

令和5年度

卒業研究報告書

題 目

細径空圧筋を用いた 外骨格生物模倣ロボットの開発

Development of an Exoskeletal Biomimetic Robot
Using Thin Pneumatic Muscles

SDGs目標番号: 9

学生氏名 (学籍番号)

長谷川侑大 (D1927)

指導教員

中西大輔

電子制御工学科

概要

McKibben 型空気圧人工筋 (McKibben Pneumatic Actuator, 以下 MPA) は圧縮空気を入力することで収縮し、自身の軸方向への張力を発生させるアクチュエータであり、近年では直 径数 mm の細径 MPA が注目されている。細径 MPA は生体筋に似た特性を持ち、筋骨格系ロボットや生物模倣ロボットに用いられてきた。一方、甲殻類や昆虫を模した外骨格を有する生物模倣ロボットでは、外骨格内部へのアクチュエータの配置が困難なため、主にワイヤ駆動やサーボモータを使用したものが主流であったが、実際の生物の構成と相違点が出てきてしまう問題点があった。本研究では細径 MPA を用いた外骨格生物模倣ロボットの開発を提案し、蟹をモデルにした歩脚ロボットの開発に取り組む。それに向けて本論文では蟹の構成や筋構造について実際にズワイガニを解剖し得られた知見を基に、細径 MPA を用いた羽状筋および歩脚ロボットの開発をし動作実験を行い長節から指節までの節の開閉動作を確認した。

Abstract

The McKibben Pneumatic Actuator (MPA) is an actuator that contracts when compressed air is applied to it, generating tension in its own axial direction. Recently, thin MPAs with a diameter of a few millimeters have been attracting attention. On the other hand, biomimetic robots with exoskeletons that mimic crustaceans and insects have mainly used wire drives and servo motors due to the difficulty of placing actuators inside the exoskeleton, but there are some differences from actual biological structures. In this study, we propose the development of an exoskeleton bio-mimetic robot using a thin MPA, and work on the development of a walking leg robot modeled after a crab. Based on the knowledge obtained from the dissection of a snow crab, we developed a gait robot using thin MPA and its winged muscles, and conducted movement experiments to confirm the opening and closing of the joints from the long segment to the phalanges.

目 次

1 緒言	1
2 先行研究の内容	2
2.1 McKibben 型空気圧人工筋肉アクチュエータ (MPA)	2
2.2 細径 MPA	2
2.3 先行研究の成果と課題	3
3 モデル生物の構成および筋構造	5
3.1 使用したモデル生物	5
3.1.1 外骨格	5
3.1.2 羽状筋	5
3.1.3 蟹の関節の可動域	6
3.2 外骨格の設計方法	7
3.2.1 外骨格の寸法	7
3.2.2 機体の可動域計算に用いた簡易モデル	7
3.2.3 3次元 CAD を用いた設計	7
4 細径 MPA を用いた歩脚ロボットの開発	8
4.1 羽状筋再現方法	8
4.1.1 細径 MPA 作製方法	8
4.1.2 細径 MPA 締結方法の改善	10
4.1.3 細径 MPA 収縮率の向上	10
4.1.4 羽状角の自由度の再現	10
4.2 作製した機体	10
4.2.1 機体の構成および寸法	10
5 動作実験	12
5.1 実機の動作確認	12
5.2 実験結果	12
5.3 考察	12
6 結言	13
謝辞	14
参考文献	15

1 緒言

McKibben 型空気圧人工筋 (McKibben Pneumatic Actuator, 以下 MPA) は圧縮空気を入力することで収縮し、自身の軸方向への張力を発生させるアクチュエータである [1]. 従来は直徑が数十 mm 程度の MPA を用いたロボットに関する応用研究が盛んに行われてきたが、近年では直徑が数 mm 程度の細径 MPA が注目を集めている [2]. 細径 MPA は従来のものより細くしなやかであり生体筋に似た特徴から小さな筋肉、あるいは集積によって単純な紡錘型以外の筋肉を表現可能なため、筋骨格系ロボットや生物模倣ロボットなどに盛んに用いられてきた [3] [4].

一方で甲殻類や昆虫などを模した外骨格生物模倣ロボットに関しては外骨格内部へアクチュエータを配置することが困難なことから、ワイヤ駆動や関節にサーボモータを配置したもの [5] が主流となっている. このようなロボットは外骨格生物の外形こそ再現できているものの、実際の生物の構成や駆動原理からして異なる. また「構成要素が外骨格内にすべて納まっている」という外骨格ならではのメリットも、実現できているとは言い難い. これに対して前述の細径 MPA は、その細さやしなやかさから細長い外骨格内部に配置可能であり、また集積することで実際の生物のような羽状筋も表現することが可能である [6].

そこで本研究では細径 MPA を用いた外骨格生物模倣ロボットの開発を提案する. 本稿では初期段階として、外骨格生物のなかでも甲殻類の蟹をモデル生物として設定し、この歩脚を模倣したロボットの開発に取り組む. まず先行研究 [7] で作製された歩脚ロボットにおける課題点を解説する. 先行研究で用いられた細径 MPA 作製方法は煩雑かつ時間と練度が必要、細径 MPA の収縮性能が低いことと羽状筋の細径 MPA の根元の角度が固定されていて腱の引き込みを妨げている課題が見られた. そこで本研究では、先行研究で行われた実際の蟹の解剖によって得られた知見と寸法、および前述した課題点などをもとに改良した外骨格と細径 MPA を用いた羽状筋を開発する. その後、改良した外骨格と羽状筋を用いて作製した歩脚ロボットの動作実験を行う.

本論文の構成は以下の通りである. まず 2 章では、本研究で用いる細径 MPA に関する特徴と先行研究について述べてから、本研究で開発に成功した細径 MPA の作製方法を紹介する. 次に 3 章では、本研究でモデル生物として扱う蟹の構成と筋構造について実際にズワイガニを解剖して得た知見などを基に述べる. 最後に 4 章では模倣ロボットを作製するにあたって集積細径 MPA を用いた羽状筋の開発について述べたのち、ズワイガニをモデルにした歩脚ロボットの開発とその動作実験について述べる.

2 先行研究の内容

2.1 McKibben型空気圧人工筋肉アクチュエータ (MPA)

MPAはシリコンゴムチューブをナイロンメッシュで覆うことで構成されており(図1(a)),両端に栓をするシンプルな構造である。これに圧縮した空気を印加することでシリコンゴムチューブが膨張しメッシュによる自身の軸方向への張力が発生するアクチュエータである(図1(b))。高出力かつ素材自体も軽量で、物理的柔軟性による高い弾性力を持つという利点があり、筋肉の代用として生物を模したロボットやリハビリなどに用いられる。しかし図1に示すような従来の直径数十mmのMPAは膨張時の径の拡大が大きいため配置の際は膨張を阻害しないような配置や直線形状で駆動するような取り付け方が求められ、取り付けの位置や密度に制限がある。

2.2 細径MPA

本研究で用いる細径のMPAについて説明する。図2に本研究で開発に成功した外径5mmと3mmの細径MPAと外径12mmの従来のMPAを示す。細径化には下記のような利点があると考えられている[2][9]。

1. 非常にしなやかな人工筋となり座屈することなく任意形状での配置や集積が可能
2. 集積化により収縮量を増大させることが可能
3. 集積化により冗長性を持ちシステムの安全性が向上

MPAの収縮力は断面積に比例するため、細径MPAは従来のものに比べると発生する張力は小さいものの、細くしなやかであり任意形状での配置や集積化が可能である。生体筋と柔らかさや動作が似ていることから、紡錘状に集積し筋骨格系ロボット(図3(a))へ応用したり、生物模倣ロボットとしてタコ腕模倣メカニズム(図3(b))も開発されており、曲げ動作やねじり動作を実現している[4]。



(a) MPA 断面図



(b) MPA 外観および動作の様子

図1: McKibben型空気圧人工筋(MPA)の構成および外観[8]



図 2: MPA の外径の比較(左から 12, 5, 3 mm)

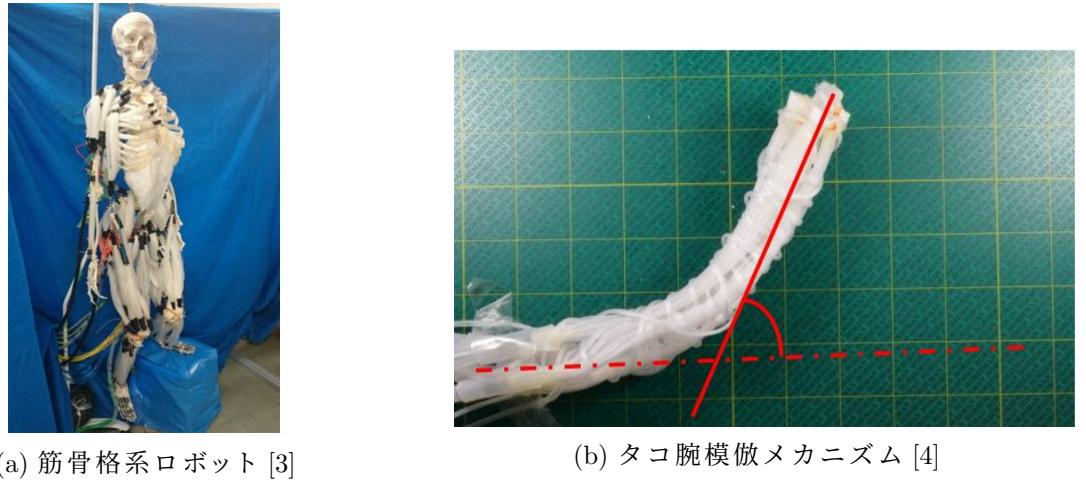


図 3: 細径空圧筋を用いたロボット

2.3 先行研究の成果と課題

先行研究では図 4 [7] のような歩脚ロボットの作製に成功した。このロボットでは図 5 [7] のように細径 MPA を用いて蟹の羽のような筋肉である羽状筋と呼ばれる筋肉を再現することができた。このロボットで動作実験を行い図 6 [7] のように開閉動作をすることを確認することができた。しかし、以下のような課題点が見つかった

1. 細径 MPA の作製方法が煩雑で時間がかかってしまい、成功させるのに技術が必要
2. 細径 MPA の収縮性能が低くて、腱が少ししか引き込めなかった
3. 細径 MPA の根元部分の角度が固定されていて、腱を引き込む妨げになっていた

そこで本研究では、上記のような先行研究で見つかった課題点を解決した歩脚ロボットの作製に取り組む。

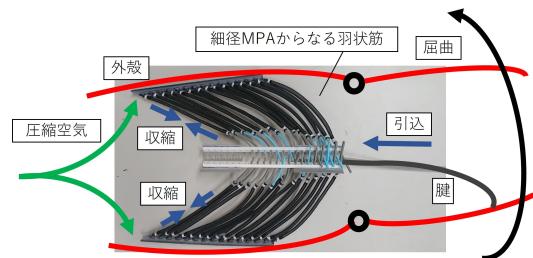
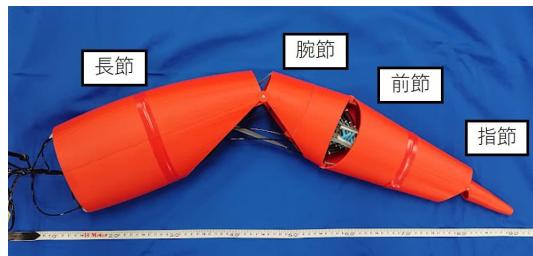
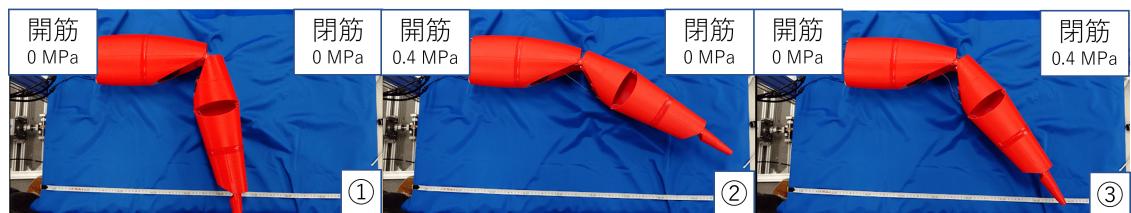


図 4: 先行研究で作製された歩脚ロボット [7] 図 5: 先行研究で開発された羽状筋 [7]



(a) 長節-腕節間の動作 [7]



(b) 腕節-前節間の動作 [7]

図 6: 動作実験

3 モデル生物の構成および筋構造

3.1 使用したモデル生物

3.1.1 外骨格

内骨格と外骨格の筋肉の付着の仕方を簡易的に示したものを図7に示す。我々人間などの脊椎動物の骨のように身体の内部にあり筋肉の付着点となり、身体を支持する骨格を内骨格という。それに対して本研究で扱う外骨格は身体を外側から覆い、体を支持し、内部を保護しつつ、筋肉の付着点となる硬い構造のことで甲殻類の外殻などが当てはまる。外骨格は外敵からの防御にも重要な役割を果たしている反面、硬くて重い外骨格は身体の屈曲性や可動性を阻害することが多いが、甲殻類、昆虫類などは外骨格に多数の関節を持つため運動性に優れている。しかし身体は完全に外骨格で覆われており成長が妨げられるため定期的に脱皮を行うことで身体を大きくしている。

3.1.2 羽状筋

蟹の脚の筋肉について、蟹の脚内部を充填する筋繊維の一端は節の内壁に付着し、もう一方は腱と呼ばれる組織、いわゆる蟹のすじに付着する。腱は隣の関節の端に繋がっており、筋繊維が収縮することによって腱が引っ張られ節が開閉する。先行研究でズワイガニを解剖した際に記録した長節-腕節間の腱の様子を図9に示す。図9の左側が筋肉が伸展、右側が収縮した状態。収縮中、羽状筋の角度は 27 deg から 41 deg に増加し、腱は距離 d を移動する。各筋繊維は短く太くなるが、筋全体の幅 w は変化しないことを表している。解剖結果よりズワイガニの腱は節間膜と一体になるように挿入されていることが分かった([7])。筋繊維は腱に対して斜めに充填されており、このように配置された筋繊維を羽状筋という。羽状筋の動きの模式図を図10に示す。羽状筋には2つの利点があるとされている。1つ目は収縮しても膨張せず、羽状筋の角度が大きくなるだけなので限られた狭い空間で働くのに適していること、2つ目は同じ形状と体積の平行筋と比べ収縮時に約2倍の力を発揮することが出来ることである[10]。

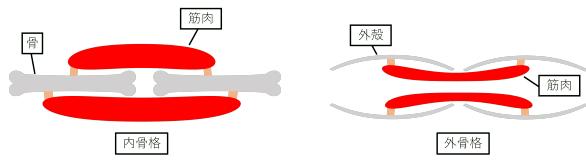


図7: 内骨格と外骨格

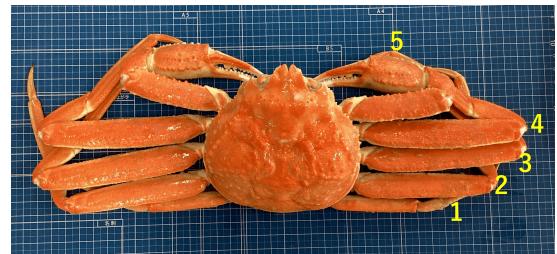


図8: 解剖に用いたズワイガニ [7]

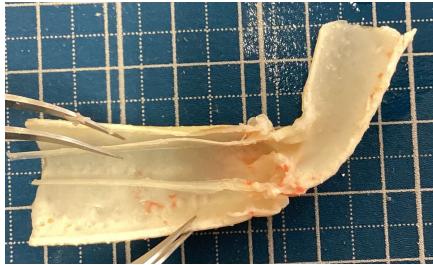


図 9: 腱の様子 [7]

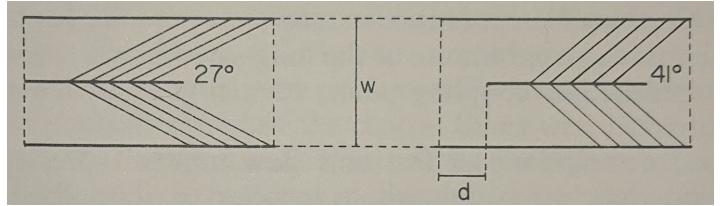


図 10: 羽状筋の動きを模式的に表したもの [10]



図 11: 可動域の測定の様子

表 1: 第 4 肢の節間の可動域

	可動域 [deg]
長節-腕節間	0-140
腕節-前節間	0-45
前節-指節間	0-89

3.1.3 蟹の関節の可動域

実際の蟹の可動域を先行研究では解剖を行い測定した。解剖には甲殻類の十脚目短尾下目ケンガニ科のズワイガニを用いた。測定している様子を図11に示す。測定方法は、可動域を測定したい関節の軸を分度器の中心に合わせる。その時に関節の身体側の節の中心を 180° の線に合うように配置する。そして蟹の脚で開閉動作を行い、脚先側の節の中心が閉じた状態と開いた状態での角度をそれぞれ測定してそれらを可動域とした。なお、本研究では図8中の4と書かれている下から4番目の節(第4肢)の可動域のデータを用いて機体を作製する。第4肢の可動域を上に示す。

3.2 外骨格の設計方法

3.2.1 外骨格の寸法

本研究で作製する歩脚ロボットは先行研究で行われた蟹の解剖の際に測定された寸法をもとに設計した。測定された寸法を以下の表に示す。本研究では第4肢をモデルにして歩脚ロボットを作成する。なお、歩脚ロボットは外骨格内部へアクチュエータの配置が困難なことから長節、前節、指節では実測値に対して直径方向に7倍、直角方向には3.5倍、腕節は他の節より長手方向のみ5.2倍にした。長手方向の具体的な寸法としては、長節が350mm、腕節が256mm、前節が245mm、指節が100mmである

表 2: 第4肢の長節から指節の寸法

	幅-左 [mm]	幅-中 [mm]	幅-右 [mm]	厚み [mm]	長さ [mm]
長節	19.10	21.74	13.11	11.05	100.0
腕節	10.57	-	18.42	8.74	40.5
前節	16.48	-	10.40	4.68	70.0
指節	-	5.60	-	3.69	30.0

3.2.2 機体の可動域計算に用いた簡易モデル

3.2.3 3次元CADを用いた設計

4 細径MPAを用いた歩脚口ボットの開発

本章では本研究で用いた改良した細径MPAの作製方法、それを用いた羽状筋の再現方法について述べる。

4.1 羽状筋再現方法

4.1.1 細径MPA作製方法

本研究で用いる3mmの細径MPAの作製方法について説明する。構造は2.1節で述べた従来のMPAと同様、シリコンゴムチューブをナイロン繊維メッシュで覆ったシンプルなもので、0.4~0.6 MPaで駆動し収縮率は約20%である。おまかに作製手順を図12に示す。端部の締結方法はOリングを用いる方法を採用した。図中①に示した物品が作製に必要なもので左から以下の通りである。

- PPX(瞬間接着剤) メーカー：セメダイン 品番：CA-522
- シリコンゴムチューブ 2×3(内径×外径) メーカー：タイガースポリマー 品番：SR1554
- ポリウレタンチューブ 2×1.2(外径×内径) メーカー:PISCO 品番：UB0212-20-B
- 編組チューブ 1×5(最小径×最大径) メーカー：モノタロウ 品番：-
- 光造形で作製した細径MPA端部部品

以下、作成手順である。

1. まず初めにシリコンゴムチューブを任意の長さで切り、ナイロンメッシュをシリコンゴムチューブより5cm程長く切る
2. シリコンゴムチューブの両端をそれぞれ光造形の部品の溝に差し込み、部品とシリコンゴムチューブの間に接着剤を塗布する(図中②)
3. 接着剤が十分に乾いたら編組チューブを被せる(図中③)
4. ナイロンメッシュを押さえつけ、かつ光造形のOリング固定溝にはまるようにOリングを配置する。固定する際にナイロンメッシュが緩まないようにOリングを固定する(図中④)
5. 締結した部分に接着剤を塗布し、緩まないようにする
6. 接着剤が十分に乾いたら余分なナイロンメッシュを切り取る(図中⑤)
7. ポリウレタンチューブを光造形の部品に差し込み、部品とポリウレタンチューブの間に接着剤を塗布し乾燥させて完成

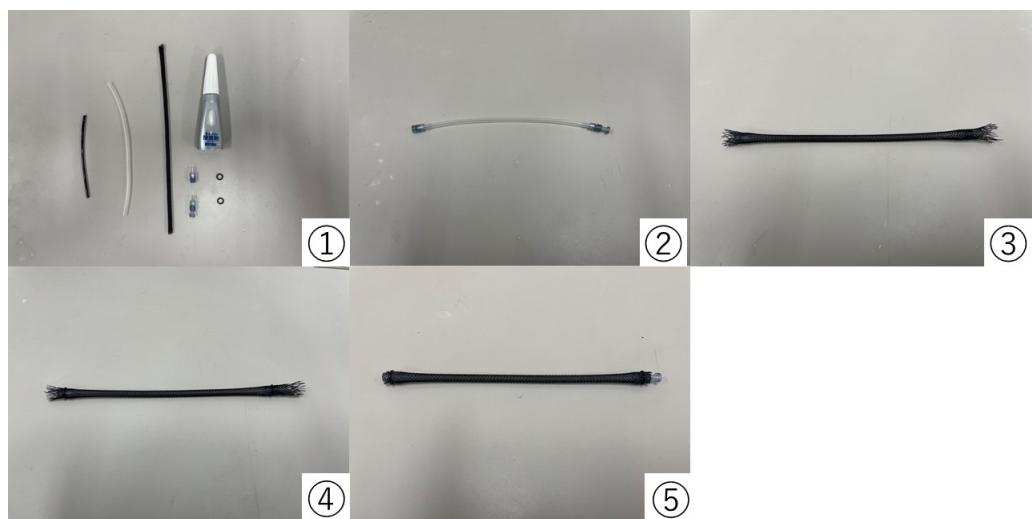


図 12: 改良型細径 MPA の作製方法

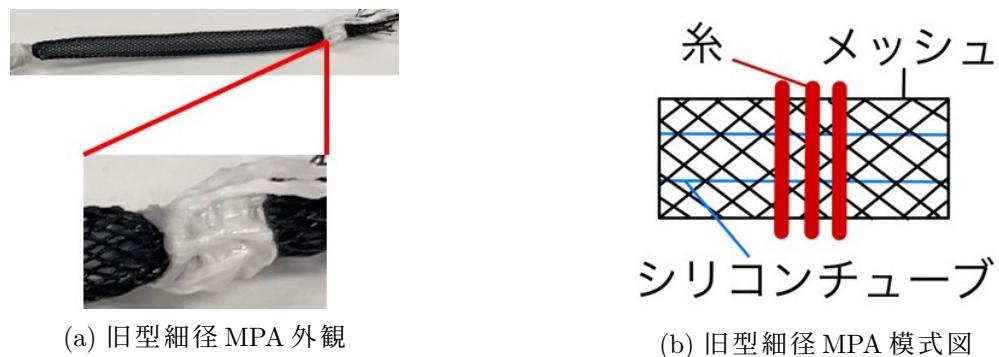


図 13: 先行研究で用いられた旧型細径 MPA

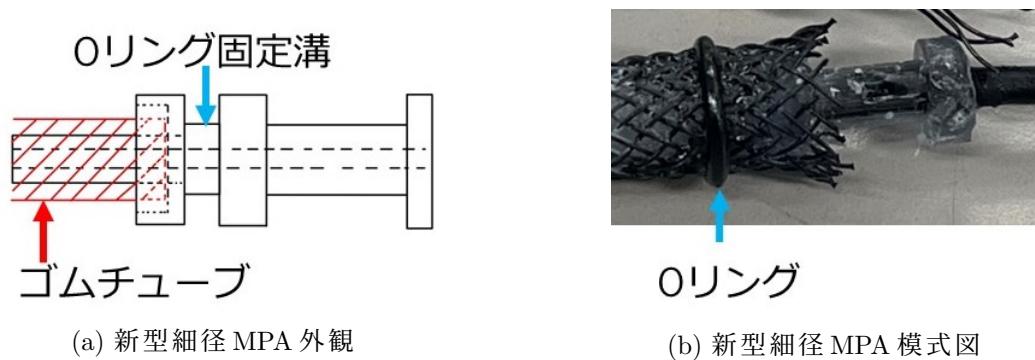


図 14: 本研究で用いた新型細径 MPA

4.1.2 細径 MPA 締結方法の改善

先行研究の細径 MPA 締結方法を図 13(a) に示す。

4.1.3 細径 MPA 収縮率の向上

市販に売られている編組チューブは、図 15(a) のように断面が平たく折縫がついている。その状態の編組チューブを用いて細径 MPA を作成すると、図 16(a) のようにシリコンゴムチューブと編組チューブの間に隙間が生じてしまう。これにより、自身の径方向に膨張し軸方向に収縮する細径 MPA にとっては収縮率を低下させる原因となる。そこで本研究では、細径 MPA の収縮性能を高めるために編組チューブを熱可塑変化させた。大まかな作成方法を図 17 に示す。図中(1)に示した物品が作製に必要なもので左から以下の通りである。

- O リング $\phi 4(\pm 0.15)$ メーカー：モノタロウ 品番：1A-SS 4.5
- ステンレス丸棒 $\phi 2\text{mm}$ メーカー：モノタロウ 品番：1378
- 編組チューブ 1×5 (最小径 × 最大径) メーカー：モノタロウ 品番：-
- マスキングテープ テープ幅 15mm メーカー：モノタロウ 品番：15
- ホットプレート メーカー：山善 品番：YHA-W102

熱可塑変化の手順を以下に示す。

1. まず初めに、編み込みチューブをステンレス棒よりも 3cm 程短い範囲で任意の長さに切る
2. 編み込みチューブにステンレス棒を差し込む(図中②)
3. 編み込みチューブの内径がステンレス棒の外径になるようにマスキングテープで巻いて固定する(図中③)
4. ホットプレートを 180°C まで温めて、編み込みチューブ全体に熱が伝わるように転がしながら 3 分間温める(図中④)
5. 全体を冷水に漬けて、3 分間ほど熱をとる(図中⑤)
6. 粗熱が取れたらマスキングテープを外して完成

熱可塑変化によって編組チューブは図 15 のように折縫が取れ

4.1.4 羽状角の自由度の再現

4.2 作製した機体

4.2.1 機体の構成および寸法

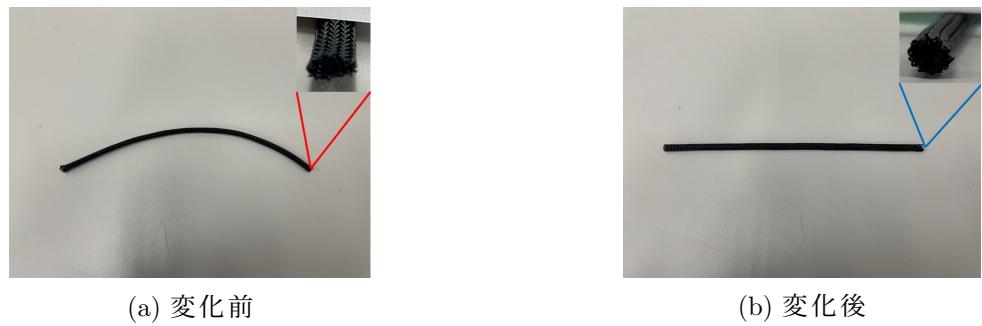


図 15: メッシュの熱可塑変化の様子



図 16: 細径 MPA の熱可塑変化の様子

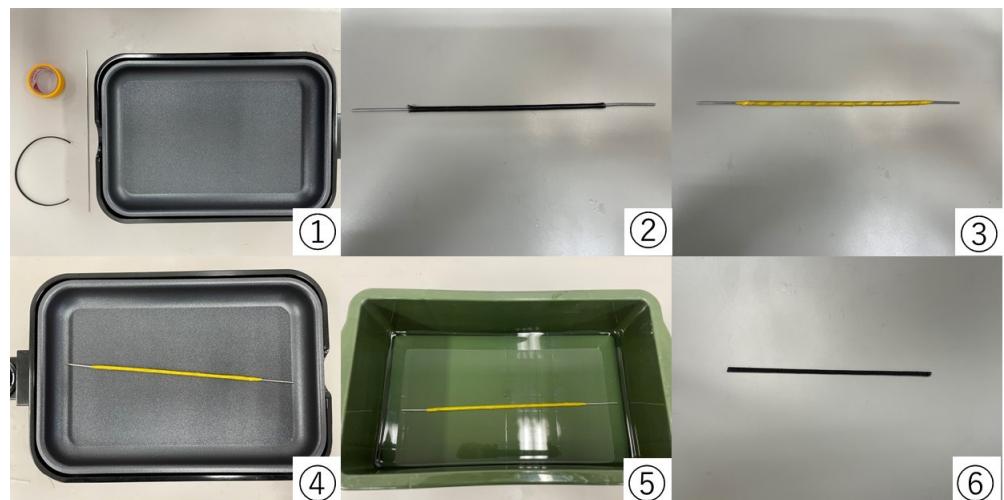


図 17: 熱可塑変化の手順

5 動作実験

5.1 実機の動作確認

5.2 実験結果

5.3 考察

6 結言

謝辞

本研究を進めるにあたり、数多くの助言や提案、資料の添削など最後まで手厚くサポートしていただいた中西大輔先生に心より感謝いたします。また、苦しい時間や楽しい時間をともにした研究室の皆様に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 則次俊郎. 空気圧ソフトアクチュエータと人間親和メカニズム. 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 7, pp. 722–726, 2003.
- [2] 脇元修一. 細径 mckibben 型人工筋の開発と用途開拓. 計測と制御, Vol. 57, No. 11, pp. 812–815, 2018.
- [3] 森田隆介, 鈴森康一, 車谷駿一. 細径マッキベン人工筋を用いた筋骨格ロボットの歩行動作実現. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2016, pp. 2P2–12a3, 2016.
- [4] 森和也, 脇元修一, 高岡真幸, 鈴森康一. 3p1-v05 細径 mckibben 型人工筋肉を集積したタコ腕模倣メカニズムの開発(フレキシブルロボット・メカニズム). ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2014, pp. _3P1–V05_1–_3P1–V05_4, 2014.
- [5] Xi Chen, Jiawei Li, Shihao Hu, Songjie Han, Kaixin Liu, Biye Pan, Jixin Wang, Gang Wang, and Xinxing Ma. Study on the design and experimental research on a bionic crab robot with amphibious multi-modal movement. *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 10, No. 12, 2022.
- [6] 斎藤昭彦. 骨格筋の構造. 理学療法科学, Vol. 18, No. 1, pp. 49–53, 2003.
- [7] 中西大輔, 長谷川侑大, 浪花啓右, 杉本靖博. 細径空圧筋を用いた羽状筋および外骨格生物模倣ロボットの開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2024, pp. 2A1–L08, 2024.
- [8] 中西大輔, 加原竜太, 浪花啓右, 杉本靖博. 二関節四筋を有する空圧筋脚ロボットの脚先軌道制御法の提案. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2020, pp. 1P2–H08, 2020.
- [9] 俊幸土井, 修一脇元, 康一鈴森, 岳文神田. 1p1-b03 細径 mckibben 型人工筋の集積化に関する研究 : 第1報: 収縮率と収縮力の静特性の測定. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2015, No. 0, pp. 1P1–B03, 2015.
- [10] G.F. Warner. *The Biology of Crabs*. Elek, 1977.