

報告日 令和元年 10 月 30 日

報告者 岡山大学大学院自然科学研究科 准教授

脇元 修一

1. 研究概要

(和文)

(1) 課題名

導電性繊維を複合した空気圧駆動スマート人工筋の開発

(2) 研究者氏名

脇元 修一 岡山大学大学院自然科学研究科 准教授

(3) 研究概要

空気圧駆動のソフトアクチュエータであるマッキベン型人工筋は、ゴムチューブとそれを覆うスリーブから構成される。スリーブは編み込まれた繊維層であり人工筋の駆動特性を決定する重要な構成要素である。

本研究では、スリーブを構成する繊維の一部を導電性繊維とすることで、自己センシング機能を持つスマート人工筋の開発を行っている。導電性繊維の電気抵抗値変化により印加圧力が、インダクタンスにより変位が推定可能な人工筋が実現できることを確認した。

(4) キーワード

空気圧アクチュエータ, 人工筋, センサ, スマート構造

(英文)

(1) Research title

Development of pneumatic smart artificial muscles with conductive fibers

(2) Name of researcher with title of position

Shuichi Wakimoto, Associate Professor, Okayama University

(3) Summary

A McKibben artificial muscle, which is a pneumatic soft actuator, is composed of a rubber tube and a sleeve covering the rubber tube. The sleeve is the knitted fibers and it is an important element that affects the characteristics of the artificial muscle. In this study, smart artificial muscles, which has the conductive fibers as the sleeve fibers and the sensor elements, have been developed. By measuring the electrical resistance of the fiber, the applied pressure was estimated and, also, by measuring the inductance of the fibers, displacement of the artificial muscle was estimated.

(4) Key Words

Pneumatic actuator, Artificial muscle, Sensor, Smart structure

2. 本研究の意義・特色

マッキベン型人工筋は代表的な空気圧駆動のソフトアクチュエータであり、軽量・柔軟・高出力／重量といった特長を有する。人工筋の利便性を高め、用途をさらに拡大していくためには、人工筋に適切なセンサを複合することが重要である。人工筋は、ゴムチューブとそれを覆う繊維から構成される。本研究は、このアクチュエータとしての構成要素である繊維にセンサ機能ももたせることで人工筋の制御システムが単純化されるという発想に基づいている。人工筋は製紐機（せいちゅうき）を用いることで製作が可能である。製紐機を用いることでセンサ繊維は通常的人工筋の製造工程中に複合できるため、容易にセンサ機能付きのスマート人工筋が実現できる。

3. 実施した研究の具体的内容、結果（本文）

（1）スマート人工筋の製作方法

マッキベン型人工筋の構造を図 1 に示す。人工筋は内部のゴムチューブのまわりを編み込んだ繊維からなるスリーブで覆うことで構成され、ゴムチューブに空気圧を印加することで繊維の編角が変化しながら径方向に膨張、軸方向に収縮する。

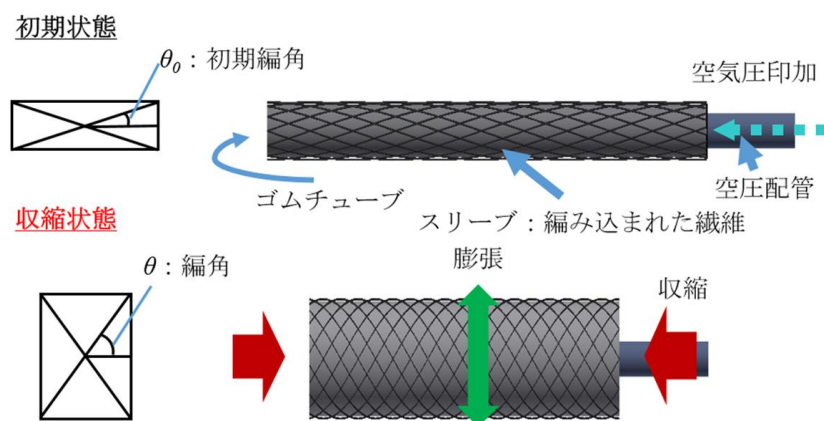


図 1 マッキベン型人工筋の構成と駆動原理

本研究では、人工筋を構成するスリーブの繊維の一部を導電性繊維とする。電気抵抗値を測定することによって印加圧力を推定するタイプ、インダクタンスを測定することで変位量を推定するタイプの 2 種類のスマート人工筋を製作した。両タイプとも製作プロセスは同一であり、製紐機を用いることで製作される。

製紐機は、組紐（くみひも）を製造する際に用いられる装置である。図 2 に製紐機を示す。本研究室で使用している製紐機は 32 本の繊維を編み込むことができる。図中の A 部において 16 個のボビンが右回りに、残りの 16 個のボビンが左回りに互いに交差しながら回転することでスリーブが形成される。それと同時に、B 部でゴムチューブを引き上げる。こ

の動作によって C に示すようにゴムチューブ周りに繊維を巻き付けることができ人工筋が製作できる。D 部のギヤ比によって、A 部、B 部の速度比が調整可能であり、繊維の編角を変更することが可能になる。本研究ではポビンに搭載する繊維の一部を導電性繊維とすることで、スマート人工筋を製作した。

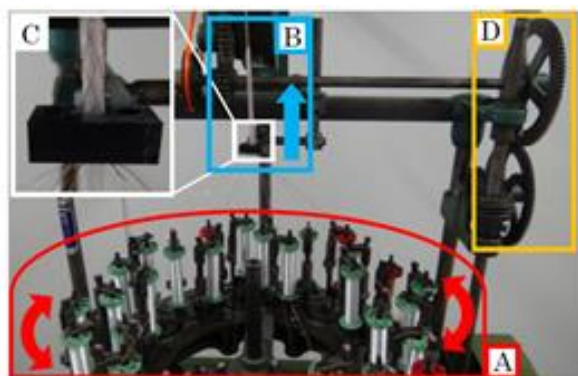


図 2 製紐機による人工筋製作手法

本研究期間では銀薄膜をポリエステル薄膜で挟んだ構造を有する導電性繊維である銀被膜内蔵繊維を有する人工筋と銅線をエナメル被膜したエナメル線を有する人工筋をそれぞれ製作し、前者では電気抵抗値変化を、後者ではインダクタの変化をセンサ出力として用いた。

(2) 電気抵抗値型

銀被膜内蔵繊維を有する人工筋を図 3(a)に示す。人工筋は直径 6mm、実駆動部の長さが 100mm で製作している。スリーブを構成する 32 本の繊維のうち 1 本を銀被膜内蔵繊維として製作している。研究開始当初は、この導電性繊維の電気抵抗値の変化によって人工筋の収縮量が測定できるのではないかという予測のもと製作を行った。しかしながら、銀被膜内蔵繊維の電気抵抗値変化を調べた結果、抵抗値の変化は、変位ではなく印加する圧力に依存することが分かった。図 3(b)はセンサの基礎特性として人工筋への印加圧力とブリッジ回路により電圧に変換されたセンサ出力の関係を示している。このようにセンサ出力は人工筋に印加する圧力に相関があること確認された。すなわち、本人工筋は圧力センサ内蔵型となっている。

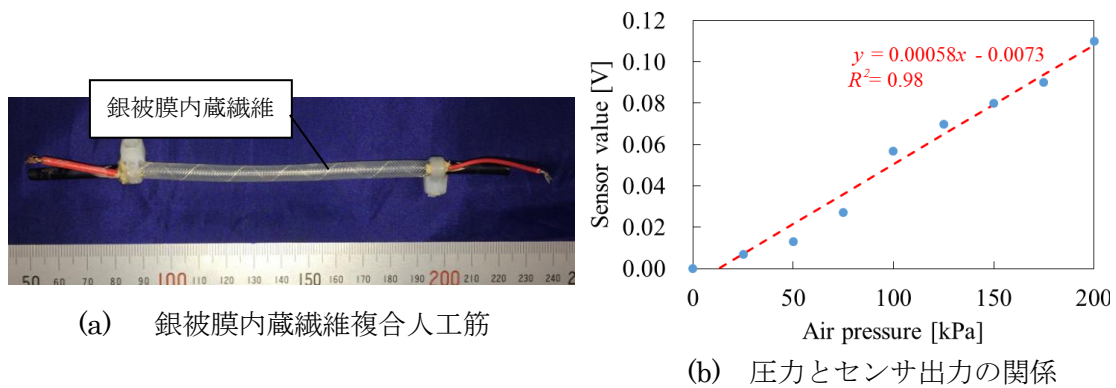


図 3 銀被膜内蔵繊維を有する人工筋とセンサ特性

ステップ状圧力に対するセンサ出力の応答を確認したところ、即応するものの一定の時間、僅かにドリフトすることが分かった。そのため、二つの一次遅れ系の和としてセンサのモデル化を行った。各一次遅れ系の時定数、およびゲインは数値計算によるパラメータマッチングによって決定した。図 4 に実測されたセンサ出力とステップ入力に対するセンサモデルの応答を示す。

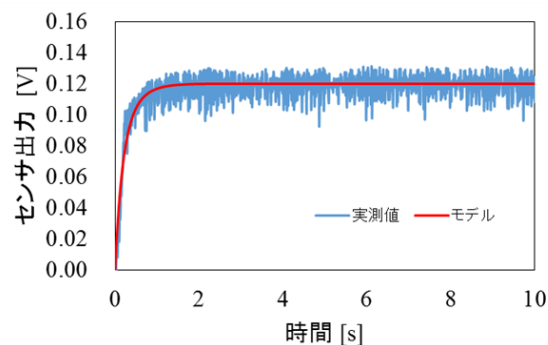
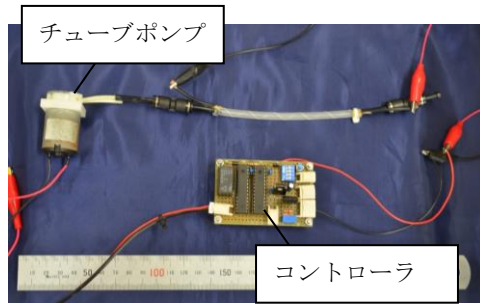
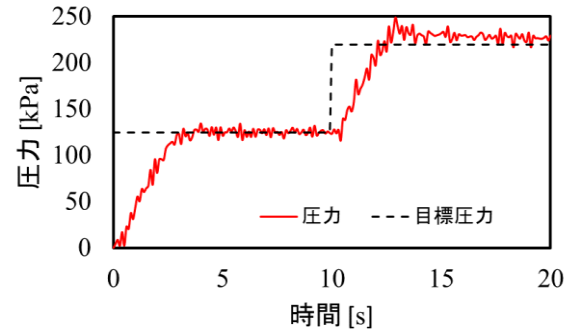


図 4 ステップ状圧力に対するセンサ出力（実測とモデル）

本人工筋は圧力センサ機能を有しているため、他の圧力センサや電空レギュレータなどを用いず、図 5(a)に示すように小型のチューブポンプとコントローラを有する簡易な駆動システムによって印加圧力を制御することが可能である。人工筋への印加圧力は銀被膜内蔵繊維のセンサ出力をセンサモデルに通すことで推定し、目標圧力値と推定された圧力値の偏差を PI 制御器を通しチューブポンプへの操作量を決定した。図 5(b)に圧力制御の結果を示す。目標圧力に対して、遅れや定常誤差が生じているものの、導電性繊維の電気抵抗値変化を利用することで圧力制御が可能であった。



(a) 駆動システム



(b) 実験結果

図5 銀被膜内蔵繊維を有する人工筋の駆動システムと圧力制御実験結果

(3) インダクタンス型

導電性繊維としてエナメル線を有する人工筋を図6に示す。本人工筋では32本のスリーブ繊維の内8本をエナメル線で構成し、すべてを直列になるよう接合している。

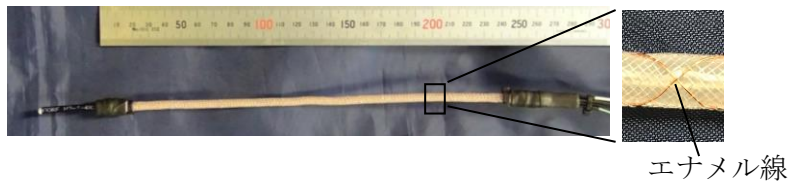


図6 エナメル線を有する人工筋

人工筋のスリーブの各繊維はらせん状にゴムチューブ周りに編み込まれていく。そのため、エナメル線はゴムチューブのまわりでコイルを形成することとなる。コイルのインダクタンス L の理論式は、以下ようになる。

$$L = \frac{\mu N^2 S}{l}$$

ここで μ はコイルの芯の透磁率、 N はコイルの巻数、 S はコイルの断面積、 l はコイルの全長である。人工筋が収縮駆動すると、コイルの断面積が大きくなると同時に、コイルの全長が短くなるため、インダクタンスの値は大きくなる。したがって、インダクタンスの変化量からアクチュエータの変位を推定することが可能になる。

製作した人工筋は直径 6mm、実駆動部の長さ 193mm であり最大で 14%収縮する。人工筋の収縮率とインダクタンスの関係を図 7(a)に示す。この関係より、エナメル線コイルのインダクタンスを計測することで人工筋の収縮量が推定可能であることが示された。

人工筋は繊維の初期編角によって、圧力印加に対して軸方向に伸長するタイプも実現できる。製紐機のギヤ比 (図 1 の D 部) を変更することで、伸長型人工筋を製作した。製作した人工筋は直径 6mm、実駆動部の長さ 211mm であり、最大で 6.6%伸長する。図 7(b)

は伸長型人工筋の伸長率とインダクタンスの関係を示している。収縮型的人工筋と同様にインダクタンスによって伸長率が測定可能であることが分かる。

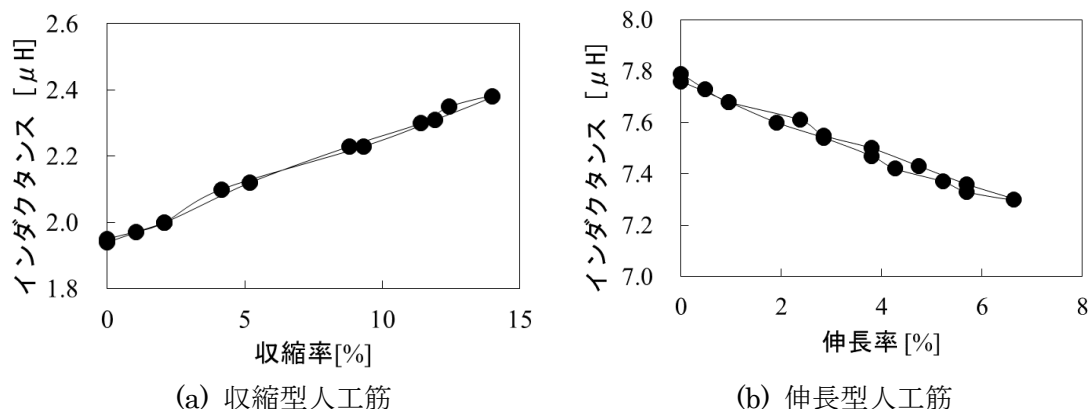


図7 人工筋の駆動量とインダクタンスの関係

(4) 結果

本研究では、製紐機を用いて導電性繊維をスリーブの一部とすることで、容易にセンサ機能付き人工筋を製作できることを示した。アクチュエータの構成要素である繊維がセンサ要素として機能することからシンプルな人工筋の制御系が構築できる。当初は導電性繊維の電気抵抗値変化を測定することで、人工筋の変位量が測定できるというアイデアで研究を実施したが、電気抵抗値変化は圧力に依存することが分かった。圧力センサとして機能することから、外部圧力センサや電空レギュレータを用いずチューブポンプのみで人工筋の圧力制御が実現できることを示した。

一方で、人工筋の変位量のセンシングはインダクタンスを計測することで可能である。エナメル線をスリーブ繊維として利用することで、人工筋の変位量が測定できることが確認できた。製紐機を用いて製作を行うことで、容易に繊維の編角を変更することが可能であり、収縮型・伸長型の変位センサ機能付き人工筋を実現することができた。

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

脇元修一・岡山大学大学院自然科学研究科・准教授

5. 研究実施時期

2016年(平成28年)年3月1日から 2018(平成30年)2月28日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

・後藤佳輔, 脇元修一, 三隅潤平, 新木遼平, 空圧スマート人工筋による拮抗駆動関節の制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2A1-C04, 2017.

- ・ Keisuke Goto, Shuichi Wakimoto, Jumpei Misumi, Ryohei Araki, Control of a robot arm with smart pneumatic artificial muscles, *The 7th International Conference on Machine Design and Tribology*, O-FR-5-E-5, 2017.
- ・ Kento Omura, Keisuke Goto, Shuichi Wakimoto, Takefumi Kanda, Development of Pneumatic Valves and a Fiber Sensor for a Smart Artificial Muscle, *16th International Conference on New Actuators*, P55, pp.567-570, 2018.
- ・ 小川草太, 脇元修一, 神田岳文, 大村健人, 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, 平成30年秋季フルードパワーシステム講演会, GA18052, pp. 4-6, 2018.
- ・ 小川草太, 脇元修一, 神田岳文, 大村健人, 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, 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, 3C3-12, pp. 2802-2804, 2018.
- ・ 小川草太, 脇元修一, 神田岳文, インダクタンス型スマート人工筋に関する論文を投稿予定.

7. 内外における関連研究の状況

近年、ソフトロボットの研究開発が世界中で行われてきており市販化されるシステムも現れている。より利便性の高いソフトロボットの実現に向けて人工筋のスマート化に関する研究も国内外で盛んに実施されている。その多くは、人工筋とは別に製作したセンサを人工筋に搭載するものとなっている。これに対して、本研究と同様に人工筋のスリーブ繊維をセンサ材料とする研究も実施されている¹⁾。しかしながら、手作業で繊維を編み込んでいるため、量産を行うことは困難である。本研究では、製紐機を用いることで、効率的にスマート人工筋を製作することが可能であり、また、収縮型・伸長型などを自由に設定できるという利点を有している。

1) Wyatt Felt, Khai Yi Chin, and C. David Remy: Contraction Sensing With Smart Braid McKibben Muscles, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRO-NICS, Vol. 21, No. 3, pp.1201-1209, 2016.

8. 今後の発展に対する希望

今後、スマート人工筋を用いたアプリケーションを開発し、スマート人工筋の有効性を示していきたい。また、本研究期間では、圧力センサ、変位センサを有する人工筋をそれぞれ開発したが、両センサ機能を有する人工筋の開発を実施したいと考えている。加えて、本研究を実施する中で、導電性繊維以外の機能性繊維によってもセンサ機能を付加できることが分かってきた。繊維種による特性の違い、利点・欠点を明らかにしながら、より利便性の高いスマート人工筋を開発していきたい。