

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	5
3.2 外骨格の設計方法	5
3.2.1 外骨格の寸法	5
3.2.2 機体の可動域計算に用いた簡易モデル	5
3.3 蟹の関節構造と筋構造および筋配置	7
3.3.1 関節構造	7
3.3.2 筋構造	8
3.3.3 筋配置	8
4 細径 MPA を用いた歩脚ロボットの開発	10
4.1 羽状筋再現方法	10
4.1.1 細径 MPA 作製方法	10
4.1.2 細径 MPA 収縮率の向上	12
4.1.3 羽状角の自由度の再現	12
4.2 作製した機体	12
4.2.1 機体の構成および寸法	12
4.2.2 改良した MPA の集積方法	13
4.3 動作実験および結果	15
5 動作実験	17
5.1 実機の動作確認	17
5.2 実験結果	17
5.3 考察	17
6 結言	18
謝辞	19
参考文献	20

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)

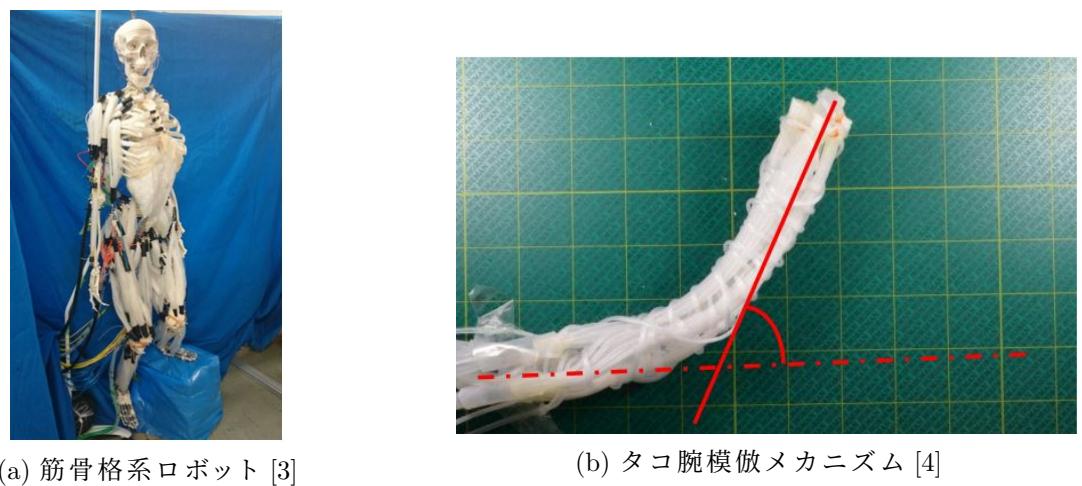


図 3: 細径空圧筋を用いたロボット

2.3 先行研究の成果と課題

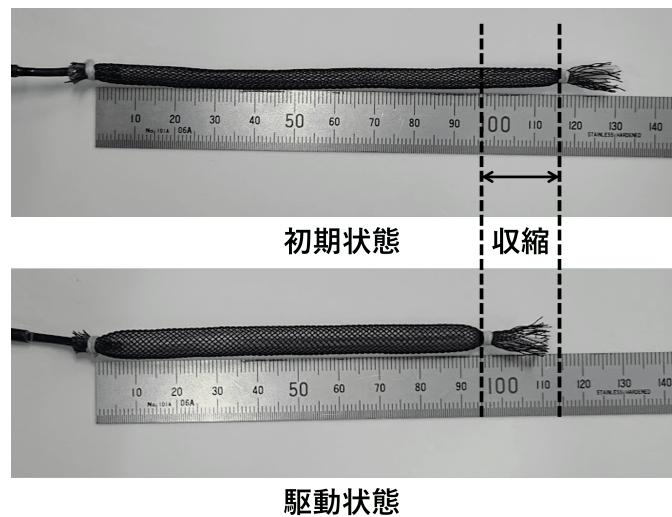


図 4: 収縮率

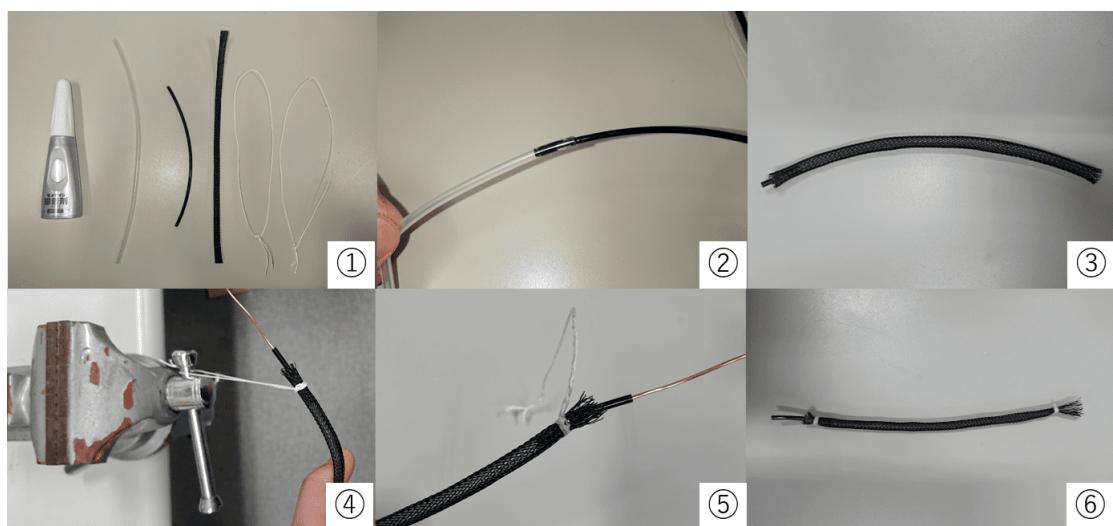


図 5: 細径 MPA の作製手順

3 モデル生物の構成および筋構造

本章では今回モデルにする甲殻類の蟹について、外骨格と内骨格の違いや本研究で重要な筋構造など実際にズワイガニを解剖した知見なども基に述べる。

3.1 使用したモデル生物

3.1.1 外骨格

3.1.2 羽状筋

3.1.3 蟹の関節の可動域

3.2 外骨格の設計方法

3.2.1 外骨格の寸法

3.2.2 機体の可動域計算に用いた簡易モデル

表 1: 第 1 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	12.01	12.01	8.86	7.68	52.0
腕節	6.11	-	9.85	7.60	14.5
前節	10.39	-	7.12	4.26	38.0
指節	-	4.51	-	3.36	24.5

表 2: 第 2 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	18.10	19.05	11.85	9.18	87.5
腕節	8.59	-	16.14	7.32	27.5
前節	16.14	-	8.83	4.40	58.5
指節	-	5.43	-	2.65	25.0

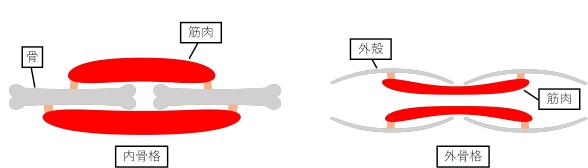


図 6: 内骨格と外骨格



図 7: 解剖に用いたズワイガニ

表 3: 第 3 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	18.38	20.88	13.56	9.98	102.0
腕節	9.70	-	17.30	9.12	31.5
前節	17.06	-	9.01	4.91	63.5
指節	-	5.62	-	3.93	27.5

表 4: 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 5: 第 5 肢(鉄脚)の長節から指節の寸法

	幅(左-中-右) [mm]	厚み(左-中-右) [mm]	長さ [mm]
長節	18.10-18.23-18.24	11.72-15.05-15.89	63.5
腕節	11.70-18.40-19.31	13.23-18.64-17.03	15.5
前節	22.97-25.82-25.06	14.75-21.30-19.09	50.0
前節(鉄部)	8.64- - -	- - - 4.45	45.0
指節	8.15- - -	- - - 4.26	50.0

表 6: 第 1 肢の節間の可動域

	可動域 [deg]
長節-腕節間	0-155
腕節-前節間	0-81
前節-指節間	0-110

表 7: 第 2 肢の節間の可動域

	可動域 [deg]
長節-腕節間	0-145
腕節-前節間	0-50
前節-指節間	0-90

表 8: 第 3 肢の節間の可動域

	可動域 [deg]
長節-腕節間	0-150
腕節-前節間	0-45
前節-指節間	0-80

表 9: 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

表 10: 第 5 肢の節間の可動域

	可動域 [deg]
長節-腕節間	70-140
腕節-前節間	0-40
前節-指節間	15-30

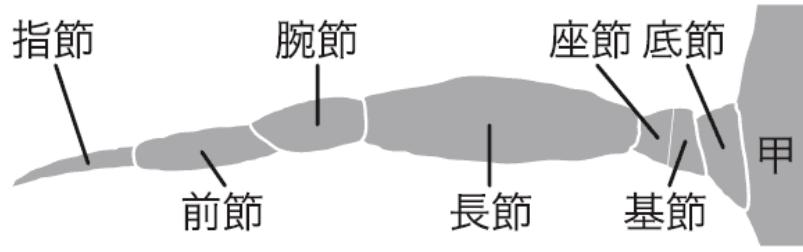


図 8: 節の名称 [10]



図 9: ズワイガニの脚の可動域



図 10: 節間膜

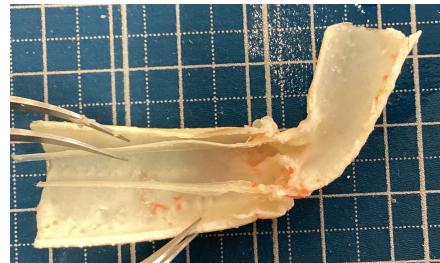


図 11: 腱の様子

3.3 蟹の関節構造と筋構造および筋配置

3.3.1 関節構造

蟹の脚は鋏脚と歩脚の5対10本から構成され、それぞれの脚は甲に近いほうから底節、基節、座節、長節、腕節、前節、指節の7つの節からなる(図8)。基節、座節の間の関節は融合し1つの節のように見える場合もある[10]。脚を構成する7つの節が接する関節の部分はそれぞれ動く方向が決まっており、底節は複雑に配置された筋によって前後左右に動かすことが可能であるが、それよりも遠位の関節は基本的には単純な開閉動作をする。図9に解剖したズワイガニの歩脚に回転軸を追記したものを示す。今回用いるズワイガニに関しては長節から指節のうち、腕節-前節間は前後に可動域を持つが、それ以外の節間は甲から腹側への開閉方向の可動域を持つことが分かった。また、それぞれの節間に筋膜と呼ばれる丈夫で柔軟なクチクラ質の組織によって繋がっている(図10)。

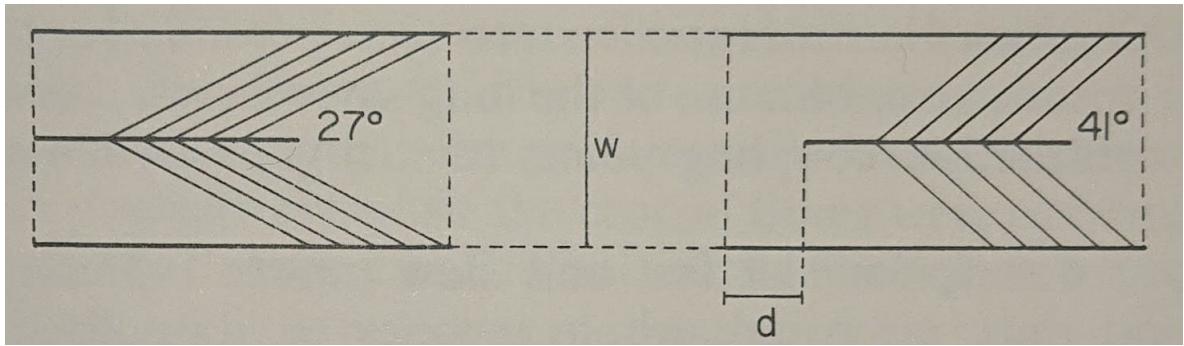


図 12: 羽状筋の動きを模式的に表したもの. 左側が筋肉が伸展, 右側が収縮した状態. 収縮中, 羽状筋の角度は 27 deg から 41 deg に増加し, 腱は距離 d を移動する. 各筋繊維は短く太くなるが, 筋全体の幅 w は変化しない [11]

3.3.2 筋構造

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. 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になるように挿入されていることが分かった. 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12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 [11].

3.3.3 筋配置

脚内部の筋肉配置について, 同じく十脚目短尾下目の *Libinia emarginata* の歩脚と鉗脚の筋構造を図13に, ヨーロッパイチョウガニとヨーロッパミドリガニの歩脚をCTスキャンしたもの図14(a), (b)に示す. 図13, 図14より, 3種の歩脚の長節以降の筋配置は非常に似ていることが分かり, 腕節-前節間, 前節-指節間は節の可動域に沿って配置されているが, 長節-腕節間は可動域よらず縦に配置されている. また, 図13より, 底節, 基節, 座節部分は複雑な筋配置となっていることが分かる. 本研究ではズワイガニの長節-指節間の筋配置はこれらと同様なものとして扱い, 節を開く方向に作用する羽状筋を開筋, 閉じる方向へと作用するものを閉筋とする. また, 筋配置が複雑な底節, 基節, 座節は扱わないものとする.

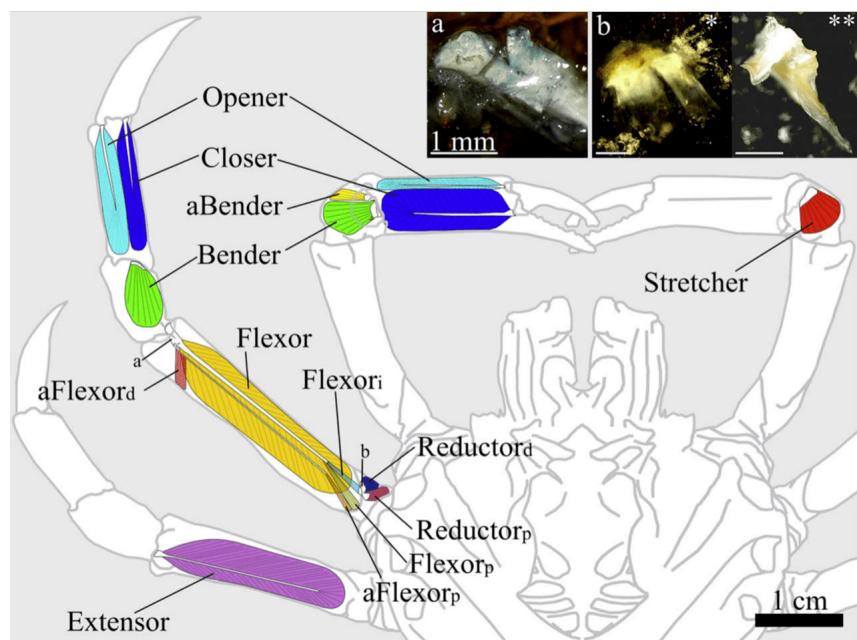


図 13: *Libinia emarginata* の歩脚と鉗脚の筋構造 [12]

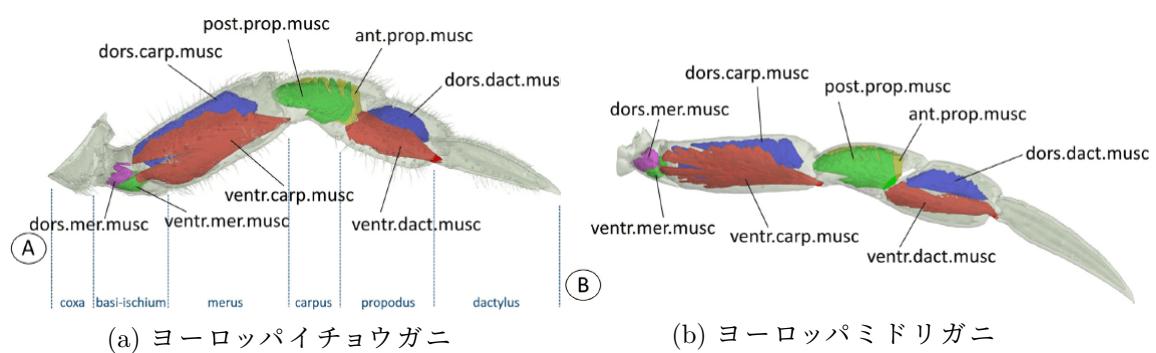


図 14: 歩脚の ct スキャン画像 [13]

4 細径 MPA を用いた歩脚ロボットの開発

本章では実際に作製した歩脚ロボットの構成について述べる。まず初めに羽状配置での動作確認を行うために作製した予備実験の機体の構成とその実験結果についてまとめ、その後に実際のズワイガニの構成と寸法をもとにした機体とその動作実験の結果について述べる。

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 3 mm 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(図 4)。おおまかな作製手順を図 5 に示す。端部の締結方法として端部に光造形方式の 3D プリンタで出力した部品を取り付ける方法(4.1.2 節で使用)もあるが、ここでは直に紐で結び締結する手法を紹介する。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 5 cm 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)

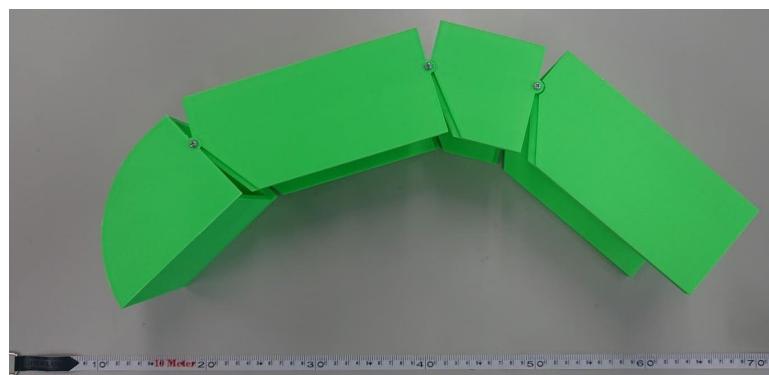


図 15: 実験機の外観

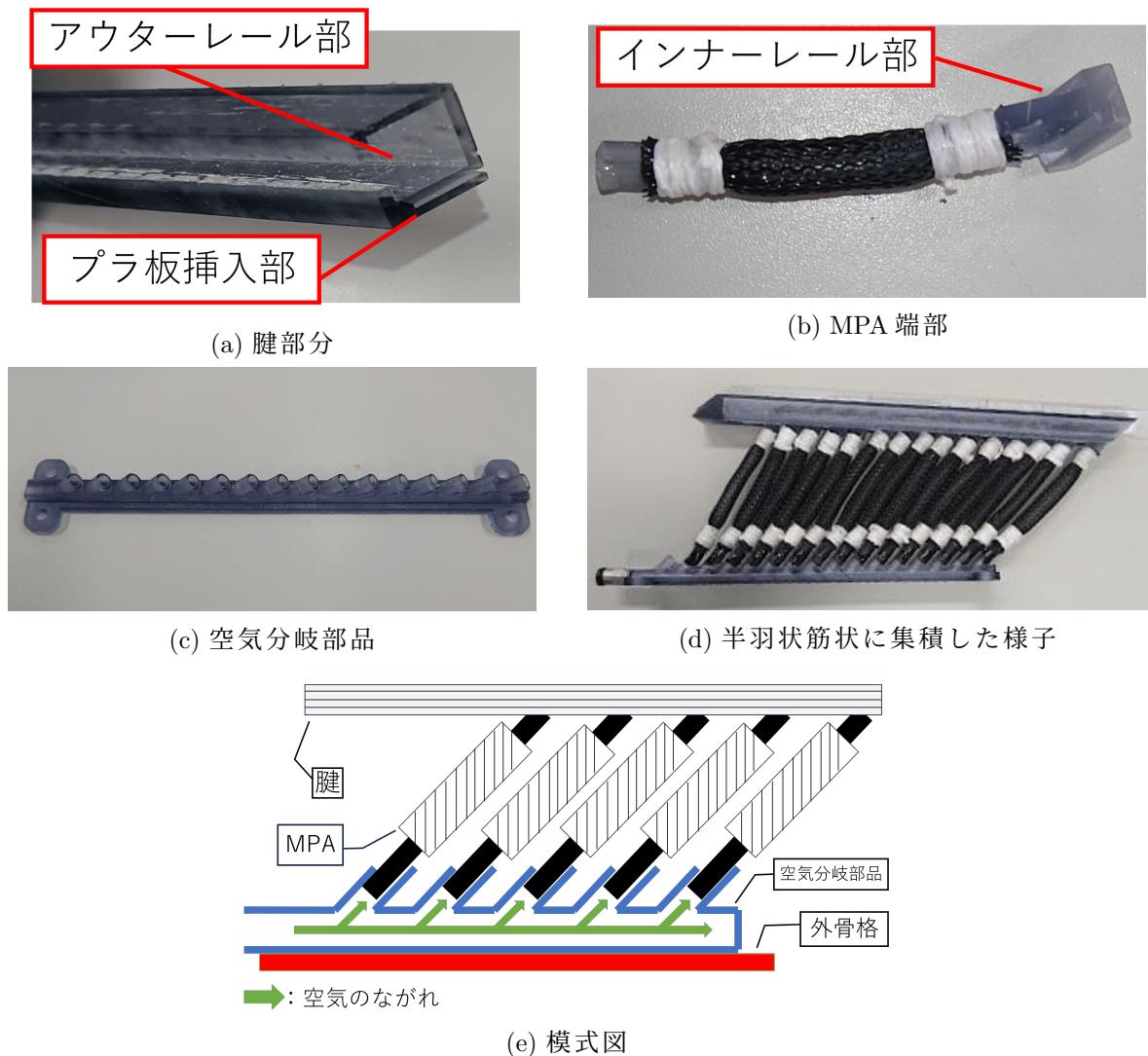


図 16: 予備実験に用いた集積部品

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
5. 締結した部分に接着剤を塗布し、緩まないようにする(図中⑤)
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⑥)
7. ポリウレタンチューブを光造形の部品に差しこみ、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したら完成



図 17: 予備実験

4.1.2 細径 MPa 収縮率の向上

4.1.3 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

実際の蟹の寸法や可動域などをもとにした3次元3自由度を有する歩脚ロボットの機体について述べる。本研究では解剖時に測定したズワイガニの最も大きい歩脚(第4肢)について表4, 表9に示した寸法および可動域を基に機体を作製した。図18に3DCADソフトのSOLIDWORKSを用いた機体の設計方法を示す。以下、設計手順である。

1. 測定した寸法を基に2~3個の橈円輪郭を描く
2. 描いた橈円輪郭をロフトで繋ぎ、立体にする(ロフト:2つ以上の輪郭を繋ぎ立体的な形状を作る機能)
3. シェルを用いて立体を厚み2 mmでくり抜く(シェル:指定した面を開けて均一な厚みにくり抜く機能)

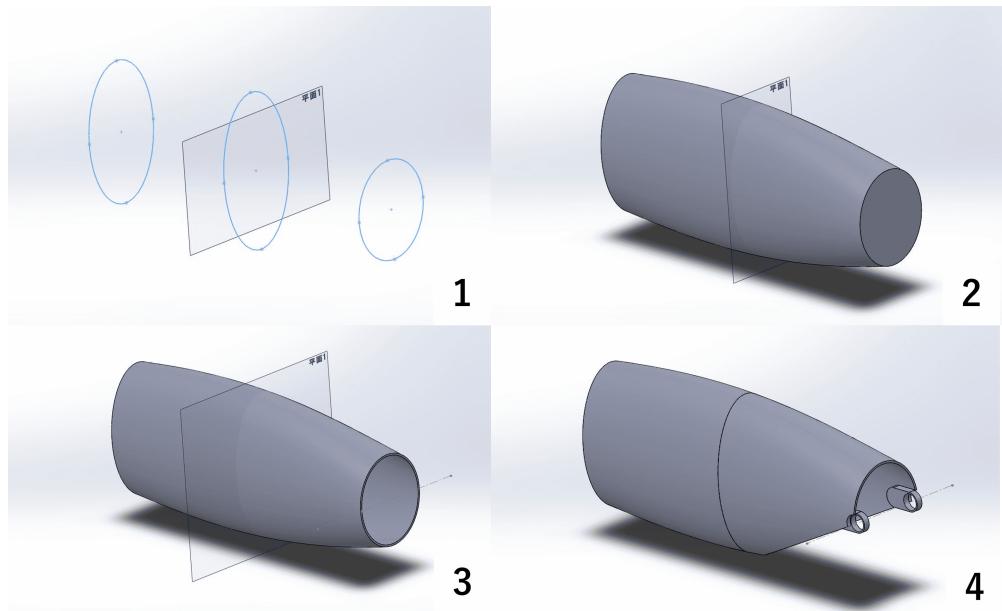


図 18: 実機の SOLIDWORKS 上での作製手順

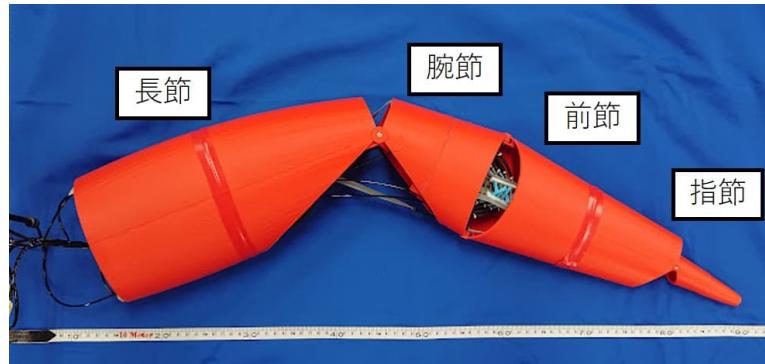


図 19: ズワイガニの歩脚を模したロボット

4. 測定した可動域を実現できるよう端面をカットし、端部にペアリングを挿入できるように加工

以上の手順で作製した機体を図19に示す。寸法については表4に示した実測値を小数点以下で切り捨て、直径方向へ7倍、長手方向へ3.5倍のサイズとした。ただし、直径方向へは集積部品の厚みも考慮して5 mm加えた。外殻の厚みは一律で2 mmとなっている。また、手順にもあるように関節部にはペアリングを使用した(図20(a), (b))。具体的な機体の寸法を表11に、使用したペアリングの寸法を表12に示す。機体の作製にはFDM方式の3Dプリンタを使用し、印刷の際は各節を半分にしてからそれぞれ出力した。

4.2.2 改良したMPAの集積方法

ズワイガニを模した機体では予備実験に用いた機体よりも内部のスペースが限られたため、よりコンパクトに羽状配置を構成できるような集積方法を用いる必要があった。また、

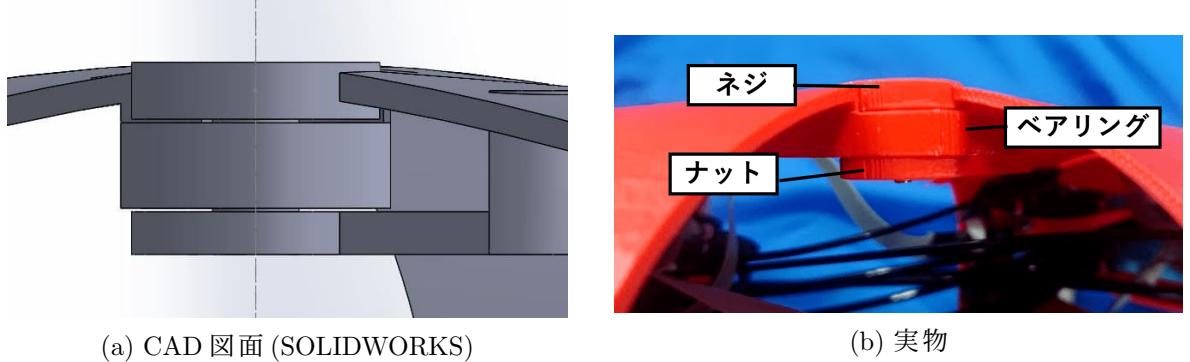


図 20: 関節構造

表 11: 実機寸法

	左 [mm]	中 [mm]	右 [mm]	長手方向 [mm]
長節	137.5-81.5	151.5-81.5	95.5-81.5	350
腕節	95.5-81.5	-	130.5-60.5	140
前節	130.5-60.5	-	74.5-32.5	245
指節	35.5-32.5	-	-	100

表 12: ベアリングの各寸法

	外径 [mm]	内径 [mm]	厚み [mm]	ネジ, ナット
長節-腕節間	16	4	6	M3
腕節-前節間	8	3	4	M3
前節-指節間	6	2.5	2.6	M2

予備実験に用いた集積方法では MPA 一つ一つの長さが異なると羽状配置が崩れるため、本研究で用いる手作業で作製する MPA には不向きな集積方法であった。これらの問題を解決するために取り付けと長さの調節が容易な結束バンドの機構に注目し集積部品を作製した。図 21(a), (b) のように MPA 端部は TPU 素材で結束バンドのシート部にし、腱部分は PLA 素材で結束バンドのヘッド部を連結させたような形状にすることで長さの調節が可能かつ強固に固定できる集積方法となっている。腱部分の PLA 部品の連結には予備実験に用いたプラスチック板よりも剛性に優れている穴の開いた TPU 素材のシートを用いることで立体的に集積できるようになっており、シートの端部を細長く伸ばすことで隣の節まで繋げられるようになっている。

図 21(c) に実際に集積した MPA を示す。また、図 21(d) に機体に配置した際の動作の模式図を示す。本来、羽状筋は立体的に配置されているが機体内部のスペースに限りがあるため上下の 2 方向から羽状筋を構成した。集積した MPA と外殻の付着には容易に着脱可能かつ強固に固定可能な面ファスナーを用いた(図 22)。本研究では空気分岐部品の裏面に面ファスナーのフック側、外殻にループ側を取り付けることで着脱できるようになっている。腱と外殻の付着にはインサートナットを使用している。外殻とは別でインサートナット挿入部品を FDM 方式方式の 3D プリンタで作製し、インサートナット挿入後、外殻へ瞬間接

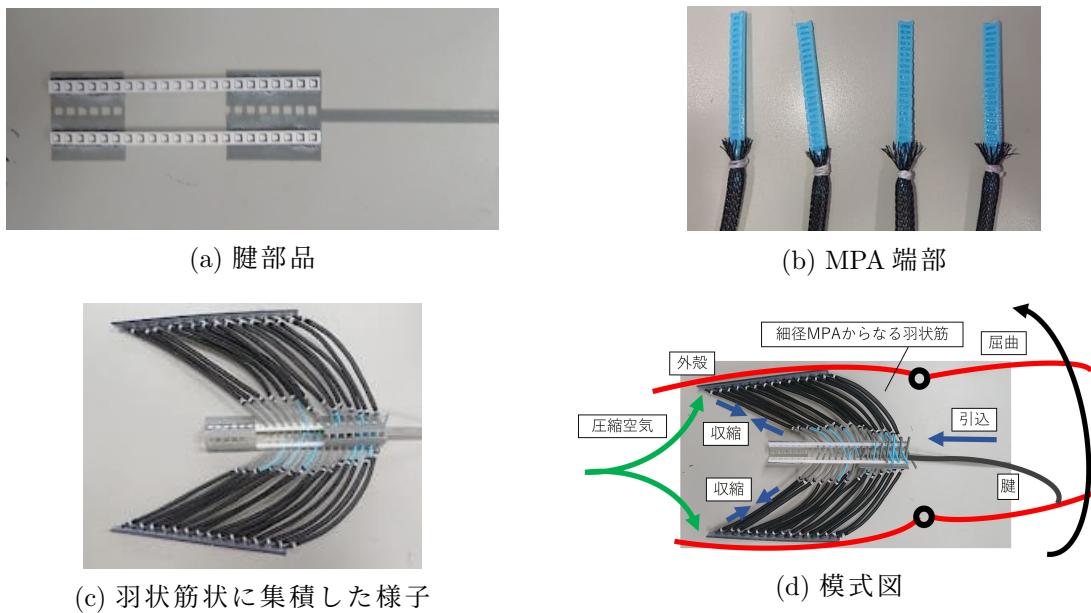


図 21: 改良した集積方法

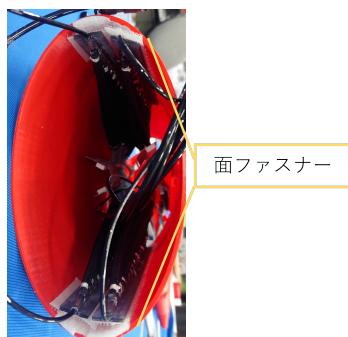


図 22: 外殻との付着方法



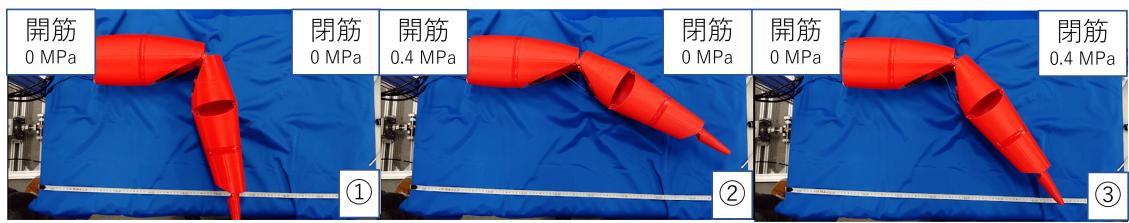
図 23: 腱の外殻への固定方法

着剤 (PPX メーカー: セメダイン 品番: CA-522) を用いて固定した。その後、インサートナットと外殻の隙間に TPU シートを挿入し、ネジ止めすることで固定可能となっている。

4.3 動作実験および結果

羽状配置に集積した MPA を長節から腕節、腕節から前節間の開筋、閉筋に配置し動作実験を行った。関節の動きを確認しやすくするために長節-腕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の腱が張った状態の位置とし、空気の印加は手動で行い印加圧力は 0.4 MPa、開筋と閉筋の手動弁を交互に開閉させることで動作させた。

長節-腕節間の動作結果を図 24(a)、腕節-前節間の動作結果を図 24(b) に示す。結果より、長節-腕節間では初期位置から動作させたときに最も大きく関節が動き、それ以降の関節の動きは僅かなものであった。腕節-前節間では初期動作から関節の動きは小さかったものの開閉動作が確認できた。



(a) 長節-腕節間の動作



(b) 腕節-前節間の動作

図 24: 動作実験

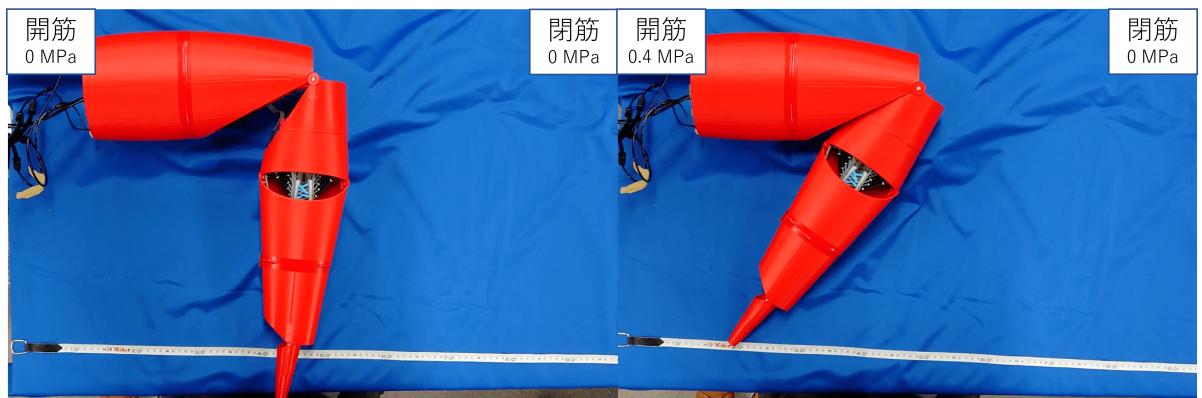
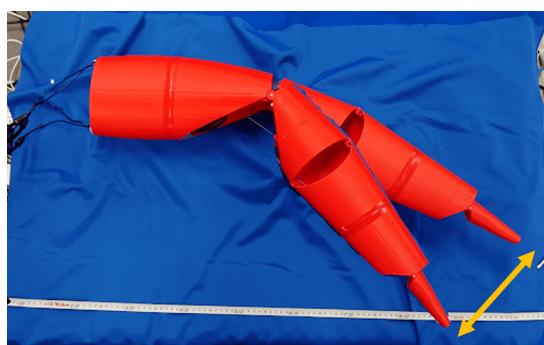
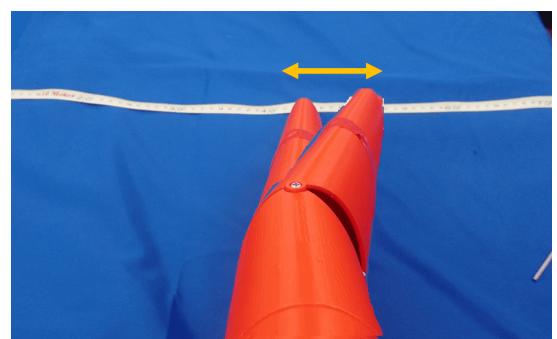


図 25: 角度による動作の変化



(a) 長節-腕節間の駆動範囲



(b) 腕節-前節間の駆動範囲

図 26: 駆動範囲

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

本研究では手作業で作製可能な外径3 mmの細径MPAの作製方法を開発し、それを用いた羽状筋の構成手法の開発、ズワイガニの歩脚をモデルにしたロボットの開発を行った。まず、4つの節に分かれた2次元3自由度の機体を開発しそれらを用いて細径MPAを羽状配置にした際に動作するか、また、どのような問題点があるか予備実験によって確認した。次に、ズワイガニを解剖して得られたデータを基にズワイガニの歩脚を模したロボットを作製し予備実験で見つかった課題を解決できるように細径MPAの改善、新たな集積方法の開発を行い動作実験を行った。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。

今後は、より蟹らしい歩脚の動作を実現するために節間膜の実装や羽状筋の配置の見直しを行い、前節から指節間にも集積したMPAを配置し歩脚ロボットの完成を目指す。

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] 佐藤武弘. カニの脚. 自然科学のとびら, Vol. 17, No. 1, 2011.
- [11] G.F. Warner. *The Biology of Crabs*. Elek, 1977.
- [12] A.G. Vidal-Gadea and J.H. Belanger. Muscular anatomy of the legs of the forward walking crab, libinia emarginata (decapoda, brachyura, majoidea). *Arthropod Structure & Development*, Vol. 38, No. 3, pp. 179–194, 2009.
- [13] Dennis Hazerli and Stefan Richter. Why “swimming crabs” are able to swim - the importance of the axial skeleton: A comparison between the “swimming crab” liocarcinus

depurator and two other brachyuran crabs (*cancer pagurus*, *carcinus maenas*) using μ ct and 3d-reconstruction. *Arthropod Structure & Development*, Vol. 59, p. 100972, 2020.