

円板磁石を用いた可変磁路制御機構による2つの鉄球浮上

Simultaneous suspension of two iron-balls with variable flux path control mechanism using permanent magnet

○学 孫 鳳 (高知工科大学) 正 岡 宏一 (高知工科大学) 武智 徹 (高知工科大学)

Feng SUN, Kochi University of Technology, Tosayamada, Kami, Kochi

Koichi OKA, Kochi University of Technology

Toru TAKECHI, Kochi University of Technology

This paper proposes a simultaneous suspension of two different weight iron balls with a magnetic suspension system using flux path control method. In this system, the suspension force is generated by a disk-type permanent magnet, and controlled by varying the angle of the permanent magnet that is driven by a rotary actuator. In this paper, first, the suspension principle is explained, and the prototype is introduced. Second, the characteristics of this system are examined by some basic experimental results. Third, basing on the examination results, a model is created, and the controllability is proved theoretically. Finally, the simultaneous suspension experiments are carried out. Some results of suspension are shown and discussed.

Key words: Magnetic Suspension, Simultaneous Suspension, Permanent Magnet, Variable Flux Path Control, Rotary Actuator.

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。本報告では、円盤形の永久磁石を用いた可変磁路制御機構による2つの鉄球を同時に浮上させるのを提案する。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2つの鉄球を浮上させる吸引力を同時に制御する。本報告では、磁路制御形浮上機構による2つの鉄球が同時に浮上する原理を説明し、試作装置について述べる。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。最後に、数値シミュレーションと浮上実験を行った。

試作装置の写真をFig.A1に示す。試作装置は、永久磁石、磁石の左右に対称に設置されたコア、重量が異なる2つの鉄球、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つの渦電流センサの位置を上下に調整するためマイクロメータを取り付ける。試作装置では、円盤磁石がFig.A1に示すように停まったとき、円盤磁石の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、磁石がFig.A1の角度から右に少し回転しており、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。左側コアではその逆である。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。またある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。

試作した装置を用いて、2つの鉄球を同時に浮上させる実験を行った。2つの鉄球の間に磁束があり、互いの吸引力が発生してしまうため、直接に浮上できなかった。そして、2つの鉄球をリニアレールに配置し、鉄球の運動を浮上の方に限ると、同時浮上を成功した。安定浮上するとき、鉄球の位置にステップを入力し、浮上の安定性を考察した。応答結果をFig.A2とFig.A3に示す。結果より、提案した装置を用いた2つの鉄球を同時に安定浮上させることができることを確認できた。

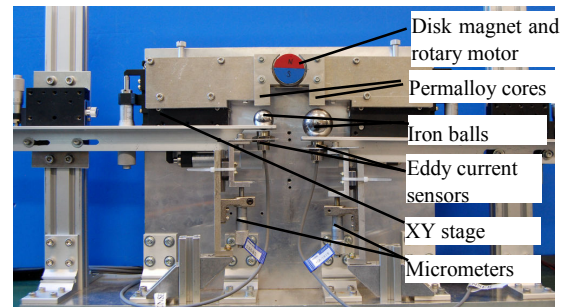


Fig.A1 Photograph of the simultaneous suspension device

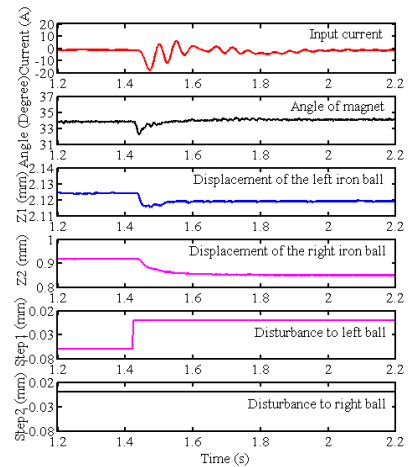


Fig.A2 Step response to the left iron ball

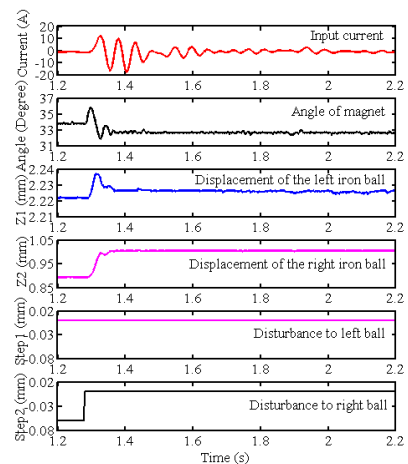


Fig.A3 Step response to the right iron ball

1. はじめに

磁気浮上機構は、磁気力を用いた浮上体を非接触で支持するものである。磁気浮上では、機械的な接触からの摩擦がないことと塵埃などを発生しないことなどの利点がある。これらの利点によって、様々な磁気浮上機構が提案されている。コイルによる浮上機構には、電磁石を用いた磁気浮上装置¹⁾や磁気軸受²⁾をいろいろな研究している。一方、永久磁石による浮上機構には、リニアアクチュエータを用いて永久磁石と強磁性体との間に動く吸引力を制御する方式を用いた磁気浮上機構³⁾⁴⁾や、永久磁石の反発力を用いた磁気軸受⁵⁾が提案されている。また、永久磁石を浮上装置の磁路中に挿入して磁歪素子と圧電材料を用いて磁路を制御する磁気浮上装置⁶⁾、磁路中に挿入した強磁性体の位置を変化させることによって永久磁石から浮上体に到達する磁束の大きさ、方向を変化させることにより、浮上力を調整する磁気浮上装置⁷⁾などが提案されている。

近年、電磁石を用いた多重磁気浮上システムが提案されている。例としては、直列2重磁気浮上システムは、間接支持(indirect suspension)と呼ばれ、支持用電磁石の生成する磁場によって、1つの永久磁石と1つの鉄球を直列に浮上させるのを実現している⁸⁾。並列2重磁気浮上システムは、単一のアンプによって、2つの電磁石コイルが直列に接続され、2つの並列の磁気浮上システムの安定浮上を実現した⁹⁾。

本研究は、円板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¹⁰⁾¹¹⁾。この浮上システムでは、回転モータに取り付けられた円板磁石の回転角度を制御することにより、円板磁石が発生した磁束の経路を変更し、2つの鉄球のための浮上力を同時に制御する。また、この浮上システムの運動制御過程は並列形二重倒立振子の安定化制御と似ていると考えられる¹²⁾。

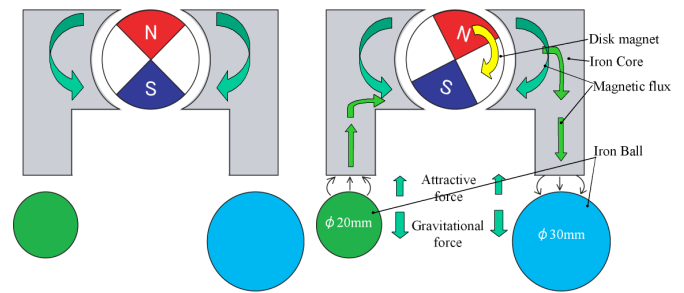
本論文では、まず円板磁石を用いた可変磁路制御機構の浮上力を制御する原理を説明し、試作装置を紹介する。次に、試作装置によって、装置の磁束密度と吸引力の特性を考察し、モデル化を行う。モデルを用いたシステムの可制御性を解明する。そして、リニアレールを用いた鉄球の運動方向を浮上の方向に限り、2つの鉄球の同時浮上実験を行った。

2. 可変磁路制御機構による浮上力の制御原理

Fig.1 に提案する可変磁路制御機構による浮上力の制御原理を示す。この磁気浮上機構は、円板磁石と2つのF型の強磁性体コアと2つの鉄球から構成されている。また、2つの鉄球の質量は異なっている。ここでは、まず、以下のことを仮定する。

- (1) 円板磁石は、ある90度の部分がN極、反対側の90度がS極である。
- (2) 2つの鉄球の距離が十分に遠いため、2つの鉄球は、互いに吸引力が発生しない。

まず、Fig.1, (a)のように円板磁石のN極がちょうど真上に、S極が真下にあるとき、上部のN極から出発した磁束の半分は右側のコアに、半分は左側のコアに流れ込んでいると考えられる。そして、これらの磁束はコア下部のS極に面した部分までコアを通り、その後左右のコアから磁石のS極に入る。



(a) The magnet stops at 0 degree. (b) The magnet rotated a little.

Fig.1 Control principle of suspension forces

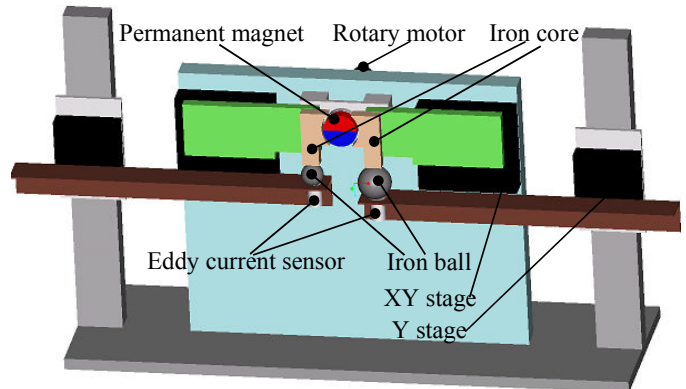


Fig.2 Illustration of the simultaneous suspension device

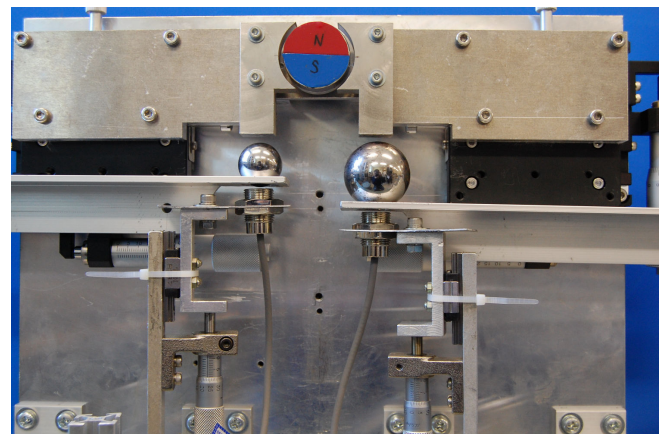


Fig.3 Photograph of the simultaneous suspension device

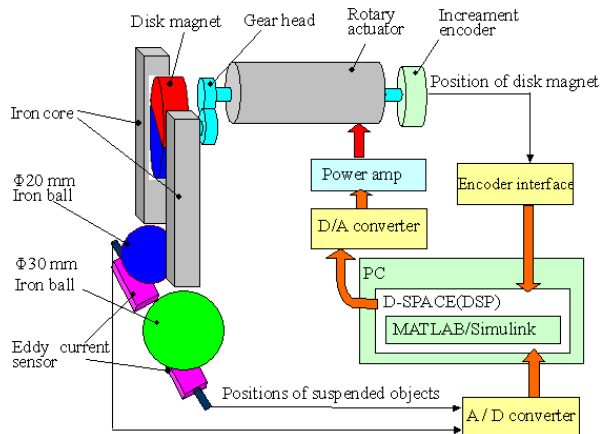


Fig.4 Configuration of the simultaneous suspension system

よって、円板磁石からの磁束は鉄球に着いていない。従って、コアと2つの鉄球間では吸引力は発生しない。

次に、Fig.1, (a)の状態から、円板磁石が右に少し回転したときの様子が Fig.1, (b)である。この時、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。またある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。

3. 試作装置と制御システム

3・1 試作装置

今回提案する磁路調整形磁気浮上機構の概図を Fig.2 に、試作装置の正面から見た写真を Fig.3 に示す。この浮上機構は、円板磁石、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している。円板磁石は、装置の中央の円形のもので、直径が 30mm、厚さが 10mm、直径方向上に磁極が半分に磁化されているネオジウム磁石であり、垂直固定板の裏側に取り付けられている回転モータによって回転駆動される。回転モータは、高い位置決め精度のハーモニックドライブと回転エンコーダを取り付けている DC モータである。このエンコーダの分解能は 360 p/r である。コアは円板磁石の両側にある二つの F 型のもので、厚さが 10mm のパーマロイである。パーマロイは、透磁率が非常に高く、また保磁率が極めて低い金属であり、残留磁気の影響が少ない。回転モータにより、円板磁石の回転角度を制御し、磁路中の磁気抵抗を制御する。それにより、浮上体と鉄球との間の吸引力を調整する。鉄球下の 2 つの渦電流センサは、測定範囲が 3.5mm で、分解能が 0.3 μ m で、鉄球の位置を測定する。2 つの鉄球はサイズが異なっており、左の鉄球の直径が 20mm で、右の鉄球の直径が 30mm である。

3・2 制御システム

この磁気浮上システムのコントローラは Fig.4 に示したような DSP コントローラである。このコントローラには、A/D 変換器によってデジタル化した 2 つの渦電流センサの信号と回転モータのエンコーダからの回転角度信号が入力される。その信号に基づいて DSP は演算を行い適切な回転モータの回転角度を計算する。その結果は、D/A 変換器を通して回転モータへの電流信号として出力される。

4. 基本特性の考察と浮上力のモデル化

4・1 磁束密度の測定

提案した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ときの磁束密度と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。測定方法は、円盤磁石と両コアの距離を 2mm に調整し、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° ごとに回転させ計測した。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は、磁束密度の測定では 2 mm から 10 mm までを、吸引力の測定では 1 mm から 8 mm までを測定した。また、用いた鉄球には、左の方の直径が 20mm で、右の方の直径が 30mm である。

磁束密度の測定結果を Fig.5 と Fig.6 に示す。Fig.5 は磁束密度と円盤磁石の回転角度の関係である。図からわかるように、

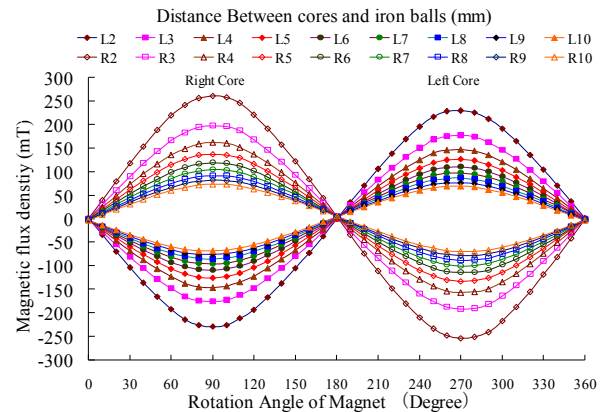


Fig.5 Relationship between flux density and rotational angle

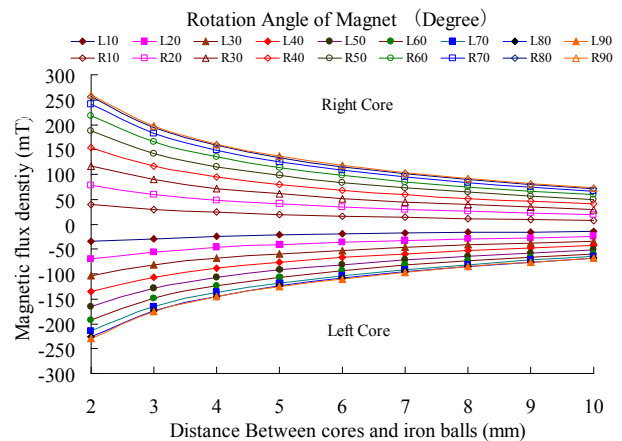


Fig.6 Relationship between flux density and air gap

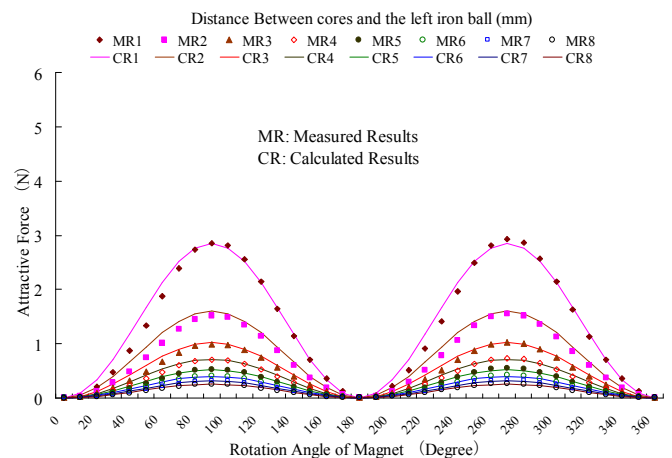


Fig.7 Relationship between force and rotational angle of left ball

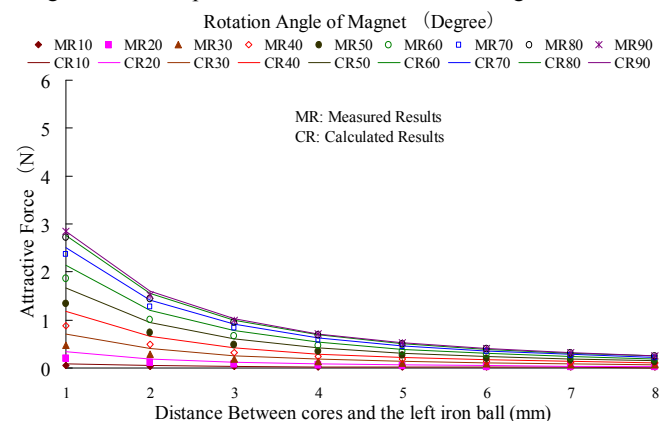


Fig.8 Relationship between force and air gap of left ball

磁束密度は、円盤磁石の回転によりほぼ正弦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、右の大きな鉄球の方の磁束密度が大きくなっていることがわかる。

Fig.6 は浮上体とコアの空隙と磁束密度の関係を示している。図からわかるように、磁束密度は、円盤磁石の回転角度と空隙によって変化することがわかる。距離が小さくなると、磁束密度は大きくなる。その関係より、磁束密度は、ほぼ浮上体とコアの距離に反比例することがわかった。

4・2 吸引力の測定

吸引力の測定結果は、左の方を Fig.7 と Fig.8 に、右の方を Fig.9 と Fig.10 に示す。Fig.7 と Fig.9 は吸引力と円盤磁石の回転角度の関係を示している。鉄球とコアとの空隙をパラメータとして、磁石の角度が変化したときの吸引力を示している。図からわかるように、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 になっていることがわかる。また、角度が 90° と 270° のとき、吸引力が最大値になっている。それより、円盤磁石の回転角度により吸引力を制御することが分かった。Fig.8 と Fig.10 は浮上体とコアの空隙と吸引力の関係を示している。図からわかるように、距離が小さくなると、吸引力は大きくなる。また、右の大きな鉄球の吸引力の方が大きい。

4・3 浮上力のモデル化

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。Fig.5 と Fig.6 の測定結果に基づいて浮上体中を通る磁束は、モータの回転角度 θ とほぼ正弦波の関係があり、浮上体とコアの空隙 d とは、ほぼ反比例の関係になることが分かった。これらのことと、Fig.7~10 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。

$$f_{mi} = k_{mi} \frac{\sin^2 \theta}{(d_i + \Delta d_{mi})^2} \dots\dots\dots (A1)$$

また比例定数 k_{m1} と k_{m2} の値は 2.56×10^{-5} (Nm²) と 4.06×10^{-5} (Nm²)、定数 Δd_{m1} と Δd_{m2} の値は 2mm と 1.8mm であると確認できた。このモデルは、Fig.5~10 に示した計算結果と測定結果に比べることによって妥当であると考えることができた。

5. システム運動のモデル化と浮上可能性の考察

5・1 浮上システムの運動方程式

推定した浮上力のモデル化と試作装置に基づいてシステムのモデル化をした。構成したモデルを Fig.11 に示す。モデルによる浮上システムの運動方程式を求めた。

今回のモデル化ではモータの回転は、永久磁石の角度の影響を受けないと仮定して、次式のように電流から磁石角度への方程式を求めた。

$$J\ddot{\theta} = c\dot{\theta} + k_i \dots\dots\dots (A2)$$

ただし、 J は永久磁石部などを考えた等価慣性モーメント、 c はモータの軸などに発生する減衰件数、 k_i は減速比を考えた等価トルク定数である。

また、浮上力の方程式 f_i ($i=1, 2$) により、2 つの鉄球の運動方程式は以下のように表すことができる。

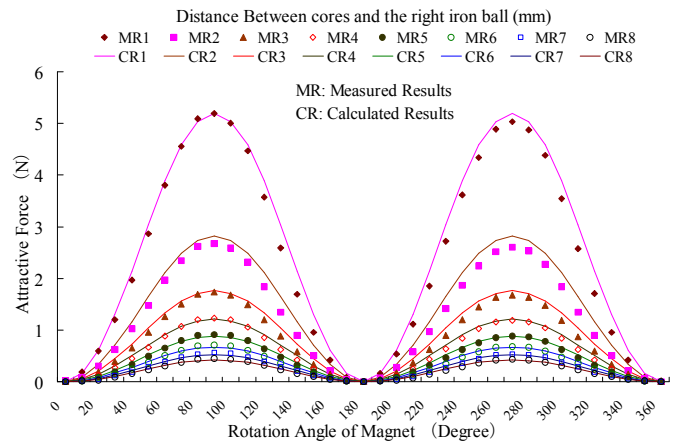


Fig.9 Relationship between force and rotational angle of right ball

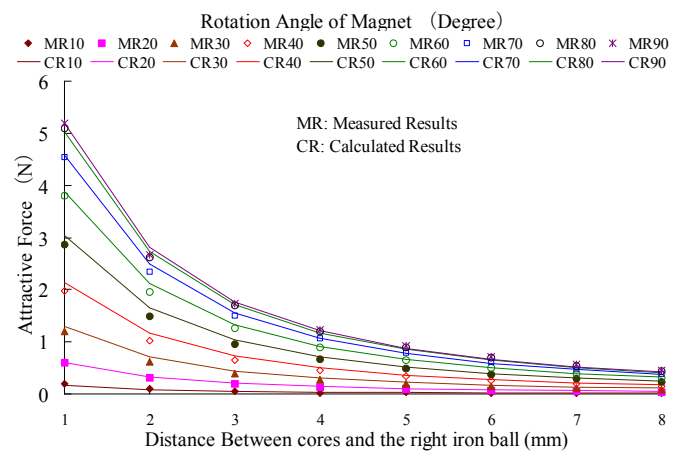


Fig.10 Relationship between force and air gap of right ball

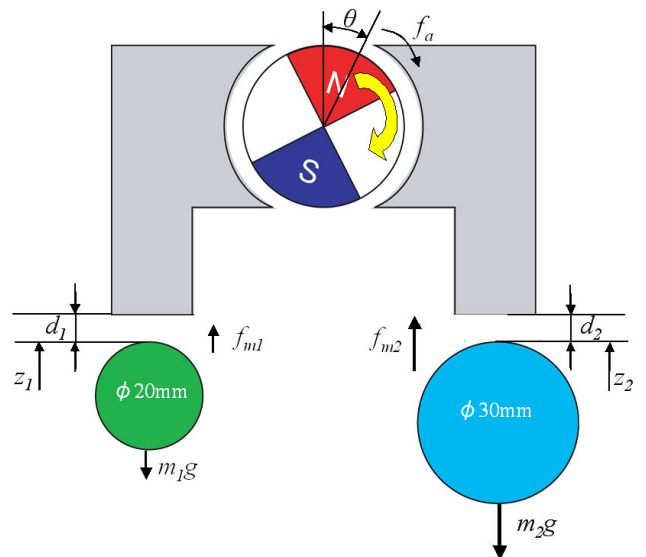


Fig.11 Model of simultaneous suspension system

$$m_1 \ddot{z}_1 = k_{m1} \frac{\sin^2 \theta}{(d_1 + \Delta d_{m1} - z_1)^2} - m_1 g \dots\dots\dots (A3)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 = k_{m2} \frac{\sin^2 \theta}{(d_2 + \Delta d_{m2} - z_2)^2} - m_2 g \dots\dots (A4)$$

ただし,

m_1, m_2 : 左右の鉄球の質量 (35.81g, 109.96g)

z_1, z_2 : 左右の鉄球の位置 (上向きを正)

5・2 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.

$$\Delta f_{mi} = \frac{2k_{mi}(\sin \theta_0)^2}{(d_{i0} + \Delta d_{mi})^3} \Delta z_i + \frac{k_{mi} \sin 2\theta_0}{(d_{i0} + \Delta d_{mi})^2} \Delta \theta \dots\dots (A5)$$

ただし,

$i=1, 2$

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

θ_0, d_{i0} : 平衡点の値

また,

$$d_{mi} = d_{i0} + \Delta d_{mi} \dots\dots (A6)$$

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.

$$\dot{x} = Ax + Bu \dots\dots (A7)$$

$$y = Cx$$

$$x = (z_1 \quad \dot{z}_1 \quad z_2 \quad \dot{z}_2 \quad \theta \quad \dot{\theta})' \dots\dots (A8)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2k_{m1}(\sin \theta_0)^2}{m_1 d_{m1}^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{m1} \sin 2\theta_0}{m_1 d_{m1}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2k_{m2}(\sin \theta_0)^2}{m_2 d_{m2}^3} & 0 & \frac{k_{m2} \sin 2\theta_0}{m_2 d_{m2}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c}{J} \end{bmatrix} \dots\dots (A9)$$

$$B = \left(0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{k_l}{J} \right)' \dots\dots (A10)$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \dots\dots (A11)$$

$$u = i \dots\dots (A12)$$

従って, 可制御行列を P_c 表すと,

$$\det(P_c) = \frac{-4k_{m1}^2 k_{m2}^2 k_l^6 \sin^4 \theta \sin^4 2\theta (d_{m1}^3 k_{m2} m_1 - d_{m2}^3 k_{m1} m_2)^2}{d_{m1}^{10} d_{m2}^{10} J^6 m_1^4 m_2^4} \dots\dots (A13)$$

となる.

$$d_{m1}^3 k_{m2} m_1 - d_{m2}^3 k_{m1} m_2 \neq 0 \dots\dots (A14)$$

が成立すれば, 浮上システムが可制御となる.

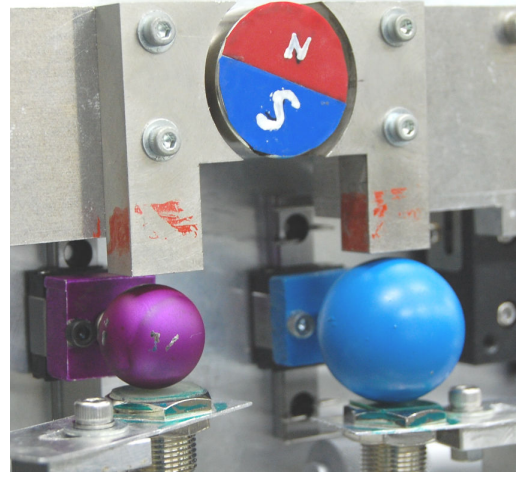


Fig.12 Photograph of the suspension device with linear rails

6. 浮上実験

6・1 浮上実験

浮上実験では, 2つ鉄球の互いの距離が十分ではなくて, 互いに吸引してしまうため, 2つの鉄球をリニアレールに取り付け, 浮上の自由度に制限して浮上実験を行った. リニアレールを取り付けた試作装置の写真をFig.12に示す. 改善した試作装置では, 浮上体とするユニットは鉄球, ブロック, アルミのつながるパーツなどを含んでいる. 左の浮上ユニットの質量は62.33gで, 右の浮上ユニットの質量は134.79gである.

また, システムの数値モデルによって, 最適レギュレータを用いて, 制御システムのフィードバックゲインを計算した. 計算したゲインは次のようになる.

$$K = [-9669000 \quad -140810 \quad 10908000 \quad 147060 \quad 466.64 \quad 0.9282]$$

このゲインを利用した安定浮上を成功した.

6・2 実験結果

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った. 実験は, 安定浮上しているとき, 左右の鉄球を, 別々に1.2秒後に上に0.06mm動かして, 2.2秒までの応答を記録した. その応答結果をFig.13とFig.14に示す. 図では, 上から回転モータへの入力電流, 円板磁石の回転角度, 左右の鉄球の変位, 及び左右の鉄球に加えたステップ信号を表している. 結果より, 左右の鉄球にステップを入力した後, 直ぐに安定浮上状態になった. Fig.13では, 左の鉄球のフィードバックゲインがマイナスであるため, 左の鉄球に上がるステップを加えたが, 2つの鉄球が下に変位した. 磁石の回転角度は, まず, 安定状態から突然小さくなり, そして大きく回転し, 最後の安定角度が前より大きくなった. これは, 吸引力を小さくすることで, 浮上体を下に変位させ, そして吸引力を大きくすることで, 再び安定状態にさせたからである. また, 変位した鉄球とコアとの距離は長くなったので, 前より大きい吸引力が必要なが分かる. 逆に, Fig.14より, 右の鉄球に上がるステップを加えたときには, 正のフィードバックゲインより, 2つの鉄球が上に変位した. 従って, この磁気浮上機構を用いて, 2つの鉄球を同時に安定浮上させることを実験的に確認できた.

文 献

- (1) B.V. Jayawant, "Electromagnetic levitation and suspension techniques", Edward Arnold, London (1981)
- (2) G. Schweitzer and E.H. Maslen, "Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery", Springer Dordrecht Heidelberg London New York (2009)
- (3) 樋口 俊朗, 岡 宏一, リラクタンس制御形磁気浮上システム—永久磁石とリニアアクチュエータを用いた浮上機構, 電気学会論文集, Vol. 113-D, No.8, (1993), pp.988-994
- (4) 催天時, 岡宏一, 政木慶次, 永久磁石とリニアアクチュエータを用いた磁気浮上機構—両側吸引の場合の浮上特性について, 第17回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, No.2AM5, (2005), pp. 243-248
- (5) Mizuno T., Sekiguchi H. and Araki K., Repulsive Magnetic Bearing Using Motion Control of Permanent Magnets (Stabilization in the Axial Direction), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 64, No.628 (1998), pp. 187-192
- (6) 上野 敏幸, 裘 進浩, 谷 順二, 超磁歪・圧電の複合化による磁気力制御用電磁変換素子とその磁気浮上への応用, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.67, No.658, (2001), pp.1897-1904
- (7) 水野 毅, 星野 博, 高崎 正也, 石野 祐二, 磁路制御形磁気浮上の提案と基礎実験, 日本 AEM 学会誌, Vol.14, No.3, (2006), pp.96-102
- (8) A. Yamamoto, M. Kimura and T. Hikiyara, "A Study on Indirect Suspension of Magnetic Target by Actively Controlled Permanent Magnet", 11th International Symposium on Magnetic Bearings, pp.182-188, (2008) Nara, Japan,
- (9) T. Sakurada, Y. Maruyama, Y. Ishino, M. Takasaki, and T. Mizuno, "Multiple Magnetic Suspension Systems 4th report: Realization of Parallel Magnetic Suspension of twofloater", 52th Automatic Control Union Lecture, G5-2, CD-ROM, (2009), Osaka, Japan
- (10) K. Oka, N. Ninomiya, L. Chen and Y. Fujiwara, Magnetic Suspension System with Variable Flux Path Mechanism Using Rotary Actuator, Tenth International Symposium on Magnetic Bearings 2006, p.86
- (11) 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, P.436, CD-ROM, (2009), 札幌, 日本
- (12) C.N. Lu, C.C. Tsai, M.C. Tsai, K.V. Ling, and W.S. Yao, "Application of Model Predictive Control to Parallel-Type Double Inverted Pendulum Driven by a Linear Motor", The 33th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Nov.5-8, pp.2904-2909, (2007), Taipei, Taiwan

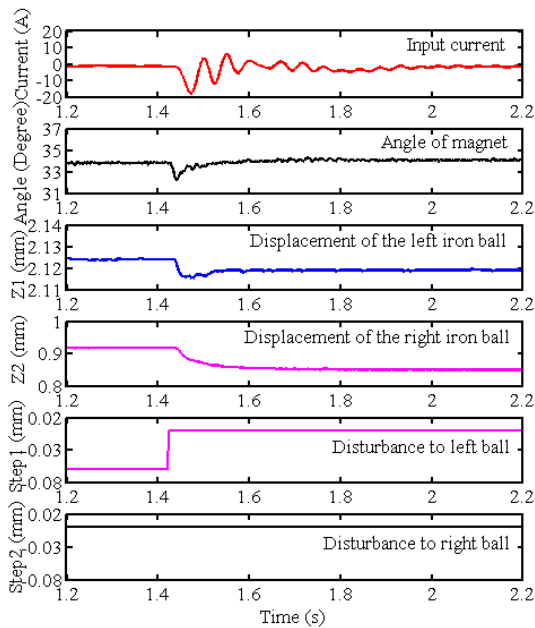


Fig.13 Step response to the left iron ball

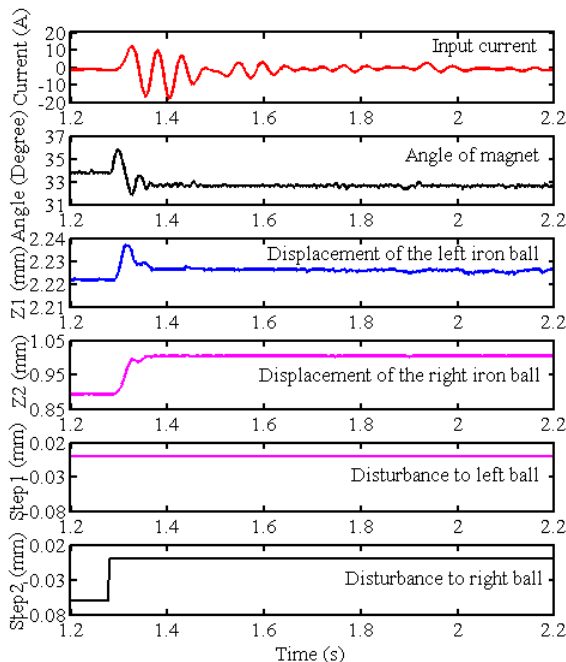


Fig.14 Step response to the right iron ball

7. おわりに

本論文では、円板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調整原理を説明し、試作の浮上装置を設計・製作した。試作装置を用いた磁束密度と吸引力の測定を行った。そして、システムのモデル化して、理論的に浮上可能性を考察した。最後に、試作装置を用いた浮上実験を行った。2つの鉄球ををリニアレールに取り付け、浮上の自由度に制限して浮上実験を行い、安定浮上を成功した。従って、この試作装置によって、2つの鉄球を同時に浮上させることが確認できた。