

昇圧チョッパ回路を用いた無拘束ポペット弁の駆動回路

Unconstraint Poppet Valve Driver based on Step-up Chopper Circuit

○正 平井 慎一 (立命館大) 沖野 友亮 (立命館大)

Shinichi HIRAI and Yuusuke OKINO, Ritsumeikan University

This paper presents a driver for unconstrained poppet valves based on a step-up chopper circuit. Unconstrained poppet valves are small-sized and lightweight, capable of controlling air flow around 0.5 MPa up to 10 L/min. Drivers for unconstrained poppet valves require generation of pulse signals and amplification of driving current. We applied a step-up chopper circuit to realize these requirements on a driver. We found that the developed chopper-based driver could control unconstrained poppet valves.

Key Words: pneumatic valves, unconstrained poppet valves, step-up chopper circuit

1 緒言

本報告は、無拘束ポペット弁の駆動回路について述べる。無拘束ポペット弁は、小型で軽量の空気圧弁であり、圧力 0.5 MPa 程度で流量 10 L/min 程度の空気圧を制御することができる [1, 2, 3]。したがって、人間と同程度のサイズを持つ空気圧駆動ロボットシステムに用いられる、空気圧シリンダやマッキベンアクチュエータを駆動することができる。

無拘束ポペット弁の駆動には、専用のドライバが必要となる。このドライバの主な機能は、電圧パルスの生成と電源電圧の増幅である。これまでに開発してきたプッシュプル型ドライバ [4, 5] では、電圧パルスの生成に外部に設置したファンクションジェネレータを用いていた。ファンクションジェネレータは高価であり、弁本体と比較して非常に大型である。したがって、パルスの生成と電源電圧の増幅が可能で、無拘束弁と同程度の大きさの駆動回路が望まれる。本報告では、昇圧チョッパ回路を基にして、パルスの生成と電源電圧の増幅、流量の制御を単体で行うことが可能な小型の弁駆動回路を提案する。昇圧チョッパ回路はその原理上、使用する部品が少なく、ドライバの小型化に大きく貢献すると考えられる。また、PWM 制御による見かけ上の電源電圧の調節によって、流量の制御が可能であるかを実験により検証する。

2 無拘束ポペット弁

無拘束ポペット弁のプロトタイプを図 1a に、構造を図 1b に示す。弁は、ポペット、貫通穴を有する振動体、ケースから成る。ポペットはケースの中に封入されており、名称の通り他の部材とは接続されていない。構成部品が少なく単純な構造であり、ポペットが無拘束であるため、組立が容易である。プロトタイプは、直径 7 mm、高さ 9 mm の円筒形であり、重量は 1.8 g である。

入力ポートは空気圧源に接続され、出力ポート側は大気圧に保たれる。入力ポート側と出力ポート側の圧力差のため、ポペットは振動体の貫通穴に押し付けられる (図 2a)。これが閉状態である。ここで、貫通穴を有する振動体を振動させると、振動によって生じる慣性力によりポペットが跳躍し、ポペットと振動体との接触が断続的に失われる。結果として、入力ポートから印加された空気が、貫通穴を通して出力ポート側に流れる (図 2b)。これが開状態である。すなわち、振動体の振動を制御することにより、弁の開閉を実現することができる。ポペットと振動体は接続されていないため、振動によって生じる熱で振動体が膨張しても、弁の開閉が可能である。

3 チョッパ型ドライバ

チョッパ型ドライバの構成を図 3 に示す。本回路は、ホストコンピュータからの弁の開閉の指示を受け、パルス波の生成を行うマイクロコントローラと、電源電圧を昇圧するための昇圧回路から構成される。図中の太線で囲まれている箇所がマイクロコ

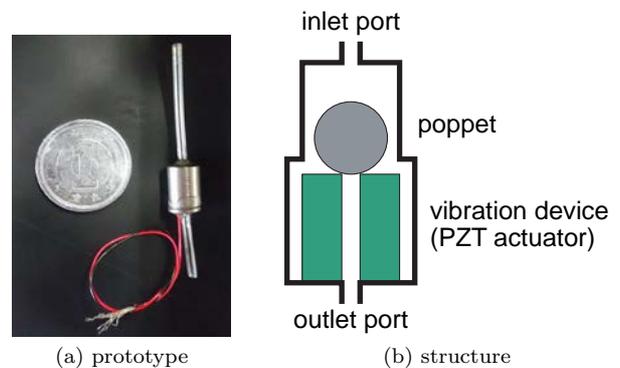


Fig.1: Unconstrained Poppet Valve

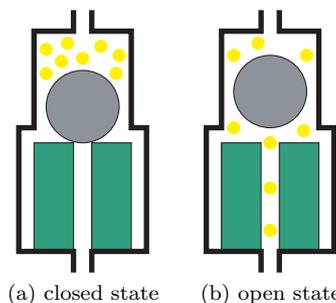


Fig.2: Behavior of Unconstrained Poppet Valve

ントローラの内部回路の簡略図であり、それ以外の箇所は主に昇圧回路である。ホストコンピュータとマイクロコントローラは、シリアル通信の一種である UART 通信により接続される。チョッパ型ドライバの出力電圧は、20 V から 30 V と設定した。マイクロコントローラ部の電源電圧は 3.3 V、昇圧回路部の電源電圧は 7.0 V とした。実際に製作したチョッパ型ドライバの外観を図 4 に示す。製作したドライバの寸法は、コネクタ部を除いて 15 × 20 × 9.5 mm である。

チョッパ型ドライバの動作原理を図 5 に示す。図 3 において、FET (Q_1) が ON となっている状態が図 (a) (フェーズ A)、OFF となっている状態が図 (b) (フェーズ B) に対応する。図中の矢印は、電流の向きを表している。まず、FET を ON にすると、回路はフェーズ A の状態になる。フェーズ A では、電源 V_1 からインダクタ L_1 へと電流が供給される。図中のダイオード D_1

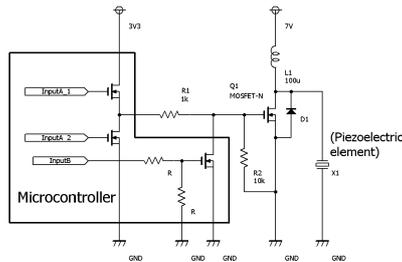


Fig.3: Schematic of chopper-based driver

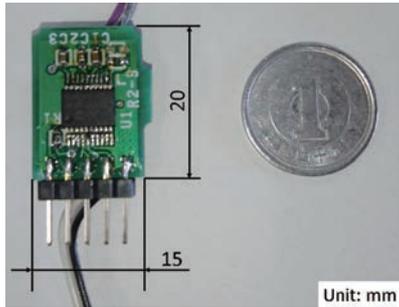


Fig.4: Photograph of chopper-based driver

は、導通状態にある FET を模式的に表している。次に FET を OFF とし、回路をフェーズ B に移行させる。このとき、インダクタ L_1 を流れる電流の経路が瞬間的に切り替えられ、インダクタ L_1 の両端子間には高電圧の起電力が発生する。そのため、インダクタに接続されている圧電素子 (X_1) にも、瞬間的に高電圧が印加される。このフェーズ A とフェーズ B を繰り返すことにより、昇圧動作を行いながら、圧電素子にパルス状の電圧信号を印加することができる。

製作したチョップ型ドライバを無拘束弁の圧電素子に接続して、その圧電素子の端子間の電圧を計測した。電源装置 (BPA351A) の 1 台をドライバのマイクロコントローラ用の電源として、もう 1 台をドライバの昇圧回路部分の電源として使用した。計測結果を図 6 に示す。図中の番号 (1) はフェーズ A からフェーズ B への遷移、番号 (2) はフェーズ B からフェーズ A への遷移の瞬間を表す。(1) から (2) の区間において、フェーズ B の共振回路の働きにより、圧電素子の端子間電圧が脈動する様子が観察できる。

4 チョップ型ドライバを用いた無拘束弁の駆動

本節では、試作したチョップ型ドライバを用いて、無拘束ポペット弁の駆動を試みた結果を示す。実験システムの概略を図 7 に示す。コンプレッサによって圧縮された空気は、タンク、フィルタ、およびレギュレータを介して無拘束弁に供給される。無拘束弁はチョップ型ドライバに接続されており、ホストコンピュータからの開閉の指示に従って制御される。本実験では、ホストコンピュータとしてマイコンボード (Nucleo STM32F401RE) を用いる。マイコンボードはチョップ型ドライバに指示を送るだけでなく、流量計から得られる流量データを収集し、所定のタイミングでノート PC にこれを送信する。

実験は、1) 圧縮空気の供給圧力が 0.50 MPa となるようにレギュレータを設定する、2) マイコンボードから駆動回路に対し、弁を開状態にするように指令を送信する、3) 1 分間に渡って、流量計の出力電圧を記録するという手順で実施した。実験は、2 個の異なる無拘束弁 (Valve A, Valve B) に対して行う。各弁において、流量が最大となる周波数をあらかじめ調べ、それを弁の駆動周波数として用いた。その結果、各弁の駆動周波数は、Valve A で 69 kHz, Valve B で 67 kHz となった。これまでに用いていたプッシュプル型ドライバによる実験結果と、提案するチョップ型ドライバによる実験結果を、図 8 および図 9 に示す。また、流量の 1 分間の平均と標準偏差の値を表 1 に示す。なお、プッシュプル型ドライバを用いるとき、ドライバの電源電圧を 10 V とした。平均流量は、Valve A では 5.1 L/min, Valve B では 9.3 L/min であった。プッシュプル型ドライバを用いた場合と比較すると、Valve A で

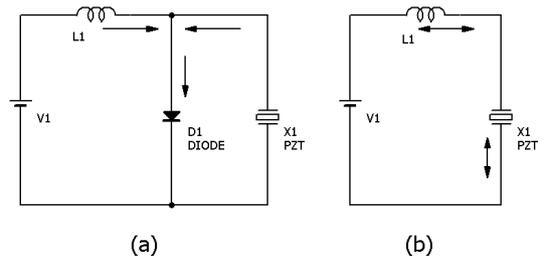


Fig.5: Principle of operation of chopper-based driver



Fig.6: Output voltage of chopper-based driver

は 19% 減少し、Valve B では 1.1% 増加した。すなわち、Valve B では平均流量を維持することができた。一方、Valve A では平均流量が大きく減少した。これは、ドライバの出力パルスの周波数が、無拘束弁の流量が最大となる駆動周波数からわずかに外れてしまったためと考えられる。チョップ型ドライバの出力パルスはマイクロコントローラによって発生されるため、その周波数には誤差が生じる。これによる周波数のずれが、流量を減少させたと考えている。一方、Valve A, Valve B ともに経時的な流量の変化はなく、プッシュプル型ドライバと同様、安定して無拘束弁を駆動できたと言える。一般に、空圧システムは高次の遅れ要素をもち、その時定数は油圧システムなどと比較すると大きく、この遅れ要素はローパスフィルタとして働く。無拘束弁は、この空圧システムの特徴を利用して、流量を安定化している。本実験においては、空圧システムの遅れ要素による流量の平均化の影響が大きく、駆動方式の違いが流量に及ぼす影響は、実用上無視できる程度に抑えられたと考えられる。

5 チョップ型ドライバを用いた流量制御

チョップ型ドライバは、ドライバの電源電圧を制御するための機構として、マイクロコントローラを搭載している。したがって、このマイクロコントローラを利用して流量を制御できる可能性がある。そこで、チョップ型ドライバを用いた PWM (Pulse Width Modulation) 制御によって、無拘束弁の流量の制御が可能であるかを検証する。

これまでに、PWM を用いた空気圧システムの制御法が提案されている [6, 7]。本稿では、文献 [7] の手法を参考にした。無拘束弁は開状態のとき、実際にはポペットの働きにより、流路の開閉が高速で繰り返されている。一方、閉状態のときには、流路は常に閉じられている。この見かけ上の弁の開閉に対して PWM 制御を行うことで、流量の調節を試みる。この手法で用いられる理想的な電圧信号の波形を図 10 に示す。信号 (a) は、弁内の圧電素子を振動させ、ポペットを跳躍させるために必要なパルスである。その周波数は 60 kHz から 80 kHz 程度であり、駆動させる無拘束弁ごとに適切に設定する。また、信号 (b) は、無拘束弁の PWM 制御を行うためのパルスである。無拘束弁を用いたフィードバック系を構成したとき、系の帯域幅を 10 Hz 程度とすることを想定し、信号 (b) の周波数はその 10 倍である 0.10 kHz とした。信号 (a) および (b) を AND 演算によって合成し、昇圧回路に入力することで、信号 (c) が得られる。この信号 (c) を、無拘束弁の圧電素子に印加する。信号 (b) のデューティ比を変化させることにより、無拘束弁の PWM 制御が達成される。

実験は、1) 圧縮空気の供給圧力が 0.50 MPa となるようにレギュレータを設定する、2) 流量制御デューティ比を 0% から 100%

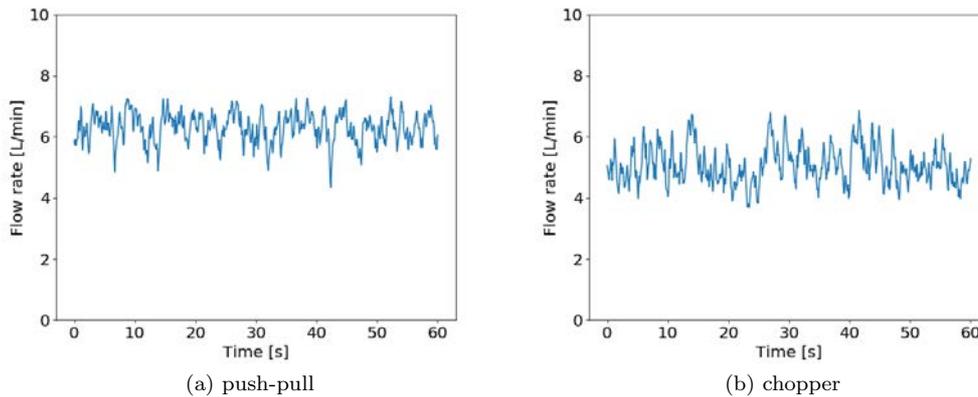


Fig.8: Flow rate of Valve A

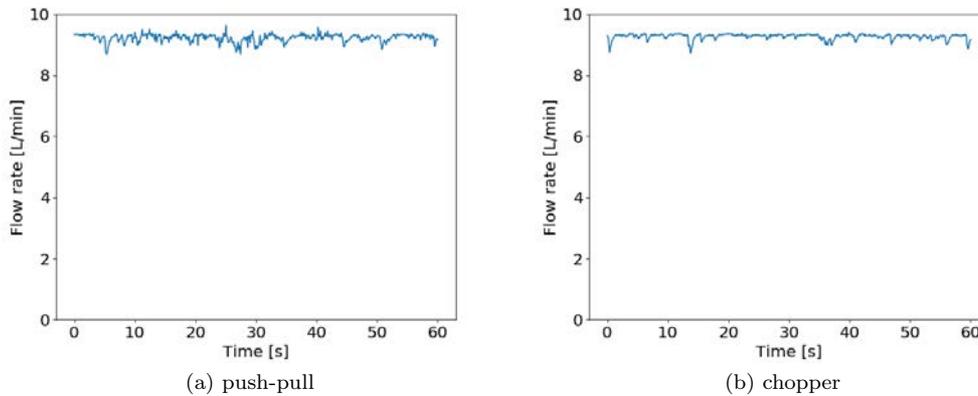


Fig.9: Flow rate of Valve B

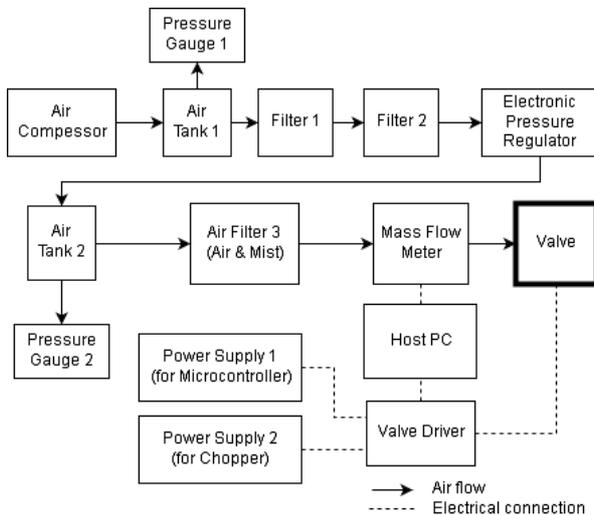


Fig.7: Schematic diagram of experimental system

まで 10% ごとに変化させ、各デューティ比に対し、1 分間の流量データを記録するという手順で実施する。なお、マイコンボードからチョッパ型ドライバに対し、PWM 制御のデューティ比の設定値を送信する。チョッパ型ドライバを用いた流量制御の結果を図 11 に示す。Valve A と Valve B のいずれにおいても、デューティ比の増加に対して、流量は単調に増加した。一方で、流量の増加には大きな違いが見られた。Valve B では、デューティ比 0% から 30% の範囲において、急峻な立ち上がりが見られた。こ

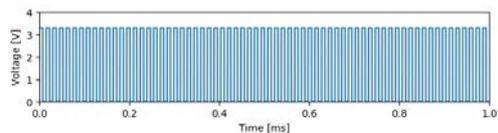
Table 1: Statistics of flow rate

Valve	Driver type	Mean	Std.Dev.
A	Push-pull	6.3 L/min	0.49 L/min
	Chopper	5.1 L/min	0.62 L/min
B	Push-pull	9.2 L/min	0.13 L/min
	Chopper	9.3 L/min	0.093 L/min

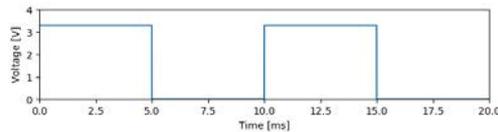
れに対し、Valve A では、全域に渡って比較的線形に増加した。一般に PWM 制御では、デューティ比の増加に対してシステムの出力が線形に増加することが望ましい。この観点から言えば、Valve A では PWM 制御の目的を達成できた一方、Valve B では良好な制御結果が得られなかった。本実験で用いた Valve B においては、圧電素子へのパルスの印加を停止しても、弁が直ちに閉状態とならないことがあった。こうした弁の特性が、実験の結果に影響を及ぼしたと考えられる。

6 結言

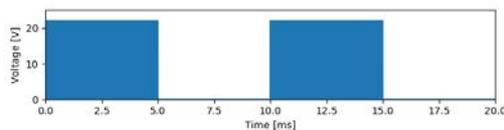
本報告では、昇圧チョッパに基づく無拘束ポペット弁用の小型駆動回路について述べた。駆動回路を試作し、無拘束弁の駆動ならびに流量制御の実験を行った。無拘束弁の駆動実験においては、従来とほぼ同等の流量で駆動することができた。また、流量の安定性に関しても、同程度を確保できた。流量制御の実験においては、PWM を用いた手法によって、流量の段階的な制御が可能であることを示した。しかしながら、PWM 信号のデューティ比に対する流量の変化の割合には、駆動する無拘束弁によって違いが見られた。



(a) high frequency signal to drive a PZT actuator



(b) Low frequency signal for PWM



(c) Mixed output signal

Fig.10: Electrical signals for flow-rate control

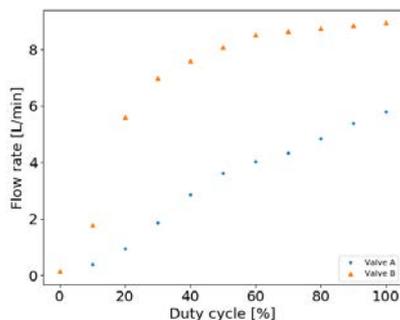


Fig.11: Relation between duty cycle and flow rate

今後の課題は、流量のPWM制御における無拘束弁の個体差の影響を抑制することである。チョップ型ドライバはマイクロコントローラを内蔵しているため、入力信号に対する出力パルスのデューティ比を、非線形に増加させることができる。また、プログラムメモリ内に、個々の無拘束弁のデューティ比と流量特性の関係をルックアップテーブルとして保存しておくことができる。このチョップ型ドライバの特徴を利用することにより、弁の個体差の影響を抑制しつつ、流量を制御することが可能であると期待される。

参考文献

- [1] Shota Uehara and Shinichi Hirai, *Unconstrained Vibrational Pneumatic Valves for Miniaturized Proportional Control Devices*, 9th Int. Conf. on Mechatronics Technology (ICMT2005), Kuala Lumpur, Malaysia, Dec. 5-8, 2005
- [2] Sumadi Jien, Shinichi Hirai, and Kenshin Honda, *Miniaturized Unconstrained On-Off Pneumatic Poppet Valve – Experiment and Simulation –*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 14, Issue 5, pp. 626-635, 2009
- [3] 平井 慎一, 振動駆動マイクロ空気圧弁, 計測と制御, Vol. 56, No. 4, 特集 人に寄り添う空気圧システムの現状と展望, pp. 258-261, 2017
- [4] 巽 正之, ジェン スマディ, 小川 洋一郎, 本田 顕真, 平井 慎一, 振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁のための駆動回路の小型化, ロボティクス・メカトロニクス'10 講演会, 2010
- [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, 2011
- [6] 則次 俊郎, 花房 秀郎, 空気圧シリンダのパルス幅変調方式速度制御: 低速駆動時における一定速度送り, 油圧と空気圧, Vol. 14, Issue 7, pp. 505-512, 1983
- [7] 鈴木 邦秀, 古屋 信幸, 長田 佐, 大内 英俊, 超音波 PWM バルブによる空気圧シリンダの位置および力制御 (第1報): シミュレーションと実験による制御法の検討, 精密工学会誌, Vol. 61, No. 9, pp. 1322-1326, 1995