

第6回

知能メカトロニクスワークショップ
——人間を支援するメカトロニクス技術——
講演論文集

平成13年8月30日（木）—31日（金）
香川大学工学部

ISBN 4-921073-04-X

主 催
精密工学会

共 催
香川大学工学部／IEEE 四国セクション／計測自動制御学会四国支部

共同企画
知能メカトロニクス専門委員会（精密工学会）／メカトロニクス専門委員会（精密工学会）／
画像応用技術専門委員会（精密工学会）／非整備環境におけるパターン認識の適用拡大
協同研究委員会（電気学会）／マシンビジョン活用技術委員会（電気学会）／
パターン計測部会（計測自動制御学会）／画像処理特別研究委員会（非破壊検査協会）

協 賛
日本機械学会／電気学会／日本ロボット学会／電子情報通信学会／
計測自動制御学会／情報処理学会

永久磁石の運動制御を用いた2自由度磁気浮上の安定化

Stability of 2 DOF magnetic suspension
with control of permanent magnet motion

岡 宏一*, 政木 慶次**

Koichi OKA* and Keiji MASAKI**

高知工科大学知能機械システム工学科, *oka.koichi@kochi-tech.ac.jp

**055060h@gs.kochi-tech.ac.jp

概要: 能動形磁気浮上の一つの方式として, 永久磁石の運動を制御して浮上体との空隙を調整し吸引力を制御する方法がある. この浮上方式を用いて微小物体の操りを目的とした2自由度磁気浮上システムについて述べる. 浮上システムの実験装置を紹介し, そのモデル化を行う. モデルに基づいてシステムの安定性を線形制御理論と数値シミュレーションにより1自由度浮上システムと比較する.

1. はじめに

永久磁石をアクチュエータで制御することにより, 強磁性体の非接触浮上が可能である [1]. この浮上機構の原理は, 永久磁石と浮上体の空隙を調整することにより, その間に働く支持力を制御して非接触浮上を行わせるものである. この浮上機構を応用して種々の1自由度浮上システムが提案されている [2] [3] [4]. また, この浮上方式は永久磁石を用いるのでコイルの体積が不要であることや永久磁石の駆動機構を浮上体周辺に配置する必要がないことなどの特徴を持つため, 微小物体の非接触把持に有効に利用することが考えられる. 非接触把持を考えた場合, 横方向の安定性, 対象物の形状への対応, 操り動作などの点から現在提案されている1自由度浮上システムでは不十分であり, 2自由度, 3自由度の浮上機構を考える必要がある. このように多自由度にした場合, 永久磁石を用いた浮上方式では磁路が閉じる構成になっていない, 浮上体の大きさに対して空隙が比較的長いことなどを考慮する必要があり, ラジアル形の磁気軸受のように各支持力を独立に考えることができない可能性がある.

本報告では操りのための多自由度化のステップとして, 垂直平面内に浮上機構を2つ配置した2自由度の浮上機構を考察の対象とする. まず, 2自由度浮上システムの試作装置を紹介する. 次に試作装置のモデル化を行う. そのモデルに従って線形制御理論の立場からシステムを安定化することのできるフィードバックゲインを求め, モデルに基づいた数値シミュレーションを行う. これら

の結果を, 1自由度浮上システムと比較し2自由度浮上システムの実現のための検討を行う.

2. 2自由度浮上装置

試作した2自由度浮上装置の写真を図1に示す. 2つのボイスコイルモータ形のアクチュエータを持ち, それぞれが永久磁石を駆動するようになっている. アクチュエータは鉛直に立てられた半円形のレールに取付けられており, その取付け位置によって永久磁石の駆動方向を調整可能である. 浮上体は鉄球であり, それを2つの永久磁石でひっぱりあげるような形式となっている. すなわち, 永久磁石は, 鉄球を中心とした半径方向にアクチュエータによって駆動される. 永久磁石の動き, および浮上体の動きはセンサによって検出可能である.

図1に示されるような2自由度浮上システムを考察するための概略図を図2に示す. 図2には, 2自由度および1自由度浮上装置の概略を示してある. 2自由度浮上装置では, O が原点であり, (x, y) で示される球形のものが浮上体である. 浮上体は重力の影響を鉛直下向きに受ける. X 軸, Y 軸にある長方形のものは永久磁石を表しており, それぞれの軸上を可動であるものとする. 両軸は鉛直方向から $\pi/4$ だけ傾いているものとする. 浮上体に働く永久磁石の吸引力は, 浮上体の中心位置と永久磁石の先端の間に働くものとし, その強さは浮上体と永久磁石の先端の距離の二乗に反比例するものとする. 浮上体の大きさは無視できるものとし, 永久磁石の横方

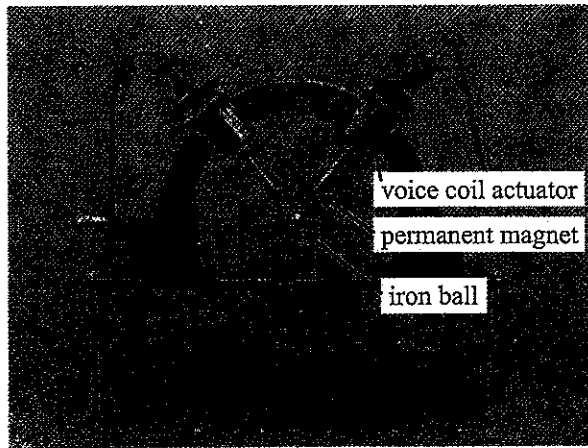


図 1 2自由度磁気浮上システム試作装置

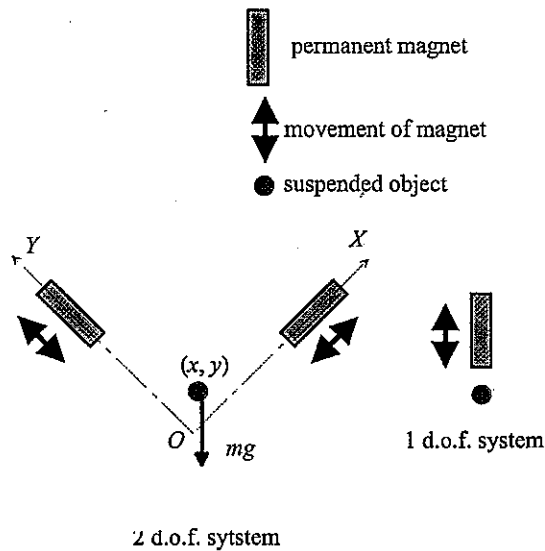


図 2 2自由度システムおよび1自由度システムの概略

向のポテンシャル力は上記の吸引力の横方向成分と一致するものとする。

1自由度浮上装置では、永久磁石を鉛直方向に駆動し、吸引力と重力を釣り合わせて浮上体を安定に浮上させる。この場合、横方向の復元力は永久磁石の横方向成分として受動的に得られる。今回の考察では1自由度は鉛直方向の運動だけを考える。

3. 浮上システムのモデル化

前章で述べた2自由度浮上システムは、以下のようにモデル化することができる。記号を以下に示す。

- x, y : 浮上体位置
- m : 浮上体質量
- x_m : X 軸上の磁石の先端位置
- y_m : Y 軸上の磁石の先端位置

m_m : 磁石質量

f_{xx}, f_{xy} : X 軸上の磁石が浮上体におよぼす吸引力、2つ目の添字がその方向

f_{yx}, f_{yy} : Y 軸上の磁石が浮上体におよぼす吸引力

k : 磁石の定数

l_x, l_y : それぞれの軸の磁石と浮上体との距離

k_p : 比例フィードバックゲイン

k_d : 微分フィードバックゲイン

x_{m0}, y_{m0} : 平衡状態を実現するための位置

k_e : 力制御の場合の磁石を支持するばね定数

k_b : 力制御の場合の磁石支持部の減衰係数

F_x, F_y : 力制御の場合の各磁石に対する駆動力

l_0 : 平衡位置にあるときの空隙距離

F_{x0}, F_{y0} : 平衡状態を実現するための力

g : 重力加速度

永久磁石と浮上体の吸引力の大きさは次のように空隙の二乗に反比例すると仮定する。

$$\text{吸引力} = \frac{k}{\text{空隙}^2} \quad (1)$$

3.1 浮上系の運動方程式

浮上体に働く吸引力は

$$f_{xx} = k(x_m - x)/l_x^3 \quad (2)$$

$$f_{xy} = -ky/l_x^3 \quad (3)$$

$$f_{yx} = -kx/l_y^3 \quad (4)$$

$$f_{yy} = k(y_m - y)/l_y^3 \quad (5)$$

ここで

$$l_x = \sqrt{(x_m - x)^2 + y^2}$$

$$l_y = \sqrt{x^2 + (y_m - y)^2}$$

である。空気などの粘性摩擦の影響を無視するとすると、浮上体の x 方向、 y 方向における運動方程式は、次のように表すことができる。

$$m\ddot{x} = f_{xx} + f_{yx} - mg/\sqrt{2} \quad (6)$$

$$m\ddot{y} = f_{xy} + f_{yy} - mg/\sqrt{2} \quad (7)$$

なお、システムの出力は浮上体の x, y の位置とし、それぞれ独立に検出可能であるものとする。

3.2 制御システム

浮上システムの入力、 X, Y 軸の永久磁石を駆動する力とし、永久磁石は弾性特性と減衰特性をもった機構で支持されているものとする。弾性特性と減衰特性は、システムの出力が浮上体位置だけであるので浮上システムの安定化のために必要である [5]。

このシステムでは、駆動力が一定では安定な浮上は行われないため、フィードバック制御が必要である。浮上システムを安定化するための制御は、浮上体位置 (x, y) に基づいて、 X, Y 軸の各永久磁石の駆動力を独立に PD 制御するものとする。具体的には、 k_p, k_d をゲインとして次の制御則に従うものとする。

$$F_x = k_p x + k_d \dot{x} + F_{x0} \quad (8)$$

$$F_y = k_p y + k_d \dot{y} + F_{y0} \quad (9)$$

磁石およびその支持機構は、 X, Y 軸共に等しいとする。各軸上の磁石の運動方程式は次式となる。

$$m_m \ddot{x}_m = -f_{xx} - m_m g / \sqrt{2} - k_e x_m - k_b \dot{x}_m + F_x \quad (10)$$

$$m_m \ddot{y}_m = -f_{yy} - m_m g / \sqrt{2} - k_e y_m - k_b \dot{y}_m + F_y \quad (11)$$

3.3 状態方程式

上のモデルを線形化し、状態ベクトル x_2 を $x_2 = (x \ y \ \ddot{x}_m \ \ddot{y}_m \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{x}_m \ \dot{y}_m)$ とすると、つぎのような状態方程式が得られる。

$$\dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 u_2 \quad (12)$$

$$y_2 = C_2 x_2 \quad (13)$$

ただし、入力 u_2 は、 $u_2 = (F_x \ F_y)'$ であり、

$$A_2 = \begin{pmatrix} \frac{k}{m l_0^3} & 0 & \frac{0_4}{m l_0^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k}{m l_0^3} & 0 & \frac{-2k}{m l_0^3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-2k}{m l_0^3} & 0 & \frac{2k - k e l_0^3}{m m l_0^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{-k_b}{m_m} & 0 \\ 0 & \frac{-2k}{m l_0^3} & 0 & \frac{2k - k e l_0^3}{m m l_0^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{-k_b}{m_m} \end{pmatrix}$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_m} \end{pmatrix}$$

$$C_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

である。

また同様に 1 自由度の場合の状態方程式は、状態ベクトルを $x_1 = (z \ z_m \ \dot{z} \ \dot{z}_m)$ として、

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + b_1 u_1 \quad (14)$$

$$y_1 = c_1 x_1 \quad (15)$$

となる。ただし、

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k}{m l_0^3} & \frac{-k}{m l_0^3} & 0 & 0 \\ \frac{-k}{m l_0^3} & \frac{k - k e l_0^3}{m m l_0^3} & 0 & \frac{-k_b}{m_m} \end{pmatrix}$$

$$b_1 = (0 \ 0 \ 0 \ \frac{1}{m_m})$$

$$c_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0)$$

である。これらの状態方程式から、1 自由度および 2 自由度システムはともに可制御、可観測であることがわかる。

4. 安定性の解析

4.1 線形性を考えた場合のフィードバックゲイン

本報告は 2 自由度浮上システムの特徴を把握することであるため、システムは簡単化を行ってもその一般性を失わない。ここでは、上に挙げた定数などの値を次のように正規化して用いた。

$$m = m_m = k = k_b = l_0 = 1, \quad k_e = 6 \quad (16)$$

フィードバック制御は各軸独立な PD 制御で行う。このときの安定なフィードバックゲインの範囲は、1 自由度システムでは比較的簡単に求められるが [5]、2 自由度システムでは非常に複雑になる。よって、ここでは微分ゲインを固定し、比例ゲインの安定範囲を求めることにより、1 自由度システムと 2 自由度システムを比較する。

今、 $k_d = 1.2$ とする。このときフィードバックを行ったシステムを自律形として考えて、その安定性を考察するためにフルビッツの安定判別法により、比例ゲイン k_p の範囲を求めた。その結果 1 自由度システムでは、

$$6 < k_p < 6.32 \quad (17)$$

でシステムは安定となり、2 自由度システムでは

$$4 < k_p < 5.12 \quad (18)$$

の範囲で安定となることがわかった。

永久磁石を使った浮上では、比例ゲインの安定範囲に下限と上限があるが、1 自由度システムに比較して 2 自由度システムでは、小さな値となっている。これは、2 自由度システムでは、 X 軸方向の運動に対し、 Y 軸上の磁石の吸引力の横方向成分が復元力として働くため、その成分が比例ゲインに重畳しているためにその安定範囲が小さな値になると考えられる。

4.2 数値シミュレーション

提案した浮上システムは、その吸引力の特性に非線形性を持つ。よってここでは、非線形性を考慮した数値シミュレーションによって、より実際に近いであろうと思われるシステムの挙動の違いを調べる。

フィードバックゲインは、線形システムにおいて安定となるようなゲインを用いた。1 自由度システムでは $(k_p \ k_d) = (6.1 \ 1.2)$ 、2 自由度システムでは $(k_p \ k_d) = (4.5 \ 1.2)$ とした。初期位置は、1 自由度

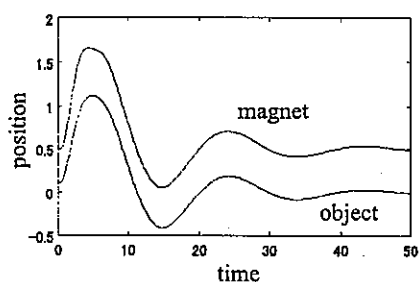


図 3 1 自由度浮上システムの応答

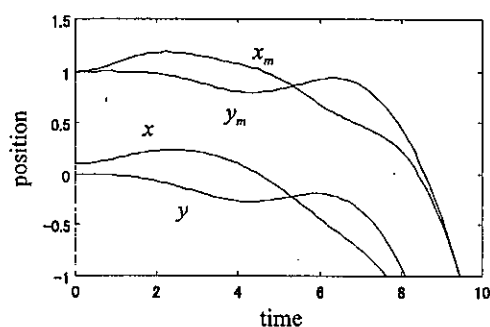


図 4 2 自由度浮上システムの応答

システムでは $z = 0.1$, 2 自由度システムでは $(x \ y) = (0.1 \ 0)$ とした。

シミュレーション結果を図 3 および図 4 に示す。また、2 自由度の場合の浮上体の軌跡を図 5 に示す。図からわかるように、1 自由度システムでは浮上体は平衡位置に収束しているが、2 自由度システムでは、安定な浮上状態となっていない。軌跡の図より最終的に、浮上体が鉛直に落下していることがわかる。なお、図 3 の永久磁石の平衡位置は、実際の位置から 0.5 だけ下にあるように表している。

次に 2 自由度システムに対して、初期位置を $(x \ y) = (0.03 \ 0)$ にして計算した結果を図 6 に示す。ゲインは図 4 の場合と同じである。この場合は安定な浮上状態が実現できている。この結果、安定状態が初期偏差の影響を受けるということがわかった。これは、システムの

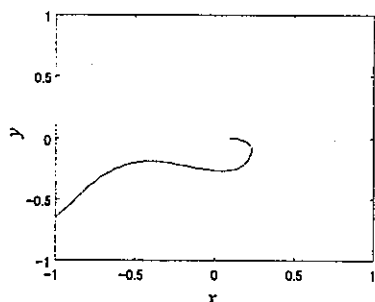


図 5 2 自由度浮上システムの浮上体の動き

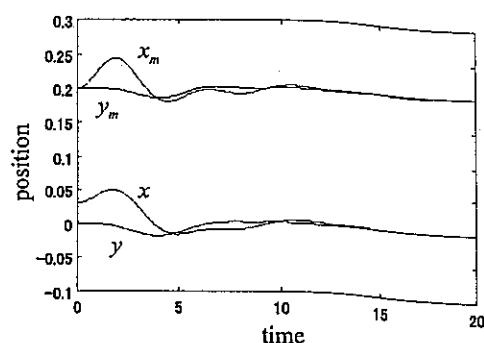


図 6 初期偏差が小さい場合の浮上システムの応答

非線形性の影響であると考えられる。また、このシステムは外乱に弱いということも言える。この対策として、 x, y 軸のクロスフィードバックループを加えることやロバスト制御を用いることが考えられる。

5. まとめ

永久磁石の運動を制御して安定化を図る浮上機構を用いて浮上体の 2 自由度の操りを実現するためのシステムを提案した。提案したシステムをモデル化し、PD 制御を用いたときの数値シミュレーションを行った。その結果、システムを安定にするゲインは 1 自由度浮上システムのものと異なることがわかった。また、2 自由度システムの安定性は、その初期偏差に敏感でありロバストな制御方法を導入する必要があることがわかった。今後は、よりよい制御方法を考えながら、試作した 2 自由度浮上システムの浮上実験を行う予定である。

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（課題番号 5112450099）の補助の基に行われた研究である。このことをここに記して感謝する。

参考文献

- [1] K. Oka and T. Higuchi: Magnetic levitation system by reluctance control — levitation by motion control of permanent magnet —, International Journal of Applied Electromagnetics in Materials, 4, (1994), pp.369-375.
- [2] K. Oka, and T. Higuchi: A three-degrees-of-freedom maglev system with actuators and permanent magnet, Transactions of the IEE of Japan, 116-5 (1996) pp.138-147
- [3] K. Oka, T. Higuchi, and Y. Shimodaira: Noncontact Conveyance Using Robot Manipulator and Permanent Magnet, Proc. of the Fifth Int. Symp. on Magnetic Bearings, (1996) pp.447-452
- [4] 岡, 樋口, 白石: 永久磁石の運動制御による懸垂形磁気浮上機構, 電気学会論文誌, 119D-3 (1999) pp.291-297
- [5] 樋口, 岡: リラクタンس制御形磁気浮上システム — 永久磁石とリニアアクチュエータを用いた浮上機構 —, 電気学会論文誌, 113D-8 (1993), pp.988-994