

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04240

研究課題名（和文）製紐技術を基盤としたスマート人工筋の実現とソフトロボットメカニズムへの応用

研究課題名（英文）Realization of smart artificial muscles by braider technology and their applications to soft robots

研究代表者

脇元 修一（Wakimoto, Shuichi）

岡山大学・自然科学学域・准教授

研究者番号：40452560

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、空気圧駆動のソフトアクチュエータであるMcKibben型人工筋をベースとし、アクチュエータとしての構成要素である繊維の一部を光ファイバに置き換え、これをセンサとして利用する収縮型・湾曲型の2種類のスマート人工筋を製紐機（せいちゅうき）による簡易な製造プロセスで実現した。また、これらのスマート人工筋のソフトロボットメカニズムの駆動要素としての可能性を実験的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高剛性のアクチュエータとセンサの組み合わせに関しては、例えば、エンコーダを有するサーボモータにみられるように、その基本的な設計手法が確立されている。一方で、柔軟性の高いソフトアクチュエータに関しては、センサとの統合手法が未成熟である。本研究では、製紐機を用いたソフトアクチュエータへの効率的なセンサ統合手法を実現している。また、開発したスマート人工筋の応用性も示しており、本研究の成果はソフトロボットの発展へ寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, based on a McKibben artificial muscle, which is a pneumatic-driven soft actuator, two types of smart artificial muscles, one is a contraction type and the other is a bending type, have been developed. These smart artificial muscles can be fabricated by using a braider machine, and have optical fibers as the sensor element in the structure. We also experimentally demonstrated the potential of the smart artificial muscle as a driving element of soft robot mechanisms.

研究分野：アクチュエータ工学

キーワード：ソフトアクチュエータ 人工筋 センサ ソフトロボット

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

McKibben 型人工筋は代表的な収縮型のソフトアクチュエータである。また、McKibben 型人工筋の側面を拘束することで湾曲型的人工筋が実現できることが知られている。これら的人工筋を用いた機械システムの開発が盛んに行われているものの、人工筋へセンサを複合する効率的な手法の確立は十分ではなく、柔軟な機械システムの構築において課題となっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、収縮型・湾曲型の両タイプ的人工筋に効率的にセンサを搭載する手法を確立するとともに、それらを応用したソフトロボットメカニズムを構築し、スマート人工筋（開発するセンサ機能付き人工筋をスマート人工筋と定義する）の有効性を示す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 収縮型スマート人工筋の開発と応用

McKibben 型人工筋を構成する繊維の一部を光ファイバに置き換えることで、センサ機能を有する収縮型スマート人工筋を開発してきた（科学研究費補助金(17K06121)を受けて実施）。光ファイバを人工筋の収縮量測定に用いるためには、発光素子 (LED) と受光素子 (Photo IC diode) が必要となる。本研究では、図 1 に示すように、これらの素子を人工筋の根元に集約するための製造手法を実現した。また、2 本の本収縮型スマート人工筋を並列に配置して接合することで、図 2 に示す 2 方向への湾曲メカニズムを開発した。ここでは、左側に配置した収縮型スマート人工筋を人工筋 A、右側に配置したものを人工筋 B とし、人工筋 A を駆動することで湾曲した方向を正、人工筋 B を駆動し湾曲した方向を負とする。湾曲メカニズムの湾曲角度に対する人工筋 A、人工筋 B からのセンサ出力の関係を図 3 に示す。空気圧を印加したスマート人工筋のセンサ出力が湾曲角度とともに減少することが確認された。また、図 4 は湾曲角度と両スマート人工筋からのセンサ出力の差分との関係を示しており、センサ出力の差を用いることで湾曲量が推定可能であることが示唆された。

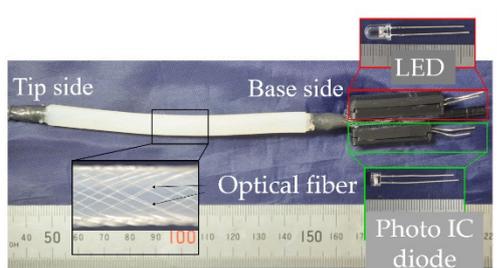


図 1 収縮型スマート人工筋

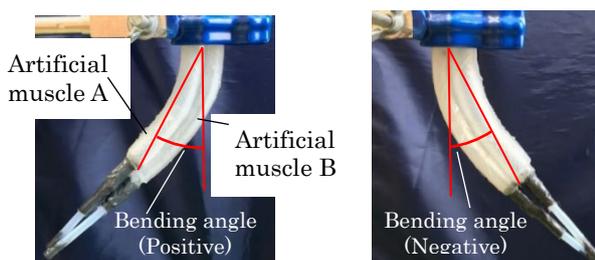


図 2 湾曲メカニズム

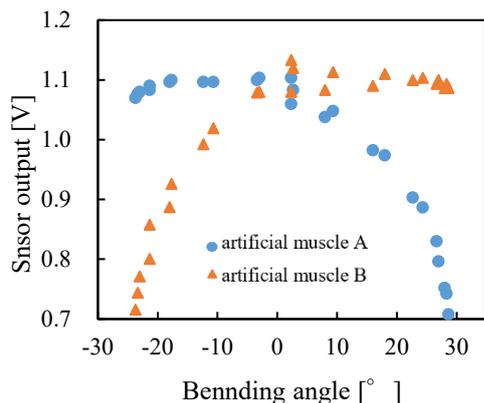


図 3 人工筋 A, B のセンサ特性

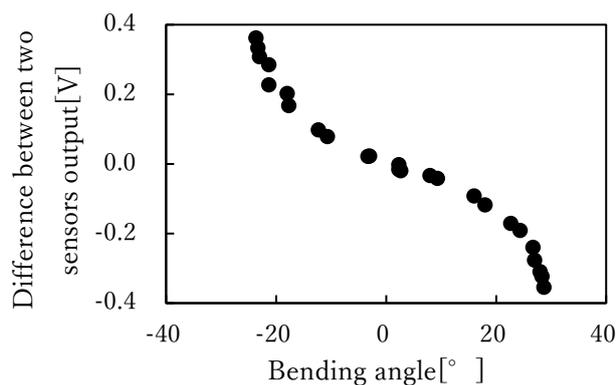


図 4 湾曲角とセンサ出力の差分の関係

#### (2) 湾曲型スマート人工筋の開発と応用

McKibben 型人工筋の側面の一部を非伸縮材で補強し、その部分の収縮を抑制することで湾曲型人工筋が開発できる。非伸縮材として光ファイバを利用し、自己湾曲量を推定可能な湾曲型スマート人工筋を開発した。図 5 に示すように製紐機によって McKibben 型人工筋を製作していく際に、人工筋の側面に長手方向に対して平行に光ファイバと LED 用の導線を編み込む。こ

の光ファイバと導線は、センサ要素として利用すると同時に、湾曲駆動を実現するための構成用としても機能しており、単純な構造であり、かつ容易な製作プロセスで湾曲型スマート人工筋が実現できる。

光ファイバを曲げセンサとして利用する場合、ファイバ表面の一部を加工することでセンサ特性が変化することが知られている。そのため、ファイバ表面を切削加工し、湾曲型人工筋の湾曲に対して検出特性の良いセンサシステムの実現を試みた。湾曲型スマート人工筋は、空気圧によって曲率半径約 27mm～80mm の範囲で湾曲するため、この範囲より広い 25mm～100mm の曲率半径を対象として、表面切削加工量によるセンサ特性を比較した。直径 0.75mm、長さ 150mm の光ファイバの中央部の表面に対して、切削量を変えながらセンサ特性を計測した結果、本研究では図 6 に示すように、深さ 0.1mm、幅 4.0mm の条件で表面を除去することに決定した。

製作した湾曲型スマート人工筋の初期状態と空気圧印加状態を図 7 に示す。図に示すように、空気圧を印加すると、光ファイバ、および導線が配置された側面が背となるように湾曲動作が実現される。また、図 8 に人工筋の曲率半径とセンサ出力の関係を示す。センサ値は初期電圧からの変化率として示している。光ファイバに加工を行わない場合、曲率半径が大きい範囲でセンサの感度が低くなっているのに対して、加工を行うことで駆動領域全体にわたってセンサ出力が変化していることが分かる。

また、湾曲型スマート人工筋 3 本をフィンガとしたソフトロボットハンドを具現化した。基礎実験として、円筒形物体の把持を行った結果、計測されるセンサ値が物体の直径に応じて変化することを確認した。本結果は、本フィンガによって、把持の成功・失敗、および把持対象物の直径が推定できることを示唆するものである。

#### 4. 研究成果

##### (1) 収縮型スマート人工筋

申請者らが開発してきた収縮型スマート人工筋の構造を改良し、発光素子と受光素子を人工筋の根元に集約した。2本の収縮型スマート人工筋を並列に結合することで、2方向への湾曲駆動を実現する柔軟な湾曲メカニズムを開発した。湾曲メカニズムの駆動量が収縮型スマート人工筋からのセンサ出力の差分をとることで推定できることを確認した。

##### (2) 湾曲型スマート人工筋

製紐機を用いることで光ファイバを長手方向に複合した湾曲型スマート人工筋の製作手法を確立した。光ファイバの表面の一部を除去加工することで、湾曲量の推定が可能となることを示した。また、ロボットハンドへ適用することで、湾曲型スマート人工筋のロボットシステムへの応用可能性を示した。

##### (3) まとめ

本研究では、空気圧駆動の人工筋に効率的にセンサを複合する手法を確立した。また、開発した2種類のスマート人工筋がソフトロボットメカニズムに適応できることを示した。

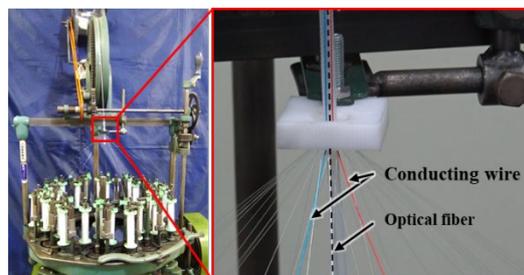


図 5 湾曲型スマート人工筋の製造プロセス

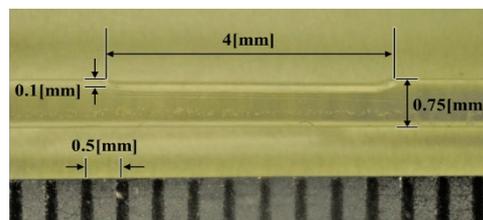


図 6 光ファイバの表面加工



(a) 初期状態



(b) 空圧印加状態

図 7 湾曲型スマート人工筋

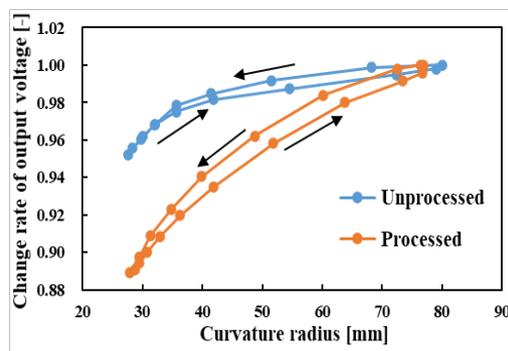


図 8 湾曲型スマート人工筋のセンサ特性

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 Weihang Tian, Shuichi Wakimoto, Takefumi Kanda, Daisuke Yamaguchi	4. 巻 22
2. 論文標題 Displacement Sensing of an Active String Actuator Using a Step-Index Multimode Optical Fiber Sensor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	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） 10.3390/s22093232	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13件（うち招待講演 0件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 脇元修一，長岡和弥，作間祐仁，安藤克倫，松田大成，神田岳文
2. 発表標題 紐製造技術を用いた空気圧人工筋肉への機能性繊維複合方法
3. 学会等名 秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田大成，脇元修一，神田岳文，小川草太，長岡和弥，吉本依史
2. 発表標題 光ファイバセンサを搭載したMcKibben型人工筋の変位制御
3. 学会等名 第21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 2020年

1. 発表者名 Shuichi Wakimoto, Sota Kogawa, Hiroaki Matsuda, Kazuya Nagaoka, Takefumi Kanda
2. 発表標題 Comparison of smart artificial muscles with different functional fibers
3. 学会等名 ACTUATOR 2021 International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Weihang Tian, Shuichi Wakimoto, Kazuya Nagaoka, Yorifumi Yoshimoto, Takefumi Kanda, Daisuke Yamaguchi
2. 発表標題 Displacement Sensing of an Active String Actuator by an Optical Fiber
3. 学会等名 8th International Electronic Conference on Sensors and Applications (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshie Yamamoto, Shuichi Wakimoto, Takefumi Kanda, Daisuke Yamaguchi
2. 発表標題 A soft robot arm with flexible sensors for master-slave operation
3. 学会等名 8th International Electronic Conference on Sensors and Applications (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本好恵, 脇元修一, 神田岳文, 山口大介, 浮田貴宏
2. 発表標題 柔軟ひずみセンサ搭載による空気圧ソフトマニピュレータの湾曲・ねじれ制御の基礎検討
3. 学会等名 第22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 2021年

1. 発表者名 吉本依史, 田偉航, 長岡和弥, 脇元修一, 神田岳文, 山口大介
2. 発表標題 光ファイバ型スマート人工筋肉を用いた湾曲メカニズムの検討
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長岡和弥, 脇元修一, 神田岳文, 山口大介, 松田大成
2. 発表標題 湾曲型スマート人工筋肉用光ファイバセンサの特性改善
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田偉航, 安藤克倫, 脇元修一, 神田岳文
2. 発表標題 インダクタンス変位型変位センサを用いたスマート人工筋肉の制御
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田偉航, 長岡和弥, 脇元修一, 山口大介, 神田岳文
2. 発表標題 湾曲型人工筋に複合する光ファイバセンサの表面加工条件の検討
3. 学会等名 春季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yorifumi Yoshimoto, Shuichi Wakimoto, Weihang Tian, Keima Inoue, Daisuke Yamaguchi, Takefumi Kanda
2. 発表標題 Combination Process of a Pneumatic Artificial Muscle and a Fiber Optical Sensor System
3. 学会等名 The 9th International Electronic Conference on Sensors and Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kai Sawada, Shuichi Wakimoto, Daisuke Yamaguchi, Takefumi Kanda
2. 発表標題 Fabrication of Combination Structure of Flexible Polymer and Shape Memory Polymer by 3D Printing for Soft Actuator
3. 学会等名 The 9th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Weihang Tian, Shuichi Wakimoto, Takefumi Kanda, Daisuke Yamaguchi
2. 発表標題 Fabrication Process of Optical Fiber Type Smart Artificial Muscle
3. 学会等名 The 9th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------