

# 16.0×7.0×17.5 mmのサイズで0.5 MPaを制御できる 三方向無拘束ポペット弁の開発

泉沢和宏 (立命館大) 平井慎一 (立命館大)

## 1. 緒言

近年、人間の手を模したロボットハンドの研究が盛んに行われている。特に義手のようなウェアラブルロボットにおいては小型であることが重要であり、小型・軽量のアクチュエータとして McKibben 型アクチュエータが注目されている [1], [2]。しかし、McKibben 型アクチュエータを駆動する制御弁のサイズと流量が問題となる (図 1)。電磁ソレノイド弁は McKibben 型アクチュエータの駆動に十分な流量を出力できる。しかしながら、そのサイズは数十 mm 以上であり、人と同サイズのロボットハンドに組み込むことは難しい。ロボットハンドに制御弁を内蔵できない場合、ロボットから無数のチューブが伸びたスパゲッティ状態となる。このようなスパゲッティ状態の駆動システムは複雑であり、ウェアラブルロボットとして利用することは難しい。一方、小型な弁として MEMS 弁がある。MEMS 弁のサイズは数 mm 程度であるため、人間と同サイズのロボットハンドへの実装も容易に行うことができる。しかしながら、この弁の流量は数十 ml/min 程度であり、McKibben 型アクチュエータを駆動することができない。よって、図 1 に示すような流量が数 l/min 以上であり、なおかつサイズが十数 mm 程度の制御弁が必要である。

そこで我々は図 2-a に示すような構造の空気圧弁を提案した [3]。本弁は無拘束のポペットの跳躍運動によって流量を制御するため、無拘束ポペット弁と名付けた。本弁はポペットを固定する機構を必要としないため小型化に適している。図 2-b に製作したプロトタイプを示す。プロトタイプのサイズは  $\phi 7.0 \times 9.0$  mm、重量は 2.2 g である。使用している各要素は、 $3.0 \times 3.0 \times 2.0$  mm の圧電素子、 $\phi 3.0$  mm のポペットである。オリフィス径は  $\phi 0.5$  mm である。また、McKibben 型アクチュエータを高い精度で制御するためには圧力制御が重要である。そこで、無拘束ポペット弁の構造を用いて、圧力制御弁を開発した。本稿では開発した圧力制御弁およびその制御回路について述べる。さらに、開発した圧力制御弁によって McKibben 型アクチュエータの圧力制御が可能かを検証する。

## 2. 三方向無拘束ポペット弁

### 2.1 三方向無拘束ポペット弁の構成

圧力制御を行うためには、3 方向に入出力口を有した弁が必要となる。そのため、本弁は 2 つの無拘束ポペット弁を組み合わせることにより、3 方弁の構造を実現する。図 3 に三方向無拘束ポペット弁の構成を示す。本弁は 2 つの無拘束ポペット弁によって構成されている。供給弁は供給口を有し、タンクから圧力を供給する。排気弁は排気口および圧力制御部に 2 つの出力口

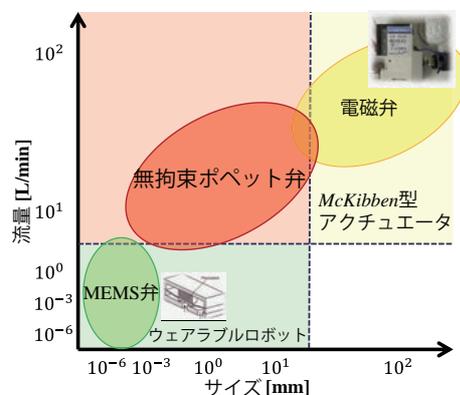


図 1: 空気圧弁のサイズと流量



a. 無拘束ポペット弁の構成 b. 無拘束ポペット弁のプロトタイプ

図 2: 無拘束ポペット弁

を有している。制御回路接続口は弁内部圧力の計測に使用する。出力口は McKibben 型アクチュエータへの圧力の供給に使用する。排気口から内部の圧力を排出する。

### 2.2 三方向無拘束ポペット弁の駆動原理

次に本弁の駆動原理について述べる。供給弁内のポペットは、タンクからの供給圧力と圧力制御部の圧力との差圧によって閉状態を保持する。供給弁の駆動によって圧力制御部に圧力を供給する。排気弁内のポペットは圧力制御部に供給された圧力と外部の大気圧との差圧によって閉状態を保持する。排気弁の駆動によって圧力制御部の圧力を外部に排出する。また、無拘束ポペット弁の駆動において差圧は必要不可欠な要素である。圧力制御部と供給および排気側との間には常に差圧を生じさせる必要がある。

### 2.3 三方向無拘束ポペット弁のプロトタイプ

図 4 に製作した三方向無拘束ポペット弁のプロトタイプを示す。プロトタイプのサイズは  $16.0 \times 7.0 \times 17.5$

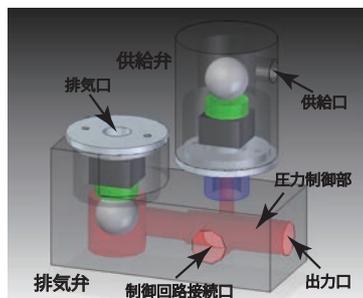


図 3：三方向無拘束ポペット弁の構成

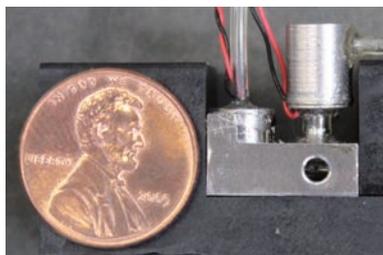


図 4：三方向無拘束ポペット弁のプロトタイプ

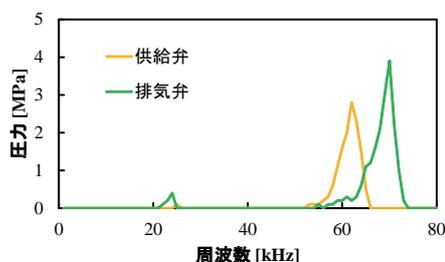


図 5：三方向無拘束ポペット弁の周波数 流量特性

mm, 重量は 6.5 g である．使用しているポペットおよびオリフィス, PZT アクチュエータのサイズは図 2-b のプロトタイプに使用したものと同様である．図 5 に供給弁および排気弁の周波数と流量の特性を示す．

本稿の実験は, 全てこのプロトタイプを使用している．

### 3. 制御回路

#### 3-1 Multi-level Hysteresis Control

McKibben 型アクチュエータを高い精度で制御するためには, 圧力制御が重要である．本弁の制御では, 無拘束ポペット弁の圧力制御に適した制御方法として Multi-level Hysteresis Control を使用する [4]．本制御は計測した圧力と目標圧力との差圧の大きさによって 5 段階の駆動状態を設定する．多段階の切り替えを用いることから Multi-level Hysteresis Control (MLHC) と呼ぶ．差圧は, 目標圧力と制御圧力の差である．弁の駆動状態は最大供給 (High Supply, HS), 最小供給 (Low Supply, LS), 停止 (Idle, I), 最小排気 (Low Exhaust, LE), 最大排気 (High Exhaust, HE) に分けられる．図 6 に本制御における駆動状態の切り替えについて示す．三方向無拘束ポペット弁において流量は図 5 のような

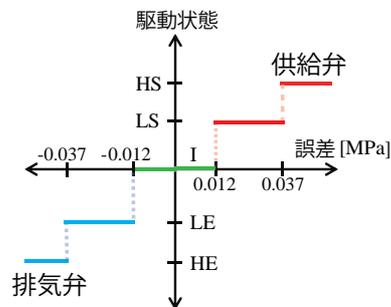


図 6：Multi-level Hysteresis Control

特性を示す．よって, 供給量および排気量の切り替えは印加する周波数によって行う．本稿では最大供給, 最大排気における流量は 2.5 l/min, 最小供給および最小排気における流量は 1.0 l/min となる周波数を印加した．図 5 より, 本弁では HS = 62 kHz, LS = 58 kHz, HE = 69 kHz, LE = 66 kHz において使用する．

#### 3-2 圧力制御回路

本弁を小型化する上で制御回路のサイズは重要である．三方向無拘束ポペット弁を高い精度で制御するためには, 弁と近い距離で圧力を計測, 制御する必要がある．よって, 弁と同等のサイズとなる, Multi-level Hysteresis Control の圧力制御を内蔵した制御回路を開発した．制御回路を小型化するため, OMRON 株式会社より提供された圧力センサチップを使用した．図 7 に製作した圧力制御回路のプロトタイプを示す．本制御回路は主に圧力センサ, マイクロコントローラ, 計装アンプより形成された圧力制御回路部 (図 7-c) と, LC 回路, レギュレータによって構成された駆動回路部 (図 7-d) によって構成されている．圧力制御回路と駆動回路は GND 間に 10 Ω の抵抗を挟んでいる．これは駆動回路からの高電圧・高周波によるノイズを防ぐためである．

本制御回路において圧力センサのサイズは, 小型化するために重要である．パッケージされた市販のセンサ素子は弁との接続方法に制限があり, 回路の小型化に適さない．本研究では, 圧力センサチップを回路基板上に直接取り付けすることで小型化を図った．図 8 に使用した圧力センサチップと, それを接着したベースを示す．圧力センサのサイズは 1.3 × 1.3 × 0.4 mm である．ベースは圧力計測用に φ0.5 mm の貫通穴を有し, 圧力センサのダイアフラムに圧力を供給する．圧力センサとベースはエポキシ系接着剤によって固定している．図 9 に圧力センサ接着後に計測した圧力センサの圧力と出力電圧の特性を示す．圧力センサの出力は 0.2 ~ 0.5 MPa において非線形となっている．このため, 本制御では, 0.0 ~ 0.2 MPa および 0.2 ~ 0.5 MPa 間において 2 段階の線形近似を行った上で使用している．ベースを回路基板に接着し, ワイヤボンディングによってセンサと回路を接続する．

マイクロコントローラには TEXAS INSTRUMENTS の MSP430F2012 を使用した．主に, 供給・排気用矩形波出力 2 ピン, 圧力センサ読み取り, および目標圧力入力 A/D 変換 2 ピン, プログラム書き込

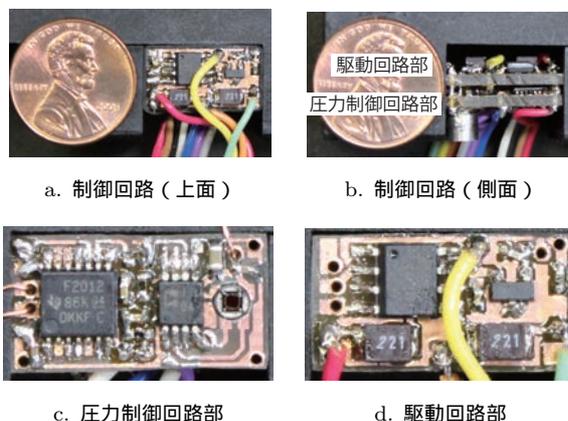


図 7：制御回路のプロトタイプ

みに 2 ピン使用している．目標電圧の設定電圧は 3.0 V/MPa とした．

計装アンプには ANALOG DEVICES の AD623 を使用した．計装アンプのゲイン  $G_V$  が 3 になるよう，リファレンス抵抗  $R_G = 47 \text{ k}\Omega$  を選定した．

駆動回路部はマイクロコントローラより出力された矩形波信号を昇圧し，給気弁および排気弁を駆動する [5]．また，駆動回路用電源から圧力制御回路駆動用の電圧を取り出す．

LC 回路はローサイド・ゲート・ドライバと 2 つのインダクタによって構成されている．静電容量  $C$  は無拘束ポペット弁内の圧電素子の静電容量を使用する．インダクタンスに  $220 \mu\text{H}$  を使用することで，無拘束ポペット弁の共振周波数である  $50 \sim 80 \text{ kHz}$  において昇圧が可能である．ローサイド・ゲート・ドライバに MICREL の MIC4427YM を，インダクタに TDK の NLFC322522T を使用した．

レギュレータには LM3480IM3-3.3 を使用した．LC 回路の電源電圧から圧力センサおよび計装アンプ，マイクロコントローラの駆動電圧である 3.3 V を生成し，圧力制御回路に供給する．

### 3.3 圧力制御実験

製作した制御回路を使用して，圧力制御が可能であることを検証した．図 10 に実験システムを示す．排気弁の制御回路接続口に制御回路を接続する．出力口を閉じた状態にする．タンクから供給弁に 0.5 MPa を供給する．制御回路に 12 V を供給し，ファンクションジェネレータより目標圧力の信号として 0.1 Hz の正弦波および矩形波を入力する．制御圧力範囲は 0.10 ~ 0.40 MPa とする．実験結果を図 11 に示す．正弦波制御における誤差は  $\pm 0.01 \text{ MPa}$  以下であった．また，矩形波制御における立ち上がり時の遅れ時間は 10 ms であった．製作した三方向無拘束ポペット弁および制御回路によって圧力制御が可能であることが確認できた．

## 4. 圧力制御応答性検証実験

### 4.1 実験概要

本弁は McKibben 型アクチュエータの駆動を目的としている．ここでは三方向無拘束ポペット弁によって McKibben 型アクチュエータの圧力制御が可能である

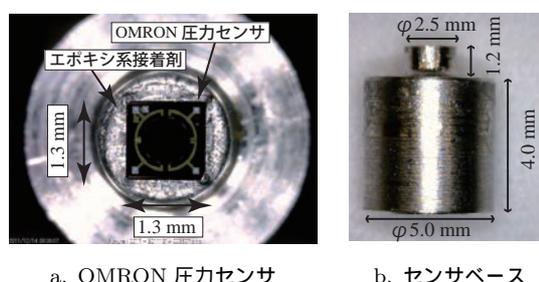
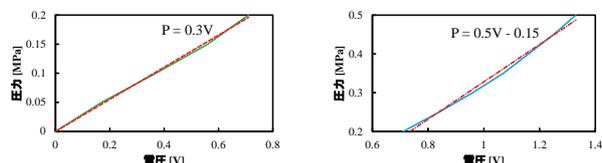


図 8：OMRON 圧力センサとベース



a. 0.2-0.5 MPa の計測値

b. 0.2-0.5 MPa の計測値

図 9：OMRON 圧力センサの圧力-出力電圧特性と近似

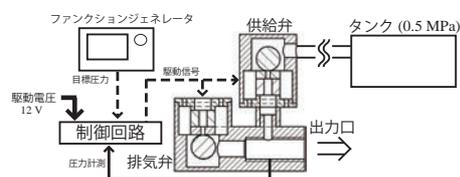


図 10：圧力制御システム

かを検証する．さらにその応答性について検証する．製作した三方向無拘束ポペット弁および制御回路，McKibben 型アクチュエータを使用して，圧力制御実験を行った．図 10 の実験システムを使用し，出力口を McKibben 型アクチュエータへ接続した．McKibben 型アクチュエータには FESTO Ltd. のラバーマッスルシリーズ，MXAM-3-AA を使用した．図 12 に実験に使用した三方向無拘束ポペット弁および，制御回路，McKibben 型アクチュエータを示す．制御圧力として，ファンクションジェネレータから正弦波および矩形波信号を 0.1 Hz から 5.0 Hz の範囲で入力した．実験結果を図 13，図 14 に示す．

### 4.2 考察

図 13 より，正弦波制御では 2.0 Hz までの周波数で応答性の高い制御をすることができた．すなわち，ロボットハンドに搭載した際の負荷がゼロの場合，0.25 秒で曲げ動作を行うことができる．ロボットハンドの動作速度として十分な速度だと考える．しかしながら，2.0 Hz 以上の周波数では遅れおよび，目標圧力に到達できない現象が確認された．これは三方向無拘束ポペット弁の流量が影響していると考えられる．供給弁および排気弁は HS，HE において 2.5 l/min で駆動するよう周波数を設定している．しかしながら，無拘束ポペット弁では差圧によってポペットを固定するため，差圧の変化が流量に影響していると考えられる．内部の圧力が高くなるにつれて供給圧力と内部の圧力との差圧が小さくなり，供給弁の流量が減少する．この結果，0.4 MPa 付近では差圧の減少によって流量が減少し，遅れ

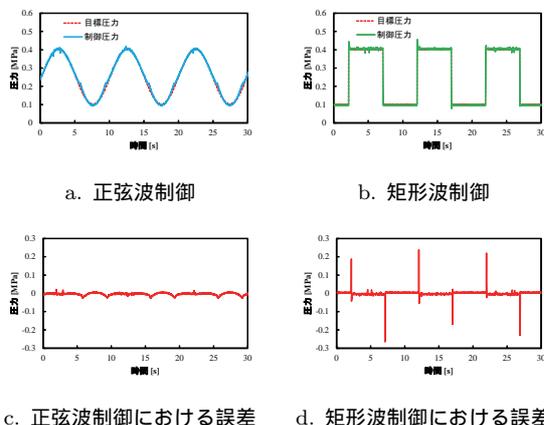


図 11：圧力制御実験結果

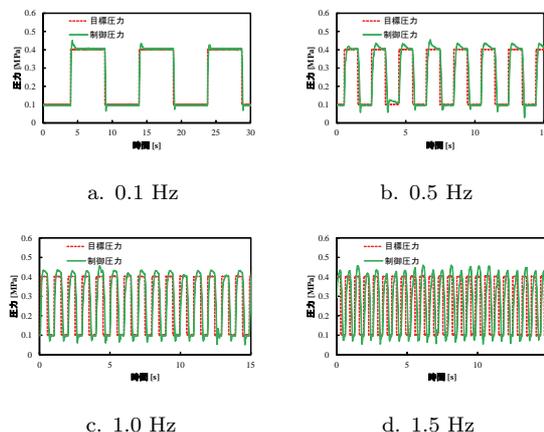


図 14：応答性検証実験結果（矩形波制御）



図 12：実験に使用した三方向無拘束ポペット弁および制御回路，McKibben 型アクチュエータ

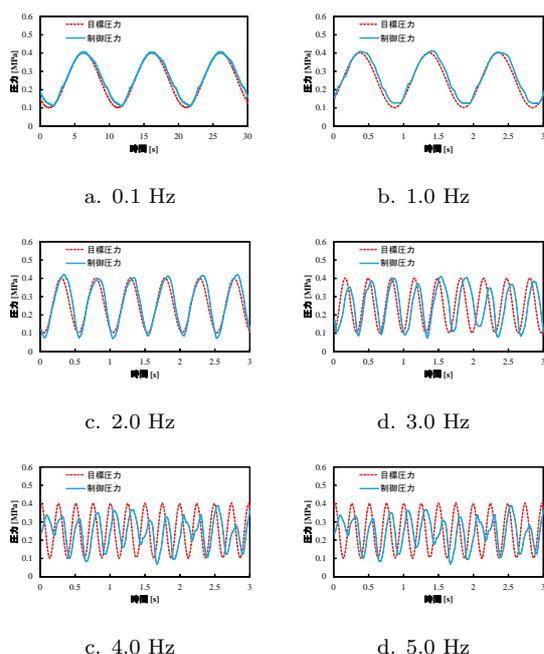


図 13：応答性検証実験結果（正弦波制御）

が生じていると考えられる．流量の変化は排気弁においても同様であり，0.1 MPa 付近で遅れが大きくなる．

また，矩形波制御においては，McKibben 型アクチュエータに接続した状態で圧力を一定に保つことができた．この結果から，ロボットハンドの駆動において，指を曲げ状態あるいは伸ばした状態での保持ができると考えられる．矩形波制御においても流量の減少は問題となる．一定の流量での制御ができないため，立上がり時および立下がり時の遅れが大きくなる．このため，

三方向無拘束ポペット弁の制御において，応答性の高い矩形波制御を行うことは難しいと考える．

しかしながら，これらの問題は流量を増加させることで解決，または応答性を向上させることができる．駆動電圧を高くすることで，弁の流量は増加する．HS および HE の設定流量を高く設定することで，圧力制御の応答性を上げることができると考える．

### 4.3 結言

三方向無拘束ポペット弁と同等のサイズで制御回路を製作した．製作した制御回路によって三方向無拘束ポペット弁の圧力制御が可能であることを確認した．また，McKibben 型アクチュエータを使用した圧力制御および応答性の検証を行った．正弦波制御において高い応答性を確認した．矩形波制御において圧力を保持できることを確認した．このことから，三方向無拘束ポペット弁およびその制御回路によって，ロボットハンドを制御できると言える．

### 4.4 謝辞

圧力センサチップの提供と，その使用にあたってご指導を頂いた OMRON 株式会社様に感謝の意を表します．

### 参考文献

- [1] 細田耕，坂口雄紀：“生物型筋骨格構造をもつ一脚ロボットの跳躍運動”，第 27 回日本ロボット学会学術講演会論文集，RSJ2009AC1K2-04，2009.
- [2] 田中大資，前田浩之，中村太郎：“人工筋肉マニピュレータの突発的な負荷を考慮した関節剛性制御”，第 27 回日本ロボット学会学術講演会論文集，RSJ2009AC2A1-04，2009.
- [3] 巽正之，伊藤正彦，ジエン・スマディ，平井慎一，本田顕真：“振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁の小型化における形状と材質の影響”，平成 21 年春季フルードパワーシステム講演会，pp. 125-127，2009.
- [4] S. Jien, S. Hirai, Y. Ogawa, M. Ito and K. Honda：“Pressure Control Valve for McKibben Artificial Muscle Actuators with Miniaturized Unconstrained Pneumatic On/Off Valves”，Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 1383-1388，2009.
- [5] 泉沢和宏，巽正之，平井慎一：“無拘束ポペット弁の駆動回路”，第 29 回日本ロボット学会学術講演会論文集 RSJ2011AC3K2-6