

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20364

研究課題名（和文）二個体間における協調の形成と崩壊の予測符号化に基づくロボット構成論的理解

研究課題名（英文）Synthetic Robotics Approaches for Understanding the Formation and Deformation of Cooperation between Agents Based on Predictive Coding

研究代表者

村田 真悟（Murata, Shingo）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・講師

研究者番号：80778168

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は、人間の他者との協調を支える認知情報処理機構の理解を目的とし、認知神経科学・機械学習・ロボティクスの観点を統合したロボット構成論的手法により取り組むものである。特に、他者や環境といった外的要因と自己の意図やゴールといった内的要因によって生じる協調の形成とその崩壊に関する動的過程に注目し、予測符号化に基づく計算モデルの構築とロボット実験を実施した。具体的には、勾配法に基づく最適化手法及びその高速化を実現するための償却推論法を提案した。それらを備えた深層生成モデルを構成論的に検証すると同時に協働ロボットにも応用することで、基礎・応用の両側面に関して評価を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、他者や環境といった外的要因と自己の意図やゴールといった内的要因によって生じる協調の形成とその崩壊が、予測符号化という単一の仕組みによって説明可能であることを示した。具体的には、過去に生じた予測誤差を最小化することで外的要因を知覚し、未来に生じると想定される予測誤差を最小化することで内的要因を満たす行動生成が可能であることが確認された。本研究で得られた成果は他者との協調のみならず、共同注意や心の理論といった社会性認知に関する問題への貢献も期待される。また、ロボットを含む機械による他者（人間や他の機械）との円滑な協調の実現へと繋がる工学的応用可能性も期待される。

研究成果の概要（英文）：The aim of this research project is to understand the cognitive information processing mechanisms that support cooperation with others through synthetic robotics approaches integrating cognitive neuroscience, machine learning, and robotics. In particular, the focus is on the dynamic processes of the formation and deformation of cooperation, which are influenced by external factors such as other agents and the environment, as well as internal factors such as one's own intentions and goals. We have developed computational models based on predictive coding and conducted a set of robot experiments. Specifically, we have proposed a gradient-based optimization method and a more accelerated amortized inference method. We validated deep generative models equipped with these methods and applied them to collaborative robots to evaluate their performance in terms of both fundamental and practical aspects.

研究分野：認知ロボティクス

キーワード：予測符号化 予測誤差最小化 認知ロボティクス ニューラルネットワーク インタラクション

1. 研究開始当初の背景

他者との協調は人間にとって必須の認知機能であるが、そのメカニズムを理解するためには、二者間の行動や脳神経活動の相互作用を考慮する必要がある。これまで、認知神経科学や発達心理学をはじめとする分析的手法と計算論的神経科学や複雑系数理科学をはじめとする構成論的手法によって研究が行われてきた。しかし、行動や脳神経活動を分析するだけでは、メカニズムの理解にまで踏み込むことは困難である。また、構成論的手法においては、多くの研究が簡易なシミュレーション実験にとどまっているという問題がある。身体性認知科学の分野で指摘されているように、人間の知能や認知を考える際は、脳・身体・環境の密な相互作用を考慮し、いかにして認知機能が感覚運動経験の学習の結果獲得されるかを考える必要がある。

上で述べた問題点を踏まえ、研究代表者はこれまでの研究において構成論的手法の中でも特に、脳を表現する計算モデル・身体に対応するロボット・実環境を用いた認知ロボット実験を行ってきた。具体的にはまず、脳の情報処理の仕組みとして提案されている予測符号化に基づく再帰型神経回路モデル (Recurrent Neural Network: RNN) を構築した。予測符号化では、過去の経験や意図に基づきトップダウンに生成される予測と環境からボトムアップに得られる感覚の間の予測誤差最小化を目指し、パラメータやモデル内部状態の最適化を行う。構築したモデルをロボットに実装することで実環境における学習実験を行い、環境変化に対する二台のロボット間の相互適応や予測不可能な他者のふるまいに対する適応の仕組みを提案してきた。

2. 研究の目的

本研究は、人間の他者との協調を支える認知情報処理機構の理解を目的とし、認知神経科学・機械学習・ロボティクスの観点を統合した予測符号化に基づくロボット構成論的手法により取り組む。特に、(i) 環境変化や他者のふるまいといった外的要因と (ii) 自己の将来の行動に関する計画や意図といった内的要因によって生じる協調の形成とその崩壊に関する動的過程に注目し、ニューラルネットワークを利用した予測符号化に基づく計算フレームワークの構築とロボット実験を実施する。具体的には、勾配法に基づく最適化手法及びその高速化を実現するための償却推論法を提案し、それらを備えた計算モデルを構成論的に検証すると同時に協働ロボットにも応用することで、基礎・応用の両側面に関して評価を行う。

3. 研究の方法

(1) 最適化手法 APGraDe の提案

脳の情報処理の仕組みとして提案されている予測符号化を階層的な RNN で具現化し、(i) 外的要因に対する適応的側面や (ii) 内的要因に基づく計画的側面を扱うための、勾配法に基づく最適化手法 (Adaptation and Planning by Gradient Decent: APGraDe) を提案した。具体的には、本手法では過去を振り返り、また、未来を想像することで、実際の観測情報・未来に観測を期待する情報・それらに対する予測結果を算出し、反実仮想的な予測誤差を計算する。この予測誤差の合計値を最小化するように、RNN の上位表現の内部状態を勾配法によって修正することで、過去に関する予測誤差は適応に貢献し、未来に関する予測誤差は計画に貢献することが可能となる。

(2) 高次元観測情報を利用するための拡張

前述の RNN ベースの計算フレームワークに対して、高次元の画像情報をロボットの視覚情報として扱えるように拡張を行った。具体的には、画像を Convolutional Neural Network (CNN) ベースのエンコーダを用いて視覚特徴量として低次元に圧縮し、その圧縮された視覚情報とロボットの運動情報を合わせることで RNN への入力とする。そして RNN は視覚特徴量と運動情報を予測し、予測された視覚特徴量を CNN ベースのデコーダによって元の画像情報の次元へと展開する。

(3) 償却推論による高速化

前述の決定論的な RNN ベースの計算フレームワークに対して、より広範な知覚・行動パターンの学習を目指し、確率的な潜在表現を扱えるように拡張を行なった。具体的には、Predictive-Coding-Inspired Variational RNN (PV-RNN) と呼ばれる予測符号化に基づく変分推論が可能な RNN に対して、実時間処理を可能にするために償却推論 (Amortized Inference) を導入した。従来の PV-RNN は、変分推論を順伝播計算と逆伝播計算の繰り返しが必要な勾配法ベースの手法に基づいて行うため潜在変数の計算コストが高く、ロボットの行動生成等の実時間処理が必要な部分に適用することが困難であるという問題点があった。そこで本研究では、時間的に現在から過去に向かって順伝播計算を行う Backward RNN を導入し、償却推論によって潜在変数を求めることで、勾配法における複数回の順伝播計算と逆伝播計算を一度の順伝播計算のみで置き換えることを実現した。

(4) 協働ロボットへの応用

これまでに構築してきた計算フレームワークを協働ロボットへ応用し (図 1), 人とロボットのインタラクション実験を実施した. 具体的なタスクとして協調物体操作タスクを設定し, 複数の物体が置かれた作業空間において, 人とロボットがある特定の目標状態に向かってそれぞれの位置から操作可能な物体を配置することを要求された. タスク開始前に人とロボットの間で目標状態は共有されるが, 人がその目標状態を作業途中で変更した場合に, ロボットは学習した経験と現在の状況から変更された作業目標を動的に推論し, 自身の行動計画を切り替えることが可能かどうかを検証した.

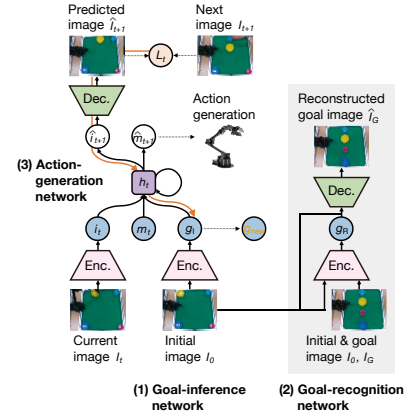


図 1. 協働ロボットへの応用.

4. 研究成果

提案する最適化手法である APGraDe をロボットに実装し, 人とロボットの協調に関する学習実験を行なった結果, ロボットに対して未来に観測を期待する情報を与えることで, 予期せぬ状況に対する適応と, 自らの期待を実現するための計画の両者を同時に実現可能であることが確認された. 一方で, 過去に生じた予測誤差のみや未来に生じると期待される予測誤差のみを考慮した場合は, APGraDe によって実現されたような適応と計画の両立が不可能であった. 以上から, 過去・未来の予測誤差が, 協調における外的要因に対する対処と内的要因の実現に重要であることが示唆された. また, 高次元観測情報を利用するための拡張を行なった計算フレームワークを用いた場合も, 同様の結果が得られた.

変分推論を行えるように拡張した計算フレームワークをロボットに実装し, 人とロボットの協調に関する学習実験を行った結果, 学習時に損失関数のハイパーパラメータを調整することでロボットの行動選択が決定論的・確率的になりうることを確認した. さらに, Backward RNN を利用した償却推論を利用することで, 実時間で変分推論に基づくロボットによる外部環境の知覚・行動生成が可能であることが確認された.

協働ロボットへの応用では, 協調状態が一度崩壊した状況においても, 計算フレームワークが備える予測誤差最小化によって, 再び協調状態の形成が可能であることが確認された. 具体的には, タスク開始前に共有された作業目標を人が途中で変更した場合においても, ロボットは協調物体操作を実現することができた (図 2). ロボットは, 共有された作業目標及び現在の視覚情報から未来の視覚情報の予測を生成するが, 人が作業目標を変更することで予測結果と実際の視覚情報に齟齬が生まれる. この齟齬は予測誤差として表現され, ロボットの作業目標はこの予測誤差を最小化するようにリアルタイムに最適化計算によって更新される. これによって他者の意図推定が実現され, 想定とは異なる状況への対応ができたと考えられる. 計算フレームワークが有する作業目標の潜在空間を可視化したところ, 最初に共有された作業目標の潜在状態から, 人が途中で変更した作業目標の潜在状態へ遷移していることを確認した

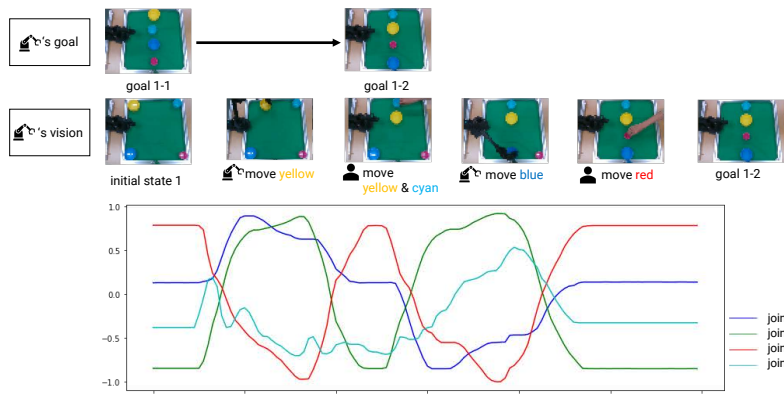


図 2. 人—協働ロボット間における協調の崩壊と再形成の様子.

以上をまとめると, 本研究は, 勾配法に基づく最適化手法及びその高速化を実現するための償却推論法を提案した. それらを備えた計算フレームワークを構成論的に検証すると同時に協働ロボットにも応用することで, 基礎・応用の両側面に関して評価を行なった. 本研究の成果は, 他者や環境といった外的要因と自己の意図やゴールといった内的要因によって生じる協調の形成とその崩壊が, 予測符号化という単一の仕組みによって説明可能であることを示した. 具体的には, 過去に生じた予測誤差を最小化することで外的要因を知覚し, 未来に生じると想定される予測誤差を最小化することで内的要因を満たす行動生成が可能であることが確認された.

本研究で得られた成果は他者との協調のみならず, 共同注意や心の理論といった社会性認知に関する問題への貢献も期待される. また, ロボットを含む機械による他者 (人間や他の機械) との円滑な協調の実現へと繋がる工学的応用可能性も期待される.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hiramatsu Shun, Murata Shingo	4. 巻 -
2. 論文標題 Deep Predictive Network for Inference and Dynamic Optimization of Task Goals during Human-Robot Collaboration	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN) 2023	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Murata Shingo	4. 巻 40
2. 論文標題 Application of Robotic Predictive Learning to Computational Psychiatry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 796～801
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.40.796	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Idei Hayato, Murata Shingo, Yamashita Yuichi, Ogata Tetsuya	4. 巻 138
2. 論文標題 Paradoxical sensory reactivity induced by functional disconnection in a robot model of neurodevelopmental disorder	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 150～163
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neunet.2021.01.033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Murata Shingo, Sawa Hiroki, Sugano Shigeki, Ogata Tetsuya	4. 巻 -
2. 論文標題 Looking Back and Ahead: Adaptation and Planning by Gradient Descent	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the Ninth Joint IEEE International Conference on Development and Learning and on Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob 2019)	6. 最初と最後の頁 151～156
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/DEVLRN.2019.8850693	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Orui Yukiko, Murata Shingo
2. 発表標題 Action Modification Based on Real-time Amortized Inference of Others' Intentions Using Backward RNN
3. 学会等名 The 54th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS '22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大類有紀子, 村田真悟
2. 発表標題 Backward RNNを用いた階層的な潜在状態の動的推論
3. 学会等名 日本発達神経科学会 第11回学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大類有紀子, 村田真悟
2. 発表標題 Backward RNNを用いた他者意図のリアルタイム推論に基づく行動修正の実現
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平松駿, 村田真悟
2. 発表標題 深層学習を用いた協働ロボットによる作業目標の推論と動的修正の実現
3. 学会等名 人工知能学会全国大会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤琢, 村田真悟, 出井勇人, 尾形哲也
2. 発表標題 過去から未来までの文脈を考慮した神経回路モデルによるロボットの目標に基づいた柔軟な行動生成
3. 学会等名 人工知能学会全国大会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 樋園翼, 斎藤菜美子, 森裕紀, 村田真悟, 出井勇人, 尾形哲也, 菅野重樹
2. 発表標題 RNNを用いた予測不確実性と予測変化に基づく好奇心による行動選択モデルの提案
3. 学会等名 発達神経科学会 第9回学術集会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------