

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

現実空間を認識し、
臨機応変に対応できる
ロボットの実現に向けて



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）が令和4年2月24日に開催した科学技術未来戦略ワークショップ(WS)「現実空間を認識し、臨機応変に対応できるロボットの実現に向けて」に関するものである。

ロボット技術は日本が直面する社会的課題の有効な解決手段の一つと期待され、様々な将来像が提示されている一方で、現状のロボット技術は我々が生活している「開かれた環境」での非定型作業を苦手としており、期待との間に大きなギャップが存在している。

このような現状を踏まえ、CRDSでは、今後取り組むべき重要な研究開発課題と実施体制・仕組みなどを検討・議論し、以下のような仮説をまとめた。

- ・「開かれた環境」に対応できるロボットの研究開発には、柔軟性をもたせたロボットの統合システム開発と理論的基盤の確立が必要である。
- ・そのためには、さまざまな異分野からの知見も取り入れる必要がある。
- ・これらの研究開発を加速するために、オープンな研究の共有基盤である「プラットフォームの整備」、研究のベンチマークとなる「競技会型の研究開発の推進」が求められる。

本ワークショップでは、7件の話題提供と総合討論を通じて、これらの仮説の検証と内容の深化を行った。

第一部「柔軟なロボットの実現に向けた研究について」では、実世界と学習モデルとの誤差を最小化する適応的な学習法の応用事例、ロボットが環境との相互作用から概念を獲得する統合的認知モデル、四脚ロボットの脚間協調制御の事例、相互作用の積極的活用による無限定環境への対応など4件の話題提供があった。

続く総合討論では、環境に対して受動的な「柔軟性」に加えて、能動的に環境を利用する「適応性」の重要性が示唆された。また、社会への適応まで考慮した研究テーマを設定すべきとの指摘を受けた。適応すべき環境として、野外から都市内、屋内まで様々な環境が想定され、環境に応じて適応するためのアプローチも異なることが示唆された。

第二部「柔軟なロボットの社会実装に向けた仕組みについて」では、プラットフォームロボットを用いた共創的研究の事例、競技会を通じたロボットの基礎研究推進に関する事例、ロボットの社会実装により創出される価値や懸念など3件の話題提供があった。

総合討論では、ロボット競技会が果たす役割として参加者と主催者が一体となったヒューマンネットワークの形成が挙げられた。このネットワークを介して個々の研究者が抱えている課題が広く共有され、異分野との連携の場になると考えられる。また、研究開発を行っているロボットがどのような社会課題解決につながるのか、社会にどのような影響を与えるのか、基礎研究段階から検討することが重要であるとの指摘がなされた。

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

1	ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明	1
	東 良太 (JST-CRDS)	
2	第一部：柔軟なロボットの実現に向けた研究について	7
2.1	深層予測学習を用いたロボットの実世界適応 尾形 哲也 (早稲田大学／産業技術総合研究所)	7
2.2	記号創発ロボティクスと統合的認知アーキテクチャ ～人と環境との相互作用に基づく自律的な発達知能創成～ 谷口 忠大 (立命館大学)	14
2.3	開かれた環境に対応可能なロボット制御のための理論的 基盤の構築を目指して 石黒 章夫 (東北大学)	21
2.4	『開かれた環境』に対応するロボット 大須賀 公一 (大阪大学)	29
2.5	総合討論 1 ファシリテーター：嶋田 義皓 (JST-CRDS)	34
3	第二部：柔軟なロボットの社会実装に向けた仕組みについて	40
3.1	研究 PF ロボットを用いた共創的研究 その持続的発展の ための一案について 山本 貴史 (トヨタ自動車)	40
3.2	ロボット競技会による技術力の革新的な加速と社会応用 岡田 浩之 (玉川大学)	45
3.3	社会システムとしてのロボット 稲谷 龍彦 (京都大学)	50
3.4	総合討論 2 ファシリテーター：茂木 強 (JST-CRDS)	54
	付録	60

1 | ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明

東 良太 (JST-CRDS)

1.1 ロボット技術の現状と問題

ロボット技術の革新は、少子高齢化、災害対応など、日本が直面する社会的課題に対し、非常に有効な解決手段の一つとなると期待され、様々な分野における将来像が「ロボット新戦略」等にて提げられているが、これらの将来像においては、予め整えられた「閉じた環境」で定型作業をするのではなく、我々が生活しているような「開かれた環境」において非定型の作業ができることが、ロボットに求められている。

しかしながら、ロボットに対する高い期待に対し、現状の技術との間には大きなギャップがある。「モラベックのパラドックス」として知られているように、知覚と運動に関するスキルをロボットに与えることは非常に困難である。衣服を畳む、手すりをつかんだ階段昇降、日用品を掴むといった、人間にとっては容易にできる行動が、ロボットにはなかなか出来ていない。

従来のロボットは、センサーにより未知の空間の情報を精密に測定してモデル化し、論理演算による行動計画に従い、行動している。これは、工場のライン等での定型作業等には有効だったが、我々が生活している「開かれた環境」に対処することは困難である。「開かれた環境」では、

- ・ センサーが全ての情報を取得出来ない
- ・ 様々な要素が複雑に関係しモデル化が困難
- ・ 状況が刻々と変化する

といった要因により、容易に行動が破綻してしまうためである。このような問題に対する研究開発として、従来から注力されてきたアプローチは、計算能力やセンサー精度の向上等によって「開かれた環境」の不確実性を削減するというものである。これによってロボットの適用範囲が拡大してきたが、不確実性を完全に無くすることは不可能であり、これだけでは問題の解決は困難である。

1.2 問題に対するアプローチ

今回のワークショップでは、柔軟性を取り込んだロボットシステムの探求と理論的基盤確立に向けた取り組みの推進を提案する（図1-1）。知能や身体に柔軟性を取り込むことで不確実性に対する許容度を向上することで、問題の解決を目指すというものである。ロボットの知能に関しては、脳科学や認知科学における知見を基盤に、人間の知能が感覚器や運動器を通じて外部世界とつながる仕組みを取り入れることにより柔軟性を獲得することが考えられる。また、ロボットの身体に関しては、柔軟な素材の活用や身体と環境の相互作用ダイナミクスを積極的に活用した制御機構により、柔軟性を獲得することが考えられる。これらの取り組み事例について、第一部「柔軟なロボットの実現に向けた研究について」にて話題提供を頂いた上で議論を行いたい。

ロボットに柔軟性を取り込むためには、要素技術にとどまらない統合したロボットシステムに関する研究が求められる。しかしながら、このような研究を阻害する要因として、

- ・ システム統合に関する理論基盤がない。
- ・ アイデア、思いつきのみ依存した研究では、体系的な海外研究に太刀打ち出来ない。

- ・論文になりやすい個別の要素研究をやりたがり、論文になりにくいシステム研究は避けがちといった問題が挙げられる。これらの問題解決のために整備すべき研究開発環境として
 - ・研究を下支えするプラットフォームの提供と有効活用
 - ・新規手法の優位性を客観的・定量的に検証する競技会型の研究開発の活用
- が有効であると考えられる。

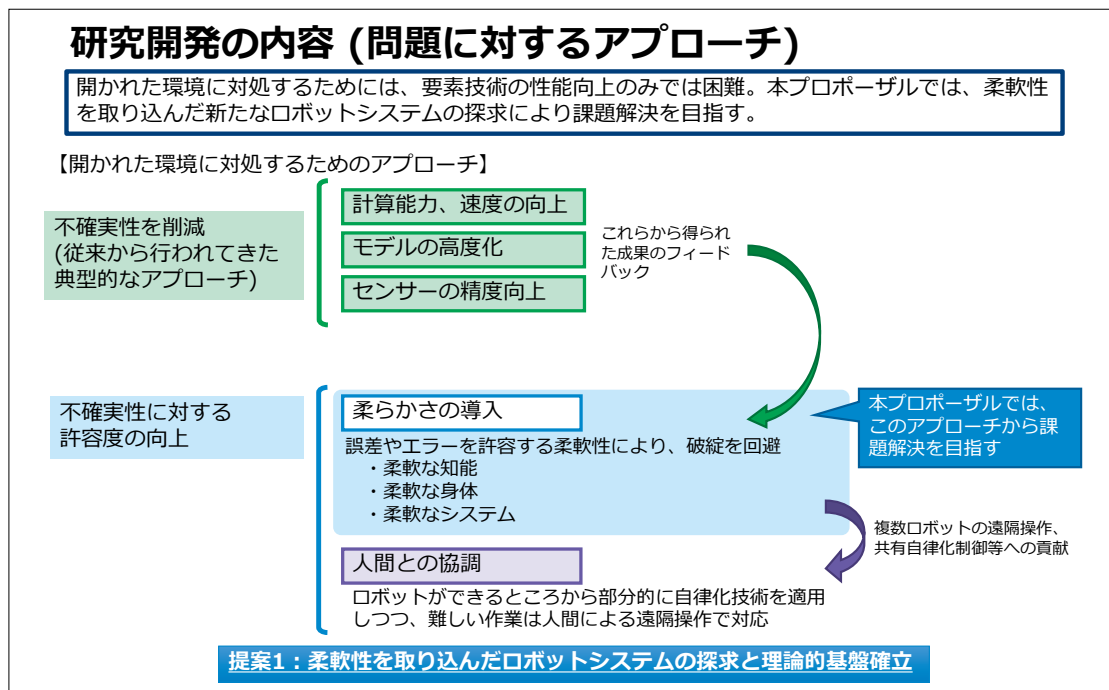


図1-1 開かれた環境に対処するためのアプローチ

1.3 研究開発の推進方法

(1) プラットフォームの整備

ロボットを作りあげるには、様々なノウハウや大量の研究リソースの投入が必要であり、これらが異分野研究者の参入やロボット技術の発展を困難にしている。

このような問題を解決するために、「研究を下支えするプラットフォームの提供と有効活用」を提案する（図1-2）。

ロボットに関するプラットフォームの既存事例として、ROS（Robot Operating System）と呼ばれるオープンソースで提供されるソフトウェアプラットフォームや、生活支援ロボット HSR を通じた研究コミュニティの構築等が挙げられる。

上記の問題解決のためには、これらの取り組みをさらに発展させて、

- ・機械学習ライブラリと連携する API 整備、大規模データセット整備といった異分野研究者の参入を容易にするためのソフトウェア基盤整備
- ・仕様、CAD データ等をオープンデータ化し、3D プリンターを用いて高性能なロボットを安価かつ容易に製作できるオープンなハードウェアプラットフォームの整備

が求められる。

研究開発の推進方法 (プラットフォームの整備)

研究プラットフォーム、ツール群を提供することで、分野融合研究を促進するとともに、本質的な研究にかかる時間を増やし、技術の発展を支える。

【対処すべき問題点】

実際のタスクを実行するためのロボットを作りあげるには、様々なノウハウや大量の研究リソースの投入が必要であり、異分野研究者の参入や技術の発展を困難にしている。



提案2：研究を下支えするプラットフォームの提供と有効活用

【既存の枠組み】

ROS(Robot Operating System)：オープンソースで提供されるロボット向けのメタ・オペレーティングシステム、分散型の計算システム基盤、開発ツール、各種ソフトウェアライブラリ等からなる。

HSR開発コミュニティ：トヨタが開発し日本ロボット学会に移管される“HSR”を軸に、一般環境で人の作業の代替するロボットの実現を目指した共創環境を構築、技術開発の加速を図っている。

【問題解決のために取り入れるべき事項】

- ◆人工知能研究者等、異分野研究者の参入を容易にするためのソフトウェア基盤をROS上に構築
 - ・機械学習ライブラリと連携するAPI整備、大規模データセット整備等
- ◆実ロボットを用いた研究実施を容易にするためのオープンなハードウェアプラットフォームを新たに開発
 - ・仕様、CADデータ等をオープンデータ化、3Dプリンターを用いて高性能なロボットを安価かつ容易に製作できる
 - ・ハード、ソフトウェアは自由に改造、機能追加可能であり、幅広い研究に適用できる
 - ・改造等の成果をコミュニティで共有することで、研究の発展を促進できる

図1-2 プラットフォームの整備

(2) 競技会型の研究開発

新規手法の優位性を客観的・定量的に検証する手法の確立も求められる。現状では、個々の研究グループが用いているロボット、タスク、評価方法がそれぞれ異なっているため、研究成果の再現や、相互比較による有効性検証が困難であり、産業界への橋渡しや、研究者間の成果の共有を阻害している。

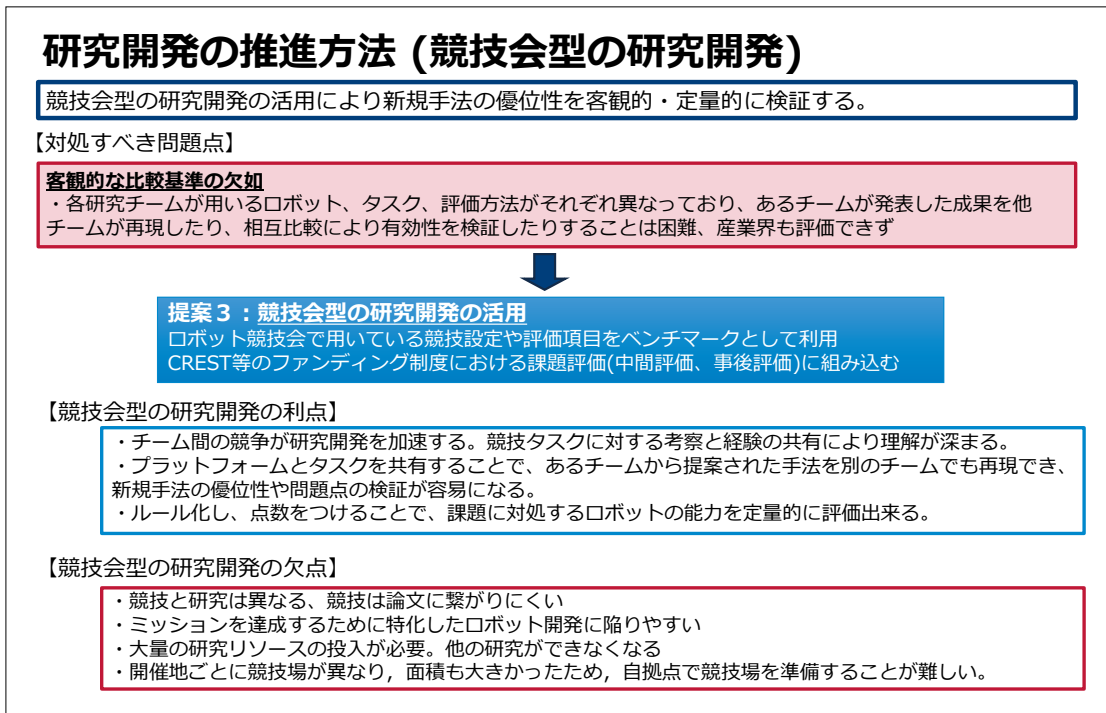


図1-3 競技会型の研究開発

このような問題を解決するために「競技会型の研究開発の活用」を提案する（図1-3）。ロボカップやワールドロボットサミットで実施されているようなロボット競技会の設定や評価項目をベンチマークとして用いる競技会型の研究開発を導入することによって、新規手法の有効性について客観的かつ定量的な評価が可能となる。

一方で、競技は論文につながりにくい、競技に勝つためのロボット開発に陥りやすいといった欠点も指摘されている。

これらの欠点をカバーするため、競技会型の研究開発には

- ロボットの性能を「見える化」する標準的性能試験法の導入
- プラットフォームの活用
- 自拠点での評価に活用可能な簡便な競技設定

といった事項を取り込むことが求められる。

(3) 人とロボットが共存するために対処すべき課題

ロボットに関する基礎研究と並行して、人とロボットが共存することに伴う課題への取り組みが求められる。これまでの研究者インタビューを通じて、3つの課題が挙げられた。

第1の課題は「安心と安全について」である。家庭内ロボットや介護ロボットは、人との接触を前提とした安全性の確保、安心感の醸成が求められる。このためには、ロボット自体の安全性を向上させる研究開発に加え、安全規格の整備、ユーザーに心理的安心感を与える技術の開発等も求められる。

自律ロボットが事故を起こした場合、損害賠償責任をだれが負うのかという「機械の判断と責任」が第2の課題として挙げられる。従来の製造物責任に代わる新たな責任類型が求められる。

第3の課題はロボットが人と共存するためには、「個人情報とプライバシー」の問題である。個人情報の保護に関する取り組みだけでなく、パーソナルスペースへの物理的侵害や、ロボットとの感情インタラクションを通じた価値観や思想への悪影響、といった様々なプライバシーの問題を考慮する必要がある。

プラットフォーム、競技会、ロボットと人が共存することに伴う課題については、について、第二部「柔軟なロボットの社会実装に向けた仕組みについて」にて話題提供を頂いた上で議論を行いたい。

1.4 ロボット研究の現状

ロボット研究に対する国内の主なファンディングの状況を応用分野別にまとめた（図1-4）。縦軸に各ファンディングで目標とする技術成熟度（TRL）を示しており、上にいくほど高い技術成熟度レベルを目標としている。ロボットに関して多くのファンディングが実施されているが、社会実装に近い段階に対する支援が充実している一方で、基礎研究に対する支援が不十分である現状が見て取れる。基礎研究を支援するプログラムの実施が求められる。

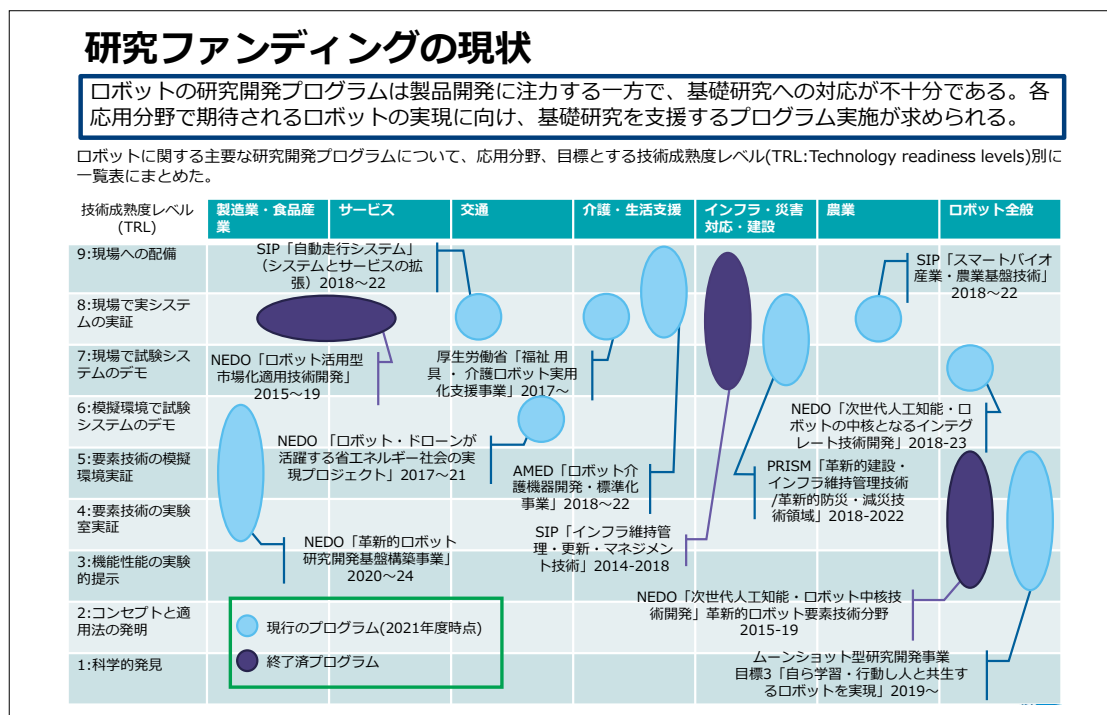


図1-4 ロボット研究に対する国内の主なファンディング

1.5 論点

今回のワークショップにおいて提案する仮説をまとめる（図1-5）

- ・「開かれた環境」に対応できるロボットの研究開発には、柔軟性をもたせたロボットの統合システム開発と理論的基盤の確立が必要である。
- ・そのためには、さまざまな異分野からの知見も取り入れる必要がある。
- ・これらの研究開発を加速するために、オープンな研究の共有基盤である「プラットフォームの整備」、研究のベンチマークとなる「競技会型の研究開発の推進」が求められる。

これらの取り組みにより、ロボット研究の発展のみならず、様々な学術分野への波及が期待され、日本の研究力の向上につながると考えられる。さらに、各応用分野で期待されるロボットの社会実装をいち早く実現することで我が国の産業競争力の向上が期待される。本ワークショップを通じて、これらの検証および、内容の深化を行う。活発な議論をお願いしたい。

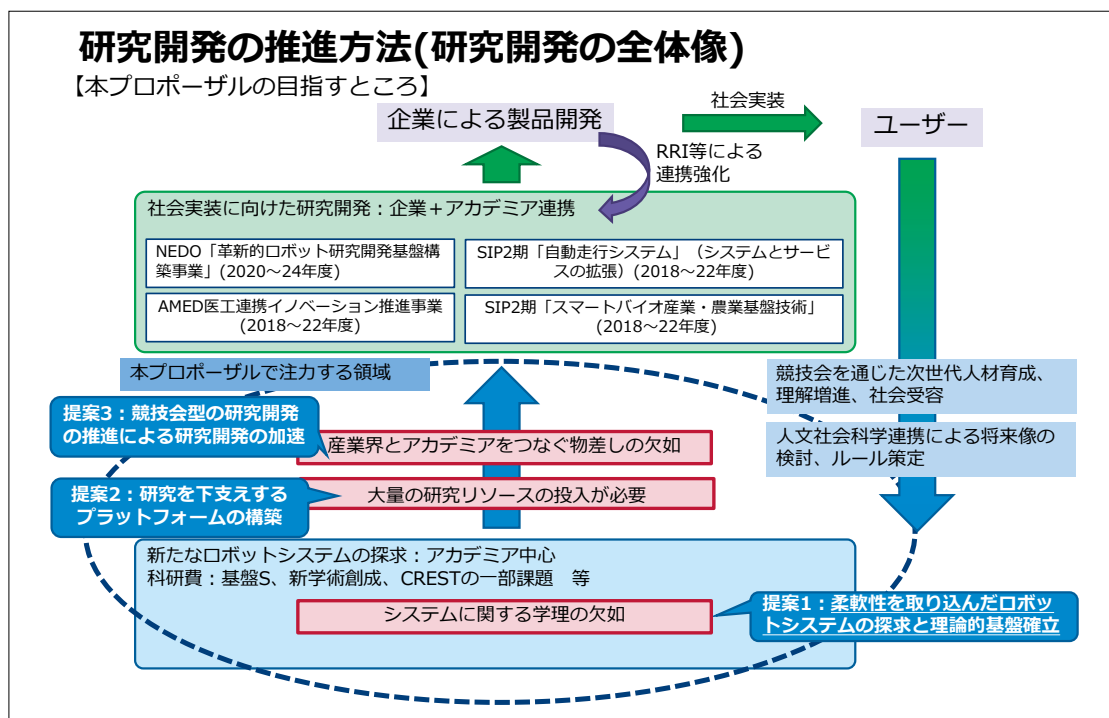


図1-5 本プロポーザルの目指すところ

2 | 第一部：柔軟なロボットの実現に向けた研究について

2.1 深層予測学習を用いたロボットの実世界適応

尾形 哲也（早稲田大学／産業総合技術研究所）

ディープラーニングの次の知能

今、ディープラーニングという技術がAIの中の1つの中核技術として広がりつつあるが、その実世界システム（ロボット）への応用について考えたとき次の知能が見えてくるのではというのが大きな趣旨である。

画像、音声、自然言語、多くの人工知能のアプリケーションにディープラーニングが使われるようになってきた。一部は推論のようなアプリケーションも含まれる。かなり広範な適用が期待出来、非常に高い性能を示しているが、その中身が分からないという、不思議な技術である。

ただ、実世界の応用というところになると、直接利用するというのはなかなか難しい。

それはまさに開かれた世界にどう適用するかという話に尽きると考えている。今までの機械学習のコンテキストをロボットに適用しようとすると、画像認識や音声認識をそのままロボットビジョンのような技術に使う、もしくは強化学習のように、シミュレーションの世界で膨大な経験をさせることによって動作と感覚、マッピングを手に入れようというアプローチになる。

これらの方法論は、いずれもちろん重要な研究であるが、ここでは、大量のデータを与え、多様なシチュエーションにある程度対応できるような「最適モデル」を手に入れるということが前提になっている。もちろん100%のパフォーマンスにはならないが、90%以上の高いパフォーマンス、人間のパフォーマンスを越えればよいという考えである。

しかし改めて、データをいくら集めても完璧なモデルになることはない。常に世界は不安定で予測不可能だということである。大量のデータを集めることで、完成度を上げることはできるが、常に不完全だということになる。

予測符号化

異分野との交流が本ワークショップの1つのキーワードの中に入っていた。私自身は、今日参加されている浅田先生が提唱されたような、人間というものをロボットで考えていこうという認知発達ロボティクス研究をやってきた。その中で分かってきたのは、世界は決して学習で最適化モデルを得る、という対象ではないということである。

異分野との交流 予測符号化

Sensory inputs from environment has inherent noise and unpredictability.
[Andy Clark, 2016, Corlett et al., 2018...]

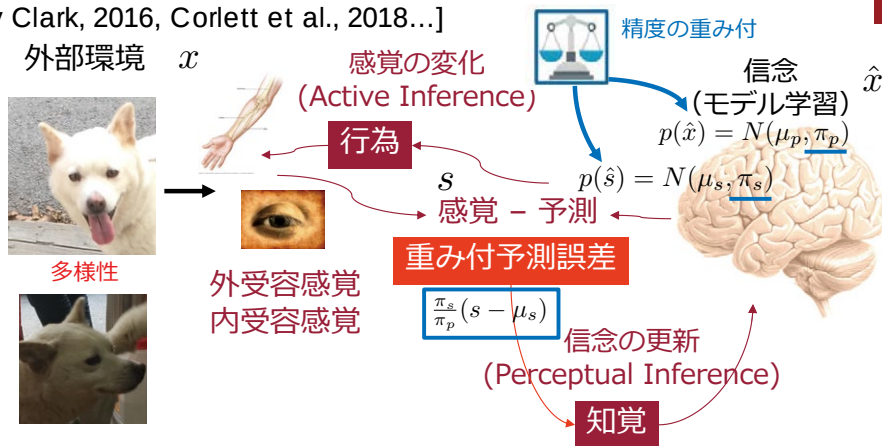


図2-1-1 予測符号化

例として予測符号化という考え方を挙げる（図2-1-1）。世界と学習したモデルがあったときに、そこには不可避の誤差が生じる。モデル化の誤差である。それに対応するための1つ方法として、機械学習では、モデルを学習して汎化能力を上げる、というアプローチをとる。もちろん学習は極めて重要なアプローチだが、これだけでは時間圧にさらされる主体が、環境に合わせて行動をとることは難しい。

別の考え方として、知覚を変えてそのモデル化の誤差を減らそう、というアプローチがある（Perceptual Inference）。つまりモデルが世界に対して予測をしているときの内部状態、隠れ状態（ニューロンの発火状態）、仮定しているバイアスを変える。つまり知覚を変えることで誤差に耐えられるのではないかという考え方である。

さらに別のアプローチとして行為を産み出す方法がある（Active Inference）。リアルタイムに自分の行為を変えることによって、より自然な、モデルにとって予測のしやすい状況を引き出す。

非常に大きな誤差が来た場合は、学習をする必要があるが、その場合でも、現在の予測誤差をどう評価するのか、モデルの信念の強さのようなものに依拠して、その誤差をどう扱うか考える必要がある。

深層予測学習によるロボットの動作学習

そのようなコンセプトを一部でも反映する試みでロボットを動かした例として、我々が産総研で行ったロボットのタオル折り畳みが挙げられる（図2-1-2）。タオルの折り畳み動作について、タオルの種類、置き場所を変え、変形もさせながら、50パターンぐらいの経験を通じてロボットに学習させる。これによって、ロボットはタオルを畳むようになる。

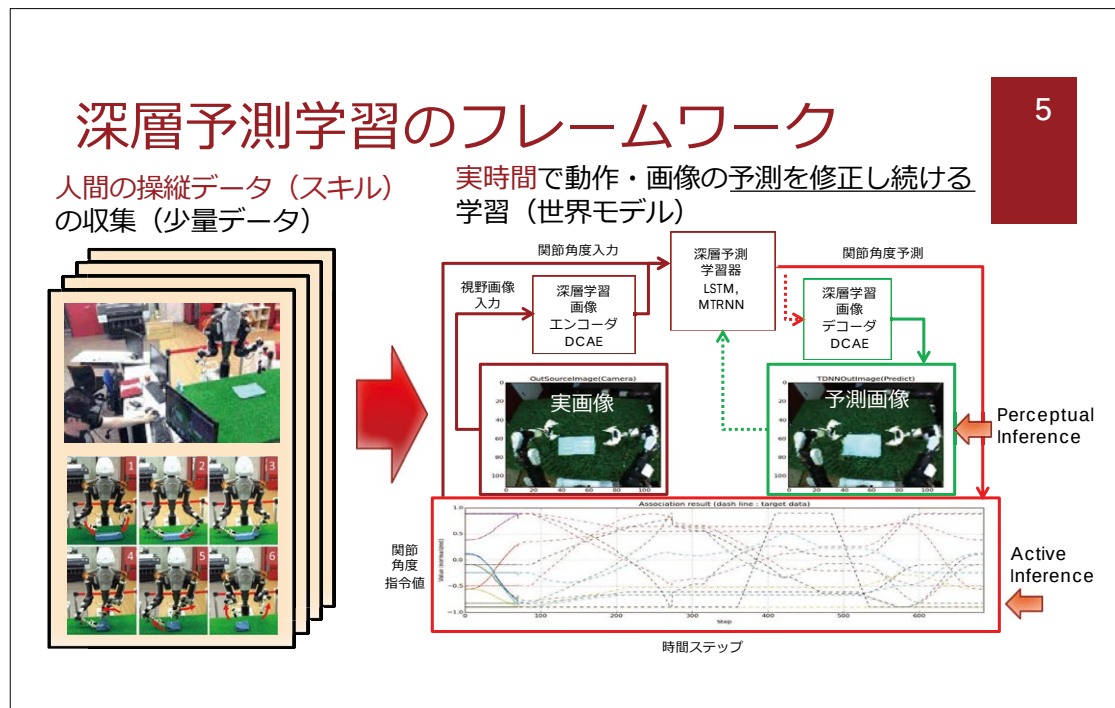


図2-1-2 深層予測学習のフレームワーク

ポイントは世界を実時間で予測するという考え方である。ただし、全てを正解できる予測モデルはつくれない。完璧なワールドモデルは手に入らないということがすごく大事な前提である。

例えば、この事例では予測画像を出しているが、実世界の画像と比較するとエッジがぼやけてしまっている。この予測画像は、ロボット自身が有しているモデルが、その予測誤差が一番小さくなるようにつくった知覚である。つまり、「うその知覚」をつくることによって誤差を小さくしようとしている。それと同時に、教えた軌道とは微妙に違う軌道が生成される。実際、未学習の物体に対しては違う軌道が生成されなければならないわけだが、これは自分の行動を変えることでモデルの予測誤差を減らそうとしているのである。

こういった知覚や運動の変化というものが実時間で生成されていく。本当ではないその予測だが、そういったことによりタオルを畳むといったような行為がリアルタイムにできるようになっていく。未学習の位置、未学習の形状にも対応できる。

このように「データで最適なモデルを手に入れよう」ということとは異なるアプローチであることを示すため「エクスペリエンス」という言葉を使っている。つまり静的なデータの対応ではなく、実時間で流れてくる感覚、運動の時系列情報に対応する、ということである。

このシーンでは未学習のタオルを置いているが、予測の知覚には学習データに与えたことがない特異な色のタオルが出てくる。うその知覚だが、それが自分の行動を完遂するための最も自然な知覚の状態である。

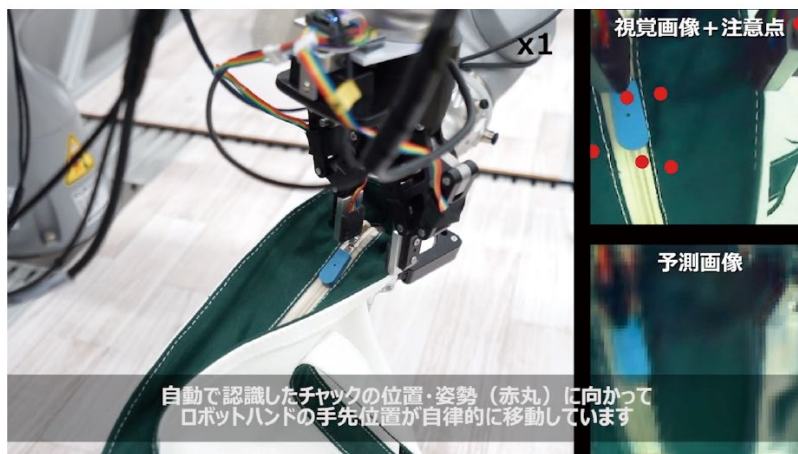
本や私の手を見せても、ロボットの頭の中ではタオルになる。そのように世界に対して自分で新しい知覚をつくり上げ、反実の仮想世界をつくることによって世界に対応するということが重要な発想になっている。

このような思想のもとに、多様な企業の協力を得て、柔軟物体操作、全身運動協調、液体・粉体の計量といったデモンストレーションを行っている。完璧な予測モデルを学習することはできなくても、実時間で実世界の問題に対応できるということを示している。また一部は製品化も始まっている。

チャック開け動作 (2021.5)

H. Ichiwara, H. Ito, K. Yamamoto, H. Mori, T. Ogata: ICRA2022

8



自動で認識したチャックの位置・姿勢（赤丸）に向かって
ロボットハンドの手先位置が自律的に移動しています

動画：形状が変わる物体のハンドリングに対応
する深層学習型ロボット制御技術(解説)
<https://youtu.be/f9Lh5vMRgq8>
(2022/5/17時点)

図2-1-3 チャック開け動作

次に、チャック開け動作の例を示す（図2-1-3）。毎回少しずつ異なる位置にあるチャックを把持し、リアルタイムに引っ張り方向を様々に調整しなければ（“試行錯誤”）、チャックを開けることはできない。右上の図に示した赤い点はロボットが、その予測誤差を最小化するために注意を向けている点であり、学習の過程で自己組織化される。チャックをつかんだ上で、視覚、力覚、触覚を予測しながらチャックを開ける動作を実行する。この例では、人間が直接教示することで動作を学習しているが、どのような方法を用いるにしても、世界に対する予測、自分の仮想的なイメージを獲得するのを助ける経験をロボットに与えればよい。動いている最中に、背景照明の色を変えても、物体位置を動かしても対応できる。

ロボットが作っている予測画像（仮想の知覚）は、注意を向けた物体と自分の手は再現しているが、他の画像は消えてしまう。この予測画像は「うその画像」であり、現実ではない。しかしながらこのタスクを実行するために、注意を向けた物体を見て他を無視するということが、全体の予測誤差を一番小さくできる。予測学習をした結果として、このようなイメージが頭の中で自動的につくられるのである。

異分野との交流：神経発達障害に関する取り組み

異分野との交流の例として、神経発達障害での認知行動異常モデルを紹介する。これはタオル畳みとほぼ同じ神経回路モデルを使っている。ここでの仮説は神経活動のバイアスの分散が学習や発達のプロセスにおいて重要であり、この分散が狭くなると発火するニューロンと発火しないニューロンのバランスが取れなくなる（どちらかに偏る傾向が生まれる）。つまりニューロンの発火の仕方の多様性が重要、という仮説である。

実際の学習では、ニューロンの多様性に関わらず学習は収束する。しかしながら、実ロボットに導入し、動作を観察すると、ニューロンの多様さが少ないケースでは、環境の知覚に対して非常に過敏・過剰に反応するような動きが出てくる。この結果はロボットやAIではなく、精神医学のジャーナルで発表している。

ムーンショット目標3での取り組み

ムーンショット目標3の中でどのようなことを考えているのかについて、お話ししたい。我々のムーンショッ

トプロジェクトでは1人に1台一生寄り添うようなロボットを目指している。これは世界初のヒューマノイドロボットを開発された故加藤一郎先生が提唱された「マイロボット」の概念に通じるだろう。ムーンショットなのですぐできないというのはよく承知しているが、2050年までに何とかこれを実現したい。

そのときに非常に重要なのが、人間が当たり前に行えることがとんでもなく難しいということ（モラベックのパラドックス）。そこに挑戦していきたいと思っている。

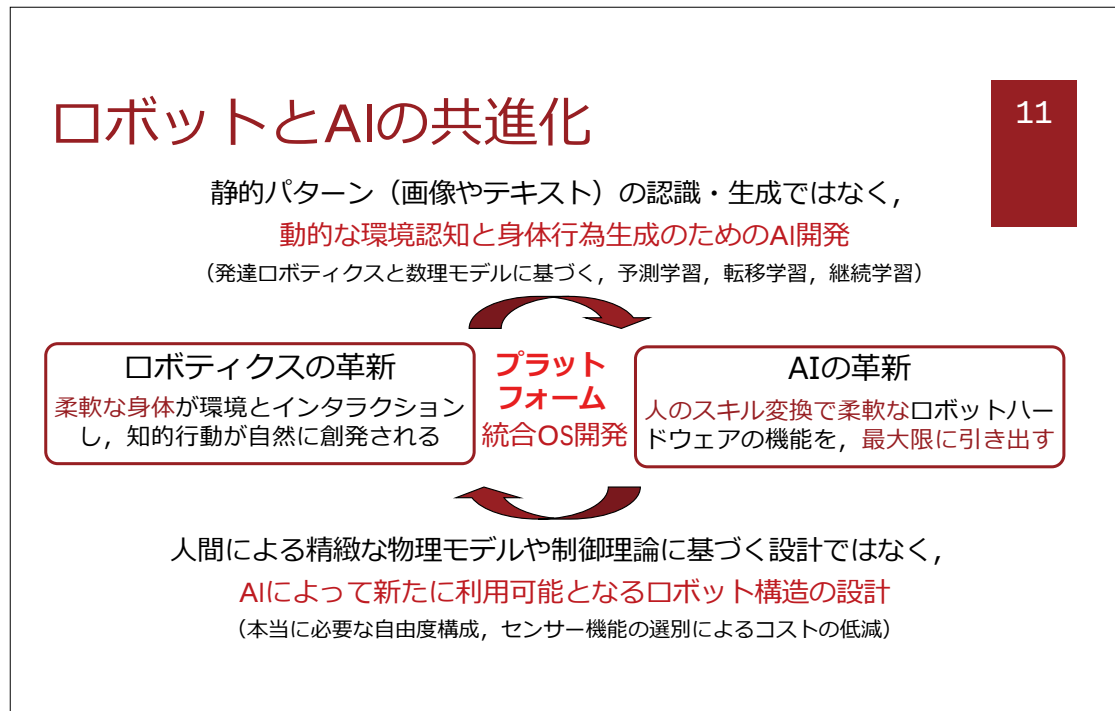


図2-1-4 ロボットとAIの共進化

ここで重要となる考え方が「共進化」である（図2-1-4）。ロボットがその身体の潜在能力、特に柔軟な身体の潜在能力を生かしたときには、知的な計算を行う部分が極めて小さくても、簡単な神経回路だけで非常に知的な行為が生成できる。ただその設計方法は非常に難しい。一方で私たちのロボットはロボット自身が経験を積む中で、どのように予測誤差を小さくして行動を生成するという視点に基づいている。これらの2つを相互作用させ共進化をさせていきたい。

あるロボットを作ってみて学習させる。学習させた結果、必要な機能をまたフィードバックする、こういうプロセスを繰り返しながらある種のプラットフォームや、ディープラーニングとRTミドルウェアの統合OSといったものにも広げていきたいと思っている。

プロトタイプDry-AIREC (2021年10月)

13

身長: 1660mm
 全体重量: 約150kg
 可搬重量: 最悪姿勢保持: 8kg、最大瞬間(肘直角時): 20kg
 関節トルクセンサxインピーダンス制御(腕部7軸x2、腰部3軸)
 ハンド6軸x2(把持力センサ)
 人肌ゲル(腕部、胴体前面)
 台車: 全方位オムニホイール



図2-1-5 プロトタイプDry-AIREC

現在、ムーンショットでは、プラットフォームの最大限の可能性を示すため、Dry-AIRECというハードウェアプロトタイプを開発している(図2.1.5)。各関節のインピーダンス制御ができるので非常に柔らかくなると同時に、固くなったときは片腕で20kg以上の物体を持てるぐらいのパワーが出せる。この柔らかさと固さを同時にコントロールできることが非常に重要であり、今後、多様なタスクの学習に取り組んでいきたいと思っている。

競技会型研究開発について

競技会型研究開発というアプローチは大事だと思っている(図2-1-6)。人々に受け入れやすいロボットを、論文以外の方法で社会に対して発信できるというのは非常に大きい。さらに全く異分野の方がネットワークを構築できる場でもある。

ただ競技会型では、「順位」にこだわり過ぎないことが非常に重要だと思っている。競技にのみ過度に適応してしまうと、本来の意味を失う可能性が高くなるからである。学術的価値や、DCON(ディープラーニング×ハードウェア 高専生による事業創出コンテスト)において提示している事業的価値、他にも芸術的な価値など様々な価値観があると思われる。そういった多様な価値観を受け入れられるような枠組みができるといいと思っているが、実際にやっていて難しいと感じているところでもある。

14

競技会型研究開発への期待

- 😊 評価の場で成果を見せる
- 😊 多様な人々が参加しネットワークを構築できる
- 「順位」はどこまで大事か？

- 「競技に勝つこと」が目的化されない工夫
 - 多様な価値観が評価される枠組み
 - 学術的価値、事業的価値、芸術的価値

ディープラーニング × ハードウェア
高専生による事業創出コンテスト

■主催（社）日本ディープラーニング協会、(株)日本経済新聞社

図2-1-6 競技会型研究開発への期待

2.2 記号創発ロボティクスと統合的認知アーキテクチャ ～人と環境との相互作用に基づく自律的な発達知能創成～

谷口 忠大（立命館大学）

「記号創発ロボティクス」という看板を掲げて、場所概念の学習や語彙獲得、また、物体概念の獲得における模倣学習、強化学習の融合、さらに、マルチモーダル情報を統合したマニピュレーションなどといった様々な研究を展開している。またワールドロボットサミット等のロボット競技会に参加し、研究成果を実装したロボットのデモンストレーションを行っている。

尾形先生と同じように認知発達ロボティクスに私も学生時代からインスパイアを受け続けた。人工生命や複雑系、身体性認知科学といった分野の視点を大切にしながら、そこからいかにして高次の認知、言語といった存在に迫るかというのが問いだ。個体の認知発達を超えて、社会における記号の創発までをボトムアップに捉えるというところまで射程に含む意味で記号創発ロボティクスというキーワードを掲げて研究を行っている。

しばしば「記号的なAI」をトップダウン的、「統計的なAI」をボトムアップ的という捉えられ方がされるが、これについて一言述べておきたい。我々が扱っている言語や概念は、そもそも進化的、発達的に考えて、ボトムアップ的に形成されるものである。同時に、動的であり、不確実な存在でもある。人間個人の視点から言えば、社会という高次の存在からトップダウンに与えられているように錯覚するが、それ自体の動的な変容を捉えることが「記号的なAI」と「統計的なAI」の統合には不可欠であると考えている。

そもそも旧来の「記号」概念というのは昔のコンピューターサイエンス（計算機科学）やロジック（数理論理学）における「記号」概念の影響を強く受けている。それは計算の単位となる離散的で原子（アトム）的な表象だ。しかし、人間が社会の中で用いる言語はそういうものではなく、記号論的な意味での記号だ。人間とロボットのインタラクションを考えると、人間の使っている言語というのは極めて曖昧で、不確実である。そのような言語や記号の影響を受けながら我々が行う日常のプランニングも、コンピューターサイエンスでいうような記号処理的なことをやっているわけではないはずである。したがって、言語や記号を、不確実でも扱っていいというのが記号創発システム、記号創発ロボティクスの重要な部分である。

ディープラーニングの技術は大いに発展し、人工知能の景色を変えた。できることもずっと増えた。実世界における不確実性の扱いに関して偉大な一歩を生んだ。しかし、一方で知能の描像は多くの場合で様々なツールとしての「機能」をつくるというところに終始している。ここでの「機能」とは英語でいうところの「ファンクション（function）」であり、興味深いことに画像認識や機械翻訳など様々な人工知能技術が「関数（function）」として実現されていることと符号している。

実世界で生き抜く生命、そのモデルとしてのロボットにとって大事なことは、「身体」をもって環境の中で生き続けることである。そうしたときに、それぞれのタスクに対して個別にシステムを用意し、データを提供して、ファンクションをつくっていくという認知の構成は、我々人間の発達の仕方や認知の構成過程とは合わないものである。実のところ私たちの知能にとって本質的に重要なのは、私たちが1つの身体で様々なタスクをやっていることだ。自らの経験を知識に変えて行動していく、そのような自律的な存在をつくるのが知能の探究の上で重要だと思う。

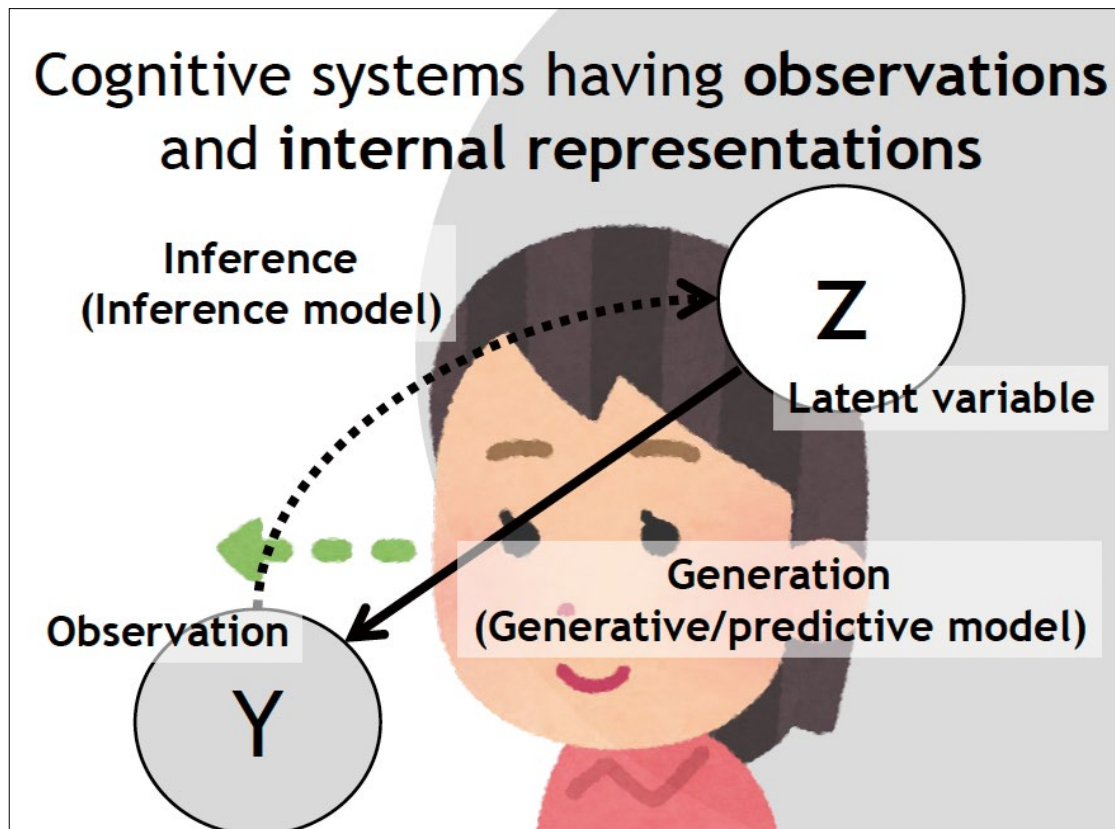


図2-2-1 確率的生成モデルを用いた認知のモデル表現

記号創発ロボティクスのこのような考え方は、予測符号化や自由エネルギー原理として、近年、脳科学で注目されていることと、軌を同じくするものである。自由エネルギー原理では確率的生成モデルとして認知システムをモデル化する。確率的生成モデルによって認知システムを表現する最小限の表現が図2-2-1である。システム内には内的表象もしくは内部表現としての潜在変数（latent variable）が存在する。それを用いて予測を行い、そして環境に働きかけている。その予測と観察結果を比較することで自らの内部変数をアップデートして環境を認識するというのが大まかな流れである。ここでは行動は明示的に書いていないが、時間方向の軸を足して行動を加えることで、この描像に自然と含まれていく。

図2-2-1の絵はグラフィカルモデルと呼ばれるが、それは確率的生成モデルや階層ベイズモデルと言われたり、潜在変数モデルと言われたりする確率モデルを表現するものである。これまでこのようなタイプの描像は実際には、教師なし学習、クラスタリングによく使われてきた。人によっては、これはそういった教師なし学習のためのものだと思いがちである。しかし、この描像はそれを超えて一般的なものである。

機械学習には、教師あり学習、強化学習、教師なし学習というものに大別されると教科書には載っている。しかし数学的には、教師あり学習は事後分布の直接的なモデル化である。強化学習でさえ確率的な予測符号化、もしくは確率的モデリングと推論で置き換えることができると知られている。予測符号化という概念はかなり一般的なものであると言える（図2-2-2）。

Modeling cognitive systems with PGMs and their inference is a general view

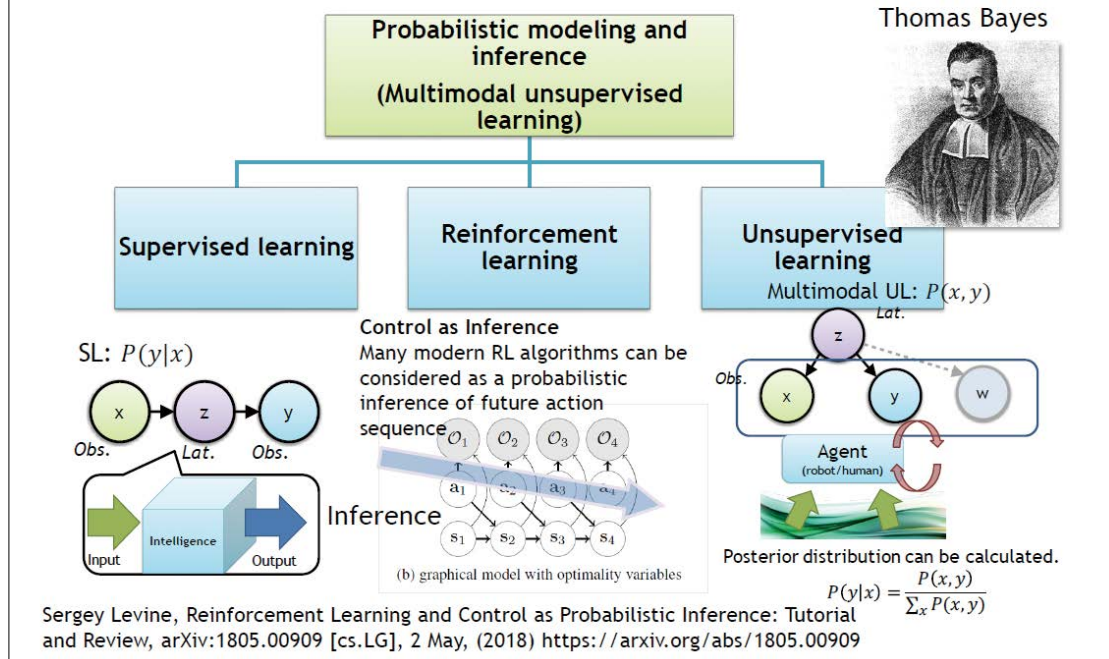


図2-2-2 機械学習の一般的なモデルとしての予測符号化と確率推論

さてここで具体的にJSTのCREST「知的情報処理」¹の研究テーマ「記号創発ロボティクス」の成果について紹介することで、ここまで話してきたことの肉付けを与えたい。ここではSpCoSLAMという確率的生成モデルにより、ロボット自身が得る視覚情報や聴覚情報、距離センサー情報といったセンサー情報、それから推論される位置情報やモーター情報をもとに確率内部変数を更新していくことで場所概念と語彙を獲得する。

ロボットは、距離センサー情報やオドメトリ情報などを使いながらマップを生成する。ときどき人間が「コピー室まで来たよ」とか、「エレベーター前だよ」とか、「廊下を走っているよ」とか話しかける。ロボットは、音素や音節は知っているが、最初は一切単語を知らない。その予測性能を最大化するようにベイズ推論で学習を進めていくと自動的に語彙が獲得されて、その語彙と位置、視覚情報が統合されて、まさに接地された場所概念がロボットに生まれ、ロボットは記号を知ることになる。

このようにして語彙や概念を獲得できる。この概念はマルチモーダル情報に基づいており、語彙から位置を推論したり、視覚情報から語彙を推論したりすることができる。一つの認知システムの中で様々な知覚情報をクロスモーダル推論により認識したり予測したりできる。これは単一の身体の上で、単一の認知システムの上で生まれた、複数の機能である。しかしその多くは知覚的な意味での機能であった。

¹ JST戦略的創造研究推進事業「人間と調和した創造的協働を実現する知的情報処理システムの構築」(2014～)

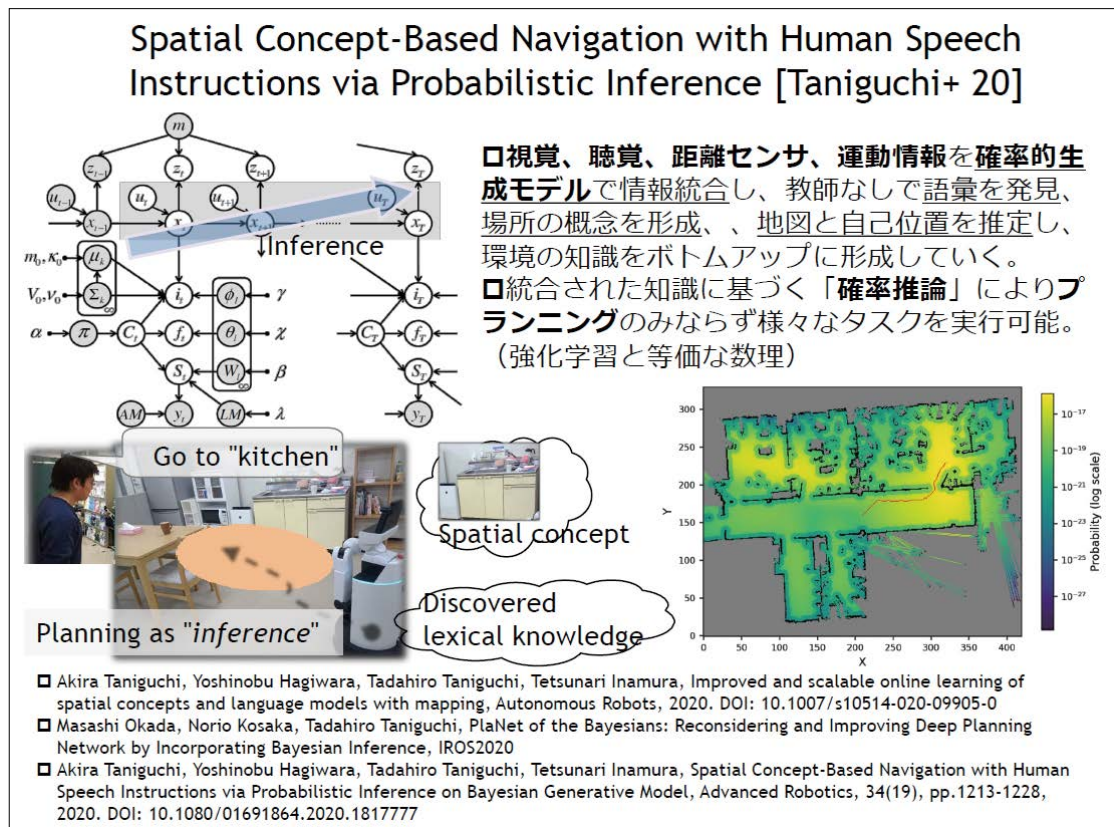


図2-2-3 ユーザとのインタラクションを通した場所概念と語彙のオンライン獲得

このような認知システムに獲得された知識を行動にどう使うかというのは比較的新しい研究である。先ほども申し上げたように、強化学習とかプランニングは、確率的生成モデルの中の推論の一種として捉えることができる。すなわち、あるゴールまで行くという場合、このモデルの中では未来にそのゴールにたどり着いているということを所与の条件として、未来の自分の行動系列を確率推論する。例えば10秒後、1分後にあそこにたどり着いているという行動系列に関する確率推論問題に帰着させることができる。この手法はSpCoNaviと呼んでいるが（図2-2-3）、グラフィカルモデル、確率モデルは、先ほどの場所概念モデル（SpCoSLAM）と何一つ変えることなく、この未来の行動系列（action sequence）を推論する。例えば、トイレに行つてと言われたときには、トイレというキーワードに紐づいた画像情報が見つかるような場所にたどり着く行動系列を推論していくことができる。

その意味で一つのモデルにより様々な感覚運動情報を統合し、その相互推論により近くから行動までをこなすこのような確率的生成モデルは統合的な認知のモデルといえる。

以上、グラフィカルモデル、確率的生成モデルと推論を、シングルエージェントの学習について展開してきたが、最近、マルチエージェント系における記号の創発もこの枠組みの延長上で議論できることが大分分かってきた（図2-2-4）。

Multiagent Multimodal Categorization for Symbol Emergence: Emergent Communication via Interpersonal Cross-modal Inference [Hagiwara+ 22]

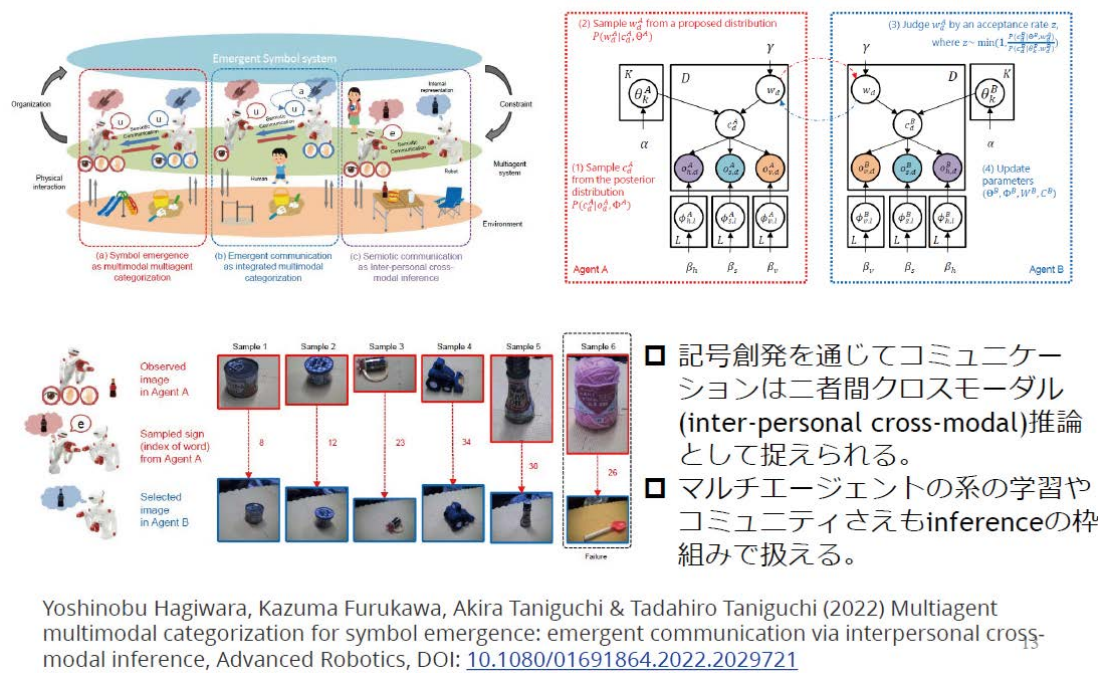


図2-2-4 マルチエージェント系における記号の創発

コミュニケーションにおいて相手の頭の中はのぞけない。それなら相手がその言葉をどう理解しているのかも分からない。また、正しい言葉の意味というのが規定されていない状況下で、いかにして意味のある記号を形成させていくかというのは簡単ではない問題である。ここで二者のエージェントが物体の名前を名づけ合う言語ゲームを考える。あるやり方でエージェントにコミュニケーションさせて、放たれた言葉をエージェントが自らの知覚のみに従って、その言葉を信じられるかどうかを確率的に判断するという言語ゲームだ。この確率的な判断をある基準に用いて行っていると仮定すると、実はこれが、数学的にある種のマルコフ連鎖モンテカル口法の推論と等価になるということが分かった。この結果、2つのロボットは別々の存在だが、各エージェントを全部結合して1つのセンサーを持ったシステムであるかのような最適化がコミュニケーションを通じて行われていると考えることができるようになる。人間の言語もシングルエージェントの予測符号化ではなく、集団として、集合知として、予測符号化をすることで記号創発が起きていると考え、「集合的予測符号仮説」を提案しているところである。マルチモーダルな情報やアクション情報を予測符号化して、内部変数を推論するという考え方はかなり一般的ではないかと考えている。

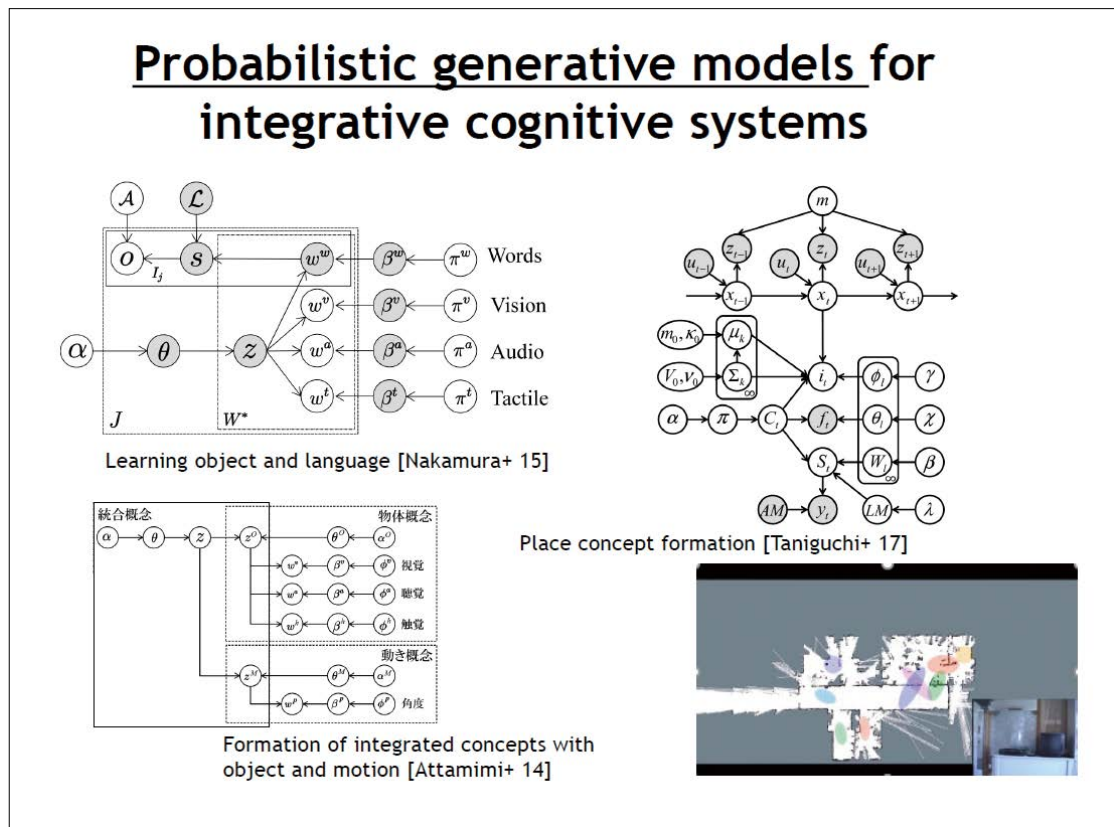


図 2-2-5 Probabilistic generative models for integrative cognitive systems

一方で、こういうものをどう効率的につくっていくかということは、ひとつのチャレンジである。図 2-2-5 はこの 10 年間の研究活動の中で提案してきたモデルで、全てマルチモーダルで統合的なモデルである。画像認識だけのモデルとは違い、統合的なモデルでは常に様々なモダリティが統合され、さらにプランニングや言語が絡まってくる。そのために一人の研究者がこのような統合的なモデルを構築しようとする、さまざまな知識が必要となる。

そこでレゴブロックを組み合わせるように、認知モジュールを別々に作って組み合わせるということを考える。しかし、それぞれがばらばらにチューンされた後にそのパラメータを固定して統合するという考え方では、ロボットが自らの身体で環境と相互作用し続ける中で、認知モジュールをアップデートさせていくことはできない。したがって、各モジュールは統合した状態で学習させながら動かし続ける必要がある。

CREST の成果研究の一つとして、要素的な確率的生成モデルを簡単に統合する枠組みとして SERKET (Symbol Emergence in Robotics tool KIT) というものを考えた。ここではオートエンコーダー、音声認識、トピックモデル、クラスタリングモデルなどの既存のモジュールをくっつけてしまう。その上で、コミュニケーションをさせながら学習していく。その結果、全体をフルスクラッチでゼロから統合してつくり上げたモデルと変わらないレベルの全体学習の性能を示すことができた。ニューラルネットワークベースの生成モデルを加えることもできる。そのバージョンを Neuro-SERKET と呼んでいる。

このような考え方の上で、科研費の新学術領域の「人工知能と脳科学の対照と融合」(2016～2020 年度)では、より巨大な人間の脳がやっているようなものをできるだけ網羅的にやろうというビジョンについて議論した。全脳のリファレンスモデルを、解剖学的な情報なども使いながら、それを対応させて、複雑な全脳確率的生成モデル (WB-PGM: Whole Brain Probabilistic Generative Model) をつくるアクティビティを展開していきたい。

事前にご質問いただいた個別の観点について回答する。まず、「開かれた世界に対応するロボットを実現す

ということは記号接地問題を解くことに相当し、非常に困難ではないか？」という質問である。記号接地問題というのはかなり誤解されている問題だ。実世界ロボットを問う上で記号接地問題は問うべき問題ではない。記号接地問題はその問いの立て方そのものに誤謬めいたものを含んでいる。問題とすべきは記号創発の問題と言語理解、言語生成の問題である。記号接地問題は「記号ありき」から始める。人間の知能を鑑みるに、人間は発達的にそれらを獲得して使用しているわけであり、ある種の進化的、発達的なプロセスをきちんと追って自律的な知能をつくるというアプローチを取り続けなければ問題ないと私は確信している。

また、これからの展開について、自律的なロボットを考えるときには、経時的な、よりロングターム（長期的な）な知能発達を考えていく必要がある。これまでの競技会では、ある瞬間であるタスクができるかというところに焦点が当たってしまっている。しかし、ロボットが自らの経験に基づいて発達して得たものなのか、それとも、その場、そのタスクに合わせてつくり込まれたものなのかというのには、技術開発として、知能の研究として、大きな差がある。そのような研究開発のためのロボットプラットフォームとしては経時的な知能の発達や自律性に向き合えるシステムであることが大変重要である。その意味でSONYのAIBOは非常によく出来たプラットフォームだった。

そういうことを意識しながら、この1月に『僕とアリスの夏物語』²という本を出版した。断片的な研究を扱うのではなくて、知能がどう発達していくかと、それとロボットがどう対応するかということを、半分小説の形で書いた。これが現時点の私からの研究プロポーザルであると考えている。

2

第一部…柔軟なロボット
の実現に向けた研究につ
いて

2 谷口忠大、岩波科学ライブラリー、僕とアリスの夏物語 人工知能の、その先へ、岩波書店、2022

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

石黒 章夫（東北大学）

前2件の発表は比較的高次の脳機能の話であったが、これから話すのは低次レベルの話である。これは運動知あるいは適応的運動機能と呼ばれるものであり、動物にとっては最も根源的な知能といってもよい。

我々のモチベーションは、動物に比肩し得るような動きをロボットに実現させるということである。もちろん、そこに至るまでにはたくさんの壁がある。例えば、アクチュエータの壁、センサーの壁、そしてマテリアルの壁などである。その中で我々が特に注目しているのが「制御の壁」ということになる。

昔は私もかなり工学的なアプローチでこの壁を乗り越えることを試みていた。しかし最近では、生き物はこの世にあり得る設計や制御の仕方というのを教えてくれる非常に面白い存在と強く意識して、そこからこの秘密を解き明かしたいという思いで研究している。そのためにも動物の動きをできるだけこの眼で実際に観察して、その背後にある制御原理を数理言語的に説明するという、理学的志向のアプローチにこだわった研究をしている。

まず、現代の制御理論の理論的枠組みを紹介する（図2-3-1）。今の制御理論のフレームワークというのは、一言で言うと「分離」である。制御器、制御対象、そして環境の3者を分離することで美しい理論体系を構築してきたといえる。これは構造化された環境下では非常に上手くいったが、自由空間を移動するロボットとなると話は変わってくる。この辺りでボタンのかけ違いが起ってしまったのではと考えている。

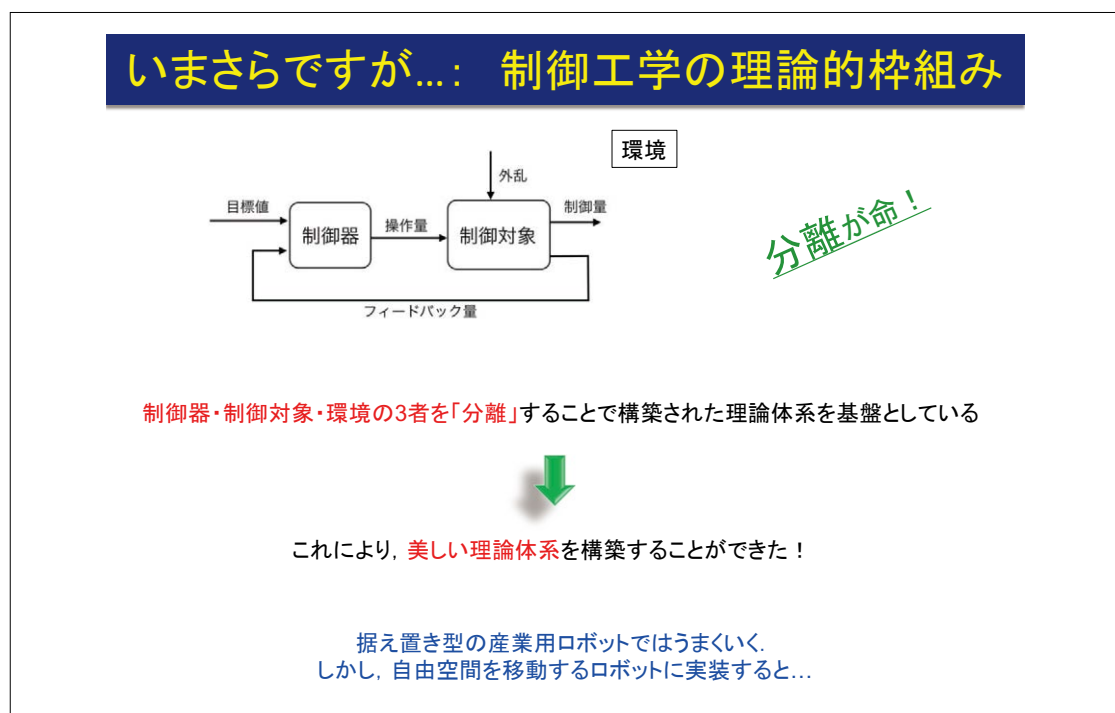


図2-3-1 制御工学の理論的枠組み

分離のためにということが要請されるかというと、まず制御器が振る舞い生成の責任を100%担うということが挙げられる。また、それ以外の制御対象や環境は徹底した既知化が必要になる。そのため、自由空間を移動するロボットは、周囲の環境を常に既知化しながら動くことが求められるのである。これは図2-3-2に示したとおり、ロボットの周囲にあたかも常に「結界」を張りつつ動くことが要求されており、そういう意味では「閉じた制御スキーム」と言えるだろう。この方法だと、未知環境下かつ高速移動などを考えると、ダブルパンチになって、なすすべもなくなってしまうわけである。ところがたちの悪いことに、この力ずくの制御スキームは、このような問題を孕みつつも工学者の本能に妙にフィットしてしまうのである。

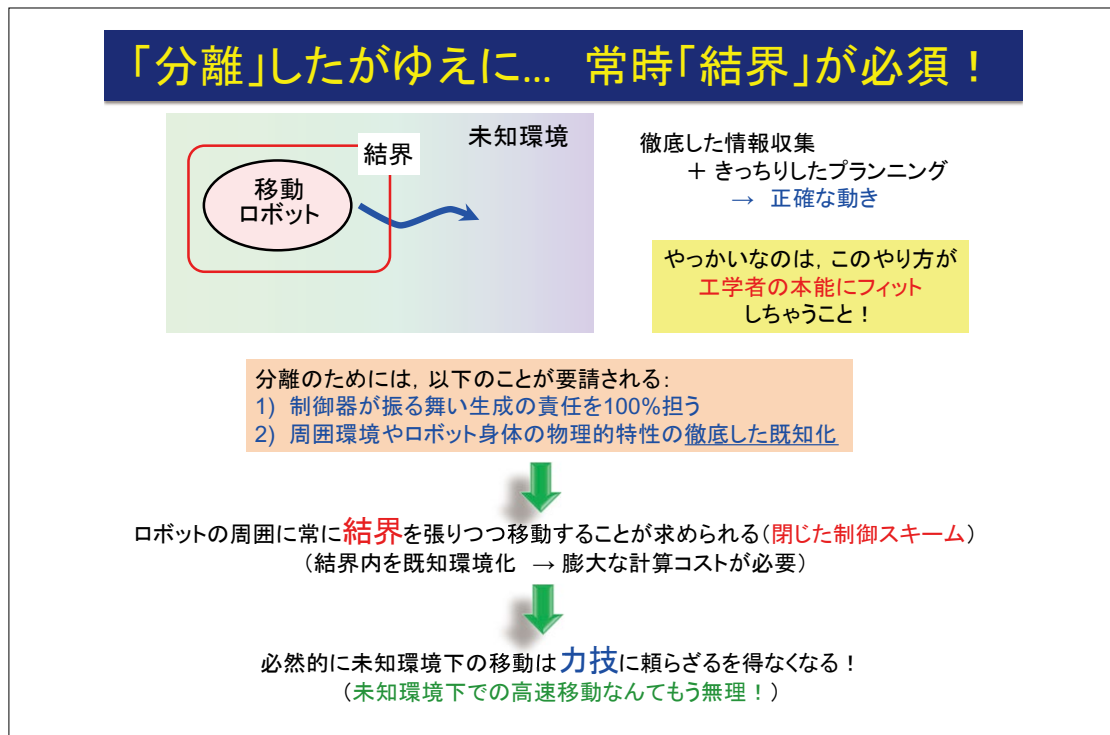


図2-3-2 「分離」と「結界」

このことを頭に置いて、私の憧れの動きのひとつであるユキヒョウが断崖絶壁でハンティングする様子を見してみる（動画）。ユキヒョウというのは体重が200Kgを超える巨軀で、当然大きな慣性を持つため急には止まらない。なおかつ、このような断崖絶壁を走り下る際には強烈な時間圧がかかっているのも、結界を張り巡らせる十分な時間はない。それにもかかわらず、これだけの振る舞いをするという、ものすごい制御ができていっているわけである。このような離れ業を成し得るからくりに変な興味がある。少し余談になるが、こういう断崖絶壁に四脚動物を突き落としてこういうふうな動きをさせるようなロボットの競技会やベンチマークが面白いのではないかと考えている。

さて、ユキヒョウのような制御をしたいが、分離に基づく閉じた制御スキームでは上手くいかないだろう。従って非分離ということになるが、これもまた厄介である。非分離にしてしまうと、今まで制御器が担ってきた振る舞い生成の責任を分散しなければならなくなる（図2-3-3）。明示的な制御アルゴリズムで記述される制御則は「陽的制御」とも呼ばれるが（2.4節を参照）、非分離にするには今の100%陽的制御をやめなければいけないのである。これを、どのようにすればいいのかというのは、まだ良く分かっていない。

制御の壁をブチ破るためには...: BCEの非分離化が必須！

しかし非分離性を仮定すると、振る舞い生成の責任の所在が分散してしまう：
明示的に記述される制御アルゴリズム（陽的制御則）だけで振る舞いが決まらない！

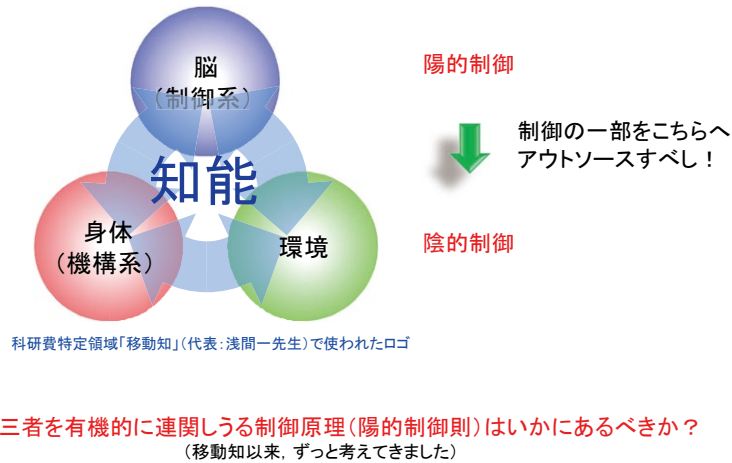


図 2-3-3 制御の壁をブチ破るためには...

別の表現をすると...

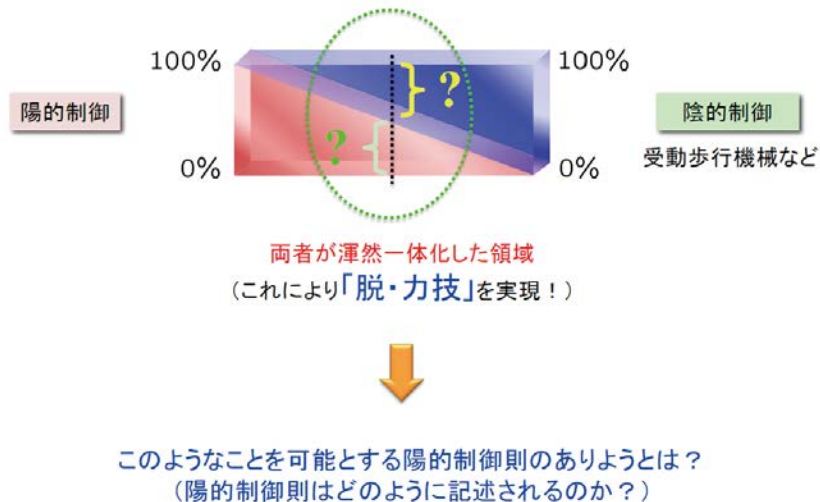


図 2-3-4 陽的制御と陰的制御

図 2-3-4 に示したように、今までは陽的制御 100% だったものの一部を陰的制御にアウトソースしなければならないわけである。このようなことを可能とする陽的制御則のありようは何か考える必要があるだろう。陽的制御則は一体何を書けばいいのかが分からなくなってしまうわけである。私はこういうところで、どのよう

に陽的制御を書けばいいのか、そして、この状態からどんな面白いことが出るのかというのをずっと探してきた。

最近の成果を紹介する。四脚動物というのは、4本の脚を巧みにコーディネートして動くのだが、ここではとても面白い現象が見られる。まず、速度に応じて歩容（足並み）が自発的に遷移していくことが挙げられる。ウマの場合には、ゆっくりのときはウォーク、中ぐらいのスピードになるとトロットというのが出て、スピードが速くなるとギャロップという歩容に変わる。こういう速度変化に応じた歩容の自発的变化は、それだけで面白い現象である。

また、動物種に応じて様々な歩容が生じる点も興味深い。例えば、ウマがゆっくり歩くときは後ろ脚、前脚、反対側の後脚、前脚の順番で足を動かす。ところが、同じ低速領域でも、サルは前脚、後脚、反対側の前脚、後脚と動かす。これはウマと逆である。中速領域の場合、ウマは対角線にある脚を同期して動く（トロット）が、ラクダは同側の脚が同期する。これがどうして生じているのかというのは面白い問題である。さらに、スピードに応じた歩容の遷移はエネルギー的に効率の良い、ある種のギアチェンジであることも分かっている。

この脚間協調制御というのは昔から知られた面白い問題で、これまでたくさんの研究者が取り組んできており、数多くの制御モデルが提唱されている。我々は最近、ひとつの制御則で図2-3-5に示した3つの歩容を全て実現する制御モデルの構築に成功した。これは、脚間協調制御メカニズムの優れた「特解」を見つけたとも言えるだろう。

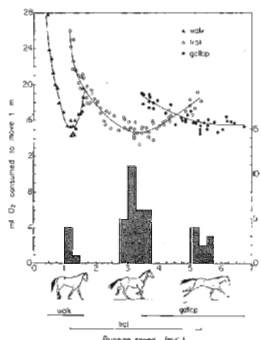
最近の成果：「特解」を見つけた！



速度変化に応じた
歩容の自発的变化



動物種に応じた
歩容の変化



優れたエネルギー効率

四脚動物が示す多種多様な歩容の背後にある脚間協調制御原理とは？

図2-3-5 脚間協調制御の特解

我々が見出した制御則はきわめてシンプルである（図2-3-6）。この制御則を実装して自律分散的に各脚を動かすと、先ほどの3つのものが全て出てくる。

脚の動きというのは基本的にリズムカルな周期運動である。それを決めているのが右辺の第1項である。角速度 ω を大きくすると速く歩くということになる。第2項が局所的なセンサーフィードバック制御則を表している。これがこの制御則のコアにあたる部分である。 N_i は i 番目の脚にかかる床反力である。これに応じて位相を進めたり、遅らせたりするという制御を行うと、先ほどの3つが全て実現できるのである。この制御則を自

然言語的に説明すると「脚に荷重がかかっていたら脚を上げちゃ駄目ですよ。脚に荷重がかかってない抜重した状態になったら脚を上げていいですよ」ということを言っているだけである。だからこそ、このような単純な式で書ける制御則になっているわけである。

この制御則をロボットに実装して環境に置いた途端に、様々なものが出てくるわけである。例えば速度を変えたときの実験結果（動画）では、 ω が小さい場合にウォーク（後、前、後、前）で歩いているが、 ω をすこし大きくするとトロットに変化するというのがわかる。ゲートダイアグラムを書くにより詳細にわかるが、動画でも歩容の変化は分かるだろう。 ω をさらに大きくするとギャロップも出てくる様子も見られる。

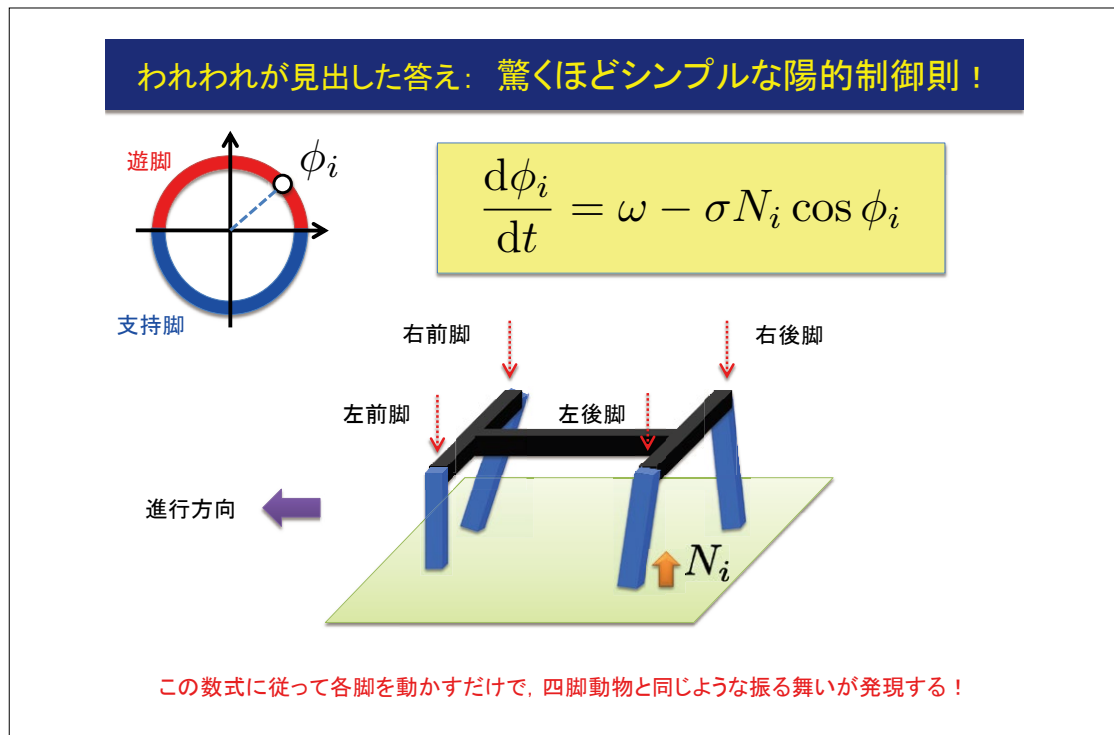
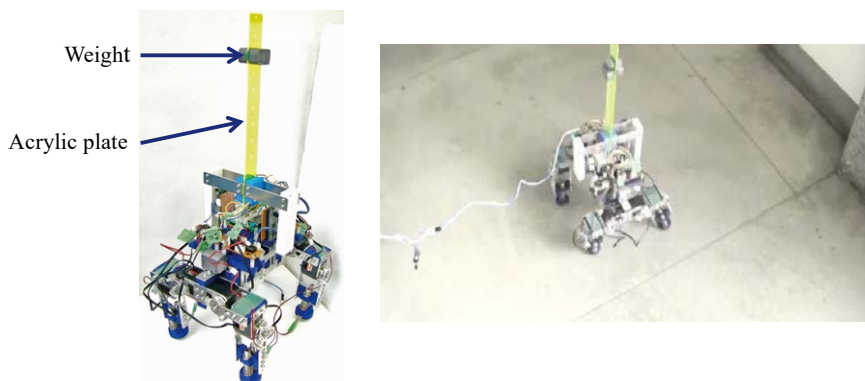


図2-3-6 驚くほどシンプルな陽的制御則

動物種に応じた歩容の違いについても研究した。中速領域で、ウマは対角線の脚を同期し、ラクダは同じ側の脚を同期して動かすということの再現である。動物園に行ってラクダを観察したり、博物館で骨格標本などを見たりしたが、ラクダは非常に薄っぺらな体をしているのがわかる。また、コブがあり重心がものすごく高く、左右にすごく振れやすい体をしている。これをロボットの体に取り込むため、30センチ物差しのようなフレキシブルなものを背中に付け、その先に重りをつけて左右に揺動しやすい振り子にした。そして制御パラメータを全て同一にして、振り子がある場合（ラクダ）と無い場合（ウマ）を比べた（図2-3-7）。

左右に揺れやすい振り子がついている場合、同じ側の脚がほぼ同期して歩くラクダ型の歩容が発現するのを確認した。一方、制御則をなにも変更せず振り子だけ取ると、対角線の脚が同期して動くウマ型が発現した。このような、身体依存的な振る舞いが自然に出てくるのである。制御則は同一だが、それを実装した物理的特性に呼応して、合理的な振る舞いが創発されるのである。これは「置かれたところで咲く制御」をまさに体现化していると言える。

動物種による歩容変化(ラクダとウマの歩容の違い)



ロボットの背中に振り子を実装して身体左右方向への
重心移動を生起させやすくする

図2-3-7 動物種による歩容変化

これだけ示唆的な特解であれば何か面白いことが含まれているかも？

$$\dot{\phi}_i = \omega - \sigma N_i \cos \phi_i$$



$$\dot{\phi}_i = \omega + \sigma \frac{\partial T_i}{\partial \phi_i}$$

縮約した数理モデルだからこそ
見出すことができたカラクリ！

$$T_i = N_i(-\sin \phi_i)$$

→ 縮約モデルを考える意義は
ここにある！



ところで関数 T_i は何を意味しているのだろうか？

手応え(TEGOTAE)制御の発見!!!

図2-3-8 手応え制御の発見

この研究はもともと、速度に応じた歩容遷移の実現を目的としていたが、ウマとラクダの話以外にも、脚が故障しても他の脚が補って歩くなどといった副産物がたくさん出てきたのである。これは、うれしい悲鳴というべきか、まったく想定外のことであった。となると、これだけ示唆的な特解であれば何か面白いものが含まれ

ているだろうということで、改めて制御則に含まれる数値構造を調べてみた。気づいたことは、図2-3-8に示したという T_i 関数を増やすように制御変数を変えているということである。これが何を意味するかというと、 $-\sin \phi_i$ が大きくなるのは、地面、体を支えたいと制御系が意図しているときである。そのときに N_i が入ってくるタイミングでそれを増やす方向に脚をつくタイミングを変えましょうという制御をしているのである。日本語にはこれを表現するのにものすごく適切な「手応え」という言葉があり、それに倣って「手応え制御」と呼んでいる。制御系がしたいというふうに思っている意図と整合するような感覚情報、レスポンスが環境から返ってくるということを増やす方向に制御が行われるということである。

この「手応え」は、いろいろな体でも使えるだろうと考えられ、実際に試してみた。例えば、動物は、得られた「手応え」が推進に利するか否かを峻別し、推進に利する手応えのみを巧みに活かしている。例えばヘビでは、ここの突起は良い手応えなので使うが、ここは推進に利さないので使わない、などの制御である。ロボットの制御則に取り入れると何か生き物のような動きが出る。クモヒトデを模したロボットでも、やはり地面にとかかりがあればそれを使って移動するなど、やはり生き物のような動きが出てくる（図2-3-9）。最近、海外の研究チームとの共同研究で生まれたTEGOTAE制御の遊泳ロボットがScience Robotics誌の表紙を飾った。



図2-3-9 手応え制御の応用

今後の課題として、この特解を切り口として一般解の発見へと考察を進めることを目指している。ここまでの話は脚同士という同質の身体自由度間の協調であったが、胴体や首など異質の運動自由度間に状況依存的かつ合理的な協調が起こるような制御を考えている。具体的には、サンショウウオ型やムカデ型のロボットなどをプラットフォームとした研究を進めている。

大自由度をリアルタイムで合目的に操るための制御理論の構築が喫緊の課題である。このためには、我々が今考えていることは、自己組織化理論と制御理論が融合した新たな制御理論体系の構築である。自己組織化というのは、もともと物理現象であるので、元来無目的な秩序形成の話である。例えば、魚の体表のパター

ンや砂漠の風紋などを見ればわかるであろう。一方で制御というのは、合目的性といういわば下心がある。これらを組み合わせて、自己組織化を望ましい方向に持っていく、キャナライズしていくような理論の構築が今後の課題である。これらを結びつけるヒントとなるのが「自律分散制御」と「手応え」ではないかと考えている（図2-3-10）。

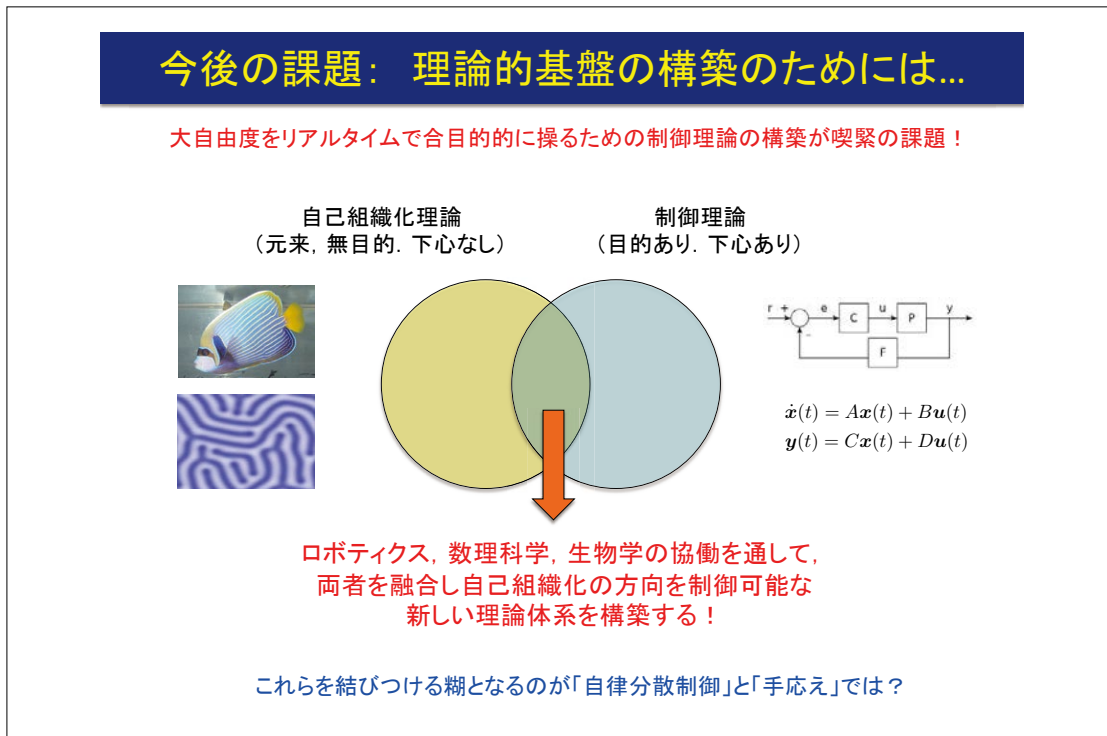


図 2-3-10 理論的基盤の構築のためには…

2.4『開かれた環境』に対応するロボット

大須賀 公一（大阪大学）

生物はどうやって有限で無限に立ち向かっているのか。その答えは身体の中ではなく「身体の外」にあるというのが、今日のTake-home Messageである。

まず、自然環境（無限定環境）の中をしなやかに移動する人工物をどのようにして作ったらよいか、図2-4-1に示すオーソドックスな制御系で考えてみる。これまでの考え方では、無限に複雑な環境を外乱とみなす。それに対応するにはオールマイティな体が必要となり、コントロールするにはすべてを予測し最適軌道を計画する大きな制御系が必要になる。その場合、因果律に反する能力、無限大の計算能力、万能な身体能力が要求される。いわゆるフレーム問題に向かっている、現実的には不可能なアプローチになる。



図2-4-1 自然環境（無限定環境）の中をしなやかに移動する人工物の制御系

一方、生物はそういうことをしていないが、はるか昔から複雑な環境の中で多様な振る舞いをしうまく対応している。しかも単純な脳神経系でうまく対処しているように見える。どうもこれは我々工学者が習ってきたやり方ではなさそうだ。そこで、無限定環境に突っ込む生物の構造や制御をどのように理解すれば良いかという、素朴な疑問が生まれてくる。

生物は、因果律の制約、計算資源の制約、身体的資源の制約という三重の制約があるにも関わらず、無限定環境に突っ込み何とか対処している。我々が習ってきた工学の考え方からすると無理と思われることを生物はやっているように見える。そのカラクリはどこにあるのだろうか。

人工物は無限に対して無限で対応しようという考えがちだが、生物は無限に対して有限で対応しうまくいつている。このギャップを埋めるカラクリ、知能の源泉になるものは一体何なのかを見つけ出したい。

そもそも知能とは何かと聞かれても、なかなか答えられない。明確な定義は恐らく作れない。ある側面からであれば定義ができるが、素朴な感覚で言う知能はなかなか定義できない。そういうときは、知能を感じるものを列挙して、共通する知のもとになるものを探してみようというやり方があり得る。

そこで、幾つかの例を見ながら考えたい。最初に示す例は、犬が電子レンジの中のおやつを取ろうとしてい

る様子である。部屋の中をうろうろした結果、椅子の上に乗っておやつを取ることを思いつく。これは非常に賢い行動である。もっとも、犬も人間も同じ哺乳類であり大きな脳を持っているから賢いのは当然だ、という意見もあるだろう。

次に示すのは昆虫の例である。アリの大群が移動して池に遭遇したとき、彼らはお互いが連結して大きな船を形成し、その上に卵や女王アリを乗せて水面を移動する。対岸に到達すると、再び自然に分解してまた歩き出す。このように非常に賢い行動をする。昆虫も脳を持っているから賢いのは不思議でないかもしれない。ただし、その脳は微小脳と呼ばれるほど非常に小さく、ニューロン数で言うと10万程度しかない。人間のニューロン数が1,000億程度であるから、非常に少ない。

次は、2.3でも紹介されていたクモヒトデの行動の例である。右側にある餌に向かって、クモヒトデは自分の腕をうまく操りながら移動する。障害物の手応えを利用しつつ、うまくそれらを潜り抜けながら餌に向かっていく。非常に賢く動いている。さぞかし高度な知能を持っているかと思いきや、実はクモヒトデには脳がない。神経系は持っているが脳はない。脳がないのに知的な行動をとれるのは非常に面白い。

最後の例として示すのはある生き物が作った巣である。小さな砂粒で作った、1ミリにも満たない巣である。この巣を作った主は、巣の中から触手を伸ばして餌を取る。こんなことができる生物はさぞかし賢いだろうと思うが、その正体は実はアメーバ。アメーバは多核性単細胞生物で、脳はおろか神経系すらない。こういうタイプの生物は地球上にはたくさん存在する。

こうした例を見ていくと、微小脳しかないもの、脳がないもの、脳も神経もないものであっても、生物は全て知能を持っているように見える。したがって知能の源泉は脳神経系ではないように思えてくる。もし知能の源泉が脳にあるなら、哺乳類や昆虫の知的な行動までは説明できそうだが、棘皮動物やアメーバはそもそも知能が発生する場所がないことになり、知能を感じるという感覚と合致しない。

全ての生物が知能を持っているように見えるとすると、全ての生物が共通に持っている何かがあるはずである。その答えは「身体と場との相互作用」ではないだろうか。

これを私の専門である制御の視座から考察してみる。図2-4-2に示すように、賢い振る舞いをする生物を制御の視座から見ると、生物の身体とその中の脳神経系が見え、身体と環境とが相互作用している、と見える。制御対象があって、制御則が埋め込まれていると解釈できる。図では便宜上分離して描かれているが、2.3でも論じられたように、本来は混然一体化している。問題は環境との相互作用である。身体と環境との相互作用は複雑なので、動きに邪魔のなるものと解釈して、外乱として扱ってしまうことが多い。

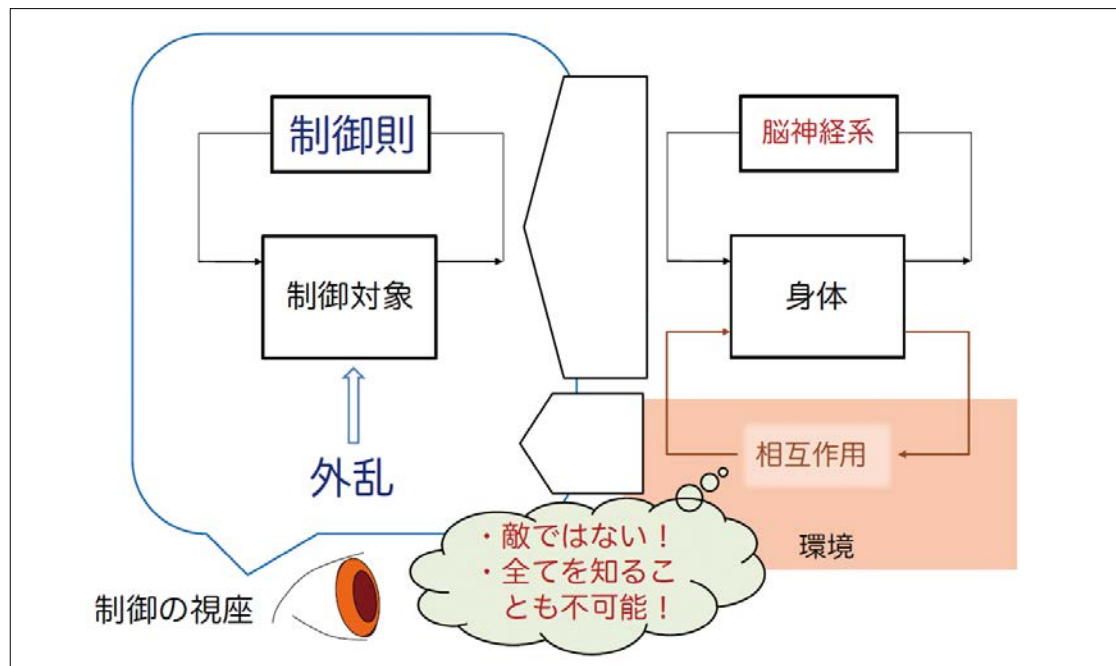


図 2-4-2 制御の視座からみた生物 環境との相互作用を外乱とみなした場合

ところが生物の動きをよく観察していくと、環境との相互作用を味方にして上手に利用しようとしているように見える。ある作用がある目的に資するように働くとき、それを制御則と呼ぶが、そういう意味では、生物の身体と環境との相互作用は制御則の一種といえる。明示的に人工物とコンピューターとして実現されているわけではないが、身体と環境との相互作用は物理作用なので制御則として見える（図 2-4-3）。そこでこれを陰的制御則と呼ぼう、と提唱している。

一方、図 2-4-3 の上部に描かれている脳神経系あるいはコンピューターによる制御は陽的に実現されているので陽的制御と呼ぶ。陰的制御と陽的制御の両方合わせた制御則で、知的な振る舞いが実現されるのであれば、場合によっては陽的制御がなくても知を感じるはずである。その例がまさにアメーバやクモヒトデにあたる。

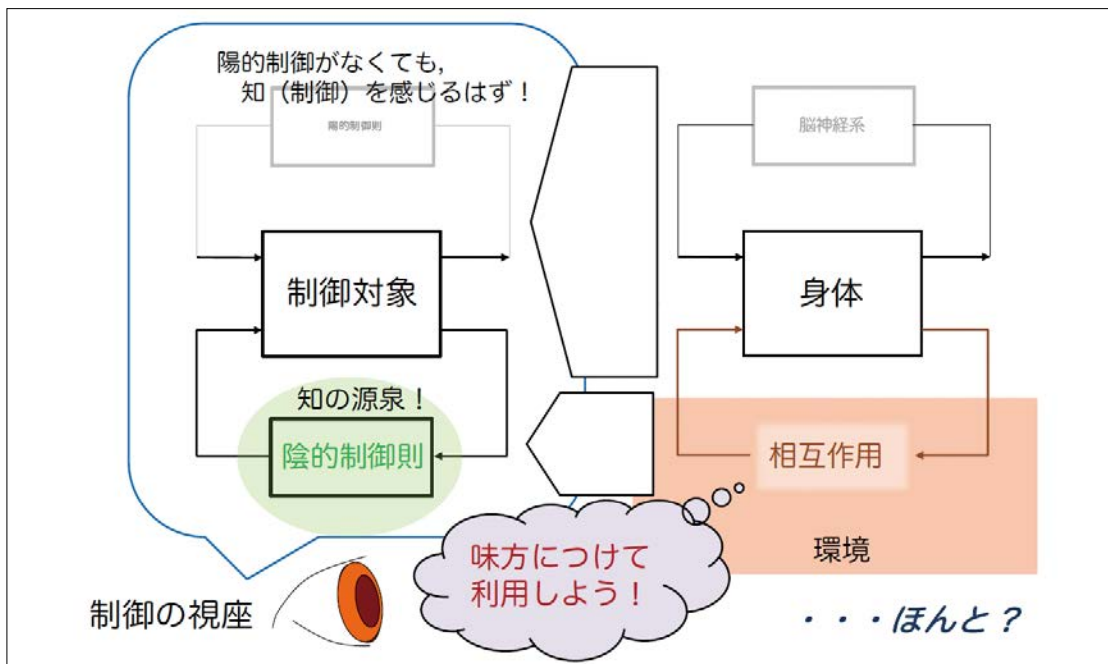


図2-4-3 制御の視座からみた生物 環境との相互作用も制御則とみなした場合

本当にそのようなことが起こるのか確かめるため、デモンストレーション機として作ったロボットが、図2-4-4に示すi-CentiPotである。森の中といった自然環境を自在にしなやかに動き回る。i-CentiPotが小さな石垣に遭遇すると、石垣を越えようともがく。もがいているうちに石垣の窪みを見つけ、そこを突破口にして石垣を乗り越えてゆく。このような振る舞い実現できた。



図2-4-4 i-CentiPot

何も説明を受けずにこのi-CentiPotの動きを見ると、非常に賢く動いているように見える。さぞかし高度な制御をしているかのように見える。しかし実はセンサーなし、コンピューターなしで、モーター1つだけで動いている。各関節、各脚は柔軟性を持っており、陰的制御則だけで動いているロボットである。先ほどは生物の例を見てきたが、i-CentiPotでも、身体と場との相互作用によって知が生まれてくるように見えることが判明した。

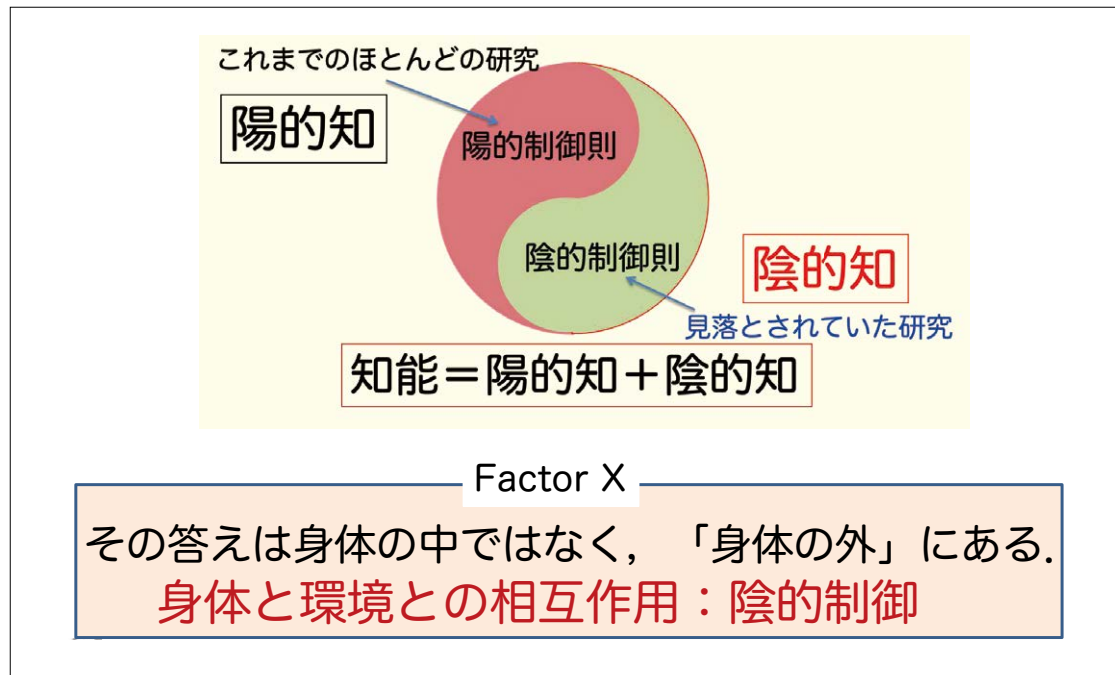


図2-4-5 陽的知と陰的知

今日は無限定環境に突っ込む生物の構造、制御をどのように理解すればよいのかというテーマで話題を提供した。無限に対して有限で対応する方法は何かあるのか。1つの答えは、身体と環境との相互作用、それを陰的制御と呼ぶとしたら、そこが知の源泉である。もちろん陰的制御だけではなく、この上に陽的制御が加わり、全体として知的な制御が実現される（図2-4-5）。これは、西洋的ではなく東洋的な思想であろうと思われる。

最後に、私が大好きなファインマンの寓話を紹介したい。

「ある人が街灯の下で地面を一生懸命見ている。別の人から『何をやっているんだ』と尋ねられ、『自分は鍵を落としたので探している』。さらに『どの辺で落としたんだ』と聞かれて『いや、あっちの暗いところで落としたのだけれども、ここは街灯があって明るいから探しているんだ』。」

西洋的なAIはこの寓話のようなことをやっているように見える。これを今の話に焼き直すと、

「ある人が知の源泉を脳の中に探し求めている。別の人から『何をやっているんだ』と尋ねられ、『自分は知能の源泉を探している』。さらに『それは脳の中にあるのか』と聞かれて『いや、身体と環境との相互作用に答えがあるのは知っているんだけど、ここは明るいから探しているんだ』。」 このように言い換えられる。

今日は粗っぽい話になったが、知能、ファクターXは身体の中ではなく、身体の外にあるということをお話させていただいた。

2.5 総合討論1

ファシリテータ：嶋田 義皓（JST-CRDS）

東：第一部の議論をプロポーザルに反映していくため、総合討論1では3つの論点を取り上げたい

- 1) 柔軟性を取り込んだロボットに関する理論的基盤確立のために重点的に取り組むべき研究課題は何か。
- 2) システム統合に関する研究を促進するために、研究開発に何をとり込むべきか。
- 3) ロボット技術に新展開をもたらすために何が求められるか。異分野との連携によってどのような効果が期待され、これを促進するための仕組みとして何が必要なのか。

環境への適応について

浅間：社会でロボットをもっと使っていききたいという最終的なゴールに向けて、ロボットについて行うべき研究は何かということだが、第一部にて話題提供された4人の先生方の基本的な立場は、ロボットは知能があまりにもまだ足りないということだと思う。ロボットの知能にどういうふうに取り組むかというコンセプトがあった。ロボットには欠けている生物の大きな機能として、限定されない開かれた環境においてもそれに応じた行動ができる、あるいはその制御ができるということだと思う。

生物は、環境に対してパッシブに動いていると同時に、アクティブに環境を利用している。単に言葉の印象だけかもしれないが、柔軟性という言葉にはパッシブなイメージがある。「適応」という言葉のほうがまさに今日議論している内容に沿っていると思った。

嶋田：石黒先生の話提供（2.3）で提示された「手応え」とは、まさに環境をアクティブに利用していることと思ったが、いかがか。

石黒：生物の制御のからくりで面白いのは、今回紹介した制御則もそうだが、制御則だけを見てもどのような振る舞いを生み出すのか全然分からないが、制御則を身体に実装し、それを環境に置くことで初めて意味を持つところである。陽的制御則のありようとはまさにそのようなものである。それゆえに、生き物からリバースエンジニアリングしてそのような制御則をあぶり出すのはきわめて難しい問題となっている。特定領域研究「移動知」（2005–2009）以来、この問題を追ひ求め、ようやく一つの特解を見つけることができた。当初は、速度に応じて歩容が変わることを四脚歩行ロボットで再現できれば良いと思っていたが、ヒトデやヘビのような異なる身体性に対しても適用可能であり、脚が故障しても行動可能であるといった、様々な副産物が出たことが興味深い。その背後にあるのが「手応え」という概念であり、環境への適応において大きな役割を果たしている。

一方、今回の四脚歩行ロボットはあまりにも単純化し過ぎたところはある。実際の生き物は、より多くのセンサーモダリティを使っており、身体部位間の神経的な結合もある。この四脚歩行ロボットで得られた知見を核にしてもう少し難しい問題を攻めていければと思っている。

身体性と言語について

浅田：まず「身体性」問題の定義は、10年前、20年ぐらい前から言われているかなり古いものである。ここまでの話題提供において共通するのは、身体を通した環境の中でどのように学習していくかという課題があって、例えば尾形先生の深層予測学習（2.1）の場合だと、いわゆる独立同分布からドメイン外へどうやって行くかということが重要になると思う。いわゆる深層学習1.0から2.0への橋渡しにおいて、その辺りがどうなっていくのか。一方、石黒先生の手応え制御（2.3）は、能動的推論の

ように聞こえた。つまり明示的か非明示的かは別としても、予測には能動的推論のイメージがある。そうすると、Karl Fristonの自由エネルギー原理が1つキーになる。ただし、予測誤差を解消するために行動の選択や予測を変更するというだけでは解ける問題しか解けない。結局堂々巡りになってしまう。このような状況を打開するには言語が重要ではないかと思っている。最近、Yoshua Bengioは意識プライヤーというものを提唱しているが、基本的に彼は、意識とかセンス・オブ・エージェンシーにアプローチしようとしているのではないか。

深層学習や能動的推論といった技術的なツールによって、表層的なタスクや機能に対して自律性を与えるということも出来るが、人工物自体がセンス・オブ・エージェンシーのようなものを持ち、エージェントそのものを自律的な存在として認めるかどうかということが重要ではないか。人工物が機能的な側面で充足されるという話から、環境への適応という意味と、人工物を作って社会に広げていこうとすると社会への適応も含めてトータルに考えていかなければならないのではないか。今回の趣旨説明には、それらがあまり反映されていない。

JST/CRDSとして長いレンジで研究テーマを設定していかなければいけない。機能的側面だけにフォーカスを当てるだけでなく、長期的に人工物の設計の問題をどういう視点で捉えて展開していくのかということを議論すべきではなかろうか。

谷口先生は、言語による地に着いた記号の汎化や概念の共有化について述べていた(2.2)。言語にすることでと良いことも当然あるが、一方で、簡約化の功罪というものもあり、誤解といった問題も生じる。だから、それらの問題も含めてトータルに考えたときに各自の研究者がどのようなテーマ設定をするか。目の前にある課題を解くことは基本として、さらにそれを越えたときにどのような定式化ができるのかということまで考えるべきである。

大須賀先生は、身体と環境との相互作用について述べていた(2.4)。脳神経系から見ると、身体も外部に存在している。身体と環境はカップリングしており、どこで切り分けるのかという身体性の問題もある。また、外部の環境に関する感覚だけではなく、内受容感覚もあり、これがセンス・オブ・エージェンシーに関係している。このように神経科学や認知科学は無視できない。ただし、神経系を全く無視した工学的実現があっても全然問題ないと思う。あとは解釈論でそれをどのように捉えるかではないか。もう少し大きな枠組みでの捉え方をできないかということを提言したい。

谷口 : 言語、記号について、浅田先生は簡約化の功罪とおっしゃったが、記号や言語が偉いという話ではない。人工知能では記号という言葉が古典的な人工知能の記号主義に引っ張られすぎだ。古典的な人工知能では記号というもので全てを表現しようとしたが、それは間違い。人間の脳内は記号で出来てはいないが、一方で人間は記号を用いている。他者とコミュニケーションするためには何かをジェネレート(生成)しないといけない。ロボット同士は直接的に回路につなげてコミュニケーションすることができるが、人間は他者の頭の中を覗くことができない。だから進化的に、まず音声言語というものを選択して、それを通してコミュニケーションをするやりくちを生み出した。ただどうして他者の頭を覗けないのに言葉の意味を共有できているのか? 一体、記号系がどのような最適化基準に従ってマルチエージェント系において、変化しているのか、つまり何を最適化しているのかは分かっていない。私のお話した議論は、言語を介して、集合的予測符号化、自由エネルギー原理を集団レベルに引き上げることができるのではないかとことだ。

人工知能の世界と、陰的制御やモーフォロジカルコンピューテーション(形態による計算)をつなぐ経路をつくるのが大事ではないか。記号創発ロボティクスはロボットの身体的な経験を根拠として、さらにそこから記号の世界まで手を伸ばしていこうとしている。しかし、ロボットはハードなロボットであり、生物的ではなく、石黒先生や大須賀先生の議論されているような自律分散的なハードウェアシステムをラボの中で作り、本当にそこから立ち上げていくというようなところまでは出来て

いない。

枯れ葉舞い散る山の中といった無限定環境と、コンビニエンスストアや家庭内環境といった都市内の環境ではあまりに異なる。コンビニエンスストアや家庭環境は、人間により形式化された概念から生成された極めて人工的なものであり、多くの記号的なものをそれ自体が含んでいる、いわば「限定され過ぎ環境」である。ロボットは、無限定環境とともに、限定され過ぎ環境にも適応が求められる。

尾形 : どうしてもロボットは(内部モデル vs 身体の)両極端な話になりがちである。内部モデルを作る時に、対処すべき状況を全部書き切ることとは出来ないと当然、皆が知っている。そこでRolf Pfeiferの「知の創成」の頃から身体についての考え方が必要とだと言われるようになり、「移動知」では、身体だけで十分に動く例が得られて大成功を収めた。その後、深層学習という、高次元の世界の認知を可能にするような巨大な神経回路が手に入った。ただし、今のところ多くの場合、深層学習は単なる入力と出力のマップとしてのみ使われている。神経回路は身体、環境とカップリングして、ダイナミックに動かして初めて意味を持つと思っている。そのツールとして深層学習を見直したほうがよい。私はこれを深層予測学習と呼んでいる。深層学習が非常に大きい次元のものを扱えるようになり、身体の柔らかさや環境とのインタラクションも含めて、その環境のゴールに合わせて神経回路のダイナミクスも変わるというモデルが作れそうというフェーズになったと思っている。

身体と知能とを一気通貫につなぐことは簡単ではない。人工知能研究者は、現在の深層学習・強化学習に対応する即応的知能であるシステム1と言語的、論理的な熟考的知能であるシステム2とをつなげる方向に早く行こうとしているが、今の深層学習のままシステム2につなぐことは困難であり、もっと身体を考慮しないとつなげないと考えている。そういう意味では、ちゃんと身体のことを知っている人が、これらの理論や記号まで考えていくというストーリーが大事なのではないかな。

設計論について

嶋田 : このあたりに何らかの設計論が必要なのではないかな。大須賀先生が論じられていた陰的制御と陽的制御を活用した設計論について、お話を頂きたい。

大須賀 : 「身体性」というのはロボットが生まれて以来の永遠のテーマかもしれない。モフォロジカルコンピューティング、アフォーダンス、サブサンクション・アーキテクチャーなど、様々なアイデアは出てきているものの、設計論はまだできてない。我々も20年ぐらいずっと同じことを言い続けながらぐるぐる回っている状態である。

同じことを考えていると、設計論というものがだんだん分かってくる。例えば陰的制御というのは単なる概念だったが、それは身体依存であり、陽的制御依存であり、環境依存であり、制御目的依存であることが分かってきた。結局、生物を規範にするということは、生物をまねることではない。自然界が生物に埋め込んだように見える制御系の設計原理を探し出すことである。それを見つけないとロボットには使えない。

生物も人工物も同じ地球上の物理世界に住んでいるので、共通原理があるだろうと考えている。ロボットがまだできてないことについては、まずはできている生物の中に設計原理がないかと調べてみる。自然界がつくった生物の設計原理をつかみたいと同じところをぐるぐる回りながら、少しずつ上に上がっている気はしている。

浅田 : 身体がなかったら意味には絶対に接地できないと思っていたが、今や深層学習がすごく発達していて、身体派の我々としては危機感を感じている。例えば自然言語対話は、相当のつくり込みと大量のデー

タによって、よっぽどの専門家でないと見極めが難しいレベルの自然な対話ができている。あたかも身体を持ってシンボルを創発したかのごとく振る舞っている。

一方で、身体派からの進展はあまり見えていないが、ソフトロボティクスは1つの非常に大きなトリガーになるだろうと思っている。柔らかくなることでコントロールはしにくいけれどもインタラクションがリッチになる。人工知能や深層学習には、お金も人的リソースもつぎ込まれてどんどん発達しているが、ソフトロボティクスが1つの契機となって、身体性についてもアトラクティブにならないといけな。それによって人がいっぱい来て、新しい設計理論をつくるなどの取り組みを加速していくべきだと思っている。

石黒 : 作るという研究の時定数と、理解するという研究の時定数との間には大きな乖離があると思う。理解するには時間がかかる。断続進化のように時々研究が非連続的に進む。今回の手応え制御についても、見出し、その意味を理解するのに相当な時間がかかった。作ることも大事だが、理解が伴うと設計論の構築につながり、波及効果は高い。この時定数のギャップを考慮した息の長いサポートをお願いしたい。

尾形 : 深層学習と言うと最近の話のように聞こえるが、卒論時（1993年）にロボットの心の研究を手がけて以来、数十個のニューロンの神経回路モデルを用いて、ずっと認知研究を続けてきた。もう何十年もニッチなところやっているが、このようなニッチな研究を長く続けられるようなサポートをぜひお願いしたい。

浅田先生のご意見と同様に、言語はすごいと思っている。モダリティや身体を考えずに自然言語を扱うことなんかできないかと思っていたが、すごいものができてきている。人が読んだら恐らく何十年もかかるような大量のテキストを放り込むと、あたかも経験が入ったかのような対話ができる。これは、構造化された世界をある程度うまく表すように、言語は構造化されていることの証明でもある。ただし、優れたモデルでも特異な質問をすると変な答えを返す場合がある。あなたの足には目がいくつありますかと聞くと、2つあると答えるケースもある。

一番大きな問題は、今の単一モダリティを学習する深層学習がどんどん進歩しても、ロボットは動かせないということである。当たり前だが、言葉しか知らなければ動作は作れない。動けないのに対話ができる、という我々人間とはかけ離れた変なものをつくってしまっている。人工知能と対話をして、あれを自然だと思ってしまうのは、かなり不気味なことだ。

入力画像にわずか1ピクセルの改変を加えただけで人工知能の誤認識を導くワンピクセルアタックという事例が知られているが、もっとひどいことが起こる可能性が十分あると思っている。ロボットをちゃんと動かせないと、自然言語はちゃんと扱えないと思っている。

実世界に適応するロボットの実現に向けて

谷口 : 身体性は3つに分けて考えるとわかりやすい。世界と認知をつなぐ感覚運動系としての身体性（環世界の根拠としての身体性）、社会的な身体性（石黒浩先生が研究されている存在感を生み出すような身体性）、モーフォロジカルコンピューテーションや陰的制御といったダイナミクスの意味での身体性の3つである。

センサーやアクチュエーターを持つ身体によって、我々の認知の世界と外部世界との間に接点をつくることが重要である。それは言語を含んだ我々の認知の根幹であり、世界との関わり方、及びそれに立脚した世界理解そのものである。浅田先生が深層学習による言語理解の発展に関して述べられたが、そこで議論された言語によるタスクはテキストに閉じた世界で完結するタスクがほとんどである。テキストのみから得られる「意味」はどこまでいってもテキスト間の相互関係に基づく意味に

過ぎない。

大事なのは、我々が暮らす世界の中でその言語が何を意味して、それを我々はいかに使えるのかということである。そのためには身体が必要であることは当たり前である。要するに言語とは、我々が環境に適用するために作った道具であり、それを我々はコミュニケーションを通じて集団的な行動をコーディネート（調整）するために使っている。そこまで考えると、まだできないことが多くある。

言語インタラクションを通じて、コンビニエンスストアなどのリアルな環境におけるタスクをロボットにやってもらうとしているが、お掃除のような簡単なタスクですら思いどおりにできていない。言語については、まだ全然分かってないと思っている。そこには絶対、身体、外界との接点が必要だと思う。

浅間：深層学習によってできる翻訳などについては、どんどん進んでいると思う。一方、ロボットを無限定環境で制御するというところに、どこまで深層学習や強化学習などが使えるかということについては、今まさに皆が様々なアプローチから取り組んでいるところだと思う。

今うちの学生は、制御理論と深層学習を組み合わせるニューラルODEについて研究している。モデルフリーの学習と、それから物理現象、物理法則に従うようなモデルベースのやり方をどうやって融合できるのかという研究の発展を期待したい。それと同時に、大須賀先生や石黒先生が話されていた身体性を取り込んだ制御理論も、極めて重要だと思っている。浅田先生が重要性について述べていたセンス・オブ・エージェンシーを説明するモデル（コンパレータモデル）はまさに制御理論から出てきたものである。

我々は予測誤差を少なくするように学習しているが、ただそれだけではなく、同時に誤差をつくるような行動を行っている。このような行動を好奇心と呼んでいる。生物は、好奇心によって無限定環境への適応能力を向上させている。自分の感覚では、7割は予測誤差を減らすような内部モデルの学習をし、3割は誤差をつくるような勝手な運動をすると感じている。これらを通じて、できるだけその行動、予測を正確にするための知が蓄えられると同時に、好奇心による行動を通じて自分というものを学習する。

好奇心と並んでもう一つ重要なのが、環境や身体をいかにコントrollableにするかということである。これは多分本能であり、これによって生存のチャンスが上がると思っている。そのようなことを行うことによって自律性を獲得しているのではないかと最近考えている。自分というものをどうやって学習するのかについて、ムーンショットにおける1つの中心的なテーマにしようと思っている。

先ほど谷口先生が論じられたように言語やコミュニケーションは非常に重要だと思っている。これらの根源にはインタラクションというものがある。インタラクションの中の一部が言語や記号だと思っている。そういうインタラクションの中に大須賀先生や石黒先生の話が位置付けられるのではないか。

安藤：本当に開かれたところまで取り組まないといけないのかということについて、よくよく考えたほうが良いのではないかと。開かれた世界というのは何なのか、いつ、どのようなことができるか。開かれていると思っていても、時には閉じているのではないかと。逆に言うと、最終的に開かれているところを解かないといけない場合においても、本当に解くことを失敗したときにクリティカルになるシーンというのはどのような状況なのかということについて意識合わせをしたほうが良いのではないかと。それほどクリティカルなシーンはないのではないかと。だからやらなくていいという話ではないが、具体的なシーンを想定して、目標や戦略について議論すべきである。

先ほど浅間先生から適応という話もあったが、いつも適応できるものなのかという点も考慮すべき。適応できないケースというのも多々あるのではないかと。その場合に大事なのは、適応(ア

ダブト) し切れていないけれども調和 (ハーモニー) しているシーン。要は失敗しても全体システムとして許容されているというシーンをどのように作っていくのかということ。このようなシーンが人間と人間、人間とロボットのやり取りでも多々出てくるのではないかな。

石黒 : 安藤さんが言われたことはまさに言おうと思っていたこと。2つお伝えしたいことがある。生物の面白さは間違えることにありと個人的に考えている。同時に優れたエラーリカバリーを持っている。そこが生物らしいところである。動物の行動の邪魔を意図的にすると、あの手この手の驚くほど多様なエラーリカバリーを見せてくれる。その意味で、「うまくいく」というよりも「詰まない」ということがすごく重要であろう。そのような詰まないAI、システムというのが、ものすごく面白い。例えば、尾形先生の話提供 (2.1) でタオルを畳むシーンを見せていただいたが、最初変な折り癖がついていたら、逆にそれを利用して芸術的な畳み方をするとか、間違いのところまで戻ってやり直すということまで出来たらすごいと思う。「詰まない」というのはすごく重要なワードになるのではないかな。

もう一つは、これは浅間先生も指摘されていたが、趣旨説明のスライドを見ると、研究開発の3つの方向性として、柔軟な知能、柔軟な身体、柔軟なシステムが挙げられていたが、柔軟な知能とか柔軟な身体については研究者人口がものすごく多いと思うが、一方で柔軟なシステム、要するに制御については、研究者人口が少ない。3つのどれが欠けても駄目なので、サポートをお願いしたい。

尾形 : 我々のタオル畳みデモは途中で戻すとまたやってくれる。幾らでもそういった意地悪ができるロボット、という点が重要である。

嶋田 : 詰まないというのは面白い。学術的にも興味深いワードではないかな。

大須賀 : 今日の話で、身体の話と言語の話が出ていて、言語レベルでもかなりつくり込みでできるところもよく分かるが、身体と言語の本質的な違いは、言語は有限であり、その要素は離散的である一方で、身体は無限の自由度を持ち、連続的である。連続な対象物である無限定な環境に対応するには、無限の自由度を持つ身体は、相性が良いはずだ。

「踊る大捜査線」という映画で「事件は会議室で起きているんじゃない、現場で起きているんだ」という台詞があった。現場において身体と環境とが調和することである。作用・反作用の法則が必ずあるので、戦ってはいけない。戦わないが、なすがままにしていると単なるパッシブな要素になるが、そこに上から来るちょっとした陽的な作用で自然になじみながら進んでいくというイメージがある。そういう意味で、身体性は重要である。

3 第二部：柔軟なロボットの社会実装に向けた仕組みについて

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

山本 貴史（トヨタ自動車）

研究プラットフォーム（Human Support Robot（HSR））を用いた共創的研究の事例紹介

研究プラットフォームロボットを用いた共創的研究、その持続的発展のための一案について説明する。まず2021年9月に日本ロボット学会学術講演会にて発表した内容を簡単に振り返った上で、そこで述べた共創的な研究活動をどうしたら持続発展できるのかということについて考えていきたい。

少子高齢化、QOL向上のような社会的課題の解決の一案として、人共存環境で働くモバイルマニピュレーター（MM）があると想定している。このような難易度の高い最終目標に到達するには、赤丸A（図3-1-1）にあるように、マイルストーン目標を定めながら継続的に研究を続ける必要がある。一方で、赤丸Bのように、その過程で得られた技術を着実に利活用して実環境で使っていくことも必要である。A,Bのような異なる2つ活動を、組織的、プロジェクト的に独立させつつ、1つの領域として共存して進めることが重要だと考える。

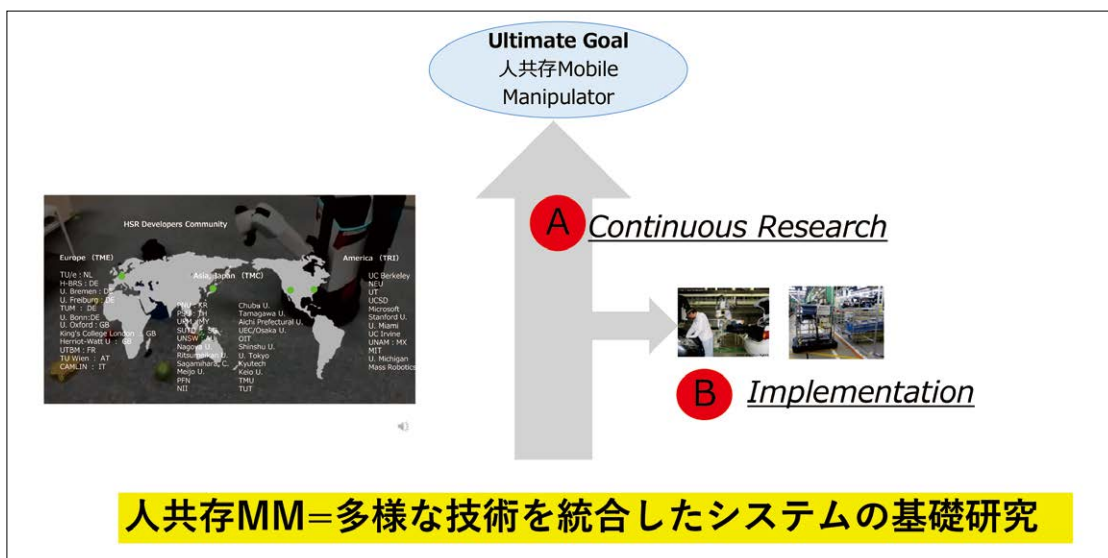


図3-1-1 継続的研究と利活用との両立

人共存モバイルマニピュレーターの研究の究極の目標は非常に難易度が高く、短期に到達し得ない。そのため、研究の過程で得られた技術を別プロジェクトとして分岐し、利活用していくことは、研究の維持のためにも重要である。現在、HSRコミュニティでは、人共存モバイルマニピュレーターの研究は、多様な技術を統合したシステムの基礎研究であると位置づけて、様々な国際的な研究機関の方々と協力して進めている。この研究の最終目標に対し、事業化・商品化の計画を具体的に立てることは現時点では困難であるが、分岐して起こした利活用プロジェクトでは様々な成果も出ており、このような活動の進め方には一定の価値があるのではないか、という感触を持っている。



図3-1-2 HSRの活動の一覧

図3-1-2はHSRの活動の一覧である。プラットフォームを順次展開しながら、工場への導入や、病院へのロボット導入など技術展開を行っている。まちづくりの開発に対しても人材および技術を提供している。残念ながら無観客ではあったが、東京オリンピックの国立競技場でのサービスにもHSRが利用されるとともに、World Robot SummitやRoboCupなどの国際競技の標準プラットフォームとしても採用された。あわせて図下段にあるように、コミュニティの中で共創的に研究を進めた結果、多様な研究成果が生まれている。このように研究と利活用を両立させることで、コミュニティによる共創的研究は少しずつ成果を挙げつつある。

コミュニティ活動の1つの効果として、実環境で実験可能な研究プラットフォームロボットを導入することによって、ロボット専門家以外の研究者もモバイルマニピュレーターの研究が実行できるようになってきたことが挙げられる。事例として東京大学の松尾研究室でのHSRの活用が挙げられる。当該研究室は必ずしもロボット専門の研究室ではないが、HSRを使ったプロジェクト型の講座を開設するとともに、World Robot Summitに出場し準優勝を果たしている。

別の事例として弊社の研究子会社であるトヨタ・リサーチ・インスティテュート（TRI）が挙げられる。認識研究者中心のチームがロボットの学習に関する研究を進めているが、実機実験にHSRを活用している。特にコロナによる出社停止期間中においても、研究者がHSRを自宅に持ち帰り、止めることなく研究を進め、論文発表に繋げるなど、研究活動を継続できている。このように研究者が利用しやすい研究プラットフォームの導入によって、研究の多様性が拡大していると考えている。

続いてHSRコミュニティの運営体制について述べる。これまでは弊社と、個別の大学や企業との間で制約の緩い契約を締結し、研究発表会や成果管理などコミュニティの活動全般について弊社が中心になって運営してきたが、2022年4月からコミュニティ運営を日本ロボット学会に移行することとした。コミュニティの核が構築できた現状を考慮すると、フラットな関係の下でコミュニティメンバーが自律的に運営する方が、より横の連携が強まるため、長期的にコミュニティを維持発展できると考えたためである。

共創的研究の持続的発展について

次に、このような活動を持続するためにはどうすべきか試案レベルではあるが紹介する。一般に、企業の研究開発は、マーケットや自社工場などに開発した製品や設備、システムなどを導入して、そこから何らかの利益を獲得するというのが中心になる。自社だけでは達成が困難な場合には、クローズドな契約を結んだパートナーと連携して、明確な目標達成を目指し厳格な日程管理の下で開発を進める。一方、人共存ロボットの

研究において、このやり方が本当にベストなのかという疑問が生じる。システムの基礎研究は、非常に広範囲かつ未確立な要素技術の研究とその統合的研究が必要となるため、自社とクローズ連携したパートナーだけでは技術が完結しない。加えて明確な事業化計画を初期段階で立てることは困難である一方、図3-1-2で示したように研究開始時では想定していないような他プロジェクトへの技術提供、利活用に貢献するケースが発生しうる。

これらを前提として、統合システムの基礎研究を持続するための一案を以下に示す。

1 番目として、HSRでこれまで進めてきたように、理想機能の達成を最終目標にしつつ、途中過程で得られる技術や人材が別の製品開発、応用開発などに利活用可能であると仮定する。

2 番目として、多様なプレイヤーの協力に基づく自律的な小規模プロジェクトの集合体でシステム研究全体を運営することである。1社で全て丸抱え、あるいは1つの大型研究プロジェクトでは、短期視点化、硬直化を招きやすく、長期持続的で変化に柔軟な研究活動の維持が困難になると考えられる。

3 番目は、システム研究に関わる研究プロポーザルの採択や予算承認の際に、研究者の研究の自由度を保障しながらも、何らかのシステムへの統合を条件として課すことである。これは、統合を促すような仕掛けがないと、システム統合には向かわないと考えられるからである。とはいえ研究者の創造性を発揮するためにも、強制するのではなく、初期段階において、自発的かつ自然な形で仕組みを入れることが望ましい。それには応募段階で、予算のインセンティブを付与することが望ましいと考える。

4 番目は、システム統合の場としてのコミュニティの維持発展のために、個々の研究プロジェクトとは独立して、コミュニティそれ自体に対して中長期的に資金支援を行い、持続させていくことが重要である。これによりコミュニティに参加する研究者や研究テーマ、研究プラットフォームロボット等は、時と共に変化しながらも、コミュニティが柔軟に変化を受け入れて、最終目標に向けたシステム研究を停止させず継続的に進められる可能性が高まる。

これらを図3-1-3に示す。ここでは例として、企業の応用開発部門（App.Div.）とシステム基礎研究部門（R.Div.）とを別組織に分けている。システム基礎研究部門は、他の研究機関や企業とオープンな形でシステム統合型の研究を進めるコミュニティに自発的に参加する。

大学や国立研究機関、特定の企業についてはシステム統合前提の国の資金支援に基づき、コミュニティに参加することになる。また、コミュニティ全体の運営事務、共有実験スペース管理、研究プラットフォームロボット活用、競技運営、といった様々なコミュニティの運営業務に対して、独立して、中長期的な資金支援を行う必要がある。

全てこの形で研究開発を進めるべきということではないが、システム統合を目指した研究を自律分散的に進める1つの例として、このような枠組があるとよいのではないかと考えている。

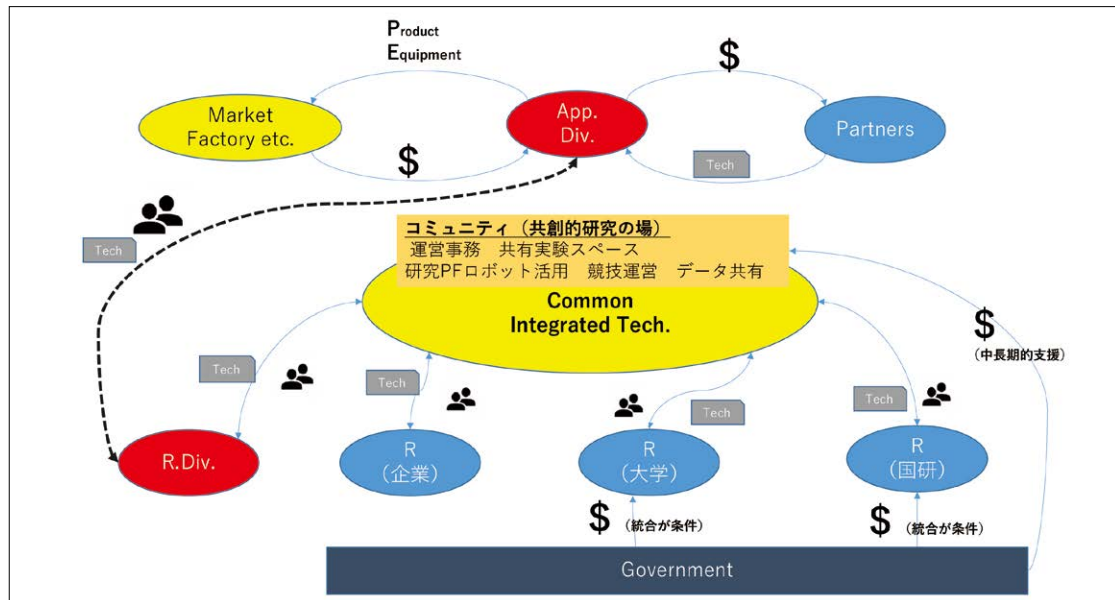


図3-1-3 コミュニティを介した持続可能な研究開発プロジェクト

このようにコミュニティ支援によって、自律分散的かつ統合インセンティブを有する研究プロジェクトに関するメリットをステークホルダー別に述べる。企業の立場では、近年、研究分野への貢献ということ自体が、将来に向けた重要な成果とみなされるようになってきている。また、システム研究全体の研究予算、人員について自社で丸抱えする必要がない。さらに、活性化したコミュニティに参加し、様々な研究者と密に交流することで技術力向上、人材育成が図られるとともに、段階ごとに利活用につながる有用な技術がコミュニティから得られると思われる。

大学や国研等の研究機関にとっては、システム統合へのインセンティブが仕組みに組み込まれているため、自由闊達な研究を維持しつつも、自発的にシステム統合に参加すると想定される。結果として、独自研究だけでは得られにくい、研究の比較評価、客観評価が可能となり、論文アクセプト率向上や研究価値のアピールがしやすくなる可能性がある。

予算元である国にとっては、大型で硬直化しやすい巨大計画を組む必要がなくなり、個別の研究提案やコミュニティに対して、状況に合わせて柔軟な対応が可能である。またインセンティブによってシステム研究の方向性やコミュニティ間の競争を誘導することも可能である。また、インテグレーションによって各拠点のコミュニティの研究成果や当該コミュニティ全体に対する評価が行いやすくなるというメリットが考えられる。

研究プラットフォームロボットについて

研究プラットフォームロボットは、システム統合の基盤であるとともに、システム統合の象徴、共創の場をつくり出すためのアイコンとしても重要な意義がある。

実際に、日本においては、文化的背景からか、組織の異なる研究者が、成果を生み出すレベルでの連携は容易ではないと推定される。また過去を見ても、ハードウェア（ものづくり）的システムでは研究から社会実装を含めて主要な成功例（鉄鋼連続 casting、自動車生産システムなど）を挙げることができるが、より抽象度の高いソフトウェア的システムの研究では比較的少ないように思われる。

このため、ソフトウェア研究が重要となる人共存ロボット研究の共創的發展のためには、何らかの組織横断連携の仕組み、工夫が必要であると考えられる。その1つの案として、過去例を鑑みると、連携を促すためにハードウェア（研究プラットフォームロボット）をコミュニティの内部に取り入れることは有益となる可能性がある。

実際に、研究プラットフォームロボットHSRの意義について、複数のユーザの方にヒアリングした際、HSRそのものの重要性もさることながら、多くの方からHSRを活用したコミュニティの存在に重要な価値があるという話を頂いた。プラットフォームロボットを共に開発、改良、活用していくことにより、離散しやすい個々の研究者の間に柔らかな連携意識が生まれつつあるのかもしれない。このような観点から、研究プラットフォームロボットは、システム研究を目的としたコミュニティの維持継続と研究者の連携を促す可能性がある。

もちろん市販製品ロボットを研究プラットフォームに利用できれば良いが、利用に向いていない研究分野の場合には、新たに研究プラットフォームロボットを準備する必要がある。その際には、コミュニティ内部で共有する研究プラットフォームを設計、製作、改良、改造することは、コミュニティ持続性、研究加速、研究コスト低減の点で望ましいと考える。

最後に、研究プラットフォームを用いた研究の進め方について述べる。まず、ロボット研究の1つの中核である、機械的・機構的研究は、ロボットの基礎研究として非常に重要だと考える。この段階では設計、試作、評価を頻度高く繰り返す必要があり、共通の研究プラットフォームロボットの活用よりも、図面公開や図面共有、改造配布の許諾や試作品の共有のような連携手段が有効かもしれない。

そして、あるタイミングで上記成果も取り入れつつ、研究プラットフォームロボットという形に統合し、領域をまたいだ多様な研究者が参加するコミュニティで共有する。研究プラットフォームロボットはハードウェア改造やコンピュータ、センサーなどの追加変更を柔軟に行いながらも、センシング、ソフトウェア的な研究や実証実験を進めて、コミュニティの研究を促進していく。また、研究プラットフォームロボットを一定期間利用することは成果蓄積にとって重要であるが、研究促進のためには、研究の進捗に応じて研究プラットフォームロボットの世代交代を進めることも重要である。

ここに述べた案はあくまで多様な取り組み方の1例ではあるが、システム研究の持続的発展に有益な案ではないかと考えている。

3.2 ロボット競技会による技術力の革新的な加速と社会応用

岡田 浩之（玉川大学）

今日は、「競技会を通じたロボットの基礎研究推進に関する事例紹介」、「競技会形式の研究開発に何が求められるか」、「競技設計の方法論と今後の展望」という大きく分けて3つの話をしたい。

競技会を通じたロボットの基礎研究推進に関する事例紹介

競技会を通じたオープンイノベーション型の研究開発に関する具体的な事例として、CREST「記号創発ロボティクスによる人間機械コラボレーション基盤創成」（研究代表者：大阪大学 長井隆行教授）における取り組みを紹介する（図3-2-1）。



**CREST「記号創発ロボティクスによる人間機械コラボレーション基盤創成」
（代表：長井隆行）～2021年**

- **国際的ロボット競技会での成績を評価軸に設定（提案時）**
 - 原著論文の数，特許の数では無い
- **領域の目標に沿った競技の提案と実現**
 - World Robot Summitパートナーロボットチャレンジ
- **目標達成**
 - World Robot Summit2018 優勝
 - RoboCup2021優勝
- **成果の普及と継続**
 - WRSのルールを米NISTと共同で標準試験法化（STM）
 - WRS以外の競技会（RoboCup）でも実施
 - 提案するフレームワークの標準化を推進

図3-2-1 CRESTでの取り組み

研究課題の評価項目として、普通は論文の発表数や特許の出願数を挙げるが、この研究課題では、それらに加え、新しい評価軸として国際的なロボット競技会での成績というものを提案した。しかしながら我々の研究課題に整合した競技会がなかったため、このCRESTの研究のテーマとして我々の目標に沿ったような競技、競技会自体を作ることを提案に含めた。この提案に基づき、家庭内ロボットプラットフォームHSR（Human Support Robot）を用いた片づけタスクの競技をつくり、ワールドロボットサミットにおいてパートナーロボットチャレンジという競技会として実施した。

本CRESTの5年間に於いてロボット競技会に参加した結果、2018年にワールドロボットサミットで優勝、2021年にロボカップの世界大会で優勝し、当初の目標を達成することができた。課題終了後の取り組みとして、成果の普及と継続が挙げられる。パートナーロボットチャレンジのルールを標準化するという作業を米NISTと共同で行うとともに、ワールドロボットサミット以外の競技会（ロボカップ）にも展開している。さらには、競技を通じてプロジェクトの評価をし、その結果をもとに次につなげていくというフレームワークの標準化の推進に取り組んでいる。

本CREST研究の終了後も、記号創発ロボティクスによる人間・機械コラボレーション基盤の創成に関する多くの研究成果が継続的に出ているが、同時にルールの標準試験法、コミュニティ形成方法、オープンイノベーション型で開発する仕組み等を次世代に伝えていきたい。

競技会形式の研究開発に何が求められるか

オープンイノベーション型の研究開発が良いという話は「シリコンバレー型」、「コミュニティ主導」といったいろいろな言葉で、ずいぶん前から言われてきたことである。

これは、米ウィローガレージ社のビジネスモデルに一番近いと思われる。ウィローガレージ社は、私企業ながら営利追求ではなくロボットに関わる技術開発を促進することを第一目標に掲げ、画像処理ライブラリーのOpenCV、ロボット用ミドルウェアのROS、家庭用サービスロボットPR2などの新技術を開発して無償配布するとともに、インターシップの受け入れを積極的に行い、これらがスタートアップ企業の創出に有効に働いていた（図3-2-2）。こういうことが仕組みとしてうまくできれば良いと思っている。

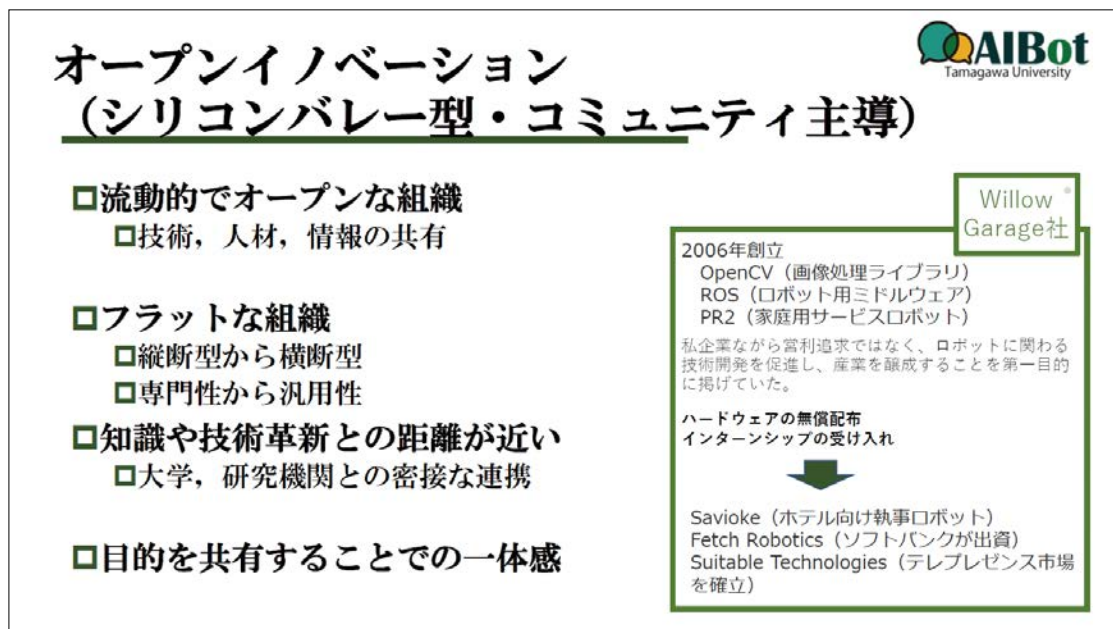


図3-2-2 オープンイノベーション

ロボット競技会は、まさにこのオープンイノベーションの特徴というものを全て持っている。例えば、チーム間の情報共有は、まさにオープン化である。勝つことが目的になっているとチーム間の情報はなかなか共有できないが、そうではない参加者同士では情報共有が加速されると身をもって感じている。一方で勝敗が評価につながることは、分かりやすさにつながっている。さらに、年に数回程度実施して毎年続く継続性というのも大事なことである。

競技設計の方法論と今後の展望

ロボット競技会は大きくランドマーク型と標準性能試験法型とに分類される（図3-2-3）。



ロボット競技会の分類

- **ランドマーク型競技会**
 - DARPAロボティクスチャレンジ（災害救助）
 - ANA AVATAR XPRIZE（アバター技術の活用）
 - Amazon Robotics Challenge（ピッキング）
 - RoboCup（2050年にワールドカップ優勝チームに勝つ）
- **標準性能試験法（STM）型競技会**
 - RoboCupレスキュー
 - WRSパートナーロボットチャレンジ

図3-2-3 ロボット競技会の分類

ランドマーク型の代表的な例は、DARPAロボティクスチャレンジ、ANAアバターXプライズ、アマゾンロボティクスチャレンジ、ロボカップなどである。ランドマーク型の競技会は、ある目的を設定して短期間で一気に技術を開発する方式である。競技会によっては高額賞金をかけて参加者にインセンティブを付与する場合もある。ランドマーク型競技会における課題として継続性がないことが挙げられる。優勝した技術がその後になくなってしまったのか分からないという例が散見される。

一方、標準性能試験法型の代表的な例はロボカップレスキューや我々が提案したワールドロボットサミット（WRS）のパートナーロボットチャレンジである。標準性能試験法（STM：Standard Test Methods）は、ロボットの性能を見える化し、客観的に評価する指標を用いた試験法である（図3-2-4）。



標準性能試験法（STM）

- **ロボットの性能を細分化**
 - 家庭用片付けロボット（長井CREST）で200項目
- **個々の数値を目標化しない**
 - 測定された数値はSTMの使用者が主体的に判断する
- **STMを競技化することで、**
 - 再現性を重視
 - 現実場面の特徴を反映
 - 製品の評価と同じ指標（基礎研究と製品化が近づく）

多様なパラメータを有するサービスロボットは、関係者がその幅広い性能の優劣を判断できない

図3-2-4 標準性能試験法

ロボットの性能を細分化すること、個々の数値を目標化しないことがSTMの特徴である。総合点をつけて優劣を競うということではないということが重要である。サービスロボットの場合、その機能を100とか200ぐらいに細分化して、それぞれについて標準的なテストを行い、総合的に点数をつける。これによって、競技に勝つことが目的化しないような方法が自然に採用できる。製品化を目指す各事業化主体は目的にあった指標を抽出することで、主体的に判断することができる。

我々が推進しているロボカップ@ホームという競技では、図3-2-5のように性能を細分化している。また、「特定物体認識」から「一般物体認識」へ、「不変な環境での競技」から「変化する環境での競技」、さらに新たに「柔軟物のハンドリング」タスクを追加する等、年々難易度を上げながら、継続的に競技を実施している。

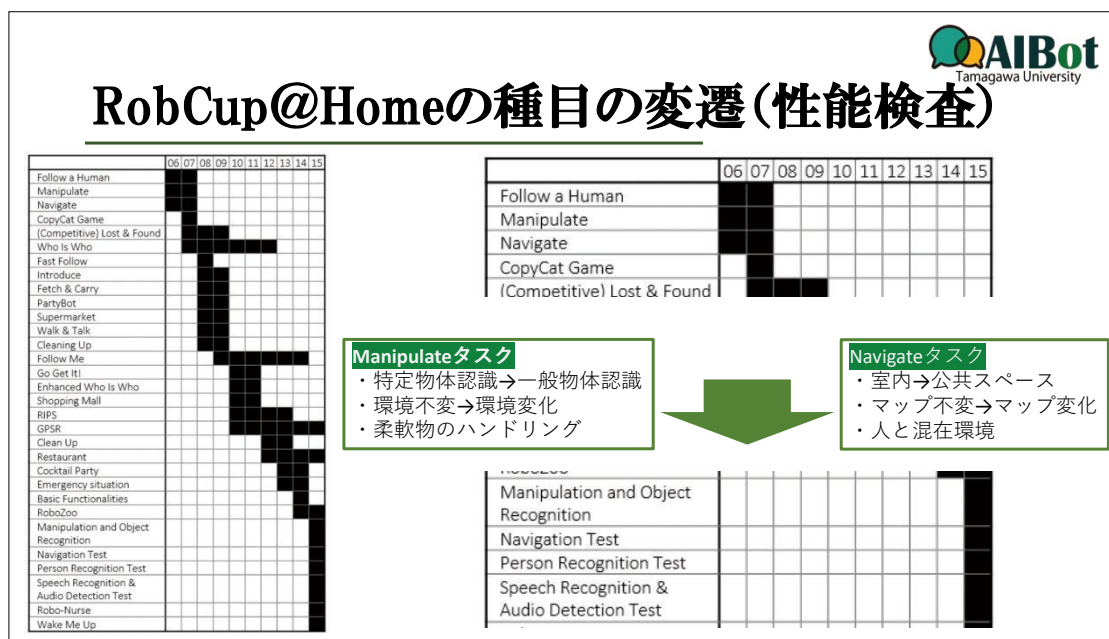


図3-2-5 ロボカップ@ホームの種目の変遷

ロボット競技会を用いたオープンイノベーション型の研究開発は非常に有効だが、ロボット競技会だけでは駄目である。ロボット競技会を核として、研究者とユーザーと事業化主体の三者が一体となるようなオープンなコミュニティをつくることが求められる。そのためには標準化の推進が重要となる。上で述べた性能評価の標準化に加え、ソフトウェアの標準化、プラットフォームの標準化をセットで行い、コミュニティベースでオープンな研究開発をするという方法が今後有効になってくる（図3-2-6）。

ロボット競技会を核にした オープンイノベーション型の研究開発



- ロボット競技会だけではNG
- コミュニティベースでオープンな開発
 - ロボット競技会が核
 - 研究開発者・ユーザ・事業化主体の3者が一体となれるコミュニティ
- 標準化の推進
 - ロボットの性能評価の標準化（競技だけでなく、論文評価などにも）
 - ソフトウェアの標準化（ROS等のミドルウェア）
 - プラットフォームの標準化（異分野からの参入が容易に）

図3-2-6 ロボット競技会を核としたオープンイノベーション型の研究開発

3.3 社会システムとしてのロボット

稲谷 龍彦（京都大学）

科学技術と社会：B.ラトゥールのANTを手掛かりに

最初にELSI（倫理的・法的・社会的課題：Ethical, Legal and Social Issues）の必要性について、哲学者で文化人類学者であるBruno Latour（B.ラトゥール¹）の議論から紹介していきたい。Latourは、科学技術社会論で大きな影響を持ち、2021年に京都賞²を受賞したことで有名である。彼は、科学技術と社会との関係について、科学技術が「真空状態」に存在するわけではないことを指摘している点で重要である。ガリレオ・ガリレイとカトリック教会が、地動説と天動説を巡って争ったことや、最近ではいわゆるGAFAがEUで規制強化に直面して苦戦を強いられていることなどからも分かるように、科学技術の進化はそれ自体によって進むわけではなく、社会の側の受容性に不可避免的に影響を受けるものである。つまり、社会実装が進むためには、科学技術と社会との密接な関係を視野に入れなければならない。科学技術や新しい知見が展開されようとしている社会において既に重要視されている価値観と、科学技術や新しい知見が新たに持ち込もうとしている世界観が衝突した場合、簡単に科学技術が社会に受け入れられていくわけではなく、むしろ科学技術の側が変更を迫られたり、それがもたらす新しい社会の姿について説明責任を負わされたりするのである。

この観点から、本日のワークショップでの議論を伺いながら気になった点として、発明とイノベーションの概念の違いを挙げるができる。ここで発明とは、研究者の興味関心に基づきなされた新たな科学的発見や技術開発であり、一方イノベーションは、社会のあり方や社会の価値観に変革をもたらす科学技術の開発である。Latourが言うように、科学技術は真空で存在しているわけではないので、社会の中で受け入れていく素地がないと社会実装は難しいのである。例えば、蒸気機関が社会に普及していく過程では、当時著しく発展した鑄金技術だけではなく、鉱山からの利益の重要性が認識されたため、蒸気機関の収益化が可能になるなどの、種々の社会的な要素の後押しがあった。Latourの言葉を借りれば、人と事物との「ネットワーク」の拡張を通じて、科学技術の社会実装が進むのである。

科学技術を実装していくに当たっては、社会実装することでどのような価値が生まれ、それに対してどのような懸念が存在し、またその懸念へどのような応答ができるのか、あるいは、その懸念を解決する制度としてどのようなものが用意できるのか、といったことを検討する必要がある。ELSIを丁寧に行っていくことは、こういった活動を通じて、人と事物とのネットワークを拡張していくことに他ならない。つまり、単なる発明・発見ではなく、社会の変革をもたらすイノベーションを本気でやろうと思うのであれば、研究開発のかなり初期の段階から、どのような形で現在の社会の中の要素と新しい科学技術を結合させるのか、また、それによって何を生み出すのか、さらに、それを社会に受容してもらうためにはどうすれば良いのかということを考える必要がある。こういった視点が今回のプロポーザルの中でもポイントになるかもしれないと考えている。

- 1 1947年、フランスのボーヌ生まれ。哲学者としての経験を積んだのち、人類学者になる。1982年から2006年までパリ国立高等鉱業学校で教授職を務め、その後、パリ政治学院に移り、2007年から同学院の副学長を勤める。主な著書に『科学がつくられているときー人類学的考察』（邦訳：1999）、『虚構の「近代」ー科学人類学は警告する』（邦訳：2008）、『科学論の实在：パンドラの希望』（邦訳：2007）、『社会的なものを組み直す：アクターネットワーク理論入門』（邦訳：2019）などがある。
- 2 1984年に京セラの創設者稲盛和夫が創設した日本発の国際賞。科学や技術、思想・芸術の分野に大きく貢献した者に贈られる。「先端技術部門」「基礎科学部門」「思想・芸術部門」の3部門からなり各部門はそれぞれ4分野で構成される。

ロボットと社会：社会システムとしてのロボット

今回のプロポーザルにおける「実世界ロボット」というものが、具体的にどのようなものを想定しているのか、私は素人なので理解しきれていないが、家庭用ロボットと診療AI、自動運転等が連携し、体調不良の人を病院に緊急搬送し、病院でAIもしくはロボットが治療を開始するといったように、様々なロボットが自律的に協調動作をするような事例を想像した（図3-3-1）。こうしたロボットを想定すると、ロボット、あるいは広い意味でのロボットシステムによる判断によって、人の生命や健康が直接的に左右される可能性が生じることが考えられる。例えば、使用した家庭用ロボットの判断ミスで病気が発見できなかった、搬送された病院のAIシステムが誤って間違った薬を投与したなどの問題が起きるかもしれない。ロボットの研究開発においては、このような場合に備えて、どのようにその動作に関する監督システムを導入するのか、事故時の責任をどのように分配するかなど、システムの設計運用段階から、そのリスクとベネフィットについての説明責任を果たし、あるいは必要な法制度を構築するために、マルチステークホルダーアプローチを採用することなどを検討しないと、なかなか社会に受容されないということになりかねないだろう。

ロボットの機能は、社会システムの中にそれをいかに組み込むかということによって相当左右されるように思われる。逆に言うと、多額のリソースを投入して研究開発を進めたロボットシステムであったとしても、社会的受容性がなければ、結局社会実装ができないということになるのである。



図3-3-1 ロボットと社会

ロボットとの共生：「ヒューマニズム」を脱する

現在のELSIの議論を国際的にリードしているのは欧米諸国だが、その前提となっているのは「ヒューマニズム」という考え方である（図3-3-2）。「ヒューマニズム」とは、人の行動が意志に由来し、また、意志によって制御されること、及び、人は理性によってその行動を正しく認識・評価できることを前提に、意志と理性を備えた「人間」のみが道徳的主体となることができるという立場である。



図3-3-2 ロボットとの共生

この立場に立つと、ロボットに起因する事故の処理は2つの方向に分かれる。一方は、ロボットの自律性を上げることで、ロボットに意志、理性、説明能力を持たせ、ロボットに責任を取らせるという責任分配システムを検討する方向である。他方は、ロボットの情報処理能力は研究開発を進めても完璧になるものではないことを前提に、完璧でないものを市場に導入したということで、開発者の責任を問う方向性である。このように極端な2つの立場からの議論がなされているが、現在はどちらかというと、後者の方向で議論が進んでいる。ただし、後者の場合には、自律的システムの中でロボットがシステムや他のロボットと協調動作している際に、何か事故が起きた場合、毎回システムの開発者に責任を問うことになりかねない。もしくはEUのAI規則案が示唆するように、システムの電源を切るスイッチを用意し、危ないときにシステムを止める人間を準備することで、事故がおきた場合はその人間の責任を問うという法制度の設計がありうるだろう。

一方でヒューマニズムには2点課題があると言われている。1点目は、「人間」概念自体の歴史性・偶然性を無視しており、人間概念の過度の本質化によって、かえって「人間」でない人を生みかねないという課題である。ヒューマニズムでは、理性及び自由意志を持つことが人間の本質的部分となるため、それを備えていない人が事実上社会から除外されてしまうというリスクがある。この問題については、フェミニズムを始めこれまでの多くの批判があったところであり、このような考え方をロボットにまで拡張するのか、という倫理的な課題が生じる。2点目は、ロボットを「人間」に近づけることで、かえってロボットの優位性が損なわれてしまう可能性があるという課題である。端的に言えば、AIやロボットが人間にはない長所や独自性を持っている場合には、それらを無理に「人間」に近づけることによって、AIやロボットが持つ可能性が損なわれるということである。

Taking ELSI Seriously? : 進むべき方向性についての試論

ヒューマニズムは、西洋の伝統的な考え方に非常に親和的な考え方であり、EUのAI規則案³において、「人間」中心のアプローチが強調されたことにも十分に理由があると考えられる。一方で、EUのAI規則案には域外適用条項があることから、EU域内でプロダクトやサービスを展開しようとする企業は、本籍がEUにならない場合でも制裁金が課されるというリスクを負う可能性がある。EUの「人間」中心アプローチは、極めて強力な影響力をグローバルに持つ可能性があるのである。

しかし、ヒューマニズムを前提としたEUの価値観においては、我が国のSociety5.0で想定しているような、自律的なロボット同士が人間の判断を介さずに協調して機能目的を実現するという、高度な自律ロボットシステムの社会実装は相当難しい可能性が否定できないと考える。したがって、EUの取り組みに対しては、我が国としては、各論としての課題解決の提案だけでなく、我が国の世界観や哲学といったものの長所を打ち出し、相互理解を深めていく必要があるだろう。日本及び東洋諸国の全体論的・関係的なインティマシー優位の世界観は、「人間」や「個人」という概念とは相性が悪い反面、機械の自律的判断を組み込んだ社会システムや、システムの問題に対処しやすいという長所もある。このような世界観の下で作られた製品やサービスであっても、EUの世界観の下で作られるものとも機能的に同等以上であることに加え、EUにおいて懸念されている問題点についても解決することができるのだということを、説得力を持って発信していく必要がある。



図 3-3-3 Taking ELSI Seriously?

以上のように、社会システムとしてロボットを社会実装することを考えるならば、ELSIの果たすべき役割は大きくなっている。日本的な世界観やその世界観に合う課題と解決方法を積極的に展開すると同時に、相補的、あるいは競合する関係国に対しても発信を行っていく必要があり、そのためにも、ELSI分野ヘリソースとエネルギーを割くべきだろう。そうすることによって、研究開発された技術を効果的に社会実装へと繋げていくことになると思う。

3 European Commission (2021), Proposal for a Regulation laying down harmonised rules on Artificial Intelligence act, April 2021

3.4 総合討論2

ファシリテータ：茂木 強（JST-CRDS）

東：第二部の議論をプロポーザルに反映していくため、総合討論では3つの論点を取り上げたい。

- 1) 「プラットフォームの整備」において留意すべきことは何か。例えば、これが研究の画一化を誘発し、革新的な研究を阻害することにならないか。
- 2) 同様に「競技会型の研究開発」において留意すべきことは何か。
- 3) 将来の社会実装に向け、基礎研究の段階からどのような取り組みが求められるか。そのような取り組みに、どのような分野の人間が参画し、どのような役割を演じるべきか。

プラットフォーム、競技会について

茂木：まずは、プラットフォームと競技会についてまとめて議論したい。

浅田：ロボカップの経験から「プラットフォームの整備」と「競技会型の研究開発」は大変リンクした課題なので、これをセットに議論する事は大変よい。ロボカップへの海外からの参加はコンピューターサイエンス分野の研究者が多かった。彼らはモノづくりがあまり得意ではないため、当初からプラットフォームの需要があった。最初のプラットフォームは、ソニーのAIBOだった。これはインダストリアルクオリティを持つ非常に優秀なプラットフォームであった。参加者はハードのプラットフォームを供給してもらい、提供した企業側は、競技を通じた過酷なテストによって問題点が見つかり品質を高められるというウィン・ウィンの関係があった。ロボカップでは、ハードユーザーがプラットフォームを徹底的に使いまくり、その中で、その限界や問題を議論した上で次のプラットフォームにつなげている。ソニーのAIBOから、Nao、Pepper、HSRと、色々なプラットフォームを使ってきている。プラットフォームは固定化する必要はなく、常々それを変えていくような形が望ましい。

ロボカップの良いところとして、参加者と競技主催者が同じレベルであることが挙げられる。主催者と参加者が分かれている競技会では継続性がない。ロボカップで優勝した参加者は、どんどん主催者側に入れていく。参加者が競技主催者になり競技をつくることにより、自分達が持っている課題を競技に取り入れて提案することができる。ロボカップのコミュニティに参加すると、そこからロボカップ自体をつくっていける。このようなコミュニティをつくって、そこに色々な分野の方が入り、共通のプラットフォームロボットを通じてディスカッションができる。これによって継続性が生まれる。

ロボカップには、小学生から参加出来るロボカップジュニアという部門がある。これは教育、人材育成としてすごく意味がある。これは僕の理想だが、子供たちが小中高生の時点で競技会に参加し、国際的にコミュニケーションを取るということにより、文化差や、いろいろな格差を超えられるような形に持っていきたい。

ロボカップの一番の財産は、ヒューマンネットワークだと考えている。世界中どこに行っても知り合いがいて、ヒューマンネットワークがいろんなところに効いてくる。これが、国際共同研究などにつながっている。さらに分野の違う方もどんどん入れるようにしようと思っている。

ロボカップ@ホームなどで次のタスクセットを検討する時には、それが実現したときに人がどのように行動を変えて、社会がどのように変わりそうかなどについて研究者が設計時点で考えることが求められている。機械学習分野の国際会議であるNeurIPSでは、投稿時に「あなたの研究は社会にどのような影響を与えますか」という問いに対する回答を入れないと投稿できないようになっているらしい。学生や研究者は、これを書くことが面倒くさいと言ってコピペをするような場合もあるようだが、書くことにより社会実装に対する責任がそこで出てくる。そのような発想を持って設計してい

なきやいけないという時代になってきていると思う。

これは多くのステークホルダーが関わりポリティカルイシューも多く、文化的、宗教的な違いも存在するので、簡単に答えが出るものではないが、コミットしている人たちの間でコミュニティとして議論を重ね、探索してゆくしかない。やはり、人間、コミュニティというのが一番大きなポイントかなと思う。

浅間 : プラットフォームに関して重要な事はシステムインテグレーションをアジャイルに実施できる環境づくりである。福島原発廃炉の経験から言うと、個々のロボットをいちいち数億円もかけて開発するのは大変効率が悪い。個々の要求仕様や環境に応じて、効率的に設計開発する時に役立つプラットフォームを作ることが重要であると思う。

その一つはソフトウェア。ROSは浸透しているが、日本発のRTミドルウェアは戦略的に上手くいっていない。競争力を持ったソフトウェアのプラットフォームをどうやって推進していくのか戦略的に考える必要がある。ヨーロッパではアジャイルなソフトウェア開発を支援するソフトウェアプラットフォームが開発されようとしており、ここでも日本は負けるのかという危機感を持っている。

もう一つはハードウェア。HSRのようなハードウェアがあると、学生も含めて広く活用できるといった良い面があるが、ロボットはその身体性に依存するため、ハードウェアプラットフォームによって、やれることが限定されてしまう。それを打破する方策を考える必要がある。

ユニバーサルなハードウェアプラットフォームの実現は難しいので、むしろ色々なシステムインテグレーションがしやすいような環境を整えるというようなコンセプトでプラットフォームも考えるのがよい。

また、深層学習などを組み込んだシステムを開発するためには、サイバーフィジカルシステムのようなものをサポートできるプラットフォームが極めて重要になる。

多くのドメインを超えた学習をしようすると、シミュレーション環境を使いながら学習データをつくっていくということが必要になってくる。そのためのプラットフォームという考え方も必要だと思う。同時に標準化、スタンダードテストメソッド（STM）も重要であることは間違いない。

競技会については人材育成の面でも重要。はっきりとした目標をもって、それを達成する能力を鍛える競技会は人材育成という点で極めて重要である。競技会に参加する学生がどんどん入れ替わりながら技術を維持発展させるには、それを支える資金が重要であり、それをサポートするシステムがあるとよい。

茂木 : プラットフォームを固定化しない、ROSなどをどんどん進化させていくといったお話があったが、実際に取り組んでみたうえで、実現するためのポイントや、困難な点があれば意見を頂きたい。

安藤 : まず、浅田先生のユーザーとオーガナイザーが一緒になる話や、浅間先生のサイバーフィジカルシステムの話は、企業側の視点から見てもかなり大事なポイントだと理解している。一方で、プラットフォームの整備、もしくは競技会型において留意すべき点として、目的と手段が入れ替わってしまう事が発生しがちということが挙げられる。これは自社内でのコンテストなどでもよく起こることだが、特にプラットフォームの開発において多く起こると感じている。いつの間にかプラットフォームを作ること、あるいは使う事が目的になってしまっている。本来の目的を忘れがちな事もあり、注意が必要であると思う。

今回の議論では先端研究に主眼を置くのか、人材育成を行うのか、標準化、ヒューマンネットワークというところをいかにつくっていくのかなど、目的と手段の切り分けをはっきりさせると、企業からの支援による資金の問題なども解決し易くなるかもしれない。

茂木 : 競技会やプラットフォームで、何をテーマとするかということが1つのポイントになると思う。例えば競技会のターゲットとして社会実装は重要な要素になると思うが、その際に考慮すべき点についてご意見を頂きたい。

上出 : 評価すべき点や研究の必然性を若手のエンジニア、開発者自身が考えていく必然性について、もっと発信していくことが重要だと考える。例えば谷口先生の発表(2.2)で、ロングタームな知性を考えたほうが良いという話があったが、そのような新しい知を形成するシステム自体がすごく面白いが、一方で今までの生物社会や人間社会とは異なる言語や習慣を持つ社会が生まれるかもしれない。尾形先生の発表(2.1)からは、生物や人間の知能が正解でなくても良いといった可能性を感じた。研究としては面白いが、その先のことについてはどう考えるのか。

浅田先生は、「ここまで言語理解が進むとは思っていなかった、身体の方が全然追いついていない」という指摘をされ、一方で稲谷先生は、研究の早い段階でイノベーションの影響を考えたほうが良いとも論じていたが、予想し得ないようなスピードで技術が進んでいく中で、開発しているエンジニアやコンピューターサイエンティストが、どの様にして数十年後の世の中のあるべき姿を予想しながら研究、開発を進めてゆくのだろうか。

一方で、そのような議論をしていると研究が進まないという意見もちろんあると思う。先ほど、研究の社会的影響について書かないと国際会議に投稿できないようになってきているという話があったが、このような進め方は現実的に大事だと思っている。技術開発によって自然環境の破壊やSDGsの問題を引き起こしてきたと議論されているが、自らの技術が、将来の社会における持続可能性にどのように寄与するのかということを研究者自身がちゃんと考えながら技術開発していく方向性があった方が良いのではないか。これによって技術開発がストップしてしまうということもあるかもしれないが、うまく両方を包含しながら研究を進めるしかないのだろうと感じた。

尾形 : ムーンショットにおけるハードウェアプラットフォームについて話しておきたい。我々のプロジェクトはロボカップにすごく影響を受けている。ハードウェアプラットフォームを(AIを開発しながら)壊すつもりで研究に使っている。ハードウェアプラットフォームにAIをいれて学習させると面白いデモができると同時に、できないことや限界や不要な部分など改善すべき事がすぐに明確にでてくる。そこでロボット屋と一緒にプラットフォームを開発し続けている。ロボット屋と人工知能屋がちゃんとくっつくことがすごく大事である。本来は、ハードをつくるのが好きな人と、ソフトをつくるのが好きな人とは、ものすごく近くなくてははいけないはずだが、現実にはロボット学会と人工知能学会は、すごく遠い存在である。ソフトウェアの人がハードウェアに影響を与えて、ハードウェアの人がソフトウェアに影響を与えるということにより初めて、競技会でプラットフォームを一緒につくろう、OSも一緒につくろう、といったことが出てくるはずだ。ハードウェアの人とソフトウェアの人がもう少し近づいて、広い意味での知能をちゃんと考えていくことができる場が求められる。

岡田 : 競技会などで目的と手段が入れ替わるという指摘があったが、ロボカップでは意図的に入れ替えているところがある。ロボカップには研究者もユーザーも事業化する人も入っていて、最初から目的と手段が逆の人が一緒に参加している。個人において目的と手段が入れ替わることは良くないと思うが、コミュニティ全体としては、逆の人を入れたほうが結果としてうまくいくと考えている。

浅田 : オープンにすることによって想定外の参加者が入って来る。ロボカップは人工知能とロボットの研究だと位置づけていたが、コーネル大学(当時)のRaffaello D'Andreaが、学生の教育目的として入っ

てきた。彼のチームは、小型サイズで優勝して、Kiva Systemsという倉庫の搬送ロボットのベンチャー企業を立ち上げた。当初想定している形じゃない人たちが入ってきて、それによって新たなエボリューションが起きてしまう。そのようなダイナミズムを持っていることがコミュニティの幅を広げる。

既存の学会はオープンと言いながら専門家しか入ってこない。コミュニティとしては閉じてしまっている。やらなくてはいけないことは、オープンなコミュニティをつくり、そのことを社会的にも発信して、分野の違う人たちが入れるようにすることである。

社会実装に向けて基礎研究の段階から求められる取り組み

稲谷 : 例えば、スーパーに行って代わりに買い物をしてくれる自律移動ロボットは必要ないという考え方もありうると思う。人の代わりにスーパーで買い物をするという機能の実現に注力するよりも、機械同士で通信して、必要な物の輸送を自律移動ロボットに任せる方が、必要な機能を低コストで実現出来るという考え方はあり得るだろう。また、例えば、コンビニ内を動き回る自律移動ロボットと接触して人がけがをしたという状況が起きたときに、既に言及したような別の選択肢がありうるにも関わらず、なぜあえてこのようなリスクをはらむロボットを導入したのかという理由を説明することが求められるだろう。こうした説明がきちんとできないと、開放環境における自律移動ロボットの社会実装は困難になってしまうと思う。

学術的な好奇心に基づくロボット研究は非常に面白いと感じるし、身体知をロボットにどの様に組み込むのかということにも個人的に強い興味関心があるので、ここまでのお話は大変楽しく伺っていた。しかし、他方で、自律移動ロボットを社会実装する上で、なぜ開放系にする必要があるのかという点はあまり見えてこないように思う。悪く言えば、高度な技術に挑戦することで、あえてリスク取っているだけにも見えてしまう。否定的に聞こえるかもしれないが、これは非常に重要なポイントだ。

例えば、技術を社会実装し、マネタイズしていくためには、海外市場も視野に入れる必要があるという話になったときに、る開放環境型の自律移動ロボットが、結局各国の法規制やその根底にある世界観などに抵触し、展開できないという事態が生じる可能性はないのか、といったことを、もっと考えておく必要があるのではないだろうか。非常に面白い研究をやっているからこそ、こうした点がボトルネックになって社会実装が出来なくなったら大変もったいないと感じている。

浅間 : 私は、買い物好きということもありスーパーのロボットの必要性は感じないが、別の観点では、開放系ロボットは重要であると思う。例えば、体の不自由な患者さんがOrihimeというロボットを介して人共存のカフェで仕事をするなど、患者さんの社会活動への参加を可能としている。また新型コロナなどで接触を避けなければならない状況でもアバターロボットで買い物などが可能になれば、それを使う事で助かる人もいるので、社会生活に対する大きな貢献となるはずである。

問題は、社会実装するときにはどのような問題が起きるのかということだ。ELSIの問題については、日本工学アカデミーや日本学術会議において議論が行われており、何らかの提言や意思の発出を行おうとしている。科学技術に携わる者は、社会的な受容性や、ELSIの問題を考えながら研究開発をやる必要がある。以前より、安全の問題は、考慮すべき非常に大きな問題として存在していたが、今は、エコノミカルな視点、サステナビリティ、環境に対する配慮なども必要になってきて、多様な問題を考慮しながら研究開発をしなければならなくなっている。倫理に関しては、人によって価値観は異なるし、時代によっても変化している。このような多様性や変化に合わせて社会に受け入れられるロボットを開発することが重要であるが、それは簡単なことではない。

茂木 : これは、先ほど上出先生が述べられた若手の研究者に考えさせる機会を与えるいい機会であるという主張にもつながる。

尾形 : 開放系でなくても良いのではないかという話だが、開放系でなければならない問題もたくさんある。柔らかいもの、粉体、粘性液体などの操作は、今までは人の手でやらざるを得なかったが、このような問題に対して機械学習で対応しようとしている。介護者にとって大きな負担になる排泄物の処理などは開放系の問題であり、作業において起こりうる色々な可能性に対処出来る知能が必要になる。これを閉じた制御で解くことは難しい。

こういう新しい技術を社会実装するのは技術者の視点だけでは不可能である。確かに、研究者が発信すべきではあるが、どうしても人文社会系の研究者の視点が重要になる。そのため、人文社会系の研究者にも資金を回すべきだと思っている。海外でのビジネスを見ても、イギリスやアメリカで、人文社会系の人たちがAIを研究する予算規模は億円単位になっている。日本でも自然科学系の研究者と人文社会系がキチンとした予算の元で一緒に取り組めるような仕組みをつくる必要がある。

聴講者 : 現状のロボットの技術レベルは想像されるよりもはるかに低い。お金をかけたとしても、腕を持った家庭用ロボットを一般家庭に導入できるような段階にはない。実現に向けて先生方が頑張って開発されているということを理解頂きたい。

大須賀 : 開いた環境のロボット研究に対する私の最大のモチベーションは、阪神・淡路大震災の後、レスキューロボット開発に取り組んだが、結局、全く歯が立たなかったことである。災害というのは同じものが二度とないため、普通の工学的やり方では無理だと気づき、一旦は諦めたが、もう一度挑戦しようとしているのが今の段階だ。今度こそ開いた環境に何とか対応するロボットを作りたいと思っている。

ロボットフェスタ関西において、レスキューロボットコンテストを運営したが、何回か続けていると競技に特化したロボットがでてくる。レスキュー環境は二度と同じものがないので、毎回フィールドを変えるべきじゃないかと考えている。屋外で、夜間や悪天候下でも開催するというのがレスキューロボットコンテストの最終形だと考えているが、競技会として成立させるためには、それができないというジレンマを抱えている。

安藤 : 企業の立場から述べると、人文科学系、社会科学系の先生には予算をつけてほしい。今後、解くべき問題が明らかに複雑化していくので、工学研究者だけで開発することは避けるべきだと思っている。

また、ELSIの課題を解いていく取り組みとして、企業のなかではSFプロトタイピングという手法を取り入れ始めている。人間はネガティブな思考は得意なようで、工学者とか企業のエンジニアに対してネガティブな未来像を考えてみると言う、アイデアを出せる人がそれなりにいると感じている。この手法は面白い取り組みになると思う。

稲谷 : 誤解のないように申し上げると、開放環境に対処するロボットの開発を否定したいわけでは全くない。皆さんがたった今お話しされたように「このような社会課題に、このような形で適用するから、このようなことをやるんだ。」というメッセージをうまく研究のアジェンダに組み込むということと、そして同時に、「それが既存の、あるいはあるべき法制度とか倫理観の中でこういう形で位置づけられる、だからやれるし、やるのである」ということを発信していくという統合的なアプローチがないと社会

実装にはうまくつながらないか、という意味で申し上げたことはご理解いただきたい。

茂木 : 皆様、そこは理解されていると思う。おかげで皆様の本音に近いところが聞けて、良い議論になった。
ありがとうございました。

付録

付録1 開催概要・プログラム

開催趣旨：

ロボット技術は日本が直面する社会的課題の有効な解決手段の一つと期待され、様々な将来像が提示されています。一方、現状のロボット技術は、我々が生活している「開かれた環境」での非定型作業を苦手としており、期待との間に大きなギャップが存在しています。

これまで、計算能力やセンサー精度の向上などにより、環境の不確実性を削減することでロボットの適用範囲は拡大してきました。しかし、不確実性を完全に無くすことは不可能であり、これだけでは問題解決には不十分です。一方、機械学習、新規材料、生物模倣技術などによりロボットの知能や身体に柔軟性をもたせ、不確実性に対する許容度を向上する研究も推進されています。これらの研究は、個別の状況においては有効性を示す成果を挙げつつあります。

JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、今後取り組むべき重要な研究開発課題と実施体制・仕組みなどを検討議論し、以下のように作業仮説としてまとめました。

- ・「開かれた環境」に対応できるロボットの研究開発には、柔軟性をもたせたロボットの統合システム開発と理論的基盤の確立が必要である。
- ・そのためには、さまざまな異分野からの知見も取り入れる必要がある。
- ・これらの研究開発を加速するために、オープンな研究の共有基盤である「プラットフォームの整備」、研究のベンチマークとなる「競技会型の研究開発の推進」が求められる。

本ワークショップでは、CRDS よりこれらの仮説を示した上で、知能や身体に柔軟性をもたせたロボットの研究事例や研究開発の推進方策の事例などについて有識者より話題提供して頂きます。これらをもとに、

- ・我が国が注力すべきロボット技術に関する研究領域
- ・異分野との融合を促進するための仕組み
- ・ロボットの利用範囲を広げるために必要となる取り組み

などについて総合討論で議論します。

本ワークショップを通して、「開かれた環境」に対応するロボットの研究開発において取り組むべき方向性を明らかにするとともに、その推進方策についての共通認識を得たいと考えております。

プログラム：

開催日時：2022年2月24日（木）13：00－16：40

開催場所：オンライン（Zoom）

13：00－13：05 挨拶

木村 康則（JST-CRDS）

13：05－13：20 趣旨説明

東 良太（JST-CRDS）

13：20－15：00 第一部：柔軟なロボットの実現に向けた研究について

深層予測学習を用いたロボットの実世界適応

尾形 哲也（早稲田大学）

記号創発ロボティクスと統合的認知アーキテクチャ

谷口 忠大（立命館大学）

開かれた環境に対応可能なロボット制御のための理論的基盤の構築を目指して

石黒 章夫（東北大学）

『開かれた環境』に対応するロボット

大須賀 公一（大阪大学）

総合討論

15：10－16：35 第二部：柔軟なロボットの社会実装に向けた仕組みについて

研究PFロボットを用いた共創的研究その持続的発展のための一案について

山本 貴史（トヨタ）

ロボット競技会による技術力の革新的な加速と社会応用

岡田 浩之（玉川大学）

社会システムとしてのロボット

稲谷 龍彦（京都大学）

総合討論

16：35－16：40 全体まとめ

東 良太（JST-CRDS）

付録2 参加者一覧

招聘者：

(話題提供者)

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

(コメンテータ)

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

チームメンバー：

奥付記載の通り

傍聴参加者：

文部科学省	3名
大学、国立研究開発法人	4名
科学技術振興機構（JST）	23名（上記チームメンバー以外）

総括責任者	木村 康則	上席フェロー	シス情ユニット
リーダー	茂木 強 ¹⁾	フェロー	シス情ユニット
メンバー	若山 正人	上席フェロー	シス情ユニット
	東 良太 ²⁾	副調査役	先端重要技術育成推進部
	青木 孝	フェロー	シス情ユニット
	島津 博基	フェロー	ライフユニット
	嶋田 義皓	フェロー	シス情ユニット
	鈴木 和泉	フェロー	企画
	徳永 友花 ³⁾	フェロー	環エネユニット
	茂木 強	フェロー	シス情ユニット
	吉脇 理	フェロー	シス情ユニット
	一矢 光雄	主任専門員	産学連携展開部
	上田 幸弘	主任専門員	戦略研究推進部
	宮田 裕行	主任専門員	戦略研究推進部
	佐野 広大	科学コミュニケーター	日本科学未来館
	蔣 赫	スタッフ	日本科学未来館
	渡邊 孝信 ⁴⁾	教授	早稲田大学

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

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

CRDS-FY2022-WR-01

現実空間を認識し、臨機応変に対応できる ロボットの実現に向けて

令和4年6月 June 2022

ISBN 978-4-88890-800-9

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

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

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

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

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

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

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

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

Any quotations must be appropriately acknowledged.

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

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



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