

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

Development of oscillation circuit for driving unconstrained poppet pneumatic valve

○宮治 和弥 (立命館大) 正 平井 慎一 (立命館大)

Kazuya MIYAJI, Ritsumeikan University
Shinichi HIRAI, Ritsumeikan University

In recent years, the application of pneumatic actuator to drive a robot was increased. However, the commonly used pneumatic valves are large in size and may not be incorporated inside the robot. Therefore, we developed a compact, high flow of unrestrained poppet pneumatic valve. However, the size of peripheral system for driving the unrestrained poppet pneumatic valve is still large. Currently it is driven using a function generator. As an alternative function generator, an astable multivibrator circuit was adopted. Here, we proposed an astable multivibrator circuit for driving the unrestrained poppet pneumatic valve and verified its practicality.

Key Words: Air valve, Oscillation circuit, Multivibrator

1. 緒言

近年、ロボットハンドやウェアラブル等で、空気圧アクチュエータを用いて駆動させようという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。例えば、マニピュレータの先端に搭載された空気圧ロボットハンドを動かす場合を考える。多くの場合、先端の空気圧ロボットハンドの駆動に必要な制御弁は、マニピュレータの根元にまとめて配置される。そして、根元の制御弁とハンドの空気圧アクチュエータをチューブで繋ぎ、空気圧が供給される。しかし、多自由度の空気圧ロボットハンドの駆動は、多数の制御弁を必要とするため、多くのチューブがマニピュレータ付近に設置されることになり、これらがマニピュレータの運動を妨げる恐れが高い。この問題の1つの解決策が、制御弁の小型軽量化である。これにより、制御弁をマニピュレータの根元ではなく、先端のハンド側に配置することが可能となる。すなわち、空気圧を供給する際、マニピュレータの根元からハンドまでを1本のチューブで供給し、そこから分流させて各空気圧アクチュエータに供給することが可能となる。結果、チューブがマニピュレータの運動を妨げる恐れは低くなる。しかし、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、非常に小型かつ軽量である反面、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、小型かつ軽量で、十分な流量を確保できる全く新しい構成の弁として、振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁を提案する[3]。

本弁は、比較的単純な機構で構成されており、非常に小型かつ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それぞれ必要である。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ため、周辺システムは巨大かつ高コスト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小型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

本弁は、PZT アクチュエータが振動することで、無拘束のポペットを振動させる。このため、振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁と名付けた。ここでは、本弁の概要について述べる。

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、空気が流れる。これが開状態である。

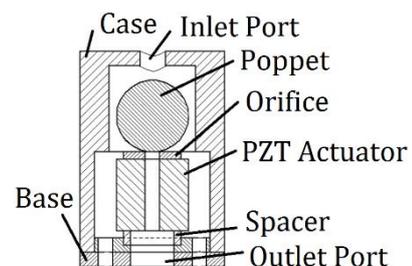


Fig. 1 Structure of an unconstrained valve

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、ベースという5点のパーツで構成される。ポペットはφ2.0mmのステンレス球であり、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φ0.5mm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の断面図に示す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。ある2つの無拘束弁 A, B 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、共振周波数の値はそれぞれ異なる。しかし、その共振周波数は経験上、60~80kHz の間に存在することが分かっている。

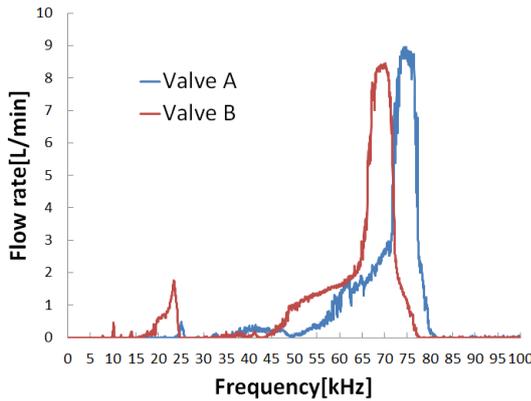


Fig. 2 Flow rate – frequency relationship

2.4 従来の駆動システム

従来の無拘束弁の駆動システムを図 3 に示す。まず、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。次に、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。複数の無拘束弁を駆動させる際、各弁の共振周波数には個体差があるため、無拘束弁の数だけファンクションジェネレータが必要になる。そのため、無拘束弁の使用数に比例してシステム全体が大きくなってしまう。

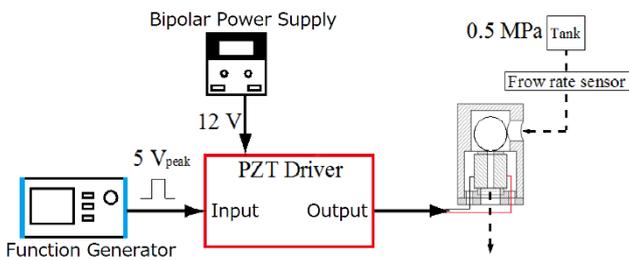


Fig. 3 Conventional drive system

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小型発振回路として、無安定マルチバイブレータ回路を製作した。本回路は、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。さらに、トランジスタ、抵抗、コンデンサのみで回路が構成でき、ファンクションジェネレータに比較して非常に小さい。

製作したマルチバイブレータの回路図を図 4 に示し、構成要素のパラメータを表 1 に示す。この回路に電源電圧 V_{cc} を印加することで、V_{out} から V_{cc} を peak 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、

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

$$d = \frac{R_x C_x}{0.69(R_x C_x + R_y C_y)} \quad (2)$$

で与えられる。無拘束弁の共振周波数は、60~80kHz の間に存在するため、発振周波数はその範囲で調節可能でないといけない。そこで、発振周波数 f を式(1)により、抵抗値 R_x および R_y を可変として任意に変化させる。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_x を微細な範囲の周波数調整用に低レンジの可変抵抗とし、抵抗値 R_y を主要な範囲の周波数調整用に高レンジの可変抵抗とした。このとき、式(2)より duty 比も周波数の変化に連動して変化する。

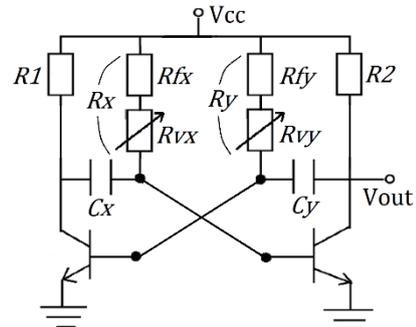


Fig. 4 Astable multivibrator circuit

Table 1 Parameter of component

構成要素	パラメータ
R _{fx}	1 kΩ
R _{vx}	0~50 Ω
R _{fy}	560 Ω
R _{vy}	0~1 kΩ
R ₁ , R ₂	43 Ω
C _x , C _y	10 pF

製作したマルチバイブレータ回路において、実際に V_{out} から生成された出力波形を図 5 に示す。

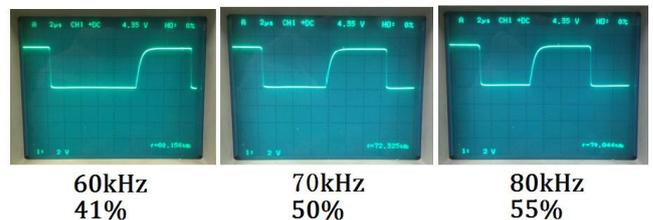


Fig. 5 Multivibrator output waveform

発振周波数は、R_y を調節することで約 60~80kHz の範囲で任意の周波数の矩形波が生成可能であることが確認できた。しかし、この範囲において、duty 比も 41~55% の範囲で連動して変化してしまうことも確認された。

4. 無拘束弁の duty 比に対する流量特性

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、弁に印加するパルス電圧の周波数値に関わらず、その

duty 比は 50%であった。しかし、ファンクションジェネレータに代わるマルチバイブレータ回路を用いた無拘束弁の駆動を考えたとき、弁に印加するパルス電圧の duty 比が 50%であるとは限らず、41~55%の範囲のいずれかとなる。そのため、無拘束弁は、その共振周波数での駆動において、duty 比が 50%でなくとも、その性能が発揮できなくてはならない。ここでは、無拘束弁の duty 比の変化に対する流量特性について述べる。

4.1 実験目的

本実験では、無拘束弁の duty 比の変化に対する流量特性について調べる。そして、実験結果からマルチバイブレータ回路を無拘束弁の駆動に用いることが可能かどうかを検証する。

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、ファンクションジェネレータでは、周波数を固定したまま duty 比を自在に操作することが可能である。実験では、3つの無拘束弁を使用し、それぞれ無拘束弁 1、無拘束弁 2、無拘束弁 3 と名付ける。

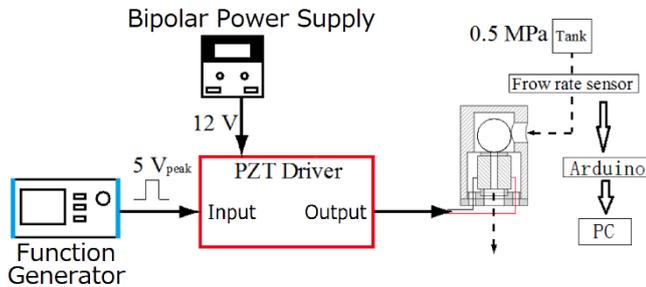


Fig. 6 System for driving the valve

4.3 実験手順

実験の手順を以下に示す。

- 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_{peak} 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 比を 0% に設定する。そして、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 30 秒間取得する。
- 5) 得られた流量出力電圧を実際の流量に換算し、その平均を実験結果として記録する。
- 6) 4)および 5)の手順で 0~100%までを 5%刻みで同様に計測する。
- 7) 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

実験により得られた無拘束弁 1、無拘束弁 2、無拘束弁 3 の duty 比に対する流量特性を図 7 に示す。無拘束弁 1 では、約 25%以下および約 75%以上において流量が急激に低下している。同様に、無拘束弁 2 では、約 35%以下および約 70%以上において流量が急激に低下し、無拘束弁 3 では、約 30%以下および約 70%以上で急激に低下している。しかし、これらの範囲内では、最大流量近い流量を維持できている。

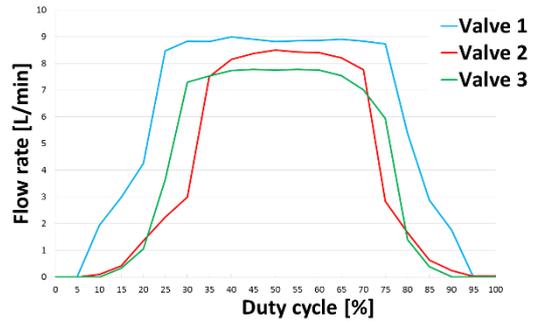


Fig. 7 Flow rate – duty cycle relationship

4.5 考察

それぞれの無拘束弁の共振周波数には個体差があるのと同様に、最大流量を維持する duty 比の範囲にも個体差があると考えられる。その原因として、無拘束弁を 1 つずつ手作りしていく過程で生じる製造誤差が挙げられる。例えば、旋盤で加工した部品を切り落とす際の遊びの違いや、接着する際の接着剤の量の違いなどがこれらの個体差を生む要因と考えられる。しかし、いずれの無拘束弁においても、少なくともマルチバイブレータ回路の変動範囲である 41~55%では最大流量近くを維持できている。したがって、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考えられる。

5. マルチバイブレータ回路を用いた無拘束弁の駆動

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利用可能であることが分かった。ここでは、マルチバイブレータを実際に使用して無拘束弁の駆動を検証する。

5.1 実験目的

本実験では、実際に無拘束弁をマルチバイブレータで駆動させ、流量を計測する。そして、その流量をファンクションジェネレータを用いた場合の流量と比較することで、マルチバイブレータの実用性を評価する。

5.2 実験環境

本実験に使用する駆動回路構成を図 8 に示す。本回路は、左半分がマルチバイブレータを構成する回路、右半分が PZT ドライバを構成する回路となっており、両者を一体化している。本実験の構成を図 9 に示す。無安定マルチバイブレータ回路部に印加する電源電圧は、定電圧レギュレータにより 12V から 5V に降圧している。また、実験に使用する 2 つの無拘束弁を、それぞれ無拘束弁 A、無拘束弁 B と名付ける。

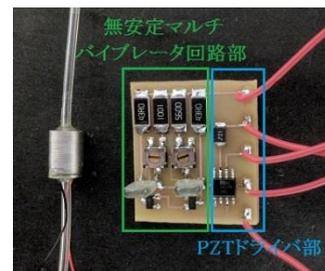


Fig. 8 Multivibrator and PZT driver

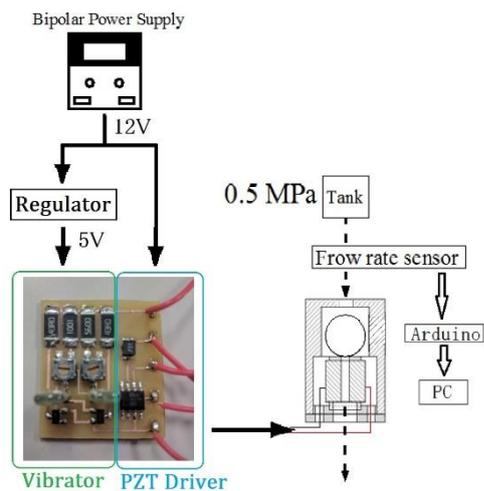


Fig. 9 System for driving the valve

5.3 実験手順

実験の手順を以下に示す。

- 1) 第 5.2 節の実験環境を構成し、無拘束弁 A を接続する。
- 2) バイポーラ電源による電源電圧を 12V に設定する。
- 3) マルチバイブレータの可変抵抗を操作し、発振周波数を無拘束弁 A の共振周波数に調整する。
- 4) 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 30 秒間取得する。
- 5) 得られた流量出力電圧を実際の流量に換算し、その平均を実験結果として記録する。
- 6) 無拘束弁 B においても同様の計測を行う。

5.4 実験結果

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 2 に示す。

Table 2 Flow rate measured by experiment

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 A	8.40 L/min	8.35 L/min
無拘束弁 B	8.86 L/min	8.85 L/min

5.5 考察

マルチバイブレータを用いた場合の流量は、従来のファンクションジェネレータを用いた場合の流量と同程度得られている。よって、製作したマルチバイブレータは、ファンクションジェネレータの代わりとなる役割を十分果たしているといえる。今後、無拘束弁の駆動において、本駆動回路を採用しても従来と同水準の駆動が可能であると考えられる。

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 2 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、周波数調整の自由度を低くするとともに、微細な範囲での調整もしやすくするため、2 つの可変抵抗のうち、1 つを高レンジの可変抵抗、もう 1 つを低レンジの可変抵抗とした。その結果、発振周波数の変化に連動して duty 比も変化することになってしまう。その変動範囲は、発振周波数 60~80kHz の範囲では 41~55% である。そこで、無拘束弁への印加電圧の duty 比を変化させ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 つ無拘束弁のいずれにおいても、少なくとも 41~55% の範囲では最大流量と同程度の流量が維持できるとわかった。すなわち、無拘束弁は想定する範囲の duty 比の変動に影響しないことが確認できた。次に、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。その流量は、ファンクションジェネレータを用いた場合の流量と同程度であった。よって、本駆動回路および電源のみで、従来のファンクションジェネレータを用いた場合と同水準の駆動が可能であるとわかった。今後の課題は、本駆動回路を用いた無拘束弁の流量を制御することである。また、現在は 1 つの無拘束弁だけを駆動させる環境であるため、複数の無拘束弁を同時に駆動させる環境を本回路を用いて構築する。

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.