

ワイヤ式リニアポテンショメータを用いた 柔軟空気圧シリンダの位置計測システムの開発

松井 保子・赤木 徹也*・堂田 周治郎*・小林 亘*

岡山理科大学大学院工学研究科システム科学専攻

* 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、わが国は超高齢社会を迎えようとしている。このような状況において、高齢者が高齢者を介護せざるを得ない状況が生じており、高齢者自身の身体能力の維持など、生活の質 (Quality of Life) の向上を、高齢者自身が意識的に行う必要性に迫られている。このような背景のもと、介護や身体能力回復のためのリハビリ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⁾。リハビリ機器として本研究では、以前に2つのリング状に曲げた柔軟空気圧シリンダを直交させて構成した球面アクチュエータを試作し、両手で機器を保持しながらリハビリを行う可搬型上肢リハビリ機器を提案・試作し、その制御性能などについて検討してきた。しかし、この可搬型上肢リハビリ機器は、その柔軟な動きや可搬状態での動作などの特殊な仕様により、機器内の柔軟空気圧シリンダ変位を直接するセンサがなく、保持ステージなどの変位計測が困難であった。現状では、保持ステージ上の傾斜角を加速度センサで検出し、相対位置を求める手法を用いているが、動作に伴う加速度の検出や、広範囲の動きに対する検出範囲の条件分けなど正確な位置計測は困難である。また、家庭で使う機器であることを考慮すると、高額のセンサの使用はこれらの機器の普及の大きな妨げとなる。そこで、本論文では、柔軟空気圧シリンダの変位を計測するため、安価に構成可能なワイヤ式リニアポテンショメータを提案するとともに、組込みコントローラを用いた安価な計測システムを構築し、位置決め制御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1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し、それに伴いローラが押しら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⁾。

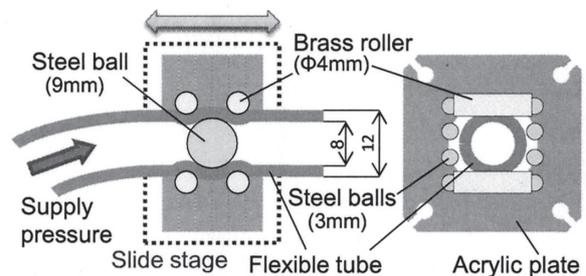


図1 柔軟空気圧シリンダの構造

3. 可搬型上肢リハビリ機器

図2に、以前の研究³⁾で開発した2本のリング状の柔軟空気圧シリンダを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り、患者が両手で装置を保持しながら動かすことで、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運動を与えるようなリハビリテーションを想定したものである。また、患者が、危険を感じた場合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。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。

図3に、シーケンス制御で機器を動かした様子と、加速度センサによるステージ角度の計測結果を示す。ここで、アクチュエータへの供給圧力は450kPaである。図3に示すように、患者を想定した使用者の手のみ動きを与えることで、腕のねじりなどの動作を加えることができ、上肢全体が動かされている様子がわかる。このように試作機器は他動運動を与えることは

できたものの、使用者の手が接触するなどの問題が生じている。この問題を解決するには、両ステージの相対的な位置を知る必要があるが、加速度センサによる傾斜角の計測だけでは、両保持ステージの相対位置の計測は困難である。そのため、ステージ間の距離を知る柔軟な変位センサが必要となる。

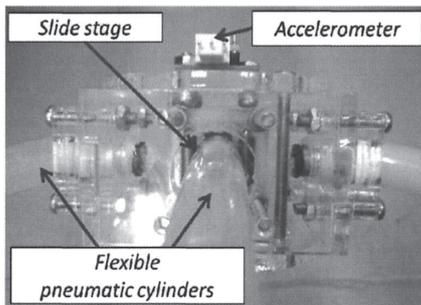
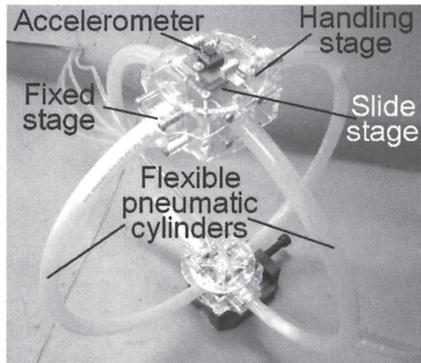


図2 柔軟球面アクチュエータの外観

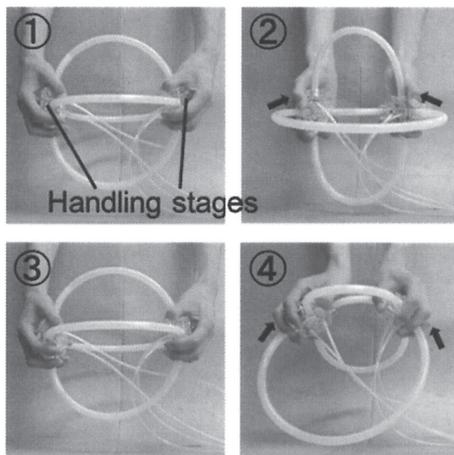


図3 シーケンス制御

4. ワイヤ式リニアエンコーダ

前述の問題を解決するため、機器内の柔軟空気圧シリンダ変位を直接計測する手法について検討した。図4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。図5に、シリンダヘッドの構造を示す。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6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、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。

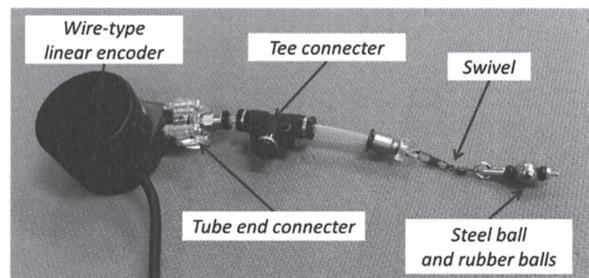


図4 ワイヤ式リニアエンコーダを用いた変位計測システムの構成

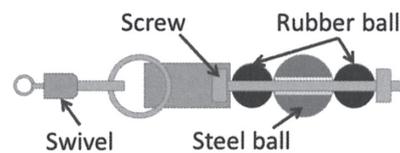


図5 シリンダヘッド

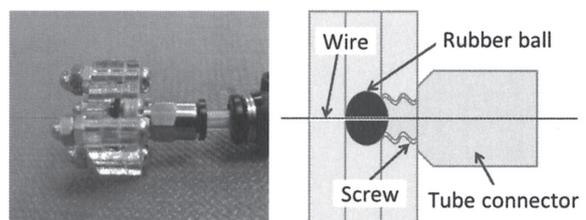


図6 チューブ端コネクタ

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。しかし、これらのカウンタボードはPC用のものは市場にあるものの、組込みコントローラへ

の搭載はあまりない。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ムの構成した。以下にそのアルゴリズムについて記す。図7はエンコーダから得られる出力信号のパターンである。まず、図7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。

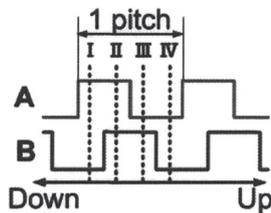


図7 A相・B相のパターン

表1 Up/Downカウンタのアルゴリズム

Pattern	Phase		Step1	Step2	Step3	
	A	B	Binary data	Replaced	Up	Down
I	H	L	2	3	-3→+1	-1
II	H	H	3	2	+1	-1
III	L	H	1	1	+1	-1
IV	L	L	0	0	+1	+3→-1

以上、試作した変位計測システムの有用性を確認するため、市販の変位センサである直動式のポテンショメータ(Midori Precision Co. Ltd., LP-50F)を用いて、エンコーダで計測した変位と実変位を比較した。図8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ョメータ(真値)の変位である。図8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。

しかし、ここで用いたワイヤ式リニアエンコーダは約5万円と高価であり、質量も185gと大きいという問題がある。さらに、プログラムによるUp/Downカウンタを構成したため、計測速度や誤差がサンプリング周期に依存することになる。そのため、複数個のセンサによる同時計測は現状の組込みコントローラでは困難である。そこで新たに、アナログ出力など安価な組込みコ

ントローラの使用に合った検出方法で、コントローラの計算の能力に依存することなく高速(0.01ms以下)での測定が可能で、さらに安価な柔軟変位センサの開発をめざす。

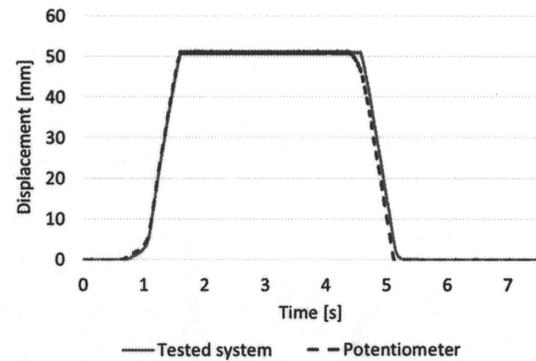


図8 リニアエンコーダによる変位計測実験結果

5. ワイヤ式リニアポテンショメータ

以上の仕様を考慮して新たに開発したワイヤ式リニアポテンショメータの外観を図9に示す。センサは、10回転分を計測できるヘリカルポテンショメータ(株BOURNS, 3590S-A26-104L)と、板バネによるワイヤ巻取り機構(直径22mm)、ステンレス製ワイヤ(直径0.4mm)、図6に示すチューブ端コネクタによって構成される。このワイヤ式リニアポテンショメータの最大計測長さは約0.7mであり、組込みコントローラに標準装備されている10bitのA/Dコンバータを用いた場合の検出分解能は0.74mmである。ワイヤを除くセンサのコストは約900円と非常に安価である。質量は45gであり、ワイヤ式リニアエンコーダと比べて軽くなり、可搬性が向上している。

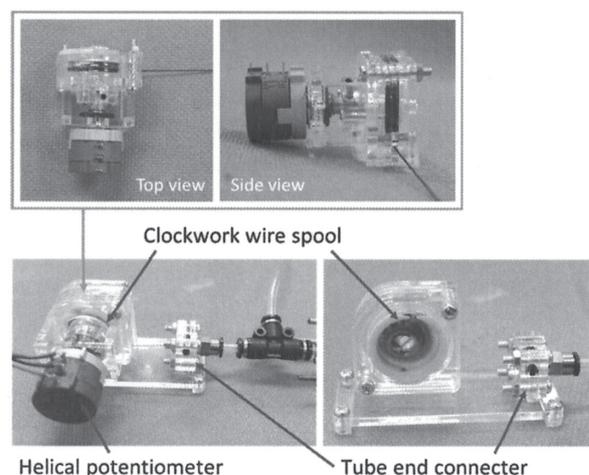


図9 ワイヤ式リニアポテンショメータの外観

表2は、前述のエンコーダ方式とポテンシオメータ方式を用いた場合の比較である。表2より、質量、コスト、応答速度が大きく改善された。分解能はポテンシオメータ方式を用いた方が低いが、外部接続の12bitのA/D変換器ICなどを使うことで、同程度の検出精度が実現できる。しかし、現状の検出精度でも、アクチュエータの仕様として1mm以下の位置決め制御は行えないため、十分な分解能である。

表2 試作センサの比較

方式	エンコーダ	ポテンシオメータ
質量[g]	185	45
コスト[円]	約50000	約900
応答速度[ms]	0.14	0.001以下
分解能[mm]	0.2	0.74 (10 bit A/D)

6. シリンダの位置決め制御

6-1 システムの構成

図10に、前述のセンサを内蔵した柔軟空気圧シリンダの外観を示し、図11に、その位置決め制御システムの構成を示す。システムは、2つのON/OFF弁と、試作センサを搭載した柔軟空気圧シリンダ、試作センサの逆側に設置されたワイヤ巻取り機構から構成される。このワイヤ巻き取り機構の構造は、試作ポテンシオメータからヘリカルポテンシオメータを取り外したものとほぼ同じである。制御の流れは以下の通りである。まずマイコンに内蔵されたA/D変換器を介して、リニアポテンシオメータからの出力電圧を取込む。そして、事前に設定された目標値との偏差を求め、その正負によって弁を操作し、ステージ変位を制御する。また、変位データはシリアル変換モジュール(株FTDI, FT234X)を介し、PCで記録する。ここで、制御則としてON/OFF制御を用い、変位などのシリアルデータの送信を含めた制御のサンプリング周期は1msである。

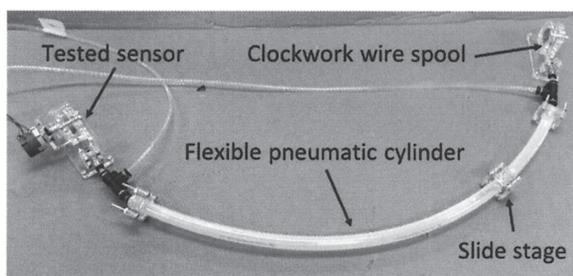


図10 ワイヤ式リニアポテンシオメータ内蔵型柔軟空気圧シリンダ

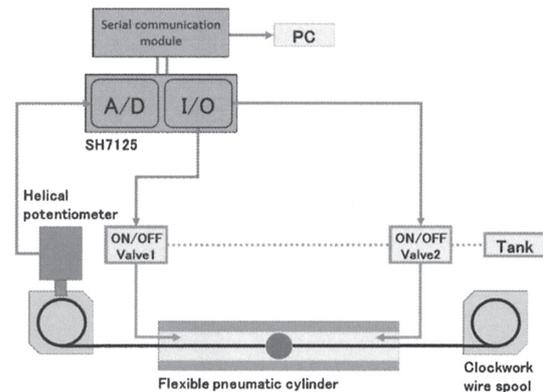


図11 位置決め制御システムの構成図

6-2 実験結果

図12に、ワイヤ式リニアポテンシオメータを用いたON/OFF制御によるシリンダの多点位置決め制御結果を示す。図中の破線は目標値、実線は試作センサによる変位を示す。図12より、ON/OFF制御則による振動は見られるが、変位のフィードバックによる位置決め制御が実現されており、シリンダ変位も目標値に追従できるなど、試作センサの有効性が確認できる。図13に、目標値として正弦波(振幅150mm、オフセット200mm、周波数0.1Hz)を与えた場合の応答結果を示す。図13より、シリンダ変位が目標値によく追従していることがわかる。

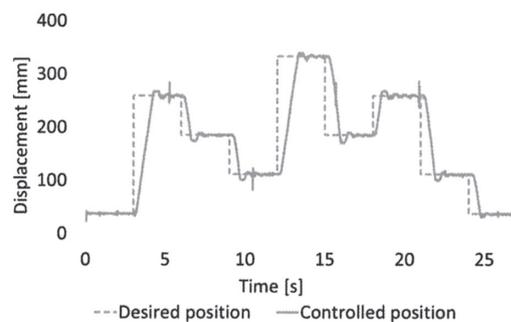


図12 応答結果(多点位置決め制御)

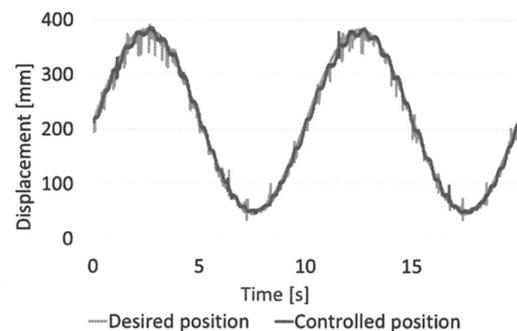


図13 応答結果(正弦波)

また、図14に示すように、柔軟空気圧シリンダが大きく湾曲した状態でも、同様に制御できることを確認している。

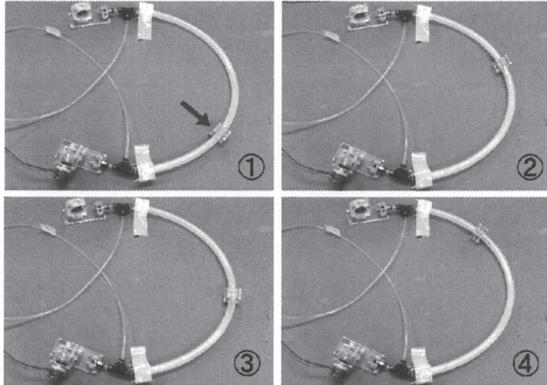


図 1 4 湾曲時の動作

7. 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提案、試作した。しかし、ワイヤ式リニアエンコーダは約5万円と高価で、質量も185gと大きいという問題がある。また、複数個のセンサによる同時計測も困難である。そこで新たに、ヘリカルポテンシオメータとワイヤ巻取り機構を用いて、軽量・安価なワイヤ式リニアポテンシオメータを提案・試作し、柔軟空気圧シリンダと組み合わせた変位計測システムを構築した。また、このシステムを用いたシリンダの位置決め制御が実現でき、その有用性を確認した。この試作センサを球面アクチュエータに搭載することで、2つの把持ステージの相対位置を推定し、姿勢角制御を行うことが可能であると考えられる。

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 and C. Liu: Development of Portable Rehabilitation Device Using Flexible Spherical Actuator and Embedded Controller, *Lecture Notes in Electrical Engineering 293*, Springer, Vol.1, 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) 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)

7) T. Akagi, S. Dohta: Development of a Rodless Type Flexible Pneumatic Cylinder and Its Application, *Transactions on Robotics and Automation of the JSME (C)*, Vol. 73, No. 731, pp.2108-2114 (2007)

8) Y. Matsui, T. Akagi and S. Dohta: Development of Flexible Displacement Measuring System Using Wire-type Linear Encoder for Flexible Spherical Actuator, *Journal Procedia Computer Science* 76, pp. 113-118 (2015)

Development of Displacement Measuring System of Flexible Pneumatic Cylinder Using Wire-type Linear Potentiometer

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

Doctor's Program, 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)

Rehabilitation devices help to recover physical ability of patients for keeping Quality of Life. This study aims to develop a portable rehabilitation device which can be safe to use while holding it. In the previous study, the flexible spherical actuator using two ring-shaped flexible pneumatic cylinders was proposed and tested. In this paper, a flexible pneumatic cylinder with built-in wire-type linear potentiometer was proposed and tested. As a result, it is confirmed that the tested potentiometer can measure the long distance of 0.7 m with resolution of 0.74 mm. The position control using the tested cylinder is realized.

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