

可変磁路制御形 2 自由度浮上機構 - 2 つの鉄球の浮上と棒の浮上における考察

岡宏一 中村豪太 岡崎大洋 鶴身輝 (高知工科大学) 孫鳳 (瀋陽工業大学)

Magnetic Suspension System Using Variable Flux Path Control Mechanism - Study of simultaneous 2 ball system and stick type object system -

*K. Oka, G. Nakamura, T. Okazaki, A. Tsurumi (Kochi Univ. Tech.)
F. Sun (Shenyang Univ. Tech.)

Abstract— This paper describes 2 DOF suspension control of an iron stick type object by a magnetic suspension mechanism. In this system, suspension forces are controlled by the angle of a disk-type permanent magnet. This suspension system must control two degrees of freedom of an iron stick object for complete noncontact suspension. A vertical displacement and a horizontal rotation of the object should be controlled. This paper proves the feasibility of the noncontact suspension system for such a system by controlling these two movements simultaneously. A theoretical analysis will be done on the model of this suspension system and a numerical simulation validate the feasibility of the system. This analysis can be adopted to EMS systems.

Key Words: Magnetic Suspension System, Dual Suspension Control, One input system, Feasibility analysis

1 はじめに

磁気浮上機構は、浮上体を非接触で支持する機構である。機械的な接触がないため摩擦や塵埃の問題を発生しないため、高速回転のための軸受、磁気浮上列車、クリーンルーム中の搬送装置などに利用されている。磁気浮上機構には様々な形式があるが、永久磁石を用いた磁気浮上機構はコイルがなく、発熱の問題が無視できる。この形式の磁気浮上機構は、支持力として永久磁石の起磁力を用いており、浮上力の調整方法には二つのものが考えられる¹⁾。それらは、(a) 永久磁石と浮上体との間の空隙の長さを制御する方法と、(b) 磁気回路内にリラクタンス (磁気抵抗) 調整機構を設ける方法である。

方法 (b) を応用した磁気浮上システムの例としては、磁歪素子と圧電材料を用いて磁路を制御し、浮上体を通過する磁束量を調整する磁気浮上装置²⁾³⁾ や、磁路中に挿入した強磁性体の位置を変化させて、永久磁石から浮上体に到達する磁束量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⁴⁾⁵⁾ などが提案されている。しかし、これらの磁気浮上装置は、磁極を変えることができない。多自由度の浮上装置やモータなどの駆動装置に用いるためには不十分な場合があると考えられる。これらのことを解決する浮上方法として、円盤磁石を回転駆動させることによる可変磁路制御機構を用いた浮上方法が提案されている⁶⁾。しかし、この浮上方式では直方体の浮上体を完全に非接触で浮上させることができないという欠点がある。

本研究では、この問題を解決するために、浮上体の運動の 2 自由度を安定に浮上制御することを考え、このために必要な条件を導くことを行う。ひとつの浮上機構で 2 つ以上の運動の自由度を浮上させる機構は、すでに、種々の提案が行われている⁷⁾⁸⁾⁹⁾ が、ここでは単純な 2 つの浮上対象がある場合と浮上対象が棒のような場合の比較検討を行う。まず円盤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、浮上体の垂直方向の運動と水平方向回りの回転の 2 つの自由度の制御を考えるためのモデルを構築する。そのモデルを用いてシステムの可制御性を検討する。可制御行列の行列式を評価することにより、提案の 2 自由度浮上機構の実現可能性を検討する。なお、このモデルは、可変磁路制御形磁気浮上機構だけではなく、通常の電磁石を用いた浮上機構にも応用が可能である。

2 回転モータを用いた可変磁路制御形浮上機構

提案する可変磁路制御形磁気浮上機構の原理を Fig. 1 に示す。この磁気浮上機構は、2 つの鉄球を浮上させることを考察するための説明図であり、円盤磁石と左右二つの F 字型の強磁性体コアと 2 つの鉄球の浮上体から構成されている。円盤磁石は、図のように半分が N 極、反対側の半分が S 極であると仮定する。まず、左の図のように円盤磁石の N 極が真上に、S 極が真下にあるとき (この状態の円盤磁石の角度を 0° とする)、上部の N 極から出発した磁束の半分は、図の矢印で示すように右側のコアに、半分は左側のコアに流れ込むと考えられる。これらの磁束は各コアと S 極が面した部分から S 極に入る。よって、円盤磁石からの磁束は浮上体を通過することはない。従って、コアと浮上体間では吸引力は発生しない。

次に、円盤磁石がわずかに右に回転したときの様子を右の図に示す。この時、上部の N 極と面するコアの面積は、右側のコアの方が大きいため、N 極からの磁束は右側のコアの方に多く流れる。一方、下部の S 極と面するコアの面積関係は、N 極側とは逆になっている。磁束は、図の矢印のように流れる。このときコアと浮上体間に磁束が流れるため、吸引力が発生する。

上記より、左図の状態から 90 度までの間では、円盤磁石の回転角度が大きくなるに従って、浮上体を通過する磁束が大きくなり、吸引力も大きくなる。このことから、円盤磁石の回転角度を制御することによって

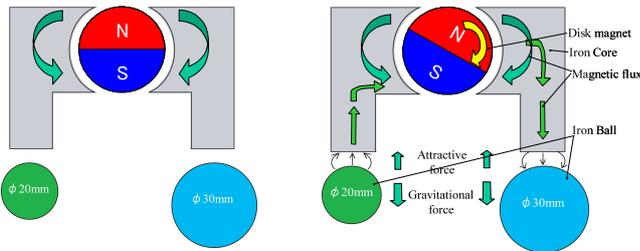


Fig. 1: Principle of suspension mechanism with variable flux path.

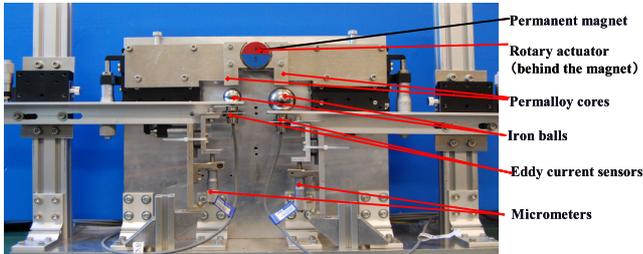


Fig. 2: Photograph of prototype suspension system.

浮上力を調整することが可能であると考えられる．また，逆方向に円盤磁石を回転させることにより，磁束を逆に流すことが可能であり，コアの磁極の極性を変化させることができる．

3 試作装置

今回提案する磁路調整形磁気浮上機構の写真を Fig. 2 に，浮上システム全体の構成を Fig. 3 に示す．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つの鉄球の浮上体，二つの渦電流センサで構成される．装置の中央の円形のもは磁石であり，直径が 30 mm，厚さが 10 mm，直径方向上に磁極が磁化されている．この円盤磁石は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，ハーモニックドライブ機構を用いた DC モータであり，減速比は 50，最大回転速度は 180 rpm である．角度の検出用にエンコーダを用いており，その分解能は 360 p/r である．

円盤磁石の両側にある二つの F 字型のコアは，厚さが 10mm のパーマロイである．F 字型のコアの下にある直方体はパーマロイの浮上体である．パーマロイは，透磁率が非常に高く，また保磁力が極めて低く残留磁気の影響が少ない．磁石の回転により，浮上力を調整する本提案機構では，残留磁気の影響が少ないことは，浮上力をゼロに設定するために重要な要素である．浮上体の位置はその下に取り付けられた渦電流センサによって計測される．渦電流センサの精度は 10 μ m である．左の鉄球の直径は 20mm で，右の鉄球の直径は 30mm である

制御システムは DSP を用いたデジタル制御であり，モータのエンコーダと渦電流センサの値に基づいて，円盤磁石の回転角度を制御し，磁路を制御する．それにより，浮上体とコアとの間の吸引力を調整する．

4 システムのモデル化と可制御性

この浮上装置を用いて非接触浮上の可能性を確認するために，浮上システムのモデル化を行う．2つの鉄球を浮上させる場合のモデルとその記号を Fig. 4 に，棒を浮上させるモデルと記号を，Fig. 5 に示す．添え字

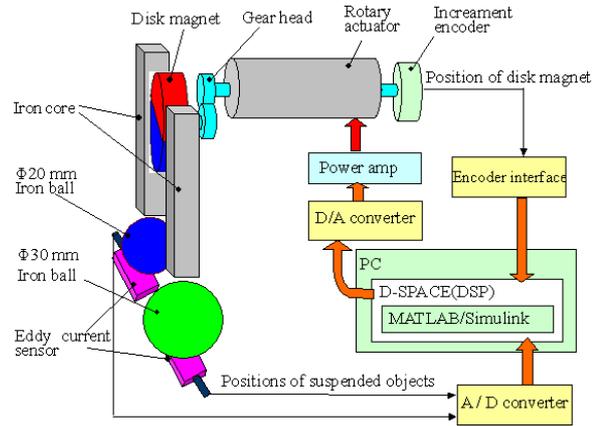


Fig. 3: Configuration of suspension system.

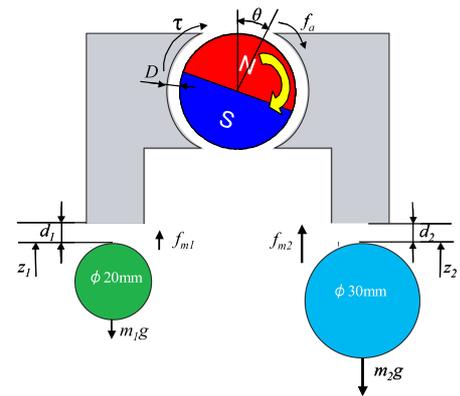


Fig. 4: Symbols and model of 2 ball suspension system.

の数字の 1 と 2 は，それぞれ図に向かって左側と，右側の諸元を表している．また，鉛直上方を z 軸，図の左から右に y 軸，紙面を貫く方向を x 軸とする．

4.1 浮上システムの運動の自由度

まず，浮上システムに必要な制御の自由度を考察する．2つの鉄球を浮上させるシステムの場合，それぞれの鉄球の浮上のために 1 自由度，計 2 自由度の運動を制御する必要がある．

棒を浮上させる場合には，浮上体の直進方向の 3 つの自由度のうち， x 方向と y 方向は磁気ポテンシャル

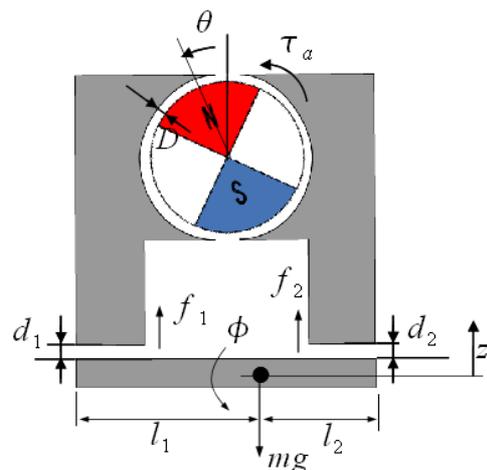


Fig. 5: Symbols and model of stick type object suspension system.

力によって復元力が働く。このことは z 軸回りの回転に関しても同様である。よってこれらの自由度に関しては、能動的な制御を行わなくても安定であると考えられる。また、 x 軸回りの回転に関しては浮上体の形状を丸棒とすることによって安定化を図ることができる。

以上の考察により、棒を非接触浮上させるために能動的な制御が必要な自由度は、 z 方向の直動運動と x 軸回りの回転である。浮上システムのモデルは、これらの2つの自由度を状態変数として含んだものを考える。また、システムの入力は、簡単のために永久磁石の回転角 θ とする。

4.2 2つの鉄球浮上システムのための条件

2つの鉄球浮上システムにおいて、それぞれの鉄球の運動方程式は次式で表される。

$$m_1 \ddot{z}_1 = f_1 - m_1 g \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 = f_2 - m_2 g \quad (2)$$

鉄球に働く吸引力は、入力である永久磁石の回転角と、それぞれの鉄球とコアの空隙との関数であると仮定すると、次式で表される。

$$f_1 = f_1(z_1, \theta) \quad (3)$$

$$f_2 = f_2(z_2, \theta) \quad (4)$$

これらの式に基づいて線形化を行い、平衡位置の近傍で改めて同じ記号を定義すると、次の運動方程式が得られる。

$$m_1 \ddot{z}_1 = \frac{\partial f_1}{\partial z_1} z_1 + \frac{\partial f_1}{\partial \theta} \theta \quad (5)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 = \frac{\partial f_2}{\partial z_2} z_2 + \frac{\partial f_2}{\partial \theta} \theta \quad (6)$$

状態空間モデルで表すと

$$\dot{x} = Ax + bu \quad (7)$$

$$y = Cx \quad (8)$$

ただし、 $x' = (z_1 \ z_2 \ \dot{z}_1 \ \dot{z}_2)$,

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix},$$

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

$$a_{31} = \frac{1}{m_1} \frac{\partial f_1}{\partial z_1}, \quad a_{42} = \frac{1}{m_2} \frac{\partial f_2}{\partial z_2}, \quad b_3 = \frac{1}{m_1} \frac{\partial f_1}{\partial \theta}, \quad b_4 = \frac{1}{m_2} \frac{\partial f_2}{\partial \theta}.$$

このシステムは1入力システムのため、可制御行列は正方行列となり、その行列式で可制御性を確認できる。行列式は次式となる。

$$-b_3^2 b_4^2 (a_{31} - a_{42})^2 \quad (9)$$

2つの鉄球を浮上させるシステムが実現するためには、この式が0とならなければよいので、次式がその条件となる。

$$\frac{1}{m_1} \frac{\partial f_1}{\partial z_1} \neq \frac{1}{m_2} \frac{\partial f_2}{\partial z_2} \quad (10)$$

4.3 棒の浮上システムのための条件

まず、浮上体の z 方向の運動方程式は次式で表される。

$$m \ddot{z} = f_1 + f_2 - mg \quad (11)$$

次に、重心周りの回転の運動方程式は次式で表される。

$$I \ddot{\phi} = -f_1 l_1 + f_2 l_2, \quad (12)$$

ここで、 I は重心周りの慣性モーメントである。

浮上体に働くそれぞれの力は、2つの鉄球浮上システムと同様に、各コアと浮上体の空隙 d_1, d_2 とシステムの入力である磁石の回転角 θ の関数であると考え。つまり、

$$f_1 = f_1(d_1, \theta) \quad (13)$$

$$f_2 = f_2(d_2, \theta) \quad (14)$$

となる。ここで、各空隙は次式で表される。

$$d_1 = d_{10} - z + l_1 \phi, \quad (15)$$

$$d_2 = d_{20} - z - l_2 \phi. \quad (16)$$

これらの式に基づいて左右の力の微小変化は

$$df_1 = \frac{\partial f_1}{\partial d_1} \frac{\partial d_1}{\partial z} dz + \frac{\partial f_1}{\partial d_1} \frac{\partial d_1}{\partial \phi} d\phi + \frac{\partial f_1}{\partial \theta} d\theta \quad (17)$$

$$df_2 = \frac{\partial f_2}{\partial d_2} \frac{\partial d_2}{\partial z} dz + \frac{\partial f_2}{\partial d_2} \frac{\partial d_2}{\partial \phi} d\phi + \frac{\partial f_2}{\partial \theta} d\theta \quad (18)$$

となるので、線形化した状態空間モデルは次式となる。

$$\dot{x} = Ax + bu \quad (19)$$

$$y = Cx \quad (20)$$

ただし、 $x' = (z \ \phi \ \dot{z} \ \dot{\phi})$,

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_{d1} - a_{d2} & l_1 a_{d1} - l_2 a_{d2} & 0 & 0 \\ l_1 a_{d1} - l_2 a_{d2} & -l_1^2 a_{d1} - l_2^2 a_{d2} & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ a_{\theta 1} + a_{\theta 2} \\ -l_1 a_{\theta 1} + l_2 a_{\theta 2} \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & -l_1 & 0 & 0 \\ 1 & l_2 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

ここで、 $a_{\theta i} = \frac{\partial f_i}{\partial \theta}$, $a_{d i} = \frac{\partial f_i}{\partial d_i}$ である。通常の磁気浮上系の場合、棒の回転の釣り合いを考慮すると、 b 行列の4行目は0になる。この場合、可制御行列の行列式は次式となる。

$$-(a_{\theta 1} + a_{\theta 2})^4 (l_1 a_{d1} - l_2 a_{d2})^2 \quad (21)$$

この式の2つめの括弧の中が0でなければ、棒の浮上システムの実現の可能性があることがわかった。

5 シミュレーション

前節で用いたモデルに基づいて、ステップ応答の数値シミュレーションを行った。フィードバックゲインは、最適レギュレータ理論により求めた。

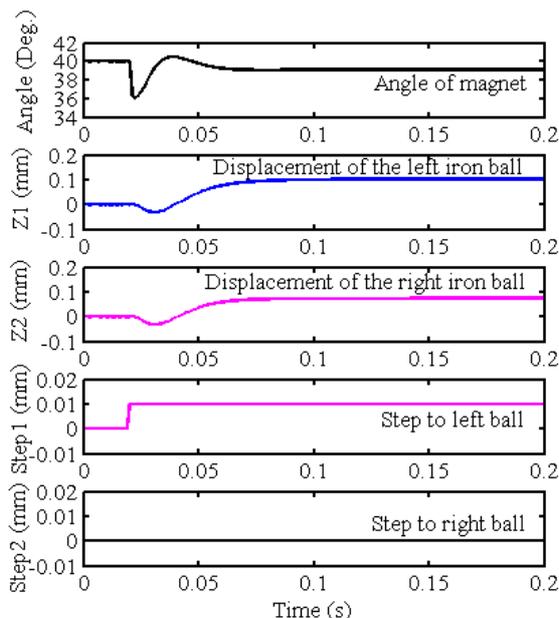


Fig. 6: Simulation result of 2 iron ball suspension system.

2つの鉄球の浮上システムの場合の結果を Fig. 6 に示す．図は上から磁石の回転角度，左の鉄球の位置，右の鉄球の位置，左の鉄球に加えたステップ及び右の鉄球に加えたステップを示す．図から分かるように，ステップ応答の前後で二つの鉄球の安定浮上が実現されている．これより，提案した同時浮上システムの安定浮上を示されたといえる．左の鉄球に上がるステップを加えたとき，円盤磁石の回転角度は，まず，ステップに反応するため，安定状態から小さくなり，二つの鉄球の浮上力が小さくなった．これは，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，上がるステップは円盤磁石の回転角度を小さくしたためである．浮上力が小さくなると，二つの鉄球が落ちるため，二つの鉄球の位置が下がった．二つの鉄球を安定状態に戻すため，円盤磁石の角度を大きくし，浮上力を大きくした．そのため，二つの鉄球の位置が上がった．これより，円盤磁石の角度を調整することによって，二つの浮上力と鉄球の重力との釣り合う点を探し，二つの鉄球を同時に浮上させることができた．最後の安定浮上状態では，円盤磁石の回転角度は初期値より小さくなり，二つの鉄球の位置は初期値より大きくなった．

次に棒の浮上システムにおけるシミュレーションを行った結果を，Fig. 7 に示す．図は，上から左側，右側の空隙距離，重心位置の変位，および浮上体の回転を表している．図からわかるように，重心位置の変位は，その周りの回転より早い応答をしていることがわかる．これは，永久磁石の回転が，重心周りの回転を直接駆動できないためである．しかし，すべての値は一定の値に収束しており，安定化ができていくことがわかる．このことにより，完全な非接触制御の実現の可能性が示されていると考えられる．

6 おわりに

円盤磁石の回転駆動により構成される可変磁路制御形磁気浮上機構において，丸棒を完全に非接触で浮上させるための考察を行った．今回の発表では，浮上シ

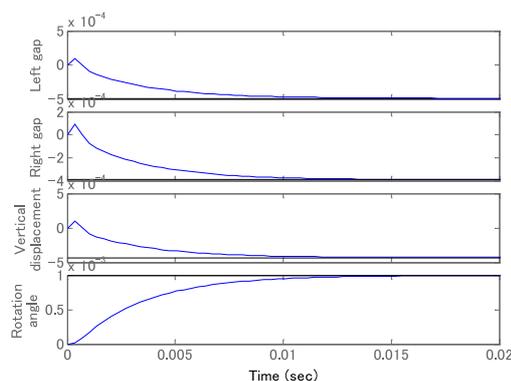


Fig. 7: Simulation result of stick type object suspension system.

ステムの紹介と，そのモデル化を行い，現代制御理論より，浮上可能性の検討を行った．その結果浮上のための条件を求めることができた．また，シミュレーション結果により，提案した浮上システムの可能性が示された．

今回の結果に基づいて実際の浮上体をどのようなものとするかを検討し，棒の非接触浮上を実現させる予定である．

参考文献

- 1) Oka K. and Higuchi T., Magnetic Levitation System by Reluctance Control: Levitation by Motion Control of Permanent Magnet, International Journal of Applied Electromagnetics in Materials, Vol. 4 (1994), pp.369-375.
- 2) Ueno T., Qiu J., Tani J., Magnetic Force Control Based on the Inverse Magnetostrictive Effect, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.40, No.3 (2004), pp.1601-1605.
- 3) Ueno T., Qiu J., Tani J., Magneto-Electric Composite Element of Giant Magnetostrictives and Piezoelectric Matrerials and Its Application of Magnetic Force Control to Magnetic Levitation System, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 67, No.658 (2001), pp. 1897-1904.
- 4) Mizuno T., Hoshino H., Takasaki M. and Ishino Y., Proposal and Basic Experimental Study of Flux Path Control Magnetic Suspension, Transactions of the Japan Society Applied Electromagnetic and Mechanics, Vol. 14, No.3 (2006), pp. 346- 352.
- 5) Mizuno T., Hirai Y., Ishino Y. and Takasaki M., Flux Path Control Magnetic Suspension -Development of a System Using Voice Coil Motors -Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 72, No.721 (2006), pp. 185-192
- 6) 孫，岡，西原，回転モータを利用した浮上システムの開発，Dynamic and Design Conference 2009, Sapporo, CD-ROM
- 7) 樋口俊郎，岡宏一，リラクタンス制御形磁気浮上機構の安定性と1磁石多浮上体に関する研究，第36回システム制御情報学会研究発表講演会，No. 5053 (1992)，pp. 501-502.
- 8) Yamamoto A., Kimura M. and Hikihara T., A Study on Indirect Suspension of Magnetic Target by Actively Controlled Permanent Magnet, 11th International Symposium on Magnetic Bearings (2008), pp .182-188.
- 9) 水野毅，高崎正也，石野裕二，多重磁気浮上システム（第1報，基本構想と基本定理），日本機械学会論文集 C 編，Vol. 76, No. 761 (2010)，pp. 76-83.