

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

<b>1 緒言</b>	<b>1</b>
<b>2 先行研究の内容</b>	<b>2</b>
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
<b>3 モデル生物の構造およびロボット外殻の設計</b>	<b>5</b>
3.1 解剖によって得られた知見について . . . . .	5
3.1.1 モデル生物(ズワイガニ)について . . . . .	5
3.1.2 外骨格および羽状筋について . . . . .	5
3.1.3 可動域、各部寸法、および可動域について . . . . .	6
3.2 羽状筋および関節構造のモデル化および可動域の計算 . . . . .	7
3.2.1 羽状筋および関節構造のモデル化 . . . . .	7
<b>4 改良型細径羽状筋の開発</b>	<b>10</b>
4.1 先行研究で確認された課題 . . . . .	10
4.2 課題 1：細径 MPA の制作方法の改良 . . . . .	10
4.3 課題 2：細径 MPA の収縮率向上 . . . . .	12
4.4 課題 3：羽状角の変化に対する対応 . . . . .	14
4.5 改良型細径羽状筋 . . . . .	15
<b>5 動作実験</b>	<b>17</b>
5.1 改良型細径羽状筋を備えたロボット . . . . .	17
5.2 動作実験 . . . . .	17
5.3 実験結果 . . . . .	17
5.4 考察 . . . . .	20
<b>6 結言</b>	<b>21</b>
<b>謝辞</b>	<b>22</b>
<b>参考文献</b>	<b>23</b>

## 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、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 [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 [7] 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)

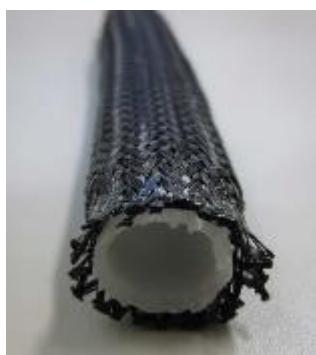
MPAはシリコンゴムチューブをナイロンメッシュで覆うことで構成されており(図1(a)),両端に栓をするシンプルな構造である。これに圧縮した空気を印加することでシリコンゴムチューブが膨張しメッシュによる自身の軸方向への張力が発生するアクチュエータである(図1(b))。高出力かつ素材自体も軽量で、物理的柔軟性による高い弾性力を持つという利点があり、筋肉の代用として生物を模したロボットやリハビリなどに用いられる[1]。

### 2.2 細径 MPA

従来のMPAは外径が十数mm程のものであったのに対し、細径MPAは外径が数mm程のものである。先行研究[7]で用いられた細径MPAについて説明する。図2には、先行研究[7]で開発した外径5mmおよび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)

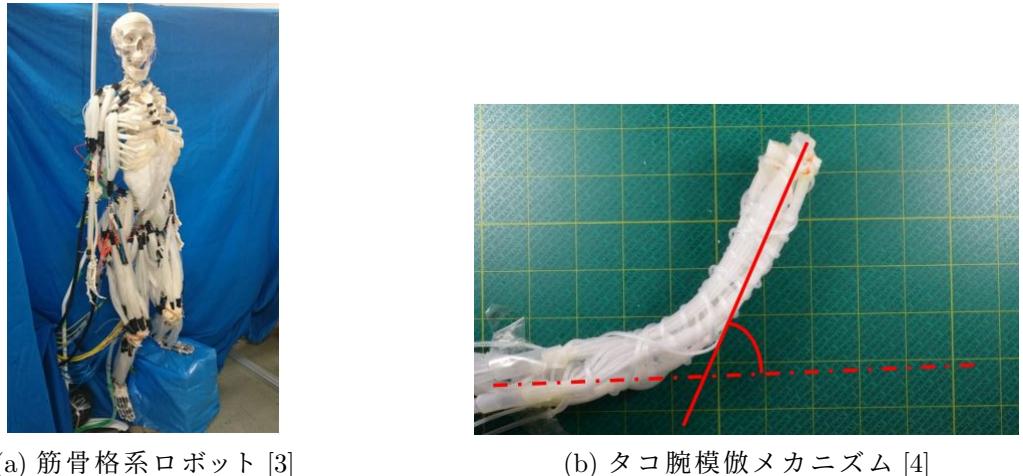


図 3: 細径空圧筋を用いたロボット

### 2.3 先行研究の成果と課題

先行研究 [7] では図 4 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 を用いて蟹の関節を駆動す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、先行研究で述べられていた収縮率に関する課題 [7] のほか、筆者が検証した結果、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り、技術も必要
2. 細径 MPA の収縮性能が低く、腱を充分に引き込めない
3. 細径 MPA の根元部分の角度が固定されており、腱の引き込みを妨げている

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細径 MPA および羽状筋さらに歩脚ロボットの開発に取り組む。



図 4: 先行研究で作製された歩脚ロボット [7]

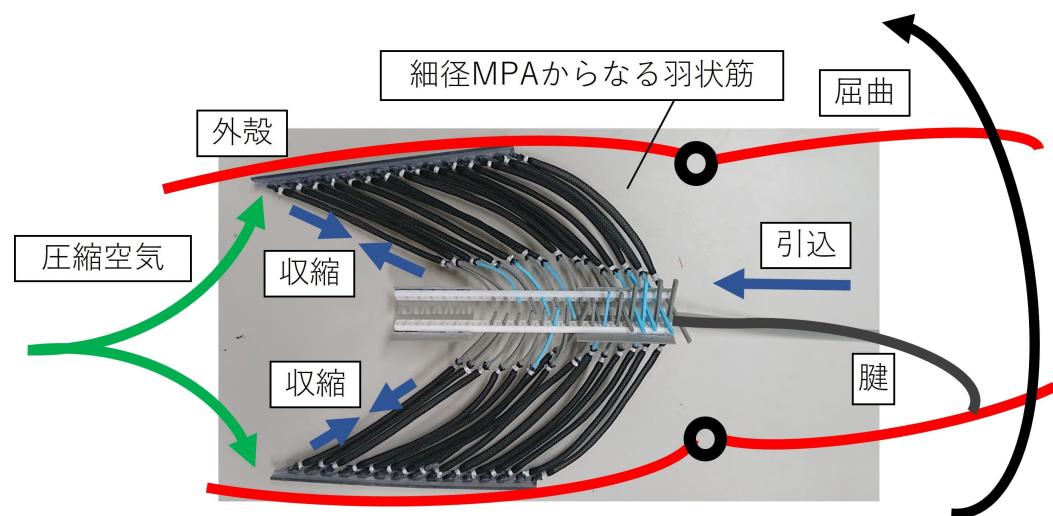
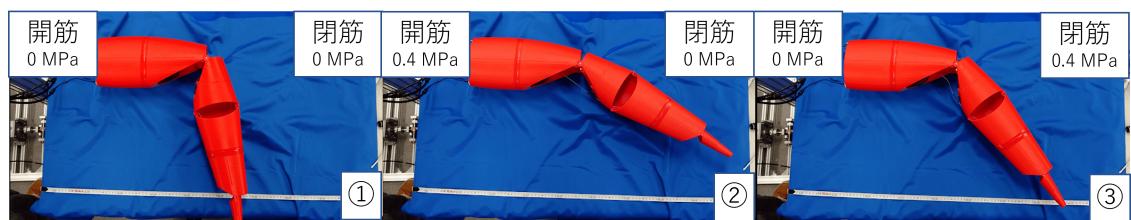


図 5: 先行研究で開発された羽状筋 [7]



(a) 長節-腕節間の動作



(b) 腕節-前節間の動作

図 6: 動作実験 [7]

### 3 モデル生物の構造およびロボット外殻の設計

本研究ではモデル生物としてズワイガニを採用した。本章では先行研究 [7] にて行われた解剖にて得られた各部の寸法、関節可動域、および関節構造に関する知見について述べる。さらにカニの羽状筋および関節構造を数理モデルとして表現し、実際のズワイガニの可動域を再現できるようなロボットの設計について検討する。

#### 3.1 解剖によって得られた知見について

##### 3.1.1 モデル生物(ズワイガニ)について

本研究では外骨格を有するモデル生物として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。理由として蟹の中でも入手しやすく、モデルサイズも大きく解剖時に内部構造等の確認や測定が比較的容易なためである。図7に先行研究にて解剖に用いたズワイガニを示す。解剖に用いたズワイガニは食用に冷凍されたものであり、解剖によって得られた可動域などが、カニが能動的に動く際のものとは異なる可能性があるが、今回は考慮しないものとする。

##### 3.1.2 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8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。

蟹の脚内の筋肉の構造および関節駆動機構について述べる。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。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

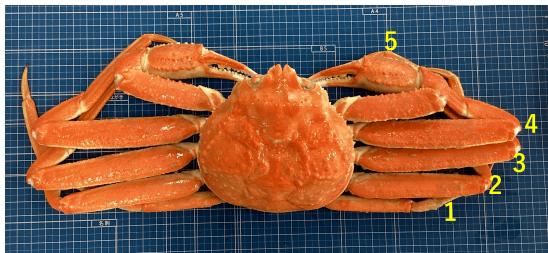


図7: 解剖に用いたズワイガニ [7]

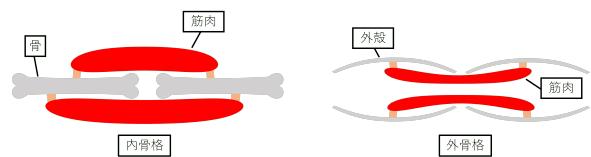


図8: 内骨格と外骨格 [7]

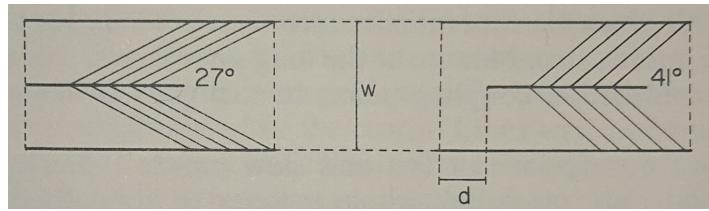


図 9: 羽状筋の動きを模式的に表したもの [10]



図 10: 可動域の測定の様子

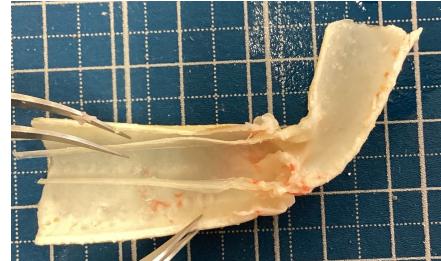


図 11: 腱の様子 [7]

状筋という。羽状筋の動きの模式図を図9に示す。図9の左側が筋肉が伸展した状態、右側が収縮した状態を表している。ここで筋肉と腱のなす角を羽状角という。筋肉が収縮することで羽状筋の角度は  $27\text{ deg}$  から  $41\text{ deg}$  に増加し、腱は距離  $d$  を移動する。ここで各筋繊維は収縮することで短く太くなるが、筋全体の幅  $w$  は変化しない。このような羽状筋の動作には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]。

### 3.1.3 可動域、各部寸法、および可動域について

先行研究 [7] にて行われた関節可動域の計測の様子を図10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  $180^\circ$  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7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肢の可動域を表1に示す。

また各節の長さについても測定が行われた。第4肢の長節から指節の寸法を表2に示す。なお、実寸大で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、後述する今回開発したロボットにおいては長節、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。また先行研究 [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11に示す。解剖結果よりズワイガニの腱は節間膜と一体となっていることが分かった [7]。このような構造は

表 1: 第 4 肢の節間の可動域

	可動域 [deg]
長節-腕節間	52-130
腕節-前節間	0-45
前節-指節間	0-89

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

関節内部への侵入を防ぐなど、外骨格として重要な役割をになっている可能性がある。

### 3.2 羽状筋および関節構造のモデル化および可動域の計算

#### 3.2.1 羽状筋および関節構造のモデル化

作製する歩脚ロボットの可動域を設計するために、カニの関節構造を数理モデル化し、計算を行った。数理モデルを図 12 に示す。モデルは伸筋による関節の開閉を表しており、図 12(a) が関節が最も閉じて筋が引き延ばされた状態、図 12(b) が筋肉が収縮し関節が最も閉じている状態である。図 12, 13 中に用いた変数について表 3 に示す。可動域導出の手順について述べる。まず図 12(a) から、伸び縮みしない腱の長さ  $L_{Te}$  を求める。腱付着点から腱の延長線に向かって垂線を引く。赤い点を頂点とする三角形において三平方の定理を用いて  $L_{Te}$  を求める。

$$L_{Te} = \sqrt{r_e^2 + (d_0^2 + S_{e1}^2) - 2r_e\sqrt{d_0^2 + S_{e1}^2} \cos(\theta_f + \phi)} \quad (1)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{S_{e1}}{d_0} \right) \quad (2)$$

続いて図 12(b) から、 $S_{e2}$  を求める。青い点を頂点とする三角形の辺 AB と赤い点を頂点とする三角形の辺 CD を足し合わせて  $S_{e2}$  を求める。

$$S_{e2} = r_e \sin \theta_e + L_{Te} \cos \psi \quad (3)$$

$$\psi = \sin^{-1} \left( \frac{r_e \cos \theta_e - d_0}{L_{Te}} \right) \quad (4)$$

ここで、可動域  $\theta_e + \theta_f$  を実現するためには、腱は  $S_{e2} - S_{e1}$  の長さを移動しなければならない。そこでこの移動距離を必要ストローク  $S_e = S_{e2} - S_{e1}$  と定義する。

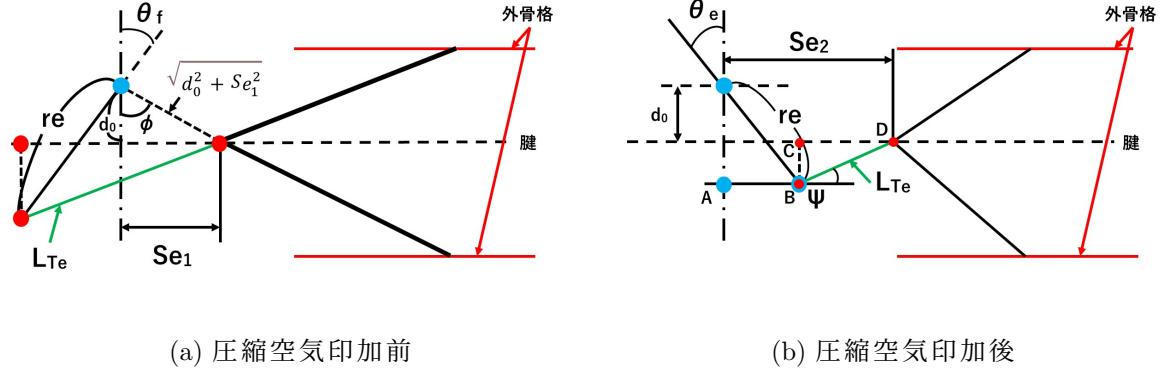


図 12: 可動域計算に用いた数理モデル(必要ストローク)

一方で、実際のロボットにおいては初期羽状角と空圧筋の収縮率がわかっていれば、収縮によって腱がどれ程引き込まれるかは計算することができる。この実際の腱の移動量を可能ストローク  $S'_e$  と定義する。本研究で新たに行った蟹の解剖の結果から、初期羽状角を 20 度と設定した。また後述(4.3)するように、本研究で用いる改良型の細径 MPA は最大収縮率が 20 %である。以上の条件および図 13 から、腱がどれ程引き込まれるか計算した。圧縮空気印加前の細径 MPA の長さが  $l_1$  とするとき印加後の長さは収縮率が 20 %なので  $l_2 = 0.8l_1$  となる。このことを用いて  $S'_e$  を求める。

$$\begin{aligned} S'_e &= l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 \\ &= l_1 \cos 20^\circ + 0.8l_1 \cos \theta_2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left( \frac{d}{0.8l_1} \right) \quad (6)$$

表 4~9 に長節から指節までの各関節のパラメータを示す。

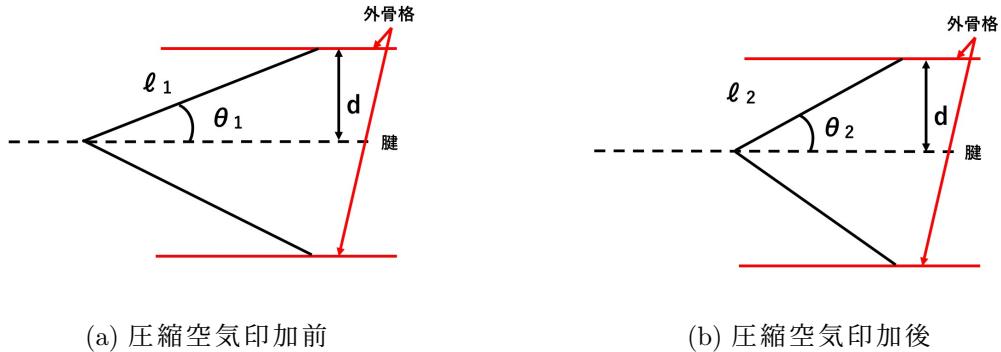


図 13: 可動域計算に用いた数理モデル(可能ストローク)

表 3: 可動域の計算に用いた変数

$\theta_f$ [deg]	関節から腱への垂線と、腱の付着点から関節への直線とのなす角						
$\phi$ [deg]	関節から腱への垂線と、関節から 関節側にある細径 MPA の交点への直線とのなす角						
$r_e$ [mm]	関節から腱の付着点までの長さ						
$d_0$ [mm]	関節から腱への垂線の長さ						
$L_{Te}$ [mm]	腱付着点から関節側にある細径 MPA の交点までの長さ						
$S_{e1}$ [mm]	関節から腱への垂線と腱との交点から 関節側にある細径 MPA の交点までの長さ						
$\theta_e$ [deg]	関節から腱への垂線と、腱の付着点から関節への直線とのなす角						
$\psi$ [deg]	関節側の細径 MPA の交点から腱の付着点の直線と水平な直線とのなす角						
$S_{e2}$ [mm]	関節から腱への垂線と腱との交点から 関節側にある細径 MPA の交点までの長さ						
$l_1$ [mm]	細径 MPA 動作前の細径 MPA の長さ						
$\theta_1$ [deg]	細径 MPA 動作前の羽状角の大きさ						
$l_2$ [mm]	細径 MPA 動作後の細径 MPA の長さ						
$\theta_2$ [deg]	細径 MPA 動作後の羽状角の大きさ						
$d$ [mm]	腱から外骨格までの垂直距離						

表 4: 長節-腕節間(開筋)のパラメータ

$\theta_f$ [deg]	$\phi$ [deg]	$r_e$ [mm]	$d_0$ [mm]	$L_{Te}$ [mm]	$S_{e1}$ [mm]	$\theta_e$ [deg]	$\psi$ [deg]
39.5	64.3	24.7	17.0	51.1	35.3	51.5	11.5
$S_{e2}$ [mm]	$l_1$ [mm]	$\theta_1$ [deg]	$l_2$ [mm]	$\theta_2$ [deg]	$d$ [mm]	$S_e$ [mm]	$S'_e$ [mm]
69.4	156	20.0	125	25.3	53.4	34.1	31.0

表 5: 長節-腕節間(閉筋)のパラメータ

$\theta_f$ [deg]	$\phi$ [deg]	$r_e$ [mm]	$d_0$ [mm]	$L_{Te}$ [mm]	$S_{e1}$ [mm]	$\theta_e$ [deg]	$\psi$ [deg]
39.5	64.3	24.9	17.0	64.2	35.3	51.5	11.5
$S_{e2}$ [mm]	$l_1$ [mm]	$\theta_1$ [deg]	$l_2$ [mm]	$\theta_2$ [deg]	$d$ [mm]	$S_e$ [mm]	$S'_e$ [mm]
69.4	156	20.0	125	25.3	53.4	34.1	31.0
表 6: 腕節-前節間(閉筋)のパラメータ							
$\theta_f$ [deg]	$\phi$ [deg]	$r_e$ [mm]	$d_0$ [mm]	$L_{Te}$ [mm]	$S_{e1}$ [mm]	$\theta_e$ [deg]	$\psi$ [deg]
45	90.0	27.1	0	44.9	19.0	0	0.707
$S_{e2}$ [mm]	$l_1$ [mm]	$\theta_1$ [deg]	$l_2$ [mm]	$\theta_2$ [deg]	$d$ [mm]	$S_e$ [mm]	$S'_e$ [mm]
14.6	57.8	20.0	46.2	25.3	19.8	13.6	11.6

表 7: 腕節-前節間(閉筋)のパラメータ

$\theta_f$ [deg]	$\phi$ [deg]	$r_e$ [mm]	$d_0$ [mm]	$L_{Te}$ [mm]	$S_{e1}$ [mm]	$\theta_e$ [deg]	$\psi$ [deg]
68.7	90.0	24.9	0	49.7	18.8	21.6	33.7
$S_{e2}$ [mm]	$l_1$ [mm]	$\theta_1$ [deg]	$l_2$ [mm]	$\theta_2$ [deg]	$d$ [mm]	$S_e$ [mm]	$S'_e$ [mm]
30.3	57.8	20.0	46.2	25.3	19.8	25.5	11.6
表 8: 前節-指節間(閉筋)のパラメータ							

$\theta_f$ [deg]	$\phi$ [deg]	$r_e$ [mm]	$d_0$ [mm]	$L_{Te}$ [mm]	$S_{e1}$ [mm]	$\theta_e$ [deg]	$\psi$ [deg]
80	90.0	16.7	0	78.9	78.9	0	12.6
$S_{e2}$ [mm]	$l_1$ [mm]	$\theta_1$ [deg]	$l_2$ [mm]	$\theta_2$ [deg]	$d$ [mm]	$S_e$ [mm]	$S'_e$ [mm]
90.5	58.5	20.0	46.8	25.3	20.0	9.81	11.7
表 9: 前節-指節間(閉筋)のパラメータ							

$\theta_f$ [deg]	$\phi$ [deg]	$r_e$ [mm]	$d_0$ [mm]	$L_{Te}$ [mm]	$S_{e1}$ [mm]	$\theta_e$ [deg]	$\psi$ [deg]
88.0	90.0	16.7	0	78.9	78.9	1.00	27.2
$S_{e2}$ [mm]	$l_1$ [mm]	$\theta_1$ [deg]	$l_2$ [mm]	$\theta_2$ [deg]	$d$ [mm]	$S_e$ [mm]	$S'_e$ [mm]
90.5	58.5	20.0	46.8	25.3	20.0	11.5	11.7

## 4 改良型細径羽状筋の開発

本章では、先行研究 [7]において開発された羽状筋に関する3つの課題点について、どのように解決を行ったかを述べる。

### 4.1 先行研究で確認された課題

先行研究 [7]で開発された歩脚ロボットで脚の開閉動作を確認することができたが、以下のような3つの課題が見つかった。

1. 細径MPA端部の締結方法が煩雑で、細径MPAを完成させるまでに時間がかかり、また締結部から空気漏れが生じる可能性が高い
2. 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い収縮率が低下する
3. 細径MPAの根元の部品が角度を固定されていて、腱の引き込みを妨げている

以上の3つの課題の解決するために4.1, 4.2, 4.3で示す対策を講じた。

### 4.2 課題1：細径MPAの制作方法の改良

先行研究 [7]の細径MPA締結方法を図14に示す。先行研究 [7]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る。また、空気漏れが発生しやすく、細径MPAの製作には技術と練度が必要となる。そこで本研究では、図15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約10分で作製することが可能であり、空気漏れなど、作成後に確認される不具合の発生確率も大幅に低減した。先行研究と本研究ではPPX(瞬間接着剤)(セメダイン社製、CA-522)を用いて細径MPAを作成した。

1. 図15(b)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
2. 接着剤が乾いたら、図15(a)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15(a)のように図15(b)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
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

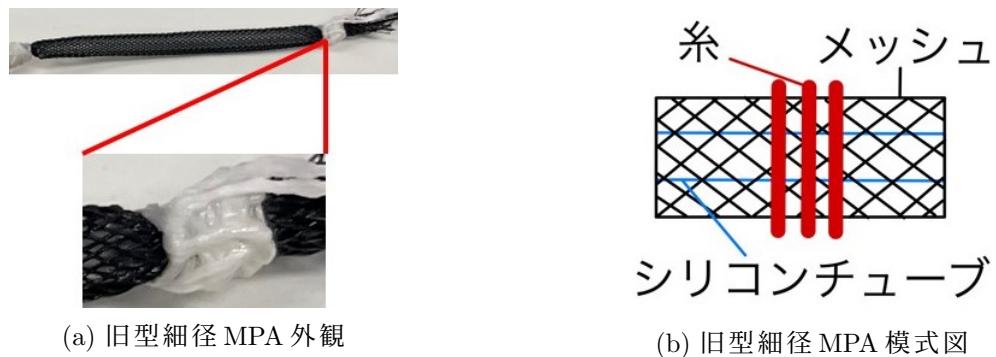


図 14: 先行研究で用いられた旧型細径 MPA および作製方法

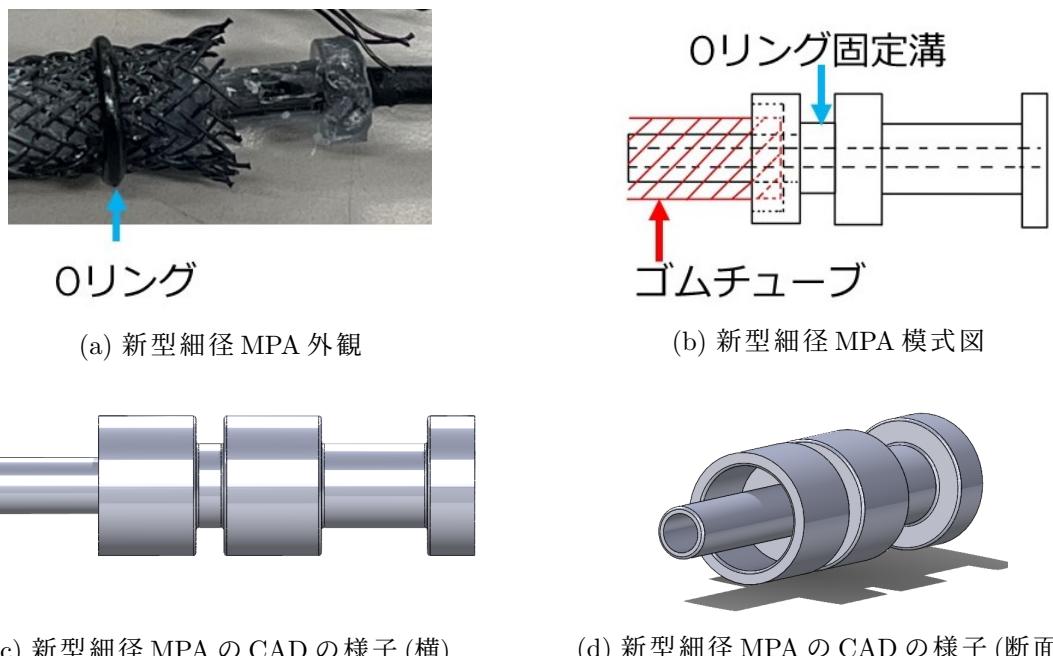


図 15: 本研究で用いた新型細径 MPA および作製方法

### 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 16(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 17(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 で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る加工を行い、径を小さくすることで収縮率の向上を試みた。大まかな作成方法を図 18 に示す。図 18 中①に示した物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 (モノタロウ社製, 15)
- 編組チューブ ほつれにくいタイプ 1 × 5(最小径 × 最大径) (モノタロウ社製, 6993303)
- ステンレス丸棒  $\phi$  2mm (モノタロウ社製, 1378)
- ホットプレート (山善社製, YHA-W102)

加工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 16(a), 热可塑変化させた編組チューブを図 16(b) に示す。熱可塑変化させていない編組チューブは折癖があり、断面が平たいのに対し。熱可塑変化した編組チューブは折癖が取れ、断面が円形になっている。この熱可塑変化させた編組チューブを用いて細径 MPA を作製したものを図 17(b) に示す。図 17(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ところ、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。

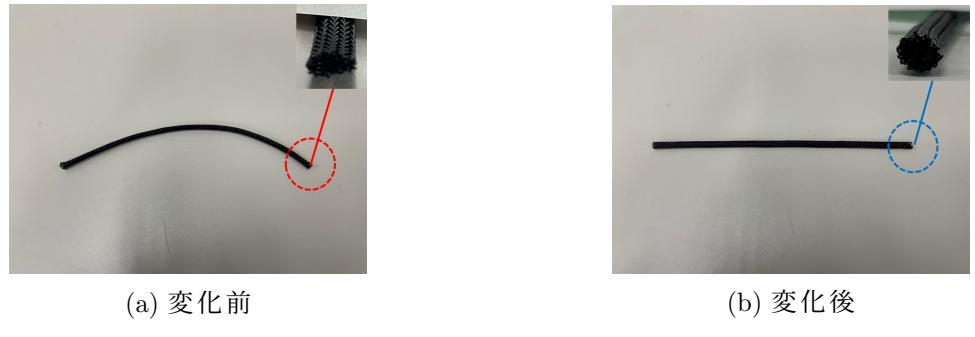


図 16: メッシュの熱可塑変化の様子



図 17: 細径 MPA の熱可塑変化の様子

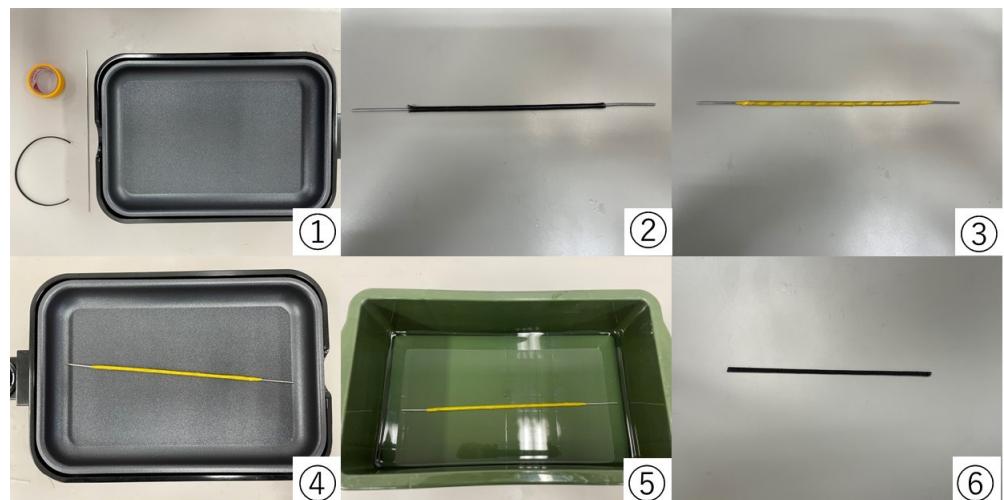


図 18: 熱可塑変化の手順

#### 4.4 課題 3：羽状角の変化に対する対応

細径 MPA を用いた羽状筋による腱の引き込みを模式図にしたものを見ると、図 19 に示す。細径 MPA が収縮することにより、腱が長手方向(赤い矢印の方向)へ引っ張られる。このとき、腱と細径 MPA のなす角(羽状角)は収縮前後で変化するため、細径 MPA の腱および外殻への付着点(図 19 中赤点)は回転自由度を持つ必要がある。しかし、先行研究 [7] で作製された細径 MPA を用いた羽状筋では、細径 MPA 端部の部品の角度が固定されていた。(図 20(a)) そのため、細径 MPA が収縮した際に細径 MPA 自身が折れ曲がるように変形してしまい、腱を十分に引くことができず、関節可動域が狭くなる原因の一つとなっていた。

そこで本研究では細径 MPA の端部に回転自由度を持たせる構造を考案した。図 21 に構造を示す。図 21(a) に示すように、MPA 端部部品(部品③)の軸部分を両側から挟むように、部品①②を取り付ける。部品①②には MPA 端部部品の軸と直行する向きに穴があけてある。組み立てたものを土台部品にとり付け、部品①②を左右からネジで固定する(図 21(d))。このとき、ネジの先端が部品①②の穴部にはまることで、このネジが回転軸となり細径 MPA 端部が自由度を持つことができる。また細径 MPA の外殻側は圧縮空気を供給するために中空状になっており、そこへ  $\phi 3\text{mm}$  のポリウレタンチューブを挿入して接着剤で固定する。また土台部品も圧縮空気を供給するための流路が内部に設けてあり、ポリウレタンチューブの他方はそちらに挿入して接着剤で固定する。図 21(d) に実際に細径 MPA を土台に組付けた様子を示す。

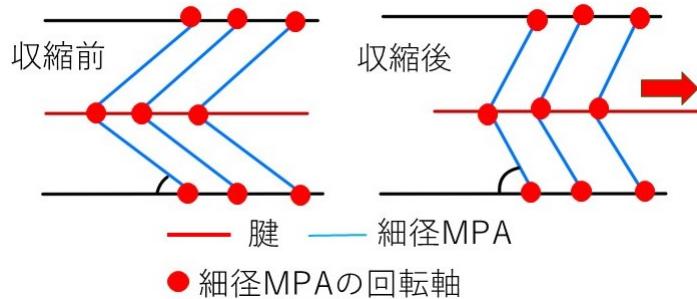


図 19: 羽状筋の動作の模式図

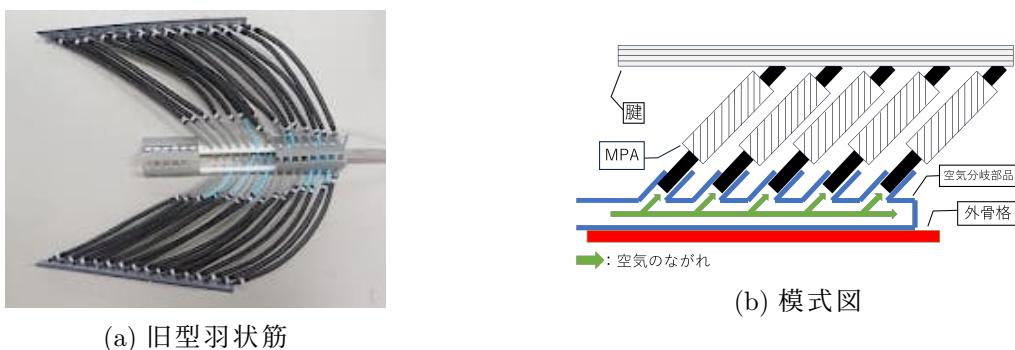


図 20: 先行研究で開発された羽状筋

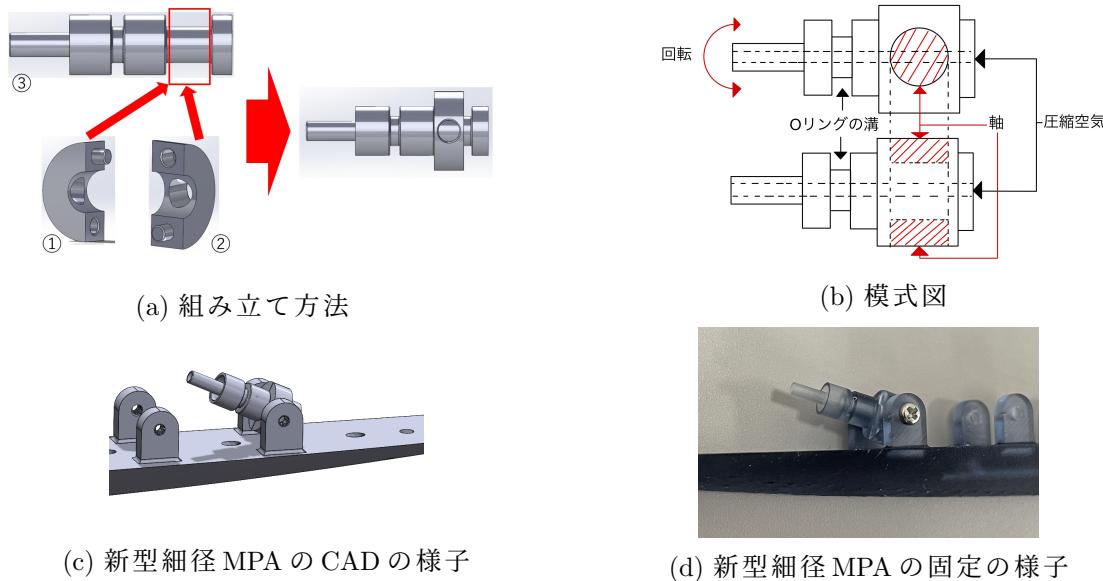


図 21: 先行研究で開発された羽状筋

#### 4.5 改良型細径羽状筋

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開発した改良型細径空圧羽状筋を図 22 に示す。図 22 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、外殻部分は PLA を用いて FDM 方式の 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。3.2 で述べたように、圧縮空気印加前の羽状角を 20 度かつすべての細径 MPA の長さは等しいという条件のもと、可能な限り外骨格内部に細径 MPA を配置した。また外殻の幅の制約から、すべての節で屈筋伸筋は一列ずつとした。本研究で開発した各節の羽状筋を図 23 に示す。長節においては屈筋伸筋とともに上下に 7 本ずつ、7 対 14 筋能状筋とした。同様に前節は 4 対 8 筋とした。腕節では屈筋伸筋とともに腱の上側が 5 本、下側が 4 本の非対称な羽状筋とした。これは可能な限り空間内に多数の細径 MPA を配置し、腱を引き込む力を大きくするためである。

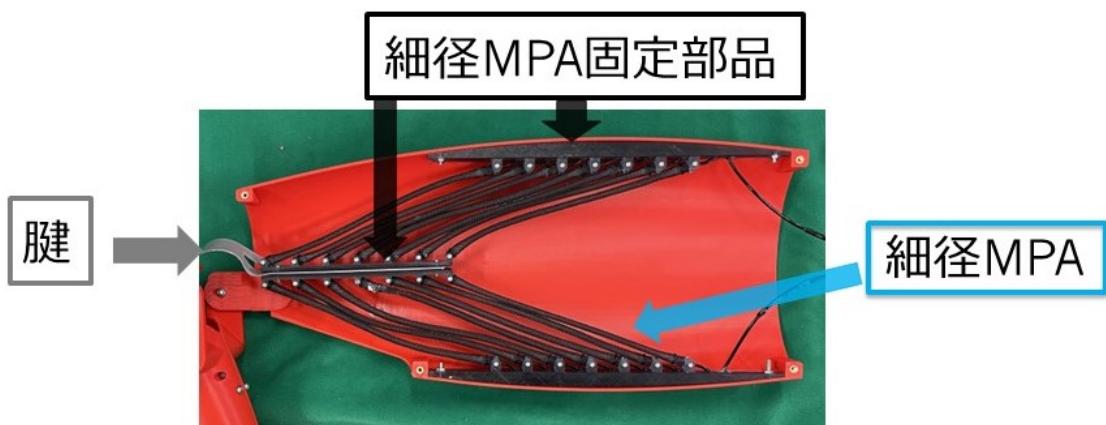


図 22: 改良型細径空圧羽状筋

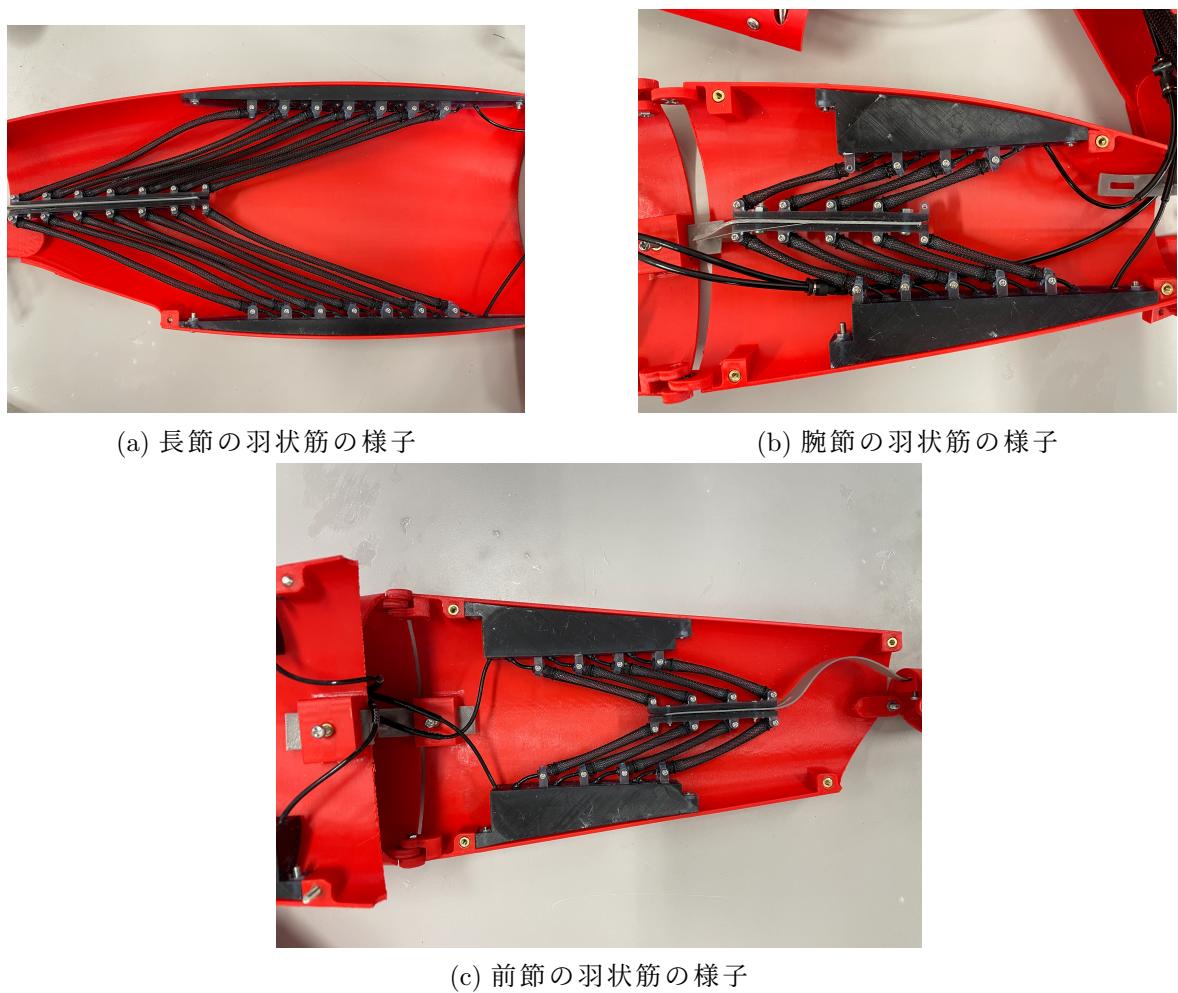


図 23: 本研究で開発した歩脚ロボットの羽状筋

## 5 動作実験

### 5.1 改良型細径羽状筋を備えたロボット

3.2と4.1, 4.2, 4.3, 4.4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24に示す。歩脚ロボットは長節、腕節、前節、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。全体重量が1586g。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。また、直径方向の具体的な寸法としては、長節が86.4mm、腕節が78.4、前節が59.8mm、指節が32.4mmである。

### 5.2 動作実験

本研究で開発した歩脚ロボットの改良型細径空圧羽状筋に圧縮空気を印加して、各関節の開閉動作および可動域を調べた。関節の動きを確認しやすくするために長節-腕節間と前節-指節間は機体を寝かせた状態、腕節-前節間は機体を立てた状態で動作実験を行った。また、初期位置は開筋か閉筋のどちらか一方が張った状態の位置にし、圧縮空気の印加は手動で行い印加圧力は0.6 MPa、開筋と閉筋の手動弁を交互に開閉することで動作させた。ここで開筋は関節を開く方向に、閉筋は閉じる方向に作用する羽状筋を指す。

設計上の可動域と機体の可動域の比較を行うために、図25のように各関節の軸となる部分にFDM方式の3Dプリンターで作製したマーカーを配置した。マーカーをつけた状態で動作実験の様子を録画した。その動画をトラッキングソフトの(kinovia)に読み込ませ、マーカーの1フレームごとの座標情報をexcelファイル形式で取得した。そのexcelファイルの座標データをMATLABで読み込み、関節のマーカーから節端部のマーカーのベクトルと関節からもう一方の節端部のマーカーのベクトルを求めた。その後、MATLABで先ほど求めたベクトルで内積を計算して脚の可動域を計算した。

### 5.3 実験結果

長節-腕節の動作実験を図26(a)、腕節-前節の動作実験を図26(b)、前節-指節の動作実験を図26(c)に示す。動作実験より、長節-腕節間では初期状態(図26(a)左)と最終状態(図26(a)右)



図 24: 本研究で作製した歩脚ロボット

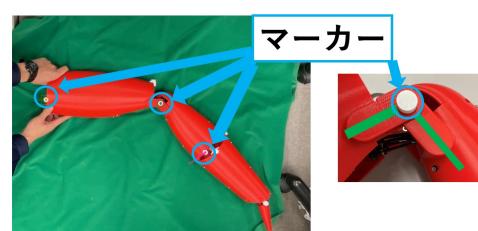


図 25: マーカーの配置の様子

右)では歩脚の角度が近い状態となった。腕節-前節間、前節-指節間では長節-腕節間と同じような動作が見られたが、可動域が狭く感じられた。

実験の結果から可動域を算出したものを図27、表10に示す。その結果、全ての関節において多少の誤差はあるものの、概ね設計通りの可動域が実現されていることが確認できた。

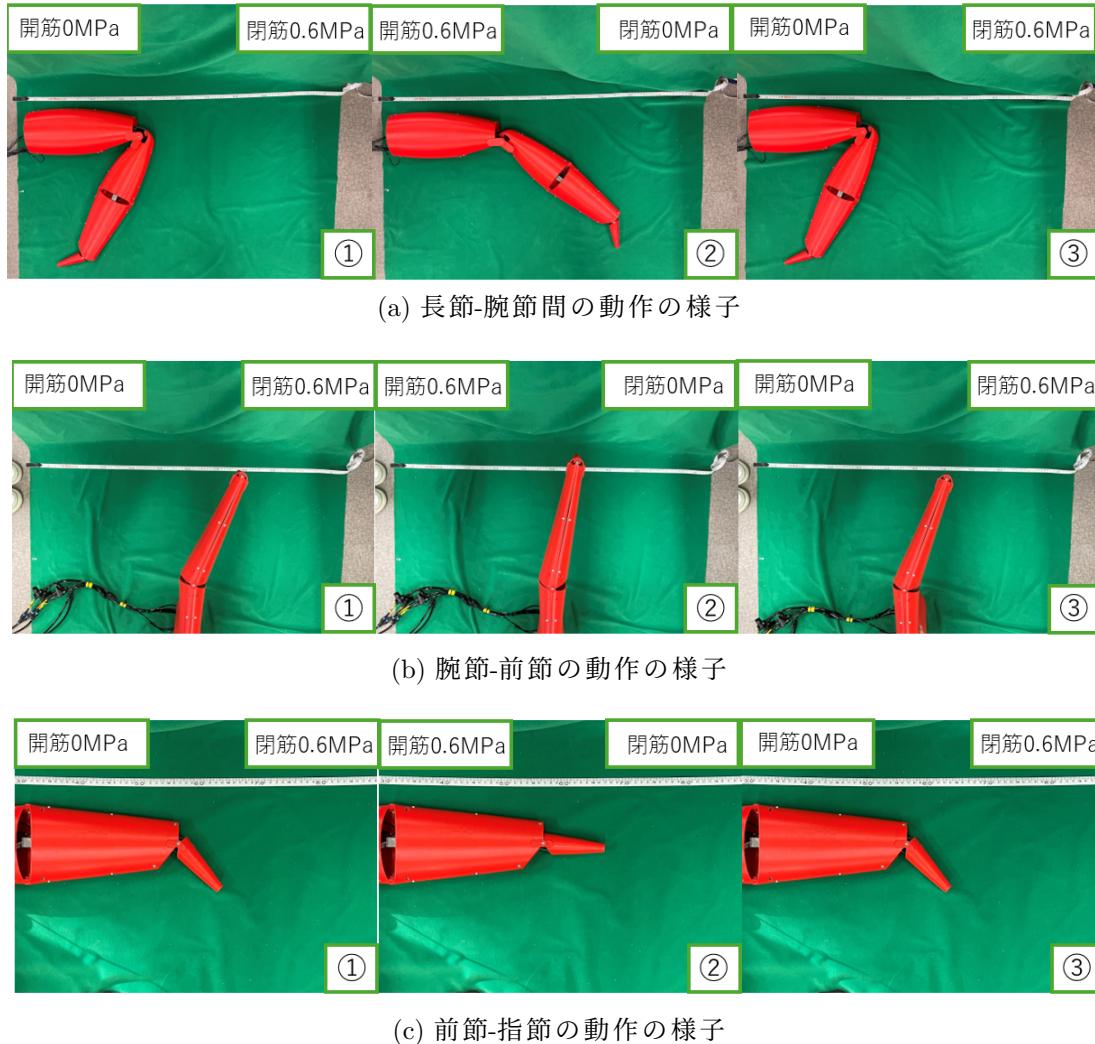


図 26: 動作実験の様子

表 10: 実際の蟹と実機の可動域比較

項目/可動域 [deg]	長節-腕節間	腕節-前節間	前節-指節間
実際の蟹	52~130	0~45	0~89
計算上のロボット	41.7~127.97	0~27	0~32.35
実際のロボット	45.3~133.1	3.25~36.0	9.82~39.8

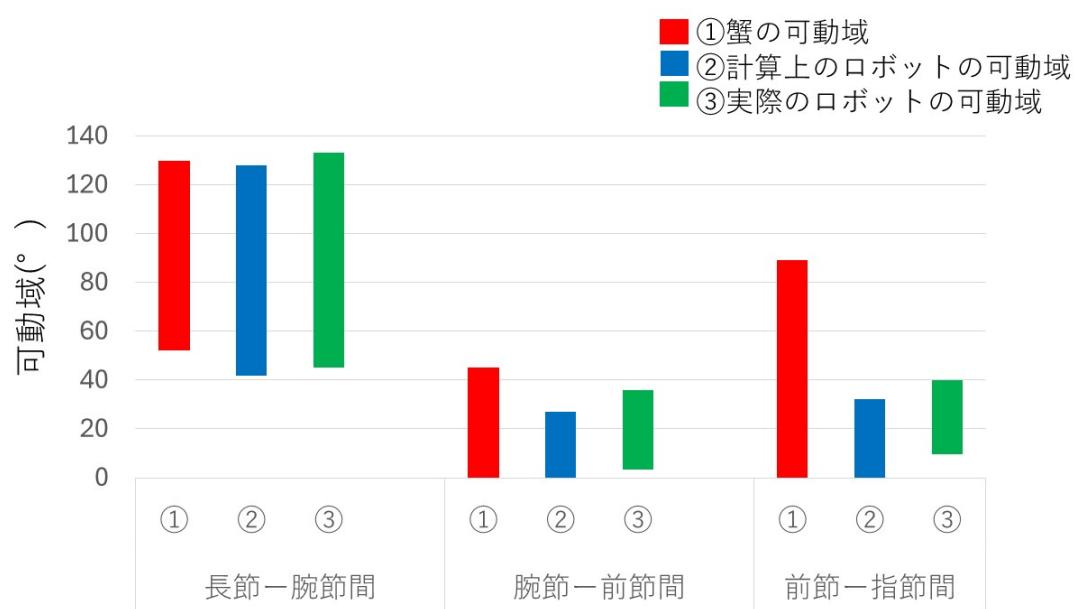


図 27: 実際の蟹と実機の可動域比較

## 5.4 考察

計算した可動域と実機の可動域で差が出た原因について考察する。原因として、腱の固定方法が挙げられる。図28、図29に本研究で作製した実機の腱の固定方法を示す。本研究では腱をねじで押さえつけて固定する方法を採用した。しかし、この固定方法では腱を設計通りの長さに固定することが難しく、計算上の腱の長さとの差が生じる可能性がある。またTPU素材の腱は、柔軟であるが弾性を有するために曲げに対して復元力も生じる。図27を見てみると、実際のロボットの可動域が計算上のロボットの可動域と比べて閉じる方向にずれていることが確認できる。これらの差により圧力を印加していない状態でも腱はわずかに引き込まれてしまい、計算上の可動域と実機の可動域の間に差が生じたと考えられる。

また本研究では、実機の可動域を計算するために数理モデルを用いたが、その数理モデルでは細径MPAを腱に固定する部品の高さを考慮していなかった。実機と数理モデルの差を図30に示す。これにより計算上の細径MPAのストロークと差が出てしまったと考えられる。この問題を解決するためには実機に近い構造を持つ数理モデルを構築し、それを用いてより正確な可動域を計算する必要があると考えられる。

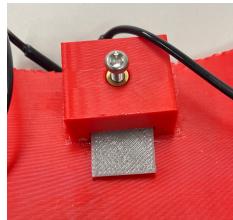


図28: 腱の固定方法

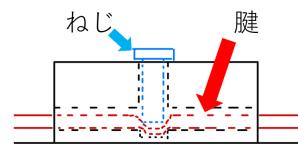


図29: 腱の固定方法の模式図

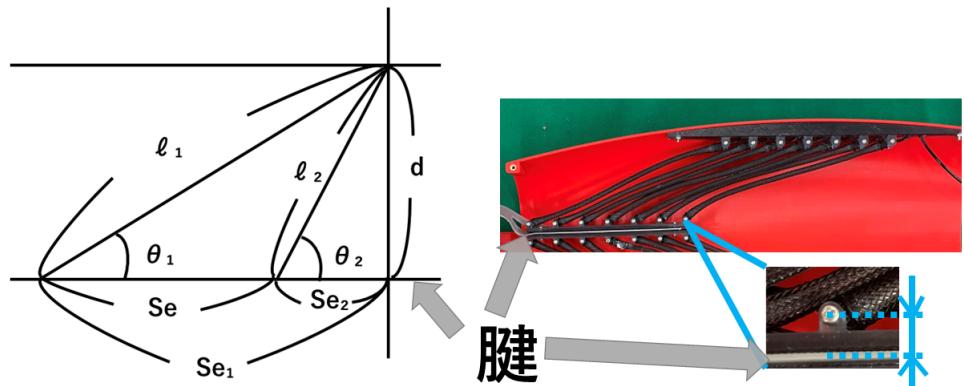


図30: 数理モデルと実機の差

## 6 結言

本研究では、細径MPAを用いて羽のような構造である羽状筋を再現し、それを用いてカニの脚を模したロボットの開発を目的として研究を行った。

本稿ではまず先行研究において確認された細径MPAを用いた羽状筋に関する3つの改題について対策を講じ、改良型細径空圧羽状筋の開発を行った。細径MPAの作製方法を見直し、Oリングを用いた締結方法を開発することで簡易かつ確実に製作することが可能となった。またメッシュの後加工手法を開発することで、収縮率の向上に成功した。さらに細径MPAを羽状配置した際、羽状角が可変となるように端部部品に回転自由度を持たせる改良を行った。ロボットの設計については、カニの羽状筋および関節構造を数理モデルとして定式化し、所望の関節可動域に対して細径MPAの長さや羽状角がどの程度必要かを検討した。その後、改良型細径空圧羽状筋と外骨格を用いて歩脚ロボットを作製し、動作実験を行った。動作実験では長節から腕節間、腕節から前節間の開閉動作を確認することが出来た。またトラッキングソフト(kinovia)を用いて可動域の計算を行った結果、全ての関節において多少の誤差はあるものの、概ね設計通りの可動域が実現されていることが確認できた。

今後は多様な長さの細径MPAを配置する方法、細径MPAに圧縮空気を印加していない状態で張力が発生しない固定方法を考えることにより実際の蟹の動きに近づけるような歩脚ロボットの開発を予定している。

## 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.