

磁路制御形磁気浮上に関する研究*
(ボイスコイルモータを用いたシステムの開発)水 野 毅^{*1}, 平 井 雄 三^{*2}
石 野 裕 二^{*2}, 高 崎 正 也^{*1}Flux Path Control Magnetic Suspension
(Development of a System Using Voice Coil Motors)Takeshi MIZUNO^{*3}, Yuzo HIRAI,
Yuji ISHINO and Masaya TAKASAKI^{*3} Department of Mechanical Engineering, Saitama University,
255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

A novel magnetic suspension system with three flux path control modules was developed. The module consists of a ferromagnetic plate, a voice coil motor (VCM) for driving the plate and a displacement sensor for detecting the position of the plate; the sensor is comprised of a V-shape plate spring and four strain gauges pasted on it. The ferromagnetic plate is inserted into the gap between a permanent magnet and a suspended object (floator). The lateral position of the plate is controlled with the VCM and the sensor. Since the flux from the permanent magnet to the floator varies according to the position, the amplitude and direction of the attractive force acting on the floator can be adjusted by using multiple modules. Stable suspension was achieved by applying PD control. A fluctuation was observed in the position of the floator. It was reduced by feeding back the lateral motions of the floator. The two- or three-dimensional noncontact manipulation of the floator was also achieved in the developed magnetic suspension system.

Key Words: Magnetic Bearing, Positioning, Motion Control, Electromagnetic Actuator, Magnetic Suspension, Flux Control, Permanent Magnet

1. 結 言

磁気浮上は、磁石の力を利用して浮上対象物を非接触で支持する技術で、浮上側と支持側に用いる物質の組み合わせによって、いろいろな方式が可能である⁽¹⁾⁽²⁾。この中で、永久磁石と強磁性体との間に働く吸引力を利用する方式の磁気浮上は、吸引力を発生するのにエネルギー消費を必要としないという利点を持っているが、安定な浮上を実現するために、浮上体の運動に合わせて何らかの方法で吸引力の大きさを動的に変化させる必要がある。広く使われている方法は、電磁石を併用してそのコイル電流を制御する方法である。特に、定常電流が零に収束するような制御則を用いるゼロパワー制御⁽³⁾は、宇宙用機器⁽⁴⁾、超清浄空間用搬送装置⁽⁵⁾、アクティブ除振装置⁽⁶⁾などに用いられている。

上記したように、磁石の吸引力を利用した磁気浮上

では、ほとんどの場合、磁気回路中の起磁力を変化させることによって安定化を達成している。これに対し、磁気回路中のリラクタンス（磁気抵抗）を制御するリラクタンス制御形磁気浮上も提案されており⁽⁷⁾、これまでにつぎのような方式の磁気浮上システムが実現されている。

- (1) アクチュエータで永久磁石を支持・駆動し、強磁性体との空隙の大きさを制御することによって吸引力を調整する方式⁽⁸⁾
- (2) 磁歪材料と圧電材料とを複合したデバイスを用いて、磁歪材料の逆磁歪効果を利用してリラクタンスを調整する方式⁽⁹⁾

また、ロータリアクチュエータに取り付けられた永久磁石の回転角度を制御することによって、磁石が発生する磁束の経路を変化させて浮上力を調整する磁気浮上システムも考案されている⁽⁹⁾。

著者らは、永久磁石の吸引力を利用した磁気浮上において、上記したいずれの方式とも異なった動作原理を持つ磁路制御形磁気浮上を提案している。提案された磁気浮上では、磁路中に挿入した強磁性体（以下では、これを遮束板と呼ぶ）の位置を変化させることに

* 原稿受付 2006 年 1 月 23 日。

^{*1} 正員、埼玉大学大学院理工学研究科(〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)。^{*2} 埼玉大学大学院理工学研究科。

E-mail: mizar@mech.saitama-u.ac.jp

よって、永久磁石から浮上対象物に到達する磁束の大きさ及び方向を調整する。このシステムの特徴の一つとして、永久磁石から浮上対象物に到達する磁束の大きさだけでなく、その空間的な配置も変えられることが挙げられる。

これまでの研究では、まず、1対(2枚)の遮束板を備えた装置を用いて、提案する方式の磁気浮上が可能であることを実証した⁽¹⁰⁾。つぎに、2対(4枚)の遮束板を備えた装置を用いて、浮上対象物の3次元的な運動制御が可能であることを実証した⁽¹¹⁾。これらの研究では、遮束板の運動制御を行う可変磁路機構に、差動式電磁石と変位拡大機構を利用していた。しかしながら、このような機構では、遮束板を高速で動かすことが難しく、磁気浮上系の高性能化が容易ではない。また、浮上対象物の3次元的な運動制御を実現するのに4枚の遮束板を用いていたが、これは遮束板を3枚としても達成可能である。さらに、差動式電磁石をアクチュエータとして用いたので、1枚の遮束板について2台の電力増幅器、全体で8台の電力増幅器を必要とするなど、システム全体がかなり大掛かりなものとなっていた^{(11),(12)}。

本研究では、上記した問題を解決するため、遮束板の運動を制御する新しい可変磁路機構の開発を行う。具体的には、差動式電磁石と変位拡大機構とを組み合わせた機構に換えて、ボイスコイルモータ(Voice Coil Motor; 以下VCMと略記する)によって遮束板を直接駆動する方式とする。また、浮上対象物の3自由度の運動制御を最小数である3台のアクチュエータを用いて実現する。本論文では、まず、磁路制御形磁気浮上システムにおける浮上原理および水平方向の位置制御の原理を紹介する。つぎに、開発した可変磁路機構を備えた実験装置の概要および諸特性について述べる。さらに、開発した可変磁路機構を3台用いて、浮上対象物の3次元的な運動制御を実現した結果を示す。

2. 磁路制御形磁気浮上の原理

図1を用いて磁路制御形磁気浮上の原理を説明する^{(11),(12)}。磁力源である永久磁石と浮上対象物(強磁性体)との間に遮束板(強磁性体)を挿入し、遮束板の開閉により浮上対象物に作用する吸引力の大きさを制御する。同図(a)のように一对の遮束板の間隔を狭くすると、遮束板を通る磁束が増加し、浮上対象物に作用する吸引力が増加する。逆に、同図(b)のように遮束板の間隔を広くすると、遮束板を通る磁束が減少し、浮上対象物に作用する吸引力が減少する。このように、浮上対象物の位置や速度に応じて一对の遮束板の間隔を調整

することで安定浮上を実現することが可能となる。また、永久磁石あるいは常電導電磁石の吸引力を利用した磁気浮上系では、通常、支持力と垂直な方向(図1では、水平方向)の運動に関しては、端効果などによって、アクティブに制御しなくても安定な系となる。具体的には、浮上対象物が水平方向に変位しても、つり合い位置に戻るような復元力が作用する。図1(c)は、この力を利用して、浮上対象物の水平方向の位置を調整する原理を示している。図に示すように、一对の遮束板を同じ方向に動かすと、水平方向のつり合い位置も遮束板と同じ方向に移動するので、前述した復元力の作用によって、浮上対象物は新たなつり合い位置まで移動することになる。これが提案する磁気浮上機構による水平方向の位置制御の原理である。

磁路制御形磁気浮上では、遮束板の運動方向が吸引力を生み出す磁束の方向と直交しているので、遮束板を駆動するアクチュエータは、浮上対象物の重量を支持する力を発生する必要がない。したがって、発生力の小さなアクチュエータを用いて、質量の大きな物体の完全非接触支持を実現できる可能性がある。また、一つの磁力源(永久磁石)を用いて3次元的な運動制御を実現できることも特徴の一つとして挙げられる。

3. 実験装置

3・1 可変磁路機構 提案する磁気浮上機構では、遮束板を動かす可変磁路機構が重要な役割を果たす。図2は、これまでの研究で用いていた可変磁路機構の構成を示している^{(11),(12)}。遮束板は、球軸受によって支持されたレバーの上端に取り付けられている。回転中

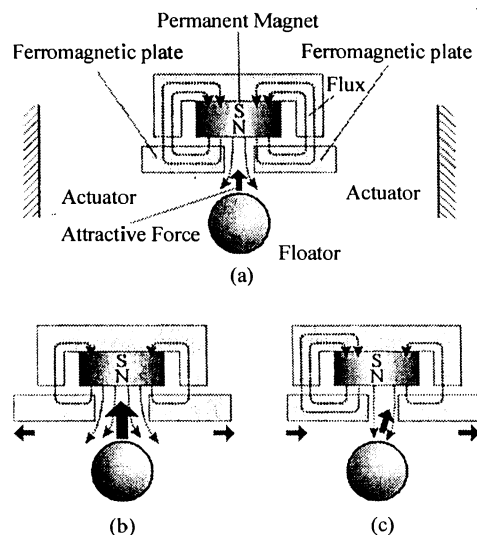


Fig.1 Principle of flux path control magnetic suspension

心に関して遮束板と逆側(図では下側)には、運動制御に用いる差動形電磁石をレバーを挟み込むように配置している。電磁石部でのレバーの変位は、この原理によって、遮束板を取り付けた位置で機械的に拡大される。レバーの角変位の検出には、渦電流形変位センサを用いている。この可変磁路機構のメリットは、アクチュエータ・センサとして低コストで入手し易い電磁石・渦電流形変位センサを使用できる点にある。両者はともに可動領域や検出範囲が狭いという欠点を持つが、この問題を機械式変位拡大機構を用いて解消している。しかしながら、変位拡大機構は、可変磁路機構を複雑にし、さらにアクチュエータで駆動する質量を等価的に大きくするので、レバーの運動を高速化することが難しくなる。

図3は、新たに試作した可変磁路機構の構成を示す。この機構の特徴としては、以下のことが挙げられる。

- (1) アクチュエータとして比較的大きなストロークを持つVCMを用いているので、機械式変位拡大

機構を用いなくても良い。

- (2) 変位センサとして、板ばねと歪みゲージとを組み合わせたもの(これをゲージ型変位センサと呼ぶ)を用いることによって、VCMの可動範囲全域での検出を可能としている。また、板ばねは、可動部を支持・案内する機能や、駆動(水平)方向に復元力を持たせる効果も持っている。

アクチュエータとして用いたVCMは、最大推力: 30N, ストローク: 15mm, 最大入力: 14Wの市販品で、可動部は滑り軸受によって支持されている。また、遮束板を含めた可動部の質量は164gである。

3・2 磁気浮上装置 図4は、これまでの研究で用いていた実験装置の外観を示している^{(1),(2)}。この装置では、図2に示した可変磁路機構が90度おきに四つ配置し、浮上対象物の運動に応じて、遮束板の開閉を調整することによって、浮上対象物の垂直方向(z 軸方向)の並進運動及び水平方向の2自由度($x \cdot y$ 軸方向)の並進運動の合計3自由度の運動を能動的に制御していた。

図5は、本研究で試作した実験装置の写真および概念図(上面図)を示す。この装置では、図3に示した可変磁路機構を120度おきに三つ配置している。これによって、アクチュエーションの冗長性の問題を解消している。また、装置全体でも3台の電力増幅器があれば動作させることができる。

この装置の浮上対象物は、直径30mm、質量110gの鉄球(SS400製)、永久磁石は、円筒状のネオジウム磁石(直径: 40mm, 高さ: 10mm, 表面磁束密度: 380mT)、遮束板は、矩形形状(幅: 18.9mm, 厚さ: 2.8mm)の鉄板(SS400製)である。

浮上対象物の垂直方向の変位は、浮上対象物の下部に取付けた渦電流形変位センサ S_z によって検出して

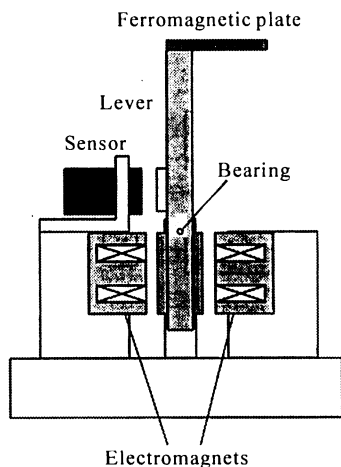


Fig.2 Former flux path control module

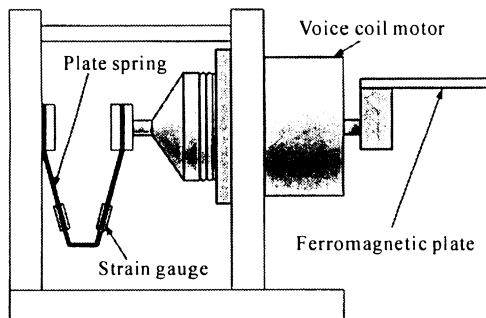


Fig.3 New flux path control module

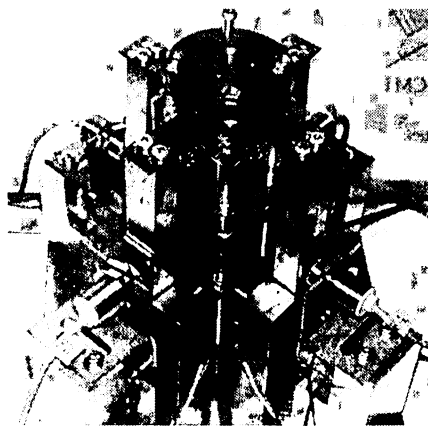


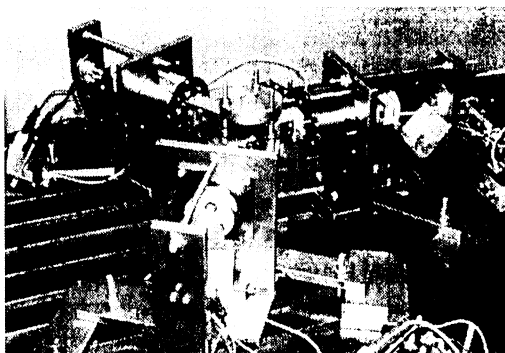
Fig.4 Former experimental apparatus

いる。以下では、その出力を s_z と表すこととする(他のセンサについても同様の記号を用いる)。浮上対象物の水平方向の変位は、水平方向に90度の角度をもって配置された渦電流形センサ S_x 、 S_y で検出している。センサの検出方向は、それぞれ x 軸と y 軸と一致させている。

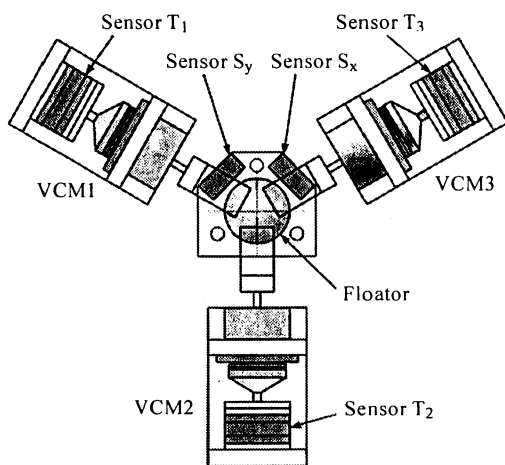
また、可変磁路機構1~3において、遮束板の位置をゲージ型センサ T_1 、 T_2 、 T_3 で計測している。各センサの出力は、A/Dコンバータを介してDSPを核とするデジタルコントローラ(dSPACE社製・DS1103)に入力される。コントローラでは、次節で述べる制御則にしたがって制御入力进行計算し、D/Aコンバータを介して、各VCMを励磁する電力増幅器に出力する。電力増幅器は電流出力形なので、各VCMのコイル電流 i_k を操作量とする。なお、制御周期は100 μ sである。

3.3 制御系の設計 本研究では、制御系の構成を

(1)各可変磁路機構内での局所フィードバック制



(a) Top perspective view



(b) Schematic drawing (top view)

Fig.5 New experimental apparatus

御系

(2)浮上対象物の運動制御系

の2層構造としている。

可変磁路機構の役割は、浮上対象物の運動に合わせて遮束板を素早く動かすことにある。本研究では、最も基本となるPD制御を用いて、遮束板を支持・駆動する機構が適当な剛性と減衰特性を持つようにする。数式を用いて説明すると、可変磁路機構 k ($k=1\sim3$)の遮束板を含む可動部に関する運動方程式は、次式で与えられる。

$$m\ddot{x}_k + c\dot{x}_k + kx_k = K_v i_k \quad (1)$$

ここで、 x_i :遮束板の変位、 m :可動部質量、 c :可動部支持用軸受の粘性抵抗係数、 k :ゲージ型センサの板ばねのばね定数、 K_v :VCMの推力係数である。PD制御を用いる場合、操作量 i_k を以下のように表される。

$$i_k = -(p_d + p_v \frac{d}{dt})x_k + e_k, \quad (2)$$

ここで、 p_d :比例ゲイン、 p_v :微分ゲイン、 e_k :可変磁路機構への指令信号である。指令信号から変位までの伝達関数 $G_i(s)$ は、つぎのように表される。

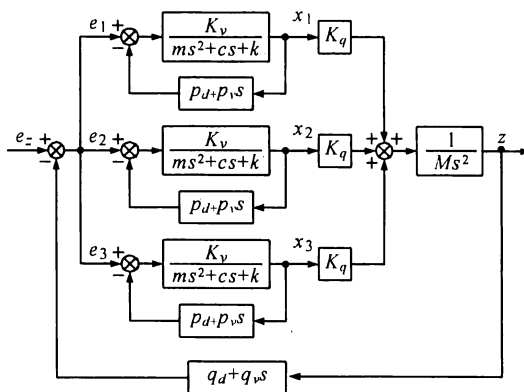


Fig.6 Control system for the vertical motion

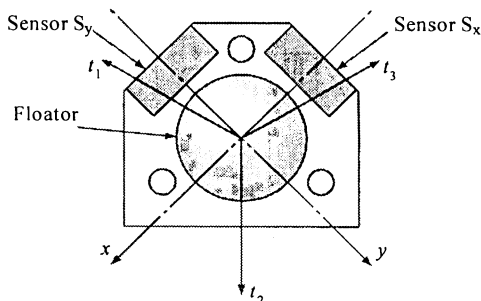


Fig.7 Arrangement of sensors

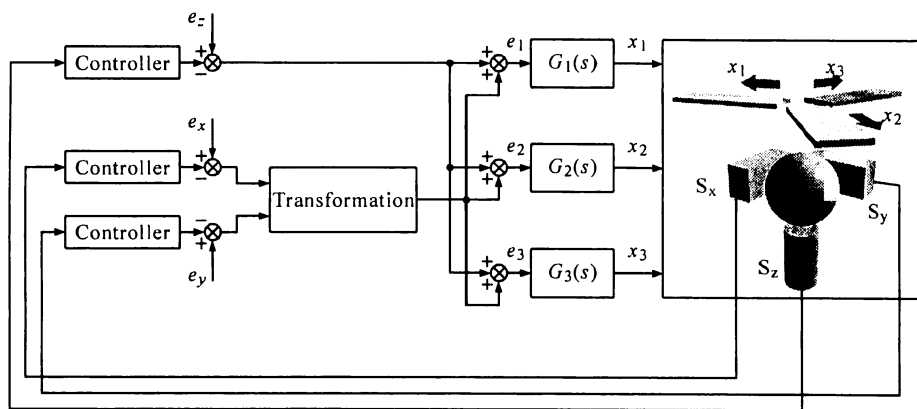


Fig.8 Block diagram of the whole control system

$$G_i(s) = \frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (3)$$

ここで,

$$a_1 = \frac{c + K_v p_v}{m}, \quad (4)$$

$$a_0 = \frac{k + K_v p_d}{m}, \quad (5)$$

$$b_0 = \frac{K_v}{m}. \quad (6)$$

浮上対象物の垂直 (z 軸) 方向の運動に関しては, 不安定な系となっている. そこで, 前者に関しては, 変位の検出信号 s_z から PD 補償回路によって安定化に必要な信号を生成し, この信号と z 軸方向の位置を指定する信号 e_z と合わせて可変磁路機構への指令信号 e_k とする. 以上の制御系の構成をブロック線図で示すと, 図 6 のようになる. この図で, M : 浮上対象物の質量, K_q : 遮束板の変位に伴う吸引力の変化係数, q_d : 浮上対象物の z 方向の変位に関する比例ゲイン, p_v : 微分ゲインである.

一方, 浮上対象物の水平 (x 軸, y 軸) 方向の運動に関しては, 前述したように端効果などによって不安定な系となっている. そのため, これまでの研究では, フィードフォワード的に指令信号を与えるだけで水平方向の位置を調整していた. しかしながら, そのような状態では, 水平方向の外乱に弱く, 水平方向の振動がなかなか減衰しないという問題があった. そこで, 本研究では, 水平方向の 2 自由度の並進運動に関しても, フィードバック制御を施すことにした. 図 7 は, 浮上対象物の水平方向の変位を検出するセンサ及び可変磁路機構の配置を示したものである. 図からわかるように, 両者の方向は一致していないので, モード制御を取り入れている. 具体的には, 二つの変位センサの出

力をコントローラに入力し, この信号に基づいて PD 補償入力を計算する. つぎに, 二つの補償入力を一つのベクトルとして合成し, さらにこれを可変磁路機構の方向の成分に分解することによって, 可変磁路機構への指令信号を求めている.

以上で述べた制御系の構成をまとめて図 8 に示す. なお, 以下に結果を示す実験では, PD 制御のチューニングは, 試行錯誤的に行った.

4. 実験結果

4・1 可変磁路機構の特性 最初に, 試作した可変磁路機構の特性を測定した. ここでは, 可変磁路機構 3 の結果を示す. 図 9 および図 10 は, 入力を e_3 , 出力を x_3 としたときの周波数応答を示している. 図 9 は無制御の状態で測定した結果で, 23Hz に共振点を持っていることがわかる. 可動部の質量 m は 164g なので, この結果から, ばね定数 k および粘性抵抗係数 c がつぎのように求められる.

$$k = 3.42 \times 10^3 \text{ [N/m]}, \quad c = 5.17 \text{ [Ns/m]}.$$

また, 実測した推力係数の値は, $K_v = 1.16 \text{ [N/A]}$ である. つぎに, 比例ゲイン p_d を

$$(a) p_d = 0.3 \times 10^{-3} \text{ [A/m]},$$

$$(b) p_d = 1.5 \times 10^{-3} \text{ [A/m]},$$

$$(c) p_d = 2.5 \times 10^{-3} \text{ [A/m]},$$

としたときの応答を図 10 に示す. なお, この実験では微分ゲインは $p_v = 0$ と設定している. 図から, (c) の場合には, 約 45Hz まで, 指令信号に対する遮束板変位の位相遅れがほとんどないことがわかる. ただし, 比例ゲインをこれ以上大きくするとフィードバック系が発散してしまうので, 単純な P 制御を用いる限りでは, 入力信号に対して可動部が遅れることなく追従できる限界であると考えられる. なお, 図 2 に示すような機

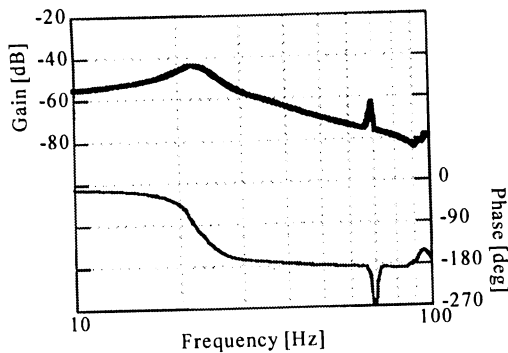


Fig.9 Frequency response of the flux path control mechanism 3.

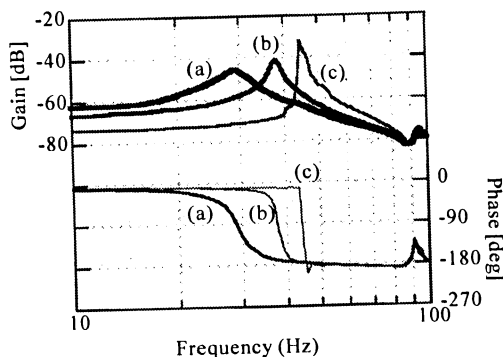


Fig.10 Frequency response of the flux path control mechanism 3 with a proportional feedback

構を用いたときには 35Hz 程度が限界であったので、速応性が改善されていることがわかる。

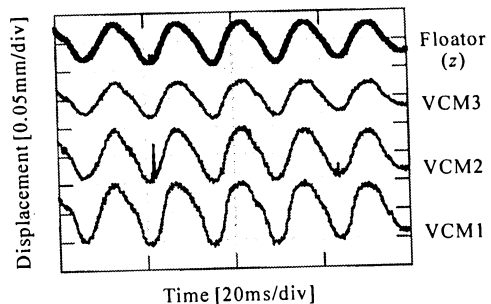
4・2 浮上実験と水平方向フィードバックの効果 つぎに、試作した実験装置を用いて、磁気浮上を達成した結果を図 11 に示す。この実験では、水平方向のフィードバックの効果を調べるため

(a) 水平方向の変位をフィードバックしない場合

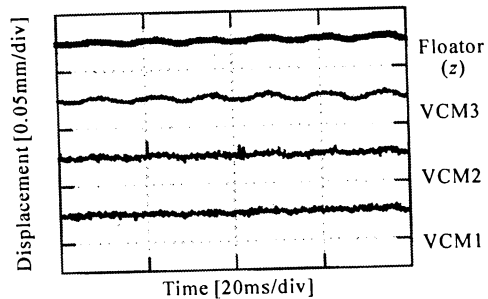
(b) 水平方向の変位をフィードバックする場合

を比較している。図から、(a)の場合には浮上対象物が約 25 μ m の振幅で振動しながら浮上しているのに対し、(b)の場合には振幅が約 1/5 に低減していることがわかる。なお、以下の実験は、いずれも水平方向の変位をフィードバックした状態でやっている。

また、z 軸方向の位置を指定する信号 e_z を矩形波として、ステップ応答を測定した結果を図 12 に示す。この実験では、変位フィードバックゲインは一定として、速度フィードバックゲインを (b) の場合は、(a) の場合の 2 倍としている。図から、速度フィードバックゲインを大きくすることによって減衰特性を改善できている



(a) Without lateral motion feedback



(b) With lateral motion feedback

Fig.11 Effects of lateral motion feedback

ことが確認できる。

つぎに、y 軸方向の位置を指定する信号 e_y を矩形波として、ステップ応答を測定した結果を図 13 に示す。図から、水平方向の運動においても良好な減衰特性が実現できていることがわかる。

4・3 浮上対象物の多次元マニピュレーション まず、xy 平面内で浮上対象物に閉軌道を描かせるため、

$$e_x = 0.09 \cos 2\pi t \text{ [A]}, \quad e_y = 0.064 \sin 2\pi t \text{ [A]}$$

としたときのリサーチを図 14 に示す。この結果から、これまでの磁路制御形磁気浮上装置^{(1),(2)}よりも滑らかに浮上対象物を動かせることが確認できる。ただし、位置を指定する信号 e_x 、 e_y と浮上対象物の変位 x 、 y との間に位相差がなければ、浮上対象物の軌道の長軸と短軸はそれぞれ x 軸、 y 軸と平行になるはずであるが、実際には軸が傾いたような軌道が観測されている。これは、位置を指定する信号に対して浮上対象物の運動が遅れているためであると考えられる。

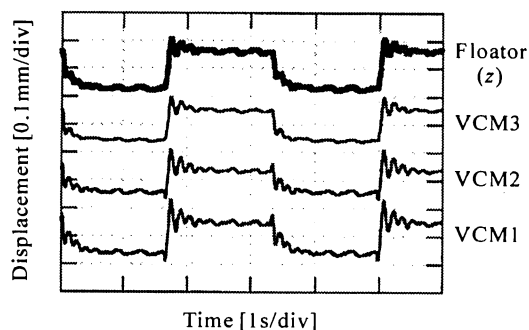
最後に、立体的なマニピュレーションを実現した結果を図 15 に示す。この実験では、

$$e_x = 0.1 \sin 2\pi t \text{ [A]},$$

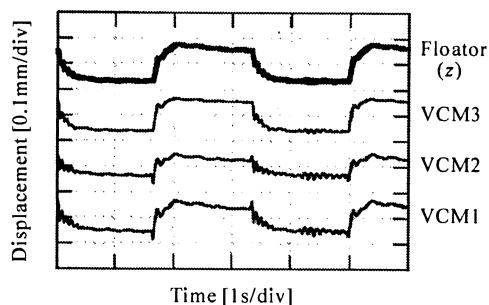
$$e_y = 0.078 \cos 2\pi t \text{ [A]},$$

$$e_z = 0.068 \cos 6\pi t \text{ [A]},$$

としている。図からわかるように、3 次元的な閉軌道を描かせることに成功している。



(a) Small derivative feedback



(b) Increased derivative feedback

Fig.12 Step response of the vertical motion control system

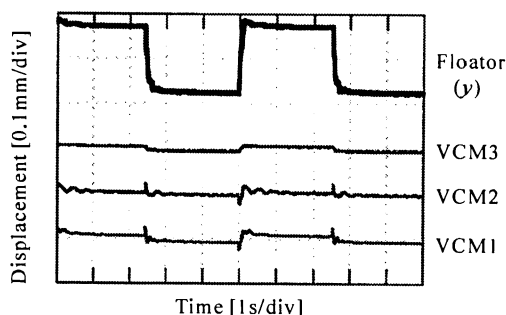


Fig.13 Step response in the y direction

5. 結 言

VCM をアクチュエータとする可変磁路機構を3台備えた磁路制御形磁気浮上装置を開発した。開発した可変磁路機構では、変位拡大機構を用いず、遮束板をVCMで直接駆動している。また、遮束板の変位を検出するのに、ゲージ型センサを用いている。この信号に基づいてP制御を施すことによって、約45Hzまで指令信号に遅れることなく追従できることを確認した。つぎに、可変磁路機構を3台用いて、実際に磁気浮上を実現した。浮上対象物の水平方向の変位もフィードバックすることによって、浮上しているときに発生す

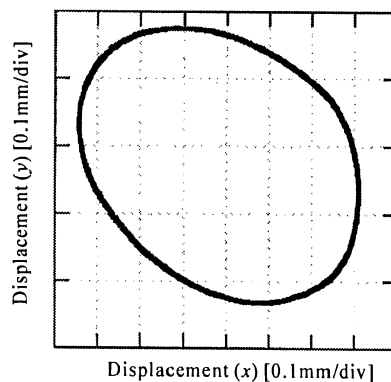


Fig.14 Circular motion of the floator in the x-y plane

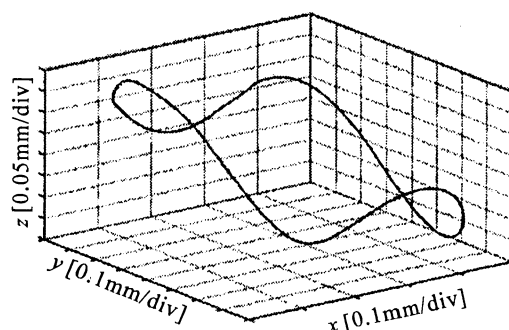


Fig.15 3-D manipulation of the floator

る微振動を小さくできることを実証した。さらに、位置指令信号として、正弦波・余弦波信号を与えることによって、浮上対象物を3次元的な閉軌道を描くように動かせることを示した。

本研究の結果によって、提案する磁路制御形磁気浮上の基本的な機能が把握できた。今後は、磁路制御形磁気浮上の大きな利点となる可能性のある「発生力の小さなアクチュエータを用いて質量の大きな物体を完全非接触支持する」ことを実証する予定である。

文 献

- (1) Jayawant, B.V., "Electromagnetic Levitation and Suspension Techniques", (1981), pp.1-17, Edard Arnold.
- (2) The Magnetic Levitation Technical Committee of the Institute of Electrical Engineers of Japan (IEE Japan) ed., "Magnetic Suspension Technology", (1993), pp.8-13, Corona Publishing Co., LTD.
- (3) Sabnis, A.V., Dendy, J.B. and F.M. Schmitt, "A Magnetically Suspended Large Momentum Wheel", J. Spacecraft, 12, (1975), pp.420-427.
- (4) Morishita, M., Azukizawa, T., Kanda, S., Tamura, N. and Yokoyama, T., "A New Maglev System for Magnetically Levitated Carrier System", IEEE Trans.

- Vehicular Technology, 38, No.4, (1989), pp.230-236.
- (5) Mizuno, T. and Yoshitomi, R., Vibration Isolation System Using Zero-Power Magnetic Suspension (1st report: Principles and Basic Experiments), Trans. Japan Society of Mechanical Engineers (JSME), Series C, Vol.68, NO.673 (2002), pp.2599-2604.
 - (6) Higuchi, T. and Oka, K., Reluctance Control Magnetic Suspension System (Suspension System with Permanent Magnet and Linear Actuator), Trans. IEE Japan, Vol.113-D, No.8, (1993), pp. 988-994.
 - (7) Oka, K., Higuchi, T. and Shiraishi, T., Hanging Type Mag-lev System with Permanent Magnet Motion Control, Trans. IEE Japan, Vol.119-D, No.3, (1999), pp.291-297.
 - (8) Ueno, T., Qiu, J. and Tani, J., Magnetic Force Control Based on the Inverse Magnetostrictive Effect, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.40, No.3 (2004), 1601-1605.
 - (9) Oka, K., Fujiwara, Y., Cui, T. and Mihara, T., Mag-lev System Using Permanent Magnet and Rotary Actuator, Proc. 47th Japan Joint Automatic Control Conference (2004), 316.
 - (10) Mizuno, T., Hirota, S., Takasaki, M. and Ishino, Y., Flux Path Control Magnetic Suspension (2nd report : Basic Experimental Study), Proc. 15th Symposium on Electromagnetics and Dynamics (2003), pp.641-642.
 - (11) Mizuno, T., Hoshino, H., Takasaki, M. and Ishino, Y., Flux Path Control Magnetic Suspension (3rd report : Control of Lateral Motion), Proc. 8th Symposium on Motion and Vibration Control (2003), pp.163-165.
 - (12) Mizuno, T., Hoshino, H., Takasaki, M. and Ishino, Y., Proposal and Basic Experimental Study of Flux Path Control Magnetic Suspension, Submitted to J. Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics.
-