自己保持形マイクロリニア電磁ソレノイドの設計*

鈴 森 康 一^{*1}, 吉 川 雅 博^{*2}

Latching-type Micro Linear Electromagnetic Solenoid

Koichi SUZUMORI^{*3} and Masahiro YOSHIKAWA^{*3} Department of Systems Engineering, Okayama University,
3-1-1 Tsushima-naka, Okayama-shi, Okayama, 700-8530 Japan

Design of latching type electromagnetic solenoids becomes more important recently especially for micro switching devices such as optical switches for optical network communications, and electrical switches for electro communications and power electronic devices with low impedance. Design and characteristics of a micro electro magnetic solenoid with 7 mm×4 mm×2.2 mm are reported in this paper: (1) general discussion of potential structures, (2) electromagnetic design using finite element method, (3) design and characteristic of the prototype, and (4) small limits of electrical current and activating period for switching are shown.

Key Words: Actuator, Electromagnetic actuator, Micromachine, Microactuator, MEMS, Solenoid

1. 緒 論

波長多重通信における光コネクタ、油空圧サーボ機構における制御バルブ、通信や電力用の低インピーダンススイッチング素子など、機械的な動きを伴う各種のマイクロスイッチングデバイスの開発が急速に進められている。このようなデバイスでは、おもに、静電、圧電、電磁のいずれかのマイクロアクチュエータが利用される。電磁ソレノイドは、その大きさが数 mm からサブ mm の領域では、比較的大きな力と動作ストロークが得られる反面、マイクロ化に伴い通電による発熱が設計上大きな問題となってくる。通常の大サイズの電磁ソレノイドではばね等による復帰力と拮抗させて駆動する形式が通常用いられる。しかしこの形式の電磁ソレノイドは、ソレノイドのオン状態を維持するために保持電流が必要なため、マイクロソレノイドでは通電による発熱が大きく適用できない。マイクロ領域では自己保持形の電磁ソレノイドが不可欠である。

自己保持形電磁ソレノイドは、永久磁石とソレノイドコイルの組合せで構成される。永久磁石によって、可動子が二つの安定点をもつように磁場を形成し、この二つの安定点間の切替え時のみ、ソレノイドコイルに瞬時電流を流して磁場を変化させて可動子の位置を切替える。このような電磁ソレノイドは、省エネルギー形ソレノイドとして近年普及し始め、マイクロ領域でもこれまで、光スイッチ用の回転形ソレノイド⁽¹⁾や電気スイッチ用の揺動形ソレノイド⁽²⁾、光ファイバスイッチ⁽³⁾、バルブ⁽⁴⁾が試作されている。

Fig. 1 General model of latching type electromagnetic micro solenoid

* 原稿受付 2002年9月24日.

^{*1} 正員, 岡山大学工学部(〒700-8530 岡山市津島中3-1-1).

^{*2} 学生員, 岡山大学大学院.

E-mail: suzumori@sys.okayama-u.ac.jp

本研究は、このような技術的背景を踏まえ、最も汎用性の高いリニア形の電磁マイクロソレノイドについて、自己保持機能を実現する設計法と駆動条件を一般化して整理し、明らかにすることを目的としている。本報告では、図1に示すような左右対称な平面状形状をもち、動作ストローク 500 μm 程度のリニアソレノイドを対象に検討する。可動子周辺に環状の磁路を形成し、この内部で可動子が、図1で上下に動作するものとする。この環状磁路の中に永久磁石とコイルが組み込まれる。このような構成にすることで、可動子は動作範囲の両端において二つの安定点をもつ。この安定点においては、可動子と固定子が機械的に接触するので、動作軸方向および紙面に垂直軸回りの回転に関しては高い位置決め精度が確保できる。

2. 構成法の検討

自己保持形電磁ソレノイドは、永久磁石、ソレノイドコイル、磁性体、空隙をどのように配置して、上述の球状磁路を構成するかによって分類できる。本節は、可動子をどのように形成するかによって一般的に表1に示す三つの構成法が考えられる。

このうち、可動子側にコイルを形成する構成は、マイクロソレノイドの場合、通電用のケーブルの剛性による負荷が過大となるので、今回検討対象からはずし、他の2種の構成について検討することにする。

2.1 固定子側にコイルと磁石を配置する構成

固定子側にコイルと磁石を配置する構成例を図2に示す。この例では上下の安定点付近にそれぞれ永久磁石を配置して安定点を形成する。この他にも、図2においてコイルと磁石を置き換えた構成や、永久磁石を一つ用いることも考えられる。ただし、前者はコイル数が増えて配線や構造が複雑になり、後者は安定した安定点を作るのが難しい。図2のように二つの安定点付近に別々の永久磁石を配置するほうが設計も容易で、確実に動作する。

図3は、図2で示したモデルの動作原理を示しており、図3(a)と(c)が非通電で、永久磁石の作る磁場で保持されている状態を示している。永久磁石の作る磁界によって、可動子が、接触している固定子の端面に自己保持されることがわかる。

一方、図3(b)と(d)は通電状態で可動子が現在の位置から他方の位置へ切替わる直前のようすを示している。

コイルに通電することで、図3中、太線の矢印で示す磁束が作られ、保持側の永久磁石が作る磁界を打ち消し、同時に反対側の方向に引き寄せる。いったん、

Table 1 Configurations of solenoid

Slider	Stator
Magnetic materials	Coil + Permanent magnet
Permanent magnet	Coil
Coil	Permanent magnet

Fig. 2 Model #1, consisting of 2 magnets and a solenoid on stator

Fig. 3 Driving principle of Model #1

可動子が他方に移動すればそこでソレノイド通電をやめても自己保持が維持される。

2.2 ムービングマグネット構成

可動子に永久磁石を設ける構成例を図4に示す。これは図1の磁気回路において、永久磁石とソレノイドを直列に配置する構成である。これは前タイプに比べて永久磁石の数を減らして構成しやすい。図5にこの構成の動作原理を記す。図3と同様に、図5(a)と(c)が非通電状態を、(b)と(d)が通電状態を示す。非通電状態では可動子は永久磁石の作る磁束で保持され、通電状態では太線矢印で示す磁束が生成され、他方に切替え動作が

Fig. 4 Model #2, moving magnet type

Fig. 5 Driving principle of Model #2

行える。

3. 有限要素法による磁場設計

以上の検討に基づき、著者らは、構造の簡単さを考慮して、図4に示す構成を採用し、詳細な設計・検討を有限要素法を用いて行った。

磁場解析には汎用有限要素法ソフトウェアの一つであるANSYSを用いた。解析は、線対称平面問題として扱い、四角形四接点要素を用い、材料の非線形磁気特性を考慮した非線形解析を行っている。要素分割のようすを図6に示す。

解析に用いたパラメータを表2に示す。永久磁石はアルニコ磁石を想定している。磁性体部は鋼材(SK-15)を想定しそのBH曲線を用いた。ソレノイドコイル部は22ターンを想定し、ATをソレノイドコイルの領域に一様に分布しているのとして扱った。吸引力

Table 2 Material properties

Permanent magnet	ALNICO magnet bHc 51000A/m $\mu_r=1$
Solenoid coil	22 turn $\mu_r=0$
Magnetic parts	SK-15 steel Non-linear B-H curve
Non-magnetic parts	Aluminum $\mu_r=0$

Fig. 6 Finite element model of the Model #2

は、マクスウェル応力に基づいたものと、仮想仕事の原理に基づいたものの二通りの方法で計算を行った。

図7に計算の結果求めた磁束線図を示す。図7において、(a)～(c)は可動子が上側に位置した状態、図7(d)から(f)は可動子が下側に位置した状態で、ソレノイドの通電量を零から徐々に増加させていくようすを示している。

図7(a)は非通電の状態、このとき、可動子は永久磁石の作る磁束によって固定子に吸着されていることがわかる(A部)。コイルに通電をすると図7(b)のように、永久磁石が作る磁束が相殺され、さらに電流を上げると(c)のように可動子下側を通る磁束線の数が増え(B部)、可動子は下側に切替わる。図7(b)は可動子に働く上向きの力と下向きの力がちょうど零になった状態、(c)は下向きの力が大きくなった状態を示す。実際には(b)と(c)の間の過程で可動子が切替わる。

図7(d)～(f)は可動子が下側に位置している状態で、同様に、電流を上げていったときの磁束の変化を示している。

図8と9に可動子に働く上下方向の吸引力の計算値を示す。図8は、可動子が上側に位置する状態、図9

Fig. 7 Analytical results of magnetic field of Model #2

Fig. 8 Analytical results of magnetic force (down ward drive)

Fig. 9 Analytical results of magnetic force (upper ward drive)

は可動子が下側に位置する状態で、それぞれ電流を上げていったようすを示している。いずれも上向きを正としている。吸引力の計算は、マクスウェル応力からの方法と仮想仕事の原理による方法の2種によった。

Fig. 10 Dimensions of prototype (unit: mm)

Fig. 11 Prototype

いずれも ANSYS に組込まれた機能を利用している。

なお、以上の図7～9で示した解析結果は、非通電時の保持力と、通電時の切替え力がおおよそ等しくなるように、ソレノイドと永久磁石の強さや磁路の幅などの設計パラメータを数種類変えて得られたもので、最終的に図4の形状から、図10に示す形状に変更したものの特性である。

4. 設計、試作

4.1 設計 前述の磁場解析結果に基づき試作を行った。可動子の大きさと動作ストロークを設計仕様とし、これを基に非通電時の保持力と通電時の切替え力がおおよそ等しくなるように、磁気回路の設計を進めた。自己保持主要部分の寸法を図10に、試作品の外観を図11に示す。また、コイル、永久磁石、および各部の材質は、表2から変更していない。コイルには線径 200 μm の銅線を用い、22 turn とした。

可動子と固定子は、アルニコとアルミの滑り接触と

なっている。潤滑剤は使用していないが、アルミの部材表面には加工の際に形成された放電痕が形成され、可動子と固定子が吸着防止に寄与していると考えられる。

4・2 動作実験 可動子の動きをレーザ変位計を用いて測定した。通電電流を変えて測定した結果を図12に記す。電流量を変えて、0.4 Aと1.2 Aの二つの場合について応答を測定した。いずれも図10で、可動子が下側に位置した状態から上側へ移動する過程の応答を示している。0.4 Aは動作が限界となる電流値で不安定な動きがみられる。1.2 Aは発熱も少なく良好に安定して動作する状態で、ステップ状の電流を流した時、約5 msで切替わることが確認できる。

4・3 最小切替条件 切替えが行える最小電流と引加最小時間の関係を実験で求めた。

実験には、図13に示すような電圧波形を用い、 δ を変えながら、それぞれの δ に対して、停止電流と起動電流を測定した。停止電流とは、安定して往復駆動している状態からコイルにかかる電圧を徐々に下げてゆき、動作が停止する電流値を意味する。起動電流値とは、可動子が停止した状態から徐々に引加電圧を上げてゆき、可動子が動き出したときの電流値と定義する。いずれも電流値とは、定常状態になったときの値をさす。

この実験では、可動子が上側から下側へ動作するときの限界電流値と、下側から上側へ動作する限界電流値を別々に求めるため、図13のA部は注目しない方向へ動作させる時の通電時間 t_1 は十分に長くにとって測定を行った。

測定結果を図14と15にそれぞれ示す。それぞれ、上側から下側へ、下側から上側への動作時のデータである。

図14, 15からわかるように、限界電流 i と通電時間 δ の曲線は、おおよそ $\delta=0, i=i_0$ を漸近線とする双曲線を描くことがわかる。ここで、 $i=i_0$ とは可動子が固定子との間の摩擦力や吸着力に打ち勝って動くのに必要な最低の電流値であり、図14では0.4 A、図15では0.9 Aである。これより低い電流値をいくら長時間流しても可動子は動作しない。

5. 結 論

自己保持形マイクロニア電磁ソレノイドの設計と制御法に関し、試作と実験を通じ以下の点が明らかになった。

(1) 自己保持形マイクロニア電磁ソレノイドには、おもに二つの構成がありうることを示し、それぞ

Fig. 12 Experimental results of dynamic response

Fig. 13 Driving signal for experiments

Fig. 14 Criteria of stable drive (upper ward drive)

Fig. 15 Criteria of stable drive (down ward drive)

れの設計例を示した。

(2) 有限要素法を用いた磁場解析により、自己保持形マイクロリニア電磁ソレノイドの動作に伴う磁場変化と電磁力発生過程を明らかにした。

(3) 永久磁石、ソレノイド、磁路設計を適切に行うことによって、非通電保持力と通電時の切替電磁力がほぼ等しい磁気回路設計が行えることを具体的に示した。

(4) 以上の設計に基づいて、外形 $7 \times 4 \times 22$ mm の自己保持形マイクロリニア電磁ソレノイドを試作し、切替時間 5 ms で動作することを実験で示した。

(5) 動作に必要な最低通電時間と最低電流値の関係を実験で求めた。その結果、限界電流 i_c と通電時間 δ 曲線は、おおよそ $\delta=0, i=i_0$ を漸近線とする双曲線を描くことがわかる。ここで、 $i=i_0$ とは可動子が固

定子との間の摩擦力や吸着力に打ち勝って動くのに必要な最低の電流値である。

最後に、本研究を行うにあたりご助言いただいた、住友電工株式会社播磨研究所平田嘉裕氏と沼澤稔之氏に感謝する。

文 献

- (1) Takeda, M., ほか 6 名, Micro-Optical Switch with Uni-Directional I/O Fibers, *Proc. IEEE 13 Int. Conf. MEMS*, (2000), 479-484.
- (2) Ruan, M., Shen, J. and Wheeler, C. B., *Proc. IEEE 14 Int. Conf. MEMS*, (2001), 224-227.
- (3) 長岡新二, 機構デバイスの新しい展開とその基礎自己保持形単一モード光ファイバスイッチの構成法, 電子通信学会論文誌, C-2 Vol. J 79-C-II No. 11 (1996), 649-656.
- (4) Mueller, J., ほか 5 名, Design and fabrication of MEMS-based micropropulsion devices at JPL, *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.*, Vol. 4558, (2001), 57-71, USA.