

無拘束ポペット弁の駆動回路

泉沢和宏 (立命館大) 巽正之 (立命館大) 平井慎一 (立命館大)

1. 緒言

近年、空気圧アクチュエータを使ったロボットハンドや歩行機構の駆動が再評価されている。特に McKibben 型アクチュエータは、人間の筋構造に近い特性を持ち、柔軟な動きが可能である [1]。また、材質・構造の点から小型軽量化が容易であり、それらの特性を利用した柔軟でコンパクトな人間に近いサイズのロボットの研究も行われている [2]。その他にも、McKibben 型アクチュエータの問題である変位量の不足についての研究が行われ、高変位を得られるようになっている [3]。これらの点から、McKibben 型アクチュエータは人間と同サイズのロボットハンドや歩行機構の製作に適していると考えられる。

ここで問題となるのが制御弁のサイズである。1 個の McKibben 型空気圧アクチュエータを駆動するには、給気と排気を行う 1 対の制御弁が必要である。人間のような多関節を有したロボットハンドを製作するためには、多数の McKibben 型空気圧アクチュエータが必要となり、制御弁の数も多くなる。一般的に空気圧アクチュエータに使用されている電磁弁は、高圧力・高流量である反面、構造が複雑であることから小型化には適していない。また、MEMS 技術を利用した制御弁は非常に軽量かつ小型である。しかしながら、ロボットハンドを駆動するための高流量・高圧力を出力することができない [4]。

このため、小型化が容易で、また十分な流量を出力することのできる全く新しい構成の弁として無拘束ポペット弁を開発した [5]。本報告では、この新型弁の駆動に必要な不可欠となる駆動回路 PZT ドライバについて述べる。MOS-FET を用いた回路と、コイルを用いた回路という 2 つのアプローチにより、より小型な駆動回路を製作し、それぞれの挙動を検証する。

2. 無拘束ポペット弁の概要

2-1 構造

無拘束ポペット弁は、ポペットを固定する機構を持たない弁である。図 1 にその構造を示す。無拘束ポペット弁は、主に無拘束のポペット、中心に貫通穴を有したピエゾアクチュエータ、流量を調節するオリフィス、全体を覆うケースから成り立っている。このことから、本弁は比較的簡単な構造をしており、小型化に適している。図 2 に、現状で最小 ($\phi 7 \times 9$ mm) の無拘束ポペット弁を示す。表 1 にピエゾアクチュエータとポペット、オリフィスのサイズを示す。

2-2 駆動原理

本弁の駆動原理を図 1 を用いて説明する。給気口から圧縮した空気を供給すると、ケース内と排気口との間に差圧が生じ、ポペットがオリフィスの穴を塞ぐように密着し、閉状態となる。この状態でピエゾアクチュ

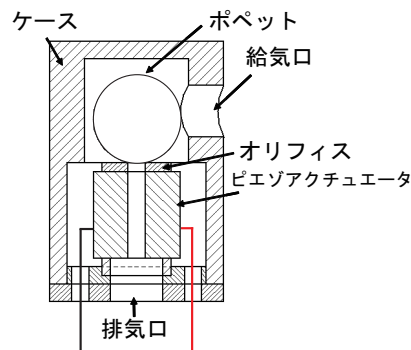


図 1 無拘束ポペット弁の構造

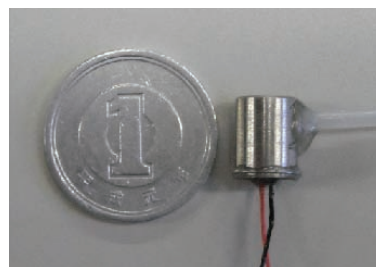


図 2 無拘束ポペット弁のプロトタイプ

表 1 無拘束ポペット弁の要素の大きさ

要素	サイズ [mm]
ピエゾアクチュエータ	3 × 3 × 2
ポペット	$\phi 3.0$
オリフィス	$\phi 0.5$

エータに矩形波を印加すると、ピエゾアクチュエータとともにオリフィスが振動する。オリフィスからの撃力によってポペットが跳躍運動を行い、それによって生じた隙間から空気が流れ、開状態となる。この時、周波数により流量が変化するため PFM (Pulse Frequency Modulation) 信号を使用し、適当な周波数を印加する。本報告では、矩形波のデューティ比を 50 % とする。

2-3 PZT ドライバ

本弁においては、印加周波数、駆動電圧および出力電流量が流量に影響する。ピエゾアクチュエータの変位量は駆動電圧の大きさで決まり、電流量によって変形速度が決まる [6]。変位量と変位速度が大きくなれば流量も高くなる。本弁を制御する場合、マイクロコントローラから入力する命令信号は TTL か CMOS レベルである。しかしながら、ピエゾアクチュエータを十分に変位させ、必要な流量を出力するためには 25.0V

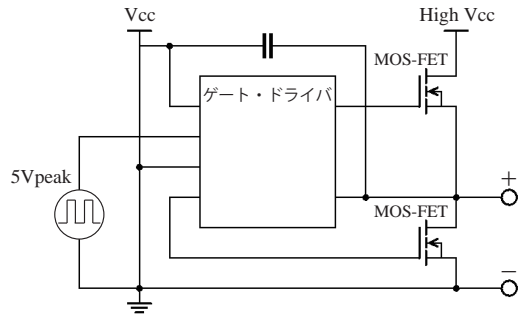


図3 MOS-FET型PZTドライバの基本構成

程度の駆動電圧が必要となる [7] . このことから、マイクロコントローラからの入力信号を任意の周波数で増幅することのできる、小型かつ高出力なPZTドライバが必要となる .

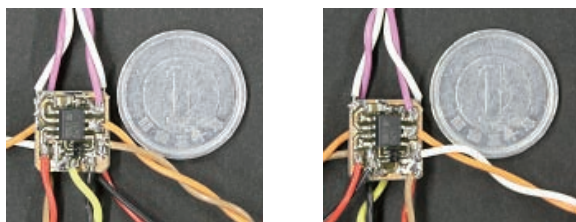
3. MOS-FET型PZTドライバ

3.1 構成

本弁の小型化に伴い、PZTドライバを小型化する . サイズが重要となるのは、弁の数だけPZTドライバが必要となるからである . また、本弁は2方向弁であるため、実際の使用では2つの無拘束ポペット弁を組み合わせて使用する . このため、PZTドライバは少なくとも2つの弁を独立して駆動できる出力を持ち、なおかつ弁と同サイズもしくはそれ以下でなければならない .

本章では、MOS-FETによるハーフ・ブリッジ回路を用い、スイッチングによって無拘束ポペット弁を駆動する方法で、PZTドライバの小型化を図る . 図3にその基本構成を示す . これまで1入力1出力であったPZTドライバについて、小型化しつつ2入力2出力のドライバを製作した .

図4にMOS-FET型PZTドライバのプロトタイプを示す . デッド・タイム回路、ブートストラップ回路を内蔵したゲート・ドライバを使用することで、シンプルな構成のハーフ・ブリッジ回路となっている . ゲート・ドライバにはSTMicroelectronicsのL6741を使用し、MOS-FETにはSANYOのMCH6622を使用した . 両面実装とし、1入力1出力のPZTドライバを両面に配置することで2入力2出力となっている . 共通の電源で独立した2つの矩形波出力を得ることができ、出力できる矩形波電圧は60.0 Vまでである . サイズは11 × 12 × 5 mmである . 表2にドライバの特性を示す .



(a) 表

(b) 裏

図4 MOS-FET型PZTドライバのプロトタイプ

表2MOS-FET型PZTドライバのプロトタイプの特徴

項目	詳細
最大出力電圧	60.0 [V]
ゲート・ドライバ供給電圧	10.0 [V]
最大出力パルス電流	4.0 [A]
MOS-FET オン抵抗	0.2 [Ω]
サイズ	11 × 12 × 5 [mm]
入出力数	2入力2出力(独立)

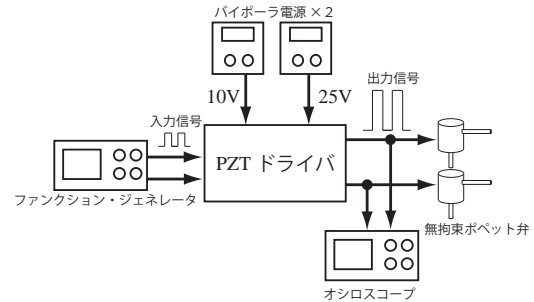


図5 MOS-FET型PZTドライバの駆動環境

3.2 駆動実験

3.2.1 駆動環境

図5にドライバの駆動環境を示す . スwitching用電源と、ゲート・ドライバ用電源の2つの電源を使用する . 本弁に必要な駆動電圧が25.0 Vであることから、switching用電源は25.0 V、ゲート・ドライバ用電源は10.0 Vとし、ファンクション・ジェネレータからピーク電圧5.0 Vの矩形波を入力する .

3.2.2 実験方法

ファンクション・ジェネレータから入力1, 2にそれぞれ別々の矩形波を入力し、2つの無拘束ポペット弁を駆動する . 矩形波の周波数を0.0 ~ 80.0 kHzまで印加し、1.0 kHzごとに流量を計測する . また、最大流量を計測した周波数において、出力波形と電流量を計測する .

3.2.3 実験結果

図6に出力流量、図7に流量が最大となった周波数での出力波形と、その電流量を示す .

結果として、出力1, 2ともに68.0 kHz印加時に於いて流量が最も高くなり、4.0 l/minを超える流量を出力した . 本報告では、McKibben型アクチュエータの駆動のために、3.0 l/minの流量が弁に必要と考えており、得られた流量は十分である . また、図7から、矩形波の立ち上がりにおけるピーク電流値が、出力1で1.1 A、出力2で1.5 Aと非常に高いことがわかる . このことから、 piezoelectricアクチュエータの変形速度が速く、十分な撃力を得られたと考える .

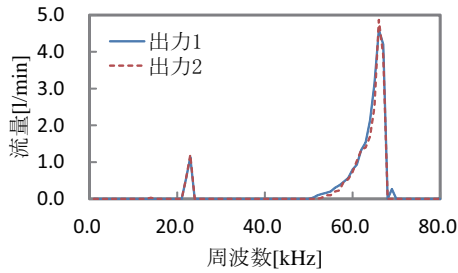
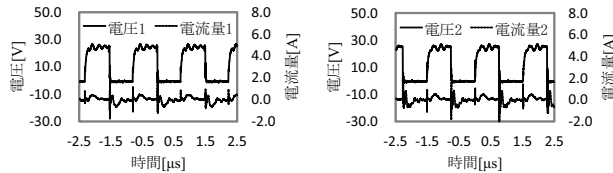


図6 MOS-FET型PZTドライバのプロトタイプの高周波数と出力流量の関係



(b) 出力1

(c) 出力2

図7 MOS-FET型PZTドライバのプロトタイプの高周波数と出力電流量の関係

4. コイル型PZTドライバ

4.1 構成

3章において、小型かつ高出力なMOS-FET型PZTドライバを実現した。しかし、MOS-FET型PZTドライバにおいては印加する矩形波の電圧分の供給電圧と、さらにゲート・ドライバ用の電源が必要となる。本研究において無拘束ポペット弁を小型化するためには、電源の大きさと数も重要となる。この問題を解決するため、LC回路の共振を利用する[8]。図8にその構成を示す。コイルとピエゾアクチュエータ内のキャパシタンスを利用し、LC回路を構成する。LC回路に共振周波数を印加することでインピーダンスが0となるため、入力電圧よりも大きな電圧を出力することができる。また素子点数も削減される。ここで重要となるのは、無拘束ポペット弁とLC回路の共振周波数を同じにすることである。無拘束ポペット弁の共振周波数は変えることができないため、コイルのインダクタンスを変えることで共振周波数を同じにする。コイルのインダクタンスの値は、無拘束ポペット弁の共振周波数とピエゾアクチュエータのキャパシタンスによって決定する。

本章では、2入力2出力のドライバを製作し、流量の計測を行った。図9にコイル型PZTドライバのプロトタイプを示す。2回路を内蔵したローサイド用ゲート・ドライバを使用することで、2入力2出力でありながら非常にシンプルな構成となっている。3-2より無拘束ポペット弁の共振周波数を60.0~70.0kHzと考え、お互いの共振周波数が近い値となる220μHのコイルを使用した。ゲート・ドライバはMicrelのMIC4427YM、コイルはPanasonicのELJPA221KFを2素子使用し

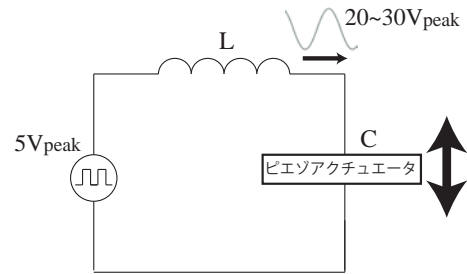
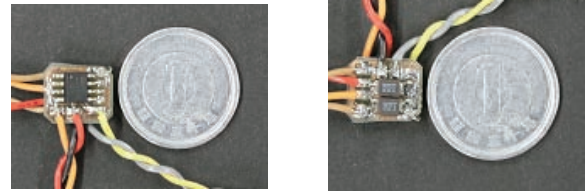


図8 コイル型PZTドライバの基本構成



(a) 表

(b) 裏

図9 コイル型PZTドライバのプロトタイプ

表3 コイル型PZTドライバのプロトタイプの特性

項目	詳細
最大駆動電圧	22.0 [V]
最大出力電流	1.5 [A]
コイル直流抵抗	11.0 [Ω]
サイズ	11 × 9 × 6 [mm]
入出力数	2入力2出力(独立)

ている。サイズは11 × 9 × 6 mmである。表3に回路の特性を示す。

4.2 駆動実験

コイル型PZTドライバの最大の利点は、必要な出力電圧に対して供給電圧を低く設定できることである。ここではコイル型PZTドライバのプロトタイプによる無拘束ポペット弁の駆動実験によって、供給電圧と出力流量の関係を検証する。

4.2.1 駆動環境

図10にコイル型PZTドライバの駆動環境を示す。矩形波はファンクション・ジェネレータから入力し、ゲート・ドライバ内でスイッチングによって矩形波を昇圧する。共振周波数の矩形波を入力することで、矩形波はさらに増幅された正弦波となって出力される。

4.2.2 実験方法

まず、コイル型PZTドライバで駆動した場合の無拘束ポペット弁の共振周波数を調べるため、供給電圧10.0Vにおいて周波数を0.0~80.0kHzまで変化させた場合の流量を計測する(実験1)。次に、実験1より明らかとなった無拘束ポペット弁の共振周波数において、供給電圧を0.0~15.0Vまで変化させた場合の出力流量を計測する(実験2)。

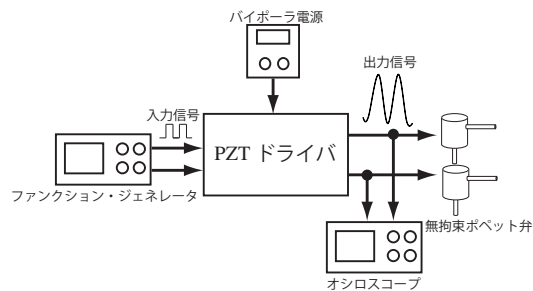


図10 コイル型 PZT ドライバの駆動環境

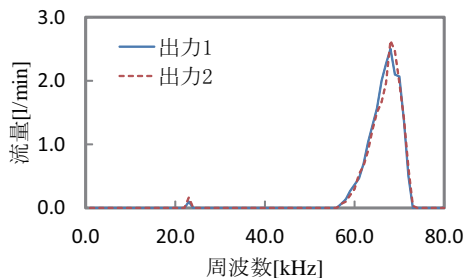


図11 コイル型 PZT ドライバのプロトタイプでの周波数と出力流量の関係 (実験 1)

4.2.3 実験結果

図11に周波数を変化させた場合の出力流量を示す。その結果、コイル型 PZT アクチュエータで駆動した場合の無拘束ポペット弁の共振周波数は 68.0 kHz となった。実験1の結果から、印加周波数 68.0 kHz において供給電圧を変化させた場合の流量の変化を図12に、初めて 3.0 l/min を超えた 12.0 V 印加時の出力波形および出力電流量を図13に示す。

結果として、供給電圧 12.0 V 以上で必要となる 3.0 l/min を出力できた。その場合の出力信号の電位差は出力1で 25.6 V、出力2で 26.3 V であり、MOS-FET 型 PZT ドライバによって駆動した場合に必要な電圧とほぼ等しい値となった。このことから、正弦波においても矩形波と同等の撃力を得ることができていると考える。またピーク電流値は、出力1で 0.7 A、出力2では 0.6 A であった。MOS-FET 型 PZT ドライバを 25.0 V で駆動した場合に比べて低い値となったのは、使用しているコイルと MOS-FET を比べた場合、コイルの抵抗値が高いためであると考えられる。

本実験によって、コイル型 PZT ドライバでは MOS-FET 型 PZT ドライバの半分以下の供給電圧で、無拘束ポペット弁を十分に駆動できることがわかった。素子点数、駆動電圧の面からコイル型 PZT アクチュエータが小型化に優位であるといえる。

5. 結言

本報告においては、MOS-FET 型 PZT ドライバとコイル型 PZT ドライバという2パターンでの PZT ドライバを製作、検証を行った。ともに2入力2出力で小型かつ高出力な点では同等な駆動回路を製作することができた。しかし、電源の大きさ、回路構成を考慮する

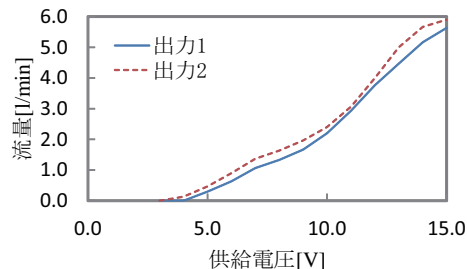


図12 コイル型 PZT ドライバのプロトタイプでの供給電圧と出力流量の関係 (実験 2)

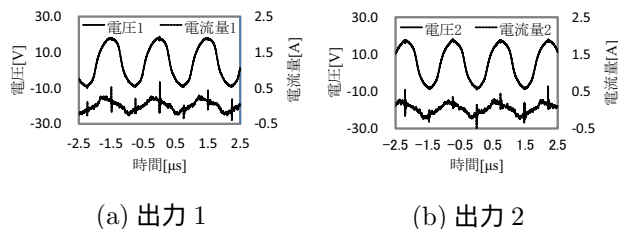


図13 コイル型 PZT ドライバのプロトタイプでの出力波形と出力電流量の関係

と、コイル型 PZT ドライバは MOS-FET 型の半分以下の供給電圧、素子点数で製作することができるという利点を有する。このことから、コイル型 PZT ドライバのプロトタイプの方がより小型な PZT ドライバであるといえる。

これらを踏まえ、今後はセンサ、マイコンを備えた PZT ドライバの研究を行う。

参考文献

- [1] アクチュエータシステム技術企画委員会編, 樋口俊郎 著作 代表: “アクチュエータ工学”, pp122-123, 養賢堂, 2004.
- [2] 細田耕, 坂口雄紀: “生物型筋骨格構造をもつ一脚口ポペットの跳躍運動”, 第27回日本ロボット学会学術講演会論文集, RSJ2009AC1K2-04, 2009.
- [3] 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.
- [4] K. W. Oh, C. H. Ahn: “A review of microvalves”, J. Micromech. Microeng. 16, R13-39, 2006.
- [5] 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”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, ROBOMECH20051A1-S-083, 2005.
- [6] S. Jien, S. Hirai, and K. Honda, “Miniaturized Unconstrained On-Off Pneumatic Poppet Valve - Experiment and Simulation-”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.14, Issue 5, pp.626-635, 2009.
- [7] 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”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, ROBOMECH20102A2-C12, 2010.
- [8] S. O. Reza Moheimani, A. J. Fleming: “Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping”, pp.73-78, Springer, 2006.