

可変磁路制御による 2 自由度磁気浮上機構 —円盤磁石の回転角制御による二球体同時浮上に向けて—

Two degrees of freedom levitation system with variable magnetic flux path control
- Simultaneous two ball levitation by controlling permanent disc magnets' angle-

○学 岡崎 大洋 (高知工科大) 正 岡 宏一 (高知工科大)
学 鶴身 輝 (高知工科大) 学 中村 豪太 (高知工科大)

Tomohiro OKAZAKI, Kochi University of Technology
Koichi OKA, Kochi University of Technology
Akira Tsurumi, Kochi University of Technology
Gouta NAKAMURA, Kochi University of Technology

We have proposed a new type of magnetic suspension system using a disk magnet and a motor. In this system, we can control the attractive force by changing the angle of the disk magnet. This system allows the two balls to levitate simultaneously with the help of suspension rails. In this paper, we propose another suspension model that is capable of levitating two balls simultaneously without any mechanical contact. Before we conduct experiments, we evaluated a controllability of the model and confirmed controllable conditions for the simultaneous levitation of two balls. With this condition, we continue experiments and improve the controller of the system.

Key Words: magnetic levitation, non-contact suspension, permanent magnet, variable magnetic flux path control

1. 緒言

磁気浮上機構は磁気力を用いて浮上体を非接触で支持するための機構である。一般的に磁気浮上を用いると機械的な接触がなくなるため、摩擦および摩耗がなく塵埃などを発生しないといった利点があり¹⁾、電磁石を用いた応用例としては、磁気軸受、磁気浮上装置などがある²⁾。一方、永久磁石を用いた浮上機構には、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働く吸引力³⁾や永久磁石の反発力⁴⁾を用いた磁気浮上機構、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⁵⁾、磁路中に挿入した強磁性体の位置を変化させることで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、浮上力を調整する磁気浮上装置⁶⁾などが提案されている。

先行研究において、我々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、円盤磁石が発生させ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磁気浮上システムを提案した。⁷⁾

本研究では、先行研究において提案された円盤磁石と回転モータを用いて浮上システムを改良し、レールによる鉄球の運動を限定することなく鉄球の同時浮上させる制御システムを開発することを目指す。

2. 可変磁路制御機構による浮上原理

提案する可変磁路制御機構による浮上力の制御原理を図.1 に示す。この磁気浮上機構は、円盤磁石と2つのF型強磁性体コアと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。まず、円盤磁石のN極がちょうど鉛直上向きであるとき、上部のN極から発生した磁束の半分は右側のコアに、残り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

分を通り、磁石のS極に入る。このとき、円盤磁石からの磁束は鉄球に達しておらず、コアと鉄球の間に吸引力は発生しない。

次に図.1 (a)の状態から円盤磁石が右に少し回転した状態が図.1 (b)である。このとき、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。左側の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。このように、回転角度によってコアに流入する磁束密度を変化させることで左右の鉄球を通る磁束の量は増減し、コアと鉄球の間に生じる吸引力を制御することができる。

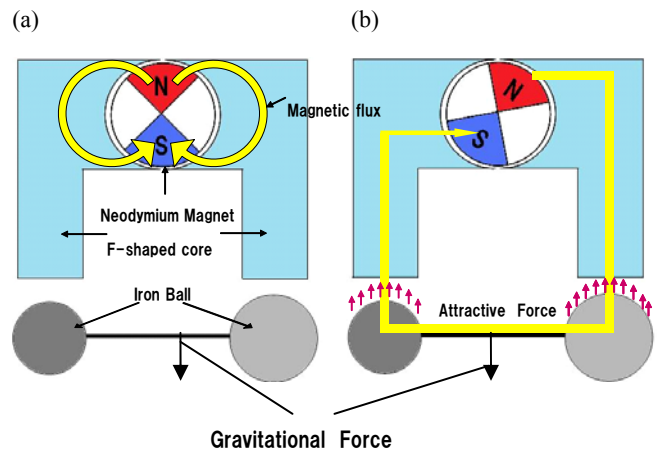


Fig.1 Variable flux path control system.

3. 試作装置と制御システム

磁路調整型磁気浮上機構の概要図を図.2 に、装置の正面から見た写真を図.3 に示す。この浮上機構は、円盤磁石回転モータ、F 型のパーマロイのコア、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、直径方向に磁化されているネオジウム磁石であり、裏側に取り付けてあ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分解能が 360p/r の回転エンコーダを取り付けている DC モータである。コアは透磁率が非常に高く、残留磁気の影響が小さいパーマロイで、円盤磁石の両側に配置してある。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 $0.3\mu\text{m}$ である。2つの鉄球は寸法が異なっており、左の鉄球の直径が 20mm で右の鉄球の直径が 30mm である。

続いて、試作装置に用いる制御システムの概要を示す。この磁気浮上システムコントローラは図.2 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二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 変換器を通りして、回転モータへの電流信号として出力される。

4. 磁気浮上機構の基本特性

提案した磁気浮上システムにおける浮上力を確認するため、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と吸引力をそれぞれガウスメータとロードセルを用いて測定した。磁束密度の測定結果を図.4、5 に示す。図.4 では、縦軸は磁束密度、横軸はコアと球体の距離となっており、この 2つのグラフから磁束密度は距離の二乗に反比例していることがわかった。図.5 は、縦軸を磁束密度、横軸を永久磁石の角度とした結果であり、回転角度によって磁束密度が正弦波状に変化していることがわかるをつづいて、コアと球体の間に発生する吸引力の測定結果を図.6~9 に示す。縦軸が吸引力、横軸が図.6、8 ではコアと球体の距離、図.7、9 では横軸は円盤磁石の回転角度である。この 2つのグラフから吸引力も磁束密度の周期に合わせて変化し、距離の二乗に反比例していることがわかった。

5. 2 自由度磁気浮上システムのモデル化

本研究で目指す 2 自由度磁気浮上システムを図.10 に示す。まず、浮上体に働く吸引力からモデル化を行った。浮上体に働く吸引力は、先ほど図.5~8 で示した測定結果から、円盤磁石の回転角を θ (deg)、浮上体の重心位置の鉛直方向の変位を z (m)、球体を連結する棒の水平方向との傾きを φ (deg)、浮上体とコアの距離を d_i (m) ($i=1, 2$)、 k_i を比例定数とすると吸引力 f_i (N) は次式で表される。

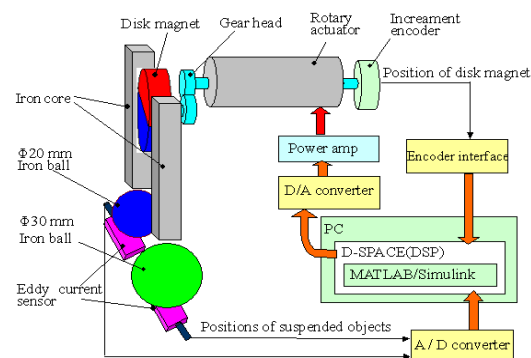


Fig. 2 Configuration of the simultaneous suspension system.

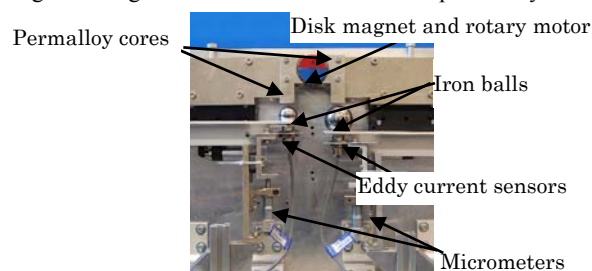


Fig. 3 Photograph of the simultaneous suspension device.

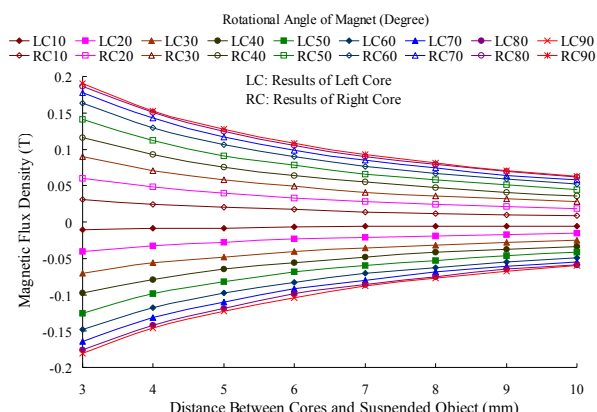


Fig.4 Relationship between flux density and air gap

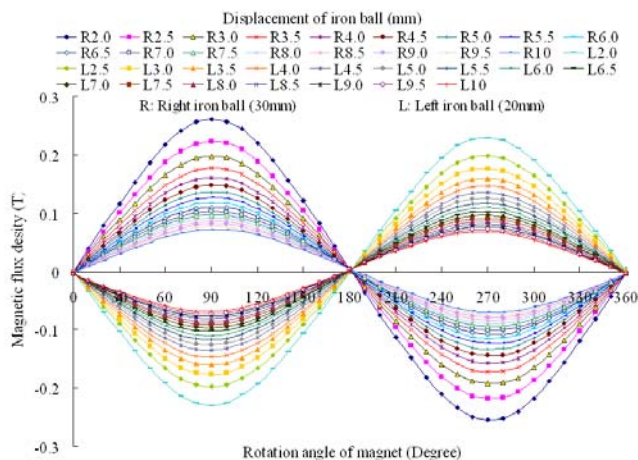


Fig.5 Relationship between flux density and rotational angle.

$$f_i = k_i \frac{\sin^2 \theta}{\{d_i - z + (-1)^{i+1} l_i \sin \phi\}^2} \quad (1)$$

このモデル化では、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、次式のように方程式を求めた。

$$J\ddot{\theta} = c\dot{\theta} + k_t i \quad (2)$$

ただし、 J は円盤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係数、 k_t は減速比を考えた等価トルク定数、 i は電流である。そして、図 9 に示す 2 自由度系の運動方程式は次式のように求めた。

$$M\ddot{z} = k_1 \frac{\sin^2 \theta}{(d_1 - z + l_1 \sin \phi)^2} + k_2 \frac{\sin^2 \theta}{(d_2 - z - l_2 \sin \phi)^2} - Mg \quad (3)$$

$$I\ddot{\phi} = k_1 l_1 \frac{\sin^2 \theta}{(d_1 - z + l_1 \sin \phi)^2} + k_2 l_2 \frac{\sin^2 \theta}{(d_2 - z - l_2 \sin \phi)^2} \quad (4)$$

ここで、

$M(\text{kg})$: 球体と棒の質量の和、 $z(\text{m})$: 球体を棒で連結させたときの重心の変位(鉛直上向きを正)、 $\phi(\text{deg})$: 重心における球体の回転角度、 $l_1, l_2(\text{m})$: 重心から各球体までの棒の長さ、 $d_1, d_2(\text{m})$: 球体とコアとの距離である。

6. 浮上の可能性の評価

式(3)および式(4)で示した浮上システムによって、2 球体同時浮上が可能かどうかを考察するためにシステムの可制御性を検証した。

まず、式(1)にてモデル化した浮上力を浮上平衡点付近において線形化したものが次式で表される。

$$\Delta f = \frac{2k_i \sin^2 \theta_0}{(d_{mi})^2} \Delta z + \frac{4k_i l_i \cos \phi_0 \sin^2 \theta_0}{(d_{mi})^3} \Delta \phi + \frac{k_i \sin 2\theta_0}{(d_{mi})^2} \Delta \theta \quad (5)$$

$$(i=1,2)$$

ここで、

$$d_{mi} = d_{0i} + \Delta d_{mi}$$

であり、 d_{0i} 、 θ_0 、 ϕ_0 は浮上における平衡点の値とする。式(5)から、状態方程式と出力方程式は次式のようになる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{Cx}, \quad u = i \quad (6)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} z & \phi & \theta & \dot{z} & \dot{\phi} & \dot{\theta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} z & \phi & \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

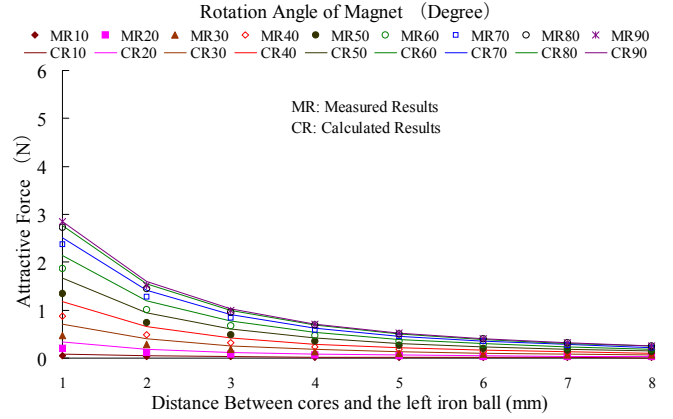


Fig.6 Relationship between force and air gap of left ball

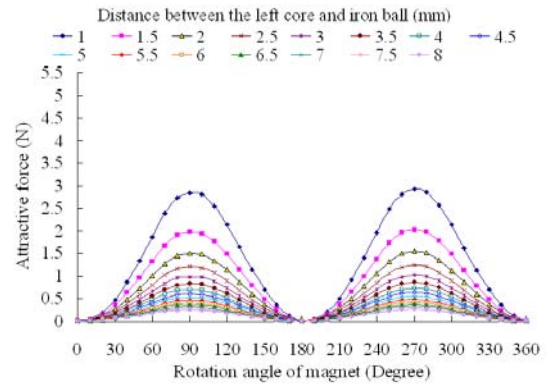


Fig.7 Relationship between left attractive force and angle .

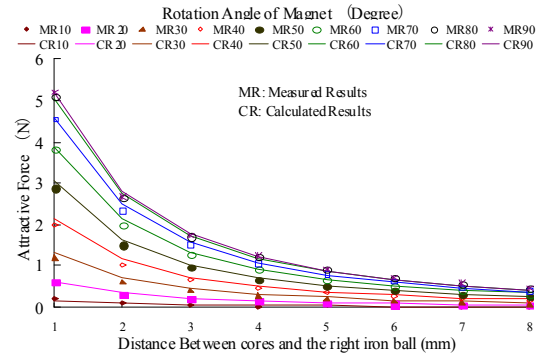


Fig.8 Relationship between force and air gap of right ball.

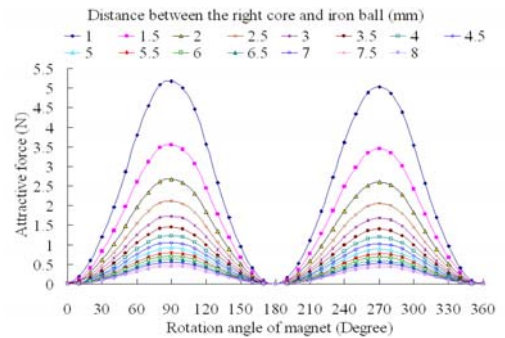


Fig.9 Relationship between right attractive force and angle.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{S}{M} \left(\frac{k_1}{d_{m1}^2} + \frac{k_2}{d_{m2}^2} \right) & \frac{T}{M} \left(\frac{k_1 l_1}{d_{m1}^3} + \frac{k_2 l_2}{d_{m2}^3} \right) & \frac{U}{M} \left(\frac{k_1}{d_{m1}^2} + \frac{k_2}{d_{m2}^2} \right) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{S}{I} \left(\frac{k_1 l_1}{d_{m1}^2} + \frac{k_2 l_2}{d_{m2}^2} \right) & \frac{T}{I} \left(\frac{k_1 l_1^2}{d_{m1}^3} + \frac{k_2 l_2^2}{d_{m2}^3} \right) & \frac{U}{I} \left(\frac{k_1 l_1}{d_{m1}^2} + \frac{k_2 l_2}{d_{m2}^2} \right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c}{J} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_t}{J} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

ただし,

$$S = 2 \sin^2 \theta_0, \quad T = 4 \cos \varphi_0 \sin^2 \theta_0, \quad U = \sin 2\theta_0 \quad (10)$$

である. この系の可制御性は, 可制御行列を $\mathbf{P}_c$ とすると,

$$\mathbf{P}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{AB} & \mathbf{A}^2 \mathbf{B} & \mathbf{A}^3 \mathbf{B} & \mathbf{A}^4 \mathbf{B} & \mathbf{A}^5 \mathbf{B} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\det(\mathbf{P}_c) = P \left\{ d_{m1}^3 k_2 l_2^2 (-1 + l_2) - d_{m2}^3 k_1 l_1 (l_1 - l_2) - d_{m1} d_{m2}^2 k_1 k_2 (l_1 - l_2^2) \right\}^2 \quad (12)$$

また, 式(11)において

$$P = \frac{16 k_2^2 k_t^6 \cos^2 \varphi_0 \sin^4 \theta_0 (\sin 2\theta_0)^4}{M^2 I^4 J^6 d_{m1}^{10} d_{m2}^{14}} (d_{m2}^2 k_1 l_1 + d_{m1}^2 k_2 l_2)^2 \quad (13)$$

である. この行列式が零であるとき, システムは可制御ではないと言える. したがって, 式(12)の3項すべてが負でないための条件は

$$d_{m1}^3 k_2 l_2^2 (-1 + l_2) - d_{m2}^3 k_1 l_1 (l_1 - l_2) - d_{m1} d_{m2}^2 k_1 k_2 (l_1 - l_2^2) \neq 0 \quad (14)$$

であり, 式(14)を満たすとき, システムは可制御であるといえる. 今後は試作装置を用いて2球体の同時浮上の実現に向けて実験を行っていく.

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, リラクタンス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

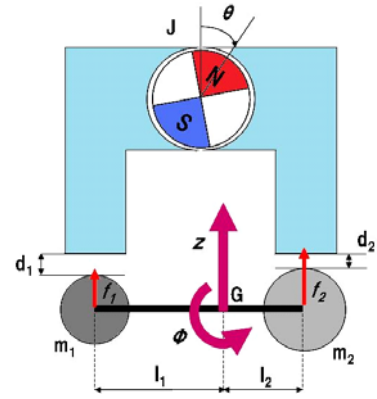


Fig.10 Model of simultaneous suspension system.

- 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, 袈 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] 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