カニ模倣型ロボットの開発に向けた細径空圧筋の改良

Improvement of Thin Pneumatic Muscles for Development of Crab-type Robot

研究者　濱口 紘生　　指導教員　　中西 大輔

Keywords: McKibben Pneumatic Actuater, Exoskeleton, Biomimetic Robot

1.　緒言

代表的な人工筋肉として，圧縮空気を印加することにより骨格筋のように収縮する McKibben 型人工筋肉 (MPA) があげられる．従来は直径が数十 mm 程度のものが多かったが，近年では数 mm 程度の MPA が注目を集めている [1]．その細さを活かして小さい筋肉，あるいは集積によって複雑な筋肉を表現可能なことから，筋骨格系ロボットに盛んに用いられている [1]．一方で，甲殻類のような外骨格を有する生物模倣ロボットでは，アクチュエータの配置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が主流であった [2]．細径 MPA であれば骨格内部にアクチュエータを配置することが可能であり，実際の生物に近い構成でロボットを作成することが可能である．そこで本研究では外骨格生物のうち甲殻類の蟹をモデルに，実際の蟹の筋肉と関節の構造を参考にして細径 MPA を使用した蟹の歩脚ロボットの開発に取り組む．

2.　細径 MPA を用いた羽状筋の再現

2.1　羽状筋について

羽状筋とは，筋肉全体が斜めの角度で腱に付着する筋肉形状を指す．この構造により，筋肉全体が羽のような配置を持ち，同じ断面積内に多くの筋繊維を収めることが可能となる．これにより，高い力を発生する特性を有する．羽状筋は多くの生物に見られる筋配置の 1 つであり，人においては三角金がその代表例として挙げられる．本研究で作製するカニ模倣型ロボットにおいても，外骨格内部に羽状筋に類似した筋構造を組み込む設計を行う．

2.2　先行研究の課題と改良方法

先行研究では図 1 上のように，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が，糸の締結に時間と練度を必要とすることや，度々空気漏れを生じるという難点があった．そこで本研究では端部部品を改良し，ゴムと端部を接着剤で，スリーブと端部を O リングと接着剤でそれぞれ固定する方式へと変更した (図 1 下)．これにより細径 MPA に練度が不要となり，作成時間も大幅に短縮された．

続いて細径 MPA の収縮性能向上に取り組んだ．先行研究において開発された細径 MPA においては，折癖の影響からスリーブが多少膨らんだ状態で作成されていたため，圧力印加時の収縮量が減少してしまっていた．本研究ではメッシュの中に直径 2mm の丸棒を差し込んで

図 1: 細径 MPA 締結方法

図 2: 細径 MPA 端部部品

固定した状態でホットプレートで加熱することで熱可塑変化させた．折癖をとるとともにスリーブの初期直径を 2mm にまで小さくすることに成功し，収縮量を向上させることができた．

最後に，細径 MPA を羽状配置するために端部の部品の構造を改良した．羽状筋は収縮した際に筋肉の角度が変化するが，先行研究では根元の角度が固定されており，腱の引き込みの妨げになっていた．そこで本研究では図 2 の細径 MPA の端部の部品を作成した．図 2 の赤い斜線部の穴を回転の軸にして細径 MPA の角度を自由に変化することができ，これにより細径 MPA 動作時に端部の部品に干渉しないことが確認できた．

3.　実機の設計・作成方法

3.1　外骨格の設計について

作成した実機を図 4 に示す．今回の研究では甲殻類のうち蟹のズワイガニの歩脚モデルに機体を作成した．機体作成時には先行研究 [3] のズワイガニの歩脚の各部寸法と，本研究で新たに解剖した際に得られた可動域をもとにしてモデリングした．ただし機体内部に細径 MPA や腱部品などを配置する必要があるため，実測値に対して直径方向には 7 倍，長手方向には 3.5 倍のサイズとした．可動域を実際の蟹に近づけるために腕節部だけ長手方向に 6.3 倍した．作成には MPA 方式の 3D プリンタを使用し，関節部にはベアリングを入れている．長手方向の具体的な寸法としては，長節が 350 mm，腕節が 256 mm，前節が 245 mm，指節が 100 mm である．

3.2　細径 MPA を用いた羽状筋の再現について

本研究では，羽状筋のような蟹の駆動機構を再現するため細径 MPA を用いた羽状筋の開発を行った．開発した羽状筋を図 5 に示す．上記で説明した羽状筋の筋繊維は 1 本ずつ長さが異なっているが，作成方法と関節の可動域の幾何学的計算を簡易化するため図 5 のように細径 MPA の長さがすべて等しくなるように設計した．図 5 の細径 MPA の端部にある黒い部品は 3 章で紹介した細径 MPA の収縮に合わせて角度が自由に変化でき，圧縮

(a) 長節-腕節間の動作実験

(b) 腕節 - 前節間の動作実験

(c) 前節 - 指節間の動作実験

図 3: 動作実験の様子．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．

空気を各細径 MPA へ一度に供給することができる部品である．この部品は光造形方式の 3D プリンターで作製した．また図 5 にある灰色の部品は蟹の腱を模したもので，TPU 素材を使用して FDM 方式の 3D プリンターで作製したので柔軟性が高くねじれに対応可能である．腱と外骨格は全てねじで固定しており，腱の張り具合は可能な仕組みになっている．

実際の蟹の可動域を再現するために必要な腱のストローク，腕節-前節間のように細径 MPA の配置が困難なことから可動域を再現不可能な関節の可動域を幾何学的計算から求めた (表 1)．

4. 動作実験

長節から指節にかけて MPA を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 0.6MPa，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．

長節-腕節間の動作結果を図 3(a)，腕節-前節の動作実験を図 3(b)，前節-指節の動作実験を図 3(c) に示す．結果より，長節-腕節間では初期状態 (図 3(a) 左) と最終状態 (図 3(a) 右) では歩脚の角度が近い状態になった．腕節-前節間，前節-指節間では長節-腕節間と同じような動きがみられたが，可動域が少し狭く感じた．

また，動作分析ソフトウェアの Kinovia と数値解析が可能な MATLAB を用いて実機の可動域を計測した (表 1)．その結果，長節-腕節間では実際の可動域の再現することができた．腕節-前節間は実際の蟹の可動域は再現できていなかったが，今回設計した実機で出力可能な可動域を再現できていた．前節-指節間は今回の設計では実際の蟹の可動域が再現可能にもかかわらず，実際の蟹の半分の可動域しか再現できていなかった．

5. 考察

前節-指節間の関節の動きが小さい原因について考察する．

一つ目の原因として，ゴムチューブの折癖により全ての細径 MPA の長さが等しく作製できなかった点が挙げられる．これにより，圧縮空気を印加していない状態での細径 MPA と腱の角度が大きくなってしまい出力可能ストロークが減少してしまった．よって細径 MPA の長さを等しくするために，ゴムチューブの折癖をなくす作業が必要だと考える．

図 4: 実機の外観

図 5: 実機内部の筋配置

表 1: 実際の蟹と実機の可動域比較

項目/部位	長節-腕節間	腕節-前節間	前節-指節間
実際の蟹の可動域	52~130	0~45	0~89
計算上のロボットの可動域	45.3~133.1	0~34.13	0~55.85
実際のロボットの動域	45.3~133.1	3.25~36.0	9.82~39.8

二つ目の原因として，腱付着点から節の中心まで伸びている腱の長さが長かった点が挙げられる．これにより，可動域を再現するための簡易モデルのとの差が生じてしまい可動域を再現するためにより多くのストロークが必要になってしまっていた．よって，簡易モデルを再現するために腱を押さえつけるような部品の開発が必要であると考えられる．

6. 結言

本稿では，外骨格生物模倣ロボットの開発をするにあたって課題となる細径 MPA の作成方法と固定方法について改良を行った．さらにそれらを用いてカニ模倣型ロボットの開発に成功し，長節から指節までの動作実験を行った．節の開閉動作を確認することができたが実際の蟹の可動域を完全に再現することはできなかった．今後は細径 MPA を同じ長さに配置する方法，動作時に腱が関節から離れない設計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完成を予定している．

参考文献

1) 脇本修一，細径 McKibben 型人工筋の開発と用途開拓，計測と制御，57 巻，11 号，pp.812-815，2018
2) CHEN, Xi, et al. Study on the Design and Experimen-

tal Research on a Bionic Crab Robot with Amphibious Multi-Modal Movement, Journal of Marine Science and Engineering, 10, 12, p.1804, 2022
3) 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 2024，2A1-L08，2024.
4) D.Hazerli and S.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, 59,p.100972,2022