

## 論文内容の要旨

博士論文題目

Utilizing Partial Automation in Imitation Learning for Complex Task Automation  
(複雑作業の自動化に向けた部分自動化を活用した模倣学習)

氏名

田原 熙昂

(論文内容の要旨)

労働力人口が減少する日本において、代替労働力としてロボットの活用が急務であり、近年では土工作业をはじめとする長期的な操作かつ環境全体を正確に把握することが難しい部分観測性をもつ複雑作業への適用が期待されている。人が行う複雑作業に対して、教示者が収集したデータからロボットを自動化する方策を直接獲得する模倣学習は、ロボットの行動規則を網羅的にプログラムする手間を減らすことができる柔軟な枠組みである。一方で、長期的な作業では教示者の操作負担が大きく、部分観測に基づく意思決定は認知負荷が高い。これらの問題が教示者の操作ミスを引き起こし、質が多様化した教示データから学習される方策の性能が劣化する問題がある。以上より本研究では、これらの問題を解決し、模倣学習によって複雑作業を自動化することを目的とする。

従来のアプローチでは、質が多様化した教示データに対して後処理を施して最適な方策を抽出する手法を議論している。しかし、ここではミスを含む準最適なデータを無視するためデータの活用効率に問題がある。そこで本研究は、データの後処理ではなく教示データの生成過程に着目する。複雑作業に取り組む産業システムの運転者の操作戦略から知見を得れば、操作者は高い認知能力が必要な状況では手動でシステムを操作し、それ以外の状況では自動操作を活用している。この手動操作と手動/自動モードの切り替えを行う半自動操作を用いることで、継続的な手動操作と比較して長期的な操作負担や認知負荷を低減している。以上の複雑作業に対する操作戦略に着想を得て、本研究では、手動操作と事前に設計された自動操作の切り替え構造を教示者のデータ生成過程に組み込んだ、部分自動化を活用した模倣学習アプローチを提案する。加えて教示の質を考慮して方策を学習する手法を提案し、部分自動化を活用した模倣学習アプローチとの関連性について議論する。

具体的には、部分自動化のアプローチに基づいて、長期作業の教示負担と部分観測下での認知負荷の問題に着目した2つの手法を提案し、土工作业タスクに適用して有効性を評価した。長期作業タスクではシミュレーションと実機環境で検証を行い、提案手法が最も高いタスク性能を達成するとともに教示負担を低減することを確認した。また、部分観測タスクでは土砂に埋もれた直接視認できない岩石を除去する実機環境で検証を行い、提案手法が最も高い性能を達成するとともに認知負荷を低減することを確認した。最後に、教示の質の多様性に対してタスク達成度を考慮して方策を学習する手法を検証し、提案手法が最も高い性能を達成することを確認するとともに部分自動化を用いたアプローチとの関連性について考察した。結論として、本研究で提案された手法を組み合わせることで、土工作业をはじめとする複雑作業を模倣学習で自動化することを可能とする枠組みを実現することができた。

(論文審査結果の要旨)

本論文では、ロボットを自動化するための制御方策を教示者から収集した教示データから獲得する模倣学習に焦点を当てている。長期的な作業では教示者の負担が大きく、部分的な情報しか得られない状況下での意思決定は認知負荷が高いため、教示者が操作ミスを頻発し、多様な品質の教示データから学習される方策の性能が劣化する。この問題に対するアプローチとして、産業システムの運転者が複雑作業に取り組む際の操作戦略から得られる洞察に着想を得た。操作者は高い認知能力が必要な状況では手動でシステムを操作し、それ以外の状況では簡易的な自動操作を活用している。そこで本研究では、手動操作と事前に設計された自動操作の切り替え構造を教示者のデータ生成過程に組み込んだ、部分自動化を活用した模倣学習アプローチを提案している。

部分自動化に基づいて、長期作業の教示負担と部分観測下での認知負荷の問題に着目した2つの模倣学習手法を提案した。長期作業タスクではシミュレーションと実機環境で検証を行い、提案手法が高いタスク性能を達成するとともに教示負担を低減することを確認した。また、部分観測タスクでは土砂に埋もれた岩石を除去する実機環境で検証を行い、提案手法が高い性能を達成するとともに認知負荷を低減することを確認した。最後に、教示の質の多様性に対してタスク達成度を考慮して方策を学習する手法を検証し、提案手法が高い性能を達成することを確認した。教示者の認知負荷に基づいて自動/手動操作の切替型模倣学習の設計思想は、複雑かつ長期的作業に向けた独自性の高いアプローチを開拓している。また、全観測・部分観測という特性の異なる環境に対する実装技術の提案、実ロボットも含めた実験検証により有効性を確認したことなど、高い学術的価値を有すると評価できる。

公聴会では、部分自動化の切替構造や自動操作ルールの設計思想、提案アプローチの制限や他のアプローチとの対応付け・位置づけについて審査委員との質疑が行われた。その後の最終審査において、すべての質問への回答と論文修正について説明が行われ、適切な対応がとられたことを審査員全員で確認した。

本論文は、手動操作と事前に設計された自動操作の切り替え構造を教示データ生成過程に組み込んだ模倣学習アプローチを提案した。シミュレーションおよび実ロボットを用いた評価実験を実施していることに鑑み、新規性および有用性の観点から一定の学術的意義があるものと評価できる。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。