

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13734

研究課題名（和文）非対称導電パターンを用いた薄板状弾性体の変形形状計測

研究課題名（英文）Deformation measurement of a thin flexible material using asymmetric conductive patterns

研究代表者

松野 孝博（Matsuno, Takahiro）

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号：40815891

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,700,000円

研究成果の概要（和文）：ソフトロボットとは柔軟物や弾性体で構成されたロボットを指し、安全性やロバスト性の向上、剛体の機構では不可能な動作・機能などが実現されている。これらの効果を損なわずにソフトロボットにセンシング機能を追加する場合、柔軟なセンサ“ソフトセンサ”が必要とされる。本研究では、ソフトセンサにおける柔軟電極の構造や形状、ロボット本体の動作による計測値への影響を補正する手法について着目した。研究の結果、ソフトロボットの变形形状計測において、非対称導電パターンの抵抗値変化から全体の变形形状を推定する方法を確立した。また、柔軟電極による近接センシングにおいて、静電容量の基準値の自動補償アルゴリズムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来より様々なソフトセンサが提案されてきた一方で、ソフトロボット本体の变形の影響やそれを補正するための信号処理、センサの構造や形状に関する議論は十分に行われていない。本研究ではこれらの一部を明らかにしたことで、ソフトロボットにおける現実的なセンシング方法の確立に近づいた。ソフトセンシング技術を確立することで、ソフトロボットの実用化が現実的になり、将来的には食品工場の自動化、介護・看護などにおける補助装置、安全な協働ロボットの実現などが期待される。

研究成果の概要（英文）：A soft robot refers to a robot composed of soft or flexible materials, which has improved safety and robustness. It is also realizing effects and functions that cannot be achieved by a rigid body mechanism. A soft sensor is required to add a sensing function to the soft robot without reducing these effects. In this research, we focused on the structure and shape of soft sensors and the method of reducing the influence of the motion of the robot. Asymmetric conductive pattern and deformed shape estimation method were proposed and confirmed. In addition, we constructed the adaptively update algorithm for the reference capacitance of in proximity sensing using soft electrode.

研究分野：ソフトロボティクス

キーワード：ソフトロボティクス ソフトセンシング 導電パターン 導電布 柔軟電極 近接・接触センシング 曲げセンシング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

昨今、ソフトロボティクスが注目され、多く研究されている。ソフトロボティクスとは、ロボットや装置の一部を弾性体に置き換えることで、既存の剛体機構では実現不可能な動作や効果を発揮させる手法である。今までに発表されたソフトロボティクスに関する研究において、機構の一部を弾性体に置き換えることで、安全性やロバスト性の向上などを実現している。また、これらのソフトロボットに、より発展的な動作を実現させるためにセンシングが必要になる。しかし、従来のセンサは剛体部品で構成されるため、これらのセンサをソフトロボットに導入した場合、ソフトロボットの柔軟性が損なわれこれらの特徴が消失する。そこでソフトロボットの柔軟性を損なわずにセンシングを実現するために、柔軟な部品で構成されたセンサ“ソフトセンサ”も併せて研究されている。先行研究において様々なソフトセンサが提案されてきた一方で、ソフトロボット本体の変形の影響やそれを補正するための信号処理、センサの柔軟電極の構造や形状に関する議論は十分に行われていない。

2. 研究の目的

本研究ではソフトセンサにおける(1)非対称導電パターンを用いた変形形状計測と(2)柔軟電極を用いた近接・接触センシングに関する研究を行う。

(1)非対称導電パターンを用いた変形形状計測

既存の弾性体の変形形状を計測する方法には、ひずみゲージやそれに類するセンサを用いる方法がある。ただし、既存の方法ではひずみゲージ単体では、弾性部位の変形形状を計測することはできず、多数のひずみゲージを変形部に取り付ける必要がある。この方法で変形形状の計測を行う場合、分解能はセンサ数に依存し、センサ数が少ないと精度が下がり、増やすと多くのAD変換機や信号線が必要となり、弾性体周りの配線の増加や計測回路および制御回路周辺の大型化につながる。そこで、本研究では非対称形状の導電パターン(図1)を用いて、面状のソフトマテリアルの変形形状を計測する方法を提案する。非対称形状の導電パターンは、薄板の位置により密度が異なるため、変形形状により導電体の抵抗値上昇量が異なる。そのため、導電パターンの抵抗値、内部エネルギーの変分原理から、薄板の変形形状を特定することが可能である。本研究では、解析的手法を用いた変形形状計測の理論構築と検証実験を行う。

(2)柔軟電極を用いた近接・接触センシング

柔軟近接・接触センサ(図2)は、ソフトロボットの柔軟性を損なわずにそれらへの導入が可能である一方で、ロボットの姿勢や環境の状態、電極に加わる圧力や変形がどのようにセンサ値に干渉するかは未解明である。本研究では可変剛性リンク(VSL)やそれに類するリンクで構成されたロボットアームへの導入を想定し、ロボットの動作が近接センサの計測値に影響する項目を明らかにし、その補償方法について研究する。

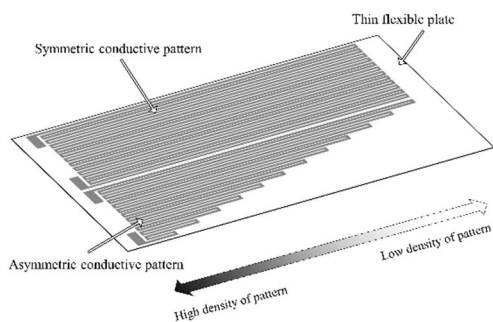


図1 非対称導電パターン(一例)

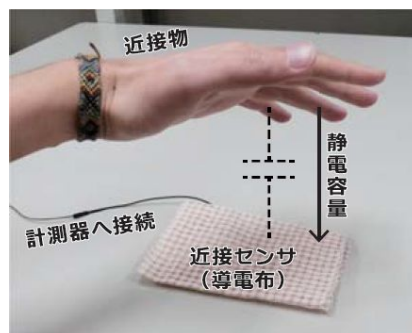


図2 柔軟電極を用いた近接・接触センシング

3. 研究の方法

(1)非対称導電パターンを用いた変形形状計測

まず、導電パターンの形状を仮定し、そのパターンにおける薄板の変形形状と抵抗値変化の関係を解析的に求める。この関係を基に、導電パターンの抵抗値から変形形状を推定するアルゴリズムを構築する。つぎに仮定した導電パターンをシルクスクリン印刷等で作成し、導電パターンの抵抗値から変形形状を推定する検証実験を行う。最後に実際の変形形状と推定した形状を比較し計測精度をまとめ、導電パターンや推定方法の改善を行う。

(2)柔軟電極を用いた近接・接触センシング

本研究では、導電布を用いた近接センシングシステムを構築する。導電布を電極として使用し、電極と近接物の間に発生する静電容量から近接の程度と接触の有無を推定する。近接センシングのためには、計測対象物が十分に離れた状態の静電容量を基準値とし、その基準値からの差分に着目する。ただし、計測対象物が十分に離れている状態においても、静電容量の値は0でない。センサ周辺の計測対象物以外の物体（机や壁面など）との間に静電容量が発生しており、計測値に影響を与えるためである。このように基準値は環境により容易に変化するため、センサ使用中に基準値を随時更新する必要がある。今回は、設置対象を小型のロボットアーム、または可変剛性リンク(VSL)などで想定し、近接センシングにおける静電容量の基準値の補償方法を確立する。

4. 研究成果

(1)非対称導電パターンを用いた変形形状計測

実際に作成した導電パターンの一例を図3に示す。まず、変形形状を推定するために、薄板状弾性体の変形モデルを構築した。次に、薄板状弾性体の変形と導電パターンにおける抵抗値の関係を定式化した。定式化の方法として、導電パターンの抵抗値モデルから定式化する方法と、一部の実測データからフィッティングにより定式化する方法を確認した。実際に計測した導電体の抵抗値を制約条件とし、薄板状弾性体のモデルを用いて変形形状を数値的に計算することで、薄板弾性体の変形形状を推定することができる。変形形状の推定実験を行った。その結果、実際の変形形状と導電パターンの抵抗値から推定した変形形状の傾向が一致することを確認した。また、その変形形状から計測対象に加わる力を推定する方法も併せて提案し、力の推定においても実測値と推定値に近い傾向を示すことを確認した。実験結果の一例を図4-5に示す。

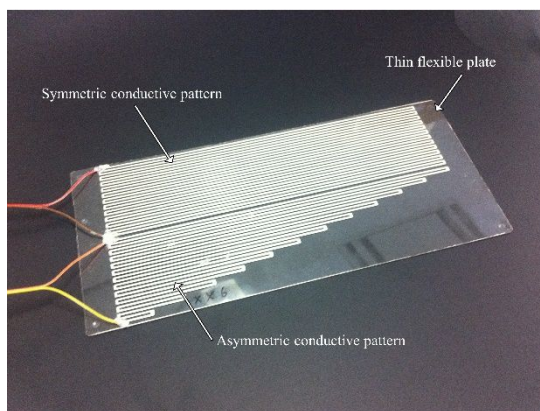


図3 非対称導電パターンを塗布した面状弾性マテリアル

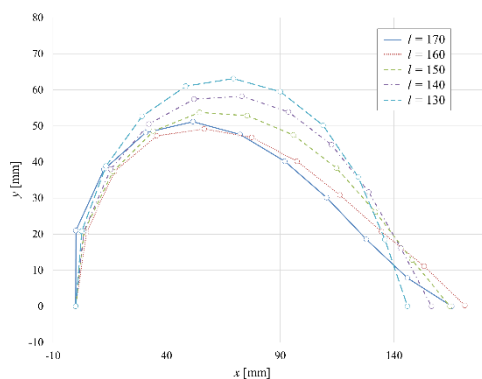


図4 導電パターンより推定した変形形状

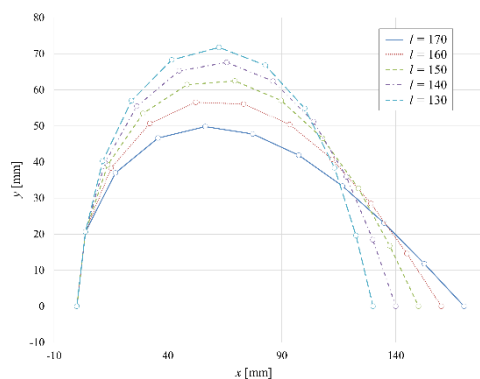


図5 実際の変形形状

(2)柔軟電極を用いた近接・接触センシング

近接センサをロボットアームに設置した状態を想定し、センサの静電容量の変化が、人や物体の一時的な近接によるものか、または環境の変化によるものかを判別し、基準値を更新するアルゴリズムを構築した。

ロボットアームに設置したセンサが移動した場合、センサと周辺物体との距離が変化し、基準静電容量が不安定になる。センサの起動時に、周囲に近接物がない状態を確保し、ロボットアームの関節角と静電容量の関係を関数にまとめる。この関係から、ロボットアームの姿勢ごとの静電容量基準値を補償する。

センサ周辺の環境が変化した場合、静電容量基準値を補償する関数を更新する必要がある。そこで、計測した静電容量と、関数で求めた基準値の差に随時着目する。この差が閾値を超えた場合、それ以降に計測したロボットアームの関節角と静電容量の関係からフィッティング関数を

求める。このとき、基準値を補償する関数は二つ存在するため、それぞれの関数を投票で評価する。まず二つ存在するそれぞれの関数に、現在のロボットアームの姿勢を代入し、それぞれの関数で基準値を求める。そして、実際に計測した静電容量と各基準値との差分を比較し、差の小さいほうの関数に1点を与える。ただしこのとき、両方の差分が閾値を超えた場合、どちらの関数にも点数を与えない。この投票を計測プログラムの毎ループで行い、いずれかの点数があらかじめ設定した目標点数に到達した時点で投票を終える。最初に設定したフィッティング関数が目標点数を獲得した場合、関数は更新しない。これは計測対象物がセンサに接近した状態を示している。反対に、新たに求めたフィッティング関数が目標点数を獲得した場合、関数を更新する。これはセンサ周辺の環境が変化することを示す。

上記のアルゴリズムを構築し、検証した結果を図6に示す。図6は、ロボットアームの運動と環境の変化に応じて基準値が変化し、対象物を検出できることを示している。またこれらのみならず、ロボットの静止時における基準値の更新方法、VSLに適用した際の計測値への影響と制御方法についてまとめ、それぞれ発表した。

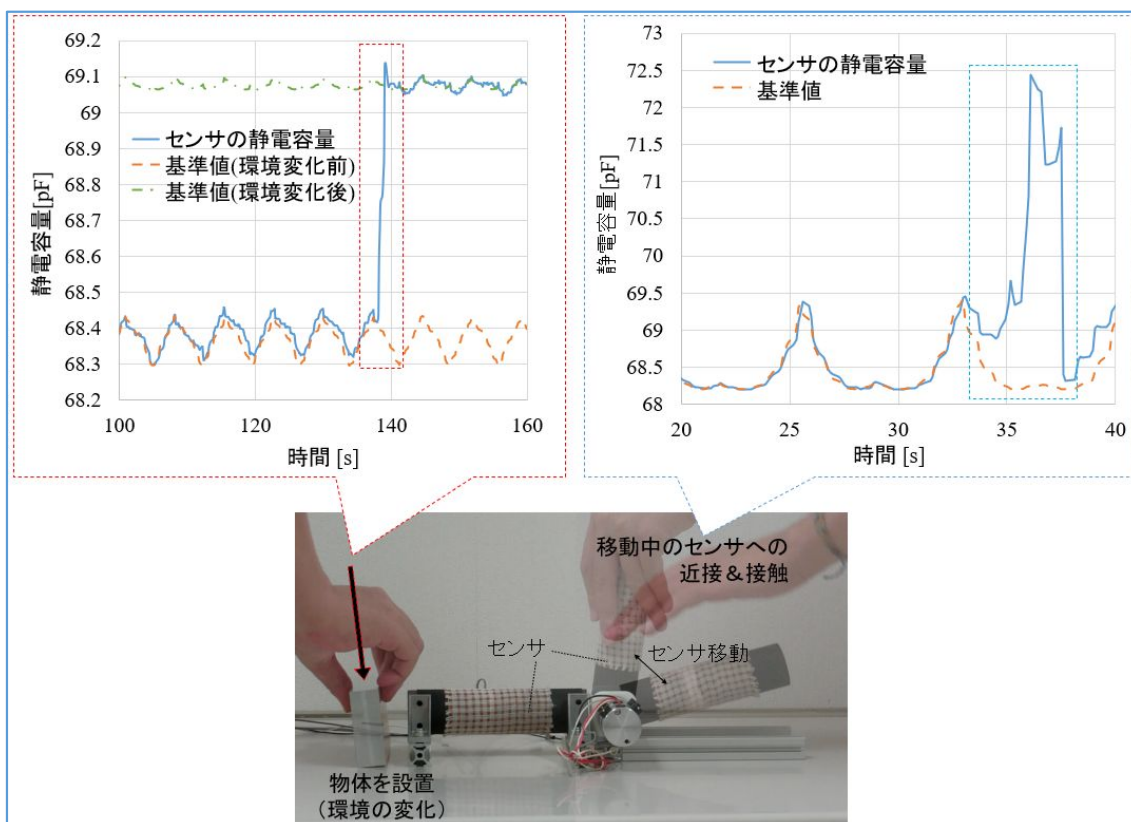


図6 環境の変化時の計測値補償および移動中のセンサへの近接・接触センシング

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 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takahiro Matsuno, Zhongkui Wang, Kaspar Althoefer, Shinichi Hirai	4. 巻 4
2. 論文標題 Adaptive Update of Reference Capacitances in Conductive Fabric Based Robotic Skin	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 2212-2219
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2019.2901991	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 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Mana Ishihara, Takahiro Matsuno, Kaspar Althoefer, Shinichi Hirai
2. 発表標題 Stiffness Control of Variable Stiffness Link Using a Conductive Fabric Based Proximity Sensor
3. 学会等名 IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mana Ishihara, Takahiro Matsuno, Kaspar Althoefer, Shinichi Hirai
2. 発表標題 Integration of a Conductive Fabric Based Proximity Sensor into Variable Stiffness Link with Two Axes and Two Links
3. 学会等名 2021 IEEE Int. Conf. on Soft Robotics（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiro Matsuno, Zhongkui Wang, Kaspar Althoefer, Shinichi Hirai
2. 発表標題 Adaptive Update of Reference Capacitances in Conductive Fabric Based Robotic Skin
3. 学会等名 2019 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Matsuno, Shinichi Hirai
2. 発表標題 Deformed Shape Estimation of an Asymmetric Conductive Pattern Printed Plate without using Resistance Model
3. 学会等名 2020 IEEE Int. Conf. on Real-time Computing and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiro Matsuno, Shinichi Hirai
2. 発表標題 Grasping Force Measurable Soft Finger Using Electro Conductive Material
3. 学会等名 2019 IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Matsuno, Shinichi Hirai
2. 発表標題 Estimating Deformation of a Thin Flexible Plate Using a Minimum Number of Angular Measurement
3. 学会等名 The First IEEE-RAS Int. Conf. on Soft Robotics (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 堀 照夫, 牛島洋史, 才脇直樹, 清水祐輔, 上條正義, 赤石良一, 三寺秀幸, 井上 翼, 間瀬健二, 榎堀 優, 島上祐樹, 田中利幸, 水野寛隆, 鈴木陽久, 高橋秀也, 山崎 貢, 藤岡 潤, 森山信宏, 平井慎一, ホアンヴァン, 松野孝博 (他15名)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 267
3. 書名 スマートテキスタイルの開発と応用	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 演算装置、センサシステム、及び、コンピュータプログラム	発明者 平井慎一、松野孝博	権利者 立命館大学
産業財産権の種類、番号 特許、2020-078654	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 センサシステム、可動装置システム、検出処理装置、検出方法、及びコンピュータプログラム	発明者 平井慎一、松野孝博、三谷篤史	権利者 立命館大学
産業財産権の種類、番号 特許、2019-227104	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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		
英国	Queen Mary University of London		