

可変磁路制御機構による2つの鉄球の非接触浮上に関する検討

Study of simultaneous noncontact two ball suspension system by variable flux path mechanism

中村豪太*, 岡崎大洋**, 鶴身輝***, 岡宏一****

Gouta NAKAMURA* and Takahiro OKAZAKI** and Akira TSURUMI*** and Koichi OKA****

*高知工科大学大学院, 155034t@gs.kochi-tech.ac.jp
**高知工科大学大学院, 155020e@gs.kochi-tech.ac.jp
***高知工科大学大学院, 145040y@gs.kochi-tech.ac.jp
****高知工科大学, oka.koichi@kochi-tech.ac.jp

概要: 本研究は、円盤磁石と回転モータを用いて浮上システムを構成し、2つの鉄球を同時浮上することを提案する。この浮上システムは、回転モータに取り付けられた円盤磁石の回転角度を制御することにより、円盤磁石が発生した磁束の経路を変更し、2つの鉄球の浮上力を同時に制御する。現在、リニアレールを用いて同時浮上を行っているが吸引力が鉄球の間にもあるため完全非接触の浮上が行えない。鉄球の間の力での安定点を見つけ完全非接触の同時浮上を目指す。

Keywords: 磁気浮上 円盤磁石 磁路制御 同時浮上

1. 緒言

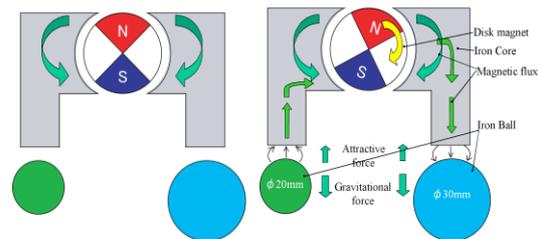
著者らのグループでは現在までに円盤磁石を用いた可変磁路制御型磁気浮上機構により角棒の非接触浮上に成功している^[1]。本研究では、同様の浮上システムを用いて2つの鉄球の同時浮上を提案する。この浮上システムでは、回転モータに取り付けられた永久磁石の回転角度を制御することにより2つの鉄球の浮上を実現するものである。

2. 浮上力の制御原理

可変磁路制御機構による浮上力の制御原理を示す。まず、Fig.1(a)の状態では図の矢印のように円盤磁石のN極からS極へ左右のコアの中だけを磁束が流れるため、2つの鉄球に吸引力は働かない。一方、Fig.1(b)では、右側コアのN極がコアに面する面積がS極より大きくなる。そのとき、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。その結果、

コアと鉄球の間に吸引力が発生する。

また、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が増加する。よって、コアと鉄球の吸引力を磁石の回転角度で制御することができる。



(a) 磁石の回転角度 0° (b) 右に少し回転。

図1 磁束の流れ

3. 試作装置

この浮上機構は、円盤磁石、回転モータ、パーマロイのコア、2つの鉄球、2つの渦電流センサで構成されている。円盤磁石は、直径30mm、厚さ10mm、直径方向上に磁極が半分になっているネオジウム磁石で、垂直固定板の裏

側に取り付けてある回転モータによって回転駆動する。コアは、円盤磁石の両側にあり、厚さ 10mm の F 型強磁性体のパーマロイである。

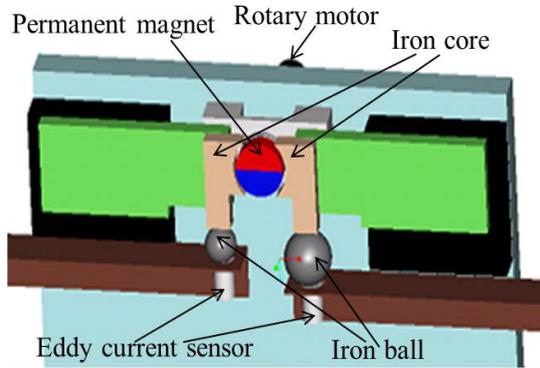


図 2 装置外観図

4. 磁束密度

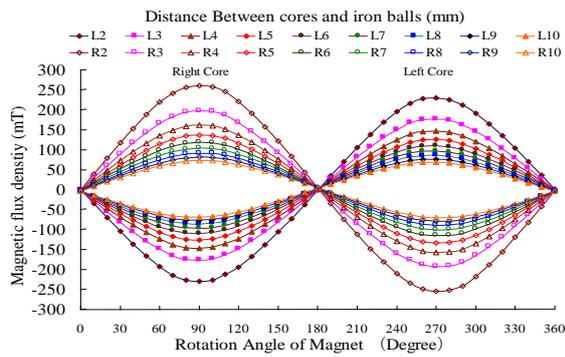


図 3 左右の鉄球の磁束密度

この、磁気浮上システムにおける浮上力の変化を確認するため、鉄球とコアの空隙距離や円盤磁石の角度を変化させたときの磁束密度の測定を行った。測定方法は、コアと鉄球の間隔を 1mm ごとに変化させ、円盤磁石の回転角度を 10° ごとに設定し測定した。測定の時、一方の鉄球を 2mm に固定して一方の鉄球の空隙距離を 2mm から 10mm で測定した。磁束密度の測定結果を図 3 に示す。図 3 は磁束密度と円盤磁石の回転角度の関係である。図 3 からわかるように、磁束密度は、円盤磁石の回転によりほぼ \sin 波状に変化している。また、左右コアの磁束密度は正負が逆となっており、直径の大きい鉄球の方の磁束密度が大きくなっている。

5. 鉄球に働く吸引力

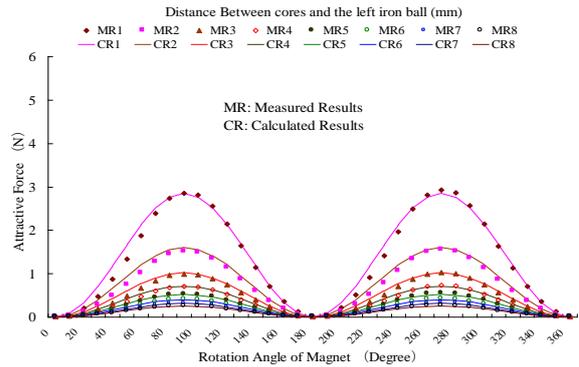


図 4 左の鉄球の吸引力

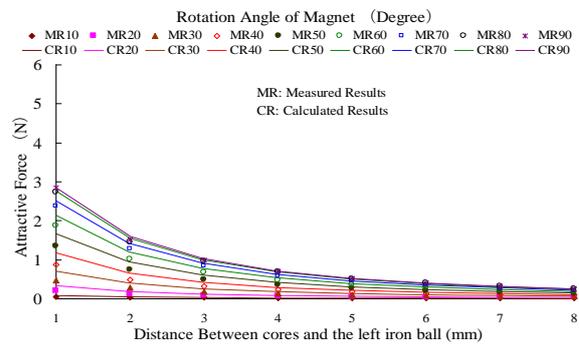


図 5 左の鉄球の距離に応じた吸引力

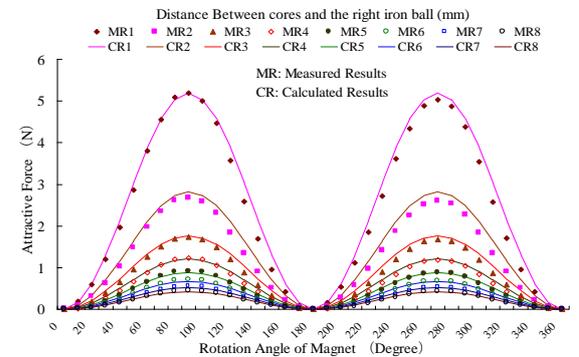


図 6 右の鉄球の吸引力

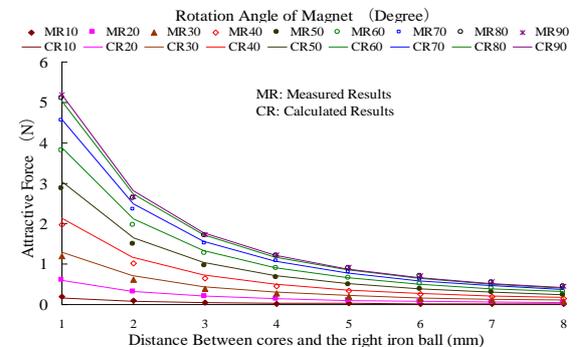


図 7 右の鉄球の距離に応じた吸引力

この磁気浮上システムにおける浮上力の変化を確認するため、鉄球とコアとの空隙距離や円盤磁石の角度を変化させた時の吸引力の測定を行った。測定のためにガウスメータと力センサを用いた。円盤磁石と両コアの間の距離を2mmに調整し、円盤磁石の回転角度を10°ごとに回転させて計測した。測定の時、一方の鉄球を2mmに固定して、もう一方の鉄球の空隙距離を吸引力の測定では1mmから8mmまで測定した。

吸引力の測定結果は左の鉄球の結果を図4と図5、右の鉄球の結果を図6と図7に示す。円盤磁石の回転角度が0°または180°であるとき、つまりN極とS極が上下方向にあるとき吸引力はほぼ0であることがわかる。また角度が90°と270°のとき、吸引力が最大値になっている。

6. モデル化

試作装置を用いた磁束密度と吸引力の測定結果に基づいて磁気浮上システムのモデル化を行った。これらのことと、図4~7の測定結果に基づいて、また吸引力は空隙を通過する磁束の自乗に比例すると考えられるため、2つの鉄球の吸引力 f_{mi} ($i=1, 2$) は次式で表される。

$$f_{mi} = k_{mi} \frac{\sin^2 \theta}{(d_i + \Delta d_{mi})^2}$$

$$J\ddot{\theta} = -c\dot{\theta} + \tau(\theta) + k_{\tau}i$$

$$m_1\ddot{z}_1 = f_{m1}(\theta, z_1) - m_1g$$

$$m_2\ddot{z}_2 = f_{m2}(\theta, z_2) - m_2g$$

$$\tau(\theta) = k_{\tau} \cos \theta$$

J : モータと磁石の慣性モーメント;

k_{τ} : モータトルクの定数;

m : 左右の鉄球の質量;

c : モータの減衰係数;

z_1 : 左の鉄球に作用する吸引力と重力が釣り合う平衡点からの鉄球の垂直方向の変位;

z_2 : 右の鉄球に作用する吸引力と重力が釣り合

う平衡点からの鉄球の垂直方向の変位;

θ : 永久磁石の回転角度;

τ : 永久磁石による回転トルク;

f_{m1} : コアによる左の鉄球に作用する吸引力;

f_{m2} : コアによる右の鉄球に作用する吸引力;

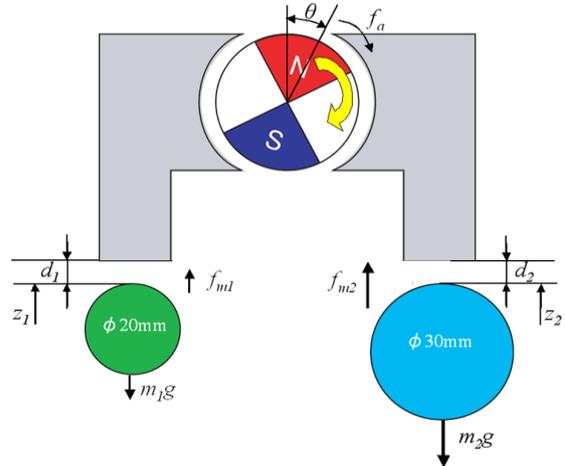


図8 2つの鉄球を用いたシステムのモデル

7. 浮上可能性の考察

この浮上機構によって、2つの鉄球を同時に浮上させる可能性を考察するため、推定したモデルに基づいて、システムの可制御性を検証した。まず、非線形性の浮上力の線形化を、浮上平衡点の付近の微小範囲内に行った。線形化した浮上力を次の式に表す。

$$\Delta f_{mi} = \frac{2k_{mi}(\sin \theta_0)^2}{(d_{i0} + \Delta d_{mi})^3} \Delta z_i + \frac{k_{mi} \sin 2\theta_0}{(d_{i0} + \Delta d_{mi})^2} \Delta \theta$$

Δf_{mi} , Δz_i , $\Delta \theta$: 平衡点の付近の微小値

θ_0 , d_{i0} : 平衡点の値

また、 $d_{mi} = d_{i0} + \Delta d_{mi}$ と仮定すると、状態方程式と出力方程式は、次式ようになる。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad x = (z_1 \quad \dot{z}_1 \quad z_2 \quad \dot{z}_2 \quad \theta \quad \dot{\theta})'$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2k_{m1}(\sin \theta_0)^2}{m_1 d_{m1}^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{m1} \sin 2\theta_0}{m_1 d_{m1}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2k_{m2}(\sin \theta_0)^2}{m_2 d_{m2}^3} & 0 & \frac{k_{m2} \sin 2\theta_0}{m_2 d_{m2}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c}{J} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_t}{J} \end{pmatrix}'$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$u = i$$

従って、可制御行列を P_c 表すと、

$$\det(P_c) = \frac{-4k_{m1}^2 k_{m2}^2 k_t^6 \sin^4 \theta \sin^4 2\theta (d_{m1}^3 k_{m2} m_1 - d_{m2}^3 k_{m1} m_2)^2}{d_{m1}^{10} d_{m2}^{10} J^6 m_1^4 m_2^4}$$

$$d_{m1}^3 k_{m2} m_1 - d_{m2}^3 k_{m1} m_2 \neq 0$$

が成立すれば、浮上システムが可制御となる。

8. 浮上実験と実験結果

2つの鉄球の互いの距離が十分でないため、2つの鉄球をリニアールに取り付け、浮上の自由度を上下方向のみに制限して浮上実験を行った。

浮上の安定性を評価するためにステップ応答の実験を行なった。実験では、安定浮上している左右の鉄球を上を 0.006mm 動かす、応答を観測する。結果を図9と図10に示す。結果より、左右の鉄球にステップを入力した後も安定浮上状態になっていることがわかる。図9では、左の鉄球の変位を上に変位させるステップ入力を加えると2つの鉄球が下に変位した。磁石の回転角度は、安定状態から一度小さくなり、最後の安定角度は前よりも大きくなった。これは、吸引力を小さくし、一度浮上体を下に変位させてから吸引力を大きくし、再び安定状態にしたからである。変位した後の鉄球とコアの距離は大きくなったため、前より大きな磁力が必要なことが分かる。図10より、右の鉄球を上に変位させるステップ入力を加えた時には、2つの鉄球が上に変位することがわかる。これは、図9の結果と逆になった。

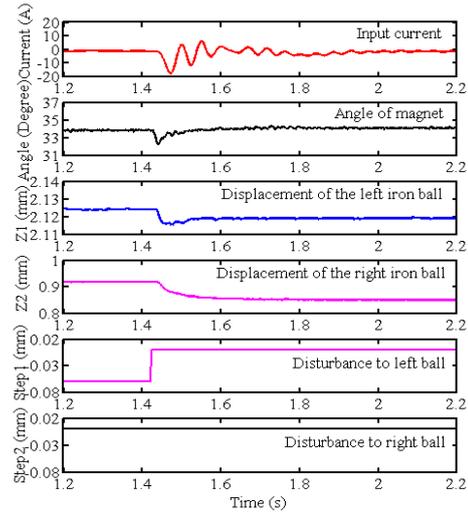


図9 ステップを加えた左の鉄球の偏差

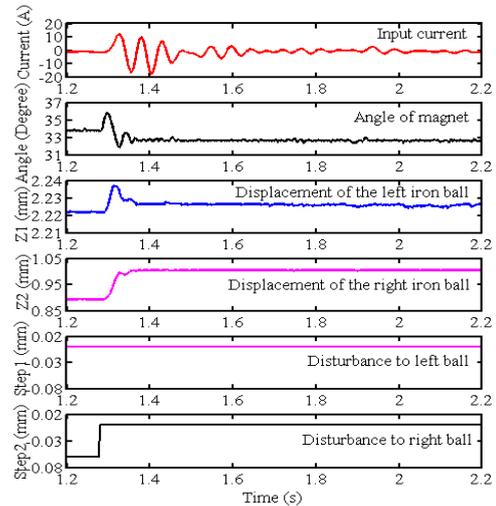


図10 ステップを加えた右の鉄球の偏差

9. 結言

円盤磁石と回転モータを用いた2つの鉄球の同時浮上システムを提案した。まず、可変磁路制御機構による浮上力の原理を説明し、試作の浮上装置を製作した。試作装置を用いた吸引力の測定を行い、フィードバックゲインを決定した後実験を行い、2つの鉄球の同時浮上が可能なことが確認できた。

参考文献

- [1] 孫鳳, 岡宏一, 西原雄太, “回転モータを利用した浮上システムの開発”, Dynamics & Design Conference 2009, 札幌, 日本, P.436, 2009.