

# McKibben型人工筋肉とリンク機構を組み合わせた 脚部機構の開発

## Development of a Leg Mechanism Combining McKibben-Type Artificial Muscles and Linkage Mechanisms.

○竹之内涼\*, 戸森央貴\*

○Ryo Takenouch\*, Hiroki Tomori\*

\*山形大学

\*Yamagata University

キーワード :McKibben型人工筋肉 (McKibben-type artificial muscle), リンク機構(Linkage Mechanisms),  
脚部機構(Leg Mechanism)

連絡先 : 〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16 山形大学 工学部 機械システム工学科 戸森研究室  
戸森央貴, Tel.: (0238)26-3217, E-mail: tomori@yz.yamagata-u.ac.jp

### 1. 緒言

地面を歩行できる脚ロボットには利点が多い。人間のように歩行可能なため、瓦礫が散らばっているような不整地での対応力が高く、階段や坂等、人間に向けて作られた設備も進むことが可能である。こういった利点が多いため、脚ロボットの研究は各所で行われている。

一方で、アクチュエータの選択は脚ロボットの特性に大きな影響を与える点で重要である。ここで、ロボットのアクチュエータの一種である人工筋肉に着目した。本アクチュエータはゴムチューブと繊維から構成されており、圧縮空気の注入により収縮運動を行う。人工筋肉の特徴として、軽量かつ高出力であり、さらにバックドライバビリティが高いといった性質を持つ。これを用いたロボットの開発はいくつかあり、Xizhe Zangらは人体に近い筋肉配置を行い、歩行に対してアプローチをかけている<sup>(1)</sup>。細田らは振り子モデルから歩行を実現させる研究を行っている<sup>(2)</sup>。人工筋肉を用いた脚ロボットは人工筋肉特

有の柔軟性を活かして、細かいフィードバック制御がなくても階段や岩場のような不整地も歩行可能、特有の柔軟さからサスペンションのような効果も得ることができると考えている。本研究室でも過去に日吉氏らが人工筋肉を用いた歩行ロボットの開発を行っていた。<sup>(3)</sup> 実際に製作した歩行ロボットの写真をFig. 1に示す。

本ロボットの関節部は2本一対の人工筋肉がプーリーを介してワイヤでつながれた拮抗構造となっており、プーリー径の大小で可動域と出力トルクのトレードオフを調整できる。本構造は汎用性が高い反面、出力トルクと可動範囲の両立が困難であった。

そこで、本研究ではリンク機構に着目した。脚部に適したリンク機構を設計し、リンクの駆動に人工筋肉を用いることで必要な運動と出力を得ることを目指す。特に、本論文では平行リンク機構をベースとしたリンク機構を設計し、本機構を少数のアクチュエータで効率的に駆動するアクチュエータ配置を提案する。



Fig.1 Hiyoshi's Four-Legged Walking Robot

## 2. 脚部機構概要

### 2.1 アクチュエータ

脚部機構に使用するアクチュエータはMcKibben型空気圧ゴム人工筋肉である。McKibben型人工筋肉の構造と動作の図をFig.2に示す。

McKibben型人工筋肉はゴムチューブと繊維素材から構成される。ナイロン製の繊維コードを格子状に編んだスリーブでゴムチューブを覆い、スリーブの両端を固定することで製造されており、圧縮空気の注入による内圧増加で収縮動作を行う。これはチューブ内の圧力を上げるとチューブは半径方向に膨張し、この時生じる円周方向の張力が繊維コードにより軸方向の強力な収縮力に変換されることによるものである。また、McKibben型人工筋肉は同種のワルシャワ型人工筋肉と比較して、収縮率が低いものの、膨張径が小さいため収縮時においてもケーブルのように曲げることが可能である。従来の関節構造では人工筋肉をエアシリンダ等の直動アクチュエータと同様に直線状に配置していたが、本人工筋肉は曲線的な配置が可能ことから後述のような複雑な筋配置が実現できる。

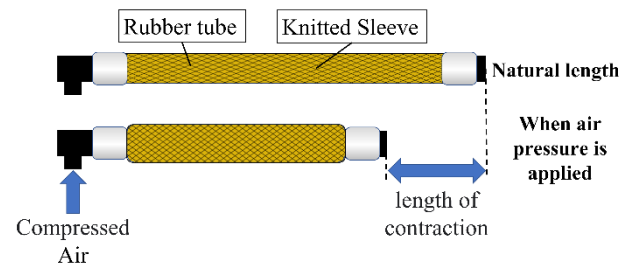


Fig.2 Structure and operation of McKibben-type Pneumatic artificial muscle

### 2.2 平行リンク機構

人工筋肉の不利な点として、収縮力、収縮長さが有限であること、柔らかすぎるが故に外力の影響を受けやすいことが挙げられる。これらのデメリットを解消するため、平行リンク機構を導入しようと考えた。平行リンクには減速機のような働きが期待できるため、人工筋肉において有限である収縮長さを変換し、可動域を大きくとることができるほか、トルク確保にもつながる。加えて収縮力を機構から様々な動きに変換できるため、歩行運動に変換させることも可能である。これらの理由から、開発する脚部機構には平行リンク機構を導入する。

脚部機構のフレーム部は研究室で多用されているMISUMI製の「アルミフレーム 5シリーズ 正方形 20×20mm 1列溝 4面溝」を用いる。関節部は3Dプリンターを用いて製作を行う。関節部を自由に設計することが可能なため応用がききやすい。関節部の一例をFig.3に示す。軸部のシャフトにはM6のボルト、穴部にはオイレス社製のつば付きブシュを用いている。

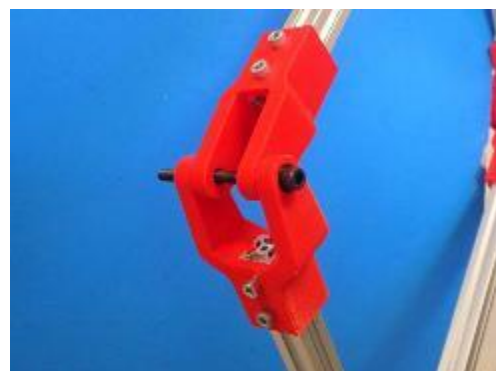


Fig.3 joint area

### 3. 第一試作概要

この脚部機構は、二足で歩行する鳥類に代表されるような逆関節機構を模して設計を行った。脚部機構第一試作と鳥類の骨格<sup>4</sup>との比較をFig. 4に示す。機構に配置した人工筋肉には説明のため名前を設けており、次項からそれぞれの詳細について議論する。

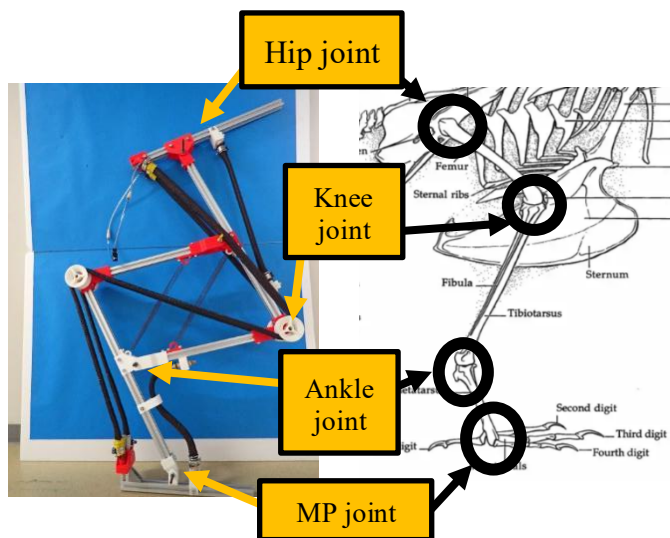


Fig. 4 Leg Mechanism First Prototype

#### 3.1 アクチュエータ配置

##### 3.1.1 脚部伸展用人工筋肉

脚部伸展用人工筋肉の図解をFig. 5に示す。こちらは脚部を伸展させるため、長尺の人工筋肉を2本用いている。関節部のガイドプリー (Fig. 6) を介して、股関節側のベースから地面に接地する足部までのすべての関節をまたぐ構造となっている。そのため、実際の生物の二関節筋のような働きが期待できる。脚部伸展用人工筋肉の全長と負荷、印可圧力を示したグラフをFig. 7に示す。この特性は人工筋肉を吊るし、筋肉の下端に錘を取り付け、全長を計測することで求めた。

また、伸展した脚部を屈曲させるため、平行リンク内に引張バネを2本配置している。これにより、脚部伸展用のものと拮抗関係を構成している。

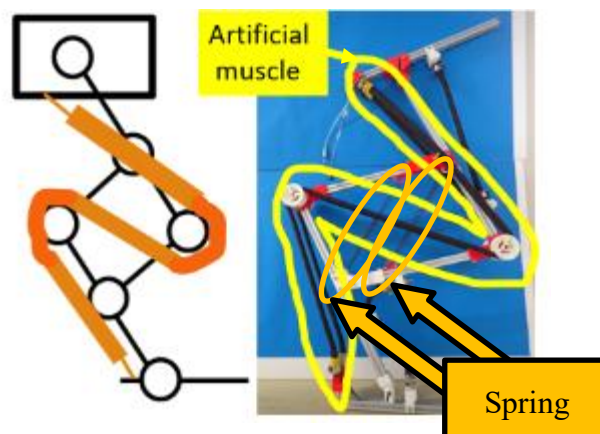


Fig. 5 Diagram of Artificial Muscle for Leg Extension



Fig. 6 Artificial Muscle Guide Pulley

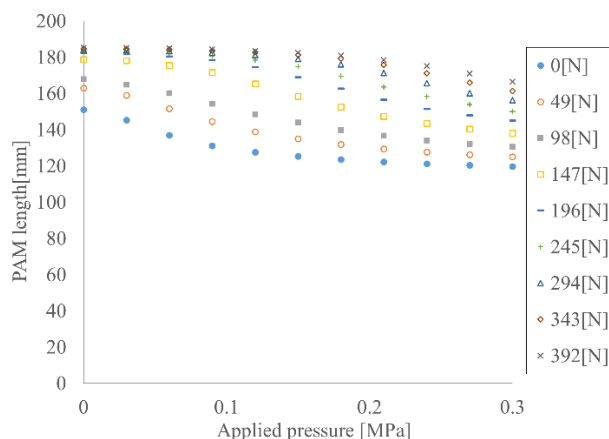


Fig. 7 Characteristics of the Artificial Muscle for Leg Extension

##### 3.1.2 大腿部運動用人工筋肉

大腿部運動用人工筋肉の図解をFig. 8に示す。股関節部から膝部に向かって1本の人工筋肉が接続されている。主に脚を前に振る動きに利用されるほか、脚部伸展用人工筋肉と拮抗関係にあるため、股関節の関節角度を調整することができる。

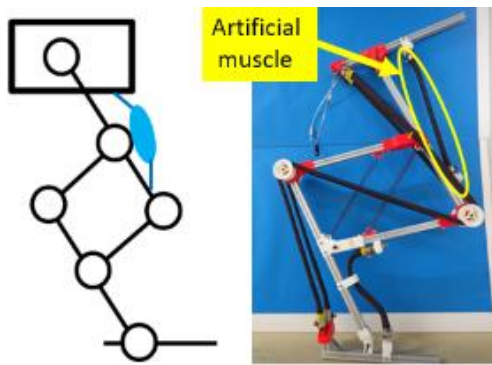


Fig.8 Diagram of Artificial Muscle for Thigh Movement

### 3.1.3 足部運動用人工筋肉

足部運動用人工筋肉の図解をFig.9に示す.膝部から足部に向かって1本の人工筋肉が接続されている.主に接地中に脚を前に倒す動きに利用される.そのほか,脚部を着地させる際にサスペンションのような動きをさせることも可能と考える.脚部伸展用人工筋肉と拮抗関係にあるため,足部の関節角度を細かく調整することができる.

また,人工筋肉はある程度の張りがなく緩んでしまっている場合,収縮してもうまく機構に力を伝えることができない.足部伸展用人工筋肉は鳥脚の足首関節に当たる部分の角度によって筋肉の張りが変わってしまい,収縮力をうまく機構に伝えることができない.そのため,筋肉がある程度の張りを保てるよう,U字型のガイドを設けた.製作したガイドの3Dモデル図をFig.10に示す.

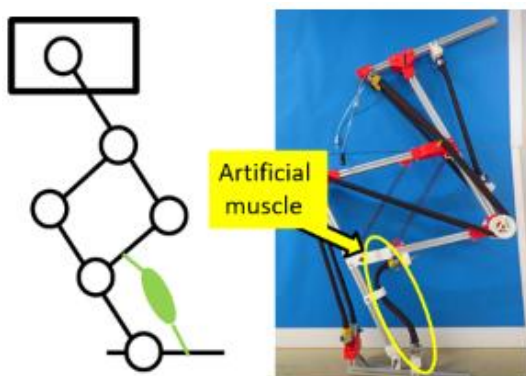


Fig.9 Diagram of Artificial Muscles for Foot Movement

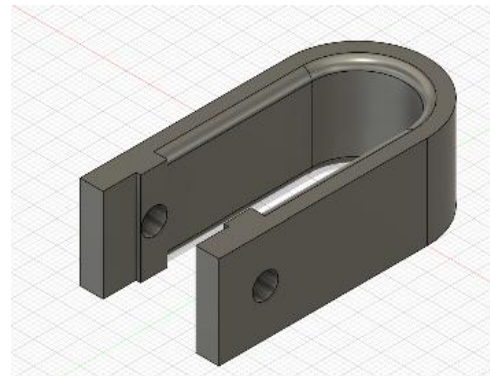


Fig.10 Leg Mechanism Walking Model

## 3.2 脚部機構動作イメージと歩行モデル

脚部機構の各人工筋肉を収縮させた際の動作イメージ図をFig.11に示す.脚部伸展用を1番,大腿部運動用に2番,足部運動用に3番と番号を振った.続いて歩行モデルをFig.12に示す.黒い太線で示してある脚が右足,青い線で示してある脚が左足である.また,歩行の進行方向は左から右に向かって表されている.

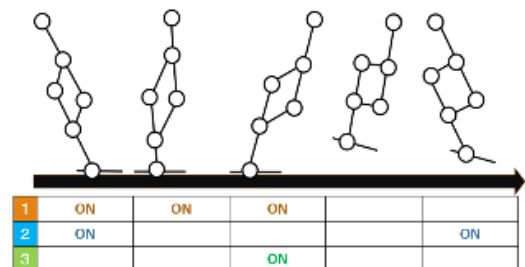


Fig.11 Leg Mechanism Operation Concept Diagram

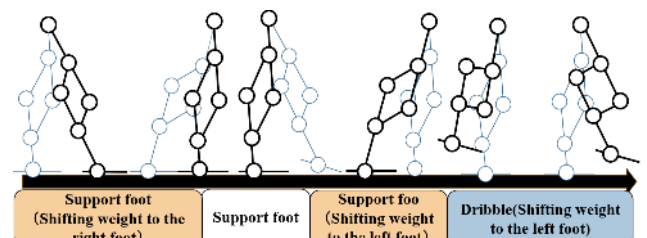


Fig.12 Leg Mechanism Walking Model

## 4. 実験

前項で議論したように脚部機構が動作するか, また歩行モデル通りに駆動するか検証する.次項から詳細について議論する.



## 4.1 実験方法・使用機器

今回の実験では片足のみで実験を行うため、人の手で保持しながら駆動させる。実験の様子をFig.13に示す。各人工筋肉に空気圧を入れた際に想定通り駆動するか、各関節の座標位置を測定し検証を行う。駆動のさせ方はFig.12の歩行モデルに準拠して駆動させる。座標位置測定には、モーションキャプチャであるOptyTrackを用いる。また、今回は測定した座標位置からPythonにてアニメーション化を行って動きの視覚化をする。

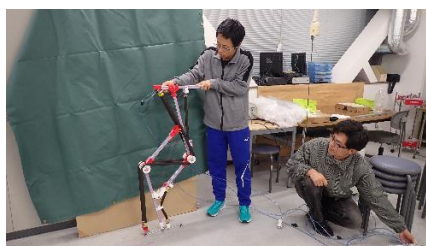


Fig.13 The experiment in progress

## 4.2 実験結果

脚部機構の動作の様子をFig.14,Pythonにてアニメーション化した駆動時の脚部機構の動作をFig.15に示す。

Fig.12の歩行モデルと比較して、モデル通りの動きをしたことを目視で確認した。

しかし、足部運動用人工筋肉が収縮する際にU字型ガイドが収縮を想定以上に阻害してしまい、想定より縮むことができなかった。そのため、人工筋肉の張りを保たせるためにはガイドではなく別の方法で張りを調整するべきと考えた。



Fig.14 Leg Mechanism Actual Movement Demonstration

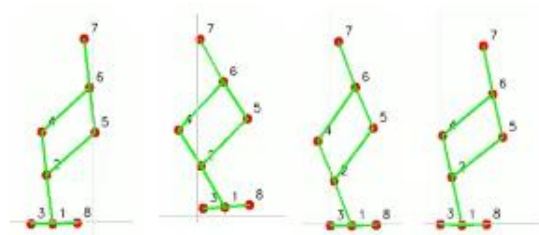


Fig.15 Python-animated leg mechanism operation

## 5. 結言

人工筋肉と平行リンクを組み合わせた脚部機構の提案と第一試作の開発、またその駆動実験を行った。現在、人工筋肉の空気圧から脚の角度の関係の計算などの定量的評価を行っている。今後は脚部機構をもう一つ作成し、二足にして歩行試験も行いたい。

## 参考文献

- 1) Zang X, Liu Y, Liu X, Zhao J. Design and control of a pneumatic musculoskeletal biped robot:24 Suppl 2,443/454, Technol Health Care (2016)
- 2) Yiqi Li, Yelin Jiang and Koh Hosoda: Controller design and experimental validation of walking for a musculoskeletal bipedal lower limb robot based on the spring-loaded inverted pendulum model, Frontiers in Robotics and AI, Original Research (2024), doi:10.3389/frobt.2024.1449721
- 3) 日吉健太:軸方向繊維強化型人工筋肉を用いた4足歩行ロボットの研究,平成31年度修士学位論文,資料番号8175
- 4) Proctor, Nobel S. Proctor and Patrick J. Lynch :Manual of ornithology avian structure and function, New Haven, 117/148, Yale University Press (1993)