

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12070

研究課題名（和文）スキルライブラリに基づく離散連続強化学習と食品マニピュレーション

研究課題名（英文）Discrete and Continuous Reinforcement Learning with a Library of Skills and its Application to Robotic Food Manipulation

研究代表者

山口 明彦（Yamaguchi, Akihiko）

東北大学・医学系研究科・大学院非常勤講師

研究者番号：10625031

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）：離散的な表現で表されるスキルの組み合わせ、および各スキルの持つ連続的なパラメータを、同時に最適化・学習する問題として「離散連続強化学習」を提案し、この学習を実現する手法の構築を目標とした。この仕組みにより、ロボットによる高度な物体操作を実現する。この学習・推論メカニズムの特性が最も発揮されると考えられるタスクとして、ロボット調理を選択し、研究開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

食品を対象とするような物体操作では、対象物が食材という柔軟不定形物であり、人間はいとも簡単にこれらの対象物を操作する一方で、ロボットや機械による自動化が難しいタスクとして知られていた。このため、食品産業においても、人手不足に代表される社会課題があるにもかかわらず、自動化が進んでいないプロセスとして残っている。このようなタスクに対するソリューションとして、離散連続強化学習が開発できればインパクトは大きく、社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this research, I proposed "discrete-continuous reinforcement learning" as a problem of simultaneously optimizing and learning combinations of skills expressed in a discrete form and continuous parameters of each skill, and aimed to construct a method to realize this learning framework. This mechanism enables robots to perform sophisticated object manipulation. Robot cooking was selected as a task where the characteristics of this learning and reasoning mechanism can be best demonstrated, and research and development was conducted.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ロボットラーニング 強化学習 ロボットマニピュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人間レベルの物体操作能力の工学的な実現のため、現実世界で取得したデータからの学習が不可欠であるという考えに基づきロボットラーニングの立場でアプローチする。制御問題は状態 $x(t)$ から制御 $u(t)$ を何らかの指標に基づいて計算する問題と定式化できるが、一般に物体操作では x や u は膨大な次元数となる。深層学習はデータを集めれば膨大な x , u あるいはその変化のモデル化ができることを画像や自然言語処理といったタスクで示したが、膨大なデータを実ロボットの物体操作タスクで集めることは難しく、何より人間は「より効率的で知的な情報処理」をしていると考える。このためには知識の蓄積・構造化・再利用を工学的に実現する手段の確立が必要である。既存研究は、単独のスキルを限定的な状況で学習する研究がほとんどで、調理のような複雑なタスクの自動化は極めて限定的であった。

2. 研究の目的

本研究では物体操作に関する知識を「スキル」の集合という形で抽象化し、スキルを多様な状態に対して変容させる「パラメータ」およびパラメータの変化が引き起こす状態変化のモデルを内包させることで、物理世界のダイナミクスを扱えるようにする。さらに、代替スキルを許容しモデル化することでシミュレーションの多様性を高め、現実世界の多様性に対応する。

代替スキルとは、例えば「液体を注ぐ」というタスクに対して容器を傾ける(水などの場合)、容器を振る(粘性の高い液体の場合)、スプーンを使う(注ぐ量が重要な場合)などの代替手段であり、代替スキルの存在が現実世界の多様性(幅広い操作対象物や要求)に対応するカギである。代替スキルによって、ある状況であるスキルが機能しない場合に別のスキルを試すなど、ロバストなエラーリカバリが実現できる。

これまでに研究代表者は「スキルライブラリを導入した強化学習」手法を提案し、多様な液体を注ぐタスクや、バナナの皮剥きタスクで仮説検証を行った。本研究では以下を目的とする。

- (1) 質の異なる多種のスキルからなるライブラリを構成する。
- (2) スキルライブラリを利用して物体操作を達成する制御を計画し、結果をフィードバックして学習する手法を確立する。
- (3) 意味のある物体操作タスクを実世界で実現し仮説検証を繰り返す。具体的には、柔軟物操作や物理・化学・熱プロセスを含み挑戦的な物体操作である「調理タスク」を採用する。

3. 研究の方法

各研究項目について、以下の方法で研究を進める。

- (1) スキルライブラリの構成：調理レシピを分析し、代替スキルを含むスキルセットに分解し、共通に使用されることが多い重要なスキルを選定して実装する。既に 20 程度の調理タスクを分析し、把持・注ぐに分類されるスキルが多いことを特定した。
- (2) モデルベース型離散連続強化学習手法を提案手法の土台とする。この手法については既に研究を進めており、仮説検証レベルの論文を投稿中である。本研究では過去の業績を統合し理論を強固にする。代替スキルを利用したロバスト制御はダイナミクスモデルの動的更新が手法のポイントとなる。オンライン学習の導入を切り口とする。
- (3) 高機能ロボットハンドやシミュレータを開発し、調理タスクの検証を進める。目的関数を最大化するように(1)のスキルを(2)の手法によって自動的に組み合わせ、ロボットで実行し、(2)の手法で学習・改善する。

4. 研究成果

各研究項目に対して、以下の成果を得た。

- (1) スキルライブラリの構築：
 - ・注ぐタスクで使われるスキルとして傾けるスキル、振るスキルを実装した。
 - ・触覚ハンドを利用したスキルとして、把持の判定化、プレーシングにおける接触検知などの触覚スキルを実装した。
 - ・手探り把持スキルを実装した。
- (2) スキルライブラリを利用したロボット動作の計画・制御・学習手法の開発：
 - ・確率的ニューラルネットワークによるダイナミクスの学習と行動計画の研究を進める中で、粘性の高い液体やパーティクルのような対象物の「注ぐ」タスクで使われるスキル(傾ける、振るなど)では、ダイナミクスの出力分布が正規分布から外れるような現象が確認され、これが確率的モデルで学習したダイナミクスに基づく行動計画でリスクの高い行動選択を引き起こす要因となることを明らかにした。この問題に対処するため、確率的モデルを拡張し、Risk sensitive な強化学習手法を開発した。
 - ・提案する離散連続強化学習手法で効率的に扱えるようにするダイナミクスモデルの構成方法を開発した。特に、学習したモデルが異なる状況でも共有できる(再利用できる)ような工夫を導入することで、学習効率を向上させることに成功した。
- (3) シミュレーションやロボットを用いたタスクでの検証：

- ・シミュレーションおよび実機のロボットで、粘性の高い液体やパーティクルの注ぐタスクにおいて検証した。
- ・漏斗などの道具の使用やマヨネーズの容器のような柔軟な容器をシミュレーション実験で扱えるようにするためのシミュレータを開発した。
- ・双腕ロボットシステムの構築、および高度な物体操作が可能なロボットハンドとして2指4自由度かつ全リンクに触覚センサ FingerVision が埋め込まれたハンドを開発した。
- ・視触覚センサ FingerVision を搭載した高機能ロボットハンドを開発し、触覚情報処理プログラムや基本制御プログラムを開発した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 八島 諒汰, 山口 明彦, 橋本 浩一
2. 発表標題 液体スキルシミュレータ: 道具と柔軟な容器の導入
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 山口 明彦
2. 発表標題 視触覚センサFingerVisionを搭載した高機能ロボットハンド
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 Ryota Yashima, Akihiko Yamaguchi, Koichi Hashimoto
2. 発表標題 Reinforcement Learning with Incremental Skill Models: Extension to Tool Use As Skills
3. 学会等名 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 八島 諒汰, 山口 明彦, 橋本 浩一
2. 発表標題 複雑なダイナミクス構造におけるモデルベース型強化学習のデバッグ手法
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 八島 諒汰, 山口 明彦, 橋本 浩一
2. 発表標題 確率的モデルベース型強化学習における液体マニピュレーションのマルチモーダルダイナミクスの解析
3. 学会等名 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryota Yashima, Akihiko Yamaguchi, Koichi Hashimoto
2. 発表標題 Sample-Efficient Multimodal Dynamics Modeling for Risk-Sensitive Reinforcement Learning
3. 学会等名 8th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------	---------