

永久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)

水野 毅^{*1}, 関口 秀樹^{*2}, 荒木 獻次^{*1}

Repulsive Magnetic Bearing Using Motion Control of Permanent Magnets (Stabilization in the Axial Direction)

Takeshi MIZUNO, Hideki SEKIGUCHI and Kenji ARAKI

A magnetic bearing system using forces of repulsion between permanent magnets is developed. In the developed system, the radial motions of the rotor are passively supported by repulsive force. The suspension system of such configuration is inherently unstable in the axial direction so that it is stabilized by using motion control of the permanent magnets for passive radial suspension; these magnets are driven by voice coil motors according to the motion of the rotor in the axial direction. The characteristics of the system are studied both theoretically and experimentally. The experimental results demonstrated that the developed magnetic bearing can suspend a rotating mass without any mechanical contact, and realize positioning control of the rotor in the axial direction.

Key Words: Magnetic Bearing, Motion Control, Actuator, Analog Control, Positioning, Permanent Magnet, Repulsive Force

1. 緒 言

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という利点を持つが、一般に減衰特性が悪く、浮上力も調整できないので単独では微小移動機能を実現できない。また、反発力の方向と垂直な方向（横ずれ方向）には不安定であるという問題を持っている。

これらの問題を解決するため、著者らは、支持側永久磁石をアクチュエータで駆動する新しい形式の反発形磁気浮上機構を提案している。具体的には、浮上方向にアクチュエータを挿入することによって、浮上方向の位置と振動の精密制御が実現できることを実証している¹⁾。また、横ずれ方向にアクチュエータを挿入することによって、倒立振子と同じ原理によって、横ずれ方向の運動を安定化できることを指摘している²⁾。

本研究では、磁石の運動制御による横ずれ方向の安定化の原理を応用して、回転体を支持する永久磁石反発形軸受を実現し、その特性を把握することを目的とする。具体的には、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、アキシャル方向の1自由度の並進運動を支持側の永久磁石の運動制御を利用して安定化する。

本稿では、まず、永久磁石反発形磁気浮上における横ずれ方向の安定化の原理とこれを利用した磁気軸受機構について述べる。つぎに運動制御用のアクチュエータとしてボイスコイルモータを利用した装置を想定したモデルに基づいて、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、回転体の非接触支持が実現できることを示す。

2. 永久磁石反発形磁気浮上系の横ずれ方向の安定化

永久磁石間の反発力を利用する浮上機構は、反発力の働く方向と垂直な方向（横ずれ方向）には、不安定な系である。これに対し、図1(a)に示すように、横ずれ方向に支持側永久磁石をアクチュエータで駆動制御することによって、系を安定化することが可能となる。この機構の動作原理は、何もしないと平衡点から横方向にずれていってしまう浮上対象物を、その動きに基づいて支持側の永久磁石を動かすことによって、ずれていかないようにするというものである。この動作原理は、図1(b)に示すように、支点の水平方向の動きによって棒が倒れないようにする倒立振子の原理と類似

* 1997年6月25日 第9回電磁気関連のダイナミックスシンポジウムにおいて講演、原稿受付 1998年2月12日。

^{*1} 正員、埼玉大学工学部(☎338-8570 浦和市下大久保255)。

^{*2} カヤバ工業(株)(☎228-0828 相模原市麻溝台1-12-1)。

している。

このような磁気浮上機構を利用すると、反発力による受動的な支持と横ずれ方向の能動的な支持との組み合わせによって、いろいろな形式の浮上機構が可能となる。図2は、これを回転体を支持する磁気軸受に応用したもので、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する。

図2に示した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、通常の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。また、発熱の問題も生じない。したがって、将来、マイクロマシン用の非接触支持機構として用いられる可能性を持っている。

そこで、本論文では、図2に示すような方式の磁気軸受によって、実際に回転体を完全非接触に支持することができることを示すため、アキシャル方向の運動の安定化について検討する。

3. モデル化

対象とする磁気軸受の基本モデルを図3に示す。ここでは、浮上対象物は半径方向に変位しないと仮定し、アキシャル方向（横ずれ方向）の並進運動について解析する。

リング状の支持側永久磁石は、ばね k_p と減衰要素 c_p を介してベースに結合され、これらと並列に設置されたアクチュエータから制御力 F_a を受けているとする。これは、後述するように、試作した装置では、磁石を板ばねで支持し、運動制御用アクチュエータとしてボイスコイルモータを用いていることに対応している。

浮上対象物に作用する重力と、永久磁石による横ずれ力（図3では垂直方向）とが釣り合っている状態（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、次式ようになる。

$$m_a \ddot{z}_a = k_l (z_a - z_p) \quad (1)$$

$$m_p \ddot{z}_p = k_l (z_p - z_a) - c_p \dot{z}_p - k_p z_p + F_p \quad (2)$$

ここで、

z_a : 浮上対象物の変位、

z_p : 支持側永久磁石の変位、

m_a : 浮上対象物の質量、

m_p : アクチュエータで駆動する支持部の質量、

k_l : 浮上対象物と支持物体間の横ずれ係数。

アクチュエータの制御力 F_p は、駆動回路によって操作入力 u に比例して変化するように制御されているもの

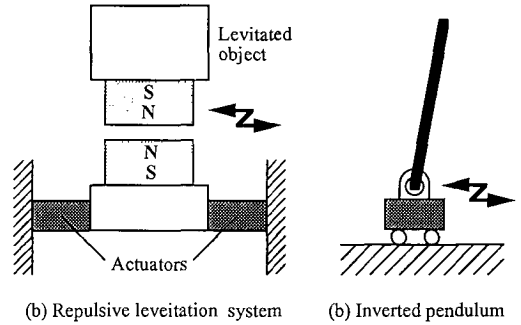


Fig.1 Stabilization using motion of the support

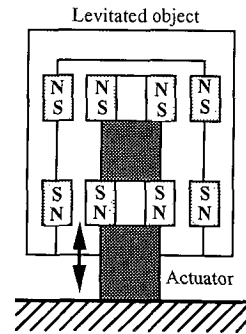


Fig.2 Stabilization of the axial motion using the motion control of magnets in a radially passive magnetic bearing

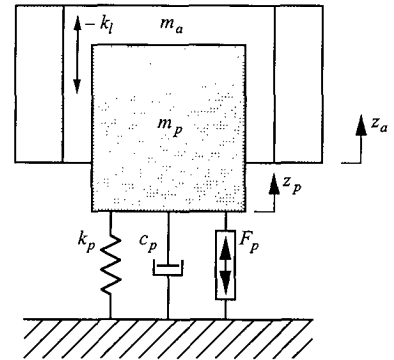


Fig.3 Basic model (k_l : lateral factor)

とする。

$$F_p(t) = k_a u(t) \quad (3)$$

ここで、

k_a : 駆動回路のゲイン

式(1)-(3)から、制御入力と浮上対象物の変位との間の伝達関数 $G_a(s)$ を求めると、次式のようになる。

$$G_a(s) \equiv \frac{Z_a(s)}{U(s)} = -\frac{k_a k_I}{t_o(s)} \quad (4)$$

ここで、

$$t_o(s) = m_a m_p s^4 + m_a c_p s^3 + \{m_a k_p - (m_a + m_p) k_I\} s^2 - k_I c_p s - k_I k_p \quad (5)$$

式(5)からわかるように、この系は、無制御では不安定である。したがって、安定な浮上状態を実現するには、何らかのフィードバック制御を施す必要がある。

4. 制御系の設計

本論文では、出力フィードバックの効果について検討する。すなわち、制御入力 $u(t)$ は、浮上対象物の変位 (z_a) から定め、支持側磁石部の変位 (z_p) はフィードバック制御には用いない。

4.1 PD制御 磁気浮上の制御において最も基本となる制御方式はPD制御である。具体的には、制御入力を次式のように定める。

$$u(t) = p_d z_a(t) + p_v \dot{z}_a(t) + v(t) \quad (6)$$

ここで、

p_d, p_v : 変位、速度フィードバック係数

また、 $v(t)$ は、 $u(t)$ に代わる新たな制御入力で、閉ループ系の動特性を測定するときに加えられる入力信号などを表している。式(6)を(4)に代入し、整理すると閉ループ系の伝達関数 $G_c(s)$ が次式のように求められる。

$$G_c(s) \equiv \frac{Z_a(s)}{V(s)} = -\frac{k_a k_I}{t_c(s)} \quad (7)$$

ここで、

$$t_c(s) = m_a m_p s^4 + m_a c_p s^3 + \{m_a k_p - (m_a + m_p) k_I\} s^2 + k_I (k_a p_v - c_p) s + k_I (k_a p_d - k_p + k_I) \quad (8)$$

式(8)から、PD制御によって安定化するためには、

$$c_p > 0 \quad (9)$$

$$k_p > (1 + \frac{m_p}{m_a}) k_I \quad (10)$$

を満たすように、永久磁石を支持するばね・減衰要素を選ぶ必要があることがわかる。逆に、式(9)、(10)が成立しているときには、変位・速度フィードバック係数を適切に選ぶことによって安定化できる³⁾。

4.2 I-PD制御 浮上対象物の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には、積分補償を導入する必要がある。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⁹⁾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。

$$u(t) = -p_I \int (z_r(t) - z_a(t)) dt + p_d z_a(t) + p_v \dot{z}_a(t) \quad (11)$$

ここで、

z_r : 目標値

式(1)、(2)、(3)、(11)から、次式が得られる。

$$G_r(s) \equiv \frac{Z_a(s)}{Z_r(s)} = \frac{k_a k_I p_I}{t_r(s)} \quad (12)$$

ただし、

$$t_r(s) = m_a m_p s^5 + m_a c_p s^4 + \{m_a k_p - (m_a + m_p) k_I\} s^3 + k_I (k_a p_v - c_p) s^2 + k_I (k_a p_d - k_p + k_I) s + k_I k_a p_I \quad (13)$$

この場合も、式(7)、(8)が成立していれば、フィードバック係数 p_I, p_d, p_v を適切に選ぶことによって閉ループ系を安定化することができる。

5. 実験

5.1 実験装置 試作した実験装置の概略を図4に示す、また、装置全体の外観を図5に示す。この装置では、磁石の運動制御用アクチュエータとして、制御性が良く、可動範囲が固体アクチュエータと比較して大きいボイスコイルモータを使用している。なお、図5では、装置の構成を見やすくするため、ボイスコイルモータを実際に動作させるときより浮上対象物から離れた位置に取り付けた状態を示している。

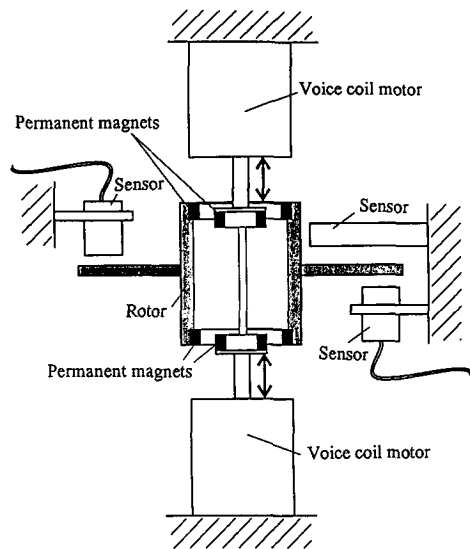


Fig.4 A schematic drawing of the experimental instrument

軸受部の構造は、支持側の磁石は内側、浮上対象物（ロータ）は外側という、いわゆるアウトロータ形となっている。浮上対象物の外観を図6に示す。浮上対象物は、質量353g、長さ105mm、直径40mmで、中央部には軸方向の変位を検出するため、直径100mmの円盤状のターゲットが取り付けられている。また、浮上対象物の上部と下部には外径34 [mm]、内径24 [mm]のリング状の希土類永久磁石が取り付けられている。

2個の支持側永久磁石(外径12 [mm]、内径7 [mm])は、それぞれ、ストローク10mmのボイスコイルモータによって軸方向（垂直方向）に駆動される。ただし、本実験では、実験装置の上下に取り付けた2つのボイスコイルモータの動きを機械的に拘束し、同位相の運動をするようにしている。また、図4には示されていないが、式(9)、(10)が成立するように、磁石は板ばねによっても支持されている。

ボイスコイルモータの駆動回路には、式(3)が成立するように電流出力形アンプを使用している。また、浮上対象物の軸方向および半径方向の変位は、渦電流形変位センサによって検出している。軸方向の変位については、浮上対象物の傾き運動の影響を受けないようにするため、図4に示すように2つのセンサを用いて、その出力の差を検出信号としている。

実験装置の各パラメータの値をまとめて表1に示す。この表で、横ずれ係数 k_l の値は、永久磁石の相対位置と横ずれ力との関係を実測し、その結果から推定した

ものである。

5.2 実験結果 最初に、PD制御を実施したときの結果について述べる。フィードバックゲインを

$$p_d = 3.34 \times 10^3 \text{ A/m},$$

$$p_v = 5.79 \text{ As/m},$$



Fig.6 A photograph of the rotor

Table 1 Parameters of the experimental instrument

m_a	0.353 kg
m_p	0.340 kg
k_p	$7.23 \times 10^4 \text{ N/m}$
c_p	15.2 Ns/m
k_l	$2.92 \times 10^3 \text{ N/m}$
k_a	9.80 N/A



Fig.5 A photograph of the experimental instrument

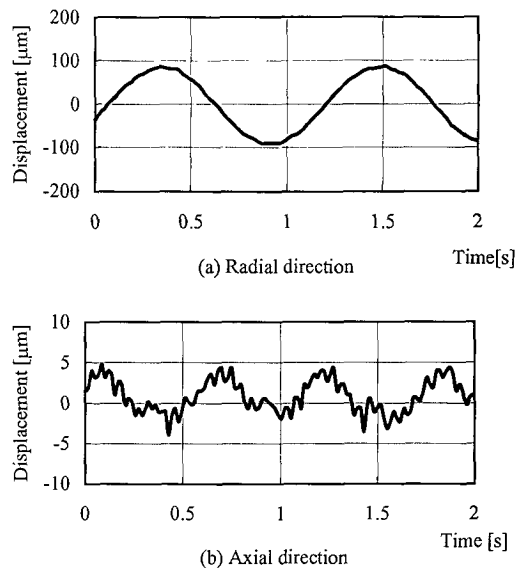


Fig.7 Motion of the rotor at a rotational speed of 51 rpm when PD controller is used

として、完全非接触支持を実現し、浮上対象物を約50rpmで回転させたときの浮上対象物の軸方向および半径方向の変位を図7に示す。ただし、試作した装置では、モータは組み込んでないので、外部から適当な駆動トルクを与えた後、惰性で回っている状態での測定結果を示している。この結果から、半径方向の振れ回りが90 μm 程度であるのに対し、軸方向の変動は5 μm 以下であることがわかる。半径方向の振れ回りがかなり大きくなっているのは、浮上対象物のつり合わせは行わなかったため、浮上対象物に存在する不つり合いの影響のためであると考えられる。また、軸方向の運動には、約2Hzの成分が顕著に観察されているが、これは浮上対象物を回転させる際に傾き振動が生じ、2つのセンサを差動動作させているにもかかわらず、その成分が軸方向の変位の検出信号にある程度含まれてしまっているためであると推測される。

つぎに、軸方向の運動制御系について、周波数応答 $G_c(j\omega)$ を測定した結果を図8に示す。ただし、位相については、 $\angle -G_c(j\omega)$ の値を示している。入力信号としては、振幅50mAに相当する正弦波信号を用いている。この実験では、微分ゲイン p_v は、9.11As/mに固定し、比例ゲイン p_d を

- (a) $p_d = 2.64 \times 10^3 \text{ A/m}$
- (b) $p_d = 4.80 \times 10^3 \text{ A/m}$

の2とおりに変化させている。図から、周波数が比較的高いところ(100Hz付近)では、低周波領域と比較して位相が360°遅れており、式(7)で表されるような4次系の特性を持っていることが確認できる。また、比例ゲインを大きくすると、1次の共振周波数が(a)8.5Hzから(b)18.8Hzに高くなることがわかる。

図9は、比例ゲイン p_d を $2.64 \times 10^3 \text{ A/m}$ として、微分ゲインを

- (a) $p_v = 2.11 \text{ As/m}$
- (b) $p_v = 9.11 \text{ As/m}$

と変化させたときの周波数応答である。図から、微分ゲインを大きくすると、共振ピークが下がり、減衰を大きくする効果があることがわかる。

つぎに、I-PD制御系についての結果を示す。フィードバックゲインを

- $p_i = 4.08 \times 10^6 \text{ A/ms}$,
- $p_d = 5.81 \times 10^3 \text{ A/m}$,
- $p_v = 32.8 \text{ As/m}$,

とした制御系において、目標値 z_r を $\pm 25\mu\text{m}$ の矩形波状に変化させたときの応答を図10に示す。目標値が切り替わった直後(図で、 t_a で示した時点)、支持側磁石はいったん目標値とは逆方向に動き、横ずれ力を利用

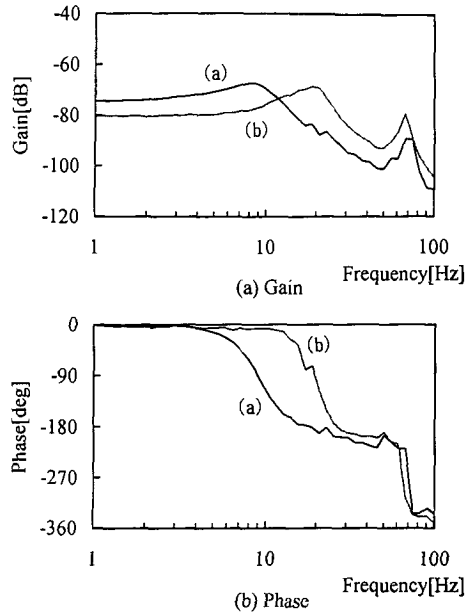


Fig.8 Frequency responses of the rotor displacement to disturbance input when PD control is applied.

- (a) $p_d = 2.64 \times 10^3 \text{ A/m}$, $p_v = 9.11 \text{ As/m}$.
- (b) $p_d = 4.80 \times 10^3 \text{ A/m}$, $p_v = 9.11 \text{ As/m}$.

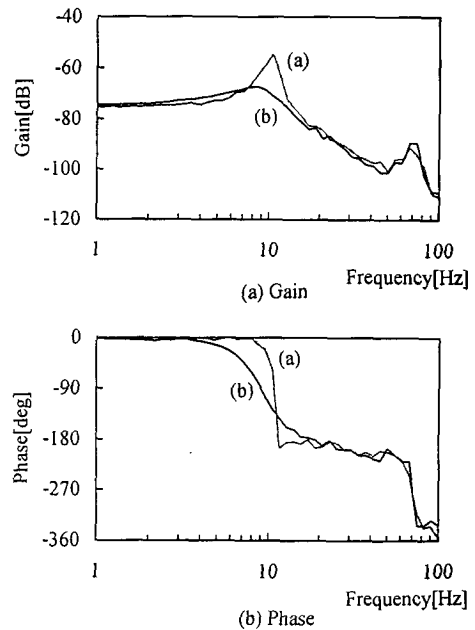


Fig.9 Frequency responses of the rotor displacement to disturbance input when PD control is applied.

- (a) $p_d = 2.64 \times 10^3 \text{ A/m}$, $p_v = 2.11 \text{ As/m}$.
- (b) $p_d = 2.64 \times 10^3 \text{ A/m}$, $p_v = 9.11 \text{ As/m}$.

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。浮上対象物が目標位置を通り過ぎてしまうと、これを追い越すことによって目標位置への復元力が生じるようにし、最終的には指令値に収束させていることがわかる。このような動作は、倒立振り子において水平方向の移動を行う場合と類似した動きとなっている。

以上の結果から、開発した磁気軸受機構において、回転体を完全非接触支持できること、およびアキシャル方向の位置決め制御を実現できることが確認できる。

6. 結 言

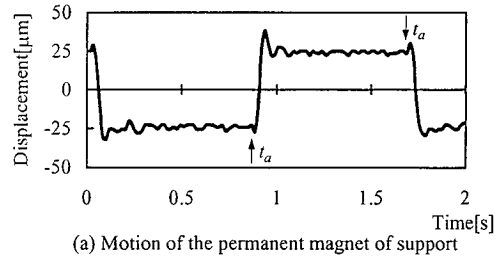
支持側磁石の運動制御によってアキシャル方向の運動を安定化する形式の永久磁石反発形磁気軸受装置を試作した。試作した装置では、運動制御用アクチュエータとしてボイスコイルモータを用いた。アキシャル方向の運動の制御にPD制御およびI-PD制御を適用して、以下のことを実験的に確認した。

- (1) 実際に回転体を完全非接触で支持できること。
- (2) アキシャル方向の軸受特性がフィードバックゲインによって調整できること。
- (3) アキシャル方向の位置決め制御が実現できること。

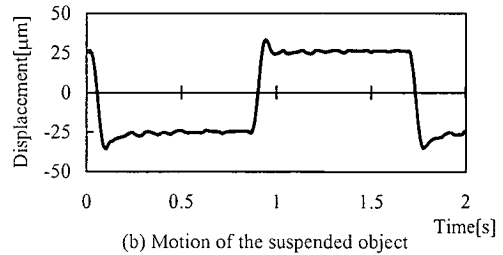
今後、より高性能な特性を実現するため、装置および制御方法を改良していく予定である。

文 献

- (1) 水野, 大内, 石野, 荒木: 磁石の運動制御を利用した反発形磁気浮上機構, 機論, 61-589, C(1995), 3587.
- (2) Mizuno, T., Sekiguchi, H., and Araki, K., Repulsive Magnetic Levitation Systems Using Motion Control of Magnets, *Proc. 5th Int. Symp. on Magnetic Bearings*, (1996), 473.
- (3) 岡, 樋口: リラクタンس制御形磁気浮上システム, 電気学会論文誌, 113-8, D(1993), 988.
- (4) 原: PID形制御系とI-PD形制御系の特性比較と設計指針, 計測自動制御学会論文集, 20-8(1984), 691.



(a) Motion of the permanent magnet of support



(b) Motion of the suspended object

Fig.10 Step response of the closed-loop system with I-PD controller