

令和6年度

卒業研究報告書

題 目

改良型細径空圧羽状筋を用いた
カニ模倣型ロボットの開発

Development of Crab-Type Robot Using an Improved
Thin Pneumatic Feathering Muscle

SDGs目標番号: 9

学生氏名 (学籍番号)

濱口紘生(D2030)

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。これに対して先行研究では細径 MPA を用いた羽状筋の開発が行われた。またズワイガニを実際に解剖して得られた計測データを参考にし歩脚ロボットを開発し、細径空圧羽状筋によって関節を開閉動作させることに成功した。一方で、細径 MPA の制作方法や羽状筋の構成、および関節構造の再現など様々な点で課題が残された。本研究ではこれらの先行研究の課題点を改良した細径空圧羽状筋とロボットの開発を行った。長節から指節までの節の開閉動作を実機によって確認し、全ての関節について概ね設計通りの可動域が実現できていることを確認した。特に長節-腕節間関節については、実際のカニと同等の可動域が再現できていることを確認した。今後は腱の固定方法と可動域の計算の際に用いた数理モデルの改良を行い、実際のカニの可動域に近い動きをする歩脚ロボットの開発を目指す。

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 response to this problem, previous research developed a feather-shaped muscle using a thin MPA. In addition, a gait robot was developed based on measurement data obtained by dissecting a snow crab, and the joints were successfully opened and closed using thin pneumatic pterostome muscles. On the other hand, there are still various issues to be solved, such as the production method of the thin MPA, the composition of the pterygoid muscles, and the reproduction of the joint structure. In this study, we developed a robot with a thin pneumatic winged muscle that improves on these issues in previous studies. We confirmed that all joints were able to achieve the designed range of motion. In particular, we confirmed that the range of motion of the joint between the long segment and the brachial segment was equivalent to that of an actual crab. In the future, we will improve the method of tendon fixation and the mathematical model used to calculate the range of motion, and aim to develop a walking leg robot that can move in a range of motion similar to that of an actual crab.

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 モデル生物の構造およびロボット外殻の設計	5
3.1 モデル生物(ズワイガニ)について	5
3.1.1 外骨格および羽状筋について	5
3.1.2 関節構造、および可動域について	5
3.1.3 各部寸法について	6
3.2 ロボット外殻の設計	7
3.2.1 可動域の計算	7
3.2.2 三次元 CAD を用いた外殻部の設計	7
4 改良型細径羽状筋の開発	8
4.1 先行研究で確認された課題	8
4.2 課題 1：細径 MPA の制作方法の改良	8
4.3 課題 2：細径 MPA の収縮率向上	9
4.4 課題 3：羽状角の変化に対する対応	11
4.5 改良型細径羽状筋	12
5 動作実験	13
5.1 改良型細径羽状筋を備えたロボット	13
5.2 動作実験	13
5.3 実験結果	13
5.4 考察	13
6 結言	14
謝辞	15
参考文献	16

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 [5] 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行う. 先行研究では [7] では外骨格生物のなかでも甲殻類の蟹(ズワイガニ)をモデル生物として設定し、これの歩脚を模倣したロボットの開発に向けて、細径 MPA およびそれを用いた羽状筋の開発が行われた. またズワイガニを実際に解剖して得られた計測データを参考に歩脚ロボットを開発し、細径空圧羽状筋によって関節を開閉動作させることに成功した [7]. 一方で、先行研究で開発された細径空圧羽状筋およびロボットにはいくつかの問題が確認された. まず、先行研究で用いられた細径 MPA 作製方法は煩雑であり、作製に時間と練度が必要であった. また収縮性能が低いことや、羽状筋の細径 MPA の根元の角度が固定されており、収縮時に羽状角が変化できずに腱の引き込みを妨げていた. またロボットの関節部についても腱の付着構造に問題があり、可動域の再現などはできていなかった. そこで本研究では、改めてカニの解剖を行い、関節構造などを確認した. さらに前述した課題点を見直した改良細径空圧筋およびロボットを開発した.

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。

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)

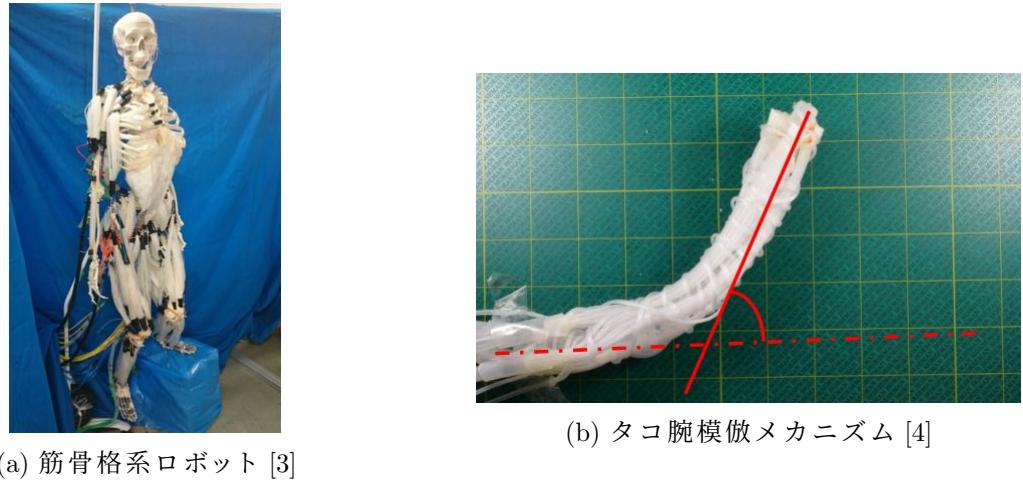


図 3: 細径空圧筋を用いたロボット

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 [7]。このロボットで動作実験を行い図6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 [7]

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]

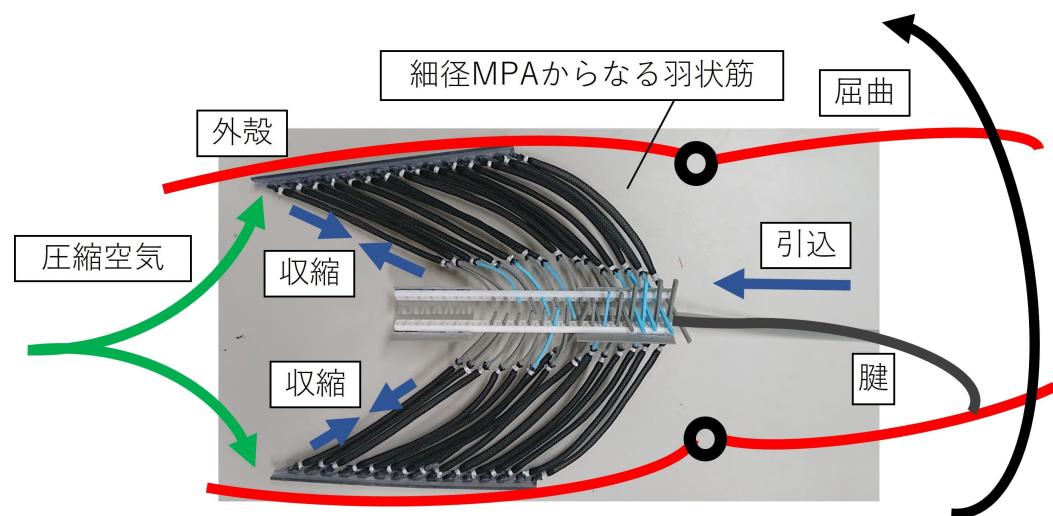


図 5: 先行研究で開発された羽状筋 [7]

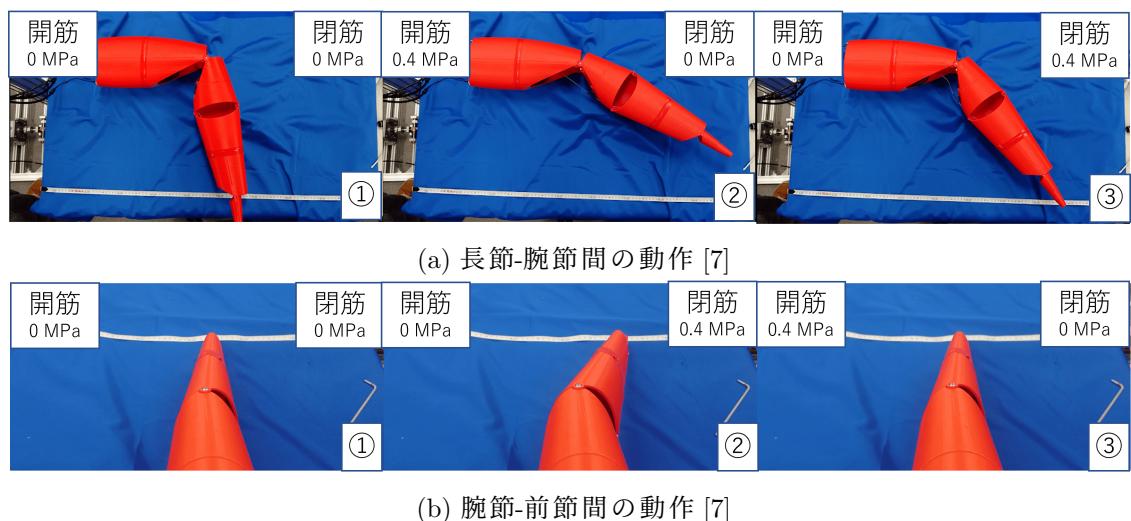


図 6: 動作実験

3 モデル生物の構造およびロボット外殻の設計

3.1 モデル生物(ズワイガニ)について

3.1.1 外骨格および羽状筋について

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。

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[7]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10に示す。図10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]。

3.1.2 関節構造、および可動域について

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セ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

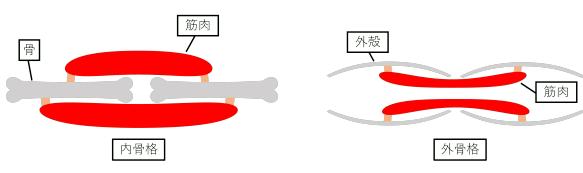


図7: 内骨格と外骨格

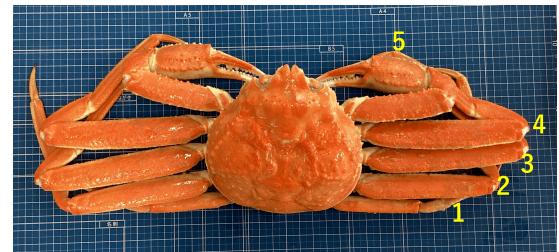


図8: 解剖に用いたズワイガニ [7]

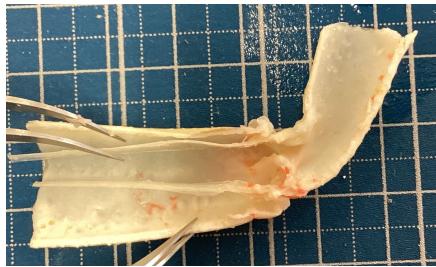


図 9: 腱の様子 [7]

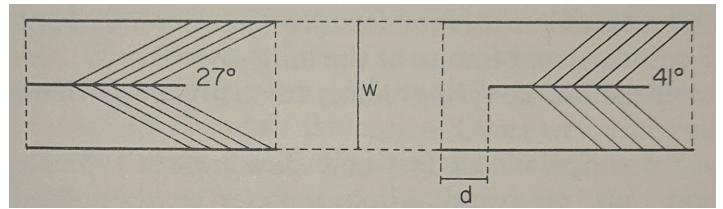


図 10: 羽状筋の動きを模式的に表したもの [10]



図 11: 可動域の測定の様子

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。

3.1.3 各部寸法について

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 1: 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

表 2: 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

3.2 口ボット外殻の設計

3.2.1 可動域の計算

3.2.2 三次元 CAD を用いた外殻部の設計

4 改良型細径羽状筋の開発

4.1 先行研究で確認された課題

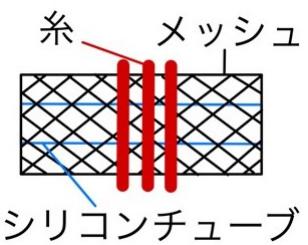
4.2 課題 1：細径 MPA の制作方法の改良

先行研究の細径 MPA 締結方法を図 12 に示す。先行研究では、細径 MPA を構成するシリコンチューブとスリーブを端部で糸で縛り接着剤で固定する方式を採用していた。しかし、この方法では作製するのに時間がかかり、完成するのに技術が必要になってしまう。そこで本研究では、13 のように細径 MPA 端部部品と O リングを用いた新しい細径 MPA 作製方法を開発した。新型細径 MPA の作製手順を以下に示す。従来の細径 MPA 作製方法を用いると作製時間が約 20 分なのに対し、本研究の作製方法では失敗することなく約 10 分で作製することができる。

1. 図 13b のようにゴムチューブを端部部品の溝部分に差し込み、差し込んだ隙間に接着剤を塗布する。反対側でも行う
2. 接着剤が乾いたら、図 13a のようにゴムチューブと端部部品をスリーブで包む
3. 図 13a のように図 13b 中の O リング固定溝にはまるように O リングを配置する。反対側でも行う
4. 端部部品、スリーブと O リングを固定するために接着剤を塗布する。反対側でも行う



(a) 旧型細径 MPA 外観

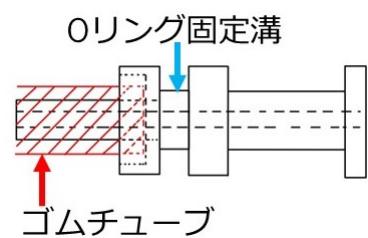


(b) 旧型細径 MPA 模式図

図 12: 先行研究で用いられた旧型細径 MPA



(a) 新型細径 MPA 外観



(b) 新型細径 MPA 模式図

図 13: 本研究で用いた新型細径 MPA

4.3 課題 2：細径 MPA の収縮率向上

市販に売られている編組チューブは、図14(a)のように断面が平たく折癖がついている。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15(a)のようにシリコンゴムチューブ(青色)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 にとっては収縮率が低下してしまう。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16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。

- 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
- 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：-
- ステンレス丸棒 ϕ 2mm メーカー：モノタロウ 品番：1378
- 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

熱可塑変化させていない編組チューブを図14(a)、熱可塑変化させた編組チューブを図14(b)に示す。熱可塑変化させていない編組チューブは折癖あり、断面を平たいのに対し、熱可塑変化した編組チューブは折癖が取れ、断面を円形になっている。この熱可塑変化させた編組チューブを用いて細径 MPA を作製したもの図15(b)に示す。図15(a)と比べるとシリコンチューブ(青色)と編組チューブの間が狭くなっていることがわかる。熱可塑変化させたメッシュを用いて作製した新型細径 MPA の収縮性能の変化を調べた。熱可塑変化させていないメッシュを用いた旧型細径 MPA の収縮率が 16 %なのに対して、新型細径 MPA の収縮率は 20 %と向上したことを確認することができた。

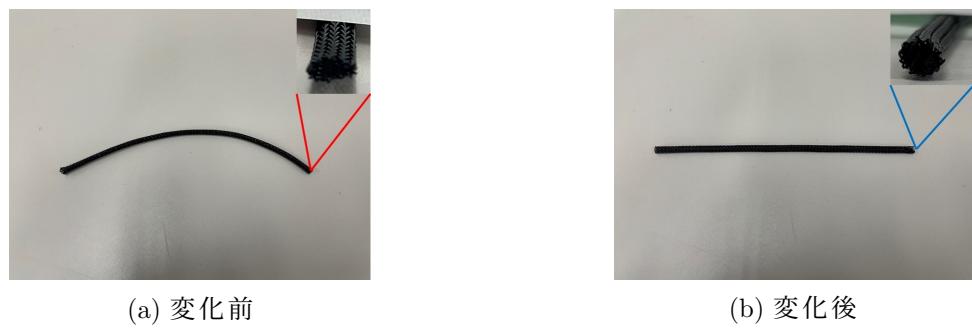


図 14: メッシュの熱可塑変化の様子



図 15: 細径 MPA の熱可塑変化の様子

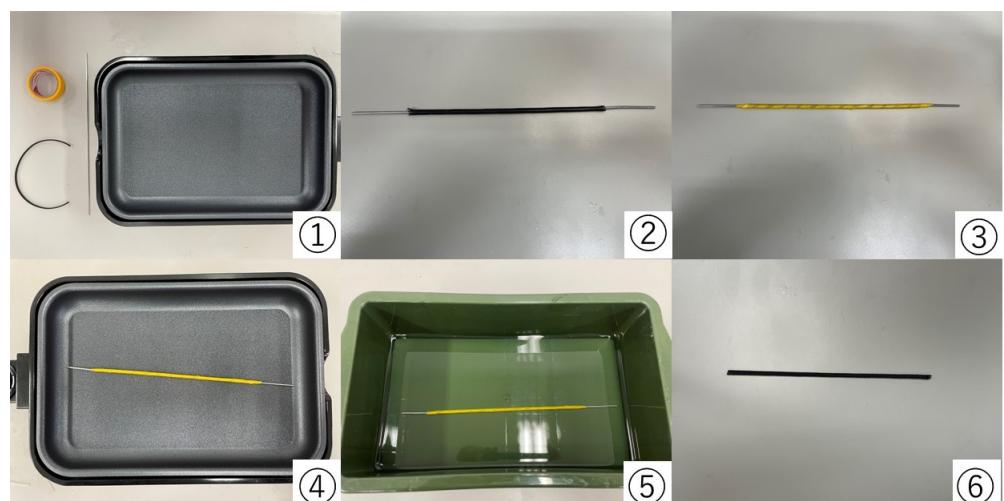


図 16: 熱可塑変化の手順

4.4 課題 3：羽状角の変化に対する対応

細径 MPA を用いた羽状筋の動作の模式図を図 17 に示す。細径 MPA が収縮すると、腱は赤い矢印の方向へ引っ張られる。そして、細径 MPA と腱とのなす角(羽状角)が変化することにより関節が回転する。しかし、先行研究で作製された歩脚ロボット(図 18)では細径 MPA 端部の部品の角度が固定されていた。それが原因で、細径 MPA が収縮する際に端部部品と細径 MPA が干渉してしまい腱を十分に引き込むことができなかった。そこで本研究では細径 MPA の収縮に応じて羽状角が変化する端部部品を開発した。開発した端部部品を図 19(a) に示す。細径 MPA 端部の作製方法、手順を以下に示す。

1. 図 19(a) 中①, ②, ③を SolidWorks を用いて設計する
2. 光造形方式の 3D プリンターで印刷する。
3. 図 19(a) 中の③の赤枠部分を図 19(a) 中①, ②で挟み込む
4. 図 19(a) 中①, ②の隙間が空いていないことを確認したら完成

次にこの部品の主な動作について説明する。先ほど説明した部品を組み立てた後(図 19(a) 中③)の模式図を図 19(b) に示す。図 19(b) 中の赤斜線部の穴に回転軸が左右からはある構造になっている。これにより、端部部品に 1 自由度を持たせることができた。さらに、細径 MPA の収縮に合わせて羽状角が変化することができ、端部部品と細径 MPA が干渉しないことが確認することができた。

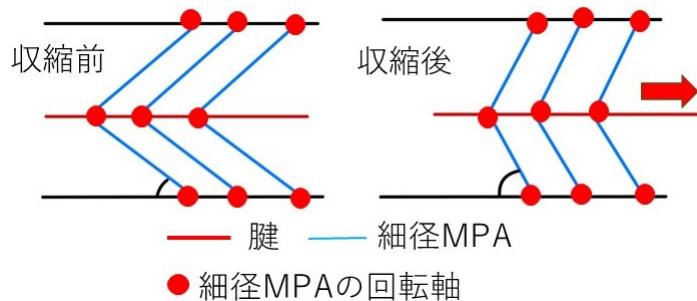


図 17: 羽状筋の動作の模式図

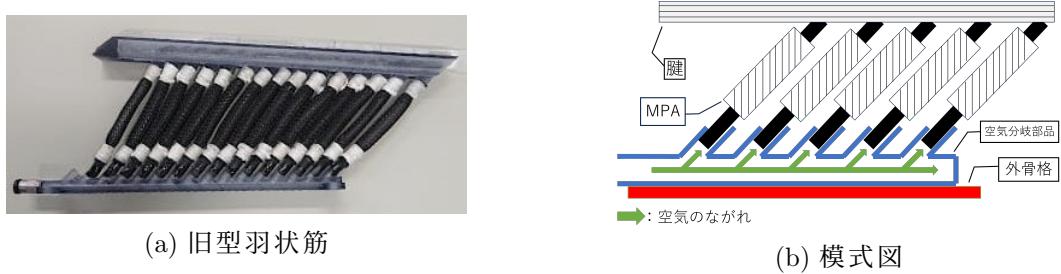


図 18: 先行研究で開発された羽状筋

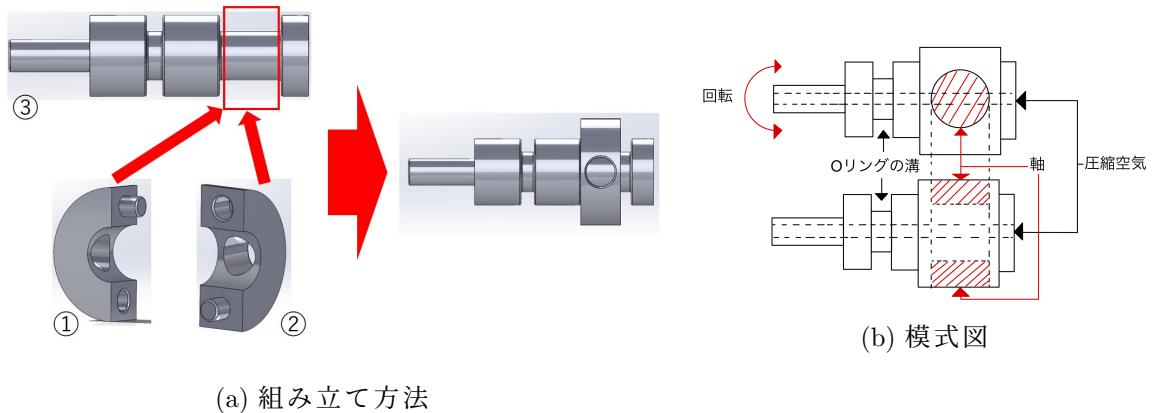


図 19: 先行研究で開発された羽状筋

4.5 改良型細径羽状筋

本研究で開発した改良型細径空圧羽状筋を図 20 に示す。前述した先行研究の課題 1, 2, 3 の解決方法を取り入れて羽状筋を開発した。図 20 中の腱は柔軟な素材である TPU を用いて FDM 方式 3D プリンターで、細径 MPA 固定部品は光造形方式の 3D プリンターでそれぞれ作成した。外骨格内部に配置可能な最大の長さの改良型細径空圧羽状筋を各節で作製した。その結果、解禁と平均で細径 MPA の数が同じでそれぞれ 1 列ずつの構成となった。長節では腱の上下ともに 7 本ずつ、腕節では腱の上側が 5 本で下側が 4 本、前節では腱の上下ともに 4 本ずつで羽状筋を作製した。また、3 章 2 節で述べた数理モデルのを用いた可動域の計算と作製の容易さから、細径 MPA の長さは全て同じになるように作製した。

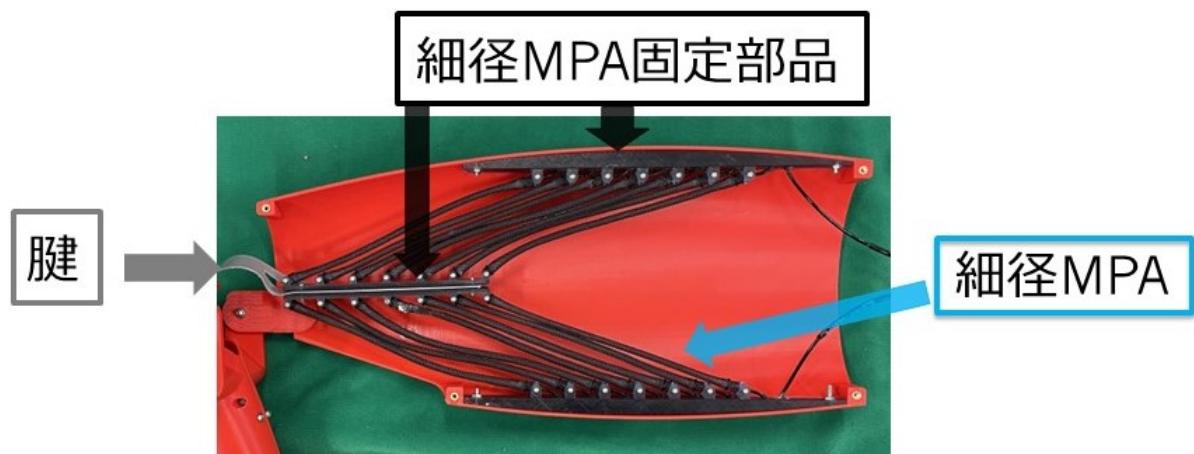


図 20: 改良型細径空圧羽状筋

5 動作実験

5.1 改良型細径羽状筋を備えたロボット

3章2節と4章で述べた外骨格と羽状筋の設計方法と作製方法より開発した歩脚ロボットを図21に示す。歩脚ロボットは長節、腕節、腕節、指節の4つの節で構成されている。各節の内部には本研究で開発した改良型細径空圧羽状筋を備えている。



図 21: 本研究で作製した歩脚ロボット

5.2 動作実験

5.3 実験結果

5.4 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.