

# チューブの屈曲を利用した低コストサーボ弁の静特性の改善

大野 歩・赤木 徹也\*・堂田 周治郎\*・アブドル ナシル\*\*

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

\*\* 岡山理科大学大学院工学研究科システム科学専攻

(2014年9月30日受付、2014年11月6日受理)

## 1. 緒言

空気圧駆動システムにおいて、発生力が必要となる空気圧アクチュエータの小型化は難しいものの、周辺機器の小型化は可能である。特に、生産技術において駆動システムの小型化は有効な手段である。その周辺機器として制御弁の小型化は大きな課題である。現在主流の制御弁は、圧力差による大きな力が加わったポペットをソレノイドで駆動するため、大きなソレノイドが必要となり、弁の容積や重量が大きくなるという問題点がある。これは容積を大きくするだけでなく、弁のコストを高くするという問題につながる。実際に、空気圧システムにおいてアクチュエータに比べて弁のコストは大きなウェイトを占める。そこで、以前の研究で安価な振動モータでチューブ内のチェック弁のボールを駆動し、開閉する低コストな弁<sup>1)</sup>を試作した。また、サーボ弁としてチューブ内に設定したチェック弁を複数個用いて流量を離散的に制御する安価な小型デジタルサーボ弁の開発を行った<sup>2)</sup>。しかし、流量を細かく調整するためには、チェック弁の数を増やす必要があり、弁が大きくなり、コストが増えるという問題点があった。

著者らは、以前に屈曲したチューブのねじれ角度を調整することにより開口面積を連続的に変える小型サーボ弁を開発した<sup>3)</sup>。また、チューブにねじれを加えるモータ角度と出力流量のヒステリシス特性を改善するため、圧力センサを用いた圧力フィードバック制御を行う弁を安価な組み込みコントローラを用いて実現した<sup>4)</sup>。本論文では、この弁の静特性であるモータ回転角に対する出力流量のヒステリシス特性やその弁を用いたゴム人工筋の位置決め制御性能の改善について述べる。

## 2. 低コストサーボ弁

試作弁の外観を図1に示す。試作弁は、空気圧配管用のポリウレタンチューブ(株式会社SMC TUS0425:内径2.5 mm、外径4.0 mm)、小型のラジコン用サーボモータ(株式会社GWS PICO/STD/F、速度500 deg./s、質量5.4 g)、チューブ

を保持するためのアクリル製の円板とチューブを保持する治具から構成される。図1左の側面写真に示すように、チューブを屈曲した状態から、図1右の正面写真のように直角方向にねじることで、屈曲部分に3次元的なねじれを生じ、流路面積を変えることができる。この方法は、単純に屈曲方向にチューブを動かす方法に比べ、小さな力でチューブを動かすことができ、コンパクトな弁が構成できる。また、サーボモータを挟んだ両側に屈曲したチューブを2本設置することで、給気、排気の流量調節と保持が可能である。3ポート弁のサイズは46×40×32 mm、質量は20 gである。

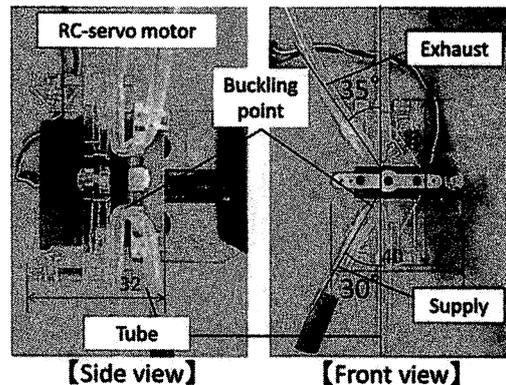


図1 低コストサーボ弁の構造

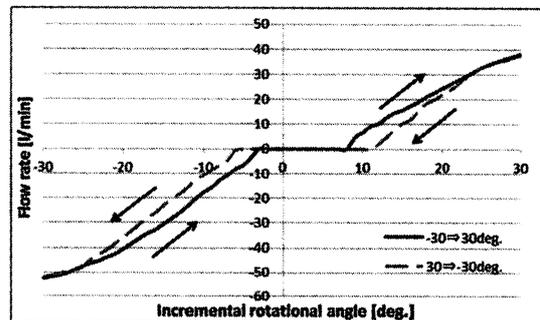


図2 低コストサーボ弁の出力流量特性

図2に試作弁のモータ回転角と出力流量の関係を示す。弁への供給圧力は500 kPaである。図中の実線はモータ回転角度を増加させた場合、破線は減少させた場合を示す。横軸は、図1に示す状態のモータの角度を0 deg.とした際のモータの相対的回転角である。また、サーボモータの可動角度範囲は、供給チューブがねじれない範囲である $\pm 30$  deg.とした。図を見ると、弁の開閉方向に対してヒステリシスを有しているものの、 $-3 \sim 8$  deg.の範囲で保持が可能なオーバーラップを有していることがわかる。またこのヒステリシスの原因は、チューブのねじれ動作に伴いチューブがスライドすることによる摩擦の影響や圧力や流体の運動量によるチューブの膨張によって生じるものと考えられる。つまり、チューブを固定し、スライドを防ぐことによってヒステリシス特性は改善できるものと考えられる。また、保持のオーバーラップ部分はこのヒステリシス特性のため、多少大きくする必要があったが、ヒステリシス特性が改善されれば、このデッドゾーン部分を小さく設定でき、弁の速応性の改善につながるものと考ええる。

### 3. ウェアラブルサーボ弁を用いた位置決め制御

前述の弁を用いたゴム人工筋の位置決め制御システムの構成図を図3に示す。システムは試作弁、目標値入力用と制御量である人工筋変位を測定するための2つのポテンシオメータ(株MIDORI LP-50F)、自然長254 mm、内径10 mmのゴム人工筋(株FESTO MXAM-10-AA)、制御器となるマイクロコンピュータ(株Renesas H8/3664F)から構成される。制御の流れは以下の通りである。目標値入力用のポテンシオメータとゴム人工筋に接続されたポテンシオメータからの出力電圧をマイコン内の10 bitのA/D変換器を介して検出し、偏差を求め、PD制御則に基づいて試作弁を駆動し、ゴム人工筋の位置決め制御を行う。そのステップ応答結果を図4に示す。図中の破線は目標変位、実線は制御結果を示す。

実験では目標値をほぼステップ状に20 mm変化させ、制御には次式のPD制御則を用いた。これは、単純なP制御ではオーバーシュートが生じたためである。

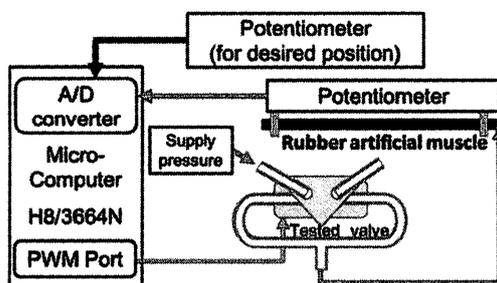


図3 ゴム人工筋の位置決め制御システム

$$u_{(i)} = K_p e_{(i)} + K_D (e_{(i)} - e_{(i-1)}) / \Delta t \quad (1)$$

ここで、 $e_{(i)}$ は目標値入力用のポテンシオメータの変位からゴム人工筋に接続されたポテンシオメータの変位を引いた偏差[mm]、 $u_{(i)}$ はサーボモータへ入力されるPWM信号のデューティ比の変化分である制御入力[%]、 $\Delta t$ は制御のサンプリング周期[s]を示す。制御パラメータである比例ゲイン $K_p$ と微分ゲイン $K_D$ はそれぞれ試行錯誤的に求め0.088 %/mm、 $2.4 \times 10^{-5}$  %s/mmとした。制御ではモータに入力されるデューティ信号は図1に示す初期状態を基準位置とするため次式で与えられる。

$$d_{(i)} = u_{(i)} + 7.5 \quad (2)$$

ここで、 $d_{(i)}$ はサーボモータへの入力デューティ比[%]である。制御では目標値付近での振動を防ぐため、目標値の $\pm 0.5$  mmの範囲でデッドゾーンを設けている。また、サンプリング周期は1.9 msである。

図4から、ゴム人工筋は多少の偏差を有するものの、オーバーシュートの少ない良好な応答が得られることがわかる。また図5に追従制御実験結果の例を示す。追従制御では目標値付近のデッドゾーンを設けずに制御を行った。この結果より、比較的良好に追従できているものの給気と排気が切り替わる際に0.4 s程度の遅れが生じているのがわかる。この遅れは弁の保持状態のためのオーバーラップ範囲の大きさに依存し、この弁の場合、ヒステリシス特性が存在するためデッドゾーンを大きくする必要があった。

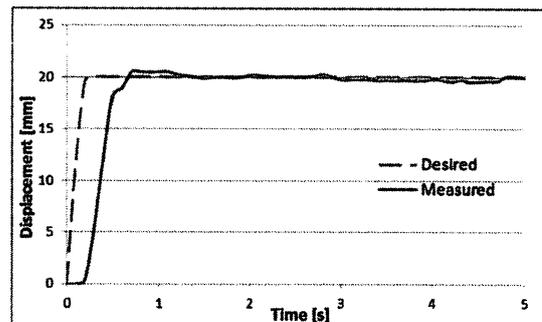


図4 ゴム人工筋の位置決め制御結果

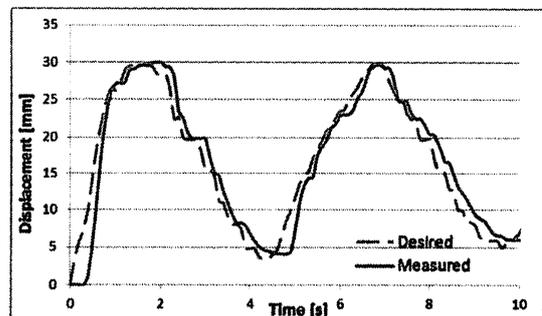


図5 ゴム人工筋の追従制御結果

#### 4. 改良弁

そこで、ヒステリシス特性の改善とデッドゾーンの最小化をめざし、新たに改良した弁を図6に示す。弁は、図1の弁(従来弁とよぶことにする)と同様に空気圧配管用のポリウレタンチューブ、小型ラジコン用サーボモータ、チューブを保持するためのアクリル製の円板とチューブを保持する治具から構成される。従来弁との構造上の違いは、座屈チューブにねじれを加えることなく直接座屈角度を調整するようにした点である。これにより、以前に比べモータに加わる負荷が大きくなるため、チューブの初期座屈角を同じ(63 deg.)にし、チューブの屈曲による反発力を相殺するようにしている。また、モータの回転角度に対して、線形に出力流量が変化するように、試行錯誤的にチューブの座屈位置を求め、さらに、保持のためのデッドゾーンを小さくするため、初期の座屈角も検討した。これらチューブの最適配置は今後、弁の解析モデルの構築、シミュレーション等を行い最適設計を行う必要がある。以上の検討を行った弁形状を図6に示す。弁の動作原理は従来弁と同じであるが、チューブを屈曲方向に曲げることができるように円板についた壁により押さえながら角度を調整できるようにしている。この弁も従来弁と同様に、給気、排気の両方の操作を同時に行うことが可能である。弁のサイズは46×47×28 mm、質量は22.5 gと従来弁とほぼ同じサイズと質量である。

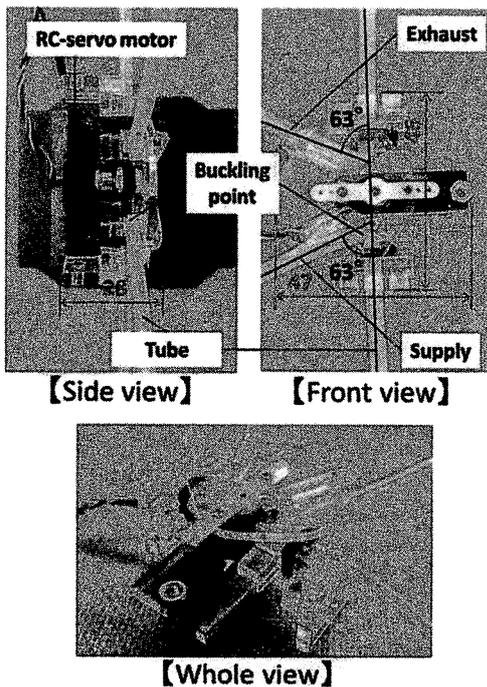


図6 改良弁の構造

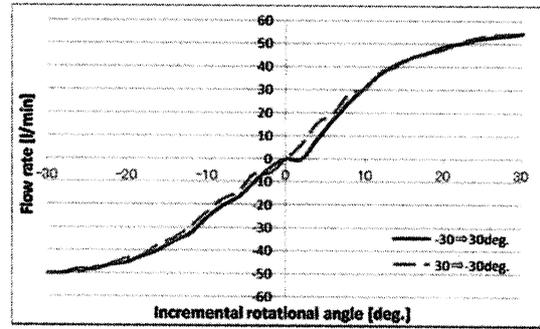


図7 改良弁の出力流量特性

図7に改良弁のモータの相対回転角と出力流量の関係を示す。図中の実線はモータ回転角度を増加させた場合、破線は減少させた場合を示す。図から、以前のチューブのねじりを利用した弁に比べヒステリシスが少なく線形な特性を有し、さらに、オーバーラップの範囲も $-1\sim 2$  deg.の範囲と小さく設定できていることがわかる。

#### 5. 改良弁を用いたゴム人工筋の位置決め制御

前述の改良弁を用いてゴム人工筋の位置決め制御を行う。図8に人工筋の追従制御結果を示す。実験では、ポテンショメータを用いて変位が0~25 mmの範囲で約0.2 Hzの周期で変化するように目標値を手動で変えた。この図から、目標値入力に対してゴム人工筋の変位が良好に追従していることがわかる。

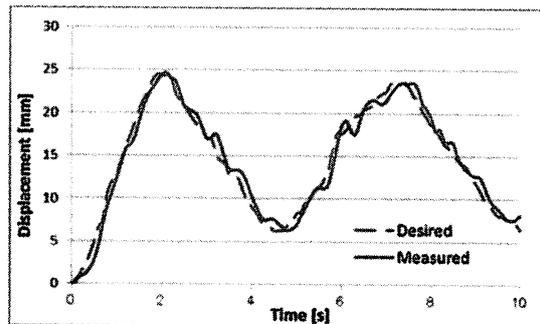


図8 ゴム人工筋の追従制御結果

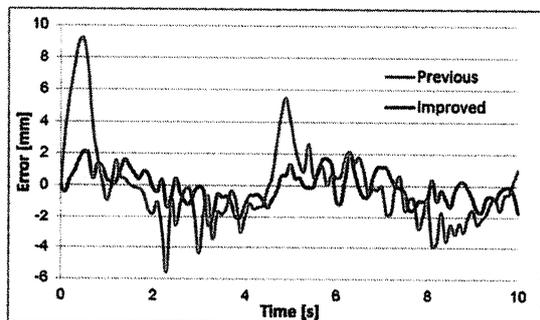


図9 ゴム人工筋の追従変位誤差の応答

また従来弁との比較として追従制御における偏差の過渡応答結果を図9に示す。ここで赤線は改良弁(曲げ型サーボ弁)を用いた場合、青線は従来弁(ねじれ型サーボ弁)を用いた結果である。これらの応答結果における追従誤差の標準偏差は改良弁を使用した場合は0.9 mm、従来弁の場合は2.0 mmと約45%に低減できている。これはモータ回転角に対するデッドゾーンを小さくすることでむだ時間が低減できたためと、弁の静特性の線形性が良くなったため、制御性能が改善されたものと考えられる。

## 6. 結 言

サーボモータを用いて屈曲チューブのねじれ角を変えることで連続的な流量調節を行っていた従来弁を改良し、屈曲角を直接調整するサーボ弁を提案し、試作した。その結果、モータ回転角に対する出力流量のヒステリシス特性を低減することができた。さらに、試作弁を用いてゴム人工筋の位置決め制御を行った結果、デッドゾーン領域を小さくできたことで、追従誤差の標準偏差を以前の2.0 mmから0.9 mmに改良できた。

今後は、弁の解析モデルを構築し、座屈チューブ配置の最適設計などを行う予定である。

## 参考文献

- 1) T. Akagi et.al., "Development of Small-sized Flexible Control Valve Using Vibration Motor", JFPS International Journal of Fluid Power System, Vol.2, No.2, (2010), pp.45-50.
- 2) S. Dohta et.al., "Development of Small-Sized Digital Servo Valve for Wearable Pneumatic Actuator", Journal of Procedia Engineering, Vol.41, (2012), pp.97-104.
- 3) A. Nasir, T. Akagi, S. Dohta and A. Ono, "Development of Small-Sized Servo Valve Controlled by Using Buckled Tube and Its Application", Journal of System Design and Dynamics, Vol.7, No.4, (2013), pp.516-527.
- 4) 大野歩・赤木徹也・堂田周治郎・正子祐輔・アブドルナシル:チューブの屈曲を利用した低価格ウェアラブルサーボ弁の試作, 岡山理科大学紀要, 第49号, (2013), pp. 29-33.
- 5) A. Ono, T. Akagi, S. Dohta, A. Nasir and Y. Masago, "Development of Low-Cost Pressure Control Type Wearable Servo Valve Using Buckled Tube", Proceedings of International Research Conference on Engineering and Technology, (2013), pp.64-71.

# Improvement of Static Characteristics of Low-cost Servo Valve Using Buckled Tube

Ayumu ONO, Tetsuya AKAGI\*, Shujiro DOHTA\* and Abdul NASIR\*\*

*Master's Program in Intelligent Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering,*

*\* Department of Intelligent Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,*

*\*\* Doctoral Program in System Science, Graduate School of Engineering,*

*Okayama University of Science,*

*1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan*

(Received September 30, 2014; accepted November 6, 2014)

The typical electromagnetic solenoid valve drives its spool using a solenoid to open the flow passage. This complex configuration prevents to fabricate a low-cost valve. Therefore, the cost for valve occupies most of the total cost in a pneumatic control system. The purpose of our study is to develop a low-cost and small-sized control valve. In our previous study, a low-cost wearable servo valve that can control the output flow rate by changing the twisted angle of the buckled tube in the valve was proposed and tested. The pressure control type valve using the buckled tube was also developed so as to improve its hysteresis characteristics. In this paper, the improved valve using the buckled tube without being twisted was redesigned and tested. The relation between the motor angle and the output flow rate of the valve was investigated. As a result, we confirmed that the static characteristics had a linear relationship. The position control system of McKibben rubber artificial muscle using both tested valves and embedded controller was also executed. As a result, we also confirmed that the position control performance of the muscle using the improved valve was superior to the case using the previous valve.

**Keywords:** low-cost servo valve; buckled tube; hysteresis; embedded controller; static characteristics.