

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

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。

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立的視覚サーボ学習等に成功した。

(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	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) 身体図式の応用理論構築	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適応	強化学習との併用
C) 冗長センサを持つロボット身体開発	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) 筋骨格ヒューマノイドへの適用	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) 多様なロボットへの一般化	双腕ロボットPR2 (模倣学習・道具操作) 台車ロボットFetch (足回り制御)	低剛性ロボットKXR (全身道具操作)	低剛性単腕MyCobot (自覚視覚サーボ・拭き動作) 一本脚ロボットRAMIEL (高跳躍・連続跳躍)
	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づき、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らかい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られ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らかい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

本能的な制御・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験を行った. 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.



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す、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、能動的な身体変形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形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。

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。

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。

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。

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

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。

(2)特許出願

なし

研究期間全出願件数: △件(特許公開前のもも含む)

1	発 明 者	〇〇 〇〇
	発 明 の 名 称	〇〇〇〇
	出 願 人	〇〇大学
	出 願 日	201x/xx/xx
	出 願 番 号	Xxxxxxx
	概 要	100 字程度
2	発 明 者	〇〇 〇〇
	発 明 の 名 称	〇〇〇〇
	出 願 人	〇〇大学
	出 願 日	201x/xx/xx
	出 願 番 号	Xxxxxxx
	概 要	100 字程度

(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

公開

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