

## 圧電素子による永久磁石の運動制御を利用した 反発形磁気軸受機構の開発\*

水野 毅<sup>\*1</sup>, 相澤光範<sup>\*2</sup>, 石野裕二<sup>\*3</sup>

### Repulsive Magnetic Bearing Using the Motion Control of Permanent Magnets by a Piezoelectric Actuator

Takeshi MIZUNO<sup>\*4</sup>, Mitsunori AIZAWA and Yuji ISHINO

<sup>\*4</sup> Department of Mechanical Engineering, Saitama University,  
255 Shimo-Okubo, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

A magnetic bearing system using forces of repulsion between permanent magnets was developed. In the developed magnetic bearing, the radial motions of the rotor were passively supported by repulsive forces. The motion in the axial direction, which is inherently unstable, was stabilized by using the motion control of the permanent magnets for passive radial suspension with a piezoelectric actuator. The maximum displacement of the actuator was 200  $\mu\text{m}$ . The developed magnetic bearing suspended a rotor without any mechanical contact. Its dynamic characteristics were studied experimentally. It was demonstrated that the rotor could follow stepwise command signal whose magnitude was within  $\pm 60 \mu\text{m}$  when I-PD control was applied.

**Key Words:** Magnetic Bearing, Piezo-Element, Positioning, Electromagnetic Actuator, Mechatronics, Motion Control, Permanent Magnet

#### 1. ま え が き

磁気浮上の代表的な方式の一つとして、永久磁石間の反発力を利用した方式がある。永久磁石反発形磁気浮上は、反発力が働く方向（浮上方向）には無制御でも安定であるが、反発力の方向と垂直な方向（横ずれ方向）には不安定な系となっている。

著者らは、支持側磁石の運動制御によって、浮上対象物の横ずれ方向の運動を安定化することを提案し<sup>①</sup>、倒立振子を模擬した基礎実験装置において実際に安定化できることを示している<sup>②</sup>。さらに、この原理を利用して、回転体を支持する永久磁石反発形磁気軸受の開発を行っている<sup>③</sup>。開発する磁気軸受は、回転体の

半径方向の4自由度の運動を永久磁石の反発力を利用して受動的に支持し、軸方向の1自由度の並進運動を支持側永久磁石の運動制御によって安定化する構造となっている。

これまでの研究では、上記のような構造の磁気軸受によって完全非接触支持が可能であることを実証することを主眼として、ストロークが比較的長いボイスコイルモータを運動制御用のアクチュエータとして利用していた<sup>④</sup>。これに対し、アクチュエータとして圧電素子を用いると、通常磁気軸受では不可欠な電磁石用のコイルを省くことができる。これは、マイクロ磁気軸受<sup>⑤</sup>のようにコイルを巻くことが技術的に容易でない場合には、大きなメリットとなる。また、発熱の問題も生じないので、将来、微小機械の非接触支持機構として利用されることが期待できる。

本研究は、磁石の運動制御用アクチュエータとして圧電素子を用いた磁気軸受を開発することを目的としている。これまでも、最大変位 46 $\mu\text{m}$  の圧電素子を

\* 原稿受付 2002年1月10日。

<sup>\*1</sup> 正員、埼玉大学工学部(☎338-8570)さいたま市下大久保255)。

<sup>\*2</sup> (株)アドバンテスト大和根R&Dセンター(☎349-1158)埼玉県北埼玉郡大和根町新利根1-5)。

<sup>\*3</sup> 埼玉大学工学部。

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

用いた磁気軸受の試作を行ったが、完全非接触浮上を達成することはできなかった<sup>6)</sup>。本研究では、新たに最大変位 200 $\mu\text{m}$  の圧電素子を用いた装置を試作して、完全非接触支持の実現を試みた。

本論文では、最初に、磁石の運動制御を利用した反発形磁気軸受の基本構造について述べる。つぎに、試作した圧電素子を利用した反発形磁気軸受の数学モデルを導出し、このモデルに基づいて、アキシャル方向の並進運動の制御方法について検討する。そして、試作した実験装置を用いて、アキシャル方向の運動をフィードバック制御によって安定化し、浮上対象物の非接触支持を実現した結果について示す。

## 2. 磁石の運動制御を利用した反発形磁気軸受の基本構造

磁石の運動制御を利用した永久磁石反発形磁気軸受の基本的な構造を図1に示す。これは、半径方向の4自由度の運動をリング状の永久磁石間の反発力によって受動的に支持し、アキシャル方向（横ずれ方向、図では垂直方向になる）の並進運動を支持側永久磁石の運動制御によって安定化している。前述したように、このような構成の磁気軸受において、アクチュエータとして圧電素子を用いる場合には、通常磁気軸受では不可欠な電磁石用のコイルを省くことができる。

## 3. モデル

**3.1 磁気軸受の概略** 試作した反発形磁気軸受装置の概略を図2に示す。構造的にはアウターロータ形で、浮上対象物（ロータ）の上部と下部にはリング状の永久磁石が取り付けられている。板ばねによって支持した2つの支持側の永久磁石は、圧電素子によってアキシャル方向に駆動される。

**3.2 基本方程式** ここでは、浮上対象物は半径方向に変位しないと仮定し、軸方向（横ずれ方向）の並進運動について解析する。図2に示した装置の物理モデルを図3に示す。浮上対象物に作用する重力と横ずれ力（図3では垂直方向）とがつり合っている状態を平衡状態とする。横ずれ力を負の剛性を持つばね力として扱うことにすると、平衡状態からの変動が微小な場合、この系の運動方程式は、次式のようになる。

$$m\ddot{x}_a = k_l(x_a - x_b) \dots\dots\dots (1)$$

$m$  : 浮上対象物の質量,

$x_a$  : 浮上対象物の変位,

$x_b$  : 支持部の変位,

$k_l$  : 浮上対象物と支持物体間の横ずれ係数.

本論文では、簡単のため、支持側磁石の変位  $x_b$  が近似

的に次式のように表されるとして、議論を進める。

$$x_b = k_e u \dots\dots\dots (2)$$

$k_e$  : アクチュエータの特性係数,

$u$  : アクチュエータの駆動電圧.

より厳密な議論を展開するには、アクチュエータのヒステリシス特性や駆動アンプの周波数特性などを考慮

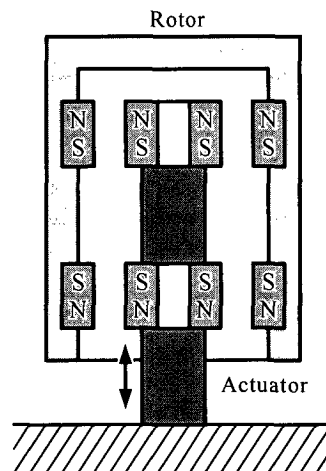


Fig.1 Repulsive-type magnetic bearing using the motion control of the magnets for support

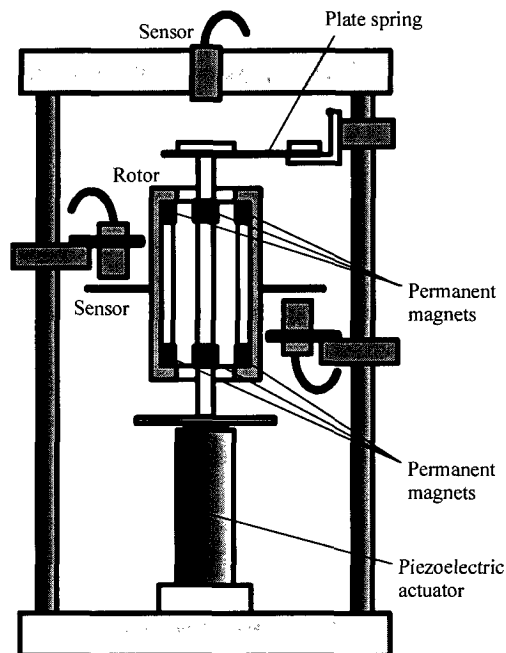


Fig.2 Schematic diagram of the developed magnetic bearing system with a piezoelectric actuator

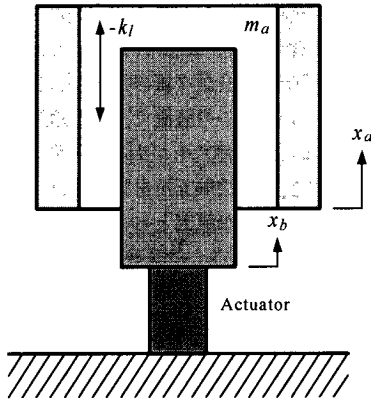


Fig.3 Basic model

しなければならない。

式(1), (2)から、浮上対象物の変位  $x_a$  に関する方程式は、次式のようになる。

$$m\ddot{x}_a = k_l x_a - k_l k_e u \dots\dots\dots (3)$$

4. 制御系の設計

4・1 PD 制御系 磁気浮上の制御で最も基本となる制御方式は、つぎのようなPD制御である。

$$u = K_p x_a + K_D \dot{x}_a + v \dots\dots\dots (4)$$

- $v$  : 補助入力信号
- $K_p$  : 変位フィードバックゲイン
- $K_D$  : 速度フィードバックゲイン

式(3), (4)から、補助入力信号  $v$  と浮上対象物の変位  $x_a$  との間の伝達関数  $G(s)$  は、次式のように求められる。

$$G(s) = \frac{-k_l k_e}{ms^2 + k_l k_e K_D s + k_l (k_e K_p - 1)} \dots\dots\dots (5)$$

式(5)から、

$$K_D > 0, \dots\dots\dots (6)$$

$$K_p > \frac{1}{k_e}, \dots\dots\dots (7)$$

を満たすようにすれば安定化できることがわかる。

本報では、極配置法を用いて各フィードバック係数を定める。閉ループ系の極を指定する多項式をつぎのように表すことにする。

$$t_d(s) = s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2 \dots\dots\dots (8)$$

式(5)と式(8)から、フィードバック係数  $K_p$ ,  $K_D$  は次式のように求められる。

$$K_p = \frac{1}{b_0} \left( \frac{k_l}{m} + \omega_0^2 \right) \dots\dots\dots (9)$$

$$K_D = \frac{2\zeta\omega_0}{b_0} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、

$$b_0 = \frac{k_l k_e}{m} \dots\dots\dots (11)$$

4・2 I-PD 制御系 アキシャル方向の運動について精度の良い位置制御を行うため、積分補償を導入する。ここでは、PID 制御に比較して外乱に強いことが指摘されている I-PD 制御を適用する。この場合、制御入力は、次式のように定められる。

$$u = K_I \int (x_a - x_r) dt + K_p x_a + K_D \dot{x}_a \dots\dots\dots (12)$$

- $x_r$  : 目標値
- $K_I$  : 積分フィードバックゲイン

式(3), (12)から、次式が得られる。

$$G_r(s) = \frac{X_a(s)}{X_r(s)} = \frac{k_l k_e K_I}{ms^3 + k_l k_e K_D s^2 + k_l (k_e K_p - 1)s + k_l k_e K_I} \dots\dots\dots (13)$$

ラウス・フルビッツの安定判別法を適用すると、

$$K_D > 0, \dots\dots\dots (14)$$

$$K_I > 0, \dots\dots\dots (15)$$

$$K_p - \frac{m}{k_l k_e} \cdot \frac{K_I}{K_D} > \frac{1}{k_e} \dots\dots\dots (16)$$

を満たすようにすれば安定化できることがわかる。

ここでは、PD 制御系と同様に、極配置法を用いて各フィードバック係数を定める。閉ループ系の極を指定する多項式を、つぎのように表すことにする。

$$t_d(s) = (s + \tau)(s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2) \dots\dots\dots (17)$$

式(12), (17)から、各フィードバック係数は、次式のように求められる。

$$K_I = \frac{\tau\omega_0^2}{b_0}, \dots\dots\dots (18)$$

$$K_p = \frac{\omega_0^2 + 2\tau\zeta\omega_0 + k_l}{b_0}, \dots\dots\dots (19)$$

$$K_D = \frac{\tau + 2\zeta\omega_0}{b_0} \dots\dots\dots (20)$$

## 5. 実 験

**5.1 実験装置** これまでの研究で試作した装置の概観を図4に示す<sup>4)</sup>。この装置では、アクチュエータとして最大変位 46 $\mu\text{m}$  の圧電素子を使用している。ま

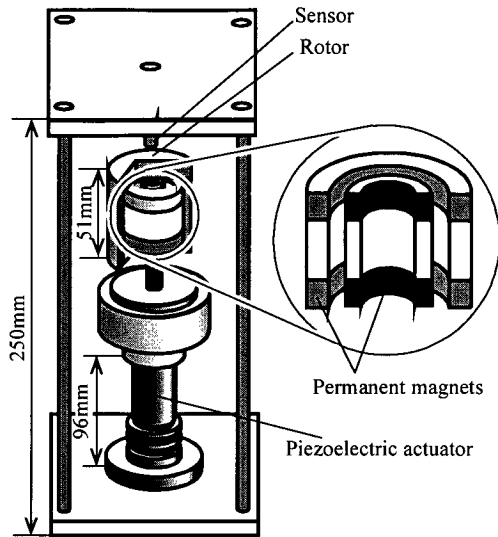


Fig.4 Apparatus developed in the previous work<sup>4)</sup>

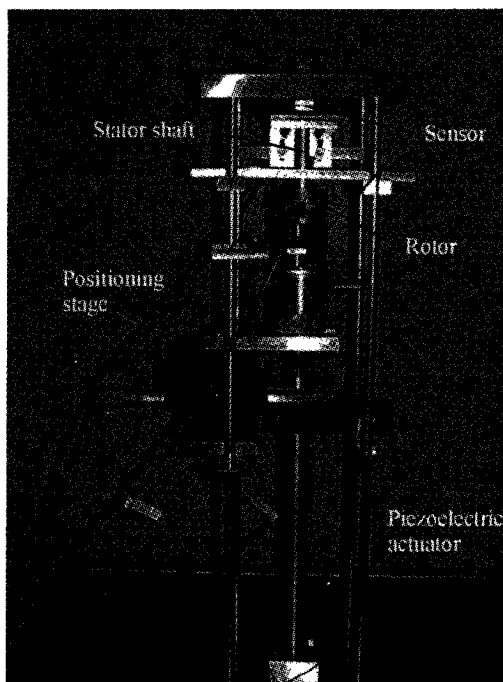


Fig.5 Photograph of a newly developed apparatus

た、浮上対象物は、高さ 51mm、外径 51mm、内径 32mm の中空の円筒で、質量は約 300g である。また、内部には、浮上用のリング状の永久磁石が上下に二つ取付けられている。この装置で、磁石の強さや上下の磁石の間隔および制御アルゴリズムを様々に調整して浮上対象物の完全非接触支持を試みたが、成功には至らなかった。その主な原因としては、支持側磁石の可動範囲が $\pm 23\mu\text{m}$ と小さく、浮上対象物の初期位置をこの範囲内に設定することが難しかったことが挙げられる。また、浮上対象物の外径に対して、上下に取付けられた浮上用磁石の間隔がそれほど大きくないので、浮上対象物の傾き運動を安定化しづらいという問題もあった。

そこで本研究では、以下のような改良を加えた装置の試作を行った。

- ①圧電素子として、より大変位が得られるものを使用する。
- ②浮上対象物の初期位置を精密に設定する機構を設ける。
- ③浮上対象物を、これまでに完全非接触支持に成功した装置<sup>9)</sup>のものと同形状とする。

あらたに試作した実験装置の概観を図5に示す。浮上対象物は、高さ 100mm、外径 40mm、内径 20mm、質量 215g で、内部には高さ 5mm、外径 26mm、内径 20mm の永久磁石が上下に二つ取付けられている。支持部には、浮上対象物の永久磁石と対応する位置に、高さ 5mm、外径 9mm、内径 6mm の永久磁石が二つ取付けられている。圧電素子としては、ストロークが 200 $\mu\text{m}$  のものを用いている。また、浮上対象物の垂直方向の初期位置は、図5に示されているような位置決めステージ (Positioning stage) によって、精密に設定できるようにしている。具体的には、ステージの可動部に取り付けられた U 字状の台に浮上対象物を載せ、平衡点付近まで送れるような構造となっている。

なお、浮上対象物の変位は、渦電流型センサで測定している。

**5.2 実験結果** 最初に、横ずれ係数を測定した結果について述べる。測定は、図6に示すような装置を用いて行った。具体的には、浮上対象物を位置決めステージ、支持側磁石をロードセルに取付け、それらの横ずれ方向の相対位置を位置決めステージで変化させながら、支持側磁石に作用する横ずれ力をロードセルで測定した。測定結果を図7に示す。得られた特性曲線を相対位置が $\pm 2\text{mm}$ の範囲で直線近似すると、横ずれ係数 $k_f$ が以下のように定められる。

$$k_f = 1.4 \times 10^3 \text{ [N/m]}$$

つぎに、使用した圧電素子の静特性を測定した結果を図8に示す。図からわかるように、印加電圧 600V のときに、最大変位 200 $\mu\text{m}$  が得られている。また、ヒ

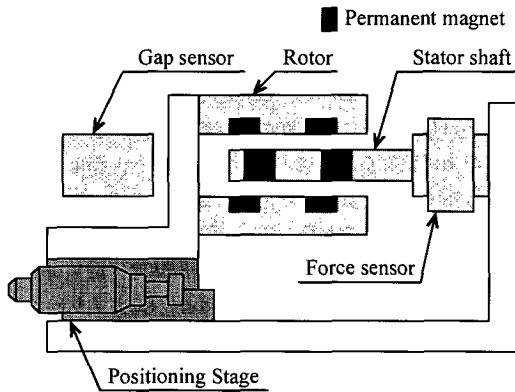


Fig.6 Setup for measuring lateral force

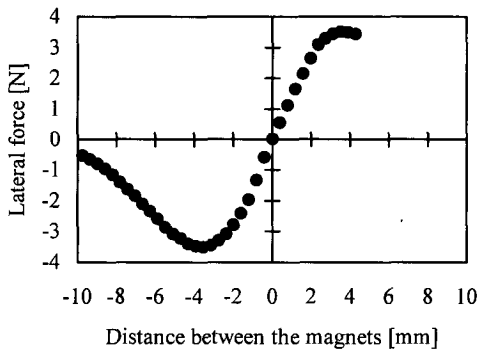


Fig.7 Measured lateral force

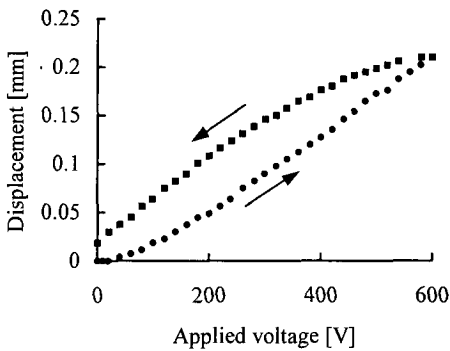


Fig.8 Static characteristics of the actuator

ステリシス特性を持っていることもわかる。以下の実験では、支持側磁石が平衡点を中心に正・負両方向に変位できるように、圧電素子に予め 300V の電圧を印加している。

PD 制御を施して完全非接触磁気浮上を実現したときのステップ応答を図9～図11に示す。ステップ応答を測定するときには、制御信号に重畳させて

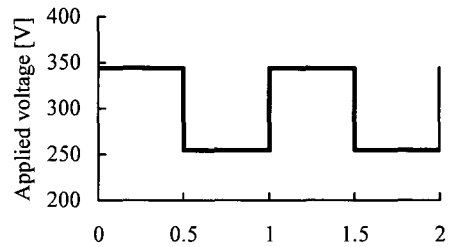
$$v(t) = \pm 45 \text{ [V]}$$

という矩形波を駆動信号として与えている。この実験では、閉ループ系の極を以下のように設定している。

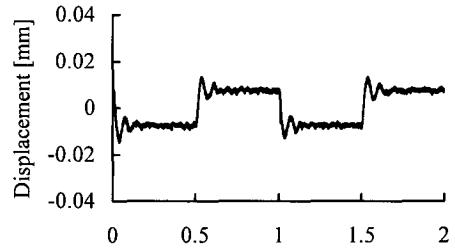
図9 :  $\omega_0 = 75.4 \text{ [rad/s]}$ ,  $\zeta = 0.7$ ,

図10 :  $\omega_0 = 94.2 \text{ [rad/s]}$ ,  $\zeta = 0.7$ ,

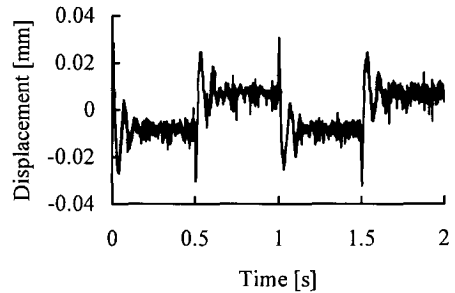
図11 :  $\omega_0 = 75.4 \text{ [rad/s]}$ ,  $\zeta = 1.0$ 。



(a) Applied voltage



(b) Motion of the rotor



(c) Motion of the stator shaft

Fig.9 Step response of a PD-controlled system

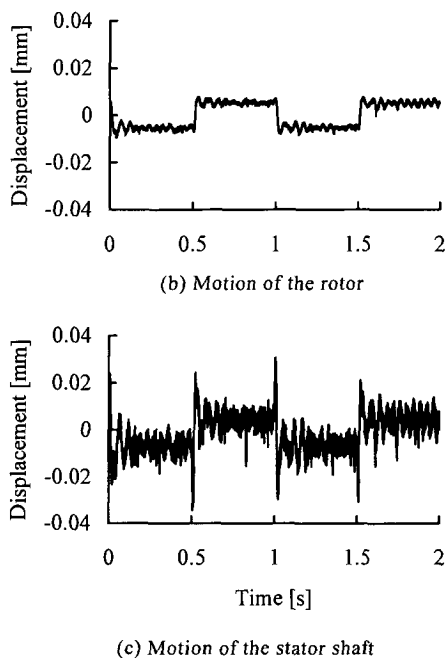


Fig.10 Step response of a PD-controlled system

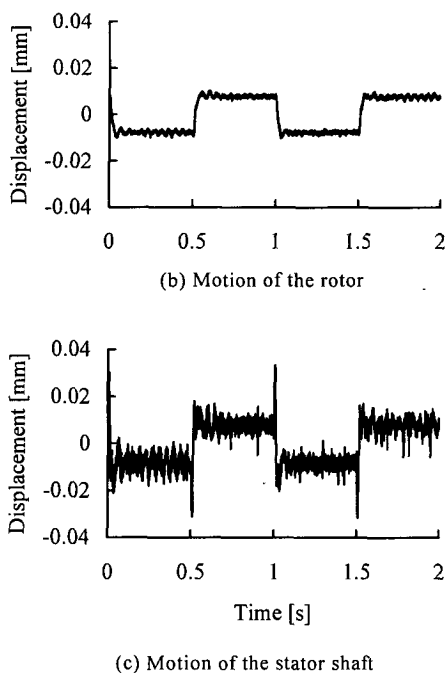


Fig.11 Step response of a PD-controlled system

図で、変位が 0 の状態は、駆動信号を重畳していないときの平衡位置（以下では、原点と呼ぶ）に対応している。また、図 10、図 11 では、(a)印加電圧のグラフを省いている。これらの図から、PD 制御系では、つぎのような応答をすることがわかる。駆動信号が負から正に切り替わると、支持部は、一旦、正方向に変位する。すると、横ずれ力の作用によって、浮上対象物は負方向に動き始める。支持部は、浮上対象物の運動に合わせるように、運動の向きを負方向に変え、やがて浮上対象物を追い越すに至る。すると、浮上対象物に作用する横ずれ力が正方向に変わるので、浮上対象物は正方向に動きを転じる。このような動作を繰り返して、最終的には、新たな位置で平衡状態に達する。その位置は、駆動信号が切り替わる前の位置より、負方向に存在する。このことは、式(5)の右辺の分子の符号がマイナスであることにも対応している。

図 9 と図 10 とを比較すると、駆動信号を重畳した場合の平衡位置は、 $\omega_0$  を大きく設定するほど、原点からのずれの大きさが小さくなっていることがわかる。これは、式(5)からも予測できるように、比例ゲイン  $K_p$  の大きさに起因するものである。

$$\text{図 9} : K_p = 1.64 \times 10^5 \text{ [V/m]},$$

$$\text{図 10} : K_p = 2.07 \times 10^5 \text{ [V/m]}.$$

このように、PD 制御では、定常偏差の大きさがフィードバックゲインに依存してしまうので、軸方向の位置の精密制御を行う場合には、つぎに述べる I-PD 制御系の方が適している。

図 9 と図 11 とを比較すると、 $\zeta$  を大きく設定することによって、減衰を大きくできることがわかる。いっぽう、定常状態での位置変動は、図 9 に比較して、図 10、図 11 の場合は、幾分大きくなってしまっている。これは、 $\omega_0$  や  $\zeta$  を大きく設定すると、よりハイゲインな系となり、フィードバック信号に含まれている雑音や、モデル化では無視した圧電素子のヒステリシス特性及び駆動アンプの位相遅れなどの影響が顕著になってくるためではないかと考えられる。

つぎに、補助制御入力を正弦波信号として、周波数応答  $G(j\omega)$  を測定した結果を図 12 に示す (式(5)参照)。ただし、位相については、 $-\angle G(j\omega)$  の値を示している。この実験では、閉ループ系の極を以下のように設定している。

$$(a) \omega_0 = 75.4 \text{ [rad/s]}, \quad \zeta = 0.7,$$

$$(b) \omega_0 = 113.0 \text{ [rad/s]}, \quad \zeta = 0.7.$$

この結果からも、極を変化させることにより浮上対象物の浮上特性を調整できることが確認できる。

つぎに、IPD 制御を適用した場合について述べる。まず、目標信号を矩形波としたときの応答を測定した。実験の結果、平衡点から±60μm までの範囲で目標信号に追従できることがわかった。目標値をこれより大きくすると、追従できなくなり、浮上対象物が落下してしまうことがあった。目標信号を追従限界値である±60μm と設定したときの浮上対象物と支持部の応答を図13に示す。ここで、系ループ系の極は、以下のよう

$$\tau = 50.2 [\text{rad/s}], \quad \omega_0 = 75.4 [\text{rad/s}], \quad \zeta = 0.7.$$

この図から、倒立振り子において水平方向の移動を行うときと類似した動きが実現されていることが確認できる。すなわち、目標値が切り替わった直後、支持側磁石は一旦目標値と逆方向に動き、横ずれ力を利用して追いかけるように浮上対象物を目標位置まで駆動していく。目標位置に静止させるときには、浮上対象物を追い越すことによって逆向き力を生じさせている。これは、PD 制御系の場合と同様な動作であるが、IPD 制御系では、最終的な位置を目標信号により直接設定できるという利点がある。

つぎに、目標信号を正弦波信号として、周波数応答  $G_r(j\omega)$  を測定した結果を図14に示す(式(13)参照)。この実験では、閉ループ系の極を以下のように設定している。

$$(a) \tau = 50.2 [\text{rad/s}], \quad \omega_0 = 62.8 [\text{rad/s}], \quad \zeta = 0.7,$$

$$(b) \tau = 50.2 [\text{rad/s}], \quad \omega_0 = 75.4 [\text{rad/s}], \quad \zeta = 0.7.$$

図から、 $\omega_0$  を大きく設定することによって、目標値に追従できる周波数帯域が幾分広がっていることがわかる。このことから、 $\omega_0$  や  $\tau$  をより大きく設定することによって、速応性を向上させることができると予想されるが、実際には、フィードバックゲインが大きくなるため、閉ループ系の挙動が振動的になってしまうなどの問題が生じた。この原因としては、PD 制御系の場合と同様に、フィードバック信号に含まれている雑音や、圧電素子のヒステリシス特性および駆動アンプの位相遅れなどの影響が挙げられる。現状のハードウェアのままで、より速応性の高い系を実現するには、これらの影響を考慮した制御方法を工夫することが必要であると考えられる。

### 6. 結 言

磁石の運動制御を利用する方式の永久磁石反発形磁

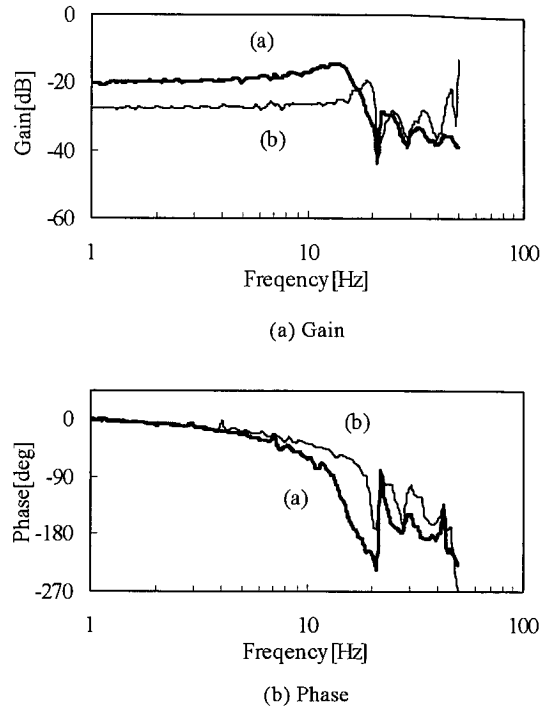


Fig.12 Frequency response of PD-controlled systems

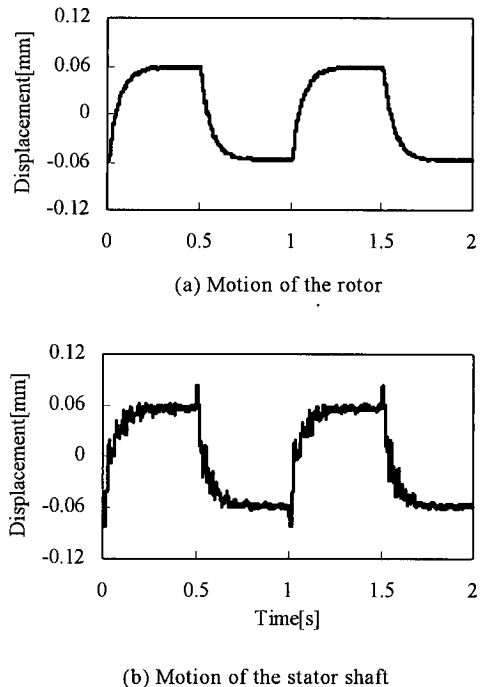


Fig.13 Step response of an I-PD control system

気軸受において、運動制御用アクチュエータとしてストローク 200 $\mu\text{m}$  の圧電素子を用いて、浮上対象物の完全非接触浮上を実現した。また、I-PD 制御を適用した場合、平衡点から $\pm 60\mu\text{m}$  までの範囲でステップ状の目標信号に追従できることを確認した。

なお、ストローク 90 $\mu\text{m}$  の圧電素子を用いて、浮上対象物の完全非接触浮上を実現することにも成功している<sup>6)</sup>。

## 文 献

- (1) Mizuno, T., Ouchi, T., and Araki, K.: Repulsive Magnetic Levitation Systems with Magnets Driven by Actuators, Proc. 2nd Japan-France Congress on Mechatronics, (1994), 759.
- (2) 水野, 関口, 大内, 荒木: 永久磁石反発形磁気浮上系の横ずれ方向の安定化について, 第4回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, (1995), 29.
- (3) 水野, 関口, 荒木: 磁石の運動制御を利用した反発形磁気軸受に関する研究(アキシャル方向の安定化制御), 日本機軸学会論文集(C編), 64-628, (1998), 4717.
- (4) Bleuler, H., (訳) 水野: マイクロ磁気軸受, 日本機械学会誌, 100-943, (1997), 604.
- (5) Mizuno, T. and Ueki, K.: Repulsive Magnetic Levitation System Using a Piezoelectric Actuator for the Motion Control of Levitation Magnets, Proc. 4th International Conference on Motion and Vibration Control, (1998), 1107.
- (6) 相澤: 圧電素子による磁石の運動制御を利用した反発形磁気軸受, 平成 12 年度埼玉大学大学院理工学研究科修士論文(2001).

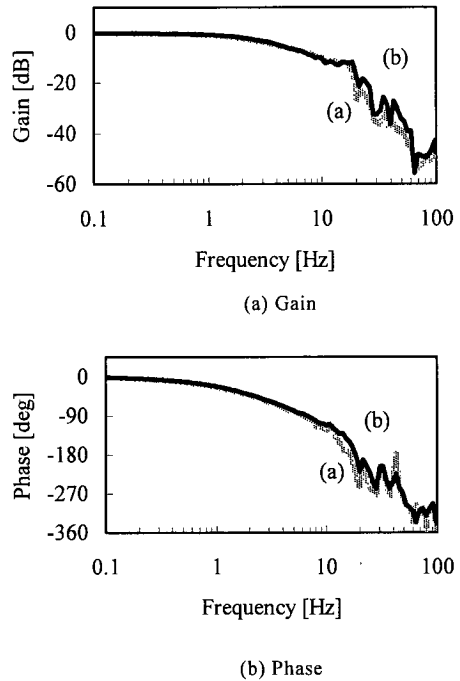


Fig.14 Frequency response of I-PD control systems