

## 柔軟空気圧シリンダを用いた球面アクチュエータの改良

安藤 文華・堂田 周治郎\*・赤木 徹也\*・劉 長江

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

(2012年9月28日受付、2012年11月1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<sup>(1)</sup>。我々は、これまで人体に装着可能な柔軟空気圧シリンダを開発してきた<sup>(2)</sup>。本研究ではそれを利用した、手首を含むリハビリテーション機器の開発<sup>(3)</sup>をめざしている。前報<sup>(4)</sup>では、自由度の高い手首等の他動運動を行うために球面アクチュエータを用いて周方向に湾曲できる簡易な他動運動型リハビリ機器の開発をめざし、球面アクチュエータを試作した。すなわち、柔軟空気圧シリンダ2本を用いて新しいタイプの球面アクチュエータを試作し、基本特性やマスタースレーブ制御実験を行った。しかし、試作アクチュエータには、振動が大きい、応答が遅いという問題があった。そこで本報告では、アクチュエータの振動を抑制するためにスライドステージ部を工夫・改良し、アクチュエータに適度な剛性を持たせるようにしたことについて述べる。

### 2. ロッドレス型柔軟空気圧シリンダ

我々は2種類の新しいロッドレス型柔軟空気圧シリンダを開発している<sup>(2)</sup>。図1の(a)(b)にシリンダの構造を示す。(a)はシングルタイプ、(b)はダブルタイプである。どちらのタイプも似たような構成になっており、動作原理は同じである。

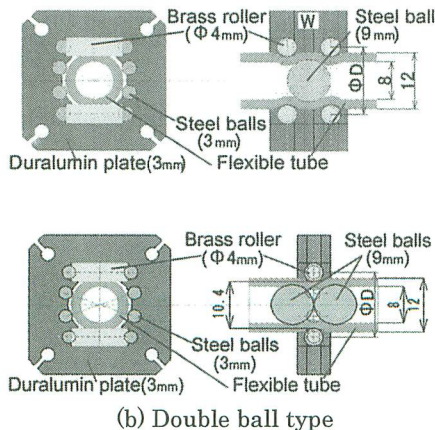


Fig.1 Construction of flexible pneumatic cylinder

これらの特性の違いを以下に示す。シングルボールタイプは摩擦力が少ないという利点を有するが、柔軟性は低い。一方、ダブルボールタイプは高い柔軟性があるが、摩擦力は大きい。シングルボールタイプのシリンダは、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スチールボール、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。スチールボールは、ボールの両サイドから真鍮製ローラの2つのペアによって挟まれている。ロッドレス型の柔軟空気シリンダの動作原理を以下に示す。動作原理は片側の圧力室を印加すると内部のスチールボールが押しされ、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。我々は、それぞれの中心距離Dと設計パラメータとして2つのペアのローラ間の距離Wを用いた、試作ロッドレス型柔軟空気圧シリンダの最低駆動圧力を調べた。その結果、最低駆動圧力は120kpaであることがわかった。

### 3. 従来の球面アクチュエータの概要と問題点

従来の球面アクチュエータ<sup>(4),(5)</sup>の概観を図2に示す。球面アクチュエータはリング状に曲げた2つの柔軟空気圧シリンダのチューブ(チューブ中心間直径φ148mm)を90度で交差させ、固定台に固定している。そして、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。

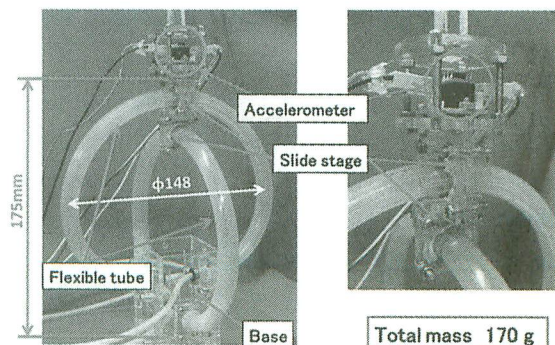


Fig.2 View of previous spherical actuator

それぞれのチューブに取り付けたダブルボールタイプのスライドステージを直角に結合することで2つのスライドステージが連動して動き、2自由度の湾曲動作が可能となる。アクチュエータのサイズは、幅160mm、高さ175mmで、全質量は170gと軽量である。このサイズは、使用したチューブの柔軟性により、最小のサイズとなっている。試作したアクチュエータはシリンダの円中心を基準に240度の範囲で湾曲する。

前回の球面アクチュエータは、姿勢制御において容易に振動が発生するという問題があった。これは、スライドステージの剛性が低いため生じるものである。また、X、Y方向の発生トルクの違いは、スライドステージにおける差によって生じ、不安定な動作を引き起こしてしまう。それゆえに、スライドステージの交点で適度な剛性をもつアクチュエータの改良が必要とされる。

#### 4. 改良した球面アクチュエータ

##### 4-1 構造と改良点

前述の球面アクチュエータはスライドステージ部分で結合されているため、2つのリング状シリンダにずれが生じ、さらに力を発生するスライドステージ部にずれがあるため発生トルクがX、Y方向により異なるという問題を持っていた。

そこで、球面アクチュエータの改良として、図3に示すように上下逆のような構造にし、シリンダ両端部を上面に、同一平面上に配置し、さらに互いのスライドステージを土台部でずれた位置に配置し、2つチューブを交差させることで段差を小さくした。以上の方法によりアクチュエータに生じていた振動の抑制が可能になると考えた。

また、従来のもより剛性を高くするため、シングルボールタイプのスライドステージを用いた。

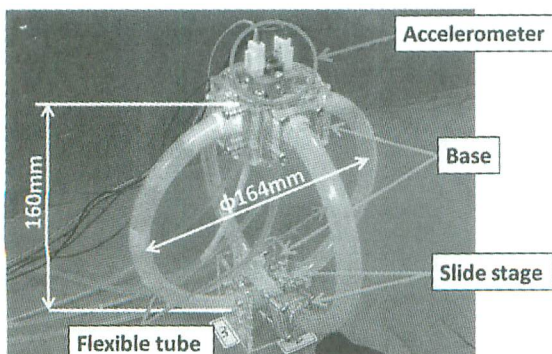


Fig.3 View of improved spherical actuator

##### 4-2 発生トルクの特性

図4に改良した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。測定方法は、アクチュエータの一定高さの位置にワイヤを固定し、加圧した際の引っ張り力をフォースゲージを用いて計測する。測定は±X、±Y方向の4方向で行う。そのトルクは、発生力と改良したアクチュエータの半径から計算される。つまり、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85mm、Y方向は80mmをもとに計算した。

図4より、X方向の最大発生トルクは0.45Nm、Y方向は0.47Nmであることがわかる。この結果、従来の最大発生トルクであるX方向0.36Nm、Y方向0.5Nmの場合に比べて、X、Y方向の値の差が減少した。

改良したアクチュエータも従来のもと同様に、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。加えて、発生トルク特性は従来に比べて線形ではない。これは、土台に固定したスライドステージの向かい側に補足のスライダを加えたことで、シリンダとスライドステージの間の摩擦が大きくなることによって生じる。

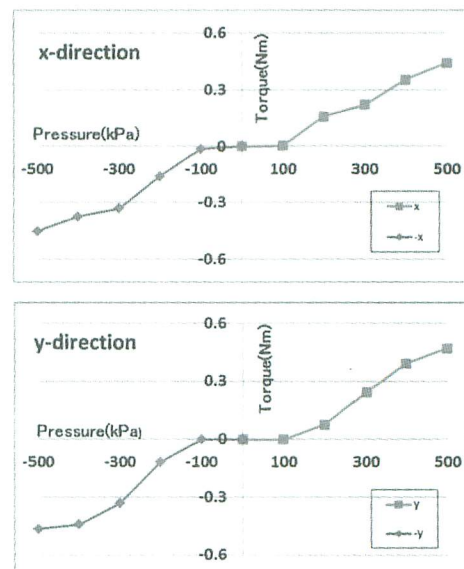


Fig.4 Generated torque of improved actuator

#### 5. 制御システムの構成と制御実験

##### 5-1 優れた組み込み制御装置を用いたマスタースレーブ制御システム

図5に、改良した球面アクチュエータと従来のシステムより優れた組み込み制御装置を用いた、マスタースレーブ制御システムの回路図を示す。図6に、試作した制御システムの外観を示す。従来に比べて、優れた機能をもつマイクロコンピュータ(株式会社ルネサステク

ノロジ社製, SH/7125)を使用した。その結果、制御のサンプリング周期は、30msから2.3msに改善された。

図5, 6に示すように、スレーブ側は球面アクチュエータ、加速度センサ、2つの柔軟空気圧シリンダを駆動するための4つの小型疑似サーボ弁、制御器となるマイクロコンピュータから構成される。マスター側は、図6に示すように、直径100mmの円板に目標値入力用の加速度センサを取り付けたものである。

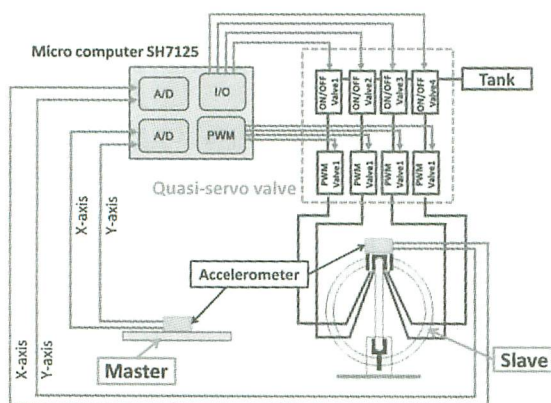


Fig.5 Schematic diagram of control system

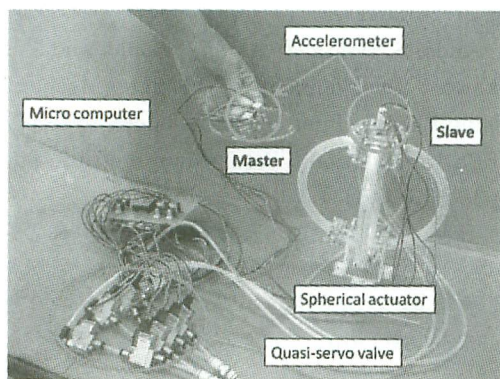


Fig.6 View of master-slave control system

制御方法は、マスター側、スレーブ側の加速度センサの出力電圧の偏差をもとに、制御則によって、疑似サーボ弁を駆動し、球面アクチュエータの姿勢を制御する。制御則はPD制御則である。なお、疑似サーボ弁は著者らが開発したものであり、流れの方向を切り換えるオンオフ弁(KOGANEI社製, G010E1)と流路面積を変えるPWM弁(排気ポートを塞いだ弁)を結合して開口面積が調整可能な2位置3ポート弁を構成したものである<sup>(6)</sup>。加えて、疑似サーボ弁において、それぞれのPWM制御弁は、PWMポートのチャンネルが増加することによって独立して制御される。この方法を用いることで、シリンダの各空間の流量を独立して制御することができる。これは、空気圧アクチュエータの動特性が改良

に役立つ可能性がある。なぜなら、片側の圧力室に印加している際、駆動しているシリンダの向かい側の圧力室内の空気が、シリンダの駆動の妨げになるためである。また、湾曲角のような実験結果は、マイコンのメモリーで保存するのは難しいので、SPI通信タイプの自作の外部D/A変換器(Linear Technology LTC1660)を介して、レコーダ(GRAPHTEC, CORP midi LOGGER TYPE GL200)で計測を行っている。

### 5-2 マスタースレーブ制御の実験結果

マスター側の湾曲方向角をほぼ一定の周期で回転するようにステージを動かす、PD制御によりマスタースレーブ制御実験を行った。疑似サーボ弁のPWM周期は10msである。制御実験の動作風景を図7に示す。これを見ると、マスターの動きにスレーブ側が追従していることがわかる。

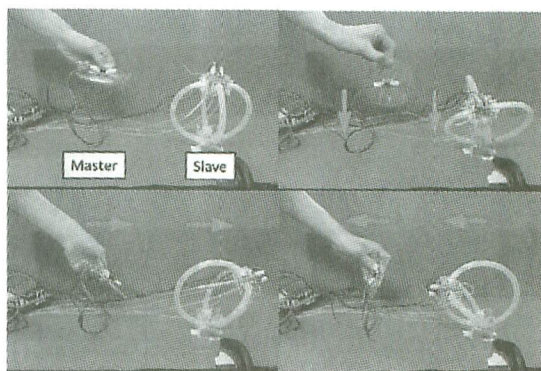


Fig.7 View of master-slave control

図8(a)(b)に、PD制御則による改良アクチュエータの湾曲角の過渡応答を示す。図の(a)(b)ともに、上の図はX方向、下の図はY方向の湾曲角の応答結果を示す。破線はマスター、実線はスレーブを示す。図の(a)は、従来のPD制御則を用いた応答結果を示す。図の(b)は、今回試みた排気を考慮したPD制御結果を示す。これは、排気時の工夫として、シリンダの排気圧力室の入力デューティ比を、PD制御則によって計算した値の2倍の値を与える方法である。加えて、図8(a)(b)を比較すると、排気流量を多くすることで湾曲角の応答がより早くなっていることがわかる。特に、湾曲角の追従誤差に比べて、Y方向の湾曲角の応答において、誤差の標準偏差が22.6度から18.4度に減少させることができた。提案した排気流量を多くする方法を用いることで、制御システムの動特性を改善できたことを意味している。

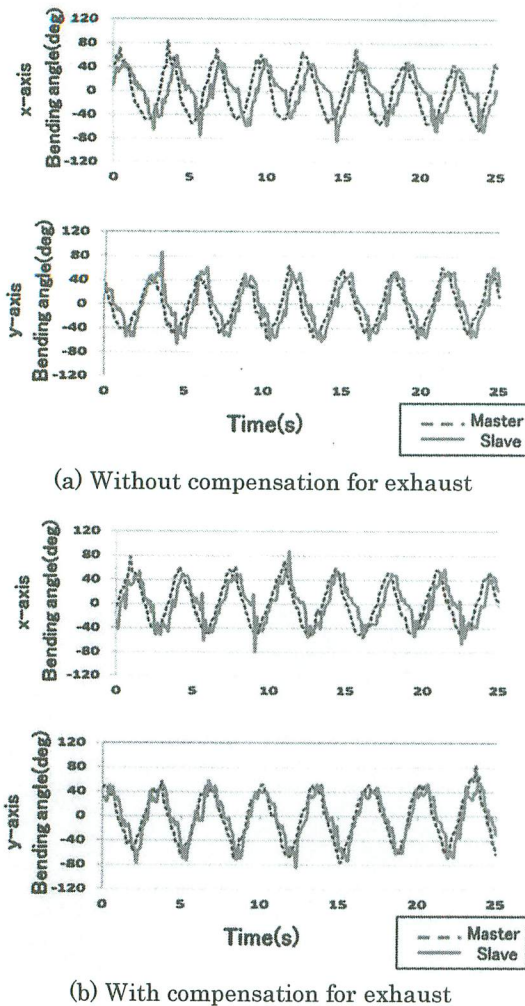


Fig.8 Results using the improved actuator

## 6. 結 言

- 1) 2つの柔軟空気圧シリンダで構成されたシンプルな構造の球面アクチュエータの制御性能を改善するために、2つの柔軟空気圧シリンダの形状を変えることで、改良アクチュエータを提案し、試作した。その結果、不安定だったX方向とY方向との発生トルクの特性が改善された。
- 2) 従来のものに比べ優れた機能を有するマイクロコンピュータ (SH7125) を用いたマスタースレーブ制御システムを開発した。その結果、制御のサンプリング周期を30msから3.2msに減らすことができた。また、このマイコンの採用により、より複雑な制御則を試みる準備もできた。
- 3) 改良アクチュエータと改良制御装置を用いて制御実験を行った。その結果、アクチュエータの追従制御性能を改善することができた。さらに、動特性の改善のために疑似サーボ弁の排気流量を多くする方法を提案し、制御実験を行った。その結果、追従制

御誤差の標準偏差は22.6度から18.4度に減らすことができた。

なお、高性能マイコンを用いた外乱オブザーバなどによる制御方法の検討や制御性能の改善は今後の課題である。

## 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, pp607-613(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, pp2108-2114(2007)
- 3) 堂田周治郎・赤木徹也・藤川敬広：柔軟空気圧シリンダを用いたロボットアームの制御, *第28回日本ロボット学会学術講演会講演論文集*, 1P3-5, pp1-3(2010)
- 4) 安藤文華・堂田周治郎・赤木徹也・劉 長江：柔軟空気圧シリンダを用いた球面アクチュエータの試作, *岡山理科大学紀要 第47号A (自然科学)*, pp. 21-26(2011)
- 5) A. Ando, S. Dohta, T. Akagi, F. Zhao and T. Fujikawa : Development of Flexible Mechanism Using Flexible Pneumatic Cylinders, *Proc. of 8th JFPS International Symposium on Fluid power*, pp364-371 (2011)
- 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, pp3665-3671(2010)

# Improvement of a Spherical Actuator Using Flexible Pneumatic Cylinder

Ayaka ANDO, Shujiro DOHTA\*, Tetsuya AKAGI\* and Changjiang LIU

*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 28, 2012; accepted November 1, 2012)

A wearable actuator needs to be flexible so as not to injure the human body. The purpose of our study is to develop a flexible and lightweight actuator which can be safe enough to be attached to the human body, and to apply it to a flexible mechanism and rehabilitation device. New types of flexible pneumatic actuator that can be used even if the actuator is deformed by external force have been developed in our previous studies. In this paper, we propose and test a flexible spherical actuator using the novel flexible pneumatic cylinders. The simple spherical actuator consists of two ring-shaped flexible pneumatic cylinders. They are intersected at right angle and are fixed on the base. The low-cost control system using the tested quasi-servo valves and an embedded controller (micro-computer) was also developed. The spherical actuator was also improved so as to suppress the vibration in control and to increase the stiffness of the actuator by changing the structure of the actuator. In addition, by using the quasi-servo valve controlled by the superior embedded controller, the flow rate of supply and exhaust could be controlled independently. As a result, the control performance could be improved using the improved spherical actuator and the quasi-servo valves controlled by the embedded controller with compensational method for exhaust.

**Keywords:** spherical actuator; flexible pneumatic cylinder; quasi-servo valve; embedded controller.