

学術論文

超磁歪材料の逆磁歪効果を利用した 磁極切り替え型リニアステップアクチュエータの基礎的検討

Basic Investigation on Magnetic Pole Changing Type Liner Stepping Actuator using Inverse Magnetostrictive Effect

菅澤 昌之^{*1} (学生員), 上野 敏幸^{*2} (正員), 樋口 俊郎^{*3} (正員)

Masayuki SUGASAWA (Stu. Mem.), Toshiyuki UENO (Mem.), Toshiro HIGUCHI (Mem.)

A new type of magnetic force control method using inverse magnetostrictive effect of giant magnetostrictive material (GMM) was proposed. The magnetic force between two yokes can be adjusted by controlling the strain of GMM rod in magnetic circuit. For the purpose of efficiently controlling the strain of GMM rod, a magneto-electric composite element is constructed, in which the two functional materials: GMM rod and a piezoelectric actuator, are mechanically coupled via strain. In this paper, we propose linear stepping motor using the composite. This motor consists of a permanent magnet, iron yoke and four GMM rods, which the magnetostriction controlled by PZT changes the flux distribution on four magnetic poles. This motor has advantages of low power consumption and low heat generation compared with a conventional system with electromagnetic coils.

Keywords: stepping motor, giant magnetostrictive material, magnetic force control, inverse magnetostrictive effect.

1 緒言

現在、携帯電話には、電話着信やメール通知の意識づけとしての振動モータ、またどこでも気軽に撮影できるカメラの搭載が、一般的になっている。携帯機器におけるカメラの光学系に着目すると、光学ズーム・オートフォーカス・マクロ機能および手振れ補正等があげられる。各機能を実現化するためには、カメラ内部のレンズや撮像素子を動かすアクチュエータが必要となるが、携帯機器に搭載させる関係上、アクチュエータは小型でなければならない。大抵のアクチュエータは、構造が複雑、携帯機器に対して大型である等の問題点が存在する。さらには、各アクチュエータが携帯機器に収まるほど小型であると、推力・変位量が微小となり、レンズ光学系の重量や移動量に対し、対応できない場合が多く存在する。携帯機器カメラのオートフォーカス機構に着目すると、応答性の良さやコストから Fig. 1 に示すような Voice Coil Motor 方式が主に採用されている。今後携帯機器のカメラにおいて、ユーザーの要求から動画撮影対応が必須になるものと思われる。これらは電磁石で構成され、巻線の起磁力が発生する磁気力を利用する。動きのある被写体の撮影

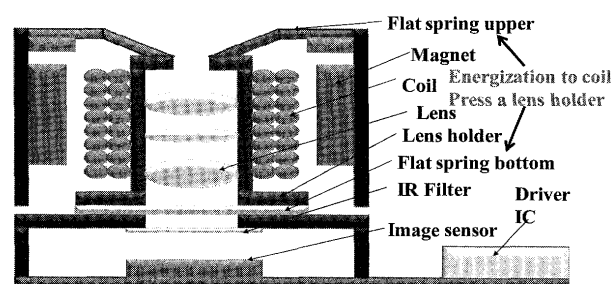


Fig. 1 Structure of camera module actuator (VCM).

のために、常時ピントを合わせようとオートフォーカス機構が働くため、レンズが連続的に微小駆動する。起磁力の制御は電流で行うことから、抵抗によるジュール損、そして発熱が必然的に伴う。デバイスを微小にするにつれ、これらの問題はより顕著に現れ、巻線の薄細化に伴う抵抗、そして発熱の増加は、その作製方法と共に考慮すべき課題である。[1]これら電磁石に対し UENO ら[2]は、巻線を用いずに磁気力（磁束）を制御する方法、その実用化として磁歪材料と圧電材料を複合化した磁気力制御素子を提案してきた。これより圧電材料の特性が磁気力の制御に反映され、力を保持する場合の消費電力、発熱が零になる。汎用的に磁気力の制御を行う方法として、磁歪材料と圧電材料の積層を用いる方法がある。[3]構成が単純で製作も容易であることから、電磁石に代価する要素として、モー

連絡先: 菅澤 昌之, 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1,
東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻,
e-mail: sugasawa@aml.t.u-tokyo.ac.jp

^{*1} 東京大学 ^{*2} 金沢大学 ^{*3} 東京大学

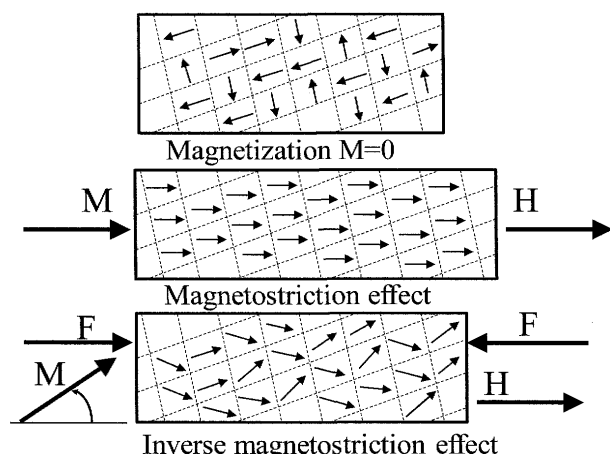


Fig. 2 Magnetostrictive and inverse magnetostrictive effect.

タやスイッチング素子、磁気浮上装置等への適用が期待できる。更に積層が微細化できれば、電磁石では不可能なマイクロな領域での磁気力の制御も可能になる。ここでは、超磁歪材料 (Tb-Dy-Fe 合金) と圧電材料 (PZT) の積層を用いた素子を Sawyer 型ステッピングモータに適用し、実用性を検証する。

2 逆磁歪効果

強磁性体は一樣な自発磁化を持った多数の磁区から構成されている。磁界が存在しないとき、これらの磁区の向きはランダムであるが、磁界 H 加えると、それぞれの磁区の向きが、磁界方向に揃うように、磁壁の移動や磁区が回転し、全体で磁化 M 生じる。特に磁区の回転は形状変化を伴う。これが磁歪効果である。このとき自発磁化の向きは、材料の全エネルギーが最小化されるように決定されるが、一般的には、最も磁界の向きに近い磁化容易軸に向いている。ここで、磁界と同じ向きに圧縮応力 F を加えると、これは磁化ベクトルを磁界の向きと垂直方向に向かわせるような異方性を与えることになり、磁化の向きは容易軸から逸れていく。よって磁化ベクトルの磁界方向成分に着目すると、圧縮により磁化の磁界方向の成分が減少する。磁力線の通しやすさを考えると、圧縮により磁力線に対する抵抗成分が増えたことになり比透磁率が小さくなる。これが逆磁歪効果である。(Fig. 2 参照) [4, 5]

3 磁歪／圧電材料の積層を用いた磁気力制御素子

3.1 磁気力制御の原理

本稿で用いる磁気力制御素子を Fig. 3 に示す。素子は、磁歪材料 (磁歪効果を有する磁性材料) の板とその両面に圧電材料の板を接合した積層 (Fig. 3) から構

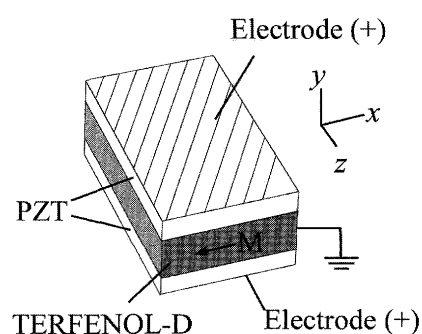


Fig. 3 Lamination [3]

成される。磁歪材料の磁化は、逆磁歪効果により応力で変化し、この場合、磁化の変化が最も大きい磁化容易軸が x 方向にある。圧電材料は磁歪材料に接合する面が GND、その対面が + 電極で、分極方向は厚み (z) 方向である。双方の圧電材料に電圧を印加すると圧電横歪効果により、 x 方向に縮み、磁歪材料には圧縮力が負荷される。

この積層と永久磁石 (x 方向着磁)、ヨークで構成される素子は、外部の磁性体 (ヨーク) にギャップを介し、磁気力を作用する。

4 磁歪材料による磁気力変化を利用するアクチュエータ取り組み

4.1 Sawyer の原理のステッピングモータ

ステッピングモータの磁気構造上、Permanent Magnet (PM) 型と Hybrid (HB) 型は、ロータあるいは、可動子側に永久磁石が使用されている。このため無励磁状態でも、ある程度の保持力があり、これがロータあるいは可動子を拘束する力となる。したがって、この保持力を効果的に利用することにより省エネ型のシステムが構成できる。HB 型による (ロータあるいは可動子は極歯状鉄芯と軸方向 N-S 一對のマグネットを使用) 駆動方法は、Table 1 に示す方向にコイルに電流を励磁する。すると、各磁極の磁気力とヨーク極歯同士の吸引力の発生状態が Fig. 4 のようになる。HB 型の特徴は、その磁気回路に永久磁石を用いている。また電磁石は左右それぞれに 2 個ずつあり、さらにコイルの半分は互いに反対方向に巻かれている。基本動作としてはコイルによる電磁石の作用と、マグネットによる発生磁界を効果的に利用したものである。これが Fig. 4 に示す Sawyer の原理である。

4.2 磁歪材料を用いた Sawyer 型ステッピングモータ

磁歪／圧電材料の積層を用いた磁気力制御素子を

Table 1 Parts movement.

	Current direction	Rate of magnetic force(%)				Stable magnetic pole	Displacement
		Pole1	Pole2	Pole3	Pole4		
No1	a	50	0	25	25	1	0
No2	b	25	25	0	50	4	1/2pitch
	i						
No3	a	0	50	25	25	2	1pitch
	i						
No4	b	25	25	50	0	3	3/2pitch
	i						

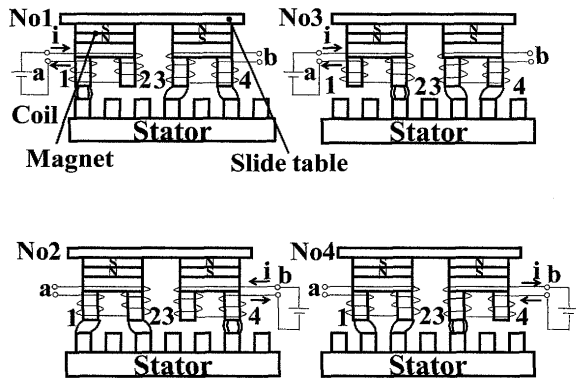


Fig. 4 The principle of hybrid-type linear stepping motor.

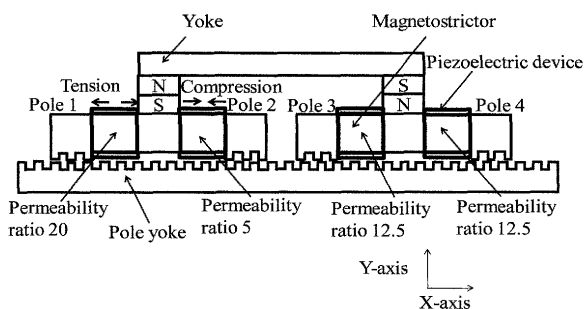


Fig. 5 The principle of linear stepping motor using giant magnetostrictive material.

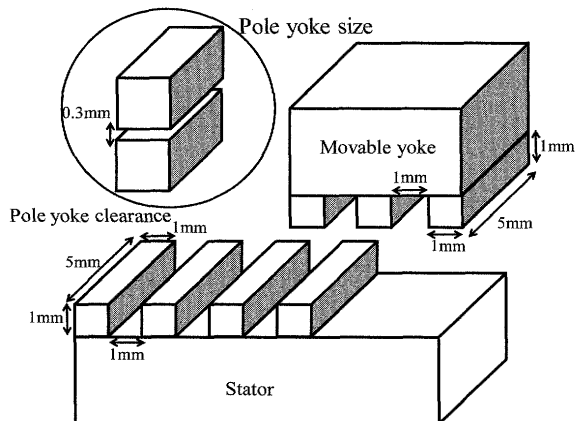


Fig. 6 Size of the model.

用いて, Fig. 5 に示すように, Sawyer の原理に基づいたマグネット, 可動子極歯ヨーク, ステータ極歯ヨークを配置する。従来の巻線の代替として, 磁気力制御素子を配置する。磁気力制御素子は, 最も超磁歪素子が伸長された場合, 比透磁率 20, 最も圧縮された場合, 比透磁率 5 とする[6][7] (つまり圧電素子にも超磁歪素子にも予荷重がかかっている場合を示す)。今回用いた材料が次のような特徴があることから, 上記比透磁率の変化が可能である。

- (1) 超磁歪素子に用いた TERFENOL-D であるが, ヤング率は加わる磁界強さにより大きく変化し, 最小で 10GPa 程度となる。これは, 鉄の 210GPa のヤング率と比較すると 1 桁も小さく, より小さな応力で磁気力の変化が起きる。
- (2) 透磁率が小さい値で変化できる。超磁歪材料の比透磁率は最小で 5 程度, 最大で 20 程度となる。今回用いたヨークは 5000 と設定している。これは従来の実験値から算出したものである。
- (3) 磁歪が大きい。超磁歪材料の磁歪は最大で 2000ppm と鉄やニッケルの数 10ppm に比較し大きい。これより, 同じ歪に対する磁気力の変化をより小さく出来ることになり, 磁気力をより精密に制御できる[6-9]。

永久磁石の残留磁束密度は, $B_r=1.2T$ 程度とした。磁石サイズであるが 5mm 角の大きさとした。詳細なサイズは Fig. 6 に示すように設定した。極歯部分は, 1mm ピッチで 1mm 幅とし, 奥行き 5mm と設定した。ヨーク材質特性であるが, 比透磁率 5000 の鉄を用いた。マグネット付き可動子極歯ヨークとステータ極歯ヨーク間は 0.3mm に設定した。磁石間をつなぐヨークの磁束に対して, 超磁歪素子の比透磁率に応じた磁束を分配し, 可動子極歯ヨークからステータ極歯ヨークを通して磁束が流れることになる。結果的に Sawyer の原理によるリニア HB 型ステッピングモータを実現することが可能であると思われる。実機試作の前に数値シミュレーションを行い, 今後の実験に対する指標を考察した。

5 永久磁石を使用した場合の基礎方程式

永久磁石中の磁束密度 B , 磁界 H とすると, 磁石に生じる磁化 M を用いて次式で表わされる。

$$B = \mu_0 H + M \quad (1)$$

アンペアの周回路の法則の微分形より,

$$\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 \quad (2)$$

ここで $\mathbf{J}_0$ はもともとコイルに流れている強制電流であり零であるが、計算式上定義しておく。

よって、式(1)(2)より、

$$\text{rot} \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{B} - \mathbf{M}) = \mathbf{J}_0 \quad (3)$$

$\mathbf{B}$ は磁気ベクトルポテンシャル $\mathbf{A}$ を用いて、 $\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A}$ と表されるので、式(3)に代入して、 $1/\mu_0$ を磁気抵抗率 ν_0 で置き換えると、

$$\text{rot} \nu_0 (\text{rot} \mathbf{A} - \mathbf{M}) = \mathbf{J}_0 \quad (4)$$

式(4)を変形すれば、次式が得られる。

$$\nu_0 \text{rot} \text{rot} \mathbf{A} - \mathbf{J}_0 - \nu_0 \text{rot} \mathbf{M} = 0 \quad (5)$$

ここで式(5)において、左辺第3項は磁化によって生じる項であり、電流と同じディメンションを表している。これを等価磁化電流密度とし (Fig. 7 参照)、 $\mathbf{J}_m$ で表わすと、

$$\mathbf{J}_m = \nu_0 \text{rot} \mathbf{M} \quad (6)$$

これが Fig. 7 に示す状態である。今回巻線が無いので、 $\mathbf{J}_0 = 0$ である。[10]

6 圧電素子を用いた超磁歪素子の伸縮による比透磁率変化と磁気吸引・反発力の計算

Sawyer 型ステッピングモータのシミュレーションは、JMAG[11] (電磁界解析ソフトウェア) を用いて、実際の磁気回路中の超磁歪素子の比透磁率を変化させることにより、駆動中の可動子ヨークの磁気力変化について計算した。メッシュは三角柱の要素とし、空気層をモデルの5倍取った。簡易解析の結果、可動子とステータ極歯ヨーク間には磁束密度が高いと思われたので、Fig. 8 に示すように、メッシュを細かく分割した。逆に永久磁石から離れ、空気層に近いところは、メッシュを粗く設計し分割を行った。メッシュ分割数は、56000 とした。

計算で磁束の流れを確認する。実際コイルを使用した Sawyer の原理 (Fig. 4 と Table 1) と同じように、巻線の起磁力を使用したものに対し、磁気力制御素子によって、永久磁石の磁路の磁束密度を変化させる。

比透磁率の変化のさせ方の一例は Fig. 5 に示したが、今回の計算による各々の極歯へ通じる磁路の比透磁率

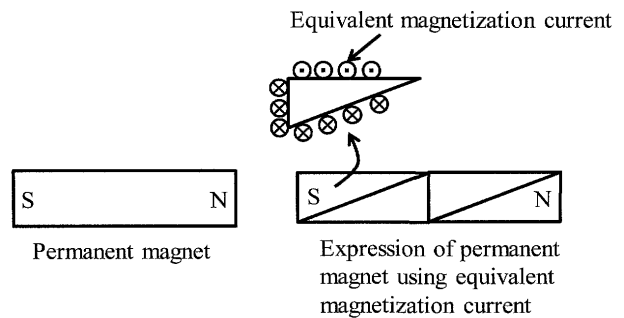


Fig. 7 Magnet analysis.

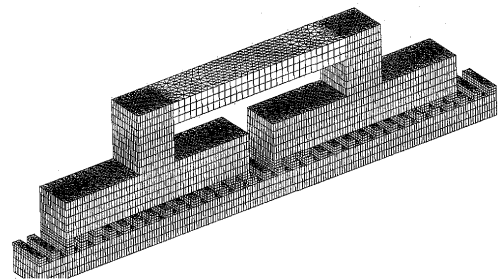


Fig. 8 FEM model.

は、Fig. 9-12 に示す通りである。極歯ヨークは 1mm ピッチで配置したので、可動子の移動量は、1/2 ステップであり、0.5mm ずつとなる。Fig. 7-10 の配色による色分けは、磁束密度の大きさを表す。青が 0T とし、MAX は赤色で 0.8T にて表している。シミュレーションの計算結果を見てみると、各極歯における磁束密度の大きさは、超磁歪素子の比透磁率の大きさに応じており、極歯同士の吸引による安定状態や移動状態がわかる。各ステップ順に進行方向 X 軸の推力が計算で求まり、これを Table 2 に示す。X 方向電磁力と記載した力は、X 軸プラス方向の推力に相当する。マイナスの力が働いたとしても、可動側の固定機構や摩擦による力を数十 mN 程度に設定していれば、X 軸マイナス方向に移動することは無いと思われる。ただしこの固定機構や摩擦による力を数百 mN 以上に設定すると今度は、超磁歪素子の比透磁率の変化による発生力を上回り、可動子が固定されてしまうので、注意が必要である。Y 軸方向の極歯ヨーク同士の吸引力を X 軸方向の推力とのバランスを取る設計の工夫がなされていないと、Y 軸の吸引力に負けて X 軸推力による可動子移動が実現しない。今回は原理を示し、その原理の確認のために一例をシミュレーションとして計算したが、実際の設計には、使用する気候要素モデルに適した設計とシミュレーションを繰り返し行い、吸引力と推力の最適化を行う必要がある。

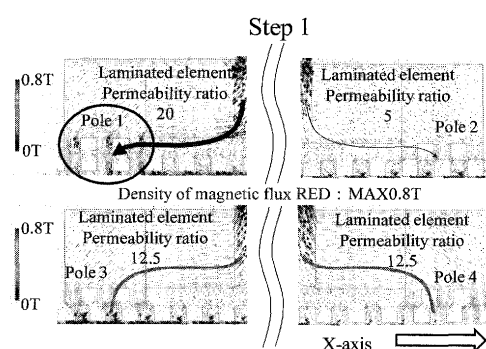


Fig. 9 Magnetic flux density distribution at step 1.

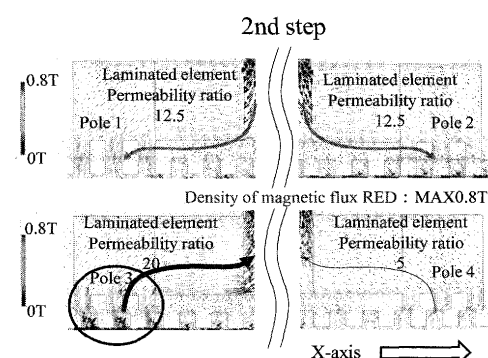


Fig. 10 Magnetic flux density distribution at step 2.

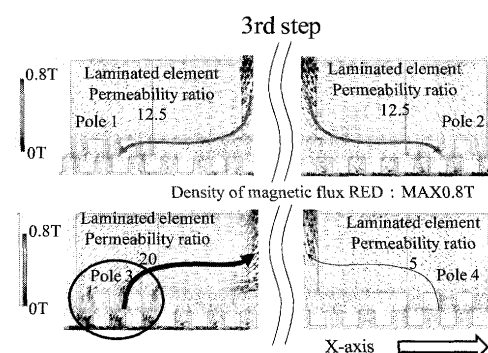


Fig. 11 Magnetic flux density distribution at step 3.

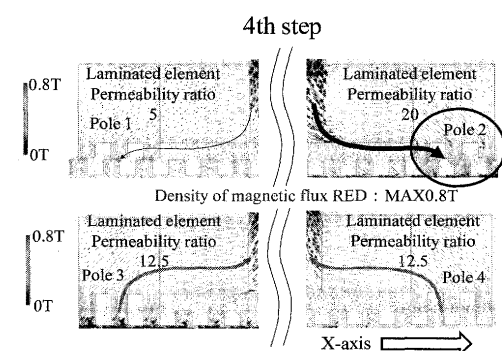


Fig. 12 Magnetic flux density distribution at step 4.

Table 2 X direction electromagnetic force.

	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
X direction electromagnetic force	-25.5	372.7	-28.4	389.3

Unit(mN)

以上の磁気力制御素子を用いた Sawyer 型ステップモータは、理論や電磁界解析シミュレーション結果より実現出来ることを示した。

7 結言

今回のように、磁気力制御素子により可動子極歯ヨークの磁路の磁束密度を変化させることができれば、Fig. 9-12 に示すように、X 軸方向の推力を発生させることがわかった。Fig. 10 と 11 は磁気力制御素子の比透磁率構成が同じであるが、Fig.10 は x 軸正の方向に動き出すための推力発生モードになっており、Fig.11 は x 軸上の位置固定のためのモードになっている違いがある。

更に磁歪材料と圧電材料の積層が微小化できれば、電磁石では不可能なマイクロ領域での磁気力制御も可能になる。よってカメラモジュール等のアクチュエータ搭載も可能となる。オートフォーカス機構の代替を考えると、高周波での圧電素子へのスイッチングを行った場合、圧電素子や超磁歪素子のヒステリシス損や弾性体の内部摩擦による発熱を無視出来ず、効率が悪くなる恐れもある。低周波スイッチングの場合や、あるポジションでの固定時間が長いリニアモータ等では、圧電素子と超磁歪素子の複合素子に変形後、長い時間での形状固定状態となるので、圧電素子にほとんど電流が流れない。この場合、ヒステリシス損や弾性体の変形による内部摩擦等もほとんど考慮しなくて良いので、電圧印加のみの保持となり、低発熱で低消費電力が期待できる。また Voice Coil Motor では、Moving coil 方式の場合、電源接続のためのリード線の応力による断線が問題となる。反対に Moving magnet 方式の場合、現状高磁束密度のネオジウム磁石を使用することから、重量が大きくなりがちで、より推力が必要な電磁石の設計を必要とする。

モバイル機器におけるカメラモジュールのオートフォーカス機構においては、耐衝撃性や光学設計上、プラスチックレンズ 3~4 枚程度で、必要可動距離が 0.5mm 以下、必要推力が 5mN 程度まで小型化されてきている (Fig. 13 参照)。そこで本稿のように積層磁気力制御素子を微小化できれば、巻線がなく可動子と固定子

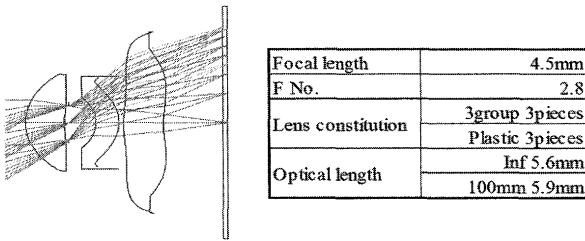


Fig. 13 Example of optical design for the camera module

が非接触である耐久性の高いアクチュエータ作製が可能となる。

ただし、超磁歪素子の圧縮・伸長による透磁率の変化が大きくないことや、圧電素子と超磁歪素子の複合素子の作製の仕方によって、その性能にばらつきが出やすいこと、高周波で圧電素子にスイッチングを行った場合、やはり発熱が無視できない等の問題点もある。超磁歪素子の変形方法や逆磁歪効果の大きい磁歪材料の開発が必要である。

謝辞

本論文のシミュレーション計算にあたっては、株式会社 JSOL の森長氏[11]にサポートいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

(2010 年 7 月 12 日受付)

参考文献

- [1] T. Niarchos, Magnetic MEMS : key issues and some applications, *Sensor and Actuator A*, Vol.106, pp.255-262, 2003.
- [2] T. Ueno, J. Qiu, J. Tani, Magnetic Force Control With Composite of Giant Magnetostrictive and Piezoelectric Materials, *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol.39, No.6, pp.3534-3540, 2003.
- [3] 上野, 樋口, 磁歪材料と圧電材料の積層を用いた磁気力制御素子の静特性評価, 電気学会論文誌 A, Vol.124, No.5, pp.435-440, 2004.
- [4] 上野, 裘, 谷, 磁歪材料を用いた新しい磁気力制御方法, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.66, pp.110-115, 2000.
- [5] A. E. クラーク, 江田, 超磁歪材料—マイクロシステムとアクチュエータ応用, 日刊工業新聞社, 1995.
- [6] T. Ueno, C. Keat, T. Higuchi, Linear Step Motor Based on Magnetic Force Control Using Composite of Magnetostrictive and Piezoelectric Materials, *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol.43, No.1, pp.11-14, 2007.
- [7] 上野, 裘, 谷, 逆磁歪効果を利用した磁気力制御における磁気回路設計, 電気学会論文誌 A, Vol.121, No.8, pp.771-777, 2001.
- [8] H. J. Park, Y. W. Park, H. W. Choi, Development of Inverse Magnetostrictive Actuator, *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol.44, No.11, pp.4309-4312, 2008.
- [9] D. H. Sui, Y. W. Park, H. J. Park, Lumped Modeling of Magnetic Actuator Using the Inverse Magnetostrictive Effect, *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol.43, No.6, pp.2591-2593, 2007.
- [10] 高橋則雄, 三次元有限要素法-磁界解析技術の基礎, 電気学会, 2006.
- [11] JMAG, URL <http://www.jmag-international.com/jp/>, 株式会社 JSOL.