

家庭用リハビリテーション機器のための柔軟油圧シリンダの試作と制御

玉木 博章・堂田 周治郎*・赤木 徹也*・小林 亘*・松井 保子**

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

**岡山理科大学大学院工学研究科博士課程システム科学専攻

(2017年10月31日受付、2017年12月4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上肢の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ことができる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、試作機器は空気圧駆動であるため、動力源として圧縮空気を必要とし、家庭などにコンプレッサを設置するなどのインフラ整備が必要となる。さらに、コンプレッサの駆動音は一般的に大きく、家庭で使用する際には騒音となるなどの問題も有している。また、開発した機器の姿勢制御には、柔軟に湾曲するシリンダの位置を計測するためのセンサが必要であるが、現状では上記の仕様を満たす変位センサは市販されておらず、今後開発の必要がある。

そこで本論文では、大型の周辺機器を必要とせず、既存の安価なセンサを利用して制御可能である柔軟なアクチュエータとして柔軟油圧シリンダの開発をめざす。さらにその試作シリンダ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

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⁾。

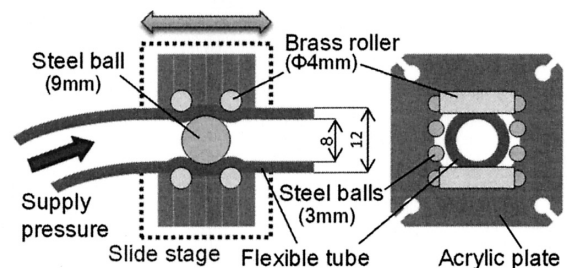


図1 柔軟空気圧シリンダの構造

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(SMC株, S070C-SDG-32)が取り付けられ、搭載された組込みコントローラ(ルネサスエレクトロニクス株, SH7125)によりシーケンス動作に従って、圧縮空気が給気・排気される。動作原理は以下の通りである。シリンダの片側を加圧すると、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移動することで、ハンドルを介して使用者の手に湾曲動作を加える。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、手先の位置を変えることで肩・腕などを含む広範囲の他動動作を与える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。さらに、機器は動力源となる空気圧と電源を供給するだけで駆

動できる。

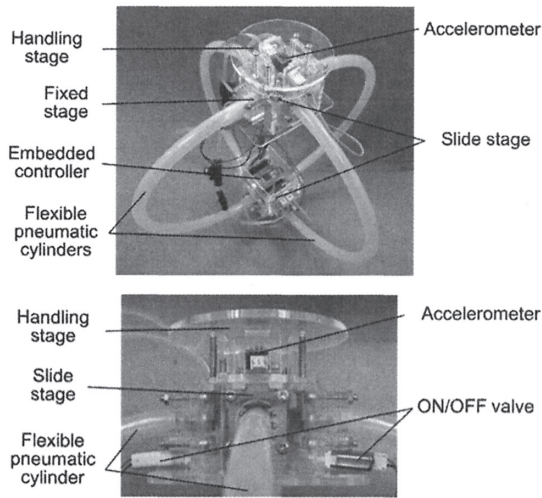


図2 ポータブル上肢リハビリテーション機器の外観

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モニター用の3軸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、また大きな駆動音が生じる。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。また、図3より、鉛直軸周りの姿勢角 ϕ は0度から20度程度までの変化しか見られず、実際の動作と比較すると姿勢角を正しく求められていないことがわかる。これは鉛直軸周りの回転では3軸加速度センサの出力が変化していないためであり、加速度センサのみでは姿勢角を計測することが難しく、姿勢制御は困難である。

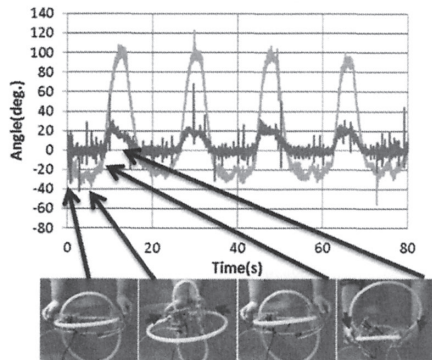


図3 姿勢角計測結果と動作風景

4. 柔軟油圧シリンダ

4-1 構造と動作原理

前述の問題を解決するため、大きな駆動音の生じるコンプレッサの代わりに小型の油圧ギヤポンプを用いて駆動させる柔軟油圧シリンダを試作した。図4に試作シリンダの構造を示す。構造は図1に示す柔軟空気圧シリンダの構造とほぼ同様であるが、スライドステージ部の摩擦を小さくするため、ローラの代わりに円周上に配置した12個の鋼球(φ3mm)で内部の鋼球(φ9mm)を保持する機構を用いている。図5に示すようにシリンダ両端は小型のギヤポンプ(尙アシスト, PE1024N)と繋がれ、シリンダ内部が油で満たされている。また、最低駆動圧力は94kPaである。柔軟油圧シリンダの動作原理は、ポンプの駆動によりスライドステージを介した両圧力室の油が移動し、圧力差が生じることで、スライドステージが移動する。この際、スライドステージの移動量は漏れがなければポンプの油の排出量つまり回転角に比例する。図6に無負荷時のギヤポンプの回転角と吐出油量の関係を示す。無負荷では1回転当たり約0.3ccの油が送られることが確認でき、これはシリンダの変位で約6mmに相当する。

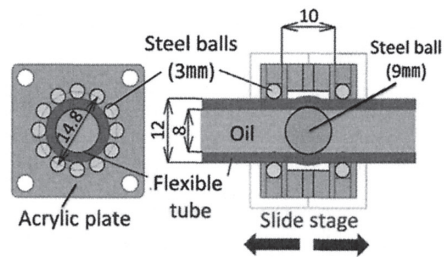


図4 柔軟油圧シリンダの構造

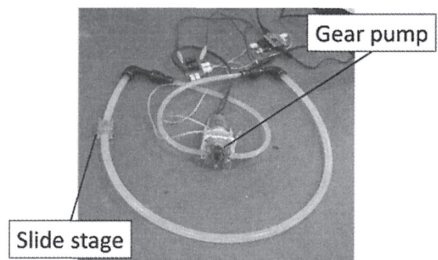


図5 柔軟油圧シリンダの外観

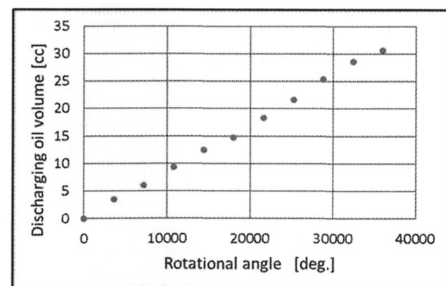


図6 ギヤポンプの回転角と吐出油量の関係

4-2 回転角検出エンコーダの構成

前述のように漏れがなければシリンダの変位はポンプの回転角に比例するため、ポンプの回転角を制御することでシリンダ変位を制御することができる。そこで、ギヤポンプに接続されたモータの回転角を検出し、ポンプの回転角を制御するためのインクリメンタル型エンコーダを図7のようにポンプに組み込んだ。エンコーダは図8に示すように90度間隔にスリットが付いた円板と2つの透過型光学センサ(オムロン(株), EE-SX493)から構成されている。モータ軸の回転に伴いスリットが付いた円板が回転し、図8のように135度ずれた位置に2つの透過型光学センサを配置することで90度位相のずれた信号が得られる。この信号を、UP/DOWNカウンタ⁶⁾でカウントすることでモータの回転方向および回転角を検出できる。なお、エンコーダの検出分解能は45度であり、シリンダ変位で0.75mmに相当する。

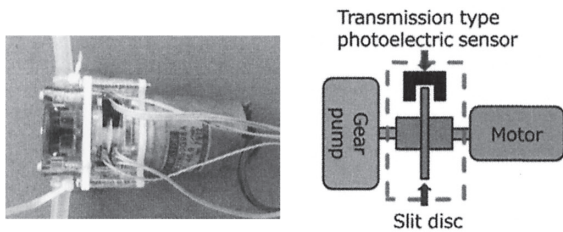


図7 組み込みエンコーダ

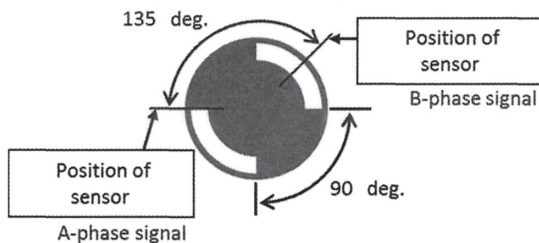


図8 組み込みエンコーダ

5. 柔軟油圧アクチュエータの位置決め制御

5-1 制御システム

図9に柔軟油圧シリンダの位置決め制御システムの構成図を示す。システムはエンコーダを組み込んだモータとギヤポンプ、柔軟油圧シリンダ、マイコン(ルネサスエレクトロニクス(株), SH7125)から構成される。

制御の流れは以下の通りである。まず前述のエンコーダから得られる信号をI/Oポートを介してマイコンに取り込み、プログラムで構成したUP/DOWNカウンタ⁶⁾を介して回転角を算出する。その後、あらかじめ設定された目標変位に相当するポンプの目標回転角を、後述する補正によって算出する。算出された目標回転角とエンコーダにより得られた現在の回転角を比較し、偏差の正負(ON/OFF制御則)に従って回転方向を制御す

る。ポンプの回転角を制御することでシリンダ変位を計測せずに位置決め制御を行うことができる。ここで制御のサンプリング周期は0.5msである。ギヤポンプの回転角制御においてデッドゾーンを設けない場合は目標値付近で振動が生じる。そのため、±135度(シリンダ変位で約2mmに相当)のデッドゾーンを設けている。このデッドゾーンの大きさは0度からエンコーダの検出分解能である45度ずつ広げていき、振動がなくなるように試行錯誤的に決めた。

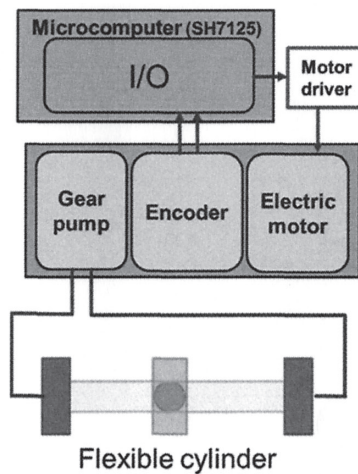


図9 柔軟油圧アクチュエータの制御システム構成

シリンダの目標変位に対するポンプの目標回転角を得るために図10に示す実験装置を用いてシリンダ変位とポンプの回転角の関係を調べた結果を図11に示す。実験では柔軟油圧シリンダを直線状に配置し、接続されたギヤポンプに±1350度、2250度、4500度、9000度、13500度の目標回転角を与えたときのシリンダの変位をワイヤ式リニアポテンシオメータ⁷⁾を用いて計測した。図中の●記号と▲記号はワイヤ式リニアポテンシオメータで計測した実際の変位を示し、実線は図6に示した無負荷時のギヤポンプ1回転当たりの吐出油量から計算された変位を示す。図11からシリンダ変位とギヤポンプの回転角の関係はほぼ線形関係であることがわかる。また、実験結果(記号)とポンプ吐出量からの推定変位(実線)に差が生じていることもわかる。この差はポンプの漏れやスライドステージの摩擦によって生じるものと考えられ、これらを補償するために式(1)に示す実験式を補正式として用いる。

$$r = \begin{cases} 74.25d + 94.50 & (d > 0) \\ 73.35d - 3.15 & (d \leq 0) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 d は目標変位(mm)を示し、 r は目標回転角(deg.)を示す。これらは図11で示した実験結果から求

めたものであり、目標変位の正負で式を分けているのはポンプの回転方向に依存する吐出流量の特性の違いを補償するためである。この式により補償された変位を図11に破線で示す。

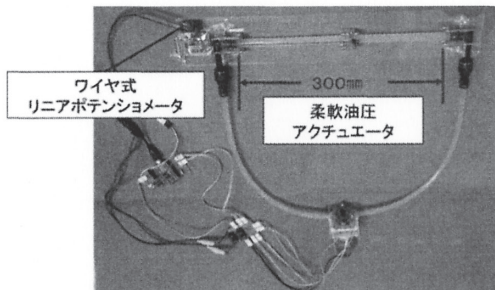


図10 位置決め制御の実験風景

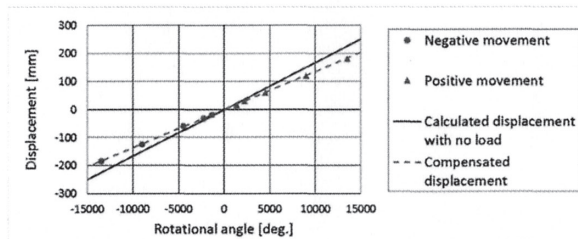
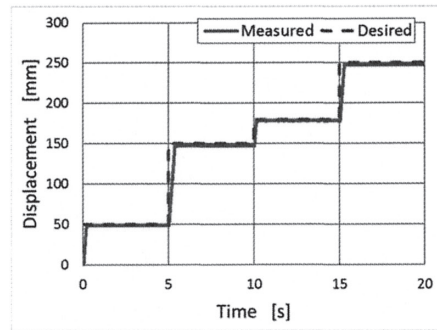


図11 シリンダ変位とポンプの回転角の関係

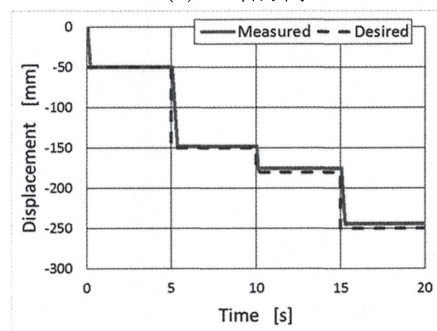
5-2 位置決め制御結果

上述の制御システムと図10に示したシリンダ長が300mmの柔軟油圧シリンダを用いて多点位置決め制御を行った結果を図12に示す。破線はシリンダの目標変位を示し、実線は検証用のワイヤ式リニアポテンシオメータで計測された変位（真値）を示す。また、原点から左方向への変位は負、右方向への変位は正で表すことにする。図12 (a) はシリンダの左端から右へ10mm離れた位置を原点として、5秒おきに+50mm, +100mm, +30mm, +70mmの目標変位を与え、右方向にシリンダを駆動させたときの結果である。同様に、図12 (b) はシリンダの右端から10mm左へ離れた位置を原点として-50mm, -100mm, -30mm, -70mmの目標変位を与えて左方向にシリンダを駆動させた結果である。図から目標変位によく追従しており、位置決め精度約6mmで多点位置決め制御が実現できていることが確認される。また、これらのシリンダの位置決め制御時のポンプモータ駆動音は、コンプレッサの駆動音よりはるかに小さく、オンオフ弁の駆動音（50cm離れた状態で60dB程度）に比べても非常に小さいことを確認している。さらに、油圧駆動により、空気圧アクチュエータの圧縮性によるコンプライアンスなどのリハビリテーション機器に有用な特性はなくなったものの、試作油圧シリンダを球面アクチュエータに応用する場合、湾曲して配置し

ている油圧シリンダ自体が柔軟であるため、空気圧を用いたポータブルリハビリテーション機器と同様の柔軟性を実現できる。



(a) 右方向



(b) 左方向

図12 目標値追従制御結果

6. 結言

家庭で使用するリハビリテーション機器に用いる柔軟アクチュエータとして、動作時の駆動音が小さく、さらに大型の周辺機器を必要としない動力源を有する柔軟アクチュエータの開発やその制御をめざした本研究は以下のように要約される。

- 1) 動力源として小型のギアポンプを有する柔軟油圧シリンダを提案・試作し、ギアポンプの小さな駆動音でスライドステージを動かすことができる柔軟アクチュエータを実現した。
- 2) 試作シリンダの位置決め制御として、ギアポンプの回転角に対する吐出流量から、シリンダ変位を推定する手法を提案し、さらにポンプ回転角度を計測するためのエンコーダを組み込んだ新たなギアポンプを提案・試作した。この方法により、特別な柔軟変位センサを用いず柔軟シリンダの変位を計測できることを確認した。
- 3) 上述のギアポンプと柔軟油圧シリンダを用いた位置決め制御システムを組込みコントローラを用いて構成し、多点位置決め制御を行った。その結果、シリンダの摩擦やポンプの漏れ流量を考慮した補正式を用いることで、誤差6mm以内での位置決め制御が可能であることを確認した。

今後はこの試作シリンダを2つ用いた球面アクチュエータ構造の家庭用リハビリテーション機器を試作し、その姿勢制御を行う予定である。

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-1057*, pp. 1-8 (2010)
- 6) T. Akagi, S. Dohta, H. Matsushita, A. Fukuhara: Development of Flexible Pneumatic Cylinder with Built-in Flexible Linear Encoder and Flexible Bending Sensor, *Journal of System Design and Dynamics*. Vol. 6, No. 4, pp. 359-372 (2012)
- 7) 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 and Control of Flexible Hydraulic Cylinder for Home Rehabilitation Device

Hiroaki Tamaki, Shujiro Dohta*, Tetsuya Akagi*, Wataru Kobayashi*
and Yasuko Matsui**

Master's Program, Graduate School of Engineering,

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

*** Doctor's Program, Graduate School of Engineering,*

Okayama University of Science,

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

(Received October 31, 2017; accepted December 4, 2017)

Inexpensive rehabilitation devices that can be used at home are strongly required because of a lack of Physical Therapist and welfare workers. We aim to develop “a home rehabilitation device” that can be used at home without special knowledge and any special attached equipment. In ideal, it is better to produce the device at low cost in order to decrease the financial aid from the government. In the previous study, the low-cost portable rehabilitation device using a flexible spherical actuator that consists of two flexible pneumatic cylinders was proposed and tested. However, a compact and high power compressor to drive such a pneumatic device at home has not been developed yet. In addition, the driving sound of a typical compressor is very noisy.

In this study, a flexible hydraulic cylinder driven by a small-sized hydraulic gear pump is proposed and tested. The construction and the operating principle of the proposed cylinder are described. The hydraulic gear pump with a rotary encoder is also proposed and tested. The empirical equation of the suitable pump rotational angle for the desired displacement can be obtained. The position control of the tested cylinder is also carried out. As a result, by using the on/off control scheme based on the empirical equation, the multi-position control within the tracking error of 6 mm can be realized.

Keywords: flexible hydraulic cylinder; spherical actuator; portable rehabilitation device; sequential control.