

社団法人 日本設計工学会 四国支部
平成 21 年度研究発表講演会
講演論文集

開催日：2010 年 3 月 16 日（火）
会 場：香川大学 工学部

主 催
社団法人 日本設計工学会 四国支部
共 催
香川大学 工学部

円板磁石を用いた磁路制御形非接触浮上機構の開発

○武智徹（高知工科大学工学部）
孫鳳（高知工科大学大学院）
岡宏一（高知工科大学工学部教授）
楠川量啓（正，高知工科大学工学部教授）

1. はじめに

磁気浮上機構は、非接触で物体を浮上でき、摩擦が発生しない。そのため、クリーンルームなどで用いられている。現在、永久磁石を用いた磁気浮上機構は数多く提案されている。しかし、永久磁石の吸引力を調整できない、浮上体が一度吸着してしまうと制御できない、磁極を変えることができないなどの問題点を持つ。

本研究では、これらの問題点を解決するため、永久磁石と回転モータを用いた磁気浮上機構を提案する¹⁾²⁾。この浮上機構は、磁石の回転角度を変化させ、磁気抵抗を調節することで浮上力を制御する。本報告では、磁路制御形浮上機構による鉄球2個の同時浮上原理を説明し、装置設計について述べる。コアの磁束密度と吸引力を測定する基本実験を行い、装置特性を考察する。次に、モデル化し、浮上システムの可制御性を考察する。

2. 浮上原理

浮上原理を Fig.1 に示す。Fig.1 の左図は、上側がN極、下側がS極である。この場合、N極とS極がコアに面する面積は同じなので、N極から出た磁束は全てコアの上部を通りS極に吸収される。磁束は2つの鉄球に到達しないため、コアと鉄球の間に吸引力は発生しない。一方、Fig.1 の右図では永久磁石が20°回転しており、右側コアにおいて、N極がコアに面する面積はS極より大きくなる。左側コアでは逆である。そのため、N極から出た磁束の一部が右のコアを通り、右の鉄球に到達する。その磁束は左の鉄球とコアを通り、S極に帰る。その結果、コアと鉄球の間に吸引力が発生する。さらに、磁石の回転角度が大きくなるにつれて左右の鉄球を通る磁束の量は増加する。よって、コアと鉄球との吸引力を磁石の回転角度で制御できる。

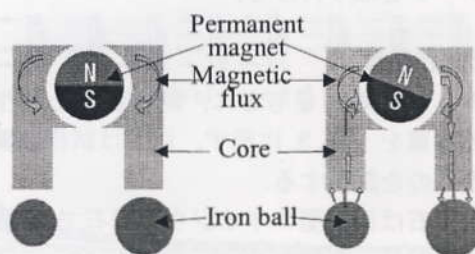


Fig.1 Suspension principle

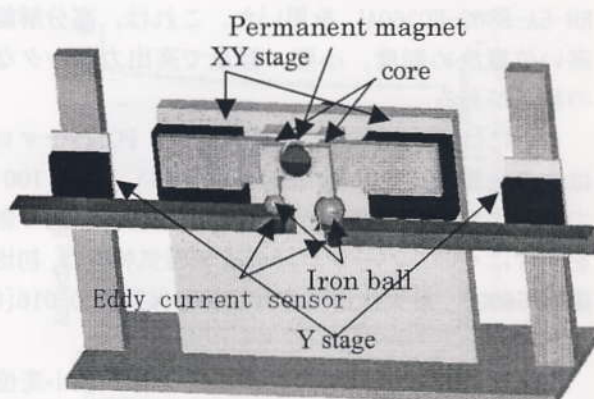


Fig.3 Design drawing of experimental device

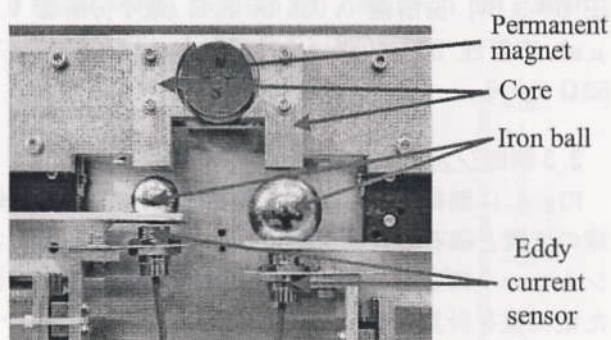


Fig.3 Experimental device

3. 試作装置の設計

3.1 設計概要

提案した浮上原理を実現するため、試作装置を設計した。試作装置の設計の概略図を Fig. 2 に示す。試作装置は、永久磁石、磁石の左右に対称にコアを設置、重量が異なる2個の鉄球、渦電流センサ、磁石を駆動する回転モータから構成される。さらに、コアと磁石の距離を上下左右方向に高精度に調整するため、左右のコアを2つのXYステージの上に配置する。また、2個の渦電流センサの位置を上下に調整するためyステージを取り付ける。

3.2 試作装置

設計した概略図をもとに、試作装置を製作した。装置の写真を Fig. 3 に示す。以下は試作装置で用いた主なものを説明する。

永久磁石は円板型のネオジウム磁石で、径方向に磁化されており、直径が30mm、厚さが10mm、磁束密度が14.2[kG]、保磁力が12[kOe]、最大エネルギー積が48[MG0e]である。

磁石を回転制御するためにハーモニックドライブ RH-5A-8802-E0360AL を用いた。これは、高分解能、高い位置決め制度、小型、軽量で高出力トルクなどの利点がある。

コアには PC パーマロイを用いた。PC パーマロイは他の金属に比べ、最大透磁率が高い。鋼板100倍である。また、保持力が小さいため残留磁化の影響を受けにくい。パーマロイの直流磁気特性は、初比透磁率56000、最大比透磁率122000、保磁力0.016[0e]である。

位置センサは渦電流変位計で、金属の微小変位を非接触で測定可能、油や埃に強く高速応答に優れているなどの利点を持つ。測定範囲0~3.5mm、出力電圧0~3.5V、分解能0.03% of F.S. (最小分解能0.3 μ m)、応答性DC~10KHz(-3dB)、出力インピーダンス52 Ω である。

3.3 制御システム設計

Fig. 4 に制御システムの概略図を示す。2つの鉄球の位置と磁石の角度を測定し、その情報を DSP コントローラに送る。DSP コントローラは送られてきた電流値を計算し、その情報を元に、アクチュエータは磁石を回転させる。

4. 装置特性の確認

4.1 磁束密度の測定

装置の特性を確認するために、磁束密度と磁石の

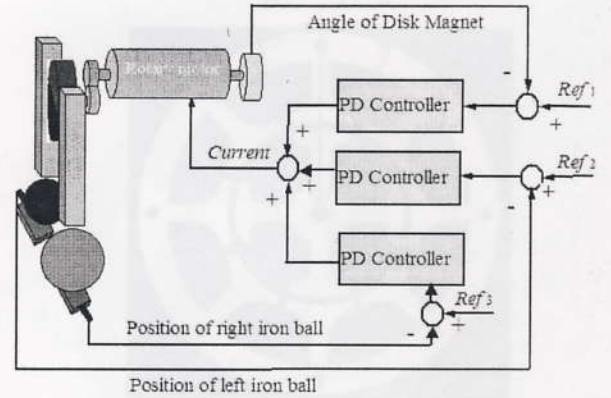


Fig. 4 Block of control system

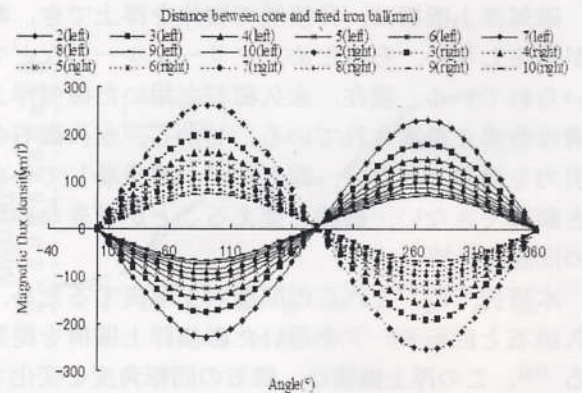


Fig. 5 Measurement results of magnetic flux density

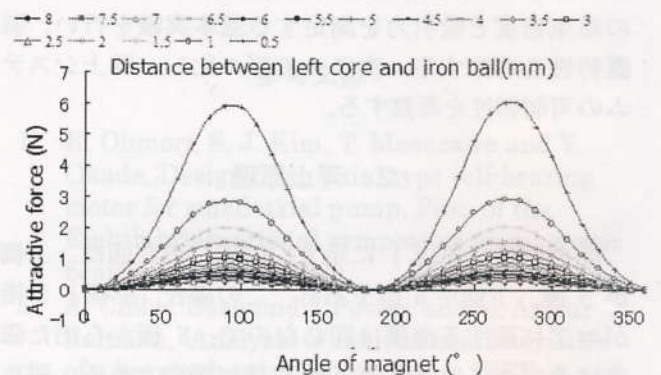


Fig. 6 Force results of left core

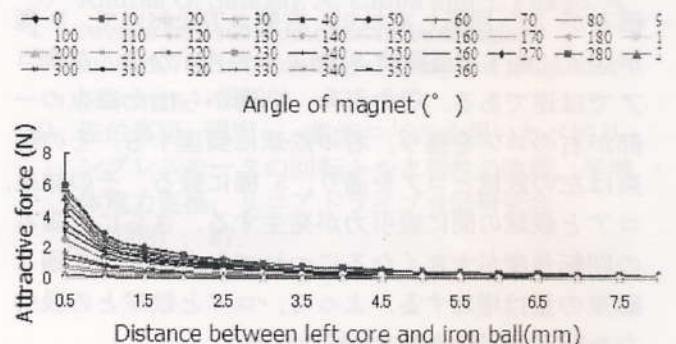


Fig. 7 Force results of left core

回転角度、コアと鉄球の空隙距離の関係を調べた。左側コアの下鉄球は 20mm で右側コアの下鉄球は 30mm である。実験では、磁石の回転角度を 0° から 360° まで 10° 刻みで変化させ、コアと鉄球との空隙距離を 2mm から 10mm まで 1mm 刻みで測定した。測定した結果を Fig.5 に示す。結果より、空隙距離が変わらないとき、円板磁石の回転角度により磁束密度にほぼ正弦曲線のような変化が現れた。さらに、角度を固定し、空隙を小さくすると、磁束密度は大きくなる。

4.2 吸引力の測定

吸引力が、磁石の回転角度とコアと鉄球の空隙距離と、どのような関係を持つか調べた実験では、20mm の鉄球と 30mm の鉄球に働く、それぞれの吸引力を調べた。実験条件は、永久磁石の回転角度を $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ まで 10° ずつ変化させ、コアと鉄球との空隙距離を 0.5mm~8mm まで 0.5mm ずつ変化させる。ただし、吸引力を測定していないほうの鉄球の位置は 2mm で固定した。実験結果は Fig.6~Fig.9 のようになった。

グラフから、吸引力と磁石の回転角度にはほぼ正弦曲線の 2 乗の関係が見られた。また、吸引力と空隙距離の間には、空隙距離が大きくなるにつれて吸引力は小さくなるという関係が見られた。

磁石の角度を固定して一方の鉄球とコアとの空隙距離を変化させたとき、もう一方の鉄球を通る吸引力を測定した。実験条件は、永久磁石の回転角度を 60° に固定し、コアと鉄球との空隙距離を 0.5mm~8mm まで 0.5mm 間隔で左右とも変化させて測定した。結果を Fig.11,12 に示す。結果より、鉄球相互の吸引力への影響はほとんど見られなかった。

5. モデル化と可制御

浮上の可能性とシステムの可制御性を確認するため、モデルを作り、運動方程式を導出した。

まず、モデルでは以下のことを仮定する。

- (1) 永久磁石の半分は N 極、もう一方の半分は S 極である。
- (2) 磁石から出た磁束はコアに面する面積に応じて磁石に吸収される。
- (3) コアの磁気抵抗は十分に小さいため、すべての磁束は 2 つのコアを通る。

モデルから運動方程式を導出すると

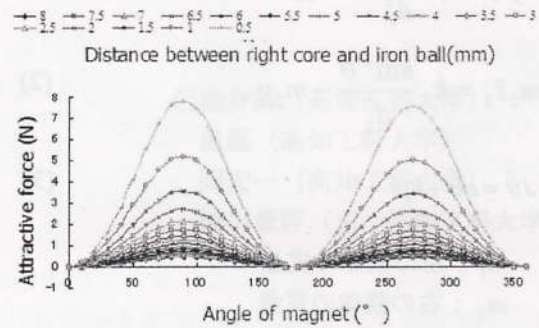


Fig.8 Force results of right core

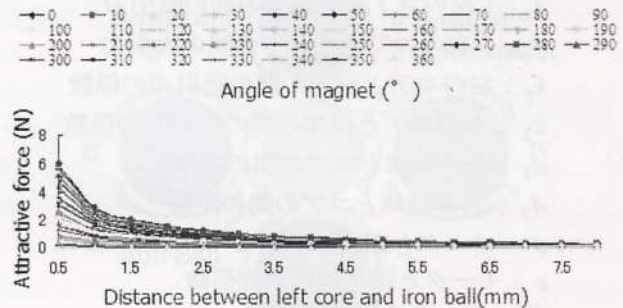


Fig.9 Force of right core

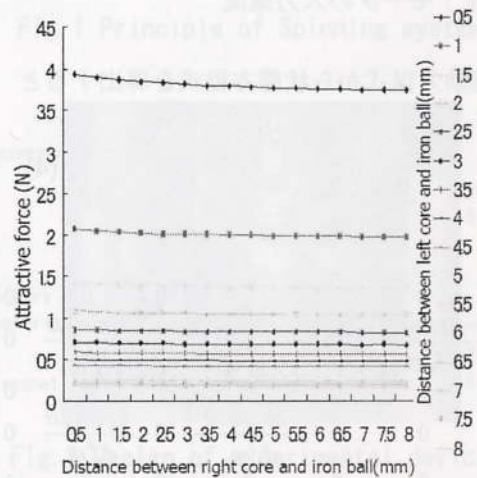


Fig.10 Force results of 20mm iron ball when angle is 60°

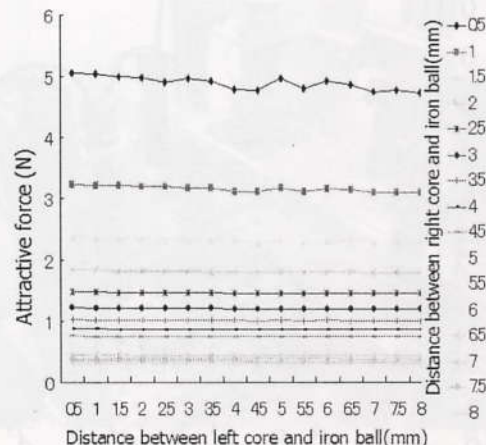


Fig.11 Force results of 30mm iron ball when angle is 60°

$$m_1 \ddot{z}_1 = k_1 \frac{\sin^2 \theta}{d_1^2} - m_1 g \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 = k_2 \frac{\sin^2 \theta}{d_2^2} - m_2 g \quad (2)$$

$$J \ddot{\theta} = c \dot{\theta} + k_t i \quad (3)$$

m_1 : 左の鉄球の質量

m_2 : 右の鉄球の質量

z_1 : 左の鉄球の変位

z_2 : 右の鉄球の変位

f_{m1} : 左のコアと鉄球との間の吸引力

f_{m2} : 右のコアと鉄球との間の吸引力

k_1 : 左のコアと鉄球の間の吸引力の係数

k_2 : 右のコアと鉄球の間の吸引力の係数

d_1 : 左の鉄球とコアの間の距離

d_2 : 右の鉄球とコアの間の距離

J : モータと磁石の慣性モーメント

c : モータと減速機の減衰係数

f_a : モータの駆動力

k_t : モータのトルク係数

i : モータの入力電流

運動方程式から状態方程式を導出すると

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (4)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2k_1 \sin^2 \theta}{d_1^3 m_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{k_1 \sin 2\theta}{d_1^2 m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2k_2 \sin^2 \theta}{d_2^3 m_2} & 0 & \frac{k_2 \sin 2\theta}{d_2^2 m_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c}{J} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{kt}{J} \end{pmatrix}$$

状態方程式から可制御条件を導出すると

$$P_c = (B \ A \cdot B \ A^2 \cdot B \ A^3 \cdot B \ A^4 \cdot B \ A^5 \cdot B) \quad (5)$$

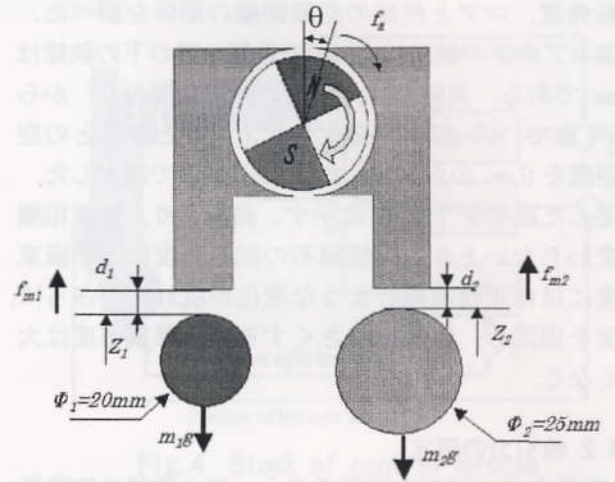


Fig. 12 Model of suspension system

$$|P_c| = \frac{-4k_1^2 k_2^2 k_t^6 \sin^4 \theta \sin^2 2\theta (d_1^3 k_2 m_1 - d_2^3 k_1 m_2)^2}{d_1^{10} d_2^{10} J^6 m_1^4 m_2^4} \quad (6)$$

システムが可制御である条件は

$$d_1^3 k_2 m_1 - d_2^3 k_1 m_2 \neq 0 \quad (7)$$

6. おわりに

本報告では、永久磁石を用いた磁気浮上機構を提案し、設計した。設計を元に装置を製作した。装置の特性を確認するため、磁束密度、吸引力の測定実験を行った。測定結果より、永久磁石の回転角度によって、2つのコアの吸引力を制御できることが確認できた。そして、一方の鉄球の吸引力に他方の鉄球の挙動はほとんど影響を及ぼさないことがわかった。さらに、実験結果を元にモデルを構築し、運動方程式を導出した。運動方程式から状態方程式を導き、可制御条件を求めた。今後は鉄球2個の同時浮上についてシミュレーションと実験を行う予定である。

参考文献

- 1) 二宮 伯覚：ロータリアクチュエータを用いた磁路制御型磁気浮上機構，高知工科大学，2007年度卒業論文。
- 2) 西原 雄太：永久磁石を用いたロータリー式可変磁路型磁気浮上機構，高知工科大学，2009年度卒業論文。