

ロボット分野における研究開発と 社会実装の大局的なアクションプラン (ロボットアクションプラン)

2023年4月

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

サマリー

ロボットアクションプランは社会課題解決に向けロボット活用を推進するため大局的な方向性を提起するものである。

労働人口の減少下での GDP の維持拡大、地球環境負荷の極小化、経済的・社会的インフラのレジリエンシー向上は我が国の喫緊の社会課題となっており、ロボットの活用を通じたより一層の生産性の向上、新たな産業創出への期待は大きい。

我が国では 2015 年度に「ロボット新戦略」を策定し、これまで 30 以上の官民連携による技術開発プロジェクトを実施してきている。その間、ロボット自体やそれを支える個々の技術は進化してきているものの、ロボット導入現場のニーズとの間に未だギャップがある。ロボットはシステム技術であり、特定のニーズ・課題解決のために技術要素を組み合わせ、環境整備・運用設計と共にインテグレーションしていく必要がある。こうした背景を踏まえ、出口志向でのロボットシステム全体を捉えた取り組みを通じて、ロボット産業を振興していくことが求められる。また、2019 年度に「ロボット実装モデル構築推進タスクフォース」を設置し、ロボットフレンドリーな環境の実現（以下、ロボフレ）が進められている。諸外国でも社会実装を加速しており、2035 年近傍を見据えた技術開発、環境整備の両輪が一体となった中長期的なアクションプランの策定の必要性が高まっている。

ロボットアクションプランを策定するにあたり、有識者委員会（以下、委員会）でロボット活用が期待される各分野の課題の個別性を重視して議論を重ね、2035 年に向けて市場性、社会的インパクト、ロボット活用素地の有無、さらなる官民連携の必要性等からロボットアクションプランの対象とする分野を導出した。各分野のあるべき姿実現のために今後求められる取り組みを、ニーズを起点とした「社会実装加速に向けたアクションプラン」、中長期でのインパクト創出を見据えた「次世代技術基盤構築に向けたアクションプラン」として抽出した。

社会実装加速に向けたアクションプランでは、委員会で各分野のニーズに沿って、技術開発に留まらない取り組みを議論し、技術開発と環境整備の両面から社会実装加速のために求められる施策を導出した。技術開発として「マニピュレーション」「モビリティ」「インタラクション」「デジタル基盤・知能化」「インテグレーション」の 5 領域、環境整備として「物理環境の整備」「業務設計・運用設計」「SIer・人材・ベンダー育成」「新サービス創出・ビジネスモデル形成」「啓発・規制対応」の 5 領域に整理した。

次世代技術基盤構築に向けたアクションプランでは、委員会では分野へのインパクトを重視し、技術開発動向から 2035 年に向けて重要となる同じく 5 領域での技術開発の方向性を整理した。

目次

サマリー	1
目次	3
第1部：なぜロボットアクションプランが必要か	4
ロボットアクションプラン策定の背景	4
ロボット活用が期待される社会背景	6
諸外国でのロボット産業・活用の動向	9
今後の官民連携の方向性	11
ロボットアクションプランの検討プロセス	12
第2部：ロボット活用の広がりと取り上げた分野のあるべき姿	14
2035年に向けロボット活用が期待される分野の選定	14
各分野におけるあるべき姿	16
第3部：技術開発動向	28
本調査で取り上げた技術および技術開発アプローチ	28
第4部：ロボットアクションプラン	37
(1) ロボットアクションプランの全体像	37
(2) 社会実装加速に向けたアクションプラン	38
(3) 次世代技術基盤の構築に向けたアクションプラン	58
第5部：まとめ（概要）	69
参考資料	71

第1部：なぜロボットアクションプランが必要か

ロボットアクションプラン策定の背景

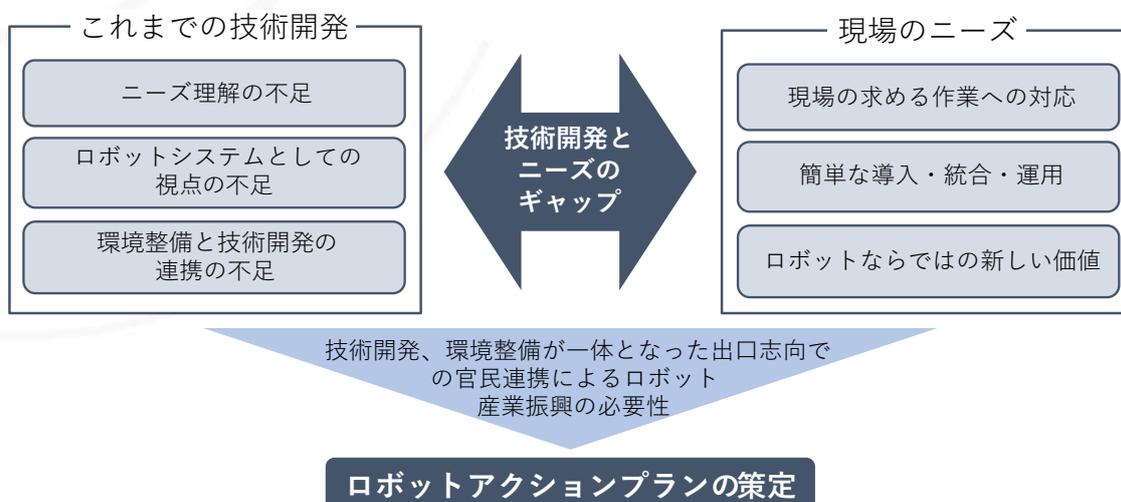
労働人口の減少下での GDP の維持拡大、地球環境負荷の極小化、経済的・社会的インフラのレジリエンス向上は我が国の喫緊の社会課題となっており、ロボットの活用を通じたより一層の生産性の向上、新たな産業創出への期待は大きい。

我が国では 2015 年度に「ロボット新戦略」を策定し、これまで 30 以上の官民連携による技術開発プロジェクトを実施してきている。その間、ロボット自体やそれを支える個々の技術は進化してきているものの、ロボット導入現場のニーズとの間に未だギャップがある。ロボットはシステム技術であり、特定のニーズ・課題解決のために技術要素を組み合わせ、環境整備・運用設計と共にインテグレーションしていく必要がある。こうした背景を踏まえ、出口志向でのロボットシステム全体を捉えた取り組みを通じて、ロボット産業を振興していくことが求められる。また、2019 年度に「ロボット実装モデル構築推進タスクフォース」を設置し、ロボットフレンドリーな環境の実現が進められている。諸外国でも社会実装を加速しており、2035 年近傍を見据えた技術開発、環境整備の両輪が一体となった中長期的なアクションプランの策定の必要性が高まっている。

出口志向での取り組みの必要性



個々の技術、ロボット単体の開発が多く進んできたが、現場ニーズに合わせたロボットシステムとしての視点に欠け、社会実装が進んでいない。出口志向のアクションプランで今後求められる取り組みの方向性を示す。



国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

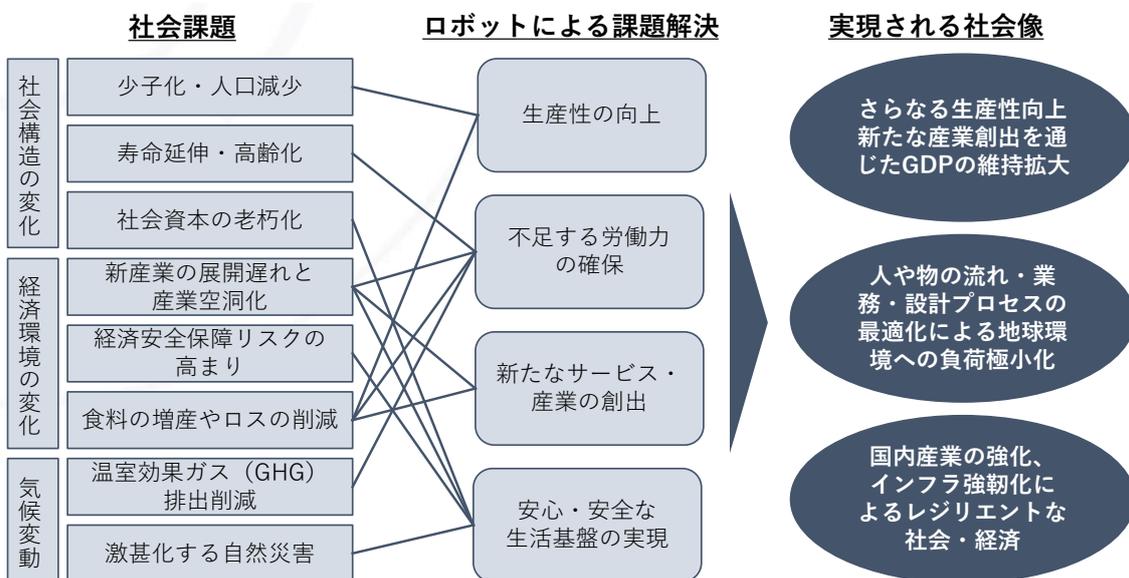
従来のロボット開発では個々の技術、ロボット単体の開発が多く進んできたが、現場ニーズの理解の不足やロボットシステムとしての視点に欠けており、また技術開発と環境整備の連携の不足があった。現場のニーズは、実際の現場で作業負担など大きく自動化が求められる作業への対応や簡単な導入・統合・運用の実現、ロボットならではの新しい価値の創出であったが、これまでの技術開発ではそれらニーズを的確にとらえられず、結果的に社会実装まで結びつかないケースもあった。このような状況を打破するためには、技術開発と環境整備が一体となった出口志向での官民連携によるロボット産業の振興が必要であり、今回のロボットアクションプランの策定に至った理由である。

ロボット活用が期待される社会背景

ロボット活用が期待される社会背景



社会構造や経済環境の変化、気候変動などに起因する社会課題に対し、ロボットが解決に貢献することで望ましい社会像を実現する。



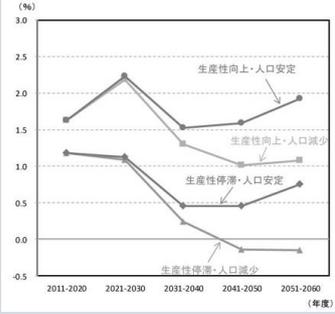
国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

現在、社会構造や経済環境の変化も著しく、地球規模での気候変動も急速に進行している。それらに起因して、対応が求められる社会課題も多く存在する。そのような社会課題の一部は、ロボットが解決に貢献でき、望ましい社会像の実現に近づけることができる。特に、少子化・人口減少や社会資本の老朽化、経済安全保障リスクの高まりや食料の増産やロスの削減、温室効果ガス (GHG) 排出削減などの重要な社会課題に対して、ロボットの活用が進むことで生産性の向上、不足する労働力の確保、新たなサービス・産業の創出、安心・安全な生活基盤の実現の観点から貢献が期待される。

ロボット活用による社会課題の解決



GDP維持・拡大、地球環境への負荷減少、レジリエントな社会・経済の実現という3つの観点でロボットの活用が貢献が期待される。

さらなる生産性向上、新たな産業創出を通じたGDPの維持拡大	人や物の流れ・業務・設計プロセスの最適化による地球環境への負荷極小化	国内産業の強化、インフラ強靱化によるレジリエントな社会・経済の実現
<p>人口減少下でGDPを維持・拡大していくためには、労働生産性の向上、新産業の創出が必要</p>  <p>※内閣府「『選択する未来』委員会報告 解説・資料集」</p>	<p>CO2排出量の4割を産業・運輸が占めており、効率化を通じた負荷低減への取り組みが必要</p>  <p>※経済産業省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」</p>	<p>インフラ老朽化、物流量増加、農業生産人口減少に対応した社会・経済を作る取り組みが必要</p> <div data-bbox="997 660 1332 772"> <p>社会インフラの維持 2038年にインフラ維持管理費用は1.4兆円増加する見通し ※国土交通省「国土交通省「所管分野における社会資本の将来の維持管理・更新費の推計」」</p> </div> <div data-bbox="997 784 1332 896"> <p>物流網の維持 宅急便取扱個数は2021年までの5年間で10.8億個増加 ※経済産業省・国土交通省・農林水産省「我が国の物流を取り巻く現状と取組状況」</p> </div> <div data-bbox="997 907 1332 1008"> <p>食料生産の維持 農業従事者が2020年までの5年間で46万人減少 ※農林水産省「2020年農林業センサス」</p> </div>

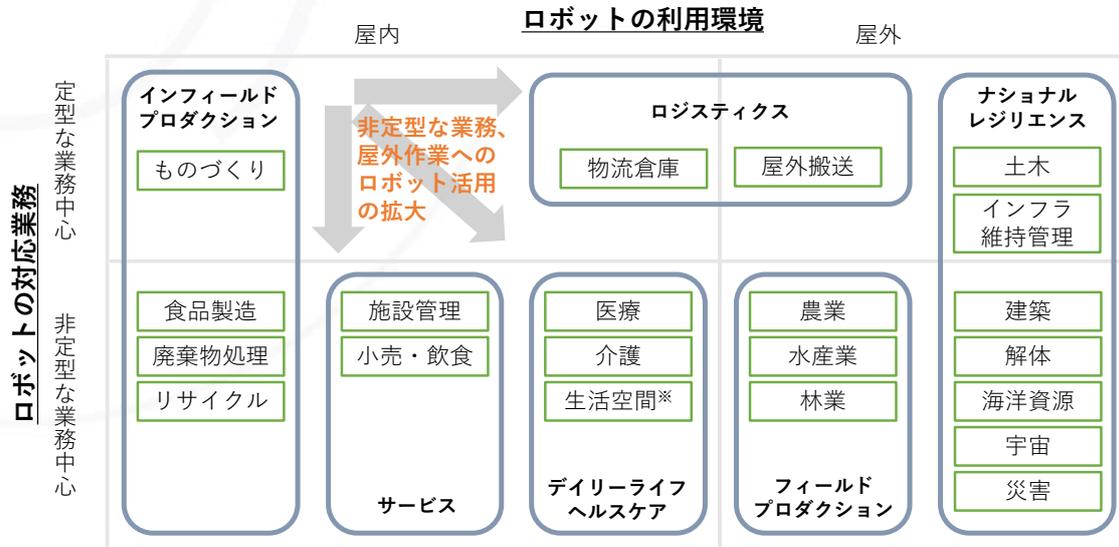
国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

具体的には、生産性向上では人口減少下でのGDPの維持・拡大のため、労働生産性の向上や新産業の創出が必要であるが、ロボット活用を進めることでそれらへの貢献が可能である。地球環境の負荷極小化に向けては、CO2排出量の4割を占める産業・運輸部門に対して、ロボット活用により生産工程や物流業務を効率化、ひいてはサプライチェーン全体の効率化を通じた温室効果ガスの削減に貢献できる。レジリエントな社会・経済の実現という意味では、例えばインフラの老朽化により2038年に維持管理費用は1.4兆円増加する見通しであり、また維持管理を行う人材も不足している。そのため、点検や補修業務の効率化が急務となっており、ロボットもその1つの解決策として貢献が可能である。また、ECの普及や新型コロナウイルスの影響による物流量の増加に対し、ロボットの活用により倉庫作業を効率化、省人化することで人手不足を解消し、安定した物流網の維持に貢献することが可能である。農業従事者は2020年までの5年間で46万人減少しており、食料生産の安定化が求められる。それに対してロボットの導入により収穫などの農作業が効率化され、農業従事者への身体的負荷も軽減されることで農業生産が維持されることが期待される。このようにインフラ老朽化、物流量増加、農業従事者の減少といった社会変化に対応しレジリエントな社会・経済を実現していくという観点でも、ロボットは有効な手段となる。

ロボット活用の広がり



社会課題解決のため、ロボットは幅広い分野で活用が期待されている。



※ 上記の各分野は、IFRによるWorld Robotics等の分類体系を参考に本プロジェクトで整理した。

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

ロボットの活用推進は社会課題解決にも資することであり、幅広い分野で活躍が期待されていることは前述のとおりである。従来、ロボットは産業用として工場内での使用が主であったが、近年、配膳ロボットや清掃ロボット、コミュニケーションロボットなど、工場を飛び出し我々の生活のすぐ近くで使われるようになってきている。そこで、ロボットの活用が期待される分野について、「World Robotics Service Robots」「World Robotics Industrial Robots」（国際ロボット連盟、IFR）の分類を参考に、ロボットの利用環境（屋内/屋外）およびロボットの対応業務（定型/非定型）の観点から利用用途の整理を行ったものが上の図である。屋内の定型的な業務で使われてきたロボットが、屋外や非定型な業務でも使われつつあるという、活用フィールドの広がりが示されている。

インフィールドプロダクションは従来からロボットが用いられてきたものづくりを含む屋内での製造等の現場を示す。これまで主体であった大規模な自動車や電機などの製造ラインにとどまらず、人手作業が多く残る食品製造のような中小事業者が中心の産業や多品種少量生産を中心とした製造現場、また循環型経済への移行に伴い重要性がより高まるであろうリサイクル産業などに活用の広がりが期待される。サービスは、近年導入が進む配膳ロボットや警備ロボット、清掃ロボットが使われる施設管理分野、小売・飲食分野を指す。ロジスティクスは物流に関わる分野であり、大きく物流倉庫と屋外搬送に分かれる。物流倉庫では棚搬送といった現在のロボットの活用が、ピッキングや段ボール等の開梱、仕分け・梱包など

へ広がることが期待される。屋外搬送では所謂ラストワンマイル配送を中心にロボットの活用が期待される。デイリーライフヘルスケアは人々の生活に最も近い部分であり、医療や介護、生活空間を指す。これらの分野で活躍するロボットは人と密接に関わるため、人を理解しサポートすることが求められている。フィールドプロダクションは農業や水産業、林業など、一次産業を中心とした屋外での生産現場を指す。従来、ロボットは屋内利用が主であったが、移動技術の進展により屋外利用も一部では実用化段階に入ってきている。環境変化の大きい屋外でも安定した稼働を実現することで、人手不足が深刻な一次産業を中心としたフィールドロボット活用の進展が望まれる。ナショナルレジリエンスは土木や建築、インフラ維持管理など、国土の保全等にかかわる現場を指す。我が国の国民生活の基盤を維持するために重要であるが、人手不足や労働環境の厳しさもあり、ロボットの活用がそれらの課題解決に貢献することが期待されている。

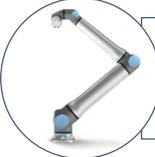
諸外国でのロボット産業・活用の動向

諸外国でのロボット産業の育成



各国は要素技術の開発から社会実装までを広く支援している。サービスロボットなどの新しいロボットは欧米、中国等がリードする。

国・地域	政策動向
米国	<ul style="list-style-type: none"> 国防・安全保障領域、航空宇宙領域でのロボットの研究に力を入れる。
欧州	<ul style="list-style-type: none"> EU Framework Programにより、国を超えて共同研究を行う。 AI・データ・ロボティクスやロボットの認知機能の拡張、開発コミュニティの促進および標準化の進展を行う
中国	<ul style="list-style-type: none"> 先進NC工作機械とロボットを重点に定め、国家として産業用ロボット分野に注力。 基幹技術・およびハイエンド製品の開発力を課題として注力する。
シンガポール	<ul style="list-style-type: none"> スマートシティを国家レベルで実現する「スマートネーション構想」を推進する。



- 協働ロボット分野はUniversal Robotsがリード
- 中国製の安価な産業用ロボットが台頭



- 配送・警備・搬送などのサービスロボットは中国・アメリカ系が市場を席捲



- フィールドロボット分野ではBoston Dynamicsなど米国が軍事技術をベースにイノベーションをリード

※1 「欧米、アジア等におけるロボット導入の現状、導入ニーズ、研究開発状況等に係る調査」より引用
 ※2 画像は各公式Webページより引用

諸外国のリスクマネー投資による イノベーション加速



100億円を超える資金調達を行うベンチャーが台頭。リスクマネーの支援を受けて革新的な技術の社会実装が加速している。

累計資金調達額が100億円以上のロボットベンチャー企業	グローバル 50社 以上	国内 2社 (ドローン・自動運転含め4社)
-----------------------------	-----------------	-----------------------------

企業例

Berkshire Grey (USA)	Keenon Robotics (中国)	Agile Robots (ドイツ)
設立：2013年 累計資金調達額：\$260M以上	設立：2011年 累計資金調達額：\$220M以上	設立：2005年 累計資金調達額：\$270M以上
		
物流倉庫でのピースピッキング	配膳などのサービスロボット	AI搭載ロボット

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

出典：欧米、アジア等におけるロボット導入の現状、導入ニーズ、研究開発状況等に係る調査
画像は各種Webページより引用

海外でのロボット政策を見ると、アメリカでは軍事領域への投資が大きく、ヨーロッパではEUの枠組みを活かし、国という垣根を超えた研究開発や環境整備を行っている。国レベルでは、ドイツは自動車産業を中心とした産官学連携による製造業のデジタル化、デンマークは医療・福祉ロボットへの注力やオーデンセでの地域規模でのロボット開発や社会実装に対する支援などが特徴的である。また、中国では過去10年程で産業用ロボットおよびそのための基幹技術の開発力向上や規格体系や認定制度の整備、科学技術教育の支援を行ってきた。シンガポールではロボットの導入に力を入れており、スマートシティを国レベルで実現する「スマートネーション構想」によって、ロボットの社会実装でリードしている。

民間企業の動向からは、従来ロボットが使用されていたものづくり以外のフィールドではロボット・ベンチャー企業の活躍が目立つ。配送・警備・搬送などのサービスロボット分野ではアメリカや中国企業の台頭が著しいほか、米国では軍事技術をベースに民間向けに開発されたロボットがイノベーションをリードしている。国による開発支援だけでなく、リスクマネーの後押しにより、革新的な技術の研究開発、社会実装が加速している。これらの新しい分野では、日本は劣勢であると言わざるを得ない状況にある。

産業用ロボットに関しては、ロボット本体や主要部品で依然国内メーカーが高いマーケットシェアを保持しているが、中国企業も徐々に勢いを増している。また、協働ロボットの分

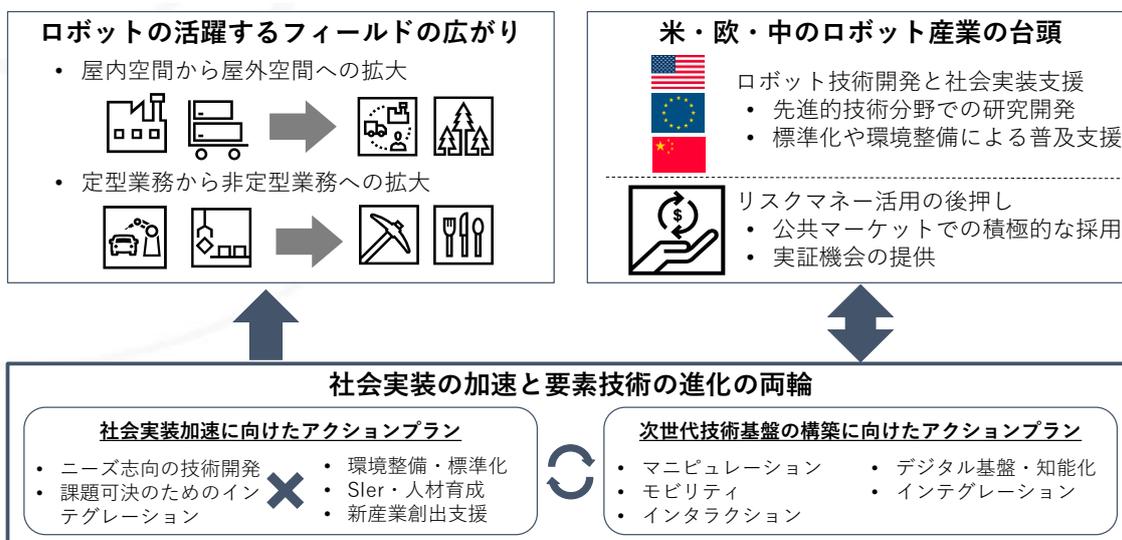
野ではデンマークの Universal Robots がリードしている。製造プロセス管理システムや製品ライフサイクル管理システムなど、デジタル領域では海外が優勢であり、ロボットとデジタルプラットフォームの融合が進む中で周辺領域を含めたロボットシステムとしての強化も求められる。

今後の官民連携の方向性

今後の官民連携の方向性



我が国においても、米・欧・中のロボット産業に後れを取らず、多様な空間、非定型業務でのロボット活用を加速させるため、社会実装と技術開発が一体となったアジャイルな官民連携が求められる。



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

このように多様な空間と業務にロボット活用が広がりつつある中で、台頭する海外のロボット産業に後れをとらず、国内のロボット産業を振興していく必要がある。そのためにも、あらためてロボットはシステム技術であり出口志向のシステム統合が重要である点に立脚し、ニーズ志向での社会実装と技術開発が一体となったアジャイルな官民連携が求められる。

社会実装加速に向けたアクションプランでは、ユーザーニーズを起点としてロボットベンダーや Sler、公的機関等のステークホルダーが連携してスピード感をもって技術開発および環境整備に取り組むことでロボットの導入・活用を進め、実際の導入現場で見えてくる課題から次世代技術の要件を明らかにし、次世代技術基盤構築に向けたアクションプランによ

り、次の社会実装のための新たな技術を提供するという両輪を一体的に回すことが重要である。

ロボットアクションプランの検討プロセス

有識者から構成される委員会での議論を通じてロボットアクションプランを策定した。有識者委員、全5回の委員会での議論内容は下記のとおりである。

■有識者委員

氏名	所属
川村 貞夫 (委員長)	立命館大学 立命館グローバル・イノベーション研究機構 機構長代理 特別招聘研究教授
牛久 祥孝	オムロン サイニックエックス株式会社 リサーチアドミニストレイティブディビジョン プリンシパルインベスティゲーター
小平 紀生	FA・ロボットシステムインテグレータ協会 参与
五内川 拓史	株式会社ユニファイ・リサーチ 代表取締役社長
真田 知典	ロボット革命・産業IoT イニシアティブ協議会 ロボット利活用推進ワーキンググループ 幹事 川崎重工業株式会社 精密機械・ロボットカンパニー ロボットディビジョン 理事
鍋嶋 厚太	株式会社 Octa Robotics 代表取締役
持丸 正明	産業技術総合研究所 人間拡張研究センター 研究センター長

■各委員会での議論内容

実施回	議論内容	主な論点
第1回	本調査で深掘りして調査すべき分野の特定	<ul style="list-style-type: none"> ● 産業分野別市場動向・各国政策動向 ● これまでの官民連携の整理 ● 今後深掘り調査をすべき分野の特定
第2回	特定した分野における将来像の整理	<ul style="list-style-type: none"> ● 特定した分野における将来像の整理 ● 特定した分野のあるべき姿 ● 特定した分野の取り上げるべき課題
第3回	将来像実現に向けた課題の整理と活用が期待される技術の特定	<ul style="list-style-type: none"> ● ロボットによる分野課題の解決策 ● 重要となる技術・社会実装の取り組み
第4回	課題解決に向けた打ち手と官民連携でのアクション	<ul style="list-style-type: none"> ● 課題を解決する具体的な打ち手 ● 官民連携で取り組むべきアクション
第5回	将来像実現に向けたアクションプランの策定	<ul style="list-style-type: none"> ● アクションプラン骨子 ● アクションプラン策定に向けた最終調整

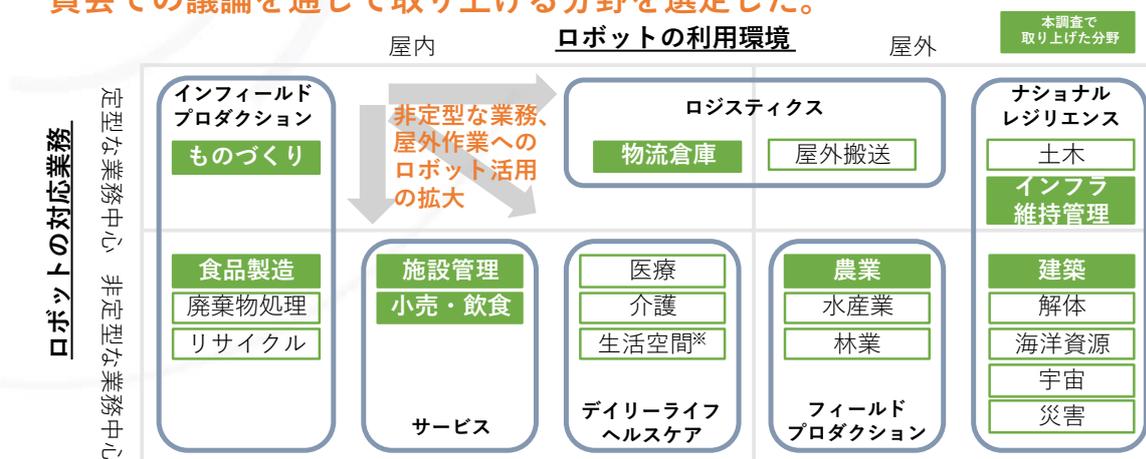
第2部：ロボット活用の広がり と 取り上げた分野 のあるべき姿

2035年に向けロボット活用が期待される分野の選定

ロボット活用の広がり と 取り上げた分野



多くの分野でロボット活用の広がりが期待される。市場性、社会的インパクト、活用素地の有無、更なる官民連携の必要性などの観点から、委員会での議論を通じて取り上げる分野を選定した。



※1 上記の各分野は、IFRによるWorld Robotics等の分類体系を参考に本プロジェクトで整理した。
 ※2 「本調査で取り上げた分野」での取り組みは当該分野のみに限定されるものではなく、将来的にはそれ以外の分野でのロボット普及拡大にもつながることを想定している。
 ※3 官民連携が既に進んでいる分野、例えば「第3期戦略的イノベーション創造プログラム課題候補「人協調型ロボティクスの拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」」で検討されている生活空間などは、本調査では取り上げていない。

本プロジェクトでは各分野のニーズ等を深掘りした調査とするため、ロボットの活用が期待される分野からアクションプランで取り上げる分野の絞り込みを行った。ロボットの市場規模・成長率、ロボットが与える社会的インパクト、ロボット活用素地の有無、さらなる官民連携の必要性などの様々な要素を踏まえ、委員会での議論を通じて取り上げる分野を選定した。それぞれのフィールドから取り上げる分野を選定し、ものづくり（既存、未活用、食品製造）、施設管理、小売・飲食、物流倉庫、農業、インフラ維持管理、建築を対象としている。なお、生活空間に関しては、「第3期戦略的イノベーション創造プログラム課題候補「人協調型ロボティクスの拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」」で検討が進められているため、本調査では対象としていない。それぞれの分野を深掘り対象とした主な理由は以下の表の通りである。

■各分野を深掘り対象とした主な理由

分野	選定理由
ものづくり (既存、未活用、食品製造)	既にロボット活用が進んでいる分野であり、最もロボット市場規模が大きい。人手作業が多く残る現場や工程もあり、更なる導入により欧米並みの生産性の実現や、環境負荷低減が求められる。
施設管理	ロボフレ等によりロボット活用の素地ができつつあり、市場成長率は非常に高い。活用の素地も醸成されつつある中で、さらなる活用を推進する施策が求められている。情報セキュリティ等の観点から国内メーカーによるロボット供給への期待もある。
小売・飲食	ロボフレ等によりロボット活用の素地ができつつあり、市場成長率は高い。活用の素地も醸成されつつある。さらなる活用を進める施策が求められている。
物流倉庫	EC 拡大等により倉庫でのロボットの活用が進み、市場規模も大きい。自動化がさらに進むことで物流網の強靱化や、環境負荷低減が期待され、社会的インパクトも大きい。
農業	高齢化等による人手不足、栽培技術の継承の課題の解決が急務となっており、ロボット市場の成長率は高い。国内食料生産の維持の面で社会的インパクトも大きい。また、普及のためには制度的・文化的な障壁があり、官民連携の必要性が高い。
インフラ維持管理	更新時期を迎える社会インフラの飛躍的増加が見込まれる中で、ロボット市場の成長率も高い。維持管理業務の担い手が不足し、その解決が急務となっており、安心・安全な社会実現という社会的インパクトが大きい。また、公共事業中心となっており、普及のための官民連携の必要性が高い。
建築	人手不足の解消、技術の継承、労働環境の改善が急務となっている。ロボット市場の成長率も最も高く、社会的インパクトも大きい。さらに、業界側のロボット活用へのニーズも強く、導入に意欲的である。

各分野におけるあるべき姿

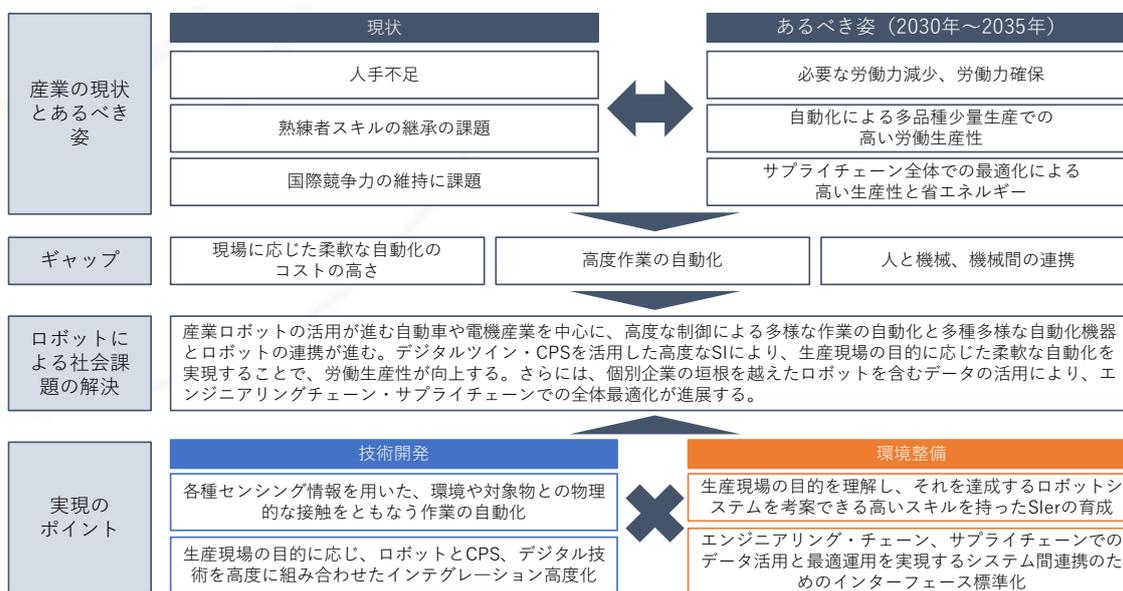
深掘り調査の対象とした分野について、文献、インタビューによる調査を行った。各分野の現状とあるべき姿からギャップ（＝当該分野における課題）を特定した上で、ロボットはどのようにそのギャップ解消に貢献できるかという一つの方向性を提示している。また、それを実現するポイントについても分析を行い、各分野におけるアクションプランの方向性を示している。第4部(2)の社会実装加速に向けたアクションプランでそれぞれの詳細は解説する。

ものづくり（既存）

分野のあるべき姿—ものづくり（既存）



ユーザーの目的に合わせた柔軟な自動化や多種多様な自動機器の連携による生産工程の最適化が求められる。



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

ものづくりでは、ロボット活用の観点から見た産業の現状やあるべき姿では一定の共通性がある一方で、ニーズや課題は多様である。そのため、自動車や電機などの大規模な組立産業を中心とするロボット活用が進む既存領域、人手による作業が多く残る加工現場を中心とした未活用領域、多品種・不定形物を取り扱う食品製造領域の3つに分けて分析した。

ものづくり（既存）では、生産人口の減少から現場での人手不足が顕在化してきており、その結果、熟練者スキルの継承も課題となっている。また、国際情勢が不確実性を増す中でサプライチェーンの国内回帰も議論されており、国内生産の国際競争力の維持・強化も求め

られる。あるべき姿としては、より一層の生産性向上により、限られた労働力でも必要な労働資源を確保し、自動化によって多品種少量生産でも高い生産性を実現していく必要がある。その一方で、カーボンニュートラルの実現など環境負荷の極小化が求められており、サプライチェーン全体の最適化などを通じた CO2 排出量の削減など環境負荷を引き下げていくことも求められる。

現状とあるべき姿のギャップとしては、現場に応じた柔軟な自動化を行う際の機器や SI のコストの高さ、人による微妙な力の調整が求められるような高度な作業の自動化、人と機械の連携や機械間の連携がある。

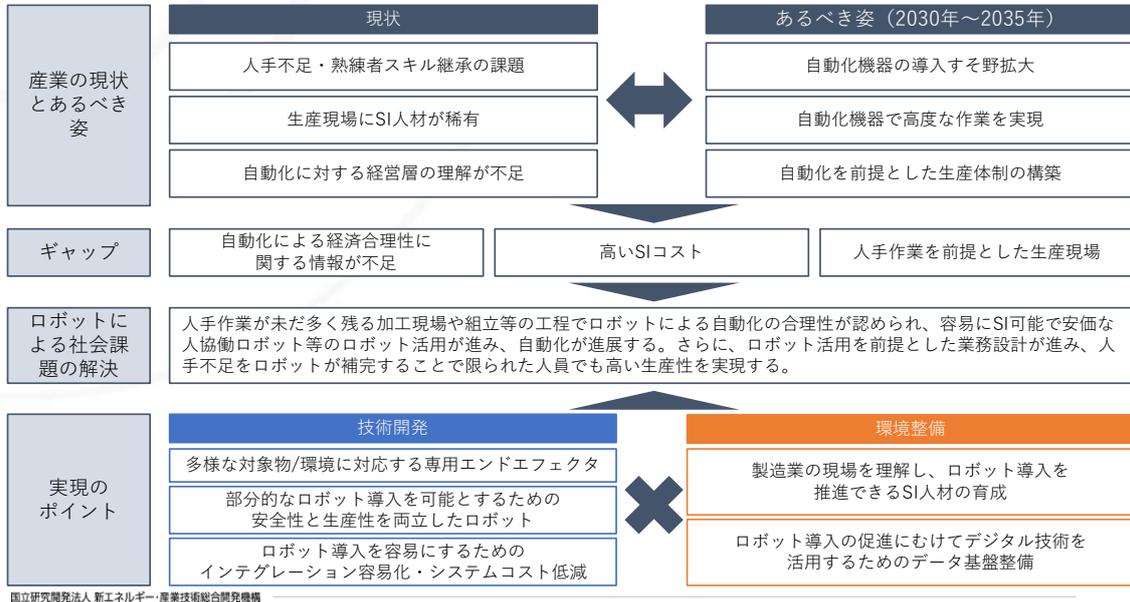
これらのギャップ解消にロボットが貢献できることとしては、高度な制御による多様な作業の自動化、多種多様な自動化機器とロボットの連携による自動化の進展がある。デジタルツイン・CPS（サイバーフィジカルシステム）を活用した高度なシステムインテグレーション（SI）により、生産現場の目的に応じた柔軟な自動化を実現することも期待される。さらには、製造現場の自動化が進むことで個別企業の垣根を越えてロボットを含めた製造現場のデータの活用が可能となり、エンジニアリング・チェーンやサプライチェーンでの全体最適化も進展することが期待される。

上記実現のポイントとして、2つの技術開発と2つの環境整備の方向性があり、第4部(2)において、社会実装加速に向けたアクションプランとして詳細に解説する。

分野のあるべき姿—ものづくり（未活用）



自動化による経済合理性への理解とSIが容易で安価な自動化ソリューションが求められる。



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

ものづくり（未活用）では、人手不足、熟練者スキルの継承が課題である点は共通している。加えて、生産現場で自動化を進めるためのSI人材が稀有であること、経営層の自動化に対する理解が不足していることも自動化が進んでいない要因となっている。あるべき姿としては、これらの課題に対して、自動化機器の導入が進み、高度な作業も自動化されることで、自動化を前提とした生産体制が構築され、高い生産性を実現していくことが求められる。

現状とあるべき姿のギャップとしては、自動化の効果や経済合理性に関する情報の不足、SIコストの高さ、人手作業を前提とした生産現場の自動化の難しさがある。

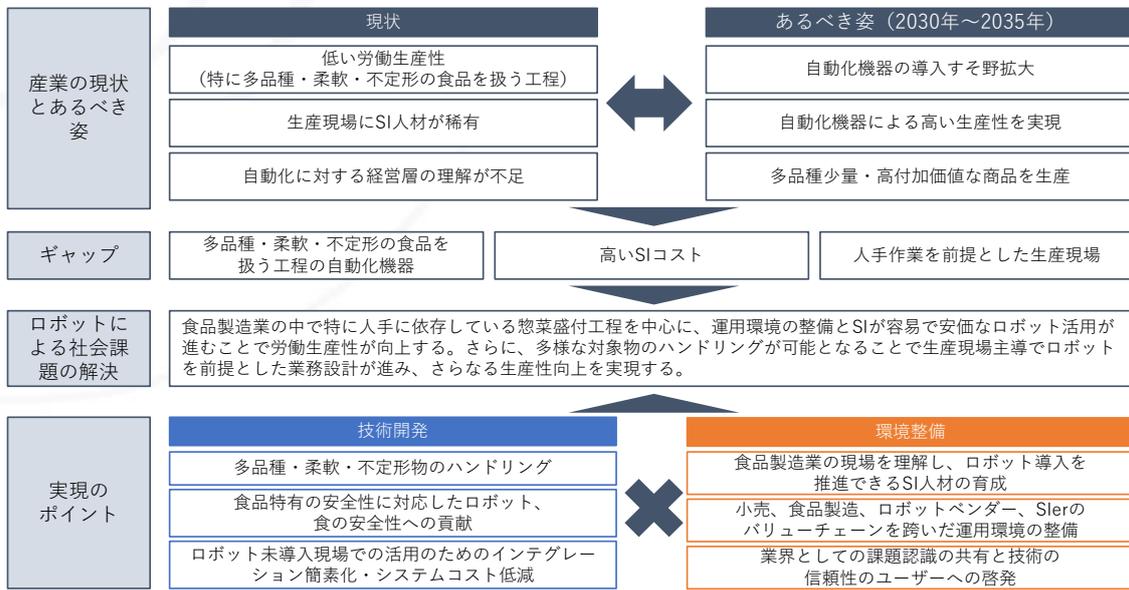
これらのギャップ解消にロボットが貢献できることとしては、デジタル基盤を活用した導入効果の可視化、容易にSI可能で安価な人協働ロボット等のロボット活用による自動化の促進がある。さらに、導入現場のニーズに即したかたちでロボット活用を前提とした業務設計が進み、人手不足をロボットが補完することで限られた人員でも高い生産性を実現できる。

上記実現のポイントとして、3つの技術開発と2つの環境整備の方向性があり、第4部(2)において、社会実装加速に向けたアクションプランとして詳細に解説する。

分野のあるべき姿—食品製造



自動化による経済合理性への理解とSIが容易で安価な自動化ソリューションが求められる。



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

食品製造では、生産現場における SI 人材の不足や、自動化に対する経営層の理解の不足という点ではものづくり（未活用）分野と課題は共通している。一方で、特に多品種かつ柔軟・不定形物を扱うため自動化が難しく、労働集約型であることから労働生産性が低い状況にある。あるべき姿としては、ものづくり（未活用）と同じく、食品の取扱いも自動化されることで自動化機器の導入が進み、高い生産性を実現していくことである。加えて、多品種少量生産や高付加価値な商品を製造することでさらに生産性を向上させていくことも求められる。

現状とあるべき姿のギャップとしては、多品種・柔軟・不定形の食品を扱う工程の自動化機器の性能が十分でないことが大きい。さらに、SI コストの高さや、人手作業を前提とした生産現場の自動化の難しさも課題である。

これらのギャップ解消にロボットが貢献できることとしては、多様な対象物のハンドリングが可能なロボットにより惣菜盛付工程を中心に自動化が可能となる。運用環境の整備とSI が容易で安価なロボット活用が進むことでさらに労働生産性が向上することも期待される。

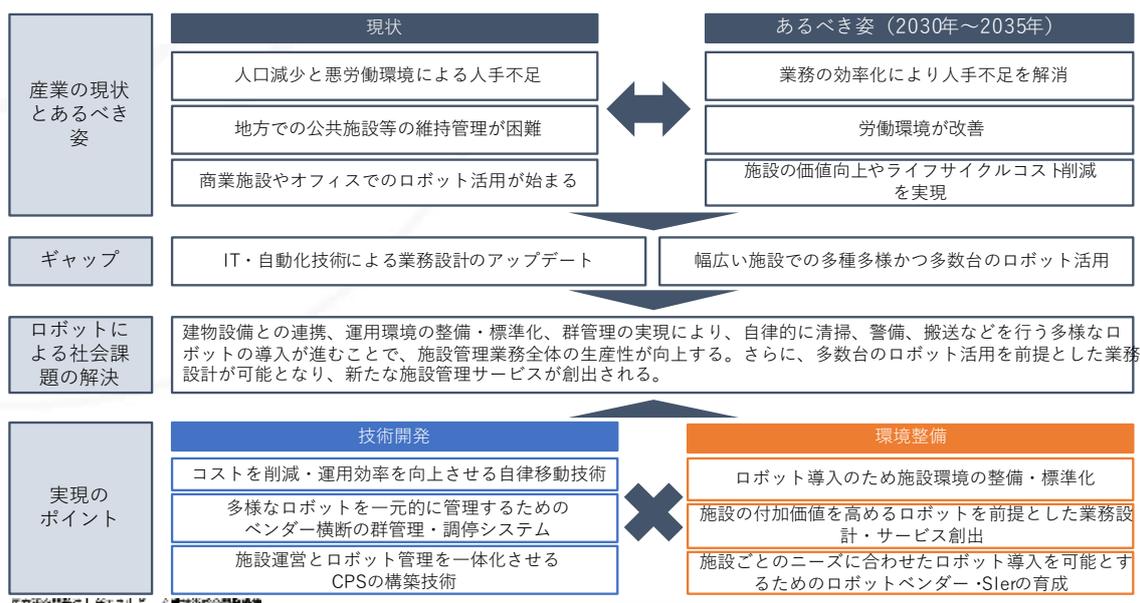
上記実現のポイントとして、3つの技術開発と3つの環境整備の方向性があり、第4部(2)において、社会実装加速に向けたアクションプランとして詳細に解説する。

施設管理

分野のあるべき姿—施設管理



人手不足解消や労働環境の改善のため、幅広い施設での多様・多数台のロボット活用およびロボットを前提としたサービス創出が求められる。



施設管理では、人口減少と労働環境の厳しいイメージから警備や清掃などでは人手不足が深刻化してきている。地方での公共施設などでは維持管理に課題を抱えるような場合もある。一方で、ロボットフレンドリーな環境づくりが進んでおり、商業施設やオフィスエリアで、清掃や警備ロボットの活用が進んできている。あるべき姿としては、この潮流を継続し、業務のさらなる効率化による人手不足の解消や、労働環境改善が進むことが期待される。また、データやロボットなどのテクノロジーの活用を通じて、商業施設やビル等の施設自体の価値向上やライフサイクルコストの削減が望まれる。

現状とあるべき姿のギャップとしては、人を前提とした施設管理業務のIT技術やロボットを含めた自動化技術の活用を前提としたかたちへの業務設計のアップデートやロボット活用の範囲を広げるための多種多様・多数台のロボットの同時使用がある。

これらのギャップ解消にロボットが貢献できることとしては、管理業務の自動化による生産性向上や新たな施設管理サービスの創出がある。商業施設やビルなどでロボットの運用環

境が整備され、多数台ロボットの運用が可能となることで多種多様な業務を行うロボットの導入が促進され、施設管理業務全体の生産性の向上が期待される。また、多数台のロボット活用を前提した業務設計がなされることで新たな施設管理サービスの創出も期待できる。

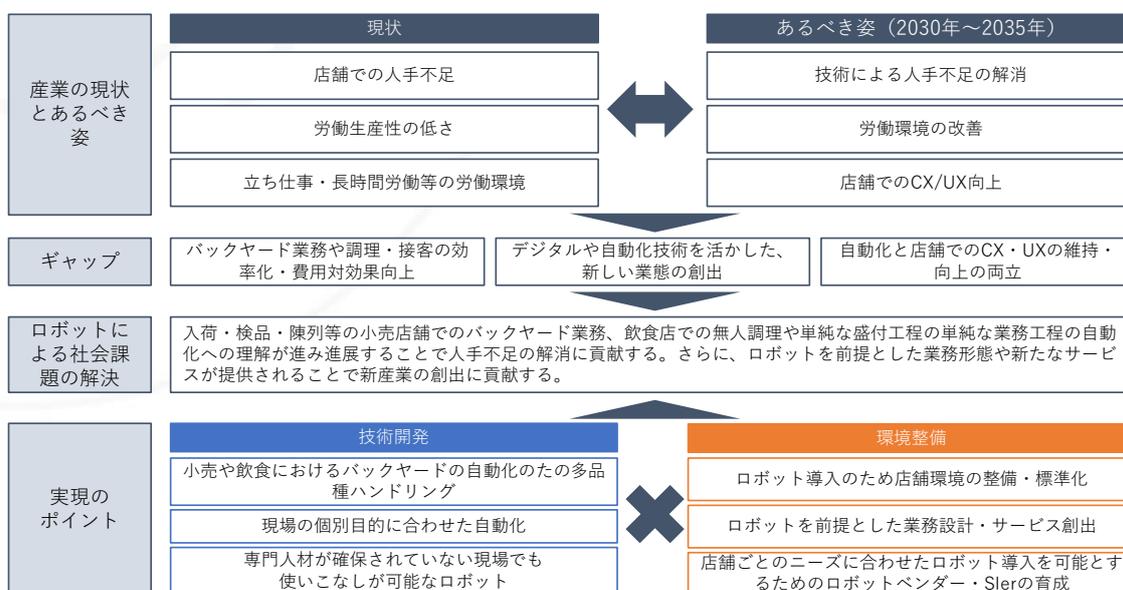
上記実現のポイントとして、3つの技術開発と3つの環境整備の方向性があり、第4部(2)において、社会実装加速に向けたアクションプランとして詳細に解説する。

小売・飲食

分野のあるべき姿—小売・飲食



人手不足を解消しつつ顧客体験を維持向上させるため、ロボットを前提とした業務にもとづく自動化や、新たなサービスの創出が求められる。



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

小売・飲食では、実店舗での人手不足が顕著であり、また他業種と比較して労働生産性の低さも課題である。小売店舗、飲食店では立ち仕事が多く、労働時間も長時間になりやすい。あるべき姿は、これらを解決する形で、デジタル技術やロボット技術によって生産性向上、人手不足解消を実現するとともに、身体的な負荷を下げ労働環境の改善に繋げることである。同時に、消費者と非常に近い分野であるため、効率化だけでなくカスタマーエクスペリエンス、ユーザーエクスペリエンスの視点からロボットならではの新しいサービスを創出していくことも求められる。

現状とあるべき姿のギャップとしては、まずは従事者が多く作業時間が長いバックヤード業務や接客業務の効率化がある。効率化を進めていく上では店舗の経営側に対して費用対効

果が明確であることが求められる。ユーザー視点からは自動化技術だけではなく、店舗側の設置・導入コストを含めた費用対効果の向上が課題である。また、既存店舗の効率化を進めるとともに、デジタル技術や自動化技術を活かした新しい業態の創出も重要である。例えば、最近では無人コンビニや Amazon のアパレル実店舗 Amazon Style（米）のような例が挙げられる。これらと同時に、従来にはないカスタマーエクスペリエンスやユーザーエクスペリエンスを創出し、顧客体験の維持・向上が必要である。

これらのギャップを解消するために、ロボットが貢献できることとしては、入荷、検品、陳列等のバックヤード業務の自動化や、飲食店での簡単な調理、盛り付け工程等の単純な業務の代替がある。加えて、ロボット活用を前提とした店舗設計やサービス設計が進むことで、新たな事業形態を創出することも可能である。

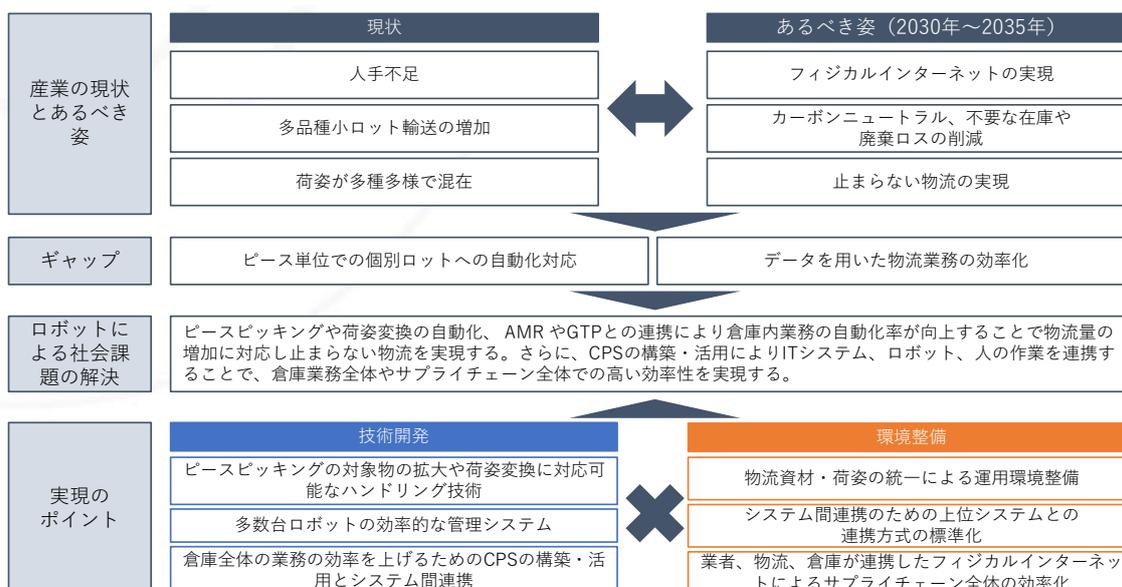
上記実現のポイントとして、3つの技術開発と3つの環境整備の方向性があり、第4部(2)において、社会実装加速に向けたアクションプランとして詳細に解説する。

物流倉庫

分野のあるべき姿—物流倉庫



消費者ニーズの多様化に伴い、ピース単位での個別ロットへの自動化対応が必要であり、データ活用による物流業務全体の効率化も求められる。



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

物流倉庫では、ECの拡大を受けて物量が増加する中で人手不足が顕在化している。多品種小ロットでの配送への対応を求められ、多種多様な荷姿が混在する中で業務効率をより高

めていく必要がある。あるべき姿としては、物流網全体がデジタル化されたフィジカルインターネットを通じて在庫量や配送効率の最適化により環境負荷を下げると同時に経済的なインフラとしての止まらない物流の実現が求められる。

現状とあるべき姿のギャップとしては、ピース単位での個別ロットへの自動化対応やデータを用いた物流業務の効率化が挙げられる。物流倉庫ではAGVやAMRを利用した棚搬送などのロボットを活用した自動化は進むものの荷姿の制約があり、個別梱包された製品の取扱いやロボットと倉庫システムの統合的な管理の面では課題がある。

これらのギャップ解消にロボットが貢献できることとしては、ピースピッキングや荷姿変換の自動化、AMRやGTPとの連携による倉庫内業務の自動化率の向上がある。さらに、CPSの構築・活用によってITシステム、ロボット、人の作業が連携し、倉庫業務全体やサプライチェーン全体での高い効率性を実現することが期待される。

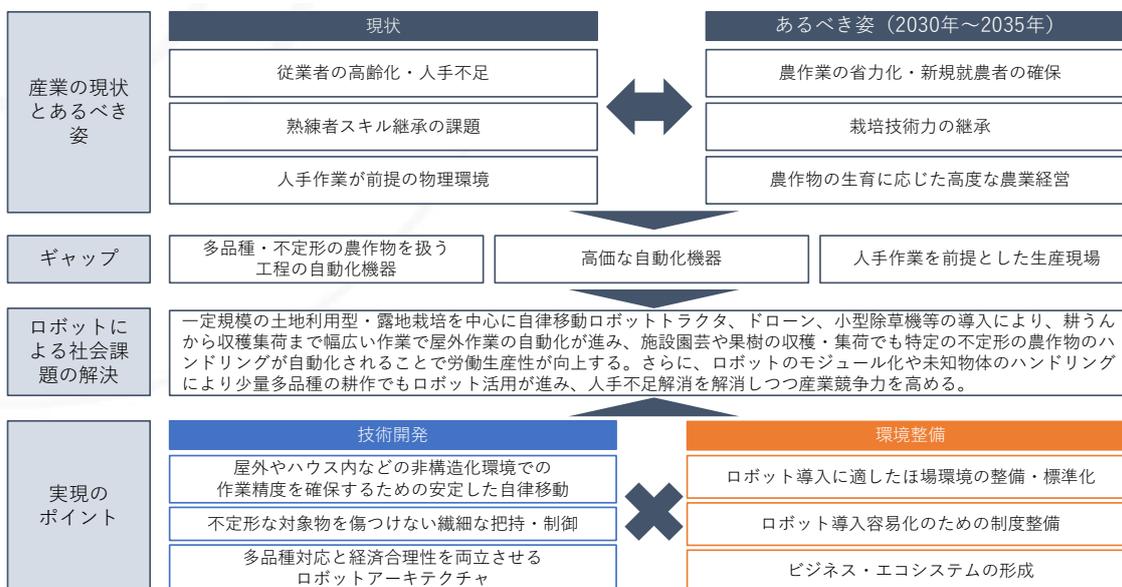
上記実現のポイントとして、3つの技術開発と3つの環境整備の方向性があり、第4部(2)において、社会実装加速に向けたアクションプランとして詳細に解説する。

農業

分野のあるべき姿—農業



異なる営農体系の個別性に対応しつつ経済合理性を満たすよう、屋外環境で不定形・未知形状の農作物を扱うことが求められる。



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

農業では、従事者の高齢化が著しく、新たな担い手も減少している中で人手不足や熟練者スキルの継承が課題となっている。農業生産を維持していくためには自動化が重要なアプローチとなるものの人手作業が前提となった圃場環境もあり、自動化の進展は充分といえない。あるべき姿としては、農作業の省力化により身体的な負担を軽減し、職業としての魅力を高め新規就農者の確保していくことが望まれる。また、新規就農者へ栽培技術を継承し、熟練者スキルを途絶えさせないことも重要である。さらに、農作物の生育に応じた施肥や灌水、収穫時期の判断などより高度な農業経営を実現していくことが求められる。

現状とあるべき姿のギャップとしては、多品種・不定形の農作物を扱う生産現場において、自動化機器の性能がまだ十分ではなく、個人経営を中心とする生産農家では高価な自動化機器への初期投資が難しいという課題がある。さらに、小規模で人手を前提とした圃場環境では、畝間の狭さや電源等が機器導入の課題となっている。

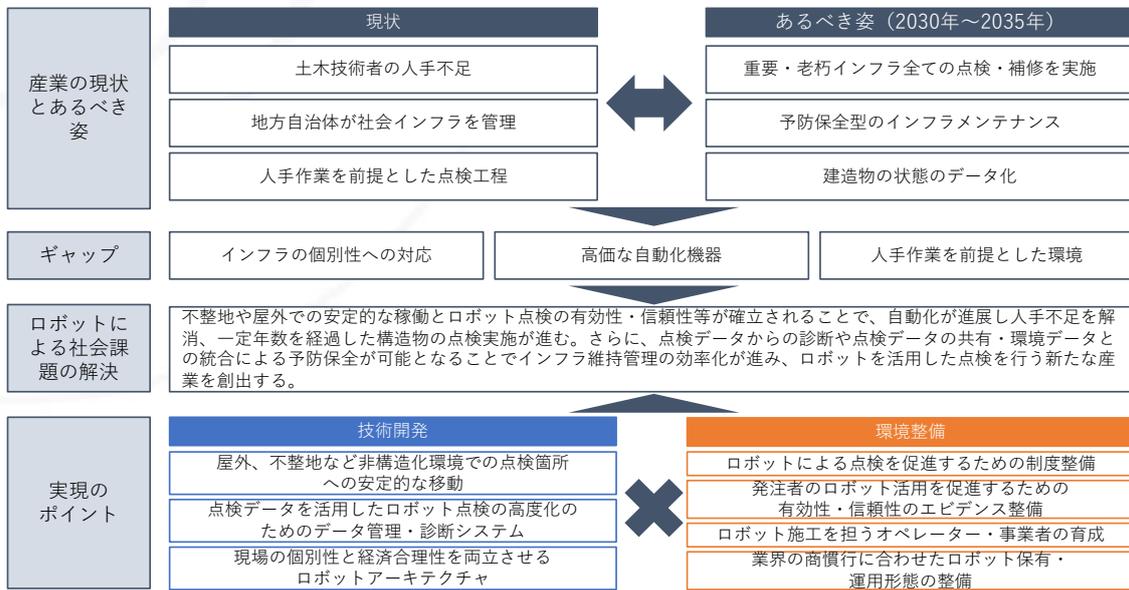
これらのギャップ解消にロボットが貢献できることとしては、一定規模の土地利用型・露地栽培を中心として、自律移動ロボットトラクタ、ドローン、小型除草機等の導入による耕うんから収穫集荷まで幅広い屋外作業の自動化がある。また、施設園芸や果樹の収穫・集荷でも特定の不定形の農作物のハンドリングが自動化されることで労働生産性の向上が期待される。少量多品種の耕作でもロボット活用が進むことで、人手不足を解消し産業競争力を高めることが期待される。

上記実現のポイントとして、3つの技術開発と3つの環境整備の方向性があり、第4部(2)において、社会実装加速に向けたアクションプランとして詳細に解説する。

分野のあるべき姿—インフラ維持管理



ロボット活用により、老朽化が顕在化しているインフラの点検と診断における生産性の向上が求められる。



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

インフラ維持管理では、更新時期を迎える構造物が増加する中で、大部分を管理する地方自治体の点検予算、点検を行う土木技術者の不足が課題となっている。また、自動化に向けては人による点検作業を前提としている点も課題である。あるべき姿としては、更新時期を迎えたインフラの点検や補修が実施され、構造物の状態がデータ化されることで予防保全型のインフラ維持管理を実現していくことが求められる。

現状とあるべき姿のギャップとしては、インフラの個性が高く業務の定型化・自動化が難しいことや、自動化機器のコストの高さ、人手作業を前提とした作業工程が挙げられる。

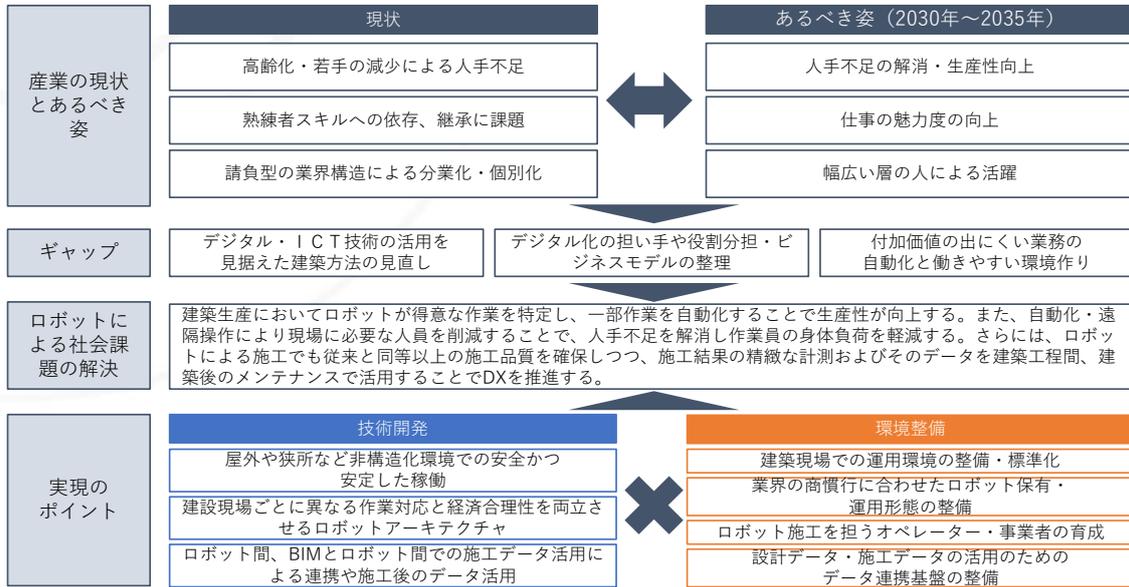
これらのギャップ解消にロボットが貢献できることとしては、不整地や屋外での安定的な稼働とロボット点検の有効性・信頼性等の確立により、点検作業の自動化と人手不足の解消への貢献が期待される。また、ロボットを用いることで点検データの共有・環境データとの統合が容易となり、データをもとに劣化状態などの診断が可能となることも期待される。さらに、ロボットを活用した点検が進むことで専門的に行う事業者や新たなロボット産業の創出に繋がることも期待される。

上記実現のポイントとして、3つの技術開発と4つの環境整備の方向性があり、第4部(2)において、社会実装加速に向けたアクションプランとして詳細に解説する。

分野のあるべき姿—建築



人手不足解消と労働環境改善、仕事の魅力度向上のため、付加価値の出にくい作業の自動化、個別性への対応と経済合理性の両立が求められる。



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

建築では、作業者の高齢化と若年層の成り手の減少から人手不足が懸念されるとともに、熟練作業者のスキルや暗黙知の継承にも課題がある。また、請負型の業界構造のため作業ごとに分業が進み、現場ごとの個別性も強い。あるべき姿としては、これらを解決する形での人手不足の解消や生産性向上が大きな目標である。また、そのためには作業の危険性や身体的負担を減らしつつ、建物やインフラを作るやりがいを感じる魅力度の高い仕事にすることが重要である。熟練スキルを持った高齢者や女性が継続して働きやすい作業にしていくことで、幅広い層の活躍を促進することも人手不足の解消につながると考えられる。

現状とあるべき姿のギャップとしては、付加価値の出にくい作業を自動化し、働きやすい環境づくりを進めることが課題である。未だ人手作業が多く残る建築現場のDXを促進するとともに、デジタル化・自動化が進化した建築現場での新たな役割分担やビジネスモデルを建築業界として整理していくことが求められる。

これらのギャップを解消するために、ロボットが貢献できることとしては、建築生産においてロボットが得意な作業を特定し、一部作業を自動化することで生産性の向上を狙うことがある。また、自動化・遠隔操作により現場作業の省人化を可能とすることで、人手不足を

解消し作業員の身体負荷軽減していくことも期待される。さらに、ロボットによる施工により施工結果の精緻な計測が可能となる。従来と同等以上の施工品質が確保され、そのデータを施工期間中および竣工後の建物のメンテナンスで活用することで建築業界のみならず維持管理も含めた価値創出が期待される。

上記実現のポイントとして、3つの技術開発と4つの環境整備の方向性があり、第4部(2)において、社会実装加速に向けたアクションプランとして詳細に解説する。

第3部：技術開発動向

本調査で取り上げた技術および技術開発アプローチ

取り上げた技術



ロボットに関わる5つの技術領域に関連する技術要素毎に、2015年以降の技術開発の変遷を示す。また、技術開発の変遷を踏まえて、次世代技術基盤の構築に向けた技術開発アプローチを技術領域毎に示す。

技術領域	技術要素
マニピュレーション	認識、制御、機構、素材、統合
モビリティ	環境認識、制御
インタラクション	遠隔制御（情報伝達、情報活用）、HMI（協働、人理解、介入）
デジタル基盤・知能化	デジタル空間構築、デジタルツイン活用
インテグレーション	動作設定（教示、補正）、安全性向上（制御、機構）

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

ロボットのコア機能は、主にマニピュレーション、モビリティ、インタラクションの技術領域から構成される。これらのコア機能を支える技術領域として、デジタル基盤・知能化、インテグレーションがある。本章ではこれら5つの技術領域について、2015年頃以降の技術開発の変遷を示す。

技術開発動向 – マニピュレーション



認識、制御、機構、素材等の個別の要素技術の開発が中心であり、今後は各要素技術の更なる進化に加え、要素技術を統合した技術開発が求められる。



マニピュレーションは、物体の位置姿勢や状態などを認識する技術、ロボットハンドを制御する技術、ロボットハンドの機構、素材で構成される。

認識の分野では、カメラ、触覚、近接覚などの様々なセンシング技術を用いて、物体に関する情報を取得する傾向が見られる。You Only Look Once (YOLO) と呼ばれるカメラを用いた物体検出技術や、FingerVision の視触覚情報を用いた把持状態の認識技術が知られているが、2022 年には、Thinker が非接触で対象物を検知し、姿勢を把握できる近接覚センサを開発している。制御に関して、AI を活用した学習アプローチでの制御に加え、触覚などの新しい情報を活用、または統合することが傾向として見られる。Levine 等が強化学習ベースで物体の把持点を検出するアルゴリズムを発表し、Ambidextrous Laboratories が Dex-Net と呼ばれるニューラルネットワークを用いた把持制御技術を開発した。また、モーションリブも、力触覚を用いたハプティクス制御技術を開発している。

機構に関しては、特定の用途に応じた機構を有するハンドの開発が進んでいる。多関節機構を有する三本指ハンドである BarretHand や、人の手に似せた精巧な機構である Shadow Dexterous Hand シリーズが知られているが、2022 年には、パナソニックが手先にベルト機

構を搭載したハンドを開発し、把持物体の姿勢をハンド内で変更できるインハンドマニピュレーションを実現している。

素材に関して、Soft Robotics は柔軟性に富んだエラストマー素材を手先に搭載した mGrip を開発し、不定形・柔軟物の把持を実現している。また、Righthand Robotics も、独自の板バネ構造を有するハンド、伸縮する吸着パッドによる把持機構、AI 制御を統合した RightPick インテリジェントグリッパーを開発している。

このようにマニピュレーションに関して、個別の要素技術の進化が見られるものの、それらを統合した技術開発は比較的少ない。今後は、要素技術のさらなる進化に加え、それらを高度に統合した技術開発が求められる。

モビリティ

技術開発動向 – モビリティ



環境認識では、安価なビジョンカメラやデプスカメラの活用、取得データの意味理解が進み、今後は未知環境や動的変化がある環境に対応できるナビゲーションの開発が期待される。制御では、マニピュレーションと自律移動ロボットの統合制御が期待される。



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

※事例は開発動向の一例

※民間企業の事例は各社HP、プレスリリース等の公開情報で確認ができる年を記載、研究論文は代表的な論文の発表年を記載。

モビリティは、周辺の状態を把握しロボットが走行する経路計画を立てるための環境認識技術と、経路計画に従い走行するための制御技術で構成される。

環境認識では、未知環境や動的変化のある環境でも安定した経路計画ができるようにするために、AI を用いた環境認識技術の開発が注目されている。自己位置推定と地図作成を同時に行う Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) のアプローチが一般的であり、

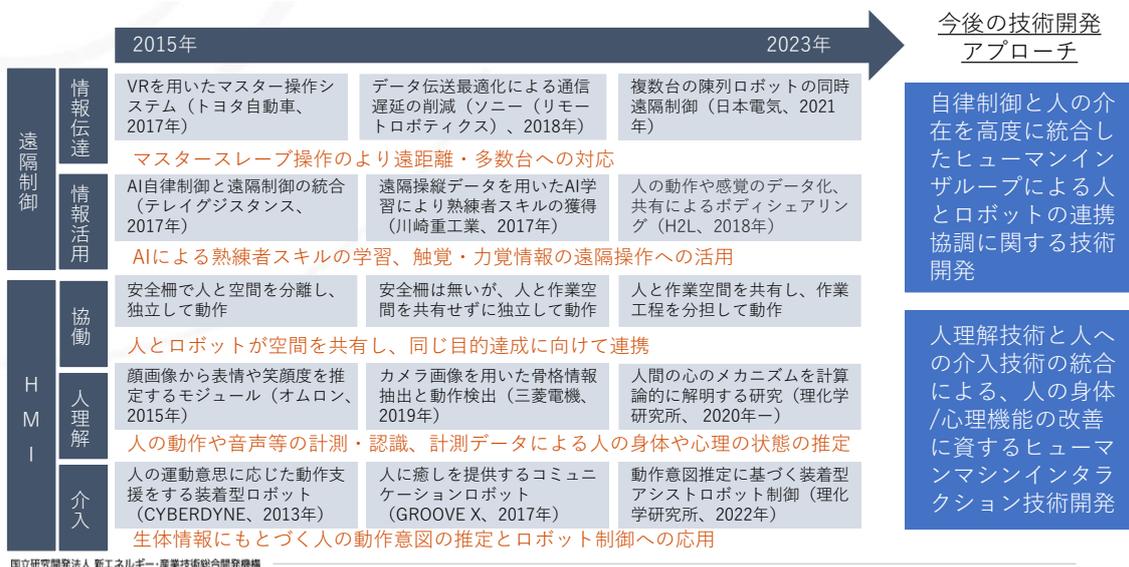
2010年代半ばから3D LiDARを用いたSLAM技術が注目され、2010年代後半には安価なビジョンカメラの活用事例が増加してきた。屋内向けではデプスカメラを用いたSLAMも注目されてきた。また、複数種類のセンサ情報を統合したり、ニューラルネットワークを組み合わせてたりすることで高精度な環境認識を実現する技術も見られる。Kudanは、GN-Netを用いてシーンの意味的理解を組み合わせることで、動的変化に頑健なSLAM技術を開発した。Yonetani等は機械学習ベースのA*探索のアルゴリズムを開発し、未知環境に対しても最適な経路計画を生成することに成功している。

制御に関しては、モバイルマニピュレータや複数台のロボットの協調制御、群制御、調停に関する技術が注目されている。ロボットアームを搭載した自律走行ロボット（モバイルマニピュレータ）では、KUKAやUniversal Robotsは協働ロボットとAutomated Guided Vehicle(AGV)を統合したモバイルマニピュレータを開発している。また、Preferred Networksは、マニピュレータの運動制御と自律走行ロボットの移動制御を高度に統合することで、広い到達範囲と可搬重量を実現するモバイルマニピュレータSK01を2021年に発表した。多数台制御では、ハイクビジョンは複数台の倉庫用ロボットリトルオレンジを効率よく制御するシステムを開発し、オムロンは100台までのモバイルロボットを管理することが可能なEnterprise Managerを発表している。

技術開発動向 – インタラクション



遠隔制御では、遠距離、多数台への情報伝達や人の動作の情報活用による高度化が進む。ヒューマンマシンインタラクションでは、人の動作意図の理解が進むことで介入への活用も期待される。



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

※事例は開発動向の一例

※民間企業の事例は各社HP、プレスリリース等の公開情報で確認ができる年を記載、研究論文は代表的な論文の発表年を記載。

ロボットは人の作業を代替するだけでなく、人の介入を必要とする状況や人とのインタラクションが発生する場面での活用も期待されており、人とロボットのインタラクションに関する技術も重要である。特に遠隔制御とヒューマンマシンインタラクション(HMI)が主要な要素技術として挙げられる。

遠隔制御は、情報の伝達と活用の観点で整理される。情報伝達では、遠距離・複数台のロボットの遠隔制御に関する技術開発が注目されている。トヨタ自動車は、離れた場所の操縦者の動作と連動して、柔軟にロボットが動くマスター操縦システム T-HR3 を開発した。リモートロボティクスは、データ伝送の最適化により通信遅延を低減する遠隔制御技術を開発している。また、日本電気も複数台・複数種の自律移動ロボットを集中的に管理制御するマルチロボットコントローラを開発している。

情報伝達では、データ化された熟練者スキルの学習によるロボットの自律化や、触覚・力覚情報を伝達することで臨場感のある遠隔制御が注目される。トレイグジスタンスは遠隔存在、VR、通信、クラウド、ハプティクスを活用した遠隔操作システム MODEL H を発表している。川崎重工業は、遠隔操縦データを用いた AI 学習により熟練技術者の動きをロボッ

トで再現する Successor を開発した。また、H2L はデータ化された人の動作や感覚を他人に共有する BodySharing を発表している。

HMI は人との協働、人の理解、人への介入の観点で整理される。人との協働に関しては3つの段階で説明できる。最初は、ロボットは安全柵により人と空間を分離し独立して動作することが主流であった。次に、安全柵は無いが人と作業空間を共有せずに独立して動作する段階に移行した。近年は、人と作業空間を共有し作業工程を分担する協働ロボットが注目を集めている。続いて人の理解では、人の動作などの計測や心理状態の推定に関する技術開発が進んでいる。オムロンが人の顔画像から表情や笑顔度などを推定する組み込み用モジュール OKAO Vision を開発し、様々なロボットに実装されてきた。三菱電機は、カメラ映像から作業者の骨格情報を抽出し、作業動作を分析するシステムを開発した。理化学研究所の心理プロセス研究チームは、2020年から実施されているガーディアンロボットプロジェクトの一環として、人間の感情、認知等の心のメカニズムを計算論的に解明しようとしている。最後に人への介入に関しては、人の状態や動作に応じたロボット制御をおこなう技術開発が注目されている。CYBERDYNE が人の生体電位信号から運動意思を推定し、それに応じて動作を支援する装着型ロボット HAL の開発をしている。GROOVE X は周辺環境、人の動きや音声を認識し、人との関係性に応じたコミュニケーションをとることで人に癒しを提供する家庭用コミュニケーションロボット LOVOT を商品化している。理化学研究所の人間機械協調研究チームはガーディアンロボットプロジェクトの一環として、人の動作意図を推定し適切なアシストをおこなう装着型ロボットを開発している。

技術開発動向 – デジタル基盤・知能化



人の作業や行動を含め、環境データを統合した高精度なデジタル空間を構築が進む。動的なシミュレーション、ロボットの動作計画へのリアルタイムでのフィードバックが期待される。



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

※事例は開発動向の一例

※民間企業の事例は各社HP、プレスリリース等の公開情報で確認ができる年を記載、研究論文は代表的な論文の発表年を記載。

デジタルツインやサイバーフィジカルシステム(CPS)は、現場の物理環境をデジタル空間に構築しシミュレーションをおこなうことで、ロボットを導入する際の事前検討や導入後のシステム全体のプロセスの改善や最適化ができるため注目されている。主にデジタル空間の構築と活用で区分することができる。

デジタル空間構築では、現場環境をより高精度に反映したデジタルツインを構築する傾向が見られる。三菱電機などが3次元CADソフトウェアを用いたロボット導入のシミュレーションツールを提供している。NVIDIAはロボットの情報だけでなく、現場空間や取り扱う製品の3次元情報、現場の撮像情報などを統合したプラットフォームOmniverseを開発した。また、建設分野では、竹中工務店がBIMモデルを地図データに活用した建設ロボット用のプラットフォームを開発している。

デジタルツイン活用に関しては、デジタルツインでの動的なシミュレーション結果をロボットの動作計画に反映することが注目されている。Siemensはクラウドベースの産業用オープンIoTプラットフォームMindSphereを提供しており、多次元情報の統合や設備の予防保全等に活用することができる。ダイキン工業では、生体、制御、環境データを統合することで、生産現場における重大なインシデントを予測している。エヌ・ティ・ティ・コミュニ

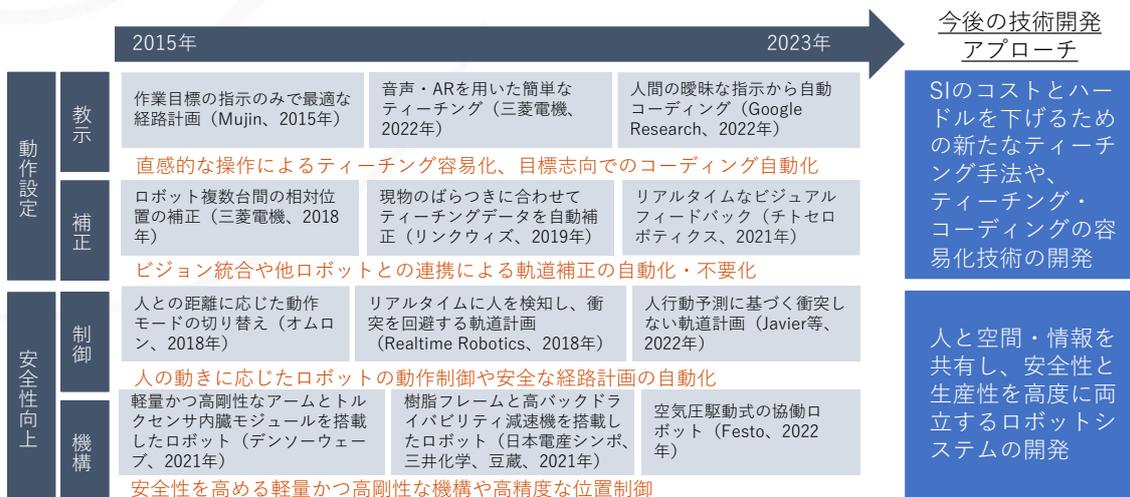
ケーションズでは、ビル設備と連携し混雑状況を加味したロボットの経路計画の支援をおこなっている。

インテグレーション

技術開発動向 – インテグレーション



動作設定ではインテグレーションの容易化のための技術開発が期待される。安全性向上のための技術開発では、人の動きに応じた動作制御や安全な経路計画の自動化、軽量かつ高剛性な機構や高精度な位置制御による生産性との両立が期待される。



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

※事例は開発動向の一例

※民間企業の事例は各社HP、プレスリリース等の公開情報で確認ができる年を記載、研究論文は代表的な論文の発表年を記載。

33

現場でロボット活用を加速させるためには、ユーザーが適切にロボットの動作設定ができることと、ロボットを安全に使えることが必要である。

動作設定では、教示と補正の観点で整理される。教示では、直感的な操作での動作設定によるティーチングレスや目標志向型のコーディング自動化に関する技術が注目されている。Mujin は人間が作業目標を指示するだけで、ロボットが自動で動作計画を生成するモーシヨンプランニング AI を開発した。三菱電機は、音声や AR を用いた直感的な操作で動作設定ができるティーチングレスロボットシステムを開発している。Google Research は、人間の曖昧な自然言語の指示を基に自動でコーディングをおこなう Code as Policies を発表した。補正では、ビジョンや他のロボットとの連携によるロボットの動作補正の自動化・不要化に関する技術が注目されている。三菱電機は、ビジョンセンサを用いることで、複数台のロボット間の相対位置キャリブレーションを自動でおこなう MELFA SMART Plus を開発した。リンクウイズは、加工対象物のばらつきを認識しそれに合わせて動作設定データを自動

補正する機能を有する L-ROBOT を開発した。チトセロボティクスは、リアルタイムなビジュアルフィードバックにより環境変化や外乱に頑健な制御をおこなう crewbo studio を発表した。

ロボットの安全性は、制御と機構の観点で整理される。制御では、周囲の人の動きに応じて、ロボットが減速または衝突回避する技術が注目されている。オムロンが人との距離に応じてロボットの動作モードを切り替える協調ロボット TM シリーズを発表した。

Realtime Robotics は、検知された周囲の人との衝突を回避する動作計画をリアルタイムに生成し、ロボット動作に反映する衝突回避システムを開発した。Javier 等は、人の行動を予測しロボットが衝突しない動作計画を生成するアルゴリズムを発表した。機構では、軽量かつ高剛性な機械要素や機構設計を統合することで、安全性とロボット性能を両立するロボットシステムの開発が注目されている。デンソーウェーブは、軽量かつ高剛性なアームとトルクセンサを内蔵したモジュールを採用した人協働ロボット COBOTTA PRO を開発した。日本電産シンポ、三井化学、豆蔵の 3 社は、樹脂フレームと高バックドライバビリティ減速機を搭載したロボット Beanus2 を共同開発した。さらに Festo は、ピエゾバルブを採用し空気の流量や圧力を高精度に制御することで、重い減速機無しで高速な動作と柔軟かつ繊細な動作を両方実現する空気圧駆動の協働ロボット Festo Cobot を発表した。

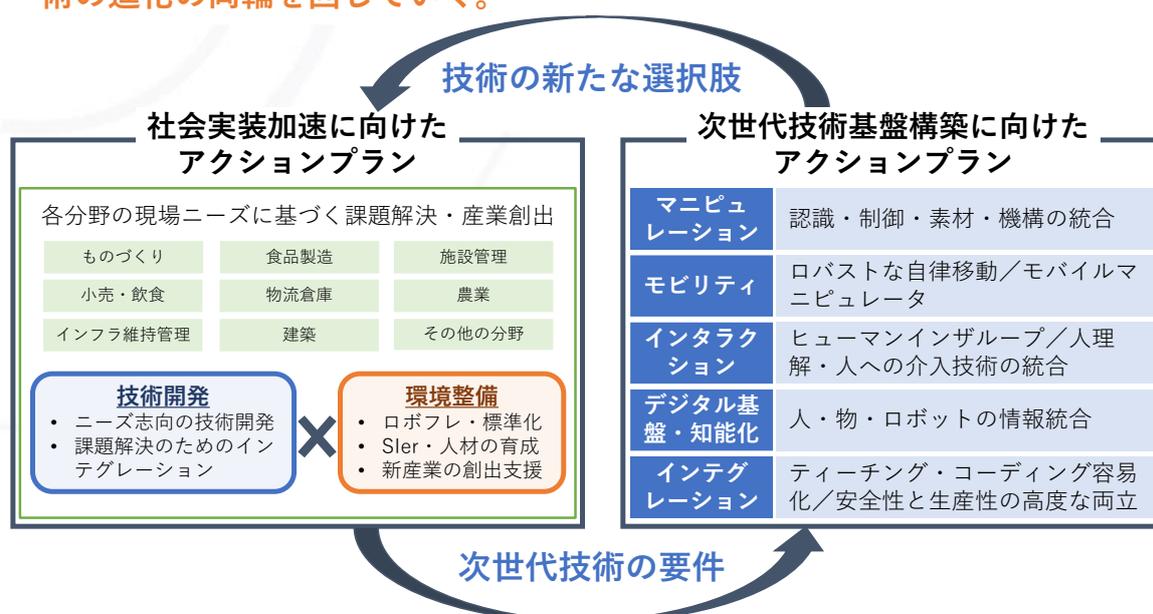
第4部：ロボットアクションプラン

(1) ロボットアクションプランの全体像

アクションプランの全体像



出口志向でのシステム統合が重要。そのための社会実装の加速と要素技術の進化の両輪を回していく。



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

35

ロボットはシステム技術であり、特定のニーズ・課題解決のため、技術要素を組み合わせ、環境整備・運用設計と共にインテグレーションしていくものである。分野ごとの社会実装を加速させると同時に、組み合わせの素材となる要素技術を進化させるという、社会実装と技術開発の両輪を回すことがポイントである。そのため、ロボットアクションプランは、大きく2つの要素から構成される。1つ目は社会実装加速に向けたアクションプランであり、2つ目は次世代技術基盤構築に向けたアクションプランである。

社会実装加速に向けたアクションプランでは、第2部で取り上げた9分野のニーズに基づくアクションプランを策定した。技術開発および標準化等の協調領域での環境整備が一体となったアジャイルな官民連携による、分野ごとのニーズに根差した課題解決がポイントである。

次世代技術基盤構築に向けたアクションプランでは、ロボットのコア機能に関わるマニピュレーション、モビリティ、インタラクションに加え、コア機能を支えるデジタル基盤・知能化、インテグレーションの5つの領域に9個のアクションプランを策定した。分野への将来的なインパクトを見据えた先進的な技術開発により、要素技術を進化させることでインテグレーションのための新たな選択肢を提供していくことがポイントである。

社会実装加速に向けたアクションプランによりロボットの活用を広げつつ、次世代技術の要件を明らかにし、次世代技術基盤構築に向けたアクションプランにより、社会実装のための新たな技術の選択肢を提供するという両輪を回すことが重要である。

(2) 社会実装加速に向けたアクションプラン

社会実装加速に向けたアクションプランでは、第2部で取り上げた9分野のニーズに基づきアクションプランを策定した。それぞれの分野において、今後求められる研究開発および環境整備の取り組みの方向性を示す。

取り組み事項のマッピング

各分野のニーズを捉えるため、分野ごとに技術開発・環境整備でどのような取り組みが必要かを分析した。分野横断で必要となる取り組みを示すために技術開発、環境整備それぞれについて、分野を横に並べ、横断的に求められている取り組みを記載したのが下の2枚の図である。2030年を目安にロボットの利活用を促進し、ロボットビジネスを振興するために、取り上げた各分野の現場での課題解決へのニーズ、その解決策としてポテンシャルがともにある代表的な取り組みを技術開発、環境整備に分けて俯瞰的に例示している。注意点として、例示した内容の記載は簡略化しているため、各分野特有のニーズよりは粒度が粗くなっている。例えば、技術開発のモビリティにおいて、農業、インフラ維持管理、建築の3領域にまたがって「屋外など非構造環境下での安定した自律移動」と記載があるが、それぞれの分野で求められている内容やレベルは本来異なっている。しかし、共通する要素も多いため、1つのブロックで示している。

社会実装加速に向けたアクションプラン



技術開発例

※本スライドは2030年を目安に短期で特に求められるユースケースでのロボット利活用に向け、ポテンシャル、ニーズがともにある代表的な技術開発を俯瞰したものである。各項目の詳細はP.9-11で記載する。

ものづくり (既存)	ものづくり (未活用)	食品製造	施設管理	小売・飲食	物流倉庫	農業	インフラ 維持管理	建築
マニピュレーション								
物理的な接触を伴う作業の自動化	多種多様な対象物に対応する専用エンドエフェクタ			多様な商品や食材のハンドリング	ピースピッキング、荷姿変換	農作物のハンドリング		
モビリティ								
			群管理 安定した自律移動		群管理		屋外など非構造化環境下での安定した自律移動	
インタラクション								
				使いやすいロボット	遠隔操作の活用			
デジタル基盤・知能化								
FA機器・ITシステム連携			CPSの活用による施設とロボットの一体管理		CPSシステムとロボットの連携 機械学習等を使用したシミュレーション		点検データのAI診断、IoT連携による予防保全	工程間のデータ連携、施工後のデータ活用
CPS活用による生産管理	機械学習等を使用したシミュレーション							
インテグレーション								
ティーチング・コーディング容易化・不要化							個別性と経済合理性を両立するアーキテクチャ	
	安全性と生産性を両立した協働ロボット							

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

社会実装加速に向けたアクションプラン



環境整備例

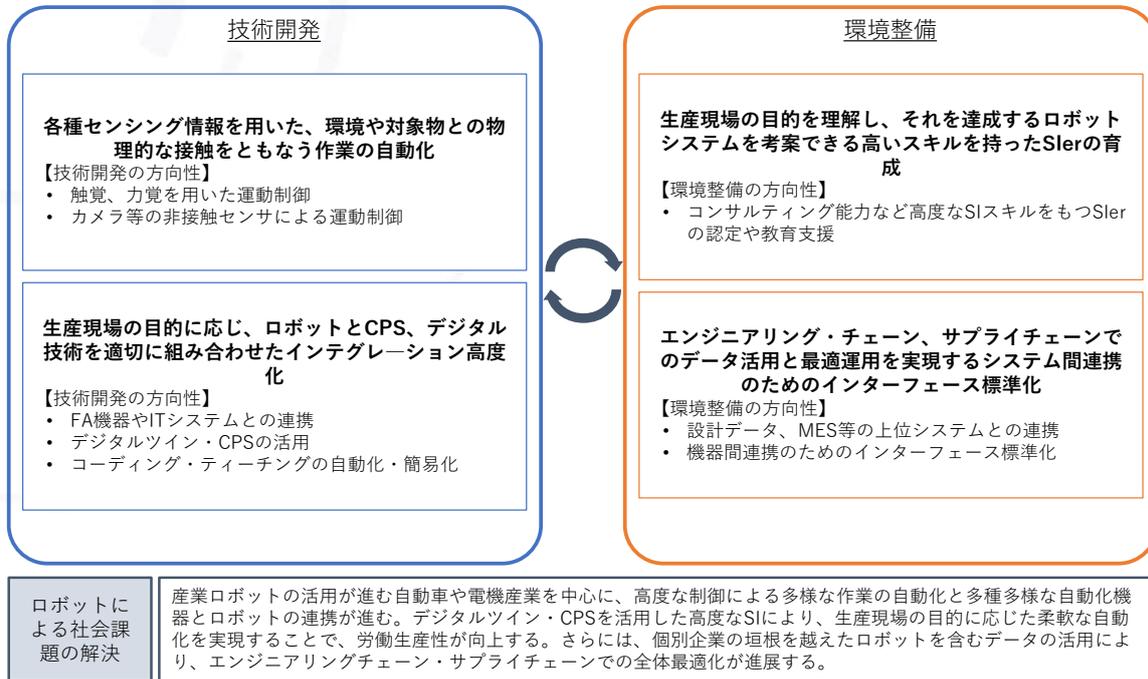
※本スライドは2030年を目安に短期で特に求められるユースケースでのロボット利活用に向け、ポテンシャル、ニーズがともにある代表的な環境整備を俯瞰したものである。各項目の詳細はP.9-11で記載する。

ものづくり (既存)	ものづくり (未活用)	食品製造	施設管理	小売・飲食	物流倉庫	農業	インフラ 維持管理	建築
物理環境の整備・標準化								
		容器、供給方法等の標準化	現場の物理環境の整備・標準化		梱包資材の標準化			現場の物理環境の整備
			ビル内設備との連携					
業務設計・運用設計								
サプライチェーン全体での業務効率化			ロボット活用を前提とした業務設計		サプライチェーン全体での業務効率化		業界の商慣行に合わせたロボットの保有・運用形態の整備	
Sler・人材・ベンダーの育成								
Slerのスキル高度化	現場を理解し変革が可能なSI人材の育成		国内ロボットベンダーの育成				ロボットを活用する事業者・オペレーターの育成	
新サービス創出、ビジネスモデル形成								
			ロボットを活用した新サービス創出支援				ロボットを使用した事業のビジネスモデル形成	
啓発・規制対応								
		HACCP等のロボット対応 業界全体での課題設定やユーザー啓発					ロボットに対応した制度整備・改正	有効性・信頼性のエビデンス整備

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

ものづくり（既存）

ロボットアクションプラン ものづくり（既存）



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

ものづくり（既存）におけるロボットの社会実装加速に向けたアクションプランとして、2つの技術開発と2つの環境整備の方向性を示す。

技術開発の1つ目の方向性は、各種センシング情報を用いた、環境や対象物との物理的な接触を伴う作業の自動化である。触覚、力覚を用いた運動制御やカメラ等の非接触センサによる運動制御を通じて、高度な作業を自動化していくことが求められる。

技術開発の2つ目の方向性は、生産現場の目的に応じて、ロボットとCPS、デジタル技術を適切に組み合わせたインテグレーション高度化である。既にロボットを使用している現場であっても、FA機器やITシステムとの連携、デジタルツインを活用したロボットの動作計画へのフィードバックなどデジタル技術等を活用することで、さらに生産性を高めることが可能である。

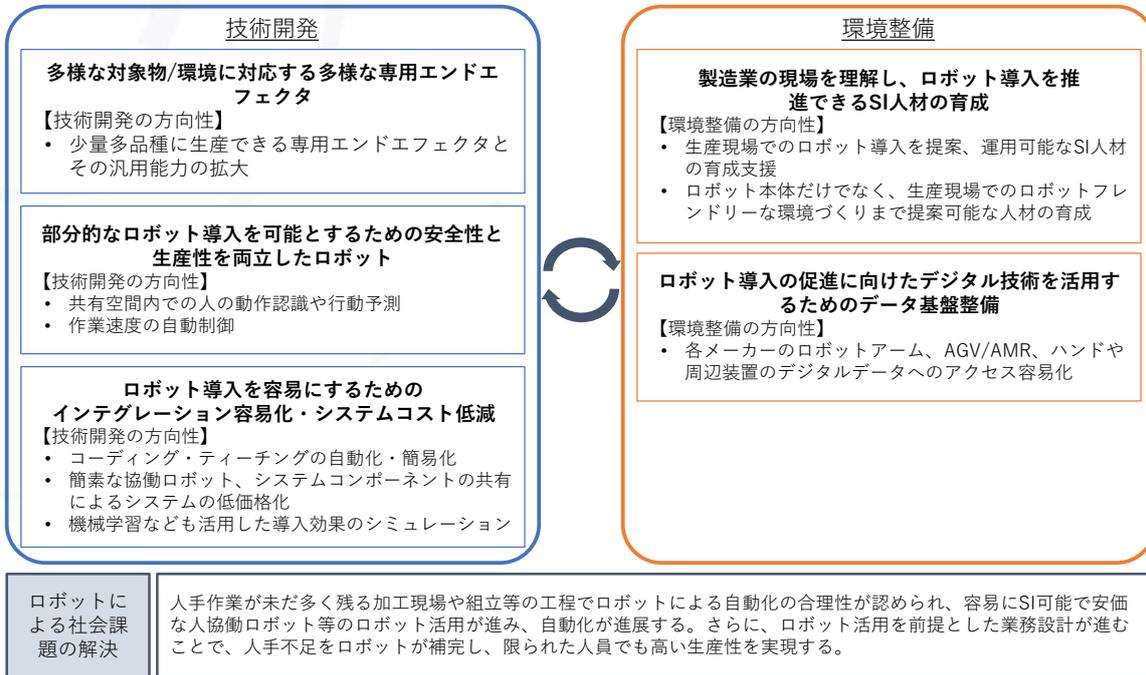
環境整備の1つ目の方向性は、生産現場の目的を理解し、それを達成するロボットシステムを考案できる高いスキルを持ったSierの育成である。ユーザーの作業工程からロボットに求められる要件を定義し、それに合わせて多様にあるセンサ、エンドエフェクタなどの要素技術を適切に選択し、生産現場に合わせた自動化を提案できるコンサルティング能力を持ったSierが重要である。また、ITシステムとの連携やCPSの活用などロボットだけに

閉じないインテグレーションやシステムも SIer が中心となって提案、導入を推進していくことが期待される。

環境整備の2つ目の方向性は、エンジニアリング・チェーン、サプライチェーンでのデータ活用と最適運用を実現するシステム間連携のためのインターフェース標準化である。ものづくり分野ではロボットシステムは生産システムの一部を構成するものであり、生産管理システムや設計管理システムとの連携を通じて生産システム全体での最適化を実現していくことが求められる。例えば、ロボットの作業データを生産管理システムと連携することで生産計画に反映したり、設計管理システムとの連携を通じて製品形状の変更をロボットの動作計画に反映したりすることなどが想定される。一方、現状ではメーカーごとにロボットのシステムが異なり、高度な制御のためには各メーカーの専用システムを用いることが殆どであるため、外部機器との連携のためのインテグレーションコストが大きい。より効率的にシステム間連携を実現するには MES（製造実行システム）や PMS（生産管理システム）等の上位システムや、他の FA 機器間での連携のためのシステム間のインターフェース標準化が求められる。

ものづくり（未活用）

ロボットアクションプラン ものづくり（未活用）



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

ものづくり（未活用）におけるロボットの社会実装加速に向けたアクションプランとして、3つの技術開発と2つの環境整備の方向性を示す。

技術開発の1つ目の方向性は、多様な対象物/環境に対応する多様な専用エンドエフェクタである。ロボットを未活用なものづくり分野では中小企業が多く、少量多品種での生産を得意としている場合が多い。従来のロボットでは少量多品種に対応することが難しいため、特定の作業に専用化されつつも、一定度の汎用性を持ったエンドエフェクタが必要である。

技術開発の2つ目の方向性は、部分的なロボット導入を可能とするための安全性と生産性を両立したロボットである。今までロボットを使っていなかった製造現場に対し、完全に自動化することは技術的、コスト的にもハードルが高く、現場作業を部分的に自動化し人と同時に稼働することが現実的な選択肢となる。そのためには、ロボットが人との共有空間内で人の動作認識や行動予測を行い、作業速度の自動制御等により高い安全性を保持しつつも高速で作業が可能なロボットが必要となる。

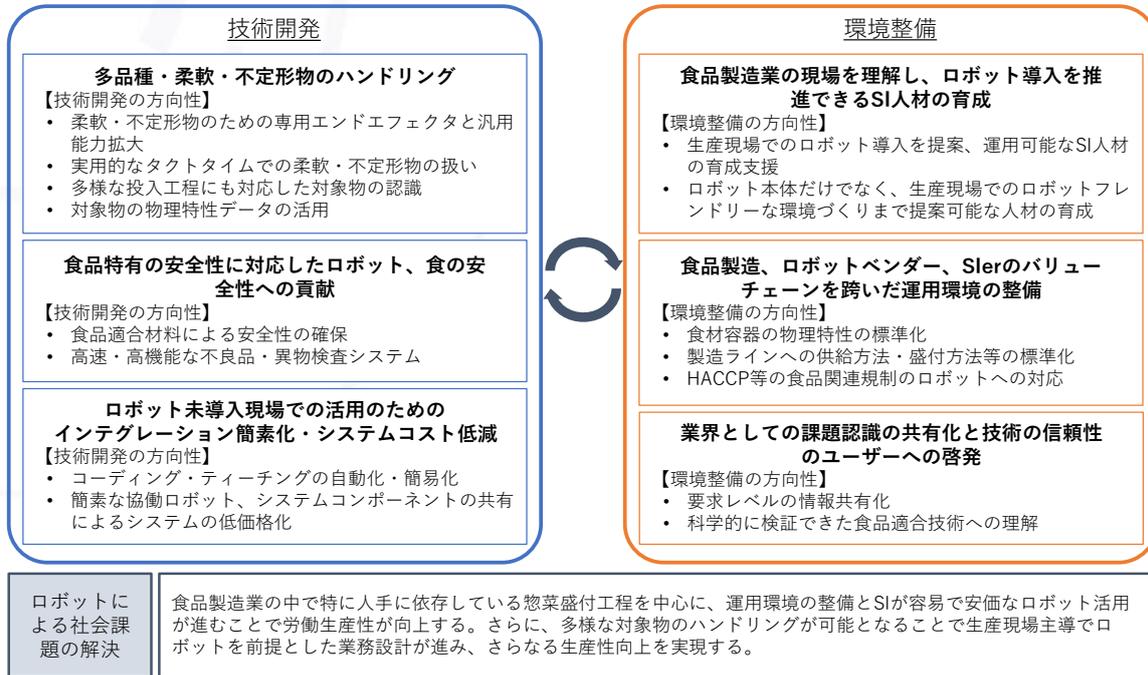
技術開発の3つ目の方向性は、ロボット導入を容易にするためのインテグレーション容易化・システムコスト低減である。ロボット導入において、インテグレーションのためのコ

ストは大きな割合を占めており、それを容易化、不要化することが導入コストの低減に効果的である。具体的には、コーディング・ティーチングの自動化・簡易化や、簡素な協働ロボット、システムコンポーネントの共有によるシステムの低価格化が挙げられる。また、機械学習なども活用した導入効果のシミュレーションを行うことで事前に効果を検証し、導入に踏み切りやすくすることも重要である。

環境整備の1つ目の方向性は、製造業の現場を理解し、ロボット導入を推進できるSI人材の育成である。現在ロボットが使われていない現場に対し、ロボット導入を提案し、運用可能なSI人材の育成支援が必要である。SIのスキルだけでなく、ユーザーの生産現場、工程への理解も重要となる。

環境整備の2つ目の方向性は、ロボット導入の促進に向けたデジタル技術を活用するためのデータ基盤整備である。メーカーごとにデジタルデータへのアクセス方法が異なり、異なるメーカー間の自動化機器、ロボットを連携することが容易ではなくなっている。各メーカーのロボットアーム、AGV/AMR、ハンドや周辺装置のデジタルデータへのアクセスを容易化することで、より柔軟に機器を選択、インテグレーションをしやすくすることが求められる。

ロボットアクションプラン
食品製造



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

食品製造におけるロボットの社会実装加速に向けたアクションプランとしては、3つの技術開発と3つの環境整備の方向性を挙げている。

技術開発の1つ目の方向性は、多品種・柔軟・不定形物のハンドリングである。食品を扱うための専用エンドエフェクタとその汎用能力拡大が求められている。また、生産ラインの効率を下げないために実用的なタクトタイムで柔軟・不定形物を扱える必要がある。加えて、多様な投入工程にも対応した対象物の認識が必要であり、対象物の物理特性データの活用なども合わせて考えていく必要がある。

技術開発の2つ目の方向性は、食品特有の安全性に対応したロボット、食の安全性への貢献である。食品適合材料による安全性の確保や、高速・高機能な不良品・異物検査システムにより、食品衛生に対応したかたちで自動化を進める必要がある。

技術開発の3つ目の方向性は、ロボット未導入現場での活用のためのインテグレーション簡素化・システムコスト低減である。ものづくり（未活用）同様、食品分野でも現場に専門人材がいるとは限らず、また自動化機械への投資に踏み切りにくいのが現状である。そのような場面でも十分にロボット活用するためコーディング・ティーチングの自動化・簡易化

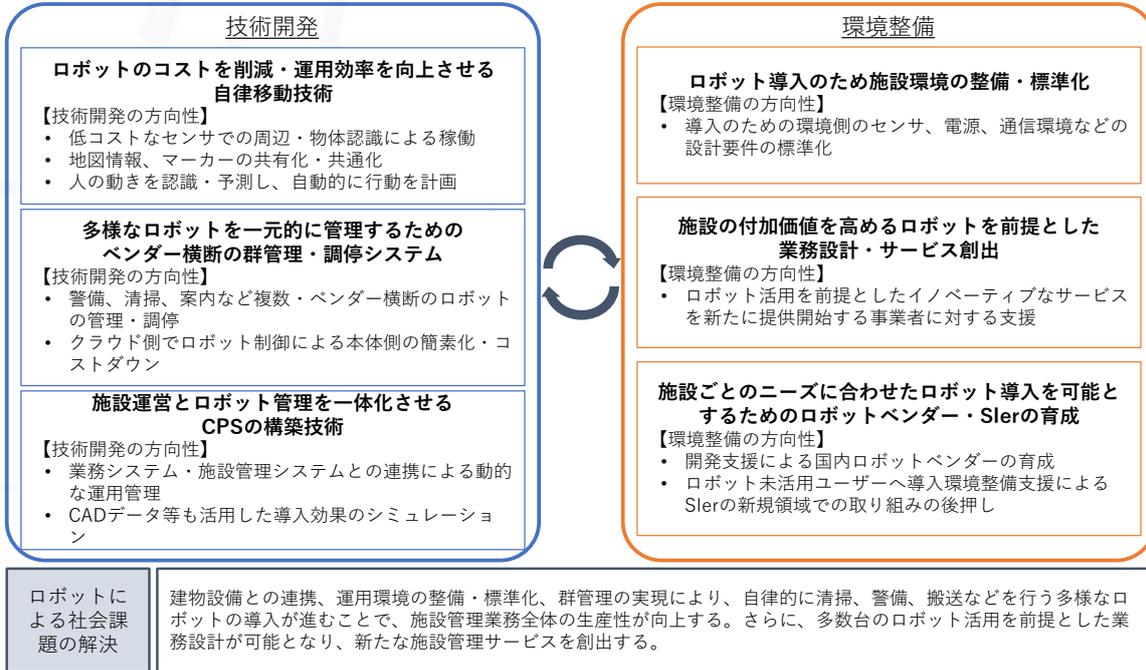
や簡素な協働ロボット、システムコンポーネントの共有によるシステムの低価格化が必要である。

環境整備の1つ目の方向性は、食品製造業の現場を理解し、ロボット導入を推進できるSI人材の育成である。食品製造の現場を理解して、現場の自動化に必要な要件を判断した上で、ロボットを提案できる人材を育成していく必要がある。また、ロボット本体だけでなく、生産現場でのロボットフレンドリーな環境づくりまでを含めた提案ができることも重要である。

環境整備の2つ目の方向性は、食品製造、ロボットベンダー、SIerのバリューチェーンを跨いだ運用環境の整備である。食材容器や製造ラインへの供給方法・盛付方法等を標準化することにより、ロボットの導入をより容易にすることが可能である。また、現行の食品衛生法やHACCPはロボットによる作業を想定しておらず、導入時に障壁になるケースもあるため、それら法規制面からのロボットへの対応も重要である。

環境整備の3つ目の方向性は、業界としての課題認識の共有化と技術の信頼性のユーザーへの啓発である。食品製造業界全体で要求レベルの情報共有化や科学的に検証できた食品適合技術への理解を浸透させることで、ロボット導入を加速することが期待される。

ロボットアクションプラン
施設管理



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

施設管理におけるロボットの社会実装加速に向けたアクションプランとして、3つの技術開発と3つの環境整備の方向性を示す。

技術開発の1つ目の方向性は、ロボットのコストを削減・運用効率を向上させる自律移動技術の開発である。施設管理では警備ロボット、清掃ロボット、屋内搬送ロボットなどが用いられているが、自律移動にまつわる部分でのコストが高いことが普及の阻害要因となっている。その削減のためには、低コストなセンサでの周辺・物体認識の実現や、地図情報、マーカーの共有化・共通化が有効だと考えられる。また、商業施設などの人と同じ空間で利用される際には安全性を担保しながら効率的にロボットが作業を行う必要があるため、人の動きを認識・予測し、自動的に行動を計画する技術も重要である。

技術開発の2つ目の方向性は、多様なロボットを一元的に管理するためのベンダー横断の群管理・調停システムの開発である。施設管理でのロボット活用は現状では普及段階にあり、単一施設で多数台のロボットが導入されることは多くないものの、今後は警備、清掃、案内など様々なロボットが1つの施設で活用されることが想定され、複数のベンダーのロボットが同時に利用されることになる。それらを管理するために、多種多様、多数台、異なるベンダーのロボットを一元的に管理、調停するシステムが求められる。また、多数台のロ

ボットの一元的な制御を前提とした場合に、ロボット本体ではなく管理システムで動作計画などの計算を行い、その結果をロボットに送信するという方式をとることで、ロボット本体の要求処理性能を下げ、本体の簡素化、コストダウンにつなげることも考えられる。

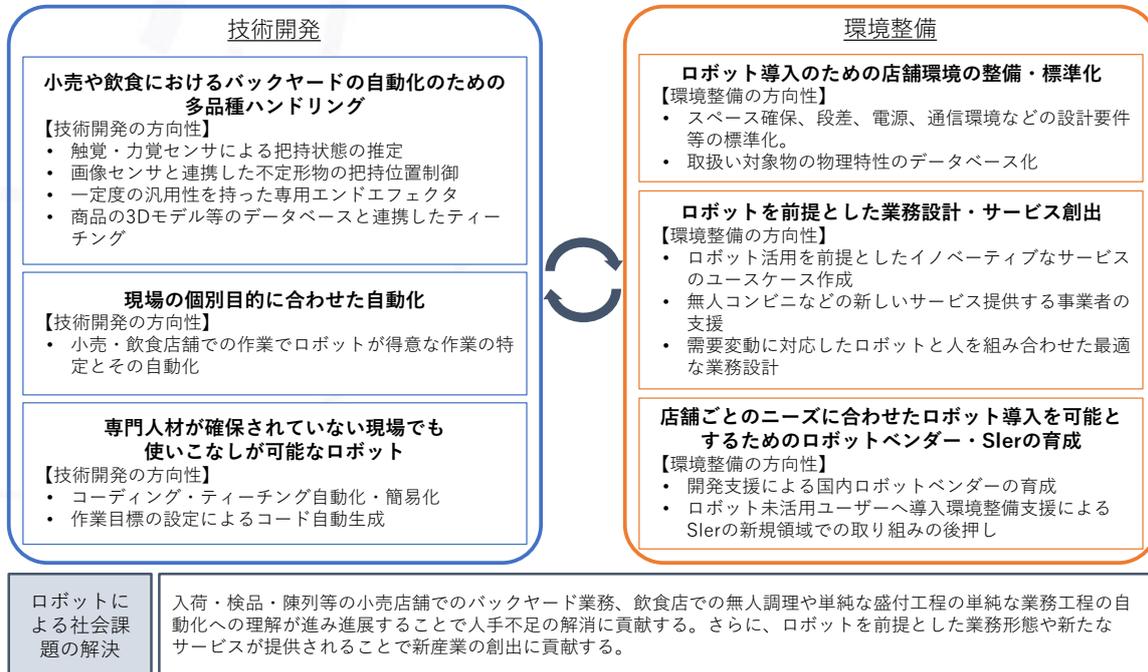
技術開発の3つ目の方向性は、施設運営とロボット管理を一体化させるCPSの構築技術である。業務システム・施設管理システムとロボット管理システムの連携による動的な運用管理により、より効率的に施設管理業務を遂行することが期待できる。エレベーターとロボットの連携など設備との連携に留まらず、建物や業務システムと柔軟に連携することで作業記録のデジタル化などの付加価値創出が期待される。また、CADデータ等も活用した導入効果のシミュレーションにより、ロボット導入効果の事前検証や、効率的な業務設計も可能となる。

環境整備の1つ目の方向性は、ロボット導入のための施設環境の整備・標準化である。ロボフレでは、エレベーターやセキュリティドアとの連携が進んでいる。それらは運用上の課題解決となる一方、導入時には、ロボットが動くための施設側のセンサ、電源、通信環境、マーカー等も必要となり、個々の導入事例ごとに検討されている現状がある。これらのロボット導入時に求められる施設側の設計要件を標準化していくことで導入ハードルを引き下げ、ユーザーが容易に導入できる環境を整えていくことが求められる。

環境整備の2つ目の方向性は、施設の付加価値を高めるロボットを前提とした業務設計・サービス創出である。一部業務を代替するかたちの部分的な導入ではなく、ロボットを前提とした業務設計によりロボットを活用するからこそ発揮できる付加価値を創出していくことが可能である。清掃と警備を同時に行いそれぞれの記録を自動化するなど、ロボット利用を前提に施設管理業務全体での効率的な活用を推進することが重要である。また、施設自体の付加価値を高めるような新サービスの創出を推進していくことも求められる。

環境整備の3つ目の方向性は、施設ごとのニーズに合わせたロボット導入を可能とするためのロボットベンダー・SIerの育成である。ユーザーがロボットを導入する際に、施設管理業務や建物側に必要な設備要件を理解し、サービスロボットを導入できるSIerが不足している。産業用ロボットを中心とする既存のSIerのサービスロボット分野への進出や新たなSIerの育成が求められる。また、サービスロボットおよびシステムは海外ベンダーが中心となっており、機微な情報を持つ施設で使用される場合には、ロボットが取得した画像、音声、動画などのデータが海外に流出するリスクも懸念される。そのため、日本国内のベンダーのサービスロボットの開発を支援していくことも多様な施設での利用を実現していくためには重要である。

ロボットアクションプラン 小売・飲食



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

小売・飲食におけるロボットの社会実装加速に向けたアクションプランとして、3つの技術開発と3つの環境整備の方向性を示す。

技術開発の1つ目の方向性は、小売や飲食におけるバックヤードの自動化のための多品種ハンドリングである。小売店での品出し等の自動化や、飲食店の調理の自動化のためには、商品や食品を傷つけずに扱う必要がある。具体的には、触覚・力覚センサによる把持状態の推定や画像センサと連携した不定形物の把持位置制御の技術開発が求められる。また、商品情報データベースの整備による3Dデータを使用したティーチングも重要である。

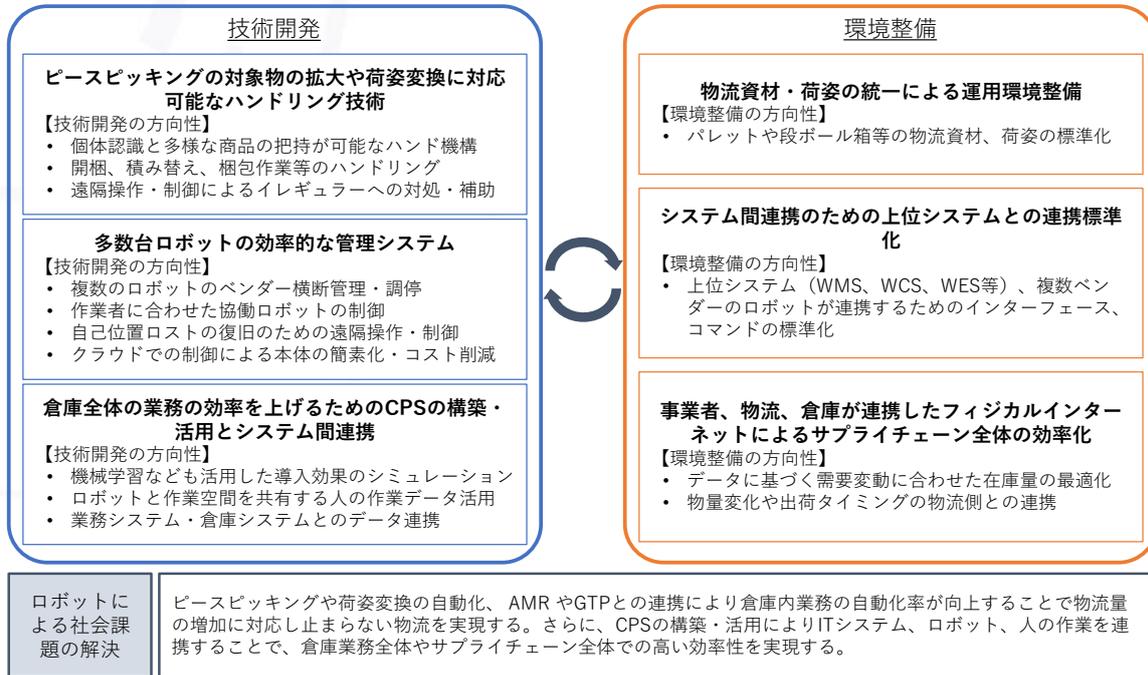
技術開発の2つ目の方向性は、現場の個別目的に合わせた自動化である。小売・飲食店では入荷、検品、陳列、調理、清掃、接客など、多様な作業があり、それぞれの場面でロボットができることやロボットに求められる性能は変化する。業務プロセスとロボットができることを照らし合わせ、どこにロボットを導入するかを検討し、その場面の目的に合わせて自動化していくことが、ロボットやインテグレーションのコストを抑えつつ、現場で最大の効果を発揮するために重要である。

技術開発の3つ目の方向性は、専門人材が確保されていない現場でも使いこなしが可能なロボットである。小売・飲食の現場では新しい商品が次々に出され、棚の配置換えなど、頻繁に環境が変わる。その都度ティーチングや経路変更などを行うためには現場にロボットやITシステムを扱える人材が必要だが、現場では多様な人が働いており、各人が持つロボットやIT機器への習熟度に大きな差があり、そのような人材を各店舗に配置したり、専門性の高い人材を育成していくことは容易ではない。簡単にロボットを扱えるよう、コーディング・ティーチング自動化・簡易化や作業目標の設定によるコード自動生成の技術が求められる。

環境整備の1つ目の方向性は、ロボット導入のための店舗環境の整備・標準化である。小売店舗や飲食店において、ロボットのためのスペース確保、段差、電源、通信環境などの設計要件等の標準化を進めることにより、ロボットを導入しやすい環境を作っていくことが重要である。

環境整備の2つ目の方向性は、ロボットを前提とした業務設計・サービス創出である。ロボットにより作業の一部を自動化しても、全体としての業務効率が上がるとは限らず、業務設計を見直し、ロボットを前提としたものに変革していくことが求められる。具体的には、ロボット活用を前提としたイノベティブなサービスのユースケース作成や、それらの新しいサービス提供する事業者の支援が求められる。また、小売・飲食ではロボットへの需要（作業量）が1日、1週間、1年の中で大きく変動するため、需要変動に対応したロボットと人を最適に組み合わせた業務設計が必要である。

環境整備の3つ目の方向性は、店舗ごとのニーズに合わせたロボット導入を可能とするためのロボットベンダー・SIerの育成である。施設管理同様、近年日本で導入されるサービスロボットやその稼働のためのシステムは海外製であることが多く、日本国内のサービスロボットベンダー、SIerの育成が重要である。また、サービスロボットはこれから活用が広がる段階であり、ロボット未活用ユーザーへの導入環境整備支援によるSIerの新規領域での取り組みの後押しも同様に効果的だと考えられる。



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

物流倉庫におけるロボットの社会実装加速に向けたアクションプランとして、3つの技術開発と3つの環境整備の方向性を示す。

技術開発の1つ目の方向性は、ピースピッキングの対象物の拡大や荷姿変換に対応可能なハンドリング技術である。個体認識と多様な商品の把持が可能なハンド機構などによりロボットのピッキングが可能な商品を拡大することで、より倉庫業務の効率化を図ることができる。開梱や積み替え、梱包作業など、現在は手作業となっている工程についても、ハンドリング技術向上により自動化を実現することも求められている。また、このような複雑な作業は場面、場面で対応できないケースも生じる場合があり、遠隔操作・制御によって人がイレギュラーな状況に対処・補助し、より効果的にロボットを運用していくことも有効である。

技術開発の2つ目の方向性は、多数台ロボットの効率的な管理システムである。AMRやピッキングロボットなどは大規模な倉庫や物流センターを中心に既に導入されているが、取扱い能力を拡張していくためにロボットを段階的に追加する場合に、複数のロボットベンダーの製品を横断的に管理・調停できるシステムが求められる。また、効率的な管理には、人とロボットが同じ空間で働くための作業者に合わせた協働ロボットの制御や、自己位置ロ

トからの復旧のための遠隔操作、クラウドシステムでの制御によるロボット本体の簡素化も重要である。

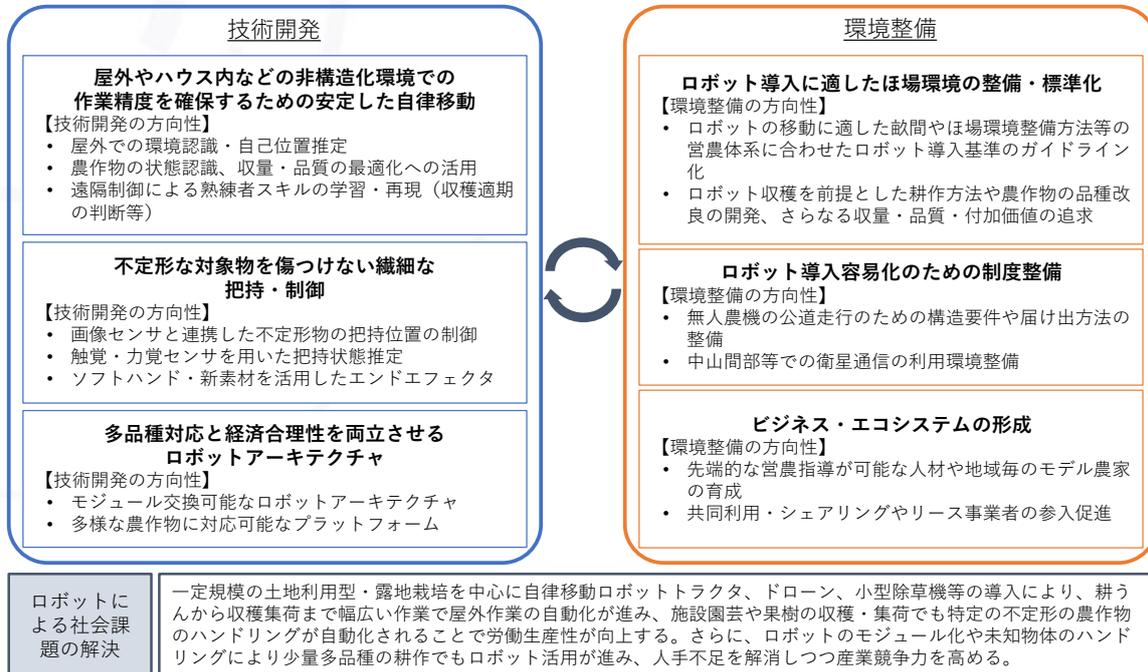
技術開発の3つ目の方向性は、倉庫全体の業務の効率を上げるためのCPSの構築・活用とシステム間連携である。機械学習なども活用したシミュレーションは導入ハードルを下げるために効果的である。また、倉庫の管理システムとロボットの管理システムを連携させることで倉庫業務全体を最適化していくことや、人の作業データを活用してロボットの動きを改善していくことも継続的にロボット導入効果を高めていく上では重要となる。

環境整備の1つ目の方向性は、物流資材・荷姿の統一による運用環境整備である。パレットや段ボールなどの物流資材や荷姿を標準化することでロボットが貨物を扱いやすい環境を整備していくことも、ロボット導入の加速のためには重要である。

環境整備の2つ目の方向性は、システム間連携のための上位システムとの連携の標準化である。技術開発で挙げた多数台ロボットの効率的な管理やCPS活用のためには上位の倉庫システム（倉庫管理システム、倉庫運用管理システム、倉庫制御システム等）との連携、ベンダーの異なるロボットを同一システムでの制御が必要となり、そのためのインターフェースやコマンドの標準化が必要である。

環境整備の3つ目の方向性は、荷主（販売事業者）、物流、倉庫が連携したフィジカルインターネットの実現によるサプライチェーン全体の効率化である。ロボットによる倉庫の自動化が進むことで、データの収集・蓄積が加速し、さらにその分析を進めることでデータに基づいて需要変動に合わせた在庫量の最適化がなされ、物量変化や出荷タイミングの変更にもより柔軟に対応が可能となる。倉庫だけでなく、事業者や小売店舗も含めて効率化することで、流通段階における無駄の削減や環境負荷低減が期待される。

ロボットアクションプラン 農業



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

農業におけるロボットの社会実装加速に向けたアクションプランとして、3つの技術開発と3つの環境整備の方向性を示す。

技術開発の1つ目の方向性は、屋外やハウス内などの非構造化環境での作業精度を確保するための安定した自律移動である。農業は屋外での作業が多く、従来のロボット活用現場と異なり足場や光源が不安定なため、屋外でも安定して稼働できる環境認識・自己位置推定技術が求められる。また、農作物の状態認識にもとづく収量・品質の最適化や、収穫適期の判断等では遠隔制御による熟練者スキルの学習・再現も有効である。

技術開発の2つ目の方向性は、不定形な対象物を傷つけない繊細な把持・制御である。農作物は傷つきやすく、また作物ごとに形や硬さなどの特性も異なる。画像センサと連携した不定形物の把持位置の制御や触覚・力覚センサを用いた把持状態推定、ソフトハンド・新素材を活用したエンドエフェクタにより、商品価値を落とさず様々な農作物をハンドリングできる技術が必要である。

技術開発の3つ目の方向性は、多品種対応と経済合理性を両立させるロボットアーキテクチャである。農作物の栽培工程や栽培する作目は多岐にわたり、それぞれでロボットに求

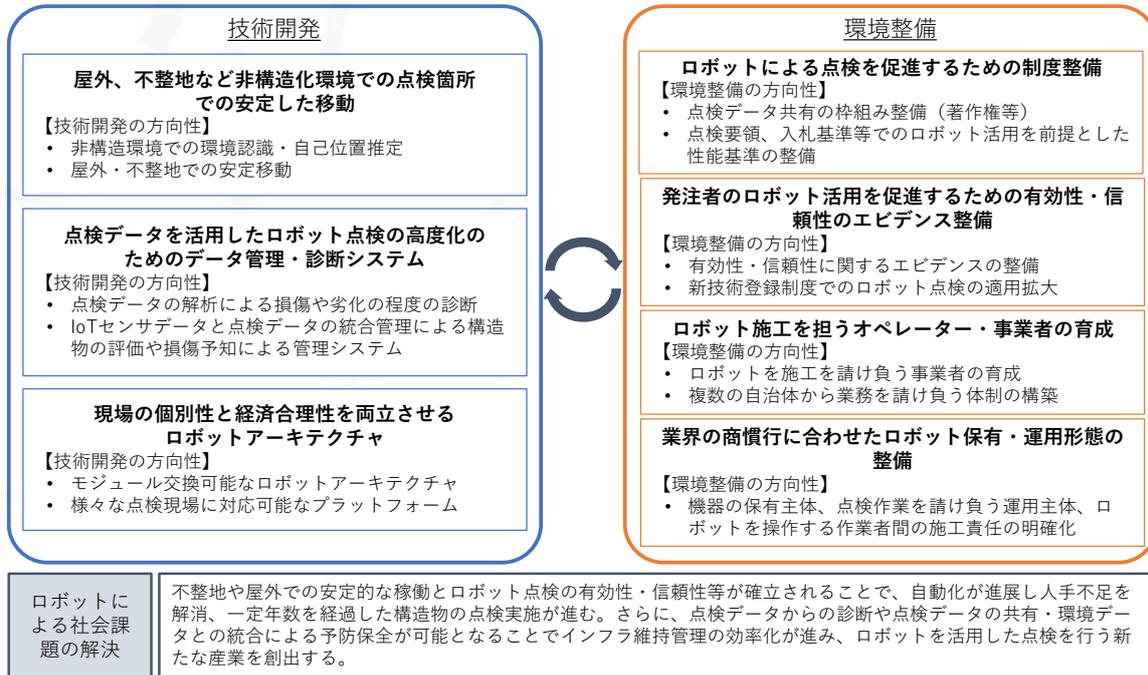
められる性能も異なる。専用ロボットを個別仕様で開発することは、結果としてコストアップとなる。そのため、モジュールが交換可能なアーキテクチャなど、多様な農作物に対応可能なプラットフォームを備えたロボットの開発により、多品種栽培に対応しつつ経済合理性を高めることが必要である。

環境整備の1つ目の方向性は、ロボット導入に適したほ場環境の整備・標準化である。ロボットが現在の農場に対応すると同時に、ほ場をロボットが活動しやすい環境にしておくことも重要である。ロボットの移動に適した畝間などのほ場環境の整備方法、営農体系に合わせたロボット導入基準のガイドラインの整備も有効である。また、ロボット収穫を前提とした耕作方法や農作物の品種改良の開発などにより、生産性をより高めることも重要である。

環境整備の2つ目の方向性は、ロボット導入容易化のための制度整備である。自律走行ロボット（無人農機）の公道走行のための構造要件や届け出方法などの整備や中山間部等での衛星通信の利用環境整備もロボットの導入容易化のためには必要である。

環境整備の3つ目の方向性は、ビジネス・エコシステムの形成である。農業分野ではロボットは今後普及して行く段階にあり、導入の拡大には、現状の商慣行を鑑みた合理性のあるビジネスモデルの構築を支援していくことも重要である。具体的には先端的な営農指導が可能な人材や地域毎のモデル農家の育成や共同利用・シェアリングやリース事業者の参入促進などが想定される。

ロボットアクションプラン インフラ維持管理



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

インフラ維持管理におけるロボットの社会実装加速に向けたアクションプランとして、3つの技術開発と4つの環境整備の方向性を示す。

技術開発の1つ目の方向性は、屋外、不整地など非構造化環境での点検箇所での安定した移動である。非構造化環境での環境認識・自己位置推定や屋外・不整地での安定移動の実現により、インフラの点検現場で安定して稼働するロボットが求められる。

技術開発の2つ目の方向性は、点検データの活用によるロボット点検を高度化していくためのデータ管理・診断システムである。現状では、ロボットで点検したインフラの劣化程度や補修要否の判断は人が行っている。ロボット点検の効果を最大限に発揮するためには、取得された点検データの解析により損傷や劣化の程度の診断や、IoTセンサーデータと点検データの統合管理による構造物の評価や損傷予知による管理システムを実現する必要がある。

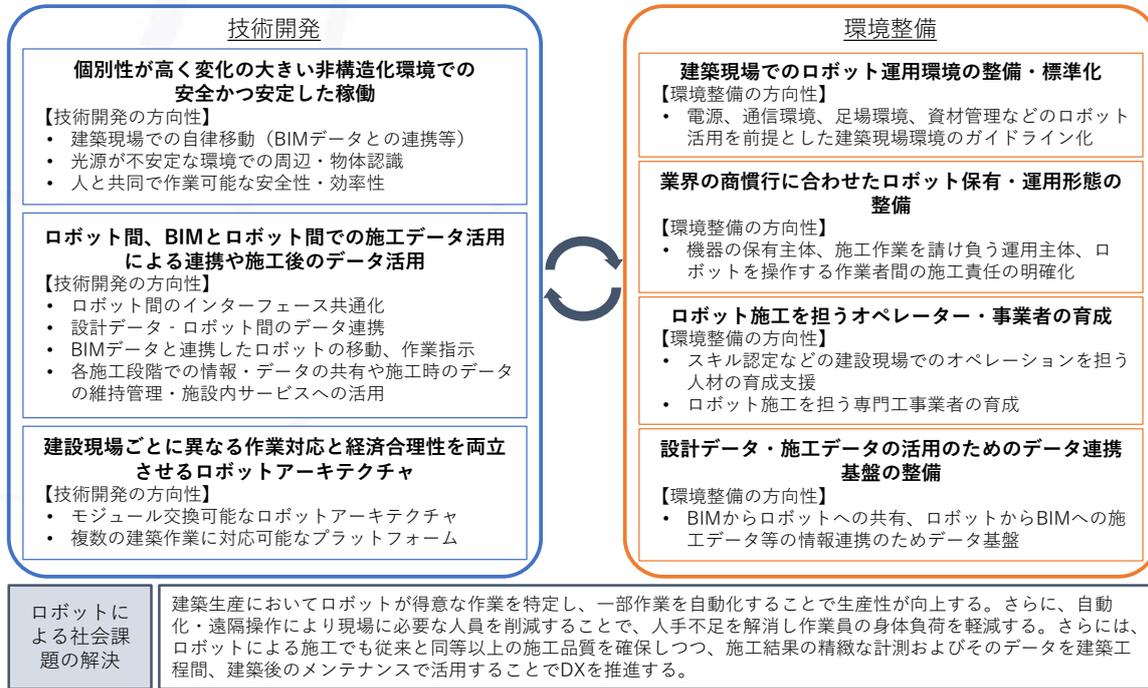
技術開発の3つ目の方向性は、現場の個別性と経済合理性を両立させるロボットアーキテクチャである。点検現場はそれぞれで異なり、1つ1つに対応するために別々のロボットを用意するのはコストがかかりすぎる。そのため、モジュール交換可能なロボットアーキテクチャを持った様々な点検現場に対応可能なプラットフォームロボットにより、現場の個別性に対応しつつ経済合理性を実現するロボットの開発が必要である。

環境整備の1つ目の方向性は、ロボットによる点検を促進するための制度整備である。具体的には、著作権等の点検データ共有の枠組み整備や、ロボット活用を前提とした点検要領、入札基準等における性能基準の整備である。

環境整備の2つ目の方向性は、発注者のロボット活用を促進するための有効性・信頼性のエビデンス整備である。インフラは公共財であり、事故が起こった際の影響や社会的責任も大きい。そのため、発注者、点検事業者の双方が安心してロボットを利用するためにも、第三者によって科学的に有効性を担保していくことが求められる。

環境整備の3つ目の方向性は、ロボット施工を担うオペレーター・事業者の育成である。ロボットによる点検ができる事業者を育成すると同時に、ロボット点検を専門に行う新しい事業者の育成など、費用対効果の高いロボット点検を実現することが重要である。また、そのためには専門スキルを持ったロボットオペレーターの育成も望まれる。

環境整備の4つ目の方向性は、業界の商慣行に合わせたロボット保有・運用形態の整備である。機器の保有主体、点検作業を請け負う運用主体、ロボットを操作する作業員間の施工責任を明確にし、ロボットを使いやすいビジネス環境を作っていく必要がある。



建築におけるロボットの社会実装加速に向けたアクションプランとして、3つの技術開発と4つの環境整備の方向性を示す。

技術開発の1つ目の方向性は、非構造化環境での安全かつ安定した稼働である。建築現場は現場ごと、作業工程ごとに現場環境が異なり、またその環境も整備されておらず、光源も不安定である。さらにロボットは作業員が動きまわり、資材が現場保管されている中で稼働する必要がある。BIM データとの連携等も含め、自律移動技術の高度化と周辺認識・物体認識技術の高度化により、安定して作業ができる能力と人と同じ空間で作業ができる安全性を兼ね備える必要がある。

技術開発の2つ目の方向性は、データ連携・活用である。ロボットとロボット以外のデータ連携・活用については、設計データや BIM・CIM データと連携したロボットの移動や作業指示などが考えられる。また、建築工程は多岐にわたり、各段階で使用されるロボットも違うものになる可能性がある。その場合、前工程でロボットが取得したデータを次の工程のロボットが活用することで、現場でのマッピングやティーチング等の手間の削減が期待できる。さらに、ロボットが取得した建築物のデータを BIM などの設計データと統合することで竣工後もメンテナンスや施設管理サービス等に活用することが考えられる。

技術開発の3つ目の方向性は、建築現場の個別性に対応しつつ、経済合理性のあるアーキテクチャである。前述のとおり、建築工程は多岐にわたり、各段階で活躍するロボットも異なる。各段階で必要になるロボットを個別に開発し、それぞれの作業を行う企業が購入・所有した場合、コストが高くなる。これを解決するために、様々な作業に対応できるが、各ロボットで必要になる機能は共通させるなどのアーキテクチャが効果的である。例えば、どの建築ロボットにも必要となる移動にかかわる部分（足回り）と、各作業に特化した部分（アームやハンド）をモジュール化し、取り付けて使うような設計が考えられる。

環境整備の1つ目の方向性は、建築現場でのロボット運用環境の整備である。建築現場におけるロボット導入の検討は始まったばかりであり、ロボットを動かしやすい環境にはなっていない。電源や通信環境などのロボットが動くための条件や、足場環境やロボットが運びやすい資材など、ロボフレ環境をつくるための取り組みが必要である。

環境整備の2つ目の方向性は、業界の商慣行に合わせたロボット保有・運用形態の整備である。技術開発の2つ目の方向性のデータ活用・連携でも述べた通り、建築工程は多岐にわたり、様々なステークホルダーが1つの現場に関与している。そのため、ロボット機器の導入者がロボット機器によるメリットを受けるとは限らない。例えば、従来は工事を委託された専門工事業者が実際に資材運搬を行っていた現場に、ゼネコンが資材運搬ロボットを現場に配置した場合、直接的にメリットを享受するのはゼネコンではなく、専門工事業者となる。ロボット機器の特性や利用シーンを捉えながら、機器の保有者、保有形態を整理する必要がある。また、ロボットを使って施工した場合の責任の所在の明確化なども必要である。

環境整備の3つ目の方向性は、ロボット施工を担うオペレーター・事業者の育成である。建築現場で現在働く作業者がすぐにロボットを使いこなせるわけではないため、現場にロボットを導入する場合、作業者の教育が必要である。また、ロボットを使うことで力作業が必要なくなり、現場におらずとも遠隔で一部の作業をすることも可能となるため、ロボット操作を専門とする新たな作業員の開拓も人手不足解消に効果的である。具体的には、カリキュラムの作成やスキル認定などの方策が考えられる。また、ロボット普及のためにはロボットによる施工を専門とする新たな専門工事業者が登場することが期待され、ロボットによる費用対効果や効率性のメリットを明らかにして、そのような施工業者を育成していくことも重要である。

環境整備の4つ目の方向性は、設計データ・施工データの活用のためのデータ連携基盤の整備である。建築現場でのDXを進めるため、積極的にデータを活用することが求められる。具体的には、BIMからロボットへの共有、ロボットからBIMへの施工データ等の情報連携のためのデータ基盤の整理などが考えられる。

(3) 次世代技術基盤の構築に向けたアクションプラン

次世代技術基盤の構築に向けて、ロボットのコア機能に関わるマニピュレーション、モビリティ、インタラクション、コア機能を支えるデジタル基盤・知能化、インテグレーションを加えた5つの領域に関する9個のアクションプランを策定した。第3部の技術開発動向にもとづき、分野への将来的なインパクトを見据えた2035年に向けた中長期での先進的な技術開発により、要素技術を進化させインテグレーションのための新たな選択肢を提供していくためのアクションプランを示す。

次世代技術基盤構築に向けたアクションプラン



今後のロボット活用でより重要性が高まる9つのアクションプランを策定した。

技術領域	アクションプラン	分野へのインパクト
マニピュレーション	① 認識・制御・素材・機構の統合による把持技術の開発	食品製造、小売・飲食、物流倉庫、農業
	② データやAIを用いた機構・制御の統合による器用な操作・操り技術の開発	ものづくり、小売・飲食、物流倉庫
モビリティ	③ 屋外等の未知環境・動的変化環境におけるロバストな自律移動技術の開発	施設管理、農業、建築、インフラ維持管理
	④ マニピュレーション制御と自律移動制御を高度に統合したモバイルマニピュレータの開発	ものづくり、小売・飲食、物流倉庫、生活空間・介護
インタラクション	⑤ 人とロボットが共進化するヒューマンインザループにより、高度に連携協調する技術開発	ものづくり、小売・飲食、物流倉庫
	⑥ 人理解・人への介入技術を統合したアプローチに基づく、人の身体/心理機能の改善に資する技術の開発	生活空間・介護
デジタル基盤・知能化	⑦ 人・物・ロボットの情報を統合したデジタルツイン・CPSのリアルタイムな構築・適用技術の開発	ものづくり、施設管理、物流倉庫、建築
インテグレーション	⑧ SIのコストとハードルを下げるための新たなティーチング手法や、ティーチング・コーディングの容易化技術の開発	ものづくり、食品製造、農業、建築
	⑨ 人と空間・情報を共有し、安全性と生産性を高度に両立するロボットシステムの開発	ものづくり、食品製造、小売・飲食

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

マニピュレーション領域では、認識・制御・素材・機構の統合による把持技術の開発と、データやAIを用いた機構・制御の統合による器用な操作・操り技術の開発を挙げている。モビリティ領域では、屋外などの未知環境・動的変化環境におけるロバストな自律移動技術の開発と、マニピュレーション制御と自律移動制御を高度に統合したモバイルマニピュレータの開発を挙げている。インタラクション領域では、人とロボットが共進化するヒューマンインザループにより高度に連携・協調する技術開発と、人理解・人への介入技術を統合したアプローチに基づく人の身体・心理機能の改善に資する技術の開発を挙げている。デジタル基盤・知能化領域では、人・物・ロボットの情報を統合したデジタルツイン・CPSのリアルタイムな構築・適用技術の開発を挙げている。インテグレーション領域では、SIのコス

トと難易度を下げるための新たなティーチング手法やティーチング・コーディングの容易化技術の開発と、人と空間・情報を共有し、安全性と生産性を高度に両立するロボットシステムの開発を挙げている。

マニピュレーション

ロボットアクションプラン① マニピュレーション(1/2)



認識・制御・素材・機構の統合による把持技術の開発	
技術開発アプローチ	分野へのインパクト
<ul style="list-style-type: none"> 認識、制御、素材、機構の個別技術要素の進化に加えて、それらを最適に組み合わせることにより、マニピュレーションシステム全体でロボットの把持対象物の拡大を目指す 	食品製造 惣菜の盛付等、不定形・柔軟な対象物の把持を要する工程の自動化を実現
	小売・飲食 多種多様な商品の品出しや食器の配膳下膳、食品の盛付の自動化を実現
	物流倉庫 多種多様な商品のピースピッキングを実現
	農業 繊細な果樹・野菜を傷つけない収穫を実現
(参考) 関連事例	
RightPickインテリジェントグリッパー (Righthand Robotics) 独自の板バネ構造を用いたハンド、伸縮する吸着パッドによる把持機構、AI制御の統合	センサリッチ柔軟エンドエフェクタ (SIP2期フィジカル空間デジタルデータ処理基盤) 軽量で柔軟性のある素材を手先に搭載した把持機構とAI制御の統合

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

※画像は各種Webページより引用

マニピュレーション領域の1つ目のアクションプランは、認識・制御・素材・機構の統合による把持技術の開発である。マニピュレーションに関わる個別の要素技術の進化に加え、それらを最適に組み合わせることで、ロボットが多種多様な対象物を把持できるようにすることを目指すことが求められる。

参考事例として取り上げた Righthand Robotics の RightPick インテリジェントグリッパーは独自の板バネ構造を用いたハンド、伸縮する吸着パッド、AI 制御を統合している。また、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第2期フィジカル空間デジタルデータ処理基盤で開発されたセンサリッチ柔軟エンドエフェクタは、軽量で柔軟性のある素材と AI 制御を組み合わせたアプローチを取っている。

このような把持技術によって、食品製造では惣菜などの不定形柔軟物の盛付作業の自動化、小売・飲食では多種多様な商品の品出し、食器の配膳下膳、食品の盛付などの自動化が

進むと考えられる。また、物流倉庫では多種多様な商品のピースッキングの自動化、農業ではロボットが繊細な果樹・野菜を傷つけずに収穫することが可能になると考えられる。

ロボットアクションプラン② マニピュレーション(2/2)



データやAIを用いた機構・制御の統合による器用な操作・操り技術の開発	
技術開発アプローチ	分野へのインパクト
<ul style="list-style-type: none"> センサデータやAIによる学習を用いた制御と機構を統合し、ロボットの作業汎用化・高速化を目指す 	ものづくり 非位置制御によりねじ締めや組立等の繊細な作業を実現
	小売・飲食 外食産業での調理工程にて、多様な作業を実現
	物流倉庫 商品や段ボールを傷つけない開梱・梱包を実現
(参考) 関連事例	
軽量高速多指ハンドシステム (東京大学石川研究室) 高速カメラを用いたダイナミックビジョンと多指ハンドの統合 	Shadow Dexterous Hand (Shadow Robot Company) 精巧な機構と多種多様なセンサの統合 
人共存型ロボットアーム (トヨタ自動車) ワイヤード駆動の機構と学習ベースの制御の統合による高いバックドライバビリティの実現 	

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

※画像は各種 Web ページより引用

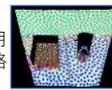
マニピュレーション領域の2つ目のアクションプランは、データやAIを用いた機構・制御の統合による器用な操作・操り技術の開発である。センサで取得したデータ、AIによる学習を用いた制御や機構の技術を組み合わせることで、ロボットが多能工または高速な作業ができることを目指すことが求められる。

参考事例として取り上げた東京大学の石川研究室は高速カメラを用いたダイナミックビジョンと多指ハンドを統合した軽量高速多指ハンドシステムを開発している。また、Shadow Robot Company は、人の手に似せた精巧な機構と多種多様なセンサを組み合わせたアプローチを取っている。トヨタ自動車が発表した人共存型ロボットアームは、ワイヤード駆動機構とデータドリブンな制御を組み合わせ高いバックドライバビリティを実現している。

このような操作・操り技術によって、ものづくりでは力制御などの非位置制御を実現し、従来の位置制御では困難であったねじ締めや組立などの繊細な作業の自動化が可能になると考えられる。また、小売・飲食では多くの調理工程の自動化、物流倉庫では商品や段ボールを傷つけずに開梱や梱包などの荷姿変換の自動化が可能になると考えられる。

ロボットアクションプラン③ モビリティ (1/2)



屋外等の未知環境・動的変化環境におけるロバストな自律移動技術の開発		
技術開発アプローチ	分野へのインパクト	
<ul style="list-style-type: none"> 事前情報が無い未知環境や動的変化の生じる環境にも対応できるロボットナビゲーション技術の進化により、事前のマップ作成や更新の簡易化・不要化を目指す 	施設管理 施設レイアウトや設備・機器の設置場所の変更時のマップ更新コスト削減を実現	
	農業 ロボットトラクタや収穫ロボット等のマップ作成コスト削減を実現	
	インフラ維持管理 マップなしでも様々な現場で使用可能な点検ロボットを実現	
	建築 動的に変化する建築現場での資材運搬ロボット等の安定した自律移動を実現	
(参考) 関連事例		
Neural A* (Yonetani等、ICML2021) 機械学習ベースのA*探索アプローチにより未知環境に対しても最適な経路計画を実現 	Growing Neural Gasに基づくトポジカルマップ構築 (Toda等、IJCNN2022) 成長型ニューラルガスを用いて、未知環境下での経路計画を実施 	Direct Visual SLAM (Kudan) GN-Netの特徴量抽出とVisual SLAMを組み合わせることで、セマンティックな周辺認識を行い、動的変化に頑健な自己位置推定を実現 

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

※画像は各種Webページより引用

モビリティ領域の1つ目のアクションプランは、屋外などの未知環境・動的変化環境におけるロバストな自律移動技術の開発である。地図に関する事前情報がない未知環境や動的変化が生じる環境でも、ロボットが安定して自律走行できるアルゴリズムを開発することで、事前のマップ作成や更新の簡易化・不要化を目指すことが求められる。

参考事例として取り上げた Yonetani らは、機械学習ベースの A*探索のアルゴリズムを開発し、未知環境に対しても最適な経路計画を実現している。Toda らは、成長型ニューラルガスを用いて、未知環境下での経路計画を実現している。また、Kudan は GN-Net を用いてシーンの意味的理解を組み合わせることで、動的変化にも頑健な SLAM 技術を開発している。

このような自律移動技術により、施設管理では施設のレイアウトや設備・機器の設置場所が変更になった際に必要なマップ更新の手間を削減することができ、農業ではロボットトラクタや収穫ロボットなどを活用する際に必要なマップ作成コストの削減が可能になると考えられる。また、インフラ維持管理では事前のマップ作成が困難な現場でのロボットの活用が進み、建築でも動的に変化しやすい建築作業現場においてロボットの安定した自律移動が可能になると考えられる。

マニピュレーション制御と自律移動制御を高度に統合した モバイルマニピュレータの開発									
技術開発アプローチ	分野へのインパクト								
<ul style="list-style-type: none"> マニピュレータの動作制御とAMRの自律移動制御を統合した協調機構により、高度なモバイルマニピュレータの実現を目指す 	<table border="1"> <tr> <td>ものづくり</td> <td>工場内搬送とロード・アンロードの一体的な自動化、柔軟な製造ラインの実現</td> </tr> <tr> <td>小売・飲食</td> <td>多種多様な商品の品出し、食器の配膳・下膳の自動化を実現</td> </tr> <tr> <td>物流倉庫</td> <td>倉庫内搬送とピッキングの一体的な自動化、柔軟な倉庫オペレーションの実現</td> </tr> <tr> <td>生活空間 介護</td> <td>荷物の搬送や高齢者の見回りの自動化を実現</td> </tr> </table>	ものづくり	工場内搬送とロード・アンロードの一体的な自動化、柔軟な製造ラインの実現	小売・飲食	多種多様な商品の品出し、食器の配膳・下膳の自動化を実現	物流倉庫	倉庫内搬送とピッキングの一体的な自動化、柔軟な倉庫オペレーションの実現	生活空間 介護	荷物の搬送や高齢者の見回りの自動化を実現
	ものづくり	工場内搬送とロード・アンロードの一体的な自動化、柔軟な製造ラインの実現							
	小売・飲食	多種多様な商品の品出し、食器の配膳・下膳の自動化を実現							
	物流倉庫	倉庫内搬送とピッキングの一体的な自動化、柔軟な倉庫オペレーションの実現							
生活空間 介護	荷物の搬送や高齢者の見回りの自動化を実現								
(参考) 関連事例									
ロボット統合コントローラ (オムロン) 協働ロボットアームとAMRを一元管理 	モバイルマニピュレータSK01 (Preferred Networks) マニピュレーションと自律移動の制御を一体的に実施 								

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

※画像は各種Webページより引用

モビリティ領域の2つ目のアクションプランは、マニピュレーション制御と自律移動制御を高度に統合したモバイルマニピュレータの開発である。現状は、マニピュレータと自律移動ロボットが独立した制御となっているため、モバイルマニピュレータが性能を十分に発揮できていないこともある。そのため、マニピュレータと自律移動の制御や機構を高度に統合したモバイルマニピュレータを開発することを目指すことが求められる。

参考事例として取り上げたオムロンのロボット統合コントローラは協働ロボットとAMRを統合管理・制御することができる。また、Preferred Networksはマニピュレーションと自律移動の制御を一体的に行う新しいモバイルマニピュレータSK01を発表している。

このようなモバイルマニピュレータによって、ものづくりでは工場内搬送とロード・アンロード作業を一体的に自動化することができ、柔軟な製造ラインを実現できると考えられる。物流倉庫でも、倉庫内搬送とピッキングの作業を一体的に自動化することにより、柔軟な倉庫オペレーションが可能になると考えられる。また、小売・飲食では、多種多様な商品の品出しや食器の配膳下膳の自動化が進み、生活空間・介護では荷物の搬送や高齢者の見回りの自動化が可能になると考えられる。

ロボットアクションプラン⑤ インタラクション (1/2)



人とロボットが共進化するヒューマンインザループにより、高度に連携協調する技術開発		
技術開発アプローチ	分野へのインパクト	
<ul style="list-style-type: none"> 自律制御と人の介在を高度に組み合わせた機械学習によるロボットの自律化・高度化、および人との円滑な連携や行動変化を促すための認識・制御・UI等のインタラクション技術進化により、人とロボットの連携協調の高度化を目指す 	ものづくり 熟練者による遠隔操作によりロボット作業の品質向上を実現	
	小売・飲食 人による柔軟な判断・対応が求められる店舗内業務の省力化・高速化や柔軟な運営を実現	
	物流倉庫 人による柔軟な判断・対応が求められる倉庫内作業の現場の省力化・高速化や柔軟な運営を実現	
(参考) 関連事例		
<p>Yonder (Plus One Robotics)</p> <p>ロボット自律制御と遠隔制御の最適な組み合わせを実現</p> 	<p>Successor (川崎重工業)</p> <p>熟練者による遠隔操作のデータを学習し、熟練者スキルをロボットが再現。作業評価によりスキルを人に伝承</p> 	<p>人とロボットの協働によるねじ締め (Suita, RSJ2022)</p> <p>人と機械が共存・協働するモノづくり現場イメージ</p> 

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

※画像は各種 Web ページより引用

インタラクション領域の1つ目のアクションプランは、人とロボットが共進化するヒューマンインザループにより高度に連携・協調する技術開発である。遠隔制御などの人の介在とロボットの自律制御を高度に組み合わせ、機械学習によりロボットが自律化、高度化することを目指すことが求められる。また、人との円滑な連携や行動変容を促すための認識、制御、UI（ユーザーインターフェース）などのインタラクション技術を進化させることで、人とロボットの連携・協調の高度化も求められる。

参考事例として取り上げた Plus One Robotics の Yonder は、ロボットの作業信頼性に応じてロボットの自律制御と人の遠隔制御を効率的に切り替えることを実現している。川崎重工業は、遠隔操縦データを用いた AI 学習により熟練技術者の動きをロボットで再現する Successor を開発している。また、Suita は人とロボットの高度な協働である「合業」の概念に着目し、人がワイヤーハーネスをかき分け、ロボットがねじ締めをおこなうユースケースを取り上げて評価している。

このような人とロボットの連携・協調技術によって、ものづくりでは熟練者による遠隔操作でロボットの作業品質の向上が可能になると考えられる。また、小売・飲食や物流倉庫で

は、人の柔軟な判断や対応が求められる現場作業の省力化や高速化を実現し、柔軟な業務運営に寄与すると考えられる。

ロボットアクションプラン⑥ インタラクション (2/2)



人理解・人への介入技術を統合したアプローチに基づく、 人の身体/心理機能の改善に資する技術の開発		
技術開発アプローチ	分野へのインパクト	
<ul style="list-style-type: none"> バイタルセンシングなどの人理解技術や人への介入技術の統合により、人の身体/心理機能の改善に資するヒューマンマシンインタラクションシステムの構築を目指す 	生活空間 介護	超高齢社会における世代を超えた人々の自立度・自由度を高め、生活（職場を含む）における諸問題を解決（人々の可処分時間の延伸、労働人口減少対策、QoL/ADLの改善、高齢者・障がい者のwell-being、災害時避難、等）
(参考) 関連事例		
Hybrid Assistive Limb (CYBERDYNE) 人の運動意思を生体電位信号から取得し、それに従った動作を支援することで、身体機能の改善、補助、拡張、再生を実施		LOVOT (GROOVE X) 周辺環境や人の動き、音声などを取得し、人との関係性に応じたコミュニケーションを実施

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

※画像は各種Webページより引用

インタラクション領域の2つ目のアクションプランは、人理解・人への介入技術を統合したアプローチに基づく人の身体・理機能の改善に資する技術の開発である。バイタルセンシングなどの人理解技術や人への介入技術を組み合わせることにより、人の身体・心理機能の改善に寄与するHMIシステムの構築を目指すことが求められる。

参考事例として取り上げたCYBERDYNEのHALは、人の生体電位信号から運動意思を推定し、それに応じて動作を支援することで、身体機能の改善、補助、拡張、再生に貢献する。GROOVE XのLOVOTは、周辺環境、人の動きや音声を認識し、人との関係性に応じたコミュニケーションをとることで人に癒しを提供する。

このようなHMI技術によって、生活空間や介護では人の自律度や自由度を高め、ウェルビーイングに貢献すると考えられる。なお、本アクションプランは、SIP第3期課題候補「人協調型ロボティクスの拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」にて検討が進められている。

ロボットアクションプラン⑦
デジタル基盤・知能化



人・物・ロボットの情報を統合したデジタルツイン・CPSのリアルタイムな構築・適用技術の開発		
技術開発アプローチ	分野へのインパクト	
<ul style="list-style-type: none"> 現場環境のデータ、人の作業や行動など、多次元の情報を高精度に統合し、セキュリティの強固なデジタルツインを構築することで、再現精度の高いシミュレーションやシミュレーション結果の現場へのリアルタイムなフィードバックの実現を目指す 	ものづくり	生産工程全体における導入前のシミュレーション、導入後改善の高精度化
	施設管理	ビル設備連携も踏まえた導入前のシミュレーション、導入後改善の高精度化
	物流倉庫	ITシステム連携も踏まえた導入前のシミュレーション、導入後改善の高精度化
	建築	BIM・CIMとの連携により、導入前のシミュレーション、導入後改善の高精度化
(参考) 関連事例		
i-Con Walker (イクシス)	Omniverse (NVIDIA)	Tecnomatix (Siemens)
自動巡回ロボットが現場環境から取得した情報をBIM/CIMに反映 	モーションキャプチャで取得した従業員の動きを統合したシミュレーションを実施 	バーチャルヒューマンを用いたシミュレーションにより作業環境の改善を実施 

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

※画像は各種Webページより引用

デジタル基盤・知能化領域のアクションプランは、人・物・ロボットの情報を統合したデジタルツイン・CPSのリアルタイムな構築・適用技術の開発である。現場環境のデータ、人の作業や行動に関するデータなどの多次元情報を統合することで現場を高精度に再現したデジタルツインの構築を目指すことが求められる。また、シミュレーション結果をロボット制御にリアルタイムに反映した現場へのフィードバックの実現も求められる。

参考事例として取り上げたイクシスの i-Con Walker は、自動巡回ロボットが現場で取得した情報を BIM・CIM に反映し、更新された情報を活用してロボットが動作することを実現している。NVIDIA が開発した Omniverse は、現場環境や取り扱う製品の 3 次元情報、現場の撮像情報に加え、モーションキャプチャで取得した作業者の動きをバーチャルヒューマンとして統合することで高精度なシミュレーションを実現している。Siemens の Tecnomatix も、従業員の情報をバーチャルヒューマンとしてデジタルツインに反映することで高精度なシミュレーションを行う。

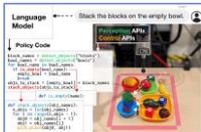
このようなデジタルツイン構築・活用によって、ものづくりでは、生産工程全体での高精度なロボット導入前のシミュレーションや導入後の改善が進むと考えられる。また、施設管理でのビル設備との連携も踏まえたシミュレーションや物流倉庫での上位の IT システムと

の連携を踏まえたシミュレーションが可能となり、より効率的なロボット活用が実現すると考えられる。加えて、建築でも BIM・CIM との連携を踏まえたシミュレーションが可能となり、ロボット活用が進むと考えられる。

インテグレーション

ロボットアクションプラン⑧ インテグレーション(1/2)



SIのコストとハードルを下げるための新たなティーチング手法や、 ティーチング・コーディングの容易化技術の開発							
技術開発アプローチ	分野へのインパクト						
<ul style="list-style-type: none"> ・ ヒューマンインターフェース技術を取り込んだ新たなティーチング手法の確立、現場でのノイズ・ばらつきに応じたティーチングの自動補正、過去の動作設計の再利用等により、ティーチング・コーディングの容易化・不要化を目指す 	<table border="1"> <tr> <td>ものづくり</td> <td rowspan="2">従来のSIerに加え、現場作業員も手軽にSIができるロボットを実現</td> </tr> <tr> <td>食品製造</td> </tr> <tr> <td>農業</td> <td rowspan="2">ロボットに不慣れな現場作業員でも手軽に使用できるロボットを実現</td> </tr> <tr> <td>建築</td> </tr> </table>	ものづくり	従来のSIerに加え、現場作業員も手軽にSIができるロボットを実現	食品製造	農業	ロボットに不慣れな現場作業員でも手軽に使用できるロボットを実現	建築
	ものづくり	従来のSIerに加え、現場作業員も手軽にSIができるロボットを実現					
	食品製造						
	農業	ロボットに不慣れな現場作業員でも手軽に使用できるロボットを実現					
建築							
(参考) 関連事例							
Code as Policies (Google Research) 人間の曖昧な指示からロボットのコーディング作業を自動化 	L-ROBOT (リンクウイズ) 自動生成対象物の微細な形の違いに合わせてティーチングデータを自動補正 						

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

※画像は各種Webページより引用

インテグレーション領域の1つ目のアクションプランは、SIのコストとハードルを下げるための新たなティーチング手法やティーチング・コーディングの容易化技術の開発である。ヒューマンインターフェース技術を取り込むことで専門スキルが無くても直感的に動作設定できる新たなティーチング手法や現場でのノイズやばらつきに応じた動作設定の自動補正、過去の動作設計の再利用によって、ティーチング・コーディングを容易化、不要化を目指すことが求められる。

参考事例として取り上げた Google Research が発表した Code as Policies は、人間の曖昧な自然言語の指示を基に自動でコーディングをすることができる。リンクウイズが開発した L-ROBOT は、加工対象物のばらつきを認識し、それに合わせて動作設定データの自動補正を行う。

このようなティーチングに関する技術によって、ものづくりや食品製造では、従来のSIerだけでなく、現場作業員でもシステムインテグレーションが可能になると考えられる。また、農業や建築では、ロボットに不慣れな現場作業員でも手軽にロボットを使いこなすことができるようになると考えられる。

ロボットアクションプラン⑨ インテグレーション(2/2)



人と空間・情報を共有し、安全性と生産性を高度に両立する ロボットシステムの開発		
技術開発アプローチ	分野へのインパクト	
<ul style="list-style-type: none"> 人の検知や行動予測のためのAI技術と柔軟なロボット動作制御・経路計画技術を統合することで、周辺環境に応じてロボットが速度調整・回避を行うロボットシステムを目指す 高い位置決め精度を維持しつつ、柔軟、軽量、頑強な新しい素材・機構の進化により、衝突影響が小さいロボットを目指す 	ものづくり	製造ラインでの人共存環境化においても安全性を担保しつつ、なるべく減速や停止をすることなく高速な作業を実現
	食品製造	惣菜の盛付等での人共存環境化においても安全性を担保しつつ、なるべく減速や停止をすることなく高速な作業を実現
	小売・飲食	品出しや調理等での人共存環境下でも安全性を担保しつつ、なるべく減速や停止をすることなく高速な作業を実現
(参考) 関連事例		
ロボット衝突回避システム (Realtime Robotics) 人を検知し、衝突を避ける経路計画をリアルタイムで実施 	COBOTTA PRO (デンソーウェーブ) 超軽量・高剛性・高精度のトルクセンサ内蔵モジュールと軽量・高剛性を両立するアーム設計の統合 	空気圧駆動協働ロボット (Festo) 圧電素子で造られた弁を搭載した空気圧駆動により、高精度なかつなめらかな位置制御を実現 

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

※画像は各種Webページより引用

インテグレーション領域の2つ目のアクションプランは、人と空間・情報を共有し、安全性と生産性を高度に両立するロボットシステムの開発である。そのための技術開発アプローチは2つある。

1つ目は人の検知・行動予測のためのAI技術、柔軟なロボット動作制御技術を組み合わせるアプローチである。人や周辺環境の情報を活用しロボットが速度調整や衝突回避をおこなうことで、安全性と生産性を両立する技術開発である。参考事例として取り上げたRealtime Roboticsのロボット衝突回避システムは、検知された周囲の人との衝突を回避する動作計画をリアルタイムに生成し、ロボットの動作に反映させることができる。

2つ目のアプローチは、柔軟、軽量、頑強な新しい素材、機構などの要素技術の進化により、高い位置決め精度を維持しつつ衝突影響の小さいロボットの開発である。参考事例のデンソーウェーブのCOBOTTA PROは高精度なトルクセンサを内蔵したモジュールと軽量かつ高剛性を両立するアーム設計を統合している。Festoが発表した空気圧駆動の協働ロボットは圧電素子を搭載することで、高精度かつ滑らかな動作を可能にしている。

このようなロボットシステムによって、ものづくりでの製造ライン、食品製造での惣菜盛付工程、小売・飲食での品出しや調理作業などの人とロボットが共存する環境下においても、ロボットの安全性を担保しながら、高速に動作できるようになると考えられる。

第5部：まとめ（概要）

ロボットアクションプランは、社会課題解決に向け、ロボット活用を推進するための大局的な方向性を提起するものである。労働人口の減少下での GDP の維持・拡大、地球環境負荷の極小化、経済的・社会的インフラのレジリエンス向上は、我が国の喫緊の社会課題となっており、ロボットの活用を通じたより一層の生産性の向上、新たな産業創出への期待は大きい。

我が国では、2015 年度に「ロボット新戦略」を策定し、これまで官民連携による技術開発プロジェクトを複数実施してきた。その間、ロボット自体やそれを支える個々の技術は進化してきているものの、ロボット導入現場のニーズとの間に未だギャップがある。ロボットはシステム技術であり、特定のニーズ・課題解決のために技術要素を組み合わせ、環境整備・運用設計と共にインテグレーションしていく必要がある。こうした背景を踏まえ、出口志向でのロボットシステム全体を捉えた取り組みを通じて、ロボット産業を振興していくことが求められる。また、2019 年度に「ロボット実装モデル構築推進タスクフォース」を設置し、ロボットフレンドリーな環境の実現が進められている。諸外国でも社会実装を加速しており、2035 年近傍を見据えた技術開発、環境整備の両輪が一体となった中長期的なアクションプランの策定の必要性が高まっている。

ロボットアクションプランを策定するにあたり、委員会で各分野の課題やニーズを重視し、2035 年までの市場性、社会的インパクト、ロボット活用素地の有無、官民連携の必要性などを考慮して、アクションプランの対象分野を導いた。その結果、ものづくり、施設管理、小売・飲食、物流倉庫、農業、インフラ維持管理、建築を深掘り対象として取り上げた。各分野のあるべき姿実現のために今後求められる取り組みを、ニーズを起点とした「社会実装加速に向けたアクションプラン」、中長期でのインパクト創出を見据えた「次世代技術基盤構築に向けたアクションプラン」として抽出した。

前者では、各分野のニーズに沿った取り組みを技術開発と環境整備の両面から社会実装を加速するために求められる施策を導いた。技術開発を「マニピュレーション」「モビリティ」「インタラクション」「デジタル基盤・知能化」「インテグレーション」という5つの領域で、環境整備を「物理環境の整備」「業務設計・運用設計」「SIer・人材・ベンダー育成」「新サービス創出・ビジネスモデル形成」「啓発・規制対応」という5つの領域で整理した。

後者では、分野への将来的なインパクトを見据えた 2035 年を見据えた中長期での先進的な技術開発により、インテグレーションのための新たな選択肢を創出するための技術開発の方向性を同じく 5 つの領域で整理し、9 つのアクションプランを示した。

参考資料

本調査で参考とした資料、政策、プロジェクト、文献、Web ページ等は以下のとおりである。なお、本調査では「欧米、アジア等におけるロボット導入の現状、導入ニーズ、研究開発状況等に係る調査」を参照しており、当該調査における参考資料についてはそちらの報告書に記載する。

- 「ロボット新戦略」（日本経済再生本部、2015 年）
- 「ロボット実装モデル構築推進タスクフォース」（NEDO、2020 年）
- 「「選択する未来」委員会報告 解説・資料集」（内閣府、2015 年）
- 「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（経済産業省、2020 年）
- 「所管分野における社会資本の将来の維持管理・更新費の推計」（国土交通省、2018 年）
- 「我が国の物流を取り巻く現状と取組状況」（2022 年、経済産業省・国土交通省・農林水産省）
- 「2020 年農林業センサス」（農林水産省、2020 年）
- 「工業統計調査」（経済産業省）
- 「World Robotics Service Robots」（国際ロボット連盟、2021 年版、2022 年版）
- 「World Robotics Industrial Robots」（国際ロボット連盟、2021 年版、2022 年版）
- 「第 3 期戦略的イノベーション創造プログラム課題候補「人協調型ロボティクスの拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」」（内閣府）
- 「次世代人工知能・ロボット中核技術開発」（NEDO）
- 「次世代人工知能・ロボットの中核となるインテグレート技術開発」（NEDO）
- 「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」（NEDO）
- ImPACT「重介護ゼロ社会を実現する革新的サイバニックシステム」（内閣府、科学技術振興機構）
- ImPACT「タフ・ロボティクス・チャレンジ」（内閣府、科学技術振興機構）
- SIP 第 1 期「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（内閣府、科学技術振興機構）
- SIP 第 1 期「次世代海洋資源調査技術」（内閣府、海洋研究開発機構）
- SIP 第 1 期「次世代農林水産業創造技術」（内閣府、農研機構）

- SIP 第 2 期「ビッグデータ・AI を活用したサイバー空間基盤技術」（内閣府、NEDO）
- SIP 第 2 期「フィジカル空間デジタルデータ処理基盤技術」（内閣府、NEDO、東北大学）
- SIP 第 2 期「スマートバイオ産業・農業基盤技術」（内閣府、NEDO、農研機構）
- SIP 第 2 期「革新的深海資源調査技術」（内閣府、海洋研究開発機構）
- ムーンショット目標 1「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」（内閣府、科学技術振興機構）
- ムーンショット目標 3「2050 年までに、AI とロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」（内閣府、科学技術振興機構）
- 「ロボット介護機器開発・導入促進事業」（経済産業省、AMED）
- 「ロボット介護機器開発・標準化事業」（AMED）
- 「ロボット介護機器開発等推進事業」（AMED）
- 「革新的技術開発・緊急展開事業」（農林水産省）
- 「スマート農業実証プロジェクト」（農林水産省）
- 「自動走行ロボットを活用した新たな配送サービス実現に向けた技術開発事業」（NEDO）
- 「革新的ロボット研究開発等基盤構築事業」（経済産業省、NEDO）
- 「石黒共生ヒューマンロボットインタラクションプロジェクト」（文部科学省、学技術振興機構）
- 「ガーディアンロボットプロジェクト」（文部科学省、理化学研究所）
- 「ロボット活用型市場化適用技術開発プロジェクト」（NEDO）
- 「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト」（NEDO）
- 「月面等での建設活動に資する無人建設革新技術開発推進プロジェクト」（国土交通省）
- 「エネルギー・産業基盤災害対応のための消防ロボットの研究開発」（総務省）
- 「自律型モビリティシステム（自動走行技術、自動制御技術等）の開発・実証」（総務省）
- 「医工連携イノベーション推進事業（開発・事業化事業）」（AMED）
- 「未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業」（NEDO、AMED）
- 「消防防災科学技術研究推進制度」（総務省）
- 「タフロボティクス×タフ IoT プロジェクト」（総務省）
- 第 40 回日本ロボット学会学術講演会（RSJ 2022）投稿論文

- ロボットフレンドリー施設推進機構 (<https://robot-friendly.org/>)
- Universal Robots (<https://www.universal-robots.com/ja/>)
- Pudu Robotics (<https://www.pudurobotics.com/jp>)
- Boston Dynamics (<https://www.bostondynamics.com/>)
- Berkshire Grey (<https://www.berkshiregrey.com/>)
- Keenon Robotics (<https://www.keenonrobot.com/jp/>)
- Agile Robots (<https://www.agile-robots.com/>)
- Amazon Style (<https://www.amazon.com/b?ie=UTF8&node=23676409011>)
- 近接覚センサー TK-01 (Thinker) (<https://www.thinker-robotics.co.jp/>)
- Dex-Net (GitHub、Ambidextrous Laboratories)
(<https://berkeleyautomation.github.io/dex-net/>)
- ABC-Core (モーションリブ) (<https://www.motionlib.com/product/abc-core/>)
- BarretHand (Barret Technology) (<https://advanced.barrett.com/barretthand>)
- Shadow Dexterous Hand (Shadow Robot Company)
(<https://www.shadowrobot.com/dexterous-hand-series/>)
- mGrip (Soft Robotics) (<https://www.softroboticsinc.com/products/mgrip-modular-gripping-solution-for-food-automation/>)
- Right Pick インテリジェントグリッパー (Righthand Robotics)
(<https://righthandrobotics.com/jp/about-us>)
- KUKA. NavigationSolution (KUKA) (<https://www.kuka.com/ja-jp/kmr-iiwa>)
- UR3e/UR5e/UR10e/UR16e (Universal Robots) (<https://www.universal-robots.com/ja/%E8%A3%BD%E5%93%81%E3%83%A9%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%8A%E3%83%83%E3%83%97/>)
- SK01 (Preferred Networks) (<https://tech.preferred.jp/ja/blog/mobile-manipulator-sk01/>)
- LMR、iWMS-1000、RCS2000 (Hikrobot)
(<https://www.hikrobotics.com/en/mobilerobot/solution/detail?id=4>)
- Enterprise Manager (オムロン)
(<https://www.fa.omron.co.jp/product/robotics/lineup/mobile/video/promotion01/>)
- T-HR3 (トヨタ自動車) (<https://global.toyota.jp/detail/19666327>)
- Remolink (リモートロボティクス) (<https://www.remoterobotics.net/service/>)
- NEC マルチロボットコントローラ (日本電気)
(<https://jpn.nec.com/iot/platform/iort/index.html>)

- MODEL H (トレイグジスタンス) (<https://tx-inc.com/ja/blog/2018/05/29/178/>)
- Successor (川崎重工業) (<https://www.khi.co.jp/rd/technologies/robot/robota.html>)
- OKAO Vision (オムロン) (<https://plus-sensing.omron.co.jp/technology/index.html>)
- 骨紋 (三菱電機) (<http://www.mitsubishielectric.co.jp/nwcamera/software/>)
- HAL (CYBERDYNE) (<https://www.cyberdyne.jp/products/HAL/index.html>)
- LOVOT (GROOVE X) (<https://lovot.life/>)
- MELFA-Works (三菱電機)
(<https://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/products/rbt/robot/smerit/mw/simulation.html>)
- Omniverse (NVIDIA) (<https://www.nvidia.com/ja-jp/omniverse/>)
- BIM プラットフォーム (竹中工務店)
(<https://www.takenaka.co.jp/solution/shinseisan/case01.html>)
- MindSphere (Siemens)
(<https://www.plm.automation.siemens.com/global/ja/products/mindsphere/>)
- モーションプランニング AI (Mujin) (<https://www.mujin.co.jp/about/technology/>)
- Maisart (三菱電機)
(<https://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/maisart/index.html>)
- Code as Policies (GitHub、Google Research) (<https://code-as-policies.github.io/>)
- MELFA Smart Plus (三菱電機)
(<https://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/products/rbt/robot/pmerit/smartplus.html>)
- L-ROBOT (リンクウイズ) (<https://linkwiz.co.jp/products/l-robot/>)
- crewbo studio (チトセロボティクス) (<https://studio.crewbo.io/>)
- 協調ロボット TM シリーズ (オムロン)
(<https://www.fa.omron.co.jp/products/family/3739/>)
- ロボット衝突回避システム (Realtime Robotics) (<https://rtr.ai/>)
- COBOTTA PRO (デンソーウェーブ) (<https://www.denso-wave.com/ja/robot/ex/cobottapro.html>)
- Beans2 (日本電産シンポ、三井化学、豆蔵)
(https://jp.mitsuichemicals.com/jp/release/2021/2021_0112.htm)
- 空気圧式協働ロボット (Festo) (https://www.festo.com/jp/ja/e/festonituite/yan-jiu-kai-fa/festonoxie-dong-robotuto-id_1379474/)

- 人共存型ロボットアーム（トヨタ自動車）（<https://global.toyota.jp/mobility/frontier-research/38445721.html>）
- Direct Visual SLAM（Kudan）（<https://www.kudan.io/jp/archives/495>）
- ロボット統合コントローラ（オムロン）
（<https://www.fa.omron.co.jp/product/robotics/lineup/integratedcontroller/>）
- Yonder（Plus One Robotics）（<https://www.plusonerobotics.com/products/yonder>）
- i-Con Walker（イクシス）（<https://www.ixs.co.jp/product/2509>）
- Tecnomatix（Siemens）（<https://plm.sw.siemens.com/ja-JP/tecnomatix/>）
- 「You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection」（Joseph 等、2016 年）
（<https://arxiv.org/pdf/1506.02640.pdf>）
- 「Combining Finger Vision and Optical Tactile Sensing: Reducing and Handling Errors While Cutting Vegetables」（Yamaguchi & Atkeson、2016 年）
（<http://www.cs.cmu.edu/~cga/papers/fingervision.pdf>）
- 「Learning Hand-Eye Coordination for Robotic Grasping with Deep Learning and Large-Scale Data Collection」（Levine 等、2016 年）
（<https://arxiv.org/abs/1603.02199>）
- 「GN-Net: The Gauss-Newton Loss for Multi-Weather Relocalization」（Lukas 等、2019 年）
（<https://arxiv.org/pdf/1904.11932.pdf>）
- 「Path Planning using Neural A* Search」（Yonetani 等、2021 年）
（<https://icml.cc/virtual/2021/spotlight/9056>）
- 「Intuitive and Efficient Human-robot Collaboration via Real-time Approximate Bayesian Inference」（Javier 等、2022 年）（<https://arxiv.org/abs/2205.08657>）
- 「Growing Neural Gas with Different Topologies for 3D Space Perception」（Toda 等、2022 年）（<https://doi.org/10.3390/app12031705>）
- 「革新的ロボット研究開発基盤構築事業」事業原簿（NEDO、2022 年）
（<https://www.nedo.go.jp/content/100952078.pdf>）
- 「ヒトの運動を支援するロボットー動作意図推定に基づく装着型アシストロボット制御を実現ー」（理化学研究所心理プロセス研究チーム、2022 年）
（https://www.riken.jp/press/2022/20220215_2/index.html#researchers）
- 「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期／フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」（NEDO）（https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP2_100124.html）
- 軽量高速多指ハンドシステム（東京大学石川研究室）（<http://ishikawa-vision.org/fusion/HighspeedHand/index-j.html>）

- 「モノづくり分野における人を中心としたロボットとの協働・協調化と合業への期待」
(Suita、RSJ2022、2022年)
- 「人と機械が安全に協働する未来に向けて～安全性評価用ツール「指ダミー」」 (パナソニックホールディングス、2021年) (<https://news.panasonic.com/jp/stories/571>)
- 「Telexistence 社新型ロボット『TX SCARA』をファミリーマート経済産業省店に導入～バックヤードにおける飲料陳列業務を独自 AI システムで自動化～」 (ファミリーマート、2021年)
(https://www.family.co.jp/company/news_releases/2021/20211102_01.html)
- 「ビル内の混雑状況などを予測した自律的かつ効率的な「ロボットによるフードデリバリー」の実証実験開始について」 (NTT アーバンソリューションズ、NTT 都市開発、NTT コミュニケーションズ、日本電信電話、2022年) (https://www.ntt.com/about-us/press-releases/news/article/2022/1003_3.html)
- 「ダイキンが工場の「デジタルツイン」、製造ラインの停滞予測しロス 3 割強減へ」
(日経クロステック、2022年)
(<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01970/030200002/>)