

戦略プロポーザル

リアルワールド・ロボティクス

～開かれた環境に柔軟に適応する
ロボティクス学理基盤の創出～

STRATEGIC PROPOSAL

Real-World Robotics

—A New Principle for Robotics that Flexibly Adapts to Open Environments—

研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立つて行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDSは、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください

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

エグゼクティブサマリー

本プロポーザルは、開かれた環境に柔軟に適応するロボットを実現するために、目指すべき方向性、重要な研究開発課題、および、研究開発の推進方法を提言するものである。

ロボット技術の革新は、少子高齢化、災害対応など、日本が直面する社会的課題に対し、非常に有効な解決手段の一つとなると期待されている。さまざまな分野における将来像が「ロボット新戦略」等にて掲げられているが、これらの将来像においては、工場の生産ラインのようなあらかじめ整えられた「閉じた環境」で決められた動作を正確に何度でも再現をするのではなく、われわれが生活している多様で動的な「開かれた環境」でさまざまな非定型の作業ができることが、ロボットに求められている。「開かれた環境」は、多種多様な要素からなり、これらが相互に影響を及ぼしあいながら、常に変化する環境である。「開かれた環境」には、物理環境の無限定性、人との共存環境の無限定性、変動するタスクの無限定性、および、ロボット自身の状態の無限定性があり、ロボットはこれらの無限定性に適応する必要がある。しかしながら、ロボットに対する高い期待と、現在のロボットにできることとの間には大きなギャップがある。衣服を畳む、手すりをつかんで階段を昇り降りする、日用品をしっかりとつかむといった、人間にとって容易にできる行動が、ロボットにはなかなかできていない現状である。

従来のロボットは、センサーにより未知の空間の情報を精密に測定してモデル化し、論理演算による行動計画に従い、行動している。これは、工場のライン等での定型作業には有効だが、われわれが生活しているような開かれた環境に対処することは困難である。なぜなら開かれた環境では、センサーがすべての情報を取得できない、さまざまな要素が複雑に関係しモデル化が困難である、状況が刻々と変化する、といった要因により、容易に行動が破綻してしまうためである。

このような問題に対する研究開発として、以前から注力されてきたアプローチは、計算能力やセンサー精度の向上等によって開かれた環境の無限定性を低減するというものである。これによってロボットの適用範囲が拡大してきたが、さらにロボットの活動領域を広げるためには開かれた環境への適応が不可欠である。また、ロボットが人・社会の中で活躍するためには、ロボットが社会に受け入れられる必要がある。そのためロボットが社会に導入された際に社会、経済にどのような影響を与えるかについて研究開発の早い段階から考慮する必要がある。

このような背景を踏まえ、本プロポーザルでは将来の社会実装に向けた「開かれた環境に適応できるロボットに関する基礎研究」の推進と、「基礎研究段階からの社会・経済的影響評価」の推進を提案する。本プロポーザルでの基礎研究とは応用を見据えた基礎的な研究を指す。基礎研究は、「適応する知能」、「適応する身体」という二つのアプローチから取り組む。ただし、ロボットの知能面や身体面に関する研究を個別に推進するのではなく、双方が連携することで統合した「適応するシステムとしてのロボット」の研究を構築していくことが重要である。また、社会・経済的影響評価については、人間との共存度合いの高いロボットについて、特に基礎研究段階から検討すべき研究課題として「ロボットに感じる安心」、「プライバシーの保護」、「社会とのインタラクション」、「新しい法制度の仕組み（責任分配）」の四点を取り上げた。

本プロポーザルではロボティクス研究を促進するための研究開発基盤として、「基礎研究を加速するオープンプラットフォームの構築」および「競技会型の研究開発の活用」を提案する。ロボットのソフトウェアおよ

びハードウェアに関するオープンプラットフォームを提供することにより、ロボティクス研究に対して異分野研究者の参入を容易とし、システム統合に関する理論的基盤の確立が促進される。また、競技会型の研究開発により、研究成果の他チームによる再現や相互比較による有効性の検証が可能となり、基礎研究から応用研究への橋渡しが促進される。

開かれた環境に柔軟に適応するための研究開発や、ロボットに対する社会受容性の向上やルール作りに関する取り組みを基礎研究段階から実施することで、各応用分野で期待されるロボットの社会実装をいち早く実現し、わが国の産業競争力の向上に寄与するとともに、少子高齢化、多発する自然災害など、日本が直面する社会的課題に対して有効な解決手段の一つとなることを強く期待する。

Executive Summary

Innovation in robot technology is expected to be one of the most effective solutions to social issues faced by Japan, such as the declining birthrate and aging society, and disaster response. Future vision in various fields is stated in the government documentation, "Japan's Robot Strategy—vision, strategy, action plan—" (2015). Shortly, robots will be required to perform a variety of tasks in the diverse, dynamic "open environment", rather than routine tasks in a pre-arranged "closed environment" such as factory production lines. However, there is a big gap between the high expectations for robots and the current capability of robots. While robots can reproduce predetermined tasks in a "closed environment" precisely and repeatedly, they have not been able to perform actions that are easy for humans to take, such as folding clothes, going up and down stairs by grabbing handrails, and grabbing daily necessities in an "open environment".

Conventional robots use sensors to precisely measure and model information in unknown spaces and act according to plans based on logical calculations. This is effective for routine tasks such as the ones on factory lines, but robots have many difficulties coping with the open environment in which we live and work. In an open environment, the behavior of the robot collapses due to the following factors:

- Sensors cannot acquire all the information
- Various elements are intricately related and difficult to model
- Situation changes from moment to moment

The traditional approach to these problems is to reduce the indefiniteness of the open environment owing to improvements in computational power and sensor accuracy. While it has expanded the range of robot applications, the ability to adapt to the open environment is essential for further expansion of the robot's activity. In addition, for robots to play active roles in human society, society must be ready to accept robots in turn. It is necessary to consider, from the early stages of research and development, how robots might affect society and the economy before being introduced into society.

With this background and a view to the future social implementation, we propose to promote "basic research on robotics that can adapt to an open environment" as well as "socio-economic impact assessment from an early stage of R&D". Basic research should be promoted from two approaches: "adaptive intelligence" and "adaptive body", by not promoting research on the intelligence and physical aspects of robots individually but promoting research on "robots as adaptive systems" by collaborating with both sides. Regarding the socio-economic impact assessments, four research themes should be examined: "sense of security with robots," "protection of privacy," "interaction with society," and "distribution of responsibility as a new legal system".

As for the basis for the development of robotics research, we propose the "construction

of an open platform to accelerate basic research" and "competition-type R&D". The open platform for robot software and hardware will facilitate the entry of researchers from different fields into robotics research. Collaboration among researchers in different fields will lead to the establishment of a theoretical foundation for system integration. In addition, competition-based R&D will enable the reproduction and validation of research results, as a result, facilitating the bridge from basic research to applied research.

We proposed the research and development of robots that can flexibly adapt to open environments, as well as efforts to improve social acceptance and rulemaking for robots from the basic research stage. The early realization of the social implementation of such robots in various application fields will contribute to the enhancement of Japan's industrial competitiveness. At the same time, we strongly hope that this will be an effective solution to social issues facing Japan, such as the declining birthrate, aging population, and frequent natural disasters.

目次

1	研究開発の内容	1
2	研究開発を実施する意義	4
2.1	現状認識および問題点	4
2.2	社会・経済的効果	8
2.3	科学技術上の効果	9
3	具体的な研究開発課題	12
3.1	開かれた環境に適応できるロボットに関する基礎研究	12
3.1.1	適応する知能	13
3.1.2	適応する身体	15
3.1.3	片付けロボットへの適用に関するケーススタディー	16
3.2	ロボットの社会・経済的影響に関する人文・社会科学研究課題	17
4	研究開発の推進方法および時間軸	21
4.1	基礎研究を加速するオープンプラットフォームの構築	22
4.2	競技会型の研究開発の活用	24
4.3	研究開発の推進方法と推進の時間軸	25
付録 1	検討経緯	28
付録 2	国内外の状況	31
付録 3	用語集	34
	参考文献	36

1 研究開発の内容

本プロポーザルで提案する研究開発の全体像を図1-1に示す。われわれが生活している多様で動的な「開かれた環境」で非定型の作業ができるロボットの実現を阻害する問題を解決するために四つの提案を行う。開かれた環境に適応できるロボットの実現が難しいという問題に対し、提案①「適応性を有するロボットに関する基礎研究」を推進する。なお、ロボットに関する基礎研究では、特に、用途を考慮しつつ根本原理の追求を行う基礎研究が重要である¹。また、社会実装に向けた課題を十分考慮せず研究が推進されているという問題に対し、提案②「ロボットを社会に適応させ人と共生するためのロボット技術の社会・経済的影響評価に関する人文・社会科学研究」を推進する。さらに、基礎研究および人文・社会科学研究を加速するための研究開発の推進においては、ロボット構築にはノウハウの蓄積が必要なため異分野からの参入が困難であるという問題に対しては、提案③「基礎研究を加速するオープンプラットフォームの構築」を、基礎研究を客観的に評価することができないため産業界で成果が活用できないという問題に対しては、提案④「競技会型の研究開発の活用」を提案する。

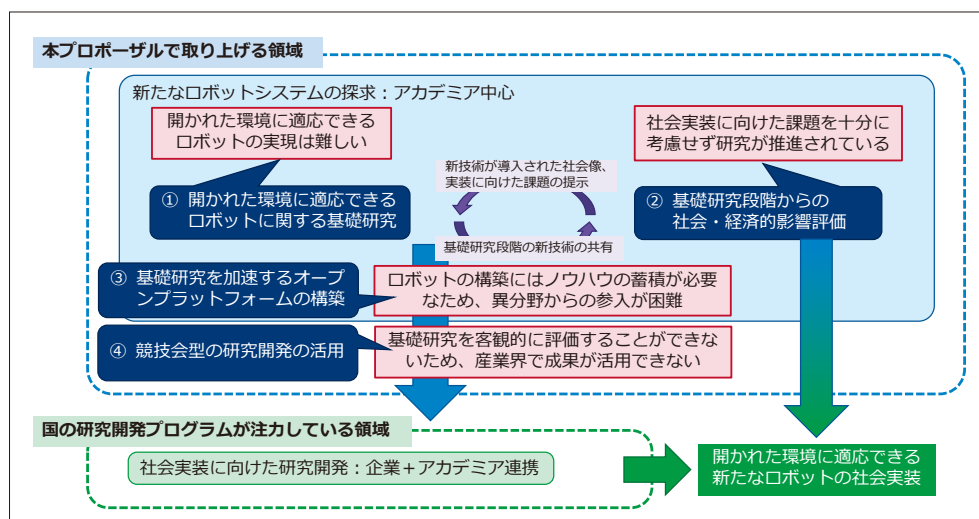


図1-1 研究開発の全体像

①開かれた環境に適応できるロボットに関する基礎研究

これまでロボットは、工場の生産ラインのように、あらかじめ整えられ、柵などで囲うことで限定された環境（「閉じた環境」）でしか安定して動作することができなかった。一方、われわれが生活している環境は、制約のない、無限定な「開かれた環境」である。「開かれた環境」は、多種多様な要素が相互に影響を及ぼしあいながら常に変化する環境である。「開かれた環境」には、物理環境の無限定性、人との共存環境の無限定性、変動するタスクの無限定性、および、ロボット自身の状態の無限定性があり、ロボットはこれらの無限定性に

1 米国のドナルド・ストークスによれば、基礎研究は用途を考慮しない根本原理の追求を行う Pure Basic Research（ポアア型）と、用途を考慮しつつ根本原理の追求を行う Use-inspired basic research（パスツール型）に分類される。本プロポーザルにおいて、ロボットの基礎研究は、用途を考慮しない基礎研究は考えにくいため、パスツール型に位置付けている。

適応する必要がある（コラム「無限定性に対する適応性」参照）。ロボットが開かれた環境に適応するための研究課題は、「多様性への対処」と「動的な状況への対処」という開かれた環境に関する軸、および「適応する知能」と「適応する身体」というロボット自身に関する軸、これら二つの軸における研究動向から整理できる。具体的には、多様性に適応する知能に関する研究課題として、脳科学における認識モデルの仮説である予測符号化理論に基づく知能基盤の確立、および人工知能分野での発達が目覚ましい深層強化学習を実世界でタスクを実行するロボットに適用する実世界深層強化学習が挙げられる。また、動的な状況に適応する知能に関する研究課題として、自動運転で用いられているSLAM（Simultaneously Localization And Mapping）技術をマルチモーダル情報に拡張し、ロボットが行動しながら場所概念と同時に語彙を獲得するセマンティックマッピング、高速かつ効率的な強化学習を実現するモデルベース強化学習とモデルフリー強化学習の統合が挙げられる。一方、適応する身体に関する研究課題として、ソフトロボティクスにおける柔軟な身体の数理基盤の確立と制御への適用や、制御主体・制御対象・環境の相互ダイナミクスによる制御理論基盤の構築などが重要である。これらのロボットの知能や身体に関する研究を個別に推進するのではなく、双方が連携することで統合した「適応するシステムとしてのロボット」の研究を構築していく必要がある。

②基礎研究段階からの社会・経済的影響評価

現状のロボティクス研究においては、社会実装に向けた課題を十分考慮せずに研究が推進されており、研究成果が社会実装につながっていかないという問題が指摘されることがある。「開かれた環境に適応できるロボット」を社会実装していくためには、ロボットの技術的開発と併せて、ロボットが、人間が生活する社会で受け入れられるかという社会的受容性の検討が重要となる。特に、基礎研究段階から検討すべき人文・社会科学研究課題として四点を取り上げた。一点目は、人がロボットに感じる「安心」に関する研究課題である。ロボットの物理的安全性の確保だけでなく、人間に与える安心感に関する客観評価手法や安心感を与える技術の開発が求められる。二点目は、プライバシーに関する研究課題である。個人情報保護に関する問題と同時に、ロボットが人間の生活空間に入ってくことで新たに発生しうるプライバシーに関する研究である。三点目は、人間がロボットと社会的つながりを形成することで発生する課題に関する研究、ロボットと社会のインタラクションである。四点目は、新たな法制度の検討である。行動しながら学習するロボットにおいては、行動やそれに伴う結果について事前に予期できないことが起こりうる。このような場合に責任分配をどうするか、新たな法制度やガバナンスの在り方に関する研究が必要となる。

③基礎研究を加速するオープンプラットフォームの構築

ロボティクス研究においては、研究チームが、それぞれのテーマに合わせて実際のタスクを実行するためのロボットを作り上げるには、さまざまなノウハウの蓄積が必要であり、さらに調整作業等のために大量の人的リソースの投入が必要となる。これが異分野研究者にとっては大きな参入障壁となってしまう、分野融合的な研究実施体制の実現をより困難なものにしている。ロボティクス研究に対して異分野研究者の参入を容易とし、システム統合に関する理論的基盤を確立するためにはプラットフォームの活用が有効である。取り組みとして、オープンなプラットフォームとして利活用が進んでいるROS（Robot Operating System）上に機械学習ライブラリーと連携するAPI（Application Programming Interface）や大規模データセットを構築すること、個々の研究に合わせて自由に改造、機能追加ができるオープンなハードウェアプラットフォームを提供すること、が挙げられる。これらにより、ロボットの研究開発に対する異分野研究者の参入を促進する。

④競技会型の研究開発の活用

ロボティクス研究の発展を阻害する問題の一つとして、各研究チームが用いるロボット、タスク、評価方法がそれぞれ異なっており、あるチームが発表した成果を他チームが再現したり、相互比較により有効性を検証したりすることは困難であることが挙げられる。このため、基礎研究における成果を産業界が評価することが

できず、基礎研究から応用研究への橋渡しを妨げている。この問題を解決し、研究の発展を促進する取り組みとして、競技会の枠組みを活用し、実環境に近い場面設定にて、リアルタイムにハードウェアが動くことを客観的に評価する環境を整備する。ロボットの基礎研究を促進するために競技会に取り入れるべき事項として、標準性能試験法の導入、プラットフォームの活用と競技会との共進化、簡便な競技設定が挙げられる。

開かれた環境に適応できるロボットの社会実装に向け、①基礎研究、②社会・経済的影響評価、③オープンプラットフォーム、④競技会が連携し、相互に知見を活用することが求められる。これらが連携したプログラム（例えば、JST 戦略的創造研究推進事業）を早急に立ち上げ、推進することが望まれる。このプログラムにおいて構築した研究開発基盤については、技術研究組合（CIP）等の枠組みを立ち上げ、維持していくことで、ロボティクス研究の継続的な発展が可能となる。

2 | 研究開発を実施する意義

2.1 現状認識および問題点

ロボットはプログラムされた動作を正確に何度でも再現できることから、組み立て現場などの産業用ロボットとして社会実装が進んだ。製造ラインで組み立てや溶接を担当するロボットであれば、ラインをロボットの動作範囲に合わせて構築し、稼働中は近づかないことで、安全性も担保できる。高価なロボットであっても、プログラムを変更することで多様な作業に同じロボットが対応できることから、投資対効果も良いとされている。産業用ロボットは、溶接・塗装、組み立て、搬送など生産現場のさまざまな製造ラインに投入され、市場を拡大してきただけでなく、今後もさらに拡大すると予測されている。産業用ロボットに関しては1980年以降、生産、利用ともに日本が市場の大きな部分を占め、ロボット大国と呼ばれるまでになったが、近年は設置ベースでは中国が台頭している。中国工業・情報化部、国家発展改革委員会などが「第14次五カ年計画」ロボット産業発展計画を発表するなど、世界のロボット技術のリーダーとして、部品製造、ロボット製造から利用まで完結させることを目指している。さらに、人と同じ作業現場で、人と協働できる新たな産業用ロボットの開発も盛んに行われている。例えば、南デンマーク大学発のベンチャー企業（Universal Robots）は人協調の産業用ロボットを製造販売し急速に世界シェアを拡大している。

一方、医療、介護、コミュニケーション、災害対応といった製造業以外でもロボットの利用が進んでいる。これらのロボットはサービスロボットと呼ばれ、新たな市場が広がってきている。例えば、Covid-19のまん延によって、人と人とが接触せずにサービスを提供することが求められるようになり、料理をテーブルまで持ってくる配膳ロボットの利用が広がっている。サービスロボットは、少子高齢化、多発する自然災害など、日本が直面する社会的課題に対して有効な解決手段の一つとなることが期待されている。2015年に日本経済再生本部から公表されたロボット新戦略にも、「センサー、AIなどの技術進歩により、従来はロボットと位置付けられてこなかったモノまでもロボット化し（例えば、自動車、家電、携帯電話や住居までもがロボットの一つとなる。）、製造現場から日常生活のさまざまな場面でロボットが活用されることにより、社会課題の解決やものづくり・サービスの国際競争力の強化を通じて、新たな付加価値を生み出し利便性と富をもたらす社会を実現するためにロボットを変えなければならない」、と記されている^[1]。サービスロボットの将来像としては、部屋の掃除だけでなく、さまざまな家事を代行できるホームロボットも想定されている。

しかしながら、現状のサービスロボットにできることは非常に限られている。「モラベックのパラドックス¹⁾」として知られているように、知覚と運動に関するスキルをロボットに与えることは非常に困難である。例えば、人にとってはいとも簡単な、さまざまな日用品の把持や取り扱いすら満足にできない^[2]。Amazon社が開催したコンテスト「ピッキングチャレンジ」では、倉庫にあるさまざまな商品を集める作業を課題とすることで、さまざまな日用品を把持し取り扱う「人間の手」を実現する技術の開発を促そうとした。しかし、参加者が実現したのは、人間の手とは似つかない吸盤を使った把持技術であった^[3]。また、衣服を畳むという作業においても、衣類にはさまざまな色、形状、柔らかさがあり、作業を事前に教えることが難しい上に、柔らかく自由に変形可能な物体は把持・操作が困難であるといった理由で、いまだに実現のめどが立っていない^[4]。

1 人間にとって難しいと思われることが機械には簡単で、逆に、簡単と思われることが機械には難しいという逆説。米国の人工知能・ロボティクス研究者のハンス・モラベックが、著書の中で、「実証実験が進むにつれて、知能テストの問題を解いたり、チェッカーで遊んだりといった大人並みの能力をコンピュータに発揮させることは比較的容易だが、知覚や運動に関しては1歳児並みの能力を持たせることは難しいか不可能だということが分かってきたと述べたことによる。（“Mind in Motion”, 1988）

サービスロボットの利用範囲を広げるために、多様で動的な開かれた環境で動作可能なロボットを実現するための技術が期待されている。従来のロボットを多様で動的な環境に持ってきても、センサーがすべての情報を正確に取得できない、さまざまな要素が複雑に関係しているために環境のモデル化が困難、状況が刻々と変化するという理由で、その行動は簡単に破綻してしまう。この問題を解決するためには、個々のタスクに特化したアドホックな技術ではなく、基礎・基盤的な技術の確立に向けた基礎研究の推進が必要である。しかしながら、わが国におけるロボティクス研究に対する支援は、実用化段階に対しては重点的に行われている一方で、基礎研究に対する支援は手薄である。ロボット関連の主要な研究開発プログラムを技術成熟度レベル（TRL）でまとめた図2-1を見ると、基礎・基盤的な技術に対応するTRL1からTRL5までの研究開発を支援するプログラムが少ないことが分かる。

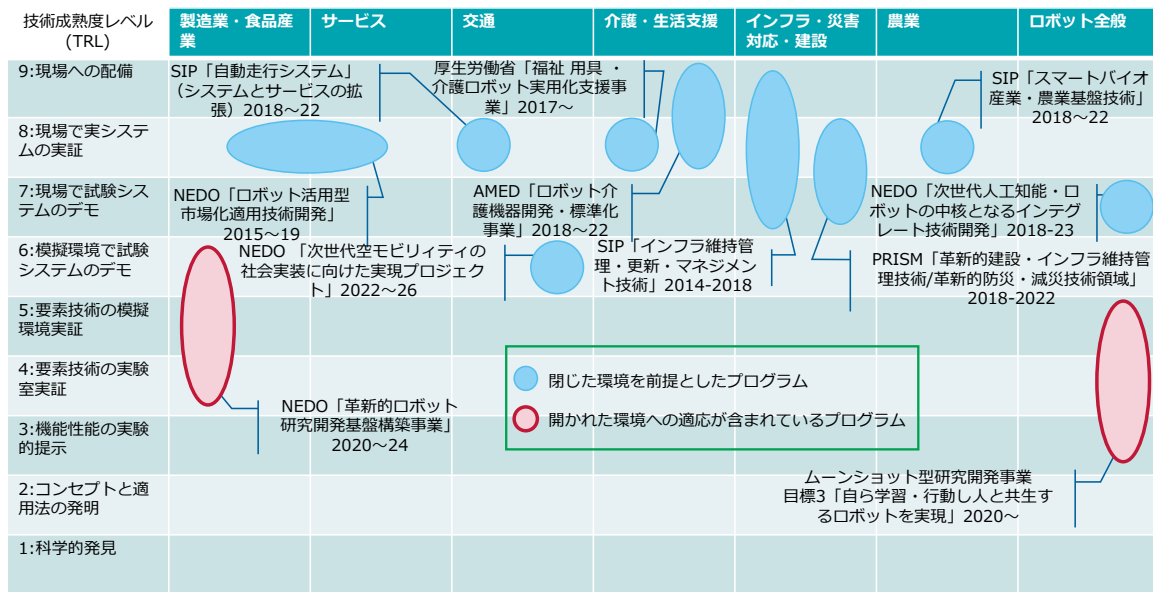


図2-1 日本で実施されているロボットに関する主要な研究開発プログラム

以上のとおり、本プロポーザルではわが国のロボティクス研究において解決すべき課題として以下の2点を捉えている。

- 多様で動的な開かれた環境で動作可能なロボットの実現が期待されているが、個々のタスクに特化したアドホックな技術開発では実現は困難である。
- このためには基礎研究の推進が必要であるが、わが国における基礎研究に対する支援は手薄である。

また、サービスロボットは、人・社会の中で活動するロボットなので、開発したロボットが実際に社会で受け入れられるのかといった社会的受容性の検討も重要である。そのためロボットが社会に導入された際に、社会、経済へどのような影響を与えるかについて研究開発の早い段階から考慮する必要がある。

これまでのわが国のロボットの研究開発における、ロボットの社会的受容性に関する取り組みを表2-1にまとめた。安全対策については、対人サービスロボット、福祉介護ロボット、道路交通支援ロボット等具体的な社会実装のフィールドで検討されてきている。標準化に関しては、産業用ロボット、福祉・医療ロボットの安全性、品質保証に関する標準化が検討されている。特に、NEDOが実施している「革新的ロボット研究開発基盤構築事業」では、産業用ロボットの国際競争力の強化のために、産業用ロボットの要素技術に関する標準化に力をいれている。

法的課題への対応については、自動運転、手術ロボット、介護ロボットなど、既に製品化されたもの、もしくは製品化段階にあるロボット適用分野において、各分野の既存の行政規制の適応の可能性と法執行における課題について議論が進んでいる^[5]。一方で、法分野に応じた検討だけではなく、AI・ロボティクスの全体方針・戦略の下で、画一化せず多様かつ柔軟な議論を行い「ロボット法」、「ロボット法総論」として体系的な学問領域の確立が重要であるとの指摘もある^[6]。また、ロボットが事故を起こした場合の法的責任の帰属と法的責任分配の在り方についても研究が行われ始めている。倫理的課題に関する研究では、ロボットを使う際の人間のあるべき態度や心構えの明確化や研究開発に社会的要請をフィードバックするための方法論、技術と社会の対話コミュニティ形成のための方法論について研究が行われてきている。

これまでの取り組みをまとめると、安全性、標準化については、ロボットが使用される場面（製造業、サービス業、交通、介護生活支援、インフラ、農業等）が明らかであり、比較的製品化に近いフェーズのものから研究が行われてきている。また、法的課題、倫理的課題、雇用や労働へ影響に関する研究は、科研費等の個人研究として進みつつある。

表 2-1 日本で実施されているロボットと社会的経済的影響に係る研究活動例

カテゴリー	主体	実施内容	年度
安全性	NEDO	次世代ロボット実用化プロジェクト	2004-05
	NEDO	人間支援型ロボット実用化基盤技術開発	2005-07
	NEDO	サービスロボット市場創出支援事業	2006-07
	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	2017-22
	JST	ムーンショット目標3：活力ある社会を創る適応自在AIロボット群	2020-
標準化	NEDO	生活支援ロボット実用化	2009-13
	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	2017-22
法的課題	JST-HITE	法・経済・経営とAI・ロボット技術の対話による将来の社会制度の共創	2016-
	JST-HITE	自律性の検討に基づくなじみ社会における人工知能の法的電子人格	2016-
	日本ロボット学会	ロボットの法および倫理に関する研究専門委員会	2021-
	科研費	対話知能システムの研究開発および社会実装のための法社会規範の研究	2019-24
倫理的課題	科研費	ポスト現象学と言語行為論に基づいたコミュニケーションロボットの倫理に関する研究	2018-21
	科研費	医療介護ロボット活用時の訪問看護倫理ガイドラインの作成と有用性の検証	2022-25
	科研費	近未来の介護ロボットの開発と社会実装のためのEthical Platform構築	2021-25
	日本ロボット学会	ロボット考学研究専門委員会	2017-
労働・雇用への影響	科研費	ロボットや人工知能技術などの技術革新が労働市場に与える影響の理論・数量分析	2021-24
	科研費	技術革新が労働市場に与える影響とそれに伴う最適な政策対応について	2019-20
	科研費	ロボット導入が日本およびアジアの経済成長と雇用に与える影響	2019-22
	科研費	エビデンスに基づく介護政策の実証分析	2018-22

また、諸外国で実施されているロボットと社会的経済的影響に係る研究活動について表2-2のとおりまとめた。諸外国では2000年代から学術機関において、AIやロボットが人類の未来に与える影響等について広く検討されている。日本の取り組みと比較すると、以下のような検討が目立つ点に特徴がある。

- 新興技術による恩恵とリスクのバランス
- 格差拡大など労働・雇用への影響
- 自由・民主主義・平等といった普遍的価値への影響
- 透明性、アカウンタビリティなど、技術や研究開発のブラックボックス化の回避
- 自律性を持った人工知能やロボットに対する懸念

これらの取り組みが学術機関を中心とした機関やセンターといった枠組みを構築して実施されている点に大きな特徴がある。そこでは、工学、数理、情報学だけでなく、法学、哲学、心理学、社会学、経済学などの研究者が参画し、学際的な研究がなされている。

表2-2 諸外国で実施されているロボットと社会的経済的影響に係る研究活動例

地域	主体	実施内容	年
欧州	欧州委員会	RoboLaw プロジェクト ロボティクスと法律の関係に焦点をあてたプロジェクト。次世代ロボットが社会実装される際に起こりうる法的・倫理的課題を欧州を中心とするロボット工学者、法学者、哲学者と検討を行ったもの。成果として「ロボティクス規制のガイドライン」(2014)を出している。	2012
英国	オックスフォード大学	Future of Humanity Institute 将来的な技術の開発能力とその影響について、潜在的なリスク評価をシミュレーション等を通じて行う。数学、哲学、社会科学、自然科学など学際的に研究者を採用。以下、四つの研究領域を設ける。 ・マクロ戦略 ・AIの安全性 ・AIガバナンス ・バイオセキュリティ	2005
	ケンブリッジ大学	Center for Study of Existing Risk 現在または将来の技術によって引き起こされる可能性のある脅威を研究することを目的とする。六つの重点領域として、以下を挙げている。 ・グローバルリスクの科学 ・生物学リスク ・地球環境とリスク ・AIによるリスク ・公平性とグローバルリスク ・テクノロジーリスクマネジメント	2012
		Loverhulme Center for Future of Intelligence AIの可能性を最大限活用し、安全性・透明性を担保するための学際的な研究センター。コンピューターサイエンス、哲学、社会科学など学際的に研究者が集まる。AI技術のフォーサイトからガバナンス、倫理、責任体制の検討、安全性、セキュリティ、リスクなど幅広い研究がなされている。	2016
米国	国家科学技術会議 (NSTC) 科学技術政策局 (OSTP)	Preparing for the Future of Artificial intelligence AIだけでなくロボットの研究開発に対して23の提言を行う。 ロボティクス分野における倫理的諸問題は、多岐にわたる専門分野が関わり、個人の信仰、宗教、文化などに影響され、ロボットの適用を期待する複雑で多様な状況において適切に対応できるアルゴリズムが必要であると述べられる。	2016
	スタンフォード大学	AI 100 AIが法・経済・社会等にもたらす長期的な影響を学際的に調査。AI研究者の他、意思決定科学、オペレーションズリサーチ、生物学、医学、情報学、倫理学、哲学、心理学、法学など学際的に研究者が参画している。	2016-21

IEEE	The IEEE Global Initiative on Ethics of Autonomous and Intelligent Systems AI・自律システム開発に関与する関係者が倫理的配慮を行うために教育を受け、テクノロジーが人類の利益のために進歩することを目指す。AI倫理に関する Ethically Aligned Design version2 報告書をまとめる。報告書では、人権、公平性、透明性、アカウンタビリティ、悪用・誤用、プライバシー、安全性、教育、法的位置付け、幸福等が重要項目として挙がる。	2016-21
Henrik I. Christensen を中心に複数の大学が 参画	A Roadmap for US Robotics: From Internet to Robotics 2009年に策定を開始した米国のロボットロードマップ。2013年、2016年、2020年に改定。法的、倫理的、経済的コンテキストのセクションでは、安全、自由、労働への影響、社会的インタラクション、プライバシーとセキュリティの検討が提示されている。	2020

以上のとおり、本プロポーザルではロボットの社会・経済的影響に関する研究について解決すべき課題として以下の3点を捉えている。

- わが国のロボットの基礎研究段階における社会・経済的影響に関する研究は、科研費等の個人研究が盛んであり、ロボティクス研究開発のファンディングプログラムに組み込まれたものは多くない状況である。
- 社会・経済的影響に関する研究成果をロボットの研究開発現場へのフィードバックし、研究開発との連携する仕組みが発展途上である。
- 諸外国では、学術機関が研究センター等を設立しそれらが中心となりロボットと社会・経済的影響に関する研究を学際的に継続して実施しているが、わが国ではそういった取り組みの規模および継続性に問題がある。

2.2 社会・経済的效果

限定のない開かれた環境に柔軟に対処する技術は、人がいる環境で動作するサービスロボットへの適用が効果的である。2021年におけるサービスロボット世界市場の売上高は2兆7410億円で、2020年比で1.2倍の伸びを示しており、2030年には5兆7628億円と、2021年比で2.1倍に拡大することが見込まれている^[7]。開かれた環境に柔軟に対処するコア技術の研究開発に取り組むことで、サービスロボットのイノベーション成果が生まれ、さまざまな応用分野で期待されるロボットの社会実装をいち早く実現できる。そのことにより、市場予測を上回る市場拡大を実現し、わが国の産業競争力の向上に寄与する。

わが国において見込まれる少子高齢化の進展に伴う労働人口の減少を踏まえると、各産業分野の労働生産性を高めることは、わが国の喫緊の課題である。開かれた環境で動作できるロボットを製造現場に大幅に導入することで、従来の産業用ロボットでは代替できなかった、労働集約的で生産性が低い作業、過重な労働等から人を解放できる。これによって人手不足を補い、人材を高付加価値分野で生かしていくことが可能となる。

また、超高齢社会に移行しつつあるわが国では、自立高齢者の家庭内での生活支援、外出・社会参加の促進、要介護高齢者の介護のための労働力確保も大きな課題である。厚生労働省の試算によれば、2019年度比で、2025年度には32万人、2040年度には69万人の介護人材が不足するとのことである^[8]。経済産業省と厚生労働省では、2013年度に介護ロボットを、重点的に開発支援する分野に特定（2017年10月に改訂^[9]）し、2013年度から開発支援を行っている。ここに挙げられている「介護ロボット」は、現在の技術で実現が可能な物理的な接触を必要としないコミュニケーションロボットや、介護者の動作を補助するパワースーツなどである。開かれた環境に柔軟に対処することのできるロボットが実現できれば、高齢者の家事を代

行するロボットや、人と直接接触する介護作業もできるロボットの実現につながる。

さらに、わが国で多発している地震・火山噴火、風水害、土砂災害に対し、ロボットを活用したいという要望には現状では十分に応えられていない。災害現場という究極の開かれた環境で作業を達成できるロボットを実現することで、二次災害被害の軽減、早期の復旧・復興に資する。

一方、ロボットの社会実装には、ロボットの社会受容性の向上やルール作りが欠かせない。どのように社会受容性を高めればよいのか、どういったルールを作れば安全に安心してロボットを身近に置いて利用することができるのか、といった社会的側面の研究が進むことで、ロボットの活用が促進される。

2.3 科学技術上の効果

①学問・技術の発展

基礎研究に重点を置いた課題解決を推進することで、工学的には以下のような技術、理論、アーキテクチャーといった新たな研究の展開が期待される。

- 大量データを用いた事前学習をすることなく、行動するなかから知識を獲得し学習する技術
- 人間の指示を文脈や状況に応じて適切に解釈する技術
- 制御器と制御対象、環境を一体として扱うような、新たな制御理論の構築
- 脚や胴体、頭頸部、尾部といった身体の各構成要素が協調して動作するためのアーキテクチャーの確立
- 動作環境の変化や、自身の機能の一部故障に対して、適応して動作を継続する技術
- 複数のロボットが協力して、複雑なタスクに適応力高く対処できる技術

また、基礎研究に重点を置くので成果の適用範囲が広く、以下のようなさまざまな異分野研究との共進化やシナジー効果といった波及効果につながる。

a. 人工知能研究

- 深層学習といった帰納的AIと、推論・計画といった演繹的AIとの融合
- 少数データからの学習
- 以前獲得した知識に追加的に学習する継続学習
- 不確実な情報をもとにしながらも適切な推論

b. システム工学

- リスクに強いシステム（河川ネットワーク、通信ネットワーク等）の設計論構築

c. 医学・脳科学

- 生物の学習・適応機構の構成論的理解
- 運動障害や神経疾患の病態メカニズムの理解、リハビリテーション応用

さらに、人文・社会科学と連携して研究を進めることで、工学にとっては技術の根本から社会との親和性のよいロボット技術を創出でき、産業への展開のハードルが低くなる。一方、人文・社会科学にとっては、人間だけで構成される従来の社会から、人間とロボットが共存する社会という未来の社会の課題を理解するといった研究の新展開につながる。

②人材育成、コミュニティの形成

「基礎研究を加速するオープンプラットフォームの構築」(4.1に記載)によって、ロボットの設計・開発をすることなく、ロボットを利用する研究を実施することが容易となり研究開発の整備が進む。「競技会型の研究

開発の活用」(4.2に記載)によって、標準的な物差しで技術の優劣を評価することができ、持続的に研究を
発展させる体制が構築できる。参画の障壁が低いことで、多くの研究者の参加が見込まれ、異分野との連携
を経験し、幅広い知見を持った人材を育成することができる。同時に、異分野間の連携が容易なことから、
アカデミアと企業の共同研究が活発化し、アカデミアから企業まで幅広いプレーヤーを巻き込んだ研究開発コ
ミュニティーの形成につながる。

2

研究開発を実施する意義

コラム

無限定性に対する適應性

現在のロボット技術では、ロボットは限定された環境・状況でしか安定に動作することができない。社会のさまざまな場面でのロボット技術の活用が求められているが、実環境・実社会においては、環境・状況がオープンで、限定されないために、そのような無限定な環境・状況でも適切に自律的に行動できる機能が必要となる。

生物はこのような無限定性への適應機能を有している。このような生物の適應機能を理解し、そこからロボットなどの人工物で適應機能を実現する方法論を見いだそうとする研究は、科学技術研究補助金特定領域研究「身体・脳・環境の相互作用による適應的運動機能の発現—移動知の構成的理解—」（略称：移動知）（2005年～2010年）で行われ、その後、同新学術領域研究「脳内身体表現の変容機構の理解と制御（略称：身体性システム）（2014年～2018年）」、「身体-脳の機能不全を克服する潜在的適應力のシステム論的理解（略称：超適應）（2019年～2023年）」などでも継続的に行われている。

環境・状況の無限定性に対する適應性として以下の四つなどが挙げられる。

●物理環境の無限定性に対する適應性

未知環境や、不確かな要因（床面の性状や風など）が存在する状況でも安定に動作する機能。災害対応ロボットなどは、自然環境のフィールドで利用されるため、特にこの適應性が求められる。

●共存するヒトの無限定性に対する適應性

人と相互作用しサービスを提供するロボット、人と共働するロボット、人が存在する公共空間で利用されるロボットなどでは、ヒトに対する適應性が求められる。人の行動は、物理法則に従う「もの」とは異なり、内部状態や意図（時に悪意）が存在し、心理的な要因も影響するため、「環境」とは別に扱う必要がある。

●タスクにおける無限定性に対する適應性

宇宙や原発の廃炉で利用されるロボットは、未知環境での動作が求められることが多い。そういった場合、通常、ロボットのタスクや目標は、設計者やオペレーターから与えられるが、状況に応じてタスクが変更されることや、新たなタスクが与えられることもあり得る。また、自律ロボットでは、タスクやサブタスクを自律的に生成することもある。このような変動するタスクに対しても適應的に動作できる機能を検討する必要がある。

●自分の状態の無限定性に対する適應性

故障や劣化など、利用に伴い、ロボット自体の状態も変化する。また、環境との相互作用の中で、自己の機能も変化することが考えられる（軟弱な地盤で動けなくなるなど）。このような自分の状態の変化、異常に対しても、これを検出し、対応する機能が求められる。

また、多数のロボットが存在するシステムにおいては、他のロボットの無限定性に対する適應性も考慮する必要がある。他のロボットとは、コミュニケーションによって相互作用を変化させることで、適應的に行動することも可能であるため、他のロボットは、「環境」とは区別して扱う必要があるからである。

このような適應性は、ロボットの社会実装をする上で重要な機能であり、ロボットの自律化において不可欠な機能である。

〔浅間 一（東京大学大学院工学系研究科 教授、
システム・情報科学技術ユニット特任フェロー）〕

3 | 具体的な研究開発課題

3.1 開かれた環境に適応できるロボットに関する基礎研究

これまでロボットは、工場の生産ラインのように、あらかじめ整えられ、柵などで囲うことで限定された環境（「閉じた環境」）でしか安定して動作することができなかった。一方、われわれが生活している環境は、制約のない、無限定な「開かれた環境」である。「開かれた環境」は、多種多様な要素が相互に影響を及ぼしあいながら常に変化する環境である。「開かれた環境」には、物理環境の無限定性、人との共存環境の無限定性、変動するタスクの無限定性、および、ロボット自身の状態の無限定性がある（コラム「無限定性に対する適応性」参照）。無限定性に対する研究開発として、以前から注力されてきたアプローチは、計算能力やセンサー精度の向上等によって開かれた環境の無限定性を低減するというものである。これによってロボットの適用範囲が拡大してきたが、さらにロボットの活動領域を広げるためには開かれた環境への適応が不可欠である。ロボットが開かれた環境に適応するためには、その場その時の環境において、タイムリーかつ適切に対処することが求められる¹。

開かれた環境に対する研究課題を、「多様性への対処」と「動的な状況への対処」という開かれた環境に関する軸、および「適応する知能」と「適応する身体」というロボット自身に関する軸、これら2軸における研究動向から整理した（図3-1）。なお、開かれた環境に関する課題そのものは古典的なものであるが、近年の人工知能、特に深層学習の進化による成果を適用することにより、ロボティクス研究は大きく様相を変えようとしている。

		基礎となる既存の研究事例	今回提案する研究開発課題
多様性への対処	適応する知能	深層強化学習 問題点：膨大な学習、試行、探索が必要、現場での学習が出来ない	・予測符号化理論に基づく知能基盤 不完全情報からの行動生成 少数事例からの学習 マルチモーダルデータの統合 ・実世界深層強化学習 Sim2realとReal2sim 逆強化学習、模倣学習 メタ学習（学習法の学習）
	適応する身体	ソフトグリッパー、連続アーム（タコ足、ソウ鼻） 問題点：柔軟性と正確性のトレードオフ、パワフルな動作、制御が困難（大変形、大自由度、非線形応答）	・柔軟な身体の数理基盤確立と制御 触覚等の複数の感覚モーダル導入 繊細かつ正確な動作とパワーを両立する駆動機構
動的な状況への対処	適応する知能	SLAM 問題点：誤差の蓄積問題、情報不足により位置推定が解けなくなる（不良設定問題）、3D計測しかできない モデルフリー強化学習：大量データ必要 モデルベース強化学習：モデル過依存	・セマンティックマッピング 計測結果への意味や概念の付与 周辺環境の理解、物体概念の獲得 ・モデルベースとモデルフリーの強化学習統合 強化学習方策や価値関数の動的な更新 ニューラルODE（常微分方程式）
	適応する身体	受動歩行機械、包摂アーキテクチャ 問題点：単純なタスク、個別の状況にししか対処できない。一般的な設計論がない。	・環境ダイナミクスに基づく身体性と制御理論 制御主体・制御対象・環境の相互作用ダイナミクス 身体性を前提とした知能 特解の探求と一般解への発展

図3-1 開かれた環境に適応するための研究マップ

¹ 開かれた環境の困難性の事例として、多様性では、事前に想定したシナリオでは対処しきれない広範な状況が存在する、認識誤差やノイズ、データの欠落があり、環境に関する正確な情報が得られないなどが、また、動的な状況では、状況が刻々と変化するため行動を開始するときには前提条件が異なる、あるいは、自分の行動の結果、状態が変化するなどが考えられる。

3.1.1 適応する知能

(1) 深層強化学習による多様性への適応

強化学習とは、人が行動において、報酬とペナルティーの関係を認識することで、ペナルティーを避け、より多くの報酬を得ようと自発的に行動を変容させてゆく行動心理学の理論に基づき、機械学習に適用したものである。ここでの報酬等の学習に深層学習を導入したものを深層強化学習という。深層強化学習は、シミュレーションやゲームのような環境で優れた成果を挙げた（AlphaGo、ATARIなど）一方で、膨大な試行による学習が必要で、一般に報酬の設計が難しく、また、現場での学習ができないなどの問題点が指摘されている。本プロポーザルでは従来の問題点を克服するために二つのアプローチを提言する。

予測符号化理論に基づく知能基盤

従来の研究事例として認知発達ロボティクスがある。認知発達ロボティクスは、ロボットや計算モデルによるシミュレーションを駆使して、人間の認知発達過程の構成論的な理解と、その理解に基づく人間と共生するロボットの設計論の確立を目指した、日本発の研究開発領域である。ここでは、世界のモデルを機械学習で得るというアプローチをとってきたが、現実とモデルの誤差が不可避であった。それを解決する方法として予測符号化という考え方が注目されている。

予測符号化理論とは、脳科学の仮説「自由エネルギー原理」から導出される外界の認識モデルである。生物が、身体や環境からの感覚信号と脳内の内部モデルとをもとにトップダウンに予測したものと、実際の感覚信号を比較することで、その誤差を最小化するように内部モデルを更新したり、環境への働きかけを実行するというものである。

ベースとなる研究として、予測符号化理論に基づき、人間の操縦データ（スキル）から、実時間で動作・画像の予測を修正し続けるように世界モデルを学習する深層予測学習^[10]が挙げられる。この研究では、実時間で動作・知覚の予測を修正し続ける学習のフレームワークを構築している。これらの研究をさらに発展・進化させることで、予測符号化理論に基づく知能基盤の確立に向けた学理探究が促進され、その結果、人間が行っているような、さまざまな感覚器からのデータ（マルチモーダルデータ）の統合や、不完全な情報からの行動生成や少数事例からの学習が可能になる。

実世界深層強化学習

実世界深層強化学習とは、開かれた環境（実世界）でタスクを実行するロボットののための深層強化学習である。従来の深層強化学習が、離散的で完全に観測可能なグリッドワールドを前提としていたのに対して、実世界は、連続空間であり、観測は部分的かつノイズが含まれ、不完全で不確実なモデルしか使えず、報酬関数の設計が困難であるという課題がある^[11]。本研究課題では、深層強化学習の最新研究成果を、身体性を持つロボティクスに適用することで、これらの課題の解決に向けた実世界深層強化学習の実現を目指す。

実世界深層強化学習に向けたベースとなる研究としては、深層動的方策計画法といった少数データで安定した深層強化学習^[12]や、Sim2real（シミュレーション上での深層強化学習による4脚ロボットの歩行制御学習の事例）^[13]などが挙げられる。本プロポーザルでは、研究の方向性をいくつか挙げる。まず、状態行動空間の効率的な表現については、Sim2realとReal2simにおいて状態行動空間の量子化手法の研究。次に、逆強化学習による報酬関数設計においては、正方向強化学習と組み合わせた生成的模倣学習を使った、人間の行動データからの報酬関数の推定。最後に、転移学習においては、経路計画の汎化・再利用による動作生成などの研究を推進することで、現場におけるリアルタイムな行動計画とタスク遂行が可能になる。また、ドメインやタスクの異なる複数のデータセットでの学習を通して、ターゲットとするドメインやタスクに合うような学習方法に関するメタ知識を獲得する枠組みであるメタ学習は、少ない訓練ステップ数・訓練データ量で未知のドメインやタスクに適応することが期待できる。

(2) セマンティックマッピングによる動的な状況への適応

SLAM (SLAM: Simultaneously Localization And Mapping) とは、レーザー距離センサーや画像を用いた自己位置推定と周辺環境の地図構築を同時に行う技術である。現状、誤差の蓄積問題、情報不足により位置推定が解けなくなる (不良設定問題)、3D 計測しかできないなど問題があり、ロボットが周辺環境を適切に把握して変化に動的に対処するには極めて不十分な状況であると言わざるを得ない。動的な状況変化に適応する知能に関しては、(1) に前述した深層強化学習と重複する研究課題が多いため、ここでは特に「多様性への対処ではなく」、「動的な変化への対処」に向けた課題を中心に記述する。

セマンティックマッピング

SLAMにおいて、計測結果への意味や概念の付与、周辺環境の理解、物体概念の形成を行う研究として、記号創発ロボティクス^[14]が注目されている。ここでは、ロボットが移動しながら、会話など人間との記号的コミュニケーションを通じて概念を形成する記号創発システム (これをセマンティックマッピングと呼ぶ) は、確率的生成モデルをマルチモーダル情報に拡張し、行動しながら場所概念と同時に語彙を獲得する。本研究をさらに推進することで、動的な状況における、周辺環境の理解と物体概念の獲得が飛躍的に推進する統合認知の枠組みとして期待できる。

モデルベース強化学習とモデルフリー強化学習の統合

深層強化学習は基本的にモデルフリーであるがために大量のデータと試行が必要であり、ロボティクスへの実践的な応用においては、タスクや環境を制限することで自由度を軽減せざるを得ない。一方で、少ないデータで安定した学習をするための手法としてモデルベース強化学習がある。環境と内部状態をモデルとして定義することで、高速かつ効率的な強化学習が可能となる。モデルベース強化学習の問題点はモデルと実環境との間の誤差が蓄積することにより不適切な学習をしてしまうことである。このような誤差を修正するために、従来より動的計画法やヒューリスティック探索法のような Planning を行うことで環境と方策や価値関数を動的に更新する方法が研究されている。

統合のベースとなる研究としては、ヒューリスティックマップによるモデルベースTD学習 (Temporal Difference Learning)^[15]が挙げられる。これにより、モデルフリー強化学習とモデルベース強化学習のメリットである、モデルによらない方策の学習と高いサンプル効率の両立が期待できる (図3-2 参照)。

また、近年脚光を浴びたニューラルODE (常微分方程式)^[16]を使って、環境やロボット自身の物理的なモデルを微分方程式の制約として学習に取り込む研究も模索されており今後の発展が期待される。

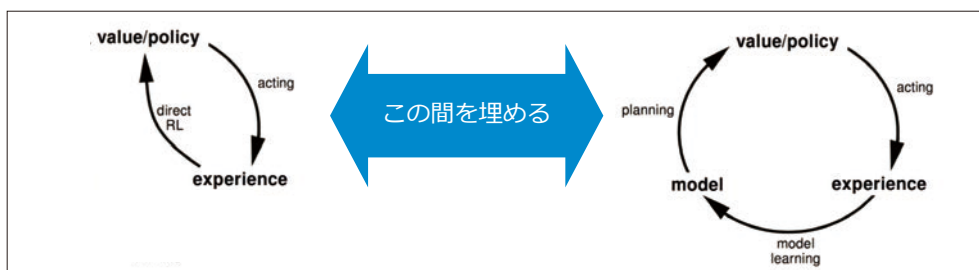


図3-2 モデルフリー強化学習 (左) とモデルベース強化学習 (右)

3.1.2 適応する身体

(1) 柔軟な身体の数理基盤確立と制御による多様性への対処

実世界の多様性に対処する身体的アプローチとしては、ハードウェア的な柔軟性の付加が挙げられる。

例えば物体の把持の場合には、ソフトグリッパーや連続アームなど関節やエンドエフェクターに柔軟性を持たせることで、多様な物体の把持・操作が可能となる。Amazon Picking Challenge (APC) の上位チームにおける「定石」となった吸引ハンド^[17]も、こうした実世界の多様性に対処する適応策の一つといえる。

ハードウェア機構に柔軟性を付与すると、多くの場合操作の正確性とトレードオフとなる。柔軟な構造による大自由度化（数十～無限大の自由度）、および、大変形やそれに伴う非線形な振る舞いをもたらす、制御が困難となるためである。この問題を解消するためには、柔軟な物体のモデリングやシミュレーション手法、大自由度・非線形システムの一般的な制御則の確立などが求められる。さらに、繊細な動作とパワーを両立する駆動機構が求められる。例えば、空気圧や油圧など、電動以外のアクチュエーターの開発やそのハイブリッドシステムの開発が必要だろう^[18]。

これら柔軟性を有するハードウェア機構に関する研究は、ソフトロボティクスとして近年、急速に発展しつつある^[19]。ソフトロボティクスとは、柔軟材料に特有の機械的・電気的・化学的性質を積極的に利用したロボットシステムに関する新興の学術分野である。柔軟材料を利用した新しいロボット機構の探索、柔らかいロボットのモデル化と制御、柔軟物体の操作、生物規範型ソフトロボットを用いた生物の振る舞いの解明といった研究を通じ、ロボティクス分野に新たなブレークスルーをもたらすと期待されている。一方で方法論、方向性はいまだ探索段階にある。今後は、設計・製造の方法論やツール、ソフトロボット技術をテスト・評価する手法の開発と標準化など工学的な基礎研究も求められる。

ソフトロボットの学理基盤を確立するための取り組みとして、科研費新学術領域「ソフトロボット学の創成」（2018年度～2022年度）が挙げられる。ここでは、「しなやかな体」、「しなやかな動き」、「しなやかな知能」という三つの研究を融合してソフトロボット学という新たな学問体系の構築を目指した研究を推進している。例えば、高速走行するチーターのしなる背、ぶら下がり移動するサル尻尾、魚をすばやく捕らえるサギの首などの動物の体幹を粘弾性を備えた索状の連続体とみなし、ダイナミクスのモデル化とシミュレーションを通じて、これらの動的振る舞いの解明と、俊敏さと巧みさを備えたロボットの実現を目指している^[20]。

(2) 環境ダイナミクスに基づく身体性と制御理論

実世界の動的な状況に対処するには、中央集権的な知能による制御だけによらず、身体と環境との相互作用を積極的に活用することで即時的な対応を可能とする制御システムが求められる。このような制御の例として、包摂アーキテクチャーや陰的制御が挙げられる。

包摂アーキテクチャーは、ロボットの制御を階層構造化し、下位層ではセンサーからの入力に応じて障害物を避けるといった単純な行動を担い、上位層ではロボットの全体目的に沿った制御を行うことで、即時的な対応を可能としている。問題は、このような階層構造による行動の設計が困難であり、周囲のゴミを集める、不整地を通り抜けて目的地に到達するといった単純な行動しか実現できていないことが挙げられる。

一方、陰的制御は身体と周囲の環境との相互作用を制御に取り込むことで、動的な状況変化への対応を可能としている。陰的制御の例として受動歩行機械が挙げられる。受動歩行機械は、明示的な制御を行わずに機構系のみで歩行という高度な運動機能を生み出している。地形等の条件変化に対して機構系が受動的に回答することで、安定な歩行を継続することができる^[21]。問題として、このようなシステムは非線形性が極めて強く、安定した歩行を実現するための条件を見つけることが困難であることが挙げられる。現状では、実験的に試行錯誤を繰り返して安定な条件を探索せざるを得ず、より複雑な行動への適用を困難にしている。

このような困難はあるものの、変化の幅が大きい動的な環境に対して冗長性と拡張性を備えた制御システムの実現は、想定外の状況からの復旧動作にも役立つ。

包摂アーキテクチャのような階層構造化した制御、陰的制御のような身体と周囲の環境との相互作用取り込んだ制御のいずれにおいても、現状では個別のタスクや閉じた環境にしか対処できない。一般的な設計論や制御則の構築が不可欠である。制御主体と制御対象、環境の相互作用ダイナミクスによる制御の理論的基盤の構築、新たな身体モデルの確立、特解の探求と一般解への発展などさまざまな研究開発課題を進める必要があろう（図3-3参照）。

このような取り組みの一例として「手応え制御」が挙げられる^[22]。これは4脚ロボットの脚間協調動作に関して見いだされた制御則を用いることで、歩行速度に応じて4脚の協調の仕方をエネルギー的に最適なものに切り替える等、遭遇した状況に呼応した合理的な振る舞いを自発的に発現することを可能としている。この制御則は脚同士という同質の身体自由度間の相互作用のみにおいて成立するいわば「特解」であるが、これをもとに胴体や首など異質の運動自由度間の相互作用に拡張する等、「一般解」への発展が望まれる。

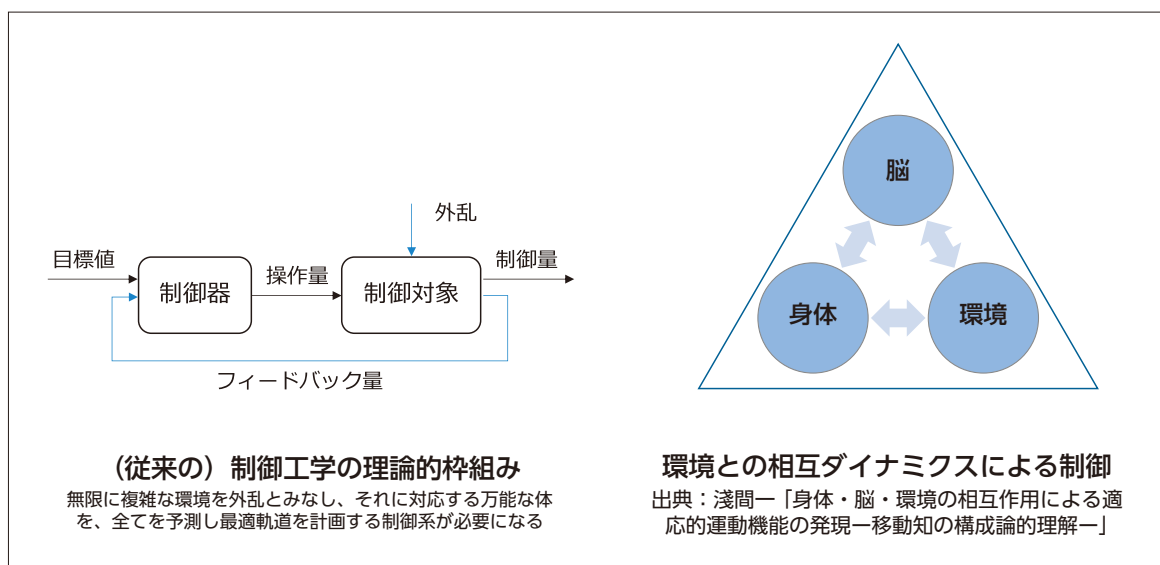


図3-3 環境との相互ダイナミクスによる制御の枠組み

3.1.3 片付けロボットへの適用に関するケーススタディー

「適応する知能」および「適応する身体」として挙げた研究開発課題を推進することによって、家庭内での片付けロボットが新たにどのようなことができるようになるのかケーススタディーを行った（表3-1）。

片付けロボットについては、WRSパートナーロボットチャレンジやロボカップ@homeにおいて、障がい者のサポートや高齢者や健常者のパートナーとして幅広いタスクをこなすホームアシスタントロボットの実現を目指した種目として競技が行われている。競技では、室内の誤った位置にあるさまざまな日用品をあらかじめ決められた場所に片付けることが求められる。このタスクを実現するためには、セマンティックマッピング、未知の物体の知覚と操作、経路計画といった要素技術の高度化が必要である。しかしながら、これらのタスクを確実に実施することは現状技術では困難であり、また人間であれば2、3分で完了するタスクに15分程度を要しており、実用化にはほど遠い段階である。このような現状に対し、表3-1で示したように、本プロポーザルで提示した研究開発課題の成果によって、ブレイクスルーをもたらすと期待される。

表 3-1 片付けロボットへの各研究例の適用

研究開発課題	研究開発課題の成果により可能となると期待できる作業
予測符号化理論に基づく知能基盤 実世界深層強化学習	- 少数事例の学習からさまざまな異なる状況に対処（衣服の畳み方を1回教えると、さまざまな形状、色、柔らかさの衣服を畳むことができるようになる） - 迅速な作業の実現（一時停止して完全な画像情報を所得しなくても、動作しながら取得する不完全な画像情報から実時間での行動を可能にする）
モデルベースとモデルフリー強化学習統合	
触覚等の複数の感覚モダル導入	- 柔軟物や重量物などを含むさまざまな日用品や、初見の物体の安定した把持、操作 - 人間が使う道具の操作等、複雑な動作を実現する手の実現
柔軟な身体の数理解基盤の確立と制御への適用	
セマンティックマッピング（記号創発ロボティクス）	大量の事前学習を必要とせず、会話による教示等により、新たな作業を習得
手応え制御の発展 （異質の運動自由度間の協調）	常時周囲で人が動き回っている状況で、突然押されるなどの予期せぬ変化があっても安定した行動を継続

3.2 ロボットの社会・経済的影響に関する人文・社会科学研究課題

本プロポーザルで対象とする「開かれた環境に適応できるロボット」を社会実装していくためには、ロボットの技術的進歩と併せて、人間が生活する社会にロボットが受け入れられるかという社会的受容性の検討が重要となる。特に、社会的ニーズに基づいているか、またどのような社会課題（social challenges）にアプローチしているのかについて考慮しながら研究開発を行うことが重要となる。研究開発の成果に対して検討を行うだけでなく、その開発プロセスにおいても、社会の価値観やニーズ、期待と整合を図っていくRRI（Responsible Research and Innovation: 責任ある研究・イノベーション）の視点を取り入れることで、社会実装に近づけることができる。逆にRRIのような視点を通じて明らかになる諸課題に取り組まずに研究開発を進めてしまうと、長期にわたり進められてきた研究開発の成果が社会に受け入れられない事態に陥ったり、新技術が社会に普及してから問題が顕在化し気づいたら後戻りできないような結果をもたらすといったことが発生しうる。先端技術の社会への影響については、これまでも科学技術社会論やELSI（Ethical, Legal and Social Issues: 倫理的・法的・社会的課題）で取り組まれており、また目的志向型（purpose-oriented）の研究開発推進方法については、RRIから研究が進んでいるところである。

本節では改めてロボット（一部AIを含む）を対象に、社会実装を想定してどのような観点から人文・社会科学の研究が行われてきたか整理した。その上で研究の初期段階から取り組むべき人文・社会科学研究課題として、「ロボットに感じる安心」、「プライバシーの保護」、「社会とのインタラクション」、「責任分配に向けた新たな法制度の仕組み」の四課題を取り上げる。四課題を取り上げるにあたっては、まず国内外で取り組まれているロボットの社会・経済的影響に関する人文・社会科学研究課題を洗い出した（詳しくは章末の表3-2参照）。その上で、ロボットの社会・経済的影響に関する人文・社会科学研究課題を、①人間との共存の度合い、②研究開発段階の2軸でマッピングし、人間と共存の度合いが高く、研究開発段階が基礎研究よりのものを選定した（図3-4）。縦軸の「人間との共存度合い」は、本プロポーザルで取り上げているサービスロボットが人間の生活空間に入り、人間との共存していることが重要であることから設定している。なお、今回基礎研究から実施すべきとして挙げた四課題は、ロボット開発全般に一律に該当するものではなく、個々の研究開発の状況に応じて柔軟に実施されることが望ましい。

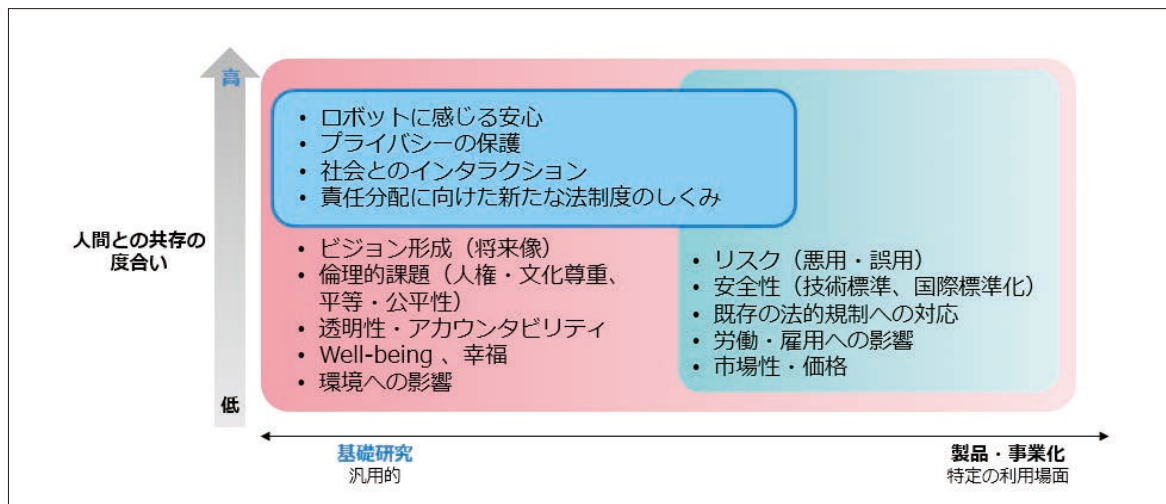


図3-4 ロボットの社会・経済的影響に関する人文・社会科学研究課題のマップ

(1) ロボットに感じる安心

「安心」は、「安全」と密接に関係する概念としてしばしば同じように論じられることがあるものの、安全工学の分野では独立したものとして論じられてきた。「安全」は客観的に評価できるものとして数量化できるものであり、ISOやJISにおいて定義が定められており²、ハザード分析およびリスクアセスメント、リスク評価手法が確立している。一方、「安心」は、納得と信頼といった個々人の主観に依存するもので一様に定義することはできない。安全であっても安心できない事例、逆に安心していても安全でない事例があるように新たな製品を普及させていくには不安を減らし「安心」を核とするための考察が重要となる。「安心」を実現する方法としては、安全性の透明性、最悪のシナリオ、残りうるリスクについての合意と納得を導き信頼と納得を獲得するリスクコミュニケーションが重要な役割を果たしてきた。ロボットにおいても、研究開発およびリスクの透明性を高め、ユーザーが納得してリスクを取捨選択できるリスクコミュニケーションは重要であると同時に、人がロボットに対してどのような印象を持っているかといった文化人類学的なアプローチの他、ロボットの形状、外形が人の心理や印象形成に与える影響評価（心理的評価）についての研究が求められる^[23]。「安心」は主観的なものだが、安心感の要因から心理評価尺度を作成するといった客観的な評価に向けた取り組みもなされており^[24]、不安を減らすリスクコミュニケーションと併せて、研究の強化が求められる。これらの研究を踏まえ、ロボットの認知能力や運動能力を高めることでユーザーに心理的な安心感を与えるインタラクションデザインをロボット組み込んでいくための研究開発が求められている。

(2) プライバシーの保護

ロボットが人間の監督から一定程度独立し、自ら周辺状況を認識、分析、行動することを想定した場合、ロボット内に個人情報を含む大量のデータが蓄積されることから、ロボットの利便性とプライバシー・個人情報保護の両立が求められている^[25]。プライバシーや個人情報に関するリスクは一度侵害されてしまうとその救済が極めて困難であることから、研究の初期段階からの検討が重要となる。個人情報のデータアクセス権、データポータビリティ、セキュリティなど萎縮効果を生まないガバナンスの在り方を国際的に議論することが求められている。

2 「ISO/IECガイド51」（2014年度版）では、「許容不可能なリスクがないこと」、JISでは「安全：人への危害または資（機）材の損傷の危険性が許容可能な水準に抑えられている状態」と定義されている。

また、プライバシーと個人情報は重複するものの、プライバシーは個人情報より幅広い内容を含むものとして考えられている³。この観点から、欧米では倫理学や哲学の分野からロボットが公的空間やプライベート空間に入ってくることによるプライバシーへの影響、リスクが検討されている^{[26],[27]}。ロボットが生活空間に入ることによってこれまで私的領域として伝統的に保護されてきた領域へのアクセスが可能となり、物理的にも精神的にも直接監視されることによってプライバシーを損なう可能性がある。また、社会的プライバシーについては、高度に擬人化されたロボットに対して人間に対する反応と同様の反応をとることで、個人の内面性が減少し、社会的な行動にも影響することも考えられる。このように幅広い側面からロボットの導入に伴うプライバシーへのリスクと保護に関する研究が求められる。

(3) 社会とのインタラクション

「開かれた環境に適應できるロボット」は、ユーザーの反応を分析し、その知見をコミュニケーションにフィードバックしていくことが想定されることから、ロボットとのコミュニケーションと人とのコミュニケーションとの差異が小さくなる可能性がある。これによって、人間同士のつながりの希薄化の問題が発生したり、擬人化されたロボットによる社会的反応を利用する能力を介して意図的にある目標に向けて行動を促すようなことが発生するかもしれない。また、既にインターネット検索やSNSにおいても問題となっているフィルターバブル⁴についても、ロボット使用によって引き起こされる可能性がある。外形的にもシステムの擬人化されたロボットによって、人間の価値観や思想などの内面、また意思決定に対して、プラス、マイナスの両面から影響を与える可能性があり、それらの影響に関する科学的根拠に基づく分析が求められる。特にロボットの使用に伴う心理的悪影響については、ロボット等新たな技術に対して生理的反発から断片的な事実が拡大解釈され、「ロボット＝人に悪影響を与えるもの」という印象が流布し、望ましい社会実装を阻害してしまうことも考えられる。このようなことを回避するためにも、ロボットと人間とのコミュニケーションに関して科学的エビデンスの蓄積と知見の共有が求められる。

(4) 責任分配に向けた新たな法制度の仕組み

「開かれた環境に適應できるロボット」が、人間や他のロボット、周囲の環境等とのインタラクションを通じて新たな学習を行う場合、事前にデザインされた学習結果からは予測できないような、ロボットの行動やそれに伴う結果が起こりうる。人とロボットが共生する社会においては、ロボットの研究開発を妨げることがないようなルールとの在り方と同時に、ロボットがもたらす新たなリスクを適切にコントロールするためのルールの在り方の検討が求められる。行動とそれに伴う結果が予測できないロボットが、生活空間に入ることによって、人間に身体的・精神的危害を加える可能性があり、その際の責任主体の問題が法制度の観点から検討されてきた。何らかの事故が発生した後に原因を特定しようとしても、ユーザーと製造者との間にさまざまなステークホルダーが関与し複合的な要因によって事故が引き起こされるため、責任を誰がどこまで負うべきかを決定することが困難であるとされる^[28]。伝統的な過失責任制度は、予見可能性を前提に行為者に課される結果回避義務の違反の有無が問われるため、研究開発が萎縮し社会実装の実現が困難となる可能性がある。既存の責任分配の仕組みに代わる他の制度の検討として、強制保険の拡充や無過失補償制度の創設についての検討もなされている^[29]。また、刑法からは情報提供と製品・開発体制の改善、被害者への補償を自主的に行うことを条件に、製造者が刑事訴追を免れるという法制度が提案されている^[30]。「開かれた環境に適應できるロボット」がもたらす社会像や便益のために、リスク分析や制度見直し、運用の見直しをその都度試行錯誤

- 3 プライバシーとは、個人、グループ又は組織が、自己に関する情報をいつ、どのように、また、どの程度他人に伝えるかを自ら決定できる権利である。個人的および精神的関心事の中で自律性を確保する試みと理解されている。
- 4 アルゴリズムによってユーザーが見たいと推測される情報が優先的に提示され、ユーザーの考え方に合わないとは推測される情報から隔離されることで、自身の考え方や価値観の中に孤立してしまう状態。

できる新たな法制度（ルール）の在り方の検討が一層求められる。

人文・社会科学からのアプローチに基づく上記研究は、人文・社会学者だけで行うべきものではなく、ロボットの研究開発現場へのフィードバック、相互関係が重要である。2.1の表2-2で述べたとおり、諸外国においては学術機関を中心に機関やセンターなどを設立して学際的な研究活動が行われている。わが国においても、東京大学の東京大学未来ビジョン研究センターや大阪大学のELSIセンターなど、先端技術の社会的・経済的影響評価に関する学際的な研究が行える機関が出始めている。こういったところが継続的に研究を続けていくと同時に、ロボットの研究開発を行う研究者およびファンディングと連携していく必要がある。

表3-2 ロボットの社会・経済的影響に関する人文・社会科学研究課題例一覧

人文・社会科学からの研究課題	研究課題例
ロボットに感じる安心	・ユーザーに与える安心感の客観的評価手法確立 ・快適性、利便性、ストレスレス、人間らしさ等
プライバシーの保護	・利便性とプライバシー・個人情報保護の両立 ・ロボットが公的空間やプライベート空間に入ってくることによるプライバシーへの影響、リスクの検討
社会とのインタラクション	・人々がロボットと社会的つながりを形成することに起因する問題の懸念（例）人とのつながりの希薄化／人の意思決定への介入／ロボットへの依存の懸念等
責任分配に向けた新たな法制度の仕組み	・結果の予測、予見可能性の低い技術を実装した際のリスク分配の仕組み ・リスクとベネフィットのバランス検討 ・民事上の法的責任分配の検討
倫理的課題（人権・文化尊重、平等・公平性）	・開発するロボット、サービスの人権侵害等の懸念の検討 ・開発するロボット、サービスの公平性と非差別の検討
ビジョン形成（将来像）	・ロボットが入った社会像、未来像の検討 ・中長期的なスパンでどのような価値観に基づく社会を実現したいのかの検討
Well-being、幸福	・ロボット導入による経済的影響以外の効果の検討（例）肉体的・精神的健康、環境、教育条件、コミュニティ、仕事（ワークライフバランス）
透明性・アカウンタビリティ	・自律システムの動作やその結果に対する説明可能性と理解可能性 ・技術のブラックボックス化の回避
環境への影響	・ロボットの開発、生産、廃棄までのプロセスにおける地球環境へ配慮
リスク（悪用・誤用）	・開発、利活用時の誤用、悪用に関する具体的な事案の検討 ・悪用、誤用による被害を受けた者の保護、発見した者の通報制度等の検討 ・テクノロジーガバナンスの検討
安全性（技術標準、国際標準）	・安全性確保、安全基準の策定、安全性の閾値や基準の設定 ・国際標準化獲得戦略
既存の法的規制	・ロボットに関する既存の規制・法制度の整理と法の適用の事例分析
労働・雇用への影響	・ロボット導入による経済的効果、雇用の損失および新たな効用の創出の可能性 ・ロボット導入による労働者の生産性への影響
市場性・価格	・ロボットの市場性の有無 ・ロボットが社会で受け入れられる価格帯か否か

※課題の洗い出しにあたっては、国内外で公開されているロボットに関する提言、AI倫理に関する指針等を参照しリストアップした。

4 | 研究開発の推進方法および時間軸

「適應する知能」、「適應する身体」は、個別に研究を推進するのではなく、双方が連携することで統合した「適應するシステムとしてのロボット」を構築する必要がある。しかしながら、日本のロボティクス研究においては、論文になりやすい個別の要素研究を志向し、論文になりにくいシステム研究は避ける傾向にあるといった問題が指摘されている。また、統合したシステムを作り上げるためには、ロボット工学にとどまらず、人工知能研究、制御理論、脳科学、認知科学、数理科学等、幅広い分野と連携した分野融合的な研究実施体制が求められる。しかしながら、実際のタスクを実行するためのロボットを作り上げるには、さまざまなノウハウの蓄積が必要であり、さらにロボットを動作させるための調整作業等に大量の人的リソースの投入が必要である。そのことが異分野研究者にとっては大きな参入障壁となってしまう、分野融合的な研究実施体制の実現をより困難なものにしている。さらに、各研究チームが用いるロボット、タスク、評価方法がそれぞれ異なっており、あるチームが発表した成果を他チームが再現したり、相互比較により有効性を検証したりすることは困難である。これらの問題によって、従来のロボティクス研究は個別の作業に最適化され、各研究者が一か

これらの問題を解決するために研究開発に取り入れるべき事項として、以下の2項目を提案する。

- ソフトウェアおよびハードウェアに関するオープンプラットフォームを整備することにより、異分野研究者の参入を容易とし、基礎研究の発展を促進する（4.1）
- 個別の要素技術の能力評価にとどまらず、実環境に近い場面設定にて、リアルタイムにハードウェアが動くことを客観的に評価する枠組みとして、競技会型の研究開発を活用することで、システム統合に関する研究を促進する（4.2）

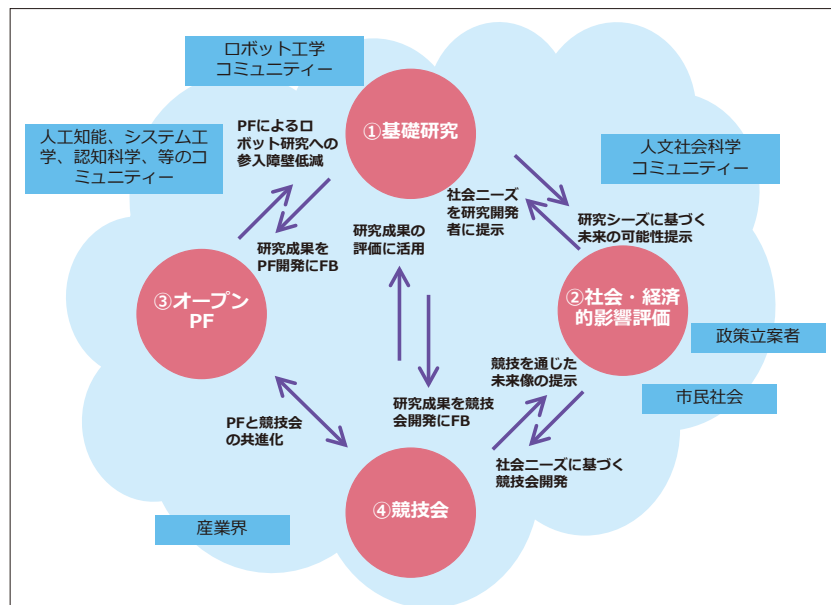


図4-1 本プロポーザルにおける実施項目間（①～④）の連携

これらの項目は独立して実施するのではなく、開かれた環境に適應できるロボットに関する基礎研究（3.1）、および、ロボットの社会・経済的影響に関する人文・社会科学研究（3.2）を含め、相互に連携を

しながら実施することが重要である。ロボットの社会・経済的影響に関する人文・社会科学研究を通じて、当該ロボット開発が社会的ニーズに基づいているのか、社会の価値観や経済的価値と整合を図りつつ、ロボットが社会実装された未来像を提示する。それらの知見を基礎研究や競技会での技術開発に反映をする。このように、①基礎研究、②社会・経済的影響、③オープンプラットフォーム、④競技会が連携し相互に知見を活用することで、ロボットの社会実装につながる。図4-1に各実施項目がどのように連携するのかまとめた。この連携においては、上述した分野融合的な研究実施体制に加え、人文・社会科学コミュニティ、産業界、政策立案者、市民社会といったさまざまな分野との協働が求められる。

4.1 基礎研究を加速するオープンプラットフォームの構築

ロボティクス研究におけるプラットフォームの意義

ロボティクス研究への異分野研究者の参入を容易にし、分野融合的な研究実施体制によりシステム統合に関する理論的基盤を確立するために、ロボットのソフトウェアおよびハードウェアに関するオープンプラットフォームの整備を提案する。

ロボティクスにおける研究プラットフォームの一例として、オープンソースで提供されるロボット向けのメタ・オペレーティングシステム ROS (Robot Operating System) が挙げられる。ROSは分散型の計算システム基盤、開発ツール、各種ソフトウェアライブラリー等からなり、世界中の共同開発者とベータテストからなるコミュニティによる迅速な開発と、wikiやバグ・質問共有サイトによるサポートによって、現在ではロボットにおけるシステム統合のデファクトスタンダードとして広く認識されるまでになっている。オープン化されていることにより、他の研究機関が開発したソースコードを利用しつつ、自らも開発したソースコードを共有するといった、共創による研究の発展が行われている。

また、ハードウェアのプラットフォームとしては、トヨタが開発した生活支援ロボット HSR (Human Support Robot) の開発コミュニティによる研究開発促進の取り組みがある。HSRを軸として、一般環境で人の作業を代替するロボットの実現を目指した共創環境を構築、技術開発の加速を図っている。コミュニティには、国内外の企業、国立研究機関、大学等、12カ国、44機関が参加(2018年末時点)しており、参加機関には、研究プラットフォームとしてHSRが提供される。加えて基本ソフト、シミュレーター、各種情報の提供や、成果の共有のためのクラウドサーバーが準備されている。またロボカップ@Home、World Robot Summit (WRS) において実施されたパートナーロボットチャレンジなどの国際ロボット競技における標準プラットフォームに採択されており、競技を通じた研究開発の促進に貢献している。HSRの管理運用は2022年に日本ロボット学会に移管され、より自由な研究開発環境の実現が期待される。

これらのプラットフォームが研究開発にもたらす利点として、以下の三つが挙げられる。

- 研究に使用するロボットやソフトウェアを個別に開発する場合に比べ、大幅なコスト削減が見込まれる。
- 人工知能研究、制御理論、数理科学等、幅広い分野の研究者やユーザー等の研究コミュニティへの参加が容易となる。
- コミュニティによる共有・連携・再利用が研究を加速する共創の場となる。

既存のプラットフォームの問題点

一方、プラットフォームを研究に活用することの問題点も指摘されており、現状では、ロボティクス研究においてプラットフォームが技術の発展を十分に促進できているとはいいがたい。既存のプラットフォームの問題点として、以下の四つが挙げられる。

- 同一のプラットフォームを使用するため研究が画一化し、新規性のある研究を阻害するおそれがある。

- 異分野からの積極的な参入を促進するための環境整備がまだ不十分である。
- 自由な改造や機能追加が可能なオープンなハードウェアプラットフォームが少ない。
- 企業開発のハードウェアには仕様等の情報について非公開の部分が存在する。

これらの問題点を解消し、さらなるロボティクス研究の発展に寄与することを可能とするオープンプラットフォームの設計が求められる。同時に、プラットフォームが異分野の研究者にとっても活用しやすいものとなる仕組みづくりも重要となる。

ロボットの基礎研究を促進するためにオープンプラットフォームに取り入れるべき事項

① ROS 上に構築した異分野研究者の参入を容易にするためのソフトウェア基盤

オープンなプラットフォームとして利活用が進んでいる ROS 上では既に多くのソフトウェアライブラリーを利用することができるが、異分野研究者が容易に実ロボット（シミュレーション上のロボットに対してハードウェアを有するロボット）を動かすためにはさらなる環境整備が必要である。例えば、ROS 上に機械学習ライブラリーと連携する API や大規模データセットを新たに構築することにより、人工知能研究者の参入を促進するといった取り組みが想定される。前述のとおり、ROS は開発者間での情報共有や質問・議論が行えるシステムを有しており、ロボットの開発経験がない研究者の積極的な参入を促すことにも適している。

また、これに合わせた設計用ツールやシミュレーターなどの開発環境を整備しておき、異分野研究に基づくソフトウェア開発を実ロボットの新規開発にスムーズにつなげることで、分野融合的なロボティクス研究を促進できる。さらに、ソフトウェアのアップデートや既存ソフトウェアの動作検証を中長期的に実施する枠組みの構築が求められる。

② 実ロボットを用いた研究実施を容易にするためのオープンなハードウェアプラットフォームの新規開発

多様な研究現場で活用しやすいロボットを新規に開発しオープンなハードウェアプラットフォームとして提供することで、ロボティクス研究への新たな参入を促し、実ロボットを用いた研究を活性化することができる。そのために新規開発するロボットは、安価かつ容易に製作できるものでなければならない。ハードウェア、ソフトウェアは個々の研究に合わせて自由に改造、機能追加ができるようにしておく。それにより新規性のあるテーマを含め幅広い研究に適用できる。

オープンなハードウェアプラットフォームの事例としては、ドイツ DFG のファンドによりボン大学のグループが開発した研究・教育用のオープンプラットフォームヒューマノイドロボット NimbRo-OP^[31] が挙げられる。このロボットは、公開されている CAD データをもとに 3D プリンターで出力した部品と、容易に入手可能な既製品のアクチュエーター、センサー、PC 等で製作可能であり、ROS をベースとしたオープンソフトウェアで動かすことができる。

NimbRo-OP は二足歩行に特化したハードウェアプラットフォームであるが、物体の把持や操作が可能なロボット、野外の不整地で自由に移動できるロボットなど、さまざまなオープンハードウェアプラットフォームの開発が望まれる。また、新規開発するハードウェアプラットフォームにおいても NimbRo-OP 同様、仕様や CAD データ等を公開しておくことで、個々の研究現場における組み立てや修理等が容易となる。

さらに、ハードウェアプラットフォームを活用し開発していく枠組みの構築も重要である。改造したロボットの仕様や CAD データ等を公開・共有する仕組みをつくり、ハードウェア自身のアップデートを持続的に進めることで、ハードウェア研究の発展が促進される。

4.2 競技会型の研究開発の活用

ロボティクス研究における競技会の意義

基礎研究によって得られた成果を産業界が評価することができず、基礎研究から応用研究への橋渡しを妨げているという問題に対して、競技会の枠組みを活用し、実環境に近い場面設定にて、リアルタイムにハードウェアが動くことを客観的に評価する体制を整備することを提案する。画像認識分野においては、競技会 ILSVRC (the ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge) において深層学習が好成績を挙げたことから、その有効性が研究者コミュニティに広く認知され、深層学習研究が大きく発展したという事例が知られている。このように競技会を通じたロボティクス研究の発展が期待される。ロボットに関する競技会の事例として、2050年までに自律型ロボットのチームがサッカーでW杯優勝チームに勝つことを目指してロボット開発を推進する国際的なプロジェクトであるロボカップや、2018年および2021年に開催されたWorld Robot Summit (WRS) において実施されたロボット競技会等が挙げられる。これらの競技会では、将来のロボットに期待されるタスクを想定した課題設定がなされ、それに解を与えるロボットのパフォーマンスを競いあうことで、技術開発の加速を図っている。

競技会が研究開発にもたらす利点として、以下の三つが挙げられる。

- チーム間の競争が研究開発を加速する。競技タスクに対する考察と経験の共有により理解が深まる。
- プラットフォームとタスクを共有することで、あるチームから提案された手法を別のチームでも再現でき、新規手法の優位性や問題点の検証が容易になる。
- ルールを設定し、点数をつけることで、課題に対処するロボットの能力を定量的に評価できる。

さらに、ロボット競技会を通じて、新たなロボットを取り入れた未来像を人々に提示することにより、ロボットに対する一般の理解を増進するとともに、社会受容の障壁となる問題点の抽出が可能となる。

既存の競技会の問題点

一方、競技会に参加することの問題点も指摘されており、現状ではロボティクス研究において競技会が十分に活用されているとはいえない。既存の競技会の問題点として、以下の四つが挙げられる。

- 競技は研究と違って、論文になりにくい。
- 競技会で設定されたミッションを達成するために特化したロボット開発に陥りやすい。
- 競技参加準備のために研究者に多大な負担がかかり、他の研究ができなくなる。
- 競技場の設定が複雑かつ大規模であるため、自拠点での競技準備やロボットの性能評価への活用が難しい

これらの問題点を解消し、ロボティクス研究の発展をさらに促進するような競技会の設計が求められる。特に、競技会で与えられたタスクを完遂することだけが目的となってしまうような仕組みの導入が必要である。

ロボットの基礎研究を促進するために競技会に取り入れるべき事項

①標準性能試験法の導入

標準性能試験法とは、ロボットの具体的な性能（物体認識、把持能力、移動能力等）を測定する標準化された試験方法である。災害対応ロボットの標準化のために、米国国立標準技術研究所（NIST）が中心となって2005年から2009年にかけて策定された。ロボットは、さまざまな要素技術が複合することで機能するため、その能力の優劣を判断することは容易ではないが、標準性能試験法を通じてロボットの性能の「見える化」が可能となり、基礎的研究と実際の製品との関連づけが可能となるとされている^[32]。これを競技会の競技設計に導入することで、異なるロボット間で能力の定量的かつ客観的な比較評価が可能となり、標準的なベン

チマーク手法として論文等での活用も期待できる。標準性能試験法はロボカップレスキューロボットリーグ（RRRL）や、WRSにおける競技会「パートナーロボットチャレンジ」の競技ルールに導入されているものの、新たな手法開発に関する取り組みは、日本では、ほとんど進んでいない。既存の標準性能試験法をさまざまなロボット競技会における標準テストとして普及させるとともに、各種ロボットの将来の利用イメージに対応した新たな標準性能試験法の開発が求められる。

②プラットフォームの活用、競技会との共進化

ロボット、シミュレーター、開発環境等の共通プラットフォームを競技参加者に提供することで、参加者の負担を軽減し、競技への参加を促進することが期待できる。また、各競技者が共通のプラットフォームを用いることで、課題の共有化や新規手法の再現が容易となり、研究の促進が期待できる。また共通プラットフォームとして競技のシミュレーターを公開・配布することで、ロボットを持たずとも競技に参加することが可能となる。また、プラットフォームを競技会で活用することにより、プラットフォームの限界や問題点が明らかになり新たなプラットフォーム開発につながる。さらに新たなプラットフォームは競技の発展を促す。このような競技とプラットフォームの共進化が期待できる。

③簡便な競技設定

競技の設定を簡便なものとするすることで、各競技参加者が自拠点において競技準備を行うことを可能にするとともに、論文等における新規技術の客観的評価等に幅広く活用されることが期待できる。このような競技設定を簡便化する取り組みとして、

- 競技場を小面積にする。
 - 使用する機材や操作対象となるオブジェクトは世界中のどこでも容易に入手可能な物品で構成する。
 - 設定や評価方法等に関する詳細をドキュメントとして公開する。
- 等が挙げられる。

4.3 研究開発の推進方法と推進の時間軸

ロボットの研究開発に対する支援は、製品開発段階については手厚く行われている一方で、基礎研究への対応が不十分である(2.1)。このために取り組むべき研究開発の推進方法と推進の時間軸について以下に述べる(図4 2)。

まず、基礎研究を推進するプログラム（例えば、JST 戦略的創造研究 推進事業）を早急に立ち上げ、推進することが望まれる。このプログラムにおけるロボットの研究開発には、第3章および第4章1,2で述べたように次のような要件を取り入れることが求められる。

- 個別に要素技術研究を推進するのではなく、各要素技術研究が連携して統合したシステムを構築するための研究を推進する
- 統合したシステムに関する理論的基盤の確立を目指す
- 既存のハードウェアプラットフォーム（例えばHSR等）の活用、ロボカップ@home等の既存競技会を課題評価に組み込む
- ロボット工学に加え、人工知能研究、システム工学、認知科学、脳科学、解剖学、数理科学等の分野の連携による融合的研究を推進する

さらに、このプログラムにおいてはロボット自体の研究開発に加えて、以下の項目に関する活動の実施が求められる。

- **社会・経済的影響評価**：ロボットを社会に適応させ人と共生するための、人文・社会科学を中心としたロボット技術の社会・経済的影響評価に関する研究の実施と、これに基づき政策立案者、市民社会と協働して社会ニーズを明らかにする枠組みの構築
- **オープンプラットフォーム**：3Dプリンター等を利用して安価に自環境で製作可能、改造・改良も可能なオープンハードウェアPFの開発、機械学習ライブラリーと連携するAPI、機械学習用の大規模データセット、設計用ツールやシミュレーターなどの開発環境などのオープンソフトウェアプラットフォームの開発・整備
- **競技会**：実世界への適応性を評価するための競技の開発

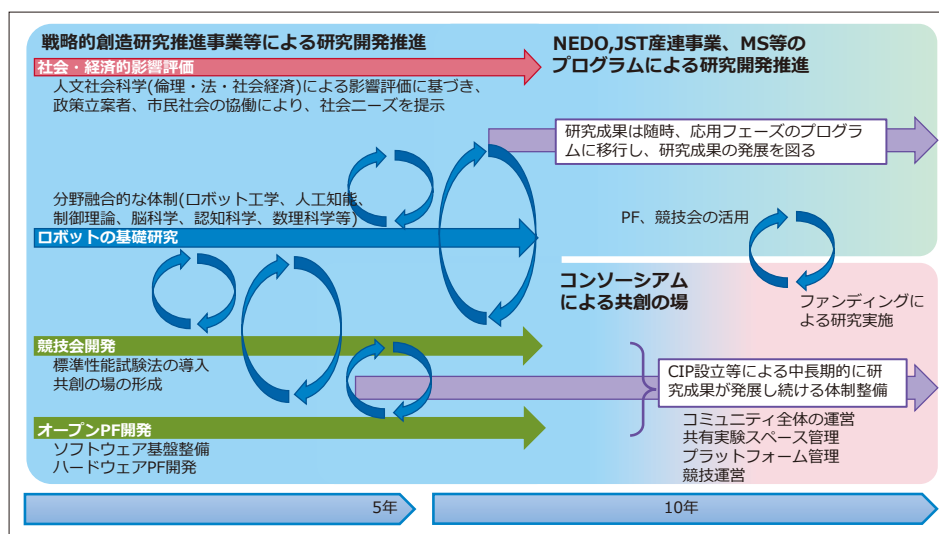


図4-2 研究開発の推進方法と推進の時間軸

それぞれの項目は、独立して実施するのではなく、相互に連携をしながら実施することが重要である（図4-1参照）。社会・経済的影響評価に基づく社会ニーズをロボットの基礎研究を実施する研究開発者に提示することにより研究開発の方向性に反映を行うとともに、基礎研究の成果に基づく未来の可能性を提示することにより社会ニーズへの反映を行う。また社会ニーズを競技会開発に反映することで、社会ニーズに基づいた研究開発の促進を可能とする。

開発した競技会やプラットフォームは順次、ロボットの研究開発に取り入れて活用することで、研究開発の効率化が可能になるとともに、現場からのフィードバックに基づき、さらなる改良・発展を図る。EUの研究・イノベーションの枠組みである Horizon 2020（2014～2020）においては、ロボットに関する研究開発の公募において、調整と支援をする活動（CSA: Coordination and Support Action）に関する募集もされており、各分野の専門家（技術者、ビジネス、倫理・法・社会経済、エンドユーザー・政策立案者・一般市民）が協働するプラットフォームを提供しロボティクス分野における RRI パラダイムを作成する課題（INBOTS, 2018～2020）や、新たなロボット競技会によるベンチマークを開発し、ロボットの能力を実証することで開発促進を図る課題（SciRoc, 2018～2020）が採択されていた。このように研究開発を支援する活動に関する公募をプログラムに取り入れることが望まれる。さらにこれらを基礎に、文理融合の研究センター設立等、継続的な連携体制の構築に発展することが望まれる。

基礎研究における成果をもとに、NEDOやJST産学連携事業等の社会実装に向けたプログラムにつなげていくとともに、開発した研究開発基盤であるプラットフォームや競技会を活用し、大学・研究開発法人や企業が参加する共創的研究の場を設立し、中長期的に維持発展していくことが求められる。プラットフォームや競技の開発の初期段階は、戦略的創造研究推進事業等のファンディングの支援や、学会における研究会での検討などを通じて、大学等の研究者等が中心となって推進するが、これらを引き継ぎ、全体の運営事務、共有実験スペースや研究プラットフォーム（ソフトウェア、ロボット）の管理、競技運営といった業務を担うため、専任人材を擁するコンソーシアムの立ち上げ・運営をすることを提案したい。運営資金については、立ち上げ初期においては上述の基礎研究プログラムの枠組み等からの支援が考えられるが、参加企業等の組合員からの賦課金や、法人として競争的資金を獲得する等による持続可能な運営体制を確立することが望まれる。このようなコンソーシアムの枠組みの一例として、技術研究組合（CIP: Collaborative Innovation Partnership）の活用が挙げられる。CIPは、複数の企業や大学・独法等が共同して試験研究を行うための法人（非営利公益法人）である。個別の企業や研究機関では解決できない課題や短期間での収益化が見込めない長期的な課題等に取り組むための産学官の共同研究の枠組みであったり、設備の共同利用を通じて地域企業や中小企業が研究開発に参加する場として活用されている。

最後に、コンソーシアムに参加するメリットをステークホルダー別に述べる。企業の立場としては、システム研究全体の研究予算、人員について自社ですべて負担する必要がない。さらに、コミュニティーを通じて、さまざまな研究者と密に交流することで技術力向上、人材育成が図られるとともに、段階ごとに利活用につながる有用な技術が得られると考えられる。大学や研究開発法人にとっては、コンソーシアムに参加することで、独自研究だけでは困難な統合したシステム研究の一翼を担うことが可能となる。またプラットフォームや競技を活用した研究の比較評価、客観評価が容易に可能となることで、論文のアクセプト率向上や研究価値のアピールがしやすくなるとともに、基礎研究における成果を実用化フェーズにスムーズに移行することが可能となる。

以上述べたように、開かれた環境に柔軟に適応するための研究開発や、ロボットに対する社会受容性の向上やルール作りに関する取り組みを基礎研究段階から実施することで、各応用分野で期待されるロボットの社会実装をいち早く実現し、わが国の産業競争力の向上に寄与するとともに、少子高齢化、多発する自然災害など、日本が直面する社会的課題に対して有効な解決手段の一つとなることを強く期待する。

付録1 検討の経緯

JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、2021 年度に戦略プロポーザルを作成すべきテーマの候補を CRDS 戦略スコープ 2021 検討委員会を経て指定し、2021 年 6 月に検討チームを発足させた。その後、検討チームにおいて提言作成へ向けた調査・分析・検討を重ねた。

チームの活動では、調査によって国内外の研究開発動向・技術水準を明らかにしながらスコープの焦点を絞り、その過程において提言の方向性を検討するため、以下の有識者へのインタビュー・意見交換を実施した。

その上で、開かれた環境に柔軟に対処できるロボットに関して CRDS が構築した仮説を検証する目的で、科学技術未来戦略ワークショップを開催した。ワークショップの結果は報告書として、2022 年 6 月に CRDS より発行している（CRDS-FY2022-WR-01）。

CRDS では以上の調査・分析の結果と、ワークショップにおける議論などを踏まえて、2022 年 7 月に本戦略プロポーザルを発行するに至った。

(1) 有識者インタビュー

インタビュー・意見交換を実施した有識者 (50 音順、敬称略、所属・役職は実施時点)

浅田 稔	大阪大学共生知能研究センター 特任教授
浅間 一	東京大学大学院工学系研究科 教授
安藤 健	パナソニック株式会社ロボティクス推進室 室長
池本 有助	名城大学理工学部 准教授
石黒 章夫	東北大学電気通信研究所 教授
稲谷 龍彦	京都大学大学院法学研究科 教授
岩澤 有祐	東京大学大学院 工学系研究科 特任研究員
大須賀 公一	大阪大学大学院工学研究科 教授
大平 竜也	ロボット革命イニシアティブ協議会 事務局長
岡田 慧	東京大学大学院情報理工学系研究科 教授
尾形 哲也	早稲田大学理工学術院 教授
岡田 浩之	玉川大学工学部情報通信工学科 教授
梶田 秀司	中部大学工学部 教授
上出 寛子	名古屋大学未来創造機構 特任准教授
神田 崇行	京都大学情報学研究科 教授／ATR 知能ロボティクス研究所 客員研究室長
久保 秀之	JST ムーンショット型研究開発事業部 技術主幹
國吉 康夫	東京大学大学院情報理工学系研究科 教授
呉羽 真	山口大学国際総合科学部 講師
佐野 明人	名古屋工業大学工学系研究院 教授
杉原 知道	株式会社 Preferred Networks リサーチャー
谷口 忠大	立命館大学情報理工学部 教授
福島 俊一	JST CRDS フェロー
細田 耕	大阪大学基礎工学研究科 教授
松嶋 達也	東京大学大学院工学系研究科 博士後期課程
村上 弘記	日本ロボット学会 会長／株式会社 IHI 理事、技術開発本部 技監
望山 洋	筑波大学システム情報系 教授

山本 貴史 トヨタ自動車株式会社未来創生センター 主査
山本 知幸 産業用ロボット次世代基礎技術研究機構研究部 部長

(2) ワークショップ

科学技術未来戦略ワークショップ「現実空間を認識し、臨機応変に対応できるロボットの実現に向けて」

開催日時：2022年2月24日（木）13:00-16:40

開催場所：オンライン会議

（敬称略、所属・役職は実施時点）

開会挨拶

木村 康則（JST-CRDS）

開催趣旨と戦略プロポーザルの概要説明

東 良太（JST-CRDS）

第一部：柔軟なロボットの実現に向けた研究について

話題提供「深層予測学習を用いたロボットの実世界適応」

尾形 哲也（早稲田大学）

話題提供「記号創発ロボティクスと統合的認知アーキテクチャ」

谷口 忠大（立命館大学）

話題提供「開かれた環境に対応可能なロボット制御のための理論的基盤の構築を目指して」

石黒 章夫（東北大学）

話題提供「『開かれた環境』に対応するロボット」

大須賀 公一（大阪大学）

総合討論 ファシリテーター：嶋田 義皓（JST-CRDS）

第二部：柔軟なロボットの社会実装に向けた仕組みについて

話題提供「研究 PF ロボットを用いた共創的研究 その持続的発展のための一案について」

山本 貴史（トヨタ）

話題提供「ロボット競技会による技術力の革新的な加速と社会応用」

岡田 浩之（玉川大学）

話題提供「社会システムとしてのロボット」

稲谷 龍彦（京都大学）

総合討論

ファシリテーター：茂木 強（JST-CRDS）

全体まとめ

東 良太（JST-CRDS）

招聘有識者

（敬称略、所属・役職は実施時点）

（発表者）

- ・石黒 章夫 東北大学電気通信研究所 教授
- ・稲谷 龍彦 京都大学大学院法学研究科 教授
- ・大須賀 公一 大阪大学大学院工学研究科 教授
- ・尾形 哲也 早稲田大学理工学術院 教授
- ・岡田 浩之 玉川大学工学部情報通信工学科 教授
- ・谷口 忠大 立命館大学情報理工学部 教授
- ・山本 貴史 トヨタ自動車株式会社未来創生センター 主査

（コメンテーター）

- ・浅田 稔 大阪大学共生知能研究センター 特任教授
- ・浅間 一 東京大学大学院工学系研究科 教授
- ・安藤 健 パナソニック株式会社ロボティクス推進室 室長
- ・上出 寛子 名古屋大学未来創造機構 特任准教授

仮説の検証

ワークショップにおいては今後取り組むべき重要な研究開発課題と実施体制・仕組みなどに関する3件の仮説をCRDSより提示し、話題提供および総合討論を通じて検証を行った。

仮説1：「開かれた環境」に対応できるロボットの研究開発には、柔軟性を持たせたロボットの統合システム開発と理論的基盤の確立が必要である。

【WSの議論における指摘】

- 「開かれた環境」に対応するためには、受動的な「柔軟性」より、さらに能動的な「適応性」が求められる。
- 統合システムの基盤として「深層予測学習」, 「記号創発ロボティクス」, 「手応え制御」, 「陰的制御」が挙げられる。
- 制御理論と深層学習や強化学習との融合、身体性を取り込んだ制御理論の構築が重要となる。

仮説2：そのためには、さまざまな異分野からの知見も取り入れる必要がある。

【WSの議論における指摘】

- 画像処理や自然言語処理などで人工知能は成果を挙げているが、これを身体の視点で捉え直すことが重要である。
- このためにはロボティクスの研究者と、生物学、数理科学などの研究者との協働が必須である。
- 新たなロボットが社会に受容されるには、ロボット研究者の視点だけでなく、人文・社会系の視点を取り入れることが重要である。

仮説3：これらの研究開発を加速するために、オープンな研究の共有基盤である「プラットフォームの整備」、研究のベンチマークとなる「競技会型の研究開発の推進」が求められる。

【WSの議論における指摘】

- プラットフォームを軸とした共創的研究コミュニティが、統合システムの基礎研究の枠組みとして必要となる。
- 競技会を用いた研究開発は有効だが、そのためには性能評価の標準化、プラットフォームの活用が重要である。
- オープンな競技会によって異分野からの参入が促進される。

付録2 国内外の状況

(1) 日本の状況

2015年に経済産業省によって策定されたロボット新戦略のもと、ロボットの要素技術について中核的な技術の開発、各応用分野の現場ニーズに基づく研究開発等が推進された。ロボット新戦略策定以降に実施された主な研究開発プログラムを以下に記す。

NEDO「次世代人工知能・ロボット中核技術開発」2015年度～2019年度

革新的ロボット要素技術分野においては、センシング技術やアクチュエーション技術、ロボットインテグレーション技術に関する研究開発を実施した。また人工知能技術とロボット要素技術の融合を目指し、機動的な連携に取り組んだ。

NEDO「ロボット活用型市場化適用技術開発」2015年度～2019年度

ものづくり分野およびサービス分野における、ロボット活用に係るユーザーニーズ、市場化の出口を明確にした上で特化すべき機能の選択と集中に向けた新規技術開発を実施した。また、各分野のロボット未活用領域におけるロボット導入を促進するプラットフォーム化されたロボットシステムの整備、現場ニーズに応じてロボットシステムを開発できる人材育成を実施した。

AMED「ロボット介護機器開発・標準化事業」2018年度～2022年度

介護現場のニーズに基づき、高齢者等の自立支援等に資するロボット介護機器の開発支援、高齢者の方の自立支援、介護業務効率化、介護負担軽減に関するロボット介護機器の効果に係る評価を実施した。

内閣府PRISM「革新的建設・インフラ維持管理技術／革新的防災・減災技術領域」2018年度～2022年度

建築現場の生産性向上を目指し、すべての建設生産プロセスでICT等を活用する「i-Construction」を推進。ロボット関連の研究開発として、無人工事現場実現に向けた建機の自動制御・群制御を実施している。

ムーンショット型研究開発事業 目標3「自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」2020年度～

ロボットの高度な身体性とAIの自己発展学習を両立するAIロボットの実現に向け、「人が活動することが難しい環境で、自律的に判断し、自ら活動し成長するAIロボット」「自然科学の領域において、自ら思考・行動し、自動的に科学的原理・解法の発見を目指すAIロボットシステム」「人が違和感を持たない、人同等以上な身体能力を持ち、人生に寄り添って一緒に成長するAIロボット」を2050年に実現することを目指した研究開発を推進している。

これらのトップダウン型の研究開発プログラムに加え、科研費やJST戦略的創造研究推進事業等において、ロボットに関する基礎研究が実施されている。主な研究開発プログラムを以下に記す。

科研費 新学術領域「ソフトロボット学の創成」2018年度～2022年度

生物の特長を備えた「生体システムの価値観に基づいた自律する人工物」を「ソフトロボット」と定義し、「しなやかな体」、「しなやかな動き」、「しなやかな知能」という三つの研究を融合してソフトロボット学という新たな学問体系の構築を目指す研究を推進している。

科研費 新学術領域「人間機械共生社会を目指した対話知能システム学」2019年度～2023年度

意図や欲求を持ち自律的に活動する知能ロボットが、人間との間で、言語を用いながら互いの意図や欲求を理解し合い、共生していく社会の実現を目指し、対話を継続維持するための研究、対話を理解し生成するための研究、ロボット自身の行動決定モデルの構築と相手の行動決定モデルの推定するための研究、ロボット共生社会における社会規範に関する研究を推進している。

また、JST CREST「人間と調和した創造的協働を実現する知的情報処理システムの構築」（2014年度～2021年度）、「人間と情報環境の共生インタラクション基盤技術の創出と展開」（2017年度～2024年度）等において、ロボット関連の課題が採択され、研究開発が推進されている。

(2) 米国の状況

2020年に米国のロボット工学に関するロードマップ“Roadmap for US Robotics: From Internet to Robotics”が更新された。2020年度版では、製造現場・ヘルスケアへの適用、自動運転車、無人航空機等の社会実装、センサー、通信、基盤的コンピューター技術等の中核技術の発展を踏まえたロボット技術に関する新たなニーズとして、材料、統合センサー、および計画／制御方法に関する新しい研究、マルチロボット協調、認識のための堅牢なコンピュータービジョン、モデリングおよびシステムレベルの最適化における新しい研究開発等を掲げ、5年・10年・15年先のマイルストーンを提示している。

このロードマップをもとに、米国での統合ロボットシステムの開発と利用を加速する基礎研究をサポートすることを目標に掲げたファンディングプログラム“National Robotics Initiative 3.0: Innovations in Integration of Robotics (NRI-3.0)”（2020～）が、全米科学財団(NSF)を中心とした複数省庁共同によって開始された^[33]。

またNSFは、ロボットに関する基礎研究を支援するファンディングプログラム“Foundational Research in Robotics”（2020～）^[34]においては、新しい強化学習手法による柔軟物体を操作（洗濯物を置く、パイ生地を成形、野菜の皮をむく等）が可能な生活支援ロボット、柔軟関節と生物規範制御等により不整地を安定して移動できる多脚ロボット、好奇心の導入により未知の環境を協調して探索する自律ロボット群、等、開かれた環境に対処するロボットに関する研究課題が採択されている。

国防高等研究計画局（DARPA）は、ロボットの研究開発におけるブレークスルーを促すため、“DARPA Grand Challenge”（2004～2007），“DARPA Robotics Challenge”（2013～2015）等の競技会形式のプログラムを主催している。2019年から2021年にかけて開催された“DARPA Subterranean Challenge”（地下チャレンジ）では、自律ロボットが人間の操作なしに未知の複雑な地下空間を探索することにより、地図の作製や、目標物の発見等が求められており、従来の競技会より、さらに開かれた環境への適応が要求される内容となっている^[35]。

(3) 中国の状況

2015年に公開された「中国製造2025」において、重大推進10大産業の一つとして高性能NC工作機械とロボットが採り上げられており、2025年に向けて以下の目標が設定されている^[36]。

- ・国産産業用ロボットの国内市場シェアを7割に
- ・減速機など中核部品の市場シェア8割に
- ・1～2社が世界ランキング5位以内に
- ・共働ロボットなど次世代製品開発と実用化

さらに、「第14次五カ年計画（2021～2025）ロボット産業発展計画」において、ロボット産業の技術革新を推進し、2025年までに世界の先進レベルに追いつくとしている。重点分野として、自動車、航空宇宙、交通、半導体などの産業用ロボット、手術ロボット、農業ロボット、鉱業用ロボット、建設ロボットなどのサービスロボット、暴動対応や治安向けの特種ロボットを挙げている。また、ロボット産業全体の売上高の年平均成長率が20%超とすることを目標に掲げている^[37]。

(4) 欧州の状況

EUの研究・イノベーションの枠組みであるHorizon 2020（2014～2020）において、ICT分野の重点項目5件の一つとして「先進インターフェイス・ロボット、ロボティクス・スマート空間」を掲げている^[38]。

ロボット研究プログラム SPARCが発足し、欧州のロボット産業の成長に貢献し、世界全体の産業用ロボット市場の35%、サービスロボット市場の65%、家庭用ロボット市場の20%を獲得することを目標に掲げ、スマート製造、物流、ヘルスケア、家事支援、農業・食糧、インフラや工場の点検・保守を重点分野と位置付け、官民合わせ28億ユーロの資金供給がなされた^[39]。後継の枠組みとして2021年に開始したHorizon Europe（2021～2027）においては、官民協働イニシアチブである「欧州パートナーシップ」の一環として、人工知能（AI）・データ・ロボット技術に対し、官民合わせ26億ユーロの投資が行われる予定である^[40]。

(5) 国際学会発表数の推移

ロボットに関する国際学会発表数について、国別の年次推移（2000～2019）を図 S2-1に示す。近年のロボット研究は米国と中国が先導し、ともに発表数を伸ばしている。特に中国の発表数は2015年以降急速に増加し、米国を追い抜き1位となっている。またドイツ、英国、インドも着実に発表数を伸ばしている。一方日本は、2000年代前半までは他国を大きく引き離れた2位として確固たる地位を築いていたものの、2010年以降は発表数の落ち込みが目立ち、各国とは対照的な振る舞いを示している。このような落ち込みの原因として、

- 近年は、ロボットはハード（メカや制御）だけではなく、ソフト（AI、深層学習、ミドルウェア）といった日本が得意でない分野にも広がりを見せている
- 欧米各国だけでなく、中国・韓国といったアジア諸国からの国際学会への投稿が増大。日本からの採択率が落ちている。

といった分析がなされている^[41]。

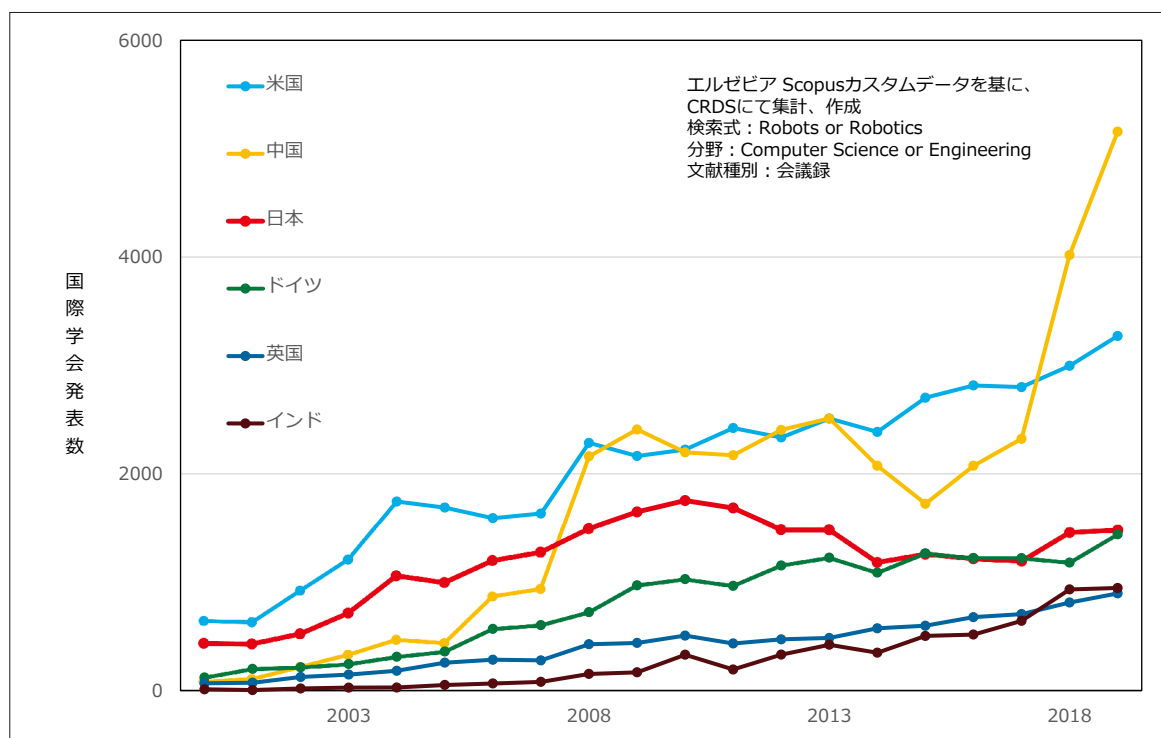


図 S2-1 ロボットに関する国別の国際学会発表数の年次推移

付録3 用語集

強化学習

人が行動において、報酬とペナルティーの関係を認識することで、より多くの報酬を得ようと自発的に行動を変容させてゆく行動心理学の理論に基づく学習方式。

深層学習

多層ニューラルネットワークを用いた機械学習方式である。特徴量空間上での識別境界だけでなく、特徴量そのものも学習できる点が革新的で、画像認識・音声認識等の分野で従来方式を大きく凌駕する性能を示して注目を浴びた。

深層強化学習

強化学習における報酬等の学習に深層学習を導入した学習方法。深層強化学習を用いた「AlphaGo」は、人間のプロ囲碁棋士を破って大きな話題となった。

ソフトロボティクス

柔軟材料に特有の機械的・電気的・化学的性質を積極的に利用し、従来の硬いロボットが苦手とする環境への適応を目指すロボティクス分野である。主要な研究テーマは、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である。

認知発達ロボティクス

シミュレーションやロボットなどの人工システムを用いた構成的手法により、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ロボットをはじめとする人工システムの設計論の確立を目指す本邦発祥の学問分野。

開かれた環境

工場などの閉じた環境の持つ制約（作業柵や非常停止ボタンなど）のない環境であり、無限定環境とも言われる。実世界は、開かれた環境そのものであり、多種多様なものからなり、常に変化する。

フィルターバブル

特定の価値観に沿った情報しか見えない状態。ソーシャルメディアでは、価値観が自分に近い相手としかつながらないために陥るが、知的な対話が可能なロボットとの相互作用においても同様の懸念が想定されている。

包摂アーキテクチャー

ロボットの制御を階層構造化し、下位層ではセンサーからの入力に応じて障害物を避けるといった単純な行動を担い、上位層ではロボットの全体目的に沿った制御を行うことで、即時的な対応を可能とする制御の仕組み。

予測符号化

生物は身体や環境からの感覚信号と脳が内部モデルをもとにトップダウンに予測する感覚信号との誤差を最小化するように、内部モデルの更新や環境への働きかけを実行するという外界の認識モデル。脳科学の仮説「自由エネルギー原理」から導出される。

ロボカップ

ロボットに関する国際的な競技会の一つ。発足当初は2050年までに自律型ロボットのチームがW杯優勝チームに勝つことを目指すサッカー競技のみであったが、災害救助、家庭内ロボット、産業用ロボットに関する種目が追加された。他にも将来のロボットに期待されるタスクを想定した競技会として World Robot Summit (WRS) において実施されたパートナーロボットチャレンジ、フューチャーコンビニチャレンジ等がある。

E3LSI

科学の進歩に伴って生じる、倫理的 Ethical、経済的 Economic、環境 Environmental、法的 Legal、社会的 Socialな課題 Issues。従来のELSIに、経済的、環境的を加えたことで、これまでより広範な研究が望まれている。

ROS

Robot Operating System。オープンソースで提供されるロボット向けのオペレーティングシステム。

SLAM

Simultaneously Localization And Mapping。レーザー距離センサーや画像などを用いた自己位置推定と周辺環境の地図構築を同時に行う技術である。自動運転車をはじめ自律的に移動するロボットが周囲環境を認識するのに用いられている。

参考文献

- [1] 日本経済再生本部「ロボット新戦略 Japan's Robot Strategy ―ビジョン・戦略・アクションプラン―」
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/robot/pdf/senryaku.pdf> (2022年6月13日アクセス)
- [2] Henrik Christensen et al. “A Roadmap for US Robotics – From Internet to Robotics 2020 Edition” (2021)
- [3] 岡田慧「国際ロボット競技から見る将来展望」『日本ロボット学会誌』 Vol.35, No.1 (2017) 9–12
- [4] 西田宗千佳「なぜ「ランドロイド」は世に出られなかったのか」<https://www.watch.impress.co.jp/docs/series/nishida/1182790.html> (2022年6月13日アクセス)
- [5] 弥永真生, 穴戸常寿編『ロボット・AIと法』187–208, 209–232 (有斐閣, 2018)
- [6] 新保史生「ロボット法をめぐる法領域別課題の鳥瞰」『情報法制研究』 Vol.1 (2017) 64–77
- [7] 『2022年版ワールドワイドロボット関連市場の現状と将来展望』 No.2 業務・サービスロボット市場編 (株式会社富士経済, 2022)
- [8] 厚生労働省「介護人材確保に向けた取り組み」https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_02977.html (2022年5月アクセス)
- [9] 厚生労働省「ロボット技術の介護利用における重点分野」<https://www.mhlw.go.jp/file/04-Houdouhappyou-12304250-Roukenkyoku-Koureishashienka/0000180157.pdf> (2022年6月13日アクセス)
- [10] 尾形哲也「深層予測学習を用いたロボットの実世界適応」科学技術振興機構研究開発戦略センター「現実空間を認識し、臨機応変に対応できるロボットの実現に向けて」(CRDS-FY2022-WR-01) (2022年6月) 7–13
- [11] 浅田稔「ロボティクスと強化学習」『日本ロボット学会誌』 Vol.39, No.7 (2021) 575–580
- [12] 松原崇充「強化学習による行動学習 – 未知問題を閉じる道具 –」『日本ロボット学会誌』 Vol.36, No.9 (2018) 597–600
- [13] 新藤智則「強化学習で4脚ロボットが低山踏破に成功」『日経 Robotics』 2022年4月号 (2022)
- [14] 谷口忠大「記号創発ロボティクスと統合的認知アーキテクチャ～人と環境との相互作用に基づく自律的な発達知能創成～」科学技術振興機構研究開発戦略センター「現実空間を認識し、臨機応変に対応できるロボットの実現に向けて」(CRDS-FY2022-WR-01) (2022年6月) 14–20
- [15] Yuka Ariki, Takuya Narihira “FULLY CONVOLUTIONAL SEARCH HEURISTIC LEARNING FOR RAPID PATH PLANNERS” (2019) <https://arxiv.org/pdf/1908.03343.pdf> (2022年6月13日アクセス)
- [16] Chen et al. “Neural Ordinary Differential Equations” NeurIPS 2018 (2018)
<https://proceedings.neurips.cc/paper/2018/file/69386f6bb1dfed68692a24c8686939b9-Paper.pdf> (2022年6月13日アクセス)
- [17] 岡田慧「国際ロボット競技から見る将来展望」『日本ロボット学会誌』 Vol.35 No.1 (2017) 9–12
- [18] 科学技術振興機構研究開発戦略センター「ナノ・IT・メカ統合によるロボット基盤技術の革新～人に寄り添うスマートロボットを目指して～」(CRDS-FY2015-SP-03) (2016年2月)
- [19] 新山龍馬「ソフトロボティクスはどこから来てどこへ行くのか」『日本ロボット学会誌』 Vol.37 No.1 (2019) 16–21
- [20] 科研費新学術領域研究 2018～2022年度 ソフトロボット学の創成：機電・物質・生体情報の有機的融合 “Science of Soft Robots” <https://softrobot.jp/> (2022年6月13日アクセス)

- [21] 細田耕『柔らかくヒューマノイド』（化学同人, 2016）
- [22] 石黒章夫「開かれた環境に対応可能なロボット制御のための理論的基盤の構築を目指して」科学技術振興機構研究開発戦略センター「現実空間を認識し、臨機応変に対応できるロボットの実現に向けて」（CRDS-FY2022-WR-01）（2022年6月）21-28
- [23] 新井健生「安心なロボットを考える」『日本ロボット学会誌』Vol.36 No.4（2018）266-269
- [24] Hiroko Kamide et al. lAnshin as a concept of subjective well-being between humans and robots in Japanz Advanced Robotics, Vol.29 No.24（2015）1624-1636
- [25] 内閣府「人工知能と人間社会に関する懇談会」報告書（2017）https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/ai/summary/aisociety_jp.pdf（2022年6月28日アクセス）
- [26] Ryan Calo l People Can Be So Fake A New Dimension to Privacy and Technology Scholarship, Pen State Law Review Vol.114 No.3（2010）842-849
- [27] I. Leite et al. l The Influence of Empathy in Human-Robot Relationsz, Int. Journal of Human-Computer Studies, Vol.71（2013）250-260
- [28] 経済産業省「GOVERNANCE INNOVATION Ver.2: アジャイル・ガバナンスのデザインと実装に向けて」<https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210730005/20210730005-1.pdf>（2022年6月13日アクセス）
- [29] 栗田昌裕「ロボット事故と民事責任」『日本ロボット学会誌』Vol.38 No.1（2020）41-46
- [30] 稲谷龍彦「ロボット事故の刑事責任」『日本ロボット学会誌』Vol.38 No.1（2020）37-40
- [31] Grzegorz Ficht et al. l Nimbro-OP2X: Affordable Adult-Sized 3D-Printed Open-Source Humanoid Robot for Researchz, Int. Journal of Humanoid Robotics, Vol.17 No.5（2020）
- [32] 木村哲也, 大金一二「標準性能試験法を用いた災害対応ロボット開発」第57回自動制御連合講演会予稿集（2014）
- [33] National Science Foundation l National Robotics Initiative 3.0: Innovations in Integration of Robotics (NRI-3.0)z <https://www.nsf.gov/pubs/2021/nsf21559/nsf21559.htm>（2022年6月28日アクセス）
- [34] National Science Foundation l Foundational Research in Robotics (FRR)z <https://beta.nsf.gov/funding/opportunities/foundational-research-robotics-frr>（2022年6月28日アクセス）
- [35] Defense Advanced Research Projects Agency “DARPA Subterranean (SubT) Challenge (Archived)” <https://www.darpa.mil/program/darpa-subterranean-challenge>（2022年6月28日アクセス）
- [36] 経済産業省「平成29年度製造基盤技術実態等調査（中国製造業の実態を踏まえた我が国製造業の産業競争力調査）」https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H29FY/000403.pdf（2022年6月28日アクセス）
- [37] 日本経済新聞「中国、ロボット5カ年計画発表 年20%成長めざす」<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOGM287630Y1A221C2000000/>（2022年6月28日アクセス）
- [38] 科学技術振興機構研究開発戦略センター「EU: Horizon 2020の概要」(EU20140221)(2014年2月)
- [39] euROBOTICS “About SPARC” <https://www.eu-robotics.net/sparc/sparc/about-sparc/index.html>（2022年6月28日アクセス）
- [40] European Partnership on Artificial Intelligence, Data and Robotics “ABOUT THE PARTNERSHIP” <https://ai-data-robotics-partnership.eu/>（2022年6月28日アクセス）
- [41] 日本ロボット学会「第36回日本ロボット学会学術講演会 OF13 どうする？ 激減している国際会議論文!!!」https://www.rsj.or.jp/content/files/event/openforum/2019/RSJ2019_OF13_Sawa_Shien.pdf（2022年6月13日アクセス）

作成メンバー

総括責任者	木村 康則	上席フェロー	システム情報U
リーダー	茂木 強 ¹⁾	フェロー	システム情報U
メンバー	若山 正人	上席フェロー	システム情報U
	東 良太 ²⁾	フェロー	システム情報U
	青木 孝	フェロー	システム情報U
	嶋田 義皓	フェロー	システム情報U
	吉脇 理雄	フェロー	システム情報U
	島津 博基	フェロー	ライフ臨床医学U
	徳永 友花 ³⁾	フェロー	環境・エネルギーU
	鈴木 和泉	フェロー	企画運営室
	一矢 光雄	主任専門員	産学連携展開部
	上田 幸弘	主任専門員	戦略研究推進部
	宮田 裕行	主任専門員	戦略研究推進部
	佐野 広大	科学コミュニケーター	日本科学未来館
	蔣 赫	スタッフ	日本科学未来館
	渡邊 孝信 ⁴⁾	教授	早稲田大学

1)2022年4月からリーダー、2)2022年3月までリーダー、3)2022年4月まで、4)2022年3月まで

戦略プロポーザル

CRDS-FY2022-SP-02

リアルワールド・ロボティクス

～開かれた環境に柔軟に適応するロボティクス学理基盤の創出～

STRATEGIC PROPOSAL

Real-World Robotics

—A New Principle for Robotics that Flexibly Adapts to Open Environments—

令和4年8月 August 2022

ISBN 978-4-88890-812-2

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

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

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



CRDS

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