

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04404

研究課題名(和文)人の行動理解と予測に基づくロボットの協調的動作の実現

研究課題名(英文) Realization of collaborative robot motion based on human behavior understanding and predicting

研究代表者

山内 悠嗣 (YAMAUCHI, Yuji)

中部大学・理工学部・講師

研究者番号：10736135

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：協調ロボットと同じ空間で作業する人間の行動理解、及び予測を実現するために、観測した過去の映像から深層学習ネットワークにより次時刻以降の人間の行動及び姿勢をリアルタイムに予測することを可能とした。そして、人間の行動を理解した上で、ロボットの動作計画を実現するために、動作計画に使用されるコンフィギュレーション空間を拡張して時系列変化に対応させたコンフィギュレーション時空間を提案した。さらに、上記の手法を応用することで、人物の行動の理解・予測結果を用いてロボットの動作を計画する手法を確立した。双腕型協調ロボットを用いた実環境における評価実験の結果、提案手法の有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間と同じ空間で働くことができる協働ロボットの導入が進められている。安全対策のためにロボットの速度を落とす等の対応が採られているが、生産性が低下する問題を抱えていた。本研究では人間の行動理解・予測することで、人間が非定常的な行動を取った場合においても、その行動を阻害しないロボットの動作を実現した。リアルタイムに人間の行動を理解・予測する手法の実現、及びこれまでの動作計画アプローチとは全く異なる手法を確立できたことから、本研究の学術的意義は高い。また、今後も様々な分野において作業の自動化が進められることが予想され、協働ロボットの導入が加速することから、本研究の社会的意義も大きいと考えられる。

研究成果の概要(英文)：To understand and predict the behavior of a human working in the same space as a cooperative robot, we developed a deep learning network that can predict the behavior and posture of a human in real time based on previously observed video images. For motion planning, we propose a configuration space that corresponds to the time-series changes by extending the configuration space used for motion planning. Furthermore, by applying the proposed method, we established robot motion planning by assessing and predicting human actions. The effectiveness of the proposed method was confirmed based on the results of the evaluation experiments in real environment using a dual-armed collaborative robot.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：動作計画 協調動作 動画予測 コンフィギュレーション空間 行動理解 協働ロボット 人物姿勢推定 深層学習

1. 研究開始当初の背景

労働力不足の解消と生産性の向上のために、ロボットが生産ラインに投入され、作業の効率化に寄与している。特に近年では、人と同じ空間で働くことができる協働ロボットが開発され、小型かつ軽量であることから様々な分野への導入が進んでいる。しかしながら、人間とロボットの作業は分担化され、時間と共に変化する状況の中でロボットが人の作業に合わせて柔軟に行動することが難しい状況にある。また、人間とロボットの協働作業時には、安全対策として接触時の緊急停止や人の接近に伴い、動作速度を制限する等の対応策が採られているが、これらは作業の生産性を低下させることに繋がる。この問題を解決するためには、人間の行動に合わせた協働ロボットの動作を計画する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、上記で述べた問題を解決するために、人の行動理解と予測に基づいてロボットの協働動作を獲得することを目的とし、これを達成するために本研究では主に2つに内容について取り組む。

(1)1つ目は、協働ロボットと同じ空間で作業する人間の行動理解・姿勢予測アルゴリズムの確立である。センサー情報から機械学習によってリアルタイムに人の姿勢を推定し、ある一定期間の姿勢推定結果から最もらしい行動及び姿勢を予測する。

(2)2つ目は、人間の行動を理解した上でのロボットの動作計画である。これにより人間の作業に干渉しないような協働ロボットの行動を実現する。

3. 研究の方法

上記2つの目的を達成するために、本研究では下記の方法で取り組んだ。

(1)人間の行動理解・姿勢予測

人間の行動理解と予測を行うために、センサから得られた情報に基づき深層学習により人間の行動の異常度合いを推定する方法を確立した。提案する手法では、図1に示すように画像から人物の2次元・3次元姿勢を推定した後に、姿勢の情報から Long Short-Term Memory ベースのオートエンコーダにより定常的な行動との違いを異常度合いとして推定する。人物動作認識を評価する既存の画像データベースを用いて提案手法を検証し、人物の動作の順番等を考慮して定常的な行動との違いを推定可能なことを確認した。図2に畳み込みニューラルネットワークとオートエンコーダを組み合わせた従来手法と提案手法の異常検知例を示す。赤い矩形領域が非定常的な動作を行なったシーンを表すが、提案手法のグラフの方がより高い復元誤差(異常度合い)を出力できていることがわかる。また、人物とロボットの協調的な動作の実現にはリアルタイム性が求められるが、本研究では2次元姿勢推定を行った後に3次元姿勢を姿勢するため、高速に計算することが可能となっている。

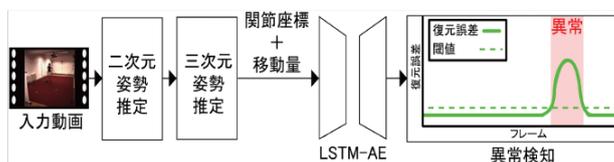


図1 姿勢推定と異常検知の流れ

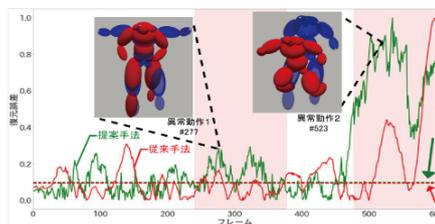


図2 異常検知結果の例

協調ロボットと同じ空間で作業する人間の行動理解及び予測を実現するために、観測した過去の映像と映像中の動きの情報から畳み込み Long Short Term Memory (LSTM) をベースとした深層学習ネットワークにより次時刻以降の映像を予測する手法を確立した。本研究では明示的に動きの情報を加味することで、画像内で移動する物体や動的な背景を考慮することが可能となり、高精度に次時刻以降の映像を予測することができた。

(2)ロボットの動作計画

人間の行動を理解した上でのロボットの動作計画を実現するためには、動的な環境下においてロボットの初期姿勢から目標姿勢までの最適な軌跡を生成する必要がある。そこで、本研究では、コンフィギュレーション空間(C-space)を拡張して時系列変化に対応させたコンフィギュレーション

オン時空間(C-time-space)を提案した。C-time-spaceはC-spaceに時間軸を追加し、静的物体に加え各時間の動的物体を表現した空間である。図3に提案するC-time-spaceを可視化し、C-time-spaceを用いて経路計画した例を示す。従来のC-spaceでは、時事刻々と変化する動的な環境に対応することができないが、提案するC-time-spaceでは動的環境に応じたロボットの動作計画が可能となった。

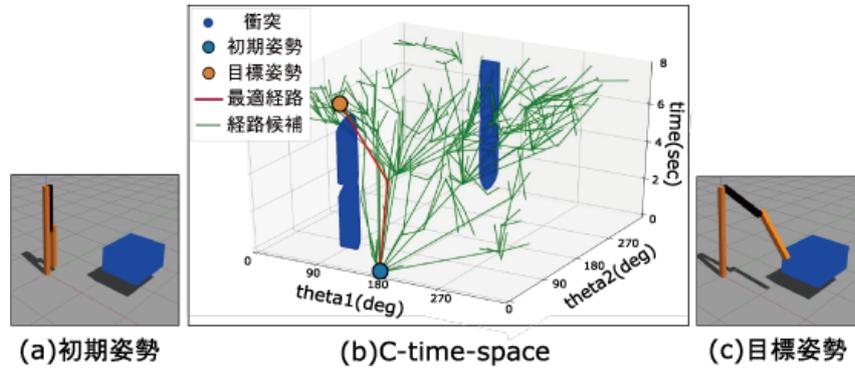


図3 提案するC-time-spaceを用いた経路計画例

上記の手法で用いたコンフィギュレーション空間は、ロボットと障害物の衝突判定が必要であり、完全なC-spaceを作成するには多大な計算量が必要となる。そこで、本研究では完全なC-spaceを作成するVox2C-spaceを提案した。Vox2C-spaceは、エンコーダ・デコーダ型(EDネットワーク)の画像生成ネットワークを応用した手法であり、直接的に衝突判定の計算をすることなくボクセルデータからC-spaceを高速に生成できる。図4に提案するVox2C-spaceの流れ、図5に提案手法によるC-spaceの生成例を示す。提案手法は、複数のカメラから観測された距離情報からボクセルと呼ばれる2値の3D占有グリッドマップを作成し、EDネットワークによりC-spaceを生成する。各関節の分解能を1度として設定した際の2自由度のロボットを用いた場合、従来のC-space作成手法では平均1.29[秒]の計算時間を要したが、提案手法では0.14[秒]でC-spaceを生成することができた。提案手法は、真のC-spaceと推定したC-spaceの一致度を表すIoU(Intersection over Union)が約0.81と比較的高精度に推定することが可能であることを確認した。図5はC-spaceの真値と提案手法により推定したC-spaceの比較例であるが、かなり類似した結果が得られていることがわかる。

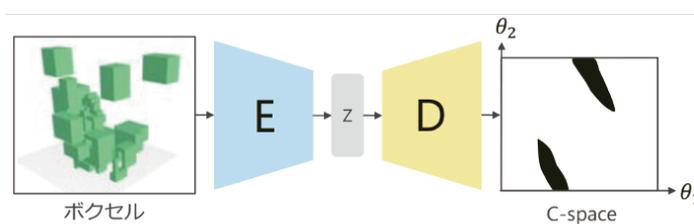


図4 Vox2C-spaceの流れ

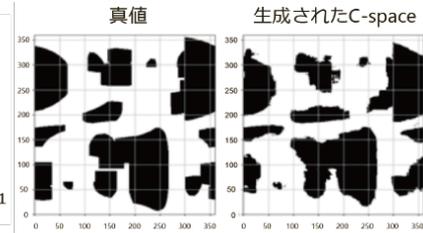


図5 Vox2C-spaceによるC-space生成の例

さらに、Vox2C-spaceを時系列データに適応させたVox2C-spaceを提案した。時系列に対応したVox2C-spaceはVox2C-spaceに時系列対応ネットワークを組み合わせた手法であり、数時刻先の未来のC-spaceを高速に生成できる。未来のC-spaceを生成することで、人間とロボットが同じ空間で作業する動的環境のような時事刻々と変化するシーンに対応したロボットの動作計画が可能とした。

(3) 人間の行動理解・姿勢予測の結果を利用したロボットの動作計画

上記の(1)と(2)の研究成果を応用し、人物の行動を理解した上でのロボットの動作を計画する手法について確立、及び評価実験を行った。提案手法は、(1)で述べた未来の人物の行動及び姿勢の情報を深層学習により推定し、その推定結果を用いてロボットの動作計画を行う。人物が非定常的な動作を取った場合においても予測することが可能であり、その動作を考慮してロボットの動作を計画できる。双腕型協働ロボットを用いた実環境において評価実験を行なった。人とロボットが協働で作業するシーンにおいて、提案手法は人とロボットが衝突しないシーンでは作業時間が67.7[秒]、人とロボットが衝突する恐れのあるシーンでは69.9[秒]とほぼ同等の作業時間を要した。なお、提案手法は人間の行動を予測することが可能であることから、実際には人とロボットの衝突を回避することが可能である。また、人間の行動を予測せずに動作計画を行なった場合、実際に衝突するとロボットが緊急停止するためにシステムの再起動を要し、作業効率が著しく低下する。

4. 研究成果

協調ロボットと同じ空間で作業する人間の行動理解, 及び予測を実現するために, 観測した過去の映像から深層学習ネットワークにより次時刻以降の人間の行動及び姿勢をリアルタイムに予測することを可能とした. そして, 人間の行動を理解した上で, ロボットの動作計画を実現するために, 動作計画に使用されるコンフィギュレーション空間を拡張して時系列変化に対応させたコンフィギュレーション時空間を提案した. さらに, 上記の手法を応用することで, 人物の行動の理解・予測結果を用いてロボットの動作を計画する手法を確立した. 双腕型協働ロボットを用いた実環境における評価実験の結果, 提案手法の有効性を確認した. リアルタイムに人間の行動を理解・予測する手法の実現, 及びこれまでの動作計画アプローチとは全く異なる手法を確立できたことから, 本研究の学術的意義は高い. また, 今後も様々な分野において作業の自動化が進められることが予想され, 協働ロボットの導入が加速することから, 本研究の社会的意義も大きいと考えられる.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木南 貴志, 山内 悠嗣
2. 発表標題 Vox2C-space: 動作計画のための機械学習に基づくC-spaceの生成
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂本 健太郎, 山内 悠嗣
2. 発表標題 人の姿勢予測に基づいた協働ロボットの動作計画
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木南 貴志, 坂本 健太郎, 山内 悠嗣
2. 発表標題 動的環境における動作計画のためのC-spaceの予測
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山内 悠嗣
2. 発表標題 深層生成モデルによる画像生成とその応用
3. 学会等名 自動車技術会エレクトロニクス部門委員会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂本 健太郎, 山内 悠嗣
2. 発表標題 人の姿勢予測に基づいた協働ロボットの動作計画
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 動的画像処理実利用化ワークショップ
2. 発表標題 時系列予測モデルを導入した価値関数に基づく強化学習
3. 学会等名 西片 智広, 山内 悠嗣
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木南 貴志, 坂本 健太郎, 山内 悠嗣
2. 発表標題 動的環境における動作計画のためのC-spaceの予測
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木南 貴志, 山内 悠嗣
2. 発表標題 Vox2C-space: 動作計画のための機械学習に基づくC-spaceの生成
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木南 貴志, 山内 悠嗣
2. 発表標題 動的環境に対応したコンフィギュレーション時空間による動作計画
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西片智広, 山内悠嗣
2. 発表標題 動き情報を加えたPredNetによる高精度な未来画像生成
3. 学会等名 画像センシングシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金田 康志, 木南 貴志, 山内 悠嗣
2. 発表標題 機械学習に基づくロボットの経路計画
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原科亮宗, 山内悠嗣
2. 発表標題 三次元姿勢推定情報に基づく異常動作検知
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021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
---------	---------