

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

2015年12月4日（金） 開催



エグゼクティブサマリー

本報告書は、国立研究開発法人 科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が平成 27 年 12 月 4 日に開催した科学技術未来戦略ワークショップ（WS）「ナノ・IT・メカ統合によるスマート小型ロボット基盤技術」に関するものである。

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、災害やテロへの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。

本ワークショップでは、現在あるいは将来のロボット開発の技術的課題や、新たに必要となる科学技術、その開発を促進するための政策などの議論を行い、今後の開発と普及が期待されるサービス系・見守り系のロボットを中心に、スマート小型ロボット基盤技術強化のために有効な研究開発戦略策定の一環として開催した。スマートロボットを利用するサービス分野に携わる産業界の問題意識や要望、動力系、センサ系、制御系を中心とする要素技術・基盤技術の新たな動向などの話題提供を基に、総合討論で戦略的に取り組むべき重要な研究開発課題、技術統合による機能実証やモジュール化、システム化を進めるプラットフォームの仕組み、研究拠点の体制、人材育成、社会受容などについて議論した。

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が必要なこと、また、情報通信、ナノテク・材料、バイオなど異分野の研究者、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必要なことを、CRDS の仮説として示した。

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として、産業用ロボットでリードしている日本の課題、Horizon2020 や National Robot Initiative など欧米でのロボット研究開発の活発な動き、動く機械のロボットではなく産業的なインパクトが大きなロボット技術として捉えることの重要性、日本のロボット関係プロジェクトの概要、ロボティクス分野の重要研究開発課題、研究開発における戦略性を持ったグランドデザインの必要性、災害対応のロボット技術開発の事例などが紹介された。

サービス視点からのスマートロボット基盤技術開発への期待としては、下水道におけるロボット利用、警備・セキュリティなどの分野におけるサービスロボット、生活支援用のロボットについての現状と今後の課題が紹介された。下水道におけるロボット開発は、人材確保、作業の効率性、安全性の観点から現場の要請に基づいて行われており、今後も下水道の調査、診断、建設、維持管理、情報管理など広範囲の業務にロボット技術を導入に取り組んでいく。警備・セキュリティ・介護など人々の生活を守るディフェンスの領域においてもオフェンスの領域にある産業用ロボットと同様に、ロボットにサービスの一部を

担わせ、人の力を最大限に増幅する技術の開発が重要である。生活支援の領域における研究開発の例として、四肢の不自由な人の自立生活を支援するための一つの腕を持つ小型ロボットの開発および研究プラットフォームとして活用の取り組みが示された。

新たな要素技術・基盤技術としては、手術支援ロボットの要素・制御技術、新たなアクチュエータ技術、ロボット用のセンサ、生物に学ぶ制御技術・自律制御技術、認識や判断に優れた脳型 LSI の回路・アーキテクチャに関するものがあつた。手術支援ロボットは内視鏡を用いた低侵襲手術が注目され、高精細画像、小型・軽量でセンシング機能や柔らかさを持つアクチュエータ、人間と機械の協調制御・ナビゲーション、配線を無くす無線化などの要素技術開発が今後期待される。新たなアクチュエータ技術としては、空気圧を利用したソフトアクチュエータや人工筋肉、油圧を利用した小型高出力のアクチュエータなどが注目される。ロボットには多くのセンサが使われるため、ロボット用センサは小型・高精度に加えて、低価格が必須であり、現在は高価な姿勢制御用のジャイロや位置計測用のライダー（LIDAR）を桁違いに低価格化する技術開発、およびマーケットと技術の特性に合った開発戦略が重要である。制御技術・自律制御技術においては、ロボット自身と環境あるいは場との関係で制御を考えることが重要であり、脳神経系による制御ともに、身体と場によって生まれる生物の制御則を理解し利用することが必要になる。脳型 LSI によるコンピュータはハードとソフトが一体化して認識・学習・超並列処理・自律分散処理などの機能を持ち、想定外のことが起こっても対処可能なものを目指しており、省エネルギー、配線、集積化を考慮した材料・デバイス、回路・アーキテクチャの開発が重要である。

総合討論では、これまでの発表や質疑を踏まえて、システム技術と要素技術、ハードとソフトの開発のやり方、ロボット開発の仕組みの国際比較、欧米の政策と日本、提案の方向性、研究開発の推進の仕組み・体制、プロジェクトのビジョン・目標設定に関して議論を行った。その結果、以下のような方向性が示された。

- ・システム統合と要素技術・基盤技術開発とが常に相互作用するロボット開発
- ・マーケットニーズを理解して要素技術開発を進めるプラットフォーム作り
- ・基礎研究、特定の技術応用、実用技術が混在し、戦略的なプログラム全体のデザインと、強いマネジメントの下での推進
- ・材料技術のように日本の強い技術をコアにしたロボット技術開発
- ・動力系、センシング系、制御系の要素技術・基盤技術が混然一体となるプロジェクト
- ・産学連携でモジュールイヒ・システム化を進めた技術のアカデミアへの蓄積
- ・トップダウン的な推進だけでなく、地方の研究者のアイデアを持ち寄れる仕組み作り

ワークショップでの議論を踏まえ、CRDS では今後国として重点的に推進すべき研究領域、具体的な研究開発課題を検討し、研究開発の推進方法も含めて戦略プロポーザルを策定し、関係府省や関連する産業界・学界等へ提案する予定である。

目次

エグゼクティブサマリー	1
1. ワークショップの趣旨説明 曾根 純一、馬場 寿夫 (JST-CRDS)	1
2. 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)	7
3. サービス視点からのスマートロボット基盤技術開発への期待	19
3.1 下水道におけるロボット利用の現状と今後 一東京都の事例一 岩佐 行利 (東京都下水道サービス)	19
3.2 豊かな未来を創るサービスロボット 小松崎 常夫 (セコム)	25
3.3 生活支援ロボットH S R (Human Support Robot) のプラットフォーム展開 山本 貴史 (トヨタ自動車)	30
4. 新たな要素技術・基盤技術	35
4.1 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)	35
4.2 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)	41
4.3 ロボット用センサの課題 田中 秀治 (東北大学)	46
4.4 身体と場に埋め込まれた「知」を探る 大須賀 公一 (大阪大学)	53
4.5 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)	58
4.6 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)	64
5. 総合討論 (ファシリテータ: 田中 秀治)	69
付 録	81

1. ワークショップの趣旨説明

曾根 純一、馬場 寿夫（科学技術振興機構 研究開発戦略センター）

このテーマを選んだ理由の一つは、ナノテクノロジー、IT、メカニクスなどの異分野技術の融合・統合により、新たな技術の創出を図り、このような新しい技術シーズを拾い上げてロボットに活用することで、ロボットの可能性を追求したいことにある。もう一つは、人類は道具をうまく使いこなして、ほかの生物とは全く段違いの進化を遂げてきたが、ある意味でロボットはその究極と考えられるためである。人間の能力を超えたパワーを手に入れたり、年をとって衰えた能力をサポートすることができ、これは技術のメガトレンドと考えている。ロボットは経済産業省、NEDOを中心に様々な政策がとられているが、長期的なスパンで科学技術として可能性を追求していく必要があり、大学も含めて日本全体の技術の底上げをしたいと考えている。

このワークショップは、スマート小型ロボットの基盤技術にフォーカスして日本の戦略などを議論する。

ロボットの歴史としては、産業用ロボットが1960年代に作られ、今は多様な分野に応用されようとしている。1960年代当時から、産業用ロボットが最初に実用化され、その後インフラ点検や家庭用が実用化されると考えられていたが、それほど簡単には進まず、最近になってドローンやルンバが登場し、インフラ点検や家庭用が注目されるようになってきた。これからはサービス系の利用が活発になっていくと考えられ、ロボット産業の市場規模は2035年には10兆円になりその半分以上がサービス分野と予想されている。また、国としてもロボット新戦略を策定してロボット技術を社会に普及させていこうとしている。介護・福祉、警備など新しいサービス分野への展開が期待されている。このような分野で使われるロボットはスマート化、つまり知能を持った形になっていく。また、人との共生ということが一つ重要なキーワードになる。

最近のロボットの開発は機能実証や制御システム（ソフトウェア）の開発が中心になっている。これらは実用化にとって非常に重要であるが、将来の日本の産業を考えると、新しいサービスに加え、それを支える部品、材料、デバイスなどもしっかりやる必要があると考えている。部品やデバイスに関しては、ネットワークやマイクロプロセッサの技術は非常に進んだが、動力系あるいはセンシング系はそれほど進んでおらず今の課題と捉えている。これらを発展させるためには、ナノテクノロジー・材料分野、情報通信分野、バイオの分野などの技術を活用して新しい技術を作っていく必要がある。最近の動向として、欧米では生物の持つ機能や構造に学ぶことが活発になっている。また、今までの硬い金属を使う代わりに柔らかい材料を使うソフトロボットティクスといったものも活発化している。ロボット開発は大きなトレンドになっているが、その中でスマート化、高性能化、低価格化、軽量化、安全性の向上に資するような基盤技術を作っていく必要がある。

図1-1はロボット関係の現在の国のプロジェクトをまとめたものである。上部は応用分野で、下部は基盤的な分野であり、横軸は時間軸を示している。我々は10年から20年を見据えて、そこで必要になってくる基盤技術を中心に考えたい。ただし、部品や材料

ロボット関係の主なプロジェクトと本提案の位置づけ

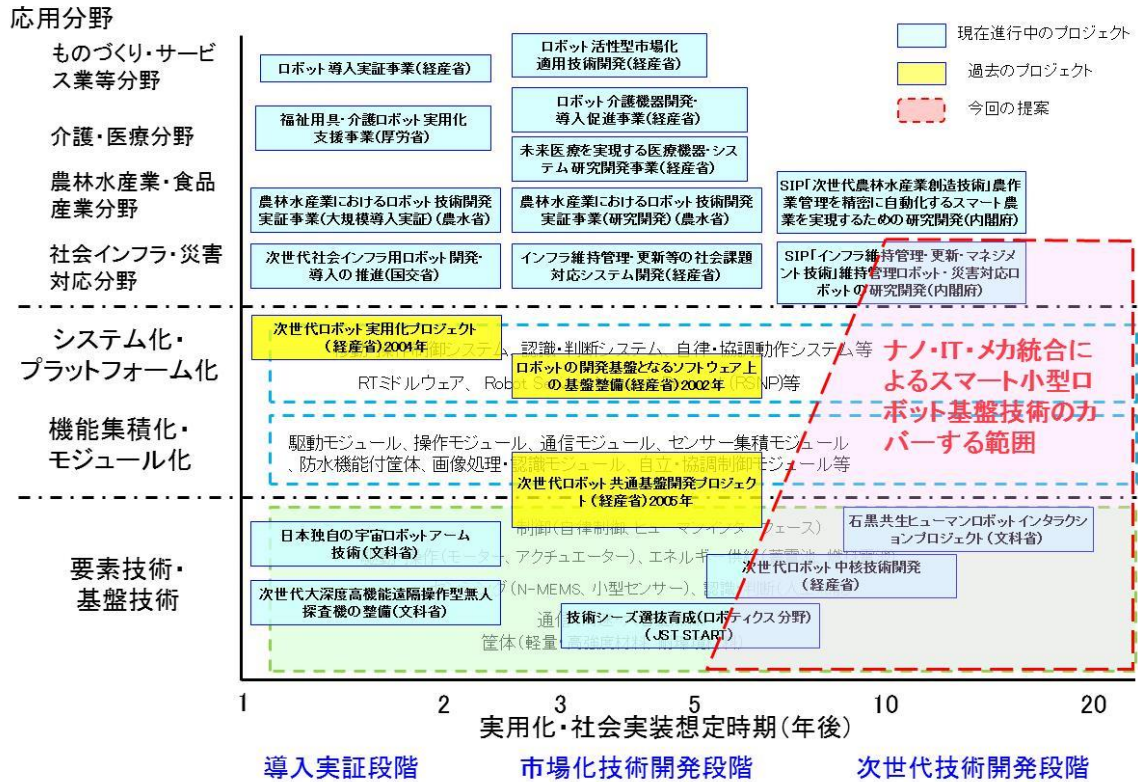


図 1-1

ロボットの全体マップ

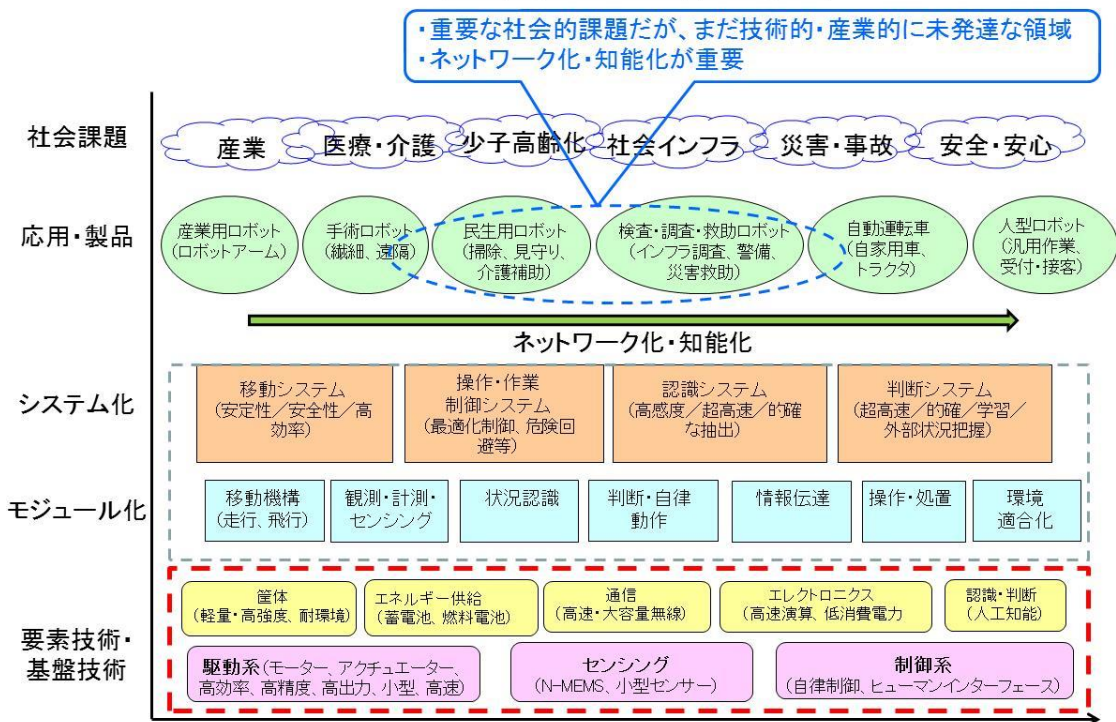


図 1-2

を開発しても実用にならないと意味がないので、どういう応用分野に使われるかということも含めて、全体として考えていきたい。海外も米国を中心にロボットに対する関心が高まっているので、日本としてもしっかりやる必要がある。

次に、提案の方向性について紹介する。図 1-2 はロボットの全体的なマップを示したものである。上部に社会課題、応用・製品に関わるいろいろなタイプのロボットを示している。産業用ロボットから民生用ロボット、人型ロボットなどいろいろあるが、注目しているのは民生用あるいはサービスで主に使うようなロボットである。サービス・見守りといったところを中心に、そこで必要となる要素技術・基盤技術、システム化・モジュール化技術にフォーカスして提案したいと考えている。

図 1-3 に要素技術・基盤技術として取り組むべき技術課題をまとめた。ロボットの三大要素として制御技術、動力系技術、センシング技術があるが、サービス用ロボットを考える場合はこれらだけでなく、その周辺にある人工知能、ネットワーク技術、材料・構造設計、エネルギー供給などの技術も含めて開発する必要がある。そのためには、ロボット分野で閉じるのではなく、情報通信分野、ナノテク材料分野、バイオ分野などの人たちと一緒に手を組んで新しい技術を開発することが必要である。また、そこで新しい技術を開発したら、その技術をロボット分野だけではなく情報通信分野や他に分野に展開していくような活動が重要になると考えている。

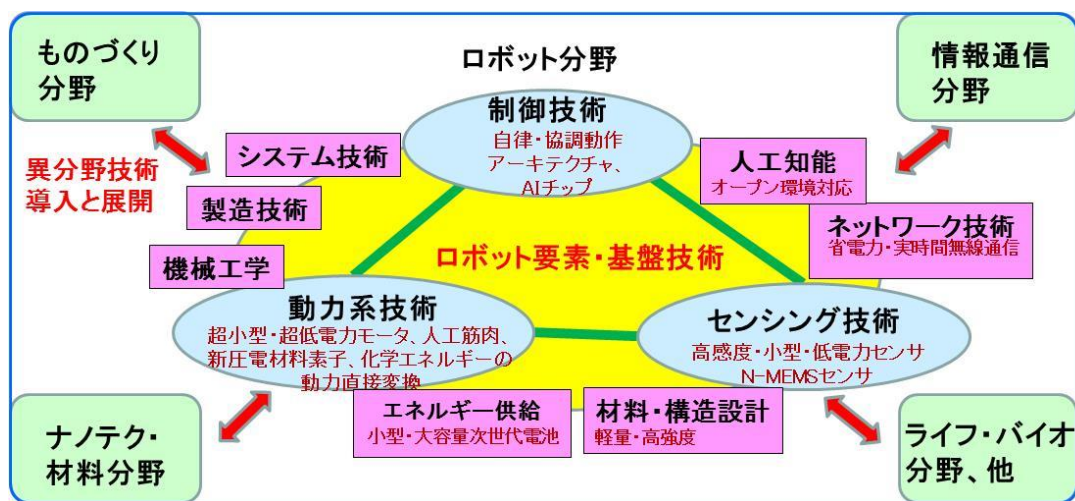


図 1-3 必要な要素技術・基盤技術開発

具体的な技術課題についていくつか例を述べる。動力系のアクチュエーターでは、高効率化、高出力化、小型軽量化というのが重要になると考えている。現在は電磁モーターを中心にロボットが開発されているが、それ以外の新しい原理に基づくものに対しても注目する必要がある。例えば、ソフトアクチュエーターや柔軟（ソフト）なロボットという視点での新しい駆動機構も重要と考えている。センサに関しては、小型化や低価格化が重要になる。サービス用のロボットでは非常に多くのセンサが使われるようになるので、ロボットの価格を抑えるためにはセンサの低価格化が非常に重要である。特に、現在使われている高性能のジャイロやレーザーレーダーなどはかなり高価であり、それを1桁～2桁価格を下げていく必要がある。制御に関しては、自分の状態を周囲の環境との関係でうまく制

御する必要がある。これに関しては、人工知能が注目される。また、生物は高度な頭脳を持っていないくとも、素早く的確に動くことができるので、これを模倣してうまく利用することなども重要になると考えている。

このような要素技術・基盤技術などの開発を効率的に行い、実際に使えるものにしていくためには、具体的な実行の仕組みを考えておく必要がある。大学の中で閉じて研究し、部品を作っているだけではもちろんだめである。産業界が使いそうだと思えるように、モジュール化やシステム化のレベルまで示すことが重要である。図 1-4 にプラットフォームの構築について示す。具体的なイメージはまだできていないが、アカデミアと産業界をつなぐ「ロボット機能実証・利用プラットフォーム」を示している。ここで、要素技術・基盤技術開発を中心に研究開発する大学の人たちと、実際にサービスや製品を提供する企業の人たちとが密な交流をし、社会が実際に欲しているものを作っていくことが必要と考えている。後で検討中のものについて説明する。

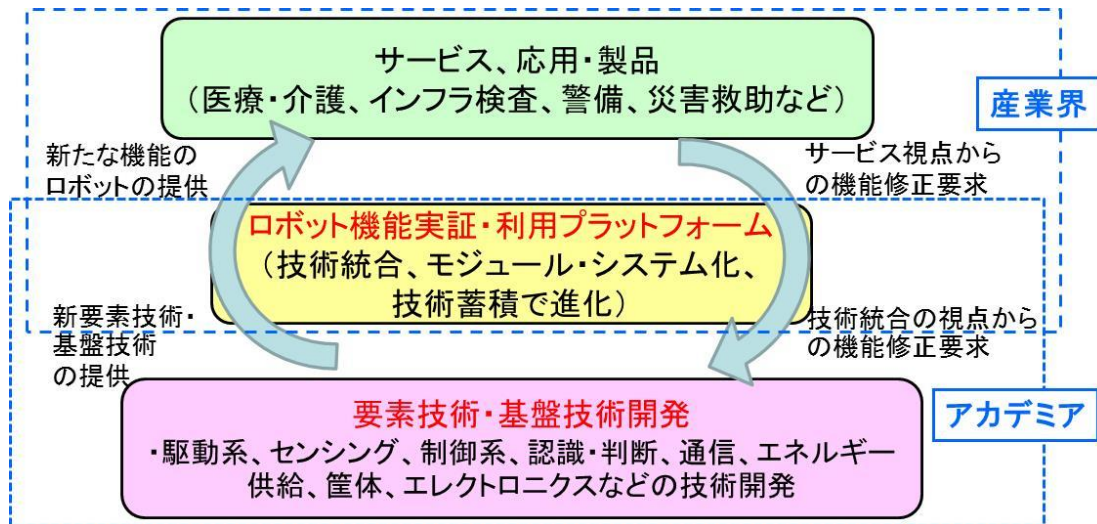


図 1-4 プラットフォームの構築

研究開発の推進方法については、何らかの研究拠点が必要と考えている。1カ所に集まってやることも大事かもしれないが、ネットワーク的なものを有効に活用して、いろいろな人が連携する仕組みを作り、そこでやっていくような「オープンな研究開発ネットワーク型拠点」の構築が必要と考えている。そこでは、将来を担う人たちをうまく育成していくことや、異分野の人たちをそこに組み込むことが重要になる。

研究課題の設定については、サービスの視点が重要であり、サービスの全体を分解してプロセスにし、ボトルネックになっているところを明確にし、それに対する技術開発をやることが重要と考えている。また、ある程度のストレッチ目標が必要であり、新しい技術を開発しないとできないものを設定して取り組ませることが必要と考えている。

コミュニティの形成も非常に重要であり、ロボットのコミュニティだけではなく、情報通信分野、ナノテク・材料分野、バイオ分野などの人たちをうまく組み込んでいく必要がある。ここでは、関連する様々な学会が連携して新しいコミュニティを作っていくことが期待される。

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)

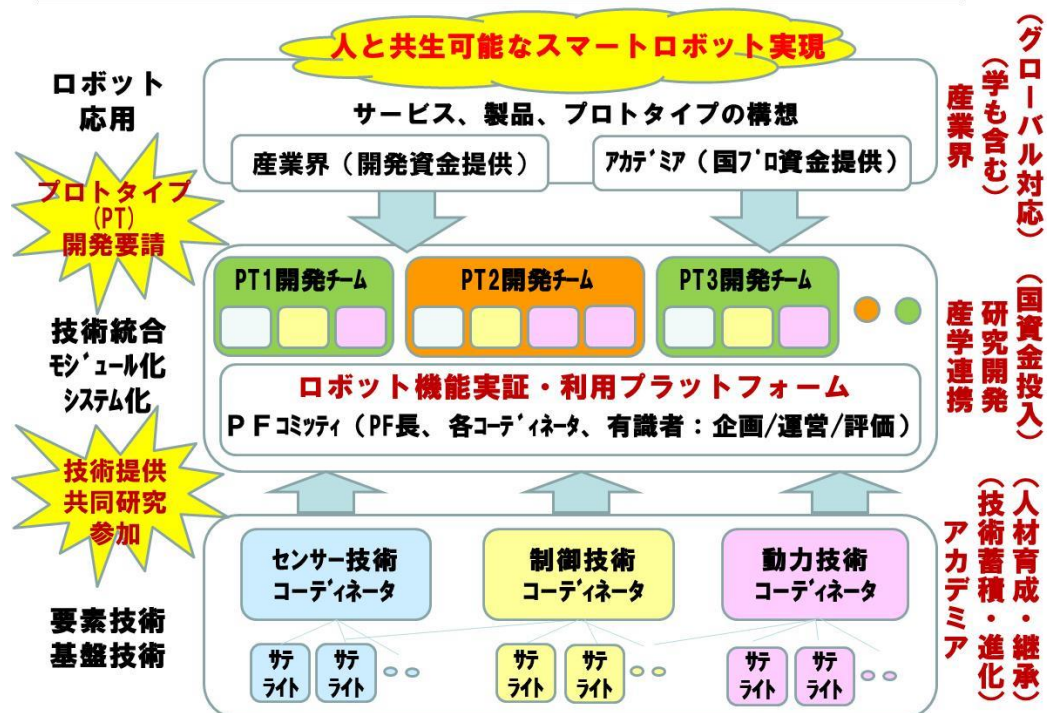


図 1-5

図 1-4 のプラットフォームを抽象的に語っているだけではなかなか前へ進めないで、総合討論での議論のたたき台として我々がどんなイメージで捉えているか図 1-5 を用いて示す。ここでは、アカデミア、産学連携の場合、産業界が三位一体になって進む必要があると考えている。図の上部に示しているように、最終的には人と共生可能なスマートロボットを実現していくことになるが、そこには多様なサービス、製品、プロトタイプがある。サービス系のマーケットがどうなるのか、ロードマップのない世界である。一方で、下部のレイヤーにおける個々の技術については、日本全体に目を通せば、多様な技術が存在している。それらのインタラクトする場をどう作っていくか考える必要がある。

一つの構想をここで説明する。一番下のレイヤーのアカデミアでは技術が蓄積され、実際の研究開発活動をするのは産学連携のプラットフォームの場合と考える。プラットフォームで鍛えられた新しい技術がアカデミアへ戻ってきて蓄積され、さらに技術が進化して新しい課題に対応できるようになるように、ポジティブなフィードバックがかかり、日本全体で参加できる仕組みを作りたい。現在、ロボットの様々なプログラムが走っており、ロボットに関してエース級の大学の先生方が参加しているが、日本全体に目を通せば、多様な技術が様々なところにあるので、それを活用したい。

何を開発するかは、産業界の方から様々な提案がプロトタイプという形で出てくる。それがプラットフォームの場に落ちてくると、メンバーを集めてプロトタイプ開発チームを構成することになる。様々な要請に対して、そのプログラムを実行するのが日本としては是非かの判断、技術がどこにあるのかの把握、オールジャパンでのベストソリューションのチーム構成の提言などができるような仕組みを作りたい。そのためには、このプラットフォームを構成するメンバー、特にコーディネータが日本中にどんな技術があるのかを

知っておく必要がある。それぞれの大学のサテライトがその技術を登録することで、三つの領域（センサ、動力、制御）の日本全体の技術データベースを構築し、コーディネータがいつもこれを把握し、要請に対してベストの形でチーム構成ができるような形にしたら良いと考えている。このように、バーチャルな組織になっている。

プロトタイプ開発チームを開始するときには、国からの資金を投入してサポートする。それを3年間程度の時間スケールで行い、筋が良く日本にとって大事に育てていく必要があるものに関しては、さらに資金を追加して大型化しアンダーワンループの拠点にすることも考えられる。このプラットフォームは技術統合の場であり、要素技術・基盤技術と様々なアプリケーションとがインタラクトし、技術が進化していく。また、これらのチームも新陳代謝していくと考えている。このプラットフォームに呼ばれる大学の人たちの技術が高まり、それが蓄積されて次のステップへ進むような形の仕組みができることを期待している。

2. 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）

私の専門は、脳、身体モデリングからサービス科学までを含めたサービスロボティクス研究である。3.11以来、原子力プラントの廃炉とか災害対応にも関わるようになったので、それらも含め、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を述べる。

ロボットの歴史は非常に古い。プログラマ的なものが導入されたのは1960年代の第1世代で、センサフィードバックが進んだのが1970年代である。産業用ロボットが開発され、ロボット産業が一気に躍進したのが1980年代で、産業用ロボット元年と呼ばれている。その後、サービスロボットの時代に入りつつあるわけだが、実際には普及が進んでいないというのが現状だと思う。

ロボットは、パーソナルロボットや産業用ロボットなどに分類される。産業用ロボットにもさまざまな用途のロボットがある。また、自律・移動型ロボットや非製造業用ロボットの研究開発も進んでいる。しかし、ロボット産業の中心になっているのは、いまだに産業用ロボットであり、これらがロボット産業の主流になっている。

日本のロボット産業は、ロボットの定義にもよるが、年間、大体7,000億円程度の比較的小さな規模で推移しているが、今後さらに飛躍するということが期待されている。

これまで日本は、ロボット産業においては常にリーディングカントリーであり、稼働台数と出荷額においてずっと1位を保っていた。最近では、それが危うい状況になってきている。ただし、ロボットの研究開発は非常に活発で、他の学会での会員数が減っている中、ロボット関係の学会や部門は会員数が維持されている。論文のアクセプト数も日本はまだ高い。最近、ロボット研究は中国と韓国でも非常に活発になっているが、中国の論文の採択率はまだ高いとはいえない状況である。日本のもう一つの特徴は、ロボット教育も非常に活発であることで、日本発のロボカップなど、さまざまなロボットの競技会が頻繁に開催されている。

日本の産業用ロボットの稼働台数は2006年に35万台（IFR統計より）だったものが今は31万台ぐらいいとどまっていて、中国とか韓国がそれに迫る勢いで台数を増やしている。EUも合計すると既に日本を抜いたといわれている。2017年には中国が日本の保有台数を抜くだろうと報道されている。

世界のロボットの研究開発動向を紹介する。EUに関しては、今、Horizon2020やその前身であるFP7でロボット関係の研究プロジェクトが多く立ち上がった。また、アカデミアを支援するEURON、ベンチャー企業・企業を支援するEUROPというシステムにより欧州の研究者はファンディングを受けながら研究開発をしている。また、PPP（パブリックプライベートパートナーシップ）も非常に活発で、産学の連携によりビジネスにつなげようとしている。

最近、特に注目を浴びているのはドイツで提案されているIndustrie4.0である。ロボットや工場がネットワークでつながって、いわゆるIoTやCPS（サイバーフィジカルシステム）でつながることによって効率がさらに上がる第四次産業革命だと提案されている。

米国はNational Robot Initiativeをオバマ大統領が推進しており、そのメインの概

念は Collaborative Robots である。Co-Defender、Co-Inhabitant、Co-Explorer、Co-Worker という人間とのパートナーとしてのロボットが社会に浸透し、いろいろな場面で役に立つことを目指した研究開発が進んでいる。NSF などがロボットの研究開発を支援しているが、最近、特に International Collaboration を強調しており、日本の多くの研究者にも声がかかっていると思う。DoD が軍事ではなくて基礎研究にファンディングをしていて、これを受けている日本の大学でもある。DARPA は Robotics Challenge を開催した。2015 年に決勝が行われ、韓国のチームが優勝した。医療とか生活支援に関しては NIH がファイナディングをしている。特に最近、目立ってきた動きは、Google とか Amazon などの企業が、ロボットの研究開発をしながら、新しいビジネス展開を目指している。かなり多くのロボット関係の企業が Google に買収されたり、日本人の優秀な研究者が Google に Head Hunting されたり、就職するというようなケースが増えている。アメリカでも国として、危惧する声がある。

韓国はサービスロボットにファンディングしているが、まだ大きなビジネスにはつなげていないようである。中国は特に産業用ロボットに力を入れているように見える。863 Project は、1986 年 3 月に始まった科学技術重点化方策であり、これによるファンディングが続いている。ロボット関係のプロジェクトでは、かなり恵まれた環境で研究開発が行われているケースがある。ただ、前述の通り、研究レベルとしてはまだ発展途上である。

2015 年 9 月にハンブルグで IROS¹ というロボットに関する大きな国際会議が行われ、そのときの Government Forum では、各国がどういったファンディングをしているかという話があった。EU の全ての国のファンディングの状況がネットワーク上に公開されている²。

2035年に向けたロボット産業の将来市場予測

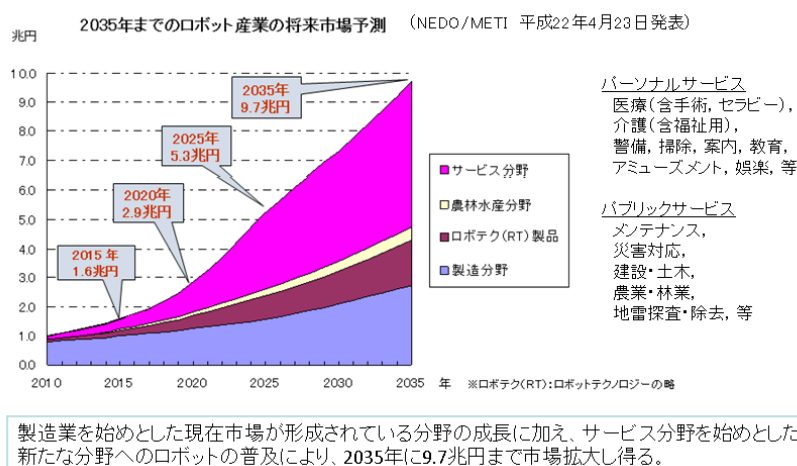


図 2-1

1 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems

2 <https://lecture2go.uni-hamburg.de/veranstaltungen/-/v/18338/>
<https://lecture2go.uni-hamburg.de/veranstaltungen/-/v/18339/>

日本の話に戻る。図 2-1 は経産省が行っている市場予測である。現在約 7,000 億円のロボット産業が 2035 年には 10 兆円に伸びるという予測である。特にサービス分野の伸びが非常に大きく期待されている。パーソナルサービスとパブリックサービスの両方が含まれている。パーソナルサービスとしては、医療、介護、警備、掃除、案内、教育、娯楽が含まれる。またパブリックサービスには、メンテナンス、災害対応、建設、農業といったものが含まれる。サービス分野にはこれらがすべて含まれる。

私は、ロボットとロボット技術とを異なるものと捕らえている。ロボット技術は、RT と呼ばれる。経産省では、センサ、知能・制御系、駆動系、この三つをもっているものは全部、ロボットと定義している。2 年に一度募集されるロボット大賞では、これらが含まれていれば応募してよいとされている。

RT というのは、もちろん、IT、ICT に対比した形で出てきた言葉である。RT は、IT、ICT に加え、センシング、制御、いろんな作業、移動などの物理的な世界とのインタラクションも含めた技術ということになる。ロボットというのは、何か動く機械につけた名前だが、何がロボットかという定義は非常に難しい。一方、ロボット技術は、要素技術ではなく、システムインテグレーションだということが重要である。

例えば今回の福島の廃炉でも、地下のサプレッションチェンバーで漏水を見てこいという、それに合わせたロボットを要求に応じて設計して開発して導入しないとイケない。このシステムをどのように設計するかということが、非常に重要な技術だと私は考えている。しかも、システム化のためには要求仕様や動作環境の条件からどういうふうにソリューションを導くかを、導入方法なども含めて考えないとイケない。そういう意味で、非常に総合的なソリューション技術になっているというのが一つの特徴だと思う。

ロボット vs ロボット技術(RT)

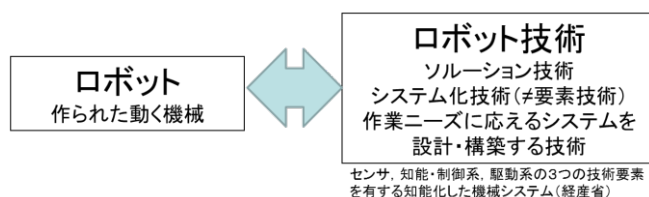


図 2-2

図 2-2 は、ロボットとロボット技術の対比である。ロボットは、動く機械につけられた名称である。一方、たとえば、実際に福島の原発に投入された Quince ロボットは、当時、小柳先生（元千葉工大）や田所先生（東北大）が、地下に行って水位計を設置して、汚染水のサンプルをとってくるという用途のために開発したロボットであるが、この特殊な環境において、ミッションを達成すべく設計したものであり、この技術こそが典型的なロボット技術であろう。ロボット技術は、ロボットと呼ばれる機械には当然使われているが、最近では、自動車も、まさにロボット技術の塊である。逆に言えば、ロボットと呼ばれる機械以外も、今はロボット化しつつあると言っても過言ではない。

そういう意味でいうと、ロボット技術というのは全体の技術の一種の技術インフラのようなものであり、まさに IT と同じように、全ての機械に組み込まれているような技術になりつつある。その日本の産業に与えるインパクトは極めて大きい。すなわち、RT が弱体化するということは、日本の産業競争力や GDP にも影響を与えることになり、これを高い技術レベルに維持することこそ日本の産業にとっても重要であると考えられる。

図 2-3 は経産省や NEDO が以前作成したロボット技術による新産業創造というコンセプトである。ロボットのみならず、環境自身にカメラなどのセンサ、アクチュエータなどが組み込まれていて、環境全体が智能化されている。自立支援でも同様なコンセプトが描かれている。例えば要介護 5 のような寝たきりの人でも、ロボットのみならず環境も智能化され、全体の環境を介してサービスが提供される、という形になっていくだろう。つまり、これらの技術も全部含めてロボット技術だと考える必要がある。

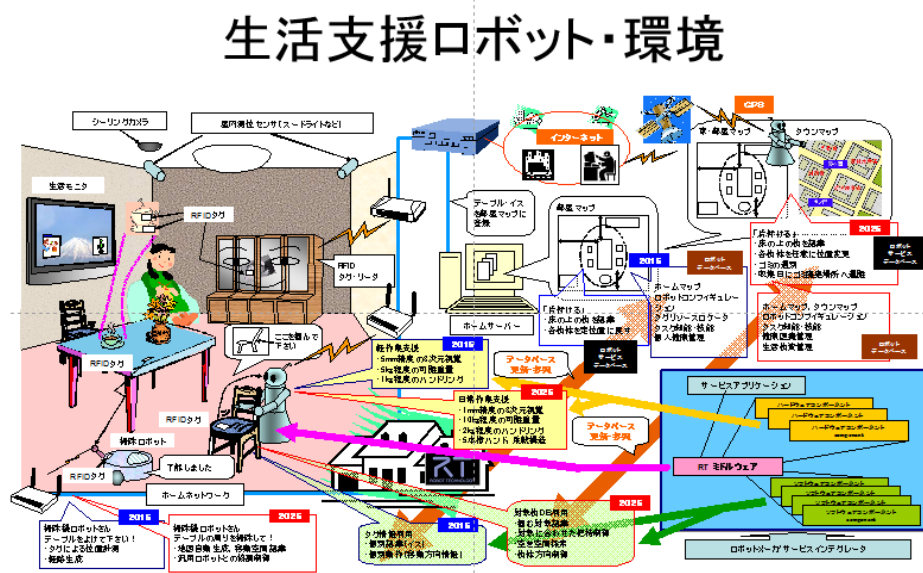


図 2-3

ここからロボット関連プロジェクトを幾つかご紹介したい。最初に、私が科研費の特定領域で実施した「移動知」というプロジェクトを紹介する。ここでは、身体と環境の相互作用による適応的運動機能の発現、要するにロボット技術を応用だけではなく、人間を理解するために使おうとした。人間は適応的に動けるが、ロボットは適応力に欠けている。一体、何が違うのか、生物はどうやって適応的な行動を脳と身体と環境とのインタラクションの中から作っているかということ、いわゆる基礎医学や生物系の先生と工学系の人間とが協力し合って解き明かしていくというプロジェクトだった。これは 2005 年から 2010 年まで行われ、現在では東京大学の太田順先生が領域代表されている「身体性システム」につながっている。これは、基本的に「移動知」の発展形であり、ロボット工学のようなシステム工学と、脳科学、さらにリハビリテーションメディシンなどリハビリテーション科学、リハビリの研究をやっている医学系の先生方の参加を得て、得られた知見を何とかリハビリテーションに活かすことを目指すプロジェクトである。

特定領域研究は、今は新学術領域研究に変わっているが、JSPS ではなくて文部科学省

が領域を設定する科研費である。ロボット関係では今回のワークショップに参加している國吉先生も別の新学術領域の代表をされているが、そのほかにも、ロボット関係のプロジェクトが多くある。基礎的な研究もいろいろ進んでいる。

経産省やNEDOによるロボット関連のプロジェクトは歴史も古く、いろいろなプロジェクトがこれまで行われてきた。共通基盤のプロジェクト、ソフトウェアのプロジェクト、人間支援、生活支援などのプロジェクトがたくさん走っていて、最近では災害対応に関するものなどもある。

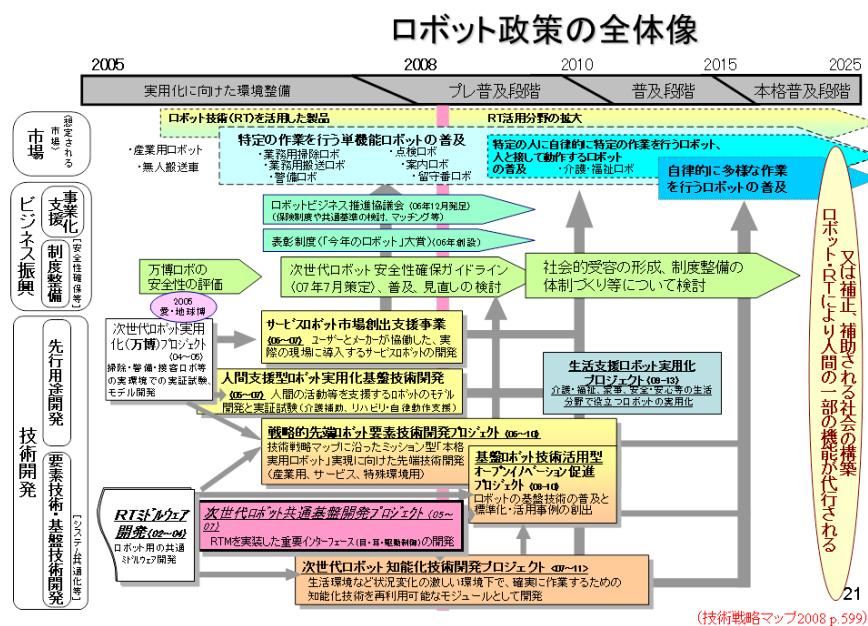


図 2-4

国交省では、災害対応の無人化施工の発展形のプロジェクトがずっと行われていて、ロボットを遠隔操作あるいは、ロボットが自律的にセンサで地形を測量しながら工事をするというようなシステムの開発が行われていた。

今回、福島原発の事故で役に立った Quince というロボットも元をたどっていくと、実は、東北大の田所諭先生が代表をされていた大大特と呼ばれる「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」(平成 14～18 年)の「レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発」で開発が行われていたロボットがある。大須賀先生と私もこのプロジェクトに参加していた。これは阪神・淡路大震災のあと、多くの人間が家屋の下敷きになって亡くなったということから、ロボット技術を使って何とか人を早期に発見できないかということで開発が行われたものである。例えば上空から探す、情報インフラ自身を知能化する、瓦礫の中に入って行って探す、瓦礫の上を移動して探すという技術や、全体を統合するプロトコルやデータベースなどいろいろなシステムが開発された。ここで開発された Kenaf という Quince の前身のロボットは、NEDO の戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトでさらに実用性が高められ、最終的に、福島原発に導入するに至ったという経緯であった。すなわち、NEDO のプロジェクトの中の特種環境用ロボットとして災害対応のロボット開発が行われていた。大須賀先生はそこにも参画されていた。



図 2-5

一方、3.11 事故が起こった当時は、川村貞夫先生が日本ロボット学会の会長をされていて、当時副会長だった私がこのような災害対応ロボットの担当になった。東電の方やエネ庁の方と話しながら進めていった中、NEDO で「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト」が立ち上がった。補正予算 1 年間 10 億円で行ったプロジェクトである。さまざまなロボット、センサ、無線システム、ガンマカメラ、ヒューマンインターフェース、ウェアラブルな HAL などが開発され、その一部は、現在福島原発に導入されている。

ここで、以前行われた CRDS の俯瞰プロジェクトについて紹介したい。生駒俊明先生がセンター長をされていたときにロボットに関する分科会があり、小菅一弘先生が主査を務め、いろいろ議論が行われた。本日参加されている鈴森先生もメンバーであった。ロボット技術というのは、研究開発がいろいろ行われているけれども、どうして現場に使われないのか、どういう構造になっているのか、という議論をインテンシブに行いまとめた³。

非常に良くまとまっていると思うので紹介する (図 2-6)。学会では、基盤要素の研究についての議論が多い。ところが、社会にそれを普及させて何かロボット技術を役立てたいということ、社会価値の話になる。ただ、ここはなかなかダイレクトにつながらない。ロボットはどういう機能を持っていて、どういうサービスが提供できるのかというレイヤーを入れると、それがうまくつながるということがわかり、そのようにまとめられている。

3 CRDS-FY2009-WR-04 科学技術未来戦略ワークショップ (電子情報通信系俯瞰 WS IV) ロボティクス分科会

ロボティクス分野の階層

・ 社会価値

・ サービス

- － サービス
- － サービス促進技術

・ 基盤要素

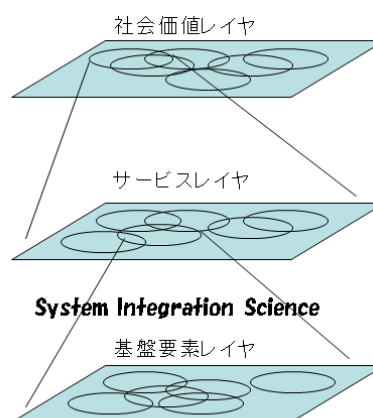


図 2-6

社会価値とは、個人レベルとしては、クオリティ・オブ・ライフを向上させるということがあり、一方で社会全体としては産業競争力を向上させるもある。これは企業レベルの価値ということにつながるが、どうやって国際的な競争に打ち勝って、ビジネスとして発展させるかという話も社会価値レイヤーの話である。さらに、地球レベルさまざまな社会的な問題解決の話もある。

一方、サービスに関して調べる上で参考にしたのは、いわゆる GDP の分類である。経済産業省が行っている GDP の分類をすべて確認し、ロボット技術と関連することを全部抜き出した。すると驚くことにほとんどがロボット技術とかかわり合いがあるということがわかってきた。かかわり合いがつけられなかったのは金融だけである。金融でもロボット技術がそのうち使われると思うが、このときはとりあえず除外した。ロボット関係者の方が見ればわかると思うが、全部、ロボットに関係あるような分野がここに並んでいる。そういう意味では、生活の質というものを上げる上では、ロボット技術というのは多くの部分に関わってくる。産業競争力においても、政府サービスから始まり農林水産業まで、これもほとんどロボットが関係する分野だということがわかる。

社会価値レイヤーの話はざっと挙げただけだが、例えば環境モニタリングにロボット技術を使うとか、資源探査、宇宙開発、深海、大深度地下のさまざまな開発・工事、テロ対策、感染症、災害に関するものもロボットの技術が求められている。これらは地球規模的な問題であろうと考えられる。

図にすると図 2-7 に示すようになる。上が社会的価値で、下が基盤技術でさまざまな技術が書かれている。赤字がエマージングな技術である。サービスでも赤字の部分が注目されているサービスであると考え、このストラクチャーの中で、我々はどこに注目すべきか、何が足りないのか、どこを重点化すべきかということを議論しまとめた。

ロボティクス分野の重要研究開発課題

赤字: 重要研究開発課題

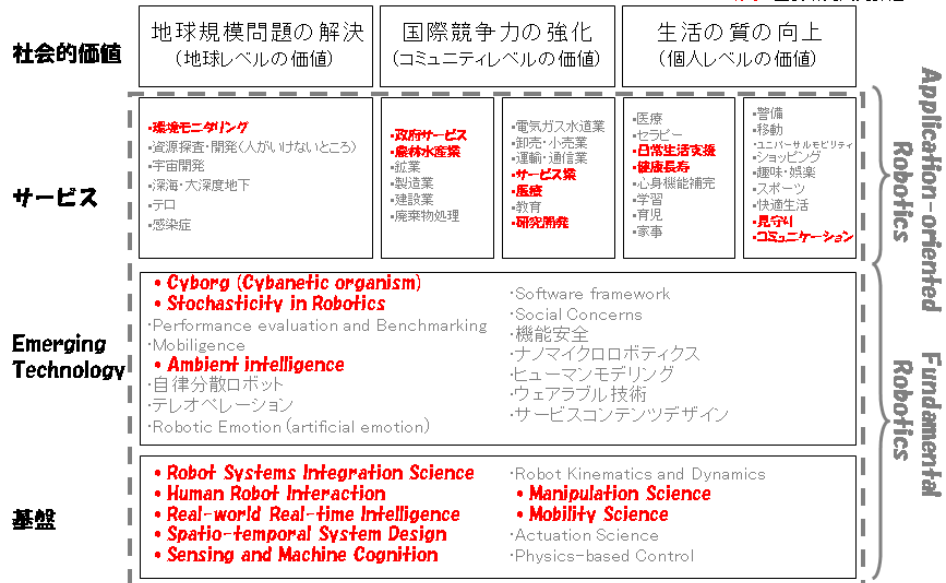


図 2-7

もう一つ、2011年に日本経済調査協議会で、ロボット技術というのはこれから一つの経済の大きなインパクトを与える技術であり、特に介護の分野でどうしたら産業として発展するのかということを議論した。ここでも非常に重要な議論が行われたのでご紹介する。

委員長は元通産省事務次官の福川伸次さんと、東大の経済の岡崎哲二先生が主査を務め、山海嘉之先生、柘植綾夫先生、松日楽信人さんが委員として参加して議論した。最後、政策提言としてまとめるというのがこの会議のミッションであり、石黒周氏の提案に基づき、図 2-8 に示すようなグランドデザインに関する提言をまとめた。我々はどうしても技術開発のところばかり注目してしまう。社会に普及させようと考えれば、当然、インテグレーションが重要だし、実証試験をしないと市場に入っていく。これを受け入れるのが社会システムであり、それを見越してグランドデザインをしないと行けないし、技術開発をする前にビジネスモデルを作るといような活動も必要である。そうすると、我々は個々の技術だけを見ていては不十分で、グランドデザインも含めた全体を考えないといけない。また、技術開発のみならず、すべてのフェーズにおいて、研究を行う必要がある。

また、普及の足かせの一つになっているのが制度である。規制緩和をしないとロボットは入りにくい。特区の設置が必要である。また、むしろ規制を強化してロボットの利用を義務づけるようなこともときに必要である。そうすることで、マーケットが生まれてくるという議論もあった。安全の確保をどうするか、介護や生活支援では非常に重要になってくる。

研究開発に関しては、まず、戦略をきちんと作るということが必要である。研究開発もいわゆるシーズや際立った技術に対して投資をするだけではなくて、ユーザーの視点に立った研究開発が非常に重要である。国のイニシアチブや海外との連携も重要である。

政策提言 グランドデザインに関する提言

- ・ 社会システムデザインからのアプローチ
- ・ 介護ロボットを利用する環境の整備
- ・ 介護者への知識普及と訓練
- ・ 被介護者への知識普及と訓練
- ・ 人材育成(アーキテクト、プロデューサ、コーディネータ)

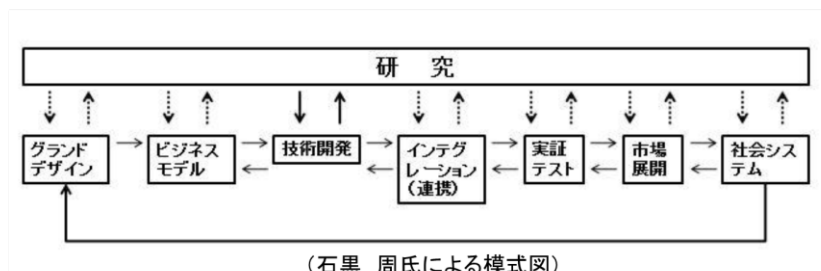


図 2-8

最後に災害対応の話をした。3.11 では津波によって福島原子力発電所の事故が起こり、廃炉には 30 年から 40 年がかかるだろうと言われている。逆に言うと、それまではそこで必要となる研究開発はずっと行っていないといけない。どんなことをやらなければならないかという、最初に求められたのは冷却系の安定化であったわけだが、今は封じ込め、さらに廃炉が主要なミッションである。具体的に言うと、例えば、溶けた燃料(デブリ)の取り出し、汚染水対策、止水、除染、調査などが必要になっている。

既に 4 年半が経ち、さまざまなロボット技術が導入され、うまくいった例も失敗した例もある。7 種類ぐらいのロボットは回収できない状況になっているが、そこそこの成果を上げている。エネ庁が、全体的な計画の下にロボットの技術開発に資金を投入しているが、十分とは考えられない。

福島原発において、ロボット技術は今は役に立っているが、事故直後にはなかなかロボット技術の導入がスムーズには行えなかった。それはどうしてなのか、何でビジネスにつながらないのかということを産業競争力懇談会の中で議論した。私がプロジェクトリーダーを務め、2011 年から 4 年間議論した結果、いろんなことがわかってきた。災害対応ロボットというと、陸海空、さまざまなロボットが必要であり、しかも災害のフェーズによって必要なロボット技術も徐々に変化する。したがって、かなり広いポートフォリオで準備しておかないとならないということになる。提言⁴には、欠けている技術の研究開発を基盤技術研究からしっかりやるべきこと、また、実用化や配備を推進するための場(拠点)としての防災ロボットセンターを設置すること、戦略設計・策定、標準化活動、制度設計など、ソフト面で検討すべきことなどをまとめた(図 2-9)。

4 産業競争力懇談会 2014 年度プロジェクト最終報告【災害対応ロボットの社会実装】2015 年 3 月 5 日

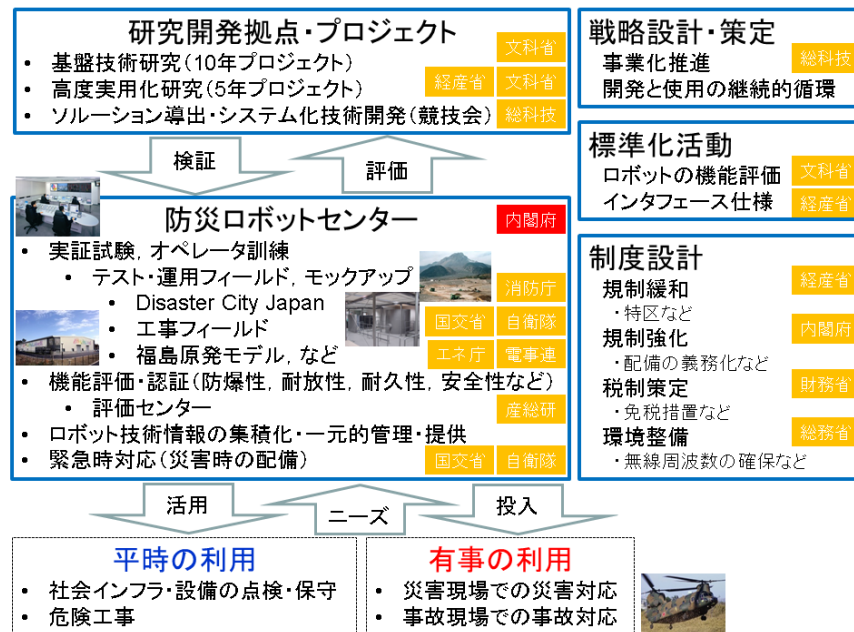


図 2-9

特に、研究開発をやっているだけでは不十分で、実証試験やオペレーターの訓練も必要であるので、それを行えるセンターあるいはテストフィールドの設置が重要である。評価方法も考えないといけない。災害現場では引火の恐れのある機器は導入できないため防爆性も要求される。何らかの評価センターを作って、そこで認証するようなシステムも必要だろう。ロボット技術をデータベース化して一元管理することも必要である。どういうロボットがあって、どこで災害があったときに何が使えるかという情報にすぐアクセスできるようにしなければならない。また、緊急時対応をやり、長期的な戦略を立てないといけない。標準化も非常に重要である。ロボットのインターフェースの標準化だけでなく、機能評価の標準が必要になる。制度設計は税制も含めて考える必要がある。

災害対応ではどんな基盤技術開発が必要かについて述べる。研究開発では、移動とかアクセス技術がまだまだ足りない。安定通信がまだできていない。遠隔操作をするために空間認知が必要だが今はこれがまだ不十分でロボットをうまく操作できない。自律知能化も必須であり、点検、診断、メンテも要求される。アメリカには **Disaster City** という施設があって、そこでロボットを実際にユーザーの方が使って評価している。こういうものも日本で作るべきだという議論もした。

実証試験のセンターについては、JAEA(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)が檜葉にモックアップの施設を建設している。2016年4月から運用予定で首相が来られて開所式をした。これからは海外の拠点と連携をとりながら使っていく。いずれにせよ、研究開発にだけ投資しているだけでは社会普及は進まず、国が調達したり、出口を作るといところで国が何らかの支援をすることが必要である。また、実用化のためのテストフィールドを作ることにも投資をする必要がある。この三つがそろって初めてロボット技術開発と社会普及が同時に進むと考えている。

この提言に基づいて、現在ではいろいろなプロジェクトが立ち上がっている。災害対応

ロボットも国交省の次世代インフラ関連で、橋梁・トンネル・ダム(point inspection)の点検、災害調査、復旧を目指した開発が行われている。SIPでも藤野陽三先生がPDをされている「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」で開発が進められている。ImPACTでも田所諭先生がPMとなり、「タフ・ロボティクス・チャレンジ」を推進している。

最後は、ロボット革命実現会議である。安倍首相が去年5月にロボットが必要だとOECD閣僚会議で発言され、ロボット新戦略が今年1月に出た。その中には、テストフィールド、標準化、ロボットオリンピックという項目も入っている。分野としては、ものづくり、サービス、介護・医療、さらにはインフラ、災害対応、建設など広く含まれている。

私は、廃炉と国土強靱化と福島(の復興)をつなげるという活動を行ってきた。復旧復興も重要だが、技術開発は日本の産業力、競争力を強め、かつ国土を強靱にするという上で非常に重要だと考えている。

【質疑応答】

Q：公的セクターの話ばかりで民間の姿が見えない。業界が盛り上がっていて、研究者も増えていると思う。例えば、主要なロボット学会の参加者や発表者で、アカデミックと民間の割合はどんなものか。

A：ロボット関係は民間からの参加者は少ない。自動車関係の学会などでは圧倒的に産業界の方が多い。ロボットは少しアカデミアが研究に寄り過ぎたという気がしている。ただ、日本経済調査会の提言も産業競争力懇談会の提言も、「産」からの観点で出されたものである。企業の希望として国に政策提言をしているので、新しいビジネスに多くの企業は期待しているというのは間違いないと思う。重要なのは企業の努力だけではどうにもならない状況にあるということで、国の支援が必須である。それが国に対する提言という形に表れたと思う。特に災害対応は厳しい。災害は頻繁に起こるわけではないのでマーケットが非常に限られているため大企業はほとんど手を出せない。アメリカは政府や軍が調達してマーケットを作っている。ユーザーは、消防、国交省、防衛、警察などの官需がメインになるので、国が調達をして使うということがないと実用化・事業化がやりにくい。

また、大企業は大きなビジネスでないとやらず、またリスクがあるとやりにくいいため、中小企業とベンチャーの参画が必須だと考えている。小さいビジネスや、リスクがあるようなものにチャレンジできるような枠組み、あるいはファンディングが必要である。私自身も、復旧復興関連の中小企業の方と話をしているが、何らかの支援策を講じ、こういった企業がさまざまな開発に参入できるようにする必要性をひしひしと感じる。

3. サービス視点からのスマートロボット基盤技術開発への期待

3.1 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（東京都下水道サービス株）

東京都の事例から、下水道事業の中でロボットがどのように活用されているかという現状と、今後どのようなことに期待しているかを紹介する。

東京都下水道サービス株は、30年前に東京都が維持管理の時代を迎えるに当たり、事業のスリム化を図る目的で、公社ではなく株式会社という形で、東京都が50%を出資し残りを損保や銀行関係で出資して立ち上げたものである。当時の業務は、下水処理場の汚泥処理の運転管理や技術開発などでスタートした。設立当初は8人という体制からスタートしたので、技術開発に投資する数十万円を捻出するのに非常に苦労したと聞いている。現在は、900人の社員がおり、そのうちの50%は東京都の下水道局を主体としたOBである。私もその一人である。残りの25%が現役の東京都からの派遣社員で、25%が固有社員という構成になっている。都の派遣社員やOB社員が多いということで、東京都の下水道事業をよく理解している。また、土木、電気、機械、水質管理の職種の社員がいるので、下水道という一つの事業を実施するのに必要な様々な分野の技術を持っている。

今日の近代的な下水道は明治に導入され、汚水と雨水を排除し生活環境を改善することを基本的な役割としている。その後、公共用水域の水質保全や、最近では処理水を都市水源としての利用、下水道施設の利用など、時代に応じて役割が多様化してきている。しかし、下水道は利用者の目に触れる機会が少ない。特に、下水道の管渠への出入りは60センチのマンホールであり、体格の良い人にとってはマンホールに入るのは非常に辛い。また、80センチ未満の管渠は作業員が入って作業できないとされ、全体の70%から80%を占めている。

下水道の排除方式には汚水と雨水を別々の管渠で運ぶ分流式と同一の管渠で運ぶ合流式がある。東京など早くから下水道を整備したところでは、合流式を採用している。都市インフラの電気ガスなどは供給施設であるが、下水道は唯一受け入れ施設であり、他のインフラと異なっている点がある。例えば、水道や電気では事業者側でサービスを停止することが可能であり、代替の供給も可能である。しかし、下水道は受け入れ施設のため、下水道事業者側からサービスを停止することはできないし、使いながら維持管理あるいは修理、補修をしなければならないという宿命を持っている。

現在、東京都は下水道管が約1万6,000キロメートル、マンホールは48万カ所、大体30メートルに1カ所ぐらいでマンホールがある。また、ポンプ所が低地部に85カ所、処理場が13カ所あり、1日に433万トン of 下水を処理している。

東京の下水道管の年度別整備延長をみると、図3-1-1に示すように、第二次世界大戦の前にピークがある。その後、前回の東京オリンピックに向けて下水道を整備したことから大きなピークがある。コンクリート構造物の耐用年数はおおむね50年と言われている。現在、昭和25年以前の管渠が耐用年数を超えている。今後は東京オリンピック頃に整備した大きな山が老朽化、更新という時期を迎える。そのため、20年くらい前からアセッ

— L C C 分析に基づいた事業平準化 —

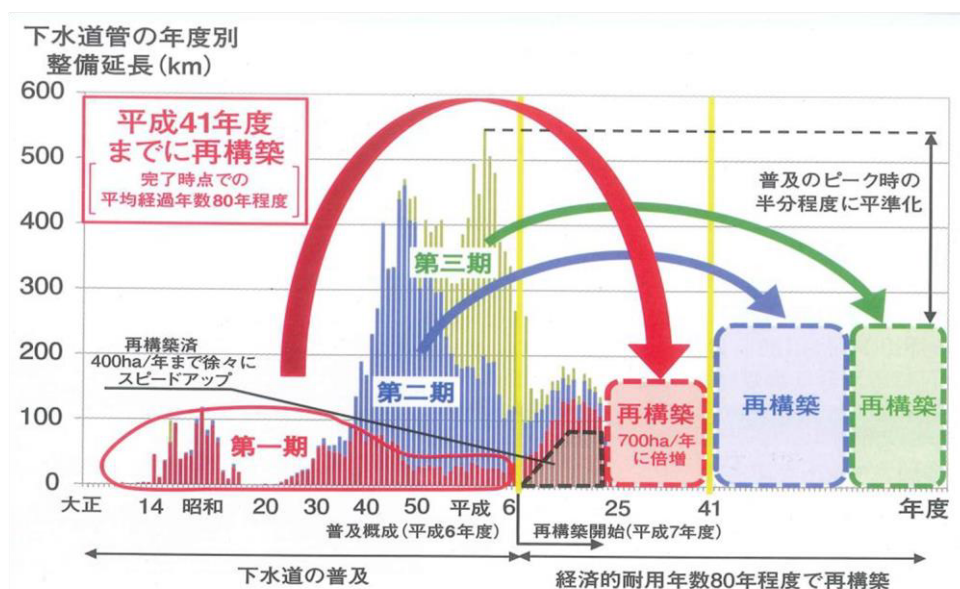


図 3-1-1 (出典：都下水道局「経営計画 2013」)

必要技術を開発することは手段であって、目的はあくまでも下水道事業に貢献すること、つまりビジネスに結びつけることということで進めてきた。開発した技術には、既設管渠に人が入って、調査・診断、維持管理ができないことをロボット化により可能としてきた。また、既設管渠を生かしながらどう更新するかといった技術にも取り組んできた。これは、東京のような大都市で新たに道路を開削して別の管渠を入れるというのは、道路交通に与える影響が大きいことなどから非常に困難である。

下水道の仕事は3K職場の代表ともいわれ、安全を確保し、特殊技術を伴う作業を修得させ、作業員をどう確保するかといった問題を抱えている。このため、弊社では、事業者の視点と実現場での作業者の視点とで何が必要な技術なのかを開発テーマとしている。具体的には勉強会を設置し、開発テーマに対して、どういう会社に参加してもらえばいいのか、開発投資はどれぐらい必要なのか、ビジネスモデルができるかなどについて、これまでの技術的知識を基に検討する。開発パートナーを選定し、おおむね2年から3年という開発期間を設定して事業化を図るようにしている。弊社は民間会社という位置づけではあるが、公的機関という一面もあることから、事業化の中ではパートナー企業に対して、アドバイザー的な役割を果たしている。弊社は設立後30年が経過したが、設立当初に開発した技術は今も再投資をしながら改良・改善、あるいは適用範囲の拡大など技術の進歩に取り組んでいる。つまり、一度開発した技術をそのままではなく、活用しながら改良・改善を続け進化させている。パートナー企業には、そういう意味で専門性、革新性、市場開拓能力が必要である。テーマによっては、ゼネコン、下水道の維持管理の専門業者やメーカー、大学、ベンチャー、コンサルなど、その技術を開発するのに必要な様々な分野の方々に声

をかけ、理解と協力を得て取り組んでいる。開発費用は弊社とパートナー企業とで応分の負担により実施している。弊社は民間会社であるため公的な補助金はなく、自社費用で賄っているが、7～8年位前から特許収入により開発投資をまかなえるようになってきている。

具体的な事例として、人が入れない80センチ未満の管渠内の調査、診断、分析について紹介する。これは30年ぐらい前は大きな課題であった。建設してから100年近くたっている管渠の中がどうなっているのか調べる必要があった。そこで、専用のテレビカメラを開発した。当初はアナログ式のカメラで、自走により録画し、撮ってきた画像を調査員が分析して、クラックや段差があるか等を判断していた。アナログカメラは前にカメラがついていて前方しか撮れないので、壁面は精度よく撮れない。また、画像診断は調査員により評価が異なることなどの課題があった。このため、統一的な基準でやるべきということから、ミラー方式テレビカメラと自動診断システムを開発した。

開発した調査機・システムの概要

《ミラー方式テレビカメラシステムの概要》

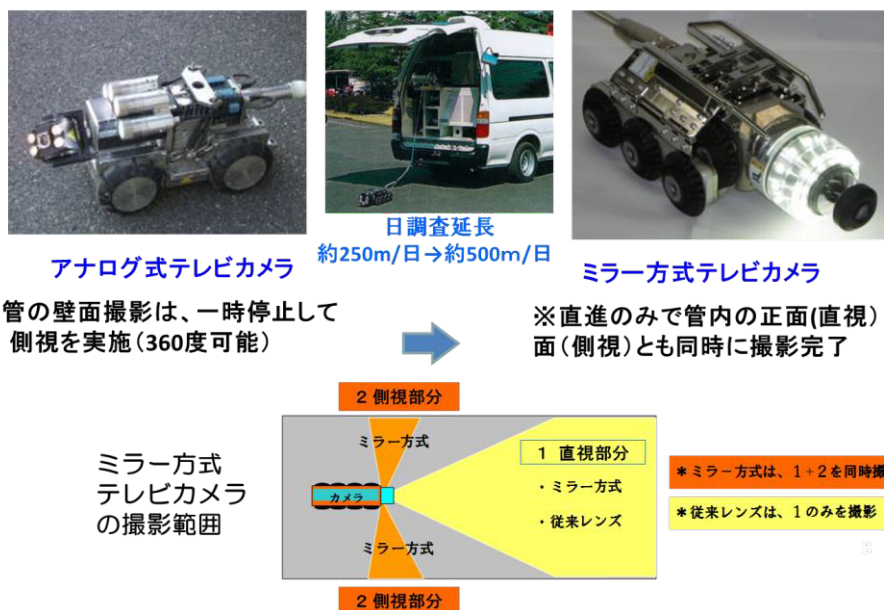
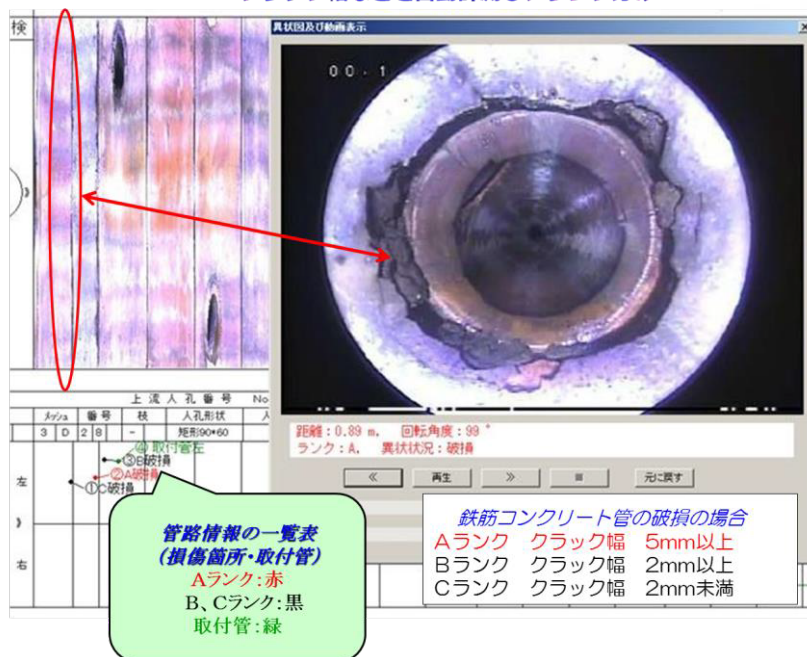


図 3-1-2

図 3-1-2 の左側が従来のカメラで、右がミラー方式である。側面の各家庭から入ってくる取り付け管も明瞭に見ることができる。図 3-1-3 に示すように、撮ってきた映像は管の頂点で展開して展開図として並べていく。さらに、損傷のランクを自動的に判断するシステムも開発した。このシステムでは、例えば、早急に補修あるいは改良工事をする必要がある5ミリ以上のクラックをAランク、その他をBランク、Cランクと自動的に判断して区別することができる。このようにして得られたデータは設計図にも使えるようシステム化を図っている。

管きょ検査診断支援システムの機能

一クラック幅などを自動計測し、ランク分け



他にいくつかの事例を紹介する。

30 年ぐらい前に情報化の流れがあった中で、下水道事業の効率的な運営を目的に管渠内に光ファイバーケーブルを敷設するロボットを開発した。ロボットが下水管の天井にアンカーボルトを挿入し、そこに光ファイバーケーブルを通して敷設するものである。

次に、マンホールには昇降するためにはしご状に足掛け金物に取り付けられている。経年により金属部が腐食し、人が落下するおそれがあるため、これを自動で取り替えるロボットも開発した。従来は直径 1 メートル程度のマンホール内で作業員がガスバーナーで切断していたが、この作業はとても危険である。このため、ロボット化した機械により切断、ドリルでの穴開け、新しい足掛け金物の差し込みができるようになった。

下水道が原因の道路陥没は都内で年間 800 件も生じている。このことから、管渠の中から調べる空洞調査機を開発している。車両型の電磁探査では深さ 3 メートル程度しか調査できないことや、埋設されているガス管や電気などのケーブル類への影響もあり空洞を発見しづらい。また、空洞の大部分は路肩や歩道部に発見されるため車両型では困難であることから、本空洞調査機を開発した。

また、処理場内の点検機器類は設置年度や製造メーカーが異なることから、点検するには熟練社員が膨大なマニュアルを現場に持参して点検作業を行っている。この点検作業を効率的かつ確実、容易にするために、マニュアルの入ったタブレットを使い確認した内容を声帯マイクで収録する「ハンズフリー点検ツール」を開発した。



図 3-1-4

今後求められるロボット技術としては、人材確保や作業の効率性、安全性の観点から以下に示すようなものがある。今は人が作業している調査などもロボット化で対応できるよう、技術開発に取り組んで行こうと考えている。

- ・管渠更生工法の無人化施工
現在：人力により施工
- ・中大口径（ $\phi 1200$ mm以上）の管路診断技術
現在：調査員が管路内調査
- ・下水管周辺部の空洞や地盤状況の把握
現在：管路内からの調査不可能
- ・下水が流下している管路下部の診断（劣化、クラック等）
現在：一時的に止水して調査
- ・災害時の迅速な被害状況把握
現在：台帳などで応援自治体職員により調査

一つの例として、図 3-1-4 に示す管渠更生工法（SPR 工法）を挙げる。下水を流しながら新しい管をリニューアルする技術であり、30 年前に開発した。この管渠更生工法は大河内記念賞を受賞するなど高い評価を受け、国内はもちろん、ヨーロッパを初めロシア、アメリカなど世界各国で採用されている。今後はこの技術をより自動化、無人化を目指し開発に取り組んでいく。

これからも、下水道の調査、診断、建設、維持管理、情報管理など広範囲の業務にロボット技術を導入すべく、様々な分野の方からの協力を得て、事業の効率化や安全性確保、信頼性確保等の課題解決に取り組んでいきたい。

【質疑応答】

Q：海外へ展開しているということだが、海外の状況を教えてほしい。

A：下水道の分野でいうと、近年までは欧米の技術導入が主であった。しかし、最近は、日本の開発した技術が高い評価を受けている。二十数年前にドイツに先ほど紹介した光ファイバー敷設ロボット技術を輸出しようという試みがあったが、商習慣や特許制度上の課題等により実現できなかった。現在は知的財産もしっかりしてきたこともあり、SPR 工法など4技術を海外で事業展開し、非常に高い評価を得ている。

Q：このような技術を最初に開発しようと発意したのは役所、それとも研究者・技術者か。

A：下水道事業は直営で調査から設計施工、管理まで行ってきた経緯がある。このことから、東京都や弊社では、必要な技術を発案することが多い。もちろん事業を受託している建設会社や維持管理の専門者が発案する場合もあり、民間企業から弊社に提案してくることもある。日頃より、幅広い分野からの技術情報の入手に努めており、民間企業はもとより、場合によっては大学（現在は3つの大学）からの協力も得ている。

Q：下水道の技術としていろいろな技術を開発してきたわけだが、機能を考えると他の産業や分野に展開できる技術が多いと思うが、プラットフォームの形成とか、連携とかをやっていると考えてよいのか。

A：我々の方から種々の媒体を活用して発信している。最後に紹介した下水管のリニューアルについては、すでに他の分野でも活用されている。他分野からの問い合わせがあれば、開発技術の発展のためにも非常に良いことなので検討させていただく。

Q：特許収入が次の研究投資に回されているというのはすごいと思う。その中で、大きな収入のある特許はあるのか。その特許の中でロボット関連というのでどのくらいあるのか。

A：現在の特許収入は、先ほど紹介した SPR 工法その他、耐震化技術やトンネル技術など多岐の開発技術から得ている。ロボットという定義を広く考えると、大半の技術が該当する。一つの技術の中にはロボット技術もあり、IC 技術やセンサー技術など非常に幅広い技術が採用されている。

Q：ロボットを開発しても、ロボットを販売するのではなく、保守管理を全部請け負って事業を営んでいるのか。

A：弊社は東京都下水道局より事業の一部を補完代行として委ねられ、業務を行っている。この業務を遂行する中で活用できる技術は採用している。しかし、建設業を保有していないので、建設工事や維持管理作業など民間の会社が行う業務に必要な技術は、民間で活用していただいている。民間企業で取り扱われる技術に対しての弊社の立場は、設計や積算の基準作成のほか、主導して活用実態を把握し、必要な改良改善を行うなど、常に信頼性の高い技術とすべく取り組んでいる。

3.2 豊かな未来を創るサービスロボット

小松崎 常夫（セコム）

セコムはセキュリティを始め、防災、メディカル、保険、地理情報、情報通信、不動産の7つのサービス事業を行っている。経営理念は「社会システム産業の構築」、すなわち安全、安心、快適、便利な生活をこれら7つのサービス事業の連携融合で実現することである。つまり、一言で言うと「困ったときはセコム」とお客様に言ってもらえる信頼される会社を目指している。

セコムが大切にしていることは、何をどう作るかではなく、何のために作るのかである。ものづくりを、ものづくり、サービス創出、社会価値創造、という三つの密接したレイヤーでとらえると、本日の議論でアカデミアの研究者の方々が、ものから社会価値までをつなげて重要視していることが理解できて、非常に敬服した。我々は逆に社会価値からものへと考える。つまり、世の中で困っている人がいる、または将来こういう困りごとが出るかもしれないという観点からものごとを考えるのだが、その社会価値の実現のためには技術が必要となる。このため、技術からものづくりを考える方々と、社会価値から考える我々が混ざり合う形が、未来のためのフォーメーションとして非常に重要なことと考えている。

このように社会からものごとを見る視点を、セコムの“想い”と呼んでいる。想いがあるので人がどんなことで困っているか、どうすれば喜んでくれるかに気づきよく理解できる。ただし、想いだけではビジネスにならないので、それを実現するために、人や組織が上手く動く仕組みを作り、そのベースとして技術開発力を持つ。つまり、想いとそれを形にする実現力を重視している。（図 3-2-1）

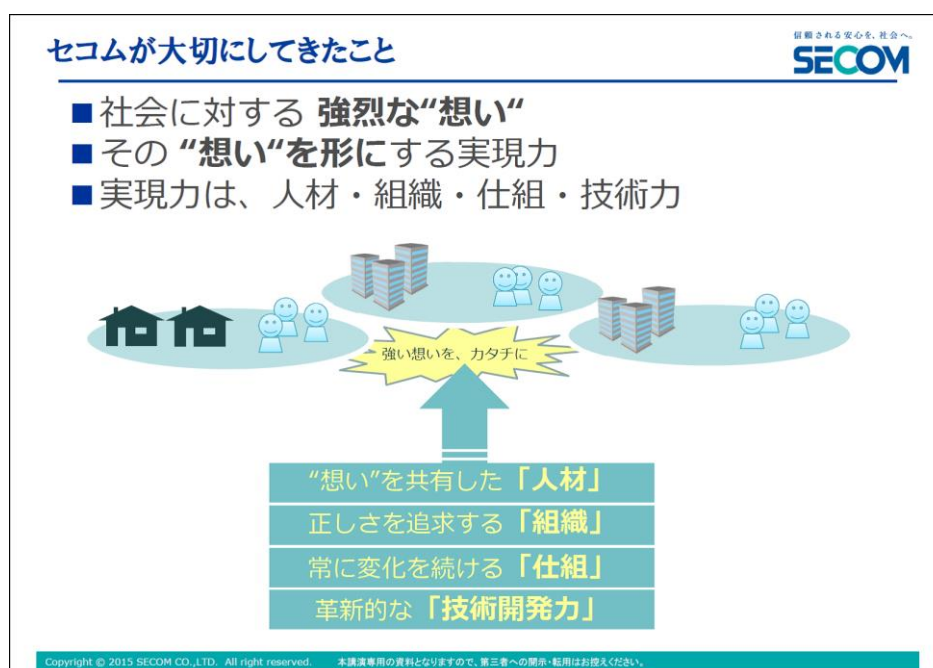
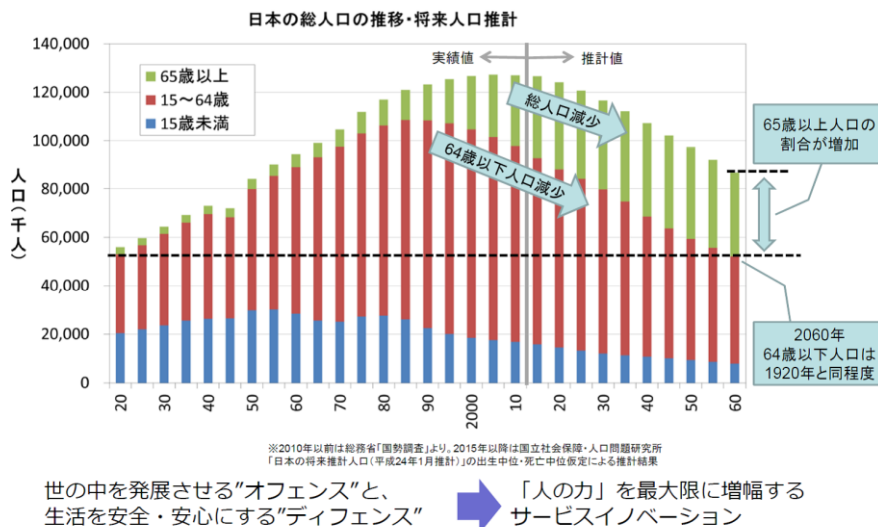


図 3-2-1

図 3-2-2 に示したのは未来の日本の背骨ともいえる人口の推移、予測である。これをみると、統計が始まった 1920 年には総人口が 6,000 万人未満で、65 歳以上の人数（緑色）が非常に少ない状態であった。2060 年の予測では、赤色で示す 64 歳以下の人口と 1920 年の総人口がほぼ同じ人数となり、さらに、総人口の 4 割を 65 歳以上で占めることとなる。この日本の状況に対応していくには“オフense力”と“ディフェンス力”のバランスを上手く調整しながら維持していかなければいけない。（図 3-2-2）

未来の日本の“背骨”

信頼される安心を、社会へ
SECOM



Copyright © 2015 SECOM CO., LTD. All right reserved. 本講演専用の資料となりますので、第三者への開示・転用はお控えください。

6

図 3-2-2

高度経済成長期に家電が多く売れた。例えば、冷蔵庫は食べ物を保存するためのもののように見えるが実は買い物に行く回数が減る効果、つまり家事にかかる時間が少なくなった結果、外で働く人の増加を促進したという見方もできる。生活を守るディフェンスにかかる人の力が家電により向上し、オフenseに回せるようになったということである。また結果として、消費者の要求に応える中で、さらに技術も伸びてきた。しかし、国が豊かでなければ物は買えず、縮小均衡へと進んでしまう。こうした、世の中を発展させるオフenseと生活を守るディフェンスの両面で人の力を最大限に増幅できることが、我々にとって極めて重要な技術の価値だと考える。

オフenseである生産年齢人口は、1990年代をピークに既に減少傾向にある。ところが、日々の感じでは日本が貧しくなったという印象は無く、依然として豊かさが維持されている。これは、生産人口の減少を、産業用ロボットも含めた技術力によって増幅し、生産力を維持し続けてきたという見方ができる。

一方で、ディフェンスではこうした人の力の増幅はまだ稀薄に思われる。国の防災や、我々がやっているセキュリティなどはディフェンスの典型である。人々が豊かに生きるという点では、医療もディフェンスと考えることができるし、介護は正にそれにあたる。セコムは今後もディフェンスに力を入れるが、国内で良いディフェンスをするためには、オフenseがしっかりしないと資金が回らない。国としてはオフenseも依然として重要である。

開発では、想いと志を共有しないと連携はできない。そのため、技術者だけでなく、開発関係者全員が、人の力の増幅を指向することで日本が豊かで快適な国になる、そのためには何を誰とやる必要があるのかを考えて、同じ目線になる必要がある。例えば、セコムは国内でのセキュリティ契約が建物数で200万件あるが、もし人が建物を24時間片時も離れず守ろうとすると、建物あたり最少で5人必要であり、200万件では最少でも1,000万人が必要な計算となる。ところが、現状セコムの警備員は数万人程度であり、一人の力を500～1,000倍近くに増幅している。これは偶然の結果ではなく、人のみの警備では成長できないことが初めから明確だったため、いち早くコンピュータネットワークを使い、センサ技術を磨いた技術開発の成果である。この背景もあり、セコムは研究所を30年前に創り、技術を一生懸命磨いている。人の力を増幅することが先端技術の一番大事な価値であると考えている。

同様の理由から、我々は、これまでオフENSE力を向上させた産業用ロボットのように、ディフェンス力を増幅するサービスロボットの早期実現に取り組んできた。我々が最初に世に出したのは、体の不自由な方がご飯を食べやすくなる、食事支援ロボットである。一番目には、自分の好み、自分の意思でご飯を食べるという人間の尊厳を大切にしたい。また、二番目の理由は違う側面であるが、食事は同じ時間帯にピークが重なるので、介助に携わる人の確保が非常に難しい領域であったためである。他にも、屋外巡回監視ロボット、間もなくリリースする予定のドローンをベースにした自律飛行する監視ロボット、現在開発中の自律型飛行船といったサービスロボットを発表している。

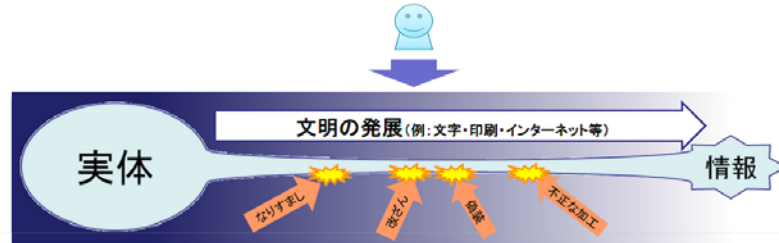
世界にはたくさんの産業用ロボットがあり、日本の技術が一番の分野である。では、なぜ、サービスロボットができないか。結論を言うと、研究者・技術者が現場の仕事を理解しづらいためだ。工場などの生産現場では技術者がたくさんいて、仕事のプロセスを見ているので、理解しやすい。しかし、サービスの現場で実際に仕事を見ている研究者や技術者は少ない。その状態で良いサービスロボットを作るのは至難のわざである。部分的にヒアリングをして何かいいものをつくろうという取組が現在普通に行われている方法だが、それで理解できるほど簡単なサービスではない。

また、サービスロボットというと人の仕事の全てを担おうとする傾向もあるが、ネジを締めるだけでも意味があった工業用ロボットと同様に、サービス分野でもプロセスの一部作業をロボット化しようという、プロセス・バイ・プロセスのアプローチにすれば、もっと状況は変わってくると考えている。

一方で、ロボットが普及すると大きな問題がでる可能性もある。ロボットが何をしているか不明で、安心できないと感じる人が多いと普及しない。我々は、お客様に何が起きているか、離れた空間にある“実体”をセンシングし、“情報”に変換・収集・処理してサービスに活用している。今後、実体から情報を切り出し活用する技術はさらに普及していくだろうが、情報は実体から離れるほど、誤りや悪意が入り込む隙ができる。そのため、人の力を増幅していく上でこれらが入り込まないように、情報と実体との関係がトレーサブルで、かつアカウンタブルであるよう、非常にセンシティブに高度な情報技術を駆使して行く必要を強く感じている。(図3-2-3)

「人の力」の増幅の要・アカウンタビリティとトレーサビリティ 信頼される安心を、社会へ。 **SECOM**

- “情報”は必ず“実体”を伴う。
- “情報”が“実体”から分離。情報システムやロボット等強力なツールが誕生。しかし、分離するほど“実体”が見えづらい。強力な分、リスクも大。



- “情報”は“実体”を正しく表すからこそ「人の力」を増幅。

今後、情報のトレーサビリティとアカウンタビリティを強固に保証する技術の重要性が増す。

- “情報”から“実体”がたどれる : **トレーサビリティ**
- “情報”が表す“実体”の正しさを示せる : **アカウンタビリティ**

Copyright © 2015 SECOM CO.,LTD. All right reserved. 本講演専用の資料となりますので、第三者への開示・転用はお控えください。

12

図 3-2-3

加えて大切な技術が、空間情報である。この技術を用いて情報を整理すると人が実体を非常に理解し易い。大量の情報を活用するこれからのサービスで、正しい対応にはそれらの情報が人にとってわかりやすいことが必須であり、我々はこの技術開発にも力を入れている。(図 3-2-4)

人にとってわかりやすい情報の器、空間情報 信頼される安心を、社会へ。 **SECOM**

大量の情報を活用するこれからのサービス

⇒ 正しい理解・対処には、人にとってのわかりやすさが必須



Copyright © 2015 SECOM CO.,LTD. All right reserved. 本講演専用の資料となりますので、第三者への開示・転用はお控えください。

13

図 3-2-4

日本の高齢化が進む、それに対して私たち民間企業が何をすべきかは鮮明である。サービスの一部だけでもロボットに担わせ、人の力を増幅できる技術には大きな価値がある。ただし、それがうまく機能するためには、物だけに頼らず、人の運営など、サービスという形となる様に上手くコンフィグレーションさせなければいけない。そのためには連携が必須である。

我々としては、日本の豊かさ、安全を守りながら、人々に優しい、つまり、オフenseとディフェンスの両面がきちんとした社会であり続けるために、連携をしてサービスを提供していきたいという考えでいる。

【質疑応答】

Q: 諸外国は日本よりもはるかに危険が多い社会だが、セキュリティなどは発達しているのか。諸外国と比べて日本の技術はどうか。

A: 世界的に見て、最高水準だといって間違いない。なぜなら、日本は普段快適な生活に慣れている中で、生死という非常にクリティカルなセキュリティに対して要求自体が世界一であるためだ。その要求に応えたサービスをつくると、結果的に世界一のサービスになると実感している。実際に、アメリカに警備業を輸出し、大変評判が良かった経験がある。また、医療をはじめどのサービスも日本はレベルが高いと思う。

Q: 産業技術が色々な形で進んでおり、人間の倫理観そのものに変化が既に起きていると思うが、変化をどう捉え、サービスのプラットフォームをどう作っていくのか、何かアイデアがあれば教えて欲しい。

A: 世間から見たときに正しいかが一番大切な価値観である。それが現行法規と違っていれば、現状が間違いだと判断する。例えば、30年前の在宅医療は当時の法規では不可で、是か非の議論で時間が過ぎていたため、アメリカの会社で在宅医療事業と救急事業を行い、十分なノウハウを積んだ後に日本で展開した。常にセンシティブに、事の善し悪しの本質を見極め、法律で禁止していることはできないという形式的なことではなく、法の思想を考え、方法論に近い法律は変えていく、というアプローチをしている。

Q: 確かに、サービスロボットへの期待は多様ながら、その仕事内容を詳しく知らないというロボットが必要かわからず、設計もできない。そうすると、非常にオーバーヘッドが重くてマスの大きいビジネスしか提供できない様な大企業では難しい領域なのか。例えば、地方特有のニーズを上手く引っ張り上げられるといったところを強化するなど、ロングテールの中小企業がすごく重要かと思った。セコムは世界的な大企業であるが、どう考えるか。

A: 私は、リスクを冒すかどうかは会社の規模に関係なく、志や思いを持った会社がどれだけやるかだと思っている。さらに、売上（利益）が大きいことは、未来に投資できるという価値があり、逆に、利益を使わなければ企業としての存在価値が余り高くない。また、リスクに対して果敢にチャレンジしやすいのも利益の大きな会社であり、新しい仕組みを考えたときには、経済的効果、人脈などの様々な情報量の方で大企業の方が取り組み易いかもしれない。これらのため、中小企業やベンチャーが力を発揮しやすい国策や、しっかりと情報を還流させながら、アイデアが上手く混ざるような政策が有効だともいえる。ただし、混ぜて何も生まれなければ意味が無いため、志のある人々を上手に混ぜるべきである。

3.3 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)

我々は HSR(Human Support Robot) と呼ぶ生活支援ロボットにおいて、まさにプラットフォームを現在展開し始めている。少子高齢化は何かで解決をしなければならない。そこで、我々は多様な分野で応えられるようなロボットの開発を主に2つのアプローチで行っている。

一つは、既存の技術を改良し、役に立つものを早く開発して世の中で使っていただくために、リハビリロボットをいくつか開発している。これについては、すでに約40拠点の病院、リハビリ施設に有償で提供し、実際に利用されている。

もう一つは、既存技術だけでは解決できない分野に取り組んでいる。その中で、アドバンスだと捉えているのは生活支援の分野であり、特に我々は作業の代替を狙った、家庭の中に入れるロボットの開発を2000年代初期から進めてきた。(図3-3-1)



図 3-3-1

開発には使用者との対話が欠かせないとして、生活で困りごとの多い人にいろいろな使い方を試してもらい、意見を反映させながら進めている。順番にステップアップし、最終的にはいろいろな人の使用に対応したい。一般の人での作業代替は、非常に波及効果が大きく、いろいろなアプリケーションが考えられる。例えば、ルンバだと床を掃くだけだが、部屋中の片づけや物の管理が可能となる。工場ではすでに物の運搬、ピッキングなどが次々と汎用的な環境で進められており、これらの技術は同じため、シナジーを持ってやっていきたい。

生活支援の作業代替について、一番初めにインスパイアされたのが「介助犬」であった。ペットボトルを取ってきたり、ドアを開けたりといった非常にプリミティブな生活支援をする。しかし、育成のお金と時間、犬を飼うことの負担などが問題となり、普及できないでいる。そこで、ロボットが代替になることを初期段階で想定した。日本介助犬協会と一緒にアンケートをすると、四肢の不自由な方にとっては、例えば、水を家族に頼むのも躊躇する場合があるという意見があり、思った以上に自立への要求が強かった。また、遠隔コミュニケーション（離れた家族や介護士に危険な状態を知らせる）が強い要望としてあった。そこで、生活支援ロボット開発では、これらの要望に対応し、自らの指示でロボットが身がわりとして動いてくれる「自立生活支援」、離れた家族や介護者が遠隔から操作する「遠隔介護支援」の二つのパターン、つまり、自分の身代わり、家族の身代わりというイメージで開発を進めてきた。

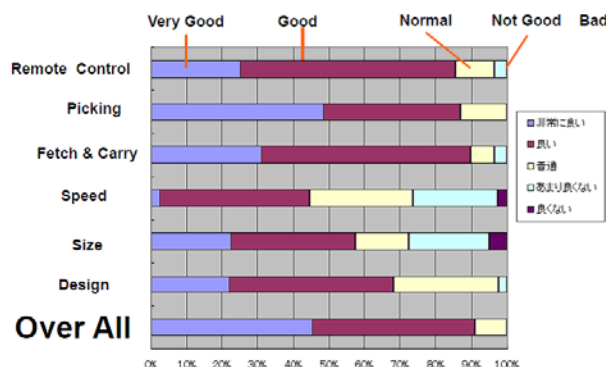
2012年には試作ロボットを開発した。特に、家庭に入れることから、非常に小型で、安全機能や簡単に操作できるといったコンセプトを示しながら、いろいろな場所に持っていった。（図 3-3-2）



図 3-3-2

そこでは、予想以上に高い期待を感じる事が出来た。一つは、実際のユーザー家庭での実験で、例えば、筋ジストロフィで指しか動かせない方に体験してもらったところ、機能はまだ未熟であるにも関わらず、自分でやれることがうれしい、このまま置いていてほしいと言われた。それから、図 3-3-2 に示す福祉機器展等での体験アンケートでは、ロボットに対して実は意外と肯定的で、機能としては改良が必要だが、人に頼むぐらいなら自分の道具として使いたいという意見であった。

3. コンセプトモデル HSR-2012 ユーザアンケート@国際福祉機器展2012



・全体としては約90%が肯定的
・機能（スピードなど）は改良要

TOYOTA Confidential

8

図 3-3-3

さらにもう一つ、ロボット研究者に開発したロボットを自由に使ってもらい、できたプログラムのコンテストをするハッカソンを行い、アンケートをとってみた。(図 3-3-3) この結果、ソフトウェア開発のプラットフォームとして使用したいという意見が 86% であった。これは、実際の家庭環境で利用できることに加えて、このロボットが ROS という世界的標準に適しており、ソフトウェア開発の共有化、データの蓄積が期待できるためである。

以上のような声を受け、2015 年に安全性、信頼性を向上させ、研究プラットフォームとして使い易いロボットを開発した。技術的な違いで例を挙げると、7 自由度のアームでは動きが予測し辛いことから、腕を 4 軸とシンプルにした。それでも、移動や昇降の自由度を加えると地面から手先までは 8 自由度と冗長な自由度を有している。しかし、本構成のロボットでは、現状の「動いて止まって取る」から「動きながら取る」というような、人が普通にやっているような動作を生成する技術の開発も必須である。開発当初は、2015 年版ロボットとして、こんなにシンプルなロボットでいいのかと感じたが、隣で人が見ながらロボットを操縦すると、実際にコップを持ち上げたり、家具を開閉したり、シンクや棚に食器などを運んだり、頑張れば紙もとることが可能である。つまり、ハードウェアは一見シンプルだが、これで十分だと判断している。ハードウェアのポテンシャルが確認できたことから、今後の開発では、認識やセンシング、知的判断といった技術に集中すればよい。さらに開発を加速するために、他の研究者たちと協力して一緒にやっていきたいと考えている。これらの開発をしっかりと詰めていけば、棚にアクセスしたり、シンクに皿を届けたりできるような支援代替が現実的になる。(図 3-3-4)

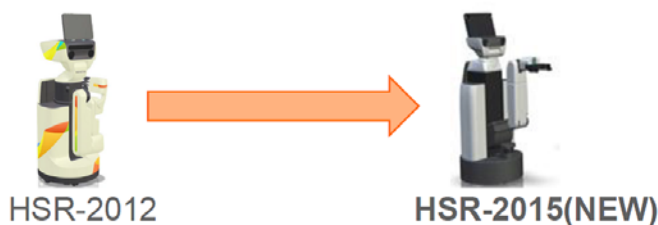
現在可能なタスクの例を少し説明する。苦戦しているのは物体の認識技術で、現状は難しい。そのため、操縦者が画面上で指差した物体をロボットがその場でセンシングし、自

動で台車を動かしつつ、腕を動かすということをやっている。また、遠隔操作でも、対話しながら扉を開けて移動し、カーテンを閉めることもそれほど苦もなくできている。現在はまだ操作が簡単ではないが、これらの一連の動きをコマンド化し、カーテンのような物体を自動で認識し、自律で作業する開発を進めている。

4. 研究PF HSR-2015

家庭内で使える研究PF(HSR-2015)の検討開始

1. 小型を維持し機能性を向上した設計
2. 安全性, 信頼性の向上
3. 研究プラットフォームとしての使いやすさ



機構の変更：1を満たすため
差動2輪+腕7軸 ⇒ 全方位+腕4軸（地面から手先まで8自由度）

TOYOTA Confidential

10

図 3-3-4

このロボットを使った研究コミュニティの公募をちょうど9月まで行っていた。多数の応募があったが、量産できないので、選定の上で10拠点程の大学に導入してもらい、自由に研究で使用してもらおう。現在は契約条件も含めて大学選定の議論中である。今後は、日本でも海外でもいろいろなところで使ってもらい、我々自身も実証の現場をしっかりと用意し、研究から実証へつないでいきたい。また、サーバー上でのソフトの共有化も進めていこうと考えている。

【質疑応答】

Q：ROS を使っているいろいろな人がソフトウェアを開発する場合、そのモジュール管理や他ロボットでの使用など、全体としての取り組みが大事だが、どういう考えを持っているのか。

A：生活支援ロボットの開発は既存技術の「改善」ではできない分野だと思っている。そのため、できるだけ幅広い人と一緒に開発し、社会的課題に到達する一番の早道を選択しようと考え、ROS を選んでいる。オープンで世界中の人が使えるソフトウェアプラットフォームの普及が研究開発段階では大事と思っている。

Q：マーケットに入っていくには、現状ではどれくらいのコストパフォーマンスで、人間

との代替を考えているのか。

A：例えば人のアワーレート（時給）とロボット代替の関係で計算は可能である。しかし、現状レベルでは見合わない。ただし、雑多な環境で扱えるような、知能・認識・センサーの研究次第では幾らでも逆転が可能である。それにより、一般の人の生活で使用され、生産量が増加すれば十分にバランスが取れると予想できる。障害者だけのマーケットなどと限ってしまうと、市場はそれほど大きくないので、いかに広げていくかが重要と思う。一般の人が使えるレベルまで到達すれば、結果的に障害者にとってもより使いやすくなると考えている。

Q：現時点で最も問題となる技術はどこか。

A：物や人や周辺環境を認識し、それに対して適切な判断で動くところが人のレベルに比べると低い。

Q：認識や判断は大事ではあるが、はじめの入力、あるいはどんな情報を入れるとよいかも大事ではないか。

A：センサーももちろん大事である。しかし、それを処理する認識技術はまだまだ発展の余地があり、人に比べるとかなり低い。そのため、自分で学習しながら、機能を高めていけるようなロボットが非常に大事と思う。

4. 新たな要素技術・基盤技術

4.1 手術支援ロボットの要素・制御技術

川嶋 健嗣（東京医科歯科大学）

手術支援ロボットの大学発ベンチャーでの実用化の事例も含めて、手術支援ロボットの要素・制御技術について紹介する。

現在、医療装置として手術ロボットが非常に注目されている。医療機器、特に治療機器は、輸入超過で日本が産業化していく必要がある成長分野である。そこではロボットの役割が非常に重要で、腹腔鏡手術の分野のほかにも、カテーテルを心臓までガイドしたり、非接触で放射線を照射して治療したり、整形外科で人工関節を入れるときに骨を削るのを CT でモニタしながらガイドしたりするロボットなどが既に実用化されている。

このような分野の要素技術は日本が非常に強かったが、ビジネスにするのはアメリカやヨーロッパが得意である。なぜなら、日本ではリスクが高いということで大手が参入しにくい実情がある。それから医療機器はリスクが高い割には市場が小さいと言われるが、例えば手術ロボットに関して NEDO の資料では 2035 年に 500 億円の市場になると予想されている。海外の資料でも、手術ロボット関連で 2035 年に 10 兆円の市場になると言われている。この数字の内訳は現在ほとんど da Vinci だが、大きく伸びる領域であり、日本がかかわるべきである。

図 4-1-1 に示すように、手術の中でも低侵襲手術が非常に注目されている。従来は開腹手術だったものを小さな穴を数カ所あけて内視鏡カメラと鉗子を入れて操作する手術である。ただ、鉗子は先端にグリップがついているだけのもので、腹壁が始点になって動きが逆になること、手首がないので非常に動きが拘束されることから、医師には高度な技術が必要になる。

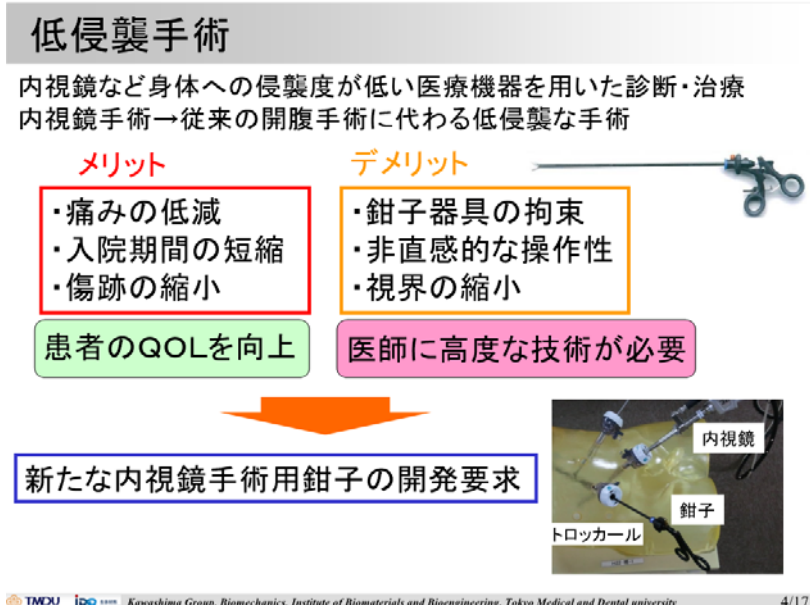


図 4-1-1

ただ、開腹手術では胃がん治療で1週間寝ている必要があるが、低侵襲手術では翌日歩けたり、女性の子宮筋腫では美容的にも傷口がほとんど残らなかったりというメリットがある。内視鏡手術は無視できないぐらい一般化しているのが実情である。日本内視鏡外科学会の資料によると、回答率48%で2013年度に18万件であり、30万件以上実施されている。特に、整形外科、婦人科系、泌尿器、腹部周りがどんどん内視鏡手術になっている。胆石、胆のう摘出、盲腸などは、ほぼ100%、内視鏡手術に置きかわっているのが実態である。

最も成功した手術ロボットとして有名な da Vinci は、マスター側に医者が没入して、スレーブ側が同じように動き、あたかも自分の手がおなかの中にあるような感覚で手術できるものである。現在、世界で3,000台以上稼働していて、国内でも200台以上稼働しており、3D内視鏡で非常にきれいに見えるなど優れた点もあるが、幾つか課題がある。

一つ目は、触った感じが一切返ってこないことである。前立腺手術は、尿道の途中の前立腺を切除して尿道をぐっと引っ張ってきて膀胱につないで縫うというのが基本的な手術なのでテンションがわからないと難しい。

二つ目は、当初は3億円、今でも2.4億円と高価なことである。それから、プラットフォームという話があるが、ほとんどデファクトスタンダードになっているので、売る価格よりも消耗品の売上げが圧倒的に多い。鉗子部は10回使うと使えなくなる初任給ぐらいする部品の交換が必要など、トータルのサービスに取り込まれてしまう。

日本で進んでいる複数のプロジェクトの方向性は、図4-1-2に示すように、コンパクト、安価、安全、現在は手術の際に穴を4カ所ぐらい開けているのを1カ所にするシングルポート、医師不足に対応するため遠隔からの治療、将来的には診断と治療の融合したトータルシステムとすることなどである。例えば、シングルポートで1カ所から入って中で分岐するような、いろいろな要素技術が必要になる。

手術ロボットの今後の方向性

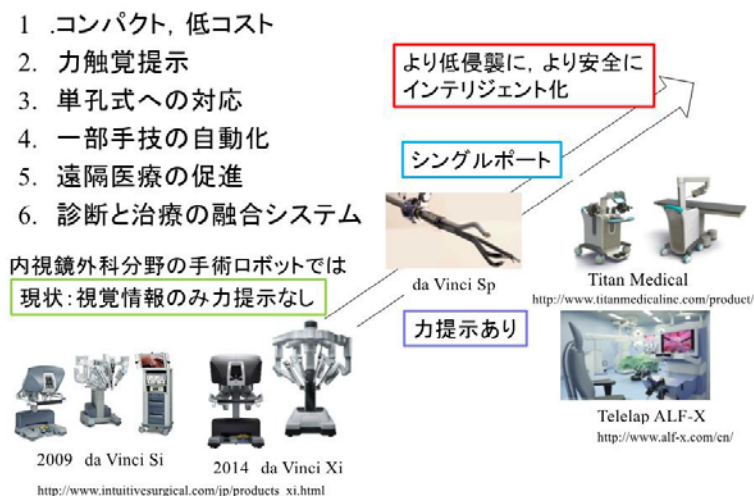


図 4-1-2

医療分野は、滅菌、洗浄など、他の分野と比べて非常にハードルが高い。医療で培ったロボット技術が他の分野にでき、応用展開が効くというメリットはある。スマート治療室という NEDO のプロジェクトが走っているが、治療室全体をロボット化するというロボットを広く捉えるという方向にも進んでいる。

そうした環境で使われる手術ロボットは、図 4-1-3 に示すように、MRI に対応できる生体適合材料、絆創膏を貼っておけば済むような 3mm 以下の穴から 400g 程度の肝臓を扱う十分な強度を持つ構造材料、滅菌・洗浄に耐えて水で何度も洗えて 125℃のオートクレーブにかけられるセンサーなどが求められる。それから、原理的には様々なアクチュエーターがあるが、実際に使われているもののほとんどは電動モーターである。また、手術室はたこ足配線の山であり、無線化が非常に重要である。制御では、ナビゲーション技術、いずれは BMI を使うかもしれないが、人間とロボットが一緒に作業したり、ここをあけてほしいと言ったときにロボットが先回りして肝臓をぐっとよけてくれるような技術が必要になる。実用化にはまだ遠いが、ボタンを押すと自動でやるような自動縫合が必要だろう。

手術支援ロボットに求められる要素・制御技術

NEDO 世界市場の獲得狙う医療機器システムを開発へ
—手術支援からリハビリ、治療室まで一体的に展開—



要素

- MRI下で対応可能な生体適合材料
- 加工が容易で強度が高い生体適合材料
- 滅菌、洗浄に耐え得る超小型センサ
- 小型・軽量で直接駆動が可能なアクチュエータ
- 無線化技術

制御技術

- ・ ナビゲーション
- ・ 人間機械協調制御(BMI, インテリジェント制御など)
- ・ 手技の一部自動化

图 4-1-3

内視鏡外科分野で要求される要素を図 4-1-4 に示す。da Vinci が売れたといっても 3,000 台であるように、医療分野の課題は電子部品なども数が出ないことである。大手企業には大体 10 億～数 10 億の市場がないと取り組めないと断られることが多く、少量多品種に対応する必要がある。それから、医療機器なので、長期的に安定供給する必要があることがある。また、内視鏡画像は高密度化させることが非常に重要であり、その際に 3D で見えると非常に便利である。

手術は目と手と言われるように、ウェアラブルなセンサーで患者の状態をモニタリングできることが重要であり、その際には無線化も重要である。滅菌・洗浄にコストも人手もかかるので、安くできれば、一回使ったものは使わないことができ、滅菌不全や洗浄不全の心配もない。

内視鏡外科分野 要求される要素

- 手術支援ロボットには制御用PCほかで多数の電子部品が使われているが、**多品種少量**が求められる
例えば手術支援ロボット
da Vinci は世界で約3000台強しか稼働していない
- 医用電気機器の安全規格などに適合し、長期的な安定供給
- 医師への画像、情報の提供が極めて重要
例えば内視鏡画像の提供 今後4Kさらに**8Kへ** 小型、省電力化
- 患者の状態モニタリング 例えばウェアラブル**センサ**
- 手術室は配線だらけ **無線化**はニーズが高い
- センサなど 低価格で使い捨て(ディスポ)の運用もあり

TMDU IBS Kawashima Group, Biomechanics, Institute of Biomaterials and Bioengineering, Tokyo Medical and Dental university 9/17

図 4-1-4

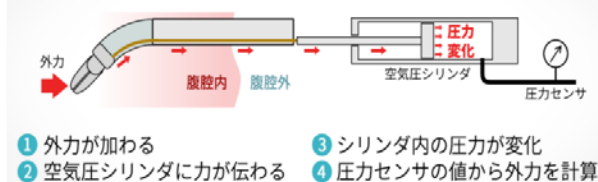
手術ロボットはリスクが高く、大手企業は実用化しようとする二の足を踏む。そこで、文科省の START プロジェクトを活用して、空気圧で動かすという技術を活かした大学発ベンチャー企業を設立した。人間と接する手術ロボットのアクチュエーターには、高いバックドライブ、力を出力したら、それが入力側に跳ね返るというやわらかさを有していることが重要である。図 4-1-5 に示すように、空気圧の場合は何かぶつかったら、それが直接根元の圧力に跳ね返るのでバックドライブがある。減速機を有する電動モーターではバックドライブは得られない。圧力を見ていれば先端にセンサーがなくてもよく、力覚を返せるだろうというのが原点で、da Vinci に対抗できるコンパクトで力が返り、安くて安全なものをつくろうと考えた。

空気圧アクチュエータの特性を活かした外力検出

空気圧アクチュエータの特徴

- ◆ 空気の圧縮性によるパッシブな柔らかさ ➡ 人間親和性
- ◆ 重量対出力比が高く、減速機なしに用いることできる
- ➡ **高いバックドライブバリティ**
- ✗ 摩擦などの影響を受けやすい ○ 圧力による外力検出が可能

外力推定の原理



TMDU IBS Kawashima Group, Biomechanics, Institute of Biomaterials and Bioengineering, Tokyo Medical and Dental university 11/17

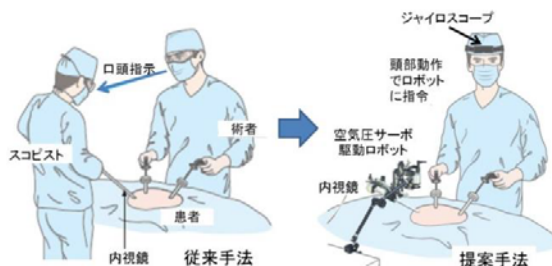
図 4-1-5

空気を使ってコンパクトで、おなかの中に入るところが回転中心になって動くようになっている。現在、手術ロボットシステムは、動物実験の段階であり、早く実用化できないかということで、ロボットの一部を切り出して実用化したものを最後に紹介する。

現在は、手術のときに内視鏡を持つ医者がいて、右だ、左だと言われて内視鏡の向きを変えるが、このロボット化を狙った。かつて日立製作所が日本で初めて出した医療用内視鏡把持ロボット Naviot というのが 2000 年ぐらいにあったが、当時は早過ぎたことと、専用の内視鏡しか使えなかったことで、うまくいかなかった。私どもは、センサー技術が良くなったことと、手が邪魔してはいけないということで、図 4-1-6 に示すように、頭の動きをセンサーが捉えて動くものをつくった。2015 年 8 月にベンチャーで実用化して、東京医科歯科大学の病院でも使っている。空気を使ってやわらかさがあることと、医者が頭を動かすとロボットのカメラの視点が変わり、手を使わないで良いというところをメリットにしている。手術ロボットの領域は、様々な要素技術や制御技術が必要な分野で、今後一層重要になってくると考えている。

手術ロボットから派生した内視鏡ホルダーロボット

術者が意図した通りの安定した視野を提供する
立体内視鏡操作システムの開発



- ・ ロボットアームによる内視鏡の保持
- ・ ヘッドトラッキング（頭部運動計測）による視野コントロール

TMDU ibs Kawashima Group, Biomechanics, Institute of Biomaterials and Bioengineering, Tokyo Medical and Dental university 14/17

図 4-1-6

【質疑応答】

Q：医療分野ということで材料などにも厳しい条件があるということだが、ロボットをつくる際の協力体制構築のハードルはどの程度あるのか。大学発ベンチャーのロボットの製作に協力している企業がさらに材料のネットワークを持っていて、その会社に連絡して適切なものを選択するという形なのか。

A：なかなか高いハードルがある。まず、生体適合という認証を受けている材料は、割とすぐ使える。認証を受けていない材料はプロトタイプでは幾らでも使えても、実用化しようとする材料の適合認証をとる必要がある。手術ロボットは医療機器のクラス 3 なので、承認はかなり大変だが、最近は日本も承認をどんどん早くしようという流れになってきて、大分変わってきている。私どもの大学発ベンチャーでは最終的な組

み立てやソフトを開発しているが、各パーツの製造は医療機器なのでライセンスを持つ製造業者をお願いしている。

Q：市場規模が小さいというだが、患者数が少ないわけではないので、機械に対する需要が少ないのか、もしくは全ての病院が個別に機械を導入すると非効率ということか。

A：自動車は売れなくても何百万台というのと比べると、病院は一回行き渡ると5年ぐらいいは替えないので、国内に全部行き渡っても売れる数は何千台とか何万という数になってしまう。このため世界的に展開することを考えることが不可欠である。

Q：空気圧アクチュエーターは力覚が扱える優れた点があるが、電磁モーターはサーボモーターで非常に精密に制御できる。手術では、かなり精密な動きが要求されると思うが、その辺の妥協点はどうか。

A：指摘のとおり脳外科や心臓外科で空気圧アクチュエーターを使うのは勧められない。空気を精密に動かす技術を持っており、ナノオーダーの位置決めができるが、万が一、空気が変に動くと直接外に伝わるデメリットがある。おなかの中なら、先端で0.1mm～1mm程度の精度で足りるし、2mmの血管も0.1mmぐらいの精度なら縫合できる。メリット・デメリットのトレードオフはある。

Q：基本的な要素技術は既につくられていて、今、一番課題になるところは、システム化のところなのか、信頼性なのか、そのあたりを教えて欲しい。

A：ロボットには、コンプレッサー、バルブ、マイコンが載っているが、バルブやコンプレッサーは海外製である。重要な要素技術が日本製でないのもう少し国産技術を高めていけると良い。

Q：日本の部品メーカーがこういう領域に興味を示さないから、結果的に海外の部品が入ってくるのか、それとも技術的な実力が海外の方が優れているのか。

A：技術的にも実力的にも空気圧はドイツが一番進んでいるが、前者も当たっている。日本のメーカーはすごく及び腰である。法律的に何かあったらロボットを製造するベンチャーが全部責任を負うと説明しても嫌がる。

4.2 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）

新しいアクチュエータが実現する新しいロボットについて紹介する。ロボットにおけるアクチュエータの歴史をざっと見てみると図 4-2-1 のように、もともとは油圧モータから始まったが、1980 年中頃のレアアースモータやブラシレスサーボモータが出てきて以降、ほぼ電磁モータが使われるようになっており、油圧モータや空気圧モータはそれぞれ領域を決めて使われている状況である。

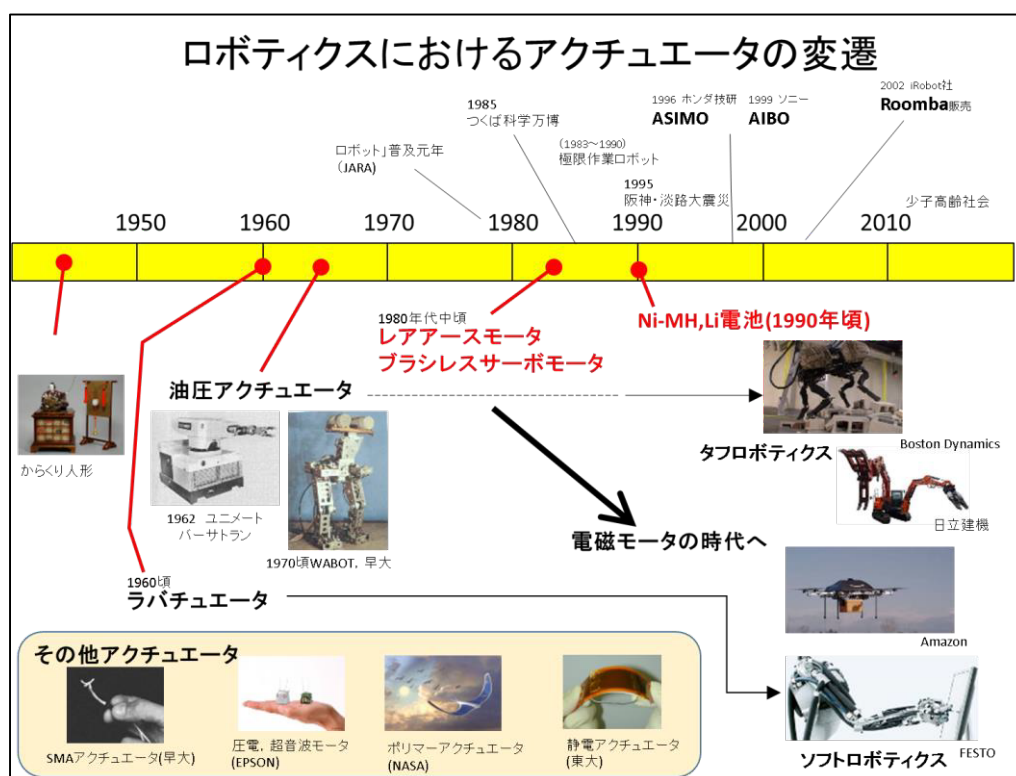


図 4-2-1

電磁モータに着目すると、最近流行のドローンにしても何にしても、原理的には1980年代の技術であると言える。ここ30年のロボティクスを牽引しているのは、マイクロコンピュータであったり、人工知能といったソフトウェア系であり、そろそろ我が国からアクチュエータのブレークスルーを起こしたいと考えている。

形状記憶合金、圧電、超音波、ポリマー、静電などの電磁モータ以外の新しいアクチュエータでどんなロボティクスが可能になるかという例を図 4-2-2 に挙げる。ハーバード大の羽ばたきロボットは圧電モータで動いているが、電磁モータではこんなに早く動かせず、軽くもできない。油圧モータで動いている Wildcat は、非常にダイナミックな動きをし、たとえ倒れたとしても壊れない。小腸の腸閉塞防止に利用されているイレウスチューブは柔らかい空気圧モータで動いている。人工筋肉については私の研究対象であり、後で詳しく話す。MIT で作られた形状記憶合金で動く Earthworm robot の優れた点は、トンカチで叩いても壊れないほど頑丈であることであり、普通のロボットはトンカチで叩くと壊れるのと対照的である。最後の Cheetah はドローンと同じく電磁モータで動いている。



図 4-2-2

このように、実はアクチュエータは 1980 年代に終わったわけではなく、そこをベースに進化している技術と言える。他にも、私が岡山大学時代に作った X 線に写らないアクチュエータがある。胃の透視の際に利用できる。通常、バリウムをたっぷり飲んだ後、ベッドをひっくり返されたり、転がされながら胃の透視を行うが、X 線に写らないアクチュエータをベッドと患者の間に挟んで動かすことで患者を動かさなくても胃の透視が可能になる。アクチュエータが X 線に写らなければ、そういう使い方もできる。

私が今研究している事例を 2 つ紹介したい。一つ目は空気圧アクチュエータを利用した人工筋肉であり、もう一つは ImPACT で東北大の田所先生がリーダーのタフロボティクスチャレンジの中で取組んでいる新しい油圧アクチュエータである。この 2 つはまったく性格の異なる研究開発である。

まず、空気圧アクチュエータの応用例である細径人工筋である。原理自体は古く、細い空気圧アクチュエータを束ねることによっていろいろな特性が出たり、いろいろなことができるようになる。例えば、1 本だと収縮力 5.8 ニュートン、収縮率が 24.8% だったものが 13 本束ねると収縮力 77.2 ニュートン、収縮率 32% になる。収縮力に関しては 13 倍 ($5.8 \times 13 = 75.4$) よりも少し大きくなる。そのような相乗効果が生まれる。また、より人間の動きに近いロボットが作れるし、パワーサポートのようなウェアラブル的なものやジャコモッティロボティクスができるようになる (図 4-2-3)。



図 4-2-3

「よりヒトらしいロボット」に関しては、ASIMO などはおそらく 5 個くらいモーターを搭載しているが、これまでのロボットはロボットダンスのようにカクカクと動く。実際の人間は片足だけでも 50 個の独立した筋肉で動いているわけで、たくさんの把持があり、冗長系である。細径人工筋を用いると滑らかな動きが可能になる。例えば、従来のロボットは膝の関節はベンディングの 1 自由度だけであったが、人間の場合には膝を曲げると回転自由度も加わるように姿勢によって自由度が変わることがある。細径人工筋はそれと同じ特性が出せるため、より人間らしい動作ができると考えられる。

ウェアラブルに関しては、これまでに HAL などのロボットがたくさんあるが、もう少し軽くて着心地の良いものがつくれないかという動機で、SIP プロジェクトとして進めている。細径人工筋をスーツに編み込んで、実際に羽田空港のバックヤードで荷物搬送に使っている。これは電磁モータにはできないことである。

ジャコメッティロボティクスとは、ジャコメッティというスイスの彫刻家に由来している。ジャコメッティは針金のように極端に細く、長く引き伸ばされた人物彫刻で有名である。すなわち、エッセンスだけで何かを作るという意味で私が勝手に使っている言葉である。現代の機械やロボットは産業革命以降、大出力化・高速化・高精度化を狙っていたため、ものすごく高機能・高性能のロボットを作れるようになったが、すぐに 200kg、300kg という重量の図体になってしまう。例えば、壁掃除ロボットも落ちたらどうなる、転倒したらどうなる、という危惧がある。それに対して、細径人工筋は非常に軽くて力があるため、先端にカメラを搭載したアーム（計算上は 20m まで可能）や壁を登る細長いロボットのようなものができる。これらは軽量であるため落ちたとしてもそれほど被害を出さない。

ただし、空気圧アクチュエータの一番の弱点はコンプレッサがあることである。よく動き回ったり、水の中を泳ぐようなものを作っているが、空気を送るホースがついている限り、「何に使うのですか？」と言われると、反論できない状況である。空気圧だけではなく、ボタン電池か何かで動くようになると、位置づけもがらりと変わるだろう。そこで、燃料電池を組み込むことを考えた。もともと空気圧アクチュエータは加圧した状態から元に戻すときに空気と一緒にエネルギーを捨てていたのが非効率であったが、燃料電池を利用することで非常に効率が良くなる。今は実際にマッキベン人口筋の中にイオン交換膜を入れて電池で動くものを作っている。

次は油圧アクチュエータの話である。東北大・田所先生がPMをされているImPACT「タフロボティクスチャレンジ」の中で取組んでいる。油圧という点で既にいろいろなところで使われているのではないかとよく言われるが、ロボット用のものは実はほとんどない。今使われているものはロボットには大きすぎるため、小型化する必要がある。バルブ、継手、ホースなどを多自由度にして、例えば12自由度をもつロボットハンドでは、指1本あたり700キロを出すことができるので、力もあり器用な動きもできるロボットが可能となる。これはおそらく今の建設機械で使っているシリンダーを用いて同じサイズでこの多自由度を実現するのは難しいだろう。

最後に、ロボット用アクチュエータの研究開発には二面性があることを強調したい。図4-2-4に示すように、一つは革新性、もう一つは実用性であり、この2つはある意味では正反対の言葉である。当然両方とも必要であると思うが、研究を実施する際には位置づけを明確に意識しておく必要がある。例えば、燃料電池で動く人工筋に関しては、いきなり「耐久性はどうか」と聞いてくる人がいるし、ロボットハンドの話にしても、「素晴らしい」と言ってくれる人もいれば、「こんなもの企業ですぐ作れる」という人もいる。このような人たちに自分の研究の位置づけをきちんと説明していけないと感じている。



ロボット用アクチュエータの研究開発の2面性 革新性と実用性

- かなり性格の異なる2つの側面
- 両方重要. 位置づけを明確に意識する

革新的アクチュエータ(革新性)

材料, 新規な小規模研究をある程度数トライ

ロボットに使えるアクチュエータ(実用性)

価格, 信頼性, 機構と一体で考える. 産学連携

図 4-2-4

【質疑応答】

- Q:** マッキベン型の空気アクチュエータに燃料電池を組み合わせることはとても面白い発想だと感じた。ただ、実際にはエネルギーに効率性をかけたものしかパワーは出ないと思うが、原理的にはどれくらいのパワーが期待できるのか。
- A:** 理論的にどのくらいまで出せるかは詰めていないが、現段階では燃料電池を使った場合には使わない場合に比べて 40%程度効率が向上している。
- Q:** 空気圧アクチュエータはドイツが強いということだが、先ほどの燃料電池との組合せとかの新しいアイデアに関しては日本はどの程度の位置づけなのか。諸外国からもしろいろなアイデアが出ている状況なのか。
- A:** 海外も同じようなアイデアを持っているところがあるかもしれないが、日本が遅れているということはない。企業としては、ドイツには強いところがあるが、日本にも先端的な企業があるので負けている印象はない。
- Q:** 新しい材料があれば空気圧アクチュエータの性能がもっと上がるという期待はあるのか。
- A:** 新しいアクチュエータを作るには材料をどうするかが一番重要であるが、最後に話したように革新性と実用性の二面性が大事である。研究レベルの材料の話と、それを如何に使えるものにするか、両方考えないといけない。
- Q:** どんな材料が候補となるのか。情報ネットワークをどのように構築するかが重要ではないか。
- A:** 今は個人的なつながりや知識が元になっている。

4.3 ロボット用センサの課題

田中 秀治（東北大学）

ロボットには、いろいろなセンサが使われている。例えば、ソフトバンクの Pepper では、イメージセンサ、マイクロフォン、ライダー（LIDAR : Laser Imaging Detection & Ranging）、タッチセンサ、距離画像センサなどが、Boston Dynamics の Big Dog でも、いろいろなセンサが使われている。こうしたセンサの中には、かなり高価なセンサがある。ライダーやジャイロはかなり高価なセンサであり、例えば ASIMO のおなかに入っているジャイロは数百万円するだろう。だから、ASIMO は皆さんの家庭には来てくれないということになる。

図 4-3-1 に示すように、ジャイロは性能に非常に幅のあるセンサである。ローエンド品は、携帯電話やカメラなどに入っているもので、100%、MEMS である。ハイエンド品は、飛行機用、そして一番高価ものは原子力潜水艦用である。ローエンド品とハイエンド品で性能は5桁ぐらい違って、値段はローエンドが 100 円とするとハイエンドは1億円くらいと幅がある。こういうセンサが家庭に来るには安くする必要があるので、私たちは 100 円の安いジャイロを、例えば 100 倍性能をよくし、値段を 1,000 円くらいにする研究にも取り組んでいる。

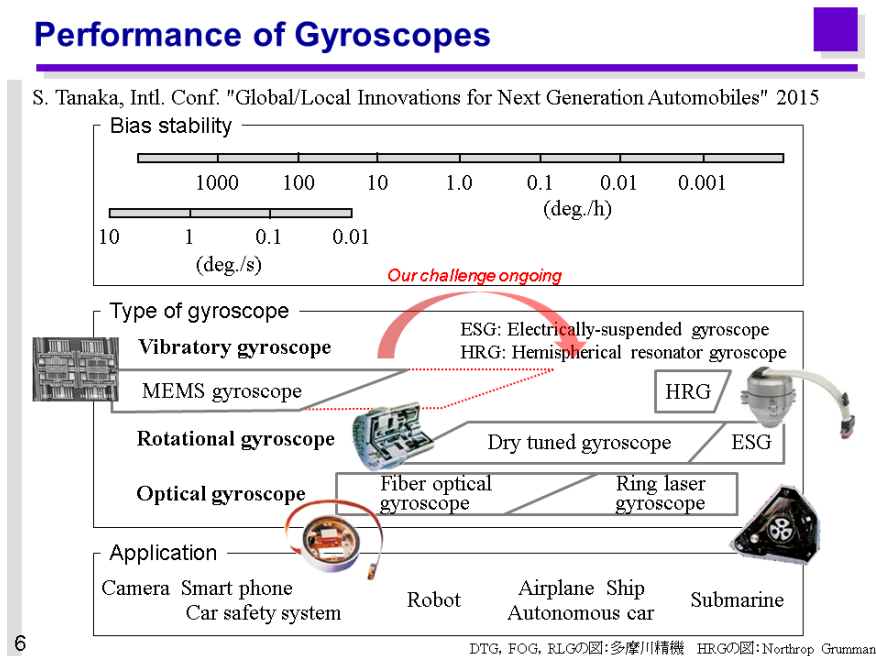


図 4-3-1

MEMS ジャイロは簡単に言うと、図 4-3-2 の左の図に示すように、マス（錘）を2軸で支える構造になっている。これを一方方向に振動させておくと、回転したときに Coriolis 力が働いて直交方向にも振動し始めるので、これを検出する仕組みである。例えば東北大で基礎研究した図 4-3-2 の右下のチップはレクサスなどに使われている。

MEMS Vibratory Gyroscope

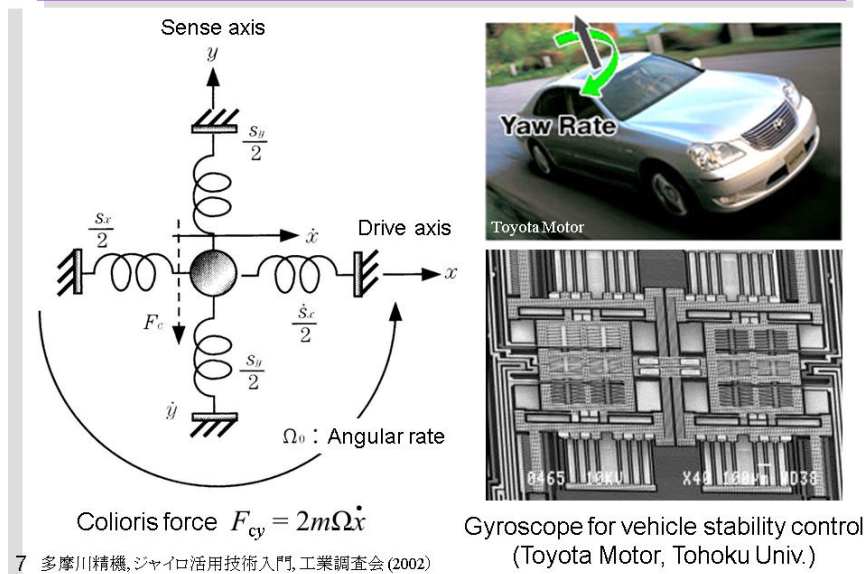


図 4-3-2

この MEMS ジャイロは、完璧な構造をつくることができれば非常に高性能になるが、実際は完璧なものとはつukれない。例えば、2 軸の直交振動系の直交性が完璧でないなどの不完全性に対して、妥協した現実的な設計がなされているために性能がよくない。つまり、原理的にはもっと高性能化できるが、技術の問題でできていない。今の 100 円のセンサを 100 倍高性能にすることや、非常に高価な何百万円のセンサを安くすることは、ほとんど技術の問題である。ジャイロ以外のセンサについても、高性能にするには同様の研究開発が必要である。

一方、ロボットで作る人からすると、買えるセンサを使ってロボットを作るしかない。したがって、買えるセンサ、売れるセンサをどう開発するかが大きな問題である。ロボットの価格は、何人分のマンパワーを代替できるかで決まるので、おのずと上限があり、台数の少ないロボット専用センサを開発して実用化していくのは経済原理に合わない。では、どうするか。今は自動運転が注目されており、産業界もその方向へいろいろな技術開発を行っているという状況を活かすことができる。自動運転にはいろいろなレベルがあり、ADAS（先進的運動支援システム）から完全な自動運転まで、それぞれの段階で実用化される。そのときに必要なセンサは、例えば高性能のジャイロ스코プやライダー、赤外線センサ、超音波センサであり、これらはロボットに必要なセンサでもある。自動運転用に開発されれば、経済原理についての問題は解決できる。

ジャイロの話に戻る。自動運転に必要な性能は大体 $0.1^\circ/\text{h}$ と言われており、現在の MEMS ジャイロの性能を 100 倍向上できれば自動運転に使える。そうするとロボットにも使えることになる。現状、ロボットの企業は少ないので、私たちは自動車用センサの企業をカスタマーとして研究開発を行っている。Google カーなどについているライダーも

非常に高価であるため、これを MEMS 技術で安価にする研究にトヨタ自動車と一緒に取り組んだ。図 4-3-3 に示すように、MEMS スキャナーを使って距離画像を撮ることができる。東北大で開発したこの MEMS の 2 軸スキャナーは、日本信号が実用化し、恵比寿駅のホームドアなどに使われている。

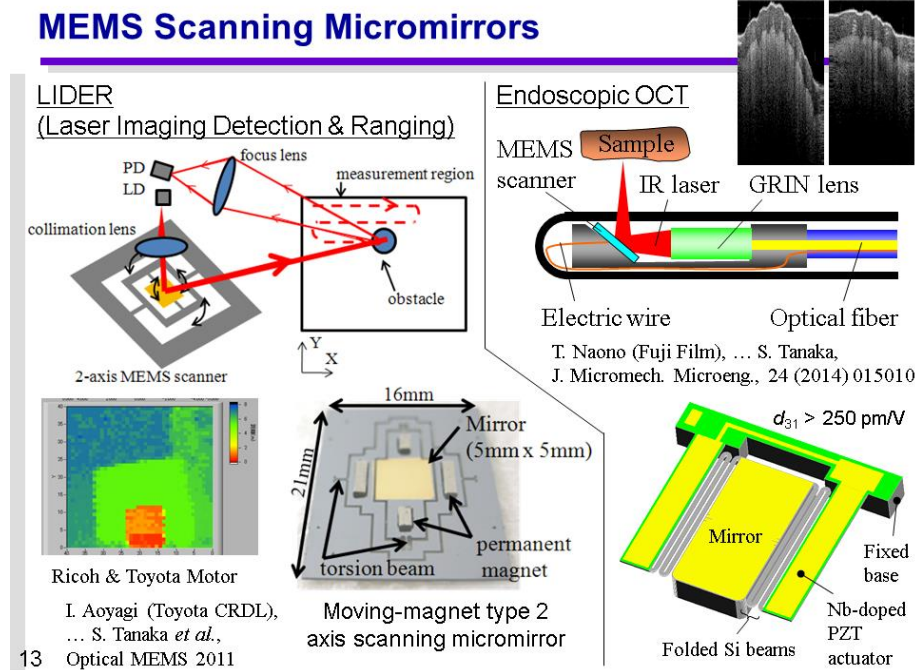


図 4-3-3

光スキャナの性能比較

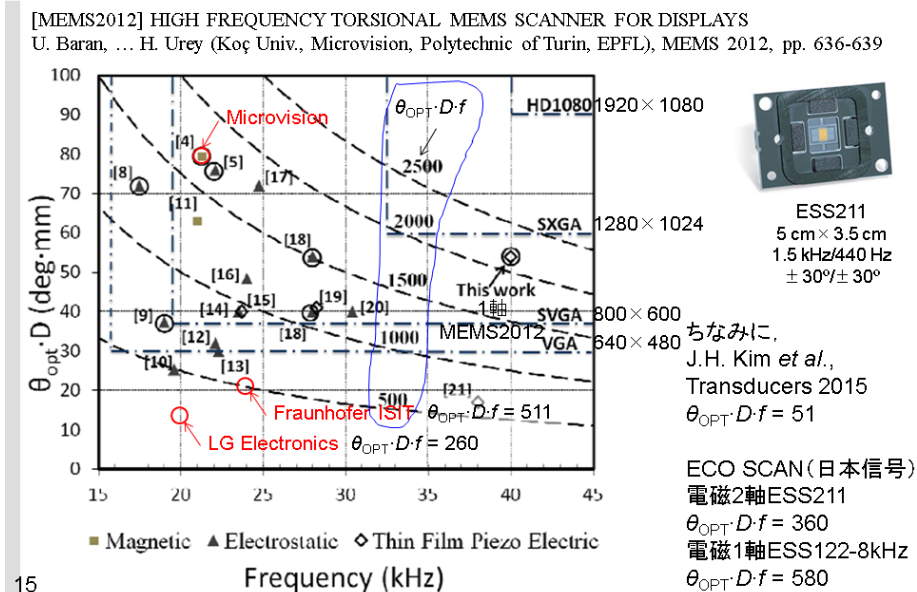


図 4-3-4

図 4-3-4 のように周波数とミラーの大きさ×振れ角を軸にとってプロットすると、右上にいくほど性能がいいことになるが、日本信号のスキャナーは下の方に位置する。論文レベルではより性能の高いものを作ったという報告があり、原理的にはもっと性能が良い MEMS ライダーは作れるはずなので、今後の課題となっている。

その他に、現在、携帯電話に入っているマイクロフォンは、100%、MEMS であり、iPhone 6S には 4 つ入っている。今後、マイクロフォンがロボットに入ると、人とマイクロフォンの距離が遠くなる。携帯電話では口とマイクロフォンとの距離は 10cm ～ 30cm 程度だが、ロボットでは 1m 以上になりうる。さらに、車の中では非常にうるさい状態での利用となり、このような新しい応用では、マイクロフォンの性能指数である SNR（信号・ノイズ比）を非常に高くする必要がある。現在は 65dB 程度のマイクロフォンが携帯電話に入っているが、70dB 以上にしないと、そういう応用には適合しない。今後、自動音声認識がいろいろなところに入ると考えられていて、マーケットも期待しているが、技術の問題でできていない。現状技術の延長では 65dB 以上には如何ともしがたい。マイクロフォンは、現在、世界中で 25 億個ぐらい製造されており、技術が開発できれば大量に売れるセンサになる。

このように、売れるセンサをつくるには、技術の問題と世の中にどのように出していくかという戦略の問題がある。そういう意味で、大きなマーケットはあるけれども、技術がない、例えばジャイロやマイクロフォンに力を入れていくのが一つ賢い方法である。一方、大きなマーケットが見えていないセンサでは、別の方法も考える必要がある。

2 番目の例として、トヨタ自動車と一緒に取り組んでいる体中に何千個も触覚センサをつけられるようにするプロジェクトを紹介する。センサ自体は MEMS の 3 軸力センサだが、1 個 1 個のセンサをコンピュータに配線すると配線のお化けになってしまうので、図 4-3-5 に示すようにバスラインのノードにたくさんセンサを付けられるようにした。そのためには、1 個 1 個のセンサが賢く、しかも通信機能を持つ必要があり、各センサが MEMS と LSI を集積したものになっている。

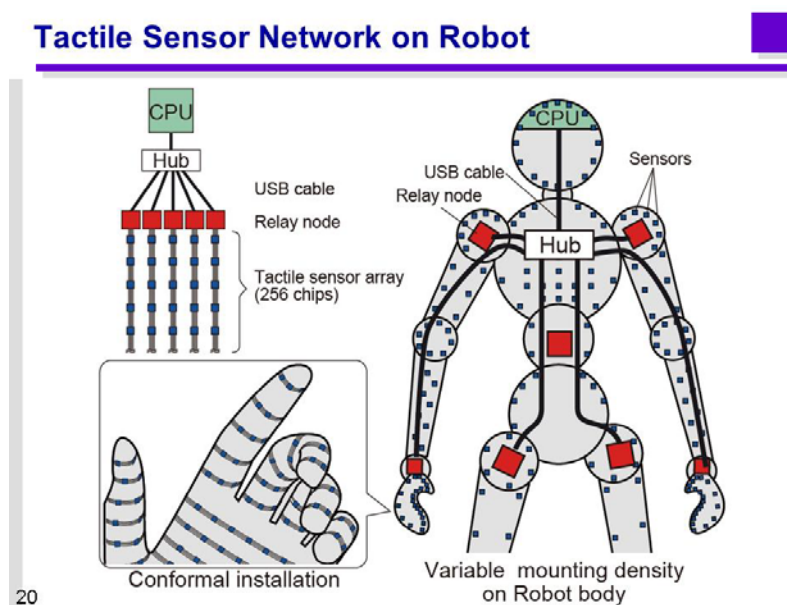


図 4-3-5

例えば、図 4-3-6 は古いものだが、前面に MEMS の力センサがあり、後ろに東北大で設計した LSI があり、貼り合わされたような形で大きさは $2.4 \times 2.4 \times$ 厚さ 0.3mm ぐらいになっている。これをフレキシブルワイヤーの上にとたくさん実装しなければいけないので、配線は LSI の裏側に溝を通して出している。

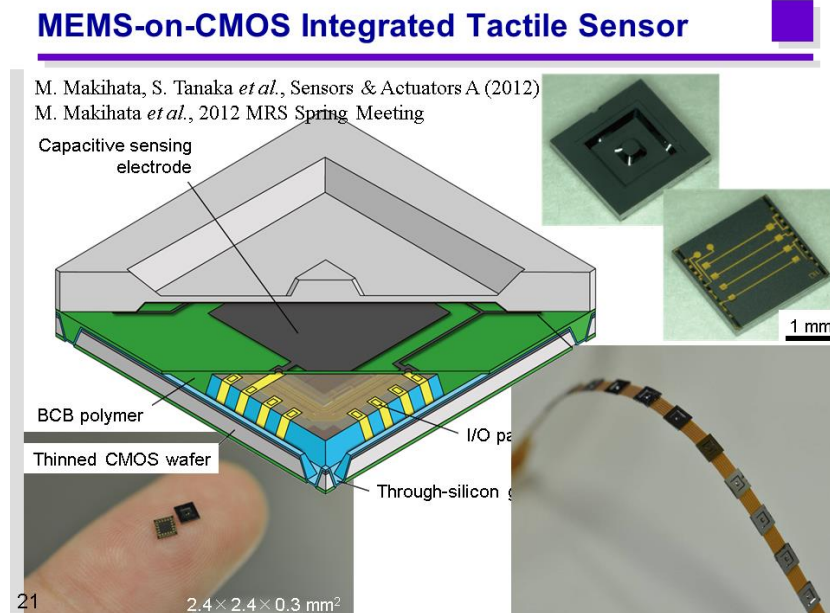


図 4-3-6

このセンサの真ん中を押すとパルスが出るが、同じ力で押し続けるとパルス間隔がだんだん広がる。1 個のバスをたくさんのセンサで共有するため、データがバスの上にあふれないように、パルスがだんだん間引きされるようになっている。1 個のパルスを拡大すると、ID と触覚のデジタルデータになっていて、FPGA でデコードするとアナログの触覚がわかる。

現在、このネットワーク触覚センサを開発しており、特に LSI の開発には何千万円もお金がかかっている。現在の $0.18 \mu\text{m}$ の次に TSMC の $0.13 \mu\text{m}$ の LSI でつくっている。この LSI を MEMS とウエハレベルで集積化するために、ASIC の背面に東北大で TSV を加工して、MEMS に貼り合わせている。システム構成は FPGA で各センサを読み取り、さらに上のシステムに上げていくものであり、これも開発している。

この開発はトヨタ自動車と共同で行っているが、今後は広く用途を広げるため、オープンプラットフォーム化を考えている。触覚センサだけでなく、様々なセンサに適用できるようにする。おそらく、LSI はスタートアップから供給することになるが、トヨタ自動車自身もユーザーの立場でいたいということであり、オープン化したいと考えている。これは世の中に物を出していく一つの方法である。

まとめると、買える価格の高性能のセンサが必要である。主に技術の問題だが、それ以外に世の中に出していく戦略が非常に重要になってくる。コンシューマーが買える価格になって普及すると、世界が変わる。スマートフォンのように今まで考えもしなかったアプ

リケーションができて、ますます技術は進んでいくことになる。これがイノベーションだと言える。高性能のセンサを世の中に出していくという意味では、自動運転が現状の最高のドライバーである。ここで開発されたセンサは、もちろんロボットにも使われる。大きなマーケットがあれば研究開発にリソースをかけられる。

【質疑応答】

Q：65dB 以上の MEMS マイクロフォンがづくりにくいというのは、具体的に何か技術的な問題があるのか。

A：マイクロフォンの SNR とは、どれだけ小さい音をとれるかという指標で、それはノイズで決まる。電気が抵抗体を流れるとノイズが出るのと一緒に、音の圧力が流れているところに何か邪魔物があるとノイズが出る。現在の静電方式では、静電容量読み取り電極が邪魔物になり、どうしてもノイズを減らせず 65dB 止まりになる。チップサイズを大きくするとノイズを減らせるが、コストの問題があり、さらに、単純に大きくすると壊れやすくなる。人がふっと息を吹いたらメンブレンが破れるようでは話にならない。そういうことを考えると 65dB が限界になる。全く違う変換の方法とか、シリコン以外の全く違う材料を使うとか、同じ大きさで 70dB 以上を実現する技術が求められている。

Q：MEMS の画像センサの高精度化について、世界的にはどんな状況か。また、どんな壁があるのか。

A：現在、MEMS マイクロミラーは、ほとんどが自動車のヘッドアップディスプレイ用として、研究開発されている。日本でも多くの会社に取り組んでいるが、信頼性の問題で苦しんでいる。原理的には動くし、ラボでも動くが、あらゆる環境を考えたときの信頼性がまだクリアできていない。これが一番大きな問題である。さらにそれ以上に高性能化するには、アクチュエータが問題になる。新しい材料のアクチュエータでも出てこない、構造だけではどうしようもない。投入できるパワーに効率をかけたものが出てくるパワーなので、構造を変えても、どこかが良くなればどこかが悪くなるだけである。新しい材料が出てこない、性能は上がらない。

Q：自動運転車はある意味、ロボットに似ているし、市場もあるので、ここをターゲットに様々なセンサを開発するのは良いストーリーだと思う。オープンプラットフォーム化して、様々なセンサを開発するというストーリーがあるのか。また、そこでのターゲット目標はあるのか。

A：トヨタもオープン化に賛成しており、そのようにプロジェクトを進めている。触覚センサ用 LSI は、現在は触覚センサと集積化しているが、加速度センサやタッチセンサなど、他のセンサもつながるように開発している。

Q：MEMS ミラーで距離画像を撮ろうとすると、社会ニーズと比べて、少し性能が悪いという話だが、学会発表では性能が出ていて、実用化に取り組めばできるのか。それとも何か壁があって、そこまでいかないのか。

A：ラボではできているが、2mm 程度の大きなミラーが共振しているので、信頼性が非常に難しい問題で、そこがクリアできていない。

Q：触覚センサを多点や面に配置しようとするすると配線が大変ということだが、CMOS LSI は、少ない本数の線で通信するためのコーディングなどの機能を実現するための LSI か、それともセンシティビティやオフセットなどを補正する LSI か。

A：少ない本数の線でセンサをホストに繋げるための LSI である。バスの中には2本の電源用と通信用で4～5本の配線が張っており、そこに LSI をつけて、さらにその LSI の上にセンサをつけている。LSI は静電容量の変化をはかる機能と AD 変換機能も持っていて、センサ信号をデジタルのパケットにして、ID と CRC（巡回冗長検査）のコードをつけ、4b/5b の変換をして、FPGA のホストへ送っている。

4.4 身体と場に埋め込まれた「知」を探る

大須賀 公一（大阪大学）

ロボットの技術あるいは制御を突き詰めようとする、結局は生物が持っている知のものがどこにあるのか、ということ突き詰めることになるのではないかと私は考えている。本日は二つの話がある。一つ目は「知能のものは脳ではない」ということで、それでは知の起源はどこにあるのかということ、身体と場の相互作用の中にその秘密があるのではないかと考えている。二つ目は、知能というものをどういう観点で見るかという話であり、私の専門としている制御という視座から見てみる。

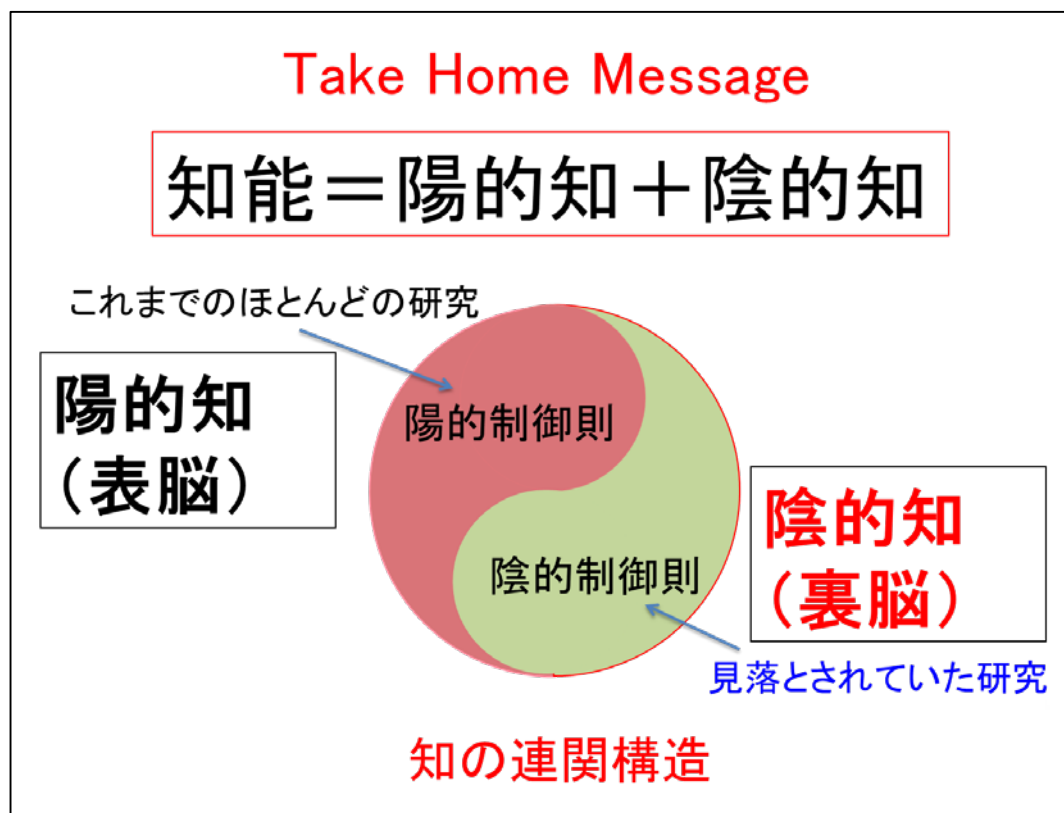


図 4-4-1

一つだけ覚えておいてほしいのは、図 4-4-1 にあるように、「知というものには陽の部分と陰の部分がある」ということである。すなわち、陽的な制御則 (Explicit control law) と陰的な制御則 (Implicit control law) というものがあって、両方が合わさって一つの「知」に見えるのではないかと考えている。生物における脳神経系あるいはロボットにおける計算機関係のところは、基本的には全部が陽的な制御則と考えている。

陽的制御則だけでは話が閉じないということがよくあり、その背後には陰的制御則、つまり身体と場によって生まれる制御則のようなものが実は大事な部分なのではないかと思う。私も含め多くの研究者は陽的な制御則を追求することが多く、陰的制御を気にすることなかったが、実は陰的制御を考慮しない限り、知全体が語られることはできないのではないかと最近考えている。図 4-4-1 では、陽的知は脳的な機能ということで「表脳」、

陰的知には「裏脳」と名前を付けて、両方合わせて双対構造を成して、どちらかが大事ということではなく、両方必要だということを表現している。

さて、「身体と場に埋め込まれた「知」を探る」というタイトルの下、「視座」「知能と制御」「陰的と陽的」の三つのトピックスについて話す。まず、「そもそも理解するとは何だ」というところから始める。物事を理解するということは、ある絶対的な真理を追求する、あるいはそれを見つけることであると思いがちであるが、何か妥当だと思われる考え方が何らかの視座から見たときにある種の確信を得ることではないだろうか。ここで、視座というのは独りよがりなものではなく、多くの方が賛同する視座でなければならず、議論しながら「ここは違う」「ここは同じだ」ということを徐々に妥当性を見出しながら進めていくということが学問の進め方であろう。独りよがりでもいい場面もあるかもしれないが、それでは趣味の域を出ないので、多くの人が妥当だと思うことが重要である。その意味で、知能を理解するということにどういう視座で見ると、今回は「制御」という視座で見たい（図 4-4-2）。

1. 視座

問:「物事」を「理解」するとは？

答: 何等かの「視座」でそれを観て、その視座である種の「確信」を得ること

注:「何等かの視座」がどれだけ多くの人に「妥当」するかが重要

趣味と学問の差

現象学（エドムント・フッサール）、
純粹経験学（西田幾多郎）など

学問には基盤がある。その基盤を、あるいは、その始源（起源／根源）を、探さねばならない。そして、そこから諸学問を厳密に基礎づけねばならない。
（谷徹：これが現象学だ、講談社現代新書、p.12,2002）

「知能」を「制御」の視座でみる！

図 4-4-2

次に「知能と制御」に関して、そもそも知能はどこにあるのかということを考えるために、知能があると思われるものをいくつか例を示す。You Tube の動画の中に犬の行動を撮影しているものがあって、その犬はキッチンのレンジの中におやつがあることを知っている。それを取りたいのだが、レンジが高い位置にあるため届かない。キッチンの中をうろろろとしているうちに、椅子が台として使えるのではないかと気づいたのか、椅子をレンジの近くまで押して行って、最後にはレンジの位置まで到達しておやつを食べることに

成功する。私はこの行動を非常に賢いと思う。もちろん、犬には大きな脳があり哺乳類なのである程度は賢くて当然ではある。

次の例はオーストラリアのダーウィンにあるアリ塚の話である。このアリ塚は非常に大きく6メートル以上ある。この中にはものすごい数のアリがいて、ものすごい数の部屋がある。排気口や吸気口もあり、温度や湿度が一定に保たれている。また、あるアリが巣から離れて別の巣に移るときには大群で地面を移動するが、目の前に川や湖があったときには、アリ同士が連結することで船になって、その上に卵や女王アリを乗せて運ぶ。このような行動を見たとき、やはり私は賢いと考えてしまう。面白いことは、1匹のアリを調べてもこれほど知的なことができるとは思えない。女王アリがものすごく賢くて全体に指示を出しているかと言えば、脳細胞数が数十万ニューロンしかないアリがそんなことをできるとも思えない。しかし、実際にアリの大群をその場所に置いてやると行動を始める。これは一体何なのだろうか。

クモヒトデにおいても、好きな誘引物質を置いて、間に遮蔽物をいくつか置くと、クモヒトデは誘引物質に向かって、障害物をよけながら向かっていく。クモヒトデには神経系はあるものの脳はない。しかし、ある種、知的な行動をする。また、アメーバにいたっては多核性単細胞生物であり、脳はもちろん、神経系も持たないが、ある種のアメーバは巣をつくり、さらに巣の中から触手を伸ばして餌をとることができる。もっと驚くべきことは、DNAから作られるたんぱく質合成である。必要なところだけ二重らせんが解けて、たんぱく質を合成する。化学反応でしかないはずだが、ある種の知を感じる。

以上のようにいろいろな例を集めてみると、「知」とは一体どこにあるのか、という疑問が出てくる。

あらゆる生物において知を感じるときの共通項として考えられるのは、脳神経系ではなくて身体と場ではないか。身体と場の相互作用はどんな生物にもあり、そのあたりに解決の鍵があるのではないかと考えている。いろいろな生き物たちの知を制御の目を見たとき、我々はすぐに制御対象と制御則と環境（場）の組合せを考えてしまいがちであるが、どうやらそれらが独立しているのではなく渾然一体としているように感じる。図4-4-3に示すように、横から透かしてみると、前からは重なって見えない部分にもう一つ要素が入っているのではないか。その要素は制御対象と場が切り離されると同時に消えるようなもので、重なりがあって相互作用があって初めて見えてくるものであれば、それは表には直接表れるものではない。これを我々は陰的制御（Implicit Control Law）と呼び、一方で表から見える制御則のことを陽的制御（Explicit Control Law）と呼ぶことを提唱している。

では、そういうものは概念的にはいいのだが、本当にあるのかどうか。例えば、人間の歩行というものは、普通に歩くときには脳神経系を使っているので陽的制御と言えるが、坂道を下るときには陽的制御は使わずに適当に重力の力を利用しているので、そこには陰的制御が働いていると考えることができる。

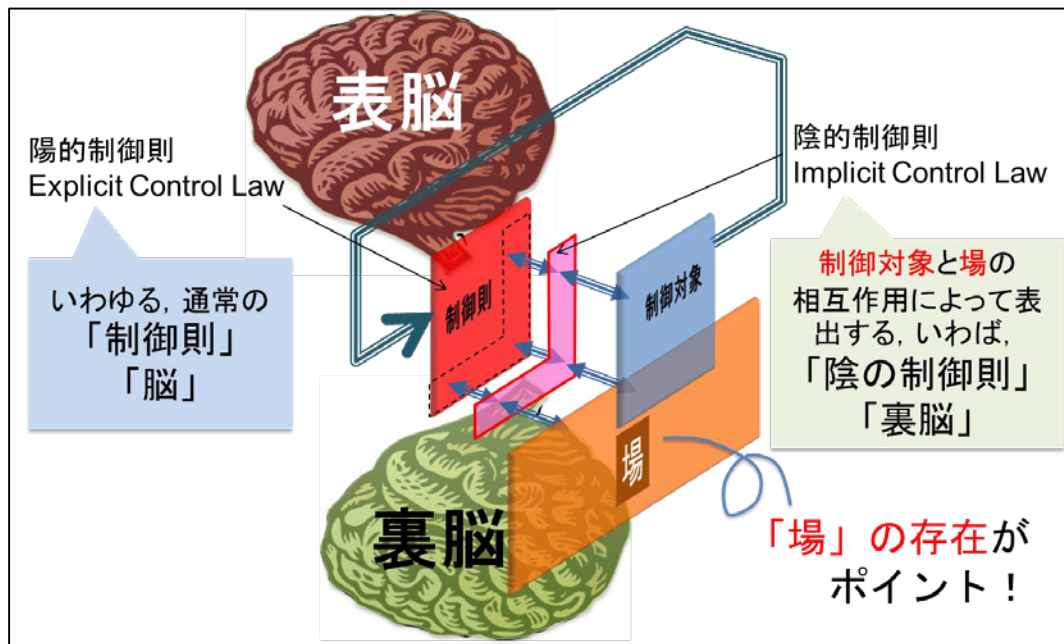


図 4-4-3

受動歩行としてよく知られていて、重力を使って、モーター、センサ、コンピュータを使わずに歩く機械というものはたくさんある。アクチュエータもセンサもコンピュータも使わない四脚受動歩行機を作ったこともある。六脚受動歩行機もあり、斜面の上に置くと歩き始めて、胴体がねじれないと左右の脚が同期して歩かし、胴体がねじれてもいいように設計すると、ウェーブしながら歩く。20脚にしても歩くことを確認している。これを物理の目で見ると、単に非線形力学系の同期現象と見るだけかもしれないが、制御という視座で見ると、歩行を安定させる何らかの制御則が埋め込まれているように見える。

実は計算もできるようになっており、確かに上記の歩行機の中には陰的制御が存在している。歩行機を地面から離すと、単に脚をブラブラさせる機械であり、制御則は見えなくなるが、地面に戻すと歩き始める。

したがって、「知」というものは、陽的な部分と陰的な部分の両方が必要であり、表の部分だけでは答はないが、裏の部分足を足してやることで初めて答が見えてくるのではないかと考えている。ファインマンの寓話の一つに、ある人が外灯の下で探し物をしていたので、「何を探しているのか」と聞いたところ、その人は「落とした鍵を探している」と言う。「どの辺りで落としたのか」と聞くと、「実はあっちの暗いところで落としたのだが、あちは暗くて見えないので、明るい外灯の下で探している」と答えた。つまり、見えない部分に答があることがわかっているのであれば、そこを徹底的に調べてみようという話で、今回の発表を締めくくる。

【質疑応答】

Q：陰的制御に関して、CPU を使う場合と陰的制御を使う場合で、消費エネルギーとしてはどれくらいの差が出るものなのか。

A：極端な場合には CPU は不要で、単なる身体と場の相互作用があれば動く。ただし、その場合にはできることは限られるため、機能を上げる場合には陽的制御が必要になり、要はどこまで能力を高めたいかに依存する。おそらく生物もそのように進化していったのではないかと考えられる。

Q：陰的制御を工学的に実現しようとする、機械系の設計と混在すると考えられるが、その辺りは系統立てて設計することが可能なのか。

A：陰的制御とは環境と制御対象の相互作用であるので、まずはそれを定式化することが必要である。定式化すると、それは陽的になるのではないかと、言われることもあるが、定式化できることと、定式化した中の制御則を計算することは違う。陰的制御は最終結果として力を出すという形で作用するので、まずはそれを定式化したい。それができると、陰的制御の中のどの部分が制御対象のどのパラメータと関係しているかわかるので、設計と連動させることはできると考えている。

Q：陰的制御を使うと省エネ、低コストになるのだと思うが、ロボットに何かさせたい機能や役割がある場合、それを実現できるように設計する必要があるが、陰的制御の設計はどの程度できるようになっているのか。

A：まだ体系立てるところまではできていないが、取っ掛かりはできたのではないかと考えている。

Q：脚の運動法則が一つの式で書かれていたが、坂道を下る機械に関しては地面との力角をセンシングする必要があると思うが、センサが入っているのか。また、機械系でその方程式を実現しているのではないかと思うのだが。

A：足底にセンサが入っている。また方程式そのものが計算機の中で作っている制御則になる。

Q：その制御則は動物のどこで実現されているのか。

A：方程式によって腰まわりの往復運動が生まれ、足底からのセンサ信号でモジュールされて歩行パターンが生まれるようになっている。

4.5 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）

開かれた知能によるロボットの自律制御ということで、開かれた知能は何なのか、その場合の自律とは何なのかという話から始めたい。近年、人工知能が非常に進歩したという話を聞くことが多い。ビッグデータをディープラーニングでうまく処理しているんなどができるようになったということが理由の一つである。非常に多くのデータから特定のものを認識する技術は大変進歩している。米国の BRAIN INITIATIVE でも、脳の大量の活動データから、どこの部位の活動が実際の脳機能や人の動きの制御と関連しているかというようなマッチングに使われ始めている。非常にすばらしいことだと思う。しかし、この技術がロボットの知能化に直結するかはおおいに疑問である。ロボットは環境と触れ合って、そのフィードバックの中で生きている。これがあって初めて知能的なものが出るというのは、大須賀先生の説明の通りである。例えば、災害救助ロボットを使うような災害現場では環境が非常に不確定であり、事前に環境の状況に合わせてロボットの動きを設計した上で、このフィードバックループを回すというのはほぼ不可能に近い。では、どうしたらいいか。我々が取り組んでいるのは、開かれた知能、要するに自然環境のような開かれた環境で、不確定な環境と相互作用しながら行動を達成していくロボットの持つべき知能である。これを我々は開かれた知能と呼んでいる。学会でも非常にホットである。日本ロボット学会に「開かれた知能研究専門委員会」が作られ、熱心に議論が進められている。また、IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems という新しい雑誌でも、閉ループの中での認知、判断が一つのターゲットとして認識されている（図 4-5-1）。以下、開かれた環境での自律とは一体どういうものなのかということを説明し、次に、開かれた知能を作るためにはどうしたらいいのか、その一例として生物の制御の原理を利用したロボットを動かすという例をご紹介します。

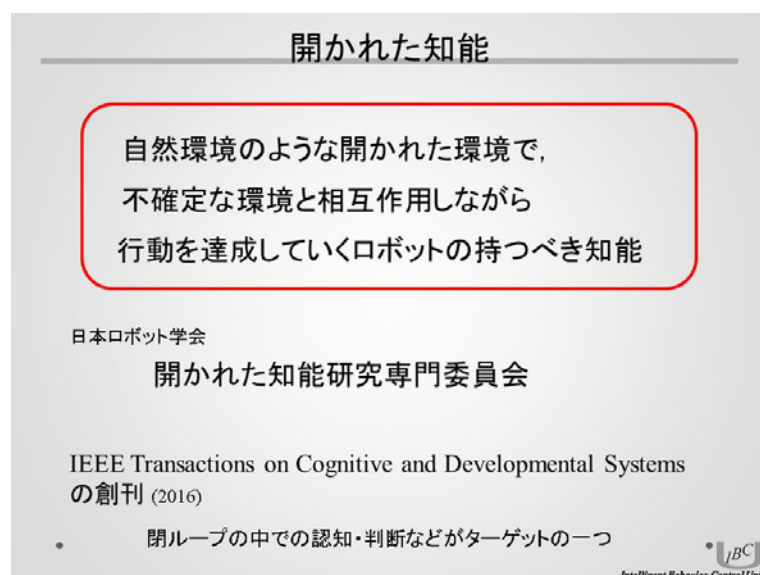


図 4-5-1

「自律」という言葉を広辞苑で調べると、「外部の制御を脱して、自身の立てた規範に従って行動すること」と書かれている。これは人の自律に当たる。ロボットの自律制御を考えると、人による操作ではなく、あらかじめ実装されたプログラムにしたがって制御されること、と定義することができると考えている。さらにこれを開かれた環境における自律に広げると、「自身の規範に従って行動する」という行動は非常に興味深いものになる。なぜなら、規範に従って行動するとは何をすべきなのか、環境・状況がはっきりするまでは何も決まっていない。これからのロボットに必要な「見守る」とか、もしくは何かよろしく願いますという「よろしく」というようなものに込められた意味とほぼ同じなのだが、実際そのときに何をすべきかは、環境・状況が決まらないうとわからないということになる。

「見守る」を何か落としたときに拾うということと定義すれば、今のロボット技術を駆使すればできる。しかし、それは「見守る」というものをそう定義しただけであって、決してそれは見守ってはいない。見守るべきは、そこでお年寄りがどうなっているかによって初めて決まる。閉じた環境だと、今、何をすべきか具体的に決まってしまうので、プログラムできる。しかし、開かれた環境では、環境や状況に応じてロボットの動作自体を変化させつつ、そこに与えられた行動目標を達成するという、もう少し抽象的な言い方になる。

ここで行動目標をどう設定するか。これが見守るという行動目標で設定できれば、とてもフレキシブルなロボットになるし、それをどういうレベルで設計して、開かれた環境におけるロボットの制御を作るかということが一つ問題になってくる。抽象的な目標からロボットをどう制御していくかが重要な課題になってくる（図 4-5-2）。

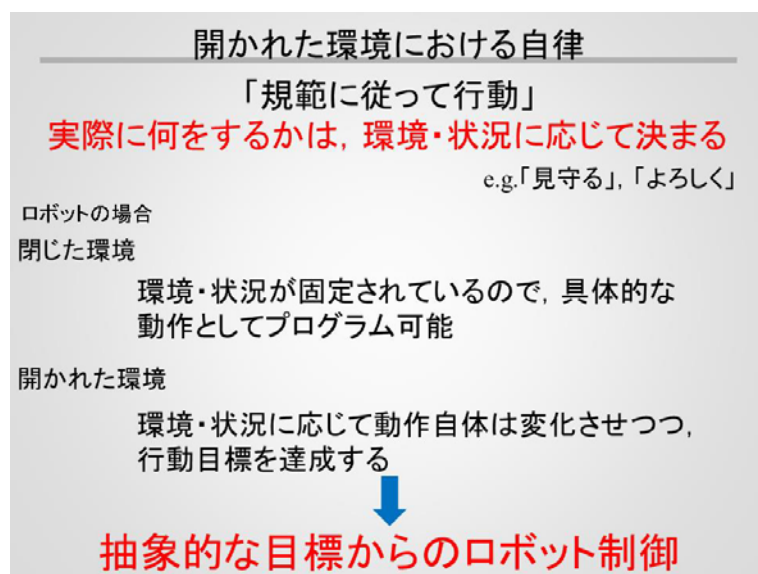


図 4-5-2

このような制御器をどうやって設計するか。たくさんやり方があるが、生物のやり方は重要なヒントを与える解だろうと考えている。当然、生物というのは未知状態を含んだフィードバック制御の中で生きている。人は真っ暗な何の環境変化もないところに1日、2日いると頭がおかしくなって、生きていくことすらできなくなると言われている。未知

環境の中で生きているということが逆に必須条件にもなっている。では、そのような未知環境の中で生きている生物が、どうやってその環境情報を処理しているか考えてみる。当然、未知環境は非常に複雑だから、その環境に入ってくる情報はバラエティに富んだ複雑なものであると言える。その中で生きていくためには、目標を達成するために非常に複雑な行動を作らなければいけない。しかし、我々が持ち得る制御器、計算機というのは非常に限られたものであって、その多種多様な二つのものをマッピングするほど優秀ではない。そのために生物は、一旦、次元を落として、意味のある信号に置きかえて、意味のある信号から高次元出力を再び作り出して生きているというふうにモデル化することができる（図 4-5-3）。

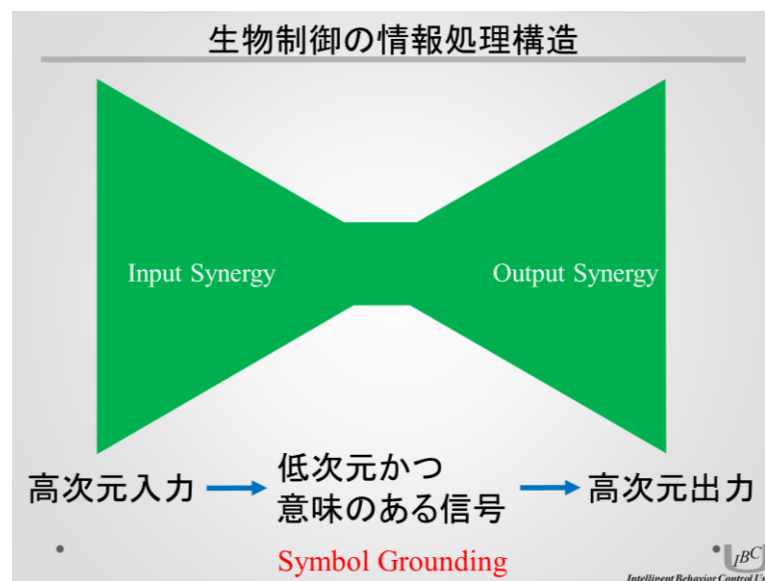


図 4-5-3

もう少し具体的に見る。「お腹がすいた」は非常に意味的である。お腹がすいたから何なんだというのはまだ分からない。お腹がすいたなと思ったら、次に何かを作ろうか、もしくは目の前におせんべいがあったからお菓子を食べようかと考える。何か作るのは歩かなければいけないし、お菓子を食べるには手を伸ばしたり体を動かしたりしなければならない。そうやって初めてどこかの筋肉を動かす。このように段を追って意味的な目的から、情報を具体化・細分化して行動を作っていくというのが生物に特徴的な情報処理の仕方である。インプットサイドも同様である。例えば、お腹がすいたに近づくのであれば、血中のグルコースが下がっているという情報も入ってくる、同時に何かおいしそうな匂いがして、初めて我々はお腹がすいたということが意識に上ってくる。すなわち、こういう情報統合が起きて、意味的なところに情報が達したとき、我々は認知できたと言える。我々はあたかもお腹がすいたから動いたように感じるが、単にここを通過することで動き始めるという見方をすれば、ここを通過したことが判断になる。我々人間は賢いからこう判断したのだと思っているようなことも、実は単純な生物の制御の情報処理系の中の一パスに過ぎないのかもしれないという見方ができる。

この情報処理の方法を利用して、また、出力から環境を通してフィードバックすることで我々は生きている。そのときにもう一つ重要なのがフィードバックループを介した適応である。我々はどんどん適応して行動を変えていくことができる。どう変えるのが生物らしいかという話は省略するが、ロボット制御では **Tacit Learning** という学習の方法が提案されている。大須賀先生の話を知ると、陰的制御則に合わせて陽的制御則を作るやり方である。そういうループの中で生物はどんどん環境に適応しながら生きていくことができる（図 4-5-4）。

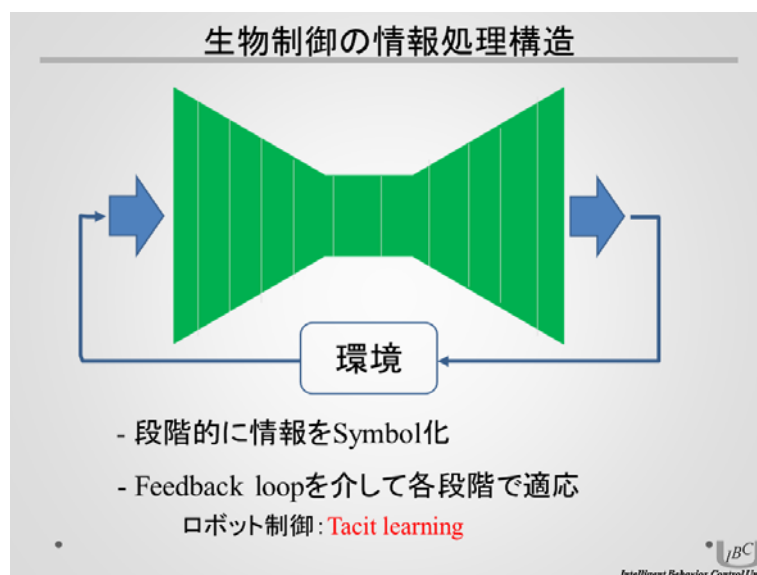


図 4-5-4

このやり方を利用してロボットを動かすときに、同じような情報処理系を作って、目標を与えれば、そこから先は勝手に作ってくれる。前に行きたいということを与えておけば、ループが勝手にそこに合わせた動きを作ってくれる。そういうやり方でロボットを制御することができるのではないかと考えている。

義手の設計を例に説明する。義手が必要な方というのは腕が失われた方なので、いわゆるこの制御系の一部が欠けている方というふうに考えることができる。その欠けている部分を埋めるように、ロボットの制御器を使う。人間の出力を見るのではなく、人間がどういうふうに動きたいかということを入力として、この中で **Tacit Learning** をかけて、この周りの動きと協調させるという制御則を作ってみる。前腕義手という肘から先がない方の義手で、一番普及している **Ottobock** 社製のものは、残った部分の筋電を利用して、開ける、締めるということだけができる。手首に回転の自由度がない従来の筋電電動義手では、長尺のものを取ろうとすると体全体、もしくは肩を利用してひねらないといけない。それでは困るので手首が動くような義手も提案されている。我々は目の前のペンを取ろうとしたときに、手首を何度にしようとは絶対に考えない。取ろうとしか意識しない。しかし、手首の角度は先ほどでいう下の階層で勝手に決めてくれる。したがって、筋電信号を利用して自分で意識的に手首を回そうというのは負担になるので、肩で回すことになる。そこで、先ほどの制御則を利用として手首の動きを他の部分に合わせる。どのくらい合わせた

ら良いのかが分からないので、環境に合わせて動かしてロボット側を適応させていく。何回かやって学習が終わると滑らかにできるようになる。図 4-5-5 に示すように、この状態で扉を開けて電子レンジのダイヤルを回すよう要求するとどうなるか。まず、扉を開けることは容易にできる。うまく体とマッチしているので、縦のものを持とうと思うだけで手首がその角度になってくれる。また、ダイヤルを回そうと思って、自分の残っている部分を動かす。そうすると、それをロボット側が読み込んで、手首に求めている角度を判断して、ぴたりと合わせる。開けるという動作は実は非常に難しく、手首を開ける角度に合わせて動かさないとうまく開かないで引っかかる。そういう微妙な調整も人とうまく協調すればできるということが分かってきた。

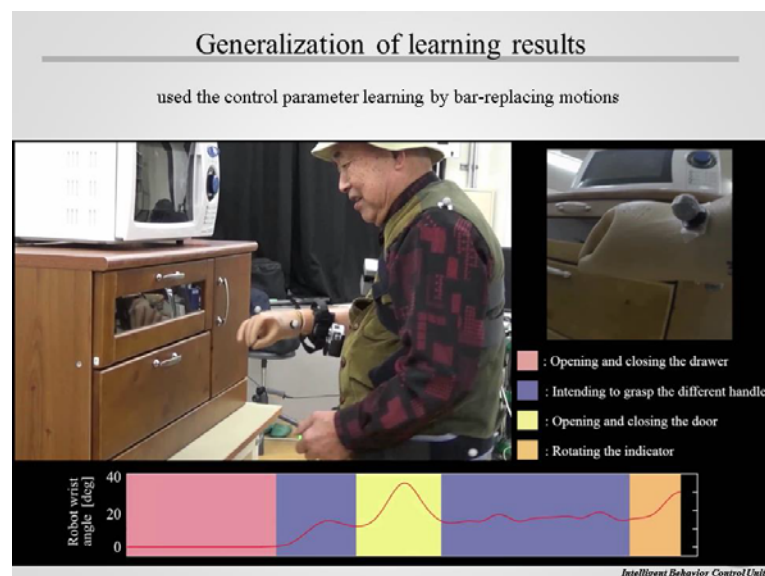


図 4-5-5

開かれた環境におけるロボットの自律制御というのは、抽象的な目標からの行動生成と、環境との相互作用に応じた行動適応の二つをうまく実施することで、開かれた環境、すなわち、よく分からない環境との相互作用の中でも、ロボットをうまく制御することである。その一例として、生物の制御模倣によって制御器の実現による義手の制御がある。義手は自律して動いている。人と上位の目標を共有し、人の動きに適応しながら自律して動いているので、あたかも人の思うままに動いているように見える。さらに高いレベルで目的を共有することによって、よりフレキシブルな動きができるロボットが開発できると考えている。

【質疑応答】

Q：学習は具体的にはどういうふうになるのか、ソフトウェアを操作するのか。

A：ここでいう学習とは、行動していく中で、フィードバックループによって環境入力が入ってくるが、それをどんどん内部にため込んでいくことである。うまく動いている

状況を常に積分し続けて、どんどん、行動を変えていくというのがここでの学習である。

Q：ディープラーニングとビッグデータでは環境が不確定なところでは不十分と言われていたが、不確定な環境をセンシングすることができるセンサーがあれば同じようにできるのではないかと。

A：ディープラーニングは、基本的にはオンラインでリアルタイムに動きながら学習効果を持たせるとするのは非常に難しい学習方法である。そういうのはロボットの制御には向かない。

Q：環境をきちっとセンシングして、それを認識して、コンピューティングパワーがあつてというのは同じではないか。

A：環境をセンシングして、そこで適応なのか、学習なのかは難しいところだが、そういう効果を制御器が持たなければいけないというのは間違いない。ディープラーニングと **Tacit Learning** には違いがある。学習も環境センシングも必要である。ただし、必ずしも全部センシングが必要なのではなくて、ある程度、載せておけば環境に応じたものが自然と発生し得る可能性がある。これが、大須賀先生の発表の中での身体の価値である。私が付け加えたいのは、少し学習をオンラインですることにより環境に応じた動きが作られるということである。

Q：その場合の学習というのは、普通に我々が思っているマシンラーニング（機械学習）と理解してよいのか。

A：それとは違う。機械学習ではおそらく不確定環境の中でどんどん環境が変わるようなところではとても対応し切れない。まず、体があるというのが環境変化に対して最低限、対処すべき行動を作るような反射系を持ち得る。滑りそうなときにちょっと踏ん張るようなものである。何回も滑るのを繰り返しているうちに、うまく滑らない行動に変えていく必要がある。それがオンラインで学習すべきことである。ちょっと滑ったという行動自体が環境入力となる。環境入力が入ってきてこうなったという状況を積分するだけで、少しずつ行動を変えてくれるというのが **Tacit Learning** のアルゴリズムである。

Q：学習をやっているところで、目標に対してずれたかどうかはカメラか何かで偏差を取るのか。

A：そこは人が判断する。人の動きをセンシングしているので、人がもっと変えたいという要求を出さない限り、ロボットはそれに応答しない。見ているのは基本的に肩と肘の動きだけである。肩と肘の動きから手首の目標角で変換が起きる。学習しているときに肩や肘が大きく動くと、それがカウンターバランスとなって、それを減らしていく。

Q：評価関数的なものをあらかじめ設計者が決めていることになるのか。

A：その通りである。一番はどの値を積分するかが、学習の中で設計と言われる部分に当たる。

Q：肘を上げて、さらに何かをつかみたいとかいうときはどうなるのか。

A：一番できそうでできないのはコップで飲むことである。人は意識的に手首を回すが、そういう意識的に手首を回さなければいけない動きはこのやり方ではできない。自然に手を動かす動きしかできない。

4.6 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）

アプリケーション分野が拡大の一途を辿る中、情報処理の複雑化・高度化が益々顕著になってきている。特に、時々刻々と変化する膨大な実世界環境情報を適応的に処理するためには、「京」のような従来型コンピュータの処理メカニズムだけでは不十分である。人間の脳は、膨大な情報を自律分散化して処理し、処理の高効率化・インテリジェント化を実行していると言われている。このメカニズムを実現するためには、従来型コンピュータではなく、全く新しいコンピュータアーキテクチャが必要になるであろう。その一つの形として、2014 年 8 月に米国 IBM 社が脳型コンピュータ「True North」を発表した。これはニューラルネットワークの動作原理をシリコンチップ上に模写して脳型計算を実行する仕組みであり、「京」と比較して 6 桁程度の省エネルギー化に成功している。しかしながら、True North では、脳の情報処理は模写しているものの、実現するシリコンチップ自体は従来型であるため、さらなる処理の高性能化、エネルギー消費の高効率化を達成するチャンスがある（図 4-6-1）。

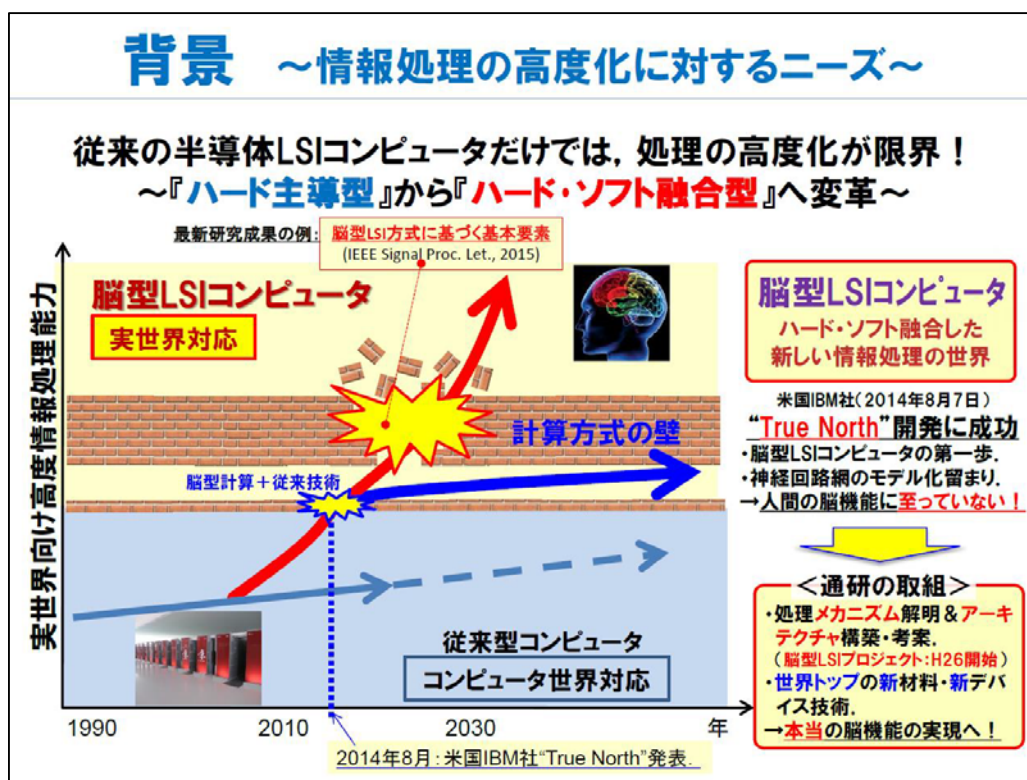


図 4-6-1

EU や米国には脳型コンピューティングに関する大型の国家プロジェクトが推進されており、True North はその成果の一部である。一方で、日本には欧米のような大きな国家プロジェクトが脳型 LSI の開発に関して推進されていないため、その研究開発を推進することが難しい現状である。ただ、日本が得意な材料・デバイス技術を活かすことで EU や米国を凌駕するような研究成果を出せるチャンスがある。つまり、今の集積回路や

CMOS の限界を補う新しい材料を考え、脳型処理にあった集積回路を検討することが必要ではないだろうか。

True North はニューロンを真似して作って、数桁効率を良くしたが、それでも人間の脳に比べれば、まだまだエネルギー効率は悪いので、ニューロン機能を単に模写して実装するだけでは不十分であると我々は考えている。例えば、人間の脳は機能分化してうまくデフォルトしている。環境の変化に応じて、どういうふうに組み直せば良いかを学習していった機能分化するが、ある程度の学習をしたら今度は機能縮退が起こって目的に合ったように行動するようになる。そういうことも考えながら設計する必要があるのではないかと感じている。



図 4-6-2

では、従来のコンピュータと脳型コンピュータの違いは何か。従来のコンピュータはソフトとハードに分かれているのに対し、脳型は一緒になっているという点が異なっている。従来のコンピュータはソフトとハードに分かれているからこそ成功したのだが、どうも融合していることに本質的なものがあるのではないかと考えている。例えば、図 4-6-2 の左下は、ASIMO ロボットに対して環境はしっかりとモデル化したが、想定外の滑りがあったために階段で転倒してしまったという例であり、やはりまだ想定外の事態には対処できていない。それに対して人間はそんなに簡単には転倒しない。まだいろいろとやることがあるのではないかと考えている。

図 4-6-3 は人間の脳の処理メカニズムを示す。感覚器から入力された膨大な外界情報は、そのほとんどが途中段階で無意識的に処理されてしまい、ほんの一部の情報だけが、いわゆる「意識的脳」まで到達し、問題解決する。脳はこのようにして省エネルギーで動いて

いると考えられている。最近のニュースで心臓にもニューロンがあったという生理実験結果が示されたが、脳は、情報を一極集中管理せず、自律分散化して効率良く情報処理しているのであろう。現在話題となっている IoT (Internet of Things) をインフラする際、クラウドのみに一極集中管理してしまうと、もし地球上の全員がクラウドで一度にアクセスしたらパンクしてしまう。脳のような自律分散化の処理メカニズムは、膨大な情報を上手に処理するお手本であると思う。

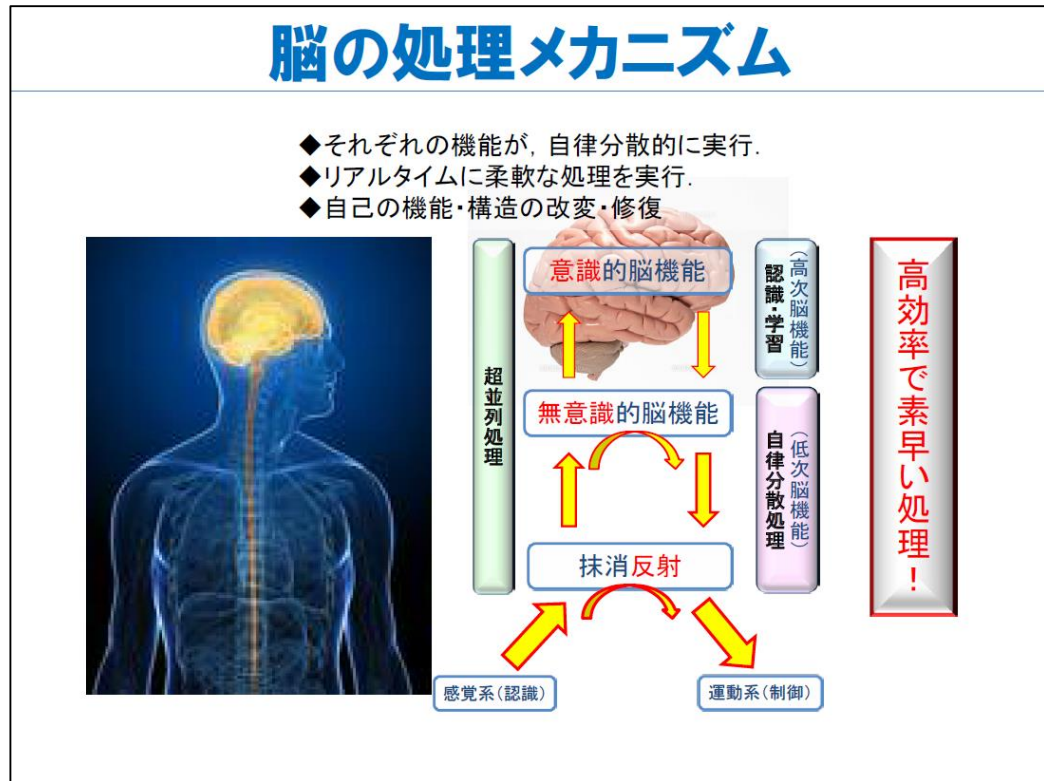


図 4-6-3

脳型 LSI では「認識機能」「超並列機能」「自律分散処理機能」の3要素が必要であり、その3つの要素技術を入れるとかなり構造も変わってくると思われる。今まではメモリをしっかりと作って、あとは配線を繋ぐことでコンピュータの性能は決まっていた。トランジスタは十分に速くなっているが、コンピュータが速くならないのは配線の問題。電力消費も大きくなっているが、これはクロックで送ってしまっているからである。脳の中は完全に非同期で動いているためエネルギー効率がいいと言われていて、それを実現しようとするとな今のコンピュータとはかなり構造が変わる。そのようなことを考えていると、新しいコンピュータを作るにはいくつかのパラダイムがあると感じている。

図 4-6-4 は、脳の V1 野と呼ばれるセンサに近いレベルの画像処理の実現例である。従来の画像処理では、画像データを AD 変換してデジタル化し、それをコンピュータで処理するため、ハードウェア規模や処理速度の向上に制約があった。これに対し、ストカステック演算による画像処理の例を紹介する。ストカステック演算とは、確率情報を用いる演算方式であり、高度な算術演算を極めて簡単なハードウェア（例えば、乗算器は

AND ゲートのみ) で実装できる。そのため、ハードウェアを超並列に実装することが可能となり、処理の高速化が見込まれる。このように、従来型の処理アルゴリズムだけにとらわれず、効率的な処理アルゴリズムを積極的に利用していくことが、脳型 LSI を開発する上で重要となる。

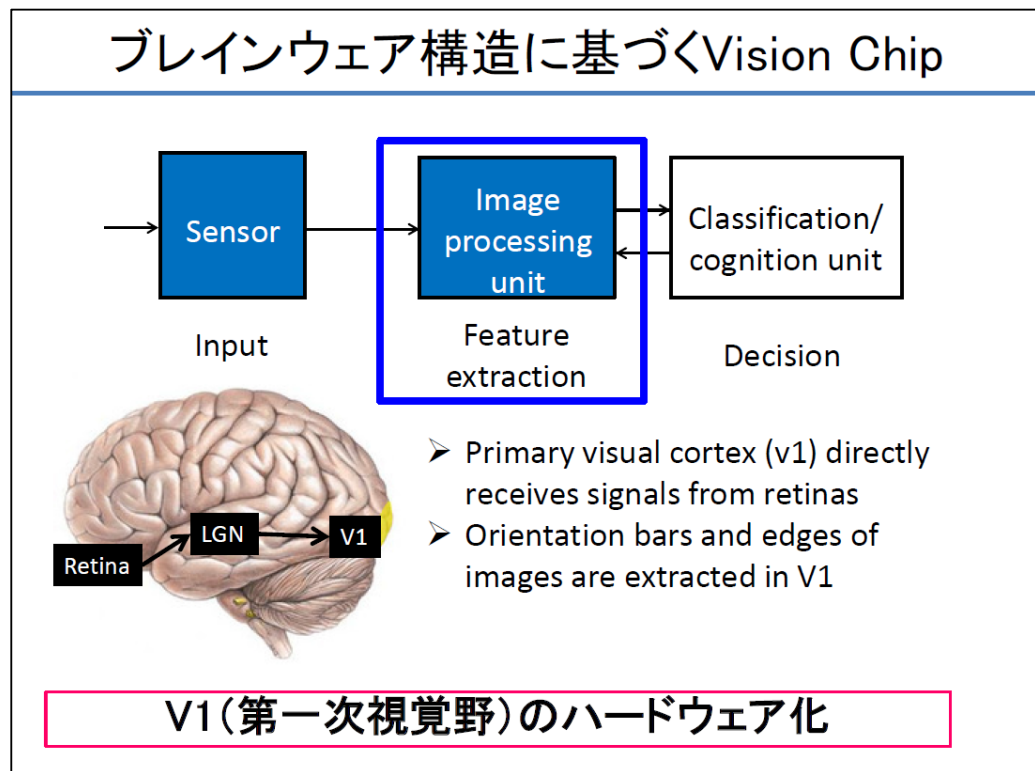


図 4-6-4

脳型 LSI の研究は、60 年代、90 年代に 2 回の波が来て、そして最近第 3 の波で盛り上がっている。過去 2 回に谷があったため、かなり研究人口は減ってしまったが、いろいろと可能性はあると考えている。

最後に、図 4-6-5 にまとめる。我々は、非同期のシステムを自動車安全制御に使ったり、CPU が落ちても大丈夫なシステムを作ったり、エネルギー消費をかなり減らすということに関しては、不揮発性のデバイスを使ったり、つまり、動いていないときには電源を切るとかして、新しい回路技術なども使って、大幅な電力削減ができるようなプラットフォームを作っている。また、IoT を考えると、とにかくエネルギーを削減しないといけない。また、やはり性能を上げるためには配線問題をクリアする必要がある。ニューロンを作ったとしてもステップ数が増えてしまったら結局エネルギー的に損をする。バイオ系ではうまくいく配線があったとしても、LSI の特性を考えれば別の配線になるかもしれない。90 年代の波の後の谷の時代にはいろいろなものができないのではないかと、言われたが、最近はデモも含めていろいろとできるようになってきている。そういうものはロボットに実際に搭載されて初めて有用性が見えてくるので、アプリとの連携も進めていきたいと感じている。

3) 将来のロボットへの適用に向けた脳型LSI研究開発の課題

→・省エネルギー化の一層の推進:

- ・TrueNorthを超える高効率化の推進(TrueNorthは従来CMOS技術)
- ・IoT(分散, energy供給の自立), Mobile化, Wearable化への展開.
- ・自立した固体に搭載する応用がゴール.

→・材料・デバイスが有力候補が登場しつつある(IEDM, ISSCC, VLSI-Cなど).

- ・不揮発性デバイスなどが脳型LSIに利用.
- (アナログ抵抗変化, 可変抵抗, 不揮発記憶, コンパクト, 高速動作)
- ・強誘電体利用(金子, Symp. VLSI-Tech. 2013), ReRAM利用(IEDM2014),
- 磁性利用(S. Fukami, arXiv:1507.00888, July, 2015), etc.

→・インテグレーション技術は重要.

- ・「CMOS+新デバイス」のインテグレーションを考慮する必要.

→・アーキテクチャ(配線問題)が重要.

- ・計算構造とハードウェア構造の整合性をどうするかがポイント.
- ・TrueNorth: 非同期化, 確率的スイッチング, など.

→・応用の展開は, 脳型LSI開発を持続的に推進する上で必須.

- ・FPGA利用が応用の実装に役立つ.
- 例: 実時間画像認識をFPGAで実装, etc.

→・脳型コンピューティング・アルゴリズムの構築:

- ・処理のロバスト性: 少ない知識ベースで時々刻々と変化する実世界環境を認識・理解し, 行動決定する原理の究明.
- ⇒ビックデータ(全データから解を探す方法論)と本質的に異なる.

図 4-6-5

【質疑応答】

Q: 脳型 LSI は FPGA の上に実装したり、既存の巨大な技術リソースの上に成り立っているものではないかと思う。

A: その通りで、シリコンで作るので、プラットフォームの例として FPGA を使うという話は当然ある。今のシステムを全部壊してゼロからやらなければならない、という話もあるが、それは現実的ではなく、むしろニッチな部分に脳型 LSI の仕組みを少しずつ組み込んでいくことになるのではないかな。

Q: 機能特化してやっていくアプローチと、True North のようにもう少し汎用に、という話があったと思うが、どのあたりを狙うと最終的に使えるものなのか。

A: 機能縮退ありきではなく、学習などによって、全部ニューロンレベルで作るのではなく、自動的に縮退していけばいいと考えている。使っていなければ休んでいくイメージ。つまり、動いていないところを検出したらパワーを切るということで、集積回路の中にモニターのようなものがあって、それがオン・オフを判断するような仕組みを入れられると良いのではないかな。

Q: それは多機能であるけれども、学習によって機能が特化していくというイメージのものか。

A: まさしくそのような動的に変わっていく LSI を作りたい。パーソナルコンピュータが本当に個人個人に合わせて機能が変化するといいなと考えている。

5. 総合討論

ファシリテータ：田中 秀治（JST-CRDS、東北大学）

■ロボットのシステムと要素、ハードとソフトの研究開発のやり方

- ・ハードウェアの開発、ソフトウェアの開発とプロジェクトを分けてしまうと、元の本阿弥になってしまう。ハードウェアの進歩とソフトウェア（知能、学習）の進歩を同時並行させられないと、ロボットの制御を次のステージに持っていくことは難しい。
- ・チップやデバイスの開発とシステム統合とは、フェーズやタイミングが合わない。革新性と実用性はトレードオフの関係であり、この問題はプロジェクトを作るときの難しい問題である。
- ・ロボットは統合技術である。システム統合が命であり、統合されていないものはロボットにならない。統合を考えるとときに問題になるのは、開発フェーズ（時間の問題）と、切り分けである。例えば、センサ屋はセンサデバイスの高性能化をする。コンピュータ屋は一生懸命チップをつくるが、センサ屋が頑張って達成した性能はどこに使われるのか知らない。ロボットに実装してみると、達成した機能・性能は必要ではなかったとか、別の機能が必要だったとかが常に起こっている。インターフェースや要求仕様の問題を解決しないと、本当に良いシステムはできない。さらに、良いメカをつくるのか、ソフトウェアで解決したほうが良いのか、あるいは、学習でやったほうが良いのか、全体を見た上でのデザインが決定的に重要であるが、うまくいった例は非常に少ない。
- ・日本ロボット学会の中で、論文の査読基準を去年から大幅に変えた。従来は、要素的、解析的な内容のものが、査読基準で通り易くなっていた。一方で、システム統合的なものは、設計をなかなか評価できず、論文にならなかった。企業には非常に多くのシステム統合の技術がある。車、プリンタ、デジタルカメラなど優れたつくり込みの技術があるが、ロボット学会としては評価できなかった。今は査読基準を変えて、システム統合の理念やそのストーリーが高く評価でき、世の中の役に立つ場合には論文にできるようにすることで動き始めている。ただし、評価軸をそう簡単につくれる話ではないので、評価する側も勉強しながらやっている。分析科学に対して、圧倒的に弱いと言われているシステム統合とか設計科学を、いかに学問として根づかせるかが問題である。いつもシステム全体を眺めながら、新しい技術をつくるベースになる科学を考えることが目的になればすばらしい。
- ・この問題については、学術会議のロボットの委員会でもかなり議論された。システム統合を研究する若手人材の層が非常に薄くなっている。今は評価システムの問題があり、短期的な成果を求める。システム統合は長くかかって苦労が多い割に、評価方法が定まっていないので、うまく評価されない。統合の重要性が打ち出されたプロジェクトで、皆がその方向を向き、それが良いやり方であるという文化になっていくと良いだろう。
- ・例えば、空気圧アクチュエータは多くのメリットがある。一方で、電磁駆動は簡単にロボット研究者が飛びつきやすく、制御しやすい面もある。応答が非常に速いとか、制御が比較的簡単であるということもある。そうすると、もし要素を空気圧に変えたときに、システム全体が電磁駆動に対してそれほど落ちない、むしろ上回る長所がクローズアッ

プできる、全体のシステムをつくるときに他の技術がないのでそこを埋めるようなことをやるのが重要になる。このような新しい要素を導入するときに必要なシステムインテグレーションを構築する、というようにセットで考えていくことが必要で、これはセンサ、アクチュエータ、コンピュータでもあり得る。

- ・要素技術や先端技術も大事であり、統合とサイクルを回すことが大事である。そのときに、常にインタラクションをする必要がある。統合システムをつくるときに、「実は、こういう性能のものがないと困る」ということもでてくる。一方、要素の人も、「そっちもあるか」と気付くこともある。また、新しいデバイスがあるのを見て、「システムをこう変えられる」と気付く。そのサイクルを回すことが重要である。従来の開発プロジェクトだと、大よそ最後に統合をやって終わりだが、そうでないタイプのほうが良い。ヒューマノイドロボットの全身に触覚を張りたいと思い、市販のデバイスをいろいろ買って、実際に張って試したが、特に触覚デバイスは、多様な軸の力をとるなど要求性能が高く、ありものは使いものにならなかった。曲面に張れない、線があり過ぎる、重すぎる、消費電力が多過ぎる、といった問題は実装上の問題であり、センサの研究者はあまり興味がない。センサ研究者とのコラボレーションが可能なのかいつも思っている。これらは研究にならないのかもしれないが、考え方を変えてもらう必要がある。最近は非常に薄くて柔軟で、体の表面に張るような回路やセンサが世界的に盛り上がっているが、コラボがあり得ると思う。つまり、研究者が新しいターゲットの学術的価値を見出して取り組むことが可能になると、非常に良いコラボレーションができる。システム屋もデバイス技術を学ぶことで新しい発想をして、それを生かすようなものができ、両方ができると良いと思う。
- ・適切な要求を適切なプロに届けるというのは結構難しい。我々のデバイスの領域でもそういう経験がある。携帯にはMEMSのマイクが入っている。その前は、エレクトレット・コンデンサ・マイクを使っていた。MEMSに置き替わった理由は、エレクトレット・コンデンサ・マイクはリフローハンダ付けができない。プラスチックのコネクタにハンダ付けして、そこにはめていた。このため、コストがかかり、全体の高さも高くなってしまう。リフローできないことやリフローしたいというのはプロにしかわからない要求であり、それが何百億円の産業になる。このようなプロにしかわからない要求が適切な人に伝わって、それをおもしろいと感じ、また学術的な価値も見出して進むようなシステムがうまく回ることが重要かもしれない。
- ・システムとエレメントがコラボレーションしていくことは非常に重要だが、そのときに問題が2点ある。一つは、プロジェクトをやっていくと、システムのほうが上位に立っていくことである。革新性と実用性はそれぞれ重要であり、それぞれ立場が違う。例えば、ドローンにしても、ジャイロの安いのが出てきたのでブレークした。こんなアクチュエータがあったらこんなこともできる、というのがシステムのブレークスルーになって、新しいシステムができていく。上からのトップダウンだけだと行き詰まる。もう一つは、一つのプロジェクトの中に、デバイスとシステムが混在しているというのは非常に重要だが、それらを最後の年度で統合するのは無理だと思うことである。システム屋から見ると、デバイスは安くてしっかり動いてくれないと困る。一方、デバイス屋はチャンピオンデータを出したい。一緒にコラボレーションすることで、相互の新しい効果も出る

ので、このような形で相互に理解して進めていくことが重要であり、最後に無理に統合すると、本質的ではないことにエネルギーをかけることになる。

■ロボット開発の仕組みの国際比較

- ・もともとロボット技術は日本のほうが優れていたが、ダ・ヴィンチで成功したのは結局アメリカだった。
- ・日本に足りなかったのは、リスクが高いものにチャレンジするということである。東大でプロトタイプがつくられたが、大手企業は最終的に製品化を見送ってしまった。医工連携で言えば、工学部はいつも下請けのようなところがあった。今は大分変わってきている。医学系は外科などでの医師不足があり、工学を求めている。プロジェクトをつくる時も、シーズベースも大事だが、ニーズ側からも見てお互いがトンネルをつないでいくことが大事である。最初のチーム体制をよく考えないとうまくいかない。
- ・医療ロボットに限らず、3D プリンタ、ドローン、マイクロマシーン、カプセル内視鏡などの技術は外国から出ているような印象がある。しかし、実は日本でも古くからやっている。今から見ると、何でそのまま突っ走れなかったのかと思うものが多い。
- ・ダ・ヴィンチの例については、学術会議で議論した。一言で言えば、本気で物にしようとしたかどうかだけであろう。ダ・ヴィンチの会社をつくったのは医学知識があり、かつベンチャーキャピタル的な活動をしている人である。ベンチャーキャピタルを説得して資金を得て本気で進めた。そういう人材が日本にはほとんどいない。銀行など資金を出すもとが、まだ物になっていない技術に対する目利きができるのか疑問である。大企業も多分リスクをとらない。ベンチャーキャピタルが日本では機能していないという問題が大きい。ダ・ヴィンチは、チームをつくって、本当の臨床医とロボティクスのトップの研究者とがタイトなチームをつくり、多くのテストをしながら迅速に開発を進めていった。会社が立ち上がって5年で認可をとるといったスピード感でできた。最後は認可の問題がある。日本での認可は、近年は改革されて速くなっていると思うが、いろいろな先生が医療ロボットをやっていたときには、10年で取れるかどうかであった。それを考えると、誰も最後まで持っていく気力が出ないということもあった。
- ・突っ走ってできたのは内視鏡だと思う。医療内視鏡は、胃カメラから始まって圧倒的に日本が強い。最後のカプセル化のところでは抜かれたが、東大に引っ張っていく医師がいたのでできた。
- ・医療機器を実用化したいが、大手企業の担当者レベルでは気に入ってもらえるのに、役員会にかけると流れたという経緯があった。今やっているものは、文科省の START プロジェクトでスタートした。このプログラムでは、初めからベンチャーキャピタル(VC)がプロモーターとして入り、ある程度の投資をもらいチームがうまくできたので、最初の製品を出せた。日本の多くの VC と会う機会があるが、認可が速くなってきたことから、新しいものに投資していく雰囲気は良くなってきた。しかし、今でも「本気でやりたいならアメリカに行け」と言われることもある。
- ・大企業だからリスクを取らないというのは、いつも言われるが違和感がある。遅く見えるというのは確かにあると思う。例えば、ロボットの分野では、ベンチャーと競うところではなく、長期視点で進めている。車でも自動運転は粛々と長い年月をかけてやる。

市場で華やかに見えるものに比べると、これらの分野はリスクを取らないと見えるかもしれない。宇宙開発のようなものであれば、それが直近の利益に結びつくかわからないが、国としてチームを組んでやっている。それに比べると、ロボットはみんながばらばらに散らばってやっている印象がある。ロボット学会では、多種多様なロボットを自前でつくり、ハードウェアとして様々なものが出ているが、どう使うのか考えてしまうものが多い。ハードウェアは、機能の目標値ははっきりしているが、アイデアはすぐには実現できなかつたりして模索が続くことがあり、大変難しい。心配しているのは、ソフトウェアである。仲間になった海外の人から、「日本はハードは良いが、ソフトはだめ」と言われた。その理由は、タコソボ化していることではないだろうか。会社はそれぞれ自前でソフトをつくる。大学でもきちんとやっているところもあるが、学生が卒業したらソフトは失われてしまい、継続されない。欧米に比べてオープンソースにする文化もないので、人に見られて使われるという意識が少ない。オープンに自分の成果を出すことがアカデミックな場でも尊重され、社会的に盛り上がってくると、企業も先を見据えて投資をする意欲も湧いてくる。このような相乗効果が生まれる。特にソフトウェアのミドルウェアなどは国の音頭取りを期待している。

■欧米と日本のプロジェクトマネジメント

- ・ヨーロッパの FP7 の外骨格ロボット制御のプロジェクトに参加している。ここでは、マネジメントチームが頑張っている。統合のマネジメントだけだと要素技術は育たないと思うが、プロジェクトが決まった以上は、そこに向けて全てをつくり上げていく。マネジメントチームが自分たちで研究することはなく、マネジメントに特化してプロジェクトを進めている。日本ではこういうことはできていない。
- ・EU の FP7 などのプロポーザルでは、10 個程度のタスクリストを作り、それぞれのグループがタスクリストのどこをいつまでにやるなど全部について詳細なスケジュールが書いてある。しかも、そのスケジュールに沿って、しっかりマネジメントされていく。それでもプロジェクトによって濃淡があり、外形をしっかり押さえつつも、研究を進めるなかで予想しない成果が出てきたときには、枠の大きな変更に至らないまでも、かなり柔軟にその成果の部分を含めたりもする。最終的な評価は、良い成果が出ているかどうかの観点でやっている。ある程度のトップダウンのマネジメントで、全体をきちんと動かしていくのが有効な部分は確かにある。
- ・EU のプロジェクトの進め方で、もう一点付け加えたい。プロジェクトで開発されてきたロボットの基盤技術、プラットフォーム的技術で良いものについては、「FP でやるプロジェクトでは、みんなこれを使え」といったことをやる。それによって、開発されたシステムがデファクトになっていく。さらに、プロジェクトの構成として、基礎研究レベル、特定の出口応用、実用技術が混在した体制が組まれていて、全体として技術体系がしっかりしているように見える。このように、プログラム全体のデザインが戦略的に考えられており、実際の技術基盤を固めるところもケアされ、先端的な基礎研究も伸びるようにしており、学ぶべきところがある。
- ・産業化、あるいは国の政策という意味で、アメリカのやり方は非常に興味がある。産業用ロボットのアイデアはアメリカ発であるが、日本は俊敏に産業として取り入れ、ロボッ

ト王国をつくった。一方で、次の世代は、特許とか論文を見ると、ハーバード、MIT、カーネギーメロンなどアメリカが圧倒的である。このままだと、次の新しい世代のロボット技術はアメリカがドライブしてしまう。アメリカと日本の違いは、やはりベンチャーであり、エンジェルやキャピタルが、新しい技術、技術のネタを探している。さらに、それを結びつけるコンサルがシリコンバレーには多くいる。おもしろい技術があったら、それをすぐに引き上げて、適当な人に紹介したりしていろんなところにつなげていく。日本はこのようなところが弱かった。一方で、大学のシステムが強力に研究を引っ張っているように思う。

- 今の日本の大学教授は作業が非常に多くて疲弊している。書類のペーパーワークも多く、その中で企業と会い、社会の情報も得て、学生の教育もしている。そこに事業化するまでのドライビングフォースはかかりにくい。今までの大学は、ペーパーを書けば評価され、学会の賞を取れば名誉になり、製品が世の中に出なくても、別に責められることはなかった。これではロボットは世の中に浸透しないわけであり、何か別のメカニズムをつくらないといけない。
- アメリカはお金を儲けることへの関心が非常に強い。日本はそれが働いていないのが弱点だが、それは長所にもなっている。ゆったりした中で、新しいアイデアを自由に考えてみるということから、新しいものが出てくる可能性はあると思う。最後のターゲットを絞った計画だけでなく、アウトプットはおおらかにし、別の意味で厳しくチェックするようなものが、日本的で良いように思う。
- アメリカでロボットが進んでいるというのは最近の話で、数年前までは軍事ロボットはやっているが、それ以外の民生的な研究はほとんどないという印象だった。ここ数年で、日本のロボット研究の地位が下がりつつあるという危機感を持っている。これまでの蓄積を見ると、基本的な発想や、新しい原理、メカニクスについては、日本が世界トップというのは間違いない。研究者の層も厚い。このため、ここまでは掛け値なしに日本は世界のトップレベルを走ってきた。しかし、ここ数年でアメリカ、韓国、中国などが力を入れており、予算規模で桁が幾つも違うようなものまで始まって急激に活性化しており、厳しい状況になっている。
- 大学の環境という意味では、海外の研究者と話をする、「おまえは、いつ時間がとれるのだ」と言われる。彼らは、サバティカルがあって、まとまった時間を取り、研究の加速、新しい展開などを考えるような、研究に軸足が置けるチャンスがある。以前は日本も小講座制で、兵隊が多くいた。今は小分けにしてしまったので、個人がきちんと時間をとれず、クリエイティブなことができない。このため、大きなプロジェクトを持ってきた先生には、大きな楽しみもあるかもしれないが、重りを背負って疲弊する世界になっているのではないかな。
- 将来的に、日本のロボットがアメリカなどに駆逐されるのではないかと強く感じる。その理由は、お金儲け以外にある。ロボットの要素技術は大分成熟してきて、進歩の度合いが大分小さくなっている。アメリカは、軍事、医療など目的志向が強いので、それが新しい技術開発のドライビングフォースになっている。いろいろな国際会議で日本人の参加率が急激に減っている、日本のロボットは危機感を持ったほうが良いということに賛成する。

- ・日本は自分の強いところを攻めないというところがあると感じる。例えば、3D プリンタも昔からやっているのに、そこを攻めない。アメリカがやると慌ててやる。私が初めてロボットの国際会議に参加したのは 1980 年代の終わりであり、そのときは日本の発表はみんなロボットのモノをつくっていた。アメリカは、コンピュータや数式ばかりを見ていた。今から考えると、当時は日本はモノをつくれたが、アメリカはつくれなかった。だから、ものづくりをどんどん進めていかなければならなかったのに、欧米コンプレックスもあるかもしれないが、逆に数式などのほうを目指してしまった。今は、アメリカもつくれるようになってきて、どんどんおもしろいものが出てきている。今でも、日本の強いところや技術を見つけて、そこを押していく必要があると強く感じる。
- ・日本はアメリカと同じことをしてもしょうがない。日本の強みを生かして必要があるが、どういう仕組みをつくっていくのか。そこが求められている。
- ・強みの一つは材料だと思う。材料と密接に繋がったロボット開発は、これからの日本にとって非常に重要である。化学も日本は強い。日本の機械工学科中心のロボットは、金属しか使っていないので、キーワードとしてこれらを入れたほうが良い。

■提案の方向性

- ・ここで考えているのは、サービス系のスマート小型ロボットに注目し、高機能で信頼性・安全性に優れ、低価格で実現できる革新的な要素技術・基盤技術を開発することである。様々な課題を解決し、要素技術が格段に進むような提案を作っていきたい。具体的な要素技術・基盤技術としては、アクチュエータ、制御、センサの 3 つの技術にまとめ、そこでの課題を挙げている。
- ・これらをあまり分離しないほうがいい。非分離な科学というのをつukらないといけない。機械系の人間はまずメカをつくる。電気配線を後から埋め込み、動かそうとすると、無理な配線をして電気配線がすぐ切れてしまう。このようなことがよくあるので、電気系と機械系が最初から一緒にやらないといけない。デザインも同様である。デザイナーの考える形と、機械屋が考える形は全く違っていて、それも最初から一緒に考えないといけないと思う。要素技術を分離することによってできたところもあるが、その要素をどこに使うのか、最初から考える必要がある。また、制御というの、制御理論だけが独立にあるわけではなく、物を動かして初めて意味があるので、いかに分離せずに作るかが重要である。いわゆる連携というのではなく、混然一体化したプロジェクトにしないといけない。これは西洋哲学的ないわゆる二元論的なものとは異なる。非分離な考え方というのは、実は日本独特なもので、西田幾多郎が言っているような哲学的なところがある。どちらかというと、日本人は不可分な分離というのはなじみやすいので、西洋的、二元論的なプロジェクトではないものができれば良く、分離した後で融合するというようにしないで欲しい。
- ・産業のロボットと違って、ここで考えているものは、環境が全く読めないところで、自律的に自分でいろいろ判断するものである。これまでのやり方では、高性能な CPU を使った設計でやろうとするが、これではものすごいパワーを食ってしまう。このため、分散型として、CPU だけではなく、いろいろな部分で判断していく必要がある。これは、環境の読めないところで働くロボットを考えると非常に重要だと思うが、プログラ

ムとしてどのようにまとめるかといった課題がある。

- ・まずは、場と身体は混然一体化していることを十分理解してもらいながら、それをプロポーザル化しないといけない。単に「環境のことを考えながら」という弱い意味ではなく、積極的に場を使うことにする。生物は必ず場の存在あつての動きである。制御理論的な立場からすると、環境の影響というのは、全部外乱としてまとめるが、そうではなく、環境は友達という感覚をまずつくらないといけない。具体的な研究開発課題の絵の中に、「環境」や「場」という言葉がほしい。この陰的制御というのは物理法則、物理作用なので、限界がある。しかし、ある程度までそれが引っ張ることで、もっと高度な要求をすることに対して陽的制御をうまくつくる必要があると思う。
- ・私は、「身体性」という言葉を使う。概念的には、同じものを見ていると思う。実は、その理論は未完成である。基礎研究としてその理論を確立することは重要なミッションとしてやるべきだと思う。物理の世界と情報の世界とを本当の意味で一体化、融合して扱うにはどうするのか。本当に意味のある形でつなぐ、効果的につなぐにはどうしたら良いのか。例えば、AIの側ではシンボルグラウンディング（記号接地問題）という未解決の問題がある。ある記号で表された概念が現実世界の、どういうアクション、どういう感覚に関係しているのかというのは、本当の意味では解決していない。このような基本問題は大事で、スピードアップしてやるべきことだと思う。世の中が本当に知能的なロボットを使いたい、しかもオープンな環境があつて使いたいとなってきたときには、その問題を本当に解決していないと、使いものにならない。もう一つ重要なことがある。本当にそれが使われる現場で、使う人たちがどう使うのか、ロボットは何に出くわすのか、ということを実際に試して、基礎的なところからシステムまでの開発を回すということも必要である。それをどうやったら本当にできるのか。これはチャレンジなことだと思う。
- ・国際ロボット展では日本の産業ロボットメーカーは、ほぼ全部出展している。この展示会は2年おきに開催されるが、2年前とは大きく変わり、多くのセンサが使われている。レーザーレンジファインダー、皮膚のようにロボットがウレタンのフォームを着て、人に当たると停止するような機能などを付け、ほとんどの産業ロボットメーカーが、人と共存するというのをキーワードにして展示している。「小型」というのがこのワークショップのタイトルに出ているが、ロボット展示のところでも、近々販売するという20cm～30cmぐらいの相当小さい多関節構造のものを展示しており、「小型」だけだと差別化が図りにくい。
- ・産業ロボットも人と一緒に作業するようになってくるので、産業ロボットとサービスロボットの垣根がだんだんなくなっている。
- ・今までのロボットの技術は、関節だけを見たら、基本的には産業ロボットの技術と同じような技術を使っている場合が多い。産業ロボット側も、MEMSのおかげもありセンサを大量に使い、知能化してきている。外界をコンピュータ側が理解しようとして、ロボットも変わってきている。
- ・例えば、インターネット環境のようなものがロボットを動かす中に入り、そこでの情報をうまく使いながら動くというように、環境というものをもう少し広く捉えることができれば、おもしろいと思う。我々の生きているこの物理的な環境以外に、インターネッ

トのバーチャルな環境も巧みに使えると、人を超えるとロボットとして取り込んでもおもしろい。

- ・動力系という言い方は良いと思う。アクチュエータ単体ではなく、アクチュエータと、その駆動系の組み合わせという意味で、動力系技術として捉えると非常に良い。

■研究開発の推進の仕組み・体制

- ・半導体の世界で、日本は2000年のころにSOC（システム・オン・チップ）の方向に行き、ものづくりを軽視した。それに対し、TSMC（Taiwan Semiconductor Manufacturing Co., Ltd.）は各種半導体の委託製造を請け負うなかで、いろんな基盤技術をどんどん蓄積していった。アプリケーションは多様であり、それを引き受ける中で、設計技術を高め、いろいろなIPをどんどん蓄積した。けれども、ビジネスとしてアプリケーションのレイヤーには入らなかった。ロボットの場合も、一種のロングテールビジネスのイメージがあり、必ずしもアプリケーションのロードマップが描けない。これからどんな技術やサービスが出てくるかわからない。そのため、基盤技術とマーケットとの激しいインタラクションの中で、合致しないものは死に絶えていく。このような形で進化していくと思われる。大事なことは、モジュール化、システム化のところを産学連携でいろいろやり、そこで生まれた技術がどこかに蓄積されていかないといけない。その蓄積する場所は、やはりアカデミアの領域であろう。これが進化していき、オールジャパンでこれからの大きな技術の流れに対応できるようになると良いと思う。
- ・TSMCが設立されたのは、対日本対策でつくったという話だと思う。欧米には、ただでチップをつくっていた。最近になって金を取るようになり、世界で商売できるようになった。ある種のプラットフォームを提供して使い易くする仕組みがあると、みんながそこを使って試せる。お金は後で回収していけばよい。少なくともTSMCは、今はしっかり全世界から金を取っている。
- ・今回の提案は、システムからのマネジメントであり、トップダウン的なところが強いと思う。例えば、「開発要請」、「共研参加」、「技術提供」という言葉はトップダウン的なところが強過ぎるという印象を受ける。デバイスから新たな提案ということも入ると良いと思う。
- ・下水道の維持管理に関するロボットの開発は、我々自身が開発するのではなく、必要な技術の開発コンセプトあるいはその性能を明確にした上で、一緒に開発してくれる材料メーカー、制御屋など様々なパートナーに入ってもらい、その中で我々がコーディネートをしながら進めている。そこでは、コスト、業者の利益、作業員が使えるためのマニュアル作りなども検討する。また、初めての技術だと、制度化などを国にお願いすることもやる。このような開発には2年～3年かかるが、実際に運用しながら改良・改善をすると、もっと長いスパンを要する。開発した技術は広く使われているが、同じような技術開発を民間主導だけでやると、開発投資を回収するだけで、ややもすると一回で終わってしまい、その後の改良・改善まで回っていかないことが多々ある。我々がやっている中では、常に改良・改善という再投資も必要である。それから、下水道のプロパーで30年～40年現場を踏まえた者が技術開発を担当し、開発に対して熱意と使命感を持ってやっているの、それが運用されたときの喜びや達成感が非常に大事である。パート

ナーの会社、特にベンチャーと一緒に国の賞を受賞することはステータスになり、張り合いにもなる。このような組織を何らかの形でつくり、そのコーディネートをする事や、必要な技術の方からも発信するようなシステム化をしてもうと、我々もパートナーを探すときに助かる。

- ・コーディネータというのは、アカデミックな研究には難しい。大学の教員は人の言うことを聞きたくないというところがあって、難しいところがある。仕切る人はお金を握っていないと、おそらくできないと思う。ImPACTはこういうものを目指してデザインされたと思う。
- ・ImPACTに関しては、プロデューサー役という言い方をしている。どういう研究が必要かを考えて第一人者を集め、最終的なゴールを目指すコーディネータ役ということで指名している。コーディネータは「調整する」というニュアンスが強いので、プロデューサー役という言い方をしている。
- ・マーケットニーズを研究者が体得しないと、要素技術研究が幾ら進んでも、マーケットでは負ける状況が必ず生まれる。このようなことを含めたプラットフォームの構成が必要だと思う。マーケットとさまざまな分野の科学者が、様々な要素技術の開発に結びつく方向を志向できるプラットフォームづくりが重要だと感じた。
- ・チーム間の交流が、ミーティングレベルの交流ではなく、ポスドクを他のチームに派遣、あるいは交換するようなことが必要だろう。このような交流は欧米では簡単かつ盛んにやっている。このようなメンバーの入れ替え、交流を積極的にやることが必須である。
- ・ニーズとシーズを整合するプラットフォームをどうつくるかが問題である。例えば、病院は勝手にニーズが集まってくる。ある種の病院のようなものをつくっていくプラットフォーム、共通の認識をオープンプログラムにすると、みんながそれに注目して解決する。知財の問題で教えられないということでは駄目である。世界的な視野で広く考えて、仕組みづくりをすると、よりうまくいくだろう。良い技術があっても、それがアプリまで結びつかないことが今の問題である。このような種をつくっていけば、徐々に人も育ってくる。
- ・サービスに対する対応というのは、医療、介護、物流など様々なところで共通した要素技術が使われるはずである。サービスのニーズがオープンな場で議論されて、それに対応できる要素技術や、要素技術開発のための科学分野のコーディネーションなどの全体構造が必要ではないか。

■プロジェクトのビジョン・目標設定

- ・このようなプロジェクトを提案していくときに、共通して気を付けるところとして、安全性やセキュリティの問題がある。システムのレベルでも、個々の要素技術においても、人のいるところで使われる以上は、技術課題として考えていくべきであろう。
- ・ロボットが人間と一緒に何かやるときには、いろいろな意味で人間に優しくないといけない。例えば、体が柔らかい、関節が柔らかいということもあるが、人間の中の制御系と同じような制御系が良いと思っている。直感的であるが、違う制御系が入っているロボットが相手だと、多分怖いと思う。この意味で、人間と近い原理で動くのであれば、自然に安心感が出てくる。

- ・ 今後は当然ネットワークにつながっていく。IoT ではどちらかというとセンシングが優位だが、アクチュエーションの話になってくれば必ず問題になる。ハッキングされれば暴走したり、直接物理的な害をなす可能性がある。本当に社会に入れるとしたら、これを解決しなければならない。自動車では、これから問題になる話であろう。
- ・ ドライバー抜き自動運転のステップの前に、ドライバーと自動運転との協調というところで考える。もちろん様々な場面があると思うが、まずは人ありきという考えである。このプロジェクト提案が製品をターゲットにするのであれば、安全は大変重要だと思うが、そもそもニーズはありそうだが、組み合わせでどんなものができるかわからないというフェーズであるなら、まずは機能を見せられるプロトタイプをつくるプロジェクトという位置づけでやるほうが良い。基礎研究を推進しつつ、プロトタイプをつくるレベルであるならば、セキュリティ技術を同時にやることはあり得る。
- ・ ロボットの技術はヒューマンオーグメンテーションという、人間にとって究極の姿を求めているようなところがある。これは長丁場の大きな技術のトレンドだと思う。我々も基礎から人材の育成まで含めて、長丁場で見えていかないといけない。プロトタイプをつくらないと、基礎の人たちも、何をしたいのかかわからないという状況にある。
- ・ 自動運転のときの DARPA がやったコンテストが非常に有効に働いたが、これが良い例である。ターゲットがしっかり示されたので、特にアメリカの大学が頑張り、技術のレベルも上がり、それを世の中に示すこともできた。ここまでが国でやってもらうことである。今は民間企業で盛んにやっている。もしこのようなフェーズを目指すのであれば、インテグレーションしてプロトタイプをつくることをターゲットにすればよい。その要求仕様は、宇宙開発のはやぶさのように、決めれば良い。まずそこまで行くという設定をすると、インテグレートしようとするチームが有機的につくられる。ハードウェアの要素技術に対しては、そのようなプロジェクトと密接につなげると、ワンチームの強みが失われるのが心配である。どうしてもハードウェアの開発は時間がかかるので、どうなるかわからないようなハードウェアの技術を入れ過ぎると、そこで止まってしまう。レベル感を合わせて、ミッションを達成するところをチーム化すると良い。予算をばらまくという形ではなく、チームになるように、どこかに集まってチームになるのが良いと思う。
- ・ 既存の産業用ロボットと、ここでやることの違いは何かを考えていた。ロボットも生物の進化と似て、過去の経緯を引きずって今のロボットがある。例えば、油圧の技術で動いている産業用ロボットは、今は無い。全部が電動モーターとギヤードモーターになっている。このため、産業用ロボットは上から下に腕をおろすときにも重力を利用するのではなく、モーターのエネルギーを使って下げている。そういう意味では、進化の過程を断ち切れないのが技術というものであり、産業用ロボットは今でもこのように発展している。これからのサービス、社会インフラの点検、医療・介護を考えるときには、これまでの進化の過程と違うところを狙うのはどうか。例えば、エネルギー消費が非常に少なく効率が良いものや、ソフト、スマート、小型軽量なども良いかもしれない。このような特徴を全体として置いた上で、要素のアイデアが出てくればできるだけ受け入れ、幾つかつないでいくと市場に投入できそうなものが生まれるかもしれない。そこにはコーディネータ、プロジェクトリーダーの目利きが必要である。このようなやり方は、

今の産業用ロボットとの違いが明確に出るし、地方の多くの若い研究者も、自分のアイデアをどこかに使えると思い、手を挙げてくる可能性が大きいように思う。

まとめ

システム技術と要素技術、ハードとソフトの開発のやり方、ロボット開発の仕組みの国際比較、欧米の政策と日本、提案の方向性、研究開発の推進の仕組み・体制、プロジェクトのビジョン・目標設定に関して議論を行った。その結果、以下のような方向性が示された。

- ・システム統合と要素技術・基盤技術開発とが常に相互作用する開発
- ・マーケットニーズを理解して要素技術開発を進めるプラットフォーム作り
- ・基礎研究、特定の技術応用、実用技術が混在し、戦略的なプログラム全体のデザインと、強いマネジメントの下での推進
- ・材料技術のように日本の強い技術をコアにしたロボット技術開発
- ・動力系、センシング系、制御系の要素技術・基盤技術が混然一体となるプロジェクト
- ・産学連携でモジュール化・システム化を進めた技術のアカデミアへの蓄積
- ・トップダウン的な推進だけでなく、地方の研究者のアイデアを持ち寄れる仕組み作り

付 録

付録 1：開催趣旨・プログラム

開催趣旨

JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、科学技術に求められる社会的・経済的ニーズを踏まえて国として重点的に推進すべき研究領域や課題を俯瞰の視点から系統的に抽出し、そのファンディング戦略を明確にするための活動を行っております。このような活動の一環として、これまでに技術分野の俯瞰を目的とした「俯瞰ワークショップ」や、重要テーマの研究開発戦略を検討する「科学技術未来戦略ワークショップ」などを開催して参りました。

本ワークショップ「ナノ・IT・メカ統合によるスマート小型ロボット基盤技術」は、上記「科学技術未来戦略ワークショップ」に位置付けられます。ロボットは産業用として実用化され日本だけでなく世界中の製造分野で使われるようになっていますが、今後は一般社会で使われるサービス系での利用が増大していくものと期待されています。政府も今年の1月に広く社会へのロボットの普及を目指した「ロボット新戦略」を策定し、産業界もロボット革命イニシアチブ協議会を立ち上げて、具体的な活動に向けた検討を進めています。一方、現在のロボット開発は応用分野での機能実証や既存のハードウェアの利用による制御システム（ソフトウェア）開発が中心になっており、サービス・システム設計とともに大きな価値を生み出す動力系やセンサ系などの部品・材料・デバイスの研究開発が進んでおらず、将来の日本の産業競争力にとって禍根を残す可能性があります。本ワークショップでは、現在あるいは将来のロボット開発の技術的課題や、新たに必要となる科学技術、その開発を促進するための政策などの議論を行い、今後の開発と普及が期待されるサービス系・見守り系のロボットを中心に、スマート小型ロボット基盤技術強化のために有効な研究開発戦略策定の一環として開催するものです。

本ワークショップでは、スマートロボットを利用するサービス分野に携わる産業界の問題意識や要望、動力系、センサ系、制御系を中心とする要素技術・基盤技術の新たな動向などの話題提供を基に、戦略的に取り組むべき重要な研究開発課題、技術統合による機能実証やモジュール化、システム化を進めるプラットフォームの仕組み、研究拠点の体制、人材育成、社会受容などについて議論します。これらの議論を通して、スマート小型ロボット基盤技術に関する研究開発の方向性を明らかにし、取り組むべき科学技術とその推進方法の共通認識を得たいと考えております。

プログラム

(敬称略)

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

司会 馬場 寿夫（JST-CRDS）

10:00 ～ 10:05 開会挨拶 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）

サービス視点からのスマートロボット基盤技術開発への期待（各発表 15 分 + 議論 10 分）

10:55 ～ 11:20 「下水道におけるロボット利用の現状と今後 ー東京都の事例ー」

岩佐 行利（東京都下水道サービス）

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 H S R（Human Support Robot）のプラットフォーム展開」

山本 貴史（トヨタ自動車）

新たな要素技術・基盤技術（各発表 15 分 + 議論 10 分）

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 ～ 14:55 「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）

16:00 ～ 17:30 総合討論 ファシリテータ：田中 秀治（JST-CRDS、東北大）

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）

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）

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）

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）

17:30 ～ 17:35 閉会

曾根 純一（JST-CRDS）

付録 2：参加者一覧

招聘識者

(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 東京都下水道サービス 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 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 室長

(コメンテータ)

- ・川村 貞夫 立命館大学 理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

JST-CRDS スマートロボットチームメンバー

- ・曾根 純一 上席フェロー
- ・島津 博基 フェロー
- ・鈴木 慶二 フェロー
- ・西野 恒代 フェロー
- ・馬場 寿夫 フェロー
- ・宮下 哲 フェロー
- ・茂木 強 フェロー
- ・岩見 紫乃 情報企画部情報分析室（ソリューション提供担当） 研究員
- ・高地 伸夫 戦略研究推進部 ICT グループ 主任調査員

関係府省・機関等

- ・守屋 直文 内閣府総合科学技術・イノベーション会議事務局
共通基盤技術グループ ナノテクノロジー・材料担当 政策企画調査官
- ・石川 稔 内閣府総合科学技術・イノベーション会議事務局
共通基盤技術グループ ナノテクノロジー・材料担当 政策調査員
- ・松本 明善 文部科学省研究振興局参事官（ナノテクノロジー・物質・材料担当）付
科学技術・学術行政調査員
- ・田中 伸彦 経済産業省産業技術環境局研究開発課 企画官
- ・松波 成行 物質・材料研究機構 調査分析室 室長

- ・川喜多 磨美子 物質・材料研究機構 調査分析室 主任エンジニア
- ・井上 貴仁 新エネルギー・産業技術総合開発機構
電子・材料・ナノテクノロジー部 主任研究員
- ・杉崎 敦 新エネルギー・産業技術総合開発機構
電子・材料・ナノテクノロジー部 主査
- ・松本 崇 新エネルギー・産業技術総合開発機構
ロボット・機械システム部 主査
- ・関根 久 新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター
電子・情報・機械システムユニット ユニット長
- ・松井 俊浩 新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター
電子・情報・機械システムユニット 統括研究員
- ・岡田 明彦 新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター
ナノテクノロジー・材料ユニット 研究員
- ・風間 俊哉 統計数理研究所 文部科学省委託事業 数学協働プログラム事務局
特任助教
- ・伊藤 和典 ナノテクノロジービジネス推進協議会 事務局長
- ・宮田 明 ナノテクノロジービジネス推進協議会 事務局次長
- ・沙魚川 久史 セコム株式会社 本社技術管理室 主務

JST

- ・中山 智弘 CRDS 企画運営室長／JST 経営企画部イノベーション企画推進室長
- ・永野 智己 CRDS フェロー・ユニットリーダー
(ナノテクノロジー・材料ユニット)
- ・佐藤 勝昭 CRDS フェロー (ナノテクノロジー・材料ユニット) ／
JST 研究広報主監
- ・末村 耕二 CRDS フェロー (ナノテクノロジー・材料ユニット)
- ・荒岡 礼 CRDS フェロー (ナノテクノロジー・材料ユニット)
- ・田中 一宜 CRDS 特任フェロー (ナノテクノロジー・材料ユニット) ／
産業技術総合研究所 名誉リサーチャー
- ・伊藤 聡 CRDS 特任フェロー (ナノテクノロジー・材料ユニット) ／
理化学研究所 計算科学研究機構 コーディネーター
- ・石田 秋生 研究プロジェクト推進部 上席主任調査員
- ・吉川 翔策 研究プロジェクト推進部 主査
- ・福井 信義 産学連携展開部 イノベーション推進マネージャ
- ・蔣 赫 産学連携展開部 イノベーションハブグループ 主査
- ・安藤 朗 産学連携展開部 イノベーションハブグループ 主任調査員
- ・伊藤 広幸 産学連携展開部 企画課 調査員

■ワークショップ企画・報告書編纂メンバー■

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・リーダー	(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-WR-09

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

「ナノ・IT・メカ統合によるスマート小型ロボット 基盤技術」

2015 年 12 月 4 日（金）開催

平成 28 年 3 月

ISBN 978-4-88890-489-6

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.

ISBN 978-4-88890-489-6

