

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04262

研究課題名(和文) 手順のある不定形物作業における状態予測および操作方法獲得

研究課題名(英文) State Prediction and Motion Planning for Deformable Object Manipulation with Work Procedures

研究代表者

山崎 公俊 (Kimitoshi, Yamazaki)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：00521254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、「手順のある不定形物作業」の実現能力を自動機械に獲得させる方法の確立である。このためには3つの能力の実現を目指した。すなわち(a)不定形物のふるまいを予測する能力、(b)不定形物に所望の変化を与えるための操作能力、(c)操作の手順を理解し、適切な手順を創る能力である。これらの能力の実現手段を提案し、実機実験を伴う検証によって、布生地や衣服の折り畳みを代表例とした不定形物操作を自律型ロボットによって実現できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動機械による不定形物の操作を一つの実用的な分野として拡大するには、「不定形物の目標状態を提示すると、その状態へ移行させる方法を自動で考案し、操作を加え、作業を達成する」能力を自動機械に与えることが重要な要素の一つと考える。本研究では、そのような高い自律性を要する作業の実行能力に関する手法を提案し、さらには複数の事例を用いて検証する。これにより、不定形物作業の自動化の参入障壁を低くし、多くの研究者や技術者に受け入れられる土壌を創ることに貢献できると考える。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to establish methods for automatic machines to acquire the ability to realize "deformable object manipulation with procedures". For this purpose, we aimed to realize three functions. (a) the ability to predict the behavior of an deformable object, (b) the ability to manipulate a deformable object in order to give it a desired shape change, and (c) the ability to understand the manipulation procedure and to create an appropriate procedure. We have proposed a means to realize these abilities, and have demonstrated that autonomous robots can manipulate deformable objects, such as the folding of fabrics and clothes, through experiments.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：不定形物操作 ロボット 作業手順 動作計画 状態推定

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

不定形物作業の自動化を目的としたこれまでの研究開発では、特定の作業や操作対象物に特化した手法を都度提案する方針が採られてきた。また、高度な目標作業を達成している研究が増えていることは素晴らしいが、それらは様々な要素技術を組み合わせているため実現手段が複雑になりがちで、別のグループによる再現が難しい。

一方で、ロボットのための強化学習手法を主として研究する研究グループでは、不定形物操作を対象とすることもある。不定形物のふるまいを人手でモデル化することが困難であること、研究課題を学習アルゴリズムに注力すれば比較的シンプルな仕組みで目的作業を達成できることなどから、学習ベースのアプローチには将来性が感じられる。しかしながら、Visuomotor Policy Search に代表されるように、操作対象の状態を陽に考慮することは少ない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、「手順のある不定形物作業」の実現能力を自動機械に獲得させる方法の確立である。このためには3つの能力を実現する必要がある。すなわち、(a)不定形物のふるまいを予測する能力、(b)不定形物に所望の変化を与えるための操作能力、(c)操作の手順を理解し、適切な手順を創る能力である。本申請研究では、これらの能力の実現手段を確立し、手順のある不定形物操作が自動化できることを実機実験によって示す。

3. 研究の方法

研究課題の核心をなす学術的「問い」は次のようにまとめられる。

- A) 操作に伴う不定形物の変化は、どうすれば実用的な精度・速度で予測できるか。
 - B) 不定形物に所望の変化を与える「操作能力」は、どのように獲得させられるか。
 - C) 「操作手順を理解したり、新たに創る能力」は、どのようにすれば実現できるか
- 以下では、主な研究項目と、それぞれで明らかにする内容について述べる。下記の研究項目 A) ~ C) は上記 A) ~ C) に対応している。

- A) 不定形物の状態変化の予測：不定形物に操作を加えたとき、その見た目や形状がどう変化するかを予測できる予測器を構築する。操作の具体例として「布を一度だけ折り畳む」などを選定し、精度・速度ともにオンライン性を満たす程度に不定形物の変化を予測可能であることを明らかにする。
- B) 不定形物の操作能力の獲得：不定形物に様々な操作を能動的に加えることを通して、「操作」と「不定形物の変化」の関係性を見出すことができる手段を構築する。それに基づき、適切な操作を自動で生成可能にする。上記 A) で示したタスクに対し、ある操作を加えることで、不定形物を現在状態から目標状態へ変化させられることを示す。
- C) 操作手順の理解および創造能力の獲得：複数回の操作を要する不定形物作業を人間がおこなない、それを観察した結果から、ある操作と次の操作の区切りを見つけるためのモデルを出力する手段を構築する。そして、強化学習によりそのモデルを改変することで、別の不定形物作業についての適切な操作列を出力できるようにする。

4. 研究成果

研究項目 A) については、新たな知能システムの構造を考案し、それに適したデータの入出力形式を整えた。具体的にはロボットに搭載したセンサから取得される RGBD データから不定形物の形状をメッシュ構造として得ることとし、離散的な点群データから連続的な形状を精度よく推定する方法を提案・実証した。なお、不定形物の操作においてはセンサから見えない部分の状態が不確定になり、それが操作目的に影響することが多いため、メッシュ構造の情報に確率的な位置の信頼度を組み込み、隠れがある状況にも対応しやすいように工夫した。そして、その確率的メッシュ表現の入力に対して、ある操作を加えた時にどのような形状変化が起きるかを予測可能にするため、ニューラルネットワークを用いた新たな推論機構を提案して、それらの学習方法、データ収集方法などを工夫するとともに、適切なモジュールの役割分担をおこなった。

なお、形状予測では2種類の手法を示した。一つは、手順レベルの予測であり、これについては項目 C) で説明する。もう一つは、微少な操作を加えた時の形状変化の予測である。これは、ロボットが現在の不定形物の形状状態を見ながらオンラインで操作を変えるためのもので、処理の高速性を重視したものである。推定のための機構として LSTM を導入し、操作に伴う数十ステップ先の形状状態を数百 msec のスケールで推定可能にした[1]。

研究項目 B) については、予測機能と密に連携する形でニューラルネットワークの構造を考案し、予測機能と一括して学習可能にした。これにより、現在の状態に対してある操作を加えると、どのような状態変化(形状変化)が起きるかをロボット自身が試行錯誤できるようになり、操作計画手法の考案へ移行できるようになった。操作計画では、EM*D net[2]やその発展形をいくつか提案し、操作や予測の精度および処理速度を数段階で改善していった。具体的な操作の入力と

しては、把持位置は手先軌道の組み合わせとした。ニューラルネットワークの学習については、大量の操作データが必要となるため、この収集の負担を軽減する方策についても検討した。具体的には、再現精度の高い物理シミュレータによる仮想データの大量生成と、そこに追加する実機での操作データの収集である。前者については、不定形物の曲率の度合いによりメッシュの密度が自動で調整される方式を採用することで、なるべく現実性の高いデータが収集できるようにした。後者については非常に負荷が高い作業であるため、なるべく少数データでよいようにする工夫と、GUIを整備して実機データを集めやすくする工夫をした。結果として、数万程度の仮想データと数百程度の実機データがあれば、ある種の不定形物操作には有効であることがわかった。これらの成果については、衣服の移動、折り畳み、引き延ばし、紐状柔軟物の操作などのいくつかの具体的な不定形物操作に適用して、その効果を確認した。

研究項目C)については、上述したEM*D net と LSTM の組み合わせからなる不定形物操作のための知能システムを構築し、実機による検証をおこなった。EM*D net はモジュラ型のニューラルネットワークであり、予測と操作生成のモジュールを連結していけば、複数回の操作に伴う不定形物の形状変化を予測できる。すなわち、その予測を利用すれば、適切な操作とはどんな操作かをロボット自身が試行錯誤できる。ただし、ランダムな試行錯誤を繰り返すのみでは適切な操作を素早く得ることは困難である。そこで、逆誤差伝播の方式を用いて、適切な操作を勾配法によって効率的に得る方法を提案した。

また、強化学習と模倣学習を組み合わせ、人が不定形物を操作している様子を観察したロボットが、その作業を自分自身で再現できるようにする方式を研究した。提案方式は、観察した作業データを適切な工程に分割する機能と、分割後に得られる一つ一つの操作を強化学習によって獲得する機能からなる。ただし、これらの機能を独立に実装すると、不適切な工程分割が起きた場合に操作獲得の機能にそのしわよせが行き、適切な操作能力が得られない可能性がある。そこで、これらの二つの機能を同時に最適化できる方式を考案し、布生地折り畳みや物品の重ね置きなどのタスクにおいて効果を検証した[3]。また、獲得された操作能力を単一の不定形物に利用するだけでなく、手順の異なる操作を必要とする不定形物にも活用できる方式を考案した。すなわち、ある不定形物の操作能力を獲得したのち、別の手順を必要とする作業を提示すると、それまでよりも少ない試行錯誤で操作能力が獲得できる方式を考案した。これをタオルやズボンの折り畳みタスクによって検証した。

<引用文献>

- [1] Daisuke Tanaka, Solvi Arnold, Kimitoshi Yamazaki, “Disruption-Resistant Deformable Object Manipulation on basis of Online Shape Estimation and Prediction-Driven Trajectory Correction,” IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 6, No. 2, pp. 3809 - 3816, Feb. 2021.
- [2] Solvi Arnold, Daisuke Tanaka, Kimitoshi Yamazaki, “Cloth Manipulation Planning on Basis of Mesh Representations with Incomplete Domain Knowledge and Voxel-to-Mesh Estimation,” Frontiers in Neurorobotics, Vol. 16, 2023.
- [3] Yaqiang Mo, Hikaru Sasaki, Takamitsu Matsubara and Kimitoshi Yamazaki, “Multi-step Motion Learning by Combining Learning-from-Demonstration and Policy-Search,” Advanced Robotics, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4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 1件）

1. 著者名 山崎公俊	4. 巻 12
2. 論文標題 製品製造自動化に向けた部品把持のためのビジョン技術	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 画像ラボ	6. 最初と最後の頁 67 - 72
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kimitoshi Yamazaki	4. 巻 -
2. 論文標題 A Motion Generation Method for Articulated Manipulators Using Linear Mapping Matrices Calculated by Neural Networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 905-912
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/CASE49439.2021.9551436	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Daisuke Tanaka, Solvi Arnold, Kimitoshi Yamazaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Disruption-Resistant Deformable Object Manipulation on basis of Online Shape Estimation and Prediction-Driven Trajectory Correction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Tomoki Kawagoshi, Solvi Arnold, Kimitoshi Yamazaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Visual Servoing Using Virtual Space for Both Learning and Task Execution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration	6. 最初と最後の頁 292, 297
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Daisuke Tanaka
2. 発表標題 Disruption-Resistant Deformable Object Manipulation on basis of Online Shape Estimation and Prediction-Driven Trajectory Correction
3. 学会等名 IEEE International Conference on Robotics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kimitoshi Yamazaki
2. 発表標題 Prediction, Estimation and Learning for Deformable Object Manipulation
3. 学会等名 The Robotics Society of Japan (RSJ) and The Robotics Society (TRS, India) WORKSHOP (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎隆広
2. 発表標題 布のオンライン状態推定に基づく袖通し作業の実現
3. 学会等名 計測自動制御学会中部支部シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 莫亜強
2. 発表標題 人の実演教示に基づく個々の動作と動作の切り替えを考慮した手順あり作業の実行能力獲得
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩崎拓也
2. 発表標題 仮想化環境にて学習したビジュアルサーボによる机上物体の把持
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎 隆広
2. 発表標題 オブティカルフローの学習に基づく着衣作業中の布製品のオンライン状態推定
3. 学会等名 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 岩崎拓也
2. 発表標題 仮想化環境での学習による多様な障害物配置および目標物形状に対応可能なビジュアルサーボ
3. 学会等名 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 山崎公俊
2. 発表標題 柔軟物形状のオンライン推定および予測に基づく操作行動生成
3. 学会等名 第26回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Solvi Arnold
2. 発表標題 Cloth Manipulation Planning with Mesh Representations and Incomplete Domain Knowledge
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中大輔
2. 発表標題 操作中の形状変化予測に基づく柔軟物操作のためのオンライン操作軌道探索
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 莫重強
2. 発表標題 個々の動作と動作切り替えを同時に考慮した方策学習に基づく手順あり作業の実行能力獲得
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kimitoshi Yamazaki
2. 発表標題 Visual Servoing Using Virtual Space for Both Learning and Task Execution
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
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
---------	---------