

研究終了報告書

「情報化身体の学習理論に基づく成長ロボットの革新と創成」

研究期間：2020年12月～2023年3月

研究者：河原塚 健人

加速フェーズ期間：2023年4月～2024年3月

1. 研究のねらい

これまでのロボット制御は、人間が様々な制御器・認識器をロボットや環境ごとに、かつ必要最低限のセンサ情報を用いて低次元空間で記述し、これらを階層的に結合することで全体のシステムを形成してきた。しかし、この方法はプログラムの記述に膨大な労力を要すると同時に、人間が想定可能な次元の要素しか含むことができないため、冗長に存在するセンサやアクチュエータ同士の複雑な関係性を最大限に活用できないという問題がある。一方で人間の内部システムについて考えると、内部感覚、視覚、聴覚、触覚等の多様な感覚器、そして筋肉の冗長な駆動系を有し、これらの関係性を自身の動作経験から常に学習・更新して、現在の身体状態変化や動作環境に適応していく仕組みを持つ。これに対して近年、大規模なデータを直接扱い暗黙的に情報を抽出して制御入力を決定する End-to-End な学習型システムが注目されてきている。この構造は多様なセンサ情報を一度に扱うことができるため、センサの冗長性を活かすことが可能である。

本研究課題では、この現在のパラダイムをさらに一歩進めることで、成長するロボットへの革新を目指す。冗長なセンサ・アクチュエータの因果的・空間的な関係性を表現する情報化身体モデルの構築と学習を考え、これを環境や現在状態に常に適応させ、その関係性から異常検知・相互補完・相互制御を含む認識制御コンポーネントを自己生成しつつ成長していくシステムを開発する。周囲の環境や道具を使い身体を拘束・拡張する戦略、不要なセンサの排除や有用なセンサ・アクチュエータの追加による冗長化等に関する応用理論も提供する。これは、システム自身が膨大な情報から自己判断し、自己修復し、新たな動作を生成する、ロボット知能の革新へと繋がる成長する AI への道を切り開くものである。また、ロボットだけでなく同様に膨大なデータを駆使しセンシングと制御を行う必要のある無人コンビニやスマートシティなど、今後人口減少や高齢化に伴い変容する社会を支えるフィールドに大きなインパクトを与える可能性がある。人間が考える負担・時間を減らし、自己判断・自己成長する AI を構築していくことが本研究の主なねらいである。

前年度までの ACT-X で解決することのできなかった課題として、(i)身体図式の応用理論における能動的な身体変形、(ii)より上位の複雑な認識行動制御の獲得が挙げられる。(i)について、これまでの成果から身体図式を用いた状態推定・制御・異常検知・シミュレーションが可能となり、ネットワーク入出力が増減する身体変形に対しても逐次的に適応可能な理論が構築できている。しかし、これは受動的な身体変形への適応であり、真に成長するという意味で、能動的な身体変形を行っているわけではない。また、(ii)について、これまで身体図式獲得という、主に身体に近い範囲のセンサ・アクチュエータ間の相関関係学習を扱ってきた。そのため、道具の先端を制



御したり、把持した布の形状を制御したりといった動作は可能な一方、より上位の片付け行動や調理行動、実機学習では難しい複雑かつバランスの必要な歩行やジャンプ等を直接生成することは難しい。

そこで加速フェーズでは、(i)と(ii)の問題に大きく取り組む。(i)については、能動的な身体変形が可能なハードウェア自体が存在しないため、新たな身体設計を行う。特にワイヤ駆動構造に着目し、ワイヤ端点を付け替えてできる拡張性の高い身体の高構築を行う。また、受動的な身体変形とは異なり、能動的な身体変形は様々な身体に変形したうえで動作を行い、実現したい動作を適切に実行できる身体かを判断する必要がある。一方でこのプロセスは現実的な時間では難しく、シミュレーションにおける身体構築と身体設計最適化を併用することで、より効率的に能動的な身体変形を行う。(ii)については、より上位の複雑な認識行動制御を行うため、実機で長期間かつ安全に身体図式学習を実行可能な、超柔軟身体を有するハードウェア開発を行う。また、実機学習のみでは効率に限界があるため、(i)と同様にシミュレーションを活用した動作戦略を考える。強化学習に基づく大規模試行実験と身体図式学習を併用し、より効率的かつ自律的な動作生成を可能とする。加えて、人間の成長にはセンサとアクチュエータの関係だけでなく、そこから発現する言語も重要であり、複雑な状態認識や意味的な情報を含む行動生成に欠かせない。そこで、言語と認識能力、制御能力を結び付け、大規模なデータセットから得られた画像と言語の対応に関する知識を用い、学習の効率化や高度な認識能力を付与する。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究課題では、「情報化身体の学習理論に基づく成長ロボットの革新と創成」を目指し、主にA)~E)の5つの研究テーマを進めた。なお、研究を進めるうちに、この情報化身体は人間の感覚と運動の相関関係を暗黙的に表現する”身体図式”という言葉がより適切であると考え、これを主に用いている。A)「**身体図式の学習理論構築**」では、成長するロボットが持つべき身体図式の要件を定め、センサの相関関係を表すマスク表現や暗黙的なダイナミクス変化を埋め込み可能なParametric Bias、経験を基にしたネットワーク構造の自動決定機能を持つ新しい身体図式モデルの構築を行った。B)「**身体図式の応用理論**」では、獲得された身体図式モデルを用いたロボットの身体制御、状態推定、異常検知、シミュレーション、逐次的な環境適応、物体/環境の認識を可能にした。センサ・アクチュエータの追加と削除にも対応し、素早い再学習が可能である。また、身体だけでなく、それを周囲の道具や環境のダイナミクスまで含むように任意に拡張することができる。C)「**冗長センサを持つロボット身体開発**」では、身体図式の学習理論をロボットに適用するにあたり、十分なセンサ・アクチュエータを持つ身体の高構築を行った。筋骨格ヒューマノイドに聴覚や足裏接触覚、臀部接触覚を加えると同時に、筋骨格双腕とメカナム台車が合体したロボット、柔軟複雑で多様なセンサを持つ筋骨格脚、高い出力と伝達効率で高跳躍と連続跳躍が可能なロボット、多点接触検知可能な力覚を有する低剛性樹脂製ロボットの構築を行った。D)「**筋骨格ヒューマノイドへの適用**」では、柔軟複雑な筋骨格ロボットの身体制御から筋破断時の継続的な動作戦略、筋追加によるタスクに応じた身体図式変化、可変剛性機構と布素材変化を考慮した動的布操作を可能とした。E)「**多様なロボットへの一般化**」では、筋骨格ヒューマノイドのみならず、台車

型ロボットの床摩擦変化と確率的挙動を考慮した安定走行制御、軸駆動型ロボットにおける人間の動作スタイルを考慮した模倣学習や把持状態変化を考慮した道具先端操作学習、低剛性樹脂製ロボットにおける拭き動作や自律的視覚サーボ学習等に成功した。

加速フェーズでは、真の成長とより高度で長期的な動作実現を目指し、F)–H)の3つの研究テーマに取り組んだ。F)「超柔軟性と拡張性を持つロボット身体開発」では、超柔軟性と拡張性についてそれぞれ、ダイレクトドライブ駆動とワイヤ駆動を応用し目的を達成した。ワイヤ駆動方式と無減速のダイレクトドライブモータを併用することで、伝達効率を極限まで高めた超柔軟身体を実現した。また、ワイヤの始点・中継点・終止点を変更することで容易にその身体性能を変更できる点に着目し、ワイヤ端点を取り外し可能なカラビナ型とし、環境に融合可能な身体を構築した。G)「シミュレーションを活用した身体図式学習」では、幾何シミュレータを用いたモジュラーロボットの身体設計の自動最適化、F)で開発したロボットのワイヤ配置設計の最適化を行った。また、シミュレータ上の大規模な強化学習と人間の動きの模倣に基づく多様な歩容生成を可能とした。H)「言語を介した上位認識行動学習戦略」では、大規模言語モデルによる長期的で適応的な動作計画、大規模視覚-言語モデルを利用した環境の離散的・連続状態認識を行い、より高度な認識行動を達成した。また、これまでの深層予測モデル学習と大規模視覚-言語モデルの組み合わせによる視界制御や、画像-言語-制御入力の間接関係を学習するロボット基盤モデルの開発に携わった。

(2) 詳細

概要で述べた研究テーマ A)–E)における当初の予定と追加計画について下図にまとめ、以下にそれぞれの詳細な研究成果と達成状況について述べる。

当初の予定 / 追加の計画		2020年度	2021年度	2022年度
A) 身体図式の学習理論構築 B) 身体図式の応用理論構築 C) 冗長センサを持つロボット身体開発 D) 筋骨格ヒューマノイドへの適用 E) 多様なロボットへの一般化	A)	データ構造の調査 特殊AutoEncoder型実装	身体図式の要件定義 入出力の自動決定	身体変形理論
	B)	制御・状態推定・異常検知・シミュレーション・オンライン更新	センサ・アクチュエータの追加と削除への対応	強化学習との併用
	C)	人体模倣両耳構造 センサグローブ接続	筋骨格台車Musashi-W 筋骨格脚MusashiOLegs 冗長センサフット	一本脚ロボットRAMIEL 低剛性単腕MyCobotと 多点接触センサ
	D)	静的/動的姿勢制御 模倣学習 静的道具操作	動的バランス制御 動的柔軟布操作	筋破断と筋追加への対応
	E)	双腕ロボットPR2 (模倣学習・道具操作) 台車ロボットFetch (促回り制御)	低剛性ロボットKXR (全身道具操作)	低剛性単腕MyCobot (自律視覚サーボ・拭き動作) 一本脚ロボットRAMIEL (高跳躍・運動制御)
		2020/達成範囲	2021/達成範囲	2022/達成範囲

研究テーマ A)「身体図式の学習理論構築」

まず、情報化身体を表現するにあたり最適なデータ構造について調査した。それぞれの変数間の因果関係を表したグラフ構造、確率変数間の条件付き依存関係を表すベイジアンネットワーク等のグラフィカルモデル、変数間の関係や Jacobian を入手可能なニューラルネットワーク、変数間の関係だけでなく分散も記述可能なガウス過程回帰、一階述語論理を記述可能な Markov Logic Network 等についてその利点と欠点を調査した。次に、情報化身体が持つべき要件について考察

した。この際、情報化身体概念が、人間の感覚と運動の相関関係を暗黙的に表現する、身体図式概念に近いことに気付き、以降ではこの名称を利用する。人間のように自律的に経験から学習し成長する知能の実現に必要な身体図式の要件を、心理学の定義に照らし合わせ、多感覚相関性・汎用性・自律獲得性・変化適応性の4つに定めた。最後に、この4つの性質を満たす身体図式モデルとして、一般化多感覚相関モデルを構築した[博士論文, 研究成果リスト(3)-1]。汎用性について、ネットワークの順伝播と誤差逆伝播を繰り返し作用させ、制御や状態推定、シミュレーション、異常検知等が可能である。自律獲得性について、自律的にデータを収集し自己教師あり学習可能なだけでなく、経験から不要なセンサ・アクチュエータを削除、ネットワークの入力と出力に必要な変数を自動決定する機構を持つ。変化適応性について、学習可能な入力変数である Parametric Bias (PB)の考え方を応用し、逐次的な身体や物体、環境の変化を埋め込み、これを更新することで環境適応が可能となる。

研究テーマB)「身体図式の応用理論構築」

前述の身体図式モデルの応用方法について理論を構築した。ネットワークの順伝播と逆伝播を駆使することで、現在得られるセンサから他の値を推論する状態推定や異常検知、出力を所望の値に変化させる制御やシミュレーションが可能である。また、モデルの予測と実測の差から Parametric Bias を更新することで、身体や道具、対象物体、環境の変化に常に適応した身体図式を得ることが可能でありこれを応用して把持物体認識や環境摩擦推定も可能となった。次に、身体図式モデルにおけるセンサ・アクチュエータの追加と削除を可能とした。ネットワーク入出力の追加に対して、追加前のネットワークを併用し破壊的忘却を防ぎつつ重みを再学習可能である。また、一部のセンサ・アクチュエータ故障の際には、出力に対するマスク変数を導入し、最適化操作を拘束することで、ネットワーク構造を破壊せずに逐次的に現在環境に適応させることに成功している。最後に、当初の予定に加え、本身体図式学習の上位レイヤ制御器を強化学習を用いて獲得することを行い、シミュレーションにおける高い性能と実機適用可能性を見出した。

研究テーマC)「冗長センサを持つロボット身体開発」

本身体図式学習機能を適用するロボットには冗長なセンサとアクチュエータ、そして自律的な動作に基づくデータ収集に向けた柔軟な身体を持つことが望ましい。そこで、既存ロボットへのセンサ追加と新規ロボット開発を行った。本テーマは当初の予定から追加したものである。まず、既存の柔軟複雑な筋骨格ヒューマノイド Musashi に対して足全周の冗長な接触覚を有するセンサフット[Humanoids2022]、人体模倣型の両耳構造による聴覚を追加した[RobomechJournal2022]。また、筋骨格双腕とメカナム台車を統合した Musashi-W を開発し、冗長センサと実タスクに耐え得る性能を持つ身体を構築した[Humanoids2022, 研究成果リスト(3)-6]。加えて、臀部接触センサと柔軟な環境接触を可能にする面状骨格間構造を持つ筋骨格脚 MusashiOLegs を開発した[Humanoids2020]。それら筋配置の一部は筋破断時対応に適した冗長性の最大化に基づいて最適化されている[IROS2021]。その他、筋骨格系だけでなく既存の低剛性樹脂製ロボット MyCobot への多点接触覚の導入、ダイレクトドライブモータにより正確に位置・速度・力を測定でき高跳躍可能なワイヤ駆動型一本脚ロボット RAMIEL も開発している[IROS2022]。

研究テーマD)「筋骨格ヒューマノイドへの適用」

身体図式学習機能を筋骨格ハードウェアに適用し実験を行った。まず、その柔軟複雑身体の基本的な制御・状態推定・異常検知・シミュレーション・オンライン適応を行い、有効性を確認した。



[RA-L/ICRA2020]. 加えて、物体中心座標系を用いたより精度の高いマニピュレーションに向けた学習機構も開発している[RA-L/IROS2021]. 次に、筋骨格ヒューマノイドの利点の一つである、筋冗長性により容易に筋追加・削除可能で動作継続が可能な特徴を利用した適応的動作実験を行った。筋破断時を異常検知により確認し、ネットワーク出力に対するマスク変数を用いて破断した筋の影響を取り除きつつ制御や状態推定、オンライン更新を継続可能となった[RA-L/ICRA2022, 研究成果リスト(1)–3]. また、タスクに応じて足りない部位に筋を追加し、筋追加前のネットワークを併用して身体図式を再学習することで、少数データでも正確に現在のモデルを得ることが可能となった[RAS2022, 研究成果リスト(1)–1]. 最後に、筋骨格台車ロボット Musashi-W において、可変剛性機能と布素材変化を考慮した動的柔軟布操作を実現した。これは布の形状変化の時系列を処理する動的身体図式と、身体制御に用いる静的身体図式の二種類を組み合わせている[Frontiers, 研究成果リスト(1)–2]. 同様に、靴の変化を考慮した筋骨格ヒューマノイドの全身バランス制御にも成功している[IROS2022].

研究テーマ E)「多様なロボットへの一般化」

筋骨格ヒューマノイドのみならず、多様な形態のロボットに身体図式学習を適用することで本理論の一般化を行う。まず、台車型ロボット Fetch が動作環境である床の摩擦変化を考慮しつつ、確率的な挙動変化を予測することで動作分散を減らした安定走行制御を実現した[IROS2021, 研究成果リスト(3)–2]. 次に、軸駆動型ロボット PR2 における模倣動作実現と道具操作実現を行った。人間の動作を、その動作速度や力の加減等の動作スタイルを考慮しつつ模倣することに成功した[RA-L/IROS2021]. また、把持状態変化を考慮した道具の先端位置制御を実現し、柔軟な道具を持ち方が変化しつつも正確に制御可能となった[RA-L/IROS2021]. 最後に、低剛性樹脂製単腕の MyCobot が自律的に視覚サーボ則を学習する機構を開発した[RA-L/IROS2022, 研究成果リスト(3)–4]. 柔軟性から意図した動作が難しくとも、動作の再現性を利用し自身で置いた物体を取ることを繰り返して自律的なデータ収集を行い、経年劣化等の身体変化を考慮した視覚サーボを実現できる。同様に布素材の変化に対応した拭き操作実現も行い[Humanoids2022], 多様なタスク設定に基づく拭き動作を可能にした。全体の構想についてキーノート講演や解説記事の執筆等も行い、研究成果を積極的に発信した[研究成果リスト(3)–3/5]. 動作実験例を下図に示す。



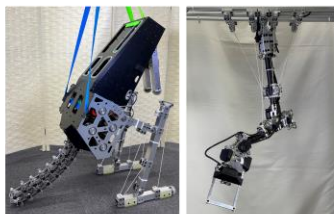
加速フェーズでは等身大ヒューマノイドによる全身模倣学習を行い[IROS2023], 加えて、本モデル

の動的体図式を Parametric Bias を含む深層予測モデル学習としてまとめ、論文を執筆した [RAM/ICRA2023, 研究成果リスト(3)-4].

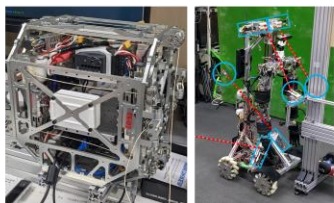
加速フェーズ

F) 超柔軟性と拡張性を持つ ロボット身体開発

超柔軟な腕/脚の設計



能動的体変形可能な身体

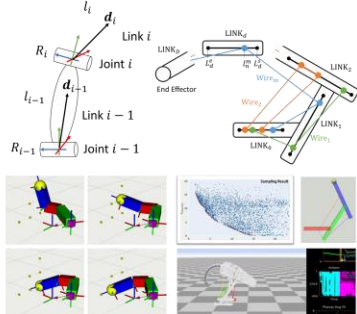


G) シミュレーションを 活用した体図式学習

強化学習 × 模倣学習

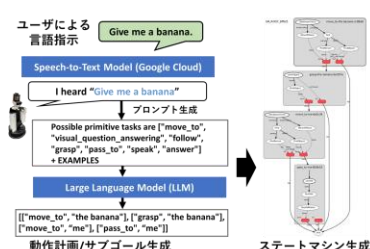


身体設計の最適化

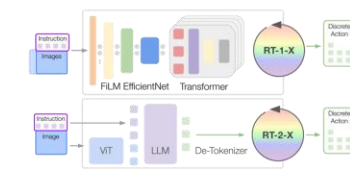


H) 言語を介した 上位認識行動学習戦略

大規模言語モデルの応用



ロボット基盤モデルの学習



研究テーマ F) 「超柔軟性と拡張性を持つロボット身体開発」(加速フェーズ)

超柔軟性と拡張性についてそれぞれ研究を行った。まず超柔軟性を持つ身体として、これまで、ダイレクトドライブモータと大電流モータドライバにより高跳躍可能なワイヤ駆動型一本脚ロボット RAMIEL を開発してきた[IROS2022]。本テーマではこれを発展させ、一切のギアを廃した無減速ワイヤ駆動マニピュレータ SAQIEL を開発した[RA-L/IROS2024]。全てのモータをルートリンクに集約させることで、人間と同様のスピードと力を実現しつつも、腕の重量をたったの 1.5kg にまで抑え、超柔軟で安全なロボットの構築に成功している。また、同様の無減速ワイヤ機構を用いて、跳躍が可能なカンガルーロボットを開発し、実世界での簡易で安全なインタラクションを実現した[IROS2023]。尻尾には多数の弾性要素により構成された尻尾を持つ。また、人間の筋腱複合体の柔軟性と膨張の機構を模倣した筋骨格関節、3D プリントで皮膚-骨格-関節が一体成型可能な柔軟ハンドの開発も行った[IROS2023]。次に拡張性を持つ身体として、筋骨格ヒューマノイドのワイヤ端点をカラビナ型とし、ワイヤを自律的に取り外して、自身の身体や環境に取り付けることが可能な環境融合型ロボットの開発を行った[Humanoids2023]。ロボットがタスクに応じて自らの身体構造を変化させることで、これまで持てなかったような重い物体の運搬や操作が可能となった。

研究テーマ G) 「シミュレーションを活用した体図式学習」(加速フェーズ)

シミュレーションを活用することで、これまで難しかったより高度な動作生成が可能となる。シミュレータ上での大規模な強化学習と人のモーションキャプチャデータによる模倣学習を組み合わせることで、様々なスピードの歩く/走る動きを実現可能な HumanMimic を開発した[ICRA2024]。ここで得られた動作戦略を実機に適用すべく実験を行っている。また、シミュレーションを活用することで、身体設計の最適化が可能となる。まず軸駆動型ロボットについて、多様な身体構造を構築可能な関節モジュールを設計し、幾何シミュレータと多目的ブラックボックス最適化に基づきそれら

モジュールの接続を最適化した[IROS2023]. 手先位置の実現度と必要トルクの最小化を行うことで、多様な解が観測できる。また、ワイヤ駆動系について同様の解析を行い、手先の発揮可能速度/力楕円から、ワイヤ配置の最適化を行った[RA-L/IROS2024]. さらに、モデル予測制御を組み合わせることで、筋骨格ヒューマノイドのワイヤ配置最適化[Humanoids2023]にも成功している。

研究テーマ H)「言語を介した上位認識行動学習戦略」(加速フェーズ)

より高度で長期的な動作実現を目指し、言語を介した認識行動制御を行った。まず認識について、大規模視覚-言語モデルを応用することで多様な環境状態認識を実現した。特に Visual Question Answering や Image-to-Text Retrieval といったタスクが可能なモデルに着目し、言語を介することで、ドアの開閉や蛇口からの出水、バターの溶け具合などの認識が可能となった[Humanoids2023, IAS2023]. これまで3次元点群処理や個別のニューラルネットワークの学習、特殊なセンサの搭載が必要であったが、これを単一モデルかつ画像と言語のみで解決することができる。さらに言語プロンプトを遺伝的アルゴリズムにより最適化することで、より高い性能を達成した[IROS2023]. また、これを人間とロボットの親密度向上に向けた日記生成システムに応用し、多様な環境状態を観測、これを大規模言語モデルによりまとめて人に伝えることに成功した[IAS2023, ROMAN2023]. 次に行動について、Robocup@Home における GPSR タスクを大規模言語モデルと大規模視覚-言語モデルを駆使して自律的に達成するシステムを構築し、Japan リーグに出場し最高得点を叩き出した[Arxiv, IROS2023]. さらにこれまでの身体図式学習システムと大規模視覚-言語モデルを組み合わせ、低剛性ロボットにおける言語からの適切な視界制御を可能にした[Humanoids2023]. 最後に、21 の研究機関、173 人の著者が参加する、google を主導として行われた多様な身体性を持つロボットの大規模動作データ収集とロボット基盤モデル構築に関するプロジェクト RT-X に参加し、現在もロボット基盤モデル開発に従事している[ICRA2024].

3. 今後の展開

本研究成果は、センサ・アクチュエータを持つ系について多感覚相関性、汎用性、自律獲得性、変化適応性を備えたモデルを獲得するという、非常に広く一般的なモデリング方法を提供している。それゆえに、多様なロボットへの適用に限らず、幅広い分野への応用が可能であると考えられる。

今後のロボット研究の展開について述べる。まず、現状の手法で既に多様なロボットの動作実現、状態推定、異常検知に成功しており、そのセンサ・アクチュエータの削除や追加にも対応可能である。今後2年間で二足歩行型のヒューマノイドや飛行ロボット、蛇型ロボットなど、まだ適用の進んでいないロボット分野に足を踏み入れ、一つのアルゴリズムで世界の全てのロボットが動く未来を構想している。一方で、現状の問題点であるデータ収集の効率や一部学習・最適化パラメータの人間による調整、より複雑な動作学習については改善する必要がある。今後多様なロボットやタスクへ適用するにしたがって出てきた問題を全て解決し、3-5 年のスパンで、サービスロボットや警備ロボット、介護ロボット、災害対応ロボット、生活支援ロボットが多様な感覚を統合して利用し、一つのモデルで汎用的に様々なタスクをこなし、自律的にこのモデルを獲得、環境の変化に適応していくことを目指し、社会実装を進めていきたい。

次に、ロボットに限らない幅広い分野への展開について述べる。本研究成果は同様にセンサ・アクチュエータ系を持つ無人コンビニやスマートシティ、また、ACT-X の同領域に見た半導体製造



や木材試験, 3D プリンタや医療など, 多様な分野に同様の形で適用できるポテンシャルを持つ。その際に問題となるのは前述同様にデータ効率であり, シミュレーションを活用した効率的なデータ収集を含め, 今後よりスケーラブルなシステムへと発展させるために 5-10 年のスパンで手法の更なる発展と他分野とのコラボレーションを行いたい。

最後に, 本研究成果では達成し得なかった, 身体の適切な構造提案についても研究を進めたい。これまでは受動的な身体変化への適応のみに着目してきたが, 今後は能動的な身体変形, つまり, ロボットが自らの身体や把持する道具, 動作する環境を選び, 構築していく世界を目指したい。自らの筋配置を自発的に変化させたり, 環境に存在する様々な物体を自身に取り込んだり, 自ら適切な道具形状を作成したりと, 能動的な身体変化が可能になれば実現可能なタスクの領域も大幅に広がる。今後5年を目安に経験から能動的な身体変化が可能なハードウェア・ソフトウェアの開発に挑み, 本当の意味で成長するロボットを目指して研究を進める。

加速フェーズでは主に, 実機での安全で継続的な学習が可能な超柔軟ハードウェア開発, 能動的な身体変形が可能な拡張性高いハードウェア開発, シミュレーションに基づく身体設計の最適化, 大規模言語モデルに基づく多様な環境状態認識と長期的な動作計画, 大規模データに基づくロボット基盤モデル構築を達成した。まず, 能動的な身体変形可能なハードウェアと身体設計最適化は, 一つの身体で多様なタスクをこなすことが可能な新しいロボットの形として, 実際の家事タスクや土木作業等にまで展開していく予定である。その中で, ワイヤの配置や関節の剛性, 振動など含め多数の問題点が浮かび上がると考えており, それらへの対処, より大規模で洗練されたシステムへの転換を3年程度かけて進める。超柔軟ハードウェアについては, 今後2-3年で実機におけるヒト/環境との高速なインタラクションへと展開する。大規模言語モデルに基づく状態認識と動作計画は今後益々のトレンドとなっていくと考える。長期的な行動が可能となったことで, 料理や洗濯, 片付けなどの実用的なタスクにどの程度利用可能か, 2年程度のスパンで実験実証をしていく。また, 画像だけでなく深度画像や音, 臭い等を組み込み, マルチモーダルな形でモデルを展開していく予定である。ロボット基盤モデルの構築については, 今後我々が主導権を握れるように, 産業界ともタッグを組みつつ, データ整備やモデル構築, オープンソース化, コミュニティづくりに取り組んでいく予定である。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

本課題では主に研究テーマ A)-E)を設定している。A)については想定通りの成果が出ている。C)については当初の予定にはないテーマであるが, D)と E)を実行するための十分なハードウェア開発に成功している。また, D)と E)については当初の想定を上回る形で多様なロボット実験が出来ており, 26 報の国際学術誌論文・トップ国際学会論文(内主著 18 報)にまとめ, 博士論文を執筆, 研究科長賞を受賞したことは非常に大きな成果と言える。B)については D)と E)を実行するに十分な成果は出ている一方で, 適切な身体変形の提案という観点のみ思い通りには行かず, 当初の想定より難しい課題であることがわかった。

加速フェーズでは研究テーマ F)-H)を設定している。F)については想定通りの成果が出ており, 実際に能動的な身体変形が可能なハードウェアの構築に成功している。一方で, その制御やシステムについては改善の余地が多く, 今後時間をかけて新しい領域を切り拓くつもりである。G)につ



いては、身体設計の最適化の面では多くの成果が出た一方で、シミュレーションを併用したこれまでの身体図式学習の効率化や複雑な動作の学習という面では課題が残った。H)については、想定以上の結果が出ており、多数の成果が出ただけでなく、ロボット以外の言語・画像の分野からの反響も大きく、産業界とも大きな繋がりができつつある点で大成功と言える。

研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

研究の実施体制については特に問題なく、研究費も有効に活用することができた。特に、光造形の3Dプリンタや低剛性樹脂製ロボット MyCobot、多様な力覚センサ、学習マシンの購入は本課題には欠かせない非常に有意義な研究費の活用であった。また、特に最終年度は多くの論文投稿にあたり多額の学会費や投稿費を支払う必要があり、有効に研究費を活用できた。

加速フェーズではハードウェアの構築と大規模モデルの推論や学習のために多額の資金が必要であり、ACT-Xの予算を十分に活用することができた。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

本研究課題における成果は非常に一般的な問題設定を解く手法であるため、多くのロボットや異分野への応用が期待でき、キーノート講演や解説記事の執筆からも注目度が窺える。これまで固定化されてきたロボットの身体モデリングが、ロボット自身の手で自律的に獲得され、経験とともに徐々に変化していくという新しい成長ロボットの考え方は、今後のロボット構成を大きく変革できるものと考えている。現在普及し始めているサービスロボットから始まり、土木や介護、生活支援ロボットの環境適応能力を向上させ、より社会・経済にロボットを浸透させる効果が期待できる。また、今後の展開でも述べたように、ロボットだけではなく多様な分野、特に同領域内で初めて見聞した様々な対象へも確かな波及効果があると考えられる。一方で、ロボット分野は医療や半導体、農業等の分野に比べると、人工知能については最先端を行っていることが分かってきた。自律獲得され逐次変化するモデリングを適用する以前に、その前の段階であるサロゲートモデルの構築や本手法のより簡易な適用から初めて、徐々にその先に適用していくという段階を踏むことが必要であるとも認識している。

加速フェーズでは前年度までの広く一般化した身体図式という問題設定から一歩踏み込み、成長という観点から新しい技術、新しいロボットの在り方について研究を行った。能動的な身体変形を行うロボットは、その身体設計、特にモジュール化や電源の取り方、コミュニケーションの仕方、ワイヤ駆動であればワイヤ端点の能動的な駆動方法、システム構成や身体設計の最適化、能動的な身体変化計画など、多様な研究課題が存在する。これらの発展はロボットの新しい形、新しい領域を形成する可能性があると考えられる。また、大規模言語モデルやロボット基盤モデルに関する研究は、ロボットのサービス業界や産業、医療、土木含め、多様な業界に大きなインパクトを与えると考える。実際、これら大規模モデルをロボットに組み込む取り組みを始めてから、LLM 勉強会や自然言語処理分野、産業界等からの引き合いが増え、ロボットを本気で社会・経済へと普及させていく道が整い始めたとも認識している。

5. 主な研究成果リスト



(1) 代表的な論文(原著論文)発表

全ての成果は<https://haraduka.github.io>に記載する.

研究期間累積件数: 11件

研究期間累積件数: 17件 (加速フェーズ実施後更新)

1. **K. Kawaharazuka**, M. Nishiura, Y. Toshimitsu, Y. Omura, Y. Koga, Y. Asano, K. Okada, K. Kawasaki, M. Inaba, “Robust Continuous Motion Strategy Against Muscle Rupture using Online Learning of Redundant Intersensory Networks for Musculoskeletal Humanoids”, Robotics and Autonomous Systems (RAS), vol. 152, pp. 1–14, 2022

筋骨格ヒューマノイドの柔軟でモデル化困難な身体に存在するセンサ群の相関関係を表現する身体図式ネットワークを構築し、これを学習することで正確な動作を実現する。また、この枠組みの中で筋の冗長性の利点を最大限に活かすため、本ネットワークを使った筋の異常検知、筋破断時におけるセンサ間関係の再学習、筋破断時における身体制御・状態推定等について議論する。本研究により、筋が一本切れても身体を動かし続け、よりロバストにタスクを継続する筋骨格ヒューマノイドの構成法を明らかにする。

2. **K. Kawaharazuka**, A. Miki, M. Bando, K. Okada, M. Inaba, “Dynamic Cloth Manipulation Considering Variable Stiffness and Material Change Using Deep Predictive Model With Parametric Bias”, Frontiers in Neurorobotics, vol. 16, pp. 1–16, 2022

モデル化困難な柔軟物の動的マニピュレーションはロボットにおける大きな課題の一つである。本研究では、人間の柔軟物操作能力に学び、(1)動的マニピュレーションのための可変剛性機構を用いた身体制御、(2)Parametric Biasを用いた操作対象物体の素材変化への対応、の2点に焦点を当てる。この2つの取り組みを深層予測モデルに組み込むことで、可変剛性制御可能な筋骨格ヒューマノイドが、操作対象の物性変化を検知しつつ動的に布をマニピュレーション可能となることを、実機実験により示す。

3. **K. Kawaharazuka**, A. Miki, Y. Toshimitsu, K. Okada, M. Inaba, “Adaptive Body Schema Learning System Considering Additional Muscles for Musculoskeletal Humanoids”, IEEE Robotics and Automation Letters (RAL), vol. 7, no. 2, pp. 3459–3466, 2022, (presented at ICRA2022)

筋骨格ヒューマノイドに特徴的な筋冗長性の重要な利点として、筋配置の変更が容易であり、状況に応じて筋を増やすことができる点が挙げられる。本研究では、筋骨格ヒューマノイドの筋増加に伴う身体図式の変化を少ない追加データから再学習可能な手法を提案する。1 自由度腱駆動シミュレーション、筋骨格ヒューマノイド Musash の腕について本手法を適用し、高負荷タスクへの筋追加による筋張力緩和の有効性を示す。

4. **K. Kawaharazuka**, K. Okada, M. Inaba, “Deep Predictive Model Learning with Parametric Bias: Handling Modeling Difficulties and Temporal Model Changes (in press)”, IEEE Robotics and Automation Magazine (RAM), 2023, (presented at ICRA2023)

ロボットにおけるモデル化困難性と逐次的なモデル変化に対応可能な, Parametric Bias を含む深層予測モデル学習に関する研究の総括を行った. 一つの統合的な理論から, 低剛性ロボットの視覚フィードバック制御, 筋骨格ハンドの把持物体認識, 動作スタイルを考慮した模倣学習, 動作環境変化を考慮した台車ロボットの安定制御, 布素材変化を考慮した動的柔軟物操作, 全身筋骨格ヒューマノイドのバランス制御が可能であることを示した.

5. 河原塚 健人, 大日方 慶樹, 金沢 直晃, 岡田 慧, 稲葉 雅幸, “大規模視覚-言語モデルと遺伝的アルゴリズムに基づくロボットのための状態認識 (in press)”, 日本ロボット学会誌 (JRSJ), 2023

大規模視覚-言語モデルが可能な Visual Question Answering と Image-to-Text Retrieval というタスクを応用し, ドアが開いているか/水が沸騰したかなどの, ロボットのための離散的/連続的な環境状態認識を行うシステムを提案した. 事前学習済みモデルを用いることで, ニューラルネットワークの訓練や手動のプログラミングが必要なく, 言語を用いることで単一のモデルで複数の認識対象を考慮することができる. また, 用意した多数の言語プロンプトの重みづけを遺伝的アルゴリズムにより調整することで, 高い認識精度を実現した.

(2) 特許出願

なし

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 河原塚 健人, 研究科長賞, 博士論文: “身体図式の逐次獲得機能を有する知能ロボットシステムの研究”, 2022.3.24
2. 河原塚 健人, 新城 光樹, 河村 洋一郎, 岡田 慧, 稲葉 雅幸, 優秀講演賞, “確率的深層予測モデル学習による分散最小化を含む環境適応型制御 – 台車型ロボットへの適用 –”, 第 22 回 SICE システムインテグレーション部門講演会, 2021.12.24
3. 河原塚 健人, キーノート講演, “深層予測モデル学習によるロボットの時間的・空間的柔軟性攻略”, 第 39 回日本ロボット学会学術講演会, OS: 確率ロボティクスとデータ工学ロボティクス～認識・行動学習・記号創発～, 2021.9.6
4. K. Kawaharazuka, N. Kanazawa, K. Okada, M. Inaba, SICE International Young Authors Award (SIYA-IROS2022), “Self-Supervised Learning of Visual Servoing for Low-Rigidity Robots Considering Temporal Body Changes”, IEEE Robotics and Automation Letters (RAL), vol. 7, no. 3, pp. 7881–7887, 2022, (presented at IROS2022)
5. 河原塚 健人, 解説記事, “パラメトリックバイアスを含む深層予測モデル学習”, 日本ロボット学会誌, vol. 40, no. 9, pp. 784–789, 2022
6. K. Kawaharazuka, A. Miki, M. Bando, T. Suzuki, Y. Ribayashi, Y. Toshimitsu, Y. Nagamatsu, K. Okada, M. Inaba, Best Interactive Paper Award Finalist, “Hardware Design and Learning-Based Software Architecture of Musculoskeletal Wheeled Robot Musashi-W for Real-World Applications”, 2022 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (HUMANOIDS2022), 2022.11.30

7. K. Kawaharazuka, Invited Talk, “Learning-based manipulation and grasping with flexible arms and hands”, Learning Meets Model-based Methods for Manipulation and Grasping Workshop at 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2023), 2023.10.5
8. 河原塚 健人, 解説記事, “情報化身体の学習理論に基づく成長ロボットの革新と創成”, 日本ロボット学会誌 (JRSJ), vol. 41, no. 8, pp. 669–672, 2023
9. 河原塚 健人, 招待講演, “脱力可能なヒューマノイドの身体と制御”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023 シンポジウム「“いいかげん”を科学して未来を創るソフトロボット学 4」 at 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2023.6.28
10. 河原塚 健人, 招待講演, “筋骨格ヒューマノイドと身体図式学習”, 第 19 回身体性認知科学と実世界応用に関する若手研究会(ECSRA), 2023.10.29
11. 河原塚 健人, 招待セッション, “大規模言語モデルの実ロボットタスク応用”, NLP 若手の会 第 18 回シンポジウム (YANS2023), 2023.8.31