

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	人工筋肉の三次元螺旋走行からなる円筒状多繊維筋構造メカニズムの試作
Title(English)	Prototyping of cylindrical structures made of helical artificial muscles
著者(和文)	平光立拓, 難波江裕之, 鈴森康一, 遠藤玄
Authors(English)	Tatsuhiro Hiramitsu, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, Gen Endo
出典(和文)	日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 862, p. 18-00083
Citation(English)	Transactions of the JAME (in Japanese), Vol. 84, No. 862, p. 18-00083
発行日 / Pub. date	2018, 6

人工筋肉の三次元螺旋走行からなる円筒状多繊維筋構造メカニズムの試作

平光 立拓^{*1}, 難波江 裕之^{*1}, 鈴木 康一^{*2}, 遠藤 玄^{*1}

Prototyping of cylindrical structures made of helical artificial muscles

Tatsuhiro HIRAMITSU^{*1}, Hiroyuki NABAE^{*1}, Koichi SUZUMORI^{*2} and Gen ENDO^{*1}

^{*1,*2}Tokyo Institute of Technology

2-12-1-11-60 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

Received: 10 February 2018; Revised: 19 April 2018; Accepted: 18 May 2018

Abstract

Pneumatic artificial muscles have many advantages. They have high force mass ratio, high compliance and simple structures. Especially, the flexibility contributes to compose novel mechanisms. The flexibility of pneumatic artificial muscles releases us from the spatially strict design required for rigid mechanical elements: it could actualize compact mechanisms made of a fewer parts. Our research group developed a thin McKibben actuator. The thin McKibben actuators is more flexible than conventional McKibben actuators. Authors succeeded in manufacturing novel soft mechanisms that are made of only braided artificial muscles. We aim to establish a design method for these novel mechanisms. We already have fabricated a cylindrical mechanism made of helical muscles. In this paper, we report a geometric model for the cylindrical mechanism. We focus on only deformation of a side surface in the coordinate system of muscles to simulate the movements of the cylindrical mechanism. The movement was verified by an experiment, and besides, it was simulated successfully in the geometric model that was created. The deformation of height and radius directions changed according to muscles alignment.

Keywords : Artificial muscle, Braided structure, Active textile, Pneumatic system, Soft mechanism

1. 緒 言

機械要素の特性は、設計思想・製造方法・挙動・使用方法といった、機械システムの様々な側面に影響を与える。そのため、従来にない特性を有する機械要素の出現は革新的な機械システムを生み出す原動力となることが期待できる。McKibben型人工筋肉に代表される空圧人工筋肉は、発生力/自重比の高さや高コンプライアンス、そして製作が容易であり安価であるといった特長を有している。特に、駆動方向・非駆動方向のどちらの場合においても確認される高いコンプライアンスは、機構を構成する際に非常に有用な特徴である。アクチュエータ自体が柔軟に変形するため、機械要素の取り付け位置を厳密に設計する必要性が低い。このため、アクチュエータをリンクなどの構造部材に取り付けるための他の部品の削減が可能であり、より簡素な構造の機構系の製作を容易にする。しかし、従来研究では高硬度のゴム材料からなる直径数十 mm の太さの McKibben 型人工筋肉を用いることが多く、空圧を印加した際には棒状に伸びた形状になることから、その要素配置は空圧シリンダを利用する際と同様に非常にかさばるものであった (Andrikopoulos et al., 2011)。

これまでに著者らは直径 4 mm 以下の細径 McKibben 型人工筋肉を開発している (Takaoka et al., 2013)。細径化

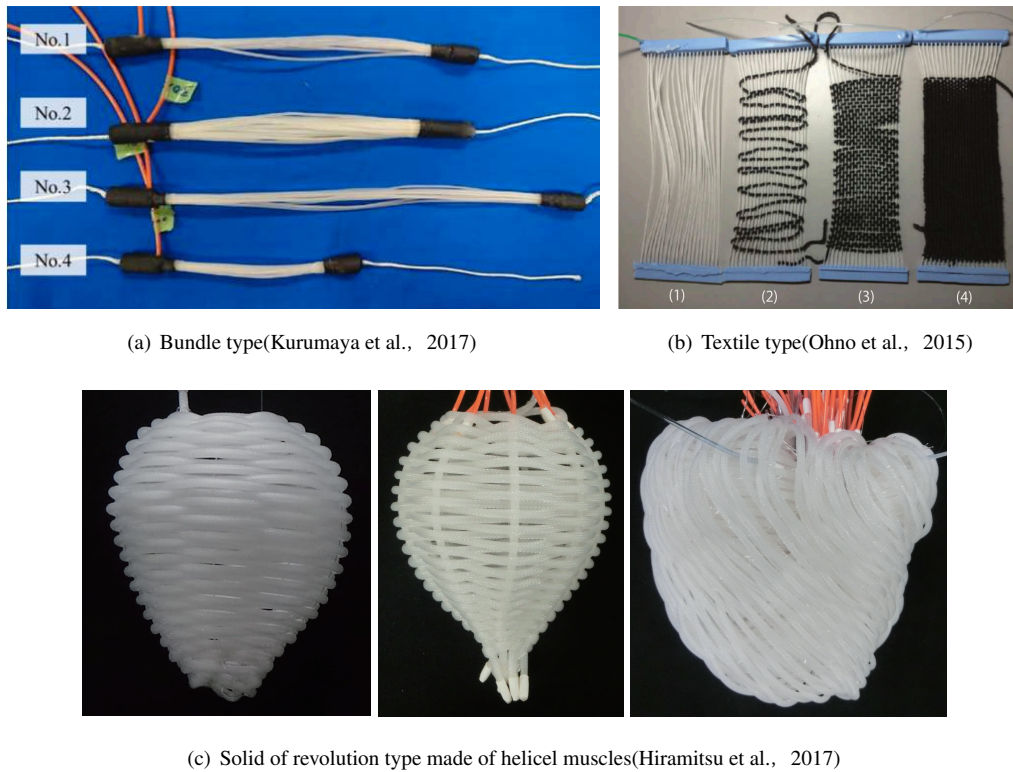
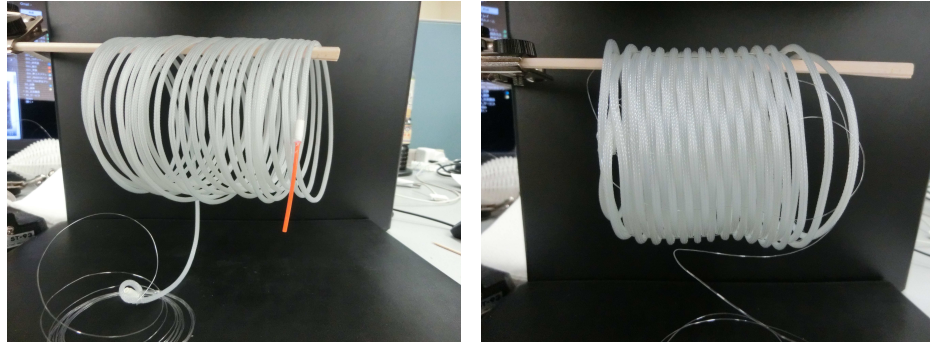


Fig. 1 Categorization of soft mechanisms made of multi filaments of artificial muscles.

によって、従来の McKibben 型人工筋肉より高い曲率での配置・動作が可能となり、これまでは実現が難しかった柔軟・多自由度の新規的なメカニズムの構築が可能となった。先行研究では、局所に人工筋肉を集積して配置することで、メカニズムの構造および挙動に柔軟さを取り入れることを検討してきた。また、Funabora はシート上に多数の細径人工筋肉を配置することで、人の様々な動きに合致するメカニズムを試作している (Funabora, 2017)。本研究では、柔軟な人工筋肉が多数集積したメカニズムを多繊維筋構造ソフトメカニズムと呼称し、新たなソフトメカニズムの形態として提案する。従来の機構と比べて、駆動自由度に対して超冗長な数のアクチュエータを用いる点、機械要素間の拘束が厳密でなくともよい点、アクチュエータの主たる駆動方向以外の働きを利用する点が異なり、単一要素の組み合わせによって多種多様な構造および機能の発現を目指す。

これまでにいくつかの異なる形態の多繊維筋構造ソフトメカニズムが製作されている。まず挙げられるのは図 1(a) に示す筋繊維を束ねた形態である (Kurumaya et al., 2017)。従来型のエアシリンダや人工筋肉と同様に扱うことが可能な収縮アクチュエータであるが、より曲がった状態での配置が可能であり、コンパクトな機構の実現に有効である (Kurumaya et al., 2016)。次に挙げられるのは図 1(b) に示すような織布状の形態である。布などの繊維を組み合わせた構造は、少ない種類の素材を用いつつも、画一的に多様な柔軟構造を製作することが可能であり、この特長をメカニズムの構築に取り入れることが狙いである。大野らは、基本的な織布構造である平織りの縦糸あるいは縦糸横糸双方を人工筋肉として編組したものについて、繊維密度を変化させた際の駆動特性の変化を実験的に検討しており (Ohno et al., 2015)、外骨格をほとんど用いないパワーアシストスーツに応用している (大野他, 2015)。平織り以外の織布については、サディチらはニット状の織布を、車谷らは三つ編みを発展させた織布を検討している (サディチ他, 2015)(車谷他, 2015)。筆者は、これら布状構造の立体への拡張として、中空の回転体形状を試作しており、更にこれを組み合わせた複雑な構造についても検討している (図 1(c))(平光他, 2017)。

本稿では、1) 三次元螺旋状に編組した人工筋肉からなる円筒状の多繊維筋構造ソフトメカニズムを対象とする、2) 対象の多繊維筋構造ソフトメカニズムに外力は加わらない、3) 圧力の印加は一つの電磁弁を用いて全ての筋繊維に均一に行う、という条件下で多繊維筋構造ソフトメカニズムのモデル化を行う。また、実際に製作した試作機との比較を行うことでモデルの妥当性を検証する。



(a) Step 1: Disposing muscles helically

(b) Step 2: Braiding muscles and wires

Fig. 2 Production flow.

2. 主な記号

本稿で扱う多繊維筋構造ソフトメカニズムは、細径人工筋肉とナイロンワイヤの二種の繊維を編みこんだ構造をもつ。以後本稿では、この二種の繊維をそれぞれ「筋繊維」「ワイヤ」と呼称する。以下に、本稿で扱う主要な記号をまとめる。

l	: 筋繊維軸方向の長さ
d	: 筋繊維の直径
p	: 印加圧力
ε_l	: 筋繊維の収縮率
ε_d	: 筋繊維の膨張率
ϕ	: 筋繊維の走行角度 (リード角)
$\bar{\phi}$: ワイヤの走行角度 (リード角)
m	: 筋繊維の本数
R	: 螺旋の半径
Z	: 螺旋の軸方向長さ
ψ	: 円筒構造の捻れ角

各変数の添え字 0 はその変数の初期値を意味する。

3. 円筒状多繊維筋構造ソフトメカニズム

3.1 製作方法

円筒状多繊維筋構造の製作方法について述べる。回転体状の多繊維筋構造ソフトメカニズムは、 m 本の細径人工筋肉を三次元螺旋状にした (図 2(a)) 後、径を変化させながら、交差するように他の繊維を編む (図 2(b)) ことによって製作される。本稿で扱う円筒構造は、細径人工筋肉とナイロンワイヤの二種の繊維を互いに逆巻きの三次元螺旋状にし、平織りの要領で編組することで製作されている (図 3)。細く滑らかなナイロンワイヤを用いることによって、細径人工筋肉を密集させつつも、ワイヤの長手方向を除いてほとんど拘束することなく形状を保つことができる。

3.2 細径人工筋肉の特性

本稿で扱う多繊維筋構造ソフトメカニズムに用いた細径人工筋肉の構造ならびに駆動特性について説明する。使用した細径人工筋肉の外観を図 4 に示す。この人工筋肉は、外径約 3 mm の McKibben 型人工筋肉であり、直径 2 mm 硬度 40 のシリコンゴムチューブが直径 0.16 mm のテトロンモノフィラメントを編みこんだスリーブで覆われた構造になっている (Takaoka et al., 2013)。スリーブ編み角は 19° 、打ち数は 32 打ちである。1 m あたりの



Fig. 3 Muscle layout of cylindrical mechanism is helical. A red string is a thin McKibben muscle.

質量は 3.4 g であり，極めて軽量である．

今回使用する人工筋肉の駆動特性を図 5 に示す．本人工筋肉は圧力を印加することによって，径方向に膨張し，軸方向に収縮する．このとき，収縮率・膨張率は人工筋肉の長さには依らない．人工筋肉の特性のモデル化に当たり，試作機の表面の筋繊維の駆動の様子を撮影・画像解析し，得られたデータをもとに有理関数近似することで，編組時における筋繊維の駆動率の実験式を得た．ただし，前述の通り本稿では，多繊維筋構造ソフトメカニズムには外力が加わらない条件で議論を進めており，人工筋肉の動きを拘束するものは何もないため，人工筋肉の力学的特性は考慮していない．得られた実験式について，収縮率を式 (1)，膨張率を式 (2) で表す．

$$\varepsilon_l = \frac{\sum_{k=1}^3 A_k p^k}{100 \sum_{k=1}^3 B_k p^k} \quad (1)$$

$$\varepsilon_d = \frac{\sum_{k=1}^3 C_k p^k}{100 \sum_{k=1}^3 D_k p^k} \quad (2)$$

ただし，信頼限界を 95% として得られた近似式の各係数 A_k , B_k , C_k , D_k [MPa^{-k}] は以下の通りである．

$$\begin{cases} A_0 = 33.74 \\ A_1 = 2.966 \\ A_2 = -41.14 \\ A_3 = 165.9 \\ B_0 = 269.7 \\ B_1 = -648.8 \\ B_2 = 445.4 \\ B_3 = 1 \end{cases} \quad \begin{cases} C_0 = -307.7 \\ C_1 = 112000 \\ C_2 = -50590 \\ C_3 = 0 \\ D_0 = 3219 \\ D_1 = -3886 \\ D_2 = 1 \\ D_3 = 0 \end{cases}$$

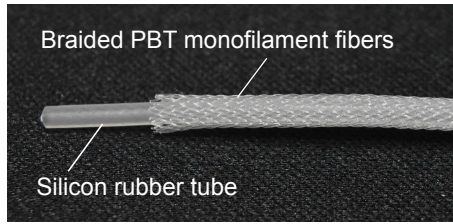


Fig. 4 Construction of a thin McKibben muscle. A muscle consists of two layers: a rubber tube and a sleeve made of braided fibers.

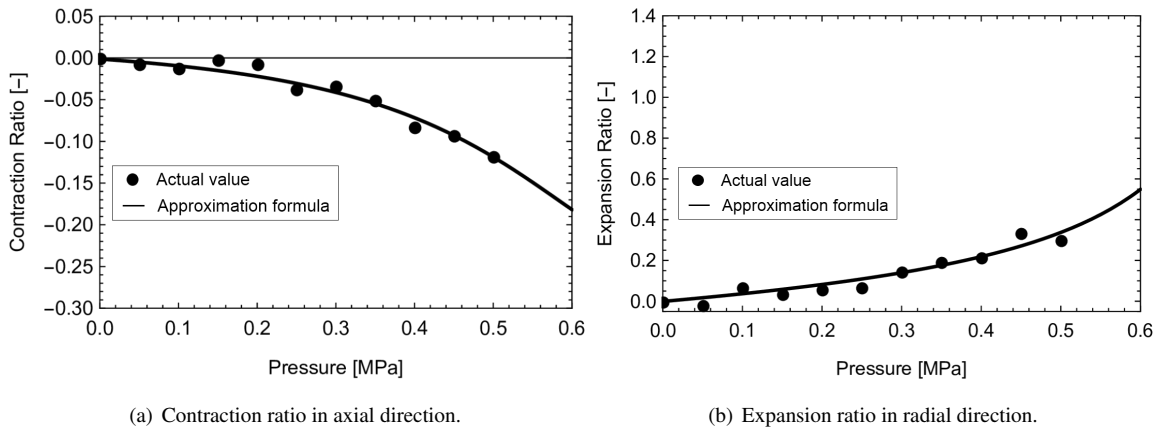


Fig. 5 Driving characteristics of a thin McKibben muscle. The diameter is 3 mm.

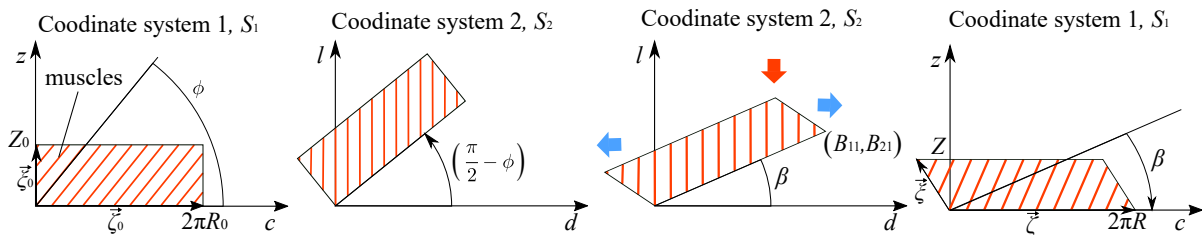


Fig. 6 Calculation method of cylindrical structure made of muscles and cords

4. 形状モデル

本章では、三次元螺旋状に筋繊維を編組した円筒構造の変形をあらわす形状モデルについて述べる。円筒構造の側面を展開して考えるとき、その側面形状は図 6 左に示すような矩形であり、表面を走行角度 ϕ で筋繊維が平行に走行する(図中、赤線)。ただし、筋繊維は右巻きとする。

円筒構造側面を円筒の周長方向 (c) と高さ方向 (z) の二つの座標軸上のベクトルで表す。この座標系を $S_1(c, z)$ とする。二つのベクトルが始点を同じくするとき、円筒構造側面の形状を表す行列 \mathbf{A} をそれぞれのベクトル $\boldsymbol{\zeta}$, $\boldsymbol{\xi}$ を列要素とする 2×2 のマトリクスで定義する(式 (3))。特に、初期形状 \mathbf{A}_0 は式 (4) で表される。

$$\zeta = \begin{bmatrix} \zeta_c \\ \zeta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\pi R \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_c \\ \xi_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R\psi \\ Z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = [\zeta, \xi] \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_0 = [\zeta_0, \xi_0] = \begin{bmatrix} 2\pi R_0 & 0 \\ 0 & Z_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

筋繊維の走行角度 ϕ が変化しないとすると、筋繊維の径方向・軸方向の座標軸を持つ座標系 $\mathbf{S}_2(d, l)$ において、筋繊維の径方向ならびに軸方向の変形はそれぞれ d 軸方向、 l 軸方向のみに影響する。前述したように、筋繊維は印加圧力 p に応じて径方向に膨張すると同時に軸方向に収縮する。このとき、座標系 \mathbf{S}_2 における、筋繊維の長さ l 、直径 d は行列 \mathbf{S} を用いて式 (5) で示される。ただし、行列 \mathbf{S} は式 (6) で表される。また、添え字 0 は初期値を示し、駆動率 ε の添え字 l 、 d はそれぞれ長さ方向、径方向を表している。特に長さ方向駆動率 ε_l を収縮率、径方向駆動率 ε_d を膨張率と呼ぶ。

$$\begin{bmatrix} d & 0 \\ 0 & l \end{bmatrix} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} d_0 & 0 \\ 0 & l_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 + \varepsilon_d & 0 \\ 0 & 1 + \varepsilon_l \end{bmatrix} \quad (6)$$

座標系 \mathbf{S}_2 における、筋繊維が変形した際の形状行列 \mathbf{B} は式 (7) で表される。ただし、 \mathbf{R} は二次元の回転行列である。

$$\mathbf{B} = \mathbf{SR} \begin{pmatrix} \pi \\ 2 \end{pmatrix} - \phi \mathbf{A}_0 \quad (7)$$

式 (8) に示すように、角度 β で時計回りに回転させることで、座標系 \mathbf{S}_2 における形状行列 \mathbf{B} を座標系 \mathbf{S}_1 における形状行列 \mathbf{A} へ変換する。ただし、行列 \mathbf{B} の i 行 j 列の要素を B_{ij} として表すとき、角度 β は式 (9) で示される。

$$\mathbf{A} = \mathbf{R}(-\beta)\mathbf{B} \quad (8)$$

$$\beta = \arctan \frac{B_{21}}{B_{11}} \quad (9)$$

以上のモデルによって、行列 \mathbf{A} の i 行 j 列の要素を A_{ij} として表すとき、円筒構造の初期半径、初期高さおよび筋繊維の走行角度をもとに、円筒構造の半径 R 、高さ Z 、捻れ角 ψ は式 (10)~ 式 (12) で求められる。

$$R = \frac{A_{11}}{2\pi} \quad (10)$$

$$Z = A_{22} \quad (11)$$

$$\psi = \frac{A_{12}}{(-R)} = -2\pi \frac{A_{12}}{A_{11}} \quad (12)$$

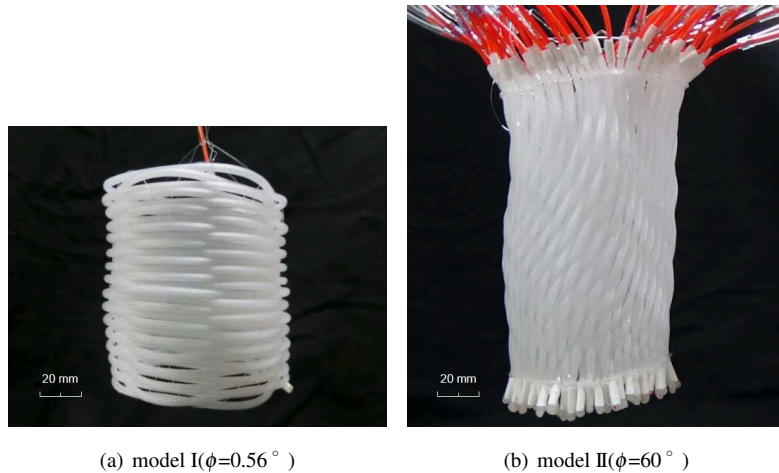


Fig. 7 Two examples of cylindrical mechanisms.

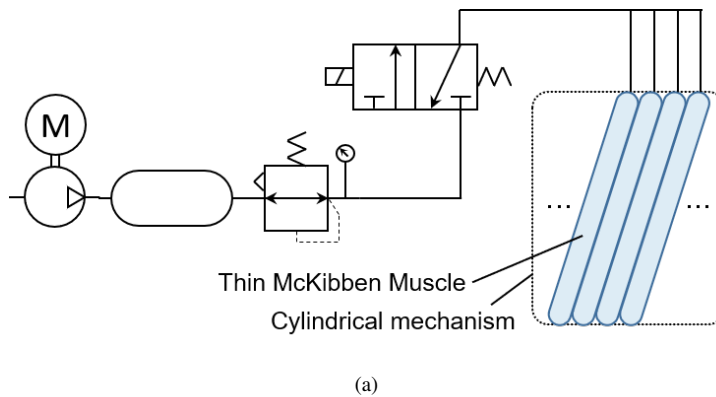


Fig. 8 Schematic diagram pneumatic system

5. 試作機を用いた検証

この円筒構造は三次元螺旋状に走行する筋繊維によって構成されており、その挙動には筋繊維の走行角度 ϕ が最も大きな影響を与える。試作機として筋走行角度が異なる二種類の円筒構造を用意し、駆動実験ならびに作成した形状モデルとの比較を行った。円筒構造を上端部に取り付けたワイヤによって吊り下げ、圧力 p を印加し、駆動の様子を観察した。ただし、大気圧の状態から電磁弁の開閉によって各圧力を印加した。実験に用いた円筒構造 model I, model II について外観ならびにパラメータをそれぞれ図 7, 表 1 にまとめる。また、実験に用いた空圧システムの模式図を図 8 に示す。

円筒構造 model I および model II について、半径 R および高さ Z の実験値と計算値を比較したものを図 9 に示す。この円筒構造は三次元螺旋状に編組された筋繊維の走行角度によって、円筒の径方向ならびに高さ方向の変形の向きが変化する。すなわち、筋繊維の走行角度が小さな model I では駆動時に半径が減少し、高さは増加するが、筋繊維の走行が高さ方向になっている model II では反対に半径が増加し、高さが減少した。この増減傾向は実測値と計算値の全ての範囲において合致した。

実験値と計算値の平均二乗誤差の各初期値 R_0, Z_0 に対する割合を表 2 にまとめる。実験値と計算値は 7% 以内の誤差範囲で一致した。半径 R と比較して高さ Z の誤差の割合は大きく、図 9(b) から計算値から下方に外れていることが判る。これは、提案した形状モデルでは筋繊維の変形を円筒側面上で起きるものとしているのに対して、試作機では織布状に編組された繊維が織布構造の厚さ方向にずれ動くことが影響している。繊維が織布構造の中で変形し動くことで、筋繊維が高さ方向に整列していない状態となり、高さの変形量が積層している筋繊維の膨張変形の総和よりも小さな値となる。

Table 1 Physical properties of air at atmospheric pressure.

	$m[-]$	$R_0[\text{mm}]$	$Z_0[\text{mm}]$	$\phi_0[^\circ]$	$\bar{\phi}_0[^\circ]$
model I	1	37.9	83.5	0.56	90
model II	72	36.0	128.5	60	60

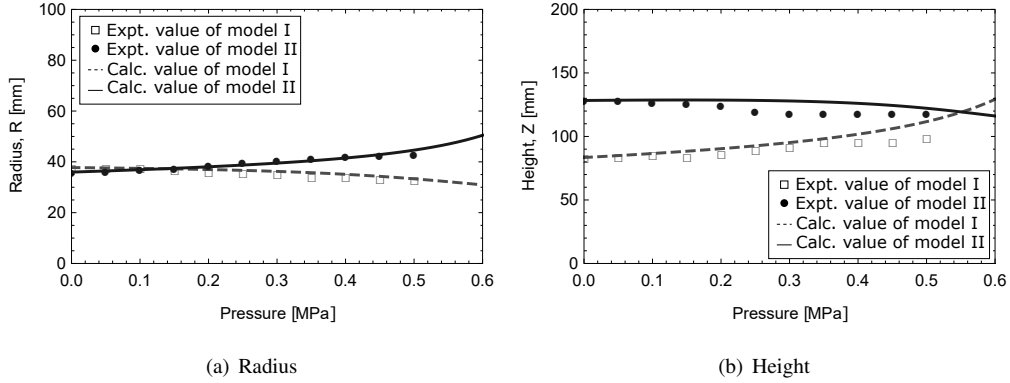


Fig. 9 Deformation of prototypes.

Table 2 Ratio of root mean squared errors between calculation values and experimental values to initial values.

	Radius in radical direction[%]	Height in axial direction[%]
model I	2.0	6.8
model II	2.2	4.8

6. 結 言

本稿では、人工筋肉繊維を多数集積したソフトメカニズムのうち、基本的な立体形状である円筒構造について、解析用の簡易形状モデルを提案し、試作機と比較した。この円筒構造は三次元螺旋状にした細径人工筋肉とナイロンワイヤを平織り状に編組することで製作した。提案した形状モデルは、円筒構造を単純な円筒状のシェルとして考え、この側面形状が筋繊維の径ならびに軸方向に変形することのみを考慮する非常に単純化されたものである。

筋繊維の走行角度によって円筒構造の変形が変化することを試作機で確認し、形状モデルにおいても合致する結果を得た。筋繊維走行角度が 0.56° の円筒構造は印加圧力を増加するに応じて、径は減少、高さは増加した。筋繊維走行角度が 60° の円筒構造は印加圧力を増加するに応じて、径は増加、高さは減少した。平均二乗誤差を算出し、実験値と計算値の合致度を確認した。円筒半径方向では非常に高い合致度を示した一方で、円筒高さ方向では全領域で計算値より実験値が低い結果となった。これは、筋繊維の変形が円筒側面上のみで起きるものとするモデルに対して、試作機では織布状に編組された繊維が織布構造の厚さ方向にずれ動くことが影響している。

以上の結果から、非常に簡素なモデルを用いて多数の筋繊維からなるメカニズムの動作を再現することができることを明らかにした。また一方で、詳細な織布構造の動作を無視したことにより生じる、実際のメカニズムの駆動との差異を実験的に確認した。

謝 辞

本研究は、科研基盤 (A) 「次世代マッキベン人工筋の実現」 (26249028) を受けて実施した。

文 献

- Andrikopoulos, G., Nikolakopoulos, G. and Manesis, S., A survey on applications of pneumatic artificial muscles, 19th Mediterranean Conference on Control and Automation(2011), pp.1439–1446, DOI:10.1109/MED.2011.5982983.
- Funabora, Y., Prototype of a fabric actuator with multiple thin artificial muscles for wearable assistive devices, 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration(2017), TuE4.1.

- 平光立拓, 鈴森康一, 難波江裕之, 遠藤玄, 細径人工筋肉群による心臓状ソフトメカニズムの試作, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2017(2017), DOI:10.1299/jsmermd.2017.1A1-I07.
- 車谷駿一, 鈴森康一, 難波江裕之, 三つ編み構造に基づく細径マッキベン人工筋の織布化, 第16回システムインテグレーション部門講演会 (2015), pp.0620–0622.
- Kurumaya, S., Nabae, H., Endo, G. and Suzumori, K., Design of thin McKibben muscle and multifilament structure, *Sensors and Actuators A* 261(2017), pp.66–74, DOI:10.1016/j.sna.2017.04.047.
- Kurumaya, S., Suzumori, K., Nabae, H. and Wakimoto, S., Musculoskeletal lower-limb robot driven by multifilament muscles, *Robomech Journal*(2016), 3:18, DOI:10.1186/s40648-016-0061-3.
- Ohno, A., Yamamoto, Y., Oguro, M. and Suzumori, K., Comparison in characteristics of textile woven by thin pneumatic artificial muscle, *Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Mechatronics*(2015), pp.43–44, DOI:10.1299/jsmeicam.2015.6.43.
- 大野晃寛, 鈴森康一, アイバークサディチ, 細径空圧人工筋肉を用いた能動織布およびウェアラブルスーツの試作, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2015(2015), DOI:10.1299/jsmermd.2015.1A1-O09_1.
- アイバーク=サディチ, 大野晃寛, 鈴森康一, Development of a human trunk exoskeleton with pneumatic artificial muscles, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2015(2015), DOI:10.1299/jsmermd.2015.1A1-P01_1.
- Takaoka, M., Suzumori, K., Wakimoto, S., Iijima, K. and Tokumiya, T., Fabrication of thin McKibben artificial muscle and their experimental evaluations, *Proceedings of The 5th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology*(2013), p.21.

References

- Andrikopoulos, G., Nikolakopoulos, G. and Manesis, S., A survey on applications of pneumatic artificial muscles, 19th Mediterranean Conference on Control and Automation(2011), pp.1439–1446, DOI:10.1109/MED.2011.5982983.
- Funabara, Y., Prototype of a fabric actuator with multiple thin artificial muscles for wearable assistive devices, 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration(2017), TuE4.1.
- Hiramitsu, T., Suzumori, K., Nabae, H. and Endo, G., Trial manufacture of heart-mimetic soft mechanism, *Proceedings of the 2017 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*(2017), DOI:10.1299/jsmermd.2017.1A1-I07(in Japanese).
- Kurumaya, S., Suzumori, K. and Nabae, H., Active textile woven into plaits with thin McKibben muscles, *Proceedings of the 16th SICE System Integration Division Annual Conference*(2015), pp.0620–0622(in Japanese).
- Kurumaya, S., Nabae, H., Endo, G. and Suzumori, K., Design of thin McKibben muscle and multifilament structure, *Sensors and Actuators A* 261(2017), pp.66–74, DOI:10.1016/j.sna.2017.04.047.
- Kurumaya, S., Suzumori, K., Nabae, H. and Wakimoto, S., Musculoskeletal lower-limb robot driven by multifilament muscles, *Robomech Journal*(2016), 3:18, DOI:10.1186/s40648-016-0061-3.
- Ohno, A., Yamamoto, Y., Oguro, M. and Suzumori, K., Comparison in characteristics of textile woven by thin pneumatic artificial muscle, *Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Mechatronics*(2015), pp.43–44, DOI:10.1299/jsmeicam.2015.6.43.
- Ohno, A., Suzumori, K. and Sadic, A., Fabrication of active textile woven and wearable suit using thin pneumatic artificial muscle, *Proceedings of the 2015 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*(2015), DOI:10.1299/jsmermd.2015.1A1-O09_1(in Japanese).
- Sadic, A., Ohno, A. and Suzumori, K., Development of a human trunk exoskeleton with pneumatic artificial muscles, *Proceedings of the 2015 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*(2015), DOI:10.1299/jsmermd.2015.1A1-P01_1(in Japanese).
- Takaoka, M., Suzumori, K., Wakimoto, S., Iijima, K. and Tokumiya, T., Fabrication of thin McKibben artificial muscle and their experimental evaluations, *Proceedings of The 5th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology*(2013), p.21.