

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06121

研究課題名(和文)機能性繊維による空気圧人工筋の高機能化

研究課題名(英文)Development of high-functional pneumatic artificial muscles with functional fibers

研究代表者

脇元 修一(Wakimoto, Shuichi)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：40452560

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文): 農業・医療・福祉などの分野では、柔らかく安全性の高いソフトロボットが求められる。ソフトロボットの利便性を向上させる方法の一つとして、その駆動源として利用される空気圧人工筋の機能性を向上させる手法が挙げられる。本研究では、機能性繊維を複合することでセンサ機能を有する人工筋や駆動形態を変化させる人工筋を開発した。前者では人工筋の駆動状態の推定を、後者では一つの人工筋で収縮や湾曲などの複数の動作をそれぞれ実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空気圧人工筋はゴムチューブとスリーブを形成する繊維から構成される。本研究ではセンサ材料繊維や形状記憶ポリマー繊維をスリーブの繊維として構成するため、人工筋に構造的付加材料が必要ない。また、製紐機を用いることで容易に高機能な人工筋が実現できている。これらの構造と製造プロセスは独自性の高いものであり、人工筋のさらなる高機能化に貢献する可能性があり学術的価値を有する。また、人工筋の高機能化は少子高齢化社会において必要となってくるソフトロボットの実用に繋がるものである。

研究成果の概要(英文): In the agriculture, medical, and welfare fields, soft robots with high safety are required. For improving the convenience of the soft robots, it is effective to enhance the functionality of the pneumatic artificial muscles that are used as the drive source of the soft robots. In this research, we have developed two kinds of artificial muscles, one has the sensor function, and the other can change the driving form, respectively. Both artificial muscles have functional fibers. The former artificial muscle can estimate its state by the embedded fiber sensor, and the latter artificial muscle can realize multiple movements such as contracting and bending by shape-memory polymer fiber.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：ソフトアクチュエータ 機能性繊維 空気圧人工筋 センサ 形状記憶ポリマー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

空気圧駆動のソフトアクチュエータである McKibben 型人工筋は安価・軽量・高出力・柔軟といった特長を持ちソフトロボットへの適用が盛んに行われている。ソフトロボットの利便性を高めるためのアプローチとして人工筋自体の機能性を高める研究が実施されており、これらの研究は大きく二つのカテゴリに分けることができる。一つはセンサ機能の付加であり、もう一つが駆動性の向上である。これまでに行われてきた人工筋の高機能化では、センサ材料や形状記憶性材料などを人工筋に複合するためのプロセスが人工筋の製作とは別に必要であった。

2. 研究の目的

本研究では人工筋の高機能化として、センサ機能の付加と駆動性の向上の双方を実施した。前者では、印加圧力や発生変位が推定可能な人工筋を、後者では通常の収縮動作だけではなく湾曲動作なども実現可能な人工筋を開発することを目指した。両人工筋とも人工筋を構成する繊維を機能性繊維に置き換えることで具現化できるため、簡易な製造プロセスで実現が可能である。

3. 研究の方法

(1) 製紐機(せいちゅうき)による製作プロセス

図 1 に McKibben 型人工筋の構造と駆動原理を示す。空気圧を印加するゴムチューブを編み込んだ繊維からなるスリーブで覆っている。ゴムチューブ内に空気圧を印加することで径方向へ膨張し、これに伴ってスリーブの繊維の編角がパンタグラフ機構のように変化することで、生体の筋肉のように軸方向に収縮する。

本研究では図 2 に示す製紐機(せいちゅうき)を用いて人工筋を製作した。製紐機とは糸や金属線等の繊維を材料として、複数の繊維を交互に交差させて紐状に編むことができる装置である。用いた製紐機は 32 本の繊維を編みこむことが可能である。スリーブの材料となる繊維を巻いたポビンはキャリアに接続されている。キャリアはホーンディスクと呼ばれる円環状の溝に沿って 16 個が右回りに、残りの 16 個が左回りに公転する。この際に、キャリアが円環状の溝を内側と外側を交互に交差しながら移動することによってメッシュ状に繊維を編みこむことが可能となる。また、これと同時に巻取ローラによって内部チューブを引き上げる。この 2 つの動作を組み合わせることによって McKibben 型人工筋が製作される。

スリーブ繊維の編角はキャリアと巻取ローラとの速度比と内部チューブ径によって決定される。そのため、同径の内部チューブによって人工筋を製作する場合、スリーブの編角はキャリアと巻取ローラとの速度比に依存する。

ポビンに巻く繊維の一部を機能性繊維とすることで、スリーブに機能性繊維を複合化することができ高機能化された人工筋が容易に製作できる。

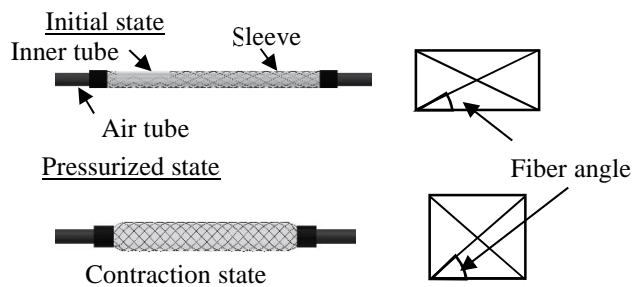


図 1 McKibben 型人工筋の構造



図 2 製紐機による人工筋の製作

(2) センサ機能を有する人工筋

センサ機能を有する人工筋として、細径導電性繊維を用いた印加圧力推定型、エネメル線を用いた変位推定型、光ファイバを用いた変位推定型を開発した。本報告では光ファイバを用いた変位推定型に焦点を当てる。

光ファイバはコア層とコア層よりも屈折率の低いクラッド層の 2 層で構成される。光ファイバに入射した光は全反射を繰り返しながらコア層内を伝播する。しかし、光ファイバが湾曲すると光の入射角が臨界角より小さくなることによって伝播していた光が外部に漏れだし、光ファ

イバ内を伝播する光量が減少する。McKibben 型人工筋に編み込まれた繊維は人工筋の駆動によって曲率半径が変化する。そのため、スリーブの繊維の一部を光ファイバにすることで駆動に伴い光ファイバ内を伝播する光量が減少し、人工筋の変位を推定することが可能となる。

使用した光ファイバの曲率半径を変化させながら伝播する光量を測定した結果を図 3 に示す。光ファイバの曲率半径が 20 mm 以上の範囲では曲率に対してセンサ感度が低く不感帯・低感帯となっていることが確認された。このため、初期状態から収縮状態においてスリーブ繊維（光ファイバ）の曲率半径が 20 mm 以下になるように人工筋を設計する必要がある。本研究では曲率半径が 15mm 以下となるよう設計を行った。人工筋の幾何学モデルと螺旋の曲率モデル、および、製作する人工筋の径を考慮し、初期編角を 20 度に決定した。この初期編角にすることで、外径 4mm の人工筋が初期状態から 20%収縮した状態において、光ファイバの曲率は 15mm ~ 7.7mm となり不・低感帯を避けたセンサ利用が可能となった。

製作は製紐機のポビンの内、2 つに光ファイバをセットすることで実施した。製作した光ファイバ搭載型のスマート人工筋を図 4 に示す。センサとして利用する光ファイバは 1 本であるが、光ファイバを 1 本のみ搭載した場合、光ファイバとその他の繊維との剛性の違いから人工筋の駆動時にねじれが生じる。構造的な非対称性を生じさせないため、光ファイバを 2 本用いた。

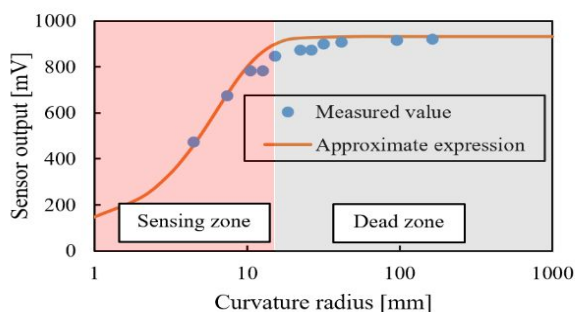


図 3 光ファイバの基本特性

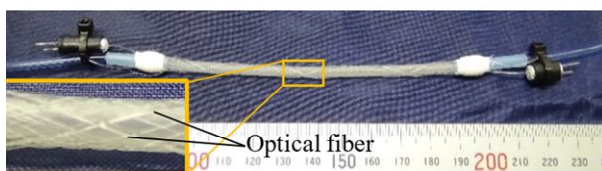


図 4 光ファイバ搭載型スマート人工筋

(3) 駆動形態が変更可能な人工筋

駆動形態を可変とする人工筋を実現するため、形状記憶ポリマー(SMP)を利用した。SMP とは、ガラス転移温度を境にして、その弾性が大きく変化する高分子材料である。ガラス転移温度よりも温度が高い状態では小さな力で変形が可能なゴム状態に、ガラス転移温度よりも温度が低い状態では剛性の高いガラス状態になる。SMP には形状固定性と形状回復性の二つの性質がある。形状固定性とは、ゴム状態で変形した形状を保ったままガラス状態まで冷却すると、その変形を保持する性質である。また、形状回復性は、形状固定した SMP を外力を加えない状態で再びガラス転移温度よりも高い温度に加熱すると元の形状に戻る性質である。本研究では形成前が溶液状でガラス転移温度が 45 度の SMP を使用した。液状の SMP を綿繊維に浸潤させ、モータによって一定速度で巻き取ることで、形状記憶ポリマーを含有する繊維(SMP 繊維)の連続成形プロセスを確立した。製作プロセスの概要図を図 5 に示す。繊維に SMP を浸潤させた後、二つの弾性体ローラを用いることで繊維表面の余分な SMP を除去するとともに、繊維の内部に SMP を浸透させる。その後、乾燥炉で SMP を硬化させる。

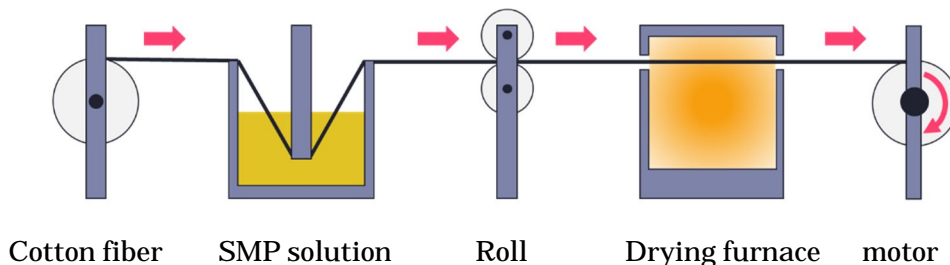


図 5 SMP 繊維の製作プロセス

製作した SMP 繊維を図 6 に示す。綿繊維に SMP が浸潤し硬化している。綿繊維長さ 10mm あたり約 0.7g の SMP 材料が含まれている。また、SMP 繊維を加熱した後に変形を加え冷却することで、変形形状が保持される形状固定性を有することを確認した。製紐機のポビンの内 16 本に、SMP 繊維をセットすることで、SMP 繊維を複合した人工筋を製作した。SMP 繊維は比較的剛性の高い繊維であるため、形状固定性の強さと人工筋としての駆動量がトレードオフの関係となる。そのため、SMP 繊維の数を変更しながら実験的に SMP 繊維本数を決定した。図 7 に製作した SMP 繊維複合人工筋を示す。

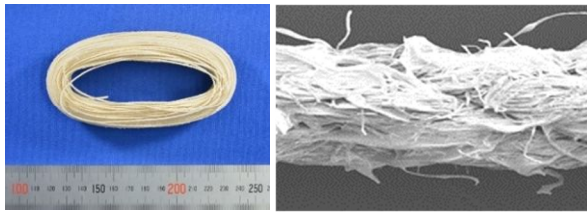


図6 SMP 繊維



図7 SMP 繊維搭載型人工筋

4. 研究成果

(1) 光ファイバ搭載型スマート人工筋の特性

3.(2)で製作した光ファイバ搭載型スマート人工筋の特性を確認した。図8に基礎特性を示す。100kPaまで空気圧を印加した際に、製作した人工筋の収縮率は18%となった。また、収縮率と光ファイバセンサからの出力を測定した結果、駆動に伴いセンサ出力が変化することを確認した。この特性を用いて人工筋の変位のフィードバック制御が可能であることを確かめている。

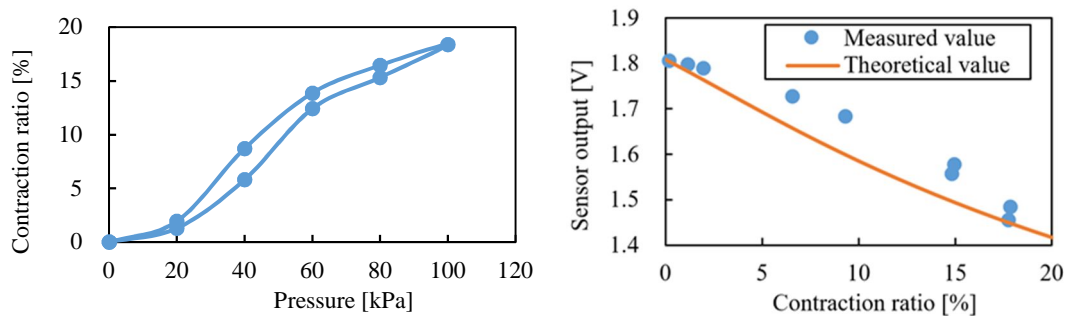


図8 光ファイバ搭載型人工筋の特性（左：収縮特性、右：センサ出力特性）

(2) SMP 繊維搭載型人工筋の特性

3.(3)で製作したSMP 繊維搭載型人工筋の特性を確認した。SMP 繊維の形状固定性によって製作した人工筋は、加熱し変形させ冷却すると、その変形形状で固定することが可能である。湾曲変形を生じさせて人工筋を駆動した際の様子と角度変化のグラフを図9に示す。なお、直線形状において空気圧を印加した場合、軸方向に約7%収縮した。

SMP 繊維を複合した人工筋は McKibben 型だけではなく軸方向繊維強化型でも開発している。軸方向繊維強化型人工筋においても、製紐機による製作プロセスを確立しており、収縮、湾曲・伸展、ねじれの各動作が実現できている。

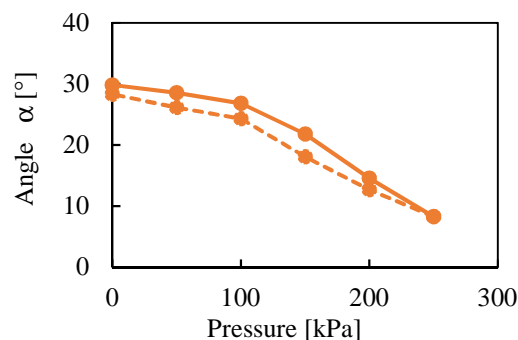
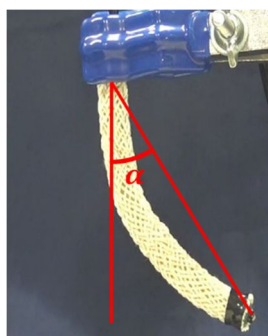


図9 SMP 繊維搭載型人工筋の湾曲伸展動作（左：駆動の様子、右：角度変化特性）

(3) 研究成果のまとめ

本研究では、機能性繊維を複合することで空気圧人工筋の高機能化を実現した。機能性繊維は人工筋のアクチュエータとしての構造要素でありながら、機能性を付加する役目も担っている。そのため、通常的人工筋と同じ構造ながら機能が向上できている。また、製作においては製紐機を利用することで容易なプロセスを実現した。研究を実施する中で、光ファイバ搭載型湾曲人工筋も開発しており、多様な高機能人工筋の基盤技術を確立した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Furukawa Shota, Wakimoto Shuichi, Kanda Takefumi, Hagihara Hiroki	4. 巻 8
2. 論文標題 A Soft Master-Slave Robot Mimicking Octopus Arm Structure Using Thin Artificial Muscles and Wire Encoders	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3390/act8020040	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 -

1. 著者名 Yahara Shigeyoshi, Wakimoto Shuichi, Kanda Takefumi, Matsushita Kouya	4. 巻 295
2. 論文標題 McKibben artificial muscle realizing variable contraction characteristics using helical shape-memory polymer fibers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 637~642
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.06.012	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19件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Koya Matsushita, Shuichi Wakimoto, Shigeyoshi Yahara, Takefumi Kanda
2. 発表標題 Fabrication process of a McKibben artificial muscle with SMP fibers by a braider machine
3. 学会等名 The 8th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Hagihara, Shuichi Wakimoto, Takefumi Kanda, Shota Furukawa
2. 発表標題 Operation of a pneumatic soft manipulator using a wearable interface with flexible strain sensors
3. 学会等名 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sota Kogawa, Shuichi Wakimoto, Takefumi Kanda, Kento Omura
2. 発表標題 Composite structure of McKibben artificial muscle and optical fiber sensor
3. 学会等名 International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 脇元修一, 大村健人, 神田岳文, 小川草太
2. 発表標題 光ファイバを編み込んだ変位推定機能を有するMcKibben型人工筋の提案と試作
3. 学会等名 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松下航也, 作間祐仁, 脇元修一, 神田岳文
2. 発表標題 SMP 強化繊維の自動製作と人工筋肉への適応
3. 学会等名 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 2019年

1. 発表者名 長岡和弥, 脇元修一, 神田岳文, 小川草太, 松田大成
2. 発表標題 光ファイバセンサを強化繊維として利用した湾曲型スマート人工筋の試作
3. 学会等名 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 2019年

1. 発表者名 秋原弘貴, 脇元修一, 神田岳文, 山本好恵
2. 発表標題 ラバーコーティングによる空気圧人工筋の特性改善
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川草太, 脇元修一, 神田岳文, 大村健人
2. 発表標題 インダクタンス変化型変位センサを一体化したスマート人工筋の磁性流体による駆動
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋原弘貴, 脇元修一, 神田岳文, 古川匠太
2. 発表標題 柔軟ひずみセンサを用いたウェアラブルインタフェースによる3自由度ソフトマニピュレータの操作
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigeyoshi Yahara, Shuichi Wakimoto, Takefumi Kanda
2. 発表標題 A McKibben artificial muscle with variable contraction characteristics by SMP material
3. 学会等名 International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川草太, 脇元 修一, 神田 岳文, 大村健人
2. 発表標題 インダクタンス変化型変位センサを内蔵したスマート人工筋の磁性粉体によるセンサ特性の向上
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 小川草太, 脇元 修一, 神田 岳文, 大村健人
2. 発表標題 インダクタンス変化による変位センサを一体化したスマート人工筋の製作手法
3. 学会等名 成30年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 脇元修一, 大村健人, 神田岳文, 小川草太
2. 発表標題 光ファイバを編み込んだ変位推定機能を有する McKibben型人工筋の提案と試作
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 2019年

1. 発表者名 Koya Matsushita, Shuichi Wakimoto, Shigeyoshi Yahara, Takefumi Kanda
2. 発表標題 Fabrication process of a McKibben artificial muscle with SMP fibers by a braider machine
3. 学会等名 The 8th International conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢原成喜, 脇元修一, 神田岳文
2. 発表標題 らせん形状記憶ポリマーを用いた空気圧人工筋の特性改善
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 湯崎真弘, 岩田和大, 脇元修一, 神田岳文
2. 発表標題 多自由度扁平ソフトアクチュエータの開発
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 脇元修一, 後藤桂輔, 大村健人, 神田岳文
2. 発表標題 導電性繊維を複合製作した空圧人工筋の駆動システムのモデル化
3. 学会等名 第18回機素潤滑設計部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Yuzaki, K. Iwata, S. Wakimoto, T. Kanda
2. 発表標題 Development of a Thin Pneumatic Rubber Actuator Generating 3DOF Motion - Design Using FEM Analysis and Fabrication of the Actuator
3. 学会等名 Actuator 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Omura, K. Goto, S. Wakimoto, T. Kanda
2. 発表標題 Development of Pneumatic Valves and a Fiber Sensor for a Smart Artificial Muscle
3. 学会等名 Actuator 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>岡山大学自然科学研究科システム構成学研究分野 http://www.act.sys.okayama-u.ac.jp/</p>
--

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
連携研究者	鈴森 康一 (Suzumori Koichi) (00333451)	東京工業大学・工学院・教授 (12608)	