

2.2 ロボティクス

ロボティクスは、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。IT との融合により、ロボットの自律化による適用領域の拡大、ネットワーク化やシステム化による多様なサービスへの組み込みが進みつつある。

電気仕掛けという意味で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、画像認識や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てきた。また人間や動物の運動能力を模倣するロボットも登場した。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年代には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、人間と知的なインタラクションが可能なパートナーとして存在に期待が高まっている。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。

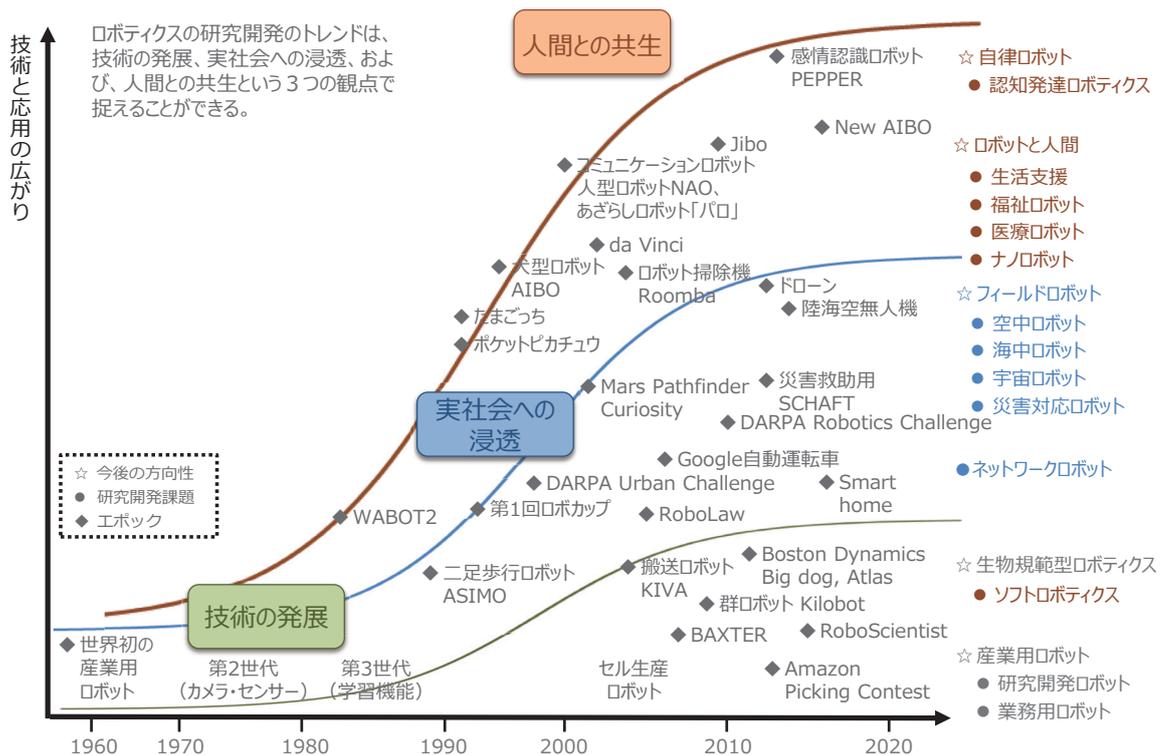


図2-2-1 ロボティクスの研究開発のトレンド

ロボティクスの研究開発領域を本俯瞰区分では図2-2-2に示すように応用領域、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) 社会インフラ、モビリティ、生活支援、医療、製造などの応用領域からみたニーズとニーズに応えるための技術群とその発展の方向性を明確化すること、2) ロボティクスに革新的変化をもたらさる新興領域を明確化すること、3) 技術の発展、社会における利活用促進、産

業競争力の強化の観点での重要性、の三つの観点から、以下の12の研究開発領域を採り上げることにした。

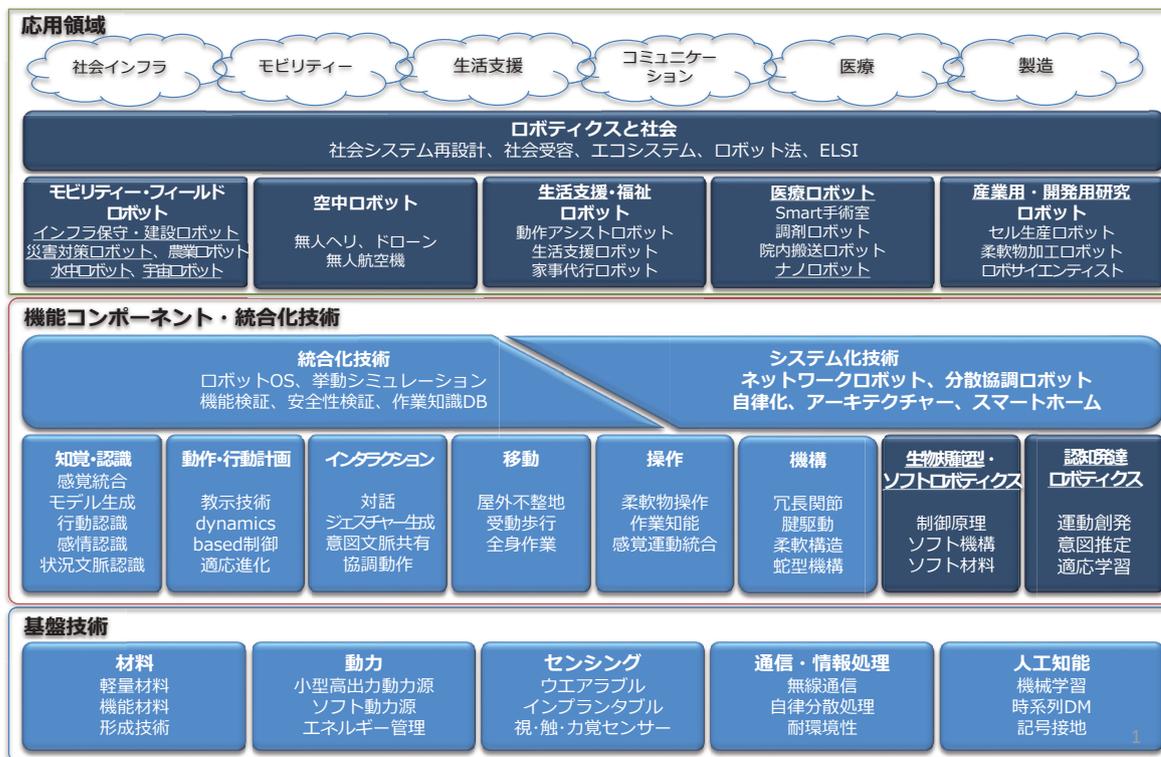


図2-2-2 ロボティクスの俯瞰図

① 認知発達ロボティクス

認知発達ロボティクスは、ロボットや計算モデルによるシミュレーションを駆使して、人間の認知発達過程の構成的な理解と、その理解に基づき人間と共生するロボットの設計論を確立する研究開発領域である。中核となるのは、ロボットの身体性とそれに基づく社会的相互作用である。その発展形が構成的発達科学である。

② 生活支援ロボット

生活の質や利便性向上を目指し、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ロボット技術の確立を目指す研究開発領域。食事・排泄・整容・入浴・移動など生活を営む上で不可欠な基本的日常生活動作、家事・外出といった屋内外、健康管理やコミュニケーション、道具を用いた作業を含む手段の日常生活動作に関する自立支援、支援者支援、就労・社会参加支援を含む。IoT技術の融合を確立していく段階にある。

③ 医療ロボット

医療ロボットは、ロボット工学の医療への活用であり、既に様々な応用事例が存在し、かつ将来的により広範な先進的応用が期待される研究開発領域である。その応用展開は多岐に及ぶが、ここでは、ある一定の動作を伴いながら、治療あるいはその支援を目的とするものを医療ロボットと位置づける。特に当該研究領域にて注目すべきは、機構・制御・センサー技術を統合した医療ロボットによる治療・診断・分析の統合により、従来には得られなかった医療効果向上を目指す研究開発である。

④ 海中ロボット

海中ロボットとは、人がいけない海中での調査観測や作業を行うロボットである。10m以下の浅い海ならば、人はなんとか潜れるが、それ以上の深い海になると人は簡単にはいけない。地球環境を支配する海水、地震、津波の発生源である海底、水産資源を産む海、など知らなければならぬ海中の諸項目はいくらでもあり、また、石油やガスを生み出す宝の山である。人に代わってそこにでかけていき、何かをするのはロボットである。

⑤ 宇宙ロボット

「宇宙ロボット」は、宇宙開発および月惑星探査を目的として宇宙空間で使用されるロボットである。地球を周回する国際宇宙ステーションにおける作業や、軌道上の宇宙ゴミ（スペースデブリ）等の捕獲回収を目的とした「軌道上宇宙ロボット」および、月や惑星などの天体表面を移動探査する「月惑星探査ロボット」に大別される。

⑥ インフラ保守・建設ロボット

日本では、高度経済成長期に集中的に整備された社会資本が老朽化し、インフラの維持管理・更新の作業が急務である。また、近年、自然災害が多発しており、災害発生時の災害調査や応急復旧は重要な課題である。一方、建設分野においては、少子高齢化に起因する若年就業者数の減少や熟練した技術者・技能者の不足が問題となっている。これらの問題を解決するため、ICTやロボット工学を用いた点検や調査、建設における自動化や省人化が期待されている。

⑦ 災害対応ロボット

地震、津波、集中豪雨による水害、台風による暴風雨、山崩れ・地滑り、森林火事、竜巻、火山の噴火、土石流などの様々な自然災害および工場でのプラント事故、原子力発電所の事故、公共交通機関での事故、テロによる事故などの様々な人為災害が世界で頻繁に発生している。これらの災害現場に人間が入っていくには大きなリスクがある。人間の代わりに災害直後の現場に進入し、情報収集や人命救助などの緊急対応や災害からの復旧復興に関わるタスクを遂行する極限環境で有用なロボット技術を災害対応ロボットと定義する。

⑧ ソフトロボティクス

ソフトロボティクスは、柔軟材料に特有の機械的・電氣的・化学的性質を積極的に利用したロボットシステムに関する新興の学術分野である。「ソフト」は物質的な柔軟性（ソフトネス）を意味する。主要な研究テーマとして、柔軟材料を利用した新しいロボット機構の探索、やわらかいロボットのモデル化と制御、柔軟物体の操作、生物規範型ソフトロボットを用いた生物の振る舞いの原理解明が挙げられる。接触安全性の付加や、高分子材料の多用による製造コストの低減などによって、ロボットの応用拡大に貢献することが期待される。高分子材料学、生体力学、フレキシブルエレクトロニクスなど、隣接する諸分野と連携した学際的なシステム統合を特徴とする。

⑨ 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伏在しているはずである。生物規範型ロボティクスは、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。

⑩ 産業用ロボット

産業用ロボットとは、国際標準化機構（ISO）によれば「3軸以上の自由度を持ち、自動制御、

プログラム可能なマニピュレーター」となる。一般的に工場で利用されているロボットアームであり、作業の前に教示された位置に自動的に移動する繰り返し作業を実行する。従来の位置のみ教示再生方式で構築されてきた産業用ロボットシステムに、カメラなどの外界情報の導入や力を制御する技術の確立が必要となっている。

⑪ 研究開発用ロボット

高度なロボット技術を活用し、バイオ・ライフサイエンス研究生産性の向上を目指した技術開発。すなわち、ロボットにより多岐にわたる研究開発・バイオ産業に必要な作業を自動化し、データ再現性の向上を目指すとともに、少子化により深刻化する人材確保と育成の問題を克服する研究開発。また、ロボットにより、品質の高いデータを大量に得ることにより、人工知能（AI）が必要とする学習データを高効率に取得することを目指す研究開発も本領域に含まれる。

⑫ ナノロボット

20年以上の歴史があるマイクロロボティクスと違いナノロボティクスは10年足らずの挑戦的研究分野であるため、厳密な研究分野の定義は存在しない。名称にナノという寸法サイズが入っているが、ナノロボットと称していても、実際は数 mm ～ 0.1mm 程度のマイクロロボットサイズであることも多い。本報告書では 0.1mm 以下の肉眼では見えないスケールの研究を中心に記述する。

2.2.1 認知発達ロボティクス

(1) 研究開発領域の定義

認知発達ロボティクスの目的は、ロボットや計算モデルによるシミュレーションを駆使して、人間の認知発達過程の構成的な理解と、その理解に基づき人間と共生するロボットの設計論を確立することである。その中核となるのは、ロボットの身体性とそれに基づく社会的相互作用である。その発展形が構成的発達科学であるが、目指すところはほぼ同じである。基本的な神経構造から始まり、身体性や社会的相互作用に基づき、学習手法を介して、機能分化が段階的に生じる過程を描いている。新たな理解や洞察の獲得を目的としているので、知識の創出がターゲットとみられがちだが、技術の確立が表裏一体であり、分けては行けないことが、認知発達ロボティクスの基本的な考え方である。

(2) キーワード

身体性、社会的相互作用、ボディイメージ、ボディスキーマ、痛覚、共感、意識、学習、発達

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

近年、目覚ましい進展を遂げ、分野を拡張しつつある広い意味でAIの観点からロボティクスの役割と意義の説明を通じて、認知発達ロボティクスの意義の明確化を試みる。この観点から、最初に現状の深層学習の状況を再認し、認識系のデータ量、結果、応用範囲の豊富さに比して、運動系が量的にも質的にも貧素であることを指摘する。そして、それを打破する可能性を示す例を紹介し、残された課題等を列挙する。これを解決する一つとして、認知発達ロボティクスの考え方を導入する。認知発達ロボティクスの思想的背景である人間の心と身体や事物との関係に関する歴史的流れを概説する。それは、ロボットの持つ身体性や社会的相互作用の能力が、AIの一つの究極的課題である人工意識に結実されるのではないかという期待からである。それにより心の設計課題が浮き彫りになると予想される。そして、認知発達ロボティクスのゴールである、人間の認知発達過程の理解の一つの側面として、ロボットが自己という概念を持つ可能性を検討する。自己概念の発達の形態として、生態学的自己、対人的自己、社会的自己を形成する機構を検討する。それぞれの段階での課題を列挙し、ロボットの身体性にもとづく、身体表象、自己感覚、共感などの社会的相互作用などに関連する認知発達ロボティクスのアプローチを紹介する。前半が計算神経科学的側面が中心であり、後半は、認知発達過程の計算原理としての予測学習規範を紹介し、その可能性を検討する。そして、最後に人工意識のあり方を議論する。

[研究開発の動向]
深層学習の現状

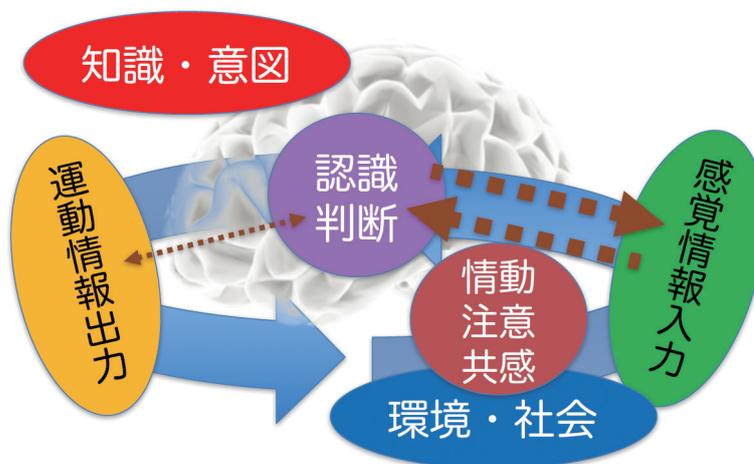


図2-2-3 深層学習の現状の適用範囲

深層学習の現状の適用範囲を図 2-2-3 に示す。随時、更新改良がなされているので、すぐに古くなることを覚悟で示す。深層学習は、元々、ヒトの視覚システムのモデル化から始まっているので、音声も含めたマルチモダルな感覚情報からの認識・判断が得意で有り、言語データとも組合せた音声や画像の出力も可能である。方や、運動出力に関しては、その厚みがない。理由は、画像の場合、数千万枚のデータが利用可能だが、ロボットの試行回数には限界があるからである。運動出力とのパイプが太くなることで、初めて、環境を含んだループが完成し、入力（感覚）から出力（運動）への即応的な応答（自動的かつ無意識的な行動）が可能になる。最近、やっとロボットの行動生成への適用が開始している。これらに関しては、以下で簡単にふれる。

深層学習によるロボットの運動生成：深層学習では、主に多様な感覚情報からの認識・判断の学習がメインであり、優れた成果が出ていることから、これをロボットの運動生成に応用する際に、以下の 2 つの考え方がある。

- ① これまで困難と想定されていた視覚情報処理の部分に適用し、正確な物体認識や分割領域情報を用いて、従来のロボティクスの枠組で解決する場合（例：^{1), 2), 3)}）。
- ② 図 2-2-3 に示したように、ロボット学習の枠組み、すなわち感覚・運動ループの中で深層学習の手法を適用する場合（例：^{4), 5), 6), 7), 8)}）。

国際会議での技術動向

認知発達ロボティクスに最も関連する国際会議として、発達・学習とエピジェネティック・ロボティクス国際会議（International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics: ICDL-EpiRob）が 2018 年 9 月早稲田大学で開催された。発表された論文や併催されたワークショップのキーワードの上位 3 つは以下であった（図 2-2-4 参照）。

- ・Sensorimotor development
- ・Machine Learning methods for robot development
- ・Human-human and human-robot interaction and communication

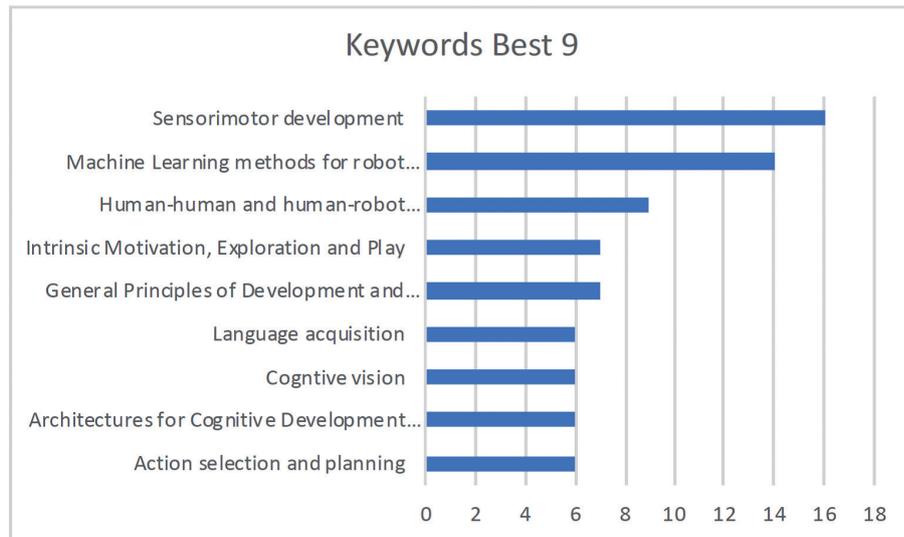


図2-2-4 ICDL-EpiRob2018における上位キーワード

第1位の感覚運動発達、本会議のメインピックであり、長年一位を保ってきているが、深層学習の興隆を受け、機械学習が猛追している。第3位は、通常のロボットの国際会議（ICRA や IROS）では、ヒューマン・ロボットインタラクションに相当し、これらの会議でも上位を占めているが、本会議では、ヒューマン・ロボットインタラクションの元となる人間対人間のコミュニケーションに焦点をあてており、人間の認知過程の構成的理解を推進している証と思われる。因みに2018年10月にスペインマドリードで開催された知能ロボットとシステムに関する国際会議（IROS）では以下の5つがトップに上がっており、同年5月にオーストラリア・ブリスベンで開催されたロボットとオートメーションに関する国際会議（ICRA）のトップ5位とほぼ同じである。第5位の Autonomous Vehicle Navigation は自動運転に相当し、それに必要な技術が SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）である。

1. Deep Learning in Robotics and Automation
2. Motion and Path Planning
3. Localization (ICRA では4位)
4. Learning and Adaptive Systems (ICRA では3位)
5. Autonomous Vehicle Navigation (ICRA ではSLAM)

ICDL-EpiRob 会議に話題を戻すと、開催地の利で、日本が最も採択論文が多く、続きドイツ、フランス、中国と続くが、今回、米国からの投稿論文が激減しており、米国でのこの分野の研究が衰退してきたのかは、次年の結果をみなければ不明であろう。欧州勢は欧州内での共同研究が盛んであり、また日本の研究グループとの共同研究成果もあり、学際研究テーマが国際的にも融和を図っている。フランスは SoftBank Robotics 社からの発表が目立った。SoftBank Robotics 社といっても日本ではなく、元の Aldebaran 社の本拠地のパリから発表であった。中国は AI/ ロボティクス分野に恐ろしい勢いで投稿数を伸ばしている。ただし、認知

発達ロボティクス分野への関心はあまり高くなく、まだ気がついていない模様で、既存分野に勢力を注いでいるようである。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

(a) 予測誤差最小化原理による社会的相互作用創発

社会的認知機能の発達を統一的に説明する理論として、感覚・運動信号の予測学習に基づく計算モデルが導入されている⁹⁾。認知発達のさまざまな側面を統一的に扱おうとする試みである。

予測学習とは、身体や環境からのボトムアップな感覚信号と、脳が内部モデルをもとにトップダウンに予測する感覚信号の誤差を最小化するように内部モデルを更新したり、環境に働きかけたりすることである。認知発達過程に適用する際、2つの過程が考えられる。一つは、自己の感覚・運動経験を通じた予測器の更新による予測誤差の最小化過程で、自他認知、目標指向動作などが含まれ、認知発達初期過程に対応する。それに対し、社会的な環境では、予測した運動の実行による他者運動起因の予測誤差の最小化が課題で、模倣や援助行動などが対象である。以下では、前者の例として、ミラーニューロンシステムの発達を、後者の例として、他者行動の予測から利他的行動に至る過程を紹介する。

MNSの発達

MNS (Mirror Neuron System) については、AI白書の2017年版¹⁰⁾の1.3.3.2の「ミラーニューロンシステムと社会性発達基盤」に詳しい。簡単に言えば、自身の行為の実行と他者による同一行為の観測を同一のニューロンが符号化しており、これがマカクサルスのF5と呼ばれる運動前野で発見された¹¹⁾ことに由来する。人間も同様のシステムを有しているのではないかということで、システムと称されている。

MNSが生得的か生後の環境での学習・発達によって獲得されるかの議論は尽きない。認知発達ロボティクスの立場としては可能な限り後者の立場をとり、説明可能なモデルを構築してきた。

MNSについては、Kawai et al.¹²⁾が、発達モデルを提唱している。視覚発達をともなう感覚運動学習がMNS発達を促進するという仮説の下に、未熟な感覚の時期には自他が混同されるが、発達に伴い自他分離が起これ、これがMNSの基盤となっている主張である。言語の習得を始めとして、乳幼児の未熟であるがゆえに、さまざまな認知機能の学習を促進していることが示唆されているが¹³⁾、その計算モデル化の一つと言えよう。もう一つ、養育者側がそれを明示的・非明示的にサポートしていることも忘れてはならない。MNS創発の場合、他者(養育者)が、赤ちゃん(ロボット)の真似をしてくれることが前提となっている。

他者視点取得の困難さ

MNSが発達したことで、相手の行動観察から、自己の運動が励起され、そのことにより相手の行動の目的が予測可能になると期待される。上記の例では、簡単な運動に限っていたので、

識別が容易であったが、複雑な動きに対しては、どのように考えられるだろうか？ 自他分離が可能になったことで、「自己の気付き」の段階に入ってきた。そして次の段階として「他者視点取得 (Perspective Taking)」の課題が上がってくる。すなわち他者の視点に立てるかという課題である。同一行動の主体の差異 (自己運動か他者運動) による観察の見かけの違いの吸収で、座標変換の課題とも捉えられる。頭頂葉で自己座標系と他者座標系の変換が行われているようだ¹⁴⁾ が、発達の観点から、生得的と考えるよりも生後の学習の結果として変換プログラムが構築されたと見なしたい。とすれば、いかにして可能か？ サルの場合のゴール指向の他動詞的動作であれば、強化学習のスキームで報酬獲得による価値の等価性¹⁵⁾ により、同一行動の異なる視点からの観察による見かけの違いばかりでなく、実現方法が異なる行動でも等価とみなすことで、結果として、座標変換が可能と考えられる。ただし、これは、サルの場合に対応し、ヒトの場合は、より一般的なスキームが必要かもしれない。例えば、物体操作など学習や発達を通じて、半ばゴール指向、半ば視触覚融合の連続的表象構築により、結果として座標変換が可能かもしれない。その際には、並行する他の認知機能の発達との兼ね合い (独立か、相互促進か、干渉か) も、構成的手法の観点から興味深い課題である。

まず、自己の運動生成経験に基づく他者運動の予測課題では、最初に自己の運動生成経験を通じた感覚・運動信号の予測学習を実施し、その後、自己の運動経験に基づく他者運動の予測が可能になる¹⁶⁾。

次に、社会的行動の一種である利他的行動の創発について考えよう。発達心理学の分野では、14ヶ月の乳幼児が利他的行動を示すこと言われている¹⁷⁾。そこでは、乳幼児は社会的信号 (視線や発話) や、利他的行動に対しての報酬を受けずに、自発的に実験者を助けようとする。この過程が先に示した自己の予測器を利用した他者運動の予測と、他者起因の予測誤差を引き金とした運動の生成に対応し、これが結果として利他的行動に映ると考えられ、その過程の計算モデル化が行われた¹⁸⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

(a) 認知ミラーリング

前節で紹介した予測符号化に基づく発達原理を追求しているプロジェクトがある。人の感覚から運動に至る認知過程を鏡のように映し出し観測可能にする情報処理技術として、認知ミラーリングシステムの開発を目指しており、計算論的モデル研究と発達障害当事者研究を融合し、脳の本質的機能とされる予測符号化理論に基づき認知 (障害) 原理とその機序を明らかにすることを狙っている。本原理をもとに開発するシステムによって発達障害者の認知過程の自己理解と社会的共有を可能にすることで、これまでに類のない当事者視点からの支援と合理的配慮の実現を目指している。

JST 戦略的創造研究推進事業 (CREST) [知的情報処理] 「認知ミラーリング: 認知過程の自己理解と社会的共有による発達障害者支援」 (平成 28-33 年度、研究代表者: 長井志江)
<http://cognitive-mirroring.org>

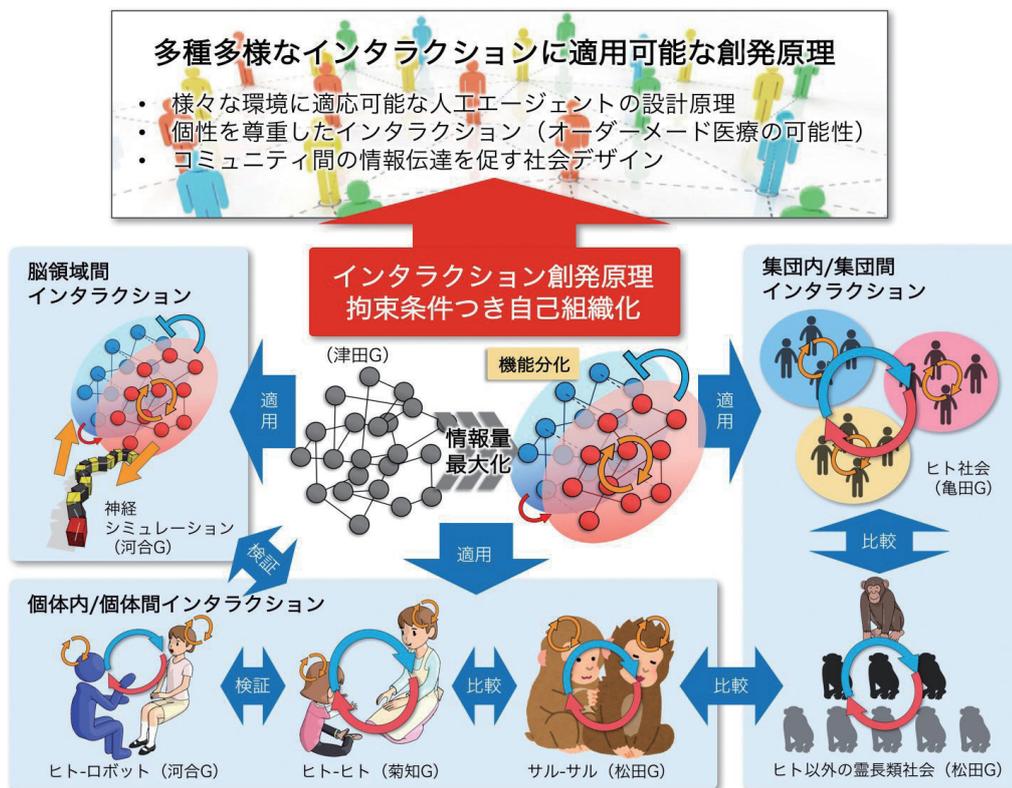


図2-2-5 機能分化プロジェクトの研究体制

(<http://www.er.ams.eng.osaka-u.ac.jp/kawai/crest/> より)

(b) 機能分化の創発原理

前章の身体と神経の結合ダイナミクスの研究で、情報ネットワークのサブネットワーク構造の機能（個々のサブネットワークの働き及びそのクラスターとしての働き）は明らかではない。その情報理論的な原理として、Yamaguti and Tsuda¹⁹⁾は、脳のヘテロなモジュール構造進化の数学的モデルを提唱している。これにもとづき、創発インタラクションを進化から発達までの拘束条件のもとで、種々の時空間スケールで解き明かそうとするプロジェクトが始まっている。

JST 戦略的創造研究推進事業 (CREST) [共生インタラクション]「脳領域/個体/集団間のインタラクション創発原理の解明と適用」(平成 29-34 年度、研究代表者:津田一郎) <http://www.er.ams.eng.osaka-u.ac.jp/kawai/crest/>

研究代表者の津田は、創発インタラクションの必須概念として、自律性、汎化性、共感や自己意識、動機づけ、時間の概念などを列挙し、上記プロジェクトで、脳領域、個体、集団のそれぞれのレベルやスケールでの相互作用の創発から生じる機能や現象としての意識のあり方が模索されている。

(5) 科学技術的課題

先の「深層学習の現状」で示したように、感覚運動ループによる学習は、環境内での行動学習の基本であると同時に、知識・意図の拘束条件が加わることで、専門家のスキル（経験知に

よる行動規範)として獲得される。また、身体が環境にさらされることで、限られたリソースの下で、実時間の応答の要求に応じるために、関連しないものを処理対象としない注意が必要になり、さらに、社会的な環境の中での他者のやり取りを通じ、情動、そして共感などのメンタルな機能が人工システムにも芽生える可能性がある(図 2-2-3 参照)。この課題を追求してきたのが、認知発達ロボティクスである。

特に、身体性の思想そのものは、哲学者 Maurice Merleau-Ponty により 1945 年に書かれた名著“Phenomenologie de la perception”(英語訳名は“Phenomenology of Perception”;日本語訳名は『知覚の現象学』^{20), 21)}がその礎であろう。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、同じ肉厚の身体が、触れたり見たりする主体と同時に触れられたり、見られたりする物体にも与えられうるとし、主観と客観の2つの極の間の繰り返される交流の場を身体が与えると主張する。すなわち、客観的物理世界と主観的経験をむすぶメディアとしての身体的重要性を指摘している。これは、認知発達ロボティクスにおける「身体性」の基本概念の根幹である。

この身体性の概念を主客の間の投影とみなし、物理的身体からの拘束を緩める「脱身体」の議論を青山学院大学の鈴木宏昭らが始めている²²⁾。プロジェクション科学と呼ばれ、認知科学的視点からの身体性の再考を促している。この視点からの発展とは、若干異なるが、イタリア技術研究所(IIT)のGiulio Sandini教授らのグループでは、人間自体の社会性の課題をロボットとの相互作用を通じて解き明かし、ロボットを始めとする人工物との共生社会のあり方を問うている²³⁾。

継続かつ蓄積型の学習過程により広範な経験の符号化をエピソード記憶として保持し、現在直面しているシーンからの断片的情報を駆使して、人間の行為観察や言語情報と合わせて、過去の連想記憶を掘り起こし、人間との協働作業を遂行している。彼らは、その他の関連研究も含め、人工物であるロボットは人間の脳のあり方に拘束されることなく、クラウドなどのネットワークも利用すべきと主張している。

このような動向を考えると、今後の方向性として、以下の2つがポイントと考えられる。

- ③ 人間とロボットを含んだ環境での行動心理学的な側面の実験やこれを補足するイメージングなどの神経科学的実験、さらには計算モデルを駆使した検証実験など、人間を含んだ多様な実験・解析・統合を通じた認知発達ロボティクスの原理となる構成的発達科学を確立させる方向。
- ④ 身体性の拡張を物理世界からクラウドのネットワーク空間に伸ばすことで、人間サイドからの人工物へのアプローチがより重みをます傾向。これは、Andy Clarkの著書“Natural-Born Cyborgs”(日本語訳名は『生まれながらのサイボーグ』²⁴⁾を彷彿とさせる。

(6) その他の課題

浅田²⁵⁾は、痛みの神経回路をロボットに埋め込むことで、痛みの感覚が、MNSを通じた他者の痛みへの共感、さらには、モラル、倫理の創発に繋がるとの仮説を立てており、これが意識の課題と関連し、さらには、法制度の問題にも発展すると以下のように主張している。

身体には、上記の痛覚回路が内在し、触覚とは異なる痛みを検知することが可能とする。また、社会的相互作用の前提として、自他認知過程を通じ、他者の運動や知覚を推定しようとする傾向があるとする。これらに基づき、これまでの認知発達ロボティクスの研究が系列的に結び付くことで、共感の発達、そしてモラルの発生の可能性を示す。さらに、「人工システムが道徳的行為者や受益者になり得るか」などの倫理的な側面、さらには、「人工システムが自身の過失に対して責任をとれるか」などの法制度の課題にも言及し、すでに現代社会に浸透している人工システムとの未来共生社会を議論する必要がある。

関連するプロジェクトとして、JST RISTEX の「人と情報のエコシステム」の研究プロジェクトで、浅田が代表を務める「自律性の検討に基づくなじみ社会における人工知能の法的電子人格」(<http://www.ams.eng.osaka-u.ac.jp/ristex/>)がある。このプロジェクトでは、近年のAI技術は、人工システムやロボットにおけるある種の自律性を可能にし、ちょうど親離れした子供のように設計者が予測できない行動を表出する可能性があることを指摘する。このような状況では、現在の法制度では設計者か利用者が過度な法的責任を負わされる恐れがあり、健全な科学技術の進展を阻害する可能性がある。そこで、人工システムの自律性をその目的の有無やその書き換え可能性に準じて三段階程度を想定し、従来の法人格論の分析を通じて、これらの段階に応じた法的取扱モデルを考案する。さらに、既存の責任理論の問題点を指摘し、リーガルビーイングズ (Legal Beings) としての人工システムに対する新たな制度を提案する。また、未来社会で起きそうな人工システムの過失を想定したビデオを作成し、一般社会がどのように受け入れるかを調査して、一般社会になじんだ法整備案を提案し、自律性の概念の深化と未来社会に通用する人工システムとその環境を提示することを目的としている。同じ RISTEX の他のプロジェクトとも協働し、心理学的側面、哲学的側面も含め、人工システム全般が社会に及ぼす影響を含めた議論を展開している。

(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	○	→	認知発達ロボティクスの提唱国であり、基礎研究に関しては、活動レベルが維持されている印象を受ける。発達を直接あつかうことの困難さがあり、原理モデルの獲得が試みられているが、まだ決定版はなく、模索している意味で現状維持である。
	応用研究・開発	◎	↗	発達の部分よりも認知の側面の応用研究としては、JST CREST の鈴木健嗣 (筑波大学) プロジェクト「ソーシャル・イメージング」 ²⁶⁾ が挙げられる。鈴木代表自身が認知発達をイメージしているかどうかは別として、さまざまなデバイス開発を通じて、身体性の意味と社会性を織り交ぜた興味ある研究を行っており、討論の価値はある。その他、先に示した「認知ミラーリング」においても、自閉症者への支援システムの開発がなされている。
米国	基礎研究	△	↘	深層学習 (DL) に代表される AI 研究の興隆の勢いにおおされ、多くの研究者が DL 関連の研究に傾倒している。計算神経科学者が多いが、認知発達の根源的な研究との関連を行っている研究者は少ない。
	応用研究・開発	△	↘	基礎研究と同様、DL の応用研究は多いが、ブラックボックスとしての利用が大半で、残りの枠組みは既存であり、新鮮味が少なく、認知発達の応用的な側面は薄い。
欧州	基礎研究	○	→	イタリア技術研究所 (IIT) をはじめとして、フランス INRIA などが、認知発達関連の研究を行っており、EU のプロジェクトを部分的に獲得しているが、大規模な予算のプロジェクトには至っていない。ドイツフランクフルトの FIAS では、計算モデルを使った種々の知覚現象の再現や動機づけの説明が試みられている。
	応用研究・開発	○	→	ドイツのビーレフェルト大学の CITEC では、人間とロボットの相互作用の工学的な応用研究を行ってきたが、最近、継続プロジェクトの予算獲得に失敗した模様である。フランスではアルデバラン社のペッパーを使った応用研究が発表されており、その成果が徐々に市場に出回ると期待される。

中国	基礎研究	△	↘	中国は中央政府の巨額の投資がAI・ロボット関係にばらまかれており、現在は、DLなどの応用研究が盛んに行われている。米国で活躍する中国人も含めると、相当な数の研究者が研究と論文作成に費やされているが、認知発達などの基礎研究には、短期の応用の見込みが困難であるため、見送られている感がある。その意味では、米国に類似した傾向である。
	応用研究・開発	△	↘	上記で説明したように、基礎研究すらあまり行われておらず、応用研究は皆無に等しい。しかしながら、認知発達ロボティクス研究に応用が明確になれば、かなりの投資が見込まれる。
韓国	基礎研究	△	↘	米国や中国やと同様の傾向で、認知発達ロボティクスの基礎研究の素地が見られない。AI・ロボティクスに関しては、軍事関係も含め、フォロー型の研究が中心とみられる。
	応用研究・開発	△	↘	AI・ロボティクス一般の応用研究はかなり行われているようだが、基礎研究の素地がないだけに、認知発達ロボティクスの応用研究はほとんど見られない。

(8) 参考文献

- 1) Ian Lenz, Honglak Lee, and Ashutosh Saxena, “Deep learning for detecting robotic grasps” , arXiv:1301.3592 (2013) ; International Journal of Robotics Research, Vol. 34, No. 4-5, (2015) pp.705-724.
- 2) Joseph Redmon and Anelia Angelova, “Real-time grasp detection using convolutional neural networks” , arXiv:1412.3128 (2014) ; In the Proceedings of 2015 International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2015; Seattle, Washington, May 26-30, 2015) pp. 1316-1322.
- 3) Lerrel Pinto and Abhinav Gupta, “Supersizing self-supervision: Learning to grasp from 50k tries and 700 robot hours” , arXiv:1509.06825 (2015) ; In the Proceedings of the 29th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2016; Las Vegas, Nevada, June 26-July 1, 2016) pp. 3406-3413.
- 4) Sergey Levine, Chelsea Finn, Trevor Darrell, and Pieter Abbeel, “End-to-end training of deep visuomotor policies” , arXiv:1504.00702 (2015) ; Journal of Machine Learning Research, Vol. 17, Issue 1, (2016) pp. 1334-1373.
- 5) Frederik Ebert, Chelsea Finn, Alex X. Lee, and Sergey Levine, “Self-supervised visual planning with temporal skip connections” , In the Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning (CoRL 2017; Mountain View, California, November 13-15, 2017) , In the Proceedings of Machine Learning Research, Vol. 78, (2017) pp. 344-356.
- 6) Chelsea Finn, Ian J. Goodfellow, and Sergey Levine. Unsupervised learning for physical interaction through video prediction. In the Proceedings of 30th Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2016; Barcelona, Spain, December 5-10, 2016) pp. 64-72.
- 7) Chelsea Finn and Sergey Levine. Deep visual foresight for planning robot motion. In the proceedings of 2017 International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2017; May 29-June 3, Marina Bay Sands, Singapore, 2017) . pp. 2786-2793
- 8) Pin-Chu Yang, Kazuma Sasaki, Kanata Suzuki, Kei Kase, Shigeki Sugano, and Tetsuya Ogata, “Repeatable folding task by humanoid robot worker using deep learning” , IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 2, No. 2, (2017) pp. 397-403.
- 9) 長井志江, “認知発達の原理を探る：感覚・運動情報の予測学習に基づく計算論的モデル” ,

- ベビーサイエンス, Vol. 15, (2016) pp. 22-32.
- 10) 独立行政法人 情報処理推進機構 AI 白書編集委員会 (編), 『AI 白書 2017』 (KADOKAWA, 2017) .
 - 11) Giacomo Rizzolatti, Rosolino Camarda, Leonardo Fogassi, Maurizio Gentilucci, Giuseppe Luppino, and Massimo Matelli. Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey: Ii. area f5 and the control of distal movements. *Experimental Brain Research*, Vol. 71, Issue 3, (1988) pp. 491-507.
 - 12) Yuji Kawai, Yukie Nagai, and Minoru Asada, “Perceptual development triggered by its self- organization in cognitive learning” , In the Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012; Vilamoura, Portugal, October 7-12, 2012) pp. 5159-5164.
 - 13) Elissa L. Newport, “Maturation constraints on language learning” , *Cognitive Science*, Vol. 14, Issue 1, (1990) pp. 11-28.
 - 14) Kenji Ogawa and Toshio Inui. Lateralization of the posterior parietal cortex for internal monitoring of self-versus externally generated movements. *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol. 19, Issue 11, (2007) pp. 1827-1835.
 - 15) Yasutake Takahashi, Yoshihiro Tamura, and Minoru Asada, “Mutual development of behavior acquisition and recognition based on value system. In the Proceedings of the 10th international conference on simulation of adaptive behavior (SAB ’ 08; Osaka, Japan, July 7-12, 2008) pp. 291-300.
 - 16) Jorge L. Copete, Yukie Nagai, and Minoru Asada, “Motor development facilitates the prediction of others’ actions through sensorimotor predictive learning” , In the Proceedings of the 6th Joint IEEE International Conference on Development and Learning, and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob 2016; Cergy-Pontoise, France, September 19-22, 2016) , pp. 223-229.
 - 17) Felix Warneken, Frances Chen, and Michael Tomasello, “Cooperative activities in young children and chimpanzees” , *Child Development*, Vol. 77, No. 3, (2006) pp. 640-663.
 - 18) Jimmy Baraglia, Yukie Nagai, and Minoru Asada, “Emergence of altruistic behavior through the minimization of prediction error” , *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, Vol. 8, No. 3, (2016) pp. 141-151.
 - 19) Yutaka Yamaguti and Ichiro Tsuda, “Mathematical modeling for evolution of heterogeneous modules in the brain” , *Neural Networks*, Vol. 62, (2015) pp. 3-10.
 - 20) モーリス・メルロ＝ポンティ (著), 竹内芳郎 (訳), 小木貞孝 (訳), 『知覚の現象学 1』 (みすず書房, 1967) .
 - 21) モーリス・メルロ＝ポンティ (著), 竹内芳郎 (訳), 木田元 (訳), 宮本忠雄 (訳), 『知覚の現象学 2』 (みすず書房, 1974) .
 - 22) 鈴木宏昭, “プロジェクト科学の展望” , 日本認知科学会第 33 回大会発表論文集, (2016) pp. 20-25.
 - 23) Giulio Sandini, Vishwanathan Mohan, Alessandra Sciutti, and Pietro Morasso, “Social

cognition for human-robot symbiosis—challenges and building blocks” , *Frontiers in Neurorobotics*, Vol. 12, No. Article 34, (2018) pp. 1-19.

- 24) アンディ・クラーク（著）, 呉羽真（訳）, 久木田水生（訳）, 西尾香苗（訳）, 『生まれながらのサイボーグ：心・テクノロジー・知能の未来』（春秋社, 2015）.
- 25) 浅田稔, “痛みを感じるロボットの意識・倫理と法制度” , *人工知能学会誌*, Vol. 33, No. 4, (2018) pp. 450-459.

2.2.2 生活支援ロボット

(1) 研究開発領域の定義

生活の質や利便性向上を目指し、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ロボット技術の確立を目指す研究開発領域。食事・排泄・整容・入浴・移動など生活を営む上で不可欠な基本的日常生活動作（ADL: Activities of Daily Living）、家事・外出といった屋内外、健康管理やコミュニケーション、道具を用いた作業を含む手段的日常生活動作（IADL: Instrumental Activities of Daily Living）に関する自立支援、支援者支援、就労・社会参加支援を含む。IoT 技術の融合を確立していく段階にある。

(2) キーワード

サービスロボット、ソーシャル・ロボット、ケア・ロボット、ロボット支援機器、人支援技術、介護福祉ロボット、移動作業支援、コミュニケーション支援、エンパワーメント、

(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、生活を支援するという目的志向に立脚し、支援される側に対する自立支援や社会活動支援、および支援する側に対する支援者支援が対象となる。すでに 90 年代前半には、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サービスロボットとして、加藤により生活支援ロボット（リリスロボット: Living and Life Support Robot）が提案されている¹⁾。また土肥は、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²⁾。

基本的日常生活動作（ADL）や手段的日常生活動作（IADL）の支援は、自立支援や支援者支援にとって重要な課題である。またこれに加え、就労支援や娯楽、コミュニケーションなどは社会参加支援であるといえる。これまで、これら生活の介助や支援は人手によるサービスとしてなされてきた。社会福祉は地域社会のネットワークに大きく依存するが、個々人の生活は、ロボットを含む機械によって支えられる範疇は多く、世界的な社会課題の解決に向けた技術の大きな柱の一つとなる研究領域である。このように、人の営みをロボットが支援するという観点からも、本領域は工学・情報学のみならず、人に関わる広範な研究領域と結びつくものであり、学際的な研究開発という科学的・工学的・社会的に高い意義がある。

これら生活支援ロボットは、人の視線や表情計測といった生体センシング技術、人の意図推定・行動予測技術、複数のモダリティを通じた人の身体へのフィードバック技術という観点より、系内に人を含むシステムをデザインすることが必要不可欠である。この観点から、人の身体的・認知的能力を補綴し強化する人間拡張（Augmented Human）工学との関連は高い。なお、人と機械の協働作業において、人と機械がどのようなインターフェースによって接続されているか（機械がどの程度介入しているのか）という観点から、多岐にわたる人支援技術の全体像を体系的に捉えることが可能である。

[研究開発の動向]

生活支援ロボットは、利用者の自立を高めて生活機能の向上を実現するとともに、介護・看護職員や家族といった支援する側の人々の生活の質を向上させることを目指している。その作業目的別に区分すると、①移動作業型生活支援ロボット、②情報・コミュニケーション型生活支援ロボットに大別される。

① 移動作業型生活支援ロボット

義肢、装具、車椅子、車椅子搭載型マニピュレーターなど、本人の意思による移動や作業を支援するロボット。福祉車両等は、今後の自動運転技術と融合することで、搭乗型の生活支援ロボットであると言える。体位変換や排泄行為を支援するベッド等の介護支援機器も環境要因としての生活支援ロボットと位置づけられる。

人の身体動作を支援する技術は、移動という基本的な日常動作に対し、四肢をはじめとする身体の動作機能を拡張・増幅・補助もしくは代替する技術といえる。「パワードスーツ」などの言葉で知られる身体着用型の動作支援機器は、外骨格ロボットとして古くより知られた技術であり、上肢・下肢ともに、世界的に多く研究がなされている。日本ではロボットスーツ HAL、米国では BLEEX、欧米では ReWalk、Locomat などが先駆的な取り組みを行っているが、このような動作支援機器は、介護支援や障害者等の移動支援、労働による身体的負担の軽減など汎用性が高い。例えば、物理的な支援としての代表的な介護動作として、介護者がベッドや車椅子などから被介護者を抱き上げ移動し抱き下ろすという移乗動作が挙げられる。これは介護現場において最も負荷の高い重労働であるにも関わらず、現状は介護者の手で行われることが一般的であり、介護者の腰痛などを引き起こす原因となっている。移乗動作の支援機器としては介護用リフターが挙げられるが、着脱に手間がかかるといった問題から、十分に普及しているとは言いがたい。近年、腰部に着用する動作支援機器が広く研究開発されている。また、トヨタ、ホンダ、パナソニック等は、作業支援を目的とした動作支援機器を事業として行っており、販売も進んでいる³⁾。

このような作業支援・介護支援技術については、今日の作業者の業務負担の軽減や、人手不足を解消するものとして期待が高まっている。また人の作業の代替・支援を目的として、高度な人間型ロボットにより問題を解決する試みがなされている。例えば、ロボットが腕で被介護者を抱きかかえて、移乗する動作を支援するロボット⁴⁾ などが見られる。また、ベッドから車いすへの移乗や、屋内のトイレ等への移動をスムーズにするなどの目的で、人の形をしていない機能的なロボットの開発も行われている。トヨタ自動車の非装着型のパートナーアシストロボット⁵⁾、パナソニックの離床アシストベッド⁶⁾ などを代表とする移乗動作支援ロボット（移動介助機器）の他、食事支援も多く研究が行われている⁷⁾。

食事は毎日決まった時間に行われており、ロボットによる食事支援は有益である。日本ではセコム社のマイスプーンが先駆的な取り組みを行って来ており、スウェーデンの医療用食事支援ロボット (Bestic) が注目されている。この他、マニピュレーターによる物体操作の支援や、家事支援、排泄・整容・入浴にも支援ロボットが開発されている。特にマニピュレーターについては複数のスタートアップ企業らによる事業拡大が見られるなど、近年生活支援ロボット応用として盛んな分野であると言える。

一方、自動運転技術に代表されるような、移動ロボット技術にも大きな発展が見られる。

GPS (Global Positioning System) や RFID (Radio Frequency Identification) などの環境センシング技術や無線通信技術の発展により、あらゆる機器がインターネットに接続され固有のアドレスを有する IoT 技術が実現されつつあり、ロボットとの連携が進められている。これらに親和性の高いロボット掃除機分野においては米国が先導しているが、日本でも複数の企業が開発を行い、普及モデルに達して来ているといえる。欧州イタリアでは、DustBot⁸⁾ と呼ばれる国家プロジェクトにより、街区において巡回する掃除機型ロボットの社会実験が行われ、その有用性が明らかになっている。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、産総研などが中心となり、ロボット特区⁹⁾ を利用した社会実験の取り組みが見られる。このような取り組みは、外出が困難な高齢者の支援に向けて特に有用である。

② 情報・コミュニケーション型生活支援ロボット

環境認識・音声認識・合成技術による対話支援機能を有するロボットなど、人の認知機能の拡張からコミュニケーションの支援までを対象とする生活支援ロボット。利用者の意思をマイクやカメラから取得するためウェアラブル機器と連動し、情報をインターネットから取得する機能も含む。

人とロボット間の言語・非言語による相互作用を通じて、人の認知機能の支援やコミュニケーションの支援を行う技術である。知覚、言語処理、コミュニケーション戦略、ロボットのネットワーク化、ロボット制御、マニピュレーターなどの技術の開発が広く行われている。特に、HRI (Human Robot Interaction) 分野において精力的に研究されている研究課題であり、認知ロボット (Cognitive Robot)、ソーシャル・ロボット (Social Robot) や、社会支援型ロボット¹⁰⁾ (Socially Assistive Robot) とも呼ばれる。生活支援を目的とし、実世界において自律的に行動する機械系を実現するとともに、人の認知・運動特性や主観性の理解に基づくロボットの行動過程における内部処理と表象に関する研究が進められている。これらは、自身の経験からその知識と内部表象を学習し、環境にシームレスに統合される未来のロボットを実現するための取り組みである。

これに加え、介護用やリハビリテーション用のロボットを次世代住居環境により補助する研究もなされている。例えば、住居環境のカメラからロボットに対して物体の位置測定データを提供することで支援する手法や、パーティション等の部屋の構造そのものが可動である住居環境なども提案されており、可動部分が自走型のロボットと互いに干渉をすることなく動作可能であることが実証されている。これらは環境型のロボット支援技術といえる。

一方、教育現場、保育現場、介護現場において、対話や教示を主たる機能とするコミュニケーション型の生活支援ロボットの導入が進められている¹¹⁾。保育や介護の現場では、パーソナルロボットを通じて支援者が現場に参加したり、子供や高齢者の状況を確認したりすることができるのと同時に、その状態を動画メールで受け取ることができるサービスが検証されている¹²⁾。このようなシステムを保育園で実際に使って実証実験を行った結果、保護者が保育園での子供の活動に関与できることが確認されている。このような遠隔操作型・遠隔存在感のためのロボット技術については、VR (Virtual Reality) 技術の進展とともに、市場を広げつつある¹³⁾。

日本では、2015年にソフトバンクロボティクス株式会社が感情認識パーソナルロボット (Pepper) の販売を開始し、2017年には約2000社の企業が導入した。しかしながら、2018年にはその応用は限定的であることが明らかになり、導入する企業は大幅に減少した。いずれ

にせよ、等身大の人間型ロボット（車輪型）が、街中で見られるようになり、コミュニケーションをするロボットが生活の中に登場することが現実となった。また米国でも、家庭用小型ロボット「JIBO」についても、事業拡大が困難に見られる。これまで研究段階であったソーシャル・ロボットが、大手・ベンチャー企業を中心に積極的な取り組みが進んでいるといえるが、同時にAIスピーカの台頭¹⁴⁾により、このようなコミュニケーションを目的とするロボットの普及は容易ではないといえる。またこのような背景の下、ソニー株式会社は2018年1月、自律型エンタテインメントロボットであるaiboの販売を再び開始した¹⁵⁾。

一方欧米では、このような情報・コミュニケーション型生活支援ロボットは、自律型よりも遠隔操作ロボットを用いた取り組みが盛んである。コンパニオンロボットを目指すCare-O-bot、Hectorや、遠隔操作による介護・食事介助支援¹⁶⁾などが代表例である。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

従来の剛性の高い機構や関節を有するロボットがその高い精度により作業を実現することに対し、柔軟な材料を積極的に用いて新しい機能を発現したり、生物学的規範を参考にして動作したりする新たなロボットの研究分野として、ソフトロボティクスが世界的にも盛んに研究されている。専門ジャーナルであるSoft Robotics誌¹⁷⁾は2014年3月に第1版が刊行されたにも関わらず、2015年にはじめてImpact Factorが6.13をつけるなど、ロボティクスだけでなく広く応用分野からも注目されている。また2018年には当該分野の最初の国際会議が開催されており、ロボティクスだけでなく素材や繊維も含めた新たな取り組みが広がっている。人支援分野においても様々な取り組みがなされており、信州大学らが中心となった生活支援ロボティクスウェア、curara（クララ）¹⁸⁾や、東京理科大やそのベンチャー企業である株式会社イノフィスによるマッスルスーツ¹⁹⁾などは、従来の機械的なアクチュエーターとは異なる機構を用いて対人親和性の高い、ソフトロボット技術に準ずる生活支援ロボットである。

当該分野の大きな課題である知能化については、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²⁰⁾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の分野では、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、人の意思と機械とを直接つなぎ相互に作用させる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（Brain Machine Interface: BMI）の研究は、主に米国が主導する形で進められている²¹⁾。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。日本でも、医療応用のため脳硬膜下に埋め込む形の電極及びロボットシステムへの連結の取り組みがなされている。また、脳波（Electroencephalogram: EEG）や近赤外分光法による脳機能マッピング（functional Near-Infrared Spectroscopy: fNIRS）等の脳の中枢系からの信号に基づくもののみならず、末梢系からの信号を利用するサイバニック技術等の研究開発も広く行われており、運動支援のみならずコミュニケーション支援への応用も期待される。こうした技術が成功すると、従来のようにコントローラなどを仲介して機械を操作することなく、人の意思を直接機械に伝えることが可能となるため、近年非常に精力的に研究が行われている。

欧州ではFP7（2007年～2013年）において、ICT分野のチャレンジ領域としてCognitive

Systems and Robotics が選定され、主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のファンディングが強化された (年約 2 億ユーロ)。Horizon 2020 (2014 年～2020 年) では、欧州委員会、180 の企業、研究機関により、ロボット工学における世界最大の民間研究・革新プログラムとして官民パートナーシップ SPARC が 2014 年 6 月に立ち上がった²²⁾。応用の対象は、製造業、農業、保健、運輸、市民社会セキュリティ、家庭であり、欧州委員会より、総額 7 億ユーロが投資される。また、欧州委員会からの投資に加えて、2012 年 9 月に設立された欧州のロボティクス関係者の非営利組織 euRobotics²³⁾ から 21 億ユーロが投資される予定である。また、2016 年度には、Horizon2020 の後継として Horizon Europe²⁴⁾ の策定が進められているが、将来計画において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福祉ロボットは、人々が独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 (ケア・ロボット)。ロボット導入により独立した生活を支援することには、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、社会福祉制度などの法的措置の採択を必要とする。

米国では、2011 年に、省庁横断型のロボット開発支援プログラム (National Robotics Initiative: NRI) が発表され、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、すでに約 3 億 \$ 以上の資金を得て広範にわたるロボティクス分野の支援が行われている。生活支援ロボットは、サービスロボットとして位置付けられており、モビリティ機能、及び人の行動を認知、習得する能力を有するサービスロボットの開発が進められている。

2015 年 12 月には、国立科学財団 (NSF) が、人間と協力して働く「協働ロボット (co-robot)」の開発・利用を促進^{25) 26)} するため総額 3,700 万ドルからなる新たな助成を開始した。これは、NRI における第 4 回目の助成となる。脳制御による人工装具プロトタイプに関する研究、捜索救助活動を行うロボットチームの開発、及び様々な医療ケアを補佐するロボットの構築などが含まれる。このような、協働ロボットに関する新たな標準規格である ISO 10218 と ISO/TS 15066 も普及を後押ししている。これは NRI-2.0 として、生活のあらゆる面で人を支援するための協働ロボットシステムの研究開発を促進するものである。

米国では、すでに複数の企業が生活支援ロボットを実用化し、大きな売上を上げている。特に 1,000 万台の iRobot ルンバを売り上げている掃除機ロボット分野では世界を主導しており、高齢者の介護や子どもの教育を対象としたコミュニケーションロボットの導入も始まっている²⁷⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

トヨタ自動車は、生活支援ロボット「HSR (Human Support Robot)」を中核としたビジネスを開始しており、介助・自立・生活面の幅広い支援を目指す生活支援ロボットや、新たなヒューマノイドロボット (T-HR3) を開発、共同研究先とともに世界展開を行っている²⁸⁾。日本で行われた World Robot Summit 2018 (WRS2018) においても、サービスロボットのチャレンジとして家庭内を想定した片付けや収納の他、店舗を舞台とする競技により商品陳列や接客が題材になった。このようなオープン・イノベーションが研究分野に与える影響は大きい。特に HSR はプラットフォームとしての役割も果たしており、多くの研究コミュニティが高い関心を持っている。

一方 2017 年から、トヨタモビリティ基金により車椅子・外骨格移動支援機器の革新的な進歩を目指した世界コンペティションが行われている²⁹⁾。これも同様に、下肢に障害を有する方々への新しい移動支援・自立支援を革新する生活支援ロボット開発を支援する取り組みであり、世界 30 カ国から選ばれた 5 件の提案の中から、2020 年以降の実用化を目指すものである。このように移動が可能な生活支援ロボットの果たす役割は今後も大きくなると考えられる。

（5）科学技術的課題

本研究領域における大きな技術的なボトルネックは未だ知能化であると言える。人の理解に基づくロボットの行動過程の生成は、知能化が大きな役割を果たし、その内部処理と表象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の応用研究の成果により、画像認識や音声認識に進歩が見られ、ロボットインターフェースとしての利便性は高まっていると言える。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いるため、実世界で動作する知能ロボットの実現には未だ至っていない。ここでは、米国及び中国において政府のみならず民間企業が数兆円規模で人工知能開発に注力している。一方我が国では 2016 年度に理化学研究所に革新知能統合研究センター（AIP）が設置され、人工知能・ビッグデータ・IoT・サイバーセキュリティの統合プロジェクトとして、基礎研究から出口に向けた応用研究を行うために約 54.5 億円の予算が措置され、日本独自の人工知能技術開発に注力してきた³⁰⁾。しかしながら、構造化されたデータの量と質において諸外国との差は大きく、また基礎研究においても主導的な役割を果たせていないのが現状である。またこれらの基礎研究を、横断的な研究課題である生活支援ロボットへ応用するための基盤研究の推進が急務である。生活支援ロボットにおいては、ハードウェア・ソフトウェア・ネットワークの融合がシームレスに行われることが必要不可欠である。通信規格 5G を前に、世界中で新たなサービスの提案がなされているが、生活支援ロボットの分野の研究開発はより活発になるものと考えられる。

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。柔軟関節や接触安全性の確保という観点から見ても、外力に対し敏感なアクチュエーター技術が重要となる。近年、力センサーを搭載したマニピュレーターの実用化が急速に進んでいる背景もこれにあると言える。対人安全性基準、試験方法、及び認証手法の確立とあわせて、重要な科学技術的課題である。

このようなロボット支援技術活用の方向性として、人とともに動作するロボットにおける最適な組合せを考えることが必要不可欠である。特に、利用者の自立を高め、より安全な生活（生活機能の向上）を実現し、介護・支援職員の負担を軽減するといった、基本的な現場での課題を研究開発現場にフィードバックし協業する枠組みが限定的であり、その知識の欠如が課題である。特に、ロボット技術をサービスとして生活支援・福祉応用するためには、複数からなるシステムを統合し、ロボットの動作から、ロボットへ動作教示するインターフェースといった人とインタラクションする部分まで、一貫した目的のために動作させるためのインテグレーション技術が必要不可欠である。

(6) その他の課題

生活支援・福祉ロボット技術は、ロボット工学、人工知能・IoT、人支援技術、ウェアラブル技術、自然言語処理、およびインタラクション技術が有機的に連携した技術領域である。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。しかし、広範かつ世界的にも高い基礎研究のレベルにも関わらず、その産業化については欧米に対し高い競争力が確保できていない現状がある。

日本国内では、工場や農業における作業支援に向けた生活支援ロボット、また自立支援や介護者支援など、福祉分野でのロボット開発は盛んに行われている。ロボットスーツ HAL を開発・販売する CYBERDYNE 社は、2014年3月に東京証券取引所マザーズに上場するなど、ベンチャー企業が牽引する分野でもある。同社は、内閣府・革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の支援も受け、「重介護ゼロ」を目指した取り組みを行っている³¹⁾。

このような生活支援ロボットの開発においては、工学的な発明と学術的な研究に加え、実社会における実証研究とともに、安全性に関する基準策定、医療福祉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のハードルは高い。このため、海外での活動が先行し、それが日本に逆輸入されるという現象が起きている。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、生活支援ロボット実用化プロジェクト (2009～2013年度、経済産業省) が行われていたが、その後継が大きく期待される。

日本における生活支援・福祉ロボットの開発水準は世界を先導している。府省連携の取り組みを活かしながら、研究開発だけでなく、社会 (臨床) 実験、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の一層の促進が望まれる。

(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 START) 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が進むなど、高い研究レベルにある。知能化においては、理研・革新知能統合研究センター (AIP) など、今後の人工知能とロボット統合プロジェクトの連携が期待される
	応用研究・開発	○	↑	社会構造が大企業を中心としており、新たな技術が産業化するのに障壁がある。近年、移動体通信の Softbank 社がロボットビジネスを展開しており、またソニー株式会社も再びエンタテインメントロボットの販売を開始した。このように本邦では歴史的にコミュニケーションロボットの分野は応用研究・開発が盛んである。今後は、よりベンチャー企業の有する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
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。手術支援ロボットや、内視鏡ロボットなど、産業ロボット技術を転用したロボット医療機器の研究開発が盛んである。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、ハイリスクな研究にも支援が行われる体制がある
	応用研究・開発	◎	↑	世界的に人工知能を搭載したロボット掃除機を普及させた iRobot 社をはじめ、大学からのスピノ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。2015年における研究ロードマップ ²¹⁾ では、医療・ヘルスケアロボットよりも先にサービスロボットが記載されていることが特色である

欧州	基礎研究	◎	↑	欧州における生活支援・福祉ロボットは、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、そのプレゼンスは極めて高い。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	◎	↑	Horizon2020・Horizon Europe や、官民パートナーシップ SPARC 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、近年Softbank社が小型の人間型ロボットで世界的に著名な仏アルデバランロボティクス社に資本を入れ、共同開発などを行っている。また、スウェーデン、オランダを中心としたロボット・ベンチャー企業によるロボット介護支援の取り組みは事業化が急速に進むとともに、産学連携により標準化への取り組みを主導するなど、今後も発展が見込まれる
中国	基礎研究	△	↑	国家中長期科学技術発展規画綱要 (2006年～2020年)において、先端技術8分野の中で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、今後サービスロボット、ケア・ロボットへの応用が期待できる。研究コミュニティの拡大と当該分野でのプレゼンスが高まっている。
	応用研究・開発	○	↑	生活支援ロボットは、多くの要素技術のインテグレーションが必要であるが、これらを推進する応用研究、開発に関してベンチャー企業などを中心に、プレゼンスが高まってきている。
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) に主導される形で様々なサービスロボットに関する研究が盛んにあり、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	×	→	ユビキタスロボットコンパニオンプロジェクト (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、知識経済部が中心となり、2013年から10年間のロボット未来戦略を発表しているが、人工知能分野への注力が目立つなど、今後に期待したい。

(8) 参考文献

- 1) 加藤 一郎, “リリ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, (1993) pp. 614-617. DOI: 10.7210/jrsj.11.614
- 2) 土肥 健純, “ライフサポートテクノロジーの今後の展望 —生命から生活へ—,” 日本生体医工学会誌, Vol. 7, No. 4, (1993) pp. 44-51. DOI: 10.11239/jsmbe1987.7.4_44
- 3) CYBERDYNE Inc. website, HAL® 腰タイプ作業支援用 HAL-CB シリーズ, https://www.cyberdyne.jp/products/Lumbar_CareSupport.html (accessed 2019-02-10)
- 4) Toshiharu Mukai, Shinya Hirano, Hiromichi Nakashima, Yo Kato, Yuki Sakaida, Shijie Guo, and Shigeyuki Hosoe, “Development of a Nursing-Care Assistant Robot RIBA That Can Lift a Human in Its Arms,” Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010; Taipei, Taiwan, October 18-22, 2010) pp.5996-6001. DOI:10.1109/IROS.2010.5651735
- 5) Toyota Motor Corporation website, Partner Robot Family, https://www.toyota-global.com/innovation/partner_robot/robot/ (accessed 2019-02-10)
- 6) Panasonic Age-Free Co., Ltd. website, Rise Assisting Robot “Resyone Plus” (離床アシストロボット“リショーネ Plus”), <https://sumai.panasonic.jp/agefree/products/resyone/news.html> (accessed 2019-02-10)
- 7) 石井 純夫, “食事支援ロボット「マイスプーン」”, 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 4, (2003) pp. 378-381. DOI: 10.7210/jrsj.21.378
- 8) Gabriele Ferri, Alessandro Manzi, Pericle Salvini, Barbara Mazzolai, Cecilia Laschi, and Paolo Dario, “DustCart, an autonomous robot for door-to-door garbage

- collection: From DustBot project to the experimentation in the small town of Peccioli,” Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2011; Shanghai, China, May 9-13, 2011) DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980254
- 9) つくばモビリティロボット実証実験推進協議会 website, <http://mobility.rt-tsukuba.jp> (accessed 2019-02-10)
 - 10) Adriana Tapus, Mataric Matarić, and Brian Scassellati, “The Grand Challenges in Socially Assistive Robotics,” IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 14, No. 1, (2007) pp. 35-42.
 - 11) 寺嶋 一彦, 『今後の超高齢化社会に求められる生活支援 (医療・福祉・介護・リハビリ) ロボット技術』 (情報機構, 2015) .
 - 12) NEC Platforms website, コミュニケーションロボット PaPeRo i, <http://www.necplatforms.co.jp/solution/marketplace/> (accessed 2019-02-10)
 - 13) 舘 暉, “テレグジスタンス”, 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 4, (2015) pp. 215~221. DOI: 10.7210/jrsj.33.215
 - 14) 安蔵 靖志, “「スマートスピーカー」音声AIが日常を変える”, 日経パソコン, No. 785 (2018年1月8日号) pp. 32-37.
 - 15) Sony Corporation website, aibo, <https://aibo.sony.jp> (accessed 2019-02-10)
 - 16) Camanio Care Ltd. website, BESTIC Eating Assistive Device, <https://www.camanio.com/us/products/bestic/> (accessed 2019-02-10)
 - 17) Soft Robotics Journal (Mary Ann Liebert, Inc. publishers) website, <http://www.liebertpub.com/soro> (accessed 2019-02-10)
 - 18) 信州大学繊維学部橋本研究室 website, Robotic Wear curara® 研究プロジェクト紹介, <http://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/textiles/chair/ht-lab/project/curara.php> (accessed 2019-02-10)
 - 19) (株) イノフィス, マッスルスーツ, <https://innophys.jp> (accessed 2019-02-10)
 - 20) 尾形 哲也, “ロボティクスと深層学習”, 人工知能, Vol. 31, No. 2, (2016) pp. 210-215.
 - 21) Christian I. Penalozza and Shuichi Nishio, “BMI Control of a Third Arm for Multi-Tasking,” Science Robotics Vo. 3, Issue 20, (2018) eaat1228. DOI: 10.1126/scirobotics.aat1228
 - 22) SPARC c/o euRobotics AISBL website, <http://sparc-robotics.eu/> (accessed 2019-02-10)
 - 23) euRobotics website, <https://www.eu-robotics.net/> (accessed 2019-02-10)
 - 24) Science|Business Network, “Research Strategies: Europe 2030 and the next Framework Programme,” Science|Business Network conference (Brussels, Belgium, 12 Oct 2016) . <https://sciencebusiness.net/events/research-strategies-europe-2030-and-next-framework-programme> (accessed 2019-02-10)
 - 25) National Science Foundation website, “National Robotics Initiative (NRI) ,” <http://www.nsf.gov/pubs/2012/nsf12607/nsf12607.htm> (accessed 2019-02-10)
 - 26) Computing Community Consortium, “A Roadmap for US Robotics, From Internet to Robotics,” 2016 Edition, (November 6, 2016) .

<https://cra.org/ccc/wp-content/uploads/sites/2/2016/11/roadmap3-final-rs-1.pdf>
(accessed 2019-02-10)

- 27) Tony Belpaeme, James Kennedy, Aditi Ramachandran, Brian Scassellati and Fumihide Tanaka, “Social robots for education: A review,” Science Robotics, Vol. 3, Issue 21, (2018) eaat5954.
- 28) トヨタ自動車(株), “ヒューマノイドロボット T-HR3 を発表,” Toyota Global Newsroom (2017年11月21日), <https://newsroom.toyota.co.jp/jp/detail/19666327> (accessed 2019-02-10)
- 29) Toyota Motor Foundation website, “The Mobility Unlimited Challenge,” <https://mobilityunlimited.org> (accessed 2019-02-10)
- 30) 理化学研究所 革新知能統合研究センター (AIP) website, <https://aip.riken.jp/> (accessed 2019-02-10)
- 31) 内閣府・革新的研究開発推進プログラム (ImpACT) website, 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 (PM: 山海 嘉之), <http://www.jst.go.jp/impact/program/05.html> (accessed 2019-02-10)

2.2.3 医療ロボット

(1) 研究開発領域の定義

ロボット工学は、機械・情報・通信等、様々な技術が密接に関連する複合分野である。医療ロボットは、ロボット工学の医療への活用であり、既に様々な応用事例が存在し、かつ将来的により広範な先進的応用が期待される研究開発領域である。その応用展開は多岐に及ぶが、ここでは、ある一定の動作を伴いながら、治療あるいはその支援を目的とするものを医療ロボットと位置づける。特に当該研究領域にて注目すべきは、機構・制御・センサー技術を統合した医療ロボットによる治療・診断・分析の統合により、従来には得られなかった医療効果向上を目指す研究開発である。ここではその代表として、手術支援と、リハビリテーションに関する活用領域について述べる。

(2) キーワード

画像診断、低侵襲手術、レギュラトリーサイエンス、医療機器、リハビリテーションロボティクス、医療機器ソフトウェア

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

本稿における医療ロボットは、医療における治療行為を行う、あるいはその支援を行うためのロボット・システムのことを指しており、従来手法の向上、または新規的手法の導入により、医療の質を高めることを目的としている。この目的のため、従来の産業機械技術の枠にとらわれない様々な技術発展を要しており、非常に幅の広い研究開発が行われている分野である。その中でも共通する課題は、ロボットが人体の近傍で安全かつ効果的に動作を行うために要する新技術である。ロボット動作の安定性・安全性が重要であるのはもちろんであるが、例えば、治療に用いるために体内へ挿入する場合には滅菌・消毒などが可能であり、かつ小型であることが強く求められる。あるいは、リハビリテーションでは身体の一部をロボットの動作端へ何らかの方法で固定し、駆動力を人体へ安全に伝達することが重要である。このように、従来の産業技術では取り扱われなかった技術開発が重要であることは、これら事例からも明らかである。加えて、医療応用に向けてロボットがさらなる真価を発揮するのは、センサーによる医療の定量化であると考えられる。センサーデータの解析によって、例えば、術者の技量を担保する、患者の回復度を定量化する、などが考えられる。その発展として、医療事故を未然に予防する、より効果的な手法を提案するなどが検討され、多くの将来的な発展が期待される領域である。

[研究開発の動向]

一般的なロボットへの医療現場からの期待は、主として精密・小型・拡張性に集約される。具体的な事例および研究開発動向について、以下に手術支援、リハビリテーションそれぞれについて述べる。

手術支援ロボットは、国内でも一部が保険適用され、今後益々の発展が期待されている。国内外で最も知られるものは、da Vinci (Intuitive Surgical 米国)¹⁾であり、現在国内では腹腔鏡下前立腺悪性腫瘍手術、および腹腔鏡下腎悪性腫瘍手術のいずれも泌尿器の領域に関し

て保険適用されている。一方で、国外に目を向けると婦人科での適用が泌尿器を上回っており²⁾、今後ますます適用が広がる可能性がある。Da Vinciによる手術では、内視鏡を含む複数の多関節細径ロボットアームを体内へ挿入する。医師はコンソールと呼ばれる装置から操作器を介してロボットアームを操ることができる。このとき、コンソールには三次元内視鏡映像が提示される。da Vinciの利点を集約すると、多関節細径ロボットアームにより患者への身体的ダメージが少ない低侵襲手術を実践する、手ぶれによる振動を機械的に除去し動作スケール変更により精細な手技を実践できる、コンピュータの介在により画像診断技術等と融合した新しい手技への発展が期待できる、などがある。この手術支援ロボットは、遠隔操作ロボットと位置づけられ、研究開発が旺盛な分野である³⁻⁷⁾。これ以外についても、事前に取得した医療画像を元に患者病変へ正確に位置決めを行うための画像誘導下手術支援ロボット Neuromate (Renishaw フランス) 英国)、人工関節置換術における骨切除をガイドするロボット Mako (Stryker 米国)、放射線を適切に病変へ照射する放射線治療器 Cyberknife (Accuray 米国) などがあり、市場を形成している。国内では内視鏡を保持する操作の手ぶれを予防する椅子形装置 iArmS (デンソー、日本)、内視鏡保持器具 EMARO (リバーフィールド 日本) 等のデバイスが開発されている。

リハビリテーションロボットは、上記の手術支援ロボットと同様に、最近になり一部に保険適用が認められ、今後のより広範な活用が期待されている。持続的他動運動と呼ばれるセンサーフィードバック無しに一定周期での規定運動を継続して処方するリハビリテーション装置は多く存在するが、ロボット技術の観点から注目すべきは、患者の生体信号を取得し、リアルタイムにロボットへフィードバックする試みである。より具体的には、患者の動作意図に合わせて障害のある身体を装着型ロボットにより適切なタイミングで駆動することによって、脳・神経・筋の可塑性を促進し、リハビリテーション効果を高めることが、これら装置への最も大きな期待である。リハビリテーションロボットは、その有効性が報告されており⁸⁾、また上肢に関への適用等⁹⁾、研究開発が活発に行われている。国外では、2000年に歩行リハビリ支援移動ロボット Locomat (Hocoma スイス) が上市され、一定の市場を形成するに至った。同装置は、トレッドミル上に設置された下肢駆動装置を患者へ装着し、歩行機能の再獲得を目指すリハビリテーションを処方するものである¹⁰⁾。国内では、HAL 医療用 (CYBERDYNE 日本)¹¹⁾ が緩徐進行性 神経・筋疾患を対象として保険適用され、今後のより広範な適用が期待される。同装置は Locomat と同様に歩行訓練を目的とするが、装置が比較的小型・軽量であり、患者に装着して移動できる点が最も異なる。Locomat、HAL とともに筋電位等の生体信号を装置へフィードバックする機能を有している。国内では、トヨタ自動車、安川電機、帝人ファーマなどの大手企業についてもこの分野へ参入しており、その有効性が広く認知されつつあると考えられ、市場の拡大が予見される。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

米国を中心として、手術支援ロボットについての新規スタートアップ企業として、Auris Surgical Robotics、Medrobotics 等、盛んに設立され、今後の動向が注目される。一部には、MAKO Surgical、Mazor Robotics のように、大手医療機器メーカーから買収を受けるケースが見られる。Google と大手医療機器メーカーである Johnson & Johnson との共同で設立され

た米国 Verb Surgical 社についても当該研究領域での開発を表明しており、今後の動向が注目される。同じく米国の TransEnterix の Senhance Surgical System は、2018年5月にFDAからの適用拡大を受けている。イタリア MMI (Medical Microinstruments) は小型外科手術ロボットを開発している。国内でも研究開発能力としてロボット技術を核とする、いわゆるベンチャー企業としてリバーフィールド、A-Traction が設立されている。また、大企業としては、トヨタ自動車、安川電機、帝人ファーマ、Medicaroid (川崎重工業とシスメックスの共同出資) などが当該領域に参入している。このように今後、より競争が増すことで、ロボット技術の臨床応用での成果発展が予見される。

【注目すべき国内外のプロジェクト】

当該研究領域に関する注目動向として、国内では、人工知能、対象のモデル化をもとに手術支援ロボットにさらなる知能化を施す試みが革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一環として進行中である¹²⁾。また、同じく国内では日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業として、軟性内視鏡手術システム、スマート治療室に加えて、ニューロリハビリシステムの開発が行われている¹³⁾。海外では、欧州にて同じく手術支援ロボットの知能化を目指す ISUR (Intelligent SURgical Robotics) プロジェクト¹⁴⁾ が実施され、成果発展が今後期待される。

(5) 科学技術的課題

現在、医工連携が国内各所でも活発に進められており、多くの成果が得られ始めているが、ロボットのような、多くの技術要素が複合した統合技術においては、医工の強固な連携が必要不可欠であり、推進が強く望まれる。また学術的な側面からは、臨床的成果が必ずしも工学的な発展的成果とは言えない場合があり、その逆も存在する。医工連携のさらなる発展によって、横断的分野における新しい価値創出が望まれる。

医療機器としての実用化を考えると、有効性・安全性の担保は必要不可欠である。ロボット技術を活用した医療機器は技術的に高度であり、これらを担保する方法に関しても高度な専門的知識と経験を要する。より実用化プロセスの迅速化のためには、このような人材育成は必要不可欠である。

要素技術に関しては、国内には優れた加工技術を有する中小企業が多く存在しており、医療機器における装置開発においては海外に対しても優位性を持っている。一方で、今後は単機能デバイスから、機器同士が相互的に高度に連携したシステム化が必要になると考えられ、医療機器ソフトウェア開発に関して、より多くの研究開発が必要となると考えられる。

医療ロボットにおいては、臨床応用へ進むためには多くのハードルがあり、その最たるものが研究開発資金である。上記(4)において、米国ではスタートアップ企業設立が盛んであることを示したが、国内の経済的風土、下地の相違を勘案する必要がある。現況、わが国において当該研究領域をより発展させるためには、公的なファンディング制度とスタートアップ企業支援の両面から支援を充実することが望まれる。

（6）その他の課題

医療機器の産業化までの道のりには、「魔の川」、「死の谷」、「ダーウィンの海」と表現される、乗り越えなければならない厳しい障壁が立ちはだかっている。これは技術的課題の解決から製品の上市に至るまで、薬事承認、臨床治験、保険収載等、安定した収益を得るまでに超えるべきハードルが高く、多くの労力、時間、資金を要するためである。医療ロボットでは、その動作の一部を機械・電氣的に代替的にロボットが行うことから、一般的医療機器と比較してそのハードルはさらに高くなる。医療ロボットにはその開発に必要な技術はもちろんであるが、医療機器としての承認まで導くためのレギュラトリーサイエンスが必須であり、この分野の技術者・研究者が今後より必要になると考えられる。

医療行為は、同一の医療機器によってその手法が支援されることで再現性が担保されることが多く、業界標準（de facto standard）となることで、その医療機器が継続的に一定の市場シェアを占める事例が治療機器（外科治療デバイス等）・診断機器（内視鏡、画像診断装置）の両分野で散見される。医療ロボットが大きな注目を集め、多くが臨床応用に向けて提案されるいま、現在の研究開発動向が将来にわたる研究開発と市場双方の領域形成に大きく影響する可能性があり、今後が注目される。

（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	○	→	ImFACT、AMED 事業等、複数の学術的国家プロジェクトが展開中
	応用研究・開発	◎	↑	リバーフィールド、A-Traction 等ベンチャー企業に加えて、トヨタ自動車、安川電機、帝人ファーマ、Medicaroid 等の大企業による上市・研究開発が進展中
米国	基礎研究	◎	→	多岐にわたる研究成果
	応用研究・開発	◎	↑	Verbsurgical、TransEnterix、Auris Health、Medrobotics、FlexDex 等、新規設立企業、ベンチャー企業による研究開発成果展開の試みが進展中
欧州	基礎研究	○	→	独・仏・伊を中心に多くの研究事例、成果発表
	応用研究・開発	◎	↑	Hocoma、MMI、CMR Surgical、Bioservo、ReHaptix 等、ベンチャー企業による研究開発成果展開の試みが進展中
中国	基礎研究	○	→	複数の研究成果報告を確認
	応用研究・開発	○	↑	一部企業に手術ロボットに関する開発事例が確認される。研究報告に増加傾向（Beijing Tinavi）
韓国	基礎研究	○	→	当該研究領域に多数の研究成果報告あり
	応用研究・開発	○	→	複数企業に開発報告あり（Koh Young Technology、Hyundai Heavy Industries、Meere Company）

(8) 参考文献

- 1) Intuitive Surgical 社ホームページ
<http://www.intuitivesurgical.com> (2018年10月10日アクセス)
- 2) 日本ロボット外科学会ホームページ
<http://j-robo.or.jp> (2018年10月10日アクセス)
- 3) 日本コンピュータ外科学会ホームページ
<http://www.jscas.org/> (2018年10月10日アクセス)
- 4) Christos Bergeles and Guang-Zhong Yang, "From Passive Tool Holders to Microsurgeons: Safer, Smaller, Smarter Surgical Robots," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* Vol.61, No. 5 (2014) : 1565-1576.
- 5) Ryan A. Beasley, "Current systems and research directions," *Journal of Robotics* Vol.2012, Article ID 401613, 14 pages.
- 6) Riccardo Autorino et al., "Current Status and Future Directions of Robotic Single-site Surgery: A Systematic Review," *European Urology* Vol.63, No. 2 (2013) : 266-280.
- 7) Nisha Patel et al., "Flexible platforms for natural orifice transluminal and endoluminal surgery," *Endoscopy International Open* Vol. 2, No. 02 (2014) : E117-E123.
- 8) CYBERDYNE) Jan Mehrholz et al., "Electromechanical-assisted training for walking after stroke," *Cochrane Database of Systematic Reviews* Vol.25, No. 7 (2013) : CD006185.
- 9) Gert Kwakkel, Boudewijn J. Kollen and Hermano I. Krebs, "Effects of Robot-Assisted Therapy on Upper Limb Recovery After Stroke: A Systematic Review," *Neurorehabilitation and Neural Repair* Vol.22, No. 2 (2008) : 111-121.
- 10) Hocoma 社ホームページ
<https://www.hocoma.com> (2018年10月10日アクセス)
- 11) CYBERDYNE 社ホームページ
<http://www.cyberdyne.jp> (2018年10月10日アクセス)
- 12) 原田香奈子, ImPACT「バイオニックヒューマノイドが拓く新産業革命」
<http://www.jst.go.jp/impact/program/15.html> (2018年10月10日アクセス)
- 13) 国立研究開発法人 日本医療研究開発機構 ホームページ
https://www.amed.go.jp/program/list/02/01/004_01-03.html(2018年10月10日アクセス)
- 14) The I-SUR Project ホームページ
<http://www.isur.eu/isur/> (2018年10月10日アクセス)

2.2.4 海中ロボット

(1) 研究開発領域の定義

海中ロボット¹⁾とは、人がいけない海中での調査観測や作業を行うロボットである。10m以下の浅い海ならば、人はなんとか潜れるが、それ以上の深い海になると人は簡単にはいけない。地球環境を支配する海水、地震、津波の発生源である海底、水産資源を産む海、など知らなければならぬ海中の諸項目はいくらでもあり、また、石油やガスを生み出す宝の山である。人に代わってそこにでかけていき、何かをするのはロボットである。なお、本報告では、新しい技術開発がいろいろと考えられる自律型海中ロボットについて主として述べる。

(2) キーワード

自律型海中ロボット (AUV: Autonomous Underwater Vehicle)、有索無人機 (ROV: Remotely Operated Vehicle)、水中音響、耐圧設計、航法

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

人がいけない海中の調査観測や作業のために、プラットフォームとして海中ロボット (表2-2-1 参照) を投入することは必然である。しかし、電磁波が伝わらない海中では、ロボットとの通信手段を確保するには、トラブルの多い通信ケーブル (索) を繋ぐか、遅くてエラー率の高い音響通信を使うかに限られる。水深以上の長さを必要とするケーブル付きの遠隔操縦機 (有索無人機 ROV: Remotely Operated Vehicle) は、ケーブルを扱うためのウインチや張力緩和装置などを必要として、システムは大規模になる。音響通信の場合はそのような大規模装置はいらないが、音の伝播速度は約 1500m 毎秒であり、遅く、周波数が高くなると急速に減衰するために 6000m の距離を通信するには数十 kHz の周波数帯を用い、Data Rate はせいぜい数千 bps²⁾ で伝送エラー率も高く、細かい遠隔操縦は困難である。ケーブルのない水中機 (無索無人機) は、操縦者との密な通信ができないので、自律性が高くなければ深海に展開できず、自律型海中ロボット (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) と呼ばれる。

表2-2-1 海中ロボットの分類

有索無人機	
	電力通信ケーブル付き遠隔操縦機 (ROV: Remotely Operated Vehicle)
	重作業 ROV (マニピュレーションをおこなう)
	カメラロボ (ビデオ観測のみで、軽量小型)
	細径ケーブル遠隔操縦機 (ロボットが電池を持ち、操縦は光通信ケーブル経由)
無索無人機 (AUV: Autonomous Underwater Vehicle、自律型海中ロボット)	
	航行型 (3ノット程度で航行する)
	ホバリング型 (海底に接近して低速で移動し写真撮影)
	グライダー型 (潜降・浮上を繰り返す)

【研究開発の動向】

有索機 (ROV) は、1980年代に技術的に大きく発展し、多くの先鋭的な商用機が作られ、海底石油開発や深海調査に用いられている。先進的な研究課題としての「テレグジステンス」の初期の研究は、米国海軍によって有索遠隔操縦機をプラットフォームとして1980年以前から行われている。日本では近海に海底石油開発がないこともあって商用重作業 ROV の開発には見るべき物がない。ただし、海洋の最深部 11,000m まで潜ることのできる ROV 「かいこう」を JAMSTEC (海洋研究開発機構) が開発し、1995年にマリアナ海溝チャレンジャー海淵に潜航させた。残念ながら2003年に二次ケーブル切断事故が起こり、「かいこう」の本体部分は失われた。JAMSTECは1999年にカナダのISE社製のROV「ハイパードルフィン」(3000m級)を購入し、これを改良しながら海底調査活動に利用し、高度な運用技術を獲得している。

カメラロボは、浅海での調査や観測に使われている。2011年の津波災害のときには、被災した沖合漁業施設周辺の海底調査に活躍している。最近、新規参加者がカメラロボを「水中ドローン」と称して開発を始めだした。しかし、小型のゆえに外力に弱く、使用環境が限られることに十分な配慮が必要である。

細径ケーブル遠隔操縦機は、電池を内蔵し、データ通信用の光ファイバケーブルのみにより、潜水機と支援船とを接続する。高速データ通信ができるとともに、大型甲板装置を必要としないので、発展が期待されている。日本での開発例は、JAMSTECが「UROV」という名前で1990年頃から開発をおこなっている。JAMSTECは2007年に「ピカソ」を開発して、深海生物調査に活用している。

無索機は、1980年代から東京大学生産技術研究所で開始され、種々のモデルが建造され実海域で展開されている。2000年に「R-One Robot」が手石海丘の全自動観測に成功し、AUVの観測実績を示した。2003年に建造された「r2D4」は「R-One Robot」のソフトウェアを継承して、機体が完成すると同時に、全自動観測を開始している。2008年にJOGMECと共同しておこなった伊是名海穴の海底地形観測データは、その後の伊是名海穴海底鉱物資源開発の基礎となっている。JAMSTECは大型の「うらしま」を1998年に建造を開始し、2003年に220kmの潜航に成功している。しかし、行動の重要な判断を超音波リンクを通じたコマンド(すなわち人の操縦)に頼っているため、自律性のレベルは低かった。その後、改良が進められ、ペイロードを十分にとれる大型機(長さ10m、空中重量7トン)として観測に利用されている。上記3台のプロトタイプAUVは3ノット程度で航行する「航行型」である。ミッションが単純な航行型AUVは、2000年代になって市販されるようになり、詳細な海底地形図の計測、墜落航空機の発見や海底石油開発のための海底調査などに用いられるようになった。2009年に発生したエールフランス447便墜落事故では、航行型AUV「REMUS 6000」が墜落機を2011年に発見している³⁾。

ホバリング型AUVは海底面直上数mまで接近して海底写真を撮影することをもっぱらの仕事としている。2000年に開発された「Tri-Dog 1」がプロトタイプの初号機といってよい。これをベースに開発が進められ、2007年に東京大学は「Tuna-Sand」を作り、これを2010年に日本海の水深1000mのメタンハイドレート地帯に展開し、水深1000mでベニズワイガニの棲息状況を撮影した。さらに、その実績をベースに、キチジヤズワイガニの調査に使われるようになった。

グライダー型AUVは、上昇下降を、浮力を変化させておこなうもので、エネルギー消費

が少なく、システムも簡単なので、利用しやすく、米国で開発された「Slocum」と「Sea Glider」が世界的に海水の調査プラットフォームとして利用されている。翼を使って水平移動が可能なので、「Algo Float」の後継機として期待されている。

このように各種の海中ロボットは、それぞれに特徴を持ち、現場にいかねばデータが得られない深海において有効性を発揮している。すなわち、その特徴を生かせる海中観測や作業活動においてニッチを得ていると見てよい。次の段階は、ロボットから得られる海中データをいかに利用するかということと、自律型の自律性を高めること、さらには複数ロボットを同時展開することである。それらが海中ロボット開発を加速することになる。

(4) 注目動向

【新展開・技術トピックスおよび注目すべき国内外のプロジェクト】

総合科学・イノベーション会議は、2014年度より「戦略的イノベーション創造プログラム(通称SIP)」を開始し、その中の一つの課題として「次世代海洋資源調査技術(通称「海のジパング計画」)」が取り上げられている。海のジパング計画では、海底鉱物資源を低コスト・高効率で調査する技術開発が進められ、その重要な課題として、自律型海中ロボットを使った複数ロボット同時展開システム開発が設定され、海上技術安全研究所などで研究開発が進んでいる。海域でロボットを展開するには支援船が必要で、その経費は数百万円/日を下らない。さらには、海域が悪ければロボットを展開することができない。海況の良いチャンスを有効利用するには、チャンスにロボットを複数展開して、同時に多くの観測・計測をおこなうことが必要となる。ケーブルのないAUVならば、それが可能となる。

SIPでは、2018年10月までに、4台の航行型AUV、1台のホバリング型AUV、1台の無人海面航行ロボット(USV: Unmanned Surface Vehicle)が開発され、試験展開がおこなわれている。これらロボットやシステムは民間企業が展開できるよう、技術移転が進められている。海のジパング計画は、具体的な観測ターゲットを見据えた大規模研究開発であり、成果が期待される。

また、JAMSTCではAUV「ゆめいるか」とAUV「じんべい」を開発して、複数AUV展開システムを研究開発している。

AUVの最大の弱点は、海底に接近するものの、写真や音響撮影のみであって、「物」を海底から取ってくることができない。AUV展開後の次のステージでROVを投入すればよいのだが、「それなら最初からROVを使えばよいのではないか」、というAUVにとってネガティブな意見が巻き起こる。これを解決するためのプロジェクトが、東京大学生産技術研究所と九州工業大学を中心としておこなわれている。科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業(CREST)【海洋生物多様性】「海洋生物多様性および生体系の保全・再生に資する基盤技術の創出」課題において「センチメートル海底地形図と海底モザイク画像を基礎として生物サンプリングをおこなう自律型海中ロボット部隊の創出(代表:浦環)」が2011年度から開始され、サンプリングができ、かつ、時間遅れのある少ない情報伝送能力の音響通信であっても、支援船上の研究者がサンプリングする対象を指定できるシステムの開発がおこなわれ、「Tuna-Sand 2」が開発され、サンプリング実験がおこなわれている。

SIPとCRESTの二つのプロジェクトは、熱水鉱床や海底生物資源に関するプロジェクトであるが、今後の我が国の自律型海中ロボット研究開発の重要な大規模プログラムは、

1) 大深度自律型海中ロボットの研究開発：特に、プレート型地震を見据えた 6000m から 8000m 水深での詳細な広域地形図調査を可能とする航行型海中ロボットの研究開発

2) 北極海を含む氷海域で、海水下の観測をおこなうことのできる海中ロボットの研究開発の二つが重要である。文部科学省等での検討がおこなわれているが、これらは極めて大型なシステムとなるため、国家的で重点的な取り組みが必要である。

さらに、SIP で開発された高速通信を可能とする衛星通信用の小型アンテナシステムは、ROV を使った海洋調査において、海中映像をリアルタイムで陸上の研究者や一般人に配信して、海洋科学や海洋技術を、青少年を含む一般人に広く紹介することができる。アウトリーチ技術として極めて重要である。

海上保安庁海洋情報部は、測量船を使って海底地形図を作ることが業務である。深い海で、より精度の良い地形図を得るには、航行型 AUV を潜らせて至近距離から計測せねばならない。これまでは海外製品を購入していたが、2018 年度から日本製を導入することになった。利用者の限られる AUV にとって国内需要を確実に押さえることは、国内 AUV 開発を推進するために必要不可欠である。

(5) 科学技術的課題

自律型海中ロボットが陸上の自律型ロボットと違う点は次の 5 つの海あるいは深海という言葉で代表される困難さである

- 1) ロボットに事故が発生したときに ROV を使わなければ助けにいけない
- 2) ロボットが働く環境を私たちは十分に想像できない
- 3) ロボットを海域で動かすためには支援船、多額の経費、大きなチームが必要である
- 4) 日本周辺でロボットが働いてほしい海域は、往々にして波が高く、風が強く、現場作業が可能かどうかの予測が難しく、計画的な海域展開ができない。
- 5) 能力をデモンストレーションする機会が少ない

1) の危険性を取り除くためには、十分な準備と海での実績が必要だが、3) と 4) のために簡単にはできない。深海は未だに「探検」の世界であるので、ロボットに「探検」をさせることになる。従って、ロボット開発者は、よく海洋のことを勉強し、経験を積んで、2) がはらむ危険性を極力さげねばならない。3) を克服するために、大きな資金を獲得し大きなチームを動かすには、ロボットを動かすことの意義を資金提供者に説明しなければならない。そのためには、AUV の展開実績が必要である。しかし、実績を作るためにも同じ 3) が必要である。すなわち、犬が尾を咬んで、ぐるぐる回っていることになり、なかなか 3) を克服できない。「運良く」研究費を獲得し、海域へと出動しても、4) のように海が荒れていれば、ロボットを展開できない。海況がよくて観測可能な状況は、最近では 50% 以下になっているようである。すなわち、予定通りの成果を挙げにくく、5) が重くのしかかってくる。

そこで、少ないチャンスをものにし、他のシステムではできないことをなすとげて、自律型海中ロボット技術を進展させ、そこから得られるデータで高い評価を得るためには、

- 1) ロボットの信頼性と全自動性（自律性）の向上、
- 2) ロボットの小型化、
- 3) 複数ロボットを同時展開ができる、

4) ロボットがたとえ失われても次に進めるような開発および展開のシナリオ作り、が必要である。それに基づいて、(4) 注目動向に示した2つの大きなプログラムが進められるべきである。特に、複数ロボットの同時展開では、無人海面航行ロボットの管理下に海中ロボットを置くことで、支援船をロボット展開作業から解放し、別の作業に従事させることが、海洋活動を活発にする上で重要となる。第1期のSIPでは、その路線のもとに開発が進められ成果をあげている。2018年から第2期が始まっているが、AUV開発については残念ながら路線が不透明である。

上記の課題を解決するためには、広い視点に立った大型プロジェクト、それも現場での具体的な活動を含んだプロジェクトを作る必要がある。すなわち、自然の中でのロボットの活動を通じて、1) のロボットの信頼性と自律性を向上させねばならない。

(6) その他の課題

前節の最初に述べたように、有用な自律型海中ロボットを開発するには、多大な経費が必要となる。この予算を得るには、世界で一番「大きい」「深い」「遠くまで」など重厚長大主義的な提案もあり得るが、前節最後に述べた4つの必要項目を満たすような方向をもつことが政策的に重要である。前述した海のジパング計画では、必要事項の1~3が重要課題として取り上げられていることが好ましい。

できあがった自律型海中ロボットを海域展開するには、通常、JAMSTECの研究船公募課題に応募して、審査を受け、採択されると海域展開が可能になる。しかし、このプロセスは長い。7月に申請書をだすと、翌年の潜航可能性が開かれ、採択されれば翌年に潜航のチャンスを得ることができる。その潜航の成果を踏まえて次の申請書をだすのは、2年後になる。このような極めて遅い日本の開発スケジュールでは世界の開発競争にはついていけないのが現状である。さらに、JAMSTECは、研究船を大型化し、公募航海日数が減っている。大型船は「大鑑巨砲」になっているために、AUV展開だけには使いにくく、大きな研究者チームを編成しなければならない。これが、小回りのきかない水中機器開発の世界をもたらしていて、JAMSTECの研究船だけに頼らない機器開発ができるような政策転換が必要である。水産系の大学などの船の利用がその道を作り出すのだが、既得権と目的外使用禁止の二つの障壁が立ちだかっている。

米国における水中機器開発の予算の多くは、基礎研究を含めて、米国海軍関係の組織から出ている。日本では、水中機器開発を重要課題とする政府組織が貧弱で、開発するものは、海外製品に価格的に、および現場実績的に太刀打ちすることができないことがある。そのために、せっかく開発したものが、政府調達されず、現場に利用されないで、開発のみで終了してしまう。このやり方を変えねば、「世界で一番」「世界でただ一つ」「だれも使わない」で、二番機も作られない、という残念な結果が引き続くことになる。海という過酷な現場で働くロボットを作るためには、その利用を促進する政策的な取り組みが不可欠である。

(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	○	↘	文部科学省のプログラム「海洋鉱物資源広域探査システム開発 (通称基盤ツール拠点)」を通じて基礎研究がなされている。しかし、2017年度で終了してしまい、その先がない。
	応用研究・開発	○	→	SIP「次世代海洋資源調査技術 (海のジバング計画)」を通じて応用研究がなされている。第2期も開始した。
米国	基礎研究	◎	↑	米海軍海事技術本部 (ONR : Office of Naval Research) の Funding、Sea Grant の推進など、基礎研究への Funding が継続してなされている。
	応用研究・開発	◎	↑	北極海や熱水地帯の観測、さらには民間の沈没船捜索など、海中活動のアクティビティはあがっている
欧州	基礎研究	○	↑	Southampton 大学を中心として英国は特に力をいれている。スペインやポルトガルも参入し、研究活動は盛んである。
	応用研究・開発	◎	↑	商用の AUV や ROV を使った新たな活動が盛んになっている。Kongsberg は民間の中心
中国	基礎研究	△	↑	国が海洋に注目していて、それに伴って大学が積極的な研究開発をおこなうようになってきた。
	応用研究・開発	◎	↑	7000m 級有人潜水艇を作り、その次のプロジェクトへとつないでいる。AUV のアプリケーションにも興味をしめしている。新たな海洋調査船を就航させている。
韓国	基礎研究	×	↘	成果主義に陥りがちで、基礎を尊重しない風潮にあり、低迷している。
	応用研究・開発	△	→	マンガン団塊採取プロジェクトを起こしたりして深海への進出を強めている

(8) 参考文献

- 1) 浦環, 高川真一, 『海中ロボット』, (成山堂書店, 1997).
- 2) Teledyne Marine Systems, “Benthos Acoustic Modem” <https://aslenv.com/brochures/Benthos-acoustic-modems.pdf> (accessed 2019-01-15)
- 3) Kongsberg Maritime, “Hydroid REMUS 6000 AUVs Aid in Discovery of Air France Flight 447 Wreckage”, (Press releases, April 8, 2011), <https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0238.nsf/AllWeb/FBAE3A993FC33666C125786F00289474?OpenDocument> (accessed 2019-01-15)

2.2.5 宇宙ロボット

(1) 研究開発領域の定義

「宇宙ロボット」は、宇宙開発および月惑星探査を目的として宇宙空間で使用されるロボットである。地球を周回する国際宇宙ステーションにおける作業や、軌道上の宇宙ゴミ（スペースデブリ）等の捕獲回収を目的とした「軌道上宇宙ロボット」および、月や惑星などの天体表面を移動探査する「月惑星探査ロボット」に大別される。

(2) キーワード

宇宙環境、地球周回軌道、微小重力、移動探査ロボット、不整地移動、自己位置推定、ナビゲーション、遠隔操作、通信時間遅れ、自律性

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

地球の大気圏よりも外に広がる空間領域を「宇宙」と呼ぶ。国際航空連盟では、地表高度100km以上の空間を「宇宙」と定義している。宇宙は高真空であり、熱環境、放射線環境が過酷であるなど、人間にとって危険な環境である。人が容易に訪れることができない宇宙空間では、ロボットによる作業が非常に重要となる。

1957年にソビエト連邦が人類初の人工衛星（スプートニク1号）を打ち上げて以来、今日に至るまでに、数千もの人工衛星が地球周回軌道に打ち上げられており、その数は年とともに増大している。宇宙空間に打ち上げられる人工物（宇宙機）のうち、地球周回軌道を離れて、月、惑星、小惑星などの探査を行う目的のものを宇宙探査機と呼ぶ。宇宙機の大半は無人機であるが、地球を周回する国際宇宙ステーションや、その建設に大きな役割を果たしたスペースシャトルは有人の宇宙機であり、1960年代から70年代に月面探査を行ったアポロ宇宙船は、有人探査機である。

打上げロケットも、無人の人工衛星も、単純なものから高度な誘導制御を含めて、一定の制御シーケンス、制御ロジックをもって動作しているので、広い意味で宇宙ロボットと呼ぶこともできる。しかしながら、ここでは腕またはハンドがある（マニピュレーション機能がある）、あるいは月惑星表面を移動する機能をもった「ロボット」を対象とする。

「宇宙ロボット」は、地球周回軌道上で活動を行う「軌道上宇宙ロボット」と、天体上を移動探査する「月惑星探査ロボット」に大別することができる。軌道上宇宙ロボットは、米国のスペースシャトルに搭載されたロボットアームや、国際宇宙ステーションに搭載されているロボットアームに代表される。これらは、宇宙ステーションモジュールの組み立てや、メンテナンスなどの宇宙飛行士の船外活動を支援することが主な目的である。近年では増加の一途をたどる軌道上で不要となった人工物体（宇宙ゴミ）を捕獲回収する目的で、軌道上宇宙ロボットの活用が期待されており、そのための研究開発が加速している。

地球以外の天体（月惑星）を探査する「月惑星探査ロボット」は、人に代わって科学的探査を行うことを主な目的とし、着陸船に搭載され岩石の採集や土壌分析を行うロボットアームや、着陸船から分離し天体表面を自由自在に移動探査するロボットが開発され、月、火星、小惑星、彗星の探査に活用されている。例えば、これまでのNASAによる一連の火星探査により、火

星表面にはかつて大きな海（大洋）があったことも明らかになっている。小惑星や彗星などの重力場が小さい天体のロボット探査も近年注目を集めており、日本の「はやぶさ」探査機は、小惑星イトカワ表面から岩石サンプルを採集し、地球に持ち帰ることに成功している。これらの探査により、太陽系における惑星形成の歴史が明らかになってきている。

また、地球以外の天体から採掘した物質を、「資源」として活用するためのロボット技術の研究開発にも注目が集まってきている。

【研究開発の動向】

宇宙空間を自由に飛び回って作業をする「軌道上宇宙ロボット」の概念は1980年代前半より議論されてきた。1983年に出版されたNASA ARAMIS レポート¹⁾では Telerobotic Servicer と名付けられた軌道上宇宙ロボット（図2-2-6）を用いた軌道上作業の可能性が論じられている。特に、軌道上ロボットによって宇宙ステーションの建設を行うことが議論され、その実証ステップとして米国では1987年に Flight Telerobotic Servicer (FTS) が計画された。しかしながら、技術や安全面で問題点が多く、1990年代中頃までには FTS 計画はキャンセルされ、実際の国際宇宙ステーションの建設は、スペースシャトル搭載のロボットアーム (Shuttle Remote Manipulator System, SRMS) および宇宙ステーション搭載ロボットアーム (Space Station Remote Manipulator System, SSRMS) を活用したモジュールの組み立てと、宇宙飛行士の船外活動による精細作業によって行われた。

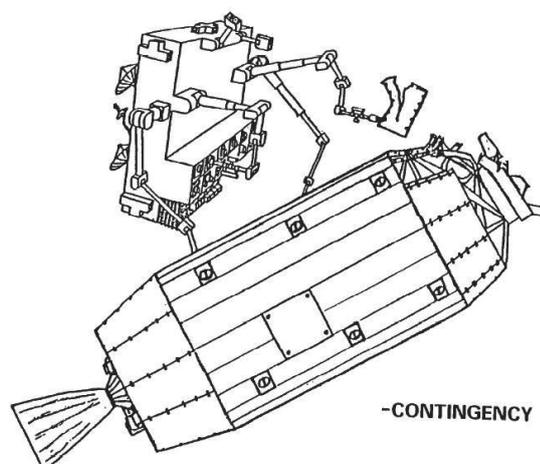


図2-2-6 Telerobotic Servicerの概念図¹⁾

これに対して、軌道上宇宙ロボットの技術は1997年に日本の技術試験衛星きく7号 (ETS-VII) によって、世界に先駆けて実証された。同衛星は軌道上で「おりひめ」「ひこぼし」と呼ばれる2つの部分に分離し、「ひこぼし」には長さ約2mのロボットアームが搭載されていた。自律制御による、おりひめ・ひこぼしのランデブー（接近飛行）・ドッキング（結合）や、ロボットアームを使って機器の交換をするなどの試験が行われた。このような技術は、他の人工衛星に対して燃料補給や機器交換などのサービスやメンテナンスを可能とし、また寿命後の衛星を捕獲して軌道変更するなど、人工衛星をより効果的に使用し、スペースデブリ（宇宙ごみ）の増加を防ぐ技術として重要なものであり、1999年のミッション終了までに、技術的および学術的にも価値の高い軌道上実験が実施された^{2),3)}。

ETS-VII で実証された自律誘導およびランデブー技術は、後に宇宙ステーション無人補給機 (H-II Transfer Vehicle, HTV) 「こうのとりのり」が国際宇宙ステーション (International Space Station, ISS) にランデブーする際の必須技術として活用されている。HTV は、ISS の下方 10m の距離まで近づいて相対停止したのち SSRMS により捕獲され、同アームにより ISS の所定の場所に結合される。HTV は 2009 年に初飛行が行われ、2018 年の 7 号機まで連続してミッションに成功している。

ETS-VII から 10 年後の 2007 年には、米国 DARPA が主導するオービタル・エクスプレス・ミッションが行われ、ETS-VII と同様の自律ランデブー・ドッキング、ロボットアームの制御実験が行われた。しかしながら、ETS-VII およびオービタル・エクスプレスで実証された技術は、捕獲される側の衛星姿勢が安定し、かつ把持のためにハンドレール状の機構が取り付けられているなどの「協力的」なターゲットであった。衛星がタンブリングと呼ばれる 3 軸回転運動し、把持するためのつかみ点が無い一般的な「非協力的」なターゲットを捕獲するためには、解決しなければならない技術課題が多く残されている。

地球以外の天体の表面を走行した世界初の無人移動探査ロボットは、ソビエト連邦 (当時) が開発したルノホートである。米国が有人月探査 (アポロ計画) を進めていく一方で、ルノホート 1 号は 1970 年 11 月にルナ 17 号により月面に着陸し、その後 1971 年 9 月までの約 11 ヶ月間にわたり月面上を 10.5km、2 号は 1973 年 1 月にルナ 21 号により月面に着陸し、その後同年 5 月に至るまで 37km (最近の再評価では 39km) 走行し、多くの画像や観測機器のデータなどを地球に送信した。

一方、米国のアポロ計画では、1969 年 7 月に 11 号が人類初の月面着陸に成功した後、15 号 (1971 年 7 月)、16 号 (1972 年 4 月)、17 号 (1972 年 12 月) の 3 回のミッションにおいて、LRV (Lunar Roving Vehicle) と呼ばれる 4 輪駆動の月面車を月面に持ち込み、宇宙飛行士が操縦して月面上を走行し探査範囲の拡大に貢献した。LRV の質量は 210kg、バッテリー (一次電池) 駆動で、アポロ 17 号では走行距離は 35.7km に達した。

これら一連の月面探査が成功裏に終了すると探査の対象は火星へと広がり、米国は 1975 年に 2 機の火星着陸探査機 (バイキング計画) を打ち上げた。バイキング 1 号は 1976 年 7 月に、バイキング 2 号は 1976 年 9 月に火星表面に着陸した。これらの着陸機にはロボットアームが取り付けられており、着陸機近傍の土壌を採集してその場分析が行われた。

移動探査ロボットとしては、1996 年 12 月に打ち上げられた米国のマーズ・パスファインダー (MPF) 計画にて、Sojourner と名づけられた質量約 10kg の小型ローバーが展開された。Sojourner は、電気モーターによる独立駆動の 6 つの車輪を持ち、ロッカー・ボギーと呼ばれる受動的なサスペンション機構を用いて、岩石が散在する凹凸の多い不整地でも適応的に走行することができた。地球・火星間の通信は片道でも 8 ~ 20 分かかるので、ローバー側に障害物や危険を認識し、緊急停止や回避行動を可能とするための相応の自律機能が必要である。マーズ・パスファインダー計画では、遠隔ロボットによる火星表面に必要な技術実証に主眼が置かれ、1997 年 7 月に火星に着陸した後、約 3 ヶ月間にわたって地球からの指令により、遠隔自律ナビゲーション、画像撮影、岩石や土壌の化学組成分析などのミッションが実施された。

MPF 計画の成功を受けて 2003 年にはマーズ・エクスプロレーション・ローバー (MER) を搭載した 2 つの探査機が打ち上げられ、2004 年 1 月に相前後して火星表面に到達した。ひ

とつは **Spirit** と名づけられ、もうひとつは **Opportunity** と名づけられた。これらはゴルフカートほどの大きさ（質量 185kg）であり、全長約 1m の小型ロボットアームを含む、さまざまな分析装置を搭載している。当初予定のミッション期間である 3 ヶ月をはるかに超えて 2 台の探査ローバーは探査活動を継続し、かつての火星には水が存在した証拠を明らかにするなど数々の成果を挙げた。**Spirit** は活動開始後の 6 年目の 2010 年までに 7.7km を走行し、2011 年に活動を終了した。一方の **Opportunity** は、活動開始から 14 年目となる 2018 年においても探査活動を継続しており、走行距離は 45km を超えている。

MER の後継機として、NASA はより大型のマーズ・サイエンス・ラボラトリー (MSL) を開発した。探査ローバーは **Curiosity** と名付けられた。その重さはマーズ・エクスプロレーション・ローバーの約 5 倍の 900kg であり、10 倍の質量の科学探査機器を搭載している。2011 年 11 月に打上げられ、2012 年 8 月に火星のゲール・クレーターに着陸した。同ローバーは全長約 2m のロボットアームを搭載しており、その先端には岩石に穴をあけるドリルが取り付けられている。また、レーザー光によって土壌や岩の表面を蒸発させてスペクトル分析を行う装置も搭載している。**Curiosity** から送られてきた画像や観測データを分析した結果、湖底の堆積物と推定される岩石が多数確認され、着陸地点であるゲール・クレーター（直径約 150km）一帯は、30 億年以上前は巨大な湖だった可能性が高いと考えられている。2018 年 12 月現在、**Curiosity** の走行距離は 19km を超えており、岩石や土壌の分析を行いつつ、探査エリアを拡大している。

図 2-2-7 に、MPF、MER、MSL ローバーの比較を示す。



図2-2-7 NASAの火星探査ローバー

(出典 : NASA Press Release Images: Opportunity 17-Jan-2012 Three Generations of Rovers with Standing Engineers <https://mars.jpl.nasa.gov/mer/gallery/press/opportunity/20120117a.html>)

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス] および [注目すべき国内外のプロジェクト]

火星探査ローバー

1997年のMPF以降の一連のNASA火星探査ローバーミッションにおいて、移動探査ローバーに関して以下の新規技術が開発され、あるいは新たな研究課題として浮上してきている。

(a) 不整地移動機構

不整地移動機構の設計には、まず大分類として車輪、クローラー、脚型とすべきか、またそれぞれについて個数や配置方法など様々なバリエーションが考えられるが、これまでの4台のNASA火星探査ローバーではいずれも、6つの駆動車をロッカー・ボギーと呼ばれる受動的なリンク機構で連結するサスペンション方式が採用された。火星表面は多数の岩石で覆われており、同機構は岩石等で構成される凹凸地形に対して受動的に適応し、常に6輪接地を保ちながら移動することに非常に効果的な設計であったといえる。

(b) ビジュアル・オドメトリ

MER、MSLローバーの車体上部にはマストが突き出しており、その上にパン・ティルト機構を伴ったステレオカメラが取り付けられている。同カメラはパン機構を用いて周囲360度のパノラマ画像の作成に加えて、ローバー進行方向の障害物の認識に有用である。取得された画像に基づいて、ローバーの6軸姿勢を求め、地形に対する移動距離を求めるビジュアル・オドメトリの手法が開発され、*Spirit*と*Opportunity*の当初2年間の移動軌跡をまとめた成果が文献⁴⁾に報告されている。月惑星表面のような自然地形では、車輪は滑りや空転を起こしてしまうため、車輪回転数に基づいたオドメトリには限界があり、ビジュアル・オドメトリはそれに代わる方法として注目を集めた。

(c) 車輪の滑りと立ち往生

上述のロッカー・ボギー・サスペンションは岩石等で構成される凹凸地形での走行においては優れた性能を発揮したが、MER、MSLローバーは、一見平坦な軟弱土壌 (loose sand) にて車輪が空転し、砂地にめり込むなどのトラブルを起こしている。特に*Spirit*は2009年5月に砂地に立ち往生し、様々な脱出策が試みられたが成功することなく、その場でミッションを終了した⁵⁾。このような状況に遭遇することを回避するため、NASAでは、前方カメラにて取得される画像に機械学習 (AI) を用いて、ローバーが遭遇する土壌を自動的に *bedrock*, *large/small rocks*, *outcrop*, *loose sand* などに分類 (terrain classification) する技術の研究が進められている⁶⁾。

小天体探査

太陽系には8つの惑星とその衛星および月の他に、無数の小惑星、彗星などの小天体で構成されている。1986年に近日点回帰したハレー彗星に向けて、欧州、日本、米国、ソ連が相次いで探査機を送り込んだのが、本格的な小天体探査の始まりと言えよう。1996年に打ち上げられた米国のNEARシューメーカー探査機は、小惑星EROSの近接観測を行った。注目すべき探査機は、2003年に打ち上げられた日本の「はやぶさ」探査機である。同探査機は2005年に小惑星ITOKAWAに到着し上空からの近接観測の後、表面に2回タッチダウンを行いサンプル (岩石片) の採集を行った。その後、いくつかのトラブルに遭遇しつつも2010年に地球に帰還し、1500個以上の岩石片を地球に持ち帰ることに成功した。ITOKAWAは岩石質 (S

型)の小惑星であり、サンプルの分析によりその形成過程を明らかにすることができた^{7),8)}。

2004年には欧州宇宙機構が開発したロゼッタ探査機が打ち上げられ、同探査機は2014年にチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星に到着した。その後、フィラエと名付けられた着陸機が分離され、彗星表面上に軟着陸した。当初予定では、フィラエはアンカーを用いて彗星上に固定されドリルを用いて土壌のサンプリングおよびその場分析を行う予定であったが、アンカー機構が正常に作動せず、これらを行うことはできなかった。

はやぶさ探査機の成功を受けてJAXAは後継機「はやぶさ2」を開発し、同探査機は2014年に打ち上げられ2018年6月に小惑星RYUGUに到着した。タッチダウン・サンプリングは2019年に予定されているが、それに先立って2018年9月から10月にかけて、ミネルバIIIおよびMASCOTと名付けられた小型の探査ロボットが切り離され、小惑星表面に軟着陸し、その表面をホッピング移動(微小重力を利用して跳びはね、転がるような移動方式)を行い、RYUGU表面の様々な写真の撮影に成功した。RYUGUは炭素質(C型)の小惑星であり、その表面には有機物や水等の揮発性物質が含まれていることが期待されている。

日本は、「はやぶさ」「はやぶさ2」の2つの探査機により、小惑星近傍へのアプローチ、タッチダウン・サンプリング、小型ロボットによる表面移動探査等の技術確立に成功した。これは世界最先端のものである。

月探査

1972年12月、アポロ計画の最後のミッションである17号が月面を飛び立って以来、人類は月面に降り立っていない。この間、いくつかの無人探査機(1994年クレメンタイン、1998年ルナープロスペクター)が月周回探査を行っているが、2007年9月に打ち上げられた日本の月周回探査機「かぐや」が、「アポロ以来」と言われる本格的な月面観測を行った。アポロの着陸地点はいずれも月の表側の赤道域周辺に分布していたため、これまでの月面に関する詳細情報はこれらの地域に限定されていたが、「かぐや」は月の全面をくまなくスキャンするように観測を行い、「縦孔」と呼ばれる隕石衝突によるクレーターとは種類の異なる穴を複数発見した。これらはかつての火山活動により生じた溶岩トンネルの天井が崩落してできた穴であると考えられている。「かぐや」を追う形で、2007年10月には、中国の「嫦娥1号」、インドの「チャンドラヤーン1号」も打ち上げられた。米国は、ルナー・リコネサンス・オービター(LRO)およびエルクロスを2009年6月に打上げ、LROは「かぐや」よりも高い、最高50cmという高解像度で撮影を行った。エルクロスは月の南極付近に衝突し、その際に巻き上げられた砂塵の観測が行われた。

1994年のクレメンタイン探査機が、月の南極にあるクレーターの内側では常に日光が当たらない領域(永久影)があることを確認し、永久影の部分には水氷の存在を示唆するデータを得た。これ以降、月面探査においては、水氷の存在を確認し、それを資源として利活用する可能性を模索することが、重要な課題となっている。また、上述の「縦孔」探査も科学的にも、また将来人類が月面に長期滞在する際の候補地としても注目を集めている。極域の永久日陰や、縦孔から繋がる溶岩トンネルを探査するためには、高度なロボット技術が必要であり、今後の研究開発の重要課題である。

中国は、2007年の「嫦娥1号」以降、2010年に2号(いずれも周回探査機)を打ち上げ、2013年の3号では月面着陸を果たし、重さ約140kgの無人探査車「玉兔号」による表面移動

にも成功した。2018年12月には4号が打ち上げられ、2019年1月に月の裏側への着陸に成功し、無人探査車を使った探査が行われる。月の裏側が地球のほうを向くことは決していないため、これまで裏側は未踏の地となっていた。月面車と直接通信することはできず、月周回軌道上の中継衛星を使う必要があり、技術的な難易度は高い。科学的な成果が期待される。

2018年2月NASAは、月周回軌道上に人が長期滞在できる「月軌道プラットフォームゲートウェイ (LOP-G)」の開発を2019年度予算に盛り込み、最初のモジュールを2022年に打ち上げる計画を発表した。米国は、この計画を国際協力で推進することを各国に呼び掛けており、日本、欧州、ロシアは結局的に協力する意向を示している。LOP-Gは、(a) 国際協力と同時に産業界と連携により実現をめざすこと、(b) 将来の月以遠の有人探査に必要な技術・システムのためのプラットフォームとなること、(c) 宇宙空間におけるロボットを活用したプロジェクトとなることなどの観点から大きな注目を集めている。

(5) 科学技術的課題

宇宙デブリ捕獲

(3) で述べた宇宙デブリの捕獲・回収技術の重要性は年々高まってきている。図2-2-6に示したイメージの軌道上ロボットの実現にはさらに時間を要すると考えられるが、以下の2つの方向で実証的な研究開発が重要であろう。ひとつは、小型・超小型衛星を活用した要素技術の実証である。この切り口では、大学やベンチャー企業が取り組むハイリスク・ローコストな取り組みが計画され、実行され始めている。軌道上の不要物体を観測し、接近する、接触する、貼り付く、網をかける、把持するなどの各要素を切り取った実証ミッションが検討および実施されている。もうひとつの切り口として、ISS補給機「こうのとり」(HTV)の発展形として、ISS以外の対象へのランデブーを可能とするHTV-Rが、JAXAにて検討されている。これらのプラットフォームにロボットアームを搭載し、軌道上実証を積み上げていくことが有効であると考えられる。

月探査

(4) で述べた月探査に向けて、日本(JAXA)ではSLIM (Smart Lander for Investigating Moon) と名付けられた月面着陸機の開発が進められている。SLIMでは月面のクレーターなどの地形をリファレンスとする画像航法を用いて、ピンポイント着陸(目標地点へ精度よく着陸)する技術を確立することが、最も重要と考えられている。上述のように月面では極域の永久日陰における水氷探査、縦孔を入口とする地底探査などが注目されており、これらを円滑に行うためには探査対象スポットへ着実にピンポイント着陸することは、探査活動の出発点として最も重要な技術である。これを踏まえた上で、月面上では、(a) ローバーに代表される表面移動技術、(b) 水氷発見のためのセンサー技術、(c) サンプルの掘削、採集技術、(d) 採集したサンプルの分析技術の開発が求められている。これらの作業は無人で行うことが想定され、ロボット技術が大いに期待されている。

月面探査を考える上で、特に大きな技術課題として「越夜」の技術があげられる。月の自転速度は遅く、月面では約2週間の昼間(日照)と約2週間の夜(日陰)が繰り返される。夜の期間には地表温度は-150°Cあるいはそれ以下まで下がるので、いかにして越夜をするかが月面ミッションにおける大きな技術課題である。(ちなみに、アポロ計画において人が月面に滞

在したのは、月の昼間の時間帯の数日間のみであった。)このような極低温では、現存する電子デバイスや電池等は破壊されてしまう。ヒーターによる保温が考えられるが、2週間ヒーター加熱を継続するためには相当の電力量が必要となる。先行する米国、ロシア、中国の探査機・着陸機では、放射性同位体熱電気転換器 (Radioisotope thermoelectric generator, RTG) が必要に応じて搭載されており、放射線同位体の崩壊熱を利用した保温 (+発電) が行われているが、この技術を日本で使うことは困難である。技術開発課題としては、放射線同位体による発熱がなくても極低温で使用可能な電池や電子デバイスの開発が求められている。

さらには、月面を覆うレゴリスと呼ばれる微粒子に対する防塵対策等も重要課題である。

自律ナビゲーション

月惑星上で上述のような無人探査ミッションを行うためには、探査ロボットには相応の自律性が求められる。ローバーが天体表面を移動するためには、ローバーと同スケールでの詳細マップが必要であり、マップを作成しながら探査領域を広げていく SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) 技術が必須のものと言える。(4) でも紹介した画像ベースの機械学習 (AI) を活用した Terrain Classification (走行のための地形分類、土壌分類) の開発と実装が注目すべき課題である。

(6) その他の課題

人材育成

これまでの宇宙開発は国家プロジェクトとして推進されてきたが、質量 100kg 程度以下の小型衛星を大学等の研究機関やベンチャー企業が開発し、大型衛星の相乗り副衛星として打ち上げるといった新しい動きが広まりつつある。そのパイオニアとなったのは英国 Surry 大学である。同大学では 1981 年にアマチュア無線衛星を成功させ、1985 年には Surrey Satellite Technology Ltd (SSTL) と名付けた大学発ベンチャー企業を設立し、この分野のフロントランナーとして成長を続けている。1990 年代半ば以降、一辺 10cm、質量約 1kg の CubeSat というフォーマットが提唱され⁹⁾、宇宙工学の教育、技術実証、人材育成、さらには、新しい宇宙探査ミッションや宇宙ビジネスへと拡がりを見せている。短期間、低予算で宇宙機を開発し、軌道上データが得られることは、新たに宇宙開発ビジネスに参加しようとする企業等に対して参入の敷居を下げ、また大学等の研究教育機関においては、実践を通して人材育成をおこなう機会の拡大につながる。地球周回軌道の範囲を超えて、月惑星探査の分野に対しても、大学やベンチャー企業が独自のミッションを提案し、実行できる時代へと突入しつつある。リスクの高い挑戦的なプロジェクトや、新しいアイデアに基づいた多様な宇宙ミッションが実施されることにより、宇宙開発・宇宙探査の分野にイノベーションが生み出されることが期待されている。

法規制

宇宙ビジネスへの参入の敷居が下がり、より多くのプレイヤーが宇宙開発に参入する時代に備えて、法規制の問題を考えておく必要がある。1967 年に、宇宙空間の探査・利用の自由、領有の禁止、平和目的などを基本原則にした国際的な「宇宙条約」が制定されている。しかし、月、火星、小惑星等に有用資源が発見され、これを国家や企業間で競争的に開発する場合、あ

るいは人類が地球以外の天体に長期滞在する時代を想定すると、これまでの枠組みでは対応できないケースが予想される。アメリカおよびルクセンブルクでは既に、宇宙における民間の活動を促進する目的で、新たな宇宙法や宇宙資源関連法を整備している。わが国も、先端技術開発でリーダーシップを発揮していくのと並行する形で、国際的なルール作りにも積極的に参加していくことが望まれる。

(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	○	→	日本初の人工衛星「おおすみ」が1970年に打ち上げられ、日本は、ソビエト連邦(当時)、米、フランスに次ぐ4番目の人工衛星打上国となった。以降2003年にJAXAとして統合されるまでの間、日本の宇宙開発は、宇宙科学ミッションを指向する宇宙科学研究所(ISAS)と、1969年に設立された宇宙開発事業団(NASDA)の2本立てで進められてきた。NASDAの宇宙ロボットとしては、1997年の技術試験衛星VII型「おりひめ・ひこぼし」が特筆される。一方、ISASの小惑星探査として計画・開発されてきた「はやぶさ」は、微小重力天体への無人サンプルリターン技術を成功させたミッションとして、世界的に注目されるものとなった。
	応用研究・開発	○	→	日本が国際宇宙探査の分野でプレゼンスを示していくためには、重力天体への直陸技術の確立が重要であると考えられている。月面への高精度着陸を目指したSLIM計画が、2020年代前半の実現に向けて開発が進められている。これに次ぐものとして、2018年現在、インド宇宙庁ISROとの共同による月極域着陸探査(SELENE-R)ミッション、米国が主導する月軌道プラットフォームゲートウェイ(LOP-G)への参加、火星衛星探査ミッション(MMX)、加えて欧州との協力による有人月離着陸実証ミッション(HERACLES)等を目指したロードマップが議論されている。日本でも宇宙開発にベンチャー企業が参入する動きも活発化しており、宇宙ゴミの監視・除去をめざすAstroscale社、月面資源探査をめざすispace社などが注目を集めている。
米国	基礎研究	◎	↗	宇宙開発・宇宙探査先進国であり、月惑星探査で常に主導的な立場にある。1958年にNASAが設立され、NASAの各フィールドセンターや主要大学にて常に基礎研究が行われている。特に、カリフォルニア工科大学の附属研究機関として発足したジェット推進研究所(JPL)は、1958年よりNASA専属の機関として宇宙開発計画や宇宙探査計画の技術開発に携わるようになり、宇宙船や惑星探査機の設計など技術面を担当している。米国の宇宙開発計画において、月着陸船や、火星探査機、外惑星探査機の開発などで大きく貢献している。
	応用研究・開発	◎	↗	NASAの宇宙プログラムは、ノースロップ・グラマン、ロッキード・マーティン、ボーイングなどの巨大産業に支えられてきたが、昨今ではSpaceX、Blue Origin、Virgin Galactic、Rocket Labなどのベンチャー企業が、ロケットの開発および打上げサービス事業を推進している。衛星を用いたリモートセンシングや通信サービスを提供するベンチャー企業も数多く立ち上がっている。2009年に創業したPlanetary Resources社は、小惑星資源探査の商業化を目指している。2018年NASAは、月周回軌道上に人が長期滞在できる「月軌道プラットフォームゲートウェイ(LOP-G)」を国際協力で開発することを呼びかけた。また米国内では、月へのペイロード輸送業務を民間に開放するCommercial Lunar Payload Services(CLPS)プログラムを開始し、民間月面探査ビジネスを目指すAstrobotics社などが採択されている。これらの動きに伴って、大学における研究開発も活発である。
ロシア	基礎研究	◎	→	宇宙開発・宇宙探査先進国であり、旧ソビエト連邦時代の1957年に世界初の人工衛星、1961年人類初の有人飛行、1966年月面軟着陸(無人)、1970年月面車(無人)、1971年有人宇宙ステーションなど、世界の宇宙開発をリードする成果をあげている。2011年に米国のスペースシャトルが退役して以降、ロシアのソユーズ宇宙船が、国際宇宙ステーションへの有人アクセスができる唯一の手段になっている。
	応用研究・開発	◎	→	月探査については、極域表面探査やサンプルリターンなどを含むルナグロブ(無人)が計画されている。火星探査については欧州苦衷機関と共同でExoMars2020の開発を進めている。
カナダ	基礎研究	○	→	NASAスペースシャトルに搭載されたロボットアームSRMSおよび国際宇宙ステーション搭載ロボットアームSSRMSはカナダにおいて開発され、カナダにおける宇宙ロボット技術の重要な実績となっている。
	応用研究・開発	○	→	NASAや欧州宇宙機関の惑星探査大型プロジェクトに、特にロボット関連技術をもって貢献している。モントリオール郊外にはカナダ宇宙庁のMars Yardがあり探査ローバーの研究開発も活発に行われている。

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス

欧州	基礎研究	◎	→	1975年に欧州宇宙機関 (ESA) が結成され、2018年時点で22か国が加盟している。ロケット打ち上げはアリアンスペース社が担い、宇宙機開発はエアバス社を中心に様々な企業が参加している。オランダに欧州宇宙技術研究センター (ESTEC) があり、宇宙機に関する技術の開発や試験が行われている。特に宇宙ロボットの研究開発については、ドイツ航空宇宙センター (DLR) が学術研究コミュニティではよく知られている。たとえば、1993年にスペースシャトルで実施された ROTEX は、軌道上宇宙ロボットの先駆的な軌道上実証として知られている。以降、DLR では継続的に軌道上ロボットの先端的な研究開発が続けられている。
	応用研究・開発	◎	→	ESA では様々な太陽系探査ミッションを戦略的に進めているが、宇宙ロボットの観点からは、ExoMars 2020 が注目される。これはロシアの着陸機と欧州が開発するローバーにより構成される。ローバーは約300kgの6輪型が計画されており、欧州主要国の宇宙機関および大学等にて研究開発、実証試験が進められている。
中国	基礎研究	○	↑	中国最初の人工衛星は1970年、日本の「おおすみ」の約2か月後に成功した。1990年代にはいと、中国国家航天局と中国航天工業会社が設立され、国をあげた戦略的な宇宙開発が加速している。基礎研究では、北京航空航天大学、ハルビン工業大学、清華大学などが密接にかかわっている。
	応用研究・開発	○	↑	中国は2003年に神舟5号によって有人宇宙飛行を達成し、2011年には、ドッキング可能な有人モジュール「天宮1号」を打上げ独自の宇宙ステーション技術を確認した。月面探査については、2007年の「嫦娥1号」を皮切りに着実に開発を進め、2013年の「嫦娥3号」では月面への無人軟着陸・ローバー走行に成功し、2018年12月に打ち上げられた「嫦娥4号」では、月の裏側への着陸に成功した。また、2020年頃を目指して火星探査機を開発することも公表している。
韓国	基礎研究	△	→	KARI (韓国航空宇宙研究院)、KAIST、ソウル大学等の研究機関、主要大学にて関連の研究は行われているが、国際的に顕著なものはいくつかない。
	応用研究・開発	△	→	KARI では月探査計画を推進しているが、打ち上げに至るまでには、さらに時間が必要であると考えられる。
インド	基礎研究	○	↑	1960年代にインド宇宙研究機関 ISRO が創設され、1979年に自国で開発されたロケットの打ち上げに成功した。2008年には初の月周回探査機「チャンドラヤーン1号」、2014年には初の火星周回探査機「マンガルヤーン」に成功している。
	応用研究・開発	○	↑	月面無人着陸・ローバー探査を目指した「チャンドラヤーン2号」の打ち上げが2019年に予定されている。また、2020年代前半の打ち上げをめざして、JAXA-ISRO の国際協力による月面極域着陸探査ミッションが検討されている。

(8) 参考文献

- 1) David L. Akin, Marvin L. Minsky, Thiel, E. D., and Kurtzman, C. R., "Space applications of automation, robotics and machine intelligence systems (ARAMIS) , Phase II: Telepresence technology base development," NASA Contract Report 3734, (1983) .
- 2) Mitsushige Oda, "Experiences and lessons learned from the ETS-VII robot satellite," In the Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2000; San Francisco, California, April 24-28, 2000) , Vol. 1, (2000) pp. 914-919.
DOI: 10.1109/ROBOT.2000.844165
- 3) Kazuya Yoshida, "Engineering test satellite VII flight experiments for space robot dynamics and control: theories on laboratory test beds ten years ago, now in orbit," The International Journal of Robotics Research, Vol. 22, No. 5, (2003) pp. 321-335.
DOI: 10.1177/0278364903022005003
- 4) Mark Maimone, Yang Cheng, and Larry Matthies, "Two years of visual odometry on the mars exploration rovers," Journal of Field Robotics, Vol. 24, No. 3, (2007) pp. 169-

186. DOI: 10.1002/rob.20184
- 5) Ramon Gonzalez, and Karl Iagnemma, "Slippage estimation and compensation for planetary exploration rovers. State of the art and future challenges," *Journal of Field Robotics*, Vol. 35, No. 4, (2018) pp. 564-577.
DOI: 10.1002/rob.21761
- 6) Brandon Rothrock, Jeremie Papon, Ryan Kennedy, Masahiro Ono, Matthew Heverly, and Chris Cunningham, "SPOC: Deep learning-based terrain classification for mars rover missions," *AIAA Space Forum 2016*, (2016) pp. 1-12.
DOI: 10.2514/6.2016-5539
- 7) Akira Fujiwara, et al., "The Rubble-Pile Asteroid Itokawa as Observed by Hayabusa," *Science*, Vol. 312, Issue 5778, (2006) pp. 1330-1334; Masanao Abe, et al., "Near-Infrared Spectral Results of Asteroid Itokawa from the Hayabusa Spacecraft," *Science* Vol. 312, Issue 5778, (2006) pp. 1334-1338; Tatsuaki Okada, et al., "X-ray Fluorescence Spectrometry of Asteroid Itokawa by Hayabusa," *Science* Vol. 312, Issue 5778, (2006) pp. 1338-1341; Jun Saito, et al., "Detailed Images of Asteroid 25143 Itokawa from Hayabusa," *Science* Vol. 312, Issue 5778, (2006) pp. 1341-1344.
- 8) Tomoki Nakamura, et al., "Itokawa Dust Particles: A Direct Link Between S-Type Asteroids and Ordinary Chondrites," *Science*, Vol. 333, Issue 6046, (2011) pp. 1113-1116; Hisayoshi Yurimoto, et al., "Oxygen Isotopic Compositions of Asteroidal Materials Returned from Itokawa by the Hayabusa Mission," *Science*, Vol. 333, Issue 6046, (2011) pp. 1116-1119; Hisayoshi Yurimoto, et al., "Oxygen Isotopic Compositions of Asteroidal Materials Returned from Itokawa by the Hayabusa Mission," *Science*, Vol. 333, Issue 6046, (2011) pp. 1116-1119; Mitsuru Ebihara, et al., "Neutron Activation Analysis of a Particle Returned from Asteroid Itokawa," *Science*, Vol. 333, Issue 6046, (2011) pp. 1119-1121.
- 9) Hank Heidt, Jordi Puig-Suari, Augustus Moore, Shinichi Nakasuka, and Robert Twiggs, "CubeSat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation," In the *Proceedings of 14th Annual/USU Conference on Small Satellites* (Logan, Utah, August 8-11, 2000) pp. 1-19.
<http://culair.weebly.com/uploads/4/3/1/4/43140931/heidt-2000.pdf> (accessed 2019-01-15)

2.2.6 インフラ保守・建設ロボット

(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社会資本が老朽化し、インフラの維持管理・更新の作業が急務である。また、近年、自然災害が多発しており、災害発生時の災害調査や応急復旧は重要な課題である。一方、建設分野においては、少子高齢化に起因する若年就業者数の減少や、熟練した技術者・技能者の不足が問題となっている。これらの問題を解決するため、現在、ICT やロボット工学を用いた、点検や調査、建設における自動化や省人化が期待されている。(関連領域：社会システム科学 社会インフラマネジメント)

(2) キーワード

インフラ点検、無人化施工、情報化施工、ドローン、建設機械、ICT 土木

(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急速に進んでいる。2012 年に発生した笹子トンネル天井板落下事故では、天井板のコンクリート板が落下し、走行中の車複数台が巻き込まれ、多数の死者を出した。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ため、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ている。しかしながら、全国には、橋梁だけで 70 万橋、トンネルは 1 万本あるため、点検コストは膨大となり、さらに、熟練点検員の不足も問題となっている。これらの橋梁やトンネルを始めとするインフラの点検を効率的に進めるための、ロボット技術に対する期待が大きい。

また、建設現場においては、少子高齢化に起因する若年就業者数の減少や、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。この施策を更に進めるため、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。特に 2018 年の異常気象による大雨や台風は、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求められている。

(4) [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、ここ数年、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。

① 情報化施工推進戦略に基づく建設機械の自動化

建設機械を用いた施工の効率化を目指し、国土交通省が主導する情報化施工戦略²⁾の下で、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。例として、高精度のGPS等を利用した機械の位置情報、施工状況、設計値をオペレータに提供し、施工をサポートする油圧ショベルのマシンガイダンス技術ならびに、ブルドーザのブレード制御技術などが挙げられる³⁾。さらに、国土交通省は、2016年9月に、政府の「未来投資会議」において、建設現場の生産性革命に向け、「建設現場の生産性を2025年までに20%向上させる。そのため、3年以内に公共工事の現場で、施工・検査に至る建設プロセス全体を3次元データでつなぐ新たな建設手法を導入する。」という方針を決定した。通称*i-Construction*と呼ばれるこの方針の施策のひとつが、ICTの全面的な活用（ICT土工等）である⁴⁾。ICT土工は、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、ICTを全面的に活用する工事である。2018年には、ICT土工のみならず、ICTの活用拡大として、河川の浚渫工事や橋梁、トンネルなどの維持管理分野への拡大なども図られている。このように、2016年より、国土交通省がICTの活用を強力に進めているため、建設機械の制御技術の高度化のみならず、三次元データを取得するためのレーザ距離センサーやドローンに搭載したカメラを用いた航空測量などの実用化が急ピッチで進められている。

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

日本には、橋梁が約70万橋、トンネルが約1万本あり、5年に1度の点検が義務づけられている。これらの橋梁やトンネル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」⁵⁾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」⁶⁾の主導で進められてきた。また、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⁷⁾。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⁸⁾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の実施が可能で、トンネル点検車の開発が進められてきた⁹⁾。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が、産官学の連携で進められている。

③ ロボット技術による災害現場調査技術の開発

日本では、地震や水害、火山災害などの自然災害が発生しやすく、被害を最小限にとどめるための、被災地における情報収集は大変重要である。そこで、災害調査技術の研究開発につい

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」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、立入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進められている¹⁰⁾。

④ ロボット技術による応急復旧技術の開発

1991年の雲仙普賢岳の噴火後、立入制限区域内における応急復旧工事（土石流を堰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¹¹⁾。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、瓦礫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、相互補完の関係にもある。

以上の4項目は、省庁間連携ならびに産官学連携により進められてきた具体的な社会的問題を解決するロボット技術であるが、石油プラントなどの民間のインフラの点検についても、国の施策とは独立に、自動化の要求が高まっている。例えば、洋上プラントの自動点検を対象としたロボットシステムの研究開発が、競技会形式で進められてきた¹²⁾。また、災害対応については、2018年にスタートしたWorld Robot Summit (WRS) の中でプラント防災予防チャレンジやトンネル事故災害対応・復旧チャレンジが設定され、競技会形式で研究開発が進められている¹³⁾。

上述の技術を更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の研究、移動ロボットやドローンの自律動作の研究、作業現場の臨場感を遠隔地のオペレータ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開発、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が重要となると考えられる。

(5) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

インフラ維持・建設ロボットの研究開発については、基本的には、「新技術の創出を期待する」というよりも、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が期待されているように見受けられる。これを念頭に置き、近年の国内外の研究動向について以下に掲載する。

建設ロボットの遠隔操作に関するロボット技術としては、ここ数年、スイスのETHの建設機械が大きく注目されている。ここでは、台車の姿勢を大きく変動させることで不整地を走行することが可能な脚車輪を有する油圧ショベルに対し、これを遠隔操作するための姿勢変動可

能な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用の椅子の姿勢が変動することができ、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¹⁴⁾。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、今後は、遠隔操作時の作業効率の向上が期待できる。

日本の建設機械については、コマツが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いる¹⁵⁾。ここでは、ドローンで取得した三次元データを元に、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。また、鹿島建設は、クラウ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た。これは、汎用の建設機械に GPS、ジャイロ、レーザスキャナなどの計測機器及び制御用 PC を搭載することによって自動機能を付加し、自動運転を実現している¹⁶⁾。上記は、いずれも、既存の技術を組み合わせることで新たな価値を創出した例である。

また、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を開発している¹⁷⁾。このプロジェクトで開発した建設ロボットは、腰部で両手が回転する 2 重旋回・複腕機構を搭載しており、両手のレイアウトが自由に変更できるため、手とクローラを使った急坂・段差のよじ登りや、双腕を用いた繊細・器用な作業性を実現することが可能である。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を行っている。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も始まっている。

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。特に、SIP のテーマの一つ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すると共に、そこに搭載し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の開発を進めている¹⁸⁾。

【注目すべき国内外のプロジェクト】

前述の SIP ならびに ImPACT タフ ロボティクスチャレンジのプロジェクトは、2018 年度で終了となるが、建設・インフラ維持管理技術／革新的防災・減災技術については、官民研究開発投資拡大プログラム (Public/Private R&D Investment Strategic Expansion Program : PRISM)¹⁹⁾ の中で研究開発が進められる予定である。ここでは、建設分野の三次元データベースの構築・有効活用、基準・制度、プレハブ化自動施工、新材料開発等基幹的な建設技術を開発することを目指している。このプログラムには、さらに「インフラ維持管理・更新・マネジメ

ント技術」と「レジリエントな防災・減災機能の強化」の両 SIP の成果も取り入れ、インフラの調査・測量から設計、施工、検査、維持管理・更新までの一連の建設生産プロセスにおいて、建設分野を中心に他産業の技術を用いて生産性向上を実現するとともに、災害予防・被害軽減に資する対策を速やかに進めることを目標としている。

一方、2020年を本大会とした World Robot Summit (WRS) では、プラント防災予防チャレンジやトンネル事故災害対応・復旧チャレンジが設定され、競技会形式で研究開発が進められている。2018年には、東京でプレ大会を実施したが、国内のみならず、世界各国からチームが集結し、それぞれの課題に取り組んだ。競技会形式の研究開発については、その効果に賛否両論が存在するが、かつて DARPA が主催したチャレンジにおいても、そこで開発された成果がロボット技術を大きく推し進めた例もあるため、今後、WRS のチャレンジについても注目が集まっている。

（6）科学技術的課題

先述の通り、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。また、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い。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²⁰⁾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、サブローラやバックホウ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 ドローンの位置推定については、基本的には GNSS (Global Navigation Satellite System : 全球測位衛星システム) 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、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、レーザ距離センサーや画像を用いた SLAM (Simultaneously Localization And Mapping)²¹⁾ の技術を利用した様々な方法が提案されている。しかしながら、こ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、環境によって比較的困難であるため、今後の研究の進展が期待される。一方、石油プラントなどのインフラ点検を行うことが期待される不整地移動ロボットの位置推定についても、同様の手法の活用が期待される。

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者が操作を行う場合、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、作業効率は、通常の搭乗操作と比較し、50%程度まで低下するといわれている²²⁾。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である。一つの方策として、作業現場の臨場感をオペレータに伝えるためのVR技術に関する研究が挙げられるが、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比較的規模の大きいロボットシステムとなる。これを長時間、安定して動作させるためには、ロボットシステムにフェイルセーフ機能を導入することが望ましく、今後、ロボットシステムに対するフェイルセーフ機能の導入に関する研究が必要であると考えられる。また、建設現場など、人と機械が空間を共有する場合、人に対する安全性を確保する必要がある。ロボットの安全に関する研究は、サービスロボットなど複数の分野で進められているが²³⁾、建設ロボットに関する安全についても、研究を進める必要があると考えられる。

⑤ ロボットとオペレータ間の無線通信を安定して確保することは、本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（総務省）の側面もあるが、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。

(7) その他の課題

(6) でも触れたが、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。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2.4GHz帯、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²⁴⁾。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。そのための法整備ならびに、非常時におけるルールの設定など、総務省の対応が期待される。

(8) 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、ロボット運用の安全に関する基礎研究は全般に成果が出ている。
	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、近年、顕著な成果が出ていると見受けられる。
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 ²⁵⁾ やJPLならびにCaltechのグループが、高い成果を挙げている。
	応用研究・開発	○	→	ブルドーザ、グレーダ、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 ²⁶⁾ 。
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 ²⁷⁾ 。
	応用研究・開発	○	→	ブルドーザ、グレーダ、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。
韓国	基礎研究	△	→	不整地の走行に関する研究などは、各研究機関において、着実に進められている。
	応用研究・開発	△	↑	2020年より、建設機械の自動化に関するプロジェクトが立ち上がると聞いている。

(9) 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> (accessed 2019-02-08)
- 2) 国土交通省, "情報化施工推進戦略," <http://www.mlit.go.jp/common/000993270.pdf> (accessed 2019-02-08)
- 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, Vol. 55, No. 6 (2016) pp. 477-482.
- 4) 橋本 亮, "I-Construction 推進コンソーシアム等," 建設機械施工, Vol. 70, No. 7, (2018) pp. 5-10.
- 5) 藤野 陽三, 永谷 圭司, "SIPのインフラ維持管理・更新/災害対応ロボット技術", 土木技術, Vol. 71, Issue 4, (2016) pp. 425-95.
- 6) 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> (accessed 2019-02-08)
- 7) 日本ロボット学会 (編), 「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」特集, 日本ロボット学会誌 Vol. 34, No. 8 & No. 9 (2016) .
- 8) 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, Vol. 83, No. 12, (2017) pp. 1066-1070.
- 9) 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), Vol. 73, No. 1, (2017) pp. 1-10.
- 10) 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, (2017) pp. 14-17.
- 11) 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, (2013) pp.45-53.

- 12) ARGOS Challenge Website, <http://www.argos-challenge.com/en> (accessed 2019-02-08)
- 13) World Robot Summit, "World Robot Challenge 2018," <http://worldrobotsummit.org/wrc2018/> (accessed 2019-02-08)
- 14) David Gonon, Dominic Jud, Péter Fankhauser, and Marco Hutter, "Safe Self-collision Avoidance for Versatile Robots Based on Bounded Potentials," *Field and Service Robotics*, edited by Marco Hutter and Roland Siegwart, (Springer-Verlag, Berlin, 2018) pp. 19-33..
- 15) 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)", *日本建設機械施工協会誌*, Vol. 67, No. 12, (2015) pp. 16-20.
- 16) 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* 2018年3月26日号, pp. 43-47.
- 17) 吉灘 裕, 横小路 泰義, 永谷 圭司, 昆陽 雅司, 山下 淳, 田中 正行, "ImPACT タフ・ロボティクス・チャレンジ (TRC) 建設ロボットー 2 重旋回・複腕モデルによるフィールド評価実験一", *ロボティクスメカトロニクス講演会予稿集*, 2A1-J02 (2018) .
- 18) 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) .
- 19) 内閣府, "官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM)" <http://www8.cao.go.jp/cstp/prism/index.html> (accessed 2019-02-08)
- 20) Jo Yung Wong, *Theory of ground vehicles*, (John Wiley & Sons, 2008) .
- 21) Josep Aulinas, Yvan Petillot, Joaquim Salvi, and Xavier Lladó, "The SLAM problem: a survey," In *Proceedings of the 11th International Conference of the Catalan Association for Artificial Intelligence (CCIA2008; Sant Martí d'Empúries, Spain, October 22-24, 2008)* , *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, Vol. 184, (2008) pp. 363-371.
- 22) 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*, Vol. 55, No. 6, (2016) pp. 495-500.
- 23) 新井 健生, "安心なロボットを考える," *日本ロボット学会誌*, Vol. 36, No. 4, (2018) pp. 266-269.
- 24) 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://kiai.gr.jp/jigyoku/h28/PDF/0617p1.pdf> (accessed 2019-02-08)
- 25) David Kohanbash, , Scott Moreland, and David Wettergreen, "Plowing for rover control on extreme slopes," *Field and Service Robotics*, edited by Kazuya Yoshida and Satoshi Tadokoro (Springer-Verlag, Berlin, 2014) pp. 399-413.
- 26) 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," *日本建設機械施工協会誌*, Vol. 65, No. 7 (2013) pp.21-24.
- 27) 山口 崇, "欧州における情報化施工等の状況," *日本建設機械施工協会誌*, Vol.65, No. 7, (2013) pp.25-28.

2.2.7 災害対応ロボット

(1) 研究開発領域の定義

地震、津波、集中豪雨による水害、台風による暴風雨、山崩れ・地滑り、森林火事、竜巻、火山の噴火、土石流などの様々な自然災害および工場でのプラント事故、原子力発電所の事故、公共交通機関での事故、テロによる事故などの様々な人為災害が世界で頻繁に発生している。これらの災害現場に人間が入っていくには大きなリスクがある。人間の代わりに災害直後の現場に進入し、情報収集や人命救助などの緊急対応や災害からの復旧復興に関わるタスクを遂行する極限環境で有用なロボット技術を災害対応ロボットと定義する。

(2) キーワード

アクセシビリティ、耐環境性（防塵防水防爆性、耐放射線性）、Human-in-the-loop、ユーザフレンドリーなインターフェース、自律機能、ロバストな通信、時空間情報統合システム、インターフェースの共通化・標準化

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

世界各地で災害が多発しており、それに備えることは各国共通の課題である。災害には、自然災害（洪水、地すべり、地震、台風、雪崩など）と人為災害（テロ、プラント災害、森林火災、交通事故など）があるが、いずれも大規模災害では多くの人が被災し、被災した国の組織と経済に大きな影響を与える。災害の様相は国の風土や文化によって様々であるが、災害対応技術の基礎となる基盤技術は共通であり、特に情報収集に関してはあらゆる災害において最重要である。日本では阪神淡路大震災で地震直後に瓦礫の中に閉じ込められた被災者の生存確率は3日後には5%以下になってしまうことが分かった。この黄金の72時間以内に、被災者を発見し救助することが喫緊の課題である。災害の被害を如何に少なくできるかは、初動にかかっている。その意味で、災害初期対応技術は非常に重要であり、二次災害を起こすことなく、迅速に大域的な情報と局所的な情報を収集し、適切な対応策を実施することが重要である。

災害時には電力・人材・時間・情報・食料など全てのリソースが不足する。このリソース不足を技術によって補完することで、より効果的効率的な災害対応活動の支援をすることは工学分野の使命である。特に情報が錯綜する初動時に、迅速に正確な情報を収集し共有することは極めて重要である。ファースト・レスポnder（最初の対応者：災害や事故による負傷者に対して、最初に対応する救助隊・救急隊・消防隊・警察など）にとって災害の大域的な情報が不足すると、限られたリソースの適切な配分など重要な意思決定が困難になる。また、要救助者の位置の特定など、局所的な詳細情報を提供できれば、救助活動の効率化に大きく貢献する。

日本では、1995年の阪神淡路大震災や地下鉄サリン事件、2011年の東日本大震災や2018年の西日本豪雨災害など、自然災害や人為災害による大被害があとを絶たない。災害発生直後の初動が減災に極めて大きな影響を与えるため、初期の災害対応技術は非常に重要である。大規模な災害の場合には、迅速に大域的な情報と局所的な情報を正確に収集し、意思決定支援に活用することは、災害対応戦略の最適化という観点から重要である。

1999年に発生した東海村JCO臨界事故直後に、原子力災害対応ロボットが政府主導で開発

されたが、開発のみに留まっており、実運用には至らなかった。これに対し、ドイツのKHG社 (Kemtechnische Hilfsdienst. GmbH) とフランスのグループアントラ社では、事故時に備えて原子力災害対応ロボットが開発・配備されてきており、日本の災害対応ロボットシステムの実用化や配備は遅れていると言わざるを得ない。

先進国は公害の問題、少子高齢化の問題など様々な問題を、他の国々に先駆けて経験する。先進国はこれらの問題を解決し、次に同じ問題を抱えることになる国々にその解決策を示す必要がある。それが先進国の一員である日本の責務でもある。一方、日本は災害大国だと言われている。災害を経験した国は、その対応策を次に同じ問題に直面する国々に示す必要がある。しかし、全ての国が可能とは限らない。災害は先進国だけで発生するものではない。地震・津波・豪雨・火山・台風など多くの災害を経験した災害大国であり先進国である日本は、災害を経験した国々の代表として、その解決策を世界に示す必要があり、それが日本のプレゼンスを示すことにもなる。

【研究開発の動向】

日本では、1995年の阪神淡路大震災や地下鉄サリン事件を契機として、大都市直下型の地震や地下街などの閉鎖空間にけるNBCテロ災害などを想定して、大学の研究者を中心にレスキューロボット開発が進められてきた¹⁾。海外では、2001年のハイジャックされた旅客機がニューヨークの世界貿易センタービルに突っ込むというテロが発生した。この9.11テロの現場から、軍用ではあるが遠隔操作ロボットを使って遺体を発見する成果を挙げた。また、フランスの様に原子力発電所を積極的に進めている国々では、事故時に備えて原子力災害対応ロボットが開発・配備されてきた。日本でも1999年に発生した東海村JCO臨界事故直後に、原子力災害対応ロボットが政府主導で開発されたが、開発のみに留まっており、実運用には至らなかった。2011年に日本で発生した東日本大震災では、陸海空のロボットが災害現場で使用された^{2),3)}。JSTとNSFの支援で、日米の合同チームが結成され、水中ロボットによる瓦礫の調査や遺体の探索が実施された⁴⁾。また、福島第一原子力発電所の事故現場では、無人化施工機械が瓦礫の除去に活用された。これは、国土交通省が普賢岳における土石流対策のための土木工事を遠隔で行うためのシステム開発を継続してきた成果である。現場での実運用を通じて開発にフィードバックする体制を継続的に支援してきたからこそ、福島第一原発での成果につながった。また、建屋の中の情報収集に国内外のロボットが用いられた。廃炉まで30-40年を要すると予想されており、現在でも様々なロボットが開発されている。

次に、米国のレスキューロボット開発に関する状況を考えてみたい。国防高等研究計画局 (DARPA) は軍で使うための新技術開発および研究を行っている国防総省の機関である。例えば、インターネットやGPSはDARPAからの予算支援を得て開発され、それが民用に転用されて広く普及し、現在ではインターネットやGPSが無い世界は考えられないまでになった。米国では、ロボットに関しても同様なシナリオで研究開発が進められている。戦場に人間が行く代わりに、ロボットが戦場に行って戦うのであれば、国民の理解が得られる。また、軍がロボットを調達するので大きな市場が形成され、ビジネスとして企業が商品としてのロボットを開発販売する。さらに、ロボットを実現現場である戦場で使って課題を抽出し、開発にフィードバックし、それをまた戦場で使う。このような開発・実証実験・改良のループを回すことができる。これに対して日本では、50年に1度程度しか起こらない大地震による大規模災害のために多額の予

算をつぎ込んでレスキューロボットを開発することは民間企業では不可能であり、市場は存在していない。市場が無ければ企業が参入できず、志をもった大学の研究者がレスキューロボットを細々と研究開発し、災害現場へも訓練を積んでいない研究者が出動しロボットを運用するのが現状である。平常に使っているロボットシステムが緊急時にも使えるというシナリオで市場を創出する、あるいは消防や警察や自衛隊にレスキューロボットを配備するなど、政府主導で研究開発を加速させる必要がある。東海村 JCO 放射能臨界事故後の原子力事故対応ロボットの開発が、運用までを視野に入れて実施されなかった失敗を反省し、研究開発の支援を継続的に行うことおよび現場での実運用を可能とするようなファンディング制度が必要である。

このように、米国のレスキューロボットの開発は、DARPA からの豊富な資金援助を背景に軍用ロボット技術を転用することで、進められてきた。また、実際に戦場でロボットを使用して問題点を明らかにし、改良に繋げるフィードバック体制が可能であった。これに比べ、日本では災害対応のみに用途が限られるレスキューロボットでは市場を形成することはできず、大学の研究者が開発を担ってきた。そのため、商品化は非常に困難な状況であった。しかし、東日本大震災における福島原発事故対応のために、政府も予算をつぎ込んで災害対応ロボットの開発を進めるようになってきており、状況は少しずつではあるが変化してきている。

一方、ヨーロッパ諸国の原子力発電所を積極的に進めていた国々では、ドイツ電力会社等によって出資設立された KHG 社やフランスの原子力事業者によって設立されたグループアントラ社などにより、事故時に備えて原子力災害対応ロボットが開発・配備されてきた。また、2015 年から ANR (The French National Research Agency) から公募された、石油サイト向け自律ロボットの国際コンテスト ARGOS Challenge - Autonomous Robots for Gas & Oil Sites が開催されてきており、プラントの保守点検および緊急時の対応にロボット技術を導入する試みがなされている。

また、アジアに目を向けてみると、中国は各分野で国策として多額の予算をかけて、世界のトップを目指して研究開発を加速させている。災害対応ロボットシステム分野もその例外ではなく、地震などの自然災害直後に用いる災害対応ロボットより、災害調査や公共安全等に用いられるロボットの開発が精力的に行われている。開発されているレスキューロボットは災害調査無人飛行ロボット、消防ロボット、陸上レスキューロボット（炭鉱レスキューロボット、爆発物処理ロボット、偵察ロボット）に分類される。開発は瀋陽自動化研究所、上海交通大学、ハルビン工業大学、北京航空航天大学、北京理工大学などの研究所や大学が中心となって、一部は商品化されている。また、大学の研究をベースに起業して、大きな会社に成長した DJI (大疆創新科技有限公司、Da-Jiang Innovations Science and Technology Co., Ltd.) などがある⁵⁾。DJI は中国広東省深圳にある会社で、民生用ドローン（マルチコプター）およびその関連機器の製造会社である。商用ドローン業界最大手であり、世界シェアの 70% を占めている。米国、ドイツ、オランダ、日本、北京、香港でオフィスが設立されている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

近年の人工知能の進展は目覚ましく、深層学習 (Deep Learning) が画像認識に対して有効であることが明らかになり、ロボットの認識技術の大幅な向上が期待されている。災害対応分野では、被災者の発見などに適用が試みられている。また、移動ロボットの自己位置と環境地

図を同時に作成する SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術にも大きな進展があり、ロボットの自律化に大きく貢献している。

日本の内閣府が進める革新的研究開発推進プロジェクト (ImPACT: Impulsing PARadigm Change through disruptive Technologies) では、タフ・ロボテックス・チャレンジ (TRC) が採択され 2014 年度から 5 年間のプロジェクトが実施されている⁶⁾。TRC では、(1) サイバー救助犬 (センサーユニットなどを装着し情報化された救助犬)、(2) 細径索状ロボット (瓦礫内の探査を目的とした能動スコープカメラ)、(3) 太径索状ロボット (プラント点検を目的としたヘビ型ロボット)、(4) 脚ロボット (2 足歩行、4 足歩行、腹這い移動などを実現する 4 脚ロボット)、(5) 飛行ロボット (劣悪環境で自律飛行可能な無人ヘリコプタ)、(6) 建設ロボット (双腕を搭載した建設ロボット)、(7) 極限油圧コンポーネント (小型軽量大出力の油圧アクチュエーターユニット) (8) シミュレータ (動力学シミュレータ: Choreonoid)、(9) フィールド評価・安全・STM (Standard Test Method) に関する研究開発が行われ、実用化に向けてフィールド評価が実施されている。

ヨーロッパでは、2018 年に EU のフレームワークである Horizon2020 において、Boosting the effectiveness of the Security Union (SU) の分野で “Specific Challenge: Resilience is critical to allow authorities to take proper measures in response to severe disasters, both natural (including climate-related extreme events) and man-made.” に関する公募がなされた。3 年間で 21,000,000 ユーロの大きなプロジェクトであり、災害対応の初動における技術の重要性が認識されていることがうかがえる。それに対応する形で JST では、災害初期対応の分野で日本と EU 間の共同研究を強化する目的で戦略的国際共同研究プログラム (SICORP: Strategic International Collaborative Research Program) 日本 - EU 共同研究「災害初期対応技術」の公募がなされた。日本と欧州の研究者が協力することによって相乗効果が生み出されることが期待されている。

ロボットの標準的ミドルウェアとして ROS (Robot Operating System) が広く使われており、全世界の研究者のアルゴリズムやソフトウェアなどの知見を共有できるようになってきた。日本でも、同様な目的で産総研が中心となり RT ミドルウェアの開発普及に努力がなされている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

日本から生まれた国際的なロボット競技会であるロボカップにおいて、ロボカップレスキュー実機リーグが 2001 年から実施されており、現在では世界大会のほか各国でロボカップオープンが開催されている^{7), 8)}。この競技会は、災害空間を模擬した実寸大のフィールドで、開発したロボットシステムを用いて、被災者を含めた環境情報を如何に正確に多く収集できるかを競うものである。本競技のフィールドは米国国立標準技術研究所 (NIST) が主導して設計されている。NIST は米国ホームランドセキュリティ省からレスキューロボットの評価方法を標準化するプロジェクトを受託し、国際標準の策定を行ってきた。この評価方法は、本競技を長年実施して蓄積された知見を基盤として、Disaster City などを利用したロボットの評価実験における多くの隊員たちの協力のもと試行錯誤を経て、構築されている。したがって、この評価方法には現場のレスキュー隊員のニーズが反映されており、将来的にはここで構築された評価方法がレスキューロボットシステムの調達での重要な役割を担うことになる。レスキューロボットリーグにおいて、この評価方法の基盤をなすフィールドを採用することにより、競技を通して

現実的な課題に解を与える技術が養われるとともに、評価方法も洗練されていくことになる。

一方、米国では国防高等研究計画局 (DARPA) がロボティクスチャレンジとして、福島第一原発の事故の様な災害を想定した、ロボット競技会を企画・開催した⁹⁾。これは、ヒューマノイドロボットが車両を運転して現場に向かい、ドアを開け、不整地や階段を走破し、バルブを回すなどの作業を遂行するシナリオで実施された。日本では軍事技術開発を支援する DARPA が主催するロボット競技会へ、DARPA から予算支援を得て出場することに対抗があり、大学からの参加は認められなかった。2013年に米国フロリダ州で開催された予選には、世界各国から 16 チームの参加があり、日本から参加した、大学発ベンチャーの SCHAFT が一位で通過した。しかし、SCHAFT は Google に買収されたため、本選には出場していない。2014年に経済産業省と米国国防総省の合意に基づき、NEDO がこの DARPA のロボティクスチャレンジに大学チームが参加できる枠組みを急遽作って、日本からは 5 チームが本選に参加した。2015年に米国カリフォルニア州で開催された本選では、世界各国から 25 チームの参加があり、韓国の大学 KAIST で開発されたロボットが優勝した。実施されたタスクは、車の運転・車から降りる・ドアを開けて建物中に入る・壁の弁を開ける・電動ノコギリで壁に穴を開ける・事前には知らされていないタスク (1 日目はスイッチ切り替え、2 日目はコンセント引き抜き)・瓦礫乗り越え・階段を上る、であった。また、通信には帯域の制約などの不定期な外乱が設定されており、不確実な情報インフラを前提としたシステム開発の重要性も意識された競技会のルール設計になっていた。

このような災害現場を模した実寸大の模擬フィールドでロボットを運用することは、非常に重要な経験である。特に、米国のように軍用ロボットの転用といった研究開発シナリオが成り立たない日本では、実環境での運用の機会が限られており、開発研究の加速にこれらの模擬フィールドでの実証実験は必須である。また、災害対応ロボットのみでは市場形成できない日本では、平常時に使っているロボットシステムが災害時にも活用できるというコンセプトで研究開発を推進する必要がある。そのような観点で、橋梁やトンネルなどのインフラ点検やダムや河川の保守管理や火山の観察調査などに有用なロボットシステムを開発・実用化することを目的とした戦略的イノベーション創造プロジェクト (SIP: Strategic Innovation promotion Program) などにおいて現場での実証試験が実施されている^{10), 11)}。また、内閣府が進める革新的研究開発推進プロジェクト (ImPACT: Impulsing Paradigm Change through disruptive Technologies) では、災害現場で有効に働く、タフなロボットを開発するタフロボティクスチャレンジが実施されている。さらに、東京オリンピックに合わせて、WRS (World Robot Summit) において国際ロボット競技大会が開催される予定で、① BtoB 中心の分野 (ものづくり、農林水産業・食品産業分野)、② BtoC 中心の分野 (サービス、介護・医療分野)、③ インフラ・災害対応・建設分野の 3 分野で競技が設けられる予定である。③の分野では、プラント点検、プラントの中の人発見・救助などが利活用シーンとして想定されている。具体的には「プラント災害予防チャレンジ」と「トンネル事故災害対応・復旧チャレンジ」、「災害対応標準性能評価チャレンジ」の 3 種目で検討が進んでいる。その会場の一部として福島県浜通り地域に災害現場や実プラントを模擬したテストフィールドの建設が進められている。また、2018年10月にはそのプレ大会として WRS2018 が東京ビッグサイトで開催され、国際ロボット競技大会が実施された。災害分野は「プラント災害予防チャレンジ」(5 か国 9 チーム参加) と「トンネル事故災害対応・復旧チャレンジ」(国内 8 チーム参加)、「災害対応標準性能評価チャ

レンジ」(9か国19チーム参加)の3種目が実施された。

(5) 科学技術的課題

大規模災害現場ではライフラインや通信網など社会基盤システムが大きなダメージを受け、使用可能な情報インフラが限られているという想定をしなければならぬ¹²⁾。災害直後にテンポラリにロバストな通信インフラを構築することは重要であり、大きな課題である。通信方式に関して、有線通信は確実であるが、移動ロボットの運動の制約になる。陸上のロボットではケーブルをロボット本体に搭載して手繰りだす方式が取られているが、本体重量の増加を招いてしまう。実際、福島第一原発の事故対応でもケーブルのトラブルにより建屋内に取り残されたままのロボットも存在する。無線通信の場合には、アドホックネットワークなどが適用されているが、ホップするごとに伝送量が減少してしまうなど問題がある。また、通信と同様に、エネルギー供給に関しても、有線と無線(バッテリー駆動)のトレードオフがある。災害現場でのエネルギー源の確保も大きな課題である。

原子力発電所の事故の様な災害現場では、放射能の影響を考えた耐放射線性を付与する必要がある。また、尼崎の列車脱線事故やトンネル内の事故など、火気による爆発の危険性がある場合には、防爆性能が要求される。このように、防塵防水に始まって防爆や耐放射線性など耐環境性についても重要な課題である。

無人ヘリは上空からの情報収集には非常に有効な手段であり、福島第一原発の被害状況を上空から把握することができた。しかし、運用が容易な小型の無人ヘリは強風下での飛行が困難であり、建物の壁などの近くでは安定な飛行は難しい。航続時間も30分程度であり、適用に大きな制約が課される。航続時間を延ばそうとすると大容量のバッテリーを搭載する必要があり、機体重量の増加を招く。ここにもトレードオフの問題がある。効率の良い(軽量で長時間持ち、急速充電が可能な)安全なバッテリーの開発が急務である。また、屋外での無人ヘリの自己位置同定はGPSを用いれば精度よく計測でき自律飛行も可能であるが、屋内の自律飛行にはSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)のような自己位置同定技術が必須であり、非GPS環境下で高精度の自己位置同定を可能とする技術開発が求められる。

東日本大震災において日米の合同チームなどにより水中ロボットを用いた、港の瓦礫の調査・ご遺体の探索・沖合の漁場や養殖場の調査などが実施された。瓦礫などの対象の位置を特定し、地理情報システムに連動させて情報を記録し、その後の瓦礫撤去や養殖施設再生など、あらゆる時期に利活用されることになる。水中でセンシングに有効な物理量は光と音波であり、これらの物理量を用いて水中の対象物の位置を特定することは非常に難しく、精度の高い位置計測装置は非常に高価である。水中での位置同定技術開発も大きな課題である。

さらに、陸海空すべてのロボットに共通するが、ロボットを操作するオペレータの訓練には時間を要することに注意しておく。災害現場は未知の環境であり、人間による遠隔操作が基本である。災害現場を模したモックアップを構築し、実災害さながらの訓練を通して、日頃からの運用やメンテナンスを実施することは、有事にシステムを有効に機能させるための必須の条件である。また、実災害現場でのロボット操作には失敗が許されず、オペレータにかかる精神的および肉体的負担は想像を絶するものがある。オペレータの負担を軽減化できるインターフェースの開発が重要である。そのために、未知の不整地環境でも自律的に移動や作業が可能な知能に関する研究開発を推進し、半自律機能を搭載していくことも今後の大きな課題である。

現状ではレスキューロボットに期待されている主なタスクは情報収集であり、アクセシビリティをどのように向上させるかが課題となっているが、今後は移動から様々な作業へと適用できるタスクを広げていく必要がある。さらに、広域災害では情報が錯綜する。携帯電話などによる人間からの情報や固定センサー・レスキューロボットなどで収集した情報など膨大な時空間情報を柔軟にハンドリングでき、災害直後だけでなく復旧復興を経て平時に至るまでを含めたそれぞれの時期に情報を利活用できる情報システムの構築も重要な課題である。

(6) その他の課題

2011年3月11日に発生した東日本大震災は地震動や津波による被害さらには原子力発電所の事故が折り重なった巨大複合災害であり、日本で災害対応ロボットが適用された初めての災害となった。発災後約一カ月の4月6日に福島第一原発の瓦礫処理に大成建設・鹿島建設・清水建設の無人化施工機械（バックホウ、クローラダンプ、オペレータ車、カメラ車）が導入された。無人化施工機械は1993年の雲仙普賢岳の噴火に始まり、2000年の有珠山噴火、2004年新潟中越地震などの多くの災害復旧工事での適用実績がある。これは、国土交通省が普賢岳における土石流対策のための土木工事を遠隔で行うためのシステム開発を継続し運用してきた成果である。現場での実運用を通じて得られた知見を開発にフィードバックする体制を継続的に支援してきたからこそ、福島第一原発での成果につながった。次いで、4月10日にはHoneywell社製の無人ヘリコプタT-Hawkが導入され、1～4号機原子炉建屋、タービン建屋およびその周辺の撮影を行った。また、4月17、18日にはiRobot社製のPackbotが原子炉建屋内の放射線量・雰囲気温度・雰囲気湿度・酸素濃度の測定を行った。Packbotは建屋内の1階部分の情報収集には成功したものの、階段を登ることができず建屋の2階以上の情報収集ができなかった。その後、6月24日に千葉工業大学・東北大学などが開発したQuinceが2号機に投入され、原子炉建屋地下に水位計センサーを投入することに、そして7月8日には2号機原子炉建屋の2階以上でダストサンプリングを収集することに成功している。

ここで、これらの活動における課題について考えてみたい¹³⁾。事故後の原子炉建屋内は強い放射能が予想され、ロボットに搭載されている電子機器やセンサー類の耐放射能性を十分検討する必要がある。電子機器はビット反転する可能性があり、CCDカメラやLRFなどのセンサーはいずれ使用不可能になってしまう。耐性が無い場合には何らかの措置を講ずる必要がある。福島第一原発の対応では準備に時間を要した。実は、1999年に発生した東海村JCO臨界事故が起こったことを受けて、国がプロジェクトを設置し、短期間に多くの技術者が心血を注いで放射能災害対応ロボットが開発された。しかし、製作しただけで、ロボットシステムの運用やメンテナンスや改良に必要な予算が計上されず、技術者たちもそのプロジェクトから離れざるを得なかった。せっかく培った技術や知見が消えて行ってしまった。無人化施工機械の成功例を見ても研究開発を継続し、現場での運用実績を積み重ねることが重要であることは明白である。

東日本大震災においてレスキューロボットを用いた災害対応支援のための日米の合同チームが結成されたときに、なかなか公的な機関からの要請が出ず、米国チームの来日が遅れた経緯がある⁴⁾。即時の受け入れが可能なような制度の設計が必要である。また、活動予算についても直後からの支援は重要である。海外からの支援を受け入れる場合に、協調活動をスムーズに進めるためには、システムの統合や情報の共有が容易なようにプロトコルを国際的に標準化しておく必要がある。また、前節で技術的課題としても述べたが、無線通信に関して有事には特

定の周波数帯の使用や民生用で許可されている微弱な電波のパワーの増大を認めるような法整備も必要である。

東日本大震災における福島第一原発の事故は人類史上最悪の事故であり、その廃炉には30－40年に歳月が必要と言われている。これは、我々の世代だけでは解決できない未来への大いなる負の遺産である。この課題を次世代の人たちに託していかなければならない。その意味でも、経験や英知の伝承のために次世代を担う人材育成は非常に大切である。いくつかの要因が複雑に絡み合った大規模複合災害に立ち向かうためには、自分の専門に関する知識や技術だけでは不十分である。自治体職員・レスキュー隊員・医師や看護師・臨床心理士をはじめ他機関や他分野の職員・研究者・技術者などとの協力により課題を解決することが必要である。さらに、政治や経済の状況を正確に把握したうえで、行政と協働することによりはじめて大規模複合災害に対応することができる。安全で安心に暮らせる災害に強い文化や社会を築くためには、俯瞰的に物事をみることができ、的確な判断をすることのできる人材育成が必須である¹³⁾。

（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	◎	→	阪神淡路大震災以降、JSTやNEDOがレスキューロボット開発研究に関するプロジェクトを実施してきており、基礎研究は進んでいると思われる。
	応用研究・開発	○	→	近年、ImPACTやSIPなど出口イメージを明確にしたプロジェクトが実施され、実用化を視野に入れて研究開発が進められている ^{14),15)} 。しかし、災害対応ロボットの市場が存在しないので、実用化や実運用には課題を残している。NEDOは、経済産業省と米国国防総省の合意に基づき、同省のDARPAと共同で、日本のロボット技術を活用した災害対応ロボットシステムの研究開発・実証プロジェクトを開始した ¹⁶⁾ 。
米国	基礎研究	◎	↗	DARPAのロボティクスチャレンジ ¹⁷⁾ に見られるように、多額の予算支援を背景に、戦場を想定したロボットに関する基礎研究が行われている。ボストンダイナミクス社のBigDogはその好例である ¹⁸⁾ 。
	応用研究・開発	◎	→	DARPAの支援で開発されたロボットが民生品として世の中に普及するシナリオで、応用研究開発が促進されている。i-Robot社のルンバはその好例である ¹⁹⁾ 。
欧州	基礎研究	○	→	地震災害はそれほど多くはないが、火災などの災害やテロ災害に対応するためのレスキューロボットが開発されてきている。
	応用研究・開発	◎	↗	原子力発電を前提としている国では早くから原子力災害対応ロボットの開発と配備が進められてきている。プラント災害を想定した災害対応ロボットの競技会ARGOS Challenge - Autonomous Robots for Gas & Oil Sitesを2015年から開催している ²⁰⁾ 。また、Horizon 2020においては、安全に関するプロジェクトを進めており、テロ対策としてロボットの活用が期待されている ²¹⁾ 。さらに2018年にHorizon 2020で災害初期対応技術に関する大型プロジェクトの公募があり、この分野の重要性が再認識された。
中国	基礎研究	△	→	ロボット関連の重要な国際会議における論文発表の状況から推測すると、災害対応分野でのロボット技術の基礎研究はそれほど進んでいないように感じられる。
	応用研究・開発	○	↗	災害対応を直接のターゲットとして開発されているわけではないが、大学や研究所を中心に軍用を視野に入れて開発が進められている。ドローンを開発し世界的に販売をしているDJI社 ²²⁾ は注目に値する。
韓国	基礎研究	○	→	DARPAのロボティクスチャレンジ ¹⁷⁾ で韓国の大学チームが優勝するなど、災害対応に関する研究を加速させようとしている。
	応用研究・開発	△	→	フィールドロボティクスに関する国際フォーラム ²³⁾ を開催するなど、ロボット技術の応用先の一つとして災害対応を視野に入れているが、大きな動きは見られない。

(8) 参考文献

- 1) 松野 文俊, “阪神淡路大震災を振り返って”, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 2, pp. 138-141, (2010) .
- 2) 特集号 震災対応 レスキューロボットの活動を振り返って I, 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 1, pp. 1-41, (2014) .
- 3) 特集号 震災対応 レスキューロボットの活動を振り返って II, 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 2, pp. 91-161, (2014) .
- 4) 特松野 文俊, 東日本大震災におけるレスキューロボットと国際協力, 日本ロボット学会誌, Vol. 30, No. 10, pp. 1013-1016, (2012) .
- 5) 特 JTS 中国総合研究交流センター, 調査報告書「中国のロボット分野における研究開発の現状と動向」(2018) .
- 6) 特集号 タフ・ロボティクス, 日本ロボット学会誌, Vol. 35, No. 10, pp. 695-734, (2017) .
- 7) 田所 諭, “ロボカップレスキューロボットリーグ”, 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 9, pp. 983-986, (2009)
- 8) 松野 文俊, 亀川 哲志, 佐藤 徳孝, 根 和幸, “ロボカップレスキューから実災害対応へ”, 計測と制御, Vol. 52, No. 3, pp. 495-502, (2014) .
- 9) Special Issue on DARPA Robotics Challenge (DRC) , Journal of Field Robots, Vol. 32, Issue 2, pp. 187-312, (2015) ; ibid. Vol. 32, Issue 3, pp. 313-444, (2015) .
- 10) 特集号 次世代インフラ用ロボット現場検証 I, 日本ロボット学会誌, Vol. 34, No. 8, pp. 491-528, (2016) .
- 11) 特集号 次世代インフラ用ロボット現場検証 II, 日本ロボット学会誌, Vol. 34, No. 9, pp. 571-607, (2016) .
- 12) 特集号 災害対応ロボットの適用, ロボット (日本ロボット工業会誌), No. 235, pp. 1-45, (2017) .
- 13) 特集号 廃炉措置のための遠隔操作技術開発と人材育成, エネルギーレビュー, Vol. 35, No. 2, pp. 6-25, (2015)
- 14) 内閣府・革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) website, タフ・ロボティクス・チャレンジ (PM: 田所 諭) , <http://www.jst.go.jp/impact/program/07.html> (accessed 2019-02-10)
- 15) 内閣府・戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) website, インフラ維持管理・更新・マネジメント技術 (PD: 藤野 陽三) , <http://www.jst.go.jp/sip/k07.html> (accessed 2019-02-10)
- 16) NEDO ニュースリリース (2014年7月31日) , “日米共同で災害対応ロボット開発プロジェクト
—NEDO、災害ロボットの性能評価等で米 DARPA に協力—” ,
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100297.html (accessed 2019-02-10)
- 17) DARPA website, DARPA Robotics Challenge, <http://www.darpa.mil/program/darpa-robotics-challenge> (accessed 2019-02-10)
- 18) Boston Dynamics website, <http://www.bostondynamics.com/> (accessed 2019-02-10)
- 19) iRobot website, History & Company Milestones,
<http://www.irobot.com/About-iRobot/Company-Information/History.aspx> (accessed

2019-02-10)

- 20) ARGOS (Autonomous Robots for Gas & Oil Sites) Challenge website,
<http://www.argos-challenge.com/en> (accessed 2019-02-10)
- 21) The European Commission's website, Horizon 2020,
<https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020> (accessed 2019-02-10)
- 22) DJI (Da-Jiang Innovations Science and Technology Co., Ltd.; 大疆創新科技有限公司) website,
<https://www.dji.com/jp> (accessed 2019-02-10)
- 23) International Field Robotics Forum 2016 (Seoul COEX, Korea, Oct. 27, 2017) ,
http://www.ireforum.org/index.php?g_page=intro&m_page=intro02 (accessed 2019-02-10)

2.2.8 ソフトロボティクス

(1) 研究開発領域の定義

ソフトロボティクスは、柔軟材料に特有の機械的・電氣的・化学的性質を積極的に利用したロボットシステムに関する新興の学術分野である。「ソフト」は物質的な柔軟性（ソフトネス）を意味する。主要な研究テーマとして、柔軟材料を利用した新しいロボット機構の探索、やわらかいロボットのモデル化と制御、柔軟物体の操作、生物規範型ソフトロボットを用いた生物の振る舞いの原理解明が挙げられる。接触安全性の付加や、高分子材料の多用による製造コストの低減などによって、ロボットの応用拡大に貢献することが期待される。高分子材料学、生体力学、フレキシブルエレクトロニクスなど、隣接する諸分野と連携した学際的なシステム統合を特徴とする。

(2) キーワード

ソフトロボット、ソフトアクチュエーター、連続アーム、ソフトグripper、フレキシブルエレクトロニクス

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

ソフトロボティクスは、ロボットの新しい機能と用途を開拓する試みとして 2010 年頃から活発になった。物理的なやわらかさは、人間と接しながら動作することを可能とし、変形の積極的な利用は環境や物体とのなじみを容易にする。また、高分子材料を主体とした設計は安価なロボット製造にもつながる。

やわらかいロボットを成立させるアクチュエーターやセンサー、エネルギー源などのコンポーネントの開発はそれぞれ挑戦的な課題である¹⁾。この解決には異分野間の連合が不可欠であり、様々な分野で技術開発の活発化が期待される。基礎技術の開発から産業応用を含め、多くの分野にまたがる課題の豊富さが、ソフトロボティクス研究が盛んな理由のひとつになっている。

現在のロボット市場の大半を占めるのは、自動車産業や電気電子産業などの製造業で使われる FA 用途の産業用ロボットである。産業用ロボットは、人間や環境との接触・衝突を想定しないため、硬質である。一方、研究開発途上の様々なサービスロボットでは、人間との接触・衝突が本質的に避けられず、物理的・心理的な安全のためにやわらかさが意味を持つ。例えば、抱き上げ介助ロボット²⁾では、かたい機構をやわらかい外装で覆うことで、撃力をやわらげ、接触圧を分散させるのと同時に、接触検知機能や、心理的な安心感を提供する。製造業向けに、人間とロボットが同じ作業空間を共有する協働ロボット (collaborative robot あるいは cobot, co-robot) に属するロボットアームが各社からリリースされ、ロボットの応用範囲が拡大していることから、物理的なやわらかさによる安全性の確保はますます重要になるだろう。ソフトロボティクスは、人間と共存するロボットの技術基盤として重要である。

[研究開発の動向]

産業用ロボットの延長線上にある「かたい」ロボットの開発では、ハードウェアの構成方法

が成熟し、人型ロボットのように複雑な多関節ロボットも実現できるようになった。かたいロボットの先端研究は、コンピュータネットワークや豊富な計算資源を背景に、大量のセンサー情報を利用した知的な制御にフォーカスが移りつつある。一方、ソフトロボットについては、ハードウェアの構成法についても課題が多く、活発に研究が行われている。

柔軟材料の利用は、そのモデル化や制御について新しい問題を提起する。ソフトロボットの物理シミュレーションや運動制御は、情報科学技術の観点からも興味深い対象である。従来、多関節ロボットの運動は剛体リンク系の運動学・動力学によって記述され、位置制御や力制御が行われてきた。一方、ソフトロボットの運動制御では、連続体の変形や、無数の接触を扱う必要があり、従来の理論体系が適用できないという根本的な課題がある。制御入力と運動の関係を明快に記述することが難しいことから、多数の試行にもとづいて運動制御を行う機械学習の手法は有望なアプローチのひとつである。そのような学習を行なう上では、環境やロボットの状態に関する豊富な情報を得るためのセンサーが必要となる。柔軟体の変形や外界との接触を検出するセンサーの開発そのものが挑戦的な課題であり、フレキシブルエレクトロニクスと呼ばれる分野において、薄型・柔軟・伸縮可能といった特性を与えた電子デバイスの開発が進んでいる。複雑な変形に追従できるセンサーやアクチュエーターは、生体親和性が高く、ウェアラブルデバイスへの応用も考えられる。

現在、典型的なソフトロボットはシリコンラバーで製作された小型ロボット³⁾である。その他、風船のように内圧で支えられた膜構造を用いるインフレータブルロボットや、生きた細胞やハイドロゲルなどウェットウェアを使ったロボットも、ソフトロボットの仲間とみなせる。ソフトロボットの開発と応用はまだ試行錯誤の段階にあり、しばらくは多様な研究が行われると思われる。

ロボットアームの先端に取り付けることができるソフトグripperは研究例が多く、製品化も進んでいる。ソフトグripperの利点は、対象を傷つけにくく、物体の形状や姿勢にばらつきがあっても、単純な動作で把持できることである。大学における研究からスタートしたソフトロボティクス関連のスタートアップSoft Robotics Inc.⁴⁾は、ソフトグripperを扱っている。チャックや真空グripperの適用が難しい野菜や果物、パンなどのやわらかい物体の取り扱いが人手にまかせるしかなかったが、やわらかい指をもったソフトグripperによって自動化が期待される。ソフトグripperの方式のひとつは、シリコンゴムなどのやわらかい素材を空気圧で湾曲させる多指ハンドである。他に、ジャミング現象を利用したやわらかいグripperがあり、ソフトロボティクスが注目されるきっかけのひとつになった⁵⁾。ジャミングとは、柔軟な袋に粉体をつめて中の空気を抜くと、袋中の粉が粉体同士の摩擦で流動性を失い、固体のような現象である。ジャミングを起こす柔軟な粉袋を対象に押し付け、対象の形状になじんだ状態でかたくすることで様々な形状の物体を把持できる。

ゾウの鼻あるいはタコの腕のように全体が柔軟で曲率が変わるロボットアームは連続アーム(continuum arm)と呼ばれ、ソフトグripperと並んでソフトロボティクス研究の主要な研究対象である。ヘビロボットと類似しているが、片端が本体に固定され、移動ではなく把持や操作に使われる点が異なる。剛体リンクを関節で接続した古典的なロボットアームと対比して、連続アームは多様な曲線を描けるので、巻きついたり、穴をくぐり抜けたりすることができる。これらの特長を活用して、医療用のアクティブ内視鏡⁶⁾や、災害救助ロボットの研究開発が行なわれている。

ソフトアクチュエーター、すなわち、電磁モーターや油空圧シリンダとは異なるやわらかい駆動源の研究は、日本国内で盛んな分野である。その背景としては、ソフトネスが必要とされる介護福祉機器への期待の大きさというニーズの面と、機能性ソフトマテリアルの開発研究の裾野の広さというシーズの面の、両方がある。ソフトロボティクス研究で用いられる柔軟材料のアクチュエーションの方法としては、空気圧による膨張収縮と、形状記憶合金ワイヤによる引っ張りが代表的である。1980年代にはすでに、空気圧駆動の柔軟な湾曲アクチュエーター (Flexible Microactuator: FMA) が開発されている⁷⁾。ソフトアクチュエーターの一種で、1950年代に開発されたマッキベン型空気圧人工筋肉もウェアラブルデバイスの研究に使われている。この他、イオン導電性高分子アクチュエーターや、誘電エラストマーアクチュエーターなどのソフトアクチュエーターの研究も進んでいるが、取り出せる変位や力が小さいため、ロボットへの応用は限定的である。新しい原理の探索や、すでに知られているソフトアクチュエーターの改良が行われている。

ソフトロボティクスは生物規範型ロボットと関係が深い⁸⁾。連続アームの開発は、タコ型ロボットを目標としたプロジェクト内で様々な研究が行なわれた⁹⁾。生物規範型ロボットの研究では、把持や操作を行なうハンドやアームばかりでなく、ソフトメカニズムによる移動能力 (ロコモーション) も注目される。動物は駆動源である筋肉そのものが軟組織であり、骨格以外の結合組織もフレキシブルであるため、生物規範型ロボットの製作のために、ソフトロボティクス関連技術が使われる。やわらかさの長所・短所を考察する上で、生物に学び、作って理解するアプローチは有効であり、ロボット研究者と生物学者の共同研究が行われている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

2014年にソフトロボティクスを扱う初の学術雑誌が創刊された¹⁰⁾。エディターは、イモムシの研究で知られるタフツ大学の生物学者バリー・トリマー教授で、ソフトロボティクス関連の研究コミュニティ形成で大きな役割を担っている。2016年に発表された *Soft Robotics* 誌のインパクトファクターは、他の全てのロボット関連ジャーナルを上回るトップのスコアであった。*Science* 誌の姉妹誌として *Science Robotics* 誌が2016年に創刊されたが、この中でもソフトロボティクス研究は一定数を占め、伸びるソフトロボット¹¹⁾が表紙に採用されるなどしている。

2018年には、初の国際会議 *RoboSoft* がイタリアで開催された。今後も年1回、開催国を変えながら継続的に開催される予定である。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

日本国内の大型研究プロジェクトとしては、2018年、科研費新学術領域「ソフトロボット学」が発足し、5年間のソフトロボティクス関連研究を推進することになった。

アメリカ国立科学財団 (NSF: National Science Foundation) は、2018年、Continuum, Compliant, and Configurable Soft Robotics Engineering (C3 SoRo) という領域を設定して研究提案を募集している。ヨーロッパにおいては、2015年からEUが出資して *SoMa - Soft-bodied intelligence for Manipulation* プロジェクトが進行中である。

(5) 科学技術的課題

現状のソフトロボティクス研究は、柔軟材料を用いた様々な形態の実験的な探索にとどまっておき、設計手法が確立されていない。ソフトロボットの振る舞いの予測や、デジタルファブリケーション技術と組み合わせた自動設計技術の開発が求められている。計算機内で柔軟ロボットの動作を扱うには、非線形な大変形や、接触・衝突のモデル化と高速なシミュレーションが必要となる。

また、柔軟ロボットの運動探索、運動創発、運動制御は大きな課題である。変形や接触に関する膨大な感覚情報をどのように取り込み、運動指令をどのように生成するかについては、大自由度システムに適用できる学習手法の開発や、分散的・階層的に運動制御を行なう取り組みが望まれる。

また、従来のロボティクスと同様、アクチュエーター技術の改善は課題として残っている。空気圧アクチュエーターは周辺機器が大型になりがちである。また、形状記憶合金アクチュエーターは、電気駆動できるものの本質的には熱駆動であるため、動作が遅くエネルギー効率が低い。高分子アクチュエーターや、動物や昆虫の筋を用いたバイオハイブリッドシステムなどのアプローチもあるが、使用条件に限られる。電気エネルギーを運動エネルギーに効率よく高速に変換できるソフトアクチュエーターが求められる。また、電磁モータのように、様々なサイズのソフトアクチュエーターの標準品が、制御装置を含めて低コストでいつでも入手できる状況を整える必要がある。

ソフトロボットは、その性質上、アクチュエーターと構造が一体化しており、製作が難しい。3Dプリンタなどのデジタルファブリケーション技術の発展にともなって、ロボットシステムを組み立てなしにまるごと造形するというプリンタブル・ロボットの概念が提案されている。柔軟材料に対応した3Dプリンタを用いたロボットの自動製造が有望視されるが、現状ではまだ材料の選択肢が少なく、強度や耐久性について材料の改良が不可欠である。

(6) その他の課題

日本国内でソフトロボティクスに関する先駆的な研究例があるにも関わらず、現状では北米やヨーロッパが主な先端的研究の発信源となっている。これは、先進的ロボティクス研究に、北米ではDARPA、ヨーロッパではEUなどから継続的な大型研究費の支援が背景となっている。次世代ロボットの開発でプレゼンスを発揮するためには、我が国においても、研究開発を促進する継続的な研究支援が必要である。また、ソフトロボティクスのような萌芽的分野は、産業界からの支援を受けにくい状況にあるため、実用段階に入ってから後追いではなく、黎明期における先行的な投資を促す施策が求められる。

(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	○	→	ソフトアクチュエーターの開発や、フレキシブルエレクトロニクスの研究、柔軟高分子材料の開発など、広範な研究が行われている
	応用研究・開発	○	→	特に介護福祉機器の開発が盛んである。ソフトアクチュエーターを使ったリハビリロボットや、ウェアラブルデバイスの開発が行われている

米国	基礎研究	◎	↗	特にハーバード大学 WYSS Institute で複数の研究者がシリコングripperを使った軟体ロボットの研究を行っており、継続的に成果が発表されている。ハーバード大学と地理的に近い MIT やタフツ大学でも関連研究が行われている。西海岸スタンフォード大学やカリフォルニア大学サンディエゴ校でも、関連研究が活発である。
	応用研究・開発	◎	→	ソフトグripperやウェアラブルデバイスで応用研究が進んでいる。スタートアップの新陳代謝も盛んで、ジャミンググripperを製品化した Empire Robotics は廃業したが、ソフトグripperを開発する Soft Robotics Inc. は継続している。
欧州	基礎研究	○	→	タコ型ロボットのような生物規範型ロボットや、やわらかい身体に根ざした知能に関する研究が行われている。欧州委員会による継続的な支援があり、RoboSoft という名称で、複数の組織をまたがったコミュニティがある。
	応用研究・開発	○	→	タコ型ロボットから派生した医療用ロボットアームの開発などが行われている
中国	基礎研究	△	→	西安交通大学や清華大学において、高分子材料を用いたソフトアクチュエーターの開発が行なわれている
	応用研究・開発	×	→	不明
韓国	基礎研究	○	↗	Seoul National University において、人工筋肉や、フレキシブルセンサー、おりがみロボットなどに関する研究が活発に行われている。また、複数の大学が参加するソフトロボティクス研究センターが設立された。
	応用研究・開発	×	→	ウェアラブルデバイスの研究開発が行われている。産業化の動きは不明

(8) 参考文献

- 1) Carmel Majidi, "Soft Robotics: A Perspective -Current Trends and Prospects for the Future," Soft Robotics, Vol. 1, No. 1, (2014) pp. 5-11.
- 2) Toshiharu Mukai, Shinya Hirano, Hiromichi Nakashima, Yo Kato, Yuki Sakaida, Shijie Guo, and Shigeyuki Hosoe, "Development of a Nursing-Care Assistant Robot RIBA That Can Lift a Human in Its Arms," Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010; Taipei, Taiwan, October 18-22, 2010) , pp. 5996-6001.3) Robert F. Shepherd, Filip Ilievski, Wonjae Choi, Stephen A. Morin, Adam A. Stokes, Aaron D. Mazzeo, Xin Chen, Michael Wang, and George M. Whitesides, "Multigait soft robot.," Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS) , Vol. 108, No. 51, (2011) pp. 20400-20403. DOI:10.1073/pnas.1116564108
- 4) Soft Robotics Inc., <http://www.softroboticsinc.com/> (accessed 2019-01-15)
- 5) Eric Brown, Nicholas Rodenberg, John Amend, Annan Mozeika, Erik Steltz, Mitchell R. Zakin, Hod Lipson, and Heinrich M. Jaeger, "Universal Robotic Gripper Based on the Jamming of Granular Material," Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS) , Vol. 107, No. 44, (2010) pp. 18809-18814. DOI: 10.1073/pnas.1003250107
- 6) Koji Ikuta, Masahiro Tsukamoto, and Shigeo Hirose, "Shape Memory Alloy Servo Actuator System with Electric Resistance Feedback and Application for Active Endoscope," Proceedings of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 1988; Philadelphia, Pennsylvania, April 24-29, 1988) , pp. 427-430.
- 7) Koichi Suzumori, Shoichi Iikura, and Hirohisa Tanaka, "Development of Flexible Microactuator and Its Applications to Robotic Mechanisms," Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 1991; Sacramento,

- California, April 9-11, 1991) pp. 1622-1627.
- 8) Sangbae Kim, Cecilia Laschi, and Barry Trimmer, “Soft robotics: A bioinspired evolution in robotics,” *Trends in Biotechnology*, Vol. 31, Issue 5, (2013) 287-294. DOI:10.1016/j.tibtech.2013.03.002
 - 9) OCTOPUS Integrating Project, <http://www.octopus-project.eu/> (accessed 2019-01-15)
 - 10) Mary Ann Liebert Inc., *Journal of Soft Robotics (SoRo)* , <http://online.liebertpub.com/loi/SORO> (accessed 2019-01-15)
 - 11) Elliot W. Hawkes, Laura H. Blumenschein, Joseph D. Greer, and Allison M. Oka-mura, “A soft robot that navigates its environment through growth,” *Science Robotics*, Vol. 2, No. 8, Issue 8, (2017) . DOI: 10.1126/scirobotics.aan3028

2.2.9 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伏在しているはずである。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。広義の意味では、バイオメティクスやバイオミクリーと捉えることができよう。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ットは、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。

しかしながら、生物規範型ロボティクスの分野でこれまでに行われてきた研究開発は、生物の皮相的な模倣の域から抜け出し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

バイオメティクス、バイオミクリー、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

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

強力な計算パワーに依拠してサーボモータ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の姿と言ってもよいであろう。一方で、このような制御指令値に「強引に」追従させることを良しとする現在の制御は、その成否がいかにか的かな制御指令値を作り出すかに決定的に依存してしまうため、近年、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。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、もちろん間違ったことではない。工学的な視座に基づくアプローチを突き詰めていくことは重要である。しかしながら、近年の計算パワーの飛躍的向上がますますこの傾向を助長した結果、高性能なロボットの開発設計はかえって隘路に入った感がある。

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、オープンで不確定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。しかしながら、このような振る舞いを実現させている発現メカニズムの本質は依然として解明されていない。

以上を鑑みると、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と考えられる。すなわち、生物規範型ロボティクスにこれから求められることは、これまで行われてきた生物の皮相的な模倣ではなく、何が有限な計算リソースしか持たない生物を非構造環境下であっても適応的に振る舞うことを実現させているのか、その本質を(生物系研究者らとの協働を通して)炙り出していくことであろう。換言すれば、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のである。「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。

以上をまとめると本領域は、隘路に入った感がある移動ロボットの設計・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大きな意義をこれまで以上に強く持ち始めたのである。

【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さまざまな興味深い構造や機能を内包している。このため、生物規範型ロボットに関係する研究トピックは必然的に驚くほど多岐に渡り、枚挙にいとまがない。このような事情を勘案し、ここでは「センサー」、「アクチュエーター」、「構造・形態」、「制御」という切り口から本領域の研究開発の動向を手短に概観する。

センサー

これまでに、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を検知するセンサーがあり、なおかつそれらが桁違いに膨大な数で全身に「偏在」している。今後は、このような膨大な数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ますます重要となってくるであろう。最近、ソフトロボティクスと呼ばれる新興分野において、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。

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で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⁾。ゴキブリを退治しようとしてわずかに近づいただけで逃げられた経験があると思うが、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、複数のこれら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を明らかにした。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よう。

アクチュエーター

筋肉はモータ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。筋肉が持つこのような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これまでに試みられてきた。これらの中で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 PMA (Pneumatic Muscle Actuator) と呼ばれるアクチュエーターである⁵⁾。PMA は筋肉同様に大きな力を発生することができる。また、柔軟な構造を有しているため、二関節筋のように関節をまたいだアクチュエーターの配置も可能である。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、アクチュエーターの配置の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。

しかしながら一方で、PMA の動特性には遅延時間や強い非線形性があり、その制御はモータほど容易ではない。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⁾。特に後者は、生物由来の材料ゆ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、生物に比肩しう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待たれる。

構造・形態

車輪型のロボットを除けば、多くのロボットは多かれ少なかれ、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。限られた紙面でこれまでの事例を網羅的に説明することは困難であるため、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⁹⁾。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。このような限界を打破する、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^{10)、11)}。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¹²⁾。広く用いられているスクルーと違い、水底の砂を巻き上げないといった利点があるため、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待たれる。

制御

紙面の都合上、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の制御の仕方としては以下の二つに大別できるであろう。

第一は、機構系には何らかのかたちで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 (RHex¹³⁾ や Sprawlita¹⁴⁾、i-Centipot¹⁵⁾、準受動歩行ロボットなど)。生物規範型ロボット

と深く関係するソフトロボットの分野においても、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。すなわち、既存研究のほとんどはこのアプローチに基づいていると言っても過言ではない。

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。リズム的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^{16,17,18)}。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興味深いアプローチである。しかしながら今のところ、制御系の素過程が結合振動子系にほぼ限られているのが現状である。ここには重大な理由と課題が山積しているため、これに関しては「(5) 科学技術的課題」のところでも詳述する。

まとめると、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。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

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化することや、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。最近では、本領域と密接に関係しているソフトロボットという新興学問領域が中心となって、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。

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 (tegoteae-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]

本領域と密接に関係しているのがソフトロボティクスと呼ばれる研究分野である。ソフトロボティクスは、柔らかい身体から生み出される非自明な能力とその周辺技術を取り扱う、まだ誕生して間もない新興分野である。これまでの硬質な身体を前提としたロボットとは一線を画した新奇な研究トピックが山積しており、世界的に大きな注目を集めている。国内でも 2018 年度から科研費新学術領域研究「ソフトロボット学」(領域代表: 鈴森康一 東京工業大学教授) が立ち上がった。今後の展開が多いに期待される。

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あまねく知られている。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。このほか、ソフトロボティクス領域で挙げたプロジェクトにおいても、研究が推進されている。

(5) 科学技術的課題

説明の便宜上、「センサー」、「アクチュエーター」、「構造・形態」、「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ていきたい。

センサー

生物は、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を検知するセンサーがあり、なおかつそれらが桁違いに膨大な数で全身に「偏在」している。今後は、このような膨大な数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ますます重要となる。すなわち、「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となろう。このためのハードウェア的・ソフトウェア的課題としては、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
- 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奇な情報処理スキーム

上記3) に関して補足しておく。生物に比肩しう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しうる、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に起因している。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、生物に比肩しう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、全身にくまな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、新奇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できることを可能とする技術の創成も待たれる。

構造・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、羽のはばたき機構を模倣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¹⁹⁾。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²⁰⁾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）²¹⁾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変更できるマテリアル
- 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。

制御

ここには重大な問題と課題が山積しているため、紙面を割いて詳しく述べていきたい。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実世界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実世界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、この思考の枠組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。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だろう。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のである。これが生物規範型の制御を考える際の大きな障壁となっているのである。

- 生物規範型ロボットの分野と密接に関係しているのがソフトロボットと呼ばれる新興分野である。ソフトロボットの分野では、環境との相互作用と身体にリアルタイムで変形として現れることを活用することで、フィードフォワード制御のような簡便な制御方策からでも優れた適応能力などが得られることを示す研究が多い。このような、機構系の賢さに適応能力の発現をほぼ全面的に依拠するアプローチが生物規範型の制御方策の理解をかえって妨げている可能性も否めない。
- 生物規範型の制御の代表格が、生物ロコモーションを司る CPG 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。しかしながら、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。しかしながら、自律個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、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期待されているのが生物規範型制御である。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紐解く必要がある。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も不可欠となる。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著しく大きいと期待する。

- 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奇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、全身に偏在する 102 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奇な制御理論の構築。換言すれば、高次脳機能に基づく制御と局所センサー情報に基づく制御（central vs. peripheral）が調和的にカップリングした制御法の創成。
- 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方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 Quantum

Leap 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を強く願う次第である。

(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²²⁾。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、兎にも角にも構築・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(個人的な経験に基づけば)、生物学とロボティクスの研究者を単に寄せ集めても化学反応を引き起こすのは至難の技である。というのも、両者間で「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からである。生工連携の「言うは易く行うは難し」はまさにここにある。この問題を回避するためには「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必要とされるのである。

以上を踏まえて二点述べておきたい。

第一は、繰り返しになるが、昨今、本領域が持つ意義と期待されることは大きく変わり始めたことである。それは、隘路に入った感がある移動ロボットの設計・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大きな意義をこれまで以上に強く持ち始めたということである。この重責に応えるために本領域でこれから一層強く求められるのは、生物の「モノ」的側面ではなく「コト」的側面に着目した研究である。「コト」の本質を炙り出すには多くの困難が伴うことが予測される。しかし、いったんうまく「コト」の本質を捉えることができれば、さまざまな事例へと適用できるため、その波及効果には著しいものがあるだろう。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も、そして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も、上記でも述べたように、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本領域では特に必要である。そこで、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を強く希望する。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ている。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だろう。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特に重要な鍵となるのである。

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 biology という呼称が最近与えられているようである。生物学とロボティクスの新たなかたちの win-win 関係を模索しつつ、両者が対等で有機的に結びついた新奇な学問領域の創成についても大いに期待したい。

(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「ソフトロボット学」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、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。福島県に接地されているロボットテストフィールドなど共用研究設備も充実している。
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	◎	→	Boston Dynamics 社や Ghost Robotics 社に代表されるように、脚式移動ロボットの事業化が開始されつつあり、生物規範型ロボットの実世界応用の開拓が期待される。これらのベンチャー企業の母体となった研究成果は DARPA などの潤沢な資金的サポートがあった。一方で、Google が進めてきた歩行ロボットに関する研究開発が中止されるとの報道が最近あった。
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。ロボットの実世界応用を見据えた ARGOS Challenge の設立にみられるように、応用分野については上昇傾向にある。
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ット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	◎	↗	米国や欧州を猛烈に追従するように四脚ロボットのベンチャー企業 UniTree 社などが登場している。中国発信のクラウドファンディングによる資金調達に背後にあり、事業化までの迅速性には目を見張るものがある。
韓国	基礎研究	○	↗	ロボット研究のトップカンファレンスである IROS2018 の bioinspired robotics セッションにおいて、30 件中 3 件が韓国のグループであり、一定の地位を確立している。また、新しく設立されたソフトロボットに関する国際会議 RobSoft の第 2 回大会が 2019 年に韓国で開催されることもあり、さらなる盛り上がりが見込まれる。
	応用研究・開発	△	→	DARPA Robotics Challenge の本戦にて韓国のチームが優勝しているものの、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。

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス

(8) 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 楯夫, "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 Tondu 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) 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
- 10) David Lentink, "Bioinspired flight control," *Bioinspiration & Biomimetics*, (2014) , (22 May 2014)
- 11) 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
- 12) 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
- 13) Galen Clark Haynes 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
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 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

- 18) 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
- 19) Malcolm Burrows and Gregory Sutton, "Interacting gears synchronize propulsive leg movements in jumping insect," *Science*, (2013) , (13 September 2013) , doi:10.1126/science.1240284
- 20) Katsushi Kagaya and Sheila Patek., "Feed-forward motor control of ultrafast, ballistic movements," *Journal of Experimental Biology*, (2016) , doi:10.1242/jeb.130518
- 21) 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)
- 22) 多賀巖太郎, “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)

2.2.10 産業用ロボット

(1) 研究開発領域の定義

産業用ロボットとは、国際標準化機構 (ISO) によれば「3 軸以上の自由度を持ち、自動制御、プログラム可能なマニピュレーター」となる。一般的に工場で利用されているロボットアームであり、作業の前に教示された位置に自動的に移動する繰り返し作業を実行する。従来の位置のみ教示再生方式で構築されてきた産業用ロボットシステムに、カメラなどの外界情報の導入や力を制御する技術の確立が必要となっている。

(2) キーワード

ロボットアーム、ロボットマニピュレーター、自動機、位置制御、力制御

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

現在の産業用ロボットの起源は、アメリカの G. C. Devol が、1954 年に出願した特許にある¹⁾。この方法では、ロボット運動を教示と再生により実現し、物体の設置や搬送を行う。現在の産業用ロボットは、この原理に基づいて動作している。その後、この教示再生方式の産業用ロボットは、日本において高速化・高精度化の方向に技術が成熟した²⁾。世界の産業用ロボットの出荷稼働数は、294,312 台 (2016 年)、346,000 台 (2017 年) であり、日本製ロボットは、152,672 台 (2016 年)、211,713 台 (2017 年) となっており、世界での産業用ロボットの利用台数は急速に増加傾向にある³⁾。日本の産業用ロボットの生産額は、ここ数年は 7000 億円前後だった。しかし、17 年は 9000 億円となり、18 年はそれを上回る 1 兆円の達成を見込んでいる。ただし、ロボットの利用の大幅な増加は海外であり、中国などロボット利用数の多い国で、自国製の産業用ロボット製造が活性化している。そのため、近い将来には現状の産業用ロボットの製造技術のキャッチアップが完了するとの見解もある。

現状の産業用ロボットは、小型軽量の電動モータにハーモニックドライブを装着して、金属製の構造体によって構成され、センサーやアクチュエーターへの電力線や信号線が、運動する関節を跨って配置される。制御法は、上記の Devol の特許と同じ教示再生方式を踏襲している。また、基本的にロボットは単体のコントローラによって個別または工場内のみで制御 / 管理されてきた。今後、産業用ロボットの高機能化のためには、このようなシステム構成や利用法を変更する必要がある。制御に関しても、従来型の産業用ロボットは位置制御を基盤としている。したがって、位置制御に適したロボットの利用となり、ロボットの関節剛性は一般に高い。これに対して、従来型の位置制御ロボットでは実現し難い組み立て作業、複数ロボットの協調作業などを達成するために力制御の導入が必要となっている。力を制御できるので、ロボットアームの関節は柔軟とできる。このような力制御可能なロボットアームは研究開発として 30 年以上前から報告されてきた。しかし、最近になって実用利用が進みつつある。ただし、産業用ロボットとして広く普及するためには、安全性、保守点検の容易性、価格などの課題があり、実用には、さらなる技術開発が必要となっている。

【研究開発の動向】

① 構造の軽量化

従来は関節角度計測からロボットの先端精度を高めるために、ロボットリンクや関節部の剛性を高める必要があった。このため金属製のリンクや関節部となり、全体の重量の増加を招いた。今後、ロボット本体の軽量小型化が、新しいロボットの利用分野や人への安全性の確保の視点からも重要となる。このために、本体を金属材料からプラスチック材料、CFRP材料に変更するなどが有力となる。また、複数のロボットアームが作業台付近で密集する可能性が高くなるので、ハンド部分やリンク自身を細く、小さく実現することが有用である。また、ギアやハーモニックドライブなどの減速器を高分子材料に置き換えて軽量化、潤滑用のオイルフリー化などが課題として挙げられる。

② IoT/AI 技術

保守点検の容易性の視点では、故障診断を IoT 技術によって達成されることが期待される。また、Deep Learning により、対象物の把持などを確実にする手法が研究開発されつつある。Google では 14 台の産業用ロボットに分散自己学習させて、様々な対象物のピックアンドプレイス作業の実験を行っている⁴⁾。

③ 無線 / 高度な有線技術

配線のトラブルが産業用ロボットにおいて最も多く発生するので、無線技術や配線を抜本的に改良するプリンティドエレクトロニクス技術⁵⁾などの利用が想定される。

④ 手先効果器 / ハンド

産業用ロボットに利用されるハンドもモータ駆動がほとんどであり、一般に減速比も高く、柔軟性が少ないものが多い。このような剛体のハンドで、様々な対象物を把持することは困難な場合が多い。特に、組み立て作業などでは、対象に倣うコンプライアントな動きが必要となる。鉛直方向への挿入作業などには、機構的に柔軟性を持たせた RCC (Remote Center Compliance) も開発されているが、利用は限定的である。

⑤ 関節柔軟化

関節柔軟化には機構的または制御的手法がある。機構的手法として、以下がある。

- ⑤-1 空気圧駆動など高減速比ギアを利用しない方法
- ⑤-2 高減速比ギア付き電動モータに（可変）弾性要素など付加する方法⁶⁾
- ⑤-3 機構的な重力補償によって重力トルク分を相殺して低減速比ギア付きモータを利用する方法⁷⁾

これらの既提案法の共通の問題点は、現状のロボットアームよりも、制御性能が低い、重量 / 体積が増加し、部品点数増から製作費も増加することなどが挙げられる。一方、制御的手法は以下となる。

- ⑤-4 手先の力センサーフィードバックによる方法
- ⑤-5 関節トルクセンサーフィードバックによる方法⁸⁾
- ⑤-6 摩擦補償入力による方法

制御的手法の問題は、信頼性、価格、保守点検などをも含めた性能評価は十分でなく、決定的なシステム実現法に至っていないと考えられる。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

- ① 金属材料から高分子材料への転換が進んでいる。たとえば、三井化学ではロボット材料事業開発室を発足させて、ロボットへの材料供給を開始している。ファナック製産業用ロボットをポリウレタン材料で被覆して、緩衝材として利用している。また、金属樹脂一体化技術により、CFRP とアルミを接合させて、ねじなどを除去することによって、軽量飛行ロボットに役立てている⁹⁾。
- ② ファナックは産業用ロボットの故障診断に IoT 技術を導入し実用化した。これは、工場稼働している産業用ロボットをネットワークで接続し、ロボットからの情報をサーバで集中管理して予防保全や故障予知を実現し、ダウンタイム（稼働停止時間）をゼロにした。ロボットの機構部やシステムの状態を監視し、実際に故障を予知した場合には顧客に自動でメール通知するなどダウンタイムをゼロとした¹⁰⁾。
- ③ ロボット関係世界最大の国際会議の一つである IEEE の ICRA2018 では、iRobot 創始者の Rodney Brooks 氏と、カリフォルニア大学バークレー校の Ken Goldberg 氏が基調講演の中で、多様な物体を取り扱うマニピュレーションが上手くできていないこと、これからの産業ではこれらのマニピュレーションが重要であると主張した。Brooks 氏は、ロボットのエンドエフェクタは数十年変わっていないことに言及し、Goldberg 氏は認識には深層学習などの技術が利用できると説明した。このような認識は世界的に広がりを見せており、様々な国でのマニピュレーションの産業化を目指している。
- ④ FESTO 社（ドイツ）がポリマー製空気圧モータを開発し、アームを製作した。ただし、粘性を適切に設定できないためか可搬物は極軽量物に限定されている¹¹⁾。
- ⑤ 米国 Rethink Robotics 社は、直列弾性駆動を利用して双腕「Baxter」を販売した。ただし、2018年10月に廃業した。
- ⑥ ドイツ航空宇宙センター（DLR:Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt）のロボット技術を基盤にドイツ KBee 社は、トルクセンサーフィードバック制御により関節柔軟化を実現したの「FRANKA EMIKA」を販売した。2018年に販売を拡大しつつある¹²⁾。
- ⑦ HEBI robotics は、アクチュエーターユニットに内蔵の SEA（Serise elastic actuator：上記（5-2）固定式）によるトルク検出機能を用いて柔軟関節ロボットを販売している¹³⁾。

- ⑧ 2015年に政府によって策定された「ロボット新戦略」に基づき、2020年にWorld Robot Summit (ロボット国際大会)を開催する。World Robot Summit 競技種目は、ものづくり、サービス、インフラ・災害対応の3分野などがあり、特にものづくり等では産業用ロボット技術の向上が期待され、2018年にはプレ大会が開催される¹⁴⁾。
- ⑨ 日本ではFA・ロボットシステムインテグレータ協会が、2018年7月に発足し、ロボットのシステム化を強化する¹⁵⁾。
- ⑩ 安川電機は、本体重量7kgで低価格の小型産業用ロボットを2017年から販売開始した¹⁶⁾。

【注目すべき国内外のプロジェクト】

- ① 中国政府は中国版インダストリー4.0(第4次産業革命)と称される政策「中国製造2025」を打ち出し、重点分野の一つとして自動生産を国家的目標に掲げている。産業用ロボットメーカーの独KUKAは2016年に中国の美的集団に買収された事実も大きな流れとして理解できる。中国では、現状の産業用ロボットの技術的なキャッチアップは近い将来に完了するとの見方が強い。さらに、現状の産業用ロボットではなく新しい機能の産業用ロボット開発に一気に進む可能性が高い。これは固定電話の普及をスキップして形態電話に移行した状況と似ている。次世代の産業用ロボットとして、AI搭載型、力制御可能型などが想定されている。
- ② EUでは、New Horizon 2020 robotics projects from 2016として、ロボット分野の多くの共同研究が進行中である。中でも産業用ロボットと関係するプロジェクトは、ハンドリングも対象とするCo4Robotsプロジェクトや物流に関するプロジェクトとしてILIAD、REFILLS、VERSATILEなどがある¹⁷⁾。
- ③ ドイツDLRでは、長年にわたりロボット関節の柔軟化に取り組み、機構的解決法のSEA (Serise elastic actuator) やトルクセンサーによる制御的解決法の両方に先端的な結果を発表している。これらは長期的な研究計画から実施されていると思われる。

(5) 科学技術的課題

① 軽量化 / 小型化

CFRPや高分子材料を積極的に利用して、従来よりも軽量小型ロボットを開発する必要がある。人協調ロボットの実現の際にもロボットの運動部の質量が軽量であることが重要な条件となる。また、ロボットの動作のエネルギー効率を高めるためにも軽量化が必要となる。軽量化、小型化から生じる様々な問題を機構や制御から解決するシステムインテグレーションも必要となる。

② システムインテグレーションの科学と技術

すでにさまざまなセンサー、アクチュエーター、機構が研究段階では提案されている。ただし、それら既存要素の組み合わせ方法(SI: システムインテグレーション)技術が未成熟である場合が多い。例えば、カメラ等の視覚センサーとロボットの運動制御を結びつける制御技術では、

ステレオカメラとロボットの幾何学的なキャリブレーションを実施する必要がある。キャリブレーション誤差のためにロボットの先端精度は、0.5 ミリメートル程度に限定されてきた。ロボット単体の繰り返し精度は、数十マイクロメートルであるにも関わらず、視覚センサーフィードバックでは、大きな誤差を生み出し、作業が実現できない場合が多い。このような課題を解決するために、SI の科学を基盤に SI 技術を構築することが必要である。

③ 力制御

今後、機械的な接触作業のニーズが多様化する中で、力を制御する科学的考察と技術的開発が必要である。力制御法はすでに提案されている。しかし、力のフィードバック制御には、因果律に反するなど基本的な理論の不備もあり、実用化しようとするればフィードバックゲインの調整などは経験者が慎重に行うなど、実用上の課題が大きく残されている。まずは、実用化のニーズが高い対象作業に対して基礎理論からの構築が重要となる。力センサーなどのハードウェアが高価で壊れやすいものが多く、実用化に適した新しい方法の提案が期待される。また、従来の集中系に対する力とトルクの計測に縛られずに、分布力を効果的に計測できるセンサーシステムとその信号処理技術も期待される。

④ 柔軟化

外部環境と積極的に接触するためにもロボットの先端効果器や関節を柔軟化する必要がある。前述のドイツ DLR では、機構的解決法と制御的解決法について研究を世界的にリードしている。ただし、未完成的な部分もあり、今後の研究開発が重要となる。

⑤ 柔軟物モデリング / 制御の科学と技術

剛体の力学を基盤に、現在までのロボット工学が作られてきた。一方、実世界には多くの柔軟体があり、今後のロボットの利活用を促進するためには、柔軟物のモデリングと制御の科学と技術を拡大することが重要である。柔軟物体のシミュレーションのために、有限要素法がある。しかし、さまざまな柔軟物のモデリングと制御の視点では、有限要素法は適していない場合が多い。実時間制御に適し、計算手法が容易で、全体の見通しも利く理論構築に適したモデルが必要である。

（6）その他の課題

① 産業界ニーズ駆動の基礎技術開発

ロボット研究では、人や生物の形態や機能から刺激を受けて、同様の人工物を製作するアプローチが今までに多く見られた。今後もこのような方法が重要ではある。しかし、産業界に有用な結果を効率的に生み出すためには、このような方法論に限定せず、産業界のニーズから研究内容を検討し、基礎原理まで立ち返る研究手法が有用となる。例えば、ティーチングの負担、キャリブレーションの負担、力制御の低信頼性などの課題に対する極めて高い産業界のニーズがあり、基礎技術・基礎科学が未熟なために解決できていない課題が数多く存在する。このようなニーズを科学的一般問題として整理し、解決することが重要である。このためには、産業界と学界が協力したプロジェクトチームを編成し、問題の整理、一般化問題の作成、一般化問題の解決法提案を実施する必要がある。このような基礎から実用までの流れは、アメリカ型で

はベンチャー企業が実現し、ドイツ型では大学と企業の強い連携システムが達成している。早急に日本型の方法を構築する必要がある。

② 次世代産業用ロボットの知財戦略

開発された次世代産業用ロボットの知財戦略を立てる必要がある。例えば、課題のひとつのケーブルトラブル解消のためのケーブルレスロボットなどの技術を、日本がいち早く開発して、国際標準規格などを提案することなどが挙げられる。また、材料技術、SI 技術など開発した技術の特徴を考慮して、どのようにして国際的な知財を獲得して日本の国益に資するかを研究開発と並行して検討すべきである。

③ 材料とロボット協同チーム

現在までのロボティクスは、伝統的な機械と電気電子からなるメカトロニクスに、急速に進歩した情報学 / 情報工学が集積して形成されてきた。しかし、材料分野とロボット分野との研究開発協力は極めて少なく、この分野での人材養成などもほとんど行われていない。ロボットへの利用を目的とした材料開発、材料利用方法開発および新しい材料を利用したロボット開発が必要であり、そのための研究開発体制が重要である。

(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	△	↑	産業界と学会の両方に現状ロボットの課題が共有されつつある。ただし、基礎研究としては十分ではなく、他の国に対して、優位性を主張することは現状では難しい。ただし、ロボットの研究者数、研究開発実績等は十分にあり、物体のマニピュレーション研究は学会で活性化しつつある。
	応用研究・開発	△	→	大学で得られた技術などの新しい技術が、ベンチャー企業などとして実用化される例が少ない。大企業では基盤からの技術改革は起こしにくい。
米国	基礎研究	△	↑	基礎研究を政策的に取り組んではいない。ただし、大学と企業との実用化問題解決の共同研究開発は活発である。また、画像処理、人工知能での情報の集積化が基礎研究を加速可能である。
	応用研究・開発	○	↑	ベンチャー企業の活動が活発であり、現状の産業用ロボット問題の解決意識をもっている。一方、Amazon picking challenge のように、ユーザー側からのロボット技術改良の力が作用して、応用研究開発が進展する可能性が高い。
欧州	基礎研究	○	↑	基礎研究を政策的に取り組んではいない。ただし、EU として共同研究開発体制ができていて、多様な研究テーマを実施している。また、DLR の研究成果が顕著となっている。
	応用研究・開発	○	↑	ドイツ FRANKA EMIKA 社の「FRANKA EMIKA」が本格的に販売されようとしている。多様な基礎研究開発体制を有しているため、応用研究開発の可能性を有している。
中国	基礎研究	△	→	基礎研究を政策的に取り組んではいない。ただし、国家、地方政府が多額の研究開発費をロボットに投入している。
	応用研究・開発	○	↑	人件費の高騰が企業存亡の危機となっているため、ロボット利用を進めている。現状は他国で製造された産業用ロボットを利用している場合が多いが、国内でのロボット生産を加速し、利用が拡大しつつある。これに伴って、新しい SI 技術などが生まれる可能性もある。
韓国	基礎研究	△	→	基礎研究を政策的に取り組んではいない。
	応用研究・開発	△	→	巨大企業内でのロボット応用技術は進展すると思われる。ただし、センサー、アクチュエーター等の要素開発を担う企業数は少なく、海外からの輸入に依存している。

(8) 参考文献

- 1) Bob Malone, “George Devol: A Life Devoted to Invention, and Robots,” IEEE Spectrum HP (26 September, 2011) ,
<https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/george-devol-a-life-devoted-to-invention-and-robots> (accessed 2019-01-15)
- 2) 日本ロボット工業会 HP, “産業用ロボット事例紹介”
<https://www.jara.jp/various/example/industrial/index.html> (accessed 2019-01-15)
- 3) 日本ロボット工業会 HP, <https://www.jara.jp/data/> (accessed 2019-01-15)
- 4) IEEE Spectrum (ed.) , ” How Google Wants to Solve Robotics Grasping by Letting Robots Learn for Themselves,” IEEE Spectrum ACM Technews (March 29, 2016) .
<https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/artificial-intelligence/google-large-scale-robotic-grasping-project> (accessed 2019-01-15)
- 5) 菅沼克昭 (監修) , 『プリンティドエレクトロニクス技術最前線』(シーエムシー出版, 2016) .
- 6) Ronald Van Ham, Thomas G. Sugar, Bram Vanderborght, Kevin W. Hollander, and Dirk Lefeber, ” Compliant actuator designs,” IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 16, Issue 3, (2009) pp. 81-94.
- 7) 武居直行, “省エネ・安全のための重力補償,” 日本ロボット学会誌, 29巻, 6号 (2011) 508-511.
- 8) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) HP,
<https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-11666/#gallery/28234>
(accessed 2019-01-15)
- 9) 三井化学 HP, https://www.mitsuichem.com/jp/release/2015/2015_0824.htm
(accessed 2019-01-15)
- 10) ファナック HP,
https://www.fanuc.co.jp/ja/product/new_product/2015/201504_zdt.html
(accessed 2019-01-15)
- 11) FESTO HP, <https://www.festo.com/group/en/cms/12746.htm>
(accessed 2019-01-15)
- 12) FRANKA EMIKA HP, <https://www.franka.de/> (accessed 2019-01-15)
- 13) HEBI robotics HP, <https://www.hebirobotics.com/> (accessed 2019-01-15)
- 14) 経済産業省 HP, “World Robot Summit の開催形式及び競技種目を決定しました” (2016年12月2日ニュースリリース) , <http://www.meti.go.jp/press/2016/12/20161202001/20161202001.html>
(accessed 2019-01-15)
- 15) FA・ロボットシステムインテグレータ協会 HP, <http://www.farobotsier.com/>

（accessed 2019-01-15）

16) 安川電機 HP, <https://www.yaskawa.co.jp/newsrelease/product/32116>

（accessed 2019-01-15）

17) New Horizon 2020 robotics projects HP,

URL : <https://robohub.org/new-horizon-2020-robotics-projects-rosin/>

（accessed 2019-01-15）

2.2.1.1 研究開発用ロボット

(1) 研究開発領域の定義

高度なロボット技術を活用し、バイオ・ライフサイエンス研究生産性の向上を目指した技術開発。すなわち、ロボットにより多岐にわたる研究開発・バイオ産業に必要な作業を自動化し、データ再現性の向上を目指すとともに、少子化により深刻化する人材確保と育成の問題を克服する研究開発。また、ロボットにより、品質の高いデータを大量に得ることにより、人工知能(AI)が必要とする学習データを高効率に取得することを目指す研究開発も本領域に含まれる。

(2) キーワード

ロボット、ロボティクス、自動化、プロトコル最適化、少子化、研究不正、プロセスバリデーション、人工知能、ビッグデータ、ラボドroid、バイオハザード、オミックス

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

ライフサイエンスの進歩とともに、研究開発・バイオ産業に必要なベンチワークの内容は多岐に渡り、大規模化の一途をたどる。即ち、研究者・大学院生・テクニシャンに至まで、研究の現場は、果てしない「手間仕事」に忙殺される。また、研究の大規模化とともに、人件費と人材の確保が常に研究生産性のボトルネックとなる。しかし、もっとも深刻な問題は、作業者間の「上手い、下手」、あるいはその時の「気合い、根性、集中力」といった、不確定要素に実験の正否と再現性が左右されることである。そのうえ、このような実験の技術は、長年の経験から取得された「暗黙知」であるため、技術の共有と再利用生が極めて低い。これらの問題をロボットによる作業の自動化によって解決しようとするのが、本研究領域である¹。

[研究開発の動向]

ポストゲノム以降、質量分析計と次世代シーケンサー等の高感度・ハイスループット解析機器の出現により、大規模で網羅的な解析が殆どのバイオ・ライフサイエンスの研究分野で展開している。その結果、膨大なサンプル数をハイスループットに、且つ正確に処理しなければならない。また、iPS細胞をはじめとする幹細胞技術の飛躍的な進歩により、より高度な細胞培養手技が常に求められている。このような作業の殆どは、これまで人手による人海戦術により処理されてきた。しかし、深刻な少子化の時代を迎え研究開発費が伸び悩む中、労働集約的な作業を前提とするライフサイエンスとバイオ産業は、今まさに破綻の危機を迎えていると言っても過言ではない。また、研究者・技術者とは名ばかりで長時間のベンチワークを常態とする分野には魅力がなく、また人材の育成も極めて困難である。

近年、大規模研究であるオミックス解析を中心に、ロボットによる自動化研究は行われてきた。これまで開発・上市された自動化装置は、溶媒・試料の分注ロボット。または、調整されたサンプルを解析機に自動的に供給するオートサンプラー的なものが中心で、それぞれの作業に特化した単機能ロボットである。また、再生医療の分野では細胞製剤生産の自動化が積極的

¹ 本項では、作業を繰り返すうちに無意識的に可能となった手技で、他者に知識として伝達出来ないことを指す。

に試みられている。その多くは、細胞・ラボウェア（試験管・試薬瓶・培養皿等）をハンドリングするロボットアームに細胞培養に必要な恒温槽・遠心機等をカスタマイズ自動化し、それに必要な外部軸と特殊治具をインテグレーションしたライン化方式である。

両方式の長所短所

① 単機能ロボット組み合わせ方式

ベンチワークの各ステップに、単機能ロボットをあてがい組み合わせる方式は、各ロボットの信頼性が高くかつロボットのスループットに見合う十分な量の定型作業が必要な場合、研究生産性を容易に向上させる可能性はある。しかし、作業量に対してロボットのスケールが過大である場合は却って準備作業時間と溶媒・培養液等の消費量が無駄となる場合が多い。また、各ロボットの使用方法あるいはプログラミングを個別に習得する必要があり導入コストを引き上げる。さらに、各作業間を繋ぐのは結局人間による介入が必要となることが常で、人手によるヒューマンエラーとルーチンワークは決してなくなるならない。また、専用ロボットだけで多岐にわたるベンチワーク全てを自動化することは不可能であるため、スループットが求められる作業のみが自動化される傾向は否めない。

② ライン化方式

専用ロボットが行うことが出来ない特殊化した作業を自動化する場合、あるいは作業全体のワークフローを人非介入で完全自動化するには、ライン化方式を取らざるをえない（文献1）。この方式は、工程の各ステップを担当するロボットをそれぞれ開発し、搬送するラインとして繋げる方式である。この方式の欠点は、開発導入コストが膨大となることである。システムデザイン、検証、製作と導入後の最適化に、多くの場合1年～数年を要することも稀ではない。また、複数メーカーの、複数のロボット方式（垂直多軸、スカラー、カーテシアン方式等）が混在するため、オペレーションには知識と経験が必要であり、専門のエンジニアが常駐しなければ稼働させられないことも多く、ランニングコストが問題となる。最も大きな欠点は、一旦完成したロボットのワークフローを変更、あるいはチューブ・フラスコ、ディッシュ類のサイズとボリュームを容易に変更出来ないことである。プロトコルの変更とプロトコル最適化が常に必要とされるバイオ・ライフサイエンスにおける作業では、費用対効果が見込まれるケースは極めて稀である。

まとめると、単機能ロボット組み合わせ方式では、作業に人の介入をなくすることが出来ない。また、ライン化方式は、導入コストとランニングコストが膨大となるため、作業内容が常に変化するバイオ・ライフサイエンスの現場には馴染まない。これらの理由が、ライフサイエンスの自動化が他の分野に比べ大きく遅れた理由である。しかし、その一方でバイオハザードの顕在化、少子化問題、プロジェクトの大規模化傾向等から、ロボットによる自動化が潜在的に強く求められており、次項の注目動向に記載する革新的なイノベーションが本格的に実用化した場合、ロボットの巨大な市場が生まれる可能性がある。

③ 新しい動向：ヒューマノイド型ロボット

生産ロボットの世界ではヒューマノイドとは、人の動作をコピーし、人がこれまで使って

きた道具を使い「作業」するロボットを指す。即ち、ロボットの周辺に設置する装置とツールを変更すれば、単一のロボットシステムで多くの作業をすることが出来る。生産現場ではこれを「多能工ロボット」とも呼ばれる。研究用としては「汎用ヒト型ロボット (LabDroid : laboratory + humanoid)」と呼ばれている¹⁾。LabDroidは、ライフサイエンスの実験が出来るだけの、人と同じリーチ長を持ち、ハンドは十分な過般重量と、動きの精度を持つ。このようなロボットが生まれ、検証研究がスタートして既に10年近くが経過した。細胞培養・オミクス(プロテオミクス/ゲノミクス)の作業を中心に、現在国内に20台以上のLabDroidが稼働している。LabDroidの特徴は、これまで自動化が困難であった、複雑で高度な手技を必要とする作業を自動化するのみならず、これまで個人のスキルとして暗黙知化していた作業を可視化・数値化し、数値化されたパラメーターを最適化することにより、熟練者よりも高い精度で作業を何度でも再現することを可能とした。また、ここ数年で、作業インターフェースが飛躍的に進歩し、特殊技能者によるティーチング作業を必要としない。特別な知識経験がなくとも、GUIにより直感的にロボットへの作業指示を可能とする。また、最適化されたプロトコルはネットワークを介して、他のロボットで共有することも可能となり、これまで、膨大なコストと時間を要した、人から人への技術移転を不要とした。また、人の技術をロボットへと遷し、そのロボットをスケールさせることにより、大きな研究生産性の向上が期待されている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

AIとの融合：細胞培養の自動化・最適化

個人の技術や経験値に高く依存し、長時間の作業が要求される、iPS細胞等の細胞培養を中心に産学連携体制での積極的な自動化の試みが行われている²⁾。特に再生医療を見据えた細胞培養は、高い再現性を担保した上での標準化が求められる。また細胞製剤の品質管理は非破壊的に行われる必要があるため、画像データから品質の良否の判断や、培養手順の迅速な最適化などが求められている。しかし、相変わらず、特定の作業者にしか、再現的な培養を行うことができず、その理由は暗黙知のままであり、人材育成に大きな問題を抱えるとともに、標準化が困難である。ごく最近、パナソニック社がiPS細胞の維持培養を自動化する専用ロボットを開発し、60日間の人非介入の細胞培養に成功した³⁾。また、臨床研究が控えている、パーキンソン病を対象とするiPS細胞による再生医療も、産業界が積極的に細胞生産の自動化にも取り組んでいる⁴⁾。

多くの細胞培養において、顕微鏡画像を教師データとして大量に得ることが可能であり、深層学習のようなAI技術との馴染がよいと考えられ、細胞培養の最適化と品質管理にAI技術を活用する試みもスタートしている。特に、ヒューマノイドのような自由度と汎用性が高いロボット技術と組み合わせた場合、膨大な培養時のパラメーターを効率よく最適化し、培養細胞の良し悪しを画像データから非破壊に判断することも可能であると期待されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

産総研人工知能研究センターが中心となり細胞培養を自動化しAIと融合するプロジェクトがスタートしている(NEDO次世代人工知能技術の社会実装を目指した先導研究:AI×ロボットによる高品質細胞培養の自動化とオミクスデータの大規模取得)。さらに、理化学研究所

多細胞システム形成研究センターにおいては、顕微鏡画像を教示データとし、AIによるiPS細胞の維持培養を最適化するのみならず、網膜再生のための分化・誘導プロトコルの最適化を自律的に実施するAIロボットシステムの研究開発がスタートしている(2017年07月01日読売新聞夕刊一面: AIロボ、iPS大量増殖…理研など実施へ)³。

がん治療において、プレシジョン・メディシンが急速に進展している。具体的には、がん細胞の遺伝子変異を網羅性高く検出し、患者個人々々の様々な変異に応じた、適切な投薬と治療法を選択する、各個人に応じたオーダーメイド治療である。近年特に、次世代シーケンサーの運用コストが下がり、臨床研究レベルから実際の診断へと急速に普及しつつある。既に国内では、がんゲノム診断を実施する臨床拠点150以上がリストアップされている。臨床研究から、診断へと展開するには、臨床検査の現場での精度管理が最も重要視される。しかし、世界的にがん遺伝子検査分野での精度管理の方法や技術はまったく確立しておらず、極めて大きな問題となっている。またこれまでの臨床検査と異なり、がん組織のゲノム診断の作業は長時間・複雑であり、これに関わる人材の確保と育成とコストの問題は全く未解決であった。しかし、がんゲノム診断に必要とされるクリニカル・シーケンスに関わる作業をLabDroidによる自動化が進んでいる。今後ゲノム診断の精度管理と標準化に向け、大きな期待が寄せられている⁴。

(5) 科学技術的課題

今後、ロボットによるライフサイエンスの自動化を推進する上で、複数種類のロボット(専用ロボット、ヒューマノイド、搬送ロボット等)と各種解析機器との連携し、プロトコル共有とログの抽出を実現する上で克服すべき問題は、全てのロボットが理解できる共通言語によるプロトコルの記述と、セマンティックにログやデータ記述を記述し、AIと連携するシステムの構築である。そのためには、試薬・遺伝子/タンパク質等の分子名称を表記揺れなく取り扱い、作業オントロジーによる概念区分の導入が必須となる。しかし、この分野の研究者は少なく、手付かず様相を否定できない。

また、自然言語処理等でこれまでの文献情報を効率的に利用することが、これまで以上に求められる。生物学・医学に関わる自然言語処理による知識抽出は、多くの予算とリソースが投じられてきたが、いくつかの理由で進捗は捗々しくなく、相変わらず人手によるキュレーションが足かせとなっている。今後AIロボットによるビッグデータが生み出されるなか、これらは成果を加速する上で解決しなければならない課題である。

(6) その他の課題

バイオ・ライフサイエンス分野においてIoT化したロボットシステムを活用した新たな研究環境が生まれる。その結果、今まで研究者の技術・経験あるいはカンといったものに頼って実施していたプロトコルをクラウド上で、誰でも何処でも再現・再利用することを可能とする。その過程において、先ず研究者はユーザインターフェースを介して、自身の技術をロボットジョブに変換し作業を行い、実験結果を基に各作業ステップのパラメーターを最適化し、精度の高い実験結果を再現的に得られるに至る。そして、一旦最適化されたプロトコルはクラウドを介

³ 参考資料内閣府広報ビデオ (Innovation Japan : AI To Advance Regenerative Medicine)

(https://www.youtube.com/watch?v=gYbMtx4xTeU&index=4&list=PLoj1Ym89bkatlgzc0ZM borN_ICrE_tFZR%E3%80%80)

⁴ 久保田文, “特集連動◎保険診療下での癌ゲノム医療:筑波大発 iLAC、癌ゲノム医療向けエクソーム解析のため衛生検査所登録へ” 日経バイオテク online (2018.11.22.). (accessed 2019-01-15)

して誰でも何処でもアクセスでき、さらに再最適化すら可能であり、高度な技術を研究コミュニティ全体で共有可能となる。すなわち、ロボットシステムは人との協働作業により進化した、より大きな知識を生み出す。

このプロセスを推進するにはロボットの特性やユーザインターフェースを熟知し、ロボットによる研究作業を指導し、データ共有の価値を啓蒙する「(仮称) ロボティックバイオロジスト」ともいべき新たな職種が必要となる。そのような人材供給を含めた全体設計が必要となる。

(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	◎	→	細胞培養をはじめとする、膨大な最適化パラメーターが存在する、複雑で、長期間にわたる作業をヒューマノイド型ロボットが自動化するのみならず、AIとの融合も急速に進展しつつあり、得られたデータを基に自律的な最適な実験プロトコルを生み出す、ロボット・サイエンスの実現に向け、産学官が積極的な連携を進めている。 ヒューマノイド型ロボットと、専用ロボットの連携・融合も進展する可能性が高い。フレキシブルで拡張性の高い自動化システムへと急速に進展しつつある。
	応用研究・開発	◎	↗	iPS細胞の維持培養・特定細胞組織への分化を、ロボットにより自動化することなどが、世界に先駆けて成功し、AIとの融合も急速に進展しつつある。世界に先駆けて、全ゲノムシーケンズの完全自動化に成功しつつあり、いち早く、がんゲノム診断に導入される見通し。大きなコスト効果だけではなく、人材育成の問題や診断に必要とされるデータの精度・再現性の問題も解決することが期待されている。
米国	基礎研究	△	→	製薬企業らの、自動化熱が冷めた形。逆に人海戦術的な労働集約型の研究開発に戻りつつある。
	応用研究・開発	△	↘	エメラルドバイオ、トランスクリプティクス等の、ロボットによるクラウド受託研究サービスが数年前にスタートしたが、特に大きな進展はなく休眠状態。専用ロボットの組み合わせによる拡張性の欠如が浮き彫りとなる。西海岸を中心に、ライフサイエンスの自動化を標榜するスタートアップが多数起業しており、活発な投資も行われ始めているが、ロボティクスの大きなブレークスルーはなく、大きな進展は期待されていない。 大規模なゲノムシーケンズの作業を必要とするがんゲノム診断など、本来、最も早く自動化されるべき臨床・診断現場ですら、自動化の動きも鈍く、従来型自動化ロボットの信頼性に大きな疑問符が投げかけられており、限定的な専用ロボットと人の介入による人海戦術が逸脱していない。
欧州	基礎研究	△	→	大学にライフサイエンスの自動化に特化した学部がある
	応用研究・開発	△	→	大手製薬企業を中心に、バイオ産業用ロボットの技術支援が活発に行われている。バイエルン社が運営している INVITE という組織では、アカデミアのイノベーションを内外から積極的に呼び込み、企業の研究者とともに応用・検証研究が実施され、実証されたロボット迅速に社内を導入するオープンイノベーションシステムを構築。
中国	基礎研究	△	→	ドイツ KUKA 社を買収した美的社が、我が国で唯一のヒューマノイドであるラボドroidを生産する安川電機と提携。積極的な自動化への意欲を見せているが、ライフサイエンス・バイオでの動きは少ない。
	応用研究・開発	-	-	特記事項ナシ
韓国	基礎研究	-	-	特記事項ナシ
	応用研究・開発	-	-	ソーシャルロボットとしてのヒューマノイド研究は活発に行われているが、バイオ用作業ロボットを生産する企業はない。

(8) 参考文献

- 1) Nozomu Yachie, Robotic Biology Consortium, and Tohru Natsume, “Robotic Crowd Biology with LabDroids,” *Nature Biotechnology*, Vol. 35, No. 4, (2017) pp. 310-312. DOI: 10.1038/nbt.3758
- 2) Shun-Ichiro Iemura and Tohru Natsume, ” One by one sample preparation method for protein network analysis,” *Protein interactions*, Vol. 15, 978-953-51-0244-1, InTech (2012) pp. 293-310. DOI: 10.5772/37931
- 3) Shuhei Konagaya, Takeshi Ando, Toshiaki Yamauchi, Hirofumi Suemori, and Hiroo Iwata, “Long-term maintenance of human induced pluripotent stem cells by automated cell culture system,” *Scientific Reports*, Vol. 5, Article No. 16647, (2015) pp. 1-9. DOI: 10.1038/srep16647
- 4) 日立製作所, “大日本住友製薬からヒト iPS 細胞を用いた再生医療向け大量自動培養装置を受注～パーキンソン病治療向け細胞の製造に向けた研究用装置～” 日立製作所ニュースリリース (2017-4-10)

2.2.12 ナノロボティクス

(1) 研究開発領域の定義

20年以上の歴史があるマイクロロボティクスと違いナノロボティクスは10年足らずの挑戦的研究分野であるため、厳密な研究分野の定義は存在しない。名称にナノという寸法サイズが入っているが、ナノロボットと称していても、実際は数mm～0.1mm程度のマイクロロボットサイズであることも多い。本報告書では0.1mm以下の肉眼では見えないスケールの研究を中心に記述するが、サイズより研究アプローチの先進性、多様性に注目すべき未踏研究分野である。

(2) キーワード

ナノロボット、マイクロロボット、ナノマシン、マイクロマシン、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)、NEMS (Nano Electro Mechanical Systems)、医用デバイス、マイクロファブリケーション、ナノテクノロジー、生体工学科

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

ナノロボティクスの研究は未踏挑戦領域であるため、学会として厳密な定義は存在しない。サイズが0.1mm下のマイクロロボットをさらに小型化、高機能にしたものから、2016年のノーベル化学賞のように超分子を組み合わせて歯車など可動機械要素を作製するもの、さらにスマートピルなど外部環境に反応して薬物放出する機能性高分子もナノマシン、ナノロボティクスと称されている。材料学、生物学、医学などサイエンスとテクノロジーが深く融合した新領域である。

[研究開発の動向 (研究アプローチの多様性と目的)]

(a) ロボティクスからのアプローチ

1990年台にMITのフリンやUSバークレーのフィアリング、東京大学の三浦下山らにより空を飛ぶ数mmの「フライングマイクロロボット」や、スタンフォード大学のカトコスキーらによるワンデルワース力を利用したヤモリの指先の微細構造の吸着現象を用いた「マイクロ壁面歩行ロボット」などの研究が有名である。2000年以降は、さらに小さい領域での研究が活発化し、ドイツのカールスルーエ大学、ETH (スイス連邦工科大学)、EPFL (ローザンヌ工科大学) などEUを中心に活発に研究された。

外部から操縦可能な世界初のナノロボットは2004年に名古屋大学の生田 (現 東京大) らの「光駆動ナノロボット」である。最初のモデルは全長10 μ mで3自由度の運動が可能で液滴内でマスタースレーブ的に稼働する。ロボットハンドはすでに独自開発していた2光子レーザを用いた光造形法を用いて100nm精度で、組み立て工程なしで作製し、Yagレーザを用いた光捕捉で駆動制御できる。pN以下の分解能で微小力をリアルタイム測定できる力感付きマスタースレーブナノロボットまで到達している。細胞への力刺激による細胞内部の情報伝達を調べる細胞生物物理学者の研究ツールとして実用化が期待されている。

その後、2007年にカーネギーメロン大学のシッティらは「バクテリアの鞭毛を人工物に結

合したハイブリッドタイプ」のナノロボットを開発した¹⁾。医療を目的としているが、体内にこのロボットを導入し外部から目的に応じて誘導、操縦するには、まだ多大な技術的、医学的、倫理的課題がある。しかしドイツのマックスプランク研究所が彼をリーダーとして招聘し、ナノロボティクス分野の研究センターを創設するなど、欧米での研究が急速に活発化している。

生体とのハイブリッドタイプには、体外で培養した心筋細胞をシリコンや樹脂に結合して動かすナノロボット研究も増えてきた。最古の研究は2001年に当時UCLAのバイオメディカル学科のモンテマグノらが開発に成功した「マッスルロボット」(「マッスルMEMS」ともいう)である。培養心筋をM形状のシリコン構造に結合し、心筋の自発的かつ周期的な伸縮をアクチュエーターとして液中を歩行した。外部からの運動制御は持たず自律的に歩行した。

遠隔駆動に有利な磁気駆動方式のナノロボットはETHのNelsonらが精力的に研究している。磁性材料を用いた小さなロボット体内に入れ、MRI用の1.5T(テスラ)の強力な磁場を発生する巨大な磁気コイルを用い、体外から駆動するシステムを構築している。眼球内に入れたロボットを磁気コイルの電流を変化させ、静磁場的な手法で遠隔操縦するシステムで網膜の各種手術を目的としていた。

これは1990年台初頭に生田(当時九州工大)、永田(滋賀医大眼科)が提案した網膜手術用マイクロロボット「ゲンゴロー」の概念に基づいた研究である。最近ではカテーテルの先に磁石を付け、体外電磁コイルの磁力によりカテーテルを誘導するシステムなど複数の医療デバイスの開発を進めている。

東大の生田、安井、川口らは、直径10 μ mの磁性材料製の微細コイルをマイクロ光造形し、10cm程度の小型ヘルムホルツコイルで小電力かつ回転磁場を用い、マイクロコイルを液中でスクリーのように高速回転移動させている²⁾。欧米の静磁場を使う方式に比べ格段に小さな磁力で眼球内を移動可能である。2018年には複数の磁気コイルを独立に駆動制御することに世界で初めて成功しており、今後多方面での応用展開の拡大が期待される。

磁気駆動方式のマイクロロボット、ナノロボットは作製と駆動が容易でもあるため、欧米、韓国、中国など多くの国で研究されている。

マイクロカプセル内に画像取得と薬物放出機能を持たせた医用ナノロボットは1980年台から数多く提案はされているが、まだ実証機まで到達しているものは少ない。研究の意義とイメージがSF的で一般人には理解しやすいので、マスコミではこれがナノロボットとして紹介されることが多い。1965年の米国映画「ミクロの決死圏」の実現に見えるからであらう。

関連研究としては、2000年台初頭、スペースシャトルの耐熱タイルの損傷を宇宙空間から検査することを目的に、無線ビデオカメラと小型推進機能を持つ手のひらサイズの円盤型衛星である「ナノサテライト」がNASA関連会社エアロスペースカンパニーのヘルバニアンらにより開発され、実際にスペースシャトルから放出された。シャトルの周囲を浮遊し観察に成功した。本来ナノロボティクスのカテゴリーには入らないサイズであるが、反応ガラス製のナノサテライト内には、3Dマイクロ流路やジェット噴射、電子回路など医療用のマイクロマシン、ナノマシン、MEMS技術が駆使されていた。

本分野の研究成果は、IEEE主催のMEMS、NEMS、ICRA、Transducers、 μ -TASなど採択倍率の厳しい国際会議やNature(姉妹紙を含む)、Science、APL、IEEEの論文誌などに掲載されている。2016年に新規創刊されたScienceの姉妹ジャーナルScience Roboticsにも掲載されている。

(b) 合成化学からのアプローチ (シーズ志向)

研究の潮流は複数あるが、1986年米国スタンフォード大のドレクスラーが提案した超分子、高分子の立体構造から構成されたナノスケールの可動機構を持つ「ナノマシン」の概念に啓発されたプロジェクトが多い。合成化学的手法が主となるため高分子合成分野の研究者の参入が多い。バクテリアの鞭毛の根元にある分子モーターが各種の高分子構造の組み合わせで構成され、さらに高効率なモーターとして機能する仕組みの解明が行われてきた。将来この手のナノサイズの分子モーターで動く数百から数千ナノメートルサイズのナノロボットが出現する可能性もある。

近年ではDNAを素材とするナノ構造や、アクチュエーター特性を持つゲルを用いたナノロボット(ゲルロボティクスと称している)も多く研究されている。

2016年のノーベル化学賞が、超分子による歯車や車台など可動機構の構築であったため、今後要素部品開発を得意とする合成化学研究者とシステム構築を得意とするロボティクス研究者の共同研究が国際的に急速に進展すると思われる。

本分野の成果はロボティクスの専門学術誌に留まらず、Nature誌、Science誌など世界的に読者の多い学術誌に掲載されることが多いため研究者間でも注目度が高い。実用化までにはまだ多くの課題解決と人的予算的リソースの投入が不可欠な段階であるが、基本特許、産業創出の観点からは看過できない。バイオ医工学の人材育成政策と同時に、未踏最先端分野への切り込みが期待される。

(c) DDS (Drug Delivery System)、創薬からのアプローチ (ニーズ志向)

pHや温度など外部環境の変化に応じて薬物の放出を制御するスマートピルをナノロボットと称することもある。東京大学の片岡らは、抗がん剤など薬物を内包できる高分子ミセルを用いた手法で開発を進め、治験段階にまで到達している。がん細胞にだけ抗がん剤を投入するターゲット療法、ミサイル療法が最終目標である。従来の抗がん剤は、体内に注射されてもがん細胞にだけ選択的に導入することは困難で、細胞膜から内部への取り込み効率が低いため顕著な副作用の問題が発生している。この問題の解決に貢献することが期待され、研究費も投資されている。

(d) 研究目的

本分野は、研究目的の多様性がそのままアプローチの多様性にも反映している。

以下に簡潔にまとめる。

ロボティクス分野

シーズ志向とニーズ志向があり、双方が融合している点が強みである。新概念、新原理の医療ツール、医療デバイスの開発を唱っている研究が多い。ロボティクス、マイクロマシン、MEMS、メカトロニクスを基盤とする研究者が多いため、単なる要素技術の開発だけでなく、システム化まで到達しているものが多い。

合成化学分野

主に合成手法の開発とサイエンスとして化学的興味が原動力、目的である。医療応用も重要課題としているが、現時点では基礎的な知見と技術基盤の確立が優先されている。

DDS、創薬分野

新規の DDS、創薬技術の開発が目的であり、研究の出口も薬事承認による実用化である。

ミセルを用いたナノマシンでは体内での癌細胞の破壊であり、光駆動ナノロボットは体内ではなく、体外における細胞生物学の研究ツールを目的としている。ただし、まだ明確な目的を持たず、ナノロボットの実現可能性を探る研究も多く存在する。黎明期の研究分野の特長であり、さまざまな分野の研究者の知的好奇心を大切にすべきことである。

昨今のプロジェクト研究が企業内研究のように成果主義に見えるが、成果を一般化、普遍化する努力をし、より高いレベルの論文誌に投稿することをねらうべきである。米国でも MEMS など一見開発研究に見える成果を理論、実験結果を一般化し、Nature、Science レベルに掲載させている。将来の研究、産業の種として広範な分野に情報提供できることにもなる。

関連分野の遠隔手術ロボットは現在ミリメートルサイズ以上の大きさであり、精密機械工学に技術基礎を置いている。他方ナノロボティクスは作用する物理現象、構成素材、製作手法、駆動制御、応用などすべての研究要素で、技術の確立による知識の創出が主目的となっている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

ナノロボティクスにおける国策ファンディング

米国では DARPA の基礎研究ファンディングで 10 年以上前から研究支援が実施されてきた。韓国でも 2000 年以降、医療分野に比重を置いたロボティクスプロジェクトが存在し、その中で小型のロボット内視鏡などマイクロロボティクスが研究されたが、ナノロボティクスのスケールまで到達しているものは少ない。

欧州では、スイスの ETH、ドイツのカールスルーエ研究所、大学が大型予算を獲得し、活発化している。2017 年にはドイツのマックスプランク研究所が特別に研究所を創設し、米国からトップ研究者を所長として招聘している。

これまでロボティクス分野には消極的であったケンブリッジ大学にも、ソフトロボティクスの拠点ができ、国外からの研究者を集結させている。実はソフトロボティクスは、日本で 1990 年台に多くの研究が実施されており、今回のブームの一部は日本の後追いであるが、英文になっていないことや、現在の新素材、新技術の取り込みで、あたかも欧米から発信されているように見える。

日本人が日本人の論文を引用しないことも原因している。大学院で論文作成の際、英語になっていない研究であっても指導者が積極的に引用を指導することが必要である。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

EDEN2020 (Enhanced Delivery Ecosystem for Neurosurgery in 2020) は EU の Horizon 2020 から 830 万ユーロの資金を得た研究開発プロジェクトである³⁾。2016 年から 4 年間で、低侵襲な神経外科手術のための統合技術プラットフォームを提供することで、脳疾患の治療に段階的な変化をもたらすことを目的にしている。インペリアルカレッジロンドンや、ミラノ工科大、ミュンヘン工科大など 8 つの大学と臨床医、産業界が連携してプロジェクトを推進し、2020 年には臨床試験を始めることができるよう計画している。

(5) 科学技術的課題

技術的なボトルネックはナノスケールの構造を製作する手法の開発もあるが、合目的に機能するシステムを構築することである。構造から機能へ、である。さらに応用分野が多岐に渡るため、その基盤技術の開発には、船団的な大型プロジェクトより中型、小型で鋭い予算配分が重要となる。オールジャパンよりオンリージャパンの成果が出せる仕組みを構築することが鍵となる。

(6) その他の課題

「人材育成」の遅れは、生体医工学分野が主体となるナノロボティクスにとって、致命的である。日本政府も医療機器が日本の中心産業にしたい意向はあるが、単に一部の医療メーカーへの資金投入に留まっており、人材育成の視点到欠ける。野球チームと同様、人材育成への投資無しには、優勝は見えてこない。

さらに我が国では、基礎研究予算が純粋サイエンスに偏り、工学の基礎への投資が少ないため、ハイリスクの工学研究が進展しにくい。サイエンスが基礎で工学が応用とのステレオタイプの見識を打ち破らないと、科学と工学が融合したナノロボティクスは発展できない。

研究インフラはシリコン MEMS のような巨大な設備は必須ではない。他方、顕微鏡、分析機器の高度化も平行して進める必要がある。

標準化も研究が実用化される前の概念段階から検討すべきである。このままでは従来のバイオ医療装置のように欧米ベンチャーの装置スペックがデファクトスタンダードになる可能性が大である。市場が明確化してからでは遅いことを再認識すべきであろう。

① 高度研究コーディネータ制度

日本と違い、欧米では世界の流れができる前に未踏研究に先行投資するため、特許、実用化の段階でも多くの先行利益を得てきた。この理由は、行政内に「研究の目利き」ができる博士レベルの「研究支援コーディネータ」が多数在籍し、政府の科学政策の方向決定、分野選択、人選、プロジェクト作成などで活動しているためである。日本でも早急な「高度研究コーディネータ制度」の確立が叫ばれている。

我が国では、1990 年台に当時の通産省が主導し 10 年間の「マイクロマシン大型プロジェクト」が推進されたが、主に企業向けであり大学での新規性、独創性の高い研究には陽には投資されてこなかった。それぞれの研究者の個人的な努力で支えられているのが日本の未踏研究の歴史である。この方法で今後日本は世界をリードできるか危惧されている。

② 人材育成政策

「人材育成」の観点でも、欧米や日本以外のアジア諸国の主要大学には、バイオエンジニアリング学科（生体工学科）、バイオメディカル学科（生体医工学科）が 20 年以上前から存在する。ここでは電気、機械工学、バイオマテリアル、創薬、医学などの研究者が学際的な研究者、技術者の育成をしている。

マイクロロボット、ナノロボットの多くも、バイオエンジニアリング学科で研究されてきた。最先端の医工学を追及するには、新素材、新概念、新原理の技術を躊躇なく推進する予算と環境が不可欠である。この点でも、日本に生体医工学科を早急に創設すべきである。

大学院レベルではなく、学部レベルからの組織的教育が重要である。

(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	○	→	ナノスケールの3Dプリンタである2光子光造形法(東大)や各種アクチュエーション技術(東大、東工大、阪大)、各種光計測などが活発である。しかし個別の研究室が頑張っており、組織的な動きや国からの大型予算なども皆無に近い。
	応用研究・開発	○	→	光駆動ナノロボットによる細胞実験ツールの開発(東大)。磁気駆動ナノロボット(東大)、筋肉駆動型のマイクロロボット(東大、阪大)などが開発されつつある
米国	基礎研究	◎	↑	DARPA、NSFなどの研究資金で、生物と融合したハイブリッドナノロボティクスが活発化。メカだけのマイクロロボットも数多く開発されてきた。基礎から実用化までのルートができています。
	応用研究・開発	◎	↑	医療応用を目指しているが、まだ多くがシーズ志向の実証研究レベルである。しかしベンチャー企業が容易に創設できるため、大学の研究成果の実用化は素早い。
欧州	基礎研究	◎	↑	ETH、RPFLなどスイス連邦工科大学、Pisaの高等研究大学院などのイタリア、カールスルーエのドイツなど、バイオ、医療応用と言っているが、研究の自由度が高いシーズ志向の研究が多い。 ニーズ志向では、英国のインペリアルカレッジが医用ロボティクスの研究所のハムリンセンタでナノロボットの試作が始まった。 ケンブリッジ大学のソフトロボティクス戦略が脅威である。 マイクロナノロボティクスとも関係が深い医用ロボティクスに関しては、2019年にダビンチの主要特許が失効するため、KUKAなど大手の産業ロボットメーカや大学発ベンチャーが遠隔手術ロボットの実用化を進めている。 EUの複数国家間の大型予算EDEN2020を始め巨大な投資がされている。さらに大型の基礎研究予算も原動力となっている。
	応用研究・開発	◎	↑	バイオ、医療分野のテーマが大半。ベンチャー的な手法で実用化も進みつつある。手術ロボットダビンチの基本特許が2019年に切れるのを見越した多くの医療ロボットが開発されている。ナノロボティクスについても、精力的。
中国	基礎研究	△	↑	欧米、日本に追従する形式で莫大な投資が行われている。欧米から帰国した気鋭の研究者が主導し、中国内の豊富な優秀人材が国から大型予算を得ている。 2017年からは3大重点研究所の一つとして医療ロボット研究所が上海交通大学に設置され、遠隔手術ロボットとマイクロナノロボットも重点テーマに選定された。
	応用研究・開発	△	↑	医療ベンチャーが日本や米国のシニアレベルの大学研究者を招いて、研究推進中。分野は医療、バイオを含む広範なものである。 産業化が世界一であり、ハイリスクの研究開発テーマでも、思い切った資金投資が行われていることは、他の産業分野と同様である。
韓国	基礎研究	○	→	国の研究所とトップメーカが推進中。ポリマーマイクロアクチュエーターなど新規要素技術にも投資中。医療ロボットの次のターゲットとしてマイクロナノロボティクスを重点推進している。
	応用研究・開発	△	→	バイオ、医用を中心にした個別研究が韓国のトップメーカと一体化して推進中。産学の人的連携も深く、意思決定も速い。

(8) 参考文献

- 1) Bareh Behkam and Metin Sitt, “Bacterial flagella-based propulsion and on/off motion control of microscale objects,” Applied Physics Letters, Vol. 90, Issue 2, (2007) pp. 023902 (3 pages). DOI:10.1063/1.2431454
- 2) Masato Yasui, Masashi Ikeuchi, and Koji Ikuta, “Magnetic micro actuator with neutral buoyancy and 3D fabrication of cell size magnetized structure,” In Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2012; Saint Paul, Minnesota, USA, May14-18, 2012) pp. 745-750. DOI: 10.1109/ICRA.2012.6225113
- 3) Enhanced Delivery Ecosystem for Neurosurgery in 2020, <https://www.eden2020.eu/>