

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06257

研究課題名（和文）三次元造形技術を利用した柔軟・高精度な立体型触覚センサの研究開発

研究課題名（英文）Development of a flexible and precise tactile sensor using 3D modeling technology

研究代表者

鈴木 陽介（Suzuki, Yosuke）

金沢大学・フロンティア工学系・助教

研究者番号：20582331

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：主としてロボット指機構を対象として、柔軟な被膜の内部に実装可能な多層構造の触覚センサの開発及び実装方法の確立を行った。荷重分布重心位置検出方式の触覚センサのシートを、シリコンゴムの被膜の内部に層状に2層埋め込んだ構造を用いることで、法線・接線方向の荷重を推定可能な触覚センサを開発した。さらに、スキャニングにより圧力分布が得られる検出方式のセンサシートで1層のみまたは2層とも置き換えることで、制御に有用な重心位置に関する情報と物体認識に有用な圧力分布情報を得られる構成を開発した。また、柔軟なロボット指機構に触覚センサを埋め込み、反射的な運動生成を行う腱駆動メカニズムの開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多様なロボット表面に被覆実装可能かつゴム材料に埋込可能な触覚センサのロボット機構への実用が期待される中で、提案したセンサは曲面上に厚さ4mm以下のシリコンゴム被覆内に構成可能であり、省配線かつ情報処理も容易な点で有用性がある。また、新規提案したシリコンゴムの硬化阻害を利用したロボット指機構は、ヒトの手指のような柔らかさと触覚機能を両立でき、食品包装などの繊細な手作業が必要な作業や、人とのインタラクションへの応用展開が想定される。

研究成果の概要（英文）：We have developed a tactile sensor with a multi-layer structure that can be mounted inside a flexible skin, and established a mounting method mainly for robot finger mechanism. The tactile sensor can estimate the load in the normal and tangential directions by using a structure in which two sheets of a tactile sensor of the center-of-pressure (CoP) detection method are embedded in layers inside a silicone rubber coating. Furthermore, we have developed a structure that can obtain the CoP information useful for control and pressure distribution information useful for object recognition, by replacing one layer or both layers with a sensor sheet that can obtain pressure distribution by scanning. We also developed a tendon-driven mechanism that embeds a tactile sensor in a flexible robot finger mechanism to generate reflexive motion.

研究分野：ロボット工学

キーワード：触覚センサ ソフトロボティクス ロボットハンド

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

人間の手作業のロボットによる代替は、多様な物体を扱う製品組立や物流に加え、農業や食品包装などの形状未知かつ柔軟な対象物を取り扱う分野で、研究開始以前より、また現在に至っても十分に進んでいない。こうした中で、物体の形になじんで把持を行うソフトロボットハンドの開発が進められていた。受動的な変形により大面積での接触が可能であり、弱い把持力で大きな摩擦力を得るため、多種多様な形の物体や、柔らかい・脆い物体に対しても有用であることを示されてきていた。一方で、精密な運動制御が困難であるため、対象物との接触状態を制御するには、ロボットの運動制御よりも、直接的に接触状態を検知する触覚センサが望ましいと考えられた。触覚センサの検出原理の多くが物体との接触に伴う変形を利用するという特徴を持つため、触覚センサは変形を利用するソフトロボットとの親和性が高いと考えられる。触覚センサ開発は1980年頃から盛んに行われていたが、本研究開始当初は、種々の方式の3Dプリンタが安価で入手可能であることや、ロボットに利用可能なシリコンゴム製品の応用事例が多く報告され、これらを利用した様々なソフトロボットハンドが開発されていた。これに伴い、立体的な柔軟構造に触覚センサを組み込むことの重要性が高まりつつあったと言える。

### 2. 研究の目的

ロボット表面を覆うシリコンゴム層の内部に実装可能にすることで立体的な感圧エレメント配置を有する触覚センサを開発することを目的として、以下の項目の開発を行った。(A)安価な感圧導電性ポリマーを用いた薄型の触覚センサに対してシリコンゴムのキャストを行う手法の確立、(B)同触覚センサをシリコンゴム層内に複数の層状に埋め込むことで多軸方向の作用荷重を検出する方法の提案、(C)伸縮性を有する導電材料を用いて触覚センサを用いた曲げと伸びの両方に耐えられる構造の提案、(D)剛性材料による骨格部をシリコンゴムにより覆うロボット指構造によるソフトメカニズムの新規製造方法の提案、(E)ソフトメカニズムに触覚センサを埋め込み腱駆動メカニズムと統合した反射的な運動生成が可能な機構の開発を行った。

### 3. 研究の方法

本研究で用いる触覚センサの基本構造は感圧導電性ポリマーとフレキシブル基板で構成される。フレキシブル基板上に適切に電極を設計し、感圧導電性ポリマーを重ね合わせることで、面に作用する圧力分布を電気信号として出力することができる。シリコンゴムによる被覆を行うため、硬化前の液状のシリコンゴムがセンサ構造内に侵入しないこと、硬化後の収縮により感圧部に初期荷重が発生しないこと、センサシートを多層配置する場合の位置合わせを正確に行うことを課題として作業手順の確立を行った。光硬化方式の3Dプリンタのラバーライク材料を利用する方法と、シリコンゴムのキャストを複数ステップに分けて行う方法を試みた。シリコンゴム被膜への触覚センサシートの埋込方法が確立した後、剛性材料で作成した基礎部に接する面に第1層の触覚センサを、被膜内の厚さ方向に数mmだけオフセットした面に第2層の触覚センサを埋め込んだ、多層型の触覚センサを作成した。触覚センサシートには、フレキシブル基板上の電極配置と配線の切替により、同じ外形で2種類の情報出力形式を可能にした。一方は重心位置と総荷重の情報のみを短時間で取得可能な方式であり、もう一方はマルチプレクサを利用して空間分解能約2.5mmで分割した各セルの圧力分布を取得可能な方式である。これらの組み合わせに対して2層化した触覚センサによる情報取得を試みた。

導電性繊維を用いて触覚センサの電極部分と配線部分を置き換えることで、感圧セル間の長さを伸張可能な構造を作成した。シリコンゴムによるコーティングは、繊維の隙間への侵入を避けるため、あらかじめ硬化させたシリコンゴム層を複数作成し、触覚センサの各部品と重ね合わせたのちにシリコンゴムで接着する手法を試みた。

ソフトメカニズムの新規製造方法として、シリコンゴムの硬化障害を利用した手法を提案した。硬化障害とは、付加型シリコンの硬化環境において(例えば鋳型などに)硬化触媒との結合性が強い物質が含まれていた場合に起こるものであり、一般的には造形失敗として扱われる。提案手法では、未硬化のまま残るシリコンオイルを構造内の適切な箇所に生じさせることで、運動機構としての潤滑作用を発揮させるものである。これを用いたロボット指機構の開発を試みた。

シリコンゴムの硬化障害を利用したロボット指に対して、骨格部の剛性材料表面に触覚センサを実装し、全体をシリコンゴムで被覆した構造を作成した。駆動方式に腱駆動を採用し、関節軸周りと剛性材料内部に通したワイヤ経路内において硬化障害が生じるようにコントロールすることで、滑らかな回転運動と柔軟な受動的な運動が可能かつワイヤ牽引時の摩擦が小さい構造の開発を試みた。

### 4. 研究成果

柔軟構造内に層状の触覚センサを配置する構造について、研究期間開始前から準備を進めてい

た光造形方式 3D プリンタのラバーライク材料を用いた構造を設計・製作した。検出方式は荷重重心位置と総荷重を推定するものを 2 層に用いた。これにより、物体との接触位置・法線方向力・接線方向力によりセンサ出力が有意に変化することを実験により確認した。図 1 に示すような多指ロボットハンドの指機構に搭載し、接触物体の運動に対してリアクティブに指関節の運動を生成するシステムを開発した。



図 1 2 層型荷重分布重心位置検出センサのロボット指への実装

2 層にする触覚センサの検出方式として空間分解能約 2.5mm の格子状の圧力分布を検出する方式（分布方式）の導入のため、荷重分布重心位置検出方式（CoP 方式）を切替可能な基板の作成を行った。2 層のうち、内側外側ともに CoP 方式の構成、内側が分布方式で外側が CoP 方式の構成、内側外側ともに分布方式の構成の 3 種類の触覚センサを搭載したロボット指を作成した（図 2）。実験に基づく評価から、この構成は、リアクティブな運動生成に有用な情報を短時間で出力しつつ、物体識別に有用な分布情報も得られる点で優位性があると結論した。本センサを用いた未知物体把持動作への展開は今後の課題である。



図 2 分布方式及び CoP 方式の触覚センサシートを備えたロボット指

導電性繊維を用いた触覚センサは、導電性のニット素材を加工して触覚センサ基板上の電極及び配線を置き換えた構造とした。図 3 左側のように導電性ニット、感圧導電性ポリマー、空間作成用のシリコンレイヤを重ねたのち、両端をシリコンカバーで蓋をして接着する構成方法が可能であることを示した（図 3 右側）。本センサは伸縮可能なうえ、衝撃荷重に強く、水に濡れても機能することを確認した。



図 3 導電性繊維を用いた伸縮可能な触覚センサ構成の例

シリコンゴムの硬化阻害を利用したソフトメカニズムの構成方法は、研究開発を進める過程で高剛性の基礎部と柔軟な被膜部を有する機構の運動性能向上に関する検討から発明したものである。本構成方法を用いた機構設計方法として、一部の光造形方式の 3D プリンタの材料（光硬化樹脂）が触媒毒を含有することを発見し、これを剛性の高い基礎部（骨格部）として用いることで、少ない行程数で、本構成方法を適用したロボット指が作成可能であることを示した。また、触媒毒を有する液体を塗布することでも特定の部位に選択的に硬化阻害を生じさせることができることを示した。硬化阻害が生じる厚さに関する調査から、構造内のクリアランスの設計方法や、腱駆動方式と合わせて用いる際のワイヤ経路の直径の決定方法の確立を行った。また、触覚センサを基礎部表面に貼付し、腱駆動メカニズムの反射的な運動生成を可能にした。



図 4 シリコンゴムの硬化阻害を利用したロボット指

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 0件）

1. 著者名 Yosuke Suzuki	4. 巻 Volume 2, Issue 4
2. 論文標題 Multilayered Center-of-Pressure Sensors for Robot Fingertips and Adaptive Feedback Control	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 2180-2187
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2017.2723469	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yuji Hirai, Yosuke Suzuki, Tokuo Tsuji, Tetsuyou Watanabe
2. 発表標題 Tough, bendable and stretchable tactile sensors array for covering robot surfaces
3. 学会等名 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木陽介
2. 発表標題 柔軟構造内部に層状に配置したシート状触覚センサに基づく情報取得手法の検討
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yosuke Suzuki, Taichi Kitamura
2. 発表標題 PCI Method: A Novel Fabrication Method of Soft Mechanisms Utilizing Cure Inhibition of Addition Reaction Silicone
3. 学会等名 2019 IEEE International Conference on Soft Robotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuji Hirai, Yosuke Suzuki, Tokuo Tsuji, and Tetsuyou Watanabe
2. 発表標題 Tough, Bendable and Stretchable Tactile Sensors Array for Covering Robot Surfaces
3. 学会等名 The First IEEE-RAS International Conference on Soft Robotics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北村泰地, 平井佑治, 水上卓也, 鈴木陽介
2. 発表標題 感光性樹脂によるシリコンゴムの硬化阻害を用いたロボット指の開発
3. 学会等名 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井上翔太, 鈴木陽介
2. 発表標題 PCI法を用いたソフトロボット指の開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020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
---------	---------------------------	-----------------------	----