

Graduate School of Fundamental Science and Engineering
Waseda University

博士論文審査報告書
Doctoral Dissertation Review Report

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

February, 2022

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。

本論文では、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している。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、を明らかにしている。

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している。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、本論文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している。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、ロボットの視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。

本論文では、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ている。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している。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

したかを判断することができる。以上の背景をもとに、本研究では、以下の4つの課題に取り組んでいる。

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している。具体的には、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ている。また、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調べている。

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している。特に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している。

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している。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している。

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っている。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が実現されている。

本論文は7章から構成されている。以下に概略を示す。

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ている。

第2章では、学習型ロボットおよび深層学習の説明可能性に関する研究動向について述べている。まず、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説明がされ、次に、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述べられている。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ている。

第3章では、課題(1)に関する内容が示されている。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、獲得内部表現と位置汎化性能を調べている。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が示されている。

第4章では、課題(2)に関する内容が示されている。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、獲得内部表現と力制御の関係を調べている。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

微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が示されている。

第5章では、課題(3)に関する内容が示されている。ここでは、複雑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が調べられている。勾配解析結果より、視覚と運動の両方の時系列情報が学習されることで、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確認している。

第6章では、課題(4)に関する内容が示されている。ロボットのドア開け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ている。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ている。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ている。

第7章では、本研究で得られた成果を総括し、残された課題と今後の研究の展望について述べている。

以上をまとめると、本論文は、深層学習を用いてマルチモーダルな情報を扱う実ロボットの動作生成の説明性を題材に、物体把持、力覚制御、視野注意、全身協調動作、について詳細に調査し、その構造を明らかにした一連の研究成果をまとめたものである。これらの成果は、ロボットのマルチモーダル学習に関する先駆的研究として国際的に認められ、国際会議で複数の賞を受賞するなど国内外で高く評価をされている。特に全身協調動作に関しては、公開の場で複数回のデモンストレーションを行うなど、産業における実用性においても高い評価を得ている。以上の成果は、高い学術的価値を持つとともに、表現工学の発展に寄与するものと評価できる。以上から本論文を博士(工学)の学位論文として相応しいものとして認める。

2022年2月

審査員

主査 早稲田大学教授 博士(工学) 早稲田大学

尾形 哲也

早稲田大学教授 博士(工学) 早稲田大学

及川 靖広

早稲田大学教授 博士(人間科学) 早稲田大学

河合 隆史