

解 説

学術論文賞受賞について*

赤木 徹也**

* 平成 28 年 6 月 4 日原稿受付

** 岡山理科大学 工学部 知能機械工学科, 〒700-0005 岡山市北区理大町 1-1

1. はじめに

このたび、栄誉ある平成 27 年度日本フルードパワーシステム学会学術論文賞を受賞し、学会員の皆様に心より感謝申し上げます。本稿では、当研究論文「Theoretical and Experimental Analysis of Wearable Control Valve with Self-holding Function using Permanent Magnets (永久磁石を用いた自己保持機能を有するウェアラブル制御弁の理論的および実験的解析)」について解説する。

近年、日本の少子高齢化は増加の一途をたどっている。推計によると、この割合は今後も上昇を続け、平成 47 年には 33.4% となり、3 人に 1 人が高齢者になると見込まれている。そのため、介護者支援や重労働などの支援におけるパワーアシスト装置の開発は必要不可欠である。また、高齢者の QOL の向上から身に付けるリハビリテーション機器の開発が必要である。これらのシステムに利用できるソフトアクチュエータや、人体に実装する制御機器の開発が盛んに行われている¹⁻⁴⁾。しかしこれらのアクチュエータを動かすためには弁などの制御機器が必要であり⁵⁾⁶⁾、実装者の負担の軽減から、コンパクト・軽量で小容量のバッテリーでも長時間使用可能な制御弁の開発が必要である。これに対し、以前の研究ではまず弁の容量、質量を減らすため小型の弁の開発をめざし、振動モータや磁石を用い、ポペット等に管路に直交する方向から小さな力を加え、弁の開閉を行う弁の開発について検討してきた⁷⁾。さらに、次のステップとして消費電力の少ない弁の開発をめざし、開閉時など弁の状態を変える時のみ電力を消費し、その状態を保持する際のエネルギーを消費しない自己保持機能を有する弁を開発した⁸⁾⁹⁾。本論文では、この自己保持型制御弁の速応性改善をめざした弁の解析モデルの提案と、弁のパラメータ同定および形状パラメータが弁応答に与える影響について実験的および解析的な検討を行った結果について述べる。

2. 自己保持機能を有する小型制御弁

図 1 に自己保持機能を有する弁の構造を示し、図 2 にその動作原理を示す。構造はチューブ内に入れた球状磁石とオリフィスから構成されるチェック弁の外側に、ソレノイドを二つ平行に配置する。さらにこの二つのソレノイドは円柱状の永久磁石を挟むように配置する。弁のサイズは 18×11×39mm、質量は 12.7g である。動作原理は鉄心に磁着したシリンダ状磁石 (図 2①参照) が、右側のソレノイド B を 8ms だけ励磁することで反発力を生じる (②参照)。その後、円柱状磁石は左側の鉄心に磁着し、同時に弁管路を塞いでいる球状磁石を引き付け、弁を開口した状態を保持する (③参照)。この際、電気的な入力を加えなくても開口が保持できる。また、弁を閉める場合は同様に左側のソレノイド A を励磁し、反発力を生じ (④参照)、円柱状磁石を右側の鉄心に磁着させることで、球状磁石を引き付ける力が外れ、チェック弁の原理により自動的に弁を閉じる。また、500kPa 供給時の最大流量は 13.4ℓ/min と市販の小型弁 (株式会社 KOGANEI G010) と同程度である。この弁の動特性の改善や小型化をめざす場合、球状磁石や円柱状磁石の動特性を含む解析モデルが必要である。

3. 弁のモデル化

そこで、図 3 に提案する自己保持弁のモデル図を示す¹⁰⁾。モデルは A, B 二つのソレノイドの電気回路式、円柱状磁石と球状磁石の運動方程式と流れの関係式からなる。円柱状磁石の運動方程式とソレノイドの電気回路式は以下の式で与えられる。

$$m_c \frac{d^2 x_c}{dt^2} + C_c \frac{dx_c}{dt} = F_{CA} + F_{CB} \quad (1)$$

$$L_A \frac{di_A}{dt} + R_A i_A = e_A \quad (2)$$

$$L_B \frac{di_B}{dt} + R_B i_B = e_B \quad (3)$$

ここで、 m_c :円柱状磁石の質量、 C_c :粘性抵抗係数、 F_c :ソレノイドにより円柱状磁石に加わる力、 L :インダクタンス、 i :電流である。添字のA、BはA側、B側のソレノイドを示す。式(1)におけるソレノイドA、Bを駆動した際に円柱状磁石に加える力 F_{CA} 、 F_{CB} を磁石の位置と発生力の実験から以下の実験式で近似する。

$$F_{CA} = \frac{0.001}{l_c + t_b - x_c} - 0.2449, \quad F_{CB} = -\frac{0.001}{x_c + t_b} + 0.2449 \quad (i_A, i_B = 0, 0 < l_c - x_c + t_b < 3 \times 10^{-3}, 0 < x_c + t_b < 3 \times 10^{-3}) \quad (4-1)$$

$$F_{CA} = -\frac{0.0006}{l_c + t_b - x_c} - 0.079, \quad F_{CB} = \frac{0.0006}{x_c + t_b} + 0.079 \quad (i_A, i_B > 0, 0 < l_c - x_c + t_b < 3 \times 10^{-3}, 0 < x_c + t_b < 3 \times 10^{-3}) \quad (4-2)$$

$$F_{CA} = 0, \quad F_{CB} = 0 \quad (i_A, i_B = 0, l_c - x_c + t_b \geq 3 \times 10^{-3}, x_c + t_b \geq 3 \times 10^{-3}) \quad (4-3)$$

同様に球状磁石に加わる力 F_b も実験から以下の式で近似する。

$$F_b = 0 \quad (l_c - x_c > 0.001), \quad F_b = 0.1 \quad (l_c - x_c \leq 0.001) \quad (5)$$

つぎに、図4に球状磁石による弁の開口部のモデルを示す。弁の開口つまり球状磁石の移動は、図3の点Cを支点として回転移動するものとし、支点Cの周りのトルクのつり合いにより球状磁石のモデルを考える。まず、球状磁石がオリフィス部分を塞いでいる状態(図の破線状態)において、球状磁石中心とC点を結ぶ直線がオリフィス軸となす角度を θ_0 (初期角度と呼ぶことにする)とすると、幾何学的関係から初期角度 θ_0 は次式で与えられる。

$$\theta_0 = \sin^{-1}(d_o/D_b) \quad (6)$$

ここで、 d_o はオリフィス内径、 D_b は球状磁石の直径である。つぎに、球状磁石に働くトルクは、円柱状磁石の力 F_b によるトルク τ_{Fb} と圧力差によって生じる力 F_p により生じるトルク τ_{FP} 、流体の運動量によるトルク τ_{FQ} の和($\tau = \tau_{Fb} - \tau_{FP} - \tau_{FQ}$)として次式で与えられる。

$$\tau = \frac{D_b}{2} F_b \cos(\theta_0 - \theta) - \frac{\pi}{4} d_o^2 \frac{d_o}{2} (P_s - P_o) - \frac{4}{\rho \pi} \frac{D_b^2}{d_t^4} \cdot Q_o^2 \frac{d_o}{2} \quad (7)$$

ここで Q_{ob} は、球状磁石の等価断面によって生じる流量である。

$$Q_{ob} = \frac{D_b^2}{d_t^2} Q_o \quad (8)$$

つぎに、球状磁石の回転の運動方程式は次式で与えられる。

$$\frac{7}{5} m_b \left(\frac{D_b}{2} \right)^2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} + C_b \frac{d\theta}{dt} = \tau \quad (9)$$

また、弁の開口面積 S_o は、球状磁石の角度 θ によって変化し、簡単のために、オリフィス断面積から球状磁石で隠れる面積を引いた面積とすると、次式で与えられる。

$$S_o = \frac{\pi}{4} \{d_o^2 - D_b^2 \sin^2(\theta_0 - \theta)\} \quad (10)$$

つぎに、開口時のオリフィス内を流れる質量流量 Q_o は次式で与えられる。

$$Q_o = S_o P_s \sqrt{\frac{2}{RT}} f\left(\frac{P_o}{P_s}\right) \quad (11)$$

ここで、 P_s は供給圧力、 $f(z)$ は流れの状態を示す関数で以下の式で与えられる。

$$f(z) = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \left(z^{2/\kappa} - z^{(\kappa+1)/\kappa} \right) \quad (0.528 \leq z \leq 1), \quad f(z) = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{2/(\kappa-1)} \quad (0 \leq z < 0.528) \quad (12)$$

この弁に一定容積のタンクと固定開口面積を有する排気絞りが弁下流部に接続されているものとする、タンク容積内の圧力変化は供給流量 Q_o と排気流量 Q_a の差から以下の式で与えられる。

$$\frac{dP_o}{dt} = \frac{\kappa RT}{V_o} (Q_o - Q_a) \quad (13)$$

ここで、 Q_o はオリフィスの質量流量である。また Q_a は排気絞りの質量流量であり、以下の式で与えられる。

$$Q_a = S_a P_o \sqrt{\frac{2}{RT}} f\left(\frac{P_a}{P_o}\right) \quad (14)$$

ここで、 S_a は排気絞りの断面積、 P_a は排気絞りの下流圧力(大気圧)である。以上の式(1)~(14)を用いて自己保持弁の圧力応答などの動特性を計算することができる。

図5に提案した解析モデルと同定したパラメータを用いた弁の圧力応答のシミュレーション結果と実験結果を示す。弁をON/OFF動作させたときの圧力のパルス応答結果(パルス幅:10ms)である。○は実験結果、実線は計算結果である。図5からON時の円柱状磁石や球状磁石の挙動に伴うむだ時間(0.02s)の大きさや圧力の応答が一致しており、提案した解析モデルの有効性が確認できる。しかし、弁OFF時の応答では計算結果と実験結果に大きな差がある。この原因として、OFF時の円柱状磁石や球状磁石の挙動の違いが考えられる。

4. 移動磁石の挙動解析と改良モデルを用いた設計

そこで、高速度カメラを使って、弁開閉時の円柱状磁石と球状磁石の動きを撮影する。図6に撮影した写真の例を示す。この写真は、撮影はソレノイドBを励磁した場合と、ソレノイドAを励磁した場合である。この結果から、円柱状磁石の動き始めは静止摩擦のため、5ms程度の遅れを生じ、OFF時には球状磁石の回転により10ms程度の遅れを生じていることがわかった。そこで、前述のモデル中にこれらのむだ時間を含めた改良モデルを作成する。図7(a), (b)に改良モデルを用いた円柱状磁石と球状磁石の計算結果を示す。○は実験結果、破線は以前のモデルの計算結果、実線は改良モデル(円柱状磁石のむだ時間5ms、Off時の球状磁石の挙動によるむだ時間10ms、 $C_c=0.745\text{kg/s}$ 、 $C_b=1.4\times 10^{-6}\text{kg/s}$)を使った計算結果である。図より円柱状および球状磁石の挙動をより正確に表すことができることがわかる。上記の改良モデルを用いた弁の圧力応答の計算結果を図8に示す。実験条件は図5の場合と同じである。○は実験結果、実線は計算結果である。これを見るとモデルの改良により、弁が閉じ圧力が下がり始める際の応答のずれが解消され、実験値と計算値はほぼ一致しているのがわかる。また、OFF時の低圧側の応答の差は球状磁石が確実に閉まられるまでの時間の違いによるものと考えられる。以上の結果から、改良モデルは、弁の挙動をよく表しており、その有効性が確認できる。

改良モデルを用いた弁の設計として、図9(a), (b)に円柱状磁石移動間距離 l_c に対する弁圧力応答の計算結果と実験結果を示す。縦軸は圧力、横軸は時間である。図9(a)より距離 l_c を小さくすることでON時の弁むだ時間が改善され、最小値は $l_c=1.1\text{mm}$ の時、むだ時間は5msになることがわかる。また、図9(b)に示す実験機を用いた実験でも $l_c=4\text{mm}$ の時のむだ時間が25msから20msに改善されていることを確認した。

5. おわりに

自己保持機能を有する流体制御弁の解析と改良を目的とした本研究は以下のように要約される。

- 1) 円柱状および球状磁石の挙動やソレノイドの電気回路、流体の挙動を含む弁の解析モデルを提案した。提案モデルと同定パラメータを用いた弁圧力応答の計算結果と実験結果を比較した結果、多少の誤差はあるものの、圧力応答がほぼ一致していることを確認した。
- 2) 高速度カメラを用いて、弁内の円柱状磁石と球状磁石の挙動を解析し、その結果から円柱状磁石の摩擦と球状磁石の回転によるむだ時間を含めた解析モデルに改良した。その結果、弁圧力応答をより正確に表現することができた。
- 3) 改良モデルを用いた弁の形状パラメータの変更による弁応答を調べた結果、円柱状磁石移動距離を短くすることでON時のむだ時間が減らすことが可能であり、実験では $l_c=4\text{mm}$ の時のむだ時間が25msから20msに改善できることがわかった。

参考文献

- 1) Yamamoto, K.et.al.: Development of Wearable Power Assisting Suit, Proc. FLUCOME2003, 113.pdf, p.1-6 (2003)
- 2) Kobayashi, H. et.al.: Realization of all 7 motions for the upper limb by a muscle suit, J. Robotics and Mechatronics, Vol.16, No.5, p.504-512 (2004)
- 3) Noritsugu, T. et.al.: Development of Power Assist Wear Using Pneumatic Rubber Artificial Muscles, J. Robotics and Mechatronics, Vol.21, No.5, p.607-613 (2009)
- 4) Nagata, Y.: Soft Actuators –Forefront of Development-, NTS Ltd.(2004) (in Japanese)
- 5) Jien, S.et.al.: Miniaturization Design of Piezoelectric Vibration-Driven Pneumatic Unconstrained Valves, J. Robotics and Mechatronics, Vol.22, No.1, p.91-99(2010)
- 6) Nishioka, Y. et.al.: A New Pneumatic Control System using Multiplex Pneumatic Transmission, Proc. Fluid Power Toyama, p.439-442 (2008)
- 7) Akagi, T. et.al.: Development of Small-sized Flexible Pneumatic Valve using Vibration Motor and Its Application for Wearable Actuator, Journal of Computer Applications in Technology, Vol.39, p.86-92 (2010)
- 8) Akagi, T. et.al.: Development of Small-sized Fluid Control Valve with Self-holding Function Using Permanent Magnet, J. System Design and Dynamics, Vol.4, No.4, p.552-563 (2010)
- 9) Akagi, T. et.al.: Improvement of Fluid Control Valve with Self-holding Function Using Permanent Magnet, J. System Design and Dynamics, Vol.5, No.6, p.1251-1263 (2011)
- 10) Zhang, Y. et.al.: Analysis of Wearable Fluid Control Valve with Self-holding Function, Proc. ICPT2012, p.211-215 (2012)

著者紹介



あかぎ てつや

赤木 徹也君

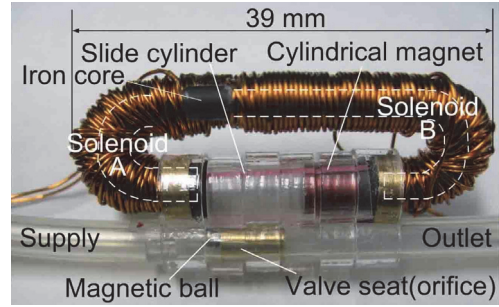
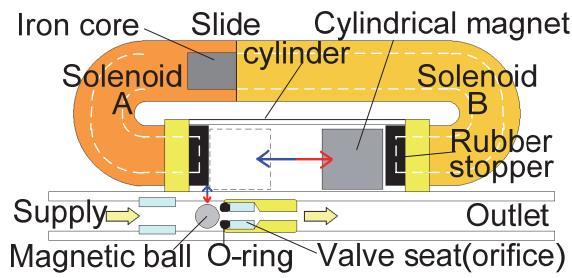
1971年1月18日生まれ。

1998年岡山理科大学大学院博士課程修了。同年津山工業高等専門学校助手。2005年岡山理科大学工学部知能機械工学科講師，2010年文部科学大臣表彰「若手科学者賞」受賞，2013年同教授，現在に至る。ソフトアクチュエータ，組込み技術を用いたウェアラブル空気圧制御機器の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会，日本機械学会，計測自動制御学会などの会員。博士(工学)。

E-mail: akagi@are.ous.ac.jp

URL: http://www.are.ous.ac.jp/are/staff/akagi/index_akagi.htm

URL: <http://researchmap.jp/read0161922/>



(a) Schematic diagram of the tested valve

(b) Photograph of the tested valve

図1 Valve with self-holding function

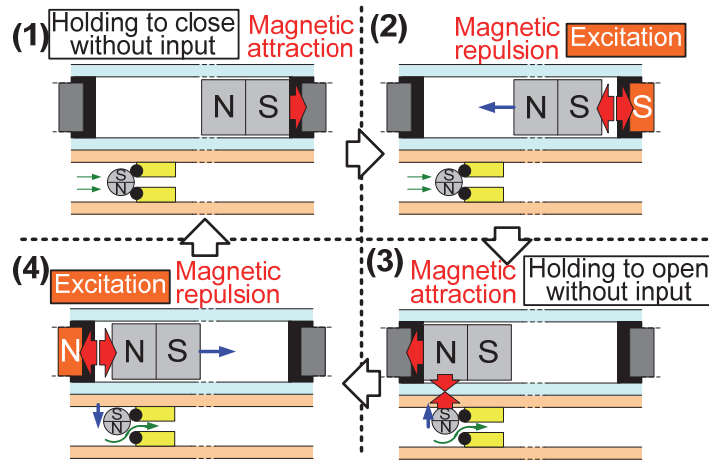


図2 Valve with self-holding function

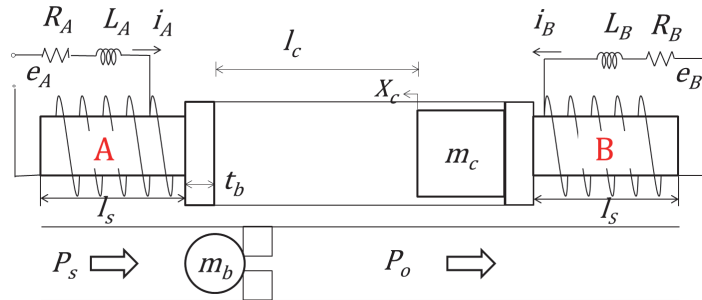


図3 Model of the tested valve

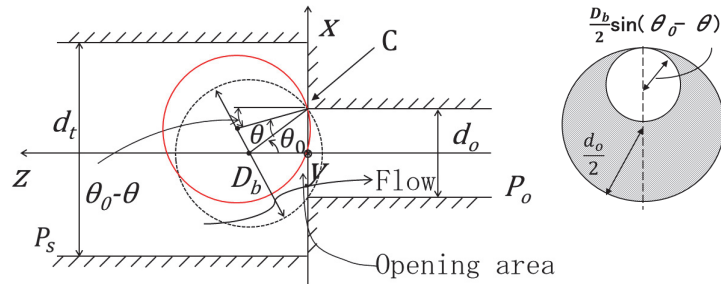


図4 Analytical model of valve opening

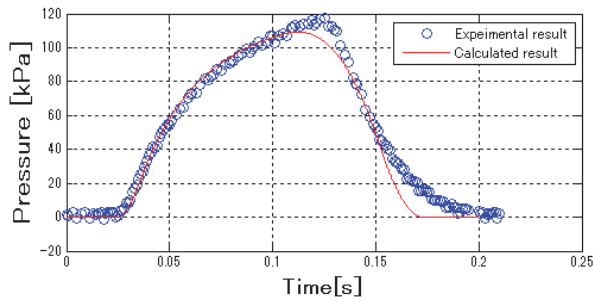


図5 Calculated response of output pressure

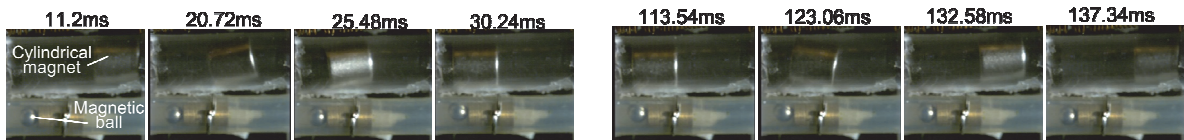
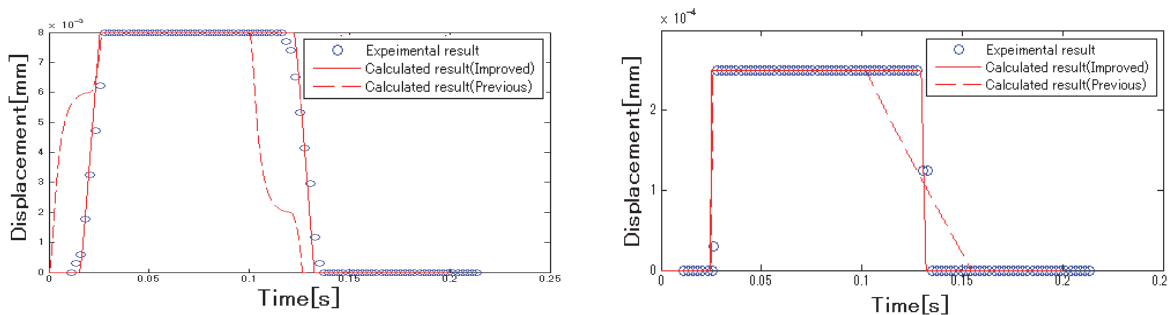


図6 Transient view of motion of two magnets



(a) Displacement of the cylindrical magnet

(b) Vertical displacement of the magnetic ball in the tube

図7 Transient response of displacement of two magnets

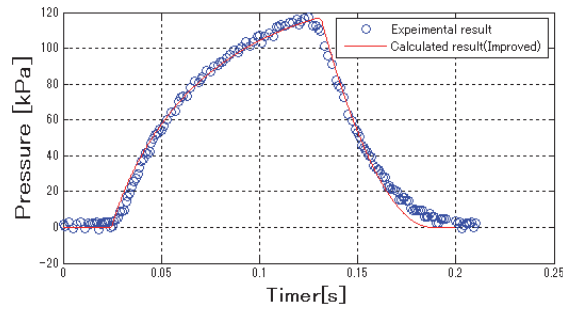
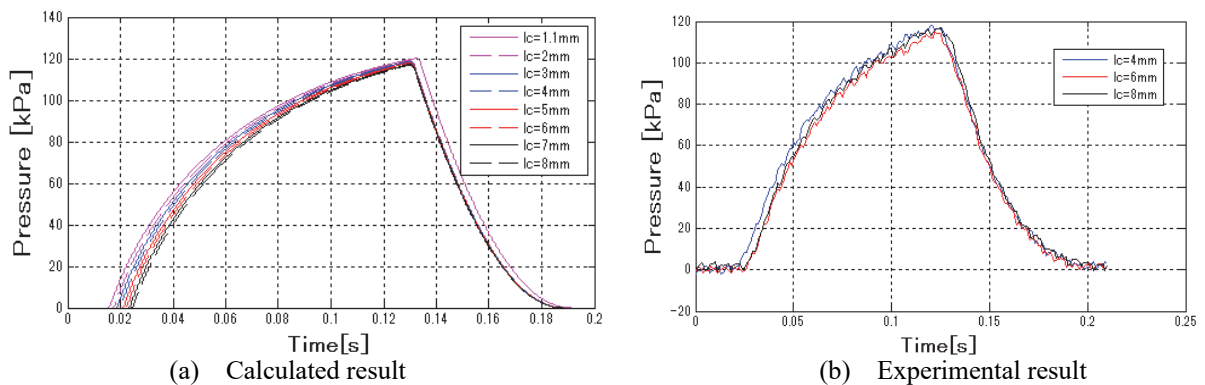


図8 Calculated response of output pressure using the improved model



(a) Calculated result

(b) Experimental result

図9 Calculated and experimental results of output pressure using various stroke of the cylindrical magnet