

報告日： 2024年 4月 19日

報告者：大阪大学 大学院基礎工学研究科

渡辺 将広

1. 研究概要

(和文)

(1) 課題名

双曲面状編組構造により大径短軸でも高出力で柔軟な鼓型空圧人工筋の開発

(2) 研究者氏名、職名

渡辺 将広 大阪大学 大学院基礎工学研究科 准教授

(3) 研究概要

双曲面状の編組直線繊維を用いた鼓型空気圧人工筋肉を提案し、その設計と特性評価を行った。本人工筋肉は、編組繊維構造の特徴である柔軟性と曲げ変形能力を持ちつつ、直線繊維人工筋肉のように収縮初期に大きな収縮力を発生できる。数値解析により、収縮率、収縮力、半径膨張率が、高さ半径比と繊維オフセット角によって制御可能であることを明らかにした。また、試作機の実験では、シミュレーション結果と概ね一致する収縮特性が確認され、短尺でも高い柔軟性と収縮力を有することが確認された。本アクチュエータは、長尺細径構造には不向きだが、短尺大径構造に適しており、直列接続された匍匐ロボットやマニピュレータへの応用が期待できる。

(4) キーワード

空気圧アクチュエータ, 人工筋肉, 変形解析, 非線形制約最適化, ソフトロボティクス

(英文)

(1) Research title

Development of a flexible hourglass-shaped pneumatic artificial muscle with high power even in a short and large-diameter structure by hyperboloidal braided structure

(2) Name of researcher with title of position

Masahiro Watanabe, Osaka University, Graduate School of Engineering Science, Associate Professor

(3) Summary

An hourglass-shaped pneumatic artificial muscle with hyperboloidal braided straight fibers is proposed, and its design and characteristics are evaluated. This artificial muscle possesses the flexibility and bending deformation capabilities of braided fiber structures while generating large contraction forces at the initial stage of contraction, similar to straight-fiber artificial

muscles. Numerical analysis reveals that the contraction ratio, contraction force, and radial expansion ratio can be controlled by the height-to-radius ratio and the fiber offset angle. Furthermore, experiments with a prototype demonstrate contraction characteristics consistent with the simulation results, confirming high flexibility and contraction force even in short lengths. Although this actuator is unsuitable for long and slender structures, it is well-suited for short and large-diameter configurations. Its potential applications include peristaltic robots and manipulators with serially connected units.

(4) Key Words

Pneumatic actuator, Artificial muscle, Deformation analysis, Nonlinear constraint optimization, Soft robotics

2. 本研究の意義、特色

本アクチュエータは、1960 年代以降から現在まで主流の空気圧人工筋肉である、McKibben 型や Warszawa 型とは異なる形状と機能を有し、研究例がほとんど見当たらない。大径短尺でも高収縮、高耐久、低剛性でしなやかという従来には無い特徴が期待されるが、実際の特性は明らかになっていない。

3. 実施した研究の具体的内容、結果

3. 1 製作

鼓型空気圧人工筋肉：h-PAM(hyperboloidal pneumatic artificial muscle)は、一葉双曲面状の編組みスリーブとゴム管が必要であり、チャンバを密閉しなければならない。初期試作では、双曲面状の編組みスリーブと、その内側と接するような双曲面状のゴムチューブ、両端のテーパ型密閉キャップで構成される構造とした（図1）。



図1 試作した鼓型空気圧人工筋肉

図2に製作方法の概略を示す。ゴムチューブは、真空脱泡した液状シリコンゴムをモールドの底部から注入して成形した。編組みスリーブは、柱状のジグにリング状部品を取り付け、PTFE コーティングを施したニッケルチタン合金ワイヤを使い、手組みで製作した。

編組み作業では，ステンレス鋼パイプを針の代わりに使用することで，パイプの案内によりワイヤの編込み可能とし，ワイヤに十分な張力を加えながら編込むことで，直線で構成される双曲面を形成した．



図 2 製作方法

3. 2 シミュレーション

(A) 解析方法

h-PAM は圧縮空気による流体エネルギーの供給と，ゴムとワイヤにエネルギー弾性エネルギーの収支を伴う．仮定として，ゴムのヒステリシスや繊維同士の摩擦の影響を無視し，h-PAM が各特定の高さでエネルギー最小の力学的な安定形状を保って変形する準静的過程の変形とする．解析では，MATLAB の組み込み関数である `fmincon` を使い，目的関数である総エネルギーの最小化を求めるために，制約付き非線形最適化アルゴリズムを用いる．目的関数 f と，収縮力 F は，以下で表せる．

$$f = pV - E_{\text{rubber}} - E_{\text{fiber}} \quad (1)$$

$$F = -\frac{df}{dh} \quad (2)$$

各項の詳細や計算の条件等は，発表論文[2]に掲載されている．

(B) モデル

h-PAM は，軸方向に対称な構造を有しており，全体がねじれ変形を起こすことなく伸縮する．このため，ワイヤの変形の解析は，1本のみで十分である．図3に示すように，ワイヤの形状は N 個のジョイントを有するシリアルリンクとみなし，方位角 θ_i と φ_i を用いて表す．すなわち，最適化により合計で $2(N-1)$ 個のパラメータを決定する．

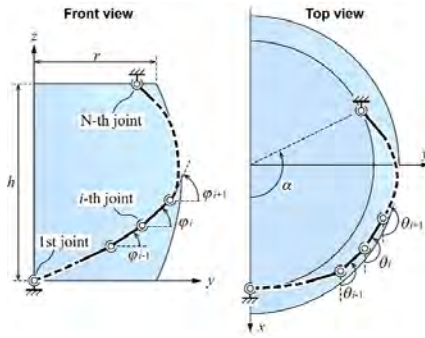


図3 単一ワイヤのシリアルリンクモデル.

ゴムチューブのひずみエネルギーは、大変形下でも変形を精度良く再現できる Ogden モデルにより近似し、ワイヤのひずみエネルギーは、微小変形理論における曲げ梁のひずみエネルギーに基づき求めた。

(C) 結果

図4に、ワイヤのオフセット角 α （鼓のくびれの大きさを決定するパラメータ）や h-PAM のアスペクト比を変えたときの h-PAM の弛緩状態と最大収縮状態を示す。従来の直線繊維を有する Warszawa 型の人工筋肉と同様に、オフセット角 α が小さい場合、編組スリーブは球状に膨張し、直径が大きく拡張された。一方、オフセット角 α が大きくなると、スリーブの中央部の膨張率は低下した。さらに、アスペクト比が小さく、オフセット角 α が大きい場合には、収縮状態で砂時計のような形状になることが明らかとなった。以上により、h-PAM の形状変形が視覚的に明らかとなった。

一方、図5にアスペクト比とオフセット角 α が収縮率に与える影響をプロットした図を示す。オフセット角 α を一定に保ったままアスペクト比が増加すると、収縮率は単調増加した。アスペクト比とオフセット角の両方が増加するにつれて、収縮率は 54.3% に近づき、直線繊維筋で観察された結果と一致した。さらに、アスペクト比が 2.0 未満でオフセット角が 120 度を超えると、収縮後も外形は砂時計型を保持し、このときはオフセット角が大きくなるにつれて収縮率が大きく上昇した。

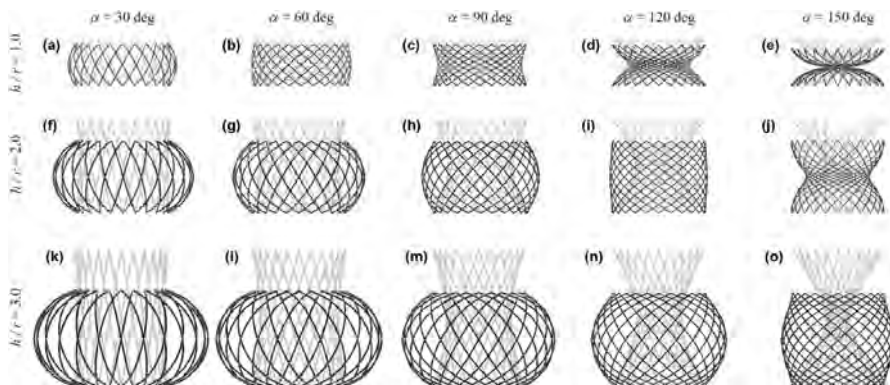


図4 パラメータを変えたときの h-PAM の弛緩状態と収縮状態

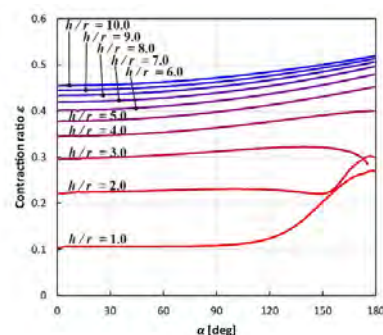


図5 アスペクト比とオフセット角 α が収縮率に与える影響

収縮力等，他の収縮特性の解析結果は，発表論文[2]に掲載されている．

3. 3 実験

h-PAM の収縮特性を明らかにするため，試作した人工筋肉を引張試験機に固定して内部を加圧し，力と変位を測定した．図6は，50 kPa の圧力を加える前後のオフセット角 60 度および 90 度の h-PAM の外観を示している．図4 (g)および(h)に示すシミュレーション結果と比較すると，シミュレーションとの差異が見て取れる．オフセット角度 α が増加すると，実験結果の人工筋肉は膨張がシミュレーション結果よりも小さい．ワイヤ同士の摩擦による影響と考えられるため，その対策には，細くて摩擦係数が低い材料の利用や，非編組構造を導入が考えられる．

さらに，オフセット角度が 90 度のゴムチューブの中央部が収縮中に座屈を起こし，径方向への膨張を阻害している様子が観察された．この座屈現象の原因は，ゴムの周方向のひずみに対して軸方向のひずみが過度に大きいことや，薄肉の砂時計型チューブが形状的に圧縮方向に弱いことが考えられる．

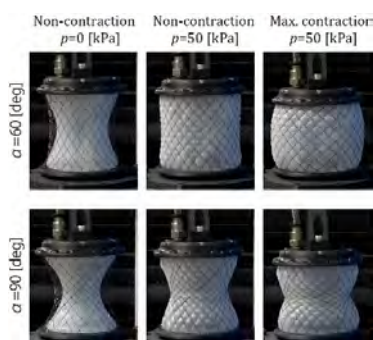


図6 引張試験機による収縮力—収縮率の測定

図7は，オフセット角 α が 60 度の場合の収縮率—収縮力の測定結果を示す．圧力の上昇に伴い，最大収縮率が増加した．特に，圧力 50 kPa では，初期最大収縮力は 184 N で測定され，最大収縮率は 15.1%（シミュレーション値の約 75%）であった．収縮と伸長の軌

道の不一致は，ゴムと繊維のヒステリシス効果に起因すると考えられる．

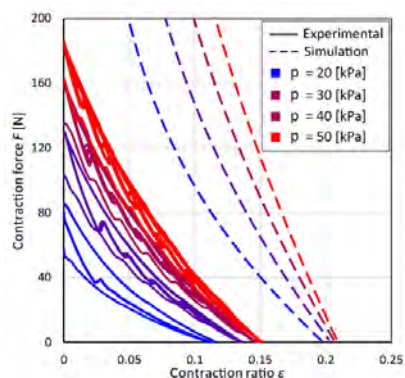


図7 収縮力—収縮率の測定結果

さらに図8のように，試作した h-PAM は，外力により容易に屈曲させられることが確認された．スリーブは直線ワイヤで編込むため無加圧時でも圧縮方向に強く，形状安定性に優れている一方で，曲げ方向については低剛性で柔軟性に富むことが示された．



図8 屈曲の様子

3. 4 まとめ

h-PAM は長尺・細径の構造には不向きであるものの，直径が大きく長さが短い柔軟アクチュエータとしての利用に適していることが分かった．複数の h-PAM を直列に接続することで，狭隘部や配管を這って移動するロボットやソフトマニピュレータへの応用が期待できる．

4. 本研究を実施したグループに属する主な研究者の氏名、職名

多田隈建二郎 大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授
田所諭 東北大学 大学院情報科学研究科 教授

5. 研究実施時期

2022年 3月 9日から 2024年 3月 31日まで

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

[1] 渡辺将広, 阿部一樹, 多田隈建二郎, 昆陽雅司, 田所諭, "鼓型空気圧人工筋肉", 日本

機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022, 2A1-M06, 札幌, 2022 年 6 月 1 日-4 日.

[2] Masahiro Watanabe, Kenjiro Tadakuma, and Satoshi Tadokoro, "Hyperboloidal Pneumatic Artificial Muscle with Braided Straight Fibers", *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 9, no. 5, pp. 4242-4249, Mar. 2024.

7. 内外における関連研究の状況

研究実施者が知る限り，鼓型の空気圧人工筋肉の研究は，国内外問わず無い。

8. 今後の発展に対する希望

本研究では，アクチュエータの収縮特性をシミュレーションによって解析し，そのポテンシャルを明らかにしたことが，主な貢献である．実機の試作も行ったものの，製作や製造，耐久性に関する技術が試作レベルに留まっているため，今後は産業応用を見据えた研究が望まれる。