

湾曲型空気圧ゴム人工筋肉を用いた索状マニピュレータの開発

Development of cord-like manipulator using bending type pneumatic rubber artificial muscles

○内山 輝一*, 西方 宏光**, 戸森 央貴**,

○ Kiichi Uchiyama*, Hiromitsu Nishikata**, Hiroki Tomori**,

*山形大学, **山形大学大学院,

*Yamagata University, **Yamagata University Graduate School,

キーワード : 索状マニピュレータ (Cord-like manipulator), 湾曲型空気圧ゴム人工筋肉 (Bending type pneumatic rubber artificial muscles), かしめ (Calking), 特性試験 (Characteristic test),

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
内山輝一, Tel.: (0238)26-3217, E-mail: tcy07914@st.yamagata-u.ac.jp

1. 緒言

本研究室では, ソフトアクチュエータの一種である湾曲型空気圧ゴム人工筋肉 (以下 BPAM) を用いた索状マニピュレータの研究を行っている。

近年, ロボット技術や情報技術の発展により, 災害現場などの人の立ち入りが困難な環境におけるロボットの活躍が期待されている。一般に, ロボットには高剛性アクチュエータを用い, 高い位置決め精度が実現されている。だが, 一方で低いバックドライバビリティも課題とされ, 衝突した場合に備え柔軟関節を持たせたマニピュレータ¹⁾や, 衝突を感知するセンサを用いたマニピュレータ²⁾などが研究されている。しかし, 制御応答の速さは瞬間的な衝撃へは対応しきれず, そのため人間や障害物等に意図しない損傷を与える可能性がある。そこで, 本質的に柔らかく, 高いバックドライバビリティを有するソフトアクチュエータが有効と考える。これにより, たとえ

ば操縦ミスなどによって外部に干渉してしまったとしても, 衝撃を吸収するため与える影響は少なくできる。

本研究室では, 索状マニピュレータの仕組みを瓦礫内を探索するようなロボットに利用できないかと模索している。しかし現在研究中の索状マニピュレータでは, 出力が足りないことが見込まれた。そこで本稿では, 現在研究中の索状マニピュレータのさらなる出力向上を目的とし, 新たな BPAM の作成方法やその特性試験について述べる。

2. BPAM の湾曲原理

Fig.1 に本研究室で使用している BPAM の概要を示す。この BPAM は, アラミド繊維で周方向に拘束されたゴムチューブの一部軸方向に繊維を貼りつけ制作している。

空気圧を印加すると, 繊維を貼り付けた面の軸方向への伸びが拘束され, 繊維を貼り付けて

いない面が軸方向へ伸長する。この時のゴムの伸長差によって、人工筋肉は湾曲を引き起こす。

BPAMは、プーリーなど他の機構を用いずとも曲げを実現することができる。これによりマニピュレータの軽量化が行える。

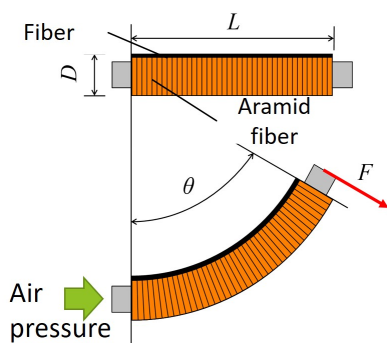


Fig. 1 BPAMの概要

3. ユニットの概要

Fig.2に、現在使用しているユニットの概要を示す。3本のBPAMを軸方向繊維部が中心になるよう、束ねたものを1ユニットとして用いる。圧力を印加する人工筋肉の組み合わせや印加圧力のバランスを変化させることによって、全方向への駆動を可能としている。また、これを複数つなげて運用することで冗長性を有することができ、象の鼻のような複雑な動きが可能となる。

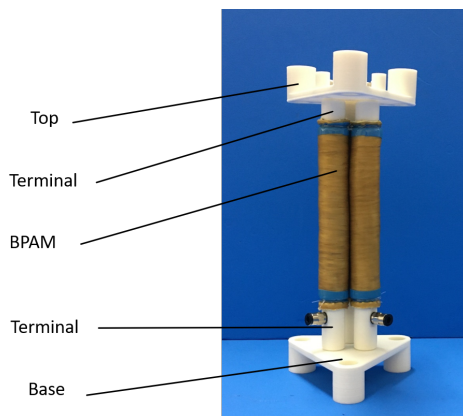


Fig. 2 ユニットの概要

4. BPAMの改良

4.1 従来までの問題点

従来まで本研究室で使用していたBPAM(以下旧BPAM)の構造をFig.3に示す。

旧BPAMはすべての層を手作業で作成しており、またターミナルとゴムチューブは、テグスを用いて人力で接合している。しかし、この作成方法では以下のような問題が発生した。

- 1) BPAMの厚さが足りず、耐久力が低い。
- 2) 空気圧が上がるとターミナルとの固定部分が耐え切れず外れてしまう。
- 3) 人力での作業工程が多いため、品質が安定しない。

そこでこれらの課題を解決するため、新たなBPAM(以下新BPAM)の作成方法を検討した。

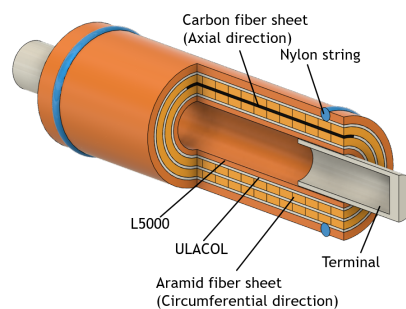


Fig. 3 旧BPAMの断面図

4.2 新BPAM作成

旧BPAMの諸問題を解決するために、新BPAMにはかしめと既製品を用いることとした。

かしめとは、ある部品をほかの部品で挟み、外部からの圧力によって変形させ結合する方法である。ホースのかしめには、重機などに用いられる油圧ホースのように高い圧力のかかる部品に使用されており、ターミナルとの接合部の強度改善が期待できる。

4.2.1 No.1 全層一体型

Fig.4に全層一体型の内部構造を示す。特徴として以下のようなものが挙げられる。

- 1) 従来まで使用していた軸方向繊維を炭素繊維からアラミド繊維へ変更した。
- 2) 従来まで液ゴム (L5000) を使用して作成していた一層目を既製品の飴ゴムチューブへ変更した。
- 3) すべての層が一体となるように接着した。
- 4) ターミナル部を既製品の真鍮製ホースニップルへ変更した。

このBPAMを用いてかしめを行ったところ Fig.5のような結果になった。改善点として

- 1) ニップルとゴムチューブが強固に結合した。
- 2) 飴ゴムチューブを用いたことにより厚さが増加した。
- 3) 制作過程の中に装置や既製品を用いたことで品質が安定した。

が挙げられる。しかし、新たにBPAMが初期から約40°湾曲してしまうという問題が発生した。これは、かしめでつぶされることによってゴムチューブが膨張し伸長差が生まれ、空気圧で湾曲させる際の現象と同じものが発生したためと考えられる。この湾曲を軽減するため、次の作成方法を検討することにした。

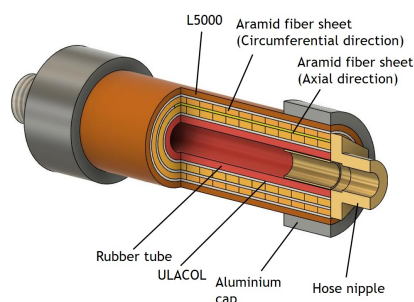


Fig. 4 全層一体型の断面図



Fig. 5 全層一体型のかしめ後

4.2.2 No.2 軸繊維後付け型

Fig.6に軸繊維後付け型の内部構造を示す。先のBPAMの湾曲原理より、軸方向繊維がなければ伸長差は生まれず、湾曲が起こらないことが判明していた。そこで、軸方向繊維をゴムチューブ内に入れるのではなく外側にある程度たわませた状態で配置し、一旦かしめを行った後で軸方向繊維をゴムチューブに接着するという方法を用いた。これにより、かしめによるゴムチューブの伸長差を軽減するとともに、軸方向繊維による引っ張りを軽減することが狙いである。

かしめ後の結果を Fig.7に示す。先の狙い通り、ゴムチューブの伸長差を取り除くことに成功した。これにより初期湾曲角度も約30°へ改善された。しかし、軸方向繊維を張り付ける際にどれだけたわませるかによって湾曲に差が生まれ、品質が安定しないという課題が発見された。そこで、次の作成方法を検討することにした。

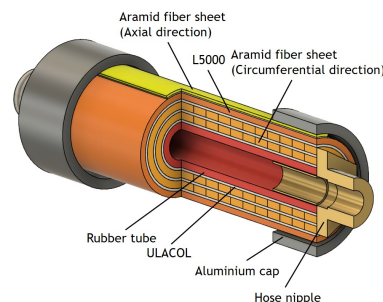


Fig. 6 軸方向繊維後付け型の断面図



Fig. 7 軸方向繊維後付け型のかしめ後

4.2.3 No.3 二層分離型

Fig.8に二層分離型の内部構造を示す。これは軸方向繊維後付け型と違い、かしめによって生まれるゴムチューブの伸長そのものを軽減することにした。ここでは飴ゴムチューブの層を下層、その他の部分を上層として説明する。

全層一体型の際には、上層と下層は接着用ゴム液 (ULACOL) によって接着されていた。そのため下層の伸長が上層へ直接影響を及ぼし、大きな湾曲を生んでいると考えられる。そこで二層分離型では、上層と下層に剥離剤を塗布することで両者が接着せず滑りやすいように変更した。これにより、1度目のかしめによって生まれる下層の伸長を取り除くことが期待できる。また、アルミキャップで覆われる部分に軸方向アラミド繊維シートを巻いた。これにより、かしめによる上層の伸長を抑えることが期待できる。1度目のかしめ後を Fig.9 に、2度目のかしめ後を Fig.10 にそれぞれ示す。

Fig.9より先の狙い通り、1度目のかしめで生まれた下層の伸長部分が現れ、これを取り除くことに成功した。また、Fig.10より上層の伸長を抑えられていることが分かる。これらの理由より、初期湾曲角を約 25° と最も軽減することに成功した。また作成方法も比較的単純であり、品質の安定が図れる。以上のことから、二層分離型を新BPAMとして採用することとした。

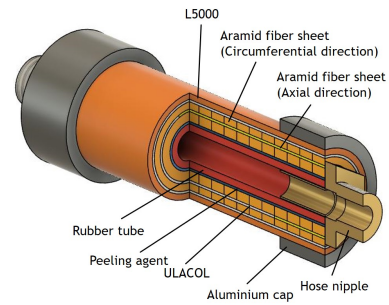


Fig. 8 二層分離型の断面図



Fig. 9 二層分離型の一度目のかしめ後



Fig. 10 二層分離型の二度目のかしめ後

5. 特性試験

5.1 力学平衡モデル

特性試験には Fig.11 の BPAM モデルを使用した。負荷なし時の力学平衡モデルの式を (1) に、負荷あり時の力学平衡モデルの式を (2) にそれぞれ示す。このモデルは、本研究室修了生の木村が湾曲型空気圧ゴムアクチュエータの発生力に関する宮川らの力学平衡モデル³⁾を改良し、新たに作成したものである。

$$P = \frac{E_0 r_c t \theta \int_0^{2\pi} \frac{(a+t+r_c \sin \varphi)^2}{L+(a+t+r_c \sin \varphi)\theta} d\varphi}{\pi(a^3 + a^2 t)} \quad (1)$$

$$P = \frac{F \frac{L}{\theta^2} (1 - \cos \theta) + E_0 r_c t \theta \int_0^{2\pi} \frac{(a+t+r_c \sin \varphi)^2}{L+(a+t+r_c \sin \varphi)\theta} d\varphi}{\pi(a^3 + a^2 t)} \quad (2)$$

Table 1 変数.

名称	文字	単位
印加空気圧	P	[MPa]
ヤング率	E_0	[MPa]
代表半径 (a+t/2)	r_c	[mm]
厚さ	t	[mm]
内半径	a	[mm]
端面における周方向	φ	[rad]
湾曲角度	θ	[rad]
発生力	F	[N]
長さ	L	[mm]

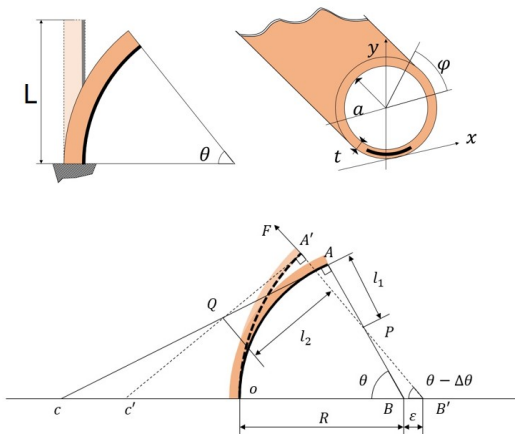


Fig. 11 BPAM モデル

5.2 負荷なし特性試験

試験は Fig.12 に示した装置を用いて、以下の手順で行った。これにより、新 BPAM の特性と駆動の様子を調べる。

- 1) 0.00[MPa] から 0.01[MPa] 刻みで 90° 湾曲するまで圧力印加の操作を行う。
- 2) 湾曲させた後,Optitrack を使用して BPAM の根本と先端の位置を記録し,湾曲角の測定計算を行う。

旧 BPAM を用いた結果を Fig.13 に、新 BPAM を用いた結果を Fig.14 にそれぞれ示す。試験結果より、従来のものと比べ新 BPAM はヤング率が増加していることが分かる。また肉厚も 3 倍に増加したため剛性が増加し、湾曲させる際に必要となる圧力が増加した。

しかし、肉厚の増加とかしめによってニップルとゴムチューブが強固に結合したことにより、BPAM の強度が向上したため扱える空気圧が増加し、その結果従来のものと同様に 90° 曲げることが可能となった。

なお、理論曲線と実測点が一致していないのは BPAM がもともと持っていた湾曲の影響と考えられる。そのため、今回は理論曲線の傾きが一致するようにした。

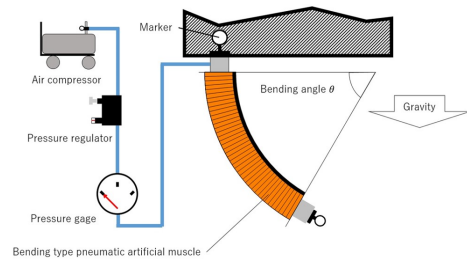


Fig. 12 負荷なし試験装置

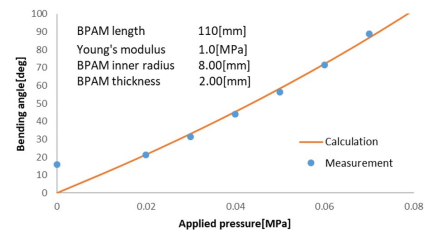


Fig. 13 旧 BPAM 負荷なし試験結果

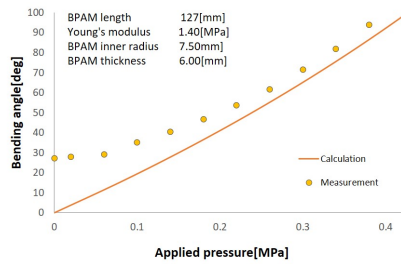


Fig. 14 新BPAM 負荷なし試験結果

5.3 負荷あり特性試験

試験は Fig.15 に示した装置を用いて、以下手順で行った。これにより、新BPAMに負荷をかけた場合の駆動がどのように変化するかを調べる。なお錘の重量は0.1[kg] から0.5[kg] までを0.1[kg] 刻みで使用した。

- 1) 圧力限界付近、または湾曲角がおよそ 90° になるまで、0.00[MPa] から0.01[MPa] 刻みで空気圧を印加する。
- 2) 湾曲させた後、Optitrackを使用してBPAMの根本と先端の位置を記録し、湾曲角の測定計算を行う。

旧BPAMを用いた結果を Fig.16 に、新BPAMを用いた結果を Fig.17 にそれぞれ示す。試験結果より、新BPAMは剛性の増加によって負荷による角度変化を軽減できたことが分かった。また、旧BPAMでは 90° 湾曲させられたのは0.3[kg] までであったが、新BPAMでは0.5[kg] まで湾曲させられることが計算より分かった。

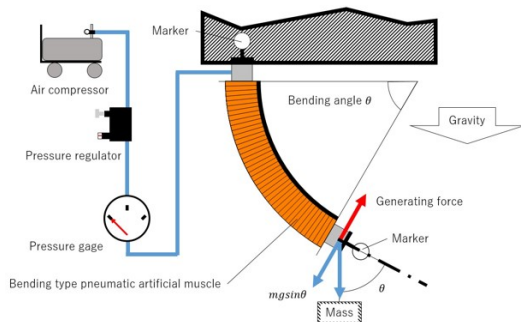


Fig. 15 負荷あり試験装置

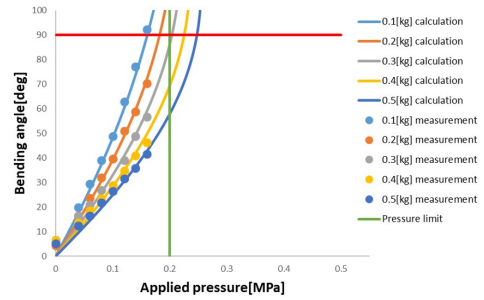


Fig. 16 旧BPAM 負荷あり試験結果

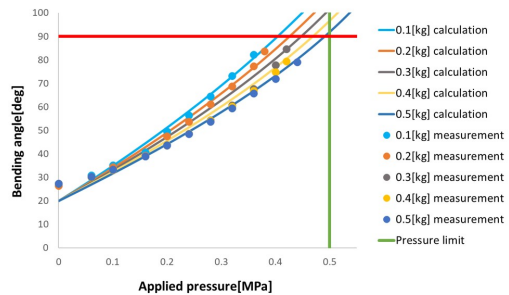


Fig. 17 新BPAM 負荷あり試験結果

6. 結言

本稿では、かしめを用いたBPAMの作成を行った。これにより、旧BPAMが課題としていた耐久力の向上を行うことに成功した。

しかしBPAMの剛性が増加したため、湾曲させるために必要となる空気圧が増加してしまった。

今後は、BPAMを3本束ねて作成したユニットの駆動試験と、新BPAMの耐久試験を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 森田 寿郎, 鈴木 雄一郎, 川崎 毅彦, 菅野 重樹: 人間共存ロボットマニピュレータの衝突安全設計と制御, 日本ロボット学会誌, Vol.16 No.1, 102/109 (1998)
- 2) 山田 陽滋, 吹田 和嗣, 今井 孝二, 池田 博康, 杉本 旭: 痛覚耐性値に基づく安全な人間の接触検出および停止機能を有するロボットシステム, 日本機械学会論文集 (C 編), 63 巻 614 号, 232/237 (1997-10)
- 3) 宮川 豊美, 戸谷 公紀, 久保田 裕二: 湾曲型ゴムアクチュエータの静特性, Proceedings of the 2007 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 1A2-A01,1/4(2007)