

ワイヤ式エンコーダを用いた 柔軟空気圧シリンダ用変位計測システムの開発

松井 保子・赤木 徹也*・堂田 周治郎*

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

(2015年9月30日受付、2015年11月9日受理)

1. 緒言

高齢化社会を迎え、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⁾。著者らの研究室では、これまでに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⁾。本研究でもこの柔軟空気圧シリンダを利用した肩や腕を含むリハビリテーション機器の開発をめざし、2つの柔軟空気圧シリンダをリング状に曲げ直角に交差させて構成する球面アクチュエータを開発し、それを用いて簡易な可搬型上肢リハビリテーション機器の開発を行った³⁾。しかし、このシリンダの変位を計測する際、市販の剛体センサを用いると、アクチュエータの柔軟性が損なわれてしまう。そこで本論文では、このアクチュエータつまり湾曲した柔軟空気圧シリンダの変位を測定するためのセンサ開発について述べる。具体的には、ワイヤ式ニアスケールを用いた柔軟な変位センサを提案、試作し、計測実験を行った結果について述べる。

2. ロッドレス型柔軟空気圧シリンダ

球面アクチュエータの基本となるロッドレス型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一つの鋼球、チューブの外側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され、それに伴いローラが押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⁾。

3. 可搬型上肢リハビリ機器

3-1 構造と動作原理

図2に、以前の研究⁴⁾で開発したリング状の柔軟空気圧シリンダ2つを90度で交差させた構造を有する柔軟球面アクチュエータを示す。これは、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ア

クチュエータである。リハビリテーションでは、患者が両手で装置の保持ステージを持ってアクチュエータを動かすことで他動動作を与えることを想定している。アクチュエータの大きさは、幅260mm、高さ270mmであり、全質量は310gと軽量である。また、各シリンダのステージ変位を直接測定できないため、以前の研究では、各保持ステージの姿勢角を測定するために2つの加速度センサを使用した。この際、図3に示す角度変化 θ 、 ϕ 、 ϕ は(1)~(3)式で得られる⁵⁾。ここで A_{xout} 、 A_{yout} 、 A_{zout} は、それぞれx軸、y軸、z軸における加速度センサからの出力である。

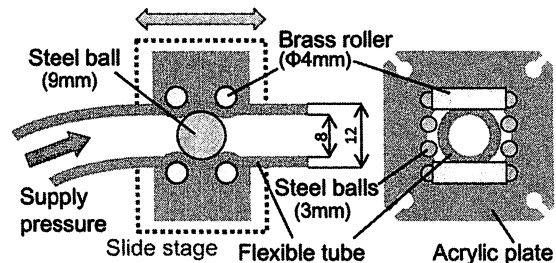


図1 柔軟空気圧シリンダの構造

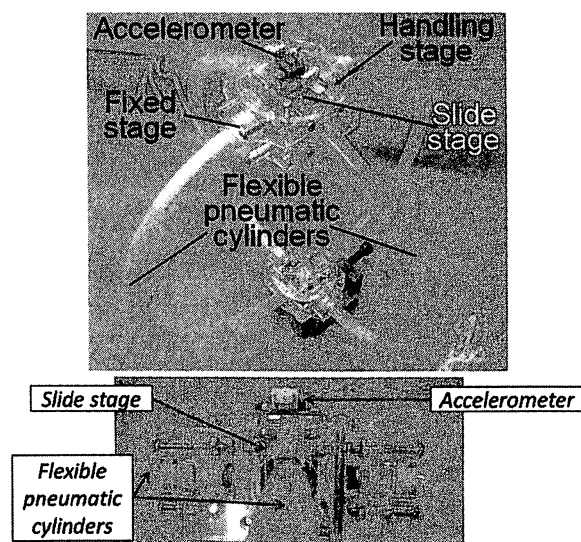


図2 柔軟球面アクチュエータの外観

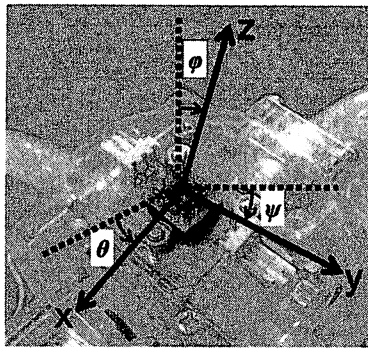


図3 角度変化

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{A_{xout}}{\sqrt{A_{yout}^2 + A_{zout}^2}} \right) \quad \dots (1)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{A_{yout}}{\sqrt{A_{xout}^2 + A_{zout}^2}} \right) \quad \dots (2)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{A_{xout}^2 + A_{yout}^2}}{A_{zout}} \right) \quad \dots (3)$$

3-2 制御システム

この加速度センサを用いた姿勢制御として、図4に柔軟球面アクチュエータの姿勢制御システムの構成を示す。システムは2つの加速度センサを有する球面アクチュエータ(スレーブ)、1つの加速度センサからなるマスター機器、柔軟空気圧シリンダを駆動するための4つの疑似サーボ弁⁶⁾と制御器となるマイコン(Renesas SH/7125)から構成される。制御器や弁を含むシステムの全質量は約0.9kgである。シーケンスデータ、もしくは理学療法士が操作するマスター機器によって、2つのステージ間の目標角を与え、マイコンのA/D変換器に接続された加速度センサの出力により各ステージの角度を算出し、スレーブの姿勢角を得る。そして、マスターとスレーブの角度差から制御則により疑似サーボ弁を駆動し、柔軟空気圧シリンダを制御する。ここで、制御のサンプリング周期は4ms、疑似サーボ弁のPWM周期は10msである。

図5に、シーケンス制御を行った様子を示す。ここで、アクチュエータの供給圧力は450kPaである。図5より、人間の両手で機器を保持した状態でシーケンス動作が実現していることがわかる。図6に、図4のシステムを用いて、マスタースレーブ制御を行った結果を示す。ここで、 θ_r 、 ϕ_r はマスターによる目標姿勢角である。図6より、多少振動的であるが目標値に追従できていることが確認できる。しかし、患者が保持している両方のステージの相対的な位置を知るには傾斜角の計測だけでは困難である。そのため、傾斜角とステージ間の

距離を知る柔軟な変位センサが必要である。そこで次節で、本論文で提案する変位センサについて述べる。

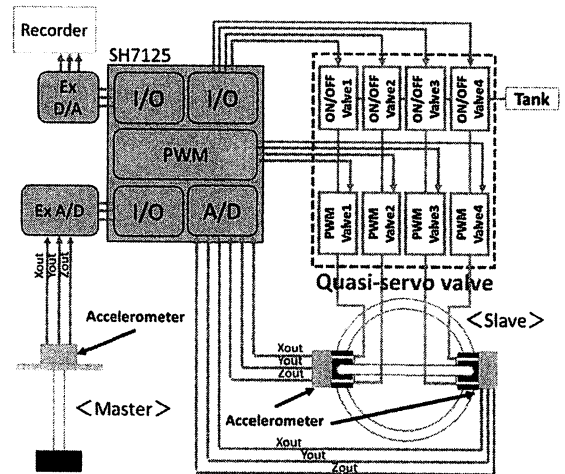


図4 システム構成図

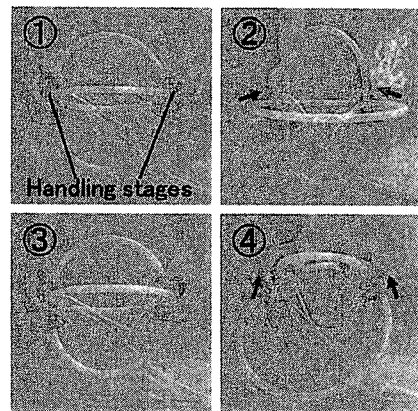


図5 シーケンス制御

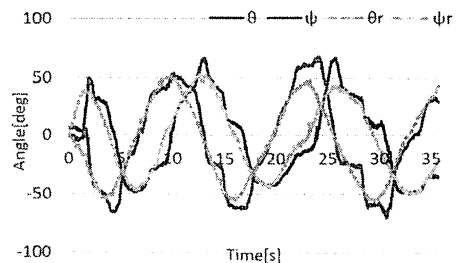
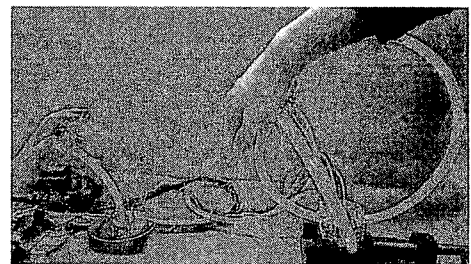


図6 マスタースレーブ制御

4. 柔軟空気圧シリンダの変位計測

4-1 計測システムの構成

図7に、試作したワイヤ式リニアスケールを用いた柔軟空気圧シリンダ用変位計測システムの構成を示す。システムは、鋼球が繋がれたワイヤ式リニアエンコーダ (Microtech Laboratory Inc., MLS-30-450-1000) と空気供給用のT字コネクタ (Koganei Co. Ltd., UT4)、気密性保持のためのチューブ端コネクタから構成される。外径9mmの鋼球には内径2mmの穴が開いており、気密性を保持するため、2つのゴム球で両側から挟んでいる。これらはネジで固定され、ナスカンを通じてワイヤと接続される。ワイヤは、T字コネクタとチューブ端コネクタを通り、シリンダ外部のエンコーダに繋がっている。図8に、チューブ端コネクタの外観と内部構造を示す。これは、一般的なチューブコネクタ (Koganei Co. Ltd., TS4-M5M) とアクリル板、小さな穴が開いたゴム球から構成されており、ネジによってゴム球に加わる圧縮力を調節することで、ワイヤがスライドしても気密性を保持することができる。石鹸水を用いたシーリングテストの結果から、500kPaを印加した場合でも、空気漏れが起こらないことを確認した。

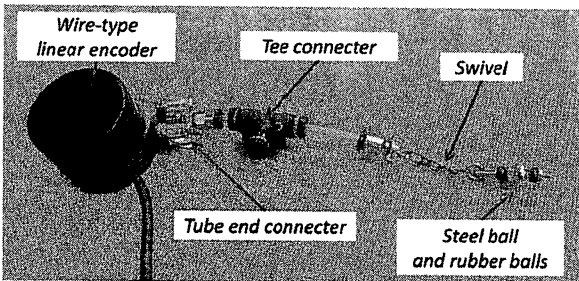


図7 変位計測システムの構成

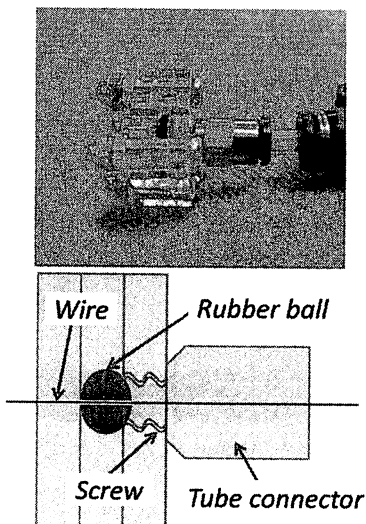


図8 チューブ端コネクタ

4-2 計測システムの原理

柔軟アクチュエータ用変位計測システムは位置検出にエンコーダ方式を用いることから、Up/Downカウンタが必要となる。そこで、Up/Downカウンタを表1のアルゴリズムに従ってマイコン内部でプログラマ的に構成した。図9に示すエンコーダの出力パターンから表1にあるようにA相を上位ビット、B相を下位ビットとしたバイナリデータを求める (Step1)。その後、順番の組み立てを分かりやすくするため、2を3に、3を2とするデータの置き換えを行う (Step2)。また、このStep2で得られた数値を使用して、1つ前の値と現在の値の差を算出し (Step3)、増減 (+1, -1) を求める。この増減 (カウント値) の和を求めることで、0.2mmを分解能とする位置検出が可能となる。

表1 Up/Downカウンタのアルゴリズム

| Pattern | Phase | | Step1 | Step2 | Step3 | Difference from previous one |
|---------|-------|---|-------------|----------|----------|------------------------------|
| | A | B | Binary data | Replaced | Up count | |
| I | H | L | 2 | 3 | +1 | -1 |
| II | H | H | 3 | 2 | +1 | -1 |
| III | L | H | 1 | 1 | +1 | -1 |
| IV | L | L | 0 | 0 | +1 | -1 |

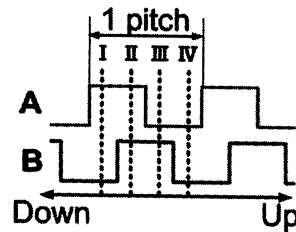


図9 A相・B相のパターン

アクチュエータの姿勢制御では、計測のサンプリング周期が重要となる。そこで、計測精度向上のため、制御用とは別に新たなマイコン (Renesas SH/7125) を用いた計測システムを構築した。図10に、Up/Downカウンタの機能を有する試作基板を示す。基板は縦70mm、横85mm、高さ18mm、質量約50gであり、カウント値をアナログ電圧、もしくはシリアルデータに変換可能である。図11に、システム構成を示す。動作原理は以下の通りである。初めに、I/Oポートに接続されたエンコーダのA相・B相からの信号が、前述のUp/Downカウンタによってカウント値に変換される。次に、外部接続された10bitのD/Aコンバータ (Linear Technology Co. Ltd., LTC 1660) によってカウント値をアナログ電圧に変換する。D/Aコンバータは3つのI/Oポートに接続されており、マイコンによって制御する。カウント値は、USBシリアル変換モジュール (FTDI Ltd., FT234X) を介して

PCに転送することも可能である。USBシリアル変換モジュールを使用した場合、サンプリング周期は0.75msである(ボーレート115200bps)。D/Aコンバータを使用した場合のサンプリング周期は、0.14msと短くなる。よって、検出分解能とサンプリング周期から計算される最大計測速度は約1.4m/sとなる。これは、柔軟空気圧シリンダの最大速度1.0m/sよりも速く、十分な計測速度である。

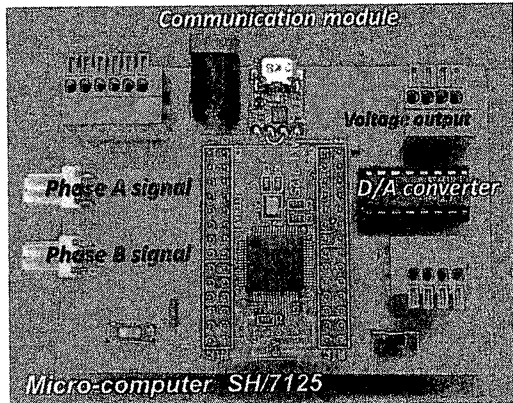


図10 試作基板の外観

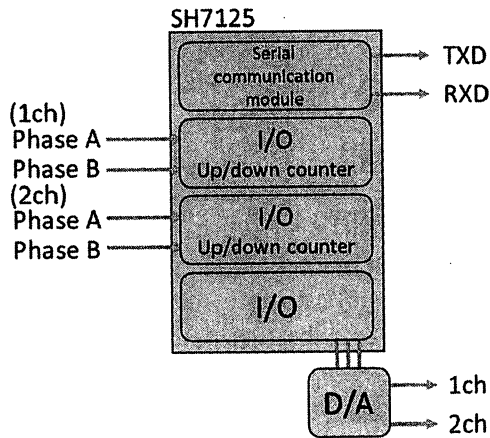


図11 システム構成図

5. 計測実験

試作した計測システムの有用性を確認するため、ポテンシオメータ(Midori Precision Co. Ltd., LP-50F)を用いて、試作センサで計測した変位と比較した。図12に、実験装置の外観を示す。ポテンシオメータはシリンダのスライドステージと並行になるように接続されている。試作システムとポテンシオメータからの出力電圧はレコーダ(GRAPHTEC Co. Ltd., midi LOGGER GL900)に記録され、出力電圧から変位に換算される。

図13に、その実験結果を示す。図中の実線と破線は、それぞれ試作システムとポテンシオメータ(真値)の変位である。図13より、2つの値がよく一致していることがわかる。よって、試作システムは柔軟空気圧シリンダの変位を測定できることを確認した。

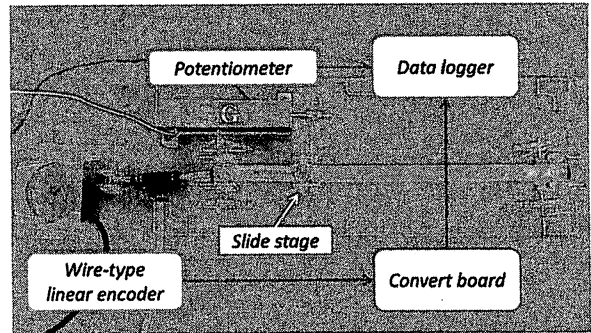


図12 実験装置の外観

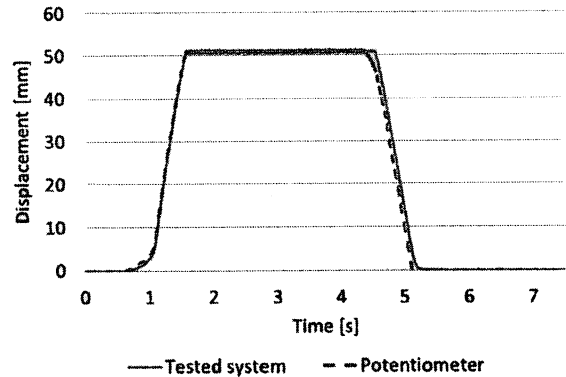


図13 実験結果

6. 結言

球面アクチュエータの傾斜角とステージ間の距離を計測するため、ワイヤ式エンコーダを用いた柔軟な変位センサを新たに提案、試作した。

また、リハビリテーション装置の姿勢制御を組み込みコントローラを使用して行うため、制御用とは別に、新たなコントローラを用いた変位計測システムを提案、試作した。試作システムは、エンコーダからの出力信号を、シリアル通信、もしくはアナログ出力に変換する。アナログ出力時のサンプリング周期は0.14msであり、最大計測速度は1.4m/sと十分な計測速度が期待できる。

ポテンシオメータを用いた変位計測検証実験から、試作センサの計測変位と、ポテンシオメータによる計測変位はよく一致しており、試作計測システムの有用性を確認した。

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) Changjiang Liu, Shujiro Dohta, Tetsuya Akagi and Ayaka Ando: Development of Flexible Spherical Actuator Using Flexible Pneumatic Cylinder, *Proceedings of 2012 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, pp.81-86 (2012)
- 4) Matsui Y, Akagi T, Dohta S, Aliff M, Liu C.: Development of Portable Rehabilitation Device Using Flexible Spherical Actuator and Embedded Controller, *Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Technologies and Engineering Systems (ICITES2013)*, *Lecture Notes in Electrical Engineering 293*. vol. 1. Springer, p.231-238 (2014)
- 5) Christopher J. F.: Using an Accelerometer for Inclination Sensing. *Analog Devices Application Note AN-1027*, pp.1-8 (2010)
- 6) 趙 菲菲, 堂田周治郎, 赤木徹也: 柔軟湾曲アクチュエータ用小型疑似サーボ弁の試作と解析, *日本機械学会論文集(C編)*, Vol. 76, No. 772, pp. 3665-3671 (2010)

Development of Flexible Displacement Measuring System Using Wire-type Encoder for Flexible Pneumatic Cylinder

Yasuko Matsui, Tetsuya Akagi* and Shujiro Dohta*

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, 2015; accepted November 9, 2015)

This study aims at developing a portable rehabilitation device which can be safe to use while holding it with human hands. In the previous study, the novel flexible pneumatic cylinder that can be used even if it is deformed has been developed. The flexible spherical actuator using two ring-shaped flexible pneumatic cylinders was proposed and tested as a portable rehabilitation device. The attitude control system using a tiny embedded controller, four small-sized quasi-servo valves and two accelerometers was also proposed and constructed. In the next step, it is necessary to recognize the relative position between both stages to prevent both hands from contacting each other. In this paper, a flexible pneumatic cylinder with wire-type linear encoder is proposed and tested. The compact sealing mechanism in the cylinder is also proposed. In addition, the measuring system using embedded controller is proposed and tested. As a result, it is confirmed that the developed measuring system can measure the displacement of the cylinder with the estimated speed of 1.4 m/s.

Keywords: flexible pneumatic cylinder; flexible spherical actuator; flexible displacement measuring system using wire-type encoder.