

四面体型ソフト空気圧アクチュエータの基本特性

長谷 建汰・赤木 徹也*・堂田 周治郎**・篠原 隆***

岡山理科大学大学院工学研究科知能機械工学専攻

*岡山理科大学工学部知能機械工学科

**岡山理科大学フロンティア理工学研究所

***岡山理科大学サイエンスドリームラボ

(2021年10月29日受付、2021年12月9日受理)

1. 緒言

老々介護に代表されるように近年、少子高齢化が深刻な状況にある¹⁾。これは単に高齢者を支える働き手世代が少ないことの問題だけでなく、今後、介護を必要とする高齢者が増えることを意味し、生産に係わる労働力が減ることを意味する。つまり、日本の生産(労働力)経済に対して無視できない問題である。この対策として高齢者を労働力として活用するため、定年の引き上げや、年金受給年齢の引き上げなどの政策が実施されている。この労働力年齢の引き上げつまり、永く働けるためにも、高齢者や一時的な致傷による障害者などの身体能力の改善が必要である。このような状況を背景としてQOL(Quality of life:生活の質)の向上から医療介護、リハビリテーションの分野での福祉機器の重要性が増加している²⁾。このような機器に使用されるアクチュエータには、高い人間親和性が求められるため、安全で人体に優しいソフトアクチュエータ³⁾が望まれている。またこのようなソフトアクチュエータは人と接する環境で使用されるアクチュエータとして有用である。例えばパワーアシストなどの人の力を補助する機器やバーチャルリアリティなど仮想空間での身体的フィードバックなどを行うシステムなどである。これらの人と接する状況下で使用できる機器に用いられるアクチュエータは上述のリハビリテーション機器に用いられるものと同様のスペックが必要となる。以下に、このような要求を満たすアクチュエータの開発について本研究室での開発事例を紹介する。本研究室では以前よりフレキシブルチューブを用いた柔軟空気圧シリンダ⁴⁾の開発を行ってきた。また、一時的な怪我からの回復するため、自宅で患者自身が一人で使える自主的なリハビリテーション機器の開発をめざし、安藤ら⁵⁾は手首を含むリハビリテーション機器として、自由度の高い手首等の他動運動を行うために球面アクチュエータを試作した。これは、図1に示すようにボールを前後左右に転がすことで、手首の関節可動域を広げる運動を他動運動として加えることを想定した装置である。機器は、前述の柔軟空気圧シリンダの柔

軟チューブをリング状に曲げ、それを2本直角に交差させた柔軟な設置型球面アクチュエータである。また松井ら⁷⁾はこの柔軟球面アクチュエータを改良し、両手で保持して腕や肩などのリハビリテーションが行えるポータブル上肢リハビリテーション機器への改良を行ってきた。これは、PT(理学療法士)などがいない自宅でのリハビリテーションを想定したもので、利用者が危険を感じた際に機器を手から離すことで安全性を確保できるものである。

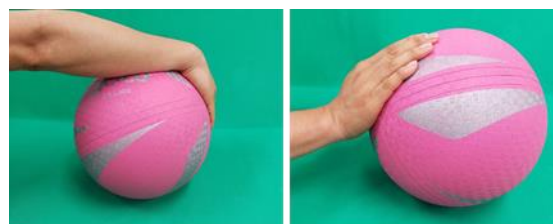


図1 ボールを使用した手首のリハビリテーション

また、田ら⁹⁾はよりシンプルでコンパクトおよび柔軟な手首リハビリテーション機器の開発をめざし伸長型柔軟空気アクチュエータ(Extension type Flexible Pneumatic Actuator: 以後、EFPAと略す)を3本用いた四面体型ソフトアクチュエータ(Tetrahedral-shaped Soft Actuator: 以後TSAと略す)を開発した。また四面体型の頂点の傾斜角と土台からの変位により、姿勢制御を行うシステムを構築した。以上のように本研究室で開発を行ってきた空気圧駆動アクチュエータはリハビリテーション機器に用いられるほど人間親和性が高いものである。本研究ではこれらのアクチュエータのうち、田らの開発した四面体型ソフトアクチュエータに注目し、これを用いたバーチャルシミュレータなどVR関連機器の開発について検討する。この機器の開発に際して、このアクチュエータに対するいくつかの課題を解決する必要がある。1つには、田らのアクチュエータ(TSA)ではEFPAの配置に対する剛性や発生力、発生トルク特性について十分調べられていない。そこで、

本論文ではTSA内のEFPAの配置に対する曲げ剛性、力・トルク特性などの基本特性について詳しく調べる。

2. 四面体型ソフトアクチュエータに関する従来研究

TSAに関して田ら⁹⁾が開発した四面体型リハビリテーション機器について紹介し、TSAの構成要素であるEFPAの構造と動作原理について説明するとともに、TSAの構造と動作原理やその姿勢制御について述べる。

図2に伸長型柔軟空気圧アクチュエータの外観と構造を示す。EFPAは、シリコンゴムチューブ(外径10mm, 内径8mm, 長さ311mm)を軸方向にのみ伸縮する蛇腹状のナイロン製のスリーブ(榊直村企画 びっくりホースプロ)で覆い、その両端を樹脂製のコネクタで固定した簡易な構造のアクチュエータである。動作原理は、供給圧力をEFPAに加えると、内部のシリコンゴムチューブが膨らみ、周方向および軸方向に向かって伸びる。しかし、蛇腹状のナイロン製スリーブにより、周方向への伸びは拘束され、軸方向のみに伸びることになる。また、排気を行うと内部のシリコンゴムチューブの復元力により、EFPAは自然長へと戻る。このEFPAは自然長の約2.5倍伸長し、ゴムチューブの復元弾性力により約20Nの最大引張力が得られる。

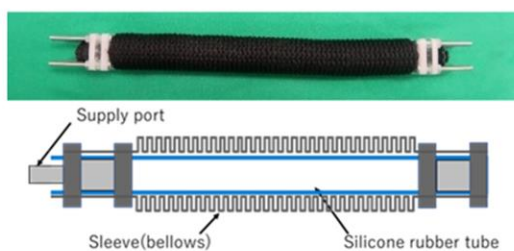


図2 伸長型柔軟アクチュエータ (EFPA) の外観と構造

図3に、田ら⁹⁾が開発した四面体型手首リハビリテーション機器の構成を示す。試作機器は、TSA、1個のワイヤ式リニアポテンシオメータ、1個の3軸加速度センサモジュール(株Kionix, KXR94-2050)から構成される。TSAは3本のEFPAを四面体の底辺を除く3辺に配置し、その3辺を22枚の厚み1mmのPETシートで拘束することによって構成されている。図4に各拘束PETシートの図面と寸法を示す。PETシート上のEFPAの配置用の穴位置は中心から最大半径で126.5mm, 最小半径は11mmである。図5はTSA内のPETシートの番号と各EFPAを配置半径の関係を示す。図5に示すように徐々に配置半径が変わるシートでEFPAの蛇腹部分を2個毎に拘束することで、水平面から約45deg.の傾斜をつけてEFPAを配置することができ、この傾斜をつけた配置と3本のEFPAを互いに拘束することで、EFPA内のゴムの伸長方向のバネ弾性力

を水平方向と垂直方向に分割可能で、両方向に対する剛性を確保できる。

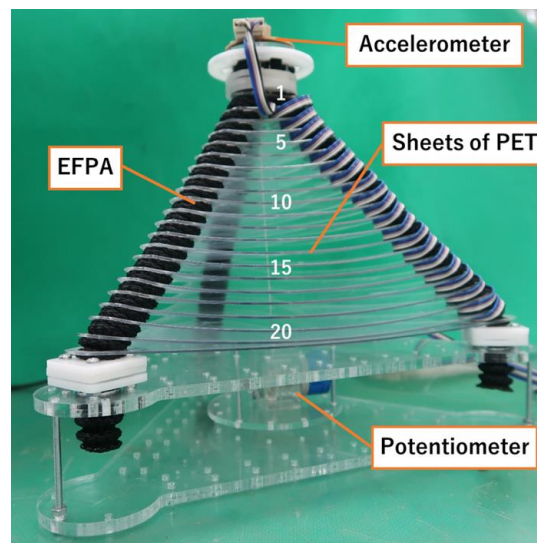


図3 四面体型手首リハビリテーション機器の外観

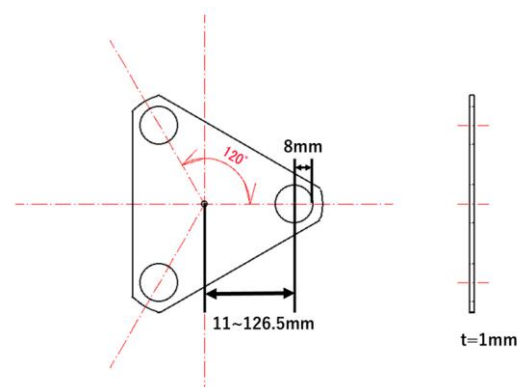


図4 拘束PETシートの図面と寸法

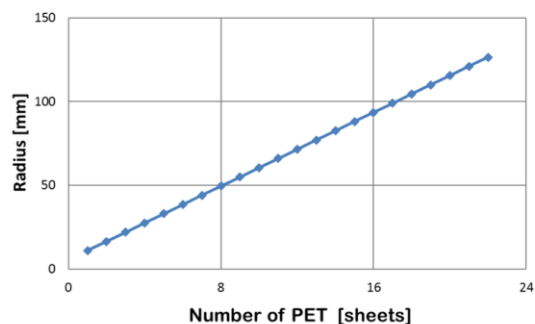


図5 PETシート番号とEFPAの配置半径の関係

また四面体の頂点に相当するハンドル部の傾斜角は3軸加速度センサモジュールで計測し、四面体の底辺に相当する土台からの変位をワイヤ式リニアポテンシオ

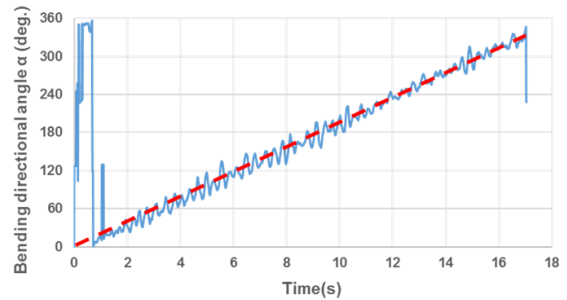
メータで計測している。

機器の動作原理は以下の通りである。1つまたは複数のEFPAが加圧されると、駆動されたEFPAが伸び図6に示すように湾曲や伸長などの様々な動作が実現できる。また、EFPA3本すべてを排気する。つまりデフォルトの状態ではEFPAは縮み、コンパクトな形状となる。このように、各EFPAの長さを制御することにより先端の位置を制御することができる。

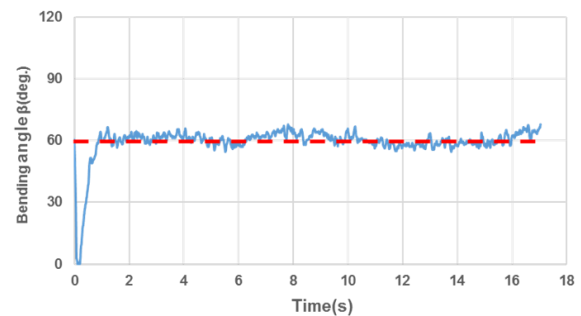


図6 四面体型アクチュエータの動作

田ら⁹⁾は、試作機器とこの機器の姿勢制御モデルを用いて、TSAの先端部分の姿勢制御を行った。図7(a), (b)にその結果を示す。図7はTSA先端部を一定湾曲角60deg. に保った状態で、湾曲方向角を0~360deg. まで約18秒で動かす目標軌道への追従制御結果を示す。図7(a)は湾曲方向角, (b)は湾曲角の過渡応答である。図中の破線は目標軌道, 実線は制御結果を示す。田らの研究では初期の大きな変化を除く定常値の追従誤差の標準偏差は、湾曲方向角で3.8deg. 湾曲角で2.1deg. と比較的良好に目標軌道に追従できていることを確認している。田らの研究ではTSAをこの四面体型リハビリテーション機器用のアクチュエータとしてのみ利用したが、著者らはこのTSAは色々なロボットや福祉機器に利用できるものと考える。その理由として、まず1つに、TSAは土台に対して水平方向で放射状に湾曲が可能であり、これは体幹強化のための座席式のリハビリテーション機器の水平方向に移動の動作に利用できる他、ベッドのマットレス部分に設置して患者の移乗システムにも活用できると考える。また、同時にTSAは軸方向に伸長動作も可能であり、発生力が十分であれば、寝たきり患者を持ち上げるなど、床ずれ防止用のアクチュエータとしても利用可能である。これらの利用を考える際、TSAの湾曲時の剛性や湾曲トルクおよび垂直軸方向の発生力など十分に検証されていない。そこで本論文ではこのTSA内のEFPAの配置角に対するこれらの曲げ剛性、発生力トルク特性などを調べる。



(a) 湾曲方向角 α の過渡応答



(b) 湾曲角 β の過渡応答

図7 試作機器の姿勢追従制御結果

3. 四面体型ソフトアクチュエータの特性

上述の基本特性を調べるため試作したTSAの外観を図8に示す。試作TSAは四面体の頂点に接続された3本の各EFPAが、底面からの角度(配置角)が60deg. と45deg. になるように拘束板に相当するPETシートで拘束している。また、各EFPAは内部のシリコンゴムチューブの自然長が180mm, 蛇腹の被覆スリーブの山数が33になるように設定した。PETシートは蛇腹が3谷毎に拘束し、計10枚を用いている。

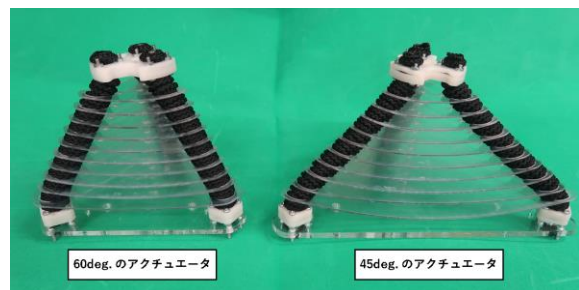
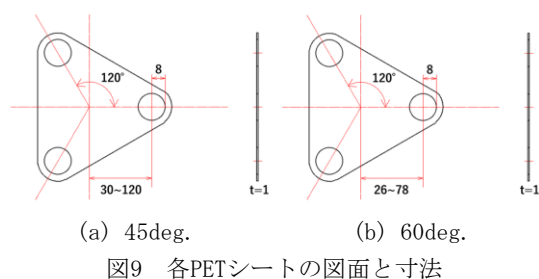


図8 試作した2種類のTSA

図9 (a), (b)にそれぞれ配置傾斜角45deg. と60deg. の両TSAに用いた各PETシートの図面と寸法を示す。また図10に両四面体型アクチュエータのPETシート番号と半径の関係を示す。●は配置角60deg. の角度▲は

45deg.の角度である。また図11に両アクチュエータ、先端部のコネクタ形状(寸法)を示す。この先端部のコネクタは両アクチュエータともに同一のものを使用しEFPAの設置位置は中心から半径20mmの位置である。また、最下部の底面プレートの形状を図12に示す。下部の土台プレートには各EFPA端部の4本のM3ネジを介して接続されている。ここで図9 (a), (b)に示す60deg.と45deg.の両TSAのEFPAのコネクタ接続位置はそれぞれ中心から半径75mmと120mmであり、PETシート上のEFPAの配置用の穴径は16mmである。



(a) 45deg. (b) 60deg.
図9 各PETシートの図面と寸法

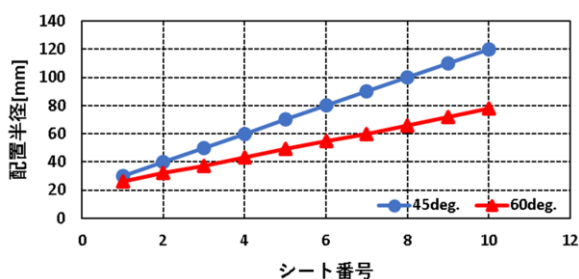


図10 シート番号に対するEFPAの配置半径の関係

この拘束板を使うことで、底面からそれぞれ所望の傾斜をつけてEFPAを配置することができ、このEFPAの傾斜配置と、3方向からのEFPAによる互いの引張で、EFPA内のゴムの伸長方向のバネ弾性力を水平方向と垂直方向に分割でき、両方向に対する剛性を確保できる。ここで配置角60deg.のアクチュエータの無加圧時の長さは145mm。底面部の三角形の一辺の大きさは135mmである。同様に配置角45deg.のアクチュエータの自然長時の高さは120mm、底面の三角形の一辺は230mmである。

図13にTSAの曲げ剛性と発生トルク特性を調べるための実験装置の外観を示す。実験装置は、TSAの底部を固定するフレームとTSA先端部に水平の位置に接続・配置したフォースゲージ(株SHIMPO, FGPX-20)から構成される。フォースゲージは常にTSAの先端部と水平になる様に土台の高さを調整できるようにしている。実験では、TSAの底面をフレームに固定した状態でTSA先端部について金属製のロッドの頂点を水平方向に引っ張ることで曲げ剛性を調べた。また、圧力センサ(株

KEYENCE, AP-C33)を介してレギュレータでEFPA内の圧力を調整し、3本のEFPAのうち1本もしくは2本給気した場合の印加圧力に対する発生トルクも調べた。

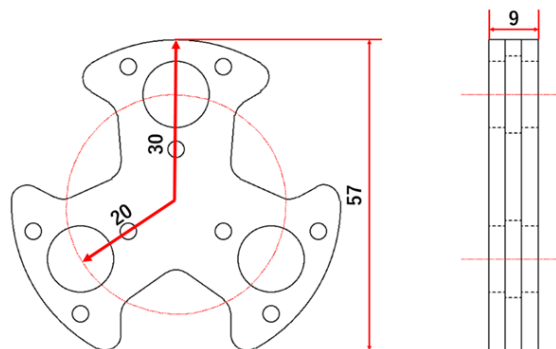
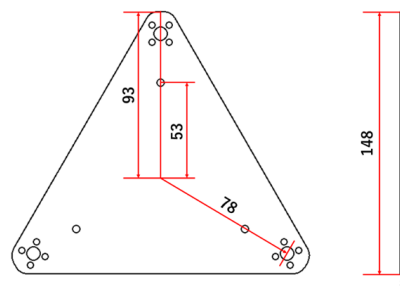
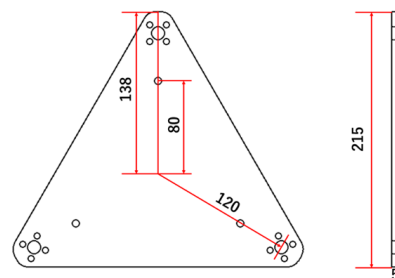


図11 先端部のコネクタ形状



(a) 配置角60deg.



(b) 45deg.

図12 下部土台プレートの形状

まず、TSAの曲げ剛性を計測する実験について述べる。実験に用いたTSAの配置とフォースゲージの引っ張り方向の関係図を図14に示す。図14(a)は機器の中心からEFPA1本に向かう方向、(b)は中心からEFPA2本の間位置の方向に引張る場合である。図14(a), (b)に示すようにTSAを固定した状態で、頂点部を水平に50, 100, 150mmの位置まで引っ張った際の力を計測し、アクチュエータ長Lとの積から曲げトルクを算出した。実験は3本のEFPAに0~500kPaまで100kPa毎に印加圧力を加えた状態で行った。ここで印加圧力に対するTSA長Lは表1に示す通りである。また上記の方法でTSA先端部に変位を与

えることで得られる湾曲角の算出はこのアクチュエータ長Lに対して加えた先端変位の比から求めた。



図13 試作TSAの曲げ剛性/発生トルク特性の実験風景

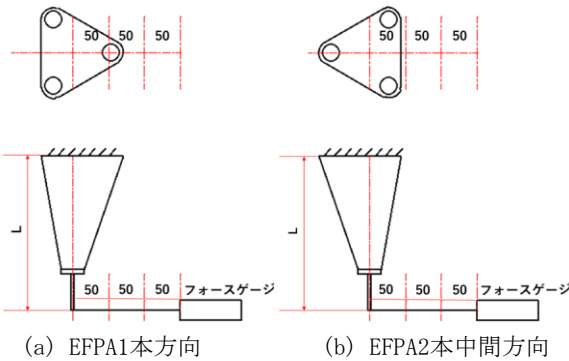
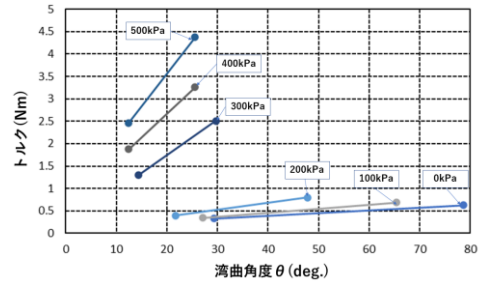


図14 曲げ剛性測定時のアクチュエータとフォースゲージの配置図

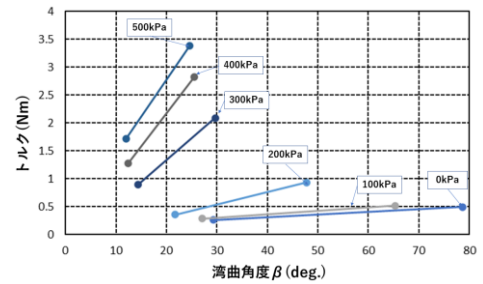
表1 印加圧力に対するアクチュエータ長

印加圧力[kPa]	0	100	200	300	400	500
アクチュエータ長[mm] 45deg.	137	145	170	237	267	275
アクチュエータ長[mm] 60deg.	144	147	180	236	265	276

以上の計測結果を図15と図16に示す。両計測結果と共に3回の実験による計測値の平均値である。図15はEFPAの配置角が45deg.、図16は配置角60deg.のTSAの曲げ剛性を示す。両グラフともに無加圧時のトルクが最も小さく加圧時には曲げトルクは大きくなる傾向がある。これは加圧するとアクチュエータが長くなり、引っ張り力はほとんど変わらないので、結果として曲げトルクが大きくなるためである。また配置角45deg.のTSAの最低曲げトルクは3.38Nm、60deg.では3.41Nmとほとんど変わらないことがわかる。また、予備実験から3本のEFPAを加圧することで生じる垂直方向の発生力の最大値は130Nであることを確認している。この発生力の上限は、EFPA本来の発生力の上限ではなく、曲げ剛

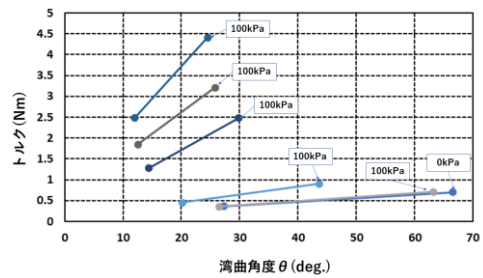


(a) EFPA 1本方向

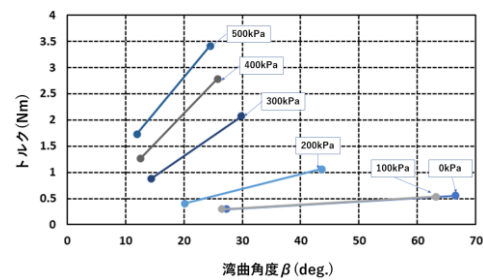


(b) EFPA 2本中間方向

図15 曲げ剛性特性(45deg.)



(a) EFPA 1本方向



(b) EFPA 2本中間方向

図16 曲げ剛性特性(60deg.)

性の不足による座屈によって生じることも確認している。

図17に両アクチュエータの発生トルク特性を調べた際のアクチュエータ配置図とフォースゲージでの発生力の測定方向を示す。図17(a)はEFPA 1本を加圧した場合、(b)は2本加圧した場合を示す。この実験ではフォースゲージは台に固定した状態で糸を介してアクチュ

エータ先端部と接続している。

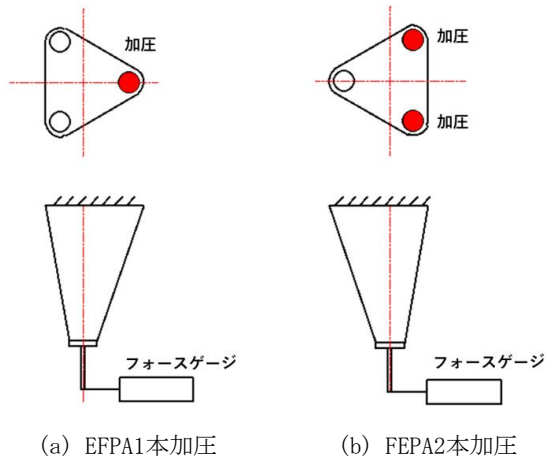


図17 発生トルク特性測定時のアクチュエータとフォースゲージの配置

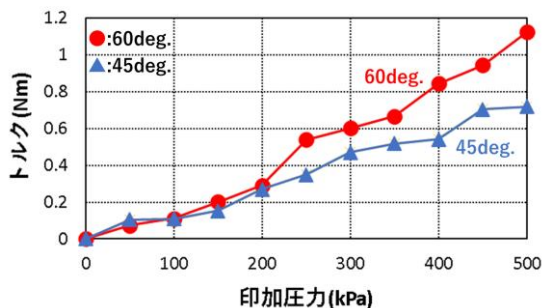


図18 発生トルク特性

実験ではEFPAの印加圧力を0~500kPaまで50kPa毎に変えた場合のフォースゲージで計測される発生力とアクチュエータ長の積として発生トルクを求めた。図18はEFPAを2本加圧した場合の結果を示す。1本加圧の場合は座屈が生じ発生トルクが計測できなかったため結果を載せていない。図18の横軸は印加圧力、縦軸は発生トルクを示す。図18から印加圧力が増える毎に発生トルクが大きくなり45deg.では最大0.72Nm, 60deg.では最大1.12Nmである。以上の結果から、配置角60deg.のEFPAの方が発生トルクが大きく、曲げ剛性の特性に差がない(図15, 図16参照)ことから、配置角60deg.のTSAが適しているものと考えられる。

4. 結言

本研究では体幹強化用のリハビリテーション機器やベッド移乗用や床ずれ防止用のソフトアクチュエータとして、伸長型柔軟空気圧アクチュエータ(EFPA)を3本用いた四面体型ソフトアクチュエータ(TSA)の基本特性として、EFPAの配置角と発生トルク、曲げ剛性特性について調べた。その結果、EFPAの配置角45deg.と

60deg.の特性実験の結果、曲げ剛性はほぼ同じであるにもかかわらず、配置角60deg.の方がトルクが大きく、TSA先端部での変位も大きくなることから、リハビリテーションや福祉介護支援機器などの応用に適しているものと考えられる。

今後は、このアクチュエータを脚に用いたロボットを製作し、体幹訓練にも用いることのできるバーチャルシミュレータの開発や、ベッドの患者移乗や床ずれ装置などの開発について検討する予定である。

参考文献

- 1) <http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2015/html/zenbun/index.html>, 高齢社会白書(全体版), (2015).
- 2) M. Takaiwa, T. Noritsugu and D. sasaki, Training Simulator For P. T. In Wrist Rehabilitation Using Pneumatic Parallel Manipulator, Proc. FLUCOME2013, OS4-01-1. pdf, pp1-8, (2013).
- 3) 小林宏・鈴木秀俊・伊庭雅弥・長谷川翔: 上肢動作補助用マッスルスーツの肩機構開発と姿勢制御手法の提案, 計測自動制御学会論文集, Vol. 42, No. 4, pp. 376-385, (2006).
- 4) 赤木徹也・堂田周治郎: ロッドレス型柔軟空気圧シリンダの開発とその応用, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 73, No. 731, pp. 2108-2114, (2007).
- 5) S. Dohta, T. Akagi, A. Ando, F. Zhao and C. Liu, Development of flexible spherical actuator controlled by low-cost servo valve and embedded controller, Journal of Procedia Engineering, Vol. 41, pp. 127 -133, (2012).
- 6) S. Dohta, T. Akagi, C. Liu and A. Ando, Development and Control of Flexible Spherical Actuator Using Flexible Pneumatic Cylinders, International Journal of Advanced Mechatronic Systems, Volume 5, No. 3, pp. 184-192, (2013).
- 7) Y. Matsui, T. Akagi, S. Dohta, M. Aliff and C. Liu, Development of Portable Rehabilitation Device Using Flexible Spherical Actuator and Embedded Controller, Lecture Notes in Electrical Engineering 293, Volume 1, Springer, pp. 231-238, (2014).
- 8) Y. Matsui, T. Akagi and S. Dohta, Development and Control of Flexible Spherical Actuator for Portable Rehabilitation Device, International Journal of Materials Science and Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 49-54, (2015).
- 9) W. Tian, C. Jhan, M. Inokuma, T. Akagi, S. Dohta, and S. Shimooka, Development of a Tetrahedral-Shaped

Soft Robot Arm as a Wrist Rehabilitation Device
Using Extension Type Flexible Pneumatic
Actuators Journal of Robotics and Mechatronics
Vol.32 No. 5, pp. 931-938, (2020).

Fundamental Characteristics of Tetrahedral-shaped Soft Actuator

Kenta Hase, Tetsuya Akagi*, Shujiro Dohta** and Takashi Shinohara***

*Department of Intelligent Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Graduate School of Science,*

**Department of Intelligent Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,*

***Frontier Institute of Science and Engineering,*

Okayama University of Science

****Science Dream Lab.,*

Okayama University of Science,

1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan

(Received October 29, 2021; accepted December 9, 2021)

In 2020, the ratio of the Japanese elderly became more than 26 %. Under these circumstances, various assisting and rehabilitation devices to help welfare work for the elderly and disabled using pneumatic soft actuators have been actively developed. A pneumatic soft actuator is useful for, not only power assisted system but also a rehabilitation device. In the previous study, the washable portable rehabilitation device using Extension type Flexible Pneumatic Actuators (we call it “EFPA” for short) that can provide passive exercise was proposed and tested. The attitude control of the device based on the model without position sensor was carried out. As a rehabilitation device using the same EFPA, W. Tian developed the Tetrahedral-shaped Soft Actuator (we call it “TSA” for short) for wrist rehabilitation was developed. Usually, a pneumatic actuator was often used for wearable and rehabilitation devices because it has advantage of compliance based on air compressibility. Especially, a pneumatic soft actuator is more suitable because it has more advantages such as lighter-weight and more compliance based on flexibility. In the next step, it is necessary to investigate fundamental characteristics of the TSA. In this paper, the improved TSA and the shape of restraint PET sheets with the setting angle of EFPA of 45 and 60 deg. from the base stage were proposed and tested. In order to get higher stiffness and generated force, the shorter EFPA with the original longitudinal length of 180 mm was used for TSA. Each TSA has 10 restraint PET sheets. The setting position of each EFPA is changed so that the setting angle of EFPA from the base can keep 45 and 60 deg. Each PET sheet is installed every three pitches. The experimental setup to investigate the stiffness and the generated torque of the TSAs as a fundamental characteristic was also reported. As a result, it can be concluded that the TSA with EFPA setting angle of 60 deg. is suitable to any rehabilitation equipment from view point of almost same bending stiffness and larger generated torque. In addition, we confirmed that TSA with the setting angle of 60 deg. can give larger bending angle and displacement from preliminary experiments. In addition, we also confirmed that a TSA can lift up the load with more than 130 N, that is enough lifting force for the target robot, under the condition when three EFPAs are pressurized.

Keywords: Extension type Flexible Pneumatic Actuator; Tetrahedral-shaped Soft Actuator; Stiffness and generated torque.