

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

フィジカルAIシステム



エグゼクティブサマリー

JST研究開発戦略センター（CRDS）は、科学技術に求められる社会的・経済的なニーズを踏まえ、科学技術の現状を俯瞰し、国として重点的に推進すべき研究領域や課題、その推進方策に関する提言を行っている。この度、この活動の一環として、AIとロボティクス分野の進展において今後重要となるであろう、フィジカル空間での影響力を持つAI（フィジカルAIシステム）に関する研究開発課題とその方向性について議論を行うワークショップを開催した。

本ワークショップは、2025年1月26日13時～16時にZOOMオンライン形式で実施され、発表者8名、コメントーター3名に加え、文部科学省、経済産業省、日本ロボット工業会関連など外部から18名が傍聴した。ワークショップは2部構成とし、前半では若手研究者やベンチャー企業の研究者が最新の研究・事業動向を発表し、後半では3名のコメントーターを交えて総合討議を行った。

フィジカルAIシステムとは、物理的環境と直接相互作用し、人間のように柔軟かつ適応的にタスクを遂行する能力を備えたAIロボットを指す。このシステムは、サイバー空間で成果を上げてきた従来のAI技術とは異なり、実世界での課題解決に向けた新たな価値を創出することが期待されている。

本ワークショップでは、主催側から、フィジカルAIの進化を「タイプP（多様なタスク遂行）」、「タイプA（多様な環境適応）」、「タイプH（人間との協働）」の三つのビジョンとして提示し、それらを実現するための研究開発課題の現状を発表いただいた。具体的には、基盤モデルの構築、筋骨格型ヒューマノイドや強化学習を活用したロコモーション技術の進化、マニピュレーション技術の高度化などが議論された。学理に関する基礎研究として、予測符号化・自由エネルギー原理を活用した認知ロボティクス、世界モデルの活用、触覚・力覚データを活用した環境適応能力の向上が重要な研究領域として挙げられた。

研究開発エコシステムについては、特に企業データの活用や社会実装のためのエコシステムの構築が求められ、プラットフォーム戦略の重要性が強調された。また、ロボカップをはじめとするコミュニティ育成のための継続的な取り組みの重要性も指摘された。日本のロボティクス事業の展開において、中小企業などの現場において多様なニーズが存在し、導入障壁を下げることでロボットの社会適用範囲が拡大する可能性があることを強調された。

総合討議では、ヒューマノイドロボットの現状について、海外ではヒューマノイドロボットが急速に発展し、強化学習や模倣学習、基盤モデルの活用が進んでいることが議論された。一方で、日本では予算の制約や独自技術にこだわる傾向が遅れの要因となっているが、まずはキャッチアップが必要であると指摘された。そのためには、ハードウェアにおいても国産モータやオープンハードウェアの開発を推進することが重要であるとの意見が出された。

また、ロボット基盤モデルの課題については、サービスロボットのスケーラビリティ確保が重要視された。大規模データを活用した基盤モデルの開発が米中で進む中で、日本の研究者はスケール化の面で不利な状況にあり、データ効率の向上やカリキュラム学習、シミュレーションの実環境適応など、別のアプローチの必要性が指摘された。

さらに、身体性に基づく知能の解明について、予測符号化や自由エネルギー理論を基盤とした認知発達の研究が重要であると議論された。特に、バイラテラル制御による模倣学習や解釈性の高い学習モデル、個体適応型の模倣学習が今後の課題として挙げられた。また、ロボットの柔軟な力制御や長期的な学習能力の強化が求められた。

最後に、新たな技術課題として、ロボット基盤技術の遅れを克服すること、身体性知能の深化、実世界への適応とスケーラビリティの確保が重要であることが確認された。また、社会・産業面での課題として、産業界との連携不足、コミュニティ形成と研究環境の強化が求められた。

今後の方向性として、「追いつく」だけでなく、「新たな価値を創出する」視点への転換が求められ、技術開発だけでなく社会実装を見据えた産学官連携の強化、長期的な研究ビジョンと持続可能なコミュニティづくりの推進が議論された。

目次

1	趣旨説明	1
2	第一部：実世界で適応的に動けるフィジカルAIの開発	3
2.1	実世界で適応的に動けるフィジカルAIの開発 - ヒューマノイドの視点から	3
2.2	ロボット基盤モデルの構築に向けて	8
2.3	「フィジカル領域の生成AI基盤モデルに関する研究開発」におけるロボット基盤モデル	13
3	第二部：身体性に基づく知能の解明に向けた研究	17
3.1	これまでと最近、そしてこれからの認知ロボティクス研究の取り組み	17
3.2	制御と学習の統合による再現性の高い動作生成モデル	23
3.3	強化学習を通じた知能の解明に向けて	29
4	第三部：研究開発エコシステム	34
4.1	研究開発エコシステムとしてのロボカップ	34
4.2	現場・現場作業で利用できるPhysical AIを目指して	39
5	総合討議	45
付録	ワークショップ開催概要	51

1 | 趣旨説明

茂木 強¹ (科学技術振興機構)

JST研究開発戦略センター（CRDS）は、科学技術に求められる社会的・経済的なニーズを踏まえ、科学技術の現状を俯瞰し、国として重点的に推進すべき研究領域や課題、その推進方策に関する提言を行っている。この度、この活動の一環として、AIとロボティクス分野の進展において今後重要となるであろう、フィジカル空間での影響力を持つAI（フィジカルAIシステム）に関する研究開発課題とその方向性について議論を行うワークショップを開催する。

フィジカルAIシステムとは、物理的環境と直接相互作用し、人間のように柔軟かつ適応的にタスクを遂行する能力を備えたAIロボットを指す。このシステムは、サイバー空間で成果を上げてきた従来のAI技術とは異なり、実世界での課題解決に向けた新たな価値を創出することが期待されている。

基盤モデルの出現によりロボット研究が大きく変化している。その変化に対応するための研究開発課題の検討を行ってきた。CRDSは2年前に「リアルワールド・ロボティクス」と題した戦略プロポーザル²を提出し、「開かれた環境に柔軟に適応するロボティクス学理基盤の創出」という提案を行った。このプロポーザルの中身は、基礎研究、社会経済的影響の事前評価、オープンプラットフォームの構築、競技会型の研究開発の活用といった内容であった。しかし、提案の直後にChatGPT 3.5といった生成AIが登場し、状況が大きく変わったため、特に基礎研究の部分を大きく見直す必要が生じた。

CRDSは、物理的な身体を獲得したAIをフィジカルAIと称し、その進化の方向性を3つのビジョンとして提示した（図1-1）。タイプPは多様で複雑な実世界タスクの遂行、タイプAはいろいろな場での活躍を、タイプHは人間との協働・分業による共進化を目指すロボットである。これら3つのビジョンに基づき、どのような研究が行われているかを整理し、解決すべき研究課題として横断的にまとめた。特にタイプP、A、Hに関連する課題として、多様な実世界タスクに対応できる能力の向上、行動範囲の拡大、安全性の確保が挙げられる。



図1-1 フィジカルAIシステムの発展ビジョン

- 1 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 システム情報科学技術ユニット フェロー
- 2 CRDS-FY2022-SP-02 戦略プロポーザル「リアルワールド・ロボティクス～開かれた環境に柔軟に適応するロボティクス学理基盤の創出～」2022年8月

これら3つの方向に横断的な研究開発課題を、実世界で適応的に動けるフィジカルAIシステムの構築、身体性に基づく知能の解明、および、安全なフィジカルAIの実現の3つに整理した（図1-2）。まず、実世界で適応的に動くために特にAIソフトウェアやデータ基盤が重要である。また、身体性に基づく知能については、ロボット開発においてエンジニアリング的アプローチが多い中、身体性そのものを正面から見つめる基礎研究が特に重要である。最後に、人間と安全に協働するフィジカルAIの開発は、人間が信頼できるシステムの構築を目指すものである。

これらの研究課題に対するアプローチは多岐にわたる。本日のワークショップに先立つ有識者インタビューで多くの専門家の意見を反映してリストアップした。多くの重要な課題が存在している。

解決すべき課題と中期的目標の検討	
解決すべき重要な研究開発課題（基盤となる研究例など）	5年後、10年後の達成目標の例
<p>①実世界で適応的に動けるフィジカルAIの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ロボット基盤モデル（LVAモデル） ● データセット（RT-X, HSRT-X） ● 模倣学習、強化学習 ● 機械学習に適したプラットフォーム 	<ul style="list-style-type: none"> ● 実世界で動作する高速・軽量なロボット基盤モデル ● ロボット用基盤モデル構築のためのマルチモーダルな学習データベースの整備（収集用プラットフォーム、人の行動データを含む） ● 人および複数ロボットの協調動作
<p>②身体性に基づく知能の解明に向けた研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 二重過程理論（集合的予測符号化） ● 予測符号化理論（能動的推論） ● 世界モデル ● 認知発達ロボティクス 	<ul style="list-style-type: none"> ● 多様なロボットの身体に適応可能な汎用的なロボット用基盤モデル ● 複雑な現実タスクを遂行可能なロボット基盤モデルと制御の統合 ● ロボット基盤モデルに適した効率的な推論システム
<p>③人に安全なフィジカルAIシステム</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Human Machine Teaming ● 安全な強化学習（Safe RL） ● オープンワールドにおけるAIの研究 ● ロボットの安全に関するガイドライン 	<ul style="list-style-type: none"> ● 人間の意図を読み取るソーシャルインテラクション ● 想定内を極大化し想定外を検出可能なリスク低減システム ● 実世界で役立つロボットを目指した現実・現場チャレンジ ● 安全ガイドラインのアップデート提案

図1-2 解決すべき課題と中期的目標の検討

本日のワークショップでは、前半で、フィジカルAIシステムが多様なタスク環境に適応するための基盤モデルの構築、身体性知能の解明に向けた基礎研究、人間との協働作業における安全性や信頼性の確保といった論点についての最新動向を共有する。後半は、総合討議として、実世界タスクの遂行能力の限界とその克服、身体性知能の理論的進展と実践的応用、人間とロボットの相互作用に関する社会的・倫理的な課題、さらにAIとロボティクスを包括する研究コミュニティの育成について、参加者が知見を共有し、活発な議論を行う予定である。

2 | 第一部：実世界で適応的に動ける フィジカルAIの開発

2.1 実世界で適応的に動けるフィジカルAIの開発 - ヒューマノイドの視点から-

河原塚 健人³（東京大学）

自分は筋骨格ヒューマノイドのような生物模倣型ヒューマノイド、生物型の制御、ヒューマノイドに関する学習型の制御、基盤モデルなどを研究しているが、今回は一般的なヒューマノイドの話をする。われわれは多くのヒューマノイドを扱ってきた。一例として、ライフサイズヒューマノイドであるPR2がサブウェイにサンドイッチを買いに行くプロジェクトがある。このように人間と同じ環境で動けるロボットを製作し、制御を開発している。また、人間よりも力が強いロボットを製作し、ハイパワーヒューマノイドとしてテニスやバッティング、パンチ、スケートなど、いろいろ動かしてきた。さらに変わった方向としては、Aerial/Modularということで、ドローンと中小型のヒューマノイドを組み合わせて動くロボットや、筋骨格ロボットという生物模倣型のヒューマノイドを研究してきた。私はここにある全てのヒューマノイドを動かした経験があるが、特に筋骨格ヒューマノイドをメインとして扱ってきた。

日本のヒューマノイドと言えばおなじみのASIMOがある⁴。久しぶりに見ると、非常に速いスピードで歩き、滑らかに動き、さまざまなことを行う様子は今見てもすごいものであると実感する。もちろん、その他にも早稲田のWABOT-2というピアノを弾くロボット、産総研のワールドロボティクスに出展されたHRP-2やHRP-4C、東京大学情報システム工学研究室のKengoroなども存在する。このように、日本はヒューマノイドの分野で一定の地位を占め、多くのヒューマノイドが造られてきた。

それが2024年はどうなっているかというと、日本のヒューマノイドは一つも存在しない状況である。<https://www.voronoiapp.com/Innovation/Current-Generation-Humanoid-Robot-Comparison-1098>にある2024年のヒューマノイドロボットは、国別に見ると、米国、ノルウェー、シンガポール、カナダ、中国などが名を連ねており、米国の企業が作成した資料なので米国が多い。しかし実際には中国のヒューマノイドが最も多く動いているように思う。このように米国と中国が席巻する状況が現状である。

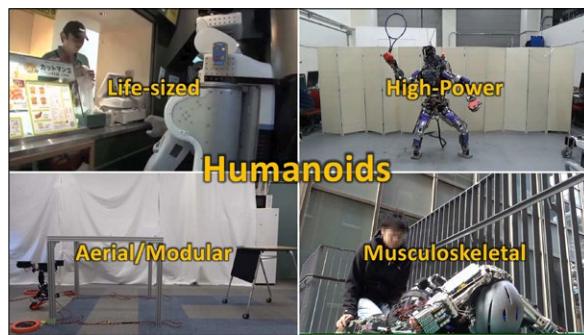


図2-1-1 開発してきたヒューマノイド

3 東京大学大学院 情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻 特任助教

4 アクティビティ「ヒューマノイドロボットASIMO実演」
<https://www.youtube.com/watch?v=hCM2LuuFUIU> (2025年2月5日アクセス)

最近はヒューマノイドの動画がほぼ毎週のように更新されている。例えば、Unitree G1が走っている⁵動画を見ると、見たことのないような動きをする。またちょっと前だが、Boston DynamicsのAtlasがパルクールをする動画も公開された⁶。Atlasはヒューマノイドであるが、強化学習では実現困難なほど高度な動きを見せている。この時はMPC（モデル予測制御）で制御していると思われるが、そのような制御技術を駆使してこれだけの動きを実現している。Atlasは油圧駆動であったが、現在は引退し、一般的な電動モータに移行している。また、制御技術はMPCも使っているが、かなり強化学習に移行している。ヒューマノイドの技術が徐々に変化しているという状況である。TeslaのOptimusも⁷一見大したことないよう見えるが、派手なロボット化に比べて、地味でつまらなく見えるマニピュレーションにおいて高度な技術を駆使している。人とのインタラクションも基盤モデルを利用して実現できるようになりつつある。

なぜ突然ヒューマノイドなのかということだが、これにはさまざまな技術の後押しがあることは間違いない。主に四つの要因が挙げられる。扁平型大出力モータの進化、強化学習によるロボット化の進化、模倣学習によるマニピュレーションの進化、そして基盤モデルと人型ロボットの親和性である。

2

の開発による実世界で適応的

なぜ突然ヒューマノイドなのか？

様々な技術の後押し

- 扁平型大出力モータの進化
- 強化学習によるロボット化の進化
- 模倣学習によるマニピュレーションの進化
- 基盤モデルと人型ロボットの親和性

10

図 2-1-2 なぜ突然ヒューマノイドなのか

まず一つ目は扁平型大出力モータの進化である。従来はハーモニックギアを用いて300対1に減速することで、非常に弱いモータを用いていたが、現在では扁平型の大出力モータが登場している。このモータは基本的に1段の遊星減速機だけを付け、柔らかくしてモデル化しやすくしているため、強化学習を用いた動作が非常にスムーズに行えるようになった。これが非常に大きな進化であり、かつては極めて高価だったモータがSteadywinでは1万円以下、Xiaomiでは3万円程度で入手できるようになった。今やmaxonなどのモータはギア無しで10万円程度するが、この分野での進化は非常に大きいと考えられる。

そして先ほど述べた、強化学習によるロボット化の進化についてであるが、これは元々ETHなどで行われていた4脚ロボットと強化学習の組み合わせ⁸が最初である。このような強化学習の進展と、それをロボット

5 https://www.youtube.com/watch?v=8_iMPkSdR3U (2025年2月5日アクセス)

6 <https://www.youtube.com/watch?v=tF4DML7FIWk> (2025年2月5日アクセス)

7 <https://www.youtube.com/watch?v=DrNcXgoFv20> (2025年2月5日アクセス)

8 <https://www.youtube.com/watch?v=PjWvf90l4cg> (2025年2月5日アクセス)

トに実装しようとするsim2realの進展によって、ロコモーションの技術がうまく実現できるようになってきた。どうやったらこんな動きを作れるのか分からぬような動画⁹も公開されているが、この分野も大いに進化している。

もう一つ、双腕ロボットによる模倣学習を用いたマニピュレーションの進化についてである。これは前述のロコモーションと比べると、地味でつまらなく、簡単そうに見えるかもしれないが、ロボットにとってはかなり難しいタスクである¹⁰。日常生活で行うような正確な動作や、意図を持って何かをすることは、ロコモーションに比べてはるかに難しい。こうしたマニピュレーションも、データを大量に集めて学習させることで、うまくいくようになってきたという進展がある。

極め付きは、最近のフィジカルインテリジェンス社¹¹である。米国の西海岸で使われているALOHAに似たようなタイプのロボットを使用し、布を畳んだり重ね合わせたりするような動作ができるようになってきた。この動画を最後まで見たことがある方も多いと思うが、動画は一部を切り取ったのではなく、一連の動作を完全に行っている。もちろん多くの失敗を繰り返しているが、それでも一連の全ての動作ができるようになっている。

最後は基盤モデルと人型ロボットの親和性についてである。オープンAIやChatGPTのようなものと人型ロボットをうまく組み合わせて利用することができる。基盤モデルはほとんどのデータが人間のデータから取られており、人間が映っていたり、人間視点のデータが使用されたりしている。人間には右手・左手、右目・左目、右足・左足があり、基盤モデルに含まれる身体性はそもそも人間のものが主であるため、それに適したもののが人型ロボットになる。現在発展している基盤モデルと人型ロボットの相性は非常に良いと言える。

すべてがヒューマノイドのために！

- ・扁平型大出力モータの進化
- ・強化学習によるロコモーションの進化
- ・模倣学習によるマニピュレーションの進化
- ・基盤モデルと人型ロボットの親和性

ここ数年で進化した技術のすべてが、
ヒューマノイドという分野を後押ししており
今やらなかつたらいつやるのか状態

17

図2-1-3 すべてがヒューマノイドのために

まとめると、全てがヒューマノイドのために存在するということである。先ほど説明した四つの話は全てヒューマノイドを実現するために生まれた技術である。ここ数年で進化した技術の全てがヒューマノイドという分野を後押ししており、今やらなければいつやるのかという状況である。

9 <https://www.youtube.com/watch?v=X2UxtKLZnNo> (2025年2月5日アクセス)

10 <https://www.youtube.com/watch?v=1EAsn71O9yA> (2025年2月5日アクセス)

11 <https://www.physicalintelligence.company/blog/pi0> (2025年2月5日アクセス)

一方、日本が現状遅れを取っている理由として、まず予算が少ないという問題がある。ヒューマノイド1台を製造するためには、以前は3000万円から4000万円ほどの予算が必要であったが、そのような予算を確保できる研究室が日本にはほとんど存在しなかった。また、ヒューマノイドを製造するためには多くの人材が必要であり、予算の確保が難しいという問題もある。しかし最近ではモータが安くなり、1000万円ほどの予算でヒューマノイドを作れるようになってきた。この程度の予算を出せば製造が進められる状況になってきた。

また、誰かがやったものと同じことを取り組まない姿勢が非常に問題だと思っている。日本の研究を見ると、誰かが最初にやると、それはすでにやられているから独自の路線を行こうとする傾向がある。そのために、4脚の強化学習に取り組んでいる人がほとんどいない状況がある。もはや私一人ではないかと思うほど、誰もやっていない。新しく興った技術に追いつこうとせずに、別のことを見ることが多い。

模倣学習については、日本でも取り組んでいる人がいるが、大規模なモデルとなると、ほとんど存在しない。ヒューマノイドの分野でも、日本は元々強かったのに、その勢いに乗ることができず、徐々に取り組む人が減っているという印象を持っている。

では、どうしたらよいのかということである。私が言いたいのは「歴史をなぞる勇気」である。誰かがやったことだからと避けるのではなく、それを一度しっかりと再現し、その上で追い越すことが非常に重要である。新しい技術に追いつき、それを超えるためには、この姿勢が不可欠であると思っている。

もう一つ重要なのは、プラットフォーマーになることである。現在、多くの研究が中国のモータやハードウェア、米国が作ったALOHAなどに依存している。しかし、自らがプラットフォーマーになると、ベースとなる技術はみんなが使い、依存することになるので、非常に強力になる。自分たちで作り、自分たちで発信し、販売することが重要である。一番重要なのは、国産モータを作ることである。ロボットの最下層を陣取ることの重要性は非常に大きいと考えている。

どうしたら良いのか？

・歴史をなぞる勇気

- ・そこに面白いものがたくさんある
- ・誰かがやっているからやらないはダメ

・プラットフォーマーになる

- ・みな中国のモータ・ハードウェア・ALOHAなどに頼っている。
- ・自分たちで作って自分たちから発信する・売る
- ・国産モータ！ロボットの最下層の重要性

・もちろん日本独自路線だって面白いところはある

- ・ワイヤ駆動ロボット・ソフトロボット・記号創発・予測学習などなど
- ・並行してやらないといけない。どこかで結びつく。

19

図2-1-4 どうしたら良いのか？

もちろん、日本独自の路線にも面白い部分がある。われわれであれば、ワイヤ駆動やソフトロボット、谷口先生の記号創発、尾形先生や境野先生の予測学習などがある。これらを並列して進め、最終的に結びつけることが重要である。

私自身もオープンハードウェアを開発し、歴史をなぞるために4脚ロボットを作り、強化学習を行い、そのハードウェア・ソフトウェア・学習環境をオープンソースとして公開することで貢献している。この先もさまざまなハードウェアを開発していく所存である。こうした話を進めつつ、いろいろなロボットを使ったロボット基

盤モデルなどもJST CRONOSで進めている。

【質疑応答】

Q : ハードウェアやモータを作らなければいけないと思うのだが、若い人を見ていると、発表者だけがハンダを握ってモノ作りをしているイメージがある。どうやつたらそういった活動が広がるだろうか。

A : 個人的には私だけとは思わない。確かにハードウェアを最初に造る際には非常に大きな障壁が存在する。しかし、私はその障壁を減らすことが重要だと思っている。現在、オープンソースとしてさまざまなハードウェアを公開しているのも、研究や教育の一環として、多くの人々にハドルを下げる取り組んでもらいたいと考えているからである。また、今日のような話を発信して広め、取り組む人を増やす必要があると感じている。それには時間がかかるが、この1年ほどが非常に重要な時期であるとは思う。ただし、難しい課題であることは変わらない。

Q : 確かにハードウェアも手掛けた方が良いし、モータもやはり自作した方が良い。しかし、ヒューマノイドに関して企業が取り組んでいたにもかかわらず中止した理由は、採算が取れないからであると思う。ハードウェアを製造する際には特に利益を生むことが重要であるが、企業が関心を示しそうな利益を生むアイデアは存在するのか。

A : その通りである。これに関しては、私自身も得意な分野ではないため、多くの人々と議論を重ねたいと考えている。

2.2 ロボット基盤モデルの構築に向けて

松嶋 達也¹² (東京大学)

私は、今後ロボットが社会に普及するに当たり、何をすべきかを考えている。社会にロボットがなかなか入っていかない原因を突き詰めると、世の中にロボットが無いことが原因であるという、卵が先かニワトリが先かのような状況になっている。この状況を打破し、なおかつ自律的に回り、自転するようなシステムを作ることがゴールだろうと考えている。それはスケーラビリティの話であり、スケーラビリティで動いてきている情報科学を、いかにロボティクスやロボットラーニングに適応できる形にするか、あるいはスケーラビリティのあるシステムをどう作るかが大事だというのが私の意見である。その方法は幾つか考えられるが、特に汎用的なロボットが実用に供される時には、ロボット単体で動けるわけではなく、遠隔操作ではないにしても、誰かが見ていることが必要である。できるだけ人間の監視下で多くのロボットを展開し、それによって多くのデータを集め、そのデータを使ってさらに性能を向上させるようなスケーラビリティのあるシステムを作ることが一番大事であると考えている。

2

の開発による実世界で適応的

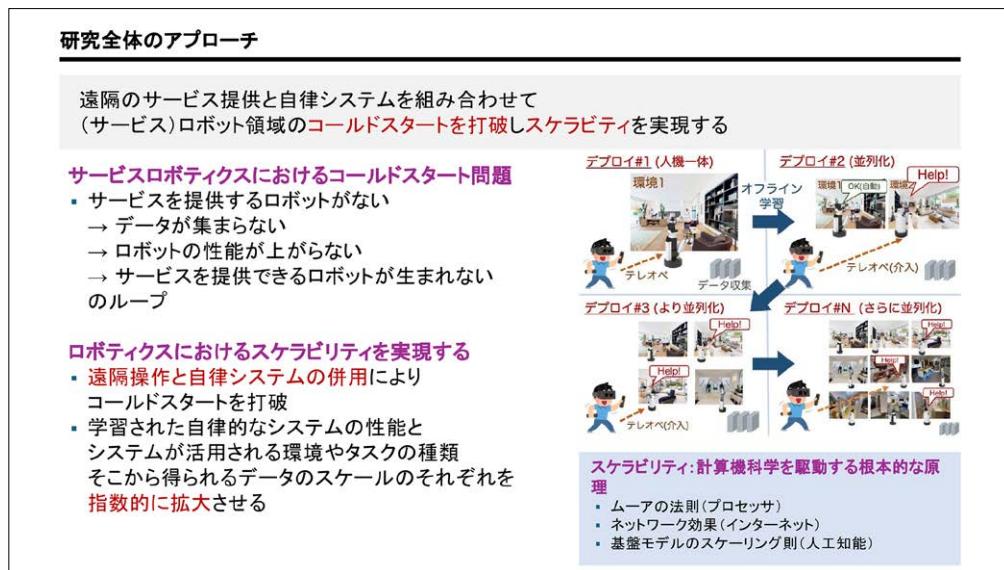


図 2-2-1 研究全体のアプローチ

最近、ロボットラーニング領域では基盤モデルの話が非常に多く出てきており、日本ロボット学会などでもワークショップを開催している。ロボット領域でも大規模データやモデルを活用した研究が非常に増えてきている。研究の内容を大まかに分けると、既存のインターネットスケールで学習されたLLM (Large Language Model) やVLM (Visual Language Model) をどう活用するかということと、ロボットのための基盤モデルをどのように構築するかということの二つである。さらに、これらの研究を実施するに当たりデータの問題が重要となるため、どうやってデータを収集するかというトピックが多く研究されている。

Conference on Robot Learningというロボット学習の国際学会がある。2023年頃から突然基盤モデルの研究が増えてきており、これは世の中の需要に合わせたものである。2024年に開催されたミュンヘンでの

学会に参加したが、開催時期がPhysical Intelligence社が例の動画¹³を公開した1週間後だったため、参加者の多くがPhysical Intelligence社について話しているという状況であった。2024年も2023年同様に多くの研究が基盤モデルに関するものであり、単に基盤モデルを使用するだけでなく、いかに適応させ、失敗からリカバリーさせるか、End-to-Endモデルのロボット制御モデルを模倣学習などでどのように構築するかという研究が非常に多くなされている状況であった。

基盤モデル自体は単一のモデルであり、問題に合わせるコストが低く、いろいろなタスクを解け、モデルや計算量がスケールするものである。言語以外のモダリティも活用できるという期待があるモデルである。こういった性質は機械学習モデルとしてはかなり使いやすく、ロボットとの親和性も高い技術である。ロボットの場合、エッジで学習することはほとんどできないので、何らかの事例が入ってきて適応するとか、いろいろなところから上がってきたデータをそのロボットでファインチューニングして利用するというシステムになってくると想像できる。そういうシステムになるとすると、基盤モデルの特徴は非常に有用である。基盤モデルでスケーリング則が成立していることは、先に述べたスケール可能なシステム、ロボット設計、ロボットシステム設計、サービスデザインと大きく関わってくる。ロボットは当然のようにマルチモーダルなシステムであるため、基盤モデルと相性がいいと考えている。

トピックを三つ紹介する。まず、基盤モデルをロボットで活用する動きである。世界的な事例としては、まだ非常に初期段階であるが、LLMの行動生成能力をロボットの制御に使うというものがある。ロボットのAPIを用意しておいて、自然言語からロボットの動作を用意したAPIの組み合わせとして生成するというものである。例えば、Code as Policiesという研究が2023年に発表されている。2年前のものであるため少し古典になりつつあるが、注目されている。他の活用方法としては、強化学習においてLLMを使って報酬関数を実現することで、sim2real（シミュレーションから実環境へ）の技術を進展させるという研究も出てきている。さらに、VLMを使ってセマンティックマップを作り、自然言語でロボットに指示するシステムを作るという研究も行われている。

トピック1: LLMを始めとする基盤モデルをロボットで活用しようとする動き

LLMや基盤モデルのロボティクスでの代表的な使われ方

A) ロボティクスにおける LLMの活用

- 言語モデルを方策として利用
- 言語モデルを報酬関数として利用

B) 複数の基盤モデルを統合してシステムを構築

- LLMとVLMを組み合わせてマルチモーダルに対応

図2-2-2 基盤モデルをロボットで活用する動き

われわれの研究室でも、基盤モデルをRoboCup @ Homeの生活支援タスクに利用し、環境認識や音声認識、セマンティックマッピングなどの領域を言語としてつなぐ研究をしている。2024年のICRA（International

13 <https://www.physicalintelligence.company/blog/pi0> (2025年2月5日アクセス)

Conference on Robotics and Automation) で発表したのは、失敗してもリカバーできるようなプランを作成する研究である。言語を使用することで、なぜ間違えたかをChain of Thoughtのように解析し、失敗からリカバーするプランを出せるという特徴がある。また、言語によってさまざまなモダリティがつながるという特徴もある。

二つめのトピックは、ロボット基盤モデル構築の動きである。大規模なモデルやデータを用いてロボットの模倣学習を行うEnd-to-Endモデルの研究がある。画像や他のセンサーの値を入力とし、自然言語に基づいてどのような動きをロボットがすべきかを学習するVLA (Vision-Language-Action) の研究が進んでいる。RT-1やRT-2が特徴的な事例である。RT-1では、Googleは13万モデルのデータを収集し学習することでVLMのPaLM-Eを学習した。この成果を活用することで、RT-2のような100億パラメタ級のVLAモデルを構築する研究が進んでいる。Googleは1年半ほどかけてオフィスにロボットを置いてデータを集めましたが、このようなデータ収集は一企業だけでは難しいため、クロスドメインの公開データセットを用意しようという研究も進められている。

その極端な例がOpen X-EmbodimentでRT-Xと言われているものである。世界21研究機関からさまざまなデータを集め、それを同じフォーマットに変換し、学習したモデルを各研究室で提供し、バリエーションが作れるようにする取り組みである。いろいろな工夫が凝らされているが、ロボットの形態に対してある程度汎化するモデルが得られた。個別利用したいロボットに対してある程度のデータを集めると、ランゲージのスキルなどを学習できることが示されているのがRT-Xの成果である。

これを受けて、いろんなドメインでいろいろなロボットを使ってデータを集めようという流れが増えており、ALOHA¹⁴やTRIのUMI¹⁵、GELLO¹⁶など、さまざまな提案が行われている。シミュレーションも高速化しつつあり、sim2realの研究、特に四足ロボットのロコモーションにおいて進展している。

sim2realの研究自体は2018年頃から行われているが、最近ではNVIDIAがGPUを活用したシミュレーションのフレームワークを開発し、その上で使いやすいレイヤーが提供され、広く利用されるようになってきている。それを受けたロコモーションの研究も盛んに発表されている状況である。

トピック2:ロボットにおける基盤モデル構築に向けた動き

A)大規模モデル・データによる方策・シミュレータの学習

- おもにデータの集め方の工夫が提案されてきた

B)高速でリアリスティックなシミュレータの活用と実世界への転移

- シミュレータ・レンダラの開発によりエコシステムが整ってきたため
大規模で汎化性能の高い方策獲得・Sim2Realが現実的に

図2-2-3 ロボットにおける基盤モデル構築に向けた動き

14 <https://mobile-aloha.github.io/> (2025年2月5日アクセス)

15 <https://umi-gripper.github.io/> (2025年2月5日アクセス)

16 https://wuphilipp.github.io/gello_site/ (2025年2月5日アクセス)

国内でもVLAの研究や開発を進めており、HSRT-XというHSR(Human Support Robot)コミュニティー(トヨタのロボットHSRを使用する30拠点の研究機関)が協力して1年半ほど前からVLAを開発している。収集したデータを基に学習されたモデルを共有し、みんながロボットを使いやくすることを目指している。現在、500時間を超えるデータが集まっており、それを使ってロボット基盤モデルの構築を進めている。元々、OctoというOXE(Open X-Embodiment)から出た数億パラメタ級のVLAを学習していたが、最近はπ0の再現実装を行い、30億パラメタ級のVLAの再現や改善を進めている。ある程度の進展が見えている状況である。こうした取り組みを進める中で、データ収集のインセンティブ設計や、オペレーションコスト、GPU調達の難しさなどの課題が浮き彫りになっており、ひとつずつ解決を目指している。

(松尾研事例) HSRTX: モバイルマニピュレータを用いたロボット基盤モデル

モバイルマニピュレータHSRを用いたロボット制御のend-to-endモデルをユーザコミュニティと連携して構築

- HSRはiHR研究専門委員会のもと
国内30拠点以上で利用される
- ロボット学習用の大規模な
統一データセットの構築
- モバイルマニピュレーションの
汎用性の高い制御モデルを構築し
コミュニティ資産として共有を目指す

https://www.i-homerobotics.org/hsr_community

図2-2-4 国内のVLA研究開発

2
に動ける
実世界で適応的
の開発

三つめのトピックはGeneralist Robot関連のスタートアップの動向である。河原塚先生も紹介していたが、最近はGeneralist Robot関連のスタートアップが米国や中国を中心に多く出ており、産業領域や家庭環境、サービス領域などで注目されている。1XやFigureAIのようなヒューマノイド関連スタートアップも登場しており、ハードウェアの開発観点でも多くの動きが見られる。こうした状況の中で、われわれは今後どうするべきかを考えていく必要があると考えている。

最後に、図2-2-5に示す三つの点について議論が必要と考えている。データや計算リソースの観点からVLAを作成できるのはごく一部の研究機関に限られていることがある。最近はスタートアップが米国や中国を中心にしており、Physical Intelligence社などが自分たちで1万時間のデータを収集したと言っている。そのため、データとモデルの独占が加速していると感じている。この中でどう戦っていくのかを考える必要がある。また、汎用ロボットのスタートアップを見ていると、最終的には自動車製造系と実世界サービス系が主要なターゲットになるとを考えている。自動車の分野ではTeslaはもちろん、NVIDIAとBMWが組んでいたり、Google、NVIDIA、Foxconnといった企業が取り組んでいたりしており、特にFoxconnは日産を買収するのではないかという報道も出ている。このため、自動車製造系で汎用ロボットを使用することを考えているプレイヤーが多いのではないだろうか。実世界サービスの分野では、Physical Intelligence社やTelexistence社などの事業が関連してくると思う。

議論

データ・計算リソースの制約からロボット基盤モデルを作っているのは
(他の基盤モデルの例に漏れず)ごく一部の研究機関

- 限られた機関のみがマルチモーダルな基盤モデルを構築する知見を持つ
- 一部でオープン化の流れもある

ロボットを実世界で動かすという観点では、
ずっとロボティクスで議論されていながらも実現されてない側面も多い

- モデルの大きさ故リアルタイムの制御が難しい
 - 例: RT-2は「推論時に」複数のTPUを使って数Hzしか出ない
- 視野外の情報をきちんと扱えているのかは不明
 - Geminiとかだとlong-context扱えるはず...?
- 予測モデルの学習・利用の話はまだあまり出てきていない
 - リアルタイムな制御や視野外の情報の処理(統合)に関する問題を解決する方向の一つ

End-to-Endのモデルがどこまで制御に実利用できるかは未知な部分も大きい

- 学習の研究としてモデルを統一する方向なのは(おそらく)既定路線
- 推論や学習の効率化(スキルの学習との組み合わせなど)が必須では?
- 制御のIn-context learningはどの程度できる?
 - 問題設定上はほぼメタ模倣学習

図 2-2-5 議論のポイント

私はVLAに関する研究に携わっているため、その観点から説明することが多いが、現実的にはここ数年、この領域の価値の源泉はVLAを作成する人材、計算リソース、そしてモータにあると考えている。多くの汎用ロボットが中国からのブラシレスDCモータを輸入して製造されている現状が続くと、危うい状況になると懸念している。特に、GPUが戦略物資として指定されているなか、将来的にはモータの購入が制限される日が来る可能性もある。特に、4脚ロボットが軍事利用される例が出てきたり、近年のブラシレスDCモータはドローンのモータの系譜をくんでいたりすると、中国がモータの輸出に規制をかけた場合、日本での研究活動に大きな支障をきたす可能性があると危惧している。したがって、国産で安価なブラシレスDCモータから開発を始めることが重要であると考えている。

【質疑応答】

Q：実世界サービスロボット領域が主要ターゲットという話があったが、どのあたりが有望と考えているか。

A：基本的には小売りとかが最初に入ってくるだろうと思っている。

2.3 「フィジカル領域の生成AI基盤モデルに関する研究開発」におけるロボット基盤モデル

堂前 幸康¹⁷（産業技術総合研究所）

主催者から基盤モデルというお題を頂いているが、先ほどお話された松嶋先生とも最近よく話をしていて、ロボット基盤モデルは私にとっても最近の中心研究課題の一つである。

簡単に自己紹介すると、企業に10年間所属し、産業用ロボット向けのマシンビジョン等を中心に実用化してきた人間であり、専門分野はマシンビジョンである。ロボット応用でいろいろと評価いただき、今は産総研でロボット研究のチーム長を拝命している。

ロボットの基盤モデルで言えば、RT-Xなどが次々と世の中に衝撃を与えている。これまでのロボット研究と比べると、汎用的かつインタラクティブに、器用な作業をするロボットが実現しはじめている。データがたくさん必要であることがネックだが、今はオープンな体制によるデータ収集が進み始めていて、どこまでできるのかとの期待が高まっている。

先ほどの松嶋先生のご発表にもあったが、フィジカルなデータを集めるツールもかなり安価なものが出てきている、器用な手作業の模倣もできるようになりつつある。シミュレーションを使ったデータの集め方も非常に重要になってきており、仮想空間の中でのドメインランダマイゼーションが現実世界にもそのまま適用できる事例がでできている。データ空間が現実のデータ分布を包含するようなイメージである。ただし、それぐらいやると現実並みにコストかかることもある。

最近面白かったのは、コンピュータービジョン系のワークショップである Embodied AI Workshop¹⁸、CVPRというコンピュータービジョンのトップカンファレンスのワークショップでの話である。1Xテクノロジーという会社が視覚とテキスト情報から動作を生成する大規模な動作生成の基盤モデルを作っていて話題になっている。タオル等の柔軟物を畳んだり、産業用途を想定した箱詰めのようなタスクに取組んでいる。彼らがワークショップで言っていた面白かったのは、視覚や言語のモデルに比べ、ロボットはデータスケールが大きくなっても学習がうまくいかないということであった。これは色々な理由があっての話なのだが、例えばパラメーターを増やしても、データを増やしてもうまくいかない懸念が研究界隈で出てきている。



図 2-3-1 データ規模と損失の関係

17 産業技術総合研究所 インダストリアルCPS研究センター オートメーション研究チーム長

18 <https://embodied-ai.org/cvpr2024/> (2025年2月10日アクセス)

視覚や言語の基盤モデルでは間違いなくラージスケール化の効果は出ているし、π0などの先行研究でもインパクトが出ているのは間違いない。しかし単純なラージスケール化は効率や能力的な限界もあるだろう。GAFAはデータドリブンなAIを強く推進するため、必要な電力の確保に原子力発電所を作ることまでやり始めている中で、日本がそれと直接戦っていくのはすごく難しいだろう。

ただし、例えばモデルの限界を知り、応用や改善を考えていく上では、ロボットの基盤モデルを国内で作ることは重要だと思っており、そういうことを松嶋先生とも話しているところである。さらに、その先の方法論も考えないといけないだろう。視覚や言語ではスケール化の恩恵を受けているが、ロボットのようにたくさんのモダリティーがあって、データ収集も難しいものに関しては、スケール化以外の別の軸も色々と考えるべきだろう。

産総研では経産省からフィジカル領域の生成AI基盤モデルの研究開発という予算を昨年から頂いている。そこではいろいろなモダリティーのデータから動作生成する基盤モデルを構築し、最終的には製造業や医療などにも転用するという大きな絵を描いている。ロボット向け基盤モデルにおいては、モデル構築の方法論やデータ収集の方法論が重要であると考えていて、後ほど紹介させていただく予定である。

われわれは製造物流や店舗等において、実証から応用までの可能性があると考えている。その先にはオフィスや一般家庭もあると思っている。

先日プレスリリース¹⁹したのは、産総研が企業を含めたオープン体制で、計算資源のABC1や後ほど紹介するフレームワークを使って産業応用向けの基盤モデルを作るという内容で、多くの反響をいただいている状況である。

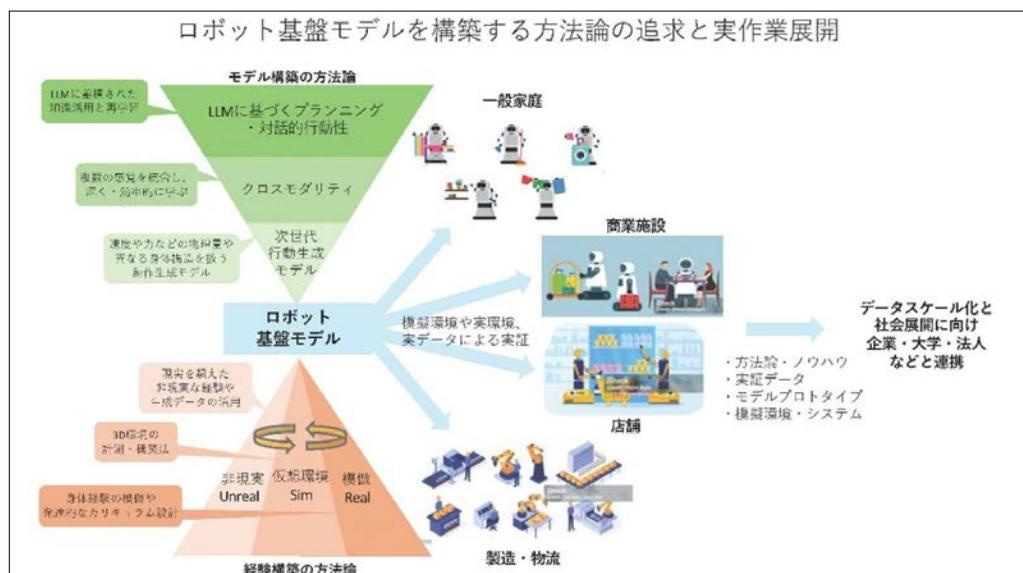


図 2-3-2 産総研のロボット基盤モデルに対する取組み

産総研では、ALOHAという双腕ロボット（マスターフォロワーシステム）をたくさん用意し、色々なタスクのデータを収集している。また、コンビニを模擬した実験環境でも別ロボットを使ってデータ収集している。他にオープンなソフトウェア整備を始めている。基盤モデルのベースとなるモデルアーキテクチャーを比較することは難しいので、複数のベースライン手法を整理し、仮想環境の中に様々なタスクを準備し公開してい

19 https://www.aist.go.jp/aist_j/news/pr20250123_2.html (2025年2月10日アクセス)

る²⁰。トランスフォーマー系のモデル、生成AI系のモデルから、早稲田大学の尾形先生の深層予測学習モデルなども加えている。

技術の方法論としてどのようなものがあるかについてだが、一つはカリキュラムの設計あるいは認知発達が一つポイントではないかと考えている。最初の河原塚先生のご発表でもあったが、4足歩行はかなり学習がうまくいくようになってきている。データをシミュレーションで生成するのだが、人間が段階的に学ぶようなカリキュラムを設計してあげると学習が効率的に進んでいく。

阪大の原田先生と一緒にやっている話であるが、ペグインホールという穴締め作業でも、はめ合いの精度や部品のサイズを段階的に難易度を上げていくと学習の効率が良くなっていることが見えてきている。

また尾形先生と一緒にやっている話であるが、認知発達のようなものが動作生成の基盤になるだろうとわれわれも考えている。ここではモーターバブリングという「乳幼児の身体行動を獲得するためのランダムな動作」をロボットで生成してプリトレーニングとリハーサルに活用すると、タスクの学習効率が上がっている。

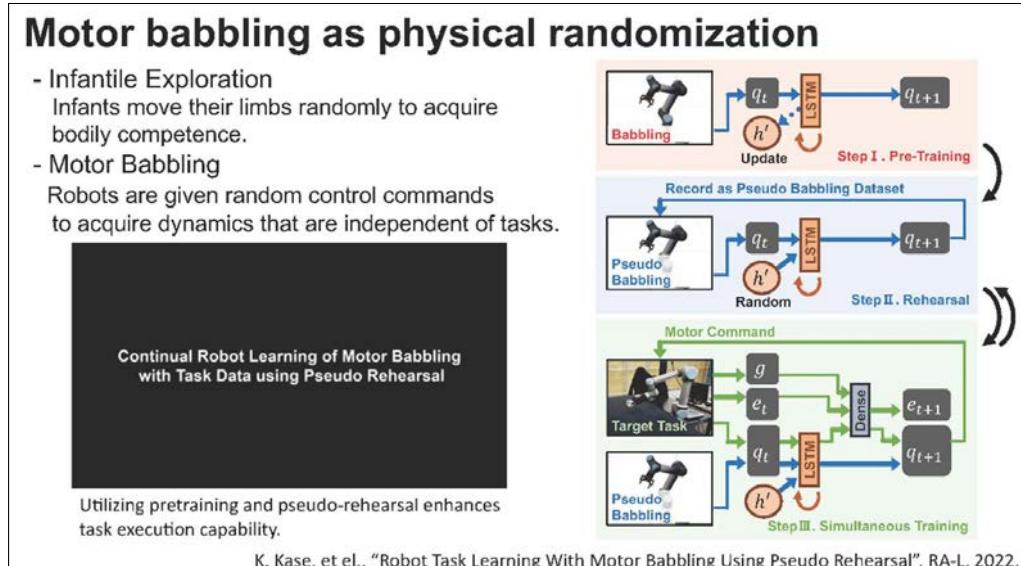


図 2-3-3 モーターバブリングによる学習の効率性向上

クロスモーダル、マルチモーダルが今、世界でも非常によく言われているが、もう少し身体的モダリティーを使っていく必要がある。例えば触覚や力覚の研究が得意な日本の研究者にはチャンスがあるのではと思う。

われわれのところでは、視覚から柔らかさを想起するモデルの研究に取り組んでいる。マシンビジョンの研究者として、視覚をベースとしたクロスモーダル研究は興味深い。シミュレーション上で生成した視覚データに仮想的に柔らかさのリファレンスを与えると、現実のセンサーデータからの視覚からシーン中のオブジェクトの柔らかさを想起できるようになる。こうした技術により、ロボットがつぶしてしまうようなものとか柔らかくて掴みにくいものを上手に掴んだり、対象物を取り囲む柔らかい周囲の物体を押しつぶして避けながら対象物を掴んでくれたりするようになる。

20 <https://github.com/isri-aist/RoboManipBaselines> (2025年2月10日アクセス)

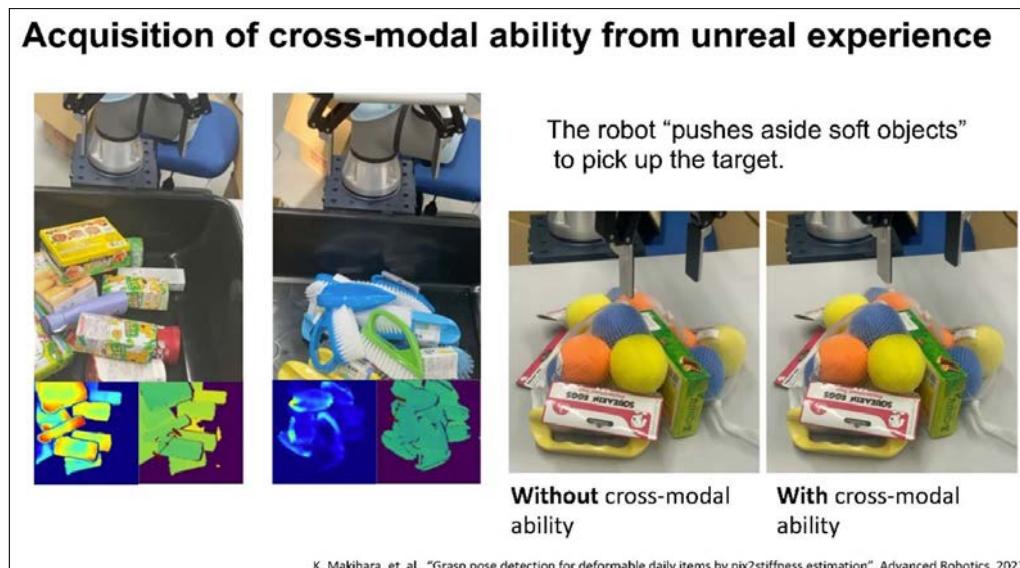


図 2-3-4 クロスモーダルを活用した動きの獲得

2

の開発による実世界で適応的
に動ける
第2部
AI

このように複数のモダリティーを使った経験をロボットが学習することで、基盤モデルを構築する際の効率性や器用さが増していくのではないかと考えている。

もう一つ。学習でシミュレーションを使っていくことはすごく大事なわけであるが、現実を超えた経験を活用するべきではないか。例えば生成AIは分かりやすい話で、これはある意味現実を模倣しているわけだが、1つの身体経験における画像、視覚的な情報を生成AIによって変えることで、一回の身体行為から何十回もの別なものをつかんだような経験を拡張するというイメージである。現実から少々離れたものからもAIは学習できることができが最近分かってきている。

これは産総研のわれわれも絡んでいる研究であるが、フラクタルで作った、あまり現実的ではない、現実の人工物ではないような3Dモデルを大量に恣意にランダムに置いて、ここに物体があるということをプリトレーニングで学習させる。プリトレーニングの成果を、例えば三次元点群の物体認識のモデルのプリトレーニングに使うと現実的なものではなくてもパフォーマンスが上がるということが見えてきており、これを使うことで、物体の端の時に現実のデータだけで学んだ場合よりも上手にピッキングできることが見えてきている。

現実での経験だけで作られた基盤モデルが、将来医療の現場で使われるときに、たくさん現実で執刀していれば安心できるわけであるが、シミュレーションの中で、現実にはレアな経験を獲得していれば、例えば心臓のバイパス手術における細い血管、現実ではめったに遭遇しないような細い血管のバイパス手術をシミュレーションで実践しておいてくれると、患者はもっと安心できる。こうしたところで、もう少し現実を拡張するという方向でシミュレーションや、仮想的なデータを使っていくことは面白いのではないかと思っている。

【質疑応答】

Q：製造業等の企業の中にはデータがあると言われているが、ロボットの基盤モデルの学習データについても、同様なのか。

A：正直言って、データはなかなか出てこない。しっかりしたデータをお持ちのところと繋がっていくのが一つだが、どちらかというと新しくデータを取りたいという話のほうが多い。産学がきっちり連携したプロジェクトがもっとあって、産側が深く入ってくることがすごく重要だと思っている。

Q：そうしたところを呼び込むための仕組みやアイデアはお持ちか。

A：データ基盤、フレームワーク等を用意していることが重要。あとはサイエンスとしての研究だけだと企業は興味を持たないので、実際のニーズとのバランスについて深く議論を重ねないといけないと思っている。

3 | 第二部：身体性に基づく知能の解明に 向けた研究

3.1 これまでと最近、そしてこれからの認知ロボティクス研究の取り組み

村田 真悟²¹ (慶應義塾大学)

身体性に基づく知能の解明に向けた研究に関する話題提供として、これまでと最近、そしてこれから取り組むべきと考えている自分の研究分野である認知口ボティクス研究について紹介する。

簡単に自己紹介する。現在は、慶應義塾大学に所属しているが、元々は早稲田大学に在籍しており、その時は菅野研究室に所属していた。当時、理研にいた谷淳先生（後にKAISTに移った）と一緒に研究を行っていた。その後、尾形哲也先生と共に研究を進め、独立してNIIで助教として活動し、現在は慶應義塾大学に在籍している。谷先生や尾形先生との研究に強く影響を受け、現在もそれらに基づく研究を行っている状況である。

私の研究のモチベーションは、すごいロボットを作りたいというよりも、人の知能や脳を理解することに興味があり、その知見をロボットに応用できたら良いというスタンスで研究を行ってきた。私の知能観としては、エージェントが最小限の計算原理を備えており、エージェント自身が環境や他者と相互作用を通じて経験やデータを得て学習した結果得られるものであると考えている。知能はトップダウンにデザインされるものではなく、ボトムアップに創発的に生じるべきものであると考えている。

このようなモチベーションの下、認知ロボティクスという研究に取り組んできた。最近はロボット学習や計算論的精神医学の研究にも取り組んでいる。認知ロボティクスのモチベーションは、人の知能や脳を理解することであり、一方でロボット学習のモチベーションは、応用的な視点で動けるロボットの知能を作ることである。最後に、計算論的精神医学のモチベーションは、自閉スペクトラム症や統合失調症などの発達障害や精神障害のメカニズムを理解することである。

これからいくつかの研究を紹介するが、そこで出てくるキーワードを最初に紹介する。まず、認知神経科学や理論神経科学の分野で提唱されている理論あるいは計算原理として、われわれは昔から予測符号化や自由エネルギー原理に興味を持って研究を行ってきた（図3-1-1）。

予測符号化とは、元々は脳の視覚情報処理に関する理論であり、脳がトップダウンに予測を行い、感覚がボトムアップに上がってき、予測と現実の誤差を最小化するように情報処理を行う理論である。最近は視覚情報処理だけでなく、運動の情報処理にも拡張されている。

自由エネルギー原理は、イギリスの Karl Friston が提唱した脳の計算原理である。これは変分あるいは期待自由エネルギーを最小化する枠組みであり、脳の様々な機能、例えば知覚、学習、行動などを説明する計算原理となっている。

キーワード
@ 認知神経科学・理論神経科学

予測符号化 [Rao & Ballard 1999]

- 脳の階層的情報処理の理論
 - トップダウンの予測とボトムアップの修正

自由エネルギー原理 [Friston 2010]

- 脳の計算原理
 - 変分・期待自由エネルギー最小化による脳機能（知覚・学習・行動）の説明

$$\mathcal{F}_t = D_{KL} [q(s_t) \parallel p(s_t)] - \mathbb{E}_{q(s_t)} [\ln p(o_t | s_t)]$$

$$\mathcal{G}_\tau(\pi) = -\mathbb{E}_{q(o_\tau | \pi)} [D_{KL} [q(s_\tau | o_\tau, \pi) \parallel q(s_\tau | \pi)] - \mathbb{E}_{q(o_\tau | \pi)} [\ln p(o_\tau | C)]]$$

2025/1/26
JST CRDS 科学技術未来戦略ワークショップ「フィジカルAIシステム」
5

図3-1-1 キーワード@認知神経科学・理論神経科学

さらに応用的な話として、最近私が興味を持っているトピックに世界モデルとプレイデータがある（図3-1-2）。世界モデルとは深層生成モデルの一種であり、例えばDavid Haの『World Models』という論文やHafnerのRSSMが有名である。これは外界のダイナミクスに関する表現を学習し、未来を想像することができる。

最後に紹介するのがプレイデータである。これはロボットを遠隔操作してデータを収集する方法であり、操作者が自分の興味や好奇心に基づいてロボットを操作し、連続的なデータを収集する。これにより、環境で有用なデータを効率的に収集することができる。プレイデータは多様性を持ちながらも無駄が少ないと特徴がある。

キーワード
@ 深層学習・ロボット学習

世界モデル [Ha+ 2018; Hafner+ 2019]

- 深層生成モデルの一種
 - 外界のダイナミクスに関するコンパクトな表現
 - 未来の「想像」が可能

プレイデータ [Lynch+ 2019]

- 操作者の興味 / 好奇心に基づく連続的なデータ
 - ロボットの身体と環境の拘束下で実現可能な操作を実施
 - 多様性を有する一方、無駄が少ない

2025/1/26
JST CRDS 科学技術未来戦略ワークショップ「フィジカルAIシステム」
6

図3-1-2 キーワード@深層学習・ロボット学習

これらのトピックに関して、特に予測符号化と世界モデルについては、京都大学の谷口先生らと共に Survey Paper²²を書いている。また、自由エネルギー原理については、人工知能学会の学会誌で特集²³を組んでいるので、興味があればご覧いただければ幸いである。

ここから具体的な研究に入る。最初に紹介するのは、2016年の研究であり、9年前のものである。これは予測符号化の枠組みを2台のロボットに導入した研究例である（図3-1-3）。予測符号化に基づいてロボットが動くため、基本的に自分の予測に従って行動を取ろうとする。しかし実世界での実験では、球が予測とは異なる方向に転がることがある。そうすると両方のロボットは予測誤差を感じ、その誤差を最小化するように内部状態を更新する。結果として、最初の協調的な状況が変わり、状況にフィットした新たな協調状態を形成することができる。

同じ枠組みを計算論的精神医学の分野にも応用できる。正常に予測符号化が動くとロボットは正常に動くが、モデルに傷を付けることで、例えばASD（自閉スペクトラム症）の計算モデルとして解釈可能になる。そのようなモデルを搭載したロボットと人のインタラクション実験を行うことで、定型発達の人と自閉スペクトラム症の人でインタラクションの仕方が異なることを見いだす研究も行っている。



図3-1-3 予測符号化に基づく二個体間相互作用

最近の研究例として、特に最近JSTのさきがけと科研費の基盤（B）のプロジェクトを進めているが、今回はさきがけに関連した話をいくつか紹介する。

一つ目は、自由エネルギー原理を実世界で検証したものである。自由エネルギー原理は複雑な確率分布を扱うため、従来は低次元なシミュレーション環境のみで検証していた。しかし、確率分布をニューラルネットワークで表現することで、実世界にスケールする枠組みに拡張可能であることを示した。デモとしては、ロボッ

²² Tadahiro Taniguchi, Shingo Murata, Masahiro Suzuki, Dimitri Ognibene, Pablo Lanillos, Emre Ugur, Lorenzo Jamone, Tomoaki Nakamura, Alejandra Ciria, Bruno Lara, and Giovanni Pezzulo, "World models and predictive coding for cognitive and developmental robotics: frontiers and challenges," *Advanced Robotics*, pp. 780-806, 2023.

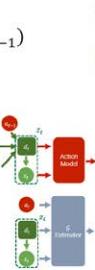
²³ 村田,「自由エネルギー原理とAI」,『人工知能』, Vol.38, No.6, 2023.

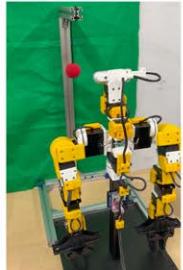
トが赤い球にリーチングするだけの小さなものだが、有意義な研究であると考えている。(図3-1-4)

**脳の計算原理とプレイデータに基づく実世界ロボット学習
自由エネルギー原理の実世界検証** [Fujii, Isomura, & Murata, IEEE Access, 2024]

自由エネルギー原理の構成要素をニューラルネットで実装

- 従来の低次元なシミュレーション環境から高次元の実世界環境を扱うことが可能に
 - 生成モデル $p_\theta(o_t|z_t)p_\theta(z_t|z_{t-1}, a_{t-1})$
 - 認識モデル $q_\phi(z_t|z_{t-1}, a_{t-1}, o_t)$
 - 方策モデル $\pi_\xi(a_t|z_t)$
 - EFEモデル $g_\psi(z_t, a_t)$
→ 期待自由エネルギーを償却推論





2025/1/26
JST CRDS 科学技術未来戦略ワークショップ「フィジカルAIシステム」
12

図3-1-4 自由エネルギー原理の実世界検証

二つ目は、自由エネルギー原理をロボットの能動視覚に応用した研究例である。ロボットはカメラを使って環境情報を部分的に把握するが、環境全体を理解するには視点を動かす必要がある。自由エネルギー原理に基づいたフレームワークを構築し、視点の変更によって環境を探索し、最後には目標に到達する視点移動を実現する研究を行っている。

三つ目は、世界モデルに関する研究である。元々は深層学習の分野で提案されたもので、脳の時間的階層性を導入することで長い未来を想像することが可能となり、ロボットの長期行動計画に繋がる研究であると考えている。

次に、データ拡張に関する研究を紹介する(図3-1-5)。これは、ロボットが現実世界である程度動いた後に、そのデータを世界モデルで学習し、新しいデータを生成するものである。実際に動いて収集したデータと、世界モデルの中で拡張したデータを組み合わせて学習することで、元のデータだけで学習するよりも性能が向上する。これにより、ロボットの多様な行動生成が可能になる。

また、プレイデータを学習することで、柔軟物体の操作ができるようになる研究も紹介する。この研究では、人の好奇心に基づいてロープを様々な形状に変化させるようなプレイデータを収集する。そのようなデータを学習することで、画像で与えられた最終的なロープの形状に近づけるためのロボットの行動生成に成功している。

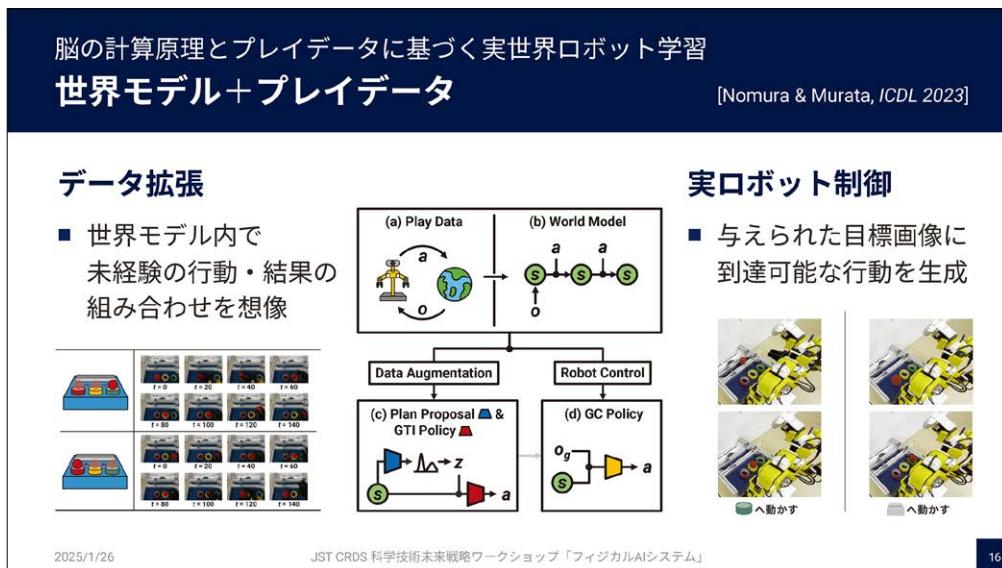


図3-1-5 世界モデル+プレイデータ

3

知能の第二部
解明に向けた研究
に基づく
身体性

この場の議論として、学習と発達について述べたい（図3-1-6）。実際の人間の発達は、低次の行動から始まり、最終的には高次の認知機能が獲得される過程を経る。これまでの認知ロボティクス研究は、特定の側面にフォーカスして学習を行うことが多かったが、これは人間の認知発達のコンテキストを無視している部分がある。もし人間の認知発達を模倣するのであれば、発達過程そのものを考慮する必要があると考えている。

認知的な発達に加えて、身体的な発達も重要である。赤ちゃんから大人に成長する過程で体も成長し、その相互作用によって創発的な要素が生じる可能性がある。これまでに得られた部分的な知見を統合し、内発的動機やプレイ、オンライン学習、継続学習、進化の中に発達があり、発達の中に学習があるといった入れ子的なタイムスケールを扱うことが必要であると考えている。

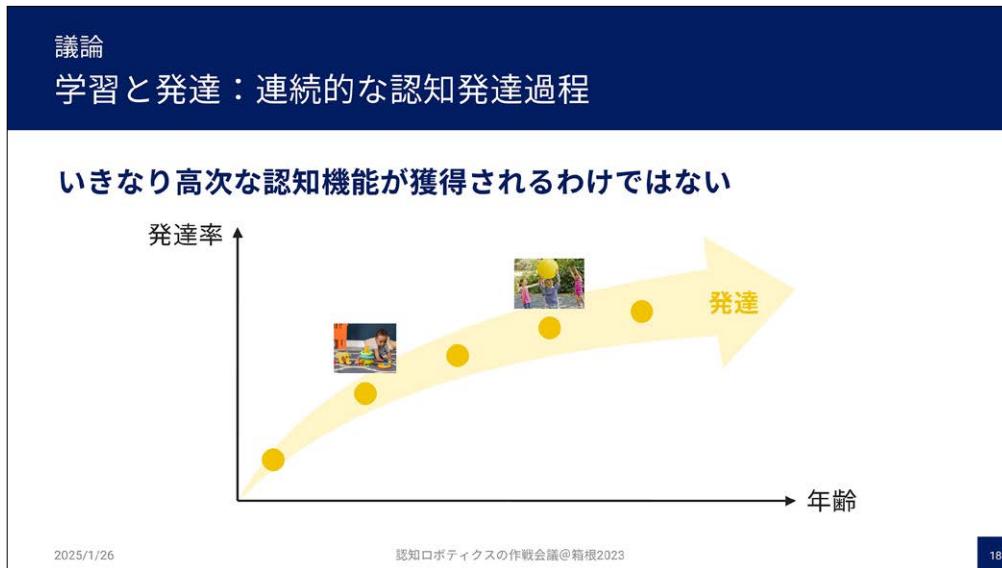


図3-1-6 議論 学習と発達：個人的に重要だと思っていること

まとめると、これまでの研究では予測符号化や自由エネルギー原理といった洗練された理論や原理に基づいて、限定された実世界での学習を行ってきた。また、世界モデルやプレイデータといった最近の深層学習・ロボット学習的な視点とも融合してきた。

これから目指すべき認知ロボティクス研究の方向性としては、これらの洗練された理論や原理に基づいて、もっと開かれた実世界での学習を行っていきたいと考えている。また、学習だけでなく、発達的側面も考慮した研究が必要であると考えている。

【質疑応答】

Q：発達の話と機械学習系の技術を組み合わせた研究について伺いたい。ディフュージョンなどの技術をどのようなイメージで考え結びつけているのか。自由エネルギー原理とディフュージョンの結びつきは斬新だと思う。ツールとして考えるべきか、どのような気持ちで結びつけているのか興味がある。

A：うまく答えられないが、自由エネルギー原理や予測符号化を使っても解ける問題を示すだけではインパクトが弱い。何とかして我々の方法でなければ解けない問題を解くことが重要だ。ただ、実際には最先端の手法を用いた方が性能がよいというのが現状である。

3.2 制御と学習の統合による再現性の高い動作生成モデル

境野 翔²⁴ (筑波大学)

私の出身は制御屋であり、モータの制御が基本になっている。最近のMobile ALOHA、RDT-1B、OpenVLAなどでは、ビジョン・ランゲージ・アクションモデル（VLAモデル）といった画像・言語のモデルを使って動作できるようになって注目されているが、制御屋の立場からすると、こんな遅いものが使えるわけがないと思っている。このギャップを何とかしたいというのが根本にある。遅くなる理由は様々あるが、一番重要なところは、基本的に力を制御できていないことである。初めて見たものをゆっくりと慎重に触る必要があるところに一番大きな問題があると思っている。

一方、我々はバイラテラル制御と呼ばれる力のフィードバックができる遠隔操作の研究をやってきた。例えば、フォロワ側でホワイトボードを触った力をリーダ側で感じることができるので、対象物を壊さないように柔らかく制御することもできるし、ロボット同士の身体性を考慮しながら遠隔操作できる。図3-2-1に示すように、身体性を考慮した動作生成で作ったデータをAIが学習し、模倣学習することで様々なことができるのを今まで示してきた。具体的なやり方としては、リーダが動くとその動きがフォロワ側に伝わり、フォロワの制御器がリーダの動きと一致するように制御する。模倣学習は赤色の破線で囲ったバイラテラル制御のところをそっくりまねるようにAIを組むだけでよい。バイラテラル制御は位置だけでなく力もフィードバックしているので、この構成を取るだけで実は位置も力も制御できる。詳細は割愛するが、このような方法で、これまでのロボットには難しいと言われていた様々なタスクが人間とほぼ同じ速度でできるようになってきた。

3

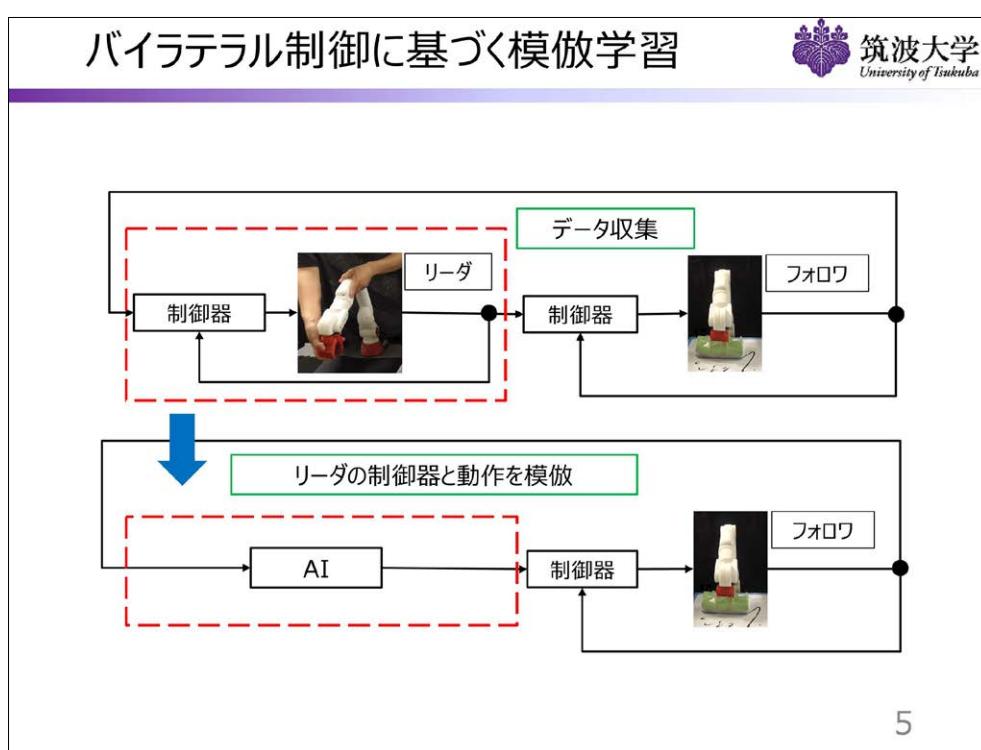


図3-2-1 バイラテラル制御に基づく模倣学習

もう一つ注目してほしいのは、全部同じロボットでやってることであり、特別なハードウェアは必要ない。このやり方を使うと、人間並みに速くて滑らかな動作ができ、力制御を使うため適応的な動作もでき、教える動作の回数もせいぜい20～30回程度と少ない。また、市販ロボットによる自律動作で様々なことができる。

しかし、基本的に動作の生成が人間にはよく分からぬ過程で生成されているため、解釈性が低くて困る。しかも、どのトップカンファレンスの論文を見ても成功率はせいぜい90%である。中には95%のもの、我々のところでは一番高いもので98%だが、工場で使えるような99.99%といった成功率ではないので、本当に使えるのかは疑問である。人間と比較して信頼性、再現性、解釈性が低いといった問題をどうにかしようと悩んでいたが、最近になってそれらが解決できるようになってきたので、次に説明する。

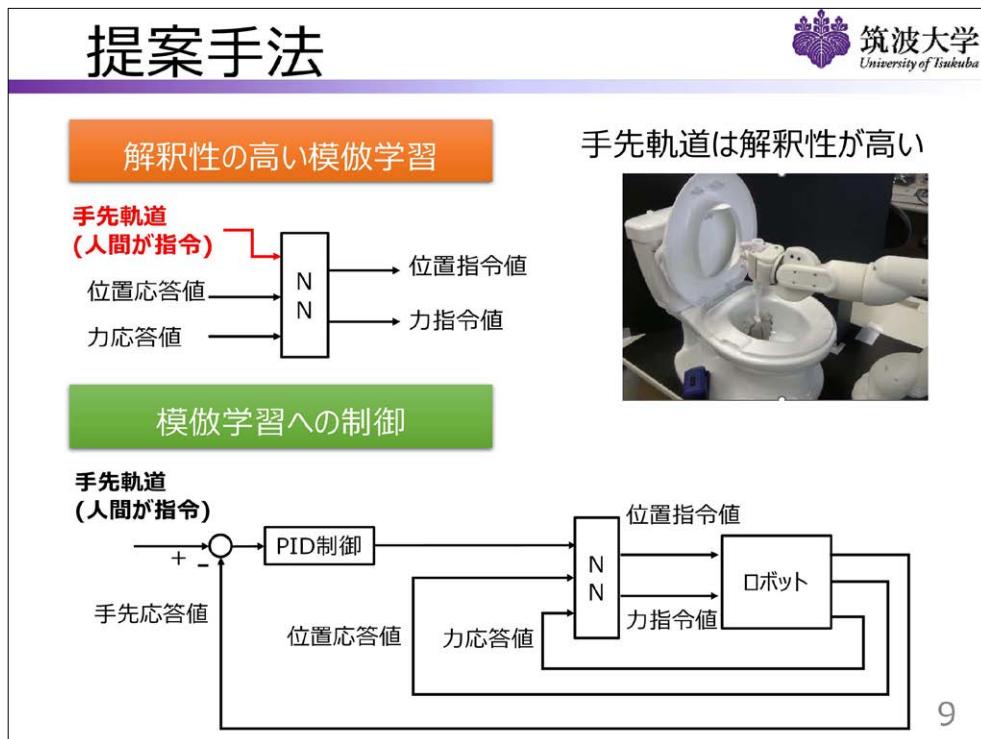


図3-2-2 提案手法

図3-2-2に提案する手法を示す。この図の右上のように便器を掃除するタスクがあった時、関節の角度や関節のトルク・力を見せられても人間にはよく分からぬ。このため、このような量でロボットを動かすとすると、解釈性がとても低くなる。人間が分かりやすいものとしては、モップの先端あるいは手先はどこにあるかといったものがあり、このようなロボットの先端の位置でAIに指令できるようなものがあるとよい。一方、ロボットの内部では関節の角度やトルクで動いてほしいので、先端の動きと内部の関節の角度やトルクが組み合わさってロボット動かすための位置と力の指令値が出てくるモデルがあつたらよいと言える。さらに、手先で動いた軌道について誤差を判断し、PID制御（Proportional-Integral-Differential Controller）などのフィードバック制御で誤差をつぶすことができると、再現性も上がる事が期待できる。現在、このような研究テーマを「さきがけ」で行っており、その内容を次に説明する。

図3-2-3に示すように、VLAや人間の意思決定はとても賢い反面遅く、せいぜい10Hz程度である。一方、我々がやってるロボット制御はできれば1kHz～10kHzで動かしたい。このため、遅くて賢いところと速くて精密なところを組み合わせることが大事になる。そこで、上位の賢いものに手先の軌道を出してもらい、それに従うように下位の模倣学習が適応的に制御して追従していく、といった機構を作った。ところが下位に賢い

LSTM (Long Short Term Memory) 推論モデル使うと全く言うことを聞かなかった。一つ前のことしか知らないといったあまり賢くない方が制御としてはうまくいくことが分かってきたので、図3-2-4のような簡単なモデルにしてやると、制御が効くようになってきた。

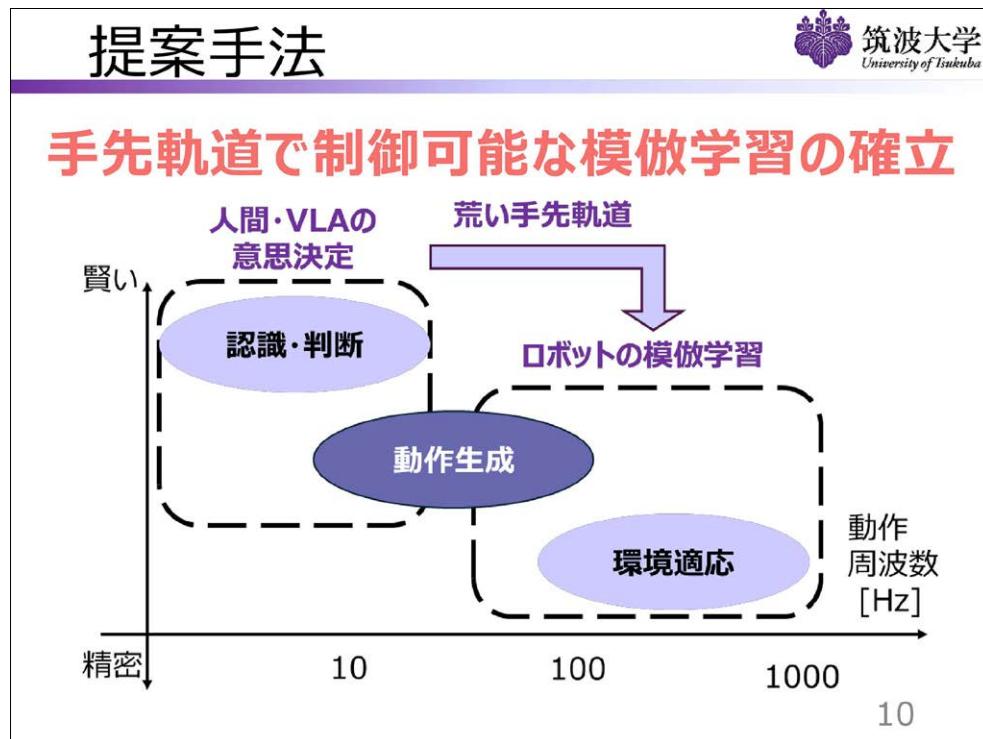
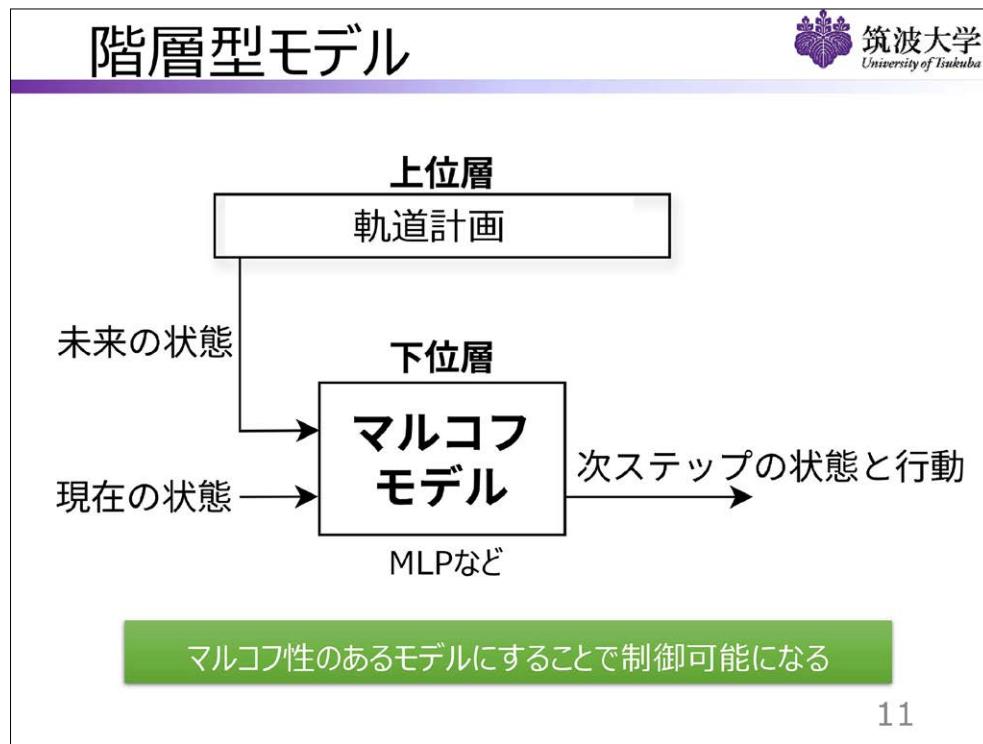


図3-2-3 提案手法：手先軌道で制御可能な模倣学習の確立

3

知能の第二部
..身体性に基づく
解明に向けた研究



11

図3-2-4 階層型モデル

関節の軌道が与えられて、同時に現在の状態もニューラルネットワークに入ってくると、このネットワークは次にどう動いたらいいかという行動だけではなく、次に自分がどうなるかという状態まで予測する。自分の予測する状態と、上位層が言ってくる「君は将来こうなるべきだよ」というものに誤差があった時に、制御してフィードバックできるような機構にすると、そのうちに上と下が違う予想をしなくなり、同じものを予測するようになってそれがなくなる。

「状態」と簡単に言っているが、普通のVLAでは角度の軌道、せいぜい速度の軌道までしか出さず、力の情報までは出してくれないものがほとんどである。さらに、本当に欲しいものは状態だけではなくロボットを制御するための指令値であるが、指令値まで出してくれるモデルはほぼ存在しない。必要な角度・角速度・トルクの指令値・応答値の6個のうちで得られるのは角度と角速度の状態なので、少ない情報から制御したい残りの4個もつられて制御することができるかやってみた。

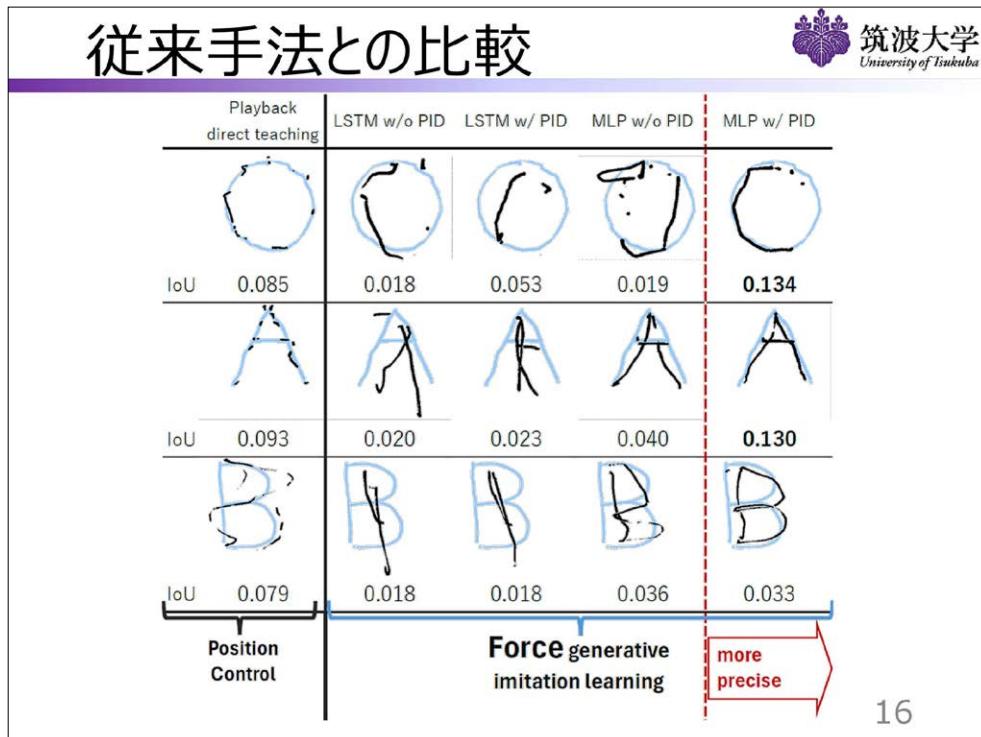


図3-2-5 従来手法との比較

我々はニューラルネットワークの学習として、ホワイトボードに縦、横、斜め、ぐるぐるの線を描くということだけを最初にバイラテル制御で教示し、字を書く時の力加減を教えた。このモデルに対して、上位から丸やA、Bなどの文字の軌道を教える（無理やり与える）ことをやった。図3-2-5に従来手法と我々の手法との比較を示す。普通の人は、軌道を教えられているのでその通りに位置の制御をすれば字を書けると思うが、実際にやると図の一番左側のものになった。力加減を制御できていないので、ペンがホワイトボードからはねてしまいきちんと字を書けない。一方、我々の方法（Force generative imitation learning:力生成模倣学習）では、角度と角速度の情報から力まで生成できるので、とりあえず離れることはなくなった。また、従来の賢いモデル（LSTMなど）を使うと、言うことを聞いて動いているように見えないが、頭が悪いMLPにすると「A」や「B」の文字を書けるようになってきている。これに対してさらにPID制御をかけると、図の右側のようにかなり追従性が良くなるのが分かる。なお、円に関しては左半分は描けているが右半分は描けてない。これは動作を教える時に上から下は教えたものの、下から上は教えてなかったので教示データが足りなかったためと

思われる。

再現性が大事なので、PID制御を入れてないものと入れているものを比較してみた。実はバイラテル制御は遠隔操作するのが難しく、特に制御性能が低いロボットではあまり小さい文字が書けないので、大体15センチ程度の字を書くのが限界だった。この大きさで「2」と「3」を書けるかどうか、またそれより小さい5cm程度の「A、B、C、D」の4文字も同じ範囲内に書けるかどうか試してみた。結果としては、「2」と「3」はPID制御のあるなしに関わらずほぼ再現性よく書けたが、小さな「A、B、C、D」はPID制御がある場合にだけ書けた。

こう動くべきという結果を教えるのは簡単にできるが、動くためにどういう指令値を与えたらいか教えるのが実は難しい。指令値と応答値の違いすらほとんどのAIモデルは議論していないので、制御屋からすると、そこは違うと思いながらやっている。今回示した力の生成モデルでは、こうなってほしいという結果の軌道を与えると、それに対して適応的な力まで含めた指令値を生成できるようになる。さらに、それらのずれがあった時に、フィードバックで制御していると思っている。実際にやってみると、確かに5回ともほぼ同じ応答になっており、しかも人間の遠隔操作では教示が難しい細かい字もかなり書けるようになってきた。5cmほどの「B」の文字は難し過ぎるようになかなかうまくいかなかったが、「A」、「C」、「D」に関しては5cmほどの大きさのものもかなりうまく書けるようになった。モーションプリミティブという言い方もするが、動作の基本となる簡単な幾つかの動きを力まで含めて教えると、それをきっかけにして教えられてもいい新しい字を書ける（新しい動きを生成できる）ことになってきた。

この解釈について簡単に説明する。VLAやLLMなどは基本的に世界からデータを集めてくるので、最大公約数的な推論しかできない。一方、体育の教科書に書いてある格好のよいスキーのやり方や泳ぎ方について文章を見てすぐにできる人はいない。このため、最大公約数的なやり方を自分の身体に合わせた動き方にフィット（ファインチューニング）させなければならない。VLAの研究者はデータさえ集めれば何でもできると思いがちだが、制御屋は個に特化したところは個でやらなければ駄目だという考えがベースにある。その代わり、賢いことができるのは事実なので、どのようにここをつなげるか今まで悩んでいた。図3-2-3に示した今回の枠組みを使うと、賢いものに荒い手先の軌道をつくってもらい、制御屋がそれを個にフィットした身体性を考えた動きに変換することができるようになり、一つの巨大なモデルで賢いところから適応的なところまで全部をやらなくてよくなった。このため、枠組みとしてかなりやりやすくなった。このようなことが進んでいくと、意思決定の賢いところだけでなく、適応的なところをいかにやっていくかが大事になっていくと考えている。

まとめを図3-2-6に示す。制御と機械学習を組み合わせることで、信頼性と高い再現性を両立できるようになってきた。今回は、AやBの文字の正解軌道を人間が教示したが、そのうちにVLAモデルが普通に生成してくれるようになるはずなので、これと適応的な模倣学習を組み合わせるのが大事だと思う。大量にデータを集めることは大事だが、今からそこで勝負しても中国やアメリカの後塵を拝しているのでかなりつらいことになる。むしろ、日本の得意なところで勝負するのがよい。今のヒューマノイドロボットに適したモータという意味では残念ながら日本のモータはあまり強くないが、自動車用のモータはまだ強い。中国は安いハードに強いので、何とかしないといけないが、ギア、パワーエレクトロニクス、センサー、制御などもまだ日本のロボット業界は強いので、これらを推していくのは大事だと思っている。

まとめ

- 制御と機械学習の統合により、信頼性と再現性の高い動作生成を実現。
- VLAモデル等が生成する荒い軌道をもとに、力制御まで内包した指令値を生成。
- ロボットのAIの次の勝負は個体に依存する領域か？
モータ、ギア、パワエレ、センサ、制御
日本はまだかなり強い(が、中国の安いハードが強いのは事実)

図3-2-6 まとめ

【質疑応答】

Q：大規模言語モデルでも推論が実は大事だという話が出てきているが、むしろ推論側をきちんと独立して設計することが大事だと思って聴いていた。力センサーを使っていないのが売りの一つだったと思うが、今回のものも全部そうなのか。

A：今回のものも全て力センサー使わずに推定している。

C：模倣学習的なやり方でここまでできるというのは面白く、他でやってる人はいないのは強みと思うので、この調子で頑張ってもらいたい。

Q：あまり賢いものを下に持ってくると言うことを聞かなくなるという例えが面白かったが、かなり賢さが進んでくると、上がこういうことを言いそだから下のほうで判断する、といった状況にならないのかとも思った。

A：そのような場合は、おそらく制御の方がかなり難しくなってくる。昔の時系列情報を引っ張った上で、将来も安定的な制御系を設計することは、モデル予測制御などで頑張ればできるのかもしれないが、自明の話ではないので、今のところは難しいという回答になる。

Q：今回は絵や文字を書くというタスクだったから押し付けるという話があると思うが、押し付けるか押し付けないか、別の意図のようなものが必要な気がする。単に軌道を入れたらできる、あとはこれを使えばよいというものではないように思う。本当は入力にもっと様々な意図が入ってくるように思うが、それはどのように見てるのか。

A：例えば、ホワイトボードが傾いた瞬間に今回のやり方はおそらく破綻する。そのため、傾いた状態や立てる状態でベースとなるようなプリミティブを取得し、下位が予測するものとの推論誤差を評価すると、どの下位のモデルを信じたらよいかわかるようになるはずである。多様な小さいモデル（小さいプリミティブ）を多数持って、推論して選んだり、場合によっては加重平均してサンプルベースのモデル予測制御のようなものを組むと、かなり様々なことができると考えている。

Q：現実世界は大変複雑なので、例えば4脚歩行ロボットでは小さいモデルの組み合わせというよりは、様々なを経験させたからこそ、うまく動けるようになってきたと思っている。細かいモデルを作り、それらを組み合わせて加重平均するといった方向性がどの程度意味をなすのか気になっているので、何かあれば教えてもらいたい。

A：歩行ロボットの場合は、シミュレーターで大抵のことを想定できるので、何とかなっていると思う。今のところマニピュレーションは全部をカバーするようなシミュレーションはできていないので、組み合わせることが必要になってくると思っている。逆に言うと、強化学習はフィードフォワード的に全部決められる問題設定に関しては多分うまくいくが、現場でどうやるか考える必要があるときは、強化学習だけでは厳しいと思う。

3.3 強化学習を通じた知能の解明に向けて

小林 泰介²⁵ (国立情報学研究所)

今回は強化学習の話題にフォーカスして話しをする。私自身は、ロボット制御の研究を進めてきた中で、強化学習やモデルフリー制御が重要であると認識し研究開発を進めている。本分野は近年著しく成長を遂げており、様々なロボットがかなりうまく動作するようになっている。この成功の鍵は、やはり物理シミュレーションを活用する点にある。

強化学習は試行錯誤的にエージェントが行動し、その結果得られた報酬を最大化するという問題なので、試行錯誤が学習効率を悪化させてしまう根本的な課題がある。このため実用性が乏しいと言われてきたが、理論的側面を改善するのではなく、シミュレーションによる物量作戦で改善するというアプローチにより画期的にうまくいくようになった。さらに、シミュレーションと実機とのギャップについては、シミュレーションの設定パラメータ、ロボット身体の大きさや摩擦係数等を多様化させ、ギャップを補完する形で学習することにより、特に脚ロボットを代表として、更には手術ロボット等へのドメイン拡張を含め研究されている。このように強化学習はようやく注目されるようになっているものの、sim2real系のアプローチは強化学習の抱える問題そのものを解決した訳ではないため、まだ多くの研究課題を残しているのも実情である。図3-3-1に現状の課題を挙げている。この中で一番の課題は、現在主流の方式がシミュレーションを大前提としている点であり、シミュレーションできないような場合、あるいはシミュレーションできてもコストが割にあわない場合にどのように対応していくかが、今後の大きな研究課題である。

3

知能の解明に向けた研究
第二部
..身体性に基づく

強化学習に残された課題例

- ◆ シミュレーションの可否
 - (高速に) シミュレーションするには解像度に限界
 - シミュレーションできていないモダリティが多い
 - 人との身体的インタラクションが難しい
- ◆ 実世界での探索
 - 探索はロボット・環境を傷つけかねない
 - 長期的な活動によりシステムが経時変化
 - エピソードやり直し時の初期化が大きな負荷
- ◆ 報酬関数の設計
 - 評価が曖昧で数値化困難な問題が多い
 - 多目的強化学習では学習すべき要素が指數関数的に増加
 - 同一目的に対して関数形状が一意に定まらない
- ◆ 理論の限界
 - 探索効率の低さはまだ根本的には未解決
 - 部分観測問題に対しては対処療法のみ
 - 定常環境・行動空間を事前定義しなければならない
 - 根本の定式化は20年以上変わらずアドオン開発ばかり

National Institute of Informatics

フィジカルAI CRDS WS 4

図3-3-1 強化学習に残された課題例

強化学習に残された課題解決のアプローチの1つとして、図3-3-2に示す、私が研究を進めている強化学習と生物の接点について紹介する。一般に、強化学習は生物と非常に多くの接点を持っている手法としても知ら

れている。具体的には、強化学習の報酬関数を自律的に設計し、それを基に学習を進めるという内発的動機付けというアプローチにおいては、生物が自分で勝手に目標を決めてそれを頑張って達成するメカニズムと類似しており、ロボットにおける高性能化においてどのような内発的動機付けをすべきかを探求するヒントしたり、あるいは生物データを模倣するような形の逆強化学習をすることにより、生物の多様な動きを取り入れていく手法の研究が進められている。報酬関数をヒューリスティックに創る従来手法に比べ、新しいアプローチではないかと考えている。



図 3-3-2 強化学習と生物の接点

次に、強化学習のメカニズムを意思決定モデルとして見なす研究アプローチについて紹介する。具体的には、生物がある意思決定をする時の脳活動や神経活動のデータを見た時に、それは強化学習的にはどの辺のデータがどのように意思決定に寄与しているか、パラメーターはどうなっているか等をデータ解析する場合に、より多くの事象を正確に説明するためには、より適切な強化学習の理論が必要になってくるという視点での研究アプローチとなる。

どのようなデータ解析が行えるかの事例として、強学習的には学習率に相当するドーパミンに関する『Nature』の論文に掲載された話題を紹介する。強学習的には、学習の量はTD誤差と呼ばれる報酬関数あるいは収益に関しての予測誤差に比例するような形でドーパミンが出ると言われていたが、これは統計的に見ていたもので、各ドーパミン細胞ごとにどのくらいドーパミンを出しているのかの発火率を細かく分析したところ、ある細胞は例えば楽観的にTD誤差がプラスの時だけ強く活性化し、TD誤差がマイナスの時にはあまり活性化しない、逆に悲観的な細胞も存在するという具合に、内部では客観的な誤差に対して、ある非線形関数を通してゆがんだ形の主観を持って学習率が与えられている事が示唆されている。このような非線形性をシンプルなヒューリスティックモデルではなく、より賢く理論的にモデルを設計するアプローチが重要になるのではないかと考えている。

その一例として図3-3-3に示すような、強学習を推論問題として扱う理論研究に取り組んでいる。従来の強学習では収益Rを最大化するだけの最適制御問題として捉えており、その解法は動的計画法的であったのに対し、提案する推論としての強学習では、収益Rに依存する最適性分布を導入することで、推論問題に使えるようなさまざまな解法が使えるようになると期待している。

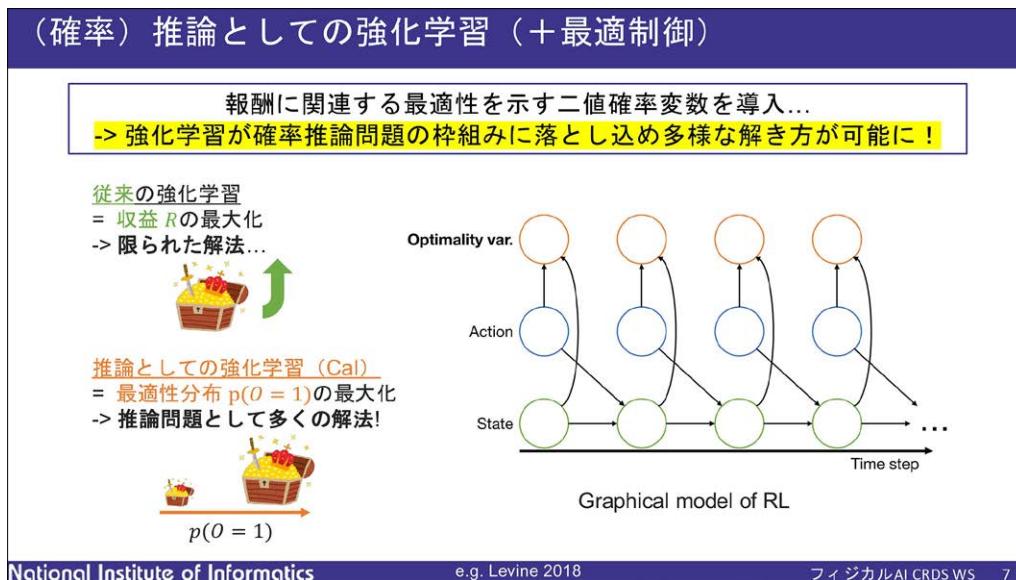


図 3-3-3 (確率) 推論としての強化学習 (+最適制御)

このように考えていくと、実際にいろんな特徴が理論的に発現することが確認できている。最適性をどうやって定義するか、確率分布間でどういう距離を測ったらしいのか等を適切に設定すると、楽観的な学習特性や、悲観的なものの中で面白いのか、さらには、刺激に対する知覚の仕方としてよく言われている対数則やウェーバー・フェヒナーの法則のように、TD誤差に対して対数的に学習率が変わる事（今の価値が高いのであれば学習はあまり進まず、今の価値が低いのであれば学習が過敏に起こる）が理論的に説明できるようになる。

次に、強化学習におけるsim2realに代表される潮流の中で、国際的な主導権を握るための研究アプローチについて述べる。どうしても圧倒的な物量作戦での競争は勝ち目がないと想定すると、有限な計算資源という制約を明確に意識して、アプローチすべきと考えている。現状では、簡単にシミュレーションできる問題に対して強化学習が使われているが、数値解析的な問題のようにシミュレーションが難しい問題には、シミュレーションしてもコストが高いためロボット基盤モデル的に実世界でデータを集めて、模倣学習を使うのが主流である。また、簡易モデルでシミュレーションを行う場合の誤差の要因となるドメインランダマイゼーションを如何に補正すべきかが理論的に解明されていない。このため物量作戦で力技で対応しているアプローチに対して、少ない有限資源で実世界を如何に学習するかを研究する必要があると考える。

これに対するアプローチの1つが、継続学習ではないかと考えている。継続学習では、基本的に新しいデータが来ても古いデータを忘れないようにする手法が中心であるが、実世界で活動してくと経時変化する事はたくさんあるため、図3-3-4に示すように、忘れるべきデータ（獲得した技能）を積極的に忘却するメカニズムを導入すべきと考えており、ROISの戦略的研究プロジェクトで進めている。

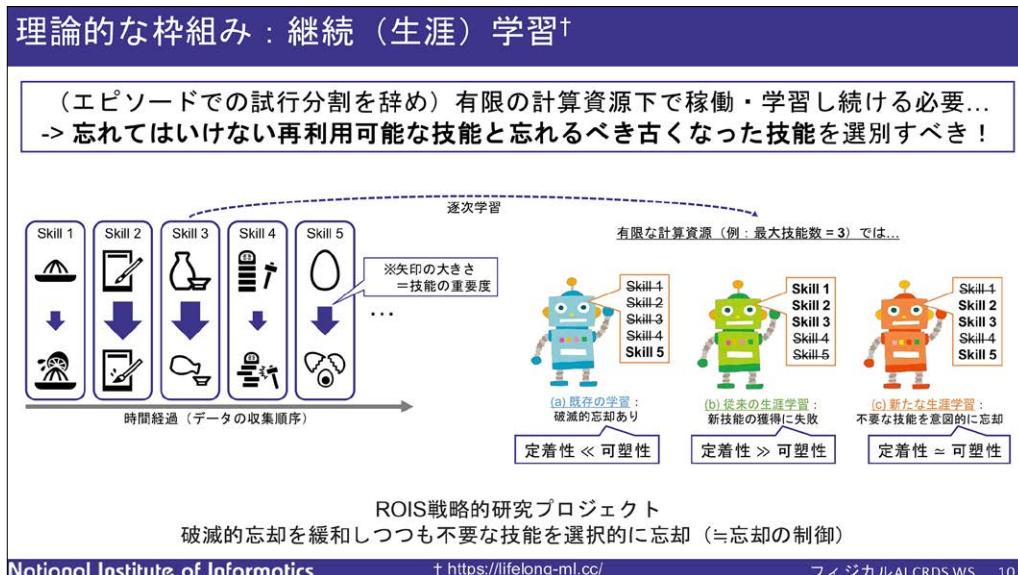


図 3-3-4 理論的な枠組み：継続（生涯）学習

次に、シミュレーションをどんな粒度で行うかが、実践的な話として非常に重要と考えている。図3-3-5に示すように、粒度の部分をヒューリスティックに創っていくカリキュラム学習的アプローチや、Genesisで行われているように不要な部分はシミュレーションを止めてしまうアプローチが提案されているが、更に状況にあわせて最適化するような手法を検討することが重要と考えている。

3



図 3-3-5 実践的なコンセプト：計算の省略（モデル）

この最適化に向けたアプローチにおいて、身体構造をきちんと考慮することが重要になると考えている。実世界で自由に活動できる究極のロボットが存在するとしたら、このロボットは探索できることが多くて、逆に学習できないと考える。身体という物理制約によって行動が制限されることで、学習や予測自体が簡単化できると考えている。図3-3-6に示すように、例えば自動運転においては、車が非ホロノミック拘束を受けているため、曲がる時は絶対弧を描いて曲がる事を簡単に予測できる。ソフトロボットも同様に構造をうまく作り

上げることで、探索範囲を狭めながらも有効な動作を実現できると考えている。



図 3-3-6 実践的なコンセプト：計算の省略（身体）

以上のように、物量作戦でアプローチする強化学習では、恐らくビッグデータに勝てないと考えているため、有限な計算資源環境下でアプローチしていくことが重要ではないかとのまとめで話を終わらせて頂く。

【質疑応答】

Q：今の生成AI等では効果的に忘却することが難しいと思うが、今回のお話の枠組みではどのように実現しようとしているのか？

A：データの価値を見て、その価値が低いものを捨てていくような形態を想定している。一方で、ビッグデータ分野におけるアンラーニングでは、意図的に、例えばプライバシー絡みのデータに依存して学習してしまった部分を忘却させるような取組もある。

Q：物量作戦でビッグデータに勝てないってのは一番の原因は何だと思われるか？シミュレーション上でもデータ集めたり学習させたりする時間がビッグデータに勝てない要因がどこにあるのか教えて欲しい。

A：結局はお金の問題だと思っています。sim2real系シミュレーションが速くなったからそんなに大変じゃないという意見もあるかもしれないが、例えば脚口ボットでいうと既にある蓄積されているパラメータ設定のノウハウが前提になっているので、想定するタスクが難しくなり、ノウハウが充分に蓄積されていない場合に、容易には勝てないと考えている。結局、理論的に保証されてるものではないので、方式をチューニングをするという圧倒的な時間が裏には実は潜んでいて、これを実現する計算資源や人員が重要になってくる。

4 | 第三部：研究開発エコシステム

4.1 研究開発エコシステムとしてのロボカップ

岡田浩之²⁶（東京情報デザイン専門職大学）

今までの話はフィジカルAIに関する個々の研究や技術が主であったと思うが、ここではフィジカルAIを搭載した実用的なロボットをどのように社会実装するかという話を、ロボット競技会「ロボカップ」での取り組みを題材として紹介する。確実性やリアルタイム性が要求される競技会を通じてロボット技術の革新を図る試みは、DARPAグランドチャレンジ等で行われており、ロボカップもそのような取り組みの一つである。今回は、ロボカップというロボット競技会での取り組みを俯瞰することで、それがフィジカルAI技術革新の加速に向けて、どのように寄与するかを紹介する。

なぜロボット競技会なのか－背景と目的

ロボカップは、ロボット工学とAIの融合的な発展のために、ロボットによるサッカー試合を題材として日本の研究者らが提唱し、1997年から取り組みが始まった。その最終目的は、2050年までにサッカーの世界チャンピョン・チームに勝てる自律型ロボットのチームを作ることであったが、現在では、サッカーに留まることなく、レスキュー・や家事の作業等の幅広いロボット競技会への取り組みも始まっている。

ロボカップの最終目的となる汎用知能ロボットには下記の様な複合的な能力が求められる。

- ・広い世界を自由自在に移動し、様々な感覚（視聴覚・力触覚等）に基づいて周辺環境の状態を感じ、動的に変化する予測困難な状況に対する方策を実時間で考え、複雑な構造の身体を思い通りに操り、所望のタスクを遂行する。

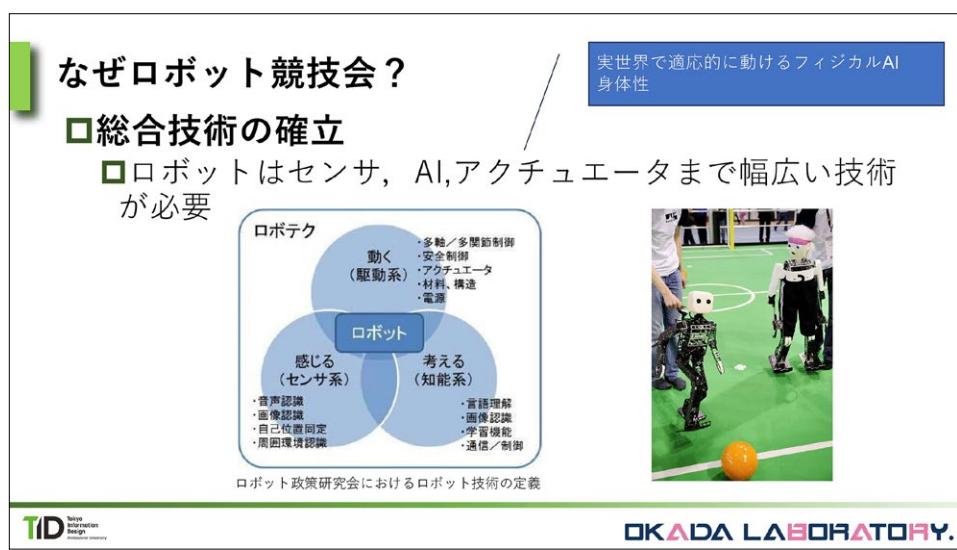


図4-1-1 なぜロボット競技会なのか

その社会実装には、駆動系（身体機構、アクチュエーター・デバイス、多軸・多関節の制御理論等）、センサー系（画像や音声や力触覚にかかるセンサー・デバイス等）、知能系（画像や言語の理解、対象物の理解、行動計画生成、それらに関係するAI基盤等）の幅広い技術を統合した総合技術の確立が必要となる。

特に、知能系が担うべきタスク内容は大きく変化している。2000年頃のチェスや将棋用のAI研究では、最適手の計算コストは大きいものの、環境（ゲームのルール）は静的かつ単純で、ゲームの局面は二人のプレイヤーの交互のアクションで一定間隔毎に変化するものであった。また、局面の状態を判定する計算アルゴリズムも事前に人手で作成可能であり、局面の判定に必要な全ての情報もコンピュータがそのまま扱える記号データとして厳密に与えることができた。そして、ゲームタスクの遂行に際しては、それらの情報を一ヵ所に集めた上で中央集権的に処理することができた。

しかし、身体を持つ汎用知能ロボットが活動する環境およびロボットを取り巻く状況は、極めて多様であり、実時間で変化し続けることが多い。そのため、人手による事前の列挙は困難であり、実運用時に、想定外の環境や状況に初めて直面することが避け難い。また、ロボットが入手できる情報は画像・音声・力触覚等の非記号的な情報が主であり、数量的にも限定的で不確実なことが多い。さらに、多数のアクチュエーターや他のロボットが夫々実時間で動作するため、高度な分散的制御も求められる。

身体を持った知能としてのロボット

西暦2050年

世界サッカーのチャンピオン・チームを作る
自律型ロボットのチームを作る



ロボットとAIの新しい標準問題

- 動的で予測困難な環境の認識
- 実時間動作のための知覚・運動系の抽象化

浅田、北野2000より引用

	チェス・将棋	ロボカップ
環境	静的	動的
状態変化	順番交代	実時間
情報	完全	不完全・不確実
センサデータ	記号的	非記号的
制御	中央集権	分散的

OKADA LABORATORY.

図4-1-2 身体を持つ汎用知能ロボットのタスク特徴

さらに、人の生活空間内での活動が求められる汎用知能ロボットには、指定された時刻に指定された精度で確実に動作することが求められる。前述の問題を踏まえて考えると、研究者が机上で想定した課題を研究室内の限られた環境で検証するだけでは、実用的な汎用知能ロボットの実現は難しいと予想される。

そのため、社会実装時の環境をできる限り包含した環境下で、できる限り多くの事前検証を行うことが求められる。ロボット競技会は、そのような課題に向けて行われるものである。

ロボカップの特徴－コミュニティ主導と人材育成のエコシステム

ロボカップの活動は25年近く変わることなく続けられているが、この継続性はロボカップの下記2つの特徴の実現において、とても重要であると考えている。

- コミュニティ主導（シリコンバレー型）

- 人材育成のエコシステム

コミュニティ主導の考え方は、2006年にシリコンバレーで設立された「Willow Garage（ウィローガレージ）」の理念が挙げられる。Willow Garageは、ロボットに関わる技術開発を促進し、産業を醸成することを目的に掲げた研究開発・インキュベーションを行う企業であった。彼らが開発したロボット向けオープンソースソフトウェアのOpenCV（画像処理ライブラリ）やROS（ロボット用ミドルウェア）は、ロボットスタートアップから大企業のロボット関連新規事業において、今もなお標準的なソフトウェアとして広く使用され続けている。

上記のシリコンバレー型のコミュニティ主導組織は、流動的でオープンかつフラットであることを特徴としていた。これにより、研究活動を領域横断的に行なうことが可能となり、大学や企業などの組織毎、専門領域毎に分断されていた技術・人材・情報が密接に共有され、共通の目標に向けた一体感のある技術開発・産業醸成に関する多くの成功事例が生まれた。ロボカップもこのような理念に基づいて始まり、今もなおそれは共有され続けている。さらに、2016年にはトヨタのHSRロボット（Human Support Robot）をベースにした研究開発のコミュニティ作りも始まった。

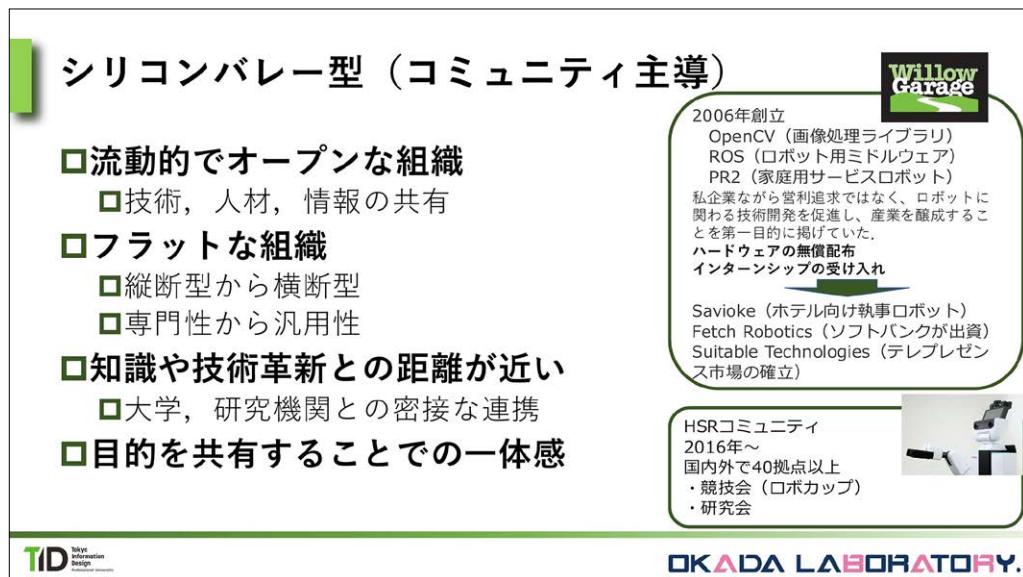


図4-1-3 口ボカップの特徴—コミュニティ主導

人材育成のエコシステム醸成には、企業研修・技術者育成・产学連携等の個別的なスキルアップを超えた取り組みが必要と考える。その実現には、特定分野の人々のコミュニティに留まることなく、あらゆる地域や世代の人々を見据えた研究開発スキル教育という観点が必要となる。

そのため、ロボカップ活動では、全員参加で話し合うことで、普遍性のある具体的な目的・目標・方法・手段を設定・共有しながら進めることに留意してきた。例えば、2000年当時の話としては、ハードウェア優先によるロボット工学の行き詰まり・開かれた世界に対するAI性能の限界・データ不足等の諸問題を共有し、目的をロボット工学と人工知能の発展とした上で、それに対して2050年までにサッカーの世界チャンピオンチームに勝つという具体的かつ高い目標を設定した。そして、50年先の未来での目標実現の具体的な手段としては「毎年の世界大会開催」を採用した。さらに、大会開催の活動を通じて、各時点での技術課題・最新

技術を明らかにした上で、最終目標に向けたロードマップを隨時アップデートするという方法を選定した。

この結果、ロボカップの競技ルールは、競技会という実証実験に基づいて段階的に難度が上がっていくことになる。このように、じっくりと時間をかけ、徐々に難しい問題を克服し続けることで、膨大な資金や人手をかけることなく、効率よく最終目標に到達できると考えている。

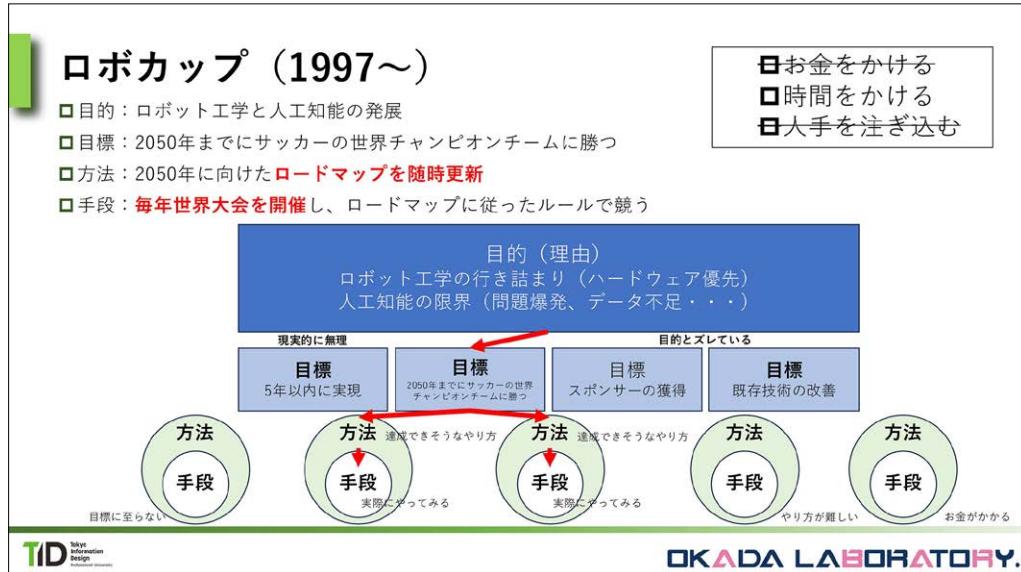


図4-1-4 ロボカップが選定した目的・目標・方法・手段

既存の国家プロジェクトと比較すると、大きな視座に立つ目的・目標の設定という点、毎年のステージゲートを設定しつつ、失敗を許容しながら挑戦的な研究開発を推進するというところには共通点がある。

一方、国家プロジェクトでは、野心的な研究構想のフレームワークを国主導で策定し、潤沢な資金と人手を集中的に注ぎ込む事も多いが、ロボカップでは、様々な専門家が自律的に参画したシリコンバレー的なコミュニティ主導で策定し、50年間継続させ続ける研究開発プロジェクトとして目標に向かって行くという点で対照的であるように思える。

まとめ－ロボカップの今とこれからへの期待

45カ国から2000人以上が参加するロボカップは、開始から25年が経過し折り返し点を迎えていた。その間、基盤モデルAI、モーター（アクチュエーター）、半導体の飛躍的進歩等、ロボット技術を取り巻く状況は大きく変化した。直近の競技会では、中国のヒューマノイドロボットが大挙して参加し、数年前のトップレベルのロボットシステムでも全く勝てない状況になりつつある。

そのような状況の中で、ロボカップの目標すらも変化しつつある。当初は自立型のロボットチームで、人間のサッカーの世界チャンピオンチームに勝つというものだったが、今や圧倒的なモーター・パワーでキックするロボットが人間のプレイヤーを圧倒する可能性すら見えてきた。そのため、人間と同じパワーでプレイする等のルールが追加されつつある。

ロボカップを通して、多様な専門性を持つ研究集団、および、最終目標に適応的に進むための具体的な研究手段をいかにデザインし、参加者の共通言語となる具体的な方法や手段にいかに落とし込むかということの重要性に気づかされた。

短期間で劇的に状況が変化するIT技術領域では、巨額の資金と人手を集中的に投じるだけで全てが解決

するとは限らない。全体のバランスが重要であり、資金と人手は少ないながらもコミュニティ主導にて、長い時間をかけて持続的に最終目標に向かう研究プロジェクトの存在が必要だと考える。

そのような研究プロジェクトがアンダーグランドではなく、表舞台で脚光を浴びつつ行われ得るように勇気づける科学技術政策があって欲しいと願っている。

4.2 現場・現場作業で利用できるPhysical AIを目指して

寺田 耕志²⁷ (Preferred Robotics)

日本のロボット技術は、まだ遅れておらず十分に強いものだと思う。論文数も決して諸外国に引けを取るものではないが、ビッグデータは取り組みが速い一方、日本はアカデミック領域のものを事業化するまでに時間を要し、そこで負けてしまう。ファンデーションモデルや模倣学習、強化学習を施したロボットが、実用になりそうな時に負けてしまうとすると残念である。3年ほど前からロボットビジネスを現場で推進している者として、どのようなところで使えており、あるいは使えておらず、本当の課題はどこにあるのかを紹介する。

我々は、趣旨説明であった「フィジカルAIシステムの発展ビジョン」で分類されているタイプP、H、Aとともにビジネス化している。タイプPだと半導体製造でのウェハ搬送ロボット、タイプHだと単機能のサービスロボットとして配膳や病院での搬送、タイプAだと専用機による作業として建設現場における重機や農業支援、インフラ点検などがある。現状の実用レベルで本当に何が課題であるのかがビジネスを推進している中で見えてきており、他国に負けない速さで対応していきたい。

タイプPでの取り組みと課題

タイプPでは、半導体工場でウェハを運んで欲しいというニーズが強い。運ぶだけであれば設定は簡単であろうと思われそうであるが、平気で半年かかったりする。課題のひとつは、タスクごとに個別にプログラミングが必要となる点にある。既存の設備（加工機や検査機）の間を縫って搬送させるために、さまざまな連携をさせていく必要があるが、そのためのインターフェイスが揃っていない。リールを一個一個剥がす機械、部品を基板に載せてハンダ付けする機械、単なるエレベーターのシフト装置などを連携させることができ、ロボット自体の動きの他に必要なことである。このためのデータも集め、モデル化し、LLMから使えるようにすることが重要である。例えば、基板の入ったマガジンを搬送し、作業員がボタンを押すとピッキング場まで持って行ったり、それによるROIをきちんと計算し、企業にとってこのタスクをこなせれば幾らの投資に対して何人分の人件費が削れるのかといったところも算出することが大切である。

タイプPでの取り組み事例と課題

取り組み

半導体製造でのウェハ搬送ロボット
ハーネス等搬送

課題

比較的単純な作業のみ実行可能
1. タスク毎に個別にプログラミングが必要

提案

既存設備（加工機、検査機、実装機、昇降機、自動倉庫等・・・）これらインターフェイスは揃っていないし、使い方がまちまち。生産技術とのコミュニケーションコストが高く、導入までの時間が非常にかかる

Preferred Robotics

図4-2-1 タイプPでの取り組みと課題

倉庫での自動搬送やロボットアームなどは、それぞれ個としては動いているが、その間の連携は実務レベルという観点では課題が残っている。ここは、LLMを活用してプログラムを記述するのに比べると簡単なタスクであり、研究としての狙いどころ（チャンスにつながるところ）でもあると思う。

タイプHでの取り組みと課題

タイプHでは、ヒューマノイドというくくりで、これまでに配膳ロボットや病院での搬送などに携わってきた。搬送する物の重量が小さい領域であり、歯科医などに売れている。課題は、より難しいタスクの実行である。今でも、ファミリーレストランでの配膳において、テーブルまでの搬送は実用化している一方で、テーブルに物を並べたり下膳する（片付ける）タスクはパフォーマンスとして問題になっている。

タイプHでの取り組みと課題

取り組み

飲食店における配膳ロボット
病院における搬送ロボット

課題

- ・限定環境での安全に配慮した作業
- ・限定話題や定型的対話

より難しいタスク（テーブルまで配膳）
対話か、簡単インターフェイスか

提案

機器導入時の自由対話は価値が高い。
利用時はボタンで十分と感じることも多い。

歯医者

飲食

図4-2-2 タイプHでの取り組みと課題

導入事例として歯科医の需要が大きいことが、やってみて初めて分かった。調べてみると、器具を使うごとに洗浄が必要なため毎回洗浄室を持って行くが、治療場所とは離れたところにあるため、歯科助手が何回も往復することになる。“ここが自動化されると助かる”、“とにかく走って持って行くだけでいい”とまで言われた。こういうところにチャンスがある。

飲食店には、中国のロボットも多く参入している。例えばイタリアンの50席程度の店だと300万円のロボットを導入してもらえるが、飲食店一般に経営が厳しくより安いロボットが求められる。そういうところでは、システムや操作性に関して派手なものは作ることはできず、逆に高い自律性が求められる。この手の実装をすることで、例えばワンオペの（一人で切り盛りしている）居酒屋だと1日3組限定でしか運営できなかったところが5組対応できるようになるなど、満足度が高まっている。

小売店は、ロボットを導入するしないの前にそもそもDX化が進んでいない状況もある。大手のチェーン店で動くロボットとしては、夜中に全部の棚を回って、どこに何があるのかをスキャンしてきて、今日は暑いからコーラがよく売れたので明日はもっと棚の上の方に並べようなど、どのように商品を並べればいいのかをデータに基づいて助言することができるロボットも提供している。店のバックヤードでは乱雑に物が積まれていることがあり、そこでもきちんと動くことが重要である。

タイプAでの取り組みと課題

タイプAでは、土木建築現場のようなところを対象にしている。例えば、鉄道線路の上を走って点検するロボットなども開発している。自然災害が発生した後、倒木や線路の破断がないかを人が歩いて全部チェックしている現状に対して、性能のいいLiDAR（Light Detection and Ranging：光により物体検知・測距を行う装置）を搭載したロボットが一気に走って調べるというものである。先週あった発表では、中国製のロボットであるUniTree（ヒューマノイド型）が、線路の上を一車一車走っていた。ただし、時速30キロ程度で3～4時間走り続けるようで、本当にヒューマノイド型で機能するのか疑問が残る。4足であれば、インフラ点検などの需要は高そうである。重機に関しては、建設業者と一緒に、大きな穴を掘るロボットを制御する機能の開発を進めている。大出力を必要とする現場でAIを使っていく、という勇気が重要なと思う。

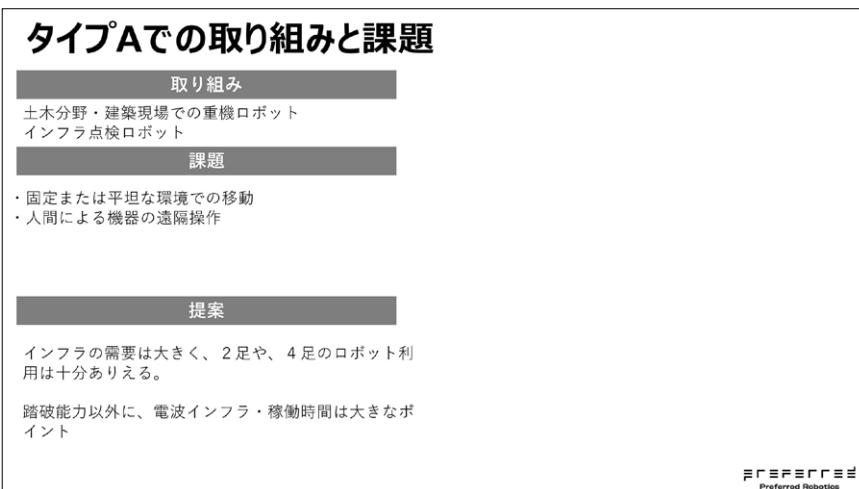


図4-2-3 タイプAでの取り組みと課題

対話的サービスロボット

対話的サービスロボットについては、「カチャカ（KACHAKA）」という搬送ロボットを開発・販売している。LLMを組み入れ、持つて行く場所（搬送先）を柔軟に扱えるシステムを開発するものの、一度でも意図と違う動きをすると、“要らない。ボタン一発でパチッと来てくれる方が全然いい。”などと言われることがある。この分野は、まだまだ頑張るべきところが多い。

安価で使いやすいプラットフォーム

Preferred Roboticsで開発・販売を行っている「カチャカ」のプラットフォームロボットとしての魅力

プラットフォームロボットとなり得るには...

- (1) ハードウェア・ソフトウェア両面で高い拡張性 / 応用可能性
- (2) 初心者~熟練者問わず、誰でも使える
- (3) 実業務で使われていてサステイナブルなサポート・販売体制
- (4) 安価で入手性が高い



Preferred Robotics

図4-2-4 プラットフォームロボットとしての「カチャカ」

プラットフォームとしてもカチャカを販売している。ハードウェアやソフトウェアの拡張性が高いことや初心者でも熟練者でも満足して使えること、そしてなによりも実業務できちんと使われていることが重要である。それによって、ロボットをより安く販売できるようになる。

最近は、OSS（オープンソースソフトウェア）のAPI（アプリケーションプログラミングインターフェイス）である「KACHAKA API」を出して、例えばロボカップなど、いろいろな人に使ってもらっている。特徴として、簡単に使えるように、ROS（ロボットOS）などに全く触れていない人でもブラウザからアクセスして、Pythonのノートブックを介して一通り全部動かせるようになっている。教育的にも非常に有用で、これらを用いて、SLAM（Simultaneous Localization and Mapping: 位置特定と地図作成を同時に実行する手法）や転移学習（あるタスクで学習された知識を別領域の学習に適用させる手法）に関するワークショップを開くという活動もある。

KACHAKA API

- OSS公開済のAPI: [GitHub: pf-robotics/kachaka-api](https://github.com/pf-robotics/kachaka-api)
 - 現状できること
 - 制御: 速度制御, 位置制御(前進・後退・旋回), 登録された目的地への移動, マップ上の位置姿勢を指定した移動, 棚のドッキング/アンドッキング, 充電器への帰還, 発話, 停止スイッチON/OFF
 - センサデータ取得: レーザーセンサ(2D LiDAR), 3Dセンサ(ToF), 前後RGBカメラ, IMU, ホイールオドメトリ, IMU補正オドメトリ
 - ロボット/環境状態取得: 自己位置, バッテリ残量, ロボット各軸やセンサ間の相対位置姿勢, マップ情報, 登録されている棚や目的地の情報, 認識情報(人, 充電器, 棚など)
 - その他: 複数マップの切り替え, マップのimport/export, 音量の変更, ロボット再起動, 前方/後方のLEDライトON/OFF

7

図4-2-5 KACHAKA API

ロボティクス研究の現状認識と今後の見通し

現在、ロボットの脚を中心に低減速・高トルクなアクチュエーター（扁平モータ、遊星ギアなど）が使われており、高速、バックドライブブル、軽量、安価なものが出てきている。日本のロボットが栄えたのは、「ハーモニック」がとても強かったことがある。例えば、減速機の製造方法などを押されたことの意義が大きく、ハイブリッド車においても実は減速機の特許が強かったために何年も世界を圧倒してきた。今は、ハーモニックよりも別の考えが必要になってきている。低減速・高トルクのアームであれば、学習するときに壊れない、力制御をしやすい、コンタクトリッチな動作ができる、実現場でも使える。

「チャレンジ後に社会実装」とよく言われるが、きちんと導入までもっていくことが重要であり、アカデミアとビジネスの結び付きを加速し、リスク提起をして製品を出してくことが大事である。例えば、中国の配膳ロボットが世界を席巻しているが、最初は故障率が70%くらいあった。そのようなものでも世の中に出して広げる勇気が大切である。

ロボティクス研究の現状認識と今後の見通し

- ・ロボットの脚を中心にアクチュエーターが低減速・高トルクのものが使われている。
 - ・高速
 - ・バックドライブブル
 - ・軽量
 - ・安価
- ・アームで類似の構成をとり、安価・安全・高速になれば作り方が代わりロボットの実用分野が一気に広がると考えられる
- ・以下のことが重要と考えられる
 - ・学習のために壊れない
 - ・力制御ができる
 - ・学習初期にコンタクトリッチな動作で使える
 - ・実現場でそのまま使える



Cyber gear

図 4-2-6 ロボティクス研究の現状認識と今後の見通し

【質疑応答】

Q：顧客からは搬送ロボットに対するニーズが大きいとのことであったが、手先など腰から上の需要はあまりないのか。

A：顧客の予算規模によるが、アームも連携させたいとか、さらには全部自動化させたいなどの需要がある。搬送だけだと人が手で載せる必要があり、アームを付けたいということになる。

Q：まだ現場投入するほどにはなっていないということか。

A：我々ができていないだけで、既に工場では動いている。それ以外に、例えばサービス業界などでは、動いている例はほとんどない。物をきちんと持てて役に立つアームは、今日話があった生成AIや強化学習、模倣学習のような枠組みが取り入れられることで、一気に裾野が広がると思う。

Q：発達ロボティクスや認知発達ロボティクスなど國吉研でのバックグラウンドは、今の現場での活動において、基盤モデルの流れなど将来の見通しに役立っていることはあるか。

A：役に立っているというか、目標とするところはある。学生時代は、面白くて世界一のロボットを開発できればということで、認知発達に関する研究室にいた。その後、とにかくロボットを実用化したい、ビジネスにしたいと考えるようになった。その中で、一時期はアームを捨てるなどいろいろな引き算をし

てきた。今は、アームを使えるようにする技術をはじめ、ヒューマノイドが実用化されるのではないかと思える技術が増えてきたこともあり、昔やっていたことが合流されていくのではないかとワクワクしている。

5 | 総合討議

司会：茂木強

これまでのプログラムの流れについておさらいを行う。第1部では基盤モデルや学習、データに関する話題が扱われ、第2部では身体性に焦点を当て、予測符号化や制御との融合について議論した。第3部ではエコシステムに関する話題が取り上げられ、ロボカップや社会適用の現場についての話を伺った。

総合討議では、図5-1に示す論点について発表者とコメントーターの方々でご議論いただく。まずはコメントーターの方々に、これまでの議論に関する感想を述べていただいた後、本題の論点に関する議論に進む。

総合討議

総合討議では以下の論点について、発表者と以下のコメントーターの先生方で議論いただきます。

- ・尾形 哲也（早稲田大学 理工学術院基幹理工学部表現工学科 教授）
- ・川原 圭博（東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻 教授）
- ・栗原 聰（慶應義塾大学 理工学部 教授）

以下の論点において、いま我が国が取り組むべき事柄は何か？

論点1：物理的な身体を獲得したAIの構築に向けた研究を進めることで、実世界で適応的に動けるフィジカルAIシステムが実現できるか？

論点2：物理的な身体を獲得したAIの構築に向けた研究が、身体と知能の統合フレームワークや身体性に基づく知能の解明につながるか（構成論的研究）？

論点3：現場・現実作業を目指した競技会、安価で使い易いプラットフォーム、および、データの蓄積共有基盤などを整備することで、研究開発の加速と社会適用を推進できるか？



11

図5-1 総合討議のコメントーターと論点

尾形²⁸：現状が非常にきれいにまとまとったと感じた。私自身、長らく類似した研究を続けてきたが、この1～2年でこれほどまで急激に進展するとは驚いている。流れ自体は概ね予想していたが、これまでの速さは予想外であった。皆様の気持ちもよく伝わってきた。

川原²⁹：時間も限られているが、話題提供をするようにとのことで、少々時間をいただく。昨日まで、ダボスのAI House³⁰というAIに特化した講演会をETHと共にオーガナイズしていた。Microsoft ResearchのトップPeter LeeやMetaのYann LeCun、DeepMindの研究者らも参加し、マルチステークホルダーで今後のAIがどうなるかについて議論していた。この取り組みは昨年から行っているが、昨年はAIはハイプか、過剰な期待があるのでないかという議論が多かった。しかし今年はそれがなく、ある種本物のイノベーションが

28 尾形 哲也（早稲田大学 理工学術院基幹理工学部表現工学科 教授）

29 川原 圭博（東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻 教授）

30 AI HOUSE DAVOS 2025: AFTER THE HYPER <https://www.aihousedavos.com/davos-2025> (2025年2月6日アクセス)

起こっている前提の議論が多かったのが印象的であった。技術系の人々がそのように述べているのが興味深い点である。

物理学者やGAFAのような大量に資本を投入している企業の上層部が述べていることとしては、AIの暴走がある前提で準備をしなければならない、国際的なルール作りも重要であるが、何より自分たちが作ろうとしているものをしっかり理解し、制御できるものを作る必要がある、といった点が挙げられる。原子力の時も物理学者から同様の議論があったが、それが現在に繋がっていることである。

電力の問題についても議論が集中し、発電所の建設やGPUの消費電力の減少についても度々議題に上がった。また、日本への期待として、ロボットが強いというイメージが依然としてあり、期待の声が多い。一方で少子化の課題についても、日本が課題先進国として注目されており、協調を求める声が多いことが印象的であった。

このテイクアウェイを使ってフィジカルAIに対する期待として、社会課題に向き合うビジネス系の人々とここに集う研究者、そしてロボカップやロボコン、高専を含むコミュニティーがもっと繋がることが重要であると考える。最近搬送用ロボットは販売されてあちこちで使われているが、次には腰から上の部分が重要になる。大企業がこの流れにどこまで投資してくれるかが大事なポイントである。基礎研究のために基盤モデルを作る必要性を大企業がどの程度理解し協力するか、国としてリードすることが非常に重要であると感じる。

もう一つ、今日の参加者の中には昔ロボコンをやっていた方々が多いと思う。ロボコンで足腰を鍛え、研究者となり、その後メーカーに就職するという人材育成のパスは大きい。しかし、ロボコンでの取り組み、研究内容、製品開発の目的意識は各フェーズでずれており、まとまりがないように感じる。それが各国の方向性で一致し、お金や人材、目標を共有できると非常に強力になるのではないかと考える。

栗原³¹：慶應の栗原です。現在人工知能学会の会長も務めている。本日はあえて何も話さなかったが、皆様の研究を拝聴し、AIコミュニティーと同様の悩みを共有していると感じた。それが証拠に、日本がこの分野で勝利するためのビジョンを語る者は一人もおらず、自分たちの立ち位置を確保するための話に終始していた。この分野も日本の存在感を出すことにおいてますます難しくなっていると感じるところであり、だからこそ我々は常にビジョンを持たなければならない。これをどうするかは真剣に考えていかなければならない。

例えば、最近感じることとして、ファンデーションモデルの話題を挙げる。川原先生のご指摘も重くもともである一方、米国ビッグテックの人々が語ることはビッグテックでしか語れないレベルの話である。彼らは資金を持ち、より最先端LLM構築の方法を語るかもしれないが、それは作れる側の立場からの話であり、残念ながら我々が作れるわけではない。鳥の翼から飛ぶことを再発明した時のことを考えると、スケールしたファンデーションモデルの価値は単に大きな基盤モデルを作ったということではなく、身体性ありきの人間が、進化しつつ学習し成長することで獲得する脳という基盤モデルを、巨大なデータと巨大なリソースという全く異なる方法で構築する方法を見いだしたということである。

つまり、ロボットやAIを社会に投入する観点から見た場合、例えば「止まるためにはどうすべきか」「移動するためにはどうすべきか」といった基本的な動作についても、新たな視点から考える必要がある。ファンデーションモデルが存在することによって、新たな動作や機能を持たせる方法はこれまでとは全く異なるアプローチが求められる。私たちは大規模ファンデーションモデルを自ら作ることができないが、それがビッグテックから提供され、それを大規模に活用するという新しい研究開発スタイルが生まれたのだと言えよう。日本の大企業が提供できる資金はビッグテックのそれと比較すると小規模であり、その限られた資金で何ができるのかを考えねばならない。

我々が成功するためには、異なる視点から新たなアプローチを模索することが必要である。例えば、身体性のところは置いとく（とりあえず考えない）とする。特に、境野先生の研究が興味深いのは、身体の動作をローカルなレベルと中枢のレベルに分けて考える点である。身体は特定の動きしかできないので、それを抽象化してプランニングに活用することが可能となる。そのコンセプトをインタラクション研究者の視点でみると、例えば、ロボットはイタコとか憑依のように駆動系だけあればよくて、身体性の主根はこちら側で考えるというような考え方である。こうした異なる角度からファンデーションモデルの活用法を考えることによって、世界に対して日本が有用なものを提供できるかどうかが問われる。

日本は、社会全体でAIやロボットの活用に対して高い親和性を持つ環境が整っている。これは日本の強みであり、この強みを活かして独自の立ち位置を確保できると信じている。しかし、ファンデーションモデルやロボットに関する議論においては、単なる大規模モデルの構築に留まらず、異なる視点からの新たなアプローチを模索する必要がある。具体的な解決策は未だ模索中であるが、このコミュニティから新たな発想や議論が生まれることを強く願っている。

司会：論点ごとに討議しようかと思ったが、時間が20分しかないため、方針を変えたい。本日の発表をいたいた先生方に、この論点についてどのように考えているか、あるいは栗原先生が言られたようなビジョン、川原先生が言られたような国としての方針について、特に今日は若い先生方を集めているので、その若手の考え方や思いをぜひお聞かせいただきたい。

河原塚：我々が何に取り組むべきか、今後どうなっていくかというビジョンについての話と思う。突然の質問で何も考えていなかったが、私がスライドで言いたかったことは、ヒューマノイドをちゃんとやろうということであり、皆で取り組むしかないというところがメインである。

川原：スライドに、「お金さえあればMEVIUSのようなものをいくらでも広げられる」とあったように思うが、多分それは論点3にかなり近いと思う。どのようなハードウェアプラットフォームがあるとよいのか、日本がリードを取れるのかという質問がそのままお答えになるかと思った。

河原塚：なるほど。お金さえあれば、ある程度いろいろなものを作れるのだが…。

松嶋：基本的に私は河原塚先生が示されたスライドに非常に賛成であり、世界で進んできていることをきちんとキャッチアップする必要があるという点については全く同感である。

スケールの問題が浮上しているが、情報産業では同じようなことが何度も繰り返されてきていると感じている。例えば、検索エンジンの時代には、ページランクのような技術が登場し、それをGoogleがシステムとして確立すると、検索の研究はほぼ終了してしまった。また、GPT-2まではOpenAIがトランスファーモデルをオープンに提供していたが、GPT-3ではウェブUIを導入してデータを独占するようになり、他の研究が困難になった。このような現象がロボティクスでも起きる可能性があり、ロボット基盤モデルがないとそれに基づく研究が進められない事態を防ぐために、現状をきちんとフォローしておくことが非常に重要であると感じている。

しかし、個人の研究者としては、他者が行っていることを単にフォローするだけでは最適な戦略ではない。例えば、私はCoRL³²に行った後にTwitterで軽率な発言をして大きな反響を受けたが、個々の研究者が独自の新しいことを進めることで業績を上げることができる。一方で、長期的には大きな流れの上に業績を積み重

ねた方が、業界やコミュニティーに対する貢献は大きい。ここで生じる合成の誤謬をどう管理するかは、研究コミュニティー全体として考えていくべき課題である。どちらのアプローチも重要であるが、そのバランスをどう取るかを考えていかなければならないと感じている。

堂前：現在、産総研の立場で様々な国の予算に関わらせていただいているが、なかなか堅苦しい部分もある。大きな夢を語るようなプロジェクトでも、シーズでなくニーズで考えるべきと言われるようになってきており、ビジョンよりも実装に重点が置かれていることが気になるところである。これはムーンショットのような大規模プロジェクトでも見られる現象である。

また、河原塚先生が最初に提言された話についても非常に共感している。キャッチアップを許すという文化も非常に重要である。国の予算である以上、日本が勝つことが大事であることは確かだが、今の時代、世界と連携しながら、その上で世界を取り込んでいくという考え方が重要である。少子高齢化が進む日本では、日本が中心になってプレゼンスを発揮するだけでなく、いかに連携を強化するかが求められている。現代は多様なつながり方が存在する時代であり、そうした連携を主体に打ち出すことが必要と感じている。

村田：自分は論点2に一番関係していると思う。先ほど栗原先生が少しおっしゃっていた「例えば身体性のことはいったん置いておいて」という部分について、昔は全然同意できなかった。しかし、最近はただ認知ロボティクスの研究を行っているだけでは、どんどん取り残されてしまうと感じている。そのため、私も最近はロボット学習的な視点を取り入れ、実世界にスケールしたものを作りたいと考えている。それがプレゼンでも話させていただいたプレイデータの話である。

元々は、赤ちゃんが好奇心に基づいて動いているように見えることに着目した。しかし、好奇心のメカニズム自体を作るのは非常に難しいので、人の好奇心に基づいたデータをうまく使って学習することを考えている。これにより、その代替を図ろうとしている。

しかし、それをやったとしても、元々の知能の原理に興味があつて研究を続けているが、その研究は小さくまとまりがちであるという問題がある。これは以前インタビューでも話させていただいたことであり、どのようにアピールするか、理解してもらうかに非常に悩んでいる。先生方からアドバイスがあれば逆にお聞きしたい。

境野：若干ポジショントークにもなってしまうかもしれないが、VLAをやっている方々がいる中でこういうことを言うのもあれだが、VLAについてはもう3年、5年で少なくともサチってしまうのではないかと感じている。今からあそこで頑張っていてもしようがないと思う。私の立場からすると、むしろもっとフィジカルな部分をやるべきだと思う。そして、現場や1つのロボット、1つのタスクにおいても全て違うため、そうしたところを一つ一つ詰めていく方が結局遠回りしても近道であるように感じる。

先ほどPFRの寺田さんもおっしゃっていたが、要するにまず使えるものを作る、まず動くものを作ることが重要である。何でもできる夢のような最高のロボットを作ることから始めるのではなく、例えばキュウリの箱詰めやAmazonの倉庫での物の出入りといったレベルのタスクを確実に詰めていくことが大事である。このような方向性で進む方が、変にアメリカや中国の流れに流されずに済むように感じる。

小林：取りあえず、今までの話で出ているように、キャッチアップが大事というのはそのとおりである。しかし、キャッチアップをどのレベルで行うかという点については、一考する必要がある。キャッチアップに全力を注いで「追いつけ追い越せ」というシナリオを実行しても、現実的に追い越せる気はしない。既に相手にリードされており、資金力も圧倒的に上である段階で追い越すのは難しいため、キャッチアップをどのレベルまで行うかを慎重に考える必要がある。

また、個人的な意見としては、理論側をきちんと育てるべきであると考えている。強化学習に関する議論をする際に、強化学習を理解している人が少ないという問題がある。現状ではライブラリとして使える形になっ

ているため、理論を理解していないくとも使うことができる。しかし、そのような人たちは問題が発生した時にブレークスルーを起こせる人間ではない。結果として、誰かがブレークスルーを起こしたもの再度キャッチアップするだけになってしまう。

そのため、きちんと理論面でリードできるように、理解している人たちを育てることが重要である。新しい理論を先立てて構築する方向を強化するべきだと考える。しかし、それを個人で行う時代ではなくなってきているため、岡田先生が話されていたようなコミュニティー主導の研究グループを積極的に作り、理論を理解している人間を増やし、議論の場を広げることが必要であると感じている。

岡田：今日の話でいうと、私はコミュニティーをどうやって作っていくかが重要だと思う。その大事さは皆さん理解していると思うが、例えばCRESTのようなプロジェクトでも採択された後に合宿をして、他のグループとも協力してコミュニティーを作れと言われることがある。しかし、それでは後から言ってもうまくいかないで、実際に成功した例はあまりない。

まず、コミュニティーを作ることが重要である。そして、そこから目的を共有して進めることができるような仕組みをぜひJST主導で実現してほしい。お金がかかると言ったが、多少はお金がかかるので、そういうところに予算をつけてもらい、少しだけ長い目で見て取り組むことが必要である。ぜひそのような取り組みを始めていただけだと良いと思う。

寺田：私がやってきた人工知能の分野では、ロボットが動くという点や、現在世界で厳しい競争が繰り広げられている中で、岡田先生の話に共感している。特に、コミュニティーを作るという話が非常に共感できる。私は組織を溶かすことが必要なのではないかと考えている。アメリカでもビッグテックの一部のグループが分離して新しいベンチャーを立ち上げたり、Physical Intelligenceのようにアカデミックな人も交じって活動したりしている。

今の時代、企業や研究所といった組織に分かれて活動していると、競争に負けがちになるのではないかと思う。例としてはタイミー（Timee）やウーバーのように、組織に属さずに多くの人々が動くというモデルがあるが、研究の分野においても同様の枠組みを作ることができるとよい。アカデミックな志を持つ人たちとビジネスをやりたい人たちがもっと有機的にこのようなものを進められると良いと思う。

河原塚：いろんな皆さんのお話を聞いても言いたいことは、多くはないが、キャッチアップを許すという点について、私は最初に言った通り、これが一番大事だと思っている。確かに研究者として最適なムードではなく、どのくらいで限界に達するかという議論も多いだろうが、結局、自分の中で強いベースラインを持つことが非常に重要である。

自分の研究を一生懸命やっていくと、気づいた時には、他者を追い越すことができない、もしくは追いつくことすらできない状況に陥ることがある。キャッチアップに多くの時間がかかると思われがちだが、意外とそうではないと感じている。私はもう少し皆が傲慢であっても良いと思っており、それほど大変ではないと考えている。

日本にも各分野で強い研究者が多く存在するし、多少の協力が得られれば、キャッチアップと並行して自分の強いベースラインを同時に進めることができると考えている。自分の強みを少し加えるだけでも、素晴らしい論文や使える研究成果になることがある。自分の強みだけにこだわると面白みが欠けることがあるため、パラレルに進めることが大事である。

ハードウェアの設計に関しても、一人ひとりが最初から触れて作ることが非常に重要である。既存のものを使うよりも、一から理解し、その上でさらに自分の強みをハードウェアやソフトウェアに追加することが必要である。そうすることで、簡単に最先端の技術を取り入れられるようなハードウェアを作ることが望ましいと考えている。

尾形：ビジョンに関して、私が語っていなかったので少しだけ。自分の中では「こうなる（身体性 + End2End）よね、それは」という予想していて、昔から研究をしてきた。確かにその方向になったと実感しているが、先ほども言った通り、アメリカや中国の進展を見てすごいと感じている。

先日、松尾研究室で多くの若い人々が集まるのを観察していた。彼らのバックグラウンドは、画像、自然言語、ロボット制御とばらばらである。たとえば理論といっても、境野先生が言う制御理論と小林先生が言う強化学習の理論は異なる。しかし、データドリブンという点で共通の理解が生まれている。私はデータというよりも経験と呼ぶ方が好きだが、いずれにしても皆が似たものを追求し始めたように感じている。

世界を見つめることは当然必要である。そしてデータを正しく使い、経験的にロボットを動かすことが重要であることが明確に分かり始め、世界中の人々が興味を持っている。

日本はロボット応用を長年リードしており、その活用先（何が難しいのか、何がインパクトがあるのか）について非常によく知っている。これが間違いなく大きな優位性である。まさに日本の立場からリードできるチャンスが来たと感じている。このため、大きく「身体性知能」を全面に押し出したプロジェクトを立ち上げてほしいと考えている。

司会：私の不手際で討議の時間がなくなってしまった。しかし、逆に個別の意見を聞くことができたのは良かったと思う。最後に木村より閉会の言葉を述べる。

木村：どうも今日は長い間ありがとうございました。いろんなことを聞かせていただき、とても刺激になった。特に若い方々の発表は非常に刺激的であり、これからこの分野にもっと力を入れていかなければならないと感じた。具体的にどう進めるかという点について、コミュニティーの重要性を再認識した。最近私もこの点について同じことを言っているが、縦割りを解消し、様々な人々が組織にこだわらずに対話を始めることが最も早い方法だと思っている。今日の議論で同様に感じたことが強調されたのは非常に有意義であった。アカデミアや産業を含む様々な分野からの人々が混じり合うことの重要性が再確認できた。

時間が足りなかつたが積極的なコメントをいただき感謝している。これをインプットとして次のステップに進んでいきたい。また、今後も個別にご相談させていただくことがあるかと思うが、その際にはどうかよろしくお願いしたい。コメンテーターの先生方も長い間お聞きいただき、コメントをいただき感謝している。今後ともプレゼンター、コメンテーターの皆様、よろしくお願いしたい。

私の挨拶はこれで終わりにする。本当に今日は長い間ありがとうございました。

付録 ワークショップ開催概要

付録

1. 概要

日程：2025年1月26日（日）13:00～16:00

場所：オンライン開催

主催：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）

2. 開催趣旨

JST研究開発戦略センター（CRDS）は、科学技術に求められる社会的・経済的なニーズを踏まえ、科学技術の現状を俯瞰し、国として重点的に推進すべき研究領域や課題、その推進方策に関する提言を行っている。この度、この活動の一環として、AIとロボティクス分野の進展において今後重要となるであろう、フィジカル空間での影響力を持つAI（フィジカルAIシステム）に関する研究開発課題とその方向性について議論を行うワークショップを開催する。

フィジカルAIシステムとは、物理的環境と直接相互作用し、人間のように柔軟かつ適応的にタスクを遂行する能力を備えたAIロボットを指す。このシステムは、サイバー空間で成果を上げてきた従来のAI技術とは異なり、実世界での課題解決に向けた新たな価値を創出することを目指している。

本ワークショップでは、フィジカルAIシステムが多様なタスク環境に適応するための基盤モデルの構築、身体性知能の解明に向けた基礎研究、人間との協働作業における安全性や信頼性の確保といった論点についての最新動向を共有する。総合討議では、実世界タスクの遂行能力の限界とその克服、身体性知能の理論的進展と実践的応用、人間とロボットの相互作用に関する社会的・倫理的な課題、さらにAIとロボティクスを包括する研究コミュニティの育成について、参加者が知見を共有し、活発な議論を行う予定である。

3. プログラム（敬称略）

- (1) 挨拶 木村康則（JST CRDS 上席フェロー）
- (2) 趣旨説明 茂木強（JST CRDS フェロー）（10分）
- (3) 発表（15分（各発表13分+質疑2分）×8=120分）

第一部：実世界で適応的に動けるフィジカルAIの開発

- ・河原塚 健人（東京大学大学院情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻 特任助教）
- ・松嶋 達也（東京大学 松尾・岩澤研究室 特任研究員）
- ・堂前 幸康（産業技術総合研究所 チーム長）

第二部：身体性に基づく知能の解明に向けた研究

- ・村田 真悟（慶應義塾大学 理工学部 電気情報工学科 准教授）
- ・境野 翔（筑波大学 システム情報系 准教授）
- ・小林 泰介（国立情報学研究所 情報学プリンシブル研究系 助教）

第三部：研究開発エコシステム

- ・岡田 浩之（東京情報デザイン専門職大学 情報デザイン学部 教授）
- ・寺田 耕志（Preferred Robotics CTO）

- (4) 総合討議（50分）

コメンテーター：

- ・尾形 哲也（早稲田大学 理工学術院基幹理工学部表現工学科 教授）

- ・川原 圭博（東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻 教授）
- ・栗原 聰（慶應義塾大学 理工学部 教授）

聴講参加者（上記参加者以外）

文部科学省	3名
経済産業省	2名
NEDO	7名
大学・企業	6名
JST	23名
合計	51名

ワークショップ企画・報告書編纂メンバー

総括責任者	木村 康則	上席フェロー	システム・情報科学技術ユニット
リーダー	茂木 強	フェロー	システム・情報科学技術ユニット
メンバー	青木 孝 嶋田 義皓 ¹⁾ 平池 龍一 福島 俊一 吉脇 理雄 馬場 寿夫 小川 泰嗣 桐葉 佳明 森下 明	フェロー フェロー フェロー フェロー フェロー フェロー 技術主幹 主任専門員 主任専門員	システム・情報科学技術ユニット システム・情報科学技術ユニット システム・情報科学技術ユニット システム・情報科学技術ユニット システム・情報科学技術ユニット ナノテクノロジー・材料ユニット ムーンショット型研究開発事業部 戦略研究推進部 未来創造研究開発推進部

1) 2024年9月まで

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

CRDS-FY2024-WR-07

フィジカルAIシステム

令和7年3月 March 2025

ISBN 978-4-88890-970-9

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。

なお、本報告書の参考文献としてインターネット上の情報が掲載されている場合には、本報告書の発行日の1ヶ月前の日付で入手しているものです。

上記日付以降後の情報の更新は行わないものとします。

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.

Please note that all web references in this report were last checked one month prior to publication.

CRDS is not responsible for any changes in content after this date.

ISBN 978-4-88890-970-9

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



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