

～身体性相互作用の秩序による智能創発ロボティクス基盤～

慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科 准教授 野崎貴裕

記録者：佐藤知正（東京大学名誉教授）

概要

人間の五感の中で唯一「外界を変えうる」感覚は触覚（力触覚）である。視覚・聴覚はすでに産業応用が進んでいるが、力触覚こそが物理的作業を可能にする第三の感覚技術として今後の実用化が期待される。野崎貴裕准教授（慶應義塾大学）は、力触覚技術を核に置いた「リアルハプティクス」と、それを AI と統合した智能創発ロボティクス基盤の構築を進めている。本講演では、①力指令と力制御の概念的区別、②遠隔操作・ロボットハンドによる義手・食品加工・建設土木分野への応用、③AI と力制御を組み合わせた技能再現の枠組み、④力学的パワー（エネルギーフロー）に基づく環境理解と身体的試行錯誤の重要性、⑤JST ムーンショット採択プロジェクトによる四層アーキテクチャ統合という 5 つの核心テーマに関して説明した。特に「力指令＝目標設定」と「力制御＝目標実現」の区別、および「押してだめなら引いてみる」型の試行（探索的接触による分岐解決能力）こそが、次世代ロボット AI 基盤の中核をなすという主張は、今後の日本の AI 戦略において力に着目した独自の道筋を示すものとして注目される。また、講演に続く議論時に出された、エネルギーフローという考え方の重要性にもふれる。

第 1 章 緒論

ロボットが人や物に接触しながら作業するとき、「どれだけの力を出すか」という力の扱いが根本的な課題となる。しかし現代の産業ロボットの 99% 以上は位置制御で動作しており、力をどのようにうまく利用するのかの実用化は依然として限られた領域にとどまっている。一方で、ヒューマノイドロボットを中心とした 20 を超える多自由度の次世代ロボットの普及が現実味を帯びてきた今、多品種少量生産や人との協働を想定すると、位置制御によらない力制御技術の重要性は急速に高まっている。

このような状況を背景に、講演者は、力触覚（ハプティクス）を「外界を変えうる唯一の感覚」と位置づけ、その工学的実現を中心に据えた研究を進めてきた。専門はロボット工学・制御工学・電機工学であり、MIT への留学経験と医学・行政との関わりも持ちながら、産業応用から医療・福祉・建設土木まで幅広い実装に取り組んでいる。

本稿は、講演者の説明内容を、読者が力触覚ロボティクスの本質と将来展望を理解できるよう整理したものである。第 2 章での力指令と力制御の概念整理から始まり、第 3 章では実応用事例を、そして第 4 章では AI 統合の枠組みと力学的パワーに基づく智能創発アーキテクチャへと議論を展開する。最後に第 5 章で、これらが日本独自の AI 戦略につながる可能性と残された将来課題をまとめる。

第 2 章 力計画法：力指令と力制御の本質

2-1 外界を変えうる唯一の感覚としての力

人間は視覚・聴覚・触覚・味覚・嗅覚の五感で現実世界を知覚している。このうち視覚と聴覚はすでにデジタル化・実用化が進んでいる。しかし物理的な作業—ものをつかむ、運ぶ、押す、曲げる—を実現するためには、力の感覚（触覚）が不可欠である。講演者はこの点を次のように強調しい：「視覚・聴覚は受動的で、状況は変わらない。触覚だけが能動的に状況を変えることができる。五感の中で外の世界を変えうるのは力の感覚だけである」。

これに関連して、ハプティクス（触覚に関する学問）には、スマートフォンのバイブレーションのような皮膚感覚型と、実際に力を介して物理的相互作用を行う力触覚型の二種類がある。前者はゲームなどの応用に限られるが、後者こそが産業・医療・建設など実世界作業の要となる技術領域である。

2-2 力指令と力制御の概念的区別

講演者の主張の核心は、「力指令」と「力制御」を明確に区別することである。この区別は設計思想の根幹に関わる。力指令とは「どれだけの力が必要かを定めること（目標設定）」であり、力制御とは「その力を実際に実現すること（目標実現）」である。

図 1 に、この概念を整理したスライドを示す。コップをつかむ例で言えば、「落とさずかつ強

く握りすぎないために5Nが適切」と判断するのが力指令であり、実際に5Nになるようにフィードバック制御するのが力制御である。この両者はどちらが欠けてもロボットによる繊細な作業は実現しない。



図1 力指令と力制御の違い：力指令は目標設定、力制御は目標実現

位置制御と力制御は双対（トレードオフ）の関係にある。剛性の高い（バネ定数 $\partial f / \partial x \rightarrow \infty$ ）状態が位置制御であり、剛性ゼロ（ $\partial f / \partial x \rightarrow 0$ ）の状態が純粋な力制御である。産業用ロボットにおいては定まった形状の部品を扱うため、また、再現性を確保するためにも、位置精度が確保できるメカニズムを有するマニピュレータを位置制御するのが最適だった。これに対し、位置精度が確保し難い多数の自由を有するヒューマノイドロボットにおいて、多様な対象・環境へ適応するためには力制御が本質的に重要となる。

2-3 3種類の接触制御方式

ロボットの接触による力制御には大きく3つの方式がある（図2参照）。①純粋な力制御（Force Control）：力を目標値として直接制御する。最も純粋だが実装が難しい。②インピーダンス制御：力と運動の関係をバネ・ダンパとして設計し、外力に応じて自然に動く。内側が力制御である。③アドミッタンス制御：外力が加わったときに位置を変化させる。内側が位置制御であり、現在の産業ロボットとの相性が良い。



図2 ロボットの接触制御の3方式（純粋な力制御・インピーダンス制御・アドミッタンス制御）

野崎研究室では産業ロボットを使う場合にはアドミッタンス制御を採用し、一方で純粋な力制御ベースのシステム開発も並行して進めている。

2-4 力指令の生成：人の技能のデジタル化

力制御の実現に加えて、「何Nで握むべきか」という力指令値の生成は、力制御とは独立した技術課題である。講演者は、力指令生成とその実行の枠組

みとして、図3に示す三段階プロセスを提案している。①遠隔操作で人の操作情報（動作・力・把持速度・対象状態など）を取得してデータ化する。②動作情報と画像情報から、多変量解析・生成AIによって「何Nが適切か」を推定し力指令 \$F_d\$ を生成する。発展的には、手順を言語化した上で手探りによる試行錯誤（接触・力覚・画像フィードバック）によって動作を補正するパターンも取り入れる。③生成した力指令 \$F_d\$ をロボットの力制御コントローラに渡し、実際の把持力 \$F\$ として実現する。



図3 人の操作情報から力指令を生成する三段階プロセス（遠隔操作×生成AI×力制御）

この仕組みにおいて、力指令はAIが決め、力制御は工学的フィードバックで実現するという役割分担が、今後の鍵である。役割を分けることで、汎用性が確保され、安定性と説明性が向上し、AIと制御の統合が現実的になる。

2-5 力計画法：試行錯誤とエネルギーフロー

今回の講演では、力指令をロボット自身が生成するためには何が必要かという議論も展開された。現在のAIは「力指令は出せても力制御できない」という限界も抱えている。想定外の硬さや外乱が加わった途端に対応が破綻する。

この問題を克服するカギが「試行錯誤（手探り）による分岐解決」である。「押してだめなら引いてみる」という人間の行動のように、接触の反応から状況を判別して動作を修正できる能力こそ、実世界ロボットに不可欠な力計画法の本質である。これは佐藤知正教授（東大名誉教授）がマッチをするロボットの研究で体験したことと一致する：柔らかいマニピュレータでも、特異姿勢を活かした力の入れ方（力線を短く保つこと）と力を加減する計画によって作業が成功する。

また、谷川民生氏（産業技術総合研究所）との質疑では、動作データを時間軸の位置・力の瞬時値としてではなく、「力学的パワー（力×速度、エネルギーの流れ）」として捉え直すことの重要性が指摘された。位置・力の瞬時値だけでは環境の構造（拘束条件・方向性）が見えにくい、力学的パワーで見れば「どこにエネルギーが流れ、どこで止まっているか」が、時間軸で明確になり、環境との相互作用の意味が理解できる。このエネルギーフローに基

づく動作理解こそ、人間が無意識に行っている力計画の本質であると考えられる。

第3章 リアルハプティクスの研究成果と応用

3-1 義手：工学的に人の手を再現する

講演者の研究室では、力を精緻に制御するロボットハンドを開発し、ブルーベリーやイチゴなど繊細な対象物を壊さずに把持することを実証した。さらにこのハンドを右手欠損者に装着したところ、市販の筋電義手（約 300 万円）がポテトチップスを握りつぶしてしまうのに対し、野崎研の義手では力加減を調節してそっと保持できることを確認した。STEF テストでは健常者と同等のハンドリング性能が実証された。これは「工学的に人の手を作れる」ことを示す成果であり、力制御の産業応用への道筋を示している。

3-2 危険作業の無人化：山岳トンネル火薬装填

最も注目される社会応用が、山岳トンネル掘削における自動火薬装填システムである（図 4）。トンネル掘削では削孔→装薬→発破→ずり処理というサイクルを繰り返すが、火薬を穴に装填する装薬作業は作業員が繊細な力加減と指先の感覚で行う最も危険な工程である。2021 年のリニア工事現場の事故のように、岩が崩れて作業員が死傷する事故が実際に起きている。



図4 山岳トンネル掘削における自動火薬装填システム（削孔から発破までの6工程）

大林組との共同研究では、トンネル外部のオペレータールームから遠隔操作で火薬を装填・発破することに成功した。オペレーターは映像を見ながら操作し、火薬棒が穴に当たる力加減がリアルタイムで手元に伝わる（リアルハプティクス）。トンネル外部と内部は約 300 メートル離れており、商用ネットワークを介した遠隔発破を長野県の実現場で達成した。

3-3 食品加工・農業への展開

生の鶏肉の切り分けや農産物の選別は、従来ロボット化が困難だった工程の典型例である。野崎研究室では遠隔操作で人の力加減をデータ化し、そのコツを AI 解析で再現する仕組みを構築した（図 5）。コンベアの上流で画像処理して対象を認識し、人の

動作データに基づいて適切な力指令を生成してロボットに指令する。



図5 AIによって人の技能（力加減）を保存・編集・再現する仕組み

これらの遠隔操作技術は単に「遠くで作業できる」だけではなく、「人の動作をデジタル化して AI に学習させる」ための力指令データ収集基盤として機能する点が本質的な価値である。シブヤ精機との連携による農協向けロボット選別システムでは、実際の生産ラインへの導入が進んでいる。

3-4 東西日本を結ぶ遠隔左官作業

東日本と西日本を商用ネットワークでつないだ遠隔左官作業（職人が遠隔から壁を塗る）では、現場施工と同等の平坦な壁の作製に成功した。職人は壁の凹凸や乾き具合に応じてリアルタイムで力加減を変えており、力制御が熟練技能の再現と伝達を可能にすることが実証された。これらの成果は、リアルハプティクスが産業・建設・医療など多様な分野で実用化できることを示している。

第4章 AI との統合：知能創発的ハプティクス基盤

4-1 現在の AI の限界と力制御の役割

現在の大規模 AI（VLA など）は状況把握や手順生成（言語・画像処理）は得意だが、実際の物理的作業において「力指令は出せても力制御できない」という本質的な限界を持つ。想定外の硬さ・摩擦・外乱が生じた瞬間に破綻する。ドアを押してみても開かなければ引いてみるという、人間にとって自然な試行錯誤が AI には難しい。この「接触による分岐解決能力」の欠如が、現在の AI ロボットが実世界作業を完遂できない根本原因である。

講演者は、膨大なデータと電力を投じる米中の大規模 AI 戦略に対し、日本独自のアプローチとして「力に着目した AI 戦略」を提唱する。力制御・ハプティクス技術を核に据え、データ効率・安全性・汎用性の観点で差別化する戦略である。

4-2 力学的パワーによる環境理解

接触環境を理解するための新たな視点として、講演者は力学的パワー（力×速度）による動作データの解釈を提唱する（図 6）。従来は時間軸上の位置と力の瞬時値としてデータを見ていたが、これでは

環境の構造（どこが固定されているか、どの方向に拘束があるか）が見えにくい。

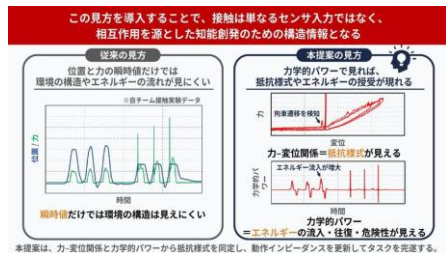


図6 力学的パワーによる抵抗様式の同定（従来の瞬時値表現との比較）

力ー変位関係に変換すると拘束遷移（抵抗様式）が明確に現れ、力学的パワーで見るとエネルギーの流入・往復・蓄積が可視化される。この見方を導入することで、接触は単なるセンサ入力ではなく「相互作用を源とした知能創発のための構造情報」となる。人間がドアを開けるときの、ドアの幅を幾何学的に計算するのではなく「押した力がどこで止まり、どこに流れるか」というパワーの空振り度として方向を知覚しているという谷川氏の指摘は、まさにこの視点と一致する。

4-3 四層アーキテクチャによる統合

講演者は、ロボット知能の構造として四層アーキテクチャを提案する（図7）。最上位の社会規範層は「無理に押さない」「周囲の安全確保」など行為の許容条件を規定する。次の記号層はLLM/VLAにより目的を手順に変換する。動作層は世界モデル・フローマッチングにより軌道と接触戦略を生成する。最底層の制御層は1000Hzの力制御で実行し10msで異常検知・復帰する。

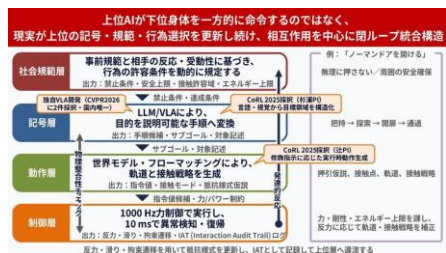


図7 四層アーキテクチャ（社会規範層・記号層・動作層・制御層の閉ループ統合）

この構造の本質は「上位AIが下位身体を一方的に命令するのではなく、現実世界での相互作用結果が上位の記号・規範・行為選択を更新し続ける閉ループ統合」にある。反力・滑り・拘束遷移をIAT（Interaction Audit Trail）として記録し上位層へ還流することで、環境との相互作用の中で自律的に知能が創発されていく構造となる。

このプロジェクトはJST ムーンショット目標3（「2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」）

のPMとして採択されており、2030年に試験導入と民間投資判断が可能な統合プロトタイプの提示を目指している。

第5章 まとめと将来課題

本講演では、慶應義塾大学・野崎貴裕准教授が、力触覚（ハプティクス）を「外界を変えうる唯一の感覚」と位置づけ、その工学的実現を核に置いた知能創発ロボティクス基盤の構想と研究成果を包括的に論じた。講演の主要な主張は次の5点に集約される。第一に、力指令（目標設定：何Nが適切か）と力制御（目標実現：その力を実際に出す）を明確に区別することであり、この概念整理こそ設計思想の根幹をなす。第二に、遠隔操作によって人の力加減をデジタル化し、AI解析で力指令を生成するプロセスが、義手・左官・火薬装填・食品加工など幅広い実応用で有効であることを実証した。第三に、現在のAIが「力指令は出せても力制御できない」という本質的限界を持ち、その克服には接触による試行錯誤（手探りによる分岐解決）が不可欠であることを示した。第四に、動作データを力学的パワー（エネルギーフロー）の次元で捉え直すことで、環境の拘束構造が明示化され、「押してだめなら引いてみる」という人間の力計画法の本質に近づけることを論じた。第五に、社会規範層・記号層・動作層・制御層の四層アーキテクチャによる閉ループ統合が、米中の大規模AI戦略とは異なる日本独自の「力に着目したAI戦略」の具体的な姿であることを示した。

将来課題としては、①ヒューマノイドを含む柔軟マニピュレータへの力制御適用における摩擦・弾性・慣性のモデル化と補償技術の高度化、②力指令生成アルゴリズム（強化学習・生成AI）と力制御側の適切な統合アーキテクチャの確立、③力学的パワー（エネルギーフロー）を用いた抵抗様式の自動同定・分岐解決技術の理論的深化、④力順送型バイラテラル制御を活用した技能データ収集と模倣学習手法の実用化（境野先生らのアプローチとの連携）、⑤四層アーキテクチャにおける各層のReal2Real適応とシミュレーションギャップの解消、⑥2030年までのJST ムーンショット統合プロトタイプの試験導入と民間投資判断可能な水準への到達、の6点が挙げられる。これらを実現することで、日本が力触覚AIロボティクスという独自の強みを持ち、世界のロボット・AI競争において差別化した存在感を示すことが期待される。

（記録者注）本稿は、野崎貴裕准教授の講演スライドおよび録音文字起こし（2026年6月16日）をもとに整理した講演記録である。記録者：佐藤知正