

振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁による 空気圧シリンダの位置制御

○谷和弘太郎(立命館大学) 平井慎一(立命館大学)

1. 緒言

現在、市販の小型空気圧弁は未だに数 10mm 以上とサイズが大きく、ロボットマニピュレータ内部や駆動部付近に組み込むことは困難である。よって、弁を新たに設けたスペースに設置し、そこからチューブを駆動部に接続するのが一般的である。しかし、複数の空気圧アクチュエータを有したマニピュレータの場合、空気圧を伝える多くのチューブを必要とし、これらのチューブがマニピュレータの運動を妨げる恐れがある。この問題を解決するためには、空気圧弁を小型軽量化し、駆動部付近に組み込む必要がある。空気圧を一本のチューブから供給し、駆動部付近で空気圧を分流することで、空気圧弁を介して個々のアクチュエータを駆動させることが可能である。このように、空気圧弁を小型軽量化することは、多数の空気圧アクチュエータを有したマニピュレータを駆動し制御する際には非常に有効であるといえる。

そこで我々は、小型軽量で、流量 10L/min 程度を確保することの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した。以降、この弁を無拘束弁と呼ぶ。

本研究では、無拘束弁を利用して PWM 制御による簡便な方法で、空気圧シリンダの位置制御を試みた。研究の目的としては、ロボットマニピュレータに使用できる実用的なシステムを開発することに重点を置き、位置決め精度も、ほぼ $\pm 0.1\text{mm}$ 程度を目標とした。このような目的ののちとって、本報告ではシミュレーションと実験を交互に検証、併用しながら制御法および制御システムの検討を行った。

2. 振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁

2.1 駆動原理

空気圧弁を小型化するためには、構造が単純であることが望ましい。また、小型弁は熱膨張の影響を受けにくい構造が望ましい。これらの要請を満たす弁として、図 1 に示す無拘束弁を提案した[1][2]。無拘束弁は主にポペット、オリフィス、貫通穴を有する 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パーツから成り立っており、比較的単純な構造である。現在、この無拘束弁は供給圧力 0.5MPa で 10L/min 以上の流量を発揮できる。また、重量 1.8g、直径 7mm、高さ 9mm の円筒形である。

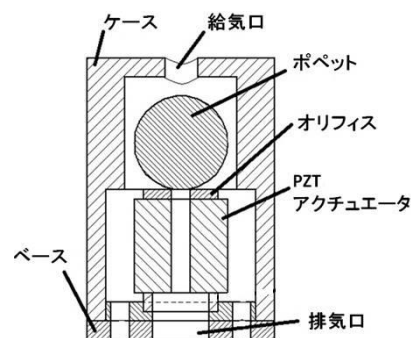


図1 無拘束弁の構造

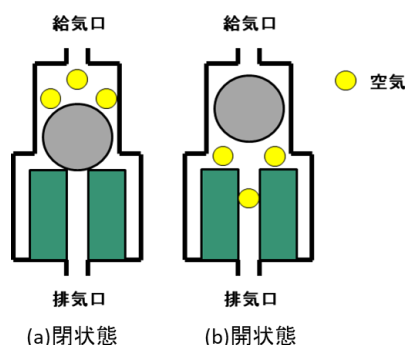


図2 無拘束弁の駆動原理

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(図 2(a))。この状態で PZT アクチュエータに正弦波を印加すると、PZT アクチュエータとともにオリフィスが振動する。オリフィスが振動することにより生じる慣性力によりポペットが跳躍し、ポペットとオリフィスとの接触が断続的に失われる。結果として、給気口から供給された圧縮空気が、排気口から放出される(図 2(b))。これが開状態である。そのため、PZT アクチュエータの振動を制御することにより、弁を ON・OFF することはもちろんのこと、流量も制御することが可能である。

2.2 駆動回路

無拘束弁は、PZT アクチュエータの振動によって駆動する。そのため、無拘束弁の流量は PZT アクチュエータを振動させるための電圧パルスの生成機能とその電圧パルスの増幅機能を有した専用の駆動回路が必要となる。また、無拘束弁は駆動周波数に個体差があるため、任意の周波数の電圧パルスを生成することが可能である駆動回路が必要である。これらの要請を満たす駆動回路として、任意の電圧パルスを生成する無安定マルチバイブレータ回路とそれを

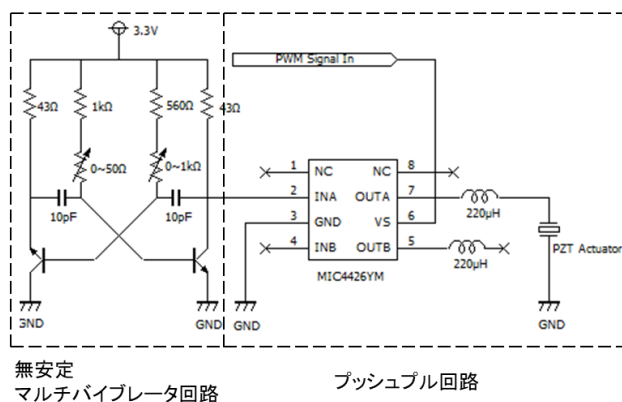


図3 無拘束弁の駆動回路図

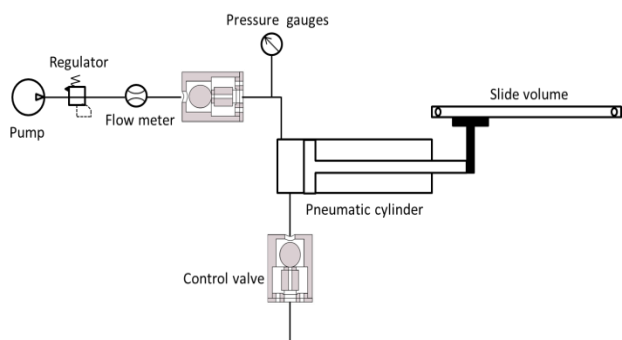


図4 空気圧シリンダ制御システム

増幅するプッシュプル回路を用いる[3]. その回路図を図3に示す. 2つの可変抵抗の値を変えることで, 無拘束弁の駆動に必要な60~80kHzのパルス信号を得ることができる.

3. 空気圧シリンダ制御システム

3.1 制御システム

空気圧シリンダ制御装置を図4に示す. 制御装置はArduino UNO R3を使用している. 空気圧シリンダは市販されている片ロッド形複動シリンダで, 内径32mm, ロッド径12mm, ストローク長100mmである. 位置の検出には, シリンダに取り付けたスライドボリュームを使用している. 無拘束弁は2方向弁であるため, 空気圧シリンダの1つの気室に対して給気用・排気用の2つの弁が必要である. 実験で用いた空気圧シリンダは, 複動型エアシリンダであり, 気室が2つある. そのため, 2つの気室に入出する空気圧を制御して空気圧シリンダの運動を制御するには, 4つの無拘束弁が必要である. 本実験の目的は, 無拘束弁と空気圧シリンダのシミュレーションモデルの作成と, 簡便な方法による空気圧シリンダの位置制御である. 制御を簡単にするため, 片側の気室には初期圧力0.2MPaの空気圧を付加し, 絞り弁を用いて密閉することで, 無拘束弁の数を2つに減らして実験を行う. ただし, この手法は空気圧シリンダのストローク範囲を制限してしまう.

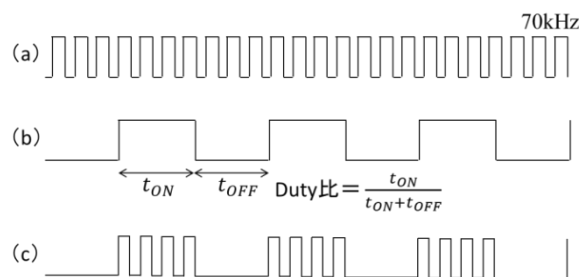


図5 制御信号

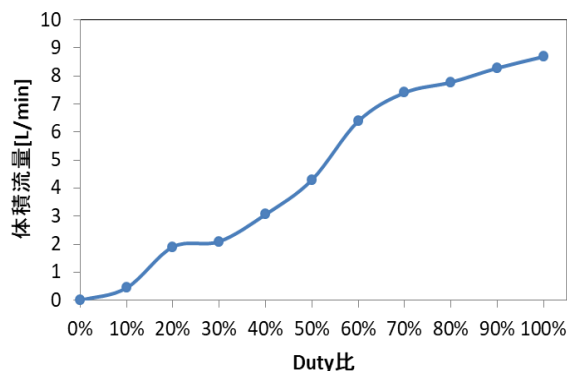


図6 PWM制御による無拘束弁の体積流量

3.2 無拘束弁の流量制御方法の検討

本研究では, 無拘束弁の流量の制御にPWM制御を用いる. PWM制御では, 無拘束弁を駆動するための電源電圧を変動させる必要はない. また, マイクロコントローラからPWM信号を出力できるため, 無拘束弁の駆動回路が大型化してしまうことはない. 無拘束弁におけるPWM制御を図5に示す. 図5(a)の信号は, 無拘束弁を駆動するための信号である. この信号は駆動回路から得ることができる. 周波数は70kHzであり, 電圧の大きさは3.3Vである. ただし, 弁によりその値は微妙に異なる. 図5(b)の信号は, 無拘束弁に与えるPWM信号である. この信号はマイクロコントローラから得ることができる. 周波数は460Hzであり, 電圧の大きさは13Vである. これら2つの信号のANDをとったものが, 制御信号である(図5(c)). 図5(b)の信号のDuty比を変化させることにより, PWM制御を行う. このDuty比はマイクロコントローラにより変更することが可能である.

弁の給気口に0.5MPaの空気圧を付加し, 圧縮空気の排気は大気開放とした. マイクロコントローラによりDuty比を10%ずつ変化させ, それぞれに対して体積流量を1分間の平均で求めたときのDuty比と体積流量の関係を図6に示す.

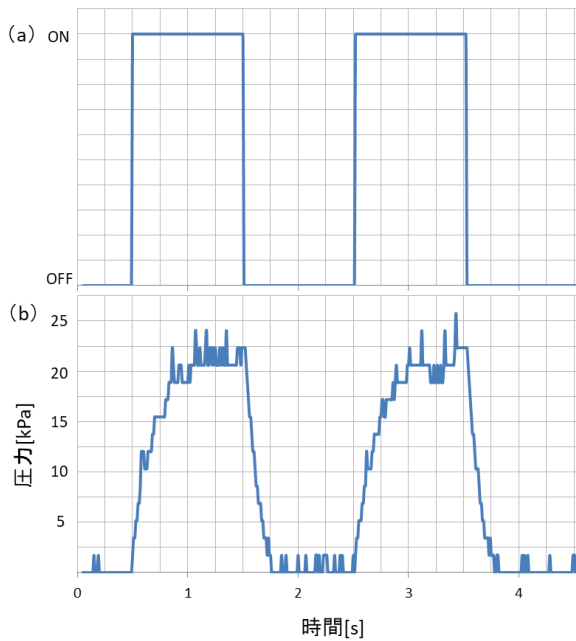


図7 無拘束弁のステップ応答

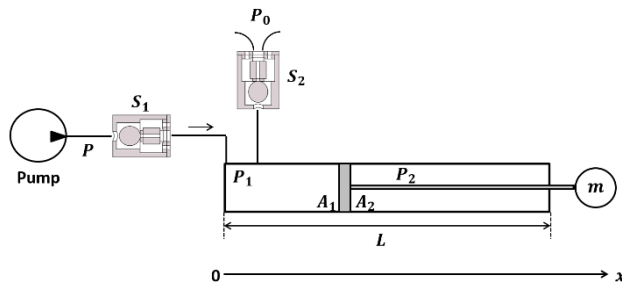


図8 空気圧シリンダのモデル

次に、コンピュータから出力された信号(図7(a))に対する無拘束弁の応答性(図7(b))を調べた結果を図7に示す。無拘束弁は2方向弁であるため、絞り弁を用いて空気の逃げ道を作りながら測定した。そのため、計測された圧力の値は実際に空気圧シリンダに使用するものとは異なる。サンプリングタイムは10msである。

以上の結果から、無拘束弁は入力信号に対しての遅れはなく、平均流量はDuty比を変えることで制御可能なことが確認できた。

4. シミュレーションモデルの検討

PWM制御によるシリンダの動作をシミュレーションによって解析するための解析モデルについて検討した。

4.1 運動方程式

図8におけるパラメータとその他のパラメータの値を表1に示す。給気用の弁を弁1、排気用の弁を

弁2と呼称する。弁1がオンで弁2がオフの場合は式(1)、弁1がオフで弁2がオンの場合は式(2)が成り立つ。また、式(3)の $Y(Z)$ は給気口側の圧力と排気口側の圧力の比によって変化する関数で、流量がこの関数の値に従って変化する。弁1、弁2の有効断面積をそれぞれ S_1 、 S_2 とする。

$$(1) \begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = \frac{kRT}{A_1 x} S_1 P \sqrt{\frac{2}{RT} Y\left(\frac{P_1}{P}\right)} - \frac{kP_1}{x} \cdot \frac{dx}{dt} \\ \frac{dP_2}{dt} = \frac{kP_2}{L-x} \cdot \frac{dx}{dt} \\ m \frac{d^2 x}{dt^2} = A_1 P_1 - A_2 P_2 - B \frac{dx}{dt} - f \cdot \text{sgn}(\dot{x}) \end{cases}$$

$$(2) \begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -\frac{kRT}{A_1 x} S_2 P \sqrt{\frac{2}{RT} Y\left(\frac{P_0}{P_1}\right)} - \frac{kP_1}{x} \cdot \frac{dx}{dt} \\ \frac{dP_2}{dt} = \frac{kP_2}{L-x} \cdot \frac{dx}{dt} \\ m \frac{d^2 x}{dt^2} = A_1 P_1 - A_2 P_2 - B \frac{dx}{dt} - f \cdot \text{sgn}(\dot{x}) \end{cases}$$

$$(3) Y(Z) = \begin{cases} \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} & 0 \leq Z < 0.528 \\ \frac{k}{k-1} \left(Z^{\frac{2}{k}} - Z^{\frac{k+1}{k}} \right) & 0.528 \leq Z \leq 1 \end{cases}$$

表1 シミュレーションパラメータ

積載重量 m	1.0kg
気室1の断面積 A_1	$8.0384 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
気室2の断面積 A_2	$6.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
粘摩擦係数 B	$700 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
比熱比 k	1.4
固体摩擦 f	20N
気体定数 R	$8.314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{K}$
温度 T	293K
タンク内空気圧 P	0.5MPa
シリンダ全長 L	100mm

4.2 制御およびシミュレーションのアルゴリズム

式(1)から式(3)の微分方程式を解いてシリンダ動特性のシミュレーションを行うためのプログラムを開発した。プログラムの概要について説明する。まず、初期設定で各種パラメータの値を入力し、Runge-Kutta法により運動方程式を解いた。計算結果の変位、速度、シリンダ内部の圧力を配列に記憶させておき、次のステップの初期条件として計算を進めた。シミュレーションでは粘摩擦係数と固体摩擦の大きさは、実験結果と比較しながら適当な値をみつけた。

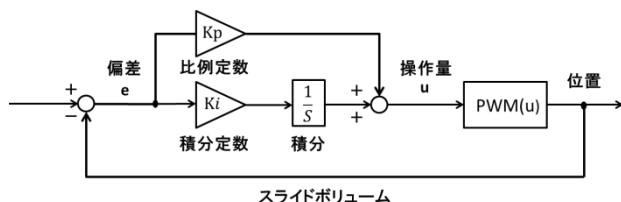


図9 制御システムのブロック線図

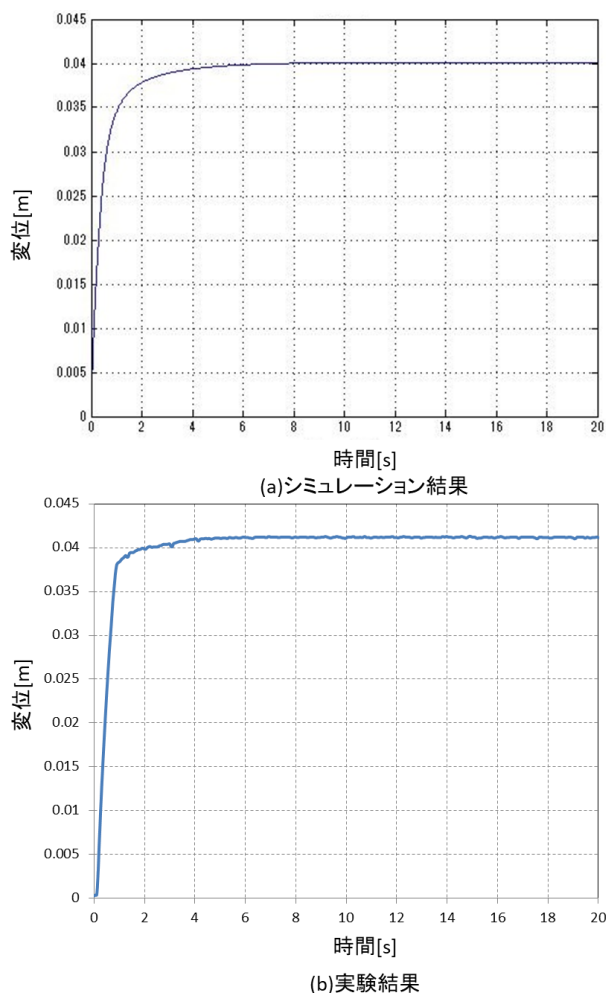


図10 位置制御実験

5. 位置制御実験とシミュレーション

次にシリンダを水平にした状態すなわち重力の影響を受けないという条件でシリンダを実際に駆動し、測定結果とシミュレーション結果の比較を行った。図9に制御方法のブロック線図を示す。目標位置を設定し、スライドボリュームから取得した位置情報を利用して、フィードバック制御を行う。目標位置までは、給気用の弁のみを駆動させ、排気用の弁は閉状態にする。反対に、目標位置を超えた場合は給気用の弁を閉状態にし、排気用の弁のみを駆動させる。

目標位置を 0.04m に設定し、タンクの圧力を 0.5MPa 、弁を接続していないシリンダの気室には初期圧力 0.2MPa の空気圧を付加した。また、 $K_p = 15, K_i = 1$

とした。この条件で無拘束弁を駆動し、位置制御を行った。シミュレーション結果を図10(a)に示す。また、同一条件での実験結果を図10(b)に示す。実験時のサンプリングタイムは 50ms である。シミュレーション結果と実験結果で変位波形の傾向が一致していることが確認できた。シミュレーション結果と実験結果の微妙な違いは、シミュレーションで用いた粘摩擦係数と固体摩擦等の外乱に相当する成分を推定で与えたことにより、正確さに欠けていたためと考えられる。この点は実験の精度の向上や回数を増やすことで解決できる。

実験結果では 1mm 程度の偏差が残ってしまった。本実験では、目標位置の前後で駆動させる弁を切り替えた。しかし、制御に用いた比例定数や積分定数は2つの弁で同じ値を使用した。弁には個体差があるため、給気側の弁では駆動するような Duty 比でも、排気側の弁では駆動しなかったと考えられる。そのため、各弁に対してそれぞれの適切なパラメータを設定することで改善できると考える。

6. 結言

本研究室で開発した無拘束弁による PWM 制御で空気圧シリンダの位置制御が可能であることがわかった。また、シリンダ動作を解析するためのシミュレーションモデルを作成し、実験結果をもとにモデルの妥当性を検証した。現在の装置を使った実際の位置制御実験では目標位置に対して $\pm 1\text{mm}$ 程度の誤差で制御が可能であったが、さらに実用化に近づけるために制御を向上させる必要がある。今後は、速度フィードバックループを付け加えることや適切な制御パラメータの設定、さらに、弁を取り付けなかった気室の制御を行うことにより高精度な速度・位置制御を実現する予定である。

参考文献

- [1] 巽 正之, 伊藤 正彦, ジェン スマディ, 平井 慎一, 本田 顕真: “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, 2009.
- [2] 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”, ロボティクス・メカトロニクス '05 講演会予稿集 CD-ROM, 2005.
- [3] 宮治 和弥, 平井 慎一: “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”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2018.