

無拘束小型空気圧 ON/OFF 弁を用いたマイコン駆動方向制御弁の開発

立命館大学 ○ジエンスマディ*, 小川洋一郎*, 平井慎一*
東レエンジニアリング (株) 本田顕真**

Microprocessors Embedded Pneumatic Directional Control Valve with Unconstrained Poppet – Orifice Structure

Keywords : Pneumatics, Unconstrained Valve, Directional Control Valve, Pressure, Miniaturization

1. 緒言

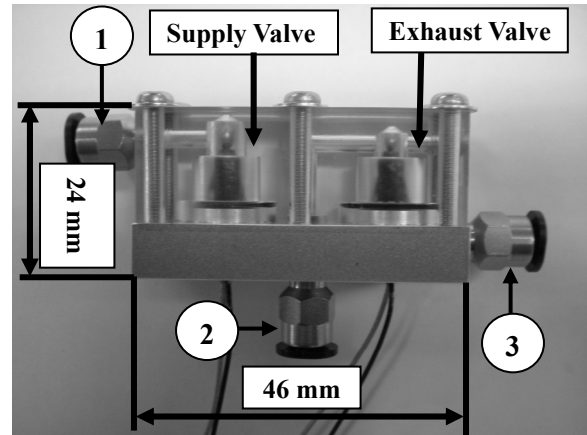
近年, 小型化に関する空気圧弁の研究が進んでおり, 様々な駆動原理のマイクロ弁が開発されている. 一般に, 圧電素子を用いた拘束型弁では, 圧電アクチュエータの内部変位が小さいため, 出力流量に限界があった[1]. しかし, 圧電アクチュエータは高発生力とコンパクトという特性を持ち, 弁の小型化に有利である. 単層圧電アクチュエータは変位が小さいため, 積層圧電アクチュエータが用いられる. 積層圧電アクチュエータは単層圧電アクチュエータに比べ, 大きい電流が必要となる. よって, 積層圧電アクチュエータの駆動回路を小型化する必要もある. つまり, マイクロ弁の小型化と共に電源装置回路を小型化する必要がある.

従来の方式による拘束型マイクロ弁では, MEMS 技術を基礎とする空気圧弁の小型化が試みられている. これらの弁は比較的少ない流量のアプリケーションに使われている. 一方, 人間の運動を補助する機械システムまたはウェアラブルロボットを駆動するためには, 10L/min オーダの流量が必要で, マイクロ弁を使用することはできない. 近年, 小型軽量高流量の空気圧 ON/OFF 弁を実現するために, 無拘束小型弁が提案されている[2-3].

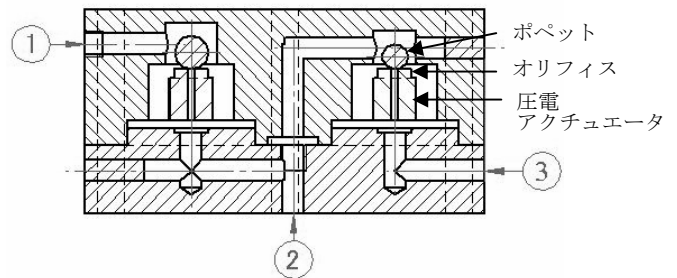
空気人工筋アクチュエータの制御において, 一般の 3/2 方向制御弁に比べ, 3/3 方向制御弁の方が効率が高い[4]. そこで本論文では, ウェアラブルロボット用の柔らかい空気圧アクチュエータを制御するため, 圧電アクチュエータを用いた無拘束小型ポペット弁から構成された 3/3 方向制御弁を提案する. そして, 弁の特性と性能の評価について述べる.

2. 3 ポート 3 位置方向制御弁

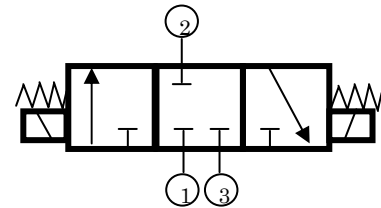
3/3 方向制御弁の構造は 2 つの無拘束小型 ON/OFF ポペット弁から構成され, 給気用弁と排気用弁の間を流路で繋げている. Fig. 1 に示すように, 本 3/3 方向制御弁には 2 つの部分がある. 左側にある弁は給気用弁, 右側は排気用弁と呼ぶ. 図中ポート 1 は供給圧空源に接続される. ポート 2 は空気圧



(a) Prototype of 3/3 DCV made of 5 mm piezoactuator



(b) Cross-sectional view of 3/3 DCV



(c) Symbolic diagram of 3/3 DCV

Fig. 1. 3/3 unconstrained directional control valve

アクチュエータに接続される. ポート 3 は大気圧に開放されている. ポート 1, 2, 3 の圧力を供給圧力, 負荷圧力, 排気圧力と呼ぶ.

本方向制御弁は無拘束構造であるため, 空気圧アクチュエータの制御を実用できるように実験結果から給気用弁側に大きなポペットを使用し, 逆に排気用弁側に小さなポペットを使用している. これにより, 排気用弁が開かれているときに給気用弁側のポ

* 立命館大学ロボティクス学科
(〒525 - 8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)
** 東レエンジニアリング株式会社開発部門開発部
(〒520 - 0842 滋賀県大津市園山 1-1-1)

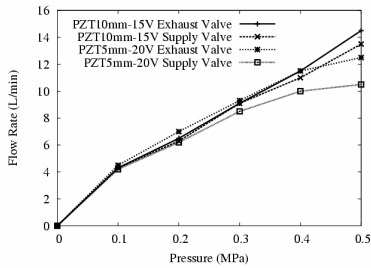


Fig. 2. Flow rate of supply and exhaust valve

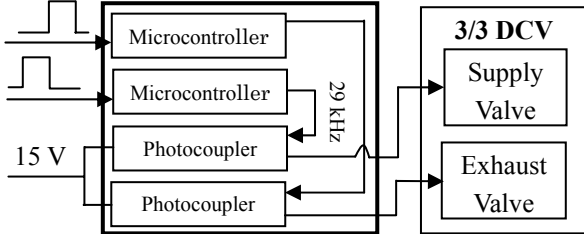


Fig. 3. Schematic of 3/3 DCV switching control

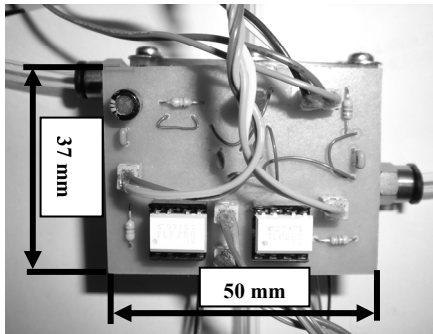


Fig. 4. Switching controller for 3/3 DCV

ペットが乱流の影響を受けにくくなり、給気用弁は完全に閉状態にすることができる。さらに、負荷圧力は供給圧力を超えないように制御されている。ポペットは差圧によりオリフィスを押し付けられ、弁は閉状態となる。

開発した方向制御弁では、両方の ON/OFF 弁に同じ円筒形オリフィスを用いる。使用したオリフィスは直径 $\phi 0.8\text{mm}$ 、給気用弁側のポペットは直径 $\phi 4\text{mm}$ 、排気用弁側のポペットは直径 $\phi 3\text{mm}$ である。

積層圧電アクチュエータの長さに対する流量の関係を Fig.2 に示す。これらの結果から、長さ 5 mm と 10 mm に対して、ほぼ同じ流量が得られていることがわかる。しかし、長さ 5 mm の場合の電圧は長さ 10 mm より 5 V 高くした結果である。Fig. 2 に示したように印加電圧を変化させることにより発生流量を変えることが可能である。結論として、印加電圧を高めることによって、弁の小型化を実現することができる。

切換駆動回路は、Fig. 3 に示すように 2つの入力によって制御を行う。切換駆動回路の外観を Fig.4 に示した。いずれかの入力を ON すると対応している弁が開放され、入力が OFF の場合は閉状態となる。

開発した駆動回路のサイズは $10\text{mm} \times 37\text{mm} \times 50\text{mm}$ であり、3/3 方向制御弁を含めた全体のサイズは $35\text{mm} \times 37\text{mm} \times 50\text{mm}$ となる。

3. 方向制御弁の応答

Fig. 5 に PWM 入力 (デューティ比は 20% - 80%) による無拘束 ON/OFF ポペット弁の発生流量を示す。これらの実験結果から出力流量が振動的であることがわかる。これにより、ON とする時に流量を制御することを考えると、開放時間と出力流量の関係を決定することは困難である。したがって、PWM 制御方式 ON/OFF 制御弁としては用いることができないと判断する。

3/3 方向制御弁の応答を調べるために、給気用弁および排気用弁の応答をそれぞれ検討した。ここでは弁の応答時間を圧力が 0MPa から目標圧力の 90% まで高まるのにかかる時間と定義する。Fig. 6 に内径 $\phi 34\text{mm}$ x 高さ 30 mm のアクリル製容器を 0 MPa から目標 0.5 MPa まで ON/OFF の切り替えを行ったときの応答性を示す。PWM 250Hz 給気用弁の応答性を Fig. 6(a)に示す。PWM 200Hz における排気用弁の応答性を Fig. 6(b)に示す。Fig. 7 に給気用弁と排気用弁の応答時間の比較を示す。排気用弁に比べて給気用弁の応答時間は 1/5 程度である。

4. 圧力フィードバックヒステリシス制御

本 3/3 方向制御弁の利点として 1) 構造が簡単、2) 小型化が容易であるという点があげられる。一方、不安定な出力流量と漏れが発生してしまう傾向を生じており、ON/OFF の単純な動作を正しく制御できない。したがって、実際に性能の高い空気圧アクチュエータを制御するために、圧力フィードバック制御を採用する。その一例として最適化ヒステリシス制御を Fig. 8 に示す。この方法を用いることによって 3/3 方向制御弁を用いた圧力比例弁を実現した。すなわち圧力センサに従って圧力追従制御を行う [5]。圧力比例弁は、目標圧力と制御対象内の圧力との差に

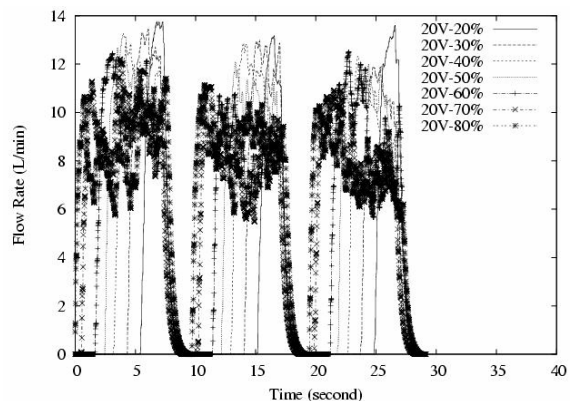
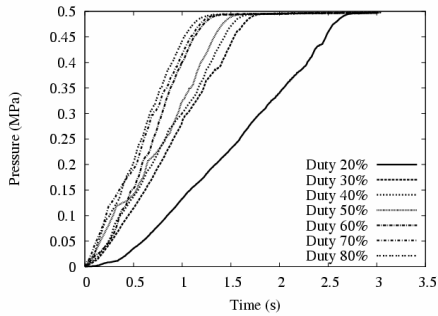
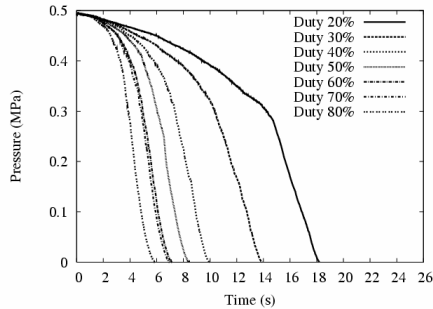


Fig. 5. Valve flow rate based on PWM control



(a) Response of supply valve (250 Hz PWM)



(b) Response of exhaust valve (200 Hz PWM)

Fig. 6. Response of PWM-controlled 3/3 DCV

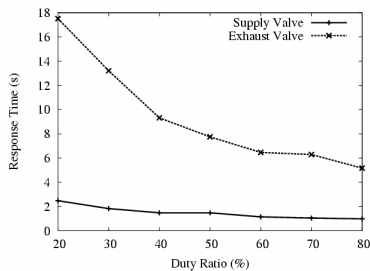


Fig. 7. Responses of supply and exhaust valves

じて給気用弁または排気用弁の開閉状態を決める。制御対象圧力の現在値が上限を上回るときは給気用弁を開け、排気用弁を閉じる。もし現在値が下限を下回るときは、給気用弁を閉じ、排気用弁を開ける。それ以外の場合は、両方の弁を閉じる。圧力追従ヒステリシス制御の結果を Fig.9 に示す。圧力追従の立ち上がり時間はそれぞれ 3.263 s, 3.191 s, 3.145 s となり、同様に立ち下り時間は 7.343 s, 7.668 s, 7.522 s となった。

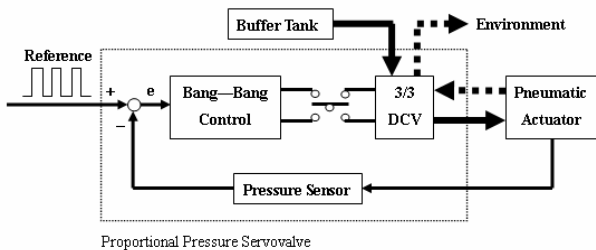


Fig. 8. Hysteresis pressure control

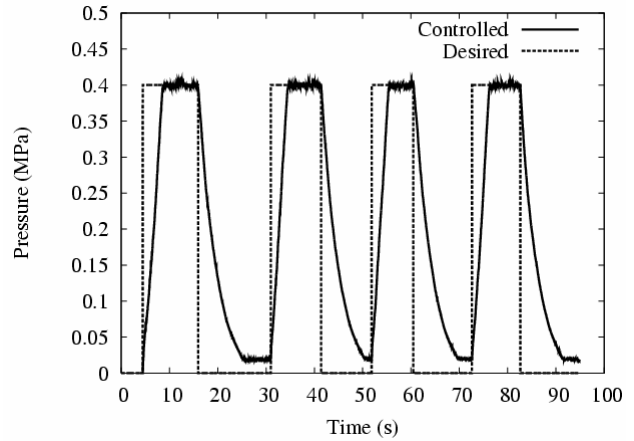


Fig. 9. Result of pressure-tracking control

5. 結言

無拘束 ON/OFF ポペット弁を用いた 3/3 方向制御弁の性能を評価し、PWM 制御における応答性を実験的に示した。出力流量は振動的に変化するため、実用的な範囲での流量制御を実現できなかった。このことから、信頼性の高いサーボ弁を実現するために、圧力フィードバック制御を採用した。本論文ではヒステリシス制御を用いた圧力比例弁を提案した。

今後、排気用弁の反応性を改良し、要求仕様を満たすため、排気用弁には 2 倍のオリフィス直径が必要となる。また、将来的に精度の高い信頼性が要求される圧力追従制御比例弁を実現するための制御方法の設計が必要となる。

参考文献

1. Yang E.H et al., "Leak-Tight Piezoelectric Microvalve for High Pressure Gas Micro propulsion", Journal of MEMS, Vol. 13, Oct 2004.
2. 上原正太, 平井慎一, "空気圧アクチュエータ用小型比例制御弁の開発", 平成 16 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp.98-100, 2004.
3. 片山真一, "振動モータを用いたマイクロ流体制御弁の開発", 平成 19 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 2007.
4. Cocatre-Zilgien J.H., "Performance of a Muscle-like "Leaky" Pneumatic Actuator Powered by Modulated Air Pulses", Journal of Robotic Systems 13(6), pp. 379-390, 1996.
5. Akagi T, Dohta S., "Development of Small Sized Multi-port Pressure Control Valve for Wearable Actuator", Proc. of the 2004 IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication, Japan, 2004.