

2.2.4 システム化技術

(1) 研究開発領域の定義

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

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

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

(2) キーワード

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

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

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

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

[研究開発の動向]

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス

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

なお、ロボット技術の最近の動向については、別報²²⁾にもまとめられている。

（４）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

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

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

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

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

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

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

〔注目すべき国内外のプロジェクト〕

日本国内では、SIP（Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program）²⁶⁾、ImPACT（Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies Program）²⁷⁾などの省庁横断型の研究開発プログラムにおいてロボットのシステム技術の開発を行ってきた。現在は、第2期SIP「ビッグデータ・AIを活用したサイバー空間基盤技術」、「自動運転（システムとサービスの拡張）」や、PRISM（Public/Private R&D Investment Strategic Expansion Program）²⁸⁾「建設・インフラ維持管理技術／防災・減災技術」（AIによる建機の自動制御・群制御）などの研究開発プログラムが進行中である。科研費では、基盤研究、新学術領域研究などに加え、新たに学術変革領域研究が設置され、ロボットの新たなシステム技術に関連する基礎研究が行われている。さらに、新たにムーンショット型研究開発制度²⁹⁾が発足し、特に目標3（2050年までにAIとロボットの共進化により自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現）において、長期的目標を掲げて新規なロボットのシステム技術開発が行われている。これらにより日本のシステム技術の巻き返し期待される。一方、ドローンの技術開発・利活用・事業化に関しては、中国のDJI社に先行を許したが、ドローンの様々な応用が広がる中、近い将来、多数のドローンが運用されることを想定し、NEDO「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト」等において、その運行管理を行うためのシステム開発、国際標準化などに取り組んでいる。

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

（5）科学技術的課題

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

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

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

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

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

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

(6) その他の課題

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

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

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

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

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

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

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	日本のロボットのシステム技術に関する基礎研究は高いレベルが維持されていると考えられるが、米国に比べると相対的にやや遅れ気味である。科研費では、基盤研究、学術変革領域研究等においてロボットの新たなシステム技術に関連する基礎研究が行われている。ムーンショット型研究開発制度 目標3(2050年までにAIとロボットの共進化により自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現)においては、長期的目標を掲げて新規なロボットのシステム技術開発が行われている。
	応用研究・開発	◎	↘	応用研究・開発は、最高レベルが維持されている。福島原発の廃炉などでも、その技術力の高さが証明されている。ただし、それが事業化や社会実装にはうまくつながっておらず、競争力は低下の傾向にある。破壊的なイノベーションを謳っているムーンショットや、経産省をはじめとする各省庁やNEDOのプロジェクトなどによる巻き返しに期待したい。
米国	基礎研究	◎	→	NSF、NIH、DoD、DARPAなどの複数のFunding Agencyの投資による様々なロボットシステム技術の基礎研究や基盤技術開発がしっかり進められている。省庁横断型の研究イニシアティブNational Robotics Initiative (NRI) に基づくNRI 2.0 (Ubiquitous Collaborative Robots) などの研究開発も強みである。
	応用研究・開発	◎	→	NRI 2.0などの国家的なプロジェクトによる研究開発に加え、ベンチャー企業も含めた民間の研究開発、技術力が極めて強く、高いレベルを維持している。技術や製品の軍事利用が活発であり、市場が大きい。
欧州	基礎研究	○	→	FP7やHorizon 2020、Horizon Europeなどの超大型のフレームワークプログラムによって、欧州規模の研究開発およびイノベーションが推進されている。

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

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

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

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考文献

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

pp. 283-290, 1989.

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

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

20) 7th Framework programme

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

21) Horizon 2020

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

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

23) 新学術領域「分子ロボティクス」

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

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

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

25) Horizon Europe

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

26) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)

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

27) 革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)

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

28) 官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM)

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

29) ムーンショット型研究開発制度

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

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

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

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

32) 生活支援ロボット実用化プロジェクト

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

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

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

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

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス