

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03963

研究課題名（和文）リアルタイム光弾性解析による密な力分布センシングに基づく力制御可能ロボットハンド

研究課題名（英文）Force-controllable robot hands based on dense force distribution sensing with realtime photoelastic analysis

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・教授

研究者番号：50313036

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）：本研究では、ハンドの構成部材に光弾性体を利用することで、密な接触力分布をリアルタイムにセンシング可能なロボットハンドの実現を目指した。まず、ハンドの大部分を光弾性体で構成する二自由度ハンドと液晶ディスプレイ、そして偏光カメラから成るシステムを構築した。そして、ピクセル単位の光弾性画像解析に基づく関節の制御を通して、把持力制御やin-handマニピュレーションを実現した。また、多峰性の接触力分布に対応できる光弾性画像解析アルゴリズムを開発した。さらに、光弾性画像をシミュレーションで生成できるようにし、CNNを用いた接触力分布推定手法に適用して、新奇的な光弾性体形状の検討と評価に応用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実現された光弾性ロボットハンドでは、光弾性を利用した従来の合力のみをセンシングできるハンドとは異なり、リアルタイムの力分布センシングを実現した。また、他の力分布センシングが可能なロボットハンドと比較すると、センシングのために必要な偏光カメラや偏光源はハンド外に配置される点が特徴である。すなわち、ハンド本体はシンプルかつコンパクトに実現することができ、また電極などの構成要素を接触部に作り込む必要がないため、耐久性・メンテナンス性に優れる利点がある。センシング能力の検証・向上を進めることで、手軽に使用できる実用的な力制御可能ハンド技術としての確立が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to realize a robot hand capable of real-time dense contact force distribution sensing by utilizing photoelastic materials in the components of the hand. First, we constructed a system comprising a two-degree-of-freedom hand mostly made of photoelastic material, a liquid crystal display, and a polarization camera. Through control of the finger joints based on pixel-level photoelastic image analysis, we achieved grip force control and in-hand manipulation. Additionally, we developed a photoelastic image analysis algorithm that can handle multimodal contact force distributions. Furthermore, we enabled the generation of photoelastic images through simulations and applied a contact force distribution estimation method using a CNN. This was applied to investigate and evaluate novel photoelastic part shapes.

研究分野：ロボット工学

キーワード：光弾性 力センシング 力制御 ロボットハンド

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

新型コロナウイルスの世界的流行は、様々な作業の自動化・ロボット化の必要性、重要性を改めて突き付けることとなった。一方で、人間が行うような器用な操りはロボットにとっては依然として困難な課題であり、これを克服することが、非単純作業の自動化に向けた大きな課題である。

器用な操りが困難となる理由の一つは、ロボットハンドの触覚・力覚センシング能力の不足にある。人間の手は皮膚のあらゆる場所で圧力を感知し、それをもとに物体の操りを行うことができる。例えば、手の中で物体を操る in-hand マニピュレーションを、人間は視覚を利用せずとも器用に行うことが可能である。これに対し、ロボットハンドでは、指先でしか力覚センシングが行えなかったり、あるいは合力としての「把持力」しかセンシングできないことが多い。このためロボットハンドの操り能力は限定的にならざるを得ない。これを改善するべく触覚・力覚センシングの研究が盛んに行われているが、コスト・サイズ・耐久性・空間分解能などの点で開発途上であると言える。

### 2. 研究の目的

本研究では、光弾性体を用いたロボットハンドにより、密な接触力分布をリアルタイムセンシングしつつ、それを用いた器用な物体操りを実現することを目的とした。光弾性解析は、光弾性体における応力に応じた複屈折の変化を偏光画像として観測し、それをもとに応力分布の解析を行う手法である。歴史のある技術であるが、従来は応力分布のオフライン解析に用いるのが一般的であった。これは計測の手間と計算時間が理由で、このためロボット制御に使用可能なレベルでのリアルタイム解析の実現は難しかった。しかし、近年のコンピュータの性能向上に加え、一度の撮影で 4 方向の偏光画像を取得できる高解像度偏光カメラの実用化により、光弾性解析に基づくビジュアルサーボを実現可能な環境が整いつつある。本研究は、この状況を踏まえ、ロボットハンドの部材として光弾性体を使用するというアイデアにより、偏光カメラ画像を利用したリアルタイム光弾性解析によるロボットハンドの接触力センシングを目指した。ロボットハンドが対象物と接触する各部を光弾性体とすることで、指先だけでなく、指の腹や掌部でも接触力センシングを行うことが可能となる。また、高解像度の光弾性画像から解析を行うことで、ピクセル単位での密な接触力分布情報を得ることができる。

### 3. 研究の方法

- (1) 偏光カメラから得られる光弾性画像を解析し、光弾性体端面での接触力分布をリアルタイムにセンシングするためのアルゴリズムを開発する。また、それを用いて接触力制御を実現する。
- (2) 主要部分が光弾性体で構成されるロボットハンドを開発し、光弾性力センシングの結果に基づく力制御および物体操作を実現する。
- (3) 様々な力学的条件下での光弾性体について、光弾性画像をシミュレーションにより生成できるようにし、それを用いてセンシングに有効な光弾性体の形状設計と評価を可能にする。

### 4. 研究成果

#### (1) 接触力分布センシングと接触力制御

液晶ディスプレイを偏光光源とし、光弾性体を偏光カメラを用いて観察する図 1 のような系を前提に、光弾性画像から接触力分布をセンシングする手法を開発した。偏光カメラ画像に写った光弾性体上に複数の走査線を設定し、DOLP (Degree Of Linear Polarization) および AOP (Angle of Polarization) から、応力分布をピクセル単位で求め、そこから端面での接触力分布を計算する。50Hz 程度でのセンシングが可能で、接触力分布が多峰性である場合にも対応している。

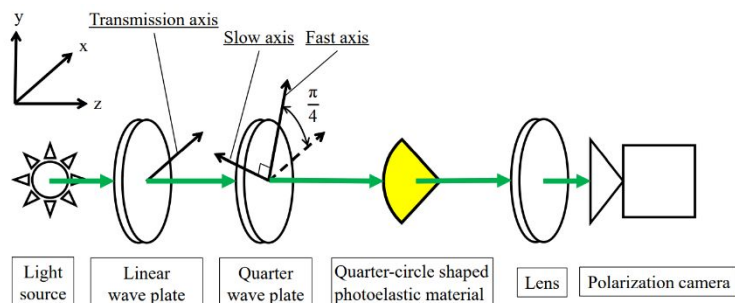


図 1 光弾性画像の取得

また、この接触力分布センシング手法を利用して、ポリウレタン樹脂製の光弾性体指先を持つロボット指による接触力制御を実現した(文献 )。図2に接触力制御中のDOLP画像の様子を示す。

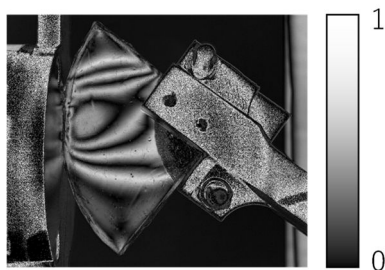


図2 光弾性力制御中のDOLP画像

### (2) 光弾性ロボットハンド

ハンドの大部分を光弾性体(ポリウレタン樹脂)で構成する二自由度光弾性ロボットハンド(図3)を製作した(文献 )。このハンドを用いて、把持力の制御や、物体の in-hand マニピュレーション(左右の移動)が可能であることを確認した。このロボットハンドは、ハンド部にセンシング用の機材を有しないことから、耐衝撃性やメンテナンス性にも優れている。



図3 光弾性ロボットハンド

### (3) 光弾性画像シミュレーションと光弾性体形状設計への応用

COMSOL Multiphysics を用いて、応力状態に基づいて光弾性画像(DOLP画像, AOP画像)を生成できるシミュレータを開発した。図4に実画像とシミュレーション画像の比較例を示す。

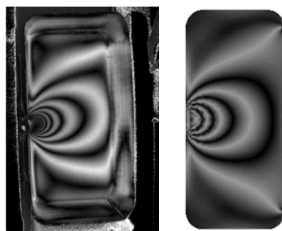


図4 DOLP画像(左:実画像,右:シミュレーション画像)

また、光弾性画像から接触力分布を推定するためのCNN(畳み込みニューラルネットワーク)を構成し、このシミュレータで生成した画像(図5)を用いて学習させた。これは、光弾性体の形状が複雑になると、上述の光弾性画像解析アルゴリズムを適用できなくなる場合があるためである。そして、光弾性体形状を、従来のものと穴あきの形状で比較したところ、穴あき形状の方が接触力の推定精度が向上するという結果が得られた。これは応力集中の効果が接触力センシングにおいて有益であることを示唆している。このように、シミュレータを利用して光弾性体の形状設計と評価が可能であることを示した。



図5 光弾性シミュレーション画像

<引用文献>

Mikiya Kohama and Yusuke Maeda: Photoelasticity-based Online Force Distribution Sensing And Its Application to Pressing Force Control, Preprints of the 22nd World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC 2023), pp. 2627-2630, 2023.

田原 芳基, 近藤 寛隆, 小濱 幹也, 前田 雄介: 光弾性体リンクを用いた力センシングロボットハンドの開発 応力分布解析の改善と評価, 日本ロボット学会誌, Vol. 41, No. 8, pp. 716-719, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Tahara Yoshiaki, Kondo Hiroataka, Kohama Mikiya, Maeda Yusuke	4. 巻 41
2. 論文標題 Development of a Force-sensible Robot Hand with Photoelastic Links	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 716 ~ 719
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.41.716	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2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 田原 芳基, 近藤 寛隆, 小濱 幹也, 前田 雄介
2. 発表標題 光弾性体リンクを用いた力センシング可能ロボットハンドの開発
3. 学会等名 第40回記念日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mikiya Kohama, Yusuke Maeda
2. 発表標題 Photoelasticity-based Online Force Distribution Sensing And Its Application to Pressing Force Control
3. 学会等名 22nd World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

横浜国立大学前田研究室ホームページ  
<https://iir.ynu.ac.jp/>  
Design and Development of a Novel Tactile Sensor Based on Photoelastic Effect Integrating Shape Adaptive Auxetic Metastructure for Harvesting Soft Fruits (IEEE ICRA 2024 Late Breaking Results Poster)  
[https://ras.papercept.net/conferences/conferences/ICRA24/program/ICRA24\\_ContentListWeb\\_2.html#wec1-ex\\_21](https://ras.papercept.net/conferences/conferences/ICRA24/program/ICRA24_ContentListWeb_2.html#wec1-ex_21)

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
研究協力者	バタチャリア ビシャク  (Bhattacharya Bishakh)	インド工科大学カンブール校・機械工学科・教授	

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		
インド	インド工科大学カンブール校		