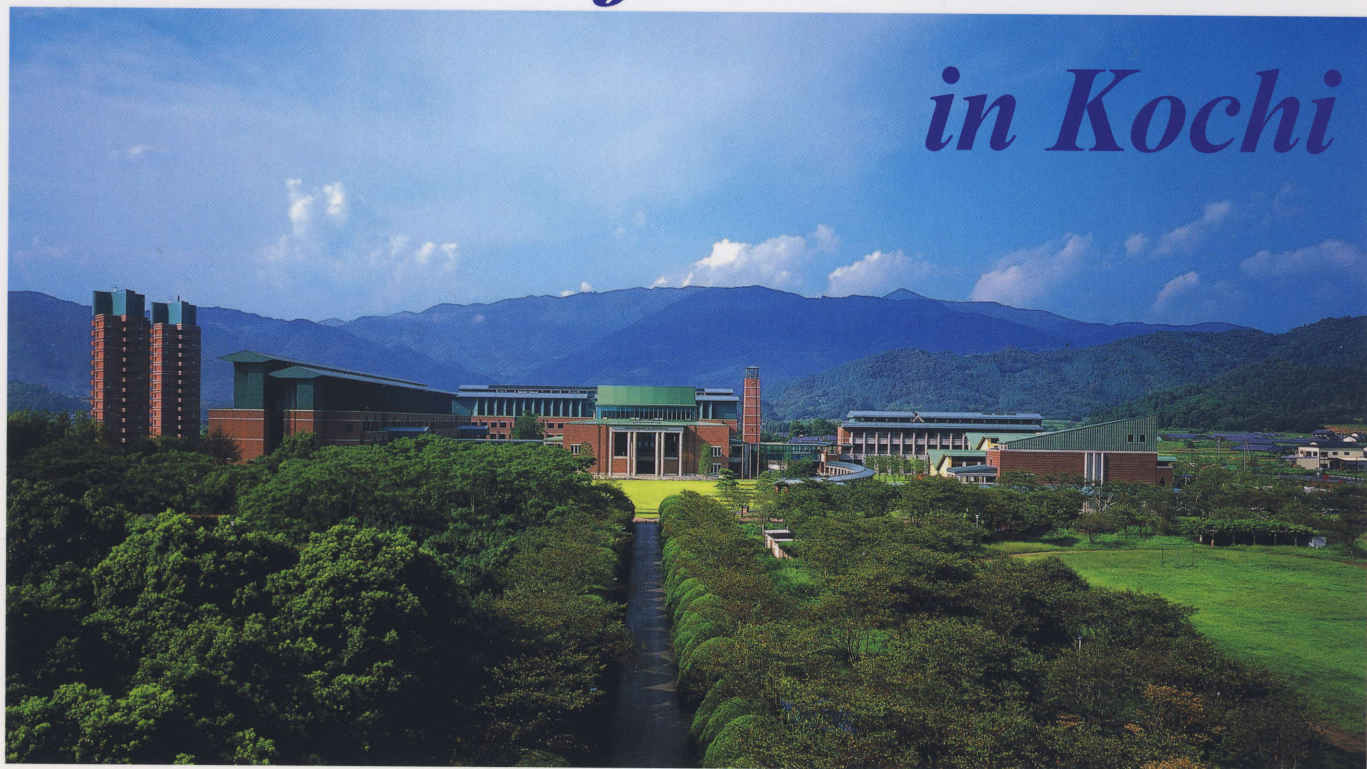


【No.11-2】

Dynamics & Design Conference 2011

in Kochi



「部門創設25周年、新たな躍動」 アブストラクト集



開催日：2011年9月5日(月)～9日(金)

会 場：高知工科大学

主 催：一般社団法人日本機械学会 機械力学・計測制御部門

TEL(03)5360-3500 FAX(03)5360-3508

URL <http://www.jsme.or.jp/dmc/DD2011/>

協賛：計測自動制御学会，システム制御情報学会，自動車技術会，情報処理学会，人工知能学会，精密工学会，電気学会，電子情報通信学会，土木学会，日本音響学会，日本原子力学会，日本建築学会，日本航空宇宙学会，日本神経回路学会，日本スポーツ産業学会，日本設計工学会，日本船舶海洋工学会，日本鉄鋼協会，日本トライボロジー学会，日本知能情報ファジィ学会，日本フルードパワーシステム学会，日本ロボット学会，バイオメカニズム学会，日刊工業新聞社

円盤磁石による磁路制御型磁気浮上機構の 2自由度浮上に関する考察

○正 岡 宏一(高知工大), 学 鶴身 輝(高知工大),
学 中村 豪太(高知工大), 学 岡崎 大洋(高知工大)

2 DOF Suspension Mechanism Using Variable Flux Path Control by Rotary Permanent Magnet

Koichi, OKA, Akira TSURUMI, Gota NANAMURA, and Tomohiro OKAZAKI

Kochi Univ. of Tech., Dept. of Intelligent Mechanical Engineering
Miyanokuchi 185, Tosayamada-cho, Kami-city, Kochi, 782-8502 Japan

This paper describes a 2 DOF magnetic suspension system for an iron stick type object using a rotary geared motor and a disk magnet. In this system, the suspension force is provided by a disk-type permanent magnet and is controlled by a magnetic flux path control mechanism. This suspension system must control two degrees of freedom of an iron stick 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.

Key Words : Magnetic Suspension System, 2 DOF Suspension Control, Variable Flux Path Control, Disk Magnet.

1. 緒 言

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⁾、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⁽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。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。

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図1に示す。この磁気浮上機構は、円盤磁石と左右二つのF字型の強磁性体コアと直方体の浮上体から構成されている。円盤磁石は、ある90度の部分がN極、反対側の90度がS極であると仮定する。

まず、図1(a)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図1(b)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、図1(a)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。

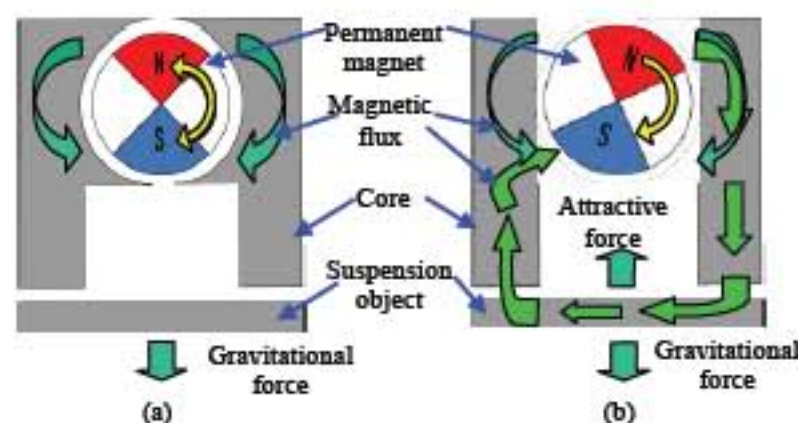


Fig.1 Principle of variable flux path control mechanism using rotary magnet

3. 試作浮上システム

今回提案する磁路調整形磁気浮上機構の略図を図2に、浮上システム全体の構成を図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、直方体の浮上体、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のは磁石であり、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、ハーモニックドライブ機構を用いたDCモータであり、ハーモニックドライブの減速比は50であり、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 μm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。

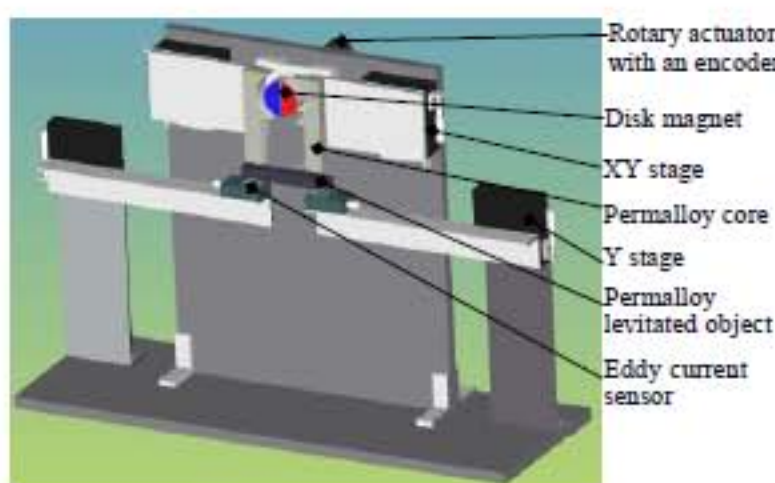


Fig.2 Illustration of the experimental prototype

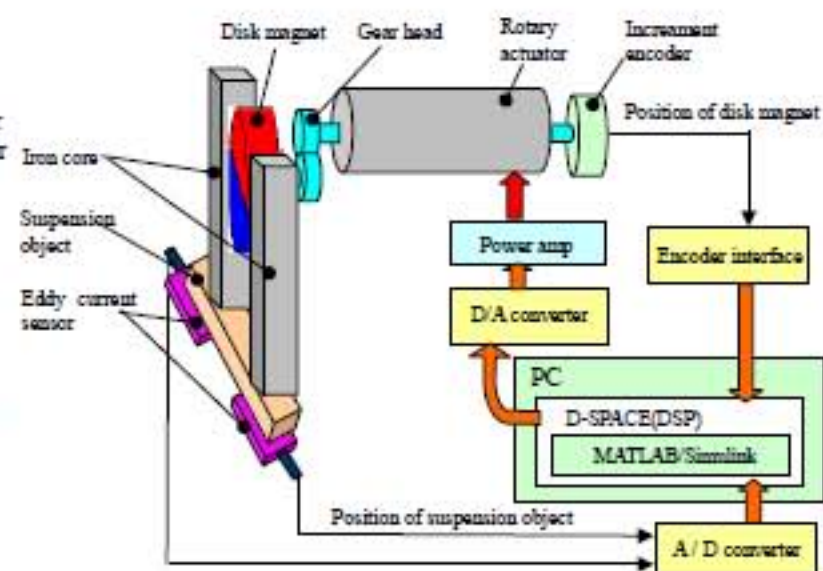


Fig.3 Configuration of suspension system

4. 浮上システムのモデル化

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。浮上システムの記号を、図4に示す。添え字の数字の1と2は、それぞれ図に向かって右側と、左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。

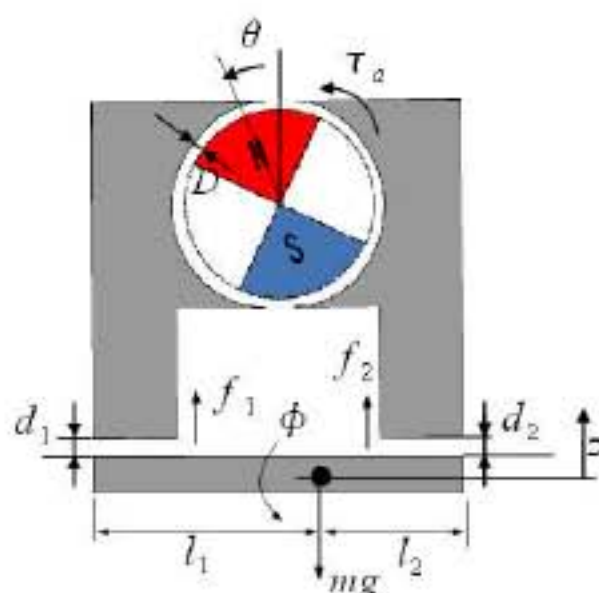


Fig.4 Schematic of symbols clarification

4.1 浮上システムの自由度

まず、浮上システムに必要な制御の自由度を考察する。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 ϕ 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 状態方程式と観測方程式

まず、浮上体の z 方向の運動方程式は、以下のようになる。

$$m\ddot{z} = f_1 + f_2 - mg \quad (1)$$

次に、浮上体重心に関する y 軸回りの運動方程式は、以下のようになる。

$$I\ddot{\phi} = -f_1 l_1 + f_2 l_2 \quad (2)$$

ただし、 I は浮上体の重心回りの慣性モーメントである。左右のコアと浮上体に働く吸引力 f_1, f_2 は、空隙の自乗に反比例し、磁石角度 θ の正弦の自乗に比例すると考え、次式のように仮定した。

$$f_i = k \frac{\sin^2 \theta}{d_i^2} \quad (3)$$

空隙距離 d_1, d_2 は幾何学的な関係から z と ϕ によって、次式のように表せる。ただし、添え字 0 はそれぞれ平衡点の値を表すものとする。

$$d_1 = d_{10} - z + l_1 \phi \quad (4)$$

$$d_2 = d_{20} - z - l_2 \phi \quad (5)$$

以上の式に基づいて線形化を行い、状態方程式と観測方程式を導くと次のようになる。

$$\dot{x} = Ax + bu \quad (6)$$

$$y = Cx \quad (7)$$

ただし、 $x^T = (z \ \phi \ \dot{z} \ \dot{\phi})$ 、

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

$$\text{また、} \quad a_{i\theta} = 2k \frac{\sin \theta_0 \cos \theta_0}{d_{i0}^2} \quad a_{id} = 2k \frac{\sin^2 \theta_0}{d_{i0}^3} \quad \text{である。}$$

5. 浮上システムのモデル化

導いたモデルを用いて、浮上システムの実現可能性について可制御性と可観測性に基づいて考察した。可観測性については、の条件で可観測行列がフルランクとなるため、問題はない。

5.1 平衡点の考慮

式(6)の状態方程式の各行列の要素は、平衡状態に基づいて値が決定される。鉛直方向の力のつり合いと y 軸回りのモーメントのつり合いより、平衡状態では以下の条件が必要となる。

$$f_{10} + f_{20} = k \frac{\sin^2 \theta_0}{d_{10}^2} + k \frac{\sin^2 \theta_0}{d_{20}^2} = mg \quad (8)$$

$$f_{10}l_1 - f_{20}l_2 = k \frac{\sin^2 \theta_0}{d_{10}^2} l_1 - k \frac{\sin^2 \theta_0}{d_{20}^2} l_2 = 0 \quad (9)$$

式(9)を整理すると、

$$l_1 d_{20}^2 = l_2 d_{10}^2 \quad (10)$$

の関係が得られ、これを b 行列に代入するとその 4 行目は零となる。

このことは、提案の浮上システムを実現した場合、入力円盤磁石の回転は、鉛直方向の浮上の運動しか直接的には制御できないことを意味する。制御すべき他の一つの、 y 軸回りの回転の自由度は、入力で直接的に制御できないことがわかった。

5.2 可制御性の考慮

可制御性に関しては、本システムは 1 入力のシステムであるため、可制御行列の行列式で評価することができる。前節で得られた結果を b 行列に代入し、可制御行列の行列式を求めると、次式となる。

$$(a_{1\theta} + a_{2\theta})^4 (a_{1d}l_1 - a_{2d}l_2)^2 = 64k^6 \cos^4 \theta_0 \sin^8 \theta_0 \left(\frac{1}{d_{10}^2} + \frac{1}{d_{20}^2} \right)^4 \left(\frac{l_1}{d_{10}^3} - \frac{l_2}{d_{20}^3} \right)^2 \quad (11)$$

この行列式がゼロになるかどうかは、最後の括弧の中の値でできます。この条件を考えるために、次式に示す 2 つの釣り合いを考えることができる。

$$mgl_1 = f_{20}l = k \frac{\sin^2 \theta_0}{d_{20}^2} l \quad , \quad mgl_2 = f_{10}l = k \frac{\sin^2 \theta_0}{d_{10}^2} l \quad (12)$$

これらの式を用いて、式(11)の l_1, l_2 を消去すると、可観測であるための条件として次式が得られる。

$$\frac{64k^8 l^2 \cos^4 \theta_0 \sin^{12} \theta_0}{m^2 g^2 d_{10}^6 d_{20}^6} (d_{20} - d_{10})^2 \neq 0 \quad (13)$$

この結果、提案した浮上システムによって丸棒が完全に非接触で浮上するための条件は、以下の 2 つであることがわかった。

- 1) 平衡状態での円盤磁石の回転角度が $\pi/2$ の倍数でないこと
- 2) 平衡状態にある場合に、左右の空隙が等しくないこと。

条件 1) は、永久磁石がその位置にあると吸引力の調整ができないので、自然な条件であると考えられる。条件 2) は、重心位置が棒の真ん中にある場合には浮上ができないことがわかる。このことは、2 つの鉄球を浮上させる場合に質量が等しい場合には、浮上できないことに相当する。

5.3 シミュレーション結果

式(6)、(7)で表されたシステムに基づいて、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。結果を図 5 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。

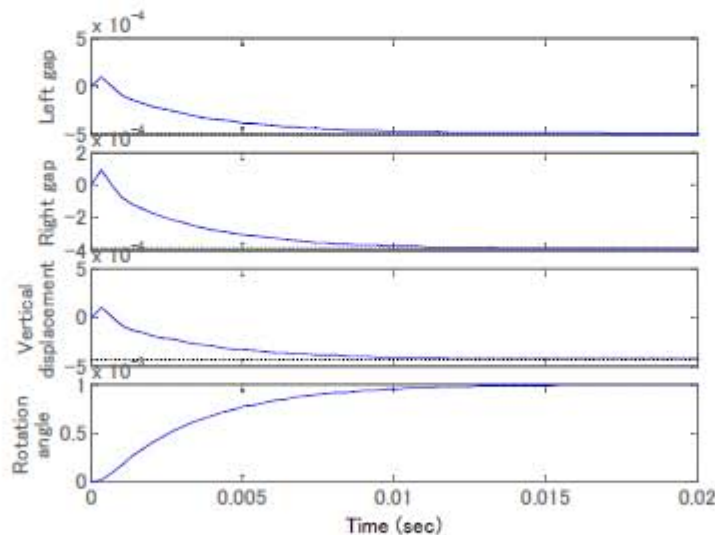


Fig.5 Simulation result of 2 dof motion control

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、安定化ができていていることがわかる。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。

5. 結言

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。

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 Materials 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, D&D Conference 2009, Sapporo, CD-ROM