

# 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

大野 歩・赤木 徹也<sup>\*</sup>・堂田 周治郎<sup>\*</sup>・正子 祐輔・アブドゥル ナシル<sup>\*\*</sup>

岡山理科大学大学院工学研究科知能機械工学専攻

<sup>\*</sup> 岡山理科大学工学部知能機械工学科

<sup>\*\*</sup> 岡山理科大学大学院工学研究科システム科学専攻

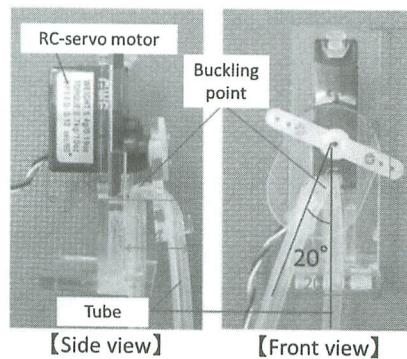
(2013年9月30日受付、2013年11月5日受理)

## 1. 緒言

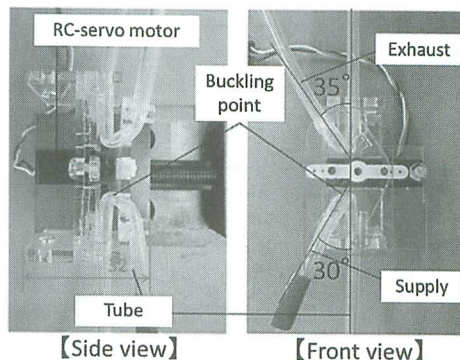
ウェアラブル空気圧駆動システム<sup>1)</sup>の実現には、流体制御弁の小型化・省エネルギー化は大きな課題である<sup>2)</sup>。現在主流の制御弁は、圧力差による大きな力が加わったポペットをソレノイドで駆動するため、大きなソレノイドが必要となり、弁の容積や重量が大きくなるという問題点がある。著者らの以前の研究ではチェック弁を複数個用いて流量を離散的に制御する小型デジタルサーボ弁の開発を行った<sup>3)</sup>。しかし、流量を細かく調整するためには、チェック弁の数を増やす必要があり、弁が大きくなるという問題点があった。そこで、本研究はチューブの屈曲により開口面積を連続的に変える小型サーボ弁の開発を目的とする。具体的には、2本の屈曲したチューブの屈曲角を同時に制御することで、連続的な流量調節が可能で、さらに給排気動作も可能な小型のサーボ弁の開発について検討する。

## 2. ウェアラブルサーボ弁

試作弁の外観を図1(a)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)、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(a)の側面からの写真に示すように、チューブを屈曲した状態から、図1(a)の正面の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。弁のサイズは56×20×32 mm、質量は14.8 gと非常に小型・軽量である。この弁は操作する管路(チューブ)が1本であり、2ポート間の流量しか調整できない。そこで、給気、排気、保持が可能となるように3ポート弁に改良した。これを図1(b)に示す。2ポート弁との違いは、サーボモータを挟んだ両側に屈曲したチューブを2本設置し、給気、排気の両方の操作を同時に行う点



(a) 2ポート弁



(b) 3ポート弁

図1 ウェアラブルサーボ弁の構造

である。3ポート弁のサイズは46×40×32 mm、質量は20.2 gと軽量である。図2に2ポート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300 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。このグラフからモータ回転角に対して給気では30 deg.、排気では35 deg.のオフセットを有していることがわかる。そこで、この値を基にして3ポート弁の給気、排気用のチューブの保持状態の初期角度をそれぞれ、30 deg.、35 deg.と決めた(図1(b)参照)。図3に3ポート弁の静特性を示す。横軸は、図1(b)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、供給圧力は500 kPaであり、サーボモータの可動角度範囲は、供給側の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。このヒステリシスの原因は、圧力や流体の運動量によるチューブの膨張や、チューブのねじれ動作によるスライドによって生じるものと考えられるが原因究明には至っていない。また、この3ポート弁本体のコストは800円程度であり、低価格の組込みコントローラ(株Renesas Electronics R8C12M)を使用することで900円程度の安価な流量制御型の小型サーボ弁が構成できる。

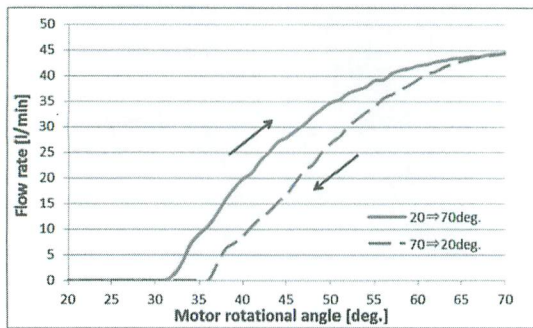


図2 2ポート弁の出力流量特性

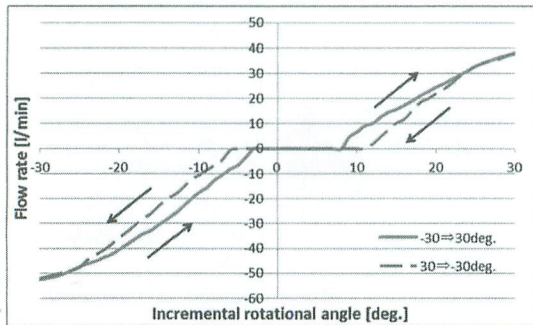


図3 3ポート弁の出力流量特性

### 3. ウェアラブルサーボ弁を用いた位置決め制御

試作弁の有用性を確認するために、3ポート弁を用いてゴム人工筋の位置決め制御を行った。ここで使用したゴム人工筋は、自然長254 mm、内径10 mmのFESTO製のMXAM-10-AAである。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。

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

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]である。実際の制御では、モータに入力されるデューティ信号は図1(b)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に追従制御結果を示す。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、比較的よく追従できているものの給気と排気が切り替わる際に遅れがあるのがわかる。

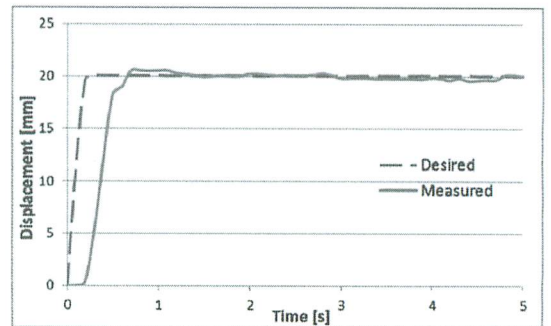


図4 ゴム人工筋の位置決め制御結果

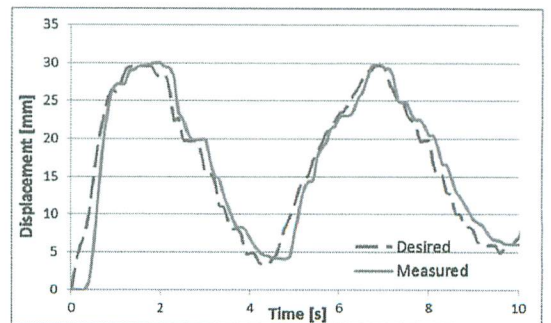


図5 ゴム人工筋の追従制御結果



#### 4. 圧力制御型ウェアラブルサーボ弁

前述の3ポート弁はチューブ内に流体が流れている状態で閉める場合、圧力および流れの運動量やチューブのねじりによってチューブが変形することがある。そのため、図3に示すようにチューブの角度に対して出力流量にヒステリシスが生じるという欠点があった。そこで、このオフセットを改善するため、弁出力圧力をフィードバックして弁出力圧力を制御することを考える。

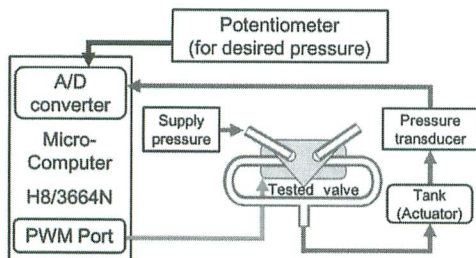


図6 試作弁の圧力制御システム

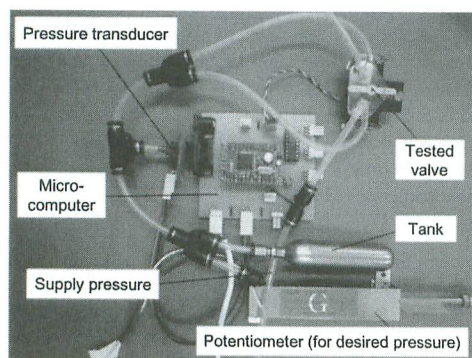


図7 圧力制御システムの概観

そこで、試作した圧力制御型サーボ弁のシステム構成図および写真をそれぞれ図6と図7に示す。システムは試作3ポート弁、圧力センサ(株Panasonic ADP5161)、マイクロコンピュータ(株Renesas Electronics H8/3664F)、目標圧力設定用のポテンショメータ(株MIDORI PRECISIONS LP-50F)、15 ccのタンクから構成される。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ョメータと圧力センサからの出力電圧をマイコン内のA/D変換器を介して検出し、偏差を求め、以下に示す比例制御則に基づいて3ポート弁を駆動し、タンク内の圧力制御を行う。

$$u_{(i)} = K_{pp} e_{p(i)} \quad (3)$$

ここで  $e_{p(i)}$  は圧力偏差、 $K_{pp}$  は比例ゲインである。サーボモータの入力デューティ比は式(2)で与えられる。

図8、図9に目標圧力を周期的に変化させた場合の弁出力圧力の追従結果を示す。図8、9はそれぞれ、0.5 Hz、

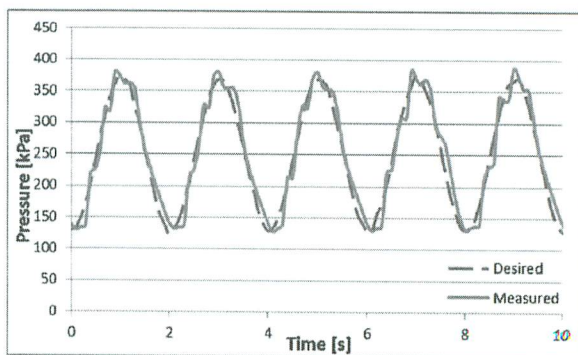


図8 圧力追従制御結果(0.5Hz)

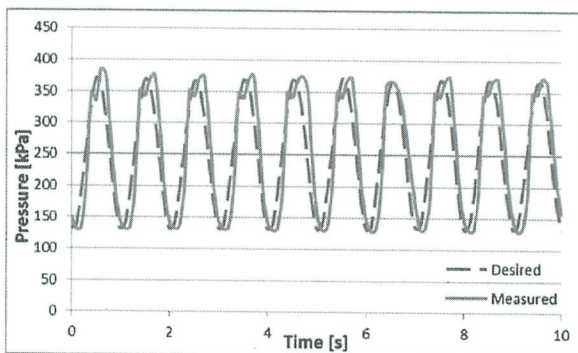


図9 圧力追従制御結果(1.0Hz)

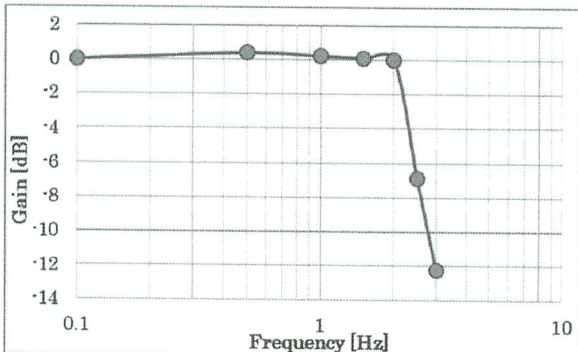


図10 圧力追従制御のゲイン線図

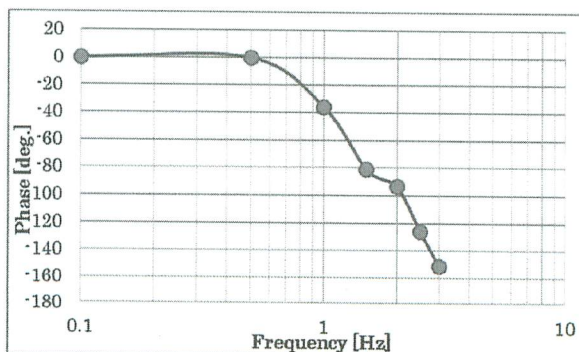


図11 圧力追従制御の位相線図

1.0 Hzの場合を示す。実験では、250 kPaを中心に振幅が100 kPaの正弦波を目標圧力とし、15 ccの負荷容積を接続した。比例ゲイン $K_{pp}$ は、偏差が少なくなるよう試行錯誤により調整し、 $K_{pp}=0.021$  [%/kPa]を用いた。これらの図から、目標圧力に対して出力圧力がよく追従していることがわかる。

また、図10と図11に圧力追従制御のゲイン線図と位相線図を示す。これらの周波数応答結果から得られたバンド幅周波数は2.2 Hzである。この弁の応答は、使用したサーボモータの速応性に依存し、より速応性に優れたモータを使用することで弁の動特性が改善できるものと思われる。

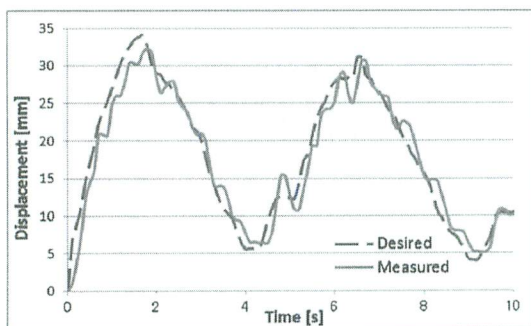


図1-2 改良弁を用いたゴム人工筋の追従制御結果

図12に圧力制御型のウェアラブルサーボ弁を用いたゴム人工筋の追従位置決め制御結果を示す。流量制御

型のサーボ弁を用いた場合(図5参照)と比較して、静止状態からのむだ時間が短く改善された。さらに、追従位置誤差の標準偏差が2.6 mmから2.1 mmに改善されており、弁の動特性の改善により制御性能が向上したことが確認できる。

## 5. 結言

サーボモータを用いてチューブの屈曲角を変えることで開口面積を変え、流量を連続的に制御できる安価なサーボ弁を提案し、試作した。また、モータ回転角と出力流量の実験結果からチューブの配置を設計し、給気、排気、保持の可能な3ポート弁を試作した。さらに、弁が有するオフセット特性を軽減するため、圧力制御型の弁を提案し、試作した。

今後は、弁の最適設計を目指した解析モデルの構築、さらなる弁の小型化や弁の高速化を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 長田義仁編, “ソフトアクチュエータ開発の最前線～人工筋肉の実現をめざして～”, NTS, (2004), pp. 294-321.
- 2) T. Akagi et.al., “Development of Small-sized Fluid Control Valve with Self-holding Function Using Permanent Magnet”, Journal of System Design and Dynamics, Vol.4, No.4, (2010), pp.552-563.
- 3) 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.



# Development of Low-cost Wearable Servo Valve Using Buckling of Tube

Ayumu ONO, Tetsuya AKAGI\*, Shujiro DOHTA\*,

Yusuke MASAGO and Abdul NASIR\*\*

*Faculty of Engineering, Graduate School of Engineering,*

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

*\*\* Doctoral Program, Faculty of Engineering, Graduate School of Engineering,*

*Okayama University of Science,*

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

(Received September 30, 2013; accepted November 5, 2013)

Recently, power assisted nursing care systems have received much attention and those researches have been done actively. In such a control system, an actuator and a control valve are mounted on the human body. Designing the system, the size and weight of the valve become serious concerns. The purpose of our study is to develop a small-sized, lightweight and low-cost servo valve for precise control using wearable pneumatic actuators. In this 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 is proposed and tested. The position control system of McKibben rubber artificial muscle using the tested valve and embedded controller is also proposed and tested. As a result, we confirmed that the tested servo valve can control the flow rate in both supply and exhaust in an analog way. In addition, the pressure control type wearable servo valve is proposed and tested. As a result, the valve can control the output pressure with a bandwidth frequency of 2.2 Hz. The estimated cost of the proposed valve can be reduced to about 1/100 (9 US Dollars) compared with the typical servo valve.

**Keywords:** small-sized servo valve; buckling of tube; pressure control; embedded controller; wearable valve.