

論文審査の結果の要旨

氏名 森 啓太

本論文は序章 (General Introduction)、本論 2 章、付録 1 章および終章 (Conclusion) からなる。序章はイントロダクションであり、計算動物行動学 (computational ethology) 分野の発展の歴史、先行研究と解決されるべき主要な課題について述べられている。本論第 1 章では動物の行動を、深層生成モデルと時系列のモデル化に適した再帰型ニューラルネットワークを用いてモデル化する方法について述べられている。本論第 2 章では強化学習を用いて動物の行動を制御する方法について述べられている。さらに付録では別種の深層生成学習の手法を発展させることにより動物の行動の背後にあるダイナミクスを分離した上で抽出する方法について述べられている。終章では本研究の結論について述べられている。

イントロダクションにおいては、多くの動物が環境情報をもとに「賢い」行動をすることにより周囲の環境に適応し生存してきたことが述べられている。これらの行動を構成する行動の要素を特定して記述し、その制御機構を理解することは動物行動学および神経科学における重要な課題である。しかし、自然界に見られる多様で複雑な要因から生じる一つの行動を実験者による観察のみで記述することは難しく、また、それに影響を与えると思われる要因を探ることも困難である。本論文では、この背景のもと、機械学習の手法を発展させることにより行動の生成過程をモデル化する手法の開発、また動物の行動を外界から制御する方法の開発を行っている。

本論第 1 章では、動物の確率的行動を再現するためのシミュレーション手法について述べられている。動物の行動機構を再現する仮想動物モデルの構築は、動物行動学の分野において重要な役割をもつ。特に線虫 *Caenorhabditis elegans* は全ニューロン間の物理的な結合が既知であるため、神経系が行動を制御する機構を解明する上で、他のモデル動物に先行し

て仮想動物モデルを構築することが期待される。本研究では、深層生成モデルと確率分布を予測する生成モデルを組み合わせて、確率的な行動を再現する手法を開発している。リカレントニューラルネットワーク（recurrent neural network; RNN）と混合正規分布を出力する混合密度ネットワーク（mixture density network; MDN）を組み合わせた MDN-RNN を線虫の行動モデリングに応用することを提案し、従来の RNN によるモデル化に比べ、実際の行動をよりよく再現できることを示している。さらに生成モデルの利点である表現学習を用いることで、モデル内の異なる構成要素によって異なる行動パターン（異なるダイナミクスを持つ行動パターン）を分離（ディスエンタングルメント）した形でモデル化できることを示した。これにより、行動の要素を支配している個々のダイナミクスを教師なしで分離することが可能となった。

本論第 2 章では、計算機による行動の制御機構を開発し、目的の課題に適した制御機構を自動的に検索することで、自然界に見られる行動戦略を機械が抽出できることを示した。そのために、制御アルゴリズムとして強化学習を適用し、神経系の計算機構の一部をコンピュータに置き換えて、動物が自然界で行っている課題を達成することを目指した。その結果、動物が実際に行っている行動と同様の行動戦略を、コンピュータが事前情報なしに獲得し、再現できることを明らかにした。

付録では、行動学の分野で重要となっている比較行動学の計算手法の開発を提案している。敵対的学習の概念を取り入れることで、共通のダイナミクスを持つ行動を比較群の異なる行動から分離する方法を提案し、Toyモデルを用いて検証した。

なお、本論文第 1 章および 2 章は、山内直寛氏、王 浩羽氏、佐藤研氏、豊島有氏、飯野雄一氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析および検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。