

自己保持機能を有するデジタルサーボ弁の改良

正子 祐輔・堂田 周治郎*・赤木 徹也*・大野 歩**・上田 宗史***

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

** 岡山理科大学工学部工学プロジェクトコース

*** SMC株式会社

(2012年9月28日受付、2012年11月1日受理)

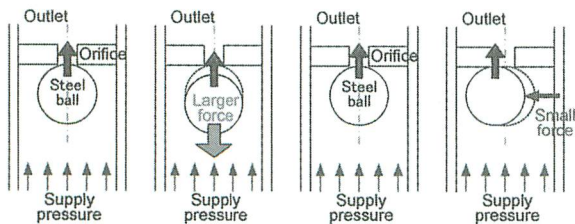
1. 緒言

近年、空気圧駆動のウェアラブル制御システムの開発が盛んである¹⁾。このようなシステムの実現には、流体制御弁の小型化・省エネルギー化は大きな課題である。現在主流の電気-空気圧制御弁では、圧力差による大きな力が加わったアーマチュアやポペットをソレノイドの力で駆動するため弁の容積と重量が大きくなってしまふ。さらにシールを保ちながら可動する複雑な機構が必要でありコスト削減の弊害となっている。

そこで、本論文では弁開閉の状態を保持するためにエネルギーを必要とせず、段階的に流量調節ができる自己保持機能を有するデジタルサーボ弁の開発とその改良について述べる。

2. 弁の基本コンセプト²⁾

従来の制御弁は図1(a)に示すように、ポペット(鋼球)に管路軸方向から力を加えることで弁を開閉しており、駆動に大きな力が必要となる。そこで本研究では図1(b)のように管路軸に直交する方向から力を加えることで、小さな力で開閉する弁の開発をめざす。図2に管路軸方向の力 F 、垂直方向の力 f で開口に必要な力の比と、ボール径 D とオリフィス径 d の比の関係を示す。鋼球の直径 $D=2\text{mm}$ 、オリフィス内径 $d=0.5\text{mm}$ の場合 f/F は $1/4$ となり、管路軸方向に比べ開閉のために必要な力が25%で良いことがわかる。



(a) 従来の弁 (b) 提案する弁

図1 弁の基本コンセプト

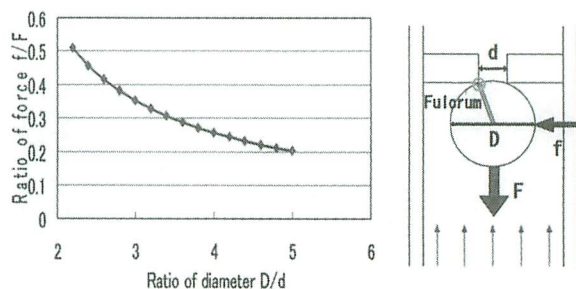


図2 垂直方向と直交方向の力の比

3. 従来のデジタルサーボ弁³⁾

従来のデジタルサーボ弁の構造および写真を図3に示す。弁は直径30mm、厚さ3mmの亚克力製円盤に中心から半径12mmの位置で 128deg. の角度を有するように配置されたネオジウム磁石(直径5mm、厚さ5mm)と、開口面積の異なるオリフィス($\phi 0.4, 0.6, 0.8\text{mm}$)が挿入された6本のチェック弁付柔軟チューブ、亚克力製円盤を駆動するためのサーボモータ(株)GWS S125-1T/2BB/F)から構成される。このサーボモータの性能は 428.6deg./s (71.4rpm)である。また、チューブは給気側と排気側の3本ずつに分けられ、6本のチューブの一端が全て1つの出力口に接続されている。

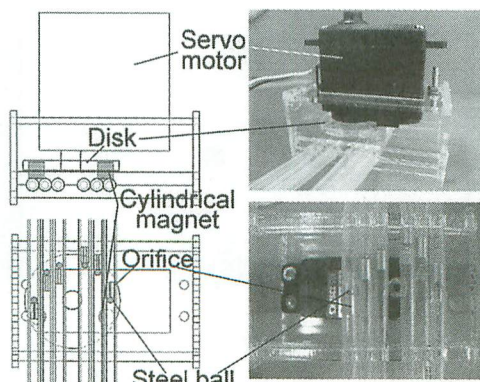


図3 従来のデジタルサーボ弁の構造と外観

そして、給気側の3本は給気口としてまとめ、排気側の3本はそれぞれ大気に開放している。また、チューブ内の鋼球(直径2mm)は、円柱状磁石の軌道である円周上に並列に配置されている。そのチューブ列上部にサーボモータで回転する円柱状磁石を配置し、サーボモータで磁石の位置を変えることで任意のチューブ内の鋼球を磁着し、給気と排気用のオリフィスを開口し、流量を調節するものである。この時の円柱状磁石の位置と開口するチューブ(ポート)の模式図を図4に示す。また、動作原理を図5(a)~(d)に示す。初期状態では、図5(a)に示すように給気側、排気側のチューブ全てが閉じた保持状態であり、(b)、(c)、(d)に示す給気小、中、大の状態へ移動できる。また円盤の反対側に配置されている磁石により、排気側も同様に3段階に調整できる。

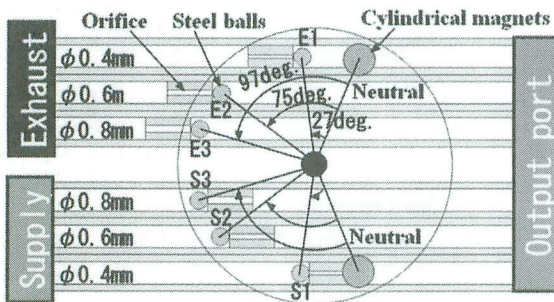
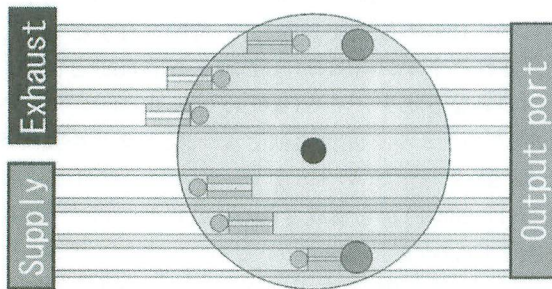
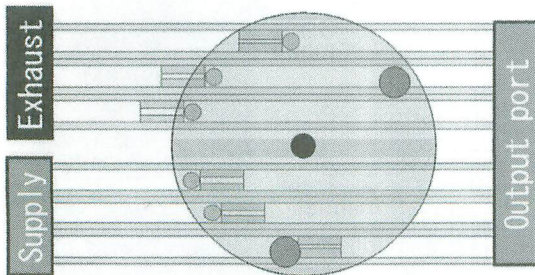


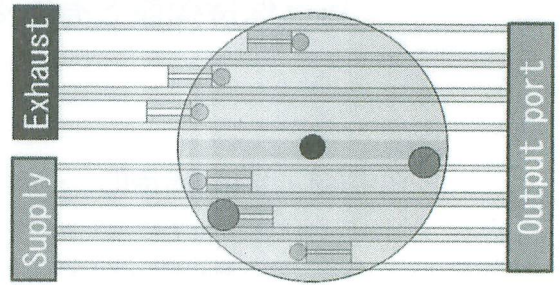
図4 従来のデジタルサーボ弁の模式図



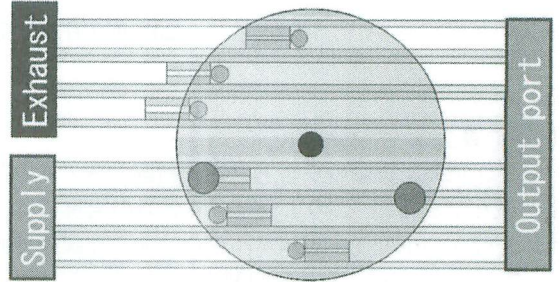
(a) 保持



(b) 給気 小



(c) 給気 中



(d) 給気 大

図5 従来のデジタルサーボ弁の動作原理

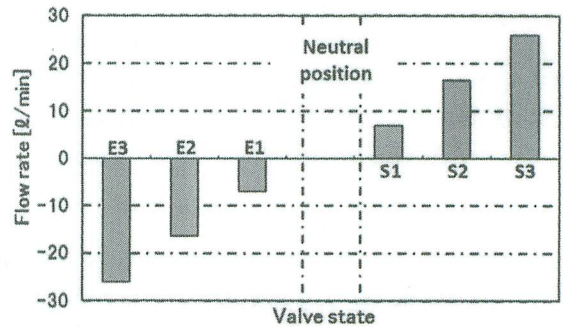


図6 流量と弁位置の関係

図6に円柱状磁石の位置(弁の状態)と弁の出力流量の関係を示す。図の横軸は弁の状態E3~S3(図4参照)で、縦軸は流量[l/min]である。図より流量は弁の状態に比例して変化しており、給排気を行わない保持状態を含め、給気3、排気3状態の計7状態の調節が可能であることがわかる。

4. デジタルサーボ弁の改良

前述のデジタルサーボ弁はサーボモータの回転範囲を大きく(360deg.)する必要があるため、大きなサーボモータを使う必要があった。本論文では、可動範囲の小さい(120deg.)小型のサーボモータを使用することで円盤の回転角度を小さくすると共に、弁全体の小型化を目指す。図7に従来の弁に使用していたサーボモータと改良弁に使用するサーボモータの外観を示す。従

来のサーボモータの容積 34cm^3 に対して、新しく使用するサーボモータ(株GWS PICO/STD/F)は 4.3cm^3 であり87%程度小型である。回転速度に関しては従来のサーボモータの 428.6deg./s に対し、新しく使用するサーボモータは 500deg./s と少し速い。しかし、可動範囲が 360deg. から 120deg. と $1/3$ に減少したことによりチェック弁付柔軟チューブを並列に6本配置した場合、両端のチェック弁を開口することができないという問題が生じた。そこで、チューブの本数を6本から4本へ変更した。改良した弁の構造および模式図をそれぞれ図8と図9に示す。改良弁は直径 20mm 、厚さ 2mm の亚克力製円盤の中心から半径 7.5mm の位置に1個の円柱状ネオジム磁石(直径 5mm 、厚さ 5mm)と、開口面積の異なるオリフィスが挿入された4本のチェック弁付柔軟チューブ、亚克力製円盤を回すためのサーボモータより構成される。改良後の弁のサイズは幅 24mm 、高さ 36mm 、長さ 50mm となり以前の弁のサイズ(幅 41mm 、高さ 55mm 、長さ 61mm)に比べて容積が約70%程度に小型化できた。

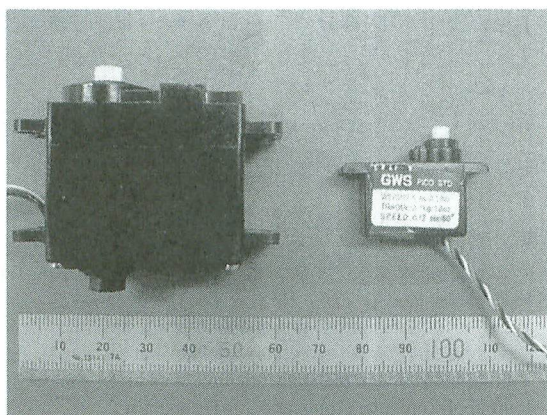


図7 サーボモータの比較

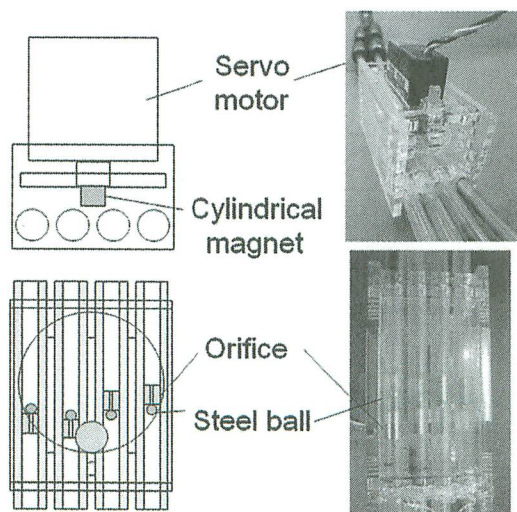


図8 改良したデジタルサーボ弁の構造と外観

図10に弁の状態と出力流量の関係を示す。図に示すように、状態が切り替わると流量がおおよそ倍になっていることがわかる。吸排気を行わない保持状態を含め、吸気2、排気2状態の計5状態の調節が可能であることがわかる。しかし、最大流量は以前の弁に比べ64%減少した。これはチューブの最大内径を 0.6mm にしたためである。

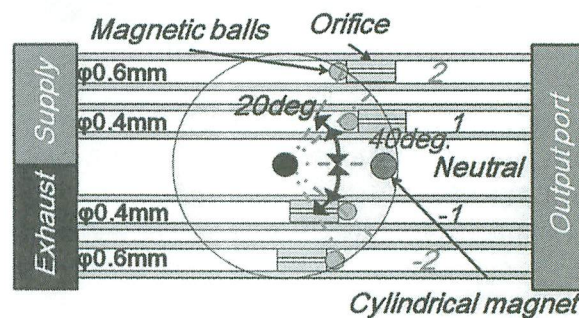


図9 改良したデジタルサーボ弁の模式図

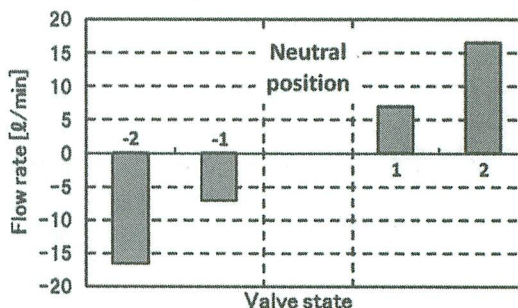


図10 流量と弁位置の関係

5. デジタルサーボ弁の応用

デジタルサーボ弁の応用としてゴム人工筋の位置決め制御を行う。制御システムの構成を図11に外観を図12に示す。

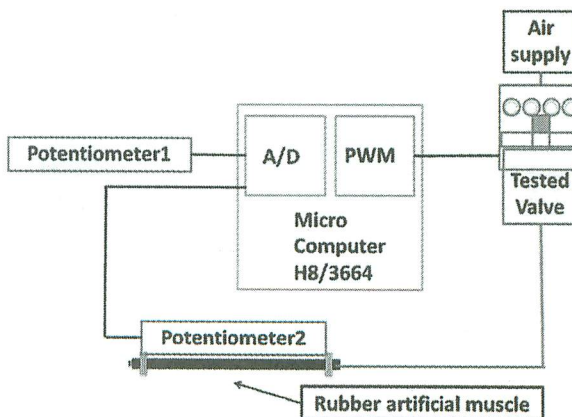


図11 制御システムの構成図

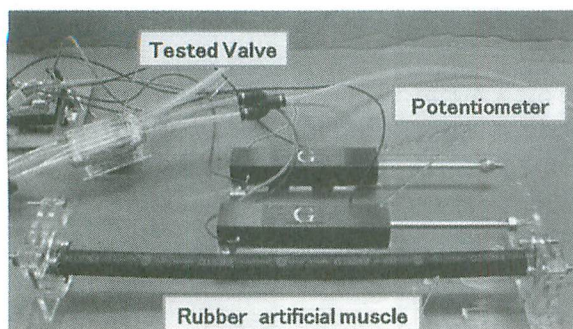


図12 制御システムの外観

制御システムは試作したデジタルサーボ弁、ゴム人工筋、目標値入力用と制御量(変位)を測定するために人工筋に接続された2つのポテンシオメータ((株)MIDORI PRECISIONS 社製 LP-50F)と制御器となるマイクロコンピュータ(株Renesas Electronics 社製 H8/3664F)から構成されている。制御の流れは以下の通りである。2つのポテンシオメータからの出力電圧をマイコン内のA/D変換器を介して検出し、偏差を求め、制御則に基づいて弁を駆動し、ゴム人工筋の位置決め制御を行う。

図13にゴム人工筋の位置決め制御の実験結果を示す。破線が目標値を示し、実線が制御値を示している。実験では供給圧は500kPaで目標値は20mmに設定し、制御則は比例制御則を適用した。この図より、目標値付近で多少の振動が見られ、開口時のむだ時間も0.1秒程度ある。これらはサーボモータの回転速度や角度に依存すると考えられる。次に、目標値設定用のポテンシオメータを手で動かし、追従制御実験を行った。制御結果を図14に示す。この図から弁の吸気と排気が切り替わる際(波形の山や谷の部分)に動作遅れが生じていることがわかる。この遅れは制御則を改良したりサーボモータの回転角度をより小さくすることで改善できるものと思われる。また、チューブ内径の組合せも検討する必要がある。

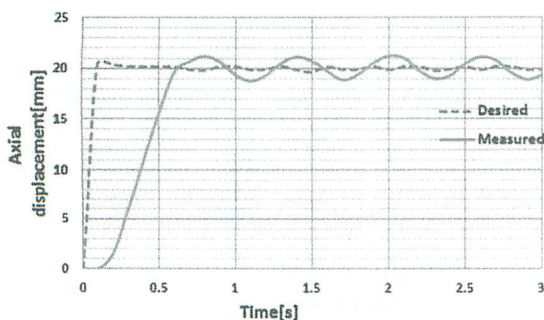


図13 位置決め制御結果

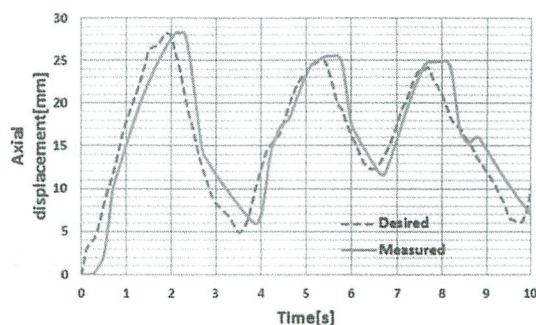


図14 追従制御結果

6. 結言

自己保持機能を有するデジタルサーボ弁の改良を目指した本研究は以下のように要約される。

- 1) サーボモータの変更やチューブ配置の変更により、デジタルサーボ弁を改良して、従来の弁に比べ約70%の小型化を実現した。
- 2) 改良したデジタルサーボ弁を用いてゴム人工筋の位置決め制御システムを構築し、制御実験を行った。その結果、多少の誤差はあるが制御できていることを確認した。

デジタルサーボ弁や位置決め制御システムの更なる性能改善は今後の課題である。

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、(2004)、 pp.294-321.
- 2) Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta and Shin-ichi Katayama: Development of Small-sized Flexible Pneumatic Valve Using Vibration Motor and Its Application for Wearable Actuator, Journal of Computer Application in Technology, Vol.39, No.1/2/3, (2010)、 pp.86-92.
- 3) Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta and Hirofumi Ueda: Improvement of Fluid Control Valve with Self-holding Function Using Permanent Magnet, Journal of System Design and Dynamics, Vol.5, No.6, (2011), pp.1251-1263.

Improvement of Digital Servo Valve with Self-holding Function

Yusuke MASAGO, Shujiro DOHTA*, Tetsuya AKAGI*,

Ayumu ONO** and Hirofumi UEDA***

Graduate School of Engineering,

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

***Engineering Project Course, Faculty of Engineering,*

Okayama University of Science,

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

****SMC Corporation,*

4-14-1 Sotokanda, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0021, Japan

(Received September 28, 2012; accepted November 1, 2012)

In a power assisted system, an actuator and a driving device such as a control valve are mounted on the human body. Therefore, the size and weight of the valve become serious problems. In addition, the valve should be operated with lower energy consumption. The purpose of our study is to develop a small-sized, lightweight and lower energy consumption control valve. In this study, a digital servo valve with self-holding function is improved and investigated experimentally. The valve consists of a small servo motor, a disk with permanent magnetic cylinders and four check valves. To realize the miniaturization and to improve the dynamics of the previous valve, the valve is redesigned. In addition, using the improved digital servo valve, a position control system of rubber artificial muscle is built and the control is performed. As a result, the miniaturization has been achieved about 30% compared with the previous valve and the position control of the rubber artificial muscle is achieved using the tested valve.

Keywords: self-holding function; low energy consumption; permanent magnet.