

空気圧駆動リニアステッピングアクチュエータの改良と 股関節リハビリテーション機器への応用

大永 昂汰・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

高齢化社会の進行に伴い、リハビリテーション機器やパワーアシスト機器に用いる強力な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)}。人体の部位を持ち上げるほどの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。しかし、人工筋の変位量は自然長の約25%程度と小さく、さらに、変位する毎に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、本研究室では以前、300N近い発生力を有し、長変位の駆動が可能な空気圧リニアステッピングアクチュエータを開発した^{4),5)}。アクチュエータは柔軟ロッドを2つの保持機構で持ち替えながら押出し/引込み動作を行うことができる。しかし、このアクチュエータは一定ストロークでのみ動くため、位置決め精度はストロークに依存する。そこで、本論文では、1ステップのストロークを自由に変えることのできる可変ステップ式空気圧駆動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股関節リハビリテーション機器の開発について述べる。

2. 空気圧駆動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空気圧駆動リニアステッピングアクチュエータの外観と構造を図1に示す。アクチュエータはストローク30mmの複動式空気圧シリンダ(株コガネイ, PBDA16×30-M)が3本、保持機構の付いたステージが2つ、柔軟ロッドに相当する外径12mm、内径9mmのソフトポリウレタンチューブ(株SMC,TUS1209-20-X74)から構成される。空気圧シリンダの端は保持機構の付いたステージに接続され、ステージの中心から半径25mmの位置に120°毎に配置されている。アクチュエータの長さは最大130mm(伸長時)、外径は68mmである。また重さは0.7kgである。

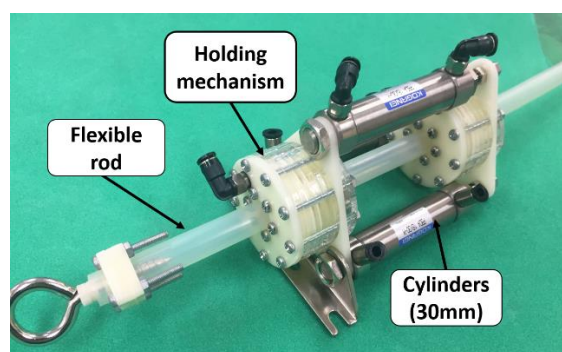


図1 従来の空気圧駆動リニアステッピングアクチュエータの外観

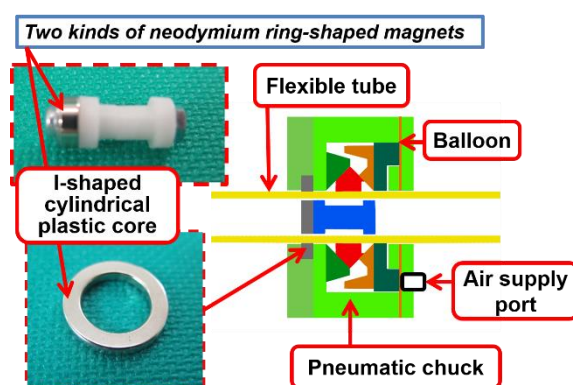


図2 コアを有する保持機構の外観と内部構造

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2種類のリング状ネオジム磁石、柔軟チューブ内に入る磁石を有する円柱状のコア、外径36mm、内径24mm、厚さ1mmのシリコンゴム製のバルーン、空気圧駆動メカニカルチャックから構成されている。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。空気圧駆動メカニカルチャックはプラスチック製の2つの爪と傾斜角45°の可動ステージと固定ステージから構成されており、バルーンに供給圧を印加することでバルーンが膨らみ、可動ステージと爪が摺動し、柔軟ロッドを保持することができる。

チューブ状の柔軟ロッド内にコアがあることにより内側と外側の両方から押し付けることで確実に保持することができ、空気圧シリンダの発生力の理論値と変わらないほどの発生力が得られるなど柔軟ロッドの滑りがほとんどないことを確認している。

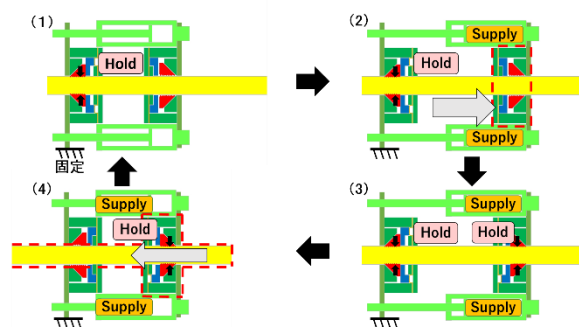


図3 空気圧駆動リニアステッピングアクチュエータの動作原理

空気圧駆動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)に示すように固定端側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の発生力実験から、500kPa印加時に空気圧シリンダの理論上の発生力とほぼ同じ、260Nの最大発生力が得られることを確認している。

3. 股関節リハビリテーション機器

この空気圧リニアステッピングアクチュエータの応用として股関節のリハビリテーション機器を選んだ。股関節のリハビリテーション機器の開発を目指す理由は以下の通りである。現在市販されている股関節リハビリテーション機器は患者自身が動かす機器であり、股関節に他動運動を与える機器はまだ開発されていない。またこのような機器が開発されれば、自発的なリハビリテーションとして有用である。一般に、理学療法士により行われる股関節のリハビリテーションでは、理学療法士が患者の膝を楕円軌道に動かすことにより患者の股関節に他動運動を与える。これらの膝の移動は広範囲にわたり、また、脚部を吊り上げるなど大きなアクチュエータが必要となる。試作アクチュエータは大きな力を加えながら長変位での駆動が可能でありこれらの機器の応用に適していると考えた。以上のことを考慮し、空気圧駆動リニアステッピングアクチュエータを用いた試作股関節リハビリテーション機器を提案・試作した。図4に3つの空気圧駆動リニアステッピングアクチュエータを用いた試作股関節リハビリテーション機器の構造を示す。試作機器は3つの空気圧駆動リニアステッピングアクチュエータ、膝サポータがついたロッドの接続金具、土台フレームから構成されている。3つのアクチュエータは中心から120°毎にそれぞれ土台フレームに配置されている。各アクチュエータのロッド端は三角形の接続金具の各頂点に接続されており、膝サポータは接続金具にネジで固定されている。試作機器の動作原理は各アクチュエータのロッド長を同時に変えることで膝サポータの位置を変えることができる。また、ロッドが柔軟なため、各ロッドを曲げながら膝サポータの位置決め制御ができる。しかし、膝の位置決め制御をするために、ロッドが曲がっていることは不確実な要素になる。さらに空気圧駆動メカニカルチャックの先端でロッドが急激に曲がっていると摩擦力が急激に大きくなることが分かった。

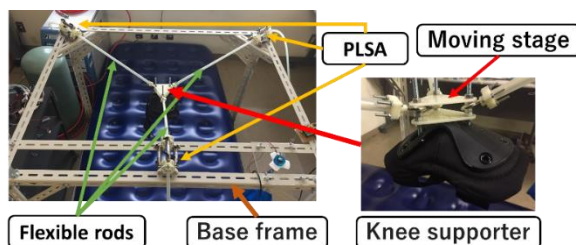


図4 股関節リハビリテーション機器の外観

そこで、ロッドの曲がりによる摩擦の影響による不確実性を減らすために、設置したアクチュエータのロッド軸が常に膝の保持部の方向を向くことができる2

軸可動ステージを試作した。図5に2軸可動ステージの外観と構造を示す。ステージの構造は仰角を変えるためのコの字型のステージを保持する2つのトックンベアリング(株TOK, DR-19-B1-14)とまたそのステージを支え、水平方向つまり方向角を変えるための土台を回転させるためのベアリングから構成される。また、重量のかかるスラスト方向の回転では5個の鋼球(直径5mm)によりスラストベアリングを構成している。さらにアクチュエータを固定するコの字型のステージの背面には柔軟ロッドの長さを測定するためのワイヤ式リニアポテンシオメータ⁹⁾がついている。この2軸可動ステージの可動範囲は水平方向角に $\pm 35^\circ$ 仰角に -60° である。また、前述のようにステージの下部にワイヤ式ポテンシオメータを配置することで、ロッドが湾曲を生じない限りロッド長を正確に測定することができる。

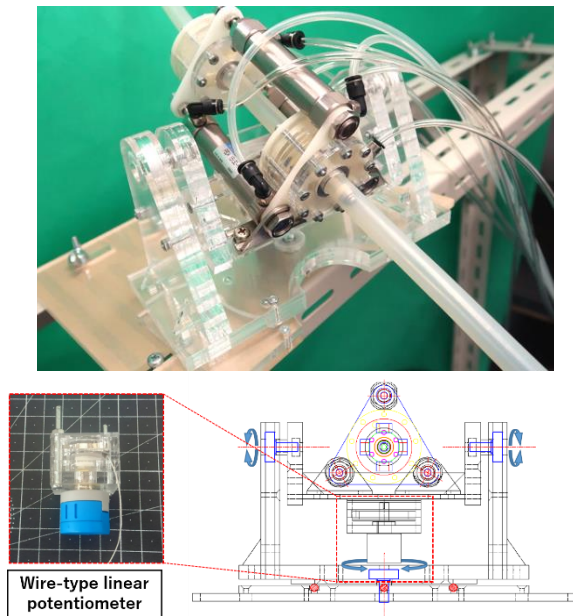


図5 2軸可動ステージの外観と構造

図6に2軸可動ステージを取り付けて改良した股関節リハビリテーション機器の外観を示す。ここで各ワイヤ式リニアポテンシオメータのワイヤ部は各ロッド同様に三角形の接続金具の各頂点に括りつけている。さらに、この2軸可動ステージの導入によりロッドが柔軟性を有する必要がなくなったため、柔軟ロッド(内径9mm・外径12mm)内に外径8mm、内径6mmのアルミ製パイプ(剛体の棒)を入れ、常に直線状になるようにした。これにより、各アクチュエータ設置位置からのロッドを常に直線状態で駆動でき、さらに膝サポータ位置の3次元位置計測も可能となった。

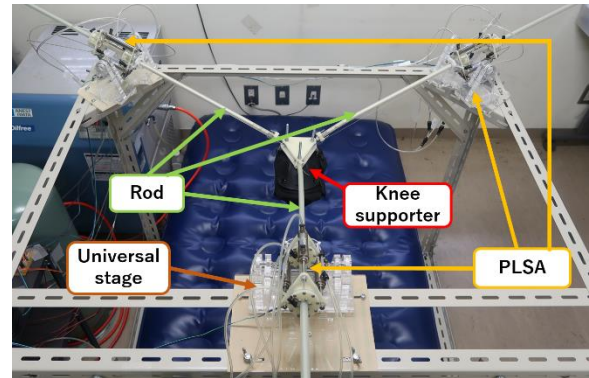


図6 改良したリハビリテーション機器の外観

図7に股関節リハビリテーション機器の制御システムの構成図を示す。制御システムは、3つの空気圧駆動リニアステッピングアクチュエータとそれらの中の保持機構やシリンダを動かすための12個のON/OFF制御弁(株コガネイ, G010HE-1)、トランジスタ(株TOSHIBA, MP4401)を備えたマイクロコンピュータ(Renesas Co. Ltd., SH7125)、3個のワイヤ式ポテンシオメータから構成される。各リニアステッピングアクチュエータにセンサとして1つのワイヤ式リニアポテンシオメータと4個の弁を使用し、リハビリテーション機器全体では12個の弁をマイクロコンピュータ内のI/Oポートを介して操作する。また、アクチュエータから膝サポータまでのロッド長を計測するワイヤ式ポテンシオメータをA/D変換器を介して位置情報を取得している。

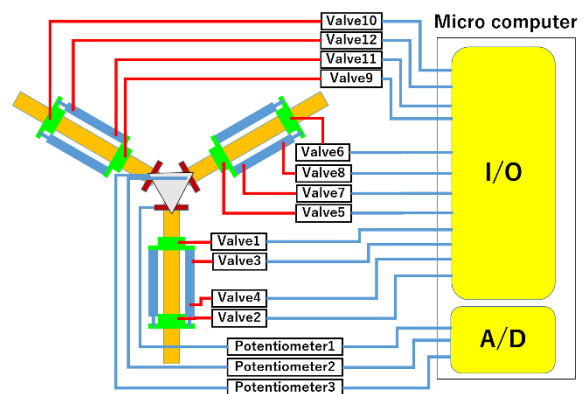


図7 制御システムの構成図

3つの空気圧駆動リニアステッピングアクチュエータのロッド長を制御し膝サポータの位置決め制御をするために、膝サポータの目標位置から各アクチュエータのロッド長を求めることができる解析モデルが必要である。図8に股関節リハビリテーション機器の制御に用いる解析モデルを示す。モデルは各アクチュエータの設置位置の平面図と側面図を示しており、膝サポー

タを固定する金具のアクチュエータ設置平面上の初期位置を原点とした図である。つまり、接続金具の初期位置はアクチュエータ設置平面上で、2軸可動ステージ上面の重心に相当する位置であり、各アクチュエータ1, 2, 3はそれぞれ長辺の半分の距離 a と短辺の半分の距離 b を使ってそれぞれ $(0, -b, 0)$, $(-a, b, 0)$, $(a, b, 0)$ の位置に設置されたことになる。ここで接続金具つまり膝のつり下げ目標位置を (x, y, z) とすると、各アクチュエータの3本の柔軟ロッドはアクチュエータ1, 2, 3の設置位置を中心とした球の交点として求められ、各目標ロッド長さに相当する球の半径 r_1, r_2, r_3 は膝の目標位置 (x, y, z) と各アクチュエータの設置位置 $(0, -b, 0)$, $(-a, b, 0)$, $(a, b, 0)$ を使って次式で与えられる。

$$r_1 = \sqrt{x^2 + (y + b)^2 + z^2} \quad (1)$$

$$r_2 = \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2 + z^2} \quad (2)$$

$$r_3 = \sqrt{(x + a)^2 + (y - b)^2 + z^2} \quad (3)$$

以上の式(1)～(3)を使って目標座標 (x, y, z) に対する各ロッド長さの目標値 $r_1 \sim r_3$ が求まる。ここで機器の形状パラメータで決まる a, b の値はそれぞれ $a=460\text{mm}$, $b=330\text{mm}$ である。

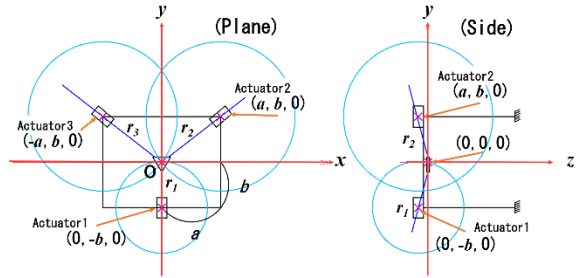


図8 股関節リハビリテーション機器の制御モデル

次に膝サポータの位置決め制御方法について述べる。まず、式(1)～(3)を使い、目標軌道 (x, y, z) に対する各ロッドの目標長さ r_1, r_2, r_3 を求め、下記の条件式に従って動作の指数となる n_i を決める。

$$e_i = r_i - L_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

$$e_i \geq \frac{S_t}{2} : \quad n_i = 1 \quad (\text{Push}) \quad (5)$$

$$e_i \leq -\frac{S_t}{2} : \quad n_i = -1 \quad (\text{Pull}) \quad (6)$$

$$-\frac{S_t}{2} \leq e_i \leq \frac{S_t}{2} : \quad n_i = 0 \quad (\text{hold}) \quad (7)$$

式(4)～(7)に示すようにアクチュエータに搭載したシリンダストローク S_i の半分の値を閾値とし、その閾値の正負に従って動作指数 n_i を決定しその値が1の場合は伸長、-1の場合は収縮、0の場合は保持などの操作を選択する。ここで e_i は各アクチュエータのロッドの長さの偏差を示し、 r_i は目標長さ、 L_i は現在の長さ、添え字の i は各アクチュエータの位置1, 2, 3を示す。また、 n_i はアクチュエータが動いた際の指数を示し、アクチュエータの1回のシーケンス動作後の各ロッド長はこの指数を使って次式(8)で与えられる。

$$L_i = L_{ik} + S_t \times \sum n_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (8)$$

ここで L_{ik} は初期のロッドの長さを示す。この股関節リハビリテーション機器の制御では各アクチュエータ長の制御を同時に行うため、上記の3つの条件分けの3乗の組み合わせ、すなわち27通りのシーケンスプログラムを作成する必要がある。図9はアクチュエータ1(A)が押し出し($n_i=1$)、アクチュエータ2(B)が引込み($n_i=-1$)、アクチュエータ3(C)が保持($n_i=0$)の時の弁の動作タイムチャートを示しており、3つのアクチュエータと弁1～12の関係は図7に示す通りである。全ての駆動パターンは2.6秒毎に実行される。

図10に楕円軌道で膝サポータの位置決め制御を行っている動作風景を示す。図10から膝サポータが楕円形の目標軌道に追従できていることが確認できる。

Actuator	times	0.5s	1.0s	1.5s	2.0s	2.5s	3.0s	
A	Valve 1	1.3s			0.5s			
	Valve 2	1.8s						
	Valve 3	1.3s						
	Valve 4					1.3s		
B	Valve 5	1.8s						
	Valve 6	1.3s			0.5s			
	Valve 7	1.3s						
	Valve 8					1.3s		
C	Valve 9	2.6s						
	Valve 10			1.8s				
	Valve 11							
	Valve 12	2.6s						

図9 各シーケンス動作のタイムチャート

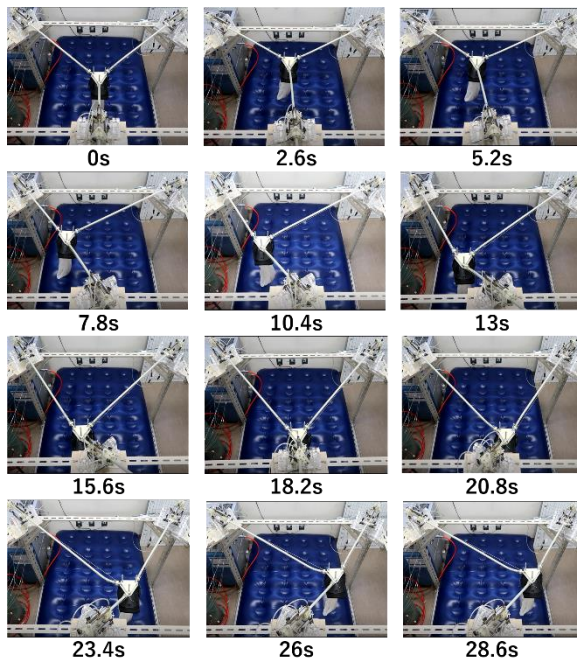


図10 膝サポータ位置決め制御の動作風景

しかし、空気圧駆動リニアステッピングアクチュエータは一定ストローク毎での押し出し/引込み動作をするため、センサを使用しなくても位置決め制御を行える利点があるが、何らかの外乱により保持機構でロッドの滑りが生じると誤差が大きくなる。したがって、変位センサを用いたフィードバック制御が必要になる。そこで、2軸可動ステージに取り付けたワイヤ式ポテンシオメータによるロッド長の計測変位をフィードバックする制御システムを構成する。さらに、フィードバック制御が可能であっても、試作アクチュエータはステッピングアクチュエータのため、ストロークである30mm毎にしか動けない問題がある。そこで、アクチュエータ内の保持機構をブレーキとして用いることで、ステップストロークを任意に調整する方法を提案する。試作アクチュエータの押し出し/引込動作中に、どちらの保持機構もロッドを確実に保持することが可能であることから、駆動していない保持機構をブレーキとして使用できる。図11に可変ステップ式空気圧駆動リニアステッピングアクチュエータによる位置決め制御のフローチャートを示す。フローチャートは図9に示すような試作アクチュエータの押し出し/引込動作の制御手順を示している。まず最初に、ロッド長の目標値とワイヤポテンシオメータで計測した変位との偏差を計算する。 J_i はアクチュエータの伸長・収縮動作の判定を行う指数であり、偏差 e_i が0より大きい時に J_i を1として伸長動作、 e_i が0以下なら J_i を0として収縮動作をする。また、この時のブレーキ指数 B_{ki} は0に初期化される。フローチャートに示すように偏差により伸長・収縮の動作を

決めた後に、ポテンシオメータを用いてアクチュエータの動作中にもロッド長を計測し、偏差を求め、求めた偏差が現動作と逆の偏差を生じた場合、アクチュエータの固定側の保持機構を駆動しブレーキ動作を実行する。また、偏差が当初の伸長・収縮動作決定時と同じであれば、判断の繰り返し数の上限2000回(約0.5秒に相当)に従って、次のプロセスに進むことになる。ここで B_{ki} は各アクチュエータのブレーキ動作のフラグであり、押し出し/引込みの両動作中では $B_{ki}=0$ であり、 $B_{ki}=1$ になっていればブレーキ動作中を示す。

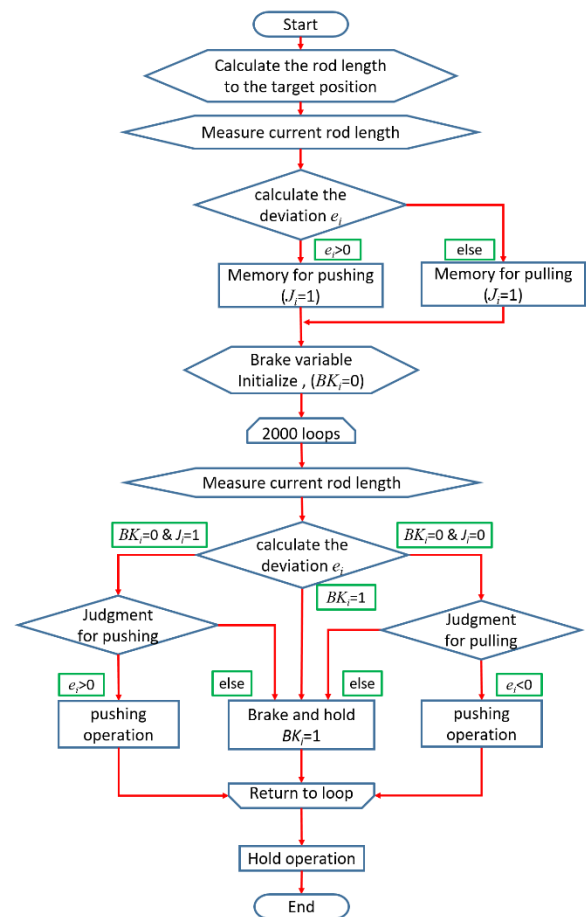
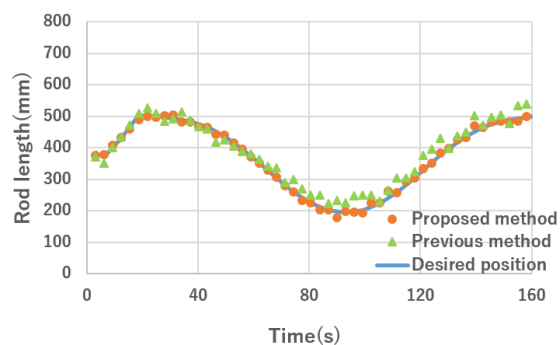


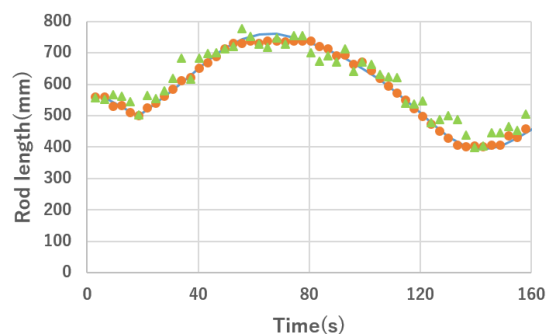
図11 可変ステップ式空気圧駆動リニアステッピングアクチュエータの制御フローチャート

図12はリハビリテーション機器の膝サポータが楕円形の目標軌道に従って動く際の各アクチュエータのロッド長の応答結果を示している。図中の青実線は目標ロッド長、●はアクチュエータの駆動中に保持機構でブレーキを可変ステップによる制御、▲はシーケンス・フィードバックによる位置決め制御結果である。センサによるロッド長のフィードバックとアクチュエータが有する保持機構をブレーキとして使用した「可変ス

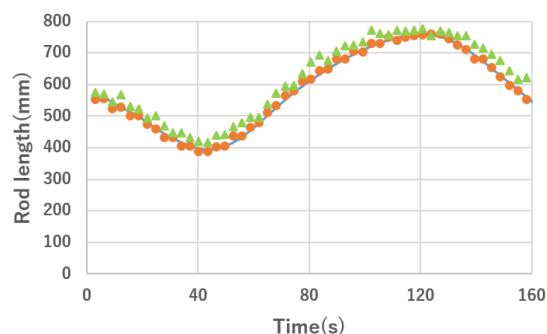
「テッピング手法」では従来の手法よりも正確に目標値に追従していることが確認できる。ここで従来手法(一定ステップを利用する方法)による偏差の標準偏差は19.1mm、改良した「可変ステップing手法」では4.7mmと大きく改善されたことがわかる。



(a) アクチュエータ1



(b) アクチュエータ2



(c) アクチュエータ3

図12 膝サポータ楕円軌道駆動時における各アクチュエータの追従制御結果

5. 結言

柔軟ロッドを持ち替えながら大きな発生力で長いストロークの駆動が可能な空気圧駆動リニアステッピングアクチュエータの改良と、患者の股関節に他動運動を加えることができるリハビリテーション機器への応用をめざした本研究は、以下のように要約される。

- (1) 二等辺三角形の頂点に相当する位置に配置した空気圧駆動リニアステッピングアクチュエータを3つ用い、股関節をつり上げながら球面軌道上に動かし他動動作を加えるシンプルな構造の股関節リハビリテーション機器を提案・試作した。
- (2) 股関節リハビリテーション機器内の3つの空気圧駆動リニアステッピングアクチュエータの動作中のロッドの変形を防ぐため方向角と仰角に自由に向きを変えることでアクチュエータ軸とロッド軸が常に一致する2軸可動ステージを提案・試作した。また、2つの軸が常に一致したことでロッド内にアルミパイプを挿入してロッドの剛性を上げるとともに、2軸可動ステージにワイヤ式リニアポテンシオメータを取り付けることで、ロッド長の計測を可能にした。
- (3) 解析モデルを基にした目標軌道に対する各ロッドの目標長さを算出し、アクチュエータの動作に伴い現在のアクチュエータ長さを算出する方法を用いて偏差を求め、各アクチュエータのストロークの半分の値の正負を基にON/OFF制御則により目標軌道へ追従させる追従制御を行った。
- (4) ロッド長を計測しながら押し出し/引込み動作中に目標位置に達した際に、ストローク途中でステッピングアクチュエータ内の保持機構を利用してブレーキをかけて任意変位のステップ動作を実現する「可変ステップing手法」を提案した。さらに、提案手法を用いた追従制御を行った結果、目標値とロッド長の偏差から求めた標準偏差が従来の手法の19.1mmに対し4.7mmと大幅に位置決め精度が向上した。

今後の課題として、家庭で使用できる股関節リハビリテーション機器の開発のため、よりコンパクトな機器の開発を目指す。さらにその他の部位に対するリハビリテーションに応用するため柔軟性が高く、逆駆動性を有する機器の開発について検討する必要がある。

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, Vol.6, No.5, (2017), pp.373-377.
- 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 Pneumatic Drive Linear Stepping Actuator and Its Application for Rehabilitation Device of Hip Joint

Kota Oe, Tetsuya Akagi*, Shujiro Dohta** and Takashi Shinohara***

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

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

*** Frontier Institute of Science and Engineering,*

**** 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)

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 types 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 study, we proposed and tested a rehabilitation device for hip joint that using three PLSAs and one connector connected with three flexible rods and a knee supporter. Also, to decrease uncertainty based on bending rods and influence of friction, a universal-joint-type stage for PLSA with a wire-type linear potentiometer was proposed and tested. The control system using PLSAs was also developed. The tracking position control of knee supporter based on an analytical model was carried out. However, the tested PLSA moves only every certain stroke. Therefore, the positioning accuracy depends on its stroke. Therefore, in this paper, a novel pneumatic linear stepping actuator that can change the stroke for one step freely was also proposed and tested. The construction and operating principle of the tested actuator are described in this paper. The tracking position control using rehabilitation devices with three previous PLSAs and renewed PLSAs for hip joint was carried out. As a result, it could be concluded that the controlled length using the renewed PLSAs could trace the desired length well. The standard deviation of tracking control error was improved from 19.1 mm to 4.7 mm compared with the method using ordinal constant step motion.

Keywords: Variable step type pneumatic linear stepping actuator, Rehabilitation device for hip joint, Backdrivability, Passive exercise.