

柔軟球面アクチュエータを用いた可搬型リハビリ機器の試作と制御

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

(2014年9月30日受付、2014年11月6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⁾。本研究では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す。具体的には、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改良し、それを用いて周方向に湾曲できる簡易な可搬型上肢リハビリテーション機器の開発をめざす。

本論文では、改良型球面アクチュエータや、それを用いた可搬型上肢リハビリ機器の構造、動作原理、基本特性、および制御実験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、片側の圧力室を印加すると内部の鋼球が押し、それに伴いローラが押し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⁾。

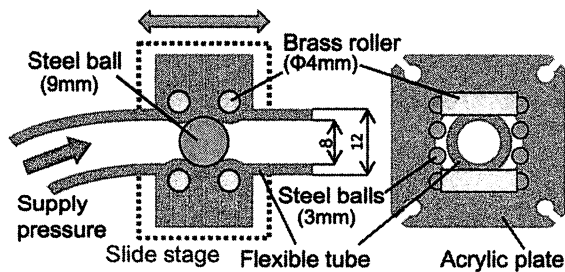


図1 柔軟空気圧シリンダの構造

3. 設置型球面アクチュエータ

図2に以前開発した設置型球面アクチュエータの概観を示す³⁾。アクチュエータはリング状に曲げた柔軟チューブ(湾曲半径80mm)2つを90度で交差させ固定している。また、スライドステージを下側の固定台に固定し、シリンダの両端(計4ヶ所)から空気を供給することで湾曲動作を行う。上側の固定台にシリンダ両端を同一平面上で固定しているため、シリンダを加圧すると上側の固定台自体が駆動する。下側のスライドステージは、チューブが互いに接触しないように10mmずらして固定している。アクチュエータのサイズは、幅170mm、高さ160mmで、全質量は300gである。

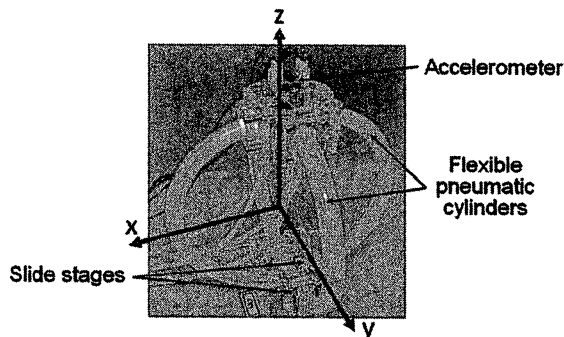


図2 設置型球面アクチュエータの概観

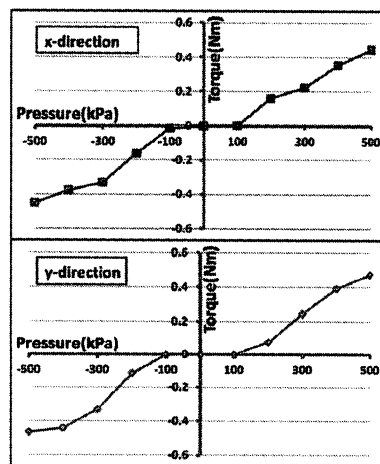


図3 発生トルク特性

図3に球面アクチュエータの印加圧力と発生トルクとの関係を示す。発生トルクは、それぞれのシリンダの円中心からワイヤ固定位置までの距離(X方向は80mm、Y方向は85mm)をもとに計算した。図3より、X方向の最大発生トルクは0.45Nm、Y方向は0.47Nmであり、0～±100kPaの入力圧力の範囲で、前述のロッドレス型柔軟空気圧シリンダの摩擦によるデッドゾーンが存在することがわかる。

4. 可搬型上肢リハビリ機器

4-1 構造と動作原理

図4に、従来の設置型球面アクチュエータを用いて試作した可搬型上肢リハビリ機器を示す。これは、肩や腕のリハビリテーションを目的としており、患者が両手で装置を保持して使用する(図5)。リハビリテーション機器に適用するためには、動作範囲とアクチュエータの発生トルクを大きくする必要がある。そこで、リング状柔軟空気圧シリンダの直径を160mmから260mmに変更した。また、前述のアクチュエータと異なり、図4下に示すように、2つのスライドステージを片側のベースに接続せず、保持ステージ上に固定している。これは装置の対称性を考慮したためである。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する。

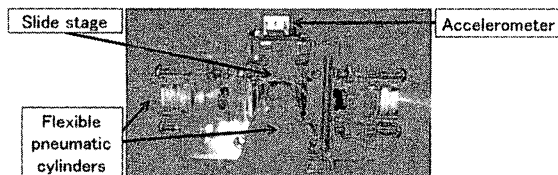
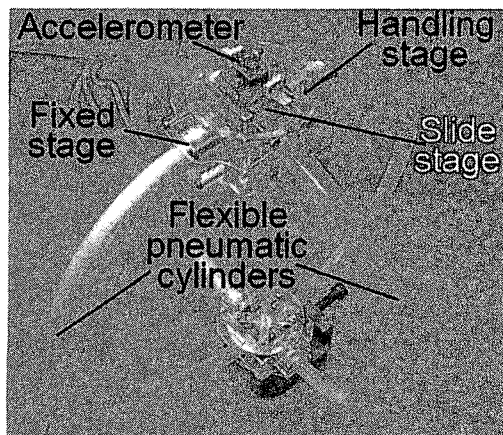


図4 可搬型上肢リハビリ機器の外観

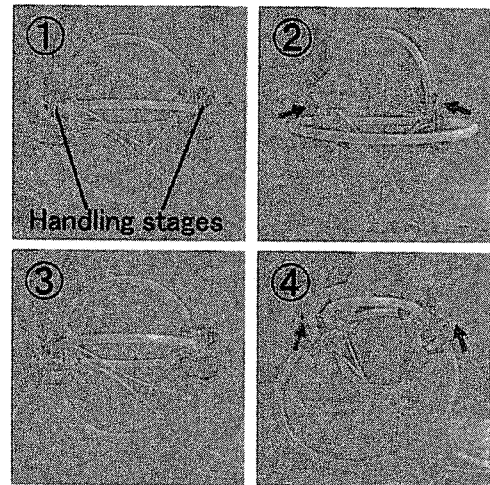


図5 動作の様子

4-2 角度変化

ここで、各保持ステージでの角度変化 θ 、 ψ 、 ϕ (図6参照)は以下の式で定義される⁴⁾。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。

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

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

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

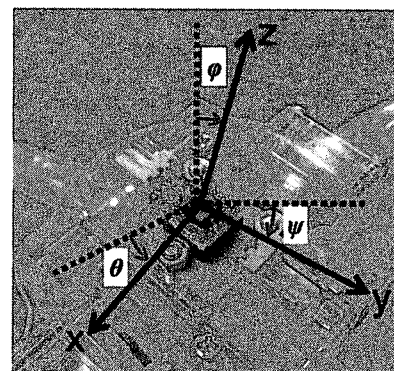


図6 角度変化

4-3 マスタースレーブ制御システム

図7に可搬型上肢リハビリ機器の姿勢制御システムの外観、図8にその構成を示す。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⁵⁾と制御器となるマイクロコンピュータ(ルネサステクノロジ 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。制御方法は以下の通りである。シーケンスの目標角データ、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から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偏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。

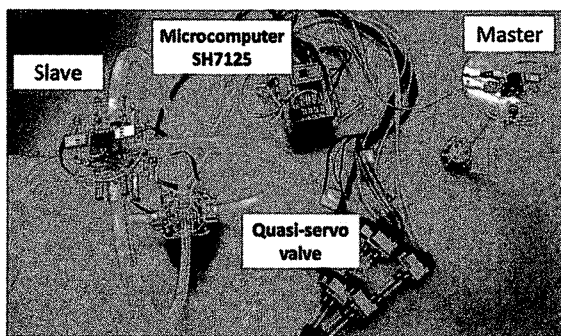


図7 システムの外観

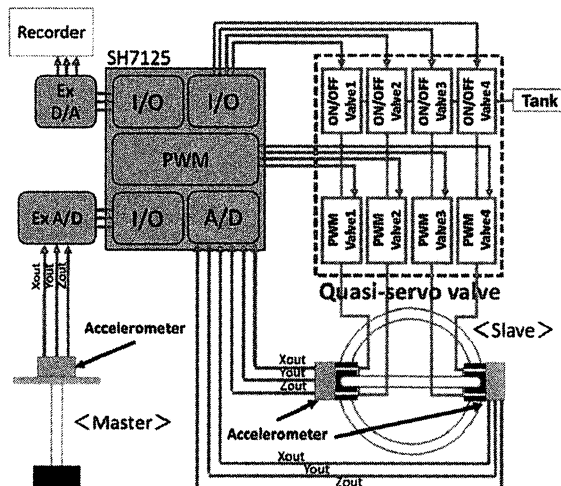


図8 システム構成図

5. 制御実験

5-1 シーケンス制御

図9にシーケンス制御における2つのステージ間の角度 θ 、 ψ の時間変化を示す。この動作は、図5に示す動作で角度を測定した結果である。実験は図8に示す制御システムを用いて行い、X方向、Y方向ともに0.8秒ごとに2つのステージ間の角度が変化するように動作させ

た。図9より、ステージ間の角度が計測できていることが確認できる。

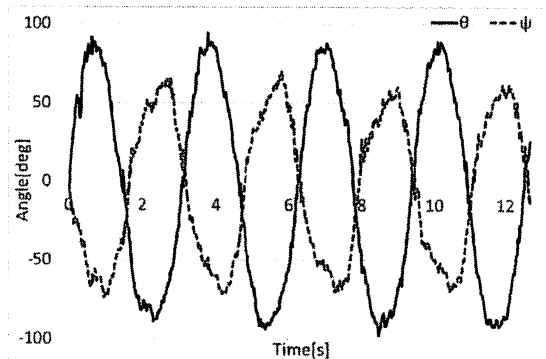


図9 シーケンス制御

5-2 目標値追従制御

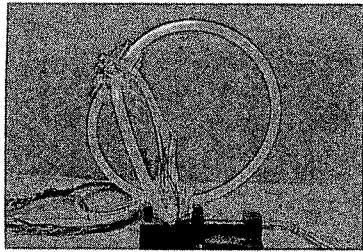
図8に示す制御システムを用いて、目標値追従制御を行った。目標値として式(4)に示すX方向、Y方向交互に目標角を変えるX-Y独立動作と、式(5)・(6)に示す2つの保持ステージに円軌道を生じるように角度変化を与えた。ここで、 θ_r 、 φ_r は目標姿勢角である。制御にはP制御則を用いた。

$$\begin{array}{lll}
 0s < t \leq 4s & \theta_r = 0^\circ & \varphi_r = 0^\circ \\
 4s < t \leq 8s & \theta_r = 45^\circ & \varphi_r = 0^\circ \\
 8s < t \leq 12s & \theta_r = 0^\circ & \varphi_r = 0^\circ \\
 12s < t \leq 16s & \theta_r = -45^\circ & \varphi_r = 0^\circ \\
 16s < t \leq 20s & \theta_r = 0^\circ & \varphi_r = 0^\circ \\
 20s < t \leq 24s & \theta_r = 0^\circ & \varphi_r = 45^\circ \\
 24s < t \leq 28s & \theta_r = 0^\circ & \varphi_r = 0^\circ \\
 28s < t \leq 32s & \theta_r = 0^\circ & \varphi_r = -45^\circ
 \end{array} \quad (4)$$

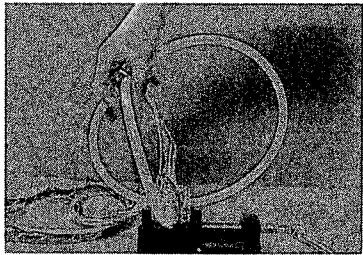
$$\theta_r = 55 \sin(0.67t) \quad \dots (5)$$

$$\varphi_r = 55 \sin(0.67t - 1.55) \quad \dots (6)$$

実験は、手を置かない場合と手を置いた場合の2つの環境で行った(図10参照)。図11、12にその実験結果を示す。図11、12の破線は目標角を示し、実線は実験結果を示す。また、各線の色の違いは測定角度の違いを示す。両図より、多少振動的だが、目標値に追従できていることが確認できる。手を置いた場合、手を置いていない場合に比べ、振動が少なくなっている。また、X-Y独立動作において手を置いた場合、ステージの質量増加のため、慣性力が大きくなり、大きなオーバーシュートが生じていることも確認できる。

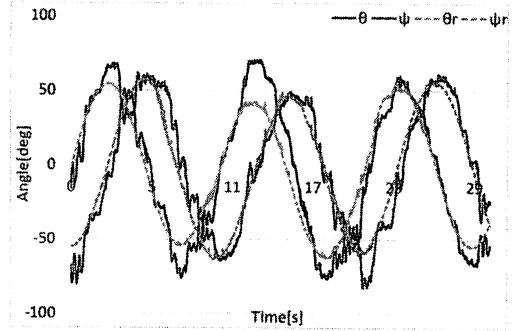


(a)手を置かない場合

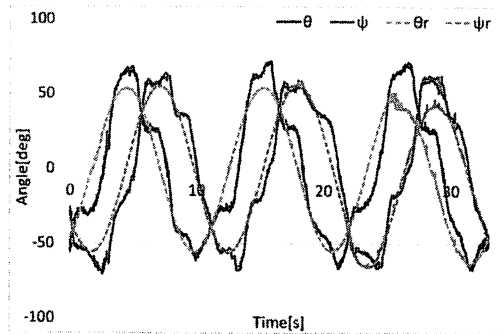


(b)手を置いた場合

図10 実験の様子(目標値追従制御)

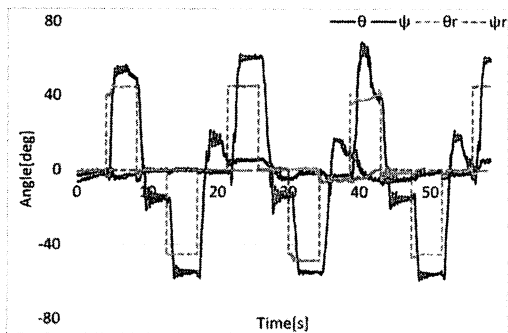


(a)手を置かない場合

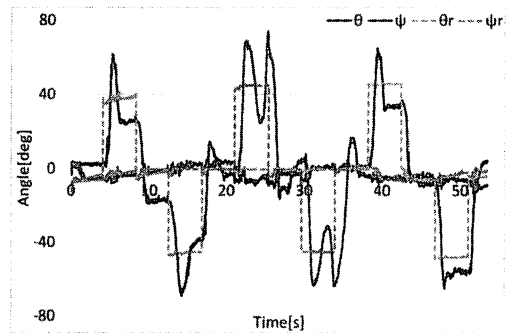


(b)手を置いた場合

図12 円動作(目標値追従制御)



(a)手を置かない場合

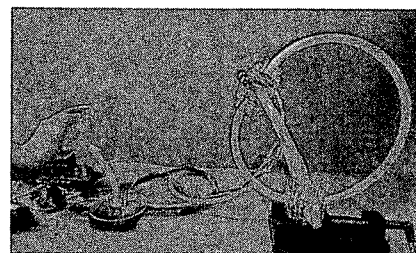


(b)手を置いた場合

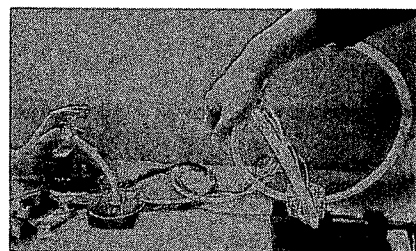
図11 X-Y独立動作(目標値追従制御)

5-3 マスタースレーブ制御

次に、目標値追従制御と同様の動作をマスター機器から与えることによって、マスタースレーブ制御を行った。図13に実験の様子、図14、15に実験の結果を示す。図中の破線および実線は依然と同じである。図14、15より、目標値追従制御と同様の傾向を示した。

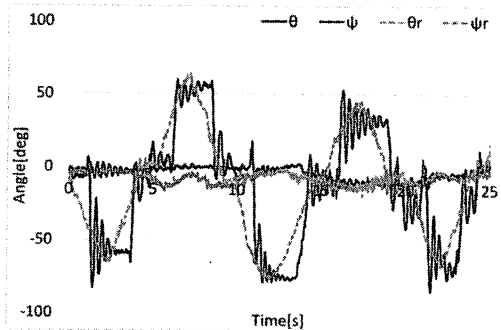


(a)手を置かない場合

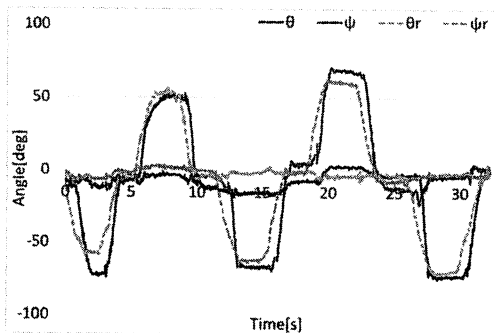


(b)手を置いた場合

図13 実験の様子(マスタースレーブ制御)

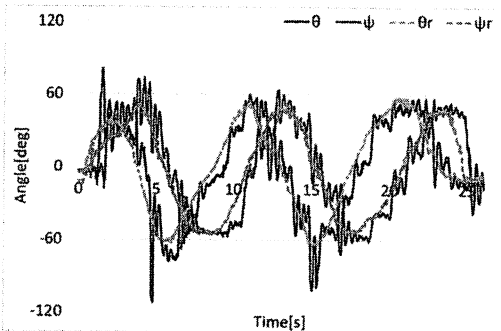


(a)手を置かない場合

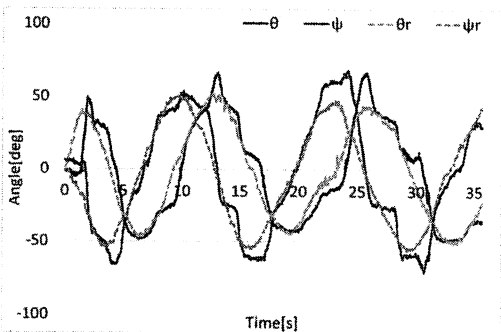


(b)手を置いた場合

図 1 4 X-Y独立動作(マスタースレーブ制御)



(a)手を置かない場合



(b)手を置いた場合

図 1 5 円動作(マスタースレーブ制御)

6. 結言

可搬型上肢リハビリ機器を開発するため、従来の設置型球面アクチュエータを大きくし、さらに、軽量化や対称性を考慮した機器を提案、試作した。

また、2つの保持ステージの角度を計測するために加速度センサを2つ用いた姿勢角制御システムを試作し、シーケンス制御、目標値追従制御、マスタースレーブ制御を行った。その結果、多少振動的ではあるが、目標値に追従できていることを確認した。

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) Christopher J. F.: Using an Accelerometer for Inclination Sensing. *Analog Devices Application Note AN-1027*, pp. 1-8 (2010)
- 5) 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 and Control of Portable Rehabilitation Device Using Flexible Spherical Actuator

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, 2014; accepted November 6, 2014)

This study aims at developing a portable rehabilitation device which can be safe to use during holding it. In our previous study, a novel flexible pneumatic cylinder that can be used even if it is deformed by external force has been developed. In this paper, a portable rehabilitation device using the flexible spherical actuator that consists of two ring-shaped flexible pneumatic cylinders is proposed and tested. The low-cost control system using four small-sized quasi-servo valves and an embedded controller is also developed. The spherical actuator is also improved so as to apply to the portable rehabilitation device. In addition, the attitude measuring system for attitude control of the device using an embedded controller and two accelerometers is constructed and tested. The attitude control of the device using the measuring system is executed. As a result, the portable rehabilitation device that can give the rehabilitation motions to patients with attitude control can be realized.

Keywords: portable rehabilitation device; flexible pneumatic cylinder; flexible spherical actuator; embedded controller; low cost.