

3. 各テーマの成果詳細

3.1 次世代産業用ロボット分野

3.1.1 柔軟物も取り扱える生産用ロボットシステム

3.1.1.1 自動車生産ラインにおける柔軟物取り付け作業の自動化

【実施者:国立大学法人東北大学】

1) 研究概要

日本の主力産業である自動車には、ワイヤーハーネスがいたるところに張り巡らされている。そこで、自動車組み立て工程において、ワイヤーハーネスあるいはワイヤーハーネス用シール・チューブ・シートなどの柔軟物の組みつけの一部を自動化することを、本研究開発の目標とした。

柔軟物を取り扱うことができるロボットシステムを開発しても、実際の生産現場に応用できなければ意味が無い。そこで、本研究開発では、自動車メーカーであるスズキ（株）と共同し、実際の自動車組立工程において、柔軟物取り付けのどの部分が自動化できるのか、どの部分を自動化すれば最も生産効率を上げることができるのか、を綿密に調査し、実際の組立工程に応用可能な、柔軟物取り扱い生産用ロボットシステムを開発することとした。

ロボットによる柔軟物のハンドリングには、視覚情報が欠かせない。ところが、実際の生産工程では照明条件が次々刻々と変化するため、大学などで研究開発された成果を生産工程にそのまま応用するのは困難であった。そこで、本研究開発では、スズキ（株）の自動車組み立てラインを対象として、照明条件変化、ノイズ、障害物による対象物遮蔽問題などの悪条件に対応した高速・高信頼の視覚センサシステムの開発を、これまで数々の優れた視覚システムを開発してきた（株）ビュープラスに再委託した。

このような柔軟物の取り扱いができるロボットシステムの実現のためには、以下の基礎技術が必要であった。

- A) 柔軟物を迅速かつ高精度・高信頼度でハンドリングできるマニピュレーション技術
- B) 柔軟物を知的にハンドリングするための分散協調センサ利用技術（能動分散ビジョンシステム、力制御、力センサ）
- C) 短時間で簡便に作業を提示できる次世代教示機能

それぞれの基礎技術を、東北大学大学院工学研究科、東北大学大学院情報科学研究科、（株）ビュープラスが分担して開発した。また、実証ロボットシステムの開発および実証実験を、東北大学大学院工学研究科とスズキ（株）が共同で担当した。

2) 成果詳細

(1) 柔軟物を迅速かつ高精度・高信頼度でハンドリングできるマニピュレーション技術の開発

- ① インパネハーネスの取り付けのための、ハーネスクランプの把持、挿入手法の開発
自動車生産ラインにおけるインパネハーネスの取り付けは、ハーネスに付けられたクラ

ンプを、インパネメンバー上にある複数個の固定用穴に挿入することで行われる。そこで、ロボットハンドによるハーネスクランプの把持、固定用穴への挿入を安定して行う手法を開発した。

ロボットハンドでインパネハーネスを安定して把持するために、図1に示すようにハーネスクランプにクランプカバーを取り付けた。クランプカバーの所定箇所を把持することで、ワイヤーハーネスのロボットハンドに対する相対位置と姿勢が一意に決定される(図2)。また、クランプカバーの各面(5面)には画像認識用のマーカが貼ってあり、そのうち1面でもカメラの視界に入れば、カメラからクランプカバーまでの3次元位置と姿勢が推定できる。

ワイヤーハーネスのクランプに把持・認識用のカバーを付加することは、ワイヤーハーネスの製作という点ではコストの増大になるが、結果としてワイヤーハーネス取り付けラインの作業員1名をロボットシステムで置き換えることが出来るならば、トータルコストの削減になる。このトータルコスト削減効果を検証するために、ワイヤーハーネスメーカー、自動車メーカーと共同で研究会を複数回にわたって開催した。この研究会における調査結果によると、クランプカバーをある程度単純化ができれば、ハーネスメーカー側による製作、ハーネスへの取り付けが、コストを大幅に増大させることなく可能であることがわかった。

② 作業の遂行を補助するための柔軟物把持及び変形状態制御技術

ワイヤーハーネスに把持用クランプカバーを付加する方法を採用しても、作業の遂行に伴い、ワイヤーハーネス自身の変形が作業の支障となることがある。例えば、ワイヤー同士が絡まり合い、作業の支障となるケースが実験中に観察された。このような問題を解決するには、柔軟物の変形状態を直接的に制御することが必要であると考え、これをワイヤーハーネス取り付け作業における補助動作と位置付けて開発を行った。

補助動作の一例として、図3に示すワイヤーのねじれ修正制御が挙げられる。実際の組み付けにおいて、クランプの向きが必ずしも把持に適切な向きになっているとは限らない。クランプの向きに対応した把持姿勢がロボットの動作可能範囲外にあることで、把持が失



図1. クランプカバー

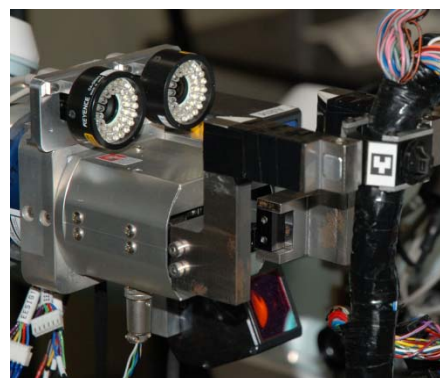


図2. クランプカバーの把持



図3. ワイヤーのねじれ状態を制御

敗することは十分考えられる。このような状況への対応策として、ワイヤーのねじれ修正動作を補助動作として取り入れた。図3に示すように、右ハンドでワイヤーをねじること



図4. 熟練作業者の技能計測



図5. 片手でワイヤーを整形しながら、他の手で取る付けを行う

によって、同じワイヤーに付けられたクランプの姿勢を、把持可能な姿勢まで調整する。なお、姿勢変化などの変形状態は固定カメラおよび手先カメラ等で監視を行っている。

③ ワイヤーハーネス取り付けにおける人間作業者スキルの、ロボット動作への応用

人間が柔軟物を操るスキルは、単に作業効率を向上させるだけではなく、一部の作業に対しては作業の成否に関わる。柔軟物を扱う作業においては、人間のもつ作業特性の活用が必須となる場面が多々ある。そこで、ワイヤーハーネス取り付けにおける熟練作業者のスキルの解析を行い（図4）、その結果を作業計画に反映した。図5に、人間作業者が一方の手で、他方の手にとって最適な作業姿勢になるようワイヤーを整形し、他方の手でクランプを取り付けるという動作を、ロボットの作業動作に応用した様子を示す。

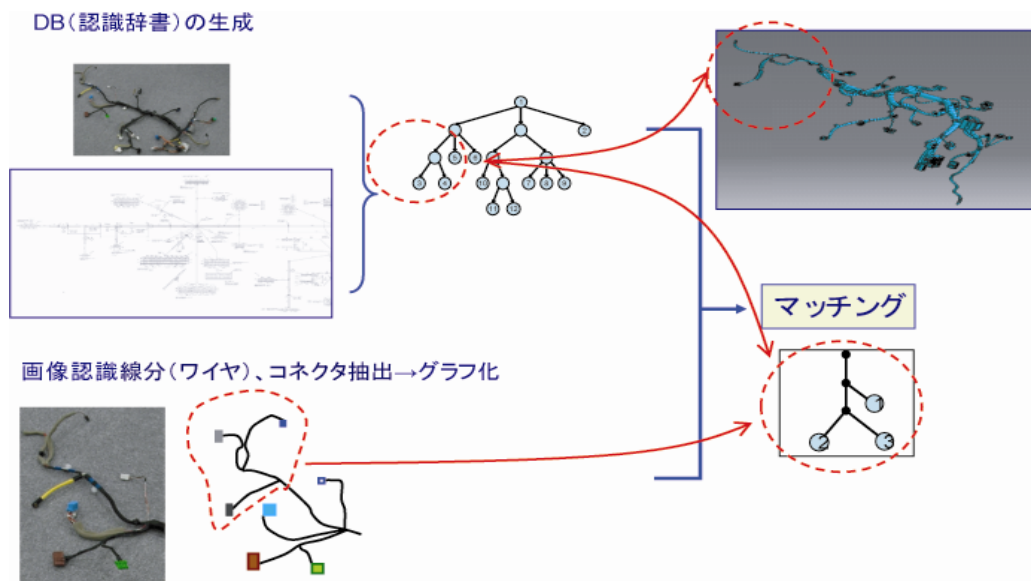


図6. グラフ構造を活かしたハーネスの認識

(2) 柔軟物を知的にハンドリングするためのセンサ利用技術（ビジョンシステム、力制御、力センサ）の開発

① グラフ構造を持つハーネス認識用データベースの構築及びそれに基づいた画像検索手法

画像情報に基づいたワイヤーハーネスの高速認識法の開発を目的として、グラフ構造モデルを用いたワイヤーハーネスの認識手法を提案した。

提案手法の概略を図6に示す。まず、ハーネスの設計図からグラフ構造モデルを応用した、ハーネス構造を表現するデータベースを作成する。そのうえで、実画像中からハーネスの特徴点をグラフ化し、データベースとのマッチングを行い、コネクタやハーネスの分岐の特定および推定を行う。この手法では、グラフ構造情報を用いることによって、カメラに映されたワイヤーハーネスの部分画像から、その部分のハーネス全体における位置を高速に特定できる。そのため、複数のカメラもしくは能動カメラを配置することで、それぞれのカメラから得られたハーネスの局所情報を用いてハーネスの全体を認識することができる。また、作業中にハーネスの一部が画面中から外れたとしても、他の部分からの情報を辿ることで位置予測が可能である。図7にこの方法による認識の一例を示している。この例においては、ワイヤーハーネスの画像（図7 認識前）から、画像中にあるコネクタの特定ができています。

② 5眼カメラユニットの開発

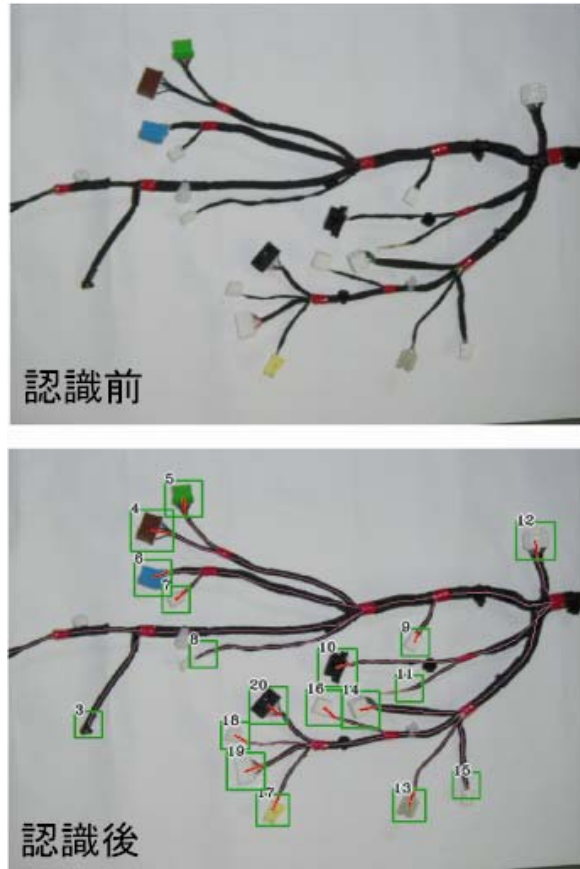


図7. コネクタの認識



図8. 5眼カメラを載せたロボット

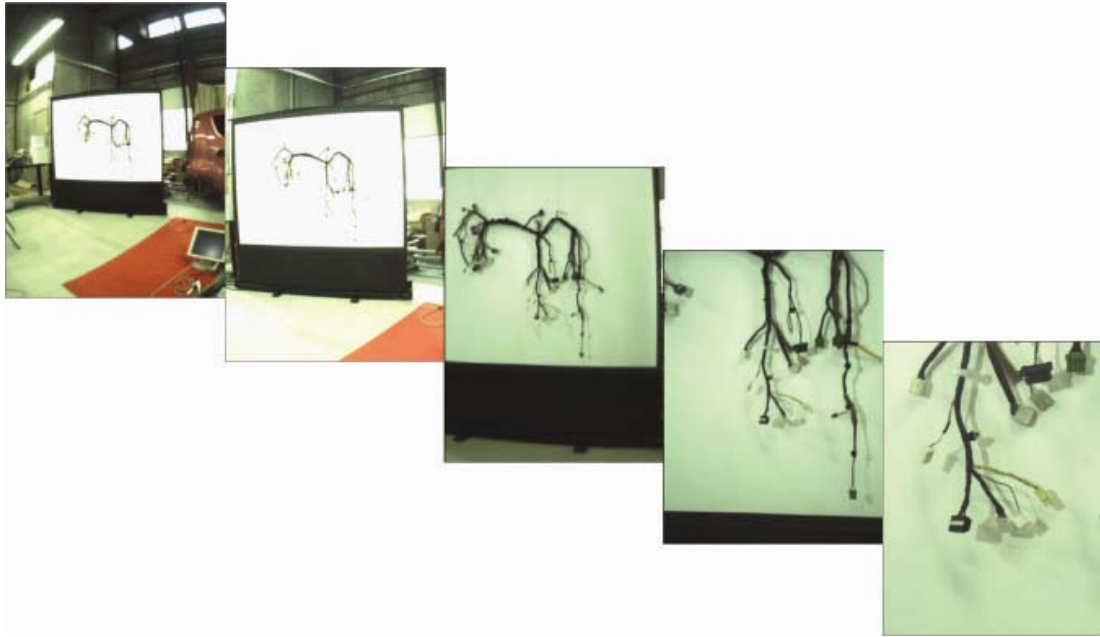


図 9. 5 眼カメラで撮られたワイヤーハーネス

5 眼カメラユニットを図 8 に示す。このユニットには焦点距離の違う 5 個のカメラが搭載されている。それぞれのカメラは可動部のない光学系であるが、ソフトウェアによるズーミングと注視を実現している。この特性により、広い範囲での環境把握と、狭い範囲の高画質映像の獲得が同時に可能であり、作業過程で予想される狭い空間での小回りのきく撮影が可能となっている。図 9 に示すのはこのカメラがワイヤーハーネスを観察する時に、各カメラでとらえた写真である。焦点距離が異なるレンズを同じカメラユニットに揃えることで、一つの撮影場所で対象物の全体像、部分像を取得できるという利点がある。このことから、作業全体の把握、具体的な把持箇所認識が同時にできる。

現在、この 5 眼カメラユニットを能動視覚用ロボット（ファナック 200i）の手先に搭載し、作業確認のための分散協調視覚システムの一部とする研究を進めている（図 8）。

③ H 型溝を持つ高指向性力センサ

H 型溝力センサとは、力センサの起歪体に H 型溝付きはりを使用する力センサである。図 10 に示すように、H 型溝付きはりを用いて、力に関する感度を従来の単板はりや並行平板はりと同一になるように設計すると、従来の構造に比べ剛性が高く変形量が少なくなるという利点がある。また、変形を引き起こす力方向に対してのみ感度が

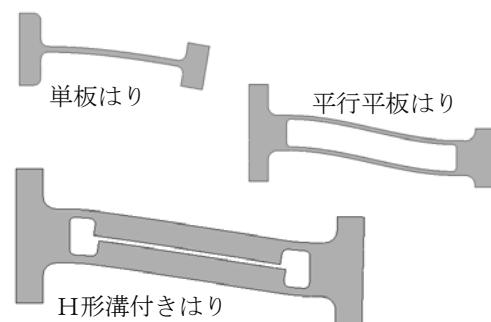


図 10. H 型溝付きはりを用いた力検出

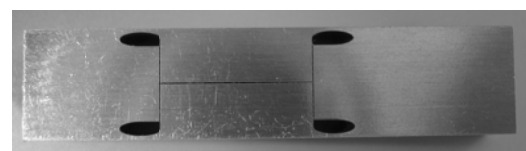


図 11. 開発した高感度 1 軸力センサ

高く、他の軸方向の力およびモーメントに対しては著しく感度が低いという、感度の指向性が得られる。この特性を活かして、柔軟物取り付けのための力センサの研究開発を行った。図 11 に開発した高感度力センサを示す。このようなセンサをハンドの把持部先端に組み込むことで、ワイヤー把持作業におけるねじりモーメントの計測が予定されている。

④ 固定カメラ、手先カメラ、レーザ変位センサを併用した分散協調センサシステムに基づいたワイヤーハーネス計測システム

このシステムは、固定カメラ、手先カメラ、手先レーザ変位センサから構成されている。固定カメラは、作業台の周りに合計 10 台が配置され、組み付け作業中における各クランプの大まかな位置計測を行う。また、手先カメラは、固定カメラからの情報を基にロボット手先がクランプに接近した後に、クランプの把持に必要となる高精度な位置姿勢情報の獲得に使用される。また、一連の作業中にはワイヤーの把持があるが、この作業においては固定カメラから得られたクランプの位置情報を利用することで、ワイヤーの大まかな位置が推定される。実際に図 12 に示すように、ワイヤーハーネスの設計図から、各クランプもしくは各コネクタがどのように繋がっているかを知ることができる。このことで、隣接するクランプもしくはコネクタの位置姿勢が獲得できれば、その間を補間することで、大まかなワイヤーの位置推定が可能となる。得られた概算把持位置をレーザで走査することで、ワイヤー把持点が決定できる。図 13 にワイヤー把持作業時の、レーザセンサによる計測の様子を示す。

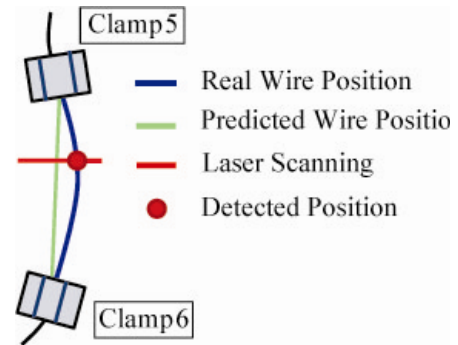


図 12. ワイヤー位置の計測



図 13. カメラ及びレーザによるワイヤー計測

(3) 短時間で簡便に作業を提示できる次世代教示機能の開発

① 3次元コンピュータグラフィックススペースとロボット作業教示システム

ロボットによって柔軟な作業動作を実現するためにはロボットに適した動作指令を生成

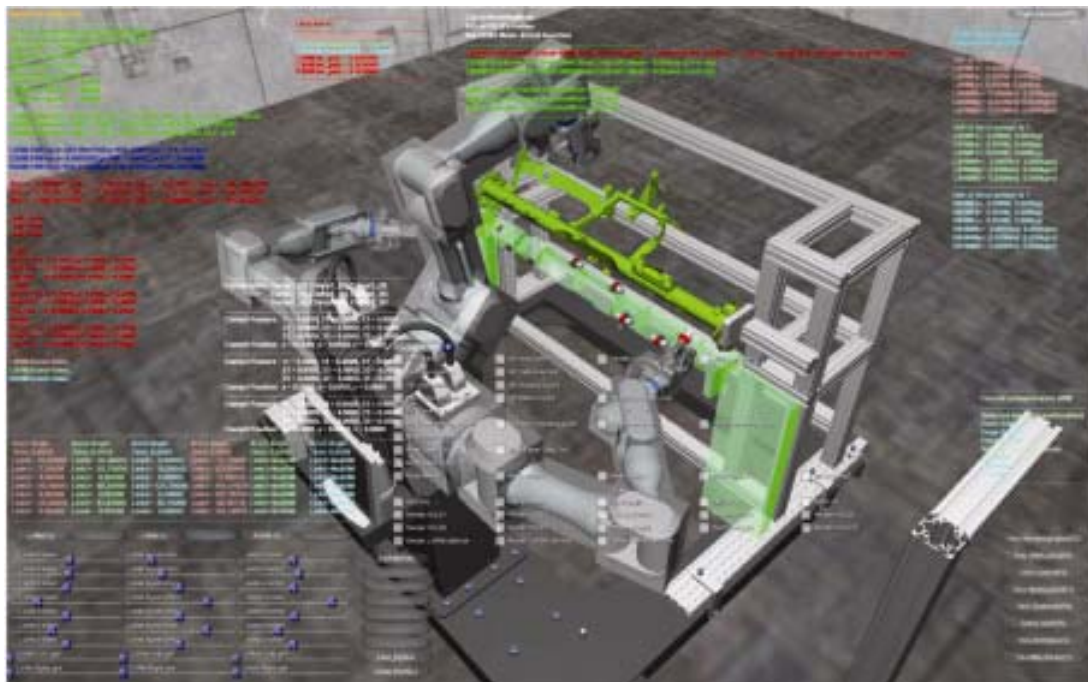


図 14. 作業シミュレータ

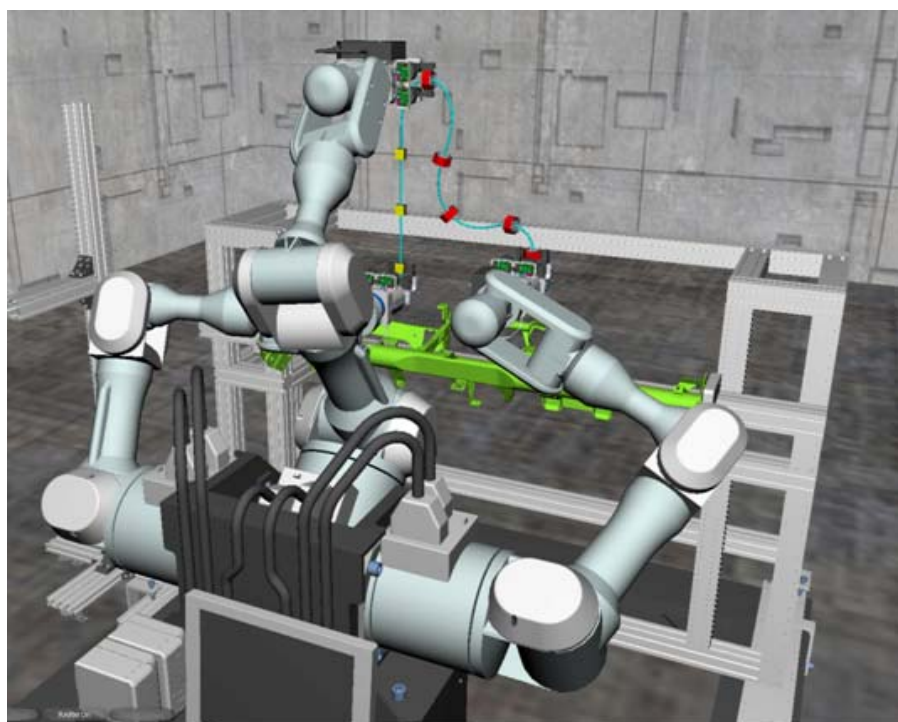


図 15. 柔軟物の振る舞いを考慮する作業計画

する機能が重要である。特に本プロジェクトでは、密接する複数のロボットが狭い空間において、迅速に動作することが必要とされている。そのため、教示システムには他に類がない直感性、便利さが求められている。そこで我々は、3次元コンピュータグラフィクス

を用いたロボット教示システムを開発した（図 14）。この教示システムでは、操作者は 3 次元仮想環境内で、簡便にかつ直感的にロボットの運動軌道の教示、動作確認ができる。また、教示作業中におけるマニピュレータ間の衝突、マニピュレータと作業環境との衝突などを教示システム上にグラフィクスで表示し、作業者の動作設計ミスを未然に防ぐこと

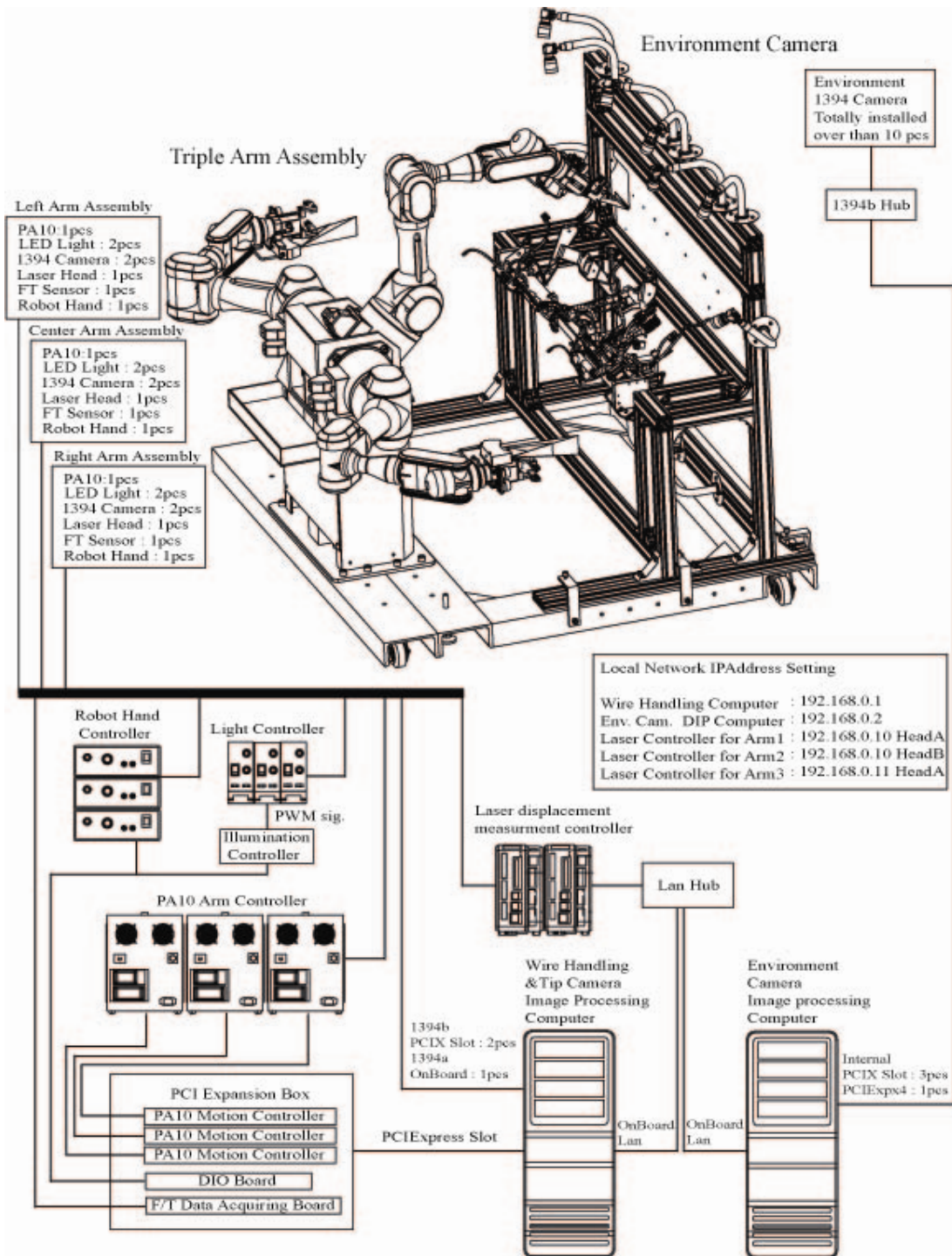


図 16. インパネハーネス組み付け用プロトタイプシステム

ができる。

② 作業におけるワイヤーハーネスの振る舞いを考慮する作業計画

ワイヤーハーネスを扱う作業では、作業対象物の変形が、剛体対象物には無い複雑さをもたらす。例えば、作業の途中ワイヤーハーネスの一部が環境に引っ掛かる、ワイヤー間での絡まりが生じ作業が不可能となる等のケースが考えられる。このような複雑な作業を考えた場合、教示システムにはワイヤーハーネスの挙動のシミュレーションや、ハーネスの動きを考慮する作業計画機能が求められる。

そこで、ワイヤーの曲げ変形、ねじり変形を表現可能な線状柔軟物のシミュレーション機能を取り入れた教示システムを開発した。この機能を使用することで、作業計画する際、作業過程でのワイヤーハーネスの変形挙動を確認、利用することが可能となる。例えば、マニピュレータの動作シーケンスを設計する際、ワイヤーのねじれを評価指標として、ねじれ変形が最小となるような作業シーケンスの作成が考えられる。

これまでに開発したワイヤーハーネスのモデルでは、実物の動きとの間に大きな誤差が

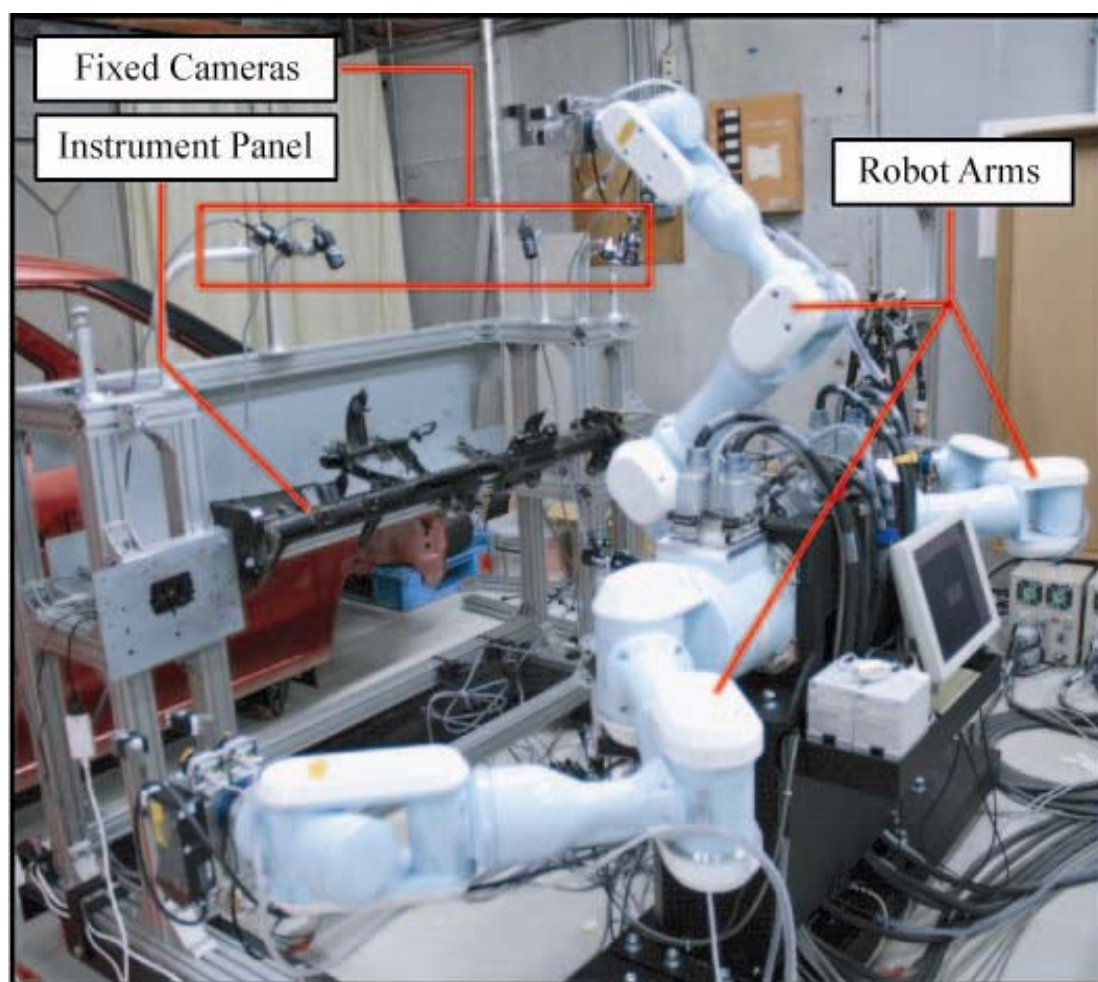


図 17. プロトタイプロボットシステムの外観

生じている。今後、ワイヤーの塑性などをモデルに組み込み、モデルと実物の整合性について研究を進める予定である。

(4) 実証ロボット（プロトタイプロボット）の開発及び実証実験

① プロトタイプロボットのシステム構成

プロトタイプロボットシステムはインパネハーネスの取り付けを目的として設計された。システムの構成を図 16 に、実際に構築されたシステムの外観を図 17 に示す。システムの中心となるのは、共通の架台に設置された 3 台のロボットアームである。各アーム先端部には図 18 に示すように、1 自由度のグリッパーと多数のセンサからなるエンドエフェクタが取り付けられている。またインパネメンバーが取り付けられたフレームとロボットアーム架台には、多数の固定カメラが設置されている。システムの具体的構成は以下の通りである。

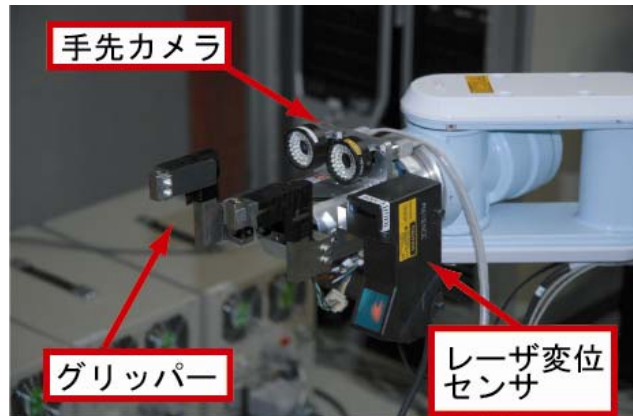


図 18. 手先の詳細

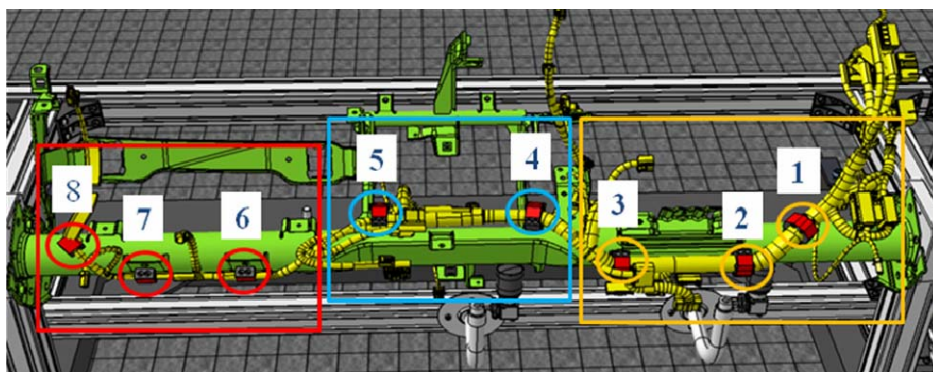
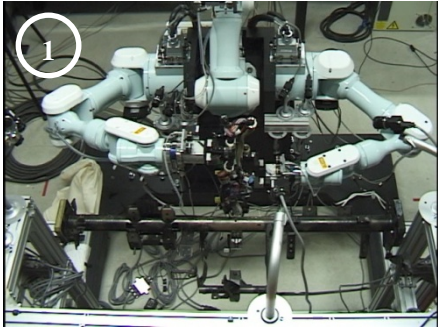
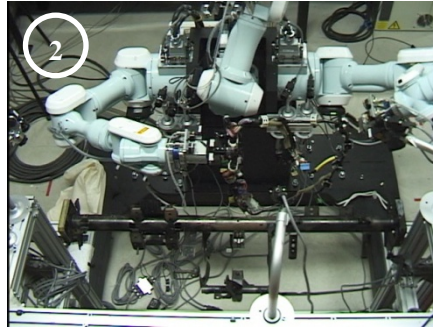


図 19. 組み付け指示図

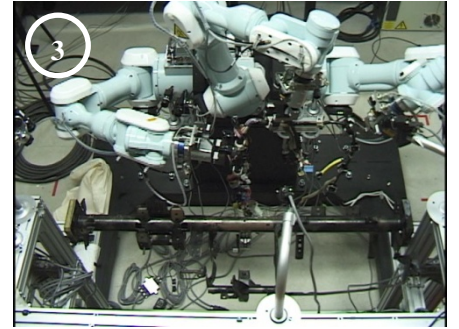
- A) ワイヤハーネス取り付け用ロボット 3 台（三菱重工 PA-10）、ハーネス把持用ハンド 3 台。
- B) 能動視覚用ロボット 2 台（ファナック 200i、手先に開発された 5 眼カメラユニットを設置）
- C) ワイヤハーネス認識用の、環境に固定されたカメラ 10 台
- D) インパネハーネスの取り付け作業台



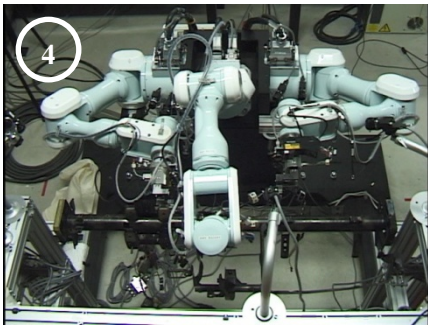
① プロトタイプロボットの右マニピュレータ（画面中の左側にあるロボットアーム、以下右アームと略す）が、ハーネス置き台からインパネハーネスを掴み上げ、フレーム中央に運搬。



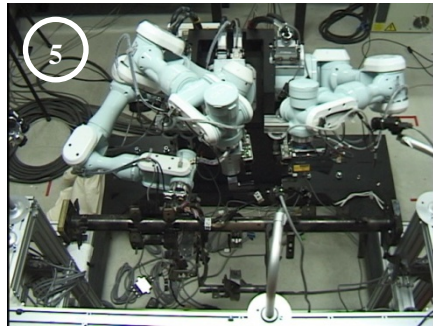
② 左アーム（画面では右）が、インパネハーネスのワイヤー部分を把持し、中央アームに受け渡し可能な位置まで持ち上げる。



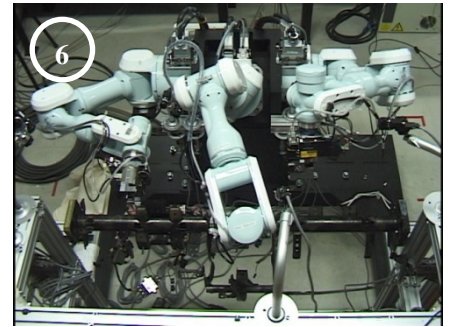
③ 中央アーム、右アームが、それぞれ把持しているインパネハーネスの 5 番クランプ、2 番クランプを、インパネメンバーに挿入する。



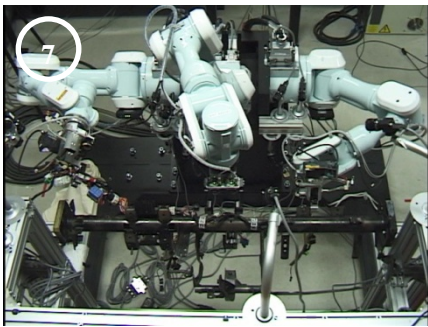
④ 中央アーム、右アームが、それぞれ把持しているインパネハーネスの 4 番クランプ、3 番クランプを、インパネメンバーに挿入する。



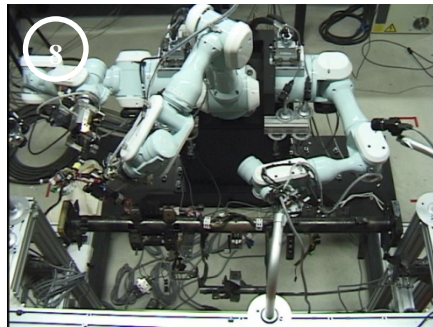
⑤ 中央アームが 5 番クランプを把持できるよう、左アームがワイヤーをねじる。その後、中央アームが 5 番クランプを把持し、右アームが 2 番クランプを把持する。



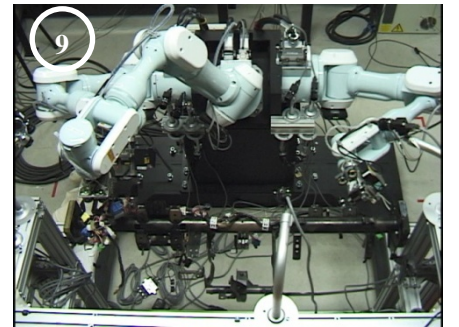
⑥ 中央アーム、右アームが、それぞれ把持しているインパネハーネスの 5 番クランプ、2 番クランプを、インパネメンバーに挿入する。



⑦ 左アームが 6 番クランプを把持しインパネメンバーに挿入。右アームはワイヤーを把持し、中央アームに受け渡す位置に移動。



⑧ 左アームが 7 番クランプを把持しインパネメンバーに挿入。中央アームは右アームからインパネハーネスを受け取る。



⑨ 最後に、左アーム、右アームがそれぞれ 8 番クランプ、1 番クランプを把持し、インパネメンバーに挿入して終了。

図 20. 作業シーケンス

このプロトタイプロボットにおいて、開発した技術を統合し、インパネハーネスの実配線実験を行った。この実験では、実生産ラインにおけるインパネハーネスの組付指示図を参考に、取り付けを行う箇所（13 か所）の中から 8 か所を選択し（図 19）、ロボットによる実配線の作業目標とした。この実配線実験の様子を図 20 ①～⑨に示す。

実験の評価によって、各開発した技術をうまく活かしたことで、インパネハーネスの自動組み付けの可能性を示したが、一方、多くの課題も残された。

【信頼性の問題】

現在、実配線実験の成功率は約 50%である。このことは、実験が失敗する理由には画像処理結果の不安定による把持の失敗、クランプ姿勢の不適による把持不能などが原因とされている。その中の、画像処理結果の不安定については、画像処理手法の改善で解決可能と考える。クランプ姿勢の不適切はワイヤーハーネスの特徴に関係する。作業中にワイヤーがねじれる方向に発生した変形の予測が困難であるため、作業を行うとともに、いずれの箇所でもワイヤーの変形がロボットの把持できる範囲を超えてしまう。

【速度上の問題】

現在の実験における作業速度は、スズキ（株）において同作業に定められたタクトタイムを大幅に超えている。今後、速度の改善が必要である。そこで、現在採用されている作業シーケンスに対して、把持速度（手先カメラでクランプを見ながら、クランプに近付く）、把持後の移動速度を上げるといった対策を取ることで全工程に要する時間を縮めることが可能と考える。加えて、速度向上に伴うワイヤーハーネスの動的な特性による影響、ロボット間、ロボット・環境間での衝突回避等を考慮する必要があることから、更なる研究開発が要求されている。

これらの問題に対する改善策の一つとして、取り付け用ハンドの再設計を考えている。これまでの実験から、ワイヤーのねじれ状態の制御が作業の成否に大きな影響を与えることが分かった。しかし、現在のシステムでは、ワイヤーのねじりを制御するために、ハンドでワイヤーを把持した後、ハンドがワイヤーを中心に大きく回転する必要がある。このようなハンドの回転動作は、狭い作業区間においては非常に危険である。また、ねじれを維持するためにはワイヤーを把持し続ける必要があり、ねじれ修正用ハンドとクランプ把持用ハンドが必要となるため、2本のアームが拘束されることとなり作業が非効率的となる。この問題を解決するためには、ハンドにワイヤーをねじるための自由度を付加することが有効である。このような自由度を付加することで、ワイヤー操作時のハンドのワイヤー周りの回転が不要となり、操作時間の削減につながる。これで、作業のシーケンスの単純化を図る。

また、ワイヤーの柔軟性、動特性によるワイヤー形状の変化は、作業軌道の計画に大きな不定性を与える。ワイヤーの単純な向きの変化、柔軟性のばらつきによっても、生成される作業軌道は大きく変わってしまう（この不定性はワイヤーハーネスの自動取り付け速度向上に対する最大の課題）。そこで、前述のねじり自由度に加え、ハンドにワイヤーを整理、ガイドする自由度の増設についても検討している。これによって、ワイヤーの動特性を押える一方、取り付け位置や取り付け条件の均一化を狙う。このようにワイヤーの不定性を減らすことで、柔軟物体についても剛体部品の組み付け作業のような高速性が期待できる。

3) 成果の意義

(1) 成果は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

本プロジェクトの研究目的は自動車生産における現実問題を解決しようとするもので、目標とする研究目的が達成できれば、新たな産業を創出することになると考えられる。また、本プロジェクトによって開発された技術は汎用性があるため、自動車産業だけではなく、柔軟物を扱う全ての作業に適用できると考えられ、他の産業における新たな事業にも十分に応用できる。

(2) 成果は、世界初或いは世界最高水準か

ワイヤーハーネスの自動組み付けは従来から困難だと考えられている。今まで成功した例はまだない。本プロジェクトにおいて、困難とされるこの組立を実際の工場に近い条件下で実現できた。作業の速度、信頼性などの点については、まだ改善すべき点は残されているが、作業自体が自動で完成されたことについては、前例がない。

グラフモデルを用いたワイヤーハーネスの認識手法では、ワイヤーハーネスの特徴である分岐情報に注目し、それをグラフ理論で処理する方法を提案した。これも本プロジェクトから生まれた独創的な成果である。

これまでの柔軟物の把持に関する研究は、主に材質が均一な紐状のものを対象としていた。そして、それらの柔軟物を認識するにあたっては、2次元での画像認識を用いた研究が数多く報告されている。これらの研究は、紐の交差状態、また紐と環境との接触状態の計測を、把持成功の条件として重要視しているものの、紐のねじれが把持に与える影響については、ほとんど考慮していない。本研究では、把持対象とするワイヤーハーネスにクランプやコネクタが付いており、それらの正確な挿入を最終の目標としている。よって、ワイヤーハーネスを3次元の柔軟物として扱う必要があり、ハーネスの形の変動のみならず、ねじりも把持への影響要素の一つとして考慮する必要がある。そのために開発したねじり制御技術は独創性がある。

(3) 得られた成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか

柔軟物のねじり状態を制御する技術、グラフ構造を持つハーネスの認識法は新たな技術領域を開拓することに十分期待できる。

(4) 得られた成果は汎用性があるか

本プロジェクトによって開発した技術は自動車生産に関わらず、柔軟物を扱う他の作業の自動化についても十分に適用できると考えられる。

(5) 投入された予算に見合った成果が得られているか

投入された予算により、実際のワイヤーハーネス組み付け工程を模擬するプロトタイプロボットシステムの開発ができた。このことによって、実配線が成功したことから、投入された予算に見合った成果が得られたと考えられる。

4) 特許等の取得

現在、本プロジェクトにおいて開発した技術を整理しているため、特許の出願はまだ行っていない。整理できた次第、出願する予定である。

5) 成果の普及

本プロジェクトでは、ステージゲート制が導入された。ステージゲートにおける評価の結果によって、後半の契約を獲得できるかどうかが決まる。また、本プロジェクトの開発において、共同研究相手であるスズキ（株）における企業秘密に関わる数多くの生産工程のデータが使用されていた。そこで、成果公開による競争不利や共同研究相手の企業秘密厳守を考慮し、成果の普及を抑えた。

本プロジェクトは既に終了したので、今後、公開できる成果について、自動車メーカーを初めとする産業界、ならびに学术界の場で発表することで、プロジェクトによる成果の普及に力を入れる予定である。

6) 実用化、事業化の見通しについて

① 成果の実用化の可能性

実用化の可能性は十分あるといえる。現在、実際の工場に近い条件下でのインパネハーネスの自動組み付けが既に成功している。今後、速度、信頼性などの点についてさらに改善することによって、実際の工場の導入では技術上、十分可能である。また、自動車生産ラインにおける柔軟物の組み付けは生産コスト削減の難関であり、自動化へのニーズは常にある。新設備導入と人件費との整合性を取れば、実導入が十分考えられる。

② 事業化までのシナリオ

【ワイヤーハーネス取り付けロボットシステム】

想定された利用形態：

各自動車メーカーの生産ラインにおける作業員によるワイヤーハーネスの組み付け工程を開発した取り付けロボットシステムに置き換える。

市場規模と根拠：

国内のロボット出荷台数（2007年度 44,205台）の1/30に、開発するビジョンシステムが搭載されると仮定すると、年間 1473台となる。ビジョンシステム一式の価格を 50万円とすると、年 736,500千円の市場規模と算出できる。

製品・サービスの提供体制：

研究開発：

東北大学は要素技術の開発を担当するとともに、製品の製造、販売を行う株式会社ビュープラスに技術的なコンサルティングを行う。

製品製造、メンテナンス、サポート：

株式会社ビュープラスは複眼視覚システムの製造、メンテナンス、サポートを担当する。

【複眼視覚システム】

想定された利用形態：

ロボットシステムの組み込み業者、大学、研究機関がユーザとして想定される。想定された利用形態はロボットの手先に乗せ、能動視覚センサとして利用する方法とマルチカメラの特徴を活かした監視カメラシステムでの利用である。

市場規模と根拠:

年間 30 万台の乗用車を生産するラインに必要となるワイヤーハーネス取り付け人件費を年間 50,000 千円 (スズキ (株) 湖西工場) と見積もると、国内総生産台数 10,058,307 (2007 年度、トラックを除く) に対する取り付けコストを 1,676,384 千円、全世界 (2007 年度 73,072,000 台) に対しては 12,178,666 千円と試算できる。これらの作業をロボットで置き換えると考えれば、試算した人件費がワイヤーハーネス取り付け作業自動化システムの市場規模となる。つまり、ワイヤーハーネスの取り付け自動化は国内において約 16 億円、全世界において約 121 億円の市場を見込める。

製品・サービスの提供体制:

研究開発:

東北大学は要素技術の開発を担当するとともに、製品の製造、販売を行う選定されたロボットメーカーに技術的なコンサルティングを行う。スズキ株式会社、協力するハーネスメーカーはワイヤーハーネス取り付けロボットシステムの実証システムの開発に参加する。また、協力するハーネスメーカー、東北大学はハーネス製造領域における技術の転用を目指し、研究開発を行う。

製品製造:

サービスプロバイダとして選定されたロボットメーカーはワイヤーハーネス取り付けロボットシステムの製造を担当する。

③ 波及効果

本プロジェクトは、実際の自動車生産ラインにおける現実問題を解決しようとするものなのである。プロトタイプロボットシステムを用いて、実際の生産ラインに近い条件下でのワイヤーハーネス自動組み付けが成功したことで、ロボットによるワイヤーハーネス自動組み付けの可能性を示した。自動車業界への波及効果が十分あったものとする。また、本プロジェクトにより開発した技術は汎用性があり、他の柔軟物を扱い作業への応用する可能性があるため、他の領域への波及効果も考えられる。

④ 産業技術としての見極め

プロトタイプロボットシステムによる実配線実験が成功したことが、実工場でのハーネス自動組み付けの実現の可能性を示した。将来、工場での導入の観点から、現在のシステムにおける改善すべき点は主に速度、信頼性の低下の二点である。この二点については、技術上解決する見通しが十分ある。

3.1.1.2 簡易な教示が可能な高機能マニピュレーション技術の開発

【実施者:(株)安川電機、筑波大学】

1) 研究概要

変形しない部品の組み立て作業における自動化はかなりの部分で進んでいるが、ワイヤハーネス等の柔軟物のハンドリング、組み付け作業は、その扱いの難しさから今でも自動化が困難で人手に頼っている。また、同時に実行されるコネクタの接続は多様な形状があり、つかみ方、組み立て方が多様なため、教示が煩雑となり、これも自動化が困難な例が多い。本研究開発はワイヤハーネス等の柔軟物を対象とする組み付け作業を、簡易な教示手法と作業モデル、計測モデルの構築により自動化するロボットシステムを提供するものである。本技術開発により、組み立て作業一般の課題解決に応用展開可能な技術開発を実施する。

開発目標を明確にし確実に具現化するために、開発においては具体的ニーズ（安川電機のインバータ製作工程）に適用できる技術開発を目標とした。また、配線作業に関わらずロボットシステム構成上の課題として、通常ロボットに部品を供給する周辺装置やロボットに装備する専用設計のジグが必要であり、システム全体のコストを押し上げると同時にロボットの汎用的な利用を阻害している。今回の開発では実際の需要があり、その中でも難作業の一つである配線作業の自動化を実現する。本技術課題を解決するロボットの開発により、同技術を他分野へ応用展開することが可能となり、その波及効果として組み立て作業の多くの課題解決に繋がる。その結果、周辺装置等も含めたシステム全体のトータルコストを下げた自動化の推進が可能になり、我が国の国際競争力増大の一助となる。

具体的な進め方として、2008年度（ステージゲート評価時点）までは、柔軟物としては比較的柔軟性の小さいケーブルで、ルーティングの必要がないもので構成される小型インバータの組み立てを対象とする。このとき、コネクタ位置姿勢のばらつきを2Dレーザセンサとアーム動作による計測で対応し、コネクタを確実に把持して接続する機能を実現することとした。2010年度（プロジェクト終了時点）には、柔軟性が大きく、ルーティング作業（ケーブルを盤内の所定の経路に固定する作業）が必要な中大型インバータへの展開を想定した。

最終目標（ミッション）を達成するため、下記技術開発を行うこととした。

(A) 柔軟物を迅速かつ高精度・高信頼度でハンドリングできるマニピュレーション技術

（複腕協調作業技術、高度配線作業技術）

柔軟物を扱う場合、その把持・操り方法の他、他の柔軟物を回避する経路を事前に教示しておくことは困難である。そこで、ハーネス両端のコネクタを複腕で把持・操りを行う手法や、(C)の教示技術を利用した把持・操り手法、(B)のセンサ利用技術と組み合わせたコネクタ接続・ルーティング・穴通し等の作業スキルを構築する。

(B) 柔軟物を知的にハンドリングするためのセンサ利用技術

（環境認識技術、作業遂行認識技術）

変形しない物体と異なり柔軟物は、マニピュレータにより把持・操りを行っても、その位置・姿勢は一

意には定まらない。このため、センサ情報を利用することにより、高精度・高信頼度で対象物の認識や状況の認識を行う手法を構築する。

(C) 短時間で簡便に作業を提示できる次世代教示機能

(教示技術、多自由度系教示技術)

柔軟物が複雑に入り組んだ箇所での多種のコネクタ毎の把持・挿入手順やルーティング作業の教示は、非常に煩雑であり、また動作失敗のリスクも高い。このため、(A) の操り技術と組み合わせた把持・挿入手順の教示手法、(B)の対象物の認識技術による経路生成、力制御やスキルを自動的に組合せ、簡易な教示により複雑な作業を達成する手法を構築する。最終的にはワークの情報や作業条件入力などにより教示プログラムを自動生成することを目標とする。

これらの技術を統合することで、現場で簡単にロボットプログラムを生成でき、さまざまな作業に対応可能な生産用ロボットシステムを構築することを目標とした。また、実際のニーズに対応した機能実現により実用化を目指すものである。

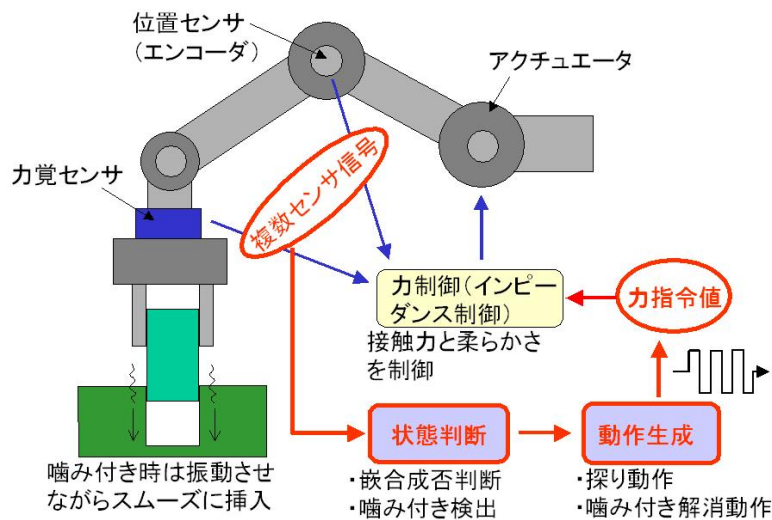
2) 成果詳細

①接触作業スキルの開発 (安川電機)

・接触作業スキルの概要

接触作業スキルは、部品と部品の接触を伴う意味のある作業（嵌合・挿入、ネジ締め、ギヤ組み等）を、センサフィードバック情報を利用してロバストに（様々な誤差を許容して）遂行する機能であり、以下の特徴を有する。接触作業スキルの概念図（ブロック図）を図①-1 に示す。

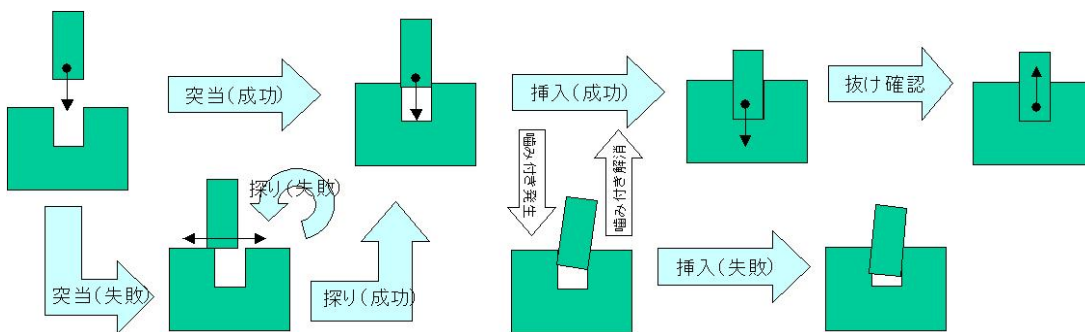
- ・ 力センサフィードバックによる力制御をベースにしている。
- ・ 接触状態を遷移させるプリミティブな動作（プリミティブスキル）に分解される。
- ・ 各プリミティブスキルは、力と位置センサ情報をもとに状態判断する機能と、判断結果をもとに力制御系への動作（力指令値）を生成する機能とを備えている。



図①-1 接触作業スキルの概念図

・嵌合作業に対応したプリミティブスキル

嵌合作業の接触状態遷移に基づいて、必要なプリミティブスキルを設計した。図①-2 は嵌合作業における接触状態遷移とプリミティブスキルの対応を示す。図中の矢印がプリミティブスキルで、成功する場合と失敗する場合で処理が分かれる。プリミティブスキルの概要を表①-1 に示す。



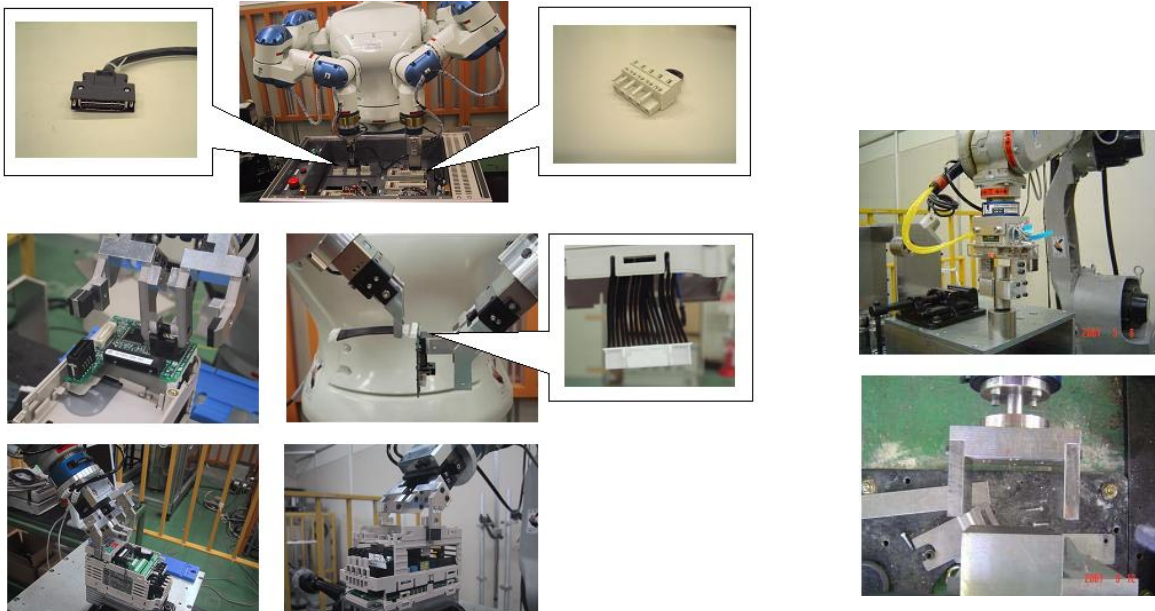
図①-2 嵌合作業の状態遷移とプリミティブスキル

表①-1 プリミティブスキルの概要

スキルコマンド	概要
突当	非接触状態からワークを接触させ、穴に嵌ったかどうかを判断する
探り	ワークを接触させた状態で穴位置を探り、穴に嵌ったかどうかを判断する
挿入	穴に嵌った状態でワークを押し込み、挿入量が十分か判断する ※途中で「噛み付き」が発生した場合は振動を印加して「噛み付き解消」する
抜け確認	挿入が完了した状態で引っ張ってみて(逆向きに力を加えて)、抜けないか判断する(コネクタなど) ※ラッチ検出できない場合に使用する

・**嵌合スキルの汎用性確認**

設計した同一スキルコマンドのパラメータ調整のみで、図①-3 に示す数種類の嵌合作業（円柱・角柱の精密嵌合、コネクタ・基板・パネル・ケース等の嵌合）への対応を実機で確認済みである。



コネクタ、基板、パネル、ケース等の嵌合例

精密嵌合(ギャップ 10 μm)

図①-3 嵌合スキルの効果を確認した作業対象

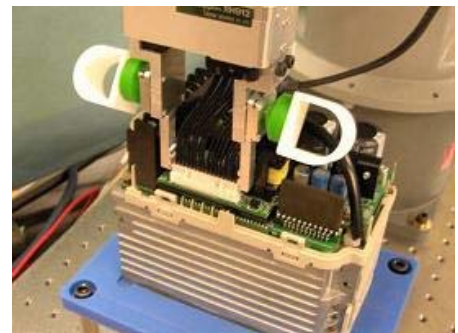
②作業パラメータの取得 (筑波大学)

②-1 グリッパ装着型ダイレクト教示システム

・**ダイレクト教示によるスキルパラメータ教示**

作業スキルをロボットに教示する手法として、人間が手を取って教えるスタイルを導入する。直感的に把持力、嵌合時の挿入力を教示できるため、教示に慣れていない初心者でも簡単に高機能マニピュレーション作業の教示が可能となる。

具体的なシステムを図②-1 に示す。グリッパの外側に人の指

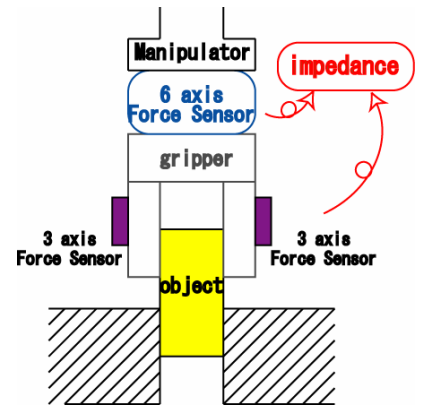


図②-1 指サック付グリッパ

が入る指サックを取り付け、図②-2 に示す力センサ配置により、環境と対象物との間の作用力も計測可能となる。

・ **教示／再生手順**

先ず、小型(80W 以下)アームを用い、インピーダンス制御系により、実機と同じ特性を持たせる。教示者は指サック及びワイヤヒューズを装着し、実際の作業対象物を把持、嵌合作業を実施する。力センサの取得データから環境と対象物間の作用力を求め、位置軌道、力のグラフを作成し(図②-3)、グラフより各位置、力のパラメータ(図の①～④)を抽出する。抽出結果に基づき、小型アームで作業スキルを再生し、作業を確認する。その後は実機のある現場で調整する。

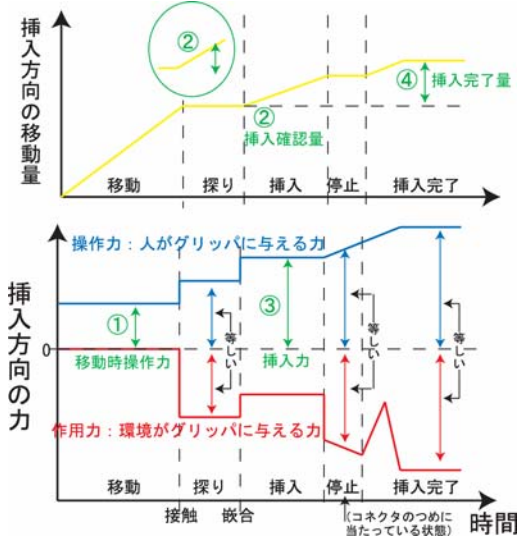


図②-2 カセンサ配置

・ **実験結果**

図②-1 の小型インバータのコネクタを対象とし、実験を行った結果、開発項目⑤の操作ペンダントによる教示とほぼ同じスキルパラメータを得られた。これにより小型アームでもインピーダンス特性を合わせることで、中型／大型アームに対して正確な教示が可能なが示された。また、この教示作業が初めての4名でも、やはりほぼ同じスキルパラメータが得られたことから、本手法が経験の少ない初心者にとっても感覚的に分かり易い教示手法であることが示された。

本教示手法においては、教示者は指サックに手を入れて作業を遂行してみせるだけなので、一通り(もしくは今後の抽出の自動化の手法によっては数回)の作業の実行で教示が完了する。このため教示に要する時間は格段に短縮できる。具体的な計測・評価は今後行う予定である。



図②-3 嵌合スキルパラメータ抽出

②-2 拘束型データグローブによる多指ハンドの動作教示技術

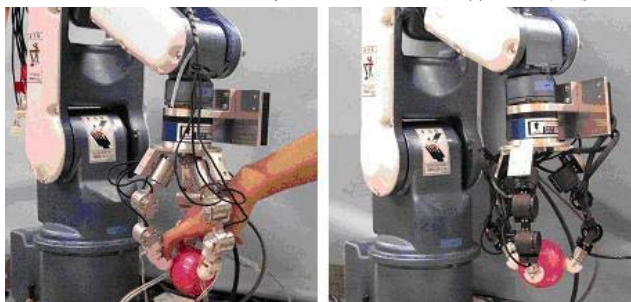
・ **多指ハンドの動作教示技術**

多種多様なハーネス(ケーブル、コネクタ)を数多く扱う高機能システムの構築には、アーム部のみならずグリッパに関しても多様な対象物を扱える多自由度化が必要である。そこで、最も多自由度なグリッパとして多指ハンドに対する動作教示技術の開発を行う。多指ハンドはその自由度の多さから、解析的な最適把持位置姿勢の計算は困難であり、かつ様々な複雑形状の対象物に対する最適把持位置姿勢を求めることは不可能である。そこで、②-1と同様に人間がグリッパ(ハンド)の手を取り、動作を教示する手法を構築する。

・ **拘束型データグローブ**

3 関節 3 本指ハンドシステム及び、拘束型データグローブを図②-4 に示す。この手法は、人間は動

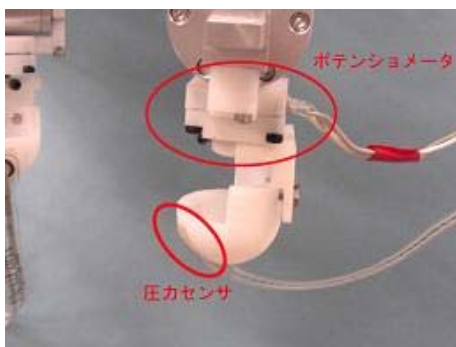
きが拘束されても感覚的にどうすれば作業を遂行できるか判断可能、という性質を利用する。データグローブで得た人間の動きをロボットの動きへ射影することは、モデルが立たず大変困難であるが、始めからロボットと同構造のグローブであれば、ロボットの動作は無変換でそのまま実行可能となる。



図②-4 拘束型データグローブと多指ハンドシステム

• コンプライアンス制御／インピーダンス制御による把持力再生

このような教示再生型のシステムでは、教示時と全く同じ関節角に位置制御で動作しても、教示時と再生時で対象物の配置位置が僅かでもずれていると、正しく物体を把持できるとは限らない。そこで、図②-5 のように指先に圧力センサと方向を見るためのポテンショメータを取り付け、教示時に指先力を測る。再生時には教示指先力を目標として、コンプライアンス制御又はインピーダンス制御を行い、僅かな位置ずれがある場合にも適切な把持力を再生し、正しく物体を把持できる。



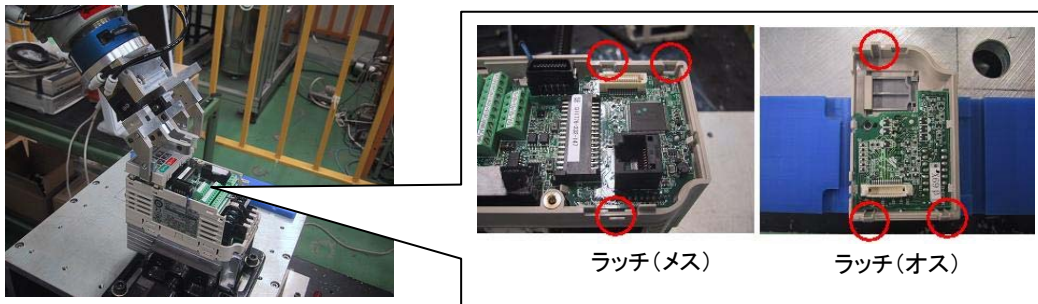
図②-5 指先力センサ

③ 作業状態認識（安川電機）

③-1 嵌合状態認識

・嵌合状態認識のアルゴリズム

組立作業の自動化では、ロボット自身が嵌合作業時の作業状態（成功か失敗か）を逐次判断して作業工程を進める必要がある。今回の作業対象である小型インバータの組立では、基板やコネクタの嵌合部分にラッチ（爪）があり、このラッチに基板やコネクタが嵌ったかどうかを力センサ情報の変化量とロボットの位置フィードバック情報から検出する方法を取っている。ラッチが無いものや力センサの変化量で検出し難いものについては、嵌合後に一定の力で引抜きチェックを行う。



図③-1 表示パネルのラッチ

・嵌合状態認識の評価結果

各作業工程での評価数50個での作業状態認識率を表③-1と表③-2に示す。

表③-1 前工程の各作業の作業状態認識率

作業内容	各作業の認識成功率 [%]	失敗原因
WCN嵌合	98.0	爪ゴムの柔軟性で力が上手く伝わらない
1 PCB基板嵌合	96.0	ラッチ部分が力作用点から遠い
表示パネル嵌合	100.0	—
認識成功率の平均	98.0	—

表③-2 後工程の各作業の作業状態認識率

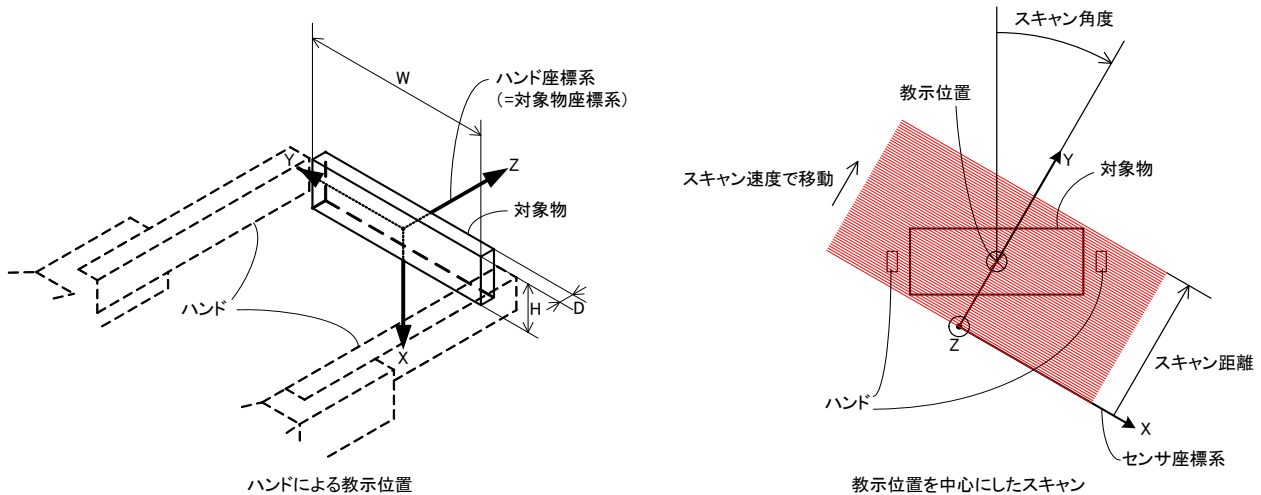
作業内容	各作業の認識成功率 [%]	失敗原因
WCN嵌合	100.0	—
ケース嵌合	97.6	ケース内でのケーブル噛み込み
認識成功率の平均	98.8	—

これらの失敗原因に対してさらに改良を加えることで最終的に99.3%の認識成功率となった。詳細は⑦の作業評価試験結果を参照。

③-2 2Dレーザセンサによる能動センシング

・能動センシングのアルゴリズム

図③-2のように、ハンドにより教示された位置を中心に、ロボットアームに取り付けた2Dレーザセンサによるスキャン動作を自動生成して、対象物の3次元データを取得する。次に、取得した3次元データから、直方体部分を抽出し、対象物の位置姿勢を認識する。最後に、対象物の位置にハンドを移動して把持する。



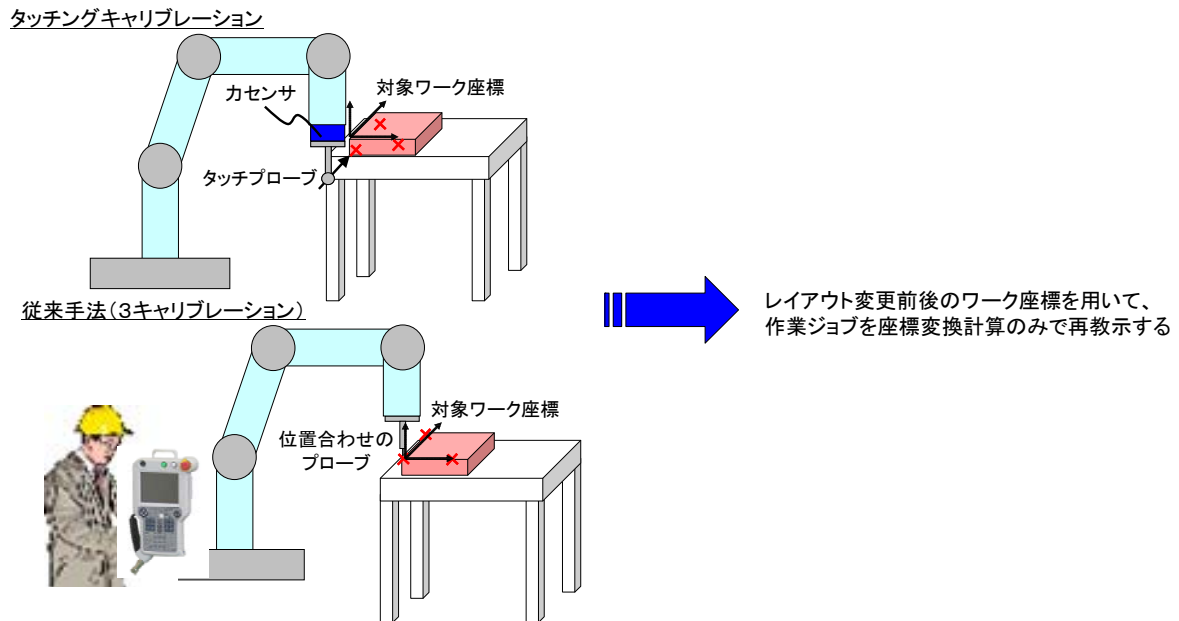
図③-2 2次元レーザセンサによるスキャン

・能動センシングの評価結果

対象物の教示位置からのずれ 位置 $\pm 10\text{mm}$ 、姿勢 $\pm 10\text{deg}$ を許容。前後工程の各50回の組立作業において、接続ケーブル端コネクタ、アース線の上端及び下端、挿入タブの認識成功率88%を達成している。

③-3 タッチングキャリブレーションの評価

作業対象の追加等で組立ラインの変更等がある場合、事前検討されたオフラインシミュレーションの結果（作業プログラム）を実機環境で使用するために、実機環境の対象ワークに関する座標原点のキャリブレーションが必要となる。その方法は、図③-3に示すように、従来の製品機能である目視でプローブ先端をワーク上の3点に誘導し原点位置を登録する3点キャリブレーションと、開発項目⑥の筑波大が開発した力センサを利用してプローブとワークを複数回接触させてワーク原点を求めるタッチングキャリブレーションがある。この2種類の方法を実機システムで評価した。



図③-3 3点キャリブレーションとタッチングキャリブレーション

・ タッチングキャリブレーションの評価結果

2種類のキャリブレーション方法の実機評価結果を表③-3に示す。タッチングキャリブレーションは従来手法と精度的には同等で、所要時間の優位性はなかった。しかし、目視の位置合わせが不要で簡便であり、作業者の熟練度に依存しない手法であることが確認できた。今後は、CADデータを活用したノミナル（理想）位置座標の登録と接触検出の自動化により、所要時間の短縮を進める。

表③-3 評価結果

評価項目	タッチングキャリブレーション	3点キャリブレーション
所要時間	△（約5min）	○（約2min）
位置あわせの簡便さ	○（力制御で半自動化が可能）	×（目視）
結果の精度	○（0.1-0.2mm）※1	○（0.1-0.2mm）
検出位置の制約	○（無し）	×（有り）※2
ノミナル位置座標	△（必要だがCADデータが活用可能）	○（不要）

※ 1 ノミナルと実際の座標系のズレが10mm程度の場合に限る（それ以上は精度悪化）

※ 2 制約：ワークの縁に正確にあわせる

④ ケーブルトレースによるコネクタ認識（筑波大学）

・ 2Dレーザセンサによるケーブルトレース

2Dレーザセンサは、スリット光の照射により、二次元ではあるが断面形状が直接計測できることから、濃淡画像よりも信頼度の高い情報が得られる。特に複雑な細かい作業を行う場合には計測環境を整えられない場合が多く、濃淡画像では背景の処理が問題となり、信頼度は更に低くなる。そこで本研究ではケーブルという不定形物の形状を計測するために、2Dレーザセンサを動かして三次元形状データを得ることを目指す。

三次元形状データを得るには2Dレーザセンサを一定速度で動かしてスキャンデータを得る手法があるが、スキャン範囲に計測対象物が必ず入る必要があり、ケーブルが長く配置が不確かな場合に利用できない。そこで、計測した形状に応じ2Dレーザセンサの動作方向を調整し、対象物が計測範囲から外れないように追従（トレース）させる。

・追従アルゴリズム

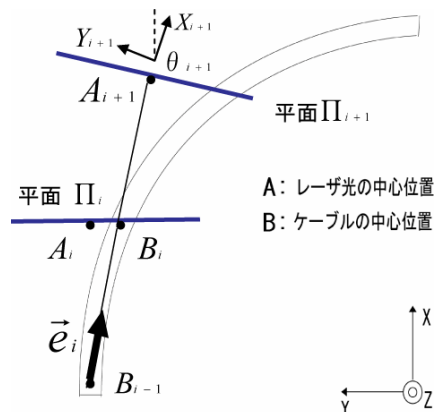
本研究のシステムでは、双腕（検証システムにおいては2台）アームのうち1台の手首部に2Dレーザセンサを取り付け、レーザスリット光を常にケーブルに垂直かつ中心がケーブル上に来るように、アーム（センサ）を動かす。図④-2のように、現在及び過去に計測されたケーブル位置から次のケーブル位置を予測し、その地点に次のレーザ光中心が来るように移動させる。2点のデータを用いれば直線でケーブル形状を推定し、3点を用いれば極率を含めた形状推定が可能となる。ただし点数を多くすると形状の変化へ柔軟に対応することが困難となる。

・追従実験

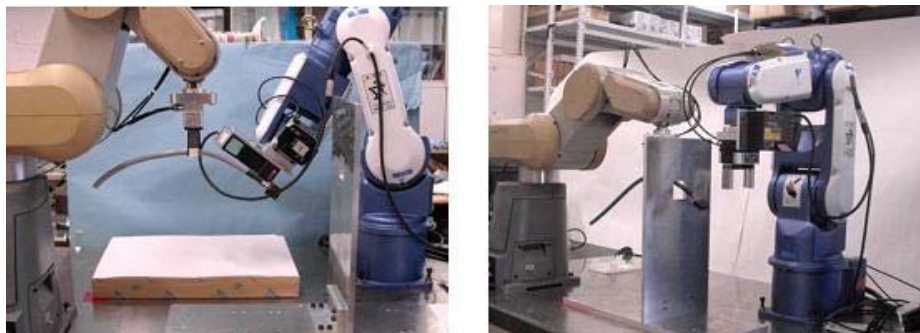
図④-3のように、長いケーブルに対し、トレースによる形状計測を行い、先端コネクタを穴へ通して受け渡し実験を行った。追従は低速で行い、まだ高速化には課題が残っているが、良好な結果を得た。高速トレースについては100mm程度のケーブルを目標とする1秒でトレースすることはほぼ100%（様々な初期姿勢に対し）可能であるが、より長い距離の追従を行う際には動作が振動的になることがあり、計測の遅延を考慮するなどの、課題が残っている。



図④-1 2Dレーザセンサ付アーム



図④-2 トレースアルゴリズム



図④-3 ケーブルトレース実験

⑤作業教示の簡易化（安川電機）

・目標

力制御が必要な組立作業では、位置と力の2種類の物理量を教示する必要があり、柔軟物を原因とした位置ずれが存在しても確実に作業成功に導く方策が要求される。本開発では、嵌合スキル制御や能動センシングを用いることで、必要な機能が共通部品化され、複雑な組立作業のプログラム作成が容易になるが、センサを利用するロボットの動きは教示が難しく、下記の課題がある。

- (1) パラメータ調整が困難であり、使えるユーザは少ない。

(2) 既存スキルで対応できない場合は作業実行不可能（開発に時間がかかる）

そこで、以下の方策を実施していく。中間時点は①の対応とする。今後は②スキル生成の対応として、スキルそのものを実機誘導の中から抽出し、複雑な組立対象でも成功する確率が高い技術を開発する。難易度の高いスキルに関してはメーカーで対応（サンプルテスト）も想定する。

(1) パラメータ調整の簡易化

パラメータの直接入力を不要とし、直感的な操作手段で、人の試行錯誤を自動化する。

(2) スキルの生成

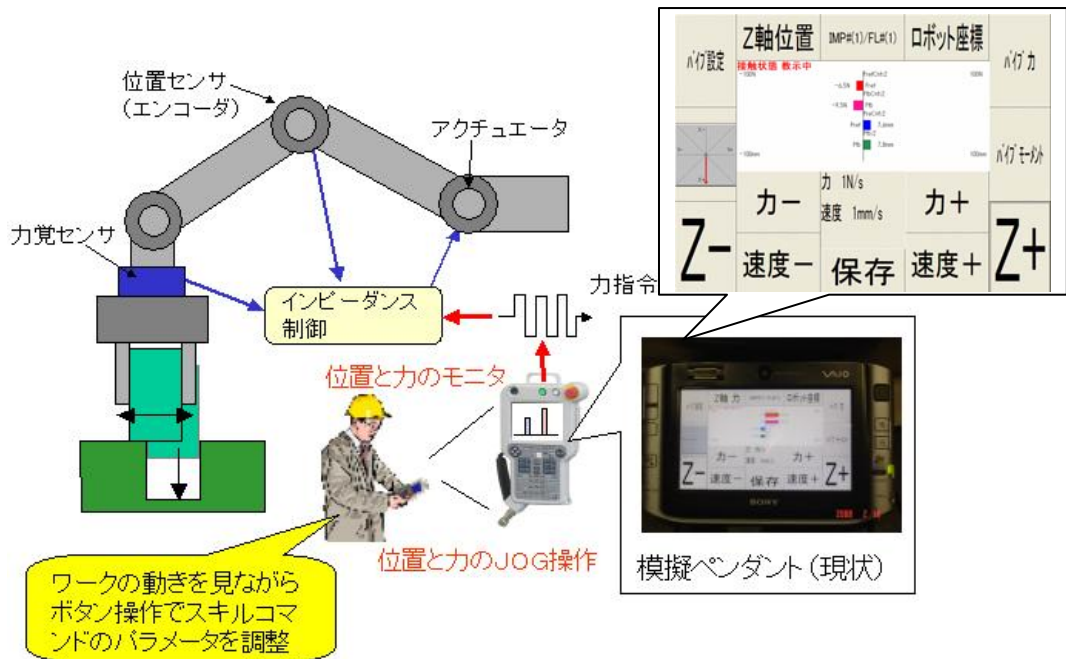
1回の成功作業動作によってスキルを抽出。ズレの吸収や判断処理の抽出、パラメータ最適値探索を行う。

⑤-1 嵌合スキルの教示

・教示の仕組み

嵌合作業の教示に関する技術は確立されておらず、現状ではその教示に多くの試行錯誤を必要とするため、操作ペンダントによる嵌合作業の実用的な（産業用ロボットに適用可能な）教示方法を開発した。

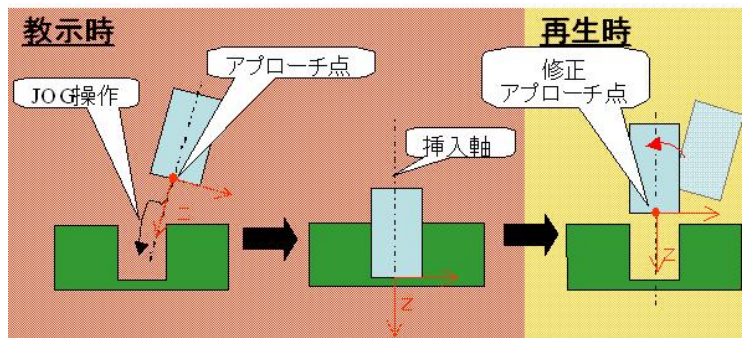
具体的な教示方法は、図⑤-1 に示すように力制御状態で作業者が操作ペンダントの JOG 操作で把持ワークを挿入完了状態まで導きながら、3つの状態（接触状態、嵌合状態、挿入完了状態）の位置と力のデータを保存し、プレイバック時の動作コマンド（スキル制御に必要なパラメータを含む）を自動生成する。ステージゲート時点では、携帯型PCをベースにした模擬ペンダントを用いて教示作業を行っているが、最終目標時点では製品の操作ペンダントで実現する予定である。



図⑤-1 嵌合スキルの教示イメージ

特に、以下の3点が特徴である。

- ①「探り」や「噛付き解消」の機能を操作ペダントからJOG操作でき、嵌合・挿入が容易に行える。
- ②挿入完了状態で計算した挿入軸を用いることで、アプローチ位置自動修正でき、アプローチ点を厳密に教示する必要がない(図⑤-2)。
- ③教示者自らが作業状態を判断しスキルに反映することで、パラメータが自動で抽出できる。



図⑤-2 嵌合スキル教示の流れ

・評価結果

評価手順は、円柱ワーク (ギャップ $10\mu\text{m}$) を題材にした実機検証とし、力制御やスキルの知識のない第三者の被験者に、教示作業のデモンストレーションを行った後、被験者が教示・再生し、教示時間と作業成否を判定した (マニュアル閲覧を許可)。評価結果を表⑤-1 に示す。

本開発技術により直感的で簡単な操作 (3分程度) で嵌合作業が教示できる (3回程度の試行で操作に慣れ、失敗は無くなった)。本教示手順を使用しない場合、1時間程度を要する。

表⑤-1 嵌合スキル教示の評価結果

試行回数	被験者A		被験者B	
	教示時間	再生結果	教示時間	再生結果
1	8分49秒	成功	6分1秒	失敗
2	3分50秒	成功	3分28秒	成功
3	4分10秒	失敗	2分1秒	成功
4	3分13秒	成功	1分59秒	成功
5	3分3秒	成功	1分52秒	成功

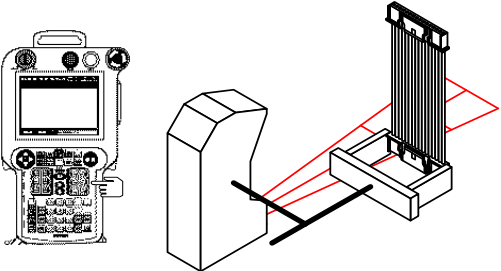
⑤-2 能動センシングの教示

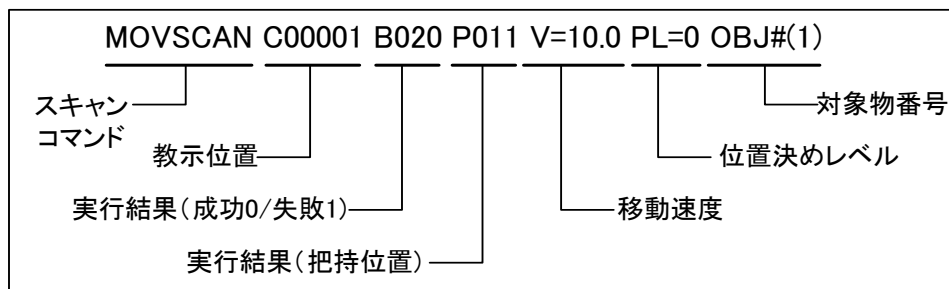
・教示の仕組み

対象物をスキャンする動作の教示は、表⑤-2 の手順で行う。表中 No. 2 のスキャンコマンドは、図⑤-3 の引数を伴う。

ロボットコントローラでジョブをプレイバックすると、教示位置を中心に2Dレーザセンサでセンシング動作が自動生成され、対象物の3次元データから位置姿勢が求められる。

表⑤-2 2Dレーザセンサによるセンシング教示

No.	作業内容																								
1		<p>プログラミングペンダントのジョグ操作で、手を把持位置へ移動（実際に把持させる等の詳細な位置決めは不要）</p>																							
2	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> MOVSCAN C00001 B020 P011 V=10.0 PL=0 OBJ#(1) </div>	<p>スキャンコマンドを登録</p>																							
3	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">寸法</th> <th colspan="3">把持位置</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>H</td> <td><input type="text" value="8"/> mm</td> <td>X</td> <td><input type="text" value="-5"/> mm</td> <td>Rx</td> <td><input type="text" value="0.5"/> deg</td> </tr> <tr> <td>W</td> <td><input type="text" value="32"/> mm</td> <td>Y</td> <td><input type="text" value="-1.2"/> mm</td> <td>Ry</td> <td><input type="text" value="0"/> deg</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td><input type="text" value="5"/> mm</td> <td>Z</td> <td><input type="text" value="2.5"/> mm</td> <td>Rz</td> <td><input type="text" value="0"/> deg</td> </tr> </tbody> </table>	寸法		把持位置			H	<input type="text" value="8"/> mm	X	<input type="text" value="-5"/> mm	Rx	<input type="text" value="0.5"/> deg	W	<input type="text" value="32"/> mm	Y	<input type="text" value="-1.2"/> mm	Ry	<input type="text" value="0"/> deg	D	<input type="text" value="5"/> mm	Z	<input type="text" value="2.5"/> mm	Rz	<input type="text" value="0"/> deg	<p>対象物寸法と把持位置を入力</p>
寸法		把持位置																							
H	<input type="text" value="8"/> mm	X	<input type="text" value="-5"/> mm	Rx	<input type="text" value="0.5"/> deg																				
W	<input type="text" value="32"/> mm	Y	<input type="text" value="-1.2"/> mm	Ry	<input type="text" value="0"/> deg																				
D	<input type="text" value="5"/> mm	Z	<input type="text" value="2.5"/> mm	Rz	<input type="text" value="0"/> deg																				
4	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">スキャン条件</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>スキャン角度</td> <td><input type="text" value="20"/> deg スキャン距離 <input type="text" value="30"/> mm</td> </tr> <tr> <td>スキャン速度</td> <td><input type="text" value="10"/> mm/s</td> </tr> </tbody> </table>	スキャン条件		スキャン角度	<input type="text" value="20"/> deg スキャン距離 <input type="text" value="30"/> mm	スキャン速度	<input type="text" value="10"/> mm/s	<p>スキャン条件を入力 (デフォルト値でも可)</p>																	
スキャン条件																									
スキャン角度	<input type="text" value="20"/> deg スキャン距離 <input type="text" value="30"/> mm																								
スキャン速度	<input type="text" value="10"/> mm/s																								



図⑤-3 スキャンコマンド仕様

上記の教示を行うと、対象物をスキャンして把持する動作に必要なデータとして、次の4種類のデータが記録される。

(a) ハンドの制御点位置

ロボットコントローラの動作プログラム(ジョブ)へのスキャンコマンドの登録により記録される。

2Dレーザセンサのセンサ座標系は目に見えないため、ハンドを使い対象物の位置を教示する。

(b) 対象物の寸法(直方体の高さ、幅、奥行き)

対象物の情報としてロボットコントローラに数値入力する。

(c) 対象物上の把持位置

対象物中心から見た把持位置をロボットコントローラに数値入力する。対象物中心ではない位置をハンドで把持したい場合に指定する。

(d) スキャン条件(スキャン角度、スキャン距離、スキャン速度)

基本的にデフォルト値を使い変更しない条件だが、スキャン範囲を変更したい場合等に指定する。

・**評価結果**

教示操作は、ハンドによる位置の教示を1点行うのみなので、センサデータを見ながら調整する必要がなく簡単で、教示操作をしてプレイバックによる把持の確認まで約2分で完了する。更に、把持位置を数値で調整しても、最初の教示操作から5分以内には全てを完了することができた。これにより、対象物の位置の変更に伴う教示の修正作業も簡単に行えた。また、ロボットの動作プログラムにおけるスキャン動作の表現がシンプルなので理解しやすい。本教示手順を使用しない場合、レーザ光の照射している場所を探しながら試行錯誤の教示となり、30分程度を要する。

⑥ キャリブレーションの簡易化(筑波大学)

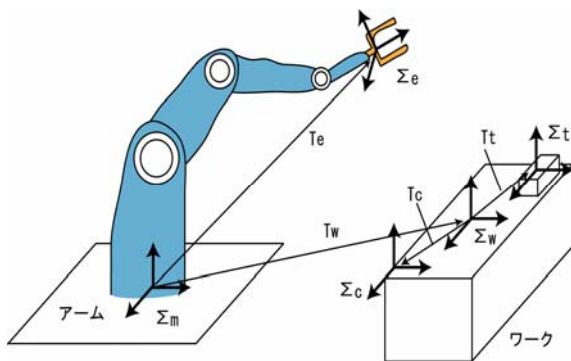
・**点-面タッチングによるアームとワークの相対位置キャリブレーション**

ロボットの作業プログラムは、古くはロボット、ワークスペースを設置した後に現場で一から教示、プログラム作成を行っており、新規製造ラインの立ち上げ時間を長くする要因となっていた。近年は3Dモデルを利用したシミュレータにより、設置前にオフラインでおおよその移動経路・干渉チェックが可能となった。これにより現場では設置後に現物に合わせたプログラムの修正を行えばよく、立ち上げ時間の短縮が図られてきた。ただし、挿入など、複雑な作業は現場での教示に依存している。

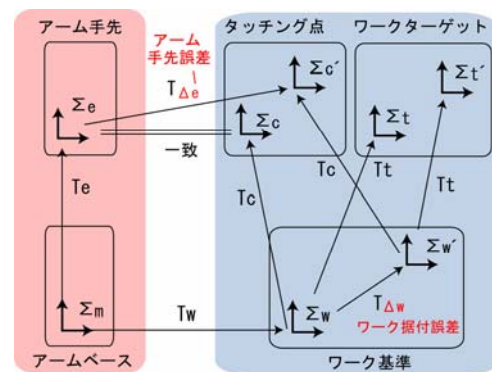
このような中、本研究においては、高度作業のために力センサなどの利用が前提となっており、これを用いることで、より容易なプログラム修正や複雑な作業の教示が行えるようになる。特にアームとワークスペースの相対位置のキャリブレーションが容易に行えるようになれば、動作プログラムの修正はかなり少なくでき、教示時間、立ち上げ時間の短縮に大きく貢献できる。

・キャリブレーションモデル設定

キャリブレーションを行うモデルを図⑥-1 に示す。アームから見たワークの基準座標系への変換を T_w とする。この T_w を正確に求めることがキャリブレーションの第一の目的であるが、実は、この T_w が求まってもアームは正しく作業を行うことができない。これはアーム手先位置に絶対位置誤差が存在するためである。このため正確な T_w ではなく、絶対位置誤差を含めたアームの手先位置（座標系） Σ_e への変換 T_e が正しくワーク上の望みの点へ一致するようにキャリブレーションを行う。



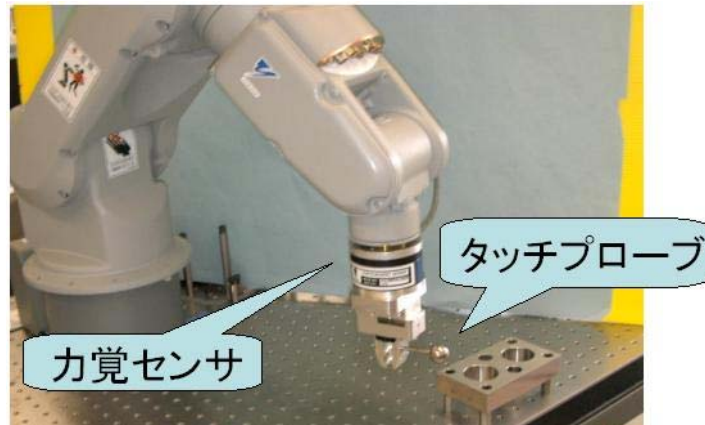
図⑥-1 キャリブレーションモデル



図⑥-2 キャリブレーション座標系

このためには、アーム手先位置でキャリブレーションを行えばよい。これにより絶対位置が含まれた手先位置がワーク座標系に合わせられる。図⑥-2 に示すように、理想的にはアーム手先位置とワークタッチング点は一致させることができるが、実際にはワーク据付誤差 Δw およびアーム手先誤差 Δe が存在するため、これらは一致しない。そこで、アーム手先の一点をワークスペース内の既知の面に接触させることで、相対位置関係を取得し、その情報から Δw および Δe を同定していく。

図⑥-3 に示すように、マニピュレータ先端のグリッパに、先端が球状になっているプローブを取り付け、このプローブにより、ワークスペース内の平面に接触させる。すると、モデル上の接触点の位置と実際にタッチした位置の誤差が手先繰り返し精度の範囲で求めることができる。ただしこれは面法線方向のみ 1 次元の拘束条件である。これを、少なくとも未知パラメータの数だけ繰り返すことにより、実際のワークスペースの存在範囲を特定することができる。



図⑥-3 タッチングプローブ

この問題を解くために、理想の位置と現実の位置の誤差は小さいものとして線形近似を行い、線形核問題として定式化した。これにより、接触位置データから自動的にキャリブレーション計算を行うことができる。また、キャリブレーションのための計測も点を面に接触させるものなので、半自動的に行うことが可能である。

・キャリブレーション実験結果

この手法を用い、筑波の検証システムを用いてキャリブレーションを行った実験結果を表⑥-1 に示す。今回の実験では、半自動的に手法による精度評価を目的とし、キャリブレーションを 5 回繰り返した際の結果のばらつきを評価した。作業時間や絶対位置精度については、安川システムにより、開発項目③にて検証を行った。

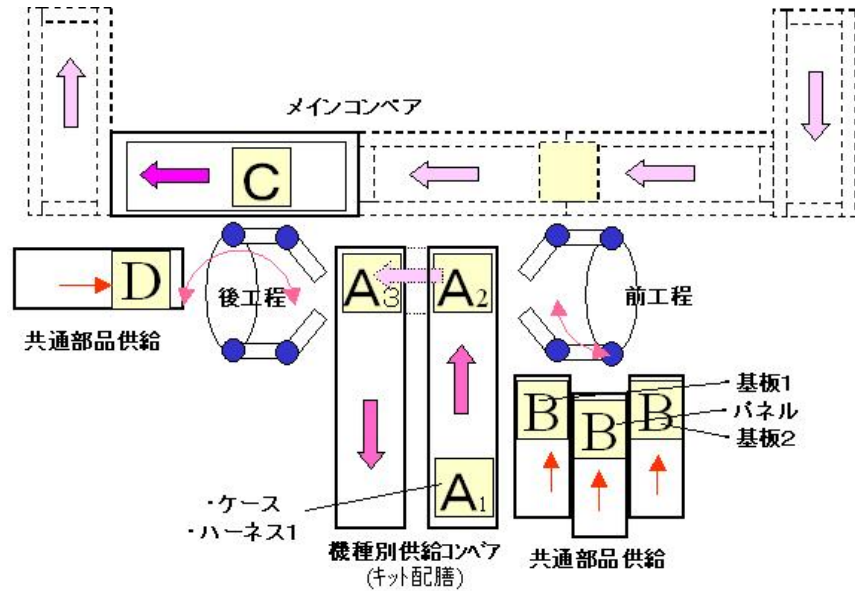
この結果は表のように、理想値に対しキャリブレーション結果は数 mm 程度ずれている。これは実際の位置ずれ及びアームの絶対位置誤差を含んでいるものと思われる。これに対し、5 回繰り返した際のばらつきは、0.1[mm]以下、0.05[deg]以下という結果が得られた。この結果（理想値より数 mm ずれているにも関わらずそのばらつきは非常に小さいこと）より、このキャリブレーションアルゴリズムが正しく機能していること、並びに、従来手法によるばらつき 0.2 [mm]、0.1[deg]という結果に比べ、かなりの向上が達成されていることが確認された。

表⑥-1 タッチングキャリブレーション実験結果

	X[deg]	Y[deg]	Z[deg]	Roll[deg]	Pitch[deg]	Yaw[deg]
理想値	390.00	160.00	50.00	0.00	0.00	0.00
校正結果	391.5713	165.2369	51.1209	0.0054	-0.2017	0.0136
	391.4743	165.1765	50.9708	0.0093	-0.3132	0.0446
	391.5441	165.2541	51.1521	0.0325	-0.2669	0.0135
	391.5238	165.3216	51.1752	-0.0703	-0.2664	-0.0104
	391.5031	165.2482	51.0213	-0.0013	-0.3055	0.0314
平均値	391.5233	165.2475	51.0881	-0.0049	-0.2707	0.0185
標準偏差	0.0372	0.0517	0.0880	0.0387	0.0442	0.0208

⑦ 実証ロボット（プロトタイプロボット）の開発及び実証実験

安川電機製小型インバータ V1000 の配線及び基板組付けをターゲットとし、組立工程（現状は2人手作業）を双腕ロボットの2台の工程に分けて実現し、インバータ工場では試験ラインを稼動した。図⑦-1に試験ラインの構成を示す。



図⑦-1 試験ラインの構成

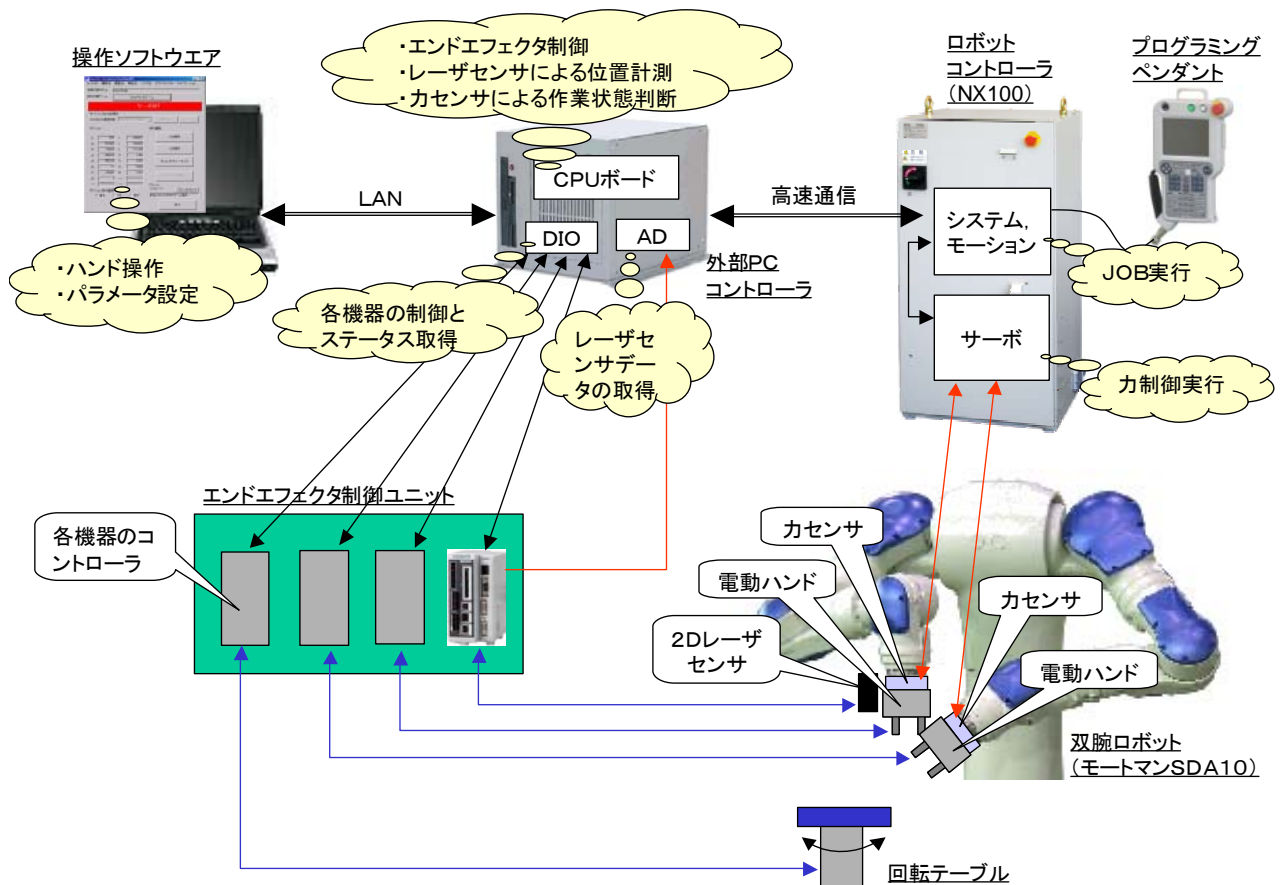
実証ロボットの試験ラインの具体的な仕様は下記の通りである。

- ▶ 枠番に依存しない部品は共通の供給装置で供給し、枠番に依存する部品はキット配膳によるコンベアで供給した。キット配膳部分は最終目標までにロボット化する。
- ▶ 対象とするインバータは1機種のみ。
- ▶ 最終目標時の作業タクトタイムは前後工程それぞれ40秒とする。

・実証システムの構成

システム構成としては、図⑦-2に示すように、安川電機製双腕ロボットSDA10とロボットコントローラNX100と外部PCとモニタ用PCとエンドエフェクタ制御ユニットで構成され、前工程用と後工程用で計2セット使用する。各機器間の接続形態は、ロボットコントローラNX100のシステムモーション部と外部PCは高速通信で接続されており、定周期での情報のやり取り（コマンドや位置修正量等）が可能である。モニタ用PCは外部PCとLAN接続されて、外部PC内のパラメータ設定を主に行う。エンドエフェクタ制御ユニットは外部PCとIO接続されて、電動ハンドの開閉や2Dレーザセンサの制御を行う。

外部PC内では2Dレーザセンサからセンサ情報とロボットの位置フィードバック情報を元に、ケーブル端のコネクタ位置の補正情報を算出し、ロボットコントローラへ送っている。また、嵌合スキルの状態遷移の判断も外部PC内の作業プログラムで行う。

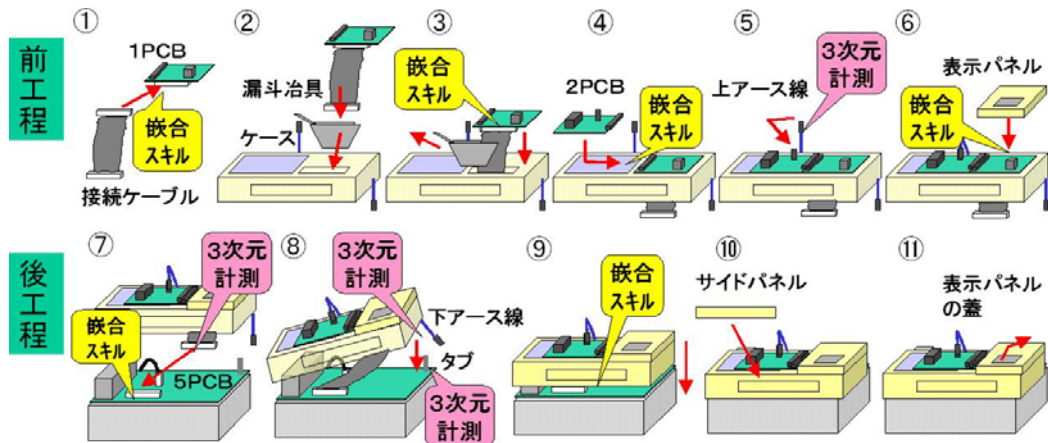


図⑦-2 システム構成 (1台分)

上記試作システムで対象工程をロボット化し、人手80秒(40秒×2)の作業を双腕ロボット2台により100秒強で実現できる見込みが得られた。今後は2Dレーザーセンサのスキャン高速化、作業工程の見直し、作業スピードの向上を図ることで、人手と同等の作業時間まで短縮する予定である。

・作業成功率の評価方法と結果

図⑦-3 に示されている前工程・後工程作業の自動組立作業試験を実施し、作業成功率を計測した。未使用の新品50サンプルを使って連続評価試験を行った。その結果、表⑦-3 のような作業成功率となり、本年度の目標を達成できた。ただし、現場サイドからはさらなる作業成功率の向上が求められている。今後、技術を確実なものにブラシアップすることで実用化が可能である。



図⑦-3 小型インバータ V1000 の組立作業手順

表⑦-3 作業成功率と作業状態認識率の評価試験結果

	前工程	後工程	全体
作業成功率[%]	100	91.3	95.7
作業状態認識率[%]	100	98.6	99.3

評価試験での作業や状態認識の主な失敗原因として、スキルパラメータの設定が最適値になっていないことによりたまたま失敗するケースがあると考えられる。⑤で説明したスキル嵌合教示機能で抽出したパラメータをさらに最適化するような機能が必要であると考えており、実用化フェーズにおける今後の課題として取り組む予定である。

表Aに研究開発項目毎の目標と達成度のまとめを示す。

表A 「簡易な教示が可能な高機能マニピュレーション技術の開発」 目標と達成度のまとめ

研究項目(基本計画内容)	目的	本開発の目標	成果	達成度
柔軟物を迅速かつ高精度・高信頼度でハンドリングできるマニピュレーション技術の開発	接触作業スキルの開発 (複腕協調作業技術)	キット配膳で定位置に部品を供給し、自動でインバータの組立を実行(作業成功率90%以上)	力センサを利用した嵌合作業スキルと2Dレーザセンサを利用したワーク位置姿勢計測により、キット配膳と個別部品供給で定位置に部品を供給し、作業成功率95.7%で小型インバータの配線及び基板の自動組み付けを実現した。	目標達成
	作業パラメータの取得 (高度配線作業技術)	グリッパに人が手を添えて、コネクタの把持姿勢、把持力等のスキルパラメータを教示、再生するシステムの構築。教示時間50%短縮を目指す。	グリッパに手を添えたスキル教示手法の開発を行い、小型マニピュレータでも大型による作業の教示が行えること、初めての教示者でも直感的に利用できること、多人数でもほぼ同様のスキルパラメータが教示できることを確認した。	教示時間の短縮度は未確認だがほぼ目標達成。
柔軟物を知的にハンドリングするためのセンサ利用技術(ビジョンシステム、力制御、力センサ)の開発	作業状態認識 (環境認識技術)	キット配膳された部品の把持認識、部品の能動センシング後の把持認識、部品組付け認識を確率95%以上。タッチングキャリブレーション(筑波大アルゴリズム)によるワーク位置姿勢計測でオフライン教示の動作プログラミングの活用。	電動ハンドの把持力とモータエンコーダ情報による部品の把持認識と、力センサとロボットエンコーダ情報を利用した部品組付け認識を確率99.3%で実現した。タッチングキャリブレーションによるワーク位置姿勢計測で、事前検証したオフライン教示の動作プログラミングを実機の動作プログラムとして活用した。	目標達成
	ケーブルトレースによるコネクタ認識 (作業遂行認識技術)	おおよその向きしかわからないケーブルに対し、トレースにより先端コネクタの位置・姿勢、ケーブル把持位置の計測を行う。90%以上の成功確率を目指す。	ケーブルを追従するアルゴリズムを開発し、100mm程度のケーブルを1秒程度で追跡することにはほぼ100%成功している。ただし、高速化に伴い計測時間遅れの影響から振動的となり、長い距離の追従には改良が必要となっている。	目標達成
短時間で簡便に作業を提示できる次世代教示機能の開発	作業教示の簡易化 (簡易教示技術)	作業教示(センサ動作教示、嵌合作業スキル教示、パラメータの自動調整を含む)の簡易化とプレイバックによる作業遂行(作業成功率90%以上)を実現。保守担当のロボットエンジニアリング関係者が教示可能なシステムを実現。	従来通りの操作ペンダントで接触作業させながら嵌合作業スキルに必要なパラメータの自動教示と、2Dレーザセンサのスキャン及び把持動作の簡易教示ができるシステムを実現した。また、作業成功率95.7%でプレイバックによる作業を遂行できた。	目標達成

	キャリブレーションの簡易化 (多自由度系教示技術)	人手で行っていたロボット設置時のキャリブレーションに対し、タッチングプローブとパレット表面の点-面接触を利用して半自動化した手法を開発する。作業時間の50%短縮を目指す。	点-面タッチングによるキャリブレーションアルゴリズムは完成し、±100mm、±20°程度の据付誤差に対しても、5回繰り返した際のばらつきが従来手法の半分の0.1[mm]、0.05[deg]以下でキャリブレーションが行える。	作業時間は従来の手動3点教示する場合と比較して優位性はなかったが、自動化可能な手法として将来性がある。
開発技術を組み込んだプロトタイプ機を製作し、開発技術の有効性を実証する	作業実証試験 (実証ロボットシステム)	インバータ製造サブラインでの試験稼働を実現。小型インバータ組立サブラインへの周辺機器も含めたシステムとしてロボットを導入し、小型インバータ組立作業の作業成功率90%以上。	インバータ製造サブラインでの試験稼働を実現し、キット配膳コンベアや部品供給装置を含めたロボット生産システムを導入し、小型インバータ組立作業の作業成功率は95.7%である。	目標達成
	技術検証試験 (検証ロボットシステム)	ロボット用ミドルウェアを用い、様々なスキルに対応可能な複数台マニピュレータからなる検証システムを構築する。	マニピュレータ、2Dレーザセンサ、力センサ、力制御系をロボット用ミドルウェアであるRTミドルウェアにより実装し、ネットワーク上で多数台のロボットが稼働するシステムを構築した。	目標達成

3) 成果の意義

製造分野での組立工程は非常に多いが、単純なものを除いてロボット化率は高くない。一方製品の多くが一部柔軟物を含みロボット作業工程の完結上ネックとなっていた。今回の技術開発でネックを解決する可能性が見え、世界的な需要に応える準備ができた。

組立て作業は機種や工程の変化対応力が求められる。そのためロボットの教示スピードが重要で位置決めと同時に微妙な力加減を簡単に教示できる技術が必要とされる。今回の開発でその解決手段を提供することができ、その効果を製品製造工程で実証した。センシングを含めたロボットの簡易な教示技術の重要性と開発事例を示すことができた。

開発した技術は従来型ロボットシステムとの整合性を重視し、現実の製品への移植性を考慮した汎用的なモジュールで構成しており、移植性、汎用性に優れている。これにより、投入コストと実用化の可能性の面で効率的開発を実施することができた。

4)特許の取得状況

番号	出願日	出願番号	名称	発明者
1	2007年9月6日	特願2007-231944	組み立て作業ロボットの制御方法および制御装置	安川電機
2	2007年8月22日	特願2007-216036	ロボットの制御装置および制御方法	安川電機
3	2008年1月18日	特願2008-009838	ロボットの制御装置および制御方法	安川電機
4	2008年9月2日	特願2008-224990	ロボットの教示再生装置および教示再生方法	安川電機
5	2008年12月9日	特願2008-313198	複腕ロボットの作業プログラム作成方法	安川電機
6	2008年12月9日	特願2008-313199	組み立て作業ロボットの制御方法	安川電機
7	2008年12月9日	特願2008-323456	ロボットシステム	安川電機

5) 成果の普及

学会発表・講演

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
平成19年3月16日	日本機械学会関東支部大会	劣駆動マニピュレータを用いたインパクト・マニピュレーションによる圧入作業	進藤晋一郎・富田信悟・相山康道（筑波大学）
平成19年5月11日	日本機械学会ロボメカ講演会	「劣駆動マニピュレータを用いたインパクト・マニピュレーションによる圧入作業の実現」	進藤晋一郎・富田信悟・相山康道（筑波大学）
平成19年8月23日	Int. Conf. Advanced Robotics	“Dynamic Manipulation with Impact Force”	Shingo Tomita and Yasumichi Aiyama
平成20年3月15日	日本機械学会関東支部大会	「マニピュレータが協調作業を行うためのRTミドルウェアによるシステムの構成論」 「マニピュレータによるワイヤハーネスの操り」	佐藤和輝・相山康道（筑波大学） 橋本敦至・相山康道（筑波大学）
平成20年4月	Int. J. of Automation Technology	Realization of Press-fitting Operation by Impact Manipulation with a Under-actuated Manipulator	Shinichiro Shindo, Shingo Tomita and Yasumichi Aiyama (Tsukuba Univ.)
平成20年6月6日	日本機械学会ロボメカ講演会	マニピュレータが協調作業を行うためのRTミドルウェアによるシステムの構成論 拘束型テータクローブを用いた多指ハンドによる物体操作	佐藤和輝・相山康道（筑波大学） 進藤晋一郎・相山康道（筑波大学）
平成20年9月9日	日本ロボット学会講演会	「ティーチペンダントによる嵌合作業の教示」	神谷陽介・安藤慎悟・井上康之（安川電機）
平成21年3月17日	ロボティクス・シンポジア	点-面タッチングによるアームとワークの相対取り付け位置キャリブレーション	久保田徹・相山康道（筑波大学）
平成21年5月25日 (予定)	日本機械学会ロボメカ講演会	RTミドルウェアを用いた汎用的なマニピュレータシステムの構成の検討 点-面タッチングを用いた複数アームによる協調組み付け作業	渡部努・相山康道（筑波大学） 久保田徹・相山康道（筑波大学）

6) 実用化・事業化の見通し

[波及効果]

本開発では中でも自動車（パーツの組立など自動化が残された部分）、家電の配線作業を特に有望な市場としている。ここでは人との単純置き換えでの作業をターゲットとしており、技術的対応の広がりによって可能な作業の種類が増えるほど、市場での受け入れ可能性が広がる。

3.1.1.3 FA機器組立ロボットシステムの研究開発 【実施者:三菱電機(株)】

1) 研究概要

本研究開発は、従来困難であったロボットによる柔軟物の高速かつ確実な組み付けを実現し、また、低コストで簡単、迅速に立ち上げ可能なロボットシステムを開発し、電機電子製造業に提供することを目的としている。開発中のロボットシステムは、柔軟物であるケーブルを部品とするFA機器を組立対象としている。FA機器は、ケーブルの他、基板、ねじ、カバーなど、他の多くの電機電子製品に用いられる部品から構成されており、開発した技術及びロボットシステムは広く活用が可能である。

本研究開発では、上記目標を達成するにあたって開発が必要と考えられる技術を次の三つに

大別し、それぞれに関して開発内容と目標を設定して研究開発を進めている。

・柔軟物を迅速かつ高精度・高信頼度でハンドリングできるマニピュレーション技術の開発

① 作業エラーからの自動復旧技術

・柔軟物を知的にハンドリングするためのセンサ利用技術（ビジョンシステム、力制御、力センサ）の開発

② 3次元センシングシステム

a. 剛体物の3次元センシング技術

b. 柔軟物の3次元センシング技術

③ 組み付け制御技術

a. 高速組み付け制御技術

・短時間で簡便に作業を提示できる次世代教示機能の開発

④柔軟物組み付け作業オフラインプログラミング技術

a. 柔軟物組み付け作業レベルプログラム生成システムの開発

b. 柔軟物体操作におけるマニピュレータ作業動作の最適化

また、これらの技術を統合し、実際のFA製品の組立において技術検証を行う為、柔軟物を含む製品である大容量サーボアンプを対象として、組立試験装置を開発している。

⑤FA機器組立実証システム

次に、各開発技術のステージゲート時点での目標と成果を下記に示す。

① 作業エラーからの自動復旧技術

目標：コネクタの組み付け作業において、挿入不可能状態を認識し自動復旧を実現する。挿入不可能状態からの自動復旧率は両コネクタにおいて80%を目標とする。

成果：基板コネクタとIGBTコネクタの2種類のコネクタの組み付け作業の挿入不可能状態から、スパイラルサーチ手法と接触探索手法を用いて、自動復旧を実現した。エラー認識後の自動復旧の成功率は基板コネクタで99%、IGBTコネクタで98%であり、目標を達成した。

② 3次元センシングシステム

目標：小型パターン投光部、及び広ダイナミックレンジカメラ一体型の3次元センサユニットを試作し、距離測定機能が正常に動作することを確認する。センサヘッドサイズは350cc以下、通常カメラの4倍以上のダイナミックレンジ、Ethernetによる画像伝送機能の実現を目標とする。また、自由姿勢状態の位置姿勢を認識するアルゴリズムを開発し、位置誤差±1mm、処理時間2秒以内の実現を目標とする。さらに、柔軟物3次元センシング技術として、ケーブルの3次元形状推定アルゴリズムを開発し、ロボット動作と組合せたモーションステレオ計測手法において、柔軟物ケーブルの計測位置精度±3mm、計算処理時間2秒以内を実現する。

成果：3次元センサユニットの設計・試作を行い、センサヘッドサイズ332ccの実現およびEthernetによる画像伝送を実現した。また、通常カメラの4倍以上の広ダイナミックレンジ機能を実現し、対象物反射特性の影響を抑制した距離測定の実現を確認した。また、コネクタ認識方式については高精度距離計測値を用いた認識処理により、フリーの状態のコネクタ位置姿勢を誤差±0.9mm、処理時間1.3秒以内で計測・認識可能であることを確認した。柔軟物3次元センシング技術に関しては、離散特徴点の運動ステレオ計測で、ロボット運動ベースの追跡安定指標の導入により精度±3mm、計測性能向上アルゴリズムの改良による利用画像枚数の削減により処理時間1.7秒以下を実現した。

③ 組み付け制御技術

目標：開発した力制御系を実証システムに統合して実際に発生する問題点に対して改良開発を行い、コネクタ挿入作業を人の作業時間の3倍以内で実現する。

成果：対象物の特性を挿入作業中にリアルタイムで同定する機能を開発し、挿入作業中に同定できることを実機で確認した。また力制御のパラメータをリアルタイムで変更することにより、人とほぼ同等の速度（0.7秒）でコネクタ挿入作業を可能とするとともに、位置ずれ時に早期に停止することによりワーク及びロボットを保護できることを確認した。

④ 柔軟物組み付け作業オフラインプログラミング技術

目標：作業レベルプログラム生成システムにおいて、電機電子製品組立において典型的な作業を行うロボットプログラム生成機能を開発する。また、ロボット手先の回転を伴う動作においてケーブルの振動を抑制する軌道と加速度を生成する動作最適化技術を開発する。

成果：コネクタの把持、挿入作業など実証システムの一部の作業工程対象に作業単位のブ

ロックを並べるだけで容易にプログラム作成、シミュレーションによる動作確認が可能となり、従来のロボットプログラミング言語を用いた場合に対し 1/3 の時間で作成できることを確認した。また、ケーブルの重心移動を抑制した軌道を自動生成しステージゲートの検証システムにおいて、ケーブル先端の振幅を約 50%減少させることができた。

⑤ FA 機器組立実証システム

目標：分岐ケーブルの組み付け作業など FA 機器組立において主要な作業を検証可能な実証システムを製作する。

成果：大容量アンプを対象に非整列供給されたケーブル取り出し及びキッティング治具へのセット、ケーブル組み付け、基板組み付け、カバー組み付けの各工程を実証システムに実装し、開発した 3 次元センシング、組み付け制御、動作最適化、自動復旧技術を用いて、柔軟物（ケーブル）組み付け作業、非整列部品のキッティング作業を含む FA 機器に代表される電機電子製品の一連の組立作業が実現可能であることを確認した。

次に、各開発技術について詳細を説明する。

2) 成果詳細

① 作業エラーからの自動復旧方式の開発

柔軟物組み付け作業における代表的な作業であるコネクタ挿入作業を対象に、エラー状態を認識し、エラー状態から自動復旧して作業を継続できる自動復旧方式を開発した。FA 機器を代表するコネクタに関して実機検証した結果、目標である自動復旧率 80%を上回る 98%を達成した。以下詳細を述べる。

- ・ 基板コネクタと IGBT コネクタの組付け作業における挿入不可能になったエラー状態から、自動復旧を実現するアルゴリズムを開発した。
- ・ 基板コネクタはヘッダー側にカバーがついており、様々なエラー状態が起こりにくくなっており、全て挿入不可能状態と認識されるようなコネクタ形状であった。その基板コネクタに対しては異常検出後、スパイラルサーチ(図 1)によって挿入位置を探索し組み付け作業の自動復旧を実現した。
- ・ IGBT コネクタはヘッダーのピンが曲がりやすい性質があり、スパイラルサーチが使えない状態である。そこで、コネクタを探針として接触探索アルゴリズムを開発し、3 回の接触動作によりピンヘッダーの位置を計算することを提案した。このアルゴリズムにより IGBT コネクタの挿入不可能状態からの自動復旧を実現した。
- ・ 作業成功時と作業失敗時の挿入量と挿入反力の関係を、ファジィ関数を用いて学習し、オンラインで得られたデータと比較し挿入作業の異常状態を検出した。異常検出の応答性を向上する目的で、挿入反力または挿入量が閾値に達した場合にも、作業を停止し異常判別をおこなった。

- ・ 実証システムにおける自動復旧動作の成功率は、基板コネクタの場合は 100 回試行して 99 回成功したため成功率 99%であり、IGBT コネクタの場合は 50 回試行して 49 回成功したため成功率 98%であった。目標成功率 80%を達成できた。

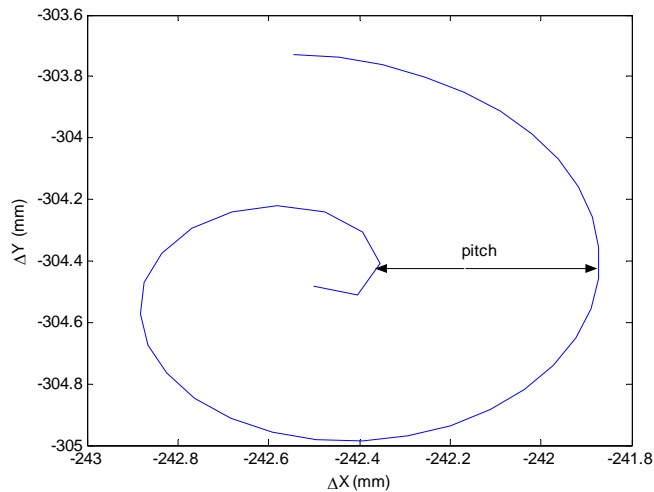


図 1 基板コネクタのスパイラルサーチでの探索軌道

基板コネクタ挿入のエラーリカバリアルゴリズム

1. コンプライアンス制御でコネクタの挿入作業を試行する。
2. 挿入作業はロボット手首のカセンサで計測される挿入反力か、挿入量が限界値に達した場合に作業終了となる。
3. 階層化ファジィパターンマッチング判別器を用いて異常検出をおこなう。
4. もし“挿入不可能状態”が検出された場合は次の作業を実行する
5. タイムアウトになった場合は作業終了する。
6. スパイラルサーチを実行して挿入開始位置を補正する。
7. 補正された挿入開始位置で挿入作業準備状態に移行する。
8. ステップ1に戻る。
9. 挿入不可能状態の場合の作業は以上

② 3次元センシングシステムの開発

柔軟物を知的にハンドリングするための3次元センシングシステムとして、下記項目の

開発を行った。

- a. 剛体物の 3 次元センシング技術
- b. 柔軟物の 3 次元センシング技術

前者では、柔軟物の先端に位置するコネクタを 3 次元計測するための小型 3 次元センサハードウェアと現場調整の容易な 3 次元計測手法を開発するとともに、コネクタ部の 3 次元認識手法を開発した。また、後者では柔軟物であるケーブル部の 3 次元計測手法を開発した。実証システムでは、狭視野範囲を高精度に計測する前者の 3 次元センシング技術と、広視野をカバーする後者の 3 次元センシング技術を組み合わせることにより、柔軟物であるコネクタ付ケーブルの 3 次元センシングシステムを実現している。図 2 に実証システムにおける作業例を示す。この作業により、キッティング治具にセットされたコネクタ付ケーブルは後半工程において、組み付け作業が行われる。

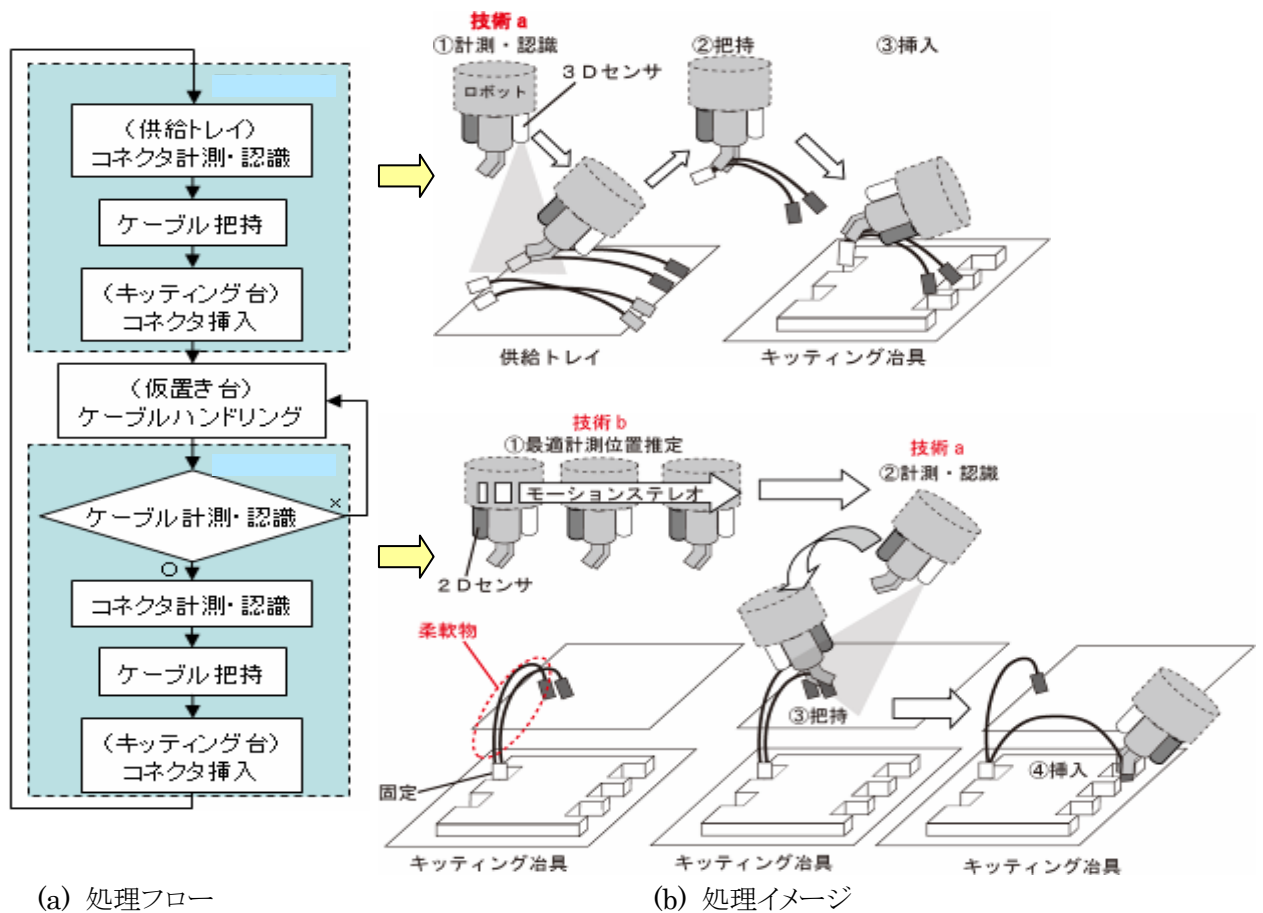


図 2 3次元センシングシステムにおける作業例

a. 剛体物の 3 次元センシング技術の開発

コネクタ付ケーブルをキッティング治具にセッティングすることを目標とし、コネクタ(剛体物)に対する 3 次元センシング技術として以下の技術開発を行い、次のような結果を得た。これにより、

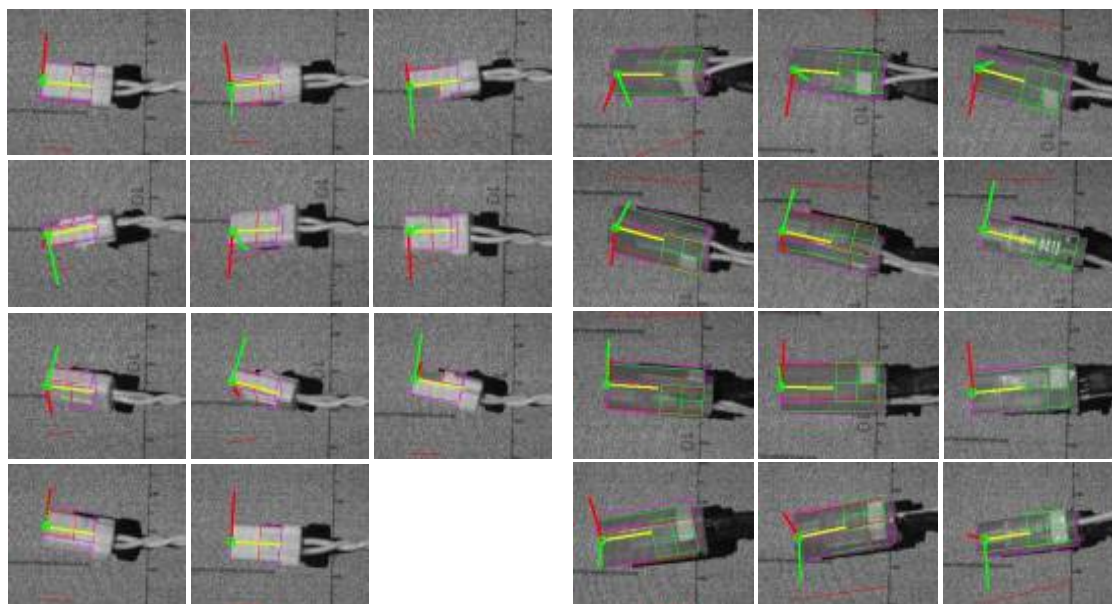
いずれも中間目標値を達成している。

(1) 小型3次元センサ

- ・パターン投光部・カメラ一体型の3次元センサヘッドユニットの設計、試作を行い、中間目標である容積350cc以下となる332ccを実現した。
- ・パターン投光部ではLDを光源とする小型光学系と小型スキャニングミラーを用いて、50度の振れ角度で投射した計測パターンがカメラで正常に同期撮像されることを確認した。
- ・高輝度画像と低輝度画像をFPGA内でフレームメモリを用いずにリアルタイム加算し、中間目標値である通常カメラの4倍のワイドダイナミックレンジ化(WDR化)を実現した。
- ・耐ノイズ性、長距離伝送を実現するため、中間目標であるEthernetによる信号(画像、制御信号等)伝送を実装した。
- ・視野変更、計測距離設定が容易に変更可能な3次元距離復元アルゴリズムを開発し、使用現場での調整が容易に実現可能であることを確認した。

(2) コネクタ位置姿勢認識アルゴリズム

- ・2次元濃淡画像及び3次元距離情報を用いた計算処理により、コネクタの3次元位置姿勢認識アルゴリズムを開発した。複数種類のコネクタに共通して対応可能な位置姿勢認識手法となっており、コネクタ部の位置誤差 $\pm 0.9\text{mm}$ (中間目標値 $\pm 1\text{mm}$)、処理時間1.26秒(中間目標値 2秒以内)を実現していることを確認した(図3)。



(a) 白コネクタ認識結果

(b) 赤コネクタ認識結果

図3 コネクタの認識結果例

b. 柔軟物の3次元センシング技術の開発

整列台（キッティング台）へのケーブル整列作業に必要となるケーブル部分の3次元センシング技術の開発については以下の技術開発を行い、次のような結果を得た（図4、5）。これにより、いずれも中間目標値を達成している。

(1) モーションステレオ手法の開発

- ・ロボットに取付けた単眼カメラをロボット動作により動かすことで仮想的なステレオを実現するモーションステレオ手法において、レーザースリット光照射による人工的特徴点(人工マーカー)付加機能と追跡安定性指標の開発により、ケーブル上の特徴点に対する高精度な計測処理を実現した。
- ・ $\pm 3\text{mm}$ 以内に約98%の計測点を含んでおり、この結果より推定されたケーブル中心位置は平均誤差0.8mm以下となっており、中間目標である $\pm 3\text{mm}$ を実現した。

(2) ケーブルの状態判定

- ・ケーブル上の特徴点のクラスタリング処理による複数本ケーブルの識別技術を開発。
- ・ケーブル計測データからのコネクタ位置・法線方向の推定処理を開発。
- ・以上の開発により、エラーリカバリのためのケーブルハンドリング処理とコネクタ計測のための計測視点決定処理を実現した。

上記(1)、(2)の処理がロボット動作を含めて約1.7秒となっており、中間目標値である2秒以内で行なわれ、実用的な性能が実現されていることを確認した。

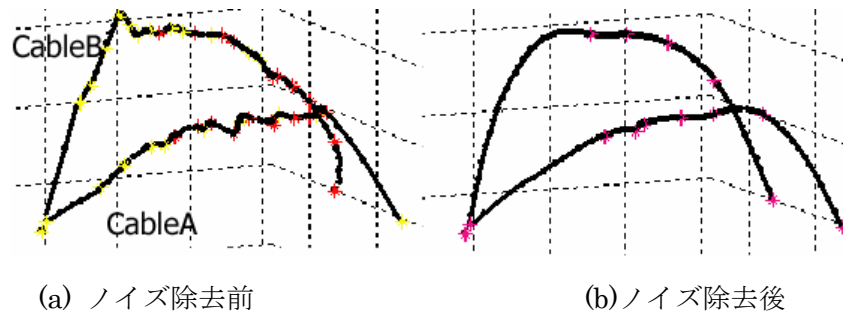


図4. 追跡安定指標に基づくノイズ除去例

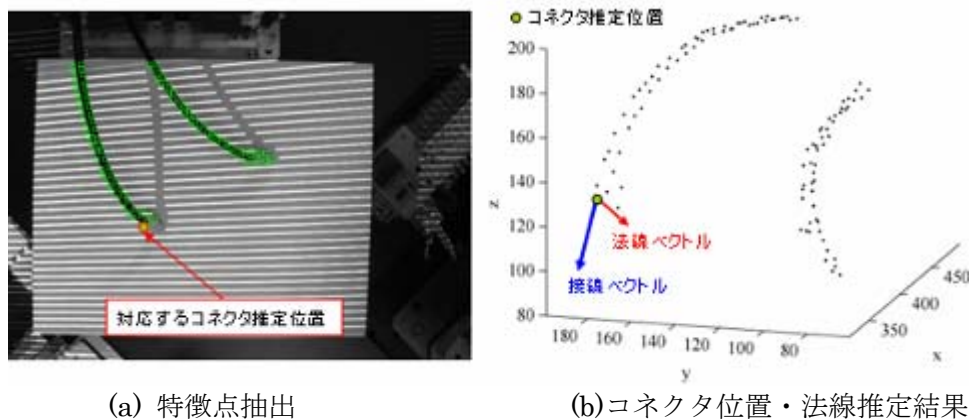


図5. コネクタ位置・法線推定例

③ 組み付け制御技術の開発

a. 高速組み付け制御技術の開発

力制御を用いる場合の動作の高速化と、位置ずれにより過大な力が作用したことを検知して停止することにより、目標の人の3倍を大きく上回る、人とほぼ同等の作業時間でFA機器に用いられているコネクタの挿入作業を実現した。

- ・ 力制御系と接触中の対象物の動特性をリアルタイムで同定する手法を検討し、シミュレーションを実施し効果を確認した。
- ・ コネクタ挿入作業に適用する実験を実施した。
- ・ 力制御パラメータのリアルタイム変更により、位置ずれ時の安全な停止と高速な挿入作業（挿入時間は約0.7秒で人とほぼ同等）の両立を実際のFA機器コネクタの挿入実験で実証した。

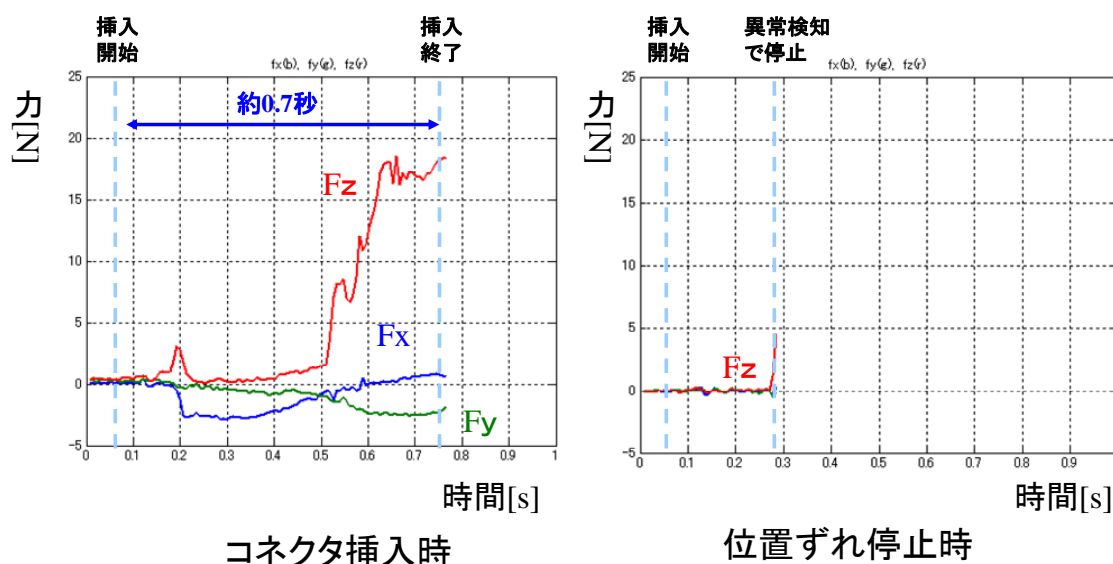


図6 コネクタ挿入実験時の力覚センサーデータ（成功時、位置ずれ停止時）

④ 柔軟物組み付け作業オフラインプログラミング技術の開発

a. 柔軟物組み付け作業レベルプログラム生成システムの開発

ロボットに組立作業を行わせる場合、ロボットの動作はロボット言語で記述し、作業位置は実際にその位置にロボットを移動させ記憶させるオンライン教示方式が一般的である。オンライン教示方式は作業が複雑な場合やロボットが複数のシステム場合、教示位置の数が膨大となり、また、ビジョンセンサを利用する場合は計測する位置も教示しなければならない。2台のロボットで1つのワークの搬送や作業をするシステムでは、ワークの大きさなどの制約条件を考慮して、ロボットの動作の同期をとるなど複雑なプログラムを作成しなければならない。また、それぞれのロボットについて周辺環

境やロボット同士の干渉に注意する必要がある。

本研究開発では、短時間で容易に2台のロボットによる組立システムの構築が可能となる作業レベルプログラム生成システムを開発した。図7に概念図を示す。

作業レベルプログラム生成システムは、従来のロボットプログラムのようにロボット言語によりロボットの動作を記述するのではなく、ユーザがGUI(Graphical User Interface)を用いてロボットに行わせたい作業を直接指示することによってプログラムを生成する。

システムは組み付けるワーク、筐体など組み立て対象の3次元データ、属性から構成される部品データベース、それらを組み付ける作業動作のプログラムが蓄積された作業記述データベース、ユーザがシステムの作業の記述、プログラム生成、シミュレーションによる動作確認を行うプログラミングGUIから構成される。

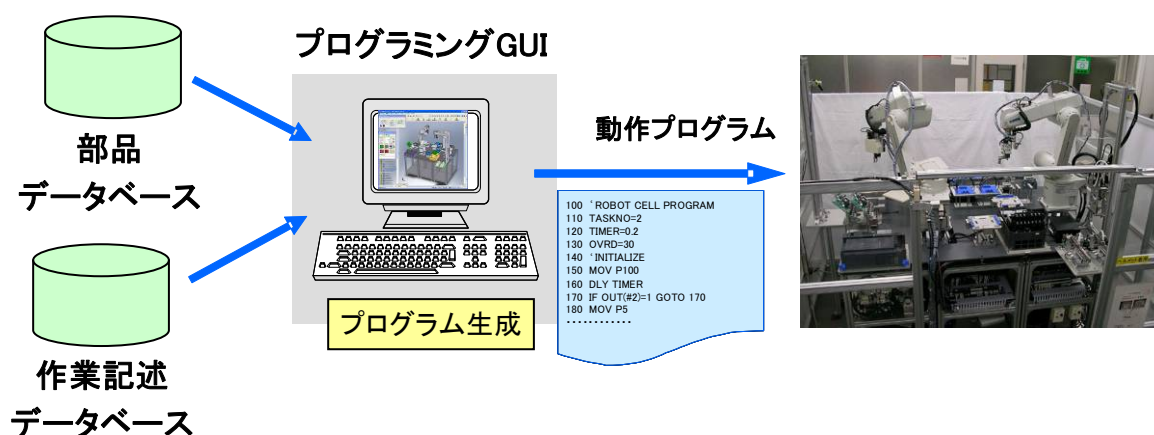


図7 作業レベルプログラム生成システム概要

部品データベースはコネクタ、ケーブルなど組立部品の3次元形状データと属性データから構成される。部品の3次元形状データは、本システムの3次元CAD機能を使用して作成するか、市販の3次元CADで作成したデータを読み込むことが可能である。3次元形状データには、ロボットの把持位置、挿入方向などのデータが付加され、作業の教示時に利用される。

属性データは、部品のサイズ、3次元形状データファイル名、把持位置データ名、嵌め合い対象コネクタ名などのデータがXMLで記述される。XMLで記述することにより、検索などの高機能化、データの再利用が容易となる。

システムのロボットプログラムの作成は、コネクタ把持や挿入など、作業単位のブロックをフローチャートの様に並べることによって行う。図8にプログラム作成及び位置教示を行う作業レベルプログラミング画面を示す。

プログラム作成時には、まず、システムのロボットの台数を選択する。最大2台のロボットのシステムに対応可能である。次に作業ブロック一覧から、ハンド装着、コネクタ挿入などの作業ブロックを選択し、作業フロー画面にドラッグ&ドロップすることにより、作業を並べる。作業フロー画面に並んだ作業ブロックを作業の順番に接続し、作業順序を決

定する。

作業ブロック一覧に新しい作業ブロックを追加するには、作業のロボットプログラムをテンプレートとして登録し、教示すべき位置、変数を設定してやるだけでよい。このとき、教示位置は自動で抽出されたため、短時間で登録することが可能である。

位置を教示したい作業ブロックをクリックすると、ブロックの色が黄色に変化し、作業レベルプログラミング画面の左側にプロパティが表示される。プロパティには教示または入力すべき変数の一覧が表示されるので、教示する位置データを選択し、システムの 3 次元データ上で教示する。各部品の 3 次元データに把持位置などの教示位置が設定されているので、教示時にはその教示位置を 3 次元データ上で選択するだけでよい。教示位置を選択すると、そのラベル名がプロパティに設定され、教示位置は、座標ではなく、ラベル名で管理されるため、対象部品の配置を変更した場合でも、画面上で教示し直す必要がない。

プロパティには作業ブロックのソースコードも表示されるため、システムに応じたカスタマイズが容易に可能である。

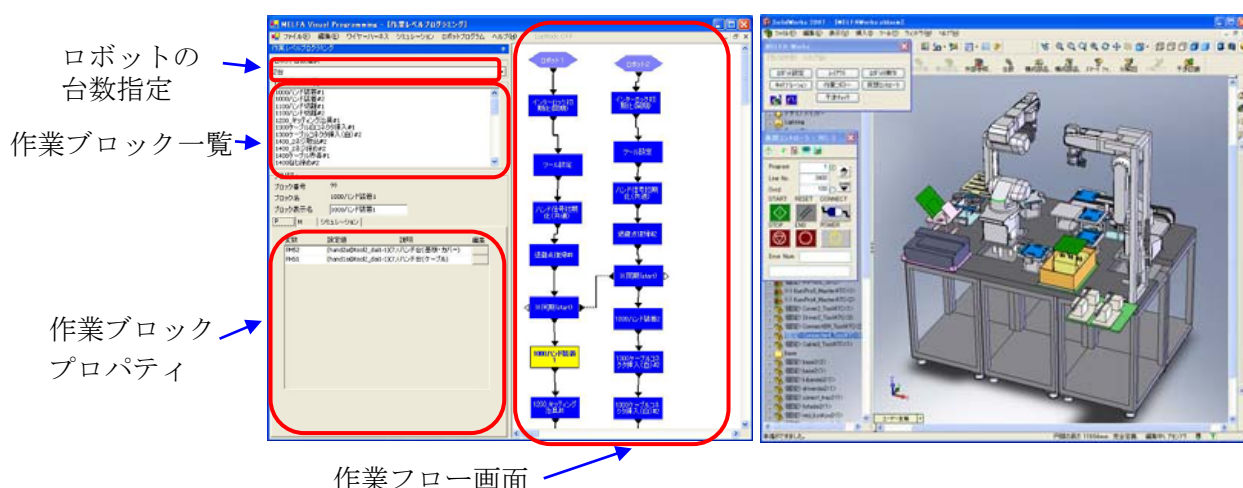


図 8 作業レベルプログラミング画面

作業ブロックを並べて作成した作業フローは、本システム上でシミュレーションすることが可能であり、PC 上でシステムの動作が確認できる。この機能により実機上での調整時間を大幅に短縮可能である。

シミュレーション実行には、ブロックごとの実行、ロボット毎のフロー全体の実行、2 台のフローの連続実行の 3 種類のモードがあり、ロボットプログラムのデバッグが容易にできる。フローの実行中には、実行されているブロックの色が変化し、システムの 3 次元表示画面上で、システムの動作が確認できる(図 9)。シミュレーションは、実機のロボットコントローラと同じソフトウェアによって行われているため、高精度なシミュレーションが可能である。

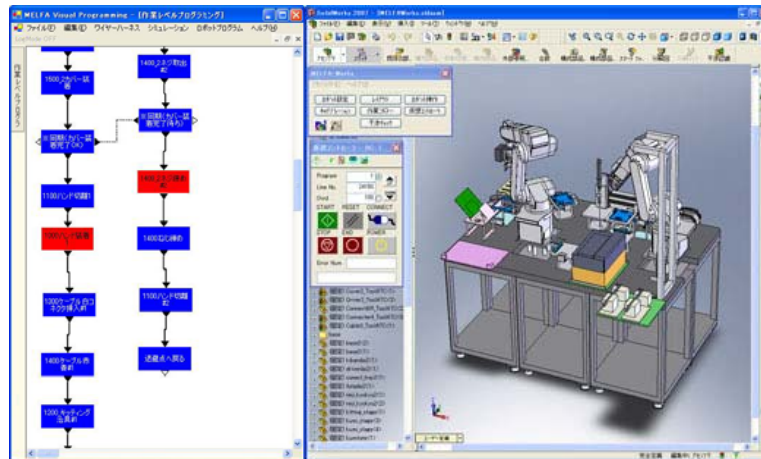


図 9 シミュレーション画面

本システムを用いて、実証システムの一部工程のプログラムを作成し、プログラムの作成時間を評価した。ロボット 1 は、ケーブル供給トレイからのケーブルの取り出し、キティング治具への挿入、サーボアンプのカバー搬送、組み付け等 13 の工程、ロボット 2 は、コネクタ挿入、ねじ締めなど 14 の工程のプログラムを作成した。

本システムを用いてプログラムを生成した結果を表 1 に示す。本システムを用いて生成したプログラムは、ロボット 1 が 1260 行、ロボット 2 が 1696 行であり、1 日でプログラムを作成、シミュレーションで動作確認できた。一方、本システムを使わずに基本検討、設計、プログラム作成した場合、約 3 日を要した。以上より、本システムを用いることにプログラム作成時間を約 1/3 に短縮できることを確認した。

表 1 プログラム生成結果

	ロボット 1	ロボット 2
プログラム行数	1260 行	1696 行
本システムによる作成時間	1 日	
従来手法による作成時間	3 日	

b. 柔軟物体操作におけるマニピュレータ作業動作の最適化

柔軟物であるケーブルを高速で搬送しようとする、ケーブルが振動し、経路途中の周辺物に接触したり、停止時の振動が収まる待つために作業時間が長くなるなどの問題がある。そこで、ケーブルの特性を考慮して振動抑制を行う軌道生成方式を開発した。その結果 FA 機器用ケーブルで実際に 50%振動を低減できることが確認できた。

- ・ 実証システムと同様の環境下において、ケーブルの搬送時に回転を伴う動作に対して、ケーブルの振動を抑制する軌道を生成するアルゴリズムを提案した。
- ・ 振動抑制アルゴリズムにおいては、移動終点付近で滑らかで、ケーブルの重心の移動量

を抑制するような軌道を生成することを目的とした。関節空間におけるマニピュレータの1, 2, 3軸の経由点を操作量とし、降下法を用いて最適なマニピュレータの軌道を生成した。

- ・ 柔軟物体の挙動を再現するシミュレーションプログラムを作成し、生成された軌道の効果を確認でき、ユーザーが経由点を指定した場合の挙動も再現できる GUI を開発した。
- ・ 最適化前と最適化後のケーブル先端の振動を比較すると、シミュレーションにおいて70%の減少効果があり、検証システムにおける実機実験において50%の減少効果があることが確認できた。

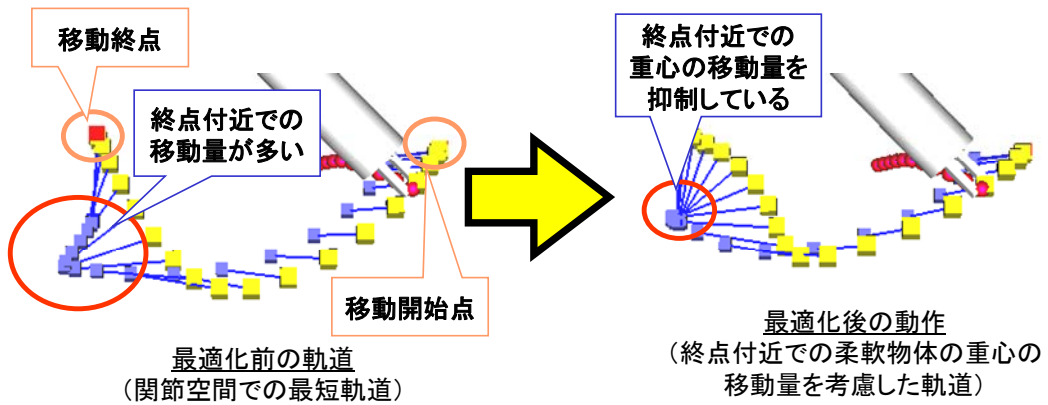
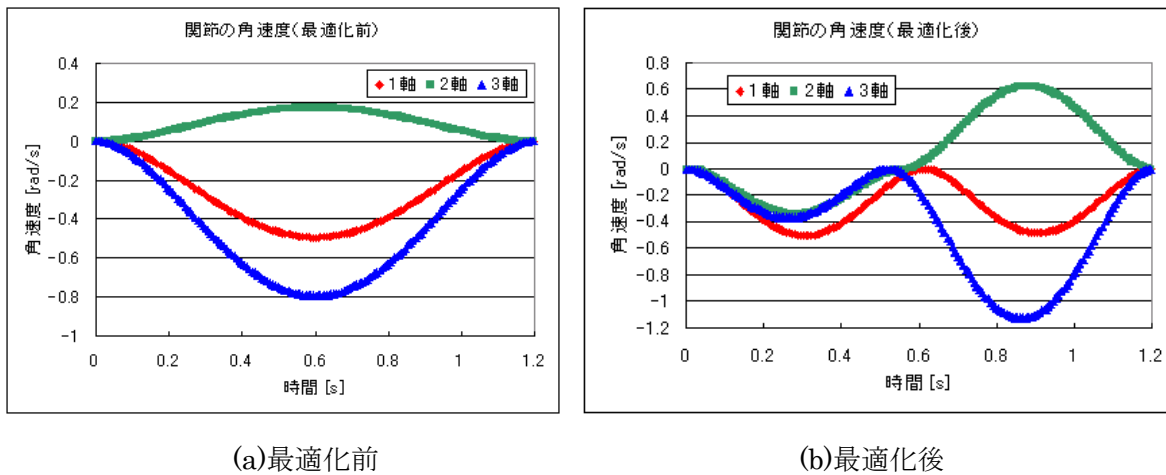


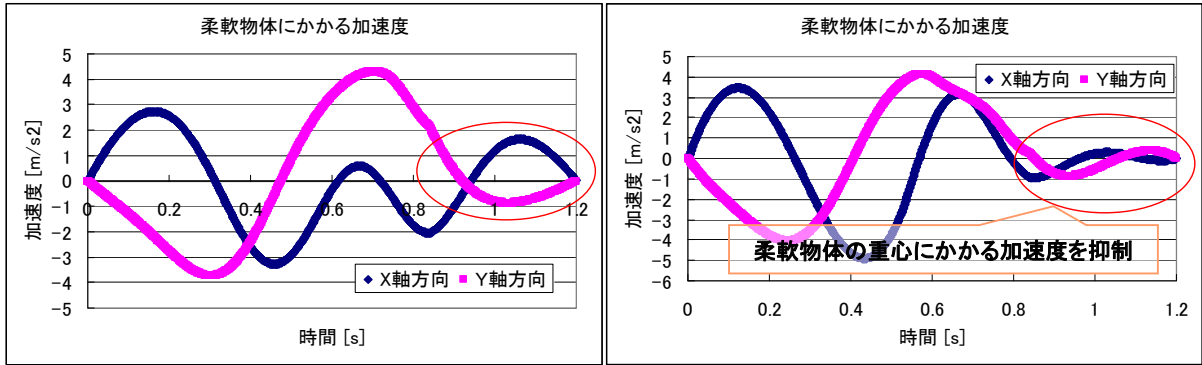
図 10 ケーブル重心の変化を抑制する軌道生成方法



(a)最適化前

(b)最適化後

図 11 生成された1,2,3軸の関節軌道



(a)最適化前

(b)最適化後

図 12 ケーブル重心にかかる加速度

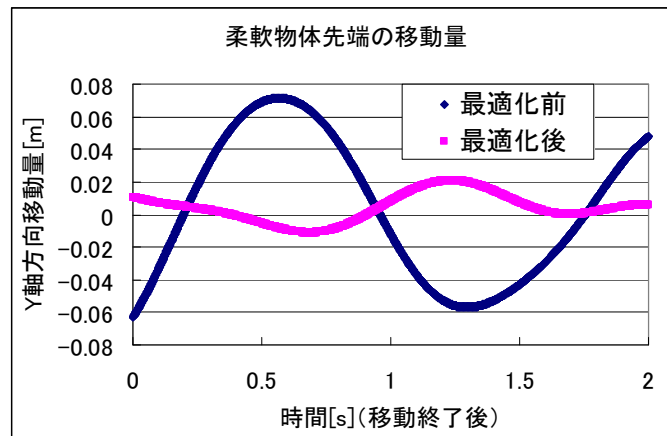


図 13 ケーブル先端の移動量

⑤ FA 機器組立実証システムの仕様検討・設計・試作

柔軟物を含むFA機器を実際に組み立てられることを示す実証システムの設計試作を行った。実証システムでは、作業エラーからの自動復旧技術、3次元センシングシステム、組み付け技術などを取り込むことにより、柔軟物の組付けを実現した。さらに、基板、カバーの組み付けも同じシステムで実証することにより、実際の製造ラインに将来適用することが可能であることを示した。以下で詳細を述べる。

- ・ 2台の垂直6軸ロボットを用いて大容量サーボアンプを組立対象とした実証システムを開発した。
- ・ 組立対象の部品と仕様は次の通りである。
 - ケーブル：両端に多ピンのコネクタが装着されている。分岐なしケーブルと2分岐ケーブルを対象とする。供給トレイで非整列供給される。

- 筐体：下部に電子部品が取り付けられており、ケーブル端の一方を挿入する。
- 基板：筐体にねじ留めする。筐体に接続されたケーブルの他端を挿入、接続する。
- カバー：ねじ留めする。
- 実証システムに実装、検証した作業工程は以下の通りである。
 - 1) 非整列供給されたコネクタ付ケーブルの取り出し・キッティング治具へのセット
 - 2) キッティング治具上の下部組付用コネクタを筐体下部電子部品に組み付け
 - 3) 基板組み付け、ねじ締め
 - 4) キッティング治具上の上部組付用コネクタを基板に組み付け
 - 5) カバー組み付け、ねじ締め
- 開発技術を実装、検証した工程は下記の通りである。
 - 3次元センシング技術(剛体物)：供給トレイ上のケーブル先端のコネクタ部分を認識し、取り出し動作に用いる。また、必要に応じてキッティング治具へのコネクタ挿入作業直前にも位置補正用のコネクタ認識を行う。
 - 3次元センシング技術(柔軟物)：キッティング治具に一端のコネクタが固定された後に、ケーブル部分を認識し、先端部のコネクタの概略位置から詳細計測のための視点決定を行なう。
 - 動作最適化技術：供給トレイからキッティング治具上へケーブルを搬送するとき高速かつ振動の少ない動作を生成する。
 - 高速組み付け制御技術：コネクタの組み付け時にリアルタイムに対象物の特性を同定、力制御パラメータをリアルタイムで変更することにより高速に組み付ける。
 - 自動復旧技術：コネクタ組み付け時に力覚データを用いて作業状態を監視し、組み付けに失敗した場合には自動復旧動作を行う。

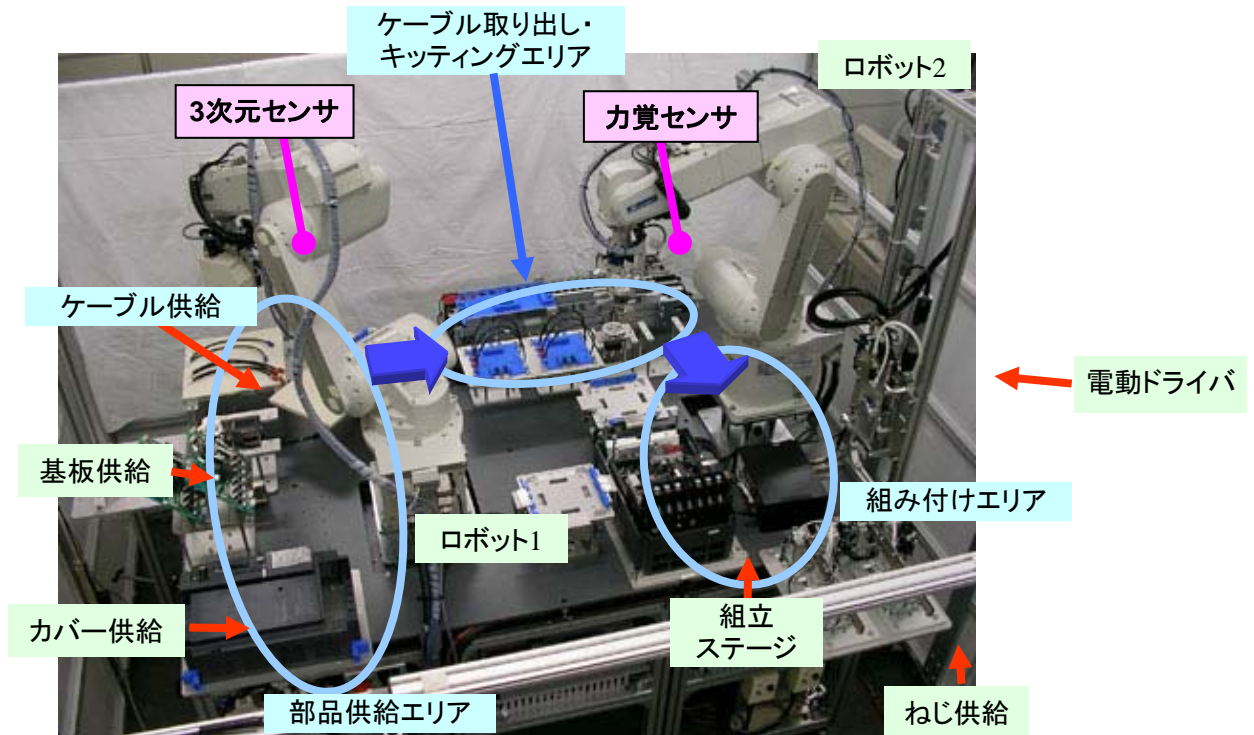


図 14 実証システム外観

(3) 成果の意義

本研究開発では三つの技術開発項目 - 1. 柔軟物を迅速かつ高精度・高信頼度でハンドリングできるマニピュレーション技術の開発、2. 柔軟物を知的にハンドリングするためのセンサ利用技術の開発、3. 短時間で簡単に作業を提示できる次世代教示機能の開発、に対応する複数の開発課題を設定して開発に取り組んできた。具体的には、1 に対しては①作業エラーからの自動復旧技術、2 に対しては②3次元センシングシステム、③組み付け制御技術、3 に対しては④柔軟物組み付け作業オフラインプログラミング技術の各開発項目を設定している。さらに各開発技術の実用性を検証する為の⑤FA 機器組立実証システムを加えた開発にも取り組んできた。以下にそれぞれの成果の意義について述べる。

①作業エラーからの自動復旧方式

基板コネクタと IGBT コネクタの組み付け作業時のエラー状態から、自動復旧を実現するアルゴリズムを開発した。通常、ロボットにおける生産システムでは、一旦エラーが発生するとシステム全体が停止してしまうため、人による復旧作業が必要となるが、今回開発したようなエラーリカバリ手法を備えることで、異常状態からロボットが自動的に復旧し、作業を継続することが可能となる。このため連続可動や省力化など、ロボットの稼働率や生産性の向上、低コスト化に大きく貢献することが可能である。

②. 3次元センシングシステム

小型光スキャナである MEMS ミラーの制御技術と光学系配置の最適化設計により小型センサヘッドを実現し、ロボットへの適用性を高めるとともに、Ethernet 伝送機能の開発により、耐ノイズ性、

長距離伝送性能を向上させた。また、通常カメラの4倍のダイナミックレンジ実現により、対象物の反射特性変化に対する許容度を高めるとともに、センサキャリブレーションが容易な3次元計測手法の開発により、従来極めて困難であった適用現場における視野変更、計測距離設定変更を実現した。さらに、コネクタに対する高速、高精度な位置姿勢認識手法も開発した。これらの成果により、ロボット手先に容易に取り付け可能であり、広い適用範囲を持ちつつ、高速、高精度な3次元センシングシステムを実現した。また、柔軟ケーブルの様に形状が定まりにくく、表面模様が少なく従来はステレオ計測手法の適用が困難とされた対象物に対して、人工的特徴点付加機能と追跡安定性指標を用いたモーショーステレオ計測手法を開発し、約1.7秒と短時間で高精度な計測処理を安定に行なえるようになった。開発した3次元センシングシステムは適用対象が広いため、各種組立作業や検査等の自動化などの作業に対して大きな貢献が期待される。

③.組み付け制御技術

開発した組み付け制御方式に対して評価を実施し、力制御のパラメータを挿入動作中にリアルタイムで変更することにより、コネクタ挿入作業を人とほぼ同等の速度で実現できることを確認した。現在組立作業において人間が行っているような、嵌め合いや挿入などの高度な作業を、ロボットによって自動化する際には力制御機能は必須のものである。本開発成果は、ロボットの作業高度化を広く展開していく上で、多くの貢献を期待することができる。

④短時間で簡便に作業を提示できる次世代教示機能の開発

コネクタの把持、挿入作業など実証システムの一部の作業工程対象に、作業単位のブロックを並べるだけで容易にプログラム作成、シミュレーションによる動作確認が可能となった。また、ケーブルの重心移動を抑制した軌道を自動生成することで、移動終了点においてケーブル振れを抑制することが可能な技術を開発した。さらに、作業床面にケーブルが接触することを回避する手先軌道を生成することも可能となった。これらの成果により、複雑なシステムにおいて従来の教示方法を用いた場合の立ち上げの際の膨大な労力を大幅に軽減することが可能になる。また、迅速なシステム立ち上げが可能になる為、多品種少量生産や機種切替の早いシステムに対して自動生産システムの導入が促進され、さまざまな産業における生産性の向上に貢献することができる。

⑤ FA 機器組立実証システムの仕様検討・設計・試作

大容量サーボアンプを対象として、非整列供給された2分岐及び分岐なしケーブルの取り出し、キッティング治具への整列、コネクタ挿入、基板組み付け、カバー組み付けを実現する実証システムの製作を行い、実証実験によって、コネクタ、ケーブルの3次元認識方式、高速組み付け制御方式、動作最適化方式、自動復旧方式を用いて対象製品を組み立てられることを確認した。これにより、柔軟物の組立工程を含む製品に対しても、要素技術の開発成果を用いて自動組立が可能であること確認できた。これらの成果を用いることで、今後ロボットによる自動生産を適用可能な分野が拡大されていき、生産性の向上に貢献す

る事が可能となる。

研究項目	成果の意義
柔軟物を迅速かつ高精度・高信頼度でハンドリングできるマニピュレーション技術の開発	高い確率でコネクタ挿入エラー状態を検知し、復旧可能なエラーリカバリアルゴリズムを開発。従来エラー発生によって停止し、人力による復旧が必須であったシステムが、エラー発生しても作業継続可能となり動作継続時間が増加する為、システムの生産性向上に貢献可能
柔軟物を知的にハンドリングするためのセンサ利用技術（ビジョンシステム、力制御、力センサ）の開発	<p>・小型、広ダイナミックレンジ、高精度、短処理時間の3次元センシングシステムと、柔軟性を有するために形状の定まらないケーブルの認識を高精度、短処理時間で行うことの出来るセンシング技術を開発。広範囲の対象に対して高精度、短処理時間での認識を行うことの出来る3次元センシングシステムを提供することが可能になり、組立や検査などのビジョンセンシングシステムを用いた自動生産ラインの適用範囲拡大と生産性向上に貢献可能。</p> <p>・力制御のパラメータを挿入動作中にリアルタイムで変更する組み付け制御方式により、コネクタ挿入作業が人とほぼ同等の速度で実現可能。人間が行っている嵌め合いや挿入などの高度な作業をロボットが行うことを可能にし、ロボットによる自動組立可能な対象の拡大に貢献可能。</p>
短時間で簡便に作業を提示できる次世代教示機能の開発	コネクタの把持、挿入作業など実証システムの一部の作業工程が作業単位のブロックを並べるだけで容易にプログラム作成、シミュレーションによる動作確認可能になることを実現。ケーブルの重心移動を抑制した軌道を自動生成することで、移動終了点におけるケーブル振れの抑制と、作業床面にケーブルが接触することを回避する手先軌道を生成する事が可能。システム立ち上げに要する多くの労力、時間を大幅に削減する事が可能になり、生産性の向上、立ち上げコストの低減、少量多品種生産や機種切替の多いシステムの自動化などに貢献可能。

4) 特許の取得

開発した技術に対して事業を確保する為に、国内6件の特許出願を行った。

今後も事業及び知財関連戦略の一環として、特許の取得に力を注いでいく予定である。

表 特許の取得状況

特許の名称	特徴・強み・新規性
3次元形状計測装置のキャリブレーション方法および3次元形状計測方法	通常の計測動作を用いた簡易なキャリブレーション手段を提供することにより、計測対象に合わせた精度のよい計測を簡易に実施できる。
3次元形状検出装置	パターン投影による人工的な特徴点付加、追跡安定度評価、信頼性評価手段を含むことにより、対象物体の形状計測を安定して行なえる。
形状計測装置	可動ミラーからの走査ビームの一部を受光素子に導き、その信号タイミングに基づき走査時間を制御することで、安定したスリットパターンを得ることができる。
形状計測装置	上記特許に関連して、走査ビームが1往復する間に1つの受光素子から得られる2つの信号タイミングの平均をとることで、さらに安定したスリットパターンを得ることができる。
多軸力覚センサおよびその製造方法	力覚センサの低コスト化が可能な構造および製作方法について。通常力覚センサには適用されない製作方法を採用した。
三次元形状計測装置及び方法	パターン投影による人工的な特徴点付加、追跡安定度評価、信頼性評価手段を含むことにより、対象物体の形状計測を安定して行なえる。

5) 成果の普及

下記の表に示す件数の学会発表を行い、成果の普及に努めた。今後、これまで得られた成果についての普及活動を一層促進していく予定である。

また、開発成果を実システムに搭載する際の立ち上げ時間を短縮することや、既存の機器との統合の際の柔軟性を高めることで、開発成果の広く一般的な普及を促すため、RobotTechnology 技術の共通プラットフォームとして提唱されている RT-Middleware を利用して、センサや自動復旧アルゴリズムの搭載といったソフトウェア開発を行った。

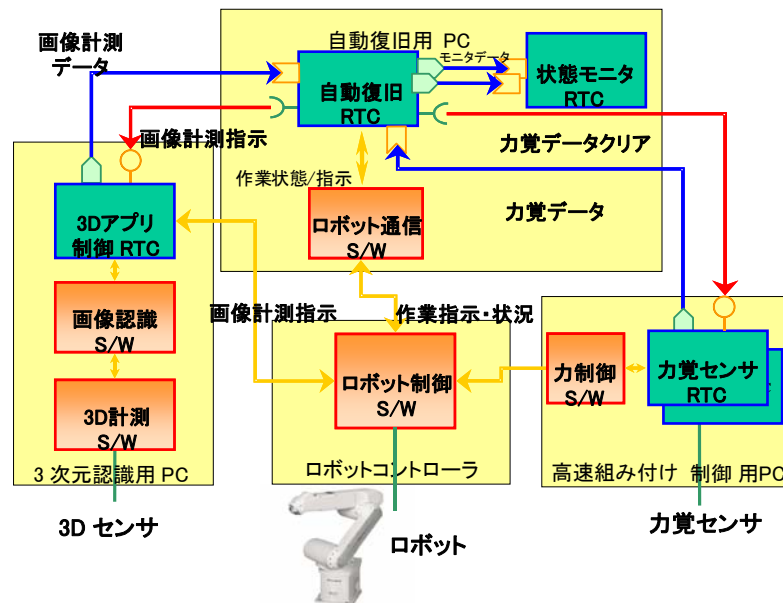


図 15 RT コンポーネント構成

開発した各 RT コンポーネントの構成は次のようなものである。

- ・ 3次元センサ RTC：3次元センサ RTC は、画像認識 S/W と通信をおこない、画像計測結果を取得し、その結果をロボットコントローラのロボット制御 S/W や自動復旧 RTC 送信する RT コンポーネントである。また、3次元センサ RTC は、3D アプリ作業指示サービスを提供するサービスポートを有しており、画像計測の開始や終了、画像の表示などの作業指示を受け付けることが可能となっている。
- ・ 力覚センサ RTC：力覚センサ RTC は、力制御 S/W から力覚センサのロボット計測データを取得し、出力ポートを通じてそのロボット計測データを、自動復旧 RTC に送信する。また、力覚センサを制御するためのサービスポートを有しており、力覚センサのオフセットをリセットすることが可能となっている。
- ・ 自動復旧 RTC：自動復旧 RTC は、3次元センサ RTC、力覚センサ RTC の出力データを収集し、状態モニタ RTC にデータを送信するコンポーネントである。また、収集したデータをもとに、ロボットの状態を監視し、異常を検知した場合は、ロボットの停止、復旧処理をおこない、状態モニタ RTC に異常を通知する。
- ・ 状態モニタ RTC：状態モニタ RTC は、自動復旧 RTC からモニタリングデータを受信し、ユーザがシステムの状態を監視するために、画面上にモニタリングデータの描画をおこなう RT コンポーネントである。

上記のように各センサや復旧機能などを RTC 化したことで、センサの接続、立ち上げが容易になると共に、これまで他で開発された RTC を用いたソフトウェアと共に用いることも容易であるため、成果の普及に対して効果的であると考えられる。

表 論文発表・成果の普及

論文等紙上发表（論文誌、学会誌、国際会議）		口頭発表		特許		報道（新聞、雑誌等）
国内	国外	国内	国外	国内	国外	
0	1	11	9	6	0	0

6) 実用化、事業化の見通しについて

(1) 成果の実用化可能性

①柔軟物を迅速かつ高精度・高信頼度でハンドリングできるマニピュレーション技術の開発

a. 作業エラーからの自動復旧方式の開発

基板コネクタと IGBT コネクタの組み付け作業における挿入不可能になったエラー状態から、自動復旧を実現するアルゴリズムを開発した。

コネクタ挿入作業の異常状態を判別する為、作業成功時と作業失敗時の挿入量と挿入反力の関係を、ファジィ関数を用いて学習し、オンラインで得られたデータと比較する事で、挿入作業の異常状態検出機能を実装した。判別した異常状態から復旧する為の方法として、基板コネクタの組み付け作業に対するエラーリカバリであるスパイラルサーチアルゴリズムと、IGBT コネクタの組み付け作業に対するエラーリカバリである接触探索アルゴリズムを開発した。

これらの手法の検証を行った結果、基板コネクタに対するエラーリカバリ率は 99%、IGBT コネクタに対するエラーリカバリ率は 98%であり、非常に信頼性の高いエラーリカバリ手法を開発することが出来た。

通常、ロボットにおける生産システムでは、一旦エラーが発生するとシステム全体が停止し、人による復旧作業が必要となるが、今回開発したようなエラーリカバリ手法を備えることで、異常状態からロボットが自動的に復旧し、作業を継続することが可能となる為、ロボットの稼働率や生産性の向上に大きく寄与することが出来き、非常に有用である。

今回開発を行ったのは、組立作業におけるコネクタ挿入についてであるが、組立作業においては他にも様々なエラー状態が想定される為、今後はコネクタ挿入以外の想定されるエラー状態からのエラーリカバリ手法についても開発を行う。また、組み立てられる製品によって使用されているコネクタは様々であるため、今回開発した異常状態検出機能、アルゴリズムを多種多様なコネクタに対して容易に適用できるようにする為の、汎用性のある調整方法も開発していく。

②柔軟物を知的にハンドリングするためのセンサ利用技術の開発

a.剛体物の3次元センシング技術の開発

小型 MEMS ミラーと光学系配置の最適化により、小型センサヘッドを実現し、耐ノイズ性、長距離伝送を実現するため、Ethernet による信号(画像、制御信号等)伝送を実装した。また、高輝度画像と低輝度画像をFPGA内でフレームメモリを用いずにリアルタイム加算することによって通常カメラの4倍のダイナミックレンジ拡大を実現した。更に、視野変更、計測距離設定が容易に変更可能な3次元計測手法を開発し、その有効性を確認した。これらの開発によって、ケーブル末端のコネクタ部の3次元位置姿勢認識を位置誤差±1mm、処理時間2秒以内で実現した。

これらの成果によって、ロボット手先に装着して組立作業を行う中で、実際の製品に使用されているコネクタを十分な精度と短い処理時間で認識することが可能であった。このように、これまでの開発の中で本センサは機能的に十分な実用性を備えたものとなっている。今後、本センサに対して更に対応範囲、耐環境性、信頼性などの検証を進めた上で、製品として販売していくことを考えている。

b.柔軟物の3次元センシング技術の開発

本開発では、人工的特徴点付加機能と追跡安定性指標を用いて、高精度な計測処理を実現しており、空間における柔軟なケーブルの様な、形状が定まらない物体の位置を計測することが可能となった。また、ロボット動作を含めて約1.7秒と短時間で認識が可能であった。認識の精度も3mm以内の範囲に収まっており、ケーブルを認識しロボットハンドで把持を行うのには十分な精度である。実証システムにおける作業では、実際の製品に使用されているケーブルを認識し、把持する事を達成しており、本開発成果は実際の組立システムに用いる上で十分な性能を有していると判断できる。

今後は、認識可能なケーブルの種類や状態の拡大について研究開発を進め、本成果の適用範囲の拡大を進めていくことが重要である。また、単一カメラで実現できるため、当社既存の2次元ビジョンセンサー及び前項の3次元ビジョンセンサーの拡張機能として製品化検討を実施する予定である。

c.高速組み付け制御技術の開発

開発した組み付け制御方式を実証システムに統合して評価を実施し、力制御のパラメータを挿入動作中にリアルタイムで変更することにより、コネクタ挿入作業単体を人とほぼ同等の0.7秒で実現できることを確認した。これにより、コネクタ位置ずれなどによるコネクタの挿入不良や衝突などの問題が生じた際に、コネクタや基板、もしくはロボットハンドなどの破損が生じることを回避しつつ、コネクタの組み付け作業を高速に実現することが可能になった。人間のようにデリケートな作業が要求される分野に対してロボットを適用していくには、本開発成果のような力制御システムが必須のものであり、高機能化の為のコンポーネントとしてロボットに搭載、販売していく予定である。

③短時間で簡便に作業を提示できる次世代教示機能の開発

a.柔軟物組み付け作業レベルプログラム生成システムの開発

本開発成果により、コネクタの把持、挿入作業など実証システムの一部の作業工程が作業単位のブロックを並べるだけで容易にプログラム作成、シミュレーションによる動作確認が可能となった。従来は、ロボット動作をロボット言語で記述した上で、作業位置を実際にその位置にロボットを移動させ記憶させるオンライン教示方式でロボットの立ち上げが行われる。しかし、複雑な作業や複数のロボットを用いるシステムでは教示位置が膨大となり、また、周囲やロボット同士の干渉を避けたり、同期を取るなど非常に労力が大きい。しかしながら、本開発においては実証システムの作業工程を対象にプログラム作成、シミュレータによる動作確認時間を評価し、従来の 1/3 の時間でプログラムが作成できており、大きな省力、時間化を達成出来ることを確認している。特に、少量多品種生産などシステムの立ち上げや切替を迅速に行う必要のあるシステム、複数のロボットが協調したり様々なセンサを用いて構成される複雑なシステムでは、今後必須のものとなっていくことが予想され、多くの需要があると考えている。今後はオフラインでのガイダンス機能の充実や対応可能な作業を拡充に取り組んでいく。

b.柔軟物体操作におけるマニピュレータ作業動作の最適化

本開発成果により、柔軟物であるケーブルをロボットハンドで搬送する際に、ケーブルの重心移動を抑制した軌道を自動生成することで、移動終了点においてケーブル振れの約 50%の振幅減少を達成することができた。また、自動生成の際にパラメータの重み付けを設定することにより、作業床面にケーブルが接触することを回避する手先軌道を生成することも可能となった。柔軟物を取り扱う際は、剛体物と異なりその姿勢、形状が定まらない為、実際のシステムを稼働させたり、ロボット動作を変化させたりした際に思わぬ影響を及ぼす可能性がある。本開発成果を用いれば、このような影響をシステム設計時に予め評価、抑制する事が可能となる為、振動抑制効果による動作時間の短縮のみならず、システム立ち上げ時間の短縮に対しても貢献することが出来る。今後は、柔軟物組み付け作業オフラインプログラミング技術と共に、組立作業用オフラインプログラミングシステムとして製品化を進めていく。

④ FA 機器組立実証システムの仕様検討・設計・試作

大容量サーボアンプを対象として、非整列供給された 2 分岐及び分岐なしケーブルの取り出し、キッティング治具への整列、コネクタ挿入、基板組み付け、カバー組み付けを実現する実証システムの製作を行い、実証実験によって、コネクタ、ケーブルの 3 次元認識方式、高速組み付け制御方式、動作最適化方式、自動復旧方式を用いて対象製品を組み立てられることを確認した。本システムは要素技術開発成果を実際の製品組立を対象として検証することを主眼としており、また、三菱電機(株)は、コンポーネントをシステムインテグレータに提供し、システムインテグレータがシステム構築を行うという事業形態を取ることを考えている為、本システムそのものが即製品化、実製品ラインへ導入されるもの

ではない。しかしながら、従来自動化が困難であったケーブルの組み付け作業を可能にしており、本システムにおいて確認することが出来た技術や成果は、他の組立システムを構築する上で非常に有用かつ実用性の高いものとなっている。

(2) 事業化までのシナリオ

本開発成果に対する事業体制は次の様になる。

- ・ 三菱電機(株)： ロボット、センサなどのコンポーネント製造し、ロボットシステムインテグレータ（ロボット SIer）に販売
- ・ ロボットシステムインテグレータ（ロボット SIer）： システム構築しエンドユーザーに販売、メンテナンスも実施。

更に、三菱電機(株)はエンドユーザーからユーザーニーズを入手し、これを製品開発にフィードバックすることで新たな製品開発へとつなげるサイクルを構築する。

(3) 波及効果

本開発成果はロボット産業における市場拡大、新市場の開拓につながるだけでなく、ロボット以外の幅広い分野に対しても様々な形での活用が見込まれる為、我が国の産業の発展に対して多大な寄与をすることが可能である。

3.1.2 人間・ロボット協調型セル生産組立システム

3.1.2.1 先進工業国対応型セル生産組立システムの開発 【ファナック株式会社】

1) 研究概要

本プロジェクトでは、下記①～③の技術を組込んだ人間・ロボット協調型セル生産組立実証システムを構築し、人間を中心とした従来方式セルと比較し、その生産性の評価実験を実施した。

- ① 作業者とロボットとが協働できるための「安全管理技術」
- ② 必要な時に必要な量の部品を整列して供給する「作業支援技術」
- ③ 作業者が習熟しやすい「作業情報提示技術」

図1で示す通り、①～③の各技術を組込んだ人間・ロボット協調型セル生産組立実証システムを構築した。図2にて統合システム概要を示す。システムはハード構成上、供給ステーションと組立ステーションから構成される。供給ステーションは、移動配膳協調ロボット・部品ピッキングハンドとビジョンシステム・知能化部品トレイの「作業支援技術」により構成され、ロボットは部品棚から必要部品をピッキングしてキット化し、作業者が組立作業を実施する作業台まで走行して部品キットを配膳する。一方、組立ステーションは、作業者位置姿勢測定システム、バイタルサインモニタ、作業教示支援システム、作業情報支援システムの「作業情報提示技術」により構成され、ロボットによる部品供給などの作業誘導および作業情報提示を受けながら作業者が組立作業を行う。知能化部品トレイは両ステーションを接続するインターフェースとして機能し、作業者に対して物理的・情動的バッファの役割を担う。本システムではロボットと作業者が協調作業を行うため、十分なリスクアセスメントに基づき、ロボット移動時安全対策・ロボットアーム部動作制限と作業者監視システムから成る作業者協調時安全対策・安全管理技術統合化の「安全管理技術」により両者の安全な連携を保障する。

構築した人間・ロボット協調型セル生産組立実証システムにおいて、セル生産組立のモデルケースとして位置付けた図3のようなケーブルハーネス製造の単品種生産を実施し、人間のみで構成される従来方式のセル生産組立システムとの生産性比較を行った。実験の結果を図4に示す。図4の実線は(A)人間のみで構成される従来方式セル生産組立システム、破線は(B)人間ロボット協調型セル生産組立システムにおける作業初心者と中級者の組立所要時間を示しており、横軸は組立作業の実施回数を表している。実証システムでは、生産立上げ当初にて、従来方式セルと比較して1品種当たりの組立所要時間が最大約1/2にまで短縮されており、更に作業初心者でも中級者と同等の生産性が確保可能なことが示された。この結果から、構築した人間ロボット協調型セル生産組立システムが従来方式セルよりも高い生産性を確保可能であることが実証された。



作業者



移動配膳協調ロボット

図1 統合システム外観

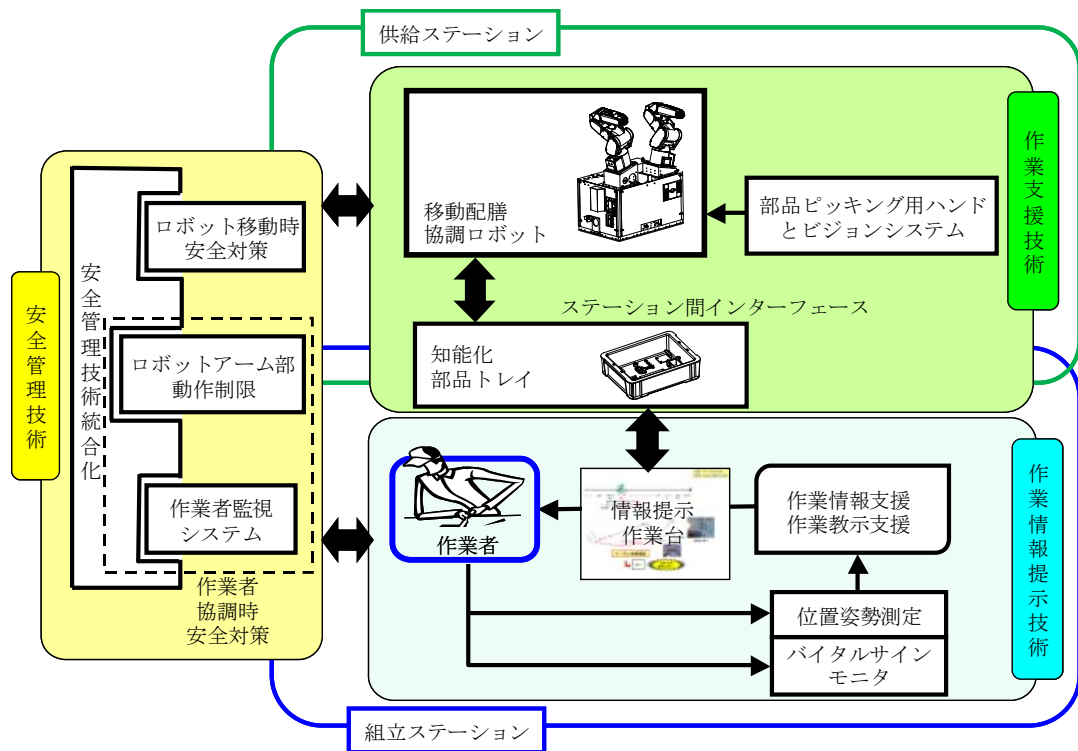


図2 統合システム概要

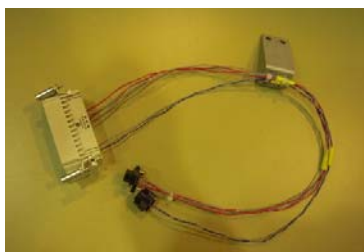


図3 ケーブルハーネス

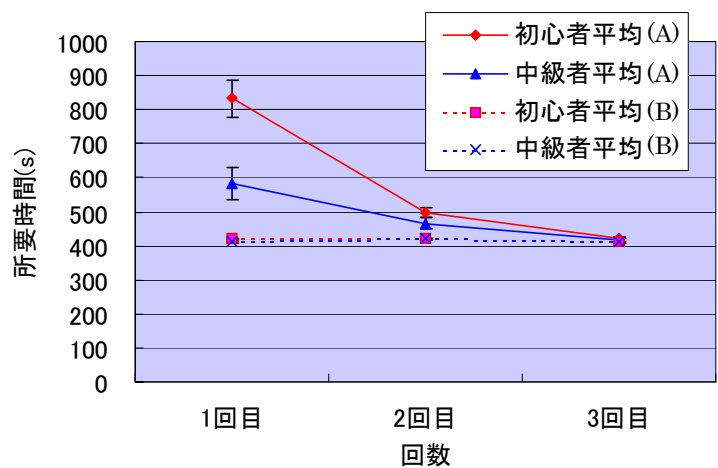


図4 単品種生産における組立所要時間

2) 成果詳細

下記に各開発技術の成果詳細を示す。

① 作業者とロボットとが協働できるための「安全管理技術」

(注) 既存の産業用ロボットの安全規格が改定されないことを考慮し、現行規格をほぼ遵守する形で達成することが求められる。

リスクアセスメントに基づき、全ての危険源に対する安全対策としてロボット走行時安全対策および作業者協調時安全対策を検討し、その両者を安全管理技術として統合の上、実証システムに実装した。

①-1 ロボット移動時安全対策

①-3「安全管理技術統合化」で述べるリスクアセスメントに基づき、ロボット移動時の安全対策として下記項目を実装した。

(a) 低重心本質安全設計による移動時転倒防止

図5に示す通り、移動配膳協調ロボットの移動走行時の転倒を防止するために、ロボット重心位置を可能な限り低くする本質安全設計を行った。

(b) 安全柵・光カーテンによるロボット走行エリアと作業者エリア分離

図6に示す通り、本システムでは、走行する移動配膳協調ロボットと作業者の衝突を避けるため、ロボット走行エリアと作業者エリアを分離した。図7の通り、自走機構部については安全柵にて作業者エリアと分離し、ロボットアーム部については作業者との協調作業を考慮し光カーテンによる分離とし、光カーテンの有効・無効状態を切替えられるようにした。

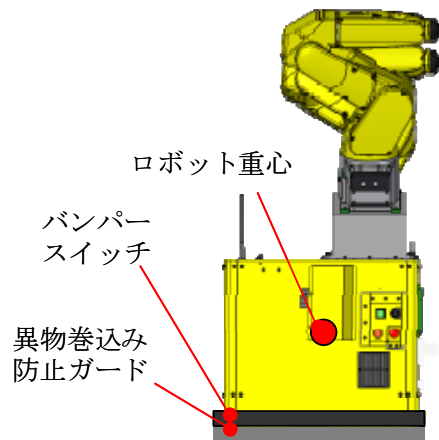


図5 移動配膳協調ロボットの安全対策

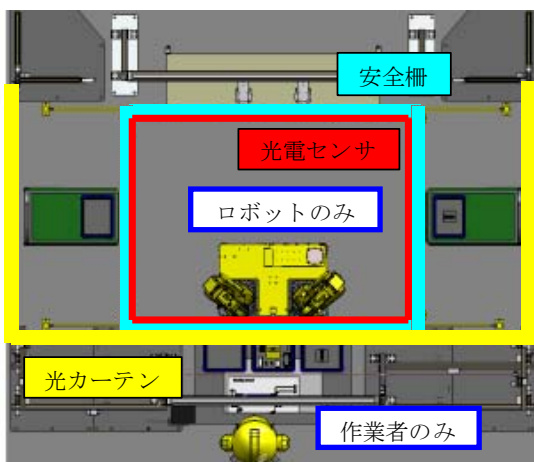


図6 移動配膳協調ロボットの移動時安全対策(平面図)

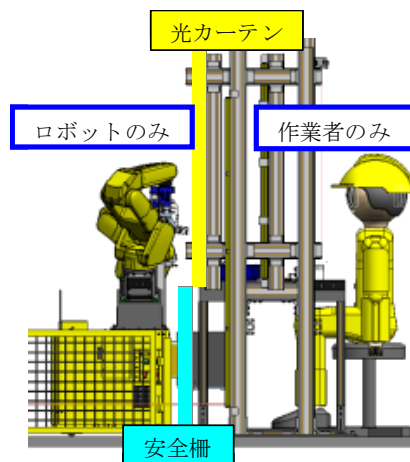


図7 移動配膳協調ロボットの移動時安全対策(側面図)

(c) 安全機器での安全多重化

リスクアセスメントにより、移動配膳協調ロボット走行時安全対策として下記を実装した。

- 接触検知バンパースイッチ(図 5)
- 路面異物巻込み防止ガード(図 5)
- 光電センサによる安全多重化(図 6)

①-2 作業者協調時安全対策

(a) 作業者とロボットの作業領域の切り替え

本システムでは、作業者とロボットの位置関係により、安全対策を切り替える。詳細を表 1、図 8 に示す。ロボットの部品ピッキング時やロボットの部品キット配膳・作業者への部品差し出し供給準備においては、作業者とロボットが別々の作業領域にて作業を行うため、光カーテンにより両者の領域を分離する。図 8 に示すように、作業者とロボットの作業内容によりそれぞれの作業領域が変更となるため、2つの光カーテンにより領域境界をシフトする。一方、ロボットが作業者へ部品差し出し供給を行う協調作業時には、2つの光カーテンを無効化し、後述のロボットアーム部動作制限および作業者監視システムにて作業者の安全を確保する。作業工程毎に必要な安全対策をシステムが自動的に切り替える制御を行うため、作業者は意識することなく常に安全に作業を行うことが可能である。

以上の光カーテンによる領域分離、ロボットアーム部動作制限、作業者監視システムを組合せた手法は、人間・ロボット協調時安全対策として新規提案の技術である。

表 1 作業者とロボットの作業領域による安全対策

作業者とロボットの作業領域	適用する安全対策
分離可能時	2つの光カーテンによる作業者・ロボットの作業領域分離
協調作業時	ロボットアーム部動作制限 作業者監視システム

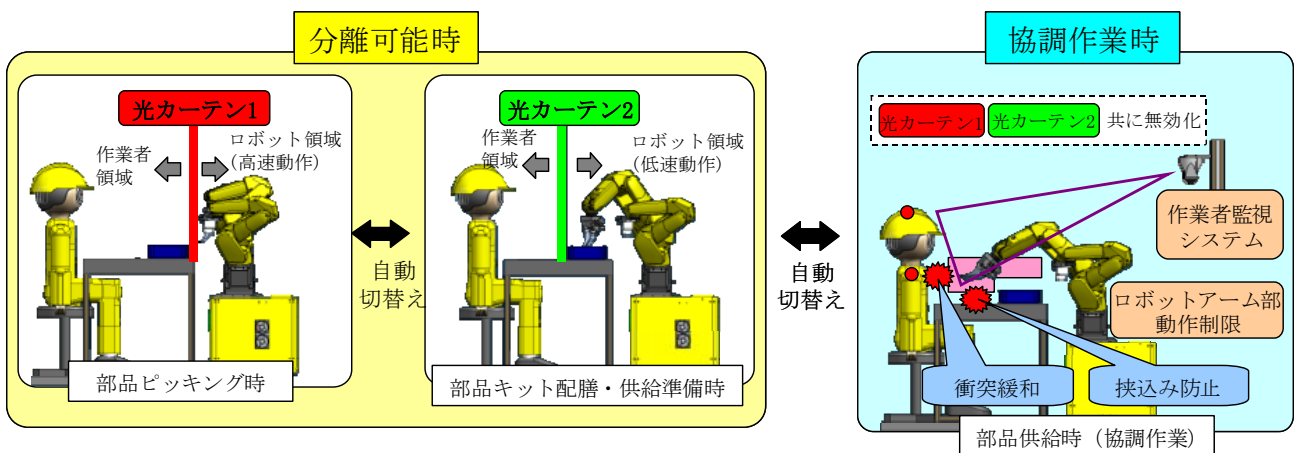


図 8 安全対策切り替え

(b) 本プロジェクトでの人間協調型ロボットの安全に関する考え方

人間協調型ロボットの安全については、現状、労働安全衛生規則(国内法規制)による「ロボット各軸モータ出力が 80W 以下」や ISO10218-1(国際安全規格)による「ロボットメカニカルインターフェース又は TCP において最大動力 80W 以下、又は最大静的力 150N 以下」といった規定が定められているものの、人間協調型ロボットに特化した安全規格が存在しないため、現在詳細規格の策定が進められている。

本システムでは、移動配膳協調ロボットにて高速動作での部品ピッキングと低速動作での作業員協調動作を両立することで、ロボットの稼働率を向上させ、設備コスト・ランニングコストの低減を図る。そのため、徹底したリスクアセスメントを行うことで、出力が本質的に大きいロボットにおいても作業員の安全が確保可能となる安全対策を確立することを目標とした。

本方針に基づき、信頼性の高い人間協調型ロボットの安全対策を確立し、今後の人間協調型産業用ロボットの安全管理技術のモデルケースとして提案を進める。

(c) 作業員協調時の安全対策

ISO141214-1、ISO13849-1 に基づいたリスクアセスメントにより、ロボットメカニカルインターフェース又は TCP における本質的的最大静的力が 150N 以上のロボットによる作業員安全対策を検討し、ロボットへの実装を行った。

本質的に最大静的力が 150N 以上のロボットとの協調作業における主な危険源は、手・頭・目に対する「ロボットと作業台の間の挟み込み」と「ロボットから受ける衝撃」である。各危険源のリスクを見積り、リスク低減のために下記安全対策を検討した。

□ ロボットアーム部動作制限

CPU 二重監視の制御装置およびソフトウェアにて設定する動作速度制限および動作領域制限を移動配膳協調ロボットのロボットアーム部に実装した。図 9 に示す通り、動作速度制限によりロボットからの手に対する衝撃を緩和し、動作領域制限にてロボットと作業台の間の手の挟み込みを防止した。

なお、現時点では信頼性指標である PL(パフォーマンスレベル)が不足しており、今後必要レベルまで信頼性を強化する。

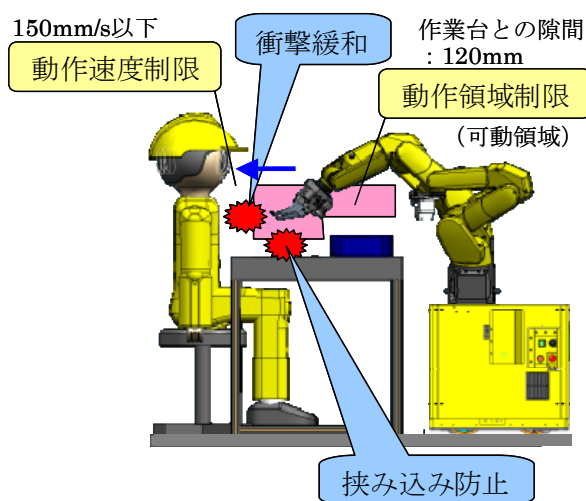


図 9 ロボットアーム部動作制限による安全対策

□ 作業員監視システム

作業員位置姿勢測定システムによる作業員監視システムを開発し、安全対策として統合シ

システムに実装した。図 10 に示す通り、作業者が居眠りなどにより作業台へうつ伏せ状態となった場合、作業者監視システム(IP カメラ)にて検出し、ロボットを非常停止する(作業者監視システムの詳細については「③作業者が習熟しやすい作業情報提示技術」にて後述)。

作業者の作業台へのうつ伏せ状態を作業者監視システムにて検出することでロボットを非常停止とし、目や頭のロボットからの衝撃、ロボットと作業台への挟み込みを防止する。なお、現時点では信頼性指標 PL(パフォーマンスレベル)が不足しており、今後必要レベルまで信頼性を強化する。

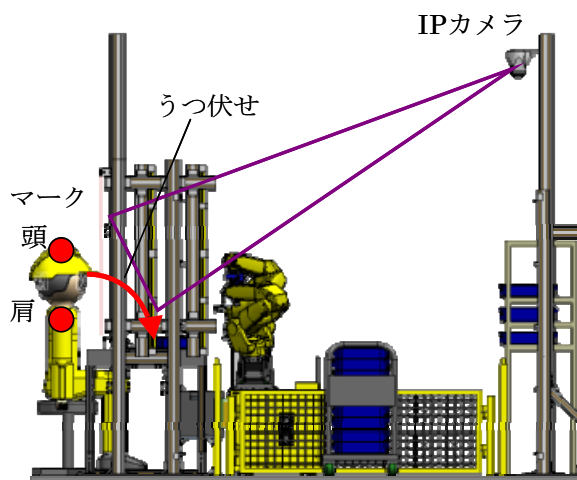


図 10 作業者監視システムによる安全対策

①-3 安全管理技術統合化

①-2 で記した安全対策を含め、今回開発した人間・ロボット協調型セル生産組立システムの全ての危険源に対して、ISO14121-1 に基づいた手順にてリスクアセスメントを実施し、その結果を文章化した。合理的に予見可能な誤使用も考慮し、システムの全ライフサイクル(輸送、組立・据付・立上げ及び設定、運転、清掃・保守、故障発見/トラブルシューティング)に対して危険源の同定を行い、168 項目の危険源を抽出した。その一例を表 2 に示す。

同定した 168 項目の危険源全てに対してリスク見積りを行い、本質安全対策・安全防護および付加保護・使用上の情報提供の「3 ステップメソッド」によるリスク低減を実施した。その結果、検討した安全対策にて全ての危険源について許容可能なリスクレベルまでリスクが低減されることを確認した。

但し、現時点では、全 168 項目の危険源の中に、まだ安全対策として実証システムに未実装の項目、あるいは信頼性指標 PL(パフォーマンスレベル)が不足する項目が残存しているため、今後これら未達成の安全対策の実装および評価を推進する。

表 2 危険源の同定の一例

システム		人間・ロボット協調型セル生産組立システム	分析者	ファナック(株)					
資料		仕様書、基本設計	現行版	01					
範囲 (ライフサイクル)		輸送	日付	2008年9月					
方法		チェックリスト: ISO14121-1:2007,附属書A	ページ	1					
参照 番号	ライフ サイクル	タスク	危険区域	事故シナリオ			参照 番号		
				危険源	危険状態	危険事象			
1	輸送	移動配膳協調 ロボットの輸送	-	落下による足の押しつぶし	荷上げ時にロボット下面に接近	輸送部材の強度不足に起因するロボットの落下 (設計不具合)	1		
2				鋭利部による切断	運搬中にロボットハンドに接近	ロボットの不安定な重心に起因する輸送中の揺れによる鋭利部との接触 (設計不具合)	2		
3				充電部による感電	運搬中にロボットドッキング面に接近	バッテリーが放電状態のまま輸送したことに起因する高電圧印加状態となったドッキング面との接触	3		
4					運搬中に剥き出しの制御部に接近	バッテリーが放電状態のまま輸送し、制御部筐体カバー未装着のまま輸送したことに起因する高電圧系統との接触	4		
5				ロボット 走行区域	-	転倒による足の押しつぶし	荷下ろし時にロボットに接近	ロボット接地時に重心が不安定となり転倒 (設計不具合)	5
6						転倒時の鋭利部による切断	荷下ろし時にロボットハンドに接近	ロボット接地時に重心が不安定となり、転倒したロボットのハンド鋭利部と接触 (設計不具合)	6
7						走行状態となったロボット(可動部)による押しつぶし	荷下ろし時にロボットに接近	輸送中にバッテリー放電およびロボット自動運転スイッチがONとなったことによる予想外の始動	7
8				作業台モニタの輸送	-	可動したロボットアーム部による衝撃	輸送中全ての状態でロボットアーム部に接近	輸送中にバッテリー放電およびロボット自動運転スイッチがONとなったことによる予想外の始動	8
9						落下したモニタによる足の押しつぶし	運搬時に作業台モニタに接近	モニタが作業台から抜け落ちたことに起因するモニタの落下(設計不具合)	9

② 必要な時に必要な量の部品を整理して供給する 「作業支援技術」

作業支援技術として、移動配膳協調ロボット・部品ピッキングハンドとビジョンシステム・知能化部品トレイを開発した。

②-1 移動配膳協調ロボット

人腕大の双腕ロボットアームと全方向移動型自走機構から構成される移動配膳協調ロボット実機を開発した。図11に外観を示す。構成の概略は下記の通りである。

- 自走機構
 - 駆動 2 輪・従動 2 輪を配置した 4 輪構成。駆動 2 輪はそれぞれ操舵軸も有し、駆動輪・操舵輪を独立制御可能。
- 双腕ロボットアーム
 - 6 軸垂直多関節型ロボットを双腕に配置。

本ロボットの特徴を以下に示す。

- 人腕大の双腕ロボットアーム搭載による高い作業対応力

図 12 に示すように、部品コンテナ引き出し動作と部品ピッキング動作を双腕ロボットア

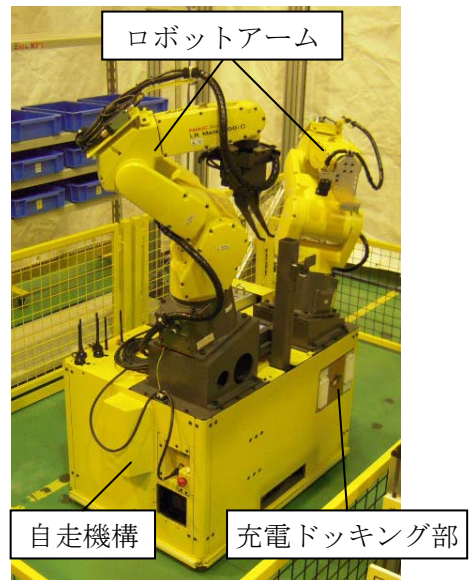


図 11 移動配膳協調ロボット外観

ームそれぞれに分担させることで、単腕式よりもタクト短縮が可能である。部品コンテナのスライド機構などが不要であり、人間によるデジタルピッキング(点灯ランプによるピッキング部品指示)と比較しても、部品棚への細工が不要で極めて簡素な周辺機器とすることが可能である。

□ ビジョン検出による高精度な位置・姿勢補正

ロボット搭載のビジョンにて自走機構の位置・姿勢を補正する手法をロボットに実装し、その有効性を確認した。

□ 路面うねりへの柔軟な対応力

サスペンション機構搭載により、うねりのある路面でもロボットが滑らない構造とした。

□ バッテリによる駆動、充電ステーションドッキングによるバッテリー充電

新規に駆動用バッテリーを開発し、図 13 の通り、ロボットアーム部が部品キット配膳などにて自走機構が停止している間に充電ステーションにドッキングし、バッテリーを短時間で充電する方式とした。小刻みなバッテリー充電を可能とすることで、容量を抑えた小型軽量バッテリーとなり、移動配膳協調ロボットの小型軽量化を実現した。

□ 無線通信により周辺機器との連動が容易

図 14 に示す通り、周辺機器との通信手段として、無線デジタル I/O 通信ならびに無線 LAN 通信機器を搭載し、容易に周辺機器と連動可能なインターフェースを設けた。

部品コンテナ
部品ピッキング
引き出し

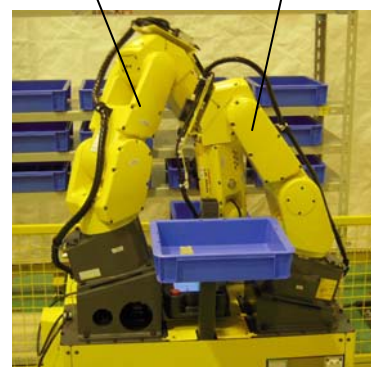


図 12 双腕ロボットアームによる
部品ピッキング



図 13 バッテリ充電ドッキング



図 14 無線通信機器

□ ロボットによる作業誘導

移動配膳協調ロボットは前述の作業者協調時安全対策により、安全に作業者と協調作業可能である。ロボットによる作業者への部品差し出し支援において、周辺機器として

設置したレーザポインタと協働し、ロボットが差し出した部品に対して作業者が組立作業を行う場所を明示する「作業誘導」を行った。その様子を図 15 に示す。作業誘導により作業者の部品組付け間違いなどを大幅に低減することが可能である。

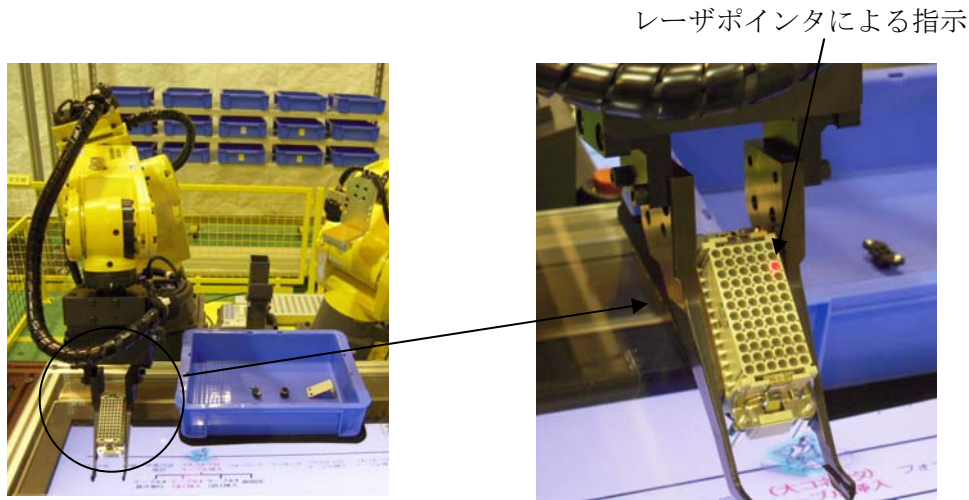


図 15 ロボットとレーザポインタの協働による作業誘導

②-2 部品ピッキングハンドとビジョンシステム

複数段から構成される部品棚の各段に部品コンテナをラフに配置し、部品コンテナに収納されたバラ積み部品を移動配膳協調ロボットに搭載したビジョンにて検出して部品ピッキングおよび部品キット化を行う手法を開発した。更に、図 16 の通り、部品キット化後にロボット搭載ビジョンにて部品キットに過不足がないことを検査する機能も組込んだ。

図 17 に示す通り、部品ピッキング用ハンドは 2 指ハンドとし、小型サーボモータにて 2 指を駆動する構造とした。サーボモータ駆動のハンドとすることで、ハンドの把持力を自在に制御することが可能のため、様々な形状・硬さの部品を把持することが可能である。

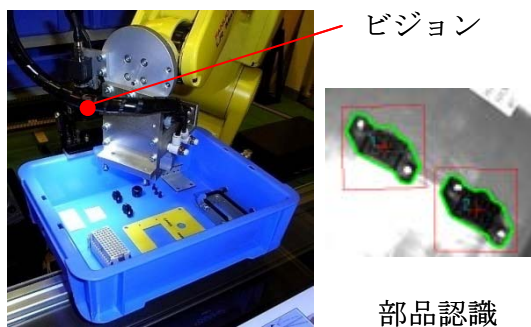


図 16 ビジョンによる部品キット検査

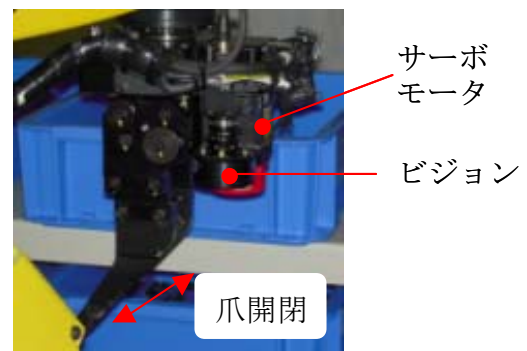


図 17 サーボモータ駆動ハンド

②-3 知能化部品トレイ

図 16 で示す通り、ロボットアームのハンド搭載ビジョンによりキット内部品の過不足検査を行う機能により、配膳する部品キットの部品間違いが完全に排除され、作業者を物理的に支援する作業信頼

性の高い部品キット化・配膳が可能となった。また、部品トレイとして汎用的市販トレイを用いることが可能であり、低コストでのシステム構築が可能である。

③ 作業者が習熟しやすい「作業情報提示技術」

③-1 組立支援システム概要

作業者の組立作業に対して情報支援を行う全体システムを組立支援システム MASS (Multi-modal Assembly Support System) と呼称し、その開発の中心をソフトウェア開発とした。その外観を図 18 に示す。

本システムは、作業熟練者から**作業者位置姿勢測定システム**と**バイタルサインモニタ**により作業者の状態計測(姿勢・位置や生体反応)を行い、そこで得られたデータから作業動作を解析し、作業のやり方を抽出する**作業教示支援 MASTER** (Multi-modal Assembly Skill TransFER)、取得した解析データから作業分析・作業情報データベースに格納し、マルチモーダル情報として分かりやすい形で作業者へ提示する**作業情報支援 MAISER**(Multi-modal Assembly Information SupportER)で構成される。これにより、組立作業に必要な情報に加え、熟練者の組立作業におけるカンやコツなどを作業初心者へ容易に継承することが可能となり、間違いの少ない、機種変更に強いセル生産システムの構築が可能となる。

さらに、LCD ディスプレイ作業台や作業者監視用 IP カメラなどのインターフェース群からなる組立作業支援空間を、作業支援する「里親」を意味して**作業支援空間構築 MA-FOSTER**(Multi-modal Assembly FOSTER)と呼称した。

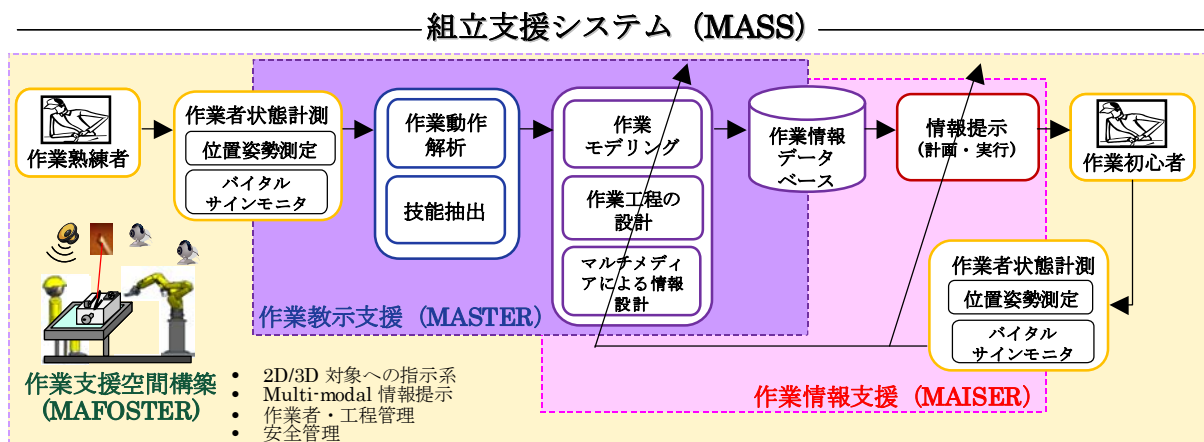


図 18 組立支援システム MASS の概要

③-2 作業者位置姿勢測定システム (MAFOSTER、MASTER、MAISER)

作業者の位置・姿勢を計測し、作業熟練者が行う作業に関するコツやカンといった作業のやり方の伝達の支援に利用可能なデータや作業者の安全管理データを収集する測定システムを開発した。システム構成を図 19(a)に示す。

作業者は頭と肩 2 か所にカラーマークを装着し、汎用 IP カメラ 2 台を作業者の前上方に配置して作業者を解像度 320×240 で測定し、測定データは三次元位置情報に変換される。その結果、位置精度 30[mm]、検出速度 0.6[s]を実現し、実システムに使用可能な十分な性能であることを示した。さらに、

計測されたデータは、3次元CGライブラリOpenGLで作成された動作シミュレーションソフトウェアに入力され、作業管理者への情報フィードバックや作業のやり方の抽出のための特徴動作パラメータの同定などに利用することが可能である。また、作業者の位置・姿勢は、前述の作業者監視システムのデータとしても利用される。作業者の正常姿勢であると判断される作業許容空間を設定し、計測データが空間外となった場合、それを異常姿勢として判断する。その様子を図19(b)に示す。

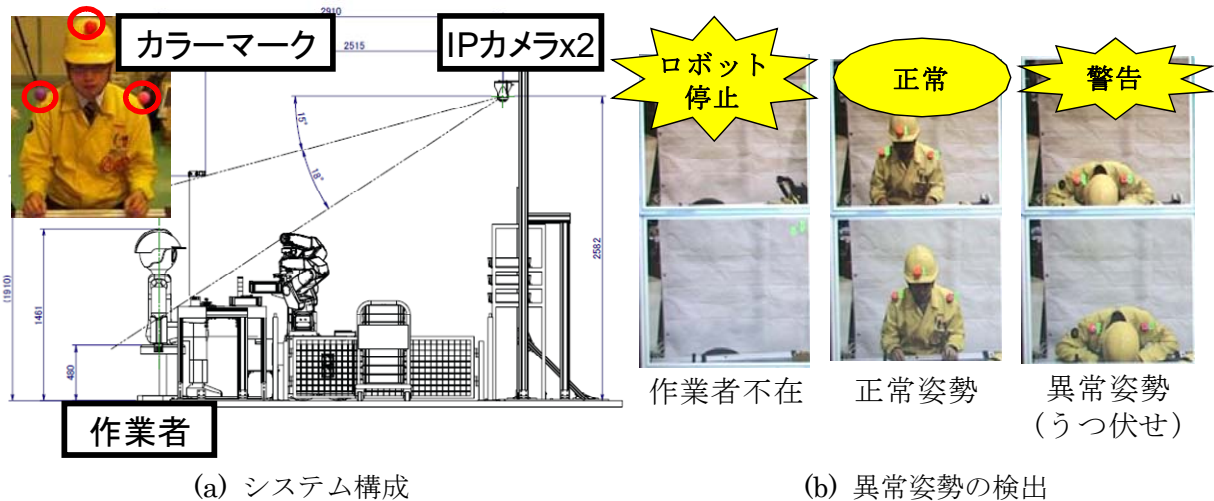


図19 作業者位置姿勢測定システム

③-3 バイタルサインモニタ (MAFOSTER、MAISER、MASTER)

組立作業や情報支援、ロボットから被る作業者の心的負荷を複数の生体反応から測定するバイタルサインモニタを開発した。生理指標の信頼性・測定 of 簡便性の観点から、本バイタルサインモニタは、心的負荷による自律神経系の変化を捉える生理指標の皮膚電位反射 SPR、心電情報(呼吸性洞性不整脈 RSA)、中枢神経系(知覚や認知)の変化を捉える生理指標のフリッカー値測定、また内分泌系の変化を捉える唾液中の α -アミラーゼ濃度計測の4測定法で構成される。それら計測の様子を図20に示す。計測されたデータは高性能PCに取り込まれ、作業者の安静時に計測したデータを統計的に比較し、心的負荷量を推定する。また、作業者がシステムから被る心的負荷を、情報支援を受けることによる負荷とロボットと協調作業を行うことによる負荷に分類し、作業者の快適性・安全性が向上する支援基準、安全基準の策定のための実験的検証を実施し、下記の3点を明らかにした。

- 紙マニュアルや音声ガイドに比べ、映像による作業指示が直観的な理解を促進し、心的負荷が小さいことを実証。
- 一度に提示する情報量には、作業効率と心的負担の評価から最適な提示量が存在することを実証。
- 作業者から1.5m離れた位置にあるロボットアームの動作最高速度は500[mm/s]以上では心的負荷が大きくなること、また、1.5[m]以上離れていれば高速に動作するロボットアームに対して心的負担が小さくなることを明らかにし、本システムの安全基準は妥当であることを実証。



図 20 バイタルサインモニタ(多種の生理指標計測)

③-4 作業教示支援システム (MASTER)

作業中の作業熟練者の姿勢・位置データから作業動作を解析し、特徴的な動作パラメータを作業のやり方として抽出、初心者へ分かりやすい形で教示を行う作業教示支援システム MASTER を開発した。人間が行う組立作業においては、身体の筋骨格構造から受ける運動制約(関節角度の可動域や筋の協働関係)などにより、作業初心者に比べ、作業熟練者の身体の物理的な運動パラメータはその制約条件下で最適値をとると考えられる。そこで、本システムでは、作業者の状態を作業位置姿勢測定システムで計測し、そのデータから熟練者特有の特徴的動作パラメータを同定する。現段階では、下記の 2 種類の作業について特徴動作パラメータの同定を行った。

□ ハンマーによるペグ打ち作業

作業初心者に比べ、作業熟練者は打点近くでは、肩と肘の関節の動きが同期した。このことから、肩の屈曲角、外転角、肘の屈曲角を特徴的動作パラメータとして抽出し、ハンマーによるペグ打ち作業は、「肩と肘の関節の動きが同期させる」ことがコツ(作業のやり方)であることを作業初心者へ伝達した場合、作業効率向上を確認した(図 21)。

□ 作業者の作業姿勢

前述した作業監視システムにおける作業者の頭・肩位置も特徴動作パラメータの一つである。図 19(b)で示

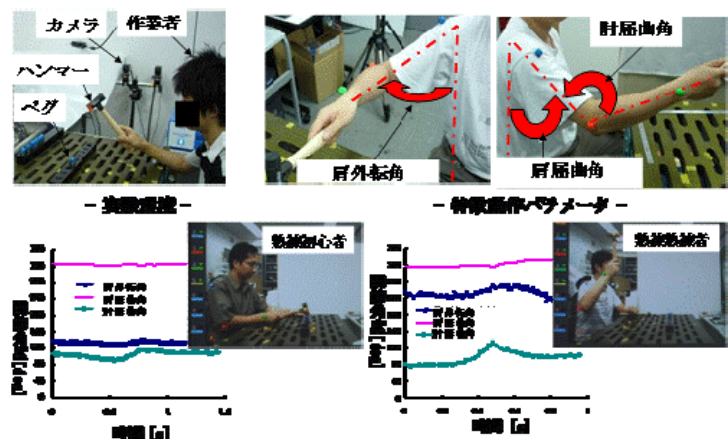


図 21 MASTER で抽出された熟練作業者の作業のやり方

すように、作業者の正常姿勢であると判断される作業許容空間を設定し、計測データが空間外となった場合は、異常姿勢として判断される。安全に作業するコツは、「ロボットとの協調作業時に頭を下げない」ということであることを確認した。

また、組立支援システム MASS では、作業者に分かりやすい情報支援を目的とし、組立作業データ

解析・表現には、人間工学的視点に基づく作業分割手法である階層的タスク分析 HTA (Hierarchical Task Analysis) を導入する。詳細は次節の作業情報支援システム MAISER で記すが、先ほど抽出した技能は、情報支援層(Information Support Task)として表現され、テキストや静止画、アニメーション、動画といったマルチメディアを用いて作業初心者に分かりやすい形で教示される。MASTER では、仮想空間上に構成された作業モデルに熟練者の技能となる部分の運動を再現し、初心者に提示を行う。さらに、情報ディスプレイ上にコツになる部分をテキスト・静止画・動画等で提示する手法も可能であり、直感的に理解しやすかつ汎用性・再現性高く教示できるのが特徴である。

③-5 作業情報支援システム (MAISER)

組立作業情報及び作業熟練者から取得した作業解析データ(技能データ)を人間の分かりやすい形で作業分析・表現を行い、作業情報データベースに格納し、かつマルチモーダル情報として分かりやすい形で作業員へ提示する作業情報支援システム MAISER(Multi-modal Assembly Information SupportER)を開発した。MAISER の機能要素は、「作業のモデリング」と「情報提示」に大別される(図 18)。

□ 作業のモデリング：階層的タスク分析法 (HTA: Hierarchical Task Analysis)

本システムでは、人間工学分野で標準化されつつある階層的作業分析 HTA(Hierarchical Task Analysis)を用いて作業分割基準を定める。HTA とは、トップレベルのタスクの目標から、その目標を満足するタスク、そしてタスクが影響を受ける個々の物理的なアクション(オペレーション)で、タスクをトップダウンに記述するタスク表現の技法である。この技法はタスクを論理的に曖昧さのない方法により表現することが可能である。

そこで、HTA の表現形式に準じて、組立作業の目標・タスク・サブタスク・オペレーションを Assembly Task(目標 (組立セルでの全作業) とそれを分解した SubAssy 群を表現) と Control Task(タスク達成のための部品及び工具・作業エージェント等のリソースのオペレーションを表現)の二階層で表現する。さらに、本システムではこれら 2 種の階層に加えて、これら組立作業の支援情報(マルチモーダル情報など)を表現する Information Task を提案する。これら、HTA モデルを図 22 左部に示す。

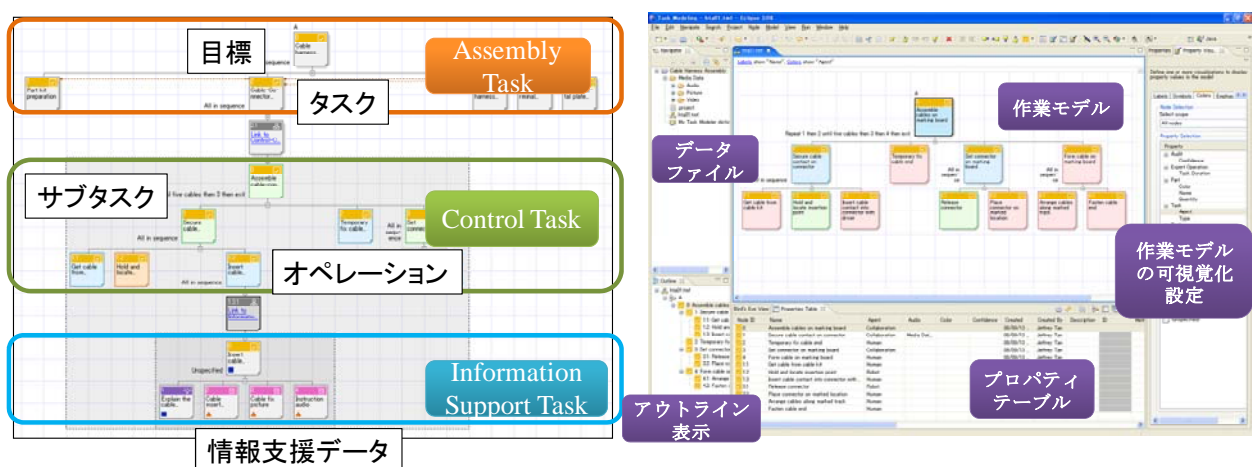


図 22 作業情報支援システム MAISER (左：作業モデル、右：ソフトウェアキャプチャ画面)

このような支援情報を含む組立作業のモデル化により、機種切り替え時の情報提示を即座に変更可能となる。また、これら作業モデル編集環境や情報提示ソフトウェアを開発し、作業手順変更を容易化した(図 22 右)。さらに、作業者の情報切り替えにかかる作業負担の軽減のため、IP カメラの撮像エリア内に設置したマーカを検出し、背景差分などの画像処理によりマーカを手で蔽い隠すことでスイッチ On となるよう設計した情報提示の切り替え入力デバイス(ビジョンスイッチ)を開発した。

□ 情報提示： 心理学的人間工学的手法を用いた作業者の理解を容易にする情報提示の実現

本システムでは、従来の作業マニュアルのような作業情報をテキスト、静止画のみで表現するのではなく、マルチメディア(動画、音声など)を用いることで、情報の多様な表現が可能にした。また、心理学研究から導出された設計原理(Mayer のマルチメディア原理など)に基づき、支援情報が生成されるため、作業者も直感的に理解しやすく、作業効率の向上が期待される(図 23 下部)。さらに、作業者は指示された作業内容に基づいて作業を行うことで、効果的に作業を習熟することが可能である。

また、透明作業台の下面に水平 LCD ディスプレイを配置したディスプレイ作業台を開発した(図 23 上部)。情報提示モニタを作業台と一体化することで、プロジェクタなど外部からの作業情報提示方法よりも省スペース化が実現できる。また、作業者は作業から目を離すことなく作業情報を取得可能であるため、組み付け間違いの発生率の低下、作業のポカ防止への効果が得られる。

上記の効果を検証するために、水平ディスプレイ作業台、縦置きディスプレイ、作業マニュアルという異なる作業提示方法による作業効率への影響を実験的に検証した。その結果、作業情報を作業者の作業エリアに提示することで、提示視線移動回数及び主観的な心的負担が統計的に有意に減少し、作業効率が向上することを実証した。

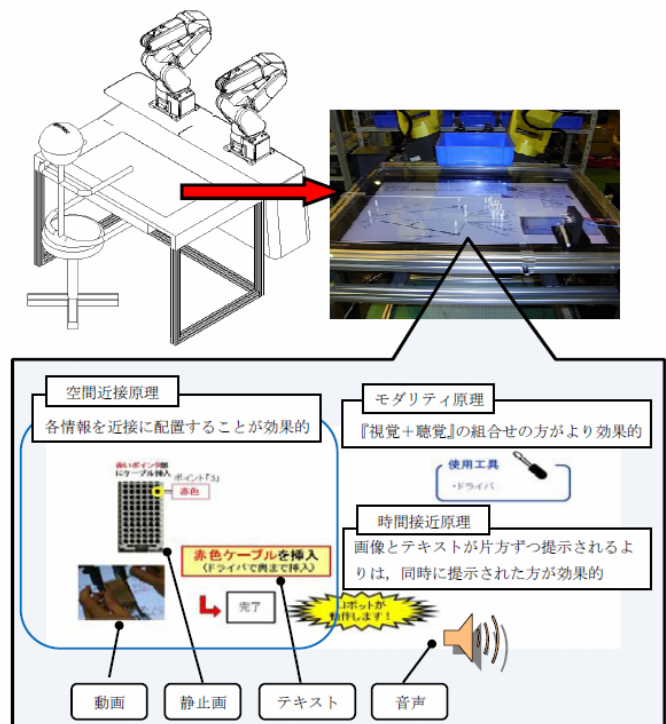


図 23 水平 LCD ディスプレイ作業台とマルチメディアによる情報提示

3) 成果の意義

表3 各研究項目と成果の意義

研究項目	成果の意義
ロボット移動時安全対策	作業者とロボットの作業エリアを分離し、両者の衝突回避のための多重化安全対策を施したことで、高生産性・高信頼性・低コストの自走ロボットによる高速部品キット化・配膳を実現した。安全性の高いロボットを容易に生産現場へ導入可能な点で、組立・加工・物流など様々な市場での部品搬送・供給用途への広がりが期待でき、成果意義は大きい。
作業者協調時安全対策	高出力ロボットでも安全な人間協調ロボットを実現するための二重監視制御装置・ソフトウェアによるロボット動作制限は新規性の高い手法であり、安全性の高い人間ロボット協調作業を可能とする点で様々な市場への広がりが期待できる。今後、安全認証の取得を経て人間ロボット協調型生産システムのモデルケースとして確立することで、組立・加工・物流市場への広がりが期待でき、成果意義は大きい。
安全管理技術統合化	本プロジェクトで実施した合理的に予見可能な誤使用も含めたリスクアセスメントにより極めて信頼性・安全性の高い人間ロボット協調型生産システムの構築が可能となる。本リスクアセスメント手法をユーザに提供することで人間ロボット協調型生産システム導入への不安・懸念を払拭でき、市場拡大が期待できる点で成果意義は大きい。
移動配膳協調ロボット	自走機構に双腕ロボットアームを搭載し、ビジョン検出にて走行時の位置・姿勢補正を行う産業用移動ロボットは業界初の新規技術である。主な特徴は下記の通りである。 <ul style="list-style-type: none"> ・人間による部品配膳よりも高い作業信頼性・生産コスト低減 ・従来のレール式走行軸ロボットよりもレイアウト自由度向上 ・無人搬送車には出来ない部品のロード・アンロードも兼務可能 また、人間との協調作業における作業誘導により、従来の人間のみでの生産作業よりも作業間違いを大幅に削減でき、作業品質が向上する。本ロボットは、組立・加工・物流・検査など様々な市場への導入が可能であり、市場への波及効果は極めて高く、成果意義は大きい。
部品ピッキングハンドとビジョンシステム	双腕ロボットアームとビジョンによるバラ積み取り出し機能により、高い動作自由度を実現し、部品棚などの周辺機器を極めて汎用的な設備とすることができる。人間によるデジタルピッキングで必要となる部品棚への点灯ランプ設置などが不要で、取扱部品品種の追加時の設備改修が不要である。これらの点で成果意義は大きい。
知能化部品トレイ	部品キット内の部品過不足をビジョンにて検査するため、人間により

	も正確で信頼性の高い部品キット化・配膳が可能である。ビジョン検査機能は部品配膳だけではなく、部品形状検査などその他用途への転用も可能であり、高い品質管理が求められる生産現場全般への導入が可能な点で成果意義は大きい。
作業位置姿勢測定システム	汎用的な IP カメラによる作業者の作業間違い検出や居眠りなどの検出による安全管理が可能であり、高品質・高信頼性・低コストの生産システムの構築が可能となる。また、画像処理系をモジュール化した構成で再利用性に富む。これらの点で成果意義は大きい。
バイタルサインモニタ	組立作業や情報支援、ロボットから被る作業者の心的負荷を評価可能にし、この負荷量を実時間・非侵襲・低負荷で測定可能にした点が従来の既存技術では見られず新規性に富む。構築した生産システムの妥当性を評価する上で有用な技術であり、成果意義は大きい。
作業教示支援システム	人間工学的視点に基づく作業分割手法 HTA (Hierarchical Task Analysis) を導入し、作業表現が人間の理解しやすい形でありかつ現場での作業手順と同様の構造をもつため、作業マニュアルの半自動生成を支援可能である。今後開発を予定している作業訓練システムのベースとなる技術であり、成果意義は大きい。
作業情報支援システム	水平作業台に組込んだ廉価な市販 LCD パネルによりマルチモーダル (動画・静止画・音声・テキスト) データでの作業指示を行い、作業をしながら視線を大きく動かさずに理解可能とした作業情報提示手法は新規性が高い。作業者の技能レベルに合わせた情報提示により、作業間違いの発生率低下・製品の組立品質の改善が見込まれ、組立に限定することなくあらゆる用途への転用が可能である点で、成果意義は大きい。

4) 特許等の取得

本プロジェクトにおいて新たに発生した発明に関しては、表 4 の「特許取得状況」または「添付資料 1」にあるように出願を行った。人間とロボットの協調作業での作業分担、自走ロボットの制御など権利化を進める予定である。

表 4 特許取得状況

特許の名称	特徴・強み・新規性
作業分担機能を備えた生産システム (特願 2008-020425)	実作業を行う作業者と作業者の実作業の準備又は段取りを行うロボットが混在して配置された生産システム。
自走ロボット制御システム (特願 2008-187627)	自走ロボットと人間の位置関係によりロボット停止命令のための有線接続の切替えを行うシステム。

自走式ロボットの位置および姿勢の補正方法(特願2009-005893)	自走ロボットの走行部とロボットアーム部の動作誤差を所定場所で補正する方法。
給電調整装置を備えたロボットシステム(特願 2009-011293)	自走ロボットと人間の位置関係により、ロボット制御装置の動作モードの切替えを行うロボットシステム。
人間とロボットとの協調動作領域を有する生産システム(特願 2009-014672)	人間とロボットが協調動作領域を有する際、ロボットに動作制限を設けることで安全を確保する生産システム。
部品キットを用いた生産システム(特願 2009-034142)	ロボット搭載の撮像手段を用いて部品キットの内容物を検査する生産システム。
シミュレーション方法(特願 2009-059678)	人間とロボットの協調作業を最適化するシミュレーション方法。

5) 成果の普及

表5の通り、プロジェクト成果について積極的に学会・論文発表を行っている。

表5 学会・論文発表状況

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2008/8/1	International Journal of Automation Technology (IJAT)	Multi-modal Assembly-Support System for Cell Production	東京大学 段峰
2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	人間・ロボット協調型セル生産組立システムの開発	東京大学 加藤 龍
2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	Assembly information development in task modeling to support man-machine collaboration in cellproduction	東京大学 Jeffrey Too Chuan Tan
2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	Analysys of operator's skill level based on assembly task in cell production	東京大学 高 洋
2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	セル生産システムにおけるマルチメディア情報を用いた作業情報支援	東京大学 張 治
2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	人間・ロボット協調型セル生産組立システムにおける協調作業を行うロボットによる精神的負荷の評価	東京大学 渡邊 圭
2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	セル生産システムにおける作業情報の提示量が精神的負荷に及ぼす影響	東京大学 藤田真理奈
2009/2/21	the IEEE Intl. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO2008)	Using Motion Capture Data to Regenerate Operator's Motions in a Simulator at Real Time	東京大学 段峰
2009/2/21	the IEEE Intl. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO2009)	Extending Task Analysis in HTA to Model Man-Machine Collaboration in Cell Production	東京大学 Jeffrey Too Chuan Tan
2008/9/17	2008年度精密工学会秋季大会	Predict Worker's Intention through Template-based Gesture Recognition Method	東京大学 段峰
2008/9/17	2008年度精密工学会秋季大会	Application of Task Analysis Strategy for Man-Machine Collaboration Modeling in Cell Production	東京大学 Jeffrey Too Chuan Tan
2008/9/17	2008年度精密工学会秋季大会	人間・ロボット協調型セル生産組立システムにおける精神的負荷の生理的指標による評価	東京大学 渡邊 圭
2008/9/9	2008年日本ロボット学会学術講演会	Image-based Operator Monitoring System	東京大学 段峰
2008/9/9	2008年日本ロボット学会学術講演会	Safety Strategy Design in Operation Control System for Man-Machine Collaboration in Cell Production	東京大学 Jeffrey Too Chuan Tan
2008/9/9	2008年日本ロボット学会学術講演会	セル生産における作業情報提示方法の検討	東京大学 張 治
2008/9/9	2008年日本ロボット学会学術講演会	人間・ロボット協調型セル生産組立システムにおける作業者の精神的負荷評価	東京大学 渡邊 圭
2008/9/9	2008年日本ロボット学会学術講演会	セル生産システムにおける作業情報提示による精神的負荷の評価	東京大学 藤田真理奈
2008/9/1	the IEEE Intl. Conf. on Automation and Logistics (ICAL2008)	Construct State-Action Map through Human Control Trajectories and Computation	東京大学 段峰
2008/9/1	the IEEE Intl. Conf. on Automation and Logistics (ICAL2008)	Task Decomposition of Cell Production Assembly Operation for Man-Machine Collaboration by HTA	東京大学 Jeffrey Too Chuan Tan
2008/8/1	the IEEE Intl. Conf. on Automation Science and Engineering (CASE2008)	Analyzing Human Skill through Control Trajectories and Motion Capture Data	東京大学 段峰
2008/5/26	The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP MS)	Multimedia based Assembly Supporting System for Cell Production	東京大学 段峰
2008/5/26	The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP MS)	Assembly Information System for Operational Support in Cell Production	東京大学 Jeffrey Too Chuan Tan
2008/5/26	The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP MS)	A Study of Design Factors for Information Supporting System in Cell Production	東京大学 張 治

3.1.2.2 コンパクトハンドリングシステムを備えた安全な上体ヒューマノイド

【実施者：(独)産業技術総合研究所、川田工業(株)、THK(株)】

1) 研究概要

本事業では川田工業(株)、THK(株)、(独)産業技術総合研究所の3主要研究開発機関が共同して、目的とした3要素技術「(T1)作業者とロボットが協働できるための安全管理技術」と「(T2)必要な時に必要な量の部品を整理して供給する作業支援技術」、さらに「(T3)作業者が習熟しやすい作業情報提示技術」を分担開発しつつ、「安全な小型上体ヒューマノイド(ロボット)」を中心とする組立作業支援システムの研究開発を総合的に共同推進する。それぞれの機関における開発内容を以下に述べるが、このほか外部からの協力者としてSONYイーエムシーエス幸田TEC(ソニー)と株式会社ベルデックスが加わり、それぞれセル生産現場での実証に関わる協力および普及のためのマーケティングに関わる協力を行う。

まず、川田工業(株)では、隣接作業する人間が安全に小型情報家電製品の組立てを実施できるように、本質安全に則って、可能な限り低出力のロボットの開発を行う。これは、言うまでもなく、高生産性を追及して高剛性低振動の制御性能を指向した従来の”硬い”産業用ロボットを導入することが危険なためである。しかし、低剛性がもたらす振動等による生産性の低下を回避するために低質量とし、さらに双腕形態をとることによって、作業に要求される剛性を適応的に確保できるようにする。加えて、現行の安全衛生規則や安全規格にほぼ遵守する方針でリスクアセスメントを行い、その結果から策定された安全方策としてデザインされた形状および運動機構をもったロボットとして開発する。すなわちまず、あらたに絶対位置検出器を加えた作業空間制限機構によって人間と動的に作業空間が隔てられる機能をロボットに与える。つぎに、その速度制限や出力制限、さらに当然であるが緊急停止については「機能安全化」すなわち制御系を構成する要素部品の単一故障が検出され、システムとしての安全機能を損なうことがないような機構の構築を図る。さらに、頻繁の人間・ロボット間の接触を想定して、本質安全を指向した機械設計によって、コンパクトな小型上体ヒューマノイドや高機能カバーの開発に取り組む。

つぎに、THK(株)では、小型軽量で汎用性の高いチャックハンドベースモジュール、ツメ先を簡便に交換できるツメ先アタッチメント機構、チャックハンド自体を迅速に交換するチャックハンド交換モジュール、協働する作業者の安全に配慮された安全機構の要素技術開発を行う。これらは、生産性向上を目指して、機種切り替えを早期に達成できるようにワークに応じて簡易に交換が可能なハンドリングシステムとして統合し、川田工業(株)の小型上体ヒューマノイドに組み込まれるが、リスクアセスメントにつづく3ステップ法によって可能な限り作業者の安全に配慮した形状と機構をもって作り上げられるようにする。

最後に(独)産業技術総合研究所では、まず、ロボットと作業者の侵入を確実に検知するための侵入検知センサシステムならびにこれらの侵入検知システムを複数組み合わせ、動的に共存空間の共有が設計できるシステムの開発を行う。加えて、全体の空間内において、ロボットの自動回避や緊急停止の制御、さらに、ロボットが作業不良の際に、作業者による直接再教示が安全に達成できるような自然なヒューマンインターフェース、およびこれを達成するための力制御に関する安全関連系構築技術を開発する。つぎに、上記の小型上体ヒューマノイドが隣接する人間の組立作業を支援することができるように、安

全な工程計画を可能とする3Dシミュレータ付きのリスクアセスメントシステムを開発する。リスクアセスメントには、小型上体ヒューマノイドの設計段階における3ステップ法、すなわち本質安全設計から安全方策の策定、さらにユーザーへの残留リスクの開示が含まれており、このプロセスをもって、川田工業㈱における小型上体ヒューマノイドと統合システムの構築が支援されることになる。

統合システムについては、初年度に実験機を構築して第1次前期実証試験を行い、セル生産現場導入による作業ニーズとの整合性確認を含めた有効性、および実用機のリスクアセスメントに資する安全性の知見を得る。これを元に実用機のプロトタイプとなる原型機を再構築し、次年度に第1次後期実証試験を行って残された技術的課題を整理する。

3年目に予定される実用機による第2次の実証試験では、作業対象をセル生産の基本的な組立作業フェーズのひとつである部品の受け渡し作業とし、実際に、ロボットを停止することなく作業空間を隔てながら、部品の検査受け渡しが可能となることを検証する。この時点で開発した要素技術の評価を行う。

2) 成果詳細

① 作業者とロボットとが協働できるための安全管理技術

①-1 小型上体ヒューマノイドの開発

<概要>

本質安全を指向したコンパクトな双腕ロボットにおいて、モータ出力 80W 以下、基本姿勢時の手先静止力 150N 以下、A4 平均周回速度 700mm/s 以上を達成し、実証現場において必要とされたタクトタイムを実現した。現場での信頼性も高く好評を得ている。ステージゲート審査時点では、人と隣り合う組立作業に導入するための技術調整を始めていた。

<目的と目標>

組立工程における省人化を図るべく、作業者が組立工程で肩を並べる作業者の一部をそっくり双腕ロボットで置き換えるために、小型家電製品セル生産に最適化した出力を持ち、本質安全が取り入れられた、安価でコンパクトな上体ヒューマノイドの基本システムを開発し、実証現場において生産性と安全性を支える要素機器の信頼性が向上したことを確認する。

<成果>

小型上体ヒューマノイドの外観を図1に、仕様を表1に示す。人と隣接した状態でも安全に作業継続できるようにするために、低出力(80W以下)で、かつ脇を絞って肩幅から肘が飛び出さない肩幅空間制限リンク図2を持つことを特長としたコンパクトな上体ヒューマノイドを開発した。

表 1 小型上部ヒューマノイド仕様

寸法 (mm)	身長	578
	肩幅	480
	胸板	166
本体質量(kg)		15
軸仕様		合計 15 軸
腰		1 軸
腕		双腕×6 軸
首		2 軸
片腕可搬質量(kg)		1
繰返し位置決め精度(mm)		0.05
駆動方式	アクチュエータ	ブラシレスモータ ハーモニック減速機
	ドライバ	デジタルサーボドライバ

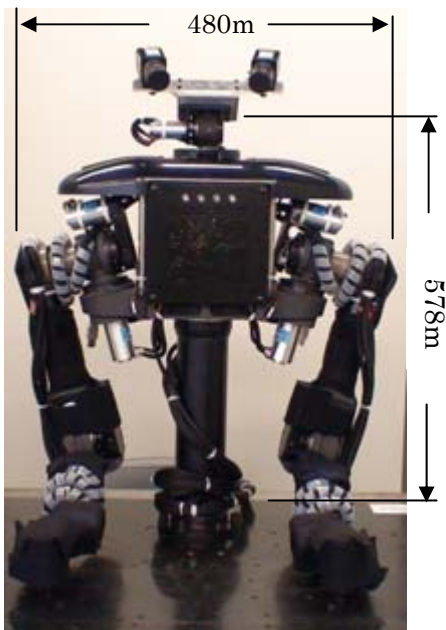


図 1 小型上部ヒューマノイドの外観

肩ロール軸を有する従来型の双腕ロボット図 3 では、手先の姿勢角によっては肘が作業側側に飛び出す。この状態を回避するため、肩ロール軸を配することを止め、脇が開いて腕が人に接触することを回避し、ロボットの両側に作業者がいる状況においても、脇を絞って肩幅から肘が飛び出さない肩幅空間制限リンクを考案した。軸構成においては腰にヨー軸を配し、腕には肩にヨー軸、ピッチ軸を、肘にピッチ軸、手首にヨー軸、ピッチ軸、ロール軸を配し、視覚装置用に首にヨー軸とピッチ軸を配した。この軸構成

によって人の動きに近い動作を行うことができる。また、セル生産現場で使用されることを前提として安全性を重視し、設計段階での十分なリスクアセスメントを行い、挟み込みが予測される個所には適切な隙間を設け、角部は全て丸くして危険個所の低減を行い、本質安全を指向した。

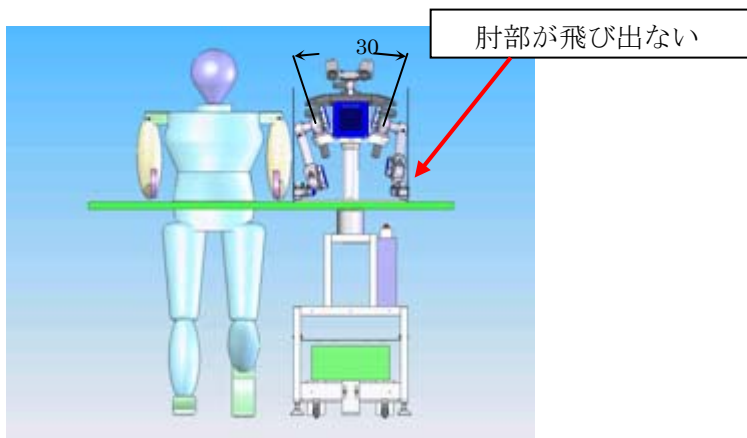


図 2 肩幅空間制限リンク



図 3 従来型の双腕ロボット

上記の本質安全を指向した小型上体ヒューマノイドを評価するために、モータの出力を腰・肩・肘に 44W、手首・首は 24W を使用しロボットの総出力を限界まで小さくしたもの（実証 1）と、腰・肩・肘モータを 71W まで出力を増やしたもの（実証 2）の 2 種類に対して安全性と生産性について評価した。実証 1、2 の検証結果を表 2 に示す。

表 2 実証1と実証2の比較

モータ出力(W)	実証 1	実証 2
腰, 肩, 肘	44	71
手首, 首	24	24
A4 平均周回速度 (mm/s)	450	700
基本姿勢時の手先静止力 (N)	120	150

動作速度については、実証 1 では手先最高速度 450mm/s 以上および実証 2 では 700mm/s 以上を達成させ、基本姿勢時の手先静止力については実証 1 では 120N 以下、実証 2 では 150N 以下とすることができた。80W 以下の低出力なロボットでも十分な生産性と安全性を有することを実証した。

安価なロボットを実現するため、ロボット関節に使用する部品を共通化し、製造原価を削減した。上体ヒューマノイドに使用した共通部品の使用状況を表 3 に示す。

表 3 ヒューマノイドに使用した部品の使用状況

構成部品の種類	部品種類	全部品数	部品 1 個当たりの共通使用数
要素部品(モータ・ギア・ベアリング)	6	45	7.5
加工部品(鋳物・切削部品)	60	163	2.7
小部品 (ボルト他)	54	745	13.8

<目標の達成度>

関節部の要素部品は大凡 2 種類に共通化し、小型・軽量とすると共にコストの低減を図っている。この結果、腕の質量は 2kg 程度となり安全性の向上に寄与している。

生産現場で要求される生産性即ち稼働率と製品信頼性であるが、設計段階で機能と信頼性を十分に検討した結果、11 月現在、当社実証機では、4000 時間の耐久動作、ソニーイーエムシーエス幸田テックの実証現場で 2000 時間（稼働率 99%）、THK 三重工場にて 100 時間の運転を達成している。上体ヒューマノイドは現場の信頼性も高く好評を得ている。ステージゲート審査時点で人と隣り合う組立作業に導入するための技術調整を行っており、計画では第 2 ステージで完成する予定であったため、達成には至らなかった。

①-2 出力制限装置の開発

<概要>

大きな最大出力電流を仕様として達成しながら、必要とされる安全性の度合いに応じて出力可能な電流を調整することで、ロボットの安全性と生産性を両立させることのできるロボット用電力供給システムを開発した。ステージゲート審査以降は上体ヒューマノイドのシステムに統合し、模擬現場での試験を行っていく予定であった。

<目的と目標>

本開発では、必要とする安全性の度合いにより、出力可能な電力を調整し、ロボットの安全性と生産性を損なうことなく両立させ、安全性を必要とする人間と共存可能なロボットの電源として利用することを目的としている。このようなシステムを試作して実用性を検証する。

<成果>

回路を図1に示す。本装置は、ロボットのモータ駆動に必要な電力を商用交流電源から直流電源へと変換する2台の電力変換回路A、Bとモータ駆動時のピーク電力を補助的に供給するバッテリー、電源出力経路を切り替えるリレー回路から構成されている。

ロボットは人間が近くにいる状況下で高速の作業を行うモード（通常モード）、人間が近くにいる作業を行っているときのモード（出力制限モード）、ワークの交換などで停止しているモード（一旦停止モード）を運用モードとして有している。これらロボットの動作モードに応じて、電力変換回路A、Bおよびバッテリーから得られる直流電源出力を、上位指令用演算装置による指令でリレー回路を切り替えることで出力可能な電流を制限している。

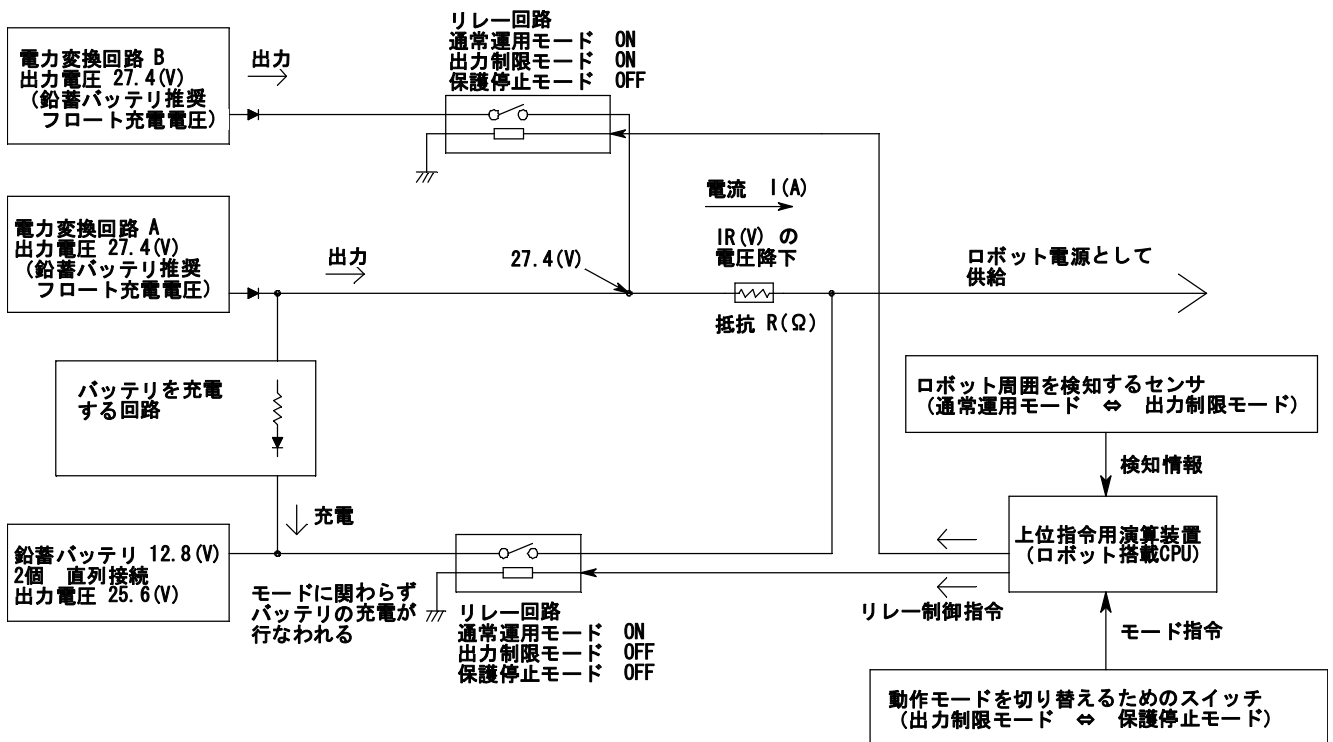


図1 出力制限装置の回路

<目標の達成度>

ステージゲート審査の時点では、回路設計が完了した。審査以降は上体ヒューマノイドのシステムに統合し、模擬現場での試験を行っていく予定であったが、達成には至らなかった。

①-3 高機能カバーの開発

<概要>

従来の産業用ロボットとは異なる視点から、現場に適応した環境機能と対人保護機能さらに親和性を有したデザインを持つ高機能カバーを開発し、実証現場向けに各社の作業着に類似したカラーの組立作業現場用のスーツ、対人保護機能は、直接ロボットに装着する保護パッドを装着して、運用および耐久性

について評価する。

<目的と目標>

従来の産業用ロボットとは異なる視点から、現場に適応した環境機能と対人保護機能さらに親和性を有したデザインを持つ高機能カバーを開発し、実証現場においてそれらの機能を評価する。

<成果>

開発した高機能カバーを装着したロボットの外観写真を図1に示す。高機能カバー実証現場として、クリーンルーム用と一般の組立作業現場用の2種類の作業現場に上体ヒューマノイドを導入することを想定し、クリーンルームではJIS B 9920クラス6（米国規格FED-STD-209Dクラス1000相当）を満足するために、ロボットから塵を排出しない機能と、一般作業現場では、その逆にロボットに環境の塵やオイルミストが悪影響を与えないようなフィルタ機能のをそれぞれ装備した。図1 クリーンスーツにクリーンルーム用カバー、図1 一般スーツ（実証1、実証2）に一般の組立作業現場用カバーの外観写真をそれぞれ示す。また、対人保護機能として緩衝材をスーツに縫込む方法とロボット関節毎に個別に装着する保護パッドによる方法の2形態を試験した。図1 緩衝材有にロボット関節毎に個別に装着された保護パッドの様子を示す。



カバー無

緩衝材有

クリーンスーツ

一般スーツ(実証1)

一般スーツ(実証2)

図1 高機能カバー外観

高機能カバーの評価について、クリーンルーム用としては、クリーンスーツによりロボットからの発塵を押さえること、一般の組立作業現場用ではロボット内部に塵やオイルミストが付着しないことをそれぞれ実証した。図2、図3はクリーンスーツの有無による発塵抑制の効果例を示しており、クリーンスーツを着用していない状態で発生していた各粒径の塵が、クリーンスーツを着用することにより減少していることが分かる。

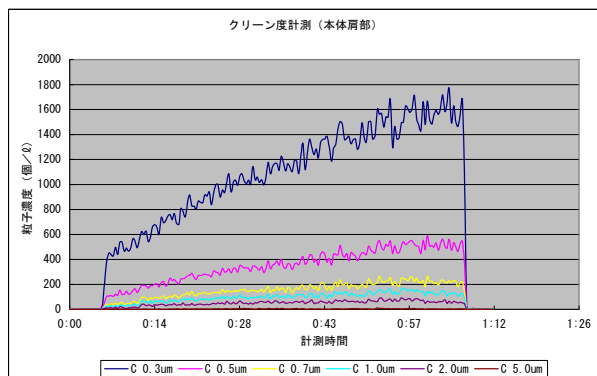


図2 クリーンスーツ無での発塵状況

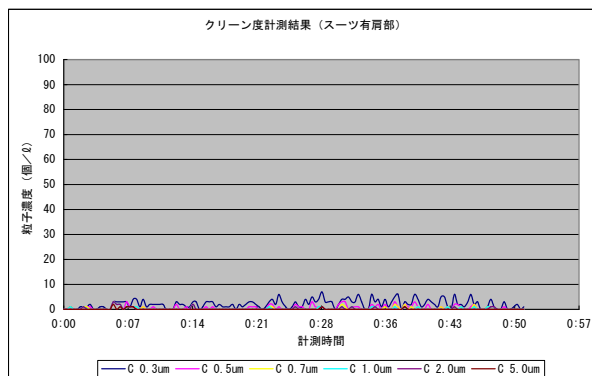


図3 クリーンスーツ有での発塵状況

<目標の達成度>

ステージゲート審査の時点では、実証現場向けに各社の作業着に類似したカラーの組立作業現場用のスーツ、対人保護機能は、直接ロボットに装着する保護パッドを装着して、運用および耐久性について評価した。ステージゲート審査以降に実証現場においてそれらの機能の評価する予定であったが、達成には至らなかった。

①-4 安全空間管理システムの開発

<概要>

本質安全化できないロボットのリスクについて、追加保護方策として、機能安全に基づく安全関連システムとなる安全空間管理システムを開発し、実証試験現場にて評価を行った。

<目的と目標>

安全の3ステップ法から、本質安全化できないリスクに対しては追加の保護方策が必要となる。本システムでは、この追加保護方策としてロボットの作業空間を制限し、同時に作業員の作業空間への侵入を検知してリスクを回避するための安全空間管理システムを開発することを目的とする。具体的には3次元ビジョンによる人検出アルゴリズムと安全モジュールを統合して動的なロボットの作動空間制限機能を実装することを目標とする。

<成果>

開発したセル生産システムでは、ロボットの本質安全は十分達成されたものの、リスクアセスメントの結果、ロボットハンドの爪先が人の眼などに刺さるリスクだけが本質安全化できないリスクとわかった。そのため、安全の3ステップ法に基づき、追加保護方策が必要となった。



図 1 実証試験現場における侵入検知

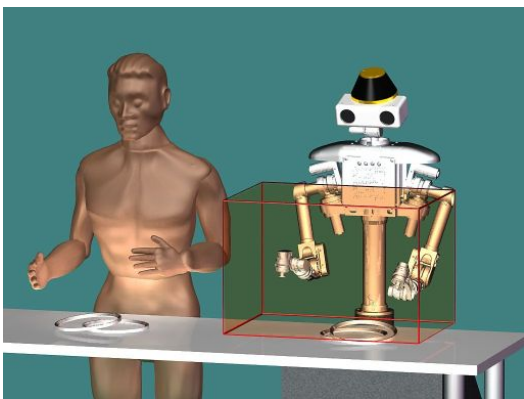


図 2 ロボットの動作制限エリア

図 1 に見える 4 本のライトカーテンで囲まれたエリアが、クロスローラーの受け渡しを行う共存作業エリアである。ロボットと作業員が同時にここに侵入した場合には、ロボットは一旦停止する。あるいは、例えばロボットの不具合を直そうとするなど、作業員がこのエリアを乗り越えてロボット作業エリアに侵入した場合にも、ロボットは一旦停止する。以上の機能によりロボットの隣に立つ作業員の安全が確保される。一方、作業員以外の周囲にいる人への危害を防ぐには、ロボットの手先の動作範囲が、作業機にごく近い、限られたエリアに制限されれば良い。このようなロボットの動作制限範囲として図 2 に示すようなエリアを設定し、ロボットがここから出ないよう監視を行う。



図 3 外付けの安全モジュール

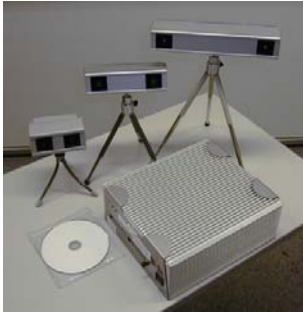


図 4 評価した 3 次元ビジョン

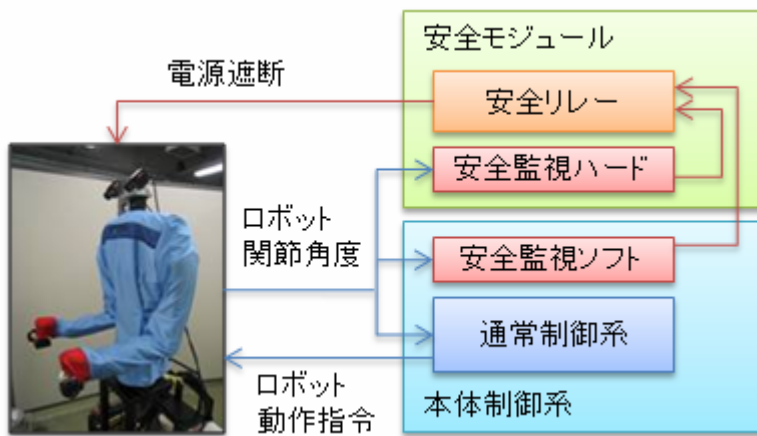


図 5 安全空間管理システムのブロック図

以上の機能について、図 3 に示す外付けのハードウェアモジュールにより、監視を行っている。本体制御系のソフトウェアのバグや暴走などにより、上記の安全機能が働かなくなった場合には、本モジュールが安全リレーにより電源の遮断を行う。

最後に、実施計画で将来技術に位置づけた 3 次元ビジョンシステムを図 4 に示す。これは産総研で開発済みのユビキタスステレオビジョンである。本開発では、図 1 のライトカーテンに代わるシステムとしてこの 3 次元ビジョンを候補とし、評価を行った。

評価結果について、安全機能の監視を行う安全モジュールは、図 5 に示すように 2 重系にて設計を行い、ISO13849:1999 のカテゴリ 3 に相当する構成を実現した。また電源遮断を行う安全リレー系についても、同カテゴリ 4 相当の回路を実現した。THK 三重工場における実証試験において安全リレー系と侵入検知系の動作試験を行い、安全装置として正常に機能することを確認した。

将来開発項目となる 3 次元ビジョンシステムについては、図 6-7 に示すように、実証試験を行った工場現場において人の動作を十分に検知する能力を有することを確認した。今後、ロボットへの搭載方法を確定し、それに合わせた人検知アルゴリズムの開発が必要である。



図 6 人が侵入した場合(左:原画像、右:3次元画像)



図 7 人が侵入しない場合(左:原画像、右:3次元画像)

<目標の達成度>

ステージゲート時の目標とした、安全空間管理システムの設計、ハードウェアの試作、評価について、全て完了した。さらに開発した安全モジュールの安全監視機能を高度化し、動作空間制限監視の2重化について、ステージゲート以降に開発と評価を行う予定であったが、達成には至らなかった。

また侵入検知センサについては、ライトカーテンによる共存空間監視を3次元ビジョンによる監視に置き換えるための初期評価を計画通りに完了し、ステージゲート審査以降の開発項目を明らかにしたが、それらの達成には至らなかった。

①-5 シミュレータベースのリスク管理システムの開発

<概要>

産業用ロボットシミュレータにリスク管理システムを実装し、実証システムのリスクアセスメントの工数、約10人・時間を節約できることを示した。

<目的と目標>

人間・ロボット協調環境はFA技術の発達に伴い発生しつつある新しい状況である。このような未知環境に存在する危険を探索して対応するためには安全に関する最先端技術を統合して適用しなくてはならない。そこで本研究では先端的なリスク管理手法を人間・ロボット協調環境のために調整した新しいリスク管理システムを開発することを目的とする。具体的には、シミュレータベースのリスク管理システムを実機の安全空間管理システムと統合し、人間共存型ロボットの対人安全機能を完成することを目標とする。

<成果>

新しいリスク管理システムは「空間ハザードトライアングル」という新しいモデルで危険をモデル化して可視化する。可視化には工業用のロボットシミュレータ「DELMIA ENVISION」を使用する。「ハザード」とは、「事故が起きる潜在的な可能性」とであると定義され、「空間ハザードトライアングル」では、「以下の3つの要素が同じ空間領域で重なること」がハザードであると考えられる。

(1) ロボットのハザード源：ロボットの危険がある部位。ロボットのリスクアセスメントによって設計時に明らかになる。これらは傷害特性の側面から「鈍的傷害」特性、「鋭的傷害」特性、「人体を押し潰す傷害」特性、などで分類することができる。

(2) 身体部位の存在空間：人間の身体部位が傷つきやすい条件で存在する空間。身体部位は、眼球、頭部、胴体、手足など、傷害特性に対する感受性の違いから区別することができる。

(3) 傷害メカニズム：「(1) ハザード源」が「(2) 身体部位」に作用するメカニズム。ハザードを回避するためには、この2者に対して「傷害メカニズム」が発現しないような「安全制御機能」をロボットに準備しておいて、「空間ハザードトライアングル」が完成することがないように制御すればよい。

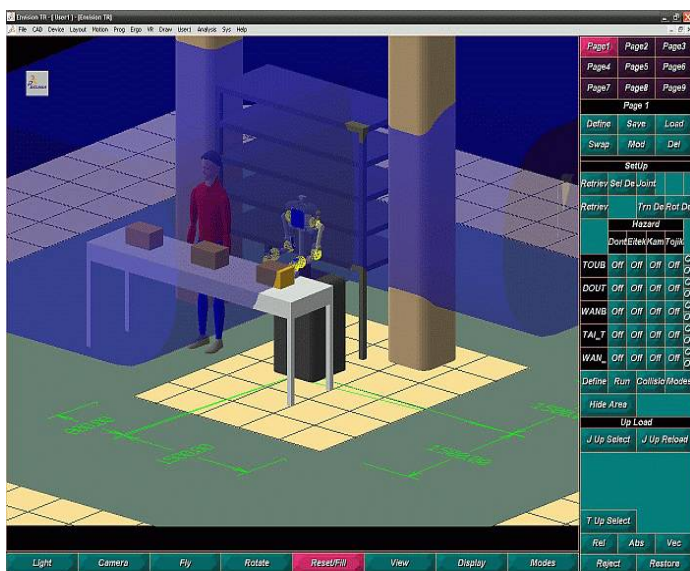


図1 DELMIA ENVISION でのハザードの可視化

シミュレータ DELMIA ENVISION によって空間ハザードトライアングルを可視化したものが図1である。ここでは「(1) ロボットのハザード源」と「(2) 身体部位の存在空間」の干渉が表示され、「(3) 傷害メカニズム」の発現が抑制されているかどうかを検討することができる。図1画面中の青色で表示されているのが作業者の腕部の可達域であり、シミュレータはこのような領域にロボットのハザード源が干渉するタイミングを検出する。人体の部位の種類、ロボットのハザード源の種類の組み合わせは画面右パネルの配列式ボタンで任意に選択できる。これにより、障害メカニズム別にハザードが抑制できているかを把握できる。

評価について、開発したリスク管理システムに実証システムの環境とロボット動作プログラムをロードしてハザードを検証した結果、表1に示すように、衝突、突き刺し、挟み込みのハザ

ード源が作業者の腕部に作用するのは距離が 1450mm 以内、頭部および胴体に作用するのは 690mm 以内であることが分かった。

表 1 ハザードが発生する距離

	衝突のハザード源	突刺しのハザード源	噛込みのハザード源
人体頭部及び胴体	690 mm	690 mm	690 mm
人体腕部	1450 mm	1450 mm	1450 mm

既存技術である英 PROCTER 社製のリスク管理ソフトウェア「Risk Assessment Calculator 4」を使用すると、実証システムについて 280 のハザードが同定された。このうち、リスク管理システムによって 11%にあたる 31 ハザードを提示できることが確認できた。従ってリスク管理システムによる支援を行うことによって全工数 90 人・時間の中の約 10 人・時間を節約することができる。

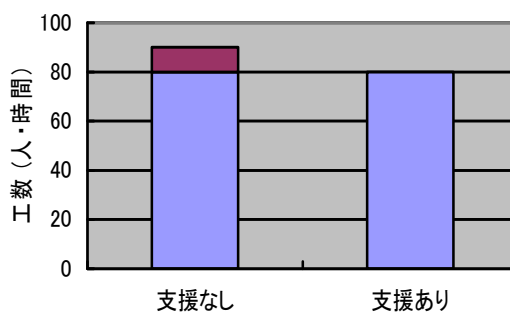


図 2 リスクアセスメント工数の削減

<目標の達成度>

ステージゲート時点でリスク管理システムの基本コンセプトの確立、特許申請、システムの実装を完成した。ステージゲート審査以降に 3次元ビジョンによる人検出アルゴリズムと安全モジュールを統合して商用パッケージ化する予定であったが、達成には至らなかった。

②必要な時に必要な量の部品を整列して供給する作業支援技術

②-1 簡易交換コンパクトハンドリングシステム

<概要>

必要な時に必要な量の部品を整列して供給する作業支援技術として簡易交換コンパクトハンドリングシステムを開発し、実証システムに搭載して本技術の有用性を確認した。

簡易交換コンパクトハンドリングシステムは、本体質量 120 g 以下の小型・軽量化を達成し、2爪タイプ、3爪タイプ、回転軸のベースモジュールをラインアップしてモジュール化することで、組み合わせによってさまざまな形状のワーク把持に対応可能とした。また、ベースモジュールはそれぞれ超小型ドラ

イバコントローラを内蔵しているため、上位からのコマンドによる簡単な指令で動作可能とし、また、シリアル通信によりハンドを多軸に組み合わせても、ロボットとの配線数は 4 本と省配線化を達成している。さらにこの省配線化と簡易交換ユニットにより、片腕のハンド交換時間が 10 秒以下と機種切り替えに対して高い対応能力を示すことができた。

簡易交換コンパクトハンドリングシステムは、リスクアセスメントおよびその結果に対する 3 ステップに基づいた安全方策を施し、最終的にロボットの動作空間制限機能と合わせてリスクを許容できるレベルまで低減した。

<目的と目標>

人間・ロボット協調型安全な上体ヒューマノイドセル生産システムの機能に即した小型・軽量で、さまざまなワークを把持することで汎用性が高く、生産性向上を目指した迅速な機種切り替え可能な簡易交換コンパクトハンドリングシステムを開発し、実証システムにおいて本機能の有用性を実証することを目標とする。

<成果>

構成概要を図 1 に示す。簡易交換コンパクトハンドリングシステムは、ハンドに内蔵可能な超小型ドライバコントローラと、超小型ドライバコントローラで動作可能なモータ・センサで構成された 2 爪タイプ、3 爪タイプ、回転軸のベースモジュールと、ロボットへの脱着が簡単に行える簡易交換ユニットで構成される。ベースモジュールを組み合わせることでさまざまなワーク把持に対応する。

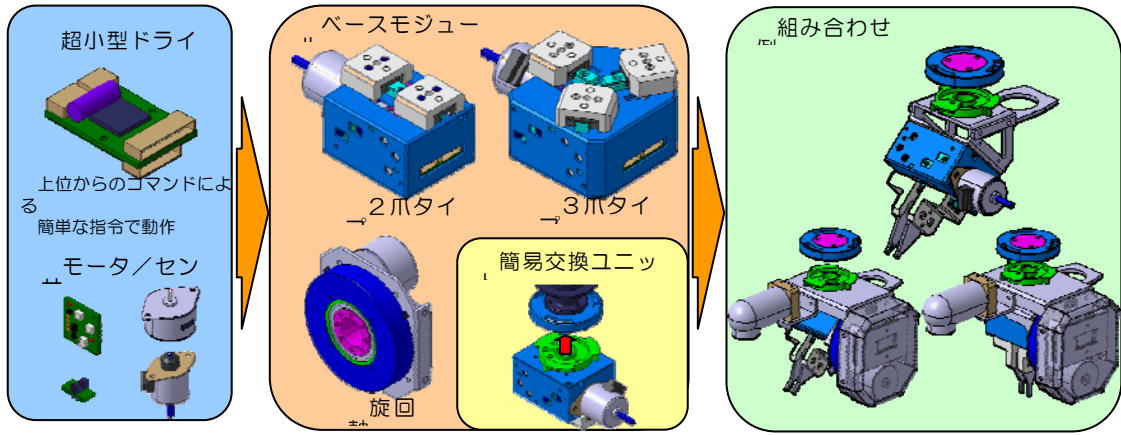


図 1 構成概要

ベースモジュールおよび超小型ドライバコントローラの仕様を表 1 表 2 に示す。

ベースモジュールは通常把持に適した 2 爪タイプ、円筒内側把持に適した 3 爪タイプ、ロボットに無理な姿勢をさせずにハンドだけで適切な把持姿勢が可能な回転軸を用意しており、3 種類とも 120g 以下で小型・軽量化を達成している。

超小型ドライバコントローラは、ベースモジュールに内蔵可能なほど小型で、コントローラ機能を搭載しているため上位からのコマンドによる簡単な指令で動作可能である。また、シリアル通信によりハン

ドを多軸に組み合わせてもロボットとの配線数は4本と省配線化を達成している。

さらにこの省配線化と簡易交換ユニットにより、簡単にハンドの着脱が可能である。

簡易交換コンパクトハンドリングシステムは、リスクアセスメントおよびその結果に対する3ステップ法に基づいた安全方策を施した安全な設計となっている。

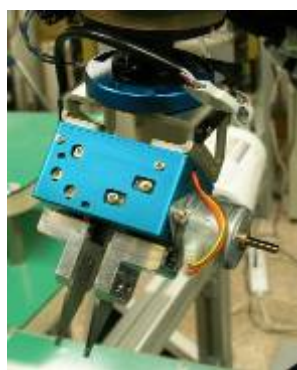
評価について、簡易交換コンパクトハンドリングシステムのベースモジュールは、120g以下を達成しており、可搬重量の小さな人間・ロボット協調型セル生産システムの安全な上体ヒューマノイドのハンドに適している。

表1 ベースモジュールの仕様

項目	2爪	3爪	旋回軸
把持力	0~5N	0~5N	—
トルク(400pps時)	—	—	47.2mN・m
最大ストローク	10mm	10mm	—
可動範囲	—	—	±120°
最大速度	10mm/s	10mm/s	60rpm
質量	90g	120g	90g
最小分解能	0.025mm	0.025mm	0.94°
リミットセンサ	2個	2個	3個
把持力調整	ひずみゲージ, ひずみアンプ搭載	ひずみゲージ, ひずみアンプ搭載	—

表2 超小型ドライバコントローラの仕様

項目	
サイズ	23mm×36mm
駆動方式	バイポーラ駆動
電源	DC24V
最大電流	1.4A
通信	CAN/RS232C
A/D	4ch
DIO	4ch
付加機能	コントローラ機能搭載



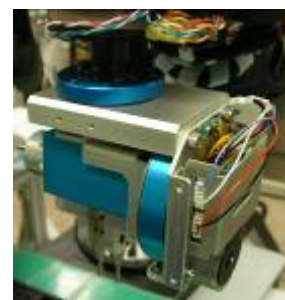
右手ハンド 45° 固



簡易交換ユニット



ロボット搭載写



左手ハンド 45° 旋回

図 2 実証システムへの搭載写真

また、2爪タイプのベースモジュールでは、今回の実証システムでのワークである $\phi 6\text{mm}$ の金属ローラーや 5mm 樹脂部品のような小物部品以外にも、厚さ 0.5mm で 20mm の基板部品のような薄型部品、 $50\text{mm}\times 70\text{mm}$ の板金部品のような大物部品も爪形状を変更するだけで把持してハンドリングすることが確認できており、円筒内側把持に適した3爪タイプと合わせて多種多様な形状のワークを把持可能である。

また、機種切り替え時にワーク形状が変更になるためハンドを交換する場合でも、省配線化と簡易交換ユニットにより、10秒以下でのハンド交換が可能であることが確認できた。

<目標の達成度>

以上より、小型・軽量で、省配線化、モジュール化され汎用性が高く、迅速な機種切り替えを達成した簡易交換コンパクトハンドリングシステムの有用性を確認できた。また、現在まで3万回の把持耐久試験を行い、正常動作していることが確認できている。

ステージゲート審査以降は更なる進化を目指し、簡易部品供給システムと、小型で安価な画像処理システムのハンドアイでの物体認識により、二次元平面に整列されずに置かれた部品のピックアップを可能にすることで、パーツフィーダが不要なシステムを目指素予定であったが、達成には至らなかった。

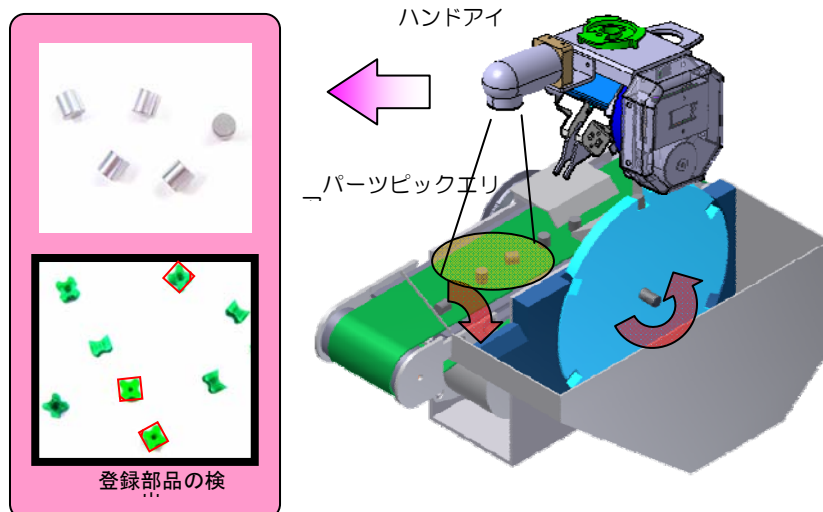


図3 今後のシステム

③作業者が習熟しやすい作業情報提示技術

③-1 安全な直接教示システム

<概要>

作業者が習熟しやすい作業情報提示技術を提供するために、全方向から無理なくアクセスして教示力が確実に発生できる直接教示ハンドル、ロボットハンドの複雑な動作を作業者の意図通りに直感的に教示できる力制御に基づいた直接教示制御技術、国際安全規格 13849-1 のカテゴリ 3 に相当する機能安全化されたインターフェースを含む安全な直接教示システムをそれぞれ開発した。実証システムを用いて本開発システムの操作性及び習熟度評価を実施した結果、従来の画面操作又はペンダント操作による教示方法に比べ、教示作業所要時間がそれぞれ 1/10、1/4 に短縮でき、本技術の有効性を確認した。

<目的と目標>

作業情報提示及び不具合修正のための教示作業において、作業者が習熟しやすく、安全かつ自然に教示作業が遂行できる教示システムを提供するために、人間工学的視点から設計された教示ハンドル、直感的な教示操作が可能な教示制御技術及び、機能安全化されたインターフェースを含む直接教示システムを開発し、実証システムにおける教示操作性及び習熟度を評価し、開発技術の有効性を実証することを目標とする。

<成果>

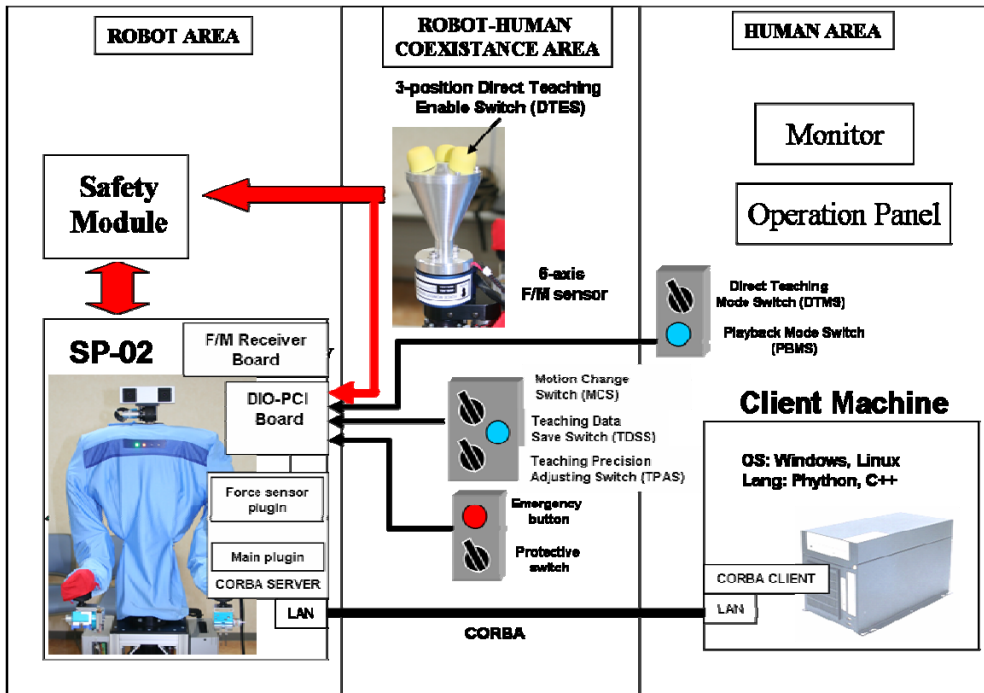


図 1 開発した安全な直接教示システムの構成図

開発した直接教示システムの構成図を図 1 に示す。同システムは、3 ポジションイネーブルスイッチを装着した教示ハンドル及び 6 軸力センサを含む直接教示装置、教示許可信号を監視する安全モジュール、位置・姿勢教示モード及び教示精度モード切り替えスイッチ等により構成される。作業者は、人間工学的に設計された教示ハンドルを握って教示力を発生させることにより、ロボットハンドを直感的かつ自由に教示することができる。作業遂行中、3 ポジションイネーブルスイッチによる教示作業許可信号は、安全モジュールとクライアントマシンにより 2 重に監視され、教示許可信号処理部に何らかの故障が検出された場合に、アクチュエータへの出力は制限される。以下、各開発要素技術について詳細を述べる。

(1) 人間工学的直接教示装置

ハンドの大きな姿勢変化を伴う多自由度ロボットアームの教示作業において、作業者が違和感なく教示ハンドルへアクセスでき、長時間の教示作業時においても過度な疲労感を感じることなく教示作業を継続的に遂行できる人間工学的視点から設計した図 2 の直接教示装置を開発した。開発した直接教示装置は、作業者が掌で握り締めるハンドルの上部に直接教示許可用のイネーブルボタンが 3 個配置されており、ハンドルの下部は 6 軸力覚センサと結合されている。ハンドルの把持部は、握りやすい形状で全方向からアクセスが可能であり、握り締めタイプなので教示力が確実に発生できる。また、ハンドル上部にイネーブルボタンを 120 度間隔で 3 個配置することによって、作業者はアクセスしたい方向からハンドルを握り、手首や親指に負担のかからない自然な姿勢でイネーブルスイッチの操作ができる。同教示装置を実証システムに装着し、評価した結果、様々なハンド姿勢に対して作業者が容易に教示ハンドル

を操作できることを確認した。

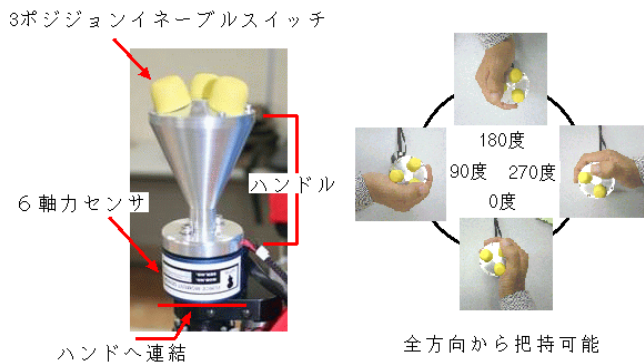


図 2 直接教示装置

(2) 教示インタフェースの機能安全化

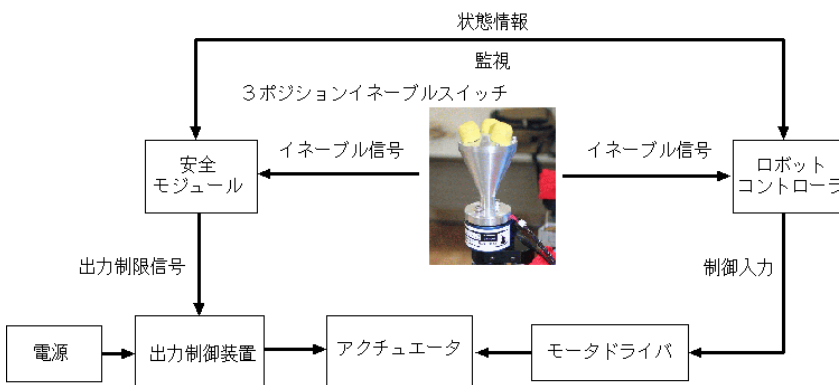


図 3 直接教示システムの安全関連部の構成

産業用ロボットの国際安全規格 ISO 10218-1 及び、ISO 13489-1:1999 に基づき、図 3 に示す直接教示システムの安全関連部を開発し、直接教示インタフェースの機能安全化を図った。同図において、3 ポジションイネーブルスイッチによる直接教示許可信号は、ロボットコントローラと安全モジュールにより 2 重監視され、両方においてイネーブル信号が確認されない限、アクチュエータへの出力は制限される。また、教示許可信号はロボットのサイクルタイム中で常に監視され、イネーブル装置の故障はサイクルタイム中に検出できる。安全機能を検証するために、実証システムにおいて、安全モジュールへのイネーブル信号を故意に遮断した結果、作業者による教示力の発生状況下で、ロボットへの出力が制限されることを確認した。

(3) 直感的教示制御

作業者の直感的ロボット操作を可能にし、かつ、習熟しやすい教示方法を提供すべく、力制御に基づく直接制御及び、各種教示操作支援モードを含む直接教示制御手法を開発した。具体的に、6 軸力センサを搭載した直接教示装置をロボットハンドに装着し、作業者の操作力をハンドの目標速度指令値として

変換する際、操作ハンドルの座標系とハンド座標系を一致させ、作業者が直感的にハンドを意図する方向へ動かすことを可能にした。さらに、位置教示制御モード、姿勢教示制御モード、位置・姿勢教示制御モードを切り替え可能にし、作業者の意図がより充実に反映できる。また、教示精度を「高、中、低」3レベルに変更できる教示精度切り替え機能を付加し、長距離移動や精密作業において教示精度を選別でき、作業性能の向上を図ることができる。実証システムにおいて、開発した制御手法を検証した結果、作業者が直感的にロボットハンドを操作し、意図した教示作業を実行できることを確認した。

直接教示システムの操作性及び習熟度評価について、開発した直接教示システムの操作性及び習熟しやすさを評価するために、従来の教示方法との比較実験を行った。従来教示方法としては、GUIによる画面操作と、直接教示装置をハンドから分離したペンダント操作を用いた。評価方法は、各教示方法の使用法を被験者に説明した後、ロボットハンドを初期姿勢からターゲットとなる目標位置・姿勢になるよう教示装置を操作するようにした。教示操作を5回実行し、各所要時間を記録した評価結果を図4に示す。評価結果から明白に分かるように、開発した直接教示方法は、画面操作方法より1/10、ペンダント操作方法より1/4程度教示所要時間が短縮できた。さらに、従来教示方法では、実験回数が増えるにつれ教示作業所要時間が短縮される反面、開発した直接教示方法は所要時間差が見受けられないことから、従来方法より習熟しやすいことを確認した。

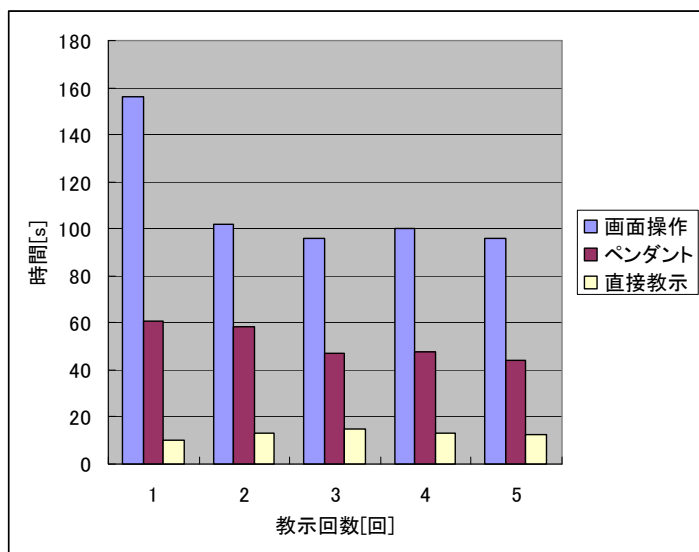


図4 操作性評価結果

<目標の達成度>

「自然」かつ「安全」なロボット教示作業を支援するための直接教示要素技術、つまり、人間工学的教示インタフェース、カテゴリ3レベルの安全関連部、好操作性及び習熟しやすい直接教示制御法を開発し、実証システムでの操作性評価を実施、その有効性を確認し、ステージゲード時の目標を達成した。ステージゲード審査以降は、開発した直接教示システムの実用化に向け、簡便着脱式教示装置、安全関連システム要素全体での機能安全化、インピーダンス制御等を適用した操作性の向上など、既開発要素技術の信頼性及び機能の向上に取り組む予定であったが、達成には至らなかった。

3) 成果の意義

成果は、新たなロボット商品の実用化に向けたものであり、市場の創造につながることを期待できる。

4) 特許等の取得

別添資料の通り、7件の特許が適切に出願された。

国内出願・国外出願

番号	出願日	出願番号	名称	発明者
1	平 19.10.05	特願 2007-262196	ロボット、ロボット制御装置、ロボット制御プログラム、ロボット制御プログラムを作成するためのシミュレータ	独立行政法人産業技術総合研究所
2	平 19.02.02	特願 2007-024455	双腕ロボットの肩幅空間制限及びその装置を具えた双腕ロボット	川田工業株式会社
3	平 19.04.17	特願 2007-108327	ロボット出力の測定方法および制限装置	川田工業株式会社
4	平 20.05.19	特願 2008-131159	ロボット用位置同定方法および装置	川田工業株式会社
5	平 20.09.11	特願 2008-233533	ロボットの作業位置修正システムおよびそのシステムを備えた簡易設置型ロボット	川田工業株式会社
6	平 20.10.28	特願 2008-276799	簡易設置型ロボット用出力制限機能付電力供給システムおよびそのシステムを具えた簡易設置型ロボット	川田工業株式会社
7	平 20.11.26	特願 2008-301513	ロボット用のプロテクトサポータおよびカバー	川田工業株式会社

5) 成果の普及

今後プレスリリースを行うとともに事業化する予定であり、成果が普及することが見込まれる。

(学会発表、論文、展示会、プレス発表等)

番号	発表日	発表形態	タイトル	発表者
1	2009.9 (印刷中)	国際論文誌「Industrial Robot -An International Journal」 35 巻 5 号	Hazard Analysis of an Industrial Upper-Body Humanoid	Takuya Ogure, Yoshihiro Nakabo, Seong Hee Jeong, Yoji Yamada

6) 実用化、事業化の見通しについて

(1) 成果の実用化可能性

「人と協業するロボット」に対する市場ニーズは期待が大きいものの現段階では萌芽段階であり、その要求仕様は定量化し難い。想定する製造現場や利用方法、その時の生産効率についても技術的仕様に置き換えるには相当の実証データが必要である。さらに、人間の活動している生産現場で安全を確保するための技術とその保証を商売の上でどのように成立させるかが課題となる。

上記の課題に対しては、顧客と密着しその要求仕様に対応する技術探索と提案が事業の継続に不可欠であると考え、「顧客ニーズに対応する活動」を事業面での特徴と位置付け、その要員（フィールドエンジニア）を教育し、配備することにより、川田工業主導の姿勢をアピールし事業の優位性を確立する。一方安全性の確保に対しては、現在の安全衛生規則で規定されている範囲内でロボットの仕様をまとめ上げ、人とロボットの共存を実現し、そのときの実証データを基に安全仕様を開発し、人と協業するロボットを実現する。

これらの対応により、高い実用化の可能性が見込まれる。

(2) 事業化までのシナリオ

セル生産システムを導入している家電メーカーは、期間労働者の増減対策および彼らの品質変動の低減を目的として更なる生産革新を期待し、人間と共存・協業可能な次世代型生産システムの導入を強く求めている。加えて、加速する少子高齢化社会を起因とした今後の労働力減少を鑑み、①従来の産業用ロボットにない卓越した安全性と親和性を有し、②生産現場の環境を変更せずに、労働者と簡便に置き換えが可能なことを特徴とする「上体ヒューマノイド」を開発し商品化する。

事業化シナリオについて、まず、スケジュールを、STEP-A、Bに分け、STEP-Aでは特定の家電メーカー（ソニーイームシーエス株式会社）の製造現場を実証現場とし、必要な仕様と機能の洗い出しを行うとともに、ロボット専門商社やエンジニアリングメーカーとともにプロトタイプ機を利用したマーケティング調査（試験販売を含む）を実施する。つぎに、前述の経験を活かし、家電メーカー一般の市場を想定した仕様に基づいて商品化を行う。そして、つづくSTEP-Bを、戦略的な拡販段階と位置づけ、販売先家電メーカーにおける類似製品の水平展開、および類似の仕様で導入が図れそうな市場（まず、流通物流

市場を想定)への展開をそれぞれ図る。とくに、顧客へのヒアリング結果から、ひとつの家電メーカーだけでも、類似のピックアンドプレース作業現場が100のオーダで存在すると考えられている。したがって、同一メーカー内でも、類似技術の水平展開を行う戦略によって販売を促進することが十分な現実性を見込める状況にある。このような類似技術の展開を重視して、拡販推進チームが戦略的に、想定商品群(詳細検討中、サービスを含む)によって販売ルートを変更する。

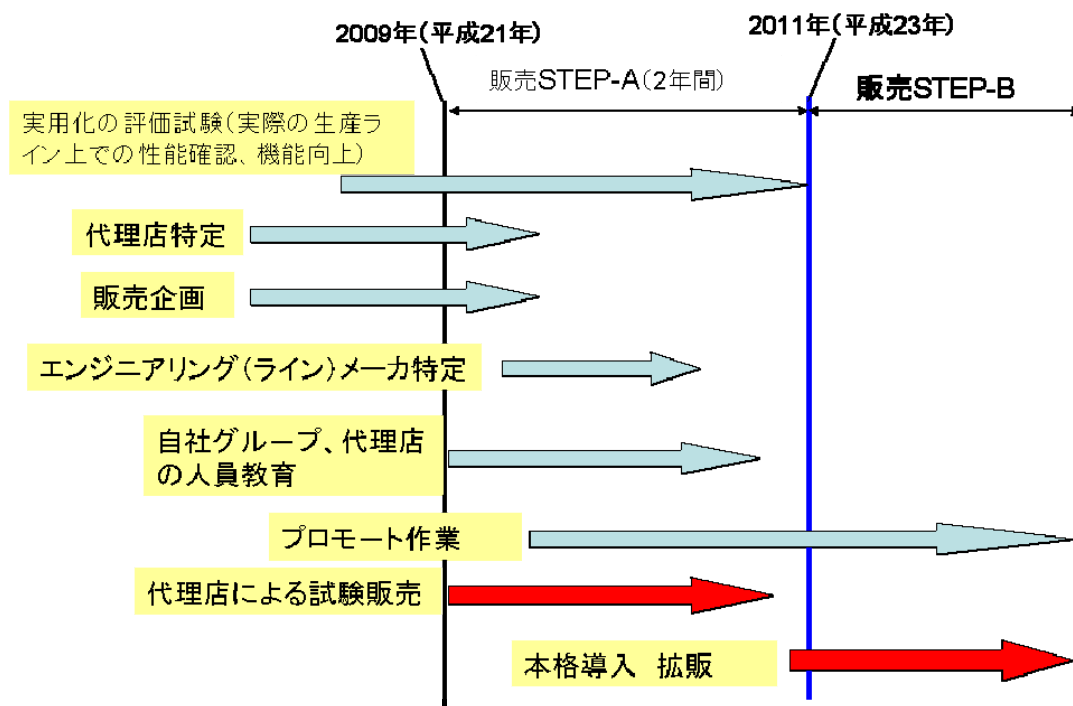
事業化体制については、川田工業が商品開発と販売促進(総販売元)に特化した活動になるように想定しており、事業化に必要な要素は他社とアライアンスを締結してこれを実施する。例えば、部品製造とサブ組立てについては、THKグループに委託することを想定しており、市場での営業、販売、および保守サービスについては、機械商社やエンジニアリングメーカーと業務配分を決定した後に、業務提携を締結する予定である。

「人と協業するロボット」に対する市場ニーズは期待が大きいものの現段階では萌芽段階であり、その要求仕様は定量化し難い。想定する製造現場や利用方法、その時の生産効率についても技術的仕様に置き換えるには相当の実証データが必要である。さらに、人間の活動している生産現場で安全を確保するための技術とその保証を商売の上でどのように成立させるかが課題となる。

上記の課題に対しては、顧客と密着しその要求仕様に対応する技術探索と提案が事業の継続に不可欠であると考え、「顧客ニーズに対応する活動」を事業面での特徴と位置付け、その要員(フィールドエンジニア)を教育し、配備することにより、川田工業主導の姿勢をアピールし事業の優位性を確立する。

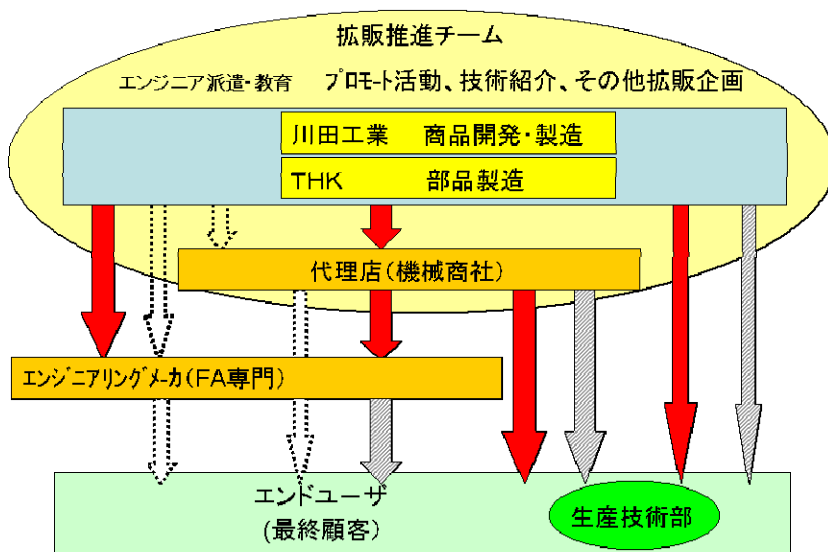
一方安全性の確保に対しては、現在の安全衛生規則で規定されている範囲内でロボットの仕様をまとめ上げ、人とロボットの共存を実現し、そのときの実証データを基に安全仕様を開発し、人と協業するロボットを実現する。

事業化のスケジュールについて、以下に具体的に示す。STEP-A(2009年~2010年)では、代理店やエンジニアリングメーカーの特定等事業体制の構築、人員の教育、マーケティングと試験販売、をそれぞれ目標とし、STEP-B(2011年~)で家電メーカーに対する本格拡販を開始する。プロモート作業は、STEP-A、Bを通して行っていく。



現時点で想定している製造体制および販売体制は、以下の図のとおりである。すなわち、川田工業は総販売元と製造元となり事業化を推進する。ただし、川田工業の事業化体制における重要な機能は、商品開発と市場ニーズを汲み上げるための販売促進に特化する。したがって、販売（含むアフターサービス）については、アライアンスを締結した上で代理店となる機械商社やエンジニアリングメカに委託する予定である。製造については、部品製造も含めて THK グループに委託する予定である。

なお、商品群と商品構成については未だ詳細を検討中であり、販売とアフターメンテナンスについても締結先との分業体制や契約内容を検討中である。以下に現在想定している事業化体制を図示する。ここで、図中の矢印は、図下部に記述しているように現在想定している商品群（（詳細検討は中、サービスを含む））によって販売ルートを変更している。



(3) 波及効果

成果はセル生産の形態を著しく進歩させ得る新しい生産パラダイムの提案を具現化するものであり、我が国で80年代以降急速に進んだ産業のオートメーション化とそれが立ち遅れた製造分野の溝を埋めるものなので、経済的・社会的に大きな波及効果を期待できる。

オートメーション化が立ち遅れた製造分野は人間のスキルや柔軟性が要求される部分であったが、本研究の目標は、設置に関して高い柔軟性を持つロボットの実現と、人のスキルを利用したままオートメーション化を進めるために必要な人間共存の能力を持つロボットの実現であった。成果はこれらの目標の達成に着実に接近するものであり、従ってこの成果には経済的・社会的に大きな波及効果が期待できると言える。