

ワルシャワ型人工筋肉を用いたロボットアームユニットの関節制御改善に関する研究

Research on improving joint control of a robot arm unit using Warsaw-type artificial muscles

○平理久人*, 戸森央貴*

○Rikuto Taira*, Hiroki Tomori*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード： 軸方向繊維強化型空気圧ゴム人工筋肉 (straight-fiber-type pneumatic rubber artificial muscle), ソフトアクチュエータ (soft actuator), 空気圧 (pneumatic), 間剛性 (joint stiffness), ロボットアームユニット (robot arm unit)

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

近年の日本では少子高齢化が急速に進行している.¹⁾ それに伴い労働人口の減少は国内での大きな課題となっている. 特に宿泊業²⁾ や農業³⁾ などの現場において顕著であり, 人手不足による生産性の低下や後継者不足から事業継続の困難化といった問題を引き起こしている. ここで人間の代替や補助にロボットを利用する動きが進み, より高効率な産業ロボットや人と作業空間の共有が可能な稼働ロボットが開発・実用化されている.

実用化されている稼働ロボットの具体的な例として, デンソーウェーブの「COBOTTA PRO」⁴⁾ や安川電機の「MOTOMAN-HC10DT」⁵⁾ などが挙げられる. いずれも安全柵を必要とせず, 省スペース化や高効率化を実現している.

しかしモータや油圧シリンダのようなバック

ドライバビリティが低く⁶⁾ 高剛性なアクチュエータを利用したロボットは, 人体や植物と接触することで怪我や損壊につながる可能性が高い. そこでゴムのような粘弾性特性を有したアクチュエータであるソフトアクチュエータを用いたロボットであれば, 動作が柔らかくなり, 人や植物と接触した際のリスクを軽減することにつながる.

本研究室ではソフトアクチュエータの一種である空気圧ゴム人工筋肉の研究を進めている. 空気圧ゴム人工筋肉とは端的に表すなら空気圧で縮むゴムチューブといえる. これらの利点として次のような点が挙げられる.

- 柔らかく変形し人や植物との衝突リスクが低減→バックドライバビリティが高い
- 摺胴部がなく密閉されており汚れや水滴に強い→防水性・防塵性に優れる

- 天然ゴムや繊維から作成されており非常に軽量→出力密度が高い
- 駆動流体が空気である→破損した際に環境を汚さない

以上の点を踏まえ、本研究では軸方向繊維強化型空気圧ゴム人工筋肉（Straight Fiber Pneumatic Rubber Artificial Muscle 以降 SF-PAM とする）に着目した。本人工筋肉は空気圧ゴム人工筋肉で最も一般的である McKibben 型人工筋肉⁷⁾と比較したとき、より高い収縮率、収縮力を発揮する。⁸⁾ よってこれをマニピュレータに用いることで、より大きな可動範囲や関節剛性、出力トルクが実現できると考えた。本稿では SF-PAM を用いたマニピュレータの開発と制御の改善について述べる。

2. 空気圧ゴム人工筋肉について

Fig.1 に SF-PAM の構造を示す。¹⁰⁾ 本アクチュエータはゴム材料と繊維材料で構成されたチューブ形状をしており、圧縮空気の注入により収縮運動を発現する。Fig.1 に示すように、チューブ壁面はゴムと繊維による層構造を成し、繊維材料は軸方向に配向している。この繊維材料は圧縮空気によるゴムチューブの膨張を拘束し、軸方向への張力に変換する役割を有しており、結果として軸方向の収縮運動が発生する。

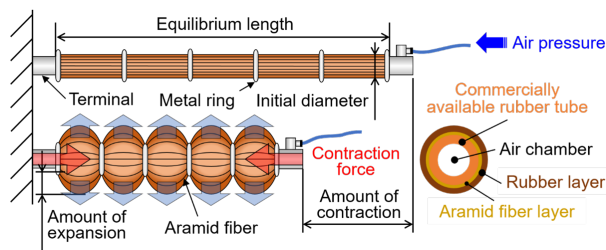


Fig. 1 Structure of SF-PAM

3. 人工筋肉を用いたロボットアームユニット

3.1 従来のマニピュレータ

従来型のマニピュレータを Fig.2 に示す。⁹⁾ 一般的に、マニピュレータは極座標型やシリアルリンク、パラレルリンクなど様々な構成が可能であり、目的によって選択されている。しかし、農作業を例に挙げると収穫に限らず剪定や摘花、摘蕾など1年を通して異なる作業がある。さらに、作物の生育位置も樹木から地下まで幅広く、異なるアプローチが必要である。このような環境で、特定の作業に限定した汎用性の低いマニピュレータは農家にとって導入が困難である。

そこで、本研究ではマニピュレータを関節ごとに分割した「ユニット構造」を提案し、これを組み合わせることで目的に応じた関節構造のマニピュレータを構成できるようにする。

本研究室ではこれまでに2本1対の人工筋肉をプリーで拮抗させる関節構造を基本とし、その設計や制御を進めてきた。本構造はプリー径の大小で可動範囲と出力トルクがトレードオフに変化する関係があり、マニピュレータの設計自由度を狭めていた。これに対し田中らは人工筋肉の出力特性を考慮した非円形プリーを設計し、可動範囲と出力トルクの両立を実現した。¹¹⁾ 本論文ではマニピュレータのユニット化を進めるために円形プリーを使用するが、最終的に非円形プリーとの融合を行う計画である。

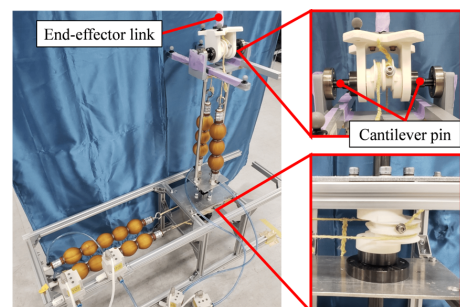


Fig. 2 Conventional manipulator

3.2 SF-PAMを用いたアームユニット構想

昨年, Fig.3 に示すように1ユニット1関節相当の構造のユニットを複数組み合わせることでロボットアームを構成するロボットアームユニット構想が提案された. これにより目標の作業や農作物に合わせた特性を確保するための構築が可能になる. また, ユニットごとの修理や交換が可能になることでメンテナンス性が向上するという利点も持つ.

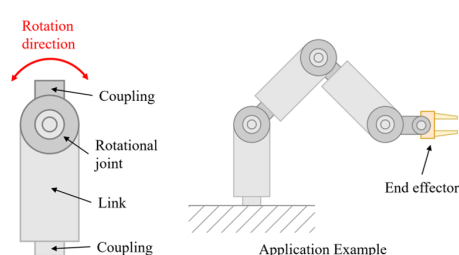


Fig. 3 robot arm unit concept

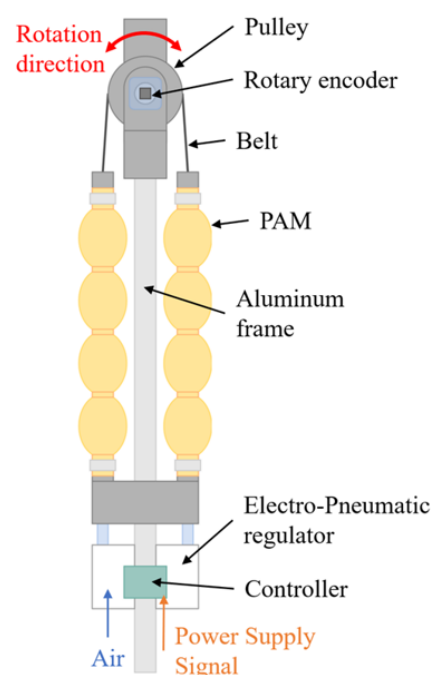


Fig. 4 robot arm unit design

3.3 アームユニットの構造設計

ユニット構造を実現するための設計として Fig.4 に示すような2本のSF-PAMを円形プーリを介してワイヤによって接続する拮抗構造(ワイヤ・プーリ機構)を採用した. ユニットの両端をほかのユニットとの接続可能な構造にし, 接続方向によって捻り動作や旋回動作といった異なる運動を実現できるようにする.

昨年製作されたアームユニットの外観を Fig.5 に示す. 電空レギュレータ: ITV0050-2MS × 2, マイコン: XIAO ESP32-C3, 磁器エンコーダー: AS5600 から構成されている. 最終的な構想では, これら全体を外殻で覆いパッケージ化を目標としている.

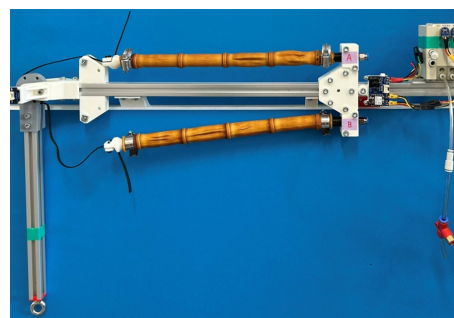


Fig. 5 robot arm unit

4. 負荷あり角度制御実験と課題

4.1 実験結果

本関節構造の制御では、マニピュレータの関節周りに関する力学的平衡関係に基づいたモデル式を利用している。具体的には、

- 人工筋肉の力学的平衡関係（収縮量, 収縮力, 印加圧力）
- 関節構造の力学的平衡関係（アーム角度, 負荷トルク）
- 各人工筋肉の弾性特性の合成により発現する関節剛性

これらを示す式の連立により得られる理論式を用い、目標とする関節角度, 関節剛性, 負荷トルクから必要な空気圧を計算している。本章では試作したユニットを上記の制御により駆動し、制御性能を評価する。

昨年実施された負荷ありでの角度制御実験の結果を Fig.6 に示す。本実験では Fig.7 に示すようにユニットを地面に対し水平に固定し、地面に対し垂直な平面上でアームを駆動させる。ここで、アーム角度は重力方向を負として定義している。また、アーム長さは $0.35[m]$ であり、先端に $1.0[kg]$ のおもりを取り付けている。入力目標関節角度であり、 $-30[deg]$ から $45[deg]$ まで $15[deg]/10[s]$ で変化する。

赤線は目標角度、青線は個体差を考慮しない場合の実験結果（SF-PAM のパラメータを同値として理論モデルの計算を行う）、緑線は個体差を考慮する場合の実験結果である。結果より、実際の関節角度は入力に対し重力方向へ落下していることがわかる。前述の通り、本制御では負荷補償が組み込まれているにもかかわらず、すべての入力に対して一定程度の誤差が認められた点について次で考察する。

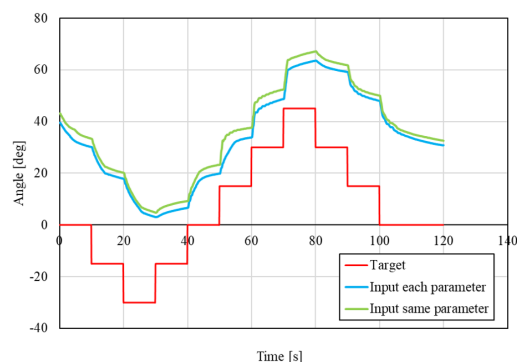


Fig. 6 Angle control with load

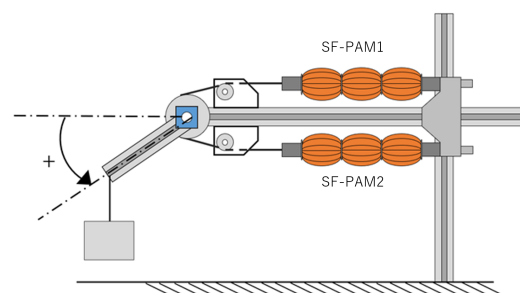


Fig. 7 Image of an experiment with a load placed on the arm

4.2 考察と原因追及

前項の記述と同様に昨年実施された水平方向の負荷無しでの角度制御実験の結果を Fig.8 に示す。この実験は Fig.9 に示すように負荷あり角度制御実験と同様のアームユニットを用いて実験をおこなう。負荷あり角度制御と異なる点として、SF-PAM2 が引っ張る方向の角度を正とし、おもりは設置しない。入力は目標関節角度であり、 $-45[deg]$ から $45[deg]$ まで $15[deg]/10[s]$ で変化する。実験結果のグラフから制御における理論モデルの位置制御に関して多少の誤差は生じているが大きな問題がないといえる。また、2つのグラフから青線と緑線のどちらも大きなずれがみられないため、個体差による影響は小さいと言える。

次に関節剛性由来のアームの変位について計算した。これは設定した関節剛性値と各関節角度における負荷トルクから計算できる。その数値を前項の Fig.6 に黒い点でプロットした様子

を Fig.10 に示す. これにより算出した誤差と実験結果から得られる誤差が近いことがわかる. ここから理論モデル内の計算式に問題があると考察でき, 人工筋肉の収縮力差から出力トルクを導出する式と人工筋肉の弾性特性から関節剛性を導出する式を単純に連立していることが原因ではないかと考えている. 目標では既知の負荷を補正し目標角度までアームを持ち上げ, 関節剛性は外力にのみ作用し柔軟性を示すはずだが, 関節剛性が既知の負荷に対しても作用してしまうことでアームが落下していると考える.

現段階の方針では, 関節剛性と負荷トルクによる角度誤差を目標角度を補正する形で理論モデルに導入することで修正する予定である. 今後もアプローチについては検討を続ける.

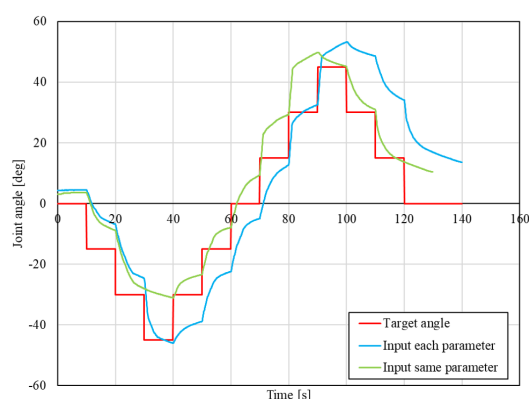


Fig. 8 Angle control without load

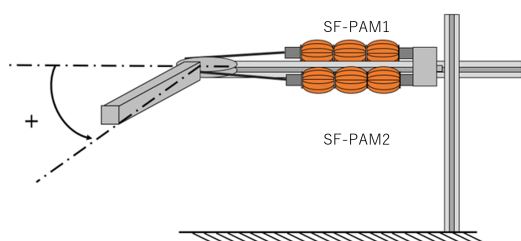


Fig. 9 Image of the arm for a no load experiment

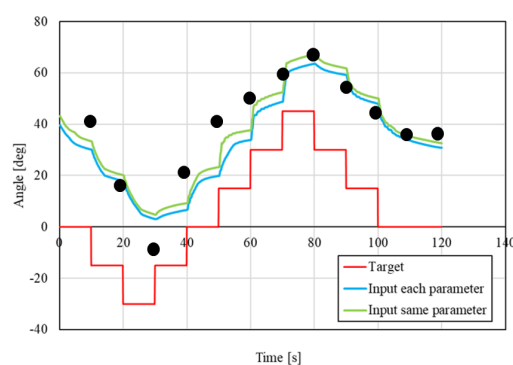


Fig. 10 Angle error plot

5. 昨年からの変更点

5.1 使用するデバイスの変更

昨年使用されていた電磁弁「電空レギュレータ IVT0050-2MS」から「電空レギュレータ EVS2-500-1H6AV-C11-3」に変更した. 元々工業用の電磁弁を使用していたため, 不便な点や試験用としての利用では不向きな点があった. 新たな電磁弁に変更したことにより組み込み性の上昇やコンパクト化といった利点を得られた. また, これに伴い必要な目標電圧も変更されたため, マイコンを「XIAO ESP32-C3」から「XIAO ESP32-S3」に変更した. 変更を加えた様子を Fig.11 に示す.

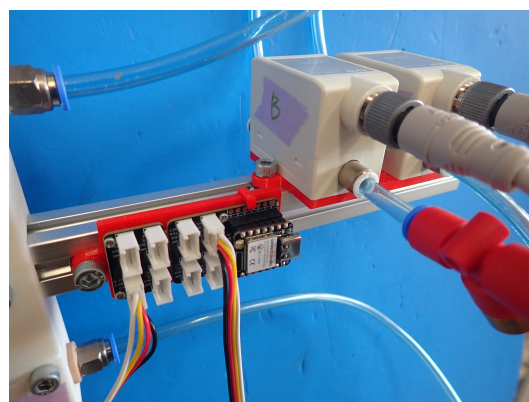


Fig. 11 solenoid valve

5.2 人工筋肉製作手法の改善

昨年新たに考案された SF-PAM の製法により、個体差の減少や機構化による生産性の向上といった利点が得られた。一方で新たに発覚したデメリットを修正するための提案となる。

従来（一昨年まで）の SF-PAM はディップ製法と呼ばれるアクリルパイプをゴム液に浸し、その上から繊維を取り付けてさらにゴム液に浸すことによりゴムの層を形成する製法が用いられていた。製作された SF-PAM の外観を Fig.12 に示す。この方法では厚みに差が生じやすいことによる個体差の大きさや、ゴム液に浸す段階で生じた気泡が乾燥してしまい穴が形成されやすく、そこから空気が流入してしまい内部から崩壊してしまうといったデメリットを抱えていた。また、節の役割を果たす金属リングがずれやすいといった欠点もあった。

昨年新たに考案されて製法ではゴム液に浸すのではなく、薄めたゴム液を回しかける製法によって SF-PAM が製作された。製作された SF-PAM を使用した様子を Fig.13 に示す。一層目のゴム層を市販のゴムチューブで形成し、繊維のシートによって覆う。その上からゴム液を回しかけることで厚みに差が生じにくくなり、個体差の減少、数回に分けて層を形成することによる気泡から穴に派生してしまうリスクを低減させている。さらに、金属リングによって形成していた節を繊維のシートによって代替することでリングのずれがなくなるように改良されている。一方で、Fig.14 のようにリングが破損する事例が度々発生した。これは両端の節では圧力を一方向からのみ受けることにより、負荷が偏ってしまうことが原因であると考察できる。これを修正するため、両端のみ金属リングに戻す改善を施した。

5.3 修正結果

改善した SF-PAM の様子を Fig.15 に示す。破損が生じやすい両端の節を繊維の帯から金属リ



Fig. 12 old SF-PAM

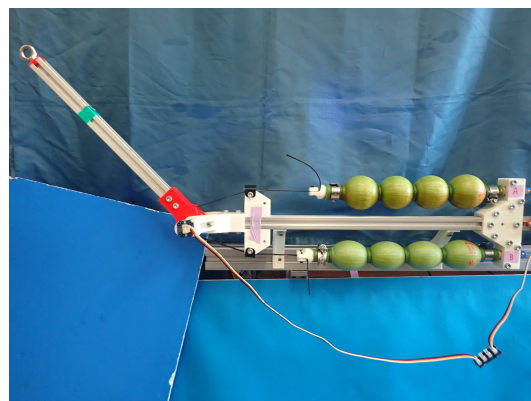


Fig. 13 new SF-PAM



Fig. 14 broken knot

ングに戻すことで両端の節が破損する現象を防いだ。金属リングがずれやすいという問題も、両端の節の場合は一方向から力を受けるため、ずれが生じにくく金属リングに戻すことは問題ないといえる。



Fig. 15 revised knot

6. 結言

本稿では、人工筋肉マニピュレータの角度制御における理論モデルの見直しの必要性和、それに向けた計画と進捗について発表した。今後の計画としては、昨年からの変更点を考慮した制御プログラムの調整をおこない、昨年の実験の再現により考察した原因から同様の誤差が出ることを検証する。その後、理論モデルの修正により目標動作に近づけアームの落下を補正する。

参考文献

- 1) 内閣府：“令和 6 年版高齢社会白書”，
https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2024/zenbun/06pdf_index.html, (最終閲覧日 2025 年 12 月 9 日)
- 2) 統計局：“労働力調査（基本集計）2021 年（令和 3 年）平均結果の要約”，
<https://www.stat.go.jp/data/roudou/rireki/nen/ft/pdf/2021.pdf>,
(最終閲覧日 2025 年 12 月 9 日)
- 3) 農林水産省：“農業労働力に関する統計”，
<https://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/08.html>,
(最終閲覧日 2025 年 2 月 7 日)
- 4) デンソーウェーブ：“TOP | COBOTTA PRO”，
<https://www.denso-wave.com/ja/robot/ex/cobottapro.html>,
(最終閲覧日 2025 年 12 月 9 日)
- 5) 安川電機：“人協働ロボット MOTOMAN-HC10DTP シリーズ”，
<https://www.e-mechatronics.com/product/robot/assembly/lineup/hc>,
(最終閲覧日 2025 年 12 月 9 日)
- 6) 鈴森康一：“ロボットのアクチュエータのバックドライバビリティ”，日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 6, pp. 548–558, 2013
- 7) 松下繁：“ゴム人工筋製法ノート”，計測と制御, Vol. 7, No. 12, pp. 946 – 952, 1968
- 8) C. Ferraresi, W. Franco, and A.M. Bertetto：“Flexible Pneumatic Actuators : A Comparison between The McKibben and the Straight Fibers Muscles”，Journal of Robotics and Mechanics, Vol. 13, pp. 56 – 63, 2001
- 9) 阿部哲平：“空気圧ゴム人工筋肉のための非円形プーリの開発とラ・フランス収穫用ロボットアームへの応用”，令和 5 年度修士学位論文，資料番号 9255.
- 10) 瀬野航生：“ワルシャワ型空気圧ゴム人工筋肉を用いたワイヤプーリ機構の出力特性向上に関する研究”，令和 6 年度修士学位論文，資料番号 9461.
- 11) 田中厘来：“非円形プーリの適用による軸方向繊維強化型空気圧ゴム人工筋肉マニピュレータの出力特性改善に関する研究”，令和 5 年度修士学位論文，資料番号 9037.