

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Efficient Learning for Dexterous Manipulation through Interactive Tactile Perception
著者(和文)	太田佳
Author(English)	Kei Ohta
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12912号, 授与年月日:2024年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:篠田 浩一,岡崎 直観,横田 理央,下坂 正倫,松原 崇充,金崎 朝子
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12912号, Conferred date:2024/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	太田佳	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	篠田浩一	教授	松原崇充	教授
	審査員	岡崎直観	教授	金崎朝子	准教授
		横田理央	教授		
		下坂正倫	准教授		

論文審査の要旨 (2000 字程度)

この論文は、“Efficient Learning for Dexterous Manipulation through Interactive Tactile Perception” と題し、英文 7 章から成っている。

第 1 章では、研究の背景と動機について述べている。基盤モデルの台頭により、ロボティクスタスクの汎用的な解法が急速に開発されている。しかし、それらは比較的単純なピックアンドプレースのようなタスクに限定され、例えば不安定なタワーに物体を積み上げる問題のような複雑な物理的インタラクションを伴うタスクには対応できない。本論文では、ロボットが実環境で物理的な接触を伴う複雑な操作を実行できる手法の開発に取り組む。この目標を実現するため、現実世界で短時間で有効な方策を学習する強化学習手法、高次元のセンサデータから本質的な表現を抽出する手法、そしてそれらを統合し実世界でロボットを制御する手法の 3 つの研究課題を解決する。

第 2 章では、第一の課題「効率的に高い制御性能を達成する強化学習」の開発に取り組む。近年の自然言語処理やコンピュータビジョン分野ではパラメータ数を増やすことで高い性能を達成してきたが、強化学習では学習が不安定になることが報告されている。この問題を解決するため、強化学習がスカラーの報酬信号かつ非定常な損失関数から関数近似器を学習する困難さに着目し、表現学習を強化学習から分離し、関数近似器の約半分のパラメータを次の状態を予測する定常な損失関数で学習することで学習全体を安定化させる OFENet を提案する。従来の「低次元の特徴ほどより速く良く学習する」という知見に反し、入力より遥かに高次元の特徴表現を学習することで高い性能を達成した。

第 3 章では、第 2 章と同じく第一の課題に取り組む。OFENet に加え、強化学習側のパラメータも増加させ、その際の学習不安定問題を DenseNet をベースとする新しいネットワーク構造で解決した。さらに、関数近似器の過適合問題を分散学習フレームワークで軽減し、結果として従来より 150 倍大きい関数近似器の学習を可能にし、制御性能 2 倍、100 倍サンプル効率の良い学習を実現した。

第 4 章では、第二の研究課題「物体操作に適した物体の表現の獲得」に取り組み、高次元センサデータからタスクに本質的な情報を抽出する。扉など関節を持つ物体の関節構造の理解に取り組む。従来の画像や点群から推定する手法では、特に関節が閉じている一見曖昧な状態で推定性能が低い。この問題を解決するため、観測から複数の関節構造を仮定し、物体とインタ

ラクションしながら仮説分布を更新する確率推論フレームワークを提案した。これにより、関節構造推定や物体操作においてビジョンモデルを上回る性能を達成した。

第5章では、任意のコネクタ部品の嵌合タスクに取り組んだ。従来手法では力覚センサや強化学習で挿入タスクを解決するが、人間はそれぞれの断面をタッチし触覚を用いて嵌合するコネクタの種類や姿勢を特定する。これに着想を得て、触覚センサで観測したオスとメスのコネクタ断面形状から対照学習モデルを用いて嵌合する確率を計算し、第4章で提案した確率推論によりインタラクションのたびに不確実性を減少させる手法を提案した。様々な未知の部品嵌合タスクで本手法を評価し、従来手法に対する効率性を実証した。

第6章では、「巧みな操作タスクをどのように解決できるか」という第三の研究課題を解決するため、未知の不安定なタワーに物体を積み上げる問題を解決する。従来手法が物体同士の接触を考慮しないのに対し、把持した物体の底面と環境が接触する面積を明示的に推定し、第5章で開発した確率推論フレームワークを利用して事後分布を計算する。その結果を第3章の強化学習フレームワークに入力し、接触面を最大化する安定した構成に導く方策を学習する。この組み合わせにより、ロボットが約1000回(3時間)のインタラクションから複雑な操作能力を要するタスクを解決できる方策を学習できることを示した。

第7章の結論では、ロボットが実環境で物理的な接触を伴う複雑な操作を実現するために必要な3つの研究課題を解決したことを示した。具体的には、強化学習の効率を100倍向上させ、物体の表現を獲得する確率推論手法を開発し、それらを組み合わせて不安定物体の積み上げタスクを解決したことを報告した。一方、より汎用的な手法とするためには、sim2realによる学習効率向上や基盤モデルとの組み合わせによる汎化性能向上が必要であることを明らかにした。

以上を要するに、本論文は、ロボットによる複雑な物体操作手法における本質的な課題に取り組み、確実かつ有用な解を示しており、工学上の貢献は極めて大きい。したがって、本論文は博士(工学)の学位論文として十分な価値があると認められる。

注意:「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。