円盤磁石を用いた可変磁路制御機構による磁気浮上* (二つの鉄球同時浮上実験)

孫 鳳^{*1}, 岡 宏一^{*2}

Magnetic Suspension Using Variable Flux Path Control Mechanism with Permanent Magnet (Simultaneous Suspension Experiment of Two Iron Balls)

Feng SUN and Koichi OKA^{*2}

^{*2}Kochi University of Technology
Miyanokuchi 185, Tosayamada-cho, Kami-city, Kochi, 782-8502, JAPAN

This paper proposes a simultaneous suspension of two iron balls using a variable flux path control mechanism. This mechanism consists of a disk-type permanent magnet, a rotary actuator, and two iron cores. In this mechanism, the two iron balls are suspended in parallel. The suspension forces for two iron balls are generated on the ends of two iron cores, and controlled by varying the angle of the disk magnet that is driven by a rotary actuator. In this paper, first, the control principle of suspension force is explained, and the experimental prototype and the controller are introduced. Second, basing on experimental data, a numerical model is setup, and the controllability is proved. Finally, the feedback gains are calculated by LQR (Linear Quadratic Regulator), and the simultaneous suspension experiment of two iron balls is succeeded with the linear rails. All results indicate that the two iron balls can be suspended simultaneously.

Key Words : Magnetic Levitation, Vibration Control, Control Device, Optimal Control, Actuator

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機構である。機械的な接触による摩擦がないこと、塵埃などを発生しないことなどの利点があり、種々の磁気浮上機構が提案されている。多くの磁気浮上装置⁽¹⁾や磁気軸受⁽²⁾には、電磁コイルを用いた電磁石が使われている。一方、永久磁石を用いた種々の磁気浮上も提案されている。例えば、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⁽³⁾⁽⁴⁾や、永久磁石の反発力を用いた方式⁽⁵⁾、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方式⁽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、浮上力を調整する方式⁽⁷⁾、円盤形磁石を回転モータにより駆動し浮上力を制御する方式⁽⁸⁾などである。これらの永久磁石を用いた浮上機構は、電磁コイルと違い起磁力発生に発熱の問題がなく、またコイル体積を少なくできる可能性がある。また、円盤磁石を用いた浮上機構は、浮上力をほぼ零にできるため、浮上体が永久磁石に吸着したときにも復帰が可能であるという特長を持つ。

磁気浮上機構において、近年多重磁気浮上システムが提案されるようになってきた。通常磁気軸受などでは、磁石の吸引力を制御するために浮上体の運動の自由度ごとに最低 1 つの電流源または電圧源を用いている。これらの多重式磁気浮上機構を用いることにより、浮上体の複数の自由度を 1 つの電流（電圧）源で駆動させることが可能となり、磁気浮上機構の低コスト化を図ることが期待できる。永久磁石を用いたシステム⁽³⁾によるものとして、永久磁石の運動制御を用いて鉛直方向に複数の鉄球を浮上させるシステムの検討が行なわれている⁽⁹⁾。しかし、これは多自由度の浮上の実現の可能性を示した提案のものである。また電磁石を用いた多重磁気浮上シ

* 原稿受付 2012 年 4 月 2 日

^{*1} 瀋陽工業大学 (〒110870 中国遼寧省瀋陽経済技術開発区瀋遼西路 111)

^{*2} 正員, 高知工科大学 (〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185)

E-mail: oka.koichi@kochi-tech.ac.jp

Fig.1 Control principle of suspension forces

Fig.2 Photograph of magnetic suspension prototype

システムでは、支持用電磁石の生成する磁場によって、永久磁石と鉄球を直列に浮上させることや⁽¹⁰⁾、直列に接続された二つの電磁コイルと一つのアンプを用いた多自由度浮上システムが提案されている⁽¹¹⁾。

本研究は、円盤磁石と回転モータを用いた浮上システムにより、二つの鉄球を同時に浮上させることを提案する。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、二つの鉄球のための浮上力を同時に制御する。

本論文では、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、試作装置と制御システムを紹介する。次に、測定実験の結果に基づいて、システムのモデルを作り、同時浮上の可制御性を推定する。最後に、モデルにより安全なフィードバックゲインを求め、同時浮上実験を行い、浮上可能性を考察する。

2. 可変磁路制御機構による浮上力の制御原理

図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、円盤磁石、二つのF型の強磁性体コア、および二つの鉄球から構成されている。なお、この浮上システムの解析のために、吸引力は鉛直方向のみに作用すると仮定する。

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、上部のN極からの磁束の半分は右側のF字型コアに、半分は左側のコアに流れ込んでいると考えられる。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、左右のコアから磁石のS極に流入する。磁束が鉄球を通過しないため、鉄球に浮上力は働かない。

次に、円盤磁石が右に少し回転したときの様子を図1(b)に示す。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極からの磁束はその一部が右のコアを通り、右の鉄球に到達する。また右側の磁束は左の鉄球とコアを通り、S極に流入する。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し、コアと鉄球との吸引力を磁石の回転角度で制御できると考えられる。

Fig.3 Configuration of simultaneous suspension system

Fig.4 Schematic of symbols clarification

3. 試作装置と制御システム

3・1 試作装置

今回提案する可変磁路制御磁気浮上機構の試作装置の正面から見た写真を図2に示す。この浮上機構は、円盤磁石、回転モータ、コア、二つの鉄球、二つの渦電流センサで構成されている。円盤磁石は、装置の中央の円形のもので、直径が30 mm、厚さが10 mm、直径方向に磁極が磁化されているネオジム磁石である。この磁石は、垂直固定板の裏側に取り付けてある回転形アクチュエータによって回転駆動される。アクチュエータはDCモータであり、ハーモニックドライブによる減速機構とエンコーダが取り付けられている。ただし、背面に取り付けられているため、この図では確認できない。ハーモニックドライブの減速比は50であり、エンコーダの分解能はモータの回転に対して360 p/rである。コアは円盤磁石の両側にある二つのF型のもので、厚さが10 mmのパーマロイである。パーマロイは、透磁率が非常に高く、漏れ磁束が少ないため本実験に適している。回転モータにより、円盤磁石の回転角度を制御し、磁路中の磁束量を変化させることにより、コアと鉄球との間の吸引力を調整する。二つの鉄球の下にはそれぞれ二つの渦電流センサが配置されており、鉄球位置を計測する。センサの測定範囲は3.5 mmで、分解能は1 μm である。左の鉄球の直径は20 mmで、右の鉄球の直径は30 mmである。

Fig.5 Measurement results of magnetic flux density

3・2 制御システム

この同時浮上システムの構成を図3に示す。制御システムはDSPを用いたデジタル制御であり、エンコーダと渦電流センサの値に基づいて、円盤磁石の回転トルクを制御し、磁路を制御する。それにより、二つの鉄球とコアとの間の吸引力を調整することにより、二つの鉄球位置を同時に浮上制御する。

4. 基本特性の考察と浮上力のモデル化

4・1 モデルと記号

浮上システムのモデルとして図4に示すモデルを考えた。記号を以下に示す。

$\Delta d_{\phi 1}, \Delta d_{\phi 2}$: 左右の鉄球の磁束に関する定数 (mm)

d_1, d_2 : 左右の鉄球とコアとの空隙距離 (mm)

$\Delta d_{m1}, \Delta d_{m2}$: 左右の鉄球の吸引力に関する定数 (mm)

d_{m1}, d_{m2} : $d_{m1} = d_1 + \Delta d_{m1}$; $d_{m2} = d_2 + \Delta d_{m2}$

f_{m1}, f_{m2} : 左右の鉄球に働く吸引力 (N)

m_1, m_2 : 左右の鉄球の質量 (35.81 g, 109.96 g)

z_1, z_2 : 左右の鉄球の位置 (上向きを正)

θ : 円盤磁石の回転角度 ($^\circ$)

D : 円盤磁石と両コアの距離 (2 mm)

f_a : モータの回転トルク (Nm)

g : 重力加速度 (9.8 m/s^2)

4・2 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 d_1, d_2 や円盤磁石の角度 θ を変化させたときの磁束密度と吸引力 f_{m1}, f_{m2} 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 D を 2 mm に調整し、コアと鉄球の間隔を 1 mm ごと、円盤磁石の回転角度 θ を 10° ごとに計測した。測定時には、一方の鉄球を 2 mm に固定した。磁束密度の測定では空隙距離を 2 mm から 10 mm まで変化させ、吸引力 f_{m1}, f_{m2} の測定では 1 mm から 8 mm まで変化させた。用いた鉄球は、左の方の直径が 20 mm で、右の方の直径が 30 mm である。

磁束密度の測定結果を図5に示す。図5(a)は円盤磁石の回転角度と磁束密度の関係である。図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、右の大きな鉄球の側の磁束密度が大きくなっていることがわかる。図5(b)は浮上体とコアの空隙と磁

Fig.6 Measurement results of attractive force of left iron ball

Fig.7 Measurement results of attractive force of right iron ball

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ほぼ反比例することがわかった。

4・3 吸引力の測定

さらに、吸引力の測定結果を図 6, 図 7 に示す, 左側の吸引力結果を図 6 に, 右側の吸引力結果を図 7 に示す。図 6(a)と図 7(a)は鉄球とコアとの空隙をパラメータとして、円盤磁石の回転角度に対する結果である。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。このことより、円盤磁石の回転角度により吸引力を制御できることがわかった。図 6(b)と図 7(b)は浮上体とコアと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ことがわかった。

4・4 相互の鉄球位置の変化の影響

また、二つの鉄球を浮上させるとき、一方の鉄球の浮上力に関して他の一方の鉄球の浮上位置により受ける影響を調べた。実験では、磁石の角度を 60° に固定した状態で、鉄球とコアとの距離を 0.5mm から 8mm まで、 0.5mm ずつ変化させて浮上力を調べた。その各々の測定時に、他方の鉄球の距離を 0.5mm から 8mm まで、 0.5mm ずつ変化させた。測定した結果を図 8 に示す。図の横軸が他の鉄球の浮上位置を示している。図 8(a)は、右の鉄球の位置を変化させたときの、左の鉄球の浮上力を測定した結果である。

(a) Attractive force of left ball when right ball is moving

(b) Attractive force of right ball when left ball is moving

Fig. 8 Interaction examination (when $\theta=60^\circ$)

これらの結果より、他方の鉄球の浮上位置を変化して浮上力がほとんど影響を与えないことがわかった。図 8(b) は、逆の場合の結果である。右の鉄球の空隙が 0.5mm のときに、多少の影響が表われているが、これは測定誤差と考えられ、またこの空隙は平衡状態から離れているため、影響がないと考えられる。

4・5 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、吸引力のモデル化を行った。図 5 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_1 と d_2 とは、ほぼ反比例の関係になることが分かった。この結果に基づいてコアと鉄球の磁束 ϕ_i ($i=1, 2$) を定数 $k_{\phi i}$ で次式のように仮定した。

$$\phi_i = k_{\phi i} \frac{\sin \theta}{d_i + \Delta d_{\phi i}} \quad (1)$$

ただし、 $\Delta d_{\phi i}$ は磁束密度に関する定数である。

吸引力はコアと鉄球の間を通過する磁束の自乗に比例すると考えられるため、二つの鉄球の吸引力 f_{mi} ($i=1, 2$) を次式と仮定する。

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

この式が正しいことを図 6 と 7 の測定結果で確認した。図中の線は式(2)に基づいて描いたものである。ただし、比例定数 k_{m1} と k_{m2} の値は $2.56 \times 10^{-5} \text{ (Nm}^2\text{)}$ と $4.06 \times 10^{-5} \text{ (Nm}^2\text{)}$ 、定数 Δd_{m1} と Δd_{m2} の値は 2 mm と 1.8 mm である。

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行った。モデル図を図 4 に示す。まず、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トルクは、永久磁石の回転角によらず 0 であり、電流と発生トルクは比例すると仮定して、次式のように電流から磁石角度への運動方程式を求めた。

$$J\ddot{\theta} = c\dot{\theta} + k_i i \quad (3)$$

ただし, J は減速比を考慮した永久磁石およびギアの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である.

また, 浮上力の方程式 f_i ($i=1, 2$) により, 二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.

$$m_1 \ddot{z}_1 = k_{m1} \frac{\sin^2 \theta}{(d_1 + \Delta d_{m1} - z_1)^2} - m_1 g \quad (4)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 = k_{m2} \frac{\sin^2 \theta}{(d_2 + \Delta d_{m2} - z_2)^2} - m_2 g \quad (5)$$

5・2 浮上可能性の考察

この浮上機構によって, 二つの鉄球を同時に浮上させることについて考察する. まず, 浮上の可能性を検討するため, 平衡点近傍における線形化を行い, 状態方程式によるモデルを構築し, 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, 浮上平衡点の近傍で行った. 線形化した浮上力は次の式となる.

$$\Delta f_{mi} = \frac{2k_{mi} \sin^2 \theta_0}{(d_{i0} + \Delta d_{mi})^3} \Delta z_i + \frac{k_{mi} \sin 2\theta_0}{(d_{i0} + \Delta d_{mi})^2} \Delta \theta \quad (6)$$

ただし, $i=1, 2$, Δf_{mi} , Δz_i , $\Delta \theta$: 平衡点の近傍の微小値, θ_0 , d_{i0} : 平衡点の値である. この式に基づいて(4), (5)式を線形化し, (3)式を考慮する. システムの入力をモータ電流, 出力を左右の鉄球位置と永久磁石の角度とすると, 状態方程式と出力方程式は, 次式ようになる.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (7)$$

ただし,

$$x = \begin{pmatrix} z_1 & \dot{z}_1 & z_2 & \dot{z}_2 & \theta & \dot{\theta} \end{pmatrix}'$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & a_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & 0 & a_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_6 \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad u = i$$

$$\text{ここで, } a_{21} = \frac{2k_{m1} \sin^2 \theta_0}{m_1 d_{m1}^3}, \quad a_{25} = \frac{k_{m1} \sin 2\theta_0}{m_1 d_{m1}^2}, \quad a_{43} = \frac{2k_{m2} \sin^2 \theta_0}{m_2 d_{m2}^3}, \quad a_{45} = \frac{k_{m2} \sin 2\theta_0}{m_2 d_{m2}^2}, \quad a_{66} = \frac{c}{J}, \quad b_6 = \frac{k_t}{J}$$

である.

なお, (4), (5)式よりシステムが釣り合いの状態にあるとき,

$$\frac{k_{m1} \sin^2 \theta_0}{d_{m1}^2} = m_1 g \quad (8)$$

$$\frac{k_{m2} \sin^2 \theta_0}{d_{m2}^2} = m_2 g \quad (9)$$

となるため,

$$a_{21} = \frac{2g}{d_{m1}} \quad (10)$$

$$a_{43} = \frac{2g}{d_{m2}} \quad (11)$$

$$a_{25} = a_{45} = \frac{2g}{\tan \theta_0} \quad (12)$$

である.

実験システムでは, $a_{21} = 4710.1$, $a_{25} = 23.4$, $a_{43} = 5497$, $a_{45} = 23.4$, $a_{66} = 0$, $b_6 = 1083.2$ であった.

このシステムは1入力システムであるため, システムの可制御性は可制御行列の行列式で確認することができる. 可制御行列の行列式は次式で表される.

$$\det(P_c) = -a_{25}^2 (a_{21} - a_{43})^2 a_{45}^2 b_6^6 \quad (13)$$

式(13)により, $a_{21} \neq a_{43}$ でなければ, 可制御行列はフルランクとなり, 提案した同時浮上システムの安定化制御が可能である. またA行列の要素を考えると, a_{21} と a_{43} は実験システムの左右の吸引力の特性係数となる. 左右の鉄球の運動の時定数が同じである場合, 浮上ができないことがわかった. これを実現するためには釣り合いの式を考慮した(10), (11)式より空隙を変えれば, a_{21} と a_{43} が異なることがわかる. このため, 今回は, 二つのサイズが異なる鉄球を浮上体として用いて, 浮上実験を行った.

6. 浮上実験

6・1 浮上実験

実験装置は, 図3に示す構成になっており, モデル化した状態ベクトル x の z_1, z_2, θ の信号をセンサから検出できる. 各信号を微分すると状態量がすべて求まることになる. よってフィードバックシステムとして, 1入力2出力の状態フィードバックシステムを構成することとした. 具体的には, 各センサからの値をPD補償した後に加えあわせ, その信号により円盤磁石回転用モータを駆動する. このフィードバックゲインは, 不安定なシステムの安定化を含むため, 求めたモデルを用いて最適レギュレータ理論に基づき求めることとした.

浮上実験では, 二つ鉄球が互いに吸引してしまう影響を避けるため, 二つの鉄球をリニアレールに取り付け, 鉄球の自由度を鉛直方向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図9に示す. 変更した試作装置では, 浮上体の質量は鉄球, ブロック, アルミのつながるパーツなどを含んだものとなる. 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, 最適レギュレータを用いて, 求めたフィードバックゲインは次の様になった.

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

このゲインを利用し, 安定浮上に成功した.

Fig.9 Photograph of suspension device with linear rails

(a) Step response to left iron ball

(b) Step response to right iron ball

Fig.10 Experimental results of simultaneous suspension with two iron balls

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、まず二つの鉄球を安定浮上させた状態で、左右の鉄球の目標値を、0.1 mm 上方に変化させたときの応答を記録した。これらの応答結果を図 10 に示す。

図 10(a)は、左の鉄球に、(b)は右の鉄球にステップ入力を加えた結果である。図中、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する前後で安定浮上状態となることがわかる。図 10(a)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、磁石角度はステップ入力に加わると同時に小さくなり、吸引力を弱めている。これにより、二つの鉄球が下に変位し、安定状態に収束している。このとき、磁石角度はステップ入力の前より大きくなり、浮上体の空隙距離が長くて、浮上体を支持できるようになっている。

図 10(b)の結果より、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、二つの鉄球が上に変位することを確認した。以上の結果より提案した磁気浮上機構を用いて、二つの鉄球を同時に安定浮上させることを実験的に確認した。

7. 結 言

本論文では、円板磁石と回転モータを用いた二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、試作した浮上機構を紹介した。試作装置を用いた磁束密度と吸引力の測定を行い、吸引力のモデルを得た。そのモデルを用いて、システム全体をモデル化して、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。二つの鉄球をリニアレールに取り付け、浮上の自由度を制限して浮上実験を行い、安定浮上が可能であることを確認した。実験の結果より、この試作装置によって、二つの鉄球を同時に浮上させることが可能であることを確認した。

以上述べたように、本論文は提案したシステムの浮上可能性について検討を行った。このため実験では二つの鉄球をリニアレールに固定して浮上を実現した。今後の研究目標は、本機構を用いた複数の自由度の完全非接触支持の実現をめざすことである。具体的には棒状の浮上体を完全に非接触で浮上させる機構の実現をめざす。この機構は、浮上体の鉛直方向の直進と、永久磁石面と垂直に交わる水平軸の回転の二つの自由度を制御する多自由度浮上機構であり、一つの駆動源による多自由度の非接触支持という特長をいかした制御システムである。

文 献

- (1) B.V. Jayawant, *Electromagnetic levitation and suspension techniques*, (1981), Edward Arnold, London.
- (2) G. Schweitzer and E.H. Maslen, *Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*, (2009), Springer Dordrecht Heidelberg London New York.
- (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ー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-両側吸引浮上に関する考察-”, 日本 AEM 学会誌, Vol.14, No.1 (2006), pp. 120-125.
- (5) Mizuno T., and Hara Y., “Active Stabilization of a Repulsive Magnetic Bearing Using Motion Control of Permanent Magnets”, *JSME International Journal Series C*, Vol. 43, No. 3 (2000), pp. 632-637.
- (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) 孫 鳳, 岡 宏一, “円盤磁石の回転を用いた磁路制御形非接触浮上機構の開発”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No. 771, (2010), pp.2916-2922
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.