

3.4 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、安全・安心で質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俯瞰区分である。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り、今回戦略レイヤーにおいて取り上げることとした。

本俯瞰区分では、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しめ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、以下の九つの研究開発領域を採り上げた。

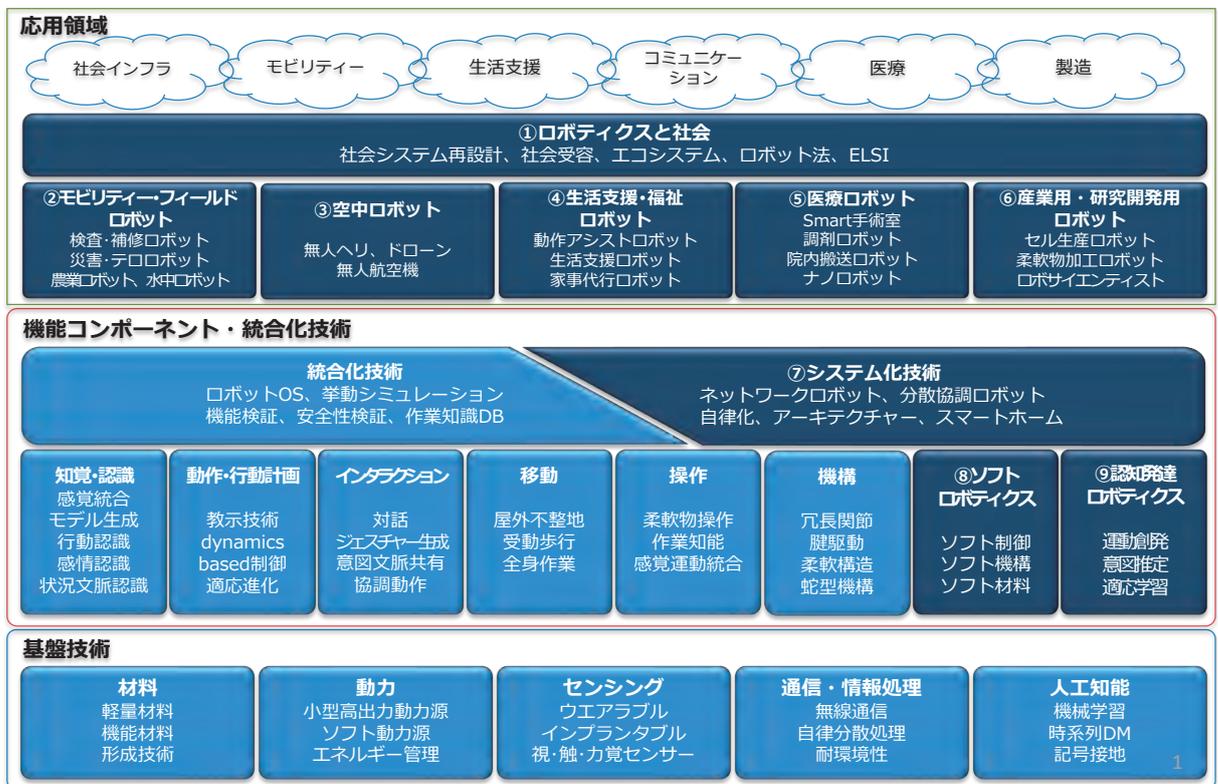


図 3-4-1 ロボティクスの俯瞰図

①ロボティクスと社会

ロボティクスの要素技術が一定レベルで整いつつあるなかでシステム技術の進展を加速する仕組み、社会への導入に伴うリスク軽減するとともに便益を最大化するための制度設計、社会への浸透を加速するためのビジネスとしてのサイクルを実現するエコシステム構築を含む社会受容の促進など、ロボティクスによる単なる既存機能の置き換えではない社会システムの再設計に係わる研究開発領域である。

②モビリティ・フィールドロボット

重要な機能として移動機能を備え、目的となるフィールドで作業を行うロボットを実現と利活用を目指す研究開発領域である。その適用領域は、農業、インフラ検査・保守、災

害調査・レスキュー、稼働するフィールドも陸上だけでなく、海中、空中などの拡がりがある。ここでは、陸上と海中で稼働するロボットを扱い、空中で稼働するロボットは別途、空中ロボットの研究開発領域で扱う。

③空中ロボット

人の操縦ではなくコンピューターで制御された自律的飛行が可能な飛行ロボットであり、小型無人航空機、UAV (Unmanned Aerial Vehicle)、UAS (Unmanned Aerial System)、ドローンとも呼ばれている。センサー、マイクロプロセッサ等が超小型化・MEMS化され高性能化された恩恵を受けて、数百グラムから数キログラム程度の小型で電動型の自律飛行可能なマルチローターヘリコプターが約10年前に誕生した。空中ロボットはホビー用から産業用まで幅広く、空の産業革命をもたらすとされている。

④生活支援・福祉ロボット

ロボット工学の生活支援や福祉への活用であり、動作支援や見守りなど、日常生活に密着して人と深く関わり合う。特に、生活全般にわたって介護が必要な重介護の支援が、まずは重要なターゲットであり、支援が必要な主な活動として食事、排せつ、入浴・着替え、移動の四つが挙げられる。こうした活動の支援の方法自体の研究とロボット活用を目指す研究開発である。

⑤医療ロボット

ロボット工学の医療への活用であり、既にさまざま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。応用展開は多岐に及ぶが、ここでは、ある一定の動作を伴う、医療支援を目的とするロボットを医療ロボットと位置づける。特に注目すべきは、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。

⑥産業用・研究開発ロボット

重工業や電子製品製造などの特定の作業に利用されてきた産業用ロボットの利用領域を食品、服飾、農林水産、サービス、医療・介護等の分野へ拡大するための基盤技術の確立、および、効率的に高い精度の作業を行うという特長を活かした先進的な取り組みが進みつつある研究開発現場で利用される研究開発ロボットの実現と利用拡大を目指す研究開発が進んでいる。

⑦システム化技術

ロボットは、認識、判断、計画、動作の各知的処理要素の統合、機構、センサー、アクチュエーター、電子回路、コンピューター、電源、配線、外装、ソフトウェアの各構成要素の統合、さらには、移動、マニピュレーション、対話、ユーザーインターフェース等の機能の統合により構成されることから、ロボティクスはシステム化の技術といえる。特に、より自律的な処理、より広範囲な状況の変化に応じた処理を可能とする知能化と各要素や部位を集積・統合する基盤となるプラットフォーム技術の研究開発が進んでいる。

⑧ソフトロボティクス

ロボットシステムにおける物理的な柔軟性 (ソフトネス) を取り扱うロボティクスの分野で、今年急速に発展し注目を集めている。主要な研究テーマとして、柔軟性を積極的に利用した新しいロボットの開発、柔軟物体のモデル化や制御、生物システムにおける柔軟性の機能の解明などが挙げられる。ロボットへの接触安全性の付加、高分子材料によるロ

ボットの安価な製造の実現などにより、ロボットの応用拡大への貢献が期待されている。

⑨ 認知発達ロボティクス

ロボットの知的機能を、従来のように直接プログラミングや単機能学習で実現するのではなく、人間の認知発達と同様に自律的に累積的に獲得させることで、より柔軟・汎用かつ高度にすることを目指す。このために、認知科学や神経科学等の知見も統合しつつ、シミュレーションやロボットなどの人工システムにより人間と同等な認知発達過程を再構成することで、その仕組みの新たな理解や洞察を得ると同時に、発達する人工システムの設計論を得る、構成論的アプローチと呼ばれる研究手法をとっている。人間の認知に関する統合システム論的理解を提示する科学的価値と、現状の人工知能技術を越え、人間により近い知能を実現する工学的価値の両面が期待される。

近年、製造業の国内生産回帰、労働生産性の向上、ロボット活用領域の拡大を狙って、各国とも次の時代に求められるロボティクスの研究開発を強化している。具体的には、米国政府の Robotics Initiative における人と協働するロボットへの注目、Google、Amazon をはじめとする巨大 IT 企業やスタートアップなどの動きである。欧州でも欧州委員会の AAL (Ambient Assisted Living)、SPARC と呼ばれる官民連携などの取り組みがある。また、各国がしのぎを削って開発を進めている自動運転車もロボティクスの技術の結晶である。ロボットの本質は、センサーとアクチュエーターを知的に統合することであり、状況変化に応じて物理的な効果をもたらす全ての応用分野に適用可能なので、IoT による住環境制御なども含め、ロボットとは見えない場面においてもロボティクスの活用の拡大が見込まれる。

3.4.1 ロボティクスと社会

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

「ロボティクスと社会」は、「ロボット活用コミュニティー創出」に関わるロボティクスをロボット社会実装学として構築する研究開発領域である。

[対象とするロボット、他分野との相違点]

ロボットは機能的には産業用ロボットとサービスロボットに分類することができる。産業用ロボットは、社会へさまざまな製品を送り出す生産性を向上させる20世紀に生まれた最大の道具のひとつである。サービスロボットは、対話案内、物流仕分け支援、インターネットを活用したテレプレゼンス、遠隔手術・診断、義足・義肢ロボットなど、人や社会と共創・共存する道具、システム、サービスであり、今後の発展が期待されている。本稿では、主に、こうした人と共に働くロボットを対象として論じる。

本研究開発領域の特徴は、形と動きをもち、生物や人の機能の一部あるいは全部を実現する機械であるロボットがベースとなることである。人(々)でもできるが、人手不足、長時間労働、単純作業、多地点移動などの体力的・精神的負担を軽減・排除する理由で、ロボットが代行した方が望ましいサービスだけでなく、衛生面、人命(原発被爆、伝染病)、近所関係などで、人ではできないサービスも対象となる。

[イノベーションとロボティクス]

イノベーション(社会変革)を実現する手段は技術革新ばかりでなく、社会制度改革や組織改革なども、その手段である。しかしながら、現在は科学技術イノベーションの時代といわれるように、科学技術により社会変革が成し遂げられることが多く見受けられる。これまでも、社会変革のうち、特に工場における生産革命が、産業用ロボットないしロボット技術により成し遂げられてきた。今後もロボットは社会変革を成し遂げるし、その可能性がより高まっている時代を迎えている。というのは、ロボットは、われわれと同様、形と動きをもち人に身近な存在であることから、今後、われわれ社会やコミュニティーに変革をもたらすことが可能になると予想されるからである。言い方を変えると、社会変革が実現された時に、その背景にロボットないしロボット技術が存在することが多くなる。

ロボットイノベーション(ロボットによる社会変革)は、ロボット技術の側からみれば、ロボット技術の研究開発とその社会実装活動であるが、逆に、変革される社会の側からみれば、ロボットおよびロボット技術により変革された社会の実現活動と位置付けられる。なお、社会の実現には広範囲な事項が含まれるため、ここでは社会の一部であるコミュニティーの実現ととらえて論じる。

つまり、本稿では、ロボットイノベーションに関わるロボティクスを、ロボット活用コミュニティー創出の観点から、ロボット社会実装学として論じる。いいかえると、ロボットによるイノベーションを興すために必要となる、ロボット先端技術課題、社会実装、社会的インパクトの最大化に関わる諸課題を「ロボット社会実装学」として論じる。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(2.1) ロボットの現状

国際ロボット連盟 International Federation of Robotics (IFR) の統計によれば、産業用ロボットとサービスロボットの市場は確実に拡大している¹⁾。2015年の世界市場は産業用ロボットがトップで24万ユニット、市場の約2/3がアジアで14・4百万ユニット、世界で最も成長した地域の一つである欧州は5万ユニット、特に東欧市場の成長が前年度比29ポイントの伸び、次いで北米が3万4000ユニットであった。2015年の生産は、中国、韓国、日本、米国、ドイツの全生産量が2014年比で11ポイントの伸びを示し、全市場の3/4に相当する。2012-2015年では、産業用ロボット市場の最大地域はアジアであり、年間平均で15%伸びており全世界の50%を占める。次いで北米南米を含むアメリカ地域、その次は欧州となっている。アジアの伸びは、アメリカ地区とアフリカを足した年間平均6ポイントの伸びをはるかに超えている。

2015年の専門家向けサービスロボットの世界市場は、2014年より25ポイント伸びて4万1060台、売上額も46億ドルと前年比14ポイント伸びている。中でも物流システムは1万9000台で46ポイント伸びて、売り上げで17ポイント伸びた。今後、2019年までの予測では、物流関連のサービスロボットが、インターネット通販が好調なために、もっと高い伸び率を予測している。これ以外に医療サービスロボットは専門家向け、個人/家族向け、世界市場向けに分類できるが、堅調な需要が続き、ビッグデータのインパクトと、人コンピューターインタラクション、その他の先端技術が繰り返し開発されて、2012年から2017年にサービスロボット市場はこれらの効果を足し合わせると、年間17・4ポイントの伸びをしめ、2017年には461億8000万台に達すると予想されている¹⁾。

2019年には33万3200台のサービスロボットと2310億ドルの市場が生まれると予想されている。中でも物流システムと倉庫内自動案内車の伸びが顕著で、サービスロボット全体の53%に相当する。プロ向け掃除ロボットも主に床掃除を中心に2016年から2019年にかけて1万1700台が市場に出ると見込まれている。医療ロボットもこの期間順調に台数が伸びるとみられている¹⁾。

(2.2) 「ロボティクスと社会」へのアプローチ

ロボティクスと社会という新しい研究開発領域の議論を、ロボットやロボット技術の社会実装に有効なアプローチ、つまり、ロボット活用コミュニティづくりへのアプローチの議論から開始する。

[ロボット活用コミュニティづくりに有効なアプローチ]

ロボットの汎用性を活かしてロボットハードウェアとソフトウェアとその要素が安価で使いやすいプラットフォームという形で市場に提供され、サービス事業者がそれらのロボットプラットフォームを利用して実現されたロボットやロボットサービスの社会実装をすすめる、教育・研究機関が人材育成や社会啓発を担う体制が構築されれば、ロボットの実用化が推進され、ロボット活用コミュニティが実現される。図3-4-2は、ロボット活用コミュニティづくりに有効なアプローチをステークホルダからみた図となっているとともに、ロボット活用コミュニティないしは経済的に持続可能なエコシステムの構成図

にもなっている。ロボット社会実装学の主要なステークホルダとその構成図といえる。

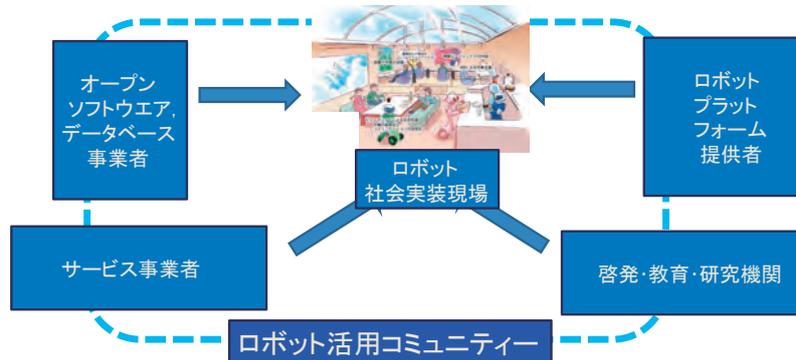


図 3-4-2 ロボット活用コミュニティづくりに有効なアプローチ

[社会共創アプローチ]

一方、ロボット活用コミュニティづくりを、それに有効な活動手法の観点から整理したのが、図 3-4-3 の社会共創アプローチである。

社会共創アプローチの要点は、①アジャイル開発、②社会システムの再設計、③コミュニティ共創、④オープンイノベーション、⑤新学問体系、教育・啓発、人材育成の並行プロセスとしての活動となっている点にある。このアプローチは日本学術会議の第 22 期の『提言：ロボット活用による社会課題解決とそれを支える先端研究の一体的推進方策～社会共創ロボティクス～』²⁾ のなかで提案されている。つまり、ロボット活用による社会課題解決や社会変革を実現するために、利用者、研究開発者、供給者が一体となったオープンイノベーションの枠組み「社会共創ロボティクス」の早急な確立と推進が不可欠であるとしている。その詳細は以下の通りである。

①アジャイル開発

実際の現場での利活用と開発・改良を直結し、迅速にフィードバックと開発・改良のサイクルを回す、いわゆる迅速な開発を実現する手法。

②社会システムの再設計

既存の作業、サービス、事業活動の一部をロボットで置き換えるという発想ではなく、それらの活動全体について、ロボット活用を前提としてシステム全体を見直し、再設計する。より大きなスケールでは、ロボットと人が協働する社会システムを創造することを目指す。

③コミュニティ共創

これらを進めるために、ロボットを利用する現場の当事者や管理者、事業主や出資者、ロボットの研究開発者と供給者、そしてロボットを用いた社会システムや新サービスの研

科学技術開発とその社会実装活動を、
長期密着の社会活動としてコミュニティから行う

社会実装指向アプローチの要点

- ①アジャイル(探索的)開発
- ②社会共創(開発時からのユーザーFB)
- ③社会システムの再設計
- ④オープンイノベーション
(RTMなど、使えるものは使う)
- ⑤啓発・人材育成
(コミュニティ作り+現地NPO等との協力)
コミュニティづくり、社会づくり
からの科学技術研究開発

図 3-4-3 社会共創アプローチ

究開発者と実現主体、ロボットのサービス利用者などが一体となったコミュニティが開発と利活用推進を行う。

④オープンイノベーション

こうした取り組みへの参入障壁を極力低くし、安価な開発ツールやプラットフォームの提供、的確な技術評価や可能性予測の能力を有する投資ファンドの育成、インターネット経由の協働、供給、投資（クラウドファンディング）等を兼ね備えたエコシステムからなるオープンイノベーションにより民間活力を喚起し推進力を確保する。

⑤ 新学問体系、教育・啓発、人材育成

これらの取り組みの方法論や理論的基盤となる、ロボティクスと社会的観点を融合した新たな学問体系の構築。および、人材育成と啓蒙、教育活動（ロボットやロボット技術を社会へ導入することを趣旨とした新しいロボコンなど）。

重要な対象分野の例として、災害・大事故・テロ等の対策、超少子高齢社会における医療と在宅看護・介護、高齢者等の自立生活支援と労働支援、交通や都市等のインフラとその保守、産業競争力強化に向けたフィールド作業や労働集約作業、多様なサービスの生産性と質的向上などがある。

これらの応用を実現するために、ロボットのハードウェアと運動、感覚、知能、コミュニケーション、ネットワーク化などの機能についてもさらなる高度化や革新が重要なことは言うまでもない。

[社会実装アプローチ]

ロボットイノベーションの推進段階を「基礎研究段階」→「応用研究段階」→「製品開発段階」→「ビジネス展開段階」にわけると、基礎研究段階と応用研究段階の間には、死の谷と呼ばれる壁が存在し、製品開発段階とビジネス展開段階の間には、ダーウインの海と呼ばれる障害が存在し、ロボットイノベーションの実現を妨げることが指摘されている。図3-4-4に示したような研究開発と社会実装を並列にすすめる社会実装アプローチをとれば、この壁はなくなると考えられる。

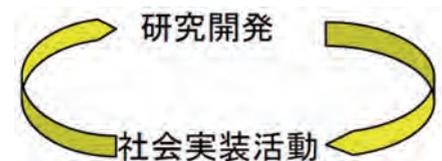


図3-4-4 社会実装アプローチ

このアプローチは、ロボットの研究開発と社会実装開発を並行に進める活動が特長であるが、このアプローチに適した課題作業や作業環境を選択するとともに、その課題解決に適した技術を創出・選択・再利用することが重要である。その活動としては、初期段階からユーザーを取り込んで技術研究開発を実施するのみでなく、その利活用までを社会現場で推進するリビングラボラトリーとでも呼べるような拠点を決めた活動が有効である。この意味で、社会実装アプローチは、これまでのシーズ指向アプローチやニーズ指向アプローチを超えるアプローチとなっている。

[ロボットイノベーションプロセスからのアプローチ]

ロボットによって社会を変革する“ロボットイノベーション”を成し遂げるには、単に科学研究や技術開発を実施していれば事足りるものではない。図3-4-5に示したプロセ

ス群が、それぞれ研究と結びついて並行的に実施されることが必要要件である。それらのプロセス群は、a) グランドデザイン構築プロセス、b) 事業モデル（ビジネスモデル）構築プロセス、c) 技術開発プロセス、d) 前述の a) ～ c) を統合する統合プロセスあるいは統合システム構築プロセス、e) その社会実験プロセス、f) 市場展開・開拓プロセス、g) 啓発・教育プロセスとさらに、h) 関連社会ルール改革プロセスである。以下に個々のプロセスごとに説明する。

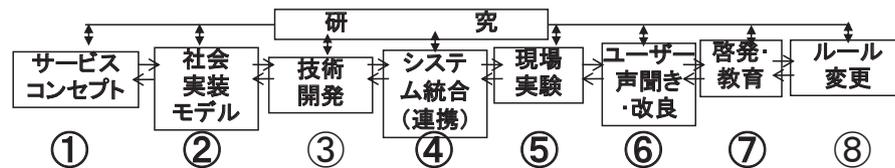


図3-4-5 ロボットイノベーションプロセス

a) グランドデザイン構築プロセス

ロボットイノベーションを実現するには、実現するビジョンを明確にし、グランドデザインとして提示し、それを維持し追求し続けることが不可欠である。このような、最終的に目指す姿が常に明確になっていないと、活動期間中に動機や駆動力を失ったり、方向性を見失ったりしてしまう。

b) 社会実装モデル構築プロセス

ロボットやロボット技術を活用して、人間社会を変化させ、変化を社会へ定着させるためには、ある程度の期間が必要である。最低限その期間中の継続性が維持されることが不可欠であり、資本主義の世の中では、経済的な合理性がないと継続できない。このため、社会への定着を可能とするビジネスモデルないし社会実装モデルが不可欠である。ロボット以外の代案と比べて経済的に合理的というだけでなく、倫理的・法的・社会的課題の観点からみて、利用者だけでなく、それ以外の人々にも受け容れられることが必須である。

c) 技術開発プロセス

科学技術イノベーションを成しとげるうえで、優れた技術がこれを容易にすることは、論をまたない。人が欲しがらるサービスやモノを実現する新しい科学的知見、技術が求められている。ただし、技術開発があれば、それだけで、科学技術イノベーションが成し遂げられるわけではないということも留意すべきである。

d) 統合（インテグレーション）プロセス

グランドデザイン、ビジネスモデル、技術開発は、お互いにかなり異質なものである。これらの互いに異質な要素を統合することでイノベーションをもたらさうるシステムが実現される。こうした異質な要素をひとつのシステムにまとめ上げるために、統合（すり合わせ）が求められる。

e) 社会実験プロセス

統合されたシステムにより社会実験が実施されることになる。社会実験においては、実験フィールドと参画者が重要な役割を果たす。これらを調達し、社会実験を成功させるには、時間も資金もノウハウも必要で、困難も伴うが避けて通れない道である。

f) 市場展開プロセス

社会実験を通じてシステムの市場展開をはかることになる。このプロセスでは、実現システムへの市場展開投資が重要な役割を果たす。

g) 啓発・教育プロセス

宣伝、啓発、教育は、市場展開のみならず、新しい人の参入や若いアイデアでの展開などに不可欠である。

h) 社会システム改革プロセス

社会システムの改革もロボットイノベーション実現のための一要素である。

[イノベーション (社会変革) 実現までの研究段階]

図 3-4-6 は、ロボットイノベーションをその進展段階で分類したものである。おのこの段階の特徴がわかるようにそれが実施される場所、目標、必要とされるマネジメントも示してある。ロボットの研究は、いわゆる Toy World での研究から始まり、実世界、社会へと活動の場を広げてゆく。その段階は、「実験室内で実施される実験室段階 (技術マネジメントが求められる)」→「研究者に好都合な限定された社会 (社会実験マネジメントが求められる) で実施される実証実験段階」→「一般の社会やコミュニティーで実施される社会実装段階 (ロボットの社会実装マネジメントが求められる)」→「広く社会に普及するために実施される普及段階 (社会浸透マネジメントが求められる)」に分けられる。

Toy World	Real World		Society
実験室段階	社会実験段階	社会実装段階	社会普及段階
場所: 実験室内	実験社会	コミュニティー	一般社会
目標: 技術力	継続性	経済性	社会受容性
マネジメント: 技術 マネジメント	社会実験 マネジメント	社会実装 マネジメント	社会浸透 マネジメント

図 3-4-6 ロボットイノベーションの研究段階とそれに求められること

[ロボットイノベーションをそのプロセスと研究段階からみた全体像]

ロボットイノベーションにおいて、このようなおのこの段階に応じた研究開発や活動が、イノベーションプロセスごとに実施される。その状況を一覧マトリクスにしたものが図 3-4-7 である。縦軸にロボットイノベーションの進展の四つの段階を、横軸にロボットイノベーションの八つのプロセス (①～⑧) を、企画、実施、評価、刈り獲りの四つに分類した、4 ×

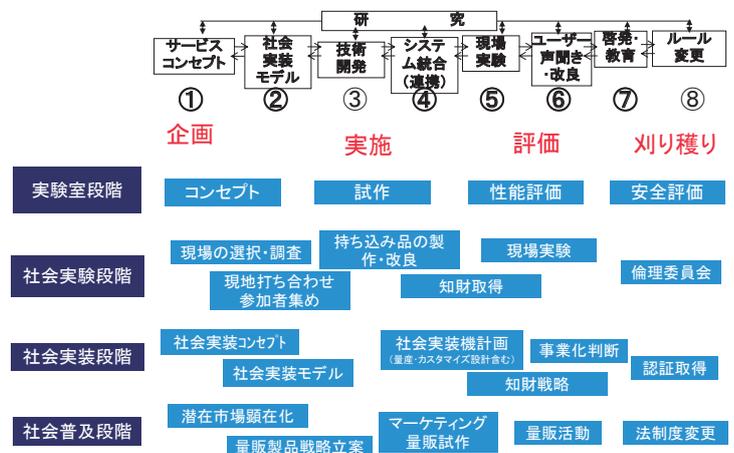


図 3-4-7 ロボットイノベーションをそのプロセスと研究段階からみた全体像

4のマトリックスとなっており、それぞれの対応する部分に実施すべき研究開発や活動を記載したものである。これらは、ロボットイノベーションを段階を追って実現するうえで不可欠の活動であり、それぞれに有効な手法や知識が存在する。この観点からいうと図3-4-7はロボットの社会実装に必要な体系を示したものとなっている。このような体系が“ロボティクスと社会”におけるロボティクスの全体像である。

(3) 注目動向

[産業用ロボット活用コミュニティー創出の例]

最近、その成果が見えるようになってきた、産業用ロボット活用コミュニティー創出の試みを、注目動向として紹介する。このような成功活動事例から、ロボットイノベーションを実現する活動の内容が把握され、それに有効な手法を集積したロボット社会実装学の要素が明確化され、体系化されてゆくと考えられる。

具体的な事例の説明

に入る前に、ロボット実用化に有効なアプローチの詳細な取り組み体制を図3-4-8に示す。

図中で、ハードウェアプラットフォームは右上、ソフトウェアプラットフォームは左上、サービス業者は左下、啓発・教育・研究は右下に配置され、その具体的な内容やステークホルダーが書き込まれている。また、中央の縦線は、ロボット活用現場であり、産業用ロボット分野、生活支援分野、災害対応分野の典型的な事例が示してある。その上で、これらの現場におけるプラットフォームやサービス事業者、啓発・教育・研究との連携のある部分(接点のある部分)を「●」印で示してある。これらの連携を主導するのが、産業用ロボット分野においてはシステムインテグレータであり、生活支援分野ではシニアコンシェルジュ、災害対応分野では、システムエンジニアということになる。この図で示した体制のロボット活用コミュニティーの形成や、エコシステムの構築を推進することが、これからのロボット実用化において不可欠な事項である。

相模原市では、図3-4-9に示す体制が構築され、産業用ロボットの普及活動が推進されている。同市では、ロボットメーカーやソフトウェアハウスが、ロボットプラットフォームとしてのハードウェアやソフトウェアを提供するとともに、治具を製作している生産機器メーカーが市や市が雇用したコーディネーターと連携しつつロボット導入を希望する事業所に産業用ロボットを納入しており、その際に金融機関などがロボット導入を希望して

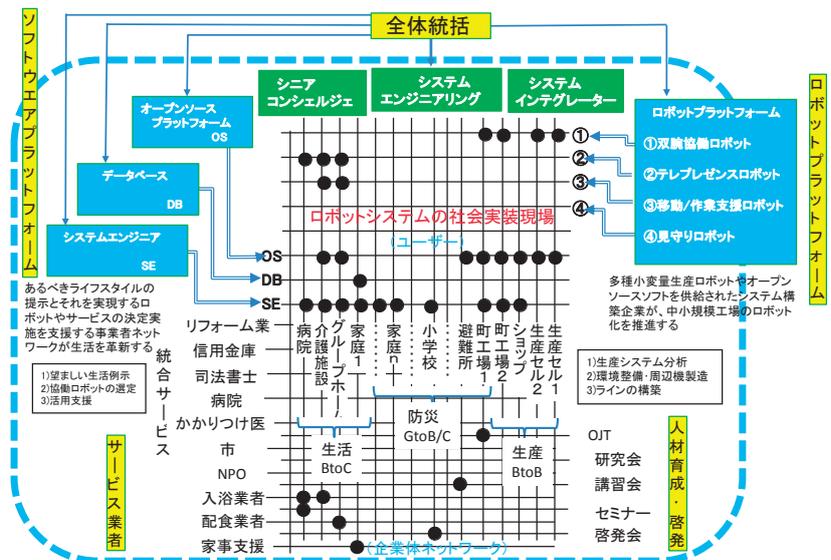


図3-4-8 ロボット活用コミュニティーづくりの詳細図

いる事業所の調査にあたること
が実現されている。また、コミュニ
ティ創出のレベルまでは達
していないが、その端緒は切り
拓かれている。

同市で実現されている産業用
ロボット導入のプロセスを図
3-4-10に示す。

金融機関（地方銀行や信用金
庫）が、ロボットの知識を持つ
コーディネーターや市の職員と
連携をとりながら、産業用ロ
ボットの潜在市場であるさまざ
まな事業所を調査し、可能性が
ある場合には、導入プロセスに
移っていく。金融機関が潜在市
場であるさまざまな事業所を調
査できる理由は、地方銀行や信
用金庫にとって地域の事業所は
融資などの金融業務の重要な
ターゲットであり、また、地域
変革の担い手として投資の対象
となるからである。地域の事業
所に常にコンタクトをとり、情
報交換することが銀行業務に
とって不可欠なのである。こう

した事業者は、必ずしもロボットの知識を持たないことが問題となるが、ロボット技術に詳しいコーディネーターと連携したり、啓発教育を受けたりすることで克服できる場合がある。

一方で、産業用ロボットの導入は、基本的にはSIerが受け持つ仕事であるが、現実には地域に十分な質と量をもったSIerが存在するわけではない。その育成が重要課題となるが、同市ではSIer育成を次のような手順で実現している。例えば、ロボット分野に進出したい自動機器メーカーとロボット分野に専門性を持ちたいソフトウェアハウスがSIerチームを結成し、大学などの研究機関からロボットシステムやソフトウェアの手ほどきを受けながら事業所への産業用ロボット導入活動を実現する。

このようにして、同市では産業用ロボットの導入をさまざまな補助金やプロジェクト支援を受けて推進している。具体的には、経済産業省のロボット導入実証事業、ロボット活用型市場化適用技術開発プロジェクト、次世代ロボット中核技術開発、地域活性化・地域住民生活等緊急支援交付金を活用して、産業用ロボットのロングテール市場の銀行による掘り起こしから治具メーカーを取り込んだロボット導入体制の構築まで、さまざまなレベルの工場への産業ロボット導入までの一貫した取り組みがなされている。こうした体制が、

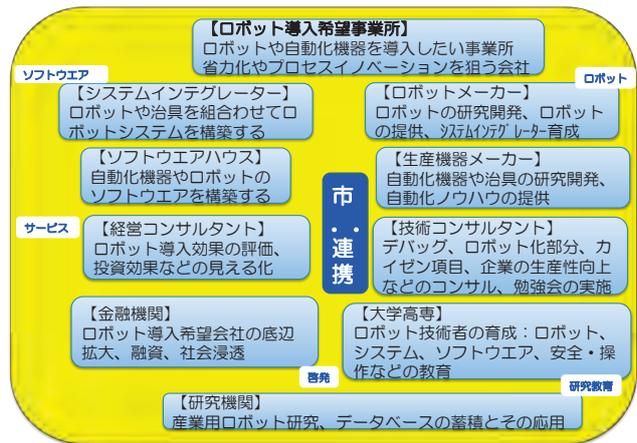


図 3-4-9 神奈川県相模原市の産業用ロボット導入プロジェクト体制

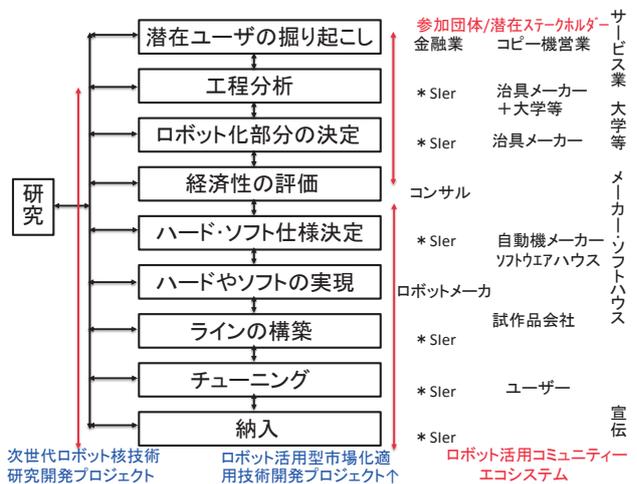


図 3-4-10 産業用ロボット社会実装プロセスと様々なステークホルダー

今後も維持され、拡大して行くことで、産業用ロボット導入のためのエコシステムにつながってゆく。

(4) 科学技術的課題

(4.1) 倫理的・法的・社会的課題の検討

ロボットイノベーションを成し遂げるために、科学技術的な視点と同様に、これまで欠如していた最も大事な視点は、倫理的・法的・社会的課題 (ELSI: Ethical, Legal and Social Issues) に関する検討である⁴⁾。

(4.2) イノベーションの推進段階を踏まえた課題

[科学技術イノベーションプロセス]

科学技術による社会変革 (科学技術イノベーション) を実現するには、図 3-4-5 に示したプロセスが全ての研究を結びつけて実施される必要があることは前述した。それらのプロセスは、①コンセプトづくり、②社会実装モデル構築、③技術開発、④統合、⑤社会実験、⑥改良、⑦啓発、⑧規則生成変革の各プロセスである。

[科学技術イノベーション実現への段階]

一方、科学技術イノベーションは、次の四つの展開段階を経ることも前述 (図 3-4-6) した。それらは、I) 実験室段階、II) 実証実験段階、III) 社会実装段階、IV) 社会普及段階である。具体的に説明すると、第 I 段階の実験室段階では、実験室において研究が構想され、試作機が実現・評価される。それに続く、第 II 段階の実証実験段階では、実現された試作機が、特定の限定された社会現場 (実験社会) に導入され、社会実験を通じて科学技術研究が洗練される。

[社会実装活動の 4 × 8 マトリクス分析]

前述した①～⑧の 8 プロセスを横軸にとり、I)、II)、III)、IV) の四つの段階を縦軸にとり、科学技術イノベーション活動をマトリクス表現し、それぞれのマトリクスの要素の活動として実施される主な活動内容を書き込んだ (図 3-4-11)。

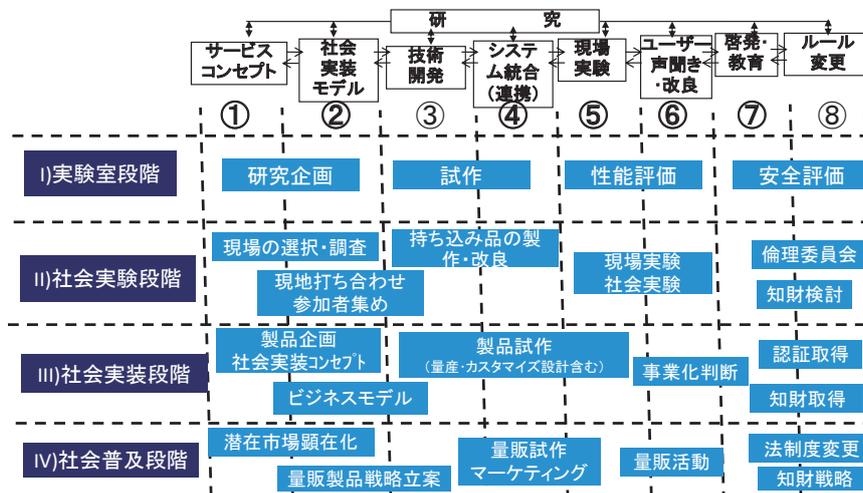


図 3-4-11 科学技術イノベーションの各プロセス・段階における主な活動

[科学技術イノベーションに有効な手法の体系化]

科学技術イノベーションを実現するための活動において、有効に活用できる手法を整理したものが図3-4-12である。このおのおのの知見が、ロボット社会実装学を構成し、それぞれの項目の研究開発が、今後追求されねばならない科学技術的課題である。

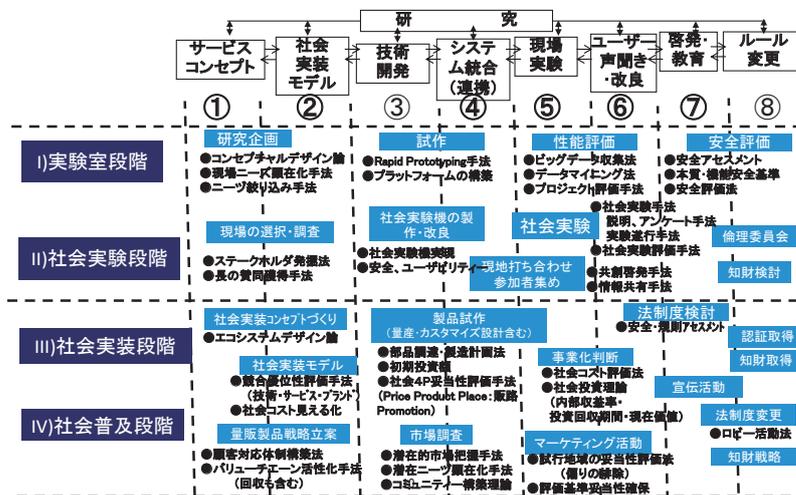


図3-4-12 科学技術イノベーションの各プロセス・段階マトリクス整理

(5) 政策的課題

ロボット社会実装学の研究開発を推進する上で考慮しなければならない点に、本領域は、本質的に産官学連携、府省連携がその根底にあることである。民のみで完結する世界でないこと、官に関しても縦割りの省庁のみでは不十分である。ロボティクスと社会という研究領域の研究を推進するうえでは、必然的に、文部科学省、経済産業省、厚生労働省、国土交通省、農林水産省、外務省などの府省連携とそれに加えて民間との連携が求められる。

(6) キーワード

●ロボティクスと社会

ロボティクスと社会は、ロボットイノベーション（ロボットによる社会変革）を成し遂げることを目標とし、ロボット活用コミュニティ創出に関わるロボティクスを、ロボット社会実装学として構築する研究開発領域である。

●ロボット活用コミュニティ創出

ロボット活用コミュニティ創出活動は、ロボットイノベーション活動と等価である。その理由は、以下の通り。ロボットイノベーションは、ロボットに関する科学技術（ロボティクス）により社会を変革する活動であるが、科学技術の側から表現すると、「社会変革をひきおこすロボティクスの追求活動」であり、社会の側から表現すると「ロボティクスによる変革社会の創出活動」である。

●社会共創アプローチ

利用者、研究開発者、供給者が一体となったオープンイノベーションの枠組みで、社会課題解決や社会変革を実現するアプローチ。

●社会実装アプローチ

研究開発を実施してからその社会実装をはかる直列的なアプローチでなく、研究開発と社会実装を並列的に実施するアプローチ。

(7) 国際比較

ロボットイノベーションを成し遂げるために、多くのロボティクス関連の科学技術研究が実施されている。また、ロボットの社会受容性に関する研究も欧州を中心に実施されている。その概要を下表に整理する。いずれの国においても、科学技術研究が中心で、ロボット活用コミュニティ創出という観点での（4）で述べたような科学技術的課題に、体系的に取り組んでいる例は見当たらない。

その一方で、ロボットイノベーションの成功例が、米国のシリコンバレー、ボストン、ピッツバーグのエリア、デンマークやオーストラリアにおいて、運搬ロボット、医療ロボット、軍用ロボット、介護ロボットなどで見受けられる。持続可能なエコシステム構築も含めた観点で、その一部を概説する。これらの事例が、なぜ成功したのかの解明研究、効果的な手法抽出研究をはじめ、その他の地域における適用を効果的に実施することを可能にするプロジェクト管理に関する研究などが、これらの成功事例を世界に広めるために求められている。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> AI、ビッグデータ、ロボティクスが融合したロボット研究プロジェクトが立ち上がっている（NEDO: 次世代人工知能・ロボット中核技術開発、総務省:SCOPE スマートネットワークロボット、JST: ERATO 石黒プロジェクト、CREST「知的情報処理」や「人工知能」など）³⁾
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ロボット基盤となるラピッド開発のためのマイクロエレクトロニクス、パワーエレクトロニクス、センサー、自動化技術、その他のハイエンド技術の領域で、世界のブランドとリーダーである ファナック、不二越、川崎重工、その他のブランド力ある企業が製造業の国際競争力を増している¹⁾ 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）インフラ維持管理・更新・マネジメント技術、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などフィールドロボティクスに重点³⁾ ロボット活用型市場化適用技術開発プロジェクトでロボットの社会実装を進めている³⁾
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 1960年代からAI研究拠点設置が進展。同時期に基礎研究体制も整備⁶⁾ オバマ政権のイノベーション戦略でロボティクス、高度製造業、コネクテッド・カーを優先分野に位置づけ、研究開発・実証実験を支援⁶⁾ CS分野の人材育成、雇用促進政策を実施し、産業構造転換を支援 関連基礎研究分野としてBRAINイニシアチブが注目されている⁶⁾ トヨタがGoogle・Shaft、Boston Dynamicsを買収し、シリコンバレーにAI研究所を設置⁶⁾
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> DARPA Grand Challengeは一段落。NSFなどで応用研究が進展⁶⁾ コネクテッド・カーなどAI活用型の製品・サービスが既に市場に投入されており、自動運転のリスク対策・セキュリティ強化のための安全基準の策定など、具体的な対策を実施する段階に入っている⁶⁾ 2012年から毎年開催の「We Robotカンファレンス」では、ロボットの利用拡大が社会に与える影響を法的・経済的・社会的観点で議論⁶⁾

欧州	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・2010年に開始したデジタル・アジェンダにロボティクス等のAI関連領域があり、「FP7」や「Horizon2020」の枠組みで、研究開発を支援。基礎研究に加えて産官学が参画する連携も促進⁶⁾ ・FP7のRoboLaw(2012-2014)で、自動運転車、手術ロボット、義手・義足ロボット、介護ロボットについて、ロボット技術の発展が社会規範、人々の価値観、社会的行動に与える影響を想定し、欧州がロボット技術で主導権を取ることが必要であること、柔軟な規制方式であるソフト・ローによる規律が望ましいこと、個人情報・人権の尊重が求められること、倫理的な見地から法規制を行うべきであることを提言⁶⁾ ・EU議会でもELSIに関する委員会が議論を進めている⁶⁾
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・FP7のECHORD++で自治体とベンチャーを含む企業・大学が連携したUrban Roboticsの分野でスマートシティーを目指している⁵⁾ ・英国:ビジネス・イノベーション技能省が研究開発費を公的研究組織や大学等に交付。AI関連領域としてはロボット分野を支援⁶⁾ ・フランス:R&D、ベンチャー支援、地域経済活性化など、複数の支援計画で、AI関連領域であるコネクテッド・オブジェクト、ロボット分野等を重点分野とした⁶⁾ ・ドイツ:AI関連領域として、Industrie 4.0、スマート・デバイス、自律技術、3D、ビッグデータ、クラウド・コンピューティングの基礎研究・応用研究を推進⁶⁾
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・2020年までに次世代ロボットの核心技術のブレークスルーを目指す¹⁾ ・コア技術に関する独自の成果と革新的理念に欠けており、精密減速機、サーボモータ、サーボドライブ、コントローラなど基幹部品の技術格差が特に顕在化しており、長期的に輸入に依存¹⁾
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・2015年に国務院は「中国製造2025」を公布、中国のロボット産業の発展方針と技術的ロードマップを明確にした。2020年までに15カ所前後、2025年までに40カ所前後の製造業イノベーションセンターを形成する目標¹⁾ ・産業用ロボットの生産は2013年より3年連続世界一。産業用ロボットに対する補助金政策により、産業用ロボット関連企業に対する製造現地化の誘致や優遇、コア構成デバイスの国内開発・製造を推進¹⁾ ・2016年に工情部は「ロボット産業発展計画(2016～2020)」を公布、ロボット産業発展の5カ年計画全体目標およびロボット産業体系の形成を掲げた¹⁾ ・サービスロボットは育成期に入った。産業用ロボットは環渤海、長江デルタ、珠江デルタと中西部の四大産業集積区を形成した¹⁾
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・2015年米国DARPA Robotics Challengeで韓国科学技術院(KAIST)によって開発された二足歩行人型ロボット『HUBO+(DRC-HUBO)』が全ての課題に成功し、最高タイムで優勝¹⁾
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・韓国政府が柔軟な動きを持つ「ソフトロボット」の開発に最大7年間で125億ウォン(約12億円)を投資¹⁾

(注1) フェーズ

基礎研究フェーズ: 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ: 研究・技術開発(プロトタイプの開発含む)のレベル

(注2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(注3) トレンド

↑: 上昇傾向、→: 現状維持、↓: 下降傾向

●ロボットによる社会変革を成し遂げるための各国の取り組み⁶⁾

[米国]

米国シリコンバレーでは下記のような特徴的なステークホルダーを持つロボット実用化エコシステムが構築されている⁷⁾。

○ロボット・スタートアップ

スタートアップとは、「新規ビジネスで急成長し、市場開拓フェーズにある企業」

を指す。米国では、The Robot Report というウェブサイトが世界中のスタートアップの情報を集めており、このサイトによると、シリコンバレーやボストン、ピッツバーグ、アトランタに多くのスタートアップが存在する。中でも、シリコンバレー周辺には、図3-4-13のとおり、ロボット開発に取り組むスタート

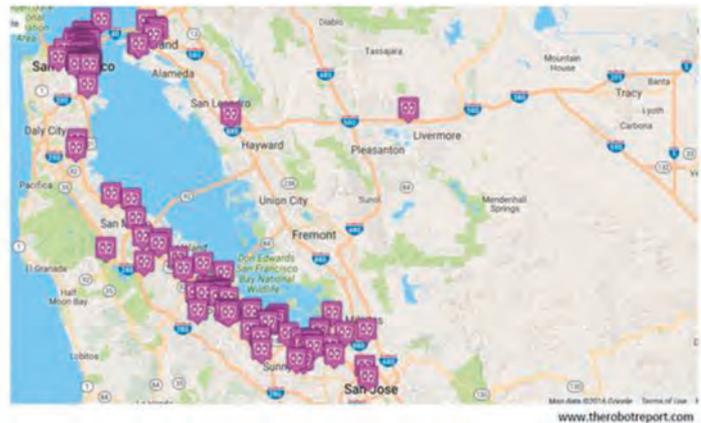


図3-4-13 シリコンバレー周辺に存在する
ロボット・スタートアップの分布

アップが多い。技術を非公開にしておくことを目的として意図的に表に出てこないスタートアップも存在するため正確な企業数は不明であるが、シリコンバレーだけで約100社存在すると言われている。

シリコンバレーには先駆的にロボットを研究開発した Willow Garage 社という有名企業があり、この企業の閉鎖を機にロボット技術に関して優秀な人材がシリコンバレーの各社に散ったと言われている。これらの企業を含め、シリコンバレーにはソフトウェア開発からロボット開発に移行した企業が多い。現在は、①自走技術、②ビジョンテクノロジー（対象物を3次元で認識するための技術）、③インターフェース（スマホのように簡単にロボットを操作するための技術）の三つが、シリコンバレーにおけるロボット技術のキーワードと言われている。実用化が進んでいる自律搬送ロボットの事例を紹介すると、最初に倉庫やホテル、病院、老人ホーム、学校等、想定される各用途におけるニーズを掘り起こし、ビジネスとして成り立つ見込みのある用途に特化して製品開発する手法をとっている。日本は、こういったニーズ・ファインディングや市場の絞り込みの面でアメリカに劣っている。

投資側であるベンチャー・キャピタルについても、従来のソフトウェア開発だけではなくハードウェア開発にも関心を持ち始めており、近年、ロボット開発企業への投資が盛んになってきている。さらに、後述するハードウェア・アクセラレーターやクラウドファンディングによる投資も加わり、ロボット開発企業への投資額は急激な増加傾向にある。シリコンバレーのスタートアップには、生活支援ロボットや医療ロボットを開発する企業が多く、実用化されている商品も多い。

○アクセラレーター、企業投資、クラウドファンディング

シリコンバレーでは、一昔前にはベンチャー・キャピタルと企業の2者によって成り立っているとされていたが、ベンチャー・キャピタル間の情報網は閉鎖的でありその資金だけでは不足することから、アクセラレーター等、別の仕組みを担う投資機関が生まれた。

アクセラレーターとはスタートアップの事業化を支援する事業者である。特にハードウェアの開発では、ソフトウェア開発に比べ多くの資金が必要であることや、試作を経て製造まで結びつける必要があること等、事業化に多くの課題があるため（図

3-4-14)、その課題解決をサポートするハードウェア・アクセラレーターという事業者が存在する。ハードウェア・アクセラレーターでは、一般的に、10～15社の技術者が入る仕事場を提供され約3カ月にわたって専門教育を受けることができ、設計、マーケティング、法律、広報等、事業化のために必要な多くのことについて約100人いる専門家に相談することができる。また、未公開株7%程度と引き換えに10万～15万ドルの資金提供を受けることができ、3か月の教育プログラムの終了後には、投資家に対して約10分間でビジネス、製品、技術力等についてプレゼンテーションをする場が設けられ、投資を受けるチャンスが与えられる。

その他に、クラウドファンディングという仕組みも有効に機能している。クラウドファンディングとは、企業がインターネット等を通してプレゼンテーションをし、製品を安く売ると約束するなどして資金を募る仕組みである。

○ロボット人材の創出、教育の背景

シリコンバレーのエコシステムの特徴の一つとして、シリコンバレーロボティクスというNPOが開催するミーティング、セミナー、パーティー等、地元の交流会が盛んであることが挙げられる。ロボットに限らずアメリカ人は交流会の開催を好む傾向があり、中学生からNASAの研究者まで多くの人が展示、参加している。

ロボット人材の創出に寄与する取組の中では、「ファースト」という全米ロボットコンテストが有名である。毎年開催されており、小学生コース、中学生コース、高校生コース等がある。参加費だけで約8000ドルも要するため、多くの学生は寄付を募って参加している。この費用調達プロセスは企業の資金調達のプロセスと類似しており、技術PR、広報、マネジメント等、起業のリハーサルと言えるものになっている。また、親が手助けして良いというルールがあるため、特にシリコンバレーではNASAやスタンフォード大学の関係者が多く、専門家に近い人材がアドバイスしており、ハイレベルなチームが出場する。大学にとっては青田買いの場となっており、今年は3200チームが出場した。

[欧州連合]

ロボット社会実装の成功例として、FP7プロジェクトECHORD++プロジェクトのUrban Robotics (都市型ロボティクス) によるスマートシティ作り⁵⁾が知られている。欧州の複数の自治体にロボットサービスを必要とする社会問題を挙げてもらい、その中からバルセロナ市などを中心として社会問題の洗い出しとしかるべきベンチャーや企業をプロデュースする機能も持ち得た対策が取られている⁵⁾。

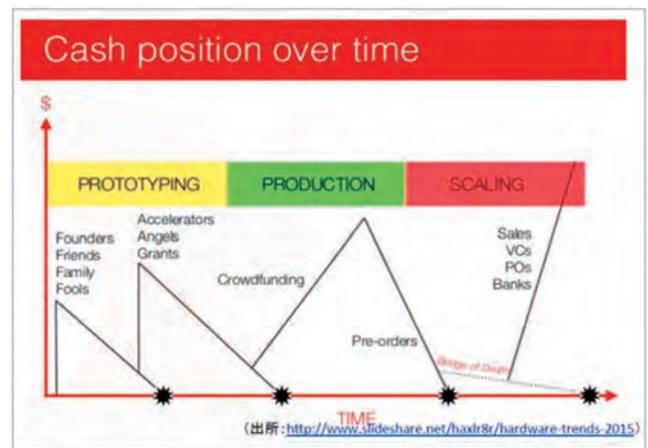


図 3-4-14 ハードウェア開発が実用化に至るまでのハードル

[デンマーク]

○デンマークで福祉技術が積極的に展開される背景⁸⁾

福祉分野においてロボット化が推進されている理由としては、高齢化による労働者不足の解消と福祉におけるサービス品質の向上の二つが挙げられる。デンマークでは、日本と同様に高齢化が進んでおり、医療・福祉分野においても労働力不足が深刻になっている。65歳以上の人口の割合は16.5%であり、日本(26.7%)と比べると深刻ではないが、公務員の全人口に占める割合は日本の7%に比べ、28%と顕著に高い。一方、デンマークにおける福祉に対する考え方の根本に、「自立」がある。自宅の庭の手入れを自分でしたい、友人や社会とつながりのある仕事を持ちたい、自立して買い物に行きたい、若いときのように自転車に乗りたい、福祉施設から自宅に戻りたいなど、高齢者が健康的で能動的な、意味のある人生を送るために必要な福祉技術が導入されている。具体的には、高齢者自身の能力を回復、開発、維持(広い意味でのリハビリ)するための、センサーおむつや遠隔治療ロボットなどである。また、福祉現場の労働環境の改善や魅力的な雇用の創出など、サービスを「提供する側」の視点に立った技術導入も行っている。

このように、デンマークは社会福祉先進国として高齢化社会に対応するために、高齢者などの自立を支援するロボットや福祉労働現場を改善するロボットに関する技術を積極的に導入していると考えられる。

○オーデンセ市の事例から見る先進福祉技術導入の取り組みと評価方法について

・オーデンセ市の決断

オーデンセ市では高齢化に加えて、高い失業率、厳しい財務環境、増加する慢性疾患患者などの福祉行政課題が顕在化している。これら課題に対し、福祉サービルのレベルを下げるか、あるいは新しいサービスモデルを創出するかを選択を迫られた。社会保障先進国としてのあり方を議会で議論した結果、「新技術を活用し、新たな価値を創出し、福祉サービスのリストラを行い、新しいアプローチを導入する」改革を実行する方針を打ち出し、2008年から政府が具体的なアクションを取り始めた。その結果、高度なロボット技術を国外から導入するべく、盛んに実証実験などに取り組む結果となっている。

・ホリスティック(全体論的)な評価方法の採用

デンマークでは、以前から「人間」を中心に置いた考え方が浸透しており、製品開発や技術導入の際には、ユーザーの視点に立ったユーザー・ドリブン・イノベーション(UDI)が確立している。UDIでは、革新プロセスにユーザーを巻き込み、ユーザーの経験や知識を啓発して真のニーズを理解し、ユーザーニーズを満たすソリューション開発に注力する。UDIとしての評価方法は、MAST評価方法とも呼ばれ、ロボット技術の導入目的、代替手段との関連性、技術・アプリケーションの成熟度などを検討し、患者の視点、経済上、組織上の視点、社会文化、法的観点などから総合的に分析・評価する。オーデンセ市はさらに、経済性と資源、市民の視点、雇用と組織、技術の性能と機能の4項目からなる独自の評価方法をMAST評価方法に加えた、ホリスティックな評価方法を採用している。例えば、ロボット技術を導入した場合には、労働力削減(Labor Saving)などのポジティブな効果だけでなく、それに伴う雇用

減少などネガティブな影響を広く捉えて公平に評価する方法であり、日本ではこのような観点は欠落しているように感じる。

・コラボレーションラボラトリー

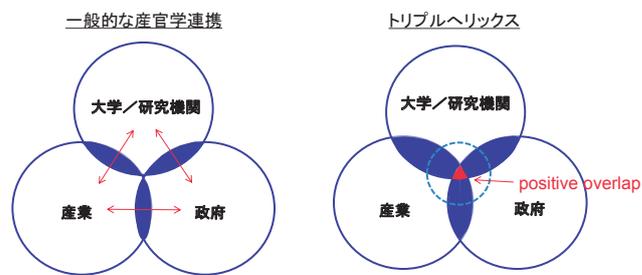
オーデンセ市では、技術開発の初期段階からユーザー、自治体、作業療法士などさまざまな立場の人々に実証実験に立ち合ってもらい、意見を取り入れる体制をとっている。さらに、ヘルスケア分野における課題を早急に評価する「コラボレーションラボラトリー」という先端の評価施設を新しく設立した。企業ごとにカスタマイズされた開発プロセスで、複数機関による横断的な評価や次世代ヘルスケアシステムに適合したテストを受けることができる。自宅、福祉施設、病院、かかりつけ医など異なる環境における評価を互いに関連させながら一度に行うことができるシステムを構築している。オーデンセ市と協力関係にある日本企業にとっては、コラボレーションラボラトリーに加え、病院、大学、行政機関等と広くつながることができ、ユーザーニーズが分かること、新しいアイデアを助言してもらえること、利便性をテストできること、大規模なテストができること、社会実装の支援をしてもらえることなど多様なメリットがある。例えば、ウォッシュレットを導入した場合に、プライバシー保護、感染症予防や労働環境改善になるだけでなく、福祉提供者の作業時間を2分間/回削減することができトータルの労働力削減効果が5100万円と算出された例や、介護士プラットフォームにおける業務管理の最適化や遠隔医療を行った場合に、2013年～2016年の4年間の労働力削減効果が2億5000万円と算出された例がある。

・デンマークが社会実装に成功している要因

福祉ロボットの社会実装に成功している要因は、前述した①人間中心の考え方が浸透していること、②ホリスティックアプローチのような方法論が確立していること、の他に③全員の意見を尊重する産学官の連携システム（トリプルヘリックス）が確立していること、④新規技術を社会に取り入れるシステムが確立していること、および、⑤ロードマップを描ける実行能力の高い人材を有していることが挙げられる。

特に、③トリプルヘリックスについては、日本における産学官連携とは似て非なるものである。具体的には、日本の場合は、図3-4-15の従来型の産学官連携のイメージ図のように産⇄学⇄官の連携が1対1になりがちであるが、デンマークにおけるトリプルヘリックスでは3者全てが連携している。そもそもヘリックスとは「らせん構造」を意味し、トリプルヘリックスにおいては3者が連携していく中で関係性を柔軟に有機的に変えながらうまく機能している。その理由の一つとして、例えば「事務次官と企業の最高技術責任者」のような、複数セクターのトップを経験した人がトリプルヘリックスの中心を担っていることが挙げられる。

また、④社会システムとしては、



出典: The Triple Helix of University-Industry-Government Relations. Loet Leydesdorff ASCoR

図3-4-15 従来型の産学官連携（左）とトリプルヘリックス

インテリジェントパブリックデマンドと呼ばれる、課題を抽出し、本質的な問題を絞り込み、革新チームを編成し、新たなソリューションの導入、の4工程を繰り返す行うプロセスが採用されている。特に、本質的な問題の絞り込みは重要な工程であり、2～5年を費やす。費用と効果のバランスを常にチェックする体制が整っていることも、デンマークが事業化にほとんど失敗しない理由と考えられる。

[オーストラリア]

○ノーリフトの導入とその効果⁹⁾

1998年から看護連盟によってノーリフトポリシーに基づく介護システムが現場に導入され始め、現在に至るまで離職率の低下等、大きな改善効果が見られている。中でも、ビクトリア州都であるメルボルンではノーリフトポリシーが浸透しており、ほぼ全ての介護施設でリフトが使用されている。2002年に発表されたビクトリア州政府の報告によると、リフトの導入は介護職員、被介護者、介護施設経営者の3者にメリットがあるとされている。それぞれのメリットの詳細を以下に記す。

介護職員が被介護者の「持ち上げ」をするには、その体重の大部分を支える必要があるため、職員の腰痛を引き起こす原因となる。「持ち上げ」にリフトを使用することで、職員の肉体的負担は大幅に軽減し、労災申請がおよそ半減(121件→68件)したと報告されている。その結果、職員の休職日数が減少しただけでなく、リフトという各施設共通の機器を導入することで、その使用訓練が一律となり、職員の新人教育での負担が軽減したと報告されている。

一方、被介護者にとっては介護職員によらず同様の介護を受けられるメリットがある。また、皮膚損傷の低減、移乗時の不快感の低減、転倒・転落事故件数の減少の他、寝かせきりによる合併症予防に効果があったと報告されている。

介護施設経営者にとっては、職員の離職率低減に伴い人材不足が解消しただけでなく、統一したケアの提供により介護現場で何が起きているのか把握しやすくなり、インシデントの発見が容易になるといったメリットがあると報告されている。

○オーストラリアと比較した日本の介護現場の現状と将来課題

日本では、昔からマンパワーで解決しようとする考えが根強く残り、オーストラリアの考え方とは対照的である。日本の介護職員6000人を対象にアンケート調査したところ、81～82%の職員が介護に伴う腰痛を経験していることが分かった。腰痛になった場合にはサポーターや湿布で対策しているのが現状で、痛みを職場に伝えても職場環境が改善された例はほとんど無く、18%の職員が体重の重い被介護者の介護を断ったり寝かせきりにしたりすることがあると回答している。被介護者を寝かせきりにすると、次第に身体が硬くなってしまいう「拘縮」という症状が見られるようになり、特に足が拘縮するとオムツ交換の作業が困難になる等の弊害が生じる。また、人力で持ち上げると被介護者の表皮が剥離したり、被介護者の筋疲労が起こったりする等の問題もある。このように、職員の肉体的負担や職場環境、被介護者への身体的ダメージ等、日本の介護現場では多くの課題を抱えていることが、アンケート調査から明らかになっている。

○将来課題

オーストラリアでは国や地方自治体等の行政機関が主体となり、特に在宅介護を重視する介護制度やエコシステムを設けながら、ノーリフトポリシーに基づく介護システムを現場に導入してきている。その背景には、介護職員不足を福祉機器・用具で補う必要性があったことも考えられる。一方、日本では2016年3月に加藤勝信内閣府特命担当大臣がノーリフト導入現場の視察に訪れ、6月に閣議決定された一億総活躍プランにノーリフトが導入されたように、徐々にリフトが介護現場に認知され始めているが、オーストラリアと比較すると遅れている。リフトの使用が介護職員、被介護者、介護施設経営者の3者にとって十分なメリットがあることが、オーストラリアだけでなく日本でも明らかとなっている。今後も地域で無料介護相談を開催する等してノーリフトの普及活動が希求されている。

以上、ロボットによる社会変革の各国における成功事例を紹介してきたが、このようなロボット実用エコシステムの構築に集約される取り組みの体系的記述、成功要因の解明、有効手法の抽出などが、今後のロボットによる社会変革（ロボットイノベーション）、いかにするとロボット活用コミュニティ創出において希求されている。このロボットと社会の中心課題を解決する科学技術をロボット社会実装学として構築する必要がある。

(8) 参考文献

- 1) 国際ロボット連盟 Internation Federation of Robotics (IFR) <http://www.ifr.org/>
- 2) 日本学術会議の第22期の提言、『提言：ロボット活用による社会課題解決とそれを支える先端研究の一体的推進方策～社会共創ロボティクス～』
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-t201-2.pdf>
- 3) 平成28年度補正予算・ロボット関連の平成28年度補正予算・平成29年度予算概算要求について
http://www.jmfrri.gr.jp/content/files/Open/2016/20161028_Robot_yosan/H29robot_yosan_kobetu.pdf
- 4) 堀川、萩田、“ロボット社会実装における倫理的・法的・社会的問題の国内外動向”，電子情報通信学会 CNR 研究会、信学技報、(2017-02)。
- 5) EU FP7 プロジェクト ECHORD++ プロジェクト <http://echord.eu/>
- 6) 欧米における AI ネットワーク化に関連する政策・市場動向
http://www.soumu.go.jp/main_content/000414765.pdf
- 7) 瀧口範子：シリコンバレーにおけるロボット新規事業立ち上げのためのエコシステム，神奈川県産業技術センター 第5回エコシステム研究部会，2016.11.24。
- 8) 中島健祐：デンマークにおける先進福祉技術導入の取組みについて，神奈川県産業技術センター 第1回エコシステム研究部会，2016.5.16。
- 9) 保田淳子：オーストラリアのノーリフトとそのエコシステム，神奈川県産業技術センター 第1回エコシステム研究部会，2016.9.1。

3.4.2 モビリティ・フィールドロボット

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

重要な機能として移動機能を備え、目的となるフィールドで作業を行うロボットの実現と活用を目指す研究開発領域である。不確定な環境での移動や作業の実現が重要な技術的課題であるが、必要なタイミングでロボットを投入できるようにするための信頼性の確保、運用や研究開発サイクルをいかに担保するかといった課題もある。ここでは、インフラ検査・保守、災害調査・レスキュー対応へ適用されるロボット、および海中で稼働するロボットを採り上げる。なお、空中で稼働するロボットは空中ロボットの研究開発領域で採り上げる。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

以下では、①インフラ検査・保守ロボット、建設ロボット、②災害調査・レスキューロボット、③海中ロボットに分けて記載する。

①インフラ検査・保守ロボット、建設ロボット

日本では、現在、建設産業において、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。また、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が急速に老朽化し、インフラの維持管理・更新の作業が急務である。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り、災害発生時には、災害調査や応急復旧が重要となる。これらの問題に対応するため、2013年3月に国土交通省の「建設ロボット技術に関する懇談会」は、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⁾。これらのロボット技術の開発は、上述の社会問題を解決するために急務であり、近年、関連する研究開発プロジェクトが複数立ち上がり、産官学連携で研究開発が進められている。

まず、(1)情報化施工推進戦略に基づく建設機械の自動化について説明する。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現在進められている。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ーに提供し、施工をサポートする油圧ショベルのマシニングガイド技術や、ブルドーザーのブレード制御技術などが開発された³⁾。次の(2)ロボット技術によるインフラの無人点検や補修の高度化については、橋梁点検とトンネル点検を中心に技術開発が進められている。日本には橋梁が約70万橋、トンネルが約1万本あり⁴⁾、5年に一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)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)の主導で進められてきた⁵⁾。例えば、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を用いた橋梁点検システムの開発や、トンネル内を走行するだけでトンネル壁面のヒビや剥離の点検の実施が可能なトンネル点検車の開発が進めら

れてきた。(3) ロボット技術による災害現場調査技術の開発については、主にトンネル災害や土砂災害、火山災害における情報収集を目指した災害調査技術の研究開発が進められている。最近では、トンネル火災に対応可能な防爆仕様の不整地移動ロボットの開発が進められている⁶⁾。また、土砂災害や火山災害対応では、人の進入が困難な領域におけるドローンを用いた調査システムや、ドローンでの運搬が可能な調査用の小型移動ロボットの研究開発が進められている。最後に(4) ロボット技術による応急復旧技術の開発について説明する。1991年の雲仙普賢岳の噴火後、立ち入り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。この無人化施工は、カメラで取得した画像情報を元に油圧ショベルなどの建設機械をオペレーターが遠隔から操縦するものであり、先の福島第一原子力発電所の事故においてがれき撤去作業の際にも活用された。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⁷⁾。

以上の4項目は、具体的な社会的問題を解決するロボット技術であり、現在、数年後の実用化を目指した研究開発が進められているが、これらの技術をさらに向上させるためには基礎研究も重要となる。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、ロボットとオペレーター間の安定した通信を確保するための通信技術に関する研究開発、作業現場の臨場感を遠隔地のオペレーターに伝えるVR技術等を用いた遠隔操作性向上に関する研究、数多くのセンサーや駆動系を必要とする大規模なロボットシステムを、長時間、安定して動作させるためのロボット自身の安全に関する研究が重要となると考えられる。

②災害調査・レスキューロボット

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NBCⁱ⁾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。米国では、2001年にハイジャックされた旅客機が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を積極的に進めている国々では、事故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、開発のみにとどまっており、実運用には至らなかった。2011年の東日本大震災では、陸海空のロボットが実災害現場で使用された。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がれきの調査や遺体の探索が実施された。また、福島第一原子力発電所の事故現場では、無人化施工機械ががれき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、現在でもさまざまなロボットが開

i) Nuclear 核兵器、Biological 生物兵器、Chemical 化学兵器を使用したテロ

発されている。

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、改良につなげるフィードバック体制が可能であった。一方、日本では災害対応のみに用途に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た。

③海中ロボット²⁴⁾

海中ロボットは表 3-4-1 に示すように有索無人機と無索無人機に分類できる。

表 3-4-1 海中ロボットの分類

名称	特徴
有索無人機 (ROV: Remotely Operated Vehicle)	
電力通信ケーブル付き遠隔操縦機	
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	海底に接近して写真撮影
グライダー型	潜降・浮上を繰り返す

電磁波が伝わらない海中では、ロボットとの通信手段はトラブルの多い通信ケーブル(索)をつな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。水深以上の長さを要するケーブル付き遠隔操縦機(有索無人機)は、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 1500 メートル毎秒であり、周波数が高くなると急速に減衰するために 6000 メートルの距離を通信するには数十キロヘルツの周波数帯を用い、Data Rate はせいぜい数千 bps²⁵⁾ で伝送エラー率も高く、高度な遠隔操縦は困難である。従って、ケーブルのない水中機(無索無人機)を深海に展開するには高い自律性が必要であり、自律型海中ロボット(AUV: Autonomous Underwater Robot)と呼ばれる。

有索機は、1980 年代に技術的に発展し、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「テレエグジステンス」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その時代から行われている。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 1 万 1000 メートルまで潜ることのできる ROV「かいこう」を海洋研究開発機構(JAMSTEC)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 2 次ケーブル切断事故が起これ、「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」(3000 メートル級)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。

細径ケーブル遠隔操縦機はデータ通信の光ファイバケーブルのみにより、潜水機と支援船が接続されているので、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、2007年にJAMSTECが開発した「ピカソ」で、深海生物調査に活躍している。

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年に石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）と共同で調査され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220キロメートルの潜航に成功している。しかし、超音波リンクを通じたコマンドに頼っている面が多く、自律性のレベルは低かった。その後、改良が進められ、大型機（長さ10メートル、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²⁶⁾。ホバリング型AUVは海底面直上数メートル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。2010年に東京大学の「Tuna-Sand」が日本海のメタンハイドレート地帯に棲息するベニズワイガニの棲息状況を撮影したのを皮切りに、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、浮力を変化させて上昇下降を行うもので、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、現場に行かなけれ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、その特徴を活かせる海中観測や作業活動においてニッチを得ている。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であり、それらが海中ロボット開発を加速することになる。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に述べる。

(3) 注目動向

①インフラ検査・保守ロボット、建設ロボット

建設ロボットの遠隔操作に関する技術として、スイスのETH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⁸⁾。この装置では、遠隔地にある操作対象の建設機械の姿勢に応じてオペレーターの椅子の姿勢を変動させることができ、臨場感の高い遠隔操作が可能となる。今後、このような研究に近年急速に成

長を遂げている VR 技術なども融合させることでオペレーターに現場の臨場感を与えることが可能となるため遠隔操作の作業効率の向上が期待できる。

また、建設ロボットの研究開発では、無人化施工機械を含め一般の建設機械をベースに遠隔操作や自動制御の研究開発が進められており、移動性能や作業性能については、その機械が有する能力が上限値となる。これに対し、内閣府の ImPACT プロジェクト内のタフ・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重回旋型の 2 本腕を有する建設ロボットを開発し、二つの腕を利用した不整地走行や 2 本腕の協調による複雑な作業の実施などの提案 (図 3-4-16) を行っている⁹⁾。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、2014 年以降、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)⁵⁾ や新エネルギー・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¹⁰⁾、省庁間連携による実用化研究が強力に進められてきた。特にマルチローター機 (ドローン) の性能向上により、ドローンを活用した調査手法の提案が数多く行われ、産学連携の下で研究開発が活発に行われている。



図 3-4-16 二重回旋型の双腕建設ロボット⁹⁾

②災害調査・レスキューロボット

米国では DARPA のロボティクス・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が開催された。これは、ヒューマノイドロボットが車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、世界各国からの参加があり、韓国の大学で開発されたロボットが優勝した。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の下、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 SIP プロジェクトのインフラ維持管理・更新・マネジメント技術¹⁵⁾ が実施されている。また、内閣府が進める ImPACT プロジェクトでは、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¹⁶⁾ が実施されている。さらに、東京オリンピックに合わせて、ロボットオリンピック (国際ロボット競技大会) が開催される予定で、ものづくり、サービス、災害の 3 分野で競技が設けられる予定である。災害分野は「プラント」、「トンネル」、「災害対応規定」の 3 種目で検討が進んでいる。その会場として福島県楢葉町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する構想が進められている。

③海中ロボット (自律型海中ロボット)

2014 年度より開始した「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)」の一課題として「次世代海洋資源調査技術 (通称「海のジパング計画」)」が採り上げられている。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システム開発が設定され、研究開発が進んでいる。これにより2016年11月までに、2台の航行型AUV、1台のホバリング型AUV、2台の無人海面航行ロボット (VMob:Autonomous Virtual Mooring Buoy) が開発され (写真3-4-1)、試験展開が行われている。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。

AUVの最大の弱点は、海底に接近するものの写真・音響撮影するのみであり、「物」を海底から取ってくることができないことである。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行われている。JSTの戦略的創造研究推進事業 (CREST)「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」領域において「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行う自律型海中ロボット部隊の創出」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対象を指定できるシステムの開発が行われている。

上記プロジェクトは、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大規模プログラムとして以下が重要である。

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～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

2) 北極海を含む氷海域で、海氷下の観測を行うことのできる海中ロボット

文部科学省等での検討が行われているが、これらは極めて大型なシステムであり、国家的で重点的な取り組みが必要である。

(4) 科学技術的課題

①インフラ検査・保守ロボット、建設ロボット

不整地や軟弱土壌における移動ロボットの移動技術、フィールドロボットの通信技術、作業現場の臨場感を伝える遠隔操作技術、複雑なロボットシステムの安全性の確保が重要となると考えられる。この中でも特に大きなボトルネックが通信技術である。

フィールドロボットのための遠距離無線通信を安定して確保することは、本領域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) でもあるが、今後、ハード面、ソフト面とも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、フィールドロボットの実用化が大きく進む可能性がある。



写真3-4-1 「海のジバング計画」で開発されたAUV

②災害調査・レスキューロボット

災害現場では、使用可能な情報インフラは限られることを想定しなくてはならない。テンポラリーにロバストな通信インフラを構築することは大きな課題である。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搭載して手繰りだす方式が採られているが、本体重量の増加を招いてしまう。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。有線と無線をうまく使い分けるあるいは併用するなど課題解決が必要である。

また、災害現場でのエネルギー源の確保も大きな問題である。バッテリーに関しても、効率良い（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。小型の無人ヘリは俯瞰的な情報収集には有用であるが、飛行可能時間はバッテリー性能に大きく依存している。

原子力発電所の事故の場合には、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、防塵防水にはじまり防爆や耐放射線性など耐環境性も重要な課題である。

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。オペレーターの負荷を軽減化できるインターフェースの開発が重要である。また、オペレーターの訓練に要する時間的・金銭的コストの削減が可能な操作が容易なシステムの開発も重要である。さらに、未知の不整地環境でも自律的に作業が可能な知能に関する研究開発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。固定センサーやレスキューロボットなどで収集した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。

③海中ロボット（自律型海中ロボット）

自律型海中ロボットが陸上の自律型ロボットと異なる点は次の五つの海・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行けない
- 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) ロボットを海域で稼働させるには支援船、多額の経費、大規模なチームが必要である
- 4) 日本周辺でロボットを稼働させたい海域は、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

こうした困難さのうち、1) を取り除くには、十分な準備と海での実績が必要だが、3) と 4) のために簡単には実現できない。深海はいまだに「探検」の世界であり、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避けねばならない。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説明しなければならない。そのためには、実績が必要であるが、実績を作るためにも同じ3) が必要である。すなわち、なかなか3) を克服できない。「運よく」研究費を獲得し、海域へと出動しても、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の向上
- 2) ロボットの小型化
- 3) 複数ロボットの同時展開ができる
- 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ステム作り

が必要である。それに基づいて、(3) 注目動向の最後に示した二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。

(5) 政策的課題

①インフラ検査・保守ロボット、建設ロボット

上記(4) 科学技術的課題でも触れたが、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規制という制約が存在する。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月に総務省は移動体を対象とした2.4ギガヘルツ帯、5.7ギガヘルツ帯、169メガヘルツ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¹¹⁾。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、今後もフィールドロボットを活用するため、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。

②災害調査・レスキューロボット

50年に一度程度しか起こらないような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、政府主導で開発研究を加速させる必要がある。

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。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、活動予算に関しても直後からの支援は重要である。

東海村 JCO 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。

海外からの支援を受け入れる場合に、協調活動がスムーズに進むように、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標準化しておく必要がある。

③海中ロボット

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、通例「世界で一番」が必要とされている。そこで、世界で一番「大きい」「深い」「遠くまで」など、重厚長大主義的提案がまかり通ることになる。これは、(4) 科学技術的課題の最後に述べた四つの必要項目とは向かっていく方向が違う。したがって、重厚長大ではない「世界で一番」を主張するような課題を採択できる仕組みをつくるのが政策的に重要である。(3) 注目動向で述べた海のジパング計画では、(4) 科学技術的課題の 1) ~ 3) が重要課題に挙げられており好ましい。

完成し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月に申請書を提出して採択されると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提出すると次の潜航は最初の潜航の2年後になる。このような極めて遅い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、研究船の大型化に伴って、公募航海日数が減っている。大型船は、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おり、大型の研究船だけに頼らない機器開発ができる政策転換が必要である。

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、という残念な結果をもたらすことになる。海という過酷な現場で稼働するロボットを作るには、その利用を促進する政策的な取り組みが不可欠である。

(6) キーワード

①インフラ検査・保守ロボット、建設ロボット

遠隔操作、臨場感、移動体通信

②災害調査・レスキューロボット

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、ユーザー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海中ロボット

自律型ロボット、探検、サポート体制、政府調達

(7) 国際比較

表中の丸数字は、①インフラ検査・保守ロボット、建設ロボット、②災害調査・レスキューロボット、③海中ロボットに対応する。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	①○ ②◎ ③○	①→ ②→ ③↘	①不整地移動に関する基礎研究、遠隔操作性向上に関する基礎研究、ロボット運用の際の安全に関する基礎研究は全般に成果が出ている ②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 ③文部科学省プログラム「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、プログラムが終了する2017年度以降が見えていない
	応用研究・開発	①◎ ②○ ③○	①↑ ②→ ③→	①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 ¹⁰⁾ ②近年、ImPACT、SIP など出ロ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 ③「海のジパング計画」を通じて応用研究がなされている
米国	基礎研究	①○ ②◎ ③◎	①→ ②↑ ③→	①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 ¹²⁾ や NASA ジェット推進研究所ならびにカリフォルニア工科大学のグループが高い成果を挙げている ②DARPA の Robotics Challenge ^{18),19)} 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の基礎研究が行われている。Boston Dynamics 社 ²⁰⁾ の BigDog はその好例である ③海軍研究局 (ONR) の Funding、米国海洋大気庁の Sea Grant の推進など、基礎研究へのファンディングが継続的に実施されている
	応用研究・開発	①○ ②◎ ③◎	①→ ②→ ③↑	①ブルドーザー、グレーダー、油圧ショベルなどの自動制御の建設機械については、日本と同等（またはそれ以上）に実用化が進められている ¹³⁾ ②DARPA 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 ²¹⁾ のルンバはその好例である ③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が上昇
欧州	基礎研究	①△ ②○ ③○	①→ ②→ ③↑	①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 ⁸⁾ 。それ以外、顕著な成果が認められない ②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 ③Southampton 大学を中心に英国は特に力を入れている。スペインやポルトガルも参入し、研究活動は盛ん
	応用研究・開発	①○ ②○ ③◎	①→ ②→ ③↑	①ブルドーザー、グレーダー、油圧ショベルなどの自動制御の建設機械については、日本と同等（またはそれ以上）に実用化が進められている ¹⁴⁾ ②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。また、Horizon 2020 ¹⁷⁾ で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 ③商用の AUV や ROV を使った新たな活動が盛んになっている。ノルウェーの Kongsberg は民間の中心
中国	基礎研究	①- ②△ ③△	①- ②→ ③→	①- ②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、災害対応分野のロボット技術の基礎研究はそれほど進んでいない ③国が海洋に注目しており、それに伴い大学が積極的な研究開発を行うようになってきた
	応用研究・開発	①- ②○ ③◎	①- ②↑ ③↑	①- ②災害対応を直接のターゲットとしているわけではないが、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 ③7000メートル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示している。新たな海洋調査船を就航させている

韓国	基礎研究	①- ②○ ③×	①- ②→ ③↓	①- ② DARPA の Robotics Challenge 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 ③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	①- ②△ ③△	①- ②↑ ③→	①- ②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 ③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

(注1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(注2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(注3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

①インフラ検査・保守ロボット、建設ロボット

- 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>
- 2) 国土交通省, "情報化施工推進戦略"
<http://www.mlit.go.jp/common/000993270.pdf>
- 3) 建山和由, 横山隆明. "ICTを利用した建設施工の高度化と将来展望." 計測と制御 55.6 (2016): 477-482.
- 4) 国土交通省, "道路構造物の現状"
http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1_1.pdf
- 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, Volume 71, Issue 4, pp. 42595, (2016)
- 6) 大西献, 宿谷光司, 岡崎弘祥, 小堀周平, 村角謙一, 久川恭平, "トンネル災害時の引火性ガス雰囲気内探査ロボットの開発 (NEDOインフラ対応ロボット開発プロジェクト)", 第16回システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp.2543-2546 (2015).
- 7) 植木睦央, 猪原幸司, 北原成郎: 「無人化施工」による災害復旧と今後の取り組みについて, 建設マネジメント技術 2013年6月号, pp.45-53 (2013).
- 8) Marco Hutter et. Al, "IBEX - A Tele-operation and Training Device for Walking Excavators", Proceedings of the 2016 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, pp.48-53 (2016).
- 9) 吉灘裕, 昆陽雅司, 永谷圭司, 山下淳, 野瀬松男, "ImPACT タフ・ロボティクス・チャレンジ (TRC) 建設ロボット実験システム (単腕モデル)", 第34回日本ロボット学会学術講演会予稿集, RSJ2016AC3C2-06 (2016).
- 10) 特集 "次世代社会インフラ用ロボット現場検証の取り組みについて." 日本ロボット

- 学会誌 Vol. 34.No.8, No.9 (2016).
- 11) 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/jigyuu/h28/PDF/0617p1.pdf> (2016).
 - 12) Kohanbash, David, Scott Moreland, and David Wettergreen. "Plowing for rover control on extreme slopes." *Field and Service Robotics*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 399-413 (2014).
 - 13) 椎葉祐士, 建山和由, 宮武一郎, 古屋弘, " 米国における情報化施工の導入環境調査報告." *建設機械施工：一般社団法人日本建設機械施工協会誌：Journal of JCMA 65.7*, pp.21-24 (2013).
 - 14) 山口崇. " 欧州における情報化施工等の状況." *建設機械施工：一般社団法人日本建設機械施工協会誌：journal of JCMA 65.7*, pp.25-28 (2013).
- ②災害調査・レスキューロボット
- 15) SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術
http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/iinkai/meibo/infura_meibo.pdf
 - 16) ImPACT タフ・ロボティクス・チャレンジ
<http://www.jst.go.jp/impact/program/07.html>
 - 17) Horizon 2020
<https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020>
 - 18) DARPA ロボティクス・チャレンジ
<http://www.darpa.mil/program/darpa-robotics-challenge>
<https://ja.wikipedia.org/wiki/DARPA> ロボティクス・チャレンジ
 - 19) NEDO DARPA ロボティクスチャレンジに協力
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100297.html
 - 20) ボストンダイナミクス
<http://www.bostondynamics.com/>
 - 21) i-Robot
<http://www.irobot.com/>
<http://www.irobot.com/About-iRobot/Company-Information/History.aspx>
 - 22) DJI
<https://www.dji.com/jp>
 - 23) International Field Robotics Forum 2016
http://www.ireforum.org/index.php?g_page=intro&m_page=intro02
- ③海中ロボット
- 24) 浦ほか：「海中ロボット」、成山堂書店、1997
 - 25) Benthos Acoustic Modem:
http://teledynebenthos.com/_doc/main/Brochures_Datasheets/Modems_brochure_2013_2014_lo.pdf
 - 26) Hydroid REMUS 6000 AUVs Aid in Discovery of Air France Flight 447 Wreckage:
<https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0238.nsf/AllWeb/FBAE3A993FC33666C125786F00289474?OpenDocument>

3.4.3 空中ロボット

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

空中ロボットとは人の操縦ではなくコンピューターで制御された自律的飛行が可能な飛行ロボットのことであり、小型無人航空機、UAV (Unmanned Aerial Vehicle)、UAS (Unmanned Aerial System)、ドローンとも呼ばれている。空中ロボットは当初は軍事目的で第2次世界大戦前に試験飛行した後、イラク戦争やアフガン戦争で実戦配備された。一方で、携帯電話やスマートフォンの進化の中で、センサー、マイクロプロセッサ等が超小型化・MEMS化され高性能化された恩恵を受けて、数百グラムから数キログラム程度の小型で電動型の自律飛行可能なマルチローターヘリコプターが約10年前に誕生した。これらの空中ロボットは技術的完成度から考察すると安全性や信頼性・耐久性に課題が多く黎明期の段階であったため、これまでは主にホビー用が主力であった。しかし、2016年頃から次第に産業用への利活用が拡大し始め、空の産業革命をもたらすとまで言われるようになってきている。ここでは主に、飛行距離が短距離で数キロメートルまでの農業、インフラ点検、測量、警備、災害対応用途、飛行距離が中距離で数キロメートル～数十キロメートルの物流、宅配用途等の産業用空中ロボットの現在と将来技術を俯瞰する。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

設計に関する研究開発要素として、固定翼、回転翼、これらの複合型 UAV の航空工学的な最適化設計が挙げられる。つまり、飛行距離、飛行速度、滞空時間、ペイロード等の最大化と、消費エネルギー、機体サイズ、重量、騒音の最小化の達成である。電気推進系では、モーター、モータードライバー、プロペラ、バッテリーなどの駆動系とペイロード、機体サイズ、重量、構造等の最適化である。エンジン推進系ではモーター、モータードライバーをエンジンに置き換えれば最適化アプローチは同じである。さらに、可変ピッチと固定ピッチなどパラメータも多岐にわたる。特に、無人の飛行体であり自律制御しやすい機体構造も検討すべきである。静音化も考慮した高出力プロペラの3次元形状もほとんど取り組まれていない。有人航空機に関しては約100年の歴史の中で体系化された設計理論が確立されているが、UAVについては経験則はあるものの設計論が確立されていない。

次に製作に関する研究開発要素がある。空中を飛翔する機体はいかに軽量化するかで性能が決まる。1グラムでも削減するにはどうすべきかという難問と対峙して、軽量化すると剛性が低下するという矛盾する命題を解かなければならず、軽量化と高剛性化の紙一重の戦いである。炭素繊維強化プラスチック (CFRP) が使用されることが多いが、CFRPにも品質には大きな差がある。高品質で信頼性のある機体製作が大きな課題である。

そして、空中ロボットの正確な非線形動的モデリングという課題が依然として研究開発ステージにある。すなわち、ニュートン・オイラーの運動方程式から基本的な式は誘導されるが、個々の空中ロボットの厳密なモデルまでは導出されていない。また、風洞実験などのデータも皆無に近く、ホビー用機体製作の感覚とこれまでの経験則で産業応用機体が設計・製作されている実情がある。空中ロボットは電子工学、制御工学、コンピューターサイエンスを得意とする大学の研究室から誕生しており、航空工学の専門分野から誕生し

ていないことも理由の一つである。次のフェーズとして空中ロボットに航空工学の知見を採り入れることで、飛翔体としての飛躍的な高性能化の可能性がある。羽ばたき翼型の空中ロボットに至っては、大学での研究開発が主体であり実用機は現存していない。胴体運動と羽ばたき運動のモデル化など依然として未解明領域である。

UAV は気象変動の激しい地表から高さ 150 メートル程度までの超低空空間を人の介在しない無人で飛行するという宿命を持っている。現状は天気の良い日のみ UAV は飛行するが、いずれは雨や雪の日、風の強い日も物流ドローンは飛行する必要がある。したがって、UAV 制御技術については高いロバスト性と環境適応性が求められる。現状は試行錯誤のチューニングによる制御器が一般的であるが、6 自由度の運動をとまなう UAV をモデルベースで分散型線形制御を行う方法も実用化されている。さらに、今後は飛行性能と信頼性の向上を目指したモデルベースの階層集中型非線形制御の方法、非線形空力特性も考慮した非線形適応制御法、アクチュエーターの飽和とサンプリングレートの制限、モデリングの不確実性、時変ダイナミクスを考慮したゲインスケジューリング法、さらに先進的なロバスト適応制御、モデル予測制御、バックステッピング、ダイナミックインバージョンベース制御、モデル規範適応制御、およびフォールトトレラント制御が積極的に研究され実装される日も近い。近未来的にはスーパーバイザーの上位システム（ガイダンスシステムもしくはネットワーク型でクラウドシステム）とナビゲーションと下位の制御システムが緊密に連携しながら安全性・信頼性・耐久性を担保していくことになる。

各コンポーネントに目を転じると、推進システムには内燃機関推進と電気推進がある。エンジンに代表される内燃機関は、長時間・長距離・大ペイロード用途に優れているが飛行高度に限界がある。一方、電気推進システムは、エネルギー源としてバッテリー、太陽電池、燃料電池等が使われるが、長時間・長距離・大ペイロード用途への軽量小型高性能化の研究開発が活発である。他方で、不燃性と耐環境性、特に $-20^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ 程度の低温環境下での発電能力が求められている。パワーマネジメントの観点の研究も重要となっている。そして、現状ではホビー用モーターとドライバーが多くを占めているが、高出力で信頼性、耐久性の高い産業用 UAV のモーター、モータードライバーの開発が必要である。

次に、センサーとセンシング、中央演算処理装置 (CPU) と CPU 周辺機器である。慣性計測センサー (IMU: Inertial Measurement Unit) と方位センサー、衛星測位システムと気圧計から拡張カルマンフィルター等を利用した高精度自己位置推定の課題がある。オートパイロットの超小型化・軽量化への命題から、全てのセンサーの MEMS 化による低消費電力化、低ノイズ化と高信頼化、振動と飛行環境の影響を受けない耐環境性が求められている。後述する (4) 科学技術的課題でも解説しているが、現状の UAV はガイダンスシステムの無いナビゲーションと制御システムで飛行している。これは搭載可能な高速演算可能な超小型マイクロプロセッサ CPU が現存しないことが理由である。CPU や周辺メモリーなど半導体産業の進化を待たねばならない側面もあるが、解決策としてクラウドサービスを活用したネットワーク型 UAV として飛行することが考えられるが、その場合には高速通信が肝となる。搭載可能な高性能で超小型のガイダンスボードが実装できるには少なくとも 10 年程度を要すると思われる。

通信技術については、各国の法律的制約がありさまざまであるが、現在使用されている社会インフラの携帯電話基地局との通信、衛星通信、複数 UAV 間通信などにより飛行状

態をモニタリングするというのが一般的である。今後は携帯電話基地局を活用した LTE 回線による高速大容量通信が進化していくと考えられる。この発展型としてアドホック & メッシュネットワーク化と、UAV 運行管理システムや UAV 管制システムからなる UTM (UAV Traffic Management system) が実現される。そして、空域エリアごとに UTM が構築され、通信途絶時には優れた自己修復機能により信頼性の高いネットワーク化と緊急時の応答を行うなどの多様なユースケースで、空中ロボット群の多数機管制制御が可能になる。いずれは有人航空機と無人航空機が共存して統合型管制システム下で安全運航管理する技術開発がなされていくと考えられる。こうした通信のためにドローン専用周波数帯として 5.7 ギガヘルツが総務省から割り当てられたが、小型軽量のデバイスの開発も急務である。実時間軌道計画については、飛行中の LTE 回線によるネットワーク化が必須で、クラウドサービスにより必要な 3 次元地図が実時間でダウンロードできるようにすべきである。この 3 次元地図は、将来的には、社会的共通基盤化もしくは地図サービス会社などから提供されるようになることが望ましい。局所的な天気情報なども同様である。

故障検出技術について、有人航空機ではパイロットが行う重要なミッションをコンピューターが自律的に行うという大変過酷な現状にある。センサー系統、アクチュエーター系統、フライトコントローラ CPU 周辺の故障が想定される。信頼性向上の観点から 2 系統以上の冗長システムが望ましいが、ペイロードの制約の関係からできない場合も多い。この場合は自律的異常診断アルゴリズムを別系統 CPU により実行して FTA (Fault Tolerant Analysis) 解析を行う必要があり、統合型機体健康管理 IVHM (Integrated Vehicle Health Management) システム¹⁾ や不測の事態に対応できる自動緊急対処管理 ACM (Automated Contingency Management) システム¹⁾ 等の開発と実装が求められる。さらに、フォールトトレラント制御技術は必須である。

自律性に関して、緊急の三つの課題がある。一つ目は GPS 電波が受信できない環境下での自律飛行の達成、二つ目は障害物の検知と回避であるセンス & アボイド SAA (Sense and Avoid)、三つ目は風などの外乱環境下で精度の良い着陸性能を目指すピンポイントランディングである。これら三つの技術が時速 50 キロメートル～80 キロメートル程度の飛行速度で実現すれば、空中ロボットの実応用は急速に進展して物流などで利活用され大きな産業化が図られる。さらに、高度な自律性のためには複数の自律的な UAV が相互に通信しながら、協力して個々の状態を制御し、状態情報を交換しながら共通の目的を達成することが必要となる。ネットワーク型 UAV と群れ飛行と呼ばれる UAV スワームが今後普及して行くと考えられる。

マイクロ UAV である MAV (Micro Air Vehicle) の研究開発は数グラムの昆虫サイズを目指している。MAV は極端に小さなペイロードで、電源、センサー、通信システムにかなりの制約があり、空気の粘性による低レイノルズを取り巻く問題に対抗するための研究が必要である。信頼性や耐久性への挑戦が続いている。

(3) 注目動向

現在、UAV はホビー用から産業用へと応用分野を拡大しながら、新産業創出への期待

から世界的な高揚時期に入っている。世界のドローン市場は急速に成長しており、ABI Research によれば 2016 年の 39 億ドルが 2019 年には 90 億ドルに達すると予測²⁾している。ドイツの Drone Industry Insight 社の 2016 年調査³⁾では全世界でドローン産業に係るベンチャー企業数は 711 社で、北米 50%、ヨーロッパ 30%、アジア 9%、オセアニアと中東・アフリカ 3% で、企業規模は平均年数 6.5 年、従業員数 8.3 人となっておりドローン産業はこうしたベンチャー企業によってけん引されていると報告している。

このようなドローンへの期待の社会的背景は、先進国を中心に少子高齢化社会による慢性的な労働力不足、そして、人件費高騰による省力化・無人化の促進と低コスト化、サービスの向上にある。特に、運送系や測量・建設・土木系の分野においては求人倍率が高く深刻な状況に陥っている。宅配ドローンや 3 次元測量、インフラ点検、i-construction などドローンを活用した取り組みは以上のような社会的背景がある。さらに、3 次元空間を自在に飛べない人間の憧れとして、分身としてのドローンにリモートセンシングの役割を託すという側面も多々ある。人が行けない場所での災害調査、精密農業の生育調査、漁場探索、将来的には消火活動や高所危険作業など無限の可能性を秘めたドローンに近未来を想像できる点も重要である。

(4) 科学技術的課題

近年、UAV への期待と可能性が拡大し、ハードウェアやソフトウェアの性能が劇的に改善している。そうしたなかで、飛行前方の障害物を迅速に認識して衝突回避を自律的に行い複雑な環境を認識して飛行経路を自ら生成しながら自律飛行するためには、ガイダンス (G: Guidance)、ナビゲーション (N: Navigation)、制御システム (C: Control) が重要な役割を果たす^{4),5)}。この 3 要素 (GNC) は完全自律制御飛行のためのコア技術であり、自律飛行における頭脳部として今後急速に進化を遂げていくものと思われる。特に、物流・宅配ドローンに見られるように自律制御飛行のレベルが高度化して目視外飛行かつ長距離飛行となると、ガイダンス、ナビゲーション、制御システムが決定的に性能を決めることになる。図 3-4-17 はガイダンス、ナビゲーション、制御システムの関係的模式的に示している。

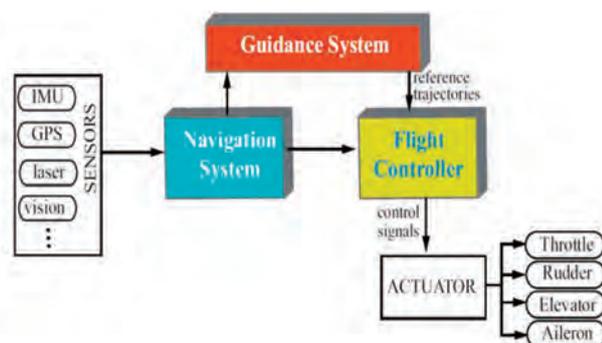


図 3-4-17 ガイダンス、ナビゲーションおよび制御システムの関係^{4),5)}

UAV におけるガイダンスシステムは人間に例えると大脳の役割に似て、認識と知能・判断を担う。複雑な未知環境においても障害物を検出して衝突回避しながら目標軌道をリアルタイムに決めて自律飛行する、いわゆる実時間経路生成を実行する。もし機体に異常

が発生した場合は、飛行継続が可能かどうかを判断して困難であれば、安全な場所を探索しながら地上に帰還するというミッションも含まれるため、高度で瞬時の判断を伴う上級レベルの自律飛行に該当する。有人航空機ではパイロットが担う高度な技術であるが、UAV ではすべてコンピューターが逐次変化する 3 次元空間を認識して飛行経路と高度などを瞬時に決定していく必要がある。現状はガイダンスが全くないかほぼ無いに等しい状態で飛行しており、最も重要な科学技術的課題と言える。当分の間はネットワーク化が不可欠で、クラウドサービスによるガイダンスを受けながら飛行することになる。将来的には搭載した人工知能 (AI) などの支援を得た飛行になるであろう。

ナビゲーションシステムは図 3-4-17 のように IMU、GPS、レーザー、ビジョンなどのさまざまなセンサーデータからカルマンフィルター等を用いて自己位置推定を行い、そのデータを制御システムに伝える役割を担っている。現在の多くの自律飛行可能な UAV はガイダンスシステムの無い、ナビゲーションシステムと制御システムの二つのシステムで Waypoint 飛行と呼ばれる初級的な自律飛行を実現している。ガイダンスが人間の脳であれば、ナビゲーションと制御は人間の小脳に相当しており平衡感覚や運動機能を担っている。先進的なナビゲーションシステムではレーザー、超音波センサー、赤外線センサー、シングル・ステレオカメラ、3D カメラ、ビジョンチップなどを冗長的に搭載してマッピングや障害物検出を行い、自己位置推定の精度を上げている。

制御システムは、ガイダンスシステムから指示されるさまざまな目標値や命令とナビゲーションシステムから伝送される現在の機体の位置、飛行速度、姿勢などをもとに、四つの制御信号を決めてロール、ピッチ、ヨー角速度、スロットルを制御する。

(5) 政策的課題

目視外飛行と第三者上空飛行について、現状では厳しい規制下にある。目視外飛行は原則禁止となっており、特別な許可が無い限り認められない。基本は目視外飛行にならないように監視者を配置することが義務づけられている。さらに困難な課題は、第三者上空飛行である。陸地の上空を飛行する場合は地権者の許可が必要となっている。これは海上においても同様で漁協等の許可が無いと飛行できないことになっている。また、タンカー等が停泊中はタンカー上空の飛行を回避し、航行中の漁船等の上空も原則飛行回避することと定められている。国家戦略特別区が全国に 10 カ所あり、その中でドローン飛行の特区として千葉市が指定されているが、この特区内での飛行においても上記の飛行許可をすべての地権者、漁協から取得する必要がある。したがって、現状では船舶がたくさん行き交う東京湾上空を飛行することは、ほとんど不可能な状況になっている。この目視外飛行と第三者上空飛行の緩和について、ゼロベース特区という新しい概念の導入の動きがある。

ドローンの国際標準化の動きが次第に本格化してきている⁶⁾。ISO TC20/SC16 Unmanned Aircraft Systems の会合がワシントン、ロンドン、北京と 3 回行われ、第 4 回はマドリードで 2017 年 3 月頃に開催された。三つの WG が設置されており、WG1 「General」は民間用および商業用の無人航空機システムに関する一般的な要求事項、WG2 「Product Manufacturing and Maintenance」は機体、管制装置、C2 リンク (管制局との通信方式) などの無人航空機システムの設計、製造、耐空性に関する要求事項、

WG3「Operation and Procedures」は無入航空機システムの運用方法に関する要求事項、について検討することになっている。ISO TC20/SC16 議長は米国連邦航空局 (FAA) 元 Senior Executive の John Walker 氏で、米国、中国、フランス、ドイツ、英国、ロシア、日本など十数カ国が参加している。WG2 では、電池 (提案者: 米 ASTM International)、管制向け機体識別システム (米 NASA、欧州民間航空機電子装置機関: EUROCAE、フランス民間航空総局: DGAC、中国 Aero-Polytechnology Establishment: CAPE、緊急時のリスク低減技術 (米 SAE International) などの議論が行われており、さらに、可搬質量、電波干渉、Fright Critical System (航法・通信・衝突防止システム) などが議論の対象に挙がっている。こうした国際的な動きに呼応して、日本も 2017 年 4 月に ISO TC20/SC16 対応の委員会を設置し活動を開始する予定である。

(6) キーワード

UAV (Unmanned Aerial Vehicle)、UAS (Unmanned Aerial System)、ドローン、空中ロボット、飛行ロボット、ガイダンス、ナビゲーション、制御システム、自律制御、自律飛行、回転翼機、固定翼機、VTOL (Vertical Take-Off and Landing)

(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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 基礎から応用研究は主に大学や研究機関中心に実施されており、ドローンの高揚期を迎えて、活発化している。内閣府の革新的研究開発推進プログラム ImPACT において災害対応を中心としたタフ・ロボット・チャレンジが実施されており、この中で飛行ロボットは 20 の研究機関でテーマを分担して基礎から応用研究まで推進されている
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 応用から実用化研究は国プロとして、戦略的イノベーション創造プログラム SIP や経産省・NEDO、国交省、農水省、総務省などの省庁でドローンを活用した農業・漁業、インフラ点検、測量、災害・火災、宅配などさまざまな公募型研究が推進されている 国内ドローン市場は 2015 年で 104 億円、2016 年 199 億円、2020 年 1138 億円と 2015 年比 11 倍の成長予測である。内訳は 2015 年でサービス市場 58.6%、機体市場 31.7% が 2020 年にはサービス市場 678 億円 (2015 年比 11 倍)、機体市場 240 億円 (同 7 倍)、周辺サービス市場 220 億円 (同 22 倍) と予測されている。ドローンメーカーでは自律制御システム研究所、エンルート、プロドローンなど、サービスではエアロセンス、アミューズワンセルフ、テラドローン、TEAD などがある
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 基礎から応用研究が盛んである。MIT 人工知能研究所では固定翼型ドローンを時速 48 キロメートルで飛行させ、障害物を二つのカメラで瞬時に見分け、かつ、3 次元マッピングシステムの開発に成功している。ペンシルバニア大学 GRASP 研究所は昆虫の飛行原理から衝突防止の飛行法を考案し実現した。その他、DARPA をはじめとする国家プロジェクトが組まれて基礎から応用研究が活発化している

	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・米国ドローンベンチャー企業のトップに位置する 3D Robotics 社は、中国 DJI 社との競争に勝つべく Phantom に似た Solo を開発販売した。しかし、DJI から価格ダンピングの攻勢を受けて敗北し、在庫を抱えて出資金を使い切り、社員を 50% 解雇する事態に陥った。結果的に 3D Robotics は凋落傾向にあることは否めない ・応用研究等では農業関連で Micasense、PrecisionHawk、Event38Unmanned System が、点検関連で Measure、Kespry、物流で Amazon、Flirtey、UPS、測量で Skycatch、工場倉庫管理で Walmart、ADASA、テレコムで Google、Facebook、娯楽で Disney、Hoovy、林業で Droneseed、水上・水中ドローンで O-Robotix、Sail Drone、ユーザー向けサービスで DroneDeploy、Pix4D、Hivemapper、Airmap、DroneBase、セキュリティーで Drone Shield 社などがある⁷⁾
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・基礎研究より応用研究が盛んである。チューリッヒ大学では 4 発ロータードローンがぎりぎり通過できる狭い空間を魚眼カメラと IMU のみから高速で通り抜ける研究や、スイス連邦工科大学チューリッヒ校 ETH ではスワーム飛行の研究を、ローザンヌ校 (EPFL) では人が搭乗できるドローンの開発や衝突回避の研究開発を実施している
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・仏 Parrot 社は 2012 年にスイス連邦工科大ベンチャーの Pix4D (ドローン専用 3 次元マッピングソフト開発) や senseFly、2014 年に農業 AI の AIRINOV (ドローンによる農業リモートセンシングサービス企業)、Micasense (農業リモートセンシング用マルチスペクトルカメラ開発企業) に出資して傘下に置いている ・農業関連では Airinov 社、点検関連で Aerial Power、Sky Futures、Redbird、DeLair Tech、Lufthansa Aerial Service、テレコムで Nokia Networks、公共で Skyfire Consulting、公共で MineKafon、Airfusion、Flyability、ユーザー向けサービスで Drone Volt、Airstoc、Flock、セキュリティーで DEDRONE、BlighterSurveillance 社などがある⁷⁾
中国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・民生用ドローンの基礎研究は北京航空航天大学無人機研究所、南京航空航天大学無人機研究所、南昌航空大学無人機研究所、西北工業大学第 365 研究所、中国航天科技集团公司研究院など中国全土で 15 カ所程度の研究所、研究センターで実施されている。基礎研究より応用開発・ビジネスが盛んである
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・DJI 社はドローンビジネスで世界の市場の 7 割程度を占めている。つまり、独り勝ちの様相で他国や他社を圧倒している。2016 年 3 月に Phantom4 を発表、初の農業散布用機体 Agras MG-1 の機体販売を開始して、10 月には高性能ドローン MAVIC Pro、11 月には Phantom4 Pro と Inspire2 を続々発表している。さらに、米国 Apple 社、Facebook 社、熱赤外線カメラ大手 FLIR、カメラメーカーやスマートグラスメーカーと連携し、測量や AI 農業を推進する Precision Hawk と連携強化している ・投資獲得規模で世界 1 位の DJI 以外にも 4 位 Zero Zero Robotics (Hover)、8 位 Yuneec、9 位 Ehang で、ZEROTECH や AEE、Xaircraft、MMC、EWATT など有力企業がある。特に、2015 年末に「軽・小型ドローン運航規程」が公布されてドローン環境が整備された⁷⁾
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・日・米・欧・中と比較してやや研究活動は遅れている感がある
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・企業としては、空撮で LSware/VORA、3S Solution、Drone IT、UAV Survey、Keva Drone、100 kg 大型ペイロードの ELECBIRD、Gryphon Dynamics、物流で Korean Air、Blueye、農業で KUAS、VTOL の PNU Drone、UNCONSYSTEM などの企業がある

(注 1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(注 2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(注 3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) Kimon P. Valavanis: Handbook of Unmanned Aerial Vehicles, Springer, 2015
- 2) Thompson, Cadie. “Here’s where the real money is in drones” . CNBS.
<http://www.cnbc.com/2015/05/13/heres-where-the-real-money-is-in-drones.html>,
(accessed 2016-11-29).
- 3) “The drone market environment map 2016” . DRONEII. COM.
<https://www.droneii.com/drone-market-environment-map-2016>,
(accessed 2016-11-29).
- 4) Nonami, K. et al: Autonomous Flying Robots, Springer, 2010
- 5) 野波健蔵：計測と制御、計測自動制御学会、Vol.56, No.1, 2017年1月14日
- 6) 馬場景子：日経 Robotics、日経 BP 社、No.16, 11月号、2016
- 7) インプレス総合研究所、世界のドローンビジネス調査報告書 2017、2016年12月15日

3.4.4 生活支援・福祉ロボット

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

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の実現を目指す研究開発領域。ロボットを中心としたICT技術の融合を確立していく段階にある。食事・排せつ・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）、および家事・外出から電話や服薬管理、金銭管理といった道具を用いた作業を含む手段的日常生活動作（IADL）に関する自立支援、支援者支援、および就労・社会参加支援を含む。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[背景と意義]

生活支援・福祉ロボットは、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、介護者およ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:Activities of Daily Living）や手段的日常生活動作（IADL:Instrumental Activities of Daily Living）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、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、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。

[生活支援・福祉ロボットの種類]

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、車いす、車いす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。体位変換や排せつ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。
- 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。

上記に共通し、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工学 (Augmented Human) 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。

[国内外の研究開発動向]

①移動作業型生活支援ロボット

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。近年「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、介護支援や障害者等の動作支援、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いす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。そこで近年、腰部に着用する動作支援機器が広く研究開発されており、販売も進んでいる³⁾。このような介護支援技術については、今日の介護職員の業務負担の軽減や、介護者不足を解消するものとして期待が高まっている。これらはまた、機能改善、機能獲得を目的とした治療技術への応用も期待される。

一方、ロボット技術の高度化により、さまざまな人間型ロボットが民間企業や大学などの研究機関において開発されており、介護者の支援動作を代替するための試みが見られる。これらは、人の作業の代替・支援を目的として構築される。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、近年でも、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、排せつ・整容・入浴にも支援ロボットが開発されている。

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、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

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。ロボットは、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。環境型のロボット支援技術であるといえる。

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とともに、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⁾。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。

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年現在ではすでに約2000社の企業が導入している。これにより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ている。また米国でも、家庭用小型ロボット「JIBO」が販売されるなど、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。

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、遠隔操作による介護・食事介助支援¹³⁾などが代表例である。

(3) 注目動向

[新しい知見や新技術の創出]

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¹⁴⁾ は2014年3月に第1版が刊行されたにも関わらず、2015年に初めて *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。人支援分野においてもさまざま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ックウェア *curara* (クララ)¹⁵⁾ 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¹⁶⁾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。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。

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。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、医療応用のため脳の硬膜下に埋め込む形の電極およ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 (EEG) や近赤外分光法による脳機能マッピング (fNIRS) 等の脳の中樞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。

[国際的なファンディング動向]

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 SPARC と呼ばれる官民パートナーシップが2014年6月に立ち上がった¹⁷⁾。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 euRobotics¹⁸⁾ 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の後継として事実上のFP9となる Europe 2030¹⁹⁾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・福祉ロボットは、高齢化という社会的課題への挑戦という位置づけで、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、人々が独立的な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的な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3億ドル以上の資金を得て広範に亘るロボティクス分野の支援が行われている。本プログラムは、先進製造パートナーシップ（Advanced Manufacturing Partnership）施策の一つとして位置付けられているのが特徴である。医療・ヘルスケアでは、遠隔ロボットやリハビリテーション支援のロボットの研究開発が行われている。また、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、および人の行動を認知、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。

さらに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²⁰⁾するため総額3700万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、搜索救助活動を行うロボットチームの開発、およびさまざま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。

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、大きな売り上げを上げている。特に1000万台の 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²²⁾。家庭用のパーソナルロボットは、人の支援のためにあるため、生活支援ロボットと同じ位置付けである。一方で、主に産業向けではあるが、低価格の人共存型ロボット（Baxter）²³⁾も実用化されている。

（4）科学技術的課題

まず、大きな技術的なボトルネックは智能化である。人の理解に基づくロボットの行動過程の生成は、智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も、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知能化技術の進展が大きな課題となる。欧米では、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なか、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ー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た。欧米型でなく、日本独自の人工知能技術開発に注力する必要があると考えられる。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。

次に、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、およ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。

最後に、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み合わ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。

(5) 政策的課題

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、日本の産業をけん引し、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、ベンチャー企業がけん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。

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。

(6) キーワード

サービスロボット、ケア・ロボット、介護福祉ロボット、知能ロボット、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、ロボット支援機器、人支援技術

(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ごとのファンディング（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	○	↑	・次世代型電動車いすを開発する WHILL などのベンチャー企業も出ているが、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するなど、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、ベンチャー企業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) においては、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	◎	↑	・FP7、Horizon2020の支援や、世界最大の民間研究・革新プログラムとしての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 ²⁴⁾ 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のロボット・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計画綱要(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が、いまだ当該分野でのプレセンスは低い
	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、開発に関してはあまり成果が見られない
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)に主導される形でさまざま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おり、今後が期待できる

(注1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発(プロトタイプの開発含む)のレベル

(注2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(注3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) 加藤 一郎, リリスロボット—生活支援ロボット—の構想, 日本ロボット学会誌, 11 (5):614-617, 1993. <http://doi.org/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, 7 (4):44-51, 1993. http://doi.org/10.11239/jsmbe1987.7.4_44
- 3) HAL[®] 作業支援用(腰タイプ), CYBERDYNE 株式会社 https://www.cyberdyne.jp/products/Lumbar_CareSupport.html
- 4) T. Mukai et al., "Development of a Nursing-Care Assistant Robot RIBA That Can Lift a Human in Its Arms," IEEE/RSJ IROS, pp.5996-6001, 2010.
- 5) パートナーアシストロボット(トヨタ自動車株式会社) http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/partner_robot/family.html
- 6) 離床アシストロボット リショーネ Plus, パナソニック株式会社 <https://sumai.panasonic.jp/agefree/products/resyone/news.html>
- 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 21 (4), 378-381, 2003.
- 8) G. Ferri et al.: DustCart, an autonomous robot for door-to-door garbage collection: From DustBot project to the experimentation in the small town of Peccioli, Proc.

- of IEEE ICRA, DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980254
- 9) つくばモビリティロボット実験特区, <http://mobility.rt-tsukuba.jp>
 - 10) A. Tapus, M. Matarić, B. Scassellati Socially Assistive Robotics, IEEE Robotics & Automation Magazine, 14 (1):35-42, 2007.
 - 11) 手嶋 一彦 (編著), 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 コミュニケーションロボット Papero 等,
<http://www.necplatforms.co.jp/solution/marketplace/>
 - 13) BESTIC, Eating Assistive Device, Bestic AB 社, <http://www.besticinc.com>
 - 14) Soft Robotics Journal, Mary Ann Liebert, Inc. publishers.,
<http://www.liebertpub.com/soro>
 - 15) 身体装着型のロボット「Robotic Wear curara[®]」,
<http://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/textiles/chair/ht-lab/project/curara.php>
 - 16) マッスルスーツ, 株式会社イノフィス <https://innophys.jp>
 - 17) SPARC c/o euRobotics AISBL: <http://sparc-robotics.eu/>
 - 18) euRobotics: <https://www.eu-robotics.net/>
 - 19) Research Strategies: Europe 2030 and the next Framework Programme
<http://sciencebusiness.net/events/2016/research-strategies-europe-2030-and-the-next-framework-programme/#sthash.CzfbZ1xY.dpuf>
 - 20) 協働ロボット (co-robot) <http://www.nsf.gov/pubs/2012/nsf12607/nsf12607.htm>
 - 21) A Roadmap for US Robotics - From Internet to Robotics -, 2016 Edition, November 6, 2016, National Science Foundation
<http://jacobsschool.ucsd.edu/contextualrobotics/docs/rm3-final-rs.pdf>
 - 22) Jibo Robot, <https://www.jibo.com/>
 - 23) 人間型ロボット「バクスター」, Rethink Robotics 社,
<http://www.rethinkrobotics.com/jp/baxter/>
 - 24) ソフトバンクロボティクス社, <https://www.ald.softbankrobotics.com/ja>

3.4.5 医療ロボット

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

医療ロボットは、ロボティクスの医療への活用であり、既にさまざま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う、医療支援を目的とするロボット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。さらに、利用目的が医療目的に留まらないが、将来的に医学や細胞生物物理学等へ大きな貢献が期待されるナノロボティクスを採り上げる。ナノロボティクスはまだ研究が始まって 10 年程度の未踏挑戦領域であり、学会として厳密な定義は存在しないが、1 ミリメートル以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とも言える外部環境に反応して薬物放出する薬物もナノマシン、ナノロボティクスといえる。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[手術支援とリハビリテーション]

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として、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、今後ますます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 (米 Intuitive Surgical 社)¹⁾であり、現在国内では、腹腔鏡下前立腺がん手術、および腹腔鏡下腎がん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 3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、コンピューター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⁾⁻⁶⁾。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 : 仏 Renishaw 社)、放射線を適切に病変へ照射する放射線治療器 (Cyberknife : 米 Accuray 社)、さらに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)、内視鏡保持器具 (EMARO : リバーフィールドとホギメディカル) 等の単機能な医療支援デバイスについて国内外での臨床応用が始まっている。

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。国外では、2000年にLocomat（スイス Hocoma 社）が上市され、一定の市場を形成するに至っている。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⁷⁾。国内では、HAL 医療用（サイバーダイン）⁸⁾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。リハビリテーションロボットによって、反復運動の処方をロボットに置き換えることが可能であることに加えて、センサー技術を活用することによって定量的な診断をリアルタイムに施すことができる。さらに、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⁹⁾、また上肢への適用等¹⁰⁾、研究開発が活発に行われている。

[ナノロボティクス]

(i) 研究分野の定義

ナノロボティクスは20年以上の歴史があるマイクロロボティクスと違いまだ10年足らずの挑戦的研究分野であるため、学会としての厳密な定義は存在しない。そのためナノロボットと称していても、実際は数ミリメートル～0.1ミリメートル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0.1ミリメートル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。

(ii) 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年代にMITのAnita FlynnやUCバークレーのRonald Fearing¹⁴⁾、東京大学の三浦宏文、下山勲ら¹⁵⁾により空を飛ぶ数ミリメートルのマイクロロボットや、スタンフォード大学のMark Cutkosky¹⁶⁾らによるファ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）など欧州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年に現在東京大学の生田幸司¹⁷⁾（2010年以前は名古屋大学）らの「光駆動ナノロボット」である（図3-4-18）。最初のモ



図3-4-18 光駆動ナノロボット
（出典：参考文献25）

デルは全長 10 マイクロメートルで 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 100 ナノメートル精度で、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。ピコニュートン以下の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。細胞への微小な力刺激による細胞内部の情報伝達を調べる新規の細胞生物物理学者の研究ツールとして実用化間近である。

その後、カーネギーメロン大学の Metin Sitti ら¹⁸⁾ は細菌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。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、まだ多くの技術的、倫理的課題がある。

生体とのハイブリッドタイプには、培養した筋肉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 Carlo Montemagno ら¹⁹⁾ が開発に成功したマッスルロボットである。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させた。

遠隔駆動に有利な磁気駆動方式のナノロボットは ETH の Bradley Nelson ら²⁰⁾ 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 1.5 テスラの強力磁場を発生する巨大な磁気コイルを用いて体外から駆動するシステムを構築している。当初は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て遠隔操縦するシステムを研究していた。網膜の各種手術を目的としていた。最近はカテーテルの先に磁石を付けて、体外コイルからの磁気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応用を進めている。

東大の生田幸士ら²¹⁾ は、直径 10 マイクロメートルの磁性材料製のマイクロコイルをマイクロ光造形し、外部の 10 センチメートル程度の小型ヘルムホルツコイルで小電力の回転磁場を用いて液中のマイクロコイルをスクリューのように回転移動させている。小さな磁力で眼球内を移動可能である特長を持つ。その他、磁気駆動方式のナノロボットは作製と駆動が容易でもあるため、韓国、中国を含む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ろう。

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発見することを目的に、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 の関連会社エアロスペースカンパニーの Henry Helvajian ら²²⁾ 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。これは、本領域で扱う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 技術が多用されていた。

アプローチ (a) の研究成果は、IEEE 主催の MEMS、NEMS、ICRA、Transducers

など採択率の厳しい国際会議や 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 の新規姉妹ジャーナル *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 年に米国の未来学者 Eric Drexler²³⁾ 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。合成化学的な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ナノロボットが出現する可能性もある。また、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活発化する可能性がある。

アプローチ (b) の成果は *Nature*、*Science* など高度な学術誌に掲載されることが多いため注目度も高いが、まだ実用化までには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。

(c) DDS、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。東京大学の片岡一則ら²⁴⁾ の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。癌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。現在の抗がん剤は注射されても癌細胞に選択的に導入困難で、細胞膜から内部への取り込み効率が低いため副作用の問題が発生している。

(d) 研究目的

研究目的の多様性が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。

アプローチ (a) : 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特長である。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、システム化まで追求している点に興味深い。

アプローチ (b) : 主として合成手法の開発とサイエンスとして化学的興味である。もちろん医療応用も重要課題であるが、現時点では基礎的な知見と技術の確立が優先されている。

アプローチ (c) : 明らかに創薬が目的であり、研究の出口も薬事認証による実用化である。代表的には、前者はミセルを用いたナノマシンによる体内での癌細胞の破壊であり、後者は体外で細胞生物学の研究ツールである。明確な目的を設定せず、ナノロボットの実現可能性を探る研究も多く存在する。

現在の遠隔手術ロボットはミリメートルスケール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が、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る。

(3) 注目動向

[手術支援とリハビリテーション]

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¹¹⁾。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¹²⁾。国外では、欧州にて同じく手術支援ロボットの知能化を目指す ISUR¹³⁾ が実施され、成果発展が今後期待される。特に米国を中心として、Auris Surgical Robotics、Medrobotics 等の手術支援ロボットのスタートアップ企業が盛んに設立され、今後の動向が注目される。一部には、MAKO Surgical 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 Verbsurgical 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。国内でも研究開発能力としてロボット技術を核とす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、安川電機、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。

[ナノロボティクス]

マイクロロボティクスを含むナノロボティクスにおける国策的活動に関しては、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。

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。

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。

我が国と違い、欧米では世界の流れを気にしないで、未踏研究に投資するため、特許、実用化の段階でも多くの先行利益を得てきた。

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の高い研究には陽には投資されてこなかった歴史がある。今後、日本が世界をリードしていくために、個々の研究者の努力で支えられている未踏研究への投資が必要である。

(4) 科学技術的課題

[手術支援とリハビリテーション]

医療ロボットにおいては、医療ニーズを顕在化し、革新的あるいは従来技術とのマッチ

ングによって、患者のための価値を創出できるかが重要である。この実践には、医学と工学とを俯瞰的に理解し、双方の専門領域を結びつける取り組みが重要である。その一例として、産業機械技術はこれまでに大きな発展を遂げたが、医療で求められる清潔性、安全性とは質が異なるため、医療ロボットへの適用には独自の進化発展が求められる。より具体的な事例としては、手術支援ロボットでは小型、細径な多関節細径ロボットアームを体内に挿入するが、このような機械技術は過去には確立されてこなかったため、大きな発展の余地を残している。さらには、センサー技術、人工知能との統合発展によって、手術支援ロボットの動作の一部を自動化する試みもなされている。最近になり大きく発展した自動車の自動運転技術ともやや関連すると言えるが、手術操作は元来専門的知識、技術、経験を要し、かつ対象となる人体は各個体で異なり、柔軟であるため大きく変形する。よって、科学技術的視点からは、より大きな挑戦的課題であり、各方面からの技術統合が期待される。

[ナノロボティクス]

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。

(5) 政策的課題

[手術支援とリハビリテーション]

医療機器の実用化までの道のりは、一般に「死の谷」とも表現され、厳しいことで知られる。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多く、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。上記(3)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と述べたが、これには国内の経済的風土、下地の相違を勘案する必要がある。現況においては、我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行うことが望まれる。

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。

[ナノロボティクス]

我が国では、基礎研究予算がサイエンスに偏り、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を打ち破り、科学と工学が融合した取り組みを推進することが必要である。

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。

従来のバイオ医療装置のように欧米ベンチャーに装置スペックのデファクトスタンダード化で先を越されることのないよう、概念段階から標準化も検討すべきである。

(6) キーワード

医療情報、画像診断、遠隔診断治療、保健情報、健康情報、医用画像、細胞内ロジスティクス解析、医用超音波システム、画像診断システム、検査・診断システム、低侵襲治療システム、遠隔診断治療システム、臓器保存・治療システム、医療情報システム、コンピューター外科学、医用ロボット、遠隔ロボット、低侵襲手術、レギュラトリーサイエンス、安全性評価、臨床研究、医療技術倫理、医療機器、ユニバーサルデザイン、福祉・介護用ロボット、生体機能代行、福祉用具・支援機器、ヒューマンインターフェース、リハビリテーション医学、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、NEMS、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

(7) 国際比較

表中の丸数字は、①手術支援とリハビリテーション、②ナノロボティクスに対応する。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	①○ ②○	①→ ②→	①複数の学術的国家プロジェクトが展開中 ②ナノスケールの3Dプリンタである2光子光造形法や各種アクチュエーション技術、各種光計測などが活発である
	応用研究・開発	①◎ ②○	①↑ ②→	①大企業、複数の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 ②光駆動ナノロボットによる細胞実験ツールの開発。磁気駆動ナノロボット、筋肉駆動型のマイクロロボットなどが開発されつつある
米国	基礎研究	①◎ ②◎	①→ ②↑	①多岐にわたる研究成果 ②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
	応用研究・開発	①◎ ②◎	①↑ ②↑	①大企業、複数の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 ②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と予想される
欧州	基礎研究	①○ ②◎	①→ ②↑	①独・仏・伊を中心に多くの研究事例、成果発表 ②ETH、RPFLなどのスイス、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、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王立芸術大学院ヘレンハムリンセンターでナノロボットの試作が始まった ②国家プロジェクトよりも、大型の基礎研究予算で進めている
	応用研究・開発	①◎ ②◎	①↑ ②↑	①独 Stryker、スイス Hocoma など実績、複数のベンチャー企業による試みを確認 ②バイオ、医療分野のテーマが大半
中国	基礎研究	①△ ②△	①→ ②↑	①大きな研究成果報告は確認されず ②欧米、日本に追従する形式で莫大な投資が行われている。欧米から帰国した若い研究者が主導し、国から大型予算を得ている

中国	応用研究・開発	①○ ②△	①↑ ②↑	①一部の企業 (Beijing Tinavi) 等に手術ロボットに関する開発事例が確認される ②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
韓国	基礎研究	①○ ②○	①→ ②→	①当該研究領域に多数の研究報告あり ②国の研究所とトップメーカーが推進中。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
	応用研究・開発	①○ ②△	①→ ②→	①複数企業に開発報告あり (Koh Young Technology, Hyundai Heavy Industries, Meere Company) ②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ーと一体化して推進中。産学の人的連携も日本では考えられないほど深い

(注1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(注2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(注3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) Intuitive Surgical, Inc.
<http://www.intuitivesurgical.com>
- 2) 日本ロボット外科学会
<http://j-robo.or.jp>
- 3) From Passive Tool Holders to Microsurgeons: Safer, Smaller, Smarter Surgical Robots: Bergeles C, Yang GZ.: IEEE Trans Biomed Eng 2014;61(5):1565-1576.
- 4) Current systems and research directions: Beasley RA.: J Robot 2012: Article ID 401613.
- 5) Current Status and Future Directions of Robotic Single-site Surgery: A Systematic Review: Autorino R, Kaouk JH, Stolzenburg J, Gill IS, Mottrie A, Tewari A, Cadeddu JA.: Eur Urol 2013;63(2):266-280.
- 6) Flexible platforms for natural orifice transluminal and endoluminal surgery: Patel N, Seneci C, Yang G, Darzi A, Teare J.: EIO 2014;02(02):E117-E123.
- 7) Hocoma 社
<https://www.hocoma.com>
- 8) サイバーダイン株式会社
<http://www.cyberdyne.jp>
- 9) Electromechanical-assisted training for walking after stroke: Mehrholz J, Elsner B, Werner C, Kugler J, Pohl M. : Cochrane Database Syst Rev. 2013 Jul 25;7:CD006185.
- 10) Effects of Robot-Assisted Therapy on Upper Limb Recovery After Stroke: A Systematic Review: Kwakkel G, Kollen B, Krebs H: Neurorehabilitation and Neural Repair 2008;22(2):111-121.
- 11) 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>
- 12) 国立研究開発法人 日本医療研究開発機構
http://www.amed.go.jp/program/list/02/01/029_01-03.html
 - 13) The I-SUR Project
<http://www.isur.eu/isur/>
 - 14) ST Hsieh, W Zesch, WP Chan, TW Kenny, R Fearing, “Adhesive force of a single gecko foot-hair” ,*Nature* 405, 681–685 ,2000
 - 15) T. Yasuda, I Sbimoyama, H. Miura, "Microrobot locomotion in a mechanical vibration field", *Advanced Robotics*, vol. 9, no. 2, 1995.
 - 16) A. T. Asbeck, S. Kim, M. R. Cutkosky, W. R. Provancher, M. Lanzetta, "Scaling hard vertical surfaces with compliant microspine arrays", *Int. J. Rob. Res.*, vol. 25, no. 12, pp. 1165-1179, 2006.
 - 17) N Shimada, K Kadoguchi, M Ikeuchi, K. Ikuta, “Nanoscale dynamic viscoelasticity analyzer by using optically driven nanobeams for study of biomolecules” , IEEE MEMS'12 Conference, 2012
 - 18) HyunGyu Kim ,Kyungmin Jeong ,Metin Sitti ,TaeWon Seo, “Steering control of a water-running robot using an active tail”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2016)
 - 19) Ricky K. Soong, George D. Bachand, Hercules P. Neves, Anatoli G. Olkhovets, Harold G. Craighead, Carlo D. Montemagno, “Powering an Inorganic Nanodevice with a Biomolecular Motor” , *Science* 24 ,Vol. 290, Issue 5496, pp. 1555-1558 ,2000
 - 20) R Borer, A Sengul, BJ Nelson , “OctoMag: An electromagnetic system for 5-DOF wireless micromanipulation” , IEEE Transactions on Robotics, Vol.26, Issue: 6, 2010
 - 21) M Yasui, M Ikeuchi, K Ikuta, “3D remote controllable nano actuation system for cell handling and micro surgery” , IEEE MEMS12 Conference, 2012
 - 22) Siegfried Janson, Adam Huang, William Hansen, and Henry Helvajian. "Development of an Inspector Satellite Propulsion Module Using Photostructurable Glass/Ceramic Materials", CANEUS 2004 Conference on Micro-Nano-Technologies 2004
 - 23) K E Drexler , “Biological and Nanomechanical Systems: Contrasts in Evolutionary Capacity.” ,ALIFE, 1987
 - 24) Kazunori Kataoka, Glenn S Kwon, Teruo Okano, Yasuhisa Sakurai, “Block copolymer micelles as vehicles for drug delivery” , *Journal of Controlled Release*, Vol.24, Issues 1–3, pp. 119-132, 1993
 - 25) K. Ikuta, S. Ito, Optical-driven nano manipulators with master-slave control for microbiology, 7th International Workshop on High-Aspect-Ratio MicroStructure Technology (HARMST 2007), Besancon, France, June 7-9, 2007

3.4.6 産業用・研究開発用ロボット

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

従来の産業用ロボットは、教示再生方式、電動モータ、剛体リンク機構等のキー技術に基づき、限定環境での正確性、高速性から、重工業や電子製品製造などの特定の作業に利用されてきた。しかし、今後の利用拡大が予想される食品、服飾、農林水産、サービス、医療・介護、科学研究等の分野での利用は限定的である。本研究開発領域では、まず、こうした利用拡大に必要な革新的な要素技術とシステムインテグレーション基盤技術を採り上げる。さらに、科学研究の生産性や再現性を飛躍的に向上させる取り組みとして、バイオ・ライフサイエンス研究におけるロボット技術活用ための研究開発を取り扱う。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(2.1) 産業用ロボット

(2.1.1) 産業用ロボットの歴史

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 **Programmed Article Transfer** 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。現在では樹脂成形、プレス、アーク溶接、スポット溶接、塗装、機械加工、研磨・バリ取り、組み立て、入出荷、クリーンルーム、その他に産業用ロボットが広く活用されている^{1),2)}。International Federation of Robotics (IFR) によれば³⁾、世界の産業用ロボットの稼働台数は、2015 年度終わりには 163 万 1600 台であり、2019 年度には、258 万 9000 台と予想している。2014 年度、日本は産業用ロボットの出荷台数が 12 万台となり、過去最高となった。ただし、輸出依存型であり、輸出先の韓国、中国などの新興国でのロボット製造も進んでいる。

(2.1.2) 現状の産業用ロボットの特徴

①教示再生方式による自律性の確保

教示再生方式では目標位置の教示のために、通常、ティーチング装置があり、オペレーターがロボットを操縦して、目標位置に移動させる。目標位置は各関節角度の値として記憶される。ロボットは一度記憶された目標位置への運動を繰り返すために、以後、オペレーターの操縦は不要となり、ロボットのみによって自律的に作業を継続可能となる。

②電動モータの利用

初期の産業用ロボットでは、油圧駆動や空気圧駆動も見られた。しかし、最近では、ほとんどが電動モータの利用となっている。一般的な電動モータは、ロボットの関節運動に比して高速に回転し、低トルクとなる。このために、100:1 程度以上の減速器を取り付け、回転数を減じてトルクを増大させている。この方法は、モータの回転数を計測すれば高減速比によってロボットの出力回転量を高精度に測定することも可能であり、産業用ロボットの高精度化に役立っている。しかし、現状の産業用ロボットは高減速比のギアなどを利用するために、摩擦の影響で、ロボットの関節は硬くなり、対象物との機械的接触を制御

することに困難を伴う。

③剛体リンク

教示再生方式によってロボットは目標関節角度への運動を繰り返す。関節角度が目標位置に収束することで、ロボット手先が目標位置へ到達することを保証するためには、対象物の重量などに依存してロボットリンクが変形しない保証が必要となる。ゆえに、剛体リンクを理想とする。

④ロボット周辺の確定環境の設定

教示再生方式では、ロボット「自身」の形状を高精度に再現することを保証できる。しかし、ロボットを設置する位置・姿勢が変化する場合や対象物の位置・姿勢が変更される場合などでは、空間座標系とロボットの関節座標系に誤差が生じ、ロボットの手先は本来の空間目標位置からずれてしまう。このような問題を発生させないために、工場などのロボット利用環境では、ロボットと対象物の位置・姿勢を正確に人が設定する。このような確定環境を準備してロボットを利用するためには、ロボットについての一定の知識が必要である。

現状の産業用ロボットは、こうした特徴を持つため、重工業、自動車産業、電子機器製造などの以下のような限定された条件下において利用が成功している。

- ・均一対象物でばらつきがない
- ・ロボットと対象物の両方が剛体で変形しない
- ・大量生産する
- ・位置制御で作業を実現できる
- ・利用環境が確定環境として整備可能である

(2.1.3) 現状の産業用ロボットの課題

①変種変量生産

近年、多くの産業で顧客ニーズなどに合わせた変種変量生産が期待されている。このような場合、大規模工場を建設して、専用の製造ラインを立ち上げる時間はなく、ロボットの能力によって対応することが要求される。

②多様な剛体対象物

対象物が剛体の場合でも、多様な形状や色などの特徴の異なる対象物を取り扱う必要がある。

③柔軟対象物

形状が変化する柔軟物のハンドリングが必須となっている。電子部品や自動車などの製造においても、フラットケーブルやワイヤハーネスなどの柔軟部品の製造は人に依存している部分が多い。また、衣服、靴などの柔軟な材料を利用する製造やハンドリングは、従来のロボット技術では十分に達成できていない。食品の場合、均一食材の大量生産は工場で実現される場合も多い。しかし、弁当の製造など多種類の食材のハンドリングは現状のロボット技術では未解決となっている。

④変動環境

現状のロボットを利用するためには、人がロボットの周辺を確定環境とする必要がある。一方、ロボットを幅広く利用するためには、不確定な環境においても利用可能な技術が必要となる。基本的には、以前から利用されるロボットの関節角センサーに加えて、カメラ

などの外界センサーを利用する方法となる。以前から研究開発成果は報告されているものの実利用までには隔たりがあり、実用化されている例は少ない。ただし、バラ積みされた剛体の対象物を視覚センサーとロボットアームで取り出す作業などは実用例が出はじめている^{4),5)}。

⑤力制御

従来の産業用ロボットの作業は位置制御を中心としていたが、さまざまな作業を達成するためには、対象物や環境とロボットとの発生力を計測、制御する必要がある。力制御を組み込んだロボットも研究開発されてはいるが、信頼性、耐久性、利用の容易さ、価格など多くの課題が残されている。

⑥ロボットの柔軟性

周辺の人や環境とロボットとの機械的接触を想定すると、ロボット自身が柔軟性を有することが期待される。関節の柔軟化、リンクの柔軟化、手先効果器の柔軟化などが想定される。

⑦ケーブルトラブル

一般に、ロボットは多自由度となる。各自由度にはセンサー/アクチュエーターがあり、多自由度にすると、ケーブル数が多くなる。今後、センサー数が増加する傾向にあり、ロボット全体でのケーブル数も増加傾向にある。設置型の産業機械に比して、ロボットは各部が動くために、これらのケーブルも動くことになる。このため、ケーブルに関する損傷、接続不良などのトラブルが多発する。この問題解決には、無接触給電技術やワイヤレス技術の導入が期待されている。

⑧フィードフォワード制御の利用

現在の産業用ロボットの制御は関節位置についてのフィードバック制御を基本としているが、今後、高速化・高精度化をもとめる際に、フィードフォワード制御を多様に利用することが重要となる。研究開発提案は見られるものの、信頼性を保証する実用化例は少ない。

(2.2) 研究開発用ロボット

(2.2.1) 研究開発の自動化の歴史

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バイオ・ライフサイエンスのほとんどの研究分野で展開しており、膨大なサンプル数をハイスループット、か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、より高度な研究手技が常に求められている。このような作業のほとんどは、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破綻の危機を迎えていると言える。また、長時間のベンチワークを常態とする分野は魅力が低下し、人材の育成が極めて困難になっている。

こうしたなか、バイオ・ライフサイエンス研究において、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。これまでに開発・上市された自動化装置は、溶媒・試料の分注ロボット、調整されたサンプルを解析機に自動供給する

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の生産自動化が積極的に試みられているが、その多くは、細胞・ラボウェア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、さらに外部軸と特殊治具をインテグレーションするライン化方式（図 3-4-19）である。



図 3-4-19 ライン化方式

(2.2.2) 研究開発用ロボットの課題

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が目的にかなう場合は、研究生産性を容易に向上することが可能である。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、かえって作業時間と溶媒・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につながる。また、各作業間をつなぐのは人間によることがほとんどであり、人手によるヒューマンエラーとルーティンワークは決してなくなる。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できない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完全自動化するには、ライン化方式を採らざるをえない¹⁷⁾。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～数年を要するからである。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、専門のエンジニアが常駐しなければ稼働できないことも多く、ランニングコストも問題となる。最も大きな欠点は、一度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種類を容易に変更できないことである。すなわち、作業が必要なくなった時点で、ロボットシステムが突然陳腐化することを意味する。プロトコル変更とプロトコル最適化が常に行われるバイオ・ライフサイエンスの作業では費用対効果が見込まれる

ケースはまれである。

まとめると、単機能ロボット組み合わせ方式は、作業に人の介入をなくすことができない。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り、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。こうした理由から、この分野の自動化は他に比べ大きく遅れている。しかし、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、ロボットの自動化が潜在的には最も求められており、次項(3.2)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) 注目動向

(3.1) 産業用ロボット

(3.1.1) 先進国の工場国内回帰指向

先進国では工場を国内に回帰して、国内での GDP 拡大と雇用を確保する政策を打ち出している。例えば、スポーツ用品世界 2 位の独アディダスは、2016 年 5 月に、2017 年からドイツ国内でロボットによる靴の大量生産を始めると明確に発表した。靴は柔軟要素が多く、ロボットでの製造が困難な対象の一つであった。同社は 1993 年に国内の靴生産から撤退していたが、24 年ぶりに国内生産に回帰する。発展途上国の人件費が上昇し、ロボット技術力への期待が背景にある。同様にキヤノンもロボット等の自動化技術により海外の工場を日本に戻し、国内生産を重点化すると発表した。米国は、トランプ政権で工場を国内に設置する方針を打ち出している。米国内での人件費を、海外と同程度にはできないと思われるので、ロボットに代表される自動化技術によって、この問題を解決すると予想される。したがって、米国の製造業でのロボット技術開発が加速すると思われる。

一方で、服飾分野において、縫製工場などの生産工場を先進国内に設置することは、技術的な問題のために、現状では達成できていない。日本では、縫製工場をアフリカ諸国へ展開することも予想されているが、現状では輸送時間とコストのために実現は困難である。

(3.1.2) スマートオートメーション

ドイツが提唱する Industrie 4.0 や IoT として、世界中につながる工場によって、変種変量生産に対応し、先進国内に工場を維持し、利益の拡大が図れるとの期待が大きい。ただし、セキュリティーの問題が指摘されている。

(3.1.3) Rethink Robotics⁸⁾

米国のベンチャー企業であり、Baxter と Sawyer と呼ばれるロボットを製作、販売している。これらのロボットは、従来の産業用ロボットの課題を解決するために、直列弾性アクチュエーターによる柔軟性の付与、カメラの内蔵による変動環境対応、ダイレクトティーチングによる利用の容易性、教示再生以外のロボットとのヒューマンインターフェース技術などの機能を有しており、従来の産業用ロボットの弱点を克服する方針を明確に打ち出している。価格も安い部品などを利用することにより、2 万 5000 ドル程度と

している。

(3.1.4) 高分子材料利用ロボティクス

高分子材料を利用するロボットは、柔軟な生物に学ぶ考えかたとして 1960 年代から研究者の興味を引き付けてきた。しかし、耐久性、運動性能、センシング性能などで既存の他の方法に比して十分でないことから、実際にロボットとして利用されることは無かった。

しかし、2010 年ごろから、Soft Robotics への関心が高まり、国際ジャーナル「Soft Robotics」⁹⁾ が刊行した。また、世界最大のロボットの研究者会員を有する IEEE に Soft Robotics の HP サイトが開設され¹⁰⁾、2014 年、2015 年とワークショップなどが開催されている。多くはポリマー材料を利用したセンサー、アクチュエーター、構造に関する研究である。アクチュエーターでは、空気圧駆動、水/油圧駆動型、ポリマー静電型、イオン電導型、導電性ポリマー、ポリマー熱駆動型などが研究開発されている。センサーでは、高分子材料の熱、電気、光などの特性変化を計測することによって、柔軟で多様なセンサーが実現可能となる。

近年特に高分子材料を利用するロボットの研究発表が多くなった理由に 3D プリンターの普及がある。例えば、最も実現性が高いと予想される空気/水/油などの流体駆動型アクチュエーターの多くは、型にシリコンゴムなどを流し込み、成型することで製作される。従来は、金属製の型を製作して、シリコンゴムなどで実現していた。金属製の型の製作は費用と時間がかかり、多数の形状を簡単に試験することが困難であった。近年、3D プリンターの利用により、CAD データからさまざまな形状の ABS 樹脂製などの型を容易に実現できるようになり、こうした方法が普及した。さらに、柔軟な高分子材料を直接 3D プリンターで成形可能となり、さらに製作が容易になっている。ただし、2016 年の現時点では、このような高分子材料を利用する 3D プリンターは、数千万円程度の価格であり、今後、低価格に移行するにしたがって、世界的にこの手法が広がると予想される。このような世界的な Soft Robotics の動向は、IEEE の雑誌 Spectrum でも紹介されている¹¹⁾。

(3.1.5) ランドロイド¹²⁾

パナソニック、大和ハウス、セブンドリーマーズは、洗濯物を自動で折りたたむ機械を 2017 年から発売すると 2016 年に発表した。乾燥した洗濯物を画像処理、人工知能、ロボットアームのシステムによって、折りたたむことが可能と言われている。

(3.1.6) Amazon ピッキングチャレンジ

Amazon が、世界から研究チームの参加を呼びかけ、Amazon 社の倉庫内での在庫の対象物群から対象物を取り出し、箱詰めする作業のコンテストを実施している。ロボットアームにカメラ等のセンサー、多様な形状と性質の対象物を確実に持ち上げて箱詰めするためのハンド、およびそれらの制御システムを組み込んでいる。

(3.1.7) ハンドリング研究

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) の開催に向けた取り組みが進んでいる。この大会は、

世界が注目する高度なロボット技術を内外から集結させて、各課題を解決すると同時に、人々のロボットへの理解を深め、ロボットの活用に関する積極的な議論を誘発し、具体的な利活用方法が生み出される機会とすることを目標としている。

World Robot Summit 競技種目には、ものづくり、サービス、インフラ・災害対応などがありⁱ⁾、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ている。

学術界でも、ハンドリング研究について、近年活発な議論が開始されている。例えば、日本ロボット学会では、2014年ごろから産学連携セッションなどを開催して、産業用ロボットの高度利用、新しい産業用ロボットの提案などの議論を重ねている。また、計測自動制御学会のロボットマニピュレーションに関する技術調査委員会は、2015年度に設立され、手の科学を基盤にハンドリング技術に迫ろうとしている。

(3.1.8) 人工知能

産業用ロボットとしては、不確定環境においてロボット自身の作業の確実性を保証することが重要となる。外部環境の認識に従来の画像処理による手法よりも、機械学習を利用することによって、認識精度が高まる結果が数多く報告され、産業利用の可能性が拡大している。

(3.2) 研究開発用ロボット

(3.2.1) ロボット・サイエンティスト

2009年、マンチェスター大学の Ross King らが、ロボティクスと人工知能 (AI) を融合し、観察に基づく仮説の生成を AI が行い、その検証実験をロボットにより自動化するシステムを構築し、科学的な知識の発見を自動化可能であることを実証した。同グループはシステムをロボット・サイエンティストと呼んだ。ロボティクスは、スカラロボットと分注ロボット・搬送ロボットをインテグレーションした典型的なライン化方式で、単細胞のモデル生物（この場合は酵母）の増殖率といった単純な観察数値から、未知の遺伝子機能を公共データベースの情報を利用して予測（仮説の生成）し、その仮説を基にロボットが検証実験を行い、結果を解釈し再び仮説を生成するというサイクルを自動化し、機能未知遺伝子の分子機能を明らかにした（生物学的な知識の発見）¹⁸⁾。その後、Eve と呼ばれる化合物スクリーニングとリード最適化ⁱⁱ⁾を自動化するロボット・サイエンティストも生み出した¹⁹⁾。これらの試みは、AI とロボットを研究開発応用した先駆的な研究でありライフサイエンスと AI ロボットの新たなトレンドを生み出した。

(3.2.2) ラボドロイド (LabDroid) によるベンチワークの高度化 / 高再現性化

谷内江（東大先端研・トロント大学）らは、近年、国内のトップロボットメーカーと共同で、人が使う道具を使用し人と同じ動作で作業するヒト型ロボットにより、長時間にわたる難易度の高いベンチワークを自動化することに成功した（図 3-4-20）。

研究室（ラボラトリー）で働くヒューマノイドから造語し、ラボドロイドと呼ばれている。

i) World Robotics Summit の開催形式及び競技種目を決定しました
<http://www.meti.go.jp/press/2016/12/20161202001/20161202001.html>

ii) リード化合物をもとにして、さまざまな化学的変化を行い、薬としての効果が高く、毒性の少ない化合物を見出す活動

る²⁰⁾。オミックス全般の作業や次世代シーケンサーのサンプル処理、細胞培養等の広範のベンチワークを、人が操作してきた装置、ツール、ピペッター、チューブ類を使って行い、既に国内で10台以上が稼働している。ラボドロイドの特徴は、ロボットに使用させるツールや装置を変更することで高い汎用性を生み出すことである。従って、段取り替えやプロトコルの変更が常に伴うライフサイエンスにおける自動化の問題をほとんど解決する。同時に、これまでの周辺機器は既存の資産をそのまま活用でき、導入コストを大幅に削減できる。また、日本の技術の粋を尽くした技術で生み出されたロボットの信頼性は極めて高く、ロボットエンジニアの常駐等のランニングコストが不要となる。さらに特筆すべきは、人の動作をロボットジョブにする際に、暗黙知であった作業が数値化・可視化されるプロセスが必然的に生まれる。その結果、数値最適化が可能となり、人間の熟練者の技術をも凌駕する高度な作業を再現的に繰り返すことが現実のものとなる。ロボットジョブを他のロボットに移植可能であり、特定の熟練者にしかできなかった高難易度の作業を共有・再現できるのである。また、作業ログをリアルタイムにタイムスタンプとともに電子化保存可能であるため、実験ノートの自動生成も可能となり、捏造の完全防止が可能となる。また、ベンチワークに忙殺されていた研究者が、知的作業に集約することが可能となり、研究生産性が革命的に向上することも実証されつつある。日本が直面する、少子化、バイオハザード、再現性の危機、捏造、高額低稼働率装置などの問題を解決するポテンシャルがあると考えられている。



図 3-4-20 ラボドロイド

(4) 科学技術的課題

(4.1) 産業用ロボット

(4.1.1) 変動環境認識技術

変動環境に対応可能とするために、センサーによる環境認識が重要となる。従来のエンコーダ等の内界センサーに加えて、カメラ、超音波センサー、接触センサー、力センサーなど外界を認識する多種類の複合センシングや分布センシングなどが期待される。また、特に以下が注目される。

① 3D ビジョンセンサー^{13)・16)}

従来のステレオカメラ方式に加えて、赤外線などのパターン照射や到達時間計測 (TOF: time of flight) により、単眼のカメラで奥行き情報が取得可能となっている。ただし、さまざまな産業への利用のためには、より高精度で実時間処理に適した機器が望まれる。

② 柔軟センサー

金属性のロードセル型のカセンサーとは異なり、エラストマー材料、導電性材料などを利用した変位センサーや触覚センサーが提案されている。

多様なセンサーが開発されているものの、利用技術としては成熟しておらず、必要なセンサー種類の明確化、不必要なセンサーの利用の排除、何をどこまで認識するかなどの基

本的な課題がある。

画像処理に機械学習を利用することによって、従来よりも対象物認識精度が高まっている。しかし、現状では利用可能な環境の多様性には限界があり、産業界での具体的利用方法を開発する必要がある。

(4.1.2) 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。

(4.1.3) 力制御

今後、機械的な接触作業のニーズが多様化するので、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ところから対象に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。

(4.1.4) 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。

(4.1.5) ロボットの柔軟化

① 手先効果器

ロボットの柔軟性に関して、産業用ロボットでは、組み立て作業を支援する手先効果器として Remote Center Compliance (RCC) が提案され、実用化されている。ただし、挿入作業に目的が限定されており、一般のハンドの柔軟化などが未開拓の課題である。

② 関節

前述のように電動モータに高減速比のギア等を利用すると摩擦力により関節が硬くなる。これを解決する方法として、直列弾性駆動が提案されている。これはモータ出力軸とロボットリンクの間に、機械的に弾性要素を入れて、ロボット関節を柔軟化する方法である。後述の Rethink Robotics 社などが製品化しているが、高速化、高精度化などの課題もあり、一般的には実用化が広がっていない。弾性値を可変にして、このような課題を解決する方法も開発されているが、研究段階にとどまっている。また、関節部にトルクセンサーや手先に力センサーを設置し、外力を計測することによって、目標とする柔軟性をモータ駆動によって人工的に作る方法も提案されている。耐久性、信頼性、価格などの課題を解決する新技術の付与が期待されている。

③リンク

リンク自身を柔軟にすることは、柔軟アーム研究として梁構造の振動抑制や位置制御として報告されている。しかし、一般にリンクの柔軟性について、対人安全性や軽量化/耐久性などの視点での研究開発はほとんど見られない。

(4.1.6) 新材料利用

ロボットに柔軟性を持たせるために、高分子や CFRP などの非金属材料を利用することが想定される。これらの材料を利用することにより、柔軟化、軽量化、低価格化などが達成できると期待される。現状では研究開発段階であり、実用化可能な技術開発が必要である。

(4.2) 研究開発用ロボット

(4.2.1) 作業教示

(3) 注目動向の (3.2.2) で述べた人の動作をロボットジョブにする場合の最も大きな技術的な課題は、関節数が多い双腕ロボットの作業教示が極めて難しく、特殊な経験と技能を持った専門家（ティーチングマン）が必要となることである。大きな自由度と汎用性を持つ一方で、作業内容の変更のたびにティーチングマンが必要となると、普及と一般化は困難であり、やはりランニングコストが下がらない。しかし、この問題を解決するための技術開発は進んでおり、AI あるいは自動軌道生成等、計算機科学によるティーチング技術が進歩し、単純な動きは、ほぼティーチングマンを必要としないシステムも生まれつつある。また、ティーチングマンによって作られたロボットジョブをブロック化しライブラリーを構築し、ライブラリーの既存ブロックを組み合わせることにより、ティーチングをすることなく、ほとんどのライスサイエンスにおける作業内容を自由に変更できることも実証されつつある²⁰⁾。

(5) 政策的課題

(5.1) 産業用ロボット

(5.1.1) 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。

（5.1.2）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。

（5.1.3）異分野協同チーム

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。

（5.2）研究開発用ロボット

（5.2.1）ロボット研究ラボの整備

高度なロボット技術とAI技術を駆使したシステムは現状では極めて高額で、各大学研究室が独自の研究資金で整備することは不可能である。従って、ロボット研究ラボを複数整備し、クラウドを活用した実験受託サービスを行うシステムの整備が望ましい（図3-4-21）。研究者は自由にロボットラボにアクセス可能となるとともに、人件費と消耗品費の無駄を大幅に節減できると予想されるⁱⁱⁱ⁾。各研究機関のロボットラボの運営費は十分捻出することが可能と考えられる。また、今後のロボット技術の競争力は、ロボットのハードウェアだけではなく、操作インターフェースの利便性やロボットジョブのライブラリーの充実度など、ロボットを活用する上での情報量である。情報量とユーザーの数が、システムのデファクト化と技術の成熟度を高める最も大きなドライビングフォースである。従って、政策的にロボットラボ整備の先行投資を実施するとともに、運用・活用方法を広く議論することが必須である。

iii) ライフサイエンスの作業は人手で行うと再現性が低く、無駄な実験を何度も繰り返すことが常である。ロボットが実験することにより、9割の実験を削減できるという予想もある。また、無駄な実験から解放された研究者が、生産的・知的な作業に従事することにより、実験費の費用対効果は大きく改善される。

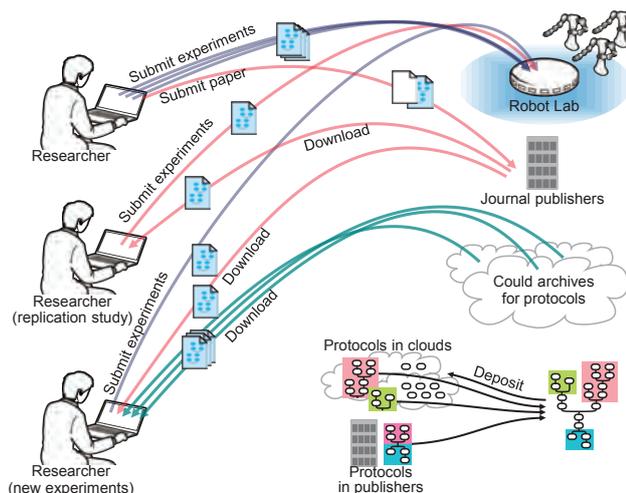


図 3-4-21 ロボットによる実験受託ラボのイメージ

(6) キーワード

産業用ロボット、教示再生方式、高減速比、位置制御、剛体リンク、力制御、柔軟ロボット、接触作業、確定環境、変動環境、キャリブレーション、フィードフォワード制御、変種変量生産、ケーブルレス、スマートオートメーション、ハンドリング、ラボドロイド、ヒューマノイド、捏造問題、バイオハザード、オミックス、細胞培養

(7) 国際比較

表中の丸数字は、①産業用ロボット、②研究開発用ロボットに対応する。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	①△ ②◎	①↑ ②↑	①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る ②アカデミアと産業界が共同でロボティック・バイオロジー・コンソーシアムを組織し、ロボット駆動型の新しい生命科学のあり方について議論が始まった。コンソーシアムが中心となり 2016年6月に RSSB(Robotics and Semantics System for Biology) という国際シンポジウムを実施。海外の著名なライフサイエンスの実験・理論研究者、ロボティクスの専門家、人工知能研究者、コンピューターサイエンティスト等を召還した領域横断的な学術交流が行われた
	応用研究・開発	①△ ②◎	①→ ②↑	①大学で得られた技術が、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 ②ヒューマノイドのライフサイエンスへの応用に世界で初めて成功。誰でも直感的に使うことのできる優れた GUI を備えたソフトウェアから、研究者自身が作業教示し、ロボットを操作可能な技術を開発、実装した。事業化もスタートした ^{iv)}
米国	基礎研究	①△ ②△	①↑ ②→	①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、人工知能での集積化が基礎研究を加速可能である ②ライフサイエンスの自動化は専用ロボットの組み合わせ研究がほとんど。ライフサイエンスロボットの IoT 化は活発に進展

iv) ロボティック・バイオロジー・インスティテュート <https://rbi.co.jp/>

米国	応用研究・開発	①○ ②◎	①↑ ②↑	①ベンチャー企業 Rethink Robotics など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 ② Emerald BioSystems、Transcriptic 等のロボットによるクラウド受託研究サービスが始まっている。ライン化方式がほとんど
欧州	基礎研究	①△ ②○	①→ ②→	①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ますので、多様な研究テーマを実施している ②独 Rostock 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	①△ ②○	①↑ ②→	①米国に比して、ベンチャー企業の活動は顕著ではないが、上記の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 ②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。Bayer 社が運営している INVITE ^{v)} 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を迅速に社内に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	①△ ②-	①→ ②-	①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 ②不明
	応用研究・開発	①○ ②-	①↑ ②-	①人件費の高騰が企業存続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 ②独のロボットメーカー KUKA を美的が買収し、今後の展開が注目される
韓国	基礎研究	①△ ②-	①→ ②-	①基礎研究を政策的に取り組んではいない ②不明
	応用研究・開発	①△ ②-	①→ ②-	①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 ②高度なヒューマノイド、バイオ用ロボットを生産する企業はない

(注1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(注2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(注3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

1) 日本ロボット工業会, 21世紀を切り開く日本のロボット産業

<http://www.jara.jp/other/dl/industry.pdf>

2) 日本ロボット工業会, 産業用ロボット事例紹介

http://www.jara.jp/x1_jirei/

3) World Robotics, Industrial robots 2016, IFR Statistial department, International Federation of Robotics (IFR)

4) ファナック, バラ積みロボット

<http://www.fanuc.co.jp/ja/product/robot/baradumi.html>

v) INVITE GmbH <http://www.invite-research.com/en/>

- 5) 三菱電機, バラ積み部品を整列するロボットシステムを開発
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2011/1011.html>
- 6) 日本ロボット工業会, 21 世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略調査報告書 (要約版)
<http://www.jara.jp/other/koho02.html>
- 7) 日本ロボット学会 ロボット工学ハンドブック 第 5 章 操縦型ロボット, コロナ社, 2005 年
- 8) Rethink Robotics
<http://www.rethinkrobotics.com/>
- 9) Mary Ann Liebert, Inc. publishers., Soft Robotics
<http://www.liebertpub.com/overview/soft-robotics/616/>
- 10) IEEE Robotics & Automation Society, Soft Robotics Technical Committee
<http://www.ieee-ras.org/soft-robotics>
- 11) Jonathan Rossiter, Helmut Hauser, Soft Robotics - The Next Industrial Revolution? [Industrial Activities], IEEE Robotics & Automation Magazine, Volume 23, Issue 3, 2016, 17-20
<http://ieeexplore.ieee.org/document/7565693/>
- 12) セブン・ドリーマーズ・ラボラトリーズ (株), ランドロイドとは
<https://laundroid.sevendreamers.com/about/>
- 13) Intel, インテル RealSense テクノロジー
<http://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/architecture-and-technology/realsense-overview.html>
- 14) Microsoft, Meet Kinect for Windows
<https://developer.microsoft.com/en-us/windows/kinect>
- 15) (株) 三次元メディア
<http://www.3dmedia.co.jp/index.html>
- 16) 三菱電機株式会社, セル生産ロボット向け小型 3 次元ビジョンセンサーと 3 次元物体認識技術を開発
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news-data/2008/pdf/0214-a.pdf>
- 17) Iemura S, et al., “One by one sample preparation method for protein network analysis”, Protein interactions, INTEC open access publisher, 2012, 293-310.
- 18) King, R. D. et al., “Make Way for Robot Scientists”, Science, 325 (5943), 2009, 945-945.
- 19) Wilson, N., “Technology: A robot scientist”, Nature Reviews Genetics. 5 (3), 2004, 164.
- 20) Yachie N, et al., “Robotic Crowd Biology with LabDroids”, Nat. Biotech in press.

3.4.7 システム化技術

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

ロボットは、認識、計画、動作の各知的処理要素の統合、また、センサー、アクチュエーター、コンピューティングの各構成要素の統合、さらには移動機構、アーム機構、ハンド機構、視聴覚機能の各機能部位の統合により構成されることから、ロボティクスはシステム化の技術といえる。

重要テーマの一つである知能化については、より自律的な処理、あるいは、より広範囲の状況に応じた処理を可能にする知能化技術の確立を目指して、他のシステム要素との相互作用、実世界での時間的・空間的な制約、ロボットの能動的な振る舞いとの関係性といった点を特徴としたロボットのための人工知能技術として研究開発が進められている。

一方で、統合化については、事例ベースの積み上げが進んでいる段階である。そのなかでも、全ての要素技術の集積となるヒューマノイドロボットの開発を進めることで統合化に関する多くの知見が得られている。また、ロボットおよびロボットを利用したサービスのシステム化に向けて、開発した要素技術を広く再利用するために、ハードウェアおよびソフトウェアの両面からモジュール化が進展しており、国際的な標準化活動も活発化している。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

知能化のうち認識分野に関しては、主に画像処理 (Computer Vision) 分野と連携しながら、物体や環境の認識といった分野の研究が進められ、これまでは線画の解釈¹⁾に代表される3次元形状の再構成の研究²⁾から、モデルベースの物体認識の研究³⁾が進められてきた。これらの認識では既知の物体を画像から見つけ出す *identification* (同定) が対象であったと言える。一方、2000年代に入ると局所特徴量の抽出と統計的機械学習法の援用による一般物体認識が盛んに研究されるようになってきた。ここでは、画像中の未知の物体をそれが属する既知のクラスに分類する *classification* (分類) が対象とされ研究⁴⁾が進んできており、2015年頃からは人工知能分野における *Deep Learning* 技術 (畳み込みニューラルネットワーク) に基づいた *End-to-End*⁵⁾ の認識処理手法の発展に伴い、一般物体認識の性能が急速に向上している状況にある。また、2010年頃から安価な3次元センサーデバイスが普及し、三次元点群処理の研究⁶⁾や人の動作認識の研究も進んでおり、これらの成果が知能ロボット分野でも盛んに応用されている。一方ロボット分野から発展した認識研究はロボット視覚 (*Robot Vision*) と呼ばれる。これには、ロボットの移動する視点を積極的に制御し認識プロセスに取り込んだ能動視覚 (*Active Vision*) の研究⁷⁾や、実時間で対象を追跡するトラッキングビジョンの研究⁸⁾がある。

計画分野に関しては、ロボットが障害物を避けながら与えられた初期姿勢から目標姿勢への遷移軌道の導出する動作計画 (*Motion Planning*) 研究⁹⁾と、環境を初期状態から目標状態へと遷移させる動作の遷移を導出するタスク計画 (*Task Planning*) 研究に分けられる。前者では配置空間 (*Configuration Space*) の概念が重要である。これは、ロボットの関節数を次元とした空間に障害物を射影したものであり、動作計画問題は配置空間における初期姿勢から目標姿勢への探索問題として定式化された。この方法は多関節のロ

ロボットでは探索空間が膨大になる問題があり、実応用は少なかった。しかしながら、2000年前後には Probabilistic Road Map (PRM) や Rapidly exploring Random Tree (RRT) といったランダムサンプリングに基づく高次元の配置空間における探索問題を効率的に解く現実的な方法^{10),11)}が提案され、一気に応用が広まっている。一方で、タスク計画については命題論理によりタスク計画問題を記述し、これを前向きまたは後ろ向き探索により解を見つける方法¹²⁾が提案され初期のロボット/人工知能研究で利用されていたが、実世界でのより複雑なタスクでは記述力の面からもアルゴリズムの面からも制約が大きかった。その後、PDDL (Planning Domain Definition Language) と呼ばれる標準的な記述言語の確立やそれを用いた世界的な技術競技会が開催され、効率的なヒューリスティックの開発がすすみ、近年では実ロボットを用いたタスク計画の研究や、動作計画とタスク計画の統合に関しても研究が盛んになりつつある。また、ロボット分野特有の問題として認識と動作の不確実性を考慮したプランニング¹³⁾や動的環境に対応する実時間プランニング¹⁴⁾が研究されてきた。

動作制御に関しては、従来の制御手法を用いたアプローチだけでなく、最適化問題として定式化し解法を得るアプローチが、特にヒューマノイドのような多関節で位置制御だけでなく、力やバランスの制御など複雑な制約が多いロボットの歩行問題¹⁵⁾や全身動作生成問題¹⁶⁾を対象に、そこに含まれるさまざまな制約条件を満たす条件内で、二次計画問題等を解くことで目的とする動作を実現する手法として、広く研究され始めている。特に全身動作生成問題は、従来は動作計画の枠組みで取り組まれていた問題であり、最適化というツールを介して動作制御と動作計画の融合が進んでいるように見える。

統合化については、ロボットサービスの実現に必要な要素技術をソフトウェアモジュールとして構成し、ソフトウェアモジュール間の連携を実現するためのミドルウェア技術 (ロボット OS) や、ソフトウェアモジュールが提供する機能を記述するためのインターフェースの定義が重要になってきている。

ロボット OS に関しては、米国 OSRF (Open Source Robotics Foundation) が推進する ROS (Robot Operating System)^{17),20)}が研究機関において多くの利用者を獲得している。その背景にはプロジェクトとしてソフトウェアを開発するだけでなく、コミュニティづくりこそが、ソフトウェアの普及と標準化の鍵になると考え、ROS と共に双腕移動型のモバイルマニピュレータロボット (PR2) を各研究機関に提供するとともに、世界中の優秀な博士課程学生をインターンとして採用しソフトウェアの活用と人材、知識、ノウハウの交流に努めたことが挙げられる。

日本国内においては産業技術総合研究所による OpenRTM-aist (RT ミドルウェア)²¹⁾が後述する RTC の実装として活発に利用されている。これらを利用することにより、C++/Java/Python など複数の言語で、PC 用 OS から組み込み用リアルタイム OS まで複数の実行環境を用いて、ロボット機能の要素技術をモジュール化し、統合することが可能となる。これらの上位層でロボットサービスの連携のためのプラットフォーム技術として、総務省「ライフサポート型ロボット技術に関する研究開発」の成果として UNR (Ubiquitous Network Robot) Platform²²⁾が公開されている。

これらに関連する標準化活動としては、従来は生産技術の一環として ISO/TC184 (Automation Systems and Integration) で活動してきたロボット関連の標準化活動が ISO/TC299 (Robotics) として 2016 年 1 月に分離して設立され、特に WG6 (Modularity for Service Robots) ではサービスロボットのシステム化のためのモジュール化を対象とした活動が始まっている。国内からは、これまで OMG (Object Management Group) において日本が主導的に国際標準化を進めてきた RTC (Robotic Technology Component) および RoIS (Robotic Interaction Service Framework) などの規格を元に提案が進められている。

RTC はロボットの構成要素を分散オブジェクトとしてコンポーネント化するための技術であり、関連規格である FSM4RTC (Finite State Machine Component for RTC) とともに、ロボットシステムのためのソフトウェアコンポーネントのモデルを規定しており、「どのようにコンポーネントを構成するか」を定める。RoIS はロボット対話サービスの実現に必要なコンポーネント機能のインターフェースを定義した規格であり、「どのような機能を持つコンポーネントが必要となるか」を定める。

また、UNR Platform のアーキテクチャは ITU-T にて標準化勧告 F.747 として 2013 年に成立している。

米国においては ROS の実装が主導する形でミドルウェアのデファクトスタンダードを取る形を、欧州では Ambient Assisted Living (AAL) 技術を統合するプロジェクトとしてサービス側からのプラットフォーム化を進めてきたと捉えられる。中国・韓国からは ISO/TC299 での標準化活動に見られるように、既存の要素技術をモジュールとして標準化を目指す傾向が見られる。

(3) 注目動向

現在は人工知能技術、特に Deep Learning 技術やこれに基づいた強化学習技術のロボット応用が盛んに研究されている。その手法や成果が確立するには数年かかると思われるが、認識分野に関してはいまだ画像処理分野で発展してきた手法と学習用データセットに強く依存してはいるものの、多くのロボットの認識行動システムに取り込まれつつある。また、強化学習については 90 年代に一度広く研究が行われていたが、その当時はロボットのとるアクションは離散的であり、タスク計画で扱うような行動レベルと動作計画で扱うような動作レベルに分類すれば行動レベルの動作計画と言えた。一方、近年注目を浴びているものとして、運転動作¹⁸⁾ や物品把持動作¹⁹⁾ など動作レベルでの強化学習の研究が行われており、この方向で研究が進めば強化学習の枠組みで動作計画と行動計画が融合される可能性がある。また、この人工知能とロボットの学際分野では民間のファンディングが盛んであり、Google や Amazon といった米国の IT 企業や、OpenAI という新たに設立されたコンソーシアムが盛んに研究を進めている。さらに中国の検索大手の Baidu が米国のロボティクス研究者を引き抜き研究拠点を構築している。

近年はコンテスト (チャレンジ) 型研究開発がロボットの知能化、システム化のけん引役を務めている点も注目に値する。2013 年、2015 年に開催された DARPA の災害ロボティ

クスチャレンジでは、等身大ヒューマノイドが研究プラットフォームとして米国の参加チームに提供されたことにより、従来はシミュレーションや理論研究を行っていたコンピュータ・サイエンス系の研究グループが一気にヒューマノイド研究に取り込む素地が整えられ、米国でのヒューマノイド研究が盛んになった。また、2015年と2016年に開催された Amazon の棚内物体把持コンテストでは、棚の中に乱雑に置かれた物品の画像認識、動作計画、把持計画、グリッパー機構が課題になり、特に画像認識では各チームが最先端の Deep Learning 技術を取り入れ、短期間でマニピュレーションロボットのシステムを構築した。

ロボット OS を基盤としたオープンソフトウェアの広まりも重要な役割を担っている。新しい手法がオープンなソフトウェアとして提供され、それを各研究グループで活用することが可能になり、新規に開発された手法でも有効なものは急速に広まり定着している。これはロボットのハードウェアに依存しない認識分野や計画分野において特に顕著であり、上記のコンテストにおける Deep Learning 画像認識処理の広まりはその好例である。また、ファンディングのプロジェクトマネージャやコンテスト主催者もロボット OS の現状を深く理解し、そこで利用されているソフトウェアの技術レベルを考慮して、その先につながる適切な課題を設定している。

ハードウェアに関しても従来は各研究グループでハードウェアを開発していたが、近年はロボットプラットフォームと呼ばれる共通の研究基盤が充実してきている。特に、ヒューマノイドや双腕ロボットに代表されるような多関節の複雑な四肢を持ち、環境と物体の認識に基づき複雑な移動や操作のタスクを行うロボットでは、各要素機能の研究だけでなく、その統合による評価や問題点の洗い出し等が可能になり、研究を大きく加速する。ファンディングセクターによる具体的な事例としては、前出の災害ロボティクスチャレンジ用の等身大ヒューマノイド (Atlas) や、米国 NSF と韓国 KAIST が協力した研究教育用のヒューマノイド (NSF-Hubo) の提供があげられる。また、民間でも、主にモバイルマニピュレータ型のロボットプラットフォームが米国 (Fetch)、欧州 (PAL)、中国 (Kejia) の企業から提供され始め、本分野の研究の進展に大きく貢献している。

ROS および OpenRTM-aist といったプラットフォーム技術は、近年、特にその通信層や、コンポーネントモデルの改良に向けて新たな標準の提案・採用を進める傾向がある。例えば ROS の次期バージョンの ROS2 では、ROS1 の通信層の実装を改良するのではなく、DDS (Data Distribution Service) または RTPS (Real-Time Publish Subscribe) の実装を利用することとなった。コンポーネントモデルについては、RTC を参照した一般的なコンポーネント仕様として UCM (Unified Component Model For Distributed, Real-Time and Embedded Systems) の制定が進められている。ロボット分野に閉じることなく、他のソフトウェアコンポーネントと共通の仕様を用いることで、さまざまなアプリケーションサービスとの連携が容易になる。

こうしたプラットフォーム技術に対するファンディング動向として、システム化技術そのものに注力するのではなく、具体的なサービス分野を想定した上で、その実現手段としてプラットフォーム化を志向する傾向が見られる。例えば Horizon2020 では、

Personalizing Health and Care (PHC) 分野において、PHC-19-2014: Advancing active and healthy ageing with ICT: service robotics within assisted living environments など、サービスロボット技術に特化したファンディングが行われている。また、日本との共同ファンディングとして総務省による2016年度「戦略的情報通信研究開発推進事業（国際標準獲得型）」研究開発課題（ICTロボット）や情報通信研究機構による欧州との連携による公共ビッグデータの利活用基盤に関する研究開発が Horizon2020 との連携研究として実施されている。

（4）科学技術的課題

人工知能分野における Deep Learning 認識、強化学習技術のロボティクスへの応用に注目が集まっている。人工知能分野では画像データセットを用いた認識や、強化学習のゲームへの応用等が盛んであるが、ロボット応用では3次元の環境の理解、認識や行動の不確実性への対応、動作失敗時の復帰行動、タスク計画を含む高次の判断、常識や習慣などセマンティクスの領域等が課題になる。

計画分野では、動的環境への適用が可能になるような、高速計算、あるいは、計画の再利用が注目を浴びている。また、障害物を避けるロボットの姿勢だけでなく関節角度や加速度、あるいはそこから導出される全身のバランス等のより複雑な問題への対応が課題になる。同様の問題は動作最適化の分野でも取り組まれているため、両分野での交流から新しい研究の方向性が生まれることが期待されている。

プラットフォーム技術については、具体的なサービスに基づき研究開発を進めることから、対象とする現象に応じてデバイス開発が先行し、ボトムアップに統合を進めることが必須となる一面がある。一方、システム化のための手法はロボット技術に限らず一般的なソフトウェア開発手法を導入することが望ましく、トップダウンに設計を進めるべき側面もある。現時点では、さまざまな応用領域ごとに統合されてきた成果を、連携プロジェクトを通して実践的に統合させることでより抽象度の高いシステムモデルとして融合させる段階にあると考えられる。

（5）政策的課題

政策的な課題としては、従来の研究テーマに対するファンディングに加えて、そこで開発された技術の検証の場として、災害ロボティクスチャレンジに代表されるようなファンディング、プラットフォーム提供、コンテスト型研究開発の一体化による運営が挙げられる。特に、準備と実施を含めて1～2年の短サイクルで何回も回すことで、研究コミュニティの活性化と、研究の加速化が図られる。また、オープンソースの活用はロボティクス研究の基盤となりつつあるが、そこで利用されるソフトウェアもこのように複数の研究グループが同じ課題に取り組み、同じロボットプラットフォームを活用する中で鍛えられ利用に耐えうるものに成長していく点も見逃せない。

また、欧州でもさまざまなロボティクス関連の研究プロジェクトが実施されているが、そこでは数カ国の研究チームが含まれ、人材やノウハウの交流が進んでいる。わが国でも産官学、省庁、多国間の連携を前提とした新しいファンディング制度がたちあがることが望ましい。応用分野ごとに担当する省庁が異なってくることからロボットサービスのシステム化を進めるうえで省庁間の連携が必要である。さらに、システム化技術を幅広く使えるよう抽象化を進める場合には、特定分野への応用という側面が薄れるため、具体的な成果に向けたファンディング制度とは相いれないこととなる。

今後ますます機械学習アプローチによる研究が盛んになることが予想されるが、そこでは学習データが重要な役割を果たす。ロボティクスに特化した標準的な学習データはいまだ存在せず、この分野における取り組みを支援するような政策も重要になってくる。

(6) キーワード

知能化、統合化、システム化、画像処理、3次元点群処理、シーン理解、ロボット視覚、能動視覚、動作計画、タスク計画、確率的プランニング、セマンティック、最適化手法、Deep Learning 認識、強化学習、ロボット OS、オープンソースソフトウェア、コンテスト型研究開発、ネットワークロボット、クラウドロボティクス、サービスロボット、IoT (Internet of Things)、AAL (Ambient Assisted Living)、環境知能、ロボティクスミドルウェア、コンポーネントフレームワーク、モジュール化、分散オブジェクト技術、メッセージングフレームワーク

(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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 日本の大学、研究機関の基礎研究のレベルは高く、特に知能化、システム化の分野では顕著な研究成果も継続的に出てきている。また、大企業の取り組みも活発で、潤沢な資金を背景に積極的に研究開発を進めている OMG および ISO/TC299 における標準化活動でモジュール化技術の抽象モデルの提案を主導している。またコンポーネントフレームワークやネットワークロボット技術の実践を先導してきた 米国や欧州での研究者層が厚みを増しつつあり、相対的には上昇傾向とは言えない状況にある
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 災害対応ロボットや、インフラ整備ロボットの分野での応用が進められている一方、知能化統合化に関しては、コンテスト型研究開発や、研究プラットフォームとなるロボットプラットフォームへの取り組みが弱い 統合されたサービスロボット技術の提案は活発に行われている一方で、モジュール化されたロボット技術を商業的に展開する活動は積極的ではない。そのためクローズドなシステム化となっている
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ロボットプラットフォームの提供、コンテスト型の研究開発を背景に、情報系の研究者を巻き込み活発に研究が進められている。なお、ROS の実装が広く使われており改良が進められているが、次期 ROS2 への切り替えを待つ段階にある
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ロボットの知能化、統合化をコア技術としたベンチャー企業や企業の研究拠点が数多く誕生しており、積極的な応用研究開発が進められている 自動運転車については研究開発が活発であるもののシステム化手法としてはクローズドな段階にある

欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ドイツ、フランスを中心に引き続き情報系と機械系がバランスよく層の厚い研究を進めている ・AALの実現にあたり、ロボットの動作や検出した出来事の意味付けを記述し推論するフレームワークの基礎研究が進められ、システム統合のための基盤となる知識処理技術が確立している ・英国でもロボティクス研究拠点が開設され、米国からロボットプラットフォームを導入し研究に取り組み始めている
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・産業界とも連携しながら、知能化統合化を意識した産業用ロボットマニピュレータ等が商品化されている ・産業用以外では Horizon2020 での応用研究への取り組みは明確であるが。まだ成果が見えるまでに至っていない
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・各大学でのロボティクスへの取り組みが増えており、研究者層も着実に増加している
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・積極的にベンチャー企業等 (Kejia) が知能化統合化の成果を商品化しており、ドローン (DJI) の様に知能化統合化をにらみながら、トップシェアを持つ分野の企業も排出している ・ISO/TC299 においてハードウェアのモジュール化を主導しており、ロボットデバイスの開発成果のアウトプット方法を考慮した活動が行われている
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・KAIST を中心にロボティクスへの取り組みが充実している ・日本とともにサービスロボット技術のコンポーネント化を進めてきた実績があるが、近年は具体的な応用にシフトしている
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ヒューマノイドプラットフォームの商品化を進め各国に導入を進めている ・ベンチャー企業も充実し、ロボット OS 用の入門用ロボットプラットフォームのデファクトスタンダードを生み出す企業 (Yujin, Robotics) も育てている ・ISO/TC299 においてソフトウェアのモジュール化を主導しており、サービス用コンポーネントの開発成果のアウトプットを考慮した活動が行われている

(注1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(注2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(注3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) D.L.Waltz: Understanindg Live Drawings of Scene with Shadows, The Psychology of Computer Vision. pp 19-91, 1975
- 2) デビッド・マー：ビジョン・視覚の計算理論と脳内表現：産業図書（1987）
- 3) D.G. Lowe: Object recognition from local scale-invariant features. ICCV, pp 1150-1157, 1999.
- 4) M. Weber, M. Welling, P. Perona: Towarts Automatic Discovery of Object Categories, CVPR, pp 101-108, 2000
- 5) A. Krizhevsky, I. Sutskever, G.E. Hinton: ImageNet classification with deep convolutional neural networks, Advances in Neural Information Processing Systems 25, 2012
- 6) R.B. Rusu: Semantic 3D Object Maps for Everyday Robot Manipulation, Springer, 2013
- 7) J. Aloimonos, I. Weiss, A. Bandyopadhyay: Active Vision, International Journal of

- Comput Vision, pp. 333-356 ,1988
- 8) H. Inoue, T. Tachikawa, M. Inaba: Robot vision system with a correlation chip for real-time tracking, optical flow and depth map generation, ICRA, pp. 1621-1626, 1992
 - 9) J.C. Latombe, Robot Motion Planning, Kluwer Academic Publishers, 1991
 - 10) S.M. Lavalle: Planning Algorithms, Cambridge University Press, 2006.
 - 11) H. Choest, K. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L. Kavraki, S. Thrun. Principles of Robot Motion, Theory, Algorithms and Implementations. MIT Press, 2006.
 - 12) R.E. Fikes, N.J. Nilsson: STRIPS: A New Approach to the Application of Theorem Proving to Problem Solving, Artificial Intelligence. 2 (3-4), pp 189-208, 1971
 - 13) J. Blythe: Decision-Theoretic Planning, AI Magazine, 20 (2), pp. 37-54, 1999
 - 14) R. Brooks: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, IEEE Journal on Robotics and Automation, 2 (1), pp. 14-23. 1986
 - 15) M. Posa, C. Cantu, R. Tedrake: A direct method for trajectory optimization of rigid bodies through contact. International Journal of Robotics Research 33 (1), pp. 69-81, 2014
 - 16) N. Ratliff, M. Zucker, J.A. Bagnell, S. Srinivasa: CHOMP: Gradient Optimization Techniques for Efficient Motion Planning, ICRA, pp 489-494, 2009
 - 17) M. Quigley et al. ROS: an open-source Robot Operating System, 2009
 - 18) P. Abbeel, V. Ganapathi, A.Y. Ng. : Learning Vehicular Dynamics, with Application to Modeling Helicopters, NIPS 18, 2006
 - 19) S. Levine, P. Pastoor, A. Krizhevsky. D. QUillen, Learning Hand-Eye Coordination for Robotic Grasping with Deep Learning and Large-Scale Data Collection. ISER 2016.
 - 20) Morgan Quigley et al., “ROS: An Open-Source Robot Operating System” , ICRA2009 workshop on open source software, 2009.05, Kobe, Japan
 - 21) Noriaki Ando et al., “RT-Middleware: Distributed Component Middleware for RT (Robot Technology)” , 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2005), pp.3555-3560, 2005.08, Edmonton, Canada
 - 22) Koji Kamei, Shuichi Nishio, Norihiro Hagita, Miki Sato, “Cloud Network Robotics” , IEEE Network Magazine, vol. 26, no. 3, pp. 28-34, May, 2012.

3.4.8 ソフトロボティクス

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

ソフトロボティクスは、ロボットシステムにおける物理的な柔軟性（ソフトネス）を取り扱うロボティクスの新興分野である。主要な研究テーマとしては、柔軟性を積極的に利用した新しいロボットの開発、柔軟物体のモデル化や制御、生物システムにおける柔軟性の機能の解明が挙げられる。接触安全性の付加や、安価な高分子材料を用いた製造などによって、ロボットの応用拡大に貢献することが期待される。材料科学、細胞工学、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) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

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な非常に高度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、コンピューターネットワークや豊富な計算資源を利用した、大量のセンサー情報の処理や知的な制御にフォーカスが移りつつある。2000年代に入って、ロボットの新しい応用分野を開拓する試みとして「やわらかさ」に注目して形成されたのがソフトロボティクスである。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⁾。コンポーネントの統合や、応用の探索を含め、多分野にまたがる魅力的な課題の豊富さが、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、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である。その他、伸縮性はないが屈曲が可能なシートを用いたおりがみロボット、風船構造を用いたインフレーターロボットなどもソフトロボットの仲間とみなせる。ソフトロボットの製作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。

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、研究開発途上のさまざま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。

ソフトロボットは、超多自由度の柔軟物体に多数のセンサーやアクチュエーターが埋め込まれたシステムであるため、そ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、無限自由度の変形や、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。制御入力と運動の複雑な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学習を行う運動制御手法が有望なアプローチのひとつである。そのような学習を行う上では、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。こういった課題は、柔軟部分の多い人体とも共通するところが多く、ソフトロボットのための制御手法やセンサー技術はウェアラブルデバイス等への応用も考えられる。

柔軟な指は、変形によって対象の形状にやわらかくなじみ、つぶしたり傷つけたりせずに把持することが期待できる。ロボットの手先に取り付けることができるソフトグリッパーは研究例が多く、製品化も進んでいる。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企業 **Empire Robotics**³⁾ や **Soft Robotics Inc.**⁴⁾ は、両社ともソフトグリッパーを扱っている。チャックや真空グリッパー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リッパーによって自動化が進むかもしれない。ソフトグリッパーの方式のひとつは、シリコンゴムなどのやわらかい素材を成形し、空気圧で湾曲させる多指ハンドである。他の方法に、ジャミング現象を利用したやわらかいグリッパーがあり、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⁾。ジャミンググリッパーは、丸い柔軟な粉袋を対象に押し付け、袋中を真空にすることで、袋中の粉が摩擦でロックし(ジャミング現象)、対象の形状になじんだまま固くなることで把持を行う特殊なグリッパーである。対象をあらかじめ整列させたり、形状をビジョン認識したりすることなく把持できることが利点である。

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、ソフトグリッパー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。連続アームは、剛体リンクを有限の可動部(関節)で接続した古典的なロボットアームと対比される。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。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に代わるような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。1990年頃にはすでに、国内で形状記憶合金ワイヤの制御方法が検討され、また、空気圧駆動の柔軟な湾曲アクチュエーター (Micro Flexible Actuator:MFA) 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、リハビリテーションロボットやウェアラブル・ロボットの研究で使われている。空気圧人工筋の製品化例は国内外に数件あるが、耐久性や制御性の問題から、利用が拡大するには至っていない。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、取り出せる力が小さいため、ロボティクス応用は限定的である。

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さまざまな研究が行われた⁹⁾。プロペラではなくヒレによって推進する水中ロボット¹⁰⁾の開発においても、水生生物がモデルとなっている。生物規範型ロボットの研究では、把持や操作を行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、生物に学ぶ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。

(3) 注目動向

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¹¹⁾。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者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。

エネルギー源および制御回路も含めてすべて柔軟材料で構成された自立型ソフトロボットが初めて開発され、**Nature**誌で報告された¹²⁾。マイクロ流路を内蔵したシリコーンゴムの身体をもったタコ型ソフトロボットで、電動ではなく流体圧で動作する。

(4) 科学技術的課題

現状のソフトロボティクス研究は、柔軟材料を用いたさまざまな形態の実験的な探索にとどまっており、センシングおよび制御についての取り組みが不十分である。計算機内で柔軟ロボットの動作を扱うには、大自由度の変形・衝突を処理するシミュレーション技術が必要となる。変形や、外界との接触に関する膨大な感覚情報を、どのように取り込み、どのような運動指令を生成するかもまた大きな課題である。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大きな課題である。空気圧アクチュエーターは配管や空気圧源などの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、さまざまなサイズのアクチュエーターが、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。また、設計手法も確立されていない。3Dプリンターなどのデジタルファブリケーション技術の発展にもなつて、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。柔軟材料が出力できる3Dプリンターを用いたロボットの造形が有望視されるが、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開発が必要である。

(5) 政策的課題

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、現状では北米が主な先端的研究の発信源となっている。これは、北米東海岸を中心に関連研究者のコミュニティが形成され、先進的ロボティクス研究に DARPA などから継続的な支援があることが背景となっている。我が国においても、社会的な要求にもとづいて、ソフトロボティクスにおけるグランドチャレンジを設定し、関係各分野の研究者による一体となった研究開発を促進する大規模なプロジェクトが必要である。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。

(6) キーワード

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

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・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りハビロロボットや、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ーンラバー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。コロンビア大学の研究グループは、VoxCAD というソフトロボットのためのシミュレーションソフトウエアの公開を行っている
	応用研究・開発	◎	↑	・ウェアラブルデバイスで応用研究が進んでいる。スタートアップも盛んで、インフレーターロボットを製作する Otherlab から派生した Roam Robotics が空気圧ロボットスーツを開発している。産業用ロボットのためのソフトグリッパーを製品化した Empire Robotics や Soft Robotics Inc. もある。Web サイト Soft Robotics Toolkit が公開されている

欧州	基礎研究	○	→	・タコ型ロボットの開発や連続アームの研究が行われている。また、身体性の観点からソフトロボティクス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。ソフトロボットの競技も開催されている
	応用研究・開発	△	→	・タコ型ロボットから派生した水中ロボット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
	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

(注1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(注2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(注3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) Majidi, Carmel. "Soft Robotics: A Perspective -Current Trends and Prospects for the Future." *Soft Robotics* 1, no. 1 (2014): 5–11.
- 2) Mukai, Toshiharu, 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." In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010)*, 5996–6001, 2010.
- 3) Empire Robotics <http://empirerobotics.com/>
- 4) Soft Robotics Inc. <http://www.softroboticsinc.com/>
- 5) Brown, Eric, 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* 107, no. 44 (2010): 18809–14.
- 6) Ikuta, K, M Tsukamoto, and S Hirose. "Shape Memory Alloy Servo Actuator System with Electric Resistance Feedback and Application for Active Endoscope." In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 427–30, 1988.
- 7) Suzumori, K., S. Iikura, and H. Tanaka. "Development of Flexible Microactuator and Its Applications to Robotic Mechanisms." *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, no. April (1991): 1622–27.
- 8) Kim, Sangbae, Cecilia Laschi, and Barry Trimmer. "Soft Robotics: A Bioinspired Evolution in Robotics." *Trends in Biotechnology*, 2013.

- 9) OCTOPUS プロジェクト <http://www.octopus-project.eu/>
- 10) ETH Zurich Sepios Project <http://sepios.org/>
- 11) Journal of Soft Robotics (SoRo) <http://online.liebertpub.com/loi/SORO>
- 12) Wehner, Michael, Ryan L. Truby, Daniel J. Fitzgerald, Bobak Mosadegh, George M. Whitesides, Jennifer A. Lewis, and Robert J. Wood. “An Integrated Design and Fabrication Strategy for Entirely Soft, Autonomous Robots.” *Nature* 536, no. 7617 (2016): 451–55

3.4.9 認知発達ロボティクス

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

コンピューターシミュレーションや実際のロボットなどの人工システムを駆使した構成的手法を用いて、人間の認知発達過程の新たな理解や洞察を得ると同時に、結果として、人間社会で共生するロボットを始めとする人工システムの設計論を確立することを目指す。新たな理解や洞察の獲得という知識の創出と技術の確立が表裏一体である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) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

本項目の構成として、まず、認知発達ロボティクスの基本的な考え方（2.1）を示し、認知発達ロボティクスを考えるうえで重要な人間の発達を概観（2.2）する。その後で、重要な基本概念である「身体性」（2.3）と「社会的相互作用」（2.4、2.5）を解説し、認知発達ロボティクス設計論（2.6）へのアプローチについて述べる。最後に国内外の研究開発動向（2.7）を紹介する。

(2.1) 認知発達ロボティクスの基本的な考え方

認知発達ロボティクスとは、従来のロボット設計では明示的にロボットの行動を規定していたのに対し、環境との相互作用からロボットが自ら行動を学習・発達させていく過程に内包される抽象化、シンボル化を実現するためのロボット設計論である。当初、「認知ロボティクス」¹⁾とも呼ばれていたが、時間的发展に重点を置く意味で認知発達ロボティクスと呼ばれるようになった^{2),3)}。

認知発達ロボティクスの焦点は、自律エージェントが環境との相互作用を通して、世界をどのように表現し行動を獲得していくかといった、ロボットの認知発達過程にある。特に、環境因子としての他のエージェントの行動が自分の行動をどのように規定していく過程の中に、ロボットが「自我」を見いだしていく道筋が解釈できるのではないかという期待がある。このように環境との相互作用をベースとして、その時間的发展に焦点をあて、脳を含む自己身体や環境の設計問題を扱う研究分野が認知発達ロボティクスである。

認知発達ロボティクスの基本的な考え方は、環境との相互作用を通じてロボット自身が問題自体に対する理解の過程を経験することで、さまざまな状況に対応可能なメカニズムを構成論的アプローチにより構築することである。特に、知的行動を人間のレベルまで求めるなら、人間以外の動物にも可能な連合学習から、人間特有のシンボル生成/利用の記号学習すなわち言語獲得に至る過程（言語創発）が、ロボットの内部構造と外部環境の多様かつ制約的相互作用の中に見いだされる必要がある。

従来のロボティクスでは、人間と共生するロボットのコミュニケーション技術として、トップダウン的に言語構造を与えており、言語創発過程が内包されていない。それゆえ、表層的な言語コミュニケーションにとどまり、限られたコンテキストでの定型的応答しかできない。認知発達ロボティクスでは、言語創発に至る過程そのものを人工的に構成することで、ヒトの認知発達過程の理解とともに新たなロボット設計論を目指す。

こうしたヒトの認知に関する研究は、従来、認知科学、神経科学、心理学などの分野で

扱われてきた。そこでは説明原理による理解を目指しており、認知発達ロボティクスが志向する設計原理に基づくものではない。しかしながら、人間理解という共通基盤をもとに、工学的アプローチからは「システム構成による仮説検証や新たな認知科学的仮説の生成」が、認知科学、神経科学、心理学などの分野に提案され、逆に、これらの分野から「システム構成への仮説」が工学的アプローチに提案され、相互フィードバックによる認知発達モデルの構成と検証が可能である。それが認知発達ロボティクスのひとつの理想形である。

(2.2) 発達の概観と多様相

認知発達ロボティクスを考えるうえで、発達自体に関する知見は非常に重要であり、以下では人間の発達の概観とそれに基づく設計論への示唆を示す。

(2.2.1) 胎児と新生児のさまざまな発達

近年、胎児の立体ソナー動画などに観察されるように、受精から数週間でさまざまな動きがあることが知られている。図 3-4-22 に胎児の運動と感覚の発達時期のデータを示す。

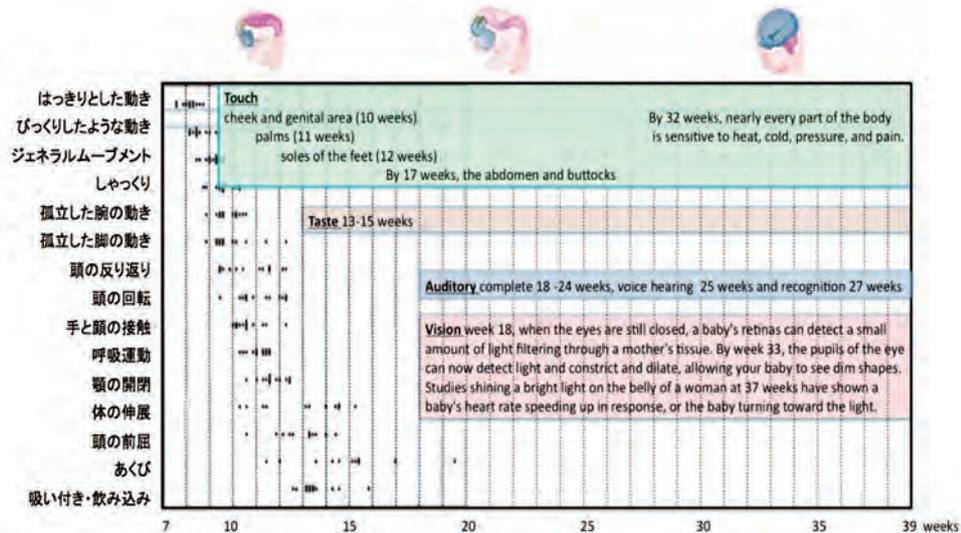


図 3-4-22 胎児の動きと感覚の創発 (出典: 参考文献 3)

触覚が、受精後 10 週くらいから頬、掌、足裏、足先で、そして 17 週あたりには腹部で発達し、32 週までに、ほぼ全身の触覚、温覚、冷覚、圧覚、痛みなどを感じるようになる。味蕾も 7 週くらいから出現し、味覚は 13 週あたりから、聴覚は 18 週～24 週あたりにかけて発達が始まり、25 週でヒトの音声が聞こえ、27 週から認識が始まる。視覚は、18 週で閉眼だが網膜は母胎の組織を通った微少な光を検出する。33 週までに瞳が光を検出し、開いたり閉じたりして大まかな形状を見ることが出来る。母親のおなかに外から光を当てると、それに応じて心拍が増加したり光の方に体を向けたりする⁴⁾。

誕生後、自分のボディースキーマ¹⁾の学習、把持できる物体の学習、道具の学習、内的シミュレーションの学習というように徐々に発達していく⁵⁾。少し詳しく見ると、5 カ月

i) ボディースキーマ (身体図式) とは、固有感覚を含む非意識的な諸感覚のフィードバックから生じ、暗黙裡に身体のコントロールに用いられているような表象 (出典: 生まれながらのサイボーグ アンディ・クラーク 春秋社)

で自分の手をじっと見る (手の順・逆モデルⁱⁱ⁾ の学習)、6カ月に抱いた人の顔をいじる (顔の視触覚情報の統合)、いろいろな角度からものを見る (3次元物体認識の学習)、7カ月に物を落として落ちた場所をのぞく (因果性・永続性の学習)、8カ月に物を打ち合わせ (物体の動力学的モデルの学習)、9カ月にたいこをたたき、コップを口に持って行く (道具使用の学習)、10カ月に動作模倣が始まる (見ることができない動きをまねる: オツムテンテンなど)、11カ月に微細握り、他者に物を渡す (動作認知と生成の発達: 協調・共同行為の起源)、12カ月に、ふり遊びが始まる (内的シミュレーションの起源)、そして、12カ月に降で他人の動きを見ながらまねる。このように、人間の赤ちゃんは、胎児期と出生後、目覚ましい勢いで認知発達過程を示す。

(2.2.2) 発達の多様相

こうした発達の様相を、外から観測した場合、内部構造として捉えた場合、それらの基盤となるもの、そして社会的構造の観点から切り出し、その背後にある構造を考えてみる⁶⁾。

外部から観測した場合、中央制御ではなく、分散かつ自己組織化的で漸次的過程とみなせる。発達段階の後段の構造は、前段の不完全で効率の悪い構造と行動表現の上に構築され、通常的人工システムと大きく異なっている。また、乳幼児の生態学的な意味での拘束は、必ずしもハンディではなく、むしろ発達を促す。脳、身体、環境の間の共同作用もしくはパターン生成の固有の傾向は、各種「引き込み現象」を引き起こし、さらに、能動的探索により自己の身体表象、自由度の拘束などによる運動パターン生成など自己組織化過程が見られる。

このような環境に対する能動的な探索と操作の結果は、発達心理学においては、知覚範疇化と概念形成であると考えられている。感覚やある種の知覚は運動と無関係に処理されるが、知覚範疇は感覚系と運動系の相互作用に依存する。自己組織化過程において、ミクロな構造として各種の調整を行う神経修飾物質があり、強化学習などにおける価値や神経可塑性と関連して、これらの相互作用をメタ学習の計算モデルから予測する研究も行われている。

マクロには、養育者をはじめとする他者の関わりが赤ちゃんの自律性 / 適応性 / 社会性を助長している。養育者による足場作り (scaffolding) は、認知的、社会的、技能的発達に重要な役割を果たす。また、乳幼児は養育者の反応に対する感受性期があり、養育者はこれに合わせて対応を調整する。

これら発達の過程において、認知発達ロボティクスの観点から重要な点は「身体性」と「社会的相互作用」である⁷⁾。以下では、これらについて説明する。

(2.3) 再考: 身体性

ロボットが「経験、学習、発達」するためには、身体を持つということ、すなわち「身体性」が重要な役割を果たす。ロボットの身体性とは以下を意味している。

① さまざまな環境やその変動およびロボット自身の内部状態を感知できる感覚能力、環

ii) 順モデルとは、脳から筋肉に送信された運動司令の遠心性コピーから運動結果を予測すること、逆モデルとは、望ましい運動結果から、それを実現するために必要な運動司令を計算すること

境に働きかける多様な運動能力、それらを結ぶ情報処理能力は不可分であり、密に結合していること (不可分性)

- ② 限られた資源 (感覚の種類や能力、運動能力) や処理能力の範囲で目的を達成するために、知覚・運動空間の関係を経験 (環境との相互作用) を通じて学習できること (学習可能性)
- ③ 達成すべき目標や環境の複雑さの増大に対して適応的に対処できるように、学習結果の経時的発展 (発達) を可能にすること (発達可能性)

これらのことを示す興味深い実験が、生後2週間の2匹の子猫の生理実験 (図3-4-23 参照) である⁸⁾。1匹は自ら歩行し、もう1匹は自ら歩行できない状態で、同じ視覚入力を与えた場合、前者が正常な奥行き知覚を構成できるのに対し、後者は正しく視覚入力を解釈できず正常な奥行き知覚が構成されないとされている。このことは、感覚入力を正しく理解する

には、自らの能動的な運動入力が必要であること (不可分性)、それらの関係を学習できること (学習可能性) が大事であることを示している。さらに、自ら歩行していない子猫も、ゴンドラから取り出して歩けるような環境を与えれば、正しい知覚が構成される (可塑性・再学習可能性と発達可能性)

以上をまとめて、浅田、國吉らは、身体性を「行動体と環境との相互作用を身体が規定すること、およびその内容。環境相互作用に構造を与え、認知や行動を形成する基盤となる。」と規定している⁶⁾。身体を感覚・運動・認知を支える物理的基盤と考えると、身体の物理的構造による拘束 (形態) だけでなく、感覚器、運動器、認知機能など、どのレベルまで生物学的な意味合いで内部構造を模擬するかは議論的である。以下では、現状と課題について探る。

(2.3.1) 脳神経系

構成的手法として、これまで扱ってきた身体は、脳神経—感覚器—筋骨格—体表面系の一部であり、消化器系や循環器系、呼吸器系 (音声模倣で一部呼気のみ扱っている) は、陽には含まれていない。従って、随意神経系である体性神経系と対照される自律神経系も含まれていないに等しい。Kuniyoshi and Sangawa⁹⁾ のように運動野と感覚野のみのごく一部を扱っているものがあるが、他の脳部位を想定したとしても明確な対応付けが困難な場合が多く、発達の視点も考慮に入れると対応問題が難しくなる。すなわち、

- ① 乳児の脳の状態、すなわち構造と機能は成人の脳から引き出すことはできないし、すべきでもない

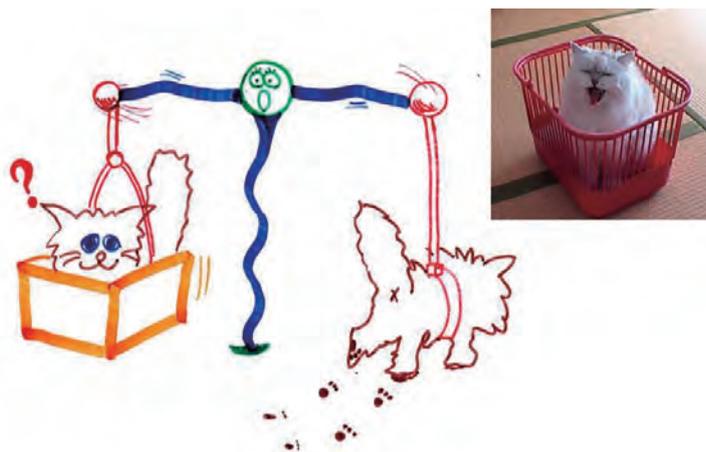


図 3-4-23 Hele and Hein の生後 2 週間の双子の子猫を使った実験の概念図

- ② 言語発達の初期においては左脳より右脳の障害のダメージの方が大きい。このことは、最終的な言語野と呼ばれる部分が最初から中心的な役割を果たしているのではなく、発達の初期段階では異なる部位が関わっていると考えられる
- ③ 共同注意や言語の発達に見られるように、巨視的には機能の神経機構が皮質下から皮質へ、脊椎、脳幹から前頭前野へと移行していると見受けられる

などが指摘されている。このため、認知発達ロボティクスでは、個体発達をメインにした森、國吉らの最小実装から始めて徐々に機能と構造を複雑化するボトムアップ的なアプローチ¹⁰⁾に加え、他者を含めた環境、特に養育者との相互作用を主体としてモデル化するアプローチがあり、その場合の脳神経系の設計原理としてはミラーニューロンシステムがキーとなる。

(2.3.2) 骨格筋系

筋骨格系は人間をはじめとする動物の運動を生成する身体の基本構造である。これは、従来のロボットではジョイント・リンク構造に相当するが、アクチュエーターとして前者では筋肉が、後者では主に電磁モータが利用されている点が大きな違いである。

電磁モータは、制御が容易であるなどの観点からアクチュエーターの代表であり、さまざまに利用されている。制御対象と制御手法を区別し、制御手法を駆使することで、さまざまな動きを実現可能であるが、トルク、速度ともに大きく変化する接触をふくむ激しい運動は非常に困難である。

これに対し、筋肉では、筋骨格系身体を効率的に利用して、跳躍・着地、打撃（パンチ、キック）、投てき（ピッチング、砲丸投げ）など瞬発的な動作を実現可能である。また、筋骨格の構造としては、一つの関節に対し複数の筋肉が、また一つの筋肉が複数の関節にまたがって張り巡らされ、複雑な構造となっている。そのため個々の関節の個別の制御は難しく、身体全体として環境と相互作用し、動きを生成する。一見、不都合にも見えるが、逆に超多自由度ロボットにおける自由度拘束問題ⁱⁱⁱ⁾の解決策とも言える。このような生物にならう筋骨格系の人工筋としてMcKibben型空気圧アクチュエーターが注目されている。新山、國吉、Hosoda et al.¹²⁾は、跳躍ロボットを開発し、動的な運動を実現している。先の自由度の拘束に関して、この二つのグループは、二関節筋構造（一つの筋が二つの関節にまたがって接続されている構造）の脚ロボットで運動のコーディネーションが一関節筋のみの場合に比べ容易であることを実験的に示している。これらは、制御が身体構造と密接に結びついていることを示している。すなわち、身体が環境との相互作用を通して、制御計算を担っているとも解釈できる。その極端な例が受動歩行であろう。明示的な制御手法もアクチュエーターもなしに坂道で歩行を実現できる。これは、物理的身体のエネルギー消費（資源拘束や疲労）の観点からも重要である。

身体性を大きな特徴とする認知発達ロボティクスでは、発達モデルで述べた運動学習から脳の高次機能学習へのシームレスな発達が理想であり、その観点からアクチュエーターとして、電磁モータではなく人工筋のような動的な運動が生成可能なものが望まれる。

iii) 「超多自由度の運動機構系に対して、どのように運動を構造化するか？」はBernsteinが指摘した運動発達の基本問題¹¹⁾

(2.3.3) 体表面

皮膚感覚は、その重要性は認識されつつも、技術的な実現の限界から人間型ロボットに、これまであまり採用されてこなかった³⁾。しかし、最近では、約 200 個の PVDF 素子が触覚センサーとしてシリコンの柔らかい皮膚の下に装着された CB2¹³⁾ などが認知発達研究の研究プラットフォームとして開発されている。また、Ohmura et al.¹⁴⁾ は、柔軟かつ切り貼り可能な触覚センサーを開発し、ヒューマノイドの全身に 1800 個を超える触覚として実装している。また、Takamuku et al.¹⁵⁾ は、プラスチックの骨格にゴム手袋を装着し、PVDF 素子とゆがみゲージをシリコンと一緒に注入したバイオニックハンドを開発し、指や掌の触覚と把持運動を利用して数種の物体を識別している。センサー素子は校正されておらず、自己組織化を目指している。ヒトと比べセンサー素子は圧倒的に少ないが、受容器の種類として類似の構造を取っており、ヒトの把持スキルの学習発達研究への拡張が期待されている。

体表面の皮膚感覚は、体性感覚と密接に結びつき、ボディースキーマやボディーイメージ^{iv)} などの身体表象を獲得する上で非常に根源的かつ重要な感覚である。高次脳機能が、このような基本的な知覚の上に構成されることを考えれば、認知発達ロボティクスとしては、何らかの形で実装していることが望ましい。メカノレセプターとしての構造化に加え、痛みとしての感覚は、生物の場合、個体の生命維持に必須であるが、その社会的意味としての共感^{v)}は、将来、人間と共生するロボットにも望まれる。その際、明示的にプログラムされた物理的インパクトへの応答ではなく、共感としての情動表現が可能であれば、より深いコミュニケーションが可能と考えられる。これは、以下のミラーニューロンシステムとも深く関連する。

(2.4) ミラーニューロンシステムと社会性発達基盤

サル^{vi)}の腹側運動前野 F5 で発見されたミラーニューロンは、ヒトの場合に対応する部位がブローカ野の近くでもあったが故に、言語能力に至る道筋での重要な役割を果たしていると推察された。その後の研究から多くの事柄が明らかになりつつある^{16),17)}。

最大の焦点は、他者の動作プログラムを自身の脳内で再現すること、すなわち、他者の内部状態を自己の内部状態としてシミュレーションできることとされている。これは、自己弁別、他者の行為認識、共同注意、模倣、心の理論、共感などと関連すると考えられる。村田¹⁷⁾ は、これらに基づき以下のように論じている。

- ・自己や他者の身体をそれぞれ認識するシステムがどこかで共有
- ・自己身体認知のステップとして、遠心性コピー^{v)}と感覚フィードバックの一致が運動主体感を構成し（実際、田村らのグループで頭頂葉のニューロンが遠心性コピーと感覚フィードバックの情報の統合に関わることを発見している）、ずれた場合には、運動主体感が構成されず他者の身体と認知
- ・ミラーニューロンは、もともと、自他に関わらず動作そのものを視覚的にコード化し、

iv) ボディーイメージとは、身長、痩せている・太っている、目や耳が大きいといった顕在的な自己身体に関する知識（脳科学辞典 <http://bsd.neuroinf.jp/wiki/> 身体図式）

v) 運動制御においては運動の指令が運動野に送られるだけでなく、その信号のコピーが感覚領野にかえってくると考えられている。このコピーは、中枢神経から末梢系に送られるので、遠心性コピーと呼ばれ、感覚フィードバックの予測に使われると考えられる。また、こうした信号は運動の主体の感覚に必要である。求心性コピーは、逆に末梢系から中枢神経系に送られる信号で感覚系の信号が相当

運動実行中に感覚フィードバックとして働いていたが、発達・進化の過程で、運動情報と統合され、現在のミラーニューロンを構成

- ・ミラーニューロンは、他者の動作認識とともに、自己の身体や他者の身体の認識に関与
- ・遠心性コピーと感覚フィードバックを照合する頭頂葉が、一致（自己という意識）とズレ（他者という意識）のいずれを検出しているのか不明（ヒトの研究では右の頭頂葉はズレを検出しているらしい）

嶋田¹⁷⁾も、ほぼ同様の立場だが「外在性身体情報（主に視覚に由来）」と「内在性身体情報（感覚や運動指令（遠心性コピー）に由来）」とう表現を用い、ミラーニューロンの活動について、「視覚野において、外在性身体が同定され、内在性身体との整合性がチェックされるが、このとき自他弁別のようにその差異が意識されるのではなく、その差異を解消するように内在性身体が調整され、その結果として運動野や感覚野の活動が起こる。この外在性身体から内在性身体への処理の流れは、運動が常に視覚フィードバックを元に修正されていることを考えれば十分可能である。」と述べている。そして、自他弁別とミラーニューロンシステムの共通点として、外在性および内在性の身体に関する諸感覚（視覚、触覚、聴覚、体性感覚、運動指令）の統合プロセスであるとしている。

このような「自己と他者の内部状態の共有と弁別」の過程は、運動経験だけに限られないと容易に察せられる。他者が触られた場合の自身が触られている感覚（体性感覚野や頭頂連合野が活性）、快/不快なおいを嗅いでいる他者を観察した際の反応（情動系の回路が反応）、他者の痛みの知覚などが挙げられ、共感の元となっていると考えられる。自己と他者の経験が脳内の共通する部位で表現されているということは、他人の経験を自分の経験のように処理するメカニズムと解釈でき、こうした「鏡のような」脳の特性が感情を含めた他者の内部状態を共有・理解する能力の神経的基盤の一つではないかと考えられている¹⁷⁾。

このようにミラーニューロンシステムは、自己と他者の共通性と差異に基づいた自己や他者への気づきを駆動し、社会的な行動の学習・発達に寄与しているとみなせるが、ミラーニューロンシステム自体が、どこまで生得的で、どれくらい学習可能かは定かではない。サルのミラーニューロンシステムの場合、対象が明示された他動詞的な動作にしか反応しないが、ヒトの場合、自動詞的な動作、つまり目的を持たない行動に対しても反応するミラーニューロンシステムが存在する¹⁶⁾。

仮説として、サルの場合、ヒトに比べて個体の生存のための圧力が大きく、ゴール指向の運動が個別に確立して早く駆動可能である。ヒトの場合は、養育者の庇護をうけるので、その圧力が小さく、ゴール指向のみならず目的を持たない要素運動的なものにも反応することで、学習による構造化や組織化による汎用性が高まる余裕があり、結果として、より社会的な行動や認知能力へ拡張されたと考えられる。先に述べたように「自他弁別のように、その差異が意識されるのではなく、その差異を解消するように内在性身体が調整され、その結果として運動野や感覚野の活動が起こる¹⁷⁾」ならば、こうした行為の連続が模倣やコミュニケーションにつながると考えられる。サルの場合には、生存の圧力が大きいため「自己と他者の差異を埋めていく」動機付けが低く、模倣にまで至らないと考えられる。事実、サルは模倣しないとされている。

(2.5) 認知発達ロボティクスによる社会性発達モデル

胎児から始まり子どもに成長するまでの発達過程を、社会性発達の観点からモデル化する試みが行われている。議論の基本的な考えは以下の通りである。

- ① 進化的過程まで踏み込まず、個体発生のレベルで議論するので、事前埋め込みは想定するが、なるべく最小に押しとどめ、可能な限り個体の学習発達過程での説明および設計を試みる。身体の構造、特に脳部位や感覚器、筋骨格系の配置、それらの結線構造を基本埋め込みとし、それら以外の事前埋め込みは、社会性発達モデルの各段階で議論する
- ② 自己他者認知のレベルに従って社会性の軸を構成する。すなわち、自己とは異なる対象と感知されるが、それが自分と類似した他者として明確には認知されない非明示的な他者（環境を含む）から自分と類似した明示的な他者の存在認知への変化を発達の基軸とする
- ③ 非明示的な他者から明示的な他者認知の過程でミラーニューロンシステムの役割を明示し、その構築と利用の可能性を議論する
- ④ 学習法として、ヘブ学習^{vi)}および自己組織化マッピング^{vii)}を基本的に想定する。事実、これまでの構成的手法の多くは、これらの学習法を利用している

図 3-4-24 に、ミラーニューロンシステム (MNS) を背景とした自己他者の確立過程を模擬した。

自己他者が未分化な状態から始まり、Neisser¹⁸⁾に従った分け方をしているが、明確な境界があるわけではなく、連続であると同時にモダリティや発達する認知能力により一様に発達するわけでもない。むしろ非一様であり、発達段階でどのように相互作用しあうかが興味ある点である。明確な自己や他者の表象があるというよりも、相互作用の動的な状況のなかで、それらに対応する状態が創発される構造が望まれる。

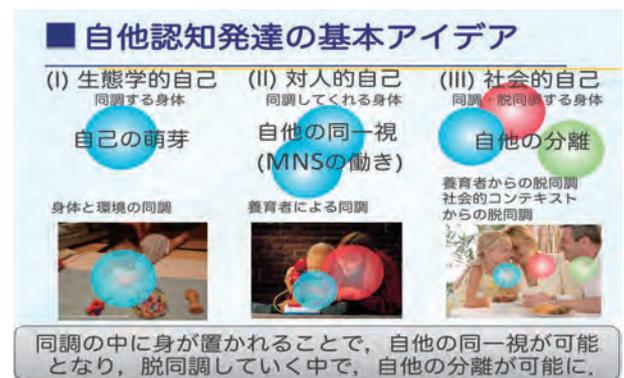


図 3-4-24 社会性の初期発達

(2.5.1) 自己と他者が未分化な状態

近年、4次元超音波撮像などの可視化技術の進展により、胎児のさまざまな行動および能力が明らかになりつつある¹⁹⁾。この時期は自己他者未分化状態と考えられ、母胎内羊水環境で、母親の身体の内外からの刺激としての音や光などが非明示的な他者として作用する。

胎児の感覚の始まりとして、先にも述べたように、触覚は受精後約 10 週から、また視覚は 18 週～ 22 週の間くらいからと言われている。身体表象が身体のクロスモーダルな

vi) シナプスにおいて、シナプス前ニューロンの繰り返し発火によってシナプス後ニューロンに発火が起こると、そのシナプスの伝達効率が強化される

vii) 視覚野におけるコラム構造の自己組織化をモデル化したもの

表現だとすると、視覚によって他者の身体を知覚する前から、自身の身体表象が触覚などの体性感覚と運動の学習からある程度獲得されていると仮定しても不思議ではない。この時期は、視覚、聴覚が作動しつつも、発声や四肢の運動との明確な結びつきが薄く、それぞれが未分化、未発達な状態にあると仮定できる。ただし、次節でも述べるように、口唇周辺や手の触覚分布の高密度である点や体内での身体の姿勢の拘束から、吸い付きなどの口唇と手の協調運動(手を口唇に近づけると口が開くなど²⁰⁾)が学習されているとみなせ、ミラーニューロンシステムの基盤として、個体の運動のライブラリーが獲得され始めているとみなせる。

Kuniyoshi and Sangawa⁹⁾の研究では、人の身体、神経系の生理学的知見に基づく個々のモデルを組み合わせ、一つの赤ちゃんモデルとした。このモデルを用い、母胎中の胎児の発達および誕生後の行動をシミュレーションし、人の運動発達の理解を目指した。学習の結果、皮質上に、筋肉ユニット配置、より一般には体性感覚・運動マップを獲得した。この学習により、母胎内では当初ランダムであった運動が徐々に秩序化してくること、誕生後の母胎外の重力場での運動で、はいはいや寝返りに似た運動が創発されたことが報告されており、まさに“Body shapes brain”の典型例と言える。最近では、これを起点として、脳や身体、環境のシミュレーション粒度を高め、社会的行動発生原理をも含むことを狙っている¹⁰⁾。そのためには、ミラーニューロンシステムのような構造が創発することが期待されるが、埋め込みとしての内的構造の基盤に加え、環境の外的構造の要件が必要である。

(2.5.2) 自己と非自己の区別の始まり

新生児期の最大のミステリーは新生児模倣²¹⁾であろう。明和は、比較認知発達科学の立場から、個体発生的な観点、進化史の観点から議論している²⁰⁾。呉²²⁾は、重度障害児観察(随意運動がほとんどなく大脳皮質が解剖学的にも機能的にもほとんど残存していない重度の脳性麻痺障害者で、新生児模倣^{viii)}と同様の口の模倣が観られる)から、新生児模倣の神経基盤は主に皮質下にあるのではないかと推論している。これは、手や口唇部分の触覚分布密度も高いことも含めて、口唇周辺の運動がかなり生得的である可能性を示している。皮質下での学習の可能性は連合学習が可能なこと^{ix)}からも十分伺える。

認知発達ロボティクスの観点からは、大胆ではあるが、これを支持する二つの仮説が挙げられている。一つ目の仮説は、身体構造の物理的拘束である。胎内の窮屈な状況では、両手を抱えているケースが伸ばしている場合よりも多く、口などの顔の近くにくる可能性が高いこと、その場合の運動経路にあまり自由度がないと察せられることである。これは、先にも述べたように、関節構造だけでなく、筋の張り方により可能な自由度が既に拘束されていることを意味する。二つ目の仮説は、情報量を増大するための探索などの能動的な行動原理である。すなわち、口唇部は触覚密度が非常に高いと仮定すると、他を触るよりも多くの情報量が入ってくる可能性がある。また、口腔内という身体表面と異なる意味合いをもつ部分に対する探索行動としても、胎児にとって興味ある対象と考えられる。

viii) ヒトやチンパンジーなどの生後まもない新生児が、他者の顔の動き、特に舌出し行動などを模倣する現象のこと

ix) 連合学習の成立機構 (<http://www.tmd.ac.jp/med/phy1/ptext/high3.html>)

胎児期や新生児期は、ミラーシステムに必要な自己感覚運動写像、特に口唇周辺の手の稚拙な運動が獲得されると考えられる。まだ他者の概念はなく、生態学的な自己と非自己の区別がなされ始める時期と考えられる。その基本として、自己の身体認知課題がある。随伴性規範に基づく自己身体弁別は、宮崎、開²³⁾が乳幼児を対象として時間遅れに対する認知感度について考察している。計算論的には、Asada et al.²⁴⁾が、状態次数推定的方式を提案している。次数1で観測と運動の直接相関がとれ、静止環境か自己身体もしくは自己身体と同期した動きをする物体、すなわち道具などを切り出すことが可能である。次数2以上は、その他に属され、他者や他者の操作する物体などが含まれる。ただし、自己と類似した他者という明確な表象ではない。

(2.5.3) 明示的な他者の存在を感じる時

生後の一年は、未熟ではあるが視覚による外界認知、特に自己身体である手を見つめるハンドリガードや母親の顔をいじる視触覚融合、物体を把持し、さまざまな角度から眺めたり、落としたりすることで、3次元物体認識や物体の運動の因果性などの学習が行われる。これらを通じ、生態学的な自己と非自己の区別が確立される。さらに、この後、対人的自己や明示的な他者、三項関係^{x)}などの理解能力が確立されると考えると、基本課題として、自他弁別、他者行動認識が挙げられ、ミラーニューロンシステムが作動するために必要な機能である。

自己と他者が似た存在であるという認知は、他者の内部状態を推定する上で、前提となる条件と社会学では考えられてきたようである。実藤²⁵⁾は、先行研究を踏まえ「ヒトに備わった自他の類似性理解を通して、乳児は他者の中に自己を置いてその動きをたどることが可能となり...それは、他者の身体や行動の中に自己との類似性を見いだすことができるだけでなく、ある行動にともなって生起する他者の心の動きにも自己との類似性を見いだすことができるようになることを意味する。」と議論している。すなわち、自他の類似性理解は他者の要求や意図、感情の理解といった後続する社会的認知発達の一側面を支える基盤と仮定される²⁶⁾。

構成的手法の観点から、類似性理解の基礎として、顔のようなパターンに対する好みを前提とし、視覚による他者観測時における顔パターンの検出および自身の顔部位との対応課題が挙げられる。新生児模倣に対する学習可能性として、Fuke et al.²⁷⁾は、視野内で腕を動かし、運動中の関節角速度と手先位置変化量の間を関係づける写像をニューラルネットによって学習し、その結果を用いて視野外でも腕の関節角度を通して手先位置を推測するモデルを提案した。また、接触運動中の各種センサー入力値に発生する不連続性をもとに、自己の顔表面からパーツを構成する特徴的な触覚センサー情報を抽出するモデルを提案した。さらに、抽出した顔の情報を他者の顔の視覚情報から抽出される特徴的な視覚情報と対応関係をとることにより、顔の模倣の基盤となるモデルを提案した。顔という非常に重要なコミュニケーションインターフェース部位の類似性理解を起点として、他の身体部位の類似性理解、さらには、行動の類似性理解にもつながると考えられる。

そこで、次の課題の「他者行動認識」だが、その前提として座標変換の課題がある。同

x) 私、貴方、物の三つの関係であり、私が貴方に物を渡すなどの四語文で表現されるような関係

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ある。頭頂葉で自己座標系と他者座標系の変換が行うわれているようである²⁸⁾が、発達の観点からは、生得的と考えるより、生後の学習の結果として変換プログラムが構築されると仮定する。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²⁹⁾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。しかし、ヒトの場合は、もっと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。その場合には、並行する他の認知機能の発達との兼ね合い（独立/相互促進/干渉）も構成的手法の観点から興味深い課題である。

(2.5.4) 養育者という他者と自己との相互作用

乳児期とオーバーラップするが、この時期は養育者という、より明確な役割をもつ他者の概念が確立されると同時に、自身に対する概念的自己也確立されるであろう。この時期の代表的課題として、共同注意、模倣、共感などが挙げられる。

これまでの共同注意を実現するロボット研究^{30),31)}では、主に視線制御のみを扱っており、「共同注意は、他者の視線を追従した先にある他者の注意の対象に、自ら注意を向けることを必要条件としている。」にあてはまるとは言い難い。何らかの形で自他弁別や他者行動の認識が可能であれば、共同注意の基本行動としての視線制御から、他者の注意対象を推察しながら視線を合わせる合目的行動としての共同注意（この場合、共同注視）への発達³²⁾が可能になると考えられる。この過程で、他者の注意が自己の中で表象され、自己の注意との共有、嶋田¹⁷⁾の言葉を借りれば、他者の注意を自己の注意としてすりあわせることで、注意が共有される。これは、まさしく、ミラーニューロンシステムの働きとみなせる。なぜなら、2.4で述べたように、例えば、他者の背中を誰かが触ったのを自分が見たときに触られ行動を感じるように、視覚的に対応可能な自他のアクション間のみならず、直接観測できなくても内部状態として抽象化した知覚の対応を取ることもミラーニューロンシステムによって可能であると考えられるからである。このような過程によって、自ら他者の注意を喚起する視線行動である社会的参照などの社会的行動が獲得されるのであろう。

模倣に関しては、先に述べた座標変換が可能であれば、模倣行動の生成に関しては、問題が少ない。音声知覚の場合の座標変換は、音韻的な違いにも関わらず、自己と他者の間でシンボルとして等価と見なせるようになるかが課題である。構成的手法としては、養育者がゴール指向の情報を明示的か非明示的に関わらず大きなバイアス与えていることを仮定した研究がなされている³³⁾。模倣したり、されたりすることで、コミュニケーションの頻度が増し、学習が加速する。

前節で類似性理解の出発点の部位として顔の重要性を指摘したが、より積極的には、顔認知から顔表情表出の課題がある。コミュニケーションにおいて、他者の顔表情や視線を識別し、それに応じて行動することは極めて重要であり、構成的手法にとって顔の設計や構築のハードルは高いが越えなければいけない課題である。

Watanabe et al.³⁴⁾ は、直感的親行動^{xi)} にもとづいて共感ロボットを構築した。明示的時には非明示的に、親が子どもの立場に立って、自身の、すなわち子の内部状態に対応する顔表情を表出させることで、子が親の顔表情の意味する内部状態が推し量れるという仮説に基づいている。ただし、この研究はこの部分に焦点を当てたので、内部状態空間において他者と自己の区別がない。先の議論を考慮すると、概念的自己の確立として、他者もしくは他者性として似ているが完全同一ではない存在の認知があり、そこに自己とは異なる差異が存在する。この過程で、先にも述べたように、差異を埋めて行く行為の連続が模倣やコミュニケーションにつながると考えられる。

(2.5.5) 自己概念の社会的発達とミラーシステム

これまで、自己概念の社会的発達とミラーシステムの関係性を構成的手法の観点から眺め、認知発達ロボティクスの研究例を交えて、その課題を示してきた。さきに述べたように、時期や認知機能に応じて、個別に表象するのではなく、統一かつ構成的に認知発達を説明かつ設計可能な形で提供できなければ新しい価値観につながらない。すなわち、図 3-4-24 に示した自己概念の発達が、個別の表象ではなく、統一的な構造の発展なり創発の帰結として生じることが期待される。ただし、非常な困難を伴う取り組みであり、この問題意識を背景に課題を切り出さざるを得ない。その際、対象とする月齢の時点での想定される認知能力、学習発達させるべき認知機能を明確にし、それらの関係（独立/相互促進/干渉）を明らかにすることの積み重ねで、おぼろげながら全体像をポップアップできれば、結果として新しい価値の創造が期待できる。

認知発達ロボティクスとしては、言語や心の理論課題が、シンボリックな意味でゴールになる。これまで述べてきた自己と他者の概念確立の発達過程を経て、モダリティに依存しない模倣能力により、動作によるコミュニケーションから音声コミュニケーションへの発展が期待される。そのためには、研究用プラットフォームの開発も重要である。また、研究対象として扱えるようになるには時間を要する課題として、記憶の問題がある。

(2.6) 認知発達ロボティクスの設計論

環境、身体、タスクが一体となって認知発達するロボットの設計論を構成しなければならないが、大きく 2 つに分けて説明する。一つは、身体を通じて行動するための環境表現を構築していくロボット内部の情報処理の構造をどのように設計するか、もう一つは、そのように設計されたロボットが上手に学習や発達できるような環境、特に教示者をはじめとする他者の行動をどのように設計するかである。両者が密に結合することで相互の役割である学習・発達が可能となる。

重要なポイントは、獲得すべき行動をロボットの脳に直接書き込むのではなく、他者を含む環境を介して（社会性）、ロボット自身が自らの身体を通じて（身体性）、情報を取得し解釈していく能力（適応性）と、その過程をもつ（自律性）ことである。認知発達ロボティクスや、それに関連するアプローチ^{xii)} は、まだその事例が少ないが、その方向性は、主に

xi) 例えば幼児が転倒してしまった時に、養育者は「痛かったね」と幼児に話しかけ、痛そうな表情をする行動のこと
xii) 文献 3.35 や <http://www.jst.go.jp/erato/asada> を参照

二つに分かれる。

一つは、機構（計算モデル）の仮説を立て、コンピューターシミュレーションや実際のロボットを使って実験し、仮説の生成、検証、修正を繰り返すことである。もう一つは、上記の過程で環境側の主役である人間の行動や機構そのものを脳活動等の計測や（心理）実験によって調べることである。これらは互いに関連し、相互フィードバックしうる。

(2.7) 歴史的経緯と国内外の動向

(2.7.1) 歴史的経緯

認知発達ロボティクスの提唱以前の AI やロボティクスでは、モデルベーストや記号表象に基づく手法が主流であり、これに対し、行動規範型のロボットアーキテクチャー³⁶⁾を提案・実証し、表象無き知能³⁷⁾を唱えたのは、当時 MIT にいた Rodney Brooks であった。実は、これに先立つ 1984 年に Valentino Braitenberg が、感覚運動系が密に連携した原初的な神経構造を模擬した移動ロボットの 14 の発展形態を表し、環境構造に依存した単純な行動から、認知や自由意志にまで言及可能な複雑な行動に至る生成法を思考実験を通じて著した³⁸⁾。

これらを背景に、先にも述べた認知発達における身体性や社会性の重要性が認識され始め⁶⁾、「身体性認知科学」³⁹⁾、「認知ロボティクス」¹⁾、「認知発達ロボティクス」³⁾が勃興し、知の理解と創造が不可分であるとの認識が高まった。2005 年秋から科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 (ERATO) 「浅田共創知能システムプロジェクト」が発足し、約 5 年半にわたりロボットなどの人工物の設計・製作・作動を通じて、人間の認知発達過程の謎に迫る研究を実施し、2011 年 3 月研究プロジェクトを終了した。そのなかで、人工筋肉などの柔軟素材を用いた身体構造と環境と動的結合による運動の創発、身体的行動から対人コミュニケーションまでを発達的につなぐ認知モデルによる認知発達の構成的理解、アンドロイドやマルチロボットシステムを用いたコミュニケーションの理解と実現、脳機能画像計測や動物実験による構成モデルの検証などを中心に取り組みされてきた。プロジェクトの個々の研究の詳細やサマリーは、既に発表されている解説等^{40),41)}を参照されたい。

(2.7.2) 国内の動向

国内では、上記の ERATO プロジェクトと並行して、ソニー CSL から理研 BSI に移り、その後 KAIST の教授となった谷淳らのグループが、リカレントニューラルネットワーク (RNN) を使ってロボットの認知の課題を追及しており、最近、一連の研究とその背後の思想をまとめた書籍を著した⁴²⁾。複雑系科学の分野で身体性認知科学としてのロボットの神経ダイナミクスの研究を極めている。かつて、谷淳のところにおいて、現在、早稲田大学の尾形哲也教授のグループでは、RNN や深層学習を駆使したロボットの行動学習に焦点を置いている。立命館大学の谷口忠大准教授のグループでは、記号創発ロボティクスを提唱し、認知発達ロボティクスにおける言語創発の課題に焦点をおいた研究を実施している。立命館大学の谷口忠大准教授を含め、玉川大学の岡田浩之教授、早稲田大学の尾形教授等がメンバーになり、電気通信大学の長井隆行教授が率いる「記号創発ロボティクスによる人間機械コラボレーション基盤創成」プロジェクトが JST の CREST で 2015 年か

ら始まっている。

(2.7.3) 海外の動向

元スイス・チューリッヒ大学の Rolf Pfeifer 教授が人工知能研究所を設立し、身体性に重きをおいた身体性認知科学の一連の研究や思想をまとめて、書籍として著している³⁹⁾。最近の著⁴³⁾では、柔軟な身体が有する環境との相互作用の豊かさが、いかにして知の創造や理解につながるかを説いている。大阪大学の細田耕教授は、Pfeifer 教授の下で過ごした経験も活かし、「柔らかかヒューマノイド」⁴⁴⁾として、この点を強調し、身体性に基づく認知発達ロボティクスの設計論を展開している。これら一連の研究は認知発達ロボティクスにおけるロボットプラットフォームの重要性、さらには、認知過程への本質的な貢献の役割も含めて、現在ではソフトロボティクスの思想基盤となっている。

イタリアジェノバ大学の Giulio Sandini 教授のグループは、コンピュータービジョンの研究で、当初から生体視覚に着目し、物体の把持や操りなど行動系と密着したロボットビジョンの研究を行ってきており、発達概念を取り入れた Developmental Robotics の考え方を、浅田らが認知発達ロボティクスとしての最初の英語論文²⁾を発表した2年後の2003年に Pfeifer 教授らと一緒に著している。彼らは、iCub と呼ぶ幼児ロボットプラットフォームを開発し、認知発達研究のプラットフォームとして世界に送り出している。Sandini 教授らのグループは、その後、Italian Institute of Technology (IIT) のロボット領域の主要メンバーとなり、人間の行動系の研究を中心に多くの研究成果をあげている。

英国 Plymouth 大学の Angelo Cangelosi 教授率いるグループでは、iCub を用いた言語発達研究を推し進めている。これは、FP7 の ITALK プロジェクト^{xiii)} (2008年3月～2012年2月)の一部であり、IIT やドイツ Bielefeld 大学など欧州の主要な研究機関が含まれていた。Cangelosi 教授は、米国の南イリノイ大学の心理学者 Matthew Schlesinger 博士とともに「Developmental Robotics – From Babies to Robots –」と題する書籍を著しており、その中に ITALK プロジェクトの成果も含まれている⁴⁵⁾。多くのプロジェクトに継続的に携わっている。

ドイツの Bielefeld 大学の Helge Ritter 教授率いるグループでは、Human Robot Interaction (HRI) をメインにした工学実利的な側面に重きをおいた一連のプロジェクトを遂行しており、欧州における COE プログラムを長年獲得し続けている。CITEC と呼ばれる研究センター (the Cluster of Excellence Center in Cognitive Interactive Technology) を設立し、多くの研究者を抱えて活動している。最近の大きなプロジェクトの一つは、The Cognitive Service Robotics Apartment as Ambient Host と呼ばれているもので、2013年10月からの4年プロジェクトで家庭内環境での認知ロボットの活動の実現を目指している。FIAS (Frankfurt Institute of Advanced Studies)^{xiv)} の Jochen Triesch 教授は、もともとコンピュータービジョンの研究を行ってきたが、神経科学をベースに認知過程のモデル化を試みている。すなわち、脳のネットワークの自己組織化により知的な感覚と行動が生成される機序を明らかにしようとしている。

xiii) ITALK <http://www.italkproject.org>

xiv) FIAS <http://fias.uni-frankfurt.de/de/neuro/triesch/>

フランス INRIA の Pierre-Yves Oudeyer 博士^{xv)} 率いる研究グループでは、内発的動機付けを情報論の立場から明らかにしようとする発達ロボティクス研究を行っている⁴⁶⁾。言語創発研究も行っているが、それは彼の師である元ソニー CSL パリ研究所長の Luc Steels 教授 (Vrije Universiteit Brussel) の影響かもしれない。Steels 教授は、もともと記号 AI からはじまり、その後、ロボットを用いた生態学的な環境での記号接地問題解決を図った一連の研究⁴⁷⁾がある。Cergy-Pontoise University の Philippe Gaussier 教授^{xvi)}のグループでは、脳神経系のモデル化を通じた認知発達過程の解明を目指している。脳の各部の機能とその関係を計算モデルとして具現化し、ロボットによる検証を通じて、新たな理解と洞察を得ることを狙っている。

Brooks が行動規範型ロボットのアーキテクチャーを唱えた米国では、提唱後、一連の研究が行われてきたが、認知発達ロボティクスに強く関連する研究グループの形成には至らなかった。その後、Brooks は、お掃除ロボット Roomba で有名な iRobot 社を設立・創業後、Rethink Robotics 社を設立し、新たな産業ロボットとして Baxter の開発・販売に従事している。認知発達ロボティクスのアプローチの一つは、ロボットを道具として人間研究に利用することである。シアトルにある University of Washington で、I-LABS (Institute for Learning and Brain Sciences) を率いる心理学者夫妻の Andrew N. Meltzoff 教授、Patricia K. Kuhl 教授らは、赤ちゃんの行動実験および脳磁図 (MEG) による計測を通じて発達研究を行っているが、ロボットやモデル研究との連携にも強い関心を示している。フランスの Gaussier 教授と共同研究を行ったり、大阪大学の浅田研究室からロボットを譲り受けたりして、ロボットの学習や社会性に関する研究を行っている。インディアナ大学は、発達心理学で著明な Linda Smith 教授が、計算モデルに関心を持っており、Chen Yu 教授らのグループらと連携し、赤ちゃんの発達モデル化を試みている⁴⁸⁾。

脳神経系の構造をベースにロボットの感覚行動のマッピングを対象とする研究は Neuro-robotics と呼ばれ、ノーベル受賞者の Gerald M. Edelman のグループが 1990 年代初期から行ってきた⁴⁹⁾。この文献の共著者には、脳のネットワーク構造を明らかにしようとするコネクトームの Olaf Sporns や意識の研究で著明な Giulio Tononi が含まれている。Neuro-robotics としての後継者は Jeffrey L. Krichmar で幾つかの共著文献がある。Edelman のグループ出身でもう 1 人あげないといけない研究者は Eugene M. Izhikevich で、大規模な脳活動シミュレーション研究⁵⁰⁾を行っている。これら一連の研究は、脳研究の派生とみなせるが、既存の脳研究のアプローチの限界を打破するうえで、人工物設計を通じたアプローチは認知発達ロボティクスの理念と通じる。

日本以外のアジア地域では、先に述べた谷らのグループが韓国の KAIST で行っている程度である。なお、大阪大学の浅田教授は、上記の海外研究機関のうち、IIT、UW、Bielefeld に加え、Caltech (下條信輔教授) の 4 機関との共同研究プログラム (JSPS 拠点形成事業) 「認知脳理解に基づく未来工学創成のための競創的パートナーシップ」2012 年 4 月～2017 年 3 月) の代表を務めている。

xv) Pierre-Yves Oudeyer <http://www.pyoudeyer.com>

xvi) Philippe Gaussier <http://perso-etis.ensea.fr/gaussier/>

(3) 注目動向

我が国における二つの研究プロジェクトと米国を中心とする脳のネットワーク構造に関連する研究の動向を紹介する。

(3.1) 構成的発達科学と構成論的発達科学

二つの後継プロジェクトは、浅田 ERATO プロジェクトと比較して、神経科学や発達心理の分野の研究の割合が増えており、より学際融合が進んだ取り組みとなっている。一つは、浅田教授が代表を務める「神経ダイナミクスから社会的相互作用へ至る過程の理解と構築による構成的発達科学（科学研究費補助金特別推進研究：平成 24 年度～平成 28 年度）」プロジェクトである。もう一つは、國吉教授が代表を務める新学術領域研究「構成論的発達科学-胎児からの発達原理の解明に基づく発達障害のシステムの理解-：平成 24 年度～平成 28 年度）」である。

前者は、計算モデル、イメージング、心理・行動実験、ロボットプラットフォームの各グループが密に結合して、自他認知の発達原理の解明を目指している。図 3-4-23 に示した自己認知の発達過程では、人工システムが何を持って自己の概念を獲得したかの判別が困難である。そこで、共感の発達になぞらえ、人工共感を設計することを想定した模式図に自他認知の発達が組み込まれ、具体的な心的機能がサブゴールとして与えられている（図 3-4-25）。イメージング研究での特徴は、世界唯一の親子同時測定可能なハイパースキャン MEG システムを開発⁵²⁾し、最初の結果として、相互に顔を見つめているときと、無関係なビデオを鑑賞時の差違が、自閉症軽度と重度の親子ペアで異なることを発見した⁵³⁾。

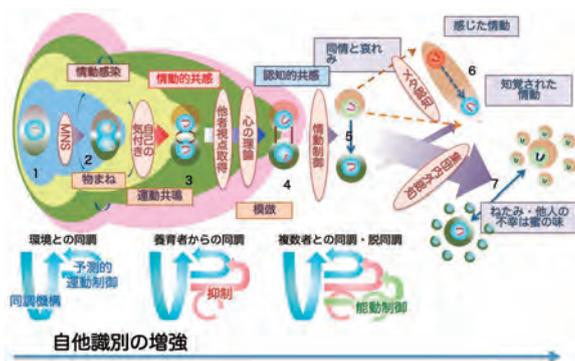


図 3-4-25 共感発達モデルとしての自己認知過程（出典：参考文献 51）

後者（図 3-4-26）の目玉の一つは、発達障害者の当事者研究⁵⁴⁾である。当事者が自身の内観を語ることで、外界からの観測による記述とは異なるものが得られ、それが設計のヒントになりうる。例えば、通常、我々が無意識的に処理し、抽象化された状態として感知する「（実際、そう指摘されるまで、そう思っていなかったが）おなかがすいた」状態は、複数の下位レベルの状態の集合として知覚される。そのため、彼らは、意識的にそれらをかき集め、いま、自分がどのような状態であるかを推定する。この過程は、先に述べた無意識的過程に相当すると考えると、彼らの記述が、この過程をモデル化する際の示唆を与えてくれる。もう一つの目玉は、胎児脳の発達シミュレーションで、2006 年の最初の論文発表⁹⁾では、200 足らずの筋肉、すなわち、200 個程度のニューロン数であったが、2016 年に発表された論文⁵⁵⁾では 260 万個のニューロン、53 億のシナプス結合を STDP 則^{xvii)}で学習させた結果が報告されている。この規模で、身体との結合がなされたシミュ

xvii) STDP 則 スパイクタイミング依存可塑性

レーションは、特筆に値し、今後の一つの方向性を示している。

これら二つのプロジェクトは、ロボティクスの範囲を超え、神経科学、発達心理、認知科学などの分野を巻き込んだ超越分野 (Transdiscipline) である構成 (論) 的発達科学の構築を目指している。基本的な神経構造から出発し、身体性や社会性の拘束を受けながら、予測符号化などの汎用の学習手法を用いて、徐々に機能分化していく過程である。図 3-4-25 に示した共感発達モデルとしての自他認知過程は、その具体例として捉えられる。これら二つの研究プロジェクトは 2017 年 3 月で終了するが、それらの後継として当事者研究を進展させ、予測符号化を核とした JST CREST プロジェクト「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」がある。もう一つは、ソフトロボティクスにおける人とのインタラクションを科学として捉えることを狙った JST さきがけプロジェクト「触れ合いデータを収集する子供アンドロイド高機能化」である。大阪大学の石黒浩教授が JST ERATO 石黒プロジェクトを 2014 年 7 月から開始し、アンドロイドの社会的行動の工学的実現を目指している。



図 3-4-26 構成論的発達科学 胎児からの発達原理の解明に基づく発達障害のシステムの理解

(3.2) 脳の機能と構造のネットワーク解析

米国における認知発達ロボティクスそのものの研究はあまり盛んではないが、関連する動きとして計算論的神経科学の研究がある。脳科学は、今世紀最大のミステリーで、欧州や米国で大規模なプロジェクトが走っているが、そのなかで、最も根源的な神経ネットワークの機能と構造のネットワーク解析が計算論的神経科学の一分野として注目を浴びている。Human Connectome Project と呼ばれるプロジェクトはヒトの脳の神経器官の全結線構造を明らかにしようとするものである。一見、認知発達ロボティクスにあまり関係がないように思われるかもしれないが、基本的な神経構造のポテンシャルを明らかにするためには、この種のネットワーク解析が重要である。中心人物の 1 人の Olaf Sporn 博士は、Linda Smith や Cheng Yu がいるインディアナ大学の教授で、計算論的神経科学の第一人者で、MIT Press から 2 冊の書籍⁵⁶⁾などを出版している。また、國吉グループにおける胎児脳発達シミュレーションに先立って、脳の大規模シミュレーション研究は、先に紹介した Edelman グループの Izhikevich⁵⁰⁾らが行った。

(4) 科学技術的課題

ビッグデータや人工知能、特に深層学習の強力な認識技術が有用な道具として活用できるようになりつつある一方で、全てが解決されるわけではなく、認知発達ロボティクスの研究を質的に転換させる取り組みが重要である。

(4.1) 脳神経ネットワークシミュレーションと機能分化

國吉グループによる最新の胎児脳の発達シミュレーション⁵⁵⁾の一つの方向性は、徹底的に実際のヒトの脳の活動をシミュレーションすることで、その意味ではニューロン数、生態学的構造、脳の領野構造、さらにはより詳細な身体（感覚・運動系）などが、より精緻にシミュレーションされる必要がある。この過程で、多くのパラメータチューニングが必要であり、どのようにしてシステムチックにそれらを構造化するかは明らかではなく、試行錯誤と同時に関連分野の知見との相互フィードバックが欠かせない。

これに対し、単純化したネットワーク構造の解析により新たな知見や設計論が生じる可能性もある。Park et al.⁵⁷⁾ は、胎児ではなく、ヘビのような機構をもつロボットの脳として、非線形振動子を組み込んだニューラルネットワークの神経系（感覚・運動・中枢）を構築し、行動創発を観測し、行動解析および、その背後にあるネットワーク構造を解析した。その結果、行動パターンによりサブネットワーク構造が異なることが分かった。これは、当初与えた解剖学的構造と異なるネットワーク構造が動的に発生し、遷移する過程を表しており、このような情報構造の再構築により、さまざまな機能が分化すると考えられる。この機能分化の情報理論的基盤、身体・環境とのカップリングによる機能の接地、さらには、左右脳に代表される側性化という機能分化のイメージング研究による検証が科学技術課題としてあげられる。

(4.2) AI 手法の HeavyData への応用

構成的発達科学の基盤となる基本的な神経構造は、ヒトの脳の機能と構造の解明に強く関連する。各種脳機能計測による膨大なデータは、BigData の一種であるが、モノに対するデータと異なり、各個人の行動と脳活動は対応していると予想されるにも関わらず、その間の関係は自明ではなく、幅広く複雑な時空間構造が内在する。そのような関係や構造を明らかにするために、膨大な脳機能データが取得されつつも、手をつけられないデータが存在し、新たな解析手法が望まれている。ここでは、各個人についてさまざまな局面で計測された脳活動の記録という意味でこれらのデータを「重い」と捉え、HeavyData と呼ぶ。HeavyData は、取得した環境の物理 / 化学 / 生理学的特性に加え、時間軸では、数ミリ秒単位の局所的ダイナミクス、さらに発達過程を視野にいた大局的ダイナミクスが存在する。空間軸では、タスクに依存した多様な感覚・運動が含まれ、さらに社会的な相互作用の局面においては複数の脳の活動が解析対象となる。このような HeavyData の解析は容易ではない。

脳の構造と機能の関係性へのアプローチはボトムアップ的な研究が中心であった。しかし、このような手法では、MEG データから時空間を含めた脳の自発活動の発生メカニズム、および、生理学的な意味の解明は困難である。そこで、ボトムアップ的なアプローチに加え、人工知能手法である最適化手法や、ネットワーク理論を駆使した脳ダイナミクスシミュレーションによるトップダウン的な仮説検証を通じた構成的手法により、この課題を解決することが考えられる。

近年、脳のネットワーク構造としての解析は、WEB や飛行機のフライトマップなどと合わせてネットワーク科学として注目を浴びている。各種脳画像データにおいて、解剖学的構造と各タスク下での脳活動をつき合わせ、トポロジカルな構造を推定する手法が多い。

最近の自閉症識別手法について、Yahata et al.⁵⁸⁾ が大人の fMRI データから脳の機能的ネットワークを推定し、機械学習手法を用いた特徴量選択により、高い識別率となることを報告した。ただし、こうしたシンプルな手法の組み合わせの MEG などの HeavyData への適用は容易ではない。最近、高い識別能力で注目されている深層学習技術が大人の脳波データへ応用されるようになってきた。このような背景から、HeavyData の解析への深層学習の適用などにより、発達障害の診断システムなどの応用が期待される。

(4.3) 人工意識研究への発展

認知発達ロボティクスの基本課題として、人工システムが自己の概念を獲得できるかという問いかけがある。これは、「(自己) 意識」の課題に関連し、「自由意志」、「動機付け」、「意図」、「自他認知」、「注意」、さらには「情動」や「共感」などの多く課題とも関係する。以前は、哲学的課題と思われていたが、近年、さまざまなアプローチがなされている。行動学や認知科学を主体とした観察と解析のアプローチ、神経科学を主体とした脳の機能と構造の解明を目指すアプローチに加え、Edeleman のグループの 1 人である Giulio Tononi は、情報論の立場から意識の測度として ϕ と呼ばれる情報量を定義し、人工システムと生物の意識をつなぐ統合情報理論を提唱している⁵⁹⁾。日本では、例えば、アラヤ・ブレイン・イメージングの金井良太が JST CREST 金井プロジェクト「神経科学の公理的計算論と工学の構成論の融合による人工意識の構築とその実生活空間への実装 (2015年～2020年)」を行っており、 ϕ を利用している。また、Tononi との共著で統合情報理論を拡張しているのは、理研 BSI の大泉匡史である。彼らは、主に理論的な側面を重視しているが、これらの検証や実際の具現化を考慮すると、人工知能やロボットなどの人工システムを用いた構成的手法が有用であり、結果として認知発達ロボティクスや構成的発達科学の基本課題の解決につながると期待される。

(4.4) 認知発達研究用ロボットプラットフォームの開発

これまで、各研究者が独自に開発したプラットフォームを用いて、提案モデルの検証を行ってきたが、客観性や汎用性、さらには頑強性にも問題があった。Ishihara and Asada⁶⁰⁾ は、ソフトロボティクスの背景理念である触れあいの科学を実践するための子ども型ヒューマノイドタイプのロボットプラットフォーム設計を目指して、5つの規範を定め、既存のロボットプラットフォームと彼らが構築中の Affetto を比較した。5つの規範は、Humanlike DOF、Agility、Mechanical softness、Lifelike surface、Childlike appearance である。これらのプラットフォームは、それぞれ個別の設計思想があるが、リッチな物理的接触を可能にすることで、認知機能の発達を支援することや、ハードとソフトともに構成的発達科学を支える基盤になることが期待され、空気圧をはじめとする柔軟アクチュエーター、ソフトマテリアル、触覚センサーの革新と統合が望まれる。

(5) 政策的課題

産官学連携：本領域は、いまだ基礎研究の占める割合が多く、直近の産業応用は難しいが、あえてあげるとするならば、発達障害の診断、およびテーラーメイド医療向けに脳の

発達シミュレーションおよびネットワーク解析を通じた医療ケアソフトウェアの販売などが考えられる。また、ロボットプラットフォームを用いて、自閉症をはじめとする発達障害のケアへの応用も考えられる。さらに、赤ちゃんロボットを用いた育児シミュレーションによる初心者のお母さん方の育児不安解消などの応用も考えらるが、もう少し先になると予想される。

府省連携：研究開発における適切で柔軟な役割分担、迅速な連携などが望まれている現状を考えると、本領域においても省庁の連携は欠かせない。本質的に融合研究領域であり、そこから超域分野 (Transdiscipline) を創る上でも重要である。

国際連携：日本人研究者の一つの欠点として、英語コミュニケーションによる国際連携の弱さがあげられる。ともかく海外の研究者と積極的に交流し、徹底的に議論する機会を増やして、学際と国際を両立させることが肝要である。特に、ロボティクスは、それ以外の研究分野間のブリッジ役として機能することが、他の分野よりも容易であり、その意味で本領域を主体とした国際交流プログラムのさらなる推進が人材育成の観点からも重要と考えられる。事実、先の共同研究プログラム (JSPS 拠点形成事業) は若手や大学院生を主体としており、若手の学際・国際交流ができつつある。

ファンディング制度：省庁間の壁を破ったテーマ設定などが必要である。省庁だけでなく、例えば科研費の融合分野の設定なども、まだ不足気味である。

人材育成：大学教育に関して、新入生の時点で基礎 (数学、物理、生物、ロボティクス：工学の代表、人文社会科学) を徹底的に教育し、その後、どの専門にでも行ける能力を養うことで、専門取得後の融合研究が容易になり、さらに高度化すると期待される。

インフラ：ロボットプラットフォームの提供が遅れている。古くはソニー AIBO からはじまり、現在ではソフトバンクロボティクス社の NAO や Pepper があるが、じゅうぶんとはいえ、特にソフトロボティクスに代表される柔軟でリッチな相互作用が可能なプラットフォームの開発が望まれる。

(6) キーワード

認知発達、構成的発達科学、身体性、ミラーシステム、神経アーキテクチャー、社会的相互作用、自他認知

(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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・JST ERATO 浅田共創知能システムプロジェクト (2005年～2010年) の成果を引き継ぐ複数のプロジェクトが進捗 ・早稲田大学の尾形教授のグループが RNN や深層学習を駆使したロボットの行動学習に取り組んでいる ・立命館大学 谷口教授、電気通信大学 長井教授、玉川大学 岡田教授、上記 尾形教授らが言語創発にフォーカスした記号創発ロボティクスの CREST プロジェクトに 2015 年から取り組んでいる ・当事者研究を進展させ、予測符号化を核とした JST CREST プロジェクト「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」がある。もう一つは、ソフトロボティクスにおける人とのインタラクションを科学として捉えることを狙った JST さきがけ「触れ合いデータを収集する子供アンドロイド高機能化」である
	応用研究・開発	-	-	
米国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・計算論的神経科学に関して、コネクトーム・プロジェクトの Sporns、意識の Tononi、脳活動の大規模シミュレーションの Izhikevich、Neurorobotics の Krichmar などが活躍。さらに、発達心理学の大御所もいる
	応用研究・開発	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ・Izhikevich が Brain Corporation 社を San Diego に設立。人工脳を応用したビジネスを展開
欧州	基礎研究	◎	↓ → → ↑	<ul style="list-style-type: none"> ・スイス: Rolf Pfeifer 教授がチューリヒ大学を退職し、減退傾向 ・イタリア: IIT の Giulio Sandini 教授のグループが主に人間中心の研究を活発に行っているが、退職に近い ・英国: Plymouth 大学の Angelo Cangelosi 教授のグループは、主に言語獲得の研究を行っており、大きなグラントを継続的に獲得。人材育成に熱心で、応用研究を含め活発に推進。グループの規模がやや小さい ・ドイツ: Bielefeld 大学は、工学的側面を重視し、応用研究が盛ん ・フランス: INRIA の Pierre-Yves Oudeyer 博士が内発的動機付けを中心とした基礎研究で継続的に活躍
	応用研究・開発	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ・ドイツ: Bielefeld 大学が高齢者ホーム応用研究を進めている
中国	基礎研究	-	-	
	応用研究・開発	-	-	
韓国	基礎研究	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ソニー CSL から理研 BSI に移り、KAIST の教授となった谷淳らのグループが、RNN を使いロボットの認知の課題を追求、複雑系科学の分野で身体性認知科学としてのロボットの神経ダイナミクスの研究に取り組む ・2016 年のソウルで行われたアルファ基に火をつけられた形で、未来創造科学部は 5 年間で 1 兆ウォンの研究予算を決定した。サムスン電子、LG 電子、現代自動車、LINE など企業連合と各大学、国立研究所がコンソーシアムを組み、基礎及び実用研究を行っていくというもの
	応用研究・開発	-	-	

(注1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(注2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(注3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) 浅田, 石黒, 国吉. 認知ロボティクスの目指すもの. 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.1, pp.2-6, 1999.
- 2) Minoru Asada, Karl F. MacDorman, Hiroshi Ishiguro, and Yasuo Kuniyoshi. Cognitive developmental robotics as a new paradigm for the design of humanoid robots. *Robotics and Autonomous System*, Vol.37, pp.185-193, 2001.
- 3) Minoru Asada, Koh Hosoda, Yasuo Kuniyoshi, Hiroshi Ishiguro, Toshio Inui, Yuichiro Yoshikawa, Masaki Ogino, and Chisato Yoshida. Cognitive developmental robotics: a survey. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, Vol.1, No.1, pp.12-34, 2009.
- 4) 小西行郎 / 監修. 子どもの心の発達がわかる本不思議な「心」のメカニズムが一目でわかる. 講談社, 2007.
- 5) 乾, 永井, 小川. 共創知能機構. 第 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. CD-ROM, 2007.
- 6) 浅田稔, 國吉康夫. ロボットインテリジェンス. 岩波書店, 2006.
- 7) 浅田稔. ミラーニューロンシステムが結ぶ身体性と社会性. 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.4, pp.18-25, May 2010.
- 8) R. Held and A. Hein. "Movement-produced stimulation in the development of visually guided behaviors". *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, Vol.56:5, pp.872-876, 1963.
- 9) Y. Kuniyoshi and S. Sangawa. Early motor development from partially ordered neural-body dynamics: experiments with a cortico-spinal-musculo-skeletal model. *Biol. Cybern*, Vol.95, pp.589-605, 2006.
- 10) 森裕紀, 国吉康夫. 胎児・新生児の全身筋骨格・神経系シミュレーションによる認知運動発達研究. 心理学評論, Vol.52, No.1, pp.20-34, 2009.
- 11) Olaf Sporns and Gerald M. Edelman. Solving bernstein's problem: A proposal for the development of coordinated movement by selection. *Child Dev.*, pp.960-981, 1993.
- 12) Koh Hosoda, Hitoshi Takayama, and Takashi Takuma. Bouncing monopod with bio-mimetic muscular-skeleton system. In Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2008 (IROS'08), 2008.
- 13) T. Minato, Y. Yoshikawa, T. Noda, S. Ikemoto, H. Ishiguro, and M. Asada. Cb2: A child robot with biomimetic body for cognitive developmental robotics. In Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Humanoid Robots, pp.CD-ROM, 2007.
- 14) Yoshiyuki Ohmura, Yasuo Kuniyoshi, and Akihiko Nagakubo. Conformable and scalable tactile sensor skin for curved surfaces. In Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1348-1353, 2006.
- 15) Shinya Takamuku, Atsushi Fukuda, and Koh Hosoda. Repetitive grasping with anthropomorphic skin-covered hand enables robust haptic recognition. In Proc. of

- IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2008 (IROS'08), p.ThAT13.5, 2008.
- 16) ジャコモ・リゾラッティ (著), コラド・シニガリア (著), 茂木健一郎 (監修), 柴田裕之 (翻訳). ミラーニューロン. 紀伊国屋書店, 2009.
 - 17) 村田哲. 脳の中にある身体. 開一夫, 長谷川寿一 (編), ソーシャルブレインズ 自己と他者を認知する脳, pp.79-108. 東京大学出版会, 2009.
 - 18) Ulric Neisser, editor. The Perceived Self: Ecological and Interpersonal Sources of Self Knowledge. Cambridge University Press, 1993.
 - 19) 明和政子. 心が芽ばえるとき. NTT 出版, 2006.
 - 20) 明和政子. 身体マッピング能力の起源を探る. ベビーサイエンス, Vol.8, pp.2-13, Dec 2008.
 - 21) Andrew N. Meltzoff and M. Keith Moore. Imitation of facial and manual gestures by human neonates. Science, pp.74-78, 1977.
 - 22) 呉東進. 重度障害児に見られる口の模倣行動から考える. ベビーサイエンス, Vol.8, pp.17-18, Dec 2008.
 - 23) 宮崎美智子, 開一夫. 自己像認知の発達. 開一夫, 長谷川寿一 (編), ソーシャルブレインズ 自己と他者を認知する脳, pp.39-56. 東京大学出版会, 2009.
 - 24) Minoru Asada, Eiji Uchibe, and Koh Hosoda. Cooperative behavior acquisition for mobile robots in dynamically changing real worlds via vision-based reinforcement learning and development. Artificial Intelligence, Vol.110, pp.275-292, 1999.
 - 25) 実藤和佳子. 他者の中に自己をみる-自他の類似性理解が拓く初期発達の可能性-. 心理学評論, Vol.52, No.1, pp.99-110, 2009.
 - 26) Andrew N. Meltzoff. The 'like me' framework for recognizing and becoming an intentional agent. Acta Psychologica, pp.26-43, 2007.
 - 27) Fuke Sawa, Masaki Ogino, and Minoru Asada. Body image constructed from motor and tactile images with visual information. International Journal of Humanoid Robotics, Vol.4, pp.347-364, 2007.
 - 28) K. Ogawa and T. Inui. Lateralization of the posterior parietal cortex for internal monitoring of self-versus externally generated movements. Journal of Cognitive Neuroscience, Vol.19, pp.1827-1835, 2007.
 - 29) Yasutake Takahashi, Yoshihiro Tamura, and Minoru Asada. Mutual development of behavior acquisition and recognition based on value system. In Proceedings of the 10th international conference on simulation of adaptive behavior (SAB08), pp.291-300, 2008.
 - 30) Yukie Nagai, Minoru Asada, and Koh Hosoda. Learning for joint attention helped by functional development. Advanced Robotics, Vol.20, No.10, pp.1165-1181, 2006.
 - 31) Yukie Nagai, Koh Hosoda, Akio Morita, and Minoru Asada. A constructive model for the development of joint attention. Connection Science, Vol.15, No.4, pp.211-229, 2003.
 - 32) G. E. Butterworth and N. L. M. Jarrett. What minds have in common is space:

- Spatial mechanisms serving joint visual attention in infancy. *British Journal of Developmental Psychology*, Vol.9, pp.55-72, 1991.
- 33) Yuichiro Yoshikawa, Minoru Asada, Koh Hosoda, and Junpei Koga. A constructivist approach to infants' vowel acquisition through mother-infant interaction. *Connection Science*, Vol.15, No.4, pp.245-258, Dec 2003.
- 34) Ayako Watanabe, Masaki Ogino, and Minoru Asada. Mapping facial expression to internal states based on intuitive parenting. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.19, No.3, pp.315-323, 2007.
- 35) 浅田稔. 認知発達ロボティクスによる赤ちゃん学の試み. *ベビーサイエンス*, Vol.4, pp.2-27, Dec 2004.
- 36) R. A. Brooks. "A robust layered control system for a mobile robot". *IEEE J. Robotics and Automation*, Vol.RA-2, pp.14-23, 1986.
- 37) Rodney Brooks. *Intelligence without representation*. *Artificial Intelligence*, Vol.47, pp.139-159, 1991.
- 38) Valentino Braitenberg. *Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts 02142, USA, 1984.
- 39) Rolf Pfeifer and Christian Scheier. *Understanding Intelligence*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts 02142, USA, 1999.
- 40) 浅田稔. 「知能共創システムプロジェクト」の特集について. *日本ロボット学会誌*, Vol.30, No.1, p.1, January 2012.
- 41) 浅田稔. 特集「共創知能を超えて」にあたって. *人工知能学会誌*, Vol.27, No.1, pp.2-3, January 2012.
- 42) Jun Tani. *Exploring Robotic Minds: Actions, Symbols, and Consciousness as Self-Organizing Dynamic Phenomena*. Oxford University Press, 2016.
- 43) Rolf Pfeifer and Josh C. Bongard. *How the Body Shapes the Way We Think: A New View of Intelligence*. MIT press, 2006.
- 44) 細田耕. *柔らかかヒューマノイド*. 化学同人, 2016.
- 45) A. Cangelosi and M. Schlesinger. *Developmental Robotics - From Babies to Robots*. MIT Press, 2015.
- 46) Pierre-Yves Oudeyer, Frdric Kaplan, and Verena V. Hafner. Intrinsic motivation systems for autonomous mental development. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol.11, No.2, pp.265-286, 2007.
- 47) L. Steels and F. Kaplan. Aibo's first words. the social learning of language and meaning. *Evolution of Communication*, Vol.4, No.1, pp.3-31, 2001.
- 48) Linda Smith and Chen Yu. Infants rapidly learn word-referent mappings via cross-situational statistics. *Cognition*, Vol.106, No.3, pp.1558-1568, 2008.
- 49) G. M. Edelman, G. N. Reeke Jr., W. E. Gall, G. Tononi, D. Williams, and O. Sporns. Synthetic neural modeling applied to a real-world artifact. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol.89, pp.7267-7272, 1992.

- 50) Eugene M. Izhikevich and Gerald M. Edelman. Large-scale model of mammalian thalamo-cortical systems. PNAS, Vol.105, No.9, pp.3593-3598, 2008.
- 51) Minoru Asada. Towards artificial empathy. International Journal of Social Robotics, Vol.7, pp.19-33, 2015.
- 52) Masayuki Hirata, Takashi Ikeda, Mitsuru Kikuchi, Tomoya Kimura, Hiroto Hiraishi, Yuko Yoshimura, and Minoru Asada. Hyperscanning meg for understanding mother-child cerebral interactions. Frontiers in Human Neuroscience, Vol.8, No.118, 2014.
- 53) Chiaki Hasegawa, Takashi Ikeda, Yuko Yoshimura, Hiroto Hiraishi, Tetsuya Takahashi, Naoki Furutani, Norio Hayashi, Yoshio Minabe, Masayuki Hirata, Minoru Asada, and Mitsuru Kikuchi. Mu rhythm suppression reflects mother-child face-to-face interactions: a pilot study with simultaneous meg recording. Scientific Reports, Vol.6, No. Article number: 34977, pp.1-8, 2016.
- 54) 綾屋紗月, 熊谷晋一郎. 発達障害当事者研究 - ゆっくりていねいにつながりたい. 医学書院, 2008.
- 55) Yasunori Yamada, Hoshinori Kanazawa, Sho Iwasaki, Yuki Tsukahara, Osuke Iwata, Shigehito Yamada, and Yasuo Kuniyoshi. An embodied brain model of the human foetus. Scientific Reports, Vol.6, No. Article number: 27893, pp.1-10, 2016.
- 56) Olaf Sporns. Discovering the Human Connectome. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts 02142, USA, 2012.
- 57) Jihoon Park, Hiroki Mori, and Minoru Asada. Analysis of causality network from interactions between nonlinear oscillator networks and musculoskeletal system. In Late Breaking Proceedings of the European Conference on Artificial Life 2015, pp.25-26, 2015.
- 58) Noriaki Yahata, Jun Morimoto, Ryuichiro Hashimoto, Giuseppe Lisi, Kazuhisa Shibata, Yuki Kawakubo, Hitoshi Kuwabara, Miho Kuroda, Takashi Yamada, Fukuda Megumi, Hiroshi Imamizu, Jos E. Nez, Hidehiko Takahashi, Yasumasa Okamoto, Kiyoto Kasai, Nobumasa Kato, Yuka Sasaki, Takeo Watanabe, and Mitsuo Kawato. A small number of abnormal brain connections predicts adult autism spectrum disorder. Nature Communications, Vol.7, 4 2016.
- 59) ジュリオ・トノーニ (著), マルチェッロ・マッスィミーニ (著), 花本知子 (翻訳). 意識はいつ生まれるのか——脳の謎に挑む統合情報理論. 亜紀書房, 2015.
- 60) Hisashi Ishihara and Minoru Asada. Design of a 22 dof pneumatically-actuated upper body for a little child android 'affetto'. Advanced Robotics, Vol.29, No.18, pp.1151-1163, 2015.