

低コスト圧力制御型疑似サーボ弁の性能評価と応用

下岡 綜・堂田 周治郎*・赤木 徹也*・守分 善法**

岡山理科大学大学院工学研究科知能機械工学専攻

* 岡山理科大学工学部知能機械工学科

** 岡山理科大学大学院工学研究科システム科学専攻

(2014年9月30日受付、2014年11月6日受理)

1. 緒言

近年の急速な高齢化社会の進行に伴い、高齢者介護の労働者不足が深刻な問題になりつつある。そのため、人間を介護・支援できるロボットやパワーアシスト装置などに用いるウェアラブルアクチュエータの開発が望まれている¹⁾。人体への装着にあたり、人間親和性の高い軽量かつ制御性能の良いアクチュエータが望まれる。また、これらのシステムでは高い自由度を必要とし、複数のアクチュエータや制御弁が必要となるため、装着者への負荷は増加する。従って、使用者の負担を軽減し、簡素で制御性の高い制御弁の開発が強く望まれる。

そこで本研究では、小型・軽量で安価なON/OFF弁を用い、アナログ的に圧力を調整できる制御弁の開発を目的とする。本報告では、4種類の制御則を用いて圧力追従制御実験を行い性能評価を行う。また、試作した圧力制御型疑似サーボ弁とマッキベン型ゴム人工筋を用いた位置決め制御を行い、制御性能の評価を行う。

2. 疑似サーボの構造と動作原理

趙ら²⁾が開発した疑似サーボ弁の構造を図1に示す。この疑似サーボ弁は小型ON/OFF弁(株コガネイ製G010HE1)を2個繋ぎ合わせ、供給源側の弁を給排気弁(2位置3ポート弁)、アクチュエータ側の弁を流量調整のための可変絞りのPWM駆動弁(2位置2ポート弁)として使用する。このPWM弁のデューティ比を変えることで開口面積を制御し、圧力や流量をアナログ的に調整することが可能になり、ON/OFF弁では困難であった比例制御などのアナログ制御則の適用が可能となる。

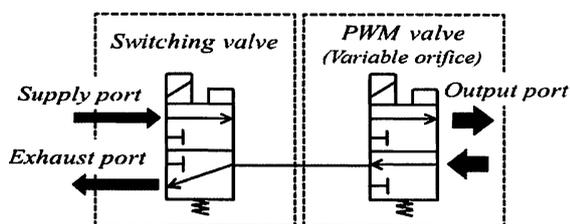


図1 疑似サーボ弁の構成

弁の具体的な動作は、制御入力 of 正負によって、給排気弁をオン、オフすることで給排気を切換え、制御入力 of 大きさによって、PWM弁の入力デューティ比を変え流量を調節する。このON/OFF弁の質量は15gである、弁を操作するためのコントローラはマイクロコンピュータ(ルネサスエレクトロニクス(株)製R8C/M12A)とトランジスタ(TOSHIBA(株)製MP4401)から構成されている。これらを含めた弁全体の質量は91gと通常のサーボ弁(330g)に比べ非常に軽量である。

3. 圧力制御システムの構成

弁の圧力制御システム、すなわち、圧力制御型疑似サーボ弁の構成を図2に示す。これは、疑似サーボ弁、マイクロコンピュータ、トランジスタ、圧力センサ(Panasonic(株)製ADP5160、A/D変換器を含む分解能: 0.61kPa)から構成される。制御の流れは以下のとおりである。目標電圧設定用のファンクションジェネレータの出力電圧と現在の圧力である圧力センサからの出力電圧をマイクロコンピュータ内部のA/D変換器を用いて取り込み、その値を偏差として求め、後述する制御則に従って弁を駆動する。また、疑似サーボ弁の構成要素である2つのオンオフ弁のうち、給排気を行う切換え弁はマイクロコンピュータのI/Oポートに接続され、流量調整のためのPWM駆動弁はPWMポートに接続されている。そのため、制御則を各々の弁に適用する。

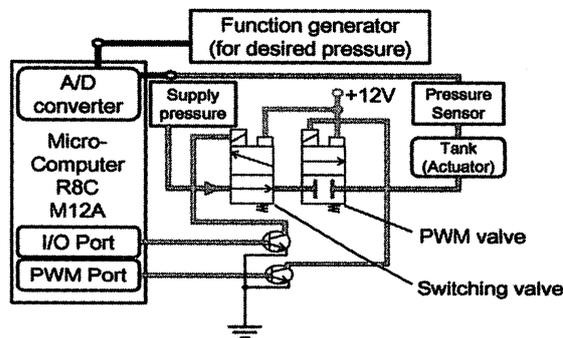


図2 圧力制御システム

例として比例制御則を以下に示す。

$$u = k_p e \quad (1)$$

給排気を行う切換え弁の制御則は以下の通りである。

$$u > 0 \quad \text{給排気 ON} \quad (2-1)$$

$$u \leq 0 \quad \text{給排気 OFF} \quad (2-2)$$

また、PWM弁への入力デューティ比は以下の式で与えられる。

$$d_u = |u| + 47.5 \quad (3)$$

ここで e は目標圧力と現在圧力との偏差、 k_p は比例ゲイン、 u は制御入力(デューティ比)、 d_u は入力デューティ比を示す。PWM弁への入力デューティ比は、不感帯(デッドゾーン)の補正のため、47.5%のデューティ比を u に上乘せする²⁾。

次に低差圧時の流量を補正するためにPWM弁への入力デューティ比を以下のように与えることにする。³⁾

$$u_s = |u| \frac{f(z)_{max}}{f(z)} + 47.5, \quad z = \frac{P_L}{P_S} \quad (4-1)$$

$$u_e = |u| \frac{P_S}{P_L} \frac{f(z)_{max}}{f(z)} + 47.5, \quad z = \frac{P_a}{P_S} \quad (4-2)$$

ここで、 u_s は給気時、 u_e は排気時の入力デューティ比、 P_L は負荷容積内圧力、 P_S は供給圧力、 P_a は大気圧力、 $f(z)_{max}$ は $f(z)$ の最大値(0.484)である。なお、 $f(z)$ は流れの状態を表す関数であり次式で与えられる。

$$f(z) = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left(z^\kappa - z^{\frac{2}{\kappa+1}} \right)} \quad (0.528 < z \leq 1) \quad (5-1)$$

$$f(z) = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{2}{\kappa-1}}} \quad (0 \leq z \leq 0.528) \quad (5-2)$$

4. 圧力制御性能の評価

圧力制御型疑似サーボ弁と、P、PD、PID、スライディングモード制御(以下、SM制御と略す)の4種類の制御則を用いて、圧力の追従制御実験を行い、性能評価を行う。

まず、実験方法について述べる。比例制御による追従実験の場合、PWM弁のPWM周期は5ms、コントローラの制御(サンプリング)周期は3.2msである、圧力制御信号をマイクロコンピュータの制御プログラムで表現する場合、A/D変換器出力のAD値で表すことにし、1AD値当

たり0.61kPaである。オフセット圧力は150kPa、圧力振幅は100kPaの正弦波入力を用いた。また、供給圧力を500kPaとし、負荷として15ccの容積を弁出力口に接続している。

4-1 PID制御

まず、P、PD、PID制御について述べる。比例制御Pは、制御入力を目標値と出力値の偏差をもとに制御する基本的なフィードバック制御方法である。微分制御Dは、出力値が目標値を行き過ぎた場合、その偏差を小さく抑える役割を果し、偏差速度に比例して入力を加え制御を行う。つまり、応答性や減衰性の改善のために用いられる。積分制御Iは、残留偏差が存在する場合、その偏差の時間積分に比例した入力を加え、定常偏差を改善するために用いられる。

PD、PID制御の制御則を以下のように表すことにする。

$$u = k_p e + k_d (e_i - e_{i-1}) \quad (6)$$

$$u = k_p e + k_i \sum_{j=0}^i e_{c(j)} + k_d (e_i - e_{i-1}) \quad (7)$$

ここで k_d は微分ゲイン、 k_i は積分ゲインを示す。

また、各制御ゲインは限界感度法で決定し、実験で微調整した。これらの値を表1に示す。

表1 圧力制御の制御パラメータ

	k_p	k_i	k_d
P	0.368	—	—
PD	0.56	—	0.034
PID	0.56	0.9 ^o	0.034

※単位は%/kPa

4-2 SM制御

SM制御は、制御入力の不連続に変化する非線形制御であり、希望する特性に適応でき、優れたロバスト性を有する。

SM制御則は以下の式で与えられる。

$$s = e + \alpha (e_i - e_{i-1}) \quad (8)$$

ここで、 s は切換え関数、 α は切換え定数である。

また、給排気の切換え弁は以下のように行う。

$$s > 0 \quad \text{給排気ON} \quad (9-1)$$

$$s \leq 0 \quad \text{給排気OFF} \quad (9-2)$$

PWM弁の入力デューティ比は式(4)と同じであり、制御則はP制御を用いる。 α は試行錯誤的に求め、0.1とする。

4-2 制御性能実験結果と考察

まず、目標周波数を1Hzとして実験した。その入出力波形例を図3に示す。これらを見ると、4種類の制御則はいずれも追従はしているが、P制御では出力の圧力振動が大きく、偏差が大きい。PD制御とPID制御ではP制御に比べると、偏差が小さくなっていて出力の行き過ぎも抑えられている。SM制御ではP制御より偏差は小さくなっているが、圧力振動が大きくなっていることが分かる。

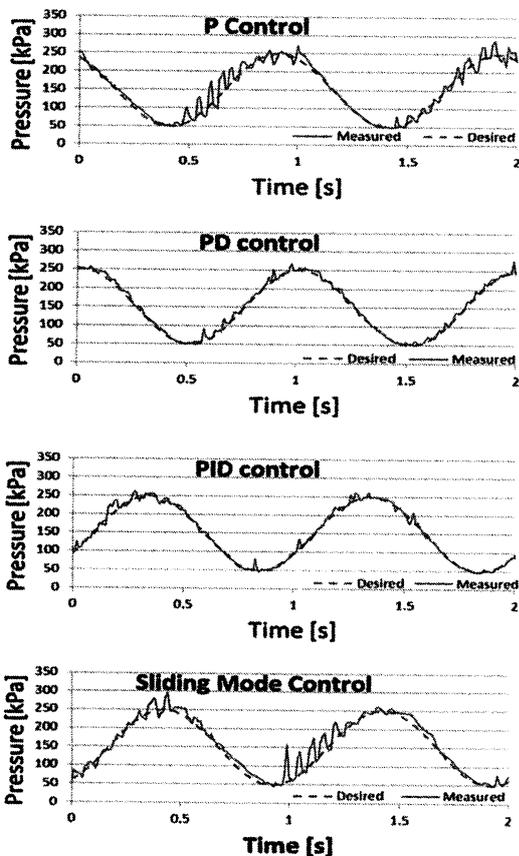


図3 1 Hz の場合の周波数応答実験結果

次にこれらの制御則を用いて0.1Hzから5Hzまでの目標周波数で実験を行った。その比較結果を図4に示す。図の縦軸はP、PD、PID、SM制御の各周波数応答の平均絶対誤差である。低い周波数(0.1-1Hz)の場合、PID制御が良い性能(絶対偏差:4.30kPa)を示している。また、高い周波数(2-5Hz)の場合、PD制御が良い性能(絶対偏差:21.5kPa)を示し、全体の周波数範囲では、SM制御が平均的に優れていることが分かる。しかし、2Hz以降からサーボ弁が目標周波数に追従しにくくなるため偏

差が大きくなっていることが分かる。

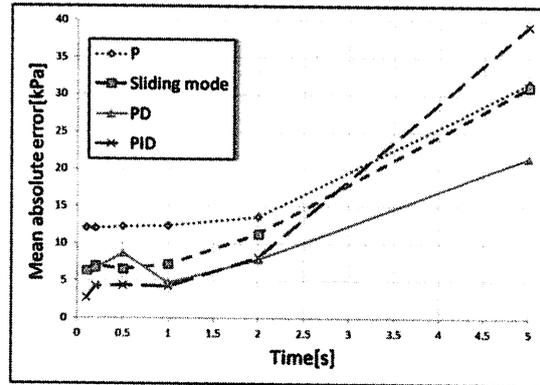


図4 絶対平均誤差における制御性能の比較

5. ゴム人工筋の位置決め制御への応用

圧力制御型疑似サーボ弁の応用として、マッキベン型ゴム人工筋を用いた位置決め制御を試み、制御性能について検討する。

5-1 制御システムの構成

マッキベン型ゴム人工筋の位置決め制御システムの構成を図5に示す。システムは、圧力制御型疑似サーボ弁、コントローラとしてのマイクロコンピュータ、外部DA変換器(LINEAR TECHNOLOGY LTC1660CN)、ポテンシオメータ(栄通信工業㈱製 18FLPA50、ストローク50mm、抵抗値10k Ω)、マッキベン型ゴム人工筋(自然長250mm、ストローク50mm、内径10mm)から構成される。ポテンシオメータは、人工筋と直列に接続する。制御システムのブロック線図を図6に示す、制御の流れは以下の通りである。まず、目標値電圧用のファンクションジェネレータの出力電圧とポテンシオメータの出力電圧をコントローラ内部のAD変換器を用いて取り込み、偏差を求め、制御則に従って、サーボ弁を駆動し、人工筋を制御する。弁の制御則は、4章で絶対偏差が小さかったPD制御とSM制御とし、人工筋の制御則は、P、PI制御である。

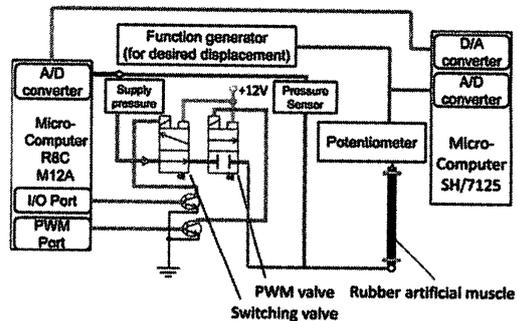


図5 位置決め制御システム

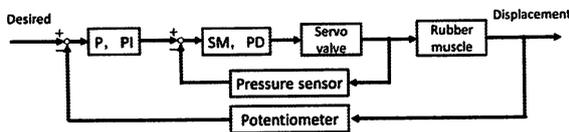


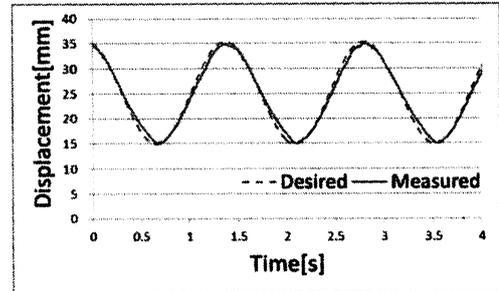
図6 位置決め制御のブロック線図

5-2 実験方法

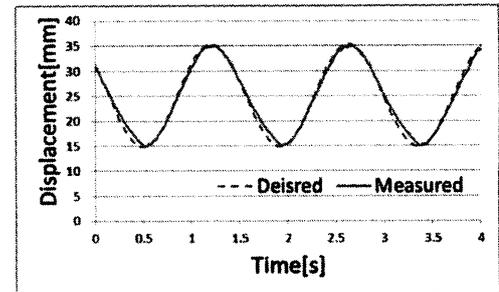
人工筋の位置決め制御の実験方法について述べる。オフセット変位25mm、変位振幅10mm、周波数0.5Hzと0.7Hz、供給圧力500kPaで実験を行う。位置決め制御の制御ゲインは、試行錯誤により、最適ゲインを求め、P制御の場合、 $k_p=307$ (kPa/mm)、PI制御の場合、 $k_p=204$ (kPa/mm)、 $k_f=266$ (kPa/mm)とした。なお、制御則によって計算された操作量 u に常に350kPa(人工筋のオフセット変位25mmに相当)の圧力を加えて疑似サーボ弁の目標圧力とした

5-3 実験結果と考察

弁にSM制御とPD制御を用い、人工筋の位置決め制御にP、PI制御を用いた場合の実験結果を図7に示す。図7(a)、(b)は弁の制御則にPD制御、位置決め制御にPとPI制御を用いた場合である。また、図7(c)、(d)は弁制御にSM制御、位置決め制御にPとPI制御を用いた場合である。その時の絶対平均誤差を表2に示す。図7から、いずれの場合も良好に追従していることがわかるが、P制御よりもPI制御を用いた方が偏差が小さいことがわかる。



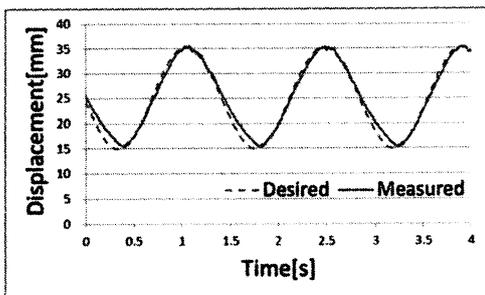
(c) 弁制御にSM制御、位置決め制御にP制御



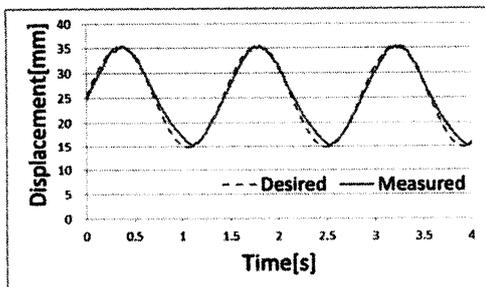
(d) 弁制御にSM制御、位置決め制御にPI制御

図7 0.7Hzにおける位置決め制御実験結果

さらに、表2を見ると、弁制御にSM制御を用いた場合、絶対平均誤差がPD制御の場合の70%程度になっていることがわかる。目標周波数が0.5Hzの場合の絶対平均誤差を表3に示す。0.5Hzの場合、位置決め制御にPI制御、弁制御にSM制御を用いた方が絶対平均誤差が0.251mmと最も小さいことが分かる。よって、位置決め制御にPI制御、弁制御にSM制御を用いるのが良いと言える。



(a) 弁制御にPD制御、位置決め制御にP制御



(b) 弁制御にPD制御、位置決め制御にPI制御

表2 0.7Hzにおける、絶対平均誤差

	MAE(P)	MAE(PI)
P	0.848	0.724
PD	0.614	0.538

※単位はmm

表3 0.5Hzにおける、絶対平均誤差

	MAE(P)	MAE(PI)
P	0.310	0.265
PD	0.336	0.251

※単位はmm

6. 結 言

圧力制御型疑似サーボ弁を用いて、4種類の制御則P、PD、PID、SM制御を用いて追従制御実験を行い、制御性能の比較を行った。その結果、低い周波数(0.1-1Hz)では、PID制御が良い性能を示し、高い周波数(2-5Hz)では、PD制御が良い性能を示した。広い周波数(0.1-5Hz)では、全般的にSM制御が良い性能を示した。

圧力制御型疑似サーボ弁の応用として、マッキベン型ゴム人工筋の位置決め制御実験を行い、性能評価を行った。その結果、弁にSM制御を用い、位置決め制御にPI制御を用いた場合が最も優れた制御性能を示すことを確認した。

参考文献

- 1) 長田義仁編：ソフトアクチュエータ開発の最前線～人工筋肉の実現をめざして～，NTS，pp.294-321(2004)。
- 2) 趙 菲菲・堂田周治郎・赤木徹也：“柔軟湾曲アクチュエータ用小型疑似サーボ弁の試作と解析”，日本機械学会論文集(C編)，Vol.76，No.772，pp.3665-3671(2010)。
- 3) Y. Moriwake, T. Akagi, S. Dohta and F. Zhao :
Improvement of Pressure Control Type Quasi-servo Valve and On/Off Valves Using Embedded Controller Proceedings of 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 882-887(2013).
- 4) S. Shimooka, S. Dohta, T. Akagi, Y. Moriwake and F. Zhao : Estimation of Pressure Control Performance in Low-Cost Quasi-Servo Valve Using Embedded Controller, Lecture Notes in Electrical Engineering 293, Springer, Vol.1, pp.359-366(2014).

Estimation and Application of Low-cost Pressure Control Type Quasi-servo Valve

So SHIMOOKA, Shujiro DOHTA*, Tetsuya AKAGI* and Yoshinori MORIWAKE**

Master's Program in Intelligent Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering,

** Department of Intelligent Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,*

*** Doctoral Program in System Science, Graduate School of Engineering,*

Okayama University of Science,

1-1, Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan

(Received September 30, 2014; accepted November 6, 2014)

Today, the care and welfare pneumatic equipment to support a nursing care and a self-reliance of the elderly and the disabled are actively researched and developed by many researchers. These wearable devices require many servo valves for multi degrees of freedom and precise control performance of the wearable actuator. The total weight load of the wearable devices increases according to the degree of freedom. In our previous study, a small-sized and light-weight pressure control type quasi-servo valve was developed to reduce the burden of the user in a power-assisted system. The valve consists of inexpensive on/off control valves and embedded controller. The valve consists of two on/off type control valves whose both output ports are connected each other. One valve is used as a switching valve to supply or exhaust, and the other is used as a PWM (Pulse Width Modulation) control valve that can adjust output flow rate like a variable fluid resistance. In this study, the pressure control performances using four kinds of control scheme were investigated and compared by experiment. The frequencies up to 5 Hz were applied to the tested pressure control system. As a result, PID controller gave the good performance in low frequency of 0.1 to 1 Hz. In the higher frequency of 2 to 5 Hz, PD controller gave the good performance. As an application of pressure control type Quasi-servo valve, we tested position control for Mckibben artificial muscle. The position control performance of Mckibben artificial muscle was investigated and compared by experiment. The pressure control using quasi-servo valve was operated by PD and Sliding mode control schemes. And the position control of an artificial muscle was operated by P and PI control. As a results, it can be confirmed that the sliding mode control for quasi-servo valve and the PI control for artificial muscle give a good control performance.

Keywords: quasi-servo valve; small-sized control valve; Mckibben artificial muscle; embedded controller.