

# 空気圧アクチュエータ用小型比例制御弁の開発

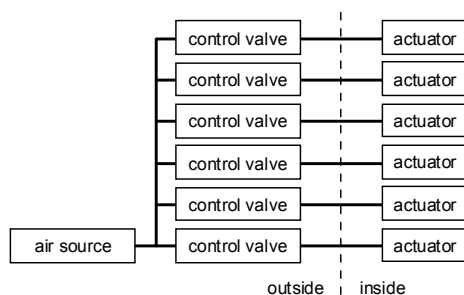
## ー小型化と応答性のトレードオフの検討ー

平井慎一，上原正太

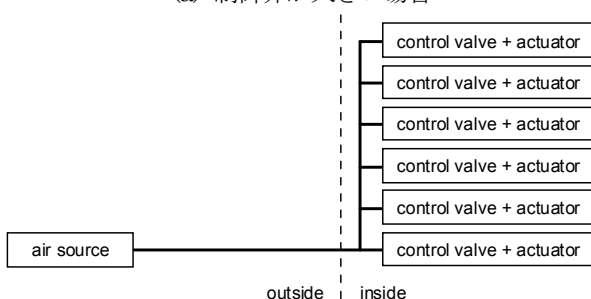
立命館大学ロボティクス学科

### 1. はじめに

近年、リハビリテーションやスポーツトレーニングを始めとして、人間の運動を支援する機械システムの研究開発が進められている[1,2,3]。このような機械システムは、ウェアラブルロボットと呼ばれる。ウェアラブルロボットは人間に装着して使用されるため、アクチュエータのパワー重量比は高くなくてはならない。パワー重量比が高いアクチュエータの候補として、空気圧アクチュエータがある[4]。しかし、空気圧アクチュエータを制御するためには、アクチュエータに加える空気の圧力や流量を制御する弁が必要になる。空気圧アクチュエータ自体は小型軽量であるのに対して、制御弁が大きく重いというのが現状であり、空気圧アクチュエータを数多く使うウェアラブルロボットでは、アクチュエータごとに制御弁が必要となり、重量が増加する。さらに、図1-(a)に示すように、各アクチュエータと比例弁とを繋ぐ配管が複雑になり、いわゆるスパゲッティ状態を生じ、ウェアラブルロボットの動作に良くない影響を与える可能性が懸念される。



(a) 制御弁が大きい場合



(b) 制御弁が小さい場合

図1：制御弁の小型化の狙い

そこで著者の研究室では、比例弁をアクチュエータ本体に内蔵できるほど小型軽量化し、空気圧システム全体

を小型軽量化することを目指している。また、図1-(b)に示すように、空気圧を送るメインの配管を一本だけ通し、ウェアラブルロボット内で配管を分離することで、スパゲッティ状態を解決できる。さらには、制御弁とアクチュエータの距離が短いため、制御性の向上を期待できる。

本稿では、ウェアラブルロボットへの適用を想定し、小型制御弁の仕様を定める。一般に、制御弁の小型化に伴い、流量が減少すると制御弁の応答性が損なわれる。そこで、小型化と応答性のトレードオフを検証し、応答性の仕様が与えられたときに、制御弁がどの程度まで小型化できるかを検討する。次に、小型化に向けた制御弁の構造を考案し、マクロモデルの試作および動作確認を行った結果を紹介する。

### 2. 圧力比例弁

#### 2.1 圧力比例弁の動作

ウェアラブルロボットで広く用いられているマッキベン型アクチュエータでは、圧力制御弁が必要である。そこで、圧力比例弁の小型化を目指す。圧力比例弁のブロック図を図2に示す。入力信号が増大すると、その大きさに応じて給気用弁を開き、排気用弁を閉じる。出力圧力を圧力センサで計測し、制御回路にフィードバックする。入力信号に比例した出力圧力になるまで訂正動作が働く。同様に、入力信号が減少すると給気用弁を閉じ、排気用弁を開くため、出力圧力が減少する。以上の動作により、入力信号と比例した出力圧力を得る。

#### 2.2 圧力比例弁の仕様

開発する圧力比例弁は、制御可能圧力が最大0.2MPa、内径φ34mm、高さ30mmの剛体容器を0.0Paから0.2MPaまで0.1sで加圧できる仕様と定める。この仕様は、マッキベン型空気圧アクチュエータの仕様から決定した。

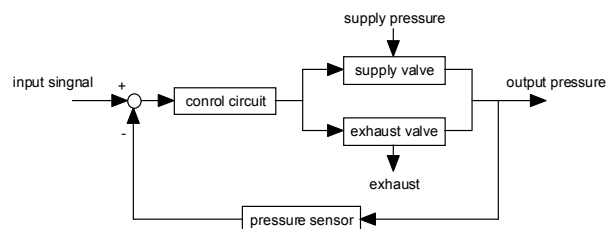


図2 比例弁のブロック図

### 3. 比例弁の流量

#### 3.1 必要な流量

比例弁の小型化は、センサや回路など各要素の小型化を行うことで実現できる。その要素の中に、流量を制御する部分となるオリフィス（流路中にある絞りの部分）

が含まれる。その断面積が大きければ単位時間当たりに多くの空気が流れるので、応答性が高くなる。一方、断面積が小さければ、応答性が低くなる。比例弁の小型化にあたってオリフィスは他の要素と異なり、ただ小さければ良いというものではなく、必要な応答性を得られる範囲で小さくする必要がある。そこで、応答性の観点から、オリフィスに必要な流量と、そのときの断面積を求める。

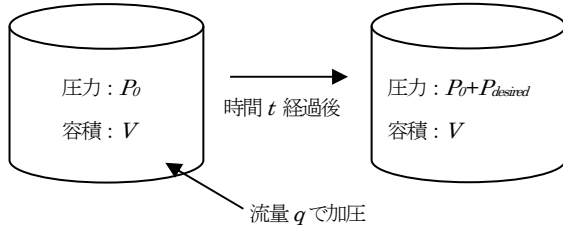


図3 制御対象への加圧

図3に示すように、容積  $V$ 、圧力  $P_0$  (大気圧) の容器を時間  $t$  で  $P_{desired}$  分加圧する。これを実現するような流量  $q$  を求める。ボイルの法則から流量  $q$  は、

$$q = \frac{P_{desired} V}{P_0 t} \times \frac{T_0}{T}$$

と求まる。なお、標準状態での流量に換算するため、 $T_0/T$  ( $T_0=273\text{K}$ ) を乗じている。2.2節で示した仕様の値  $P_{desired}=0.2\text{MPa}$ 、 $V=27237\text{mm}^3$ 、加圧前の容器内の圧力  $P_0=1008\text{hPa}$ 、空気の温度  $T=296.8\text{K}$  を代入すると、

$$q = \frac{0.2 \times 10^6 \times 27237 \times 10^{-6}}{1008 \times 10^2 \times 0.1} \times \frac{273}{296.8} \times 60 \approx 29.8 \text{ l/min}$$

となる。

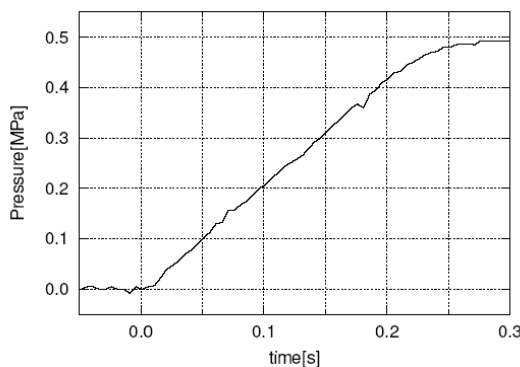


図4 目標圧力の検証実験の結果

上記の流量で、実際に容器に加圧を行った結果を、図4に示す。容器は、内径  $\phi 34\text{mm}$ 、高さ  $30\text{mm}$  のアクリル製であり、供給側の圧力は  $0.5\text{MPa}$  である。図より、

容器内の圧力が上昇を始めてから  $0.095\text{s}$  付近で、目標値の  $0.2\text{MPa}$  に達している。つまり、要求仕様を満たすために必要な流量が  $29.8\text{l/min}$  であることが、理論的にも実験的にも確認された。

### 3.2 必要なオリフィスの断面積

前節で求めた流量を確保するために必要な、オリフィスの断面積を求める。図5にオリフィスの模式図を表す。上流側の流速  $u_1$  が下流側の流速  $u_2$  に比べて十分小さいと近似する。上流側圧力と下流側圧力を  $p_u$  と  $p_d$  で表し、圧力比  $p_d/p_u$  を  $z$  で表す。上流側の任意の点とオリフィス部分の2点間に対し、気体に対するベルヌーイの定理の式を用いて、流量とオリフィスの断面積の関係を得る。これより、流量  $q$  を確保するために必要なオリフィスの断面積  $a$  は、

$$a = \frac{q\rho}{p_u} \sqrt{\frac{RT}{2} \frac{1}{f(z)}}$$

$$f(z) = \begin{cases} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} (z^{2/\kappa} - z^{(\kappa+1)/\kappa})} & (0.528 \leq z \leq 1) \\ \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{2/(\kappa-1)}} & (0 \leq z < 0.528) \end{cases}$$

で表されることがわかる。ここで、 $\kappa$  は比熱比、 $R$  は気体定数、 $\rho$  は密度を表す。空気では、 $\kappa=1.4$ 、 $\rho=1.2928\text{g/l}$  である。

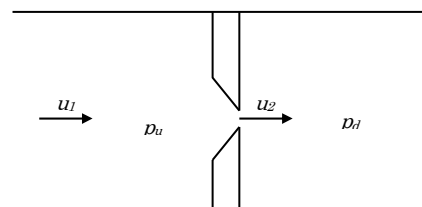


図5 オリフィス

飽和領域  $z < 0.528$  で、断面積は最小になる。そこで、 $z < 0.528$  において、 $p_u=0.5\text{MPa}$ 、 $T=300\text{K}$  の空気の場合、3.1節で求めた流量  $q=29.8\text{l/min}$  を代入すると、

$$a \approx 0.55 \text{ mm}^2$$

となり、オリフィスの断面積は  $0.55\text{mm}^2$  まで小さくできることがわかる。オリフィスが円形ならば直径は  $0.84\text{mm}$  となる。

実際にオリフィスを通して流量を測定した結果を図6に示す。使用したオリフィスは  $\phi 0.8\text{mm}$  である。圧力比が  $0.528$  以下では流量は一定となる。理論値では  $27.4\text{l/min}$  であるが、測定結果は  $30.0\text{l/min}$  となっている。オリフィスはドリルで穴をあけることで製作したため、

実際は 0.8mm より直径は大きいと考える。これを考慮すると、流量 29.4l/min を確保するのに必要なオリフィスの直径は 0.84mm という結果は、妥当であると判断する。

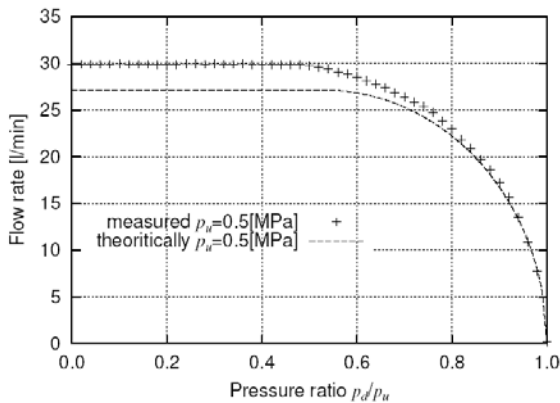


図6 オリフィスの圧力-流量特性の測定結果

#### 4. 比例弁マクロモデル

比例弁の構成を検討し、マクロモデルの製作と動作検証を行った結果を紹介する。

一般に、機械システムの小型化に伴い、摩擦力や凝着力等の表面力の影響が増大する。摩擦力や凝着力を、精密に制御することが困難であるため、制御弁を小型にするにしがって、圧力や流量を連続的に制御することは困難になると考えられる。そこで、圧力や流量をアナログ的に制御する代わりに、デジタル的に制御する。

圧力比例弁は、目標圧力と制御対象内の圧力との差に応じてオリフィスの断面積を変化させ、流量をコントロールしながら圧力制御を行う。すなわち、オリフィスの断面積を制御する必要がある。オリフィスの断面積を連続的に制御する代わりに、断面積が決まっている ON/OFF 弁を複数個並列に配置し、ON とする弁の数を変更することで流量を制御する方法を採用する。流量を連続的に変更することはできないが、ON/OFF の単純な動作であるので小型化に向いていると考えられる。この方法を検証するマクロモデルの構成を図6に示す。

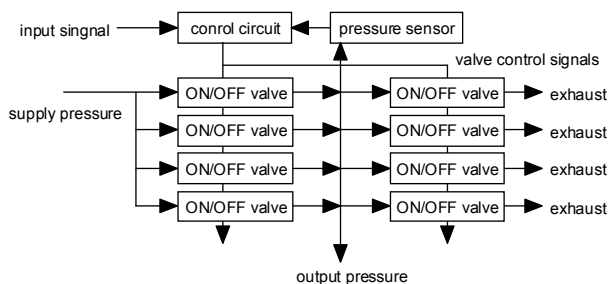


図7 マクロモデルの構成

このマクロモデルを実際に製作し、ステップ入力を与えて動作させた結果を図7と図8に示す。図7は立ち上がりの動作 (0.0MPa から 0.2MPa) を、図8は立ち下がりの動作 (0.2MPa から 0.0MPa) を表す。両図からわかるように、ステップ入力に対して 0.1s 以内に目標圧力に達している。流量の変化は連続的ではないが、圧力を制御できることが確認できている。

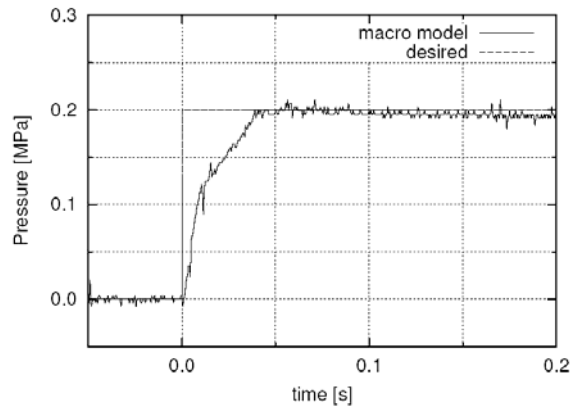


図8 立ち上がり動作の計測結果

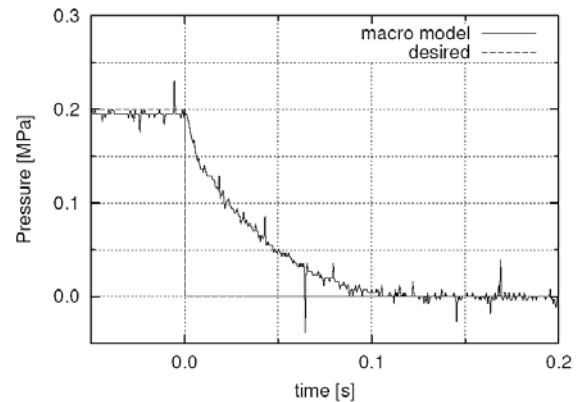


図9 立ち下がり動作の検証結果

#### 5. 小型軽量 ON/OFF 弁の開発

図7に示す制御弁の構成において、圧力センサや制御回路は、MEMS や LSI 技術による小型化が可能である。したがって、空気圧アクチュエータ用小型制御弁の開発において、キーとなるのは小型軽量の ON/OFF 弁の開発である。

プロトタイプとして、図11に示す ON/OFF 弁を試作した。この弁は、バイモルフ型の piezo 素子を用いて、オリフィスの開閉を制御するという単純な構成である。図11に示すように、十分な ON/OFF 性能を有することを確認した。オリフィスの面積と空気の供給圧力から、バイモルフ型 piezo 素子が発生すべき力を算出できる。

また、オリフィスにおける空気圧の供給の観点から、バイモルフ型 piezo 素子が発生すべき変位を試算する。これらの試算結果より、バイモルフ型 piezo 素子の寸法を試算すると、想定している小型化は困難であることが明らかになっている。もちろん、力や変位の変換機構を用いることにより、このギャップを解消することは可能であるが、構造の単純さを失うため望ましくない。そこで現在、別の原理に基づく ON/OFF 弁を、模索している段階である。

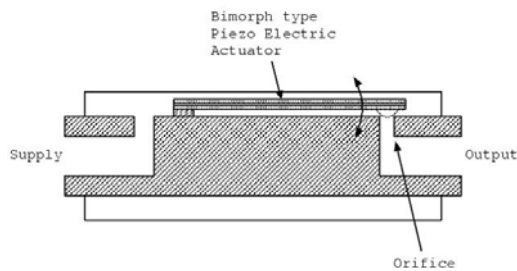
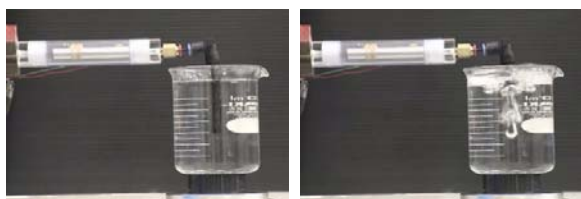


図 1 0 ピエゾアクチュエータを用いた ON/OFF 弁



(a) OFF

(b) ON

図 1 1 ON/OFF 動作の検証

## 5. おわりに

本稿では、空気圧アクチュエータ用小型比例弁の開発の一端を紹介した。

小型化と高速応答のための流量の確保という目標を両立させるため、内径  $\phi 34\text{mm}$ 、高さ  $30\text{mm}$  の剛体容器を  $0.0\text{Pa}$  から  $0.2\text{MPa}$  まで  $0.1\text{s}$  で加圧するという仕様を定め、このために必要な流量が確保できる範囲で小型化を行うという方針を定めた。次に、その仕様を満たす流量を理論的に求めるとともに、 $0.1\text{s}$  で  $0.0\text{Pa}$  から  $0.2\text{MPa}$  に加圧できることを実験的に確認した。さらに、その流量を確保できるオリフィスの断面積を計算したところ、 $0.55\text{mm}^2$  まで小さくできることがわかった。実際に製作したオリフィスで検証したところ、仕様を満たす流量が流れることが確認された。

比例弁の構造として、小型化という観点から、単純な ON/OFF 弁を複数個並列に配置し、開く弁の個数を変化させることで流量を変更し、圧力制御を行う方式を採用し、マクロモデルの動作検証を行った。さらに、バイモルフ型の piezo 素子を用いて、オリフィスの開閉を制御

する ON/OFF 弁を試作し、十分な ON/OFF 性能を有することを確認したが、小型化に限界があることが判明した。

現在、別の原理に基づく ON/OFF 弁を検討している。小型化が可能か否かを検証し、小型化が可能であれば、試作を進め、小型制御弁の実現を目指す。

## 参考文献

- [1] Jerry E. Pratt, Benjamin T. Krupp, Christopher J. Morse, and Steven H. Collins, "The RoboKnee: An Exoskeleton for Enhancing Strength and Endurance During Walking", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2430-2435, 2004.
- [2] Sai K. Banala, Sunil K. Agrawal, Abbas Fattah, Katherine Rudolph, John P. Scholz, "A Gravity Balancing Leg Orthosis for Robotic Rehabilitation", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2474-2479, 2004.
- [3] H. Kobayashi and K. Hiramatsu, "Development of Muscle Suit for Upper Limb", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2480-2485, 2004.
- [4] 則次俊郎, "ソフトアクチュエータ", 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.6, pp.795-798, 1999.