

戦略プロポーザル

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～

STRATEGIC PROPOSAL

Innovations of Basic Technology for Robots
through Integration of Nanotechnology,
Information Technology, and Mechanics

- Toward Smart and Human-Friendly Robots -

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。

<http://www.jst.go.jp/crds/about/index.html>

エグゼクティブサマリー

少子高齢化が進むこれからの社会において、負担の少ない高齢者介護、持続可能な社会インフラ保守管理、災害やテロに対するセキュリティ強化などの課題の解決には、人間が苦手な作業の代行や人間の能力を強化するロボットの活用が望まれる。本提案は、このような人に寄り添いスマートな（賢い）ロボットを実現するための革新的な要素技術・基盤技術開発とこれらの統合化、モジュール化を可能とする研究開発のプラットフォーム構築に関するものである。

ロボットは1980年代に産業用ロボットとして実用化され、現在は掃除ロボットや無人機（ドローン）などが製品化され、自動運転、災害救助、社会インフラメンテナンス、介護など様々なサービス分野で活躍するロボットが注目されている。これらサービス分野も含めたロボット産業全体の市場規模は、2035年には10兆円になると予想されている。政府は2015年1月にロボット新戦略を策定し、ロボットの早期実用化やシステム・サービスの強化を図ろうとしている。ものづくり・サービス分野、介護・医療分野、農林水産業・食品産業分野、社会インフラ・災害対応分野などに対して、多様な国家プロジェクトが推進されている。これらの活動を要素技術・基盤技術の立場から後押し、今後発展が期待されるサービス分野でのロボットの産業競争力を強化するためには、コアとなる材料や部品、モジュールの開発を通して、ものづくり力で世界をリードすることが必要である。

ロボットの要素技術・基盤技術として重要な、マイクロプロセッサや制御用のデジタル・アナログ集積回路（LSI）、通信用LSIなどエレクトロニクスに関わる技術はこの数十年で大きく進歩した。一方、ロボット用のアクチュエータやセンサは技術的に大きな進展は見られない。今後のサービス分野におけるロボットの利用では、ロボット用のアクチュエータやセンサの役割は大きく、従来とは異なる機能や性能が要求される。このような要求への対応には、ロボットの主要分野であるメカニクスと、進展の大きな情報通信（IT）やナノテクノロジー・材料など異分野間の技術の融合・統合による新たな要素技術・基盤技術の開発が不可欠と考えられる。

また、サービス用ロボットでは人間と共生することが前提となるため、スマート化、高性能化、低価格化などとともに、小型軽量化や安全性向上が求められ、これらを考慮したソフトロボティクスのような新たな要素技術・基盤技術およびそれらを統合したモジュール開発が必要になる。このためには、それぞれの専門領域の技術を深めることに加え、情報通信、ナノテク・材料、ライフサイエンス・バイオなど異分野を含む他のロボット要素技術・基盤技術の研究者、ロボットシステムやサービス分野の技術者などとの連携による、新たな形態の技術開発の仕組みが求められる。

ロボット用の新たな要素技術・基盤技術としては、ロボットの3大構成要素である動力系技術、センシング技術、制御技術に注目すると、以下の開発が重要となる。

動力系の技術としては、軽量、高効率、高出力の新たなアクチュエータの開発が重要である。現在のロボット用のアクチュエータの主流である電磁モータの特性向上だけでなく、人間に近い動きの自由度や滑らかさの実現や柔らかい素材の構造体を動かすことなどの多様な要求に対応できるように、流体の圧力、圧電効果、電気化学、形状記憶合金など新たな動作原理に基づくアクチュエータ、アクチュエータそのものが柔らかいソフトアクチュ

エータや人工筋肉などの研究開発が望まれる。

センシング技術としては、小型・軽量で低価格なセンサの開発が重要である。サービス用のロボットでは多くのセンサが搭載されるため、高精度でありながら桁違いの低価格化が求められる。また、人間と共生するため、高い信頼性や安定性・再現性が重要である。さらに、低消費電力特性や、実装時の扱いやすさ、触覚などでは点だけでなく面での計測に適するもの、アクチュエータとの一体化を可能とするものなどの開発が重要である。

制御系の技術としては、自律的動作や他のロボットや周辺機器との協調動作を可能とする周辺状況の観測・認識技術、姿勢制御技術、高速な通信技術の開発、状況変化の適切な予測技術などが重要である。これらには、多くのセンサからの情報を集めて高速に処理できる新たなアーキテクチャを組み込んだ集積回路や、ディープラーニングなどの人工知能技術が必要になる。また、予測していない環境の変化に対し、これまでの経験から反射的に安全に対応できるような、生物の認識や行動の原理を模倣しモデル化した新たな制御手法の開発も重要である。さらに、最近注目されているソフトロボティクスの実現に向けて、これまではロボットの構成部品として扱い難かったプラスチックやゴムなどの柔らかい材料を精度良く制御する技術も必要であり、材料、駆動系、センサ、制御の研究者・技術者が一体となった技術開発が望まれる。

さらに、個別の要素技術・基盤技術開発だけでなく、具体的なロボットやロボットを使うシステムの実現を目指して、ものづくりの視点でこれらの技術開発を進めることが重要である。このためには、要素技術・基盤技術開発を統合化できる製造設備や最先端の技術を使いこなせる実験施設を持ち、モジュールやシステムレベルの機能実証ができ、その有効性を評価できるプラットフォームが必要と考えられる。このプラットフォームでは、サービスの現場や産業界が必要とするロボット技術やロボット機能の要求に対し、それを実現するのに有望と考えられる要素技術・基盤技術をアカデミアから集め、それらの融合・統合化技術開発を推進してその機能性を確認し、上記要求に応じていく。また、単に開発した技術の機能性、ロボットとしての動作を確認するだけでなく、利用したい産業界などが実際の利用場面を想定した実用性の試験ができるようにすることが重要である。

以上の研究開発課題の推進には、中長期的な戦略的な取り組みが必要である。特に、異分野融合での新たな要素技術・基盤技術の開発とともに、先に述べたモジュールレベルの機能実証やその試験的利用ができるプラットフォームの構築と、このプラットフォームを活用する産学官が連携して研究開発を行うオープンな研究開発拠点の構築が重要となる。これらにより、アカデミアの持つ多様な要素技術・基盤技術がさらに進化・向上しこれらの融合・統合により利用側から求められる新たな機能が実現される。向上した技術や得られた知見はそれに参加したアカデミアに新たな知識として蓄積され、若手研究者・技術者の人材育成にも活かされる。

また、国際的優位性を確保するためには、グローバルな視点でのニーズ把握、日本の強みである材料技術や省エネ技術などを活かした技術開発、安全性や ELSI（倫理的・法的・社会的問題）の視点での対策および国際標準化を進めることも重要である。

ロボット技術開発はこれからの大きな技術トレンドであるため、短期的な取り組みに終わらず日本の強い技術として育成するために、新しいロボット技術の領域を作り上げそれを進化させていくことが重要である。

Executive Summary

In future society with a declining birthrate and growing proportion of elderly people, there is hope that robots may be used to enhance the abilities of humans and to perform hard jobs instead of humans as a solution to reducing the burden of caring for the elderly, maintaining a sustainable social infrastructure, and ensuring our security in the face of disasters and terrorism. The proposal laid out in this paper involves development of innovative basic technologies and their elements needed to build human-friendly smart-robots, and construction of an R&D platform that would enable the integration and modularization of such technologies.

In 1980s, the use of industrial robots became commonplace. Today's commercial robots include cleaning robots and unmanned aircraft (drones), while attention is also focused on robots that play active roles in various service areas including self-driving cars, disaster relief, maintenance of social infrastructures, and caregiving. The total market scale for the robot industry including these service fields is projected to reach 10 trillion yen by 2035. In January 2015, Japan's government established a New Robot Strategy with the aim of accelerating the commercialization of robots and reinforcing our systems and services. The administration is promoting various national projects in such application fields as the manufacturing and service sectors; medical and long-term care; agriculture, forestry, and fishery and food industries; and areas concerned with the social infrastructure and disaster recovery. It is important that Japan lead the world in manufacturing capability through the development of core materials, parts, and their modules for the robots. These activities would enhance Japan's industrial competitiveness for robots in the service sector, where future growth is expected.

The last few decades have brought major advances in electronics-related technologies that are important basic technologies for robots, including microprocessors, digital-analog integrated circuits (LSIs) for control, and communication LSIs. However, we have not seen similar technological progress in robot actuators and sensors. Actuators and sensors will play a central role in future robots used in the service sector and will require different functions and capabilities than what are currently available. To meet these demands, it will be essential to develop new basic technologies for robots by combining and integrating mechanics, which is one of the primary branches of robotics, with technologies in other fields that have experienced substantial progress, including telecommunications, nanotechnology, and materials.

Further, since service robots will be required to interact with humans, they must have greater intelligence and better performance at a lower cost. They must also be

smaller and lighter with enhanced safety features. For this reason, we will need to develop new basic technologies such as soft robotics aimed at meeting these needs and modules that integrate these technologies. Thus we not only will need to further develop technologies in each specialized field, but also will need to construct a new type of framework for technological development that involves collaboration with other researchers of basic robot technologies including technologies in dissimilar fields such as telecommunications, nanotechnology, materials, biotechnology, and engineers in the field of robot systems and the service sector.

When focusing on the three core elements of robots, which are powering, sensing, and control systems, the following development will be needed to address important R&D issues concerning new basic technologies for robots.

Among technologies needed for powering systems, it will be important to develop new actuators that are lightweight and highly efficient and that produce high output power. We must not only improve the performance of electromagnetic motors, which are currently the most common actuator used in robots, but also capitalize on the features of actuators based on new operating principles of fluid pressure, the piezoelectric effect, electrochemistry, and shape memory alloys in order to meet a wide variety of needs, such as achieving flexible and soft human-like movement and moving structural components formed of soft materials. R&D is also needed on actuators that are themselves soft and artificial muscles, for example.

For sensing, it is essential that we develop low-cost sensors that are smaller and lighter. In order to equip service robots with numerous sensors, the sensors must be manufactured at a much lower cost while still achieving precision. It is essential that the sensors are very reliable and have good stability and reproducibility since the robots will be interacting with humans. We will need to develop sensors that consume little power, are easy to mount, and are suitable for measuring tactile sensations along a surface rather than just at a point. We must also develop sensors that can be integrated with actuators.

For control systems, it will be important to develop technologies for observing and perceiving surrounding conditions, for posture control, and for high-speed communications that enable a robot to perform autonomous actions, as well as coordinated actions with other robots and peripheral equipment. We will also need to develop predicting technologies that can correctly predict changes in circumstances. Among the required technologies for control systems are integrated circuits that incorporate new architectures capable of collecting and rapidly processing information from numerous sensors, and AI technologies such as deep learning. We must also

develop new control techniques modeled after living creatures that imitate the principles of their perception and behavior in order that robots can reflexively and safely respond to unexpected changes in circumstances based on previous experiences. Soft robotics is another field that has been gaining much attention of late. Making inroads into soft robotics will require technologies for precisely controlling soft materials like plastics and rubbers, which have traditionally been difficult to incorporate as robot components. It is hoped that these technologies can be developed jointly among researchers and engineers involved in materials, drive systems, sensors, and control.

In addition to developing individual basic technologies, it is important that these technologies are developed from a manufacturing perspective with the goal of producing specific robots and systems employing robots.

To this end, we will likely need a platform with manufacturing equipment capable of integrating the development of basic technologies and experiment facilities for mastering cutting-edge technologies, by which we can verify functions at the module and system level and assesses their validity. Through this platform, we will be able to collect from academia basic technologies that show promise for meeting the needs of service and industrial circles for robot technologies and functions, conduct technological development for combining and integrating these technologies, and confirm the functionality of the integrated technologies. Further, rather than simply verifying the functionality of developed technologies and their operations for robots, it will be important to be able to perform practical experiments that envision actual usage scenarios at the target industrial site, for example.

Making progress with the above R&D issues will require mid-to-long term strategic efforts. In particular, we need to construct a platform that enables us to develop new element and base technologies through the fusion of dissimilar fields and to verify and experimentally use functions at the module level, as described above. We must also construct an open R&D base allowing industry, academia, and government to collaborate in research and development using this platform. This would allow researchers to make further advances and improvements in a wide variety of basic technologies developed by academia, and to combine and integrate these technologies to develop new functions sought by users. The improved technologies and expertise acquired during research would be accumulated as new knowledge for the participating academic researchers that would be utilized in the development of young researchers and engineers.

In order to gain an edge internationally, we must identify needs from a global viewpoint, develop technologies that utilize Japan's strengths in material and energy-

saving technologies, and promote international standardization from a perspective of safety and ELSI (ethical, legal, and social issues).

Since the development of robot technologies is on the verge of becoming a major technological trend, it will be necessary to create new areas for robot technologies and to work on evolving these areas so that, rather than being suspended after a short run, our continuous efforts in development will cultivate a technological strength for Japan.

目 次

エグゼクティブサマリー	i
Executive Summary	iii
1. 研究開発の内容	1
2. 提案を実施する意義	4
2-1. 現状認識および問題点	4
2-2. 社会・経済的効果	6
2-3. 科学技術上の効果	9
3. 具体的な研究開発課題	11
3-1. ナノ、IT、メカ統合による新たな基盤技術開発	11
3-2. 応用分野への適用を目指す機能モジュール、システム化技術開発	18
4. 研究開発の推進方法および時間軸	20
4-1. プラットフォーム活用の拠点形成	20
4-2. 異分野連携による新たなコミュニティの形成と統合技術の重要性	23
4-3. 研究開発の時間軸	24
付録1 検討経緯	25
付録2 国内外の状況	29
付録3 プラットフォームを具現化するネットワーク型拠点構想	34
付録4 センサ関連技術の現状	36
付録5 専門用語解説	39

1. 研究開発の内容

少子高齢化が進むこれからの社会において、負担の少ない高齢者の介護、持続可能な社会インフラの保守管理、災害やテロなどに対するセキュリティの強化などの社会的な課題を解決し、活力ある社会・質の高い生活を実現するためには、人間が苦手とする作業の代行や、人間の能力の強化ができる安全で使いやすいロボットやロボット技術の活用が望まれる。本提案は、このような実生活の中で人に寄り添って使用するスマートな（賢い）ロボットを実現するために、ナノテクノロジー・材料技術、情報通信技術（IT）、機械技術（メカニクス）などの異分野技術の統合・融合による革新的な要素技術・基盤技術の開発に関する研究戦略を示すものである。

ロボットの要素技術・基盤技術として重要な、マイクロプロセッサや制御用のデジタル・アナログ集積回路（LSI）や通信用のLSIなどエレクトロニクスに関わる技術はこの数十年で大きく進歩した。一方、ロボット用のアクチュエータやセンサについては、技術的に大きな進展は見られていない。今後発展が期待されるサービス分野でのロボットの利用では、ロボットのアクチュエータやセンサの役割は大きく、従来とは異なる要求が出てくる。新たなアクチュエータやセンサの技術を進展させるためには、ロボットの主要分野であるメカニクスと最近大きな進展を見せている情報通信やナノテク・材料など異分野の技術の融合・統合による新たな要素技術・基盤技術の開発が不可欠と考えられる。

また、今後のサービスロボットは工場のように限られた空間での利用だけでなく、人間と共生して自由な空間を動くようになるため、安全性や信頼性を確保できるよう、柔らかい素材（非剛体）の利用、予測できない環境変化への対応などの要素技術・基盤技術が重要になってくる。

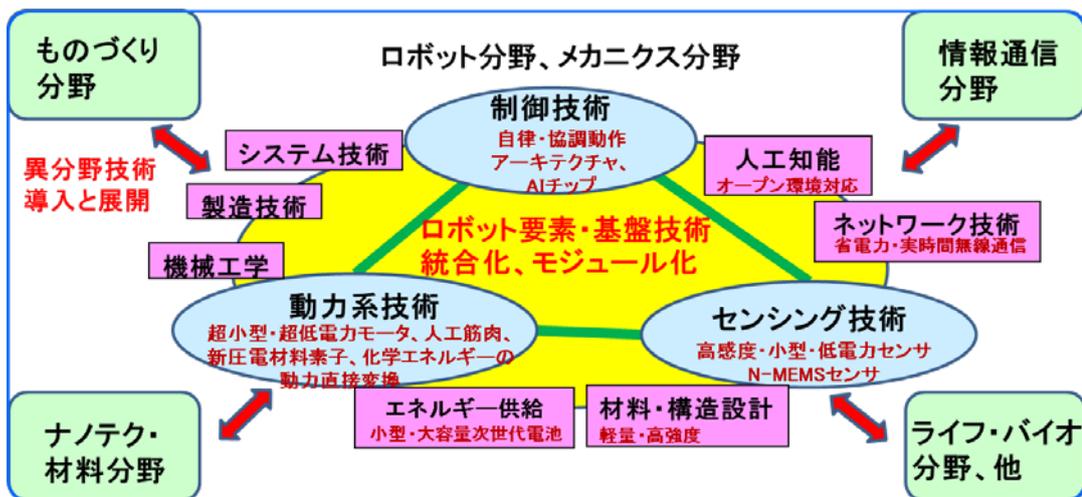


図 1-1 取り組みが必要なロボット要素技術・基盤技術

今後取り組むべき研究開発領域を図 1-1 に示す。ロボットの基本的な3大構成要素である動力系技術、センシング技術、制御技術だけでなく、これらに密接に関連する機械工学やエネルギー供給、材料・構造設計、ネットワーク技術、人工知能、システム技術、製造技術などを含み、これらを融合・統合して新たな科学や技術を生み出すことが重要である。特に、ロボット分野とは直接的な関わりを持たず異なった分野として発展してきた情報通

信分野、ナノテクノロジー・材料分野、ライフサイエンス・バイオ分野、ものづくり分野などの知見を積極的に導入し活用していくことが必要である。異分野の人たちとの協働により新たに開発した技術は、ロボット分野だけでなくこれら異分野へ展開して、さらに大きな技術の流れを作っていくことが望まれる。

ロボット用の新たな要素技術・基盤技術に関する研究開発課題としては、ロボットの3大構成要素である動力系技術、センシング技術、制御技術に注目すると、以下の開発が重要となる。

動力系の技術としては、軽量、高効率、高出力の新たなアクチュエータの開発が重要である。現在のロボット用のアクチュエータの主流である電磁モータの特性向上だけでなく、流体の圧力、圧電効果、電気化学、形状記憶合金など新たな動作原理に基づくアクチュエータについて、それぞれの特徴を活かす形で取り組む必要がある。特に、人間に近い動きの自由度や滑らかさを実現することや、柔らかい素材からなる構造体を動かす要求も出てくると考えられることから、これまでの鉄のような硬い材料（剛体）を動かすものに加え、柔らかな材料を動かすことに優れたアクチュエータの実現も期待される。また、アクチュエータそのものが柔らかい素材からなるソフトアクチュエータや人工筋肉などの新たな研究開発の方向性も望まれる。

センシング技術としては、小型・軽量で低価格なセンサの開発が重要である。サービス用のロボットでは多くのセンサが搭載されることになるため、高精度でありながら桁違いの低価格化が求められる。また、人間と共生するため、高い信頼性や安定性・再現性が重要である。さらに、低消費電力特性や、実装の扱いやすさ、触覚などでは点だけでなく面での計測に適するもの、アクチュエータとの一体化を可能とするものなどの開発が重要である。

制御系の技術としては、自律的動作や他のロボットや周辺機器との協調動作を可能とする周辺状況の観測・認識技術、姿勢制御技術、高速な通信技術の開発、状況変化の適切な予測技術などが重要である。これらには、多くのセンサからの情報を集めて高速に処理できる新たなアーキテクチャを組み込んだ集積回路やディープラーニングなどの人工知能技術が必要になる。また、予測していない環境の変化が起こっても、これまでの経験から反射的に安全に対応できるような、生物の認識や行動の原理を模倣しモデル化した新たな制御手法の開発が必要である。さらに、最近注目されるようになってきたソフトロボティクスの実現に向けて、これまではロボットの構成部品として扱い難かったプラスチックやゴムなどの柔らかい材料を精度良く動かしたり止めたりするための制御技術も必要になってくると考えられ、材料・駆動系・センサと制御が一体となった技術開発が望まれる。

さらに、個別の要素技術・基盤技術開発だけでなく、具体的なロボットやロボットを使うシステムの実現を目指して、ものづくりの視点でこれらの技術開発を進めることが重要である。個々の要素技術が非常に優れた特性を持つものであっても、それらを集めてある機能モジュールを作ったときに、それぞれの要素の良さを引き出せないものとなっては意味が無い。モジュールや小規模のシステムとしたときに、利用側の要求を満足し、全体として大きな性能向上や新たな機能の付加が実現されることが重要である。また、例えば、通常は多くの配線が必要なセンサに対してその配置や、センサに直結して瞬時の専用処理を行う分散型プロセッサの設置、さらには通信方式を見直し配線を大幅に削減したり、

3D プリンタで筐体とアクチュエータを一体的に形成するなどの従来と異なる視点での取り組みも期待される。

これには、このような要素技術・基盤技術開発に留まらず、これらの技術を統合化できる製造設備や最先端の技術を使いこなせる実験施設を持ち、モジュールやシステムレベルの機能実証ができ、その有効性を評価できるプラットフォームが必要と考えられる。このプラットフォームでは、サービスの現場や産業界が必要とするロボット技術やロボット機能の要求に対し、それを実現するのに有望と考えられる要素技術・基盤技術をアカデミアから集め、それらの融合化・統合化技術開発を推進してその機能性を確認し、上記要求に応じていく。ここでは、単に開発した技術の機能性、ロボットとしての動作を確認するだけでなく、利用したい産業界の人々が実際の利用場面を想定した実用性の試験ができるようにすることが重要である。これにより、新たなロボット技術やモジュールを使いたいと考えている利用者や産業界の要望をモジュール開発や要素技術・基盤技術開発にフィードバックできる。このようなループが円滑に回るようにすることで、単なる要素技術・基盤技術開発に留まらず、実際に使える技術として磨きがかかるとともに、このプラットフォームや要素技術・基盤技術開発を進めるアカデミアに新たな技術や知識の蓄積が行われる。また、このような場を経験することで、他の領域・他の分野・産業界の人たちとの交流を通して広い範囲の知識を身に付けられ、人材育成も進むと考えられる。

2. 提案を実施する意義

2-1. 現状認識および問題点

ロボットは1980年代に車の塗装のように人間が嫌がる作業を代行する産業用ロボットとして実用化され、最近まで生産台数および使用台数としては日本が世界のトップの座を占めてきた。このような産業用ロボットが日本で普及した理由としては、自動車などの製造業でのニーズがあったことや、希土類磁石による小型・高出力の電磁モータ、精度の高い動作を実現するサーボモータ、複雑な動作・作業を可能とするコンピュータ制御などの新たな技術の開発があった。しかし、最近では中国における導入台数が日本国内を越え、産業用ロボット生産においても中国が急速に伸びてきており、日本の生産台数のシェアは5割を切っている。依然として中国に対する技術優位性はあるものの、その差は年々縮まっており、優位性を維持するためには高度な作業を実現することに加え、エネルギー効率や安全性などで差別化できる新たな技術の開発が必要と考えられる。

産業用ロボットで実用化されたロボット技術は、次の展開として社会インフラのメンテナンスや災害対応などの分野での利用も期待されているが、工場内の閉じられた空間で決まった作業を行う産業用ロボットとは異なり、人間や周囲への安全配慮、予測できない環境変化への対応など、さらに高度な機能が必要となる。1990年代に、人間が入れないような狭い場所の点検やメンテナンスを目指したマイクロロボット、災害現場での調査や作業を行う災害対応ロボットの開発が国家プロジェクトとして実施された。現在も内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)や革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)などで社会インフラメンテナンスや災害現場の作業を行うロボットの開発が推進されているが、まだ実用化には至っていない。

また、最近になって新たなサービス用のロボットへの期待が高まっている。2000年代にはエンターテインメント用の犬型ロボットの製品化や二足歩行ロボットが登場した。現在は掃除ロボットや無人機(ドローン)などが実用化を意識して製品化されるようになった。今後はこれらに加え、医療、介護、物流、清掃、警備、自動運転などいろいろなサービス分野で活躍するロボットやロボット技術の利用が期待されている。経済産業省ロボット産業の将来市場推計によれば、2035年には10兆円の規模になり、その半分以上をサービス分野が占めると予測されている。政府は2015年1月にロボット新戦略を策定し、ロボットを広く普及・活用させ世界をリードすることを目的に、ロボットの早期実用化やシステム・サービスの強化を図ろうとしている。各府省は、ものづくり・サービス分野、介護・医療分野、農林水産業・食品産業分野、社会インフラ・災害対応分野などの応用分野に対して、多様な国家プロジェクトを推進している。さらに、2015年5月には200社以上の企業が参加する「ロボット革命イニシアチブ協議会」が発足し、政府と歩調を合わせた推進体制を構築している。しかし、どのような課題設定、推進の仕組み、ロードマップ、マイルストーンで実現していくかといった具体的な検討はこれからである。

このように、今後のサービス分野でのロボット利用の期待は大きいですが、近年のように家電、パソコン、携帯電話、集積回路など日本がこれまで強かった産業が、韓国や中国などに席卷されるようになった産業構造の変化を考えると、将来のサービスロボットの産業構

造を見据えた戦略的な取り組みが必要である。今後の製造業あるいはものづくりはサービスと密接に関係することが予想されており、サービスを提供するサービス業者や、その対極にあるロボットに不可欠な部品や材料、およびそれらを統合してある機能を実現するモジュールや小規模システムを提供する業者の付加価値が大きくなると考えられる。このため、ロボットを作り上げるインテグレーション技術を向上させるとともに、サービスの企画・提案力向上や部品・材料技術の競争力強化が重要になる。サービス企画・提案力の向上については、企業そのものの活動やアイデアによるところが大きいですが、部品・材料技術の競争力強化は、産業界だけでなく大学や国の研究機関を含めた技術開発によるところが大きい。このため、以降では部品・材料技術の競争力強化を中心に問題点などについて述べる。

現在のロボット関係の国家プロジェクトのほとんどは早期の実用化・社会実装を目指したロボットやロボットシステムの実証実験や、既存のセンサや電磁モータ、制御用コントローラ、マイクロプロセッサ（CPU）などのハードウェアを使った制御ソフトウェアの研究開発が中心になっている。これらは、ロボットのインテグレーション力の向上には非常に重要であるが、競争力のある基盤技術・要素技術開発という視点では十分ではない。ロボット技術は大きな技術トレンドであり、上に述べたように将来のサービス分野のロボットの産業構造を考えると、競争力のある部品や材料などを生み出す新たな要素技術・基盤技術の開発を世界に先駆けて積極的・戦略的に取り組み、国として長期的かつ継続的にサポートして実用化に結び付けることが重要である。

サービス分野でのロボットの利用においては、ロボットの3大構成要素技術である動力系技術、センシング技術、制御技術に対して、従来とは異なる要求が出てくる。例えば、人間が接触しても危害を与えないことや小型・軽量・高効率といったことがアクチュエータに求められ、また、非常に多くのセンサを搭載することから、高精度・高信頼性で桁違いの低価格なセンサが求められる。産業用ロボットでは閉じられた空間の中であらかじめ決められたプログラムに沿って作業をするだけで良かったが、サービス用ロボットでは人間との関係や、変化する環境の中で、限られた情報からロボット自身が賢く適切に判断し的確に動くこと（スマート化）が求められ、新たな制御技術が必要となる。

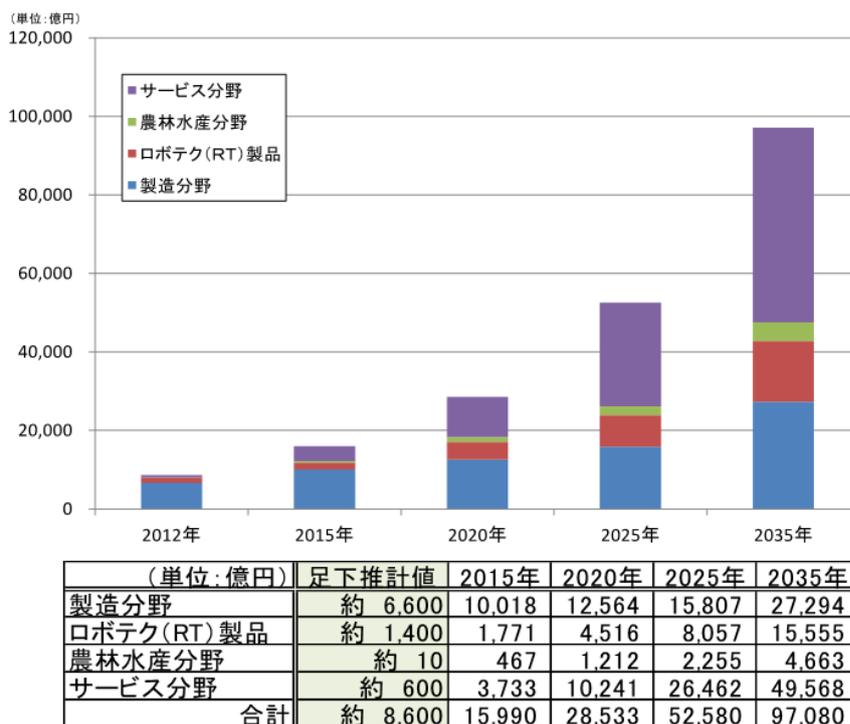
また、今後のサービスロボットは工場のように限られた空間での利用だけでなく、人間と共生して動くようになるため、モジュールやロボットシステムレベルだけでなく、要素技術・基盤技術のレベルにおいても、安全性の確保のために誤動作、故障などへの対策を考えておく必要がある。人間との共生を前提とする場合には、ロボットの誤動作や故障を防ぐだけでなく、ロボットそのものの大きさや重量にも配慮する必要がある。人間が活動する空間での共生を考慮すると、人間程度の大きさ以下であることが要求される。また、重量についても、倒れても人間が支えることができる必要があることから人間の重さ以下であることが望まれる。このように人間と共生するサービスロボットには小型・軽量も重要な要請であり、材料や部品レベルでもこの要求を満足する必要がある。例えば、現在の産業用ロボットに使われる電磁モータは大きくて重いものが主流であり、配線ケーブルも複雑に入り組んで場所を取り全体ではかなりの重量になっている。これらを根本的に解決し、小型化・軽量化できる要素技術・基盤技術開発が望まれる。

このような新たな技術開発の動きとして、欧米では生物に学ぶバイオミメティクスやソフトロボティクスと言われる研究開発が活発になっている。これらは、生物が自然の中で獲得してきた特殊な形状や材料、動作機構、あるいは行動原理を模倣して利用したり、従来の機械やロボット分野では扱いにくかった柔らかい材料を制御も含めて使える技術にしていくものであり、新たな技術開発の方向性として注目される。

2-2. 社会・経済的効果

先進国で進む少子高齢化や社会インフラの老朽化、新興国の生産拠点で進む高付加価値化や人件費の上昇などの社会的なトレンドから、製造業向けロボット、サービス系ロボットのいずれのロボットについても今後の大幅な市場拡大が予想されている。

例えば、図 2-1 に示すように、NEDO ロボット白書の「日本のロボット産業の足元市場規模推計」によると、製造分野、ロボテク製品、農林水産分野、サービス分野をあわせた国内生産量の推計が、2035 年には 9.7 兆円に達すると予測されている。特にサービス分野が大幅に伸びる（2035 年に 5.0 兆円）と予測されている。また、富士経済の調査「2015 ワールドワイドロボット市場の現状と将来展望」では、世界におけるサービス系ロボットの市場は、2020 年には 1.6 兆円に達すると予測されている。このように、調査によって数値にやや幅はあるものの、いずれの調査でもサービス系ロボットの市場として 2020 年には数兆円規模になるだろうと予測されており、市場が大幅に拡大するという点でも一致している。本提案の研究開発を推進することは、ロボット産業の産業競争力を通じて、このように今後の拡大が予測されているサービス系ロボット産業における我が国の市場シェア拡大や先進的な市場の開拓に大きく貢献する。



※2015～2035年の推計は平成22年度ロボット産業将来市場調査(経産省・NEDO)による。

図 2-1 日本のロボット産業の足元市場規模推計

(出典: 2012年 ロボット産業の市場動向 [経済産業省産業機械課、平成 25 年 7 月])

さらに、スマートロボット基盤技術は各分野向けのロボットとして市場展開されるほかに、先進的なセンシング、制御系、駆動系の各部品や要素技術として、世界各国で生産されるロボット製品に組み込まれ活用される可能性がある。それらの市場規模はロボットと比較すると1桁程度小さいと考えられるが、やはり大幅な伸びが期待される。

大分類	中分類	小分類	2015年	2020年	2025年	2035年
サービス分野	医療	手術支援	43	136	317	534
		調剤支援	65	210	383	414
		リハビリ機器(※自立支援と重)	-	-	-	-
		医療周辺サービス(搬送等)	-	-	-	-
	介護・福祉	自立支援(※リハビリ機器と重)	134	397	825	2,206
		介護・介助支援	33	146	414	1,837
	健康管理	フィットネス	1,376	1,461	1,576	1,817
		健康モニタリング	54	161	440	1,480
	清掃	-	22	127	541	4,287
		警備	210	610	1,249	2,689
	受付・案内	施設警備	17	210	703	1,632
		-	2	9	39	465
	荷物搬送	ポーター	7	30	132	811
		重作業支援	15	43	120	2,299
	パーソナルモビリティ	-	71	1,160	8,843	9,656
	物流	パレタイザ/デパレタイザ	212	410	865	1,523
		無軌道台車システム	298	648	1,210	1,681
		次世代物流支援	73	408	1,073	4,326
	検査・メンテナンス	住宅	46	98	157	213
		社会インフラ	216	1,038	2,188	1,805
教育	-	119	243	361	450	
アミューズメント	-	211	357	576	1,222	
レスキュー	-	8	60	291	670	
探査	-	17	73	257	811	
ホビー	-	223	716	1,485	2,157	
家事支援	-	-	-	157	858	
見守り・コミュニケーション	-	3	11	36	341	

図 2-2 サービス分野のロボット市場予測

(出典: 2012年 ロボット産業の市場動向 [経済産業省産業機械課、平成 25 年 7 月] より抜粋)

コラム1 ロボット開発の歴史

「ロボット」という言葉は、旧チェコスロバキアのカレル・チャペックの創作劇(1921年)に登場したものが翻訳とともに世界に広まったと言われる。以来、SF小説、マンガ、映画では様々な印象的なロボットが繰り返し登場し、研究者の憧れや目標になってきた。本コラムでは、実際に働くロボットをその開発という視点で歴史を振り返る。

浅間一教授(東京大学大学院工学系研究科)によると、実際に働くロボットは、1960年代の産業用ロボットからほぼ10年ごとに新しい世代に交代している。

1960年代は、第一世代ロボット時代と呼ばれる。複数の決められた作業を繰り返し実行するロボットである。これは、1954年に出願された基本特許「Programmed Article Transfer」に基づくもので、1962年世界初の産業用ロボットが米国AMF社で開発された。日本では製造権を得た川崎航空機工業(現川崎重工)が1969年には日本初の産業用ロボットとして生産を開始した。

1970年代は第二世代ロボット時代と呼ばれ、カメラやセンサで自律的に問題解決できるロボットが登場した。

1980年代に産業用ロボットは第三世代に突入する。学習機能により作業を効率化することが可能になり、自動車の組立など工場での利用が普及し始め、1980年は産業用ロボット元年と呼ばれる。1985年には、つくば科学万博が開催され、早稲田大学が開発した楽器演奏ロボット「WASBOT-2」が登場した。

1990年代になると、工場で活躍する産業用ロボットだけでなく、一般社会や家庭で利用する知能ロボットの研究開発が盛んになった。1999年にソニーが発売したイヌ型玩具ロボットAIBOが一世を風靡し、1996年にはホンダが二足歩行ロボットASIMOの前身であるP2を発表した。また、同年、惑星探索ローバーMars Pathfinderが火星に旅立った。

2000年代に入るとロボットの適用は更に広がった。手術支援ロボットda Vinciは術者の施術を腹腔内のアクチュエータに的確に伝え、ロボット掃除機ルンバは部屋中をくまなく掃除した後充電ステーションに戻る。

更に、2010年代には人工知能により自らの行動を判断、決定し動作する知能ロボットが実用化され始めた。産業用双腕ロボットBAXTERは少ない作業手順を覚える。ヒト型ロボットPepperや家庭用ロボットのロボビー、Jiboは人間との親密な会話能力を発揮するようになった。また、石黒浩教授(大阪大学大学院基礎工学研究科)らが開発した遠隔操作型アンドロイドのジェミノイドは人間と紛うばかりの存在感をもつ。一方で、Boston Dynamics社の四足歩行ロボットBig Dogや人型ロボットAtlasは安定した運動能力を披露する。

日本では総じてヒト型ロボットの開発が活発であるが、今日の自動車もロボットの一種とみなせる。特に、自動走行は、ロボットの3大要素である動力系技術、センシング系技術、制御系技術の高度な連携により初めて実現できるものである。また、車の自律的な判断による事故に対する責任問題は、倫理や法的な問題の議論を巻き起こしている。

ロボットの技術進歩にはグランドチャレンジの貢献も欠かせない。ロボットコンテスト(特定の目的に向けたロボットによる競技)には自律型ロボットだけでなく遠隔操作による競技も含まれる。国内では大学生や高専を対象にしたNHKのロボコン、米国DARPAのアーバンチャレンジ(自動運転)やロボティクスチャレンジ(災害時支援)が有名である。ロボット開発に関わる研究推進のみならず研究者層拡大や産業促進に一役を買っていると言える。

こうしたロボット産業やロボット部品産業の競争力の強化に加えて、世界や我が国における社会的課題への対応にも大きく貢献する。例えば、我が国の高度経済成長期に大量に構築された社会インフラは今後急速に老朽化を迎えていき、それらを維持管理していくための就業者数の不足が懸念されており、スマートロボットを利用することで監視や補修を効率的に行えるようになると期待される。また、急速な高齢化により介護や見守りを必要とする人口割合が増加するなかで、スマートロボットによる介護や見守りの充実が期待される。実際、図 2-2 の「平成 22 年度ロボット産業将来市場調査（経産省・NEDO）」に示されているように、このような現場で利用されるロボット市場が大きく拡大することが予想されている。また、我が国の社会的課題への対応だけでなく、スマートロボットを組み込んだサービスシステムとして、諸外国での同様な課題への貢献やサービスとしての展開も期待できる。

2-3. 科学技術上の効果

2-3-1. 学術的・技術的な発展

本提案のスマートロボット基盤技術に関する研究開発を推進することによって、ロボットの主要分野であるメカニクス分野やロボティクス分野、情報通信分野、ナノテクノロジー・材料分野など、それぞれの学術分野に新しい技術や考え方が入って領域が広がるとともに、新たな異分野融合・連携領域の形成が期待される。

例えば、動力系技術に関して、高効率、高出力、小型・軽量、全ての性能を満足する新しいアクチュエータの研究開発を推進することで、メカニクス分野と材料分野間の共同研究が生まれ、電磁モータなど既存のアクチュエータの飛躍的な特性向上だけでなく、新たなアクチュエータの原理や新材料の発見に繋がることが期待される。センサ技術に関しても、小型・軽量で低価格な高精度センサの研究開発を推進することで、メカニクス分野、情報通信分野、ナノテクノロジー・材料分野、ライフサイエンス・バイオ分野などの研究者との連携で、現状では性能的に劣っている技術であっても破壊的な技術に進化させることや、全く新しい原理に基づくセンサの開発も期待される。このようなセンサは、IoT (Internet of Things) などのセンサネットワークを実現する上でも重要な課題であるため、ロボット分野だけでなく情報通信分野やこれらを活用する社会インフラ分野などへも展開していくことが期待される。制御系技術に関しては、多数のセンサから来る膨大な量の情報を高速処理するために、脳型 LSI のような新しいデバイスや新しいアーキテクチャの研究開発を推進することで、材料分野、デバイス分野、回路・アーキテクチャ分野などの研究者間の連携が進み、ロボットの制御だけでなくムーアの法則の限界を迎えつつあるエレクトロニクス分野の革新につながることも期待される。また、予測不能な環境変化に対応するために、生物の認識や行動原理を模倣しモデル化した新しい制御手法の研究開発の推進により、ライフサイエンス・バイオ分野との融合領域の創出へと繋がると期待される。CPU などによる中央集中制御を陽的制御と呼ぶならば、ロボットの各部分が構造を通じて自律的に同期して動いたり、環境との相互作用を通して動きが決まるような動作モードを陰的制御と呼ぶことができ、この陰的制御のような新しい学術領域が拓かれることが期待される。

さらに、センサ機能を備えたアクチュエータの開発など、複数の要素技術を統合したモジュールレベルの研究開発を推進することにより、これまで個別に進化してきた動力系技術、センシング技術、制御技術といった要素技術間の融合領域が生まれることも期待される。これまでの産業用ロボットの研究開発では硬くて変形し難い剛体を動かすことに注力していたため、柔らかいもの（非剛体）を動かすことに関しては、要素技術だけでなく理論や基礎研究も遅れている。このスマートロボットの要素技術・基盤技術の開発の中で特に注目されるソフトロボティクスに関する研究開発を精力的に進めることにより、非剛体の運動や制御に係わる理論などの基礎研究や、動力系技術、センシング技術、制御技術間の融合技術領域が生まれることが期待される。

2-3-2. 人材の育成・学際的ネットワークの構築

本提案内容の実践には、ナノテクノロジー・材料分野、情報通信分野、メカニクス分野、ロボティクス分野など異分野融合・連携が必須であるため、自然発生的に異分野間の研究者交流が盛んになり、多岐にわたる専門分野の知識を習得した学際的な研究者の育成が期待できる。スマートロボットの基盤技術開発において、我が国が世界をリードするためには、動力系技術、センサ技術、制御技術の各要素技術に携わる研究者やそれらを統合化するロボット研究者が個々に成長するだけでは不十分である。要素技術の研究者はロボット研究者がどんな技術を欲しているのか、ロボット研究者はどんな要素技術が生まれつつあるのかを互いに把握し、優れた要素技術をいち早くロボットに取り込む体制を構築することが重要である。それを実現するために、各要素技術に関連した学会の中に留まることなく、各要素技術研究者およびロボット研究者がいつでも気軽に意見交換を行える、学会を超えた学際的なネットワーク（コミュニティ）の構築が期待される。

3. 具体的な研究開発課題

今後のサービス用ロボットでは人間と共生することが前提となることから、スマート化、高性能化、低価格化などとともに、小型軽量化や安全性向上などが求められ、これらを考慮した新たな要素技術・基盤技術開発あるいはそれらを統合したモジュール開発が必要になる。特に、これまでの産業用ロボットではほとんど考慮されなかった「柔らかい素材（非剛体）の利用」、「予測できない環境変化」などへの対応も重要になると考えられる。これには、柔らかい素材を使ったソフトロボティクスや、生物の動きに学ぶ制御技術などの開発が必要になる。また、ロボット分野とは異なった分野として発展してきた情報通信分野、ナノテクノロジー・材料分野、ライフサイエンス・バイオ分野、ものづくり分野などの知見を積極的に導入し活用していくことが必要である。さらに、個別の要素技術・基盤技術開発だけでなく、具体的なロボットやロボットを使うシステムの実現を目指して、ものづくりの視点でこれらの技術開発を進めることが重要である。以下、ナノ、IT、メカ融合による新たな技術開発、および応用分野への適用を目指す機能モジュール、システム化技術開発の課題に関して述べる。

3-1. ナノ、IT、メカ統合による新たな基盤技術開発

3-1-1. 動力系の技術

アクチュエータはロボットの運動を引き起こす駆動源であり、アクチュエータの性能がロボットの運動性能を左右する。本提案のスマートロボットにおいては、小型、軽量、高効率、高出力の新たなアクチュエータの開発が欠かせない。また、場合によっては「高速応答性」「安全性」「低価格」も考慮する必要がある。そのためには、現在のロボット用のアクチュエータの主流である電磁モータの特性向上だけでなく、スマートロボットに適した流体の圧力、圧電効果、電気化学、形状記憶合金など新たな動作原理に基づくアクチュエータの研究開発を進めることが重要である。また、これまでの鉄のような硬い材料（剛体）を動かすものに加え、最近注目されるようになってきたソフトロボティクスの実現に向けて、柔らかな材料（非剛体）を動かすことに優れたアクチュエータや、アクチュエータそのものが柔らかいソフトアクチュエータ、人工筋肉など、新材料の利用や新しい駆動原理・機構の研究開発も望まれる。

以下、電気式、空圧式、油圧式、その他のアクチュエータについて、それぞれの特徴および取組むべき課題について言及する。

(1) 電気式アクチュエータ

現在さまざまなロボットで主に使われている電磁モータは電気式アクチュエータの代表例である。油圧式や空圧式のような付帯設備は不要で使いやすく、複雑かつ高精度（ $1\ \mu\text{m}$ 程度）の運動が可能である。一方で、大きな力を生み出すにはサイズも大きく重くなる。また、かなりの発熱を伴うため、爆発性雰囲気では防爆対策が必要になる。そのため、電気式アクチュエータをスマートロボットに適用する際には、現在の制御性能を保ちつつ高出力化・小型軽量化することが課題である。

(2) 空圧式アクチュエータ

比較的安価で高速応答性・安全性にも優れており、圧縮性が高く柔軟であるため過負荷に対しても安全である。しかし、現在では低出力のものが主であり、大出力を可能にするものではなく、空気に圧縮性があるがゆえに高精度の制御は困難である。また、コンプレッサが必要となるため、例えば水道管などの細くて狭い場所の点検を目的とした細径人工筋を用いたアーム型のロボットを開発しようとした際にも、コンプレッサの存在によって行動範囲が限られるといった問題がある。したがって、オープンな空間でのスマートロボットに空圧式アクチュエータを応用する際には、コンプレッサの小型化や、他の制御系技術を組み合わせることによる制御の高精度化、複数の空気圧アクチュエータを束ねることによる高出力化などの課題がある。

(3) 油圧式アクチュエータ

比較的小さな油圧ポンプでも大きな力を得ることが可能で、回転力・直線力どちらでも得ることができる。また、高精度の制御（0.01mm程度）も可能である。一方で、油圧ポンプが必要となり、メンテナンスにコストがかかる上に、発熱の問題や油漏れの可能性があるため、火災の危険性を伴っている。そのため、油圧ポンプも含めたシステム全体をよりシンプル化し、防火対策などの安全性を確保することが課題である。

(4) その他のアクチュエータ

圧電素子を利用した超音波モータは電磁モータと比べて、応答性が高く、低騒音であるためカメラのオートフォーカスに利用されている。また、静電気を利用した静電モータ／静電アクチュエータは微細化に適しているため、MEMSなどの微小駆動機構として利用されている。しかし、いずれも低出力であるため、ごく限られた用途でしか利用されておらず、高出力化が課題である。形状記憶合金を用いたアクチュエータは、機械的・電氣的ノイズが発生せず、小型化には適しているが、使用環境温度幅が狭い点、応答性が低い点を克服することが課題である。さらに、化学エネルギーを利用したアクチュエータに関しては、軽量・超薄型・低消費電力であるため、例えば、カーボンナノチューブを用いたナノカーボン高分子アクチュエータは点字ディスプレイやマイクロポンプなどへの応用が期待されているものの、本提案のスマートロボットへ適用するには高出力化が必要となる。

3-1-2. センサ技術

ロボットが行動する際には、センサ情報として視覚（位置情報の認識を含む）、聴覚、触覚、臭覚が重要な要素である。ロボットにはそれらセンサの情報を集約統合し、環境を判断、認識、予測しながら、意思決定を行い行動することが求められる。センサ技術は多種多様な研究が精力的になされているが、本来の目的に対しほとんどのセンサは研究レベルであり、ロボット技術として真の実用域に達しているものは少ない。また臭覚センサは国内外での研究開発は少なく、感度や耐久性などに関する課題も多い。

ロボットに搭載するセンサの共通課題は、小型化、軽量化、低価格化である。これら共通課題が克服できれば、技術のブレークスルーを起こすことが可能である。例えば、ゲーム機の Kinect は 10cm 程度の大きさ、軽量（プラスチック）、低価格（数万円）で

あり、だれでも簡単に3Dを実感・体験することができる。それにより3Dを一般大衆化させ、またコンピュータビジョンの研究が加速度的に推し進められている。

センサ側で生データをそのまま送信すると膨大なデータ量、通信量となってしまう、装置が大掛かりになってしまう。そのため、統計処理しやすいデータに加工削減して送信し、通信量の緩和や装置の小型化といったことも必要である

このような共通課題に対しては、現有のセンサの素子構造や材料の改良を進めることや、その動作原理や構造を生体に学ぶことなどで新たな原理のセンサを研究開発すること、センサ素子と情報処理機能を集積化することなども重要である。

以下、スマートロボットの視覚、聴覚、触覚、臭覚用センサの研究開発で取り組むべき課題について述べる（各センサ関連技術の詳細については付録4を参照）。

(1) 視覚センサ

視覚センサは、認識、判断、推論を行ううえで、脳に直結する最も重要なセンサである。また見えないものを可視化するセンサとして人間を超える能力を取得できる可能性がある。地図的な位置認識機能は、人間にとってはきわめて弱い能力であるがロボットには最も重要な機能である。イメージセンサ、レーザレーダー/レーザレンジファインダ、ジャイロ、GPSなどはロボットの移動、行動する際の自己位置認識と環境の三次元構築・認識の基盤となる基本センサである。現状でも高精度な視覚センサが実用化されているが、非常に高価であるため、安価なサービス用のロボットへ実装するためには桁違いの低価格化を図る必要があり、素子構造やプロセスの大幅な見直し、もしくは新たな動作原理のセンサ開発が必要である。また、各種の視覚センサからの情報を同時に得て自己の正確な位置を確認するような用途に対し、複数のセンサおよび情報処理機能を集積化することも重要である。さらに、より多くの環境情報が得られるように、人間には見えないような光でも可視化できるイメージセンサの開発も期待される。

(2) 聴覚センサ

ロボットの聴覚センサとして、人間の機能を志向した言語などを聞き分ける音声認識機能（複数音源の識別・分離・認識、さらには話者の感情認識機能など）、音による環境や構造物の診断・検知機能（例えば、ひび割れ、劣化、構造物の状態、材質など）が重要である。

これらの装置はまだ試験的に実験されている段階であり、ロボットに搭載するためには、音源を識別させるための指向性の強い発信機や、打音装置、高感度な検出器などが必要である。また、検出器から得られる信号は、様々な波長が合成されているため、解析には統計的手法や人工知能的な解析法が必要である。

(3) 触覚センサ

触覚センサには、物体に対し適切な力で物をつかんだり、接触することで対象を識別したりすることが求められ、人間の皮膚感覚の再現やそれを実現させる2次元型のセンサや機能集積型センサの研究開発が必要である。ロボットが対象物に接触する際に、対象物の硬さ、柔らかさ、形状、材質などを認識し、把持する力や把持しやす

い方向のコントロールを行うことができれば、より人間に近い柔軟な動作が可能となる。このような目的に対しては、指先や手のひらや体などの曲面を含む形状の部分に多数の触覚センサを2次元状に配置した分布型触覚センサの開発が重要である。また、曲面を持ったロボットに、分布型触覚センサを取り付けるには、伸縮性や柔軟性が必要となる。このため、分布型触覚センサは、フレキシブルで柔軟な素材で作られることが望ましく、導電性ゴム、導電性ゲル、導電性ファブリックといった素材を用いたものやフィルム状のものなどの研究開発が期待される。このように、触覚センサには、小型化・軽量化・低価格化に加え薄型、柔軟性といった要求に対応した技術開発が求められる。

(4) 嗅覚センサ

ロボットに必要な嗅覚センサには、人が感じる「ニオイ」に限らず、空間中に存在する化学物質を計測し、解析可能なデータへと変換することが求められる。この空気中の化学物質を数値に変換しデータ化することで、種類と量の比較が可能となり、危険物探知、医療・健康、環境、食品、アミューズメントなどの幅広い用途が期待される。ここでは、リアルタイムに複数物質をセンシングし、データの解析結果を示す必要性があり、小型かつ高耐久性、安価、量産可能な嗅覚センサの開発が必要である。

嗅覚センサとして、付録4に示すように現在でも様々な原理によるものの開発が進められているが、感度、小型化、耐久性、コストなどを十分に満たすデファクトスタンダードとなっているものは無い。これまでに提案されている動作原理に基づく嗅覚センサの高性能化・低価格化などを進めるとともに、既存の技術とは全く異なった動作原理で、桁違いの感度や低価格化を可能とする技術についても研究開発することが必要である。また、使用するセンサの種類によって検出できる化学物質の種類、個数、濃度が異なるため、使用目的に合わせたセンサの選択およびその最適化をロボット開発初期から並行して行う必要がある。一方、これら多彩な嗅覚センサが高性能化し広く普及したときに、既存概念に捉われない嗅覚センサの新しい活用法の開拓についても検討しておくことが重要である。

嗅覚センサシステムは他センサに比べて未成熟な分野であり、これからの開発状況で業界標準が定まっていくと考えられる。このため、日本発のセンサ技術を世界標準システムとするために、センサ開発とともに国際標準化を見据えた活動をしていくことが重要である。

3-1-3. 制御技術

スマートロボットはオープンな環境で、ある程度自律性を持って稼働することが求められる。そのようなロボットには、(1) 自己と環境の的確な状況認識、(2) オープンな環境変化への対応、(3) リアルタイムの制御などが求められる。これらには、センサからの情報に基づく状況認識機能、状況認識を受けた動作の判断・動作計画機能、センシングから動作までの一体的制御などが必要であり、以下(1)～(3)に対応する必要な技術を挙げる。

(1) 自己と環境の的確な状況認識

ロボットが自律的に的確な行動をするためには、まず自己の状態と周囲の環境の状況を把握することが重要であり、次のような技術が必要となる。

①ロボットや環境からの情報をもとにした統合的な分析・解析技術

ロボット（一人称）、環境センサ（三人称）など複数の視点の異なるセンシング情報を統合した状況認識技術が必要である。探索アルゴリズムを組み合わせるなど状況認識の網羅性と精度を確保する動的なセンシング・分析・解析技術が必要である。

②センシングデータからの効果的な特徴量抽出による認識

自動車の車載カメラ映像のフレーム内の大きさの変化で速度を測ることが可能になったように、既存のセンシングデータを使いつつも効果的に特徴量を抽出して状況を認識できるようにすることが重要である。これにより、既存のセンサの併用によるロバストで信頼性の高いセンシングの実現や、廉価なセンサによる高価なセンサの代替ができればコスト低減にも貢献できる。

③複雑な環境における制御技術を確立するための知識共有

オープンな環境変化への対応を求められるスマートロボットの制御には、多様な利用場面についてのデータ・情報・知識を踏まえたアルゴリズムの実装や機械学習が不可欠である。このためのデータ・情報・知識の共有技術、さらに、複数ロボットシステムにおいて複数のロボットを協調制御するためにも情報共有技術が不可欠である。

また、制約の多い環境下でロボットを利用するにはロボット単体やロボット近傍で状況認識ができることが望ましいが、直近の技術では実装が困難な場合にはクラウドコンピューティングなど外部リソースを使うなどにより全体としての研究を進めておくことは重要である。

(2) オープンな環境変化への対応

状況を認識したうえで、どのように行動すべきかの判断とタスクを達成するための動作計画を決定する必要がある。

①動作計画の教示・学習

スマートロボットには多様な状況下で多様なタスクの実現が求められる。そうした数多くのケースについて、それぞれの動作をプログラミングすることは困難である。このため人間が直感的にタスクを教示するための技術が必要である。さらに、複数ロボットシステムや多自由度のロボットシステムでは、人間による直感的タスクの教示は困難となるため、実環境やモデル環境のデータを使った強化学習、学習結果を実際の応用場面に適用するための転移学習などの技術が必要となる。

②制約条件下での動作計画

インフラの検査や補修におけるねじ締め、人間の見守りにおける人間との安全な

相互作用を実現するために力やトルクを一定に保ちながら動作させる制約条件下での動作計画技術が必要である。また、こうした動作計画を高速に見いだすための効果的な探索アルゴリズムが必要である。エネルギー制約下での効率的に広い空間の検査などを行うための探索アルゴリズムなども必要である。

③人とロボットの協調作業技術

ロボットが自律的に対応できない状況において、オペレータとの協調によりタスクを実行するために必要な技術である。ロボットが自律的に対応できない状況の判断、オペレータの支援を得るためのフィードバック機構や人から機械、機械から人へ役割をスムーズに移行させる技術などが必要である。

(3) リアルタイム制御

スマートロボットの応用範囲を拡大するためには、リアルタイムの制御に関連する次のような技術が必要である。

①知覚と制御の一体化

スマートロボットの動作に必要な情報から機械学習などを活用して特徴量を抽出するスマートセンサ機能、センシングから動作系までの協調設計、予測処理などが重要である。これにより、遅延時間の短縮が図られ、遅延が許されないタスクの実行や、通信容量、情報処理能力、エネルギーなどのリソースが制限された条件下で従来の限界を超える高速動作などが可能となる。

②ソフトロボティクス

様々な構造体中での稼働や自由形状物体のマニピュレーションを実現するソフトロボティクス技術が今後重要になる。剛体を前提とした従来の制御理論と異なる新たな理論化が求められる。また、柔軟な筐体のフィードバック制御を行うための分布型触覚センサやセンサ情報をやりとりするためのワイヤリングなどの課題を解決する必要がある。ソフトロボティクスは、人間と近接しての利用が想定される見守りなどにおいて、接触などによる物理的な危険性を回避する意味でも非常に魅力的であり、用いる構造材料、ソフトなアクチュエータ、状態のセンシング、運動の制御を一体的に取り扱う研究開発が必要である。

③受動ダイナミクスや陰的制御の活用

環境との相互作用や外力を受けることにより受動的に駆動される動作が受動ダイナミクスである。また、中央の制御システムの明示的な指示による動作モードの発現を陽的制御と呼ぶとするならば、ロボットの各部分が構造を通じて自律的に同期することによる動作モードの発現は陰的制御と呼ぶことができる。こうした動作が駆動される構造を設計段階で組み込むことにより、能動的な制御に必要な情報処理や動力系のエネルギー消費の低減、明示的なプログラミングによっては対応しきれない想定外の環境への適応などが期待される。このような機能発現の原理や設計手法を探求することは、学術的にも意義が大きい。特に、生物の活動においては様々な形で陰的制御が活用されていると考えられており、生物に学ぶ運動制御、ロボティクスに関する研究開発を行うことは重要である。

コラム2 ソフトロボティクス

ソフトロボットとは、シリコンなどの柔らかいボディや柔軟なアクチュエータをもつロボットを指す。また、ソフトロボティクスとは、ソフトロボットの設計、構築、作動などに関わる技術を研究する学問領域で、近年注目されている研究領域である。剛健な骨格をもつ従来のロボットとは異なる挙動ができるため、不特定な材質や形状のものを持つことができたり、平坦でない場所を移動できるなど、広範囲な応用が期待されている。

ソフトロボティクスでは、柔らかい身体をもつ生物、特に、軟体動物や人間の手を模したロボットの研究が盛んである。鈴森康一教授（東京工業大学大学院理工学研究科）らが考案したフレキシブルマイクロアクチュエータは内部に複数の空気圧室を有するゴム製の小型柔軟ロボット用アクチュエータである¹⁾。イタリアのサンタアンナ大学院大学の OCTOPUS プロジェクトは、8本足をもつソフトな素材を多用したタコ型ロボットを開発した²⁾。米ハーバード大学ではシリコンラバーの躯体を空気圧で制御することで、物をつかんだり這って進むことができるヒトデ型ソフトロボットの研究をしている³⁾。手に関しては、ロボットの手だけでなく義手への応用も視野に入れた研究開発が従来より行われてきた。細田耕教授（大阪大学大学院基礎工学研究科）の研究室ではソフトな皮膚で覆われた腱駆動ロボットハンドを研究している⁴⁾。

形状が決まった堅いものをつかむ動作は産業用ロボットでは実用化されて久しい。一方で不特定な形の柔らかいものをつかむことはロボティクスにおいて積年の研究課題である。米シカゴ大学とコーネル大学の共同研究チームが開発したユニバーサルロボティクスグリッパーはジャミングという技術をつかって、いわば「ドラえもんの手」とも言うべきロボットハンドを実現している⁵⁾。ジャミングとは粒上の物質が高密度化で硬化する物理現象を言う。このグリッパーは粒の詰まった球状の「手」を対象物に押し当てた状態で内部を吸引することでしっかりつかむことができる。

ソフトロボティクスは研究領域として発展途上であり、さまざまな研究課題が含まれている。例えば、ソフトなアクチュエータは課題のひとつで、新山龍馬講師（東京大学大学院情報理工学系研究科）らは *pouch motor* と呼ぶフレキシブルなポリマー製のアクチュエータを開発している⁶⁾。素材においては、柔らかい素材や形を変えることのできる素材など従来使われなかった新しい機能素材の研究であり、また、機構においても高い自由度を持つ連続体構造、ソフトな素材とハードな素材を組み合わせた構造の研究である。これらはソフトロボットに軽さに比べて強さや速さを与えることに資すると考えられる。一方で、生物にみられる巧みな制御を実現するためには、従来の剛体の制御理論に対するソフトロボットの制御理論、それに基づくシミュレーションとモデリングの研究、アクチュエーションだけではなくセンサとしてのソフトロボットや人工皮膚、ウェアラブルロボットなどの応用研究などが必要であり、今後の発展が期待できる研究領域である。

【参考文献】

- 1) マイクロフレキシブルアクチュエータ： <http://rraj.rsj-web.org/atcl/2088>
- 2) OCTOPUS Project(FP7-ICT, 2009-2013), <http://www.octopusproject.eu/index.html>
- 3) Soft Robotics, Whitesides Group Research, Harvard University
- 4) S. Takamuku, et al., "Repetitive grasping with anthropomorphic skin-covered hand enables robust haptic recognition", IROS, pp.3212--3217, 2008.
- 5) http://creativemachines.cornell.edu/jamming_gripper
- 6) R. Niiyama, et al., "Pouch Motors: Printable Soft Actuators Integrated with Computational Design", *Soft Robotics*, 2(2), 2015.

④分散協調制御

複数ロボットの協調による網羅的なセンシングや信頼性の高いセンシングなどを
実現するために必要となる技術である。また、多自由度のスマートロボットを制御
する際に、各構成要素からの情報を中央で一元的に情報処理することは、高速動作
を制約したり、エネルギーや通信量の増大を招いたりすることから、各構成要素は
ある程度の自律性を持ち、分散協調的に動作させることが重要である。

3-2. 応用分野への適用を目指す機能モジュール、システム化技術開発

上で述べた要素技術・基盤技術の研究開発課題に加え、具体的なロボットやロボットを
使うシステムの実現を目指して、ものづくりの視点で要素技術・基盤技術を融合・統合し
て従来より格段に優れたあるいは従来に無い新たな機能モジュールやシステム化技術の研究
開発を行う必要がある。具体的には、多様なロボットの基盤となる移動、認識、判断、
操作に関わる新たな機能モジュール・小規模システムが必要となる。例えば、ソフトアク
チュエータと触覚センサや画像センサとリアルタイムのフィードバックが可能な制御回路
を統合した安全性が高く高精度のロボットアームモジュール、画像センサ、レーザレー
ダー、ジャイロなどの各種センサと人工知能技術を利用した環境認識判断モジュール、五
感に対応するセンサと人工筋肉と生物の持つ陰的制御を利用した危険回避モジュールなど
が考えられる。

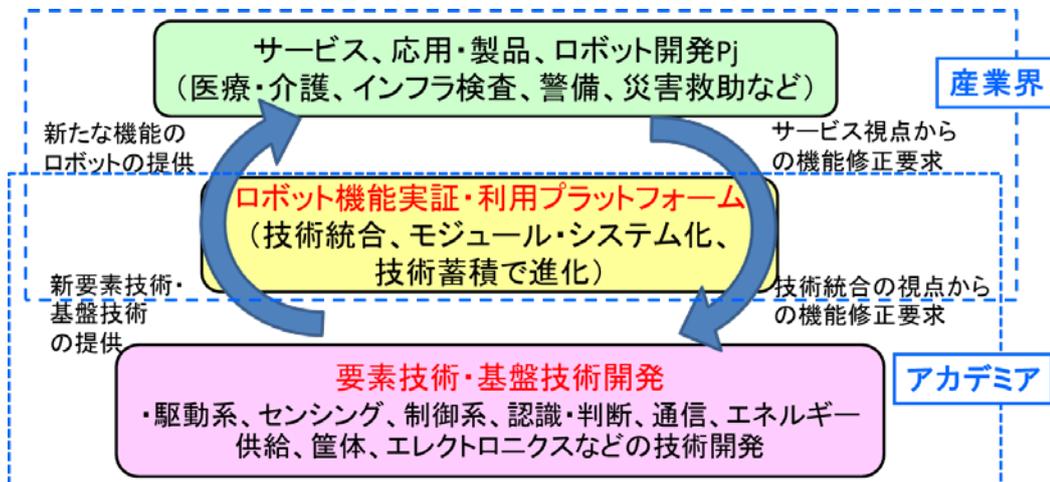


図 3-1 ロボット機能実証・利用プラットフォームの構築

このような機能モジュールや小規模なシステムを開発するためには、新たな要素技術・
基盤技術開発に留まらず、これらの技術を統合化できる製造設備や最先端の技術を使いこ
なせる実験施設を持ち、モジュールやシステムレベルの機能実証ができ、その有効性を評
価できるようなプラットフォームが必要と考えられる。図 3-1 にこのようなロボット機能
実証・利用プラットフォームを示す。このプラットフォームでは、サービスの現場や産業
界が必要とするロボット技術やロボット機能の要求に対し、それを実現するために有望と
考えられる要素技術・基盤技術をアカデミアから集め、それらの融合化・統合化技術開発

を推進してその機能性を確認する。また、単に機能性を確認するだけでなく、利用したい産業界の人々が実際の利用場面を想定した実用性の試験ができるようにすることが重要である。これにより、新たなロボット技術やモジュールを使いたいと考えている利用者や産業界の要望をモジュール開発や要素技術・基盤技術開発にフィードバックできる。このようなループが円滑に回るようにすることで、単なる要素技術・基盤技術開発にならず、実際に使える技術として磨きがかかるとともに、このプラットフォームや要素技術・基盤技術開発を進めるアカデミアに新たな技術や知識の蓄積が行われる。また、このような場を経験することで、他の領域・他の分野・産業界の人たちとの交流を通して広い範囲の知識を身に付けられ、人材育成も進むと考えられる。

人間との共生を前提とした安全性、信頼性の確保に関する研究開発も必要である。部品が壊れて誤動作をしたり、人間に危害を加えそうになったときに、安全に止めるための仕組みをどのようなレベルで組み込むか検討することは非常に重要である。サービスシステムからロボットシステム、機能モジュール、部品、材料レベルにおいて二重、三重の安全対策を組み込むことが必要であり、各レベルで検討しておく必要がある。また、モジュールのインターフェースを標準的なロボット OS に対応させることや、ロボットの周りの環境・システムと協調動作が可能ないように、環境も含めた全体のアーキテクチャを考えておくことも重要である。

4. 研究開発の推進方法および時間軸

3章で述べた研究開発課題の推進には、産学官による国全体としての中長期的な取り組みが必要である。新たな要素技術・基盤技術の研究開発、およびモジュール開発で重要と考えられる機能実証のプラットフォームの構築などは、長期的な戦略を持って行う必要があるため、公的資金を中心にして実施することが適当であり、関連する機関としては内閣府、文部科学省、経済産業省、JST、NEDOなどが想定される。

要素技術・基盤技術を統合してモジュールや小規模システムとして機能実証を行うプラットフォームの構築には、いくつかの拠点からなるネットワークを形成することが必要であり、ある程度の技術領域で括ることや、強みを持つ地域として括ることなど、どのような形が望ましいか、これまでの拠点形成の事例を参考に1～2年で具体化することが重要である。また、作られる拠点は、長期的に研究者だけでなく技術者の人材育成や知識の蓄積をおこなっていく必要があり、継続的な公的資金や産業界からの資金のサポートが得られるようにしておくことが重要である。

スマートロボットの要素技術・基盤技術の研究開発にはロボット分野や機械分野だけでなく、情報通信分野、ナノテクノロジー・材料分野など他の分野の研究者が連携して新たな技術開発を行う必要があることから、文部科学省またはJSTの競争的資金を活用した公募型研究を軸に、5年から10年程度の期間で集中的に実施することが適切である。ここでは、実際に社会が求める技術開発になっているか、安全性やELSIの視点で問題になるような研究開発内容となっていないかなどを確認して進めるように、プログラム全体の構想やテーマ設定時の検討メンバーやプロジェクト推進のアドバイザーに法学者や倫理学者・社会学者を含めておくことも重要である。また、個別の研究テーマの中でELSIに関する予算や人文社会系の人材を確保しておくことも望まれる。

また、以上のような研究体制で研究開発を行うに当たっては、ロボットの社会への普及を目指している内閣府、経済産業省、NEDOのプログラムとの連携も重要である。これらのプログラムの中から出てくる要素技術・基盤技術の課題を的確に掴んで次の研究開発に反映させることや、新たに生み出される要素技術・基盤技術を当初予定していなかったような利用分野に適用することは非常に重要であり、情報交換の場、タイムリーな共同研究の実施、研究成果の橋渡しなどが可能な仕組みを作る必要がある。以下、研究開発の推進上重要となるプラットフォーム活用の拠点形成、異分野連携による新たなコミュニティの形成と統合技術の重要性、研究開発の時間軸について述べる。

4-1. プラットフォーム活用の拠点形成

4-1-1. ロボットの研究開発体制への要請

ロボットの研究開発を進めるためには、以下の要請に応える必要がある。

- ・要素技術、基盤技術の研究開発とともにそれらを目的に応じて組み合わせ、モジュール・システムレベルでの機能実証、さらにはロボットとしての動作実証を可能にする研究開発体制が必要である。

- ・サービス分野におけるロボットへの市場ニーズは多様であり、それを実現するための要素技術も多岐にわたる。上記研究開発体制は、これら多様な市場ニーズに柔軟に対応される事が要求される。
- ・市場のニーズを身近に感じている産業界と要素技術の蓄積がなされている大学・国研との連携が積極的に促進されるような研究開発体制が要求される。
- ・上記産業界とアカデミアの連携によって目的の機能を持つロボットが開発されるだけでなく、開発を通じて高められ、また新たに生み出される要素・基盤技術がアカデミアに蓄積され、以降のより高次のロボット開発に積極的に活用される体制である事が必要である。
- ・上記のプロセスを通じて、ロボット研究開発の人材の育成がなされる事が合わせて重要である。

以上を満足する研究開発体制として、図 4-1 に示すような3つのレイヤーから成る構成を想定する。上位のレイヤーは「サービス、応用製品」などに対応しており、ロボットに関する多様な市場ニーズを代表している。ここでは多様な市場ニーズと常に向き合っている産業界が主要な担い手となると考えられる。下位のレイヤーは「要素技術、基盤技術開発」に対応し、多様な技術を蓄積しているアカデミアが中心的な担い手となる。中位のレイヤーは「ロボットの機能実証の場」であり、産学官が連携して作り上げるロボット研究開発のプラットフォームである。そこでは、上位のレイヤーから市場が求める新たな機能のロボット開発要請が持ち込まれると同時に、そのために必要な要素技術、基盤技術が下位レイヤーから抽出され、適切な開発チームが構成されることで目的のロボットが開発される。このプロセスを有効に機能させるためには、プラットフォームを運営する組織の役割が重要となる。この組織は地方まで含め、日本の大学・国研に存在する要素・基盤技術を十分に把握し、ロボット開発の具体的な課題が下りてきた時に、その実行に必要な要素・基盤技術を抽出し、それを保有している研究者群を提示できる知識・情報を保持している必要がある。また、この組織においては、先端技術の導入、新市場・ビジネスの可能性、安全性や ELSI の視点で社会が受け入れるための仕組み、規制への対応、国際標準化への対応などに関して検討する体制を組んでおく必要がある。理工学系のアカデミア、産業界だけではなく、ベンチャーファンドや経済学者、法学者、倫理学者、社会学者など人文社会系の研究者と議論できるようにしておくことが重要である。

このようなロボット開発を通して、向上が図られた要素・基盤技術は参加したチームメンバーを通じて下位レイヤーに蓄積され、以降のより高次のロボット開発に活用されていく。このプロセスを通して下位レイヤーの要素・基盤技術は、順次進化をとげ、人材育成も含め、日本のロボット研究開発力の底上げにつながっていくことが期待される。

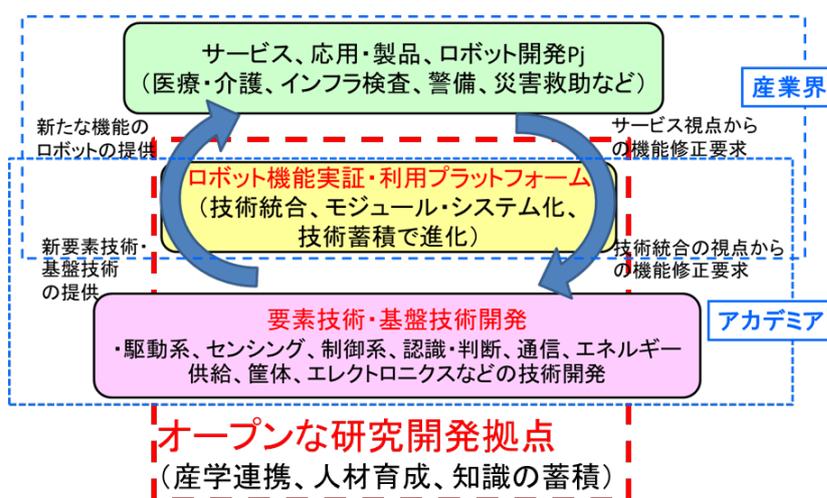


図 4-1 ロボット機能実証・利用プラットフォーム活用の拠点形成

4-1-2. 研究開発の課題設定

研究課題の課題設定としては、これからのサービス用のロボットが特徴とするスマート化や人間との共生への適用ということを中心に、そこで必要となる要素技術・基盤技術の開発とすることが重要である。ただし、実際に使われない要素技術・基盤技術開発にならないように、社会に必要となるサービスの視点から、要素技術・基盤技術の課題を設定することも重要である。これには、現在のサービスの現場でのプロセスを分解し、人間では対応が難しいプロセスを明確化して、研究開発課題に設定することも、一つの重要な手段である。産業用のロボットが実際に役立っているのは、工場の中で困っている事柄を技術者が認識し、それを補完するロボット技術を開発しているからであり、このような課題設定を見習う必要がある。単純に人の対応が難しい仕事をロボットにやらせるというだけではなく、サービス全体の中で、周りの環境とロボットとの関係をどのようにとらえるのか、人とロボットがどのように協働していくのが望ましいか、人を排除するようにならないかなど、人文社会系の研究者も交えた検討が望まれる。

また、既存の部品の単純な組み合わせでは不可能なストレッチ目標を設定することも重要である。応用側の要望に対して安易な妥協をせず、従来の技術の延長ではできない場合には、まったく異なる原理や発想の違った技術に挑戦する取組を奨励することが重要である。そこでできた新技術によってハードウェアとソフトウェアの両面で海外との差別化を図ることができ、技術的にも特許的にも日本の技術優位性を長期に確保できる。

4-1-3. オープンとクローズドのベストミックス戦略、グローバル戦略

産学連携で開発を進めるロボット機能実証（技術統合・モジュール／システム化）のプラットフォーム運営委員会においては、産業界と大学・国研の研究者との時として相反する利害関係を調整する必要が発生する。産業界は共同開発で得られる成果物（技術情報、ノウハウ、特許、設計データ）は自社での独占を優先し、公開を嫌う傾向がある。一方、大学や国研の研究者は開発した成果は論文として公開をし、獲得した技術は将来の研究開発で自由に使いたいと考える。この相反する利害を調整するには、チームでの

共同研究を始める前に参加メンバー間で成果の公開方法、知財の取り扱いに関して議論を行い、合意内容に従って契約を取りかわしておくことが必要である。産学官連携で実行するプロトタイプ開発においては、獲得された要素技術の成果はそれを提供した大学・国研の参加メンバーの技術として蓄積され、以降の研究開発で自由に利用可能とする、オープンな研究開発環境の提供が、機能実証プラットフォームの原則にすべきである。ただし、産業界が成果非公開を求める場合への対応も用意しておくべきで、その場合は開発費用の企業による自己負担が原則になると考えられる。

成果の公開、要素技術の提供という面では、グローバル化への対応も重要となる。新しいアイデアの発掘という意味では、日本だけにとどまっていたには限界もある。また産業界も、日本の大学、国研だけでなく、広く海外のアカデミアにも共同研究の相手先を求めることが想定される。ここで提案するプラットフォームの活動では国の資金も投入するため、グローバル化に対してどのように対応すべきか、事前の十分な検討が必要である。ひとつの考えとしては、ロボット応用の提案に対しては海外にも門戸を広げ、多様なアイデアの受け入れを可能とし、その実行に必要な要素・基盤技術は原則としてプラットフォームに登録された日本の大学・国研に求め、研究開発の結果生み出される要素・基盤技術は日本の大学・国研に蓄積するように求める事などが考えられる。

4-1-4. 国際的優位性の確保

ロボットの要素技術・基盤技術の開発において、海外との競争優位性を確保するためには海外の仕組みをまねるのではなく、日本独自の視点で取り組むことが重要である。例えば、わが国は材料技術や環境技術、省エネルギー技術に関しては、大きな優位性を持っており、これらを核にした取り組みは重要と考えられる。成果の公開、要素技術の提供という面では、グローバル化への対応も重要となる。技術が日本だけにガラパゴス化しないように、世界のロボット利用のニーズを的確に把握し、日本がロボットの要素技術・基盤技術で国際標準化をリードできるようにしておくことが必要である。また、要素技術・基盤技術の実用化においてはベンチャーの育成も重要と考えられるが、プラットフォームでのプロトタイプ開発のように、要素技術・基盤技術開発とシステム統合とを上手く回し、欧米とは異なる日本流のベンチャー創出のスタイルを考えることも必要である。

このようにして開発した要素技術・基盤技術およびモジュール技術については、知財権の確保とともに、国際標準化の活動を通して世界で使えるものにしていくことが重要である。特に新しい材料や新しい部品などでは安全性の評価も重要であり、4-1-1に示したようなプラットフォームの体制を活用した取り組みが望まれる。

4-2. 異分野連携による新たなコミュニティの形成と統合技術の重要性

新たな要素技術・基盤技術開発を進めるうえでは、ロボット関係者だけでなく、情報通信やナノテクノロジー・材料などの異分野の研究者・技術者との連携が重要であるが、これを早期に実現するためには、新たなコミュニティの形成が重要である。特に、学会の役割は重要であり、いろいろな専門分野に分かれている学会の中に、ロボット、情報通信、ナノテクノロジー・材料などの研究者・技術者が一緒に要素技術・基盤技術や機

能モジュール・システムについて議論できる共通の場を作ることが必要である。以下に関係の深いと考えられる学会を示すが、これらに限らずいろいろな学会が手を組んで新たなコミュニティの形成を図ることが期待される。

日本ロボット学会、日本機械学会、精密工学会、計測自動制御学会、電子情報通信学会、情報処理学会、応用物理学会、日本化学会、日本材料学会、日本複合材料学会など

分析の科学に対して、日本で圧倒的に弱いと言われているシステム統合または設計の科学などを学問として根づかせることが非常に重要である。そのためにはシステム統合の理念、ストーリーに新規性や独自性があり、きちんと世の中の役に立つ場合には、高く評価しよう、という文化をアカデミアで共有することが必要である。いつもシステム全体を眺めながら、新しい技術をつくれるベースになる科学を考える文化を醸成することがこういったプロジェクトの目的になることが期待される。

4-3. 研究開発の時間軸

プラットフォームで行われるロボットのプロトタイプ開発の個々のプログラムは最終目標に対する途中段階でのマイルストーンが設定され、国からのマッチングファンド的資金が提供され、複数年（例えば3年）でスタートする。プラットフォーム運営委員会は途中経過を良く観察し、当初設定の上記複数年が経過した段階で継続の是非を判断する。将来性が高いと判断されたプログラムは、さらに国からの資金を追加する事で、計画の拡大、開発場所の拠点化を進めることも積極的に考えるべきである。ロボット開発では、市場ニーズが多様なうえ、それらが顕在化してないケースも多く、技術のロードマップも存在してないようなケースが想定されるため、上記のように走りながら、真に市場が求めるロボット応用、さらにはロボット技術を確定していくプロセスが重要になる。プラットフォームと言うからには、例えば、10年後には、産業界からの資金と国からの資金で自律的に運営がされる形態を想定して構想が練られることが望ましい。

個々の開発プログラムに参画することで得られる要素技術の高度化、さらには例えばNEDOやJSTで産み出された新規の要素技術もプラットフォームに組み込まれ、参画した大学や国研の研究者、あるいは研究室に技術蓄積されていく。この状況を各コーディネータ（付録3を参照）は良く把握しておき、次のより高次のロボット開発に積極的に活用するサイクルを構築することが重要である。ロボット技術開発はこれからの大きな技術トレンドであるため、現状の産業用ロボットやサービス分野のロボットに限らず、今後も多様な要素技術・基盤技術への要望が出てくると考えられる。これに対し、日本の強い技術として持続させるためには、5年程度の取り組みに終わらないように、新しいロボット技術の領域を作り上げ、それを進化できるようにしていくことが重要である。

付録1 検討経緯

- ・ JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、平成 27 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 2015 策定委員会において指定し、平成 27 年 6 月に CRDS 内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、ナノテクノロジー・情報通信技術・機械工学分野におけるスマート小型ロボット基盤技術に関して 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（詳細次頁）。ワークショップの結果は報告書として、平成 28 年 3 月に CRDS より発行している（CRDS-FY2015-WR-09）。
- ・ 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、平成 28 年 3 月に本戦略プロポーザルを発行するに至った。

■意見交換・インタビューを実施した識者（敬称略、所属・役職は実施時点）

- 1) 田中 秀治（東北大学・教授）
- 2) 石正 茂（JST・革新的研究開発推進室長）
- 3) 藤田 博之（東京大学・教授）
- 4) 田所 諭（東北大学・教授／JST・PM）
- 5) 本間 格（東北大学・教授）
- 6) 浅間 一（東京大学・教授）
- 7) 松日楽 信人（芝浦工業大学・教授）
- 8) 下田 真吾（理化学研究所・ユニットリーダー）
- 9) 染谷 隆夫（東京大学・教授）
- 10) 小松崎 常夫（セコム株式会社・常務執行役員）
- 11) 岡野原 大輔（株式会社 Preferred Infrastructure・取締役副社長）
- 12) 真下 智昭（豊橋技術科学大学・准助教）
- 13) 北野 宏明（NPO 法人システム・バイオロジー研究機構・代表）
- 14) 岩佐 行利（東京都下水道サービス株式会社・技術開発担当部長）
林 悦郎（東京都下水道サービス株式会社・土木技術開発担当）
- 15) 西村 正三（株式会社計測リサーチコンサルタント・事業部長）
蔵重 裕俊（株式会社計測リサーチコンサルタント・課長）
- 16) 橋本 周司（早稲田大学・教授）
- 17) 羽生 貴弘（東北大学・教授）
- 18) 山本 晃生（東京大学・准教授）
- 19) 川嶋 健嗣（東京医科歯科大学・教授）
菅野 貴皓（東京医科歯科大学・助教）
- 20) 油田 信一（芝浦工業大学・教授）

- 21) 山本 貴史 (トヨタ自動車株式会社・先行開発室長)
- 22) 國吉 康夫 (東京大学・教授)
- 23) 川村 貞夫 (立命館大学・教授)
- 24) 鈴森 康一 (東京工業大学・教授)
- 25) 吉川 元起 (物質・材料研究機構・MANA 独立研究者)
- 26) 吉川 弘之 (JST・特別顧問)
- 27) 小平 紀生 (三菱電機株式会社・主席技監／日本ロボット工業会・ロボット技術検討部会長)
- 28) 石黒 章夫 (東北大学・教授)
- 29) 大須賀 公一 (大阪大学・教授)
- 30) 神崎 亮平 (東京大学・教授)

■ 科学技術未来戦略ワークショップ「ナノ・IT・メカ統合によるスマート小型ロボット基盤技術」

<プログラム>

開催日時：2015年12月4日(金) 10:00～17:35

開催会場：TKP 市ヶ谷カンファレンスセンター 8階バンケットB

		(敬称略、所属・役職は実施時点)
オーガナイザー		曾根 純一 (JST-CRDS)
司会		馬場 寿夫 (JST-CRDS)
10:00～10:05	開会	曾根 純一 (JST-CRDS)
10:05～10:25	ワークショップの趣旨説明	馬場 寿夫、曾根 純一 (JST-CRDS)
10:25～10:55	「ロボット技術の研究開発と実用化・事業化に向けての課題」	浅間 一 (東京大学)

セッション1 サービス視点からのスマートロボット基盤技術への期待

10:55～11:20	「下水道におけるロボット利用の現状と今後」	— 東京都の事例 — 岩佐 行利 (東京下水道サービス)
11:20～11:45	「豊かな未来を創るサービスロボット」	小松崎 常夫 (セコム)
11:45～12:10	「生活支援ロボット HSR (Human Support Robot) のプラットフォーム展開」	山本 貴史 (トヨタ自動車)

セッション2 新たな要素技術・基盤技術

13:00～13:25	「手術ロボットの要素・制御技術」	川嶋 健嗣 (東京医科歯科大学)
13:25～13:50	「新アクチュエータが実現する新ロボット」	鈴森 康一 (東京工業大学)
13:50～14:15	「ロボット用センサの課題」	田中 秀治 (東北大学)
14:30～14:45	「身体と場に埋め込まれた「知」を探る」	大須賀 公一 (大阪大学)
14:55～15:20	「開かれた知能によるロボットの自律制御」	下田 真吾 (理化学研究所)
15:20～15:45	「脳型 LSI を拓く回路・アーキテクチャの展望」	羽生 貴弘 (東北大学)

セッション3 総合討論 ファシリテータ：田中 秀治 (JST-CRDS、東北大学)

16:00～17:30	<p>論点1. 提言の骨子の妥当性 (新たな要素・基盤技術開発、プラットフォーム構築)</p> <p>論点2. 研究開発体制・分野融合・産学連携の仕組み (研究開発拠点の構築、プラットフォーム、拠点への産業界、アカデミアの係わり方)</p> <p>論点3. コミュニティの形成と人材育成 (異分野の人材、技術、学会の交流を活性化させる仕組み)</p> <p>論点4. 安全性・セキュリティ、ELSI (ロボットが普及する将来の社会を見据えて、事前に検討すべき項目)</p>	
17:30～17:35	閉会	曾根 純一 (JST-CRDS)

<ワークショップ参加識者>

(発表者)

- ・ 浅間 一 東京大学 大学院工学系研究科 教授
- ・ 岩佐 行利 東京下水道サービス 技術部 技術開発担当部長
- ・ 大須賀 公一 大阪大学 大学院工学研究科 教授
- ・ 川嶋 健嗣 東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 教授
- ・ 小松崎 常夫 セコム株式会社 常務執行役員
- ・ 下田 真吾 理化学研究所 脳科学総合研究センター ユニットリーダー
- ・ 鈴森 康一 東京工業大学 大学院理工学研究科 教授
- ・ 田中 秀治 東北大学 大学院工学研究科 教授、JST-CRDS 特任フェロー
- ・ 羽生 貴弘 東北大学 電気通信研究所 教授
- ・ 山本 貴史 トヨタ自動車株式会社 パートナーロボット部 先行開発室長

(コメンテータ)

- ・川村 貞夫 立命館大学 工学部ロボティクス学科 教授
- ・國吉 康夫 東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授
- ・黒田 昌裕 JST-CRDS 上席フェロー
- ・松日楽 信人 芝浦工業大学 機械機能工学科 教授

付録2 国内外の状況

(1) 日本の状況

我が国におけるロボット開発の歴史については、コラム1で示したが、1980年代の産業用ロボットの導入から何度かのブームを経て現在に至っている。現在も掃除ロボットや無人機（ドローン）が市場に出まわり、自動運転やAIなどへの関心が高いが、今後の少子高齢化、健康長寿、国土強靱化などの社会課題の解決や、ものづくりの革新に向けた大きな技術トレンドとして、ロボット技術開発やロボットの社会への普及に対する期待が大きくなっている。

我が国では、ロボット革命実現会議の提案によるロボット新戦略（Japan's Robot Strategy - ビジョン・戦略・アクションプラン -）が2015年2月に日本経済再生本部において政府方針として決定された。この「ロボット新戦略」においては、デジタル化およびネットワーク化を活かしつつ高度のセンサや人工知能を駆使して作業を行うシステム全体を、新たな「ロボット」の概念として位置づけ、その上で①ロボット創出力の抜本的強化、②ロボット利活用社会、③IoT時代を見据えたロボット新時代に向けた世界でのイニシアチブ発揮を掲げている。このロボット新戦略を実現するための組織的プラットフォームとしてロボット革命イニシアチブ協議会が2015年5月に発足するなど政府を挙げての取り組みが活発化している。

こうした動きとともに、ロボット技術の研究開発と社会展開に向けたプロジェクトが立ち上がっている。図S2-1に平成28年度概算要求資料を参考に、現在進行中・計画の主なロボット関係のプロジェクトを示す。この他にも関連するものを挙げると、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の自動走行システム、革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）の超薄膜化・強靱化「しなやかなタフポリマーの実現」、重介護ゼロ社会を実現する革新的サイバニックシステム、タフ・ロボティクス・チャレンジなどが総合科学技術・イノベーション会議の主導により進められている。全体を見たときに、ハードウェアのモジュール化、要素技術・基盤技術開発のプロジェクトがないことが課題であり、本プロポーザルはこの領域の強化を目指す。

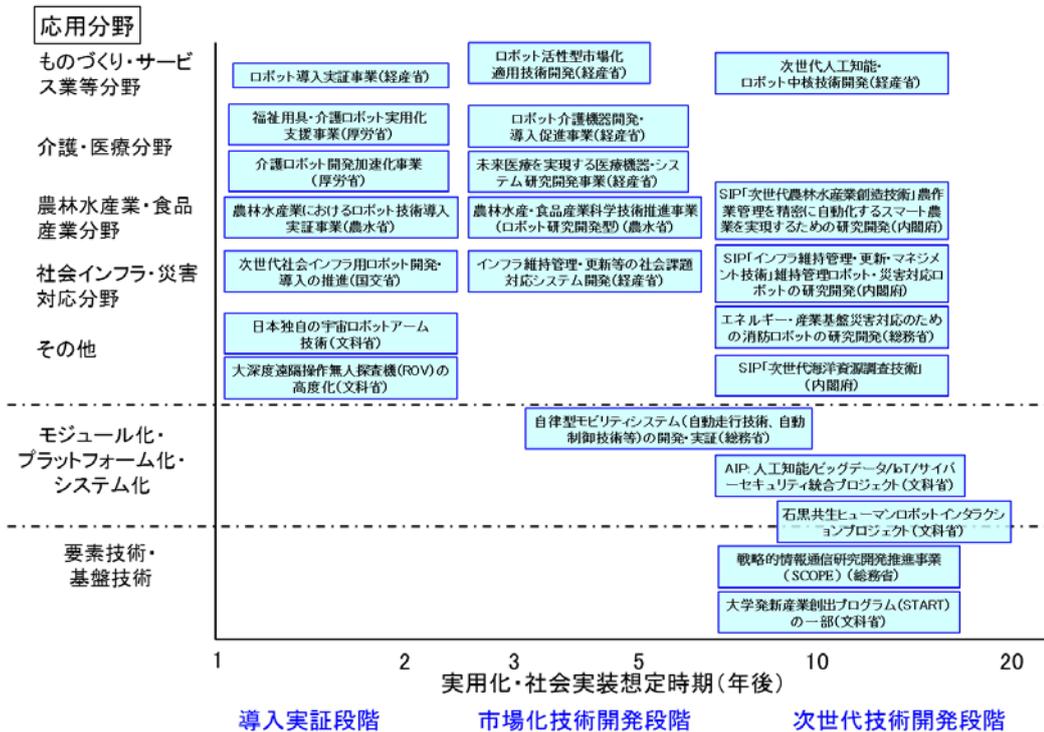


図 S2-1 ロボット関係の主なプロジェクト

また、法学者などが中心となってロボット法学会設立準備会が2015年10月に開催されるなど、ロボットの幅広い社会展開に向けて技術の研究開発だけでなく社会受容のための枠組みについての議論も盛り上がりつつある。

(2) 米国の状況

米国ではDARPAや防衛関係の組織によってロボットの基礎研究開発に資金が投入されてきた。スマートロボットにも利用される様々な技術が生み出されてきたが、特に近年ではDARPA Grand Challenge (2004, 2005) や Urban Challenge (2007) が地上の実環境での自律移動という点で、また、DARPA Robotics Challenge (2013, 2015) がオペレータとの協調作業という点で、特筆すべき取り組みである。

また、2011年のPCASTレポート Ensuring American Leadership in Advanced Manufacturing において先端製造分野における米国の地位回復に向けたトランスフォーマティブな技術開発を加速する必要性が指摘され、先端製造パートナーシップが始動したが、その一環として National Robotics Initiative (NRI) が発表され、NSF、NIH、NASA、USDA、DoD の共同公募が実施されている。このNRIは人間と協働するロボットの開発と利用の加速を掲げており、DARPA Robotics Challenge、NASA Robonaut プロジェクトなども一部に位置づけられている。また、NSFのRobotics-VO (Virtual Organization) というコラボレーションのプロジェクトを通じて、ジョージア工科大学、カーネギーメロン大学、ペンシルベニア大学、南カリフォルニア大学、スタンフォード大学、UCB、ワシントン大学、MITなどの大学と産業界が連携して A Roadmap for US Robotics: From Internet to Robotics 2013 Edition をとりまとめるなど、アカデミアと産業界が連携した取り組みが活発である。

(3) 欧州、韓国、中国の状況

欧州では Horizon 2020 の産業界のリーダーシップ確保 (LEIT) における ICT 分野の Work programme の 6 つの柱の一つがロボティクスであり、2014 年～2015 年の予算規模は 154M ユーロとなっている。また、欧州技術プラットフォーム (ETP) でもある euRobotics の下に、企業と研究機関が結集して 2014 年に世界最大の民間ロボット開発計画 SPARC を立ち上げるなど取り組みが活発化している。euRobotics において重要な応用領域として、①製造業、②ヘルスケア、③農業、④社会インフラ、⑤商業、⑥物流・運輸、⑦消費者向けを挙げてロードマップを策定している。また、ナノテク・先端材料・バイオテクノロジー・先端製造プロセスの Work Programme においては、Factories of the Future として製造資産のプロセス最適化、中小製造企業の ICT イノベーションなどものづくり関連の取り組みが挙げられている。

さらに、Horizon2020 の健康・人口変化・福祉などのいくつかの Societal Challenge においてロボットを活用した社会的課題の対応が挙げられている。

基礎科学の研究としては卓越した科学 (Excellent Science) の Future Emerging Technologies (FET) Proactive の Knowing, doing, being: cognition beyond problem solving においてロボットや CPS (Cyber Physical Systems) の将来の認知システムのための基礎的な研究が支援されている (2014 年～2015 年の予算規模 10M ユーロ)。

中国では、科学技術部が公表した国家第 12 次 5 ヶ年科学技術発展計画の専門計画である①スマート製造科学技術発展専門計画、②サービスロボット科学技術発展専門計画などがロボットの研究開発の取り組み強化を宣言している。

韓国では、第 3 次科学技術基本計画 (2013 年～2017 年) における 5 つの戦略分野の一つ「High 5 科学技術基盤の雇用創出」において、創造経済を支える専門家・職業群を育成すべき新産業分野の一つとしてロボットが掲げられている。また、2008 年に施行された「知能型ロボット開発及び普及促進法」では、知能型ロボットの開発と普及促進の基盤づくりとロボット産業の持続的発展を目的に掲げている。この法律では 5 年ごとに基本計画を策定することが定められており、現在、2014 年 7 月に発表された第 2 期中期知能型ロボット基本計画が推進されている。

(4) 論文・特許のデータから見える傾向

Thomson Reuters 社の論文データベースである Web of Science より、ロボット関係の論文を分析した。図 S2-2 は検索式として” robot*” を用いてロボット分野全体の論文を検索し、各国の論文数の推移をグラフにしたものである。世界で論文が登場した 1969 年以降、現在に至るまで米国が件数でトップを維持している。日本は、2008 年まで世界 2 位を占めていたが、2009 年には中国に 2 位の座を譲り渡し、2015 年現在では韓国、イタリアなどにも追い越されて 7 位となっている。

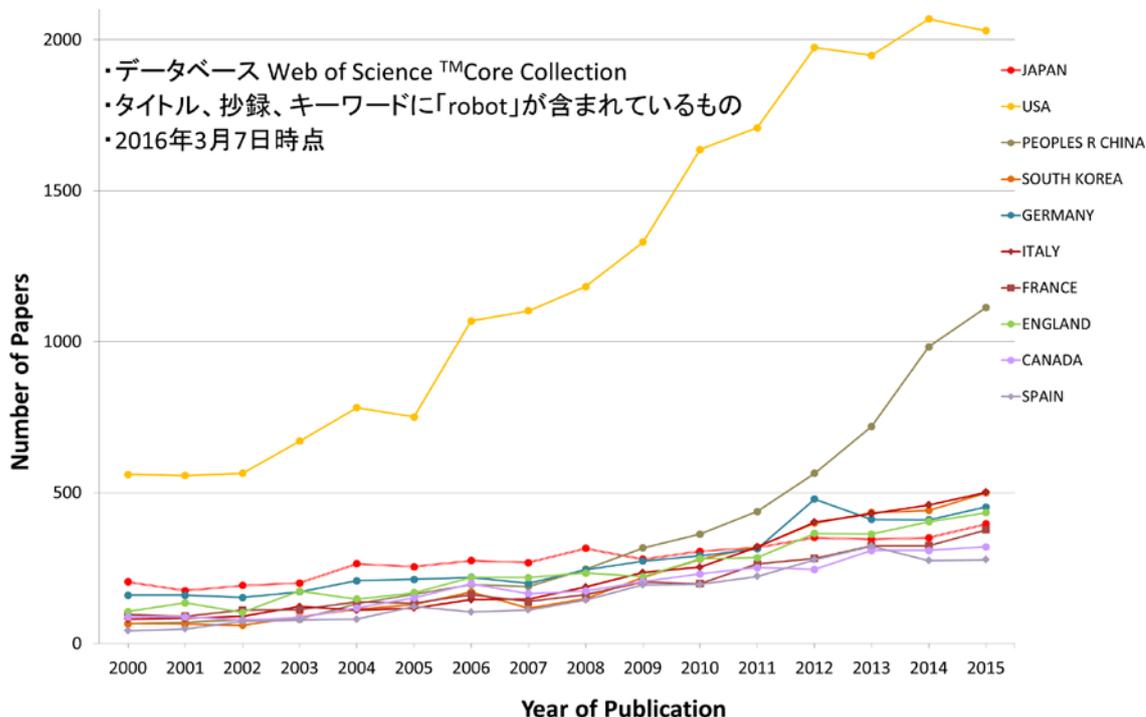


図 S2-2 ロボット関係の国別論文数の時系列推移

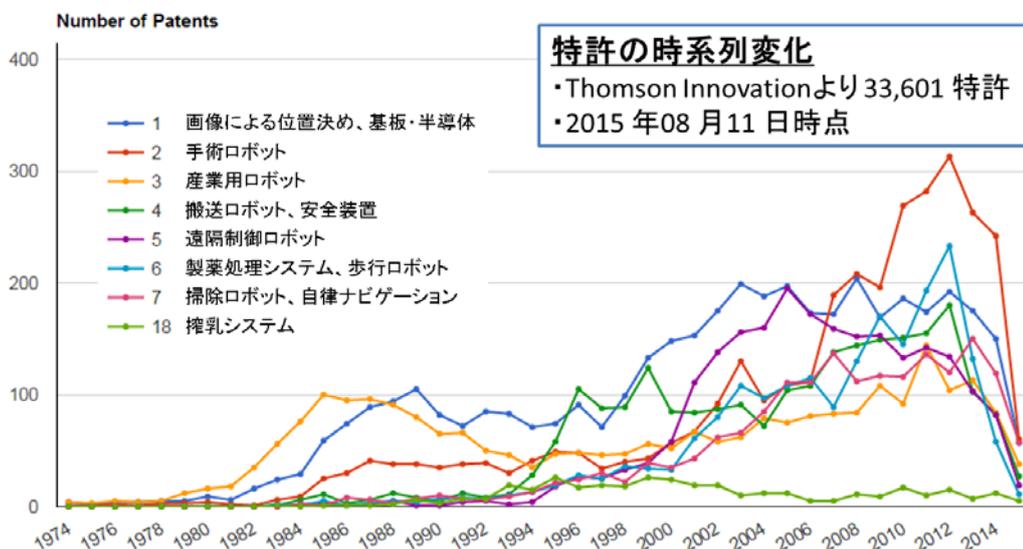


図 S2-3 ロボット関係の各産業分野の特許数時系列変化（上位の産業分野のみ）

Thomson Reuters 社の特許データベースである Thomson Innovation より、ロボット関係の特許を分析した。図 S2-3 は検索式として” robot*” を用いて特許を検索し、産業別の特許数の推移をグラフにしたものである。「画像による位置決め、基盤・半導体」(#1) および「遠隔制御ロボット」(#5) は 2000 年代前半を過ぎると、特許数が横ばい、あるいは、低下傾向にあり、技術的な進化は落ち着いてきていることが分かる。一方で、「手術ロボット」(#2) および「製薬処理システム、歩行ロボット」(#6) は、2000 年代に入って急激

に特許数が増加しており、研究開発が現在盛んに進められている分野である。「搬送ロボット、安全装置」(#4)は1990年代後半、「掃除ロボット、自律ナビゲーション」(#7)は1990年代後半から2000年代前半にかけて特許数が増加しており、1990年代後半から論文数が増加した学術分野「移動ロボット」に対応して特許が蓄えられてきたことがわかる。これは、2000年前後の第二のロボットブームに対応する産業分野だと考えられる。

「産業用ロボット」(#3)の特許数に関しては、興味深い特徴が見られる。1985年と2011年をピークとする2つの山が見られることである。これは、産業用ロボットの普及が進んだ1980年代の第一のブームと現在(2010年代前半)の第三のロボットブームに対応している。1980年代の第一のロボットブームと、2000年前後の第二のブームが別の産業分野であったものが、現在の第三のブームとともに活性化している状況が、この図の各分野の特許数に反映されていると考えられる。

付録3 プラットフォームを具現化するネットワーク型拠点構想

スマートロボットの研究開発体制を実現するオープンなネットワーク型研究開発拠点の具体的な構想を以下に提示する。図S3-1はその構想を示す模式図で、ロボット応用、ロボット機能実証(技術統合・モジュール/システム化)、要素技術・基盤技術の3層構造からなる。ロボット応用のレイヤーでは様々な市場ニーズから生まれるロボットに対するサービス、製品、さらにはそれらのプロトタイプ開発への要望が生み出される。その中から、開発資金を伴う産業界からのロボット開発への提案、既存の国プロジェクト、あるいは新たに資金援助がなされる国プロジェクトによるロボット開発への提案が中位のロボット機能実証のレイヤーに要請されてくる。既存のロボット開発の国プロジェクトにおいても、新たな提案を行うことで、本拠点構想による研究開発に参画できる道を用意しておく必要がある。以上の提案の中には、独自性、新規性の高い要素技術をベースにしたロボットの可能性追及の提案があっても良い。これは提案時点での市場は未知であるが、新たな市場を切り拓く可能性を予感させる提案に相当する。ドローンなどはその類の例で、地上をセンシングしながら空中を自由に飛行するロボットの出現が多くの人々の興味を喚起し、それによって多くのサービスの提案、さらには新たな市場が生まれてきている。このようにロボット応用のレイヤーからの提案では、市場と技術の関係は常に双方向であることに配慮しておく必要がある。



図 S3-1 プラットフォームを具現化するネットワーク型拠点構想案

中位の機能実証 (技術統合・モジュール/システム化) のレイヤーはロボットの機能実証・利用プラットフォームの運営委員会によって組織化され、上記のロボット開発の提案を受け、その実行の是非、実行する場合にはそれに必要な要素技術への分解、各要素技術を提供できる研究者、それを統合システム化できる研究者、最終目的となるロボット構想

の提案者から成る最適のプロトタイプ開発チーム構成、さらには研究開発の実行場所に関する提言を行う。これをロボット開発提案者と協議し、最終の研究開発計画書を取りまとめる。このような研究開発を促進するためには、上記研究開発計画書に対し、マッチングファンド的な国からの資金提供がなされる事が望ましい。以上のように運営委員会はロボット研究開発の実行において極めて重要な役割を担っており、プラットフォーム長、開発を支援するコーディネータ、さらには上記の適切な判断が大局的に可能なロボット開発の有識者で構成される事が必要であろう。

下位の要素技術・基盤技術のレイヤーは大学、国研で構成され、ロボット開発に必要な主要要素技術をもとに分類される。例としてここではセンサ技術、制御技術、アクチュエータ技術で分類する事を考え、上記プラットフォーム運営委員会のコーディネータも要素技術に対応して各々設けるものとする。各要素技術へは、全国の大学、国研の研究者、研究室からの登録制とし、上記各担当のコーディネータは登録を促す活動を互いに連携を取りながら全国展開すると共にそれらを取りまとめ、常にどこにどのような技術があるのか、把握できるようにしておく。各コーディネータは、上位のロボット応用のレイヤーからロボットの開発要請があった場合、最適の技術、最適のメンバーを提示できるだけの情報を常に保有しておく必要がある。なお、統合技術のように複数の要素技術を保有する研究者、あるいは研究室の場合は複数の要素技術に登録しておく必要がある。

各コーディネータからの要請を受けた大学や国研の研究者（研究室）は、特定の目標が設定されたロボットの開発チームへの参画を判断し、参画する場合は、自らの技術で目標達成に貢献する。上位のロボット応用レイヤーからの具体的な開発目標に関する提案内容は、公開できる範囲内で、登録している大学や国研の研究者にその情報を公開し、個々の研究者が積極的に提案に応募できる仕組みを用意しておくことも必要である。また上記のロボット開発の提案時点で、提案者が個別要素技術の参画研究者を指定してくることも考えられる。これらの状況に応じて、プラットフォーム運営委員会は柔軟に参画メンバーも含め、最終的な研究開発計画を確定させることが求められる。

以上のプロセスを経て計画内容が確定したロボットのプロトタイプ開発の個々のプログラムは最終目標に対する途中段階でのマイルストーンが設定され、国からのマッチングファンド的資金が提供され、複数年（例えば3年）でスタートする。プラットフォーム運営委員会は途中経過を良く観察し、当初設定の上記複数年が経過した段階で継続の是非を判断する。将来性が高いと判断されたプログラムは、さらに国からの資金を追加する事で、計画の拡大、開発場所の拠点化を進めることも積極的に考えるべきである。ロボット開発では、市場ニーズが多様なうえ、それらが顕在化してないケースも多く、技術のロードマップも存在してないようなケースも想定されるため、上記のように走りながら、真に市場が求めるロボット応用、さらにはロボット技術を確定していくプロセスが重要になる。

個々の開発プログラムに参画することで得られる要素技術の高度化、さらには新規の要素技術は、参画した大学や国研の研究者、あるいは研究室に技術蓄積される。この状況を各コーディネータは良く把握し、次のより高次のロボット開発に積極的に活用することが重要である。これにより下位の要素・基盤技術のレイヤーは動的に進化していくことが可能になる。同時に、これらの開発を通じて次代を担う若手の研究者が技術を習得するだけでなく、産学連携の研究開発プロセスを理解し、産業界が提供する市場ニーズに関する情報も吸収する事ができる。上記により、日本のロボット研究開発力の底上げがなされることが期待される。

付録4 センサ関連技術の現状

(1) 視覚センサ

- ・広いダイナミックレンジ／高解像度／多波長感度を有するイメージセンサ

例えば、広いダイナミックレンジセンサは、太陽光とトンネルのような明暗部分を同時に可視化可能とすることができる。そして高解像度センサは、0.1mm以下のひび割れなどを遠方から監視可能とし、センサの多波長化は、夜間を問わず物体の状態や植生を遠方から監視可能とする。加えてイメージセンサの超高速処理がなされれば、音や加速度や触覚情報までもイメージとして視覚化可能である。これらセンサは実現されていないものや研究開発され小型化されているものもあるが、実現されているものは数百万と高価格で一般に普及することは困難である。

- ・レーザレーダー／レーザレンジファインダ

ロボットのキー技術となりうるセンサである。視覚として画像と三次元情報が同時に取得できれば、環境を認識して行動する知能処理の基盤情報が取得できる。

これらはレーザ（あるいはLED）発信機と受光機があり、光学系や電気系、機械（駆動）系が一体としてセンサとして構成されている。高性能（屋内外：距離数m～kmでmm）なものは大きく、重量（例えば25～40cm、5～10kg）があると同時に高消費電力で高価格（数百万～1千万）であるため一般に普及されていない。Kinect（Microsoft製のジェスチャーや音声で入力するための周辺機器の名称）を低価格な普及版と捉えることができるが、近距離でしか利用できず精度が低い（屋内：距離1m以内で数mm）。エンターテインメントにはよいがロボットのセンサとして実用的ではない。チップにこの機能を組込むことが可能となれば革命的技術となる。

- ・高精度ジャイロ

ジャイロは回転運動で位置姿勢を、加速度計は直線的な動きを検知し、これらを統合した慣性航法装置（IMU）は、ロボットが室内、市街地、トンネル、地下などのGPS電波を受信できない状況下でナビゲーション（自己位置を推定、移動）するために必須の技術である。

このような環境では、Wi-Fi技術、光学技術、RFIDを利用したもの、ターゲットやランドマークを計測するものなど、多種多様な原理のものが研究開発、試行されているが、精度不足、インフラ、効率化の問題などがあり実用化には不十分である。

ジャイロセンサには機械式、光ファイバ式、半導体チップによるものなどがある。機械式や光ファイバ式は高精度であるが大型で重く、高消費電力、高価格（数千万円～）であり、軍需用途や航空機などの特殊用途しか使用されていない。半導体チップのものは小型、低価格、低消費電力でスマホなどにも利用されているが、精度が低くロボットの位置認識、制御に使用するのは困難である。

(2) 聴覚センサ

- ・音声認識

特にノイズの多い環境下での複数音声識別は最も重要であり、音源の方向を知ることで、

複数の話者の音源の位置を認識し音声を識別することが可能となる。音源方向を検知するためには、複数の小型マイクを多数設置することが有効である。

例えば、雑音の中から特定の音声だけを抽出する音響センサとして、MEMS 技術によりマイクと電子回路を集積化した小型マイクロフォンを多数設置したものや、マイクロフォンを集積化してアレイ状に配置したもの、音波を光学的に検出するものなど研究開発されている。光学的なものは、構造が複雑であったり、高精度な調整が必要とされる。

音声認識技術はまだ未成熟であるが、達成できれば社会的貢献度は高い。

- ・音による環境や構造物の診断検知装置の小型化（指向性の強い超音波発信器、高感度検出器など）

橋梁やトンネル、ビルなどの壁面の上や近傍を移動、飛翔することによって検査するための多種多様なロボットセンサが研究開発されている。例えば、実際に壁面をたたき、その打音をセンサにより読み取って解析する装置や、アコースティックエミッション（AE）と呼ばれる、材料に応力が加わる際に発生する弾性波を検出処理し診断するもの、超音波を発振してその波動を高感度に受信して解析するもの（超音波診断法）、光を照射させ、その反射光を分析することで内部の劣化を診断するもの（分光分析法）など多数ある。

(3) 触覚センサ

- ・2次元配置可能でフレキシブルな高感度センサ

より人間に近づいた柔軟な動作をさせるために、センサは一点を検出するものでなく面的に計測できる、指先や手のひらや体などの曲面を含む形状に多数のセンサを2次元状に配置した分布型触覚センサが有効であり、位置だけでなく圧力や温度が検知できると有効である。曲面を持ったロボットにこのような触覚センサを取り付けるには、伸縮性や柔軟性が必要でありゴムやフィルム状のものなど様々な素材が研究開発されている。

例えば、歪変化に反応する圧電素子であるフィルム状のもので直接歪を計測するものや、表面を弾性体で覆った超音波センサ式分布型触覚センサといったものもある。物体が接触したときの弾性体の変形によって触覚イメージを出力する。

そして、異なる種類のセンサを搭載して、同時にさまざまな触覚情報を得るために、例えばフレキシブル基板上に温度センサ、曲率センサ、熱伝導率センサ、硬さセンサを搭載したマトリクス状の触覚シートなども研究開発されている。

- ・物体を認識する触覚センサ

触覚センサが物体に接触したときの共振周波数の違いから物体の材質を識別し、また物体内部に異なる物質がある場合にその有無を判別するものや、圧電素子を物体に接触させたときに生じる電圧の違いから物体を識別するもの、圧電素子で超音波を発生させ、反射波の到達時間と物体の電気特性から物体の材質や厚さ、硬さを検出するものなどもある。

(4) 嗅覚センサ

- ・ガスセンサ

既に、実用化されているガスセンサとしては、「半導体式」「接触燃焼式」「電気化学式」などがあり、それぞれ検査対象ガスの濃度範囲や操作が異なる。これらは、既存のガス漏

れ報知器などに利用され、ppm レベルから 1% 程度のガス濃度を検知する感度を有する。このうち、口臭チェッカーや臭気測定器などに使用されている嗅覚センサ（匂いセンサ）には「半導体式」ガスセンサが用いられることが多く、高感度化、小型化、低コスト化、耐久性向上の開発が進められている。また、複数物質で構成される『ニオイ』を数値に変換、データ化するために、多種の半導体センサを組み合わせる技術の開発が国内外で激化しており、業界標準となる計測システムの確立が競われている。この技術により、これまで国際的な基準指標の無かった『ニオイ』をデータ化することで、数値による『ニオイ』の比較が可能となり、健康診断や食品管理への用途が広がると考えられている。国内では、吉川 元起 准教授（物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクニクス研究拠点 MANA 独立研究者／筑波大学）が開発した MSS（Membrane Surface stress Sensor）が最も実用化に近く、産官学共同で新たな研究体制「MSS アライアンス」を 2015 年に立ち上げ、製品化に向けた活動が進んでいる。

・高感度の嗅覚センサ

現状の半導体センサでは ppm 以下の物質測定ができないが、より低濃度の感度を有するセンサであれば、口臭原因物質の特定（数百 ppb - 数 ppm）、一般的な環境中の悪臭原因物質の特定（数十 ppb）、麻薬や爆発物の探知（数 ppt）、体臭や呼気からの個体識別、病気診断（ppt - ppb）など応用分野も拡大する。そのため、既存センサとは異なる独創的な新規センサ技術の開発も進められている。

・バイオセンサ

近年では、バイオサイエンス分野との融合によるバイオセンサに注目が集まっている。開発の方向性の一つとしては、生物の嗅覚機構（人やイヌ、線虫などの嗅覚、蛾の触角）を模倣したセンサで、主には嗅覚受容体と標的ニオイ分子との結合をイオン電流に変換する信号を利用する。国内では、竹内 昌治教授（東京大学生産技術研究所 マイクロメカトロニクス国際研究センター）の研究室において、匂い受容体を発現した細胞を用いたロボットの匂いセンサによって、匂い物質を選択的に高感度で検出することに成功している。2015 年からは NEDO の委託事業として「次世代ロボット中核技術開発／革新的ロボット要素技術分野」の研究開発項目「革新的なセンシング技術（スーパーセンシング）」において「人検知ロボットのための嗅覚受容体を用いた匂いセンサの開発」が進められている。その他、バイオ分野でこれまで低濃度物質を測定するために開発・利用されてきた技術を応用した嗅覚センサがある。例えば、都甲 潔教授（九州大学大学院システム情報科学研究院 情報エレクトロニクス部門）によって開発された超高感度匂いセンサは、目的の匂い物質と選択的に結合する抗体と表面プラズモン共鳴センサを組み合わせ、抗体の特異性の高さによってイヌの鼻を超える ppt レベルの検出感度を有する超高感度を実現している（世界トップレベルのセンサ感度といえる）。バイオセンサは多様な開発が進んではいるが、実用化するには耐久性やコスト、生産技術でのさらなるブラッシュアップが必要である。

付録5 専門用語解説

アーキテクチャ

ここでは、マイクロプロセッサなどの集積回路を構成するときの、基本的な設計思想を指す。ロボットの自律制御や協調動作、画像認識、状況判断などにおけるデータ処理の方法に関して重要になり、より効率的に動くように、これまでのコンピュータの基本設計に加えて、脳型コンピュータなどの新たな基本設計が求められる。

アクチュエータ

物理的な動作をする装置であり、電磁気力、圧電効果、静電力、油圧、空気圧を利用して、回転運動や直線運動を引き起こす。産業用ロボットでは電磁モータが主流だが、サービス用ロボットでは、空気圧や油圧など多様なアクチュエータの開発が期待される。

圧電素子

圧電体に加えられた力を電圧に変換する、あるいは電圧を力に変換する、圧電効果を利用した受動素子。俗にピエゾ素子ともいわれる。アクチュエータ、センサとしての利用の他、アナログ電子回路における発振回路やフィルタ回路にも用いられている。サービスロボットに必要な新たなアクチュエータの一つとして期待される。

アルゴリズム

アルゴリズムは、計算機の利用を前提とした効率的な計算法を示す。データ構造+アルゴリズム=プログラムといわれ、プログラムの双対を成す。情報システムに比べて資源・時間制約の厳しいロボットや組み込みシステムでは、要件を満足させるために、速度以外にも記憶容量、精度や厳密性、並列度・分散度などのさまざまな尺度をトレードオフした設計が重要なキーとなる。

移動ロボット

ここでは自律的に移動できるロボットを指し、外部からケーブルなどによるエネルギーの供給を受けることなく移動することができる。

サーボモータ

モータ軸の回転角度や回転速度を検知する機器（エンコーダ）が組み込まれたモータであり、フィードバック制御により正確に位置決めができる。このサーボモータにより工作機械や産業用ロボットが精度の高い作業が可能になっている。

ジャイロ

物体の角度（姿勢）や角速度あるいは角加速度を検出する計測器ないし装置。船や航空機やロケットの自律航法に使用される。ロボットの姿勢制御に重要な部品である。

自律ナビゲーション

出発地から経路地、目的地までの航行を自動で導く方法、または船舶や航空機、自動車

などを目的地まで、自律して導く役割をするもの。ロボットの自律動作に必要な機能の一つである。

ソフトロボティクス

ソフトロボットとは、シリコンなどの柔らかいボディや柔軟なアクチュエータを持つロボット。また、ソフトロボティクスとは、ソフトロボットの設計、構築、作動などに関わる技術を研究する学問領域で、近年注目される。剛健な骨格をもつ従来のロボットとは異なる挙動ができるため、不特定な材質や形状のものを持つことができる、平坦ではない場所を移動できるなど、広範囲な応用が期待されている。

ディープラーニング

多層のニューラルネットワークと一群の学習制御手法により構成された機械学習の技術。機械学習のもとになる特徴量のセットを予め人が設計せずに学習させることができる。当初は画像認識において他の機械学習手法と比べて高い認識率を実現し注目を集め、さらに動画像の認識など時系列データの取り扱いができるようになり、ロボットの学習や制御への活用が進んでいる。

トルク

回転軸を中心に働く力の大きさと回転軸の中心からの距離の積に相当する物理量。ねじりの強さともいえる。高速動作や重量物を扱う際などに大きなトルクを必要とする。大きなトルクを発生させる必要がある局面がある一方で、人と協働するロボットでは安全性の観点からトルクを制限値以下に抑えたり、一定のトルクで動作を行ったりといったことが求められることも多い。

マイクロプロセッサ

コンピュータ、家電製品や工業機器内で基本的な演算処理を行う、いわばコンピュータの心臓部に当たる半導体チップ。ロボットではセンサ入力からの特徴抽出、認識処理、状況判断、駆動系の制御など様々な用途で利用される。

マニピュレーション

「ロボット及びロボティックデバイス」-用語 (JIS B 0134) において、マニピュレータは、互いに連結され相対的に回転または直進運動する一連の部材で構成され、対象物（工作物、工具など）をつかみ、通常、数自由度で動かすことを目的とした機械と定義される。従って、対象物をつかみ、動かすことがマニピュレーションである。

モジュール

いくつかの要素部品が集まって機能的にまとまったものであり、システムを構成するときの組み合わせや交換を容易にする。例えば、イメージセンサ、ジャイロ、レーザーレーダーなどのセンサとデータ処理チップ、入出力インターフェースなどを一体化してセンサモジュールとすることで、多様なロボットへの組み込みが容易になる。

AI（人工知能）

コンピュータを使って人工的に人間と同様の知能を実現しようとする技術。産業用ロボットでは、対象物の認識、動作の制御、一連の動作の学習などに人工知能が使われているといえる。さらに、不確定性の高いオープンな環境で稼働するロボットでは、より高度な環境の認識、行動の計画策定と制御において人工知能の重要性が大きくなる。

CPS

Cyber-Physical Systems の略称。サイバー世界での情報処理と物理的世界へ影響を与える組込システムなどが密接に結びついているシステム。特に、交通、エネルギー、社会インフラなどにおいて、環境情報や稼働情報をサイバー世界の高次レベル情報で処理し、それに基づいた状況に適合した動的制御や全体最適化のためのシステムを指すことが多い。

MEMS

Micro Electro Mechanical Systems の略称であり、シリコン基板上に集積回路のプロセス技術を活用して、電気で動く微細な機械的要素部品を形成する技術であり、センサ、アクチュエータ、フィルタ、ジャイロなどが構築できる。ロボットのセンサの小型化・低価格化に重要な技術である。

RFID

ID 情報を埋め込んだ RF タグから、電磁界や電波などを用いた近距離（周波数帯によって数 cm ～数 m）の無線通信によって情報をやりとりするものや技術全般を指す。ロボットの周りの環境情報を得るのに有効な技術の一つである。

■戦略プロポーザル作成メンバー■

総括責任者	： 曾根 純一	上席フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
リーダー	： 馬場 寿夫	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
メンバー	： 島津 博基	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	鈴木 慶二	フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)
	西野 恒代	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学ユニット)
	宮下 哲	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
	茂木 強	フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)
	岩見 紫乃	研究員	(情報企画部情報分析室 ソリューション提供担当)
	高地 伸夫	主任調査員	(戦略研究推進部 ICT グループ)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願い致します。

CRDS-FY2015-SP-03

戦略プロポーザル

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～

STRATEGIC PROPOSAL

Innovations of Basic Technology for Robots through Integration of Nanotechnology, Information Technology, and Mechanics

- Toward Smart and Human-Friendly Robots -

平成 28 年 3 月 March, 2016

ISBN 978-4-88890-488-9

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
ナノテクノロジー・材料ユニット
Nanotechnology / Materials Unit, Center for Research and
Development Strategy,
Japan Science and Technology Agency

〒 102-0076 東京都千代田区五番町 7 番地
電 話 03-5214-7481
ファックス 03-5214-7385
<http://www.jst.go.jp/crds/>
© 2016 JST/CRDS

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。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC

CT CTCGCC AATTAATA

TAA TAATC

ISBN 978-4-88890-488-9

TTGCAATTGGA CCCC

AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC

ATAAGA CTCTA ACT CTCGCC

AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTA ACT CTAAT A TCTAT

CTCGCC AATTAATA

ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTA ACT

CTCGCC AATTAATA

TAAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTA ACT

ATTAATC A AAGA C CT

GA C CTA ACT CTCAGACC

0011 1110 000

00 11 001010 1

0011 1110 000

0100 11100 11100 101010000111

001100 110010

0001 0011 11110 000101

