

313 永久磁石と鉄粉層内蔵ばねによるアクチュエータの開発とその解析

Development and analysis of an actuator consisting of a coil spring with multi-iron particle layers and an electro-permanent magnet.

能登谷 雅幸・群馬大院
M. Notoya, Gunma University正 長屋 幸助・群馬大
K. Nagaya, Gunma University○坂本 直也・群馬大院
N. Sakamoto, Gunma University藤中 哲也・群馬大院
T. Fujinaka, Gunma University畑 秀樹・群馬大院
H. Hata, Gunma University鄭 娟莉・群馬大院
J. Zheng, Gunma University

Key Words: Spring, Actuator, Electromagnet, Control, Iron Layer.

1. 緒 言

近年、高速のリニアアクチュエータが種々開発され、位置決め制御や振動のアクティブ制御などの幅広い用途に用いられている。そこで、本研究では電磁吸引型の新しいタイプのアクチュエータを提案する。すなわち、大きな電磁力を得るために鉄片間距離を小さくし、吸引鉄片を多数用いて変位を重畳することで大きな変位の得られるアクチュエータを開発する。ばねは復元力を有する機能部品であるので、その中に多層鉄片を組み込むことで可動コイルアクチュエータより格段にコンパクトとなり、また重畳した変位が得られるので大きな変位も得られる。さらに電磁石と永久磁石を組み合わせることで、通常のアクチュエータと同様に伸縮の制御ができ、可動変位が大きく、かつ比較的高応答の新しいタイプのばね型アクチュエータを開発する。また、磁束密度の計測を行って全鉄粉層の磁束密度を近似し、それを用いて変位の影響も考慮した電磁力の計算を行い、本ばね型アクチュエータの変位と制御電流の関係を与える設計式を導出した。また、制御時における簡単なモデリングの方法を示し、それにより本アクチュエータの応答計算が可能であることを示す。

2. ばね型アクチュエータの構造と動作原理

本研究では、ばね型アクチュエータの開発とともに鉄粉層間の磁界が実際にどのようなになっているのかを測定し、アクチュエータの応答設計のための設計式を導出することを目的としている。そこで、磁束密度センサーが挿入可能なサイズの Fig.1 のような構造のばねを製作した。

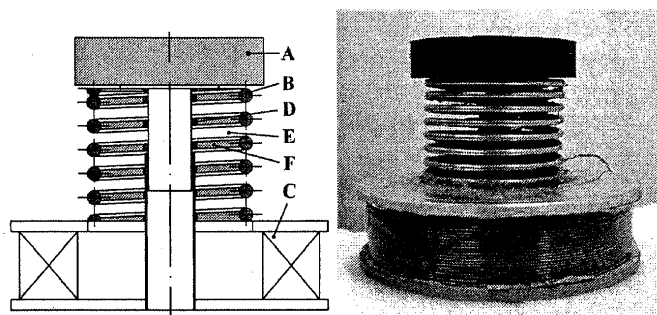


Fig.1 Geometry of the spring actuator.

Fig.1 でBは金属で作られた通常のコイルばねである。その中にシリコン接着剤とフェライト粉を混合した鉄粉層Fをばねのコイル素線に合わせて接着し積層していく。したがって図中のEは空隙となる。そのばねを電磁石Cに接着する。なお、Dは鉄粉層の中心に開けた穴であり、スライダを通してばねの横揺れを防ぐようにしてある。右図が実際の写真となっている。上記のばねに磁界を与えることで鉄粉層を磁化させ、ばねを伸縮させる。このアクチュエータは基本的に電磁力で吸引駆動を可能とするが、伸張に対する駆動ができないため、交流加振したとき、起振力は常に正の半波正弦波となるので、周波数は駆動周波数（電流の周波数）の2倍となる。すなわち、通常の制御でアクチュエータを正しく制御す

ることはできない。そこで、本アクチュエータではさらにばねの先端部に永久磁石Aを取り付けた永電磁式とし、鉄粉層間にはじめから磁気吸引力を発生させる。永久磁石により与えられた磁界の大きさを電磁石で変化させることで、鉄粉層の磁気力を変化させることができる。このとき、永久磁石の磁束と同じ向きに電磁石による磁気を与えるとばねは圧縮され、逆に永久磁石の向きと反対の磁気を電磁石で与えると磁気力が減少してばねの復元力でばねは伸張する。すなわち、永久磁石と鉄粉層内蔵ばねの組み合わせによりばねの伸縮をコントロールすることが可能となる。

3. 磁束密度と電磁力

3.1 軸方向磁束密度の計測法と近似

本アクチュエータは積層鉄粉間の電磁力によりばねを伸縮させるものである。電磁力の計算では積層鉄粉間の磁束密度が必要となる。そこで、各鉄粉層間の軸方向磁束密度をホール素子を用いて測定する。ここで、磁束密度の変化は永久磁石と電磁石の両方から影響を受けているので、これらを別々に計測する。その得られた値を基に各層に作用する力を求め、それよりばねの変位を求めることとする。測定結果を Fig.2 に、鉄粉層番号を示した略図を Fig.3 に示す。

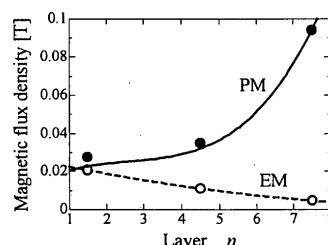


Fig.2 Distribution of Magnetic flux densities in the axial direction.

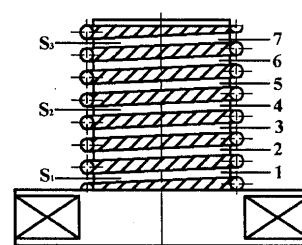


Fig.3 Arrangement of the sensors.

Fig.2 のように、本アクチュエータの軸方向磁束密度はなめらかに変化するので、数点の測定により全鉄粉層の磁束密度を簡単な 2~3 次の多項式で近似できることが分かる。

3.2 電磁力の計算

電磁力の計算では、磁化された鉄粉層をコイルに置き換えて考える。このとき、コイル n における z 方向磁束密度を近似して B_{zn} とおく。いま p 番目のコイルが任意の点 $S(r,z)$ に作る磁界の z 方向磁束密度 $B_{zp}'(r,z)$ は

$$B_{zp}'(r,z) = \mu J_p F_{zp}(r,z) \quad (1)$$

n 層の位置 (r,z_n) ($z_n = ng$) における磁束密度はそれぞれのコイルのその点に作る磁束密度の和で与えられるので

$$B_{zn}(r) = \sum_{p=1}^N B_{zp}'(r,z_n) = \mu \sum_{p=1}^N J_p F_{zp}(r,z_n) \quad (2)$$

計測等により $B_{zn}(r)$ が求められているときは、これを用いてマトリックス式をたて、それを解くことにより伝導電流 J_n を計算できる。また、 F_{zp} 鉄粉層 p と層 n に作用する力は層 p の層 n に作る半径方向磁束密度と層 n の電流の積である。層

p が任意の点(r, z)に作る半径方向磁束密度は、前述の計算で求められている伝導電流 J_p を用いて計算することができる。また、 p 層と n 層の間に作用する電磁力はスライダの穴を考慮すると次式となる。

$$Q_{pn} = \pi(a_2 - a_1)\mu J_p \{F_{rp}(r_i, z_n) + F_{rp}(r_o, z_n)\} J_n \quad (3)$$

ここで a_1 はスライダ穴の径、 a_2 はコイル径である。また、 p 層と n 層を境に磁極が変化するので電磁力の計算を行う上ではこれを考慮する必要がある。

4. アクチュエータの変位

アクチュエータの変位の計算を行う上で磁束密度が必要となる。しかし、コイル n の磁束密度 B_m はばねが変位すると変化し、また同時に鉄粉層中心面間隔 g の伸縮によっても磁束密度の変化に影響するので、これを考慮しなければならない。このときの永久磁石取り付け時の力を求める方程式は次のようになる。

$$Q_{pn}' = [\pi(a_2 - a_1)\mu J_p \{F_{rp}(r_i, z_n) + F_{rp}(r_o, z_n)\} J_n] (g_{pn}/l_{pn})^2 \quad (4)$$

これより、変位 δ_0 を求める方程式は

$$\sum_{n=2}^N \sum_{p=1}^N \varepsilon_{pn} (Q_{pn}'/k_{pn}) - f_g/k - \delta_0 = 0 \quad (5)$$

となる。また、電流のみ印加したときの力を求める式は

$$Q_{pn}'' = [\pi(a_2 - a_1)\mu (J_p + J_{ep}) \{F_{rp}(r_i, z_n) + F_{rp}(r_o, z_n)\} (J_n + J_{en})] (g_{pn}/l_{pn})^2 \quad (6)$$

であるので、このときの変位 δ を求める式は次式となる。

$$\sum_{n=2}^N \sum_{p=1}^N \varepsilon_{pn} (Q_{pn}''/k_{pn}) - f_g/k - \delta = 0 \quad (7)$$

ここに、 k_{pn} は p 層と n 層の間のコイルばねのばね定数、 k は全巻きに対するばね定数、 f_g は永久磁石による重力、 g_{pn} は p 層と n 層の間の元の距離、 l_{pn} は変化後の距離である。以上より平衡点よりの変位(電磁石のみの変位)を w とすると

$$w = \delta - \delta_0 \quad (8)$$

5. 数値計算例

上記の解析に基づくアクチュエータの変位と実験による変位の比較検討を行う。本アクチュエータの諸寸法や近似式より得られた値を代入し、計算を行った結果を Fig.4 に示す。図より、本アクチュエータは永久磁石の磁束密度を増加する方向に電磁石の電流を印加した場合(電流が正)に大きく変位し、磁束を減少する方向に電流を印加した場合(電流が負)に駆動変位が小さい。しかし、非対称性はあるものの、正負の両方に変位できることがわかる。また、実験値と計算値はほぼ一致しており、上記のような近似式を用いて本アクチュエータの設計ができることがわかる。

6. ばね型アクチュエータのモデリングと応答

6.1 モデリング

本ばね型アクチュエータを実際に使用するとき、前述の計算と運動方程式を連成させて解析することはかなり煩雑である。そこで本アクチュエータのモデリングを考える。

まず質量については、永久磁石の質量 m_p と鉄粉層付きのばねの質量 m_s の有効質量 $m_s/3$ と足し合わせたものを考える。すなわちアクチュエータの質量 m_a は

$$m_a = m_p + m_s/3 \quad (9)$$

一方、電磁力をばねの上端(永久磁石の上端)に作用したと仮定したときの等価力を F としたとき

$$F(I) = kw(I) \quad (10)$$

本ばねの場合変位 $w(I)$ は電流 I に対して非線形な関係を有するが、アクチュエータとして使用するときには線形として扱うことが望ましい。そこで、本ばねを近似的に線形として扱った場合の応答特性を検討する。ここで変位の正負のみで完全線形ばねと近似した場合に近似度が悪い場合がある。その場合には、さらに断片線形近似することで精度を改善することができる。

6.2 応答特性

本アクチュエータの運動方程式は

$$m_a \frac{d^2 w}{dt^2} + C_a \frac{dw}{dt} + kw = F(I) \quad (11)$$

ここに、 m_a はアクチュエータの質量、 w はアクチュエータ先端の変位、 C_a は減衰係数、 F は上記の制御力および t は時間である。いま電流 I_0 をステップ上に印加したときを考えると次式となる。

$$F(I) = k\varepsilon_1 I_0 u(t) \quad (12)$$

式(12)を式(11)に代入して解を求めると

$$w(t) = \frac{K}{p^2} \left\{ 1 - \frac{e^{-p\zeta t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(p\sqrt{1-\zeta^2}t + \phi) \right\} \quad (13)$$

ここに

$$K = \frac{k\varepsilon_1 I_0}{m_a}, \quad p = \sqrt{k/m_a}, \quad \zeta = \frac{C_a}{2\sqrt{km_a}}, \quad \tan\phi = \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$$

いま、数値例として本研究で試作したアクチュエータにステップ電流 $I = I_0 u(t)$ を印加した場合を考える。このとき、ばねを電流の正負のみの区間で線形近似したとき、上式に値を代入して計算した結果を Fig.5 に示す。

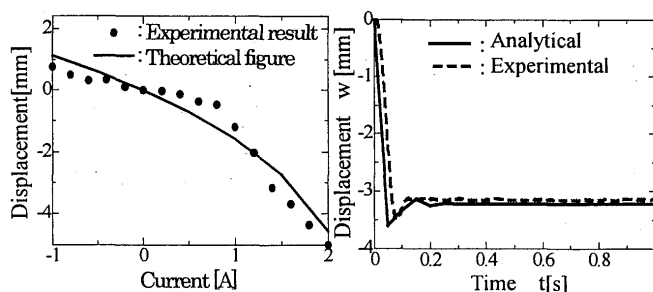


Fig.4 Displacement of the top of the actuator versus currents.

Fig.5 Comparison between theoretical and experimental results for the actuator.

図中の実線が計算値であり、破線が実験値である。ここで、減衰比 ζ は実験値にほぼ一致するように同定したものである。ばね型アクチュエータは鉄粉をシリコン接着剤で接着したものであるため、鉄粉同士の摩擦が許されるため、本アクチュエータでは減衰比が $\zeta = 0.45$ と、通常のアクチュエータに比べてかなり大きくなっている。すなわち、本アクチュエータそのものに減衰があるので、使用時は速度フィードバックなしでもかなり安定した整定値が得られることが特徴である。計算値は実験値とほぼ一致しており、本方法のような簡便なモデリングで本アクチュエータを用いて良いことがわかる。

7. 結 言

本研究は、コイルばねにアクチュエータ機能を持たせたばね型アクチュエータの開発を行ったものである。その内容を列記すると

- (1) アクチュエータの構成と製造法を示し、電流駆動を行ったところ、周波数に連動する正負の変位が得られることを確認した。
- (2) 軸方向磁束密度を数点測定するのみで、駆動電流とアクチュエータ変位の関係が得られる設計式を導出して数値計算を行ったところ、数値結果が実験値とほぼ一致することを確認した。
- (3) 本アクチュエータの簡便なモデリング法を示し、ステップ応答に対して、実験値と計算値を比較したところ、両結果はほぼ一致した。すなわち、本報で与えた計算式を用いて、アクチュエータの設計および制御系の設計ができることが明らかにされた。