

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05890

研究課題名(和文) 視覚・深度・力覚情報を統合的に利用するモデルフリーロボット教示

研究課題名(英文) Model-free Robot Programming with Visual/Depth/Force Information

研究代表者

前田 雄介 (Maeda, Yusuke)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50313036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：作業対象のモデルを用いることなく、カメラの見えに基づいてロボットに作業を教示することのできる「ビューベース教示再生」手法に関する研究を行った。光弾性を用いて力情報を可視化することで力の制御が必要な作業への適用を可能にするなどの手法の開発により、視覚情報・深度情報・力覚情報を組み合わせて利用してロボット教示に適用できるようになった。また、開発した教示手法を押し操作や倣い作業を対象に実証した。

研究成果の概要(英文)：We studied "view-based teaching/playback," a model-free robot programming method based on appearance. Development of techniques including visualization of force information through photoelasticity enabled us to apply it to various tasks using visual/depth/force information. We demonstrated its successful applications including pushing and wall-tracking.

研究分野：ロボット工学

キーワード：知能ロボティクス ロボット ロボット教示 ビューベースアプローチ

## 1. 研究開始当初の背景

近年、カメラや深度センサの低価格化が進み、これらを利用した産業用ロボットの実用展開が進められている。また、力センサについても普及が始まりつつある。

これらの外界センサを用いることで、ロボットは状況に応じた複雑な動作を行うことが可能となる。しかし、その複雑な動作を教示するのは人間であり、たとえば画像処理であれば対象物の特徴抽出やパターンマッチングなどを用いた処理を行うことが通常である。すなわち、対象物のモデルを与える作業が必要になる。モデルという事前知識を与えることでロボットは高度な動作を行うことが可能となるが、その作業は複雑で、さらにセンサキャリブレーションも必要になるなど大きな手間を要している。

一方、現在も広く用いられている教示再生方式では、状況に応じた動作をさせることは不可能ではあるものの、内界センサのみを用いて教示が行われるため、対象物や対象作業のモデルは不要であった。そこで、筆者のグループでは、外界センサとしてカメラを想定し、モデルを与えることなく、画像の見えに基づく教示再生を行う「ビューベースト教示再生」を提案している(引用文献)。この手法では、まず人間がロボットを動かして作業を行い、そのときのカメラ画像およびロボットの動作の組を記憶する。続いて、画像を入力として、それに対応する適切なロボットの動作を出力するようなマッピングをニューラルネットワークとして獲得する。そして、このマッピングを利用して、画像情報から実際にロボットを動作させることで、教示内容の再生を実現する。ビューベースト教示再生では、対象物や対象作業のモデルが不要であるという従来の教示再生方式の利点はそのままに、複数の条件下での教示を行うことで、対象物の初期位置のばらつきなど、一定の範囲の作業条件変化への対応を実現した。この方法は、対応可能な条件変化の広さという点では、モデルという事前知識を与える方法には劣る。しかし、モデルを与える必要がなく、カメラキャリブレーションも不要で教示が簡便であるため、モデルベースの手法を補完する形で有用であると考えられる。

筆者のグループではこれまでにビューベースト教示再生の研究に取り組み、産業用ロボットや多指ハンドによる物体ハンドリングへの適用を行ってきた。また、通常のカメラ画像以外に、深度情報を距離画像として用いることも容易かつ有効であることも示した。一方で、ビューベースト教示再生の以下のような課題も明らかになってきた。

力制御タスク：把持動作、押しつけ動作などで、適切な力を付与することが必要な作業においては、カメラ画像に表れない力情報が必要となる。このため、ビューベースト教示再生を適用するのが困難な場合がある。

複数センサ情報利用時の計算負荷：単一の力

メラ画像を用いる場合であれば、CPUでの処理でVGA解像度、200FPS程度の処理を実現できた。しかし、高解像度化や複数視点の利用、距離画像等の異種センサ情報の併用などを考えた場合には、計算負荷が大きくなって制御に支障をきたすことがある。

## 2. 研究の目的

本研究では、上記の問題を解決するために、ビューベースト教示再生において、視覚情報・深度情報・力覚情報を統合的に利用できるようにすることで、多様な物体ハンドリング作業に適用可能なモデルフリーロボット教示手法に発展させることを目指した。

## 3. 研究の方法

研究目的の達成のため、下記の課題に取り組んだ。

### (1) 光弾性を利用した力覚情報の可視化

ロボットハンドの指部分に透明な光弾性体を追加し、光源と偏光カメラとの組み合わせにより観測を行う。光弾性を用いて力覚情報を可視化すれば、カメラで観測することにより、多点での力覚情報を獲得することが可能になる。一般的な光弾性解析では、そこから必要な情報を取得するために複雑な画像解析を行うことになるが、ビューベーストアプローチを用いる本研究では、画像を解析なしにそのまま扱うことができる。

### (2) GPGPUを用いた計算高速化

ビューベースト教示再生における再生フェーズでは、ニューラルネットワークへの入力としてセンサ情報の主成分スコアをオンラインで計算している。主成分スコアの計算は基本的に行列計算であり、GPGPU技術を用いて計算の高速化が可能と考えられる。

### (3) 深層学習技術の導入

従来のビューベースト教示再生で使用されていた主成分分析に代わり、深層学習技術の一つであるオートエンコーダを採用し評価する。

## 4. 研究成果

### (1) 光弾性を利用した力覚情報の可視化

図1のように、指先に光弾性体(エポキシ樹脂)を備えた2自由度ロボット指を用いて、ビューベースト教示再生で力制御タスクを実現することを試みた。偏光光源として液晶ディスプレイを指の背後に配置し、偏光フィルタを介して観察することで、指先における力情報を可視化した。その結果、ビューベースト教示再生を用いて一定力での押し付け操作や做い動作(図2)を実現可能であることを確認した。

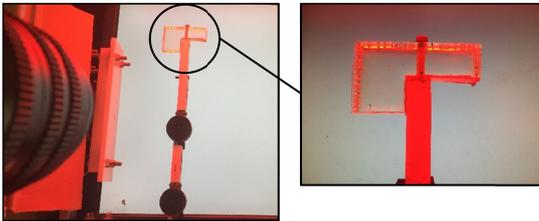


図1 光弾性体を用いた2自由度指

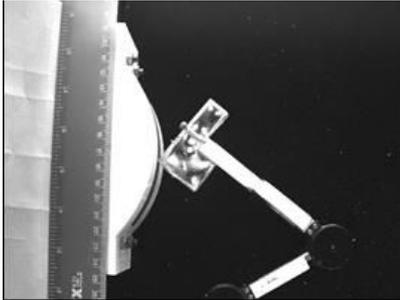


図2 做い作業の再生

### (2)GPGPU を用いた計算高速化

従来のビューベースト教示再生では、カメラで取得する画像情報を主成分分析する際に、CPUのSIMD命令を使用した並列演算を行っていた。今回、新たにNVIDIA社のCUDAを用いて、主成分スコアの計算をGPGPU上で行えるようにした。その結果、仮想環境での評価において4倍弱の高速化を実現した。

また、併せてビューベースト教示再生のテストベッドとしての仮想環境を改良し、多視点画像や深度画像(図3)を扱えるようにした。

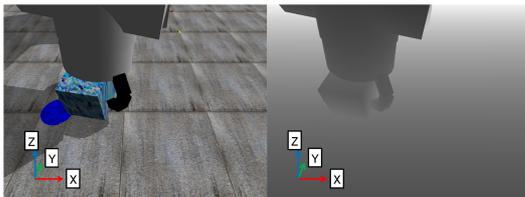


図3 仮想環境における深度画像の表現

### (3)深層学習技術の導入

従来より用いてきた主成分分析の代わりに、深層学習技術の一つであるオートエンコーダを導入した。Adam方式でミニバッチ学習をさせた結果、仮想環境での押し操作(図4)での検証において、パラメータ設定に対する教示再生性能の変動が抑えられることを確認した。ただし、オフラインの計算時間は主成分分析より大幅に長くなる。

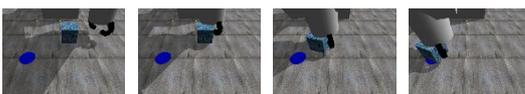


図4 仮想環境での押し操作の再生

### (4)視覚・深度・力覚情報を統合的に利用する教示再生環境

開発した技術に基づき、RGB-Dカメラを用いて視覚・深度・力覚情報を統合的に利用可能な教示再生環境を構築した。光弾性画像と深度画像の例を図5に示す。



図5 光弾性画像と深度画像

### <引用文献>

森山 祐樹, 前田 雄介: 産業用ロボットによるマニピュレーションのためのビューベースト教示再生, 日本機械学会論文集C編, Vol. 79, No. 806, pp. 3597-3608, 2013.

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

中川 義教, 石井 聡一, 前田 雄介: 光弾性を用いた力情報可視化に基づくビューベースト教示再生 做い作業への適用, 計測自動制御学会論文集, Vol. 54, No. 5, pp. 476-482, 2018.

DOI: 10.9746/sicetr.54.476

(査読有)

[学会発表](計 7件)

相澤 航輝, 今井 健太, 前田 雄介: 力制御タスクのための光弾性とモータのトルク制御を利用したビューベースト教示再生, 日本機械学会関東学生会第57回学生会卒業研究発表講演会, 2018.

Best Presentation Awardを受賞

藤浦 圭一, 前田 雄介: Autoencoderを用いたビューベースト教示再生, 第23回ロボティクスシンポジウム, 2018. (査読有)

藤浦 圭一, 前田 雄介: ディープラーニングを用いたビューベースト教示再生, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 (ROBOMECH 2017), 2017.

中川 義教, 前田 雄介: 光弾性を用いたビューベースト教示再生による做い作業の実現, 第22回ロボティクスシンポジウム, 2017. (査読有)

Yusuke Maeda and Yoshito Saito: Lighting- and Occlusion-robust View-based Teaching/Playback for Model-free Robot Programming, Proc. of 14th Int. Conf. on

Intelligent Autonomous Systems (IAS-14), 2016. (査読有)

Yoshinori Nakagawa, Soichi Ishii and Yusuke Maeda: View-Based Teaching/Playback with Photoelasticity for Force-Control Tasks, 14th Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems (IAS-14), 2016. (査読有)

米岡 裕矢, 長谷川 文美, 前田 雄介: GPGPU を用いたビューベースト教示再生, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 (ROBOMECH 2016) 講演論文集, 2016.

〔図書〕(計 2 件)

Yusuke Maeda and Yoshito Saito: Lighting- and Occlusion-robust View-based Teaching/Playback for Model-free Robot Programming, Weidong Chen, Koh Hosoda, Emanuele Menegatti, Masahiro Shimizu and Hesheng Wang eds., Intelligent Autonomous Systems 14, pp. 939-952, Springer, 2017.

Yoshinori Nakagawa, Soichi Ishii and Yusuke Maeda: View-Based Teaching/Playback with Photoelasticity for Force-Control Tasks, Weidong Chen, Koh Hosoda, Emanuele Menegatti, Masahiro Shimizu and Hesheng Wang eds., Intelligent Autonomous Systems 14, pp. 825-837, Springer, 2017.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

平成29年度「産学連携による課題解決型RTイノベーション支援補助事業(略称: RT交流プラザ)」の支援対象に採択されたため, アウトリーチ活動として, 2017 国際ロボット展において本課題の成果を4日間にわたって実演展示した。

前田研究室ホームページ  
<http://www.iir.me.ynu.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

前田 雄介 (MAEDA, Yusuke)  
横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 50313036

### (4) 研究協力者

中川 義教 (NAKAGAWA, Yoshinori)  
藤浦 圭一 (FUJIURA, Keiichi)

米岡 裕矢 (YONEOKA, Yuya)  
今井 健太 (IMAI, Kenta)  
相澤 航輝 (AIZAWA, Kouki)