

# シリンダ型柔軟リニアステッピングアクチュエータの試作と応用

福川 展弘・赤木 徹也\*・堂田 周治郎\*・江口 裕哉・小林 亘\*

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

(2017年10月31日受付、2017年12月4日受理)

## 1. 緒言

高齢者や身体障害者などのQOL (Quality of Life、生活の質) の向上のための医療介護、リハビリテーション(以下 リハビリと略す)分野での福祉機器の重要性が増している<sup>(1),(2)</sup>。このようなシステムに使用されるアクチュエータは、高い人間親和性が求められ、安全で人体に優しいソフトアクチュエータの開発が必要とされる<sup>(3)</sup>。本研究室では以前より、空気圧駆動のバルーンや保持機構を使って、動作端となる柔軟チューブをある一定ステップで押し出したり、引き込んだりすることのできる柔軟リニアステッピングアクチュエータを開発してきた<sup>(4)~(6)</sup>。

しかし、このアクチュエータは空気圧バルーンの可変容積(面積)が大きいのにに対して、1回のストロークの移動量が小さいため、高速移動が難しかった。また、バルーンの発生力は数百Nと十分大きいのにに対して、アクチュエータの発生力は組み込まれている保持機構の保持力に依存し、90Nと比較的小さいなどの問題を有していた。そこで、本論文では100N以上の発生力を有し、アクチュエータの位置決め精度を低下させることなく、高速動作を可能にする新しいアクチュエータの開発について述べる。

## 2. 従来の柔軟リニアステッピングアクチュエータ

以前の研究で試作されたアクチュエータの外観と構造を図1に示す。空気圧駆動柔軟リニアステッピングアクチュエータは、アクリル製のカバー、空気圧バルーン、チャック、スライドステージによって構成され、外径は60mmである。図2に空気圧バルーンの構造と内部にあるスライドステージの外観を示す。空気圧バルーンは外径60mm、内径14mm、厚み0.5mmのリング状のシリコンゴムシートを、内径側と外径側にそれぞれリング状の固定具と円板で挟むことで構成され、外径48mm、内径26mmのドーナツ状の受圧面積を有する。また、バルーンの外側に配置された空気圧駆動保持機構は、傾斜台をスライドするチャックをバルーンによって押す

ことで、チューブを締める構造のものを用いた。なお、この保持機構の設計および構造、動作原理の詳細は次節以降で述べる。また、スライドステージは外径48mm、厚み24mmの円板状の構造を有し、その中心にチューブを通すための内径13mmの穴が開いている。これらの要素によってステッピングアクチュエータを構成している。ここで、このアクチュエータのサイズは $\phi 60 \times 102\text{mm}$ であり、全質量は360gである。

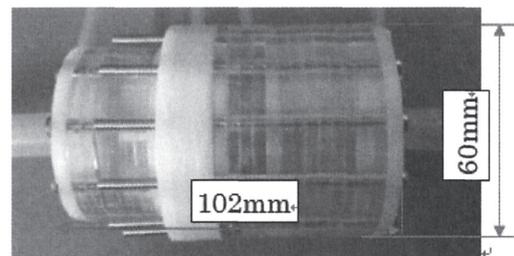
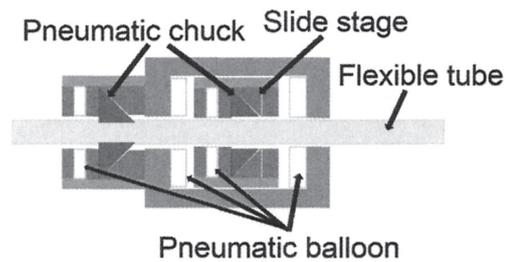


図1 従来型アクチュエータの構造と外観

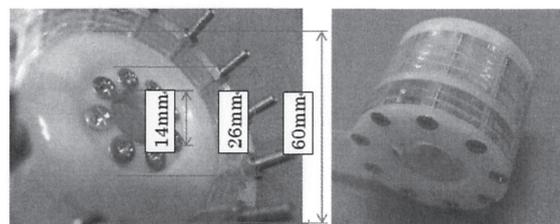


図2 空気圧バルーンとスライドステージ

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。図3(1)に示すように2つの空気圧バルーン

ンの外側について保持機構を駆動し、チューブを保持する。その後、(2)に示すように左側のバルーンに圧力を加えて膨張させ、内部のスライドステージを右端へ押す。次に(3)に示すようにこの状態を保持したままスライドステージの保持機構を駆動し、ステージにチューブを保持させてから外側の保持機構を解除する。その後、左側のバルーンへ印加された空気を排気し、右側のバルーンを加圧することにより内部のスライドステージはチューブを保持したまま押される。そのため、チューブを左側へ押し出すことができる(図3(4)参照)。また、アクチュエータ内部の空間、つまり、スライドステージの動く範囲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チューブを一定のストローク(5mm)で移動するステップ動作が実現できる。

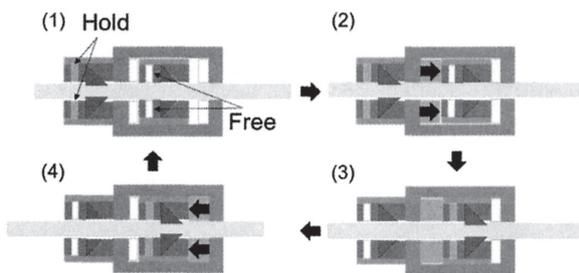


図3 アクチュエータの動作原理

空気圧で駆動する保持機構の外観と構造を図4示す。保持機構は外径36mm、内径24mmのシリコ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。バルーンに印加するとバルーンが膨らみプラスチックの円板を押すことでチャックが締め付けられ、保持機構内を通る柔軟チューブを押さえつけ、チューブの相対位置を保つことになる。

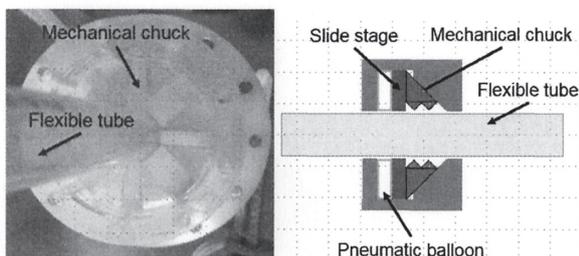


図4 空気圧で駆動する保持機構の概略

保持機構は傾斜角 $\theta$ のステージ上をアクリル製の爪が滑る構造となっている。ここで、チャック部分の傾斜角 $\theta$ と保持力 $F_b$ の関係は以下の式で与えられる。

$$F_b = 1/2 \cdot F \sin 2\theta \quad (1)$$

上式から、保持力は傾斜角 $\theta$ が45度の時に最大になることがわかる。また、チャックは予備実験の結果から2種類(3mmと6mm)の厚みの爪を有したものを、軸中心から交互に45度ごとに配置している。また、500kPaの供給圧力から計算されたバルーンの発生力 $F$ は280Nであり、保持機構の保持力は半分の140Nとなる。これは江口ら<sup>6)</sup>の開発したシリコンゴムチューブを用いた保持機構(最大50Nの保持力)に比べ3倍程度の保持力を有することになる。またこのアクチュエータの発生力は、この保持機構の保持力に依存し、この保持機構を用いた従来のアクチュエータの最大発生力は90Nである。しかし、このアクチュエータは柔軟チューブの動作がバルーンの可動範囲に依存するため低速であり、小変位(5mm/ストローク)であった。

### 3. 空気圧シリンダを用いたアクチュエータ

そこで、空気圧バルーンの代わりとして、ストロークの大きい空気圧シリンダを使用し、高速で長変位を実現する柔軟リニアステップングアクチュエータの開発をめざす。改良を加えたアクチュエータの外観と構造を図5に示す。改良型アクチュエータの長さは133mm、外径は80mmである。また質量は従来の2倍、つまり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。このように、ストロークの異なる2種類のシリンダを用いていることで、異なるステップ動作を実現する。50mmのシリンダを駆動すれば、1サイクルの変位が大きくなるため、速く動作(高速移動)することができる。また、目標値付近などでは5mmのシリンダを駆動することで、5mmの位置決め分解能も実現することができる。また、このアクチュエータの設計において、使用するシリンダの内径を供給圧力が500kPaでのシリンダ3本の発生力が保持機構の最大保持力である90Nを上回るよう選定し、本装置では内径16mmのシリンダを用いた。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。

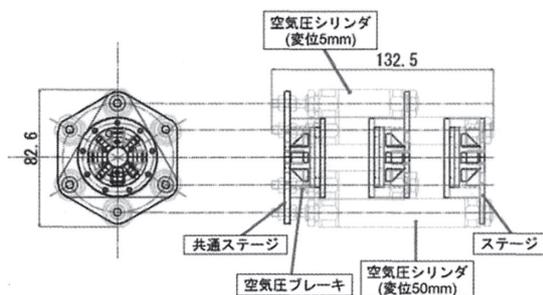
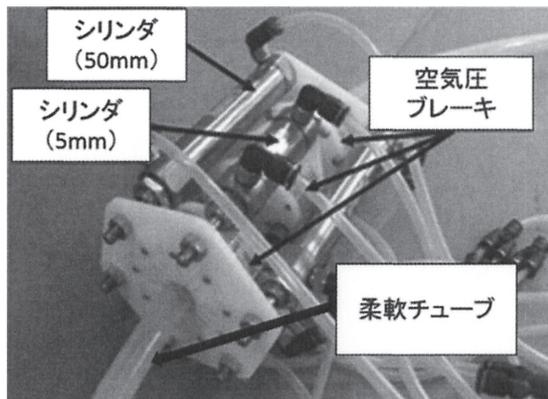


図5 改良型柔軟リニアステッピングアクチュエータ

図6に、この改良型アクチュエータの制御システムの構成図を示す。制御システムは、以前のもの<sup>6)</sup>と比較して、2種類のシリンダを駆動するための弁などの構成要素が増えている。具体的な制御システムは、改良型アクチュエータと保持機構やシリンダを動かすための7つのON/OFF制御弁(株コガネイ、G010HE-1)、トランジスタおよびシリアル通信ユニット(FTDI Co. Ltd., FT234X)を備えた組込みコントローラ(Renesas Co. Ltd., SH7125)から構成される。また、図6に示す弁1と2は5mmのストロークの空気圧シリンダを駆動するために用いられ、弁3、4、5はそれぞれステージに付いた保持機構を駆動するため、また弁6、7は50mmのストロークのシリンダ駆動用である。これらの弁は組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。

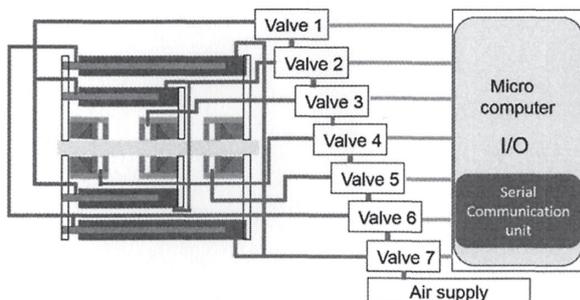


図6 改良したシステム構成図

次に5mmのストロークと50mmのストローク動作の際の弁のシーケンス操作パターンをそれぞれ図7(a)、(b)に示す。5mmの1ストロークの押し出し動作における弁のシーケンス動作は以下の通りである。まず、5mmの移動パターンの場合、50mmのシリンダは使用しない。つまり、動くことなく固定するため、常に弁6をON、弁7をOFFにしてストロークが伸びない状態にしておく。さらに、50mmのシリンダによって駆動されるステージの保持機構も開放するため、弁5は常にOFFの状態にしておく。この状態で弁1を0.5s間ONにし、シリンダを初期位置(ロッドが伸びていない状態)に戻す。この動作と同時に弁3を0.25s間ONにし、5mmのストロークのシリンダ端に接続された保持機構を駆動し、ロッドを固定する。その後(0.25s後)、弁3をOFFにして保持機構を開放すると同時に、ロッド端についたステージの保持機構を駆動するため弁4をONにし、ロッドをセンターにある保持機構に持ち替える。その後(パターン開始から0.5s後)、弁2をONにし、シリンダロッドの押し出しを行うことで、保持機構で保持した柔軟チューブが押し出される。最後に弁4をOFFにするのと同時に弁3をONにし、ロッドの位置を保つ。アクチュエータはこの動作を繰り返すことで、柔軟チューブを図6の左方向に押し出すことができる。

Time(s)	0.25	0.5	0.75	1.0
Valve1	0.50s			
Valve2			0.50s	
Valve3	0.25s			0.25s
Valve4		0.50s		
Valve5				
Valve6		1.00s		
Valve7				

(a) 5mmのストローク動作

Time(s)	0.25	0.5	0.75	1.0
Valve1		1.00s		
Valve2				
Valve3				
Valve4		0.50s		
Valve5	0.25s			0.25s
Valve6		0.50s		
Valve7			0.50s	

(b) 50mmのストローク動作

図7 弁のシーケンス操作パターン

この制御システムを用いた制御の流れを以下に記す。まず組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。例えば、目標変位275mmを入力した場合、コントローラは50mmのストロークを5回駆動し、残りの25mmを5mmのストロークの動作で実現する。本実験で行った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た。この1つのストローク動作は、前述した従来のアクチュエータの場合と同じである。以上のようにアクチュエータは、目標変位までの距離が50mmより大きい場合にはストローク50mmのシリンダを用いて速く移動し、目標変位までの距離が50mmより小さい場合には5mmのシリンダを用いて動かし、位置決め分解能5mmを実現している。

図8に試作アクチュエータに2kgf (19.6N)の負荷を加えた場合の持ち上げ動作の様子を示す。また図9は目標変位を5秒または10秒毎に変更した場合のアクチュエータ変位の過渡応答を示す。図9に示す実験では柔軟チューブの端部に0.5kgf (4.91N)の負荷を接続し、目標変位は240mm(10秒保持)→0mm(10秒保持)→120mm(5秒保持)→200mm(5秒保持)とした。また、このシリンダ変位はワイヤ式リニアポテンシオメータ<sup>7)</sup>を使って計測した。ここで図9における破線は目標変位を示し、実線は制御変位を示す。図8、図9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。また、図9から目標値に対して偏差が生じていることが確認できる。これは、各ステップ動作において、保持機構等でスリップが発生し、それが誤差として生じたものと考えられる。

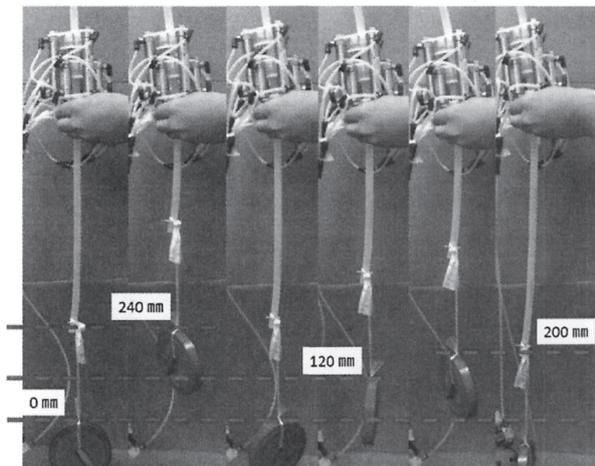


図8 新型アクチュエータの持ち上げ動作実験

特に、この実験ではアクチュエータは下降運動の際に負荷質量による慣性を受けるため、スリップが大きくなると考えられる。しかし、240mmの長変位を動く動作において、スリップによる誤差は10mm以内であり、移動距離が大きなりハビリテーション機器への適用においては、この位置誤差は深刻な問題にならないものと思われる。また、このスリップによる位置決め誤差は、保持機構に使用しているチャック部分の材質を変える、または、保持機構の構造・原理を変えるなどで改善できるものと考えられる。

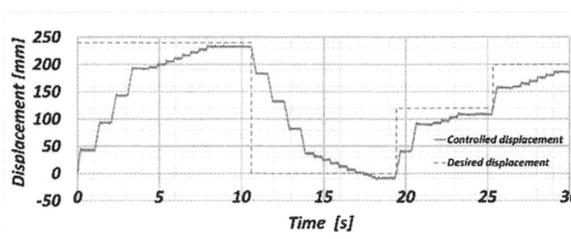


図9 新型アクチュエータの変位の過渡応答

#### 4. 逆駆動性を有する柔軟ロボットアーム

上肢リハビリテーション機器として開発した柔軟ロボットアームを図10に示す。柔軟ロボットアームは、前述の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チューブ(ロッド)の相対位置を保つための三角形の支持板9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。これらの部品形状を図11に示す。図11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48mm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終端は、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、9枚の支持板にも同様に半径48mmで中心から120度の位置に直径16mm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12mm)で互いが50mm以上開かないように繋がれている。動作原理は以下の通りである。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。このロボットアームは、3本のロッドがロッド端で1つのエンドディスクに接続されているため、3本のロッドが同時に動くことになる。また、支持板が3本のロッドを常に一定の間隔になるようにしているため、3本のロッドをまるで伸び縮みできる象の鼻のように動かすことができる。また、アクチュエータでロッド3本の押し出し動作を同時に行えば、直動運

動が生じ、3本のうち1本を引き込む、もしくは他に比べ短くなるように押し出すと、その特定の1本のロッド方向に湾曲することになる。ここで、ロボットの先端部の可動域は各アクチュエータのロッドの長さに依存し、本実験では全長2m(1.97m)のフレキシブルロッド(兼柔軟チューブ)を用いている。

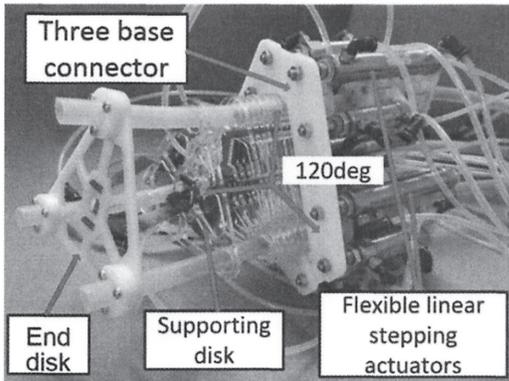


図10 柔軟ロボットアームの外観

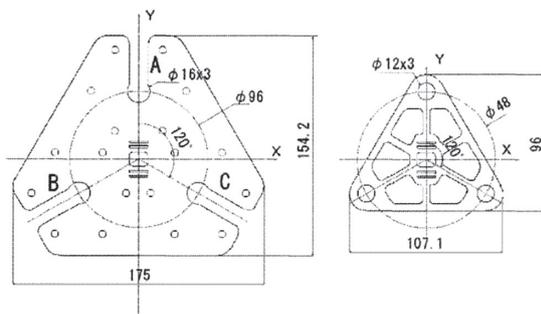


図11 ロボットアームの構成要素の図面

図12に柔軟ロボットアームの動作風景を示す。図12に示すロボットアームの動作は図13(a)、(b)、(c)に示すように各アクチュエータA、B、Cの目標変位をシーケンス的に変えた場合の動作である。ここでアクチュエータA、B、Cは図12に示すように手前のアクチュエータをAとして反時計回りに回転した位置にあるアクチュエータをそれぞれB、Cと呼ぶことにする。

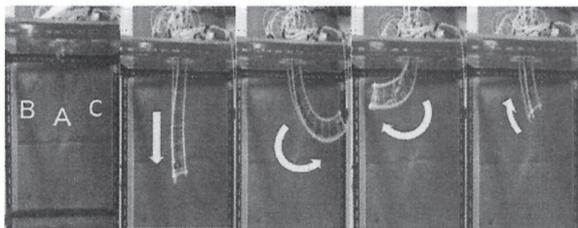


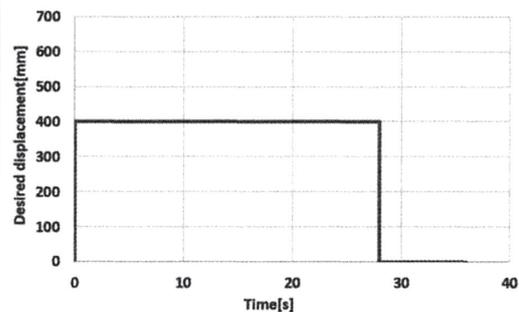
図12 柔軟ロボットアームの動作風景

柔軟ロボットアームは図12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。図12と図14を見てわかるように、ロボ

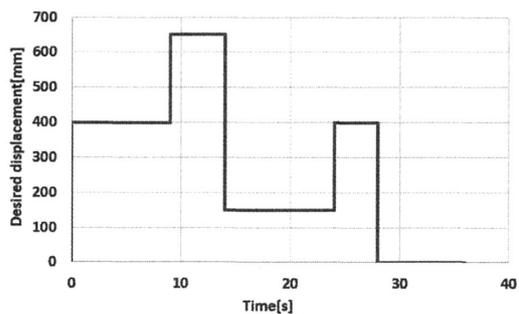
ットアームの伸縮動作は3本のアクチュエータで同時に押し出し動作(0~8s)を行うことで実現できる。また、湾曲動作は特定のアクチュエータ、例えば、Aに押し出し動作または引き込み動作を与え、他のアクチュエータがロッドの保持動作を行うことで実現できる。また、逆にAを保持して、BとCで押し出し動作を行う(図13の9~13s)ことでも同様の湾曲動作が実現できる。さらに、図12から伸縮動作において、支持板は伸縮するロッドに従って1枚ずつ押し出されていることがわかる。これは各支持板の間隔の最大値をリボンで拘束しているためであり、この機構によりアームが伸縮しても3本のアクチュエータの間隔を一定に保つことができる。

また、各アクチュエータの保持機構に印加圧力がない場合、エンドディスクを手で持って小さな力で動かすることができるなど、バックドライバビリティを有する。

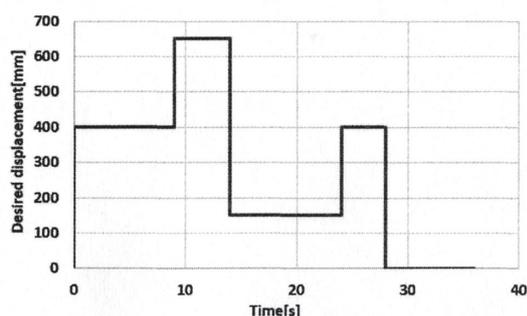
図14はこの柔軟ロボットアームに1kgf(10N)の負荷をかけた状態での伸縮動作の様子である。与えた各アクチュエータの目標値のシーケンスデータは柔軟ロボットアームを最も伸ばした状態から、図12の左の写真のように最も縮めた状態に収縮するような動きを与えた。実験では、負荷のため保持機構がロッドを保持しきれず滑りが発生し、初期位置まで戻ることができなかった。また、各アクチュエータのそれぞれの発生力が少しずつ異なっているために、均等な引っ張り動作ができずアームが湾曲した状態となった。以上の原因は保持力に依存するものであり、今後、原因となる保持機構の改良が必要である。



(a) aの目標変位



(b) bの目標変位



(c) cの目標変位

図13 柔軟ロボットアームの目標変位

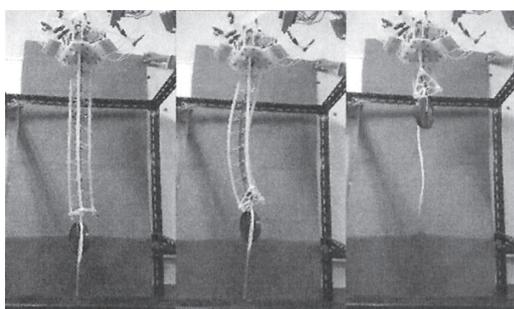


図14 柔軟ロボットアームの負荷印加時の動作風景

## 6. 結言

肩などの大きな可動域を有する部位に他動運動を加えることのできるリハビリテーション機器の開発をめざした本研究は、以下のように要約される。

- (1) 大きな発生力を有し、センサなしに長いストロークの位置決め制御が実現できる柔軟アクチュエータの発生力特性を改良するために、空気圧バルーンで押すことでチューブを絞めるメカニカルチャックを用いた保持機構を提案・試作した。さらに、この保持機構を用いた柔軟リニアステッピングアクチュエータを試作し、発生力特性を調べた結果、最大発生力が従来の30Nから90Nと3倍に改善された。
- (2) 試作アクチュエータの高速化のため、空気圧バルーンの変わりにストロークが50mmと5mmの2種類の各3本の空気圧シリンダで押し出し・引き込み動作を行う柔軟リニアステッピングアクチュエータを提案し、試作した。さらに、2種類のストロークのシリンダと3つの保持機構で、チューブを持ち替えながら押し出し・引き込み動作を行うことで、5mmの位置決め精度を有しながら、1動作50mmの高速動作が可能なアクチュエータが実現された。

- (3) 上述の柔軟リニアステッピングアクチュエータと、組込みコントローラ、7つのON/OFF弁を用いた位置制御システムを提案、試作し、一定のステップ動作に基づくシーケンス的な目標変位に対する位置決め制御を行った。その結果、駆動システムは目標変位から50mmと5mmのストローク動作の繰り返し回数を自動で計算し、その動作を行うことで、オーバーシュートのないステップ動作による位置決め制御が実現できることを確認した。
- (4) 試作した柔軟リニアステッピングアクチュエータを3つ用い、各アクチュエータの動作ロッド端を三角形のプレートで固定し、さらにロッドの移動に合わせて、各ロッド端の間隔を一定に保つ支持板で拘束することで、伸縮・湾曲動作が可能な上肢リハビリテーション用柔軟ロボットアームを実現した。
- (5) 上述の柔軟ロボットアームと組込みコントローラと21個のON/OFF弁を用いた可動範囲の大きな上肢リハビリテーション機器を開発し、動作実験を行った。その結果、アクチュエータは無加圧時に、バックドライブバビリティを有するなど、リハビリテーション機器として必要な機能を有し、さらに、大きな可動域を実現できることを確認した。

今後の課題として、機器の更なる発生力増加のため、保持機構の構造や保持部の材質を変えるなど、保持機構の改良が必要である。

## 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 and S. Dohta, "Preliminary Design of Flexible Linear Stepping Actuator Driven by Pneumatic Balloons and Brakes", MATEC Web of Conferences, Vol.51, No.02004, (2016), pp.1-4.
- 5) 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.
- 6) 江口裕哉, "空気圧バルーンとブレーキで駆動される柔軟ステッピングアクチュエータの開発",平成27年度岡山理科大学工学部卒業論文,(2016).
- 7) 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). DOI: 10.1109/AIM.2016.7576903.

# Development and Application of Cylinder Type Flexible Linear Stepping Actuators

Nobuhiro FUKUKAWA, Tetsuya AKAGI\*, Shujiro DOHTA\*, Yuya EGUCHI  
and Wataru KOBAYASHI \*

*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, 2017; accepted December 4, 2017)

Development of soft actuators for the power assisting devices and rehabilitation devices has been required for aging society in Japan. However, a flexible actuator that can generate both larger force and longer displacement has not been yet, developed on the market. 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, the flexible actuator with larger force and longer stroke that can adjust its stroke by giving a stepping motion using pneumatic balloons and holding mechanisms using mechanical chucks was proposed and tested. However, the speed of the actuator is too slow to apply to rehabilitation motion.

In this paper, a cylinder type stepping actuator using pneumatic cylinders with two types of strokes instead of pneumatic balloons is described. The position control of the cylinder type actuator is carried out. A flexible robot arm that can expand and contract using three cylinder type stepping actuators is also proposed and tested. As a result, it can be confirmed that the attitude of the robot arm can be easily controlled by giving stepping motion of each actuator.

**Keywords:** flexible robot arm; flexible linear stepping actuator; attitude control using stepping motion.