

空気バネを併用した電動式柔軟シリンダの試作

玉木 博章・堂田 周治郎*・赤木 徹也*・小林 亘*

岡山理科大学大学院工学研究科修士課程知能機械工学専攻

*岡山理科大学工学部知能機械工学科

(2016年9月30日受付、2016年12月5日受理)

1. 緒言

現在我が国は急速な高齢化社会を迎え、高齢者や障がい者のQOL向上のためにリハビリテーション機器やパワーアシスト装置の開発が盛んに行われている¹⁾。著者らは、これまでこれらのリハビリテーション機器の実現に向けて人体に装着可能な柔軟な空気圧シリンダを開発してきた²⁾。さらにこの柔軟空気圧シリンダを肩や腕を含むリハビリテーション機器へ応用してきた。具体的には、2本の柔軟空気圧シリンダをリング状に曲げ、直交させて構成した球面アクチュエータ³⁾を開発するとともに、そのアクチュエータを改良し、手に持ってリハビリテーションを行うポータブル上肢リハビリテーション機器を開発してきた⁴⁾。しかし、試作機器は動力源として圧縮空気を必要とし、家庭など大型のコンプレッサを設置していない環境での使用は困難であった。そこで本研究では、この機器を家庭で容易に使用できるようにするため、コンプレッサなしでも長時間駆動できる柔軟なアクチュエータの開発をめざす。具体的には空気バネを併用した電動式柔軟シリンダの開発である。さらにその試作アクチュエータの位置決め制御を行った結果について述べる。

2. 柔軟空気圧シリンダ

ポータブル上肢リハビリテーション機器の基本となる柔軟空気圧シリンダ²⁾の構造を図1に示す。柔軟空気圧シリンダは、シリンダとガスケットに相当する柔軟チューブとシリンダヘッドに相当する1つの鋼球、チューブに沿ってスライドできるスライドステージで構成される。鋼球は、両サイドから2つの真鍮製ローラによって挟まれている。動作原理は、片側の圧力室を加圧すると内部の鋼球が押しされ、それに伴いローラが押しされスライドステージが動くというものである。最低駆動圧力は120kPaである²⁾。

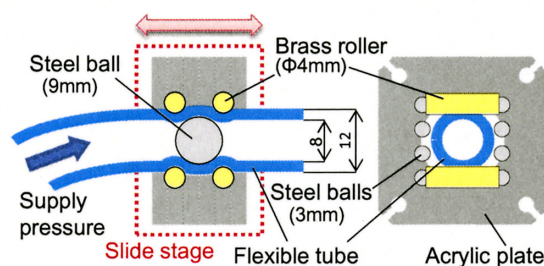


図1 柔軟空気圧シリンダの構造

3. ポータブル上肢リハビリテーション機器

3-1 構造と動作原理

図2に、以前に開発したポータブル上肢リハビリテーション機器⁴⁾の概観を示す。機器はリング状(直径290mm)に曲げた2つの柔軟空気圧シリンダが使用され、それらは直交するようにハンドル部に固定されている。また、シリンダの両端(計4ヵ所)にそれぞれ平行にオンオフ弁が取り付けられ、圧縮空気が給気・排気される。シリンダを加圧するとハンドル部に固定されたスライドステージが駆動し、ハンドルがチューブに沿って湾曲動作される。この機器は、肩や腕などを含む上肢のリハビリテーションを目的として開発した機器である。すなわち、患者が両手で装置を保持しながら機器を動かすことで、人体の関節角度の指向性から、肩・腕などを含む広範囲の他動動作を与えるようなリハビリテーションが可能となる。また、患者が危険を感じた場合、すぐに手放せるといったことから、本質的な安全性を有するといった利点がある。機器全体の大きさは、幅290mm、高さ320mmであり、全質量は580gと非常に軽量である。

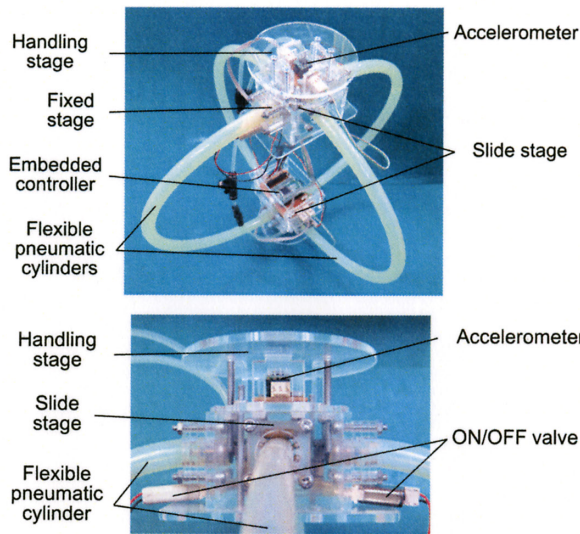


図2 ポータブル上肢リハビリテーション機器の外観

3-2 姿勢角計測結果

図3に4つのオンオフ弁を交互に動作させシーケンス制御を行った時の応答結果と動作の様子を示す。姿勢角はそれぞれのハンドルに取り付けられた加速度センサの出力から求め、 θ は水平軸回りの姿勢角、 ϕ は鉛直軸回りの姿勢角を表す⁵⁾。供給圧力は400kPaである。図から機器を持つことで上肢に他動運動を加えることができることがわかる。ただし、この機器のような空圧機器を長時間使用するためにはコンプレッサが必要不可欠である。しかし、一般的にコンプレッサは重く、また大きな音が生じる。さらに、連続使用時には圧縮熱により人が持てない程の温度にまで上昇するなど、家庭での使用に対して大きな問題を有する。このような問題を解決するためには、従来の柔軟空気圧シリンダの代わりにコンプレッサを必要としない新しい柔軟なアクチュエータが必要となる。

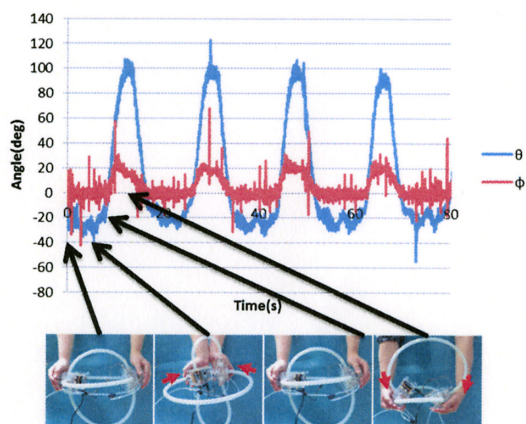


図3 姿勢角計測結果と動作風景

4. 電動式柔軟シリンダ

4-1 構造と動作原理

図4に空気バネを併用した電動式柔軟シリンダの概観を示す。構造は、従来の柔軟空気圧シリンダと違い、シリンダヘッドの鋼球(直径9mm)にワイヤが接続されている。また、一方のチューブ端(図の右)にシール機構を有するコネクタとワイヤを巻き取る機構が配置されている。さらに、もう一方(図の左)に鋼球の変位を計測するためのワイヤ式リニアポテンシオメータ⁶⁾が取り付けられ、それらがチューブ内のワイヤにより直列に連結されている。ワイヤ巻き取り機構は、亚克力製のボビン(直径10mm)を介して出力軸が向かい合うように接続された2つのモータ(Seeed Studio Co. Ltd., MOT102A2B)から構成される。また、シリンダの片側には圧縮空気が入った小型タンク(500cc)が接続されている。鋼球は図5に示すような穴(直径2mm)を有し、その両端をゴムボール(直径4.6mm)で挟むことでシールを保っている。また、チューブ端コネクタは図6に示すように亚克力のカバーとチューブコネクタで小径の穴を有するゴムボールを挟み、ワイヤにゴムボールを押し付けることによって空気漏れを防いでいる。これらによりシリンダの片側は常に圧縮空気が入った状態となり、空気バネとして作用する。

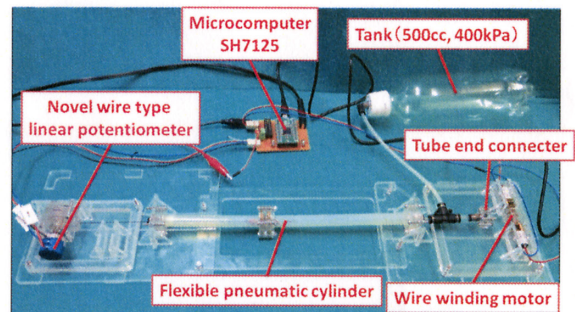


図4 電動式シリンダと制御システム

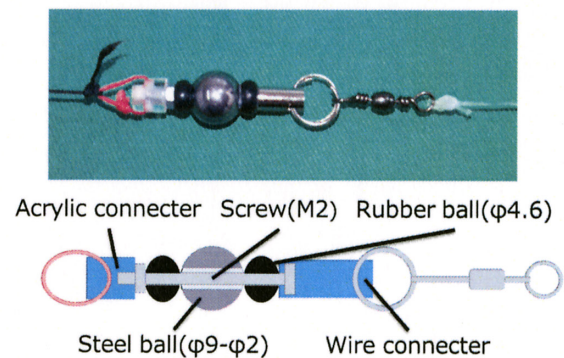


図5 シリンダヘッドの構造

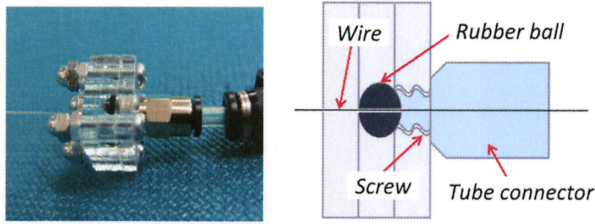


図6 チューブ端コネクタの構造

試作アクチュエータの動作原理は以下の通りである。スライドステージ内の鋼球は空気バネにより常に左方向の力を受けている。この状態で鋼球につながったワイヤがモータにより巻き取られると、それ以上の力で引っ張られて鋼球は右側に移動する(図7(a))。また、モータを逆回転させワイヤを緩めると、鋼球は空気バネによる力で左側に移動する(図7(b))。鋼球が移動すると、従来の柔軟空気圧シリンダと同様に、チューブが変形しスライドステージが左右に移動する。このようにスライドステージを左方向へ動かす時は空気圧を利用し、逆方向に動かす時はモータによる引張力を用いる。この方法は図8に示すようなシリンダの両端にそれぞれ配置された2つのモータによる引張力のみを用いる方法に比べ、モータの協調制御を必要とせず、空気バネにより常に張った状態のワイヤの張力をモータを用いて調整するだけで位置決めできるため、制御系が簡単になるといった利点を有する。

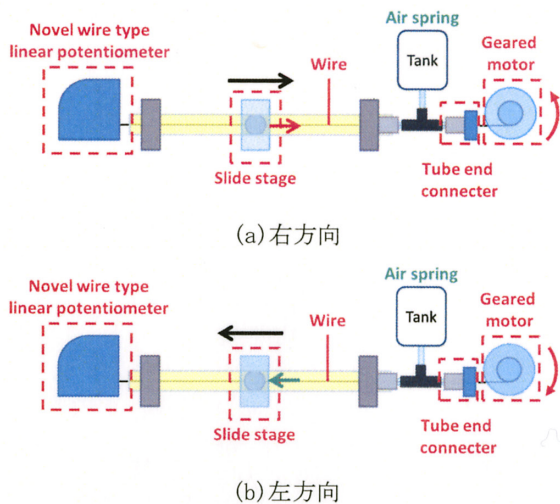


図7 電動式柔軟シリンダの動作原理

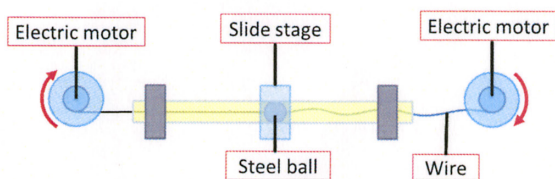


図8 2つの電気モータを用いた柔軟シリンダの構想

4-2 ワイヤ式リニアポテンシオメータ

図9にワイヤ式リニアポテンシオメータの外観を示す。このポテンシオメータはコンパクトな形状で長い直動変位を計測することを目的としたセンサである。構造は、10回転分を計測できるヘリカルポテンシオメータ(BOURNS Co. Ltd., 3590S-A26-104L)と、板バネによる直径22mmのワイヤ巻き取り機構、直径0.5mmのポリエステル製のワイヤから構成される。ヘリカルポテンシオメータと巻き取り軸はアクリル製の軸継手を介して接続されている。また巻き取り機構内にあるワイヤドラムは板バネにより、常にワイヤを巻き取るような力が働き、ワイヤはそのドラムの接線にあいた穴を通して外に出ている。つまり、ワイヤは自然な状態(力が加わっていない状態)ではワイヤ巻き取り機構に巻き取られた状態(初期値)であり、最も引っ張られた状態、つまり最大計測長さは約0.7mである。検出分解能は、10bitのA/Dコンバータを用いた場合0.74mmである⁶⁾。

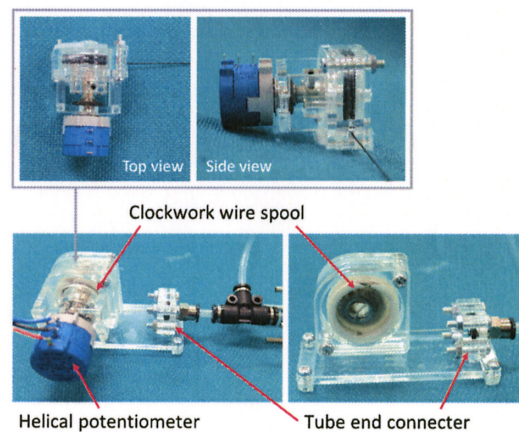


図9 ワイヤ式リニアポテンシオメータ

4-3 制御システム

図10に試作した電動式柔軟シリンダの制御システムの構成を示す。システムは直列に結線された2つのギヤードモータ(2つのモータ軸をドラムに結合)とモータドライバ、ワイヤ式リニアポテンシオメータ、マイコン(Renesas Co. Ltd., SH7125)、空気タンク(500ccペットボトル)から構成される。制御の流れは以下の通りである。スライドステージの目標変位はマイコン内のシーケンスデータもしくはA/D変換器を介してマイコン内に取り込まれる。また、スライドステージの変位を測定するためのワイヤ式リニアポテンシオメータの出力電圧もA/Dを介して取り込まれ、偏差を求め、制御則に従ってモータドライバを介してモータを駆動させる。左向きの動作ではタンクの空気を利用するため、漏れがなければ空気消費量は0である。また、制御のサ

ンプリング周期は4msである。

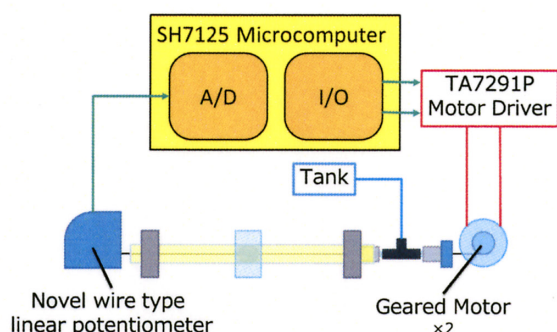


図10 電動式柔軟シリンダの制御システム構成

4-4 制御結果

図11に20秒毎に目標変位を変化させたときの応答結果を示す。直列接続された2つのモータへの供給電圧は12V、タンク内の圧力は400kPaである。ここでワイヤをモータによって引く動作時は変位が大きくなる方向(右上)、ワイヤを緩め空気バネによって押し出す動作時は変位が小さくなる方向(右下)へ移動する。図8からタンク内の圧力のみでシリンダのプッシュ・プル動作が実現でき、スライドステージの位置決め制御が実現できていることがわかる。

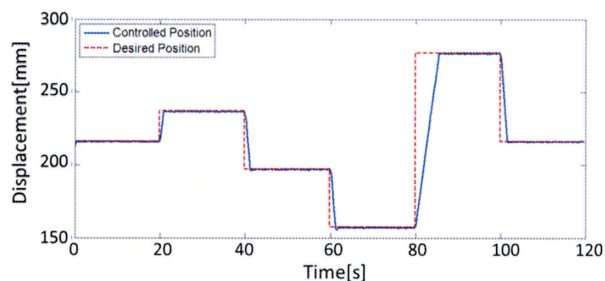


図11 多点位置決め制御結果

図12に周波数0.05Hzの正弦波状の目標変位(オフセット229mm、振幅50mm)を加えたときのシリンダ変位の応答結果を示す。図9から目標変位を周期的に変化させた場合でもシリンダ変位は比較的良好に追従できていることがわかる。また、タンク内の圧縮空気のみでこのようにシリンダを連続駆動させるような動作を1時間以上繰り返しても駆動可能であることを確認した。

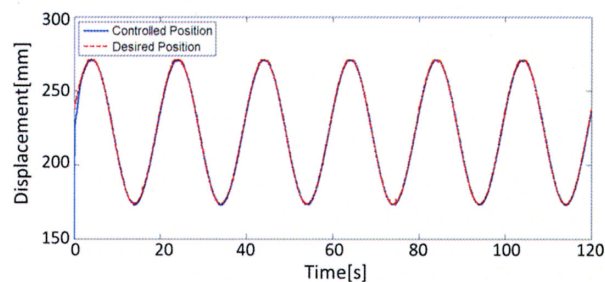


図12 目標値追従制御結果

5. 結言

空気バネを併用することにより、圧縮空気を消費することなく駆動可能な電動式柔軟シリンダを提案、試作した。また、シリンダ変位を制御するための位置決め制御システムを試作し、多点位置決め制御、目標値追従制御を行った。

このアクチュエータは柔軟性を有しながら、駆動にコンプレッサを必要としないため、家庭で使用できるポータブルリハビリテーション機器への応用が期待できる。

参考文献

- 1) T. Noritsugu, M. Takaiwa, and D. Sasaki: Development of Power Assist Wear Using Pneumatic Rubber Artificial Muscles, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 21, No. 5, pp. 607-613 (2009)
- 2) 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)
- 3) C. Liu, S. Dohta, T. Akagi and A. Ando: Development of Flexible Spherical Actuator Using Flexible Pneumatic Cylinder, *Proceedings of 2012 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, pp. 81-86 (2012)
- 4) Y. Matsui, T. Akagi, S. Dohta, M. Aliff, C. Liu: Development of Portable Rehabilitation Device Using Flexible Spherical Actuator and Embedded Controller, *Lecture Notes in Electrical Engineering 293*, Vol. 1, Springer, pp. 231-238 (2014)
- 5) Christopher J. F.: Using an Accelerometer for Inclination Sensing. *Analog Devices Application Note AN-1027*, pp. 1-8 (2010)
- 6) Y. Matsui, T. Akagi, and S. Dohta: Development of Low-cost Wire Type Linear Potentiometer for Flexible Spherical Actuator, *Proc. AIM2016*, AIM16_-294.pdf (2016)

Development of Electric Drive Flexible Cylinder with Air Spring

Hiroaki Tamaki, Shujiro Dohta*, Tetsuya Akagi* 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 September 30, 2016; accepted December 5, 2016)

Inexpensive rehabilitation devices that can be used at home are required because of a lack of physical therapists and welfare workers. In the previous study, the low-cost portable rehabilitation device using a flexible spherical actuator that consisted of flexible pneumatic cylinders was proposed and tested. However, a compact and high power compressor that supplies air pressure to the pneumatic actuator has not been developed yet. In particular, heat generated by compressing air prevents to miniaturize it. To realize home rehabilitation, a small-sized compressor or less air consuming flexible actuators are required. In this study, an electric drive flexible cylinder with air spring is proposed and tested. The concept, the construction, and the operating principle of the proposed actuator are described. The position control using the tested actuator is also carried out. As a result, we confirmed that the tested actuator can realize the more than 1 hour driving using compressed air in a small volume tank.

Keywords: electric drive soft actuator; flexible pneumatic cylinder; portable rehabilitation device; air spring.