

国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau
National Diet Library

論題 Title	第3章 AIロボット開発の現状
他言語論題 Title in other language	Chapter 3 The Current State of AI Robot Development
著者 / 所属 Author(s)	湯口 彰重 (YUGUCHI Akishige) / 東京理科大学先進工学部助教、橋本 卓弥 (HASHIMOTO Takuya) / 東京理科大学工学部准教授、松本 吉央 (MATSUMOTO Yoshio) / 東京理科大学先進工学部教授
書名 Title of Book	AI時代のロボティクス 科学技術に関する調査プロジェクト報告書
シリーズ Series	調査資料 2025-6 (Research Materials 2025-6)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2026-3-17
ページ Pages	27-51
ISBN	978-4-87582-954-6
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	AI時代におけるロボット開発の現況を、産業用ロボット、自律移動ロボット、サービスロボット及びヒューマノイドロボットの応用分野ごとに整理する。

* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰（めいせき）性等の観点からの審査を経たものです。

* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。

第3章 AI ロボット開発の現状

【要 旨】

本章は、AI時代におけるロボット開発の現況を、応用分野ごとに整理する。

まず産業用ロボットでは、IoT、CPS、AI分析、デジタルツイン等を用いた「スマート工場」が進展している。人と同一空間で作業する協働ロボットは、安全機能と扱いやすい操作体系を特徴とし、人手不足への対応、多品種少量生産への移行等、産業構造の変化を背景に、中小規模の製造現場や多工程を抱える生産ラインにおいて導入が現実的な選択肢となりつつある。

自律移動ロボットでは、自動運転車、ドローン、倉庫物流ロボットが実運用を拡大している。自動運転は国内では自動化レベル分類のうちのレベル3（条件付き運転自動化）からレベル4（高度運転自動化）相当の実証が進む。ドローンはインフラ点検・設備検査、農業、災害対応・救助、物流・配送等に展開している。物流倉庫ではAGV/AMR、棚搬送・ピッキングの事例が普及し、省人化に寄与している。

サービスロボットは、介護・医療・接客・家庭用途で開発が進んでいる。介護では見守りセンサを含む介護ロボットの導入が進む一方、高齢者の状態計測・推定や、変化の予測・危険の防止等に活用できるAIの重要性が高くなっている。医療では手術支援ロボットが最も市場が大きく、国産の手術ロボットも登場している。接客では特にレストランでの配膳ロボットの導入が進んでいる。また生成AIを利用した対話ロボットの開発も進んでいる。家庭用途では掃除機を中心に、窓拭き・芝刈り、セラピー用途が展開している。

ヒューマノイドロボットは、多くの自由度による高い潜在能力は持っているものの、制御の困難さ、信頼性・安全性、コストなど課題は多い。設計簡素化やシミュレーション活用が求められる。近年は中国やアメリカにおいてヒューマノイド開発に勢いがあるが、PoCの枠を出てはならず、実際に各分野に普及するかは不透明である。

はじめに

図1は内閣府の「AI法」に関するウェブサイトのイラストであるが、その中にはドローン、倉庫物流、ヒューマノイドなど様々なロボットが描かれている。このことから、AIを社会の中で活用するには、その身体となるロボットが必要不可欠であるということが分かる。本章では、AI時代におけるロボット開発の現況を、産業用ロボット、自律移動ロボット、サービスロボット、ヒューマノイドロボットの4分野に分けて応用分野ごとに整理する。

* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は2026（令和8）年2月18日である。

図1 AIを搭載したロボットの利活用分野



(出典)「AI法 全面施行 一次なるフェーズへ」2025.10.3. 内閣府ウェブサイト <https://www.cao.go.jp/press/new_wave/20251003.html> の図を一部加工。

I 産業用ロボット（スマートマニファクチャリング、協働ロボット）

産業用ロボットは製造業の自動化を象徴する存在であり、1970年代以降、自動車産業を中心に工場現場へ本格的に導入されてきた⁽¹⁾。従来は塙（フェンス）に囲まれ、人と離れた空間で同じ動作を繰り返す形態が主であった。しかし近年では、センサやネットワーク、AIの進展により、リアルタイムでデータを収集・分析し、生産ラインを柔軟かつ最適に制御する「スマートマニファクチャリング（スマート工場）」への移行が世界的に進んでいる。さらに、人と同じ空間で安全に協働できる「協働ロボット（Cobot）」も登場し、従来の“囲われたロボット”から“開かれたロボット”へのパラダイムシフトが起きつつある⁽²⁾。こうした技術革新は、少子高齢化による労働力不足や生産性向上の課題に対する解決策としても注目されている。本節では、産業用ロボットの定義と分類、スマートマニファクチャリングの概念と技術要素、協働ロボットの技術・安全規格・市場動向、日本の現状と国際競争、について幅広く概観する。

1 産業用ロボットの定義と分類

産業用ロボットは、工場の生産現場で人間の代わりに作業を自動化する機械装置である。その定義は国際標準化機構のISO 8373:2021 及び日本産業規格のJIS B 0134:2022 において定めら

(1) 日本ロボット学会編『ロボット工学ハンドブック 第3版』コロナ社, 2023.

(2) M. Dhanda et al., “Reviewing Human-Robot Collaboration in Manufacturing: Opportunities and Challenges in the Context of Industry 5.0,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.93: 102937, 2025. <<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102937>>

れており、「自動制御され、再プログラム可能で、多目的なマニピュレータであり、3軸以上でプログラム可能で、1か所に固定して又は移動機能をもって、産業自動化の用途に用いられるもの」とされている。この定義における「マニピュレータ」とは、産業用ロボットの腕に相当する部分であり、複数の関節（軸）を持ち、物体をつかんだり動かしたりする役割を担う。

現在の産業用ロボットは、その設置形態や運用方法によって、大きく以下の3種類に分類される。それぞれが補完し合いながら、製造現場の自動化と効率化を進める役割を担っている。

- ①据置型ロボット（例：溶接、塗装、搬送）：多くの産業用ロボットは床や架台に据え付けられて使用され、決まった作業範囲で繰り返し動作を行う。典型例としては、自動車製造ラインの溶接ロボット、塗装ロボット、搬送ロボットなどが挙げられる。これらは高精度かつ高速に動作し、生産ラインに固定設置されて24時間稼働することで生産性向上に寄与してきた。ただし、人が近づくと危険を伴うため、通常は安全柵（フェンス）で囲い、人間と物理的に隔離して運用される。
- ②移動型ロボット（例：AGV、AMR）：本体に移動機構を備え、工場内や倉庫内を移動しながら作業を行うタイプの産業用ロボットである。代表例として、あらかじめ定められた経路に沿って走行する無人搬送車（Automated Guided Vehicle: AGV）や、周囲環境を認識しながら自律的に経路を決定する自律走行ロボット（Autonomous Mobile Robot: AMR）が挙げられる。また、それらにロボットアームを搭載した移動マニピュレータは、自ら移動しながら複数の作業ステーションで作業を行うことが可能である。具体的な技術構成や応用事例については、後のIIにおいて詳述する。近年では、センサ技術や制御技術の発達により、生産条件や環境変化に適応しやすい運用上の柔軟性が向上し、多品種少量生産や変種変量生産、物流分野での活用が急速に拡大している。
- ③協働ロボット：協働ロボットとは、「安全柵を設置することなく、人間と同じ空間で共同作業ができる産業用ロボット」のことである。従来の産業用ロボットは作業者の安全確保のため、人が近づけないよう柵で囲って運用する必要があった。一方、協働ロボットは、力・トルクセンサ（力覚センサ）による衝突検知機能や非常停止システムを備え、さらにISOで定められた安全要求を満たすことで、人と同一作業空間での運用が認められている。これにより、人間と直接協力しながら組立て・検査・梱包（こんぼう）などの作業を行うことが可能となった。協働ロボットの登場により、従来は自動化が難しかった工程でも、人手とロボットそれぞれの長所を生かしたハイブリッド生産体制の構築が期待されている。

2 スマートマニファクチャリングの概念と技術要素

スマートマニファクチャリング（スマート工場）とは、製造現場におけるIoT、AI、クラウド、エッジコンピューティングなどのデジタル技術を総合的に活用し、生産性・柔軟性・自律性の飛躍的向上を図る次世代型の製造システムである。具体的には、センサやネットワークを介して工場設備から膨大なデータを収集し、クラウドやエッジ環境（エッジコンピューティングが実行される現場側の計算環境）でAI等によるリアルタイム解析を行い、生産ラインや設備の状態を常時モニタリング・最適制御する仕組みを指す。その結果、「今、どこで何が起きているか」を即座に可視化し、必要に応じて生産計画や機械の動作を自律的に調整することが可能となる。

スマートマニュファクチャリングは、ドイツが提唱した「Industry 4.0」⁽³⁾に代表されるように、急速に進展する AI・IoT・データ解析技術を活用して産業競争力を飛躍的に高めようとする世界的潮流の中で生まれた概念である。日本政府も 2016 年の第 5 期科学技術基本計画において「Society 5.0（超スマート社会）」を提唱し、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させ、経済発展と社会課題の解決を両立する人間中心の社会像を提示した⁽⁴⁾。スマートマニュファクチャリングは、正にこの Society 5.0 を製造業分野に具現化した取組と言える。スマートマニュファクチャリングを支える代表的な技術要素には次のようなものがある。

- ① IoT（モノのインターネット）：工場内の機械、ロボット、センサなどをネットワークで接続し、稼働データを収集・共有する仕組みである。IoT により、設備の稼働状況や環境データをリアルタイムに取得してクラウドに蓄積・分析できる。例えば、振動・温度・電流などを常時モニタリングし、異常の兆候を検知してメンテナンス時期を予測する予知保全が可能となる。IoT はスマート工場の「神経網」とも言える存在であり、あらゆる機器の状態を可視化（見える化）することで、生産現場の課題抽出と改善を大幅に効率化する。
- ② CPS（サイバーフィジカルシステム）：現実（フィジカル）空間での情報をセンサで収集し、仮想（サイバー）空間に送り込んで解析し、その結果を再び現実にフィードバックする統合システムである。製造分野では、生産設備や製品の状態をサイバー空間上でリアルタイムに再現し、AI 分析やシミュレーションによって最適な制御判断を下す。これにより、生産プロセスを高精度に制御し、変動や異常にも即応できる。CPS は、Society 5.0 が掲げる「サイバー空間とフィジカル空間の高度な融合」を実現するための技術的枠組みの一つとして位置づけられ、スマート工場の中核を成す概念である。
- ③ AI 分析：機械学習や深層学習を用いて、製造データから高精度な解析や判断を自動化する技術である。センサデータを AI が解析することで、設備の故障兆候検知、品質不良予測、検査工程の自動化、需要予測に基づく生産計画の最適化などが可能となる。AI の導入によって、ロボットの動作プログラミングも容易になり、従来は熟練者の経験に依存していたライン調整がデータ駆動型に移行している。このように、AI はスマートマニュファクチャリングの“頭脳”として生産システム全体の知能化を牽引している。
- ④ デジタルツイン：現実の工場や設備の「双子（ツイン）」を仮想空間上に構築し、リアルタイムデータに基づいてその挙動を再現・解析する技術である。IoT で収集した現場データを 3D モデルに反映させ、生産ライン全体を仮想的に再現することで、設計段階での検証や稼働中の最適制御が可能となる。新製品の生産プロセスを仮想空間でシミュレーションし、問題を事前に把握できるほか、現実の稼働状況に応じて制御パラメータを自動調整することもできる。デジタルツインは、CPS を具体化する技術として位置づけられ、Industry 4.0 や Society 5.0 の中核要素であり、開発期間短縮・稼働率向上・トラブル未然防止などの効果が期待されている。

以上のほかにも、クラウドコンピューティング（大規模データの集約・解析）や 5G 通信（高速・大容量・低遅延の無線ネットワーク）、マシンビジョン（画像認識による自動検品やロボット

(3) Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, “Industrie 4.0.” <<https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/EN/Dossier/industrie-40.html>>

(4) 「[第 5 期] 科学技術基本計画」（平成 28 年 1 月 22 日閣議決定）内閣府ウェブサイト <<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>>

誘導)など、多様な技術がスマートマニュファクチャリングを構成している。ポイントは、これまで分断されていた工場現場のデータと、経営・設計・計画側のデータを統合し、エンドツーエンド(全体)で最適化することであると言える。

3 協働ロボットの技術・安全規格・市場動向

(1) 協働ロボットの技術と安全性

協働ロボットは、安全柵を設けずに人と同じ作業空間に配置できるロボットであり、作業者が隣で製品のセットや検査を行う一方で、ロボットがネジ締めや部品供給などの反復作業を担うといった人とロボットの協働作業を実現する。協働ロボットが注目を集める背景には、近年のセンサ技術や制御技術の進歩がある。例えば、関節部に高感度トルクセンサ(力覚センサ)を搭載することで、人や物体との接触を即座に検知し、瞬時に動作を停止する安全機能を備えている。また、カメラや距離センサによる人の挙動モニタリングにより、作業者が近づくと自動的に減速・停止する協調制御も可能である。

このように、協働ロボットは人と直接作業することを前提に設計されており、人との親和性を高めるために以下のような特徴を有する。

- ①高度な安全機能：力覚センサによる衝突検知、モータ出力の制限、冗長化(一部が故障しても安全機能が維持されるよう、重要な機能を二重化・多重化する設計)された安全回路などを備え、人に衝撃を与えない設計となっている。国際標準であるISO/TS 15066:2016では、人とロボットが協働する際の詳細な安全要求事項が定められており、身体各部位に対する許容接触力・圧力の限界値が提示されている。各メーカはこのガイドラインに基づき、速度・力制限機能、作業空間監視、安全停止などの安全機能を実装している。
- ②人に優しい設計：ロボット本体は丸みを帯びた形状や柔軟素材のカバーで覆われ、接触時の怪我リスクを低減している。また、人間工学に基づくインターフェース設計が施されており、手でアームを直接動かして教示するダイレクトティーチングや、タブレット型の直感的操作GUI(画面上のボタンや図を見ながら操作できる画面インターフェースで、Graphical User Interfaceの略)など、非専門家でも扱いやすい操作体系を採用している。従来の産業用ロボットでは専門的な座標プログラミングが必要であったが、協働ロボットでは設定作業を大幅に簡素化し、中小企業でも導入しやすい柔軟な自動化手段となっている。
- ③柔軟な設置性：協働ロボットは小型・軽量で、安全柵や大規模設備を必要としない。標準的な家庭用電源で駆動できるモデルも多く、キャスター付き台車での可搬運用や、必要時のみ作業台に固定して使うといったモバイル型利用も可能である。重量が20kg以下のモデルもあり、人が持ち運んで別ラインに再配置することも容易である。このような柔軟な設置性と再利用性は、多品種少量生産や中小規模現場において特に有効である。
- ④低コスト化：一般に、協働ロボットの本体価格は従来の産業用ロボットよりも低廉なものが増えており、可搬重量や仕様に応じて200万～500万円程度で購入可能なモデルも多い。さらに、安全柵や大規模なインテグレーション工事を必要としないため、初期導入コストを大幅に抑えられる。加えて、ティーチング作業の簡易化により外部エンジニアへの依頼頻度が減少し、トータルでの総導入コストの低減にもつながっている。このようなコスト面でのハードル低下も、協働ロボット普及の大きな要因となっている。

これらの技術的特徴に加えて、協働ロボットの現場導入と普及を支えているのが、安全規格

及び制度的枠組みの整備である。協働ロボットの安全規格として最も重要なのが ISO/TS 15066:2016 である。本規格は、従来の ISO 10218-1/-2:2011（産業用ロボットの安全要求）を補完する形で策定されており、人とロボットが同一空間で作業する「協働運転」を想定し、その安全確保に関する詳細な要求事項を規定している。本規格では、協働作業の形態を以下の4つに分類し、それぞれに対応した安全方策を示している。

- ・安全監視停止：人が作業空間に入るとロボットが自動停止する方式
- ・手動による導引：作業者がロボットを直接操作して教示を行う方式
- ・速度・距離監視：人との距離に応じてロボットの速度を制御する方式
- ・力・速度制限：人体に危険を与えない範囲に力・速度を制限する方式

特に力・速度制限では、身体各部位ごとに許容される接触力・圧力の上限值が定められており、ロボットはこれらの閾（しきい）値以下となるよう制御パラメータを設定することが求められる。

2025年の改訂により、ISO/TS 15066の主要な内容はISO 10218に統合されており、日本では現時点で正式なJIS規格化には至っていないものの、業界における事実上のガイドラインとして広く参照されている。加えて、労働安全衛生規則（昭和47年労働省令第32号）も2013年に改正され、リスクアセスメントの実施や安全機能の適切な設定など一定の要件を満たす場合には、安全柵なしでの協働ロボット運用が認められている。

(2) 市場動向

第2章で述べたように、産業用ロボットは既に世界的に普及段階に入り、製造現場の基盤技術として定着している。こうした中、近年のロボット市場の特徴は、単なる設置台数の増加よりも、ロボットの「使われ方」や「役割」の変化にある。

従来の産業用ロボットは、安全柵内で人から隔離された自動化設備として用いられることが一般的であったが、人手不足への対応、多品種少量生産への移行、現場の柔軟性向上といった産業構造の変化を背景に、人と同一空間で協働する協働ロボットへの関心が急速に高まっている。特に、導入コストの低下、設置・再配置の容易さ、安全規格や制度的枠組みの整備といった要因が重なり、中小規模の製造現場や多工程を抱える生産ラインにおいても協働ロボットの導入が現実的な選択肢となりつつある。

このように、ロボット市場は量的拡大の段階から、用途や役割の多様化を伴う質的転換の段階へと移行しており、協働ロボットはその象徴的な存在として位置付けられる。

4 日本の現状と国際競争

(1) ロボット生産大国・日本の現状

日本は長年にわたり産業用ロボット技術で世界をリードしてきた。2020年時点では、世界の産業用ロボット出荷量の約45%を日本メーカーが占めており、その年に出荷された約14万台のうち約8割が海外向けであった⁽⁵⁾。このことから、日本は「世界のロボット工場」として国際市場を支える存在であったことが分かる。一方で、最新のInternational Federation of Robotics

(5) International Federation of Robotics (IFR), "Japan Is World's Number One Robot Maker." <<https://ifr.org/news/japan-is-worlds-number-one-robot-maker/>>

(IFR)の報告書⁽⁶⁾によれば、2024年に日本で新たに設置された産業用ロボットは約44,500台(前年比マイナス4%)で、依然として世界第2位の市場規模を維持しているものの、中国や欧米諸国の台頭によりその相対的な地位は低下しつつある。また、2023年時点で製造業従業員1万人当たりのロボット台数は419台であり、世界第5位となっている⁽⁷⁾。こうした状況を踏まえ、日本では内閣府が「統合イノベーション戦略」⁽⁸⁾においてAIやロボットをSociety 5.0を支える基盤技術として明確に位置付け、研究開発から社会実装までを俯瞰(ふかん)した国家的方向性を示している。これを受けて経済産業省は、近年、AIの進展を背景に、知能化・多用途化を志向するAIロボティクスへの転換を重要な政策課題として位置付けている⁽⁹⁾。また、科学技術振興機構(JST)は、CREST⁽¹⁰⁾やムーンショット型研究開発事業⁽¹¹⁾のプログラムを通じて、AIロボットや人間とロボットとの協調に関する基礎的・挑戦的研究を支援している。基礎研究から社会実装に至る段階的な支援体制が構築されている一方、日本は高品質なハードウェア技術に強みを持つものの、ソフトウェアやAI、データ連携を核としたビジネスモデル創出では欧米に後れを取っていると指摘も多い。今後は、従来のハードウェア競争力を基盤としつつ、AI・IoT・クラウドと統合したスマートロボット化や、自律移動ロボットを含むサービス分野への展開が、日本のロボット産業の国際競争力を左右する重要な要素となる。

(2) 中国の台頭

中国は世界最大の製造国として、産業用ロボットの導入数で他国を大きく上回っている(製造業従業員1万人当たりのロボット台数は470台で、世界第3位⁽¹²⁾)。その背景には、政府主導による体系的な産業戦略がある。中国政府は、「第14次五か年計画(2021-2025年)」の一環として「ロボット産業発展計画(2021-2025年)」⁽¹³⁾を発表し、2025年までに中国をロボット技術革新・ハイエンド製造・応用の世界的な中心拠点とすることを目標に掲げた⁽¹⁴⁾。この計画では、高精度制御、知能ロボット、主要部品(アクチュエータ、減速機、センサなど)の国産化を重点分野とし、国家研究資金を重点的に投入している。さらに、2023年に発表された『「ロボット+」応用行動実施計画』⁽¹⁵⁾では、10分野(製造業、農業、医療・健康、高齢者支援、教育、サービス、極限対応など)を主要応用領域として定め、100件を超える革新的な応用技術及びソ

(6) International Federation of Robotics (IFR), “Global Robot Demand in Factories Doubles Over 10 Years,” 2025.9.25. <<https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-robot-demand-in-factories-doubles-over-10-years>>

(7) International Federation of Robotics (IFR), “Global Robot Density in Factories Doubled in Seven Years,” 2024.11.20. <<https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-robot-density-in-factories-doubled-in-seven-years>>

(8) 「統合イノベーション戦略 2025 (2025年6月6日閣議決定)」内閣府ウェブサイト <<https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/2025.html>>

(9) 経済産業省「AIロボティクス検討会戦略の方向性の骨子」2025.10. <https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/ai_robotics/pdf/20251008_1.pdf>

(10) 「研究領域の紹介(戦略的創造研究推進事業 CREST)」科学技術振興機構ウェブサイト <https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/index.html>

(11) 「ムーンショット型研究開発事業」科学技術振興機構ウェブサイト <<https://www.jst.go.jp/moonshot/>>

(12) International Federation of Robotics (IFR), *op.cit.*(7)

(13) 「“十四五”机器人产业发展规划(ロボット産業発展計画)」2021. 中国政府網 <<https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/28/5664988/files/7cee5d915efa463ab9e7be82228759fb.pdf>> (2026年3月に第15次五か年計画が策定される見込み)

(14) 「中国情報」新エネルギー・産業技術総合開発機構ウェブサイト <https://www.nedo.go.jp/library/ZZAT09_100008.html>

(15) 「“机器人(ロボット)+”应用行动方案(応用行動実施計画)」2023. 中国政府網 <<https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-01/19/5738112/files/61a45b6de7f34f4197c4d6fe1b9106fb.pdf>>

リューションの開発を推進している。このプランは、ロボット産業の応用拡大とイノベーション促進を両立させる国家的枠組みであり、中国国内における国産ロボット比率の上昇と輸入依存度の低下を後押ししている。さらに、国家政策に加えて、地方政府（省・直轄市）も国の方針に沿ったロボット産業のアクションプランや育成目標を相次いで策定しており、国から地方まで一体となった政策支援が市場拡大を下支えしている⁽¹⁶⁾。巨大な内需と政策主導による技術開発・市場拡大の相乗効果により、中国は量・質の両面で世界のロボット産業における中心的地位を急速に確立しつつある。

(3) 韓国の戦略

韓国も、ロボット先進国として世界的に存在感を示している。特に、自動車や半導体産業の強さを背景に、製造業従業員1万人当たりのロボット台数は1,012台に達し、世界最高水準を維持している⁽¹⁷⁾。政府はロボットを第4次産業革命の中核技術と位置付け、「国家戦略技術育成計画」⁽¹⁸⁾などを通じてAI・ロボティクス・半導体を重点分野として支援している。AIやセンサ技術の発展を背景に、産業用からサービス・医療・物流分野まで応用が拡大し、国内企業とスタートアップによる技術革新が進んでいる。さらに韓国政府は、「第4次知能型ロボット基本計画」⁽¹⁹⁾の下で、主要部品の国産化率を80%へ高めるとともに、インフラ整備や専門人材の育成、ロボット倫理ガイドライン策定を推進している。こうした政策の後押しと高い技術力の融合により、韓国はAIとロボットの統合的活用を進めるアジアのリーダーとして、産業自動化とスマート製造の両面で主導的地位を確立しつつある。

(4) ドイツの取組

ドイツは欧州最大の産業用ロボット市場であり、2023年時点で製造業従業員1万人当たりのロボット台数は429台に達し、世界第4位のロボット先進国である⁽²⁰⁾。年間設置台数は約2.8万台に上り、欧州市場の約3割を占める⁽²¹⁾。ドイツは「インダストリー4.0」構想を提唱し、製造業のスマート化とデジタル化を国家戦略の柱に据え、産学官の連携によってロボットを活用したスマートファクトリー化を推進してきた。さらに、連邦研究・技術・宇宙省（BMFTR）は「ハイテク戦略2025（High-Tech Strategy 2025）」⁽²²⁾の理念である「人のための技術形成（Shaping Technology for People）」の下、AIやロボティクスを社会課題解決型イノベーションの中核に位置づけている。この戦略に基づき、BMFTRは2023年に「ロボット研究行動計画（Robotics

(16) 「中国における人型ロボット産業の現状と将来展望」株式会社野村総合研究所ウェブサイト <<https://www.nri.com/jp/knowledge/report/files/000049393.pdf>>

(17) International Federation of Robotics (IFR), *op.cit.*(7)

(18) 大韓民国 科学技術情報通信部 (MSIT) 「대한민국 과학기술주권 청사진, 제 1 차 국가전략기술 육성 기본계획 (第1次国家戦略技術育成計画) (’24-28) 수립」2024. <<https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?mId=113&bbsSeqNo=94&nttSeqNo=3184844>>

(19) 「제 4 차 지능형로봇 기본계획 (第4次知能型ロボット基本計画)」2024.1. KDI ウェブサイト <<https://eiec.kdi.re.kr/policy/callDownload.do?num=247119&filenum=2&dtim=20251203205935>>

(20) International Federation of Robotics (IFR), *op.cit.*(7)

(21) International Federation of Robotics (IFR), “Record of 4 Million Robots Working in Factories Worldwide,” 2024.9.24. <<https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-of-4-million-robots-working-in-factories-worldwide>>

(22) “Federal Government Report on the High-Tech Strategy 2025,” Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2021. <https://www.bmftr.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/FS/657232_Bericht_zur_Hightech-Strategie_2025_en.pdf?__blob=publicationFile&v=5>

Research Action Plan)」を立ち上げ、総額約3億5000万ユーロを投じて、全国の研究機関を統合する「ロボティクス研究所ドイツ (Robotics Institute Germany: RIG)」を設立した⁽²³⁾。RIGは同計画の中核機関として、学術・産業の協働、共通研究基盤の整備、人材育成を推進し、ドイツのロボティクス研究を国際的に牽引している⁽²⁴⁾。

(5) 米国の状況

米国はICTやAI技術で世界をリードする一方、産業用ロボットの製造・普及では日欧中に次ぐ位置にある。2023年の製造業従業員1万人当たりのロボット台数は295台⁽²⁵⁾で世界10位、2022年の年間設置台数は約3万9500台に達した⁽²⁶⁾。米国政府は中央集権的な産業政策を採らないが、研究開発面では2011年に「国家ロボティクス・イニシアチブ (NRI)」を開始し、国立科学財団 (NSF) を中心に産学官連携を推進している。最新版のNRI3.0 (2021年) では、人間の安全と自立を含む人間にとって有益なロボットに関する基礎研究を支援し、年間約1250万～1410万ドルの助成が見込まれていた⁽²⁷⁾。また、国家航空宇宙局 (NASA) のアルテミス計画や国防総省 (DoD) による無人・自律システム研究など、宇宙・軍事分野の技術開発が民生応用に波及している。民間企業では、巨大IT企業がAIロボティクス分野に参入し、アマゾン社は物流倉庫向けの自律走行ロボットを大規模に導入、テスラ社は自動車工場の高度自動化 (ギガファクトリー) を推進している。総じて、米国は、「ロボットそのものを大量生産する」よりも「ロボットを活用した新サービスやビジネスモデルの創出」に強みを持ち、AI・IoT技術との融合を軸としたスタートアップ企業が多数登場している点が特徴である。

II 自律移動ロボット (自動運転、ドローン、倉庫物流)

自律移動ロボットとは、周囲の環境を自ら認識・理解し、自律的な判断に基づいて経路を決定して移動するロボットの総称である。応用分野は、自動運転車、無人航空機 (ドローン)、物流倉庫内の搬送ロボットなど多岐にわたる。これらの自律移動ロボットは、GPS (Global Positioning System) やカメラ、LiDAR (Light Detection And Ranging)、IMU (Inertial Measurement Unit)、ミリ波レーダといった複数のセンサを組み合わせることで、高い認識精度と信頼性を確保している。

LiDARは、レーザー光を照射した際の反射時間から周囲の物体までの距離や形状を三次元的に計測するセンサであり、自動運転車においては周囲の建物や歩行者、他車両の位置を高精度に把握するために用いられている。これは、カーナビやスマートフォンの地図が「位置」を

(23) International Federation of Robotics (IFR), “Robotics Research: How Asia, Europe and America Invest,” 2025.2.11. <<https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robotics-research-government-programs-asia-europe-and-america-2025>>

(24) “Robotics Institute Germany (RIG),” Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt website <<https://www.bmfr.bund.de/EN/Research/EmergingTechnologies/Robotics/robotics.html>>

(25) International Federation of Robotics (IFR), *op.cit.*(7)

(26) International Federation of Robotics (IFR), “World Robotics 2023 Report: Asia ahead of Europe and the Americas,” 2023.9.26. <<https://ifr.org/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas/>>

(27) National Science Foundation (NSF), “National Robotics Initiative 3.0: Innovations in Integration of Robotics (NRI-3.0),” 2021.2.4. <<https://www.nsf.gov/funding/opportunities/nri-30-national-robotics-initiative-30-innovations-integration/503641/nsf21-559/solicitation>>

示すのに対し、「周囲の立体的な構造」を直接計測する点が特徴である。IMUは、加速度センサや角速度センサを組み合わせたセンサであり、ロボットや車両がどの方向にどれだけ動いたか、どの程度傾いているかを計測する。これは、スマートフォンの画面回転や歩数計測、ゲーム操作などに用いられているセンサと同種の技術であり、GPSが使えない屋内やトンネル内でも自己位置推定を補助する役割を果たす。ミリ波レーダは、電波を用いて物体の距離や相対速度を測定するセンサであり、雨・霧・暗所といった視界の悪い環境でも安定して動作する。自動車の自動ブレーキやアダプティブクルーズコントロール（前走車との車間距離を自動調整する機能）にも広く用いられており、安全性確保の観点から重要な役割を担っている。

これらのセンサ情報は、SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）アルゴリズムや深層学習を用いた物体認識技術によって統合・処理され、複雑な環境下でも安定した自律移動を可能にしている。近年では、センサ精度の飛躍的向上とコスト低減が進んでおり、例えば、かつて自動運転用途のLiDARは数万～十数万ドル近くしたが、今日では比較的廉価なモデルも登場し、将来的には100ドル級を目指すものもある。センサの低価格化・量産化が進むと、ハードウェアは汎用品となり、性能差による差別化が難しくなる。その結果、センサそのものよりも、取得データをどのように統合・解釈し、行動判断に結び付けるかといったソフトウェアの役割が相対的に重要となるため、ハードウェアとソフトウェアを独立に開発・更新する分離型構成が主流となり、様々な産業分野への技術波及が加速する。本節では、代表的な自律移動ロボットの技術的基盤と応用事例について概観する。

1 自動運転車

自動運転車は、自動車に搭載されたコンピュータと各種センサが人間のドライバーに代わって運転操作を行うシステムである。現在の自動車技術の最先端と言える分野であり、カメラやLiDAR等のセンサによる高度な周辺認識とAIによる意思決定によって、安全かつ効率的な移動を目指している。

(1) 要素技術

自動運転車のシステム構成は大きく4つのモジュールに分類できる。すなわち、①周辺環境の認識（Perception）、②自己位置推定・地図生成（Localization／Mapping）、③経路・走行計画（Planning）、④車両制御（Control）である。さらに近年では、他の車両や歩行者の行動予測や運転戦略の意思決定を担うAIシステムも統合されつつある。

- ①周辺認識（Perception）：自動運転車は複数種類のセンサを組み合わせることで周囲の状況を把握する。典型的には、RGBカメラによる物体や信号の検知、LiDARによる高精度な三次元環境計測、ミリ波レーダによる他車両との距離・速度の測定などを融合して用いる。深層学習を用いた高精度な物体検出により、昼夜や悪天候での検知性能も向上している。
- ②自己位置推定と地図生成（Localization／Mapping）：車両が自身の現在位置を正確に知ることは自律走行の前提である。GPSやIMUに加え、LiDARによって作成された三次元地図と車載センサデータをリアルタイムに照合することで、最適条件下において数センチメートル級の自己位置推定が可能となっている。加えてSLAM技術により、未知の環境でも地図を構築しながら走行することが可能となりつつある。なお、多くの実運用システムでは、あらかじめ高精度な地図（HDマップ）を作成し、走行中はマップとリアルタイムにセンサ

データをマッチングして位置を補正する方式を採っている。

- ③経路計画 (Planning)：目的地まで安全かつ効率的に移動するためには、経路計画アルゴリズムが不可欠である。経路計画は一般に、経路探索 (Global Path Planning) と軌道生成 (Local Motion Planning) の2段階に大別される。前者は、道路地図や交通情報を用いて目的地までの全体ルートを決定するものであり、カーナビゲーションの最適経路探索に相当する。一方、後者は周囲の車両や歩行者、障害物などの動的対象を考慮しながら、その瞬間での走行軌道や速度を決定する手法である。特に、交差点進入や車線変更などの複雑な状況下では、周囲の動的対象の将来軌道を予測し、複数の候補軌道を生成・評価して最適な挙動を選択する行動計画 (Behavior Planning) との連携が重要となる。
- ④車両制御 (Control)：決定された軌道に沿って車両を動かす制御系は、自動運転システムの最終段階に位置づけられる。アクセル、ブレーキ、ステアリング (ハンドル) を電子的に操作するため、従来の制御理論が応用されている。近年では、より高度なモデル予測制御 (Model Predictive Control: MPC) を用い、車両の運動モデルに基づいて将来の挙動を予測し、次の操作を最適化する手法が実用化されている。また、電動パワーステアリングやブレーキ制御系の冗長化設計により、一部の故障時でも安全に停止できるフェイルセーフ機構が導入されている。

(2) 自動運転のレベル分類

自動運転技術はその自動化の度合いによって国際的に定義された分類が存在する。SAE International (米国自動車技術会) の規格 SAE J3016 (J3016_202104)⁽²⁸⁾では、以下のようにレベル0～レベル5までの6段階のレベルが定義されている。

レベル0 (運転自動化なし)：運転操作は全て人間が行う。

レベル1 (運転支援)：自動車が操縦 (ステアリング) 又は加速・減速のいずれかの操作を支援する。

レベル2 (部分的運転自動化)：操縦と加速・減速の両方の操作を自動車が支援する。

レベル3 (条件付き運転自動化)：特定条件下ではシステムが運転操作と周囲監視を担うが、システムが対応困難と判断した場合には、人間に対して介入を要求する。人間は要請があれば速やかに運転を引き継ぐ責任を負う。

レベル4 (高度運転自動化)：高速道路や特定地域など、走行環境や速度などがあらかじめ限定された条件 (運行設計領域) 内では、人間への介入要求を前提とせず、システムが運転を完結できる。システムが限界に達した場合も、安全に停止するなど自己完結的に対応する。

レベル5 (完全運転自動化)：あらゆる道路・環境条件下においてもシステムが運転の主体となり、人間の介入を一切必要としない。

市販車の多くはレベル2相当にとどまっているが、一部の車両ではレベル3の自動運転機能が実用化され始めている。

[28] SAE International, J3016_202104: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, 2021.4.30. <https://www.sae.org/standards/j3016_202104-taxonomy-definitions-terms-related-driving-automation-systems-road-motor-vehicles>

(3) 社会実装事例

自動運転車は各地で実証実験や限定的な商用サービスが展開されている。日本では、トヨタ自動車株式会社が開発した電動シャトル「e-Palette」を用いた自動運転移動サービスの実証例がよく知られている。e-Paletteは内部を自由に改装できる多目的EV車で、東京2020オリンピック・パラリンピックにおいて選手村内で試験運行された。また、トヨタ自動車株式会社は2027年度までにレベル4相当の自動運転システムを搭載した車両の市場投入を目指すとして公表しており、モビリティサービス向けの次世代車両として期待されている⁽²⁹⁾。加えて、本田技研工業株式会社は2021年に自動運転レベル3相当の機能を搭載した「LEGEND」を100台限定リース形式で提供すると発表し、注目を集めた⁽³⁰⁾。さらに、日産自動車株式会社とDeNA（株式会社ディー・エヌ・エー）は共同で、無人タクシーサービス「Easy Ride」（レベル4相当）の実証実験を2018年から横浜市で実施している⁽³¹⁾。他の自治体においても、運転手不足への対応や高齢者の移動手段の確保を目的として、自動運転バスによる公共交通の実証実験が実施されている。これらの取組は、将来的なレベル4相当の自動運転の社会実装を見据えた段階的な検証として位置付けられており、一部の地域では既に限定条件下での実用運行が開始されている⁽³²⁾。

海外に目を向けると、米国ではアルファベット傘下のウェイモ社が完全無人口ボタクシーサービス（レベル4相当）を商用展開している。ウェイモ社は、2018年にフェニックス都市圏でユーザ向け配車サービス「Waymo One」を開始し、2020年には安全ドライバー不在で乗客を輸送する運行を始めた。2023年以降、サンフランシスコにおいても無人有料運行の許可を取得し、対象都市を順次拡大している⁽³³⁾。ウェイモ社は累計実走行距離を数千万マイルに達する規模に伸ばし、シミュレーションによる仮想走行データも併用して安全性向上を図っている。欧州では、メルセデスベンツ社がボッシュ社と共同で、自動バレーパーキング（利用者が施設の入口で車を預け、自動運転で代わりに駐車・出庫を行う仕組み）に関してレベル4相当の商用認可を取得するなど、着実な前進が見られる⁽³⁴⁾。中国ではバイドゥ社が、重慶市や武漢市をはじめとする都市で無人タクシー運行（レベル4相当）の許認可を拡大している⁽³⁵⁾ほか、アリババグループ傘下の物流企業ツァイニャオ（菜鸟）社は2024年時点で30以上の都市で1,000台を超えるレベル4相当の無人配送車両を正式運用しており、小売店舗向けの配送や集合住宅への宅

(29) 「トヨタ、次世代モビリティ「e-Palette」を発売」2025.9.15. トヨタ自動車株式会社ウェブサイト<<https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/43305367.html>>

(30) 「Honda SENSING Elite 搭載 新型「LEGEND」を発売」2021.3.4. 本田技研工業株式会社ウェブサイト<<https://global.honda.jp/news/2021/4210304-legend.html>>

(31) 「日産自動車と DeNA、無人運転車両を活用した交通サービス「Easy Ride」の実証実験を開始」2018.2.23. DeNA ウェブサイト<<https://dena.com/jp/news/003566/>>

(32) 「自動運転バス」岐阜市ウェブサイト<<https://www.city.gifu.lg.jp/kurashi/douro/1002587/1023154/index.html>> ; 「柏の葉キャンパス駅・東京大学 柏キャンパス間の公道での「自動運転バスの営業運行実証実験」へ新車両を導入」柏 ITS 推進協議会ウェブサイト<<http://www.kashiwa-its.jp/activity3/>> ; 「自動運転」まちづくり株式会社 ZEN コネクトウェブサイト<<https://e-machidukuri.co.jp/maas/autonomous/>>

(33) California Public Utilities Commission, “CPUC Approves Permits for Cruise and Waymo to Charge Fares for Passenger Service in San Francisco,” 2023.8.10. <<https://www.cpuc.ca.gov/news-and-updates/all-news/cpuc-approves-permits-for-cruise-and-waymo-to-charge-fares-for-passenger-service-in-sf-2023>>

(34) “World First: Bosch and Mercedes-Benz’s Driverless Parking System Approved for Commercial Use,” 2022.11.30. Bosch Media Service website <<https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/world-first-bosch-and-mercedes-benzs-driverless-parking-system-approved-for-commercial-use-248960.html>>

(35) Reuters, “Baidu Bags China’s First Fully Driverless Robotaxi Licenses,” *Reuters*, 2022.8.8. <<https://www.reuters.com/business/autos-transportation/baidu-bags-chinas-first-fully-driverless-robotaxi-licenses-2022-08-08/>>

配業務を行っている。このように、世界的には自動運転の実運用が徐々に広がっているものの、2025年現在では、レベル3以上の広域一般普及には技術的安全性検証や法制度整備の課題が残されており、限定地域・限定条件での商用サービス段階にとどまっている。

2 ドローン（無人航空機）

ドローンあるいは無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle: UAV）とは、人が搭乗せず、遠隔操作又は自律制御によって飛行する航空機の総称である。固定翼機タイプも存在するが、一般にはマルチコプター（複数の回転翼を持つヘリコプター型）が主流であり、小型から大型まで多様なサイズが存在する。近年では、バッテリーやモータの性能向上、GPSや通信技術の発展に伴い、商業用途から個人利用に至るまで急速に普及している。背景には、機体価格の低下もあり、個人向けの小型機では数万円規模から入手可能となっていることが挙げられる。また近年では、機体自体を低コスト化し、高度な認識・判断機能をクラウドや地上側に分離する設計思想も提案されており、用途に応じた多様なシステム構成が模索されている。なお、ドローンの飛行形態は、操縦者が直接操作する遠隔操作型から、事前に設定した経路や条件に基づいて飛行する半自律・自律制御型まで幅広く、活用分野に応じて求められる自律性の水準は異なる。

(1) 技術構成

ドローンの飛行制御にも、自動運転車と同様に自己位置推定や周囲環境の認識技術が不可欠である。そのため、機体にGPSやIMUを搭載し、位置・速度・姿勢をリアルタイムで計算できるようになっている。都市部や建物が密集する環境ではGPS信号が遮断される場合があるため、高性能な機体では、カメラ映像から周囲の地形を認識し、障害物との相対位置関係を利用して自己位置を補正し、安定した飛行を実現する方式（Visual SLAM）が併用されている⁽³⁶⁾。また、低高度飛行時には超音波センサや赤外線／レーザー距離センサを用いて、垂直距離や障害物までの距離を測る場合が多く、地面から一定の高さで浮遊（ホバリング）する場合や衝突回避に使われる。さらに、気圧センサにより高度変化を精密に検出し、ホバリング時や目標高度保持時の垂直制御の安定性を高めることができる。

飛行制御ソフトウェアとしては、オープンソースのPX4やArduPilotといったフレームワークが広く採用されており、姿勢安定化、センサ融合、経路追従、自律飛行モードなどを包括的に提供する。飛行モードには、手動操縦、GPSを利用した自律ホバリング、事前設定した位置への自動航行、通信途絶時の自動帰還などの安全機能が含まれる。さらに、高性能機体では機械学習を応用した画像認識により、着陸マーカーの検出や人・物体の認識を通じた自律追尾飛行を行うものもある⁽³⁷⁾。こうした技術要素を組み合わせることで、操縦者の介入なしに定点撮影や巡回監視などのミッションを自律的に遂行できるドローンが実用化されている。

(36) Fahad Lateef et al., “From GPS to AI: A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Localization Solutions,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.212: 103923, 2025.12. <<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.09.014>>

(37) Anas Aburaya et al., “Review of Vision-Based Reinforcement Learning for Drone Navigation,” *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, Vol.8, 2024.6. <<https://doi.org/10.1007/s41315-024-00356-9>>

(2) 活用分野

ドローンの活用は空撮ホビー以外にも産業・公共分野で急速に広がっている⁽³⁸⁾。以下に主要な分野を挙げる。

- ①インフラ点検・設備検査：日本国内を中心に、橋梁（きょうりょう）やビルの外壁、送電線、風力発電設備など、人が立ち入りにくい高所や狭隘（きょうあい）部の点検にドローンが活躍している⁽³⁹⁾。高解像度カメラや赤外線カメラを搭載し、近接飛行しながら劣化や異常を撮影記録することができる。これにより、従来は足場の敷設や高所作業車が必要であった作業が効率化し、コスト削減と安全確保につながっている。
- ②農業：農業分野におけるドローン利用の代表例は、農薬や肥料の空中散布である。日本では、ヤマハ発動機株式会社が展開してきた産業用無人ヘリコプターは、水田を中心に農薬散布用途として広く普及してきた。近年では、小型マルチロータードローンの性能向上と法制度の整備が進み、同様の散布業務をより低コストかつ柔軟に実施できるようになっている。これにより、人手不足や高齢化が進む農業現場において、作業負担の軽減と散布精度の向上が実現している。さらに海外では、カメラなどによって作物の生育状況を解析する精密農業（Precision Agriculture）への応用も進展しており、得られたデータを基に施肥量や灌漑（かんがい）に関する意思決定を支援することで、環境負荷の低減や収量の安定化につながる可能性が示されている。また、土壌水分や地表温度のモニタリング、果樹園での人工受粉・播（は）種支援などの新たな用途も研究段階にあり、ドローンは持続可能なスマート農業を支える中核技術の一つとして期待されている。
- ③災害対応・救助：地震や水害などの大規模災害時には、被災状況の上空からの把握や孤立地域・被災者の探索にドローンが活用されている⁽⁴⁰⁾。小型無人機は有人ヘリでは危険とされる低空域でも安全かつ柔軟に飛行でき、赤外線カメラやサーモグラフィを用いて瓦礫（れき）下の被災者を検知する試みも行われている。災害現場では、通信途絶地域の地形把握、河川氾濫や土砂崩れの監視、避難経路の確認などに活用され、現場状況の可視化と初動対応の迅速化に大きく寄与している。また、山岳地や離島における遭難者捜索や物資投下にも利用が広がり、気象条件の変化に対応できる運航制御技術の高度化も進んでいる。近年では、AIを用いた被災者の自動検出やリアルタイム地図生成との統合的運用も進展しており、災害対応の効率化と自律化が期待されている。現在、全国の消防署の50%以上がドローンを導入しており⁽⁴¹⁾、現場での情報収集・救助支援ツールとして重要性が高まっている。
- ④物流・配送：ドローンによる物流・配送は、社会実装が最も進展している分野の一つである。米国では、アルファベット傘下のウィング社、ユナイテッド・パーセル・サービス（UPS）のドローン配送子会社 UPS フライト・フォワード（UPSFF）社、及びアマゾン・プライム・

(38) R. Dewan and K.F. Rahman, "A Survey on Applications of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)," P.K. Singh et al., ed., *Recent Innovations in Computing* (Lecture Notes in Electrical Engineering Vol.855), 2022. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-892-8_8>

(39) 国土交通省「国土交通省のドローン活用事例」<<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/gijyutu/content/001510876.pdf>>

(40) 土志田正二・新井場公德「ドローンの活用による情報収集」（救助技術の高度化等検討会「大規模土砂災害時における救助能力の高度化」第2回検討会）2024. 消防庁ウェブサイト <https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/post-163/02/shiryoku3.pdf>

(41) 消防庁「消防防災分野におけるドローン活用の手引き 第2版」2022.3. <https://www.fdma.go.jp/laws/tutatsu/items/040331_drone.pdf>

エア社が、いずれも米連邦航空局（FAA）から Part 135 商業運航認証を取得し、商用ドローン配送の試験運用を精力的に進めている。これにより、ドローンが「航空運送業者」として正式に物資輸送を行う法的枠組みが確立された。なかでもウイング社は、ウォルマート社との連携により、住宅地向け配送サービスを実証している⁽⁴²⁾。利用者がスマートフォンアプリで注文すると、数分以内にドローンが出発し、庭先や指定地点に物資を安全に投下・引き渡す仕組みが実装されており、都市部・郊外の「ラストワンマイル配送」における新たな手段として注目を集めている。

日本においては、楽天株式会社（当時。現「楽天グループ株式会社」）が2020～2021年に三重県志摩市・間崎島で無人配送実証を行い、住民の注文に応じてドローンが商品をお届けする期間限定サービスを提供したことが話題となった⁽⁴³⁾。また、ANAホールディングス株式会社と独ヴィングコプター社は、医薬品及び日用品等のドローン配送事業化に向けた業務提携を締結しており、福岡市や五島市において実証実験を進めている⁽⁴⁴⁾。このように、ドローン物流は、過疎地の生活支援、災害時の代替輸送、都市部のラストワンマイル効率化など、複数の社会課題を解決するポテンシャルを持つ技術領域である。

- ⑤鳥獣被害対策：近年、日本では、シカ、イノシシ、クマなどの鳥獣による被害が深刻化しており、その対策としてドローン技術の活用が進められている。赤外線カメラや高解像度カメラを搭載したドローンにより、従来は把握が困難であった山間部や夜間における鳥獣の生息状況や移動経路を上空から安全に観測することが可能となっている。取得された位置情報付きの画像・映像データは、GIS（地理情報システム）と統合され、出没傾向の分析や重点対策区域の設定など、被害対策計画の立案に活用されている⁽⁴⁵⁾。さらに最近では、クマ被害が増加していることから、ドローンにスピーカーを搭載し、音響による威嚇や追い払いを行う取組も行われている。海外においても、ドローンを用いた非致死的手法によるクマの追い払いが高い成功率を示した事例が報告されており、人と野生動物との軋轢（あつれき）を低減する手段として注目されている⁽⁴⁶⁾。
- ⑥軍事・安全保障：日本では、自衛隊が情報収集・監視能力の向上を目的として、滞空型無人航空機（UAV）を取得・配備する計画を進めているほか、小型攻撃用 UAV の導入に向けた検討も進められている⁽⁴⁷⁾。また、災害対応時には、被災状況の把握や安全確認を目的として、ドローンを偵察・監視ツールとして運用した事例も報告されている⁽⁴⁸⁾。海外に目を向けると、NATOや米軍が、高高度長時間滞空型UAVを用いて、広域の情報収集・監視・

(42) Wing Team, “Wing and Walmart Announce World’s Largest Drone Delivery Expansion,” 2025.6.5. <<https://wing.com/news/wing-and-walmart-announce-world-s-largest-drone-delivery-expansion-ever>>

(43) 楽天株式会社「楽天、自動飛行ドローンによる配送サービスを離島で提供」2021.1.6. <https://corp.rakuten.co.jp/news/update/2021/0106_01.html>

(44) ANAホールディングス株式会社「医薬品及び日用品等のドローン配送事業化に向けた業務提携を締結」2021.4.15. <<https://www.anahd.co.jp/group/pr/202104/20210415-2.html>>

(45) 農林水産省「鳥獣被害に関する緊急情報」2025. <<https://www.maff.go.jp/j/seisan/tyozyu/higai/kikijouhou/attach/pdf/kikijouhou-118.pdf>>

(46) W. M. Sarmiento, “Drones outperform dogs for hazing bears: a comparison of carnivore aversive conditioning tools,” *Frontiers in Conservation Science*, Vol.5, Article 1478450, 2024. <<https://doi.org/10.3389/fcosc.2024.1478450>>

(47) 防衛省「防衛力抜本的強化の進捗と予算」<https://www.mod.go.jp/j/budget/yosan_gaiyo/fy2025/yosan_20250402.pdf>

(48) 三茶甲士「自衛隊のドローン史を解説！導入の背景と偵察・輸送・災害対応向けドローン6機種」『ドローンジャーナル』2025.4.8. <<https://drone-journal.impress.co.jp/docs/special/1187167.html>>

偵察任務を実施している⁽⁴⁹⁾。さらに、近年の武力紛争においては、攻撃用ドローンや自爆型ドローンが実戦で使用されており、ウクライナ戦争では、国家主体が攻撃用 UAV を戦術的に運用し、戦車や防空システムに対する攻撃が確認されている⁽⁵⁰⁾。

- ⑦その他の応用分野：このほか、空撮・映像制作、警備・監視、測量・マッピングなど、ドローンの応用は多岐にわたる。テレビや映画では上空からのダイナミックな映像取得が一般化し、警備分野では広域巡回や夜間監視への導入が進む。特に測量分野では、フォトグラメトリや LiDAR 技術を活用した高精度 3D モデリングが普及し、建設現場や都市計画における地形把握、インフラ点検、施工管理に利用されている。これにより、従来の有人測量に比べて作業効率が大幅に向上し、安全性も改善された。さらに、ドローンを活用した生態系モニタリングや環境調査も注目されており、森林資源量の推定や海岸線変動の追跡など、環境科学分野でも活用が広がっている。ドローンは正に「空からのロボット革命」として、産業・公共・環境の各分野を横断的に支える基盤技術となりつつある。

3 倉庫物流ロボット

E コマースの拡大や深刻化する人手不足を背景に、物流倉庫内の自動化・省人化が急速に進展している。とりわけ、荷物の搬送、仕分け、棚からの商品ピッキングといった反復作業を担うロボット技術の導入が拡大しており、倉庫運営の効率化と作業精度の向上に大きく寄与している。これらのロボットは、センサや AI による認識・判断機能を備え、自律的に移動・動作を行うことが可能である。

(1) 種類

物流現場で使われる移動ロボットは、大別すると AGV (Automated Guided Vehicle：無人搬送車) と AMR (Autonomous Mobile Robot：自律走行ロボット) の 2 種類に分類できる。

- ①AGV (Automated Guided Vehicle：無人搬送車)：AGV の典型例としては、床面に設置された磁気テープや誘導線、あるいは床貼付式のバーコード／QR マーカーなどの目印をセンサで追従して走行する方式がある。これらの AGV は固定ルート搬送やライン間の定常搬送に適し、工場や倉庫で長く利用されてきた。一方で、経路外走行は基本的に想定されておらず、障害物が存在すれば停止して人手による除去などの対応が必要となる。このため、レイアウト変更への適応性は限定的であり、導入時には誘導インフラ (磁気テープ敷設など) の設置といった初期コストが発生する。
- ②AMR (Autonomous Mobile Robot：自律走行ロボット)：AMR は、LiDAR やカメラ、IMU などのセンサを用いて自己位置を推定し、SLAM 技術によって地図を自動生成する。これに基づいて経路計画と障害物回避を統合した自律ナビゲーションを実現し、固定誘導なしに建物内を走行できる。障害物を検出すると動的に回避経路を選択でき、レイアウト変更や一時的な通路封鎖にもソフトウェアの変更が中心になるため対応しやすい。複数台の運用ではフリートマネジメント (複数の車両を安全かつ効率的に管理・運用する仕組み) に

(49) United States Air Force, "RQ-4 Global Hawk." <<https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104516/rq-4-global-hawk/>>

(50) 防衛省「第3回 防衛力変革推進本部「ウクライナ侵略で見られる新しい戦い方と課題」」2025.12. <<https://www.mod.go.jp/j/policy/agenda/meeting/henkaku/pdf/20251218b.pdf>>

より地図や経路を共有し、交通制御やタスク割当を最適化するのが一般的である。

AGVとAMRの違いは、ナビゲーション方式のみならず、安全性や運用コスト、用途にも表れる。AGVは走行経路やタスクがあらかじめ固定された環境において、高い信頼性と安定した搬送性能を発揮しやすく、導入・運用が比較的単純である点が長所である。そのため、工場内のライン間搬送や、同一経路を繰り返し走行する定常業務などでは、現在もAGVが有効に用いられている。一方、AMRは人感センサや緊急停止機構、安全制御ソフトウェアを備え、人が作業するエリア内でも協調的に走行できるよう設計されている。誘導線などの専用インフラを必要とせず、レイアウト変更や一時的な通路封鎖にも柔軟に対応できるため、多品種少量生産やEコマース対応など、変化の大きい物流現場に適している。もっとも近年では、従来型AGVもセンサを搭載して自律走行機能を強化したモデルが登場しており、両者の境界は次第に曖昧になりつつある。

(2) 代表的事例

- ①アマゾン・ロボティクス（旧キバ・システムズ）社：アマゾン社は、2012年にキバ・システムズ社を約7.75億ドルで買収し、棚ユニットをロボットが作業員のもとへ運ぶ方式（Goods-to-Person）を採用することにより作業員の歩行距離を削減し、ピッキング効率を向上させたと報告している⁽⁵¹⁾。以降、自社開発のモバイルロボット群（Hercules/Titan（棚ユニット搬送）、Vulcan/Sparrow/Robin/Cardinal（把持・仕分け）、Proteus（完全自律型AMR）など）を順次投入し⁽⁵²⁾、2024年時点で稼働ロボットは75万台を超え、2025年には100万台に到達した。特に、Proteusは人と同一エリアで安全に自律走行できる初のAMRとされている。さらに、アマゾン社はDeepFleet（ロボット群の協調運行を最適化するAI）を公開し、走行効率を約10%向上させている⁽⁵³⁾。同社の倉庫ではロボットと人が混在して作業しているが、重い棚の持上げや搬送などの単純な重労働作業はロボットが担い、人はピッキングや梱包などの判断を要する繊細な作業に従事する形にシフトしている。結果として省人化と効率化を両立しつつ、逆にロボットを保守・点検するための新たな雇用も生まれている。
- ②ZMP社：日本企業による代表的な事例としては、株式会社ZMP社（現ROBO-HI株式会社）が開発した物流支援ロボット「CarriRo（キャリロ）」が挙げられる。CarriRoは台車型の小型搬送ロボットで、作業員に自動追従する「カルガモモード」や、床面のランドマークを追従して自律走行するモードなどが備えられている⁽⁵⁴⁾。倉庫内で作業員がピッキングしながら移動する際に、その後ろをCarriRoが一定距離を保って追従走行して荷物を運んでくれるため、作業員は重い台車を押す負担から解放され、効率の向上が見込まれる。既に国内の物流センターや工場で数多く導入されており、人手不足対策や作業負荷軽減に貢献している。さらに、無人フォークリフト「CarriRo Fork」や自律移動台車モデル「CarriRo

(51) Amazon, “10 Years of Amazon Robotics: How Robots Help Sort Packages, Move Product, and Improve Safety,” 2022.6.21. <<https://www.aboutamazon.com/news/operations/10-years-of-amazon-robotics-how-robots-help-sort-packages-move-product-and-improve-safety>>

(52) Amazon, “Amazon has more than 1 million robots that sort, lift, and carry packages—see them in action,” 2025.10.22. <<https://www.aboutamazon.com/news/operations/amazon-robotics-robots-fulfillment-center>>

(53) Amazon, “Amazon Launches a New AI Foundation Model to Power Its Robotic Fleet and Deploys Its 1 Millionth Robot,” 2025.6.30. <<https://www.aboutamazon.com/news/operations/amazon-million-robots-ai-foundation-model>>

(54) 「CarriRo とは」 ミラロボット株式会社ウェブサイト <<https://www.mirabot.co.jp/product/carriro/>>

AD / AD+」なども開発されており、搬送形態や作業内容に応じた複数のロボットが物流現場で利用されている。

- ③Mujin社：棚から個別に商品を取り出すピッキング（バラ積みピッキング）は、倉庫業務の中でも特に自動化が難しいとされる。日本のベンチャー企業である株式会社 Mujin（ムジン）社は、このピッキングロボット分野において先進的な技術を展開している。Mujin 社は、3D ビジョンやリアルタイムモーションプランニング、把持制御（ロボットが対象物を壊さないように、指の位置や把持力を調整して安定してつかみ続けるための制御）を統合する基盤技術 MujinController を中心に、教示なし運用や動的環境対応能力を備えたロボットシステムを提供しており、物体認識・アーム操作・動作計画を自律的に行うことを目指している。特に、物流センターや製造工場、流通拠点において、デパレタイズ（荷下ろし）、パレタイズ（荷積み）、ピースピッキング（個品取り出し）、載荷下ろし、入庫～検品～積付けのような複数工程への導入が進められている⁽⁵⁵⁾。

4 技術的課題と対策

ここまで見てきた自律移動ロボット各分野で共通する技術的な課題として、以下のポイントが挙げられる。

(1) センサの精度と信頼性

カメラは、暗所や逆光、トンネル内などの照度条件が変化する場面では視認性が低下する。また、雨や霧などの悪天候下では物体検出精度が著しく低下する傾向がある。LiDAR も、降雨や降雪、粉塵の多い環境下ではノイズが発生し、検出精度が低下する場合がある。一方、ミリ波レーダは電波を用いるため、悪天候や暗所でも比較的安定して検出が可能であるが、角度分解能が低く、形状認識能力には限界があるため、微細な物体識別には不向きである。そのため近年では、複数のセンサを用いるセンサフュージョンによる冗長化構成が主流となっており、カメラや LiDAR、レーダを統合してそれぞれの長所を補い合う設計が求められている。また、GPS による測位については、都市峡谷などでのマルチパスや遮蔽（へい）による精度低下が生じるため、複数の測位衛星システムを統合する GNSS（Global Navigation Satellite System）方式が一般化してきている。日本では、準天頂衛星システム「みちびき」が整備されており、天頂付近からの測位信号や補強情報を活用することで、都市部や山間部における測位精度の向上が図られている。さらに、V2X（Vehicle to Everything）通信による外部連携の重要性が高まっている。これは、車載センサでは検知困難な死角の情報（渋滞・事故・工事など）を、道路側に設置されるセンサや信号機（Vehicle to Infrastructure: V2I）、他車両（Vehicle to Vehicle: V2V）、歩行者が携帯する端末（Vehicle to Person: V2P）との通信を通じて取得する技術である。例えば、見通しの悪い交差点での出会い頭事故防止や、信号情報の先行取得による効率的な加減速が可能となる。近年では、5G 等の携帯電話網を活用した C-V2X（Cellular Vehicle-to-Everything）の実装が進んでおり、高精度な「動的マップ」の更新や、隊列走行における車両間制御の同期など、GNSS や単独の車載センサを補完する「協調型自動運転」の基盤として期待されている。

(55) 「ロボット導入事例一覧」株式会社 Mujin ウェブサイト <<https://www.mujin.co.jp/example/>>

(2) 計算資源とリアルタイム処理

自律走行や自律飛行では、カメラや LiDAR など多数のセンサから得られる膨大なデータをリアルタイムで処理し、環境認識や経路判断を行うための高い計算能力が求められる。車両やドローンでは搭載できる CPU や GPU、電力供給に限りがあるため、その中で AI 推論や高頻度のセンサ融合を実時間で実行するのは容易ではない。クラウド側で処理を行う手法もあるが、通信遅延や切断リスクを伴うため、重要な判断は端末側で完結させることが望ましい。近年は、エッジ AI（エッジコンピューティングの一種で、エッジ環境で実行される AI）向けの省電力プロセッサの採用、ディープラーニングモデルの軽量化、並列・分散処理によるリアルタイム性の確保が進んでいる。また、処理負荷に応じてクラウドとエッジの中間層で分担を行うフォグ・コンピューティングの応用も検討されている。計算資源の制約は安全性に直結するため、リアルタイム OS（あらかじめ定められた時間内に処理を完了することを保証することを重視したオペレーティングシステム）や通信バス（複数の装置やセンサ、制御装置の間でデータを共有するために用いられる共通の通信経路）の高信頼化など、システム全体の最適化設計が不可欠である。

(3) 動的環境への適応（環境理解と行動予測）

自律移動ロボットが公道や倉庫など、人間の活動領域で安全に運行するためには、人や動物などの動的対象との相互作用を的確に処理する能力が不可欠である。特に人間の行動は多様かつ非決定的であり、歩行者の飛び出しや進路変更などを即時に予測できなければ事故につながる。この課題に対し、近年では、過去の交通・行動データを学習したディープラーニングモデルを用い、周囲エージェント（歩行者・自転車など）の将来位置や移動確率分布を推定する行動予測 AI が研究されている。倉庫や工場内でも同様に、作業者の動きをリアルタイムで把握し、衝突しない経路を即時に再計画する AMR 制御が求められる。これにはセンサデータから人の移動意図（方向・速度変化）を推定する高い推論能力が必要であり、機械学習の更なる活用領域と言える。また、現実の危険を伴わない方法として、仮想環境（コンピュータシミュレーション）上の群衆環境で自律行動を学習させる方法も注目されている。こうした AI による環境理解と行動予測技術は、ロボットの社会的受容性や安全性を左右する基盤要素となりつつある。

(4) サイバーセキュリティ

自律移動ロボットはネットワーク接続や外部通信を多用するため、ハッキングやなりすましなどのサイバー攻撃を受けるリスクが指摘されている。実際、2015年には研究者が走行中の自動車を遠隔操作して停止させる実証に成功し、自動車業界全体に衝撃を与えた⁽⁵⁶⁾。また、テスラ車においてもソフトウェア脆弱性を突いた遠隔制御の実証が複数報告されている⁽⁵⁷⁾。ドローン分野でも、GPS 信号を偽装して間違った場所に誘導する「GPS スプーフィング」攻撃が確認されており⁽⁵⁸⁾、位置情報依存システム全般の脆弱性が課題となっている。これらのリス

(56) 「走行中のクルマ乗っ取りに成功：「コネクテッドカー」のバグ」2015.7.23. WIRED Japan ウェブサイト <<https://wired.jp/2015/07/23/connected-car-bug/>>

(57) 中田敦「こうして Tesla 車を遠隔ハッキングした、中国 Tencent が詳細を公開」2017.7.28. 日経クロステックウェブサイト <<https://xtech.nikkei.com/it/atcl/column/15/061500148/072800116/>>

(58) 「ウクライナによるドローン攻撃の無力化が狙い？ロシアの複数都市で GPS 信号が妨害されている」2022.12.28. WIRED Japan ウェブサイト <<https://wired.jp/article/gps-jamming-interference-russia-ukraine/>>

クに対しては、通信の暗号化と認証による不正指令防止、車内ネットワークのアクセス制御、異常検知やセンサ冗長化による信頼性向上が求められる。また、万一侵入を許したとしても致命的な操作を防ぐフェイルセーフ設計（外部加速命令を無視して安全停止するなど）も不可欠である。さらに、ソフトウェア更新時の署名検証（正規の開発元によるものかどうかの確認）や、開発段階からのセキュアコーディング（ソフトウェアに脆弱性を生じさせないことを目的として、設計・実装段階から安全性を考慮して行うプログラミング手法）、脆弱性報奨制度（バグバウンティ）（セキュリティ上の脆弱性を発見し報告した場合に、企業が報奨金を支払う制度）などの運用面の強化も進んでいる。セキュリティ対策は終わりのない継続課題であり、自律移動ロボットを社会インフラとして運用するための信頼性確保の基盤として位置付けられる。

Ⅲ サービスロボット

サービスロボットとは、様々な場面で人々にサービスを提供するロボットの総称である。国際規格 ISO 8373 では「サービスロボット」を「産業オートメーションの用途を除き、人又は機器のために有用なタスクを実行するロボット」と定義している。製造業向けの産業用ロボットと対比される概念であり、医療・介護、物流・搬送、清掃、農業、検査・メンテナンス、接客、家庭内作業など広範な分野のロボットが含まれる。サービスロボットはさらに業務用（プロフェッショナル）と家庭用（パーソナル）に大別される。業務用サービスロボットは企業や公共機関で商用目的に使われ、訓練を受けたオペレータが操作又は監督するものが多いのに対し、家庭用サービスロボットは個人が日常生活で非商用目的に使用するロボットである。近年は AI 技術の発展や安価なセンサ・モータ類の普及により、サービスロボット市場は急速に拡大している。国際ロボット連盟のレポート⁽⁵⁹⁾によると、2021年のサービスロボット市場規模は約270億ドルに達し、ロボット関連スタートアップ企業の約29%がサービスロボット分野を標榜するなど活況を呈している⁽⁶⁰⁾。サービスロボットは高齢化社会への対応や感染症対策、労働力不足の補完、新しい顧客体験の創出など、多方面で期待される存在となっている。ただしサービスロボットは大学等での研究の歴史は長いものの社会実装に向けた取組はまだ浅く、分野ごとに解決すべき課題も多く、異なる発展段階にある。以下では、日本の状況を中心に紹介する。

1 介護分野

介護分野では、慢性的な人手不足と高齢者の増加を背景に、介護ロボットの開発・導入が政策的にも推進されている⁽⁶¹⁾。2012年には、経済産業省・厚生労働省により「ロボット技術の介護利用における重点分野」（4分野5項目）が定められ、開発・実証・導入の支援が始まった。この「重点分野」には、介助者による移乗介助を補助するパワーアシスト装置、電動アシスト機能が搭載された歩行車、ベッド上の要介護者の見守りセンサなどが含まれていたが、見守りセンサ以外は「目的の動作を支援するロボット技術を応用した機器」であり、AIの要素は少なかった。その後、2024年の改定（「介護テクノロジー利用の重点分野」という名称に変更さ

(59) International Federation of Robotics (IFR) website <<https://ifr.org/news/sales-of-robots-for-the-service-sector-grew-by-37-worldwide/>>

(60) Juan Angel Gonzalez-Aguirre et al., “Service Robots: Trends and Technology,” *Applied Sciences*, Vol.11 No.22, 2021. <<https://doi.org/10.3390/app112210702>>

(61) 壬生尚美ほか「介護老人福祉施設における介護ロボット導入の現状と課題」『老年社会科学』44巻1号, 2022.4. <https://www.jstage.jst.go.jp/article/rousha/44/1/44_19/_pdf>

れた。)では9分野16項目に増えた⁽⁶²⁾。そこには「機能訓練支援」「食事・栄養管理支援」「認知症生活支援・認知症ケア支援」といった情報システムが入り、高齢者の状態を計測・推定したり、変化を予測・危険を防止したりする機能が含まれ、AIの重要性が高くなっている。国内の介護施設への調査⁽⁶³⁾によれば見守りセンサの導入率は比較的高い(約30%)ものの、機器の導入・維持コスト、現場ニーズとの適合性、職員による操作習熟の必要性、プライバシーを含めた利用者側の受容性といった課題があり、介護ロボット導入に当たっては利用者の状態や施設環境を評価し、適切な機器を選定するとともに、スタッフ研修や運用体制の整備が重要とされている。今後、AIによる見守り精度の向上や、プライバシーの確保、ロボット介護機器の低価格化が進めば、介護現場でロボットが果たす役割は徐々に拡大していくと考えられる。

2 医療分野

医療分野におけるロボットの代表例が、手術支援ロボットである。米国インテュイティブ・サージカル社の「ダヴィンチ(da Vinci) サージカルシステム」は内視鏡下手術を支援する多関節ロボットアームと3次元内視鏡を備え、執刀医の細かい手の動きを減損なく患部に伝えることで高度な低侵襲手術を可能にした。2000年に米国食品医薬品庁(FDA)の承認を取得して以来、ダヴィンチサージカルシステムは世界中に急速に普及し、2025年3月時点で71か国に約1万台が導入されるなど、3兆円規模の市場になった⁽⁶⁴⁾。日本でも泌尿器科や消化器外科を中心に導入が進み、保険適用の手術件数も増大している。現状の手術支援ロボットは医師がカメラの映像を見ながらリモートで操作するが、AIを用いることで、画像解析に基づく手術工程の自動認識、合併症の自動予測、外科医のスキル評価など、新たな価値の提供が可能になりつつある⁽⁶⁵⁾。また、同社が専有していた特許が2000年頃から消滅し始めたことから、後発組の開発競争も進んでいる(国内では川崎重工業株式会社とシスメックス株式会社が共同開発した「hinotori」など)⁽⁶⁶⁾。

手術ロボット以外にも、リハビリテーション支援ロボット、調剤ロボット、院内物流ロボットなど医療現場の様々な業務を担うロボットが登場している。例えばトヨタ自動車株式会社が開発した自律走行型の搬送ロボットは、病院内で薬剤や医療機器、検体などを決められたルートで配送し、職員の移動労力を削減する⁽⁶⁷⁾。搭載したカメラやセンサにより自己位置を認識し、人や物などの障害物を避けて、ドアやエレベーターと連動しながら目的の病棟に移動する。ほかにも、新型コロナウイルス感染症の流行期には、病棟内を移動して紫外線照射により消毒を行うロボット(UVDロボット⁽⁶⁸⁾)や、発熱患者の問診を無人で行う自律移動ロボット⁽⁶⁹⁾なども

(62) 「「介護テクノロジー利用の重点分野」について」厚生労働省ウェブサイト<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000209634_00013.html>

(63) 「介護現場でのテクノロジー活用に関する調査研究事業(結果概要)(案)」(第215回社会保障審議会介護給付費分科会資料)2023.3.16.厚生労働省ウェブサイト<https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_31947.html>

(64) MONOist「手術支援ロボット「ダヴィンチ」が10年ぶりの新製品、データ処理能力は1万倍に」2025.6.10.<<https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/2506/10/news059.html>>

(65) 竹内優志ほか「ロボット支援手術におけるAIナビゲーションシステム」『手術』78巻5号,2024.4,pp.793-798.

(66) 「シスメックス、川崎重工と手術ロボ開発 外資牙城に風穴」『日経ビジネス』2025.4.18.

(67) 「自律搬送ロボットの導入で看護の本質に迫る—トヨタ記念病院の取り組み—」『看護管理』34巻12号,2024.12,pp.1009-1014.

(68) 「トム・メディック 自律走行ロボで病院内UV殺菌」『日本経済新聞』(東北)2020.7.9.

(69) 「新型コロナ、ロボが問診 岡山中央病院が感染リスク低減へ導入」2020.4.20.岡山の医療健康ガイドMEDICAウェブサイト<<https://medica.sanyonews.jp/article/13869/>>

活用された。医療分野のサービスロボットは患者の安全向上と医療従事者の負担軽減に直結するため、今後も発展が見込まれる。ただし、安全性・信頼性の確保が最重要であるため、臨床現場への適用には慎重な検証と規制への適合が求められる。

3 接客分野

接客・サービス分野でもロボット活用が広がっている。顧客案内や商品説明を行う案内ロボット、ホテルのフロント業務を担う受付ロボット、飲食店で料理を運ぶ配膳ロボットなど、人的サービスを部分的に代替・補助する例が増えてきた。国内ではソフトバンクロボティクス社の人型ロボット「ペッパー (Pepper)」が2010年代に話題となり、携帯電話ショップ・飲食店の店頭受付や介護施設でも用いられた。ペッパーはタブレット画面と音声認識を備えて簡単な対話や案内ができ、感情表現などエンターテインメント要素も持ち合わせている。しかし実際のビジネス現場で長期間活躍した例は限定的で、ある程度普及したことにより顧客の集客につながる“物珍しさ”が低下し、高い維持費が負担になるなど、接客ロボットの難しさも浮き彫りになった⁽⁷⁰⁾、ホテルでの受付ロボットも同様である。近年では、AIによる自然言語応答技術の進歩を背景に、より実用的なタスクをこなすことが可能な案内ロボットの開発が各社で進んでいる。例えば、病院で患者や来訪者を目的の診療科まで誘導するロボット、美術館・商業施設で多言語対応のガイドを行うロボット、コーヒーショップでバリスタとして働くロボットなど、非対面サービスへの需要拡大とともに新しい応用例が登場している。また、配膳ロボットはコロナ禍での非接触ニーズに加え、慢性的な飲食業界の人手不足を背景に、ファミリーレストランを中心に着実に普及が進んでいる。

接客分野のロボットには人と対話する高度なAIや周囲の状況を理解するセンシング技術が要求されるため、実用レベルの実現にはもう一段の技術進歩が必要とされることに加え、据置型のモニター上に表示されるキャラクターによる「アバター接客サービス」との差別化も必要である⁽⁷¹⁾。しかし、省人化や24時間対応へのニーズが高い領域だけに、優れたユーザ体験を提供できるロボットが登場すれば普及する潜在性を持つ分野でもある。

4 家庭向け

家庭用ロボットは、個人が日常生活で利用するサービスロボットである。最も普及している例は家庭用掃除ロボットで、その中でも米国アイロボット社の床掃除ロボット「ルンバ (Roomba)」は2000年代以降に国内で600万台、世界で5,000万台以上を売り上げ⁽⁷²⁾、ベストセラーとなった。ルンバに代表される多くの自律掃除機は、センサで室内の障害物や壁を検知しながら走行して床のゴミを吸引するが、最近では水拭きに対応したり、カメラやAIを搭載して部屋のマップを作成し計画走行したりする高機能機種も登場している。市場が大きくなるにつれて同社は中国メーカーによる低価格・高性能な製品に押されて劣勢となり、2026年1月に中国の杉川機器

(70) 「ペッパー君さようなら 8割超が“もう要らない”」『AERA DIGITAL』2018.10.25. <<https://dot.asahi.com/articles/-/115841>>

(71) Jamy Li, “The benefit of being physically present: A survey of experimental works comparing copresent robots, telepresent robots and virtual agents,” *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol.77, 2015.5, pp.23-37. <<https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2015.01.001>>

(72) 「アイロボット ジャパン、自社ロボット掃除機の全国世帯普及率10%を達成」2024.4.17. アイロボットジャパン合同会社ウェブサイト <https://www.irobot-jp.com/press/pdf/20240417_03.pdf>

人 (Picea) 社の傘下に入るなど、競争が激化している。また、窓拭きロボットや芝刈りロボットなどの清掃関連のロボット市場も広がりつつある。

さらに、ペット型ロボットやコミュニケーションロボットも家庭用サービスロボットの一種である。ソニー社の犬型ロボット「アイボ (AIBO)」や、産業技術総合研究所が開発したアザラシ型ロボット「パロ (PARO)」は、人に癒やしや安心感を与えるセラピー用途のロボットとして知られている⁽⁷³⁾。生成 AI の登場により、ロボットに高度な対話機能や認識機能を手軽に組み込めるようになったことから、低価格で高度な家事代行やパーソナルアシスタント機能を持つロボットが登場する可能性はある。家庭用ロボットはユーザが日常的に直接触れる存在だけに、安全性・使いやすさ・価格といった要素と、ニーズとのマッチングが普及の鍵となる。現在、掃除ロボット以外で家庭用として普及を遂げたものはないが、近い将来に一人暮らし高齢者の自立支援や在宅介護の補助、さらには家族の一員のような共生型ロボットの存在も現実味を帯びてくると予想される。

IV ヒューマノイドロボット

1 ヒューマノイドロボット開発の歴史

ヒューマノイドロボット (以下「ヒューマノイド」) とは、人間に似た形態・関節構造を持つロボットの総称である。典型的には二足歩行で直立し、人間同様に両腕や頭部を備えた形態を指す (語源的には「ヒューマノイド」は「人の姿をした」の意)。ヒューマノイドの研究開発は 1960 年代から行われてきたが、実際に自律歩行するロボットが登場したのは 1970 年代初頭である。日本の早稲田大学で開発された「WABOT-1」(ワボット 1 号、1973 年) は世界初の二足歩行できるヒューマノイドであり、簡単な対話や物体把持機能も持っていた。その後もヒューマノイド研究は大学など研究機関で続けられていたが、大きな転機となったのが 1996 年に本田技研工業株式会社が発表したヒューマノイド「P2」である。P2 は全高 182cm、体重 210kg で、自律的に歩行し姿勢を保ちながら腕を動かす全身動作を実現した⁽⁷⁴⁾。ヒューマノイドの全身が協調してスムーズに動く様子は世界中に衝撃を与え、メディアを通じて広く一般にも知られるところとなった。以来、ヒューマノイド研究は各国で活発化し、同じく本田技研工業株式会社が公開した「ASIMO」(2000 年) や、産業技術総合研究所と川田工業株式会社が開発した「HRP-2」(2003 年)、トヨタ「パートナーロボット (二足歩行型)」(2004 年)、米国ゼネラル・モーターズ (GM) 社と米国航空宇宙局の「Robonaut」(2000 年頃) や韓国科学技術院 (KAIST) の「HUBO」(2005 年) など、次々と新しいヒューマノイドが登場した。これらの多くは研究段階のプロトタイプであったが、人間に近い動作速度で歩行し、小走り程度のジョギングが可能なものも現れた。また把持機能に関しても、小型モータ・ギヤ、ワイヤ駆動など様々な機構を用いた多指・多自由度のロボットハンドが開発され⁽⁷⁵⁾、ものをつかんで運んだり、洗濯物をたたんだりするなど、ヒューマノイドの運動能力は着実に向上していった。

(73) Eva Onyeuloand Vaibhav Gandhi, “What Makes a Social Robot Good at Interacting with Humans?” *Information*, 11(1), 43, 2000. <<https://doi.org/10.3390/info11010043>>

(74) 広瀬真人ほか「人間型ロボット」『日本ロボット学会誌』 Vol.15 No.7, 1997.10, pp.983-985.

(75) Y. Wang et al., “Survey on Main Drive Methods Used in Humanoid Robotic Upper Limbs,” *Cyborg and Bionic Systems*, Vol.2021:9817487, 2021 Jun 15. <<https://doi.org/10.34133/2021/9817487>>

2 ヒューマノイドの技術的な難しさ

ヒューマノイドは、その形状のために自由度が多い一方で、搭載できるモータ、計算機、バッテリーなどに関してハードウェア的な制約が多く、技術的ハードルは高い。二足歩行におけるバランス制御、段差や不整地への対応に加え、ロボットハンドを用いた器用な物体操作、搭載されたカメラや各種センサで周囲を把握する環境認識、人と対面して会話や協調作業を行うインタラクションなど、「人にとって容易なタスク」でも実現が困難なことは多い⁽⁷⁶⁾。特に歩行動作については、平地であれば安定に歩けるロボットが増えた一方で、まだ人間のように柔軟に走ったり跳んだりすることは困難である。踏み外しによる転倒リスクも高く、屋外の起伏ある地形や非常時の素早い動作への適応など、改良の余地が大きいと言える。この ASIMO の時代から難題とされたヒューマノイドの倒れにくさを、これまで多くの研究ではゼロモーメントポイント制御をはじめとした力学モデルに基づく姿勢制御により解決しようと取り組んできた⁽⁷⁷⁾。近年では、人間の運動を基に動作を学習し、AIによりモーションを最適化する試みもなされている。例えば、深層強化学習を用いてヒューマノイドにジャンプしながら様々な環境を走破するパークールのようなダイナミック動作を習得させる研究⁽⁷⁸⁾は注目を集めている。これらはまだ実験段階ではあるが、将来的にヒューマノイドの運動性能が飛躍的に高まる可能性を示している。ヒューマノイドの制御の難しさは、自由度の多さと、複雑かつ安定性の低い構造にある。人型をまねる以上、関節やアクチュエータの数が必然的に多くなり、制御すべき変数が増大する。典型的なヒューマノイドは全身で30以上の自由度（可動軸）を持つが、これは産業用ロボットの数倍に及ぶ。自由度が多いこと自体はロボットの冗長性を高め、（狭い空間に手を伸ばすような）柔軟な動作を可能にするという利点もある⁽⁷⁹⁾。一方で、工学原則の「シンプル・イズ・ベスト」から外れる複雑なシステムは、ハードウェア・ソフトウェアともに開発や保守にコストがかかり、信頼性・安全性の面でも不利であるため、それに見合うだけの汎用性や有用性を発揮して初めて価値があるとも言える。

3 ヒューマノイドの急速な進展と見通し

ヒューマノイドの目的は、人間と同じ環境で、人間と協働しながら作業できる万能なロボットを実現することである。実現すれば、工場などの生産現場だけでなく、災害現場や宇宙空間のような人間にとって危険・困難な環境での代理作業、あるいは家庭やオフィスでの日常的なサポートまで応用範囲が広い、究極の「汎用ロボット」になると期待されている。実際に2010年代には、災害対応ロボット競技会（DARPA Robotics Challenge）でヒューマノイドが瓦礫の中を歩き車両を運転する課題に挑戦し、ヒューマノイドが災害対応に投入される可能性を示した。しかし、日本国内での大手企業によるヒューマノイドの研究開発は、2010年代を境に下火になった。ヒューマノイドの技術にマッチする実用性の高いニーズがなく、事業として成立しないことが大きな理由であったと考えられる。

(76) 柴田昌明「二足歩行ロボットの研究開発の現況」『精密工学会誌』Vol.77 No.5, 2011, pp.453-456. <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/77/5/77_5_453/_pdf>

(77) 梶田秀司「ゼロモーメントポイント (ZMP) と歩行制御」『日本ロボット学会誌』Vol.20 No.3, 2002.4, pp.229-232.

(78) Ziwen Zhuang et al., "Humanoid Parkour Learning," *8th Annual Conference on Robot Learning*, 2024. <<https://arxiv.org/abs/2406.10759>>

(79) 新山龍馬「ソフトロボットの身体性（特集アクティブソフトマテリアルのロボティクス・メカトロニクス応用へ向けて）」『計測と制御』59(11), 2020.11.

一方で、米国のボストン・ダイナミクス社は2009年にPETMANというヒューマノイドを発表したのち、グーグル社、ソフトバンクグループ株式会社、現代自動車グループと親会社が変わりながらも、運動機能の高いヒューマノイドの開発を続けてきた。また、近年になって米国や中国の多数の企業が相次いでヒューマノイド開発プロジェクトを立ち上げたことに注目が集まっている。例えば、米国では2021年に発表されたテスラ社のヒューマノイド計画「Optimus」は、汎用人型ロボットの商品化を目指す動きとして報じられている。また、Figure（フィギュア）社、Sanctuary（サンクチュアリ）社、1X（ワンエックス）社などのスタートアップも注目を集めている。

また、中国では政府主導でヒューマノイドの産業エコシステム構築に焦点を当て、数兆円規模で政策誘導、金融支援、インフラ整備等を行っているといわれ、2022年以降、多数のヒューマノイド関連スタートアップが出てきている⁽⁸⁰⁾。

現状では、これらヒューマノイドの産業（製造、物流、サービス等）での利用は、「PoC（概念実証）」と呼ばれるアイデアの実現可能性の小規模な検証段階であり、研究開発やデータ収集目的での利用やデモンストレーション用途が中心である。人と共存する生産現場などの環境であればロボットが人型である利点はあるが、更に自動化が進んで無人の環境になったときに、ヒューマノイドを使い続ける利点が果たしてあるのかは明確ではない。また、その先で家庭やオフィスなどにおける日常生活で人と共存する存在になるのかは更に不透明である。現状の「ヒューマノイドブーム」は現実との間にギャップがあり、「これまでも繰り返されてきた誇大広告である」という指摘もある⁽⁸¹⁾。

しかし、AI技術とロボティクスの融合が成熟すれば、ヒューマノイドが実社会で活躍する時代が訪れる可能性はある。今後、次章で述べる安全面や倫理面の議論も踏まえつつ、段階的に実証と改良を重ねることで、人々が受け入れられる形でヒューマノイドが社会実装されていくことが求められる。その道程は平坦ではないが、「AI時代のロボティクス」においてヒューマノイドが果たす役割は極めて大きく、引き続き動向を見守る必要がある。

（湯口 彰重、橋本 卓弥、松本 吉央）

(80) 「ヒト型ロボットのSlr争奪戦が始まった」2026.1.26. 日刊工業新聞ニュースイッチウェブサイト <<https://newswitch.jp/p/48171>>

(81) James O'Donnell「人型ロボット、熱狂と現実にギャップ 繰り返される誇大広告」2025.5.9. MIT テクノロジーレビューウェブサイト <<https://www.technologyreview.jp/s/361387/why-the-humanoid-workforce-is-running-late/>>