

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 Ota
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)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	情報工学 知能情報	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	太田 佳		審査員主査： Chief Examiner	篠田 浩一	

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

この論文は、“Efficient Learning for Dexterous Manipulation through Interactive Tactile Perception” と題し、英文 7 章から構成されている。

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」に取り組む。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。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(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。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	情報工学 知能情報	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	太田 佳		審査員主査： Chief Examiner	篠田 浩一	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

In this thesis, we address the challenge of enabling robots to perform complex manipulation tasks that involve physical contact interactions in real-world environments. Identifying efficiency in learning in the real system and estimating object's representation as key challenges, this thesis studies the following three pivotal questions.

The first question is, “*How can we train high-control-performance and sample-efficient RL policies?*”. To answer this question, Chapter 2 investigates whether increasing the input dimensionality enhances model-free deep RL algorithms' performance and sample efficiency. We introduce an online feature extractor network (OFENet) that employs neural networks to deliberately generate high-dimensional representations to serve as inputs for deep RL algorithms. In Chapter 3, we propose a novel method comprising 1) wider networks with DenseNet connections, 2) decoupling representation learning from RL training using the OFENet, and 3) a distributed training approach to further train a larger model.

The second question is, “*How can we estimate an object's representation for performing manipulation?*”. Chapter 4 proposes *H-SAUR*, a probabilistic generative framework that simultaneously generates a distribution of hypotheses about object articulation, captures the uncertainty of these hypotheses over time, and infers actions for exploration and manipulation. In Chapter 5, we introduce *Tactile-Filter*, which combines tactile sensing with the probabilistic estimation framework developed in Chapter 4 to address a general connector part mating task.

Finally, the third question is, “*How can we solve a dexterous manipulation task?*”. Chapter 6 tackles the problem of stably stacking a highly irregular object on top of an unknown tower. We utilize the probabilistic estimation framework developed in Part II to reliably estimate an extrinsic contact patch between the grasped and bottom objects, and input it into the RL framework, developed in Part I, to learn a policy that guides the robot towards stable configurations.

The conclusion in Chapter 7 summarizes the answers to the above questions, highlighting the importance of the RL framework that improves sample efficiency and control performance and the probabilistic framework that allows robots to estimate the essential object's representations from interactions.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(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。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).