

Graduate School of Fundamental Science and Engineering
Waseda University

博士論文概要
Doctoral Dissertation Synopsis

論文題目
Dissertation Title

Multimodal Motion Generation and Internal Representation Analysis of
Robots using Deep Predictive Learning

深層予測学習によるロボットの
マルチモーダル動作生成と内部表現解析

申請者
(Applicant Name)
Hiroshi ITO
伊藤 洋

Department of Intermedia Studies, Research on Intelligence Dynamics and Representation Systems

December, 2021

ロボットの活躍の場が人生活環境へ拡大するに伴い、多様な環境変化に対しロバストかつ安定的な作業を実現する知能化技術が求められている。深層学習の発展により、プログラミングでは記述困難な複雑作業をロボットで実現することが可能になり、大きな成果を挙げ続けている。しかし、深層学習が持つ課題の一つに「説明可能性」の欠如がある。深層学習は、様々なタスクに対し高精度な予測が可能であるが、なぜそのような予測をしたのか、判断根拠を人が理解することは難しい。この課題に対して、画像処理分野を中心に一定の成果があるが、マルチモーダルな情報を扱うロボットでは、動作成功率や汎化性能の議論に留まっている。ロボットは実世界で物理的な接触を伴う作業を行うため、学習型ロボットの社会実装を加速するためには、モデルの説明可能性は必要不可欠である。

学術的には、ロボットなどの実世界システムの学習モデルに関する説明可能性を議論することは、実世界の多様な現象の構造や関係性を明らかにするだけでなく、実世界を認識するシステムの理解に貢献すると期待される。例えば、認知発達ロボティクスの分野では、ロボットが環境との相互作用することで、人間の知能・認知発達メカニズムの理解を試みている。従来のロボティクスでは、視覚処理と運動処理を個別のモノとして捉えており、それらを1つの身体システムとして扱うことの重要性は議論されてこなかった。しかし、認知科学や発達心理の研究より、環境との相互作用が認知プロセスの発展に重要であることが報告されている。さらに、深層学習よりロボットの感覚情報と運動情報を統合的に扱うことが容易になり、マルチモーダル学習や一貫通貫学習の有効性が多数報告されている。そのため今後は、学習型ロボットとモデルの説明可能性の融合により、認知発達分野への貢献が期待される。

本研究では、説明可能な学習型ロボットの早期社会実装を目標に、内部表現解析に基づいた獲得行動の解明を目的とする。具体的には、ネットワーク構造と学習メカニズムの違いが、獲得内部表現と汎化性能、判断根拠に与える影響を調査し、学習過程でモデルの内部に行動がどのように構造化されるのか、推論過程で視覚中のどこに着目して動作を生成しているか、を明らかにする。

学習型ロボットの行動解析をするために、脳の多様な機能を統一的に説明する自由エネルギー原理の思想を参考に計算モデルを構築する。この原理では、脳は感覚・運動の次状態を常に予測し、その予測と実際の誤差が最小になるように振る舞うと説明される。この思想を受け、本研究ではリアルタイムに予測と動作生成を行う深層予測学習モデルを構築する。この手法では、ロボットが実環境で観測した感覚運動情報とモデルの予測誤差が最小になるような行動を、リアルタイムに予測する。具体的には、ロボットは、実世界で動作経験（環境と相互作用）した時の感覚と運動の時系列情報を学習し、推論時は、ロボットの感覚運動情報からリアルタイムに近未来の感覚と動作を予測し、その誤差が小さくなるように

動作を生成（調整）することで、環境変化に対し柔軟な動作を実現する。

本研究では、この深層予測学習モデルにより制御された実ロボットを対象として内部表現を解析する。解析手法には、主成分分析と勾配解析を用いる。行動学習により獲得した高次元の内部表現を圧縮し、可視化することで、ロボットの動作がどのように構造化されたかを解釈する。また入力値に対する出力値の勾配を計算し、予測の寄与度が高い入力値を可視化することで、たとえば、ロボットの視覚画像においてどこに着目して動作を生成したかを判断する。以上の背景をもとに、本研究では、以下4つの課題に取り組む。

第一に、視覚・運動情報の統合学習による位置の内部表現を明らかにする。視覚と運動情報がモデルの内部でどのように構造化されるかを解析し、獲得内部表現と位置汎化性能の関係を調べる。さらに、物体の位置変化に対しロバストな動作を実現するための構造を明らかにする。

第二に、力覚・運動情報の統合学習による力の内部表現を明らかにする。計算神経科学における人の運動制御に関する研究を参考に複数のモデルを構築し、ネットワーク構造の違いによる獲得内部表現と力制御の関係を調べることで、力と運動の同時制御に必要な構成を明らかにする。

第三に、視覚情報と運動情報の同時学習による空間的注意の内部表現を明らかにする。推論時のロボットの視覚的判断根拠を空間的注意として可視化し、環境変化に対する感度評価を行う。さらに、空間的注意とロバスト性の関係を調べることで、周囲の環境変化に対しロバストな動作を獲得するための学習メカニズムを明らかにする。

第四に、上記3つの解析結果に基づいて、環境変化に対しロバストな動作生成モデルを構築し、実環境における複雑作業の機能検証を行う。学習型ロボットの社会実装のファーストステップとして全身協調動作生成を例に、拡張性を備えた複数の動作モジュールの統合手法を提案し、実ロボットを用いたドア開け通過動作を実現する。

本論文は7章から構成される。

第1章では、序論として本研究の研究背景と目的、研究課題、本研究が提案するアプローチ、本論文の構成について述べる。

第2章では、深層学習の説明可能性および学習型ロボットに関する研究動向について述べる。まず、深層学習の説明可能性のアプローチに関する研究動向について、次に、深層強化学習と模倣学習、本研究で用いる深層予測学習について述べる。最後に、関連研究に対する本研究の位置づけと方向を述べる。

第3章では、課題（1）に関する内容を説明する。ここでは、複数位置にあるドア開け動作を学習したロボットを用いて、獲得内部表現と位置汎化性能を調べた。主成分分析結果より、ドアノブの位置に応じてアトラクタが規則性を持って

自己組織化すること、学習により獲得した複数のアトラクタの内挿により、未学習位置のドア開け動作を実行できることを示した。また、高い汎化性能を持った動作を獲得するためには、アトラクタが滑らかかつ規則的な形状を成す必要があることを示した。

第4章では、課題(2)に関する内容を説明する。ここでは、傾斜が異なる物体の拭き取り動作を学習したロボットを用いて、獲得内部表現と力制御の関係を調べた。実験結果より、入力部では、力と運動情報をそれぞれ時定数が異なるニューロン層に入力し、出力部では1つのニューロン層で力と運動を同時に予測させることで、時間特性の異なる2つの入力情報の特徴量抽出と統合学習が可能となり、接触状況に基づいて未学習物体の拭き取り動作をリアルタイムに生成できることを示した。また主成分分析より、タスク遂行に必要な大まかな動きがアトラクタとして表現され、接触状態に基づいてアトラクタ間を遷移することで力を調整していることを示した。

第5章では、課題(3)に関する内容を説明する。ここでは、複数位置にある物体の把持と所定位置への移動動作を学習したロボットを用いて、推論時の視覚的判断根拠を調べた。勾配解析結果より、視覚と運動の両方の時系列情報を学習することで、タスクの遂行に必要な視覚的特徴量が自動的に獲得されることを示した。さらに、背景変化や障害物などの未学習状態に対してもロバストであることを示した。

第6章では、課題(4)に関する内容を説明する。ロボットのドア開け通過タスクを題材として、複数の動作をそれぞれ個別の動作モジュールに学習させ、予測誤差に応じてモジュールを切り替える機構を新たに導入した。リアルタイムに各モジュールの予測誤差を計算することで、複数のモジュールの連携による一連タスクの実行や、急な状況変化、動作手順の変更に対応できることを示した。さらに、既存のモジュール群を学習させることなく、新たに動作モジュールを追加できることを示した。

最後に第7章では、本研究で得られた成果を総括する。さらに、残された課題と今後の研究の展望を述べる。

List of research achievements for application of Doctor of Engineering, Waseda University

Full Name : 伊藤 洋

seal or signature

Date Submitted(yyyy/mm/dd): 2022/2/10

種類別 (By Type)	題名、発表・発行掲載誌名、発表・発行年月、連名者（申請者含む） (theme, journal name, date & year of publication, name of authors inc. yourself)
論文	○ <u>Hiroshi Ito</u> , Kenjiro Yamamoto, Hiroki Mori, and Tetsuya Ogata, "Evaluation of Generalization Performance of Visuo-Motor Learning by Analyzing Internal State Structured from Robot Motion", New Generation Computing, vol.38, pp.7-22, Jan. 2020.
講演	○ <u>Hiroshi Ito</u> , Takumi Kurata, and Tetsuya Ogata, "Sensory-Motor Learning for Simultaneous Control of Motion and Force: Generating Rubbing Motion against Uneven Object", Proceeding of IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Jan., 2022.
講演	○ <u>Hiroshi Ito</u> , Kenjiro Yamamoto, Hiroki Mori, Shuki Goto, and Tetsuya Ogata, "Visualization of Focal Cues for Visuomotor Coordination by Gradient-based Methods: A Recurrent Neural Network Shifts The Attention Depending on Task Requirements", Proceeding of IEEE/SICE International Symposium on System Integration, p.188-194, Jan., 2020.
講演	<u>Hiroshi Ito</u> , Hideyuki Ichiwara, Kenjiro Yamamoto, Hiroki Mori and Tetsuya Ogata, "Integrated Learning of Robot Motion and Sentences: Real-Time Prediction of Grasping Motion and Attention based on Language Instructions", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, May, 2022.
講演	Hideyuki Ichiwara, <u>Hiroshi Ito</u> , Kenjiro Yamamoto, Hiroki Mori and Tetsuya Ogata, "Contact-Rich Manipulation of a Flexible Object based on Deep Predictive Learning using Vision and Tactility", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, May, 2022.
講演	伊藤洋, 一藁秀行, 山本健次郎, 森裕紀, 尾形哲也, "言語指示に基づいた注意予測による把持動作生成", 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 1P3-D05, 2021年6月.
講演	伊藤洋, 山本健次郎, 森裕紀, 尾形哲也, "深層学習を用いた実ロボットの反射動作学習-日立-早大の共同研究開発事例", 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 2P1-A11, 2020年5月.
講演	伊藤洋, 山本健次郎, 森裕紀, 尾形哲也, "CNNRNNPBを用いたOne-Shotによる模倣動作生成", 日本ロボット学会第37回学術講演会, 1A3-06, 早稲田大学, 2019年9月.
講演	伊藤洋, 山本健次郎, 尾形哲也, "深層学習を用いた要素動作の統合手法の開発", 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 北九州, 2018年6月.
講演	一藁秀行, 伊藤洋, 森裕紀, 山本健次郎, 尾形哲也, "触覚センサと深層学習を用いた布バッグのジッパー開け動作", 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 1P2-A10, 2019年6月.
講演	倉田拓実, 伊藤洋, 森裕紀, 山本健次郎, 尾形哲也, "モータ関節角と電流値を用いた再帰型神経回路モデルによるペグ挿入動作生成", 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 1P2-A10, 2019年6月.
講演	後藤守規, 伊藤洋, 森裕紀, 山本健次郎, 尾形哲也, "深層学習を用いた実機ロボットアームの高精度動作生成", 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会SI2018, 3A3-07, 2018年12月.
講演	日永田佑介, 伊藤洋, 山本健次郎, 尾形哲也, "MTRNNを用いたEnd to End Learningによる移動行動学習システムの開発", 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 2A2-D11, 2017年5月.