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.　MPA および羽状筋について

従来の MPA と細径 MPA を図 1 に示す．通常の MPA(図 1 左) と比べて細径 MPA(図 1 中，右) は細くて軽量のため狭いスペースへの配置と集積が可能である．また複数の細径 MPA を集積することで複雑な筋肉の再現が可能である．また先行研究 [3] で開発されたロボットに搭載された細径 MPA を用いた羽状筋を図 2 に示す．羽状筋とは羽のように筋繊維が斜めに並んだ筋肉である．先行研究 [3] ではこの羽状筋を用いてカニの歩脚を模した外骨格型ロボットを開発し，脚の開閉動作の実現に成功した．しかし羽状筋の構成方法や細径 MPA の収縮性能などを原因として，実際の蟹と比べて可動域が狭いという課題が残された．また細径 MPA の制作過程の煩雑さも課題であった．本研究ではまずこれらの課題を解決することで，より実際の蟹に近い構造や可動域を有するロボットの開発を目指す．

3.　細径 MPA および羽状筋構造の改良

まず細径 MPA の制作方法の改良を行った．先行研究では図 3 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 3 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．

図 1: MPA の外径

図 2: 蟹模倣ロボット [3]

図 3: 細径 MPA 締結方法

図 4: 細径 MPA 端部部品

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 (図 2) 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 4 の細径 MPA の端部の部品を作成した．図 4 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．

4.　実機の設計・作成方法

4.1　外骨格の設計について

作成した実機を図 5 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．

4.2　細径 MPA を用いた羽状筋の再現について

蟹の外骨格内部の筋配置を図 6 に示す．蟹の筋肉は外骨格から腱に向かって斜めに並んだ羽状筋となっている．羽状筋は収縮した際，各筋繊維の角度が大きくなるだけで，膨張しないため狭い空間で働くのに適している．また，長節から腕節に配置されている羽状筋は節の回転軸によらず縦に格納されており，腱がねじれるようになっている．

本研究では，徐行き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 7 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 7 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 7 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 7 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．

可動域の幾何学的計算は図 8 のような簡易モデルをもとに三角関数などを用いて式 (1)，(2) を導いた．収縮前の細径 MPA の長さ ℓ_1 と細径 MPA の付着点間の垂直距離を d を用いて収縮後の細径 MPA と腱のなす角を θ_2 を計算した (式 1)．収縮前の細径 MPA の長さ ℓ_1，その時の細径 MPA と腱のなす角 θ_1，収縮後の細径 MPA の長さ ℓ_2，その時の細径 MPA と腱のなす角 θ_2 を用いて誌細径 MPA の収縮による腱の水平移動距離 S_e を計算した (式 2)．なお，細径 MPA の収縮率は 20 %，θ_1=20 として計算を行った．

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{d}{0.8\ell_1}\right) \quad (1)$$

$$S_e = \ell_1 \cos\theta_1 - \ell_2 \cos\theta_2 \quad (2)$$

5.　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 9(a)，腕節-前節の動作実験を図 9(b)，前節-指節の動作実験を図 9(c) に示す．結果より，長節-腕節間では初期状態 (図 9(a) 左) と最終状態 (図 9(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．

図 5: 実機の外観

図 6: 蟹模倣ロボット [4)]

図 7: 実機内部の筋配置

図 8: 実機の簡易モデル

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
実機の可動域	45.3~133.1	3.25~36.0	9.82~39.8

表 1: 実際の蟹と実機の可動域比較

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．

6.　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．考察は細径 MPA が全て同じ長さで作成することができなかったことと，前節-指節間では閉筋に圧縮空気を印加した際に，腱付着点から節の中心に向かって伸びている腱の長さが他の関節に比べて長かった．それにより本来のストロークを出し切れていなかった．などについて考察していきたいと考えています．

7.　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

(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 9: 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．

2) CHEN, Xi, et al. Study on the Design and Experimental 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