

令和 6 年 6 月 28 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11930

研究課題名（和文）人間・ロボット協調系のためのゆらぎの確率的性質を陽に考慮した学習法

研究課題名（英文）A Learning Method Explicitly Considering the Stochastic Properties of Fluctuations in Physical Human-Robot Collaboration

研究代表者

山脇 輔（Yamawaki, Tasuku）

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・システム工学群・講師

研究者番号：20546171

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、人間のゆらぎの確率的性質に着目することにより、ゆらぎが学習性能へ与える影響を陽に考慮できる学習法を提案し、その有効性を人間・機械協調系のインピーダンスパラメータの最適化に適用し、その性能評価を実験的に行うことを目的とした。大きく分けて3つのアプローチにより学習法の改善に取り組んだ。(1) 確率的に生じる人間の突発的な異常動作の検知、(2) 状態に応じた学習ゲインの適応的調整の採用、(3) 過去の試行結果を用いた勾配の推定精度の向上。これら3つの学習法により、確率的に生じる人間のゆらぎによる学習性能の劣化を軽減すること実験的に確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、(1) 確率的に生じる人間の突発的な異常動作の検知、(2) 状態に応じた学習ゲインの適応的調整の採用、(3) 過去の試行結果を用いた勾配の推定精度の向上の3つのアプローチを採用した新たな学習法を提案した。その有効性を人間・機械協調系のインピーダンスパラメータの最適化に適用し、その性能評価を実験的に行った。その結果、提案手法は、これまでの学習法と比較して、少ない試行回数で評価関数の改善できることを確認した。

研究成果の概要（英文）：This study proposes a learning method that explicitly considers the impact of stochastic fluctuations in human behavior on learning performance. The method's effectiveness is demonstrated through its application to the optimization of impedance parameters in human-machine cooperative systems, with performance evaluations conducted experimentally. We focused on improving the learning method through three primary approaches: (1) detection of sudden, abnormal human movements occurring probabilistically; (2) adoption of adaptive adjustments to learning gain based on the state; and (3) enhancement of gradient estimation accuracy using past trial results. Experimental results confirmed that these three learning methods effectively mitigate the degradation of learning performance caused by stochastic human fluctuations.

研究分野：ロボット工学

キーワード：人間ロボット協調系

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2060年の日本の生産年齢人口は現在の約6割にまで減少すると見込まれており、ものづくりの人手不足を補うための技術開発が喫緊の課題である。特にライフスタイルや価値の多様化により変種変量生産が求められる生産現場では、人間とロボットが協働することで臨機応変に対応する協働型ロボットが注目されている。協働型ロボットシステムのひとつである人間・ロボット協調系では、操作者が印可した力の方向にロボットを制御するインピーダンス制御が一般的に用いられる。その操作性は仮想的なインピーダンスパラメータで決まるため、インピーダンスパラメータを状況に応じた時変とすることで操作性を向上させる可変インピーダンス制御が提案された。

可変インピーダンス制御では、インピーダンスパラメータの調整アルゴリズムが操作性の向上に大きく寄与する。これまでの調整アルゴリズムは、人間の動特性をモデルに基づいたものと、操作者の主観的評価に基づいたものに大別される。しかし、人間の動特性は非常に複雑なため、完全にモデル化することは困難であり、主観的な評価は定量的にインピーダンスパラメータを調整することができないといった問題点があった。人間のモデルを用いずに定量的にインピーダンスパラメータを最適化できるアルゴリズムが求められていた。

申請者らは繰り返し学習によりインピーダンスパラメータをモデルなしに定量的に最適化できる新しいアプローチを提案し、2自由度ロボットアームに対する有効性を示した。しかし、これらの手法では、予め設定した軌道で動くマーカにトラッキングさせてロボットの動きに拘束を加えて学習させる必要があった。しかし、実際の人間・ロボット協調系では、目標軌道は与えず、目標点のみを与える Point to Point (PTP) 動作が一般的である。そこで PTP 動作に対して上述の繰り返し学習を適用した事前実験を行った結果、学習が不安定となり、従来手法が適用できないことが明らかになっていた。

### 2. 研究の目的

操作者が自由にロボットを操作できる PTP 動作では、ゆらぎが与える学習性能への影響が大きいことが分かった。申請者らが提案した従来手法ではこれ以上の学習性能の向上は困難である。そこで本研究では、ゆらぎの確率的性質に着目することにより、ゆらぎが学習性能へ与える影響を陽に考慮できる学習法を提案し、その有効性を人間・機械協調系のインピーダンスパラメータの最適化に適用し、性能評価を行うことを目的とする。

### 3. 研究の方法

大きく分けて3つのアプローチにより学習法の改善に取り組んだ。

- (1) 確率的に生じる人間の突発的な異常動作の検知
- (2) 状態に応じた学習ゲインの適応的調整の採用
- (3) 過去の試行結果を用いた勾配の推定精度の向上

これら3つの学習法により、確率的に生じる人間のゆらぎによる学習性能の劣化を軽減することを目指した。

## 4. 研究成果

### (1) 確率的に生じる人間の突発的な異常動作の検知

インピーダンスパラメータの学習中、人間の腕のダンピングパラメータの変化や予期せぬ筋活動の変動により、人間の操作が直前の操作から著しく変動することが予想される。これらの変動は、評価関数の勾配を大きく変化させ、学習性能を低下させる可能性がある。そこで、学習性能を低下させる程度に大きな人間の操作の変動を検出し、学習データから削除することを考えた。本研究では、動作の変動を検出するため、連続する2つの試行間でのエンドエフェクタの軌道の相違に着目し、軌道の相違を動的タイムワーピングにより定量的に評価した。さらに評価精度の向上を目指し、3つの特徴量(位置、速度、加速度)を同時に評価する手法を採用した。この検出機能を採用することにより、それを採用しない場合と比較して、少ない試行回数で評価関数の値がより良くなることを実験的に確認した[1]。

### (2) 状態に応じた学習ゲインの適応的調整

上記の学習法は学習ゲインが固定であったため、データに含まれるノイズや外れ値などの不確実なデータの影響によって、学習性能が大幅に低下するといった問題があった。また学習ゲインを試行錯誤によって設定する必要があるため、調整コストが大きかった。そこで学習性能に対するハイパーパラメータの影響が少なく、初期学習ゲインの設定も不要であるといった特長をもつ適応勾配法のひとつ AdaDelta を採用した。その結果、固定学習ゲインの場合と比較して、少ない試行回数で評価関数値が大幅に改善し、PTP 動作に必要な操作力を大きく低減できた。また、提案手法は全試行を通じて操作力のばらつきが小さく、ノイズに対するロバスト性の違いが学習曲線のばらつきに影響を与えたことが分かった[2]。

### (3) 過去の試行結果を用いた勾配の推定精度の向上

上述した2つのアプローチでは、直前の試行結果を用いて学習を行っていた。過去の試行結果を積極的に採用することにより、学習性能の改善が期待できるのではないかと考えた。そこで、一般化単体勾配法を用いることにより過去の試行結果に基づいて勾配の推定性能の向上を目指した。提案手法は、これまでの学習法と比較して、少ない試行回数で評価関数の改善することを実験的に確認した[3]。

## 参考文献

- [1] T. Yamawaki, L. Tran, and M. Yashima, "Learning Variable Admittance Control for Human-Robot Collaborative Manipulation," J. Robot. Mechatron., Vol.35 No.6, pp. 1593-1603, 2023.
- [2] 山脇 輔, トラン ドック リエム, 泉 文乃, 八島 真人, "人間・ロボット協調操作のための適応勾配降下法を用いた繰り返し学習による可変アドミッタンス制御," 日本機械学会論文集, 89 巻, 917 号, p. 22-00243, 2023.
- [3] L. Tran, T. Yamawaki, H. Fujiwara, M. Yashima, "Admittance learning strategy using generalized simplex gradient methods for human-robot collaboration," Mechanical Engineering Journal, Volume 10, Issue 4, Pages 23-00129, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 YAMAWAKI Tasuku, TRAN Liem Duc, YASHIMA Masahito	4. 巻 35
2. 論文標題 Learning Variable Admittance Control for Human-Robot Collaborative Manipulation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1593 ~ 1603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2023.p1593	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 TRAN Liem Duc, YAMAWAKI Tasuku, FUJIWARA Hiroyuki, YASHIMA Masahito	4. 巻 10
2. 論文標題 Admittance learning strategy using generalized simplex gradient methods for human?robot collaboration	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 23-00129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/mej.23-00129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 山脇 輔, トラン ドック リエム, 泉 文乃, 八島 真人	4. 巻 89
2. 論文標題 人間・ロボット協調操作のための適応勾配降下法を用いた繰り返し学習による可変アドミッタンス制御	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 22-00243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.22-00243	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔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 Tran Duc Liem, Yamawaki Tasuku, Fujiwara Hiroyuki, Yashima Masahito
2. 発表標題 Variable Impedance Control Using Mixed Reality for Human-Robot Collaboration
3. 学会等名 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 トランドク リエム, 山脇 輔, 藤原 浩幸, 八島 真人
2. 発表標題 人間ロボット協調作業のためのベイズ最適化によるインピーダンスプロファイル生成
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2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 トランドク リエム, 山脇 輔, 藤原 浩幸, 八島 真人
2. 発表標題 人間・ロボット協調系のためのベイズ最適化を用いたダンピング場パラメータの学習
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2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 トランドク リエム, 山脇 輔, 藤原 浩幸, 八島 真人
2. 発表標題 人間・ロボット協調系のためのタスク成功率モデルを考慮したベイズ最適化によるパラメータ調整
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 トランドクリエム, 八島真人, 山脇輔, 洞出光洋
2. 発表標題 人間・ロボット協調系のための単体勾配を用いた繰り返し学習
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 Tran Duc Liam, Masahito Yashima, Tasuku Yamawaki, Mitsuhiro Horade
2. 発表標題 Variable Impedance Control with Simplex Gradient based Iterative Learning for Human-Robot Collaboration
3. 学会等名 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (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
研究分担者	八島 真人  (Yashima Masahito)  (50546158)	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・教授   (82723)	
研究分担者	藤原 浩幸  (Fujiwara Hiroyuki)  (60531994)	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・教授   (82723)	
研究分担者	吉田 秀久  (Yoshida Hidehisa)  (00332635)	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・教授   (82723)	

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
---------	---------