

## 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

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

(2011年9月29日受付、2011年11月7日受理)

### 1. 緒言

現在、少子高齢化の進行に伴い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進められている<sup>1)</sup>。著者らはこれまでにソフトアクチュエータとして、柔軟チューブをシリンダに用いた柔軟空気圧シリンダの開発<sup>2)</sup>や柔軟ロボットアームへの応用<sup>3),4)</sup>などを行ってきた。本研究では柔軟空気圧シリンダを利用した手首を含むリハビリテーション機器<sup>5)</sup>の開発をめざす。具体的に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す。

本論文では、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試作した球面アクチュエータの構造、動作原理、基本特性について述べる。さらに、試作アクチュエータ、加速度センサ、疑似サーボ弁、マイクロコンピュータを用いて構成したコンパクトな湾曲制御システムや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

著者らが開発したロッドレス型柔軟空気圧シリンダ(ダブルタイプ)<sup>2)</sup>の構造と外観写真をそれぞれ図1、図2に示す。これはシリンダに相当する柔軟チューブ(株式会社SMC TUS1208)とシリンダヘッドに相当する直径9mmの2個の鋼球、アクリル樹脂製のスライドステージから構成される。また、スライドステージには直径4mmの真鍮製ローラがチューブを中心方向に押し付けるように配置されている。ローラの両端は直径3mmの鋼球で支えられ、ステージにはチューブを保持する役割を持つ直径3mmの鋼球が4個設けられている。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されチューブを変形しながらスライドステージが動くというものである。ここで、シリンダ内のシールは、チューブ自身がパッキンの役割を果たすことで行われる。また、内部の鋼球は、シリンダチューブが湾曲しても直線動作と同じようにステージに動力を伝えることができる。このアクチュエータは通常のロッドレス型シリンダと同様に摩擦が大きく最低駆動圧力は130kPaである。

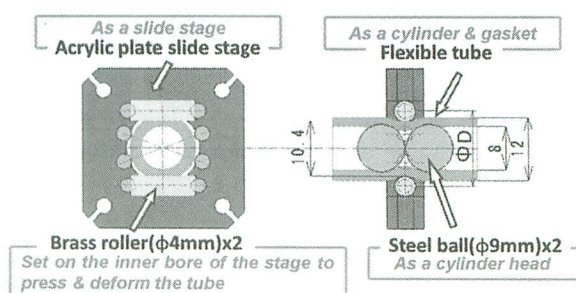


Fig.1 Construction of flexible pneumatic cylinder

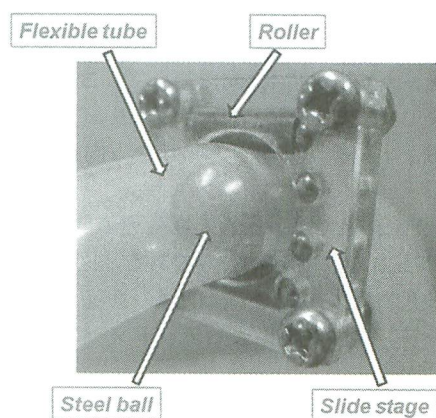


Fig.2 View of flexible pneumatic cylinder

### 3. 球面アクチュエータ

試作した球面アクチュエータの外観を図3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90deg.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。それぞれのチューブに取り付けた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。これは柔軟空気圧シリンダが動作中に湾曲しても動くことができるといった特徴を最大限に生かしたアクチュエータの構造である。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。試作したアクチュエータはシリンダの円中心を基準に垂直方向を0deg.として $\pm 120\text{deg.}$ つまり、 $240\text{deg.}$ の範囲で湾曲する。

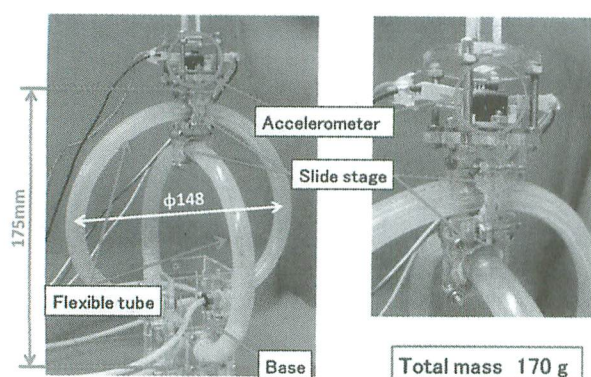


Fig.3 View of tested spherical actuator

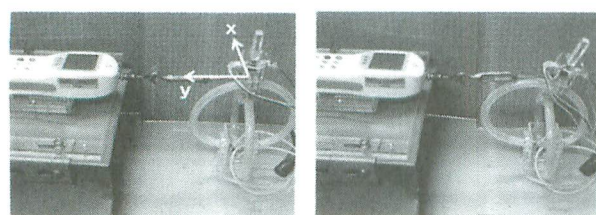
#### 4. 基本特性

##### 4-1 発生力特性

図4(a), (b)に球面アクチュエータの発生力測定の様子を示す。図(a)は、印加圧力が0kPaの場合で、図(b)は印加圧力が300kPaの場合である。測定方法は、アクチュエータの一定高さにワイヤを固定し、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 $\pm x$ ,  $\pm y$ 方向の4方向で行う。ここで、各シリンダが直交した初期状態で、下側のシリンダと平行な方向をx軸、上側のシリンダと平行な方向をy軸と定義する。

図5に測定結果である圧力と発生力の関係を示す。横軸は印加圧力で縦軸が発生力である。図より、 $0 \sim \pm 100\text{kPa}$ 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。

図より、x方向の最大発生力は3.5N、y方向は7Nである。このように、x方向とy方向で最大発生力が異なるのは、図4を見てわかるように、下側シリンダと上側シリンダのワイヤ固定位置を同じにして発生力を測定したためである。そこで、次節で、これをトルクに換算して比較を行う。



(a) Pressure: 0kPa (b) Pressure: 300kPa

Fig.4 Experimental setup

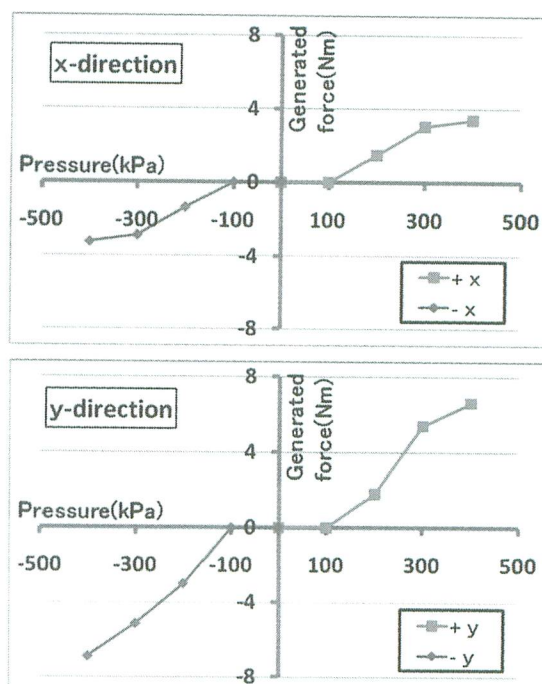


Fig.5 Measured generated force

##### 4-2 トルク特性

図5の結果から発生トルクに換算したグラフを図6に示す。すなわち、x方向は下側シリンダの円中心からワイヤ固定位置までの距離105mmを、y方向は上側シリンダの円中心からワイヤ固定位置までの距離75mmをもとにトルクを計算した。

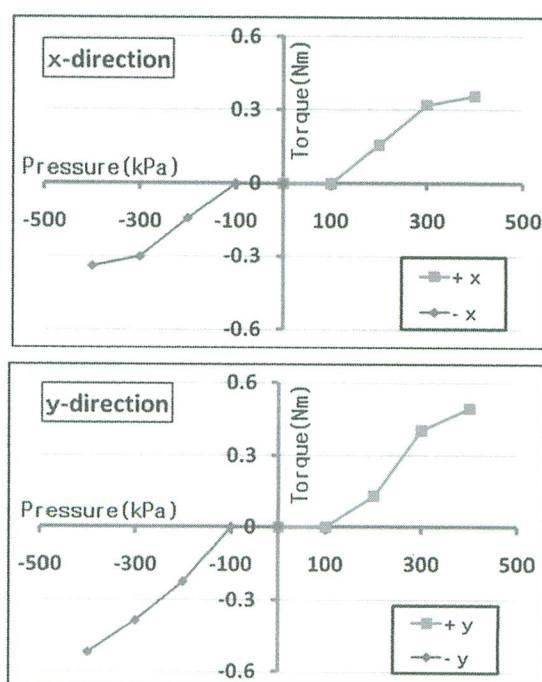


Fig.6 Measured generated torque



この結果、試作したアクチュエータは柔軟性を有しながら、x方向の最大トルクが0.36Nm、y方向は0.5Nmであることがわかる。このように、発生力に比べ、x方向とy方向のトルクの差は小さくなったが、依然としてx方向トルクの方が小さいことがわかる。これは、下側シリンダの方がシリンダ中心から他方のシリンダのスライドステージまでの距離が長くなり摩擦トルクが大きくなるためである。なお、アクチュエータの構造上、図4の姿勢つまり、スライドステージが各シリンダの中間位置にある状態において、アクチュエータの剛性が最も低くなるものと考えられる。これらの結果から、試作したアクチュエータは0.36Nm以上の発生トルクがあるため、他動運動を行う手首リハビリ機器<sup>5)</sup>に応用できる可能性がある。

### 5. 制御システムの構成と制御実験

#### 5-1 制御システムの構成

加速度センサを用いた球面アクチュエータのマスタースレーブ制御システムの構成を図7に、外観写真を図8に示す。スレーブ側は球面アクチュエータ、スライドステージ部分の傾斜角を測定するための加速度センサ、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と、制御器となるマイクロコンピュータ(髙ルネサステクノロジ社製、H8/3664)から構成される。マスター側は、図8に示すように、直径100mmの円板に傾斜角の目標値入力用の加速度センサを取り付けている。制御方法は、傾斜角の変化に伴う加速度センサの出力電圧の偏差をもとに、制御則に従って、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。制御則はオンオフ制御則とアナログ制御であるPD制御則を試みた。なお、アナログ制御に用いた疑似サーボ弁は著者らが以前の研究で開発したもの<sup>6)</sup>であり、詳細は後で述べる。また、マイコンを用いた制御では、制御実験中の諸量の計測方法に工夫を要するが、本制

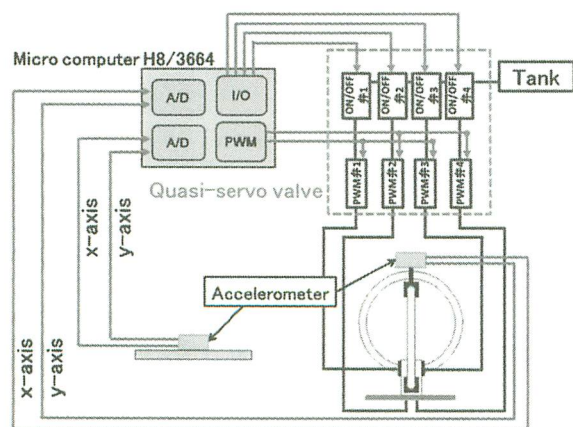


Fig.7 Schematic diagram of control system

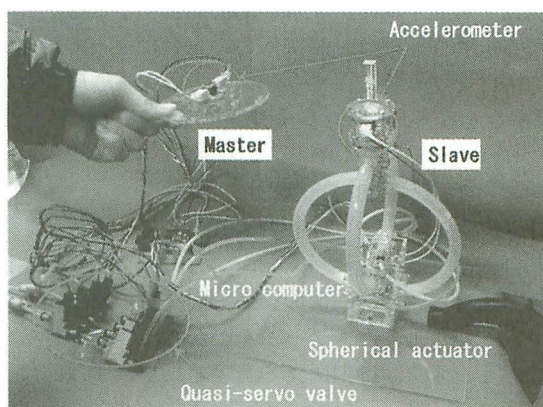


Fig.8 View of master-slave control system

御システムでは、制御実験中、マイコンに増設した自作の外部D/A変換器(Linear Technology LTC1660)を介して、レコーダ(GRAPHTEC.CORP midi LOGGERTYPE GL200)で湾曲角や湾曲方向角などの同時計測を行っている。ここで、湾曲角はシリンダ円中心から垂直方向を0deg.とした場合のスライドステージとのなす角とし、湾曲方向角は、円中心を原点とした極座標系でのスライドステージのx、y平面上の投影角とする。

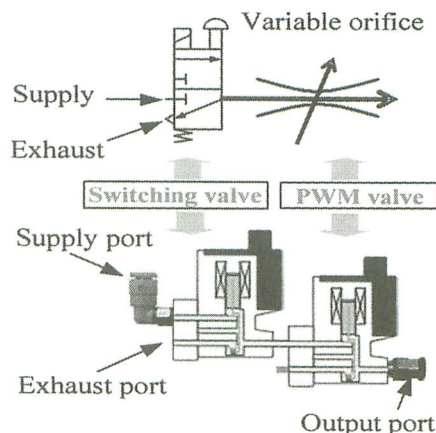


Fig.9 Schematic diagram of the tested quasi-servo valve

前述の疑似サーボ弁は、給排気の流れの方向を切り換える、2位置3ポート型オンオフ弁(KOGANEI, G010E1)と、流路面積を変えるPWM弁(排気ポートを塞いだ2位置2ポート弁)を結合して流量を調整することを可能にした制御弁である。弁の構成を図9に示す。この弁は2個の小型オンオフ弁の出力口と供給口を繋ぎ合わせ、供給源側を給排気用の弁とし、アクチュエータ側の弁を流量調整のための可変絞りのPWM駆動弁として使用する。このPWM弁のデューティ比を変更することで開



口面積を時間平均でアナログ的に調整することが可能となる。動作原理は、制御入力の正負に従って給排気(ON/OFF)を切り替え、また制御入力の大きさによってPWM弁の入力デューティ比を変え流量の調整を行う。

### 5-2 オンオフ制御実験

球面アクチュエータの制御実験として、まずオンオフ制御則によるマスタースレーブ方式の姿勢制御を行う。実験は、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して実験を行った。図10にオンオフ制御則による実験結果を示す。図は上から順に、x軸、y軸方向の湾曲角、湾曲方向角 $\alpha$ の応答結果である。図の破線はマスター側、実線はスレーブ側を示す。これを見ると、マスター側に比べスレーブ側の湾曲角や湾曲方向角は非常に振動的であることがわかる。また、加速度センサは球面アクチュエータの加速度も検出しており、応答結果は実際の球面アクチュエータの動きより激しい変化が現れている。これは湾曲方向角の応答結果にも現れており、実際の動作風景では見られない大きな変化として現れている。これはオンオフ制御則の高ゲインによって、発生したためである。そのため、制御性能の向上を図るためにはアナログ制御を行う必要がある。

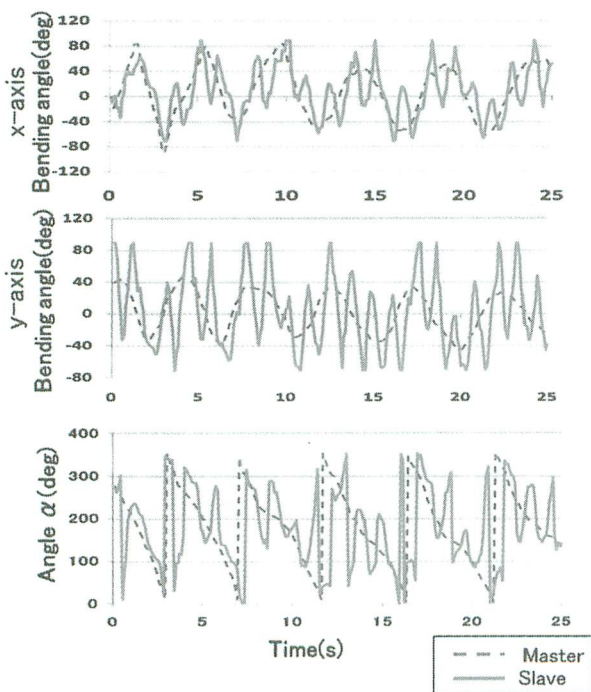


Fig.10 Transient response for on/off control

### 5-3 PD制御実験

そこで、疑似サーボ弁によるPD制御則を適用する。実験はオンオフ制御と同様に、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して実験を行った。ここで、小型疑似サーボ弁のPWM周期は30msである。PD制御実験の動作風景を図11に、制御実験結果を図12に示す。

図12は図10と同様に、湾曲角や湾曲方向角 $\alpha$ の応答結果である。図12を見てわかるように、PD制御の場合、オンオフ制御結果に比べ、振動が抑えられ、スレーブ側の動きはマスター側に追従していることがわかる。しかしながら、スレーブ側の湾曲角が階段状に変化している所があり、制御性能を改善する必要がある。これは、ロッドレス型柔軟空気圧シリンダの摩擦の影響が大きいためと考えている。

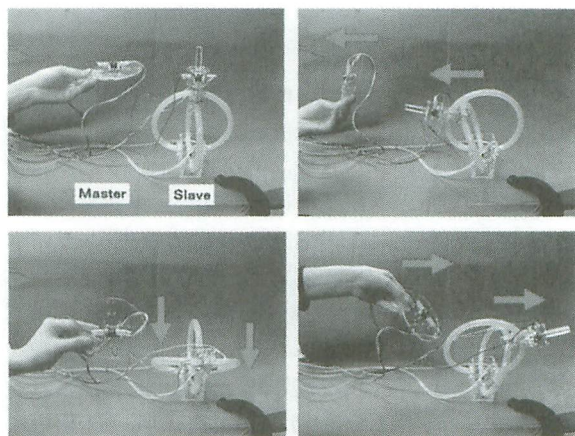


Fig.11 View of master-slave control

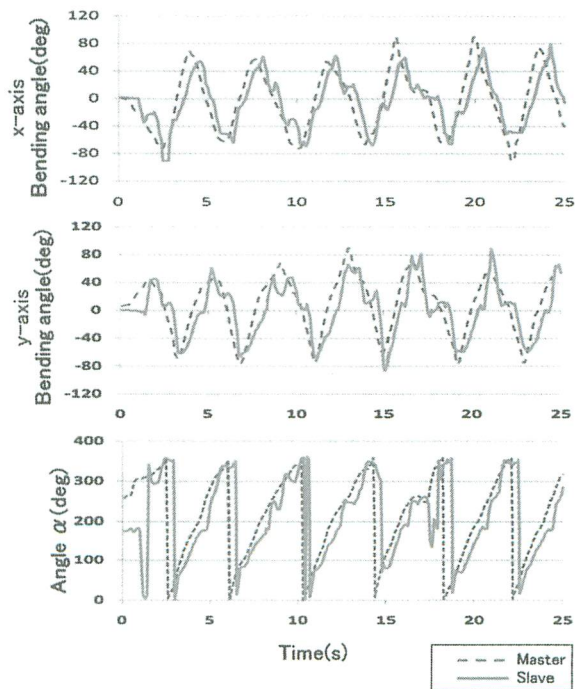


Fig.12 Transient response for PD control

## 6. 結 言

本研究では、ロッドレス型柔軟空気圧シリンダを2つ用いて、簡単な構造をもつ柔軟メカニズムとして、球面アクチュエータを試作した。そして、加速度センサ、小型疑似サーボ弁、マイコンを用いた安価でコンパクトなマスタースレーブ制御システムを構築した。その結果、疑似サーボ弁とPD制御則を用いた実験では、オンオフ制御に比べ振動を抑制でき良好な追従制御結果を得ることができた。

さらなる制御性能の向上や、リハビリテーション機器への応用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, 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) 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, pp. 1-3 (2010)
- 4) T. Akagi, S. Dohta, F. Zhao and T. Fujikawa: "Development and Attitude Control of Flexible Robot Arm Using Flexible Pneumatic Cylinder with Simple Structure", *International Journal of Automation Technology*, Vol.5, No.4, pp.523-530 (2011)
- 5) H. I. Krebs et al.: "Robot-Aided Neurorehabilitation: A Robot for Wrist Rehabilitation", *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol.15, No.3, p.327-335 (2007)
- 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 a Spherical Actuator Using Flexible Pneumatic Cylinders

Ayaka Ando, Shujiro Dohta<sup>\*</sup>, Tetsuya Akagi<sup>\*</sup> and Changjiang Liu<sup>\*</sup>

*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 29, 2011; accepted November 7, 2011)

Recently, it has been desired strongly to develop a system to aid in nursing care and to support the activities of daily life for the elderly and the disabled. The actuators required for such a system need to be flexible so as not to injure the human body. The purpose of this study is to develop a flexible and lightweight actuator and to apply it to a flexible robot arm, a rehabilitation device and so on. So far, new types of flexible pneumatic actuator that can be used even if the actuator is deformed by external forces have been proposed and tested in our previous studies. Also, several kinds of rod-less type flexible pneumatic cylinder were tested, and the tested flexible pneumatic cylinder was utilized as a rotary actuator and a flexible robot arm.

In this paper, we propose and test a spherical actuator using the flexible pneumatic cylinders. The novel spherical actuator using two flexible pneumatic cylinders has a simple structure. The actuator consists of two ring-shaped flexible pneumatic cylinders (the double type cylinder). They are intersected at right angle and are fixed on the base. The diameter of each ring-shaped cylinder is 148mm. And they can bend by being supplied the air to the cylinder. Two slide stages of each cylinder are connected by a right angle so that the bending movement with 2 degrees-of-freedom can be realized. The size of the actuator is 160mm in width and 175mm in height. The total mass of the actuator is only 170g. By driving two cylinders, the actuator can bend largely for every direction. The bending control system using a micro-computer and the quasi-servo valves is proposed and tested. As a result of the experiment using the tested spherical actuator, it is confirmed that the tested actuator can bend over the range of 240 degrees around the center of circle of the cylinder. Furthermore, the master-slave control can be realized by using the proposed compact and inexpensive control system.

**Keywords:** spherical actuator; flexible pneumatic cylinder; quasi-servo valve; master-slave control.