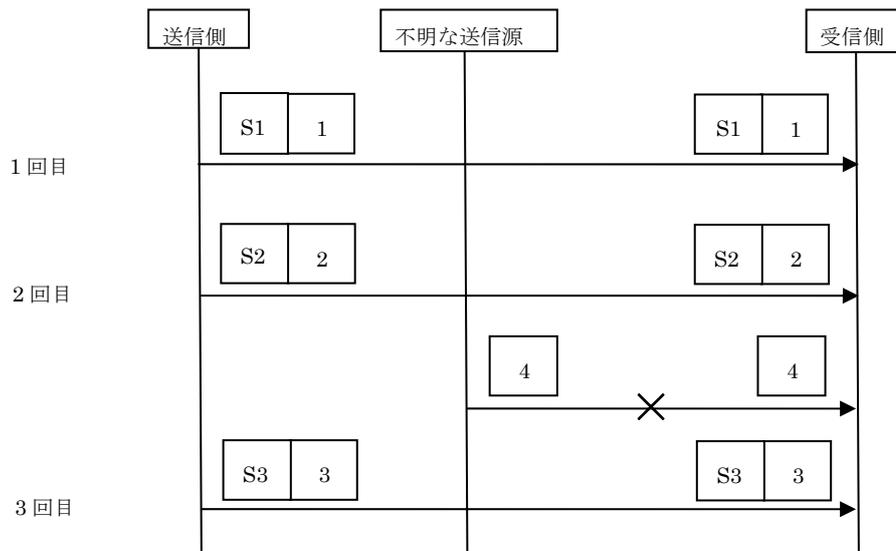


図 3-4-2-2-1-4 シーケンス番号による挿入の対策例

3-4-2-2-2. タイムスタンプによる対策

送信側と受信側の間でやりとりされるメッセージに、タイムスタンプを付け加えることで通信脅威への対策を行う。タイムスタンプで対策可能な通信脅威をそれぞれの例を用いて示す。

- 繰り返し

タイムスタンプによる繰り返しの対策例を下記に示す。

送信側が1回目にデータ1、2回目にデータ2、3回目にデータ3を送信する場合を考える。未対策時には1回目にデータ1、2回目にデータ2を受信し、3回目に繰り返されたデータ2を受信し、4回目にデータ3を受信する。一方、タイムスタンプによる対策時には、受信側は1回目にタイムスタンプT1が付加されたデータ1を受信し、2回目にタイムスタンプT2が付加されたデータ2を受信する。そして3回目に再度タイムスタンプT2が付加されたデータ2を受信する。これによりデータが繰り返されたことを認識可能となる。

- 誤ったシーケンス

タイムスタンプによる誤ったシーケンスの対策例を下記に示す。

送信側が1回目にデータ1、2回目にデータ2、3回目にデータ3を送信する場合を考える。未対策時には1回目にデータ1、2回目にデータ3を受信し、3回目にデータ2を受信する。一方、タイムスタンプによる対策時には、受信側は1回目にタイムスタンプT1が付加されたデータ1を受信し、2回目にタイムスタンプT3が付加されたデータ3を受信する。そして3回目にタイムスタンプT2が付加されたデータ2を受信する。これによりシーケンスの誤りを認識可能となる。

- 遅延

タイムスタンプによる遅延の対策例を下記に示す。

送信側が時刻 T1 にデータ 1 を送信する場合を考える。未対策時にはデータ 1 が許容時間 T2 を越えて受信される。一方、タイムスタンプによる対策時には、受信側はタイムスタンプ T1 が付加されたデータ 1 を受信する。これにより遅延を認識可能となる。

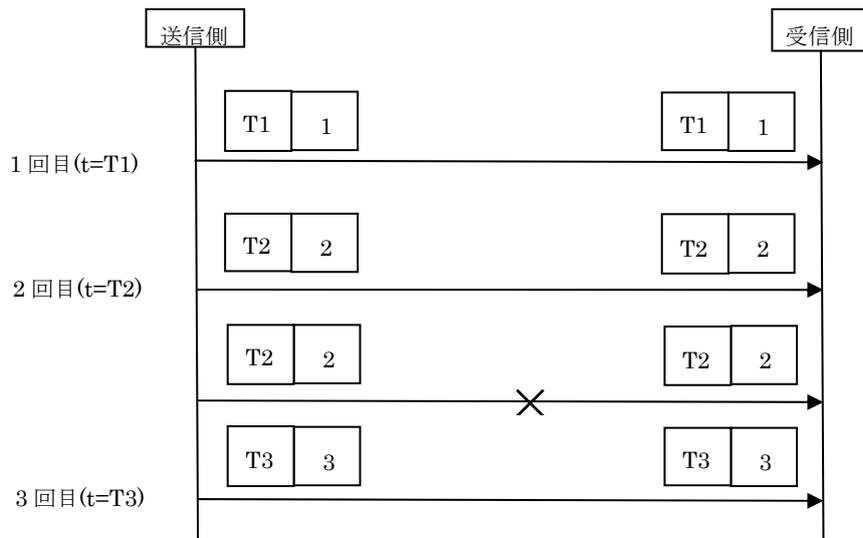


図 3-4-2-2-2-1 タイムスタンプによる繰り返しの対策例

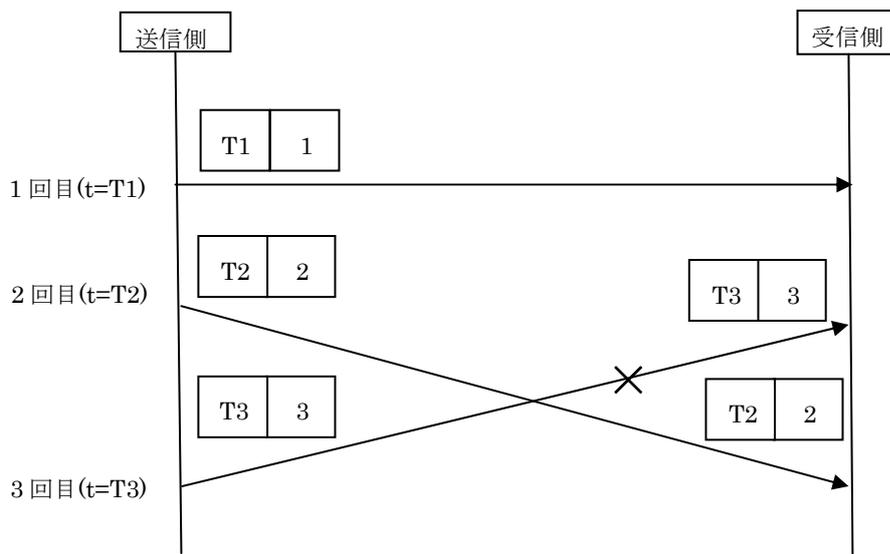


図 3-4-2-2-2-2 タイムスタンプによる誤ったシーケンスの対策例

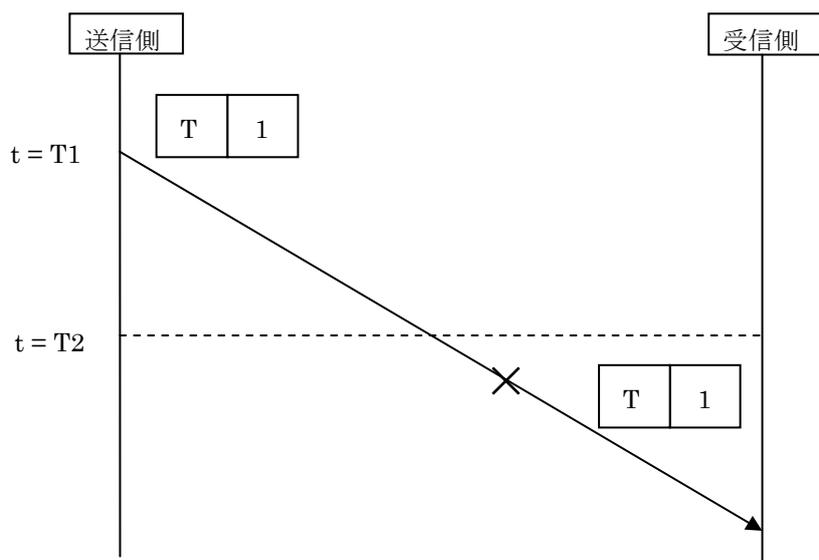


図 3-4-2-2-3 タイムスタンプによる遅延の対策例

3-4-2-2-3. 時間予想による対策

送信側と受信側の間でやりとりされるメッセージの到着間隔を確認することで通信脅威への対策を行う。時間予想で対策可能な通信脅威をそれぞれの例を用いて示す。

- 遅延

時間予想による遅延の対策例を下記に示す。

送信側が時刻 $T1$ にデータ 1、時刻 $T2$ にデータ 2 を送信する場合を考える。未対策時にはデータ 2 が一定時間を越えて受信される。一方、時間予想による対策時には、受信側はデータ 1 とデータ 2 の間の到着間隔を確認する。これにより遅延を認識可能となる。

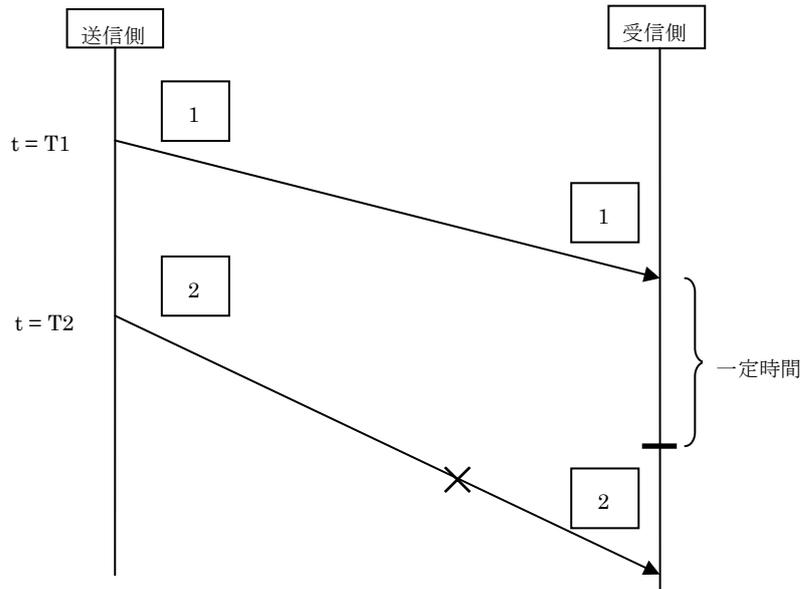


図 3-4-2-2-3-1 時間予想による遅延の対策例

3-4-2-2-4. 接続認証による対策

送信側と受信側の間でやりとりされるメッセージを接続認証することで通信脅威への対策を行う。接続認証で対策可能な通信脅威をそれぞれの例を用いて示す。

- 挿入

接続認証による挿入の対策例を下記に示す。送信側が1回目にデータ1、2回目にデータ2、3回目にデータ3を送信する場合を考える。未対策時には1回目にデータ1、2回目にデータ2を受信し、3回目に挿入されたデータ4を受信し、4回目にデータ3を受信する。一方、接続認証による対策時には、受信側は1回目に送信元と送信先が記されたアドレスAが付加されたデータ1を受信し、2回目にアドレスAが付加されたデータ2を受信する。そして3回目にアドレスAが付加されていないデータ4を受信する。これによりデータが挿入されたことを認識可能となる。

- なりすまし

接続認証によるなりすましの対策例を下記に示す。送信側が1回目にデータ1、2回目にデータ2、3回目にデータ3を送信する場合を考える。未対策時には1回目にデータ1、2回目にデータ2を受信し、3回目に挿入されたデータ4を受信し、4回目にデータ3を受信する。一方、接続認証による対策時には、受信側は1回目に送信元と送信先が記されたアドレスAが付加されたデータ1を受信し、2回目にアドレスAが付加されたデータ2を受信する。そして3回目にアドレスAが付加されていないデータ4を受信する。これによりデータがなりすまされたことを認識可能となる。

● アドレス指定

接続認証によるアドレス指定の対策例を下記に示す。送信側がデータ 1 を受信側 1 に送信する場合を考える。未対策時にはデータ 1 が受信側 2 に受信される。一方、接続認証による対策時には、受信側 2 は送信元と送信先が記されたアドレス A が付加されたデータ 1 を受信する。これにより宛先が誤っていることを認識可能となる。

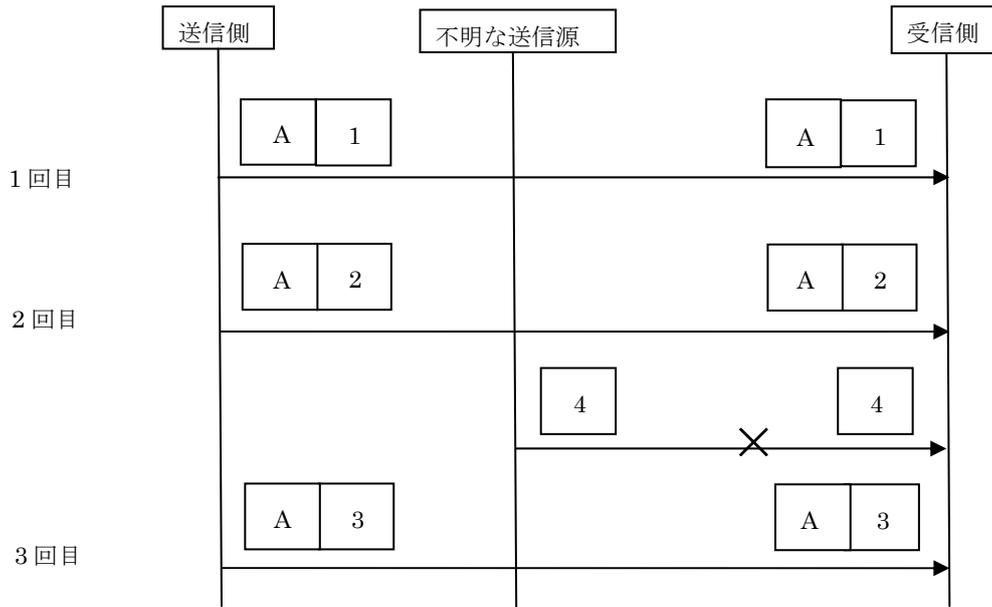


図 3-4-2-2-4-1 接続認証による挿入の対策例

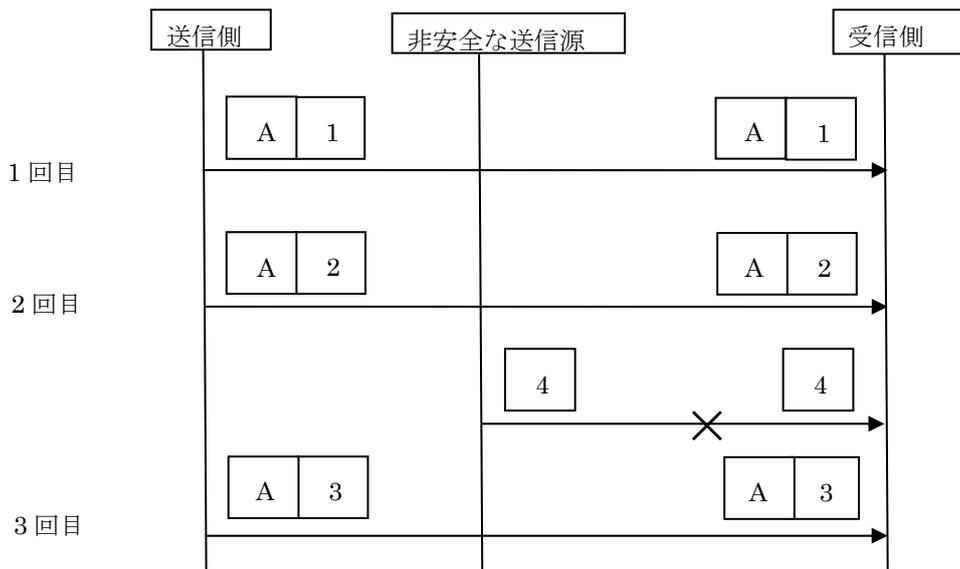


図 3-4-2-2-4-2 接続認証によるなりすましの対策例

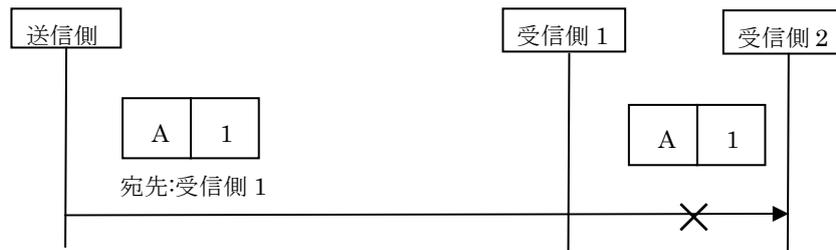


図 3-4-2-2-4-3 接続認証によるアドレス指定の対策例

3-4-2-2-5. フィードバックメッセージによる対策

送信側と受信側の間でやりとりされるメッセージをフィードバックすることで通信脅威への対策を行う。フィードバックメッセージで対策可能な通信脅威をそれぞれの例を用いて示す。

- くずれ

フィードバックメッセージによるくずれの対策例を下記に示す。送信側がデータ 1 を送信する場合を考える。未対策時にはくずれたデータ 2 が受信側に受信される。一方、フィードバックメッセージによる対策時には、受信側はデータ 2 に対するフィードバックメッセージを返信する。これにより、データ 1 のくずれを認識可能となる。

- 損失

フィードバックメッセージによる損失の対策例を下記に示す。送信側が 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 2、3 回目にデータ 3 を送信する場合を考える。未対策時には 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 3 を受信し、データ 2 は失われる。一方、フィードバックメッセージによる対策時には、受信側は受信したメッセージに対するフィードバックメッセージを返信する。これによりデータが損失されたことを認識可能となる。

- 挿入

フィードバックメッセージによる挿入の対策例を下記に示す。送信側が 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 2 を送信する場合を考える。未対策時には 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 3 を受信し、3 回目にデータ 2 を受信する。一方、フィードバックメッセージによる対策時には、受信側は受信したメッセージに対するフィードバックメッセージを返信するため、送信側は意図しないフィードバックメッセージを受信する。これによりデータが挿入されたことを認識可能となる。

- なりすまし

フィードバックメッセージによるなりすましの対策例を下記に示す。送信側が 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 2 を送信する場合を考える。未対策時には 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 3 を受信し、3 回目にデータ 2 を受信する。一方、フィードバックメッセージによる対策時には、受信側は受信したメッセージに対するフィードバックメッセージを返信するため、送信側は意図しないフィードバックメッセージを受信する。これによりデー

タがなりすまされたことを認識可能となる。

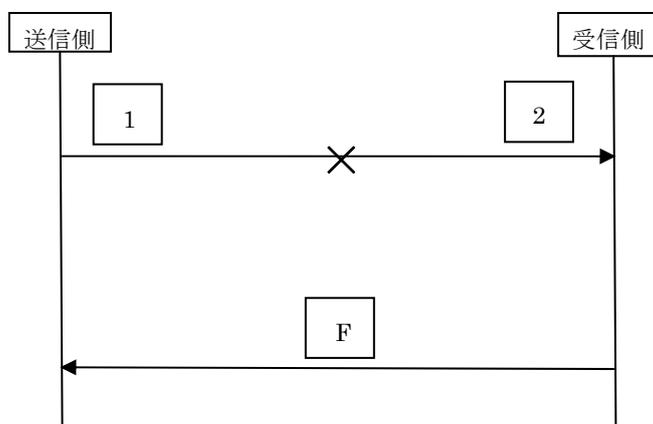


図 3-4-2-2-5-1 フィードバックメッセージによるくずれの対策例

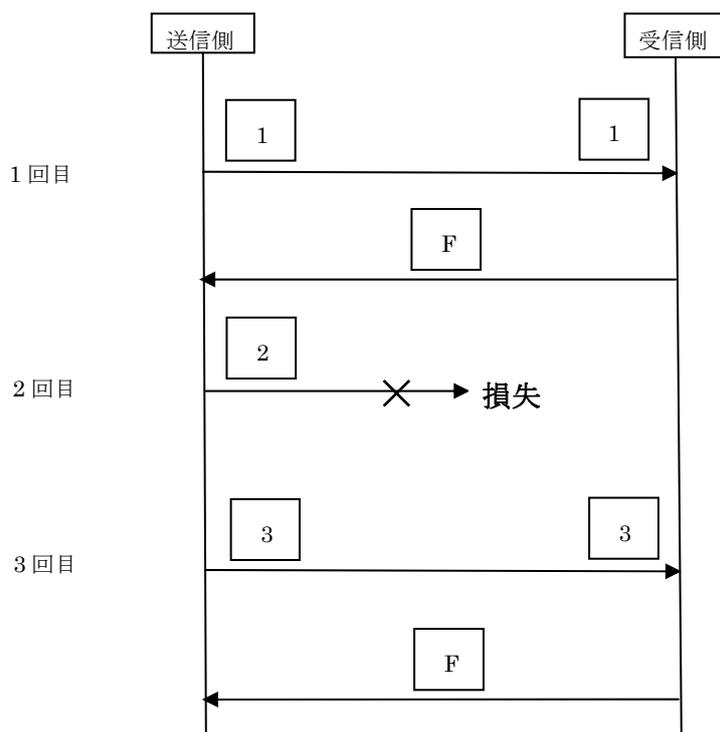


図 3-4-2-2-5-2 フィードバックメッセージによる損失の対策例

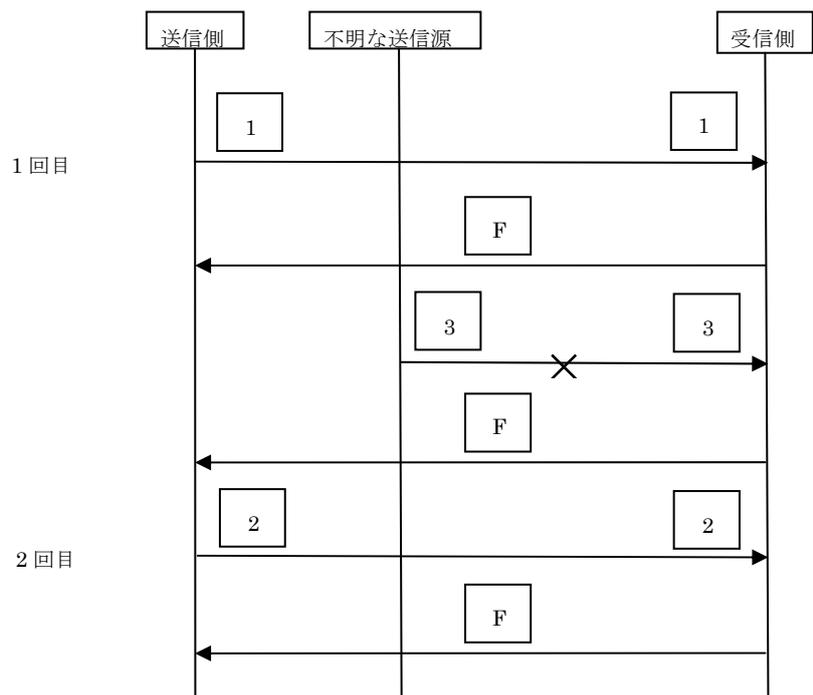


図 3-4-2-2-5-3 フィードバックメッセージによる損失の対策例

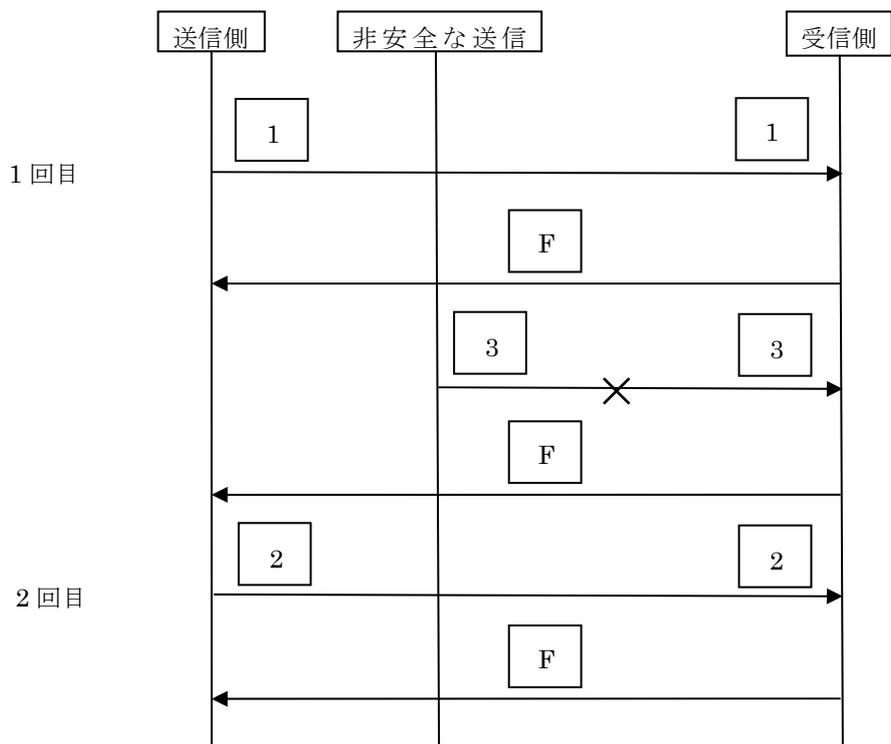


図 3-4-2-2-5-4 フィードバックメッセージによるなりすましの対策例

3-4-2-2-6. データ保全性の保証による対策

送信側と受信側の間でやりとりされるメッセージのデータ保全の保証を行うことで通信脅威への対策を行う。データ保全の保証で対策可能な通信脅威をそれぞれの例を用いて示す。

- くずれ

データ保全の保証によるくずれの対策例を下記に示す。

送信側が受信側にデータ 1 を送信する場合を考える。未対策時にはくずれたデータ 2 が受信される。一方、対策時には冗長データが付加されたメッセージが受信される。これにより、メッセージのくずれを認識可能となる。

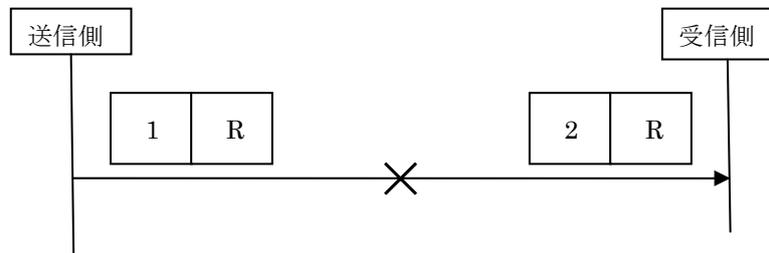


図 3-4-2-2-6-1 データ保全性の保証によるくずれの対策例

3-4-2-2-7. 冗長による伝送チェックによる対策

送信側と受信側の間でやりとりされるメッセージのデータ保全の保証を行うことで通信脅威への対策を行う。データ保全の保証で対策可能な通信脅威をそれぞれの例を用いて示す。

- くずれ

冗長による伝送チェックによるくずれの対策例を下記に示す。

送信側がデータ 1 を送信する場合を考える。未対策時にはくずれたデータ 2 が受信される。一方、対策時には送信側は同じメッセージを 2 つ送信する。これにより、受信側はデータのくずれを認識可能となる。

- 繰り返し

冗長による伝送チェックによる繰り返しの対策例を下記に示す。

送信側が 1 回目にデータ 1、2 回目にデータ 2 を送信する場合を考える。未対策時にはデータ 2 が繰り返し受信される。一方、対策時には送信側は同じメッセージを 2 つ送信する。これにより、受信側はデータの繰り返しの認識可能となる。

- 誤ったシーケンス

冗長による伝送チェックによる誤ったシーケンスの対策例を下記に示す。

送信側が1回目にデータ1、2回目にデータ2を送信する場合を考える。未対策時にはデータ1がデータ2の後に受信される。一方、対策時には送信側は同じメッセージを2つ送信する。これにより、受信側はシーケンスの誤りを認識可能となる。

- 損失

冗長による伝送チェックによる損失の対策例を下記に示す。

送信側が1回目にデータ1、2回目にデータ2、3回目にデータ3を送信する場合を考える。未対策時にはデータ1、データ3が受信される。一方、対策時には送信側は同じメッセージを2つ送信する。これにより、受信側はメッセージの損失を認識可能となる。

- 挿入

冗長による伝送チェックによる挿入の対策例を下記に示す。

送信側が1回目にデータ1、2回目にデータ2を送信する場合を考える。未対策時にはデータ1、データ3、データ2が受信される。一方、対策時には送信側は同じメッセージを2つ送信する。これにより、受信側はメッセージの挿入を認識可能となる。

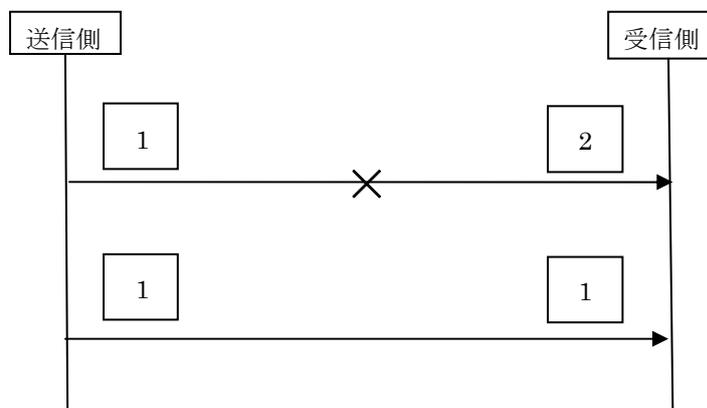


図 3-4-2-2-7-1 冗長による伝送チェックによるくずれの対策例

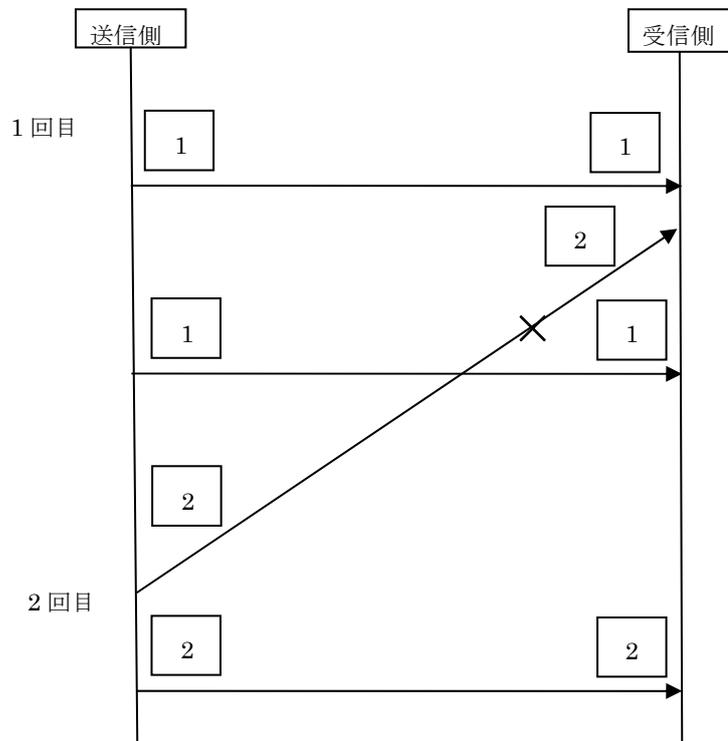


図 3-4-2-2-7-2 冗長による伝送チェックによる誤ったシーケンスの対策例

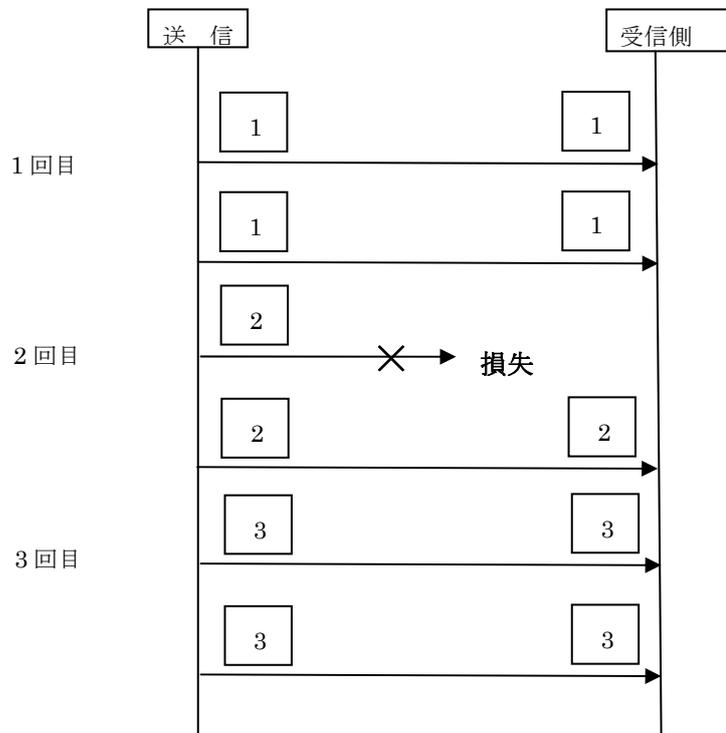


図 3-4-2-2-7-3 冗長による伝送チェックによる損失の対策例

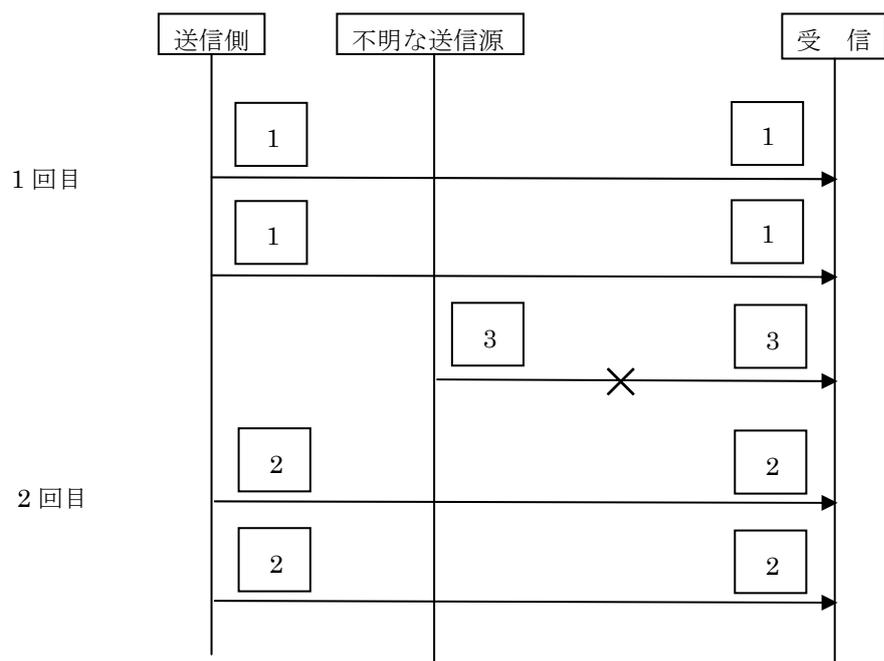


図 3-4-2-2-7-4 冗長による伝送チェックによる挿入の対策例

3-4-2-2-8. 異なるデータ安全性の保証システムによる対策

送信側と受信側の間でやりとりされるメッセージに非安全データと安全データが混在する場合、それぞれに異なるデータ安全性の保証を行う。異なるデータ安全性の保証システムで対策可能な通信脅威をそれぞれの例を用いて示す。

- なりすまし

異なるデータ安全性の保証システムによるなりすましの対策例を下記に示す。

送信側が 1 回目にアドレス付きのデータ 1、2 回目にアドレス付きのデータ 2、3 回目にアドレス付きのデータ 3 を送信する場合を考える。未対策時に非安全な送信源により送信側のアドレスを付加したデータが送信される。一方、対策時にはアドレスに冗長データが付加され送信される。これにより、なりすましを認識可能となる。

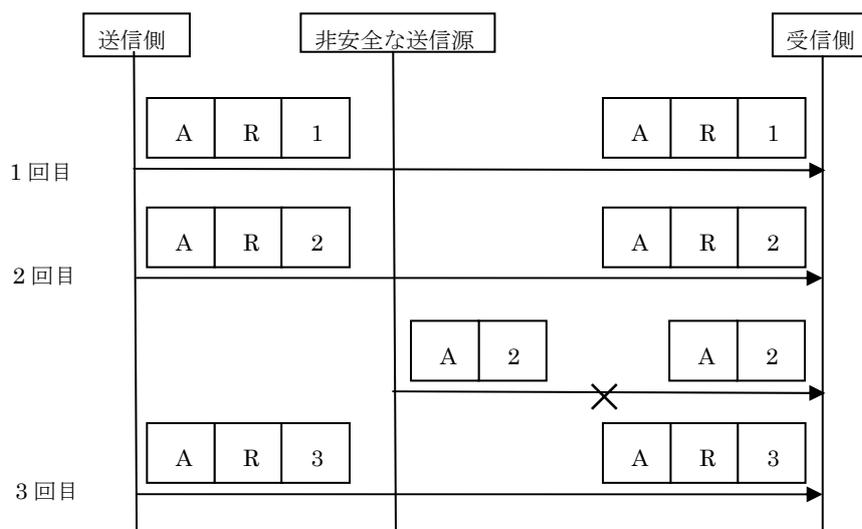


図 3-4-2-2-7-5 異なるデータ安全性の保証システムによるなりすましの対策例

3-4-3. 通信脅威の対策

既存の通信脅威への対策として、各線通信規格について述べる。

3-4-3-1. IEEE802.15.4

IEEE802.15.4 のフレームフォーマットと通信脅威対策内容について述べる。

3-4-3-1-1. フレームフォーマット

通信脅威の対策のためのフレームフォーマットについて述べる。MAC フレームフォーマットを下記に示す。

- **Frame Control**

2 オクテットのフィールドを持ち、フレームタイプ、アドレス指定フィールド、その他の制御フラグを定義する。Frame Control の詳細を下記に示す。

- **Frame Type**

3 ビットのサブフィールドを持つ。詳細を下記に示す。

- **Security Enabled**

1 ビットのサブフィールドを持つ。値が 0 の場合、MAC サブレイヤによって保護されない。値が 1 の場合、その逆となる。また、値が 1 の場合にのみ、Auxiliary Security Header が存在する。

- **Frame Pending**

1 ビットのサブフィールドを持つ。値が 1 の場合、デバイスはコーディネータとのデータをまだ保持しており、新たなデータ要求コマンドを送信することによりデータを抽出することができる。値が 0 の場合、その逆となる。Frame Pending サブフィールドはビーコン

フレーム又は、ビーコン対応 PAN 上で動作するデバイスによる CAP 中に送信されるフレームないしはビーコン非対応 PAN 上で動作するデバイスによって送信されるフレームのいずれかのフレームでのみ使用される。

- **Ack Request**

1 ビットのサブフィールドを持ち、データまたは MAC コマンドフレームの受信時に受信デバイスから確認応答が要求されるかどうかを指定する。値が 1 の場合、フィルタの 3 番目のレベルに合格した際に確認応答フレームを送信する。値が 0 の場合、受信デバイスは確認応答フレームを送信してはならない。

- **PAN ID Compression**

1 ビットのサブフィールドを持つ。値が 1 で、送信元、送信先アドレスの両方が存在する場合、送信先 PAN 識別子のみをフレームに含み、送信元 PAN 識別子は送信先 PAN 識別子と同一となる。値が 0 で、送信元、送信先アドレスの両方が存在する場合、送信先 PAN 識別子および送信元 PAN 識別子の両方をフレームに含む。アドレスを 1 つのみ持つ場合は 0 に設定され、アドレスに対応する PAN 識別子を持つ。アドレスがどちらもない場合は 0 に設定され、PAN 識別子は存在してはならない。

- **Destination Addressing Mode**

2 ビットのサブフィールドを持つ。詳細を下記に示す。このサブフィールドが 0 に設定され、フレームタイプが確認応答を指定していなく、送信先アドレスモードが 0 以外の場合、送信元アドレスモードは 0 以外に設定され、このフレームが送信元 PAN ID として指定された PAN ID を持つ PAN コーディネータに直接送られることを意味する。

- **Frame Version**

2 ビットのサブフィールドを持ち、フレームに対応するバージョン番号を指定する。詳細を下記に示す。

- **Source Addressing Mode**

2 ビットのサブフィールドを持つ。詳細を下記に示す。このサブフィールドが 0 に設定され、フレームタイプが確認応答を指定していない場合、送信先アドレスモードが 0 以外に設定され、このフレームが送信先 PAN ID として指定された PAN ID を持つ PAN コーディネータから発信されたフレームであることを示す。

- **Sequence Number**

1 オクテットのフィールドを持ち、フレームのシーケンス ID を指定する。ビーコンフレームの場合は BSN を指定する。BSN (Beacon Sequence Number) とはビーコンフレームを送信する際に付与するシーケンス番号のことであり、ビーコンフレーム送信毎に 1 増加する。データ、応答確認、MAC コマンドフレームの場合はデータ、MAC コマンドフレームに対する応答確認フレームを照合するために使用される DSN を指定する。ACK の場合は対応するメッセージのシーケンス番号をそのまま指定する。

- **Destination PAN ID**

存在する場合は 2 オクテットのフィールドを持ち、フレームの受信者の一意な ID を指定する。0xFFFF はブロードキャスト PAN ID を示す。Frame Control フィールドの Destination Addressing Mode サブフィールドが 0 以外の場合のみ MAC フレームに存在する。

- Destination Address

存在する場合は Frame Control フィールドの Destination Addressing Mode サブフィールドの値に応じて、2 オクテット又は 8 オクテットのフィールドを持ち、フレームの受信者のアドレスを示す。2 オクテットで、0xFFFF の場合はブロードキャスト(ショート)アドレスを示す。Frame Control フィールドの Destination Addressing Mode サブフィールドが 0 以外の場合のみ MAC フレームに存在する。

- Source PAN ID

存在する場合は 2 オクテットのフィールドを持ち、フレームの送信者の一意な ID を指定する。Frame Control フィールドの Destination Addressing Mode サブフィールドが 0 以外かつ PAN ID Compression サブフィールドが 0 の場合のみ MAC フレームに存在する。デバイスの PAN ID は PAN アソシエーション中で最初に決定されるが、PAN ID の競合の解決にしたがって変更されるかもしれない。

- Source Address

存在する場合は Frame Control フィールドの Source Addressing Mode サブフィールドの値に応じて、2 オクテット又は 8 オクテットのフィールドを持ち、フレームの送信者のアドレスを示す。Frame Control フィールドの Source Addressing Mode サブフィールドが 0 以外の場合のみ MAC フレームに存在する。

- Auxiliary Security Header

可変長のフィールドを持ち、セキュリティ処理に必要な情報を指定する。セキュリティ処理に必要な情報(フレームが実際に保護される方法と MAC セキュリティ PIB に使用される暗号鍵)を示す。このフィールドは Security Enabled サブフィールドが 1 に設定されている場合のみ存在する。

- Frame Payload

可変長のフィールドを持ち、サービスデータユニットを指定する。Security Enabled サブフィールドが 1 に設定されている場合、Frame Payload はそのフレーム用に選択したセキュリティによる定義として保護される。

- FCS

2 オクテットのフィールドを持ち、16 ビットの ITU-T CRC を指定する。FCS は MHR と MAC Payload 上で計算される。また、標準的な 16 桁の生成多項式を用いて計算されなければならない。

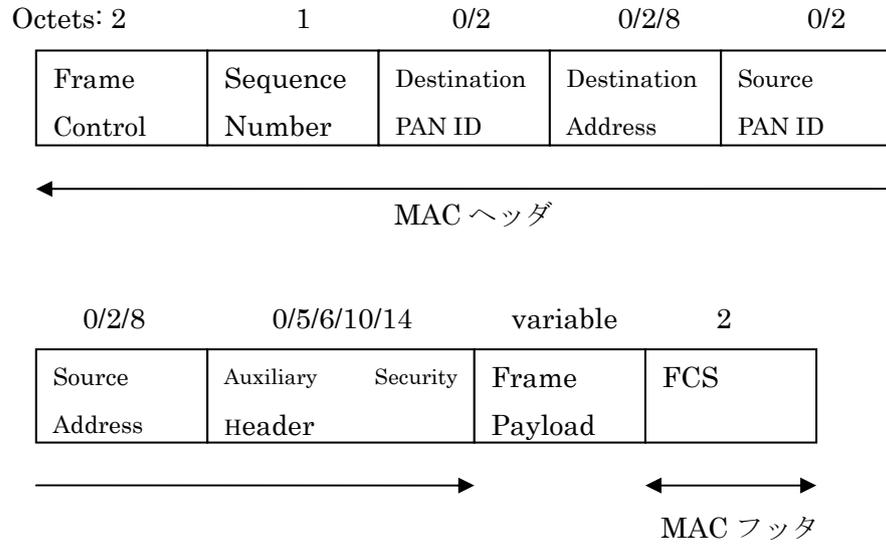


図 3-4-3-1-1-1 MAC フレームフォーマット

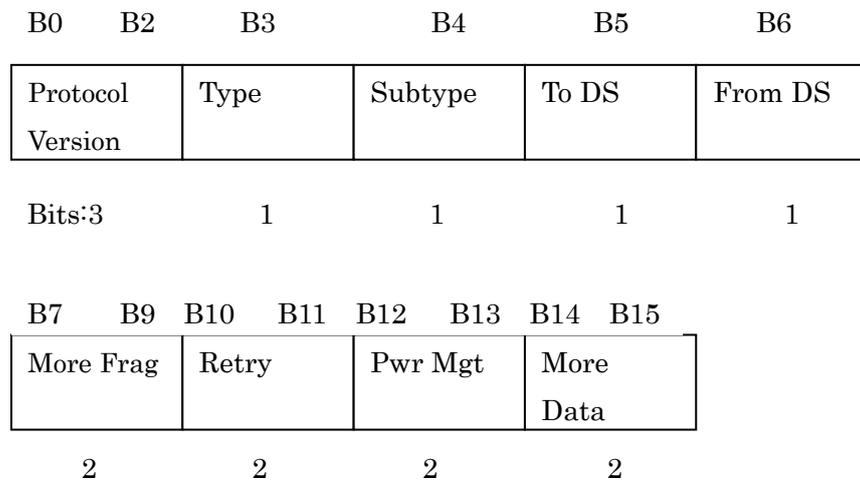


図 3-4-3-1-1-2 Frame Control フィールドフォーマット

表 3-4-3-1-1-1 フレームタイプ

Frame type value	Description
000	Beacon
001	Data
010	Acknowledgment
011	MAC command
100-111	Reserved

表 3-4-3-1-1-2 Destination Addressing Mode の値

値	説明
00	PAN識別子とアドレスのフィールドが存在しない
01	予約
10	16ビットのショートアドレスフィールドを持つ
11	64ビットの拡張アドレスフィールドを持つ

表 3-4-3-1-1-3 Frame Version の値

値	説明
00	IEEE802.15.4-2003 との互換性
01	IEEE802.15.4 を示す
10	将来のための予約
11	

表 3-4-3-1-1-4 Source Addressing Mode の値

値	説明
00	PAN識別子とアドレスのフィールドが存在しない
01	予約
10	16ビットのショートアドレスフィールドを持つ
11	64ビットの拡張アドレスフィールドを持つ

3-4-3-1-2. 通信脅威への対策

- 接続認証

MAC フレームフォーマット内の PAN ID 及び Address フィールドにて送信元、送信先を指定する。

- シーケンス制御

MAC フレームフォーマット内の Sequence Number フィールドにてシーケンス番号を指定する。

- フィードバックメッセージ

MAC フレームフォーマット内の Frame Control フィールドにてフレームタイプとして ACK を指定する。

- データ保全性の保証

MAC フレームフォーマット内の FCS フィールドにて CRC データが指定されている。

3-4-3-2. IEEE802.11b/g

IEEE802.11b/g のフレームフォーマットと通信脅威対策内容について述べる。

3-4-3-2-1. フレームフォーマット

通信脅威の対策のためのフレームフォーマットについて述べる。MAC フレームフォーマットを下記に示す。

● Frame Control

2 オクテットのフィールドを持ち、フレームタイプ、アドレス指定フィールド、その他の制御フラグを定義する。Frame Control の詳細を下記に示す。

➤ Protocol Version

2 ビットのフィールドを持ち、00 が設定される。

➤ Type/Subtype

Type は 2 ビット、Subtype は 4 ビットのフィールドを持ち、フレームの種類を指定する。Type の値の意味をエラー! 参照元が見つかりません。に示す。また、Type と Subtype の組み合わせを表に示す。

➤ To DS/From DS

To DS、From DS とともに 1 ビットのフィールドを持ち、送信先、送信元が有線と無線のどちらであるかを指定する。詳細を下記に示す。

➤ More Fragment

1 ビットのフィールドを持つ。サイズの大きいフレームを断片化し、分割して送信する必要がある場合、1 が設定される。

➤ Retry

1 ビットのフィールドを持ち、再送であるフレームの場合、1 が設定される。

➤ Power Management

1 ビットのフィールドを持つ。値が 1 の場合、STA が PS モードであることを示し、値が 0 の場合、STA がアクティブモードであることを示す。ただし、AP によって送信されたフレームには常に 0 が設定される

➤ More Data

1 ビットのフィールドを持つ。宛先の STA が PS モードである場合、1 が設定される。

➤ Protected Frame

1 ビットのフィールドを持つ。Frame Body フィールドのデータに暗号カプセル化アルゴリズムが施してある場合、1 が設定される

➤ Order

1 ビットのフィールドを持つ。QoS データフレーム以外のフレームの場合、1 が設定され、Strictly Ordered サービスクラスを用いて送信される

- **Duration/ID**
2 オクテットのフィールドを持ち、送信に必要な時間を指定する。詳細を下記に示す。
- **Address1/Address2/Address3/Address4**
各々2 オクテットのフィールドを持ち、To DS、From DS の組合せによって意味が異なる。To DS、From DS の組合せ毎の意味を表、略語の意味を下記に示す。
- **Sequence Control**
2 オクテットのフィールドを持ち、Fragment Number、Sequence Number を指定する。
 - **Fragment Number**
4 ビットのフィールドを持ち、MSDU を分割した際のフラグメントのオフセットを示す。
 - **Sequence Number**
12 ビットのフィールドを持ち、MSDU、MMPDU のシーケンス番号を表す。シーケンス番号は初期値 0 から 1 ずつ増加し、4096 を法とする。
- **QoS Control**
Subtype フィールドの Qos サブフィールドに 1 が設定されている場合に存在し、2 オクテットのフィールドを持つ。TXOP Limit、Queue Size、TXOP Duration Requested、AP PS Buffer State は Type と Subtype によっていずれかに決定する。詳細を下記に示す。
 - **TID**
4 ビットのフィールドを持ち、MSDU が属する Traffic Category または Traffic Stream を示す。詳細を下記に示す。
 - **EOSP**
1 ビットのフィールドを持ち、HC が送信した最後のフレームに 1 が設定される。
 - **Ack Policy**
2 ビットのフィールドを持つ。詳細を下記に示す。
 - **TXOP Limit**
8 ビットのフィールドを持ち、TXOP の時間制限を指定する。
 - **Queue Size**
8 ビットのフィールドを持ち、送信元の non-AP STA の TC または TS の為にバッファリングされたトラフィック量を示す。0 の場合、トラフィックの不足を示す。254 の場合、64768 オクテットより大きいサイズであることを示す。255 の場合、不明または未知のサイズであることを示す。
 - **TXOP Duration Requested**
8 ビットのフィールドを持ち、デューレーションの時間間隔を示す。0 の場合、その MSDU は送信にあたってキューイングをしないことを示し、TXOP 要求のキャンセルに使用される。
 - **AP PS Buffer State**

8ビットのフィールドを持ち、non-AP STA に対する AP が保存している PS バッファの状態を示す。

- **Frame Body**

可変長のフィールドを持ちサービスデータユニットを指定する。

- **FCS**

4 オクテットのフィールドを持ち、CRC データのチェックサムを指定する。チェックサムの計算には標準生成多項式を用いる。

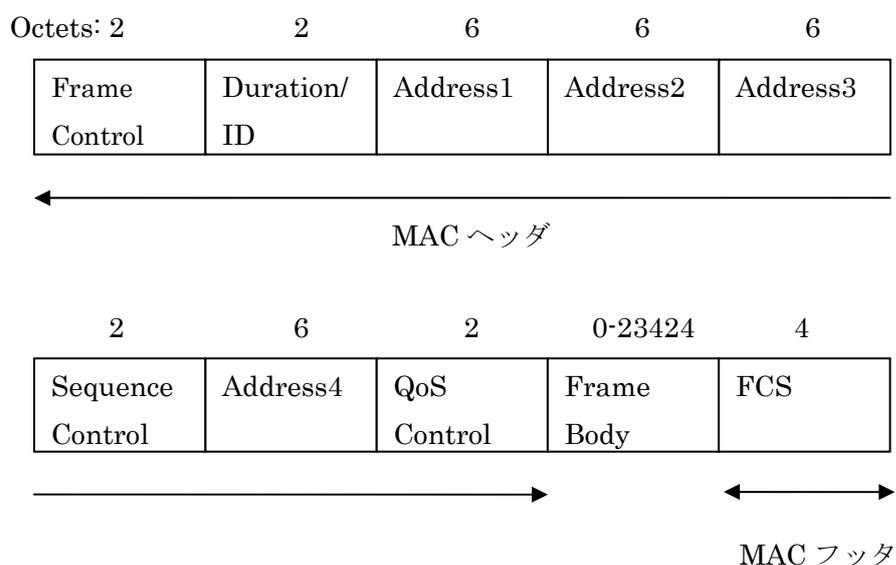


図 3-4-3-2-1-1 MAC フレームフォーマット

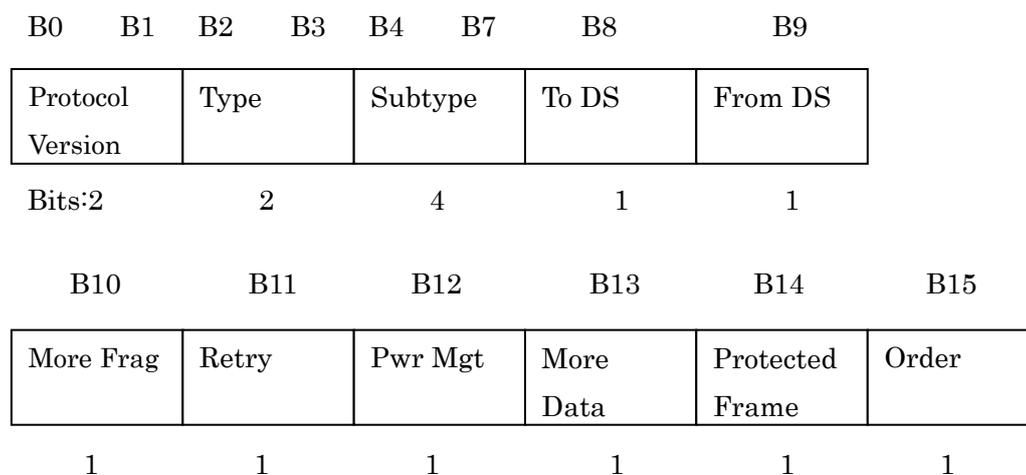


図 3-4-3-2-1-2 Frame Control フィールド

表 3-4-3-2-1-1 タイプの意味

Type の値	意味
00	管理
01	制御
10	データ
11	予約

表 3-4-3-2-1-2 タイプとサブタイプの組み合わせ

Type の値 b3 b2	Type の意味	Subtype の値 b7 b6 b5 b4	Subtype の意味
00	Management	0000	Association request
00	Management	0001	Association response
00	Management	0010	Reassociation request
00	Management	0011	Reassociation response
00	Management	0100	Probe request
00	Management	0101	Probe response
00	Management	0110-0111	Reserved
00	Management	1000	Beacon
00	Management	1001	ATIM
00	Management	1010	Disassociation
00	Management	1011	Authentication
00	Management	1100	Deauthentication
00	Management	1101	Action
00	Management	1110-1111	Reserved
01	Control	0000-0111	Reserved
01	Control	1000	Block Ack Request (BlockAckReq)
01	Control	1001	Block Ack (BlockAck)
01	Control	1010	PS-Poll
01	Control	1011	RTS
01	Control	1100	CTS
01	Control	1101	ACK
01	Control	1110	CF-End
01	Control	1111	CF-End + CF-Ack
10	Data	0000	Data
10	Data	0001	Data + CF-Ack

10	Data	0010	Data + CF-Poll
10	Data	0011	Data + CF-Ack + CF-Poll
10	Data	0100	Null (no data)
10	Data	0101	CF-Ack (no data)
10	Data	0110	CF-Poll (no data)
10	Data	0111	CF-Ack + CF-Poll (no data)
10	Data	1000	QoS Data
10	Data	1001	QoS Data + CF-Ack
10	Data	1010	QoS Data + CF-Poll
10	Data	1011	QoS Data + CF-Ack + CF-Poll
10	Data	1100	QoS Null (no data)
10	Data	1101	Reserved
10	Data	1110	QoS CF-Poll (no data)
10	Data	1111	QoS CF-Ack + CF-Poll (no data)
11	Reserved	0000–1111	Reserved

図 3-4-3-2-1-3 To DS と From DS の値の意味

To DS と From DS の値	意味
To DS = 0 From DS = 0	A data frame direct from one STA to another STA within the same IBSS, or a data frame direct from one non-AP STA to another non-AP STA within the same BSS, as well as all management and control frames.
To DS = 1 From DS = 0	A data frame destined for the DS or being sent by a STA associated with an AP to the Port Access Entity in that AP.
To DS = 0 From DS = 1	A data frame exiting the DS or being sent by the Port Access Entity in an AP.
To DS = 1 From DS = 1	A data frame using the four-address format. This standard does not define procedures for using this combination of field values.

図 3-4-3-2-1-4 接続認証における略語の意味

略語	意味
BSSID	basic service set identification
SA	source address
DA	destination address
TA	transmitter address or transmitting station address
RA	receiver address or receiving station address

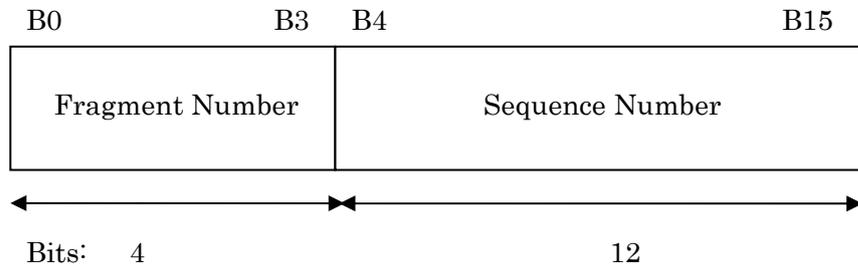


図 3-4-3-2-1-3 Sequence Control フィールド

表 3-4-3-2-1-5 各条件における Duration

条件	デュレーション
TXOP Limit が 0 以外	1 SIFS + TXOP Limit
TXOP Limit が 0	1 つの MPDU の送信時間+ACK 送信に掛かる時間+2 SIFS インターバル時間
TXOP 最後のフレームでない	TXOP の残り時間
フレームが 1 つのみ、または最後である	フレーム交換シーケンスに掛かる時間

表 3-4-3-2-1-6 Duration のエンコーディング

Bits0-13	Bit14	Bit15	用途
0-32767		0	Duration value (in microseconds) within all frames other than PS-Poll frames transmitted during the CP, and under HCF for frames transmitted during the CFP
0	0	1	Fixed value under point coordination function (PCF) within frames transmitted during the CFP
1-16383	0	1	Reserved
0	1	1	Reserved
1-2007	1	1	AID in PS-Poll frames
2008-16383	1	1	Reserved

表 3-4-3-2-1-7 QoS Control フィールド

適用可能なフレームタイプ	Bits0-3	Bits4	Bits5-6	Bits7	Bits8-15
QoS (+)CF-Poll frames sent by HC	TID	EOSP	Ack Policy	Reserved	TXOP Limit
QoS Data, QoS Null, and QoS Data+CF-Ack frames sent by HC	TID	EOSP	Ack Policy	Reserved	AP PS Buffer State
QoS data frames sent by non-AP STAs	TID	0	Ack Policy	Reserved	TXOP Duration Requested
	TID	1	Ack Policy	Reserved	Queue Size

表 3-4-3-2-1-8 TID サブフィールド

アクセスポリシー	用途	許される値 Bits0-3
EDCA	UP for either TC or TS, regardless of whether admission control is required	0-7
HCCA	TSID	8-15
HEMM	TSID, regardless of the access mechanism used	8-15

表 3-4-3-2-1-9 Ack Policy サブフィールド

QoS Control フィールド		意味
Bit5	Bit6	
0	0	Normal Ack. The addressed recipient returns an ACK or QoS +CF-Ack frame after a short interframe space (SIFS) period, according to the procedures defined in 9.2.8, 9.3.3, and 9.9.2.3. The Ack Policy subfield is set to this value in all directed frames in which the sender requires acknowledgment. For QoS Null (no data) frames, this is the only permissible value for the Ack Policy subfield.
1	0	No Ack The addressed recipient takes no action upon receipt of the frame. More details are provided in 9.11. The Ack Policy subfield is set to this value in all directed frames in which the

		sender does not require acknowledgment. This combination is also used for broadcast and multicast frames that use the QoS frame format.
0	1	No explicit acknowledgment. There may be a response frame to the frame that is received, but it is neither the ACK nor any data frame of subtype +CF-Ack. For QoS CF-Poll and QoS CF-Ack+CF-Poll data frames, this is the only permissible value for the Ack Policy subfield.
1	1	Block Ack The addressed recipient takes no action upon the receipt of the frame except for recording the state. The recipient can expect a BlockAckReq frame in the future to which it responds using the procedure

3-4-3-2-2. 通信脅威への対策

- 接続認証

MAC フレームフォーマット内のアドレスフィールドを用いて送信元、送信先を指定する。

- シーケンス制御

MAC フレームフォーマット内の Sequence Control フィールドを用いてシーケンス番号を指定する。

- フィードバックメッセージ

MAC フレームフォーマット内の Frame Control フィールドのフレームタイプとして ACK を指定する。

- データ保全性の保証

MAC フレームフォーマット内の FCS フィールドにチェックサムを指定する。

3-4-4. 安全通信プロトコル

本安全通信プロトコルは前項で述べた既存の無線通信規格の対策内容を包括する、より強固な対策内容を有する。本項ではその対策内容について述べる。

3-4-4-1. 通信モデル

安全通信プロトコルは OSI 参照モデルの第 2 層から第 4 層に位置する。OSI 参照モデルと安全通信プロトコルの関連を以下に示す。

第 7 層(アプリケーション層)	
第 6 層(プレゼンテーション層)	
第 5 層(セッション層)	
第 4 層(トランスポート層)	安全通信プロトコル層
第 3 層(ネットワーク層)	
第 2 層(データリンク層)	
第 1 層(物理層)	

表 3-4-4-1-1 OSI 参照モデルと安全通信プロトコル

3-4-4-2. インターフェース

本プロトコルでは物理インターフェースについて特に制限は設けない。このため、すべての通信脅威に対して本プロトコルにより対応可能なものとする。

3-4-4-3. 動作

IEC61784 の定義している通信脅威とその対策を以下に示す。

本プロトコルでは IEC61784 の定義している通信脅威の対策を踏まえて、以下の機能を規定する。各機能の詳細については次項に記載する。

- 時間同期
- シーケンス制御
- 認証
- 再送制御
- 異なるデータ保全性の保証
- 伝送チェック

表 3-4-4-3-1 通信脅威と安全対策

		安全対策							
		シーケンス番号	タイムスタンプ	時間予想	接続認証	フィードバックメッセージ	データの保証	冗長による伝送チェック	異なるデータの保証システム
対策番号		1	2	3	4	5	6	7	8
通信脅威	くずれ					x	x	only for serial bus(d)	
	予想外の繰り返し	x	x			※ x		x(?)	
	誤ったシーケンス	x	x			※ x		x	
	損失	x				x		x	
	受け入れがたい遅れ		x	x(c)					
	挿入	x			x(a,b)	x(a)		x	
	自己を偽る/変装				x(a)	x(a)			x
	アドレス指定				x				

3-4-4-4. 時刻同期

IEC61784 の通信脅威対策における本対策の内容を以下に示す。タイムスタンプ、時間予想の対策を施す。タイムスタンプを使用するにあたり、送受信者間での時刻同期をとる必要がある。時刻同期の手法として、受信者に対する送信者の時刻の遅れを算出し、その差分だけシステムクロックを補正する。受信者に対する送信者の時刻の遅れを算出する方法を以下に示す。まず、送信者は受信者にメッセージを送信する。受信者は送信者に対してフィードバックを送信する。送信者のメッセージ送信時刻を t_0 、受信者のメッセージ受信時刻を t_1 、受信者のフィードバック送信時刻を t_2 、送信者のフィードバック受信時刻を t_3 とすると、受信者に対する送信者の時刻の遅れ T は以下の数式で表わされる。なお、一般に通信路には揺らぎが存在し、メッセージの到着時間にばらつきが生じる。このため、複数回の送受信を行うことで揺らぎを抑える。

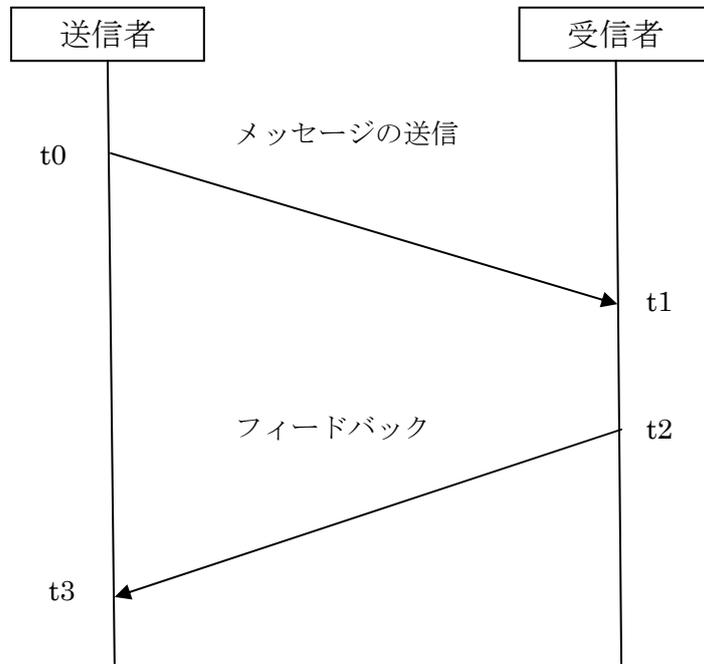


図 3-4-4-1 時刻同期手法

受信者に対する送信者の時刻の遅れ

$$T = \frac{t1+t2}{2} - \frac{t0+t3}{2}$$

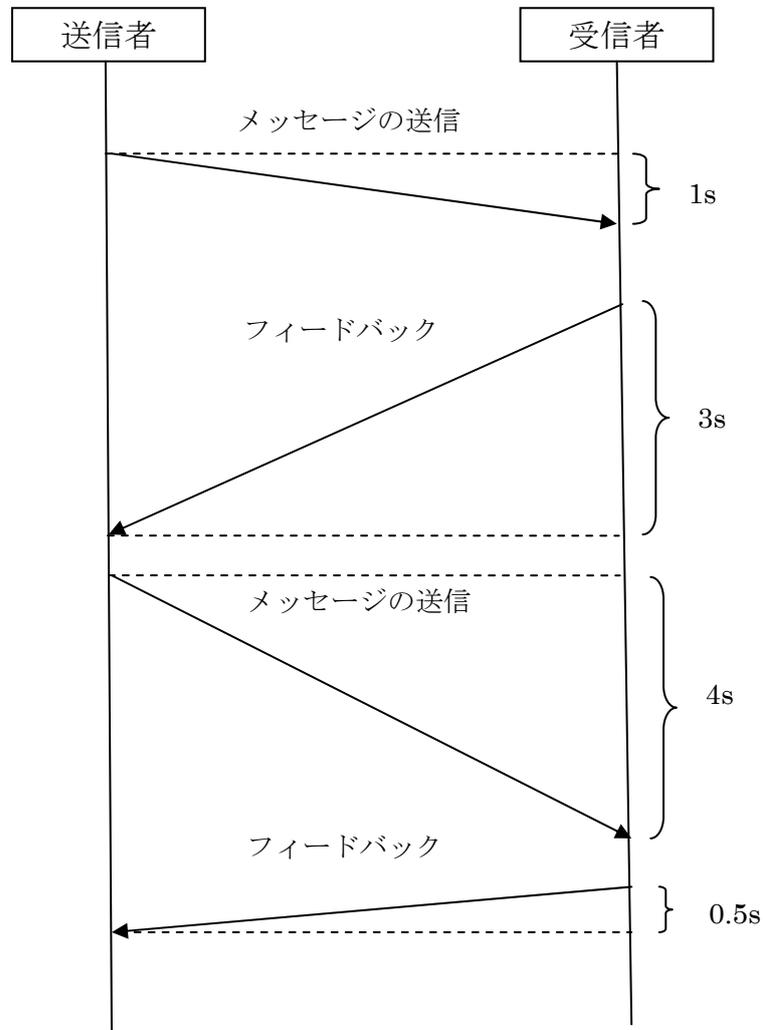


図 3-4-4-4-2 揺らぎの例

3-4-4-5. シーケンス制御

IEC61784 の通信脅威対策のうち、シーケンス番号、タイムスタンプの対策を施す。送受信フレームにシーケンス番号を付加し、シーケンス番号とフレーム内のタイムスタンプから対象フレームの通信シーケンスが正常であるか確認する。通信シーケンスが正常でなかったと判断される場合は不正フレーム受信とし、そのフレームを廃棄する。

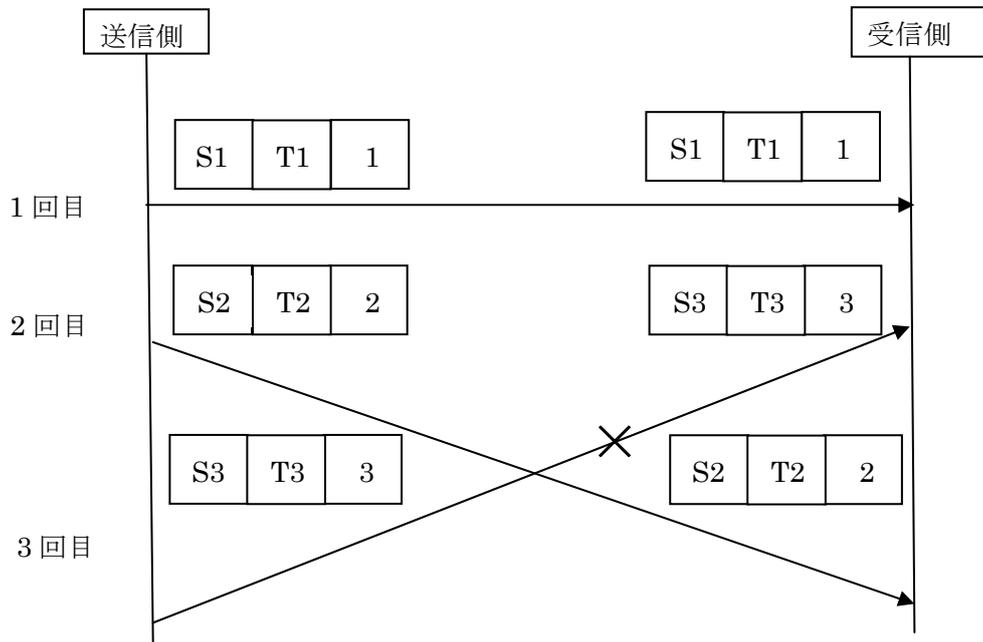


図 3-4-4-5-1 シーケンス番号とタイムスタンプによるフレームの破棄

3-4-4-6. 接続認証

IEC61784 の通信脅威対策のうち、接続認証の対策を施す。フレーム内に含まれる送信先 ID、送信元 ID を元に自身宛のフレームであるか、想定する送信元からのフレームであるかの認証を行う。フレームの受信者はフレームの DST フィールドの値と自身の ID が等しいことを確認する。フレームの受信者はフレームの SRC フィールドの値と予め規定されたサーバの ID が等しいことを確認する。いずれかの値が等しくない場合は認証を通過できないため、受信したフレームを破棄する。両方の値が等しい場合のみ受信したフレームを受信データとして扱う。

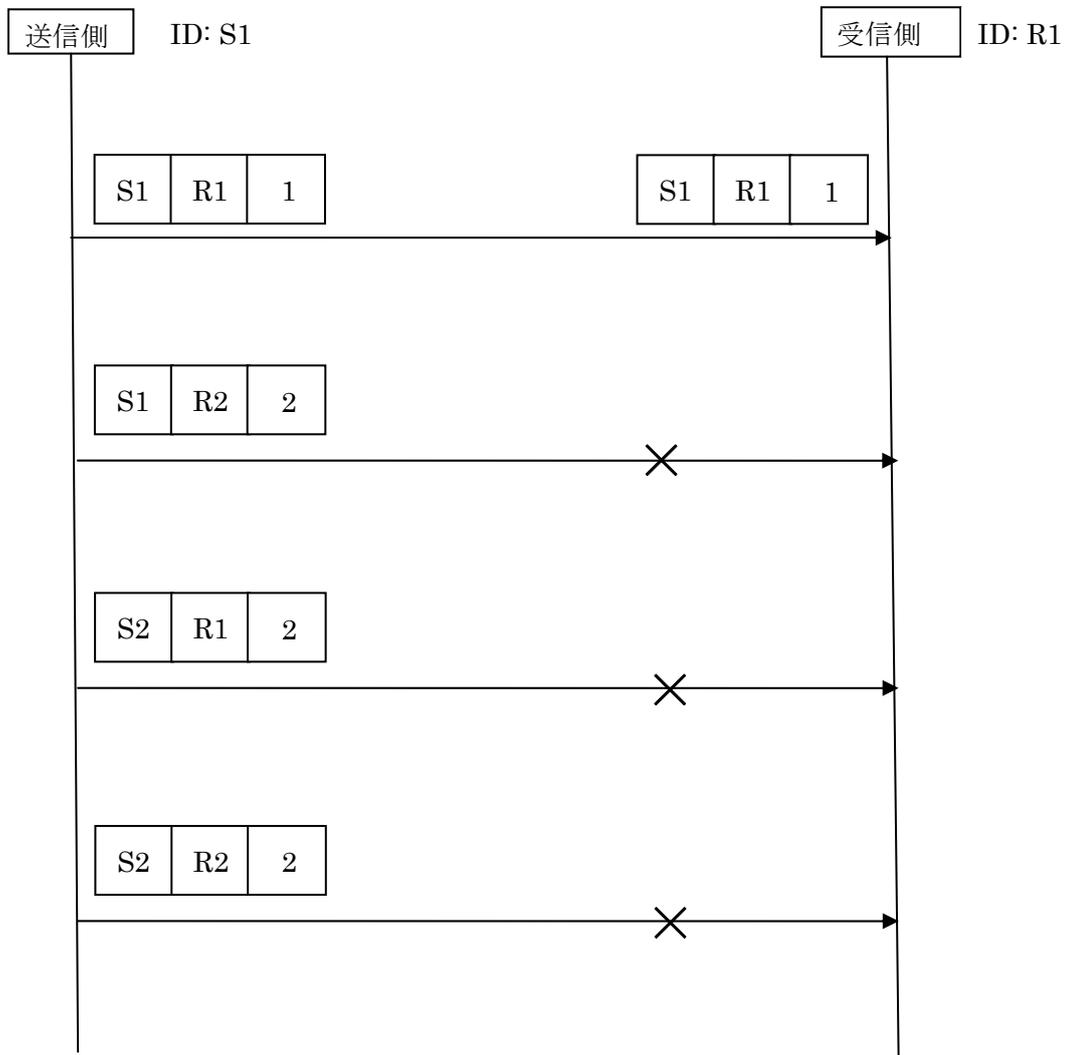


図 3-4-4-6-1 接続認証によるフレームの破棄

3-4-4-7. 再送制御

IEC61784 の通信脅威対策のうち、フィードバックメッセージの対策を施す。メッセージフレームが正常に送信されない場合は同一フレームの再送を行う。また、メッセージフレーム送信者がメッセージフレーム受信者からのフィードバックフレームを一定時間内に受信できない場合、再送を行う。再送回数および再送するまでの時間 (Retransmission Time Out) はシステム依存とする。また、再送回数によってこの時間は変更することができるものとする。再送の方法を以下に示す。

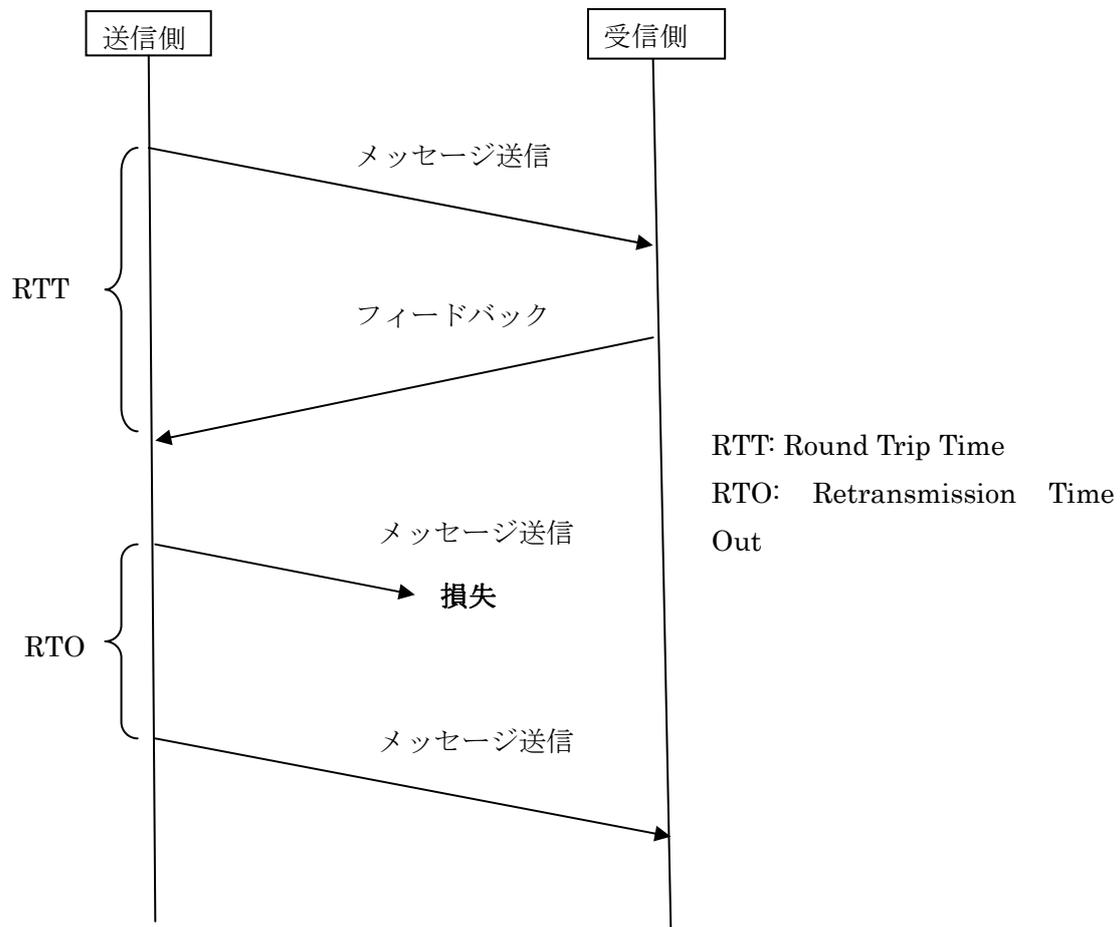


図 3-4-4-7-1 再送制御手法

3-4-4-8. 異なるデータ完全性の保証

IEC61784 の通信脅威対策のうち、異なるデータ完全性の保証システムの対策を施す。同一媒体に安全系データと非安全系データが混在するシステムでは、それぞれのデータの区別が付くようフレーム体系および、CRC、BCH 符号を別にする必要がある。つまり、非安全系データのフレーム形態を本仕様書のフレーム形態と別のものを使用しなければならない。

3-4-4-9. 伝送チェック

IEC61784 の通信脅威対策のうち、冗長による伝送チェック、データ保全の保証の対策を施す。情報データに対して BCH(255,215,11)を用いて符合化し、さらに CRC を用いて冗長化することで伝送チェックを行う。BCH 符号は符合化後のデータの扱いを考慮して、パリ

ティビットを付加することで符合化後のデータが 256bit となるようにする。そのため、パリティビットを付加していることを示すため、BCH(255+1,215,11)と記述している。BCH 符号の生成多項式と CRC32 の生成多項式を用いる。ビットエラー率 0.01 とした場合のフレームの 1 時間あたりの残余誤り率は 6.97×10^{-10} となり、SIL2 の評価を満たしている。

式 3-4-4-9-1 BCH 符号の生成多項式

$$G_{(X)} = X^{40} + X^{39} + X^{37} + X^{34} + X^{33} + X^{31} + X^{28} + X^{27} + X^{25} + X^{22} + X^{21} + X^{20} + X^{19} + X^{17} + X^{16} + X^{14} + X^{11} + X^7 + X^6 + X^5 + X^4 + X^2 + 1$$

式 3-4-4-9-2 CRC32 の生成多項式

$$G_{(X)} = X^{32} + X^{26} + X^{23} + X^{22} + X^{16} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^5 + X^4 + X^2 + X + 1$$

3-4-4-10. フレームフォーマット

安全通信プロトコルにおけるフレームフォーマットを下記に示す。

Header 部			DATA 部		
ヘッダ 情報	BCH (255+1,215,11)	CRC32	データ 情報	BCH (255+1,215,11)	CRC32
22[oct]	-	4[oct]	26[oct]	-	4[oct]
HEAD	BCH	CRC	DATA	BCH	CRC

図 3-4-4-10-1 安全通信フレーム全体構成

3-4-4-10-1. ヘッダ部詳細

ヘッダ部の詳細について述べる。ヘッダ部の構成とヘッダ部を構成する情報をそれぞれ下記に示す。

Header 部									
ヘッダ情報								BCH (255+1,215,11)	CRC32
2[oct]	2[oct]	2[oct]	2[oct]	4[oct]	4[oct]	4[oct]	2[oct]	-	4[oct]
DST	SRC	SEQ	TYP	TMS			LEN	BCH	CRC
				MSGSEND	MSGRCV	ACKSEND			

図 3-4-4-10-1-1 安全通信フレームヘッダ部構成

表 3-4-4-10-1-1 安全通信フレームヘッダ部詳細

フィールド	サブ フィールド	説明
DST		送信先番号
SRC		送信元番号
SEQ		シーケンス番号。
TYP		フレームタイプ
TMS	MSGSEND	送信側のメッセージフレーム送信時間。1msec 単位
	MSGRCV	受信側のメッセージフレーム受信時間。1msec 単位
	ACKSEND	受信側のフィードバックフレーム送信時間。1msec 単位
LEN		ペイロード部のデータサイズ
BCH		ヘッダ情報 (DST~LEN) の BCH 符号結果
CRC		DST~BCH 符号までの CRC32 結果

- DST フィールド
 - 2 オクテットのフィールドを持ち、送信先の ID を指定する。

- SRC フィールド
 - 2 オクテットのフィールドを持ち、送信元の ID を指定する。

- SEQ フィールド
 - 2 オクテットのフィールドを持ち、シーケンス番号を指定する。

- TYP フィールド

2 オクテットのフィールドを持ち、フレームタイプを指定する。指定する値を下記に示す。

表 3-4-4-10-1-2 TYP フィールドの指定値

値	説明
0x0000	BCON
0x0001-0x00FF	Reserve
0x0100	メッセージフレーム
0x0101-0x00FF	Reserve
0x0200	フィードバックフレーム
0x0201-0x03FF	Reserve
0x8000	リトライフレーム
0x0401-0x07FF	Reserve
0x0800	接続要求フレーム
0x0801-0x0FFF	Reserve
0x1000	接続許可フレーム
0x1001-0x1FFF	Reserve
0x2000	時刻同期／補正フレーム
0x2001-0x3FFF	Reserve
0x4000	切断要求フレーム
0x4000-0xFFFF	Reserve

- TMS フィールド

12 オクテットのフィールドを持ち、下記に示すサブフィールドを持つ。各サブフィールドについて以下に述べる。

- ▶ MSGSND フィールド

4 オクテットのフィールドを持ち、送信側のメッセージフレーム送信時間を指定する。

- ▶ MSGRCV フィールド

4 オクテットのフィールドを持ち、受信側のメッセージフレーム受信時間を指定する。なお、TYP フィールドがフィードバックフレームを指定している場合のみ有効となる。

- ▶ ACKSND フィールド

4 オクテットのフィールドを持ち、受信側のフィードバックフレーム送信時間を指定する。なお、TYP フィールドがフィードバックフレームを指定している場合のみ有効となる。

TMS		
4[oct]	4[oct]	4[oct]
MSGSEND	MSGRCV	ACKSND

図 3-4-4-10-1-2 TMS フィールド構成

- LEN フィールド

2 オクテットのフィールドを持ち、ペイロード部のデータサイズを指定する。

- BCH フィールド

41bit のフィールドを持ち、ヘッダ情報(DST-LEN)の BCH 符号化結果を指定する。なお、パリティビットとして 1bit 使用し、下記に示す生成多項式を用いる。

BCH 符号にて使用する生成多項式

$$G_{(X)} = X^{40} + X^{39} + X^{37} + X^{34} + X^{33} + X^{31} + X^{28} + X^{27} + X^{25} + X^{22} + X^{21} + X^{20} + X^{19} + X^{17} + X^{16} + X^{14} + X^{11} + X^7 + X^6 + X^5 + X^4 + X^2 + 1$$

- CRC フィールド

32bit のフィールドを持ち、DST-BCH 符号までの CRC32 結果を指定する。下記に示す生成多項式を用いる。

CRC 符号にて使用する生成多項式

$$G_{(X)} = X^{32} + X^{26} + X^{23} + X^{22} + X^{16} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^5 + X^4 + X^2 + X + 1$$

3-4-4-10-2. データ部詳細

データ部の構成とデータ部を構成する情報を下記に示す。

DATA 部		
データ情報	BCH (255+1,215,11)	CRC32
26[oct]	-	4[oct]
DATA	BCH	CRC

図 3-4-4-10-2-1 安全通信フレームデータ部構成

表 3-4-4-10-2-1 安全通信フレームデータ部構成

名称	説明
DATA	データ
BCH	データの BCH 符号結果
CRC	DATA~BCH 符号までの CRC32 結果

- DATA フィールド

26 オクテットのフィールドを持ち、安全通信層のサービスデータユニットとなる。

- BCH フィールド

41bit のフィールドを持ち、ヘッダ情報(DST-LEN)の BCH 符号結果を指定する。

なお、パリティビットとして 1bit を使用すし、下記に示す生成多項式を用いる。

式 3-4-4-10-2-1 BCH 符号にて使用する生成多項式

$$G_{(X)} = X^{40} + X^{39} + X^{37} + X^{34} + X^{33} + X^{31} + X^{28} + X^{27} + X^{25} + X^{22} + X^{21} + X^{20} + X^{19} + X^{17} + X^{16} + X^{14} + X^{11} + X^7 + X^6 + X^5 + X^4 + X^2 + 1$$

- CRC フィールド

32bit のフィールドを持ち、DST-BCH 符号までの CRC32 結果を指定する。なお、生成下記に示す生成多項式を用いる。

式 3-4-4-10-2-2 CRC 符号にて使用する生成多項式

$$G_{(X)} = X^{32} + X^{26} + X^{23} + X^{22} + X^{16} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^5 + X^4 + X^2 + X + 1$$

3-4-5. 安全通信の性能確認

安全通信プロトコルを実装し、残余誤り率に関する性能の確認を行った。本項では確認結果について述べる。

3-4-5-1. 評価環境

- 無線モジュール XBee(無線通信規格 IEEE802.15.4)

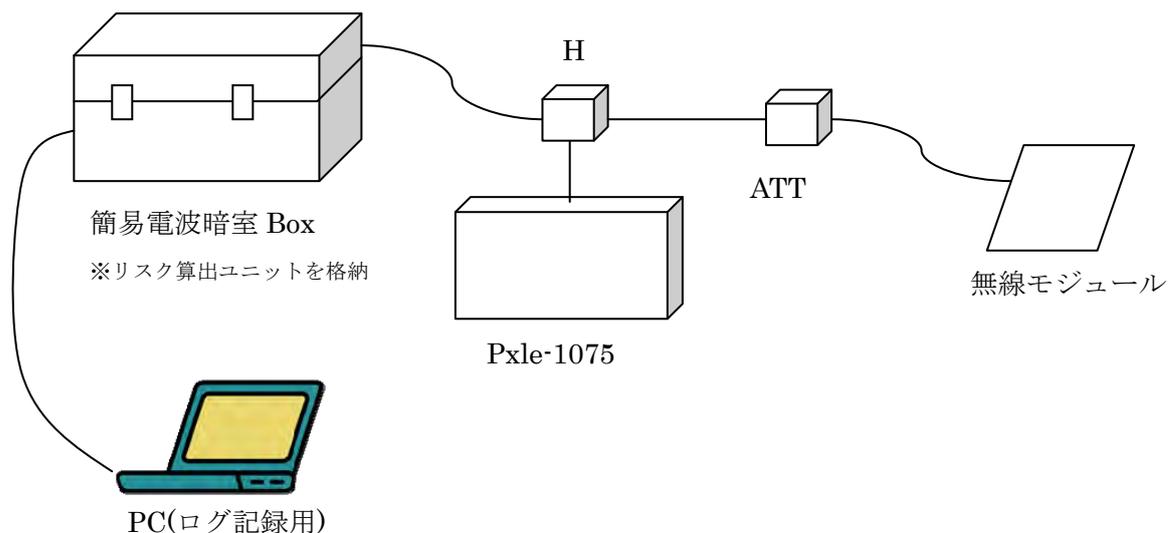


図 3-4-5-1-1 環境構成

3-4-5-2. 評価内容

リスク算出ユニットに搭載した無線モジュールと、受信データを折り返す無線モジュールを同軸ケーブルで接続し、電波レベルをアッテネータ(ATT)により減衰する。

Pxl-1075 は電波レベルの測定、及び、雑音混入に使用する。

簡易電波暗室 Box に格納したリスク算出ユニットは、リスク算出ユニットに搭載されている無線モジュールよりデータを送信する。

そのデータは、対向の無線モジュールにて折り返され、再び、リスク算出ユニットに戻される。

リスク算出ユニットは、受信したデータを安全通信プロトコルにより検査し、エラー検出の場合、その情報をログ出力する。

安全通信プロトコルにて正常と判断された通信データは、データを送信したアプリケーションに引き渡され、送信したデータと同一で有るかのチェックを行う。このチェックでエラーとなった物が、残余誤り率を求めるための情報となる。

上記の折り返し試験を、電波強度、S/N 比を変化させて1時間行い、エラーをどのレベル

で検出するか、および、安全通信プロトコルでの検査で OK となりながら、異なるデータとなることがあるかの確認を行う。

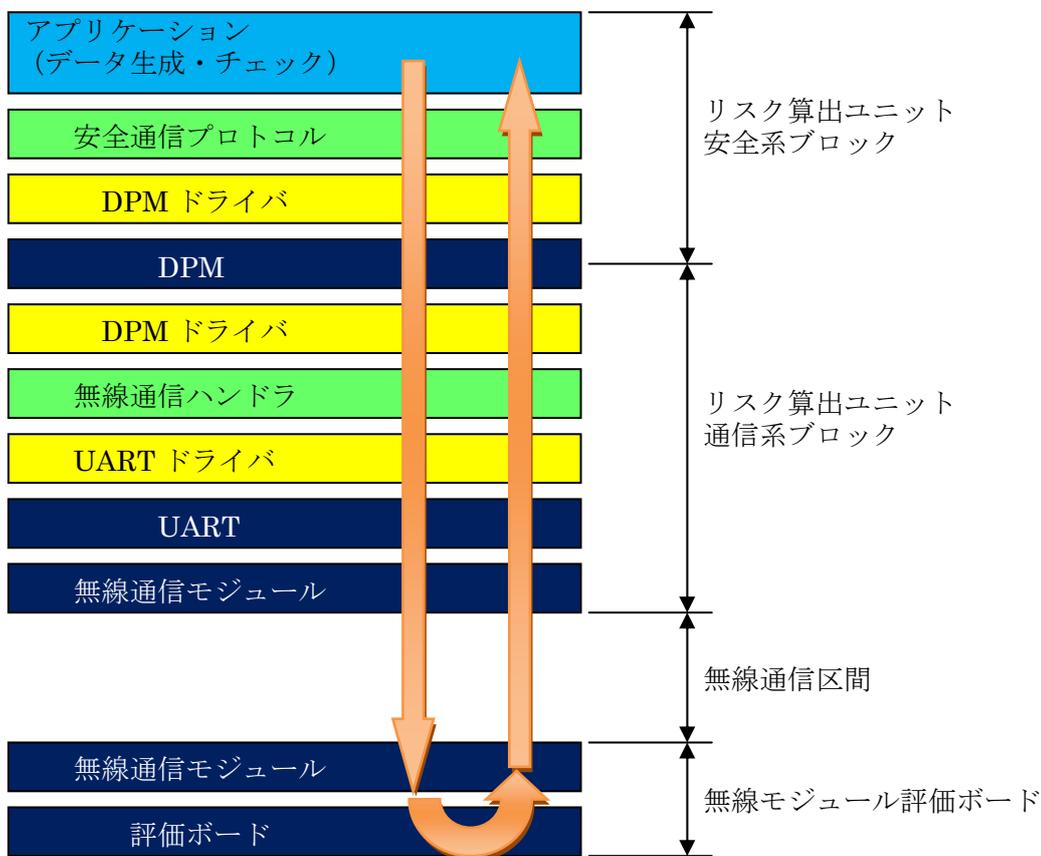


図 3-4-5-2-1 評価データの伝送経路

3-4-5-3. 評価結果

測定した結果を下記に示す。

表 3-4-5-3-1 測定結果 (安全通信プロトコル使用時)

安全通信プロトコル使用時				
送信フレーム数 ①	正常フレーム数 ②	CRC/BCH エラー ③	データ異常数 ④	タイムアウト回数 ⑤
21,848	16,122	0	0	2,588

表 3-4-5-3-2 測定結果 (安全通信プロトコル未使用時)

安全通信プロトコル使用時				
送信フレーム数 ①	正常フレーム数 ②	CRC/BCH エラー ③	データ異常数 ④	タイムアウト回数 ⑤
19,331	19,260	—	0	3,209

安全通信プロトコル使用時、未使用時のどちらの場合においても、安全通信プロトコルにて検出したエラー③、および、アプリケーションにて検出したデータ異常④はなく、残余誤り率は 0.00%となり、残余誤り率に対する安全通信プロトコルの有効性を確認することができなかった。

今回使用した無線通信モジュールは、IEEE802.15.4 の通信スタックを搭載し、IEEE802.15.4 にて対応されている通信脅威の対策（CRC チェック）が有効になっているため無線区間にて発生したデータエラーを検出して、再送によるエラーの復旧、及び、エラーフレームの廃棄が行われてしまう。このためエラーのフレームのデータはリスク算出ユニットには到達せず、安全通信プロトコルが有効に機能する部分が、リスク算出ユニット内のデータ転送部分に限定されてしまったことが原因と考えられる。

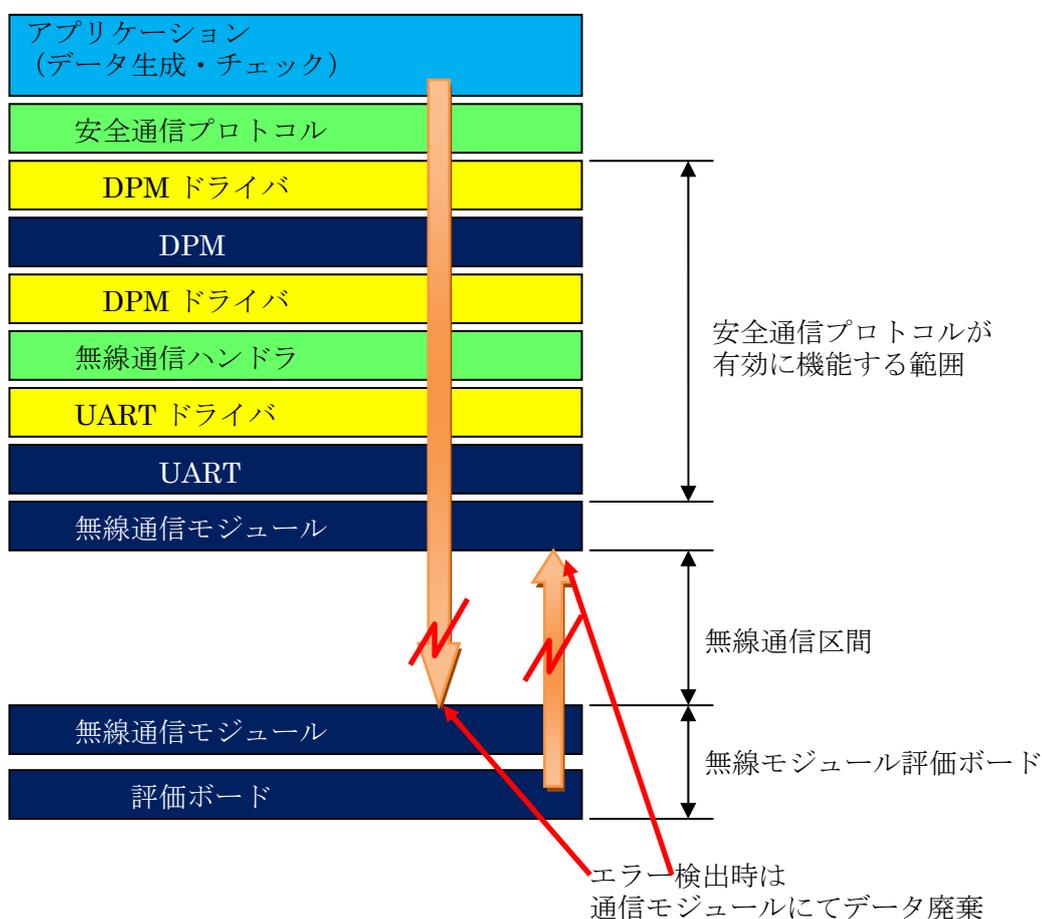


図 3-4-5-3-1 エラーデータの廃棄

今後、通信脅威への対策が全くされていない伝送媒体を用いた評価にて、安全通信プロトコルの性能を確認する必要がある。

4. つくばモビリティロボット実験特区での実証実験（アイシン精機）

開発したロボットの利便性と安全性について実際の利用環境にて走行し確認する必要がある。本ロボットは、歩行者空間として、屋内と屋外をシームレスに走行するものであるが、屋外は主に歩道（公道）であり、道路交通法に照らし合わせると公道走行は許されていない。一方、つくば市にあるつくばモビリティロボット実験特区は、2011年3月より構造改革特別区域の認定を受けており、公道上で実験的な走行が可能である。

開発ロボットの安全性について、ロボット安全検証センターにおける評価にて確認し、関東運輸局に開発ロボット特区基準緩和認定、及びつくば市からの標識交付を受けて2013年10月22日より公道での実証実験を開始した。

4-1. 実験計画

実証実験では、開発したロボットの利便性と安全性について評価する。本ロボットは、事業背景及び事業目的の章でも述べた通り、超高齢化社会における日常生活の移動支援を目的とするもので、すでに社会導入されている電動車いすをベースとしつつ、その最高速度を時速10kmまで拡張する事で、行動範囲を広げ自立した移動支援を可能とするものである。従って、屋内外を移動機器の乗り換え無しにシームレスに移動できる事に加え、機動性、すなわち移動時間の短縮も利便性の一つの指標とした。

また、安全性については、リスクアセスメントにて抽出した許容リスクを超える危険事象の回避性を評価する。リスクアセスメントでは、許容リスクを超える危険事象として、時速6kmを超える速度での衝突や、ロボットの転倒、ロボットからの転落による衝突があった。その危害程度も衝突安全性能試験にて定量的に把握しており、妥当なものであると確認している。そこで、安全性の検証は、実際に公道走行中の搭乗者の所感分析と走行状況の分析により、この許容リスクを超える危険事象が発生しない事を確認する。搭乗者の所感分析は、搭乗者が何かしらの気付きを感じた場面を抽出し、表4-1-1に示す4種類に分類した。

表4-1-1. 所感の場面分類

場面	場面説明
A(安心)	衝突等しない安全な場面であり、搭乗者が安心して走行している場面
B(不安)	衝突等しない安全な場面であるが、狭路や降り坂での走行等、搭乗者が不安を感じる場面
C(危険)	衝突、転倒・転落等の危険事象が発生する場面
D(不快)	衝突等しない安全な場面であるが、搭乗者が不便・不快感を抱く場面

この中で、衝突・転倒・転落につながる危険な場面Cの発生頻度を安全性の一つの指標とした。また、走行状況の分析では、リスクアセスメントで危険であると想定した障害物に対し、速度制限機能が動作した頻度を安全性の指標としている。この2つの指標を基に安全性を判断した。

実証実験にあたり、走行コースの選定は重要である。つくばモビリティロボット実験特区では、図4-1-1に示すエリアが対象エリアではあるが、実際の走路は、歩道幅員の条件を満たさねばならない。



【実験対象エリア】

以下の2のエリアで分類。

① つくばセンターエリア

：茨城県つくば市中央部の、東西約2km、南北約9kmの範囲内(赤色で図示)

② つくば研究学園エリア

：茨城県つくば市中央部西側の、つくばエクスプレス研究学園駅を中心とする半径約2kmの範囲内(青色で図示)

図4-1-1. つくばモビリティロボット実験特区

このような走行条件を満たす走路を抽出した上で、ユーザとなる高齢者像と、その利用シーンを想定しあらかじめ走行コースを選定した。また、選定したコースについては、事前に代表的な路面及び障害物状況について調査を実施している。調査結果を図4-1-2-1と図4-1-2-2に示す。これらの検討結果を基に走行コースを図4-1-3-1から図4-1-3-4に示す。

実証実験では、この設定した走行コースを実際に走行し、設定した指標を基に利便性と安全性を評価した。尚、評価者(搭乗者)は、実際の利用者(高齢者)ではなく、開発者らで実施した。

対静止障害物環境



路面環境



図4-1-2-1. 代表的な路面及び障害物状況 (つくば研究学園エリア)

対静止障害物環境



路面環境

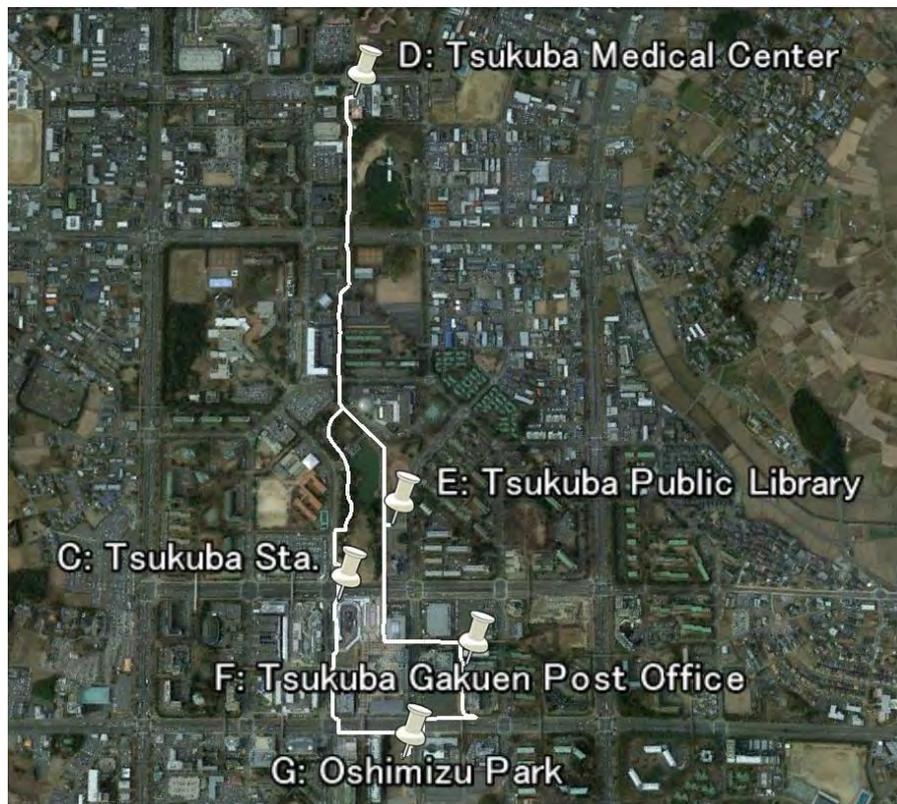


図4-1-2-2. 代表的な路面及び障害物状況 (つくばセンターエリア)



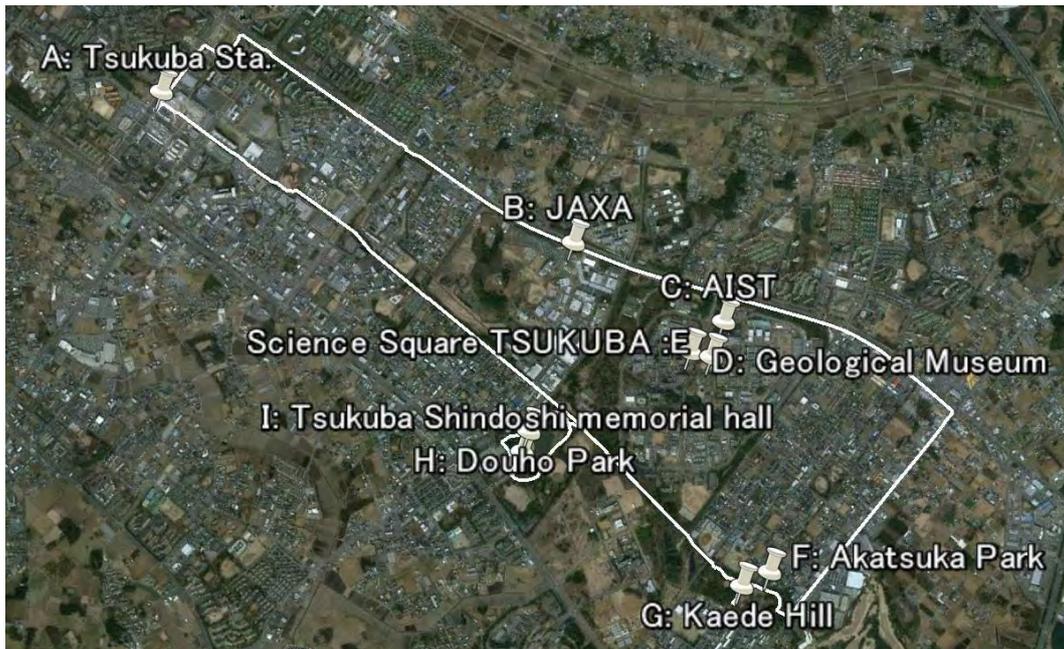
画像©2013 Digital Earth Technology, Digital Globe,地図データ© Google, ZENRIN

図4-1-3-1. 走行コースA (つくば研究学園エリア)



画像©2013 Digital Earth Technology, Digital Globe,地図データ© Google, ZENRIN

図4-1-3-2. 走行コースA (つくばセンターエリア)



画像©2013 Digital Earth Technology, Digital Globe,地図データ© Google, ZENRIN

図4-1-3-3. 走行コースB(つくばセンターエリア)



画像©2013 Digital Earth Technology, Digital Globe,地図データ© Google, ZENRIN

図4-1-3-4. つくばモビリティロボット実験特区における走行コース

4-2. 実験準備

搭乗者の所感と走行状況の分析を実施するため、ロボットに各データを収集する計測システムを構築し、搭載した。搭載した計測システムを図4-2-1に示す。走行中のロボットと周囲状況、評価者（搭乗者）の様子を記録するため、複数のビデオカメラをロボットに配置し動画を記録した。また評価者（搭乗者）が何かしらの気付きを感じた場面でその旨を音声記録する事とした。さらに、客観的なデータとしてロボットの内部データを記録している。内部データは、評価者（搭乗者）のジョイスティック操作量、ロボットの速度、安全機能の速度制限指示値、走行コース内位置（GPS）などである。

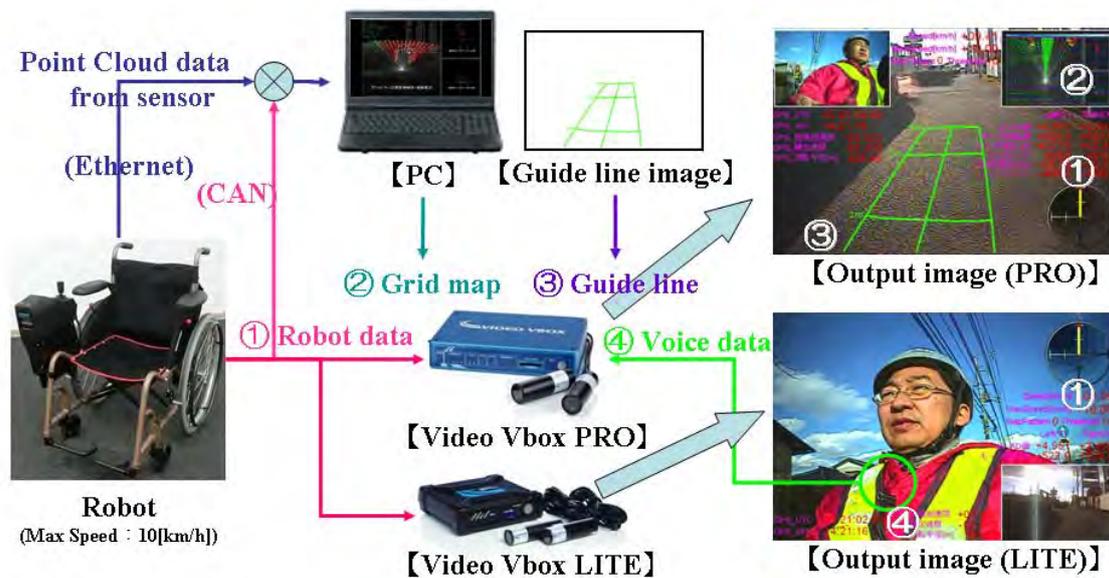


図4-2-1. 計測システム

これらのデータは全て同期され実験終了後、走行中に発生した事象に対して必要なデータを抽出する事が可能である。

また、安全を最優先に実験を行うべく、安全対策を施し、実験を実施した。つくばモビリティロボット実験特区では、実験に際し、評価者（搭乗者）とは別に、保安員1名を配置する事が義務付けられている。これは、実験中における一般通行者に対する安全の確保及び通行の妨げを防ぐため保安員が実験中の周囲環境を把握し、実験運行を適切なものとするためである。本実験にあたり、2名の保安員を配置し、評価者とあわせ3名1組にて実験を実施した。実験の様子を図4-2-2に示す。



図4-2-2. 実証実験の様子

4-3. 実験及び実験結果

つくばモビリティロボット実験特区における、走行実績を表4-3-1に示す。2つの走行コースを2名の評価者（搭乗者）にて走行し、その延べ走行距離は51.3kmであった。

表4-3-1. 走行実績

走行コース	種類	走行コースA				走行コースB		
	分類	つくば研究学園エリア		つくばセンターエリア		つくばセンターエリア		
	回数	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	3回目
実施日		2013/10/22	2013/10/31	2013/10/23	2013/10/31	2013/11/1	2013/12/12	2014/1/17
車両	最高速度	10km/h	10km/h	10km/h	10km/h	10km/h	10km/h	6km/h
	速度制限機能	○	○	○	○	○	○	×
走行実績	走行距離	2.4km	2.5km	3.9km	4.5km	13.0km	12.8km	12.2km
	走行時間	20分	18分	43分	37分	2時間13分	1時間59分	2時間1分
搭乗者		A (男性50代)	B (男性50代)	A	B	B	A	A
照度	スタート地点	-	61300lx	-	42000lx	52000lx	52400lx	26500lx

尚、実験は、晴天時の日中（実験日のつくば市“日の出時刻”から“日の入り時刻”の間）にて行った。各走行コースにおいて抽出された代表的な場面を実験結果として図4-3-1～8に示す。

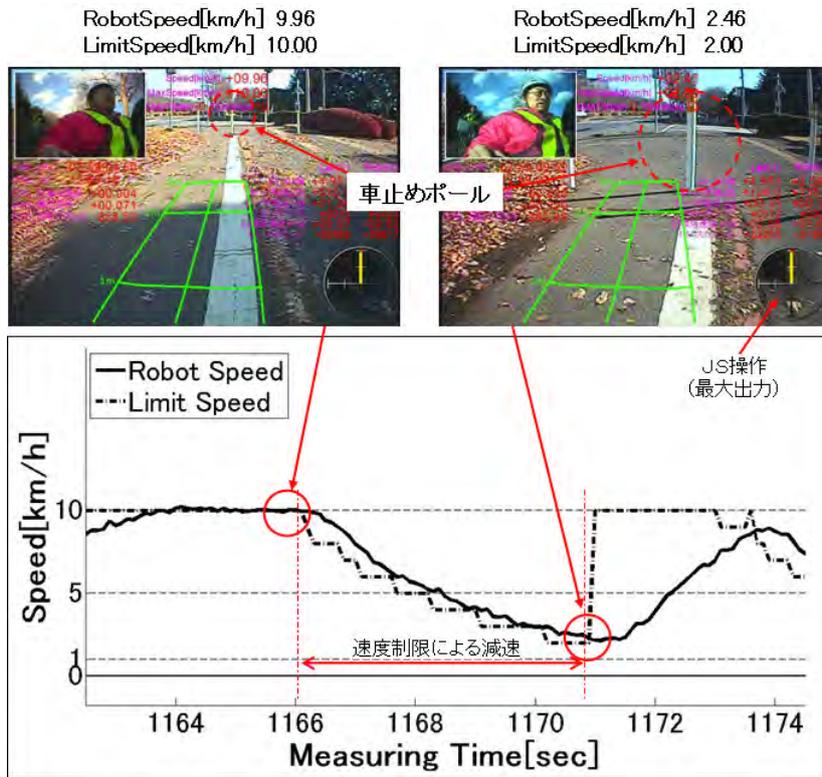


図 4-3-1. 代表場面 (車止めポールA接近時)

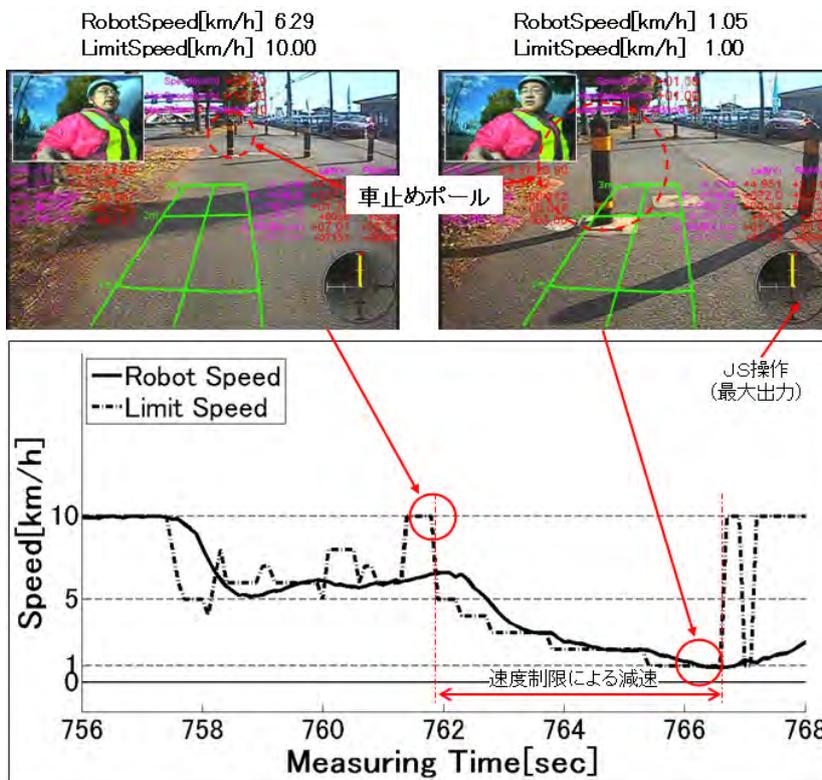


図 4-3-2. 代表場面 (車止めポールB接近時)

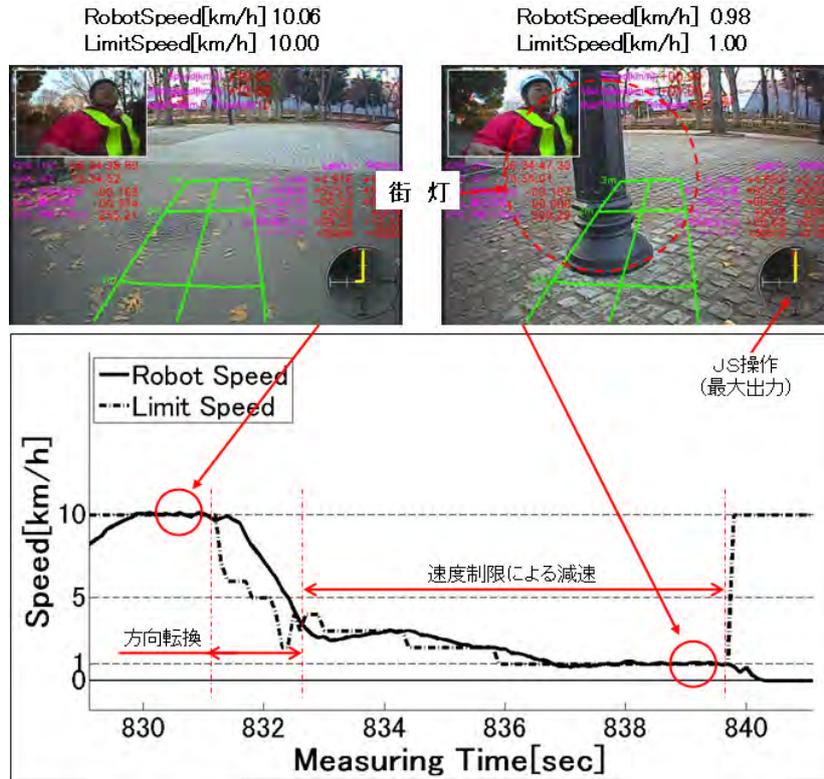


図 4 - 3 - 3 . 代表場面 (街灯接近時)

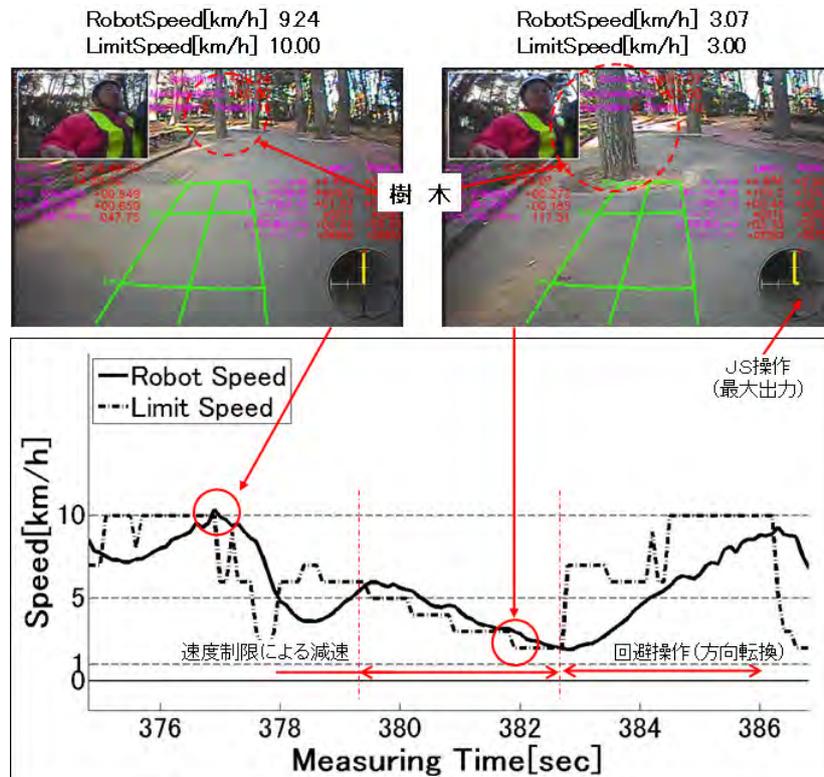


図 4 - 3 - 4 . 代表場面 (樹木接近時)

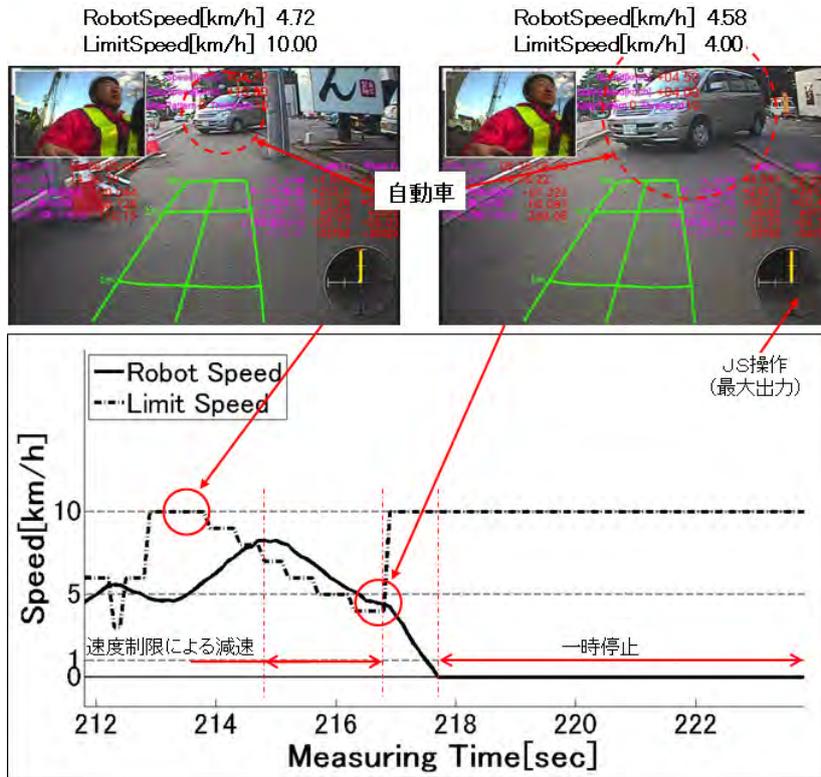


図 4 - 3 - 5 . 代表場面 (自動車接近時)

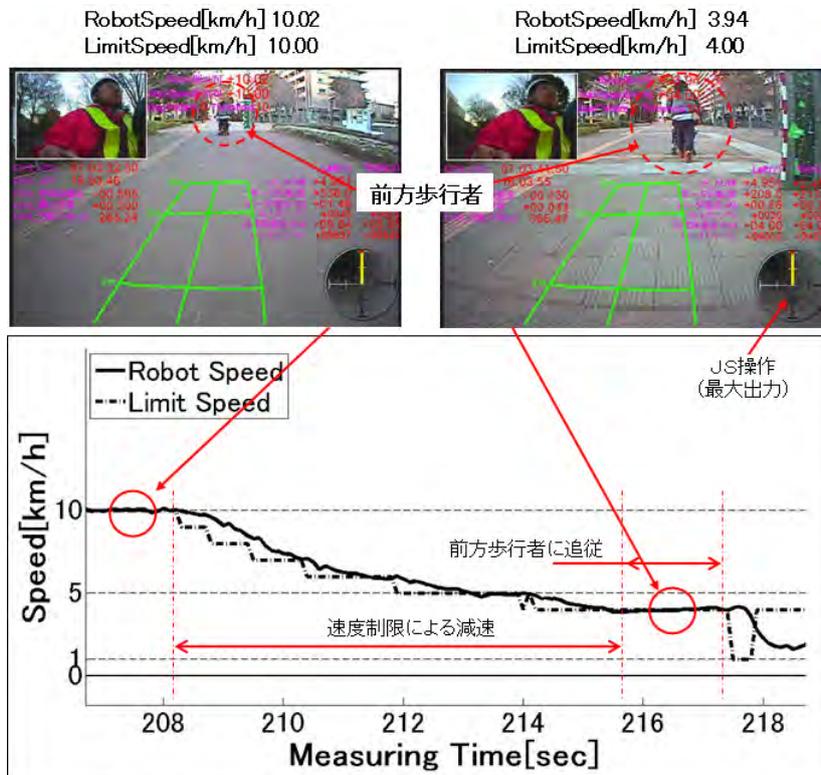


図 4 - 3 - 6 . 代表場面 (前方歩行者接近時)

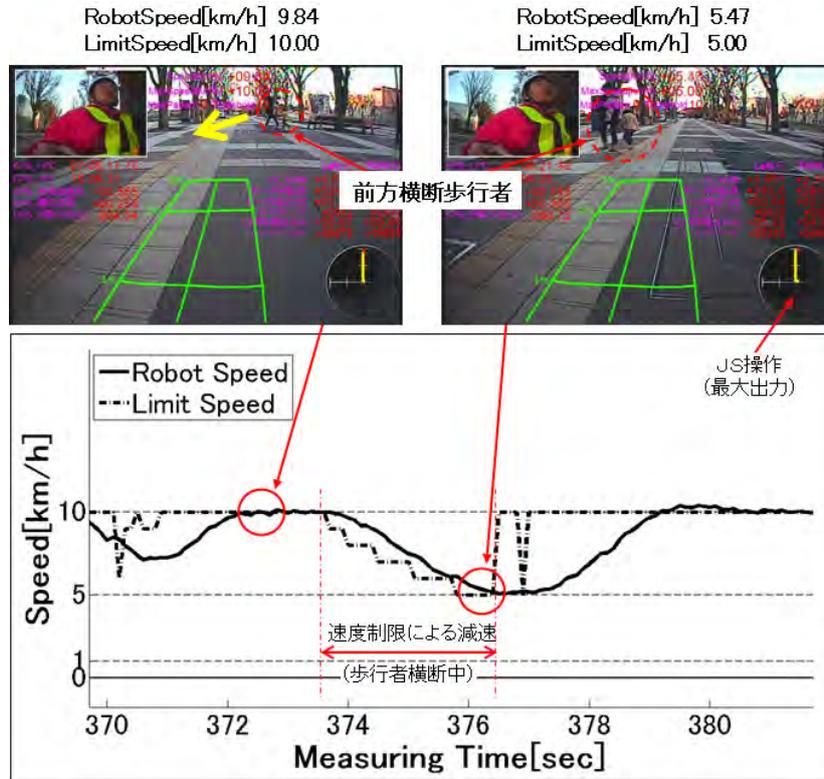


図 4-3-7. 代表場面 (前方歩行者横断時)

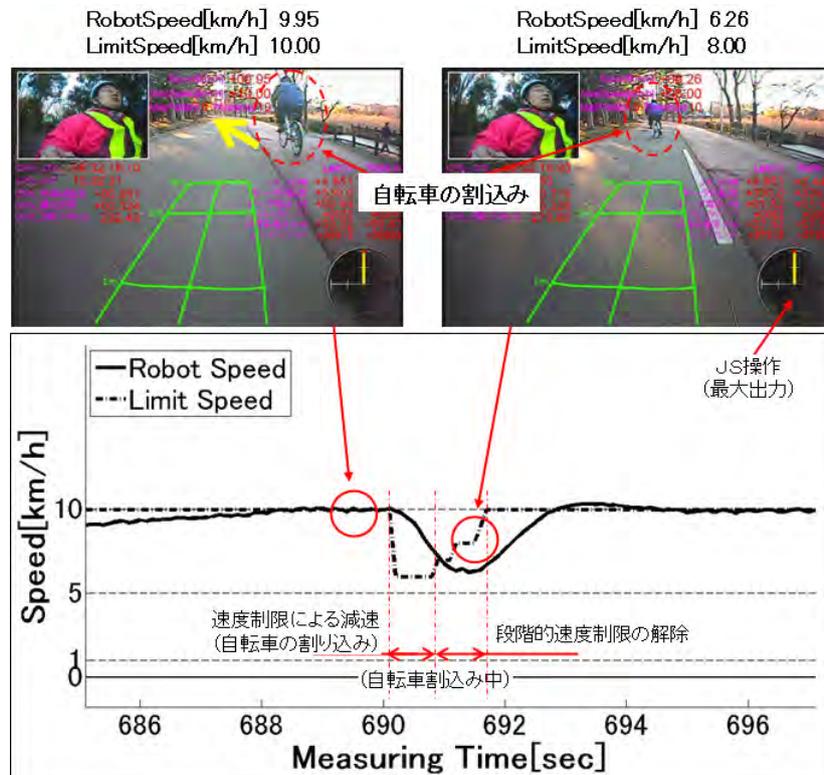


図 4-3-8. 代表場面 (前方自転車の割り込み時)

また、走行中に記録された評価者（搭乗者）の様子及び評価者（搭乗者）の音声データから評価者（搭乗者）が何かしらの気付きを感じた場面は表4-3-2に示す様な一覧表にまとめた。表には、各場面の発生した時刻、その区分と内容を記載している。場面の区分は、それが利便性に関するものか、安全性に関するものであるのか、また、安全性に関するものであれば、表4-1-1に示す何れに区分される場面であるのかを記録している。これを評価者（搭乗者）の所感データとして分析に用いている。

表4-3-2. 所感一覧表

場面の区分				場面の内容	
時刻	区分	区分	区分	コメント	コメント
12:40:36	1	2	A	若干の下り坂。路面が荒れていたため速度制動がかかると思われたが、それもなく快適。速度は操縦者が制御。時速20km程度	
12:40:48	1	2	A	若干の下り坂。路面荒れの影響か、平坦になる前の形状の影響か。速度制動が一瞬かかる	
12:41:23	1	3	B	これは特有の左折道路の横断歩道を横断する事自体が珍しい。カーブドライバの目線の高さの違いなど	
12:42:23	1	2	B	大きな交差点での車道→横断歩道前の時速1kmまでの減速は逆に驚かされそうだが	
12:42:35	1	2	B	これは特有の左折道路の車道中央で減速していき、車道がわかれそうだが	
12:43:09	2	2	A	荒れて、落ち葉のある自転車道。急な速度制動が一瞬かかる。	
12:43:36	2	2	D	時々、速度制動が入り、減速するのでは無く、しばらくこのような状態が続く。	
12:43:58	2	2	D	前面前方が少し小さくなっている場面で速度制動がしばらく続き、思ひような走行ができず不快	
12:44:09	2	2	D	時々、速度制動が入り、減速するのでは無く、しばらくこのような状態が続く。	
12:44:39	2	2	D	路面がうねっている影響か、時々、速度制動が入り、減速するのでは無く、しばらくこのような状態が続く。	
12:45:29	1	3	B	車道→横断歩道前で時速1kmまで減速。歩道の段差にて一時停止した後、駆動力が増えてワザリ状態となり、操縦不能で路肩に衝突しそうになる	
12:47:26	2	2	A	路面前方が少し小さくなっている場面で速度制動により減速	
12:49:19	2	2	D	車道→横断歩道前で時速1kmまで減速。歩道の段差にて一時停止。うまく位置移動してバランスをとり段差を乗り越	
12:50:20	2	2	D	これは特有の左折道路の横断歩道前で速度制動がかかるので横断歩道に入るタイミングが気になる	
12:50:39	2	2	D	横断歩道中央(中央分離帯付近)の凸路面形状手前で減速。スムーズな横断ができない	
12:50:59	2	2	D	かなり下り急で、急に速度制動がかかり、車輪が滑った	
12:51:18	1	2	A	車道→横断歩道前で時速1kmまで減速。歩道の段差にて一時停止。うまく位置移動してバランスをとり段差を乗り越	
12:51:35	1	2	A	ここから、とどころ速度制動(時速7km程度まで)が入るが、操縦者の操作に促った快適な走行	
12:51:59	2	2	A	横断歩道前の車止めにに対して、速度制動機能が働かず、車に車止めのボールをすり抜けさせた	
12:52:57	2	2	A	歩道幅の狭さ(1.0m程度?)に対してうまく速度制動がされ、乗り上げる(衝突する)前にスムーズに減速した	
12:53:46	1	2	A	路面状態も良く、とどころ速度制動(時速7km程度まで)が入るが、操縦者の操作に促った快適な走行	
12:54:06	2	2	D	自行路肩の雑草に反応したか?とどころ速度制動がかかり、急になる	
12:54:06	2	1	B	横断歩道→歩道に入る前の車止めのボールを踏み出し、横断歩道端で減速。操縦を切ってボールを回避。歩道段差を越えて一時不安定(ワザリ)に	
12:54:21	2	2	D	路面(より急、落ち葉)の影響か、速度制動が頻りに入り、車輪がしばらく状態に、大変そうらしい。	
12:54:47	2	2	A	これは、スムーズな速度制動(時速7km程度まで)が入るが、操縦者の操作に促った快適な走行	
12:55:09	2	2	A	ここから、とどころ速度制動(時速7km程度まで)が入るが、操縦者の操作に促った快適な走行	
12:55:43	2	2	A	走行路の落ち葉に反応したか?比較的平坦であるが、とどころ速度制動(時速7km程度)がかかり、急になる(約1.0m程度?)	
12:56:55	3	3	A	なぜかしばらく時速7kmに制動。路面は落ち葉でもあり、スリップを考えるとこれで良いのかもしれない(結果的に)	
12:58:44	1	3	B	車道→横断歩道前で時速1kmまで減速。歩道の段差にて一時停止した後、駆動力が増えてワザリ状態となり、操縦不能で路肩に衝突しそうになる	
12:59:50	1	2	A	ここから、とどころ速度制動(時速7km程度まで)が入るが、操縦者の操作に促った快適な走行	
13:00:09	2	2	A	路面は落ち葉でもあり、少しの間、速度が時速7kmに制動	
13:02:59	3	3	A	なぜかしばらく時速7kmに制動。路面は落ち葉でもあり、スリップを考えるとこれで良いのかもしれない(結果的に)、大きく急にはならない	
13:03:09	2	2	A	特に問題無い場面で急な速度制動が一瞬かかる	
13:03:22	2	1	B	横断歩道→歩道に入る前の車止めのボールを踏み出し、横断歩道端で減速。操縦を切ってボールを回避。歩道段差を越えて一時不安定(ワザリ)に	
13:03:35	2	1	A	前方歩行者を後出し。歩行者の位置に合わせて減速して後を空欄を自動的に確保。安心で乗る。	
13:03:45	2	1	A	前方歩行者が離れたので、速度制動が解除され自動的に希望速度に再加速。	
13:04:09	2	1	A	歩道(走路)幅の狭さ(1.0m程度?)に対してうまく速度制動がされ、乗り上げる(衝突する)前にスムーズに減速した	
13:06:10	2	1	B	車道→横断歩道への段差が大きいところはあらかじめ減速したので速度制動がかかりやすかった	
13:06:22	2	1	B	横断歩道→歩道に入る前の車止めのボールを踏み出し、横断歩道端で減速。操縦を切ってボールを回避。歩道段差を越えて一時不安定(ワザリ)に	
13:07:13	2	1	A	歩道(走路)中央に設置された車止めの後押し。1.0m手前から減速。問題無く、車止めのボールの間を通過。しばらく同じ状態が続く。	
14:14:27	2	1	B	自動車の乗り入れの歩道への空欄に対して速度制動が働かず、なかなか乗り入れ口から減速できないのと、より急なところで急加速(ワザリ)する	
14:14:50	2	1	B	自動車の乗り入れの歩道への空欄に対して速度制動が働かず、なかなか乗り入れ口から減速できないのと、より急なところで急加速(ワザリ)する	
14:15:39	2	1	B	自動車の乗り入れの歩道への空欄に対して速度制動が働かず、なかなか乗り入れ口から減速できないのと、より急なところで急加速(ワザリ)する	
14:15:54	2	1	B	自動車の乗り入れの歩道への空欄に対して速度制動が働かず、なかなか乗り入れ口から減速できないのと、より急なところで急加速(ワザリ)する	
14:16:11	2	1	B	自動車の乗り入れの歩道への空欄に対して速度制動が働かず、なかなか乗り入れ口から減速できないのと、より急なところで急加速(ワザリ)する	

4-4. 結果の分析

実証実験を通して、評価者（搭乗者）からは快適であるとの感想が得られている。これは、幅員が広く、かつ歩行者などの少ない比較的広い空間を走行する際、ロボットが最高速度時速10kmにて走行された事であった。これは、あくまで主観的な評価結果ではあるが、この様な新しい移動ロボットに対し、まずは“使ってみたい”と感じていただける事は重要であろう。さらに、仮定した行動範囲の拡張につながったかを実際に数値として確認すべく電動車いすにて走行した場合との比較をした。最も走行コース長が長い、走行コースBにおける走行時間・平均走行速度としてまとめたものを表4-4-1に示す。コースの総移動時間を10%程度短縮できており、最高速度を上げたことによる効果は確認できた。走行コースの全てにおいて最高速度を出せる状況では無いため、単純に最高速度

に比例した移動時間短縮は実現できない。利用場面に応じ、総移動時間を短くできる事が考えられ、その場合はより効果的であり、利便性を感じていただけるものと考えている。

表 4-4-1. 電動車いすと開発ロボットの総移動時間の比較

比較内容	電動車いす	開発ロボット
総移動時間 [min]	131	119
平均速度 [km/h]	5.58	6.15

次に所感一覧表から、ヒヤリハットを含めた評価者（搭乗者）の気付きを98場面で抽出した。その中で、所感の場面分類に基づき該当事象を抽出・整理したものを表4-4-2に示すこの中で、衝突・転倒・転落といった危険な場面（C）に相当する状況は発生していない。従って、許容リスク以下の状態であると考えられる。

表 4-4-2. 所感データのまとめ表

分類	A(安心)	B(不安)	C(危険)	D(不快)
発生件数	40	22	0	34
発生割合 [%]	40.8	22.8	0	34.7

また、走行状況についてロボットの内部データから、障害物に対して速度制限が機能した頻度を分析した。分析した結果を表4-4-3に示す。

表 4-4-3. 速度制限が機能した頻度分析表

分類	名称	場面数	動作回数	動作率[%]
固定物	ポール	23	18	78.3
	看板	3	3	100
移動体	歩行者	3	3	100
	自転車	2	2	100
合計		31	26	83.9

尚、評価者（搭乗者）が、自ら衝突リスクを事前に感知し、速度制限が機能する前に回避した場面は除外している。障害物については、歩行者、自転車の他、固定物としてすでに図4-1-2-2に示したものが存在する。遭遇した障害物としては、歩道に設定された車止めのポールが最も多く23場面、次に看板が3場面であった。また歩行者や自転車に遭遇する場面が5場面あった。それらの障害物との遭遇時において全体で83.9%の場面

で速度制限機能が働いた。これらは、表4-4-2に示した所感データのまとめ表における、A（安心）に区分された場面に含まれる。

この事から評価者（搭乗者）が安心と感じた場面の6割以上の場面において、安全機能である速度制限機能がうまく働いた結果であり、安全機能が利用者の安心感につながると考える。ただし、歩道に設置された車止めポールの約2割についてはうまく検知されていない。そしてこれらは、22件のB（不安）に区分される場面につながっている。さらに、不快と感じる場面が34件あり、想定していたものより多く発生している。これについて、場面分析をおこなうと歩行者や障害物が存在せず、特に危険な場面につながる要素が無い場面において安全機能が働いていたことがわかっている。この事は、ロボットの乗り心地を悪くするだけでなく、不必要に速度を落とす事にもつながり、無駄に移動時間を延ばす原因でもある。さらなる商品性を高めるために利便性・快適性を確保しつつ、不安を感じる場面の低減のため、周囲環境における障害物検知性能の向上をはかってゆく。

5. 総括（アイシン精機）

5-1. 開発した搭乗型移動ロボットとその安全技術のまとめ

今後の高齢社会において、特に高齢者の日常生活における自立した移動を支援する事が重要である。その解決策の一つの有望な選択肢として、電動車いすをベースとし速度域を時速10kmまで拡張した搭乗型移動ロボットを開発した。またそのロボットが安全に利用でき、かつ社会的に受け入れられるものとすべく、自律的な速度制限機能と注意喚起機能を安全機能として開発し、実際にロボットに搭載した。

安全機能の開発において、ISO13482フェーズ1（設計コンセプト）の開発プロセスに準拠し設計コンセプトを検討、安全機能のシステム設計を行った。また、安全機能については、生活支援ロボット安全検証センターにてその性能検証を済ませ、必要な性能を確保した。さらに、つくば市にあるつくばモビリティロボット実験特区を活用し、実際の利用場面を想定した公道走行実験を通して、その利便性と安全性の検証を確認している。

表5-1 成果のまとめ

	目標	成果	達成度	今後の課題と解決方針
1) 許容リスク以下 安全移動支援技術	安全コンセプト作成	ISO13482フェーズ1認定	○	事業化に向けた低コスト化
	安全技術の実装	リスク低減アルゴリズムの開発と実装したロボットの試作	○	
	性能評価結果の取得	安全検証センタでの目標性能確認	○	一般者による追加評価
	実証実験結果の取得	つくば特区での実験実施とヒヤリハットデータの収集	○	
2) 3次元レーザー測域センサ	所要検知性能の達成と安全センサ認証	所要検知性能の達成を検証 太陽光など耐外乱性の高い環境センシングの有効性検証	○	検知範囲拡大、安全認証取得(市場環境で要否判断)
3) 距離画像カメラ	路面の障害物検出	センサから2m先の路面の突出20cmを、50,000Lx以下の太陽光下で検出する。	△	検出性能向上
4) 安全通信モジュール	IEC61508 SIL2レベルを達成する通信プロトコル	通通信脅威の対策とSIL2で要求される残余誤り率の達成	○	各種の通信方式に適用した場合の性能評価

表5-2 特許・論文・新聞発表

	H20	H21	H22	H23	H24	H25	計
特許出願(うち外国出願)	-	-	-	0	0	3	3件
論文(査読付き)	-	-	-	0	0	1	1件
研究発表・講演	-	-	-	0	3	3	6件
受賞実績	-	-	-	0	0	0	0件
新聞・雑誌等への掲載	-	-	-	0	0	9	9件
展示会への出展	-	-	-	1	0	1	2件

5-2. 開発成果のアウトリーチ活動

開発成果について国際ロボット展での展示・プレゼンテーション、学会発表、公道走行実験及びそのプレス発表などを通し多くの方に知っていただく機会を設けた。研究者の方、企業（メーカー）の方、サービス業者、一般ユーザの方とさまざまな分野の方のご意見を伺うことができた。これまで電動車いすをイメージすると、特定ユーザ向けの専用機器と思われる、広く一般に使われる印象をもたれない。しかしながら、開発したロボットは電動車いすをベースとしながらも、外観デザインと、速度域を拡張したことによる爽快感から新しいモビリティとしての印象を持たれたようである。また昨今、自動車分野において高齢者ドライバー事故やアクセル・ブレーキ操作ミスによる衝突事故などへの対応として、自

動ブレーキ装置の搭載が進んでいる事もあり、今回開発した安全機能についての理解も容易であり、実用的なロボット技術として身近に感じていただけたと感じている。

5-3. 今後の事業展開について

今回、最高速度を時速10kmとする歩行者空間を移動対象とした搭乗型移動ロボットとその安全機能について開発を進めてきた。しかしながら、現在、時速10kmでの屋外公道（歩道）走行をする事は現行法において許可されていない。ただし、このロボット技術を使った、安全機能は、現行法に対応する電動車いす規格の超小型移動機器に対しても有効である。

これからの高齢社会に対応すべく、歩行が困難な方の日常生活の外出支援に加え、誰もが使いたくなる「軽量・コンパクトで安全」な生活支援のモビリティ提供をコンセプトに、まずは現行法に適応可能な最高速度時速6kmの搭乗型移動ロボットとして、2018年頃を目標とし製品化を予定している。

2.10 研究開発項目⑤ 屋外移動支援機器における安全エンジニアリング技術の研究開発 I D E C株式会社（共同実施先：大阪大学）

まえがき

移動は人類の普遍的な欲求である。産業革命以降の急速な技術革新は、鉄道や航空機のような高速且つ大量輸送を現実のものとした。私達の社会はすでにそのような技術の恩恵に預かって久しい。しかし同時にそのような技術の利用は新しい危険を生み、多くの事故を発生させ続けていることは説明するまでもない。これに対し私達の社会は移動体に直接適用する技術方策だけでなく、道路信号や踏切のような社会インフラによる分離や整理、詳細なルールと法整備、免許制度などの教育・訓練、保険制度などの善後策など総合的な安全対策を講じることによって、かろうじて機械による移動を許容している。

一方、医療技術の進歩や食糧事情の改善、加えて少子化の影響によって私たちの社会は急速に高齢化しており、今なお進行中である。社会は要介護者と高齢者の生活支援に対して深刻なリソース不足に直面している。例えばこのような高齢者が営む基本的な生活のための移動に求められる技術はもはや速さやパワーではなく、むしろ穏やかでなくてはならない。そのような生活空間には信号もルールも免許制度もないにも関わらず、移動体は不特定多数の人々と空間を共有するからである。

産業分野の国際規格の考え方では、機械のリスク低減方策（安全対策）は基本的には機械と人間の空間的な隔離、もしくは時間的な隔離（停止）により実現する。しかし生活支援を目的とした搭乗型ロボットを歩行者と隔離することは困難であるし、搭乗者に関しては不可能である。それ故、生活支援分野の機械の安全対策には新しい技術開発が必要である。

搭乗型生活支援ロボットを操縦（手動）型、自動走行型、自律走行型に分類した場合、操縦型と自動走行型は広く普及し利用されているが、やはり多くの事故が報告されている。

本研究では、これら操縦型と自動走行型の搭乗型生活支援ロボットの事故事例について調査し、リスクアセスメントした上で安全対策について技術開発した。すでに実用化され広く普及している搭乗型生活支援ロボットの操縦型としてハンドル型電動車いす、自動走行型として電磁誘導式ゴルフカートを一つのモデルとして実施した安全対策に関する研究成果を報告する。

内容

第1章	実施計画の細目	4
1	研究開発の目的	4
2	研究開発の概要	4
3	研究開発の内容	5
3.1	安全機器技術の研究開発－安全センシング技術の研究開発(X1)	5
3.2	安全機器技術の研究開発－安全無線通信の研究開発(X2)	5
3.3	安全機器・システム技術の研究開発－GPSとRFIDによる誘導技術の研究開発(X3)	6
3.4	安全システム設計技術の研究開発－機能安全システム(Y1)、およびシステムのリスクアセスメント技術(Y2)	6
3.5	安全運用技術の研究開発－広域空間での安全システム運用技術(Z1)、および安全マネジメント技術(Z2)	6
3.6	安全性基準に関する適合性評価に対する協力	6
4	成果の達成度合い一覧	7
第2章	誘導式ゴルフカートの安全機器技術開発(X)の成果	8
1	安全機器技術の研究開発－安全センシング技術の研究開発(X1)	8
1.1	概要と達成度状況	8
1.2	安全性能	13
2	安全機器技術の研究開発－安全無線通信の研究開発(X2)	15
2.1	概要と達成状況	15
2.2	安全性能	25
3	安全機器・システム技術の研究開発－GPSとRFIDによる誘導技術の研究開発(X3)	29
3.1	概要と達成状況	29
3.2	GPS技術について	29
3.3	RFID技術について	31
第3章	誘導式ゴルフカートの安全システム技術開発(Y)の成果	33
1	安全システム設計技術の研究開発－機能安全システム(Y1)	33
1.1	概要と達成状況	33
1.2	安全性能	33
2	安全システム設計技術の研究開発－システムのリスクアセスメント技術(Y2)	33
2.1	概要と達成度	33
2.2	リスクアセスメント	36
2.3	事故事例調査	37
第4章	誘導式ゴルフカートの安全運用技術開発(Z)の成果	61
1	安全運用技術	61
1.1	概要と達成状況	61
1.2	残留リスク対策	62
1.3	安全運用マニュアル	63
1.4	検知エリアの研究	67
第5章	誘導式ゴルフカートの安全性基準に関する適合性評価に対する協力	76
1	概要と達成状況	76
2	システムの安全要求仕様	76
3	危険側故障率	77
4	妥当性確認結果	78
4.1	保護停止	78
4.2	EMC	79
4.3	衝突(参考)	83

第6章	ハンドル型電動車いすの安全対策技術開発の成果	84
1	センシング技術の研究開発	84
1.1	概要と達成状況	84
1.2	センシング性能	84
2	制御システム	85
2.1	概要と達成状況	85
2.2	安全性能	85
3	リクアセメント技術	86
3.1	概要と達成度	86
3.2	リスクアセスメント	87
4	安全性能の評価	88
4.1	基本的な停止性能	88
4.3	振動などの外乱による影響	93
4.4	実証試験	95
第7章	まとめ	104
1	誘導式ゴルフカート	104
2	ハンドル型電動車いす	104

第1章 実施計画の細目

1 研究開発の目的

屋外で使用する搭乗型生活支援ロボットの実用化において最大の課題である安全性について、既に存在するビジネスモデルと使用実績のある移動機器を利用し、これに新たな「安全エンジニアリング技術」を付加し、人と密接に動作する搭乗型生活支援ロボットにおけるハードウェア・ソフトウェアの安全機構の確立と実用化を図る。対象とする移動機器としては、ゴルフ等で用いられるカート及びハンドル型電動車いす（シニアカー）を使用し、これらを電気・電磁的手段によりあらかじめ定められたルートを走行する機能あるいは危険区域を回避する機能を有する搭乗型生活支援ロボットとして安全技術の開発及び安全性の検証を行う。

生活支援ロボットの安全技術を確立するためには、搭乗型生活支援ロボットを対象に本質安全・機能安全に係る試験を行い、安全性に関わるデータの取得・分析等により具体的な安全性の検証を行なう必要があるが、例えばゴルフで高齢者に不可欠な電磁誘導式カートは、屋外の気候変化が大きく路面の凹凸・斜面も多い環境で使用されており、走行中の事故は非常に多く、安全対策は現状全く不十分である。このことから、安全性に関わる技術開発や検証を行なう対象として適しており、ここで確立された安全性技術は、搭乗型生活支援ロボットの安全対策に広く適用が可能となる。

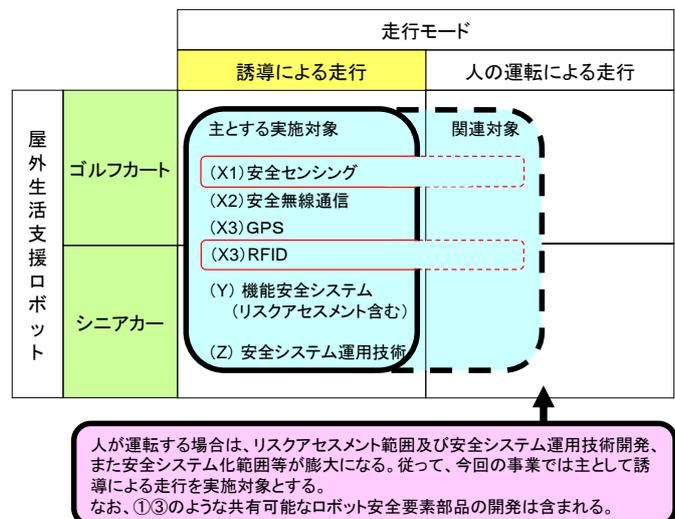
また一方、より日常的に高齢者の生活を支援する移動ロボットとしては、ハンドル型電動車いすが広く普及しているが、同じく走行中の事故が発生している。このようなハンドル型電動車いすの安全性を確立するためには、搭乗する人間の誤操作を想定し、少なくとも公共空間においては、危険区域への進入回避なり安全区域への誘導による移動を実現する必要もでてくる。

これら屋外用誘導式ゴルフカート及びハンドル型電動車いすを対象とした安全エンジニアリング技術が開発されると、例えば病院内の薬搬送ロボットと同様に、患者搬送ロボットとしての誘導型搬送カート等にも、様々な技術の適用が可能となる。すなわち将来的に、商業施設、駅・空港等の交通施設、病院、公共施設、オフィス、家庭に至るまで、高齢者に対する生活支援ロボットとしての展開も期待できる技術である。

IDECでは、産業分野で培った機械安全・機能安全のエンジニアリング技術によって、搭乗型移動ロボットの安全性を、先ず図表1に示す通り誘導型移動ロボットで確立すること、及びここで確立された安全技術をもとに、本研究スキーム関係者と共に、ロボットシステムとしてのサービス化を推進することを目的とするものである。

2 研究開発の概要

生活支援ロボットの実用化において最大の課題である安全対策について、屋外用誘導式ゴルフカート及びハンドル型電動車いすに共有されると考えられる安全エンジニアリング技術に関して、安全エンジニアリングハードウェア要素技術部分の研究開発と、既にIDECにおいて実績がある安全対策技術を、誘導式ゴルフカートに展開するための安全エンジニアリングソフトウェア要素技術の研究開発を行う。また安全エンジニアリングソフトウェア要素技術には、そのために基礎として必要となる交通工学を含めた学術面の研究開発を大阪大学と共同で行い、最終的にはこれらを融合した屋外用誘導式ゴルフカート及びハンドル型電動車いすといった搭乗型生活支援ロボットの安全エンジニアリング技術を開



図表1-1 安全エンジニアリング要素技術の適用範囲

発するものである。

3 研究開発の内容

本事業では、屋外用誘導式ゴルフカート及びハンドル型電動車いすの安全エンジニアリング技術の研究開発として以下の3つのカテゴリを定義しており、順次説明する。

X：安全機器技術の開発

Y：安全システム設計技術開発

Z：安全運用技術開発



図表1-2 安全エンジニアリング要素技術の適用範囲

3.1 安全機器技術の研究開発－安全センシング技術の研究開発(X1)

屋外で人体検知をするために有効且つ実用的な技術手段はある程度絞られており、ゴルフカートやハンドル型電動車いすのような速度、用途の移動ロボットで求められる検知精度、検知範囲などを考慮すると、レーザスキャナが最適である。しかし屋外環境で使用する場合には、他のセンシング装置と同様に太陽光や雨、雪、霧など対処すべき課題は多い。そこで本研究開発ではこれらの問題を解決するために、照射角度が垂直に広く太陽光の影響を受けにくいことを特徴としたマルチレイヤーレーザスキャナを開発する。マルチレイヤーレーザスキャナはジンバル機構により光学系全体を回転させることで、1つのレーザビームを垂直方向にも走査させ、受光部へ太陽光が直接入射した時にはその入射角以外の範囲で周囲の障害物を検知できる能力をもったレーザスキャナである。

開発するレーザスキャナはその製品規格である IEC61496-3 を満たすとともに、機能安全制御システムを構築するための機器としては、最終的に ISO13849-1 PLd および IEC61508 SIL2 の要件を満たすことを目標とする。

3.2 安全機器技術の研究開発－安全無線通信の研究開発(X2)

平成 21～22 年度 NEDO イノベーション実用化助成事業において「ロボットに不可欠な機能安全無線式次世代非常停止スイッチの開発」として開発を行った安全無線技術を、屋外環境における安全無線非常停止スイッチとして適用するために、筐体の耐環境性と屋外使用する際に必要となる安全無線通信技術（距離、通信周波数、その他発生する課題）について研究開発を行う。

具体的には、屋外での通信に適した有効通信距離:100m(精度：±20m)および保護構造 IP65 を有し、さらに IEC61508 の SIL3 相当の要件を満たす安全無線非常停止装置の開発を目標とする。

3.3 安全機器・システム技術の研究開発－GPS と RFID による誘導技術の研究開発(X3)

搭乗型生活支援ロボットの走行には GPS を利用したナビゲーションシステムと 3次元デジタルマップ、加えて RFID の利用を検討する。

GPS による測位技術は、位置特定に 4 つ、高精度測位には 5 つの GPS 衛星からの信号と準天頂衛星からの GPS 補強信号により精度を 1 m まで向上する方法を利用する。また特別に危険な区域には RFID 技術を併用して、進入がないように誘導するシステム設計について研究開発を行う。

RFID 技術はゴルフ場内の歩行者がタグを携帯することで位置をゴルフカートへ知らせる目的で、スキャナの補助的な安全支援機器としてシステム開発する。またハンドル型電動車いすでは、路面にタグを埋め込むことで危険区域への接近を知らせるシステムについて技術開発し試作機を製作する。

また準天頂衛星みちびきによるハンドル型電動車いす向けの危険区域警報システムについて技術開発し、試作機を製作する。

3.4 安全システム設計技術の研究開発－機能安全システム(Y1)、およびシステムのリスクアセスメント技術(Y2)

誘導式ゴルフカートのハンドル型電動車いすのリスクアセスメントを行い、システムに必要な安全性の維持能力の水準を確認し、本プロジェクトで開発する屋外対応マルチレイヤーレーザスキャナと屋外対応安全無線非常停止スイッチ、その他既存の安全対策機器による安全制御システムを構築する。具体的にはセンサによる信号もしくは非常停止装置による信号を受けたとき、カートの制御回路を介さずに直接ロボットの駆動電源を遮断するシステムを実現する。

3.5 安全運用技術の研究開発－広域空間での安全システム運用技術(Z1)、および安全マネジメント技術(Z2)

交通工学的専門知識と、安全なまちづくり、弱者・高齢者への交通手段といった視点で、全国のゴルフ場における事件事例とハンドル型電動車いすにおける事故例を対象として調査・検討を行い、それぞれゴルフ場、大阪大学敷地内などでの安全実証によって、どのように搭乗者と歩行者の安全を確保していくのかという「広域空間での安全システム運用技術」と「安全マネジメント技術」を開発し、パーソナルモビリティが安全利用できるような安全運用技術を確立する。

3.6 安全性基準に関する適合性評価に対する協力

設計コンセプトを確認し、リスクアセスメントより要求される安全要求仕様書とそこから波及する関連書類を整備する。次に開発したロボットシステムの妥当性評価試験を実施して、ISO13482 に基づく設計コンセプト認証を取得する。

また、設計コンセプト認証にて必要となる妥当性評価試験を生活支援ロボット安全検証センターにおいて実施することで、生活支援ロボットの認証に必要な評価技術の構築に寄与する。

4 成果の達成度合い一覧

研究開発課題	最終目標	達成度
(X)安全機器技術の研究開発－安全センシング技術の研究開発(X1)	検出エリア：180°（分解能：0.5°） 検出距離：2m（精度：±100mm） 応答速度：150ms 耐光性能：100000lux 耐雨性能：10mm/min 耐霧性能：視程 50m 以上 安全度水準：SIL2	90%
(X)安全機器技術の研究開発－安全無線通信の研究開発(X2)	有効距離：100m（精度：±20m） 保護構造：IP65 安全度水準：SIL3	100%
(X)安全機器・システム技術の研究開発－GPS と RFID による誘導技術の研究開発(X3)	GPS による誘導走行と、RFID による危険区域からの隔離 ※初年度の基礎実験後の考察にて精度に課題があることなどが判明した。またその他の技術にて十分なリスク低減が可能なことから基礎実験までとした	40%
(Y)安全システム設計技術の研究開発－機能安全システム(Y1)、及びシステムのリスクアセスメント技術(Y2)の研究開発	安全度水準：SIL2 入力機器のレーザスキャナ、安全無線非常停止装置から安全制御ユニットを介して安全リレーを駆動してコンタクタ断までを安全関連部で構築。	100%
(Z)安全運用技術の研究開発－広域空間での安全システム運用技術(Z1)、および安全マネジメント技術(Z2)	ゴルフ場とシニアカーの移動空間における交通工学に基づいた安全システム技術の構築と安全運用マネジメントの実現	100%
安全性基準に関する適合性評価に対する協力	搭乗型生活支援ロボット試作と試作機の設計コンセプト認証ドキュメント製作	90%

第2章 誘導式ゴルフカートの安全機器技術開発 (X) の成果

1 安全機器技術の研究開発—安全センシング技術の研究開発(X1)

1.1 概要と達成度状況

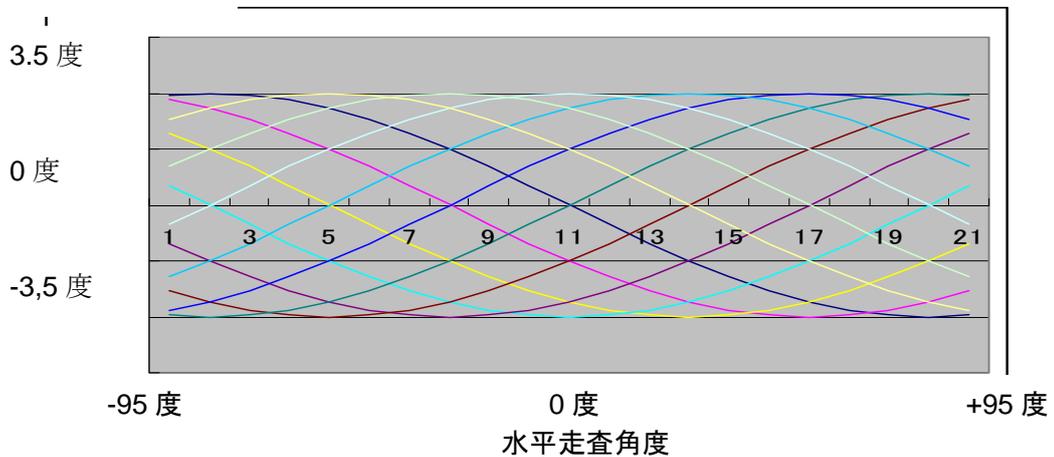
ジンバル構造による3Dスキャン方式レーザスキャナ（以後、屋外対応3Dレーザスキャナと記載する）の試作品を製作した。



屋外対応3Dレーザスキャナの主な仕様	
防護距離	2.0 m (反射率 1.8 %)
警報距離	6.5 m (反射率 10 %)
水平走査速度	30 ms
垂直走査速度	240 ms
応答速度	270 ms
水平検出角度	160 °
垂直検出角度	7 °
角度分解能	0.25 °(水平), 0.875 ° (垂直)
検出物	最長距離 2.0 m: φ70 mm,(反射率 1.8 %)
保護構造	IP64 相当

図表 2-1 屋外対応3Dレーザスキャナの外觀と仕様

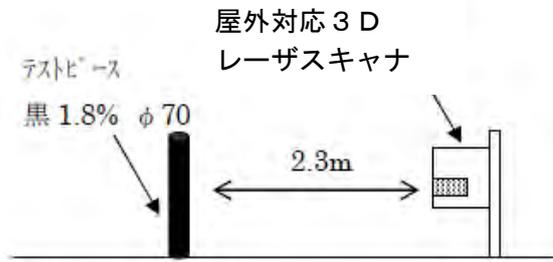
垂直走査角度



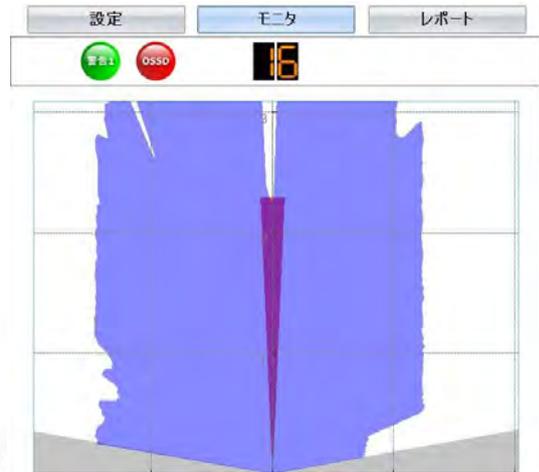
図表 2-2 3Dスキャンしたレーザの走査のイメージ

屋外仕様における大きな課題は太陽光対策であり、太陽光による誤動作を防がなければならない。セーフティレーザスキャナは IEC61496-3 で規定されているように、外乱光により検出感度が低下した場合、安全出力を OFF させなければならないが、太陽光の影響を回避するため、ジンバル構造による3Dスキャンの8本の走査線が7°の垂直走査角度を有することによって太陽光が入射する場合にも2本以上の走査線が有効であれば距離情報を得て演算し、ゴルフカートを安全に走行させ続けることが可能である。

評価としての外乱光テストについて、試験内容は外乱光の環境下での検出特性を確認するものとし、



図表 2-3 試験設置条件



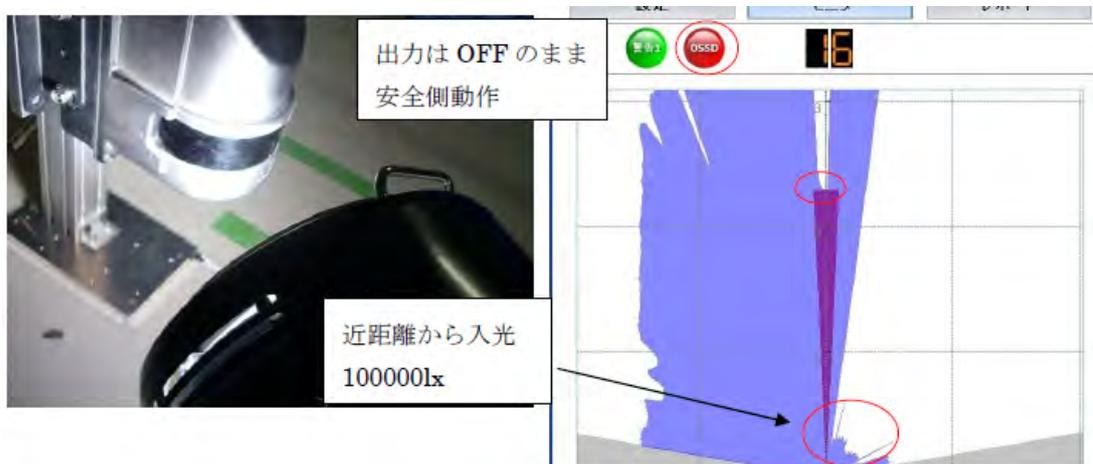
図表 2-4 テストピースの検出状態のモニタ

検出対象には黒 1.8%、φ70 のテストピースを使用し、検出エリア内の境界付近に設置し、外乱光を照射させ、検出への影響を測定した。テストピースの設置位置は、屋外対応 3Dレーザスキャナの防護距離 2.0mに対して追加安全距離を追加した 2.3mとした。通常動作は、図表 2-4 のように検出対象を検知し安全出力を OFF させる。

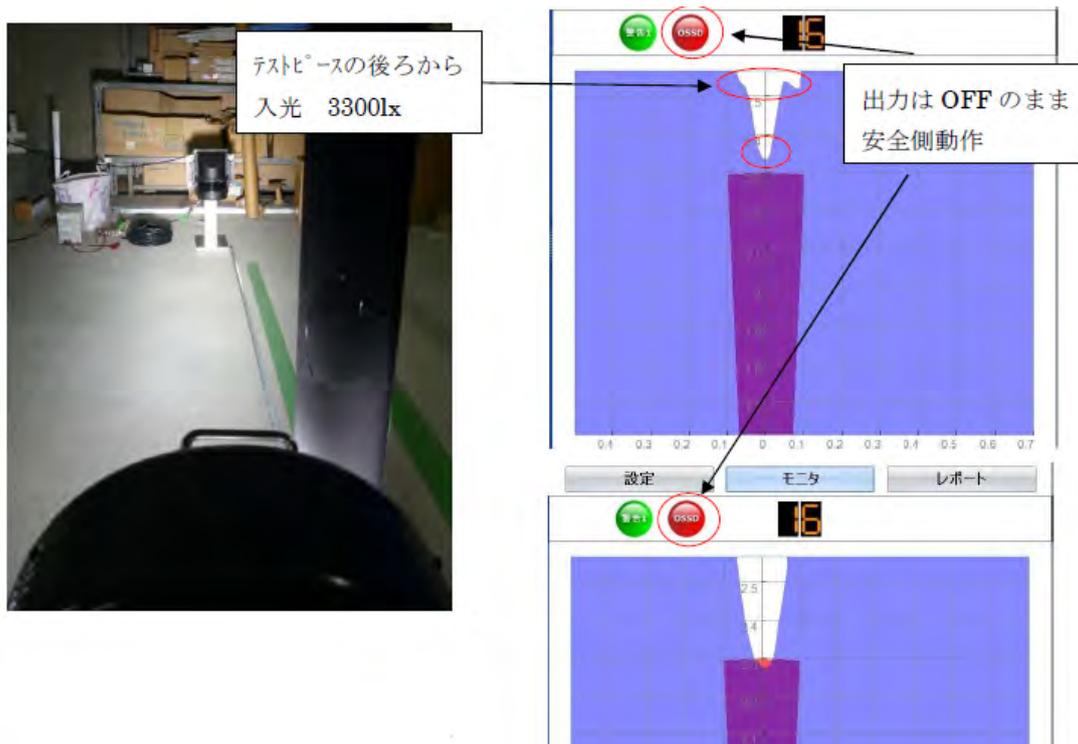
まず、ハロゲン光源を用いた人工太陽光にて危険側故障に陥る誤動作が発生するかの確認を行った。危険側故障に陥る誤動作とは、テストピースを検出できずに安全出力を ON させてしまう動作のことであるが、図表 2-5 と図表 2-6 のように、近距離での人工太陽光の照射（屋外対応 3Dレーザスキャナ付近の明るさは約 100,000 lx）および、テストピースの後ろからの照射（屋外対応 3Dレーザスキャナ付近の明るさは約 3,300 lx）でも問題なくテストピースを検出し安全出力を OFF させている。テストピースの後ろからの照射では、タイミングによっては外乱光の影響を受けるスキャン（走査線）もあるが、その他のスキャン（走査線）がテストピースを検出しており、安全出力は常時 OFF であり危険側に陥る誤動作はなかった。

次に太陽光を照射し危険側故障に陥る誤動作が発生するかの確認として、テストピースの横から鏡にて太陽光を屋外対応 3Dレーザスキャナに直接照射させる方法を行った。（屋外対応 3Dレーザスキャナ付近の明るさは約 70,000 lx）

結果は、ハロゲン光源を用いた人工太陽光と同じく、タイミングによっては外乱光の影響を受けるスキャン（走査線）もあるが、その他のスキャン（走査線）がテストピースを検出しており、安全出力は常時 OFF であり危険側に陥る誤動作はなかった。



図表 2-5 人工太陽光（近距離照射）



図表 2-6 人工太陽光（2.3mから照射）

最後の確認として、外乱光にて安全出力が OFF とならないことを確認した。安全出力が OFF となると危険側故障ではないがゴルフカートが停止してしまい、運用上使い勝手が悪い製品となってしまいが、結果、検出エリア内にテストピースが無ければ安全出力は外乱光により OFF することは無かった。

屋外対応にて必要な保護構造としては、IP64 を有しており、屋外における雨や風により水や粉塵が筐体内部へ侵入することによる故障は無い。また、マルチエコー現象として屋外対応 3D レーザスキャナが発するレーザ光の先に雨や霧、または光学窓についた水滴などがあつた場合、それらから反射する光とその奥にある検出物体から反射する光の双方が屋外対応 3D レーザスキャナに戻ってくるが、現時点では、この現象を利用して雨や霧、水滴などのマルチエコーの特徴を検出し、ソフトウェアにてフィルタをかけることで、本来の検出物体のみを検出させる機能（マルチエコー機能）の確認まで完了している。今後は、マルチエコー機能のブラッシュアップと共に、実製品に実装した場合の検証等を行う必要がある。

応答速度については、OFF ディレイ無しに設定した場合、水平走査及び垂直走査を考慮し、人や障害物を検知し安全出力を OFF させるまでの時間は Max.270 ms となる。よって、この応答速度を考慮した検出エリアを作画する必要がある。

水平検出エリアは、警報エリア 6.5 m、防護エリア 2.0 m、水平検出角度 160°であり、警報エリアにて障害物を検知すると低速走行へ移行し、防護エリアでの障害物の検知により安全出力を OFF し、ゴルフカートを停止させるのが一般的な使い方である。



図表 2-7 太陽光

水平検出エリアは PC のソフトウェア上で簡単に作画することが可能で、PC と USB 接続を行い、16 エリアを本機メモリへ記憶させることができる。記憶した 16 エリアは、8 本のエリア切替入力により任意に切り替えることができ、直進や右折、左折時にその地形に合ったエリアにて障害物を検知させる。以下に設定内容を示す。

- ・ EDM

EDM（外部デバイスモニタ）機能を使用する場合は、チェックボックスを有効にして、オンディレイ／オフディレイ時間の設定を行うことができる。

- ・ インターロック

インターロック機能を有効にする場合は、チェックボックスを有効にして、電源投入後のスタート、および歩行者や障害物を検知し OSSD が OFF したあとのリスタートおよびディレイ時間の設定を行うことができる。

- ・ 補助出力 警告 2 or エラー

非安全出力として、警告 2 出力もしくはエラー出力のどちらかの選択を行うことができる。

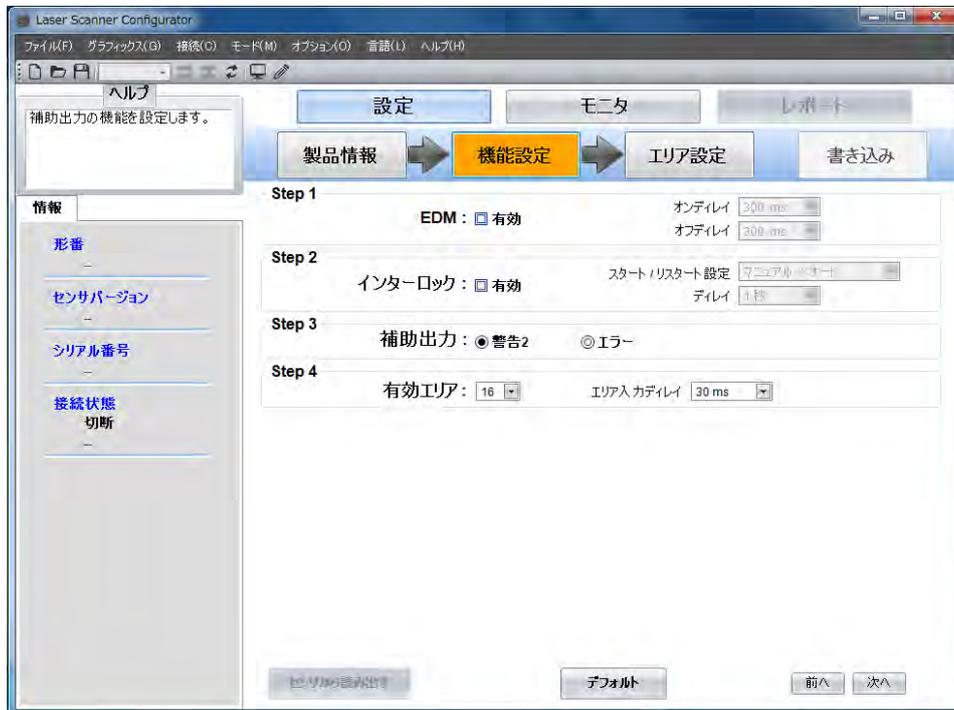
- ・ 有効エリア

使用するエリアの数（1～16）およびエリア入力ディレイ時間を選択することができる。

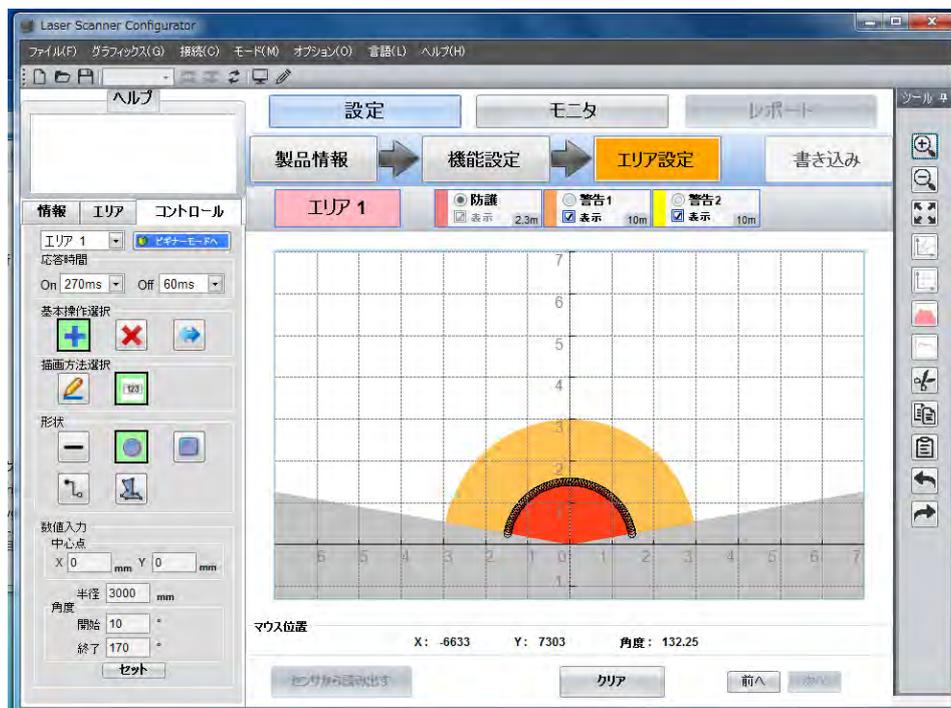
- ・ 防護エリア

屋外対応 3D レーザスキャナの OSSD 出力を OFF させ、緊急停止させたいエリアを作画することができる。

- ・警告 1 エリア
歩行者を検知し、非安全出力としての警告 1 出力にてゴルフカートを減速させたいエリアを作画することができる。
- ・警告 2 エリア
補助出力設定にて、警告 2 を選択した場合、エリアを作画することができる。警告 1 エリアと同様である。



図表 2-8 屋外対応 3 D レーザスキャナの機能設定



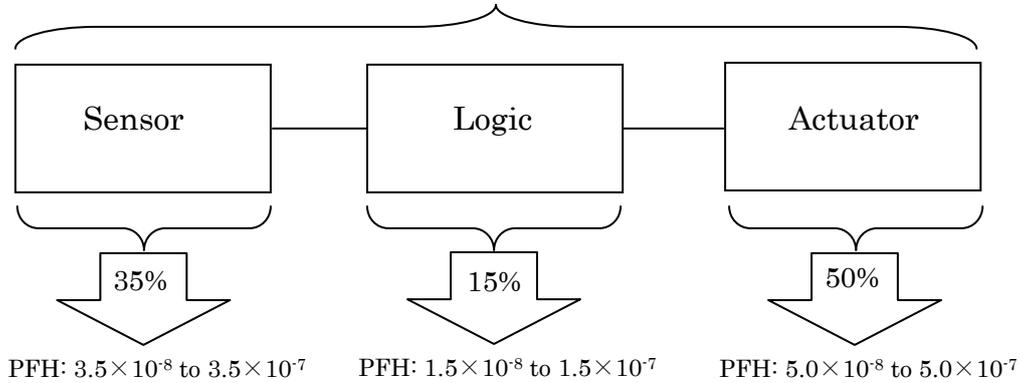
図表 2-9 屋外対応 3 D レーザスキャナのエリア設定

1.2 安全性能

屋外生活支援ロボットの安全関連部の要求レベルはリスクアセスメント結果より SIL2、PLr=d、である。

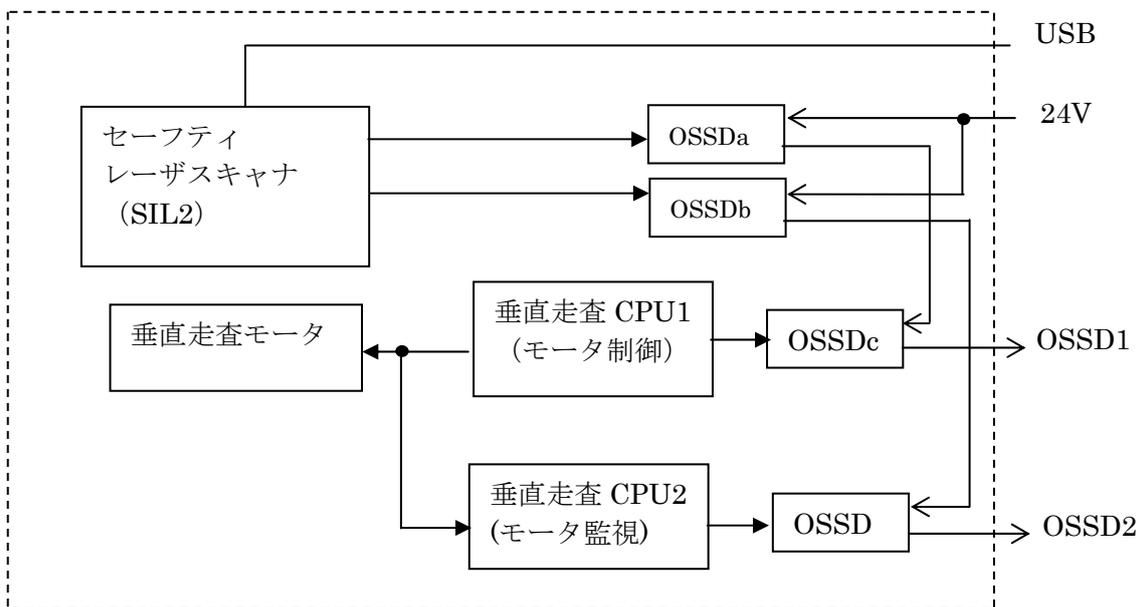
SIL2 PFH: 10^{-7} to 10^{-6}

PLr = d PFH: 10^{-7} to 10^{-6}



よって、Sensor としての屋外対応 3D レーザスキャナに求められる時間当たりの危険側故障率 PFH は Max. 3.5×10^{-7} となる。

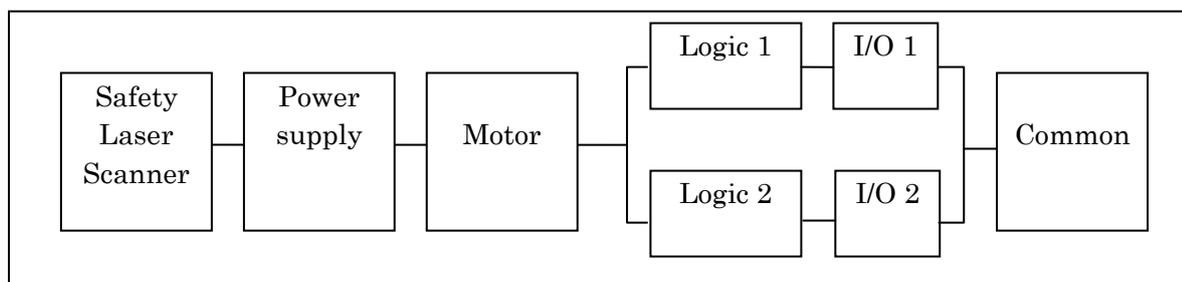
屋外対応 3D レーザスキャナの安全性能は、IEC61496-1 及び-3 の Type3、機能安全は IEC61508 の SIL2 に準拠した設計となっており、図表 2-10 に内部構成を示す。



図表 2-10 ジンバルモータ制御の内部構成

内部のセーフティレーザスキャナは既に IEC61496-1 及び-3、IEC61508 の SIL2、ISO13849-1 の PLd の認証を受けた安全センサであり、水平走査を担っている。垂直走査では、垂直走査 CPU1 がモータの駆動を行い、CPU1 と CPU2 の 2 重化回路でモータ回転の監視を行っている。2 重化された CPU でそれぞれモータ異常を検出し、2 重化された安全出力回路で OSSD を出力する。OSSD1 及び OSSD2 においては、短絡や地絡などの故障が発生すると、それを検出し安全出力（OSSD1 及び OSSD2）を OFF させることで安全性を確保している。

下記に安全関連部のブロック図としての信頼性ブロックダイアグラムを記す。



図表 2-11 信頼性ブロックダイアグラム

図表 2-11 より、IEC61508 及び ISO13849-1 に従い PFH や DCavg、MTTFd 等の各パラメータの計算を行うと PFH=8.31×10⁻⁸ となり SIL2 を満たし、ISO13849-1 Table 7 から PLd を満たしていることがわかる。

Estimating PL (ISO13849-1 Table 7)

Category	B	1	2	2	3	3	4
DCavg	none	none	low	medium	low	medium	high
MTTFd							
Low	a	Not covered	a	b	b	c	Not covered
Medium	b	Not covered	b	c	c	d	Not covered
High	Not covered	c	c	d	d	d	e

図表 2-12 ISO13849-1 の Table 7 抜粋

2 安全機器技術の研究開発—安全無線通信の研究開発 (X2)

2.1 概要と達成状況

①概要と仕様

本プロジェクトでは、保護等級 IP65、IEC61508(SIL3)に適合し、屋外での使用に適した有効通信距離を持つ安全無線非常停止装置の試作品の製作を行い、ゴルフカートによる実証試験を行った。

従来のゴルフカート		安全無線非常停止装置を搭載した ゴルフカート	
	リモコン		リモコン
(1) 走行中 		(1) 走行中 	
(2) 停止 STOP! 		(2) 停止 STOP! 	
(3) 通信エリアを外れると 停止させることができない 		(3) 通信エリアを外れると自動的に停止 STOP! 	
(4) 通信障害が発生すると 停止させることができない 		(4) 通信障害が発生すると自動的に停止 STOP! 	

図表2-13 従来のゴルフカートと安全無線非常停止装置の効果



図表 2-14 安全無線非常停止装置のリモコン側の外観

本プロジェクトで製作した安全無線非常停止装置の仕様を図表 2-15 および図表 2-16 に示す。

無線通信仕様	
通信周波数	2405MHz...2480MHz(16チャンネル)
送信方式	直接拡散方式
通信方式	独自プロトコル通信
無線通信速度	最大理論値 250kbps (電波の特性上、設置場所によって異なります)
送信出力	最大 3mW (アンテナ給電点での値)
通信距離	見通しで150m以上 (使用している通信モジュール単体での仕様で、周辺環境によって変化します)
電氣的仕様 (安全無線非常停止装置:安全リモコンユニット)	
動作時間	4時間以上 (満充電にて)
バッテリー	リチウムイオン二次電池
充電電流	500mA (USB miniB コネクタより充電)
電氣的仕様 (安全無線非常停止装置:安全カートユニット)	
定格動作電圧	24VDC
許容電源電圧範囲	20.4V~28.8VDC
消費電力	Max. 3W (出力負荷含まず)
環境仕様	
動作周囲温度	0...40°C (但し、充電時は、5...35°C)
保存周囲温度	-20...60°C (但し、充電時は、5...35°C)

図表 2-15 安全無線非常停止装置の通信仕様/電氣的使用/環境仕様

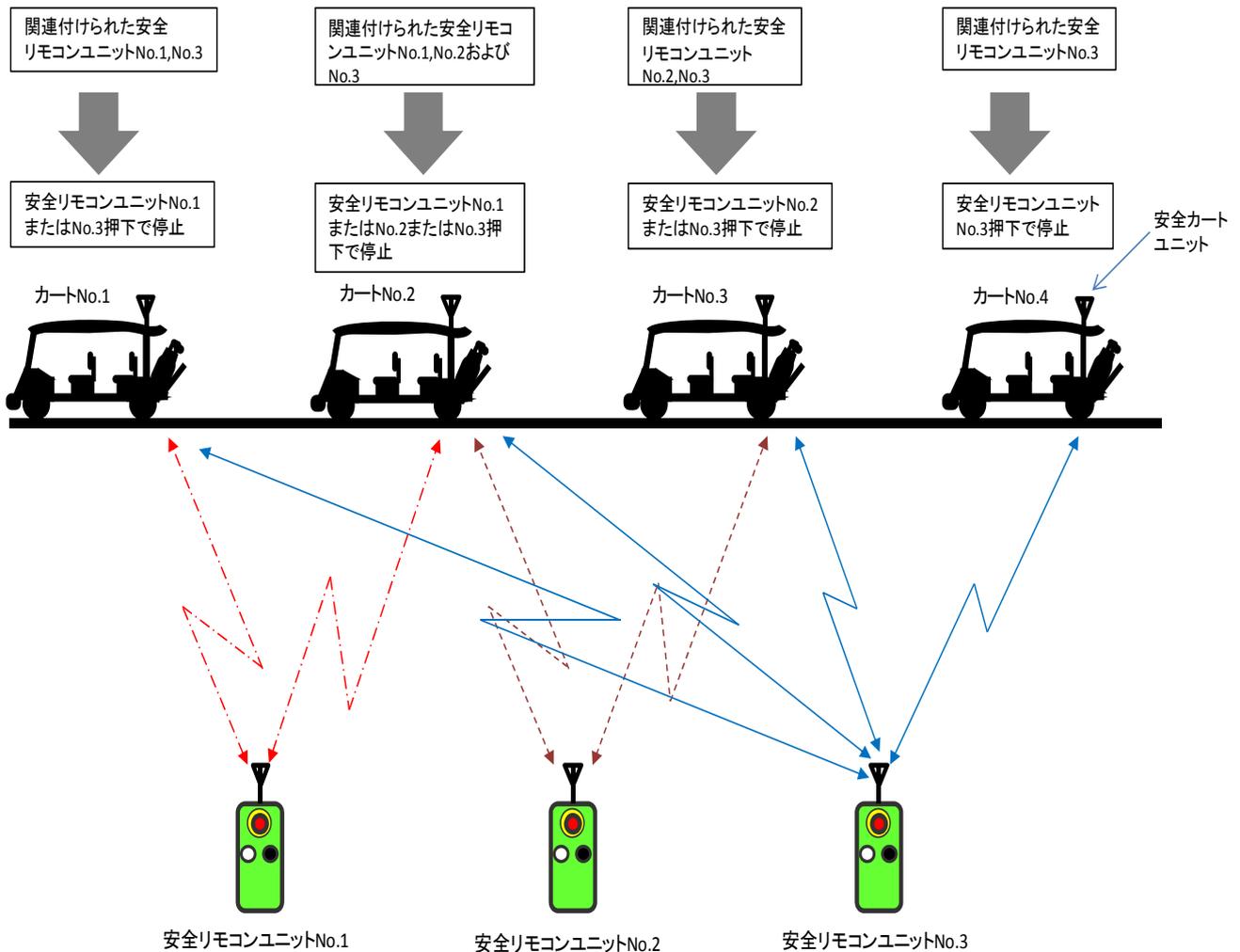
システム仕様		
最大接続台数	安全リモコンユニット	8台
	安全カートユニット	8台
応答時間	安全リモコンユニットの非常停止SW 押下時から安全カートユニットの安全 出力がOFFするまでの時間	160msec以下(通信ノード:1:1時) , 230msec以下(通信ノード:8:8時)

図表 2-16 安全無線非常停止装置のシステム仕様

②安全無線非常停止装置の関連付け設定とコンフィグレーションツール

本プロジェクトでは、安全無線非常停止装置のシステム構成や通信の詳細設定を行うために、PC上で動作するアプリケーションソフトの試作を実施した。

安全無線非常停止装置では、システムの構成として最大で安全リモコンユニット8台と安全カートユニット8台のシステム構成が可能である。ここでは、図表 2-17 で示した安全リモコンユニット3台と安全カートユニット4台のシステム構成を例に関連付けの構成方法と試作を行ったコンフィグレーションツールによる設定手順について記述する。

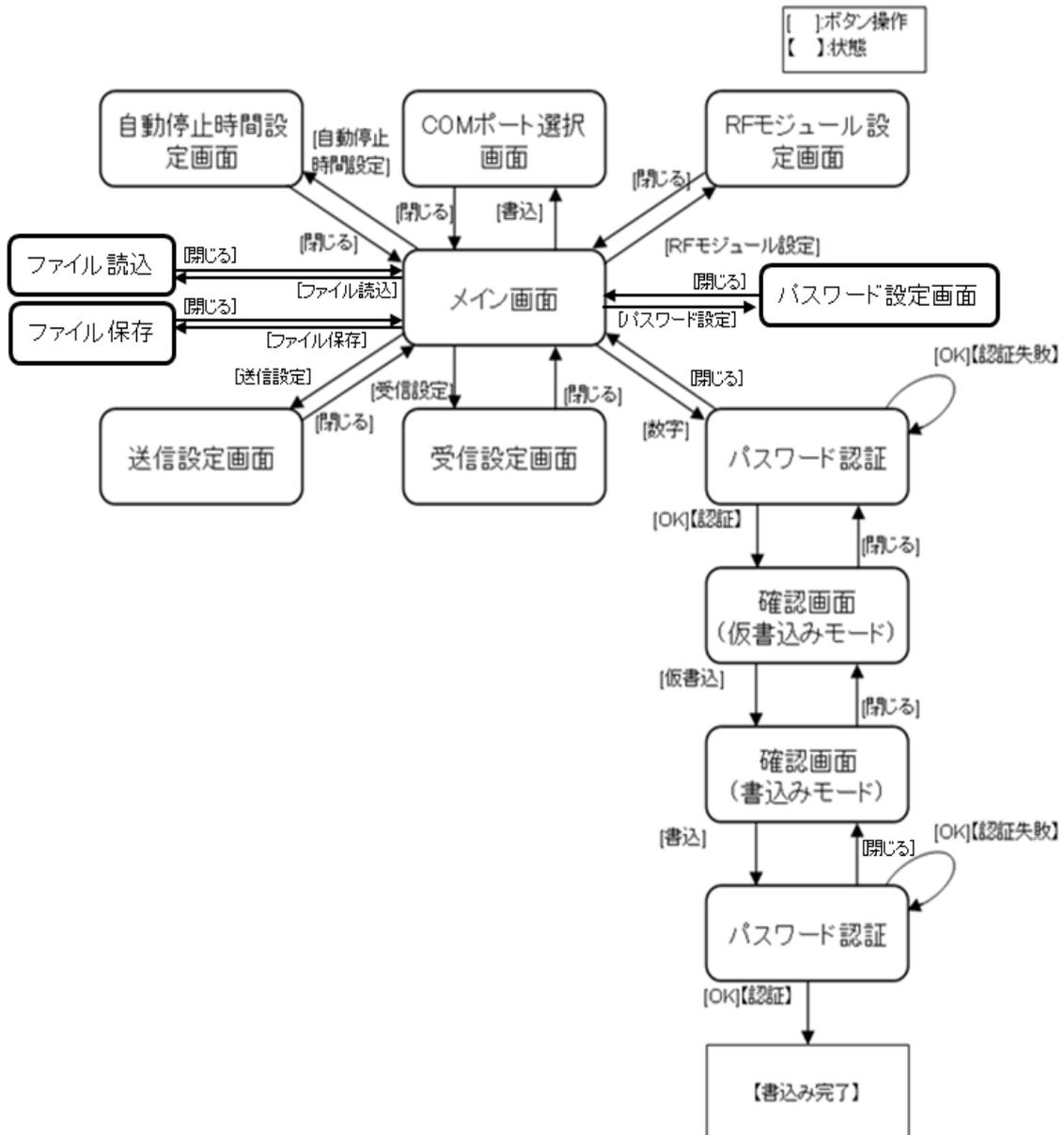


図表 2-17 安全リモコンユニット/安全カートユニットの関連付け構成の例

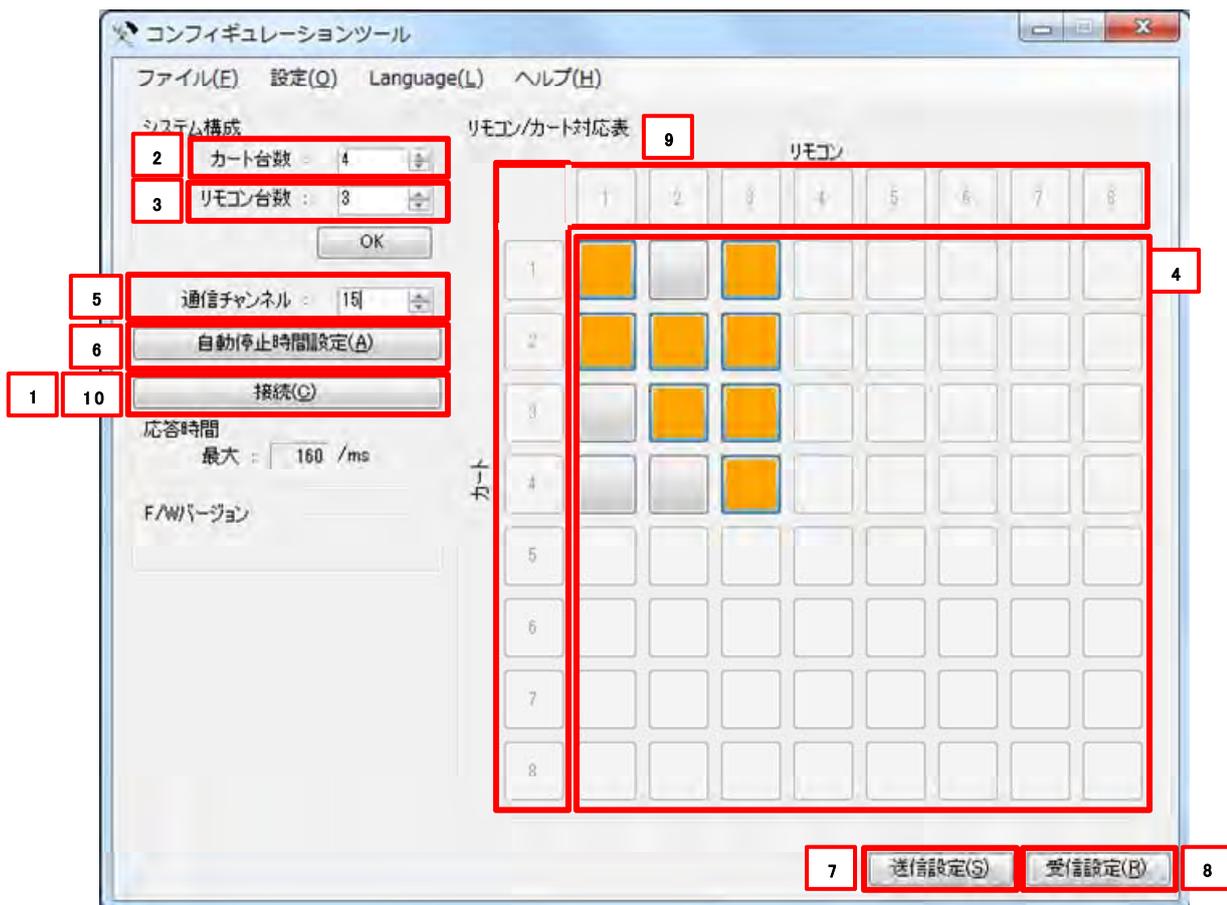
本プロジェクトで試作を行ったコンフィグレーションツールの対応環境仕様および画面の遷移構成は、以下の通りである。

項目	仕様
必要 PC スペック	1GHz 以上の 32 ビット(x86)プロセッサ 1GB 以上の RAM
対応 OS	Windows XP(32 ビット)、Windows 7(32 ビット)
対応インターフェース	USB2.0 Full Speed

図表 2-18 コンフィグレーションツールの対応環境仕様



図表 2-19 コンフィグレーションツールの画面構成および遷移表

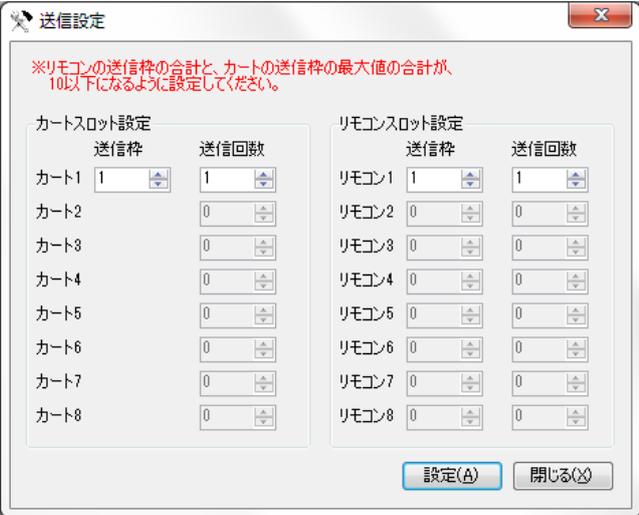


図表 2-20 コンフィギュレーションツールのメイン画面

上記の安全リモコンユニット3台と安全カートユニット4台のシステムのコンフィギュレーションツールによる具体的な設定手順は、以下の通りである。

設定順序	項目	説明
1	接続	安全リモコンまたは、安全カートユニットと PC を USB ケーブルで接続した状態で、各ユニットの電源を投入し、接続ボタンをクリックし、該当する COM ポートを選択することで、コンフィギュレーションツールと安全リモコンまたは安全カートユニットとの接続を確立する。 
2	システム構成/ カート台数	システム構成として使用する安全カートユニットの台数を設定する。設定した値は、OK ボタンを押下することで有効になり、リモコン/カート対応表に反映される。 ここでは、図表 2-20 で示したように「4」に設定する。

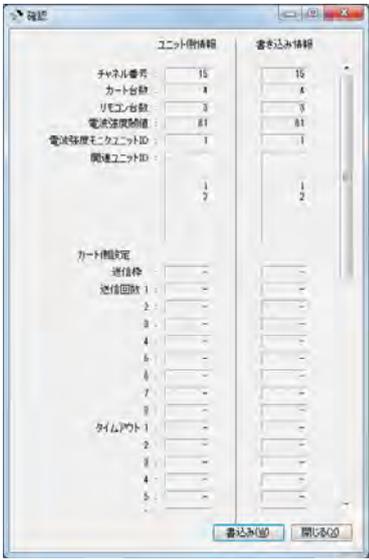
3	システム構成/ リモコン台数	システム構成として使用する安全リモコンユニットの台数を設定する。設定した値は、OK ボタンを押下することで有効になり、リモコン／カート対応表に反映される。 ここでは、図表 2-20 で示したように「3」に設定する。
4	リモコン/カート 対応表	リモコンとカートの割付を設定する。 関連付けを行いたいカート No とリモコン No の交点となる場所をクリックすると、オレンジ色の表示となり、関連付けをコンフィグレーションツール上で反映することができる。 ここでは、図表 2-20 で示した設定を行うこと。
5	通信チャンネル	通信に使用するチャンネル番号を表示、設定する。 0～15 チャンネルの中から所望のチャンネルを選択すること。
6	自動停止時間設定 ボタン	<p>本ボタンをクリックすると以下の画面が表示される。</p>  <p>各安全リモコン/カート安全ユニットに対して、必要なタイムアウト時間(関連付けされた対向ユニットからの無線通信が途切れた場合に、通信が途切れたと判断し、安全出力を遮断するまでの時間)を設定する。</p>

<p>7</p>	<p>送信設定</p>	<p>本ボタンをクリックすると以下の画面が表示される。</p>  <p>電波状況等により、安全リモコンまた、安全カートユニットの送信感度を変更したい場合に設定する。それぞれの意味は、以下の通りである。</p> <p>送信枠：1回の送信時に使用できる無線通信の最大数。 送信回数：1回の送信時に使用する無線通信の回数。 必要に応じて、設定を行うこと。</p>
<p>8</p>	<p>受信設定</p>	<p>本ボタンをクリックすると以下の画面が表示される。</p>  <p>各安全リモコン/安全カートユニットがシステム内のどの対向ユニットの電波強度をモニタするかを決定し、モニタする際の電波強度の閾値も合わせて設定する。</p> <p>無線受信した電波の強度が閾値以上の場合、受信したデータを破棄する。閾値未満の場合は、有効データとして使用する。 電波強度閾値はマイナスの値を絶対値表現で表記する。</p>

<p>9 仮書込</p>	<p>設定情報の書き込みを行いたい安全リモコンまたは安全カートユニットの該当番号をクリックすると以下の画面が表示される (注意：セキュリティのためパスワード入力を要求される。)</p>
<p>9' 書込み</p>	<p>仮書込に成功すると、以下の画面が表示される。</p>



本画面の左の列(ユニット側情報)には、現在各ユニットに書き込まれている設定情報が表示され、右側(書き込み情報)には、設定ツール上で決定した、これから書き込みを行いたい情報が表示される。右の列の設定内容が所望の内容であることを確認のうえ、仮書込ボタンを押下する。



本画面の左の列(ユニット側情報)には、現在各ユニット上に仮書込された設定情報が表示され、右側(書き込み情報)には、設定ツール上で決定した、これから書き込みを行いたい情報が表示される。左右の列の設定内容が同一であり、かつ所望の内容であることを最終確認し、書込みボタンを押下する。
(注意：セキュリティのためパスワード入力を要求されます。)

10	切断	9'にて書き込みが正常に完了したら、再度、接続ボタンをクリックし、切断ボタンを押下し、PC と各ユニットとの接続を切る。 
11	他ユニットへの書き込み	設定順序 1~10 を各安全カートおよび安全リモコンユニットに実施し、全てのユニットに対する設定情報の書き込みを行う。

③安全無線非常停止装置の関連付け設定完了後の起動手順

(事前準備)

起動操作を行う前に、安全カートユニットおよび安全リモコンユニットから USB ケーブルが抜かれていることを確認すること。USB ケーブルが繋がれたままの場合、起動操作が行えない。

(1)安全リモコンユニットおよび安全カートユニット各々の基板に配置されている

電源スイッチを ON にする。

(2)初期化処理完了まで 10 秒ほど待つ。

(初期化処理中は、安全リモコン/安全カートユニットともに LED 等の点灯や点滅がないが、故障ではないため、注意すること。電源投入後、10 秒ほどで、各ユニットの LED が点灯/点滅を開始する。)

(3)以下の操作を実施する。

- A. 関連付けられた安全リモコンユニットに搭載されている非常停止スイッチが押下されていないことを確認する。
(もし、押下された状態の場合は、解除する。)
- B. 関連付けられた安全リモコンユニットに搭載されている非常停止スイッチを全て押下し、押下後、非常停止スイッチの押下状態を解除する。
- C. B の操作の後、設定時間が経過したら、リセットスイッチを押下する。

※上記の設定時間は、コンフィギュレーションツール上の自動停止時間設定画面で設定した各カートユニットの「タイムアウト時間」の中で「最大時間」を示している。タイムアウト時間変更時は、必ず、「最大時間」経過後、リセットスイッチを押下すること。

※安全カートユニットの安全出力を出力する場合は、安全カートユニットに関連付いた安全リモコンユニットすべてに上記(1)(2)(3)の操作を行うこと。

(起動操作の例)

安全カートユニット 1 対 安全リモコンユニット 1、安全リモコンユニット 3、
安全カートユニット 2 対 安全リモコンユニット 1、安全リモコンユニット 2、
安全リモコンユニット 3、

安全カートユニット 3 対 安全リモコンユニット 2、安全リモコンユニット 3、
安全カートユニット 4 対 安全リモコンユニット 3

が関連付いているため、

安全カートユニット 1 の安全出力を出力する場合は、安全リモコンユニット 1、安全リモコンユニット 3 に(1)(2)(3)操作を、

安全カートユニット 2 の安全出力を出力する場合は、安全リモコンユニット 1、安全リモコンユニット 2、安全リモコンユニット 3 に(1)(2)(3)操作を、

安全カートユニット 3 の安全出力を出力する場合は、安全リモコンユニット 2、安全リモコ

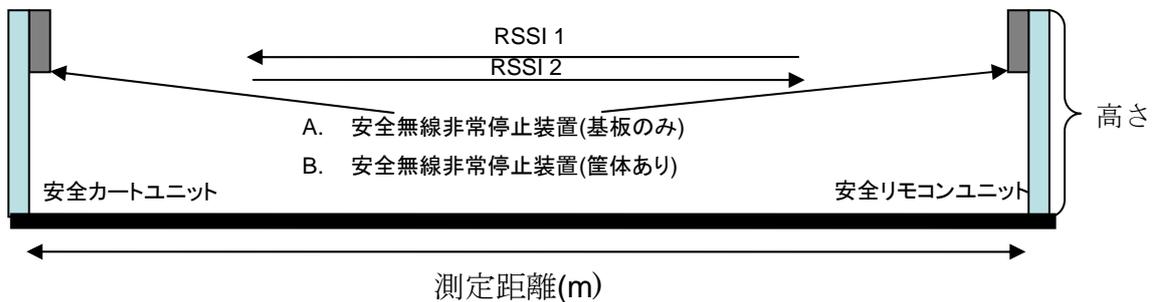
ンユニット 3 に(1)(2)(3)操作を、

安全カートユニット 4 の安全出力を出力する場合は、安全リモコンユニット 3 に(1)(2)(3)操作を行う。

上記内容を実施することにより、全ての安全カートユニットの安全出力が出力される。

④有効通信距離

本プロジェクトでは、安全無線非常停止装置の筐体による通信性能の変化を測定するため以下のような方法で有効通信距離の比較を行った。図表 2-21 で示されるシステムを構築し地面からの高さ 1.8m の位置に A.安全無線非常停止装置(基板のみ)または B.安全無線非常停止装置(筐体有り)を配置した。また、各無線非常停止装置の電波到達の有無を判定する受信信号強度(RSSI)の基準値を -90dBm とし、 $-90\text{dBm} > \text{RSSI}$ の場合には、電波到達なしと判断し、 $-90\text{dBm} < \text{RSSI}$ の場合には、電波到達有りと判断することとした。また、測定は見通しの良い一級河川の河川敷にて行った。



図表 2-21 有効通信距離測定システム

	安全無線非常停止装置(筐体あり)	安全無線非常停止装置(基板のみ)		安全無線非常停止装置(筐体あり)	安全無線非常停止装置(基板のみ)
	地面から1.8m	地面から1.8m		地面から1.8m	地面から1.8m
5m	○	○	80m	○	○
10m	○	○	85m	○	○
15m	○	○	90m	○	○
20m	○	○	95m	○	○
25m	○	○	100m	○	○
30m	○	○	105m	△	○
35m	○	○	110m	△	○
40m	○	○	115m	×	○
45m	○	○	120m	×	○
50m	○	○	125m	×	○
55m	○	○	130m	×	○
60m	○	○	135m	×	○
65m	○	○	140m	×	○
70m	○	○	145m	×	○
75m	○	○	150m	×	○

○: 通信問題なし △: 通信可能(通信が途切れることがあるが一定時間内に通信は、復帰する) ×: 通信不可

図表 2-22 有効通信距離測定結果

有効通信距離測定の結果、安全無線非常停止装置(基板のみ)の場合は、今回使用した無線通信モジュール単体が持つ仕様を満たした動作をできることがわかった。一方、安全無線非常停止装置(筐体あり)の場合には、有効通信距離が 100m 近傍となり、筐体による電波の減衰により有効通信距離が約 2/3 となることが分かった。このため、実際に安全無線非常停止装置を適用する場合には、事前に十分な適用環境の調査を行う必要がある。

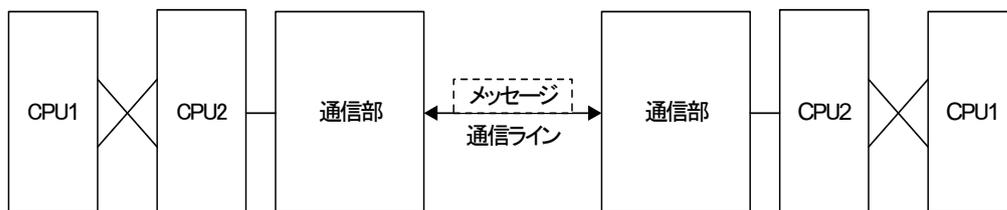
2.2 安全性能

安全性能を評価する場合、安全無線通信部の安全性評価(ア)(イ)と安全無線非常停止装置の安全性評価(ウ)のそれぞれについて行う必要がある。

(ア) 安全無線通信のコンセプト

安全無線非常停止装置の実現のためには、無線通信部の安全確保が必須となる。これは無線通信部を、通信の一部と仮定することにより、産業機器における通信の手順や方法について規定された国際規格 IEC 61784 の中で機能安全性について述べている Part 3 の活用が可能となる。IEC 61784-3 では通信における故障モードを i) データ改ざん、ii) 意図しない反復、iii) シーケンス誤り、iv) 欠損、v) 遅延、vi) 挿入、vii) なりすまし、viii) 通信相手誤りの 8 つと想定している。また、これらの故障モードに対して、a.シーケンス番号、b.タイムスタンプ、c.処理時間設定、d.接続確認、e.フィードバックメッセージ、f.データの完全性保証、g.クロスチェックによる冗長性、h.安全系、非安全系で異なる方法によるデータ完全性保証の 8 つの防護方策から有効な方策を選択し、通信プロトコルへと実装することが推奨されている。

安全無線非常停止装置では図表 2-23 に示すよう、2 重化された CPU から出力された結果を一方の CPU で結合し、その CPU が通信を制御する方式を採用する。このシステムの特性を考慮し、上記防護方策の中から、a、c、d、f、g の方策を安全無線通信のプロトコルとして採用した。a は各ユニットにおける処理番号として通信データ内に付加されることで、通信が確立しているユニット同士がお互いの処理番号の確認を行う。c は各ユニットが通信に対する許容時間を設けており、この設定時間を越えても通信が完了しない場合、ユニットは異常としてこれを検出する。d は通信データ内に付加される固体識別番号であり、通信が確立していないユニットと誤って通信を開始することを防ぐ。f は通信データ内にデータの信頼性確保のためのセーフティコードとして CRC を付加した。g は二重化された CPU による通信データの冗長化と互いの CPU によるクロスチェックにより実現している。これらの防護方策を実施することで、想定される全ての故障モードに対し、除外もしくは検出できることを図表 2-24 に示す。



図表 2-23 通信モデル

実装	防護方策								Total
	✓		✓	✓		✓	✓		
通信の故障モード	a. シーケンス番号	b. タイムスタンプ	c. 処理時間設定	d. 接続確認	e. フィードバックメッセージ	f. データの完全性保証	g. クロスチェックによる冗長性	h. 安全系、非安全系で異なる方法によるデータ完全性保証	
i) データ改ざん					✓	✓	Only for Serial bus ^d		✓
ii) 意図しない反復	✓	✓					✓		✓
iii) シーケンス誤り	✓	✓					✓		✓
iv) 欠損	✓				✓		✓		✓
v) 遅延		✓	✓ ^c						✓ ^c
vi) 挿入	✓			✓ ^{a, b}	✓ ^a		✓		✓
vii) なりすまし				✓ ^a	✓ ^a			✓	✓ ^a
viii) 通信相手誤り				✓					✓
^a アプリケーションによる ^b 送信識別のみ。不正データのみ検出 ^c すべてに要求される ^d 2つのメッセージが独立した通信部から送信されるとき、残余エラー率が規格要求値を満たす場合のみ、この方式により高い品質を確保できる。									

図表 2-24 通信における防護方策とその実装

(イ) 安全無線部における安全性評価

(ア)で確立した安全無線通信プロトコルにより、通信異常や通信部の故障からの防護方策は実現できる。しかし、データの完全性保証を確保するために用いられるセーフティチェックコードは、残余エラーが見込まれる。機能安全無線通信では、この残余エラーから見積もれる危険側故障率がシステム全体の許容リスクの中で1%未満であることが求められている。

前述したよう、今回採用した安全無線通信プロトコルはセーフティチェックコードとしてCRCを使用しており、32bitのCRCとして広く市場で活用されているCRC-32を採用した。このとき通信における残余エラー率 $R(P_e)$ は以下の数式で表される。

$$R(P_e) \approx 2^{-r} \times \sum_{k=d_{\min}}^n \binom{n}{k} \times (P_e^k \times (1 - P_e)^{n-k})^2 \text{-----} (1)$$

このとき、各係数は以下で表される。

$\binom{n}{k}$: チェックコードの分布係数

n : 通信データを構成するビット数

P_e : 通信媒体のビットエラー率

r : CRCのビット数

数式(1)から時間当たりの残余エラー率 $\Lambda(P_e)$ は、

$$\Lambda(P_e) = R(P_e) \times v \times m \text{-----} (2)$$

v : 1 時間あたりの最大メッセージ数
 m : 安全機能の実行に必要な最大メッセージ数

このときシステムに求められる高需要モード危険側故障率(Probability of a dangerous Failure per Hour: PFH)は 10^{-8} から 10^{-7} であり、無線通信部で許容される時間あたりの残余エラー率は 10^{-9} 以下となる必要がある。

本システムにおける通信データの条件を

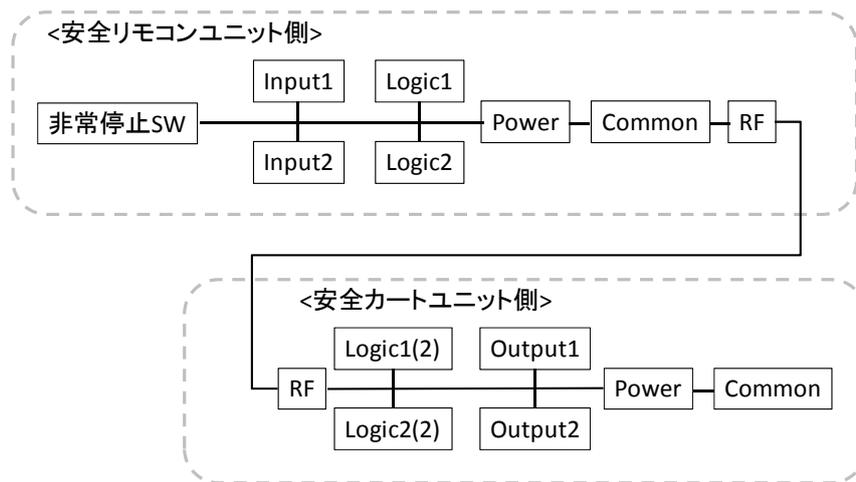
$r : 32$ 、 $n : 120$ 、 $P_e : 0.5$ 、 $v : 45000$ 、 $m : 1$ とした場合、数式(1)および(2)から本システムにおける 1 時間あたりの残余エラー率は、

$$\Lambda(P_e) \approx 1.0 \times 10^{-42}$$

この結果、安全無線通信部は、安全無線非常停止装置の安全性能を満足させるために使用することができることが立証された。

(ウ) 安全無線非常停止装置の安全性評価

安全性能の評価においては、安全関連部とそのアーキテクチャの同定が必要となる。そこで安全関連部であるサブシステムと、その構成を抽出した信頼性ブロックダイアグラムを図表 2-25 に示す。



図表 2-25 安全無線非常停止装置の安全関連部ブロック図(信頼性ブロックダイアグラム)

図表 2-25 より各信頼性ブロックにおける DCi(各ブロックの診断範囲)を式(3)で、MTTFdi(各ブロックの平均危険側故障時間)を式(4)で計算し、その結果を用いて安全無線非常停止装置全体の MTTFd(平均危険側故障時間)を式(5)で、DCavg(平均診断範囲)を式(6)で計算した結果、安全無線非常停止装置での DCavg=99.54% ,MTTFd=3.2×10⁵(h)≒36.5(year)となる。

$$DC_i = \lambda_{DD} / (\lambda_{DD} + \lambda_{DU}) \text{----- (3)}$$

$$1/MTTF_{di} = 1/(\lambda_{DD} + \lambda_{DU}) \text{----- (4)}$$

$$1/MTTF_d = \sum_{i=1}^N (1/MTTF_{di}) \text{----- (5)}$$

$$DC_{avg} = ((DC_1/MTTF_{d1} + DC_2/MTTF_{d2} + \dots + DC_N/MTTF_{dN})) / ((1/MTTF_{d1} + 1/MTTF_{d2} + \dots +$$

1/MTTF_{dN})) ----- (6)

この結果、ISO13849-1 の表 5 で示されている平均危険側故障時間(図表 2-26)と表 6 で示される診断範囲(図表 2-27)より、安全無線非常停止装置の MTTFd は、“高”、診断範囲も“高”と判定される。

MTTFd	
各ブロックの指定表示	各ブロックの範囲
“低”	3 年 ≤ MTTFd ≤ 10 年
“中”	10 年 ≤ MTTFd ≤ 30 年
“高”	30 年 ≤ MTTFd ≤ 100 年

図表 2-26 平均危険側故障時間

DC	
DC の指示表示	DC の範囲
“なし”	DC < 60%
“低”	60% ≤ DC < 90%
“中”	90% ≤ DC < 99%
“高”	99% ≤ DC

図表 2-27 診断範囲

無線非常停止装置の安全カテゴリは、4 であることから ISO13849-1 の表 7 で示される制御システムの安全関連部によって達成される PL の評価する手順(図表 2-28)と照らし合わせると、無線非常停止装置の PL(Performance Level)は、“e”となる。

最終的に、ISO13849-1 の表 4 で示される PL と SIL との対応表(図表 2-29)により無線非常停止装置の SIL(Safety Integrity Level)は、3 となり目標となる SIL を満たしていることがわかる。

カテゴリ	B	1	2	2	3	3	4
DCavg	“なし”	“なし”	“低”	“中”	“低”	“中”	“高”
各チャンネルの MTTFd							
“低”	a	該当なし	a	b	b	c	該当なし
“中”	b	該当なし	b	c	c	d	該当なし
“高”	該当なし	c	c	d	d	d	e

図表 2-28 制御システムの安全関連部によって達成される PL を評価する手順

PL	SIL(高/継続運転モード)
a	-
b	1
c	1
d	2
e	3

図表 2-29 PL と SIL との関係

3 安全機器・システム技術の研究開発—GPS と RFID による誘導技術の研究開発 (X3)

3.1 概要と達成状況

ハンドル型電動車いすが危険区域へ接近した際に停止、もしくは減速、若しくは搭乗者へ警告を与えるために、安全支援技術として GPS 信号による自己位置把握技術について研究開発することが目的で準天頂衛星による精度確認を実施した。その結果、安全対策としては精度不足であること、またそのシステムを安全システムとすることが困難であることが判明した。合わせて、その他のシステムにおいて十分なリスク低減が可能であることもわかり、初年度実施した基本性能の測定までの実施とした。

ハンドル型電動車いすに対しては RFID 技術による危険区域検知も技術開発していたが、同様の理由により基本性能評価のみの実施とした。

3.2 GPS 技術について

精度確認では、高層ビルの多い都市部でも測位可能率を高めるために、観測ツール QZS-ProveTool を実装済みの通常の GPS 受信機である PDA 型 GPS ロガーと、衛星測位利用推進センター(以下 SPAC) に準天頂衛星“みちびき”の実証利用を申請して借用した専用受信機の 2 種類の GPS 受信機を用いて測位精度の確認を実施した。また 3 軸ジャイロセンサと 3 軸加速度センサで構成された慣性センサ及び車速パルスを用いて推測航法を行うため、車用 GPS 受信機評価キットを使用した。ただし準天頂衛星 (QZS)には未対応である。

(1)測定方法

実験場所は大阪府吹田市にある大阪大学構内の工学部から歯学部付近で、実施時期は準天頂衛星の仰角が大きい 2012 年 1～3 月に毎月 1 度午前中とした。QZ-Radar によると QZS の仰角は約 80°、また NEMA ログによると試験区間での GPS 衛星数は 8～11、HDOP 値 : 0.8～1 で GPS 受信環境としては非常に良好であった。受信機などはミニキャブバンに搭載し、ハンドル型電動車いすを想定して 4km/h～10km/h で走行し、測位データを電子地図スーパーマップル・デジタル 1 2 (昭文社) 上にプロットして測位精度を確認した。

実施日	2012 年 1/27、2/29、3/15 (午前中に準天頂衛星の仰角が高い時期)
試験場所	大阪大学工学部構内、吹田市。開始点-終了点間の距離は約 1.9km (図 1)。
試験要領	一般車 (MMC ミニキャブバン) へ GPS 受信機を搭載。シニアカー走行を想定し、時速 4～10km で走行。電子地図上に GPS 測位データ (NEMA 形式) をプロットし、地図が正確であると仮定して、測位精度を確認。
GPS 受信機 (2 種類)	① SPAC から借用した、準天頂衛星 (QZS) が受信可能な GPS 受信機 (QZSR-βⅢ) と、PDA 型 GPS ロガー (本体 : iPAQ212、観測ツール QZS-ProveTool を実装済)。 ② 慣性センサ (3 軸ジャイロセンサと 3 軸加速度センサ) 及び車速パルスを用いて、推測航法を行う、車用 GPS 受信機評価キット (古野電気製 GV-18503H)。準天頂衛星 (QZS) には未対応。
GPS アンテナ	GPS 受信機 2 台共、外部アンテナを車上 (地上高約 1.9m) に設置。
電子地図	昭文社製電子地図 スーパーマップル・デジタル 1 2

* 1 : SPAC は、財団法人 衛星測位利用推進センターの略。

(2)測定結果

結果は図表 2-30 の通りである。GPS+推測航法は、測定開始直後の 100m を除き、測位データは概ね道路幅内（約 5m）に収まっている。一方 QZS 受信機は、測位データは概ね車道幅内（約 5m）に収まっているがデータにふらつきがあり、走行コース最後のナイフエッジ型左折路の直前で少し道を外れたデータとなった。そのため推測航法を併用する必要があると考える。

対策として、3 軸ジャイロセンサ、車速パルスを用いた推測航法を併用することが望ましい。また、GPS 受信機としては、GPS 以外に、高仰角+GPS 補強信号を提供する QZS、ロシアの GLONASS 衛星など、多数の測位衛星を受信可能な受信機が望ましい。



図表 2-30 GPS 精度測定結果

3.3 RFID 技術について

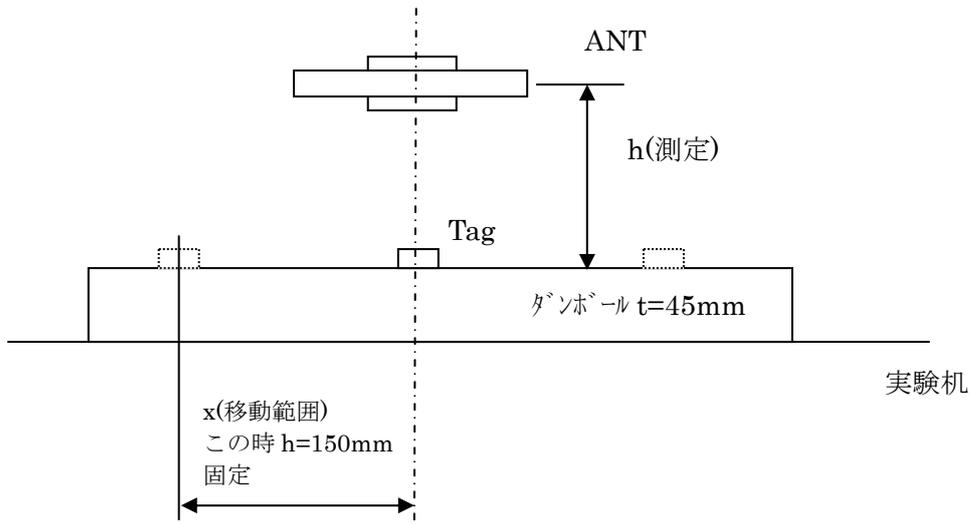
入手した2種類の RFID タグの読み取り距離について基礎的な確認を行った。その結果垂直方向には大型タグは 230mm、小型タグは 150mm まで読み取りが可能であった。また実際にハンドル型電動車いすに取り付けた場合の最大アンテナ高さとして想定する 100mm の垂直距離の場合、図表 2-31 に示す X 方向の読み取り可能な最大距離は、大型タグは 100mm、小型タグは 60mm となった。なお、走行中に読み取るために必要な相対速度はハンドル型電動車いすでは 6km/h、誘導式ゴルフカートの自動走行時は最高で 12km/h であり、今回は 20km/h にて読み取り可能なことを確認することができた。

(1)実験構成

- RFID 本体 (HF-CNTL-IND-02) IP 192.168.253.110
- RFID ANT (HF-ANT-2020-01)
- RFID ANT (HF-ANT-1010-01)
- TAG (HF-250HTS) 大型タイプ
- TAG (LRP-123S) 小型タイプ

(2)RFID の通信距離測定

- ①RFID ANT (HF-ANT-2020-01) アンテナ 20cm 角 (ゴルフカート実装品)



図表 2-31 実験条件

測定結果

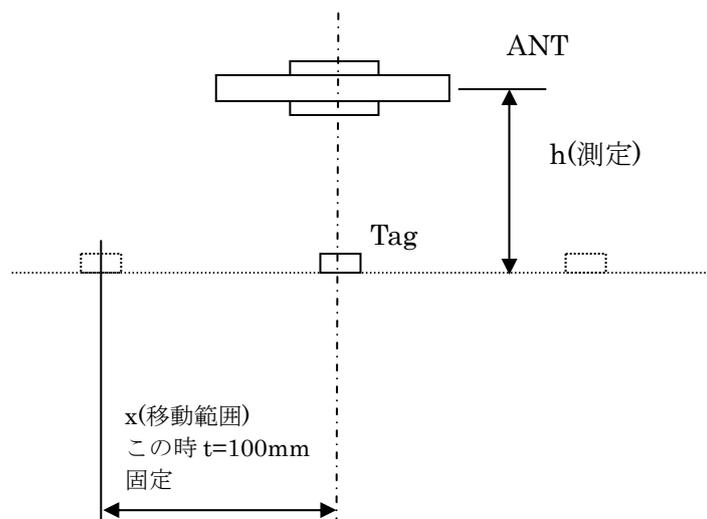
	TAG (HF-250HTS)	TAG (LRP-125S)
h(mm):x=0	375	220
X(mm) :h=150mm 固定	160	100

アンテナと近接金属の影響：50mm 以内は極端に通信距離が低下する。

アンテナ 200mm 角に対し約半分まで金属がかかっても通信が大きくは変化しない。

タグ間を並べて置くと読み取りが出来ない場合あり。その間のタグ間距離は、TAG (HF-250HTS)で 300mm,TAG (LRP-125S)で 250mm となる。

②RFID ANT (HF-ANT-1010-01) : メーカーからの借用小型アンテナ 10cm角での測定データ



図表 2-32 実験条件

測定結果

	TAG (HF-250HTS)	TAG (LRP-125S)
h (mm) : x=0	230	150
X (mm) : h=100mm 固定	100	60

アンテナと近接金属の影響 : 30mm 以内は極端に通信距離が低下する。

アンテナ 100mm 角に対し平行に金属が 33mm の隙間で存在した場合、TAG (HF-250HTS) で 145mm, TAG (LRP-125S) で 100mm となる。

アンテナ 100mm 角に対し平行に金属が 16mm の隙間で存在した場合、TAG (HF-250HTS) で 60mm, TAG (LRP-125S) で 25mm となる。

(3)移動時のパターン読取り確認試験

①ゴルフカートへ実装して走行試験

駐車場アスファルトに置いたタグ情報をゴルフカートを走行させてパターン情報読みとれることを確認。手動でアクセルを一杯踏んで試験を実施した。問題なく読取れることを確認したが、カートの速度を測定出来なかった。

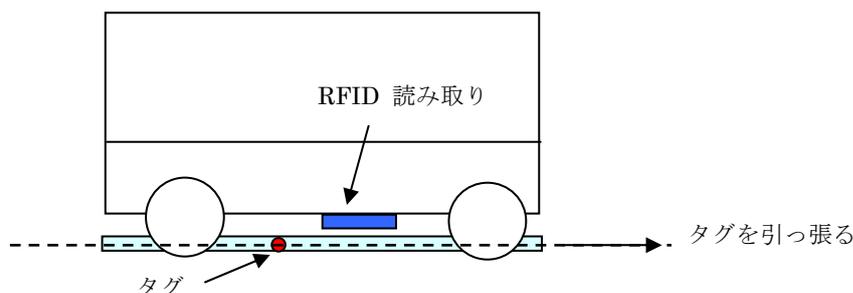
②ゴルフカートへ実装した読み取り機に対して RFID タグを移動して測定

RFID タグに紐をつけて一方から引っ張り読み取り機の下を移動させる。

移動した距離と時間を測定して時速を算出する。

タグ移動距離 520mm、時間 80ms……約 23.4 km (測定誤差考慮せず) まで読取れることを確認。

(光電スイッチにより 2 点を通じた時間をオシロスコープにより確認)



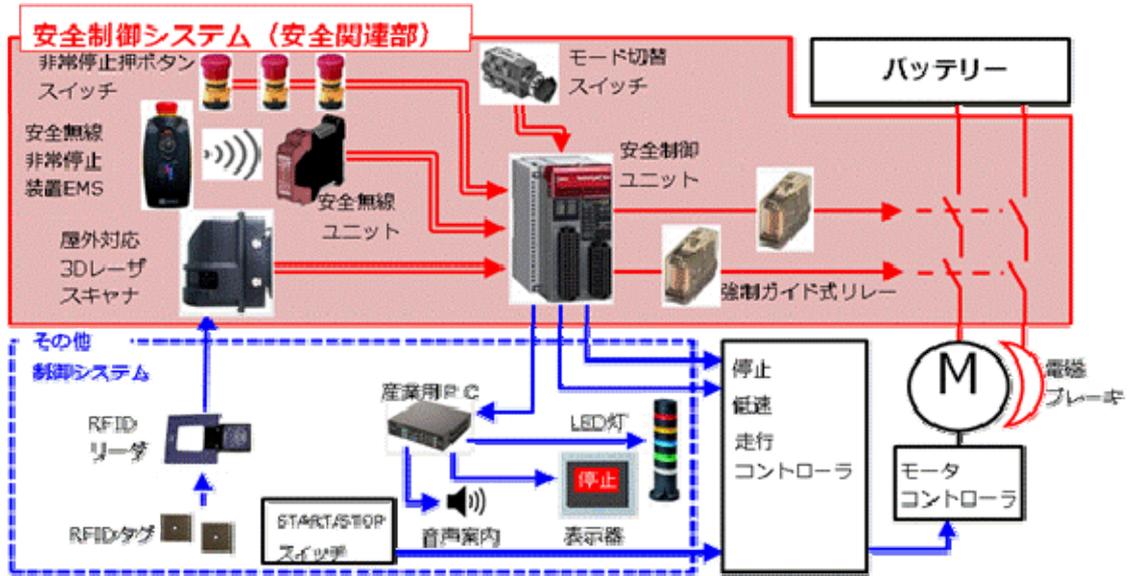
図表 2-33 速度実験条件

第3章 誘導式ゴルフカートの安全システム技術開発 (Y) の成果

1 安全システム設計技術の研究開発—機能安全システム(Y1)

1.1 概要と達成状況

リスクアセスメントの結果、PLd、SIL2 の安全度水準の安全関連部を構築した。製品認証済みの従来型の非常停止スイッチと強制ガイド式リレーなどを含めて図表 3-1 のように構築した。赤い線で囲まれた部分が安全関連部である。



図表 3-1 ゴルフカートの安全制御部

1.2 安全性能

システムを構成する機器が全て2重化されており、診断機能を有している。システム全体としてPLd、SIL2相当であり、誘導式ゴルフカートに求められる安全機能の維持能力を有したシステムである。詳細は5章にて述べる。

2 安全システム設計技術の研究開発—システムのリスクアセスメント技術(Y2)

2.1 概要と達成度

安全システム構築の元になる安全要求仕様は、リスクアセスメントの結果得られる。今回誘導式ゴルフカートの自動走行時についてリスクアセスメントした。リスクアセスメントは以下で構成される。

- ・今回対象とした搭乗型ロボットの基本仕様
- ・使用上の制限
- ・リスクアセスメントシート
- ・リスクアセスメントシート (after)

- (1) 今回対象とした搭乗型ロボットの基本仕様
ゴルフカートの基本仕様を仕様を図表 3-2 に示す。

走行方式	オート時：誘導線埋設、電磁誘導方式による専用等走行 マニュアル時：ハンドル操作による自由走行
積載（定員）	5名（65kg×5名=325kg）
積載（バッグ・他）	4バック+他小物（50kg）
全長	3450±20mm（折り畳時2950±20mm）
全幅（前/後）	1100±10mm/1250±10mm
全高	1815±15mm
ステップ 最低地上高	高さ：250±20mm（空車）、幅：1100±5mm 120±10mm
トレッド	前後：905±5mm
ホイールベース	1900±10mm
タイヤ	205/50-10（6PR）、外径φ466mm、幅195mm
質量	本体：395kg、積載質量：375kg バッテリー：46kg×4個=184kg、合計 954kg
最小回転半径	3.2m+0, -0.2m（ピックアップ中心）【3.0R 3.0km/hにて走行可】
登降坂角度	登り、降り：20°
速度	手動：19km/h（平坦直線路） 自動：6.5/8.5km/h 高速：10.0~12.0km/h（見通しのよい平坦直線路に限る） 低速：3.0~5.5km/h 速度範囲は±1km/h、荷重はフル荷重（375kg）、 押しボタンSW ON→3回鳴動後スタート（”発進します”アナウンス ※オプション）
スタート	
モータ	分巻式直流モータ（DC48V、3.0kW）
ブレーキ機構	4輪油圧式：前輪ディスクブレーキ/後輪ドラムブレーキ 走行モータ回生ブレーキ
パーキングブレーキ	電磁ブレーキ
バッテリー	HC100-12×4個
充電器	入力：単相 AC200~220V、周波数：50~60Hz、入力容量：1.2KW
ステアリング	誘導走行時ロック
バッグササエ	幅：1026mm、地面からの高さ：910mm、角度：43°
前後進切替	操作パネルのトグルSWにより切替ブザー音（”バックします。ご注意ください。”アナウンス【オプション国内仕様のみ】）
追突防止	電磁誘導 パルスランダム方式センサー（対カート） 超音波方式センサ（対歩行者） ※オプション
表示 発進停止	誘導・警報・充電（ブレーキオイル残量警報追加）、バッテリーゲージ（4個） スイッチ：操作パネル1個、前席後ろ両サイド2個 リモコン（GCC4）：100m以上

図表 3-2 ゴルフカートの概略仕様

(2) 使用上の制限

誘導式ゴルフカートの基本操作とゴルフ場での運用、暴露時間に関わる内容について以下の様にとりまとめた。

○意図した仕様

- ①ロボットはゴルフ場という閉じられた施設内で使用される。
- ②施設利用者は高齢者を含めた成人が98%以上である。
- ③RAの対象であるロボットの誘導（自動）走行は顧客の利用時である。
- ④ロボットは電磁誘導線の上までスタッフにより手動運転で移動される。
- ⑤ロボットはロボットに設置された”走行/停止”スイッチ、もしくはリモコン

スイッチにより始動、停止制御される。

- ⑥ロボットは誘導線が埋設されたカート道を誘導走行する。
- ⑦ロボットは誘導線上を走行するときは埋設された磁石により制御される。
- ⑧ロボットの出入庫、メンテナンスは教育訓練されたスタッフが行う。
- ⑨搭乗者は運転中身体をシートベルトを着用しない。
 - ※1：ロボットは実用化されて普及が進み、国内ゴルフ場では一般的である。
 - ※2：ロボットが何らかの理由で誘導線上を逸脱した場合は緊急停止する。

○意図した時間

- ①ロボットはゴルフコース間の移動に利用され、18ホール/日が標準的な形態である。午前、午後各2～3h合計4～6hがロボットを利用する時間である。
- ②移動距離は18ホールで8～10kmのため、ロボットの平均速度6km/hとして1.3～1.7hが実際にカートに搭乗している時間である。18回乗降する。
- ③上記より、4.3～4.7hがカートの周辺にいる可能性のある時間である。
- ④先発の組に追いついたり、または後続の組に追いつかれることがある。
- ⑤1組最大4人、キャディがつくゴルフ場とつかないゴルフ場がある。
- ⑥ロボットの寿命は約10年間

○合理的に予見できる誤使用

- ①利用者が動き出したロボットに駆け込み乗車する。
- ②ロボット誘導路上でプレーに専念するプレイヤーがいるときに第三者がリモコン操作にてロボットを始動する。
- ③プレイヤーがロボットが接近しているにも関わらず誘導線路上でプレーする。
- ④利用者がロボットが停止する前に飛び降りる。
- ⑤ロボットの後ろを人が歩いているときにロボットを急停止させる。
(人がロボットにぶつかる)

2.2 リスクアセスメント

誘導式ゴルフカートの運用段階の全体を明らかにした上で対象となる自動走行時について危険源、危険事象を同定した。

それぞれの危険源に対する危害の程度と発生頻度を想定し、許容できないリスクに対してはPLd相当の安全性能の維持能力を持ったマルチレイザースキャナと安全無線非常停止装置によって誘導式ゴルフカートを許容可能な生活支援ロボットにまでリスク低減することとした。

- 運用の全体
- ① 設定段階
 - ② 運用段階（営業）
 - ・ 出庫・格納（手動走行）
 - ・ 運転（自動走行）
 - ・ 乗降・移乗（自動走行）
 - ③ 保守など

作業項目	作業者	危険源	危険状態／危険事象	危険区域	対象者
起動	従業員 ・顧客	ロボット	歩行者が衝突され打撲	誘導線上	歩行者
走行中		ロボット	歩行者が衝突され打撲	誘導線上	歩行者
			歩行者が衝突され転倒・骨折	誘導線上	歩行者
			飛び乗り失敗で骨折	ロボット上	歩行者
			飛び降り失敗で骨折	ロボット上	歩行者
急停止		減速	タイヤスリップによる誘導路逸脱で搭乗者衝突打撲	搭乗席	搭乗者
			タイヤスリップによる誘導路逸脱で搭乗者転落骨折	搭乗席	搭乗者
		ロボット後部	ロボットの急停止して後ろの歩行者が衝突。	誘導路 ロボット後部	搭乗者
—		ロボット	故障により暴走し歩行者と衝突・転倒 骨折	誘導線上	歩行者
—		ロボット	電磁波により暴走し歩行者と衝突・転倒 骨折	誘導線上	歩行者
—		ロボット	雨天による水の浸入（スキャナ、制御ボックス）	誘導線上	歩行者
乗車	ロボット	第三者がリモコン始動し乗降者を振り落とす	搭乗席	搭乗者	
降車	ロボット	第三者がリモコン始動し乗降者を振り落とす	搭乗席	搭乗者	

図表 3-2 リスクアセスメントの危険源の同定

2.3 事故事例調査

A.調査の背景と目的

(a)背景

乗用カートは、1990年代頃から全国のゴルフ場で急速に導入が進められ、現在では導入率が90%以上と報告¹⁾されている。また、高齢の利用者が増える中で、その役割はますます高まっており、ゴルフ場だけでなくリゾート施設や公園など利用領域が広がりつつある。乗用カートには運転操作が必要な「手動式」と、埋設された電線もしくは電磁誘導上を自動走行することができる「誘導式」の2タイプがある。誘導式カートは、走行経路が既定されているほか、速度についてもコントロールされている。2011年の時点では全国のゴルフ場が保有するカートのタイプの構成は約半数ずつである。

しかし、乗用カートの事故については、大事故についてマスメディアで報道されていることがあるが、乗用カート事故に関する統計調査データは現在のところ見当たらない。

(b)目的

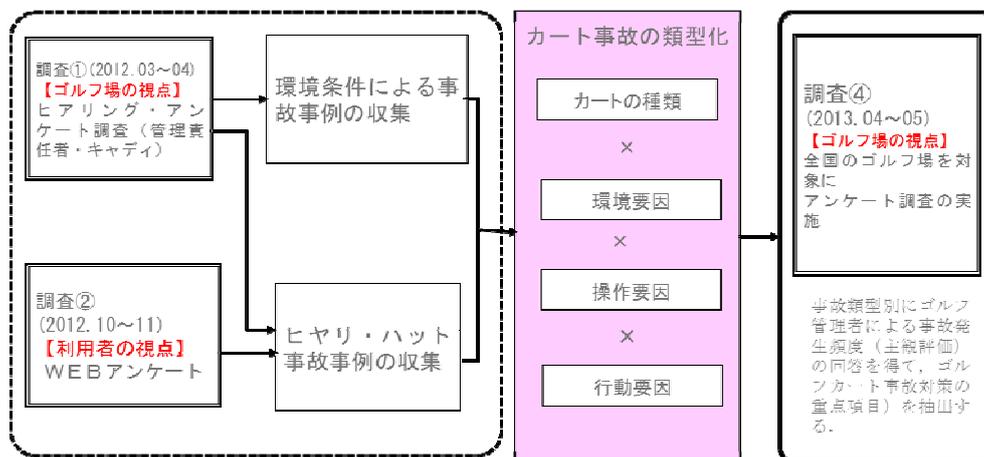
本調査は、ゴルフ場における乗用カートの事故について、複眼的に事故事例（大事故からヒヤリハットまで）を収集し、事故パターンの類型化を行い、事故発生件数ならびに事故特性について把握することを目的とする。

- ・乗用カート事故の類型化と頻度の把握
- ・安全性向上に効果的な改善ポイントの抽出

(c)調査の体系

調査は3段階で実施した。まず、関西の主要なゴルフ場6箇所に対して管理責任者へのヒアリング調査とキャディを対象としたヒヤリ・ハットに関するアンケート調査を実施し、乗用カートに関する事故概況を把握した。

次に利用者の視点から、ヒヤリ・ハット経験に関するWEB調査を行った。その結果から事故パターンを抽出し、最後に全国2289箇所のゴルフ場を対象に事故頻度、改善意向に関するアンケート調査を実施した。調査の体系は図3-3に示すとおりである。



図表 3-3 調査体系

B. ゴルフ場ヒアリング調査

(a)調査対象

ヒアリング調査は2012年3月から5月にかけて、図表3-4に示す6箇所に実施した。

図表 3-4 ヒアリング対象のゴルフ場の概況

	茨木CC	枚方CC	茨木高原CC	ベニーCC	新大阪GC	池田CC
開場時期	大正14年	昭和34年	昭和36年	昭和49年	昭和48年	昭和35年
コース数	36	18	18	18	18	27
年間利用者数	5万人	3万8千人	4万人	3万8千人	4万人	5万8千人
ラウンドスタイル*	キャディ	キャディ	セルフ	セルフ	セルフ	キャディ
カート導入時期	平成16年	平成13年	平成9年	平成16年	平成12年	昭和37年
カートタイプ①	誘導式	誘導式	誘導式	誘導式	誘導式	自走式
カートタイプ②	バッテリー	ガソリン→バッテリー	ガソリン	ガソリン→バッテリー	ガソリン	バッテリー
台数	100	55	60	60	60	76

(b)乗用カートの導入状況

(1)導入時の留意点

誘導式カートは安全性やカート道逸脱防止効果を期待し導入している事例が多い。その一方で、手動式カートは、カート道への磁器の埋設がないため、初期投資の簡便さおよびラウンド時間の短縮などを期待して導入されている。いずれも駆動形式としてバッテリータイプとガソリンタイプがあるが、静音性重視する場合はバッテリーが採択されている。

近年、セルフ方式がプレイの中心に移行する中で、安全性の高い誘導式の乗用カートのニーズは高まると予想される。また、バッテリー技術の向上、コストの低廉化などからガソリンからバッテリーに移行する傾向がある。

図表 3-5 乗用カート導入のポイント

バッテリー	ガソリン
<ul style="list-style-type: none"> ・静音性 ・ランニングコストの低下 ・動きの円滑性 	<ul style="list-style-type: none"> ・初期のバッテリーの耐久性や駆動力等の技術的課題への懸念 ・発電設備等が不要であるなど、初期投資の簡便さ
誘導式	自走式
<ul style="list-style-type: none"> ・安全性 ・カート道逸脱防止(セルフ対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・初期投資の簡便さ ・ラウンド時間の短縮

(2)カート道の整備の考え方

カート道の整備の考え方には、「景観重視型」と「利便性重視型」の2種類がある。景観重視型では、カート道をコースの端部又はコースから見えない位置に設置している。一方、利便性重視型はフェアウェイの側やグリーン間に設置され、最近ではコースのセンターライン上に設置されている場合もある。

景観重視型ではリモコン操作時に目視による安全確認が難しいという短所があり、利便性重視型ではプレイ空間とカート道が接近又は含まれているため、カート道にプレイヤーが立ち入る可能性が高くなる。



図表 3-6 カート道（景観重視型）



図表 3-7 カート道（利便性重視型）

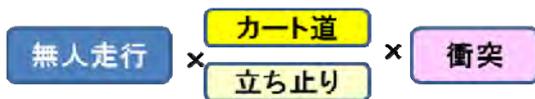
(3)事故事例

すべての事故事例を整理保存しているゴルフ場はなかったが、比較的大きな事故に関する事故の調書を保存するゴルフ場は多かった。概ね過去5年の間に7件～10件程度の事故記録があった。

事故事例を以下に紹介する。

- キャディがリモコン操作で無人でカートを進めた時に、次のティーの手前（フェアウェイからは死角の位置）のカート道で体操をしていたプレイヤーに衝突した。

【誘導式・バッテリー・キャディ付】

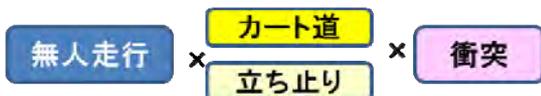


図表 3-8 事故発生箇所（イメージ）

- バンカーでプレーをする同伴プレイヤーを、その横のカート道で屈んで見下ろしていた。被害者の右後方から走行するカートに衝突し負傷。

カートは別のプレイヤーがリモコンで操作して、無人走行中であった。

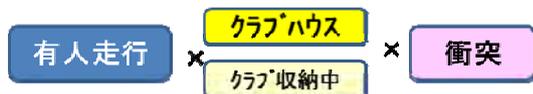
【誘導式・ガソリン・セルフ】



図表 3-9 事故発生箇所（イメージ）

- 終了後、カートにクラブを片付けている際、後続組のカートが衝突して負傷（左足複雑骨折）。
被害者自身がカート衝突防止の車間センサーを遮断していたか、地形的にセンサーが効きにくかったと考えられる。

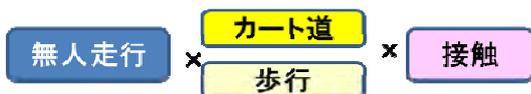
【誘導式・ガソリン・セルフ】



図表 3-10 事故発生箇所（イメージ）

- 前方のカート道を歩くプレイヤにカートが近づいているとキャディが注意をしたが、避けているつもりが十分でなく、カートがプレイヤにあたる。カートよりカート道のほうが幅が狭いためと考えられる。

【誘導式・バッテリー・キャディ付】



図表 3-11 事故発生箇所（イメージ）

(c) キャディのヒヤリ・ハット事例調査

ヒアリング対象ゴルフ場のキャディを対象に乗用カートでのヒヤリ・ハット経験に関するアンケート調査を実施した。有効サンプル数は131であり、質問項目は図表 3-12 に示すとおりである。

図表 3-12 乗用カートタイプ別サンプル数

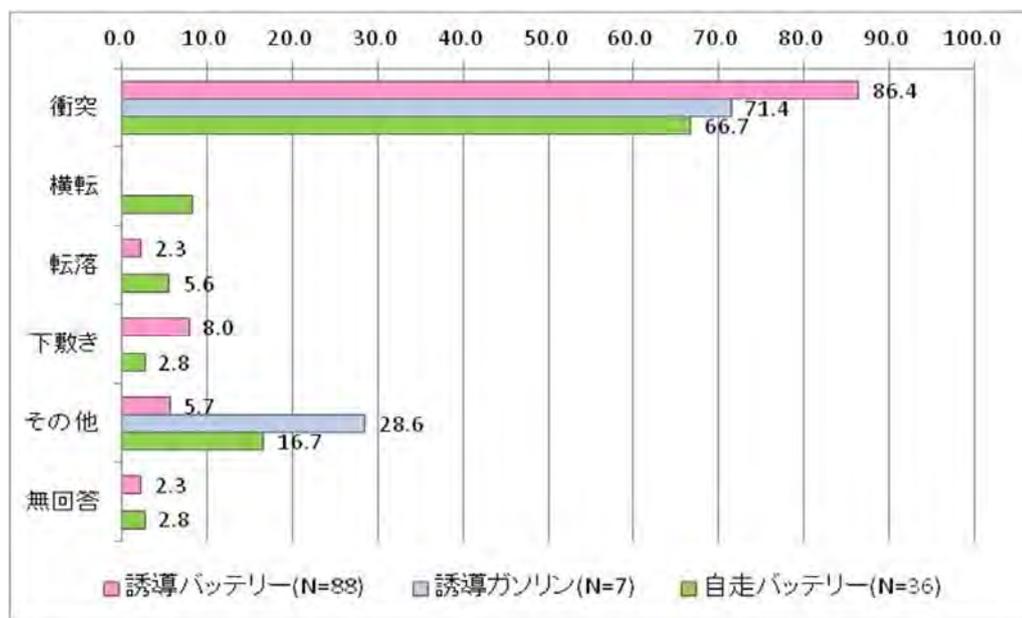
乗用カートのタイプ	サンプル数
1. 誘導式バッテリーカート	88
2. 誘導式ガソリンカート	7
3. 自走式バッテリーカート	36
4. 自走式ガソリンカート	—
合計	131

図表 3-13 質問項目

発生した場所	ヒヤリ・ハットした人
ヒヤリ・ハットさせた対象・年齢、	ヒヤリ・ハットの概要
ヒヤリ・ハットの種類（衝突、横転、転落、下敷き、その他）	
場所の特徴（ジョイント部、カーブ部、傾斜部、交差点部、その他）	
カートの状況（無人走行、有人走行）	
ヒヤリ・ハットの要因（操作要因、行動要因）	

(1) ヒヤリ・ハットの種類

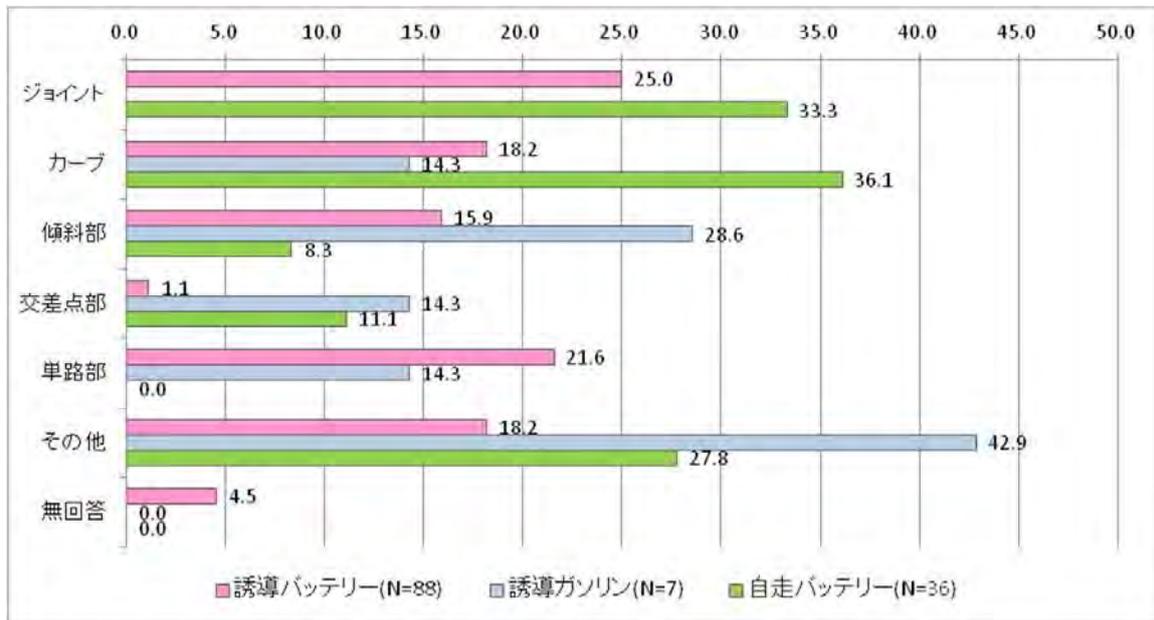
カートの種類を問わず「衝突」に関するヒヤリ・ハットが多い傾向が確認された。



図表 3-14 ヒヤリ・ハットの種類

(2)ヒヤリ・ハットした場所

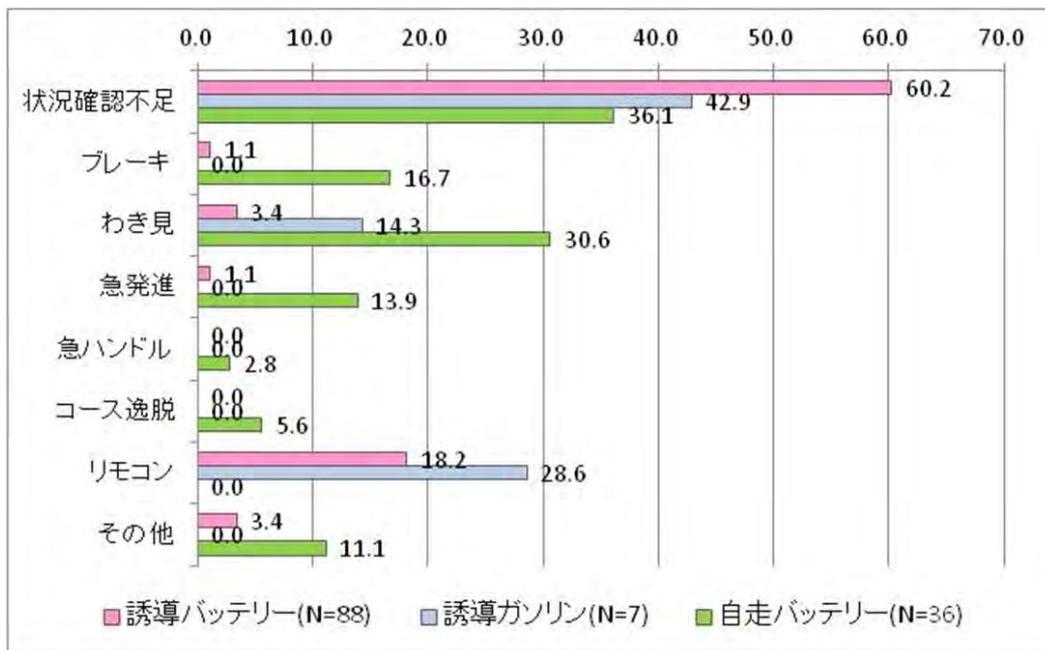
誘導式カートは、ヒヤリ・ハットが起きやすい場所に特徴はなく、手動式カートは、「ジョイント部」、「カーブ部」でヒヤリ・ハットが起きやすい傾向があることがわかった。



図表 3-15 ヒヤリ・ハットした場所

(3)ヒヤリ・ハットの原因（操作）

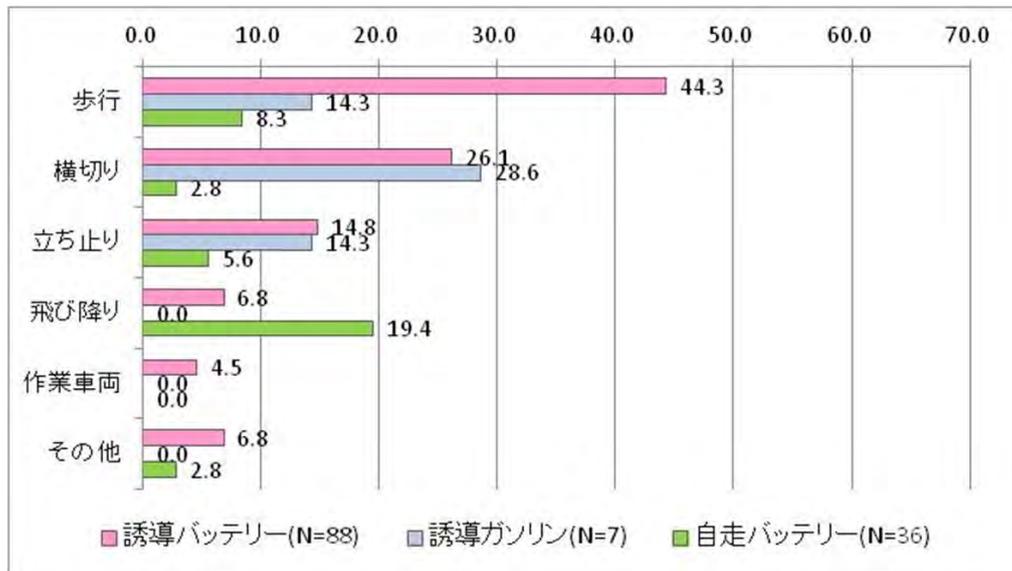
誘導式カートは、「状況確認不足」が最も多く、途中で気づいて「リモコン」操作が間に合わないという自由意見が多かった。手動式カートは、「状況確認不足」に加えて「わき見」がヒヤリ・ハットの要因になっている。



図表 3-16 ヒヤリ・ハットした操作要因

(4)ヒヤリ・ハットの原因（行動要因）

誘導式カートは、プレイヤー等の「歩行」、「横切り」がヒヤリ・ハットの要因になっている。手動式カートは、カートからの「飛び降り」がヒヤリ・ハットの要因となっているケースが多い。



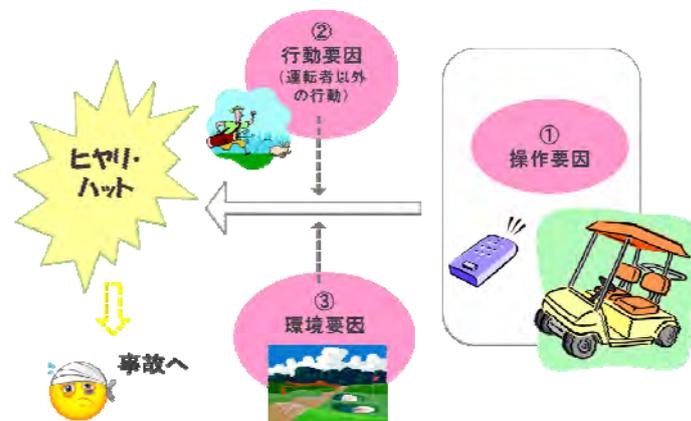
図表 3-17 ヒヤリ・ハットの行動要因

(d)ゴルフ場における乗用カートの事故の構造

ゴルフ場のヒアリング調査ならびにキャディのヒヤリ・ハット調査の結果から、乗用カート事故は操作要因、行動要因、環境要因の3要因から構成されることが明らかになった(図表 3-18)。

操作要因とは、カートを運転する際に起こす操作ミスのことであり、「急ハンドル」や「スピードの出しすぎ」などである。ただし、誘導式カートの場合は、リモコンによる操作も含まれる。次に行動要因とは、カートの運転手又はリモコンを操作している以外の人の事故を誘発する行動のことであり、「カートから飛び降りる」、「カートにきちんと座っていない」、「カート道を歩行する」などの行動をさす。3つ目の環境要因とは、カートが走行するカート道の構造上の特性のことであり、「カーブ部」、「急勾配部」、「ホールとホールの接合部（通称、ジョイント部）」などである。

乗用カートの事故およびヒヤリ・ハットは、これらの複数の要因が重なって起きる場合が多い。



図表 3-18 事故が起きる構造

C.利用者WEB調査

本調査は、ゴルフ場における乗用カート事故の事故要因の特性を把握するため、ゴルフプレイヤーのヒヤリ・ハット経験に関する調査を行い、以下の3点から分析を行った。

- ・利用者属性のヒヤリ・ハット経験への影響の把握
- ・カートの種類別のヒヤリ・ハットとその要因の把握
- ・ヒヤリ・ハット要因間の関連性の把握

(a)調査概要

調査の概要は図表 3-19 のとおりである。

事前調査を通じて、半年に1回以上ゴルフをする人を対象に1000サンプル回収した。回答者属性は、余暇活動におけるゴルフ参加率を参考に回収した。また、年齢については20歳代から60歳代以上の5段階でほぼ同率となるよう回収している。

また、「B ゴルフ場ヒアリング調査」の結果より、本調査で設定したヒヤリ・ハット要因は図表 3-20 に示すとおりである。

図表 3-19 WEB調査概要

調査日	2012年10~11月
調査方法	WEB調査（楽天リサーチモニター使用）
回収数	1000サンプル（ゴルフを年数回以上行う人対象）
設問概要 （事前調査）	・プレイ頻度 ・誘導式、手動式カートに関わるヒヤリ・ハット経験頻度
設問概要 （本調査）	もとも印象に残るヒヤリ・ハットした経験について ・カートの種類 ・ヒヤリ・ハットした事故の種類 ・ヒヤリ・ハットした事故の要因

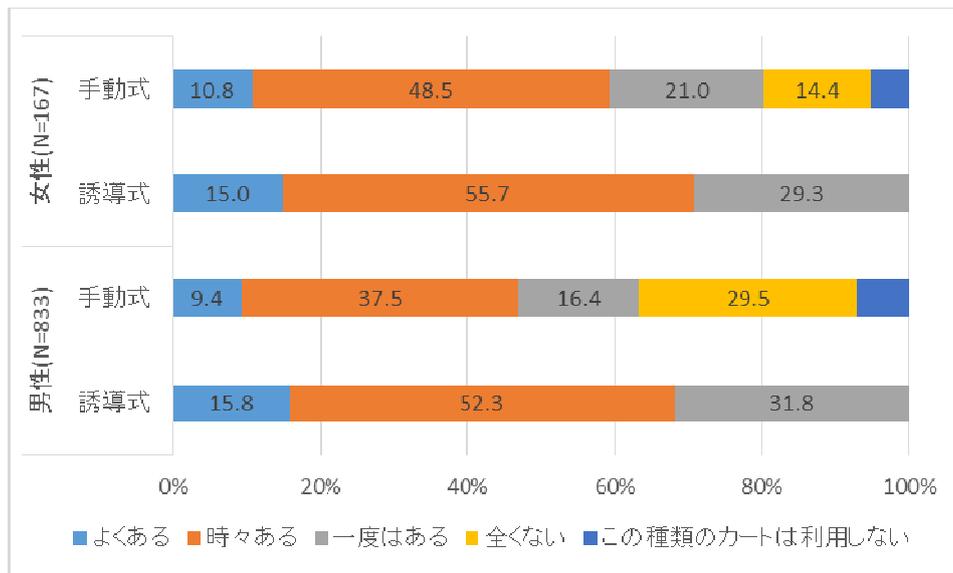
図表 3-20 ヒヤリ・ハットの要因一覧

操作要因	行動要因	環境要因
急ブレーキを踏んだ	飛び降りた	相互通行部
急ハンドルをきった	飛び乗ろうとした	カーブ部
スピードを出しすぎた	きちんと座っていなかった	交差部
急発進させた	カート道の上を歩いていた	急こう配部（上り）
ブレーキとアクセルを間違えて操作した	カート道を横切った	急こう配部（下り）
カート道から逸脱して走行した	カート道に立ち止っていた	ホールとホールの接合部
わき見運転をした	その他	カートの入出庫部
前方を確認せずにカートを前進させた	特に危険な行動はなかった	その他
後方を確認せずにカートを後進させた		特に危険な場所ではなかった
リモコンを誤操作した		
その他		
特に危険な行動はなかった		

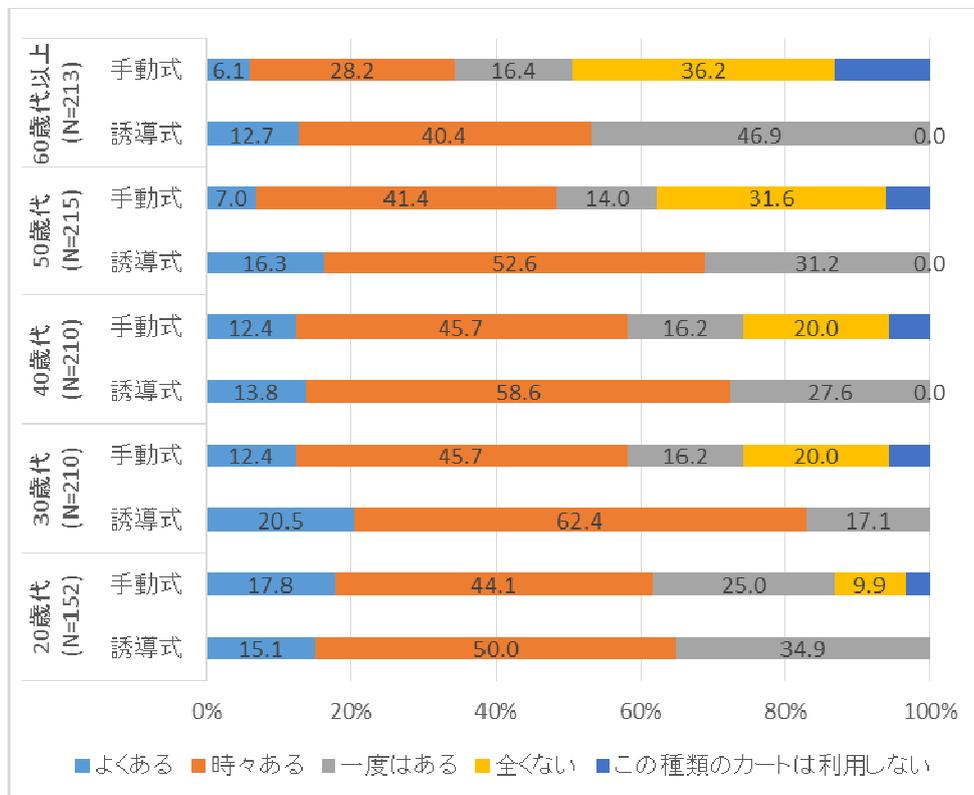
(b) 利用者属性とヒヤリ・ハット経験頻度

性別、カート種類別のヒヤリ・ハット経験頻度の構成比は図表 3-21 に示す通りである。誘導式カートでは性別による構成比の有意な差は確認されなかったが、手動式カートでは性別による構成比に有意な差が認められた。手動式カートは、女性のほうがヒヤリ・ハットする経験頻度が高い傾向にある。

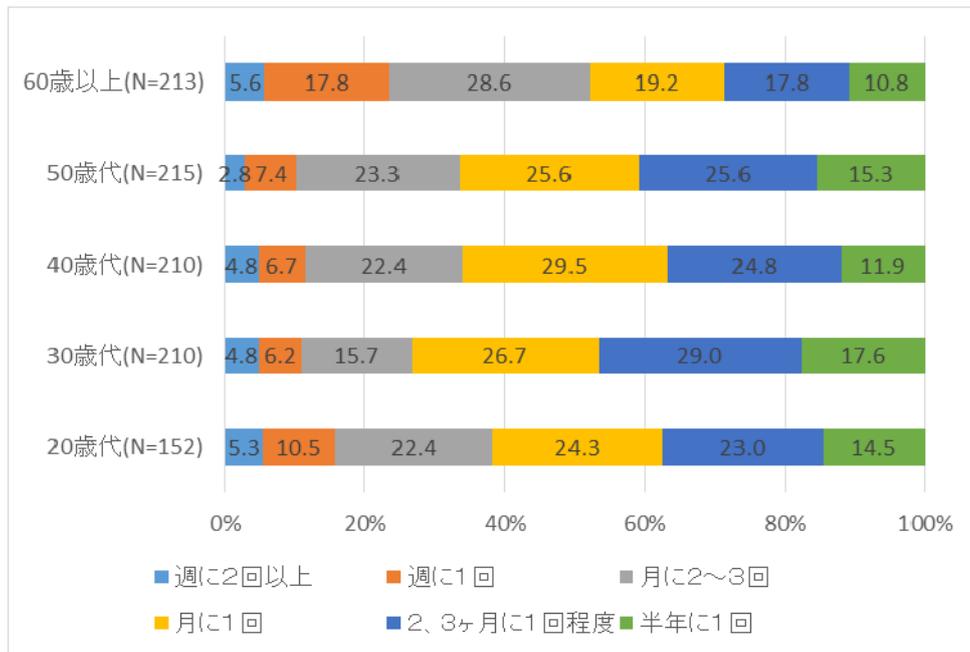
年齢別には、カートの種類を問わずヒヤリ・ハット経験頻度の構成比に有意な差が確認された（図表 3-22）。手動式カーとは、ヒヤリ・ハットを経験した人の割合（「よくある」から「一度はある」の合計値）が 20 歳代で 86. 9%と最も高く、年齢が上がるごとに下がる傾向にあり、60 歳以上では 50. 7%である。手動式カートでは、すべての回答者がヒヤリ・ハットの経験があるため、ヒヤリ・ハット経験率の高い人（「よくある」と「時々ある」の合計値）の割合で比較すると、年代による規則的な傾向は確認できないが、60 歳代以上が 53. 1%と最も低い頻度となっている。年齢別のプレイ頻度は図表 3-23 に示すとおりであり、60 歳以上のプレイ頻度はやや高い傾向にある。このことを考慮すると、60 歳以上のプレイヤーはカートでのヒヤリ・ハット経験頻度は低いといえる。



図表 3-21 性別_カート種別_ヒヤリ・ハット経験頻度(%)



図表 3-22 年代別_カート種別_ヒヤリ・ハット経験頻度(%)



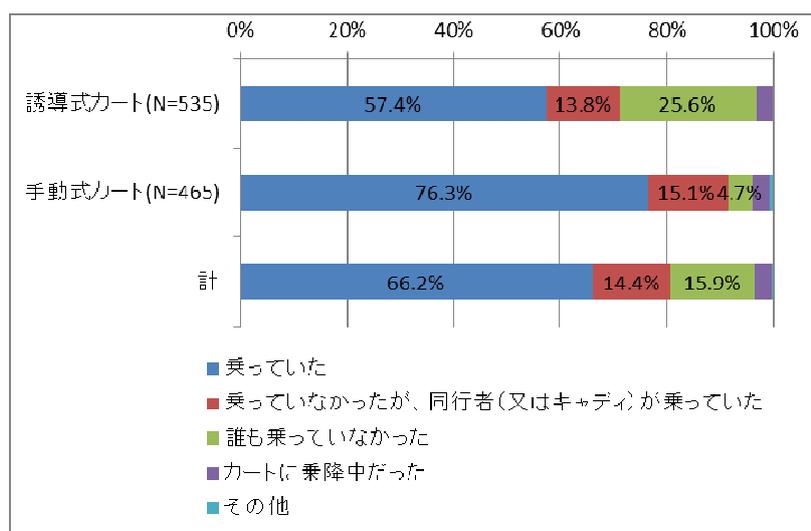
図表 3-23 年代別_プレイ頻度(%)

(c) カートの種類とヒヤリ・ハット

(1)ヒヤリ・ハット時の乗車状況

カートには誘導式と手動式の2タイプがあるが、誘導式カートはリモコン操作により無人でも走行できることが特徴である。プレイヤがヒヤリ・ハットを経験した時の乗車状況について集計した結果が図表 3-24 である。

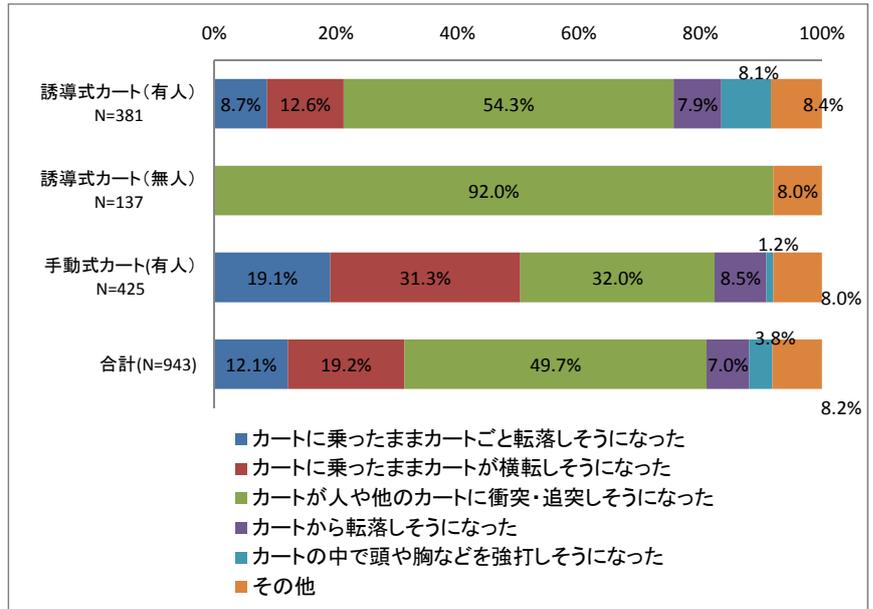
手動式カートでは本人又は同行者が乗車している割合が91%であるのに対して、誘導式カートは71%と有意な差が確認された。誘導式カートでは、誰もカートに乗っていない時（以下、無人時という。）にヒヤリ・ハットが起きており、ヒヤリ・ハット全件数の25%(137件)を占めている。このため、以下の分析については、誘導式カート（有人）、誘導式カート（無人）、手動式カート（有人）の3分類（合計943サンプル）で行った。



図表 3-24 カート種類別_ヒヤリハット時の乗車状況 (%)

(2)事故の種類

カート種類別にどのような事故になりそうなヒヤリ・ハットであったかについて集計した結果が図表 3-25 である。いずれも衝突・追突事故につながるようなヒヤリ・ハットが多い傾向にある。手動式カート（有人）は衝突・追突以外にも転落(19.1%)、横転(31.3%)などの占める割合が比較的高く、事故種別間には有意な差は認められなかった。一方、誘導式カート（有人）は衝突・追突が 54.3%を占めており、有意な差（有意確率 10%）が確認された。また、誘導式カート（無人）では 92%が衝突・追突に係わるヒヤリ・ハットであった。



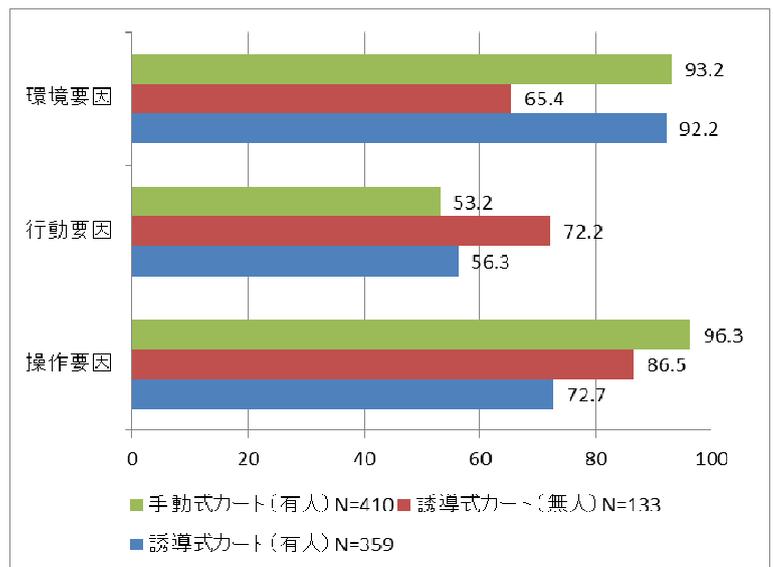
図表 3-25 カート種類別_ヒヤリ・ハット事故種別割合 (%)

(d)ヒヤリ・ハットの要因

操作要因、行動要因、環境要因別に要因の有無と要因の内訳についてカート種類別に集計を行った。なお、要因の項目は表-6 に示したとおりであり、複数回答で回答を得ている。

(1)各要因の有無

図表 3-26 はヒヤリ・ハットの要因として選択された割合を示す。手動式カート（有人）のヒヤリ・ハットの大部分は環境要因と操作要因がかかっていることがわかる。一方、誘導式カート（有人）は、操作要因がかかわる率(72.2%)がやや減少する。これは、誘導式カートは誘導線上を自動走行し、速度設定も行われているため、プレイヤ等の操作技術の影響を受けにくいと考えられる。また、誘導式カート（無人）では、有人時と比較して、行動要因がかかわる率が高く(72.2%)、操作要因がかかわる率も誘導式カート（有人）より高くなる傾向にある。これは、リモコンによる操作時に前方確認の不足などが操作者側の要因として認識されているためである。



図表 3-26 カート種類別_要因有の割合 (%)

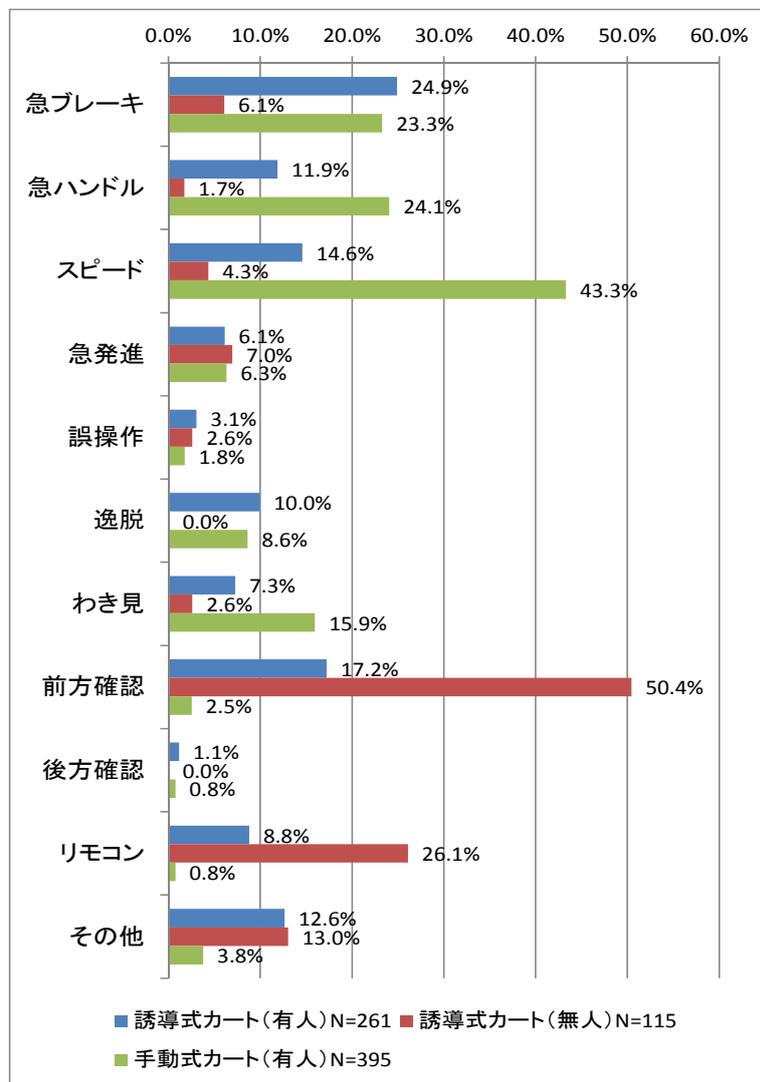
(2)要因の内訳

各要因の内訳の選択率について図表 3-27～3-29 に示す。

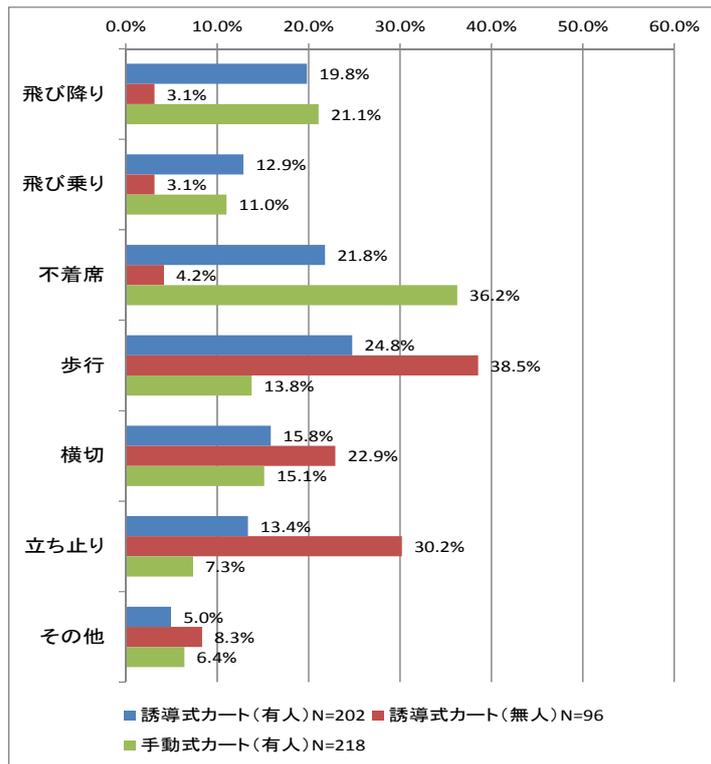
操作要因では手動式カート（有人）の「スピードの出しすぎ」、誘導式カート（無人）の「前方確認の不足」の選択率が高くなっている。

行動要因では手動式カート（有人）の「きちんと座っていなかった（不着席）」、誘導式カート（無人）の「カート道の歩行（歩行）」、「カート道の立ち止まり」の選択率が高い。誘導式カート（無人）の行動要因の選択率が高いのは、操作要因とも関連するが、リモコン操作時に前方確認不足のためカート道内を歩行又は立ち止まっている他のプレイヤー等に衝突しそうになった場合に、回答者（操作者）が、カート道に人や物があることを事故がおこる要因として認識しているためと考えられる。

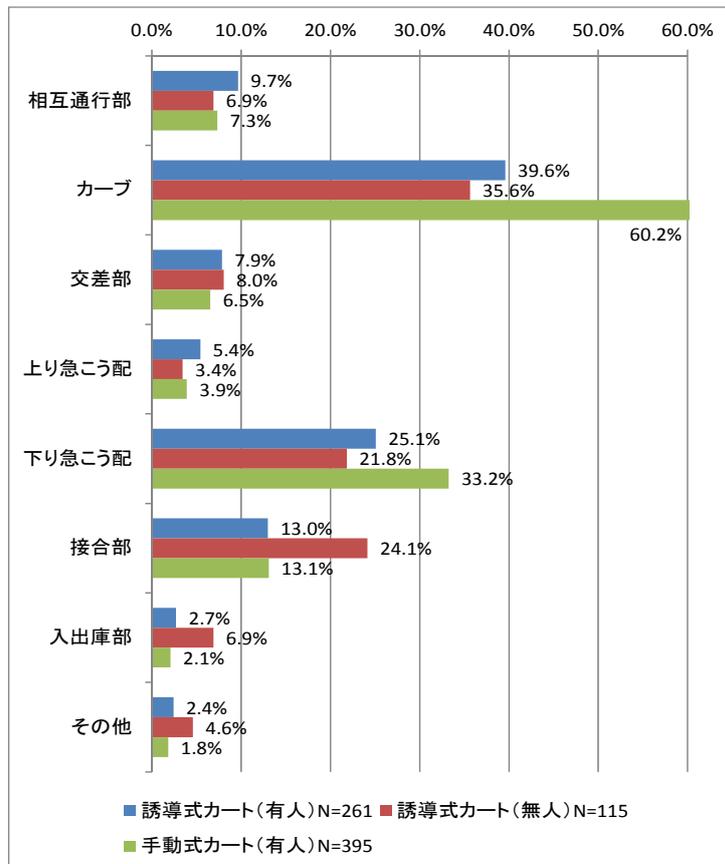
環境要因ではカート種類に関係なく、カーブ部、下り急勾配部の選択率が高くなっている。手動式カート（有人）では60%のヒヤリ・ハット経験がその要因として選択している。また、誘導式カート（無人）において接合部の選択率が高まるのは、ホールとホールの接合部では停止点が多く、見通しが悪い箇所が多いためと考えられる。



図表 3-27 カート種類別_操作因子の選択割合 (%)



図表 3-28 カート種類別_行動因子の選択割合(%)

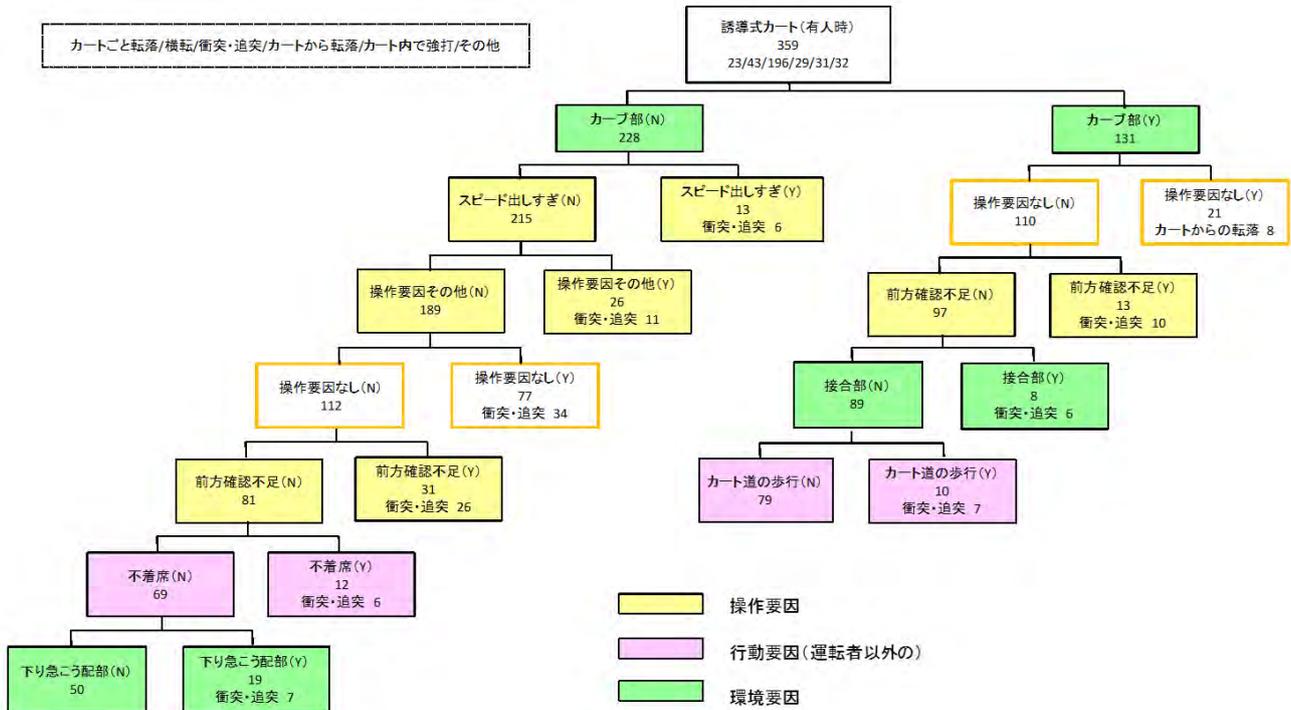


図表 3-29 カート種類別_環境因子の選択割合(%)

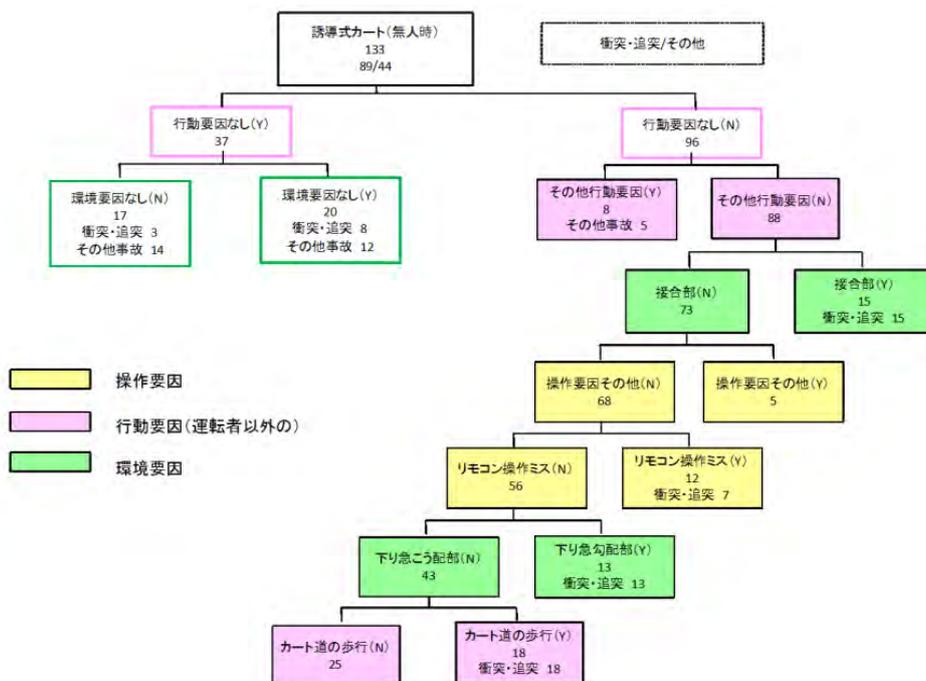
(e)ヒヤリ・ハット要因間の関係性

(d)の分析結果から、手動式カート（有人）は、環境要因と操作要因の影響が強い傾向が確認された。一方、誘導式カート（有人）は環境要因、誘導式カート（無人）は行動要因の影響が強い傾向が確認された。

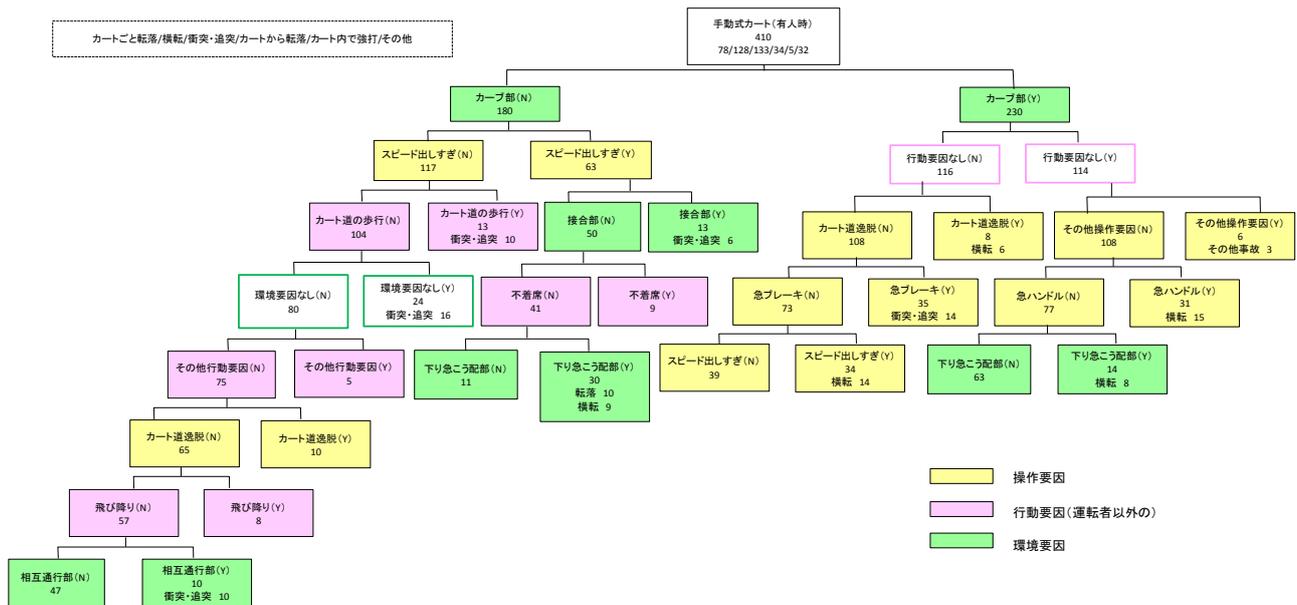
各要因の組み合わせ、つまりヒヤリ・ハットから導き出される事故パターンを把握するため、カート種類別に決定木分析を行った。目的変数をヒヤリ・ハットした事故の種別とし、説明変数を操作、行動、環境の各要因項目を用いて、有意度最大となる説明変数で分割していった。（図表 3-30～3-32）。



図表 3-30 誘導式カート（有人）ヒヤリハット要因ツリー図



図表 3-31 誘導式カート（無人）ヒヤリ・ハット要因ツリー図



図表 3-32 手動式カート（有人）ヒヤリ・ハット要因ツリー図

誘導式カート（有人）では、カーブ部（環境要因）で前方確認の不足（操作要因）、同じくカーブ部でカート道の歩行（行動要因）により衝突・追突事故にいたるヒヤリ・ハットがあげられる。その他はスピードの出しすぎや前方確認不足などの操作要因ならびに下り急勾配部といった環境要因が単独でヒヤリ・ハットの原因となっていることが確認できた。

誘導式カート（無人）では、環境要因の接合部、下り急勾配部、操作要因のリモコンの誤操作、行動要因のカート道の歩行などがあるが、複数の要因の関連性は確認しにくい。

一方、手動式カートはカーブ部（環境要因）においてカート道逸脱（操作要因）や急ハンドル（操作要因）による横転事故、カーブ部のスピード出しすぎ（操作要因）、下り急勾配部（環境要因）での横転事故などが確認できる。また、スピード出しすぎ（操作要因）の接合部（環境要因）での衝突追突事故など複数の要因が重なっている傾向が確認できた。

(f) 小括

本調査の結果から乗用ゴルフカートの事故要因の特性として得られた成果は以下のとおりである

(1) カート事故における利用者属性の影響

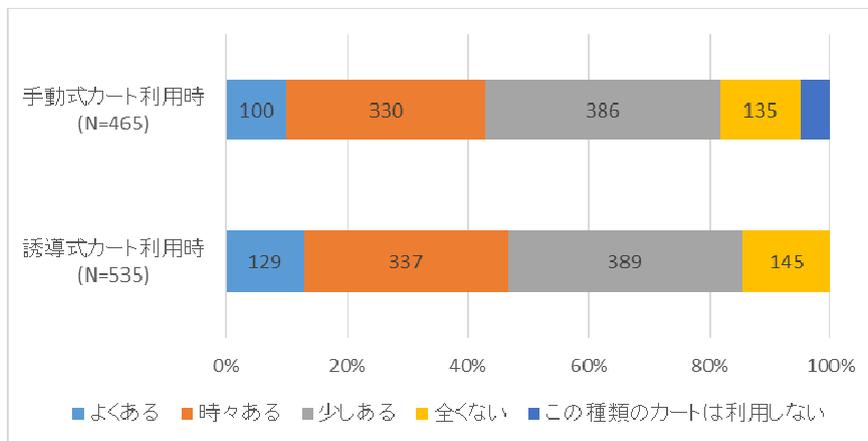
手動式カートにおいて性別の影響が確認された。手動式カートは運転操作が必ず必要なことから、運転操作技術に対する性別の影響について精査が必要である。一方、年代については、本調査では60歳以上のプレイヤーのヒヤリ・ハット経験率が低い傾向が確認された。しかし、あくまでも本人からの自己申告に基づくヒヤリ・ハット経験であるため、本当の事故における年齢の影響については、今後精査が必要である。

(2) カートの種類別の事故要因の特性

誘導式カートではリモコン操作による無人走行時の事故が一定程度含まれる傾向が確認された。また、事故の種類としては、誘導式カートは衝突・追突の占める割合が高く、手動式カートは転落、横転、衝突と様々なタイプの事故がおきやすいことが確認された。

ヒヤリ・ハットの経験頻度からは、手動式カートよりも誘導式カートの頻度が高い傾向にあり、上述の事故種類とあわせて解釈すると、誘導式カートは衝突・追突の比較的軽微な事故が多数おきやすい傾向が想定される。反対に手動式カートは、事故頻度は誘導式に比べて低い、いったん事故が起きると、転落、横転など大事故が起きやすい傾向にあると考えられる。

事故要因の特性としては、手動式カートは環境要因と操作要因、誘導式カート（有人時）は環境要因、誘導式カート（無人）は行動要因の影響を受けやすい傾向が確認された。特徴的なのは、誘導式カート（無人）において、ヒヤリ・ハットした原因としてカート道の歩行など行動要因を強く認識している点である。図表 3-33 に示すとおり、カート道の歩行頻度はカートの種別によって異なるわけではない。これは機器への依存心が反映された結果とも考えられ今後、精査が必要である。



図表 3-33 カート道の歩行頻度 (回答数)

(3)事故要因間の関連性

誘導式カートは単発要因である場合が多く、手動式カートは環境要因と操作要因の複合要因によるヒヤリ・ハットが起きている傾向が確認された。

図表 3-34 カートの種類別代表的なヒヤリ・ハット要因

	誘導式カート (有人時)	誘導式カート (無人時)	手動式カート (有人時)
環境要因	カーブ部 接合（ジョイント）部 下り急こう配部	接合（ジョイント）部 下り急こう配部	カーブ部 下り急こう配 接合（ジョイント）部 相互通行部
操作要因	前方確認の不足	リモコンの誤操作	スピード出しすぎ コース逸脱 急ハンドル 急ブレーキ
その他行動要因	カート道上の歩行 不着席	カート道上の歩行	カート道上の歩行 不着席 飛び降り
事故の種類	衝突・追突	衝突・追突	転落 横転 衝突・追突

D.ゴルフ場アンケート調査

本調査は、ゴルフ場における乗用カート事故の発生頻度ならびに事故対策の方向性を分析すること目的に全国 2,289 箇所のゴルフ場を対象に調査を行った。

(a)調査概要

調査の概要は以下のとおりである。

<調査概要>

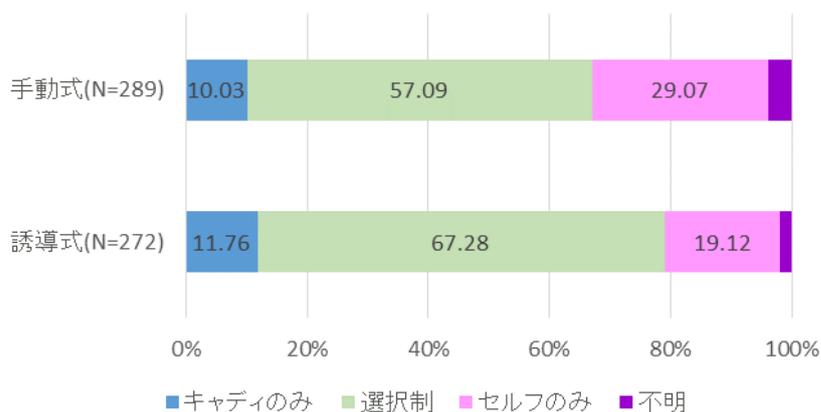
- ・調査期間：2013 年 4 月 3 日

～4 月 20 日

- ・調査対象：全国のゴルフ場 2289 箇所
- ・調査方法：郵送配付、郵送回収
- ・有効回収数：558 票（回収率：24.3%）

<回答属性>

- ・誘導式 272 箇所、手動式 289 箇所
- ・誘導式はキャディ付 11.8%、選択制 67.3%、セルフ式 19.1%
- ・手動式はキャディ付 10.0%、選択制 57.1%、セルフ式 29.1%



図表 3-35 カート種類別ラウンドスタイル割合

(b)事故件数とヒヤリ・ハット件数の推計

(1)推計方法

過去の調査結果から設定した代表的な事故パターン（誘導式カート 13 種類、手動式カート 12 種類）を対象に事故実績とヒヤリ・ハット経験について回答を得た。

事故実績は、過去 5 年間を対象に「1 年に 6 件以上」、「1 年に 3 件程度」、「1 年に 1 件程度」、「5 年に 1、2 件」、「全くない」の 5 段階で回答を得た。

ヒヤリ・ハット経験は、過去 1 年間を対象に、「10 件以上」、「9～6 件程度」、「5～3 件程度」、「1～2 件程度」、「全くない」の 5 段階で回答を得た。

回答の結果を図表 3-36 にもとづき集計し、1 年あたりの事故件数およびヒヤリ・ハット件数の平均値（件/年・箇所）を算出した。

図表 3-36 事故件数換算表

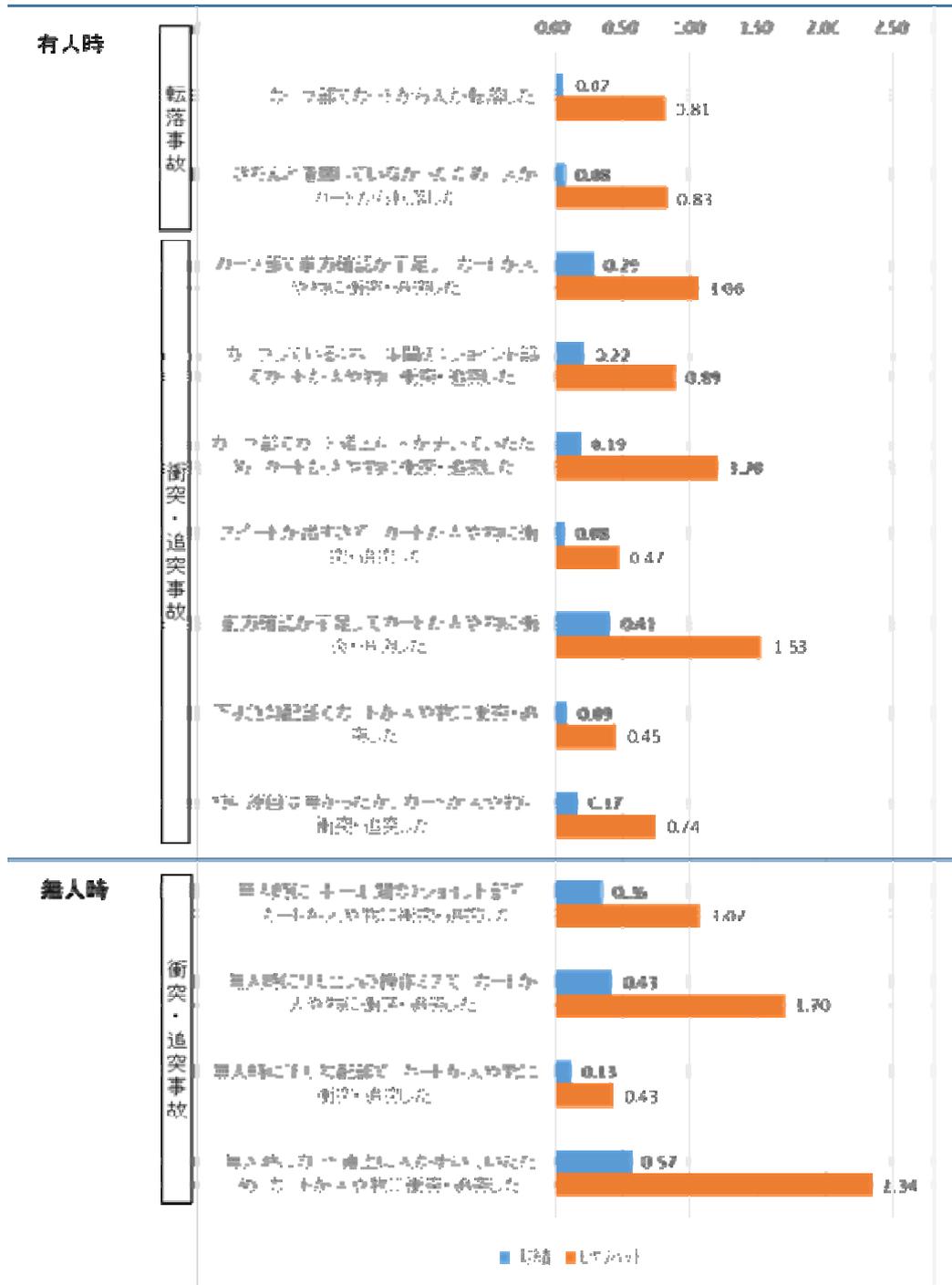
	選択肢	算定件数 (/年)
事故実績 過去 5 年間を対象に	1 年に 6 件以上	6
	1 年に 3 件程度	3
	1 年に 1 件程度	1
	5 年に 1、2 件	0.2
	全くない	0
ヒヤリ・ハット 過去 1 年間を対象に	10 件以上	10
	9～6 件程度	7.5
	5～3 件程度	4
	1～2 件程度	1.5
	全くない	0

(2)誘導式カート

代表的な事故（13種）による事故件数の合計は約3件/年である。

衝突・追突事故の件数が多い傾向にあり、特に「前方確認の不足」、「リモコンの操作ミス」、「カートの歩行」に関する事故件数が多い傾向にある。

ラウンドスタイル別には、キャディ同行よりも選択制、セルフの事故件数が多い傾向にある。

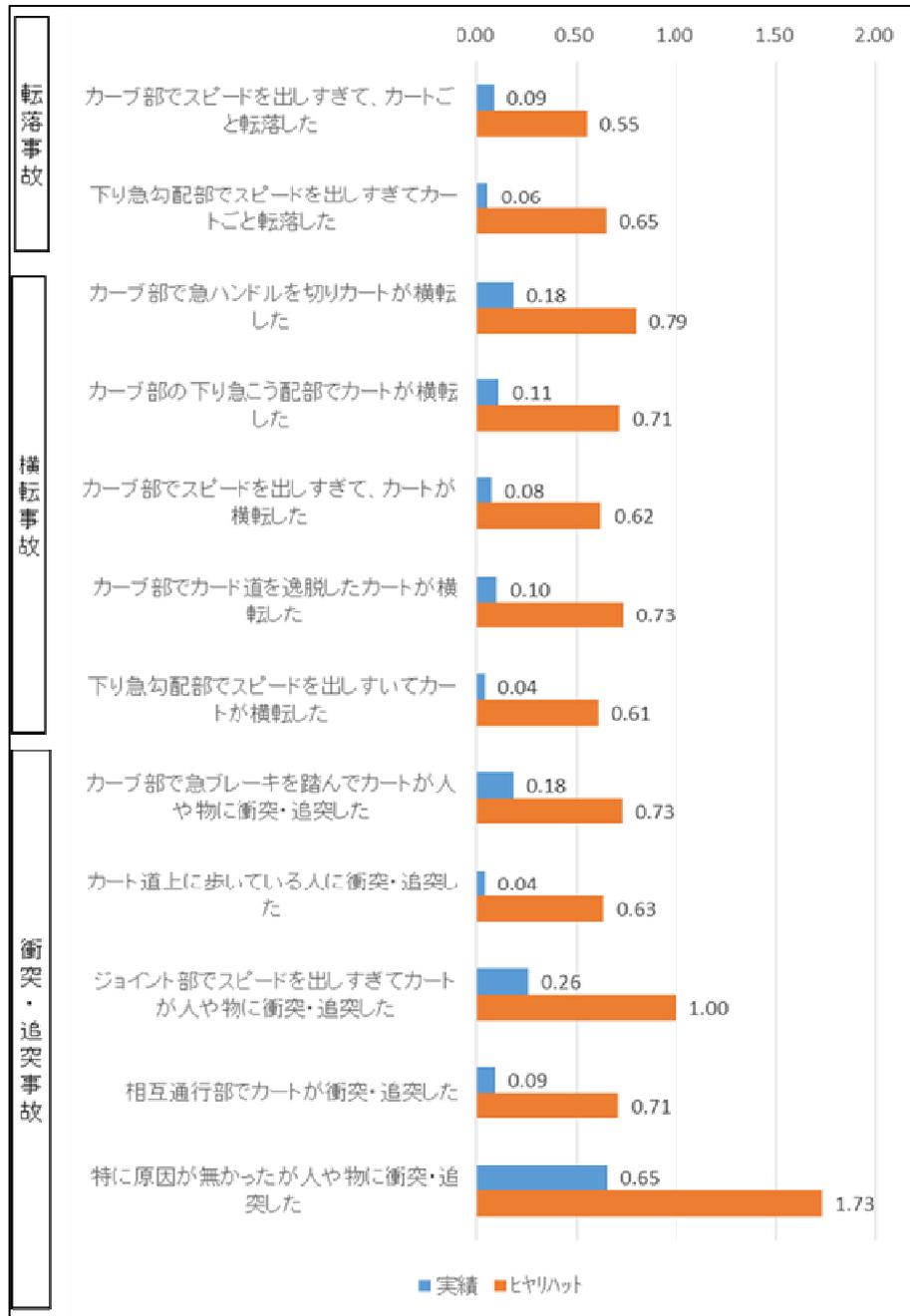


図表 3-37 誘導式カート__事故パターン別事故実績、ヒヤリ・ハット件数推計値（件/年・箇所）

(3)手動式カート

代表的な事故パターン（12種）による事故件数の合計は約1.7件/年である。

事故パターンによる件数の差は少なく、やや衝突・追突事故の件数が多い傾向にある。ラウンドスタイル別には、キャディ同行よりも選択制、セルフの事故件数が多い傾向にある。

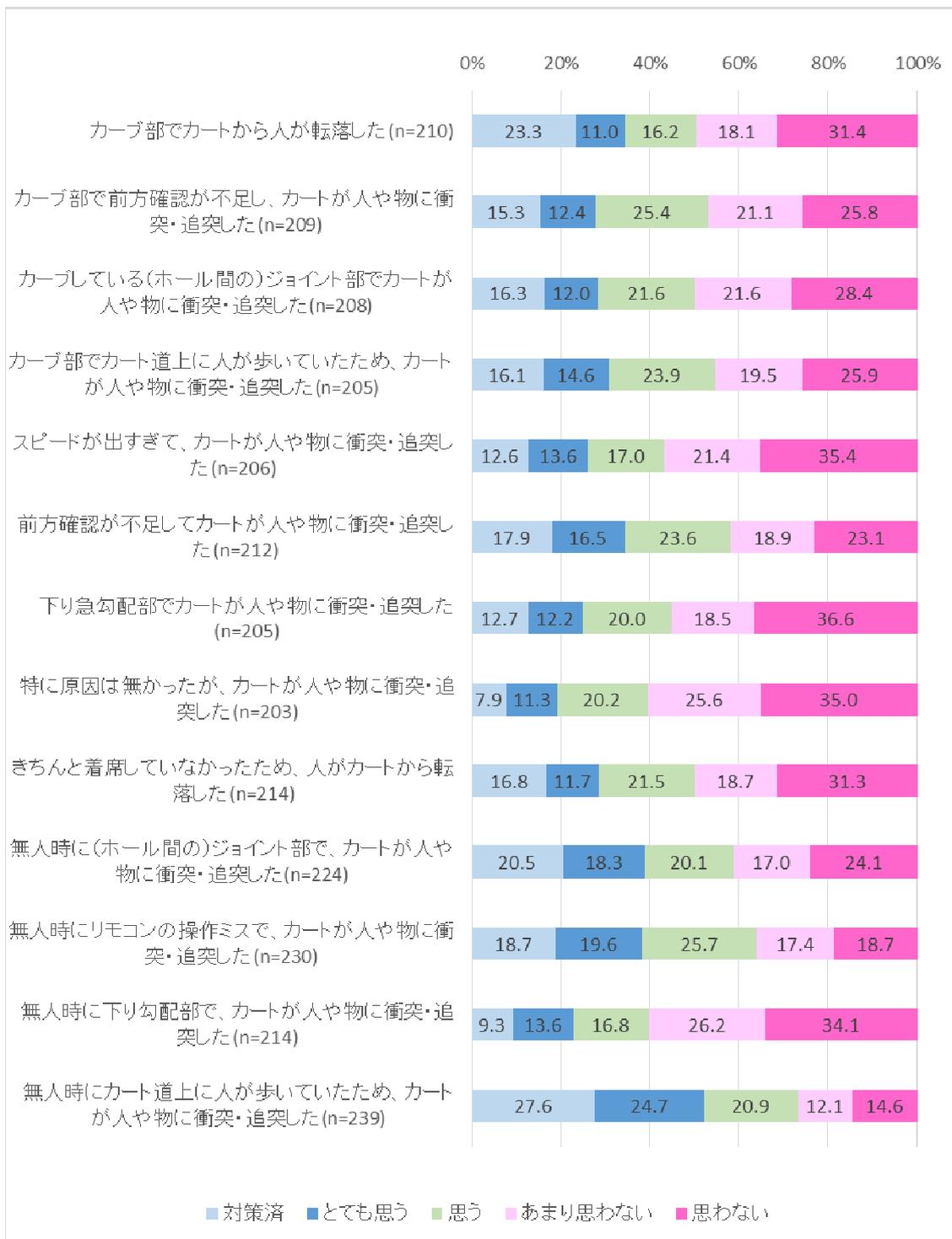


図表 3-38 手動式カート__事故パターン別事故実績、ヒヤリ・ハット件数推計値（件/年・箇所）

(c)改善意向と対策事例

(1)誘導式カートの改善意向

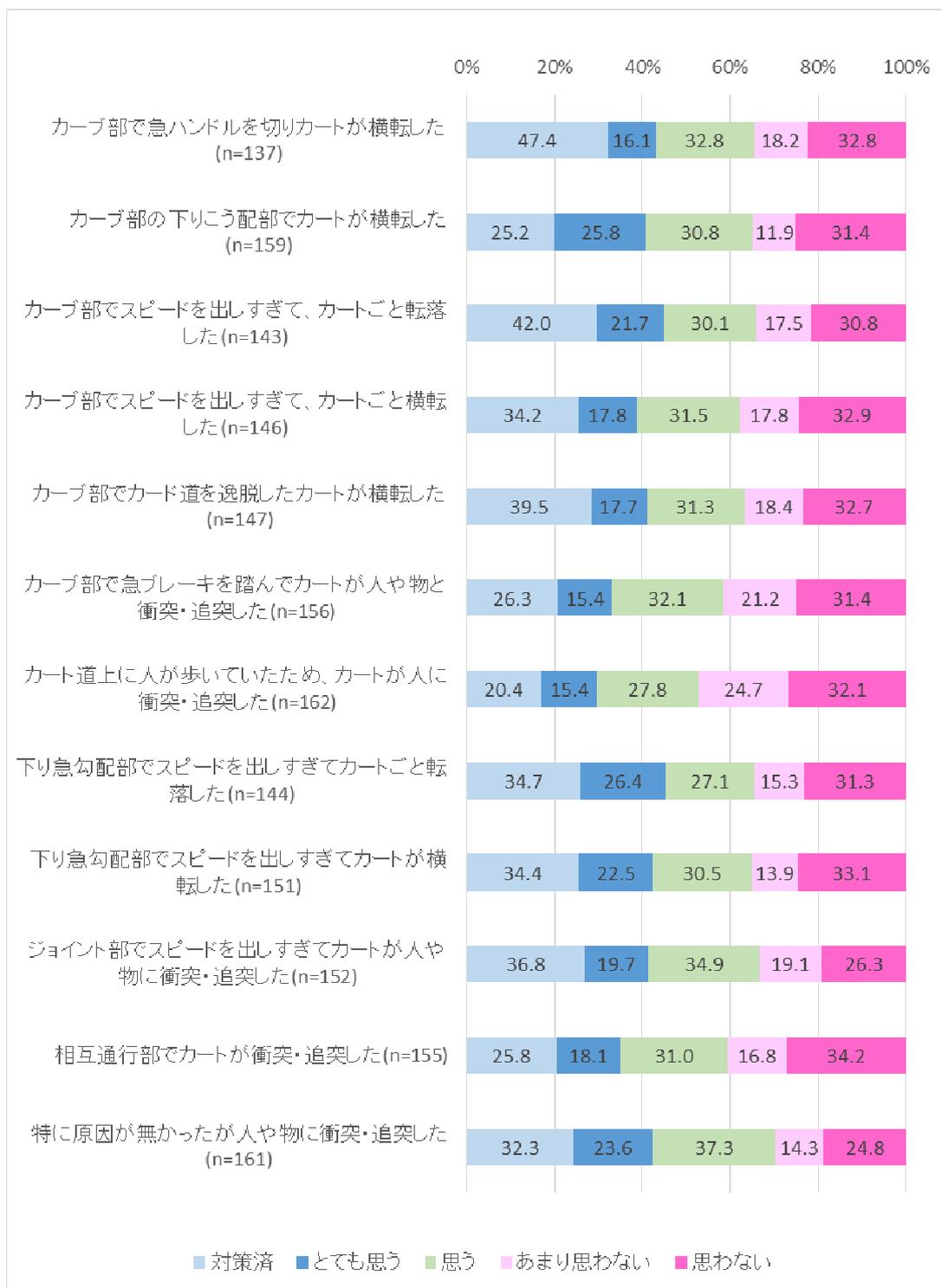
下り急こう配部での事故など抜本的な改善が難しい事故パターンや、事故原因が不明確な事故パターンに対して、改善意向が低い傾向にある。



図表 3-39 事故パターン別改善意向 (誘導式カート)

(2)手動式カートの改善意向

横転や転落事故に対する対策の実施率が高い傾向にあり、衝突・追突に関する事故は改善意向が低い傾向にある。



図表 3-40 事故パターン別改善意向（手動式カート）

(3)対策事例

対策としては「カート道の改修」、「カートの改修」、「カートの操作制限」、「注意喚起設備」、「意識啓発」に大別される。誘導式カートでは、カートの操作制限による対策が多いことが特徴となっている。一方、手動式カートでは、横転や転落に対して様々なカート道の改修が行われているが、カートの操作制限は難しく速度抑制のみである。

	誘導式カート	手動式カート
カート道の改修	<ul style="list-style-type: none"> ・線形の改良 ・こう配の改良 ・障害物（樹木など）の撤去による見通しの確保 ・カートとすれ違える退避場所の確保 ・カート道の明示化（白線など） ・ミラーの設置 ・滑り防止（シートマットの装着、滑り防止ブロックの設置） ・補修の徹底（カート動線のズレ、カート道の劣化による振動が大きいため） 	<ul style="list-style-type: none"> ・カート道の改修（拡幅、線形改良など） ・カート道の路面の凹凸化、ハンプの設置など（速度抑制、滑り抵抗） ・ガードレール、ガードパイプの設置 ・クッションドラム、杭、枕木などの設置 ・カート道の明示化（白線など） ・転落予測箇所防止壁を設置 ・カート道の動線の変更 ・衝突した樹木の伐採 ・危険箇所のペイント
カートの改修	<ul style="list-style-type: none"> ・タイヤに鈴の設置（接近警告用） ・タイヤ、ブレーキパッドの交換の徹底、ブレーキ圧の設定 ・バンパー点検 ・バッテリーの交換や充電（センサー機能低下の防止） 	<ul style="list-style-type: none"> ・自動ブレーキ付カートへの変更 ・エンジンブレーキの改良
カートの操作制限	<ul style="list-style-type: none"> ・プレイヤによる運転禁止 ・手動走行の禁止 ・強制停止箇所の設置 ・乗車禁止区間の設定（急こう配部） ・カートへの自動追従停止区間の設置 ・自動一時停止点、減速点の設置、追加、変更 ・速度抑制（低速度設定） 	<ul style="list-style-type: none"> ・最高速度の抑制（15km/h）
注意喚起設備	<ul style="list-style-type: none"> ・警告音の設置 ・警告看板の設置 ・警告ランプの設置 ・カート内の張り紙添付（人物への停止機能がないこと、カート道歩行禁止など） 	<ul style="list-style-type: none"> ・看板の設置（危険箇所・事故現場の明示、徐行等の啓発） ・危険箇所へのポールの設置
意識啓発	<ul style="list-style-type: none"> ・口頭による指導（スタート時、危険箇所通過時） ・マニュアルの作成、配備 	<ul style="list-style-type: none"> ・口頭による指導（スタート時、危険箇所通過時等） ・啓発チラシ、ポスターの貼付 ・無線、ナビゲーションシステム(GPS など)による音声啓発 ・カート利用約款の配布
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・ティーグラウンド改善による動線の変更 	<ul style="list-style-type: none"> ・誘導式カートへの変更 ・他コースの事故事例の共有（スタッフ間で） ・無事故継続日数の目標を設定

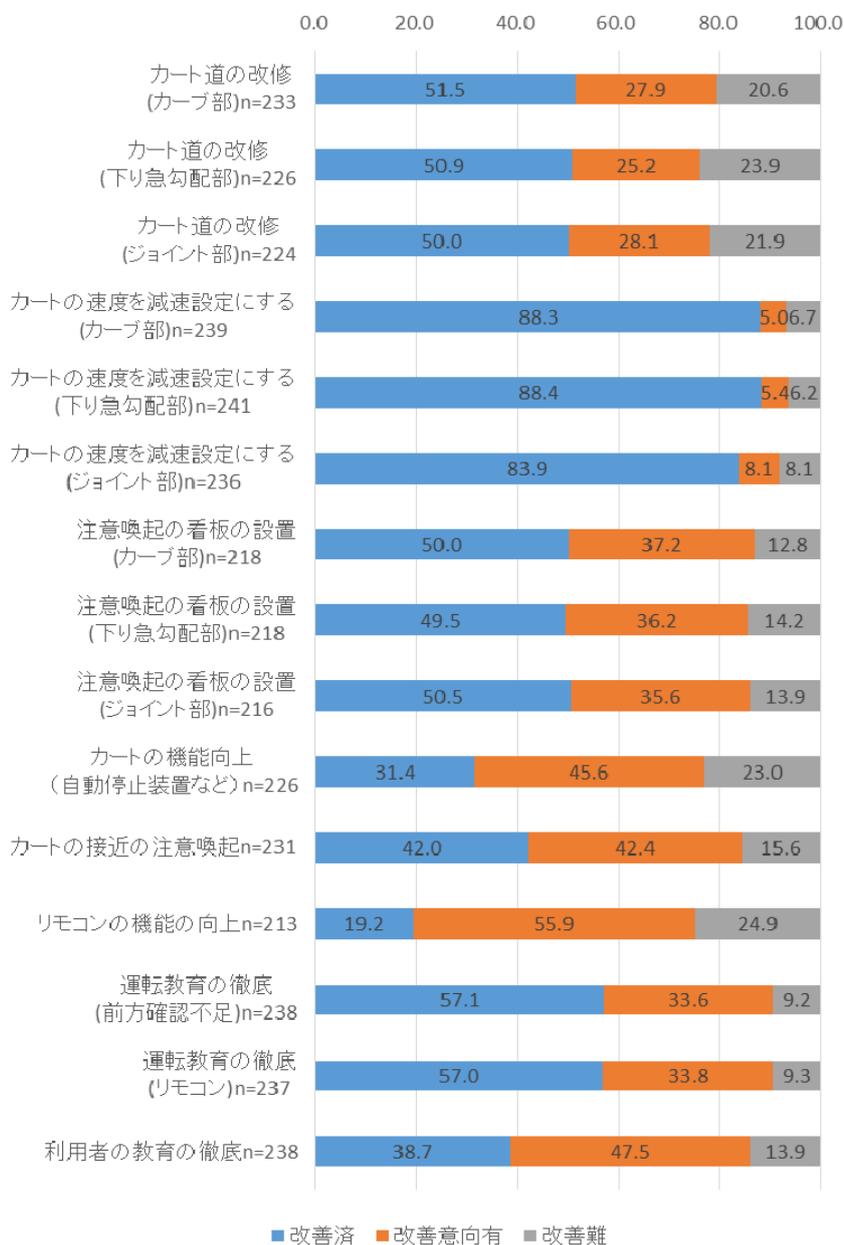
図表 3-41 対策事例

(d)対策への取り組み意向

(1)誘導式カート

カートの減速設定は約9割のゴルフ場で取り組まれている。カート道の改修は約5割で取り組まれているが、一方で約2割が取り組み困難と回答している。

カート機能の向上、リモコン機能の向上については改善率が低く、改善意向が高い。

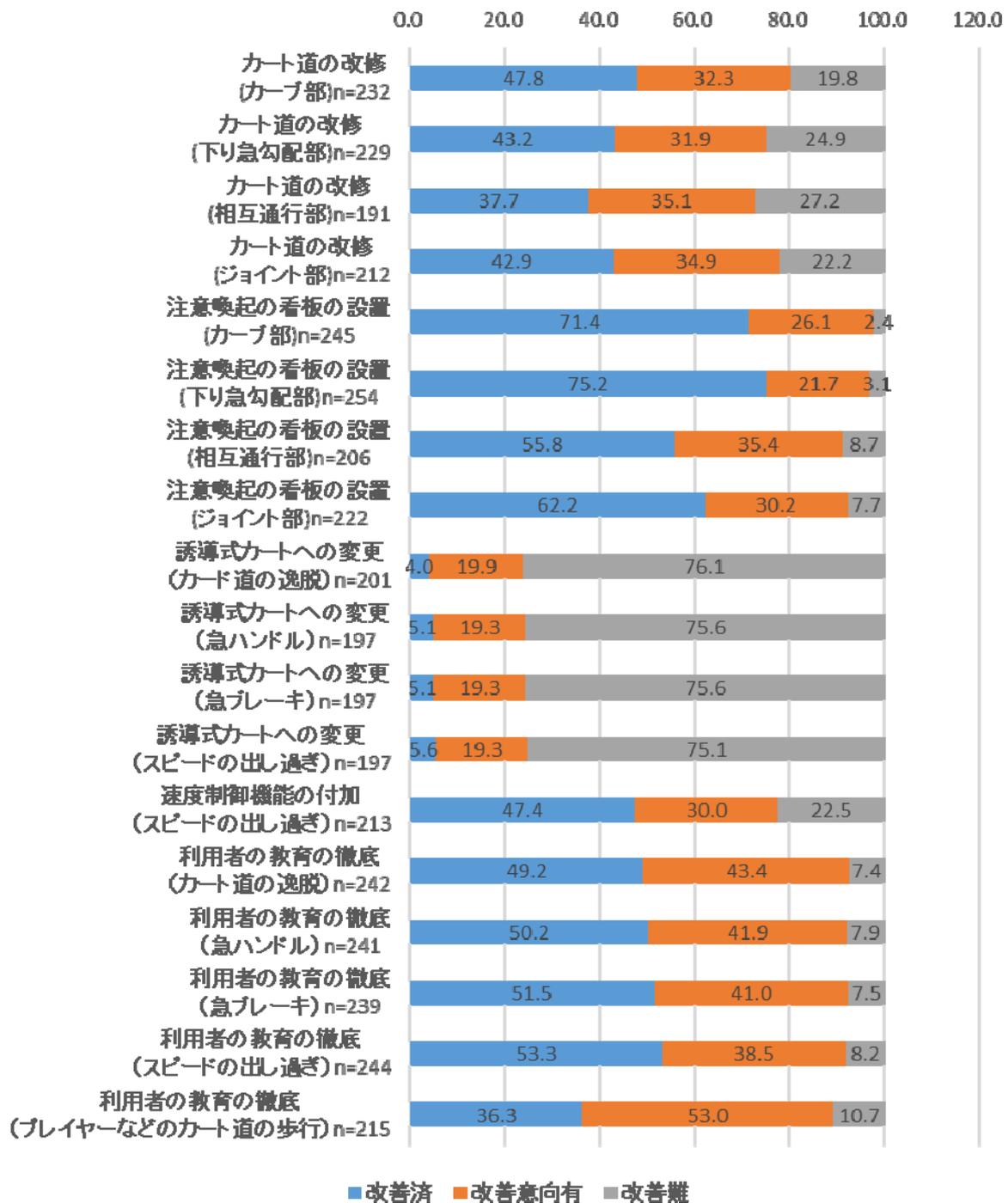


図表 3-42 誘導式カート__対策別改善意向割合 (%)

(2)手動式カート

カート道の改修は約5割で取り組まれているが、一方で約3割が取り組み困難と回答している。

看板の設置は約6、7割で取り組まれており、取り組み意向も高い。また、利用者教育も取り組み意向は高い。誘導式カートへの変更については、約2割のゴルフ場で取り組み意向が確認された。



図表 3-43 手動式カート_対策別改善意向割合 (%)

(e)小括

(1)事故発生件数（推計値）

誘導式カートが約 3 件/年、手動式カートが約 1.7 件/年となり、誘導式カートのほうが多いことが確認された。

(2)事故パターン

誘導式カートは衝突・追突事故が多く、手動式カートは事故パターンによる傾向は確認できない。セルフ時（選択制も含む）の事故が多く、対策が必要となっている。

(3)事故対策

誘導式カートではカートの操作制御、手動式カートではカート道の改修に取り組む傾向にある。環境要因は可能な限り改善させているものの、地形条件等により改善が非常に困難なケースがある。カート機能の向上、リモコン機能の向上（誘導式のみ）は、機器の開発も必要なことから改善意向があっても取り組み率は低い状況である。少数ではあるが、手動式カートから誘導式カートへ変更を行っている、または希望しているゴルフ場が存在する。

E.事件事例調査のまとめ

「ゴルフ場ヒアリング調査」、「利用者WEB調査」、「ゴルフ場アンケート調査」を通じて検証されたゴルフ場における乗用カート事故の特性は以下のとおり整理される。

図表 3-44 カートの種類別事故特性

	誘導式カート	手動式カート
事故件数	多い（推計値：3 件/年・箇所）	少ない（推計値：1.7 件/年・箇所）
事故のタイプ	衝突・追突事故が多い 軽度な事故が多い 無人操作時の事故が一定数（約 1/4）含まれる	転落、横転、衝突・追突と多様である 大事故につながりやすい
事故対策の傾向	操作制御	カート道の改修 （しかし、一定の限界がある）
今後の課題	カート、リモコン機能の向上（開発）が必要	セルフ化への対応

第 4 章 誘導式ゴルフカートの安全運用技術開発（Z）の成果

1 安全運用技術

1.1 概要と達成状況

誘導式ゴルフカートのリスクアセスメントと事件事例調査より技術的な安全対策を実施した。これ以降の残留リスク対策として残留リスクマップとリスク一覧表を作成した。また、誘導式ゴルフカートの使用者であるゴルフ場での運用マニュアルを、ゴルフ場へのヒアリング、アンケートの結果を踏まえ策定した。

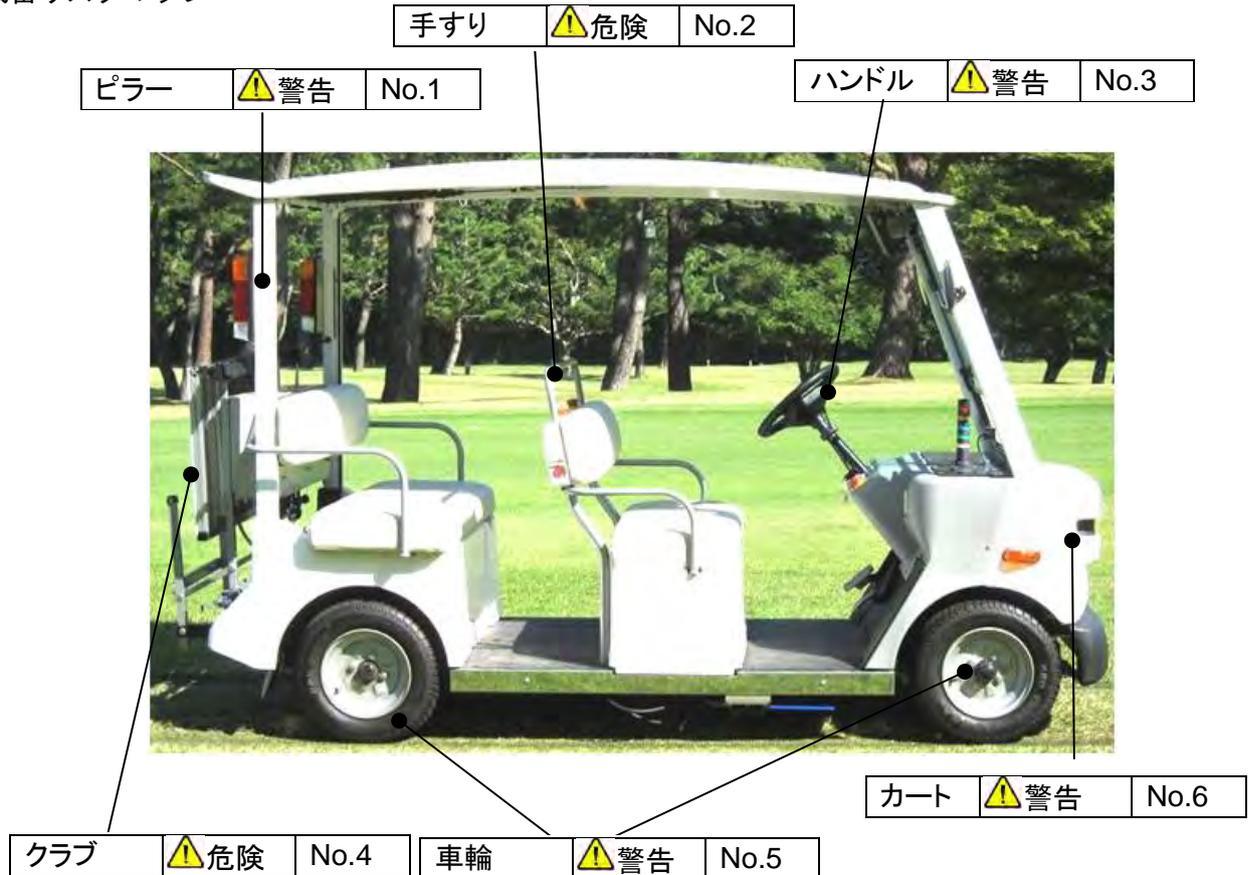
1.2 残留リスク対策

プレイヤー、キャディなど誘導式ゴルフカートを利用する者による保護策が必要な残留リスクマップを以下に示す。ゴルフ場が事前に教育・説明することによって当事者へ実践させなければならない。

「リスクの程度」は、以下の定義に従って分類し記載している。

- ・ 危険：保護策を実施しなかった場合に、人が死亡または重傷を負う可能性が高い内容
- ・ 警告：保護策を実施しなかった場合に、人が死亡または重傷を負う可能性がある内容
- ・ 注意：保護策を実施しなかった場合に、人が軽傷を負う可能性がある内容

・ 残留リスクマップ



・ 残留リスク一覧

No.	運用段階	実施者	危害の内容	実施する保護方策
1	走行中	搭乗者	急停止の反動で頭部打撲	運転席では手すりかハンドルを握る
2	走行中	搭乗者	急停止で胸部打撲	後部座席では手すりを握る
3	走行中	搭乗者	〃	運転席では手すりかハンドルを握る
4	走行中	歩行者	クラブ収納時急停止で顔打撲	走行中クラブの後部バッグへの収納禁止
5	走行中	共通	タイヤでの巻き込み骨折	タイヤへ触れないこと
6	走行中	歩行者	急な飛び出しで衝突	誘導路へは入らないこと

1.3 安全運用マニュアル

(1) 乗用カート事故のパターン

①乗用カートの事故パターン

全国の半年に1回以上ゴルフをする人を対象に行ったプレイヤーのヒヤリハットに関するWeb調査を行った。その結果、代表的な事故パターンとして、誘導式カート13種類、手動式カート12種類を設定した。

②乗用カートの事故の発生頻度

全国のゴルフ場を対象とした乗用カート事故に関する調査により誘導式カート、手動式カートの事故発生件数ならびに事故対策の特性を把握した。事故発生件数（推計値）は、誘導式カートが約3件/年、手動式カートが約1.7件/年となり、誘導式カートのほうが多いことが確認された。

事故パターンとしては、誘導式カートは衝突・追突事故が多く、手動式カートは事故パターンによる傾向は確認できない。誘導式カート、手動式カートともにセルフ時（選択制も含む）の事故が多く、対策が必要となっている。事故対策は、誘導式カートではカートの操作制御によるものが多く、手動式カートでは転落や横転など大事故につながる要因への対策としてカート道の改修に取り組んでいる傾向が確認できた。しかし、環境要因は可能な限り改善させているものの、地形条件等により改善が非常に困難なケースがあると考えられる。カート機能の向上、リモコン機能の向上（誘導式のみ）は、機器の開発も必要なことから改善意向があっても取り組み率は低い傾向にある。

③ まとめ

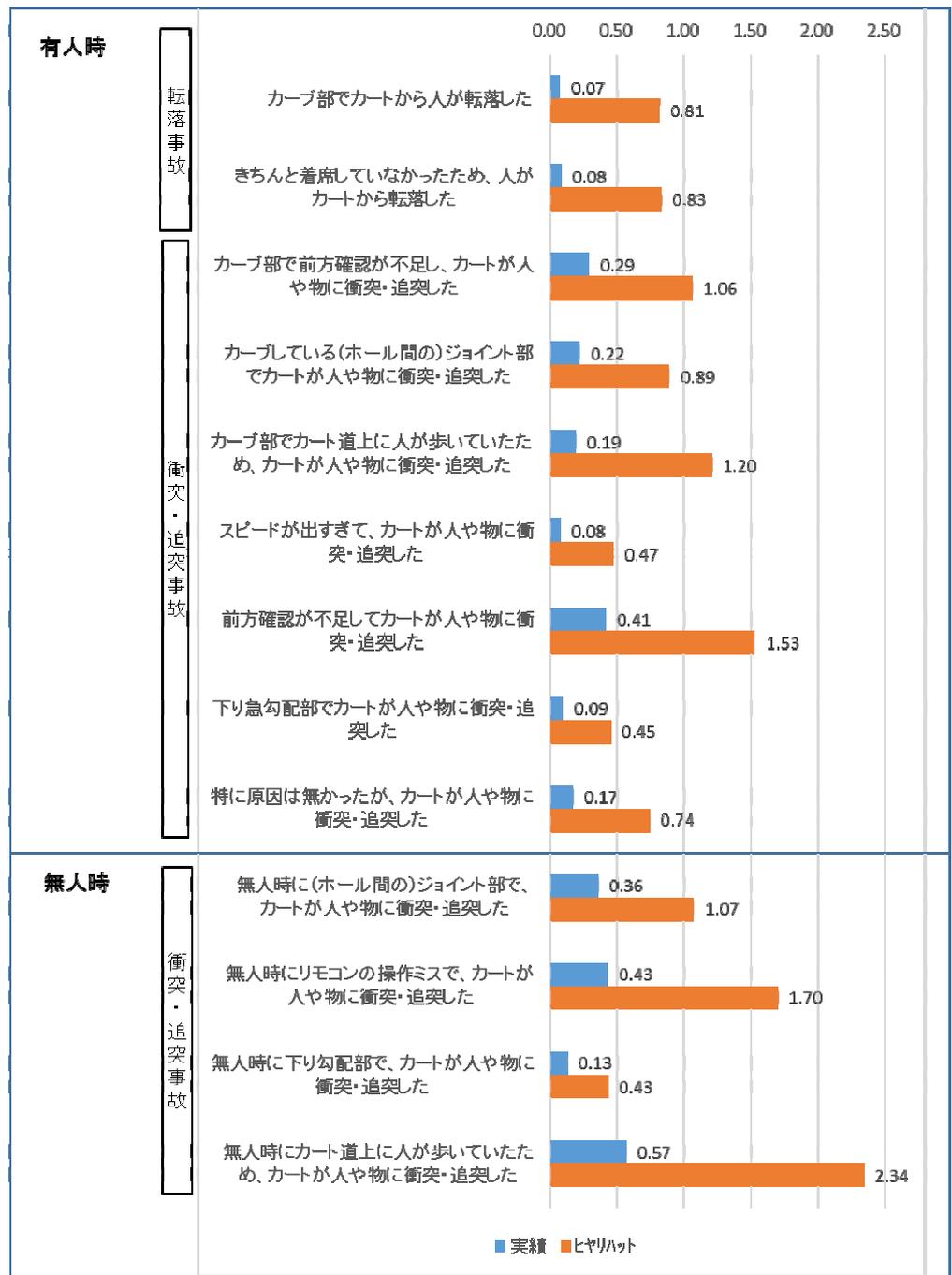
誘導式カートに限定すると、ゴルファー調査をもとに作成した事故パターンとゴルフ場調査で把握したその発生頻度を集計すると、図表4-1のようになる。

(2)安全制御システム導入による事故リスク低減効果

この誘導式ゴルフカートで設定した代表的な事故パターンについて、障害物センサと非常停止機能付きリモコンを含む安全制御システムが誘導式ゴルフカートに導入され、有効に働いた場合、有人時、無人時に生じる衝突・追突事故のほとんどの事故パターンの発生が解決されると期待される。一方、本システムを導入しても転落事故に関する事故パターンについては、解決できないと予測される。なお、本システムにより制動が行われることにより搭乗者が受傷するリスクが発生するが、制動による姿勢の乱れに問題が無く、搭乗者がカート車内の座席に正着しておれば、問題が無い。

このシステムを導入したとしても解決されない事故パターンについては、これまで対策が行われており、「カーブ部でカートから人が転落した」については、23.3%のゴルフ場で対策済みであるものの、11.0%のゴルフ場が「対策を行いたい」ととても思う」16.2%が「対策を行いたいと思う」と回答している。対策は比較的とられるようになってきているものの、不十分な状況が予測される。同様に「カーブ部で前方確認が不足し、カートが人や物に衝突・追突した」については、15.3%のゴルフ場で対策済みと回答している一方、12.4%のゴルフ場が「対策を行いたい」ととても思う」25.4%が「対策を行いたいと思う」と回答している。意識啓発程度しか有効に働かないと考えられ、下記がこれまで行われている対策であるが、これを継続的に行っていくことが望ましいと考えられる。

- ・口頭による指導（スタート時、危険箇所通過時等）
 - ・啓発チラシ、ポスターの貼付
 - ・無線、ナビゲーションシステム(GPS など)による音声啓発
- また、次章で述べる状況については、事故、ヒヤリハットの発生の低減が不十分であると考えられるので、注意を要する。



図表 4-1 誘導式ゴルフカートの事故パターン別発生頻度 III-5-4-64

(3) 安全制御システム導入時に注意を要する項目

安全制御システムを導入することにより、衝突・衝突事故の発生が抑えられると期待されるが、下記に示す項目が、影響を及ぼし、安全制御システムの効果が低減されると推測される。

1)上り坂終端部

- 上り坂の終端においては、高さの低い障害物を検知できない可能性が高まる。
- 対策：速度を落とし、衝突の可能性を減らす。そのため、坂道の登り切った部分に停止点を設置するか、減速のマグネット設置を行う。

(状況に由来するもの)

2)雨天時

- タイヤスリップによる停止距離の増加。その結果として止まりきらず、衝突が生じる可能性がある。
- 対策：雨天時は制動距離が伸びるため、走行速度を下げる。カート内ディップスイッチを変更し、最高速度設定を下げる。

(エリア設定・機器の特性に由来するもの)

3)右左折時の巻き込み

- 後方から近づく車両
- 車両と併走するプレイヤー
- 対策：巻き込み対策は、本システムでな実現できない旨、利用時に伝える。

4)急角度での右左折時

- 急角度で曲がる外側の障害物を認知しないように、エリア設定を短く限定しているため、停止までに必要な制動時間、空走時間を満たす時間を稼ぐことができない。
- 対策：急角度手前での低速指令マグネットを入れる。

(周辺環境によるもの)

5)急な飛び出し

- 安全制御システムが側方から時速約 6km/h（歩行速度程度）で接近することを想定し、これを避けるためのエリア設定が行われている。そのため、6km/h を超える速度で進入する人、物については、センサで感知したとしても、ゴルフカートが静止するまでの空走距離が生じる結果、追突、衝突が生じると考えられる。
- また、急な飛び出しについては、立木の間から現れる人物も同様に検知はできるものの、制止までの間接触が生じる恐れがある。
- 対策：急な飛び出しが生じないよう広報啓発活動具体的には、看板の掲出などを行う必要がある。

(システムの不正な使用によるもの)

6)正しく着席しない場合

- 本システムが導入され、制動が行われたとしても、正しく座席に着席して居れば、姿勢の乱れ起こらないことが確認されている。しかし、座席にちゃんと座らなかったり、前方を向いていなかった場合、車両から転落、受傷する可能性がある。
- 対策：カートに乗車する姿勢について、スタート時に口頭による注意を与える。

7)本システムを起動しなかった場合

- 本システムは、誘導走行（キーの表示は自動運転）時に起動する。そのため、手動運転時には安全確保が期待できない
- 対策：ゴルフカートの引き渡しを行う際に、キー位置が自動運転の位置にあることを確認し、誘導走行状態にあることを確認し、プレイヤーにカートを引き渡す。

(4) 安全にゴルフカートを運用するための注意事項

2章、3章で述べた残存するリスクを避け、ゴルフカートを安全に運用するため、本章では、ゴルフカートを使用した営業の各場面における注意点を記す。

(共通)

① カート引き渡しの方法

- キー位置が自動運転の位置にあることを確認し、誘導走行状態にあることを確認し、プレイヤにカートを引き渡す。誘導走行での運用を基本とする。また、プレイヤが勝手に誘導走行を止めないようにキーを引き渡さない。

② カート引き渡し時の注意事項

カート引き渡し時の口頭による注意として次の事項をプレイヤに伝える。

(システムの機能の限界について)

- カートには、衝突を防止するため、自動で制動するシステムが装備されているが、安全性を向上するシステムであり、自動運転を実現するシステムではない。
- カートは障害物を検知する機能がついているが、センサの設置位置の関係で、高さの低いものを検知できないことがある。たとえば、カート道上に置かれたゴルフクラブなどはセンサで検知できない可能性がある。この点に留意し、前方を注視し、搭乗者が障害物がないかを見極めることが求められる。

(転落事故の対策)

- カートに乗車する際は、座席に座ること。あぐらなどの不安定な座り方をしないこと

(制動の追加によるリスクの上昇に対する対策)

- 障害物を検知して、急に制動するため、乗車中にはできる限り手すりを持つまたは手すりを持てるよう準備をすること。深く座席に腰掛け、安定した体位をとれる座り方をすること。スコアをつける際などは、特に注意をして深く座席に腰を掛けること。

(安全制御システムの効果が低減される状況に対する対策)

- カートは障害物を検知し、制動を行うが、カート道に突然飛び出すことには対応できないため、カート道に飛び出さないこと。特にカート道の曲率が大きい区間は、検知範囲を限定しているため、カート道の曲率が大きい区間では、カート周辺に近寄らないこと。
- カート後方から近づいた場合、車両に巻き込まれる事故が起こる可能性があるため、走行中のカートを追いつくことをしないこと。
- 雨天時、制動距離が伸び、衝突が生じる可能性があるため、雨天時はカート道に入り込まないこと。

(キャディ同行で運営されるケース)

キャディ同行により運営されるコースの場合、システムによりカートが停止した場合、キャディにより安全確認を行うため、スタート時に口頭による注意として次の事項をプレイヤに伝える。

- カートが障害物を検知し、停止した場合、キャディが安全を確認し、再始動する。そのため、プレイヤが勝手に手動モードに変更しないこと。

(セルフで運営されるケース)

セルフにより運営されるコースの場合、システムによりカートが停止した場合、プレイヤにより安全確認を行う。そこで、スタート時に口頭による注意として次の事項をプレイヤに伝える。

- カートが障害物を検知し、停止した場合、安全を確認すること。
 - ◇ 障害物となっていた歩行者や他の車両などの障害物が明確であり、カートの進行方向からいなくなった場合
 - (ア) システムが障害物を検知していないことを確認し、発車ボタンを押し、カートを再始動すること
 - ◇ 障害物となっていたものが不明確である場合
 - ・ 障害物となっていたものが明確であるが、カートの進行方向から動かない場合。(具体的には、カート道周辺にある樹木が伸び、カート道にかかっている場合などが考えられる) カートの運転を停止し、運営者に連絡を行い、運営者による対応を待つこと。
 - ◇ 障害物となっていたものが不明確である場合
 - ・ 車両の停止を確認し、カートから降り、カート前方、カート底部などに障害物がないかを確認する。この際、カートの進行方向に立ち入らずに確認するよう留意すること。確認後、発車ボタンを押し、再始動を試みる。再始動しない場合は、カートの運転を停止し、運営者に連絡を行い、運営者による対応を待つこと。

1.4 検知エリアの研究

A. はじめに

ゴルフカートの安全化において、検知エリアが広すぎると、頻繁に停止することが予想され利便性を損ないかねない。反対に検知エリアが狭すぎると、ゴルフカートの接近に気付いていない歩行者を追い抜いた際に、歩行者が危険感や恐怖心により驚いて転倒するなどの危険性がある。ゴルフカートが歩行者を追い抜く際に歩行者を驚かすことのない距離は安全対策において重要な要素であると考え、恐怖心を与えずに追い抜くことができる距離を検証する。

この恐怖心を与えず追い抜くことができる距離を元に検知エリアについて提案する。

B. ゴルフカートが歩行者を追い抜く際に歩行者を驚かすことのない距離の検証

(a) ストレス評価について

齋藤らエラー! 参照元が見つかりません。や山田らエラー! 参照元が見つかりません。自動車と歩行者のすれ違いによる危険感をストレス値を測ることで明らかにしている。そこで、本研究においてもゴルフカートが人に与える危険感や恐怖心はストレスとして距離と速度により増減するという仮説を立て、ストレスを評価する指標として、心拍計測による心拍変動の分析を用いる。心拍変動の分析により短時間におけるストレスを算出することができる。計測が容易であることに加えて妥当性が高く、心拍計測から心拍変動を評価することによりストレス計測・評価を行っている既往研究が多く、確立された手法である。心拍変動の分析によりLF/HFを算出する。このLF/HFの大きさがストレスの大きさを表す。LF/HFの値は個人差が大きいため、数値の絶対値ではなく、数値の変化率を求めることでデータの比較・分析を行う。変化率を扱うことで平常時のLF/HFが高い人と低い人との間の個人差を無視できる。また心拍測定は生理指標であるため様々な原因で外れ値が含まれやすいため外れ値の除外を行う。

(b) 実験

齋藤らエラー! 参照元が見つかりません。によると自動車と歩行者のすれ違いにおいては歩行者の前方から自動車がすれ違うときよりも歩行者の後方から自動車が追い抜くときの方がストレスは大きい。この研究を参考に本研究でもストレスを感じる状況として後方からの追い抜きを検証した。またゴルフカートは電気で動く電動カートが増加しており、今回安全対策の対象であるバッテリー式のゴルフカートはこれらは走行音が非常に小さいため後方から近づく際に人は気が付きにくいいため、ストレスに影響すると考える。以上より本研究では後方からの追い抜き時の人の心拍変動からストレスを検証することで人とカートがどこまで近づくことができるのか実験を行った。

実験は2012年11月15日から22日までの平日6日間に午前と午後に分けて行った。いずれの日も天候は晴れもしくは曇りであった。本研究では実験条件の設定を行うために事前実験を行った。その結果、ゴルフカートが追い抜いているときの人の距離を20、40、60、80cmに設定して測定することにした。これ以上細かく設定すると試行回数が多くなり被験者に疲労によるストレスを与えてしまう可能性があり、これ以上遠い距離では80cmを超えたあたりからは変化が期待できないことが事前実験よりうかがえた。またカートの速度を6.5km/hにして同様に行ったところ60cmより離れてしまうと12km/hにおける80cmの試行と平常時のデータとほぼ同等であり変化が見られないようなので、6.5km/hの場合は20、40、60cmのみで行うことにし、6.5km/h、80cmで行った場合は12km/h、80cmで行った場合の結果と変わらないと仮定した。よってこれらの距離と速度の組み合わせは7通りあり、さらにそれぞれの組み合わせで被験者一人につき4試行ずつ行うことで一人当たり計28個のデータを収集した。どの距離設定、速度の組み合わせから行うかは被験者ごとに変え、ランダムにすることで試行順序による差は無視することができる。被験者は男女差による結果の違いはなく心拍が安定していると思われる20歳代エラー! 参照元が見つかりません。の大阪大学の学生17名とし、心拍計測にはCheck My Heart、ゴルフカートは電磁誘導型ゴルフカートを用いた。使用した電磁誘導型ゴルフカートの特性を表4-2にまとめた。電磁誘導型ゴルフカートは地面に埋め込まれた誘導線の上を自動で走行させることができる。何度でも同じ走行位置を走行できるため、この実験のような20cm毎という細かい距離設定もほぼ誤差を生じさせないようにすることが可能である。さらに一定の速度で走行するように制御することで、毎回同じ速度で走行できる。また心拍測定には心拍を正常に測ることを妨げるノイズと呼ばれるものが重要である。今回使用した心拍測定機器は非常にノイズに弱く、心拍測定を行う際にはさまざまな要因からノイズを受けてしまうが、大きく分けて2種類のノイズが生じる。ひとつは、計測機器が心拍を電気信号で測る際に体を動かすなどしてその電気信号にノイズを発生させてしまうものである。もう一つが、計測を行う際に対象とするストレス刺激以外の要素からストレスを受け、対象とするストレス刺激から受けたストレス以上のストレスを計測してしまうという意味でのノイズである。実験を行う際にこれらを取り除く、軽減させる、防止するような対策をしなければならない。そこで、体を動かすことを極力防止するために、被験者には椅子に座ってリラックスさせ、対象としないストレスの影響を受けないような環境下で実験を行った。実験場は大阪大学のキャンパス内の中でも主要な道とされていない、歩行者が極めて少ない遊歩道とし、歩行者や自動車がほぼ通らないため対象としないストレスを抑止できた。

図表4-2 ゴルフカートの概要

形式	ECO5-Z (HIC-870)
製造	新神戸電機
最高速度	オート時：6.5km/hまたは8.5km/h（定速） 10km/h、12km/hにも設定可能 マニュアル時：19km/h
質量	約395kg
外形寸法	全長：3,470mm（バックスタンド折りたたみ時2,970mm） 全幅：1,260mm 全高：1,830mm

出典) 日立エラー! 参照元が見つかりません。カタログから抜粋

(c)分析

LF/HF を利用している既往研究の多くはストレス測定中ずっとストレスを与え続けるというものであり、例えば向江らエラー! 参照元が見つかりません。は2分間の心拍データを利用して分析を行っている。後藤らエラー! 参照元が見つかりません。は、心拍変動の時系列データを周波数解析することによって神経性循環調節機能の推定を行う中で、Short Term 解析と題して短時間の時系列データによるスペ

クトル解析を行っている。それによると FFT 法によるスペクトル解析では、時間幅として時系列データの 16 点、32 点、64 点を利用して解析実験を行い、64 点であれば安定した解析ができるとしている。本研究の場合はストレス刺激が起こる時間は一瞬であり、その影響を測るためにも強くストレスの影響が残っている時間幅で分析する必要があると考え、また、数分間の繰り返しを行った場合長時間の計測になってしまい、計測のために長時間不動の状態を保ち続けることでストレスが大きくかかる可能性があるため、本研究では追い抜きの瞬間を中心とした 64 拍分の FFT 法によるスペクトル解析を行う。

本研究の実験では 7 種類の試行を 4 回ずつ繰り返し行った。LF/HF を算出するにあたり、前述のとおりノイズが入ったり、極端な外れ値が発生したりするケースが見受けられた。そこで、データが 4 試行分あるものについては外れ値を除外する。本研究では各実験条件で 4 つずつあるデータのうち、平均値からもっとも離れている値を外れ値として扱い、測定不能データと同等に除くことで各試行のデータを 3 つずつとするよう統一する。本研究では得られたデータを距離や速度の違いによりどう変わるのかを、被験者全体で比較・分析することで確かめたい。許らエラー! 参照元が見つかりません。が LF/HF の個人間の比較を行った方法を参考に、各被験者における 21 個あるデータの平均ですべてのデータを除することで変化率を求め、比較・分析を行うこととした。変化率は算出した LF/HF の数値の個人差に影響されない。一人の被験者における n 個の LF/HF の値を X、各変化率を Y とし、変化率を求める式を以下に示す。

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (1a)$$

$$Y_i = \frac{X_i}{\bar{X}} \quad (1b)$$

しかし、変化率においてもゴルフカート以外からのなんらかのストレス刺激を受けたために異常なストレスを感じ、外れ値が発生することが考えられるため、全被験者データの各試行の中で外れ値検定を行うことでさらに外れ値の影響を抑える。外れ値検定として、山森らエラー! 参照元が見つかりません。はスミルノフ・グラブス検定を行っており、本研究でもこれを採用した。この検定では、1 回につき 1 個の外れ値を検出することになる。複数個の外れ値がある場合は、最も大きなものについてまず検定を行い、それが外れ値だとすると次の段階ではそれを除いた n-1 個のデータについて同じように検定を行うということを繰り返す。また、本研究では分析する際は各被験者において各試行の 3 つの変化率データを平均したものをを用いることにした。

上記で LF/HF のデータの扱いを述べたが、距離の違い、速度の違いにより有意差が生じるか検証する。そこで、有意差の検定を行うため、等分散性の検定、正規性検定を行った。その結果、等分散かつ正規分布である場合は t 検定を行い、それ以外はノンパラメトリック検定として Mann-Whitney 検定を行った。

まず、速度別の設定距離間で、等分散性の検定を行った。F 検定の帰無仮説を分析する 2 つの群が等分散であることとし、5%水準により帰無仮説が棄却されれば不等分散、棄却されなければ等分散となる。F 検定の結果を図表 4-3 に示す。

図表 4-3 等分散性の検定 (距離間)

	12km/h		6.5km/h	
	p 値	結果	p 値	結果
80cm-60cm	0.495	等分散	-	-
80cm-40cm	0.211	等分散	-	-
80cm-20cm	0.0982	等分散	-	-
60cm-40cm	0.212	等分散	0.0457	不等分散
60cm-20cm	0.101	等分散	0.000153	不等分散

40cm-20cm	0.314	等分散	0.0135	不等分散
-----------	-------	-----	--------	------

図表4-4 正規性の検定

速度：6.5km/h				速度：12km/h			
距離	統計量	自由度	有意確率.	距離	統計量	自由度	有意確率.
20cm	0.972	15	0.893	20cm	0.95	14	0.565
40cm	0.980	15	0.97	40cm	0.962	14	0.756
60cm	0.939	14	0.408	60cm	0.96	14	0.724

図表 4-5 距離間の有意差検定結果

速度：6.5km/h			速度：12km/h		
	p 値	検定法		p 値	検定法
60cm-40cm	0.001**	Mann-Whitney 検定	80cm-60cm	0.007**	t 検定
40cm-20cm	0.00**	Mann-Whitney 検定	60cm-40cm	0.023*	t 検定
60cm-20cm	0.00**	Mann-Whitney 検定	40cm-20cm	0.000**	t 検定
			80cm-40cm	0.000**	t 検定
			80cm-20cm	0.000**	t 検定
			60cm-20cm	0.000**	t 検定

図表 4-6 速度間の有意差検定結果

距離	p 値	検定法
60cm	0.001*	t 検定
40cm	0.111	t 検定
20cm	0.477	Mann-Whitney 検定

次に前述のとおり正規性の検定を行う必要があるためそれぞれのデータ群に対し正規性の検定を行った。5%水準のもと正規性があるという帰無仮説を棄却すれば正規性はないつまり正規分布ではないとし、棄却されな

ければ正規性がある、正規分布であるとする。検定の方法にはShapiro-Wilks検定を採用した。図表4-4に正規性の検定の結果を示す。

F検定と正規性の検定の結果を受けて、t検定もしくはノンパラメトリック検定の有意差検定を行うことで距離の違い、速度の違いにより有意な差がみられるかどうか分析した。ノンパラメトリック検定としてMann-Whitney検定を行った。どちらも帰無仮説を有意な差はないとし、5%水準で検定した。図表4-5、図表4-6に分析結果を示す。

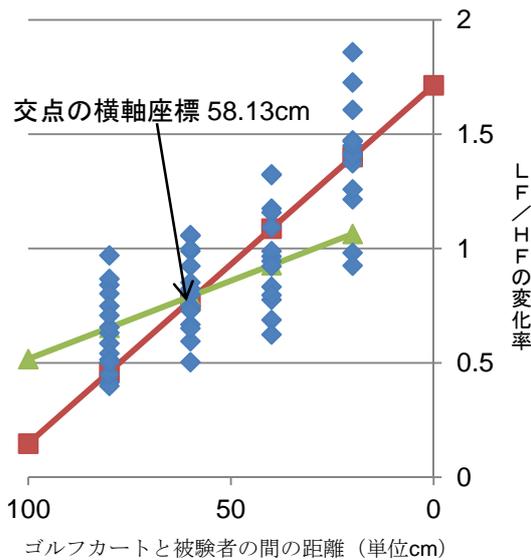
図表4-5より12km/hにおいて60cmと40cmの試行では帰無仮説は棄却されず有意な差が得られなかった。しかし、そのほかの検定結果はすべて帰無仮説を棄却しており、有意確率が1%以下のものが大半であるため、距離によって差があることを表していると考えられる。図表4-6より60cmの試行では帰無仮説が棄却されるため速度に有意な差があることが分かる。しかし、他の距離の試行では有意差はみられない。よって12km/hと6.5km/h程度の速度の差では接近すればするほど速度のストレス値における影響は小さいと考えられる。

(d)折れ線回帰

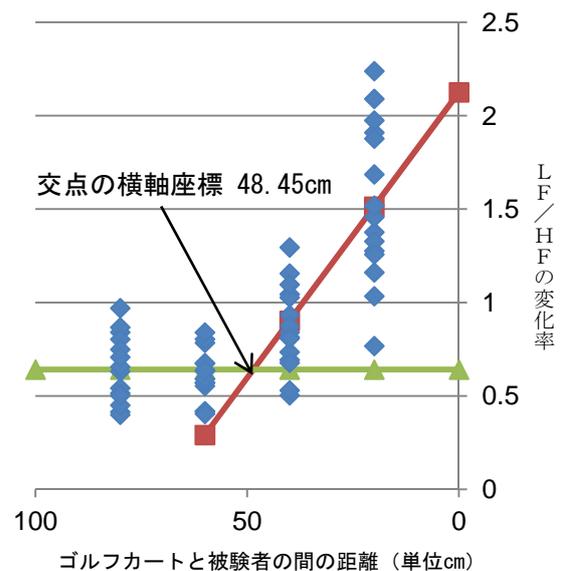
本研究では実験の結果としてさらにゴルフカートと人がどこまで近づくことが可能な距離を算出した。先に述べたようにストレスは距離が近くなることで大きくなるが、ストレスの増加は単調増加ではないと仮定し、ある変曲点を境に大きくストレスを感じるようになることを考える。そこで、変曲点までは近づいても人の反応は大きく変化しないと考え、変曲点までをもって、近づくことが可能な距離とした。変曲点の算出には折れ線回帰を用いる。なお、本手法の類例として、濱野らエラー! 参照元が見つかりません。は無給水状態の造園樹木の生存率に折れ線回帰をあてはめ変曲点を求めることにより枯死個体の発生が始まる期間を割り出した。折れ線回帰は2本の直線回帰により求められるため、データを2つに分ける必要がある。最適な変曲点や傾きを求めるために、残差平方和が最も小さくなるようにデータを2つに分ける点を分割点とする。分割点でデータを分け、それぞれで直線回帰を行う。さらに、二直線の交点をもって変曲点とし、変曲点座標を算出する。12km/h、6.5km/hともに折れ線回帰を求めるが前述のとおり、6.5km/h、80cmにおいては12km/h、80cmのデータと同等と考えあてはめる。結果を図表4-7、図表4-8に示す。

12km/hの場合、折れ線を書き込むと上の図ようになる。二直線の交点つまり変曲点は約58.1cmとなった。58.1cmより近づくと急激にストレスを感じる事が予想される。6.5km/hの場合、二直線の交点は約48.4cmとなった。これは12km/hの結果と比べ距離が近くなっている。傾きが小さいほうの直線がほぼ水平になっており、極端な変曲点であるといえる。

折れ線回帰の決定係数は、12km/hでは $r^2=0.6363$ 、6.5km/hでは $r^2=0.6404$ であった。管エラー! 参照元が見つかりません。によると決定係数が0.5以上で分析精度がややよいと評価することができる。そのため、求めた折れ線回帰はともにやや良い精度といえる。



図表4-7 折れ線回帰グラフ12km/hの場合



図表4-8 折れ線回帰グラフ6.5km/hの場合

(e)まとめ

本研究ではゴルフカートが人に与える影響をストレスとして扱い、どの程度両者が近づくとストレスを大きく感じてしまうのか、どこまで近づくことができるのか、その具体的な距離を把握しようと実験・分析を行った。分析により、距離や速度の違いによる有意差の有無やゴルフカートと人が約60cmより近づくとストレスを大きく感じる事がわかった。約60cmまでならば危険を感じさせることなく近づくことが可能だという考え方もできると考える。さらに速度を小さくすると50cmまでは許容できる。本研究の目的であった、人とゴルフカートが近づくことができる具体的な距離を把握することができたといえる。また、40cmよりも近づくとストレスの速度による有意差はなく、速度に関係なくストレスを大きく感じる事から、6.5km/hの折れ線回帰の結果より50cmより近づくとそれ以上減速しても効果はなく、

停止するほうが効果があると考え。

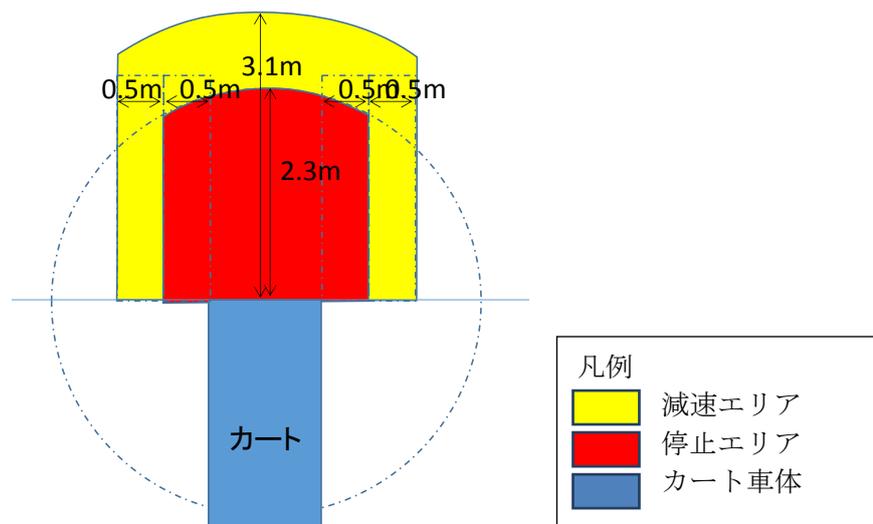
以上の結果をふまえて、ゴルフカートの安全化のために開発されているレーザスキャナの運用について提案したい。レーザスキャナはある一定の検知エリアを設定することで、そのエリア内に人や障害物を検知した場合に自動で減速・停止を行うという特徴から、減速を開始するエリアの横幅をゴルフカートの車幅から60cm以上に、停止を開始するエリアゴルフカートの車幅から50cm以上に設定することが追い抜きの際ストレスを与えない方法として有効だと考える。本研究における課題としては、本研究の検討が心拍変動をもちいており、必ずしも被験者自身の恐怖感を表現しているとは限らない。そのため、主観的評価を追加して、距離の検討を行うべきである。

C. 検知エリアの提案

以上の実験結果をもとにエリアを提案する。検知エリアは歩行者すなわち周辺のゴルファーに恐怖感を与えない車幅から50cmに設定する。一方、停止まで必要な空走距離を考えると、本スキャナの設定可能な前方距離である2.3mを採用する。

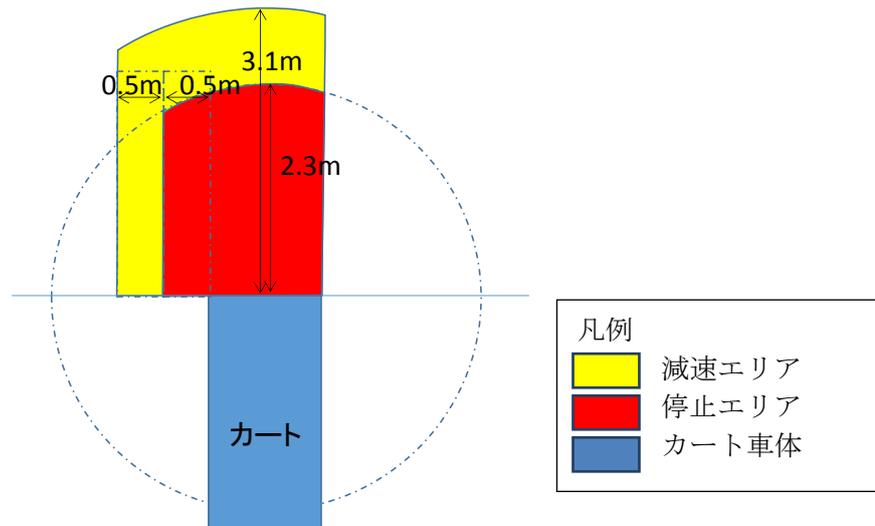
A) 基本形状

- 設置場所：見通しのきく直線部を中心に使用の差し支えのないコース全体
- 速度指定：なし

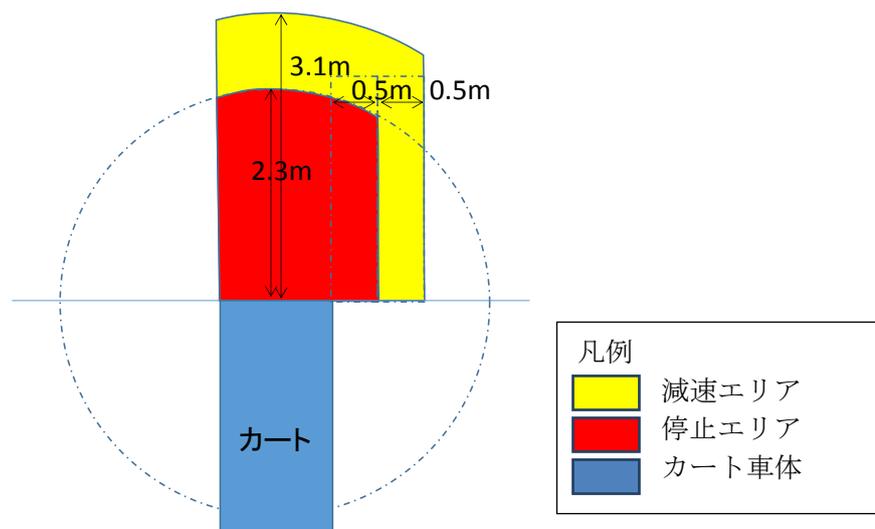


B) 右左折時に制限がある区間

- 特徴：障害物が存在する方向のエリアを削除。それ以外の減速、停止エリアの範囲については、基本形状と同じ。
- 設置場所：木立の区間など障害物が存在し、障害物の間からコースプレイヤー車両の進入が予測される区間
- 速度指定：遮蔽度が低い区間については、基本形状と同様に速度抑制を行う必要が無いが、障害物がある方向に東屋があるなど進入が予測される区間は、減速の速度で区間に進入する速度指定が望ましい。



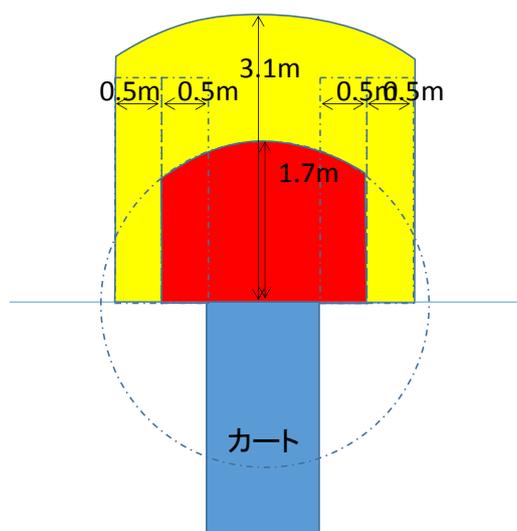
図表 4-10 エリア設定（右方向に障害物がある場合）



図表 4-11 エリア設定（左方向に障害物がある場合）断方向の曲率の大きい

C) 横断方向の曲率の大きい区間

- 特徴：横断方向の曲率が大きいことから停止エリアに、曲線区間の外側にある障害物が入り込み、停止することを防ぐため、停止エリアの距離を短くしている。
- 設置場所：最小回転などで曲率が大きな区間
- 速度指定：元々、減速の速度指定がなされていることが多いが、検知エリアのうち、停止エリアの距離を短くしているため、減速を行っていない状況では、停止できない可能性がある。そのため、減速は必要不可欠である。



図表 4-12 エリア設定（曲率が大きい区間）

第5章 誘導式ゴルフカートの安全性基準に関する適合性評価に対する協力

1 概要と達成状況

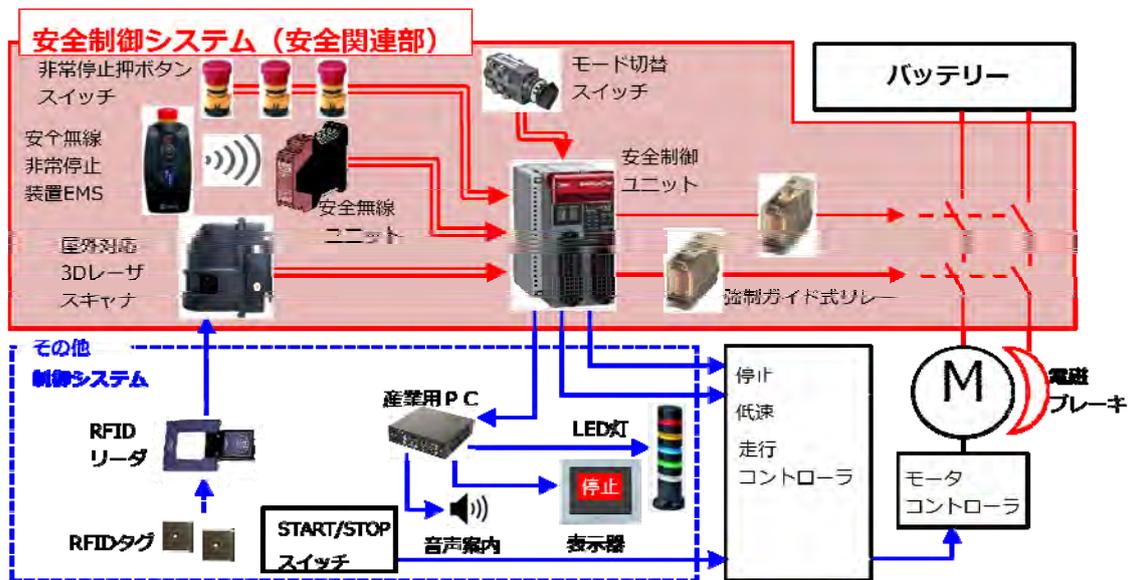
リスクアセスメントの実施、設計コンセプトの確認、安全要求仕様書の作成とこれに基づく安全制御システムの構築、ロボットの製作と妥当性評価を行った上で、危険側故障率について算出し、機能安全認証に必要なドキュメントを作成して、本プロジェクトのコンソーシアム1に提出した。

2 システムの安全要求仕様

誘導式ゴルフカートの安全関連部を図表 5-1 に示す。誘導式ゴルフカートは、人間の行動の範囲および自由度を拡大する移動手段であり、モード切替スイッチにより「誘導モード」にした際、決められたルートを自動走行する誘導式のゴルフカートは、プレイヤーとの衝突、搭乗者の振り落としなどのリスクがあり、そのリスクを低減するために、下記の安全システムを実装する。

- 屋外対応 3D レーザスキャナによる歩行者検知と緊急停止
- 安全無線非常停止装置による外部からの停止
- 非常停止用押ボタンスイッチによる緊急停止

なお、搭乗者が振り落とされることに際してはシートベルト、もしくは扉にて機械的に対応し、比較的衝突事故が多い無人時のみを安全システムの対象とする。

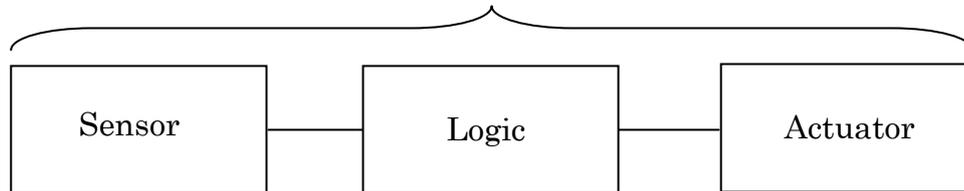


図表 5-1 誘導式ゴルフカートの制御ブロック図

3 危険側故障率

誘導式ゴルフカートの安全関連部の要求レベルはリスクアセスメント結果より、下記図表 5-2 である。

- ・ PLr = d : 非常停止用押ボタンスイッチ（有線）システム
- ・ PLr = d : 安全無線非常停止装置（無線）システム
- ・ PLr = d : 屋外対応 3 D レーザスキャナシステム



図表 5-2 安全関連部の PLr

Sensor 部分の入力装置としては非常停止用押ボタンスイッチ、安全無線非常停止装置、屋外対応 3 D レーザスキャナがあり、Logic 部分の論理回路としては安全制御ユニットを適用し、Actuator 部分の出力装置としては強制ガイド式リレーを適用する。

各コンポーネントを組み合わせ、システムとして ISO13849-1 に従い、MTTFd、DCavg 等を計算すると、各システムのカテゴリ及び MTTFd、DCavg は下記の通りとなり、ISO13849-1 Table 7 より、全て PLd を満たすことがわかる。

- ・ 非常停止用押ボタンスイッチ（有線）システム
カテゴリ 3、MTTFd=89 年（High）、DCavg=99%（High）→ PLd
- ・ 安全無線非常停止装置（無線）システム
カテゴリ 3、MTTFd=26 年（Medium）、DCavg=99%（High）→ PLd
- ・ 屋外対応 3 D レーザスキャナシステム
カテゴリ 3、MTTFd=35 年（High）、DCavg=93%（Medium）→ PLd

4 妥当性確認結果

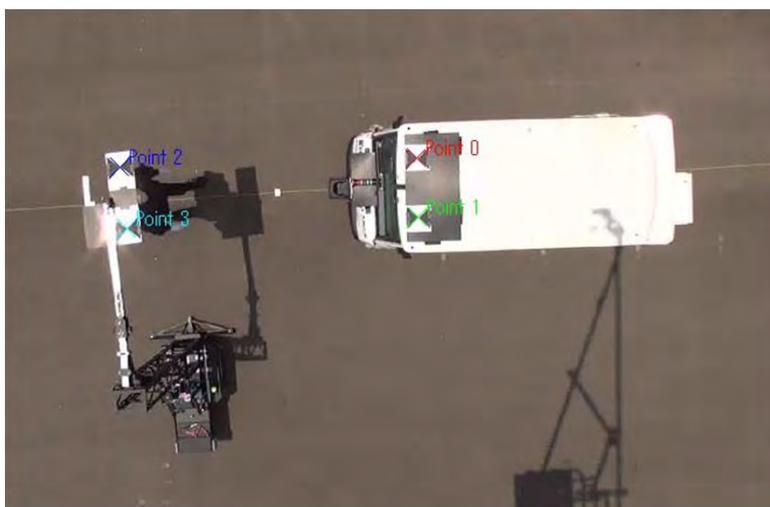
生活支援ロボット安全検証センターと日本自動車研究所（JARI）において実施した評価結果について以下に示す。

4.1 保護停止

ゴルフ場で誘導式ゴルフカートとプレイヤーが衝突する多くの場合、プレイヤーはゴルフカートと同じ方向に歩いているか、プレイ中である。今回はレーザービームの反射率が比較的低い黒い衣類を着用したマネキンを立ててゴルフ場のプレイヤーと見立て、保護停止性能について確認した。ゴルフカートの初速は一般的に使用される以下の4種類の速度とした。停止後の歩行者との距離を図表5-3に示す。

図表 5-3 保護停止試験結果 (mm)

カート設定 (初速)	結果 人との接触	人との距離				
		1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
3.0km/h	無し	1646	1613	1605	1646	1653
6.5km/h	無し	1242	1260	1275	1237	1268
8.5km/h	無し	928	909	921	911	836
10.0km/h	無し	706	641	722	708	533



図表 5-4 保護停止評価の様子

4.2 EMC

図表5-5 安全機能の電磁妨害耐性評価の試験結果

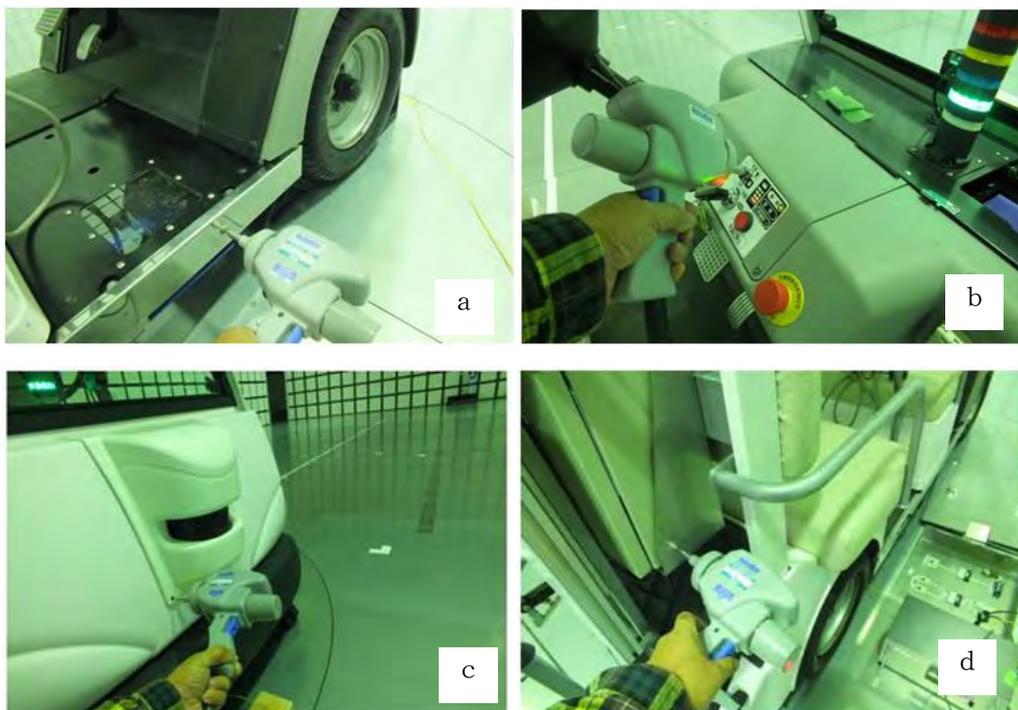
試験機能	妨害・障害	規格	結果	備考
障害物センサによる減速・停止	ESD	IEC61000-6-2	OK	機能の異常動作無
	放射RF電磁界印加	IEC61000-6-2	OK	機能の異常動作無
	電源周波数磁界印加	IEC61000-6-2	OK	機能の異常動作無
無線非常停止ボタンによる停止	ESD	IEC61000-6-2	OK	機能の異常動作無
	放射RF電磁界印加	IEC61000-6-2	OK	機能の異常動作無
	電源周波数磁界印加	IEC61000-6-2	OK	機能の異常動作無
	バッテリー電圧低下・無線強度低下		平均0.964s 最大1.032s	設定された動作
	無線周波数雑音印加		平均1.178s 最大1.239	設定された動作

(1)障害物センサによる減速・停止機能の対ESD耐性

カートの車体後部に、木製の台を配置し後輪が空回りするように、グラウンド板上に設置する。カート下部には誘導線を配置し、自動走行させる。ここにESD印加しその後、障害物センサを手動の障害物で動作させ停止するか、その後走行ボタンを手で押し走行開始をするか、の試験を行った。

接触放電は、電圧は±4KV。

- a) ボディフレーム、b) 前進後退スイッチ、c) 障害物センサカバーネジ、d) 後部回路ボックスに対して実施した。



図表 5-6 静電気試験（接触）の印加ポイント



図表 5-7 静電気試験（気中）の印加ポイント



図表 5-8 電波暗室内

気中放電は、印加電圧は±8KV。e) 発進停止スイッチ（前部）に対して行った。

(2)障害物センサによる減速・停止機能の対放射 RF 電磁界妨害耐性

カート全体に対して、電磁界印加を行い、機能が保たれていることを確認する。

カートの車体後部に、木製の台を配置し後輪が空回りするように、電波暗室の回転台に設置する。カート下部には誘導線を配置し、自動走行させる。

0、90、180、270度の垂直・水平偏波の80~1000MHz:10V/m、1.4~2GHz:3V/m、2~2.7GHz:1V/m 1 %ステップにて実施。

(3)障害物センサによる減速・停止機能の対電源周波数磁界妨害耐性

カートの車体後部に、木製の台を配置し後輪が空回りするように、ループコイル内部に設置する。カート下部には誘導線を配置し、自動走行させる。ループコイルに所定の電流を流し磁界を発生させた状態で、障害物センサを手動の障害物で動作させ停止するか、その後走行ボタンを手で押し走行開始をするか、の試験を行った。

30A/m : 50HzX、Y、Z 3 方向の磁界印加



図表 5-9 の対電源周波数磁界妨害耐性の様子

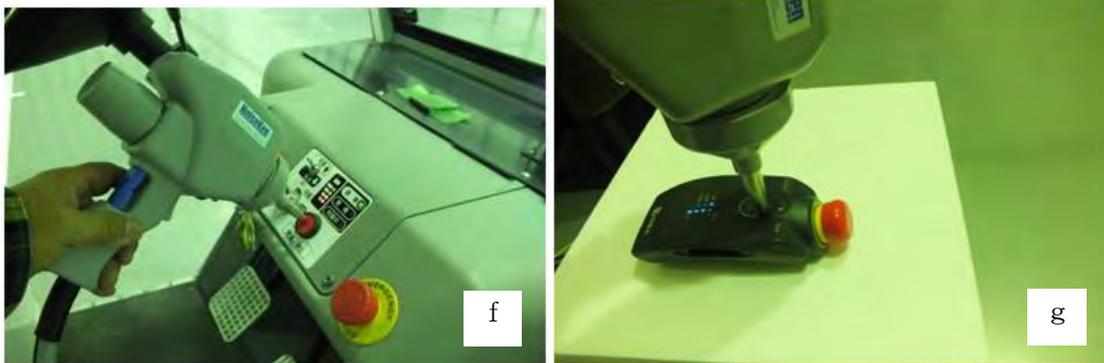
(4)無線非常停止ボタンによる停止機能の対ESD耐性

カートの車体後部に、木製の台を配置し後輪が空回りするように、グラウンド板上に設置する。カート下部には誘導線を配置し、自動走行させる。ここにESD印加しその後、無線非常停止ボタンを押し停止するか、無線非常停止リセット後走行ボタンを手で押し走行開始をするか、の試験を行った。

接触放電は、接触放電は、電圧は±4KV。

a) ボディフレーム、b) 前進後退スイッチ、c) 障害物センサカバーのネジ、d) 後部回路ボックスに対して実施した。

気中放電は、印加電圧は±8KV。f) 発進停止スイッチ（前部）、g) 子機リセットスイッチ、に対して行った。



図表 5-10 非常停止装置の静電気試験（接触）の印加ポイント

(5) 無線非常停止ボタンによる 停止機能の対放射 停止機能の対放射 RF 電磁界 妨害耐性

現在の評価設備では、空気圧により独立に操作できるのは2系統となっている。このためカート搭載状態での非常停止機能検証はできない。（子機無線非常停止ボタン、子機リセットボタン、本体の走行・停止ボタンの操作が必要なため。）

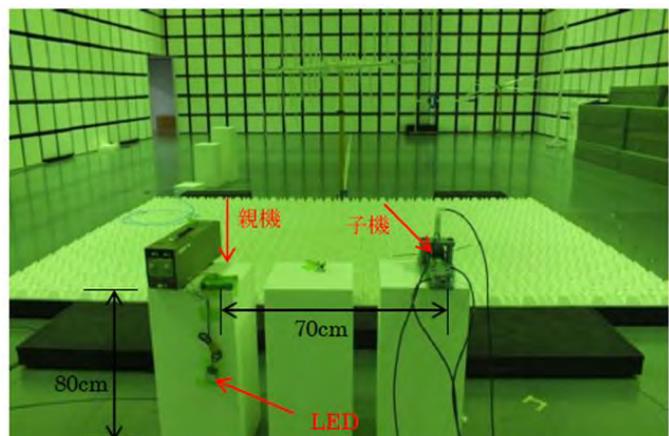
今回の測定では無線非常停止の親子・子機両方に、放射 RF 電磁界印加を行い、その状態で非常停止機能が保持されていることを確認する。親機子機はそれぞれ、電波暗室の回転台の80cmの高さの発泡スチロール台の上に設置する。親機と子機の間隔は70cmとした。

0、90、180、270度の垂直・水平偏波の80~1000MHz:10V/m、1.4~2GHz:3V/m、2~2.7GHz:1V/m 1%ステップにて実施。

(6)無線非常停止ボタンによる停止機能の対電源周波数磁界妨害耐性

カートの車体後部に、木製の台を配置し後輪が空回りするように、ループコイル内部に設置する。カート下部には誘導線を配置し、自動走行させる。ループコイルに所定の電流を流し磁界を印加した状態で、無線非常停止ボタンを押し停止するか、無線非常停止リセット後走行ボタンを手で押し走行開始をするか、の試験を行った。

30A/m : 50HzX、Y、Z3方向の磁界印加



図表 5-11 停止機能の対放射 停止機能の対放射 RF 電磁界 妨害耐性

(7) バッテリー電圧低下、無線強度低下時の無線非常停止ボタンによる停止機能の確認

無線非常停止親子・子機を用いて、試験の開始から、親機のY0出力に接続されたLEDの消灯までの時間を、オシロスコープで測定する。開始は、電源スイッチOFF操作を行った音があるスレッショールドを超えた時間とし、停止の時間はLEDをモニタする光センサの出力があるスレッショールドから落ちた時間とした。

電源スイッチOFFから停止ランプ点灯までの時間を10回測定し、下記表の結果となった。

図表 5-12 試験結果

	停止時間(s)
1	0.954
2	0.876
3	1.011
4	1.011
5	0.882
6	1.032
7	1.032
8	0.924
9	0.960
10	0.957
平均	0.964
最大	1.032

(8) 無線周波数雑音存在時の無線非常停止ボタンによる停止機能の確認

無線非常停止親子・子機を用いて、試験の開始から、親機のY0出力に接続されたLEDの消灯までの時間を、オシロスコープで測定する。雑音は、2.475GHz、0dBmのシグナルジェネレータの接続されたアンテナを親機と子機の間設置した。開始は、SGの出力スイッチ操作を行った音があるスレッショールドを超えた時間とし、停止の時間はLEDをモニタする光センサの出力があるスレッショールドから落ちた時間とした。

雑音を印加して、無線に妨害を与えてから停止ランプ点灯までの時間を10回測定し、下記表の結果となった。

図表 5-13 試験結果

	停止時間(s)
1	1.239
2	1.050
3	1.200
4	1.149
5	1.125
6	1.182
7	1.173
8	1.263
9	1.236
10	1.161
平均	1.178
最大	1.239

4.3 衝突（参考）

歩行者検知のためにレーザスキャナを取り付けたことによって、ゴルフカート正面に従来ではなかった凸部ができた。このことによって発生する危険について確認するために正面からの衝突実験を実施した。参考ではあるが、いずれの速度においても乗用車の搭乗者保護の基準を大きく下回る結果を得た。

一次衝突 [対カート]	HIC	頸部せん断 荷重(N)	頸部軸荷重 (N)	頸部トルク (Nm)	胸部加速度 (m/s ²)	胸部変位 (mm)
Test 1	0	57	78	3	21	0
Test 2	3	103	-128	-4	33	1
Test 3	15	192	-306	6	37	1
Test 4	15	328	-429	-7	54	2

衝突安全基準 米国法規（女性）	700		2520		588	52
衝突安全基準 欧州法規（男性）		3100	3300	-57		

注）上段は、米国法規（自動車衝突時の乗員保護）における小柄な女性ダミーの障害基準値である。

下段は、体格は異なるが参考として、欧州における成人男性ダミーの傷害基準値を示した。

図表 5-14 試験結果

No.	衝突速度	前部のセンサ有無
Test 1	3.0 km/h	有
Test 2	6.5 km/h	有
Test 3	8.5 km/h	有
Test 4	10.0 km/h	有

図表 5-15 試験条件

第6章 ハンドル型電動車いすの安全対策技術開発の成果

1 センシング技術の研究開発

1.1 概要と達成状況

H23年度の事故分析やリスクアセスメントの結果、ハンドル型電動車いすの最大のリスクは、歩行者のハンドル型電動車いすとの衝突ではなく、ハンドル型電動車いすの転落に伴う搭乗者の転落であることがわかった。そのため路面の形状を認識することが重要と判断しレーザビームを路面に向けて照射する方式とした。従来レーザスキャンでは検出距離が小さいことで危険を判断したが、今回の方式では設定したエリアよりも遠くから反射があれば危険と判断する。実証走行では太陽光の影響を受けることなく段差を検出することができた。

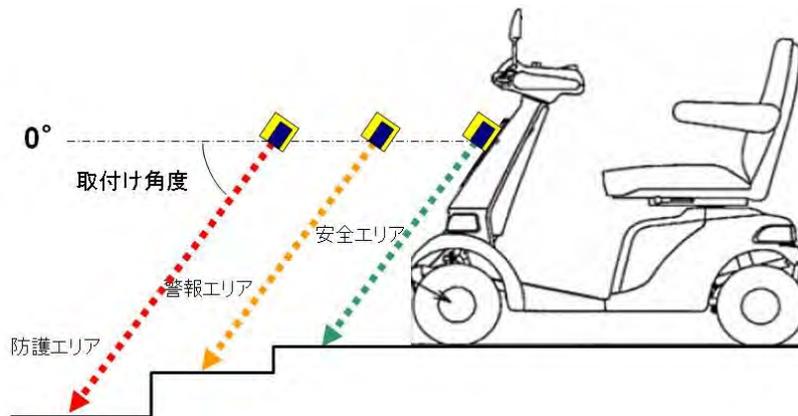
1.2 センシング性能

レーザスキャナによる段差検知の原理は上述した通りでシンプルである。図表 6-1 に示すように走行している路面までのエリアを安全エリアとし、段差があればその大きさに応じて警報エリア、防護エリアと段階的にエリアを設定する。

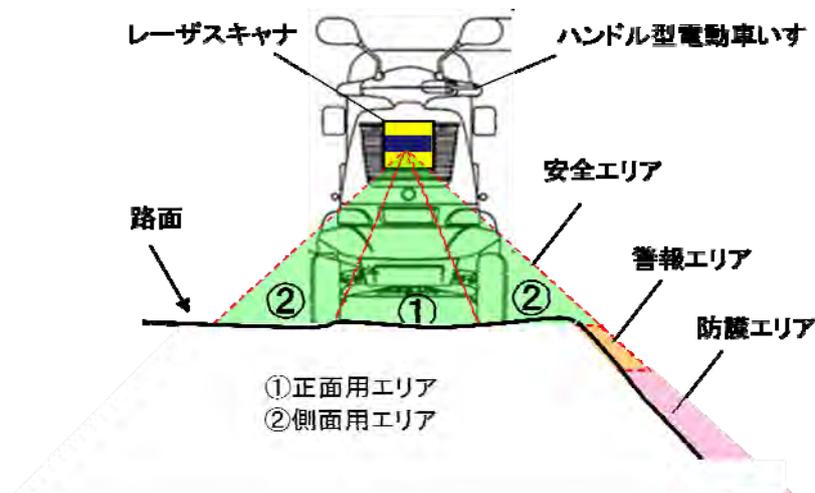
従来型の障害物検知用のレーザスキャナをベースにソフトウェアによる判定ロジックだけを変更したものであるため測距精度はそのレーザスキャナの性能と同じで 25mm である。

ハンドル型電動車いすに搭載した状態での段差検知性能評価については 4 項に示す。

また図表 6-2 に示すように進行方向に対して正面と側面の段差を検出することができる。レーザスキャナの走査角度など主な仕様を図表 6-3 に示す。



図表 6-1 段差検知センサの検出原理



図表 6-2 側面段差検知の原理

検知距離	0.1~2.0m (反射率1.8%黒シート)
測距分解能	1mm
測距精度	$\sigma=25\text{mm}$ (反射率1.8%黒シート)
角度分解能	0.25°
最小検出物	50mm (2.0m)
エリア角	最大120° (段差検知)
	固定90° (障害物検知)
外形寸法	80mm×90mm×80mm
重量	500g以下
その他	
エリア数	5

図表 6-3 段差検知センサの基本性能



図表 6-4 段差検知センサを搭載したハンドル型電動車いす

2 制御システム

2.1 概要と達成状況

ハンドル型電動車いすには安全制御ブロックを設け、センサからの入力を安全制御ユニットで受けている。しかしハンドル型電動車いすにはゴルフカートのような電磁ブレーキがなく、原則的に制動は回生ブレーキによる。そのため、完全な安全関連部として構築することはできなかった。

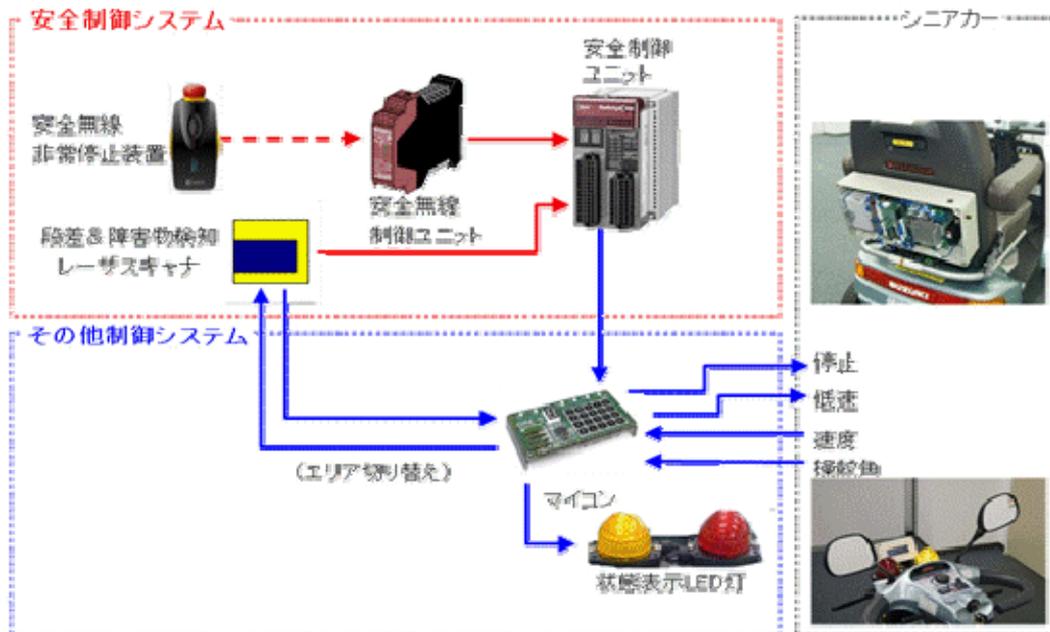
2.2 安全性能

ハンドル型電動車いすの制御システムを図表 6-5 に示す。

安全制御ユニットの出力はマイコンを介して、ハンドル型電動車いすのコントローラへ入力される。停止出力はアクセル信号ラインの切断、減速（低速移行）出力は最高速設定ボリュームに低速度設定の疑似信号を与える。ハンドル型電動車いすの安全制御には、メーカーによる取り組みが必要ながわかった。

その他、レーザスキャナのエリア切替情報としてハンドル型電動車いすの速度情報と操舵角情報を利用している。

例えば段差に斜めに進入して停止した場合、安全な方向への操舵により小さなエリアに切り替えるなどして離脱することができるようにするためである。



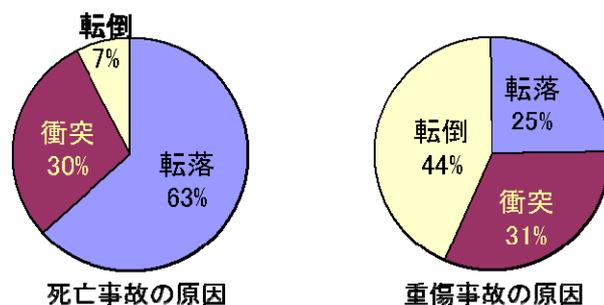
図表 6-5 ハンドル型電動車いすの安全制御部

3 リクアセメント技術

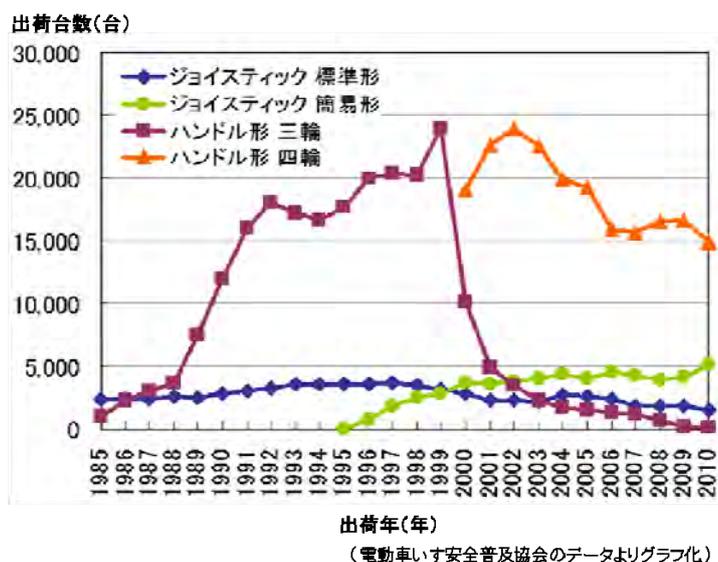
3.1 概要と達成度

ハンドル型電動車いすのリスクアセメントは事故事例調査と累計稼働台数から危害の重篤度と頻度を算出し評価することで実施した。危害の重篤度は独立行政法人製品評価技術基盤機構（NITE）の事故事例データベースを調査し、累計稼働台数は電動車いす安全普及協会のデータを元に独自の方法で推計した。（2011年の時点で実施）またそれらを、ハンドル型電動車いすの管轄省庁である経済産業省が推奨するリスクマネジメントツール R-Map 上にプロットすることでリスクを評価した。

その結果、危害では転落による死亡がもっとも重篤であり、発生件数でも最も多いことがわかった。



図表 6-6 ハンドル型電動車いすの重大事故原因 (NITEの事故事例データベースより)

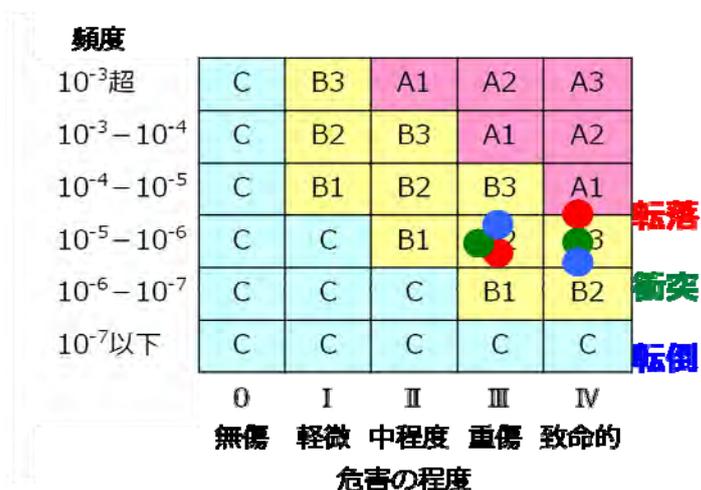


図表 6-7 電動車いすの出荷台数の推移

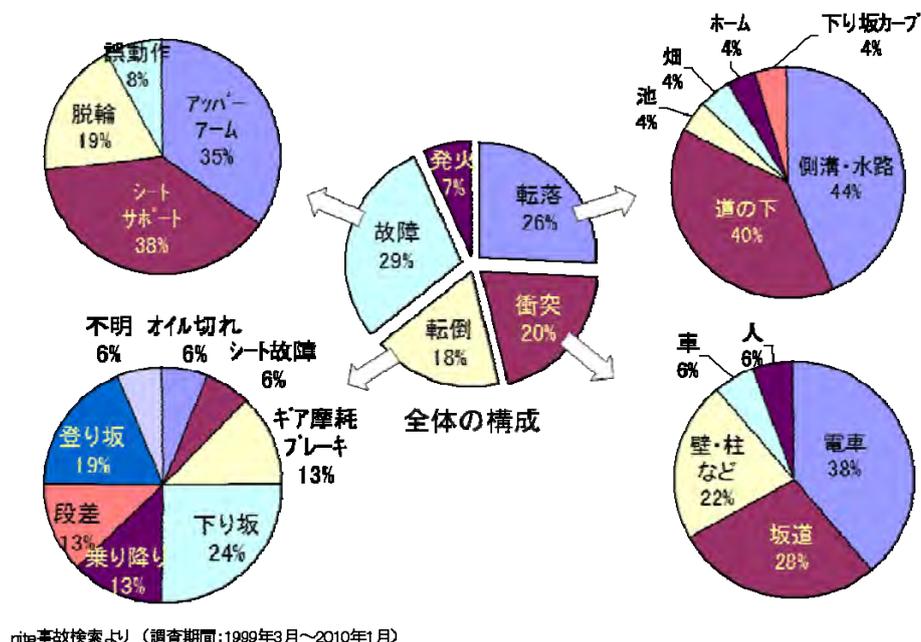
3.2 リスクアセスメント

R-Map の詳細な説明は割愛するが、頻度計算の際の分母にあたる部分は累積稼働台数であり、単位は台数・年となり、プロットされる領域で許容できないリスク、ALARP 領域のリスク、受け入れ可能なリスクを判定することができる。

上述した危害の大きさと発生頻度からリスクを R-Map 上にプロットしたものが図表 6-8 である。



図表 6-8 ハンドル型電動車いすのリスク



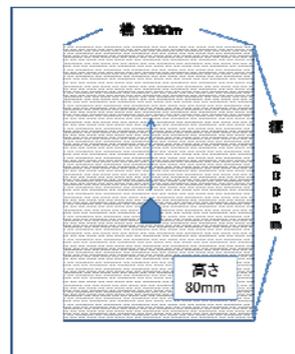
図表 6-9 転落などのハンドル型電動車いすの事故が発生した状況

4 安全性能の評価

4.1 基本的な停止性能

今回開発したレーザスキャナを用いた転落事故防止策が安全対策として有効であるかを検証する。検証センターにて実際に段差のあるコースを走行し、段差を検知し、転落前に停止するかを検証する。確認項目としては、以下の3点を検証する。

- ① 段差を検知し、転落前に停止するかどうかの確認
- ② 段差検知地点から停止までの停止距離の検証
- ③ 段差検知の精度調査



図表 6-10 コース概要図

4.1.1 実験日時

実験日 : 2013年8月8日

実験時間 : 9:00~15:00

実験場所 : 生活支援ロボット安全検証センター(屋内)

試験コース概要 : 3000mm(横) x 6000mm(縦) x 80mm(高さ)

4.1.2 転落防止の検証試験

初めに、今回のシステムが段差を検知し、転落前に停止することが出来るか確認を行う。

1) 試験内容

段差に向かって最高速度(6km/h)で直進し、転落する前に停止するかどうかを確認する。

試行回数は、3種類の取り付け角度で各5試行、全15試行行う。

2) 試験結果

実験結果を図表6-11に記す。

実験の結果、すべての試行において段差を検知し、転落前に停止することが確認された。

図表 6-11 実験結果 (○: 転落前に停止 x: 転落)

	1 試行目	2 試行目	3 試行目	4 試行目	5 試行目
取り付け角度 1	○	○	○	○	○
取り付け角度 2	○	○	○	○	○
取り付け角度 3	○	○	○	○	○

4.1.3 停止距離の検証試験

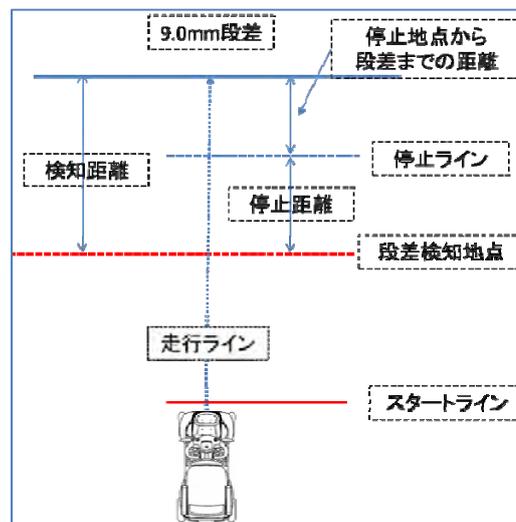
続いて、段差検知後、停止するまでの停止距離の検証を行う。

1) 試験内容

段差のある試験コースを走行し、実際に停止することができるか確認し、停止距離についての調査を行う。

2) 試験概要

図表6-12に試験概要図を示す。十分に加速することができる位置にスタートラインを引き、スタートラインから段差に向かって時速6km/hで走行し、実際に停止することができるのか確認する。同時に停止距離の調査の検証を行う。走行は、試験ごとにバラつきが出ないように、ハンドル形



図表 6-12 正面試験概要図

電動車いすの走行ルートにラインを引くことで、毎回同様の走行が行えるよう配慮した。

試験は、3種類の取り付け角度でおこない、各取り付け角度で試験回数は5回行った。以下に試験結果を記していく。

なお、取り付け角度は、30.0°、29.0°、28.0°の3種類でおこなった。

3) 停止距離の定義と測定方法について

イ) 本研究における停止距離の定義について

本研究では、停止距離を以下のように定義する。

停止距離： 段差検知地点から実際に停止するまでの距離

即ち、段差を検知してから実際に停止するまでの距離を停止距離とする。

ロ) 測定方法

検知距離は常に一定のため、段差検知地点は段差から検知距離分離れた地点となる。よって、検知距離と実際に停止したハンドル形電動車いすの位置と段差までの距離を測定することで以下の式により停止距離を求める（図 4-2 参考）。

$$\text{停止距離} = \text{検知距離} - \text{停止時の段差までの距離}$$

なお、測定位置は、前輪接地点を基準とし、左右の停止距離の平均を測定値とする。

※ 検知距離

レーザスキャナは、斜め下についているため、検知箇所はハンドル形電動車いすの前方である。実際の検知箇所とハンドル形電動車いす（前輪接地点）との距離を検知距離とする。各取り付け角度の検知距離は図表 6-13 に示す。

図表 6-13 取り付け角度別検知距離（単位：mm）

取り付け角度	28度	29度	30度
検知距離（mm）	1195	1245	1298

4) 試験結果

3種類の取り付け角度で各5回、計15回の走行の結果、全ての走行で段差を検知し、転落する前に停止することを確認することができた。次に、停止時の段差までの距離を図表 6-14 にまとめる。

図表 6-14 試行別停止時の段差まで距離（単位：mm）

取り付け角度	試行回数					平均
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	
28度	406.1	415.7	408.4	422.0	403.6	428.2
29度	465.5	490.3	465.2	473.2	471.6	481.1
30度	511.6	529.6	517.3	517.3	510.3	531.2

停止時の段差までの距離と検知距離をもとに、停止距離（＝検知距離－停止時の段差までの距離）を求める。求めた停止距離の結果を図表 6-15 に示す。

図表 6-15 停止距離の平均と標準偏差

	停止距離	標準偏差
平均値(mm)	796.8	7.09

図表 6-16 試行別停止距離の結果 (単位 : mm)

取り付け 角度	試行回数					平均
	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	
28 度	805.9	796.3	803.6	790.0	808.4	800.8
29 度	797.5	772.7	797.8	789.8	791.4	789.9
30 度	805.4	787.4	799.7	799.7	806.7	799.8

全 15 走行の平均測定結果を図表 6-16 に記す。測定の結果、停止距離は 800mm 前後であることがわかった。

4.1.4 検知精度に関する実験

最後に、今回のシステムの検知精度に関する検証を行う。

1) 試験内容

あらかじめ高さがわかっている段差を検知し、レーザスキャナにより取得された測距値を高さ方向に変換することによって検知精度を検証する。

なお、測距データは図表 6-17 のように正面・側面 (左)・側面 (右) の 3 つに分けてデータをまとめる。ハンドル形電動車いすのタイヤ幅である 530mm を基準に考え、中心より左右 265mm 内の測定値を正面、中心より左右 265mm~795mm 内の測定値を側面 (左・右) とし、各範囲での平均値を検知による段差高さとする。

なお、取り付け角度は 3 種類 (29.0°、27.0°、25.5°)、試行回数は各 5 回とする。

2) 実験結果

取り付け角度ごとに試験結果を記していく。

イ) 取り付け角度 $\theta=29.0^\circ$

図表 6-18 各エリア平均測定値 (左) と標準偏差 (右) $\theta=29.0^\circ$

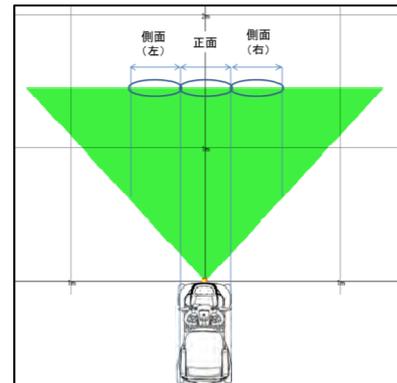
平均(mm)	側面(左)	正面	側面(右)	偏差(mm)	側面(左)	正面	側面(右)
一回目	79.6	79.4	79.9	一回目	4.1	0.4	1.4
二回目	80.1	80.2	80.0	二回目	3.8	0.3	1.4
三回目	80.4	80.9	80.3	三回目	3.6	0.3	1.4
四回目	80.0	80.1	80.7	四回目	3.7	0.5	1.3
五回目	80.3	80.5	80.6	五回目	3.4	0.5	1.2
平均	80.1	80.2	80.3	平均	3.7	0.4	1.3

ロ) 取り付け角度 $\theta=27.0^\circ$

図表 6-19 各エリア平均測定値 (左) と標準偏差 (右) $\theta=27.0^\circ$

平均(mm)	側面(左)	正面	側面(右)	偏差(mm)	側面(左)	正面	側面(右)
一回目	79.9	80.1	79.8	一回目	4.3	0.5	2.0
二回目	80.6	80.3	80.2	二回目	4.6	0.4	1.9
三回目	80.5	80.1	80.2	三回目	4.6	0.5	2.1
四回目	78.2	79.3	80.2	四回目	4.5	0.4	2.9
平均	79.8	79.9	80.1	平均	4.5	0.5	2.2

※ 5 試行目はデータ欠損のため 4 試行のみ



図表 6-17 レーザスキャナの検知点概要図

ハ) 取り付け角度 $\theta=25.5^\circ$

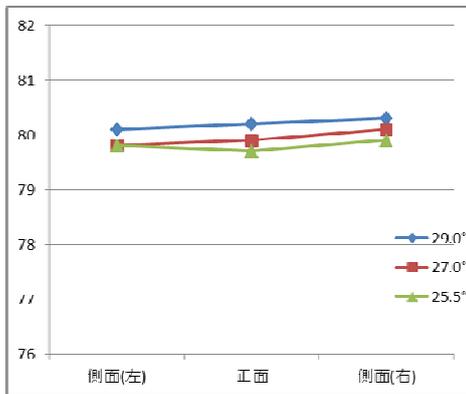
図表 6-20 各エリア平均測定値 (左) と標準偏差 (右) $\theta=25.5^\circ$

平均(mm)	側面(左)	正面	側面(右)
一回目	80.1	79.5	79.7
二回目	79.7	79.3	81.2
三回目	79.1	79.1	78.3
四回目	81.3	80.3	79.2
五回目	78.9	80.3	81.2
平均	79.8	79.7	79.9

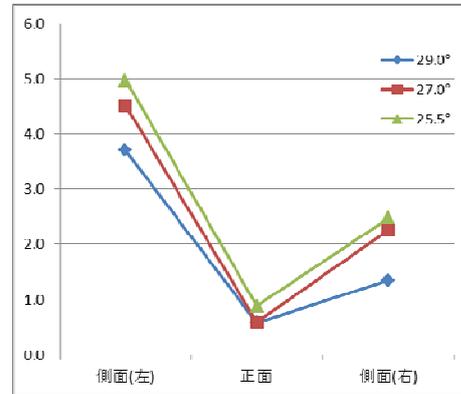
偏差(mm)	側面(左)	正面	側面(右)
一回目	5.7	0.9	1.9
二回目	5.2	0.6	3.1
三回目	4.3	0.8	2.1
四回目	5.8	0.6	2.4
五回目	3.9	1.0	2.3
平均	5.0	0.8	2.4

3) 試験結果のまとめ

段差を検知した結果、正面・側面共に実際の 80mm という値に近い数値を検出した。標準偏差は約 0.3~6.0mm の結果となった。図表 6-21、6-22 に各取り付け角度の平均測定値と標準偏差の結果をグラフにまとめる。今回の実験では、取り付け角度による極端な検知精度の差は見られないと考えられる。また、正面・側面を比べると、平均測定値に大きな差は見られないが、側面にいくほど標準偏差が大きくなる傾向がみられる。これより、測定にいくほど測定値にバラつきが出てくることわかった。



図表 6-21 各取り付け角度の測定平均値(単位 mm)



図表 6-22 各取り付け角度の標準偏差 (単位 mm)

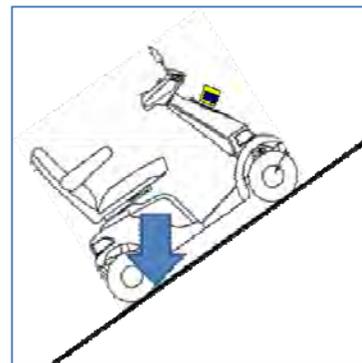
4.1.5 まとめ

以上の試験結果より、

- ① 段差を検知し、転落前に停止することの確認
- ② 停止距離は 800mm である
- ③ 段差を精度良く検証できることが確認された。

4.2 勾配走行時の影響

続いて、勾配を走行する際の姿勢の影響を検証する。ハンドル形電動車いすで勾配を走行する際には、図表 6-23 のようにハンドル形電動車いす後方の力が強くなり、前輪が浮くことでレーザ光と地面の成す角もずれてくる。勾配によるズレを実験により検証を行う。



図表 6-23 勾配による影響図

4.2.1 実験日時

実験日 : 2013 年 12 月 10 日
 実験時間 : 9:00~17:00
 実験場所 : 生活支援ロボット安全検証センター（屋外）
 試験コース : 走行試験関連エリア・傾斜走行性試験路

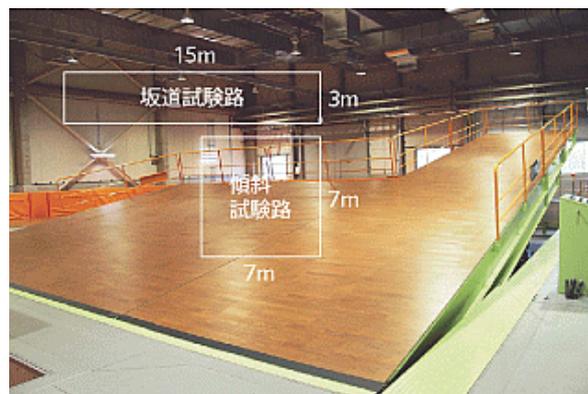
※ 傾斜走行性試験路

寸法 :

坂道試験路部 : 幅 3m×長さ 15m
 傾斜試験路部 : 幅 7m×長さ 7m

傾斜角度 :

最大 10° (17.5%)



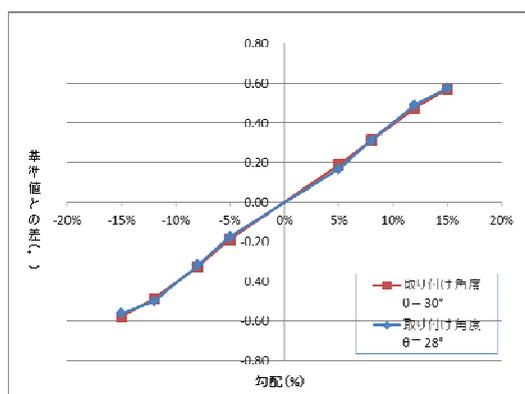
図表 6-24 傾斜走行性試験路図

4.2.2 検証方法

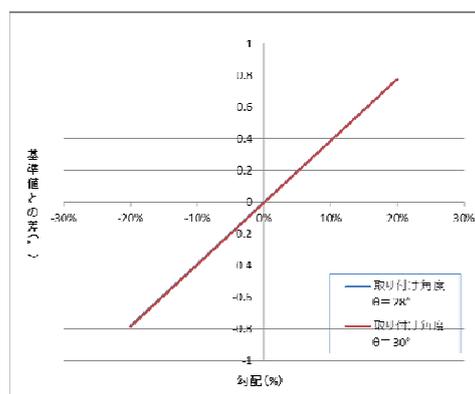
各勾配において測距データを取得し、0%を基準に測距データを比較する。各勾配で測距データを比較することによって勾配による検知への影響を検証する。

4.2.3 実験結果

取り付け角度別の勾配とレーザ光が地面と成す角度の基準値との差の関係を図表 6-25 に表す。図を見ると、ほとんど両者等しく、比例関係になっている。



図表 6-25 勾配と角度変位の関係



図表 6-26 勾配と角度変位の関係_単回帰式

そこで、取り付け角度ごとに勾配と。勾配 0%を基準とした場合の勾配によるレーザ光と地面が成す角の変位との関係を単回帰式で表すと、以下のようになる。

$$y_{\theta=28^\circ} = 3.90 \cdot x - 0.00 \dots 5.4$$

(相関係数 R=0.999、 決定係数 R=0.998)

$$y_{\theta=30^\circ} = 3.91 \cdot x - 0.01 \dots 5.5$$

(相関係数 R=0.999、 決定係数 R=0.999)

単回帰式を図に表すと図表 6-26 のようになる。

4.2.4 まとめ

勾配がない状況を基準に考えると、勾配が大きくなるにつれ、ハンドル形電動車いすが傾き前輪が浮き、前輪が浮くことでレーザ光と地面の成す角もずれてくるため、勾配が大きくなるにつれて測距データが基準値からずれてくる。分析の結果、勾配とレーザ光と地面が成す角の変位との関係は比例関係にあるということがわかった。勾配 0%を基準とした場合の勾配によるレーザ光と地面が成す角の変位は次式 4.1 によって表すことができることがわかった。

勾配と角度変位の関係式

$$y = 3.90 \cdot x - 0.00 \dots 4.1$$

※ y : 角度変位(°)、 x : 勾配 (%)

4.3 振動などの外乱による影響

上記までの結果より、レーザスキャナを用いることによって、精度よく段差を検知できることや転落前に停止できることがわかった。また、勾配走行時の影響についても検証を行った。最後に、振動から受ける影響について検証を行う。

屋外を走行する際には、ハンドル形電動車いすが振動を受ける。振動によってハンドル形電動車いすが上下に動くことにより、レーザスキャナが誤検知を起こすことが考えられる。よって、振動による影響を実験により検証する。

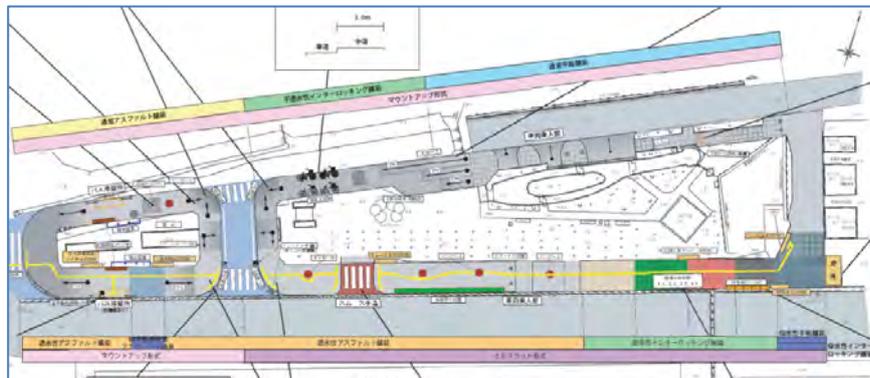
4.3.1 実験日時

実験日時 : 2013年10月15日

実験時間 : 11:00 ~ 15:00

実験場所 : 国土交通省近畿技術事務所 交通バリアフリー比較体験コース (屋外)

実験コース概要 :

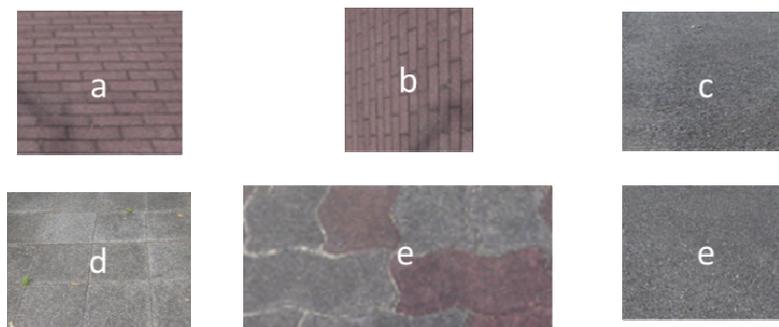


図表 6-27 実験コース概要図

4.3.2 実験内容

ハンドル形電動車いすに加わる振動の大きさは、舗装材の違いによって決まる。そこで6種類の異なる舗装材を走行し、振動の大きさと測距データを分析することによって振動の影響を検証する。

なお、舗装材はコース内にある透水性インターロッキングブロックの縦置き、同横置き、アスファルト、不透水インターロッキングブロック、平板、コース脇のアスファルトの6種類の路面において走行を行った。なお、以後6種類の舗装はそれぞれ、インター縦（図表 6-28a）、インター横（図表 6-28b）、アスファルト1（図表 6-28c）、インター2（図表 6-28d）、平板（図表 6-28e）、アスファルト2（図表 6-28f）と呼ぶ。



図表 6-28 各舗装の写真

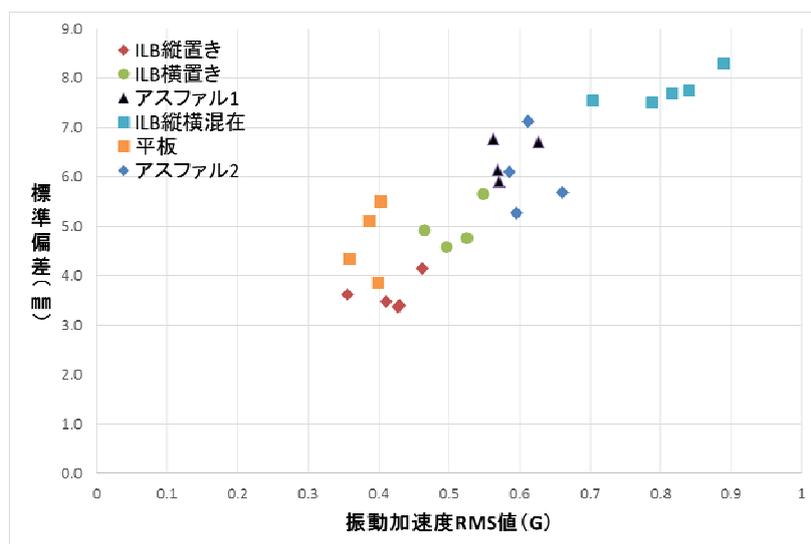
4.3.3 評価法

振動は、ハンドル形電動車いすに加わる振動加速度の大きさにより評価する。振動加速度は周期的な動きをしている。そこで、振動加速度の値としては RMS 値（二乗平均平方根）を用いる。なお、RMS 値は以下の式によって求まる。

$$X_{rms} = \sqrt{\sum X_i^2 / N}$$

また、振動の影響については、測距値の標準偏差によって検証する。

4.3.4 実験結果



回帰統計	
重相関 R	0.891
重決定 R2	0.794
補正 R2	0.786
標準誤差	0.697
観測数	26

図表 6-29 試行ごとの鉛直方向振動加速度と測距値の標準偏差の関係

横軸：振動加速度の RMS 値 (G) 縦軸：測距値の標準偏差 (mm)

各舗装材の振動値の大きさと測距値の標準偏差の大きさを図表 6-29 に記す。振動加速度の RMS 値と測距データの標準偏差で単回帰式を求めると

$$Y(\text{測距データの標準偏差}) = 8.75X(\text{加速度のRMS値}) + 0.704 \dots 4.2$$

となる。相関係数を求めると、 $R=0.89$ となり、非常に強い相関であることがわかる。

4.3.5 まとめ

施工によりバラつきがあるため一概には言えないが、坂口ら¹⁾や前田ら²⁾による研究を参考にすると、振動の大きな舗装はILB縦横混在時と考えられる。今回の実験でも同様の結果となっている。これより、日常空間で路面を走行する際には10mm前後の標準偏差が出ることを考慮しなければならないと言える。

4.4 実証試験

最後に、以上の結果を基に、実際に日常空間で使用する際の仕様を決定し、街中で走行する際にも転落事故防止策として有効であるかを検証する。

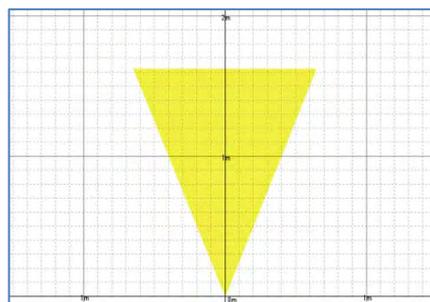
4.4.1 日常空間で走行する際の仕様について

エリア等の設定について

図表 6-30 設定エリア

	側面（左）		正面		側面（右）	
FRONT	1620		1620		1620	
SIDE	-646	-382	-382	382	382	646
欠損率	33%		50%		33%	

取り付け角度	30°
基準測距値	1380mm



図表 6-31 ハンドル形電動車いすの仕様

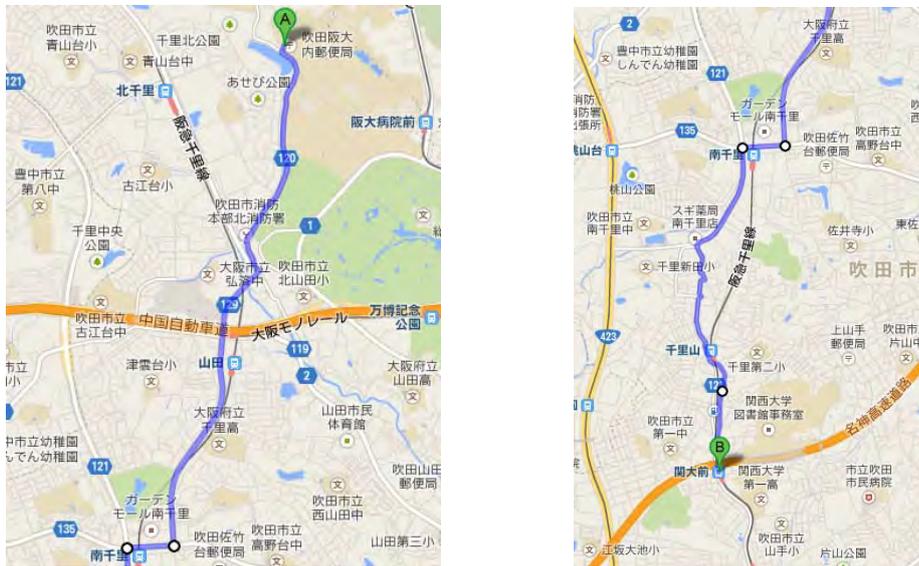
エリアの設定説明

日常空間を走行する際には、利便性を考えた場合に、少なくともバリアフリー道路に関しては停止することなく通過することが望ましいと考える。バリアフリー新法では勾配は5%以下が望ましく、沿道の状況等によりやむを得ない場合には8%以下とすることができるとされている。そこで今回は、8%までの勾配は停止することなく通過できるようなエリア設定をおこなう。8%の勾配を走行する際には、110mmの段差検知時と同等の測距データが得られると考えられる。また、振動により最大10mm前後の標準偏差が予想されることと合わせて考え、今回は8%の勾配を停止することなく通過するために、対象検知段差高さを120mmとする。よって防護エリアの距離は1620mmとなる。

また、側面は利便性を考え、側面段差に150mm近づいた場合に停止するような設定とする。

4.4.2 実験日時

実験日時： 2014年1月15日（水） 天候：晴れ
 実験時間： 11:00～17:30
 走行場所： 大阪大学吹田キャンパス～阪急関大前駅（往復）
 走行ルート概要図



図表 6-32 走行ルート図（Google map 引用）

大阪大学吹田キャンパスから関大前駅までの道のりをレーザスキャナ付きハンドル形電動車いすで走行することにより、日常空間で遭遇すると考えられる状況においても転落事故対策が有効なものであるかを検証する。

4.4.3 実験概要

エリアを設定し、設定したエリアで実際に街中を走行し、危険な状況において停止するか、危険ではないと判断した場合において停止しないかを検証する。なお、本研究においては客観的な根拠を基にして危険な状況を決定することはできないと考える。よって危険な状況や危険ではない状況と判断する場合には、個人の主観的判断でおこない、段差の形状などを記録する。

4.4.4 実験結果概要

走行結果を図表 6-33 にまとめる。

また、危険な状況で停止するか検証するため、側溝や歩車道等の段差に気づかず転落してしまう状況を想定し、側溝に向かって真っすぐ走行する状況を検証した。結果を表 6-34 に記す。

図表 6-33 走行結果まとめ（踏切は除く）

項目	往路	復路	合計
走行時間	2時間30分	2時間	4時間30分
危険と思われる状況で停止しなかった回数	0回	0回	0回
停止回数	危険と思われる場所	1回	1回
	危険ではないと思われる場所	3回	9回
	合計	6回	4回

図表 6-34 危険な状況（再現）における停止回数

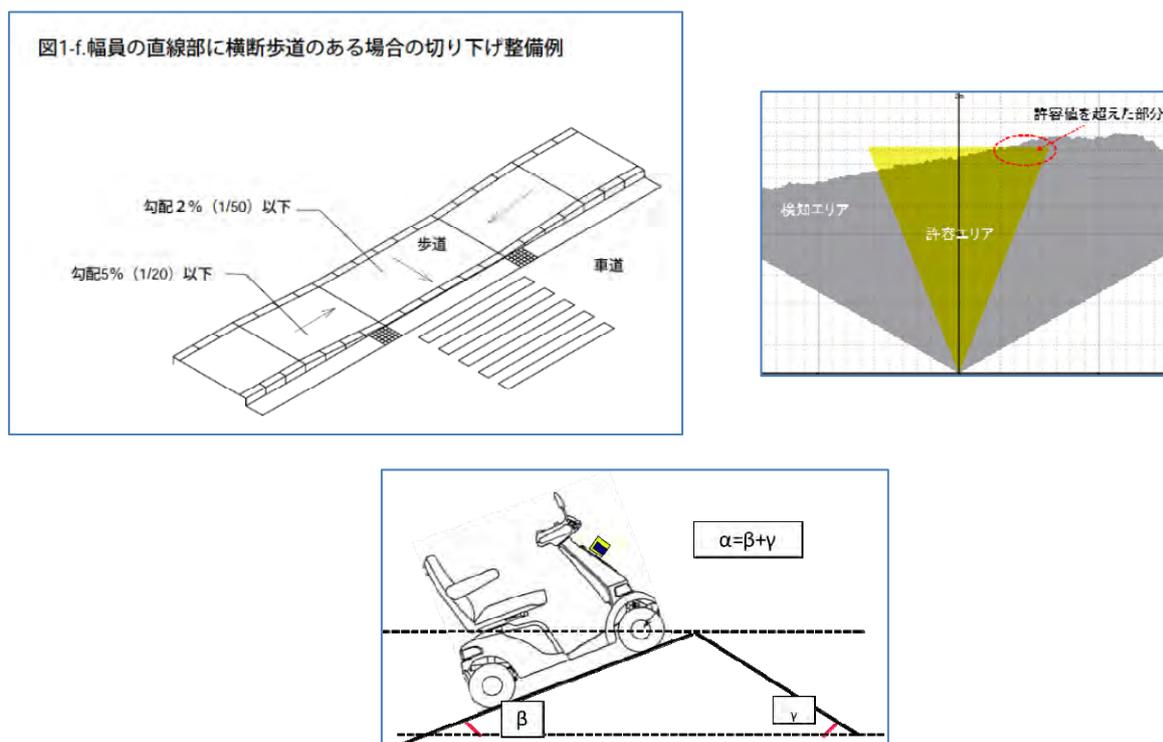
項目		回数
危険な状況 の再現	停止回数	8回
	停止しなかった回数	0回
	危険な状況の再現回数の合計	8回

以上、今回の走行結果をまとめると、以下のようになる。

- ① 危険と思われる状況では、全て転落前に停止制御が働くことが確認できた。
- ② 合計4時間半の走行中、主観的には使用する上で特に不都合はなかった。誤作動としては、危険ではないと思われる状況での停止は9回ほどあった。

危険ではないと思われる状況での停止は、大きく分けて以下の2点に分けられる。

- ① 車道から歩道へ乗り上げる切り下げ部を走行する際に、ハンドル形電動車いすが上下の縦断面の傾き+左右の横断面にも傾くことで側面の測距値が伸びることで許容値を超えて制御働く状況。
- ② 車いす設置地点が上り勾配、検知点が下り勾配の際に、合計の勾配が大きくなることで測距値が伸び、許容値を超えることで制御が働く状況。



図表 6-35 車道から歩道へ乗り上げる切り下げ部と実際のレーザスキャナのエリアモニタの様子

4.4.5 停止した状況の整理

今回の走行実験で停止した個所について、停止した場所と状況の写真を走行ルート順に図に記す。なお、本文中の歩道の形式を図表 6-36 で、と図中のの意味を図表 6-37 で、説明する。

図表 6-36 歩道の形式

歩道等の形式	歩道等面と車道面との関係	歩道等面と歩車道境界ブロック天端との関係	略図
マウントアップ型	歩道等面が高い	同一の高さ	
セミフラット型	歩道等面が高い	歩道等面が低い	
フラット型	同一の高さ	歩道等面が低い	

○ : 危険と思われる場所での停止	停止1-○: 停止箇所の番号(危険と思われる場所)
● : 危険と思われる場所での停止(再現)	停止2-○: 停止箇所の番号(危険では無いと思われる場所)
✕ : 危険でないと思われる場所での停止	---> : 停止した場所の写真
	— : 地図上の地形例

図表 6-37 図中の印の意味

4.4.6 地区別走行結果

1) 大阪大学吹田キャンパス千里門～府道 120 号線

歩道の形式 :

- マウントアップ型
段差高さ 200mm

側溝あり :

- 幅 : 250mm
深さ : 250mm



大阪大学吹田キャンパス千里門から府道 120 号線を走行する道のりでは、危険と思われる場所で 2 回、危険と思われない場所で 1 回、計 3 回ほど停止動作が働いた。以下に停止した状況について記す。

- 危険と思われる状況での停止 :

停止 1-1 :

歩道走行中に深さ 250mm の側溝に向かって前進したところ、転落前に側面段差まで 180mm のところで停止した。

停止 1-2 :

歩道走行中に段差高さ 200mm の車道へ向かって前進したところ、転落前に側面段差まで 200mm のところで停止した。

- 危険では無いと思われる状況での停止

停止 2-1 :

写真に示すような切り下げ部の縁石を通過したところ、制御動作が働いた。切り下げ部で車体が横断面に傾いており車体が横断方向に傾き、なおかつ縁石を通過する際に車体が上を向いたため、側面の測距データが許容値を超え、制御動作が働いた。

2) 府道 120 号線～吹田市津雲台 5 丁目 120 号線～山田駅

歩道の形式：

- マウントアップ型
植樹帯での分離

側溝あり：

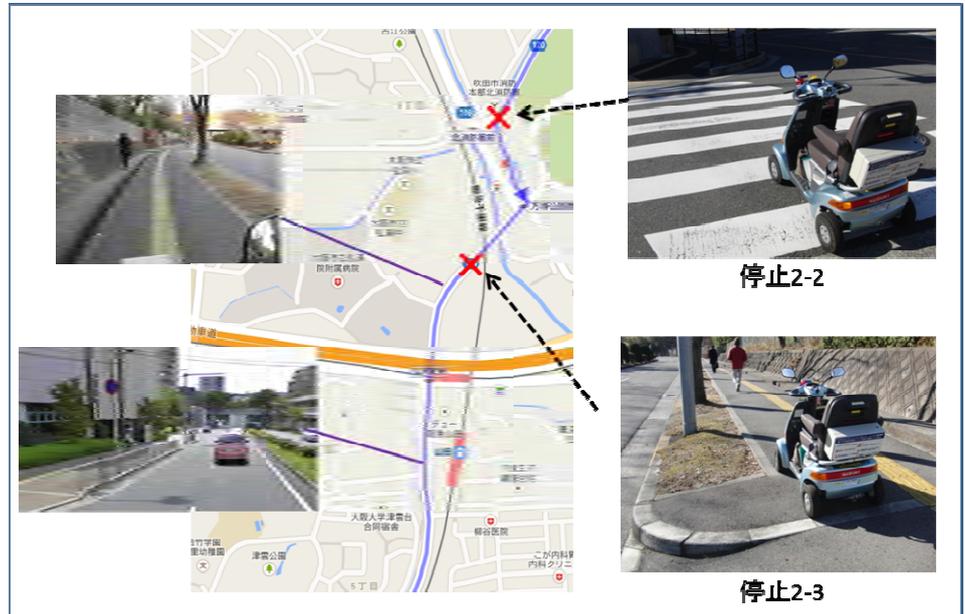
- 幅：250mm
深さ：250mm

山田駅～津雲台 5 丁目

歩道の形式：

- セミフラット型

側溝なし



停止2-2

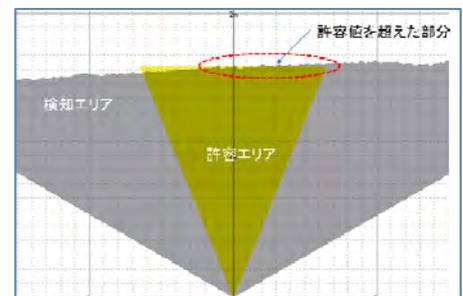
停止2-3

府道 120 号線から山田駅方面へ走行する道のりでは、危険と思われない場所で 2 回ほど停止動作が働いた。以下に停止した状況について記す。

- 危険では無いと思われる状況での停止

停止 2-2：

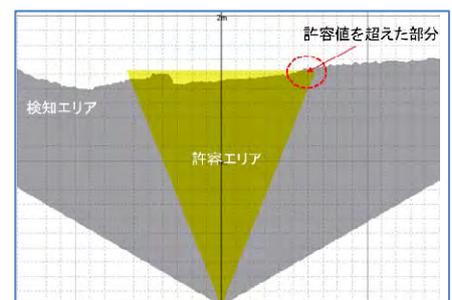
横断歩道を通過しようとしたところ、制御動作が働いた。ハンドル形電動車いす設置地点が上り勾配かつ、検知地点が下り勾配であったため、測距データが許容値を超え停止動作が働いた。



図表 6-38 停止時エリア図例：停止 2-2

停止 2-3：

切り下げ部を通過したところ、制御動作が働いた。切り下げ部で車体が縦横断方向に傾いていたため、車体が傾くことで側面の測距データが許容値を超え、制御動作が働いた。



図表 6-39 停止時エリア図例：停止 2-3

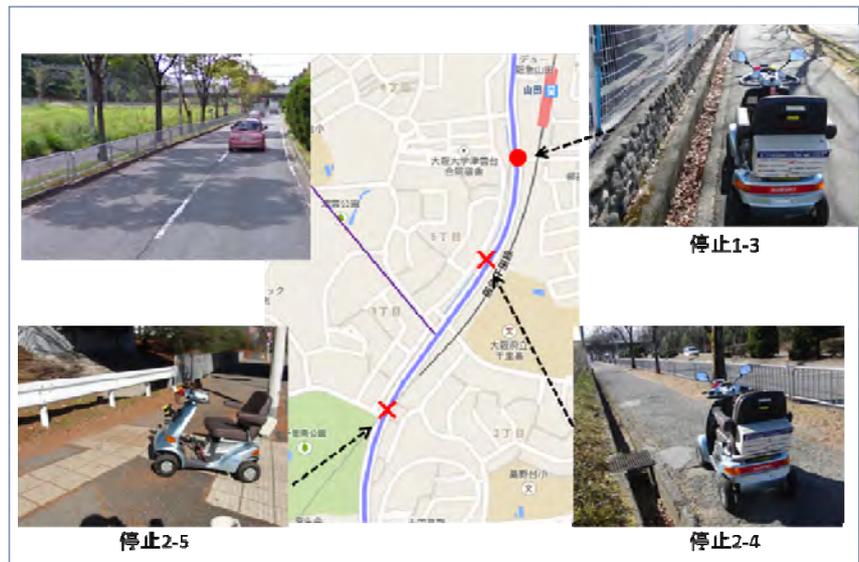
3) 吹田市津雲台

歩道の形式：

- マウントアップ型
柵による分離

側溝あり：

- 幅：250mm
深さ：250mm



津雲台を走行する道のりでは、危険と思われる場所で1回、危険と思われない場所で2回、計3回ほど停止動作が働いた。以下に停止した状況について記す。

- 危険と思われる状況での停止：

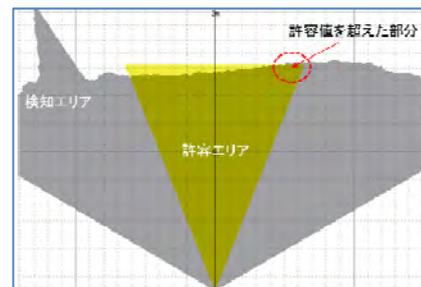
停止 1-3：

歩道走行中に深さ 250mm の側溝に向かって前進したところ、転落前に側面段差まで 200mm のところで停止した。

- 危険では無いと思われる状況での停止

停止 2-4：

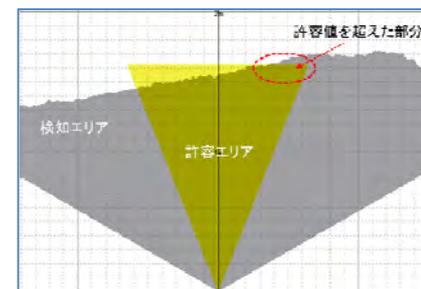
舗装の劣化により凸凹した部分を走行中に、道路の出っ張り部を走行した際に停止動作が働いた。道路の出っ張り部を走行時に車体が上を向いたため、側面の測距データが許容値を超え、制御動作が働いた。



図表 6-40 停止時エリア図例：停止 2-4

停止 2-5：

切り下げ部を通過したところ、制御動作が働いた。切り下げ部で車体が縦横断方向に傾いていたため、車体が傾くことで側面の測距データが許容値を超え、制御動作が働いた。



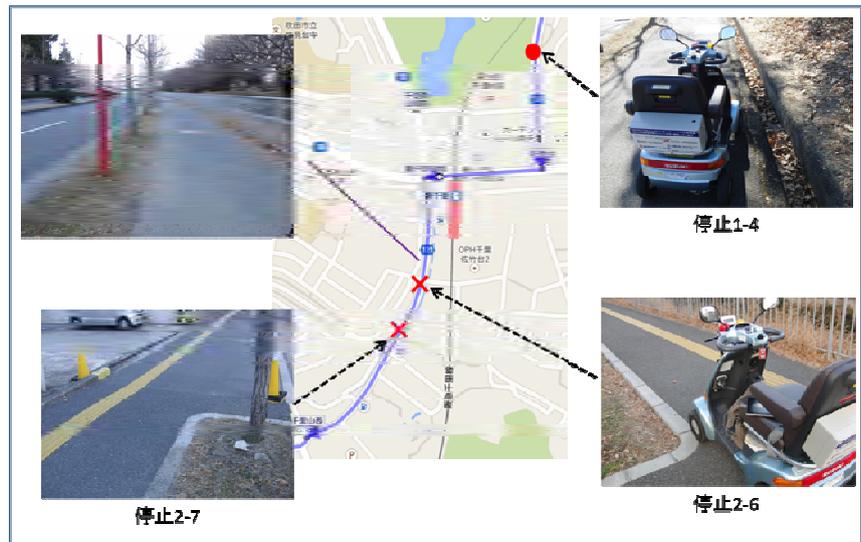
図表 6-41 停止時エリア図例：停止 2-5

4) 吹田市津雲台 1 丁目～吹田市千里山西 6 丁目南

歩道の形式：

- セミフラット型

側溝なし



津雲台から千里山西 6 丁目の方面へ走行する道のりでは、危険と思われる場所で 1 回、危険とされない場所で 2 回、計 3 回ほど停止動作が働いた。以下に停止した状況について記す。

- 危険と思われる状況での停止：

停止 1-3：

歩道走行中に深さ 250mm の側溝に向かって前進したところ、転落前に側面段差まで 150mm のところで停止した。

- 危険では無いと思われる状況での停止

停止 2-6、2-7：

切り下げ部を通過したところ、制御動作が働いた。切り下げ部で車体が縦横断方向に傾いていたため、車体が傾くことで側面の測距データが許容値を超え、制御動作が働いた。

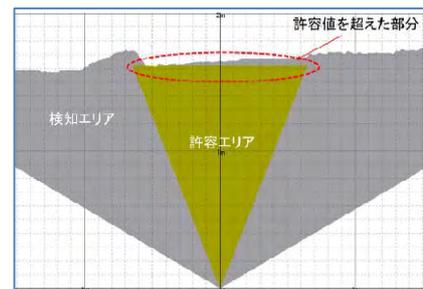


図 6-42 停止時エリア図例：停止 2-6

5) 吹田市千里山西 6 丁目南～阪急千里山駅
千里山西 6 丁目南～関西電力西千里変電所

歩道の形式：

- マウントアップ型
柵での分離

側溝あり：

- 幅：250mm
深さ：250mm

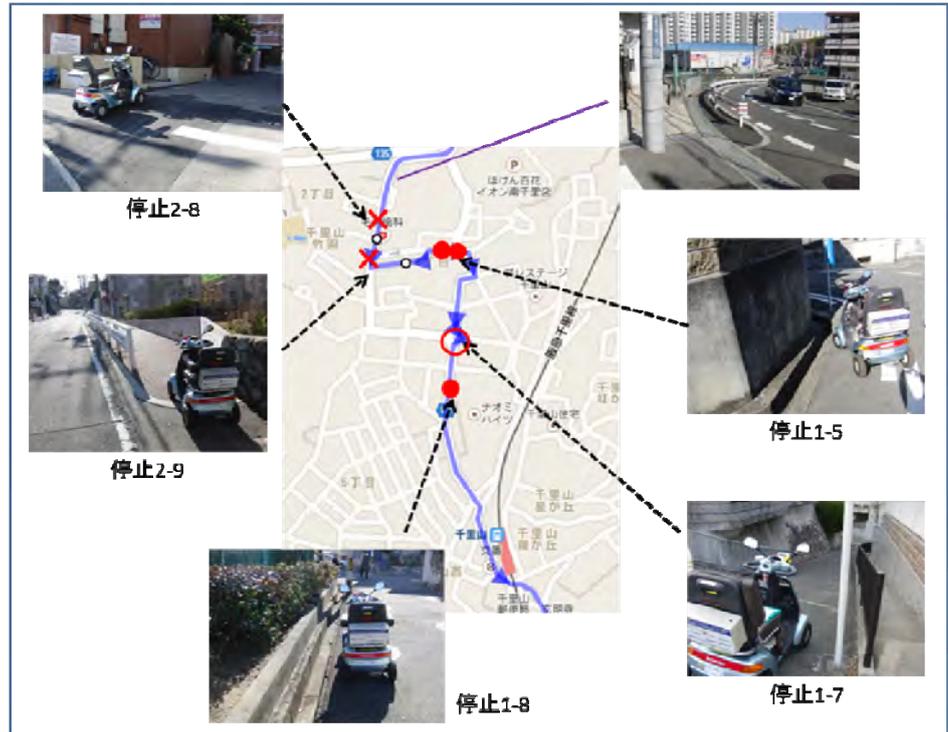
関西電力西千里変電所～
阪急千里山駅

歩道の形式：

- 歩車の分離なし

側溝あり：

- 幅：250mm
深さ：250mm



吹田市千里山西 6 丁目南から阪急千里山駅へ走行する道のりでは、危険と思われる場所で 4 回、危険と思われない場所で 2 回、計 6 回ほど停止動作が働いた。以下に停止した状況について記す。

- 危険と思われる状況での停止：

停止 1-5、1-6：

歩道走行中に深さ 200mm の側溝に向かって前進したところ、転落前に側面段差まで 220mm のところで停止した。

停止 1-7：

歩道走行中に勾配 20%の坂を下ろうとしたところ、停止した。

停止 1-8：

歩道走行中に深さ 280mm の側溝に向かって前進したところ、転落前に側面段差まで 200mm のところで停止した。

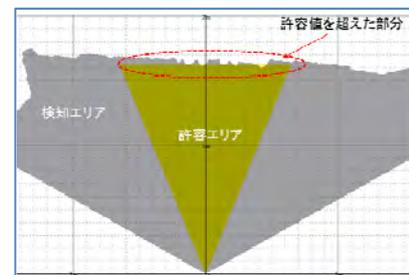


図 6-43 停止時エリア図例：停止 2-8

- 危険では無いと思われる状況での停止

停止 2-8：

切り下げ部を通過したところ、制御動作が働いた。切り下げ部で車体が縦横断方向に傾いていたため、車体が傾くことで側面の測距データが許容値を超え、制御動作が働いた。

停止 2-9：

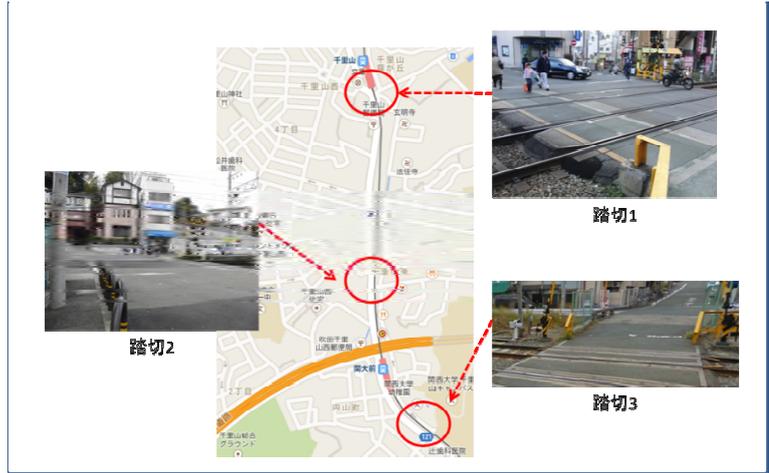
切り下げ部を通過したところ、制御動作が働いた。切り下げ部で車体が縦横断方向に傾いていたため、車体が傾くことで側面の測距データが許容値を超え、制御動作が働いた。

踏切通行時

6) 踏切走行時

- 踏切 1： 阪急千里山駅南
- 踏切 2： 阪急関大前駅北
- 踏切 3： 阪急関大前駅南

今回の走行実験では3ヶ所の踏切を各3往復ずつ走行した。各踏切を走行した結果を図表 6-44 に表す。



図表 6-44 踏切走行結果 (○：停止せず通過 ×：途中で制御動作が働く)

試行	踏切 1		踏切 2		踏切 3	
	往路	復路	往路	復路	往路	復路
1 回目	○	○	×	×	×	○
2 回目	○	○	×	○	○	○
3 回目	○	○	×	×	○	○

➤ 停止した原因について

踏切 2：

踏切 2 では、ほとんど全ての走行で踏切走行中に制御動作が働いた。測距データを基に原因について考えると、以下の2点が原因と考えられる。

① 地形的な理由

まず1点目に地形的な理由のため制御止動作が働いたと考えられる。線路 2 では、線路内に上下の勾配が存在したため、ハンドル形電動車いす設置地点が上り勾配かつ、検知地点が下り勾配であったため、図表 6-45 のように測距データが許容値を超え停止動作が働いた。

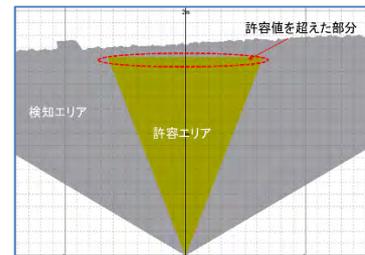
② 反射による理由

2 点目に反射が原因で制御動作が働いたと考えられる。踏切通過時の測距データを確認したところ、一部で図表 6-46 のように許容値をはるかに超えた測距データを測定している。

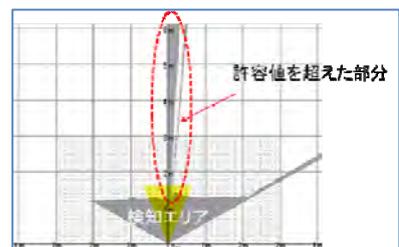
これは、レールの金属にレーザー光が反射したことで誤検知してしまったと考えられる。

踏切 3：

踏切 3 では1走行のみ制御動作が働いた。制御動作が働いた理由は、図表 6-47 に示すように、踏切 2 の②同様レーザー光がレールの金属に反射したことで誤検知してしまったためと考えられる。



図表 6-45 停止時エリア図例：踏切 2 その 1



図表 6-46 停止時エリア図例：踏切 2 その 2

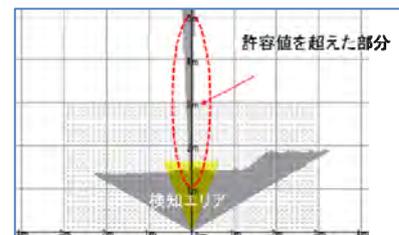


図 6-47 停止時エリア図例：踏切 3

4.4.6 まとめ

街中で走行した結果、設定したエリアで危険と思われる状況で停止することが確認できた。このことより、本研究が提案する転落事故防止策によって転落事故に対して安全性が向上すると考えられる。一方で危険では無いと思われる状況で制御動作が働く場面も数カ所みられ、利便性がやや低下することが考えられるが、許容段差高さをもう少し高くすることや欠損率の変更などによって改善できるのではないかと考える。

第7章 まとめ

1 誘導式ゴルフカート

誘導式ゴルフについてはゴルフ場が加入する施設利用保険の保険金支払い実績調査や、実際にゴルフ場を訪問してヒアリング調査したり、WEB を利用したプレイヤー側のアンケートも実施し、多角的な調査を実施してきた。これらにより机上のリスクアセスメントを補完し、妥当な安全対策を実施できたと考える。

ゴルフカートは走行速度が概ね 10km/h 以下であること、開放的な作りで走行中にも歩行者の接近、乗車、降車が行われる事実、またなによりも無人走行するという特徴がある。このようなロボットの歩行者に対する安全を確保することを考えると、一般の自動車の安全対策とは違い、短い距離で視野角の広い検知が必要という結論となり、センシングデバイスとしてレーザスキャナを選択したことは妥当であった。

次に従来のリモコンは通信圏外にまで離れるとゴルフカートを停止操作させることができないこと、また、スタート直後の停止に関しては応答時間が長く設定されているなど、安全上の課題があった。その対策として今回開発した非常停止専用のスイッチを設けた安全無線非常停止装置つきリモコンは、誘導式ゴルフカートに限らず自動走行、自律走行するロボットに共通して利用されるものである。また、このリモコンのみの導入でもリスク低減効果があると考えられる。

人口減少もあって、ゴルフ人口は減少の傾向にあり、日本のゴルフ場は軒並み厳しい経営を強いられている。今回のシステムを導入するためにはコストダウンを検討し事業化したい。

2 ハンドル型電動車いす

ハンドル型電動車いすは言うまでもなく操縦者が必ず搭乗して稼働する移動ロボットである。搭乗者がある場合のロボットの最適な回避については操舵によるものも想定されるが、私達はそのような分野の詳細な知見を持ち合わせていない。しかし今回、進行方向正面の、安全に降りられる保証がない大きな段差に対して、ロボットのおおよそ最短制動距離（メカニカルなブレーキを使用しない場合）でこれを検知し、強制的にロボットを停止させる制御を採用した。これは、この時点以降の搭乗者の減速操作より早い停止を実現するからである。

一方、今回採用したハンドル型電動車いすは使用上の注意として踏切内へ進入しない旨の情報が与えられている。しかしこの予見される誤使用への対応が課題と考える。

事業全体の成果

目 標	研究開発成果	達成度	課題と解決方針 ※未達の場合のみ
<p>(1) (X)安全機器技術の研究開発－安全センシング技術の研究開発(X1)</p> <p>検出エリア:180°(分解能:0.5°) 検出距離:2m(精度:±100mm) 応答速度:150ms 耐光性能:100000lux 耐雨性能:10mm/min 耐霧性能:視程 50m 以上 安全度水準: SIL2</p>	<p>(1) ジンバル機構による 3D スキャン方式により、太陽光の影響を軽減した屋外対応レーザスキャナを PLd、SIL2 の安全性能で試作した。安全防護のための検知エリア(検出距離)2m、応答速度 270ms である。</p>	(1) 未達 (90%達成)	(1) 応答速度は 270ms で未達であるが、検出距離内で安全停止できることが確認できたため実使用上問題はない。
<p>(2) (X)安全機器技術の研究開発－安全無線通信の研究開発(X2)</p> <p>有効距離:100m(精度:±20m) 保護構造:IP65 安全度水準: SIL3</p>	<p>(2) 移動ロボットに共通して必要となる安全無線による非常停止装置を開発した。応答時間 160ms (1:1 通信時)、通信距離最大 150m、国際規格に準拠した安全な停止と表示機能を備えている。</p>	(2) 達成	
<p>(3) (X)安全機器・システム技術の研究開発－GPS と RFID による誘導技術の研究開発(X3)</p> <p>GPS による誘導走行と、RFID による危険区域からの隔離</p>	<p>(3) 初年度の基礎実験後の考察にて精度に課題があることなどが判明した。またその他の技術にて十分なリスク低減が可能なことから基礎実験までとした。</p>	(3) H24 年度に中止	(3) 初年度の基礎実験後の考察にて精度に課題があることなどが判明した。またその他の技術にて十分なリスク低減が可能なことから基礎実験までとした
<p>(4) (Y)安全システム設計技術の研究開発－機能安全システム(Y1)、及びシステムのリスクアセスメント技術(Y2)の研究開発</p> <p>安全度水準: SIL2 入力機器のレーザスキャナ、安全無線非常停止装置から安全制御ユニットを介して安全リレーを駆動してコンタクタ断までを安全関連部で構築。</p>	<p>(4) 機能安全システム開発(Y1) リスクアセスメントの結果から要求される安全性能の維持能力(PLd、SIL2)をもった機能安全制御システムを構築した。また故障挿入試験(FIT)試験による妥当性確認を実施し合格した。</p> <p>リスクアセスメント技術の開発(Y2) 電磁誘導式ゴルフカートにおける自動走行モードを対象にリスクアセスメントを実施した。また、ゴルフ場の責任者(支配人など)、キャディ、プレイヤー、保険金支払い記録などの多角的な事故調査により、これを補完した。</p>	(4) 達成	
<p>(5) (Z)安全運用技術の研究開発－広域空間での安全システム運用技術(Z1)、および安全管理技術(Z2)</p> <p>ゴルフ場とシニアカーの移動空間における交通工学に基づい</p>	<p>(5) 残留リスクへの対応と、ゴルフ場に対する包括的な安全運用マニュアルを策定した。</p>	(5) 達成	

<p>た安全システム技術の構築と安全運用マネジメントの実現</p> <p>(6) 安全性基準に関する適合性評価に対する協力</p> <p>搭乗型生活支援ロボット試作と試作機的设计コンセプト認証ドキュメント製作</p>	<p>(6) 生活支援ロボット安全検証センターに対して、段差検知による停止性能測定、斜面における姿勢変化の影響測定など、電磁誘導式ゴルフカートならびにハンドル型電動車いす等搭乗型生活支援ロボットについての性能評価方法を提案した。</p>	<p>(6) 未達 (90%達成)</p>	<p>(6) 2016年までに認証ドキュメント完備予定</p>
--	--	-----------------------	---------------------------------

年度毎の特許、論文、外部発表等の件数

特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発表・ 講演	新聞・雑誌等 への掲載	その他
H23FY	0件	0件	0件	0件	5件	5件	0件	0件
H24FY	0件	0件	0件	3件	3件	6件	0件	0件
H25FY	1件	0件	0件	2件	5件	7件	0件	1件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

注) 論文投稿し、かつ学会発表も行っているものは、上表「論文」「学会発表」両方に記載

平成21・03・27産局第2号
平成21年4月1日

ロボット・新機械イノベーションプログラム基本計画

1. 目的

我が国の製造業を支えてきたロボット技術・機械技術を基盤とし、IT技術・知能化技術など先端的要素技術との融合を促進することにより、家庭、医療・福祉、災害対応など幅広い分野で活躍する次世代ロボットや新機械技術の開発・実用化を促進し、生産性の向上と人間生活の質の向上を実現するとともに、我が国経済社会の基盤である製造業の競争力の維持・強化を目指す。

2. 政策的位置付け

経済財政改革の基本方針2008(2008年6月閣議決定)

経済成長戦略の3本の柱、革新的技術創造戦略のうち、革新的技術戦略のひとつとしてロボット技術が位置付けられている。

科学技術基本計画(2006年3月閣議決定)

ロボット・新機械技術は、特に重点的に研究開発を推進すべき分野(重点推進4分野)の一つである情報通信分野や、推進分野であるものづくり技術分野、社会基盤分野に位置付けられている。

「経済成長戦略大綱」(2006年7月財政・経済一体改革会議。2008年6月改定版を経済財政諮問会議に報告)

国際競争力の強化の取組みのうち、世界の潜在需要を喚起する新産業群の創出において、我が国が特に優位性を有し、早期にその成果を社会に還元するため、積極的な実証や環境整備を行うべき技術として、ロボットやMEMS技術が位置付けられている。

「新産業創造戦略」(2005年6月経済産業省取りまとめ)

先端的新産業分野として、「ロボット」を戦略7分野の一つとして掲げ、2010(平成22年)までの市場規模、その成長に向けたアクションプログラムを盛り込んでいる。当該アクションプログラムには、ユーザ(施設、地域)を巻き込んだ実証試験を中心としたモデル開発事業による先行用途開発、モデル事業と連携した重要な要素技術や共通インフラ技術の開発支援、及び人間とロボットの共存に必要な安全性の確保と、保険制度等の制度基盤の整備が提示されている。

新機械技術の重要分野であるMEMS技術について、当該新産業群の創出を支える重点四分野(「科学技術基本計画」による)の分野間の融合による推進が指摘されている。

「イノベーション25」(2007年6月閣議決定)

ロボット・新機械技術は、生涯健康な社会や多様な人生を送れる社会の実現に向けて、中長期的に取り組むべき課題として、新たな走行車等の普及促進のための環境整備、高度みまもり技術導入のためのルール作りなどの安全・安心な社会形成、また、ユビキタスネットワークや民生用ロボットの本格普及に向けた環境整備、低侵襲診断・治療技術の実現、安全・安心な社会のための将来デバイスの実現、さらに世界的課題解決に貢献する社会のための新しいものづくり技術など、今後の研究開発の進展等によって、その成果を社会に適用していく上で取組が必要であるとともに、随時見直しをし、その取組を加速・拡充していくことが必要とされている。

「ロボット産業政策研究会」報告書（2009年3月とりまとめ）

近い将来に、次世代ロボットが実際に役立つものになるよう、特に技術開発・事業開発、安全確保、社会ルールの整理・策定のための取組等についてまとめた。

3. 達成目標

- (1) 我が国製造業の高度化に必要な基盤技術である機械分野においては、パイオ技術やIT技術等の異分野技術を活用した従来の機械の概念を超えた新しい機械の創造及びその計測技術の確立を図ることを目標とする。例えば、2015年頃に革新的MEMSの本格普及を目指すことにより、安全・安心な社会の構築に貢献する。
- (2) 安全・安心な社会、便利でゆとりある生活の実現のために必要不可欠なロボットは、信頼性技術、高機能化・知能化技術、システム化技術が特に重要であり、これら技術を開発することで、2015年頃には、自律的に多様な作業を行うロボットの実用化を目指す。

4. 研究開発内容

[プロジェクト]

・ロボット技術開発

(1) 生活支援ロボット実用化プロジェクト（運営費交付金）

概要

介護者支援や移動支援等の生活支援にあたっては、人との接触度が高くなるため、より一層の安全性の確保が必要。このため生活支援ロボットの対人安全性技術の開発・実証と、安全基準設定等に向けた安全性・有効性データの集約・分析を実施する。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、生活支援ロボットのリスクアセスメント手法や、安全性基準適合性評価手法・情報の蓄積提供手法を確立する。また、対人安全性に関する指標、機械・電気安全、機能安全の試験・評価方法や手順について、国際標準提案を行えるようにするとともに、実証試験を実施する。

研究開発機関

2009年度～2013年度

(2) 基盤ロボット技術活用型オープンイノベーション促進プロジェクト（運営費交付金）

概要

これまでの研究開発プロジェクトの成果を活用し、生活環境やロボットで使用される各種要素部品をRT(Robot Technology)システムで利用しやすい共通の接続方式、制御方式の下で利用可能な形で提供(RTコンポーネント化)するための基盤を開発する。これにより既存の生活環境を簡単にRTシステム化し、それらを活用することにより様々な生活支援機能の提供、基盤ロボット技術の普及と標準化を推進する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、共通の通信インタフェースとRTミドルウェアで動作させる基盤通信モジュール、既存の要素部品をRTコンポーネント化したRT要素部品、それらを用いたRTシステムを開発する。

研究開発期間

2008年度～2010年度

(3) 次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

生活空間や多品種少量生産の製造現場など状況が変わりやすい環境下では、ロボットの使用条件や用途は大きく限定されている。これを克服するため、ロボットが確実性(ロバスト性)をもって稼動し、ロボットの環境・状況認識能力等の向上とともに、ロボットの知能要素をモジュール化し、その蓄積管理及び組合せ等を可能とする技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代ロボットが高度な作業(タスク)を行う上で必要な効率的で実用的な知能化技術を開発する。具体的には、魅力的でニーズが高いタスクを設定し、知能化技術モジュールを開発し、高機能なロボットシステムの構築を実証する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

市場ニーズ及び技術戦略マップに基づき、約10年後にロボット技術の活用により達成するミッションを設定した上で、これを達成するために必要なロボットシステム及び要素技術開発を、関係府省の連携の下で実施する。

技術目標及び達成時期

市場ニーズ及び技術戦略マップに基づき、約10年後にロボットを活用して達成するミッションを設定した上で、これを達成するために必要なロボットシステム及び要素技術の開発を実施する。具体的かつ先端的なRT開発を支援することで、我が国のRT競争力の維持・発展を図るとともに、研究開発成果の他分野(自動車、情報家電等)への波及を図る。

研究開発期間

2006年度～2010年度

・MEMSの技術開発・新機械産業の領域開拓

(1) 異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

高信頼性が必要な医療分野や特殊環境等で活用され、医療や安全・安心等の社会的課題を解決する、小型・高性能・省エネルギーな次世代デバイスの基盤プロセス技術を、MEMS製造技術とナノ・バイオ等の異分野技術の融合により開発する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、次世代デバイス製造に必要な不可欠な基盤プロセス技術群である、バイオ・有機材料融合プロセス技術、3次元ナノ構造形成プロセス技術、マイクロ・ナノ構造大面積・連続製造プロセス技術を開発すると共に、得られた知見を系統的に蓄積しデータベース化し、従来の技術情報と統合的に取り扱える知識データベースシステム整備を行う。

研究開発期間

2008年度～2012年度

5. 政策目標の実現に向けた環境整備(成果の実用化、導入普及に向けた取組)

[導入普及促進]

ロボットやその関連部品等の見本市の開催等を支援することによって、システム開発者、要素部品の開発者、ロボットユーザ等との間のマッチングを図り、中小・ベンチャーや異業種企業のロボット産業への参入を促進する。

また、市場創出に貢献するロボットを表彰し、ロボットユーザ、メーカーから一般の方まで広くPRする表彰制度「今年のロボット」大賞を共催機関と協力して実施している。

開発したソフトウェア等の成果については、広く一般に提供するなど積極的な普及を図ることにより、より多くの開発主体がロボット技術開発に参加できる環境を創出し、ロボット技術開発の裾野の拡大を図る。

将来のロボットは人に接する場面が多くなるであろう。したがって、ロボットの導入・普及を促進するためには、安全に対する考え方を整理し、周知することが重要である。平成19年7月には人間と共存する次世代ロボットの安全性を確保するための基本的な考え方をまとめた「次世代ロボット安全性確保ガイドライン」をとりまとめた。今後は、普及や具体化に向けた取組みが求められており、技術開発と並行して安全に係るルールなどの整備を推進することで普及をより現実化させることが必要である。

MEMSの一層の実用化促進を図るため、異分野や製造設備を有していない企業でも容易にMEMSビジネスに参入できるように、MEMS用設計・解析支援システムを開発した。その成果を活用しつつ、実習を中心とした人材育成及び試作環境の充実、製造拠点(ファンドリー)強化などMEMS産業全体の競争力の維持・強化を図る。

[標準化]

各プロジェクトで得られた成果のうち、標準化すべきものについては適切な標準

化活動（国際規格（ISO/IEC）、日本工業規格（JIS）、その他国際的に認知された標準団体（OMG等）への提案等）を実施する。

特に、ロボットの安全基準や性能の評価基準については、過去に実施した研究開発プロジェクト等による実証データや「次世代ロボット安全性確保ガイドライン」の活用を図りつつ我が国発の国際標準としての提案について検討し、拡大するロボット市場における国際競争力の確保を目指す。

なお、これまでの研究施策の成果である、ロボット部分品の接続の共通化を目指したRTM（ロボット・テクノロジー・ミドルウェア）が、OMG（ソフトウェア技術の国際標準化団体）において、平成19年12月に標準仕様として採択されている。

MEMS技術・製品を世界市場に広く普及するために技術戦略マップに基づくMEMS標準化戦略の策定、国際規格案の開発、提案、推進等の標準化活動に継続的に取り組む。

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

7. 改訂履歴

- (1) 平成14年2月28日付け、21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画制定。
- (2) 平成15年3月10日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画（平成14・02・25産局第3号）は、廃止。
- (3) 平成16年2月3日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画（平成15・03・07産局第11号）は、廃止。
- (4) 平成17年3月31日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画（平成16・02・03産局第16号）は、廃止。
- (5) 平成18年3月31日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画（平成17・03・25産局第18号）は、廃止。
- (6) 平成19年4月2日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画（平成18・03・31産局第7号）は、廃止。
- (7) 平成14年2月28日付け、新製造技術プログラム基本計画制定。
- (8) 平成15年3月10日付け制定。新製造技術プログラム基本計画（平成14・02・25産局第6号）は、廃止。
- (9) 平成16年2月3日付け制定。新製造技術プログラム基本計画（平成15・03・07産局第9号）は、廃止。
- (10) 平成17年3月31日付け制定。新製造技術プログラム基本計画（平成16・02・03産局第11号）は廃止。
- (11) 平成18年3月31日付け制定。新製造技術プログラム基本計画（平成17・03・25産局第5号）は、廃止。
- (12) 平成19年4月2日付け制定。新製造技術プログラム基本計画（平成18・03・31産局第6号）は、廃止。

- (1 3) 平成 2 0 年 4 月 1 日付け、ロボット・新機械イノベーションプログラム基本計画
制定。2 1 世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画(平成 1 9 ・ 0 3 ・ 1 5
産局第 2 号)及び新製造技術プログラム基本計画(平成 1 9 ・ 0 3 ・ 1 9 産局第
3 号)は、本イノベーションプログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (1 4) 平成 2 1 年 4 月 1 日付け制定。ロボット・新機械イノベーションプログラム基本
計画(平成 2 0 ・ 0 3 ・ 2 7 産局第 3 号)は、廃止。

(ロボット・新機械イノベーションプログラム)
「生活支援ロボット実用化プロジェクト」基本計画

技術開発推進部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

我が国では、少子高齢化が急速に進展しており、このままでは我が国の社会を支える人材が不足することが懸念されている。

一方、我が国は、産業用ロボットをはじめ、国際的にもトップレベルのロボット技術を蓄積してきた。これらのロボット技術を活用して、製造業の生産工程やサービス業の作業工程における一層の効率化・自動化の促進が必要となっている。

また、ロボット技術は産業分野のみならず、介護・福祉、家事、安全・安心等の生活分野においても、社会的課題の解決策の一つとして活用することが期待されており、生活支援ロボットの活用により、生活の質や利便性向上が可能となる。

しかしながら、不特定多数の人が関与する等、条件や状況が変化する実際の使用環境下で稼働する生活支援ロボットは、対人安全技術が確立されておらず残留リスクの高いものが多く、民間企業の独自の取組のみに委ねては本格的な産業化が期待できない。このため、国等の一定の関与により、安全性検証を行う認証機関・試験機関、安全性基準に関する国際標準等を整備することが求められている。

本プロジェクトは、生活支援ロボットとして産業化が期待されるロボットを対象に関係者が密接に連携しながら安全に係る試験を行い、安全性等のデータを取得・蓄積・分析し、具体的な安全性検証手法の研究開発を実施することを目的とする。

また、これらの試験においてはロボット研究開発実施者と安全性検証手法の研究開発実施者が連携し、リスクアセスメント技術、危険予防技術の検討や実際の使用環境下で幅広い参加者による実証試験を集中的に実施する。さらに、生活支援ロボットの安全性基準等の国際標準化を念頭に置きつつ研究開発を進める。

なお、本プロジェクトは、経済産業省が推進する「ロボット・新機械イノベーションプログラム」並びに内閣府が推進する「社会還元加速プロジェクト」の一環として実施する。

(2) 研究開発の目標

(最終目標) 平成25年度

生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を確立し、生活支援ロボットの開発者に提供可能となること。対人安全性に関する指標、機械・電気安全、機能安全の試験・評価方法や手順について、国際標準提案を行えること。生活支援ロボットに関する安全性基準適合性評価手法を確立すること。

研究開発の対象とした生活支援ロボットに関して、安全性検証のための安全性試験を完了し、ロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示され、実証試験が完了していること。

(中間目標) 平成23年度

生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を開発するとともに、人間工学実験等による対人安全性に関するデータをロボット開発実施者に提供すること。研究開発の対象とした生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に必要な試験装置を開発し、ロボット安全性試験項目、各タイプのロボットの試験・評価方法や手順の策定を行うこと。これらに基づき、対象としたロボットの安全性検証を完了していること。

最終目標及び中間目標の詳細は、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、次の5つの研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

[委託事業]

研究開発項目① 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発

研究開発項目② 安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの開発

研究開発項目③ 安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発

研究開発項目④ 安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットの開発

研究開発項目⑤ 安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）が、実施者を公募により選定し、委託により実施する。なお、研究開発項目①を実施する体制は国際標準化を推進できるものとする。研究開発項目②～⑤を実施する体制は、ロボットのハードウェアまたはソフトウェアの開発者、及び実証試験施設提供者の参加を得るものとする。

本研究開発の推進にあたっては、NEDOが研究開発責任者（プロジェクトリーダー）を指名する。

(2) 研究開発の段階的推進

研究開発項目②～⑤の実施は、安全性に係る試験方法の検討段階であるプロジェクトの初年度から参加する「グループⅠ」と、開発された安全性に係る試験手法を用いて2年度目から試験を行う「グループⅡ」に分けて段階的に推進する。「グループⅡ」については、各タイプのロボットの試験・評価方法や手順が策定される2年度目に公募により実施者を選定する。

なお、「グループⅠ」については、実施者毎に、3年度目において実施計画の見直しを行う。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の実施期間は、平成21年度から平成25年度までの5年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成23年度、事後評価を平成26年度に実施し、中間評価結果を踏まえ、必要に応じ、その結果を後年度の研究開発に反映することとする。

なお、平成25年度までの各年度中に推進委員会等で各研究開発内容を内部評価し、必要に応じ、プロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他の重要事項

(1) 成果の取扱い

①成果の普及

得られた研究開発成果については、NEDO及び実施者とも普及に努めるものとする。共有可能なロボット安全要素技術に関しては、実施者間の成果の公開を必須としてオープンイノベーションを促進するとともに、プロジェクト実施期間中または終了後に、適切な知財戦略の下、成果の外部への提供を積極的に行うこととする。

②成果の産業化

a) 研究開発項目①の実施者は、本研究開発から得られる安全性検証手法等に関する研究開発成果の着実な実用化を図るため、本研究開発の終了後に実施すべき取組のあり方や検証・認証機関の構築及びビジネスモデルについて立案する。また、開発した安全性基準等の国際標準化を戦略的に推進する仕組みを構築する。

b) 研究開発項目①の実施者は、上記a)で立案した取組とビジネスモデルを本研究開発の終了後、実行に移し、成果の産業面での活用を努めるものとする。また、研究開発項目②～⑤の実施者においては、本研究開発の終了後も成果の保守管理及び安全技術の蓄積・発展に努める。

③知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発・標準化動向、産業技術政策動向、プログラム基本計画の変更、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第2号に基づき実施する。

6. 基本計画の改訂履歴

- (1) 平成21年3月、制定。
- (2) 平成22年12月、平成22年補正予算（第1号）に伴い、研究開発の実施方式の一部内容を改訂。
- (3) 平成24年3月、所管部署の変更等により改訂。
- (4) 平成25年2月、(別紙)研究開発計画の研究開発項目②～⑤中の特記事項に関して、25年度実施内容の追加による改訂。

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目①：生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発

1. 研究開発の必要性

生活支援ロボットは少子高齢化の課題に対して大きな支援力になると期待されている。しかし、生活支援ロボットは不特定多数の人が関与する使用環境で稼働することが考えられ、安全を保證する方式が確定していない。特に、対人安全技術が確立されていないため残留リスクの高いものが多く、早急にリスクを低減し安全性を保證する方式を策定することが求められている。このため、本研究開発項目では生活支援ロボットの安全性や信頼性等のデータの取得・蓄積・分析を行い、具体的な安全性基準を含む実務的な安全性検証手法の策定に必要な技術を開発する。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 生活支援ロボットの安全性検証方法の開発

生活支援ロボットの安全性を検証するには、まずロボット開発実施者が自らリスクアセスメントを行った後、これに基づいて安全性検証を行う認証機関及び試験機関により客観的に安全性を検証する手順となる。リスクアセスメントに関しては、我が国でいち早く策定された「次世代ロボットのための安全確保ガイドライン」に則り、ISO-12100 に規定されているリスクアセスメントを実行する方針とする。しかし、生活支援ロボットのリスクアセスメントに関しては、本質安全設計のための定量指標等がほとんどなく、社会的にも方法論が確立していない。このため、生活支援ロボットに関するリスクアセスメント手法を開発する。

他方、生活支援ロボットにおける安全性の評価試験方法については、生活支援ロボットの普及のためにはその枠組みを早急に設定する必要がある。機械・電気・機能安全の側面からの試験は既存の関連規格が存在するため、これらを参考に安全性・信頼性等に関するデータを取得・蓄積・分析することにより定める。

①リスクアセスメント手法の開発

生活支援ロボットに関する各応用分野、あるいは使用されるフィールドにおいて標準となるリスクアセスメント手法を開発する。具体的には、まず自動車等の機械安全分野を広く調査し、また必要に応じて適切な装置の開発及び試験体による耐性試験・人間工学実験等を行って、安全性に係わる耐性値をはじめとした対人安全性に関するデータを取得・蓄積・分析する。次に、これらのデータや類似機械の事故やトラブル履歴等の情報の効率的フィードバックが可能なリスクアセスメント手法を開発する。

②機械・電気安全、機能安全等ロボットの安全性試験評価方法の開発

耐環境試験、電磁環境試験等、生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全の観点における安全性試験評価方法を開発する。そのため、産業用ロボット等の類似機械装置・コンポーネントに関する安全規格等を調査し、それらの試験基準や方法に関して、既存の試験装置を利用、あるいは必要に応じて新規に試験装置を開発して、安全性・信頼性等に関する試験データを取得・蓄積・分析する。なお、対人安全に関する各種試験・評価手順に関しては、現状では参照すべき規格等が確立されていないため、その

試験装置の開発を含めた安全度水準の定量化等に関する研究開発を行う。

これらの結果に基づいて、安全性能の定量化、評価指標等についての研究を行い、試験・評価方法を開発する。

以下に、安全性試験項目の例を挙げる。

- a) ロボット運動性能試験（制御安定性、加速・減速、変動負荷安定性及び各項目における耐久性・信頼性）
- b) ロボット動作性能試験（動作安定性、操作性、及び各項目における耐久性・信頼性）
- c) ロボット耐環境性試験（EMC 特性、低・高温環境信頼性、防滴特性、防塵特性、振動耐久性、感電防止、及び各項目における耐久性・信頼性）
- d) 安全停止特性（非常停止、故障検出時の安全停止）及び予期せぬ再起動防止

(2) 生活支援ロボットの安全性基準に関する適合性評価手法の研究開発

安全技術を導入して開発された生活支援ロボットを対象として、コンセプト段階から製品段階までについて、安全性基準に関する適合性評価手法の研究開発を実施する。

3. 達成目標

(1) 最終目標（平成25年度）

- ①各タイプのロボットのリスクアセスメント手法を確立すること。並びに、それを各タイプのロボット開発実施者に対して提供する。さらに対人安全性に関して取得したデータに基づき、耐性指標等の国際標準提案を行えること。
- ②各タイプの生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に関し安全性試験評価方法を確立すること。さらに策定した試験・評価方法や手順について、国際標準化提案を行えること。
- ③各タイプの生活支援ロボットに関する安全性基準適合性評価手法を確立する。

(2) 中間目標（平成23年度）

- ①リスクアセスメント手法を開発すること。さらに人間工学実験等による対人安全性に関するデータをロボット開発実施者に提供すること。
- ②各タイプの生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に必要な試験装置を開発し、ロボット安全性試験項目、各タイプのロボット毎の試験・評価方法や手順の策定を行うこと。

4. 特記事項

- (1) 試験・認証方法については国際標準化の推進のため、必要な情報を提供しつつ、関係機関と連携し、安全規格の確立に向け努力すること。特に、生活支援ロボットに関する安全性・信頼性等のデータ取得・蓄積・分析に際しては、(社)日本ロボット工業会にて審議中の ISO/TC 184/SC 2/WG 7 Robots in personal care (Robots and robotic devices - safety requirements - Non-medical personal care robot) の議論と連携して進めること。
- (2) 国際的な評価が得られる安全認証拠点が我が国に形成されるように、その中核をなすべく、ISO/IEC Guide 65 (JIS Q 0065) 「製品認証機関に関する一般要求事項」に、

準拠した認証機関、ISO/IEC 17025（JIS Q 17025）「試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項」に準拠した試験機関が、本研究開発の実施期間終了後に設立・継続できるような体制の構築を実施期間中から目指すこと。さらに、PL法を見据えた法的責任の確認も行うこと。

(3) 制度設計の観点から、安全認証拠点基盤がより強固かつ広範に発展するように、例えば事故情報の提供に関し保険機関の関与が、さらに、規格提案に向けて学会の関与が、それぞれ提案に含まれることを目指すこと。また、様々な使用者の協力を得ることが可能な地域に根ざした施設を整備することを目指すこと。

(4) 各種試験装置は、プロジェクトの中間目標年度（平成23年度）までに試験機関候補場所に可能な限り集約することを目指す。

研究開発項目②：安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの開発

1. 研究開発の必要性

少子高齢化が急速に進展しており、介護を必要とする高齢者・障害者が増え、その人たちを支える体制の整備が急務となっている。そのため、この分野への新しい技術であるロボット技術による支援の強化が求められている。しかし、このような介護・福祉分野へのロボット技術の活用は、利用者に加えて家族等の人との共存が必須となるため安全性の確保が必要なこと、作業内容が多様であること等から困難となっている。

このため、本研究開発項目では、人とロボットを積極的に連携させることで、これらの課題を克服するための要求仕様や運用ルールを明確にし、多様な作業を、安全に行うことができる移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの安全技術を開発する。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットにおける安全技術の開発

安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットを開発する。移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットとは、人の生活環境下で、ユーザーの指示によって、安全かつ効率よく生活に必要な作業を行う機能を実現するロボットである。

ロボットの使用目的、使用環境及び運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する。リスクアセスメントは研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や検証手順を開発しながら進めるものとする。

以下に安全な移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットを実現するための安全技術の例を挙げる。

a) 移動・作業技術

生活環境下において、ユーザーの指示より、移動や作業（マニピュレーション等）を効率よく安全に行うための技術。

b) ユーザーインタフェース技術

直感的に操作可能で、利用者の負担の少ないユーザーインタフェース技術により操縦動作の安全性の確保、ユーザーに適切な情報を提示することによりロボットが周囲の人を含む作業環境に対して安全性を確保する技術。

c) ユーザーへの適用（フィッティング）技術

利用方法が簡便であり、様々な身体状況のユーザーが、安全に利用できる適用技術。

d) 安全な退避技術

ロボットへの供給電源（バッテリー等）が、突然遮断された場合でも、ロボット本体が安全に停止、退避がなされる技術。

e) ユーザー拘束時の安全開放技術

ロボットが故障等によって、ユーザーや第三者の身体を拘束するような状態に陥った場合でも、安全かつ容易に開放できる技術。

(2) 移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの安全性検証

①安全性試験

上記2.（1）に該当する安全技術をその用途、使用シーンに応じて一部、またはすべて

を搭載した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの安全性試験を、研究開発項目①において開発する安全性検証手法を用いて行う。この安全性試験の結果は、研究開発項目①の開発に対してフィードバックしつつ実施する。

②実証試験

想定ユーザーによる、実環境あるいは模擬した環境において、上記2.（1）で開発されたロボットの実証試験を行い、各安全性試験項目について検証を行う。

3. 達成目標

（1）最終目標（平成25年度）

- ①上記2.（1）に該当する安全技術の一部またはすべてを搭載した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットが2.（2）項の安全性検証のための安全性試験を完了していること。
- ②上記2.（1）で開発されたロボットの安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。
- ③2.（2）②項の実証試験が完了していること。

（2）中間目標（平成23年度）

- ①上記2.（1）で開発されたロボットのリスクアセスメントを終了し、安全性試験項目がすべて示されていること。
- ②実施計画に予定されている安全技術の開発が終了し、その一部またはすべてが上記2.（1）項で開発されたロボットに搭載されていること。
- ③上記2.（2）①に該当する安全性試験のうち、研究開発項目①で策定済みの安全性検証手法を用いて試験を完了していること。

4. 特記事項

- （1）安全技術として、共有可能なロボット安全要素部品の開発を含めることを推奨する。これら要素部品は、生活支援ロボットに使用される構成部品であり、安全度水準（SIL）等の標準規格に適合するものの取得を目指して開発されるものであり、本プロジェクト内外に提供することが望ましい。
- （2）安全性検証に用いるロボットは、安全技術も含め開発済みのロボットを用いても良い。
- （3）実証試験を実施できる施設を有する機関を、協力機関として確保すること。
- （4）実証試験は、倫理問題に配慮して行うこと。
- （5）2.（1）に記載のリスク低減に必要な安全技術開発は、平成24年度末までに完了の目処をつける。平成25年度は研究開発項目①の研究開発に資する内容に特化して実施する。

研究開発項目③：安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発

1. 研究開発の必要性

次世代ロボットの大きな特徴の一つは、自ら環境を認識してその情報に基づき、物理的移動を伴う作業を行う「自律性」であり、これによって複雑な環境下においても人に代わって様々な作業を行うことができる。我が国の社会が直面している少子高齢化社会に伴う労働力不足や、家庭における高齢者の生活支援等の大きな問題を解決する鍵を握る。しかし、この自律性を有する移動作業型のロボットは、従来の安全規格、概念への適合が難しく、また技術的にも確立されていない部分がある。

このため、本研究開発項目では、自律性を有する移動作業型ロボットの安全に関する課題を洗い出し、安全を実現するための要求仕様や運用ルールを明確にし、その課題を解決する安全技術を開発する。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットにおける安全技術の開発

安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットを開発する。移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットとは、周囲の環境を認識し、自律的な判断に基づいて安全かつ効率よく生活に必要な作業を行う機能を実現するロボットである。

ロボットの使用目的、使用シーン及び運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する。リスクアセスメントは、研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や検証手順を開発しながら進めるものとする。

以下に安全な移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットを実現するための安全技術の例を挙げる。

①リスク低減技術

a) 安定走行技術

自律での走行速度指令による駆動力制御に加え、走行加減速や外力、凹凸や斜面等がある路面環境に対して自律的に姿勢を安定化し、安全に走行する技術。

b) 人・障害物回避技術

静止障害物の位置及び人等の移動障害物の位置・動きを検知する機能、またこれらとの衝突リスクを見積もり回避する等安全に走行する技術。

c) 自律走行技術

自己位置認識技術や地図情報生成技術、動的経路計画技術等の安全性要素技術を使い安全に自律走行する技術。

d) 自己診断技術

ロボットの各機能が正常に動作していることを常時確認して、故障や異常を自動的に検出して通報又は修復することにより、安全に運用する技術。

e) 危険予防技術

ロボットの動作や行動を人に事前に認識させることや人の行動を予測することにより安全に運用する技術

②安全要素技術

a) 自己位置認識技術

周囲環境のセンシングによる環境地図情報や、ロボットの移動及び動作の履歴情報を活用し、正確な自己位置を推定する機能を持つことで安全な移動や作業動作を確保するためのセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

b) 安全環境認識技術

ロボットやその作業環境に配置された各種センサを用い、人の移動、及び作業の障害となる環境変化を検出する機能を持つことで、環境地図生成と動的動作計画機能を成立させ、安全な移動や作業動作を確保するためのセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

c) 環境地図生成技術

ロボットやその作業環境に配置された各種センサを用い、移動や作業に必要な地図等の環境記述を生成する機能を持つことで、自己位置認識と動的動作計画機能を成立させ、安全な移動や作業動作を確保するためのセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

d) 動的動作計画技術

目的地への移動や目的作業を実現するための動作を計画する技術において、人の移動、及び作業の障害となる環境変化による動作変更の必要性があっても、補正、再計画を自立的に行うことで安全な移動や作業動作を確保するためのセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

(2) 移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの安全性検証

①安全性試験

上記2.（1）に該当する安全技術をその用途、使用シーンに応じて一部、またはすべてを搭載した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの安全性試験を、研究開発項目①において開発する安全性検証手法を用いて行う。この安全性試験の結果は、研究開発項目①の開発に対してフィードバックしつつ実施する。

②実証試験

想定運営先を模擬した環境において、上記2.（1）で開発されたロボットの安全性の実証試験を行い、各安全性試験項目について検証を行うこと。

3. 達成目標

(1) 最終目標（平成25年度）

①上記2.（1）に該当する①リスク低減技術及び②安全要素技術を一部またはすべて搭載した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットが2.（2）項の安全性検証のための安全性試験を完了していること。

②上記2.（1）で開発されたロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。

③2.（2）②項の実証試験が完了していること。

(2) 中間目標（平成23年度）

- ①上記2.(1)で開発されたロボットのリスクアセスメントを終了し、安全性試験項目がすべて示されていること。
- ②実施計画に予定されている安全技術の開発が終了し、その一部またはすべてが上記2.(1)項で開発されたロボットに搭載されていること。
- ③上記2.(2)①に該当する安全性試験のうち、研究開発項目①で策定済みの安全性検証手法を用いて試験を完了していること。

4. 特記事項

- (1) 安全技術として、共有可能なロボット安全要素部品の開発を含めることを推奨する。
これら要素部品は、生活支援ロボットに使用される構成部品であり、安全度水準(SIL)等の標準規格に適合するものの取得を目指して開発されるものであり、本プロジェクト内外に提供することが望ましい。
- (2) 安全性検証に用いるロボットは、安全技術も含め開発済みのロボットを用いても良い。
- (3) 実証試験を実施できる施設を有する機関を、協力機関として確保すること。
- (4) 実証試験は、倫理問題に配慮して行うこと。
- (5) 2.(1)に記載のリスク低減に必要な安全技術開発は、平成24年度末までに完了の目処をつける。平成25年度は研究開発項目①の研究開発に資する内容に特化して実施する。

研究開発項目④：安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットの開発

1. 研究開発の必要性

少子高齢化社会では、高齢者・障害者の自立と生き甲斐が重要な点であり、生活支援、活動の質の向上が課題である。高齢者・障害者においては、身体機能が低下する傾向にあり、それが高齢者・障害者の自立を制限している。さらに、一層の身体機能低下への悪循環を加速している。また、要介護者の急増は介護者不足、介護労働負担を増加させている。これらの課題を解決するために人間の身体機能を拡張・増幅・支援する技術の開発が必要である。

このため、本研究開発項目では、人に装着して人間の身体機能を拡張・増幅・支援する人間装着（密着）型生活支援ロボットの安全に関する課題を洗い出し、安全を実現するための要求仕様や運用ルールを明確にし、その課題を解決する安全技術を開発する。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 人間装着（密着）型生活支援ロボットにおける安全技術の開発

安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットを開発する。人間装着（密着）型生活支援ロボットとは、人間に装着し、装着者の意思を反映した随意的、自律的機能によって制御される実用的なロボットである。

ロボットの使用目的、使用環境及び運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する。リスクアセスメントは研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や認証手順を開発しながら進めるものとする。

以下に安全な人間装着（密着型）型生活支援ロボットを実現するための安全技術の例を挙げる。

a) 装着時機能安定技術

人に装着して人間の身体機能を拡張・増幅・支援するための駆動力制御に加え、歩行や作業に付随して生じる負荷変動、外力、障害物衝突などに対して自律的に対処し安全に人の動作を支援する技術

b) 制御技術

装着者の意思を反映し、随意的、自律的機能によって制御する技術

c) 安全管理技術

動作支援中の環境情報を取得し、この情報を用いて安全確保を行うための管理技術

d) 自己診断技術

ロボットの各機能が正常に動作していることを常時確認して、故障や異常を自動的に検出して通報または対処することにより安全に運用する技術

e) 安全要素技術

モータ、バッテリー、センサ等の人間装着（密着型）型生活支援ロボットを構成する基盤部品に関する安全技術・リスク低減技術

(2) 人間装着（密着）型生活支援ロボットの安全性検証

①安全性試験

上記2.（1）に該当する安全技術をその用途、使用シーンに応じて一部、またはすべてを搭載した人間装着（密着）型生活支援ロボットの安全性試験を、研究開発項目①におい

て開発する安全性検証手法を用いて行う。この安全性試験の結果は、研究開発項目①の開発に対してフィードバックしつつ実施する。

②実証試験

想定ユーザーによる、実環境あるいは模擬した環境において、上記2.(1)で開発されたロボットの実証試験を行い、各安全性試験項目について検証を行う。

3. 達成目標

(1) 最終目標 (平成25年度)

- ①上記2.(1)に該当する安全技術を一部またはすべて搭載した人間装着(密着)型生活支援ロボットが2.(2)項の安全性検証のための安全性試験を完了していること。
- ②上記2.(1)で開発されたロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。
- ③2.(2)②項の実証試験が完了していること。

(2) 中間目標 (平成23年度)

- ①上記2.(1)で開発されたロボットのリスクアセスメントを終了し、安全性試験項目がすべて示されていること。
- ②実施計画に予定されている安全技術の開発が終了し、その一部またはすべてが上記2.(1)項で開発されたロボットに搭載されていること。
- ③上記2.(2)①に該当する安全性試験のうち、研究開発項目①で策定済みの安全性検証手法を用いて試験を完了していること。

4. 特記事項

- (1) 安全技術として、共有可能なロボット安全要素部品の開発を含めることを推奨する。これら要素部品は、生活支援ロボットに使用される構成部品であり、安全度水準(SIL)等の標準規格に適合するものの取得を目指して開発されるものであり、本プロジェクト内外に提供することが望ましい。
- (2) 安全性検証に用いるロボットは、安全技術も含め開発済みのロボットを用いても良い。
- (3) 実証試験を実施できる施設を有する機関を、協力機関として確保すること。
- (4) 実証試験は、倫理問題に配慮して行うこと。
- (5) 2.(1)に記載のリスク低減に必要な安全技術開発は、平成24年度末までに完了の目処をつける。平成25年度は研究開発項目①の研究開発に資する内容に特化して実施する。

研究開発項目⑤：安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発

1. 研究開発の必要性

人間の行動の範囲及び自由度を拡大する移動手段として、現在、自動車から自転車まで各種移動体が存在するが、少子高齢化の進展や CO2 ガス発生削減等の社会的課題を解決していくため、今後、高齢者や環境に配慮した移動体が求められてくる。具体的には、商業施設、駅・空港等の交通施設、オフィス、家庭に至るまで、不特定多数の歩行者や家族、他の移動体や障害物と同一空間内に共存し、搭乗者による操作または自律走行が可能な搭乗型生活支援ロボットが必要となる。

このため、本研究開発項目では、人や障害物が混在する状況において、人を乗せて移動する機能を備えた搭乗型生活支援ロボットの安全に関する課題を洗い出し、安全を実現するための要求仕様や運用ルールを明確にし、その課題を解決する安全技術を開発する。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 搭乗型生活支援ロボットにおける安全技術の開発

安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットを開発する。搭乗型生活支援ロボットとは、人を乗せて、操縦者の指令により、または自律的に安全かつ自在に移動する機能を実現するロボットである。ロボットの使用目的、使用環境及び運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する。リスクアセスメントは研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や認証手順を開発しながら進めるものとする。

以下に安全な搭乗型生活支援ロボットを実現するための安全技術の例を挙げる。

①リスク低減技術

a) 安定走行技術

搭乗者または、自律での走行速度指令による駆動力制御に加え、走行加減速や外力、凹凸や斜面等がある路面環境に対して自律的に姿勢を安定化し、安全に走行する技術。

b) 人・障害物回避技術

静止障害物の位置及び人等の移動障害物の位置・動きを検知する機能、またこれらとの衝突リスクを見積もり回避する等安全に走行する技術。

c) 自律走行技術

操縦者不在時の自律走行及び操縦アシストを含めた半自律走行時、②に記述する自己位置認識技術や地図情報生成技術、動的経路計画技術等の安全要素技術を使い安全に自律・半自律走行する技術。

d) 操縦者の意図推定、操縦支援技術

広範囲な利用者にとって簡便に操縦できるものとするために、短時間での習熟により操作できるような操縦者の意図推定、操縦支援技術を備え、安全に走行する技術。

e) 協調走行技術

ロボット間及びロボットと使用者間の相対位置・方位検出機能に基づき、追従制御等による協調走行を安全に実施する技術。

f) 自己診断技術

ロボットの各機能が正常に動作していることを常時確認して、故障や異常を自動的に

検出して通報または修復することにより安全に運用する技術。

②安全要素技術

a) 自己位置認識技術

周囲環境のセンシングによる環境地図情報や移動履歴情報を活用することで自己位置を認識し安全な走行を確保するセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

b) 地図情報生成技術

ロボットに搭載されたセンサを用い、移動に必要な地図等の環境記述を生成する機能を持つことで、自己位置認識と動的経路計画機能を成立させ、安全な走行を確保するセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

c) 動的経路計画技術

目的地に到達するための経路を計画する技術において、動的障害物による経路変更等があっても、補正、再計画を自律的に行い、安全な走行を確保するセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

d) 姿勢安定化技術

ロボット自身の姿勢を検出し、外部環境から影響を受けても常に安定を保持し、安全な走行を確保する機構、センサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

(2) 搭乗型生活支援ロボットの安全性検証

①安全性試験

上記2.(1)に該当する安全技術をその用途、使用シーンに応じて一部、またはすべてを搭載した搭乗型生活支援ロボットの安全性試験を、研究開発項目①において開発する安全性検証手法を用いて行う。この安全性試験の結果は、研究開発項目①の開発に対してフィードバックしつつ実施する。

②実証試験

想定運営先を模擬した環境において、上記2.(1)で開発されたロボットの安全性実証試験を行い、各安全性試験項目について検証を行うこと。

3. 達成目標

(1) 最終目標 (平成25年度)

- ①上記2.(1)に該当する安全技術を一部またはすべてを搭載した搭乗型生活支援ロボットが2.(2)項の安全性検証のための安全性試験を完了していること。
- ②上記2.(1)で開発されたロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。
- ③2.(2)②項の実証試験が完了していること。

(2) 中間目標 (平成23年度)

- ①上記2.(1)で開発されたロボットのリスクアセスメントを終了し、安全性試験項目がすべて示されていること。
- ②実施計画に予定されている安全技術の開発が終了し、その一部またはすべてが上記2.

(1) 項で開発されたロボットに搭載されていること。

③上記2.(2)①に該当する安全性試験のうち、研究開発項目①で策定済みの安全性検証手法を用いて試験を完了していること。

4. 特記事項

- (1) 安全技術として、共有可能なロボット安全要素部品の開発を含めることを推奨する。
これら要素部品は、生活支援ロボットに使用される構成部品であり、安全度水準(SIL)等の標準規格に適合するものの取得を目指して開発されるものであり、本プロジェクト内外に提供することが望ましい。
- (2) 安全性検証に用いるロボットは、安全技術も含め開発済みのロボットを用いても良い。
- (3) 実証試験を実施できる施設を有する機関を、協力機関として確保すること。
- (4) 実証試験は、倫理問題に配慮して行うこと。
- (5) 2.(1)に記載のリスク低減に必要な安全技術開発は、平成24年度末までに完了の目処をつける。平成25年度は研究開発項目①の研究開発に資する内容に特化して実施する。

事前評価書（案）

		作成日	平成21年2月18日
1. 事業名称	生活支援ロボット実用化プロジェクト (ロボット・新機械イノベーションプログラム)		
2. 推進部署名	機械システム技術開発部		
3. 事業概要	<p>(1) 概要： 少子高齢化が急速に進展しており、このままでは我が国の社会を支える人材が不足することが懸念され、製造業の生産工程やサービス業の作業工程における一層の自動化・ロボット化が必要となっている。本事業では、生活支援ロボットとして産業化が期待されるロボットを対象に関係者が密接に連携しながら本質安全・機能安全に係る試験を行い、安全性等のデータを取得・蓄積・分析し、具体的な安全性検証手法の研究開発を実施する。また、これらの試験においてはロボット研究開発実施者と安全性検証手法の研究開発実施者が連携し、リスクアセスメント技術、危険予防技術の検討や実際の使用環境下で幅広い参加者による実証試験を集中的に実施する</p> <p>(2) 事業規模：総事業費80億円（平成21年度事業費16億円）</p> <p>(3) 事業期間：平成21年度～25年度（5年間）</p>		
4. 評価の検討状況	<p>(1) 事業の位置付け・必要性</p> <p>我が国では、少子高齢化が急速に進展しており、このままでは我が国の社会を支える人材が不足することが懸念されている。</p> <p>一方、我が国は、産業用ロボットをはじめ、国際的にもトップレベルのロボット技術を蓄積してきた。これらのロボット技術を活用して、製造業の生産工程やサービス業の作業工程における一層の効率化・自動化の促進が必要となっている。</p> <p>また、ロボット技術は産業分野のみならず、介護・福祉、家事、安全・安心等の生活分野においても、社会的課題の解決策の一つとして活用することが期待されており、家庭や公共空間において、生活支援ロボットの活用により、生活の質や利便性向上が可能となる。</p> <p>しかし、不特定多数の人が関与する等、条件や状況が変化する実際の使用環境下で稼働する生活支援ロボットは、対人安全技術が確立されておらず残留リスクの高いものが多く、民間企業の独自の取組のみに委ねては本格的な産業化が期待できない。このため、国等の一定の関与により、安全性検証を行う認証機関・試験機関、安全基準に関する国際標準等を整備することが求められている。</p> <p>本プロジェクトは、生活支援ロボットとして産業化が期待されるロボットを対象に関係者が密接に連携しながら本質安全・機能安全に係る試験を行い、安全性等のデータを取得・蓄積・分析し、具体的な安全性検証手法の研究開発を実施することを目的とする。</p> <p>また、これらの試験においてはロボット研究開発実施者と安全性検証手法の研究開発実施者が連携し、リスクアセスメント技術、危険予防技術の検討や実際の使用環境下で幅広い参加者による実証試験を集中的に実施する。さらに、生活支援ロボットの安全性基準等の国際標準化を念頭に置きつつ研究開発を進める。</p>		

(2) 研究開発目標の妥当性

<目標>

本プロジェクトでは、生活支援ロボットの安全性検証手法の構築に向けて、生活支援ロボットの安全性基準、安全性検証手法の開発及び国際標準提案を行う。そして、本プロジェクトで対象とするロボットを用いて本質安全・機能安全に係る試験を行う。また、ロボット及び周辺の共有可能な安全要素技術を研究開発する。安全性検証手法に関する研究開発の成果を元に、国際標準提案を行う。

上記目標を達成するために、次の5つの研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

[委託事業]

研究開発項目① 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発

研究開発項目② 安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの開発

研究開発項目③ 安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発

研究開発項目④ 安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットの開発

研究開発項目⑤ 安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発

<妥当性>

日常生活を支援する生活支援ロボットの実用化には安全性の確保が不可欠であり、安全性基準や安全性検証手法の策定が必要である。また、安全技術を導入した生活支援ロボットを用いて実証試験等により、安全性を検証することも必須である。研究開発目標には生活支援ロボットの産業化に向けて必要となる技術課題が抽出されている。

(3) 研究開発マネジメント

本研究開発は、実施者を公募により選定し、委託して実施する。本研究開発の推進にあたっては、NEDO技術開発機構が研究開発責任者（プロジェクトリーダー）を指名する。具体的には、プロジェクトの推進に関わる委員会を年2回程度開催するとともに、必要に応じて開発テーマ毎の分科会等を適宜開催し、研究開発の進捗管理を行うとともに、進捗状況を踏まえた予算配分や事業計画の策定を行う。技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成23年度、事後評価を平成26年度に実施し、中間評価結果を踏まえ、必要に応じてその結果を後年度の研究開発に反映することとする。なお、平成25年度までの各年度中に推進委員会等で各研究開発内容を内部評価し、必要に応じて、プロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

(4) 研究開発成果

本研究開発により、得られた研究開発成果については、ロボット及び周辺の共有可能な安全要素技術に関しては、実施者間の成果の公開・共有することでオープンイノベーションを促進するが期待できる。また、安全性検証手法等に関する研究開発成果は、本研究開発の終了後に実施すべき取組のあり方や検証・認証機関の構築及びビジネスモデルについて検討するので、早期に産業面での活用が期待できる。

(5) 実用化・事業化の見通し

プロジェクト終了5年後の2019年以降に本研究開発成果を活用した生活支援ロボット製品の実用化・事業化が見込まれる。

(6) その他特記事項

特になし。

5. 総合評価

本研究開発は、我が国に蓄積されている高度なロボット技術をいち早く産業化するため、最も早い実用化が期待される生活支援ロボットを対象に、障害となっていたロボットの安全性に関する研究開発を行うものである。総合科学技術会議が立案した革新的技術戦略に合致するとともに、産官学が連携して集中的に取り組むべき実用化技術であることから、ナショナルプロジェクトとして実施する意義は高い。また、これまでのロボット基盤技術に関するプロジェクト成果の活用によって、本研究開発の効率かつ円滑な推進が見込まれる。

以上のことから、NEDO技術開発機構が実施する事業として適切であると判断する。

研究開発項目①：生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発

【研究開発の具体的内容】

(1) 生活支援ロボットの安全性検証方法の開発

生活支援ロボットの安全性を検証するには、まずロボット開発実施者が自らリスクアセスメントを行った後に、安全性検証を行う認証機関及び試験機関により安全性を客観的に検証する手順となる。リスクアセスメントに関しては、我が国でいち早く策定された「次世代ロボットのための安全確保ガイドライン」に則り、ISO-12100 に規定されているリスクアセスメントを実行する方針とする。しかし、生活支援ロボットに対するリスクアセスメントは実施例がほとんどなく、特にロボット分野では機能安全に関して社会的にも方法論が確立していない。このため、生活支援ロボットに対するリスクアセスメント手法を開発する。また、生活支援ロボットにおける検証方法や判断基準の定量化は、未だ定められたものがなく生活支援ロボットの普及のためには早急に設定する必要がある。機械・電気・機能安全の側面からの試験は既存の関連規格が存在するため、これらを参考に安全性・信頼性等に関するデータを取得・分析することにより定める。具体的に、本研究開発で取り組むべき研究開発項目を以下に挙げる。開発にあたっては、開発項目②～⑤の実施者と連携して検証試験データを取得しながら実施する。

①リスクアセスメント手法の開発

生活支援ロボットに関する各業界、あるいは使用されるフィールドにおいて標準となるリスクアセスメント手法を開発する。具体的には、まず自動車を含めた機械安全分野を広く調査し、また必要に応じた適切な装置の開発及び試験体による耐性試験・人間工学実験等を行って、安全に係わる耐性値をはじめとするヒューマンファクタに関するデータを取得・分析する。次に、これらのデータや類似機械の事故やトラブル履歴等の情報の効率的フィードバックが可能なリスクアセスメント手法を開発する。

②機械・電気安全、機能安全等ロボットの安全性試験評価方法の開発

耐環境試験、電磁環境試験等、生活支援ロボットの機械・電気・機能安全の観点における安全性試験評価方法を開発する。そのため、産業用ロボット等の類似機械装置・コンポーネントに関する安全規格等を調査し、それらの試験基準や方法に関して、既存の試験装置を利用し、あるいは必要に応じて新規に装置を開発して、安全性・信頼性等に関する試験データを取得・分析する。なお、対人安全に関する各種試験手順に関しては、現状では参照すべき規格等が確立されていないため、その試験装置の開発を含めた安全基準の定量化等に関する研究開発を行う。

これらの結果により、安全性能の定量化、評価指標等についての研究を行い、試験・評価方法を開発する。以下に、安全試験項目の例を挙げる。

- a) ロボット動作性能（動作安定性・加速・減速・変動負荷安定性及び各項目における耐久性・信頼性）
- b) ロボット制御性能（制御安定性、操作性、及び各項目に於ける耐久性・信頼性）
- c) ロボット環境性能（EMC 特性、低・高温環境信頼性、防滴特性、防塵特性、振動耐久性、感電防止、及び各項目における耐久性・信頼性）
- d) 安全停止特性（非常停止、故障検出時の安全停止）及び予期せぬ再起動防止

(2) 生活支援ロボットの安全基準に関する適合性評価手法の研究開発

生活支援ロボットの安全基準適合性評価については、認証機関・試験機関が、安全技術を導入して開発されたロボットを対象として、コンセプト段階から製品段階までについての研究開発を実施する。併行して、ロボット開発実施者は安全管理技術の開発を行い、適合性評価結果も踏まえて実証試験を行う。

【最終目標】

- ①開発されたリスクアセスメント手法を改良し、各タイプのロボット開発実施者に対して提供する。対人安全性に関して取得したデータに基づき、耐性指標等の国際標準提案を行う。
- ②各タイプの生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に関し、策定した試験・評価方法や手順について、国際標準提案を行う。
- ③各タイプの生活支援ロボットに関する安全基準適合性評価を実施する。

【中間目標】

- ①リスクアセスメント手法を開発するとともに、人間工学実験等による対人安全性に関するデータをロボット開発実施者に提供する。
- ②各タイプの生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に必要な試験装置を開発し、全試験項目の評価指標、各タイプのロボット毎の試験・評価方法や手順の策定を行う。

研究開発項目②：安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの開発

【研究開発の具体的内容】

（１）移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットにおける安全技術の開発

安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットを開発する。移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットとは、人の生活環境下で、ユーザーの指示によって、安全かつ効率よく生活に必要な作業を行う機能を実現するロボットである。

ロボットの使用目的、使用環境、運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する。リスクアセスメントは研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や検証手順を開発しながら進めるものとする。以下に安全技術の例を挙げる。

①安全な移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットを実現するためのリスク低減技術

a) 移動・作業技術

生活環境下において、ユーザーの指示より、移動や作業（マニピュレーション等）を効率よく安全に行うための技術。

b) ユーザーインタフェース技術

直感的に操作可能で、利用者の負担の少ないユーザーインタフェース技術。

特に、操縦動作の安全性の確保、及びユーザーに適切な情報を提示することによりロボットが周囲の人を含む作業環境に対しても安全性を確保する技術。

c) ユーザーへの適用(フィッティング)技術

利用方法が簡便であり、様々な身体状況のユーザーが、安全に利用できる適用技術。

②共有可能なロボット安全要素技術

上記2.（1）①のリスク低減技術の実現のために有用なロボット安全要素技術の開発を行う。以下に安全要素技術の例を挙げる。

a) 安全な退避技術

ロボットへの供給電源（バッテリー等）が、突然遮断された場合でも、ロボット本体が安全に停止、退避がなされる技術

b) ユーザー拘束時の安全開放技術

ロボットが故障等によって、ユーザーや第三者の身体を拘束するような状態に陥った場合でも、安全かつ容易に開放できる技術

（２）移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの安全性検証

①安全性試験

上記2.（1）で開発する①リスク低減技術、②安全要素技術をその用途、使用シーンに応じて一部、またはすべてを搭載した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの安全試験を、研究開発項目①において開発する安全性検証手法を用いて行う。この実証試験の結果は、研究開発項目①の開発に対して相互にフィードバックしつつ実施する。

②想定ユーザーによる実証試験

想定ユーザーによる、実環境あるいは模擬した環境において、上記2.（1）で開発されたロボットの实証試験を行い、各安全性試験項目について検証を行う。そのため、実証試験を実施できる想定利用先を本研究開発の実施に先立ち、予め必要に応じて確保しておくこと。ただし、実証試験は、倫理問題に配慮して行う。

【最終目標】

- ①上記2.(1)で開発されたロボットが2.(2)①項の安全性試験を終了していること。
- ②研究開発項目②に係る安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。
- ③2.(2)②項等に掲げた想定ユーザーによる実証試験が実施されていること。

【中間目標】

- ①グループIのロボットで、3年目で開発を終了するロボットにあつては、3.(1)項を満たすこと。グループIのその他のロボットにあつては以下の中間目標を満たすこと。
- ②研究開発項目②に係る安全性試験項目がすべて示されていること。
- ③上記2.(1)項で開発された①リスク低減技術及び②安全要素技術を一部またはすべて搭載した移動作業型(操縦が中心)生活支援ロボットが2.(2)項の安全性試験を終了していること。

研究開発項目③：安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発

【研究開発の具体的内容】

(1) 移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットにおける安全技術の開発

安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットを開発する。移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットとは、周囲の環境を認識し、自律的な判断に基づいて安全かつ効率よく生活に必要な作業を行う機能を実現するロボットである。

ロボットの使用目的、使用シーン、運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する。リスクアセスメントは、研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や検証手順を開発しながら進めるものとする。

以下に安全技術の例を挙げる。

①安全な移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットを実現するためのリスク低減技術

a) 安定走行技術

自律での走行速度指令による駆動力制御に加え、走行加速度や外力、凹凸や斜面等がある路面環境に対して自律的に姿勢を安定化し、安全に走行する技術。

b) 人・障害物回避技術

静止障害物の位置及び人等の移動障害物の位置・動きを検知する機能、またこれらとの衝突リスクを見積もり回避する等安全に走行する技術。

c) 自律走行技術

自己位置認識技術や地図情報生成技術、動的経路計画技術等の安全性要素技術を使い安全に自律走行する技術。

d) 自己診断技術

ロボットの各機能が正常に動作していることを常時確認して、故障や異常を自動的に検出して通報又は修復する技術。

②共有可能なロボット安全要素技術

上記2.(1)①のリスク低減技術の実現のために有用なロボット安全要素技術の開発を行う。以下に安全要素技術の例を挙げる。

a) 自己位置認識技術

周囲環境のセンシングによる環境地図情報や、ロボットの移動及び動作の履歴情報を活用し、正確な自己位置を推定する機能を持つことで安全な移動や作業動作を確保するためのセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

b) 安全環境認識技術

ロボットやその作業環境に配置された各種センサを用い、人の移動、及び作業の障害となる環境変化を検出する機能を持つことで、環境地図生成と動的動作計画機能を成立させ、安全な移動や作業動作を確保するためのセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

c) 環境地図生成技術

ロボットやその作業環境に配置された各種センサを用い、移動や作業に必要な地図等の環境記述を生成する機能を持つことで、自己位置認識と動的動作計画機能を成立させ、安全な移動や作業動作を確保するためのセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

d) 動的動作計画技術

目的地への移動や目的作業を実現するための動作を計画する技術において、人の移動、及び作業の障害となる環境変化による動作変更の必要性があっても、補正、再計画を自律的に行うことで安全な移動や作業動作を確保するためのセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

(2) 移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの安全性検証

①安全性試験

上記2.（1）で開発する①リスク低減技術、②安全要素技術をその用途、使用シーンに応じて一部、またはすべてを搭載した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの安全性試験を、研究開発項目①において開発する安全性検証手法を用いて行う。この実証試験の結果は、研究開発項目①の開発に対して相互にフィードバックしつつ実施する。

②模擬実環境における実証試験

想定運営先を模擬した環境において、移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの安全性の実証試験を行い、各安全試験項目について検証を行うこと。ただし、実証試験は、倫理問題に配慮して行うこと。

【最終目標】

- ①上記2.（1）で開発された①リスク低減技術及び②安全要素技術を一部またはすべて搭載した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットが2.（2）項の安全性確認のための実証試験を終了していること。
- ②研究開発項目③に係る安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。
- ③実環境で安全運用が実施されていること。

【中間目標】

- ①グループIのロボットで、3年目で開発を終了するロボットにあつては、3.（1）項を満たすこと。グループIのその他のロボットにあつては以下の中間目標を満たすこと。
- ②研究開発項目③に係る安全性試験項目がすべて示されていること。
- ③上記2.（1）項で開発された①リスク低減技術及び②安全要素技術を一部またはすべて搭載した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットが2.（2）項の安全性確認のために少なくとも一つ以上の模擬実環境での実証試験を終了していること。
- ④上記③項に掲げた模擬実環境での安全運用が可能と判断できる各安全性評価項目と達成すべき基準値が示されていること。
- ⑤模擬実環境で安全運用が実施されていること。

研究開発項目④：安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットの開発

【研究開発の具体的内容】

(1) 人間装着（密着）型生活支援ロボットにおける安全技術の開発

安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットを開発する。人間装着（密着）型生活支援ロボットとは、人間に装着し、装着者の意思を反映した随機的、自律的機能によって制御される実用的なロボットである。

ロボットの使用目的、使用環境、運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する。リスクアセスメントは研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や認証手順を開発しながら進めるものとする。

以下に安全技術の例を挙げる。

①安全な人間装着（密着）型生活支援ロボットを実現するためのリスク低減技術

a) 装着時機能安定技術

装着時の駆動力制御に加え、歩行や作業に付随して生じる負荷変動、外力、障害物衝突等に対して自律的に機構を安定化する技術。

b) 制御技術

装着者の意思を反映し、随機的、自律的機能によって制御する技術。

c) 自己診断技術

ロボットの各機能が正常に動作していることを常時確認して、故障や異常を自動的に検出して通報または修復する技術。

②共有可能なロボット安全要素技術

上記2. (1) ①のリスク低減技術の実現のために有用なロボット安全要素技術の開発を行う。

以下に安全要素技術の例を挙げる。

a) 意思検出技術

装着者の皮膚表面に貼り付けられた生体電位センサ等により、意思を安定に検出する技術。

b) 姿勢検出技術

関節角度を測定する角度センサ、重心の位置を検出する床反力センサ等を利用して、床形状や負荷に依存せずに姿勢を安定的に検出する技術。

(2) 移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの安全性検証

(2) 人間装着（密着）型生活支援ロボットの安全性検証

①安全性試験

上記2. (1) で開発する①リスク低減技術、②安全要素技術をその用途、使用シーンに応じて一部、またはすべてを搭載した人間装着（密着）型生活支援ロボットの安全性試験を、研究開発項目①において開発する安全性検証手法を用いて行う。この実証試験の結果は、研究開発項目①の開発に対して相互にフィードバックしつつ実施する。

②想定ユーザーによる実証試験

想定ユーザーによる、実環境あるいは模擬した環境において、上記2. (1) で開発されたロボットの实証試験を行い、各安全性試験項目について検証を行う。そのため、実証試験を実施できる想定利用先を本研究開発の実施に先立ち、予め必要に応じて確保しておくこと。ただし、実証試験は、倫理問題に配慮して行う。

【最終目標】

- ①上記2.(1)で開発されたロボットが2.(2)①項の安全性試験を終了していること。
- ②研究開発項目④に係る安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。
- ③2.(2)②項等に掲げた想定ユーザーによる実証試験が実施されていること。

【中間目標】

- ①グループIのロボットで、3年目で開発を終了するロボットにあつては、3.(1)項を満たすこと。グループIのその他のロボットにあつては以下の中間目標を満たすこと。
- ②研究開発項目④に係る安全性試験項目がすべて示されていること。
- ③上記2.(1)項で開発された①リスク低減技術及び②安全要素技術を一部またはすべて搭載した人間装着(装着)型生活支援ロボットが2.(2)項の安全性試験を終了していること。

研究開発項目⑤：安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発

【研究開発の具体的内容】

(1) 搭乗型生活支援ロボットにおける安全技術の開発

安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットを開発する。搭乗型生活支援ロボットとは、人を乗せて、操縦者の指令により、または自律的に安全かつ自在に移動する機能を実現するロボットである。ロボットの使用目的、使用環境、運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する。リスクアセスメントは研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や認証手順を開発しながら進めるものとする。以下に安全技術の例を挙げる。

①安全な搭乗型生活支援ロボットを実現するためのリスク低減技術

a) 安定走行技術

搭乗者または、自律での走行速度指令による駆動力制御に加え、走行加速度や外力、凹凸や斜面等がある路面環境に対して自律的に姿勢を安定化し、安全に走行する技術。

b) 人・障害物回避技術

静止障害物の位置及び人等の移動障害物の位置・動きを検知する機能、またこれらとの衝突リスクを見積もり回避する等安全に走行する技術。

c) 自律走行技術

操縦者不在時の自律走行及び操縦アシストを含めた半自律走行時、②に記述する自己位置認識技術や地図情報生成技術、動的経路計画技術等の安全要素技術を使い安全に自律・半自律走行する技術。

d) 操縦者の意図推定、操縦支援技術

広範囲な利用者にとって簡便に操縦できるものとするために、短時間での習熟により操作できるような操縦者の意図推定、操縦支援技術を備え、安全に走行する技術。

e) 協調走行技術

ロボット間及びロボットと使用者間の相対位置・方位検出機能に基づき、追従制御等による協調走行を安全に実施する技術。

f) 自己診断技術

ロボットの各機能が正常に動作していることを常時確認して、故障や異常を自動的に検出して通報または修復する技術。

②共有可能なロボット安全要素技術

上記2.(1)①のリスク低減技術の実現のために有用なロボット安全要素技術の開発を行う。以下に安全要素技術の例を挙げる。

a) 自己位置認識技術

周囲環境のセンシングによる環境地図情報や移動履歴情報を活用することで自己位置を認識し安全な走行を確保するセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術

b) 地図情報生成技術

ロボットに搭載されたセンサを用い、移動に必要な地図等の環境記述を生成する機能を持つことで、自己位置認識と動的経路計画機能を成立させ、安全な走行を確保するセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術

c) 動的経路計画技術

目的地に到達するための経路を計画する技術において、動的障害物による経路変更等があっても、補正、再計画を自律的に行い、安全な走行を確保するセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術

d) 姿勢安定化技術

ロボット自身の姿勢を検出し、外部環境から影響を受けても常に安定を保持し、安全な走行を確保する機構、センサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術

(2) 搭乗型生活支援ロボットの安全性検証

①安全性試験

上記2.(1)で開発する①リスク低減技術、②安全要素技術をその用途、使用シーンに応じて一部、またはすべてを搭載した搭乗型生活支援ロボットの安全性試験を、研究開発項目①において開発する安全性検証手法を用いて行う。この実証試験の結果は、研究開発項目①の開発に対して相互にフィードバックしつつ実施する。

②模擬実環境における実証試験

想定運営先を模擬した環境において、搭乗型生活支援ロボットの安全性実証試験を行い、各安全試験項目について検証を行うこと。ただし、実証試験は、倫理問題に配慮して行うこと。

【最終目標】

- ①上記2.(1)で開発された①リスク低減技術及び②安全要素技術を一部またはすべて搭載した搭乗型生活支援ロボットが2.(2)項の安全性確認のための実証試験を終了していること。
- ②研究開発項目⑤に係る安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。
- ③実環境で安全運用が実施されていること。

【中間目標】

- ①グループIのロボットで、3年目で開発を終了するロボットにあつては、3.(1)項を満たすこと。グループIのその他のロボットにあつては以下の中間目標を満たすこと。
- ②研究開発項目⑤に係る安全性試験項目がすべて示されていること。
- ③上記2.(1)項で開発された①リスク低減技術及び②安全要素技術を一部またはすべて搭載した搭乗型生活支援ロボットが2.(2)項の安全性確認のために少なくとも一つ以上の模擬実環境での実証試験を終了していること。
- ④上記③項に掲げた模擬実環境での安全運用が可能と判断できる各安全性評価項目と達成すべき基準値が示されていること。
- ⑤模擬実環境で安全運用が実施されていること

「生活支援ロボット実用化プロジェクト基本計画（案）」に対するパブリックコメント募集の結果について

平成21年3月13日
NEDO技術開発機構
機械システム技術開発部

NEDO POST 3において標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。
みなさまからのご協力を頂き、ありがとうございました。

1. パブリックコメント募集期間

平成21年2月19日～平成21年3月2日

2. パブリックコメント投稿数＜有効のもの＞

計5件

3. パブリックコメントの内容とそれに対する考え方

ご意見の概要	ご意見に対する考え方	基本計画への反映
全体について		
<p>[意見1]（1件） 国際安全規格を踏まえたプロジェクト推進を計画しているが、国際安全規格を体系的に適切に理解・運用できる生活支援ロボット関連技術者が、プロジェクト全体を推進するのに十分な数があるか不安である。知識の普及と人材育成も、プロジェクト規模に合わせて適切に進めてほしい。でないと、シンガーポールに輸出できなくなった2層式洗濯機（脱水機部）と同じことが生活支援ロボットでもおこる懸念がある。</p>	<p>[考え方と対応] ご意見ありがとうございます。ご指摘の点については、その他の重要事項の「検証・認証機関の構築及びビジネスモデル」に含まれると考えております。</p>	<p>[反映の有無と反映内容] 特になし</p>

全体について

[意見2] (1件)

人間生活環境での汎用ロボットの安全基準を構築するのではなく、生活支援ロボットとしてある程度絞り込んで作られたロボットを実際の人間生活環境の中で動作させるためのリスクアセスメント手法、安全基準の構築を目指すことは、日本の先端産業技術を活かし、国際的な標準化作業の先導となると同時に、生活支援ロボットの実運用に非常に効果的な方策と思う。しかし、ロボットの安全性については、機械の安全（ロボットと人）だけでなく、環境の安全（人を含む既存環境とロボット）、サービスの安全（既存サービスとロボット）が同時に考慮できなければ、その後の社会導入は困難であると予想する。

事前評価書に記載されている「想定ユーザーによる実環境または模擬環境において実証実験」という文言は非常に重要なところであるが、それにしては、本プロジェクトは、「ロボット開発者」の部分のみ強調され、「想定ユーザー」、「環境」が、生活支援ロボット分野のどの程度をカバーしようとしているのか見えない。ロボットを4種類（操縦移動型、自律移動型、人間装着型、搭乗型）に大別しているのと同時に、環境（ビル内、屋内公共空間、屋外公共空間、整備自然環境等）、サービス（病院、高齢者施設、役所窓口、地域内移動等）のマトリクスを定め、機械+環境+サービスのどの部分の安全基準が実証されるのかをより具体的に示すことも重要ではないかと思う。もし、環境要素としてゼネコンや管理主体の自治体、サービス要素として医療従事者グループ（病院）や介護士、公共交通機関などが手を挙げるのが可能であるならば、プロトタイプレベルのロボットを用いたプロジェクト実施でも、有用な安全基準と確立することは可能ではないかと思う。ただし、これについては、研究開発項目（1）「安全性検証手法の研究開発」と強くリンクする必要がある、または、この中で実施すべきことである。

[考え方と対応]

ご意見ありがとうございます。ロボット開発者は実証試験施設提供者の参加を得るような仕組みになっており、ご指摘については基本計画に一致していると考えています。

[反映の有無と反映内容]

特になし

全体について

[意見3] (1件)

全体として、『要素技術の研究』に比重が置かれ過ぎている印象を受けます。優れた要素技術（センサなど）を実現しても、産業用ロボットに、そのセンサをつけただけで、安全な生活支援ロボットにはなりません。

- ・実環境で、実ユーザーが利用する場合のリスクを網羅的に把握すること。
- ・そのリスクを、確実に十分に低減する方法をロボットに組み込むことが重要です。つまり、『リスクアセスメント』とその検証を行う『実証試験』が、本事業の最大のアウトプットになると思います。

よって、『リスクアセスメント』『実証試験』をどれだけリアルに実施できるかがポイントになると考えます。

[考え方と対応]

ご意見ありがとうございます。ご指摘については基本計画に一致していると考えています。

[反映の有無と反映内容]

特になし

[意見4] (1件)

1) 安全のデータの取得・分析

生活支援ロボットの安全性検証手法「安全性検証方法」、「安全基準に関する適合性評価手法」における認証機関及び試験機関は、NPO等ではなく、公的な機関にするべきである。

特にデータの取得・分析については、メーカーもその施設を用いて試験できるが、その公的機関が独自にデータを取得・分析することが重要である。例としては、日本自動車研究所、農業試験場等である。

これにより、メーカーのデータの裏を取ることができ、かつメーカーが表に出さないデータ分析もできる。今までの安全に対するデータ取得・分析における問題点は、アンケートや委員会でメーカーがデータを出すと考えていることである。

2) 安全のデータの評価について

従来のデータ分析、リスクアセスメントは、具体的なことまで踏み込んでいない。事業化に耐え得る安全のデータ評価を行うべきである。具体的には設計に使えることである。例としては自動車における保安基準、試験法は型式認定試験のトリアスが参考に挙げられる。このような内容については、メーカーは公開が社内規定のため難しく、やはり1)項のように公的な機関が地道に行う必要がある。

3) 認証機関、試験機関

どのような性格の機関を作るか、ということ、まず議論すべきではないか。これが不明確であるような気がする。

[考え方と対応]

ご意見ありがとうございます。ご指摘の点については、ビジネスモデルの中で検討します。

[反映の有無と反映内容]

特になし

研究開発の実施体制について

[意見 1] (1 件)

基本計画P.2(2)の最後に下記のような文章の追加を希望いたします。
『ただし、各研究項目(①～⑤)にて、グループⅠの開発委託機関は、グループⅡに委託あるいは再委託機関として重複申請は不可能である。』

『すなわち、たとえば、研究開発項目⑤の「搭乗型生活支援ロボット」のグループⅠをA社が委託開発している場合、A社は、たとえ社内の異なる研究チームであっても、研究開発項目⑤のグループⅡに委託あるいは再委託機関として応募できない。ただし、この場合、他の研究開発項目(①～④)には応募資格を持つ。また、グループⅠの再委託機関は、その限りではない』これは、同一カテゴリーのロボットの安全規格を策定する際、その規格が公正および中立性をもつための必須条件であると考えます。グループⅠとグループⅡの役割は、それぞれ下記の通りと認識します。

グループⅠ 安全規格のDRAFT案の策定

グループⅡ 上記DRAFT案の修正(グループⅠ以外の他機関による
検証 → 規格の公正・中立性の確保)

グループⅠで先行して安全規格のDRAFTを策定したのち、全く違う団体が、グループⅡとして、この草案を検討せねば、グループⅠの開発団体が保有する独自の技術でしか達成できないような内容が安全規格に盛り込まれる危険性が発生する。当該カテゴリーへの企業新規参入を阻まぬためにも、上記の内容を担保する必要があると考えます。

[考え方と対応]

ご意見ありがとうございます。実施者については、厳正かつ適切に選定いたします。

[反映の有無と反映内容]

特になし

以上

●生活支援ロボット実用化プロジェクト全機関（研究開発項目①～⑤）
特許出願、論文・記事、その他外部発表の件数まとめ

区分 年度	特許出願			論文・記事		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読付 き	その他	学会発 表・講演	報道（新 聞・雑誌等 への掲載）	その他展 示会等
H21FY	0件	0件	2件	9件	2件	30件	77件	30件
H22FY	11件	0件	0件	22件	5件	53件	176件	9件
H23FY	5件	2件	0件	38件	16件	105件	181件	46件
H24FY	11件	1件	0件	55件	17件	183件	252件	81件
H25FY	7件	1件	0件	17件	13件	106件	284件	74件
合計	34件	4件	2件	141件	53件	477件	970件	240件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

●各研究開発項目の特許出願、論文・記事、その他外部発表リスト

■（研究開発項目①）生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発

【（一財）日本自動車研究所、（独）産業技術総合研究所、（独）労働安全衛生総合研究所、名古屋大学、（一財）日本品質保証機構、日本認証（株）、（一社）日本ロボット工業会、（一財）製造科学技術センター】

年度毎の特許、論文、外部発表等リスト

特許等

出願年月日	出願番号	名称	出願者
2011.7.1	特願 2011-147706	安全度水準評価支援装置	日本認証, 山田陽滋

論文・記事（2009年度）

発表年月日	発表先	発表タイトル	発表者	査読
2009.9	精密工学会誌 75(9)	パーソナルケア・ロボット安全の国際標準化-現状と課題への取り組み-	山田陽滋(名古屋大学)	無
2009.11	Advanced Robotics 23(11)	Safety Robot Technology in the Future	Yoji Yamada (Nagoya Univ.)	無

論文・記事（2010年度は無し）

論文・記事（2011年度）

発表年月日	発表先	発表タイトル	発表者	査読
2011.7.15	標準化と品質管理 2011年8月号	サービスロボットの安全設計の基本的考え方と手順	池田博康(労働安全衛生総合研究所)	無

2011.7.15	標準化と品質管理 2011年 8月号	サービスロボットの国際安全規格 ISO 13482「パーソナルケアロボット」概要紹介	山田陽滋(名古屋大学)	無
2011.11.15	日本ロボット学会誌, Vol.29 No.09, pp.12-13	ロボットの障害物検知技術と安全コンポーネント	加藤晋(産業技術総合研究所)	無

論文・記事 (2012年度)

発表年月日	発表先	発表タイトル	発表者	査読
2012.9.9	21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)	A Test Method for Contact Safety Assessment of the Wearable Robot -An Analysis of Load Caused by the Misalignment of the Knee Joint-	Yasuhiro Akiyama, Yoji Yamada(Nagoya Univ.), Koji Ito(Toyota Industries), Shiro Oda(Toyota Motor), Shogo Okamoto, Susumu Hara(Nagoya Univ.)	有
2013.3	ロボット工業会誌, No.211	サービスロボットの国際安全規格 (ISO13482 パーソナルケアロボット) 紹介	山田陽滋(名古屋大)	無
2013.3	ロボット工業会誌, No.211	リスクアセスメントに基づくロボットの安全設計手順	池田博康(労働安全衛生総合研究所)	無
2013.3	ロボット工業会誌, No.211	生活支援ロボットの安全性検証	藤川達夫(日本自動車研究所)	無

論文・記事 (2013年度)

発表年月日	発表先	発表タイトル	発表者	査読
2013.9	電磁環境工学情報, Vol.26, No.5	生活支援ロボットの安全とイミュニティ評価	村上真之, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)	無
2013.9.13	電子情報通信学会技術研究報告,	コヒーレンスを用いた無線通信に影響を与え	風間 智, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)	無

	Vol.113, No.218	る雑音源の特定		
3013.11.5	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS2013)	Estimating Child Collision Injury Based on Automotive Accident Data for Risk Assessment of Mobile Robots	Tatsuo Fujikawa, Masami Kubota(JARI), Yoji Yamada(Nagoya Univ.), Hiroyasu Ikeda(JNIOOSH)	有
2013.12.	日本赤外線学会誌, 第 23 巻第 2 号	生活支援ロボットのた めの赤外線ビジョン安 全センサの性能評価に ついて	角保志, 金奉根, 松本吉央(産 業技術総合研究所)	無

研究発表, 講演 (2009 年度は無し)

研究発表, 講演 (2010 年度)

発表年月日	発表先	発表タイトル	発表者
2010.9.22	日本ロボット学会学術 講演会	NEDO 生活支援ロボッ ト実用化プロジェクト	比留川博久(産業技術総合研究 所), 宮川豊美(NEDO)
2010.9.22	日本ロボット学会学術 講演会	生活支援ロボットの安 全性に関する国際標準 化活動	尾暮拓也(産業技術総合研究 所), 山田陽滋(名古屋大学)
2010.9.22	日本ロボット学会学術 講演会	生活支援ロボットの安 全設計コンセプト検証 の試み	池田博康(労働安全衛生総合研 究所), 丹羽邦幸(日本認証), 清 水雄一郎(日本品質保証機構)
2010.9.22	日本ロボット学会学術 講演会	生活支援ロボットの機 能安全対応について	水口大知(産業技術総合研究所)
2010.9.22	日本ロボット学会学術 講演会	生活支援ロボットの安 全性検証試験方法の開 発	藤川達夫(日本自動車研究所), 松本治(産業技術総合研究所), 山田陽滋(名古屋大学), 池田博 康(労働安全衛生総合研究所)

2010.9.22	日本ロボット学会学術講演会	製品の適合性評価の概要	清水雄一郎, 浅田純男, 榎山哲郎, 神賀誠(日本品質保証機構)
2010.9.22	日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボット関連の法律と制度の調査	加藤雅弘, 間野隆久, 宮下朋子(製造科学技術センター), 松下俊夫(日本ロボット工業会)
2010.11.26	計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会	人間共存型ロボットにおける安全設計課題の論理解析	岡部康平, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)

研究発表, 講演 (2011 年度)

発表年月日	発表先	発表タイトル	発表者
2011.5.28	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011	下肢用人間装着型ロボットの安全性評価試験方法に関する研究 第1報: 膝ジョイント連動並進機構を有するダミーの提案	伊藤浩治, 山田陽滋, 大西惟史, 小田士朗, 原 進, 岡本正吾(名古屋大学)
2011.7.7	日本機械学会安全工学シンポジウム 2011	FMEDA によるハードウェア機能安全の SIL 評価支援ソフトウェアの研究開発	丹羽邦幸(日本認証), 山田陽滋(名古屋大学)
2011.7.7	日本機械学会安全工学シンポジウム 2011	生活支援ロボットの開発におけるマネジメントシステムの構築と第三者評価の意義と有効性	清水雄一郎, 浅田純男, 榎山哲郎, 神賀誠(日本品質保証機構)
2011.7.7	日本機械学会安全工学シンポジウム 2011	リスクアセスメントに基づく生活支援ロボットの安全設計に関する考察	岡部康平, 池田博康, 齋藤剛, 村上真之(労働安全衛生総合研究所)
2011.9.8	第 29 回 日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットのリスクアセスメント雛形シートの作成	池田博康, 岡部康平, 齋藤剛, 村上真之, 芳司俊郎(労働安全衛生総合研究所)
2011.9.8	第 29 回 日本ロボット学会学術講演会	安全機能ハードウェアの SIL 評価支援ソフト	丹羽邦幸(日本認証), 山田陽滋(名古屋大学)

		ウェア	
2011.9.8	第 29 回 日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットの安全性試験方法の開発	藤川達夫, 小口誠(日本自動車研究所), 大場光太郎, 松本治, 加藤晋(産業技術総合研究所), 池田博康, 村上真之(労働安全衛生総合研究所)
2011.9.8	第 29 回 日本ロボット学会学術講演会	装着型ロボットの安全性評価試験方法の開発	山田陽滋(名古屋大学), 本間敬子(産業技術総合研究所), 秋山靖博, 岡本正吾, 原進(名古屋大学)
2011.9.8	第 29 回 日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボット関連の法律と制度の調査	加藤雅弘, 間野隆久, 宮下朋子(製造科学技術センター), 濱田彰一, 松下俊夫, 三浦敏道(日本ロボット工業会)
2011.9.12	電子情報通信学会 環境電磁工学研究会	移動ロボットのイミュニティ評価用試験治具の作製	村上真之, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2011.9.16	SICE Annual Conference 2011	A basis of safety design for cooperative human-machine system	岡部康平, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2011.11.10	2011 国際ロボット展「生活支援ロボット実用化プロジェクト～プロジェクト活動説明会～」	ロボットの安全とリスクアセスメント	池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2011.11.10	2011 国際ロボット展「生活支援ロボット実用化プロジェクト～プロジェクト活動説明会～」	ロボットの安全に関する海外と日本の視点	加藤雅弘(製造科学技術センター)
2011.11.10	2011 国際ロボット展「生活支援ロボット実用化プロジェクト～プロジェクト活動説明会～」	安全検証試験の紹介	藤川達夫(日本自動車研究所)

2012.3.15	自動計測制御学会 第39 回知能システムシンポジウム「コミュニケーション場のメカニズムデザイン」	サービスロボットの安全設計を支援するデータベースのシステム開発	岡部康平(労働安全衛生総合研究所), 松下 俊夫, 濱田 彰一(日本ロボット工業会)
2012.3.15	第 17 回ロボティクスシンポジア	装着型ロボットの接触安全性評価試験方法の研究-膝関節部の不整合についての下肢ダミーによる検討-	秋山靖博(名古屋大学), 山田陽滋(名古屋大学), 伊藤浩治(豊田自動織機), 小田志朗(トヨタ自動車), 岡本正吾(名古屋大学), 原 進(名古屋大学)

研究発表, 講演 (2012 年度)

発表年月日	発表先	発表タイトル	発表者
2012.5.27	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012	下肢人間装着型ロボットの安全性評価試験方法に関する研究” - 第 2 報: 人体形状の再現を目的としたダミー皮膚の提案-	石黒健次(名古屋大学), 秋山靖博(名古屋大学), 山田陽滋(名古屋大学), 原進(名古屋大学), 岡本正吾(名古屋大学), 大西惟史(名古屋大学), 伊藤浩治(名古屋大学)
2012.7.6	安全工学シンポジウム 2012	サービスロボットのための機能安全規格に基づく安全コンセプト検証用ツールの作成	池田博康(労働安全衛生総合研究所), 丹羽邦幸(日本認証), 清水雄一郎(日本品質保証機構)
2012.9.19	日本ロボット学会第 30 回学術講演会	生活支援ロボット関連の法律と制度の調査	加藤雅弘(製造科学技術センター)
2012.9.19	日本ロボット学会第 30 回学術講演会	生活支援ロボットのリスクアセスメントにおける保護方策実施後のリスク再見積に関する考察	齋藤剛, 池田博康, 岡部康平(労働安全衛生総合研究所)
2012.9.19	日本ロボット学会第 30 回学術講演会	SIL2,3 の要求事項に対応した PROH-SIL ソフトウェアの事例	丹羽邦幸(日本認証), 山田陽滋(名古屋大学), 橋本慎也(エスクリエイト)

2012.9.19	日本ロボット学会第30回学術講演会	生活支援ロボット安全情報センター (RTSIC) の開発	松下俊夫(日本ロボット工業会), 岡部康平(労働安全衛生総合研究所), 濱田彰一(日本ロボット工業会)
2012.9.19	日本ロボット学会第30回学術講演会	移動ロボットの障害物検知・対応能力試験のための接近再現装置と走行状態模擬装置の開発	加藤晋, 竹内厚司, 児玉将人, 橋本尚久(産業技術総合研究所)
2012.9.19	日本ロボット学会第30回学術講演会	生活支援ロボットのセンサのための人工太陽灯による光干渉試験	角保志, 堀内英一, 松本治, 大場光太郎(産業技術総合研究所)
2012.9.19	日本ロボット学会第30回学術講演会	生活支援ロボットの走行安定性試験方法	小口誠, 神保浩之, 小林隆, 藤川達夫(日本自動車研究所)
2012.9.20	日本ロボット学会第30回学術講演会	搭乗型ロボット走行安定性基準策定のための重心移動制御装置の開発	松本治(産業技術総合研究所)
2012.9.20	日本ロボット学会第30回学術講演会	生活支援ロボットの温湿度・振動複合試験方法の提案	池田博康, 芳司俊郎(労働安全衛生総合研究所)
2012.9.20	日本ロボット学会第30回学術講演会	走行耐久性試験装置におけるロボットの位置および速度制御	岩田拓也, 松本治(産業技術総合研究所)
2012.10.11	The 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2012)	Development of a Self-Check Sheet for Safety Design of Human-Collaborative Robots	Hiroyasu Ikeda (JNIOOSH), Kuniyuki Niwa (JC), Yuichiro Shimizu (JQA)
2012.10.11	The 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2012)	Study on Law and Social Systems for the Safety of Social-care Robots	Masahiro Kato (MSTC)

2012.10.11	The 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2012)	Empirical Approach to Assessing Foot Injury Level Resulting from being Run Over by a Mobile Robot	Masami Kubota, Tatsuo Fujikawa (JARI)
2012.10.12	The 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2012)	Evaluation of Injury Level and Probability for Risk Assessment of Mobile Robots	Tatsuo Fujikawa, Masami Kubota (JARI), Yoji Yamada (Nagoya Univ.), Hiroyasu Ikeda (JNIOHS)
2012.10.19	Japan Robot Week 2012 つくば国際戦略総合特区フォーラム	生活支援ロボット安全検証センターの紹介	小口誠(日本自動車研究所)
2012.11.2	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2012)	装着型ロボットの接触安全性評価試験にむけた下肢ダミーの開発	秋山靖博, 伊藤安海, 山田陽滋(名古屋大学), 伊藤浩治(豊田自動織機), 小田史朗(トヨタ自動車), 岡本正吾, 原進(名古屋大学)
2012.11.4	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2012)	生活支援モビリティの衝突時安全性の評価例	藤川達夫, 久保田正美(日本自動車研究所), 山田陽滋(名古屋大学), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2012.11.4	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2012)	生活支援モビリティロボットの走行安定性試験方法	小口誠, 神保浩之, 小林隆, 藤川達夫(日本自動車研究所)
2012.11.4	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2012)	生活支援モビリティの走行耐久性試験装置の開発	岩田拓也, 松本治(産業技術総合研究所)
2012.11.4	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2012)	生活支援ロボットの複合環境振動試験による安全性評価方法	池田博康, 芳司俊郎(労働安全衛生総合研究所)
2012.11.12	日本ロボット学会第74回ロボット工学セミナー 安全規格と開発プロセス	パーソナルケアロボットのための安全規格 ISO 13482 の動向	藤川達夫(日本自動車研究所)

2012.12.14	電子情報通信学会 環境電磁工学研究会 (EMCJ)	生活支援ロボットにおける帯電フレームモデルの ESD イミュニティ試験法の検討 ～電動車いすの製品規格で規定された試験法に関する考察～	村上真之(東京都立産業技術研究センター), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.1.11	電子情報通信学会 環境電磁工学研究会 (EMCJ)	生活支援ロボットにおける帯電フレームモデルの ESD イミュニティ試験法の検討 ～ロボット支持台に関する要件～	村上真之(東京都立産業技術研究センター), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.1.11	電子情報通信学会 環境電磁工学研究会 (EMCJ)	機能安全を導入した生活支援ロボットのための放射 RF 電磁界イミュニティ試験システムの開発	村上真之(東京都立産業技術研究センター), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.1.22	第44回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム	モーションキャプチャを用いた人体部位の3次元動作解析のための皮膚揺動誤差評価	石黒健次, 山田陽滋, 秋山靖博, 原進, 岡本正吾(名古屋大学)
2013.3.8	電子情報通信学会 環境電磁工学研究会 (EMCJ)	生活支援ロボットにおける帯電フレームモデルの ESD イミュニティ試験法の検討 ～ロボット使用者からの放電の模擬～	村上真之(東京都立産業技術研究センター), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.3.12	日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2013	無線式近接警報装置の性能評価	風間智, 岡部康平, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.3.14	第18回ロボティクスシンポジウム	装着型ロボットの接触安全性評価試験方法の研究 - 下肢ダミーを用いたロボット装着者への負担の再現方法に	秋山 靖博, 山田 陽滋(名古屋大学), 伊藤 浩治(豊田自動織機), 小田 志朗(トヨタ自動車), 岡本正吾(名古屋大学)

		関する検討 ー	
--	--	---------	--

研究発表, 講演 (2013 年度)

発表年月日	発表先	発表タイトル	発表者
2013.5.23	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	生活支援ロボット関連の法律と制度の調査	加藤雅弘 (製造科学技術センター)
2013.5.23	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	生活支援ロボットに関する安全情報データベース	岡部康平(労働安全衛生総合研究所), 松下俊夫(日本ロボット工業会), 濱田彰一(日本ロボット工業会)
2013.5.23	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	ロボットの車輪の轢過による中足骨損傷に関する検討	久保田正美, 藤川達夫(日本自動車研究所), 西本哲也(日本大学)
2013.5.23	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	マニピュレータの挟圧安全性とその試験方法について	齋藤剛, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.5.23	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	装着型ロボットの接触安全性試験方法	秋山靖博(名古屋大), 山田陽滋(名古屋大), 伊藤浩治(豊田自動織機), 小田志朗(トヨタ自動車), 岡本 正吾(名古屋大)
2013.5.24	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	装着型ロボットが装着者の転倒現象に与える影響に関する検討	秋山靖博(名古屋大), 山田陽滋(名古屋大)
2013.7.3	平成 25 年度国際標準推進戦略シンポジウム	安全認証のプロセス	浅田純男 (日本品質保証機構)
2013.8.22	生活支援ロボット安全技術研究会 (第 3 回)	生活支援ロボット関連の法律と制度	加藤雅弘 (製造科学技術センター)
2013.9.4	日本ロボット学会第 31 回学術講演会	生活支援ロボット関連の法律と制度の調査	加藤雅弘 (製造科学技術センター)
2013.9.4	第 31 回 日本ロボット学会学術講演会	装着型ロボットのための創傷リスクに対する安全性評価試験方法の	山田 陽滋(名古屋大), 吉田 剣吾(名古屋大), 石黒 健次(名古屋大), 秋山 靖博(名古屋大), 原 進

		開発	(名古屋大), 岡本 正吾(名古屋大学)
2013.9.4	第31回 日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットの騒音試験方法の提案	池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.9.4	第31回 日本ロボット学会学術講演会	屋外環境シミュレータによる ビジョン安全センサの性能評価	角保志, 金奉根, 松本吉央(産業技術総合研究所)
2013.7.30	生活支援ロボット実用化促進セミナー	生活支援ロボットの安全規格と試験方法について	藤川達夫(日本自動車研究所)
3013.11.3	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS2013) RAS-IARP Joint Workshop	Outdoor Environment Simulators for Evaluating Safety Sensors of Personal Care Robots — Artificial Sunlight Lampheads and Simulated-Snow Chamber —	Yasushi Sumi, Bong Keun Kim, Yoshio Matsumoto, Eiichi Horiuchi, Osamu Matsumoto, Kohtaro Ohba (AIST)
3013.11.3	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS2013) RAS-IARP Joint Workshop	Technology for Safety Verification	Yoji Yamada (Nagoya Univ.)
3013.11.3	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS2013) RAS-IARP Joint Workshop	Study on Laws and Systems for Life-supporting Robots	Masahiro Kato (MSTC)
2013.11.7	国際ロボット展 NEDO フォーラム	日本から始まるサービスロボットの普及と安全認証ビジネス	菅原淳 (NEDO) 藤川達夫(日本自動車研究所), 浅田純男, 清水雄一郎 (日本品質保証機構)

2013.11.7	2013 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO2013)	Outdoor Environment Simulators for Vision-Based Safety Sensors - Artificial Sunlight Lampheads and Simulated-Snow Chamber	Yasushi Sumi, Bong Keun Kim, Yoshio Matsumoto, Eiichi Horiuchi, Osamu Matsumoto, Kohtaro Ohba (AIST)
2014.2.19	ロボットと法ーロボットと共生する社会に向けてー中央大学イタリア大使館共催シンポジウム	生活支援ロボット関連の法律と制度の調査	加藤雅弘（製造科学技術センター）

展示会等

出展年月日	出展先	内容
2011.11.9～12	2011 国際ロボット展	NEDO 展示ブースにて生活支援ロボット安全検証センターを紹介
2012.10.17～19	Japan Robot Week 2012	つくば国際戦略総合特区展示ブースにて、生活支援ロボット安全検証センターを紹介
2013.11.6～9	2013 国際ロボット展	NEDO 展示ブースにて生活支援ロボット安全検証センターを紹介
2013.11.8	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS2013)	IROS2013 のテクニカルツアーを生活支援ロボット安全検証センターに招待

報道（新聞・雑誌等への掲載）

年月日	媒体	内容
2010.12.27	時事ドットコム	生活支援ロボの安全確保＝検証センターがオープン

2010.12.27	NHK ニュース	生活支援ロボットの実験施設
2010.12.28	朝日新聞	介護・家事支援ロボの安全性試験 茨城に検証センター
2010.12.28	毎日新聞	家庭用ロボット：安全の「お墨付き」 検証センターが開所
2010.12.28	東京新聞	生活支援ロボ 安全性を認証
2011.1.4	ロボナブル（日刊工業新聞）	特集 生活支援ロボット安全検証センター始動！ 設立の背景と課題を探る
2011.2.11	ワールドビジネスサテライト （テレビ東京）	新ロボット大国へ 「サービスロボットが拓く」
2011.4.21	日本経済新聞 夕刊	「介護ロボット、実用化へ動き出す」の中で生活支援ロボット安全検証センターの一部が紹介された
2011.4.	日本経済新聞	「ロボットが拓く～柵を超えて～」の中で生活支援ロボット安全検証センターの一部が紹介された
2012.1.30	NHK ワールド NEWSLINE	「HIGH-TECH HELPERS」にて生活支援ロボット安全検証センターの一部が紹介された
2013.2.27	NHK 首都圏ニュース, 日本経済新聞ほか	日本品質保証機構が CYBERDYNE 株式会社の「ロボットスーツ HAL 福祉用」に対して ISO/DIS 13482 に基づく認証を発行したことを紹介

■（研究開発項目②）安全技術を導入した移乗・移動支援ロボットシステムの開発【パナソニック（株）、国立障害者リハビリテーションセンター】

表 3：研究発表・講演の詳細リスト

番号	発表者	所属	タイトル	発表先	発表年
1	本田幸夫	パナソニック株式会社	高齢化社会を支える生活支援ロボット	パワーエレクトロニクスアプリケーションフォーラム2009 基調講演	2009/10/30
2	本田幸夫	パナソニック株式会社	パナソニックにおけるロボット事業の取り組み	ロボット産業創出 国際ワークショップ	2009/11/6
3	本田幸夫	パナソニック株式会社	生活支援ロボット（健康、リハビリ、医療、高齢者支援）への取り組み	2009 国際ロボット展 併催 特別セミナー	2009/11/26
4	河上日出生	パナソニック株式会社	自立／介護支援ロボット「ロボテイクベッド」の紹介	東大阪福祉用具展示会 オープニング講演	2010/01/27
5	河上日出生	パナソニック株式会社	自立／介護支援ロボット「ロボテイクベッド」の開発取組み	第2回人間支援ロボットの開発プロセスに関する勉強会」講演	2010/01/31
6	小林昌市	パナソニック株式会社	ロボット技術が支える少子高齢化社会	ロボティクスフォーラム2010	2010/03/14
7	本田幸夫	パナソニック株式会社	高齢化社会に挑戦するパナソニックのロボット事業	組み込み総合技術展 関西	2010/06/18
8	本田幸夫	パナソニック株式会社	超高齢社会に挑戦するパナソニックのロボット事業	介護・福祉ロボット開発・普及支援プロジェクト検討会	2010/09

9	本田幸夫、河上日出生、久米洋平	パナソニック株式会社	The Proposal of Bed-Shaped Robot Transformable into Wheelchair to Support People with Limited Mobility to Lead Independent Life	第 49 回日本生体医工学会大会	2010
10	中村美緒、崎山美和、硯川 潤、井上剛伸 (国リハ)、塚田将平、久米洋平、岡本球夫、河上日出生 (パナソニック)	国立障害者リハビリテーションセンター研究所、パナソニック株式会社	リハ専門職を対象とした試用試験による「ロボティックベッド」の実用可能性評価	第 25 回リハ工カ ンファレンス講 演会	2010
11	久米洋平、河上日出生、塚田将平、中村徹	パナソニック株式会社	ロボティックベッドの自動合体制御	(社)計測自動制御学会 システム インテグレーション部門講演会	2010 /12/2 4
12	本田幸夫	パナソニック株式会社	パナソニックの医療福祉分野での戦略	ロボラボトーク セッション	2011 /02/2 3
13	Tamao Okamoto	Panasonic Corporation	Analysis of Human Behavior and Collision Risks at An Indoor Crossroad to Prevent Broadside Collisions	IARP Workshop on The Role of Robotics in Assisted Living, Seoul, Korea	2011 /06/0 7
14	岡本球夫 (パナソニック)、山田陽滋 (名古屋大)	パナソニック株式会社、名古屋大学	屋内交差通路における出会い頭の事故防止に向けた人の行動特性と衝突リスクの分析	安全工学シンポジウム 2011	2011 /07/0 7

1 5	中村美緒、硯川潤（国リハ）、塚田将平、久米洋平、河上日出生（パナソニック）、井上 剛伸（国リハ）	国立障害者リハビリテーションセンター研究所、パナソニック株式会社	福祉機器開発における臨床評価手法の提案	バイオメカニズム学会	2011 /07/27
1 6	Nakamura M, Sakiyama M, Suzurikawa J, (国リハ) Tsukada S, Kume Y, Kawakami H (パナソニック), Inoue T (国リハ)	国立障害者リハビリテーションセンター研究所、パナソニック株式会社	Methodology for comprehensive clinical evaluation of assistive technology : Evaluation by rehabilitation professionals	AAATE 2011	2011 /09/01
1 7	久米洋平、下田智大、太田章博、塚田将平、河上日出生（パナソニック）、中村美緒、硯川潤、井上剛伸（国リハ）	パナソニック株式会社、国立障害者リハビリテーションセンター研究所	移乗支援ロボットシステムの開発	Robomec2012	2012 /05/28
1 8	中村美緒（国リハ）、井上薫（首都大）、硯川潤（国リハ）、河上日出生（パナソニック）、井上剛伸（国リハ）	国立障害者リハビリテーションセンター研究所、パナソニック株式会社	ロボティックベッドの臨床評価-評価から見える近未来のOTの役割-	第46回日本作業療法学会	2012 /06/16
1 9	Nakamura M, Suzurikawa J (国リハ), Ohta A, Kume Y, Kawakami H (パナソニック), Inoue K (首都大), Inoue T (国リハ)	国立障害者リハビリテーションセンター研究所、パナソニック株式会社	Clinical Evaluation of The Prototype Robotbed in an Experimental Environment	RESNA 2012	2012 /07/02

20	久米洋平、下田智大、太田章博、塚田将平、河上日出生、本田幸夫	パナソニック株式会社	ロボティックベッドの安全技術	RSJ2012	2012/09/20
21	塚田将平、下田智大、太田章博、久米洋平、河上日出生、本田幸夫	パナソニック株式会社	ロボティックベッドの安全技術	RSJ2012	2012/09/20
22	久米洋平、下田智大、太田章博、塚田将平、河上日出生	パナソニックヘルスケア株式会社	移乗支援ロボット「ロボティックベッド」の安全機能設計・評価	Robomec2013	2013/05/23
23	太田章博、下田智大、塚田将平、久米洋平、河上日出生	パナソニックヘルスケア株式会社	移乗支援ロボット「ロボティックベッド」の開発	Robomec2013	2013/05/23
24	下田智大、久米洋平、太田章博、塚田将平、河上日出生	パナソニックヘルスケア株式会社	移乗支援ロボット「ロボティックベッド」の機能安全開発	Robomec2013	2013/05/23
25	中村美緒（国リハ）、井上薫（首都大）、硯川潤（国リハ）、河上日出生（パナソニック）、井上剛伸（国リハ）	国立障害者リハビリテーションセンター研究所、パナソニック株式会社	開発段階の福祉機器における臨床評価-ロボティックベッド®の改良点に着目した効果検証-	第47回日本作業療法学会	2013/06/28
26	硯川潤（国リハ）、三上功生（日本大学）、井上剛伸（国リハ）	国立障害者リハビリテーションセンター研究所	ギャッチアップ時の背面圧分散を促進するための低摩擦シートによるベッド上での身体再配置	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2013	2013/09/02
27	塚田将平、久米洋平、河上日出生（パナソニック）、中村美緒、硯川潤、井上剛伸（国リハ）	パナソニック株式会社、国立障害者リハビリテーションセンター研究所	移乗支援ロボット「ロボティックベッド」の開発	RSJ2013	2013/09/04

表 4：論文の詳細リスト

番号	発表者	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表 年
1	久米洋平、河上日出生、塚田将平、中村徹 (パナソニック)	ロボティックベッドの開発	自動車技術、Vol.64, No.5, p.31-34	無	2010
2	久米洋平、河上日出生 (パナソニック)	自立した生活を支援するロボティックベッドの制御技術	パナソニックテクニカルジャーナル、Vol.56 No.3, p.32-34	無	2010
3	Nakamura M, Sakiyama M, Suzurikawa J, (国リハ) Tsukada S, Ohta A, Kume Y, Kawakami H, (パナソニック) Inoue K, (首都大) Inoue T (国リハ)	Methodology for User and User's Life Centered Clinical Evaluation of Assistive Technology (ULCEAT): Evaluation with Prototype Roboticbed	Technol. Disabil., Vol. 24, pp. 273-282, 2012	有	2012
4	Kume Y, Shimoda T, Ohta A, Tsukada S, Kawakami H (パナソニック), Nakamura M, Suzurikawa J, Inoue T(国リハ)	Development of Transfer Assist Robot System Supporting Self-Reliant Life	Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.25, No.2, 2013.	有	2013
5	久米 洋平, 下田 智大, 太田 章博, 塚田 将平, 河上 日出生, 本田 幸夫(パナソニック)	ロボティックベッドの安全技術	日本ロボット学会誌, Vol.31, No.8, pp.77-83	有	2013

6	Nakamura M (国リハ) , Kume Y (パナソニック) , Suzurikawa J (国リハ) , Tsukada S, Kawakami H (パナソニック) , Inoue K (首都大) , Inoue T (国リハ)	Development of Transfer Assist Robot Based on the User Needs.	J. Robotics Mechatronics, Vol. 25, No. 6, pp. 992-999, 2013	有	2013
---	--	---	---	---	------

表 5：特許出願等の詳細リスト

番号	出願者	出願番号	国内 外	出願日	状態	名称	発明者
1	パナソニック株式会社	特願 2010-23430 8	国内	2010/10/1 9	出願	電動車両 およびその 制御方法	久米洋平 他
2	パナソニック株式会社	特願 2010-23430 9	国内	2010/10/1 9	出願	全方向移動型電動 車両およびその制 御方法	久米洋平 他
3	パナソニック株式会社	特願 2010-23432 5	国内	2010/10/1 9	出願	接触検知 センサおよ び駆動装 置および 介護用ベ ッド	塚田将平 他
4	パナソニック株式会社	特願 2010-25656 0	国内	2010/11/1 7	出願	接触検知 センサ、 可動部お よびベッ ド	塚田将平 他
5	パナソニック株式会社	意願 2011-006649 ⇒意匠第 1422594号	国内	2011/03/2 4	出願 ⇒登録	信号表示 機	岡本球夫 他
6	パナソニック株式会社	意願 2011-006650 ⇒意匠第 1422595号	国内	2011/03/2 4	出願 ⇒登録	信号表示 機	岡本球夫 他
7	パナソニック株式会社	意願 2011-006651 ⇒意匠第 1422596号	国内	2011/03/2 4	出願 ⇒登録	信号表示 機	岡本球夫 他
8	パナソニック株式会社	特願 2011-202635	国内	2011/09/1 6	出願	衝突防止 システム および電 動車両	岡本球夫 他
9	パナソニ	特願	国内	2011/09/1	出願	衝突防止	岡本球夫

	ック株式会社	2011-202636		6		システム	他
10	パナソニック株式会社	特願 2011-202898 ⇒米国出願 13/275391 ⇒中国出願 2011103184 78.5 ⇒EPC 出願 11185512.8 ⇒特許第 5192577 号	国内	2011/09/16	出願 ⇒外国出願 (米国・中国・EPC) ⇒国内登録	接触検知センサ、駆動装置、及び、介護用ベッド	塚田将平 他
11	パナソニック株式会社	特願 2011-202899 ⇒米国出願 13/275555 ⇒中国出願 2011103189 23.8 ⇒EPC 出願 11185512.8 ⇒特許第 5161353 号	国内	2011/09/16	出願 ⇒外国出願 (米国・中国・EPC) ⇒国内登録	電動車両及びその制御方法	久米洋平 他
12	パナソニック株式会社	特願 2012-133444	国内	2012/06/13	出願	走行車の走行方法	久米洋平 他
13	パナソニック株式会社	特願 2012-133445	国内	2012/06/13	出願	走行車の走行方法	久米洋平 他
14	パナソニック株式会社	特願 2012-275384	国内	2012/12/18	出願	電動車両の制御方法	久米洋平 他
15	パナソニック株式会社	特願 2012-275385	国内	2012/12/18	出願	電動車両の制御方法	久米洋平 他

表 6：新聞・雑誌等の詳細リスト

番号	発表先/タイトル	備考	発表年
1	パナソニックニュースリリース「ロボティックベッドを開発」	http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn090918-1/jn090918-1	2009/09/18
2	パナソニックHP「暮らし発見マガジンism(イズム)」	http://panasonic.co.jp/ism/robot/index.html	—
3	パナソニックHP「Human File～開発ストーリー」	http://panasonic.co.jp/humanfile/200911robotic/	—
4	読売新聞	2009/12/3 夕刊 7面に掲載	2009/12/03
5	経済産業ジャーナル	2010/1-2月号	2010/01
6	福祉介護機器テクノプラス	2010/1月号 58頁に掲載	2010/01
7	Tomoniile	2010/1-2月号 19頁に掲載	2010/01
8	どーも	2010/1月号 16頁に掲載	2010/01
9	プレジデント	2010/2/1号 110頁に掲載	2010/02/01
10	日経ビジネス	2010/3/29号 24,25頁に掲載	2010/03/29
11	「ニュースアンカー」特集「ターゲットはシルバー」～シルバー層向け生活支援ロボットの開発が進む	関西テレビ	2010/04/13
12	介護/ヒューマン・インタラクティブ/アシストロボットの取組み	オランダ国営放送NOS	2010/07
13	ニュースフライデー「介護ロボットの可能性」	テレビ神奈川	2010/07/02
14	時事潮流：「サービスロボ、介護・福祉現場支援～官民	日刊工業新聞	2010/07/15

	連携」		
1 5	ワールドビジネスサテライト 特集「”民”主導の新成長戦略～高齢化社会」	テレビ東京	2010/07/22
1 6	ズームインスーパー 特集 「福祉・医療の最先端」	読売テレビ	2010/12/06
1 7	NHKニュースウオッチ 9 特集「ジャパンシンド ローム」～ロボット技術実 用化に壁	NHK	2011/01/11
18	NHKクローズアップ現代 「高齢化先進国の強みを生 かせ」	NHK	2011/06/08
19	NEDO 定期広報誌「Focus NEDO」、人の暮らしを支 えるロボット技術	NEDO	2011/10
20	ロボコンマガジン、 NEWS：第38回国際福祉 機器展	ロボコンマガジン、オーム 社	2012/01
21	KBC テレビ「朝です KBC” ロボット最前線 “」	KBC テレビ	2013/04/17
22	TBS 「はなまるマーケッ ト」(ロボティックベッド体 験・紹介 生放送)	TBS	2013/11/07
23	「リショーネ」読売新聞掲 載(1面、7面) 2013.12.31	読売新聞	2013/12/31
24	「ロボティックベッド」日 経産業新聞掲載(7面)	日経産業新聞	2014/01/01
25	パナソニックニュースリリ ース「離床支援のためのロ ボット介護機器「リショー ネ®」が世界初の ISO 13482 認証*1を取得」	http://www.panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/2014/02/jn140217-1/jn140217-1.html	2014/2/17
26	朝日新聞「生活支援ロボに 「安全」(国際規格取得)」	朝日新聞	2014/02/19
27	シルバー新聞「生活支援ロ ボットで初の国際安全認証 取得」	シルバー新聞	2014/02/21

表7：その他の公表（プレス発表等）の詳細リスト

番号	発表先/タイトル	備考	発表年
1	国際福祉機器展 出展 H.C.R.2009	パナソニックブース出展	2009/9/29-2009/10/1
2	APEC / JAPAN EXPERIENCE	http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/apec/2010/japan_experience/index.html	2010/11/6-2010/11/14
3	日豪国際フォーラム in KOBE	http://www.nolift.jp/forum/index2011.php	2011/2/5
4	第28回日本医学会総会 (WEB展示)	http://www.isoukai2011.jp/	2011/6-
5	国際福祉機器展	パナソニックブース出展	2011/10/5-2011/10/7
6	国際ロボット展	NEDO ブース出展	2011/11/9-2011/11/12
7	ASEAN ロードショー	クロージングレセプション出展	2012/4/28
8	Japan Robot Week	NEDO ブース出展	2012/10/17-2012/10/19
9	国際福祉機器展	パナソニックブース出展	2013/9/18-2013/9/20
10	国際ロボット展	NEDO ブース出展	2013/11/6-2013/11/9
11	NEDO 成果報告会	ISO13482 認証取得	2014/2/17

■（研究開発項目③）安全技術を導入した配送センター内高速ビークルシステムの開発【(株)ダイフク】

【特許】

No.	発明の名称	出願番号	出願日	発明者	外国出願
1	物品搬送設備における位置計測システム	2012-090592	2012/4/11	辻本 方則 原 義正 高川 夏生 嵯山 利貞 窪田 耕児	
2	位置計測システム及びそれを備えた物品保管設備	2012-211551	2012/9/25		
3	位置計測システム及びそれを備えた物品保管設備	2012-211552	2012/9/25		
4	移動体の姿勢判別システム	2012-211553	2012/9/25		
5	移動体の姿勢判別システム	2012-211554	2012/9/25		
6	物品搬送設備	2013-047060	2013/3/8		米国(特願13/859233号)および中国(特願201310122369.5号)
7	搬送台車制御システム	2013-079873	2013/4/5		
8	走行車制御システム	2013-088631	2013/4/19		米国および中国に出願書類作成中。
9	移動体管理システム	2013-088632	2013/4/19		

【外部発表】

(a)学会発表

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2011年9月8日	第29回日本ロボット学会学術講演会	配送センター内高速ビークルシステムの安全技術開発	辻本方則、原義正、辻本和史、高川夏生、渡邊義孝、○嵯山利貞、窪田耕児
2012年9月20日	第30回日本ロボット学会学術講演会	配送センター内高速ビークルシステムの安全技術開発(第二報)	辻本方則、原義正、高川夏生、渡邊義孝、○嵯山利貞、窪田耕児
2013年3月12日	生産システム部門研究発表講演会2013	NEDO:生活支援ロボット実用化プロジェクト配送センター内高速ビークルの安全技術開発のご紹介	○嵯山利貞、辻本方則、原義正、高川夏生、渡邊義孝、窪田耕児
2013年5月23日	ロボティクス・メカトロニクス講演会2013	配送センター内高速ビークルの安全技術開発のご紹介	○嵯山利貞、辻本方則、原義正、高川夏生、渡邊義孝、窪田耕児
2013年9月4日	第31回日本ロボット学会学術講演会	配送センターにおける高速AGVの安全技術開発	○窪田耕児、辻本方則、原義正、高川夏生、渡邊義孝、嵯山利貞

(b)講演

講演年月日	講演媒体	講演タイトル	講演者
2012年9月11日	国際物流総合展2012プレゼンテーションセミナー	無人搬送車システムの新たな可能性	辻本方則
2013年12月12日	第22回交通・物流部門大会 (TRANSLOG2013)	特別企画③:物流を勉強するシンポジウム	辻本方則

(c)展示

展示会名	場所	出展期間
2011国際ロボット展	東京ビックサイト	2011年11月9日～12日
2013国際ロボット展	東京ビックサイト	2013年11月6日～9日

■（研究開発項目③）安全技術を導入した配送センター内のフォーク型物流支援ロボットの開発【(株)日立産機システム、(株)日立製作所】

特許

番号	出願者	出願番号	国内外 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	(株)日立製作所	特開2013-149296	国内	平成21年1月28日	登録	人横断支援通知システム及び人横断支援方法	原 祥堯 中 拓久哉 柄川 素 古賀 昌史
2	(株)日立製作所 (株)日立産機システム	特開2013-230903	国内	平成24年4月27日	出願	フォークリフト	古川 光治 山本 治正 中 拓久哉

論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	古川 光治	(株)日立プラントテクノロジー	安全に配慮したフォークリフト型自律走行型無人搬送車 (NEDO生活支援ロボット実用化プロジェクトによる技術開発)	日本ロボット学会 第30回学術講演会 402-4	なし	2012/09/17
2	正木 良三	(株)日立産機システム	安全技術を導入したフォーク型物流支援ロボットの開発 -NEDO生活支援ロボット実用化プロジェクトによる技術開発-	日本機械学会 ROBOMEC2013 1A1-G08	なし	2012/05/27
3	禎 修一	(株)日立産機システム	位置同定コンポーネントの開発と精度評価	日本機械学会 ROBOMEC2013 1P1-I04	なし	2012/05/27
4	松本 高斉	(株)日立製作所	地図作成・位置同定用コンポーネントの開発と実環境での評価	映像情報メディア学会 2013年次大会講演予稿集 6-4-1	あり	2013/08/28

学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	発表年月
1	古川 光治	(株)日立プラントテクノロジー	安全に配慮したフォークリフト型自律走行型無人搬送車 (NEDO生活支援ロボット実用化プロジェクトによる技術開発)	日本ロボット学会 第30回学術講演会	2012/09/17
2	正木 良三	(株)日立産機システム	安全技術を導入したフォーク型物流支援ロボットの開発 -NEDO生活支援ロボット実用化プロジェクトによる技術開発-	日本機械学会 ROBOMEC2013	2012/05/27
3	禎 修一	(株)日立産機システム	位置同定コンポーネントの開発と精度評価	日本機械学会 ROBOMEC2013	2012/05/27
4	松本 高斉	(株)日立製作所	地図作成・位置同定用コンポーネントの開発と実環境での評価	映像情報メディア学会 2013年次大会	2013/08/28

新聞・雑誌への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	(株)日立産機システム	電子・電気工場の物流を自動化するロボット	日本電機工業会 電機No.768 P. 27	2014/02
2	(株)日立産機システム	自律型ロボで部品搬送	日刊工業新聞	2012/10/08
3	(株)日立産機システム	部品搬送にロボ導入	日刊工業新聞 P. 4	2012/11/14
4	(株)日立産機システム	物流搬送作業の自動化を提案	包装タイムス P.3	2012/12/10

■（研究開発項目④）安全技術を導入した人間装着型生活支援ロボットスーツ HAL の開発【CYBERDYNE（株）、筑波大学】

年度毎の特許、論文、外部発表等リストの作成フォーマット

【特許】※リスト例

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名 称	発明者
1	筑波大学	PCT/JP2009/66364	PCT	2009/9/18	公開 W0/2010/035706	装着式動作補助装置のフレーム構造	山海嘉之
2	筑波大学	PCT/JP2009/65825	PCT	2009/9/10	公開 W0/2010/029966	生体信号計測装着具及び装着式動作補助装置	山海嘉之
3	筑波大学	特願 2010-181601	国内	2010/8/16	登録 特許 5108922	装着式動作補助装置のキャリブレーション装置、及びキャリブレーション用プログラム	山海嘉之
4	CYBERDYNE 株式会社	特願 2010-290769	国内	2010/12/27	特開 2012-135486	装着式動作補助装置、そのインターフェース装置およびプログラム	山海嘉之
5	筑波大学／ CYBERDYNE 株式会社	特願 2013-502400 (特 願 2011-045318 から PCT を経て各国出 願へ移行)	国内	2012/3/1 (2011/3/2)	出願	歩行訓練装置及び歩行訓練システム	山海嘉之

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

【論文】 ※リスト例

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Tomoyoshi Kawabata, Hozumi Satoh and Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Working Posture Control of Robot Suit HAL for Reducing Structural Stress	ROBIO 2009 pp. 2013-2018	有	2009
2	Takeru Sakurai and Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Development of Motion Instruction System with Interactive Robot Suit HAL	Proc. of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics pp. 1141-1147 Finalist for Best Student Paper Award 受賞	有	2009
3	Masahiro Shingu, and Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Development of Foot Pressure Feedback System with Functional Electrical Stimulation for Robot Suit HAL	Proc. of 14th Annual Conference of the International FES Society pp. 76-77	有	2009
4	他 5 件					
5	Tasuku Otsuka and Yoshiyuki Sanka	University of Tsukuba	Development of Exo-Finger for Grasp-Assistance	Proc. of Joint 5th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 11th International Symposium on Advanced Intelligent Systems pp. 410-415	有	2010
6	Kousuke Hiramatsu and Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Development of Manipulation System with Cybernic Master	Proc. of Joint 5th International Conference on Soft Computing and	有	2010

			Arm based on BES”	Intelligent Systems and 11th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS2010) pp. 422-427		
7	Hiromasa Hara and Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Development of HAL for Lumber Support	Proc. of Joint 5th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 11th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS2010) pp. 416-421	有	2010
8	Hiroaki Kawamoto, Stefan Taal, Hafid Niniss, Tomohiro Hayashi, Kiyotaka Kamibayashi, Kiyoshi Eguchi, and Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Voluntary Motion Support Control of Robot Suit HAL Triggered by Bioelectrical Signal for Hemiplegia	Proc. of 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp.462-466.	有	2010
9	Atsushi Tsukahara, Ryota Kawanishi, Yasuhisa Hasegawa and Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Sit-To-Stand and Stand-To-Sit Transfer Support for Complete Paraplegic Patients with Robot Suit HAL	Advanced Robotics, Vol. 24, No. 13	有	2010
10	佐藤帆紡, 川畑共良, 田中文英, 山海嘉之	CYBERDYNE 株式会社	ロボットスーツ HAL による移乗介助動作の支援	日本機械学会誌 (C 編)	有	2010
11	新宮正弘, 江口清, 山海嘉之	筑波大学	バイオフィードバックを用いたポリオ経験者	日本機械学会誌 (C 編), 76 巻, 772 号, pp. 3630-3639	有	2010

			の筋神経系制御能力の改善とロボットスーツ HAL による麻痺肢動作支援			
12	佐藤帆紡, 川畑共良, 田中文英, 山海嘉之	CYBERDYNE 株式会社	ロボットスーツ HAL による移乗介助動作の支援	日本機械学会誌 (C 編), 76 巻, 762 号, pp. 227-235	有	2010
13	Atsushi Tsukahara, Yasuhisa Hasegawa and Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Gait Support for Complete Spinal Cord Injury Patient by Synchronized Leg-Swing with HAL	Proc. of the 2011 IEEE/RSJ Int' l Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2011), pp. 1737 - 1742	有	2011
14	S.R. Taal and Y. Sankai	University of Tsukuba	Exoskeletal spine and shoulder girdle for full body exoskeletons with human versatility	Proc. of the International Conference on Robotics and Automation 2011 pp. 2217-2222	有	May 2011
15	Gota Nabeshima, Hiroaki Kawamoto, Yoshiyuki Sanka	CYBERDYNE. Inc.	Typical Risks and Protective Measures of Wearable Walking Assistant Robots	roceedings of 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration E1-3	有	2011
16	Hiroaki Kawamoto, Tomoya Shiraki, Tasuku Otsuka and Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Meal-Assistance by Robot Suit HAL using Detection of Food Position with Camera	Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics	有	201
17	Tasuku Otsuka, Ko Kawaguchi, Hiroaki Kawamoto and Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Development of Upper-limb type HAL and Reaching Movement for Meal-Assistance	Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2011	有	2011
18	K. Hasebe, and Y. Sankai	University of Tsukuba	Stepwise Process of Clinical Trials in Safety-Conscious Development of Human	Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics	有	2011

			Assistive Robots			
19	K. Yamawaki, H. Kawamoto, K. Eguchi, Y. Nakata, Y. Sankai and N. Ochiai	University of Tsukuba	Gait training for a spinal Canal Stenosis Patient using Robot Suit HAL -A Case Report-	Proceedings of the 5th world congress of the International Society of Physical and Rehabilitation Medicine	有	2011
20	林 知広, 岩月 幸一, 山海 嘉之	CYBERDYNE 株式会社	神経・筋活動の制御に支障がある重度対麻痺患者の脚上げ意思推定と歩行アシスト	日本機械学会論文集C編, Vol. 77, No. 774, pp. 439-449	有	2011
21	S.R. Taal and Y. Sankai	University of Tsukuba	Exoskeletal Spine and Shoulders for Full Body Exoskeletons in Health Care	Advances in Applied Science Research, Vol.2 (6), pp. 270-286	有	2011
22	林 知広, 岩月 幸一, 山海 嘉之	CYBERDYNE 株式会社	神経・筋活動の制御に支障がある重度対麻痺患者の脚上げ意思推定と歩行アシスト	日本機械学会論文集C編, Vol. 77, No. 774 (2011), pp. 439-449	有	2011
23	長谷部浩二, 河本浩明, 上林清孝, 松下明, 山海嘉之		段階的な臨床試験プロセスによる人支援型ロボット開発の提案	日本ロボット学会誌, vol.29 (3), pp.14-18	有	2011
24	山海嘉之, 鍋島厚太, 河本浩明	筑波大学	ロボットスーツ HAL の安全技術	日本ロボット学会誌 Vol.29 No.9 pp.780~ pp.782	有	2011
25	山田 陽滋, 山海嘉之, 河本浩明, 李秀雄, 鍋島厚太		パワーアシスト機器の安	日本機械学会誌, 114 巻 1106 号, pp. 45-48	有	2011
26	Kousuke Hiramatsu, Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Development of 3D Visual Feedback System for Cybernic Master System	Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 25-30	有	2012
27	Takumi Taketomi, Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Stair Ascent Assistance for Cerebral Palsy with Robot Suit HAL	proceedings of the International Symposium on System Integration (SI International 2012,	有	2012

				SII2012), pp. 336-331		
28	Ryotaro Sabe, Tomohiro Hayashi, Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Visual Feedback System Showing Loads on Handrails for Gait Training	proceedings of the International Symposium on System Integration (SI International 2012, SII2012), pp. 337-342	有	2012
29	Kanako Yamawaki, Ryohei Ariyasu, Shigeki Kubota, Hiroaki Kawamoto, Yoshio Nakata, Kiyotaka Kamibayashi, Yoshiyuki Sankai, Kiyoshi Eguchi, and Naoyuki Ochiai	University of Tsukuba	Application of Robot Suit HAL to Gait Rehabilitation of Stroke Patients: A Case Study	Lecture Notes in Computer Science, Springer, Volume 7383, pp. 184-187	有	2012
30	Gota Nabeshima, Hiroaki Kawamoto and Yoshiyuki Sankai	CYBERDYNE, Inc	Strength Testing Machines for Wearable Walking Assistant Robots based on Risk Assessment of Robot Suit HAL	Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2012), pp. 2743-2748	有	2012
31	林 知広, 岩月 幸一, 長谷川 真 人, 田上 未来, 山海 嘉	CYBERDYNE 株式 会社	自力運動困難な麻痺患 者に対するロボットス ーツを用いた新しい随 意運動訓練—重度脊髄 損傷患者への臨床適用 —	生体医工学, Vol. 50 (2012) No. 1, pp. 117-123	有	2012
32	佐邊綾太郎, 林 知広, 山海嘉之	筑波大学	視覚情報提示による手 すりへの依存荷重フィ ードバックシステムの 開発	日本機械学会論文集(C 編), Vol. 78, No. 792, pp. 3000-3012	有	2012
33	鍋島厚太, 河本 浩明, 山海嘉之	CYBERDYNE 株式 会社	装着型歩行補助ロボッ トのリスク分析と安全 性試験	日本ロボット学会誌, Vol. 30, No. 7-	有	2012

34	山海嘉之, 桜井尊	筑波大学	福祉ロボットにおける テレロボティクス	日本ロボット学会 誌, Vol. 30, No. 6, pp. 595–pp598	無	July 2012
35	山海嘉之, 桜井 尊	筑波大学	サイバニクスを駆使し た HAL (Hybrid Assistive Limbs) 最前 線	分子脳血管病, Vol. 11, No. 3, pp. 25–pp34	無	July 2012
36	Alexsandr Igorovitch Iarov, Hiroaki Kawamoto and Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Development of Noise Resistant Hybrid Capacitive–Resistive Electrodes for Wearable Robotics, Computing and Welfare	IROs 2013: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4249–4254,	有	2013
37	Minh Tuan Nguyen and Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Measurement method of interaction force between human and wearable assistive robot based on strain of contact part	SICE Annual Conference 2013	有	2013
38	山海嘉之	筑波大学	ロボット工学とサイバ ニクス先進リハビリテ ーション	理療, vol. 42 (3)	無	2013
39	村田耕一, 松下 明, 五月女康作, 河本浩明, 山海 嘉之	筑波大学	ピン刺激と擦過刺激が 可能な MRI 対応感覚刺 激装置の開発	日本機械学会論文集	有	2013, (in press)
40	AKIHIRO KITAMURA, TAKASHI NAMEKAWA, KOUSUKE HIRAMATSU, and YOSHIYUKI SANKAI	Japan Atomic Energy Agency (JAEA), University of Tsukuba	OPERATING MANIPULATOR ARM BY ROBOT SUIT HAL FOR REMOTE IN-CELL EQUIPMENT MAINTENANCE	NUCLEAR TECHNOLOGY Vol. 184, pp. 310–319	有	2013
41	Harutoshi Sakakima, Kosei Ijiri, Fumiyo	Kagoshima University, University	A Newly Developed Robot Suit Hybrid Assistive Limb	Case Reports in Orthopedics, Volume 2013 (2013), Article ID 621405	有	2013

	Matsuda, Hiroyuki Tominaga, Takanori Biwa, Kazunori Yone, and Yoshiyuki Sankai	of Tsukuba	Facilitated Walking Rehabilitation after Spinal Surgery for Thoracic Ossification of the Posterior Longitudinal Ligament: A Case Report			
42	Junji Takahashi, Noel Segura Meraz, Yasuhisa Hasegawa, and Yoshiyuki Sankai	Nagoya University, University of Tsukuba	The Discriminant Criteria Detecting Operational Intention from Myoelectricity for Alternative Interface System	Transaction on control and mechanical systems, Vol.2, No.1	有	2013
43	Shigeki Kubota, Yoshio Nakata, Kiyoshi Eguchi, Hiroaki Kawamoto, Kiyotaka Kamibayashi, Masataka Sakane, Yoshiyuki Sankai, Naoyuki Ochiai	University of Tsukuba	Feasibility of Rehabilitation Training With a Newly Developed Wearable Robot for Patients With Limited Mobility	Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, Volume 94, No 6, June 2013. (pp1080-1087)	有	2013
44	Tetsuya Ueba, Omi Hamada, Toshiyasu Ogata, Tooru Inoue, Etsuji Shiota, and Yoshiyuki Sankai	Fukuoka University, University of Tsukuba	Feasibility and Safety of Acute Phase Rehabilitation After Stroke Using the Hybrid Assistive Limb Robot Suit	Neurol Med Chir (Tokyo) 53, pp287-290	有	2013
45	Tetsuya UEBA, Omi HAMADA, Toshiyasu	Fukuoka University,	Feasibility and Safety of Acute Phase	Neurol Med Chir (Tokyo) 53(5), pp. 287-290	有	2013

	OGATA, Tooru INOUE, Etsuji SHIOTA, and Yoshiyuki SANKAI	University of Tsukuba	Rehabilitation After Stroke Using the Hybrid Assistive Limb Robot Suit			
46	Mirko Aach, Renate Meindl, Tomohiro Hayashi, Irene Lange, Jan Geßmann, Andre Sander, Volkmar Nicolas, Peter Schwenkreis, Martin Tegenthoff, Yoshiyuki Sankai, Thomas A. Schildhauer	BG University Hospital Bergmannsheil, University of Tsukuba	Exoskeletal Neuro-Rehabilitation in Chronic Paraplegic Patients - Initial Results	Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation Biosystems & Biorobotics Vol 1, 2013, pp 233-236	有	2013
47	Matthias Sczesny-Kaiser, Oliver Höffken, Silke Lissek, Melanie Lenz, Lara Schlaffke, Volkmar Nicolas, Renate Meindl, Mirko Aach, Yoshiyuki Sankai, Thomas A. Schildhauer, Martin Tegenthoff, Peter Schwenkreis	BG University Hospital Bergmannsheil, University of Tsukuba	Neurorehabilitation in Chronic Paraplegic Patients with the HAL® Exoskeleton - Preliminary Electrophysiological and fMRI Data of a Pilot Study	Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation Biosystems & Biorobotics Vol 1, 2013, pp 611-615	有	2013
48	山海嘉之, 鍋 嵩厚太	筑波大学	ロボットスーツ HAL® 福祉用の開発と実用	月刊 福祉介護テクノプラ ス 2013年7月号,	無	2013

				pp. 16-18		
49	鍋島厚太, 新宮正弘, 河本浩明, 山海嘉之	CYBERDYNE 株式会社	装着型歩行補助ロボットのリスク管理方法: ロボットスーツ HAL® 福祉用の事例	日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 5, pp. xxx-xxx	有	2014. (in press)

【外部発表】※リスト例

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	長谷部浩二, 河本浩明, 松下明, 上林清孝, 山海嘉之	筑波大学	治験のプロセスを基にした人支援技術開発のための実験プロトコルの策定法	第7回生活支援工学系学会連合大会, pp. 132-133	2009
2	松下明, 長谷部浩二, 河本浩明, 上林清孝, 山海嘉之, 松村明	筑波大学	医工連携による機器開発のための実験プロトコルの策定法 -ロボットによる人支援技術を中心に-	社団法人日本脳神経外科学会 第68回学術総会	2009
3	Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Robot Suit HAL based on Cybernetics and Future challenges	The International Conference on Intelligent Robotic Technology and Business Taipei International Robot Show	2009/8/6
4	山海嘉之	筑波大学	HAL 事業化の取り組み	産業交流展 2009	2009/11/4
5	山海嘉之	筑波大学	ロボットスーツの基礎研究と臨床応用	日本整形外科学会 基礎学術集会	2009/11/5
6	山海嘉之	筑波大学	健康長寿社会を支えるサイバニクス人支援技術	第47回日本人工臓器学会大会	2009/11/14
7	Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Robot Suit HAL based on Cybernetics	Volkswagen topmanagement conference	2009/12/4
8	山海嘉之	筑波大学	HAL の運動失調への応用 (基礎編)	厚生労働省 運動失調症班 ミニシンポジウム「小脳の	2010/1/15

				機能と、その評価法を探る」	
9	他 16 件				
10	塚原 淳, 長谷川 泰久, 山海嘉之	筑波大学	意思推定機能を有する HAL による完全脊髄損傷患者のための歩行支援 -マネキンによる歩行実験-	第 11 回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2010), pp. 291-294	2010
11	佐藤帆紡, 山海嘉之	筑波大学	ロボットスーツ HAL による移乗介助動作支援時の装着者と介助動作対象者に関する基礎的主観評価	第 28 回日本ロボット学会 学術講演会, RSJ2010AC2J1-7	2010
12	山海嘉之	筑波大学	リハビリ支援ロボット	日本臨床医療福祉学会	2010/9/4
13	平松宏介, 山海嘉之	筑波大学	サイバニックマスタームによるマニピュレーションシステムに関する研究	第 9 回情報科学技術フォーラム,	2010/9/9
14	竹内奨, 山海嘉之	筑波大学	把持動作支援を可能とする装着型サイバニックハンドの開発	第 9 回情報科学技術フォーラム	2010/9/9
15	山海嘉之	筑波大学	サイバニクスを駆使したロボットスーツ HAL 最前線	第 40 回日本臨床神経生理学会学術大会	2010/11/2
16	山海嘉之	筑波大学	医療・労働安全・災害医療におけるサイバニックメディケアの貢献 - 現在と将来 -	第 58 回日本職業・災害医学会学術大会	2010/11/6
17	山海嘉之	筑波大学	ロボットスーツのある未来! 最先端人支援・技術が創る健康長寿社会	FIRST 最先端サイバニクス 一般シンポジウム	2011/3/26
18	山海嘉之	筑波大学	ロボットスーツ HAL の現状と未来について	第 2 回健康ビジネスセミナー	2011/3/23
19	山海嘉之	筑波大学	ロボットスーツのある未来-活力ある「健康長寿」社会		

20	他 29 件				
21	Yamawaki K, Kawamoto H, Nakata Y, Eguchi K, Sankai Y, Ochiai N.	University of Tsukuba	Gait Training for a Spinal Canal Stenosis Patient using Robot Suit HAL -A Case Report-	6th World Congress of the International Society of Physical & Rehabilitation Medicine (ISPRM) World Congress, Puerto Rico	2011
22	山海嘉之	筑波大学		日本医工学治療学会 第 27 回学術大会	2011/4/23
23	山海嘉之	筑波大学		Entrepreneurship in Asian High-Tech Industries Stanford	2011/5/17
24	山海嘉之	筑波大学		JSPS-NRCT Seminar at Research Expo 2011 "Advanced technology in Japan"	2011/8/27
25	山海嘉之	筑波大学		第 29 回 日本ロボット学会 学術講演会	2011/9/8
26	山海嘉之	筑波大学		国立大学病院医療安全管 理協議会総会	2011/10/20
27	山海嘉之	筑波大学		日韓サービスロボットワ ークショップ(2011 国際ロ ボット展)	2011/11/11
28	山海嘉之	筑波大学		Robotica 2011 Milan, Italy	2011/11/17
29	他 3 3 件				
30	山海嘉之	筑波大学	人や社会のためのイノ ベーションスパイラル ～『ロボットスーツ HAL』 の開発から事業展開ま で～	平成 24 年度 産業・技術委 員	2012/4/11
31	Yoshiyuki Sankai	筑波大学	Recent advances of HAL (Hybrid assistive limb) and clinical	Symposium World Congress Orthopaedie+Reha-tech nik 2012	2012/5/16

			applications		
32	山海嘉之	筑波大学	ロボットスーツ HAL の現状と小児神経への展開	第 54 回日本小児神経学会 総	2012/5/19
33	Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Leading Edge of HAL (Hybrid Assistive Limb) and Clinical Applications	Med Tech Pharma 2012	2012/7/5
34	山海嘉之	筑波大学	ロボットスーツが未来 を変える！医療・福祉・ 介護分野へー新産業創 出への挑戦	第 116 回夏期全国経営者大 会	2012/7/12
35	山海嘉之	筑波大学	ロボットスーツ HAL と臨 床応用への展開	第 5 回アジア義肢装具学術 大会 (APOS2012)	2012/8/4
36	鍋島厚太, 新宮 正弘, 河本浩 明, 山海嘉之	CYBERDYNE 株式会社	CYBERDYNE のリスク管理 方法と安全規格への貢 献	第 30 回日本ロボット学会 学術講演会予稿集, 402-5, 北海道	Sep, 2012
37	山海嘉之	筑波大学	ロボットスーツ HAL の脊 髄損傷患者への適用 Robot Suit HAL and Applications for SCI patients	第 47 回日本脊髄障害医学 会	2012/10/25
38	山海嘉之	筑波大学	大学の持続成長とイノ ベーション	SSC2012 サミット：大学財 務資産運用カンファレ ンス	2012/11/6
39	Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Cybernetics: fusion of Human , Machine and Information ~Robot Suit for the Future~	SIMPAR 2012 (International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots),	2012/11/7
40	山海嘉之	筑波大学	ロボットスーツ HAL の市 場拡大に向けた取組	健康ビジネスサミットう おぬま会議 2012	2012/11/14
41	山海嘉之	筑波大学	サイバニクス国際医療 開発拠点形成と HAL によ る次世代ニューロリハ への展開	つくば医工連携フォーラ ム	2013/1/29

42	Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Introduction of the neurologic controlled HAL Robot Suit System	Trauma Conference of the Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung	2013/3/15
43	他 32 件				
44	鍋島厚太	CYBERDYNE 株式会社	CYBERDYNE のリスク管理: リスクアセスメントのリスク再見積の事例	ロボットビジネス推進協議会 サービスロボットのリスクアセスメントに関するセミナー	2012/12/5
45	Murata, K., Mastushita, A., Saotome, K., Kawamoto, H., Matsumura, A., Sankai, Y	筑波大学	Development of an MR-Compatible Sensory Stimulation Device	The 42th Annual Meeting of The Japanese Society of Neuroradiology, International Session, Kitakyushu	2013
46	Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	The Future of Robots : Japan' s Robot Revolution	Harvard Asia Business Conference 2013	2013/4/13
47	鍋島厚太, 河本浩明, 山海嘉之	CYBERDYNE 株式会社	装着型歩行補助ロボットのための ISO 13482 要求分析	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 (ROBOMECH2013), 1A1-H09, 茨城	May, 2013
48	Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Robot Suit HAL and Clinical Applications for Locomotor Disorder	2nd joint world congress of ISPGR and Gait & Mental Function	2013/6/26
49	山海嘉之	筑波大学	イノベーションで成長を実現－変革の実践者に学ぶ	成長戦略タスクフォース主催 パネルディスカッション	2013/7/19
50	Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Cybernetics : fusion of human, machine and information systems ~ Challenges for the future~	International Conference of International Association of Societies of Design Research 2013	2013/8/27
51	鍋島厚太, 新宮正弘, 河本浩明, 山海嘉之	CYBERDYNE 株式会社	ISO/DIS 13482 認証による装着型生活支援ロボットの安全性評価	第 31 回日本ロボット学会 学術講演会予稿集, 1A3-01, 東京	Sep, 2013
52	Yoshiyuki	University	Innovating for Healthy	Annual Meeting of the New	2013/9/12

	Sankai	of Tsukuba	Living, World Economic Forum	Champions 2013	
53	Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Open General Session	The 2013 American Orthotic Prosthetic Association (AOPA) O&P World Congress	2013/9/19
54	山海嘉之	筑波大学	少年のころからの夢とロボットスーツ HAL の開発, 最先端技術の重度障害児者への応用	第 39 回重症心身障害学会 学術集会	2013/9/26
55	Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Public Health / Nursing “Global Challenges in Public Health & Nursing	Tsukuba Global Science Week 2013	2013/10/3
56	山海嘉之	筑波大学	日本・スイスクラスタースィンポジウム	Case Study 8 for future collaboration	2013/10/29
57	Yoshiyuki Sankai	University of Tsukuba	Robot Suit for Nuclear Facilities in Radioactive Environments	IEEE IROS2013	2013/11/3
58	山海嘉之	筑波大学	脳・神経・筋系の機能再生のための新たな医療機器「ロボットスーツ HAL 医療用」	PMDA 薬事戦略フォーラム	2013/11/19
59	山海嘉之	筑波大学		TEDxTsukuba「一期一会」	2013/12/8
60	山海嘉之	筑波大学	世界初サイボーグ型ロボット「ロボットスーツ HAL」で未来を変える！！	第 127 回 全国経営者セミナー	2014/1/24
61	山海嘉之	筑波大学	医工融合によるサイバニクス国際医療開発拠点形成	つくば医工連携フォーラム	2014/1/28
62	山海嘉之	筑波大学	医療・介護ロボットの現状と可能性	一般社団法人 医療介護福祉政策研究フォーラム (虎の門フォーラム)	2014/2/20
63	他 38 件				

64	鍋島厚太	CYBERDYNE 株式会社	リスクアセスメントの 実例：ロボットスーツ HAL®福祉用の場合	経済産業省 グローバル認 証基盤整備事業 先端分野 に係る機能安全に関する認 証システム基盤整備事業 機能安全に係る人材育成セ ミナー 応用・実技領域 生 活支援ロボット分野, リ スクアセスメント (実習) 事例紹介	2013/11/19
65	鍋島厚太	CYBERDYNE 株式会社	ISO/DIS 13482 認証の事 例：ロボットスーツ HAL®福祉用の場合	ロボット産業振興会議・北 九州市介護ロボット普及推 進会議, 医療・介護ロボッ トセミナー パーソナルケ アロボット 安全認証とそ の事例	2014/1/22
66	鍋島厚太	CYBERDYNE 株式会社	サービスロボットの開 発～安全性認証の実際	サービス・ロボットの安全 性 (ISO 13482) 説明会	2014/3/5

(b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	筑波大学/CYBERDYNE 株 式会社	イノベーションの芽 育てられぬ 日本 装着型ロボ 普及のハード ル高く	日経ネット Plus	2009/7/6
2	筑波大学/CYBERDYNE 株 式会社	生活支援ロボット実用化へ安全基 準づくり	産経新聞	2009/8/3
3	筑波大学/CYBERDYNE 株 式会社	生活支援ロボ 実用化へ安全基準 づくり	産経新聞	2009/8/4
4	筑波大学/CYBERDYNE 株 式会社	Development of "Robot Suit HAL"	Attractive Sectors Medical Care (Jetro 発行), pp. 11	2009/9
5	筑波大学/CYBERDYNE 株 式会社	生活支援ロボ実用化 三洋電・独バ イエル参加 筑波大が国際研究拠 点	日刊工業新聞	2009/9/16
6	筑波大学/CYBERDYNE 株 式会社	ロボットスーツ、医療機関に リハ ビリ支援県が 18 体貸与へ	読売新聞, pp. 30 (地 域版)	2009/10/3

7	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	SUPER VISION ロボット社会への第一歩, 公共の場ではじめてロボットスーツの歩行実験が行なわれた	Newton, pp.16-17	2009/11月号
8	University of Tsukuba/ CYBERDYNE. Inc	Japansk robotfirma abner dansk kontor (英訳: Japanese robot company opens Danish office)	Borsen (デンマークの経済紙) pp.14-pp. 15	2009/11/26
9	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	Japanese Robotics Firm Cyberdyne to Establish Presence in Denmark	Invest In Denmark	2009/11/30
10	他 54 件			
11	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	Un 'casco' que lee actividad cerebral, último complemento para el traje-robot	EL MUND.es (スペインエル・ムンド紙) [URL]	2011/3/9
12	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	社会の新たな課題解決への挑戦~科学・技術への期待, 首相官邸ブログ (KUN-FULL BLOG)	首相官邸ブログ (KUN-FULL BLOG) [URL]	2011/3/10
13	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	2台連動型のロボットスーツ=リハビリに应用期待—筑波大学	時事ドットコム [URL]	2011/3/10
14	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	パワフル 未来の助っ人	読売経済新聞/p. 24	2011/3/10
15	University of Tsukuba/ CYBERDYNE. Inc	Cyberdyne demos lower-body HAL exoskeleton for helping the disabled	not eradicating mankind Engadget[URL]	2011/3/15
16	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	現代の発明家から次世代へのリレーメッセージ「健康長寿社会を支える最先端人支援ロボット ロボットスーツ HAL」	特許庁[URL]	2011/3/15
17	他 147 件			
18	University of Tsukuba/ CYBERDYNE. Inc	Roboteranzug soll Querschnittsgelähmte gehen lassen	Financial Times Deutschland	2011/05/26
19	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	科学者たちのメッセージ・16歳のきみへ 装着すれば誰でもパワーUP! 世界初の「ロボットスーツ」	大学受験講座 「Encollege」物理・理系難問6月号 (ベネッセコーポレーション) p. 52	2011/6/01

20	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	ロボットスーツ HAL 既に自律動作支援に活用	MedicalTribune p. 33	2011/7/28
21	University of Tsukuba/ CYBERDYNE, Inc	Robot Suit HAL: The World-Leading Human-Assistive Robot Contributing to a Long -Lived and Healthy Society - Dr. Yoshiyuki Sankai	特許庁ホームページ (英語版)	2011/7/29
22	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	ロボで手足動作回復: 今秋に欧州で臨床試験	日本経済新聞 全国版	2011/08/22
23	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	日本のロボットスーツ、ドイツ健康市場のチャンス	Germany Investment MAGAZINE p. 4	2011/11
24	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	人を幸せにするテクノロジー バージンロード 歩けた 筑波大教授 開発 ロボットスーツで訓練	毎日新聞 p. 7	2012/1/1
25	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	人間の身体機能を増幅・強化するパワーアシストスーツ	技術・家庭 技術分野(中学校技術・家庭科用教科書)(教育図書) p. 135	2012/2/5
26	他 147 件			
27	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	医療機器品質管理国際規格認証取得 サイバーダイン	毎日新聞 朝刊 25 ページ	2013/1/22
28	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	サイバーダイン: 医療機器品質管理の国際規格認証取得/茨城	掲載 web : Yahoo! JAPAN ニュース (毎日新聞)	2013/1/22
29	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	「ロボットスーツ」機器企業 医療機器品質 ISO 取得	読売新聞 朝刊 35 ページ	2013/1/22
30	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	サイバーダイン 医療用 HAL 国際規格 ISO 取得 つくば 国内外、臨床試験可能に	茨城新聞 朝刊 20 ページ	2013/1/22
31	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	つくばのベンチャー・サイバーダイン 医療機器の国際規格取得 ロボットの活用へ弾み	朝日新聞 朝刊 29 ページ	2013/1/22
32	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	ロボスーツを医療機器に つくばのサイバーダイン社 品質管理の国際規格取得	常陽新聞 朝刊 1 ページ	2013/1/22

33	University of Tsukuba/ CYBERDYNE. Inc	Japan robot suit gets global safety certificate	掲載 Web : SPACE DAILY (USA)	2013/2/27
34	University of Tsukuba/ CYBERDYNE. Inc	HAL Robotic Suit Gets International Safety Certificate	掲載 Web : Popular Science	2013/2/27
35	University of Tsukuba/ CYBERDYNE. Inc	Robotic Exoskeleton Gets Safety Green Light	掲載 Web : Discovery News	2013/2/27/
36	University of Tsukuba/ CYBERDYNE. Inc	Japan robot suit gets global safety certificate	掲載 Web : Phys.org	2013/2/27
37	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	生活支援ロボットに国際規格	掲載 Web : NHK ONLINE (首都圏版)	2013/2/27
38	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	生活支援ロボットが国際認証	掲載 Web : NHK ONLINE (水戸放送局版)	2013/2/27
39	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	「ロボットスーツ HAL 福祉用」「生活支援ロボット実用化プロジェクト」の成果を基に、世界に先駆け国際安全規格の認証取得	経産新報, 1 ページ	2013/3/5
40	他 207 件			
41	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	最先端サイバニクスを活用し医療機器として“人支援産業”の創出を	掲載 Web : 経済産業省 HP 2013 年版ものづくり白書 P. 150-151	2013/6/7
42	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	話の肖像画 ロボットスーツ「HAL」開発者・山海嘉之 (55) (1) ~ (5)	産経新聞	2013/6/24-2013/6/28
43	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	介護ロボ 開発・導入支援 厚労省、施設に企業紹介	日本経済新聞 P. 4	2013/7/6
44	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	深層断面「医療・介護ロボ」実用化へ着々	日刊工業新聞 P. 1	2013/11/4
45	筑波大学/CYBERDYNE 株式会社	人間発見 筑波大学大学院教授 山海嘉之さん ロボットで未来を開拓 (1) ~ (5)	日本経済新聞	2013/12/9~ 2013/12/13
46	他 261 件			

(c) その他 (同様の形式で表を作成する)

番号				
1	テレビ放映資料	NHK 総合テレビ「経済ワイド vision e」	NHK	2009/7/18
2		TBS みのもんたの朝ズバッ!	TBS	2010/1/5
3		NHK 首都圏ネットワーク	NHK	2010/4/8 18 : 10-19 : 00
4		「財部ビジネス研究所」	BS 日テレ	2010/9/30 22:00-22:54, 10/3 9:00-9:54
5		すこやか介護 (たかとりじゅんの「ビタミンJ」)	ラジオ (AM), 茨城放送 : 水戸局 1197 kHz 土浦県西中継局 1458 kHz	2010/12/31 10:05-
6		HK, 東証ベンチャーフォーラム	NHK	2011/1/19 19:00-
7		ラヂオつくば	地域情報番組「Wh@t?tsukuba!」	2011/3/3 12 : 30-40
8		「ブレークスルーに挑むノトップサイエンティストからのメッセージ」	NHK 教育	2011/05/21 14:00-14:59
9		「夢の扉+」	TBS テレビ	2012/01/08 18 : 30-19 : 00
10		「CHANGE MAKERS 変革者たち」	テレビ東京, テレビ大阪 テレビ愛知	2011/04/10 22:48-52 2011/04/11 21:54-58
11	他 14 件			
12		おはよう日本	NHK	2013/1/25 6 : 00-
13		NEWSLINE・NL20	NHK ワールド	2013/2/13 20:00-

14		おはよう日本	NHK 総合	2012/5/19 14:00-15:30
15		ワールドビジネスサテライト	テレビ東京	2012/6/5 4:30-5:00, 5:00-6:00
16	他6件			
17		プロフェッショナル 仕事の流儀	NHK 総合	2013/1/20 22:00-22:48
18		NEWSLINE 「Walking with Medical Robots」	NHK ワールド	2013/4/19
19		Through The Wormhole With Morgan Freeman	Science Channel (Discovery Channel 系列)	2013/7/10 22:00-
20		はなまるマーケット「こだわりサーチ」	TBS	2013/11/7
21		プライムニュース	BS フジ	2013/11/28
22	他23件			
23	展博への出展	DIGITAL CONTENT EXPO 2009	日本科学未来館（東京都）、経済産業省／（財）デジタルコンテンツ協会	2009/10/22-25
24		ジャパン・クリエイティブ・センター開所式 オープニングイベント 「ジャパン・グッド・デザイン」展（鳩山総理およびリー・シェン・ロン首相出席）	ジャパン・クリエイティブ・センター（シンガポール）、在シンガポール日本国大使館	2009/11/14
25		Seminar: "Innovative Technology in Neurorehabilitation"	DS Auditorium（スウェーデン）、スウェーデン大使館／Karolinska Institute Danderyds Hospital	2009/11/16
26		2009 国際ロボット展, 東京ビッグサイト	社団法人日本ロボット工業会／日刊工業	2009/11/25-28

			新聞社	
27	他 2 2 件			
28		上海万博	上海、中国	
29		日中友好 4 0 周年記念事業 活力 日本展～日本新万象～	上海、中国	2012/02/24-26
30		日独交流 150 周年記念経済展		2011/05/24 - 05/28
31		「TOP OF THE TOP ! - 世界の頂点 をめざす研究者 30 名」展	東京	2011/06/11- 07/24
32		文部科学省：ロボットスーツ HAL 常 設展示・実	東京	2011/08/12- 08/18
33		2011 国際ロボット展	東京	2011/11/09-11/12
34		AAAS 総会への出展	Vancouver, CA	2012/02/16-20
35	他 6 件			
36		ASEAN ロードショー	東京	2012/04/25-28
37		Symposium World Congress Orthopaedie+Reha-technik 2012	Leipzig Messe, Leipzig, Germany	2012/05/16
38		科学技術が創り出す未来	新潟県立自然科学 館, 新潟	2012/06/02
39		第 7 回高齢者福祉研究大会 アクテ ィブ福祉 in 東京	東京	2012/09/26
40		CEATEC JAPAN 2012	千葉	2012/10/02-06
41		メディカルクリエーションふくし ま	福島	2012/11/28
42	他 45 件			
43		国際ロボット展,	東京	2013/11/6-9
44		MEDICA (医療機器展@ドイツ)	ドイツ	2013/11/20-23
45	他 28 件			
46	受賞実績	平成 2 1 年度全国発明 2 1 世紀発明賞	山海嘉之 CYBERDYNE 株式会社, 筑波大学	2009/7

47		10 NetExplorateurs of the Year, Robot Suit HAL	CYBERDYNE 株式会社, 筑波大学	2011/2
48		2010 年度「アントレプレナー・オ ブ・ザ・イヤー・ジャパン チャ レンジング・スピリット部門大 賞	山海嘉之 CYBERDYNE 株式会社	2010/12
49		いばらきデザインセレクション 2010 知事選定受賞	Robot Suit HAL CYBERDYNE 株式会社, 筑波大学	2010/12
50		平成 22 年度茨城県表彰・特別功労 賞受賞	山 海 嘉 之 , CYBERDYNE 株式会社, 筑波大学	2010/11
51		CHANGEMAKERS OF THE YEAR 2010	研 究 者 部 門 , 山海嘉之 CYBERDYNE 株式会社	2010/5
52		Technology Pioneer 2014	World Economic Forum (ダ ボス会議)	2013/9

■（研究開発項目④）安全技術を導入した歩行アシストの開発
【(株) 本田技術研究所】

【特許】

出願無し。

【論文】

発表無し。

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	及川清志	(株)本田技術研究所	市民公開シンポジウム「生活支援モビリティ～ユニバーサルなモビリティ～の展開を期して」における「リズム歩行アシストの開発」	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2012	2012/11/04
2	及川清志	(株)本田技術研究所	生活支援ロボット実用化プロジェクト 安全技術を導入した人間装着型生活支援ロボットの開発 ーリズム歩行アシストの開発	ロボテイクスメカトロニクス講演会 2013in Tsukuba	2013/05/22--2013/05/25
3	松田広志	(株)本田技術研究所	生活支援ロボット実用化プロジェクト 安全技術を導入した人間装着型生活支援ロボットの開発 ーリズム歩行アシストの開発	2013 国際ロボット展	2013/11/06--2013/11/09
4	松田広志	(株)本田技術研究所	安全技術を導入した歩行アシストの開発	生活支援ロボット実用化プロジェクト成果報告会	2014/02/18

(b) 新聞・雑誌等への掲載

番号	分類	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	報道記事	「アシモ」の技高齢者お助け	朝日新聞, p.5	2012/07/30
2	報道記事	ホンダ医療機関に提供	日本経済新聞, p.9	2012/07/30
3	報道記事	歩行アシスト開発	読売新聞, p.7	2012/07/30

4	報道記事	ホンダ、歩行支援機器	産経新聞, p.10	2012/07/30
5	報道記事	介護予防にアシモ技術	東京新聞, p.3	2012/07/30
6	報道記事	介護予防にアシモ技術	毎日新聞, p.11	2012/07/30
7	報道記事	ホンダ歩行支援ロボ	日経産業新聞, p.3	2012/07/30
8	報道記事	歩行アシストロボ 40 台提供	日刊工業新聞, p.7	2012/07/30
9	報道記事	介護予防に ASIMO 技術	フジサンケイビジネスアイ, p.4	2012/07/30
10	報道記事	「歩行アシスト」開発	日刊自動車新聞, p.1	2012/07/30
11	報道記事	アシモの技術 介護予防に活用	SANKEI EXPRESS, p.7	2012/07/30

(c) その他メディア

番号	メディア	番組／タイトル	放送局	放映日
1	テレビ放送	NHK ニュース	NHK	2012/07/30
2	テレビ放送	サキどり↑ DX60 分スペシャル版!	NHK	2014/01/06
3				

■（研究開発項目⑤）搭乗型生活支援ロボットにおけるリスクアセスメントと安全機構の開発【トヨタ自動車株式会社】

公開月	イベント名称	場所
2010/02/10 -2010/02/20	人とロボットのスペシャルコンサート	アムラックス、 メガウェブ
2010/02/27	豊田市発明クラブ	愛・地球博記念公園
2010/03/01 -2010/03/02	次世代モビリティフォーラム	名古屋国際会議場
2010/10	豊田市実証実験	豊田市駅前
2011/04/19 -2011/04/28	上海モーターショー	中国上海
2011/06/05	HUREAIday	トヨタスポーツセンター
2011/07/22 -2011/07/31	インドネシアモーターショー	インドネシア
2011/08/22 -2011/10/14	Winglet 実証実験	カラフルタウン岐阜
2011/09/23 -2011/09/25	モリコロパーク秋祭り	愛地球博記念公園
2011/10/02	TES フェスティバル	トヨタスポーツセンター
2011/10/17 -2011/10/28	Winglet 実証実験	豊田市交通安全センター
2011/11/01	ロボット発表会	メガウェブ
2011/11/14	ロボット発表会	ラスベガススピードウェイ
2011/11/27	ガスレーシングフェスティバル	富士スピードウェイ
2011/11/30 -2011/12/11	東京モーターショー	東京ビッグサイト
2011/12/06 -2011/12/07	プリウスカップ	富士スピードウェイ
2012/01/04 -2012/01/22	タイBOIフェア	バンコク
2012/01/25	ロボット発表会	ポートメッセ名古屋
2012/03/31 -2012/04/01	サイクリングロード完成	モリコロパーク

公開月	イベント名称	場所
2012/04/19 -2012/04/21	EV・PHV サミット	朱鷺メッセ（新潟）
2012/04/23 -2012/05/02	北京モーターショー	中国北京
2012/06/14	AFFITN（医学学会）	ANA クラウンプラザ （金山）
2012/09/20 -2012/09/30	インドネシアモーター ショー	インドネシア
2012/10/17 -2012/10/19	JAPAN ROBOT WEEK	東京ビックサイト
2012/11/15 -2012/11/16	明知 スキル アップセミナー	豊田市
2012/11/16 -2012/11/18	あいち次世代ロボットフ ェスタ	モリコロパーク
2012/11/30 2012/12/01	ものづくり博2012IN 東三河	豊橋総合体育館
2013/02/14 2013/02/15	くまもと産業ビジネスフ ェア	グランメッセ熊本
2013/05/11 2013/05/12	ドライブ王国 2013in 福島	ビッグパレットふくしま
2013/10/02 -2013/11/15	Winglet 実証評価	ららぽーと TOKYO-BAY
2013/10/06	T E S フェスタ	トヨタスポーツセンター
2013/10/12 2013/10/13	にしお産業物産フェア	西尾市文化会館
2013/10/24 -2013/11/08	Winglet 業務利用追従	ヴィーナスフォート
2013/11/21 -2013/11/22	海外メディアトリップ対 応 (Winglet 試乗対応)	西浦モーターパーク

■（研究開発項目⑤）搭乗型生活支援ロボットにおけるリスクアセスメントと安全機構の開発 【独立行政法人国立長寿医療研究センター】

(1) 研究発表・講演

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2009年10月11日	バイオメディカル・ファジィ・システム学会	干渉を起こす量子回路と脳理論 (損傷を含む)	松浦弘幸・根本哲也伊藤安海・中野正博西井匠
2010年8月5日	バイオメディカル・ファジィ学会, 論文誌	施設設計図から見た動線別リスク要因	山中・根本・伊藤・松浦
2010年8月5日	バイオメディカル・ファジィ学会, 論文誌	頭部損傷基準値(HIC)の理論分析	中野・松浦・玉川・山中・行正
2010年9月12日	Bio-med. fuzzy system. Association	Theoretical Analysis of HIC (accept)	Nakano, Matsuura, Tamagawa, et. Al
2010年3月22日	日本医学会シンポジウム	骨粗鬆症関連の転倒骨折、その予防と治療	原田敦
2010年7月29日	日本整形外科スポーツ医学学会集會	転倒・骨折のバイオメカニクスと高齢者の運動訓練	原田敦、田中英一
2010年9月12日	バイオメディカル・ファジィ学会大会	転倒と衝突に関する力学的損傷	松浦・伊藤・根本・西井・久保田・中野・玉川・山中
2010年10月9日	バイオメディカル・ファジィ学会大会	医療者のリスク認知と事故防止	山中・伊藤・根本・松浦・中野
2010年10月10日	International Conference of BMSFA2010	Theoretical Analysis on Head Injury Criterion	Nakano, Matsuura Tamagawa, Yukimasa, Yamanaka
2011年10月	バイオメディカル・ファジィ学会, 論文誌 Vol. 13(2), p39-44	体損傷リスク評価法の開発における転倒実験と物性解析 頭部損傷基準値(HIC)の理論分析	近藤・松崎・松浦・玉川・中野・山中・根本
2011年10月	バイオメディカル・ファジィ学会, 論文誌 Vol. 13(2), p45-52	頭部損傷基準値(HIC)の理論分析 床材質と姿勢変化による頭部外傷の評価	山中・中野・松浦・玉川・行正

2011年10月	バイオメディカル・ファジー学会, 論文誌 Vol. 13(2), p53-62	力学的人体損傷に関する基礎的研究-1, 日常的空間に於ける機会と人の共存リスクの見積もり	松浦・根本・伊藤・中野・西井・玉川・久保田
2011年10月	バイオメディカル・ファジー学会, 論文誌 Vol. 13(2), p63-70	力学的人体損傷に関する基礎的研究-2, 日常空間での衝突・転倒のモデル作成とその解析法	松浦・玉川・中野・山中・行正
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2011年10月	バイオメディカル・ファジー学会, 論文誌 Vol. 13(2), p71-78	力学的人体損傷に関する基礎的研究-3, 人体の衝撃力学とその物理量の推定	松浦・中野・玉川・伊藤・久保田・根本
2011年10月	バイオメディカル・ファジー学会, 論文誌 Vol. 13(2), p79-82	力学的人体損傷に関する基礎的研究-4, 衝撃応答による粘性弾性率の推定原理	松浦・根本・中野・玉川・伊藤
2011年10月	バイオメディカル・ファジー学会, 論文誌 Vol. 13(2), p83-88	力学的人体損傷に関する基礎的研究-5, 回転・自由落下仮説による損傷と重傷度推定の実際	松浦・玉川・中野・根本・久保田
2011年10月	バイオメディカル・ファジー学会, 論文誌 Vol. 13(2), p97-104	人体の衝突・転倒時の安全評価に関する基礎的研究, 第1報ダミーの衝突・転倒時	玉川・松浦・中野・行正・山中・久保田
2011年10月	バイオメディカル・ファジー学会, 論文誌 Vol. 13(2), p109-114	転倒による受傷リスク調査	行正・中野・松浦・玉川・山中・久保田
2011年10月	バイオメディカル・ファジー学会, 論文誌 Vol. 13(2), p109-114	衝突衝撃指標(CII)に基づく衝撃のパターン	中野・松浦・玉川・行正・山中・久保田
2011年3月	日本実験力学会	高齢者の転倒と骨折-プロテクタ	原田敦

	11(1): 9-11	の効用-	
2011年3月	財団法人長寿科学振興財団 45-53	サルコペニア：診断と現状把握 運動器疾患の予防と治療 Advances in Aging and Health Reserch 2010	原田敦
2011年3月	実験力学 11(1), 30-34	リアルタイム皮膚ひずみ測定法を用いた皮膚特性の評価方法の検討	久保田 怜, 根本 哲也, 伊藤 安海, 磯貝 善蔵, 古田 勝経, 松浦 弘幸, 島本 聡
2011年4月	サルコペニアの基礎と臨床 64-71	第3章 サルコペニアの診断 臨床におけるサルコペニアの診断	原田敦
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2011年4月	Rad Fan, 9(5): 45-47, 2011. 4	パーキンソン病の核医学診断	新畑豊、加藤隆司
2011年5月	大腿骨頸部／転子部骨折診療ガイドライン 改訂第2版 48-59	日本整形外科学会診療ガイドライン委員会 大腿骨頸部／転子部骨折診療ガイドライン策定委員会	原田敦
2011年6月	日本褥瘡学会誌 13(2), 150-156	組織水分調節にかかわる細胞外マトリックス分子であるヒアルロン酸の褥瘡における挙動	松本尚子, 高橋佳子 磯貝善蔵, 森将晏, 古田勝経, 米田雅彦
2011年7月	J Orthop Sci 16: 418-423	Serum 25-hydroxyvitamin D status in hip and spine-fracture patients in Japan.	Mayumi Sakuma, Naoto Endo, Hiroshi Hagino, Atsushi Harada, Yasumoto Matsui, Tetsuo Nakano, Kozo Nakamura
2011年7月	Osteoporosis Japan 19(3): 376-378	骨粗鬆症における発症と骨折予防 骨粗鬆症の骨折予防 骨外因子	原田敦
2011年8月	日経メディカル N i k k 61	骨折予防には「転倒予防」も大切	原田敦
2011年8月	認知症者の転倒予防とリスクマネジメント 一病院・施設・自宅でのケア 51-54	認知症高齢者と骨粗鬆症の関連は	原田敦、松井康素、下方浩史
2011年8月	月刊デイ Vol140, 58-64	若年性認知症の方への支援	長屋政博

2011年9月	Geriatric Medicine 49(9): 961-962	序文 特集 骨粗鬆症診療の最近の 進歩	原田敦
2011年10月	Medical Tribune 44:52:00	シリーズ ロコモティブシンドロ ーム 長寿医療研究としてのとり くみ	原田敦
2011年11月	Modern Physician 31(11): 1279-82	サルコペニアの定義、診断基準 サ ルコペニアの診かた	原田敦
2011年12月	現代医学 59(2): 325-329	医療の現場から ロコモティブシ ンドローム	原田敦
2011年12月	癌と化学療養, 38(Sup1), 53-55	登録制による在宅医療を支援する 病棟における癌患者と非癌疾患の 検討.	大島浩子, 中村孔美松本明 美, 鈴木隆雄
2012年1月	日本在宅医学会雑 誌, 13(2), 107-112	在宅医療を支援する病棟における 初回入院患者の特性の検討: 在宅 復帰支援と在宅継続支援の比較	大島浩子, 中村孔美松本明 美, 鈴木隆雄
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2012年1月	Breast Cancer 19(1), 46-53	Versican G1 and G3 domains are upregulated and latent transforming growth factor- β binding protein-4 is downregulated in breast cancer stroma.	Takahashi Y, Kuwabara H, Yoneda M, Isogai Z, Tanigawa N, Shibayama Y
2012年1月	日在医会誌第 13 巻第 2 号 41-45	認知症—在宅でできる認知症に対 するリハビリテーション—	長屋政博
2012年2月	J Am Geriatr Soc 60(2): 251-255	Vitamin D deficiency in elderly women in nursing homes— Investigation with consideration of decreased activation function from the kidneys.	Yasuhito Terabe, Atsushi Harada, Haruhiko Tokuda, Hiroyasu Okuizumi, Masahiro Nagaya, Hiroshi Shimokata

	Geriatrics and Gerontology International	Estimation of appendicular muscle mass and fat mass by near infrared spectroscopy in older persons.	Daisuke Yoshida, Hiroyuki Shimada, Atsushi Harada, Yasumoto Matsui, Yoshihito Sakai, Takao Suzuki
	Int J Cancer	Versican Regulates Cell-associated Matrix Formation and Cell Behavior Differentially from Aggrecan in Swarm Rat Chondrosarcoma Cells.	Wasa J, Nishida, Y, Shinomura T, Isogai Z, Urakawa H, Arai E, Kozawa E, Futamura N, Tsukushi S, Ishiguro N.
2011年10月2日	転倒予防医学研究会 第8回研究集会	転倒・転落のダミー人形実験と理論、及び衝撃力と損傷リスク評価	松浦・NEDO-PJ, JARI
2011年10月29日	バイオメディカル・ファジー学会	人体損傷リスク評価法開発における転倒実験と物性解析	近藤・松崎・伊藤・根本・松浦・久保田 中野・山中・玉川
2011年10月29日	バイオメディカル・ファジー学会	スリッパ転倒における頭部外傷危険度	山中・中野・松浦・玉川・行正
2011年10月29日	バイオメディカル・ファジー学会	人体の衝突・転倒時の安全評価に関する基礎的研究 第1報 ダミーの衝突・転倒実験による現象の把握	玉川・松浦・中野・山中・久保田・行正
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2011年10月29日	バイオメディカル・ファジー学会	病院における転倒による受傷の状況調査	行正
2011年10月29日	バイオメディカル・ファジー学会	転倒・転落と人体損傷	松浦・根本・伊藤・久保田・近藤・松崎 玉川・中野・山中
2011年10月29日	バイオメディカル・ファジー学会	転倒による人体各部の受ける衝突衝撃指標(CII)	中野・松浦・玉川・行正・久保田
2011年10月30日	Bio-med. fuzzy system. Association	The Analysis of Injury caused by Fall in human body	Yukimasa T

2011年10月30日	Bio-med. fuzzy system. Association	Falling, Cropper and Mechanical human injury	Matsuura H, Tamagawa T, Nkano M, Konndo R, Matsuzaki
2011年10月30日	Bio-med. fuzzy system. Association	Theoretical analysis of collision Impact Index	Nakano M, Matsuura H, Tamagawa M, Yamanaka M Yukimasa T
2011年12月23日	6th int. conf. on Innovative Computing, information and Control	The calculation of an injury by fall using a rigid body models	Yamanak M, Namkano M, Matsuura H, Tamagawa T, yukimasa T
2011年12月23日	6th int. conf. on Innovative Computing, information and Control	Risk assessment of head injuries due to Slip-induced falls backward	Matsuura H, Tamagawa M, Nakano M,
2011年12月23日	6th int. conf. on Innovative Computing, information and Control	Mechanical injuries of human bodies	Yamanaka M., nemoto T
2011年12月23日	6th int. conf. on Innovative Computing, information and Control	Pattern recognition based on collision impact index	Nakano M, Matsuura H, Tamagawa M
2012年3月17日	第14回日本在宅医学会大会	在宅療養支援における多職種共同カンファレンス実施状況の検討	大島浩子, 中村孔美, 松本明美, 鈴木隆雄
2011年5月17日	第52回日本神経学会学術集会	神経疾患における褥瘡の管理	磯貝善藏
2011年5月18日	第52回日本神経学会学術集会	アルツハイマー型認知症に対する塩酸ドネペジル少量投与に関する多施設後向き調査	新畑豊、他
2011年5月21日	第5回知多地域認知症看護・介護研修会	認知症と転倒・予防と対策	原田敦
2011年6月1日	三重県骨粗鬆症治療戦略セミナー	骨強度と外力からみた骨折予防戦略	原田敦
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2011年6月7日	愛知県立大学看護学部老年看護学科目内特別講義	病院・在宅における脳卒中高齢患者の看護	大島浩子
2011年6月15日	第53回日本老年医学会総会	高齢者の褥瘡発生の傾向と合理的な予防対策	磯貝善藏

2011年6月15日	高齢者褥瘡に対する積極的な薬物療法の有用性	高齢者褥瘡に対する積極的な薬物療法の有用性	溝神文博, 古田勝経, 磯貝善蔵
2011年6月16日	第53回日本老年医学会学術集会	ロコモティブシンドロームとサルコペニア	原田敦
2011年6月16日	日本老年看護学会第16回学術集会	在宅医療を支援する病棟に入院した高齢者の特性と再入院の関連要因の検討	大島浩子, 中村孔美三浦久幸, 鈴木隆雄
2011年6月16日	第53回日本老年医学会学術集会	在宅医療を支援する病棟に登録した在宅高齢者における在宅療養継続の関連要因の検討	大島浩子, 鈴木隆雄
2011年6月16日	第53回日本老年医学会学術集会	握力による骨量減少および骨粗鬆症の発症の予測 —地域在住中高年者を対象とした疫学縦断研究	松井康素, 竹村真里枝, 原田敦, 他
2011年6月26日	第22回日本在宅医療学会学術集会	登録制による在宅医療を支援する病棟における癌患者と非癌患者の特性の検討	大島浩子, 中村孔美松本明美, 鈴木隆雄
2011年7月18日	The 2 nd Japan-Korea joint Conference on Community Health Nursing	A case-control study of home care among the elderly registered at a hospital.	Ohshima H, Suzuki T
2011年7月26日	第325回緑医学研究会	高齢期の骨折予防—骨粗鬆症と転倒の両面から考える—	原田敦
2011年8月4日	2011年老年医学セミナー	骨粗鬆症・転倒・骨折	原田敦
2011年8月23日	第67回久留米大学TQM研修会	転倒外力から考える骨折予防—プロテクターなどの効果—	原田敦
2011年8月26日	第13回日本褥瘡学会	全身性エリテマトーデス患者に生じた坐骨部褥瘡の1例	佐藤三佳, 加納宏行, 磯貝善蔵, 清島真理子
2011年8月26日	第13回日本褥瘡学会	マットレスたわみ量とシーツ接触面の湿度との関係	根本哲也, 久保田怜, 伊藤安海, 磯貝善蔵, 古田勝経, 松浦弘幸
2011年8月26日	第13回日本褥瘡学会	リアルタイム皮膚ひずみ測定法を用いた骨突出部周辺の皮膚ひずみ評価	久保田怜, 根本哲也, 伊藤安海, 磯貝善蔵, 古田勝経, 島本聡, 松浦弘幸
2011年8月26日	第13回日本褥瘡学会	感染創の見極めと対処法	磯貝善蔵

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2011年9月13日	北信整形外科医会教育研修会	骨折予防の新戦略ー骨強度と外力からー	原田敦
2011年9月17日	第24回日本老年医学会東海地方会	在宅療養高齢者における入院時の疾患別の患者特性と支援内容の検討	大島浩子, 中村孔美松本明美, 原田敦, 鈴木隆雄
2011年9月17日	第24回日本老年医学会東海地方会	在宅療養高齢者の移動能力の検討	大島浩子, 尾崎充世, 中村孔美, 鈴木隆雄, 原田敦
2011年9月27日	(独)国立長寿医療研究センター 高齢者医療・在宅医療総合看護研修カリキュラム	高齢者の在宅看取り. 高齢者の在宅医療: 在宅医療を推進する能力を養う	大島浩子
2011年10月2日	第8回転倒予防医学研究会研究集会	ビタミンDと転倒・骨折予防 教育講演	原田敦
2011年10月2日	第8回転倒予防医学研究会研究集会	筋肉減少症(サルコペニア) 新しい診断基準	原田敦
2011年10月2日	第8回転倒予防医学研究会研究集会	薄型ヒッププロテクターの初期コンプライアンス試験	原田敦, 長屋政博, 他
2011年10月13日	豊田加茂整形外科医会学術講演会	骨粗鬆症と転倒骨折	原田敦
2011年10月21日	第26回日本整形外科学会基礎学術集会	筋肉減少症(サルコペニア)の観点から	原田敦, 飛田哲朗
2011年11月3日	第13回日本骨粗鬆症学会	地域在住中高齢者の膝関節変形と膝伸展筋力との関連	松井康素, 竹村真里枝, 原田敦, 他
2011年11月4日	第13回日本骨粗鬆症学会 骨ドック・健診分科会	サルコペニアの現状	原田敦
2011年11月5日	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会2011	ヒッププロテクターの効用ー臨床試験からー	原田敦
2011年11月10日	知多半島骨粗鬆症フォーラム	骨粗鬆症: 骨折リスク診断と骨折予防介入	原田敦
2011年11月11日	第30回認知症学会学術集会	[C-11]BF-227 集積と脳糖代謝変動の関係: 認知機能正常から健忘型MCIまで	加藤隆司, 伊藤健吾, 篠野健太郎, 藤原 謙, 中村昭範, 三浦久幸, 服部英幸, 新畑 豊, 他
2011年11月13日	第98回三重県臨床整形外科医	高齢者の骨折の現状とその予防	原田敦

	会		
2011年11月23日	日本薬学会東海支部合同学術大会	褥瘡の治療期間を短縮する薬剤師の役割	古田勝経、溝神文博、木ノ下智康、磯貝善蔵、野呂岳志
2011年12月3日	県北地区骨代謝セミナー	高齢者の骨折予防-骨粗鬆症と転倒の両面から-	原田敦
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2011年12月3日	第31回日本看護科学学会学術集会	病院による高齢患者の在宅療養支援:在宅療養選択者とその特性の検討	大島浩子
2012年2月12日	第8回日本褥瘡学会中部地方会	院内における褥瘡新発生の傾向と今後の取り組みへの課題	正岡愛、堀江千恵子、近藤公美子、楠雅代、下菌いず美、古田勝経、磯貝善蔵
2012年2月12日	第8回日本褥瘡学会中部地方会	専門職コンサルテーションと連携によって完治した難治性褥瘡の1例	岡戸京子、古田勝経、磯貝善蔵、前川厚子
2012年2月12日	第8回日本褥瘡学会中部地方会	地域皮膚科クリニックにおける褥瘡訪問診療の現状と問題点	高橋佳子、米田雅彦、尾之内博規、古田勝経、三浦久幸、磯貝善蔵
2012年2月12日	第8回日本褥瘡学会中部地方会	背部褥瘡発生患者に対する半側臥位での頭側拳上:第8回日本褥瘡学会中部地方会	下菌いず美、楠雅代、古田勝経、磯貝善蔵
2012年1月29日	テレビ出演 カラダのキモチ 第289回	足腰きたえて長生きだ!元気のヒケツ転倒予防	原田敦
2011年3月	交通科学, 41, (2): 18-23	高齢者ドライバーの安全運転対策におけるドライビングシミュレータの活用と課題	伊藤安海、根本哲也、久保田怜、松浦弘幸
2012年1月	福祉介護テクノプラス「特集 災害と福祉②」, 5, 1, 15-18	バッテリーを被災地へ	根本哲也、伊藤安海、久保田怜、松浦弘幸
	Journal of Physical Therapy Science, 25(1): 41-43, 2013	Relationship between feet position and anterior-posterior center of pressure (COP) location. -What are determining factors in the adjustment of	Teranishi T, Sakurai H, Ohtsuka K, Yamada M, Tsuzuki A, Miyasaka H, Tanino G, Abbas O, Kondo I

		center of gravity?-	
	Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 94: 59-66, 2013	Preliminary Trial of Strategy Training Using a Personal Transport Assistance Robot for Patients With Central Nervous System Disorder	Ozaki K, Kagaya H, Hirano S, Kondo I, Tanabe S, Itoh N, Saitoh E, Fuwa T, Murakami R
	Japanese Journal of Comprehensive Rehabilitation Science, 4: 7-13, 2013	An analysis of falls occurring in a convalescence rehabilitation ward - a decision tree classification of fall cases for the management of basic movements -	Teranishi T, Kondo I, Tanino G, Miyasaka H, Sakurai H, Kaga J, Suzuki Y, Matsushima Y, Kawakita M, Sonoda S
2013/2/8	第3回 次世代ロボット産業研究会, 大府市	リハビリテーションで求められる器具・ロボットについて	<u>近藤和泉</u>
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
	The 6th Asan Rehabilitation Symposium: Robot@rehab, Robot@home, Nov 23, 2012, Seoul, Korea	Robotics for rehabilitation in Japan	<u>Kondo I</u>
2013/3/8	青森県成人・老人リハビリテーション施設協会研修会, 2013年3月8日, 青森市	転倒リスク管理に関してー認知症への対応も含めてー	<u>近藤和泉</u>
2012/11/10	第28回日本義肢装具学会学術大会, 名古屋市	転倒と立位バランス-患者さんの安全確保を目的として-	<u>近藤和泉</u>
	7th World Congress for NeuroRehabilitation, Melbourne, Australia, 2012	3D gait analysis before and after the botulinum toxin A injection for pes equinovarus.	Tanikawa H, Kagaya H, Saitoh E, Ozaki K, Itoh N, Yamada J, Hyohdoh M, Tanabe S, Ohtsuka K, Aoki T

	7th World Congress for NeuroRehabilitation, Melbourne, Australia, 2012.	PRELIMINARY REPORT OF BALANCE EXERCISE BY USING A PERSONAL TRANSPORT ASSISTANCE ROBOT FOR PATIENTS WITH CENTRAL NERVOUS SYSTEM DISORDER	Ozaki K.
2012年 5月	バイオメディカル・ファジイ・システム学会誌, Vol. 14, No. 1, p 71-76	量子神経理論の基礎～古典と量子力学的情報～古典的情報理論から量子情報力学へ～	松浦弘幸、根本哲也、久保田 怜
2012年 5月	バイオメディカル・ファジイ・システム学会誌, Vol. 14, No. 1, p 77-82	量子神経情報理論と量子ベイズ形式～古典的情報理論から量子情報力学へ～	松浦弘幸、久保田 怜、根本哲也
2012年 5月	バイオメディカル・ファジイ・システム学会誌, Vol. 14, No. 1, p 83-87	量子神経回路と古典的ニュートラルネット, 量子ベイズ計算～神経細胞の分極, 脱分極, そしてポラリトンの情報動力学～	松浦弘幸、久保田 怜、根本哲也
2012年 5月	バイオメディカル・ファジイ・システム学会誌, Vol. 14, No. 1, p 89-96	神経伝導の量子力学モデル—準粒子・ポラリトン理論～神経細胞の分極, 脱分極, そしてポラリトンの仮説～	松浦弘幸、根本哲也、久保田 怜
2012年 6月	ICIC International, 6(6), p1653-1657	Expression of Quantum Bay's Form and Its Calculations	Matsuura H, Wasaki K
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2012年 6月	ICIC International, 6(6), p1665-1669	Quantum Neural Net, Polariton, and Classical Neural Networks	Matsuura H,
2012年 6月	ICIC International, 6(6), p1671-1675	Quantum Theory of Polariton on Neuro-Conduction and Ephapse (Quantum Current and Role of Polariton on Axon)	Matsuura H,
2012年 6月	実験力学, 12:(2)	工学鑑定における人体損傷評価 - 事件・事故捜査や裁判における人体損傷の定量評価手法 -	伊藤安海、根本哲也、小倉 崇生

2012年 11月	ICIC Express Letters An International Journal of Research and Surveys, Vol. 6, No. 11, p 2815-2820	FUNDAMENTAL STUDIES OF COLLISION AND FALL INDUCED HUMAN INJURY -ESTIMATION OF INJURY PARAMETERS UNDER VARIOUS CONDITIONS BY COLLISION AND FALL IN DUMMY TEST-	Tamagawa M, Matsuura H, Nakano M, Yukimasa T, Yamanaka M, Kubota M,
2012年 11月	ICIC Express Letters An International Journal of Research and Surveys, Vol. 6, No. 11, p 2867-2872	A CALCULATION OF SPEED OF COLLISION BETWEEN A HUMAN BODY AND A FLOOR	Yukimasa T, Kubota M,
2012年 11月	ICIC Express Letters An International Journal of Research and Surveys, Vol. 6, No. 11, p 2873-2880	EVALUATION OF FALL INJURY IN THE MEDICAL FIELD	Yamanaka M, Nakano M, Matsuura H, Tamagawa M, Yukimasa T, Noto H, Kubota M,
2012年 11月	ICIC Express Letters An International Journal of Research and Surveys, Vol. 6, No. 11, p 2881-2888	THEORETICAL ANALYSIS OF MICRO MOVEMENTS IN BRAIN AT FALL	Nakano M, Matsuura H, Tamagawa M, Yukimasa T, Yamanaka M, Kubota M,
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2012年 11月	ICIC Express Letters An International Journal of Research and Surveys, Vol. 6, No. 11, p 2889-2894	BASIC STUDY OF HUMAN BODY' S INJURY AND CRITERIA	Matsuura H, Tamagawa M, Nakano M, Yamanaka M, Yukimasa T, Nemoto T, Kubota R, Ishikawa K, Matsuzaki T, Kondo R,

			Kubota M,
2012年 11月	ICIC Express Letters An International Journal of Research and Surveys, Vol. 6, No. 11, p 2895-2899	HUMAN BODY DAMAGE EVALUATION THAT USES DUMMY DOLL WHEN WHEELCHAIR FALLS	Ishikawa K, Matsuura H, Nakano M, Tamagawa M, Yukimasa T, Yamanaka M, Kubota M, Matsuzaki T, Kondo R,
2012年 11月	ICIC Express Letters An International Journal of Research and Surveys, Vol. 6, No. 11, p 2901-2907	STANDARDS FOR STEP HEIGHT AND FRONT WHEEL OPERATION INDEXES FOR WHEELCHAIR HELPERS NAVIGATING STEPS	Noto H, Muraki S,
2012年 3月	病気と薬パーフェクトブック 2012 1125-1128	褥瘡	磯貝善藏、古田勝経
2012年 4月	CLINICAL CALCIUM 22(4): 11-12	巻頭言 ー運動器障害は虚弱にお ける身体的脆弱性にどこまで関与 しているのかー	原田敦
2012年 4月	CLINICAL CALCIUM 22(4): 27-33	転倒・骨折患者にみられる虚弱 (Frailty)	原田敦
2012年 4月	骨粗鬆症診療ハンドブック 182-192	骨粗鬆症・骨折の合併症と QOL 1. 大腿骨近位部骨折	原田敦
2012年 4月	Osteoporosis Japan 20(2):108-110	地域在住中高齢者の膝関節変形と 膝伸筋力との関連	松井康素、竹村真里枝、原 田敦、安藤富士子、下方浩 史
2012年 5月	Int J Cancer 30(10): 2271-81	Versican Regulates Cell-associated Matrix Formation and Cell Behavior Differentially from Aggrecan in Swarm Rat Chondrosarcoma Cells.	Wasa J, Nishida Y, Shinomura T, Isogai Z, Urakawa H, Arai E, Kozawa E, Futamura N, Tsukushi S, Ishiguro N
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2012年 6月	CLINICAL CALCIUM 22(6): 68-72	転倒リスクの評価と転倒予防	原田敦
2012年 6月	難病と在宅ケア 18(6): 53-56	神経疾患における褥瘡の予防と治 療	磯貝善藏

2012年 7月	Biol Pharm Bull 35(7): 1048-53	Iodoform gauze removes necrotic tissue from pressure ulcer wounds by reduction of type I collagen aggregates.	Fumihiro Mizokami, Yusuke Murasawa, Katsunori Furuta, Zenzo Isogai.
2012年 7月	ロコモティブ・シンドローム 183-191	第II章 運動器の評価 2. ロコモの疑いの人の診察法 3) 主な疾患の診断と保存治療 大腿骨近位部骨折	原田敦
2012年 9月	Glycobiology 22(9): 1268-77	Versican/PG-M and hyaluronan proteoglycan aggregates are essential for cardiac atrioventricular cushion development and subsequent ventricular septal development.	Sonoko Hatano, Koji Kimata, Noriko Hiraiwa, Moriaki Kusakabe, Zenzo Isogai, Tamayuki Shinomura, Hideto Watanabe.
2012年 9月	整形外科最小侵襲手術ジャーナル 64: 15-18	骨粗鬆症性椎体骨折に対する我が国での医療行為	原田敦
2012年 9月	月刊薬事 54(10):58-61	脳血管性認知症	新畑豊
2012年 10月	看護技術 58(11): 1024-1025	褥瘡と全身性疾患のかかわり	磯貝善蔵
2012年 10月	Geriatrics and Gerontology International 12(4): 652-658	Estimation of appendicular muscle mass and fat mass by near infrared spectroscopy in older persons	Daisuke Yoshida, Hiroyuki Shimada, Atsushi Harada, Yasumoto Matsui, Yoshihito Sakai, Takao Suzuki
2012年 11月	J Osteoporosis 1-6	Divergent significance of bone mineral density changes in aging depending on sites and sex revealed through separate analyses of bone mineral content and area	Yasumoto Matsui, Marie Takemura, Atsushi Harada, Fujiko Ando, Hiroshi Shimokata
2012年 11月	Viscoelasticity (Juan de Vicente eds.) Intech Rijeka 157-170	Viscoelastic Properties of the Human Dermis and Other Connective Tissues and its Relevance to Tissue Aging and Aging-related Disease	Tetsuya Nemoto, Ryo Kubota, Yusuke Murasawa Zenzo Isogai

2012年 11月	臨床と研究 11: 31-34	ロコモティブシンドロームの原因 疾患と治療 大腿骨近位部骨折	原田敦
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2012年 11月	日本老年医学会雑誌 49(6): 788-805	サルコペニア: 定義と診断に関する 欧州関連学会のコンセンサス— 高齢者のサルコペニアに関する欧 州ワーキンググループの報告—の 監訳と Q&A	原田敦、秋下雅弘、江頭正 人、金憲経、金信敬、神崎 恒一、重本和宏、島田裕之、 下方浩史、鈴木隆雄、橋本 有弘、細井孝之
2012年 11月	Osteoporosis Japan 20(4): 661-668	全国的データベースを用いた骨粗 鬆症性骨折の予防と治療に関する 研究	細井孝之、黒田龍彦、中村 利孝、白木正孝、太田博明、 原田敦、森聖二郎、大橋靖 雄、折茂肇
2012年 12月	Carcinogenesis Intech Rijeka, Croatia, (Kathryn Tonissen eds.	Expressional Alterations of Versican, Hyaluronan and Microfibril Associated Proteins in the Cancer Microenvironment	Hiroko Kuwabara, Masahiko Yoneda, Zenzo Isoga
2012年 12月	PLoS One 7(12)	The anti-inflammatory effects of matrix metalloproteinase-3 on irreversible pulpitis of mature erupted teeth.	Eba H, Murasawa Y, Iohara K, Isogai Z, Nakamura H, Nakamura H, Nakashima M.
2012年 12月	Journal of Clinical Rehabilitation 21(12): 1168-1176	高齢者の骨折	竹村真里枝、原田敦
2013年 1月	J Orthop Sci. 18(1): 110-120	Why not use your own body weight to prevent falls? A randomized, controlled trial of balance therapy to prevent falls and fractures for elderly people who can stand on one leg for ≤15 s	Keizo Sakamoto, Naoto Endo, <u>Atsushi Harada</u> , Takenori Sakada, Kazuyo Tsushita, Kiyoshi Kita, Hiroshi Hagino, Akinori Sakai, Noriaki Yamamoto, Tetsunori Okamoto, Meigen Liu, Akatsuki Kokaze, Hiromichi Suzuki

2013年 1月	Japanese Journal of Comprehensive Rehabilitation Science, 4: 7-13	An analysis of falls occurring in a convalescence rehabilitation ward - a decision tree classification of fall cases for the management of basic movements -	Teranishi T, Kondo I, Tanino G, Miyasaka H, Sakurai H, Kaga J, Suzuki Y, Matsushima Y, Kawakita M, Sonoda S.
2013年 1月	Journal of Physical Therapy Science, 25(1): 41-43	Relationship between feet position and anterior-posterior center of pressure (COP) location. -What are determining factors in the adjustment of center of gravity?-	Teranishi T, Sakurai H, Ohtsuka K, Yamada M, Tsuzuki A, Miyasaka H, Tanino G, Abbas O, Kondo I.
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2013年 1月	Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 94: 59-66	Preliminary Trial of Postural Strategy Training Using a Personal Transport Assistance Robot for Patients With Central Nervous System Disorder.	Ozaki K, Kagaya H, Hirano S, Kondo I, Tanabe S, Itoh N, Saitoh E, Fuwa T, Murakami R.
2013年 1月	CLINICAL CALCIUM 20(1): 15-22	関節の老化	松井康素、原田敦
2013年 1月	Bone Joint Nerve 3(1): 9-13	特集 サルコペニア—筋研究の最前線— サルコペニアの定義や診断基準	原田敦
2013年 1月	Bone Joint Nerve 3(1): 139-149	特集 サルコペニア—筋研究の最前線— 座談会 サルコペニア—筋研究の最前線—	斎藤充、原田敦、村木重之、重本和宏
2013年 2月	J Invest Dermatol 133(2): 386-93	An Ex Vivo Model Employing Keloid-Derived Cell-Seeded Collagen Sponges for Therapy Development.	Yagi Y, Muroga E, Naitoh M, Isogai Z, Matsui S, Ikehara S, Suzuki S, Miyachi Y, Utani A.
	Geriatr Gerontol Int	High prevalence of sarcopenia and reduced leg muscle mass in Japanese patients immediately after a hip fracture	Tetsuro Hida, Naoki Ishiguro, Hiroshi Shimokata, Yoshihito Sakai, Yasumoto Matsui, Marie Takemura, Yasuhito

			Terabe, Atsushi Harada
	JOSKAS	地域在住中高齢者における膝関節痛と膝伸展筋力の関連	松井康素、竹村真里枝、原田敦、安藤富士子、下方浩史
	Int Wound J	Definition of the Physical Properties of Pressure Ulcers and Characterization of their Regional Variance.	Fumihiko Mizokami; Katsunori Furuta; Atsushi Utani, Zenzo Isogai.
	Int Wound J	Sacral pressure ulcer successfully treated with traction, resulting in a reduction of wound deformity.	Fumihiko Mizokami; Katsunori Furuta, Hisako Matsumoto, Atsushi Utani, Zenzo Isogai.
	臨床皮膚科	皮膚科医主導型褥瘡診療	磯貝善蔵
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2012年6月13日	the 26th Annual Conference of JSAI, International Organized Session 「Alan Turing Year Special Session on AI Research That Can Change The World (2)」, Yamaguchi	Model of Polariton, Quantum Neuron, Its Network& quantum Information	Matsuura H, Wasaki K
2012年6月13日	第26回人工知能学会全国大会, 山口	神経伝導の量子モデルとその干渉, 量子ベイズ統計, 量子ニューラルネット	松浦弘幸、和崎克己
2012年6月13日	第26回人工知能学会全国大会, 山口	神経細胞の軸索伝導の量子論モデル	松浦弘幸、和崎克己

2012年9月20日	日本ロボット学会第30回記念 学術講演会, 札幌	人とロボットの共生環境での傷害 リスクに関する研究 (NEDO-PJ)	松浦弘幸、玉川雅彰、中野 正博、行正徹、根本哲也、 久保田怜、石川耕介、近藤 理恵、松崎照美、久保田正 美、山中真
2012年9月20日	日本ロボット学会第30回記念 学術講演会, 札幌	人の衝突・転倒時の損傷評価に関 する研究 (NEDO-PJ)	玉川雅彰、松浦弘幸、中野 正博、行正徹、山中真、久 保田正美
2011年10月3日	CAE POWER 2012 GTC, 東京	Atomic Schwinger-Dyson Method(ASD法)の概要, 将来の原 子/分子の解析法として, シミュレ ーション技術	松浦弘幸
2011年10月7日	第9回研究集会, 転倒予防医 学研究会, 58, 東京	転落と転倒に伴う力学的人体損傷 に関する基礎研究	松浦弘幸、中野正博、玉川 雅彰、根本哲也、山中真、 久保田怜、久保田正美
2012年11月3日	生活生命支援医療福祉工学系 学会連合大会 2012(LIFE2012), 名古屋大学	人体損傷の重症度クライテリアと その許容レベル	松浦弘幸、中野正博、玉川 雅彰、行正徹、山中真、根 本哲也、久保田怜、石川耕 介、松崎照美、神谷直樹、 近藤理恵、久保田正美
2012年11月3日	生活生命支援医療福祉工学系 学会連合大会 2012(LIFE2012), 名古屋大学	車椅子転倒時におけるダミー人形 を用いた人体損傷評価	石川耕介、松浦弘幸、中野 正博、玉川雅彰、行正徹、 山中真、久保田正美、松崎 照美、近藤理恵
2012年11月3日	生活生命支援医療福祉工学系 学会連合大会 2012(LIFE2012), 名古屋大学	転倒による頭部加速度の理論的分 析	中野正博、松浦弘幸、玉川 雅彰、行正徹、山中真、久 保田正美
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2012年11月3日	生活生命支援医療福祉工学系 学会連合大会 2012(LIFE2012), 名古屋大学	滑りを考慮した人体の転倒に関す る理論的検討	行正徹、中野正博、松浦弘 幸、玉川雅彰、山中真、久 保田正美
2012年11月3日	生活生命支援医療福祉工学系 学会連合大会 2012(LIFE2012), 名古屋大学	人体の衝突・転倒時の損傷評価に ついて (転倒条件による損傷パラ メータへの影響)	玉川雅彰、松浦弘幸、中野 正博、行正徹、山中真、久 保田正美

2012年11月3日	生活生命支援医療福祉工学系 学会連合大会 2012(LIFE2012), 名古屋大学	転倒衝撃力による骨折評価に関する基礎研究	山中真、中野正博、玉川雅彰、行正徹、松浦弘幸、久保田正美
2012年11月3日	生活生命支援医療福祉工学系 学会連合大会 2012(LIFE2012), 名古屋大学	車いすの推進操作方法と路面環境が乗り心地と介助負担に及ぼす影響：車いすの評価視点	能登裕子、村木里志
2012年11月3日	生活生命支援医療福祉工学系 学会連合大会 2012(LIFE2012), 名古屋大学	車椅子転倒時におけるダミー人形を用いた人体損傷評価	石川耕介、松浦弘幸、中野正博、玉川雅彰、行正徹、山中真、久保田正美、松崎照美、近藤理恵
2012年12月26日	第25回バイオメディカル・フ ァジィ・システム学会年次大 会 (BMFSA2012), 東京	学的人体損に関する基礎研究-6～ 包括的な損傷予測法と安全クライ テリア～	松浦弘幸、玉川雅彰、中野正博、山中真、行正徹、根本哲也、久保田怜、松崎照美、近藤理恵、神谷直樹、石川耕介、久保田正美
2012年12月26日	第25回バイオメディカル・フ ァジィ・システム学会年次大 会 (BMFSA2012), 東京	生活支援機器使用時の人体の衝 突・転倒における転倒条件の鈍的 損傷に及ぼす影響	玉川雅彰、松浦弘幸、中野正博、行正徹、山中真、久保田正美
2012年12月26日	第25回バイオメディカル・フ ァジィ・システム学会年次大 会 (BMFSA2012), 東京	拘束力を考慮した転倒の理論的検 討	行正徹、松浦弘幸、玉川雅彰、中野正博、山中真、久保田正美
2012年12月26日	第25回バイオメディカル・フ ァジィ・システム学会年次大 会 (BMFSA2012), 東京	異なる心理物理学的測定法によっ て得られた評価値の違いに関する 検証	神谷直樹、松浦弘幸、向後礼子
2012年12月26日	第25回バイオメディカル・フ ァジィ・システム学会年次大 会 (BMFSA2012), 東京	様々な転倒の仕方における解剖学 的重症度の推定ーダミー人形を用 いた転倒実験を通じてー	神谷直樹、松浦弘幸、近藤理恵、石川耕介、松崎照美、玉川雅彰、行正徹、中野正博、山中真、久保田正美
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2012年12月26日	第25回バイオメディカル・フ ァジィ・システム学会年次大 会 (BMFSA2012), 東京	車椅子転倒時におけるダミー人形 を用いた人体損傷評価	石川耕介、松浦弘幸、中野正博、玉川雅彰、行正徹、山中真、久保田正美、神谷直樹、松崎照美、近藤理恵

2012年12月26日	第25回バイオメディカル・フ ァジィ・システム学会年次大 会 (BMFSA2012), 東京	Risk Adjustor and Level Acceptable for Human Injury	Matsuura H, Tamagawa M, Nakano M, Yamanaka M, Yukimasa T, Nemoto T, Kubota R, Matsuzaki T, Kondo R, Kamiya N, Ishikawa K, Kubota M
2012年12月26日	第25回バイオメディカル・フ ァジィ・システム学会年次大 会 (BMFSA2012), 東京	The theoretical approach to the analysis of human fall with consideration about constraint forces	Yukimasa T, Kubota M
2012年12月26日	第25回バイオメディカル・フ ァジィ・システム学会年次大 会 (BMFSA2012), 東京	Risk Adjustor and Level Acceptable for Human Injury	Matsuura H, Tamagawa M, Nakano M, Yamanaka M, Yukimasa T, Nemoto T, Kubota R, Matsuzaki T, Kondo R, Kamiya N, Ishikawa K, Kubota M
2012年12月26日	第25回バイオメディカル・フ ァジィ・システム学会年次大 会 (BMFSA2012), 東京	Human body damage evaluation that uses dummy doll when wheelchair falls	Ishikawa K, Matsuura H, Nakano M, Tamagawa M, Yukimasa T, Yamanaka M, Kubota M, Kamiya N, Matsuzaki T, Kondo R
2012年4月7日	第1回長久手整形外科医療連 携会 長久手	サルコペニア(筋肉減少症)の診断 と治療の現状ー骨粗鬆症性骨折を 防ぐためにー	原田敦
2012年6月12日	H24年度第1回香川県臨床整形 外科医会学術講演会 高松	骨強度と転倒の両面から骨折リス クを軽減	原田敦
2012年6月28日	第54回日本老年医学会学術集 会 東京	サルコペニアに対する薬物治療の 可能性ー骨粗鬆症薬の検討からー	原田敦
2012年5月24日	日本神経学会学術大会	生活健忘チェックリストからみた MCIよりADへの進行予測 SEAD-J データ解析より	新畑豊、鷺見幸彦、加藤隆 司、伊藤健吾、SEAD-J study group
2012年6月1-3日	第111回日本皮膚科学会総会 京都	褥瘡に合併した感染症の診療	磯貝善蔵、古田勝経

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2012年6月7-8日	第44回日本結合組織学会・第59回マトリックス研究会合同学術集会 東京	褥瘡、発生真皮組織におけるパーシカンG1-SHAP-ヒアルロン酸コンプレックス 肉芽組織由来パーシカンG1ドメインを含むマクロコンプレックス形成	村澤裕介、米田雅彦、中村博幸、渡辺研、木全弘治、磯貝善蔵
2012年6月28日	第54回日本老年医学会学術集会 東京	高齢者の身体機能測定のための新しい握力測定器の開発	松井康素、藤田玲美、原田敦、櫻井孝、根本哲也、野田信雄、鳥羽研二
2012年6月28日	第54回日本老年医学会学術集会 東京	サルコペニアに対する薬物治療の可能性ー骨粗鬆症薬の検討からー	原田敦
2012年6月29日	第54回日本老年医学会学術集会 東京	ロコモティブシンドローム（ロコモ）とサルコペニアの関連	松井康素、竹村真里枝、原田敦、安藤富士子、小坂井留美、下方浩史
2012年7月19日	第4回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会	地域在住中高齢者における膝関節痛と膝伸展筋力の関連	松井康素、竹村真里枝、原田敦、安藤富士子、李成喆、下方浩史
2012年7月25日	瑞穂区医師会学術講演会 名古屋	骨強度と外力から考える骨粗鬆症性骨折の予防	原田敦
2012年8月24日	愛媛骨粗鬆症治療学術講演会 愛媛	骨強度と外力から考える骨折予防	原田敦
2012年9月1-2日	第14回日本褥瘡学会 横浜	院内における褥瘡発生の傾向と今後の取り組みへの課題	堀江千恵子、正岡愛、近藤久美子、楠雅代、下菌いづ美、古田勝経、磯貝善蔵
2012年9月1-2日	第14回日本褥瘡学会 横浜	在宅へ退院される患者と家族へのパンフレット作成～高齢の介護者に注目して～	熊谷由起江、南保茂美、鈴村美樹、下菌いづ美、楠雅代、古田勝経、磯貝善蔵
2012年9月1-2日	第14回日本褥瘡学会 横浜	褥瘡予防対策についての院内教育の効果と看護師の意識変化～アンケート調査からの考察～	小田祥子、楠雅代、下菌いづ美、古田勝経、磯貝善蔵
2012年9月1-2日	第14回日本褥瘡学会 横浜	褥瘡ハイリスクケア加算の妥当性の検証～極度の皮膚の脆弱（黄疽）患者と強度の下痢患者について～	溝神文博、古田勝経、磯貝善蔵

2012年9月1-2日	第3回日本プライマリ・ケア 連合学会学術大会	腹壁皮下輸液により、壊死性筋膜炎に至った一例	洪英在、磯貝善蔵、遠藤英俊、川嶋修司、佐竹昭介、西原恵司、小林正樹、三浦久幸
2012年9月2-6日	4th Congress of the World Union of Wound Healing Societies Yokohama Japan	BMP-6 specifically induce by pressure force in cultured fibroblast is present in wound fluid of pressure ulcer	Naoko Arai, Hisako Matsumoto, Yoshiko Takahashi, Zenzo Isogai, Masahiko Yoneda
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2012年9月2-6日	4th Congress of the World Union of Wound Healing Societies Yokohama Japan	Location-dependent properties of pressure ulcer wounds.	Yoshiko Takahashi, Zenzo Isogai, Hiroyuki Kanoh, Hisako Matsumoto, Masahiko Yoneda
2012年9月2-6日	4th Congress of the World Union of Wound Healing Societies Yokohama Japan	Iodoform gauze removes necrotic tissue from pressure ulcer wounds by fibrinolytic activity	Fumihiro Mizokami, Yusuke Murasawa, Katsunori Furuta, Zenzo Isogai
2012年9月2-6日	4th Congress of the World Union of Wound Healing Societies Yokohama Japan	Changes of fibronectin in wound surface of pressure ulcer	Hisako Matsumoto, Zenzo Isogai, Yoshiko Takahashi, Katsunori Furuta, Masahiko Yoneda
2012年9月2-6日	4th Congress of the World Union of Wound Healing Societies Yokohama Japan	Unique versican-HA complex in wound tissue	Yusuke Murasawa, Masahiko Yoneda, Zenzo Isogai
2012年9月6日	第35回三河関節外科懇話会 知立	転倒リスクと転倒骨折リスク	原田敦
2012年9月17日 -20日	日本ロボット学会 第30回記念 学術講演会 札幌	高齢虚弱リスク患者に対する立ち乗りモビリティの応用とその効果	近藤和泉、尾崎健一、才藤栄一
2012年9月17日 -20日	日本ロボット学会 第30回記念 学術講演会 札幌	転倒時に外力を免ずる材料が骨に与える緩衝性の評価	久保田怜、根本哲也、伊藤安海、鳥本聡、松浦弘幸、原田敦

2012年9月29日	第14回日本骨粗鬆症学会 新潟	サルコペニアに対する活性型ビタミンD剤の治療効果-筋量増強効果に関する骨粗鬆症患者における検討-	原田敦、松井康素、酒井義人、竹村真里枝、寺部靖人、伊藤定之、細井孝之、徳田治彦、飛田哲朗、伊藤研悠
2012年10月6日	第23回日本老年医学会東海地方会	生活支援ロボット登場の実証試験：健常者による立ち乗り搭乗型ロボットの試乗と安全性の検討	大島浩子、根本哲也、久保田怜、石川耕介、松井康素、原田敦、磯貝善蔵、新畑豊、加納周美
2012年10月6日	第23回日本老年医学会東海地方会	骨突出部周辺の皮膚の変形計測	根本哲也、久保田怜、松浦弘幸、古田勝経、磯貝善蔵、伊藤安海、島本聡
2012年10月7日	第9回研究集会，転倒予防医学研究会，58，東京	立体バランステスト standing test for imbalance and disequilibrium(SIDE)の妥当性の検討：テスト肢位の順序性は重心動揺と並行するか？	近藤和泉、尾崎健一、原田敦、寺西利生、園田茂、宮坂裕之、成田渉、才藤栄一
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2012年10月7日	第9回研究集会，転倒予防医学研究会，58，東京	Personal Transport Assistance Robot (PTAR)を用いた中枢神経障害患者に対するバランス訓練の試み	近藤和泉、尾崎健一、加賀谷齊、平野哲、才藤栄一
2012年10月13-14日	第63回日本皮膚科学会中部支部学術大会	創傷におけるgelatinaseの役割りーMatrix metalloproteinase (MMP)-9発現は悪化因子か？	小林孝史、輪千浩史、里史明、水野晃治、磯貝善蔵、早川和人
2012年10月20日	第14回日本医学会公開フォーラム 東京	高齢者のサルコペニア	原田敦
2012年10月23日	第4回富士・富士宮整形外科懇話会 富士	転倒骨折リスクとその軽減	原田敦
2012年10月27日	第31回日本認知症学会学術集会 つくば	血管性認知症とアルツハイマー病との鑑別およびco-morbidityに関する検討	新畑豊、鷺見幸彦、武田章敬、山岡朗子、辻本昌史、川合圭成、櫻井孝、文堂昌彦、加藤隆司、伊藤健吾

2012年10月27日	第31回日本認知症学会学術集会 つくば	地域の事業所の日常業務における認知症に関する困りごと調査	武田章敬、尾之内直美、鈴木亮子、清家理、辻本昌史、川合圭成、山岡朗子、新畑豊、鷺見幸彦、鳥羽研二
2012年10月27日	第31回日本認知症学会学術集会 つくば	アルツハイマー病における運動機能の日常生活に与える影響の検討	武田章敬、尾之内直美、鈴木亮子、清家理、辻本昌史、川合圭成、山岡朗子、新畑豊、鷺見幸彦、鳥羽研二
2012年10月27日	第31回日本認知症学会学術集会 つくば	詳細な神経心理学的検査による、前臨床期のアルツハイマー病検出の可能性	加藤公子、加藤隆司、倉坪和泉、岩田香織、山岸未沙子、新畑豊、伊藤健吾、MULNIAD study group、中村昭範
2012年10月27日	第31回日本認知症学会学術集会 つくば	Default mode network の functional connectivity と局所脳糖代謝との相関	岩田香織、加藤隆司、ディアース ケアステン、加藤公子、倉坪和泉、藤原謙、牛鼻健二、新畑豊、伊藤健吾、中村昭範
2012年10月29日	運動器の10年・骨と関節の日市民公開講座 名古屋	高齢期の骨折の予防と治療一骨の寿命は延びていますー	原田敦
2012年11月11日	第28回 日本義肢装具学会学術大会 名古屋	転倒と立位バランス-患者さんの安全確保を目的として-	近藤和泉
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2012年11月17日	第84回医協メディカルフォーラム「老年医学のパラダイムシフト」 名古屋	加齢性筋肉減少症（サルコペニア）の臨床	原田敦
2012年11月23日	The 6th Asan Rehabilitation Symposium: Robot@rehab, Robot@home. Seoul, Korea	Robotics for rehabilitation in Japan	Kondo I
2012年12月6日	International Conference on Sarcopenia Research	A new grip-strength measuring device for evaluating various	Yasumoto Matsui, Remi Fujita, Atsushi Harada,

		conditions in sarcopenia like catching and holding ability	Takashi Sakurai, Tetsuya Nemoto, Nobuo Noda, Kenji Toba
2012年12月7-8日	第10回エラスチン研究会 東京	MMP-3の抗炎症、組織再生作用の検討	中村博幸、村澤裕介、磯貝善蔵
2012年12月7-8日	第10回エラスチン研究会 東京	肉芽形成過程におけるパーシカング1マクロコンプレックスの役割	村澤裕介、栗林忠弘、中村博幸、米田雅彦、磯貝善蔵
2012年12月7-9日	第37回日本研究皮膚科学会 沖縄	Identification of ABCC6 gene mutations in the Japanese patients with psuedoxanthoma elasticum (PXE)	Iwanaga A, Yozaki M, Yagi Y, Maemura K, Tsuiki E, Kitaoka T, Tanioka M, Tamura H, Yamamoto Y, Hattori, T, Isogai Z, Yoshimura K, Utani A
2013年1月9日	第25回日本機械学会 バイオエンジニアリング講演会 つくば	高齢者における転倒による骨折	原田敦
2013年1月30日	第1回城東ロコモティブ・シンドローム懇話会 東京	骨と筋肉から考える高齢者の骨折予防	原田敦
2013年2月8日	第3回 次世代ロボット産業研究会 大府	リハビリテーションで求められる器具・ロボットについて	近藤和泉
2013年2月19日	第32回褥瘡研究会 名古屋	褥瘡の発生部位による特徴	高橋佳子、溝神文博、古田勝経、加納宏行、米田雅彦、磯貝善蔵
2013年3月8日	青森県成人・老人リハビリテーション施設協会研修会 青森	転倒リスク管理に関して一認知症への対応も含めて	近藤和泉
2013年3月10日	第9回日本褥瘡学会中部地方会 岐阜	高齢者医療の中での褥瘡チーム医療（特別講演）	磯貝善蔵
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2013年3月10日	第9回日本褥瘡学会中部地方会 岐阜	褥瘡予防対策についての院内教育の効果と看護師の意識変化～アンケートからの考察～	小田祥子、楠雅代、下菌いづ美、古田勝経、磯貝善蔵

2013年3月10日	第9回日本褥瘡学会中部地方会 岐阜	創傷治癒におけるヒアルロン酸に対する加圧の影響	高橋佳子、小松万喜子、磯貝善蔵、米田雅彦
2013年3月10日	第9回日本褥瘡学会中部地方会 岐阜	院内における褥瘡発生の傾向と今後の取り組みへの課題	堀江千恵子、正岡愛、近藤公美子、下菌いづ美、古田勝経、磯貝善蔵
2013年3月10日	第9回日本褥瘡学会中部地方会 岐阜	ハンチントン病の不随意運動が影響する外力をコントロールし著効した右足外側褥瘡	溝神文博、古田勝経、磯貝善蔵
2013年7月28日	健康ワンダフル テレビ愛知	骨折は寿命を縮める？～骨粗しょう症～	原田敦
2013年10月3日	NHK ためしてガッテン	ためしてガッテン「女性の5割が危険領域 謎の足腰フラフラ病！」	原田敦
2013年7月26-27日	第22回日本意識障害学会, 秋田市	バランストレーニングロボットとその将来への展開	近藤和泉
2013年6月13-15日	第50回日本リハビリテーション医学会学術集会,, 東京都	高齢者に対するリハビリテーション医療と Frailty	近藤和泉, 佐竹昭介, 尾崎健一
24 February, 2014, Seoul	Symposium on Rehabilitation Robot and Business	Fields in medicine, care and welfare in Japan being expected for robots to participate - ideal use and R&D scheme	Kondo I.
June 16-20, 2013, Beijing China	7th World congress of The international society of physical and Rehabilitation Medicine	Rehabilitation after hip fracture in convalescent rehabilitation wards.	Osawa A., Maeshima S. , Nishio D. ,Hirano Y. , Kigawa H, Ozaki K., Kondo I.
22 March, 2014, Busan	The 3rd Korea-Japan NeuroRehabilitation Conference, The 8th Annual Conference of Korean Society for NeuroRehabilitation	Balance Training Using a Personal Transport Assistance Robot is Effective for Frail Elderly.	Ozaki K., Kondo I., Satoh K., Hirano S. , Fujinori Y.

(2) 文献

なし

(3) 特許等

なし

(4) その他の公表（プレス発表等）

平成21年8月3日：NEDOからのプレス発表に共同参画

「生活支援ロボットの実用化を目指したプロジェクトをスタート」

平成22年12月27日：NEDOからのプレス発表に共同参画

「ロボット安全性検証センターの開設」

平成25年1月：第14回日本福祉工学会技術賞

「在宅療養家庭用バックアップ電源装置」根本哲也

■（研究開発項目⑤）安全要素部品群と安全設計に基づく搭乗型移動ロボットの開発【アイシン精機株式会社、日本信号株式会社、オプテックス株式会社、株式会社ヴィッツ、学校法人千葉工業大学】

【特許】

番号	出願人	出願番号	国内		出願日	状態	名称	発明者
			外国	PCT				
1	アイシン精機 千葉工業大学	特願 2014-026725	未定		2014/2/14	公開前	移動体及びその最高速度の制御方法	安藤 充宏 落合 博敏 古田 貴之 清水 正晴 大和 秀彰 戸田 健吾 小太刀 崇
2	アイシン精機 千葉工業大学	特願 2014-040515	未定		2014/3/3	公開前	搭乗型移動ロボット	安藤 充宏 長嶺 昇 梁 盛濬 落合 博敏 高柳 渉 清水 正晴 大和 秀彰 戸田 健吾 小太刀 崇 古田 貴之
3	アイシン精機 千葉工業大学	特願 2014-059696	未定		2014/3/24	公開前	移動体	安藤 充宏 梁 盛濬 高柳 渉 長嶺 昇 落合 博敏 小太刀 崇 戸田 健吾 清水 正晴 大和 秀彰 古田 貴之

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	小太刀 崇	千葉工業大学	搭乗型移動ロボットのための移動リスク低減アルゴリズムとつくば市ロボット特区における実証実験	日本ロボット学会誌 Vol. 32 No. 7~8「日本ロボット学会学術講演会論文特集号」	有	2014/7 予定 (2013年 12月 16日論文受付)

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	板倉 正人	アイシン精機	電動車いすの安全設計	サービスロボットの安全性に関するセミナー	2012/7/25
2	安藤 充宏	アイシン精機	許容リスク以下安全移動支援技術を有する搭乗型移動ロボット	第30回日本ロボット学術講演会	2012/9/20
3	安藤 充宏	アイシン精機	安全移動支援技術を有する電動車いすベースの生活支援モビリティ	L I F E 2 0 1 2	2012/11/4
4	村田 記一	オプテックス	安全移動支援技術を有する搭乗型移動ロボットの環境情報取得モジュール群の開発	ROBOMECH 2 0 1 3	2013/5/23
5	小太刀 崇	千葉工業大学	搭乗型移動ロボットのための移動リスク低減アルゴリズム	第31回日本ロボット学会学術講演会	2013/9/17
6	猪俣 宏明	日本信号	搭乗型移動ロボットへの搭載を想定した3Dレーザ測域センサの開発	第31回日本ロボット学会学術講演会	2013/9/17

(b) 新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	アイシン精機	電動車いすベースの搭乗型移動ロボットの安全技術	福祉介護テクノプラス 7月号	2013/7/1
2	アイシン精機	車いす型ロボ公道実験開始	日刊工業新聞	2013/11/6
3	アイシン精機	車いす型ロボ実験開始	日本経済新聞（北関東）	2013/11/6
4	アイシン精機	時速10キロ車いす公道実験を開始	日本経済新聞（中部）	2013/11/6
5	アイシン精機	搭乗型移動ロボ公道実験	中部経済新聞	2013/11/6
6	アイシン精機	周囲検知し減速	日刊工業新聞	2013/11/8
7	アイシン精機	搭乗型移動ロボットの公道実証実験	日刊自動車新聞	2013/11/16
8	アイシン精機	車いす 自動減速	中日新聞	2013/11/20
9	アイシン精機	搭乗型移動ロボットとその安全技術の開発	アイシン技術会2013年度技報	2014/3/1

■（研究開発項目⑤）屋外移動支援機器における安全エンジニアリング技術の研究開発【I D E C株式会社（共同実施先：大阪大学）】

1 研究発表・講演について

2011 年度

発表年月日	表媒体	発表タイトル	発表者
2011年8月27日	第14回日本福祉のまちづくり学会研究発表会（査読無し）	安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットを用いた地域モビリティの向上	猪井博登
2011年9月8日	第29回ロボット学会学術講演会	搭乗型生活支援ロボットとしてのゴルフカートにおける対人安全技術の開発	土肥正男
2011年9月16日	ヒューマンインターフェイスシンポジウム2011	高齢者社会と調和する屋外搭乗型生活支援ロボットの安全エンジニアリング技術の開発	栗山龍起
2011年10月20日	ISA Automation week	Application of the next-generation emergency stop system utilizing function safety wireless technology into outdoor life-supporting robots	岡田和也
2012年3月16日	R-Map実践研究会成果発表	ハンドル型電動車いすの事故事例解析・研究	栗山龍起

2012 年度

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2012年9月6日	ヒューマンインターフェイスシンポジウム2012	屋外生活支援ロボットとしての誘導式ゴルフカートの安全エンジニアリング技術の開発	栗山龍起
2012年9月20日	第30回ロボット学会学術講演会	搭乗型生活支援ロボットとしてのゴルフカートにおける対人安全技術の開発	栗山龍起
2012年10月11日	SIAS *1	Development of Safety Technology for Outdoor-use Person Carrier Robots that	岡田和也

		Achieve the Optimal Safety and Usability in the Ageing Society with a Declining Birthrate	
2012年11月4日	第46回土木計画学研究・講演会（査読無し）	ハンドル形電動車いすの自動減速による搭乗者への効果に関する研究	橋本真彌、
2012年10月11日	SIAS *1（査読有り）	The Accident prevention of Mobility scooter by automatic slowdown with laser range finder	猪井博登
2012年9月18日	TRANSED2012（査読有り）	LOAD FROM HARSH BRAKING OF MOBILITY SCOOTER FOR PREVENTING STAIRWAY FALL	猪井博登

*1 : International Conference on Safety of Industrial Automated Systems

2013 年度

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2013年5月23日	ROBOMECH2013	屋外搭乗型生活支援ロボットにおける安全エンジニアリング技術の開発とその適用事例	栗山龍起
2013年9月4日	第31回ロボット学会 学術講演会	搭乗型生活支援ロボットのリスク低減方策について	栗山龍起
2013年9月12日	ヒューマンインターフェイスシンポジウム2013	屋外搭乗型生活支援ロボットのリスクアセスメントとリスク低減方策	栗山龍起
2013年11月6日 ～9日	国際ロボット展プレゼン	搭乗型生活支援ロボットの安全対策	大杉典史 関野義男 栗山龍起
2013年11月3日	第48回土木計画学研究発表会 (査読無し)	ストレス計測によるゴルフカートと人の接近可能距離の検証	武田将司
2013年6月8日	平成 25 年度土木学会 関西支部年次学術講演会 (査読無し)	ストレス計測によるゴルフカートと人の接近可能距離の把握	武田将司
2013年9月17日	第 33 回交通工学研究発表会 (査読有り)	ヒヤリハット事象にみる 乗用 ゴルフカートの事故要因	石塚裕子
2013年7月15日	The proceedings of 13th World Conference on Transport Research (査読有り)	SAFETY IMPROVEMENT FOR MOBILITY SCOOTERS USING AUTOMATIC DECELERATION	猪井博登

*1 : International Conference on Safety of Industrial Automated Systems

2 特許について

出願日	名称	発表者
2013年11月29日	地上移動体、制御回路及び設定プログラム	栗山龍起（IDEC株式会社） 橋本真彌（国立大学法人大阪大学）

2. 分科会における説明資料

次ページより、プロジェクト推進・実施者が、分科会においてプロジェクトを説明する際に使用した資料を示す。

ロボット・新機械イノベーションプログラム

「生活支援ロボット実用化プロジェクト」(事後評価) 2009年度～2013年度(5年間)

プロジェクトの概要 (公開)

- I 事業の位置付け・必要性について
- II 研究開発マネジメントについて

NEDO

ロボット・機械システム部
菅原 淳

2014年9月17日

1/23

発表内容

公開

午前

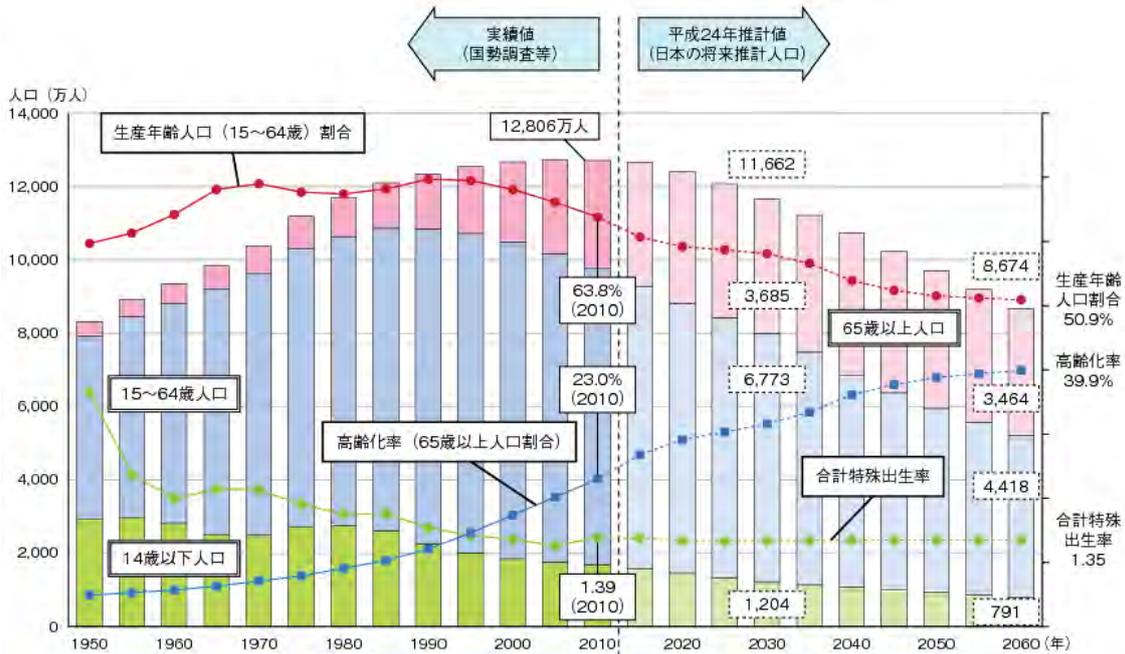
- I 事業の位置付け・必要性について
- II 研究開発マネジメントについて
- III-1 研究開発成果について(全体概要)
- IV-1 実用化・事業化の見通し及び取り組みについて(全体概要)

午後

- III-2 研究開発成果について(研究開発項目ごと)
- IV-2 実用化の見通しについて(研究開発項目ごと)

2/23

少子高齢化が進展。高齢者支援のロボットの必要性が高まる



事業原簿 I-5

サービスロボットの現状

- ・業務用として**搬送ロボット**が事業化
- ・家庭用掃除ロボットが**全世界で400万台以上を販売**
- ・手術支援ロボット、放射線治療ロボットが販売

実用化の動きはあるものの、その適用範囲は限定的

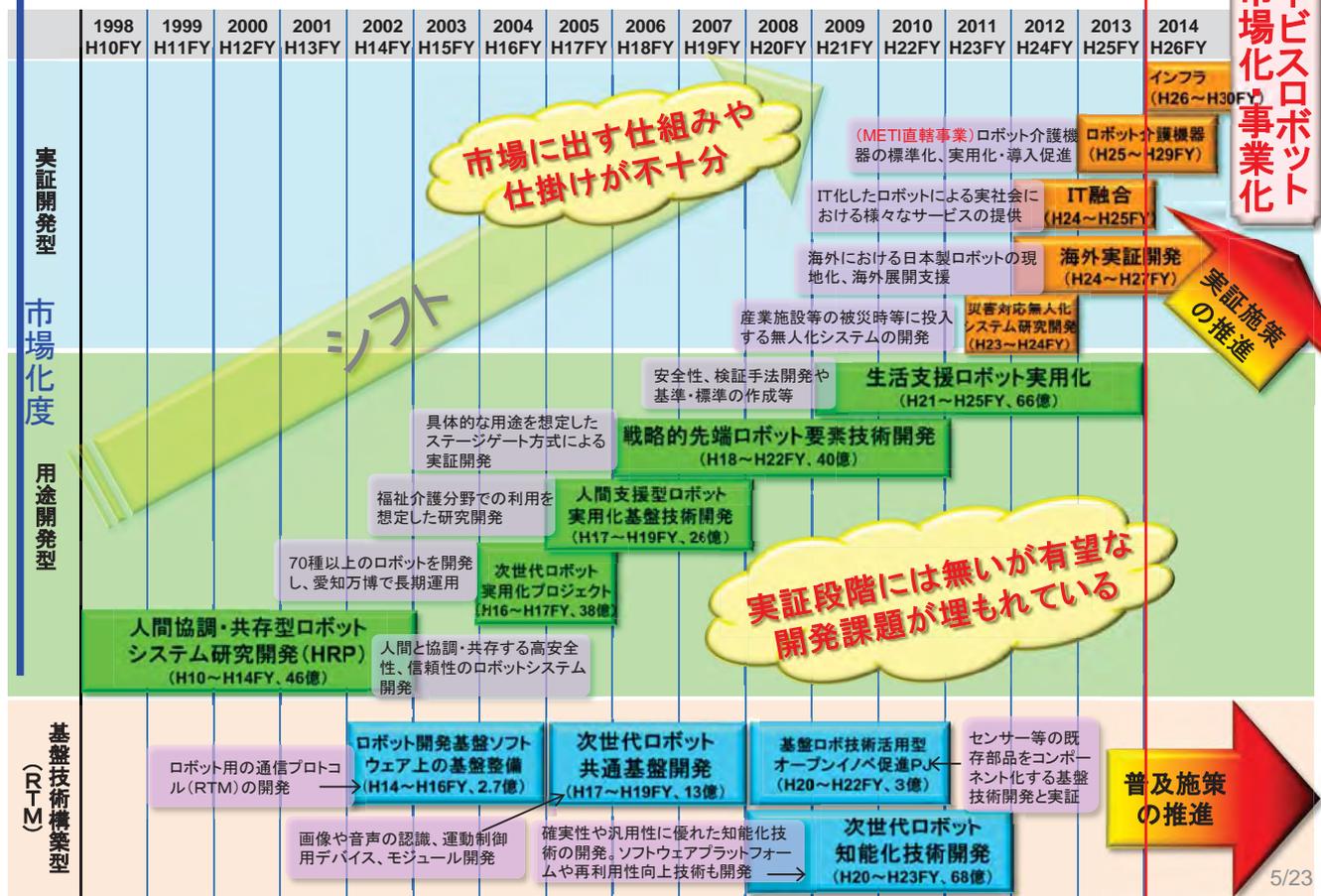
- ・人と共存する生活支援ロボットの**対人安全技術が未確立**
- ・生活支援ロボットの**安全規格等の社会制度の未整備**
 - ① サービスロボットの国際的な安全規格が未整備
 - ② 規格適合のための試験機関が未整備
 - ③ 規格適合を認証する認証機関が未整備

- ・民間企業に委ねているだけでは**本格的普及が望めない状況**
- ・安全基準、安全技術について公的機関の**一定の関与が必要**
安全性検証を行う認証機関、試験機関の整備
安全性基準等の国際標準化

事業原簿 I-1~5

これまでのNEDOのロボット開発と今後の課題

サービスロボットの市場化・事業化

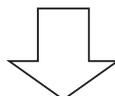


I 事業の位置付け・必要性について

公開

本プロジェクトの目的

- (1)生活支援ロボットとして本格的普及が期待されるロボットを対象として、対人安全性基準、及び基準適合性評価手法を確立する。
- (2)さらに、安全性基準の国際標準化を目指す。我が国発基準及び生活支援ロボットを海外市場へ普及を図る。



生活支援ロボットを世界に先駆けて事業化するために、
ロボットの安全に関する国際標準規格、
関連する試験機関、
規格認証機関の整備 を目指す

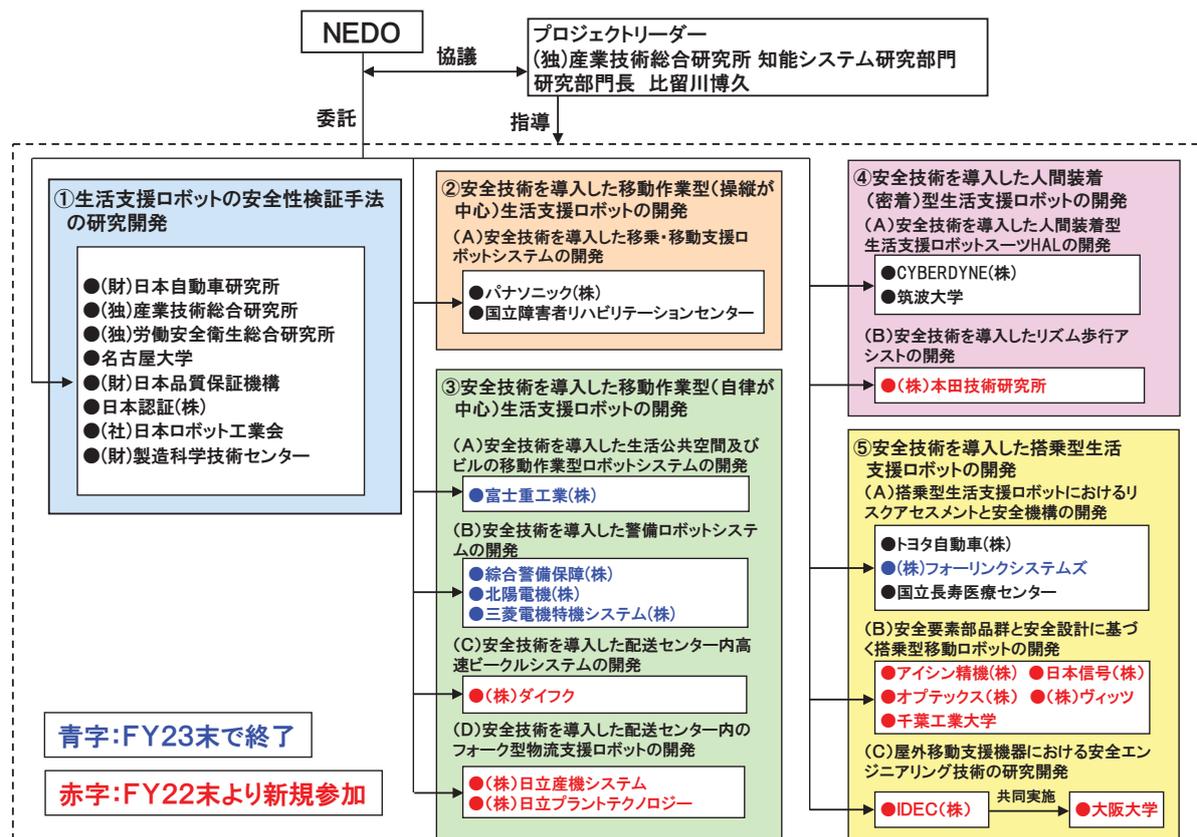
1. 事業の目標

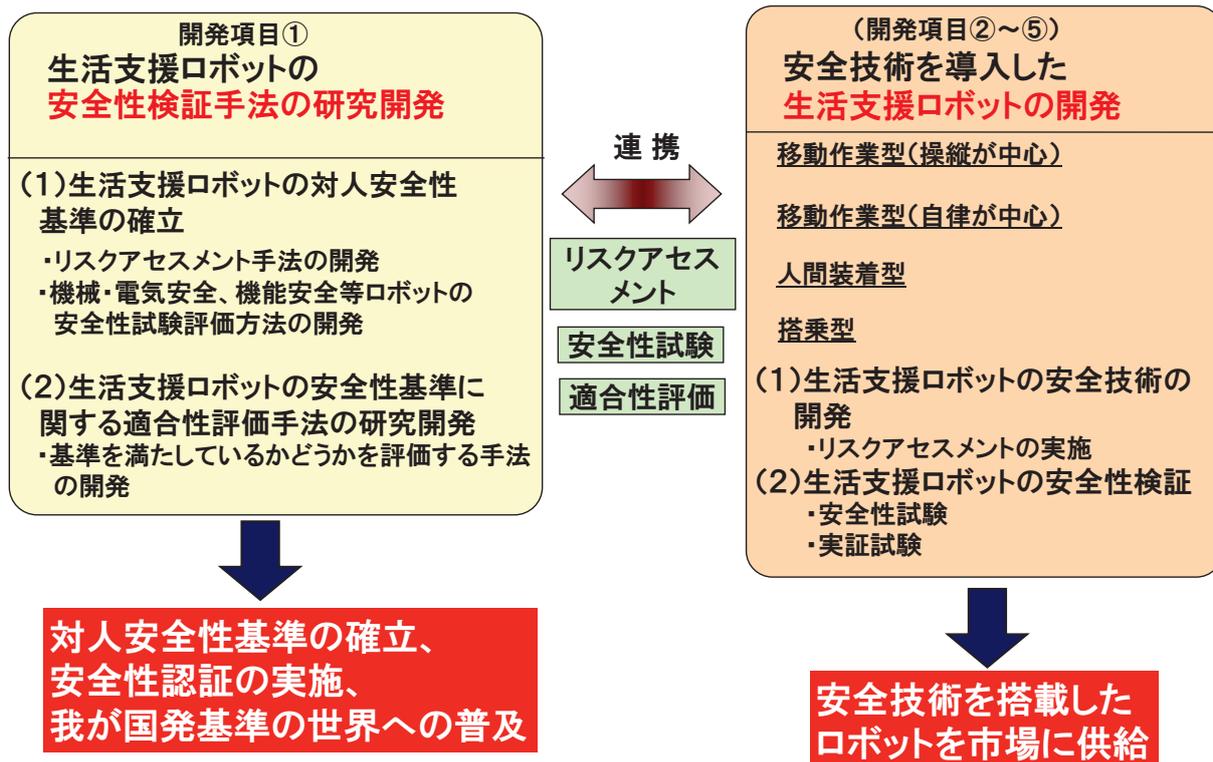
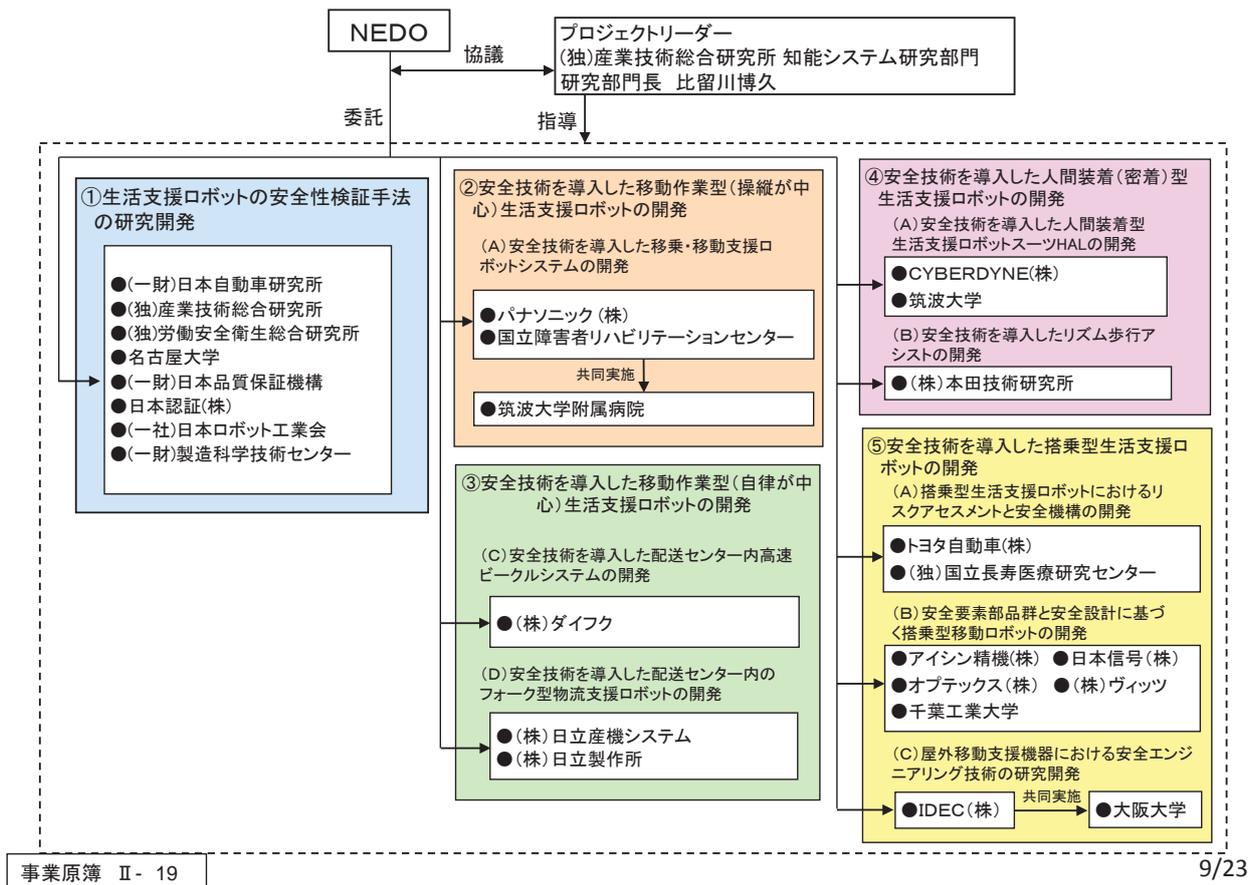
(最終目標)平成25年度

生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を確立し、生活支援ロボットの開発者に提供可能となること。対人安全性に関する指標、機械・電気安全、機能安全の試験・評価方法や手順について、国際標準提案を行えること。生活支援ロボットに関する安全性基準適合性評価手法を確立すること。

研究開発の対象とした生活支援ロボットに関して、安全性検証のための安全性試験を完了し、ロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示され、実証試験が完了していること。

Ⅱ 研究開発マネジメントについて 研究開発実施の事業体制の妥当性





プロジェクトにおける対象ロボット

公開

移動作業型(操縦中心)ロボット



- ・耐荷重試験
- ・衝撃耐久性試験
- ・電波暗室試験
- ・静的安定性試験
- ・複合環境試験

ロボティックベッド(パナソニック)

ISO13482、IEC6060-1、EN12184等

移動作業型(自律中心)ロボット



- ・衝突安全性試験機
- ・障害物接近再現試験機
- ・電波暗室試験
- ・環境認識性能試験
- ・多目的走行試験

物流センターの無人搬送ロボット
(ダイフク) (日立産機システム)
JIS D 6802、IEC61508、ISO13849

人間装着(密着)型ロボット



- ・耐荷重試験
- ・衝撃耐久性試験
- ・ベルト走行耐久試験
- ・電波暗室試験
- ・複合環境試験

ロボットスーツHAL 歩行アシスト
(CYBERDYNE) (本田技術研究所)

ISO13482

事業原簿 I - 19

搭乗型ロボット



搭乗型ロボット (トヨタ自動車) 電動車いす (アイシン精機)

屋外移動支援機器 (IDEC)

ISO13482、IEC61496、IEC61508

- ・耐荷重試験
- ・衝撃耐久性試験
- ・ドラム型走行耐久性能試験機
- ・障害物接近再現試験機
- ・複合環境試験
- ・電波暗室試験

11/23

II 研究開発マネジメントについて 開発項目ごとの研究開発目標

公開

研究開発項目	研究開発目標(最終)	根拠
①生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発 	①リスクアセスメント手法の確立 ②機械・電気安全、機能安全等に関し安全性試験評価方法の確立 ③安全性基準適合性評価手法の確立	対人安全技術が確立されていないため残留リスクの高いものが多く、早急にリスクを低減し安全性を保証する方式を策定することが求められている
②安全技術を導入した移動作業型(操縦が中心)生活支援ロボットの開発 	①安全技術を搭載した移動作業型(操縦が中心)生活支援ロボットが安全性試験を完了していること。 ②開発されたロボットの安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。 ③実証試験が完了していること。	少子高齢化を背景として介護・福祉分野へロボットを適用する際の安全性の確保が必要

事業原簿 II - 1~4

12/23

研究開発項目	研究開発目標(最終)	根拠
<p>③安全技術を導入した移動作業型(自律が中心)生活支援ロボットの開発</p> 	<p>①リスク低減技術及び安全要素技術を搭載した移動作業型(自律が中心)生活支援ロボットが安全性試験を完了していること。 ②開発されたロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。 ③実証試験が完了していること。</p>	<p>自律的に動作するロボットの安全性を確保する。</p>
<p>④安全技術を導入した人間装着(密着)型生活支援ロボットの開発</p> 	<p>①安全技術を搭載した人間装着(密着)型生活支援ロボットが安全性検証のための安全性試験を完了していること。 ②開発されたロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。 ③実証試験が完了していること。</p>	<p>人間の身体機能を拡張・増幅・支援する技術開発が必要であり、装着(密着)型ロボットの安全性を確保</p>

事業原簿 Ⅱ- 6~8

13/23

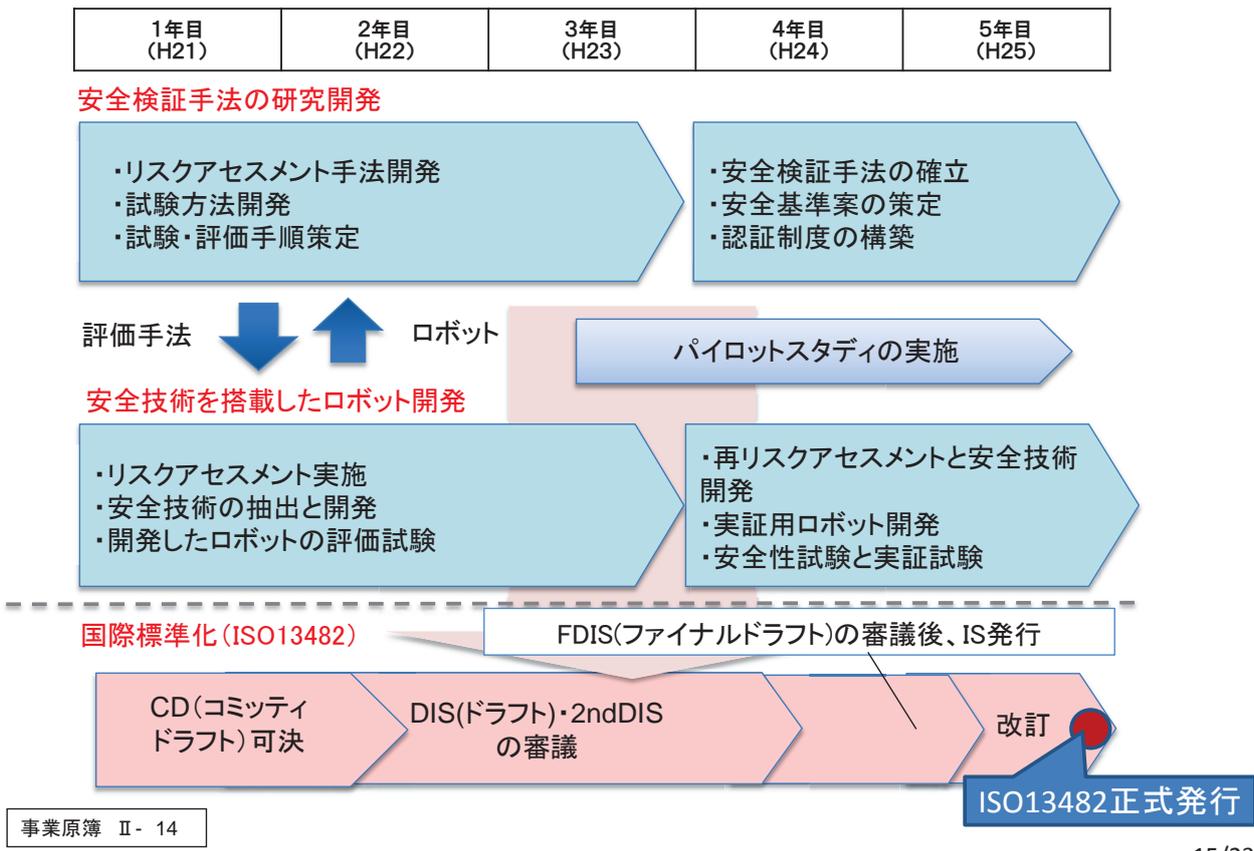
研究開発項目	研究開発目標(最終)	根拠
<p>⑤安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発</p> 	<p>①安全技術を搭載した搭乗型生活支援ロボットが安全性検証のための安全性試験を完了していること。 ②開発されたロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。 ③実証試験が完了していること。</p>	<p>高齢者や環境に配慮した新しい移動体の実用化のため人や障害物が混在した環境下での安全性の確保が必要。</p>

事業原簿 Ⅱ- 10~13

14/23

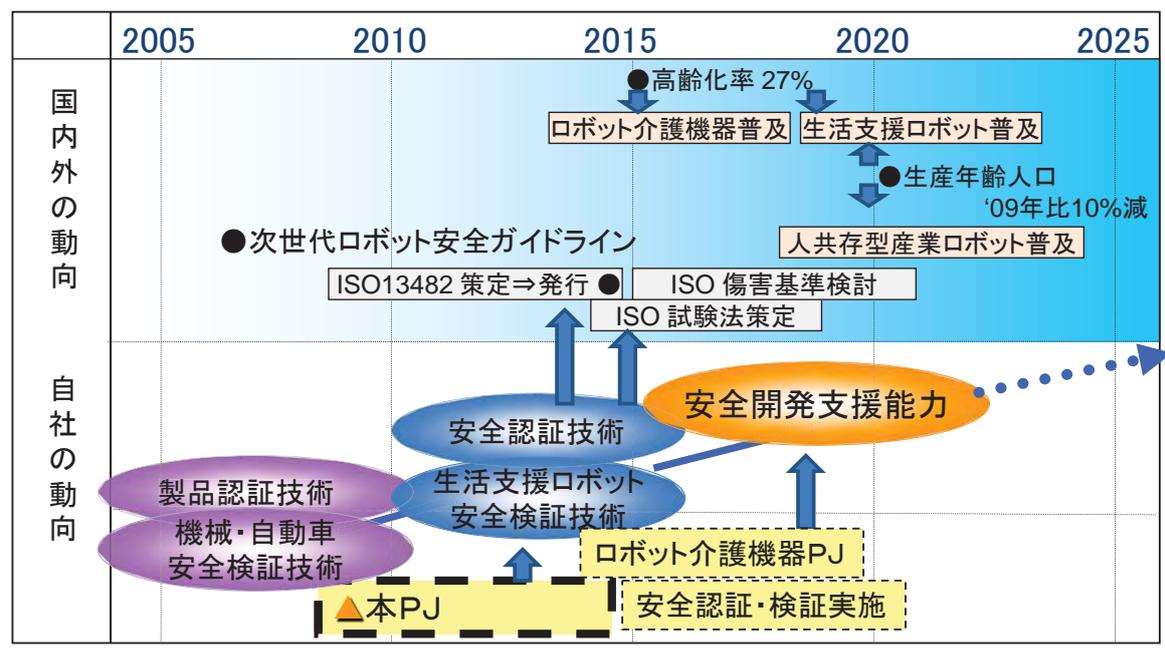
研究開発スケジュール

公開



公開

◆国内外の研究開発の動向



開発予算

◆開発予算

(単位:百万円)

年度	予算額	補正予算	備考
2009	1600		
2010	1525	840	グループⅡの追加公募・採択
2011	1150		
2012	1350		
2013	940		
計		7405	

プロジェクトの運営

●安全性検証全体連絡会

実施者が一堂に会しプロジェクト全体のスケジュールおよび課題の確認、安全性検証手法の開発状況や開発した手法の紹介、またロボット開発事業者からの情報提供依頼などを行う。

主催:NEDO、PL、METI

開催頻度:3ヶ月に一度

●進捗報告会、研究進捗確認シート

各実施者から研究進捗の説明、課題と今後のスケジュール確認を行う。

出席者:NEDO、PL、METI

報告者:各研究開発実施者

開催頻度:3ヶ月に1度

【国際ロボット展】
(2013年11月6-9日 @東京ビックサイト)



- ・生活支援ロボットPJの9種類のロボットを動態展示、フォーラムで実演。
- ・サービスロボットに関しては、NEDOが最大のブース
- ・NEDOブースに8700名が訪れた
- ・テレビ取材6件

事業原簿 II - 20

【成果発表会、プレスリリース】
(2014年2月17日
@機械振興会館)

- ・200名参加 (PJ関係者、介護PJ、ビジ協)
- ・ISO13428の認証式
パナソニック・リショナー、ダイフク・エリア管理システム
- ・マスコミ発表会、搭乗型、装着型ロボット体験会



【一般向け成果発表会】
(2014年6月18日
@つくば市役所)

- ・PJ外の一般者が対象。200名参加。
- ・搭乗型ロボット、歩行アシスト体験会、安全検証センターの見学会を併設



事業原簿 II - 20

■平成23年度末、総合警備保障(株)、北陽電機(株)、三菱電機特記システム(株)のコンソ、及び(株)フォーリンクシステムが、本プロジェクトを卒業。警備ロボットや安全回路に関し、技術開発の目処がたったため。

■平成23年度、富士重工業(株)の掃除ロボットについては研究開発に目処が付きPJを卒業したが、その後、公的資金の不正利用が判明した。NEDOは同社から資金を回収済み(平成25年1月)。

■行政公開プロセス(仕分け)

【平成24年】

- ・研究開発項目①～⑤の中で、より公共性の高い①に対し、予算を重点的に割り振ること。
 - ・研究開発項目②～⑤に関しては、各タイプのロボットについて、パイロットスタディーを行いリスクアセスメントを完成させ、①が行う各タイプの認証スキーム開発に協力すること。これに関して予算を重点的に使い、企業固有の問題については、各企業の負担で開発すること。
- ⇒平成25年度予算の割り振りで、上記意向を反映。

【平成25年】

- ・安全標準については幅広い知見を募るため、オープンに議論していくこと
 - ・国内試験機関が海外のロボットの安全試験を請け負える環境を整備すること
- ⇒講演会、セミナー、国際学会での発表で、国内外にアピール。海外案件も検討中。

今後に対する提言	対処方針・計画等への反映
<p>【1】人間の多様性、ロボットの多様性、利用環境の多様性のために、安全基準作成は極めて多様な項目を対象とせざるを得ない。</p> <p>しかし、細かく数多くの基準が増え続ける方向の研究には、基準としての意味がない。</p> <p>そこで、専門家のみならず一般人が安心できる安全基準の骨格を作ることが重要である。</p>	<p>【1】指摘のように、生活支援ロボットの安全基準は自動車等とは異なり、用途や対象者によって異なるタイプのロボットに対応した多様なものとなる。</p> <p>一般利用者が理解しやすく、さらにサービスロボット市場の成長を促進するような骨格作りを行った。</p>
<p>【2】PJに参加している全員が性能基準や機能安全に基づく安全認証に対する理解を深める必要がある。更に安全性の検証、認証に関する能力、及び、安全設計に関する基礎知識を持つ人材の育成は喫緊の課題である。</p>	<p>【2】認証制度の整備のため安全検証手法の開発実施者とロボット開発実施者が連携して進める「パイロットスタディ」の取り組みを通じて理解を深めた。また、PJ内で人材育成も行った。</p>
<p>【3】実際の社会の現場での実証実験も必要である。並行して、そのための法整備(特区構想など)を積極的に提案していくべき。</p>	<p>【3】本PJでは、実環境での実証試験も行った。</p>
<p>【4】国際標準化に関しては、ISO/TC184/SC2/WG7関係だけでなく国際標準化の世界をISO/IEC/ITUを含めて、広い視野で捉えて対応してほしい。また、欧米諸国の標準化動向にも、今以上に注意するべきだろう。</p>	<p>【4】国際標準化については、WG7が他の規格を参考・引用して構築が進められているため、他の標準化活動(例えば医療機器、物流機械、光学式センサー)を視野に入れて進めた。</p>

	H21	H22	H23	H24	H25	計
特許出願(うち外国出願)	2	11	7(2)	12(1)	8(1)	40(4)
論文(査読付き)	11(9)	27(22)	54(38)	62(55)	40(17)	194(141)
研究発表・講演	30	53	105	183	106	477
新聞・雑誌等への掲載	77	176	181	252	284	970
展示会への出展	30	9	46	81	74	240

事業原簿 添付資料4

23/23

「生活支援ロボット実用化プロジェクト」
(事後評価)第1回分科会
資料6-2

ロボット・新機械イノベーションプログラム

「生活支援ロボット実用化プロジェクト」(事後評価) 2009年度～2013年度(5年間)

プロジェクトの概要 (公開)

- Ⅲ-1 研究開発成果について(全体概要)
- Ⅳ-1 実用化の見通しについて(全体概要)

プロジェクトリーダー
(独)産業技術総合研究所 比留川 博久

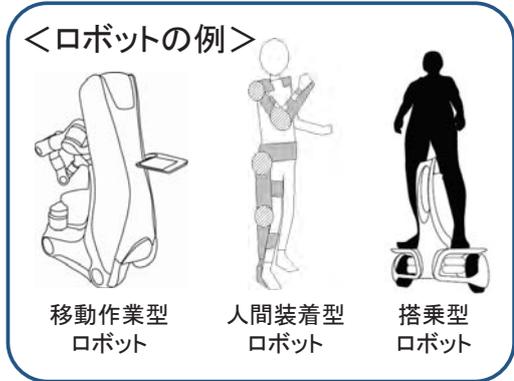
2014年9月17日

パーソナルケアロボットの安全規格で2014年2月1日にISO(国際標準化機構)より発行

**NEDO生活支援ロボット実用化PJメンバーが草案を提出。
議論をリードして正式発行に至った！**

ISO 13482の構成

- 1. 適用範囲
- 2. 参照規格
- 3. 用語と定義
- 4. リスクアセスメント
- 5. 安全要求事項と保護方策
代表的危険源
(エネルギー源、振動、熱、耐久性など)
に対する要求事項
- 6. 安全関連制御システム要求事項
安全関連制御システム
(停止、速度制御、環境センシング、力制御など)に
対する要求事項
- 7. 検証と妥当性確認
- 8. 使用上の注意



成果2： 参画企業のISO13482認証

昨年：2013年2月27日

ISO/DIS 13482

ドラフト(原案)版

CYBERDYNE(株)「ロボットスーツHAL」



今回：2014年2月17日

ISO13482:
2014

正式版

パナソニック(株)
「リショーネ®」



(株)ダイフク
「エリア管理システム」



成果3： 参画機関の8種類のロボットに関し、それぞれ
リスクアセスメントを行い、
安全性検証試験を通して、
安全技術を確立できた。

段階	No.	危険源	危険状態/危険事象	危険区域	対象者	リスク見積					
						危害の発生率	暴露率	回避率	リスク点数R		
起動・シャットダウン	12	電磁波	車いすが電磁波で誤動作して衝突する	周辺	搭乗者 第三者	4	7	2	3	28	
前進/後退/旋回/停車	22	加減速不安定性	車いすが転倒する	乗車部 周辺	搭乗者 第三者	4	6	3	2	1	24
	27	誤操作	車いすが周囲の人に衝突する	周辺	第三者	4	6	3	2	1	24
	28	制御系の故障	車いすが周囲の人に衝突する	周辺	第三者	4	8	3	2	3	32

成果4： 移動作業型、装着型、搭乗型の各タイプのロボットについて、電気、機械、機能安全の安全性評価基準を作り、認証スキームを構築した



成果5： 各タイプのロボットは、それぞれのフィールドで実証試験を行い、有用性と安全性を実証した。



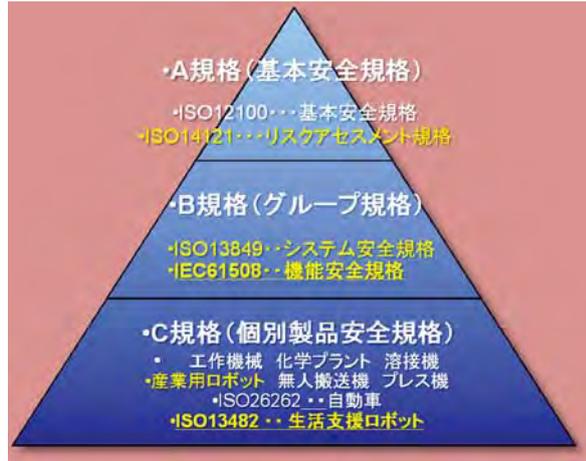
Ⅲ 研究開発成果について 最終目標の達成度

最終目標(平成25年度末)	研究開発成果	達成度
<p>【プロジェクト全体の目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ リスクアセスメント手法を確立し、開発者に提供可能となること。 ・ 機械、電気、機能安全の試験・評価方法や手順について、国際標準提案を行えること。 ・ 安全性基準適合性評価手法を確立すること。 ・ 各テーマのロボットの評価基準値が示され、安全性試験を完了し、実証試験が完了していること。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ リスクアセスメント手法を開発し、開発者に提供した。 ・ 開発対象ロボットの試験装置を開発し、ロボット安全性試験項目、各タイプのロボットの試験・評価方法や手順の策定を行った。 ・ Personal Care Robot の国際安全規格ISO13482の策定に貢献し、2014年2月に正式発行となった。 ・ 各タイプのロボットに対し、リスクアセスメントに基づいた評価基準を示し、安全性試験を完了し、実証試験を行った。 	○
<p>【研究開発項目①：生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 各タイプのリスクアセスメント手法を確立し、開発者に提供すること。取得したデータに基づき、耐性指標等の国際標準提案を行えること。 ・ 各タイプの機械・電気安全、機能安全等に関し安全性試験評価方法を確立すること。それに関し国際標準化提案を行えること。 ・ 各タイプの安全性基準適合性評価手法を確立する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ リスクアセスメントシート雛形を完成し提供した。また耐性指標等の国際標準化案を、ISO/TC199に新規作業項目として提案した。ISO13482の策定に貢献し、2014年2月に正式発行。 ・ 各タイプの機械、電気、機能安全等に関し安全性試験評価方法を確立した。ISO/TC184/SC2/WG7 に試験方法案を提案し、標準化作業を行った。 ・ 各タイプの生活支援ロボットに関して認証スキームを確立し、3件の認証を発行した。 	◎
<p>【研究開発項目②～⑤：安全技術を導入した生活支援ロボットの開発】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 各ロボットが安全性試験を完了していること。 ・ 開発された安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。 ・ 各ロボットについて実証試験が完了していること。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 各タイプに関し安全技術を開発し、リスクアセスメントを終了。安全性検証試験を行った。 ・ パナソニック(株)の「リショーネ」、(株)ダイフクの「エリア管理システム」については、ISO13482の認証を取得し、サイバーダインのロボットスーツHALについては、ISO/DIS13482の認証を取得した。 ・ 各タイプについて、用途、使用シーン、想定ユーザーを考慮し、安全試験項目に関する実証試験を行った。 	○

①:生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発

ISO TC184/SC2/WG7で標準規格策定中

生活支援ロボット安全検証センター



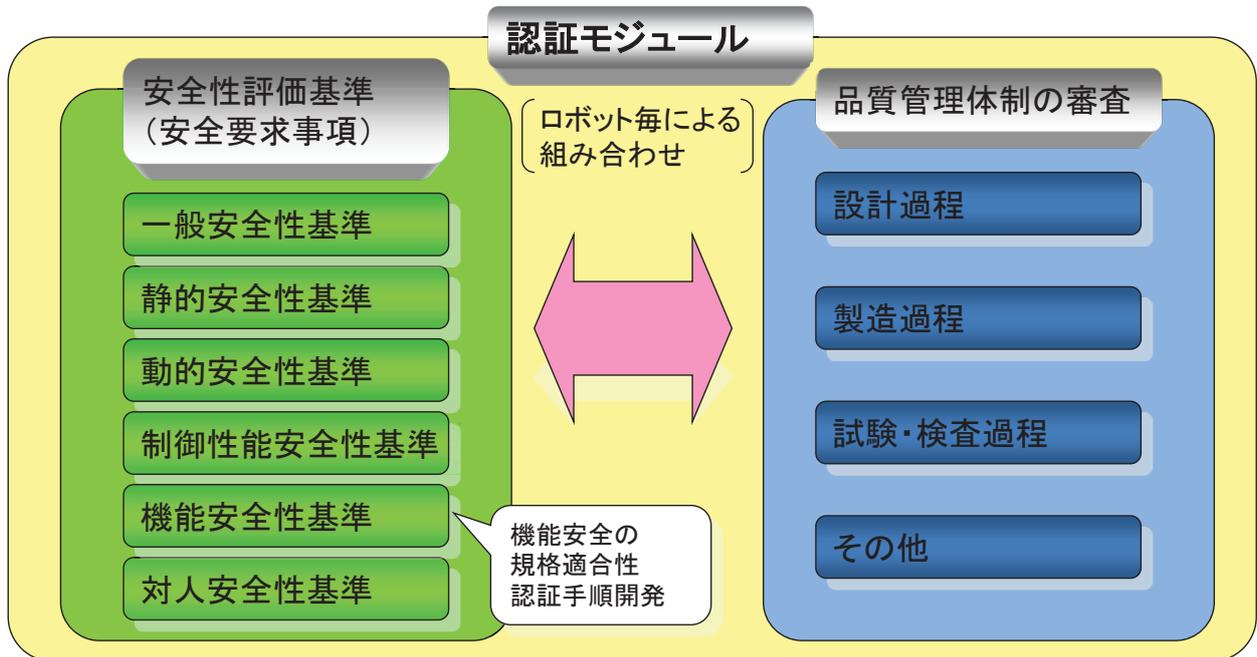
ダミーを用いた衝突安全性評価試験

対人安全試験装置



①:生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発

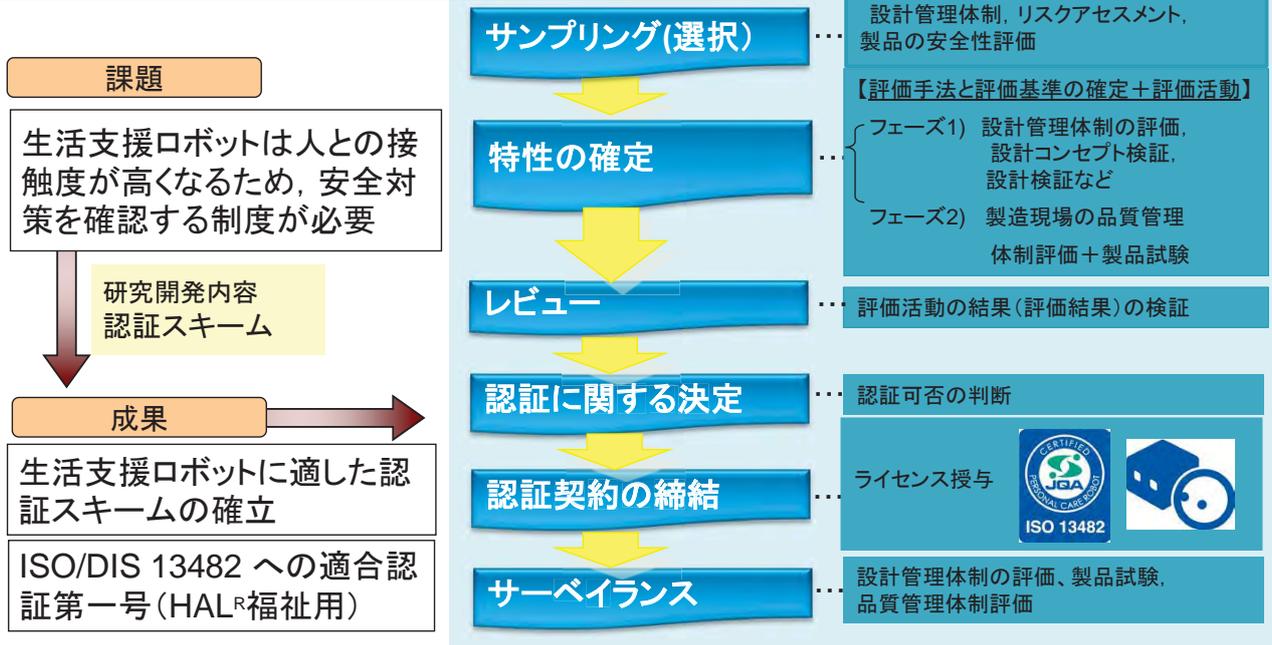
- (2) - 1 認証モジュール設計に関する研究開発
- (2) - 2 安全性評価基準の規定化に関する研究開発
- (2) - 3 機能安全の規格適合性認証手順に関する研究開発



生活支援ロボットの安全検証手法の研究開発

日本自動車研究所・産業技術総合研究所・労働安全衛生総合研究所・名古屋大学・日本品質保証機構・日本認証・日本ロボット工業会・製造科学技術センター

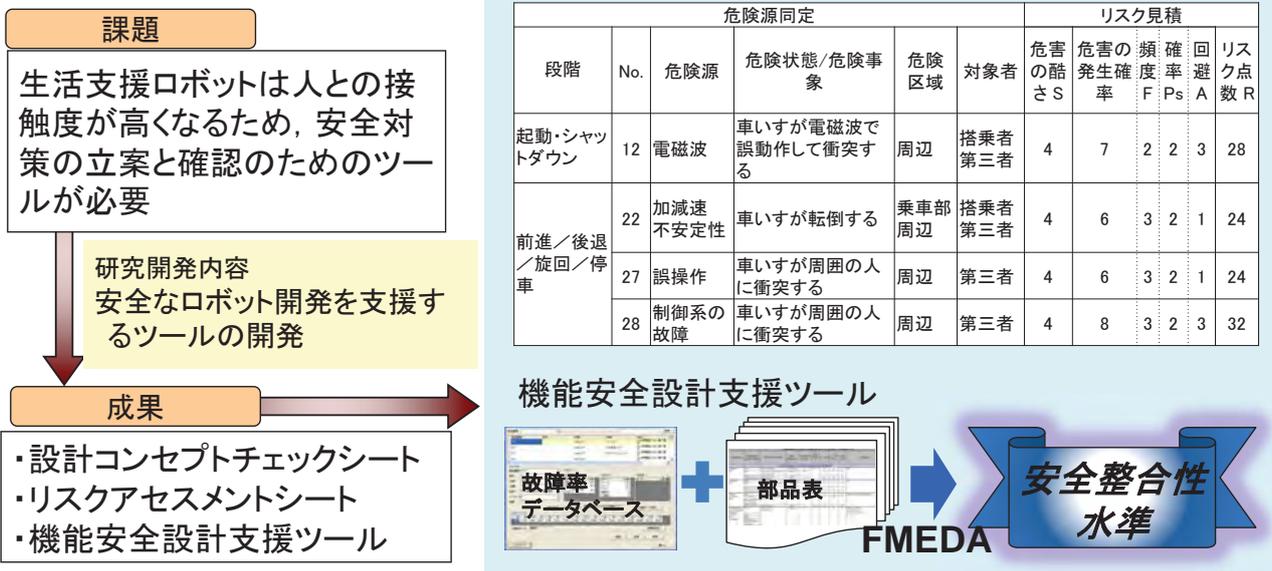
本件に関するお問い合わせ先: 日本品質保証機構
http://www.jqa.jp/service_list/fs/action/form/index.html



生活支援ロボットの安全検証手法の研究開発

日本自動車研究所・産業技術総合研究所
 労働安全衛生総合研究所・名古屋大学・日本品質保証機構
 日本認証・日本ロボット工業会・製造科学技術センター

本件に関するお問い合わせ先: 日本認証
<http://www.japan-certification.com>



生活支援ロボットの安全検証手法の研究開発

日本自動車研究所・産業技術総合研究所
 労働安全衛生総合研究所・名古屋大学・日本品質保証機構
 日本認証・日本ロボット工業会・製造科学技術センター

試験実施に関するお問い合わせ先：
日本自動車研究所
<http://www.jari.or.jp>

センターに関するお問い合わせ先：
生活支援ロボット安全検証センター
<http://robotsafety.jp/wordpress/>

課題

生活支援ロボットは人との接触度が高くなるため、安全対策を確認する試験方法が必要

研究開発内容
 安全検証試験方法開発

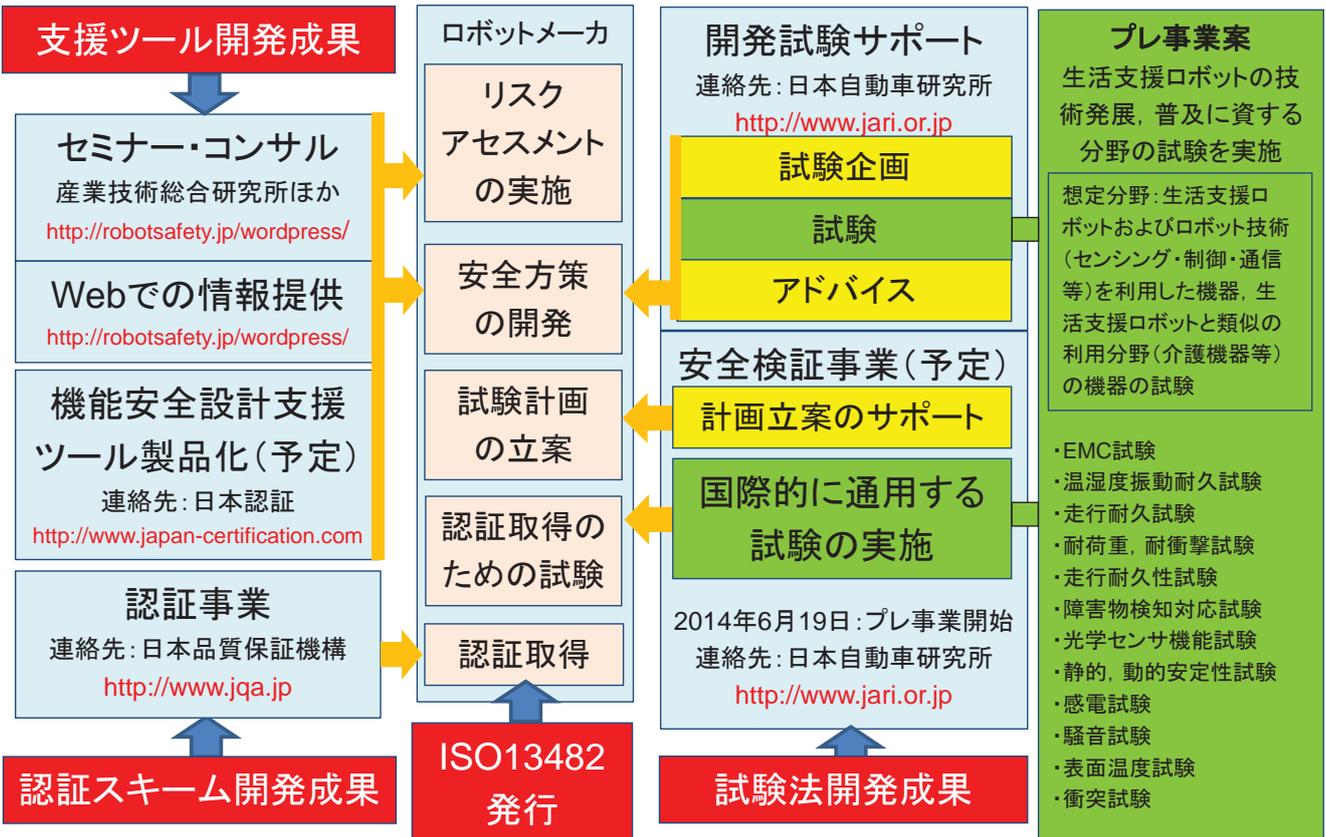
成果

- ・試験方法の確立
- ・国際標準化への提案

生活支援ロボット安全検証センター



成果の活用と事業化計画(案)



●安全技術を導入した移乗・移動支援ロボットシステムの開発

委託先：パナソニック株式会社、国立障害者リハビリテーションセンター

課題

高齢者・障害者が利用するベッド、車いすが統合された移乗・移動支援ロボットの誤動作、操作等に対するリスク低減

- ・操縦支援技術
- ・安全変形／動作技術
- ・ロボットシステム自己診断技術
- ・ユーザビリティ
- ・安全環境センシング技術
- ・動的動作経路生成技術

自立支援型「ロボティックベッド」



介助支援型「リショーネ」



波及効果

- ①介護・福祉ロボット市場の開拓、拡大
- ②電動車いす、電動ケアベッドのRT化促進による市場拡大
- ③RT利用自立支援普及促進による介護保険費用削減

成果

安全技術を導入したロボット開発、実用化

- ・安全規格に基づき、ロボティックベッド、リショーネのリスクアセスメント及び安全コンセプト策定を行い、それらの結果に基づき、ISO13482に準拠し、安全性向上を図ったロボットを開発。
- ・安全検証センターにおいてロボット安全性試験を実施、安全試験方法、安全基準策定に貢献。
- ・実証評価により実使用における安全性／実用性課題を抽出・改善し、有用性向上を図った。
- ・**ロボット介護機器「リショーネ」は、世界初のISO13482認証取得、2014年6月から受注販売開始。**

安全技術を導入した配送センター内高速ビークルシステムの開発

委託先：株式会社ダイフク

課題

人とフォークリフトが混在する大型配送センター内高速ビークルの安全方策が未確立

研究開発内容

- ・高速ビークル本体での200m/minからの危険回避技術の開発
- ・エリア管理システムによる安全確保技術の開発
- ・エリアローカルシステムによる警報技術の開発
- ・JIS D6802: 無人搬送車システム安全通則 改定案の提

成果

- ・ 高速ビークルシステムのリスクアセスメントを実施し、危険源の特定とその防護事例を公開した。
- ・ 安全防護技術の開発を行った。特にエリア管理システムはISO13482を取得した。
- ・ 高速ビークルの制作と、実機による物流センターにおける安全性能検証試験を実施した。
- ・ (一社)日本産業車両協会へJIS改定案を提出した。高速化に対する、ビークル業界としての統一的な考え方を提言した。



協力：味の素株式会社 味の素物流株式会社 様

事業化

アメリカの子会社で発売し（日本の市場の3倍あり）その後日本市場に本格的に投入

NEDO生活支援ロボット実用化プロジェクト

公開

「安全技術を導入した移動作業型(自律が中心)生活支援ロボットの開発」
安全技術を導入した配送センター内のフォーク型物流支援ロボットの開発

委託先 : 株式会社日立産機システム
株式会社日立製作所 インフラシステム社

課題

作業者と一般者*1)が共存する配送センタ内での高速な自動搬送作業

研究開発内容

- ・リスクアセスメントに基づく安全設計
- ・3次元障害物検出技術による障害物回避の安全サポート系の開発
- ・走行時・荷扱い時に体人接触を回避を安全系の開発



成果

作業者と一般者*1)が共存可能な、高速で搬送能力の高い安全なフォークリフト型物流支援ロボットの実現

配送センタへの物流支援システムの展開

*1)安全教育を受けていない配送業者や工場内事務員などの作業者以外の人

実用化の見通し

フォーク型ロボット安全システム(日立製作所): オプションとして設定済み
3次元位置認識装置(日立産機システム) : 2015年製品化予定

事業原簿 Ⅲ-3-2

14/20

NEDO生活支援ロボット実用化プロジェクト

公開

安全技術を導入した人間装着型生活支援ロボットスーツHALの開発
委託先: CYBERDYNE株式会社、筑波大学

課題

安全を実現する技術と運用ルールの研究開発

- ・下肢型(立ち座り・歩行支援)
- ・上肢型(食事・把持支援)
- ・全身型(重作業支援)

研究開発内容

- ・装着機能安定技術
- ・制御技術
- ・安全管理技術
- ・自己診断技術
- ・安全要素技術
- ・安全性試験
- ・実証試験



成果

- ・ISO/DIS 13482認証取得(HAL福祉用)
- ・CEマーキング取得(HAL医療用; MDD Class IIa)
- ・70名を超える実証試験

HAL福祉用
国内市場での展開
160施設・
400台以上が稼働

HAL医療用
欧州市場での展開
40台が稼働中 @
ドイツ・スウェーデン

事業原簿 Ⅲ-4-1

15/20

安全技術を導入した人間装着型人支援ロボット 一歩行アシストの研究開発
 委託先：株式会社本田技術研究所 基礎技術研究センター

課題

高齢者支援領域での運用に
 合致した安全性評価の実践

研究開発内容
 ・ 高齢者を対象としたリスク分析とISO13482各項目に対応した設計
 ・ 安全性検証のための歩行や稼働状況の記録装置開発
 ・ 残存リスクの安全性の評価
 ・ 実環境実証実験



医療・福祉・健康維持など幅広い領域での歩行支援

成果

・ 高齢者の運動教室で運用可能な安全性の評価を完了。
 ・ 装着型歩行支援ロボットの高齢者支援領域での転倒リスク評価プロセスを示した。

2014年度歩行アシストISO13482認証取得（予定）
 高齢者支援（介護予防）事業の可能性を検討中16/20

安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボット(Winglet)の開発
 委託先：トヨタ自動車株式会社

課題

・ Wingletの安全基準、試験方法が未定
 ・ Wingletが基準を満たしているか不明

《研究開発内容》
 ・ 基準に整合した安全設計手法の開発
 ・ 試験方法の開発、検証
 ・ 認証スキーム開発への参画

成果

・ JQA安全認証（設計コンセプト認証）取得
 ・ Wingletの安全基準、試験方法の策定と確認
 安全機能開発や標準化へも反映
 ・ 実使用環境（つくば特区）での安全性確認
 重大ヒヤリ無し

展開

実用化の場の拡大

● 警備利用（商業施設）

● ツアー（商業施設）

MEGA WEB

NEDO生活支援ロボット実用化プロジェクト

公開

- 研究テーマ：安全要素部品群と安全設計に基づく搭乗型移動ロボットの開発
- 委託先：アイシン精機株式会社、日本信号株式会社、オプテックス株式会社、株式会社ヴィッツ、学校法人千葉工業大学

課題

搭乗型移動ロボット(最高速度10km/h)の生活空間内における許容リスク以下での移動の実現

- ・許容リスク以下安全移動支援技術
- ・生活空間内移動リスク算出アルゴリズム
- ・リスク低減速度算出アルゴリズム
- ・安全要素モジュール群の開発
- ・3次元レーザ測域センサ
- ・距離画像カメラ
- ・IEC61508 SIL2準拠機能安全ソフトウェア開発プロセスに基づき構築(リスク低減速度算出ソフト)



公道など人と共存する生活空間での移動支援

成果

公道等の生活空間における許容リスク以下の移動を可能とする搭乗型移動ロボットを実現

実用化の見通し

実用化に向けた実証実験と商品企画(目指す商品コンセプト作り)を推進中

NEDO生活支援ロボット実用化プロジェクト

公開

屋外移動支援機器における安全エンジニアリング技術の研究開発
委託先: IDEC株式会社、共同実施: 大阪大学大学院

課題

ゴルフカートなどの屋外移動支援機器における誘導移動時のリスク低減

研究開発内容

- ・安全機器技術
安全センシング技術、安全無線通信技術
- ・安全システム設計技術
機能安全システム化技術、システムのリスクアセスメント技術
- ・安全運用技術
広域空間での安全システム運用技術、安全マネジメント技術

安全エンジニアリング技術
安全機器技術 安全システム設計技術 安全運用技術



搭乗型生活支援ロボットの屋外での利用拡大

成果

安全エンジニアリングによる屋外移動支援機器の安全性の確立

実用化の見通し

実用化に向けた実証実験実施中

安全性検証手法の開発による波及効果

機能安全などの国際規格に適合したロボットの安全規格を定め、ロボットの安全性を試験・評価する技術開発拠点を整備することにより、ロボット事業のみならず、認証事業、試験事業、さらには、国際標準、研究開発、人材育成まで広く波及効果が期待できる。

安全技術を導入したロボットの開発による波及効果

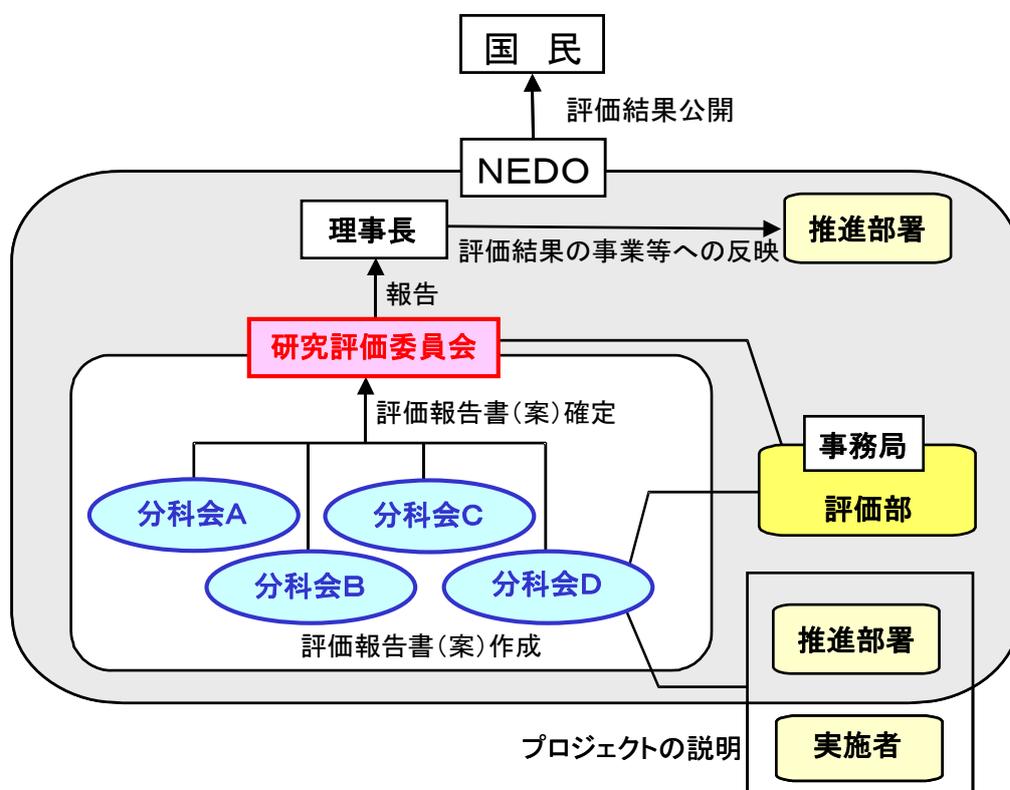
生活支援ロボットが市場に普及し、少子高齢化・労働力不足といった社会問題の解決策となっていく共に、開発した安全技術と検証手法の実績をつくりあげることにより後発メーカーの生活支援ロボット事業への新規参入を促し、国内外の産業の活性化につながる。

参考資料 1 評価の実施方法

本評価は、「技術評価実施規程」（平成 15 年 10 月制定）に基づいて研究評価を実施する。

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）における研究評価の手順は、以下のように被評価プロジェクトごとに分科会を設置し、同分科会にて研究評価を行い、評価報告書（案）を策定の上、研究評価委員会において確定している。

- 「NEDO 技術委員・技術委員会等規程」に基づき研究評価委員会を設置
- 研究評価委員会はその下に分科会を設置



1. 評価の目的

評価の目的は「技術評価実施規程」において。

- 業務の高度化等の自己改革を促進する
- 社会に対する説明責任を履行するとともに、経済・社会ニーズを取り込む
- 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を促進するとしている。

本評価においては、この趣旨を踏まえ、本事業の意義、研究開発目標・計画の妥当性、計画を比較した達成度、成果の意義、成果の実用化の可能性等について検討・評価した。

2. 評価者

技術評価実施規程に基づき、事業の目的や態様に即した外部の専門家、有識者からなる委員会方式により評価を行う。分科会委員選定に当たっては以下の事項に配慮して行う。

- 科学技術全般に知見のある専門家、有識者
- 当該研究開発の分野の知見を有する専門家
- 研究開発マネジメントの専門家、経済学、環境問題、国際標準、その他社会的ニーズ関連の専門家、有識者
- 産業界の専門家、有識者

また、評価に対する中立性確保の観点から事業の推進側関係者を選任対象から除外し、また、事前評価の妥当性を判断するとの側面にかんがみ、事前評価に関与していない者を主体とする。

これらに基づき、分科会委員名簿にある7名を選任した。

なお、本分科会の事務局については、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構評価部が担当した。

3. 評価対象

平成21年度に開始された「生活支援ロボット実用化プロジェクト」を評価対象とした。

なお、分科会においては、当該事業の推進部署から提出された事業原簿、プロジェクトの内容、成果に関する資料をもって評価した。

4. 評価方法

分科会においては、当該事業の推進部署及び実施者からのヒアリングと、それを踏まえた分科会委員による評価コメント作成、評点法による評価及び実施者側等との議論等により評価作業を進めた。

なお、評価の透明性確保の観点から、知的財産保護の上で支障が生じると認められる場合等を除き、原則として分科会は公開とし、実施者と意見を交換する形で審議を行うこととした。

5. 評価項目・評価基準

分科会においては、次に掲げる「評価項目・評価基準」で評価を行った。これは、NEDOが定める「標準的評価項目・評価基準」（参考資料 1-7 頁参照）をもとに、当該事業の特性を踏まえ、評価事務局がカスタマイズしたものである。

プロジェクト全体に関わる評価について、主に事業の目的、計画、運営、達成度、成果の意義、実用化に向けての見通しや取り組み等を評価した。

評価項目・評価基準

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 経済産業省が推進する「ロボット・新機械イノベーションプログラム」並びに内閣府が推進する「社会還元加速プロジェクト」の目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断できる具体的かつ明確な開発目標を設定しているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 適切な研究開発実施体制になっており、指揮命令系統及び責任体制が明確になっているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 知的財産取扱（実施者間の情報管理、秘密保持、出願・活用ルール含む）に関する考え方は整備され、適切に運用されているか。

(4) 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化・事業化につなげる戦略が明確になっているか。

- ・ 成果の実用化・事業化シナリオに基づき、成果の活用・実用化の担い手、ユーザーが関与する体制を構築しているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダーにより、成果の実用化・事業化シナリオに基づき、適切な研究開発のマネジメントが行われているか。
- ・ 成果の実用化・事業化につなげる知財戦略(オープン/クローズ戦略等) や標準化戦略が明確になっており、かつ妥当なものか。

(5) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向等に機敏かつ適切に対応しているか。

3. 研究開発成果について

(1) 目標の達成度と成果の意義

- ・ 成果は目標を達成しているか。
- ・ 成果は将来的に市場の拡大或いは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。
- ・ 目標未達成の場合、達成できなかった原因が明らかで、かつ目標達成までの課題を把握し、この課題解決の方針が明確になっているなど、成果として評価できるか。
- ・ 設定された目標以外に技術的成果があれば付加的に評価する。
- ・ 世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓、または汎用性のある成果については、将来の産業につながる観点から特に顕著な成果が挙げられている場合は、海外ベンチマークと比較の上で付加的に評価する。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 大学または公的研究機関で企業の開発を支援する取り組みを行った場合には、具体的に企業の取り組みに貢献しているか。

(2) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(3) 成果の普及

- ・ 論文等の対外的な発表は、将来の産業につながる観点から戦略的に行われているか。
- ・ 成果の活用・実用化の担い手・ユーザー等に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

本項目における「実用化・事業化」の考え方

当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることであり、さらに、当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により企業活動(売り上げ等)に貢献すること。

(1)成果の実用化・事業化の見通し

- ・ 産業技術としての見極め(適用可能性の明確化)ができているか。
- ・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。
- ・ 成果は市場やユーザーのニーズに合致しているか。
- ・ 実用化に向けて、競合技術と比較し性能面、コスト面を含み優位性は確保される見通しはあるか。
- ・ 量産化技術が確立される見通しはあるか。
- ・ 事業化した場合に対象となる市場規模や成長性等により経済効果等が見込めるものとなっているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

(2)実用化・事業化に向けた具体的取り組み

- ・ プロジェクト終了後において実用化・事業化に向けて取り組む者が明確になっているか。また、取り組み計画、事業化までのマイルストーン、事業化する製品・サービス等の具体的な見通し等は立っているか。

はじめに

本「標準的評価項目・評価基準」は、「技術評価実施規程」に定める技術評価の目的^{*}を踏まえ、NEDOとして評価を行う上での標準的な評価項目及び評価基準として用いる。

本文中の「実用化・事業化」に係る考え方及び評価の視点に関しては、対象となるプロジェクトの特性を踏まえ必要に応じ評価事務局がカスタマイズする。

※「技術評価実施規程」第5条(技術評価の目的) ①業務の高度化等自己改革の促進、②社会への説明責任、経済・社会ニーズの取り込み、③評価結果の資源配分反映による、資源の重点化及び業務の効率化促進

なお「評価項目」、「評価基準」、「評価の視点」は、以下のとおり。

- ◆評価項目：「1. . . .」
- ◆評価基準：上記、各項目中の「(1) . . .」
- ◆評価の視点：上記、各基準中の「・」

評価項目・基準・視点

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 特定の施策（プログラム）、制度の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断できる具体的かつ明確な開発目標を設定しているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマごとの配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 適切な研究開発実施体制になっており、指揮命令系統及び責任体制が明確になっているか。
- ・ 研究管理法を經由する場合、研究管理法が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 知的財産取扱（実施者間の情報管理、秘密保持、出願・活用ルール含む）に関する考え方は整備され、適切に運用されているか。

(4) 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

（基礎的・基盤的研究開発及び知的基盤・標準整備等研究開発の場合は、「事業化」を除く）

- ・ 成果の実用化・事業化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化・事業化シナリオに基づき、成果の活用・実用化の担い手、ユーザーが関与する体制を構築しているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダーが選任されている場合、成果の実用化・事業化シナリオに基づき、適切な研究開発のマネジメントが行われているか。
- ・ 成果の実用化・事業化につなげる知財戦略(オープン/クローズ戦略等) や標準化戦略が明確になっており、かつ妥当なものか。

(5) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向等に機敏かつ適切に対応しているか。

3. 研究開発成果について

(1) 目標の達成度と成果の意義

- ・ 成果は目標を達成しているか。
- ・ 成果は将来的に市場の拡大あるいは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。
- ・ 目標未達成の場合、達成できなかつた原因が明らかで、かつ目標達成までの課題を把握し、この課題解決の方針が明確になっているなど、成果として評価できるか。
- ・ 設定された目標以外に技術的成果があれば付加的に評価する。
- ・ 世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓、又は汎用性のある成果については、将来の産業につながる観点から特に顕著な成果が上がっている場合は、海外ベンチマークと比較の上で付加的に評価する。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 大学又は公的研究機関で企業の開発を支援する取り組みを行った場合には、具体的に企業の取り組みに貢献しているか。

(2) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、又は実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(3) 成果の普及

- ・ 論文等の対外的な発表は、将来の産業につながる観点から戦略的に行われているか。
- ・ 成果の活用・実用化の担い手・ユーザー等に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

(4) 成果の最終目標の達成可能性(中間評価のみ設定)

- ・ 最終目標を達成できる見込みか。
- ・ 最終目標に向け、課題とその解決の道筋が明確に示され、かつ妥当なものか。

4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

本項目における「実用化・事業化」の考え方

当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることであり、さらに、当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することを言う。

なお、評価の対象となるプロジェクトは、その意図する効果の範囲や時間軸に多様性を有することから、上記「実用化・事業化」の考え方はこうした各プロジェクトの性格を踏まえ必要に応じカスタマイズして用いる。

(1)成果の実用化・事業化の見通し

- ・ 産業技術としての見極め(適用可能性の明確化)ができているか。
- ・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。
- ・ 成果は市場やユーザーのニーズに合致しているか。
- ・ 実用化に向けて、競合技術と比較し性能面、コスト面を含み優位性は確保される見通しはあるか。
- ・ 量産化技術が確立される見通しはあるか。
- ・ 事業化した場合に対象となる市場規模や成長性等により経済効果等が見込めるものとなっているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

(2)実用化・事業化に向けた具体的取り組み

- ・ プロジェクト終了後において実用化・事業化に向けて取り組む者が明確になっているか。また、取り組み計画、事業化までのマイルストーン、事業化する製品・サービス等の具体的な見通し等は立っているか。

◆プロジェクトの性格が「基礎的・基盤的研究開発」である場合は以下を適用

4. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

(1)成果の実用化の見通し

- ・ 実用化イメージに基づき、課題及びマイルストーンが明確になっているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会

的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

(2) 実用化に向けた具体的取り組み

- ・ 成果の実用化に向けて、誰がどのように引き続き研究開発を取り組むのか明確になっているか。

◆プロジェクトの性格が「知的基盤・標準整備等の研究開発」である場合は以下を適用

4. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

(1) 成果の実用化の見通し

- ・ 整備した知的基盤についての利用は実際にあるか、その見通しが得られているか。
- ・ 公共財として知的基盤を供給、維持するための体制は整備されているか、その見込みはあるか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ J I S 化、標準整備に向けた見通しが得られているか。注) 国内標準に限る
- ・ 一般向け広報は積極的になされているか。
- ・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

(2) 実用化に向けた具体的取り組み

- ・ 成果の実用化に向けて、誰がどのように引き続き研究開発を取り組むのか明確になっているか。

参考資料 2 分科会議事録

研究評価委員会
「生活支援ロボット実用化プロジェクト」(事後評価)分科会
議事録

日 時：平成26年9月17日(水) 10:00~17:40

場 所：WTC コンファレンスセンター フォンテーヌ AB

出席者(敬称略、順不同)

<分科会委員>

分科会長	向殿 政男	明治大学 名誉教授
分科会長代理	大道 武生	名城大学 理工学部 メカトロニクス工学科 教授
委員	五島 清国	公益財団法人 テクノエイド協会 企画部長
委員	五内川 拓史	株式会社ユニファイ・リサーチ 代表取締役社長
委員	杉本 旭	明治大学 理工学部 機械工学科 教授
委員	長竹 和夫	株式会社ADTech 代表取締役社長
委員	長谷川 勉	熊本高等専門学校 校長

<推進者>

植田 文雄	NEDO 理事
弓取 修二	NEDO ロボット機械システム部 部長
生井 達朗	NEDO ロボット機械システム部 主査
菅原 淳	NEDO ロボット機械システム部 主査
樋口 博人	NEDO ロボット機械システム部 主査

<実施者>

比留川 博久(PL)	独立行政法人 産業技術総合研究所 知能システム研究部門 研究部門長
藤川 達夫	一般財団法人 日本自動車研究所 ロボットプロジェクト推進室 室長
浅田 純男	一般財団法人 日本品質保証機構 認証制度開発普及室 室長
清水 雄一郎	一般財団法人 日本品質保証機構 認証制度開発普及室 主幹
大場 光太郎	独立行政法人 産業技術総合研究所 知能システム研究部門 副研究部門長

<評価事務局等>

関根 久	NEDO 技術戦略研究センター ユニット長
佐藤 嘉晃	NEDO 評価部 部長
保坂 尚子	NEDO 評価部 主幹
渡邊 繁幸	NEDO 評価部 主査

議事次第

【公開セッション】

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明
 - 5.1 事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメントについて
 - 5.2 研究開発成果、実用化・事業化の見通し及び取り組みについて
 - 5.3 質疑

【非公開セッション】

6. プロジェクトの詳細説明
 - 6.1 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発
 - 6.2 安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの開発
安全技術を導入した移乗・移動支援ロボットシステムの開発
 - 6.3 安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発
 - 6.3.1 配送センター内高速ビーグルシステムの安全技術開発
 - 6.3.2 安全技術を導入した配送センター内のフォーク型物流支援ロボットの開発
 - 6.4 安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットの開発
 - 6.4.1 安全技術を導入した人間装着型生活支援ロボットスーツ HAL の開発
 - 6.4.2 安全技術を導入した歩行アシストの開発
 - 6.5 安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発
 - 6.5.1 搭乗型生活支援ロボットにおけるリスクアセスメントと安全機構の開発
 - 6.5.2 安全要素部品群と安全設計に基づく搭乗型移動ロボットの開発
 - 6.5.3 屋外移動支援機器における安全エンジニアリング技術の研究開発
7. 全体を通しての質疑

【公開セッション】

8. まとめ・講評
9. 今後の予定、その他
10. 閉会

議事内容

【公開セッション】

1. 開会、資料の確認
 - ・ 向殿分科会長挨拶
 - ・ 出席者の紹介（評価事務局、推進者）
 - ・ 配布資料確認（評価事務局）
2. 分科会の設置について
 - ・ 研究評価委員会分科会の設置について、資料1に基づき評価事務局より説明

3. 分科会の公開について

評価事務局より資料2及び3に基づき説明し、議題6.「プロジェクトの詳細説明」を非公開とした。

4. 評価の実施方法

評価の手順を評価事務局より資料4-1～4-5に基づき説明した。

5. プロジェクトの概要説明

5.1 事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメントについて

推進者より資料6-1に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

5.2 研究開発成果、実用化・事業化の見通し及び取り組みについて

実施者より資料6-2に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

5.3 質疑

【向殿分科会長】 質疑に入ります。技術の詳細は午後からテーマごとに議論します。ここでは主として事業の位置付け・必要性、マネジメントなどの大枠の話をお願いします。

【長竹委員】 このプロジェクトは、規格も、成果も出ていると感心しました。今回は「安全」をキーワードにプロジェクトを発足しました。中身を見ると、ロボットを使う側の安全はリスクアセスメントも含めてかなり対応しています。しかし、実用化を考えると、例えばパーソナルモビリティで公道を走る場合の使用者以外の人たちの安全への対応は資料6-2の9ページに書いてあります。人間とロボットが共存する中で衝突が起きた場合、どの程度のものが許されるか。安全検証センターでの実験を私も見ました。物と物がぶつかる場合、人間と人間がぶつかる範囲であれば許されると思います。しかし、ロボットのように、金属や硬いプラスチックが人間にぶつかった場合、本当に許してもらえるかを含めて、最初に「安全」を考えた際にどのような議論が行われましたか。

【向殿分科会長】 許容可能なリスクはどの辺りか。人と人がぶつかるのはラグビーのようなもので問題がないけれど、機械と人間がぶつかった場合に許容されるリスクはどの辺りかという議論は行いましたか。

【産総研：比留川 PL】 詳細は藤川室長に説明してもらおうほうがよいと思いますが、最初に自動車の場合はどうかという話がありました。自動車の場合、基本的に問題になるのは死ぬか、死なないかです。自動車は重量が1トンあり、時速40km、60kmとスピードも出ているので、まずそこが基準です。しかし、ロボットは少し違うのではないかと、自動車のように重くないし、スピードもそれほど出ない。先ほどのダミーも自動車用ではありません。センサーの範囲がもっと小さい。1トンのものが自由速度40kmでぶつかるのではなく、せいぜい100kg、200kgのものが時速10km、20kmでぶつかる場合に評価可能なセンサーの範囲で設定しています。骨折か、どうかということ、そこがまず違うと思います。

もう一つは、自動車の場合、年間約4,000人が亡くなります。それでも社会は受容していることを考えると、安全というよりも、効用とのバランス、世の中の役に立つことと安全のバランスをどう考えていくかが最初に議論になりました。

詳細は藤川室長からお願いします。

【日本自動車研究所：藤川室長】 そのことは、プロジェクト開始以来、開発者の皆さんも交えて議論してきました。申し訳ないのですが、現状では答えがないというのが回答になります。

大きな理由は分野ごとに考え方が違うことです。今回のプロジェクトでは自動車メーカー出身者から電気メーカー出身者まで様々な人がいます。「お客様が手から血を出すのはほとんどない」という意見の業界の方もいますし、私のように自動車業界出身者は「死ぬか、死なないか」をまず大事にします。

全体的に言うことができるのは、受け入れ可能なリスクは自動車よりも厳しい方向に行くだろうということ。介護ロボットプロジェクトなどにも同じメンバーが参加して勉強していますが、分野やアプリケーションごとにリスクの社会受容性を考える必要があり、何か一つの答えがあるのではないというのが現状です。

【向殿分科会長】 「安全」は最も基本的な問題ですね。

【長竹委員】 回答がそのようになることは予想していました。普及を考えた場合、先週見学したサイバーダインのようなものは注意深く、また専門性がある人が横について使用します。モビリティなどでも、実証試験では皆さんそのつもりで実験しており、周りもそのように見ているので問題ありません。この絵を見ても、歩道を車椅子が1台走っている場合は問題ないと思います。しかし、これが雑踏に入った場合、過度に「安全」を考えると一歩も前に進めないという場合が出てきそうです。実用化を考えた場合、その部分は避けて通れない。これは難しい問題だと思うので、なかなか解がないと思いますが、ぜひそういう部分への取り組みを進めてほしいという、どちらかというトーンです。

【日本自動車研究所：藤川室長】 ありがとうございます。がんばります。

【向殿分科会長】 安全のレベルはベネフィット、コスト、リスクのせめぎ合いで、しかも時代によって違ってきます。これは議論しながら進めていく必要があります。そういう意味で、先駆的に面白い例が示されたと思います。自動車のように入ってから考えるのではなく、つくる前から考えることは重要だと思いますので、ぜひお願いします。

ほかにご発言ありませんか。

【五島委員】 今の話に関連する質問というよりは意見です。確かに、福祉用具、生活支援ロボットも含めて、工学的な安全性は重要です。しかし、既存の福祉機器の事故を見ると、その製品に起因するというより、現場の使い勝手や使用者側の状態の変化から起きる事故が多いように思います。現状を見ても、軽度の認知症の人が増えるなど、急速にお年寄りの身体状況は変化しています。

これは意見ですが、医療機器はきちんとした認証スキームがある。生活支援ということで、今後、我が国の高齢化が進む中で生活を支援していくロボットのリスクアセスメントのあり方、「安全」の評価認証の手法を検討していくことは、世界に先駆けて重要なことだと思います。我々は福祉機器を開発するメーカーと接する機会が多いのですが、これまでそうしたことをきちんと行っていなかったことは事実です。今回、生活支援ロボットにこのような取り組みを行ったことで日本が先頭に立つことになる。今後、高齢化の波はアジア、ヨーロッパも追随してくると思うので、波及効果は大きいと考えています。

【向殿分科会長】 どうもありがとうございました。この意見も、ある意味、支援する側の意見だと思います。比留川 PL、藤川室長、何かありますか。

【産総研：比留川 PL】 福祉機器に基準がなかったという指摘はその通りだと思います。国内で福祉機器を開発している会社は小規模のものが多く、そこまで対応できない面があったと思います。それを世界で販売する輸出産業にしていくには基準を策定し、評価して商品を販売していく必要があると思います。

それから、機器に起因するリスク、運用に起因するリスクは、基本的に機械安全の国際標準規格 ISO 12100 で、3ステップ法で、まず本質的安全設計を行い、それで機能を果たせないものは機能安全設計を行う。それでも残るリスクは運用でカバーするということになっています。ご指摘の通り、福祉系のもものは3番目のステップの比重が重く、1つ目、2つ目が手薄です。認知症の方が使われる場合や、介護現場を考えても、必ずしもいろいろな知識やスキルがある人ばかりではないので、3番目のステッ

に依存するといいいながらも、使う人がうまくできるかという難しい。そういう意味では、1 つ目、2 つ目をエンジニアが考えて、安全にしていけることが必要だと思います。

【NEDO：弓取部長】 ロボット機械システム部の弓取です。いろいろなお意見ありがとうございます。こうしたロボットを社会に実装していく際の「安全」は重要な指摘だと思います。これを考える時、まず合理的に想定し得る危険は徹底的につぶしていく必要があります。しかし、移動モビリティについて、曲芸乗りをする人が出てきたらどうするかといった問題もあります。そのような予期せぬ使い方をしないルールづくり、制度づくりも行い、社会に実装していく必要があると思います。

自転車は不安定な乗り物で、走っていなければ転んでしまいます。それに比べると、セグウェイや今回開発したロボットモビリティは安定しています。ただ、使い方によりけりです。まずは、実際に使ってもらい、メリットとデメリットを認識した上で、これは社会で使うべきであるという大きな声をいただきながら、制度づくりも我々から働きかけていきたい。そうした面で、今後、菅原が説明したように、社会実証事業を推進していく必要があると考えています。もちろん、安全を確保した上で推進するという事です。委員の先生方も、今後、実証事業を推進すべきであるとの考えをお持ちのようですので、ぜひご支援いただければと思います。

【向殿分科会長】 今の話は人間の合理的予見可能な誤使用というか、人間にも様々な人がいるので、その使い方も含めて、どのように安全を担保するか。ある意味安全哲学を策定しておくことは重要です。今回のプロジェクトは、そういう方向に向けて提案する上でよい機会だと思います。

【杉本委員】 試験を見ていると、技術的な安全の限界を証明しています。安全なロボットがあるわけではなく、使う人やロボットが安全に人間を支援しようとしています。使い方の限界としてデータを出した、これをユーザーに提供するので、この機能はユーザーであるあなたの財産です。使う人が考えるための情報を提供して、使う人がマネージしていく。情報を、責任を持って自主管理していく方法をユーザーがリスクアセスメントする。自分の状況は何か、普通の人とは違う、自分はこういう支援がほしいということで、ほしいものは個別に違う。だから、共通の方法で試験をしたから安全ということではなく、共通に言えることはこの程度だから、この機能という財産、支援という財産を、ユーザーが大きく取り出すか、自分たちでマネージしてください。公明正大な立場で対応する。大道芸人のように使う人もいられるけれど、それは関係ない。悪いことに使う人はだめです。まじめに使うので情報をくださいといったときに、こういう試験結果が有効に働くとします。

やはり自主管理で、自主活動で、被害防止規程を自分でつくる、管理・安全の体制をつくる。これは労働安全衛生法の第1条です。ユーザー自身の問題であり、そのためのいろいろな試験が提供され、情報がもらえる。自分が危害防止規程をつかって、責任を持つ。それによって具体的に自分のものになるという関係を整理していく必要がある。メーカーが安全なロボットをつくらうとしても、安全なロボットはありません。この前、拝見しましたが、試験をして、安全に使うための試験情報をユーザーに提供する。どのようにすれば自分の製品を最高に使うことができるか、そのことを自分たち（ユーザー）でつくるという基本、これはヨーロッパ方式です。そういう考え方で進めないと、責任が全部メーカーに来ては動けません。だから、大きな財産を与える、最高の契約関係を結ぶための条件づくりをしているという考え方でないと、なかなか販売できません。

【向殿分科会長】 ありがとうございます。どういう考え方をするか、それを日本から発信していくきっかけとして、考え方はユーザーにもあるし、マネジメントにもある。ルールその他風土も含めてあるとい

うことを、将来に向けた前向きのコメントとして伺いました。

【大道分科会長代理】 すばらしい成果を出し、次に進むベースができたと感じています。私は以前、フォークリフトのように人が運転する場合の事故は後ろから追突したといったものが多い。工場内でそういうことがよく起こる。大体、人間に原因があるという話を聞いたことがあります。

杉本委員の意見に近いのですが、使う側の、どういうところであればよく、大いに使ってくださいという話だと思います。ロボットと通常の車に乗っている人、そういう関係で使うのであれば、そこを突破していく一つの大きな手がかりができたので、このプロジェクトの内容ではないかもしれませんが、何か日本道路交通法に相当するものができるとういと思います。

【向殿分科会長】 ありがとうございます。これもバックアップというか、後押ししていただけるご意見です。実例ができて実証段階が近くなってきた。これを広げるためのルールづくりをどうするか、社会にどう浸透させていくか、皆さんがどのようにして安全を自分の責任で確保するか、次はそういう方向に進んでほしいという、次の目標を与えるコメントだと思います。

ほかをお願いします。

【五島委員】 今回のプロジェクトでは、機器の安全性、どちらかというと性能評価の部分はここまでしっかりと構築したという感想を持ちました。自立支援のロボット等を有効に活用していくには医学的な評価、先ほどでた話のように認知症の人が増え、身体状況が低下していく人が使うので、そういう人たちがロボットを使いこなせるか。そういう医学的な面からの評価スキームを構築する必要があります。

さらに、そのロボットを使って何をするか。例えば、買い物に行くなど、誰もがベッドの上で寝た生活を好んでいるわけではありません。リショナーのようなベッドを使って、一緒に入所されている人と会話を楽しむ、そうした社会的な効果があります。今回の NEDO のプロジェクトで、医学的な評価や社会的な評価まで含めた評価スキームは難しいと思いますが、今回、ベースになるものができました。使う側からすると安全であって当たり前の面があるため、自動車の運転免許証を発行するように、医学的な評価や社会的にどう目的でこの機器を使うのかを、我々も含めてもっと考えていく必要がある。そうしないと、生活支援ロボットが使用されるようにならないと思います。

【向殿分科会長】 ありがとうございます。

【五内川委員】 今のお話とは少し角度を変えた話ですが、これも質問というよりは意見です。今回の検証の対象は最終製品のイメージが強く、自動車で言うと完成車だけ評価した形です。間口を広げる意味で、モジュールや機能的な部品、そうした構成要素の評価が行われるべきではないかと感じています。

これらのロボットはいずれも一品料理的な感じが強く、各社各様に一から十まで全部つくっています。垂直統合的な話はしばらく続くと思いますが、将来を考えると、横串で汎用的に使う部品、いずれはそういう水平分業的な形でロボットをつくり、構成していく世界もあると思います。キーデバイスというか、特にロボットの場合はセンサーや足回りの機構部分など、そうしたものはある種のプラットフォーム的な使われ方をしていくと思います。

今回これだけの成果が出たので、もっといろいろな方に使ってほしい、多くのメーカーにいろいろなものを検証してほしいと思います。こうしたモジュール的なものの検証あるいはプラットフォーム的なものの検証も行うというアピールをもっとしてよいと思います。もちろん、検証センターの稼働率の問題があると思いますが、もっと広がりが出てきてよいという感想を持っています。

以上、意見です。

【産総研：比留川 PL】 ありがとうございます。ご指摘のとおりだと思います。今年6月から始めたプレ事業は部品も対象にしており、実際に部品の安全試験を受け始めています。

また、プロジェクトの中では要素技術的なものとして国際標準規格 IEC61496、ビジョンセンサーの安全性試験に取り組んでいます。ただ、こちらは、IEC61496 自体はありますが、レンジファインダーの次にほかのセンサー、例えばステレオや単孔の使い方について IEC61496 をどうするか、規格を議論中です。IEC61496 の2になるか、3か、4かわかりませんが、議論が並行して進んでいます。この議論が進んでくると、安価な安全距離センサーの認証スキーム、試験方法に取り組みたいと思っています。

【杉本委員】 少し反論があります。先ほど機械安全国際規格の SIL2 レベル(Safety Integrity Level)の関係で行うと言われました。SIL2 は信頼性です。信頼性は、なるべく故障しないことです。安全性は、安全計測の故障で、故障すれば止まります。人間支援をしているのに、故障したら支援できません。故障して電源が落ちたので支援が中止されると人も一緒に倒れてしまう。私は、人間支援である限りは信頼性が重要だと思うので、故障の仕方でも安全のレベルを上げるよりも、人間支援用のセンサーやシステムは故障をなるべく少なくすべきだと思います。人間を助けているわけですから、ロボットの支援を中止するので人間が支援してくださいというのではなく、なるべく故障しないように信頼性を上げるという基本姿勢があってもよいと思いましたが、いかがですか。

【向殿分科会長】 本質安全を行い、次に機能安全、その次に使用上の情報でユーザーとの注意事項という話ですが、比留川 PL は最初に本質安全を行い、今は機能安全、要するに信頼性を上げる話をしている。SIL2 はあまり高くないけれど、信頼性は相当議論していると思います。いかがですか。

【産総研：比留川 PL】 信頼性を高めることに異論ありません。ただ、コストとの兼ね合いもあります。何億円もする産業機器ではなく、介護機器では5万円や10万円で販売していこうという話があります。このプロジェクトを手がけるメーカーからも悲鳴が上がりました。SIL3 の安全レベルと言われても、民生品として製作するとコストが合わないという問題があります。信頼性が高いほうがよいに決まっていますが、コストとの兼ね合いを考える必要があります。これは2,000万円ですが買いませんかという話になりかねないところが悩みです。信頼性とコストをどう両立させるか、まだ答えが出ていません。

【杉本委員】 少し誤解があります。信頼性、SIL2 ですが、安全レベルが SIL3 や SIL4 になると故障の仕方でも考えるのでコストが高くなります。防爆仕様にする、しないで大きく違ってきます。つまり、つくり方によって大変なお金がかかる。私は、故障したら止まるという特性を要求するのではなく、なるべく止まらないようにするアプローチでよいと思います。安全性のレベルは低いかもしれませんが、故障しないというアプローチで対応する。故障したからといって止めるなどということです。安全性の中身を追究するより、むしろ故障しないという側に留まってよいと思います。そのほうがコストは安いからです。

【向殿分科会長】 これは「安全」についての本質的な意見で、「安全」の専門家を入れたら、まず本質安全設計を行い、それに対して安全装置やセンサーなどで対応する。信頼性が低いとよく止まるので、信頼性を高くする。その前に行くべきことがあるというのが本来の考え方です。この辺りを議論していると切りがありませんので、どうしますか。

【杉本委員】 もう結構です。

【産総研：比留川 PL】 杉本先生がそういう意見をいわれるとは少し意外でした。ありがとうございました。

【向殿分科会長】 ほかにお願いします。

【長谷川委員】 少し細かいことになりますが、マネジメントの中で、平成23年度末に一応卒業しているプ

プロジェクトがあります。平成23年度末の成果は、中間評価で諮っていましたか。

【NEDO：菅原主査】 はい。

【長谷川委員】 卒業後、このプロジェクトのどういう成果につながったか明確にする必要があると思います。

今回の説明では、この部分はほとんど触れていません。その辺りは明確にしたほうがよいと思いました。

【NEDO：菅原主査】 途中で卒業したコンソーシアムの成果は、成果報告書をウェブで見ることができます。

NEDO のホームページでサイト内検索の欄に各企業の名前をキーワードとして入れれば、成果報告書を見ることができます。NEDO は卒業したコンソーシアムに関して ISO13482 の取得をもう一度考えてみないかとお願いしたいと考えています。

【向殿分科会長】 長谷川委員、よろしいですか。

【長谷川委員】 はい。

【向殿分科会長】 ほかにどうぞ。

【長竹委員】 先ほど菅原主査が説明された資料6-1の23ページに論文がたくさん出ています。研究発表も、私が国際ロボット展などでNEDOのブースを見るかぎり、十分成果をPRしていると感心しています。ところで特許出願が5年間で40件というのは妥当な数字ですか。企業から見ると、一つの開発の中で少なくともこのくらいのもので出てよいという気がします。その点はいかがですか。

【NEDO：菅原主査】 企業によってばらつきがあります。ゼロから開発しているサイバーダイン社の出願は多いのですが、安全技術に関する部分のみ携わっていた企業は少ない。NEDOとしてどうかと言われると、企業それぞれの事情があるので、基本的にはお任せすることになります。

少し加えますと、こういう特許は、いわゆる日本版バイドール法が適用され、基本的には、特許を書いた企業が特許権を持ちます。しかし、有効活用していないことをNEDOが後々発見した場合、使わせてもらう仕組みになっております。

【産総研：比留川 PL】 ご指摘のとおり、特許は多少寂しいと思います。

1点だけ確認ですが、今回のプロジェクトでは基本的にロボットの開発自体は企業が自前の予算で行いました。プロジェクトの対象は、企業が開発したロボットを安全にする技術だけです。ロボットの開発全部がプロジェクトの対象ではなく、安全にする技術の部分だけがプロジェクトの予算を使用できる範囲です。こういうロボットをつくったのに、なぜこんな特許出願件数かという指摘については、このプロジェクトはロボット全体の開発でないことが一番大きな要因だと思います。

【向殿分科会長】 私も確認したいことがあります。このプロジェクトで、日本が生活支援ロボットの分野で世界を引っ張っていくきっかけをつくっていると言ってよいですか。ISOの基準を制定して、生活支援ロボットの認証スキームをつくった。3件ですが、認証も行った。世界的に見ると、日本はこの分野で進んでいる。それは、このプロジェクトの成果と言ってよいかという確認です。

【産総研：比留川 PL】 そう言ってほしいと我々は考えています。もう少し正確に国内外の状況を説明すると、研究開発投資という意味での生活支援ロボットへの投資は日本がずば抜けて多いと思います。そういう意味では、世界を引っ張っています。私が内々に聞いている数字を足していくと、プロジェクトの開発期間中に、国内でこの関係の開発に投じられた金額は250億円くらいです。そういう意味では、かなり投資が行われています。その数字は、産業用ロボットの市場規模が5,000億円から6,000億円。通常の開発投資は売上の約5%ですから、産業用ロボットの研究開発投資に匹敵する額です。生活支援ロボットの市場規模はまだ小さいですが、大きな投資が行われていると思います。

ただ、懸念というか、外国で何もしていないかという、アメリカで50~60億円の出資を受けたベンチャー企業が輩出しています。例えばiRobotは65億円、リシンク・ロボティクスは産業ロボットですが、やはり60何億円。そういう意味では、アメリカではリスクマネーが数10億円の規模でロボットベンチャー企業に投資を始めているので、のんびりしていてよいという状況ではないと思います。しかも、そのうちの数社をGoogleが買収して、これからどうするという懸念があります。しっかり進めていかないと、日本が断トツの首位で、のんびり進めていても大丈夫という状況にはないと思います。

【NEDO：弓取部長】 生活支援ロボットは日本が先行して開発しており、ISOも取得したことで世界のトップを走っていることは間違いないと思います。ただ、それで終わりかという、そうではありません。安全検証センターもでき、認証機関もあります。しかし、まだ3種類の生活支援ロボットにしか適用できていないので、その範囲を広げていくべきです。世界に先駆けて安全検証を行うことができるセンターをつくったので、そこにアジアや欧米からも生活支援ロボットの検証を呼び込んでいく。物が動き、人が動き、そこに情報が落ちていく、こうしたことを推進していく必要があると思っています。

今回、国の事業で一つのきっかけをつくることができたので、この重要性を社会に広めていく必要があります。広い支援の声がないとこういう事業は進めることができません。このロボットは便利である、社会に必要なことを実感してもらおう活動とともに、適用するロボットの範囲をさらに広げる。安全検証の活動の幅も広げていく必要があると思っています。ぜひ、ご支援をいただきたいと思っています。

【向殿分科会長】 ありがとうございます。ほかにどうぞ。

【長竹委員】 今、範囲を広げていきたいという話がありました。今回、プロジェクトの対象ロボットを見ると、一つは福祉に近いアシストを行うもの、もう一つはAGV（自動搬送装置）のロボット化のように工場の中で安全にAGVを動かすためのもの、そして、パーソナルモビリティでした。ほかに用途を広げるとすると、これ以外のところで生活支援として開発を進めたいものがありますか。

【NEDO：弓取部長】 例えば、介護分野におけるコミュニケーションロボットがあります。人形のようなロボットを抱くとお年寄りの心が癒される場合があります。しかし、これは変な方向に使うこともできます。癒すこともできれば、癒さないこともできる。人の心に与える影響のあり様は慎重に考える必要があります。かわいいから癒されるだけならよいですが、人の気持ちを持ち上げることもできれば落とし込むこともできるかもしれない。どう判断基準をつけるのかという大きな問題があります。

また、生活支援ロボットの中でも、パートナーロボット、テレコミュニケーションロボットなど、これからはアバター型のロボットが普及してくると思います。オフィスの中でも、在宅勤務でも、パソコンを通して文字で通信をするのではなく、自分と同じ目線を持ったアバターがオフィスを動き回る時代が来るかもしれません。そういう状況になったときに、アバター型のロボットの機能安全はどうあるべきか。これはあまり問題ないかもしれません。むしろ、先ほどのコミュニケーションロボットは問題が大きいと思います。音声や動きで人に影響を与えるだけに注意を要します。

【産総研：比留川 PL】 今回の、移動型、搭乗型、装着型の3つのカテゴリーは、かなり広範囲をカバーしています。介護ロボット関係のプロジェクトを昨年からはじめましたが、この3つのカテゴリーで相当カバーできます。生活支援の用途を考えると、入っていないものの一つはセンサーです。ロボットであるかは別として、見守るセンシング技術、例えばセキュリティとして使用することは、この企画あるいはプロジェクトの対象外です。対象にした場合、立ち上がりは早いと思います。

もう一つはマニピュレーションです。これは対象にしたかったのですが、できませんでした。今の物

流の手搬や、介護を行う際の物を取る、人の手助けをするという意味でのマニピュレーションが抜けています。応募段階ではいくつか提案がありましたが不採択になりました。安全性を考えると、いくら何でもこれは危ないという提案でした。我々としても、この分野の安全検証も研究したいので、マニピレーターが入ってくるとよいと思っています。特に労働安全衛生総合研究所からそういう意見がありましたが、審査の結果、安全性が確保できそうにないということで不採択になりました。そういうことで、今、5年間取り組んできた中で抜けているのはその2つ、センサー系とマニピレーション系です。

今、センサーそのものが利用者に対して危害を及ぼすことはあまりありません。ただ、センシングで失報、誤報があると問題になります。例えば、浴槽での安否を確認していますが、失敗すると溺死につながる恐れがあります。センサーの性能が不十分なために危険な事象を引き起こすことは多いのです。それをどう考えるかが課題です。お風呂に浴槽の見守りをするセンサーがあった。なければ、そこで溺死した場合は本人の責任となり、誰が責められるということもないのですが、見守りセンサーが付いていて溺死した場合にはメーカーが責任を問われまいかという問題がでてきます。それも、安全の効用とリスクをどう考えるかという大きな課題であると思っています。

これを皆さん質問しているのですが、答えに窮しています。大きな警備会社の執行役員に聞くと、問題ないと言われました。どうしてかということ、なければ死んでいた、付いていれば救える場合が増えるので、メーカーの責任は明らかに大丈夫だとのことでした。しかし、この意見に社会的合意があるわけではないので、考えていきたいと思っています。

【向殿分科会長】 ありがとうございます。特に「安全」は大事な問題ですね。

【杉本委員】 「安全」の考え方について、私がヨーロッパの人たちから教わった最大の知識は、一番上にISO/IECガイド51がある。これは理念です。それから、技術屋の基本規格としてISO12100があり、その下に共通に使うものがある。最後に個別規格があるというように上から落ちてきます。一番上に何を置くか、理念に何を置くか、安全規格を置いたことは、人間支援にとって本当によいことかと思いません。本当は、福祉の理念が一番上のA規格になるべきではないか。人間型の機械が人間に代わって支援する場合、人間が支援した際に起こるトラブルは許されるべきではないか。お風呂の事例のように、滑ってしまうことも起きます。人間が行っていることの失敗は確率の問題で、信頼性を上げることが重要であり、許していこうということが一番上に置かないと、私の意見である、そういう考え方がある、という話になってしまいます。だから、機械が人間を支援するとどうい利益があり、皆さんがどういことを許していくかを共通にする必要があります。その共通する考え方を生活支援ロボットのガイドの分野ではA規格につくり、その手段として「安全」がある。「安全」が一番上にある理念ではなく、あくまでも福祉で人間型機械が人間を扱う際の手段として、うそをつかないというか、その時代のできることというか、そういうこと的手段として「安全」を追求していると考えないと、福祉医療の考え方が、人により千差万別になると思います。

【向殿分科会長】 わかりました。これも今回のプロジェクトの成果の先にある話です。機械安全の体系から見ると、福祉のための規格の体系があってもよいのではないかと。そのためには、人間の幸せ、やりがい、生きがいなども入ってくる規格体系を考える。そのための一つの道具として機械安全があるのではないかと。そういう、これから先のことに対する提案ですね。この成果に対するバックアップだと思います。

予定の時間が来ました。まだご質問があるかと思いますが、プロジェクトの詳細は午後にご質問等お受けしたいと思います。

【非公開セッション】

6. プロジェクトの詳細説明

省略

7. 全体を通しての質疑

省略

【公開セッション】

8. まとめ・講評

【向殿分科会長】 ここから先は公開になります。皆さんの発言は公開され、議事録にも記載されますので、ご留意願います。それでは、委員の皆様から講評をいただきます。長谷川委員から始めて、最後に私に来るという流れで進めたいと思います。それでは、長谷川委員、お願いします。

【長谷川委員】 本日はいろいろとありがとうございました。全体として感じたことは、資料 6-1 ページ 10にある研究開発項目 1がこのプロジェクトの最大の成果であり、今後も残し、発展させなければいけないと思います。ISO13482の策定、安全検証センター、スキームの確立、これらが基盤となっていていろいろところで使用できると思います。また、個別テーマの話でも認証を受けて商品化が進んだ、あるいは、進むものが出ています。これもすばらしいことだと思います。

午前中の公開セッションで、将来に向けた話が出ました。これを次に向けていくところで改めていろいろな形でブレークダウンして個別に一つ一つ詰めていく必要のある項目が指摘されました。そこに結びつけていくことが次の重要なポイントだと思います。そうした議論ができたことはよかったですと思います。それを具体的に進める方策を考えてほしいと思います。

簡単ですが、こうしたことを感じました。

【向殿分科会長】 ありがとうございました。長竹委員、お願いします。

【長竹委員】 本日は、有意義な会議に参加させていただき、ありがとうございます。やはり人と生活支援ロボットが共存していく中で一番キーになるのは「安全」です。安全性検証の手法が、概念ですが、ISO 13482という形で認証されたことはよかったですと思います。日本が世界に胸を張り、先陣を切ることができる技術は自動車であり、ロボットだと思います。ただ、ロボットは、市場規模がまだ大きくありません。期待は大きく、話題も先行していますが、事業として企業が参入しようとする、どうしても壁があります。そのような中で、こういう形で指針を示した。また、4つのカテゴリー、8つの事例研究発表の中にも実用化に向けて、これなら実用化に進めそうだとこのことが見えてきています。ぜひこの8社は実用化に向けて研究を進め、他の模範になってほしいと思います。

ぜひお願いしたいことは、先ほどの私のコメントの中でも言いましたが、せっかく ISO13482 という国際標準を取得した。その具体化もあるので、ヨーロッパに負けずに推進してほしいということです。

もう一つは、特許提案は官がある程度主導し、後発国が、あたかも自分たちの技術だ、手法だと主張し、その縛りを受けることがないようにしてほしいことです。そうした点もぜひ主導して進めてほしいと思います。

【向殿分科会長】 ありがとうございました。杉本委員、お願いします。

【杉本委員】 分科会長である向殿先生はフェイルセーフの専門家です。安全性に関して先生が、相当前でしたか、始めていただいて、私もそれに付いてきたので、今日の発表は感慨無量です。もう何十年前ですから、厳しい「安全」をよく知っていると思います。安全確認をしなければだめだ、フェイルセーフで

なければ通用しないと強く推進してきたことが徐々にやわらかくなってきました。今回も感じましたが、人間支援ロボットの知見は誰の財産かという、日本の財産かもしれませんが、それを待っているハンデキャップを持つた皆さんの人たちの財産です。そういう人たちが一番上にいる。私を助けてくださいということが一番上にあるはずで、それをA規格にして、「安全」は手段として、その下のB規格の中に入ってくるという形が一番よいと今回、感じました。

もう一つは、リスクアセスメントについて、リスクに絶対安全というものはないことです。何かというと、必ずリスクが残る。最後に残るのはどういうリスクかというときに、「リスク」と言うのはだめです。「どういう被害が出るか」です。この程度の被害ですということです。確率の範囲ではありません。だから最後に実証試験ではどういうことが起こるかを示す。実証試験を行い、こういうことが起こると言わなければだめです。この程度ですと言えなければいけない。この程度のことが最後にあるという情報ももらい、今度はリスクをコントロールして、生活支援ロボットを使う側が、良い情報をありがとうということができるようにする。この程度であれば、私たちはこうしてコントロールし、能力がある支援ロボットの財産を使って、ハンデキャップをノーマライゼーションする。こういう関係です。

先ほども、脱線はしませんという回答がありました。リスクで言う限りは、最後にはいろいろなリスクがあっても、そのリスクによる被害がどの程度にまで抑えられていると示すために、被害の実証試験を行い渡すのがよい。あくまでも、使いたいという立場の人に、使ってくださいという立場の人が情報・データを正直に与えると、その情報をもった側は使いこなすことができるようになると思います。例えば、日本の新幹線は、安全装置を切ると時速30kmしかだせません。自動的に抑えています。人間に委ねることはできますが、被害が小さくなる状態でしかできないわけです。申し訳ないですが、中国の新幹線は、ATCを切っても時速200kmでも時速300kmでも走れます。だから衝突事故を起こしてしまいました。安全装置が切れると、最後は人間にお願いすることになる。その際の被害を抑えて、この程度ですという説明をしてもらくと、生活支援ロボットという財産は、ユーザーの側、患者の側、ノーマライゼーションを求めているハンデキャップがある人たちに渡るのはではないか。そういう精神で進めていくことができればよいと思いました。

【向殿分科会長】 どうもありがとうございました。次に五内川委員、お願いします。

【五内川委員】 まず、このテーマについて、安全評価は一企業の手に残ると思うので、国が大きなインフラ部分を整備することは意義があると思います。今回、国際規格を提案し、リードして決めた点、また、安全検証センターを設置し、将来的な運営の問題はあるものの、まずは企業が実際にそこに持ち込み、検証するというハードウェアのインフラを整備したので、かなり大きな成果があったと思います。

今後の展開としては、ハードウェアからソフトウェアに知的資産が移っていく必要があると思います。今回は導入編ということで8社が協力し、検証を行いました。これからできるだけ事例を積み重ねて、どういうケースが本当に起こり得るのか、ロボットの種類も広げていく必要があります。個別事例も積み重ねて、そこで評価はこうするというソフトウェアというか、データベースになるのか、検証のバリエーションになるのかわかりませんが、目に見えないものを蓄積していく。そうすれば、それを持ち込んだ日本企業にとってもメリットがあるし、世界のロボットの検証を呼び込むという意味でも力になってくるので、ソフトウェアを充実させてほしいと思います。

もう一つは、今回のケースでは、最終製品をかなりイメージして持ち込んでいます。始まっていると聞いていますが、モジュール、部品を含めて、構成要素の知見もこれから積み上げてほしい。もう一つ

の方向性は、より社会システム側というか、製品に関してはかなり実証ができていますので、それを使うユーザー側の現場のフィールドでの実証もしてほしい。それから、できれば法規制を含めて様々な提言を行っていくことで、社会システムの変革につながる提案ができるセンターになればよいと思います。

特に重要なことは、これから、評価した製品が商品として市場に出ていき、実際に使われ始めると、こういう事故が起きた、事故に至らなくてもヒヤリ・ハット事例としてこういうことが起きたなど、商品として出た後の情報も可能な範囲できる限りフィードバックしてもらい、最初の評価と比べてどうかという突き合わせをしていくことです。一回評価して手離れした商品として販売されてどうなったか分からないという、ことではフィードバックが効かないと思います。企業とも協力して、そういうソフトウェア資産を積み重ねていくことが望まれると思います。

そういうことも含めて、スタートとしては相当な成果を出したと感じました。

【向殿分科会長】 どうもありがとうございました。次に五島委員、お願いします。

【五島委員】 どうもありがとうございました。私自身、事後評価は初めてですが、外から平成 21 年から生活支援ロボットを見ていました。本日改めてプレゼンテーションを聞いて、重要であることを認識しました。午前のお話で NEDO の菅原主査が説明されましたが、ロボットのことを 1998 年からずっと手がけてきた。平成 21 年にこのプロジェクトを立ち上げ、先生方が言われたように、安全性検証の評価スキームを構築することがこれまでの集大成となっている。その結果として、ベースになるものが一つできたと思います。

今回、企業に協力してもらいながら ISO13482 の規格ができたと思います。今後、団塊世代がお年寄りの仲間入りをすると、しっかりとご自身の意見を発言するお年寄りが出てくると思います。その中で、ロボットを活用した自立支援、機器開発はますます求められます。最後のところで少し話が出ていましたが、ISO13482 をベースにしながら個々の規格をどのように考えていくべきか、先ほどの休憩時間中に自分なりに考えました。福祉機器・生活支援ロボットを見ると、どうしても多品種少ロットの生産になります。いろいろな人に合わせていこうとすると、様々な製品が必要になってくる。私見ですが、一つの製品を規格にしていくより、個々のロボット技術を規格化し、組み合わせてノーマライゼーションを進めていく。その手段として機器を使う、安全性を実現して使う必要があると思います。

本日、私は当事者の立場で参加しました。これから個々の規格を制定するに当たり、現場での意見、現場でどういう使われ方をしているか、どういう人が使うのかということも踏まえて規格を考える必要があります。障害をお持ちの方と特に接していると、ある程度のリスクがあっても、自分がそれ以上に必要なものがあれば、そこは承知で使うと思います。何もかも 100%安全ということはあり得ないと思いますので、そうしたことも加味しながら、次の規格に進むとよいと思います。

【向殿分科会長】 どうもありがとうございました。大道先生、お願いします。

【大道分科会長代理】 本日はどうもありがとうございました。このプロジェクトが始まる時は、どういうことになるだろうという感覚を持ったのですが、NEDO、比留川 PL、参加企業にすばらしい成果を出してもらったと思います。少し言いすぎかもしれませんが、驚きをもって会議に臨んだ次第です。

ロボットがなかなか売れないということで、この後、ビジネスをどのようにしてつくっていくかが課題になる中で、安全認証という一つの強力な武器を手に入れたと思います。安全性がないから売れないという議論が長い間行われてきました。そういう意味ですばらしい成果が出ています。その成果を出すに当たり、やはり継続は力であると痛感します。このせつかく手に入れた武器を継続して織り込んでい

く、そういう努力が必要だと思えます。今いろいろなロボットのプロジェクトが並行して走っていますが、その中でも、評価をどうするか、評価の仕組みがないと指摘されるプロジェクトもあります。そのことがプロジェクトの問題ではないのですが、今回こういうものができたので、そういうプロジェクトにアピールして、必要であれば次のプロジェクトもみんなで立てていく展開を期待します。

このプロジェクトの最初の目標の中に、この成果を使っていろいろな人がロボットに参加しやすくなるということがありました。中小企業も含めて、より多くの人たちに参画してもらい、なるほどロボットががんばっていると思われるようになればよいと、本日はそういう意を強くしました。今後も継続的に展開してほしいことを強調したいと思います。

【向殿分科会長】 どうもありがとうございました。私も一言申し上げます。私も「安全」ということを包括的に広く手がけてきました。産業ロボットの安全性についても携わってきましたが、隔世の感があります。2006年だったと思えますが、経産省で次世代ロボットの安全確保のガイドラインを策定しました。それは機械安全を頭に置いて策定しました。それから思うと隔世の感があり、今回は ISO 規格まで持ってきている。このプロジェクトでは選考の委員長を務め、スタートする際にいろいろな人の意見を聞くと、まず安全認証とは何かがよくわかっていない、機能安全とは何か、その辺りから始めたため、これは大変なことだと思いました。しかし、本日聞いてみると、それをきちんと理解し、使いこなして、安全検証センターができたことは大変大きいことです。私は、これで峠を越えたと思えます。

今度は、現場の意見・要望を聞いて、それに合ったロボットをつくるということで、ほとんど個別対応です。私は、その対応ができると思っています。絶対に安全でないことは明らかでリスクはあります。それでもベネフィットがあれば ISO 認証を取得しようという人が世の中にはたくさんいます。そのときにどこまで許すかということに関して、この検証センターの存在が大きいと思えます。そういう意味で、このロボットに長く携わっている経産省、NEDO に敬意を表するとともに、このプロジェクトを担ってきた比留川 PL に感謝します。

これからこれをどう持っていくかという方向が重要です。今までは機械が基本でしたが、最後には人間がリスクを受け入れ、自分のベネフィットのために「安全」とはどのようなものをみんなが理解してくる時代、ロボットの安全の文化が日本に定着する方向に向かうことが大事だと思えます。そういう意味で、このプロジェクトは、総括して大変うまくいった、成功だと思えます。次はどこに向かうべきか、思想というか、理念というか、哲学も明確にして、各メーカー、各機関が努力するきっかけになったと思えます。参加した企業の方、NEDO、経産省の皆さんに敬意を表します。

以上、私の意見とさせていただきます。本日はありがとうございました。

それでは、推進部長、プロジェクトリーダーから、最後に一言ずつお願いします。

【NEDO：弓取部長】 いろいろなご意見をいただき、ありがとうございました。ロボット開発は何とか役立つもの、使ってもらえることができるもの、使ってよかったと言われるものに技術を仕上げていきたい。企業の研究開発の場だけでなく、社会の現場に何としても持ち込みたいという要望が強くあります。

日本は今までリスクをなかなか許容しない社会だったと思えます。しかし、これからは、ある程度リスクを許容してでもベネフィットを追求する、夢がある、もっと便利な社会をつくる、みんなでそういったコンセンサスを構築していこうという機運に世の中がなってくる、あるいは、そういう方向に持っていく必要が我々にはあると思えます。我々も恐れず、このプロジェクトから生まれた成果が、ぜひ社会の中に溶け込んでいくように、次の一手を打てるよう、国に対しても要望していきたいと思えます。

どうなるかわかりませんが、何としても研究の成果だけで終わらせたくないという思いを強く持っていますので、今後ともぜひご支援をよろしくお願いいたします。

本日はどうもありがとうございました。

【産総研：比留川 PL】 本日は貴重なご意見をたくさんいただき、ありがとうございました。プロジェクトを推進してきた立場としては、皆様にも少しは評価していただける成果が出たと思い、感謝しています。

杉本委員が言われた、トップにある理念は安全ではなくユーザーであるという言葉が身にしみました。役に立っていくらでするので、そう考えると私も考え方が180度違ってくるので、自分の頭の中もこれから整理していきたいと思います。

プロジェクトとしては、私は、愛知万博のころからいくつかのプロジェクトの運営に携わってきました。その中で、今回のものがある意味、一番楽でした。参加企業がまじめに熱心に展開してくれたため、よけいな叱咤激励はあまり必要ありませんでした。そういう意味で皆さんに感謝しています。

「安全」について、私も峠を越したという気がしています。今後は本当に役に立つものを、効用とリスクのバランスをいかにとって社会に受容してもらうかが重要だと思います。とにかく、まず販売する、世の中に投入していくことが大事だと思うので、今後とも皆様にはご支援いただきたいと思います。

本日はどうもありがとうございました。

【向殿分科会長】 どうもありがとうございました。

9. 今後の予定、その他

10. 閉会

配布資料

資料 1	研究評価委員会分科会の設置について
資料 2	研究評価委員会分科会の公開について
資料 3	研究評価委員会分科会における秘密情報の守秘と非公開資料の取り扱いについて
資料 4-1	NEDO における研究評価について
資料 4-2	評価項目・評価基準
資料 4-3	評点法の実施について
資料 4-4	評価コメント及び評点票
資料 4-5	評価報告書の構成について
資料 5-1	事業原簿（公開）
資料 5-2	事業原簿（非公開）
資料 6-1	プロジェクトの概要説明資料（公開）
	5-1. 事業の位置付け・必要性および研究マネジメント
資料 6-2	プロジェクトの概要説明資料（公開）
	5-2. 研究開発成果及び実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて
資料 7-1	プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
	6.1 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発
資料 7-2	プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
	6.2 安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの開発 安全技術を導入した移乗・移動支援ロボットシステムの開発
資料 7-3-1	プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
	6.3 安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発
	6.3.1 配送センター内高速ビークルシステムの安全技術開発
資料 7-3-2	プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
	6.3.2 安全技術を導入した配送センター内のフォーク型物流支援ロボットの開発
資料 7-4-1	プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
	6.4 安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットの開発
	6.4.1 安全技術を導入した人間装着型生活支援ロボットスーツ HAL の開発
資料 7-4-2	プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
	6.4.2 安全技術を導入した歩行アシストの開発
資料 7-5-1	プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
	6.5 安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発
	6.5.1 搭乗型生活支援ロボットにおけるリスクアセスメントと安全機構の開発
資料 7-5-2	プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
	6.5.2 安全要素部品群と安全設計に基づく搭乗型移動ロボットの開発
資料 7-5-3	プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
	6.5.3 屋外移動支援機器における安全エンジニアリング技術の研究開発
資料 8	今後の予定
参考資料 1	NEDO 技術委員・技術委員会等規程
参考資料 2	技術評価実施規程

以上

本研究評価委員会報告は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）評価部が委員会の事務局として編集しています。

平成26年11月

NEDO 評価部

部長 佐藤 嘉晃

主幹 保坂 尚子

担当 渡邊 繁幸

* 研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。

(http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html)

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地

ミューザ川崎セントラルタワー20F

TEL 044-520-5161 FAX 044-520-5162