

柔軟リニアステッピングアクチュエータの改良と応用

福川 展弘・赤木 徹也*・堂田 周治郎*・井上 椋太

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

(2018年10月31日受付、2018年12月6日受理)

1. 緒言

高齢化社会の進行に伴い、リハビリテーションやパワーアシスト機器に用いる強力で人間に優しいソフトアクチュエータの開発が望まれる^{(1)~(3)}。大きな力を有するソフトアクチュエータとしてゴム人工筋肉がよく知られているが、その変位は自然長の約25%程度と小さく、さらに、変位するに従って発生力が低下するなど大きな力や一定の発生力での長変位駆動は難しい。そこで、本研究では以前、動作端となる柔軟ロッドを一定刻みで押し引きでき、長変位で大きな発生力を有しながらも、変位センサなしに位置決め制御が可能な柔軟リニアステッピングアクチュエータを開発した。しかし、その発生力は理論値に比べて小さく、ロッドと保持機構の間に滑りが生じるなどロッドの保持性能も悪かった⁽⁴⁾。そこで、本論文では、中空柔軟ロッドの内径から保持する特殊な保持機構を搭載することで300Nに近い発生力を有する柔軟リニアステッピングアクチュエータの開発と、その応用として、改良アクチュエータを用いた検査用柔軟ロボットアームの開発について述べる⁽⁵⁾。

2. 従来の柔軟リニアステッピングアクチュエータ

以前の研究で試作したアクチュエータの外観と構造を図1に示す。試作したアクチュエータの長さは約133mm、外径は約80mmである。また質量は0.7kgである。アクチュエータはストロークが5mmと50mmの2種類の複動式空気圧シリンダ(株式会社コガネイ、P13DA16×5-MとPBDA16×50-M)が各3本、合計6本と3つの保持機構の付いたステージ、動作端となる柔軟ロッドである配管用ポリウレタンチューブ(株式会社SMC、TUS 1208)から構成される。各ストロークのシリンダは、アクチュエータの中心から33mmの位置に120度毎に配置され、ストロークの異なるものとは60度ずらした状態で円筒状に配置している。さらに、シリンダ端はストローク毎(3本毎)に保持機構の付いたステージに接続され、6本のシリンダのロッド端は共通のステージ(保持機構付)に接続されて

いる。

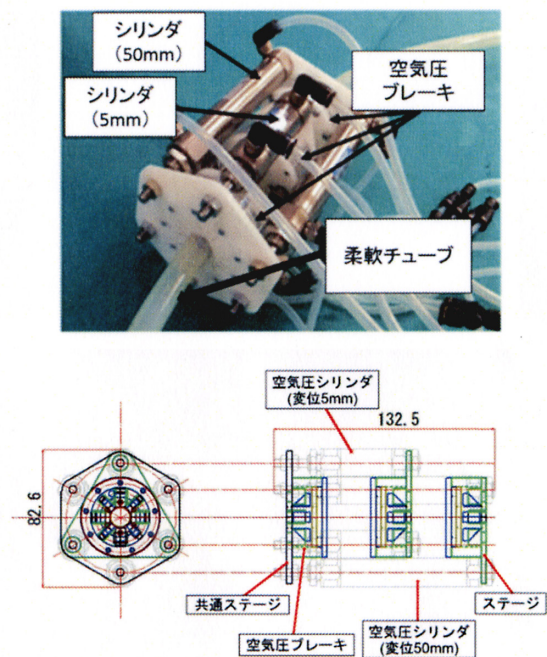


図1 従来の柔軟リニアステッピングアクチュエータの外観と構造

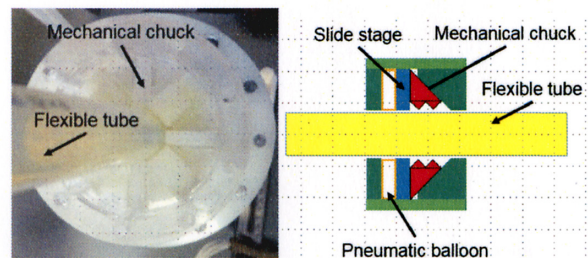


図2 空気圧で駆動する保持機構の外観と内部構造

このアクチュエータに搭載している保持機構の構造を図2に示す。保持機構は外径36mm、内径24mmのシリコーンゴム製のドーナツ型バルーン、チャックを抑えるためのプラスチック製の円板、チャックから構成され

ている。保持機構は傾斜角 45° のステージ上を亚克力製の爪が滑る構造となっており、チャックは予備実験の結果から2種類(3mmと6mm)の厚みの爪を用い、軸中心から交互に 45° ごとに配置している。また、500kPaの供給圧力から算出されるバルーンの発生力は280Nであるが、保持機構の保持力は半分の140Nである。

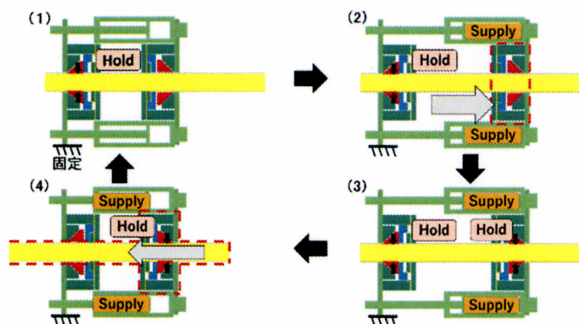


図3 柔軟リニアステッピングアクチュエータの動作原理

柔軟リニアステッピングアクチュエータの動作原理を図3に示す。まず、図3(1)に示すように固定側端の保持機構を駆動し、チューブを保持する。その状態で、図3(2)に示すように空気圧シリンダ右側の圧力室を加圧し、ロッド端に接続されている保持機構を有したスライドステージを右端に移動させる。ステージがストローク端に到達すると、図3(3)に示すようにスライドステージ上の保持機構を駆動し、ロッドを保持する。その後、固定端側の保持機構と空気圧シリンダの右側圧力室を排気し、シリンダの左側圧力室を加圧することにより、スライドステージ上の保持機構はチューブを保持したまま図中の左側へ送られる(図3(4)参照)。また、使用する空気圧シリンダのストロークによってスライドステージの動く変位は決まっているため一回の操作により一定間隔の移動動作が実現できる。この動作を繰り返すことによりロッドを一定のストロークで移動させるステッピング動作が実現できる。また、このアクチュエータは、保持機構に空気が供給されていない場合に、ごく小さな力でロッドを駆動できるというバックドライバビリティ(逆駆動性)も有している。これは、過負荷に対して安全側に作用し、人と機械が接触する環境下では必要な性質・機能である。

図4に、このアクチュエータの位置決め制御システムの構成を示す。制御システムは、アクチュエータと3つの保持機構、2種類の複動式空気圧シリンダを動かすための7つのON/OFF制御弁(綑コガネイ、G010HE-1)、トランジスタおよびシリアル通信ユニット(FTDI Co. Ltd.、FT232X)を備えた組み込みコントローラ(Renesas Co. Ltd.、SH7125))から構成される。これらの弁は組み込み

コントローラのI/Oポートとトランジスタを介して接続されている。

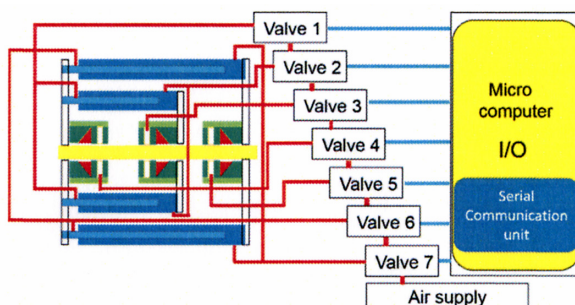


図4 アクチュエータの位置決め制御システム構成図

この制御システムを用いた制御の流れは以下の通りである。まず組み込みコントローラ内のシリアル通信ユニットを介して、目標変位をシリアルデータとして与える。組み込みコントローラでは目標変位までのストローク(50mmと5mm)の繰り返し回数を計算する。具体的なアルゴリズムではオーバーシュートを起こさないようにするため、目標変位を50mmで割った値で50mmのストロークの回数を算出し、またその残りを5mmで割って5mmのストローク動作の回数を算出し、その回数分それぞれのストロークのシリンダを使ってアクチュエータを駆動する。

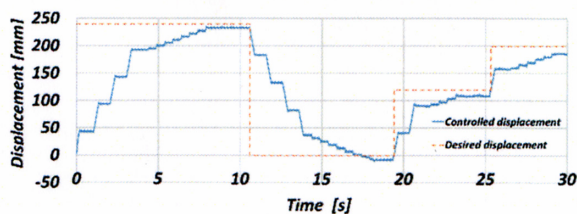
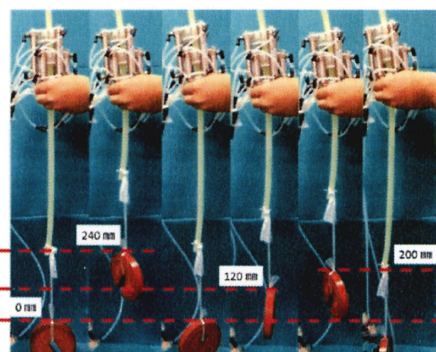


図5 試作アクチュエータの多点位置決め制御の様子とその結果

図5に負荷0.5kgf(4.91N)印加時の多点位置決め制御の様子と変位の時間変化を示す。また、このシリンダ変位はワイヤ式リニアポテンショメータ⁶⁾を使って計測した。図5中の破線は目標変位を示し、実線は制御変

位を示す。図5から、アクチュエータが、目標変位の変化に合わせたステップ動作により、位置決め制御が実現できることがわかる。しかし、駆動回数が増える毎に偏差が大きくなることが確認できる。これは、各ステップ動作において、保持機構駆動時に柔軟ロッドが変形し、チャックと中空ロッド間に滑りが生じたことが原因であると考えられる。

3. コアが自動追従するマグネットコア型保持機構

そこで、保持機構駆動時における中空ロッドの変形を防ぎ、さらにチャック機構と中空ロッド間の摩擦力を向上をめざし改良したマグネットコア型保持機構の構造を図6に示す。保持機構は2種類のリング形ネオジム磁石と柔軟中空ロッド(株SMC、TUS 1208 N-20)、図2で示した保持機構のチャック機構と磁石を有するコア部分から構成されている。チャックの爪は押し板の上部に45度の傾斜角で設置されており、供給圧印加時に膨らんだバルーンによって摺動することで駆動する。コアは異なる外径を持った2種類の穴の開いたプラスチック板と外径8.5mm、内径5.5mmのリング形ネオジム磁石(株ネオマグ、N52)から構成され、これらはネジとナットで一体化されている。さらに、チャック機構内部にも外径20mm、内径12mmのリング形ネオジム磁石(株ネオマグ、N40)が組み込まれており、コアと保持機構との相対位置を保つ仕組みになっている。

柔軟中空ロッドの内側にコアを配置し、保持機構駆動時のロッドの変形を防ぐと同時に、ロッドの内側と外側から保持することでより確実な保持を実現することができる。

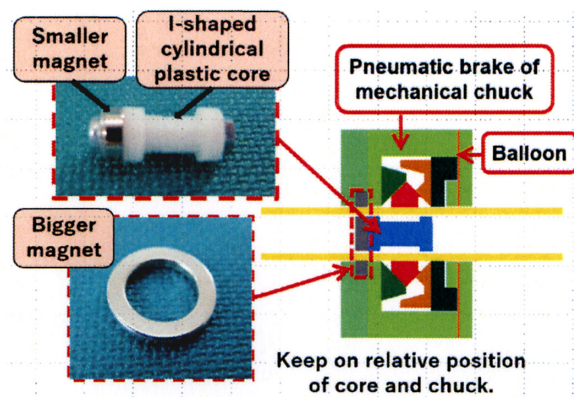


図6 マグネットコア型保持機構の構造

改良した保持機構の無加圧時におけるチューブとの摩擦をフォースセンサ(NIDEC-SHIMPO Co., FGPX-100)を用いて計測した。20回の計測を行い、平均を求めた結果、静止摩擦力11.4Nが得られた。また、改良した保持機構を使用した改良アクチュエータの発生力実験装

置を図7に示す。実験装置は改良保持機構を組込んだアクチュエータと、柔軟ロッド、フォースセンサから構成される。まず初めに、保持機構を駆動し柔軟チューブを保持する。その状態のまま、3本のシリンダを駆動し、フォースセンサに接続された柔軟チューブの引き出し動作を行うことで発生力を計測した。

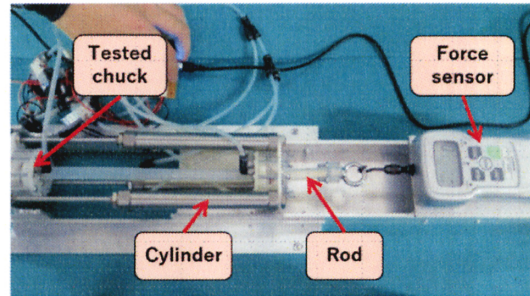


図7 改良アクチュエータの発生力実験装置

発生力実験の結果を図8に示す。図は改良保持機構で柔軟ロッドを保持した状態で、3本の空気圧シリンダに500kPaの供給圧力をステップ状に加えた場合のロッドの引き込み力を計測した結果である。図8からアクチュエータの最大発生力は約260Nであることが確認できる。この値はロッドと保持機構との静止摩擦力11.4Nを考慮すると、空気圧シリンダ3本の受圧面積から計算された500kPa印加時におけるシリンダの発生力の理論値270Nとほぼ同じである。また、保持機構駆動時に柔軟ロッドが若干の伸びを生じるため、すぐに最大発生力に到達せず、約0.5Sで最大発生力に達している。また、定常状態で発生力が変化していないことから滑りを生じていないことも確認できる。発生力の実測値と理論値の差は、可撓性のロッドの弾性変形によるものと思われる。以上の結果、保持しない場合の摺動摩擦が約10Nと小さいが、改良保持機構は260N以上の引張り動作に対して十分ロッドを保持できる能力を有することを確認した。

次節で、この改良アクチュエータを用いた検査用ロボットへの応用について述べる。

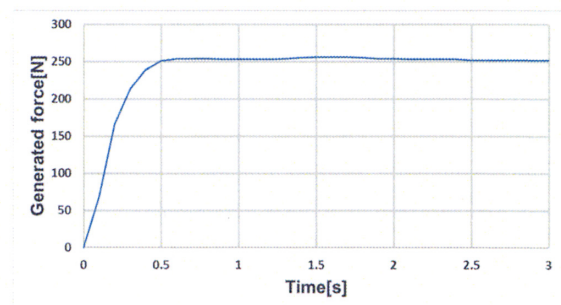


図8 アクチュエータの発生力測定結果

4. 検査用ウェアラブル型柔軟ロボットアーム

改良アクチュエータの応用として、人体に装着でき、あたかも装着者の手が伸びるように感覚的に操作することができ、汚染などロボットの洗浄や廃棄の必要な人体にとって有害な環境下での検査用ロボットの開発をめざす。このコンセプトをもとに試作した検査用柔軟ロボットアームの外観を図9に示す。ロボットは、3節で述べた保持機構を組み込み、ロボットアームに使用するため小径化を行った柔軟リニアステッピングアクチュエータ3つと、そのアクチュエータを固定するためのベースディスク、各アクチュエータの柔軟ロッドの相対位置を保つためのアクリル樹脂製の三角形の支持板(30枚)と、3本のアクチュエータの動作端を固定する三角形のエンドディスクから構成されている。

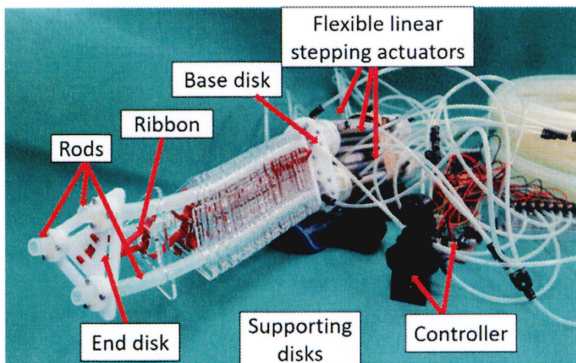
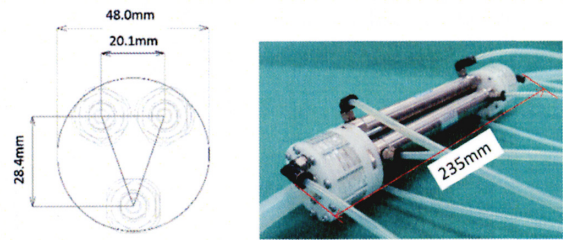
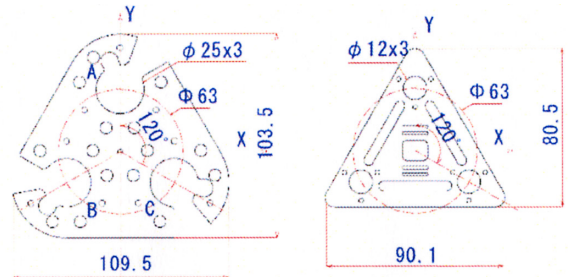


図9 検査用柔軟ロボットアームの外観

図10に改良したアクチュエータの外観とディスクの部品形状など、柔軟ロボットアームの構成要素を示す。アクチュエータは図10(a)に示すように、従来空気圧シリンダの内側に配置していた保持機構(図1、7参照)を、空気圧シリンダの両端に配置することで各シリンダ間の間隔を狭くし、以前のものと比較して約60%の小径化を実現している。また、長変位の動作を考慮しシリンダの内径は変えずにストロークを100mmに統一している。さらに、図10(b)に示すように、3本のアクチュエータはベースディスクの中心から半径32mmの位置に120度毎に円周上に設置されており、アクチュエータのフレキシブルロッドの末端は、同じ配置を有したエンドディスクに接続されている。また、支持板にも同様に半径32mmで中心から120度の位置に直径12mmの穴を有しており、アクチュエータのフレキシブルロッド上を自由にスライドできるようにしている。また、この支持板同士または支持板とエンドディスク/ベースディスク間にはリング状のリボン(幅6mm)で互いが50mm以上開かないように繋がれている。



(a) 改良型アクチュエータの概観



(b) ディスクの構造

図10 ロボットアームの構成要素

この柔軟ロボットアームの姿勢制御システムの構成を図11に示す。制御システムは改良したアクチュエータ3つと12個のON/OFF弁(楸コガネイ、G010HE1)、操作用のジョイスティック(楸栄通信工業、30JHK-ZT-30R3G)、トランジスタを備えた組み込みコントローラ(マイコン)から構成される。図11では1本のアクチュエータの制御系のみ記載している。各アクチュエータの制御には4個の弁が使用され、3本のアクチュエータ、合計で12個の弁をマイコン内のI/Oポートを介して操作する。ロボットへの操作入力はジョイスティックのx、y、z軸の回転角度をマイコン内のA/D変換器を介して取り込むことで行い、その3つのA/D値の組合せによって各アクチュエータの駆動パターンを変え、ロボットアームの姿勢を制御する。

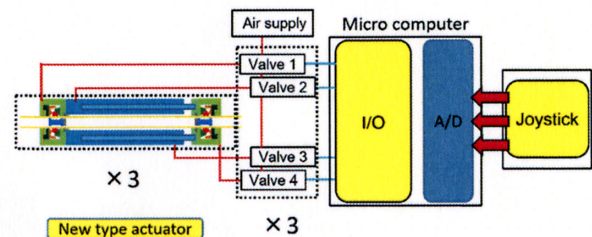


図11 柔軟ロボットアームの姿勢制御システム

ロボットの操作および駆動原理は以下の通りである。図12は電源を切った状態でアームを手で引っ張って操作している様子である。ロボットアームの各々の柔軟リニアステッピングアクチュエータは保持機構が無加圧な(保持していない)状態ではフレキシブルロッドを

自由に動かすことができる。図に示すように実際に手でアームを引っ張った場合、エンドディスクを手で持ってアームの伸張部を小さな力で動かすことができるなど、バックドライバビリティ(逆駆動性)を有する。

また、ロボットアームをアクティブ(能動的)に動かす場合、3つのアクチュエータが同時にロッド3本の押し出し、もしくは引込み動作を行えば、直動の伸長・収縮動作を実現できる。また湾曲動作では3本のロッドのうち1本、もしくは2本を押し出し動作、もしくは引込み動作を行うことで、所要の方向にロボットアームを湾曲させることができる。具体的なジョイスティックの操作とあわせて、図13に柔軟ロボットアームの動作風景を示す。柔軟ロボットアームは図13に示すように伸縮だけでなく、あらゆる半径方向に曲がる湾曲動作を実現することもできる。実際の操作では、ジョイスティック上部のレバー(z軸角度)を時計回りに捻ると3本のロッドを同時に押し出し、伸張動作を行う。逆に、半時計回りに捻ると収縮動作を行うようにコントローラ内にシーケンス動作のプログラムを設定している。湾曲動作の操作ではレバーを該当方向へ倒すことで湾曲の指示を行う。具体的には、ある程度の遊び角度のある状態で、ジョイスティックによるX, Y軸方向のA/D値がある閾値を越えると前述の操作手法により任意方向の湾曲動作のシーケンスプログラムが実行し湾曲動作を実現する。以上の操作システムを用いて基本動作実験を行った結果、ジョイスティック操作に従い、柔軟ロボットアームが指令通りに動作することを確認した。

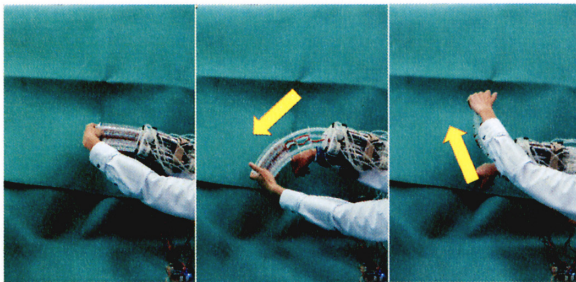


図12 ロボットアームの保持機構無加圧時の逆駆動性

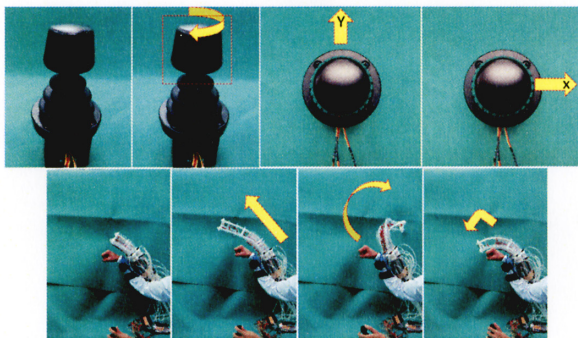


図13 ジョイスティック操作とロボットアームの動作風景

このロボットアームの長変位駆動時の動作の様子を図14に示す。実験では、ロボットアームを床と水平に配置し、各ロッドに同時に伸張動作を加えた。図14から、ロボットアームが伸張するにつれてアームは直進せず、写真下方に傾いていった。これはロッドに使用している柔軟チューブの曲げ剛性が低いため、アーム長が長くなるとアーム自体の曲げ剛性が低下し、ロッドと床の摩擦により曲がったものと思われる。しかし、伸張に伴ってリボンと補助板が骨組み構造を構成することができており、約1.5mの伸張を確認することができた。今後、ロボットアームの伸長時の曲げ剛性を高める工夫について検討する必要がある。

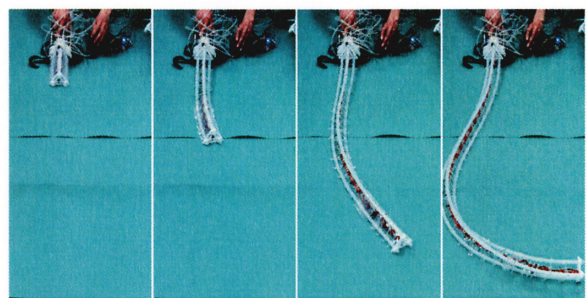


図14 ロボットアームの長変位駆動時の動作風景

5. 結言

長変位と大きな発生力を有するアクチュエータの改良と、そのアクチュエータを使用した人体に有害な環境下での検査作業のために、感覚的に操作できる柔軟ロボットアームの開発をめざした本研究は、以下のようによに要約される。

- (1) 柔軟リニアステッピングアクチュエータの発生力増加と滑り防止のために、柔軟ロッド内にある円筒形コアがチャック部に追従して動くマグネットコア型保持機構を提案・試作した。試作した保持機構は磁石同士が引付け合いながらその相対位置を保ち、また、内部にコアを配置したことで保持機構駆動時のチューブの変形も緩和されることを確認した。
- (2) 改良型保持機構の発生力特性を調べた結果、無加圧時の保持機構の摺動摩擦が約10N程度と小さいにもかかわらず、保持時に滑りを生じることなく、ロッドを保持し、空気圧シリンダによる発生力の理論値とほぼ同じ260Nの発生力が得られた。また、発生力の応答結果から一定保持力を維持していることから、ロッドに滑りが生じていないことも確認した。
- (3) 柔軟リニアステッピングアクチュエータの保持機構を空気圧シリンダの両端に配置することによりアクチュエータの小径化を図り、最大外径

を約60%に削減した。また、シリンダストロークを従来の5mmと50mmから100mmに統一することで、1ステップの変位を大きく設定し、シリンダの本数を減らすことでアクチュエータ質量を約0.5kgと約70%に軽量化した。

- (4) 改良したアクチュエータ3本を用いて、伸縮・湾曲の可能な柔軟ロボットアームを提案・試作し、動作実験を行った結果、コントローラの動きに追従して操作可能であることを確認した。しかし、ロボットアームの伸張に伴いロッド部分の曲げ剛性が低くなり、伸張動作に影響を及ぼすことも確認した。

今後の課題として、柔軟ロボットアームの操作性向上のため、柔軟チューブの曲げ剛性を高める工夫が必要である。現時点では、伸張部の先端から袋で覆い、ベースディスク側からブロワ等で空気を送り込むことにより生じる袋の張りを利用して曲げ剛性の改善を図る予定である。

参考文献

- 1) M. Ishii, K. Yamamoto, K. Hyodo. "Stand-Alone Wearable Power Assist Suit -Development and Availability-", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.17, No.5, (2005), pp.575-583.
- 2) J. Piquion, et al., "Robot-assisted gynecological surgery in a community setting," *Journal of Robotics and Surgery*, Vol.3, Issue 2, (2009), pp.61-64.
- 3) 長田義仁 編：ソフトアクチュエータ開発の最前線 -人工筋の定理をめざして,NTN,(2004).
- 4) Y. Eguchi, T. Akagi, S Dohta and W. Kobayashi, "Improvement of Flexible Linear Stepping Actuator Driven by Pneumatic Balloons and Brakes", *MATEC Web of Conferences*, Vol.82, No.01005, (2016), pp.1-6.
- 5) N. Fukukawa, T. Akagi, S Dohta, W Kobayashi and Y Eguchi, "Development of Flexible Robot Arm with Backdrivability Using Flexible Linear Stepping Actuators", *Int. Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vo.6, no.5, 373-377, 2017.
- 6) Y.Matsui, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, "Development of Low-cost Wire Type Linear Potentiometer for Flexible Spherical Actuator", *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2016)*, 16340660 (2016).

Improvement of Flexible Linear Stepping Actuator and Its Application

Nobuhiro FUKUKAWA, Tetsuya AKAGI*, Shujiro DOHTA* and Ryota INOUE

Master's Program in Intelligent Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering,

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

Okayama University of Science,

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

(Received October 31, 2018; accepted December 6, 2018)

Based on the progress of Japanese aging society, development of rehabilitation devices and power assistive devices has been required. In such devices, it is required to use human-friendly soft actuators. In ideal, the soft actuator with both a longer stroke and a larger generated force is required. However, a flexible actuator that can generate both larger force and longer displacement has not been developed on the market yet. It is also difficult to realize a flexible displacement sensor with long stroke while deforming its form according to the actuator's shape. In the previous study, a various type of flexible linear stepping actuators that can push and pull the flexible rod while changing the gripping position of the tube have been proposed and tested.

In this paper, the improvement of the pneumatic holding mechanism for gripping a rod to increase the generated force of the actuator is described. As a method to grip the rod surely, the core in the tube with cylindrical magnets is inserted into the flexible rod. The proposed holding mechanism can hold the rod from both inner and outer sides. The holding mechanism also has a larger cylindrical magnet. By attracting both magnets in inner core and holding mechanism each other, the core can trace the holding position in the holding mechanism even if the flexible rod moves. The construction and the operating principle of the improved pneumatic holding mechanism are described. In addition, as an application of the improved actuator, the flexible search robot arm which can be used under the hazardous condition is also introduced. The construction and operating principle of the robot are also described.

Keywords: Flexible pneumatic linear stepping actuator, Holding mechanism, Pneumatic actuator, Robot arm, Automatic tracking system using magnet.

