

2.2 ロボティクス

ロボティクス分野は高い自律性を持つ機械や機械と人間の緊密な相互作用を実現することで、安心安全でQoLの高い生活をもたらす新たな社会システムの形成に貢献する研究開発領域からなる。センサーやアクチュエーターなどのハードウェア技術の進歩に加え、深層学習や強化学習などの機械学習手法を認識や制御に導入することで、非定型な環境での作業や人との協調作業などが可能となり、適用領域が多様な分野へと拡大しつつある。

近代的なロボットの研究開発の歴史を振り返る。ロボットは、1962年の産業用ロボットに始まり工場内の工程の自動化の実現を目指し、パターン認識による自動位置決め機能や移動軌跡の学習機能を実装することで、定型的な作業を正確に休まず実施できるレベルになった。さらにこれらの技術の発展により、複雑な非定型作業や協調作業が可能となりつつある。90年代になると工場働く産業ロボットだけでなく、一般社会や家庭で働く知能ロボットの研究開発が盛んになった。2000年代に入るとロボットの適用はさらに広がり、手術支援ロボットやロボット掃除機も開発された。また、2010年代末には、ロボットの適用はさらに広がり、条件付き（レベル3）自動運転車、配送用2足歩行ロボット、インフラ点検用ドローンが実用化された。また、一段と進歩した人工知能を搭載し、自らの行動を判断・決定して動作する知能ロボットが、家庭用ロボットや人型ロボットとして開発され、人間と知的なインタラクションが可能なパートナーと言った存在になると期待が高まっている。またVRやハプティック技術によるアバターを介した新たな共生も登場している。以上のトレンドは、技術の発展、実社会への浸透、および、人間との共生という3つの観点で捉えることができる（図2-2-1）。

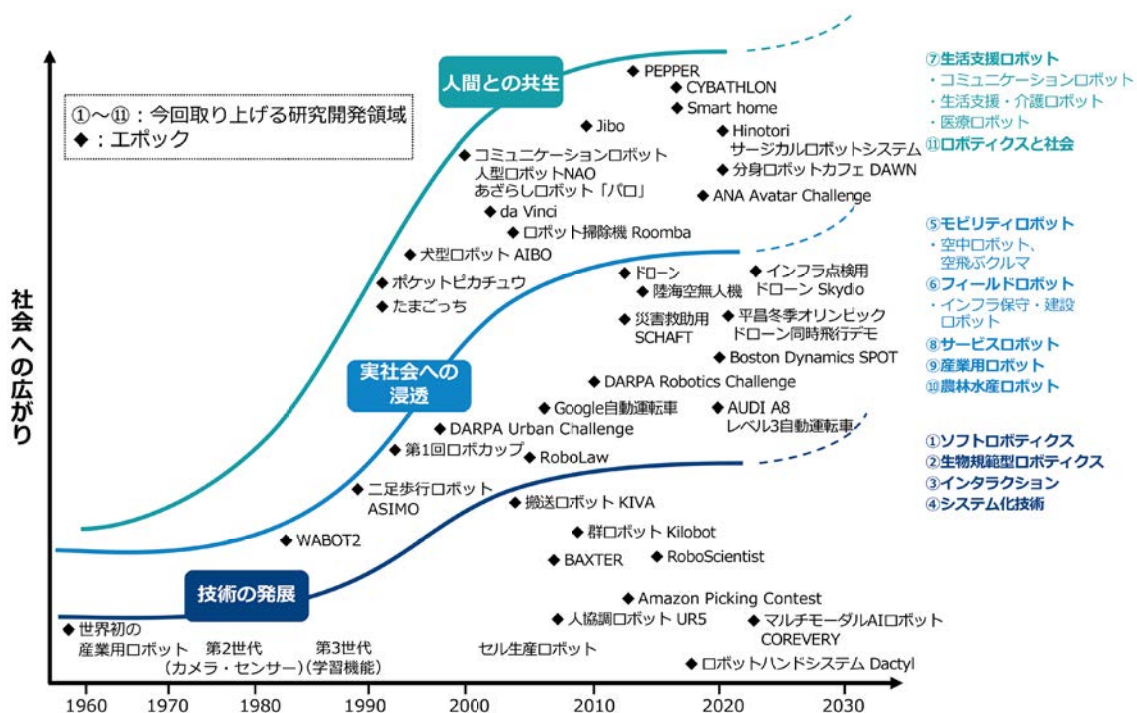


図2-2-1 ロボティクスの俯瞰図（時系列）

また、with/postコロナ社会への対応として、触診などを含むオンライン医療、テレプレゼンスロボットを介した拡張テレワークなど、人と直接振れる業務や複数人の密接な連携を必要とする業務のテレワーク化を実現するための重要な基礎技術として位置づけられる。

本俯瞰区分では図2-2-2に示すように、ロボティクスの研究開発領域を応用領域、機能コンポーネント・統合化技術、および基盤技術のスタックに整理した。その上で今回の俯瞰報告書では、1) 技術の革新性やその技術への期待の急速な高まりに注目し、ロボティクスに革新的変化をもたらしうる新興領域を明確化すること、2) 社会からの要請や国のビジョンとの整合性に着目し、これらの実現に向けて必要となる技術開発領域とその発展の方向性を明確化すること、3) 人々のライフスタイル・ワークスタイルや社会・産業構造の変革とSDGsを含む社会課題解決に貢献すること、の三つの観点から、以下の11の研究開発領域を採り上げることとした。なお、ロボティクスにおける基盤技術である「認知発達ロボティクス」については、2.1 人工知能・ビッグデータにて論じている（2.1.8 認知発達ロボティクス）。

① ソフトロボティクス

環境変化に対する適応性は、生物の最も重要な特徴の1つであり、生物の身体が有する柔らかさはそこに大きく寄与していると考えられる。ソフトロボティクスは、このような柔らかさに注目し、従来の「硬い」ロボットが苦手とする環境への適応を実現するロボティクス分野である。生物的な柔らかさを実現する技術の確立と、柔らかな適応的知能の実現に向けた理論の構築が本研究開発領域における重要な両輪と考えられる。

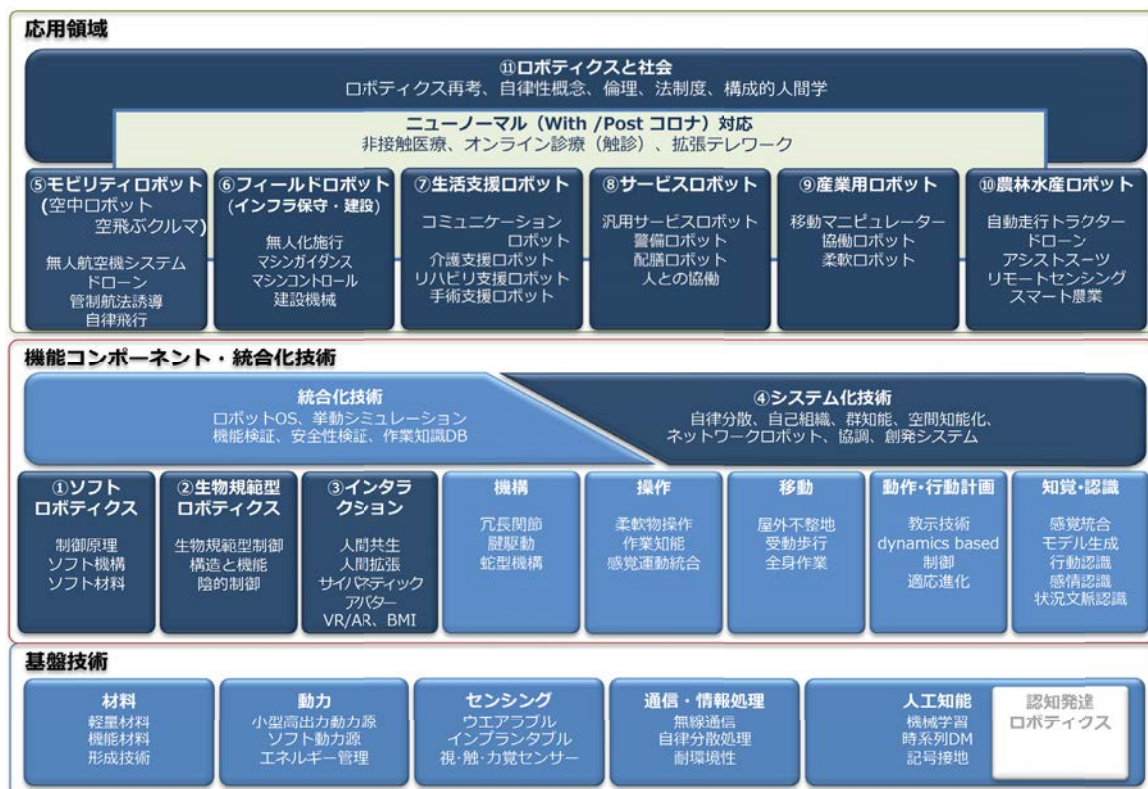


図2-2-2 ロボティクスの俯瞰図（構造）

② 生物規範型ロボティクス

生物は、進化過程という壮大な試行錯誤の場を通して、優れた機能や能力、構造を獲得してきた。これらの中には、未だわれわれが知り得ぬ非自明なカラクリが潜んでいるはずである。生物規範型ロボティクス (bio-inspired robotics) は、生物に内在する優れた機能や能力、構造をロボットの設計過程に積極的に取り入れ、発現する性能の向上を図ることを志向する研究開発領域である。広義には、バイオミメティクスと捉えることができる。一方で、生物規範型ロボティクスの分野における従来の研究開発は、生物の皮相的な模倣の域から抜け出ていないものが多く、本研究開発領域のあり方や戦略を考えることが求められている。

③ インタラクション

インタラクションは、物理空間・情報空間での人間の経験や表現を豊かにすることに役立つシステムを構築するための研究開発領域である。現在のVR / ARなどのヒューマンインターフェース技術は主に視聴覚情報のみを用いているが、近年の「Society 5.0」においては、各種のセンサーやスマートデバイスがつながったIoTの技術などを使って、物理空間と情報空間を別ものとして扱うのではなく、これらの空間の間を自由自在に行き来したり、統合したりするなど、本研究開発領域に求められるものも拡大している。

④ システム化技術

ロボット技術は、システムインテグレーション技術である。ロボットシステムは、複数の要素から構成されるため、その要素をいかに統合し、システムとして連携して機能させるかが重要である。ロボットシステムには、単体のロボットにおける構成要素のみならず、複数台のロボットや機器、およびそれらの組み合わせ、さらには環境に設置するセンシングデバイス、記憶装置、情報処理装置、情報提示装置、動作モジュールなどをすべて要素として含む。これらの要素群を連携させ機能させるための技術がシステム化技術である。

⑤ モビリティロボット (空中ロボット、空飛ぶクルマ)

遠隔飛行、自動飛行、自律飛行により空中を飛行し、ミッションを遂行できる空中ロボットに関して、飛行体としての機体本体、飛行制御システム、遠隔操作やデータ送信のための通信システム、複数の飛行体の安全で効率的な飛行を可能とする運航管理システムを包括した領域を研究開発領域として定義する。無人航空機システム (UAS: Unmanned Aircraft System) と呼ばれることもあるが、機体が大型し、人を運ぶことができるほどのペイロード能力を持つ機体「空飛ぶクルマ」と呼ばれることもある。「空飛ぶクルマ」に関しては操縦士が搭乗する場合は、航空機の扱いとなるため、ここでは、UASと同様に、操縦士は遠隔で操作、または自動・自律操縦するものを対象とする。

⑥ フィールドロボット (インフラ保守・建設)

日本では、インフラの維持管理・更新の作業の自動化、災害発生時の災害調査や応急復旧は重要な課題であり、これらを遠隔から実施するためのシステムの研究開発が進められている。一方、建設分野においては、ICTやロボット工学を用いた、建設における自動化や省人化が期待されており、そのための研究開発が進められている。これらのインフラ保守・建設ロボット分野では、問題解決型の研究開発が幅広く行われている。いずれも、対象とする環境が屋外であるため、不整地走行性能、センサーのロバスト性、機器の耐環境性能が求められる。そのため、多くの発展が期待される研究開発領域である。

⑦ 生活支援ロボット

生活支援に関わる応用ドメインで利用されているロボットについて、「コミュニケーション」、「生活支援・介護」、「医療」の3つの観点から取り上げる。

コミュニケーションロボットは、人々と社会的なインタラクション、会話、触れ合いなどを行う機能を持つロボットであり、生活支援・介護や医療ドメインでは、高齢化、人手不足といった社会問題を背景に、ロボットの潜在的なニーズが高く、さまざまな応用方法が研究開発において模索されている。

生活支援・介護ロボットは、日常生活動作（ADL）や調理・掃除などの日常生活活動を対象とした自立支援、社会参加支援、介護者や家族の負担軽減、介護事業者の生産性向上のための技術開発が対象となるロボットである。

医療ロボットは、医師や医療スタッフによる疾病の診断や治療、予防行為を支援するためのロボットシステムである。センシングやナビゲーション、多数の医療機器のネットワーク統合、高速大容量通信や人工知能といった基盤的な技術の発達によって、医療ロボットにより得られる医療の質がさらに高まることが期待される。

⑧ サービスロボット

サービスロボットとは、汎用的な産業用ロボット以外のロボット全般を指すことが多く、明確に定義されているものではないが、本稿においては日常生活の支援や小売業など第三次産業においていわゆる「サービス」を提供するロボットについて論じる。例えば、家庭における清掃ロボット、公共施設等における警備ロボット、店舗等における接客ロボットや配膳ロボット等が対象となる。人へのサービスを提供するロボット分野であることから、ユーザとの距離が近いことに起因する「安全性」や、自ら考え、認識、判断する「自律性」などの技術確立を課題とした研究開発領域である。

⑨ 産業用ロボット

産業用ロボットは、製造業で利用されるロボットに関する研究開発領域である。利用分野として、従来からロボットが導入されている重工業、自動車産業、電気電子産業に限定せず、食品産業など新しいロボット利用分野も対象となる。ものづくりを想定しているので、最終的には実用化、事業化に結び付く要素技術開発とシステム技術開発が目的となる。

⑩ 農林水産ロボット

我が国の農林水産業は、就業者の減少と高齢化により労働力不足が深刻である。多くの作業が炎天下や急斜面等の過酷な労働環境であるため、ロボットを活用した省力化、省人化技術のニーズが高まっている。他方、世界では今後人口の増加とともに地球温暖化、干ばつ、砂漠化など地球環境の過酷化が進行する中で、農林水産業において人に代わるロボットが必要不可欠との認識である。本研究開発領域では農林水産ロボット、特に最も技術開発が進んでいる農業を中心にその最新の技術動向とともに今後の発展方向について述べる。

⑪ ロボティクスと社会

近年の人工知能やロボット技術の進展に伴い、社会におけるロボットの役割を明確に意識したロボットの設計論が望まれる。本稿では、これらの課題を扱う上で、最初に、ロボティクスをさまざまな学問分野が

ら構成されるtrans-disciplinary（超域）として再考する。次に、人と相互作用するロボットの設計論の哲学的背景を概観する。そして、社会における自律性の意味を問いなおし、共生社会における倫理のあり方を議論する。最後に法制度の面から社会制度改革への提言につなげる。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

2.2.1 ソフトロボティクス

(1) 研究開発領域の定義

環境変化に対する適応性は、生物の最も重要な特徴の1つであり、生物の身体が有する柔らかさはそこに大きく寄与していると考えられる。ソフトロボティクスは、このような柔らかさに注目し、従来の「硬い」ロボットが苦手とする環境への適応を実現するロボティクス分野である。生物的な柔らかさを実現する技術の確立と、柔らかな適応的知能の実現に向けた理論の構築が本研究開発領域における重要な両輪と考えられる。

(2) キーワード

柔軟材料、柔軟センサー・アクチュエーター、身体的知能、生物規範ロボティクス、ウェアラブルロボット、流体アクチュエーター、柔軟関節、力覚・触覚センサー、脚ロボット、人協働ロボット

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

工場などの生産現場で使われている産業用ロボットなどの「硬い」ロボットは、高精度が要求される作業や、作業の繰り返しを得意としており、工場のような整備された環境下では効率よく動くことができる。しかしながら「硬い」ロボットは環境変化に対する適応性が低く、環境から予想外の干渉がある場合には、作業実現率が低下してしまう。また、過大な力を発生し、環境を破壊したり自らを破壊したりする場合もある。一方、柔らかい体を持つ人間などの生物は、高精度の繰り返し作業は苦手であるが、環境の変化に柔軟に対応し、作業を遂行することができる。このような適応性は、知能を構成する重要な要素であると考えられ、柔らかい身体によって適応的、知的な振る舞いを作り出し、人間に匹敵する知的なロボットを作ることができると期待される。

柔らかい身体によって知的な振る舞いを生み出す機序とともに重要なのは、生物的な柔らかさを実現する技術の確立である。これまでのロボットは、金属やプラスチックなどの硬く、加工法が確立されている材料で構成されている。一方、ロボットにどのような柔らかい材料を実装するのかについて、そしてその実装の方法論については、まだ確立していない。近年、急速に普及が進んでいる各種の3次元プリンティング技術や、生物から摘出したり、培養したりすることによって作成された生体部品を使う方法など、これまでにロボットにおいて検討されていなかった新しい実装方法を開発する必要がある。

応用としては、硬いロボットが安全上、人間と干渉しないように使われていたのに対し、人間と作業環境を共有する人協働ロボットや、人間が直接装着して動きをアシストしたりするウェアラブルロボットやアシストスーツなど、人間と柔らかく干渉することができる特性の利用に注目が集まっている。

[研究開発の動向]

ロボットに弾性を導入することは、フィードバック制御におけるゲインの上限を下げることとなり、制御の精度を上げようとする場合、不利に働く。これに対して、最初にアクチュエーターに直列弾性を導入することを提案したのは、MIT人工知能研究所のロドニー・ブルックスらである。ブルックスは1986年にロボットを構成する各モジュールが自律的に処理を行うことで、全体として大きな適応性を実現するというサブサンプシオンアーキテクチャーを提唱した。これによって昆虫並みの知能は実現できるが、それを人間並みのロボットにスケールアップすることはできないだろうとするマーヴィン・ミンスキーとの議論を経た後、直列弾性アク

チューーター駆動のヒューマノイドロボット¹⁾を作り、知能的な振る舞いを実現しようとした。しかしその後、柔らかいロボットは複雑な動特性を持つ制御対象として扱われることはあっても、知能研究の対象としては、一旦姿を消す。

一方で、マーク・レイバート（現ボストンダイナミクス）は、1980年代に直列に空気圧シリンダを備えた一脚、多脚のロボットを作り、柔らかさを利用することで、制御周期の遅いコンピューターでも瞬間的な制御の必要な跳躍や走行をコントロールできることを示し、圧倒的なパフォーマンスを実現した²⁾。その後もボストンダイナミクスにおいて、さまざまな脚ロボットを開発し、歩行ロボット技術を先導している。しかし、柔らかさが計算を代替するという新たな知能研究への展開や、ソフトロボティクスという新しい分野の確立にはつながらなかった。

ソフトロボティクスというキーワードが学会誌に現れたのは、日本ロボット学会誌1999年9月号「ソフトロボティクス」特集号である³⁾。「非構造環境下で不可避免的に発生する外乱を受け入れ、人間との接触において安全なロボットの設計を目指し、様々なソフトな要素、アクチュエーターを慎重に選択し、ロボットの機構に組み込む方法、さらに、その機構に適用する制御系の設計法」、「『メカニカルなソフトネスの導入』は、非構造環境下で働くロボット、あるいは人間と共存するロボット等を設計、製作するための必須条件である」といった記述があり、人間との柔らかい相互作用、あるいは安全、安心が焦点であったことがみてとれる。

1990年代終わりから、チューリッヒ大学のロルフ・ファイファーを中心に、身体性という考え方が人工知能の分野で台頭してくる^{4), 5), 6)}。身体性の本質をひとことで説明することは難しいが、「知的なロボットの振る舞いは、身体の構造と制御、そして環境のダイナミクスの相互作用の結果生み出される」というのが基本的な考え方である。「コンピューターがいかに高速になろうとも、相互作用を考えずに制御のみで知的な振る舞いを生み出すことは難しい」と言い換えてもよい。ファイファーが主張したのは、身体の構造から生み出される形態学的計算が、コンピューターによる形式的計算と組み合わせ、環境と相互作用することで、知的振る舞いが生み出されるという点である。

2000年以降、生物規範ロボティクスについての研究がカリフォルニア大学バークレイ校、スタンフォード大学で進んでいる。ゴキブリロボットのロコモーション⁷⁾や、イモリの足部機構とその機能に関する研究によって、生物を模倣した柔らかさの設計が、知能的振る舞いを生み出すために重要であることを示した。生物規範ロボティクスでは、生物の形態をそのままコピーをするのではなく、形態の持つ機能をよく解析して、その機能をコピーするべきであると主張している。すなわち、生物の柔軟構造が持つ機能を十分に理解し、人工物によってそれを再現することで、柔らかさを機能的に利用したソフトロボットを実現することができる、ということである。

一方、米東海岸のMITやハーバード大学では、異なった観点から、ソフトロボティクスの潮流が生じている。2008年から2010年にかけてハーバード大学のジョージ・ホワイトサイズが、米DARPAによるChemBotsプログラムを主導した^{8), 9)}。ChemBotsでは、化学的あるいは流体力学的（Hydrostat、ハイドロスタット）な駆動による柔らかいアクチュエーターの開発、という観点からソフトロボットにアプローチしている。ホワイトサイズによると、このプログラム自体から非常に新しいものが生まれたわけではないが、このプログラムに参加していた研究者は、その後、MITやハーバードを中心にソフトロボティクスの大きな流れを作り出した^{10), 11), 12)}。この研究の流れは、その後、Soft Robotics ToolkitやeGaln（Gallium-Indium eutectic、共晶ガリウムインジウム）を用いた柔軟なセンサー開発へと発展した¹³⁾。ハーバード大学では、非常に小さいサイズで柔らかい羽根を持つ飛翔ロボットであるRobo-BEE¹⁴⁾や、化学反応を利用した回路を持つタコロボット¹⁵⁾など、多くのソフトロボットが開発されている。タフツ大学のバリー・トリマーらは、イモムシの構

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス

造や運動を解析し、その動きを実現するような柔らかいロボットを開発している^{16), 17)}。ソフトロボティクスのもっともわかりやすい機能は、環境への適応性、コンプライアンス（機械工学におけるコンプライアンスではなく、本来の字義的な「なじみ」という意味でのコンプライアンス）である。ソフトロボティクスに関するもっとも古い解説記事の一つでは「静水圧を用いた無限次元のなじみこそがソフトロボティクスであり、超多自由度ロボットはそれに該当しない」と、ソフトロボティクスにおいて無限次元の柔らかさが重要であるという言及をしていて興味深い¹⁸⁾。同様の考え方はホワイトサイズの解説記事にも表れている⁸⁾。柔らかいアクチュエーターとして、既に紹介した空気圧人工筋や、流体エラストマーを用いたアクチュエーターなども開発されている。粉粒体の特性を利用したジャミングハンドも、コンプライアンスを利用したソフトロボティクス研究の事例として挙げられる。

2005年から2009年まで実施された特定領域研究「移動知」（領域代表：浅間一（東大））では、生物やロボットの身体性に注目し、身体、脳、環境によって振る舞いを生み出す原理についての研究が行われた。ソフトロボティクスの身体性において生物を模倣する必然性は存在しないが、創発される相互作用を設計するための一般論が存在しないなかで、柔らかさを活用したロボットを設計する指針の一つとして生物の構造を参考にすることができる。2010年には、身体性関連の研究者によって、ソフトロボティクスワークショップが東京大学で開かれた。これは「ソフトロボティクス」をどう定義したらよいかを考える日本初の会議である。ソフトロボティクスを直接定義するのではなく、むしろ、定義を模索することでソフトロボティクスを広くとらえ、何らかの意味で柔らかいロボットを研究している研究者をできるだけ取り込んで、大きな流れを作ろうとしていた。

ヨーロッパにおける、もっとも初期のソフトロボティクス関連プロジェクトは、オクトパスプロジェクト（FP7-ICT 2007.8.5, FET Proactive, 2009-2013）である。当初は、特にタコの触手の流体力学的な性質に着目し、タコの触手の構造を解析して、柔らかい触手の工学的なモデルを作ることを目的としていた、その後、触手の柔軟な構造がもつ計算能力に着目し、柔らかさに潜む身体的知能研究の先鞭をつけている。オクトパスプロジェクトは、そのPIであったセシリア・ラスキにより、ソフトロボット関連の研究者の共同研究プロジェクトであるRoboSoft（FP7-ICT-2013-C project # 619319）へと発展している。

ヨーロッパにおける生物模倣とは異なる流れとして、ソフトロボティクスを柔軟なアクチュエーターの持つ特性ととらえ、関連する研究者を取り込んで分野を発展させようという動きもあった。2014年フラウンホーファー研究機構のワークショップがドイツで開かれ、関連する研究者がその後寄稿して作られた予稿集が“Soft Robotics”の題名で刊行されている¹⁹⁾。このワークショップには、VIActorsプロジェクト（FP7, 2009-2012）で、直列弾性アクチュエーターや、可変弾性アクチュエーターを開発した研究者らも参加している。これはMITで開発された直列弾性の考え方を引き継ぐものである。

（現在の潮流）

ソフトロボットの隆盛を受け、2013年には、Soft Robotics Journalが刊行された²⁰⁾。また、前述の2010年に東京大学で開かれたワークショップは、IEEE Technical Committee “Soft Robotics”の最初のイベントであった。その後、ソフトロボティクスTCは成長を続け、先に挙げたRoboSoftを母体に、2018年には第一回IEEE International Conference on Soft Robotics（RoboSoft）がイタリアで開催され、第二回（2019年）は韓国ソウルで、第三回（2020年）はミエール大学（オンライン）で開催されている。ソフトロボットは分野としての地位を確立しつつあるといえる。第三回（2020年）RoboSoftの研究キーワードは、現在のある程度の学術的なトレンドを示していると考えられるので、ここに列挙しておく（頻度順）：

Soft Robot Materials and Design, Soft Sensors and Actuators, Soft Robot Applications, Modeling, Control, and Learning for Soft Robots, Biologically-Inspired Robots, Wearable Robots, Hydraulic/Pneumatic Actuators, Compliant Joint/Mechanism, Force and Tactile Sensing, Legged Robots, Grippers and Other End-Effectors。材料、センサー、アクチュエーターなどの要素技術に関する多くの発表があり、それを用いたモデル化、学習、制御、そして生物規範ロボティクスが続いている。注目すべきは、ウェアラブルや脚ロボット、グリッパなどの応用例である。「柔らかい」という接頭語がついてはいるが、ロボティクス全般に研究が広がっているといえる。米国では、NSF EFRI Continuum, Compliant and Configurable Soft Robotics Engineering (C3 SoRo) が発足し、ソフトロボット研究を推進している。韓国では、2016年より韓国研究財団 (NRF) による理工分野の基礎研究事業として、ソウル国立大学にソフトロボティクス研究センターが設立され (センター長、キウジン・チョウ)、次世代ソフトウェアラブルロボット技術を中心に研究開発が進められている。日本では、2018年より科研費新学術領域「ソフトロボット学」 (領域代表：鈴森康一 (東工大)) が発足し、生物、材料、ロボティクスという異なる分野の融合的研究によってソフトロボット学を確立しようとする試みがなされている。日本国内のロボットメーカーでは、関節を柔らかく制御することによって、柔らかい運動ができて人間と共存できるような人協働ロボットの開発が進んでおり、そのためのトルク制御などの制御技術などに進展がみられる。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

自己修復可能な材料

EUのHorizon 2020において、自己修復可能な柔らかい素材についての研究 (Self-Healing Soft Robotics, A Horizon 2020 FET Open Project) が進められている。自己修復能力は、工学にとって一つの大きなベンチマークである。このプロジェクトでは、特殊な材料をロボットの部品として用いることで、自己修復を可能としている。また、新学術領域「ソフトロボット学」では、生体細胞を材料としたロボットを作る試みがなされており、細胞の成長を利用した自己修復技術に発展することが期待される。

新規材料開発

ソフトロボットのための新規材料開発が活発になりつつある。前出の自己修復可能な材料のほか、液体金属のeGaIn、各種の高分子ゲル、シリコンなどが柔らかいロボットの素材として試されてきている。ソフトロボット材料は、加工性と安定性といった相反する特性をバランス良く持つことが重要である。また後述の付加製造技術の進展により、柔らかい～固い、導電性～誘電性といった材料特性が、場所によってシームレスに変化する傾斜機能材料が創出されており、ロボットの設計自由度の向上につながる技術として期待されている。

Additive manufacturing (付加製造)

近年の3次元プリンターの普及により、これまでの (切削などの) 除去による造形ではなく、付加によって造形を行う付加製造技術に注目が集まっている。3次元プリンター材料の改良が進み、構造部材などの強度が要求される部品が付加製造によって造形できるようになってきた。一方で、付加製造特有の精度確保手法、機構設計法、材料に関する検討は引き続き行われており、付加製造のためのマニファクチャリング工学技術の確立が望まれる。特に、ソフトロボティクスにおいては、高分子材料などの柔らかい素材をどのように安定に加工できるかがカギとなる。また、付加製造によって生体材料を生体組織に直接プリントするという手法の研

究が始まっている。生体材料の場合には、生体親和性と、製造後の成長を考慮した設計法など、これまでに考えられなかった問題点が浮上しつつある。また3次元形状を造形するだけでなく、成長、劣化、自己修復などの造形後のさらなる形状変化まで予め設計に組み込む4次元造形技術（4Dプリンティング技術）にも注目が集まりつつある。

モデリングと制御

IEEE RoboSoftでは、無限次元の自由度を持つ柔らかいロボットをどのようにモデル化し、制御するかについて多数の発表が行われている。特に近年は、進展が著しいディープラーニングなどの機械学習をソフトロボットのモデル化や制御に使うという動きが活発化している。またモデル予測に基づくトルク制御を用いて高い踏破性を示す四脚ロボット（これもトルク制御によって柔軟性を実現したソフトロボット技術の一種といえる）など、アメリカを中心に脚ロボット（特に四脚ロボット）の研究が進んでいる。脚ロボットにおけるモデリングは、無限次元のモデリングに比べて幾分シンプルではあるが、シンプルな制御であるがために非常に素早く適応的な運動を生み出すことができる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

NSF, Continuum, Compliant and Configurable Soft Robotics Engineering (C3 SoRo)

米国NSFは、EFRI Continuum, Compliant and Configurable Soft Robotics Engineering (C3 SoRo) を立ち上げ、ソフトロボット研究を推進している。10個の学際融合チームに対し、総額2千万ドルが2019年から4年間配分される。2020年のIEEE RoboSoftでは、口頭発表60件のうち半数以上の31件がアメリカからの発表であり（参考までに、日本は10件、イギリス4件、イタリア3件と続く）、このプロジェクトが、アメリカにおけるソフトロボティクス研究の推進に貢献していることが見て取れる（かなりの数の論文が、NSFのサポートに言及している）。

新学術領域「ソフトロボット学」

日本では、2018年より新学術領域「ソフトロボット学」が立ち上がっており、生物学者、材料研究者、ロボット学者がチームを作って研究を進めている。生命現象のプラットフォームである有機体に特有の「やわらかさ」に注目し、生物学・情報科学・物質科学・機械工学・電子工学が有機的に融合したサイエンスであるソフトロボット学の創設を目指している。

山形大学・ソフトマターロボティクスコンソーシアム

産学連携による機能性有機材料研究コンソーシアムを形成し、「ソフト機能材料・デバイス」、「ソフトセンシング」、「ソフトメカニクス」、「ソフト蓄電デバイス」の4テーマから、有機材料の極限機能の創出を目指している。さらに、人・モノ・情報・人工知能をソフトにつなぐ「ソフトマターロボティクス」への発展を目指している。

Self-Healing Soft Robotics, A Horizon 2020 FET Open Project

EUのHorizon 2020において、人工機能材料、スマートセンシング、アクティブアクチュエーションと制御機能をソフトロボットに統合し、完全自律型自己治癒ソフトロボットデバイスを開発することを目的としている。受動的および能動的な治癒メカニズムを含む材料システムとスマートな感覚機能の組み合わせは、より信頼

性が高く持続可能な製品の実現に寄与すると考えられ、自動車産業、航空宇宙産業、海運産業、エネルギー生産、製造業、建設業などに革命をもたらす可能性があり、社会全体での応用が期待される。

ソウル国立大学ソフトロボティクス研究センター

2016年から2022年までの7年間、韓国研究財団理工分野の基礎研究事業の一環として設立された（センター長、キュウジン・チョウ教授）。韓国の国家戦略ロードマップの中核技術と位置づけられるヘルスケア技術とAR・VR技術を基礎に、次世代ソフトウェアラブルロボット技術を開発し、急速に成長しているウェアラブルロボット市場の先行的独占を目指している。このために、（1）ソフト知能と生体力学に基づいて着用性／利便性が改善されたソフトウェアラブルロボットの設計、（2）変形と曲げが大きい状況で、ロボットの状態推定が可能なソフトセンサーとソフトセンサーアレイの開発、（3）マシンラーニングベースの着用者の意図／作業状況の把握とウェアラブルロボット制御アルゴリズムの開発を目標としている。

（5）科学技術的課題

ソフトロボティクスに関する研究のさらなる進展を可能とするための重要な課題として、ソフトネスプロダクション（柔らかさをどう設計・実現するか）、そしてソフトインテリジェンス（柔らかさをどう適応性に結び付けるか）の2つが挙げられる。

【ソフトネスプロダクション：柔らかさをどう設計・実現するか】

柔らかさを活かした様々な材料開発が必要である。前述の自己修復材料に加え、eGaInといった液体金属による配線と有機半導体によるソフトセンサーによってソフトロボットの表面に高密度の触覚センサーアレイを構成することが期待される。また、エラストマーや導電性高分子を用いたソフトアクチュエーターの創出も期待される。このように、ソフトロボット材料には、機械的特性のみならず、自己修復能力を含めた化学的特性、成長する細胞を利用するための生体親和性等の生物的特性、導電性、誘電性といった電気的特性など、複数の面から素材の特性を評価し、新たな可能性のある素材を開発することが求められる。

これらの素材を活用して、センサーと構造材料の一体化、アクチュエーターと構造材料の一体化、造形後の形状変化・成長等を取り込んだ新たなロボット設計の方法論の構築が求められる。新たな設計の方法論として、自然界でうまくいっている形態を規範とする、生物規範型設計が強力なツールとなると期待される。ロボット工学において従来から生物模倣という概念が用いられてきたが、新たな材料特性を取り込んで柔らかさを設計するにあたって、皮相的な模倣に留まらず、目的とする機能を実現するために生物がどのような形態を利用しているか本質的な理解に基づく、生物を規範とした設計が求められる（2.2.2 生物規範型ロボティクス参照）。

さらに、新たな製造技術の開発も必要となる。前述の付加製造技術に加え、センサーアレイの実現に向けて、マイクロマシニング、CVD、ソフトリソグラフィ、ナノインプリント等のマイクロ／ナノスケールの製造技術の確立が求められる。また、成長する細胞を利用するためには、これまでほとんど研究が進んでいない生物材料（つまり細胞）のプリントと培養方法の開発が求められる。このような材料開発、設計方法、製造技術の実現に向けて、ロボット分野、化学分野、材料分野、生物分野の研究者からなる分野融合的な取り組みが重要となる。

【ソフトインテリジェンス：柔らかさをどう適応性に結び付けるか】

化学・材料・生物分野との融合を通じて得られた新たな材料の特性を生かし、いかにしてロボットの適応性を生み出すかが重要となる。身体が柔らかいだけでも、ある程度の適応性（コンプライアンス）は実現できる、しかし四脚ロボットの例にもあるように、柔らかい身体（制御を含む）を作れば、モデル予測制御によって安定な歩行を生み出すことができるなど、柔らかいダイナミクスを実現することで、制御を簡素化、有効化する身体性の活用が、全体システムとしてのロボットの適応性を大きく前進させることになる。また、生物模倣に基づいたロボットを試作するという構成論的アプローチによって、柔らかさが知能にどのように寄与しているか解明することにつながる。これは、生物がどのように適応的振る舞いを生み出すかといった生物分野における課題に対する寄与も期待される。さらに、柔らかい身体非線形ダイナミクス自体を計算機構として取り込んだリザーバコンピューティングは、新たなソフトインテリジェンスのあり方として期待される。

（6）その他の課題

ソフトロボティクスは、ロボット学、材料、化学、生物など複数の分野にまたがる学際的研究であり、複数の分野の連携が必要不可欠である。ロボットにおける従来の異分野連携は、ロボットの仕様を決めると、それに応じて材料の仕様が決まり、その仕様を満たす材料を探す、といった様に他分野とは「仕様」を通してのみのコミュニケーションに限定される場合も多かったが、ソフトロボティクスの場合には、材料自体の特性がロボットの機能に直結しているため、異分野とのより密な情報交換と連携が必要となる。例えば、材料系の研究者がロボットに求められる機能を実現するための候補材料を提供し、それをもとにロボット研究者が知能の実装方法を考え、再び材料の検討に戻るといったフィードバックが常に行われることが求められる。そのために各分野のバックグラウンドを持ちつつ、異分野の知識を吸収し、その可能性と限界を見据えながら自分の分野での活用を考えられるような若手の育成が、ソフトロボティクスにとって重要である。

さらに産学連携も重要である。ソフトロボティクスの代表的な出口は、ウェアラブルロボットと人協働ロボットである。特に人協働ロボットに関しては、これまでの精度・速度優先の産業用ロボットを見直し、人間と共存しながら、かつ環境変化に適応的な事例を示していくために、産学連携は非常に重要になると考えられる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	新学術領域「ソフトロボット学」や山形大学・ソフトマターロボティクスコンソーシアムにて基礎研究が推進されている。IEEE Soft Roboticsでは、日本からの口頭発表数は10/60である。
	応用研究・開発	○	↗	各ロボットメーカーより、柔軟性を取り込んださまざまな人協働ロボットが発表されている（2019国際ロボット展）
米国	基礎研究	◎	↗	NSF C3 SoRo Projectが推進されている。IEEE Soft Roboticsでは、半数以上（31/60）の口頭発表が米国よりされている。
	応用研究・開発	◎	↗	NSF C3 SoRo Projectが推進されている。IEEE Soft Roboticsでは、半数以上（31/60）の口頭発表が米国よりされている。
欧州	基礎研究	○	→	SHEROプロジェクト、英ブリストル大学ソフトロボティクスセンターで研究が進んでいる
	応用研究・開発	◎	↗	人協働ロボットに関しては、DLRなどで研究が進んでいる

中国	基礎研究	○	↗	目立った動きはないが、Soft Robotics Journalにおいて中国発の論文が増加している
	応用研究・開発	○	↗	目立った動きはないが、Soft Robotics Journalにおいて中国発の論文が増加している
韓国	基礎研究	○	→	特に目立った動きはない
	応用研究・開発	△	↗	ソウル国立大学ロボティクスセンターでは、ウェアラブルロボットに関する研究が進んでいる

- (註1) フェーズ
- 基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲
- 応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲
- (註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価
- ◎：特に顕著な活動・成果が見えている ○：顕著な活動・成果が見えている
- △：顕著な活動・成果が見えていない ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
- (註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化
- ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・ロボット基盤技術（ナノテク・材料分野 2.3.5）

参考文献

1) Pratt, Gill A., and Matthew M. Williamson. "Series elastic actuators." Intelligent Robots and Systems 95.'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on. Vol. 1. IEEE, 1995.

2) Raibert, Marc H. Legged robots that balance. MIT Press, 1985.

3) Dragomir Nenchev,「ソフトロボティクス」特集について,日本ロボット学会誌,17巻,6号,1999.

4) 石黒章夫,小林宏,細田耕監訳,「知の創成」,共立出版,2001年11月.

5) 細田耕,石黒章夫訳,「知能の原理」,共立出版,2010年3月.

6) [review] Pfeifer, Rolf, Max Lungarella, and Fumiya Iida. "The challenges ahead for bio-inspired'soft'robotics." Communications of the ACM 55.11 (2012) : 76-87.

7) Cham, Jorge G., et al. "Fast and robust : Hexapedal robots via shape deposition manufacturing." The International Journal of Robotics Research 21.10-11 (2002) : 869-882.

8) [review] George M. Whitesides, Soft Robotics, Angew. Chem. Int. Ed. 2018, 57, pp. 4258-4273,

9) [review] Ilievski, Filip, et al. "Soft robotics for chemists." Angewandte Chemie 123.8 (2011) : 1930-1935.

10) Annan Mozeika, Erik Steltz, and Heinrich M. Jaeger, The First Steps of a Robot Based on Jamming Skin Enabled Locomotion, the 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.408-409, 2009.

- 11) Soft Robotics Toolkit, <https://softroboticstoolkit.com/>
- 12) Marchese, Andrew D., Robert K. Katzschmann, and Daniela Rus. "A recipe for soft fluidic elastomer robots." *Soft Robotics* 2.1 (2015) : 7-25.
- 13) Park, Yong-Lae, Bor-rong Chen, and Robert J. Wood. "Soft artificial skin with multi-modal sensing capability using embedded liquid conductors." *Sensors*, 2011 IEEE. 2011.pp.81-84.
- 14) Wood, Robert J. "The first takeoff of a biologically inspired at-scale robotic insect." *IEEE transactions on robotics* 24.2 (2008) : 341-347.
- 15) Wehner, Michael, et al. "An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots." *Nature* 536.7617 (2016) : 451.
- 16) Trimmer, Barry A. "New challenges in biorobotics : incorporating soft tissue into control systems." *Applied Bionics and Biomechanics* 5.3 (2008) : 119-126.
- 17) H.-T. Lin, G. G. Leisk, and B. Trimmer, "GoQBot : a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot.," *Bioinspir. Biomim.*, vol. 6, p. 026007, 2011.
- 18) [review] Trivedi, Deepak, et al. "Soft robotics : Biological inspiration, state of the art, and future research." *Applied bionics and biomechanics* 5.3 (2008) : 99-117.
- 19) Verl, A., Albu-Schäffer, A., Brock, O., Raatz, A. (Eds.) , *Soft Robotics*, Springer, 2015.
- 20) [editorial] Barry A. Trimmer, *A journal of Soft Robotics; Why Now?*, *Soft Robotics*, Vol. 1, No.1, pp.1-4, 2013.

2.2.2 生物規範型ロボティクス

(1) 研究開発領域の定義

生物は、進化過程という壮大な試行錯誤の場を通して、優れた機能や能力、構造を獲得してきた。これらの中には、未だわれわれが知り得ぬ非自明なカラクリが潜んでいるはずである。生物規範型ロボティクス (bio-inspired robotics) は、生物に内在する優れた機能や能力、構造をロボットの設計過程に積極的に取り入れ、発現する性能の向上を図ることを志向する研究開発領域である。広義には、バイオミメティクスと捉えることができる。そもそもロボットは、その出自から生物に範を求めてきたという来歴を持つ。その意味で生物規範型ロボティクスは、数多ある研究開発領域の中でもロボット黎明期から密接に関係してきた特異かつ稀有な研究開発領域でもある。一方で、生物規範型ロボティクスの分野における従来の研究開発は、生物の皮相的な模倣の域から抜け出ていないものが多い。ロボティクスの分野に革新的なブレークスルーをもたらす先導的役割を果たし得るための本研究開発領域のあり方や戦略を考えることが今、強く求められている。

(2) キーワード

バイオミメティクス、構造と機能、工学的志向と理学的志向、バイオ・インスパイアード・ロボティクス (bio-inspired robotics)、ロボティクス・インスパイアード・バイオロジー (robotics-inspired biology)、モノとコト、陽的制御と陰的制御、自己組織化理論と制御理論、自律分散制御、大自由度システム、閉じたシステムと開いたシステム、モーフォロジカル・コンピューテーション (morphological computation)

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

本領域は、隘路に入った感があるロボットの設計・開発に革新的なブレークスルーをもたらす原動力・先導的役割を担うという重大な意義を持つ。

強力な計算パワーに依拠してサーボモーターを高速かつ高精度で動かすことを基盤とした現在のロボットは、生物とは異質の方向に進化し続けてきた帰結と言ってもよいであろう。制御指令値に「強引に」追従させることを目的とする現在の制御スキームは、その成否がいかに適切な制御指令値を作り出すかに決定的に依存してしまうことが避けられない。そのため、制御アルゴリズムはますます大規模化・複雑化・精緻化の一途をたどる。生物とは異なるソリューションを追求するという方向性は、工学的な視座に基づくアプローチを突き詰めていく点においても重要である。しかし、近年の計算パワーの飛躍的向上がこの傾向を助長した結果、例えば、DARPA Robotics Challenge (2015) で見られたように、実際には実世界環境下で優れた性能が達成できないでいるという、一種の隘路に入った感があるとも言える。

一方で、生物は、高度な中枢神経系を持たない種であっても、オープンで不確実性や曖昧性を内包する実世界環境下で、驚くほどしなやかかつタフな振る舞いを見せる。有限な計算資源しか持たない生物は非構造環境下であっても即時適応的に振る舞う。しかし、このような振る舞いの発現メカニズムの本質は依然として解明されていない。

生物規範型ロボティクスが持つ意義と期待されることは、昨今、大きく変わり始めた。すなわち、これまで行われてきた生物の皮相的な模倣から、生物特有の振る舞いの発現メカニズムの本質を生物系研究者らとの協働を通してあぶり出していく方向へと変化している。生物規範型ロボットの構築は、単に構築するだけでなく、理解を伴った上で構築することが求められている。「モノ」的な模倣から「コト」的な模倣への転換と言っ

てもよい。

[研究開発の動向]

生物は、種の数も膨大なだけでなく、一個体を取り上げてもさまざまな興味深い構造や機能を内包している。生物規範型ロボットに関係する研究トピックも必然的に多岐に渡るが、ここでは、センサー、アクチュエーター、形態、機構、制御という切り口から研究開発の動向を述べる。

センサー

昆虫の複眼に着想を得た視覚センサー¹⁾や、多数の圧力センサーを実装したロボットハンドなど、生物に着想を得たさまざまなセンサーシステムの研究開発が行われてきた。以下、センサーに関する異なる研究アプローチを三つ採り上げながら説明していきたい。

第一は、感覚モダリティーの種類と感覚器（センサー）の数に着目したアプローチである。生物には、ロボットに比べると驚くほど多種多様な感覚モダリティーに対応したセンサーがあり、なおかつそれらが膨大な数で全身に「遍在」している。今後は、異なる感覚モダリティーのセンサー情報を活用することが、既存のロボットでは実現し得ない適応的運動機能の生成を試みる研究開発において重要となる。最近、ソフトロボティクス分野において、フレキシブルな基盤上に多数のセンサーを実装する技術の開発などが精力的に行われており²⁾、新しい流れを創り出すことが期待される（2.2.1 ソフトロボティクス参照）。

第二は、生物の感覚器官そのものを活用して、工学的には達成し得ない高精度なセンサーを構築する、ハイブリッド的なアプローチである。これに関して特筆すべき事例としてカイコガの触覚をロボットに実装する研究が挙げられる。カイコガの触覚はフェロモン分子にも敏感に反応するという事実に着目して、ガス漏れや麻薬の検知などへの応用も試みられており³⁾、今後の発展が注目される。

第三は、生物の感覚情報処理の原理の解明を目指した研究である。一例としてコオロギの尾に存在する多数の微小毛が担う感覚情報処理に着目した研究が挙げられる⁴⁾。ゴキブリは、人間がわずかに近づいただけでも、それを敏感に察知して逃げてしまうが、このような優れた探知能力はこれらの微小毛の基部に存在する感覚器によるものである。この研究では、複数の感覚器の情報を集めて確率共鳴に基づく情報処理を行うことで、個々の感覚器のS/N比の問題を克服して検知精度を著しく高められることが明らかになった。生物学と情報処理理論の融合を通して、生物に内在する「コト」を明らかにした優れた研究と言える。

アクチュエーター

筋肉はモーターに比べて驚異的な柔軟性とパワーウェイトレシオを持つ。筋肉の優れた機能の工学的実現を目指して、さまざまなタイプのアクチュエーターの開発が試みられてきた。広く使われつつあるのが、マッキベン型アクチュエーターに代表される空気アクチュエーター（PMA：Pneumatic Muscle Actuator）⁵⁾と呼ばれるアクチュエーターであり、筋肉同様に大きな力を発生することができる。最近では、細径の空気圧アクチュエーターを束ねた新しいタイプのPMAの開発が進められており、アクチュエーターを配置する自由度がさらに向上しつつある⁶⁾。このような研究を通して、生物のごとく全身にアクチュエーターを張り巡らせることを可能とする技術の創成が期待される。

一方で、PMAの動特性には遅延時間や強い非線形性があり、制御はモーターほど容易ではない。このような問題の軽減化を目指して、化学反応を活用したアクチュエーターや⁷⁾、生物の筋肉そのものを活用して「ウェットな」アクチュエーターを創るという試みもなされている^{8), 9)}。特に後者は、生物由来の材料ゆ

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

えに自己修復機能をも自然に併せ持つことが期待できる。このような新しい試みを通して、生物に比肩する軽量かつフレキシブルなアクチュエーターの早期の実現が期待される。

形態

車輪型のロボットを除けば、多くのロボットは何らかのかたちで生物の身体構造やロコモーション様式から着想を得たデザインが施されていると言えるであろう。ここでは特に動物の指や羽、ヒレに着目した生物規範型ロボットを三つ採り上げる。

ヤモリが、垂直な壁を苦もなく移動できるのは指に生えた微小な毛が壁面と分子間力で結合できるためである。この生物学的知見に着想を得た壁面移動ロボットが開発されている¹⁰⁾。生物の身体に潜む構造を模倣することによって、壁面移動ロボットの新たなソリューションを示した意味で特筆すべき優れた研究である。

飛行ロボットは小型化に伴い、プロペラ等の推進器を使うのが困難となる。限界を打破するために、昆虫や小型の鳥のような羽ばたきロボットの研究が進んでいる^{11), 12)}。小型飛行ロボット実現への新しいアプローチとして注目を集めている。

ヒレや身体の屈曲を活用した水中ロボットの開発も行われている¹³⁾。広く用いられているスクリューと違い、水底の砂を巻き上げないといった利点があるため、海洋探査等に活用できると期待されている。

今後も、生物の身体構造や動きに着想を得ることで、既存のロボットが抱える問題を克服できる新しいタイプのロボットの開発が期待される。

機構

機構系に工夫を施すことで「賢い機構系 (clever mechanics)」を構成してロボットに優れた運動機能を発現させようとする、興味深い試みについていくつか紹介する。

もっとも極端な事例は、歩行という高度な運動機能が機構系のみから生み出されることを示した受動歩行機械である¹⁴⁾。受動歩行機械は、力ずくの制御に偏重していた従来のロボティクスに対し、振る舞い生成における機構系の役割について再考を迫るきっかけとなった。高速走行を可能とする受動走行機械も報告されており、注目に値する成果である¹⁵⁾。

受動歩行機械や受動走行機械の振る舞いには、関節の受動性が重要な役割を果たしている。機構系に何らかのかたちでソフトネス・柔軟性を持たせることから興味深い振る舞いを生み出している事例として、脚に柔らかさを持たせることで優れた環境踏破性を実現した RHex¹⁶⁾ や Sprawlita¹⁷⁾、i-Centipod¹⁸⁾ なども特筆すべきである。

動物の解剖学的特徴を機構系の設計に反映させることで、優れた運動能力を生み出そうとする試みも報告されている。前述の空気圧アクチュエーターは、その柔軟性を活用して二関節筋のように関節をまたいだ配置をすることが可能である。これを活用して優れた運動能力を生み出す脚式ロボットが報告されている^{19), 20), 21)}。

制御

ここでは、特にロボットの移動 (ロコモーション) のための制御について採り上げる。生物規範型ロボットにおけるロコモーション制御は以下の二つに大別できる。

第一は、機構系には生物から着想を得た工夫が施されてはいるものの、制御系には生物に範を置く方策

が特に用いられていないアプローチである。具体的には、機構系に柔らかさを持たせることで、フィードフォワード制御といった、言わば「決め打ち」の簡便な制御方策であっても優れた環境踏破性が生み出されることを示した研究が多数報告されている。生物規範型ロボットと深く関係するソフトロボティクスの分野においても、大部分の研究がロボットの適応能力を「機構系の賢さ (clever mechanics)」にほぼ全面的に委ねており、制御方策は簡便なものにとどまっているというのが現状である。既存研究のほとんどはこのアプローチに基づいている。

第二は、生物規範型の制御方策を積極的に取り入れるアプローチである。リズムミクなロコモーションを生み出すことを担っているCPG (Central Pattern Generator) と呼ばれる神経回路に着想を得て、結合振動子系などをベースとした自律分散的な制御方策を採用した研究などはこのアプローチの代表的な事例である^{22), 23), 24)}。制御指令値を求めてそれに従ってアクチュエーターを中央集権的に制御するという、これまでのロボット制御のアルゴリズムとは一線を画したアプローチである。今のところ、制御系の素過程が結合振動子系にほぼ限られている。ここには重大な理由と課題が山積しているため、「(5) 科学技術的課題」のところで詳述する。以上のように、生物規範型の制御方策は依然として未成熟の段階にあり、その理論体系の構築は焦眉の課題であると言える。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

ソフトロボティクスは、新興学問領域であり、柔らかな身体がもたらす知的能力に焦点を当てた研究が大きな流れを形成しつつある。前述のように、フレキシブルな基盤上に多数のセンサーを実装することや、化学反応や生物の筋肉そのものを活用したウェットなアクチュエーターなど、さまざまな新しい要素技術に関する研究が進行中である。本領域とも密接に関係している。しかしながら、これら大部分の研究は生物の構造模倣 (ハードウェア技術) に関するものであり、生物が示す優れた能力の発現機序の理解を試みる研究はきわめて少数にとどまっていることに留意する必要がある。このような中で、morphological computationや陰的制御 (implicit control)、手応え制御 (tegotea-based control) といった、生物規範型ロボットの制御と深く関係する新しい概念が提唱されていることは注目に値する。今後は、概念レベルにとどまった議論に終始するのではなく、数理言語化を通して生物規範型ロボットならではの制御原理の理論的基盤を構築していくことが期待される。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

生体が持つ精妙かつ優れた機能の解明を中心とする基礎研究を国際的に協働して推進することを目的として設立されたヒューマン・フロンティア・サイエンス・プログラム (HFSP) 機構 (本部: フランス・ストラスブール) がサポートする国際共同プロジェクトは、生物系の研究分野においては世界的によく知られている。2017年に採択された国際共同プロジェクトのうち、生物規範型ロボティクスと深く関係する国際共同プロジェクトが2件採択された。一つはサンショウウオのように水陸両用のロコモーションを示す動物種から適応的運動機能の解明を試みる研究、もう一つはフンコロガシが示す多様かつ適応的な振る舞いの発現機序の解明を目指す研究である。これらはともに、生物学とロボティクスの両者に資する研究プロジェクトである。生物学の基礎研究サポートをするHFSPがロボティクスに関係する研究テーマを選んだことは、ロボティクスと生物学の新しいありようについて考えさせられる。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

(5) 科学技術的課題

センサー、アクチュエーター、形態（マテリアルも含む）、機構、制御という観点から生物規範型ロボットが抱える科学技術的課題について述べる。

センサー

生物のもつ膨大かつ異なる感覚モダリティのセンサー情報を活用することで、既存のロボットでは実現し得ない適応的運動機能の生成を試みる研究開発が重要である。「量的な変化から質的な変化を生み出すセンサー技術」の創成が喫緊の課題であり、そのためのハードウェア的・ソフトウェア的な課題として、以下のトピックが重要となる。

- 1) 超多数のセンサーを高密度かつ分散して実装する技術
- 2) 異なる感覚モダリティのセンサー情報を縮約・統合化する情報処理技術ならびに、それを活用する制御スキーム
- 3) 柔らかな身体の状態を検知するセンサー技術とそれらの情報を活用するための新規な知覚情報処理スキーム

3) に関して補足しておく。生物に比肩する柔軟性を身体に持たせると、今後のロボットは連続体的な特性を持つように変容していくだろう。これに伴って、物理量がベクトルからテンソル場へと変化することを反映し得るセンサーの構築技術や、感覚情報処理のあり方を考察していく必要がある。併せて、これらの膨大なセンサー出力を最大限に活用する、センサーリッチなフィードバック制御の理論体系の創成も重要な課題である。

アクチュエーター

生物が示すしなやかな動きの源の一つは、筋肉という柔軟かつ軽量のアクチュエーターが多数身体内に張り巡らされていることである。ミミズの体表からは、推進のために剛毛と呼ばれる硬い毛針のようなものが飛び出すことが知られているが、一本の剛毛の根元には10本以上の筋肉が付いていると言われている。このことからわかるように、生物規範型ロボットの究極の姿は、多数の軽量かつ柔軟で、生物に比肩するパワーウェイトレシオを持つアクチュエーターが物理的に離れた身体部位間をも結びつけつつ、全身にうまく張り巡らされたものであろう。

このようなことを可能とする、新規な原理に基づくアクチュエーターの開発が強く望まれる。電磁力や形状記憶合金をベースとしたアクチュエーター、PMA以外にも、化学反応や生体由来の材料を用いたアプローチは、ブレークスルーを生み出すことが期待される。さらに、身体中に大量のアクチュエーターを配置することを可能とする技術の創成も待たれる。

形態（マテリアルも含む）

前述のように、ヤモリの指に見出された構造を模倣することで垂直な壁面を自在に動き回るロボットや、羽ばたき機構を模擬することにより小型の飛翔ロボットが構築できたことなどは、生物規範型のアプローチによって新しいソリューションを提供し得ることを示す好事例である。個々の生物種が示す優れた能力の背後には、進化過程を経て獲得してきた、未だわれわれが知り得ぬ構造的な工夫が数多く伏在しているはずである。このことを改めて深く考えさせられる興味深い研究成果が最近発表された。それは、驚異的な跳躍能力を示すノミのような小型節足動物の脚の基部に「歯車」状の構造が見つかったというものである²⁵⁾。

すなわち、歯車はわれわれ人類が発明するずっと以前から生物が使っていた訳である。これ以外にも、シャコが示す超高速のパンチ²⁶⁾ やアギトアリというアリの一種が示す超高速のアゴの動き（これは動物界最速の動きと言われている）²⁷⁾ などの背後にある構造的な工夫を解明した研究も、今後ロボティクスへの応用が期待される興味深い事例として挙げられる。生物学者と協働しながらこのような事例やそこに内在する工夫を掘り出していく息の長い試みが今後はますます重要となってくるだろう。その分、波及効果はきわめて大きいはずである。

その他の課題として、生物的な特性を持つマテリアルの開発が挙げられる。筋肉のようなアクチュエーターに関係するマテリアル以外にも、例えば、

- 1) 粘弾性をリアルタイムで改変できるマテリアル
- 2) 自己修復能力や成長機能を有するマテリアル
- 3) 伸縮に富みつつも靱性に富むマテリアル

などが開発されれば、ロボティクスの分野に大きなインパクトをもたらすと期待される。

機構

現在の制御理論は、制御器と制御対象を分離することで構築された理論体系を基盤としている。制御対象である機構系は制御器によって「制御される対象」に過ぎず、振る舞いを生み出す主体はあくまでも制御器である。このような視座にもとづくことで、美しい理論体系を構築できた訳である。一方で生物は、制御対象である機構系（筋骨格系）も制御器（脳・神経系）と同様に振る舞い生成の一翼を担っており、制御器と制御対象が渾然一体となったシステムとなっている。これによって生物は、限られた計算資源にもかかわらず、実世界環境下で驚くほど適応的な運動能力を示すことができるのである。振る舞い生成の一翼を担わせることが可能な「機構系の賢さ（clever mechanics）のありよう」についての深い理解が強く望まれる。さらに、制御系と機構系の有機的な連関を初動段階から考慮して「賢い機構系のありよう」を考えていくことも必要であろう。このように、制御と機構は互いに密接に関係しあっているため、以下の「制御」で両者のありように関する科学技術的課題を詳しく述べたい。

制御

ここには重大な問題と課題が山積しているため、詳しく述べる。認識すべきことは、生物に範を置いた制御方策の理論的基盤は未だ脆弱であるという事実である。そもそもなぜこのような状況に至ったのか？その理由を分析すると以下ようになる

現在のロボット制御は、環境や身体特性の徹底した既知化に基づいた、言わば「閉じたシステム」に立脚した制御理論体系を基盤としている。ロボットが工場などの構造環境下から、生活環境のような非構造環境下へと稼働の場を拡大するにつれ、環境を認識するためのアルゴリズムが肥大化し、必然的に制御アルゴリズムはますます大規模化・複雑化・精緻化の一途をたどっている。工学者は、このような「閉じたシステム」に立脚する制御理論体系ではオープンで常に不確定性や曖昧性を内包する非構造環境に対峙する際には問題が生じることは十分に理解してはいるものの、代替となる理論的基盤が不在であり、なおかつ強力な計算パワーに頼ることができることも相まって、この思考の枠からなかなか抜け出せないでいる。

生物は限られた計算資源にもかかわらず、驚くほど多様かつ適応的な振る舞いを示す。これは、生物の制御系（脳・神経系）には、機構系（身体系）に実装され、そして環境に置かれてはじめて意味のある振る

舞いを生み出すような制御則が脳・神経系にコード化されているからである。すなわち、生物の制御系は「開いたシステム」を基盤としており、現在のロボットの「閉じたシステム」とは根本的に異なっている。これが生物規範型の制御系を考察する際に遭遇する大きな壁となっている。この点をもう少し敷衍したい。後の説明の便宜上、陽的制御 (explicit control) と陰的制御 (implicit control) という概念を紹介する²⁸⁾。陽的制御とは、制御系に明示的に (プログラムとして) 記述されている制御則のことである。一方、陰的制御とは、身体と環境の相互作用の中に隠伏的に埋め込まれている制御則のことであり、morphological computation や physical computation、non-neural computation、unconventional computation などと呼ばれることもある。受動歩行機械は陰的制御則のみで動いているロボットと考えることができる。これまでのロボットの制御系の設計は、アルゴリズムの大規模化・複雑化という大きな問題を内包しているものの、基本的に陽的制御則の設計に集約されており、問題の所在が明確であるという利点があった。一方、生物規範型の制御を考える際には、陰的制御の存在を前提として陽的制御のアルゴリズムを考えなければならない。しかしながら、これを実行するための理論的基盤がまったくない。これが、生物規範型の制御のありよう (と同時に機構のありよう) を考える際の大きな障壁となっている。

生物規範型の制御の典型例が、生物口コモーションを司るCPG (Central Pattern Generator、中央パターン発生器) と呼ばれる神経回路に着想を得た自律分散的な制御であろう。現在広く行われているロボット制御のように、制御指令値を明示的に作り出す必要がなく、制御系と機構系そして環境との相互作用の中から振る舞いを生み出すことができるという優れた特長を有している。しかし、素過程として用いられる数学的ツールが結合振動子系にほぼ限られているのが問題である。さらに、センサー情報をどのようにフィードバックするかについては依然として設計論が不在であり、アドホックに設計されているのが現状である。これも生物規範型制御が実用化に繋がることを阻んでいる大きな障壁の一つとなっている。

生物規範型の制御は自律分散制御と密接に関係している。しかし、自律的な個体の振る舞いと自律個集団の振る舞いを結びつけるロジックが依然として存在していない。この理論的基盤の脆弱性が生物規範型制御の理解と構築の大きな障害となっている。

以上を踏まえ、制御に関する今後の科学技術的課題を以下に列挙する

- 1) 環境の複雑化に呼応して制御系の設計がますます複雑化するという、現在のロボティクスが抱える呪縛から逃れるブレークスルーを与えることが、生物規範型制御に期待されている。このためには原点に立ち帰った研究が必要である。すなわち、「有限なリソースで全身に遍在する膨大な運動自由度を実時間で巧みに操りながら、無限の変化の様相を示す実世界環境と合理的に折り合いをつける」という、進化過程の初期に生物が獲得したもっとも根源的な知の基盤の本質を丁寧に解き明かす必要がある。このためには、「動物を動物たらしめる適応的運動機能の生成原理とは何か」を徹底的に問いかける理学的な視座が可欠となる。このような研究は必然的に長期に渡る試みとなるが、ここから生み出されるロボティクスへの波及効果は非常に大きいと期待する。
- 2) 生物は膨大な運動自由度を巧みに操りながら、リアルタイムで環境と折り合いをつけつつ適応的に振舞っている。大自由度制御とリアルタイム性という、言わば二律背反するような要請を同時に満足するためには、自己組織化理論 (理学) と制御理論 (工学) が有機的に融合した新規な理論体系の構築が喫緊の課題である。このような理論基盤が構築できた暁には、オープンで曖昧性や不確定性を

内包する実世界環境下で、全身に遍在する 10^2 オーダー以上の運動自由度をリアルタイムで統御することも可能となるだろう。

- 3) 中央集権的な制御と自律分散制御が有機的に連関した新規な制御理論の構築が必要である。高次脳機能に基づく制御 (central control) と局所センサー情報に基づく自律分散的な制御 (peripheral control) が調和的にカップリングすることで、大自由度システムを合目的かつ即時適応的に制御することも可能となるだろう。その理論的基盤の構築は喫緊の課題である。
- 4) これまでの生物規範型ロボットは、生物の構造の皮相的な模倣に基づくものが多い。すなわち、「モノ」的な模倣の域にとどまっている。生物規範型ロボットでブレークスルーを引き起こすには、生物に内在する制御原理といった「コト」の本質を炙り出す研究が不可欠である。すなわち、「モノ」的側面よりも「コト」的側面に着目した研究アプローチが求められているのである。ひとたび「コト」の本質が理解を捉えることができれば、さまざまな事例に適用できるため、その波及効果は極めて大きい。
- 5) 現在の生物規範型制御の多くは結合振動子系を基盤とした、いわゆるCPG制御である。しかしながら、どのような感覚モダリティに関する情報をどのようにフィードバックするかに関しての設計論が不在である。この現状を打破するためのシステムティックな設計論の構築が強く求められている。さらに、結合振動子系以外の基盤となる制御系の数理モデルに関してもブレークスルーが欲しい。実際、生物は、周期的な運動のみならず非周期的な運動をも発現することが可能である。振る舞いの多様性は現在のロボットから欠落している知の属性である。この問題を解決可能な理論的基盤も必要である。
- 6) 生物規範型制御の理解と発展を阻んでいるのが、陽的制御のみならず陰的制御をも活用し、なおかつそれらの間で有機的なカップリングを形成する必要があることである。換言すれば、生物における制御は身体と環境とセットになって初めて意味を持つことがコード化されている。陽的制御だけを考えればよかったこれまでのロボティクスにはない難しさがここにある。このような制御のありように関して理解の階梯を一段上がり、数理言語的に説明可能な理論の創成が焦眉の課題である。

以上まとめると、生物規範型制御の理論的基盤の創成は喫緊の課題であり、このためには動物を動物たらしめている適応的運動機能の本質を（生物系の研究者らと協働して）炙り出していく息の長い研究が不可欠である。しかしながら、これが達成された暁の波及効果には著しいものがあり、ロボットの制御が「閉じた系」から「開いた系」へと対応可能となる大きな飛躍を果たすと大いに期待される。ハードウェアの開発だけでなく、このような「コト」の本質を捉える研究に対しても長期的な支援が行われることが重要である。

(6) その他の課題

生物規範型制御として現在広く使われている、結合振動子系を基盤としたCPG制御は、多賀らによって提唱された²⁹⁾。このような革新的なアイデアが工学系ではなく、理学系の研究者（当時、多賀氏は薬学部に所属）から出されたことは示唆的である。工学者は、構築・実現を最優先するため、生物の皮相的な模倣に陥りがちである。生物に内在する、未だわれわれが知り得ぬ「コト」の本質を炙り出して理解の階梯を一段一段と上がっていくためには、理学的志向を持つ生物学や数理科学の研究者らとの長期に渡る有機的な協働が

必須であろう。

ここで、生物学だけでなく、数理科学の研究者についても言及したのは理由がある。生物規範型ロボットの分野においては、生物学とロボティクスの研究者の、いわゆる生工連携が必要であることは論を俟たない。しかしながら、生物学とロボティクスの研究者を単に寄せ集めても、両者の間で「着目している対象」や「言語」に関して往々にして齟齬が生じるだけである。「触媒」が必要なのである。それが数理科学の研究者である。コトの本質を抽出するためには数理モデリングの能力が必要である。具象と抽象をつなぐことに長けている数理科学者は、生物規範型ロボティクスにおいては特に重要である。

以上を踏まえて課題を二点述べる。

第一は、将来の応用研究・開発そして事業化への道を切り拓くために、我が国がロボティクスの分野において強力なイニシアティブを発揮していくために、生物学や数理科学の研究者らとの有機的な協働を行う基礎研究への手厚く息の長いサポートが必要である。具体的には、ロボティクスと生物学、そして数理科学が三位一体となった研究プロジェクトへの積極的な支援が喫緊の課題である。JST CRESTの数学領域では、数学と生物学、ロボティクスが三位一体となったプロジェクトが採択された実績がある。今後の生物規範型ロボットに関するプロジェクトのありようを示す一つのロールモデルとなろう。このようなプロジェクトからは複眼的視座を持つ有能な若手研究者の育成も大いに期待できる。ロボティクスの分野で我が国がイニシアティブを発揮していくためには、ロボティクスや生物学、そして数理科学といった異分野間を縦横無尽に行き来しながら斬新なアイデアを出していく、「芸域の広い」人材の育成を考えていく必要がある。ロボティクスだけに特化しない人材の育成が本領域においては鍵である。

第二は、生物規範型ロボットに関して、ロボティクスと生物学のありようについてである。生物規範型ロボット (bio-inspired robotics) という言葉が指しているのは、生物が進化過程という壮大な試行錯誤の場を通して獲得した、人知を超えるような工夫をロボティクスに活かす (ありがたく使わせていただく) という考えである。一方で、ロボットをツールとして使うことで、生物学に対して資する成果を積極的に生み出していくというアプローチも考えられるだろう。これは、robotics-inspired biology³⁰⁾ という呼称が与えられており、近年活発化している研究領域である。このアプローチでは、生物の身体機構や神経回路を模したロボットを創り、実際に生物と同様の環境で動かす実験を行うことで、従来の生物学的手法のみでは検証困難であった動力学特性等を実世界でシミュレートし計測することが可能となる。それゆえ、これまで以上に生物の振る舞いに対する理解が深まるのである。最近では、このようなアプローチに基づいて絶滅動物の運動様式の復元を試みる興味深い研究が報告されており³¹⁾、古生物学も含めて生物学とロボティクスの両者が対等かつ有機的に結びついた新しい学問領域の創成が大いに期待できる動きも出つつある。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	科研費新学術領域「ソフトロボティクス」の発足に伴い、身体の柔らかさに注目した基礎・応用研究において、生物学者、材料科学との連携が加速するものと期待できる。トレンドとしては上向きの印象を受けるが、諸外国に比べて研究予算の手厚いサポートがさほどないことが懸念事項の一つである。
	応用研究・開発	○	→	ImPACT「タフ・ロボティクス・チャレンジ」に関連して、福島県にロボットテストフィールドが設置されるなど共用研究設備も充実し、災害対応を想定した生物規範型ロボットの研究成果が多く報告されている。一方で、ロボットの事業化に向けた流れは依然として弱い。
米国	基礎研究	◎	↗	国防省などからの潤沢な研究予算配分を背景に、著名な研究室から研究成果が多く報告されている。
	応用研究・開発	◎	↗	生物規範型の二脚ロボット (Agility Robotics 社) や四脚ロボット (Boston Dynamics 社) の市場販売が開始されるなど、物流分野を中心に実社会での本格的な用途拡大が期待される。これらのベンチャー企業の多くは、大学の基礎研究開発を母体としている。
欧州	基礎研究	○	↗	米国と同様に生物規範型ロボットを扱う著名な研究室が多数存在し、多くの研究成果が報告されている。
	応用研究・開発	○	→	ETH で開発された四脚ロボット ANYmal に代表されるように、災害対応や研究開発向けの脚ロボットベンチャー企業が登場している。
中国	基礎研究	○	→	中国系のコミュニティが運営する生物規範型ロボットに関する国際会議も長く続いており、継続した研究が遂行されている。また、関連するソフトロボティクスの分野でも多くの研究成果が報告されている。
	応用研究・開発	◎	↗	ベンチャー企業 Unitree Robotics 社が、米国社製などと比較して安価な四脚ロボットを市場投入するなど、生物規範型ロボットの事業化への攻勢が強まっている。
韓国	基礎研究	○	→	新しく設立されたソフトロボティクスに関する国際会議 RoboSoft の第2回大会が2019年に韓国で開催されるなど、一定程度の存在感および研究成果を示している。
	応用研究・開発	△	→	DARPA Robotics Challenge の本戦 (2015 年) にて韓国のチームが優勝したものの、それ以降、生物規範型ロボットの実世界応用に関する事業化や研究プロジェクトについては大きな動きがない。産業用ロボットへ注力している傾向が見受けられる。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) ティンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス

関連する他の研究開発領域

・ ロボット基盤技術 (ナノテク・材料分野 2.3.5)

参考文献

- 1) Dario Floreano et al., "Miniature curved artificial compound eyes," Proceedings of the national academy of sciences of the united states of America (2013) , (4 June 2013) , doi : 10.1073/pnas.1219068110.
- 2) Martin Kaltenbrunner et al., "An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics," Nature (2013) , (25 July 2013) , doi : 10.1038/nature12314.
- 3) Noriyasu Ando et al., "Odour-tracking capability of a silkworm driving a mobile robot with turning bias and time delay," Bioinspiration & Biomimetics (2013) , (5 February 2013)
- 4) 下沢 植夫, "昆虫のセンシングと行動", 日本ロボット学会誌, (1988) , (1988/06/15) , doi : 10.7210/jrsj.6.240
- 5) Bertrand Tondou and Pierre Lopez, "Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators," IEEE Control System (2000) , (April 2000) , doi : 10.1109/37.833638
- 6) Shunichi Kurumaya et al. "Design of thin McKibben muscle and multifilament structure," Sensors and actuators A : Physical, (2017) , (1 May 2017) , doi : 10.1016/j.sna.2017.04.047
- 7) Shingo Maeda et al., "Self-walking gel," Advanced Materials, (2007) , (16, October 2007) , doi : 10.1002/adma.200700625
- 8) Yuya Morimoto et al., "Biohybrid robot powered by an antagonistic pair of skeletal muscle tissues," Science Robotics, (2018) , (30 May 2018) , doi : 10.1126/scirobotics.aat4440
- 9) Masahiro Shimizu et al., "Muscle tissue actuator driven with light-gated ion channels channelrhodopsin." Procedia CIRP, (2013) , (2 March 2013) , doi : 10.1016/j.procir.2013.01.034
- 10) Sangbae Kim et al., "Smooth vertical surface climbing with directional adhesion," IEEE Transactions on Robotics, (2008) , (25 February 2008) , doi : 10.1109/TRO.2007.909786
- 11) David Lentink, "Bioinspired flight control," Bioinspiration & Biomimetics, (2014) , (22 May 2014)
- 12) Hao Liu et al., "Biomechanics and biomimetics in insect-inspired flight systems," Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences, (2016) , (15 August 2016) , doi : 10.1098/rstb.2015.0390
- 13) Robert K. Katzschmann et al., "Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish," Science Robotics, (2018) , (21 March 2018) , doi : 10.1126/scirobotics.aar3449
- 14) Tad McGeer, "Passive Dynamic Walking," The International Journal of Robotics Research, (1990) , (1 April 1990) , doi : 10.1177/027836499000900206
- 15) Dai Owaki et al., "A 2-D Passive-Dynamic-Running Biped With Elastic Elements," IEEE Transactions on Robotics, (2011) , (10 January 2011) , doi : 10.1109/TRO.2010.2098610
- 16) G. Clark Jaynes et al., "Laboratory on legs : An architecture for adjustable morphology

- with legged robots," Unmanned Systems Technology XIV, (2012) , (April 2012) , doi : 10.1117/12.920678
- 17) Jorge G. Cham et al., "Fast and robust : Hexapedal robots via shape deposition manufacturing," The International Journal of Robotics Research, (2002) , (1 October 2002) , doi : 10.1177/0278364902021010837
- 18) 大須賀公一 他, "ムカデ型ロボットi-CentiPot", 第8回横幹連合コンファレンス, (2017), (2018/12/02), doi : 10.11487/oukan.2017.0_D-2-4
- 19) Koh Hosoda et al., "Pneumatic-driven jumping robot with anthropomorphic muscular skeleton structure," Autonomous Robots, (2010) , (April 2010) , doi : 10.1007/s10514-009-9171-6
- 20) doi : 10.1007/s10514-009-9171-6
- 21) Kenichi Narioka et al., "Development of a minimalistic pneumatic quadruped robot for fast locomotion," 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) , (2012) , (11 December 2012) , doi : 10.1109/ROBIO.2012.6490984.
- 22) Shunichi Kurumaya et al., "Musculoskeletal lower-limb robot driven by multifilament muscles," Robomech Journal, (2016) , (13 September 2016) , doi : 10.1186/s40648-016-0061-3
- 23) doi : 10.1186/s40648-016-0061-3
- 24) Gentaro Taga et al., "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment," Biological Cybernetics, (1991) , (July 1991) , doi : 10.1007/BF00198086
- 25) Dai Owaki and Akio Ishiguro, "A quadruped robot exhibiting spontaneous gait transitions from walking to trotting to galloping," Scientific Reports, (2017) , (21 March 2017) , doi : 10.1038/s41598-017-00348-9
- 26) Shinya Aoi et al., "Adaptive control strategies for interlimb coordination in legged robots : A review," Frontiers in Neurorobotics, (2017) , (23 August 2017) , doi : 10.3389/fnbot.2017.00039
- 27) Malcolm Burrows and Gregory Sutton, "Interacting gears synchronize propulsive leg movements in jumping insect," Science, (2013) , (13 September 2013) , doi : 10.1126/science.1240284
- 28) Katsushi Kagaya and Sheila Patek., "Feed-forward motor control of ultrafast, ballistic movements," Journal of Experimental Biology, (2016) , doi : 10.1242/jeb.130518
- 29) Hitoshi Aonuma et al., "Mechnisms of ultra-high speed movement in the trap jaw ant," Proceedings of the SICE Annual Conference 2017, (2017) , (19 September 2017)
- 30) 大須賀公一 他, "制御系に埋め込まれた陰的制御則が適応機能の鍵を握る!?", 日本ロボット学会誌, (2010) , doi : 10.7210/jrsj.28.491
- 31) 多賀徹太郎, "脳と身体の動的デザイン – 運動・知覚の非線形力学と発達", 金子書房 (2002)
- 32) Nick Gravish and George V. Lauder, "Robotics-inspired biology," Journal of Experimental Biology, (2018) , (29 March 2018) , doi : 10.1242/jeb.138438
- 33) John A. Nyakatura et al., "Reverse-engineering the locomotion of a stem amniote," Nature, (2019) , (16 January 2019) , doi : 10.1038/s41586-018-0851-2

2.2.3 インタラクション

(1) 研究開発領域の定義

インタラクションは、物理空間・情報空間での人間の経験や表現を豊かにすることに役立つシステムを構築するための研究開発領域である。現在のVR／ARなどのヒューマンインターフェース技術は主に視聴覚情報のみを用いているが、近年の「Society 5.0」においては、各種のセンサーやスマートデバイスが繋がったIoTの技術などを使って、物理空間と情報空間を別ものとして扱うのではなく、相互に自由自在に交流したり、統合したりするなど、本研究開発領域に求められるものも拡大している。

(2) キーワード

HCI（ヒューマンコンピュータインタラクション／ヒューマンインターフェース）、HRI（ヒューマンロボットインタラクション）、バーチャルヒューマン、デジタルツイン、サイバネティック・アバター、テレグジスタンス／テレプレゼンス、VR／AR、触覚（ハプティクス）、BMI／BCI（ブレイン・マシン・インターフェース／ブレイン・コンピュータ・インターフェース）、人間拡張、人間共生

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

産業革命以降の機械技術の発達により、人は苦役から開放された。極度の肉体的疲労を伴う作業や健康を損なうような危険な環境での作業など、本来望ましくない作業は自動機器により代替されつつある。

これら従来行われている自動化技術開発と並行して、自動機器による完全な代替が困難な作業を人と機械との協働により実現する技術の開発や、人が自らの望む行動を自由自在に行えるよう支援する技術の開発が求められる。そのために必要とされる機器やアバターなどと人とが相互交流するための技術体系をインタラクション技術と位置づけることができる。

インタラクション技術は、メカトロニクス、脳計測、機械学習、ロボット工学、センシング技術、ディスプレイ技術、BMI（ブレイン・マシン・インターフェース）、ウェアラブル技術、ネットワーク技術、人間拡張工学などを有機的に統合した技術領域であり、我が国が得意とするハードウェアとソフトウェアの融合技術に分類され、分野横断的な研究開発により、日本の産業の活性化・競争力強化につながることも期待される。

とりわけ少子化、高齢化の進む我が国においては、身体的能力を補綴（ほてい）し強化するようなインタラクション技術が普及することで、高齢者の持続的な社会参画が可能になると期待される。

[研究開発の動向]

インタラクション分野はHCI（ヒューマンコンピュータインタラクション／ヒューマンインターフェース）とも言われ、初期は、例えばコンピューターやスマートフォンなどの情報機器とのインターフェース要素技術（Graphical User Interface（GUI）やインタラクションデザインなど）を主な研究開発対象としてきた。その後、ロボットを対象としたHRI（ヒューマンロボットインタラクション）として、物理空間に存在するロボットをインターフェースとして人間がより直感的かつシームレスに情報空間に対してコミュニケーションすることを目指した研究などが、活発に行われてきた。HRIにおいては、ロボットの構成技術の開発だけでなく、ロボットと人間が共生するための社会的要因などを対象とした共生インタラクション研究も進められている。共生インタラクション研究の代表的な事例として、人と安全に関わることができるロボットの皮膚や内部メカニズム、

頑健で柔軟な音声認識技術の開発と、欲求、意図、行動・発話の階層モデルの構築を目的としたERATO石黒共生ヒューマンロボットインタラクション（HRI）プロジェクト（研究総括：大阪大学 石黒浩）や、人間・機械・情報環境からなる共生社会におけるインタラクションに関する理解を深め、人間同士から環境全体まで多様な形態でのインタラクションを高度に支援する情報基盤技術の創出と展開を目指したCREST「人間と情報環境の共生インタラクション基盤技術の創出と展開」領域（研究総括：名古屋大学 間瀬健二）が挙げられる。

人間をとりまく物理空間の情報を情報空間に取り込むIoT技術の発展、情報空間に蓄積されるビッグデータとその解析技術としての機械学習の進展を背景に、新たなインタラクション研究が進展している。従来の視覚中心のインタラクションに加え、触覚（ハプティクス）など他のモダリティをコミュニケーションの手段として取り込む研究や、新たな情報機器としてのウェアラブルコンピューティングの開発、デジタルツイン技術を人間に適用しバーチャルヒューマンをコンピューター内に再現する研究などが実施されてきた。代表的な事例として、東京大学 五十嵐健夫らは、ERATO五十嵐デザインインタフェースプロジェクト（2007～2012）において、HCIのためのラピッドプロトタイピング、ファブリケーションを提案し、その後機械学習に代表されるデータ駆動型知的情報システムの理解・制御のためのインタラクションについて研究を進めている。また、東京大学 篠田裕之らは3次元映像とともにその表面の触感を超音波で再現する技術によって、多次元インタラクションを自由にプログラムできる空間を確立する研究を行っている。

また、人間が生得的に有する脳機能（感覚機能、運動機能、知的処理機能など）を補綴するためだけでなく、人間の身体能力を増強（オーグメンテーション、エンハンスメント）する基礎的な技術として発展し得る研究として、BMI（ブレイン・マシン・インターフェース）の研究開発が進められてきた。東京都医学総合研究所の西村幸男らは日本医療研究開発機構（AMED）脳科学研究戦略推進プログラム「BMIによる運動・感覚の双方向性機能再建」などの研究プロジェクトを通して、手の運動機能を持たない脳領域に人工神経接続システムを使って、新たに運動機能を付与できることを発表している。

近年、上記にあげた要素技術であるメカトロニクス、ディスプレイ技術、人間工学、ロボット工学、ヒューマンロボットインタラクション、センサー工学、ウェアラブル技術などの複合領域として「人間拡張学（Human Augmentation）」と呼ばれる研究分野が注目を集めている。人がやりたくない作業を代替する自動化技術に対し、人間拡張学は、人が持つ感覚や運動機能や知的処理機能を物理的、情動的に補綴・拡張・増強することにより、自らやりたいことを身体能力に関わらず自由自在に行う技術の確立を目指している。パワード義足のような身体機能を直接補綴する技術に加え、テレプレゼンスやレイグジスタンスのように人工物と人間の機能を融合して総合的に能力を高める技術など、多様な研究が行われている。

また、情報空間と物理空間を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立させた人間中心の社会である「Society 5.0」の実現に向け、情報空間と物理空間を融合させたサイバー・フィジカル空間でのサイバネティック・アバターとのインタラクションを検討することの重要性が増している。例えば、慶應義塾大学 南澤孝太らは、人間とロボットとのインタラクションにおいて、物理空間に存在するハードウェアとしてのロボットとのインタラクションだけではなく、CG（コンピューターグラフィックス）アバターとのインタラクションに関する研究も行っている。東京大学 鳴海拓志らのCGアバターなどによる外見の変化と人間への心理的な影響を探るゴーストエンジニアリングも同分野の代表的な研究として挙げられる。

これらに加え、人間拡張学を含むインタラクションの基盤的な研究分野として、認知神経科学の動向も捉えておく必要がある。スイス連邦工科大学ローザンヌ校（EPFL）Olaf Blanke、University College LondonのTamar Makin、カリフォルニア工科大学 下條信輔、電気通信大学 宮脇陽一らがそれぞれ、触覚や身体

感覚に関する神経機構の変容を解明しようとしている。さらに、名古屋大学 久木田水生らは、技術倫理学の立場から、人間拡張学を含むインタラクション研究分野における哲学的倫理的問題について考察を行っている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

インタラクション研究分野のうち、人間共生・人間拡張に関する研究は、ERATO 稲見自在化身体プロジェクトやさがけ「人とインタラクションの未来」(研究総括：東京大学 暦本純一)によって、急速に研究が進められている。これらで得られた知見を社会に展開できるよう発展した大型プログラムとして、ムーンショット型研究開発制度 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」が挙げられる。人間拡張技術をもとに、「2050年までに、複数の人が遠隔操作する多数のアバターとロボットを組み合わせることによって、大規模で複雑なタスクを実行するための技術を開発し、その運用等に必要な基盤を構築する」および「2050年までに、望む人は誰でも身体的能力、認知能力及び知覚能力をトップレベルまで拡張できる技術を開発し、社会通念を踏まえた新しい生活様式を普及させる」の実現を目指した研究を開始し、注目を集めている。

また、ロボット分野における世界最大の国際会議の一つである IROS (IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems) 2019において、マサチューセッツ工科大学 (MIT) Harry Asada、南方科技大学 (中国) Chenglong Fuらをオーガナイザーとして「Supernumerary Robotic Limbs」というテーマでWorkshopが開催され、IROS 2020ではマサチューセッツ工科大学 (MIT) Harry Asada、アリゾナ州立大学 Wenlong Zhang、東京大学 稲見昌彦、伊シエナ大学 Domenico Prattichizzoらをオーガナイザーとして「Wearable SuperLimbs: Design, Communication, and Control」というテーマでのWorkshopが開催され、国内だけでなく、国際的にも研究コミュニティが形成されつつある。

これらに加え、XPRIZE財団が主催する1,000万ドル規模の世界的なコンペティション「ANA AVATAR XPRIZE」が2018年に立ち上がり、人間の存在を遠隔地にリアルタイムで輸送できるアバターシステムの開発を目指し、現在進行中である。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

日本国内においては、産業技術総合研究所「人間拡張研究センター」が2018年11月に東京大学柏IIキャンパス内に新設され、ヒューマンセンシング技術・VR/AR・ロボット技術を統合して人の身体能力やコミュニケーション能力を高める研究を実施している。

東京大学 稲見昌彦らは、超スマート社会に自由自在に適応可能な、新たな身体像「自在化身体」を設計し、人間の身体観をアップデートすることを目指したERATO 稲見自在化身体プロジェクトを2017年に開始し、研究を推進している。また、東京大学 暦本純一らは、JST さがけ「人とインタラクションの未来」において、超スマート社会における人間と人間、人間と機械、人間と情報環境、人間と実世界環境などの多様な状況でのインタラクションの進展に資する人間の能力を拡張するための新たな技術や人間と環境が高度に調和する技術の創出、インタラクション理解のさらなる深化を目指した研究を進行中である。

国際的な取り組みとして、スイス連邦工科大学チューリヒ校 (ETH Zurich) 主催による「サイバスロン (Cybathlon)」が挙げられる。これは、人間拡張学を駆使して機器を装着した障害 (しょうがい) 者が日常生活の必要な動作をこなしていく競技大会であり、エンターテインメント性のある競技を通じて、ヒューマン

ロボットインタラクション技術の発展を目指している。スポーツを対象としたパラリンピックとは異なり、サイバロンでは日常生活にスポットを当て、インフラ整備が不要な真のバリアフリーの実現を目的としている。この大会には、大手義足メーカーのÖssur社（アイスランド）、Ottobock社（ドイツ）やスタートアップのXiborg社（日本）等のエンジニアリングチームも参加し、実用レベルでの技術向上に直接貢献している。

（５）科学技術的課題

インタラクション技術は、メカトロニクス、脳計測、機械学習、ロボット工学、センシング技術、ディスプレイ技術、BMI、ウェアラブル技術、ネットワーク技術、人間拡張学などを有機的に統合した技術領域であるが故に、今後も学際的・分野融合的に、様々な分野の研究者が自身の研究領域を超えて、協働しながら研究を推進していくことが求められる。例えば、BMIや人間拡張学の研究において、脳計測などを通じて神経機構の変容を解明しようとする場合には、脳の特性やその情報を読み出す部位や方法を熟知している認知神経科学分野の研究者との協働が必要となる。

また、BMIや人間拡張学などは、人間が生得的に有する脳機能（感覚機能、運動機能、知的処理機能など）にアプローチすることで、人間の身体能力を増強（オーグメンテーション、エンハンスメント）することを可能にする技術でもあるため、脳機能に介入した結果、条件によっては脳機能にとって不可逆的な変化が起きている可能性が指摘されており、実際にどういう悪影響が起ころ得るかを調査し、悪影響が出ないような対策や規制の検討、また万が一悪影響が出た場合の対処法も見出しておくことが必要である。

インタラクション技術が急速に発展する一方、地域的・身体的・社会的条件の相違による情報通信技術の利用格差であるデジタル・ディバイドも拡大してきている。このデジタル・ディバイド解消のために、総務省が政策的に地域におけるブロードバンドインフラの整備を推進しているが、その動きに加えて研究開発的な立場からもデジタル・ディバイドを解消するインタラクション技術の開発が求められる。

（６）その他の課題

インタラクション技術は社会的に有用かつ人間の高次の欲求を満たす技術として期待されているが、一方でその影響力の強さから使用方法を正しく規定することが重要である。特に近年では技術の革新速度が著しく向上しており、技術が確立してからのルールを制定するのではなく、技術開発と同時並行でルールについて検討していく必要がある。

例えば、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）は、人間の目や脳への悪影響が懸念されており、装着時の眼精疲労、注意の転導、転倒の危険性なども考慮する必要がある。

一方、同技術の標準化に関しては、日本国内での認可、規制のハードルの高さ故に海外での応用が先行しているケースが多く、今後は新たな融合領域に対する研究開発支援を行うだけでなく、研究開発特区の策定と特区での社会実験といった、研究開発と市場開拓を促進するための政策的配慮も必要となるであろう。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	VR/ARなどの視覚的なインタラクションを用いた研究は多数進められているが、現状では触覚や身体感覚に関する神経科学的なアプローチからの基礎的な研究は限定的であると言わざるを得ない。
	応用研究・開発	○	↗	研究水準としては国際的にもトップレベルではあるものの、それらの産業展開が遅れている。企業での実用化やスタートアップ支援を活性化させる必要がある。
米国	基礎研究	◎	→	カリフォルニア工科大学教授である下條信輔を中心として、触覚や身体感覚に関する神経科学的なアプローチからの基礎研究は他国に比べ先行している。
	応用研究・開発	◎	→	DARPAを中心とした産学軍の連携が密接に行われている。また、米国特有の動向として、大学などの教育機関での研究に加え、MicrosoftやFacebookなどの企業での研究開発が盛んに行われており、実用化の速度も早い。
欧州	基礎研究	◎	→	EPFL教授であるOlaf Blankeを中心として、触覚や身体感覚に関する神経科学的なアプローチからの基礎研究は、アジア諸国に比べ先行している。
	応用研究・開発	○	↗	現在、米国に次ぐ世界第二位の市場となっている。教育機関ではETHが中心となり、人間拡張学に関する競技大会Cybathlonが2016年、2020年に開催された。また、Adidas AG（ドイツ）、Weartech S.L.（スペイン）、Eurotech S.P.A.（イタリア）などの企業での研究開発も活発である。
中国	基礎研究	×	→	大規模なモバイルユーザー層によりウェアラブル・VRの技術開発を牽引しているものの、触覚や身体感覚に関する神経科学的なアプローチからの基礎的な研究は限定的である。
	応用研究・開発	○	→	Microsoft Research Asiaや精華大学、ハルビン工業大学教授 Yanhe Zhuを中心に応用的な研究が多数行われている。また、大規模なモバイルユーザー層により、ウェアラブル技術・VR技術開発の発展を牽引しており、動画やゲームコンテンツ企業による研究開発も活性化してきている。
韓国	基礎研究	△	→	ウェアラブル・VR技術などの企業を中心とした研究開発は多数進められているが、触覚や身体感覚に関する神経科学的なアプローチからの基礎的な研究は限定的である。
	応用研究・開発	○	↗	未来創造科学部および貿易通商資源部は、2024年までに～9,000万米ドルを投資し、IoT・スマートカー事業の育成に力を入れることを宣言しており、SamsungやLGを中心としたウェアラブル・VR技術開発を押し上げる可能性が高い。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・ BMI・BCI (ライフ・臨床医学分野 2.5.5)

参考文献

- 1) 内閣府「Society 5.0」https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/
- 2) ERATO 石黒共生ヒューマンロボットインタラクション (HRI) プロジェクトホームページ
<https://www.jst.go.jp/erato/ishiguro/index.html>
- 3) [共生インタラクション] 人間と情報環境の共生インタラクション基盤技術の創出と展開 | CREST ホーム
ページ https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah29-4.html
- 4) ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクトホームページ
<https://www.jst.go.jp/erato/igarashi/>
- 5) "Bypassing stroke-damaged neural pathways via a neural interface induces targeted cortical
adaptation" 論文の「Nature Communications」への発表 プレスリリース文、公益財団法人東京都
医学総合研究所ホームページ <http://www.igakuken.or.jp/topics/2019/1016-2.html>
- 6) Saraiji, MHD Yamen and Fernando, Charith Lasantha and Minamizawa, Kouta and Tachi,
Susumu, "Development of Mutual Telexistence System using Virtual Projection of Operator's
Egocentric Body Images", ICAT-EGVE 2015 - International Conference on Artificial Reality
and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments, 2015, 10.2312/
egve.20151319. [http://embodiedmedia.org/wp-content/uploads/2016/05/yamen2015ICAT.
pdf](http://embodiedmedia.org/wp-content/uploads/2016/05/yamen2015ICAT.pdf)
- 7) 鳴海 拓志, "ゴーストエンジニアリング: 身体変容による認知拡張の活用に向けて, 認知科学", 2019,
Vol. 26, No. 1, pp. 14-29, 10.11225/jcss.26.14.
- 8) ムーンショット型研究開発制度ホームページ
<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/index.html>
- 9) IROS (IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems) 2019
Workshops and Tutorials <https://www.iros2019.org/workshops-and-tutorials>
- 10) IROS (IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems) 2020
Workshops <https://www.iros2020.org/3program/Workshops.html>
- 11) ANA AVATAR XPRIIZE ホームページ <https://avatar.xprize.org/prizes/avatar>
- 12) 国立研究開発法人産業技術総合研究所 人間拡張研究センターホームページ
<https://unit.aist.go.jp/harc/>
- 13) ERATO 稲見自在化身プロジェクトホームページ <https://www.jst.go.jp/erato/inami/>
- 14) Cybathlon ホームページ <http://www.cybathlon.ethz.ch/>
- 15) 栗田 雄一, 石原 茂和, 稲見 昌彦, サイバスロンと人間拡張工学, 電子情報通信学会 通信ソサイエティ
マガジン, 2018-2019, Vol. 12, No. 2, pp. 105-111, Online ISSN 2186-0661,
<https://doi.org/10.1587/bplus.12.105>,
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/12/2/12_105/_article/-char/ja
- 16) 「2020年に注目すべき技術」三井物産戦略研究所 技術トレンド基礎調査センター、技術・イノ

バージョン情報部 調査レポート https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/__icsFiles/afieldfile/2020/05/21/2001_report.pdf

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス

2.2.4 システム化技術

(1) 研究開発領域の定義

ロボット技術は、システムインテグレーション技術である。ロボットシステムは、複数の要素から構成されるため、その要素をいかに統合し、システムとして連携して機能させるかが重要である。ロボットシステムには、単体のロボットにおける構成要素のみならず、複数台のロボットや機器、およびそれらの組み合わせ、さらには環境に設置するセンシングデバイス、記憶装置、情報処理装置、情報提示装置、動作モジュールなどをすべて要素として含む。

これらの要素群を連携させ機能させるための技術がシステム化技術である。必要となる研究開発要素として、いわゆるロボットシステムを設計する技術、制御・運用する技術、異常時に機能を維持・回復させる技術などが挙げられる。制御においては、環境や状況に応じて適応的に動作する自律機能の実現が重要となる。基礎理論としては、システム論との関連が深い。

本稿においては、群ロボット、複数台のロボットによる協調動作を中心に、システム化技術について論ずる。

(2) キーワード

自律分散、自己組織、群知能、空間知能化、ネットワークロボット、協調、創発システム、資源共有、競合(デッドロック) 解消、移動知、超適応、自己組立、自己診断、自己修復、レジリエンス

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

ロボットが動作する環境がより複雑・無限定になることに伴い、ロボットシステムに要求されるミッションやタスクがより高度・多様・複雑・不確定になり、ロボットシステム自体も大規模化・複雑化する。さらに、システム自体の大規模化・複雑化にも適応して動作する機能がロボットシステムに要求される。特に、人との共存・協調などが求められるサービスロボットにおいては、動作環境の複雑性・無限定性のレベルが高く、ロボットシステムに対して、より高度な機能が求められる。また、ロボットシステムが大規模化・複雑化するにつれ、その信頼性を維持するために、システムの不能不全・故障などの自律的な検出、診断、修復・回復や、自律的に機能を縮退させる耐故障性が求められる。

このような要求に対してシステムの適応性を実現する方法論が、自律分散化、自己組織化である。これらはシステムを複数の要素に分散化させ、それらの要素群を動的に協調させることで適応的な機能を実現しようという戦略である。ここでのシステムとは、複数台のロボットや機器、およびそれらの組み合わせにとどまらず、環境に設置するセンシングデバイス、記憶装置、情報処理装置、情報提示装置、動作モジュールなどをすべて要素として含む。システム化技術においては、そのようなシステムをいかに設計し、協調的に動作させるかということが中心的な課題となる。

[研究開発の動向]

世の中に最初に登場した群ロボットは、森政弘氏（東京工業大学名誉教授）が1975年に沖縄国際海洋博覧会で開発・展示した「みつめむれつくり」であろう。これは7匹からなる群をつくるロボットであり、群全体を制御する中枢を持たない世界最初の自律分散制御システムと言えるものである。自律分散型ロボットシステムや自己組織化ロボットシステム、空間（環境）知能化などの研究は、1980年代後半から行われている。

CEBOT¹⁾やACTRESS²⁾などはその草分け的な研究であり、MTRAN³⁾をはじめとする動的再構成可能モジュラーロボットシステムや、ロボット間通信、複数マニピュレーターなどによる協調ハンドリング、複数移動ロボットによる協調搬送、相互衝突回避、分散協調センシングなどの協調行動などの研究が活発化した。1992年に自律分散型ロボットシステムに関する国際シンポジウム(DARS: International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems)が日本で開催され、それ以降隔年で、アジア、欧州、米国で開催されている。最近では、IEEE Robotics and Automation SocietyにTechnical Committee on Multi-Robot Systemsが設置され、International Symposium on Multi-Robot and Multi-Agent Systems (MRS)などの国際会議等が開催されている。

ロボットシステムの大規模化・複雑化に伴い、集中型から、階層型、さらには自律分散型へと変化する中で、ロボットシステムのアーキテクチャーに関しても、モデルベースドに対してビヘイビアベースドなアプローチのサブサンプション アーキテクチャーが提案された⁴⁾。サブサンプション アーキテクチャーは自律分散型ロボットシステムと親和性が高く、それを構築する上で有効なアーキテクチャーであり、これをマルチロボットシステムのアーキテクチャーや、ロボットの行動生成アルゴリズムに発展させたAlliance⁵⁾なども提案されている。

日本では、1990～1992年に科研費重点領域研究「自律分散システム」が、また1995～1997年に科研費重点領域研究「創発的機能形成のシステム理論」が実施され、自律分散システムや創発システムの研究が行われた。その中で、シナジェティクス⁶⁾、散逸構造⁷⁾などをはじめとする自律分散システムに関する理論的研究や設計論に関する研究が行われ、その中で群ロボットに関する研究も行われた。これらの研究は、特定領域研究「移動知(身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現-移動知の構成論的理解-)」⁸⁾などに引き継がれた。これらの研究は、群ロボットシステムのアーキテクチャー設計や協調制御アルゴリズム構築を行う上でのヒントを与える。生物規範型の群システムに関しては、International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM)なども開催されている。人工知能の分野においても、1980年代後半から、分散人工知能、協調問題解決などの研究が活発化し、自律知能を有する複数台のロボットに協調動作を行わせる人工知能研究も行われた。

これらの研究が始められた当時は、計算機の情報処理機能や記憶容量が低く、センサーの性能も悪く、通信容量(帯域幅)も低かった。製造技術の限界から、実現できるシステムの規模(台数)は小さく、機能も限定的で、タスクや用途も特化された個別の研究が多かった。しかし、計算機の性能の向上、通信技術の進歩、マイクロ加工などの製造技術の進歩につれて、ロボットシステムを構成する要素の小型化、高性能化、要素間のコミュニケーションの高速化が可能となり、システム技術は飛躍的に進化した。特に、ネットワーク技術の進展により、複数のロボットによる情報共有や連携を指向したネットワークロボット技術開発が発展した⁹⁾。この流れは、5G(第5世代移動通信システム)の普及によりさらに加速すると考えられる。

また、ロボットシステム自体の自律分散化のみならず、ユビキタス、IoT(Internet of Things)などの技術開発に伴い、空間の知能化技術も発展した。知的データキャリア¹⁰⁾は、群ロボットシステムにおけるロボット間の情報共有を局所的な通信と環境への動的な書き込みと取り出しを可能にするデバイスであり、先駆的・独創的なものであったが、事業化・社会実装には至らなかった。空間知能化に関しては、複数のカメラや分散的なセンサーを部屋や家全体に、あるいはキャンパスや地域全体にセンサーを配置することで実現された例¹¹⁾をはじめ、Smart Room¹²⁾、Robotic Room¹³⁾、Intelligent Space¹⁴⁾、Aware Home¹⁵⁾、Intelligent Room¹⁶⁾、空間知¹⁷⁾、ユビキタスホームなどの研究開発が活発に行われた。空間知能化は、ロボットが効率的、自律的に動作するための環境の知能化と言い換えることもできる。

これらの空間知能化技術や、GNSS(全球測位衛星システム)、SLAM(Simultaneous Localization

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

and Mapping)、SfM (Structure from Motion)、AI (機械学習、深層学習を含む) など、確率・統計的手法や機械学習を用いた計測・情報処理・通信・自動制御の技術の発展により、実時間で高精度の環境計測、地図生成、自己位置推定などが可能になり、ロボットの自律性は飛躍的に向上した。また、マイクロ加工技術などにより、センサーやメカの小型化が可能になり、2010年代からマイクロロボットの群制御の研究や、小型ドローンの群制御によるショーの演出、小型AGV群から構成される自動倉庫など、1000台以上の群ロボットの研究や応用例が出始めた。自動運転においても、群制御の技術や空間知能化などの技術が使われている。

諸外国との比較に関しては、ロボットのシステム技術は日本が先行していたが、米国・欧州・中国の研究開発が加速する中、2010年頃から産業競争力や学術競争力が低下し始め、日本の優位性は失われつつある。製造業の分野では、EUや中国における産業用ロボットの稼働台数が、日本における稼働台数を上回り、韓国もそれに迫っている。日本は、産業用ロボットのシステム技術においては優位性をある程度保っているものの、欧州では、ネットワーク型生産システムであるIndustrie 4.0を提案したドイツを中心にCPS (Cyber-Physical System) の開発などを加速している。中国では、製造業におけるロボット導入に対して、国を挙げて巨額な投資が行われている。ABBのロボット事業の本社が上海に移転され、中国の家電メーカーがKUKAを買収するなど、海外技術を積極的に取り込みつつ、中国のロボットシステム技術が急速に強化されている。

製造業以外の分野では、日本の大手企業は軒並みロボット事業から撤退したが、中小企業やベンチャー企業がなんとか善戦している状況である。日本は技術的に優位であっても、標準化、事業化、社会実装のための戦略や政策が弱い。特に、標準化、標準プラットフォームに関しては、FAシステム向けミドルウェアORiN、OriN2など、日本発の成功例もあるが、産業技術総合研究所が中心となって開発を進めていたRTミドルウェア (RTM) は、インタフェース仕様がソフトウェア技術の国際標準化団体であるOMG (Object Management Group) のRTC仕様として標準化されたものの、あまり普及していない。一方、米国のロボットベンチャー企業であるWillow Garageが開発したロボット用汎用OSであるROS (Robot Operating System) は、オープンソースとして公開され、幅広く利用されるようになった。今後、多数の機器の連携が容易に行え、Agileな設計・開発、運用を可能にする共通プラットフォームの開発が重要になると考えられる。

米国では、NSF、NASA、NIH、USDAの4省庁の横断型の研究イニシアティブであるNational Robotics Initiative (NRI)¹⁸⁾ が2011年に設立され、Co-Defender、Co-Exploerer、Co-Inhabitant、Co-Workerなどの共働型のロボット技術開発が進められた。一方、EUでは、EURON (大学などの研究機関へのロボット研究開発ファンディング) やEUROP (企業へのロボット開発ファンディング)、PPP (Public Private Partnership) など、ロボット関係事業の推進が行われている。韓国は、製造業におけるロボットの導入は加速している一方、サービス分野におけるロボットの利活用や事業は、国による大型投資があったにも関わらず余り進んでいない。日本では、ロボット革命実現会議が出したロボット新戦略¹⁹⁾ に基づき設立されたロボット革命・産業IoTイニシアティブ協議会 (RRI) をはじめ、ロボット技術を事業化するための様々な協議会が立ち上がり、協調領域の構築を強化する動きが活発化しており、それらの活動に期待が寄せられている。

基礎研究、基盤技術開発に関しては、日本では科研費などを中心とした研究開発が行われているが、米国では、NSF、NIH、DoD、DARPAなどの複数のFunding Agencyの投資による様々なロボットシステム技術の研究開発が進められている。また、欧州でも、FP7²⁰⁾ やHorizon 2020²¹⁾ などのEU大型プログラムによる研究開発が進められている。一方中国では、863計画 (1986～：国家ハイテク研究発展計画)、973計画 (1997～：国家重点基礎研究発展計画) 及びこれらを統合した国家重点研究開発計画 (2016～) や、

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス

211工程（1995～：大学教育改革計画、21世紀100校）、985工程（1998-、重点大学重点化計画）及びこれらの後継国家戦略にあたる世界一流大学・一流学科（双一流）などの国家重点研究開発計画のもとで、多くのロボット研究開発が行われている。

なお、ロボット技術の最近の動向については、別報²²⁾にもまとめられている。

（４）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

群ロボットの研究開発には、生物規範型の研究や、センサーやアクチュエーターなどの要素の小型化技術開発が重要である。生物規範型の研究に関しては、前述の「移動知」の社会適応研究において、昆虫や魚、鳥、さらには猿や人などの哺乳類の社会的行動のメカニズムの理解に関する研究が行われて以来、継続して研究が進められている。小型化に関しては、米国Harvard大学が、2014年に1024台のKilobotと呼ばれるマイクロロボットを群制御し、協調搬送や自己修復（編隊形成の修復）などのデモンストレーションを行っている。小型化技術は、ドローンなどにも有効であり、米国ペンシルバニア大学では2012年に多数のドローンの編隊制御のデモンストレーションが行われた。また、多数のロボットの協調動作に関する研究も、スイスEPFLをはじめとした多くの研究機関で行われるようになった。

一方、近年、ソフトロボティクス、バイオロボティクスなどの分野が急成長しつつある。これらの研究も、ロボットのシステム化技術に大きな影響を与えると考えられる。科研費新学術領域研究「分子ロボティクス」²³⁾は、化学反応を応用した最小構成のロボットを開発しようとする試みであり、群化への展開の期待が高い。

応用に関しては、近年、人共存型ロボット技術の開発・利用が活発化している。協働ロボット、アシストスーツ、手術ロボット、介護支援（介護者、被介護者）ロボット、セラピーロボット、サービスロボット、自動運転、遠隔操作、VRなどで、人との共存機能が要求されている。具体的には、ユーザーとの物理的インタラクションに関しては、力学的支援、共同作業、安全、物理的ユーザーインターフェースなど、ユーザーとの情動的インタラクションに関しては、情動的支援、コミュニケーション、可視化、情動的ユーザーインターフェースについて考える必要がある。人とロボットの共働においては、ユーザーとロボットとの役割分担などについても考える必要がある。また、第三者に対する安全・非干渉（邪魔にならない）、衝突回避などの機能も要求される。

COVID-19対策用ロボットに関しても、清掃・消毒、配送・搬送・配膳・陳列、検温・検査、コミュニケーション・受付・接客、見守りなどの用途で、米国、中国のメーカなどがいち早く開発・実用化・導入を行っている。日本も、多くのメーカが開発・実証試験・試験的導入などをはじめている。各国、いずれも、COVID-19対策用ロボットは国内での利活用が優先されているが、日本も、社会実装・事業化、国際的事業展開において、後れを取らないようにする必要がある。

新たな国際的なファンディングとしては、米国のNRI 2.0 (National Robotics Initiative 2.0)²⁴⁾のUbiquitous Collaborative RobotsやEUのHorizon Europe²⁵⁾などが注目される。群ロボットシステムの応用に関しては、これまで軍事応用が多かったのに対し、最近では様々な民生用の応用例が多く出てきている。例えば、自動倉庫群ロボットに関して、KIVAシステムが倉庫ロボット（小型AGV）を開発し、多数台を自動倉庫に導入した。KIVAシステムは2012年にAmazonに買収されているが、2014年には15,000台がAmazonの配送センターに導入され、カリフォルニア州トレーシーの配送センターでは3000台が稼働するなど、発展を遂げている。このような自動倉庫群ロボットは、中国や日本でも開発・事業化が進められている。また、ドローンに関しては、小型ドローンの群制御によるショーの演出が過熱している。米国Intel社が、平

昌冬季オリンピック開会式において2018機を同時に飛行させたほか、ロシアのチームは2200機を飛行させ、さらには、中国深圳の企業 DAMODA（深圳大漠大智控技术有限公司）が3051機のドローンの群制御に成功している。これらの台数の記録は、ギネス記録となっている。Horizon 2020の災害対応ロボット関連の研究開発でも、ドローンなどの群ロボットを災害対応に活用する研究開発が行われている。

〔注目すべき国内外のプロジェクト〕

日本国内では、SIP（Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program）²⁶⁾、ImPACT（Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies Program）²⁷⁾などの省庁横断型の研究開発プログラムにおいてロボットのシステム技術の開発を行ってきた。現在は、第2期SIP「ビッグデータ・AIを活用したサイバー空間基盤技術」、「自動運転（システムとサービスの拡張）」や、PRISM（Public/Private R&D Investment Strategic Expansion Program）²⁸⁾「建設・インフラ維持管理技術／防災・減災技術」（AIによる建機の自動制御・群制御）などの研究開発プログラムが進行中である。科研費では、基盤研究、新学術領域研究などに加え、新たに学術変革領域研究が設置され、ロボットの新たなシステム技術に関連する基礎研究が行われている。さらに、新たにムーンショット型研究開発制度²⁹⁾が発足し、特に目標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）において、長期的目標を掲げて新規なロボットのシステム技術開発が行われている。これらにより日本のシステム技術の巻き返し期待される。一方、ドローンの技術開発・利活用・事業化に関しては、中国のDJI社に先行を許したが、ドローンの様々な応用が広がる中、近い将来、多数のドローンが運用されることを想定し、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」等において、その運行管理を行うためのシステム開発、国際標準化などに取り組んでいる。

米国の注目すべきプロジェクトは、前述のNRIに基づき2016年からNSFが開始したNRI 2.0²⁴⁾が挙げられる。また欧州においては、前述のHorizon 2020²¹⁾（2014-2020）や、Horizon Europe²⁵⁾（2021-2027、予算総額976億ユーロ）が、欧州規模の研究およびイノベーションを促進するための注目すべきフレームワークプログラムであろう。中国に関しては、前述の国家重点研究開発計画、世界一流大学・一流学科（双一流）などが継続して行われており、これらに注目すべきプログラムである。さらに中国では、自動運転を実装した次世代先端技術を活用したスマートシティを、2035年までに北京市近郊の雄安新区に設置する計画を立ち上げており、総投資額は2兆元と試算されている。

（5）科学技術的課題

ロボットシステムに要求されるミッション・タスクの高度化・多様化・複雑化・不確定化、動作する環境の複雑化・無限定化に適応するため、ロボットシステムの自律分散化、自己組織化が必要となる。これによる要素数（ロボットの数）の増大に伴い、システムの自由度も増大する。そこで、自由度を固定したシステムの境界条件内で最適化する機能のみならず、境界条件を変化させ、システムの自由度を拡大・縮小することによって解を探索し、自己組織化する機能が要求される。すなわち、要素の物理的特性によって、要素の自由度は制約されるが、複数の要素間で協調することにより、自由度を拡大させ、物理的制約を拡張・オープン化することが可能となる。このような行動は、拡自行動³⁰⁾と呼ばれている。ただし、拡自行動を実現するための一般的な理論や方法論など、適応の原理やシステム論にはまだ手がつけられておらず、その構築が課題である。

複数のロボットによる協調に関しては、個別の分野（軍事、自動倉庫、ドローン制御、自動運転、災害対

応など)での適用例はあるものの、自己組織、自己修復などの機能はいまだに研究レベルである。極めて多くの台数のマルチロボットや群ロボットの協調の研究は、Swarm RoboticsやCollective Intelligenceと呼ばれるが、均質系(Homogeneous)のロボットシステムにおける編隊、運搬などの基本的な機能の実現にとどまっており、非均質系(Heterogeneous)のシステムや複雑なタスクの実現には至っていない。群ロボットシステムの開発においては、システム設計、相互衝突回避、協調動作計画、組織化、協調制御、協調センシングなど様々な問題があるが、これまでの研究では特定の問題設定での手法や実現例はあるものの、一般的な方法論には至っていない。群ロボット制御、自己組織化の数理モデルなどもほとんど提案されていない。

群ロボットの操作に関しては、オペレータが群ロボットを意図通りに操作できるインタフェース機能の構築が重要であるが、これらの研究開発もまだ十分ではない。また、群ロボットを操作するには、各ロボットにもある程度の自律性を組み込むことが必須になるが、この自律性を実現するには、物理的かつ動的な知能としてのロボットAIの開発が新たに求められる。ロボットAIには、多数のパラメータを同時に扱える手法である機械学習や深層学習などの適用が期待されるが、一方で現在のAIでは困難な、以下の課題を解決する必要がある。

- ・ Ill-defined、Ill-structured、未知環境への適応
- ・ ノイズや実時間性への対応
- ・ 獲得されたモデルに関する説明可能性の担保
- ・ 過学習の回避

システム技術は、分野ごとに個々のプロジェクトの中で研究開発が行われることが多い。その場合、応用が定まっているために出口指向の研究開発になる傾向がある。一方、SoS(System of Systems)におけるシステムの統合化や、システムの効率的構築・運用には、分野を超えた共通基盤技術の開発が重要である。また、基礎研究として、システムの理論的研究を推進することも同時に重要である。

(6) その他の課題

システムインテグレーション技術は体系化することが難しく、その高度化は、システムインテグレーション技術の知識やスキルを有するSler(System Integrator)と呼ばれる人材の育成と同値とも考えられる。座学やPBL(Project Base Learning)などによる教育のみならず、WRS(World Robot Summit)をはじめとするロボットシステムの競技会や、日本ロボット大賞のような表彰システムは、実践的な人材を育成するための有効な方策である。

実用化においては、システムを構成する要素間をつなげるためのインタフェースが重要であり、ハードウェアのみならず、ソフトウェアのインタフェース、API、要素間の通信規格などの共通化・標準化、共通基盤プラットフォームの構築が重要となる。また、実用化においては実証試験が重要となる。開発したシステムの性能評価や、それを操作するオペレータの訓練によるスキル向上、システムやオペレータの認証も重要である。なお、南相馬市に設置された福島ロボットテストフィールドは、ロボットのシステム技術の実証試験・認証、オペレータの訓練・認証を行う上で、重要な役割を果たすと考えられる。

社会実装においては、安全やELSI(ethical, legal and social implications(またはIssues))などに考慮することが重要である。安全に関しては、労働災害における産業用ロボットの安全のみならず、人間との接触が前提となる医療ロボットや生活支援ロボットの安全、ドローンの安全(第三者上空飛行における落下による危険防止)などの議論が進んでいる。産業用ロボットや医療ロボットに関しては、安全規格や安全認証として、ISO、EUのCEマーク、RoHS、ドイツのTÜV、米国のUL、FDAなどがある。ドローンの安全につ

いてはNEDOが安全評価基準³¹⁾を策定している。生活支援ロボットについては、NEDOの生活支援ロボット実用化プロジェクト³²⁾において、移動作業型（操縦が中心）、移動作業型（自律が中心）、人間装着（密着）型、搭乗型などの安全性検証手法が開発され、生活支援ロボット安全検証センターにおいて安全性の評価が可能になった。ソフトウェア安全についても、情報処理推進機構（IPA）が安全分析手法STAMPなどを開発している³³⁾。なお、実用化・事業化のための安全目標の基準に関しては、ALARP（As Low As Reasonably Practicable）の考え方が重要である³⁴⁾。

倫理においては、ディストピア小説などでも示されているような軍事転用やSingularityの懸念がある。群ロボットのオペレーションにおいては、ある程度の自律性の組み込みが必須になることから、自律性の実現に伴い生じるこれらの課題についても、今後議論する必要がある。

事業化、社会実装においては、制度設計が極めて重要である。規制に関しては、ロボット新戦略¹⁹⁾では、ロボットの利活用の推進の阻害要因となり得る規則として、電波法、医薬品医療機器等法、介護関係諸制度、道路交通法・道路運送車両法、航空法等、公共インフラの維持・保守関係法令などが、ロボットの社会実装の阻害要因として挙げられており、これらの改革の必要性が指摘されている。規制緩和や、規制の枠を超えて実証試験の実施を可能にする様々な特区なども、実用化、社会実装のために重要な施策である。一方、社会実装を推進し、市場を積極的に創造するには、規制緩和だけでなく、配備を義務付けるなど、規制強化の政策についても検討する必要がある。免税などの税制的制度設計、安全性を脅かすリスクに対する保険制度や、無線周波数の確保や保険制度などを含む環境整備なども重要になる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	日本のロボットのシステム技術に関する基礎研究は高いレベルが維持されていると考えられるが、米国に比べると相対的にやや遅れ気味である。科研費では、基盤研究、学術変革領域研究等においてロボットの新たなシステム技術に関連する基礎研究が行われている。ムーンショット型研究開発制度（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）においては、長期的目標を掲げて新規なロボットのシステム技術開発が行われている。
	応用研究・開発	◎	↘	応用研究・開発は、最高レベルが維持されている。福島原発の廃炉などでも、その技術力の高さが証明されている。ただし、それが事業化や社会実装にはうまくつながっておらず、競争力は低下の傾向にある。破壊的なイノベーションを謳っているムーンショットや、経産省をはじめとする各省庁やNEDOのプロジェクトなどによる巻き返しに期待したい。
米国	基礎研究	◎	→	NSF、NIH、DoD、DARPAなどの複数のFunding Agencyの投資による様々なロボットシステム技術の基礎研究や基盤技術開発がしっかり進められている。省庁横断型の研究イニシアティブNational Robotics Initiative（NRI）に基づくNRI 2.0（Ubiquitous Collaborative Robots）などの研究開発も強みである。
	応用研究・開発	◎	→	NRI 2.0などの国家的なプロジェクトによる研究開発に加え、ベンチャー企業も含めた民間の研究開発、技術力が極めて強く、高いレベルを維持している。技術や製品の軍事利用が活発であり、市場が大きい。
欧州	基礎研究	○	→	FP7やHorizon 2020、Horizon Europeなどの超大型のフレームワークプログラムによって、欧州規模の研究開発およびイノベーションが推進されている。

	応用研究・開発	○	↗	EURON（大学などの研究機関へのロボット研究開発ファンディング）や EUROP（企業へのロボット開発ファンディング）、PPP（Public Private Partnership）という官民連携プログラムに加え、上記のフレームワークプログラムでロボットのシステム技術の応用技術開発や事業化が推進されている。Industrie 4.0というネットワーク型生産システムが提案され、ドイツを中心にCPS（Cyber-Physical System）の開発などが加速している。
中国	基礎研究	○	↗	国家重点研究開発計画、世界一流大学・一流学科（双一流）など、国家重点研究開発計画のもとで、多くのロボット研究開発および、研究教育が国主導で推進されており、論文数も急激に増えている。論文の質も向上している。
	応用研究・開発	◎	↗	国家的な投資により、中小企業やベンチャー企業が多く立ち上がり、アグレッシブに事業化を進めている。製造業では、ABBのロボット事業本社の上海移転、中国の家電メーカーによるKUKA買収など、ロボットシステム技術が急速に強化されつつある。ドローンの技術開発・利活用・事業化に関しては、DJI社が製品開発で先行し、大きな市場を獲得している。自動倉庫ロボットやサービスロボットの開発も活発に行われている。自動運転を実装した次世代先端技術を活用したスマートシティーを2035年までに北京市近郊の雄安新区に設置する計画が立ち上がっている（総投資額2兆元）。
韓国	基礎研究	△	↗	基礎研究のレベルは、徐々に向上している。ただし、大きな躍進にはつながっていない。
	応用研究・開発	△	→	製造業におけるロボットの導入は加速している。サービス分野では、国による大型投資があり、ベンチャー企業も多く立ち上がっているが、利活用や事業はそれほど進んでおらず、市場は拡大せず、競争力はまだ高いとは言えない。
その他の国・地域	基礎研究	○	↗	オーストラリア、カナダ、シンガポールの基礎研究も高いレベルを維持している。ロシアの基礎研究力もある程度高いと推察される。最近では、中南米（ブラジル、メキシコなど）、東南アジア（タイなど）、イランなども徐々に力をつけている。UAEでも、ロボットの競技会を開催するなど、研究開発を活性化させようとしている。
	応用研究・開発	△	↗	オーストラリア、カナダ、シンガポールなどは、軍事、鉱山、水中、農業などのフィールド分野でロボット技術の利活用が活発である。ロシアは、軍事、宇宙において競争力が高い。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考文献

- 1) 福田敏男、中川誠也：動的再構成可能ロボットシステムに関する研究（第1報、セル間の自動接近・結合・分離制御実験）、日本機械学会論文誌（C編）、55-1、pp. 114-118、1989。
- 2) H. Asama, A. Matsumoto, Y. Ishida: "Design of an Autonomous and Distributed Robot System: ACTRESS", Proc. 1990 IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems,

pp. 283-290, 1989.

- 3) Akiya Kamimura, Eiichi Yoshida, Satoshi Murata, Haruhisa Kurokawa, Kohji Tomita and Shigeru Kokaji : “A Self-Reconfigurable Modular Robot (MTRAN) - Hardware and Motion Planning Software –”, Distributed Autonomous Robotic Systems 5, pp. 17-26、Springer-Verlag, 2002.
- 4) Rodney Brooks : “A robust layered control system for a mobile robot”. IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 2, no. 1, pp. 14-23. 1986.
- 5) Lynne E. Parker : ALLIANCE : “An architecture for fault tolerant multirobot cooperation”. IEEE transactions on robotics and automation 14 (2) , 220-240
- 6) Hermann Haken (斎藤信彦他訳) : シナジェティクスの基礎—不安定性の階層=システムとデバイスの自己組織化, 東海大学出版会, 1986.
- 7) Ilya Prigogine (小島陽之助, 相沢洋二訳) : 散逸構造—自己秩序形成の物理学的基礎, 岩波書店, 1980.
- 8) 移動知の力学的共通原理の発見と展開-人工物と生物の共通理解-
<https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-17075010/>
- 9) ネットワーク・ヒューマン・インターフェースの総合的な研究開発 (ネットワークロボット技術)
https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictR-D/pdf/h20_11_12.pdf
- 10) 藤井輝夫, 浅間 一, 倉林大輔, 嘉悦早人, 遠藤 勲:”知的データキャリアによる群ロボットの機能創発”, 日本ロボット学会誌, vol. 17, no. 6, pp. 848-854, 1999.
- 11) T. Kanade, R. Collins, A. Lipton. : Advances in Cooperative multi-sensor video surveillance, in Proc. of DARPA Image Understanding Workshop, vol. 1, pp. 3-24, 1998.
- 12) Smart Rooms
<http://vismod.media.mit.edu/vismod/demos/smartroom/>
- 13) T. Sato, Y. Nishida, H. Mizoguchi : Robotic Room : Symbiosis with human through behavior media, Robotics and Autonomous Systems, vol..18, pp. 185-194, 1996.
- 14) Joo-Ho Lee and Hideki Hashimoto, "Intelligent Space - concept and contents", Advanced Robotics, vol.16, no.3, pp.265-280, 2002.
- 15) Cory D. Kidd, Robert Orr, Gregory D. Abowd, Christopher G. Atkeson, Irfan A. Essa, Blair MacIntyre, Elizabeth D. Mynatt, Thad Starner, and Wendy Newstetter : “The aware home : A living laboratory for ubiquitous computing research、” In CoBuild '99 : Proceedings of the Second International Workshop on Cooperative Buildings、Integrating Information, Organization, and Architecture, pp. 191-198, 1999.
- 16) R.A. Brooks : “The intelligent room project”, Cognitive Technology, 1997. 'Humanizing the Information Age'. Proceedings., Second International Conference on, pp. 271-278, 1997.
- 17) 水川 真、山口 亨:空間知機能デザインに関する研究, 第7回計測自動制御学会システム・インテグレーション部門講演会講演論文集, pp. 534-537, 2006.
- 18) National Robotics Initiative
<https://www.manufacturing.gov/programs/national-robotics-initiative>
- 19) ロボット新戦略

https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/robot_honbun_150210.pdf

20) 7th Framework programme

https://ec.europa.eu/research/fp7/index_en.cfm

21) Horizon 2020

<https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en>

22) 浅間 一、他：18. ロボティクス・メカトロニクス、日本機械学会最近10年のあゆみ、日本機械学会、2017.

23) 新学術領域「分子ロボティクス」

<https://www.molecular-robotics.org/>

24) National Robotics Initiative 2.0 : Ubiquitous Collaborative Robots (NRI-2.0)

https://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503641

25) Horizon Europe

https://ec.europa.eu/info/horizon-europe_en

26) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)

<https://www.jst.go.jp/sip/>

27) 革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)

<https://www8.cao.go.jp/cstp/sentan/about-kakushin.html>

28) 官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM)

<https://www8.cao.go.jp/cstp/prism/index.html>

29) ムーンショット型研究開発制度

<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/index.html>

30) 川端邦明、浅間 一、田中雅之：マルチロボット環境下におけるロボットの拡自行動, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, p.86, 2002.

31) 無人航空機性能評価手順書, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2020

<https://www.meti.go.jp/press/2020/05/20200529004/20200529004-2.pdf>

32) 生活支援ロボット実用化プロジェクト

https://www.nedo.go.jp/activities/EP_00270.html

33) 「STAMPガイドブック ～システム思考による安全分析～」の公開 ～STAMPの本質を理解してさらなる有効活用を～

<https://www.ipa.go.jp/ikc/reports/20190329.html>

34) 日本学術会議報告：工学システムに対する社会安全目標の基本と各分野への適用, 2017

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス

2.2.5 モビリティロボット（空中ロボット、空飛ぶクルマ）

（1）研究開発領域の定義

遠隔飛行、自動飛行、自律飛行により空中を飛行し、ミッションを遂行できる空中ロボットに関して、飛行体としての機体本体、飛行制御システム、遠隔操作やデータ送信のための通信システム、複数の飛行体の安全で効率的な飛行を可能とする運航管理システムを包括した領域を研究開発領域として定義する。無人航空機システム（UAS：Unmanned Aircraft System）と呼ばれることもあるが、機体が大型し、人を運ぶことができるほどのペイロード能力を持つ機体「空飛ぶクルマ」と呼ばれることもある。「空飛ぶクルマ」に関しては操縦士が搭乗する場合は、航空機の扱いとなるため、ここでは、UASと同様に、操縦士は遠隔で操作、または自動・自律操縦するものを対象とする。

（2）キーワード

無人航空機（UAV：Unmanned Aerial Vehicle）、無人航空機システム（UAS：Unmanned Aircraft System）、垂直離着陸機（VTOL：Vertical Take-Off and Landing aircraft）、アーバンエアモビリティ（UAM：Urban Air Mobility）、ドローン、空飛ぶクルマ、空中ロボット、遠隔操作、自動飛行、自律飛行、管制航法誘導、無線システム、衛星航法、慣性航法

（3）研究開発領域の概要

歴史

無人航空機の歴史は古く、イギリスのデ・ハビランド社製の練習機 DH.82 タイガー・モス（de Havilland DH.82 Tiger Moth）に無線操縦装置を取り付けた無人航空機の Queen Bee（女王蜂）が標的機として 1935 年ごろに開発された。米国でも模型飛行機を改造した標的機が第二次世界大戦中に使用され、オス蜂を意味するドローンと命名され標的機はターゲットドローンと呼ばれるようになった¹⁾。

軍事利用のドローンは標的機以外に偵察機としての開発も行われ、1990 年代には、衛星航法、衛星通信を利用した目視外への遠隔自動飛行も実用化された。1995 年のボスニア・ヘルツェゴビナ紛争において中高度滞空型（MALE：Middle Altitude Long Endurance）の無人偵察機が実戦で使用された²⁾。無人偵察機はその後、高高度滞空型（HALE：High Altitude Long Endurance）や電動小型機なども実用化されている。

民間での産業用無人航空機としては、遠隔操作の無人ヘリコプターによる農薬散布の研究が日本において 1980 年代から開始され、1990 年代には実用化された¹⁾。現在普及しているドローンは、複数の電動プロペラの回転数制御で飛行するマルチコプター（マルチローターとも呼ばれる）タイプであり、1980 年代に国内メーカーによりホビー機として市販されたものが世界初の市販マルチコプターといわれている。マルチコプターは 1990 年代から研究用に使われていたが、近年のブームは空撮利用に適したホビー用のマルチコプターが 2010 年以降市販されたことによる。その背景として、リチウムイオンバッテリー、ジャイロや加速度計などの半導体センサー技術、Wi-Fi や Bluetooth などのデジタル通信技術などが携帯型 PC、タブレット、スマートフォンなどの普及により急速に進歩し、安価に提供されるようになったことが挙げられる。

マルチコプターは、空撮のみならず、測量、監視、農薬散布などにすでに実用化されている。今後は、通信、物流などへ用途が広がると考えられ、その産業規模は指数関数的に拡大している。マルチコプターの大型化も進み、2010 年代後半には、人を乗せることができるほどのペイロード能力を備えたものも出現し、人が操

縦する機体の飛行試験にも成功している。こうした大型マルチコプターは「空飛ぶクルマ」とも呼ばれている³⁾。

機体の分類

ドローンなどの空中ロボットは無人航空機であり、広い意味では航空機的一种である。航空機は日本では航空法により、「人が乗って航空の用に供することができる飛行機、回転翼航空機、滑空機及び飛行船その他政令で定める航空の用に供することができる機器」(航空法2条1項)とされ、いわゆる無人機は航空機に含まれなかったが、平成15年12月から施行された改正航空法により、無人航空機は、「航空の用に供することができる飛行機、回転翼航空機、滑空機、飛行船その他政令で定める機器であって構造上人が乗ることができないもののうち、遠隔操作又は自動操縦(プログラムにより自動的に操縦を行うことをいう。)により飛行させることができるもの」(航空法2条22項)と新たに規定された⁴⁾。

航空機は日本の法規では、空気よりも軽い軽飛行機、すなわち飛行船と、空気よりも重い重飛行機に分類される。重飛行機は回転翼航空機(ヘリコプターなど)と、固定翼航空機に分類され、固定翼航空機は滑空機と飛行機に分類される。無人航空機も同様に、遠隔操作、または自動操縦が可能な、飛行船、回転翼機、滑空機、飛行機に分類することができる。現状普及している小型無人航空機は4つ以上のプロペラを利用したマルチコプターであるが、単独のプロペラをもつヘリコプタータイプ、固定翼の飛行機タイプの無人機も存在し、最近では、固定翼を備えたマルチコプタータイプ(ハイブリッド機とも呼ばれる)、ローターの回転軸を変更できる機体も開発されている。

「空飛ぶクルマ」は人が操縦するものは航空機に分類されるが、操縦者が同乗しないものは日本の航空法では、無操縦者航空機(航空法第八十七条)として解釈され、大型の無人機もその解釈をされる(ただし、定義は明確ではない)。

(4) 注目動向

機体認証

民間航空機は国連の専門機関ICAO(国際民間航空機関)による国際法(シカゴ条約)で飛行安全を維持するためのルールが付属書(ANNEX)で定められ、各国航空当局(アメリカでは連邦航空局FAA、欧州では欧州航空安全機構EASA、日本では国土交通省航空局)はシカゴ条約の批准の下で国内法を制定している⁵⁾。無人航空機に関しては、小型のものは、国際運航は無いという解釈により各国で独自のルールが導入されているが、RPASと呼ばれる大型の無人機に関してはICAOで国際ルールが検討されている⁶⁾。RPASとはRemotely Piloted Aircraft Systems(遠隔操縦航空機システム)の略で、民間航空機が計器飛行で運航する空域を遠隔操縦の無人機が運行するシステムを想定している。現在、有人機のANNEXの該当する部分を無人機用に改定する作業が進んでおり、2020年半ばにはICAOで承認される計画である。有人機に匹敵する安全性を有することと、有人機と同様に管制からの飛行指示に従うことと、有人機なみの衝突防止装置を装着することが義務づけられると想定される。その意味では、空中ロボットというよりも現状の航空機を遠隔操作で飛行させるイメージで、利用用途は主に貨物輸送である。機体認証に関しては、有人機と同等な耐空性の要求と、量産機に関しては型式証明が導入される見込みである。

小型の無人機に関しては、RPASのような統一的な機体認証ルールはなく、機体個別の安全認証であるが、欧州ではEASAが各国のルールを統合する動きがある⁷⁾。わが国でも、現状は機体個別の認証をベースにしているが、2022年度から機体認証制を立ち上げる動きにある⁸⁾。

「空飛ぶクルマ」に関しては、大型ではあるが国際運航は想定しておらず、RPASと小型無人機の間位

置するといえる。操縦士が同乗するものに関しては、有人機の機体認証となり、試作機や自作機の場合は、FAAではExperimental Aircraft、ウルトラライト機（Part103）、小型スポーツ機（FAA Order 8130.2J）などの認証を受けるが、日本では航空法11条ただし書による耐空性の個別審査となる。量産機に関しては、FAAでは小型機（Part23）、小型ヘリ（Part27）、業務ヘリ（Part29）などの認証を、わが国でもN類、T類などの認証をうけることになる。無人機としての「空飛ぶクルマ」に関しては、その機体認証制度は現時点では国際的にも明確ではない⁹⁾。

飛行許可

無人機に関する飛行許可は、機体特性、飛行領域のエアリスク（無人機同士、有人機無人機の空中衝突など）および地上リスク（墜落時の被害など）、操縦者の技能などを考慮してトータルなリスクを評価し、許容レベルに抑制できる対策が講じられているかどうかを総合的に判断するSORA（Specific Operations Risk Assessment）と命名された手法が、各国の航空当局による無人機のルール形成に関するコンソシアムJURAS（Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems）を中心に開発されている¹⁰⁾。

上記のような動向があるものの、現状では各国とも無人機に関しては、当局が申請を審査して飛行許可を与える状況にある。米国では、CFR part 107（Operation and Certification of Small Unmanned Aircraft Systems）において、25kg未満の小型無人機の飛行ルールが規定され、目視外飛行などでは個別審査による免除（Waiver）が与えられ、25kg以上の無人機ではFAA Modernization and Reform Act of 2012におけるSection 333による飛行許可を個別に取得する。多くの無人航空機が登録され、活用されている状況から、運航者や無人航空機が一定の条件を満たす場合、Part107のウェーバー申請をしなくとも飛行が出来る新しいルールが提案されている（NPRM（Notice of Proposed Rulemaking））¹¹⁾。

わが国では、2015年の航空法改正により、小型無人航空機の飛行可能領域と、飛行方法が制定され、夜間飛行や目視外飛行を行うには、航空局に飛行申請して許可を得る必要がある¹²⁾。申請件数が急増する状況において、2022年度を目途に、機体の承認制度、操縦免許制度、標準飛行マニュアルを整備し、個別審査以外に、資格審査により飛行許可を発行できるような制度を設定することが、「空の産業革命にむけた官民協議会」において合意された¹³⁾。この官民協議会は、関係省庁と民間により設置され、小型無人航空機の環境整備に向けたロードマップが2016年以降、毎年公表されている¹⁴⁾。

空飛ぶクルマに関しては、関係省庁と民間により「空の移動革命に向けた官民協議会」が2018年に設置され、2023年度を目途に、空飛ぶクルマの事業化を可能にすることを目標に、制度設計、技術開発、実用化のロードマップが策定されている¹⁵⁾。このなかで、制度や体制の整備に関しては、

- ・ 運送・使用事業制度の整備
- ・ 操縦に関する技能証明制度の整備
- ・ 機体に関する型式証明・耐空証明の整備
- ・ 離発着場、飛行空域、使用電波の整備
- ・ 飛行試験拠点の整備

がリストアップされ、機体や技術の開発に関しては

- ・ 安全性・信頼性を確保し、証明する技術開発
- ・ 自動飛行や運航管理技術
- ・ ハイブリッドを含む電動推力技術

が列挙され、整備目標、開発目標が共有されている。

電波利用

無人航空機において、遠隔操作、飛行状況のモニター、画像情報などの伝送において電波利用が必須である。ラジコン用の電波は、従来から存在し、アナログの電波帯が存在するほか、WiFiも利用するISMバンド（産業科学医療用バンド）も利用され、市販のドローンは、無線局免許が不要な2.4GHz帯のISMバンドの使用が主流となっている¹⁶⁾。

この中で、無人移動体画像伝送システムには2016年に総務省から高出力の画像伝送用周波数帯の使用許可が与えられたが、免許の取得と使用者間の調整が必要である¹⁷⁾。

より簡単な携帯電話用無線（LTE）のドローン利用に関しては、試験的利用が2016年より開始され、2020年度中には一般的利用が開始の見込みである¹⁷⁾。LTEは、携帯電話の利用と同様に携帯電話基地局を自動的に切り替えることで、長距離で自営の無線局からの電波が届かない場合の交信も可能である。ただし、携帯電話基地局の存在しない山間部や洋上での利用は不可能であるため、その場合には衛星通信が利用されている。

RPASのような大型無人機では通常の航空機と同様に民間用VHF無線、洋上管制用HF無線、衛星通信が使われることが想定されている。「空飛ぶクルマ」に関しては、航空用無線が使用されると考えられるが、近距離の場合は、小型無人機に近い無線の使用も想定される。

運航管理

有人機は空中衝突を避けるために、旅客機などは常に管制官の指示に従って飛行する計器飛行方式が採用され、飛行空域も規定されている。小型機やヘリコプターなどは、空港周辺以外はパイロットの目視により安全確認による有視界飛行方式を採用している。小型無人航空機は基本的には、操縦者の目視で安全を確保するが、飛行密度が高い状態や、目視外の飛行のために、無人機用運航管理システム（UTM）が開発されている。これは、ドローンの位置情報を地上局で監視するものであるが、複数のUTMが関係する場合には、

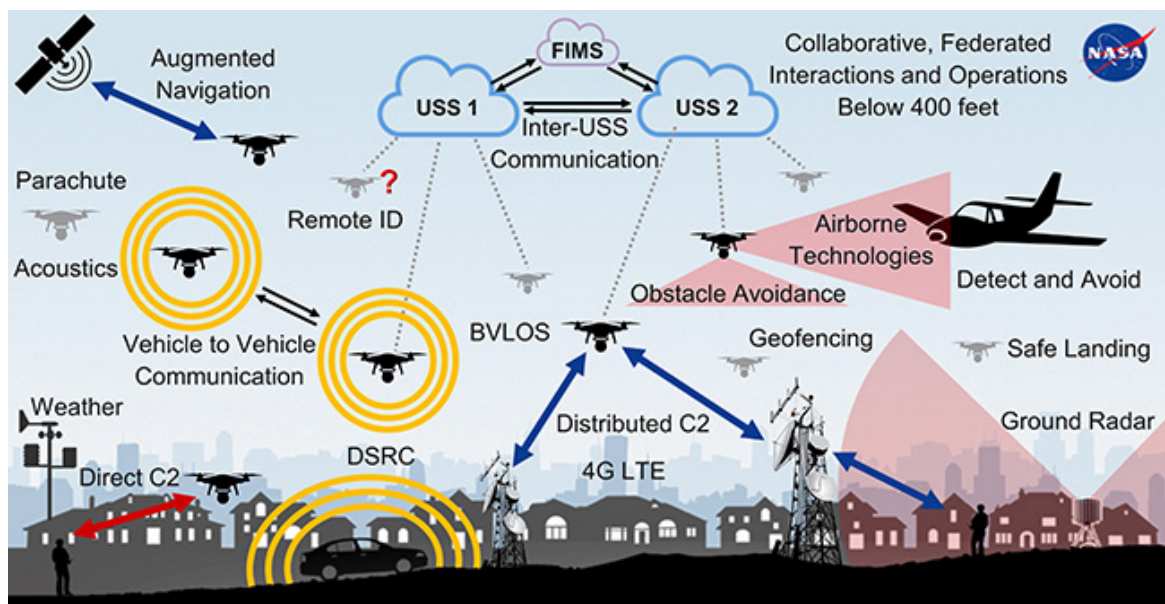


図 2-2-3 NASAのUTM構想

UTM間での調整機能も必要であり、各国で研究開発がなされている。わが国ではNEDOのプロジェクトで統合的なUTMの研究開発がなされている¹⁸⁾。米国では最終的に無人機の飛行を米国国家空域システムに統合することを目的にUTMの研究開発、実証実験を行い(図2-2-3)、空港周辺などではUTMに接続した飛行が義務付けられている。欧州でも空域統合に向けたロードマップが発表されている^{11), 19)}。

こうした本格的な管制システムとは別に、飛行中のドローンの所有者が確定できるようなシステムが欧米で義務付けられる予定である。このシステムはリモートIDと総称され、機体から常時電波を発信し、受信者が機体IDや所有者などの情報を得ることができるものである。わが国で、ドローンの登録開始が予定されており、リモートIDも導入される計画である。

(5) 科学技術的課題

特許庁の調査報告書²⁰⁾によれば、小型無人航空機の技術は機体構造技術と飛行運航技術に分類され、機体構造は

- ・ 構造部
- ・ 揚力・推力機構
- ・ 動力機構
- ・ エネルギー源 (バッテリー、優先給電、無線給電など)
- ・ 取付構造
- ・ ペイロード (カメラ、ミッション機器など)
- ・ 安全機構 (エアバッグ、パラシュート、ローターガード、衝撃吸収機構)

に分類される。

飛行運航技術に関しては

- ・ 機体技術として、センサー、アクチュエーター、フライトコントローラー、故障診断・衝突防止などの安全技術
- ・ 無線システム
- ・ 無人機管制
- ・ 飛行支援装置 (ドローンポート)

に分類される (図2-2-4)。

課題としては、

- ・ 飛行性能の向上
- ・ 制御の高度化
- ・ 耐環境性
- ・ 異常対応
- ・ 衝突安全性
- ・ 衝突回避
- ・ 不正利用防止
- ・ 低コスト化

などが項目として列挙できる (表2-2-1)。

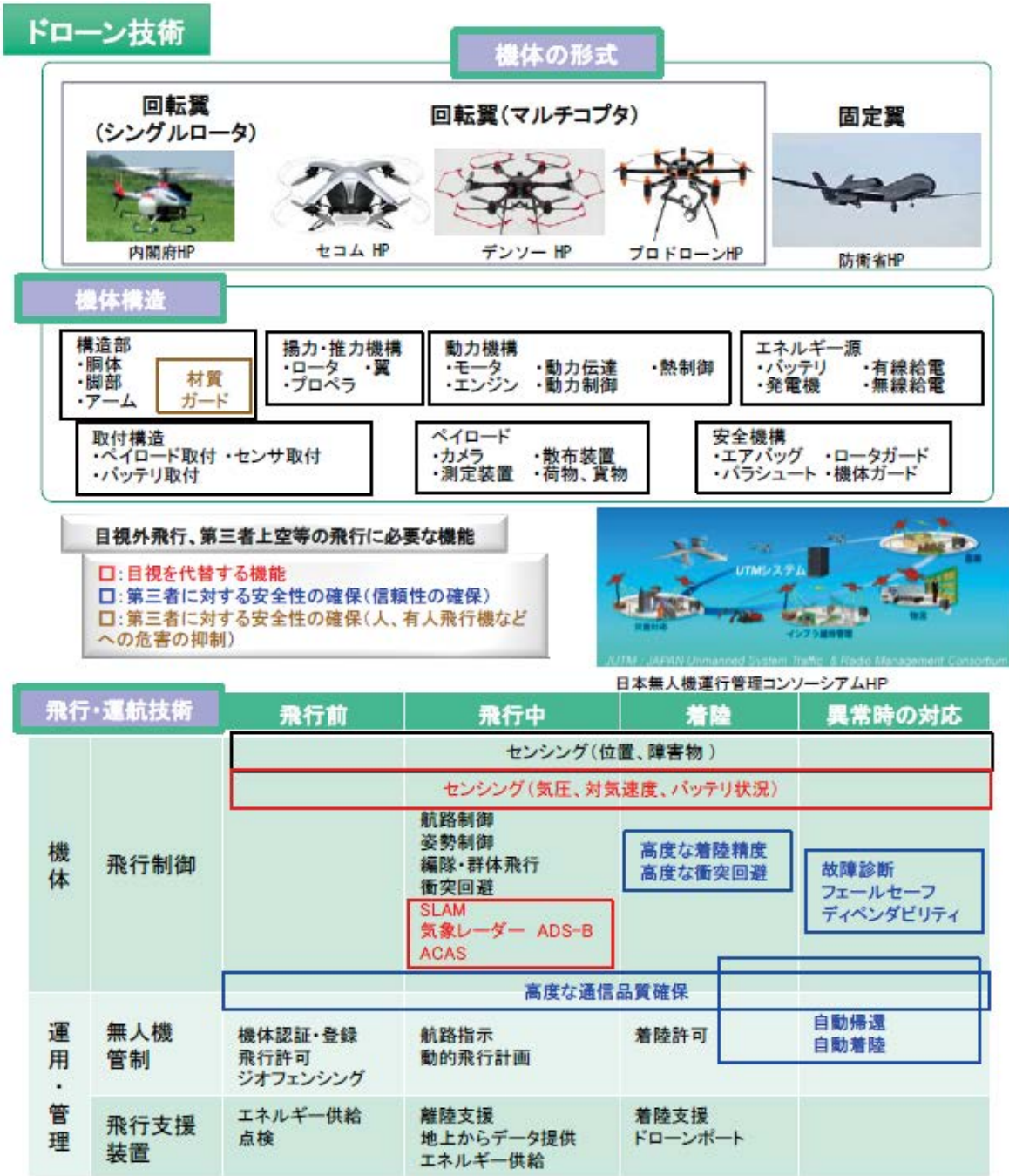


図 2-2-4 ドローンの技術分類²⁰⁾

表 2-2-1 技術区分に対する技術課題

		飛行性能の向上	制御の高度化	耐環境性	異常対応	衝突安全性	衝突回避	不正利用防止	低コスト化	その他
機体構造	構造部	・軽量化（CFRP, マグネシウム合金）	・モーフィング	・耐雷性能	・損傷検知 ・自動損傷修復	・衝撃吸収機構			・製造技術 ・リサイクル技術	リサイクル
	揚力・推力機構	・効率化（プロペラのCFD） ・低騒音化 ・可変ピッチプロペラによる応答性向上	・Active騒音低減技術	・耐雷性能		・プロペラガード				
	動力機構	・高性能モーター・ハイブリッド用発電機	・応答性の向上	・低温、高温性能	・異常検知					
	エネルギー部	・高性能バッテリー・ハイブリッド化による長時間飛行	・インテリジェント化（充電の管理）	・急速充電	・低温、高温性能	・異常検知	・衝突時の発火防止			
	ペイロード	・高性能カメラ（可視、赤外、望遠・ステレオ）		・環境センサー						
	安全機構					・墜落時の衝撃吸収機構		・機体電子登録 ・リモートID		
飛行運航技術	機体技術	・非GPS環境での自動飛行（画像センサー、ライダーなどでの環境同定と位置把握）	・自立化機能 ・自動編隊飛行		・故障検知 ・耐故障制御技術	・衝突検知技術	・飛行経路自動変更	・不正利用検知技術		
	無人機管制		・自動管制	・環境情報通知	・故障検知	・衝突回避指令	・緊急着陸管制	・不正利用防止		・有人管制との統合
	飛行試験	・強度試験 ・疲労試験	・システム検証試験装置	・環境試験装置		・衝撃試験	・シミュレーション環境			
	離着陸場	・機体固定	・自動誘導 ・GPS誤差補正	・環境計測	・飛行前の自動モニタリング	・複数機の誘導		・人の侵入検知		
	通信技術	・遅延の低減（5Gの利用）	・複数機同時接続（5G利用）	・中継技術（直接通信の困難な場合）	・複数通信（衛星通信）		・衝突防止装置	・通信性セキュリティ（暗号化など）		
	ヒューマンインターフェース	・地上局レイアウト	・複数機の同時操作		・ヒューマンエラー検知 ・疲労検知		・衝突回避アドバイザー機能	・不正使用防止		

大型無人機でもほぼ同じ技術課題を列挙できるが、有人機と同一の空域を飛行するケースが多いことから、

- ・有人機と無人機の統合的な管制技術
- ・衝突防止技術

がより重要となる。また、機体が大型化することから墜落時の被害が深刻となるため

- ・機体の信頼性・安全性を保障する設計技術、評価技術、試験技術
- ・非常時の自律的緊急着陸技術
- ・遠隔操作・飛行モニターにおけるヒューマンエラーの排除技術

などがより重要となる。なお、機体そのものに関しては、大型化にともない

- ・機体の軽量化技術
- ・燃料電池、ハイブリッドなど長時間飛行を可能とする推進技術

も必須となる。

空飛ぶクルマに関しては、大型無人機の方に加え、人を運ぶ場合には

- ・より高度な信頼性・安全性の保証
- ・墜落時の乗員の保護に関する衝撃吸収技術
- ・汎用的な空港インフラ技術

も要求されることになる。

無人航空機は遠隔操作で操縦または自動飛行が行われるため、通常は機上の乗員が行う安全関連の認識・判断・操作に遅れが生じかねない。いわゆる人工知能機能はこうした分野への活用が期待される。NEDOでの「サイバー・フィジカル研究拠点間連携による革新的ドローンAI技術の研究開発」(2018～2023)では

- ・物体認識の枠組みによる人・車両の認識により安全を確保する「自律運航AI技術」
- ・機器故障に起因する異常を検知・判断する「故障診断AI技術」
- ・機器故障時に環境認識により無人地帯を選択して安全着陸する「緊急着陸AI技術」

の研究開発が取り組まれている²¹⁾。

また、NEDOについては「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」(2017～2021)にて、物流、インフラ点検、災害対応等の分野で活用できる無人航空機及びロボットの開発を促進するとともに、社会実装するためのシステム構築及び飛行試験等を実施している。

こうしたAI技術を無人航空機に組みこむためには、

- ・信頼性の評価技術
- ・学習データの妥当性に関する基準
- ・判断の妥当性を監視するスーパーバイザリー技術

などの研究開発も同時に必要となる²²⁾。

航空機に関しては、地球温暖化ガスの排出規制が国際運航に関して国連の専門機関ICAOにおいて削減目標が設定され、機体軽量化、空気抵抗削減、排出ガスの削減、運航効率の改善、低炭素燃料の利用などすべての局面における対策が進んでいる。無人航空機においても

そうした要求は今後厳しくなり、電気推進、電気・内燃機関ハイブリッド、水素燃料利用などの研究が求められると考えられる²³⁾。

(6) その他の課題

社会受容性

無人航空機は社会的な実装がこれから進められる技術であるため、機体、操縦者、使用に関する法制度の整備が求められるほか、社会的受容性の課題も克服しなければならない。社会的受容性は

- ・騒音に関する受容性（騒音基準値の設定）
- ・上空利用に関する受容性
- ・プライバシー保護に関する課題（カメラ利用時など）
- ・不正利用の監視、防御

などが主な課題となる。

ビジネス利用に関しては、新しい技術であるために収益性における課題を克服する必要があり、その普及促進に向けては、社会的ニーズを踏まえた公的支援策（経済試験、制度の緩和）が必要と考えられる。

知財戦略

特許庁の調査²⁰⁾では以下の5項目を日本の研究開発方針として示している。

- 1) 日本国籍の特許件数は少なく、世界を追いかけるだけでなく、有人地帯目視外飛行のような高度な安全性に特化した研究開発を進めるべき。
- 2) 日本が強みとする高性能で、高信頼なデバイスを活用した産業用ドローン機体の早期開発を目指すべき。
- 3) インフラ点検や防災などの産業応用を早期に実現すべき。
- 4) 産学官の連携推進や小規模事業者への特許支援を強化。
- 5) 国際標準化とリモートIDなどの基盤技術開発を強化。

空飛ぶクルマに関しては、2023年の事業化を各国が目指している。図2-2-5はAviation Weekがまとめた分類図²⁶⁾で、コンセプトレベルの機体が多い中、中国のEHangと、米国のOpener社のBlackFlyが最も進んでいるとしている。いずれもパーソナルな小型eVTOLであり、本格的な機体の開発はこれからである。人が乗る場合には有人機としての認証を取得する必要があるが、そのような機体はまだ出現しておらず、米国FAA、欧州EASAが中心となり認証基準および認証手法を民間と協力して検討している段階である⁹⁾。日本でも、スタートアップ企業を中心に開発が進むなかで、認証方法の国際的な動向と歩調を合わせて、認証技術を開発する必要がある。また、試験環境の開発も重要である。官民協議会のロードマップでは福島ロボットテストフィールドがドローンのための飛行試験環境としてリストアップされているが、さらに、大型の無人機、空飛ぶクルマの飛行試験環境の整備が求められる⁴⁶⁾。

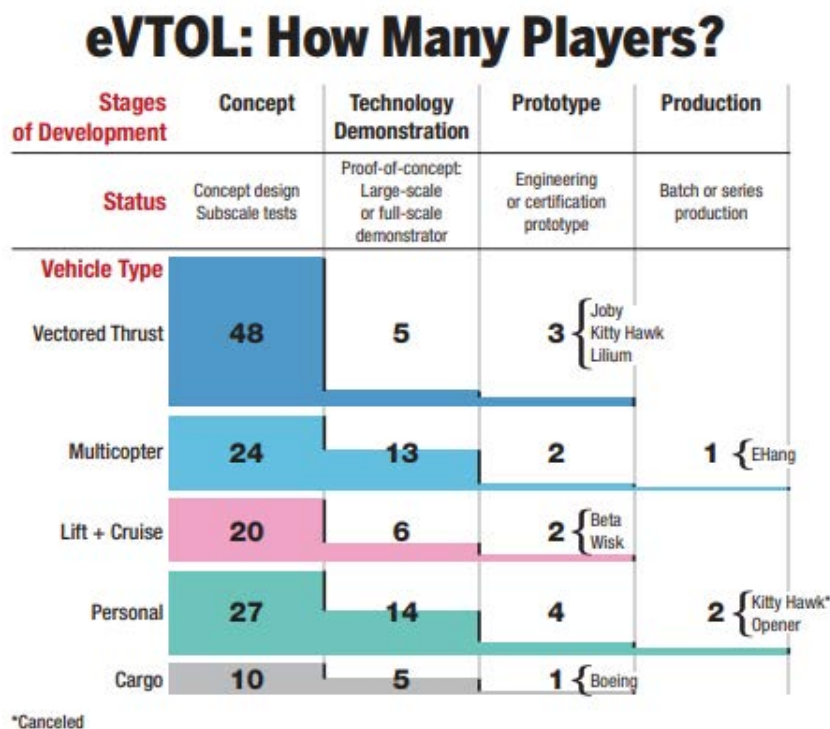


図2-2-5 空飛ぶクルマの動向²⁶⁾

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↘	ImPACTにおける「タフ・ロボティクス・チャレンジ」においてドローンの基盤研究が実施され、空中ロボットの研究も推進された（H26より5年間）。そこでは、ロボットアーム、可変ピッチプロペラ、無線中継、ロバスト制御などで成果が得られた ²⁶⁾ 。NEDOでの「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」プロジェクトでドローンの研究開発が2016年から6年計画で進められ、運航管理（UTM）、衝突回避、性能評価に関する研究が基盤研究として成果を出している ²⁵⁾ 。研究論文は制御分野などで活発であるが、世界的にみると比率は小さく（論文数は世界の2.5%）、飛行管理や安全性向上に関する国家プロジェクトが求められる ²⁰⁾ 。空飛ぶクルマに関しては、メーカーでの研究開発がスタートしているが、欧米に比較すると規模は小さい ²⁶⁾ 。
	応用研究・開発	○	→	SIP第一期におけるインフラ維持管理・更新・マネジメント技術において、ドローンによる橋梁などのインフラ点検による研究が行われた（2014～2017） ²⁷⁾ 。ドローンの離発着場（ドローンポート）の研究開発が、交通運輸技術開発推進制度（2016～2017年度研究課題）により実施され実証実験も行われた ²⁸⁾ 。ドローンの飛行安全向上に向けたAI技術応用に関する研究がNEDOにおいて実施中（2019～2023）である ²⁹⁾ 。NEDO DRESSプロジェクトにおけるリモートIDの研究開発が2019年度より開始された ²⁵⁾ 。このように活発な応用研究が推進され、ISO国際標準化活動も活発であるが ³⁰⁾ 、特許件数でみると中国、欧米とは大きな差が開いている（出願件数で6.2%） ²⁰⁾ 。空飛ぶクルマに関しては、東京都が3年間で最大5億円の助成を2019年度から開始したが ³¹⁾ 、欧米に比べるとその規模は小さい ²⁶⁾ 。
米国	基礎研究	◎	→	米国は2007年から10年間のドローン関連の論文件数で、世界の24.9%を占め、欧米、中国とともに3強である ²⁰⁾ 。内容的にはセンシング、通信、無人管制分野が多く、米国の防衛企業、通信企業、IT企業から多くの特許が出されている ²⁰⁾ 。NASAにおいては、UTM（運航管理）に関する産学プロジェクトが2015年以降活発になされ、有人機との運行管理との統合化を目指している ³²⁾ 。NASAの無人航空機プロジェクトでは固定翼無人機が大きな割合を占めている ²⁰⁾ 、 ³³⁾ 。FAAは、ミシシッピ州立大学を中心とした23の研究機関の共同体（ASSURE）を、UASに関する高度な研究・開発活動を行い、人材及び産業の創出・育成の中核となる研究拠点（COE：Center of Excellence）として2015年に認定した。ASSUREでは、安全性に係る研究・教育・訓練及び無人航空機の空域統合に資する研究開発に焦点を当てた活動が行われている ³⁴⁾ 、 ³⁵⁾ 。DAPAでは複数のドローンを制御するSwarm Programを積極的に推進しているが、目的は軍用である ³⁶⁾ 。
	応用研究・開発	○	↗	ドローン関係の特許においても米国は世界の25.2%を占め、中国に次いで多い。特許の内容は「機体性能向上」、「制御の高度化」、「衝突回避」関係が多く、用途は軍用が多い ²⁰⁾ 。ドローンの応用に関しては、2018年にDOTが発表したUAS統合パイロット・プログラム（IPP、UAS Integration Pilot Program）により米国10カ所で実証プログラムが行われ、様々なユースケースを想定した実証実験が行われている ³⁷⁾ 。また、UTMの普及を推進するために、空港周辺での無人機のための運航承認の仕組み（Low Altitude Authorization and Notification Capability（LAANC））を導入している ³⁸⁾ 。空飛ぶクルマに関しては、民間のベンチャー企業が、ボーイングやエアバスと連携して開発を進めてきたが、2020年になり、米空軍は空飛ぶクルマに関する資金援助と各種実証実験をサポートすると発表し ³⁹⁾ 、COVID-19で疲弊する産業化の支援に乗り出した。

欧州	基礎研究	◎	→	欧州は、ドローン関係の論文の27.1%を発表し、アメリカと中国を抜いている。研究者の所属は Cranfield 大 (英国)、セルビア大学 (スペイン) がベスト20に入り、その他、政府研究機関による発表数も多く、全体として世界一になっている ²⁰⁾ 。Horizon 2020にドローン関係のテーマが多く見られることも論文が多い要因と考えられる ⁴⁰⁾ 。Horizon 2020ではトップダウン式に研究テーマを提示し、EU内の多国籍な産学官の研究コンソーシアムで応募するスキームがあり、効果的な研究開発が実施されている。目的としては「精密農業」、「地図情報収集」、「環境モニタリング」が多い。空飛ぶクルマ関係では、電気推進、ハイブリッド推進、水素燃料など推進系の研究開発が欧州では活発であり ⁴¹⁾ 、無人機の管制システムに関する研究プロジェクト U-space もスタートしている ^{42), 43)} 。
	応用研究・開発	○	→	欧州からの特許出願は12.4%で、論文に比べると特許件数は少ないといえる ²⁰⁾ 。ドローン製造業はドイツやフランスで2000年代から始まっているが、中国、米国に追い越された感がある。運航管理に関しては、U-spaceでは欧州全域で統一したロードマップを掲げ、着実な研究がなされている。実践的な早期導入を目指す米国とは対照的である ⁴³⁾ 。空飛ぶクルマでは、ドイツのベンチャー企業 VOLOCOPTER が世界に先駆け開発を行い、英国、イタリアでも開発が始まっている ²⁶⁾ 。
中国	基礎研究	◎	→	中国はドローン関係論文数で世界の21.9%と、欧州、米国に次いでいる ²⁰⁾ 。用途は軍用が多いことが特徴である。所属機関のランキングでは、北京航空航天大学、南京航空航天大学、国防科技大学が上位4位を占めている ²⁰⁾ 。
	応用研究・開発	◎	→	中国はドローン関係出願数で世界の42.4%と際立っている。ドローンの機数では中国製が世界の7割を占めていることが背景にある ²⁰⁾ 。他国との差は、「低コスト化」の出願が多いことである。用途に関しては、「空撮」、「公共」、「農林水産業」が上位にあり、民生用の特許が多い ²⁰⁾ 。空飛ぶクルマに関しては Ehang が機体開発で世界をリードしていると評価され、既に多くの国に輸出されているのも驚異的である ²⁶⁾ 。
韓国	基礎研究	○	→	韓国はドローン関係論文数で世界の3.8%であり、日本の2.5%よりも多い。所属機関ランキングでも KIST が8位、ソウル大学が15位と上位にある ²⁰⁾ 。韓国では軍用ドローンの開発も行われており、論文数の多さに寄与していると考えられる。
	応用研究・開発	○	→	韓国はドローン関係論文数で世界の10.38%であり、日本の6.2%をしのいでいる。特許の目的には軍用が多いのが特徴である ²⁰⁾ 。
イスラエル	基礎研究	○	→	イスラエルは軍用固定翼ドローンの開発が早期に開始されたこともあり論文件数は0.5%である ²⁰⁾ 。
	応用研究・開発	○	→	イスラエルにはドローン産業もあり、特許出願は0.8%であり軍用関係が多い ²⁰⁾ 。ドローン兵器からの攻撃に対処するシステムに関する高度な技術を有している ⁴⁴⁾ 。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考文献

- 1) 鈴木真二、ドローンが拓く未来の空：飛行のしくみを知り安全に利用する、化学同人、2017
- 2) Ricard Whittle, Predator : The Secret Origins of the Drone Revolution, Henry Holt & Co (2014/9/16)
- 3) 鈴木真二、「空の移動革命」に向けた技術的・政策的課題と展望、研究開発リーダー、2019.2 (No155)、pp.5-8
- 4) 鈴木真二、小型無人航空機に関する法律・規制関連の現状と今後、計測と制御：56 (1) , 24-27, 2017-01
- 5) Airworthiness of Aircraft, Annex 8 to the Convention on International Civil Aviation, <https://store.icao.int/en/annex-8-airworthiness-of-aircraft> (Accessed on 2020-12-23)
- 6) Remotely Piloted Aircraft Systems Panel (RPASP) , [https://www.icao.int/safety/UA/Pages/Remotely-Piloted-Aircraft-Systems-Panel-\(RPASP\).aspx](https://www.icao.int/safety/UA/Pages/Remotely-Piloted-Aircraft-Systems-Panel-(RPASP).aspx) (Accessed on 2020-12-23)
- 7) Drones - regulatory framework background, <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas/drones-regulatory-framework-background> (Accessed on 2020-12-23)
- 8) 国土交通省航空局安全部安全企画課、無人航空機のレベル4実現に向けた国土交通省の取組について、小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会 (第14回) ,2020.7.9, <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/kanminkyoudai14/siryou3.pdf>
- 9) 鈴木真二、中村裕子、第5章 機体安全認証 (耐久証明、型式証明)、空飛ぶクルマ、空のモビリティ革命に向けた開発最前線、中野冠監修、NTS、2020.10.12
- 10) Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems
- 11) 山田 伸一、米国における無人航空機に関する新しい取組, <https://www.jttri.or.jp/document/2019/yamada.pdf> (Accessed on 2020-12-23)
- 12) 無人航空機 (ドローン・ラジコン機等) の飛行ルール (国土交通省) https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html (Accessed on 2020-12-23)
- 13) 小型無人機の有人地帯での目視外飛行 (レベル4) の実現に向けた制度設計, <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/kanminkyoudai13/siryou1.pdf> (Accessed on 2020-12-23)
- 14) 小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会, <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/index.html> (Accessed on 2020-12-23)
- 15) https://www.meti.go.jp/press/2018/12/20181220007/20181220007_01.pdf (Accessed on 2020-12-23)
- 16) <https://www.mlit.go.jp/common/001154535.pdf> (Accessed on 2020-12-23)
- 17) ドローン等に用いられる無線設備について <https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/> (Accessed on 2020-12-23)
- 18) Unmanned Aircraft System (UAS) Traffic Management (UTM) , <https://utm.arc.nasa.gov/index.shtml> (Accessed on 2020-12-23)
- 19) 鈴木 真二, 中村 裕子, 秋本 修、空中ドローンと有人航空機の連携を想定した運航システムの将来動向、計測と制御、2020 年 59 巻 7 号 p. 471-475
- 20) 平成30年度 特許出願技術動向調査報告書 - 特許庁、https://www.jpo.go.jp/resources/report/gidou-houkoku/tokkyo/document/index/30_05.pdf (Accessed on 2020-12-23)

- 21) NEDO, サイバー・フィジカル研究拠点間連携による革新的ドローンAI技術の研究開発、https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201906/20190000000328.html
- 22) 中村 裕子, 鈴木 真二、「空の産業革命」「空の移動革命」のキーワード“自動化”“自律化”の認証の壁と実現に向けた世界の取り組み、航空宇宙学会誌、2020 年 68 巻 1 号 p. 8-14
- 23) 中村裕子, 鈴木真二「ICAOの航空機CO2排出基準」日本航空宇宙学会誌, 66 (5), 130-134, 2018.
- 24) タフロボットチャレンジ研究開発成果H26～29, <https://www.jst.go.jp/impact/report/07.html#3> (Accessed on 2020-12-23)
- 25) 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, 2016～2021, <https://nedo-dress.jp/> (Accessed on 2020-12-23)
- 26) urban Air Mobility Getting Real 2020.8, https://aviationweek.com/sites/default/files/2020-08/AWST_200817.pdf (Accessed on 2020-12-23)
- 27) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) /インフラ維持管理・更新・マネジメント技術, 2014～2018, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100089.html (Accessed on 2020-12-23)
- 28) 物流用ドローンポートシステムの研究開発 (交通運輸技術開発推進制度), H28～29, <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/kanminkyoudai7/s1-6.pdf> (Accessed on 2020-12-23)
- 29) サイバー・フィジカル研究拠点間連携による革新的ドローンAI技術の研究開発, 2019～2023, https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201906/20190000000328.html (Accessed on 2020-12-23)
- 30) ISO/TC 20/SC 16 (無人航空機システム), 2020, https://webdesk.jsa.or.jp/common/W10K0500/index/dev/isotc_20sc16/ (Accessed on 2020-12-23)
- 31) 1PRTIMES 2019.2 [https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000004.000038857.html](https://prt看mes.jp/main/html/rd/p/000000004.000038857.html) (Accessed on 2020-12-23)
- 32) NASA, Unmanned Aircraft System (UAS) Traffic Management (UTM), 2015～, <https://utm.arc.nasa.gov/index.shtml> (Accessed on 2020-12-23)
- 33) UAS in the NAS | NASA, 2020, https://www.nasa.gov/centers/armstrong/programs_projects/UAS_in_the_NAS/index.html (Accessed on 2020-12-23)
- 34) "山田伸一、米国における無人航空機 (UAS) のルール策定に向けた技術開発等の取組", 2019, https://www.jttri.or.jp/members/journal/assets/no77_overseas-com04.pdf (Accessed on 2020-12-23)
- 35) "Mississippi State University, The FAA's Center of Excellence for UAS Research, ASSURE", <https://www.assureuas.org/> (Accessed on 2020-12-23)
- 36) News from DARPA, 2020, <https://www.unmannedsystemstechnology.com/tag/darpa/> (Accessed on 2020-12-23)
- 37) UAS Integration Pilot Program,

https://www.faa.gov/uas/programs_partnerships/integration_pilot_program/ (Accessed on 2020-12-23)

- 38) UAS Data Exchange (LAANC) ,
https://www.faa.gov/uas/programs_partnerships/data_exchange/
- 39) Agility Prime, <https://agilityprime.com/#/>
- 40) Innovative applications of drones for ensuring safety in transport, 2019,
https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_MG-2-8-2019
- 41) AviationWire「エアバス、ハイブリッド電気飛行機を共同開発へ 20年初飛行」,2017, <https://www.aviationwire.jp/archives/135254>
- 42) SEAR「U-space」, <https://www.sesarju.eu/U-space>
- 43) 鈴木 真二, 中村 裕子, 秋本 修、空中ドローンと有人航空機の連携を想定した運航システムの将来動向、計測と制御、2020 年 59 巻 7 号 p. 471-475
- 44) ドローン兵器の衝撃～新たなテロの時代～ - NHK クローズ アップ現代, 2019.10.24, <https://www.nhk.or.jp/gendai/articles/4345/index.html>
- 45) Top 5 Best Electric VTOL Personal Aircraft, Passenger Drones and Flying Cars (2020年7月1日)
<https://www.youtube.com/watch?v=UDZheUq3xaQ>
- 46) 空の移動革命に向けた官民協議会 https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/air_mobility/index.html

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

2.2.6 フィールドロボット

(1) 研究開発領域の定義

日本では、高度経済成長期に集中的に整備された膨大な社会資本が老朽化し、インフラの維持管理・更新の作業の自動化が急務である。また、近年、自然災害、特に地球温暖化が原因とみられる集中豪雨や台風による河川の氾濫が多発しているため、災害発生時の災害調査や応急復旧は重要な課題であり、これを遠隔から実施するためのシステムの研究開発が進められている。一方、建設分野においては、少子化に起因する若年就業者数の減少が進むと共に、高齢化に起因する熟練技術者や技能者の不足が問題となっている。この問題を解決するため、現在、ICTやロボット工学を用いた、建設における自動化や省人化が期待されており、そのための研究開発が進められている。以上に示す通り、インフラ保守・建設ロボット分野では、問題解決型の研究開発が幅広く行われている。いずれも、対象とする環境が屋外であるため、不整地走行性能、センサーのロバスト性、機器の耐環境性能が求められる。そのため、多くの発展が期待される領域である。

(2) キーワード

ロボット技術、ICT（情報通信技術）、RTK-GNSS（Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System）、インフラ点検、無人化施工、情報化施工、ドローン、建設機械、マシンコントロール

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

日本では、昭和30年代からの高度経済成長期に集中的に整備された社会資本の老朽化が現在急速に進んでおり、2012年に発生した笹子トンネル天井板落下事故に代表されるように、老朽化が重大事故につながるケースが存在する。このような事故を未然に防ぐためには、インフラの維持管理・更新の作業が急務である。そこで、国土交通省は、2014年7月より、日本国内の全トンネルと橋梁で一律に、5年に1度の点検を義務付けた。このため、日本国内に存在する70万橋の橋梁と1万本のトンネルに関する点検が実施されてきたが、点検コストが膨大となること、さらに、熟練点検員の不足が明らかとなってきた。これらインフラの点検を効率的に進めるため、ロボット技術に対する期待は大きい。

一方、建設現場においては、少子化に起因する若年就業者数の減少や、高齢化に起因する熟練した技術者・技能者の不足が問題となっている。特に、地方の土木建設工事においては、その状況は深刻化している。そこで、国土交通省は、2016年を生産性革命元年と位置づけ、建設施工分野で「i-Construction」と銘打って、ICT（Information Communication Technology）土工を推進してきた。この施策をさらに進めるため、ICTならびにロボット技術を用いた建設機械の自動化に関する研究開発が求められている。

さらに、日本は、世界的に見て非常に地震、火山噴火、風水害などの自然災害が発生しやすい地域にある。近年、地球温暖化が原因とみられる集中豪雨や台風は、各地に大きな災害をもたらした。自然災害発生時には、災害調査や応急復旧が重要となるが、一般に、対象とする災害現場は非常に過酷であり、二次災害の危険も存在する。したがって、遠隔より調査可能な無人の調査機器ならびに、遠隔より操作可能な建設機械を用いた応急復旧技術が求められている。

以上に示した通り、現在、インフラ点検ならびに建設現場における自動化や省人化が急務であり、ICTやロボット工学を用いた点検技術や建設機械の自動化／省人化技術の研究開発が、現在、求められている。

【研究開発の動向】

2013年3月、国土交通省は建設ロボット技術に関する懇談会を開催し、建設ロボット技術の開発・活用に向け、省庁連携の下で、(1) 情報化施工推進戦略に基づく建設機械の自動化、(2) ロボット技術によるインフラの無人点検や補修の高度化、(3) ロボット技術による災害現場調査技術の開発、(4) ロボット技術による応急復旧技術の開発を重点的に進める旨の提言を発表した¹⁾。これに伴い、これまで、省庁間連携ならびに産官学連携により、これら4つの重点項目を中心に研究開発が進められてきた。以下、この提言で示された区分けにしたがい、インフラ保守・点検ロボットに関する研究開発の動向について紹介する。

- (1) 建設機械の自動化については、国土交通省が主導する情報化施工戦略²⁾の下、継続してICT技術を導入した自動制御建設機械の研究開発が進められてきた³⁾。この施策は、i-Constructionと呼ばれる施策中の「ICTの全面的な活用 (ICT土工等)⁴⁾」に引き継がれ、「建設現場の生産性を2025年までに20%向上させる」ことを目指し、2020年現在も継続している。「ICT土工」とは、ドローンなどを使った3次元測量を行い、3次元設計データなどにより、建設機械を自動制御して施工し、再びドローンなどを使って3次元で出来形を検査するといった、3次元データとICTを全面的に活用する工事である。現在、RTK-GNSSをベースとした建設機械のオペレーターに情報を提示するマシンガイダンス、建設機械の操作を補助するマシンコントロール技術が向上し、建設現場への導入が進められている。一方アカデミアでは、ゼネコンやコンサルタント会社からの寄付を得て、i-Constructionを推進する技術ならびに技術者を育成することを目的として、東京大学大学院工学系研究科に「i-Construction システム学」寄付講座が2018年10月に設置された⁵⁾。またコマツは、大阪大学内にコマツみらい建機協働研究所を設置し⁶⁾、コベルコも、広島大学内にコベルコ建機夢源力共創研究所を設置している⁷⁾。このように、建設機械の自動化に向けた研究開発について、大学と企業が共同で進めるプロジェクトが生まれつつある。
- (2) ロボット技術によるインフラの無人点検や補修の高度化については、2014年より、インフラの点検ならびに維持管理を効率的に進めるため、ロボット技術を導入する試みが、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」⁸⁾ (2014年度～2018年度) や国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (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」⁹⁾ の主導で進められてきた。これと並行し国土交通省は、2014年より実業務への導入が期待できる点検ロボットについて民間企業等への公募を行い、全国各地の実現場において実用性等の検証を実施した¹⁰⁾。このロボット技術の検証に関する取り組みは、2020年現在も継続して続けられており、現在、各社の技術は、国土交通省の新技术情報提供システム (NETIS) のテーマ設定型実証という枠組みで評価を行うことができる。上述のプロジェクトならびに国土交通省の現場検証により、足場をかけずに橋梁の目視点検実施を可能とするドローンシステムの開発¹¹⁾ や、トンネル内を走行しつつトンネル壁面のヒビや剥離の点検実施を可能とするトンネル点検車の開発が進められてきた¹²⁾。このように、公共インフラの維持管理のためのロボット技術開発が産官学の連携で進められており、一部は実用化の段階に達している。
- (3) 災害調査技術についても、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (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」⁹⁾ の主導で進められてきた。例えば、火山災害対応を行うための、立ち入り制限区域の情報収集を行うことを目的とした、長距離飛行が可能なドローンシステムの開発が行われた¹³⁾。さらに、2018年にスタートしたWorld Robot Summit (WRS) では、トンネル事故災害対応・復旧チャレンジが実施され、競技会形式による研究開発も進

められている¹⁴⁾。この競技会は2020年にも実施予定であったが、新型コロナウイルス感染症の影響で2021年に延期され、福島ロボットテストフィールドにて実施される予定である¹⁵⁾。近年は、災害現場においてドローンに搭載したカメラによる災害調査が積極的に行われている。

- (4) 1991年の雲仙普賢岳の噴火以降、立ち入り制限区域内における応急復旧工事（土石流をせき止める砂防堰堤の工事）を行うため、遠隔操作型の建設機械による無人化施工技術の開発が進められてきた¹⁶⁾。この無人化施工は、建設機械や環境中に設置したカメラから取得した画像情報を元に、油圧ショベルなどの建設機械をオペレーターが遠隔から操縦するものである。先の福島第一原子力発電所の事故においても、がれき撤去作業の際にも活用され、また、2016年の熊本地震の際に発生した阿蘇地域の土砂崩れの応急復旧工事においても、無人化施工が利用された。なお、無人化施工技術に情報化施工技術を導入することで、施工効率が向上することが指摘されており、(1)と(4)の分野は、相互補完の関係にある³⁾。

上述の技術をさらに向上させるためには、基礎研究の推進も重要である。具体的には、移動ロボットの移動技術の研究、特に不整地や軟弱土壌における移動体の移動性能の向上に関する研究、ロボットの位置を精度良く推定する技術に関する研究、移動ロボットやドローンの自律動作に関する研究、作業現場の臨場感を遠隔地のオペレーターに伝える遠隔操作性向上に関する研究、ロボットとオペレーター間の安定した通信を確保するための通信技術に関する研究、数多くのセンサーや駆動系を必要とする大規模なロボットシステムを長時間安定して動作させるためのロボットシステムに関する研究などが重要となると考えられる。なお、現状では、建設機械の絶対位置を検知する手法として、RTK-GNSSが主として利用されているが、受信する衛星の配置が悪くなる時間帯に位置精度が低下する問題や、作業環境に遮蔽（しゃへい）物が存在する場合に推定位置が大きくずれる問題が存在する。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

注目すべき技術トピックは、マシンガイダンス（MG）、マシンコントロール（MC）技術の進歩である¹⁷⁾。MGとは、建設機械の位置・姿勢をRTK-GNSSやIMU（Inertial Measurement Unit）等で精度良く取得すると共に、その位置・姿勢と三次元の施工図をオペレーターに提示することで、丁張りや水糸を必要とせずに工事を実施する技術である。MCは、MGで取得した建設機械の位置・姿勢ならびに、施工図面に応じて、建設機械の作業機の一部を自動制御することで、オペレーターの作業負荷を低減する技術である。これらの技術は、これまでも研究開発が継続して行われてきたが、ここ数年で大きく進歩し、実施工にも積極的に利用され始めた。いずれにおいても建設機械の姿勢推定が重要な要素技術となる。建設機械メーカーは、油圧シリンダーにストロークセンサーを埋め込むことで姿勢推定の問題を解決している。特に、CATERPILLER社は、機体全体が電子制御化された「デジタルプラットフォーム」という枠組みにより、全ての建設機械を自動化する準備を整えつつある¹⁸⁾。一方、TrimbleやNovatronなど、建設機械を製造しないメーカーは、IMUを油圧ショベルのブームやアームに後付けすることで姿勢推定を行い、MC、MGを実現している¹⁹⁾。この技術は、既存の建設機械のMG化を実現できるため、比較的多くの建設会社が導入を進めている。

一方、コマツは、スマートコンストラクションという枠組みを提案し、その中で、情報化施工ならびにIoTをベースとした施工システムの開発を進めてきた²⁰⁾。ここでは、ドローンで取得した三次元データをもとに、

施工計画からICT建設機械を用いた施工や、これらを統括するシステムをパッケージ化し、熟練工でなければ施工が困難であった法面成型などを容易に実現するシステムを提供している。鹿島建設は、クワッドアクセルという建設機械の自動化による建設生産システムを提案し、大分川ダム等において試験施工を実施している²¹⁾。ここでは、汎用の建設機械にGPS、ジャイロ、レーザースキャナーなどの計測機器および制御用PCを搭載することによって自動機能を付加し、自動運転を実現した。大成建設は、キャタピラージャパン社製の次世代油圧ショベルCat 320に、独自に開発した「自律割岩システム」を実装した²²⁾。上記に示す通り、ゼネコン各社は建設機械メーカーと組み、建設機械の自動化に関する研究開発を進めている。

アカデミアによる建設ロボット技術として、スイスETHの建設機械が注目されている。特に、Marco Hatterのグループは、台車の姿勢を大きく変動させることで不整地走行を可能とした脚車輪を有する油圧ショベルに対し、搭乗型遠隔操作装置を開発した。この装置では、遠隔地にある操作対象の建設機械の姿勢に応じてオペレーター用の椅子の姿勢が変動することで、臨場感の高い遠隔操作が可能となる。また、この建設機械に対し、遠隔操作する際の衝突回避に関する技術を開発した²³⁾。この技術にバーチャルリアリティ技術なども融合させることで、遠隔操作時の作業効率の向上が期待できる。一方、フィンランドのRauno Heikkiläの研究グループも、「SmartBoomsproject」という枠組みで建設機械の自動化を進めている²⁴⁾。日本でも、先に述べた通り、コマツやコベルコなどが大学との産学連携を進めており、学術的な成果が発表されている。これらの取り組みは、2019年の日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会における「建設&インフラ用ロボット・メカトロニクス」セッションにて41件の研究成果が発表され、アカデミアにおけるこの分野のロボット技術のプレゼンスが向上していることが伺える。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

2014年度から2019年度にかけて実施された内閣府のImPACTタフ ロボティクス チャレンジでは、走行性能や作業性の高い新たな建設ロボットの実現を目指して、二本腕を有する建設ロボットが開発された²⁵⁾。この建設ロボットは、腰部で両腕が旋回する2重旋回・複腕機構を搭載しており、両腕のレイアウトが自由に変更できるため、腕とクローラを用いた急坂・段差のよじ登りや、双腕を用いた繊細・器用な作業が可能である。また、このプロジェクトでは、遠隔操作性の飛躍的改善を目指し、有線給電ドローンによるロボット周囲状況の把握、任意視点の俯瞰映像生成、霧の透過視、画像ノイズ除去、半消失映像の生成、音源探索、AR操作アシスト、動力学シミュレーターを用いた操作トレーニングなど、多様な情報提示と操作支援システムの開発が行われた。このように、従来の建設機械とは一線を画す建設ロボットに関する研究開発が進められた。

一方、インフラ検査ロボットや災害調査ロボットに関しては、前述の通り、2014年以降、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）や国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の主導の研究開発が行われると共に、国土交通省がトンネルや橋梁といった試行現場を提供するなど、省庁間連携による実用化研究が強力に進められてきた^{8), 9)}。この中の、トンネル検査用可変形状フレームの機構については、トンネルの目視/打音検査を実現可能な可変形状フレームを製作し、トンネル内でのフレームの走行ならびに変形制御を実現した。そのシステムは、搭載された視覚センサーならびに打音検査機を用いて、交通を妨げることなく、トンネル点検を実現する技術を有しており、実用化に向けた実装と試験運用が、現在も進められている²⁶⁾。なお、SIPは2018年度末で終了となったが、官民研究開発投資拡大プログラム（Public/Private R&D Investment Strategic Expansion PrograM : PRISM）²⁷⁾にて、これらの技術に関する研究開発が進められている。また、2020年に開始されたムーンショット型研究開発制度では、「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」というカテゴリにおいて、インフラ建設の革新に関するテーマが採択された²⁸⁾。これにより、ムーンショット型研究開発制度においても、建設ロボットに関する研究開発が進められる予定である。その他、World Robot Summitについては(3) 研究開発の動向に述べた通りである。

(5) 科学技術的課題

本分野における科学技術的課題については、「新技術の創出を期待する」ことよりも、既存のロボット技術を建設ロボット分野に適用し、新たな価値を創出することの方が期待されているように見受けられる。対象となる環境が屋外の自然環境であるため、屋内環境で培ったロボット工学の基礎技術が、そのままでは屋外環境で適用困難となることも少なくなく、各技術には屋外でも安定して動作する頑強性が求められる。以下に、今後インフラ保守・建設ロボットに必要と考えられる技術的課題について列挙する。

- (1) 建設機械における移動技術については、対象とする環境が不整地または軟弱土壌であることから、建設機械の走破性能（トラフィカビリティ）の検証ならびに、走行性能の向上が重要となる。軟弱土壌については、テラメカニクス²⁹⁾をベースとした研究が、建設機械に対しても進められてきたが、現実の環境は均一土壌といったテラメカニクスに必要となる条件を満たすことが不可能であるため、実問題に対して、直接適用することが困難といわれている。また、走行性能の検証には、土壌パラメータの取得が重要となるが、これを非接触で計測する手段も未解決の問題である。さらに、走行性能の向上については、サブクローラや油圧ショベルのアームを利用した、不整地走破性能の向上に関する研究が進められているが、この分野の研究についても、今後の発展が期待される。
- (2) 建設機械やドローンの位置推定については、基本的にはRTK-GNSSで行うものが多いが、橋梁点検などのアプリケーションでは、衛星からの信号が遮られるため、GNSSによる位置推定を行うことが困難な場合がある。これを解決するための手法として、レーザー距離センサーや画像を用いた位置推定技術（SLAM：Simultaneously Localization And Mapping）技術³⁰⁾を利用したさまざまな方法が提案されている。しかしながら、これらの手法を用いて自然地形や特徴量の少ない橋梁/トンネルにおける位置推定を行うことは、環境によっては困難である。そのため、今後、位置推定技術の頑強性の進展が期待される。
- (3) 無人化施工において、特に建設機械から遠く離れた場所から操作する場合、建設機械や作業エリアに設置したカメラから得られる画像情報を用いて作業を行う。これにより、通常の搭乗操作と比較し、作業効率は50%程度まで低下するといわれている³¹⁾。この作業効率を向上させることは、無人化施工において非常に重要な課題であるが、これを実現するための方策については研究段階にある。一つの方策として、作業現場の臨場感をオペレーターに伝えるためのVR技術に関する研究が挙げられる³²⁾。しかしながら、現場に導入するまでには、大きなブレイクスルーが必要であると考えられる。
- (4) インフラ保守・建設ロボットは、数多くのセンサーや駆動系を必要とする規模の大きいロボットシステムとなる。現状では、ゼネコンや建機メーカーが一对一で組み、開発が行われているが、開発効率が低いという問題や、複数社の建設機械を同時に制御することができないといった問題がある。そこで、

(6) その他の課題

ロボットとオペレーター間の無線通信を安定して確保することは、フィールドロボットの分野を進めていく上で必要不可欠である。しかしながら、現状では、通信距離の問題、通信遅延の問題、複雑な自然地形での遮蔽（しゃへい）物による通信遮断の問題などが存在し、これらが問題とならない範囲でのみ、実用化が図られてきた。無線通信については、通信帯域の確保の問題も含むため、政策的課題の側面もあるが、5Gの活用を含め³⁵⁾、今後、ハード面、ソフト面共に、通信に関する目覚ましい技術革新を起こすことができれば、インフラ保守・建設ロボットの適用範囲が大きく広がる可能性がある。移動体の通信技術については、通信帯域確保ならびに、通信出力の上限に関する問題が存在する。なお、国土の狭い日本では、無線通信の干渉をできる限り低減するため、無線通信に利用可能な通信出力が抑えられている。また、災害時などの非常時に占有可能な通信帯域も確保できていなかった。そこで、2016年8月、総務省は、移動体を対象とした5.7GHz帯、2.4GHz帯、169MHz帯の無人移動体用無線通信を可能とするように、電波法施行規則を改正した³⁶⁾。この改正により、通信に関する問題がどの程度解決されるかは、現状では未知数であるが、今後も、ロボットの活用において、無人移動体が利用しやすい無線帯域の確保が必要となると考えられる。そのため法の整備ならびに、非常時におけるルールの方策など、総務省の対応が期待される。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	不整地移動に関する基礎研究、遠隔操作性向上に関する基礎研究、ロボット運用の際の安全に関する基礎研究は全般に継続して成果が出ていると見受けられる。
	応用研究・開発	○	→	インフラ点検ロボットや建設ロボットの応用研究や実用化については、継続して成果が出ているが、大規模なプロジェクトが終了した後、現状では、新しいアクティビティーが生まれていない。
米国	基礎研究	○	→	不整地の走行に関する研究では、特にカーネギーメロン大学 ³⁷⁾ が、継続して、高い成果を挙げている。
	応用研究・開発	◎	↗	ブルドーザー、グレーダー、油圧ショベルなどの自動制御の建設機械については、日本と同等（またはそれ以上）に実用化が進められている ³⁸⁾ 。また、ドローンを用いたビジネスは多数立ち上がり、そのビジネスの中でも技術開発が大きく進んでいる ³⁹⁾ 。

欧州	基礎研究	○	→	遠隔操作の臨場感に関する基礎研究において、近年、スイスのETHのグループが成果を挙げている ²³⁾ 。
	応用研究・開発	◎	↗	ブルドーザー、グレーダー、油圧ショベルなどの自動制御の建設機械については、日本と同等に実用化が進められている ⁴⁰⁾ 。特に、フィンランドやスウェーデンなどにおいて、マシンコントロールを用いた工事が数多く実施されている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局、“建設ロボット技術の開発・活用に向けて～災害・老朽化に立ち向かい、建設現場を変える力～”，<http://www.mlit.go.jp/common/000995047.pdf>（最終アクセス 2020）
- 2) 国土交通省，“情報化施工推進戦略”，<http://www.mlit.go.jp/common/000993270.pdf>（最終アクセス 2020）
- 3) 建山和由，横山隆明，“ICTを利用した建設施工の高度化と将来展望” 計測と制御 55巻6号（2016）477-482.
- 4) 国土交通省，“ICTの全面的な活用”，https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000031.html（最終アクセス 2020）
- 5) 小澤一雅，“東京大学「i-Construction システム学」 寄付講座における取り組み”，建設マネジメント技術 2019 年 6 月号，pp61-64（2019）
- 6) 大島陽二郎，“コマツみらい建機協働研究所”，システム/制御/情報，Vol.64, No.3, pp.111-113, (2020)
- 7) “コベルコ建機夢源力共創研究所”，<http://dream-driven.hiroshima-u.ac.jp/>（最終アクセス 2020）
- 8) Nagatani K and Fujino Y, "Research and Development on Robotic Technologies for Infrastructure Maintenance", Journal of Robotics and Mechatronics., December, 2019. Vol. 31 (6) , pp. 744-751, (2019)
- 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 ロボット・AI 部，“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”，<http://www.nedo.go.jp/content/100871665.pdf>（最終アクセス 2020）
- 10) 特集「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」，日本ロボット学会誌 Vol.34, No.8-9（2016）。
- 11) 大野和則，岡田佳都，原島正豪，横江政和，“橋梁の近接目視点検を支援する飛行ロボットシステムの開発”，精密工学会誌，83（12），1066-1070（2017）。
- 12) 水口尚司，大西有三，徳田浩一郎，西山哲，石村勝伸，“道路トンネル走行型計測車両におけるひび割れ精度検証の報告”，土木学会論文集 F2（地下空間研究），73（1），1-10（2017）。
- 13) 永谷 圭司，羽田 靖史，“火山災害地域で活躍するセンシングロボットの開発”，電波技術協会報，Issue

315, pp. 14-17 (2017) .

- 14) World Robot Summit 2020, <https://worldrobotsummit.org/> (最終アクセス 2020)
- 15) 北島明文, "福島ロボットテストフィールド", 日本ロボット学会誌, Vol.35, No.10, pp.731-734 (2017)
- 16) 植木 睦央, 猪原 幸司, 北原 成郎, "「無人化施工」による災害復旧と今後の取り組みについて", 建設マネジメント技術 2013年6月号, pp.45-53 (2013) .
- 17) 原田 純仁, "ICTブルドーザーとICT油圧ショベルの開発", 計測と制御, Vol.55, No.6, pp.523-526, (2016)
- 18) デジタルクロス, "日本キャタピラー、油圧ショベルのIoT機能を標準装備にし i-Construction 対応を推進", <https://dcross.impress.co.jp/docs/usecase/000134.html>, (最終アクセス 2020)
- 19) NOVATRON, "Machine Control Systems", <https://novatron.fi/en/systems/> (最終アクセス 2020)
- 20) 四家千佳史, 小野寺昭則, 高橋正光, "建機メーカーが描く ICT 建機施工を中心とした建設現場の未来 (「スマートコンストラクション」の導入) ", 一般社団法人 日本建設機械施工協会誌, 67 (12) , 16-20 (2015) .
- 21) 木村駿, "鹿島のクワッドアクセルを徹底解剖 自動化の秘密, 教えます", 日経コンストラクション, (684), 43-47 (2018)
- 22) 大成建設, 次世代油圧ショベルによる作業自動化を実証, https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2019/190426_4636.html (最終アクセス 2020)
- 23) Dominic Jud, Philipp Leemann, Simon Kerscher and Marco Hutter, "Autonomous Free-Form Trenching using a Walking Excavator", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) , Macau, China, pp.3208-3215, (2019)
- 24) Heikkilä, R., et al. "Development of an Earthmoving Machinery Autonomous Excavator Development Platform." ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Vol. 36. IAARC Publications, 2019.
- 25) S.Tadokoro, "Disaster Robotics -- Results from the ImPACT Tough Robotics Challenge", Springer, (2019)
- 26) 権純洙, 井上文宏, 中村聡, 柳原好孝, "トンネル検査用可変形状フレームの機構と形状制御に関する研究", ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2A1-C01, C02 (2018) .
- 27) 内閣府, "官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM) ", <https://www8.cao.go.jp/cstp/prism/index.html> (最終アクセス 2020)
- 28) 国立研究開発法人科学技術振興機構, "ムーンショット型研究開発事業," <https://www.jst.go.jp/moonshot/>, (最終アクセス 2020)
- 29) Wong, J. Y., "Theory of ground vehicles", John Wiley & Sons (2008) .
- 30) Aulinas, J., Petillot, Y. R., Salvi, J., Lladó, X., "The SLAM problem : a survey", CCIA, 184 (1) , 363-371 (2008)
- 31) 茂木正晴, 山元弘, "無人化施工による災害への迅速・安全な復旧活動", 計測と制御, 55 (6) , 495-500 (2016) .
- 32) 山内 元貴, 橋本 毅, 新田 恭士, "無人化施工におけるHMDを用いた画像表示システムの効果", 建設機械 Vol. 56, No.1, pp.25-29, (2020)

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

- 33) 山内元貴, 橋本 毅, 山田 充, 新田恭士, 油田信一, "建設機械施工における標準プラットフォームの提案", ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-A08 (1) (2020)
- 34) 新井健生, "安心なロボットを考える", 日本ロボット学会誌, 36 (4), 266-269 (2018)
- 35) 青木浩章, 片山三郎, 進藤秀樹, 中島真二, "次世代通信規格 (5G) を用いたクローラダンプの自動走行システムのフィールド検証-建設現場における可搬型 5G の活用-", 第 19 回 建設ロボットシンポジウム 予稿集, O1-2, (2019)
- 36) 総務省 総合通信基盤局, "ロボット・IoTにおける電波利用の高度化など最新の電波政策について", <http://kiaigr.jp/jigyoku/h28/PDF/0617p1.pdf> (2016) .
- 37) Kohanbash, David, Scott Moreland, and David Wettergreen. "Plowing for rover control on extreme slopes." Field and Service Robotics. Springer Berlin Heidelberg, pp. 399-413 (2014).
- 38) 椎葉祐士, 建山和由, 宮武一郎, 古屋弘, "米国における情報化施工の導入環境調査報告." 建設機械施工: 一般社団法人日本建設機械施工協会誌: journal of JCMA 65.7, pp.21-24 (2013) .
- 39) "Near Earth Autonomy", <https://www.nearearth.aero/> (最終アクセス 2020)
- 40) 山口崇. "欧州における情報化施工等の状況." 建設機械施工: 一般社団法人日本建設機械施工協会誌: journal of JCMA 65.7, pp.25-28 (2013) .

2.2.7 生活支援ロボット

2.2.7.1 コミュニケーションロボット

(1) 研究開発領域の定義

コミュニケーションロボット、あるいはソーシャルロボット、と呼ばれるような人々と社会的なインタラクション、会話、触れ合いなどを行う機能を持つロボットは、生活支援・介護や医療などの応用ドメインにて主に利用されている。これらの応用ドメインでは、高齢化、人手不足といった社会問題を背景に、ロボットの潜在的なニーズが高く、様々な応用方法が研究開発において模索されている。

(2) キーワード

コミュニケーションロボット、ソーシャルロボット、社会支援型ロボット(Socially assistive robot)、ヒューマンロボットインタラクション、テレプレゼンス、スマートスピーカー、ロボットセラピー、ヘルスケア、生活支援、学習支援

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

将来の人口減少や社会の高齢化の問題が懸念されるなか、生活支援・介護医療などの課題の解決には、現状の人的資源を対象に専門的なトレーニングを施すだけでは、質が高くコスト面での負担も少ないサービス提供を維持することは不可能であり、ロボットを含めた情報化技術による負担軽減が必要となる。

生活支援・介護や医療などの応用ドメインでコミュニケーションロボットを利用するためには、そのドメインごとに固有の環境・文脈に応じてユーザーとなる人々との関わり合い、すなわちヒューマンロボットインタラクションを適切にデザインし、社会的に受容されるロボットサービスを構築する必要がある。

これらを実現するためには、音声認識、画像処理、アクチュエーション制御といった個々の要素技術の高度化の実現に加え、それらの高度なインテグレーション技術が必要となる。単に必要な機能を結び付けただけではなかなか社会的に受容されるサービスは実現できず、ロボットに違和感を持たれてしまったり、安心感の持てない行動を起こしてしまったり、といった問題が起きる。

このように、高度な技術群、方法論が要求される分野ではあるが、それだけに応用の範囲は広く、大きなニーズがあるため、コミュニケーションロボットの研究開発を進める意義は大きいといえる。

[研究開発の動向]

ロボティクス分野において、人々とコミュニケーションをするロボットの研究開発は比較的新しく2000年頃に始まった^{1), 2)}。当時、ASIMO(ホンダ)やAIBO(ソニー)など、ヒューマノイドロボットやペットロボットによる人々とのインタラクションに注目が集まった。初期の研究の多くは、ロボットがパフォーマンスを行う等のエンターテインメント目的のものや、ロボットが周囲の人々と比較的シンプルで情緒的な交流を行う方法とその応用に関するものであった³⁾。たとえば、MITのCynthia Breazealらが開発したロボットKismetは擬人的な外見をもち、周囲の状況に応じて様々な顔表情を表出することで、ロボットとユーザーとの間に、まるで幼児とその介護者のような情緒的な交流を引き起こした。

生活支援・介護や医療への応用に向けた取り組みも初期から行われた。産業技術総合研究所が開発したア

ザラシ型ロボット Paro は、触れ合いによりユーザーとの情緒的な交流を可能にした。衛生面の問題から動物を持ち込めない病院等で、アニマルセラピーに代わる、Paro を用いたロボットセラピーが行われ、入院患者や高齢者に癒しをもたらした。

Kerstin Dautenhahn らが開発した子供サイズの人型ロボット Kasper は、表情を表出したり触れ合ったりすることでユーザーとインタラクションをし、ターンテキングや物まねゲームなどの簡単な社会的インタラクションが可能である。コミュニケーションに困難を抱える自閉症の子供たちのコミュニケーション訓練を手助けするといった目的に Kasper は利用された。自閉症患者のためにロボットを利用する試みは、以後も継続的に行われている。

2006 年に ACM と IEEE が共催する国際会議 Human-Robot Interaction が始まり、ヒューマンロボットインタラクション (HRI: Human-robot interaction) の研究は世界中で注目されるようになり、工学、心理学、デザインを統合するような融合領域の研究がますます加速していった⁴⁾。特に、従来のコンピューターとは異なる、ロボットの特徴である「存在感」や「擬人性」について基礎的な知見が集まっていった。従来型のロボットと区別するように、人間の日常生活の場で人とのパートナーになるようなコミュニケーション機能を主体としたロボットである「コミュニケーションロボット」⁵⁾、人々との社会的な関わり合いを可能にする「ソーシャルロボット (Social robot)」^{6), 7)}、といった新しい用語が使われるようになった。

ヘルスケアなどでの利用場面において、移動したり行動したりするようなロボットの基本能力だけでなく、ロボットが実体をもつことによる存在感を活かして人々と社会的なインタラクションをすることで、ヘルスケアなどでの利用場面において人々を支援する「社会支援型ロボット (Socially assistive robot)」⁸⁾ が、特に米国やヨーロッパで盛んに研究された。ロボットと高齢者が健康のために一緒に運動する、ダイエットやリハビリをロボットの励ましのもとで行う、薬の飲み忘れをリマインドする、糖尿病の子供が自分で日記をつけることを助ける、などヘルスケアなどでの応用の検討が進んだ⁹⁾。コミュニケーションロボット PaPeRo (NEC) は子供や独居老人の見守りにも用いられた。脳計測技術の進歩により脳科学研究が盛んになり、ロボット分野でも自律ロボットが直接、脳からの信号を入力して行動するような BMI (Brain machine interface) も一時話題になった。

テレグジステンスやテレプレゼンスの研究開発は従来から行われていたが、ロボットの自律移動能力の向上や携帯通信網の普及・性能向上に伴って、移動能力を有したテレプレゼンスロボットの実用化が進んだ。2010 年代半ばごろから、特にリモートワークのニーズが高かった米国を中心に、Beam, Kubi といったテレプレゼンスロボットが販売されるようになった。大阪大学の石黒 浩は、人に酷似した見かけをした遠隔操作型アンドロイドであるジェミノイド、簡略化されたデザインの遠隔操作型アンドロイドであるテレノイドを用いて、ロボットを介して人の存在感を伝達する研究を行った。テレノイドは、認知症患者のケアにも用いられた。テレプレゼンスロボットは主には遠隔勤務の支援に用いられているが、長期入院中の子供の遠隔登校を可能にするといった応用方法も見出されている。

家庭内での生活支援や医療現場での介護等への応用として、たとえば人にものを渡す、食事を食べさせる、など、マニピュレーションを介して人との関わりを持つロボットについて研究が進められ、これまでに PR2 や Care-O-bot などが開発されてきたが、いまだ汎用的な場面でのマニピュレーション活用は研究段階にとどまっている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

深層学習などの機械学習技術により、コミュニケーションロボットの認識能力が大きく向上し、これまでは研究開発段階だった技術が急激に実用段階へと移ってきている。特に、音声認識技術の性能が向上し、ユーザーが許容可能なレベルの認識誤り率に達したと考えられる。家庭内の様々な機器がネットワーク化・スマートハウス化し、複雑な操作が必要になったことも背景として、スマートスピーカーが爆発的に普及している。2015年にはAmazon Echo、2016年にはGoogle Homeと次々に競合する製品が販売され、2018年の時点で米国では24%の家庭がスマートスピーカーを所有するようになったとの調査もある。さらに、その一歩先を見据えて、身体性を有するロボットを利用したより高度なインタラクションについても研究が進んでいる。近年、コミュニケーションロボットの応用対象として特に盛んに研究されているのが学習支援である。ロボットとインタラクションをしながら外国語を学ぶといった試みは早くから行われていたが、ここ数年、欧米にて研究が進展し、ロボットが直接的にチューター役を担当したり、あるいはコンピューター端末で学習するユーザーを励ましたり、といった新たな利用法が検討されている。

また、コミュニケーションロボットの研究開発に利用できるハードウェアプラットフォームが充実してきている。代表的なものとしては、Nao (Aldebaran: 当時) はすでに研究開発で広く使われており、ここ数年はPepper (Softbank robotics) も研究開発でよく利用されるようになってきた。日本発の擬人的なロボットプラットフォームとしては、Sota (ヴィストン) が挙げられる。かつてのコミュニケーションロボット研究はハードウェア開発と一体行われ、日本、韓国を中心としていたが、最近では、既存のプラットフォームを利用することで欧米でもコミュニケーションロボット研究が盛んになってきている。例えば、ソフトウェアと人間の認知心理の特性を踏まえたデザインを組み合わせ、適切な社会的受容性を得る方法を模索するようなHCI的なアプローチの研究開発が行われている。

コミュニケーションロボット研究として、自律動作するロボットと人々との関係構築を焦点にあてた研究が盛んである。たとえば、「信頼 (trust)」はここ数年、ホットなトピックである。自律行動するロボットは時にその判断を誤ることもあるが、どういった性質のロボットだと人はロボットを信頼するのか分かりつつある。また、場合によっては実際以上に人がロボットを信頼してしまうという過剰信頼 (over-trust) の問題も見出されている。自動運転車の事故を契機に、ロボットにおける道徳的規範のモデル化や学習に関する研究が行われている。また、注視方向、表情、音声イントネーションなどから人間の意図の知覚、痛みや所有権の理解といった研究も進められている。

COVID-19に関連して、各国でロボットの利用が脚光を浴びている。例えば、人同士の接触を減らすために配達ロボット、消毒ロボットを用いるといった試みである。コミュニケーションロボットについても、受付、事前診療、案内・情報提供、モニタリング、見守り、運動支援、などさまざまな利用事例が挙げられる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

国内では、JSTからの研究費や科学研究費補助金などでの大型のプロジェクトが続いている。例えば、ERATO 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では、人間と親和的に対話するアンドロイドロボットなどが研究された。新学術領域研究「人間機械共生社会を目指した対話知能システム学 (略称「対話知能学」)」では、意図や欲求を持つようなロボットシステムと人間の共生をテーマに研究開発が進む。トヨタは生活支援ロボットの基本プラットフォームであるHuman Support Robot (HSR) を開発し、最近ではPreferred networks社との共同開発も進めている。

米国では国立科学財団（NSF）、国立衛生研究所（NIH）、航空宇宙局（NASA）、国防高等研究計画局（DARPA）などがコミュニケーションロボット関連の研究を継続的に支援している。特に、2011年から続いている「国家ロボティクス・イニシアティブ（NRI：National Robotics Initiative）」のもとで多くの大型プロジェクトが行われている。たとえば、マサチューセッツ工科大学（MIT）では、幼児教育や語学学習のために個人化した学習を提供するロボットの研究プロジェクトが進められている。ワシントン大学では、ソーシャルロボットが友好的なインタラクションを通じて若者のストレスなどのメンタルヘルスに関する情報を集め、ヘルスケアに役立てるという研究プロジェクトが進められている。

ヨーロッパでは自閉症患者のケアを対象としたコミュニケーションロボット研究が引き続き活発であり、EUからのファンディングでDREAM、QTrobotなどのプロジェクトが実施されている。外国語学習や高齢者の生活支援についても関心が高く、これまでに研究開発プロジェクトが実施されてきた。

国際的に行われているロボットに関する競技会「ロボカップ@ホーム」は日常生活での役立つ機能の開発を題材にしているが、最近はコミュニケーションの機能も重視されるようになってきた。

（5）科学技術的課題

機械学習関連の技術について、引き続き取り組みが必要である。特に、ユーザーの指示を認識し、周囲の人々の意図や態度を理解し、周囲環境の状況を把握するなど、実世界情報の認識・学習能力の向上が必要である。例えば、家庭内で活動するロボットなら、間取りや配置されたオブジェクト、家族構成などが家庭ごとに異なるが、このような異なる環境に迅速に適応し、その場所ごとに必要とされるサービスを提供するためには、適切な学習・適応技術が必要となる。これにより、ロボットは幅広い社会的環境において高度な社会的支援、認知的支援を提供できるようになる。また、各種の技術群が高度化、複雑化していくことに対応し、適切なインテグレーション技術が必要となる。

人共存環境でロボットが活動するためには、人々との「共生」が不可欠である。工学・情報学のみでなく、認知科学や心理学など、人々の理解に関わる学術領域と融合するような研究開発が必要となる。ロボットという新しい自律エージェントが人間社会にどのような形で受容されていくのか、その共生の実現形態を明らかにし、それを可能にするデザイン原理の創出が求められる。

また、柔軟な素材を用いたソフトロボティクス（2.2.1 ソフトロボティクス参照）は、人と接触した場合の安全性の確保や、柔らかな身体によるコミュニケーションの促進といった観点から、コミュニケーションロボットとの親和性が高いと考えられる。

（6）その他の課題

人材育成・分野連携が重要になってきている。この分野の研究開発においても、いわゆる「AI人材」が重要である。特に、ロボットのハードウェアも分かったうえで、実世界型のAI技術を作る人、使える人が重要となる。日本はまだ機械系、情報系でも専門分化の傾向があり、欧米に一步遅れを取りがちな状況がある。さらに、欧米は工学と心理・デザインの双方に強い、いわゆるHCI（Human-Computer Interaction）人材の育成に強いが、日本でのHCI人材育成は著しく遅れている。日本においても、工学における分野間連携や、工学と他の学術分野との連携による人材育成の取り組みが求められる。

安全規格やELSIについても検討が必要である。装着型、移動作業型、搭乗型といったサービスロボットについては国際安全規格ISO13482が定められているが、コミュニケーションロボット全般についても安全規格を整備する必要がある。

ロボットが認識や学習に用いる上では、大量の人行動などのデータセット構築が必要になる場合が多い。特に、生活支援・介護や医療ドメインにおいて、プライバシー性の高い情報をロボットが扱う場面も今後予期される。ロボットによるデータの取得、収集についてはELSI面での検討、法制度の整備が必要となる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	コミュニケーションロボットへの関心はもともと大きく、研究が進んでおり、最近でもJSTや科研費での大型のプロジェクトが進んでいる。
	応用研究・開発	◎	→	トヨタ、ホンダ、パナソニック、日立など何社もの大企業がコミュニケーション機能も持つロボットの研究開発を実施している。Softbank RoboticsからはNaoやPepperが販売され、ヴイストンなどのベンチャー企業もSotaなどのロボットを販売している。
米国	基礎研究	◎	↗	国家ロボティクス・イニシアティブ（NRI）のもとで基礎研究が加速している。学会などでの研究発表も毎年増え続けている。
	応用研究・開発	◎	↗	スマートスピーカーではGoogleとAmazonが大きなシェアを持つ。ソーシャルロボットについてはJiboなどベンチャーがいくつも立ち上がるもののその後の展開にまではまだ結び付かない状況である。
欧州	基礎研究	○	↗	EUのファンディングにより自閉症のケアを目的としたロボットや社会支援型ロボット、学習支援のロボットなどの研究開発プロジェクトが実施されている。学会などでの研究発表はやや増加傾向にある。
	応用研究・開発	△	↗	Furhat Roboticsなど、ベンチャー企業が少し立ち上がりつつある。
中国	基礎研究	△	↗	中国の研究開発はロボティクス分野全般で加速しており、コミュニケーションロボットについても学会などでの研究発表がやや見られるようになってきている。
	応用研究・開発	○	↗	Hanson Robotics（香港）が早くから人型ロボットを開発している。UBTECH Robotics, Elephant Roboticsなど、ベンチャー企業が立ち上がりつつある。
韓国	基礎研究	○	→	Albert HUBO等のヒューマノイドロボットや、外国語学習支援ロボット、サービスロボットの研究開発が早くから行われていた。学会などで継続して研究発表の報告がある。
	応用研究・開発	△	→	Yujin robotics社などが早くからコミュニケーションロボットに取り組んでいた。

- (註1) フェーズ
基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲
応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲
- (註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価
◎：特に顕著な活動・成果が見えている ○：顕著な活動・成果が見えている
△：顕著な活動・成果が見えていない ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
- (註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化
↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考文献

1) T. Fong, I. Nourbakhsh, and K. Dautenhahn, "A survey of socially interactive robots,"

- Robotics and Autonomous Systems, vol. 42, pp. 143–166, 2003.
- 2) M. A. Goodrich and A. C. Schultz, "Human–Robot Interaction : A Survey," Foundations and Trends in Human–Computer Interaction, vol. 1, pp. 203–275, 2007.
 - 3) Cynthia Breazeal, Kerstin Dautenhahn, Takayuki Kanda, Chapter 72. Social Robots, Handbook of Robotics (2nd edition) , pp. 1935-1971, Springer, 2016. Doi : 10.1007/978-3-319-32552-1
 - 4) Christoph Bartneck, Tony Belpaeme, Friederike Eyssel, Takayuki Kanda, Merel Keijsers and Selma Šabanović, Human-Robot Interaction – An Introduction, Cambridge University Press, 2020. <https://doi.org/10.1017/9781108676649>
 - 5) 石黒浩, 宮下敬宏, 神田崇行, 知の科学 コミュニケーションロボット, オーム社, 2005
 - 6) Breazeal, C. L. (2004) . Designing sociable robots. MIT press.
 - 7) Takayuki Kanda, Hiroshi Ishiguro, Human-Robot Interaction in Social Robotics, CRC Press, 2012. <https://doi.org/10.1201/b13004> (最終アクセス2021)
 - 8) A. Tapus, M. J. Matarić, and B. Scassellati, "Socially Assistive Robotics," IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 14, pp. 35-42, 2007.
 - 9) H. Robinson, B. MacDonald, and E. Broadbent, "The role of healthcare robots for older people at home : A review," International Journal of Social Robotics, vol. 6, pp. 575-591, 2014.

2.2.7.2 生活支援・介護ロボット

(1) 研究開発領域の定義

生活の質（QoL）や利便性、安全性の向上を目指し、人が生活する空間において、介護・福祉を含む生活用途に使用される支援ロボット技術に関する研究開発領域である。食事・排泄・整容・入浴・移動などの日常生活動作（ADL）に加えて調理・掃除などの日常生活での活動を対象とした自立支援、対人コミュニケーションや教育・就労・レクリエーションなどの社会参加支援、さらには支援者（介護者、家族など）の負担軽減や、人材不足が深刻な介護事業者の生産性向上のための技術開発が対象となる。

(2) キーワード

介護ロボット、ロボット介護機器、支援技術、移動支援、リハビリ支援、作業支援、見守り支援、電動義手、ブレイン・マシン・インターフェース（BMI）、サイバロン、リビングラボ

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

生活支援ロボットは必然的に人との協働作業を行うものであり、その実現には人を含んだシステム全体を考慮する必要がある。このため、人の身体的・認知的な状態に関する生体センシング技術、意図推定・行動予測技術、フィードバック技術が不可欠である。この観点から、ヒューマンインターフェース技術や、人の身体的・認知的能力を補完し強化する人間拡張（Human Augmentation）技術との関連性が高い。このように生活支援ロボットは工学のみならず、人に関わる広範な研究領域と結びつくものであり、学際的な研究開発の対象として高い意義がある。

また、将来の人口減少や社会の高齢化の問題が懸念されるなか、生活支援・介護や医療などにおける人材不足解消や、これらの業務従事者の負担軽減に資する生活支援ロボットの普及が期待される。このように社会課題の解決という観点からも高い意義がある。

[研究開発の動向]

生活支援ロボットは、生活機能が低下した高齢者や障害者の「活動」や「社会参加」を支援するという目的で、1970年代より研究開発がはじまった。例えば、1977年から機械技術研究所（現：産業技術総合研究所）において、視覚障害者の移動支援を行う「盲導犬ロボット」¹⁾の開発が行われた。一方、介護する側の負担軽減も重要なテーマであり、1978年頃から同じく機械技術研究所で、双腕マニピュレーターにより人が乗ったベッドごと抱き上げて移乗支援を行う介助移動装置「メルコング」²⁾の開発が行われた。1990年代前半には、加藤一郎により就労支援も含む自立支援、社会参加支援、介護者支援からなる生活支援ロボットの構想が提案され³⁾、また土肥健純は、広範なライフサポートテクノロジーとして、介護ロボット、コミュニケーション支援と精神的支援も合わせて、介護者及び被介護者の両方の立場に立ったロボットを提案している⁴⁾。

2012年、高齢者介護分野での利用を目指した支援ロボットの研究開発および普及を目指して、経済産業省と厚生労働省により、「ロボット技術の介護利用における重点分野」（図1）が公表され、研究開発事業等が始まった。この背景には、少子高齢化にともなう要介護者の増加、介護職員の不足がある。厚生労働省は、2025年には介護職員が37.7万人不足すると予測している⁵⁾。

分野	移乗介助	移動支援	排泄支援	入浴支援	見守り・コミュニケーション	介護業務支援
項目	 移乗介助（装着型）	 移動支援（屋外移動）	 排泄支援	 入浴支援	 介護施設見守り	 介護業務支援
	 移乗介助（非装着型）	 移動支援（屋内移動）	 排泄支援（排泄予測）		 在宅介護見守り	
		 移動支援（装着移動）	 排泄支援（動作支援）		 コミュニケーション	

図2-2-6 ロボット技術の介護利用における重点分野（2017年改訂版）

以下では、生活支援ロボットの目的を①移動・移乗支援、②日常動作・作業支援、③見守り支援の3つに大別し、研究開発の動向を述べる。

① 移動・移乗支援

移動という基本的な生活機能に対する支援技術には、家庭・病院・介護施設などの屋内環境用から外出用まで、様々な場面で利用されるものが研究開発されている。

ベッド-車いす間などの移乗（transfer）については、介護者の身体的負担の軽減の観点から重要性が高い。被介護者を抱き上げ移動し抱き下ろすという移乗動作は、介護現場において最も身体負荷が高い作業であり、介護職員等の腰痛の原因となっており、支援機器の普及が強く望まれている。かつての取り組みとして介護用リフト（hoist）が挙げられるが、操作に手間がかかるといった問題から国内ではほとんど普及しなかった。また、ロボットが被介護者を抱きかかえて移乗支援をする双腕型ロボットも開発されたが、実用には至らなかった。その後、サイバーダイン（株）のHAL（介護用腰タイプ）、（株）イノフィスのマッスルスーツなどの装着型（いわゆるパワードスーツ）、およびマッスル（株）のSASUKE、FUJI社のHUG（株）といった非装着型（機器による持ち上げ型）の移乗介助ロボット、さらにはベッドの一部が車いすに変形するパナソニック（株）の離床アシストベッド等が開発され、事業化に至っている⁶⁾。

屋外等における、自立支援のための移動支援ロボットとしては、車輪にモーターを組み込んだ電動アシスト付きの歩行車がRT.ワークス（株）や（株）幸和製作所によって開発・製品化され、2016年からは介護保険での貸与対象になるものが出てきている。また、移動手段としてのパーソナルモビリティ技術に関しても、2011年に始まったつくばモビリティロボット実験特区における社会実験の取り組みが行われ⁷⁾、その後全国に展開された。またWHILL（株）は、電動車いすを用いた空港ターミナル内での自動運転サービスを2020年に実用化した。

また、リハビリや自立的な歩行支援を目的とした外骨格型（装着型）歩行支援ロボットの研究が世界的に行われている⁸⁾。スイスHocoma社のLocomatやReha Technology社のG-EO System、トヨタ自動

車（株）のウェルウォークは、歩行訓練装置と装着型の外骨格を組み合わせたタイプの歩行リハビリ支援システムである、またサイバーダイン（株）のHAL（医療用下肢タイプ）は装着型の外骨格による歩行リハビリ支援システムであり、医療機器として用いられている。また、イスラエルReWalk Robotics社のReWalk、本田技研（株）の歩行アシスト、アスカ（株）のWPAL、（株）今仙技研のACSIVE、（株）ATOOUNのHIMICO、AssistMotion（株）のcurara、米国ハーバード大のSoft Exosuitなどは、装着型の歩行補助ロボットである。

また、介護分野以外における類似の技術を導入した作業支援ロボットとして、サイバーダイン（株）のHAL（作業支援用）、（株）ATOOUNのパワードウェア、米国バークレー大学のBLEEX等が開発され、物流などの現場において重量物を扱う作業者の負担軽減に活用されている。

② 日常動作・作業支援

上肢障害者向けのマニピュレーターによる汎用的な物体把持・操作の支援システムとして、オランダExactDynamic社のiARM、カナダKinova社のJacoが事業化されている。国内でも多くの大学や研究機関において盛んに研究開発が行われているが、コスト面や機能面での課題が多く、普及には至っていない。一方、複雑な把持が可能な高性能な電動義手や、3Dプリンタを用いた低価格な電動義手の研究開発も進んでいる⁸⁾。

物体把持のうちの食事動作に絞った生活支援ロボットとして、2002年にセコム（株）のマイスプーンが発売され、その後2011年にスウェーデンでBesticが発売された。また、手の震えにより食事が困難な高齢者向けに、機能性スプーンLiftware⁹⁾が2014年にGoogle社より発売された。これは、スプーンのグリップ部に内蔵されたセンサーが手の震えを感知すると、揺れを抑制するスタビライザー機能が働き手元が安定するというものである。

その他の日常生活動作の支援ロボットとしては、排泄動作支援（衣服着脱）ロボットとしてデンマークのMELVIN、整容支援としてパナソニック（株）の洗髪ロボット¹⁰⁾、入浴支援ロボットとして（株）ハイレックスコーポレーションのバスアシスト等が開発されているが、まだ本格的な普及には至っていない。

③ 見守り支援

介護現場での高齢者見守りに特化したシステムの実用化事例も増えてきた。これは前述の「ロボット技術の介護利用における重点分野」の一つでもあり、多くのシステムではカメラ、レーダー、あるいはマット型センサーシート、荷重センサーなどのデバイスを用いて、ベッド上や浴室などでの危険事象（転倒、転落、単独での離床など）を検知し、介護者に知らせる機能を持つ。その際に、コミュニケーションロボットと連動し、声がけを行うシステムも開発されている。見守りシステムは介護施設における介護職員の、特に夜間の負担軽減につながることが分かっており、その利用は2018年の介護保険報酬改定にて加算の対象となった。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

近年、深層学習（Deep Learning）に代表される人工知能技術の発展が世界的な潮流¹¹⁾となっており、大学や研究機関のみならず、多くの企業が参入している。これにより、画像識別や音声認識技術が生活支援ロボットのインターフェースとして利用可能なレベルまで発展し、これらの技術が安価にかつ手軽に実装できるようになると期待される。

また、人の脳と機械とを直接つなぐシステムの実現を目指すブレイン・マシン・インターフェース（BMI）の研究は、主に米国が主導する形で進められている¹²⁾。例えばリモコンなどの操作が難しい被介護者が、ロボットに意思伝達（命令）したりその応答を受けたりすることが実現されると期待される。日本においては、大阪大学が開発したW-HERBSは、脳の硬膜下に埋め込んだ電極により脳波を検出し、ロボットアームの操作や、伝達装置によるコミュニケーションを実現している。重症ALS患者や頸髄損傷患者などの運動・意思伝達支援技術として実用化が期待される。また、末梢神経系からの信号を利用したサイバニック技術により要介護者の自立支援を目指した研究が内閣府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」（2014年～2019年）において実施された。

欧州ではFP7（2007年～2013年）、Horizon 2020（2014年～2020年）において、継続的にロボットの人工知能化技術に関する研究プロジェクトが採択されている。また、Horizon2020の後継としてHorizon Europe¹³⁾の策定が進められているが、ここでも生活支援ロボットは人工知能分野と密接に関連しながら、高齢化という社会的課題に挑戦するために官民パートナーシップの下での進展が期待される。欧州における生活支援ロボットは、人々が自立した生活を行うためのケア・システムとして位置付けられている。これら技術的なソリューションの発展とともに、各国の社会保障制度への導入が重要となる。

米国では、省庁横断型のロボット開発支援プログラムNational Robotics Initiative（NRI）が2011年に発表され、国防高等研究計画局（DARPA）、航空宇宙局（NASA）、国立衛生研究所（NIH）、農務省（USDA）らのパートナーシップの下で、広範にわたるロボティクス分野の支援が行われてきた¹⁴⁾。2020年からはじまるNational Robotics Initiative 2.0：Ubiquitous Collaborative Robots（NRI-2.0）では、生活のあらゆる面で人を支援するための協働ロボット（co-robots）システムの研究開発を促進するとしている。

【注目すべき国内外のプロジェクト】

国内の生活支援ロボットに関する研究開発プロジェクトとして、2013年度から5年間の「AMEDロボット介護機器開発・導入促進事業」、続いて2018年度から3年間の「AMEDロボット介護機器開発・標準化事業」が実施されてきた。この2つの事業では、前述の「ロボット技術の介護利用における重点分野」にて定められたカテゴリーのロボット介護機器が開発の対象とされている。これまでに100社を超える企業が開発補助事業に参画し、20以上の機器が事業化されている。同時に、基準策定や評価に関する事業も実施されており、安全性・効果・性能に関する検証手法の開発、開発ガイドラインの策定、国際標準化なども進められている。また、その導入のために介護保険ほか補助制度が整備されてきており、今後の普及が期待される。

また最先端の義肢などの支援技術を用いて障害者が様々な動作に挑む国際的なスポーツ大会サイバスロン（Cybathlon）¹⁵⁾も注目を集めている。これは、チューリッヒ工科大学のRobert Rienerが発案したもので、障害を持つ選手（パイロット）は、BMIやロボット技術を応用した義手、義足、車椅子などを操作して競技に挑む。競技種目は、脳コンピューターインターフェース（BCI）、機能的電気刺激（FES）自転車、電動義手、電動義足、外骨格型、そして電動車いすの6つである。2016年に第1回国際大会がスイスのチューリッヒで開催され、2019年には世界各地で1種目ずつの大会がリハーサル的に実施された。日本では川崎市を会場に、電動車いすの競技会が行われた。サイバスロンは、障害者と先端技術の開発者が協力して日常生活に必要な動作に挑むユニークな取り組みである。競技会を通じて、支援技術や障害に接点のない人々にも興味を持ってもらい、障害のある人々にとっての日常生活における平等や、社会参画についての対話を促すことを目指している。

海外の動向として、近年、デンマークをはじめとした北欧諸国を中心に「新技術をどのようにコミュニティー

の日常生活における社会課題解決に活用していくか」を市民参加型デザインの手法で探っていく「リビングラボ」の取り組みが盛んになっている¹⁶⁾。リビングラボは、多様なステークホルダー（関係者）が集う場で、社会課題の解決のために、最先端の技術・ノウハウ・知見をその参加者から導入し、オープンイノベーション、ソーシャルイノベーションを通して、長期的視点で地域経済・社会の活性化を推進していくための仕組みである。サービスや機器のテストベッドとしてITに関わるイノベーションを支援する組織やその施設でのアプローチとして用いられることもあれば、地域の社会課題の解決法として地方自治体やNPOによって実施されるケースもある。介護支援・生活支援ロボットなどの新たな技術についても、リビングラボでの実証評価が行われることが出てきており¹⁷⁾、その評価やその後の導入プロセスについては注目される。

(5) 科学技術的課題

生活支援ロボットにおける大きな技術的なボトルネックの一つは智能化である。人の理解に基づくロボットの行動過程の生成は、人工知能分野の長年の課題である。近年盛んに研究されている深層学習等の機械学習技術により、画像認識や音声認識には大きな進歩が見られ、ロボットのインターフェースとしての利便性は高まっている。しかしながら、現状の機械学習は、事象の相関を学習する能力には長けているが、人々が行っている日常動作の背景にある概念や社会知に関する知識が欠如しており、実世界で実用的なレベルで動作する知能ロボットの実現には未だ至っていない。米国及び中国においては、政府のみならずGAFA（Google、Apple、Facebook、Amazon）、BATH（Baidu、Alibaba、Tencent、Huawei）をはじめとしたIT関連企業が数兆円規模で人工知能開発に注力し、また、生活分野に関する人の行動履歴、ヘルスケア情報など大量の個人データを収集している。我が国においても「人工知能研究開発ネットワーク」¹⁸⁾等において実施されている基礎研究で得た成果を生活支援ロボット等に应用するための取り組みが求められる。

また、国内の医療・介護分野におけるデータ基盤として、NDB（National Data Base：特定健診・医療レセプト情報を格納）と介護DB（介護保険総合データベース：要介護認定情報と介護レセプト情報を格納）があり、それらを連結した国のデータベースが2020年から稼働する予定である¹⁹⁾。公的医療保険・介護保険制度が整備されている我が国では、世界に類を見ない医療・介護に関する広範かつ精密なデータが蓄積されており、連結も含めたさらなる利活用が求められる。しかしながら、これらは保険制度を利用した場合のデータに限定されている。今後、生活支援ロボットの構築や活用においては、より広い「生活分野」でのデータ整備が重要となるが、それにはどのようなデータが必要かというところからの議論が必要である。現状では、データ項目、データフォーマットのみならず、その前提となる用語すら統一されていない。生活活動、介護業務、人の身体および認知機能の状態、などについて科学的、定量的なデータ記述方法を整備する必要がある。これにより、介護現場での課題を研究開発現場にフィードバックしたり、複数の生活支援ロボットを組み合わせたシステムをサービスとして利用したりするための枠組みが構築できるようになる。

次に、データ記述方法が確立された上で、どのようにデータを集めるかが重要となる。通信規格5GやLPWA（Low Power Wide Area）通信技術の普及が進んでおり、低消費電力の小型・柔軟なセンサー技術などと組み合わせることで、生活支援ロボットやウェアラブル機器のIoT化がより活発になるであろう²⁰⁾。このような生活支援のためのデータインフラが整備されることで、生活支援ロボットを利用した生活状況の把握や、それによる効果評価、個人や環境に応じた最適化などが可能になると考えられる²¹⁾。

また、人がロボットと物理的な空間を共有するためには、ソフトロボットに代表されるような対人親和性の高いロボットの実現も喫緊の課題である。接触安全性の確保という観点からは、外力に対し敏感に応答するアクチュエーター技術が重要となる。

生活支援ロボットは、機械工学、ロボット工学、AI・IoT、ウェアラブル技術、自然言語処理、インタラクション技術など多数の技術が有機的に連携した研究領域である。特に、我が国が強みを持つハードウェアとソフトウェアを融合したメカトロニクス技術に関連するものであり、日本の産業を牽引し、世界的な競争力強化の礎としていくべき分野である。

(6) その他の課題

生活支援ロボットの開発においては、科学技術的課題に加え、実社会における実証試験、安全性に関する基準策定、医療機器としての許認可、健康保険・介護保険収載まで、社会に実装するまでに様々なハードルが存在する。また、国内と海外では医療機器に関する認証制度が大きく異なり、国内では規制を受けていない生活支援ロボットや介護ロボットでも、欧米では医療機器のカテゴリーに該当する場合が多く、せっかく実用的なロボットを開発しても国内市場から海外市場にシームレスに展開ができないという課題がある。

国内でも、生活支援ロボットの国際安全規格、安全性検証手法の確立、ロボットソフトウェアの機能安全等の検証を目指したNEDO生活支援ロボット実用化プロジェクト（2009～2013年度）により²²⁾、サービスロボットの国際安全規格ISO13482の策定が行われたが、この規格とCEマーク、FDAをはじめとした諸外国における医療機器規格との関係性の整理と、相互認証の仕組みの整備などが必要になる。

日本における生活支援ロボットの開発水準は世界を先導している。府省連携による研究開発支援のみならず、実証評価、機器認証、市場開拓のそれぞれのフェーズを支援する政策的な取組みが望まれる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	移動ロボットやマニピュレーターといったロボットの要素技術、ロボット学会、機械学会、日本生活支援工学会、ライフサポート学会等を中心とした学会活動、基礎研究から社会実装まで段階毎のファンディング（NEDO、JST）など基礎研究を行うためには充実した環境にある。また、対人親和性の向上、新材料を用いたロボット要素技術の開発など、高い研究レベルにある。知能化においては、産総研、理研、NICT等の人工知能研究拠点と生活支援ロボットの連携が期待される。
	応用研究・開発	◎	↗	大企業を中心とした産業構造であり、コミュニケーションロボットの分野はソフトバンク、ソニーといった大手の応用研究・開発が盛んである。近年ロボット関連のベンチャー企業の増加が見られ、今後はその技術や先進性を中心として人工知能技術と連携しての発展が期待される。ロボット介護機器開発に関するAMEDのファンディングも継続しており、開発された機器の導入に関する介護保険制度等でのインセンティブも増えている。
米国	基礎研究	◎	→	NRI（National Robotics Initiative）より現在に渡り、生活支援ロボットは医療・ヘルスケア分野の一つとして位置付けられ推進されている。生活支援ロボットにおいては、HRI分野においてサービスロボットの研究開発は高いレベルにあり、当該分野を先導している。また、教育・療育支援ロボットなどの取り組みに大きな予算が措置されるなど、ハイレベルな研究にも支援が行われる体制がある。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域

	応用研究・開発	○	→	世界的に掃除ロボットを普及させた iRobot 社をはじめ、リハビリ等の医療分野でも、大学からのスピンオフなど多くのベンチャー企業を中心に応用研究・開発が盛んである。しかしながら、継続的な開発はそれほど多くはなく、特に高齢者介護向けの生活支援ロボットに関しては、実的な開発事例は少ない。
欧州	基礎研究	◎	→	欧州における生活支援ロボットは、特にイタリア、ドイツ、フランスの研究者が主導的な役割を果たしており、過去 10 年では当該分野の研究者が IEEE のロボット分野のプレジデントを務めるなど、そのプレセンスは極めて高い。また、認知ロボットやソフトロボットの基礎研究が発展しており、世界的に著名な専門ジャーナル等が刊行されるなど、基礎研究のレベルが高い。
	応用研究・開発	◎	↗	生活支援ロボットに関する Horizon2020 での大型プロジェクトなど、世界的にも注目度が高い。コミュニケーションロボット分野では、小型の人間型ロボットで有名な仏アルデバランロボティクス社をソフトバンク社が 2016 年に買収した。また、スウェーデンを中心としたロボット・ベンチャー企業による介護支援分野の開発が盛んである。また介護現場での評価・導入に関しては、デンマークが積極的に進めている。
中国	基礎研究	△	↗	国家中長期科学技術発展計画綱要（2006 年～2020 年）において、先端技術 8 分野の中に知的ロボットをあげている。これは、認知ロボットやソーシャル・ロボットに関連する広範な分野であり、今後の生活支援ロボットへの応用が期待できる。著名なロボット研究者を世界中から招聘するなど研究コミュニティの拡大と当該分野でのプレセンスが高まっている。
	応用研究・開発	○	↗	ベンチャー企業などを中心に、コミュニケーションロボットの事業化例が多く出てきている。また、日本企業により開発された生活支援ロボット、介護支援ロボットの模倣品とみられるものも出てきており、今後、知財戦略について注意が必要である。
韓国	基礎研究	○	→	2000 年代のユビキタスロボットコンパニオンプロジェクト（URC） ²³⁾ に主導される形で様々な家庭用・公共施設用サービスロボットに関する研究が盛んになり、プラットフォームを含めて多くの成果が出たが、その後継プロジェクトが限定的である。このため、HRI に関する有力な研究者らが減少気味である。
	応用研究・開発	△	→	URC 終了後、企業との連携を中心としてその成果の実用化が進められたが、新規市場創出には至らなかった。その後、2013 年から 10 年間のロボット未来戦略を発表し、また産業・商業・医療・公共分野におけるロボット関連の規制緩和を進めるなど、新たなサービスロボットの産業創出を目指している。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ 1～2 年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考文献

1) Susumu Tachi et al, “-Guide DOE Robot-Its basic plan and some experiments with MELDOG

- MARK I,” Mechanisms and Machine Theory, Vol.16, No.1, pp.21-29, 1981.
- 2) 橋野 賢, “介助ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.5, pp.604-606, 1990.
 - 3) 加藤 一郎, “リリースボットー生活支援ロボットーの構想”, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.5, pp.614-617, 1993.
 - 4) 土肥 健純, “ライフサポートテクノロジーの今後の展望 ー生命から生活へー”, 日本生体医工学会誌, Vol.7, No.4, pp.44-51, 1993.
 - 5) 厚生労働省, “2025年に向けた介護人材にかかる需給推計 (確定値) について”, 2016年6月24日, <https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000088998.html> (accessed 2020-12-21)
 - 6) 尾崎 文夫, “高齢者生活支援ロボットの現状”, 日本老年医学会雑誌 Vol.57, No.3, pp.224-235, 2020.
 - 7) つくばモビリティロボット実証実験推進協議会, <http://mobility.rt-tsukuba.jp/> (accessed 2020-12-21)
 - 8) 才藤 栄一ほか, “リハビリ・介護とメカトロニクス特集号”, 日本機械学会誌, Vol.119, No.1166, 2016.
 - 9) Liftware website, <https://www.liftware.com/>
 - 10) 廣瀬 俊典, 藤岡 総一郎, 水野 修, 中村 徹, “接触摺動洗浄機能を有する洗髪ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.31, No.6, pp.599-604, 2013.
 - 11) 尾形 哲也, “ロボティクスと深層学習”, 人工知能, Vol.31, No.2, pp.210-215, 2016.
 - 12) Christian I. Penalzoa and Shuichi Nishio, “BMI Control of a Third Arm for Multi-Tasking,” Science Robotics, Vo.3, Issue 20, 2018.
 - 13) Science|Business Network, “Research Strategies : Europe 2030 and the next Framework Programme,” Science|Business Network conference, Brussels, Belgium, 12 Oct 2016.
 - 14) D. J. Hicks and R. Simmons, “The National Robotics Initiative : A Five-Year Retrospective,” IEEE Robotics & Automation Magazine, vol.26, no.3, pp.70-77, 2019.
 - 15) Sara Reardon, “Welcome to the Cyborg Olympics”, Nature, Vol. 536, pp. 20-22, 2016.
 - 16) European Networks of Living Labs, <https://enoll.org/> (accessed 2020-12-21)
 - 17) 赤坂文弥, 木村篤信, “リビングラボの方法論的特徴の分析-日本におけるリビングラボ事例の調査を通じて-”, 日本デザイン学会研究発表大会概要集, 2017.
 - 18) 統合イノベーション戦略推進会議, “AI 戦略2019”, 2019年6月11日, <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/aisenryaku2019.pdf> (accessed 2020-12-21)
 - 19) 厚生労働省, “医療・介護 データの連結等に関する今後 のスケジュールについて”, 2020年9月11日, 第10回要介護認定情報・レセプト等情報の提供に関する有識者会議資料, <https://www.mhlw.go.jp/content/12301000/000670766.pdf> (accessed 2020-12-21)
 - 20) 総務省, LPWAに関する無線システムの動向について, 2018年3月7日, https://www.soumu.go.jp/main_content/000543715.pdf (accessed 2020-12-21)
 - 21) 沼尾 雅之, “見守りシステムの現状と課題ーIoTとしての位置付けー”, オペレーションズ・リサーチ, Vol.64, No.7, pp.385-393, 2019.
 - 22) 貞本敦史, “NEDO生活支援ロボット実用化プロジェクトの概要”, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No.9, pp.760-764, 2011.
 - 23) Young-Jo Cho, Sang-Rok Oh, “Fusion of IT and RT : URC (Ubiquitous Robotic Companion) Program”, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.5, pp.528-531, 2005.

2.2.7.3 医療ロボット

(1) 研究開発領域の定義

本稿における医療ロボットは、医師や医療スタッフによる疾病の診断や治療、予防行為を支援するためのロボットシステムを指しており、ロボットの導入により医療の質を高めることを目的としている。医療ロボットに関する研究開発要素として、センシングやナビゲーション、多数の医療機器のネットワーク統合などの技術が挙げられるが、これらに加え、高速大容量通信や人工知能といった基盤的な技術の発達によって、医療ロボットにより得られる医療の質がさらに高まることが期待される。本稿においては、医療ロボットの中でも手術支援ロボットおよびリハビリテーションロボットを中心に俯瞰する。

(2) キーワード

画像診断、低侵襲手術、マイクロサージェリー、自律型手術ロボット、リハビリテーションロボティクス、遠隔医療

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

世界的な高齢化、医師を含む医療従事者の不足などから、診断や治療を支援するロボットシステムや介護リハビリを支援する機器の需要は今後益々増加することが予想されている。手術支援ロボットをはじめとする医療機器分野は成長産業であり、手術支援ロボットだけでもその市場が、2014年の4000億円から2021年には2.5兆円に達するとの予想がある¹⁾。また、昨今のcovid-19の感染の広がりから、感染症対策としての遠隔操作ロボットの利用や、自動PCR検査ロボット等の検査の自動化といったロボットの活用事例が今後増えると考えられる。

[研究開発の動向]

本稿では手術支援ロボットとリハビリテーションロボットを中心に医療ロボットに関する動向について述べる。手術支援ロボットの中でも代表的なものは、内視鏡手術を支援するロボットである。この分野では米国Intuitive Surgical社のda Vinci²⁾が長年にわたって世界の市場を席巻してきた。da Vinciはマスタスレーブ方式の手術ロボット機器であり、コンソールに座った医師が3次元画像を見ながらコントローラで4本のロボットアームを操作する。da Vinciの主要な特許が2019年に満了となることに伴い、新たな内視鏡手術ロボット機器が上市されている。例えばメディカロイド社のhinotoriサージカルロボットシステム³⁾は2020年8月に、国産手術ロボット機器として初めて医療機器としての製造販売承認を得たのに続き、9月には保険適用機器となった。hinotoriは3次元画像を見ながら4本のロボットアームを手足で操作する。各アームの間節数を増やし8軸構成とすることで、アーム同士の干渉や人との干渉を軽減している。また、サイズがコンパクトであるため、既存の手術室に設置可能であり専用手術室を用意する必要が無いこと、様々な操作姿勢に合わせて調整可能なエルゴノミックデザインを採用していることも特徴として挙げられる。

内視鏡手術以外の手術支援ロボットとして、整形外科分野で米国Stryker社のMakoシステム⁴⁾や英国Smith and Nephew社のNavioサージカルシステム⁵⁾を用いた人工関節置換術が挙げられる。これらは術前に関節の3次元モデルを生成して手術の計画を作成し、術中はマーカーを用いたレジストレーション（位置合わせ）で患者の身体とモデルを一致させながら、事前計画に基づいて動作領域を制限することで安全な骨

切削を支援する。さらに、脳神経外科では、米国 Zimmer Biomet 社の ROSA One ロボットシステム⁶⁾がある。Rosa One では画像から生成されたモデルを用いて術前計画を行い、レーザーを用いたマーカーレスレジストレーションを行って術中ナビゲーションを実現する。

米国 Corindus 社（ドイツ Siemens Healthineers 社により買収）が血管内治療支援ロボット CorPath GRX 用に設計した動作自動化ソフトウェアに対して、初めて FDA による販売承認（510（k）承認）がなされた⁷⁾。これは将来の自律型手術ロボットの実現に向けた一歩となる可能性がある。

中国では整形外科ロボットを開発するスタートアップである杭州 健嘉 機器人（Jointech）社が設立され、多額の資金獲得をしている⁸⁾。韓国では meere 社の手術支援ロボット Revo が既に同国で承認を受けているほか、KAIST が内視鏡手術ロボット K-FLEX の研究開発を進めている⁹⁾。

リハビリテーションロボットとして、サイバーダイン（株）の HAL（医療用下肢タイプ）¹⁰⁾ が挙げられる。これは装着型の外骨格による歩行リハビリ支援システムであり、装着者が筋肉を動かそうとした時に発する生体電位信号を読み取り下肢の動作をアシストすることで、緩徐進行性の神経・筋疾患患者の機能改善治療を行う。歩行訓練装置と装着型の外骨格を組み合わせたタイプの歩行リハビリ支援システムとして、スイス Hocoma 社の Locomat や Reha Technology 社の G-EO System、トヨタ自動車のウェルウォーク WW-1000/WW-2000¹¹⁾ が挙げられる。

（4）注目動向

【新展開・技術トピックス】

新型コロナウイルスの世界的な流行は、医療ロボットの研究開発にも大きな影響を及ぼしている。接触や飛沫による感染を防ぐため、案内や搬送、消毒といった作業のロボット化、さらには検査の自動化や遠隔医療といった分野でロボットのニーズが急激に高まっている。

米国ではバーストダイナミクス社の四脚ロボット Spot が、病院での遠隔トリアージに導入された。さらに遠隔でのバイタル測定を実施できるように開発が進んでいる¹²⁾。

欧州ではデンマークの UVD Robots 社が自律走行型紫外線殺菌ロボットの販売を開始した¹³⁾。中国では、SIASUN Robot & Automation 社や Candela（Shenzhen）Technology Innovation 社などが食事や薬の搬送、バイタルサインのチェック、遠隔問診、リハビリなどに用いるロボットを中国国内の病院に導入している¹⁴⁾。韓国では韓国機械研究院で検体採取用ロボットが開発されている¹⁵⁾。

国内ではメディカロイド社が検体採取、自動 PCR 検査、バイタル測定、配膳などを行うロボットの開発を進めている¹⁶⁾。またオムロンは紫外線消毒ロボットを開発する世界各国のパートナー企業に自社の移動ロボットを提供している¹⁷⁾。

新型コロナウイルスの影響は長期化すると見込まれ、今後も診療や患者のケアなどの遠隔化へのニーズは高まる一方であろう。これに伴って、遠隔医療に用いられるロボットの研究開発はさらに活発化すると予想される。他方、患者の孤独や医療スタッフの疲弊など、心理的な問題も深刻さを増しており、今後はコミュニケーションロボットによる心理面のケアが進むことも期待される。

【注目すべき国内外の研究プロジェクト】

日本医療研究開発機構（AMED）の医工連携イノベーション推進事業（旧：医工連携事業化推進事業）にて、メディカロイドの胸腔内軟性手術ロボットや A-Traction の手術支援ロボット、帝人ファーマの手指リハビリロボットの開発などが進められている。

欧州では、EUのHORIZON 2020においてSMARTsurgプロジェクト¹⁸⁾、EDEN2020プロジェクト¹⁹⁾、ARSプロジェクト²⁰⁾、SARASプロジェクト²¹⁾などの手術支援ロボットの研究が進められている。なかでもARSプロジェクトは、手術ロボットによる完全な自律プロセスの実現を目指している。国際的な臨床研究センタから提供された臨床ロボット手術介入に関する大規模なデータセットを用いた学習に基づいた自律手術の実現可能性を検証する。また、研究成果をもとに手術ロボットda Vinciに自律システムを組み込み、デモンストラーションを行うことを予定している。

また同じくHORIZON2020において、RETAINERプロジェクト²²⁾やReHYBプロジェクト²³⁾などのリハビリテーション用ロボット装具に関するプロジェクトが実施されている。

中国では第12次5カ年計画(2011～2016)においてロボットを重点分野と位置付けて以来、ロボットの研究開発が活発に行われている。「ロボット産業発展計画(2016～2020年)において、ブレークスルーを目指す象徴的な十大製品の中に、手術支援ロボットが明記されている²⁴⁾。

(5) 科学技術的課題

手術は、事前に正確なモデル化ができない不確実な環境で実行され、エラーが致命的な結果をもたらす可能性があり、対象である患者の身体は変形可能であり、また突然の状態変化にリアルタイムで対応する必要がある。このように、ロボット技術を手術に適用するためには多くの困難が存在する。前述のARSプロジェクトといった自律型手術ロボットに実現に向けた取り組みが推進されているが、実現に向けて知覚・認識、動作・行動計画、把持・操作、及びこれらの統合化・システム化技術といった要素技術のさらなる進展が求められる。例えば、時々刻々変化する手術野の詳細な深度マップのリアルタイム取得、色情報や触覚情報を統合した患部の状態の認識、患者の状態の急変等に対応してタスクを再構成するリアルタイムアルゴリズム、といった技術的課題が考えられる。

また、遠隔操作による手術ロボットに関しても、術者に触覚・力覚を提示するハプティックス技術の進展に加え、術者の意図・目標の推測に基づき術者の入力から手の震え除去するといった半自律的に行動する共有自律システムに関する研究開発が求められる。

(6) その他の課題

医療ロボットの開発にあたっては、倫理面や社会への影響についても考慮が必要である。例えば、欧州議会の報告書“Ten technologies to fight coronavirus”²⁵⁾では、新型コロナウイルス対策においてロボット工学による多大な貢献が認められる一方で、ロボットを広範囲に導入するためには、その動作が予測可能であるとともに、透明性、説明責任、説明可能性、監査可能性・トレーサビリティ、中立性・公正性といった価値観に適合するためにさらなる取り組みが必要であるとしている。EUではこれまでは医療機器の製造や流通に関して医療機器指令(MDD)という規制の枠組みが用いられてきたが、医療分野の技術発展に対応しきれない点があったことなどにより、MDDは欧州医療機器規則(MDR)に置き換えられ、より厳格な規制がなされようとしている。なお、MDRの適用は当初2020年5月からとされていたが、新型コロナウイルスの世界的流行により、1年延期されている。

日本ではAMED 高度遠隔医療ネットワーク研究開発事業において、遠隔治療のガイドラインの策定が大きな取り組むべき課題として挙げられている。医療ロボットの多くは、医工連携によって得られた成果であり、今後も医工連携の一層の推進が必要である。また、医療機器としては安全性と有効性の確保が必須である。特に医療ロボットは複雑な制御の下、臓器等に力を加えるため、ハードウェア、ソフトウェア双方に高度の安

全性が求められる。ロボット支援手術機器やリハビリテーションロボットの安全に関しては、2019年に国際規格が制定されている^{26), 27)}。加えて、医療機器として上市するためには、医薬品医療機器等法に基づく承認あるいは認証を受ける必要があり、これらが参入への高い障壁となっている。迅速に事業化を進めるためには、国際規格や法令等の知識を有し、これらに準拠した評価計画策定、評価体制の構築、および申請のとりまとめに関する能力を有する人材の育成が必要である。また、医療機器の事業化に向けた助言や支援機関の紹介を行う組織である医療機器開発支援ネットワーク²⁸⁾等の取り組みを活用しつつ、我が国の医療ロボットの研究開発が一段と活性化することが望まれる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	遠隔操作への期待が高まっており、AMED 高度遠隔医療ネットワーク研究開発事業が開始された。
	応用研究・開発	○	↗	保険収載が実用化の追い風になっている。また新型コロナウイルス対応のニーズが高まっている
米国	基礎研究	◎	→	マイクロ・ナノロボット、ソフトロボットの開発が活発。医療ロボットやAIなども多岐にわたる研究成果がある
	応用研究・開発	◎	→	手術ロボットの自律化を目指した取り組みが始まっている
欧州	基礎研究	◎	↗	HORIZON 2020 でマイクロサージェリーや自律手術ロボットなどを目指した研究が進行中
	応用研究・開発	○	→	リハビリテーションロボット、殺菌消毒用ロボットなどが市場投入されている
中国	基礎研究	○	↗	ロボット産業発展計画における象徴的な十大製品に手術支援ロボットを位置づけ、大学を中心に多数の基礎的研究を実施
	応用研究・開発	○	↗	新型コロナウイルス対応のため、病院等へのロボットの導入が急速に進んだ
韓国	基礎研究	○	→	大学、国立研究機関などで研究を実施
	応用研究・開発	○	→	手術ロボット、新型コロナウイルス用検体採取ロボットなどの開発が進む

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) ティンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考文献

- 1) Surgical Robots : Market Shares, Strategies, and Forecasts, Worldwide, 2015-2021, WinterGreen Research Inc., 2015
- 2) Intuitive Surgical 社ホームページ

<https://www.intuitive.com/ja-jp>

- 3) 株式会社メディカロイドホームページ

<http://www.medicaroid.com/>

- 4) Stryker社ホームページ

<https://www.stryker.com/us/en/portfolios/orthopaedics/joint-replacement/mako-robotic-arm-assisted-surgery.html>

- 5) Smith and Nephew社ホームページ

<https://www.smith-nephew.com/professional/microsites/navio/>

- 6) Zimmer Biomet社ホームページ

<https://www.zimmerbiomet.com/medical-professionals/cmf/rosa-brain.html>

- 7) Corindus社プレスリリース

<https://www.corindus.com/news-events/press-releases/corindus-receives-fda-clearance-for-first-automated-robotic-movement-in-techniq-series-for-corpath-grx-platform>

- 8) 日本経済新聞電子版、2020年10月8日

<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO64679610W0A001C2FFE000/>

- 9) Minho Hwang, Dong-Soo Kwon, "K-FLEX : A flexible robotic platform for scar-free endoscopic surgery", International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, Vol.16, Issue 2, e2078, 2020.

- 10) サイバーダイネ社 HAL (医療用下肢タイプ)

https://www.cyberdyne.jp/products/LowerLimb_medical.html

- 11) トヨタ自動車株式会社 ウェルウォーク

<http://www.toyota.co.jp/robotics/welwalk/>

- 12) ボストンダイナミクス社ホームページ

<https://www.bostondynamics.com/COVID-19>

- 13) Erico Guizzo and Randi Klett, "How Robots Became Essential Workers in the COVID-19 Response", IEEE Spectrum, October 2020, pp.36-37, 2020.

- 14) China Focus : AI robots tackling COVID-19 pandemic meet global consumers,

<http://www.focac.org/eng/zj/zj1/jmzx/t1812839.htm>

- 15) Mary Meisenzahl, "Doctors in Korea invented a remote-controlled robot that enables contactless collection of COVID-19 test samples — here's how it works",

<https://www.businessinsider.com/robot-collects-covid-19-samples-korea-2020-7>

- 16) 株式会社メディカロイドプレスリリース

http://www.medicaroid.com/release/pdf/20200603_ja.pdf

- 17) オムロン株式会社ニュースリリース

<https://www.omron.co.jp/press/2020/06/c0626.html>

- 18) SMARTsurg プロジェクトホームページ <http://www.smartsurg-project.eu/>

- 19) EDEN2020 プロジェクトホームページ <https://www.eden2020.eu/>

- 20) ARS プロジェクトホームページ <https://www.ars-project.eu/>

- 21) SARAS プロジェクトホームページ <https://saras-project.eu/>

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

- 22) RETAINER プロジェクトホームページ <https://www.ab-acus.eu/retrainer/>
- 23) ReHYB プロジェクトホームページ <https://rehyb.eu/>
- 24) 経済産業省 平成29年度製造基盤技術実態等調査（中国製造業の実態を踏まえた我が国製造業の産業競争力調査）https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H29FY/000403.pdf
- 25) European Parliament, Ten technologies to fight coronavirus, 2020.
- 26) IEC 80601-2-77 : 2019, Medical electrical equipment — Part 2-77 : Particular requirements for the basic safety and essential performance of robotically assisted surgical equipment
- 27) IEC 80601-2-78 : 2019, Medical electrical equipment — Part 2-78 : Particular requirements for basic safety and essential performance of medical robots for rehabilitation, assessment, compensation or alleviation
- 28) 医療機器開発支援ネットワークポータルサイト <https://www.med-device.jp/>

2.2.8 サービスロボット

(1) 研究開発領域の定義

サービスロボットとは、汎用的な産業用ロボット以外のロボット全般を指すことが多く、明確に定義されているものではないが、本稿においては日常生活の支援や小売業など第三次産業においていわゆる「サービス」を提供するロボットについて論じる¹⁾。例えば、家庭における清掃ロボット、公共施設等における警備ロボット、店舗等における接客ロボットや配膳ロボット等が対象となる。人へのサービスを提供するロボット分野であることから、ユーザとの距離が近いことに起因する「安全性」や、自ら考え、認識、判断する「自律性」などの技術確立を課題とした研究開発領域である。

(2) キーワード

人との協働・共生、非構造化環境、安全性、自律性、深層学習、ソフトロボティクス、対人インタラクション、コミュニケーションロボット、スマートスピーカー、無人コンビニ

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「2035年に向けたロボット産業の将来市場予測」において、2035年におけるロボット産業の市場規模を9.7兆円と予測している。中でもサービス分野の伸びは著しく2020年の1兆円から2035年には5兆円に迫るとしている。サービス分野の伸びが大きいと予測される理由として、少子高齢化による労働人口の減少に伴い、面倒な家事、屋外での危険な作業、コンビニやファミリーレストラン等での深夜業務などを代替するため、サービスロボットの導入および、コミュニケーションロボットやスマートスピーカー等の新たな分野への普及が現実視されていることが挙げられる。

サービスロボットと対比される産業用ロボットは、構造化環境（structured environment）である工場の中だけで人に代わって働くことを目的に開発された。1950年代のティーチングロボットに始まり、近年では部品の搬入から製品の組み立て、完成した製品の出荷まですべてを自動で行う無人工場も登場している。一方で、サービスロボットは家庭や店舗、公共施設などの非構造化環境（non-structured environment）において、ユーザと近接して働くものである。このため、サービスロボットには、より高度な安全性が要求される。また、定型的なタスクの定義が困難であるため、自ら考え、認識、判断する自律性が強く求められる。これらの課題を解決するためには、機構学や制御工学といった従来の研究分野とともに、ソフトロボティクスや対人インタラクションなどの新しい研究分野とのコラボレーションが必須となる。

以上のように、サービスロボット分野の市場規模が増大するであろうこと、新しい研究分野とのコラボレーションが必須であることから、本領域の研究意義は大きい。

[研究開発の動向]

これまでの研究の経緯

ロボットは、構造化環境において産業用ロボットとして実用化が進み、次いで非構造化環境に対処するための技術開発とともにサービスロボット研究が発展してきた^{2), 3)}。

サービスロボット研究は宇宙、深海、原子力施設といった人が働くことのできない極限環境での作業を目的として始まった。初期においては遠隔操縦によるマニピュレーター型のロボットが主流であり、不整地走

行・歩行や耐環境技術、センシング技術を課題としていたが、次第に自律作業に対する要望が大きくなり、それに伴い知能化技術が中心的な課題になっていった^{4), 5), 6)}。

その後、労働環境の良くない、いわゆる3K(きつい、きたない、危険)の職場における仕事を代替するロボット分野へと発展してきた。

20世紀末になりソニーのaibo(アイボ)^{7), 8)}やホンダのAISIMO(アシモ)⁹⁾の開発を契機に、エンターテインメントや癒し、教育など、人と共生するロボットの可能性が示され、サービスロボットの領域は広がりを見せた。その後、現在に至るまで様々な分野でのサービスロボット導入の検討がなされている。

現在の潮流

2002年に発売が開始された家庭用掃除ロボット「ルンバ」は世界中での累計販売数が2,000万台を越え、「一番成功した」サービスロボットだと考えることができる。また、2018年にソニーから発売された犬型ロボット「アイボ」は、発売から半年で2万台を売り上げるなど、エンターテインメントロボットとしてサービスロボットは市場に受け入れられてきた。

現在は、空港で動く自律走行型の警備ロボットやレストランの配膳ロボットが、接客・案内も行うなど、1台のロボットに対しコア機能を中心に様々な機能が付加され、サービスロボットが提供する機能の多角化が進んでいる^{10), 11)}。

さらに、従来のサービスロボットは、工場や店舗のバックヤードで作業を行う、人が留守のうちに家庭の掃除をする等、人と直接触れ合うことは少なかったが、近年はホテルの受付、案内のように、人と共生、協働するサービスロボットが求められている¹²⁾。

諸外国の政策

米国連邦政府がまとめた米国におけるロボット研究開発のロードマップ「A Roadmap for US Robotics : From Internet to Robotics 2020 Edition」(September 9, 2020)によると、工場内だけで作業する従来型の産業用ロボットに加え、人と協働するサービスロボットの活用や工場の外でのロボット利用が、AIの実用化と相まって拡大していくとし、日本と同様に、米国においてもサービスロボット市場の大幅な拡大が予想されている。

米国ではロボット産業の振興政策として、国防高等研究計画局(DARPA)によるDARPAチャレンジが挙げられる。これは賞金付の競技会形式の研究開発プログラムであり、自動運転や災害救助等、競技テーマを変えながら継続的に実施されている。2004年から2007年に行われたDARPAグランドチャレンジを契機に自動運転技術が一気に加速し、グーグルやテスラといった企業による自動運転車製品化の契機となった。また、2013年から2015年にかけて実施されたDARPAロボティクスチャレンジでは世界各国から集まったヒューマノイド型のロボットが災害を想定した様々な課題に挑戦した。最近では地下のトンネルや洞窟を動き回る能力を競うDARPA Subterraneanチャレンジが行われている¹³⁾。

欧州ではEUの「Horizon 2020」プログラムのもと「研究室から産業へ、そして市場へ」を旗印に研究開発主導での社会課題の解決を促進しており、中でもロボティクスを中心的な分野と位置付けている。EUでは120を超える研究プロジェクトがSPARCと呼ばれる官民パートナーシップをベースにして連携している。SPARCは、2014年から2020年にかけて7億ユーロの財源を欧州委員会から受けており、民間主導としては世界最大のロボティクス・イノベーション・プログラムである^{14), 15)}。

中国では2049年(中華人民共和国建国100周年)までに世界一の製造大国となるべく「中国製造2025」

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

を掲げている。現在、中国は世界の工場として世界一の製造規模を誇るが、製造コストや環境問題を含めて製造強国入りを果たするのが目的である。サービスロボット分野では、高齢化の進展に対処するため家事や店舗オペレーション等のロボットによる代替を掲げている¹⁶⁾。

技術の進展状況

サービスロボットに要求される機能は多種多様であり、必要とされる技術も多岐に渡る。ここでは、「センシング」、「マニピュレーター」、「ヒューマンインタフェース」の3項目について技術の進展状況を述べる。

センシング

安価で手軽に周囲の情報を得る手段としてカメラ画像や音声の認識性能の向上が求められている。画像認識に関しては、ステレオカメラに始まり、赤外線方式によるリアルタイム三次元距離センサーへと発展した。これにより距離画像が手軽に利用できるようになり、安価なトイレロボットでの利用も可能になった。音声入力に関しても複数のマイクの入力をリアルタイムに処理するマイクロホンアレイの利用により音源定位や雑音の除去などが容易になった。このようなハードウェアの進歩に加え、深層学習研究の進展により、事前知識の乏しい状況でも大量のデータからの学習機能により不特定話者との音声対話や一般画像理解などの諸問題に対し、従来の手法を圧倒する高い性能を示している。

マニピュレーター

ロボットが人と協働する際の最大の課題は安全性である。マニピュレーターの安全性を担保するために、コンプライアンス制御と呼ばれる、いわゆる柔らかい制御アルゴリズムの研究が進められている。従来からのハイブリッド制御やインピーダンス制御などの制御理論の改良ばかりでなく、深層学習や強化学習などの機械学習手法によりセンサーの生データから直接ロボットを制御するEnd-to-endの方法論を用いたティーチングコストの少ないマニピュレーションが実現しつつある。

制御アルゴリズムの改善とは別に、柔らかな素材や軽量な材料でマニピュレーターを作るなどの研究開発も重ねられている。ソフトロボティクスと呼ばれる研究分野では人工筋肉や非機械的な動きを実現するソフトアクチュエーターの利用により、これまでにない動特性を持ったマニピュレーターが開発されている¹⁷⁾。

ヒューマンインタフェース

人と共存するサービスロボットの大きな特徴として、人との対話やコミュニケーション機能が考えられる。人を対象とした、心理学、認知科学、脳科学といった研究分野とのコラボレーションにより、ロボットの感情表現や対話戦略などの分野で成果が出ている¹⁸⁾。アバターやインターフェースロボットと呼ばれる分野では、外出が困難なユーザに代わって買い物や美術館での鑑賞を体験するロボットの実証実験が進んでいる。CGキャラクターによる擬人化、音声合成アルゴリズム、高速な公衆回線（5G）などの日本が優位な技術とマッチすることもあり諸外国に先駆けて実用化が期待できる分野である。

(4) 注目動向

【新展開・技術トピックス】

ロボット新戦略

2015年、様々な社会的な問題を解決に向けたロボット革命の実現を目指す「ロボット新戦略」が内閣のイ

ニシアチブにより策定された。この中で、サービスロボット分野については、諸外国に比べ低い労働生産性の改善を目指して、2020年度までにピッキング、仕分け、検品に関わるロボットの普及率30パーセント、卸・小売業や飲食・宿泊などにおける集配膳や清掃等の裏方作業を中心にベストプラクティスを100例程度実現するといった具体的アクションプランが掲げられた。これに伴い、様々なロボット関連規制が改革され、遠隔操作や無人駆動ロボットで使用する電波の使用規制緩和、搭乗型移動支援ロボットの公道走行の基準緩和、無人飛行型ロボットのための運用ルール策定などサービスロボットの利活用が拡大した。2015年から2020年の5年間で官民1000億円を超える資金がロボット関連プロジェクトに投資されたこともあり、サービスロボット市場の大幅な規模拡大が予想される。

競技会による課題解決型研究開発

近年、ロボカップやDARPAチャレンジなど競技会形式の研究開発手法（チャレンジプログラム）が注目されている。チャレンジプログラムとは、ある課題について具体的な解決手法を提示する代わりに、幅広いアプローチを募集し、課題の達成具合に応じて賞金や名誉を与えるという開発手法である。研究提案の事前評価に基づき資金を提供する補助金型プログラムに比べて、幅広い分野からの参加により、既存の枠を越えた解決法の創出が期待でき、コストパフォーマンスが高い点などが評価され注目されている。ロボカップでは2006年の世界大会（ブレーメン、ドイツ）から「@ホームリーグ」（アットホームリーグ）が実施され、家庭における様々なサービスを競っている。「@ホームリーグ」の優勝チームの技術が中国のレストランでの配膳ロボットに使われるといった事例が生み出されている。アマゾン「アマゾン・ロボティクス・チャレンジ」を2015年から2017年にかけて開催した¹⁹⁾。自社製品の物流自動化における商品仕分け技術の革新を目指したチャレンジプログラムであり、2017年の名古屋大会では物体認識・把持、コンプライアンスマニピュレーション、エラー検出、およびリカバリーなど幅広い技術を4日間にわたり披露し、総額27万ドルの賞金を競った。

我が国においてもロボット新戦略の一環として開催されたWorld Robot Summit（WRS）においてサービスロボット技術に関する競技会が行われている。2018年のWRSプレ大会は8万人の来場者があった盛大な大会となり、競技会には世界23か国から126チームが参加した。ロボカップ等の既存の先端技術開発型の競技会とは異なり、WRSの競技は労働人口の減少と高齢化社会への対応のためのロボット技術の製品化・社会実装を目的としたものである。そのためWRSの競技は家庭や店舗といった身近な環境をモチーフとして、片付けや商品陳列といった社会的ニーズの高い課題を人とロボットとの協働で行うものとなっている²⁰⁾。

このようなチャレンジプログラムで重要なのは、継続的に実施することと、そこから生まれた成果を次につなげる仕組みを構築することである。WRSでは、介助犬の訓練法を参考にしたサービスロボットに必要な標準性能評価法をアメリカ国立標準技術研究所（NIST）と共同で開発した。この評価法はWRSのルールとして用いられるだけに留まらず、様々な国際的ロボット競技会における標準テストとして、世界中の研究者が利用することを狙っている。

【注目すべき国内外のプロジェクト】

日本は他の地域に先駆けてエンターテインメント系サービスロボットの研究開発、商品化を進めてきた。ソニーのaibo、NECのパペロ、癒しロボットのパロ、ソフトバンクロボティクスのPepperなど、人と共存する様々なロボットが販売されてきた。東京オリンピック開催決定を契機に東京ビックサイトや羽田空港など都内各所のみならず神奈川県、千葉県、愛知県など自治体においても各種サービスロボットの実証実験が行われており、産業界主導でのサービスロボットの社会実装が加速すると考えられる。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

日本では、2020年に始まったムーンショット型研究開発制度において、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」を掲げ、一人に一台一生寄り添うスマートロボットの研究や、AIロボット群とともに誰一人取り残さない多様性と包摂性のある社会を実現するための研究が実施されており、サービスロボットの研究開発が一層進展するものと思われる。

米国では大学や大学発ベンチャー企業によってサービスロボットの開発が盛んに進められてきたが、ここ数年はGoogleやAmazon、IBMといった大手IT企業もサービスロボット分野への投資を増やしている。国防高等研究計画局（DARPA）やNational Robotics Initiative（NRI）が多額な資金面での支援を行っているだけでなく、シリコンバレーロボティクスに代表されるベンチャー支援政策によりサービスロボット分野の研究開発を促進するエコシステムが確立している。最近、アメリカ国内で注目されているのは、ホテルや公共機関、家庭などの日常生活に近い場面で利用する自律移動ロボットの実用化である。Saviok社ではホテルにおけるルームサービスを代替する自律移動ロボット「Relay」を製品化した。このロボットは、宿泊客からの要望をネットワーク経由で受け、部屋まで自律移動し必要とされる品を配達する。移動中は廊下で他の顧客の邪魔にならないよう経路を動的に変更する、混雑したエレベータには遠慮して乗り込まないなど、安全面についても十分考慮されている。配達後に受ける評価に応じてディスプレイに感情を表示するなど、エンターテインメントの側面も有しており、宿泊客に喜ばれている。Simbe Robotics社の小売店向けの在庫管理ロボット「Tally」は、スーパーやドラッグストアの店舗を巡回して、在庫を確認するだけでなく、売れ筋商品の予測を行い売上高の向上に貢献している。ここで紹介したロボットはいずれも、従業員を減らすことによる人件費削減だけでなく、顧客満足度上昇や売上高向上といった「サービス」の提供を重視しており、このような観点がサービスロボットのさらなる普及には大切だと考える。

日本と同様に労働力不足に悩むEU諸国において、産業用ロボットの自動化、自律化は大きな課題になっているが、サービスロボットの研究開発は他の地域に比べて大幅に遅れている²¹⁾。

中国では、注文から配膳までのすべてをロボットにより完全自動化した「ロボットレストラン」が、2018年に世界で初めて開店し、開店2か月で4万人を越える利用者が来店した。その後、中国全土で飲食店へのロボットの導入が進み、2020年には調理を含め従業員のいないレストランも登場した。都市部での労働力不足を補うために進められたロボット導入だったが、最近ではコロナ禍の影響もあり、客との接触を完全に避けることによる食品衛生の向上に大きく寄与している。

（5）科学技術的課題

汎用型サービスロボット

掃除ロボットや監視ロボットのような単機能のロボットに代わり、一台のロボットで様々な要望に応えるサービスロボットの機能の多角化が進んでいる。工場内での単純な作業と異なり、極めて多様で非限定的なサービスに対応する汎用性がサービスロボットには求められる。また、非構造化環境において事前に準備不可能なユーザからの要求にいかに対応するかという課題が生じている。

汎用型サービスロボット実現のためのソフトウェアからのアプローチは、深層学習を中心とした機械学習手法の活用である。事前に想定するタスクをすべて作りこむことは困難であるため、ロボットは、画像認識、音声認識、マニピュレーション、移動計画などの基本的な機能だけを有し、タスクに関する知識や解決手段はユーザとインタラクションしながら学習する、すなわち使いながら賢くなっていく仕組みが必要とされる。これは、いわゆる汎用人工知能と呼ばれる技術であり、人と同じように、想定外の要求があってもそれまでの経験に基づいて総合的に判断し、問題解決に至る技術の実用化が期待されている。

一方、ハードウェアからのアプローチは、掃除のような特定の機能に特化したロボットではなく家庭や店舗で汎用的に使える標準的なロボットハードウェア（プラットフォームロボット）を開発し、その上で様々なサービスを実装するという手法である。複数の開発機関が共通のプラットフォームロボットを使って異なるソフトウェアを開発することで、開発成果の汎用化により流通が促進され、さらに研究開発が促進されるという相乗効果が期待できる。トヨタ自動車はFetch（モノをつかむ）とCarry（モノを運ぶ）に特化した小型で安全性の高いプラットフォームロボットHSR（Human Support Robot）を開発し、13か国にわたる国内外の49機関（2019年9月現在）に100台を超えるロボットを提供している。それぞれの機関はHSR開発コミュニティとして活動し、コミュニティ内では開発成果を共有するなどの横断的な連携を行っている。

汎用型サービスロボット実現のためには、ソフトウェアとハードウェアの両面からのオープン化を図るオープンイノベーションの取り組みをさらに進めていく必要がある。

安全性の確保の他にサービスロボットには標準性能試験法（Standard Test Method：STM）が存在しないという課題がある。STMは具体的な性能（物体認識・把持能力、移動能力等）を測定する標準化された試験方法であり、STMを通じてサービスロボット商品の性能を「見える化」することはユーザの安心にも繋がり、その後の研究開発と実用化が促進する。米国では国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology, NIST）が中心となり災害対応ロボットの標準化が進められているが、サービスロボットに関しては今後の課題になっている。WRSの競技向けに開発した標準性能評価法が発展して、サービスロボット一般に汎用的な標準性能試験法となることが期待される。

（6）その他の課題

人と協働・共生し、自律的に動き、判断し、さらには人に指示をするようなサービスロボットの実現が現実味を帯びてきている。そこで大きな課題となるのは、リスクアセスメントと、倫理的、法的、社会受容性の課題（Ethics, Legal, Social Issues：ELSI）である。

リスクアセスメント

資金的余裕がある大企業が開発の中心である産業用ロボットと異なり、初期からベンチャー企業を中心に開発されてきたサービスロボットは、人的、資金的な余裕に乏しく、リスクアセスメントの重要性は認識されつつもおざなりにされている。さらに、ユーザや適用フィールドを限定しにくい、類似事例が乏しく過去の経験からリスクの推定が困難であるといったサービスロボット特有の問題もリスクマネジメント手法の開発を困難にしている。

しかしながら、人との距離が相対的に近いサービスロボットを次世代産業として確立するには、安全性の確保が重要な課題である。しかしながら、サービスロボットや生活支援ロボットの安全規格であるISO13482は装着型、移動作業型、搭乗型ロボットの安全基準を規定したものであり、コミュニケーション型や汎用サービスロボット一般に広く受け入れられるリスクマネジメント手法の開発が急務である²²⁾。

ELSI

人工物におけるELSIに関しては、人工知能プログラムのバグや自動運転車の暴走、産業用ロボットによる事故などに関する議論が始まったばかりでサービスロボットに関してはその検討が遅れているのが現状である。しかしながら、サービスロボットが人と親密なコミュニケーションを行う状況を考えると、個人データの収集やプライバシー問題など産業用ロボットでは問題にならなかった新たなELSIに関する課題が存在すると考え

られ、産学官による一層の議論が必要だと考える。

EUではロボットの倫理面への関心は高く2000年代から様々な場面で議論されており、ロボット法整備を目的としたRoboLawプロジェクトを立ち上げ、ロボティクスと法律の諸問題に関する議論が行われた。しかし、現時点ではロボット法を立案する段階には至らず、将来ロボット法が必要になった時の諸問題を議論して提言するにとどまっている。RoboLawプロジェクトにおける重要な議論は、サービスロボット研究のようなイノベティブな分野において、消費者やエンドユーザを保護することとイノベーションを促進することとのジレンマであった。現時点では市場化・製品化には遠く、開発途上であるサービスロボットの分野においては過度の規制により健全な開発活動が妨げられるという意見と、将来的なリスクを予測して規制による介入をすべきという意見の対立が続いている。RoboLawプロジェクトはその後、欧州議会法務委員会におけるワークショップとして度々開催され、現在も議論が続いている。

米国では国家科学技術会議（NSTC）と科学技術政策局（OSTP）が中心になり「Preparing for the Future of Artificial Intelligence」という報告書をまとめ、AIだけでなくロボットの研究開発に対して23の提言を行った。ロボティクス分野における倫理的諸問題は、多岐に渉る専門分野が関わり、個人の信仰、宗教、文化などに影響され、ロボットの適用を期待する複雑で多様な状況において適切に対応できるアルゴリズムが必要であると述べられるにとどまり、具体的な方策は示されなかった。

日米欧では、プライバシー、イノベーション、民事責任、刑事責任、代理性、認証、労働、課税、政治といった部分での一部法制化が進んだ。しかし、先端技術が及ぼす社会的影響や人とロボットが共生、協働することで変化する我々の生活など個人レベルでのELSIの理解は十分ではない。今後、専門家だけでなく一般市民が積極的にELSIを議論する仕組みが必要とされている。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	AI技術の進展に伴い、画像理解、音声理解、空間認識などの知能化技術がサービスロボットに利用されるようになってきた。それに伴い、モバイルマニピュレーションのような新規研究分野が盛んになっている。
	応用研究・開発	◎	↗	トヨタ自動車（HSR）、ソフトバンクロボティクス（Pepper）などサービスロボットの標準プラットフォームロボットの開発が盛んになっている。2020年の東京オリンピックを契機に様々な地域でサービスロボットの社会実装検証が始まった。今後は、実証から商品化へのフェーズにシフトするものと思われる。
米国	基礎研究	◎	↗	政府機関や軍、大学を中心に巨額な資金に支えられて基礎研究は進められている。加えて、大手IT関連企業の研究部門において画像認識や音声認識に基礎研究が盛んである。軍事産業からのフィードバックも多くみられる。
	応用研究・開発	◎	↗	ベンチャー企業に加え、大手IT関連企業においてもサービスロボットの商品化が進んでいる。
欧州	基礎研究	○	→	ヒューマンロボットインタラクションや最適化アルゴリズムなどの基礎研究が中心である。
	応用研究・開発	×	↘	家庭へのロボット普及や店舗などでのサービスロボットの利活用はほとんど見られない。

中国	基礎研究	○	↗	主要な国際学会での論文投稿数の伸びは著しい。一方で、応用研究に傾注する傾向があり、オリジナルなアイデアに乏しい。
	応用研究・開発	◎	↗	ベンチャー企業を中心に応用研究と社会実装が進んでいる。深眸科技 (Deep Eye Technology) はAI技術の強化によりコスト削減を図り低価格な家庭用サービスロボットを商品化した。サービスロボット市場としては世界一と言える。
韓国	基礎研究	△	↗	韓国科学技術院を中心に基礎研究が若干増えているが、特筆すべき活動・成果が見えていない。
	応用研究・開発	○	→	小型サーボモータや教材用の小型ロボット ((株) ロボティズ) が世界市場で大きなシェアを得ているが、サービスロボットの利活用に関しては特筆すべき例は無い。
タイ	基礎研究	△	→	国際学会等でもタイからの論文投稿は少ない。
	応用研究・開発	◎	↗	病院や公共施設での受付・案内ロボット。ロボットレストラン等での省力化の事例が増加中。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) テレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考文献

- 1) 谷和男「ISO/TC 299/WG 4 (サービスロボットの性能) の現在, 過去, 未来」日本ロボット学会誌 38.5 (2020) : 431-433.
- 2) 小野智寛, et al「社会実装を目指したホームサービスロボットの研究開発」ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2019. 一般社団法人 日本機械学会, 2019.
- 3) 安藤慶昭, et al「ロボット活用型市場化適用技術開発プロジェクト」ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2018. 一般社団法人 日本機械学会, 2018.
- 4) 高野政晴「極限作業ロボットプロジェクト」日本ロボット学会誌 9.5 (1991) : 614-618.
- 5) 田所諭, 大須賀公一, and 天野久徳「極限環境作業ロボット レスキューロボット」日本ロボット学会誌 19.6 (2001) : 685-688.
- 6) 白井良明, and 井上博允「知能ロボット研究の展望 モデルベースト・ロボティクス」日本ロボット学会誌 5.6 (1987) : 462-469.
- 7) 藤田雅博「エンタテインメントロボット：AIBO」映像情報メディア学会誌 54.5 (2000) : 657-661.
- 8) 藤田雅博「感性とロボット ペット型ロボットの感性表現」日本ロボット学会誌 17.7 (1999) : 947-951.
- 9) 竹中透「人間型ロボット『アシモ』開発の裏話」第 85 回本田財団懇談会講演要旨, 2001 (2001) .
- 10) 山岸英明「暮らしの中で活躍する AI とロボット : 6. 警備サービスにおけるロボットについて -さまざまな場所で活躍する警備・案内機能を持つロボット」情報処理 59.8 (2018) : 706-709.
- 11) Zhong, Lina, et al. "Impact of robot hotel service on consumers' purchase intention : a

control experiment." Asia Pacific Journal of Tourism Research (2020) : 1-19.

- 12) 田村雄介, and 浅間一「サービスロボット：人間・ロボット共存環境におけるサービスロボットの振る舞い」精密工学会誌 78.8 (2012) : 666-669.
- 13) Christensen, H. "A Roadmap for US Robotics from Internet to Robotics, 2016 edn." National Science Foundation & University of California, San Diego (2016) .
- 14) Spenko, Matthew, Stephen Buerger, and Karl Iagnemma, eds. The DARPA robotics challenge finals : humanoid robots to the rescue. Vol. 121. Springer, 2018.
- 15) Moseley, Philippe. "EU support for innovation and market uptake in smart buildings under the horizon 2020 framework programme." Buildings 7.4 (2017) : 105.
- 16) 頼寧.「GLOBAL INNOVATION REPORT 進化し続ける「世界の工場」：「中国製造 2025」に見る製造強国戦略。」日立評論 99.6 (2017) : 603-609.
- 17) 細田耕「ソフトロボティクスとは何か?」知能と情報 29.5 (2017) : 159-159.
- 18) Wrede, Sebastian, et al. "The Cognitive Service Robotics Apartment." KI-Künstliche Intelligenz 31.3 (2017) : 299-304.
- 19) Ricardez, Gustavo Alfonso Garcia, Lotfi El Hafi, and Felix von Drigalski. "Standing on giant's shoulders : Newcomer's experience from the Amazon Robotics Challenge 2017." Advances on Robotic Item Picking. Springer, Cham, 2020. 87-100.
- 20) Okada, Hiroyuki, Tetsunari Inamura, and Kazuyoshi Wada. "What competitions were conducted in the service categories of the World Robot Summit?." Advanced Robotics 33.17 (2019) : 900-910.
- 21) Campeau-Lecours, Alexandre, et al. "Kinova modular robot arms for service robotics applications." Rapid Automation : Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. IGI Global, 2019. 693-719.
- 22) 中坊嘉宏.「サービスロボットの運用における安全責任分担。」ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2018. 一般社団法人 日本機械学会, 2018.

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

2.2.9 産業用ロボット

（1）研究開発領域の定義：

産業用ロボットは、製造業で利用されるロボットに関する研究開発領域である。利用分野として、従来からロボットが導入されている重工業、自動車産業、電気電子産業に限定せず、食品産業など新しいロボット利用分野も対象とする。ものづくりを想定しているので、最終的には実用化、事業化に結び付く要素技術開発とシステム技術開発が目的となる。

（2）キーワード：

製造業、ものづくり、ロボットアーム、エンドエフェクター、移動マニピュレーター、協働ロボット、柔軟ハンド、機械学習、センサーフィードバック制御、ジャミンググリッパー

（3）研究開発領域の概要：

〔本領域の意義〕

産業用ロボットは、重工業、自動車産業、電子機器産業などで数多く利用され、日本製の産業用ロボットの海外輸出も順調である。現状の産業用ロボットの利用環境は、教示再生方式を基盤としており、環境変動に対する適応能力は極めて低い。この問題を解決するために、カメラをはじめとする種々のセンサーを搭載する研究開発方向にある。また、柔らかい物体、形状にばらつきがある物体等の把持、操作を可能とするために、ロボット関節やハンドを柔軟にした柔らかいロボット実現に向けて世界的に研究開発が推進されている。現在は、60年以上継続してきた従来型のロボットアームの機構と制御方式から、新しい方式へのロボット技術の転換期と位置づけられ、本領域の研究開発を行う意義は大きい。

〔研究開発の動向〕

産業用ロボットの利用拡大

国際ロボット連盟（IFR）2020年の報告書¹⁾によれば、日本の工場で稼働している産業用ロボットの台数は、過去最高の約35万5000台となっている。産業用ロボットの利用は増加している。ロボットの導入台数が最も多い分野は電気・電子産業で、日本全体の34%を占める。海外においても産業用ロボットの導入は多く、中国では約78万台、インドは約26万台となっている。

新しい分野への導入

先進諸国では、物流、食品、外食、サービスなどの分野では人手不足が深刻化しており、従来にも増してロボットの利用拡大への期待が高まっている。産業用ロボットの利用分野拡大の例として、食品産業への導入が挙げられる。従来型の産業用ロボットが扱う規格化された部品とは異なり、食品は柔らかく、形、大きさ、硬さなどにばらつきがあり、正確にハンドリングすることは難しい。このため、後述するmGrip等の柔軟性を有するロボットハンドが導入されている。また、食品工場の特長である生産ラインの頻繁な変更への対応、人との協働作業を可能とする安全性の確保、オイルや機械の破片等の混入対策、食品製造に適合した衛生対策等が課題として挙げられる。

これらの課題や費用対効果の問題等があり、食品産業へのロボット導入は必ずしも大きな動きにはなっていない。

移動マニピュレーター

2019年の国際ロボット展では、自走可能な移動ロボットにロボットアームを搭載したモバイルマニピュレーターや、台車上にロボットアームを搭載し移動可能としたシステムが、多数の国内産業用ロボットメーカーから発表された。これらは、多品種少量生産に伴う頻繁な生産ラインの組み替えや、大型機械や船舶などの構造体の製造への対応を可能とする近未来の製造システムとして注目されている。従来の産業用ロボットは、床に固定して利用するため設置場所を容易に変更できないが、一旦設置すればエンコーダなどのロボットの内部センサーによるフィードバック制御によって、高い手先位置精度が確保できた。一方、移動ロボットや非固定のロボットアームでは、このような制御ができないため、カメラなどの外界センサーによる高精度な制御の実現が課題として挙げられる。

協働ロボット

デンマーク企業の Universal Robots 等による協働ロボットが日本国内でも販売台数を増やしている。協働ロボットは、人と一緒に作業することを前提とした産業用ロボットである。従来の産業用ロボットは柵で囲われて人の作業環境とは分離した環境で作業していたが、協働ロボットは、出力や速度の制限、近接センサーや力覚センサーによる自動停止機能、柔軟材料による衝突力の低減等の保護手段を備えることで、人と作業環境を共有した協働作業を可能としている。従来の産業用ロボットに比して速度、精度では劣るが、新しい利用分野では、必ずしも高速性と高精度が求められない場合も多く、協働ロボットの利用が拡大していくと考えられる。

柔軟性を有するロボット

従来の産業用ロボットは、金属材料による高剛性の構造を有し、高速回転する電動モータの回転数を高減速比ギアなどで下げ高トルク化することで、高精度の作業を実現している。このため、ロボットの関節や手先は硬く、柔らかい物体の把持といった柔軟な動作は苦手としている。一方、産業用ロボットの利用拡大に向けて、様々な物体の把持・操作を容易に実現できる柔軟性がロボットに対して求められている。柔軟性を生み出す方法としてセンサーフィードバックによる制御の柔軟化、関節部やエンドエフェクター部への柔軟要素の付加による機構の柔軟化、ロボットを軽量化し低減速比ギアを用いることによる駆動の柔軟化などが挙げられる。

AI／クラウド利用のロボット

IoT技術を活用した産業用ロボットの保守点検が実施されている。例えば、ファナックのゼロダウンタイム機能²⁾では、機構部の状態、プロセスの状態、システムの状態、保守時期の情報をクラウド上で集中管理することにより、利用中のロボット部品の予防保守を実施し、故障対応による製造ラインのダウンタイムを無くすことを実現している。また、AIの利用事例として、物体のハンドリングの学習が挙げられる。クラウド上に蓄積した物体とハンドの特性に関するビッグデータを教師データとして機械学習を行うことで様々な物体のハンドリングを可能としている。このような研究は、Google³⁾、Right Hand Robotics⁴⁾、Franka Emika⁵⁾などが発表している。GoogleとRight Hand Roboticsでは日常品などのハンドリング、Franka Emikaでは鍵などの金属部品の挿入作業を対象としている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

センサーフィードバック制御による関節の柔軟化

Franka Emikaの多関節ロボット Panda は、可搬重量約 3kg の 7 自由度小型ロボットアームである。トルクセンサーを用いたセンサーフィードバック制御によって関節の柔軟化を高精度で達成している。トルクセンサーフィードバック制御は、ドイツ航空宇宙センター（DLR）により長年蓄積された技術をもとに KUKA が産業用ロボットに導入した技術であるが、当初の価格は非常に高額（1000 万円以上）であった。Franka Emika は同様の技術を低価格（公表価格 2300 ユーロ）にて市販ロボットに導入している。

3D プリンタによる軽量ロボットアーム

Blue Robotics 社は、3D プリンタにより加工された樹脂製の軽量ロボットアームにより、モータギアの低減速比を可能とし、関節の柔軟化を実現している⁶⁾。低減速比のために手先精度の分解能は劣化するが、高減速比のギアのように摩擦は大きくないので、出力リンクに外力が働くとモータ軸がバックドライブし、幾何情報誤差が存在する場合でも、対象物との間に大きな力の発生を回避できる。また、3D プリンタの利用により低価格を実現し、アーム 1 台あたり 5000 ドルにて販売予定としている。高速性、高精度性が要求されず、価格がロボット導入の障壁となっている分野にとっては利用価値が高い。

モータユニットを組み合わせによるロボットアーム

中国企業 innfos のモータユニット SCA（Smart Compliant Actuator）⁷⁾ は、小さな円筒のなかにモータ、ドライバー、エンコーダ、減速機が統合されており、このモータユニットを複数組み合わせることで、小型 4 軸／6 軸ロボットアーム「GLUON」や 4 足歩行ロボットを構築できる。6 軸ロボットアームの場合、重量 2.5kg で手先可搬重量は 500g となっている。また、低減速比のギアと高トルクモーターにより関節に柔軟性を与えている。同様のモータユニットは中国企業 Steadywin も製作／販売している。いずれも構成部品をユニット化することにより、ロボットの低価格化を実現している。

空気圧駆動の柔軟ハンド

空気圧によって変形する高分子材料の袋を利用した柔軟ハンドは、学会等で数多く発表されているが、耐久性等の問題から実際に販売されているものは少ない。米国企業 Soft Robotics の空気圧駆動の柔軟ハンド mGrip⁸⁾ は、柔軟なポリマー材料により袋形状の指を構成し、袋内部の空気圧を増減させることによる変形を利用したロボットハンドである。多様な形状の対象物体を把持可能であり、食品工場の製造ライン等で利用されている。

吸着パッドを用いた把持

吸着パッドは、対象物面とパッドの間で発生する負圧を利用した把持方式であり、多くの対象物に利用できる。ポリマー製のパッド部分はベローズ状で柔軟であるため、対象物との接触時に衝撃を和らげる効果がある。しかし、吸着パッドは多くの場合 1 個のみ利用され、重心位置が予測と異なる場合には、対象物が傾斜して吸着できない状況が発生する。さらに、対象物の質量の増加にともなってパッドの弾性値と対象物の質量で決まる固有振動数が低くなり、運動時に振動現象が発生し易い。これも対象物落下の原因となる。Right Hand Robotics のエンドエフェクターは、最初に吸着パッドを伸縮させて物体を剛体ハンド内部に引き込

でから、ハンドで把持することで確実な把持を実現している⁴⁾。剛体ハンド部の一部に柔軟材料を用いることで、把持の安定性に寄与している。また、機械学習により様々な物体の把持を可能としている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

中国

中国は、ロボット応用大国からイノベーション大国への転換を図っており、国家政策「中国製造2025」(2015)において、重大推進10大産業の1つとして「高性能NC工作機械とロボット」を挙げ、国産産業用ロボットの国内市場シェア70%以上、減速機など中核部品の国産化率80%以上、世界トップ5社に1-2社をランクインさせる、共働ロボットなど次世代製品開発と実用化、等の目標を掲げている。

北京で開催された「2017世界ロボット大会」において「ロボット産業イノベーション発展路線図」が発表され、2025年までに北京にグローバル新興ロボット産業イノベーションセンターの構築を目指すという戦略を示した。戦略目標として、「2025年までに北京ロボット産業の収入約600億元を達成し、世界で先頭に立つロボット技術協同イノベーション体系を形成する。」「人工知能等の分野で世界をリードし、操作システム及びソフトウェアは国際のトップレベルを達成し、基本的に世界をリードするロボットイノベーション応用基地の建設を完成する。」としている。

日本

NEDO 革新的ロボット研究開発基盤構築事業

多品種少量生産現場をはじめとするロボット導入があまり進んでいない領域にも対応可能な産業用ロボットの実現に向け、産業用ロボットにおいて重要な要素技術の開発を推進している。要素技術として、ロボット動作計画の簡便化に資するデータベース構築等を目指した「汎用動作計画技術」、各種センシング技術を搭載したエンドエフェクター等の開発を目指した「ハンドリング関連技術」、次世代の通信技術を活用し、視覚、力覚、音声等を用いた「遠隔制御技術」、駆動部や構造部の軽量化の実現を目指した「ロボット新素材技術」の4つの研究開発項目を掲げている。事業期間は2020年度から24年度までの5年間である。

(5) 科学技術的課題

剛柔可変化

ロボット関節やエンドエフェクターを柔軟にすることにより、機械的接触をより容易にし厳密なキャリブレーションを不要とする柔軟ハンド等が実用化されている。一方、柔軟化によって、正確な操作、高速応答、大きな把持力の発生等が困難となる。産業用ロボットのさらなる汎用化に向けて、作業に応じて剛柔を可変とするロボットが求められる。エンドエフェクターの剛柔可変化の例として、ジャミンググリッパーが挙げられる。これは、柔軟で気密性を有する袋に粉体を詰めたロボットハンドである。通常このハンドは柔軟であり、把持する物体にあわせて粉体が流動し自由に形状を変えることが出来るが、内部の空気を抜くことでハンドの形状が固定され、複雑な形状の物体や脆弱な物体を安定に把持できる。Empire Robotics Inc.よりVERSABALLとして一時市販化された。ジャミンググリッパーの課題は耐久性が低いことである。また、高温の物体や尖った物体の把持も課題である。今後、ジャミンググリッパーの実用化に向けた膜材料や粉粒体材料の改良に加え、新たな剛柔可変機構の検討も望まれる。

把持・操作の汎用化

製造業の自動化における残された最後の分野として、ロボットハンドによる汎用的な操作（general manipulation）が挙げられる⁹⁾。また、ロボット分野の技術ロードマップ“Roadmap for US Robotics：From Internet to Robotics”（2016）では、産業用ロボットにおける将来の技術イメージとして、人間の手に近い触覚アレイと卓越した動的パフォーマンスを持つ高複雑度の手により、手全体を使って物体を把持・操作でき、人間の作業者が使用する道具を器用に操作できるロボットハンドを挙げている。この実現に向けた要素技術として、Robotic Materials Inc.が開発したロボットハンドEye-in-handは、視覚センサーを用いた近接覚により操作力を最適化し、硬いグリップパーでも果物などの柔らかい物体も潰さずに把持・操作することが可能としている。

軽量化・低価格化

従来型のロボットは、可搬重量に対する自重が大きく取り扱いが困難であったが、CFRPなどの新しい材料利用によるロボットの軽量化が、安全性の向上や利用容易化に繋がると期待される。これまでは、価格の増大に見合うだけの軽量化のメリットが見出されず、自動車等に比べるとロボットの高分子材料などの軽量材料の利用割合は小さかったが、3Dプリンタ普及による軽量材料加工の容易化、低価格化により、この問題解決に資すると期待されている。また、ロボットシステムのプラットフォーム化等による低価格化により、従来はコストの問題からロボットが導入できなかった産業現場にもロボットが普及し、労働生産性の向上が期待される。

（6）その他の課題

ものづくり分野では、既存技術の延長型の技術と新しい技術の2つの技術開発が必要となる。特に既存技術では解決が困難な課題に対しては、基礎技術まで立ち返った上での新しい技術開発が求められる。このためには、大学における基礎研究を活用しつつ、産学が連携して研究を推進する体制の整備が重要となる。また、材料、デバイス、システム、AIなどとの分野横断的な研究も有用ではあるが、やみくもに異分野との連携を推進するのではなく、ものづくり分野における潜在的課題からのニーズを分析し、その根幹の問題を明確にしたうえで、解決のために必要となる基礎研究を特定することが必要である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	学会等での研究発表は多く、一定の研究者人口を有している。
	応用研究・開発	○	↘	ものづくり分野のロボットとして産業用ロボットの需要は拡大傾向ではあるものの、新しいロボットの事業展開は進んでいない。
米国	基礎研究	○	→	AI、ロボットの研究活動は活発であり、海外からも研究者が集まっている。
	応用研究・開発	◎	→	Right hand robotics、Blue roboticsなどベンチャー企業が急速に立ち上がり、事業化の機会が多い状況を生み出している。
欧州	基礎研究	○	→	EU Horizon2020において基礎研究としての成果が出ている。
	応用研究・開発	○	→	ドイツを中心に Franka Emika など次世代の産業用ロボットの事業化が始まっている。

中国	基礎研究	○	↗	AIに加えて、中国の強みの物づくり分野で、モータやギアなどロボットの要素技術開発が急速に進展している。
	応用研究・開発	◎	↗	先端技術を習得した人材が、高仙機器人、UBTECH、Syrius、GEEK、Mech Mindなど多くのベンチャー企業を設立して、事業化を開始し、人件費の高い日本を市場と捉えている。
韓国	基礎研究	○	→	ハードとソフトの両面で、基礎研究成果が出ている。
	応用研究・開発	△	→	斗山ロボティクスが全軸トルクセンサー付きロボットを2019年に発表し、官民協力してロボットのベンチャー企業育成を図っている。
その他の国・地域 (台湾)	基礎研究	○	→	研究者人口は多くないが、基礎的な研究成果が出始めている。
	応用研究・開発	○	↗	HIWINは駆動部品や制御技術を充実させて、主要な産業用ロボット機種をすべて製造販売している。TechMan Robotの人協働ロボットが日本でも販売を開始されている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・ ロボット基盤技術（ナノテク・材料分野 2.3.5）

参考文献

- 1) 国際ロボット連盟（IFR）報告書”World Robotics 2020 Industrial Robots”
- 2) ZDT（ゼロダウンタイム），ファナック株式会社
<https://www.fanuc.co.jp/ja/product/robot/function/zdt.html>
- 3) “Deep Learning for Robots：Learning from Large-Scale Interaction”，Google AI Blog, 2016
<https://ai.googleblog.com/2016/03/deep-learning-for-robots-learning-from.html>
- 4) RightHand Robotics, Inc.
<https://www.righthandrobotics.com/>
- 5) Franka Emika GmbH
<https://www.franka.de/>
- 6) “Meet Blue, the low-cost, human-friendly robot designed for AI”，Berkeley News, 2016
<https://news.berkeley.edu/2019/04/09/meet-blue-the-low-cost-human-friendly-robot-designed-for-ai/>
- 7) INNFOSS (Beijing) Technologies Co., Ltd
<https://innfos.com/>

8) The mGrip system

<https://www.softroboticsinc.com/products/mgrip/>

9) Nikolaus Correll, “Robots Getting a Grip on General Manipulation”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems (IROS2020)

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス

2.2.10 農林水産ロボット

(1) 研究開発領域の定義：

我が国の農林水産業は、就業者の減少と高齢化により労働力不足が深刻である¹⁾。多くの作業が炎天下や急斜面等の過酷な労働環境であるため、ロボットを活用した省力化、省人化技術のニーズが高まっている。他方、世界では今後人口の増加とともに地球温暖化、干ばつ、砂漠化など地球環境の過酷化が進行する中で、農林水産業において人に代わるロボットが必要不可欠との認識である。本研究開発領域では農林水産ロボット、特に最も技術開発が進んでいる農業を中心にその最新の技術動向とともに今後の発展方向について述べる。

(2) キーワード

GNSS（Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星システム）、リモートセンシング、自動作業機械、ドローン、アシストスーツ、スマート農業、スマート水産業、スマート林業

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

2015年2月10日に日本経済再生本部が決定した「ロボット新戦略」では農林水産分野のロボット導入について「ロボット技術を積極的に活用することで作業を機械化・自動化し、労働力を補うとともに、センシング技術等を活用した省力・高品質生産により、大幅な生産性向上を図ることを目指す。また、多くの作業が炎天下や急斜面等の厳しい労働環境で行われている中、依然として人手に頼っている分野において重労働を軽労化するとともに、ICTと一体的にロボット技術を活用することでノウハウが必要とされる作業を経験が少ない者でも可能にし、高齢者がいきいきと農業を継続するとともに、若者・女性等多様な人材の農林水産業への就業を促す環境を整える」ことを基本的考え方としている。重点的に取り組むべき分野としては以下の3技術が挙げられている。

- ① GNSS自動走行システム等を活用した作業の自動化
- ② 人手に頼っている重労働の機械化・自動化
- ③ ロボットと高度なセンシング技術の連動による省力・高品質生産

「① GNSS自動走行システム等を活用した作業の自動化」はGNSS（Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星システム）等による精密な測位データを用いて、作業の自動化を目指す技術である。農業においては、トラクタ等農業機械の夜間・複数台同時走行・自動走行を目指す。林業においては、自動伐倒作業車、自動集材機、運材用自動走行フォワード等の実現を目指す。水産業においては、将来のロボット漁船のための自動操縦システムの開発を目指す。

「② 人手に頼っている重労働の機械化・自動化」は、アシストスーツによる作業の軽労化、ロボット等による作業の自動化を目指す技術である。農業においては、アシストスーツは重量野菜の収穫やコンテナ運搬など足腰への負担強度の大きい作業を楽にできる技術として期待される。また、除草ロボット、畜舎洗浄ロボットは、きつい作業、危険な作業、繰り返し作業からの解放を可能とする。林業においては、伐採・搬出や造林などの作業を自動化することにより、厳しい地形条件等に起因して3K（きつい・危険・高コスト）であるとされてきた労働環境の改善と生産性の向上を可能とする。水産業においては、船上作業や養殖施設における資材積み下ろし作業の軽労化を可能とする。

「③ ロボットと高度なセンシング技術の連動による省力・高品質生産」はセンシング技術や過去のデータに基づいて、きめ細やかな作業まで自動化し、高い生産性を目指す技術である。農業においては、特に高度施設園芸が該当する。地域の自然環境を把握したうえでハウス環境を制御することが要求される施設園芸は、いまだ高い技術を有した人のオペレーションが必要であり、工業化・産業化に発展させるうえで大きな障害となる。すなわち、栽培ノウハウの可視化とインテリジェント化は次世代の施設園芸分野において重要な課題である。林業では航空機レーザー計測による資源情報の高度化・デジタル化を進めて、需要に応じた精緻な生産計画を立案し、その計画に基づいた自動作業を実施することが将来像である。水産業においては、沿岸漁業を対象に7日先までの漁場を予測する精密な気象予報に基づき、経験の少ない漁業者でも漁場へ直行できるような自動操船技術が注目されている。

[研究開発の動向]

日本では農林水産業のロボット化は農業が最も進んでおり、林業、水産業のロボット化の取り組みはまだ限定的である。ここでは農業を中心に研究開発動向を論じることとする。

農業

我が国では2018年に世界に先立ち無人で作業するロボット農機を社会実装し、無人トラクタや無人田植え機が市販されている。さらに、畦畔草刈りロボット、茶園管理ロボットなど様々な農業ロボットが実用化に向けて開発されている。これらのロボット農機は障害物検出センサーを装備し、安全に作業することができるが、農林水産省が2017年3月に制定した「農業機械の自動走行に関する安全性確保ガイドライン」により、ロボット農機の傍で作業を目視監視することが求められている²⁾。現在、この目視監視の次の技術である遠隔監視型のロボット農機を産学官で開発中である。遠隔監視型のロボット農機は、管制室にいる1人の監視者が、地域内に分散した圃場で同時に作業する複数のロボットを管理することができる。さらにこのロボット農機は自律的な圃場間移動も可能であり、作業能率が格段に向上すると期待される。

日本経済再生本部の「日本再興戦略 2016」において、この圃場間移動・遠隔監視型のロボット農機を2020年の実現目標として掲げている。

農業施設で働くロボットの研究開発も進んでいる³⁾。酪農分野ではすでに搾乳ロボット、哺乳ロボット、自動給餌装置などが実用化され、省力化に大きな貢献をしているが、今後は省力化にとどまらず、発情発見装置や分娩監視装置などのセンシング技術や画像処理技術を用いた検査データの活用による個体管理の充実を図り、酪農自体のスマート化の方向に進むと思われる。

イチゴ、トマト、ピーマン、キュウリ、アスパラガスなどの果菜類の施設園芸では、育苗、管理、収穫、調製、出荷など、ほとんどの作業がいまだ手作業であり、労働力不足は深刻である。たとえばイチゴ生産における育苗、定植、管理、収穫、調製、出荷などの合計労働時間は10a当たり2,019時間にもなり、稲作労働時間の25時間/10aの80倍といったデータもある⁴⁾。このような状況のもと、果菜類の施設内収穫ロボットの研究開発が進められている。技術的課題として「センシング技術」と「ハンドリング技術」が挙げられる。センシング技術においては、熟した果実を認識し、個体レベルで位置を計測し、収穫の適否の判断を行うことが要求される。AIによる画像認識技術を利用した研究も行われているが、いまだ開発途上にある。ハンドリング技術として、柔らかく、形、大きさ、硬さなどにばらつきがある果実を傷つけないよう正確にハンドリングすることが要求される⁵⁾。ソフトグリッパーなどが活用されているが、人に比べてロボットによる収穫速度は遅い点が課題である。このように実用化に向け解決すべき技術的課題は多いが高付加価値・高価な果菜

類の大規模生産を可能とし、さらにはアジア・オセアニア地域をターゲットとしたイチゴなど果物の輸出に繋がることが期待されるなど、果菜類の施設園芸用のロボットは魅力的な技術である。

レタスを代表とする葉菜類については、育苗から収穫、出荷までを自動化した清浄レタスの高度施設園芸（植物工場）が実用化されている。一方、労働負荷が高い葉菜類の露地栽培については、高齢化の観点からロボット化のニーズが大きい、いまだ開発途上にあり、今後の研究開発に期待がかかる。

林業

日本の林業は、厳しい地形条件等に起因してきつい・危険・高コストの3K産業である。このような労働環境の改善と生産性の向上のために伐採・搬出や造林などの作業を自動化する機械の開発が必要である。とりわけ、林業における死亡災害の7割を占める伐倒作業の自動化は急務である。このような背景のもと、わが国では林業技術のロボット化に関する研究開発が林野庁を中心に進められている⁶⁾。

伐採作業のロボット化の事例として、遠隔操作による樹木の把持・伐採・集材システムの開発が挙げられる。ラジコン式伐倒作業車「ラプトル」は、傾斜30°までの森林内を走行可能な作業車を無線で操作し、作業車からのリアルタイムカメラ画像を見ながら直径40cmまでの樹木の把持・伐採・集材の遠隔作業が可能である。集材作業については、架線集材装置にカメラを搭載し、安全な場所から映像を見て、荷掛け・荷下ろしの遠隔操作が可能なシステムが国内で開発中である。運材作業については、誘導電線上を無人走行するフォワードが国内で開発中である。このフォワードは積込み以外の運材、荷下ろしは無人運転が可能である。無人運転の教示には、人が一度運転し、速度等をフォワードに記憶・再現させるティーチング・プレイバック方式が採用されている。さらに、造林作業の労働負担を軽減する林業用アシストスーツが開発されている。アシストスーツを用いることで急傾斜・不整地での移動、造林作業を17%程度軽労化できる⁷⁾。

水産業

水産分野でもロボット技術の導入が始まっており、操業の効率化や漁獲物の高付加価値化により、生産性を向上させるとともに、担い手確保にも貢献することが期待されている⁸⁾。漁業においても新規就業者に技術承継していくために先端技術の導入は喫緊の課題となっている。漁業従事者が減少する中で多くの乗組員を必要とする定置網漁業では、自動化システムによる省人化に期待されている。たとえば自動網掃除ロボットの導入により作業時間の約80%削減を達成した。また、養殖業では自動網掃除ロボットに加え、スマートフォンで養殖魚の摂餌状況を確認しながら、遠隔給餌が可能な自動給餌装置も15%の労働力削減を実現した。水産加工分野ではホタテの生剥きに係る全作業工程の自動化を可能にしたホタテ貝自動生剥きロボットがあり、ロボット1台で15人程度の人員削減効果がある。また、アシストスーツは、腰に大きな負担のかかる漁労作業で省力効果を発揮し⁹⁾、沿岸漁業における船上作業、養殖においては海中に沈められたコンテナの引き上げ作業、かがんだ姿勢で作業するため腰にかかる負担が大きいコンブ干しなどの作業に使用されている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

マルチロボットによる協調作業

北海道大学 野口 伸らは、群管理型の小型ロボットとしてマルチロボットを開発した¹⁰⁾。マルチロボットは、協調作業を行う3台以上のロボット群と人間が搭乗する自動運転の監視用ロボットから構成され、従来は人間が操作するトラクタで実施していた農地の耕運、施肥、播種、収穫といった作業をロボット群の協調作業

により実施する。人間は自動運転のロボットに搭乗し、ロボット群の監視にあたる¹¹⁾。このシステムの場合、複数のロボットを同時に使用するので作業能率は格段に向上する。また、ロボット群に対する運転操作を必要としないため、高齢者や農機操縦に慣れていない初心者もオペレータの役割を果たすことができる。また、人間が搭乗する監視用ロボットは自動走行なので夜間でも安全に作業ができる。マルチロボットの利点として、は農家の規模拡大をする場合、トラクタなど農機の大型化による対応ではなく、ロボット群の台数を増して対応することになるため、既存のロボットを継続使用でき、投資額を抑制できる点が挙げられる。さらに、個々の圃場の大きさや作業の進捗に合わせてロボット群の台数を変更可能であり、ロボットの貸し借りによる柔軟な作業体系を組むことができる点、24時間体制で作業ができる点、複数の小區画圃場における同時作業を1人の監視者により実施できる点も利点である。このマルチロボットが、日本そして世界の農業を大きく変える可能性がある。

AIとの連携によるスマートロボット

農業ロボットの将来像として、ロボットの知能化を進め、農家が代々受け継いできた篤農技術をロボットに実装することが挙げられる¹²⁾。このようなスマートロボットの具体例として、窒素ストレス検出センサーを用い、水稻、麦類に最適な追肥作業を行うロボットが挙げられる¹³⁾。

近年、5GやAIを活用したスマート農業研究も進められている¹⁴⁾。例えば、農地の高精細画像をAIによって解析することで作物生育の良否判定を行い、この結果に基づいた精密施肥や病虫害の超早期検出・対処ができるロボットが例として挙げられる¹⁵⁾。このシステムでは、5Gの大容量通信を利用してセンサーデータを伝送し、エッジとクラウドの双方が連携してデータの分析を行う。このように、センシングやAIによる意思決定は必ずしもロボット農機と一体である必要はない。たとえば目の機能を担うドローンが上空から情報を効率的に収集し、その情報をクラウドサーバーにあるAIで解析し、その最終結果だけをロボット農機に伝送して精密な作業を行うことが可能である。

また、作物と雑草を識別して雑草だけをスポット防除するロボットの研究も行われている¹⁶⁾。実現に向けた課題として、作物・雑草の識別を行うためのAIと連携したセンサーの開発、学習データの効率的な収集法の確立が挙げられる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

スマート農業の実現に向けた産官学連携プロジェクト（日本）

日本の農業は長期にわたる就農人口の減少と高齢化、後継者不足による「労働力の不足」に直面しており、産業として維持・拡大するためには、この社会課題を早期に克服する必要がある。そのため、これらの課題解決に向けた取り組みが進められている。NTTグループ（NTT、NTT東日本、NTTドコモ）と北海道大学は、「最先端の農業ロボット技術と情報通信技術の活用による世界トップレベルのスマート農業および持続可能なスマートアグリシティの実現に向けた産官学連携協定」により岩見沢市をフィールドとした近未来スマート農業技術の実証に取り組み、農機のロボット化やベテラン農家の匠の技をデータ化・活用するデータ駆動型農業の実現によるイノベーション創出に取り組んでいる¹⁷⁾。

ロボット農機については現在、世界に先駆けた複数台の協調作業システムや遠隔監視による無人状態での完全自動走行の実証フェーズにあり、その実現に向けては、正確な測位情報が必要なことに加え、ロボット農機に搭載されたカメラからの映像情報等を、低遅延かつ信頼性を担保しながら監視拠点まで伝送することも必要である。また将来はロボット農機も動くIoT機器として位置づけられる。ロボット農機に搭載した複数

台のカメラやセンサーから、作物の生育や土壌、病害虫の発生、農作業の状況、農機の空き状況等、さまざまなデータを収集し、さらに人工衛星からのリモートセンシングデータ等の外部からの情報も組合せ、AIにより処理・分析することにより、ロボット農機の行動計画や、農機シェアリング計画等の農業経営意思決定支援を行う仕組みが期待されている。岩見沢市は内閣府の「近未来技術等社会実装事業」において「世界トップレベルの「スマート一次産業」の実現に向けた実証フィールド形成による地域創生」が認定される等、日本におけるスマート農業のフロントランナーとして取り組んでいる。これらの技術を活用し、ロボット農機システムを含む農業分野をユースケースの1つとして位置づけ、新たな価値創出をめざしている。

完全無人農場プロジェクト「ハンズフリー・ヘクタールプロジェクト」(英国)

2017年に英国ハーパーアダムス大学において完全無人農場プロジェクト「ハンズフリー・ヘクタールプロジェクト」が行われた¹⁸⁾。耕うん、播種、防除そして最後の収穫までの全作業を無人で行う実証試験である。100m×100mの圃場内に秋播き小麦を栽培した。枕地部分と移動経路部分を確保して110×120mのエリアが農場で、そのエリアには人が立ち入らないことを前提とした。実証試験ではRTK-GNSSを航法センサーとした小型無人トラクタ、無人コンバイン、土壌サンプリングロボット、UAVが供試された。無人トラクタにより、10月の耕うん作業、11月の播種作業、翌3、4月の追肥作業、5月の防除作業が行われ、無人コンバインにより、8月の収穫作業が行われた。その間、UAVを使用した作物生育状況のマッピングや夜間作業のモニタリングも行っている。この実証プロジェクトの特徴的な点として、供試したトラクタが英国の農作業では使われることのない小型の日本製トラクタを改造したものであったことが挙げられる。これは安全性における小型機器のメリットと、オペレータが不要であるというロボットのメリットを活かしつつ、機械の大型化によらず台数の調整で規模拡大に対応するという戦略に基づいている。なお、このプロジェクトは2020年現在も継続しており、面積を拡大して35haの実証を行っている¹⁹⁾。

GRAPEプロジェクト「ブドウ園管理ロボット」(イタリア)

GRAPEプロジェクトはEUの「農業・食品分野のロボティクス」に関するプロジェクトであり、Eurecat社、ミラノ工科大学、Vitirover社によって構成されたコンソーシアムにて実施されている²⁰⁾。このプロジェクトではブドウ園を対象に自律走行、ブドウ生育モニター、作業を行うロボットアームを備えた知能ロボットの開発を目指している。ロボットは、ブドウ園の3次元モデルを生成するために三次元LiDARを装備し、ローカルセンサーとGNSSとの統合に基づいた測位を行っている。これによりブドウ園の変化にとんだ地形における自律走行を可能としている。

精密農業の実践は、農薬の過剰使用による農業の環境への悪影響を大幅に軽減すると同時に、世界人口の増加による食料需要増に対して必要十分な食料を生産するための効果的な方法である。高度なセンシング機能の導入により、植物個体レベルでのモニターを可能にし、病害虫の被害を未然に防ぐことができる。さらに、農薬を必要最小限の量で使用し、可能な限り環境影響の少ない技術（たとえば、生物的防除）に変更する。ブドウ園の管理作業は剪定、摘葉、草刈、農薬散布、灌水など多くの作業を含むが、GRAPEプロジェクトでは、これらブドウ園の精密な管理作業をロボットによって行わせることを目指している。特に、このプロジェクトは、ロボット車両を使用してブドウ園の自動監視とブドウ栽培に必要な資材施用、たとえばフェロモンディスペンサーのブドウ樹木への自動装着も行う。このフェロモンディスペンサーによって従来の化学防除に比べて環境への影響を大幅に軽減する。

(5) 科学技術的課題

群管理型の小型ロボットが今後の研究開発課題として挙げられる。小型ロボットは、日本の小規模農地に有効であることは言うまでもないが、大規模農業を実践している欧米もこの技術に注目している^{21), 22)}。トラクタの大型化により畑の土壌踏圧が増大し、作物の根系成長が阻害され作物生育に悪影響を及ぼしている。また農作業に使用されるトラクタの燃料など投入エネルギーの90%がこの土壌踏圧によって形成された硬盤層の破碎作業に費やされている現実がある。さらにトラクタの大型化に伴う車幅の増大も限界に達し、国によっては、法規制によって道路走行できない事例も存在する。

従来の農業は畑一面を均一に処理する「面」の作業であるが、この小型ロボットは位置情報をRTK-GNSSで正確に把握することにより、耕うん、播種、生育観察、中耕除草、収穫について超精密な「点」の作業が可能となる。作物をグリッド状に播種・栽培することで畝間除草および株間除草が極めて容易になる。雑草にピンポイントに除草剤を施用することで慣行の0.1%まで除草剤使用量を減らせる。作物の栽培位置を正確に把握されているので、作物の根の成長域だけに中耕作業を行うことが可能である。そして、収穫作業も成熟した商品価値のあるものだけ選択して収穫することが可能である。これら技術はいまだ基礎研究の段階であるが欧米の農業ロボット化の一つの方向である²³⁾。

さらに水田管理用のロボットボート、農薬散布に加え生育情報も収集する自律型ドローンの研究も国際的な研究課題になっている。

果樹生産のロボット化も欧州を中心に進められているが、収穫作業や剪定作業はいまだ実用レベルに達していない。特に熟練技術を要する剪定作業の自動化は、様々な取り組みがなされているが課題が多い²⁴⁾。エクスパートの剪定法をAIによって解析・モデル化することが要求されるが、果樹の仕立て方も多様であることから問題は複雑である。今後、果樹用ロボットの発展には、ロボット技術にとどまらず、ロボットに適した果樹の仕立て方、栽培方法の考案と標準化が必要になるであろう。

(6) その他の課題

ロボットの開発・普及には技術に加え、制度の整備も必要となる。特に安全性の確保が、社会実装に向けた最も重要な課題である。実際に草刈ロボット、茶園管理ロボットなど様々なロボット農機の実用化と並行して、前述の「農業機械の自動走行に関する安全性確保ガイドライン」はほぼ毎年改正されている。また、2019年10月に国土交通省は農用トラクタに関わる道路運送車両法の運用を見直し、保安基準に緩和措置が盛り込まれることとなった。これにより、灯火器類、作業機トラクタ速度、運転免許、チェーンなどが一定の条件をクリアした場合に限り、作業機を装着・けん引した状態のトラクタの公道走行が可能となった。これは圃場間移動・遠隔監視型のロボット農機の現場実装には不可欠な措置である。さらに警察庁は農道管理者が一般交通の用に供しない農道と判断した場合、当該農道は道路交通法の適用を受けず、農道管理者が必要な措置を行うという整理をした。これらは圃場間移動・遠隔監視型のロボット農機の社会実装に対して大きな前進と言える。

農業ロボットの導入は人件費節減に有効であることは自明であるが、同時に雇用問題に発展する可能性もある。欧州では農業のロボット化が移民をはじめ人の仕事を奪っていると非難する意見もあり、ロボットの社会的受容性の醸成も今後の課題である。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	大学はじめ公的研究機関が内閣府、文科省、農林水産省、経済産業省などの予算で研究開発を行っている。特にドローン利用、AI利用研究が盛んである。
	応用研究・開発	◎	↗	内閣府SIP「次世代農林水産業創造技術」など出口が要求される国家プロジェクトが多いので、産学官による応用研究の成果は大きい。特にロボット農機などは世界に先駆けて実用化した。
米国	基礎研究	◎	→	NSF、州政府の予算で大学を中心に基礎研究が行われている。おもに農作物の品質センサー、AIによる病害虫の早期検出技術などが多い。フロリダ大学、イリノイ大学などは精力的に研究を行っている。
	応用研究・開発	◎	↗	大手農機メーカーが果樹園用ロボットなどを研究開発している。ベンチャー企業や大学のコンソーシアムが多い。
欧州	基礎研究	○	→	オランダ・ワグeningen大学の収穫ロボット、スペイン・バレンシア・ポリテクニク大学、イタリア、フランスではワイン用ブドウ栽培ロボットの研究が盛んである。見回りロボットや剪定ロボットなどが研究されている。また英国では「ハンズフリー・ヘクタールプロジェクト」を規模を拡大しながら実施している。
	応用研究・開発	◎	↗	パブリカ収穫ロボット、果樹園用ロボットなど高収益作物で人手不足が多い作業のロボット化が進められており、施設園芸や果樹分野のロボットでは世界をリードしている。
中国	基礎研究	◎	↗	土地利用型農業、施設園芸両者においてロボット研究は科学技術部のSmart Farm関連予算が潤沢で、多くの大学・公的研究機関でロボット研究を実施している。
	応用研究・開発	△	→	農業の自動化に力を入れており、江蘇省ではロボット農機による農作業の実証実験が行われている。防除など自律ドローン利用の技術開発が進んでいる。
韓国	基礎研究	○	→	ロボット自体の研究よりもセンサー開発、AI研究が主流である。
	応用研究・開発	◎	↗	日本とほぼ同様の研究開発が進められている。ただ、韓国は日本よりも施設園芸や畜産分野の自動化・ロボット化に力点が置かれている。また農林畜産食品部の予算で産学プロジェクトで自動走行農機の研究開発が進められている。

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

312

- 3) Jacquelyn A. Jacobs and Janice Siegford. “The impact of automatic milking systems on dairy cow management, behavior, health, and welfare”, Journal of Dairy Science, 95 (5), (2012) pp.2227-47.
- 4) 内藤裕貴. 「イチゴ収穫ロボット」, アグリバイオ, 1 (13), (2017) pp.18-22.
- 5) Ali Roshanianfard and Noboru Noguchi. “Pumpkin harvesting robotic end-effector” Computers and Electronics in Agriculture, 157, (2020) 105503.
- 6) 林野庁. 「林業イノベーション現場実装推進プログラム」
https://www.rinya.maff.go.jp/j/press/ken_sidou/attach/pdf/191210-1.pdf
- 7) 森林総合研究所 web. “林業用アシストスーツ 17% 負担軽減「2017 国際ロボット展」に出展”
<https://www.affrc.go.jp/press/2017/20171128/index.htm>
- 8) 水産庁. 「水産新技術の現場実装推進プログラム」 <https://www.jfa.maff.go.jp/j/press/kenkyu/attach/pdf/191210-1.pdf>
- 9) 高橋秀行ほか. “漁業用サロペットと一体化した漁業用軽労化支援スーツの試作” 平成 30 年度日本水産工学会学術講演会講演要旨 (2018 年 5 月) .
- 10) Noboru Noguchi. “Agricultural vehicle robot”, Journal of Robotics and Mechatronics, 30 (2), (2018) pp.165-172.
- 11) Chi Zhang and Noboru Noguchi. “Development of a multi-robot tractor system for agriculture field work” Computers and Electronics in Agriculture, 142, (2017), pp.79-90.
- 12) Dallan Adams. “Future of farming : AI-enabled harvest robot flexes new dexterity skills” <https://www.techrepublic.com/article/future-of-farming-ai-enabled-harvest-robot-flexes-new-dexterity-skills/>
- 13) M. M. Ali et.al. “Leaf nitrogen determination using non-destructive techniques—A review”, Journal of Plant Nutrition, 40 (7), (2017), pp.928-953.
- 14) Victor Partel et.al. “Development and evaluation of a low-cost and smart technology for precision weed management utilizing artificial intelligence” Computers and Electronics in Agriculture, 157, (2019) pp.339-350.
- 15) Redmond Ramin Shamshiri et.al. “Research and development in agricultural robotics : A perspective of digital farming”, International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11 (4), (2018)
- 16) Brian Steward et al. “The use of agricultural robots in weed management and control” In Robotics and automation for improving agriculture, edited by John Billingsley. Burleigh Dodds Science Publishing (2019)
- 17) 日本電信電話株式会社. “最先端の農業ロボット技術と情報通信技術の活用による世界トップレベルのスマート農業およびサステナブルなスマートアグリシティの実現に向けた産官学連携協定を締結”.
<https://www.ntt.co.jp/news2019/1906/190628a.html>
- 18) Hands Free Hectare Project web. <http://www.handsfreehectare.com/>
- 19) Harper Adams University web. “Hands Free Hectare broadens out to 35-hectare farm”
<https://www.harper-adams.ac.uk/news/203368/hands-free-hectare-broadens-out-to-35hectare-farm>

- 20) GRAPE project web. <http://www.grape-project.eu/home/>
- 21) UK-RAS networks (ed.) . “Agricultural robotics : The future of robotic agriculture” June 2018.
- 22) James Lowenberg-DeBoer et.al. “The impact of swarm robotics on arable farm size and structure in the UK”, 93rd Annual Conference of the Agricultural Economics Society (April 2019) .
- 23) Lars Grimstad et.al. “On the design of a low-cost, light-weight, and highly versatile agricultural robot” 2015 IEEE International Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, DOI : 10.1109/ARSO.2015.7428210 (March, 2016) .
- 24) Tom Botterill¹ et.al. “A robot system for pruning grape vines”.Journal of Field Robotics.34(6), (2017) , pp.1100-1122.22)
GRAPE project web. <http://www.grape-project.eu/home/>

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

2.2.11 ロボティクスと社会

共生社会にむけた統合知としてのロボティクスの役割と社会変革の様相

本項は、研究開発領域の域を超えたメタな内容となるため通常の記述形式に捉われない形で記述する。

(1) はじめに

近年の人工知能（AI：Artificial Intelligence）やロボット技術の進展はめざましく、人と接しない構造化された環境から、物理的にも心的にも複数の人と接する非構造化環境へのロボットの導入が進んでいる。人間社会における機能優先の技術開発のみではなく、社会におけるロボットの役割を明確に意識した設計論が望まれる。特に、最先端AI技術などが搭載された高度自律型ロボットが人と相互作用する場合、単なる道具からパートナー的な存在として位置づけが出現し、道徳や倫理、最終的には法制度の問題も絡んでくる。本稿では、これらの課題を扱う上で、最初に、ロボティクスをさまざまな学問分野から構成されるtrans-disciplinary（超域）として再考する。次に、人と相互作用するロボットの設計論の背後にあると想定される哲学的背景を概観する。そして、社会における自律性の意味を問いなおし、共生社会における倫理のあり方を議論する。最後に法制度の面から社会制度改革への提言につなげる。

(2) キーワード

ロボティクス再考、哲学的背景、自律性概念、倫理、法制度、構成的人間学、設計原理、身体性、自己

(3) 再考：ロボティクス

ロボティクスの要素技術や統合化・システム技術、各応用に関しては、本報告書のそれぞれの項目を参照頂くとして、本稿では、最新AI・ロボット技術の社会実装による未来共生社会に向けた課題やアプローチを大局的な側面から見直すことで、ロボティクスを再考する。

2003年6月に第17期日本学術会議の吉川弘之会長のもとに新しい学術のあり方が模索され、社会のための学術と文理の融合では、以下が報告されている¹⁾。

科学技術の利用の量的・規模的拡大、複合化が行われると、小規模、個別の利用では無視し得た影響が拡大し、その影響の質も変化し、後戻りができない修復し難い事態を生み出す。これをどの様に予測し、排除していくかは、現代科学の利用に当たって我々が克服しなければならない課題である。この課題に挑戦するためには従来の狭い範囲で専門化された‘認識’を中心とする科学では対応が困難である。科学技術の適用に当たって、それがもたらす便益（ベネフィット）と危険（リスク）を広い立場から俯瞰し、便益を増大するとともにリスクを排除していく学術的仕組みを構築することが必要である。理学、工学の立場だけでこれを行うことはできない、技術の適用について、必要な社会制度、外部的に処理される経済を内部化するための仕組み、これまでの生活文化に対する影響、自然環境・人類の生存に与える影響などを広く考察することが必要である。このためには哲学、倫理学、心理学、社会学、法学、経済学、エコロジー、医学などの観点を加えて、従来の学問体系を横断して研究が行われなければならない。俯瞰的研究プロジェクトはこの研究体制を実現の一環として行われる活動である。

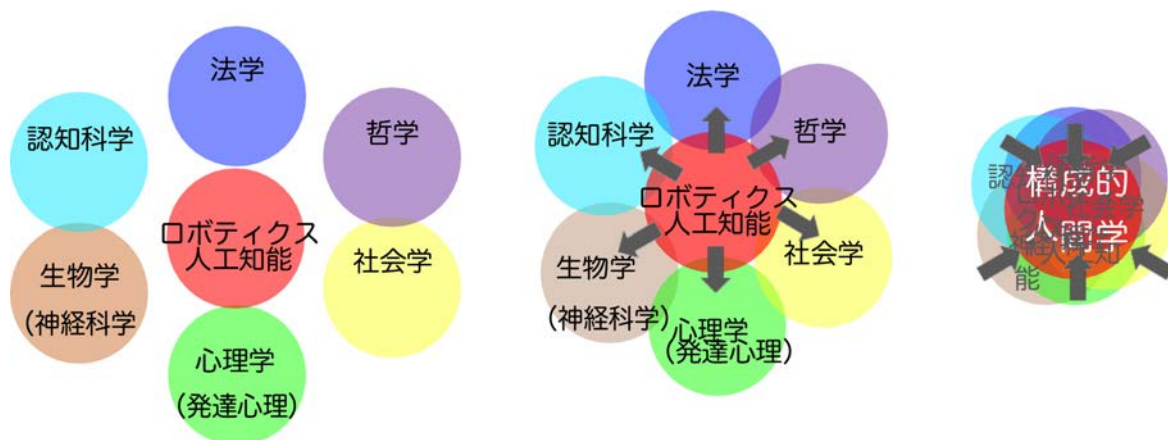


図2-2-7 Multi-disciplinary (左) から Inter-disciplinary (中) を経て Trans-disciplinary (右) へ

さらに、文系と理系を横断する「設計科学」というディシプリンが提唱され、俯瞰的研究プロジェクトの推進が謳われている。これに先立って、1999年に認知ロボティクスの提案²⁾がなされているが、設計科学の典型がロボティクスであろう。Roboticsはロボット工学と訳されてきたが、本稿ではロボット学と称する¹⁾。機械、電気・電子、情報、制御工学、材料などの工学的分野の集積であるばかりでなく、人文社会系の学問分野との連携もいわれて久しい。しかし、真の融合に至っていないのが現状である。図2-2-7に示すように、multi-disciplinaryは、多くの学問分野が共存している状態、inter-disciplinaryは、各学問分野が少し重なりはじめて、異なる分野間の協働が始まっている状態だが、より進めて、trans-disciplinary、すなわち超域として新たな学問分野が構成されなければならない。それが、ロボット学が目指す姿である。

ロボット学に関連する学問分野は、既存の工学分野に加えて、生物学（神経科学）、認知科学、心理学（発達心理）、社会学、哲学、倫理学、法学などが考えられる。これらの既存の学問分野から見れば、ロボット学は、学際融合の橋渡し役であり、リサーチビークルの役割が期待されている（図2-2-7の中央）。既存分野のアプローチは、説明原理に基づくものが多く、設計原理に基づくロボティクスの手法により実証・検証されるとみなされる。このような既存分野の補助的な役割に留まらず、ロボット学は、これらの分野を内包し、新たな規範のもとに、再構築されなければならない。この規範の核となるアイデアが「構成的人間学」である（図2-2-7の右）。

構成的人間学における「人間」は、種としてのヒト、社会的存在として人を表すと同時に、他の種も含めた生物の代表としての意味合いも持つ。「構成的」とは、計算機シミュレーションやロボットなど機械の設計・製作・作動を通じて、仮説の検証や新たな仮説の枠組みの提案能力などの特徴を示している。この点が、先に示した「設計科学」の意味合いである。構成的人間学における仮説は、微視的レベルから巨視的レベルにわたり、各分野との相互浸透的な相互作用が必須である。形骸化しやすい学会間連携ではなく、研究者レベルで密な連携から進めるべきであろう。

近年注目されることの多い自動運転を「ロボット学」の視点から再考すると、技術的な課題だけでなく、より深刻な法制度の問題が表出している。法律専門家にまかしておけばいいという問題ではない。技術の課題

1 社団法人日本ロボット学会の学会誌の呼称は旧字を用いた「ロボ學」で再考の意味が込められている。

とそれが社会に及ぼす影響を最初の段階から考慮・検討しなければならない。その際、技術者だけではなく、他分野の研究者とも議論できる場が、特殊ではなく、それが普通にならないといけない³⁾。

SF作家であり、かつ科学・技術コメンテーターの瀬名秀明は、日本ロボット学会2020年度学術講演会RSJ2020特別公演「ロボティクスと総合知」において、ロボット学で、何が可能かとの問いに対して、「ロボット学が総合知を拓くと示すことの大切さ」を主張している。背景には、今回のコロナ禍によるパンデミック状況において、専門家の意味が問いただされ、専門家に責任を押し付けるのではなく、総合知による対処の可能性を見出すことが重要で、その過程にロボット学が貢献すべきであると説く。また、ロボット学と人間学の共存も説いている⁴⁾。

(4) 共生社会構築の哲学的背景

人と相互作用する最先端ロボットの設計思想の背景にあると想定される哲学的考察を紹介する（文献5）の第三章）。もともと、認知発達ロボティクス⁶⁾の思想的背景として説明^{7), 8)}でもあるが、共生社会に向けたロボットの設計思想にも関連するので紹介する。

図2-2-8にその流れを示す。これは、Taniの書籍⁹⁾や稲谷の論説¹⁰⁾に基づき、イマヌエル・カント(Immanuel Kant)とイタリアの哲学者ジャンバッティスタ・ヴィーコ(Giambattista Vico)や徳倫理のジュリア・アナス(Julia Annas)を追加したものである。ルネ・デカルト(René Descartes)は、心と身体、もしくは事物の関係に関して、心身二元論²⁾を唱え、近代哲学の基礎を築いた。

一方、ヴィーコは、デカルト主義やあらゆる還元主義に反対の立場をとり、真実は、デカルト主義にしたがった観察によってではなく、創造か発明によってしか検証されないという真実の原理(Verum Factum Principle)を主張した³⁾。この考え方は、ロボット学を言い換えた「構成的人間論」の構成的手法の思想的原点である。従来の説明原理に基づく科学ではなく、設計原理を内包した新たな学問分野としての提案であ

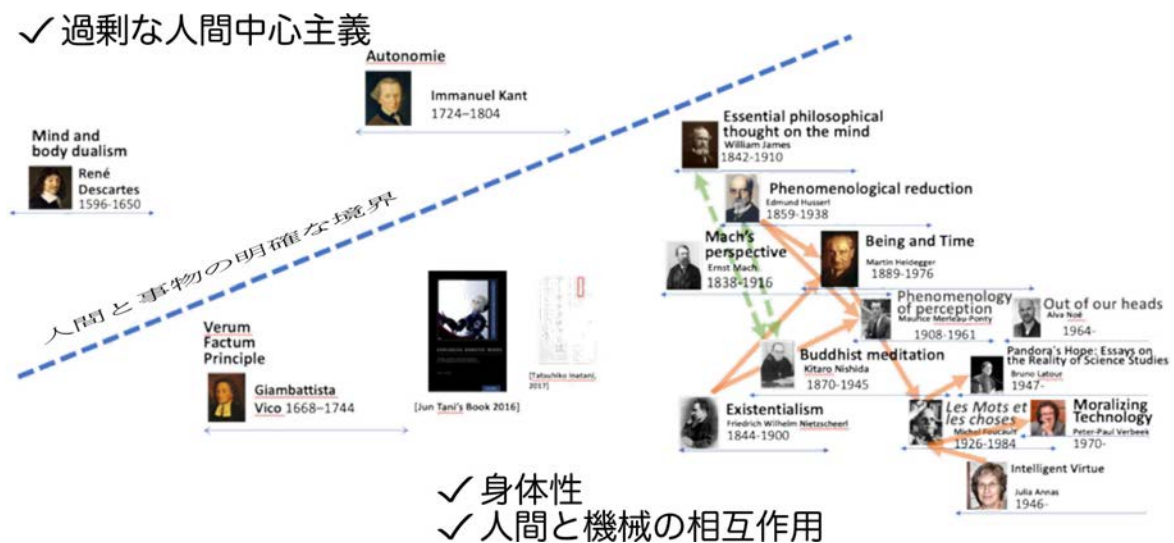


図 2-2-8 共生社会構築の哲学的背景

2 実体二元論、物心二元論、霊肉二元論、古典的二元論とも言われる。

3 https://en.wikipedia.org/wiki/Giambattista_Vico

り、先に示した「設計科学」の原点とも言える。それがこの時期に提唱されていることは、重要である。

カントは、自身が唱える道徳哲学において、義務的な行為としての道徳のありかた、すなわち「どうあるべきか」といった視点から義務論的道徳を説いた¹¹⁾。科学技術の高度な発達で、さまざまな意味で価値観をシフトさせる現代においては、このような人間中心の考えによる義務論的道徳が通じなくなっている。ミシェル・フーコー (Michel Foucault) は、アナスが説く徳倫理¹²⁾に注目したと言われており¹³⁾、「どうあるべきか」ではなく、「どうありたいか」がより重要であると考えた。前者はトップダウンに規定されると説いているのに対し、後者は、科学技術の高度な進展に対応するために、新たな倫理観を常々更新する必要があることを説いている。

デカルトを超えて超越論的現象学へと進む「新デカルト主義」を主張し、現象学的考察を与えたのは、エドムント・フッサール (Edmund Gustav Albrecht Husserl) である (例えば、14) など)。我々は客観的な物理世界が事前に存在すると捉えがちだが、そうではなく、個人の意識的な主観体験による表象が、共有できる可能性としての客観性、すなわち主観と客観の狭間の間主観性の考え方を展開し、後世に多大な影響を与えた。

フッサールの現象学を拡張・進化させたのが、マルティン・ハイデッガー (Martin Heidegger) (『存在と時間』¹⁵⁾, ¹⁶⁾ やモーリス・メルロー＝ポンティ (Maurice Merleau-Ponty) (『知覚の現象学』¹⁷⁾, ¹⁸⁾) である。

ハイデッガーは間主観性とは異なるアプローチで主観性を取り上げた。すなわち、主観と客観を分けずに、いま現実に存在すること (「現存在」) の重要性を説き、これが、時間軸上の過去と将来との動的な相互作用によって生じると主張している。人間という存在を時間軸で捉えるとき、現在という切断面で見えるのが「現存在」だが、それは、決して孤立しているわけではなく、過去と未来の駆け引きの隙間にあると解釈できる。また、現存在する個々のエージェントは、それぞれが目的を持って相互作用しているという合意のもとに、個々が相互に存在しうる。これは、社会的相互作用の重要性の一つでもある。

メルロー＝ポンティは、主観と客観に加えて身体性という次元が創発し、そこでは、同じ身体が、触れたり見たりする主体と同時に触れられたり、見られたりする客体にも与えられうると主張している。このことは、主観と客観の二つの極の間の繰り返される交流の場を身体が与えているのだ。すなわち、客観的物理世界 (先の議論では偶像に過ぎない) と主観的経験をむすぶメディアとしての身体の重要性を指摘している。これは、ロボット学における「身体性」の基本概念の根幹である。

デカルトやカントらは、主体と客体とを厳格に区分する近代的な思考法 (人間存在のあり方を本質化する、ヒューマニズム) の提唱者だが、その考え方に頼っていると、現代社会を適切に扱えないとブルーノ・ラトゥール (Bruno Latour)¹⁸⁾ は警告する。なぜかという、高度な科学技術の進展により、現代社会は主体と客体が入り混じったハイブリッドな世界となっているからだ。また、ピーター＝ポール・フェルベーク (Peter-Paul Verbeek)²⁰⁾ は、「技術は、我々の行為や世界経験を形成し、そうすることによって、我々の生活の仕方に能動的に関わっている」と主張する。つまり、本来、人間にとって便利に機能すべく設計された人工物によって、我々の行動や、更には、考え方自身が影響を受けているのだ。

このような流れから、図2-2-8では、人間と事物を区別し、人間中心主義に基づく考え方 (太い点線の左上部) から、人間と事物の相互作用による関係性に重点を置き、創造することで理解する視点の重要性を説く考え方やそれが社会に影響を及ぼすことの重要性を指摘する考え方 (太い点線の右下部) への移行が見て取れる。これは、

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

1. 深層学習に代表される機械学習によって、人工物が判断し、意思決定にコミットしており、あるレベルの機械の自律性が、すでに実現されつつあること、
2. 人間固有と思われていた自由意志や意識なるものの構造や機構などが、神経科学・生理学・認知科学などで徐々に明らかにされつつあること

を考えると、近代諸学問における意識や自律に対する考え方が機能しなくなっている。このような背景から、機械の自律性の可能性について議論可能になりつつある。そこで、以下では、人との相互作用における自律性の意味を物理的・心的側面から眺めてみる。

(5) 物理的相互作用の設計

身体性はロボット学においてもっとも際立った特徴の一つである。メルロー＝ポンティが示唆する情報構造は人と人との間を想定したものであったが、人工物との関係においても成り立つと考えられる。しかしながら、従来の金属製の硬い身体を有し、電動モーターで駆動されるロボットは、目標軌道を達成するために、人との相互作用のダイナミクスをノイズ要因として扱い、それを消し去る方向で開発されてきた。目標の達成をソフトウェア的に実現できたとしても、本来の物理的な硬さは変わらない。これに対し、近年ソフトロボティクスが興隆し、全世界的に研究が活発である。従来、ソフトロボットは、その柔らかさ故、軌道制御が難しく、制御対象としては嫌われていたが、逆に豊かな相互作用による時空間的にリッチなセンサー情報が獲得され²¹⁾、それに応じて心的相互作用にも影響を及ぼすことが可能になる。柔らかなペットボトルを掴む事例から、硬いロボットとソフトロボットの違いを示す (図2-2-9)。左側の通常の硬いロボットハンドだと静的な点接触のみだが、右のソフトロボットハンドであれば、面接触で掴み直すなど、識別に有利なリッチな時空間センサー情報が得られる。

ソフトロボットの持つ潜在的な意味や価値については、2.2.1ソフトロボティクスや2.2.2生物規範型ロボティクスに詳しく述べられているが、物理的な相互作用の観点から要約すると以下のようにまとめられる。

1. 物理的な柔らかさが、安全面を向上させ、安心感や信頼感に繋がる。
2. 軌道制御が困難なのではなく、軌道制御自体が意味を持たず、むしろ柔軟な行動や行為の単位での相互作用が意味を持つ。



図 2-2-9 従来の硬いロボットハンド (左) とソフトロボットハンド (右: Kawasetsu et al. (in prep.))

3. 多様で柔軟な物理的相互作用が、さまざまな心象を誘発し、そのことが心的相互作用の設計論に影響を与える（例えば、文献 22）など。
4. 生体親和性の高い材料を用いることで、その経時的変化による劣化も含めて、成長・老化するソフトロボットの可能性が示され、このことと3を考慮することで、心的相互作用の設計論を含めて、人間に寄り添い馴染んでくれるドラえもんのようなロボットの設計に繋がると期待される。

(6) 心的相互作用の設計

ロボットの心的機能の設計を検討するとき自律性は大きな課題である。自律性や主体感、共感からモラル創発の可能性、さらに人工モラルマシンに関する議論が重要である^{3), 7), 8)}。

(6-1) 人と機械の自律性と主体感

自律性に関して、人のみが自律性を有し、機械には自律性が無いと主張する考えがある²³⁾。それは、ロボットが生物学的な意味合いにおける自律性を持っていないことによるだけでなく、人が自身で意思決定する際と比較して、ロボット自身が「自身」という表現をもっておらず、さらにロボット自身が自らが意思決定のモジュールであるという明確な確信を持っていないからである。しかしながら、人においても、自由意志と言うのは、空想に過ぎず、さまざまな過程から、意識レベルがつつま合わせを行っているに過ぎないということを示唆する結果が神経科学的から得られている^{4, 24)}。このように考えると、人工システムには真の自律性がなく、純粋に自律性を持っているのは人だけである、とは言えず、自律性に関する人と人工システムとの違いは、相対的な差に過ぎない様に見える。

1970年代初頭、チリの生物学者ウンベルト・マトゥラーナ（Humberto Maturana）とフランシスコ・バレラ（Francisco Varela）は生物の自律性をシステムの観点から考察し、自己創出（再生と自己による境界決定）を主眼としたオートポイエーシス²⁵⁾を提案した。これを根拠に機械に自律性が無いとする主張がなされているが²³⁾、マトゥラーナとバレラの細胞の自己創出のコンピュータシミュレーション²⁶⁾では、そのオートポイエティック性が示されている。感覚運動の個体レベルから社会システムレベルに上がれば、厳密な生物学的な意味合いでのオートポイエティック性が薄らぎ、より本質的、もしくは機械と共有できる性質としての意味合いでの、オートポイエティック性が引き出せる。また、これを理由にバレラは、フォーコーやメルロー＝ポンティらの思想に傾倒したと述べている。そして、相互作用（コミュニケーション）の重要性を示し、自律性の規範の更新を謳っている。

自律性と並んで、重要な概念として「自己」がある。自他認知を含む自己の概念の進化は、ウルリック・ナイサー（Ulric Neisser）²⁷⁾が提唱する自己知識の五つの視点が参考になる。生態学的自己、対人的自己、想起的自己、私的自己、概念的自己のうち、最初の二つをそのまま借用し、残り三つを社会的自己としてまとめて、個体発生、すなわち発達過程とみなして、浅田がまとめている（文献5の第三章図3.2）。

Seth et al.は、当時の神経科学や精神医学の知見や証拠をとりまとめ、自己主体感を作るネットワークと自己存在感をつくるネットワークの相互作用モデルを提案した²⁸⁾。自己存在感は、有益な内受容性予測信号が入力と正常に一致し、予測誤差が抑制されると生じると主張する。外受容信号と内受容信号によって内受容感覚を予測する。自己主体感のモジュールが感覚運動予測と同時に内受容感覚も生成する。自己主体感の

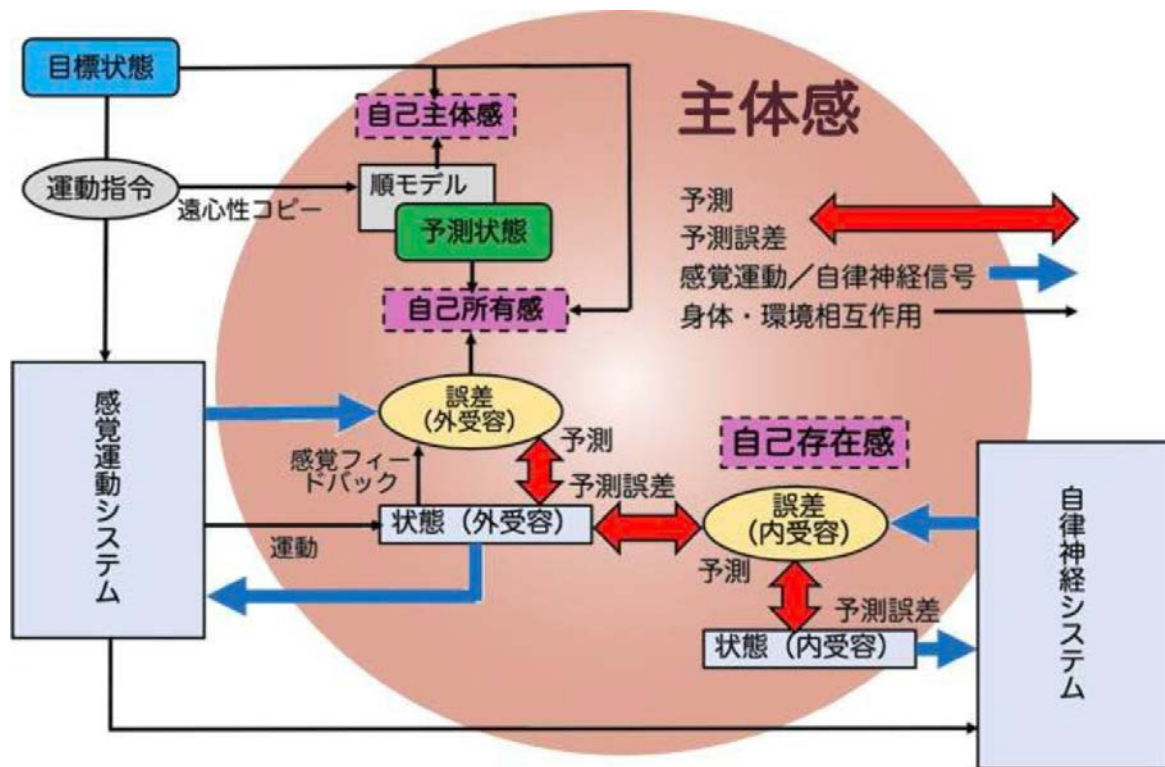


図 2-2-10 広義の自己主体感の構図

モジュールが自己存在感のモジュールより階層が上とされている。ロボットの場合、内受容からの情報によって駆動される自律神経系を自己主体感、自己存在感、自己所有感などにどのように結びつけるかが課題である。

Haggard²⁸⁾ は、Gallagher³⁰⁾ の2つの様相、すなわち主体感と所有感は、予測と後付で説明可能で、その2つをあわせて主体感 (SoA) と呼んだ。図2-2-10にGallagher³⁰⁾、Seth et al.²⁸⁾、Haggard²⁹⁾ の主張を一つの図にまとめた。Legaspi et al.³¹⁾ は、Haggard²⁹⁾ のヒトに関する主体感の認知神経科学的なレビューを参考に人工システムにも適用可能な主体感のあり方を議論している。Haggardの論文では扱っていない人間とロボットの相互作用局面における人側の主体感のモデルを提案している。Gallagher³⁰⁾ のモデルは比較器モデル (comparator model) として捉えられているが、そこに遡及的推論 (retrospective inference) を加え、拡張している。

(6-2) 共感からモラル創発の可能性

ロボットの共感からモラル創発の可能性として、痛覚の重要性が示唆されている³²⁾。意識 (心) 創発の要が痛覚であることを示すための作業仮説として、

- ① ロボットが痛みを感じるように痛覚神経回路を埋め込む。
- ② MNSの発達を通じて、ロボットは他者の痛みを感じるかもしれない。
- ③ すなわち、情動感染、情動的共感、認知的共感、同情、哀れみの感情をロボットが発達させる？
- ④ 道德の原型が創発される。
- ⑤ ロボットが道德 (被) 行為者になる。

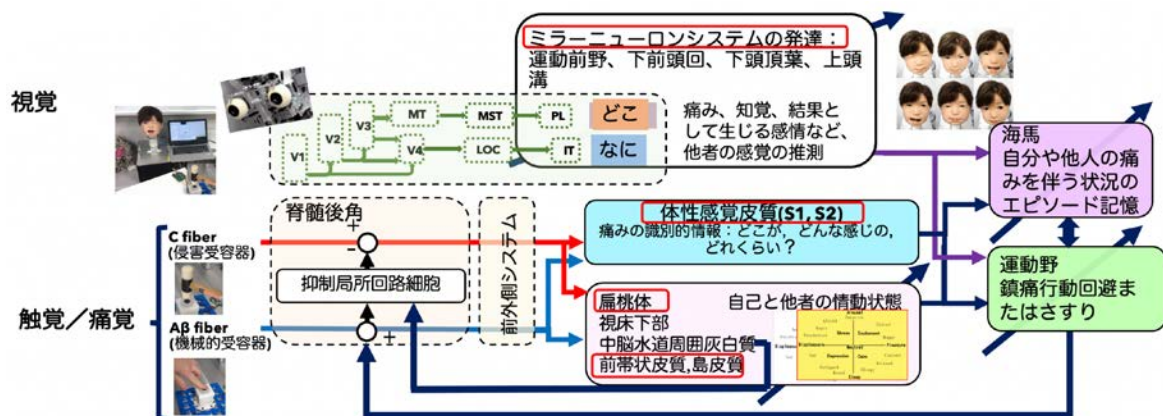


図 2-2-11 痛み体験の共有：共感の始まり

⑥ロボットやAIに対する法制度が検討される。

といった流れを考え、①に対しては、柔軟触覚センサー³³⁾を用いて、痛覚と通常の触覚の区別可能性を示している。②に関しては、計算モデル³⁴⁾を提案しているが、③³⁵⁾以降に関しては、概念モデルのみである。図 2-2-11 は、自身の痛み体験を基に、他者の同様の状況を観察したときに励起される自身の経験の想起と回避行動学習の概念図である。

(6-3) 人工モラルマシンの可能性

人工モラルマシンの可能性を検討する上で、人自身のモラルの成り立ちについて、ジョシュア・グリーン (Joshua Greene) の「モラル・トライブズ」³⁶⁾を参考にする。若くしてハーバード大学の心理学の教授になったジョシュア・グリーンは、実験心理学者、神経科学者であると同時に哲学者でもある。先に示したカントの義務論的道德論と並んで、功利主義に基づく道徳哲学を説き、有名なトロッコ問題を題材に、ポイント切り替えによる5人の救助と力づくで人を落下させての5人の救助（いずれも一人の死を伴う）の例で、前者が道徳的に許されるのに後者が許されないとされる理由を基本問題として、これにまつわるモラルの課題を広く深く解説している³⁷⁾。詳細を省くと、モラル発動には2つのモードがあり、自然に（無意識に）、それ故、速い応答として振る舞うオートモードと論理的思考を経て、認知的な判断をくだすマニュアルモードである。前者は、自身が所属する集団内のルールとして定着しており、そのため、自動的に反応するのに対し、後者は、他の集団との対応の中で、必要とされるとしている。宗教や文化が集団内の規律であるとする、他宗教や他の文化に触れるとき、オートモードでは軋轢が生じ、マニュアルモードにしないといけな。先のトロッコ問題では、力づくで一人を落下させることによる5人を救助することは、直接的かつ意図的であるためにオートモードでの対応であり、ポイント切り替えによる一人の死は5人の救助におけるは副次的なものでありマニュアルモードの対応だと解釈されている。問題は、過去の公民権運動や女性の参政権など、既存の価値観（主に宗教）や文化に依存すること、すなわちオートモードでの判断ばかりしていると、反対することが自然に映るが、マニュアルモードで論理的に判断することによって初めて他の集団の価値観や文化を認めて、合意に至ることができる。現代でもオートモードとマニュアルモードの葛藤による多くの課題が存在する。

さて、本題の人工モラルマシンの設計課題に移る。ウェンデル・ウォラックとコリン・アレン (Wendell

Wallach and Colin Allen) の人工モラルマシンの著書³⁸⁾を参考にその可能性について議論する。本書は、10年以上前に出版されながら、その序論において展開される世界の状況予測は、まさしく現在の社会が抱えているAIの最新テクノロジーが及ぼす社会的状況を的確に表している。2010年5月に起きた株価相場の瞬間的急変動のフラッシュクラッシュなどがその典型例である³⁹⁾。

ウォラックとアレンは、人工的道德的行為者 (AMAs: Artificial Moral Agents) をどのように設計可能かについて、既存の関連技術を踏まえ、トップダウンとボトムアップの両面から議論している。結論から言えば、完全な人間が存在しないと同様に完璧なAMAも存在しない。しかし全く出来ないわけでもない。倫理コードをトップダウンに埋め込んでも、すぐさまフレーム問題に突き当たる。もちろん、人間もフレーム問題を解いている訳ではないが、ある程度の融通性をもって対処している。ただし、文化や宗教の違いなどから、どのような行動を (行動選択) どのような時に (ある行動を起こすトリガーのしきい値) とするかといった道德的行動の選択基準が異なり、人間とて、容易ではなく、経験と学習に依存する。まさしくオートモードとマニュアルモードの葛藤である。

Asada³¹⁾ は、痛覚のポテンシャルを見出している。すなわち、痛みの記憶による共感の可能性である。痛覚神経系を内包する人工エージェントが物理的な痛みの経験から、ミラーニューロンシステムの発達を通じて (例えば、Nagai et al.⁴⁰⁾, Kawai et al.⁴¹⁾ の研究参照)、他者の痛みを推定し、共感できる可能性を指摘している。その際、痛覚のみならず、社会的な環境を通じて多様な情動の理解と表出 (例えば、Watanabe et al.⁴²⁾ の研究参照) が可能になり、結果として道德的行動の創発が期待される。ただし、このままだとオートモードの再現に留まる可能性がある。アシモフのロボット三原則は、大きな矛盾をはらみつつも、ロボットの倫理則とも言われている。矛盾は人間社会そのものの矛盾の鏡像であり、その意味では、人間の倫理則といえなくもない。瀬名もそれを指摘している⁴⁾。痛み回路は、第三原則の必要条件と察せられるし、社会的相互作用を可能にする機能は第一、二原則の遵守に必要な要素と考えられる。さて、これでマニュアルモードも再現できるだろうか? 経験する社会的環境が、狭いとオートモードに陥り、広くとることでマニュアルモードの獲得も可能だが、一体のロボットが物理的に取りうる空間は限られるので、論理的思考による認知的判断は、ネットを通じた広域的な知識や事実の蓄積に委ねることもできるだろう。再現可能なマニュアルモードは、その実現手法が人と異なっても、モードによる判断結果が同じになれば、共生社会の規範になり、ロボットを道德的行為者とみなせるだろう。もし、ロボットを道德的行為者とみなすことの合意が得られれば、それは同時に道德的被行為者ともみなすことを意味するだろうか? ロボットなので、人間を助けることは、当然だが、人間からロボットに対して道德的行為を授ける必要があるか? という議論になろう。最終的には、法制度の問題も絡むため次節で扱う。

(7) ロボットと法制度

ここまで機械の自律性と主体感について述べた。これらは、事故や犯罪にお機械ける責任帰属に関して、重要な要件である。Haggardはヒトの主体性に関する論文²⁹⁾の中のコラムで、現在の法制度が神経科学の知見と整合していないことを以下のように指摘している。

- ・すべての法制度には、刑事責任の概念があり、この概念は、健常な成人は行動の自発的な制御を支える彼ら自身の意図、行動、および結果についての意識的な経験と知識を持っているという仮定に基づく。ローマ法体系では、過失故意という用語を使って、責任の主観的で意図的な側面を説明している。したがって、原則として、行動に対する主体性の欠如した者は、その行動に対して刑事責任を問われることは

ない。仮に被告が自分たちのしていることを経験しなかったと主張する場合、裁判所は当然懐疑的である。意図と主体感の客観的な証明は困難である。自発的として経験される行動の前兆として、自動的かつ無意識の過程が存在することが神経科学的には明らかだが、故意の法的概念、すなわち、自発的行動の起点としての犯意が存在することを前提としている点とは好対照である。

- ・しかしながら、法は一部、行動の自発的制御や主体感が減少する状況を認めていて、例えば、長期にわたる虐待が、認知能力と行動能力に重大な変化を引き起こす可能性があり、そのような場合の殺人は、脅威に対する「戦う」反応に類似していると見なされる可能性がある。当然、長期にわたる虐待が、大脳辺縁系と運動の相互作用を変化させ、行動の自発的制御に影響を与えることが神経科学的に示されつつある。
- ・英国法では、長期にわたる虐待行動が、自発的な行動管理とその責任に対して、通常の条件を満たさない可能性があることが認識されている。ストレスを制御した経験のあるラットは、その後の制御不能なストレスの影響に対する回復力を獲得しているが、持続的な虐待は、その回復力を阻止する可能性がある。よって、虐待の期間がトリガーとなり行動制御不能に陥ると見なすための神経基盤を提供する可能性があることは激しい議論の的である。

現在の法制度と最新の神経科学の知見との不整合は非常に複雑な問題であるが、ここに人工物が介在した事故や事件が発生したときには、法制度のあり方がさらに解決困難な課題として表出する。この課題に対し、稲谷はポストヒューマニズムの観点から、法のあり方を論じている¹³⁾。(4)でも紹介した人間と機械の相互作用に重点をおいた考え方をベースに、人間自体の再定義、よき生のあり方を追求する過程における法のあり方を論じ、現在の法制度に挑んでいる。要点は以下である。

- ・最先端技術が搭載された人工物が人間と機械の境界を曖昧化し、結果的に意思決定や行為の主体を特定することが困難な状況を作っている。
- ・外的環境から文字通りに独立して意思決定し、また行為することのできる主体としての人間は、存在しない。意思決定や行為の主体は、外的環境との相互作用の場として立ち現れる。人間は主体でも客体でもない。
- ・従来の刑事法は、近代を基礎付ける心身二元論と主客二分論というアイデアに立脚し、主体の自由意志に基づく行為に対して刑事制裁を科すことで、望ましくない行為を抑止して、社会秩序を維持するないし法益を保護するという構図で、あるべき主体と客体の線引きを確保するべく、あらゆる存在を多少強引にでもどちらかに押し込む(規律・訓練によって〈他者〉を〈標準化〉して人間にする)。
- ・従来の刑事法を新たな状況に適用を考えると、以下の状況

1. 神経科学的に自由意志が存在しないユーザーに責任を押し付けるのは意味がない。
2. 製造者側に責任を求めると、萎縮が生じて、イノベーションが生じない。

- ・よって、人間を所与の前提とする思考法を捨てる必要(ポストヒューマニズム)があり、人とその構成に関わる外的環境のありようを、反省的にデザインしていくことのできる法理論が必要。
- ・法理論の前提となる倫理について、ポストヒューマニズムの観点からは、〈どう生きたいか〉という問いを広く直接的に問い続けることで、人の存在態様の望ましさについての批判的吟味を絶えず行い、より良

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス

い人の存在態様とそれを実現する方法とについて探究する営みとして徳倫理を推奨。

- ・ポスト・ヒューマニズムにおける法とは、自己の練り上げに呼応しながら、自らの姿を変えていく可能性を留保した、開かれた動態的運動としての法自己を練り上げ、自身と他者（人と人以外の存在とを含む）とを導く理の定立を通じて、現実の新たなありようを示し、法の言説を利用することで、これを法と結びつけ、現実を変化させようとする実践（自律実践）は、法自身を一層動態的で開かれた運動へと変えていくことになるのである。

そして、公私協働による法秩序形成が必要と結言しており、これに関しては、ガバナンスイノベーションとして、すべてのステークホルダーが参画して、決めていく、変えていく体制を提案し⁵、具現化に努めている。

ロボット学の観点からも稲谷の考え方は重要である。（3）で提案したように、様々な学問分野が分野ごとの研究のみならず、その成果が社会にどのような影響を及ぼしうるか、その過程も含めて、科学技術の進展とともに、パラダイムを常時更新していく姿勢を可視化し、多様な人間社会での規範の構築と相互理解を通じて、共生社会を設計していく必要がある。

参考文献

- 1) 新しい学術の体系— 社会のための学術と文理の融合 —日本学術会議運営審議会附置新しい学術体系委員会、<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/18pdf/1829.pdf>
- 2) 浅田, 石黒, 國吉. 認知ロボティクスの目指すもの. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 1, pp.2–6, 1999.
- 3) 浅田稔. 講演報告「再考（最高?）：ロボット学」. 日本ロボット学会誌, Vol. 39, No. 1, p. to appear, 2021.
- 4) 瀬名秀明. 講演報告「ロボティクスと総合知」. 日本ロボット学会誌, Vol. 39, No. 1, p. to appear, 2021.
- 5) 浅田稔. 浅田稔のAI 研究道. 近代科学社, 東京, 2020.
- 6) Minoru Asada, Koh Hosoda, Yasuo Kuniyoshi, Hiroshi Ishiguro, Toshio Inui, Yuichiro Yoshikawa, Masaki Ogino, and Chisato Yoshida. Cognitive developmental robotics: a survey. IEEE Transactions on Autonomous Mental Development, Vol. 1, No. 1, pp. 12–34, 2009.
- 7) 浅田稔. なじみ社会構築にむけて：人工痛覚がもたらす共感、道徳、そして倫理. 日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 4, pp. 287–292, May 2019.
- 8) 浅田稔. 再考：人とロボットの自律性. 日本ロボット学会誌, Vol. 38, No. 1, pp. 7–12, January 2020.
- 9) Jun Tani. *Exploring Robotic Minds: Actions, Symbols, and Consciousness as Self-Organizing Dynamic Phenomena*. Oxford University Press, 2016.
- 10) 稲谷龍彦. 技術の道徳性と刑事法規制. 松尾陽（編）, 『アーキテクチャと法』, 第4章, pp. 93–128. 弘文堂, 2017.
- 11) 牧野英二編. 『新・カント読本』. 法政大学出版局, 2018.
- 12) ジュリア・アナス（著）, 相澤康隆（訳）. 徳は知なり. 春秋社, 東京, 2019.
- 13) 稲谷龍彦. ポスト・ヒューマニズムにおける刑事責任s. 宇佐美誠（編）, 『AI で変わる法と社会：新しい

| 5 <https://www.meti.go.jp/press/2020/07/20200713001/20200713001-1.pdf>

人間の条件』, 第 6 章, pp. 113–136. 岩波書店, 2020.

- 14) フッサール 著, 浜渦辰二 訳.『デカルト的省察』. 岩波文庫, 2001.
- 15) マルティン・ハイデッガー, 細谷貞雄 訳.『存在と時間 〈上〉』. ちくま学芸文庫, 1994.
- 16) マルティン・ハイデッガー, 細谷貞雄 訳.『存在と時間 〈下〉』. ちくま学芸文庫, 1994.
- 17) M. メルロー＝ポンティ, 竹内芳郎・小木貞孝 訳.『知覚の現象学 1』. みすず書房, 1967.
- 18) M. メルロー＝ポンティ, 竹内芳郎・木田元・宮本 忠雄 訳.『知覚の現象学 2』. みすず書房, 1974.
- 19) ブルーノ・ラトゥール, 川崎 勝 平川秀幸 訳.『科学論の実在—パンドラの希望』. 産業図書, 2007.
- 20) ピーター＝ポール フェルベーク 著, 鈴木 俊洋 訳.『技術の道德化: 事物の道德性を理解し設計する』. 法政大学出版局, 2015.
- 21) 細田耕.『柔らかヒューマノイド』. 化学同人, 2016.
- 22) Hisashi Ishihara, Binyi Wu, and Minoru Asada. Identification and evaluation of the face system of a child android robot affetto for surface motion design. *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 5, p. 119, 2018.
- 23) 河島 茂生編著.『AI 時代の「自律性」』. 勁草書房, 2019.
- 24) スタニスラス・ドゥアンヌ, 高橋 洋＝訳.『意識と脳——思考はいかにコード化されるか』. 紀伊國屋書店, 2015.
- 25) 河本英夫.『オートポイエーシス』. 青土社, 1995.
- 26) F. J. Varela, H. R. Maturana, and R. Uribe. Autopoiesis: The organization of living systems, its characterization and a model. *BioSystems*, Vol. 5, pp. 187–196, 1974.
- 27) Ulric Neisser. The self perceived, pp. 3—22. *Emory Symposia in Cognition*. Cambridge University Press, 1994.
- 28) Anil Seth, Keisuke Suzuki, and Hugo Critchley. An interoceptive predictive coding model of conscious presence. *Frontiers in Psychology*, Vol. 2, p. 395, 2012.
- 29) P. Haggard. Sense of agency in the human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, Vol. 18, pp. 196–207, 2017.
- 30) Shaun Gallagher. Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 4, No. 1, pp. 14 – 21, 2000.
- 31) Roberto Legaspi, Zhengqi He, and Taro Toyoizumi. Synthetic agency: sense of agency in artificial intelligence. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, Vol. 29, pp. 84 – 90, 2019. SI: 29: Artificial Intelligence (2019) .
- 32) Minoru Asada. Artificial pain may induce empathy, morality, and ethics in the conscious mind of robots. *Philosophies*, Vol. 4, pp. 38–47, 2019.
- 33) T. Kawasetsu, T. Horii, H. Ishihara, and M. Asada. Flexible tri-axis tactile sensor using spiral inductor and magnetorheological elastomer. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 18, No. 4, pp. 5834–5841, 2018.
- 34) Jorge L. Copete, Yukie Nagai, and Minoru Asada. Motor development facilitates the prediction of others' actions through sensorimotor predictive learning. In *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Development and Learning, and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob 2016)*, pp. (CD-ROM) , 2016.

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

- 35) Minoru Asada. Towards artificial empathy. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 7, pp. 19–33, 2015.
- 36) ジョシュア・グリーン (著), 竹田円 (訳). モラル・トライブズ-共存の道德哲学へ- (上・下). 岩波書店, 東京, 2015.
- 37) 笠木雅史. 自動運転の応用倫理学現状と課題: 自動運転車とトロリー問題. 日本ロボット学会誌, Vol. 39, No. 1, p. to appear, 2021.
- 38) Wendell Wallach and Colin Allen. *Moral Machines: Teaching Robots Right from Wrong*. Oxford University Press, 2008.
- 39) ウェンデル・ウォラック (著), コリン・アレン (著), 岡本 慎平 (翻訳), 久木田 水生 (翻訳). ロボットに倫理を教えるーモラル・マシーンー. 名古屋大学出版会, 2019.
- 40) Yukie Nagai, Yuji Kawai, and Minoru Asada. Emergence of mirror neuron system: Immature vision leads to self-other correspondence. In *IEEE International Conference on Development and Learning, and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob 2011)*, pp. CD-ROM, 2011.
- 41) Yuji Kawai, Yukie Nagai, and Minoru Asada. Perceptual development triggered by its self-organization in cognitive learning. In *In Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5159–5164, 2012.
- 42) Ayako Watanabe, Masaki Ogino, and Minoru Asada. Mapping facial expression to internal states based on intuitive parenting. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 19, No. 3, pp. 315–323, 2007.