

# 振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁の 駆動用発振回路の開発

○宮治和弥(立命館大学) 平井慎一(立命館大学)

## 1. 緒言

近年、人間の動作を補助する歩行機構などのウェアラブルロボットを、空気圧アクチュエータを用いて駆動させようとする動きが高まっている[1][2]. 空気圧アクチュエータを使用する際に問題となるのがアクチュエータを制御するための制御弁である. ウェアラブルロボットの中で、特に空気圧アクチュエータで駆動する歩行機構などは、多数のアクチュエータと制御弁を必要とする. そのため、制御弁のサイズと重量が大きな問題となる. 一般的に空気圧アクチュエータの駆動に使用される高出力な電磁ソレノイド弁のサイズは数十 mm 以上と大きく、ロボット内部に組み込むことは難しい. また、MEMS 技術を利用した弁は非常に小型、軽量である. しかし、出力が小さくロボットハンドなどに使用するサイズのアクチュエータを駆動できないという問題が起こる. そこで、振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁が提案された[3].

本弁は、比較的単純な機構で構成されており、非常に小型で高流量な制御弁である. しかし、制御弁の周辺システムの小型化は実現できていない. 現在、無拘束弁の駆動には、ファンクションジェネレータおよび電源装置が必要である. また、無拘束弁ごとの駆動周波数にずれがあるため、無拘束弁 1 つの駆動に対して 1 台のファンクションジェネレータが必要である. これでは多数の無拘束弁を使用する場合、ファンクションジェネレータも多数必要となるので周辺システムは巨大なものになってしまう. 無拘束弁自体が小型であっても、周辺システムが巨大であるとその効果は発揮されにくい. そのため、ファンクションジェネレータに代わる発振回路を開発することが望まれる.

## 2. 振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁

### 2.1 駆動原理

振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁の構造を図 1 に示す. 空気を給気口からケース内に供給すると、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. これが空気を通すことのない閉状態である. ここで、PZT アクチュエータにパルス電圧を印加すると、PZT アクチュエータは振動する. その振動により PZT アクチュエータに接着されているオリフィスも同様に振動し、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う. そ

の結果、ポペットとオリフィスの間に隙間が生じ、空気を放出する. これが開状態である.

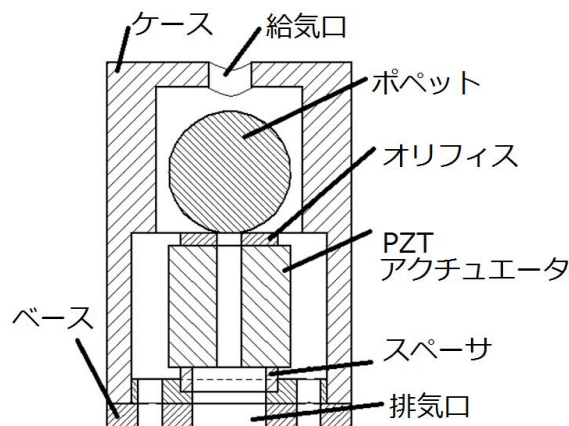


図 1 無拘束弁の構造

### 2.2 構造

無拘束弁は主にポペット、オリフィス、PZT アクチュエータ、全体を覆うケース、そして蓋となるベースという 5 点のパーツから構成される. ポペットは  $\phi 2.0\text{mm}$  の球であり、跳躍運動を行うことでオリフィスの穴の開閉を行う. オリフィスは流量を調節するパーツであり、PZT アクチュエータの上部に接着されている. オリフィスの内径は  $\phi 0.5\text{mm}$  である. PZT アクチュエータは本弁の主となる部分であり、このアクチュエータによって本弁は駆動している. PZT アクチュエータは図 1 の断面図のように中心に穴を有し、空気はその穴を通り空気圧アクチュエータに供給される. ケースには空気の供給口があり、チューブが取り付けられている. ベースには空気の排出口があり、そこにもチューブが取り付けられている. また、ベースには PZT アクチュエータの配線を通すための穴も有する.

### 2.3 周波数特性

無拘束弁を駆動させるためには、PZT アクチュエータにパルス電圧を印加しなければならない. 2 つの無拘束弁について、印加する電圧の周波数と流量の関係を図 2 に示す. 無拘束弁には共振周波数が存在し、共振周波数周辺以外では流量は急激に低下する. また、同じ構造の無拘束弁でも個体差があり、共振周波数の値は異なる. その共振周波数は経験上、 $60\sim 80\text{kHz}$  の間に存在することが分かっている.

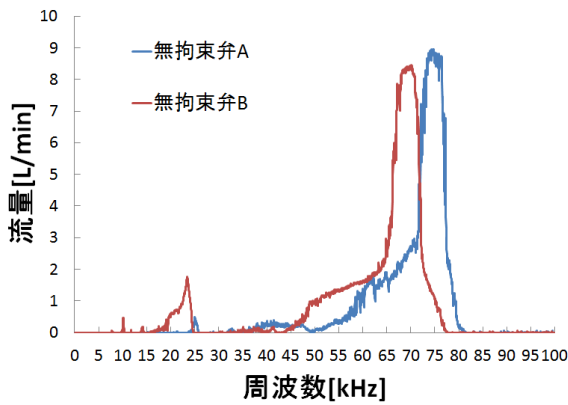


図2 無拘束弁の周波数特性

## 2.4 駆動システム

従来の無拘束弁の駆動システムを図3に示す. 矩形波を生成することのできるファンクションジェネレータにて  $5V_{peak}$  の矩形波を生成する. 生成した矩形波を PZT ドライバにより増幅し, それを無拘束弁に印加することで駆動させる. 無拘束弁の共振周波数に個体差があるため, 無拘束弁1つを駆動させるのに1台のファンクションジェネレータが必要になる. そのため, 多数の無拘束弁を駆動させるには, 多数のファンクションジェネレータが必要になり, システム全体が非常に大きくなってしまふ.

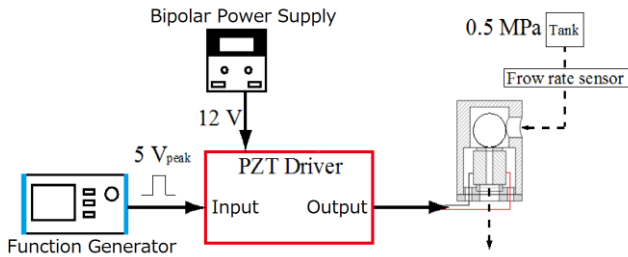


図3 従来の駆動システム

## 3. 無安定マルチバイブレータ回路

ファンクションジェネレータに代わる発振回路として, 無安定マルチバイブレータ回路を製作した. 無安定マルチバイブレータ回路は, 収束することなく矩形波のパルス電圧を発振し続ける回路である. トランジスタ, 抵抗, コンデンサのみで回路が構成でき, チップ抵抗やチップコンデンサ, チップトランジスタを使用することで後の小型化が可能である.

製作したマルチバイブレータの回路図を図4に示し, 構成素子のパラメータを表1に示す. この回路により  $V_{out}$  から  $V_{cc}$  をピーク値とする矩形波が生成される. その矩形波の周波数  $f$  および duty 比  $d$  は,

$$f = \frac{1}{0.69(R_x C_x + R_y C_y)} \quad (3.1)$$

$$d = \frac{R_x C_x}{0.69(R_x C_x + R_y C_y)} \quad (3.2)$$

で与えられる. 発振周波数は, 式(3.1)により抵抗値  $R_x$  および  $R_y$  を変化させることで任意に変化させることができる. しかし, 2つの抵抗値を可変とすると自由度が高く, 目的の周波数への調節が困難となる. そこで, 抵抗値  $R_y$  のみを変化させることで発振周波数を変化させる. このとき, 同時に式(3.2)より duty 比も  $R_y$  の変化により変動する.

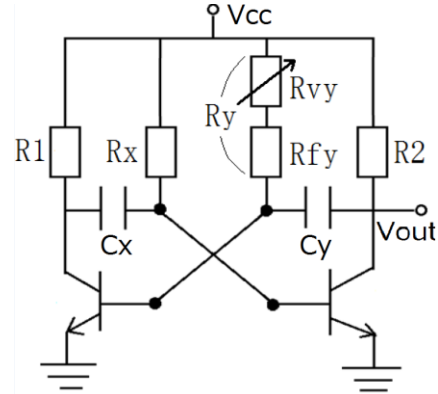


図4 無安定マルチバイブレータ回路図

表1 構成素子パラメータ

構成素子	パラメータ
$R_x$	1 k $\Omega$
$R_{vy}$	0~1 k $\Omega$
$R_{fy}$	560 $\Omega$
$R_1, R_2$	43 $\Omega$
$C_x, C_y$	0.01 $\mu F$

製作したマルチバイブレータ回路において, 実際に  $V_{out}$  から生成された矩形波を図5に示す.

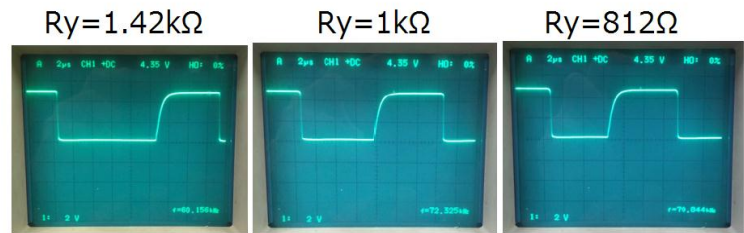


図5 生成矩形波

発振周波数は  $R_y=1.42k\Omega$  のとき 60.156kHz,  $R_y=1k\Omega$  のとき 72.325kHz,  $R_y=812\Omega$  のとき 79.844kHz であった. したがって, 製作したマルチバイブレータ回路で, 発振周波数が 60~80kHz 程度の矩形波が生成可能であるとわかった. しかし, この範囲で式(3.2)より, duty 比が 41.3~55.2%の範囲で変動する.

## 4. 無拘束弁の duty 比に対する流量特性

### 4.1 実験目的

従来のファンクションジェネレータを用いた無拘束弁の駆動では, 無拘束弁に印加するパルス電圧

の周波数値に関わらず，duty 比は 50%であった．しかし，マルチバイブレータを用いた無拘束弁の駆動では，duty 比が 41.3～55.2%の範囲で変化する．つまり，マルチバイブレータを用いた駆動では，ファンクションジェネレータ使用時と同じ周波数の矩形波を生成し印加するとき，duty 比が変化してしまう．よって，無拘束弁をその共振周波数で駆動させたとき，duty 比が変動しても流量が変化しないか調べる必要がある．そこで，本実験で無拘束弁の共振周波数での駆動において，duty 比が変化したときの流量の変化を調べる．

#### 4.2 実験環境

本実験の構成を図 6 に示す．流量計から出力される流量出力電圧を読み取る機器として Arduino と PC を使用する．また，本実験で測定した 3 つの無拘束弁を表 2 に示す．

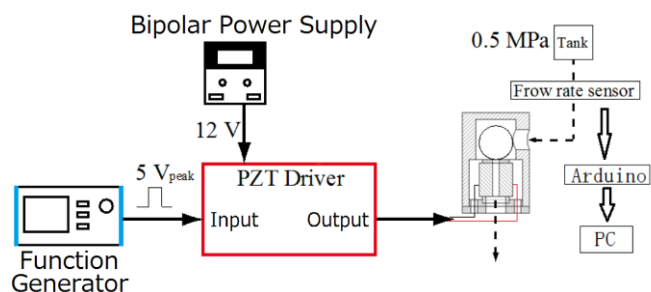


図 6 実験環境

表 2 測定した無拘束弁

無拘束弁	共振周波数
無拘束弁 1	74.3 kHz
無拘束弁 2	74.2 kHz
無拘束弁 3	70.2 kHz

#### 4.3 実験手順

実験手順を以下に示す．

- 1) 第 4.2 節の実験環境を構成し，無拘束弁 1 を接続する．
- 2) ファンクションジェネレータの出力波形を 5V<sub>peak</sub> の矩形波に設定し，周波数は無拘束弁の共振周波数に設定する．
- 3) バイポーラ電源による PZT ドライバへの印加電圧を 12V に設定する．
- 4) ファンクションジェネレータを操作し duty 比のみを変化させる．Duty 比は 0.00% から 100% まで 0.01% 刻みで一定の速度で変化させ，このとき Arduino のアナログ入力端子で流量計から得られる流量出力電圧を 0.1 秒間隔で取得する．
- 5) 流量出力電圧を実際の流量に換算し，実験結果として記録する．
- 6) 計測を 3 回行い，無拘束弁 2，無拘束弁 3 にお

いても同様の計測を行う．

#### 4.4 実験結果・考察

図 7 に無拘束弁 1，図 8 に無拘束弁 2，図 9 に無拘束弁 3 の duty 比に対する流量特性を示す．

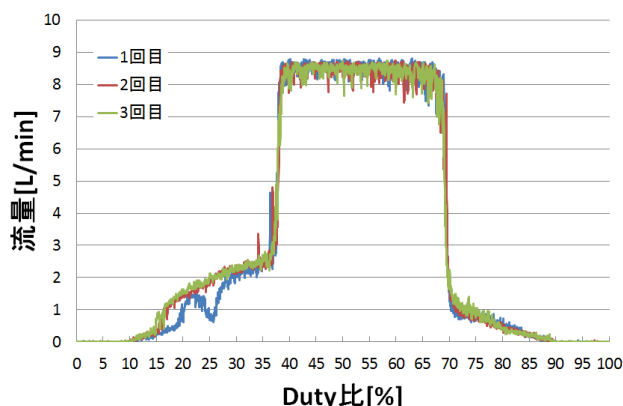


図 7 無拘束弁 1 の duty 比に対する流量特性

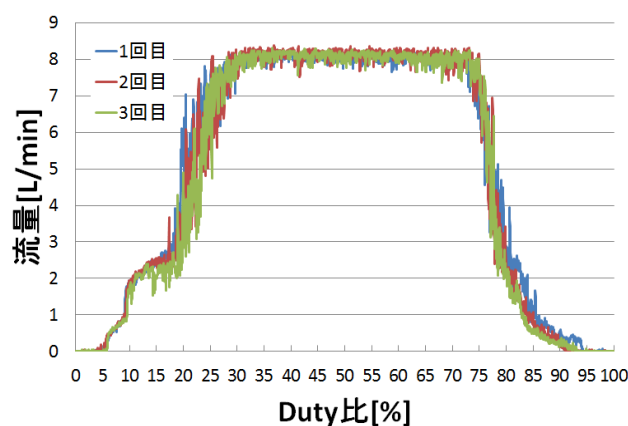


図 8 無拘束弁 2 の duty 比に対する流量特性

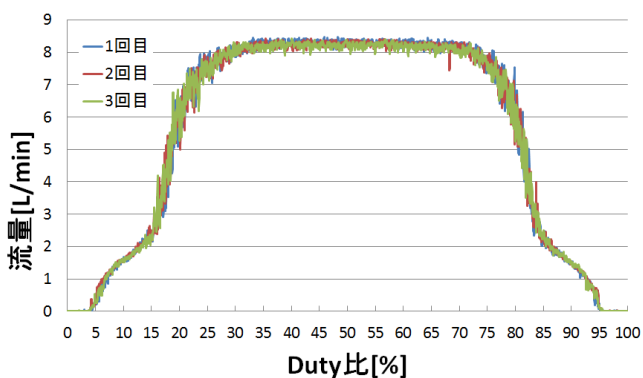


図 9 無拘束弁 3 の duty 比に対する流量特性

無拘束弁 1 では約 40～65%において最大流量約 8.8L/min，無拘束弁 2 では約 30～70%において最大流量約 8.2L/min，無拘束弁 3 では約 30～70%において最大流量約 8.3L/min をそれぞれ計測している．マルチバイブレータの duty 比の変化は，発振周波数 60～80kHz の範囲では 41～55%の範囲の変化でしかない．実験結果では，いずれの無拘束弁においても，少なくとも 41～55%の範囲では最大流量を維持でき

ている。よって、ファンクションジェネレータをマルチバイブレータに置き換えたとしても無拘束弁の流量を低下させることはないとする。

## 5. マルチバイブレータを用いた無拘束弁の駆動

### 5.1 実験目的

第3章で製作したマルチバイブレータは、第4章の実験によりファンクションジェネレータに代わる発振回路として無拘束弁の駆動に利用可能であることがわかった。そこで、第4章で使用した3つの無拘束弁をマルチバイブレータで駆動させ、流量を測定する。それをファンクションジェネレータを用いたときの流量と比較し、評価する。

### 5.2 実験環境

本実験の構成を図10に示す。これは第4.2節での実験環境において、ファンクションジェネレータをマルチバイブレータに置き換え、回路への供給電源としてArduinoの5V出力ピンを接続したものである。無拘束弁は、第4章で使用した無拘束弁1、無拘束弁2、無拘束弁3を用いる。

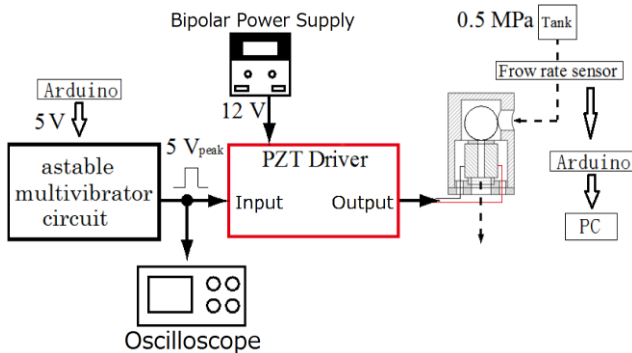


図10 実験環境

### 5.3 実験手順

実験手順を以下に示す。

- 1) 第5.2節の実験環境を構成し、無拘束弁1を接続する。
- 2) オシロスコープを見ながらマルチバイブレータの発振周波数を無拘束弁1の共振周波数に設定する。
- 3) バイポーラ電源によるPZTドライバへの印加電圧を12Vに設定する。
- 4) 流量計から得られる流量出力電圧を10秒間0.1秒間隔でArduinoのアナログ入力端子より取得する。
- 5) 流量出力電圧を実際の流量に換算し、平均したものを実験結果として記録する。
- 6) 無拘束弁2、無拘束弁3においても同様の計測を行う。

## 5.4 実験結果・考察

実験結果と事前に計測しておいたファンクションジェネレータを用いた場合の流量を表3に示す。

表3 実験結果

無拘束弁	マルチバイブレータ使用時の流量	ファンクションジェネレータ使用時の流量
無拘束弁1	8.47 L/min	8.73 L/min
無拘束弁2	8.16 L/min	8.39 L/min
無拘束弁3	8.00 L/min	8.64 L/min

流量は、いずれの無拘束弁においてもファンクションジェネレータを用いたときより減少した。しかし、いずれも流量は大きく減少することはない。3つの無拘束弁で8.00L/min以上の流量を出力できた。また、マルチバイブレータを用いたことによる流量の減少は、今後PZTドライバへの外部供給電源の電圧を上げることなどで改善できると考える。よって、今後無拘束弁の駆動にはマルチバイブレータを使用しても必要十分な流量は得られると考える。

## 6. 結言

本研究の目的は、ファンクションジェネレータに代わる駆動用発振回路を開発することであった。その回路の満たすべき条件は、周波数が60~80kHzの範囲で発振できることである。そこで、無安定マルチバイブレータ回路を製作し、回路を構成する1つの抵抗を可変抵抗とすることで任意の周波数の矩形波を発振できるようにした。しかし、発振周波数の変化に連動してduty比も変化する。そのため、無拘束弁に印加する矩形波のduty比が変化したときの流量の変化を実験により調べた。その結果、実験に使用した3つ無拘束弁において、少なくとも41~55%の範囲では最大流量が維持できるとわかった。よって、製作したマルチバイブレータを用いて実際に無拘束弁の駆動実験を行った。流量はファンクションジェネレータを用いた駆動より低下した。しかし、流量を大きく低下させることはなく、いずれも8.00L/min以上の出力が実現できた。今後の課題は、マルチバイブレータとPZTドライバを融合させ、1つの電源と1つの発振回路だけで駆動システム全体を構成することである。

## 参考文献

- [1] K.Suzumori: "New Pneumatic Actuators Producing Breakthrough in Mechatronics," Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, pp. 197-202, 2008.
- [2] 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.
- [3] 平井慎一: 振動駆動マイクロ空気圧弁, 計測と制御, 56(4), 258-261, 2017