

入れ子構造を有するワイヤ引き空気圧人工筋による やわらかい駆動システムの開発

Development of Nested Chamber Pneumatic Artificial Muscle for Cable Transmission

2151025



研究代表者

株式会社 国際電気通信
基礎技術研究所

主任研究員

野 田 智 之

〔研究の目的と背景〕

近年の少子化・高齢化社会に伴い、リハビリテーションや日常生活支援に利用可能なシステムとして、外骨格型ロボットを始め、人と近接もしくは接触するロボットの開発が盛んになってきている。工場の柵内部での作業に必要とされたのは高い位置決め精度の固い関節機構であったため、現時点で広く普及している駆動装置は、高減速比のギアドモータである。しかし、リハビリ医療・工場などのアシスト機器を始め、ヒトと協調するロボットに必要なのは、ヒトの関節と互換性のある力強くやわらかい駆動関節である。本研究では、外骨格型ロボットなどのアシスト装置の駆動関節に応用するための、力強さとしなやかさを両立するコンパクトな駆動関節の開発を目的とする。

本研究では柔軟ロボットの駆動要素として、空気圧人工筋 (Pneumatic Artificial Muscle, PAM) に注目する。PAM は最も高い出力重量比が達成可能な空圧アクチュエータの一つとして注目されている。圧縮空気の柔軟性は人と接触する場合に有効で、例えばリハビリ用アシスト装置^[1,2]などへ応用されている。空圧のためパワーウェイトレシオを高くすることができるため、大きな力を出し続けても、関節が固くならず、しなやかさを失わない特徴がある。さらに、拮抗に冗長配置すれば、近年注目されている剛性・粘性などの固有インピーダンスが制

御可能なアクチュエータとしても利用できる。

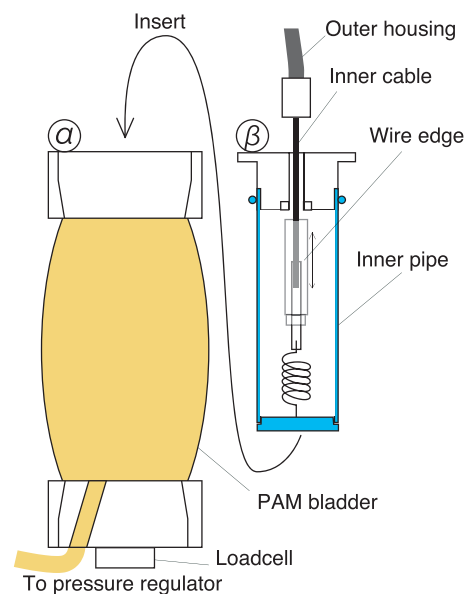


Fig. 1 Concept of proposed structure: Nested-chamber Pneumatic Artificial Muscle

〔提 案 手 法〕

空気圧人工筋でロボットの関節を駆動するにはワイヤ（腱）と組み合わせる必要があるが、ここでの課題は、ワイヤの弛みである。従来式の PAM は筋が弛緩した時のワイヤの取り回しが基本課題となっており、弛みが起こるとプリーアの溝から外れるなど実用上の問題となる^[3]。外部にバネで弛みを取る構成が取られることがあるが、露出した可動部やバネの可動空間は設計およびロボットの運用の制約となり、制御に

よって対応する場合は収縮可能範囲を超えて関節を動かすことはできない。

さらに、膨張に必要な圧縮空気量はバルブの性能に依存し遅れなどが課題となる。流量の大きなバルブを使って応答性を維持するか、小型の流量の少ないバルブにより応答性を犠牲にするかの選択が必要であり、システム構成におけるトレードオフの一つとなっている。これらの点は従来研究では十分に議論されてこなかった。

Fig. 1 に示すように、本研究ではシリンダ構造を空気圧人工筋に入れ子状に埋め込むことでこれらの課題を解消する。このコンセプトは圧縮空気のエネルギーを張力に変換する人工筋の膨張空間と、ワイヤの格納空間を一体化する入れ子構造が特徴で、本研究ではこれを「入れ子構造を有する空気圧人工筋」(*Nested-chamber Pneumatic Artificial Muscle: NcPAM*) を呼ぶことにする。

Fig. 2 (a)～(d) に提案する NcPAM の実際の構成と外骨格型ロボットへの適用用例を示す。Fig. 2 (a) は NcPAM の組み立て後の構造で、PAM の内部にワイヤに常にテンションをかけるためのバネと取り回しの空間が設けられている。ここで、バネは人工筋の収縮に比べてずっと小さい力で良い。バネ収縮力が NcPAM の発生力より小さい場合は、ワイヤストップは NcPAM 端部に接しており、NcPAM の収縮力をそのままワイヤで伝達している。NcPAM の収縮力がバネの引っ張り力を下回った時のみ内部に配置されたバネの収縮が有効になる。つまり、PAM の収縮範囲を超えてワイヤを取り回すことができる。さらに、Fig. 2 (a) のように NcPAM をさらに筒状もしくは箱状の構造に格納することで、可動部が露出しにくい構成を取ることができる。

さらに、副次的効果として膨張空間の容積が小さくなることで、応答性が向上し、収縮と弛緩に必要な吸排気量が小さくできる。Fig. 2 (b) に示すように、ワイヤとの接合を人工筋内部に配置できるため、同じ長手方向の空間に

対して PAM の長さで有利である。

Fig. 2 (c) および Fig. 2 (d) に示すように、ロボットの駆動関節に適用する場合はプーリーなどと組み合わせることで駆動関節が実現できる。ボーデンケーブル（自転車ブレーキなどに採用されているワイヤシステム）とシームレスに組み合わせることができ、外部駆動の関節はコンパクトで力強く軽量で、人工筋のしなやかさを生かしたロボット関節を実現可能である。

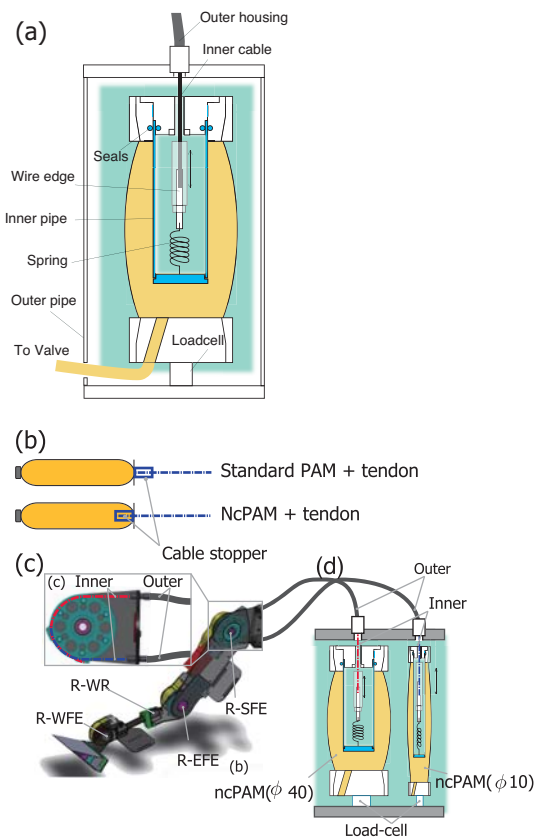


Fig. 2 Implementation of NcPAM to air exoskeleton robot

[実 験]

本節では、提案する NcPAM の試作および実験による評価について示す。まず空気圧人工筋のゴム部分は工業製品として入手可能な FESTO 社製の空気圧人工筋（MAS シリーズ φ40、公称最大収縮力は 5000 N）を利用し、端部の部品は樹脂切削で製作した。シリンダは外径・内径を精度加工し、NcPAM 端部の部品と

は O リングにより圧縮空気と大気圧のシールを行っている。空圧の制御バルブは Norgren 社製の圧力比例弁 (VP50) を使用し、外径 $\phi 8$ のウレタンホースで接続した。

Fig. 3 に試作した NcPAM を収縮させた時の流量特性を示す。流量は FESTO 製流量センサ (SFAB シリーズ) により計測し、計測値はバルブ制御圧力を 0 MPa を初期値として 0.6 MPa をステップ的に入力した。Table 1 にこの結果を含め、試作した NcPAM と FESTO 社製の PAM を比較する。計測は片方の端部をフレームに固定し、ワイヤ側は無負荷としている。計測は熱式 (ヒートロスプロセス) による計測のため、計測の下限値 (約 50 l/min) を閾値としてそれを超えた区間の単位流量について数値積分した。今回は端部を固定していないため、PAM の収縮率の動作点は最小 (自然長) から最大 (最大圧における収縮状態) の間の状態をとる。この場合、内部の体積は最大収縮時におよそ 2 倍程度増加するため、総流量は自然長での体積減少に比べて Fig. 3 の実験値は低い値を示すことに注意されたい。

収縮前の自然長の状態で拘束される条件 (この条件で最大力を発生) では、体積の比と同じだけ総流量の削減 (最大で約 50% 程度、ただし等温過程) が見込め、エネルギー消費を大幅に減らすことができる。ここで、エア配管が短ければ内部体積の影響は十分小さいため無視している。

さらに Fig. 4 (a) および Fig. 4 (b) に示すように、Fig. 2 (c) に示した構成で上肢外骨格型ロボット^[3]に肩関節の屈曲関節に実装した。

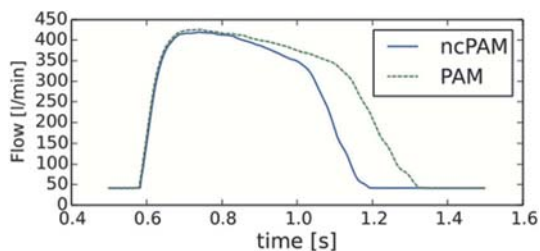


Fig. 3 Comparison of flow rate of PAM and NcPAM during contraction process

Table 1 Summary of comparison NcPAM and PAM.

	PAM (*1)	NcPAM	improve
Bladder length (*2)	243 mm	283 mm	+14.4 %
Unit Weight	700 g (+2)	450 g	-40 %
Theoretical internal volume (at initial length)	0.349 L	0.167 L	-52.32 %
Measured sum of flow (at the contracted length)	—	—	-19.4 %

(*1) The values are taken from our previous model [3] (*2) Compared to the original off-the-shelf model of FESTO Inc. (MA S/DMAS40 series).

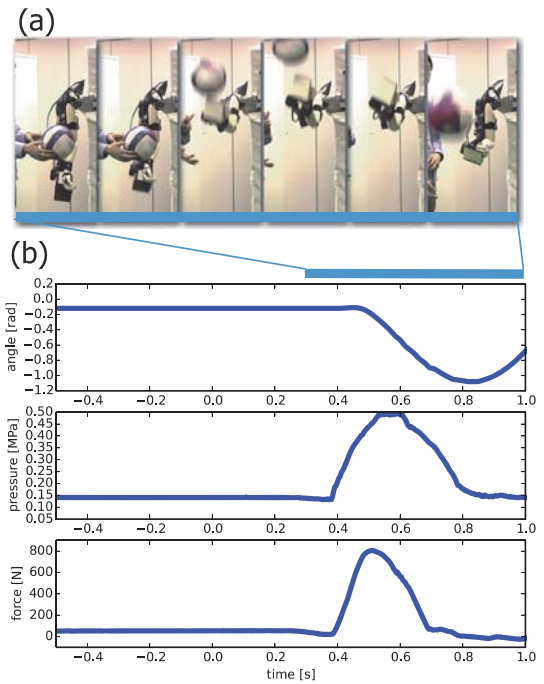


Fig. 4 Ball Hitting Experiment

試作した NcPAM の収縮力をプーリーにてトルクへ変換し駆動する構成となっている。実験では、外骨格型ロボットにマネキンの腕 (肘関節にフリーの受動関節を有し重量 1.65 kg) をベルトで固定している。まず、NcPAM を制御しない PAM が弛緩した状態で関節側を動かし、ワイヤの張力が NcPAM の内部のバネで維持できることを確認した。駆動実験のタスクとしてはバレーボールをサーブするように所定の位置・速度を目標とする目標入力を、最適制御のフレームワークを用いて実装した。Fig. 4 (a) に示すように、ボールを打つことのできるだけの速度に達しており、Fig. 4 (b) に示すように最大約 800 N の張力が発生しているが、イン

パクトの瞬間も推力にピークが発生していないことがわかる。

[今後の研究の方向, 課題]

本項では、圧縮空気のエネルギーを張力に変換する人工筋の膨張空間と、ワイヤの格納空間を一体化する入れ子構造が特徴の「入れ子構造を有する空気圧人工筋 (NcPAM)」とその応用例として上肢外骨格型ロボットへの実装について報告した。ワイヤシステムと空気圧人工筋 (PAM) をワイヤ力伝達システムと組み合わせてシームレスに運用するための要素技術として、NcPAM の構造はワイヤ弛緩の基本課題を解決するとともに内部の空間が空気圧人工筋体積の減少に寄与する。発生する収縮力を落とさずに理論上のエア消費を最大で約半分に削減できる画期的な構造が特徴である。

実験では提案する NcPAM の構造を実際に試作し、NcPAM を収縮させて流量を計測する実験に加え、CAD モデルから算出した PAM の体積比の比較により有効性を検証した。動作点によって異なるものの、約 20% から最大 50% 程度の消費される圧縮空気量を削減することが可能であることを示した。この結果は、圧縮ガスの供給源として高圧タンクをロボットに搭載する場合や、最大流量が制限される小型のバルブで制御する場合に特に有効である。また、実現される駆動関節はコンパクトで、関節固有の剛性をヒト身体の力強さとしなやかさに整合できる。このようなロボットの駆動関節がヒトと互換になることで、アシスト装置などの人—ロボット間の物理的相互作用を、快適かつ

安全に実現できるようになる。

入れ子構造を有する空気圧人工筋は圧縮ガスの使用量が減少しており NcPAM の静的な発生力の特性は理論上 PAM のそれと変わらないものの、内部体積が大幅に削減されているため、収縮時の体積変化量は相対的に大きくなる。今後は、力および剛性の特性に関して周波数特性を計測する予定である。また、力伝達のボトルネックは特にワイヤとストッパの部分の強度に依存するため、これを改良することでアクチュエータの力の伝達を最大源まで高めることができる。

今後は、上記のような NcPAM の制御に取り組むとともに、上肢だけでなく下肢用の外骨格型ロボットに適用し、リハビリテーションを目的としたロボットにおいて有効性を検証する予定である。

[参考文献]

- [1] T. Aida, et al., Proc. of IEEE-ICMA2009, pp. 1027-1032, 2009.
- [2] D.G. CALDWELL and N.G. TSAGARAKIS, J. Humanoid Robotics, vol. 4, no. 3, pp. 549-573, 2007.
- [3] T. Noda et al, in Proc. of IEEE-IROS2014, WeA1.17, 2014.

[成果の発表, 論文等]

- T. Noda and J. Morimoto, "Development of upper-extremity exoskeleton driven by pneumatic cylinder toward robotic rehabilitation platform for shoulder elevation," *2015 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, Singapore, 2015, pp. 496-501.