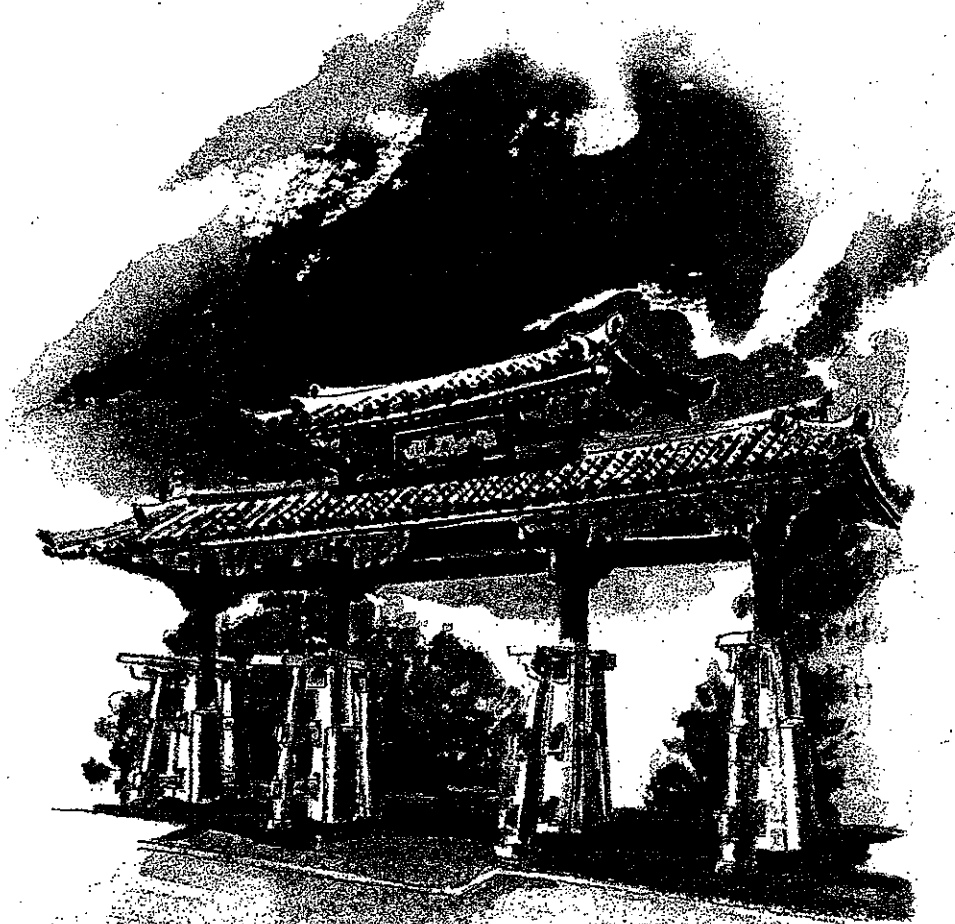


第12回「電磁力関連のダイナミックス」 シンポジウム

The 12th Symposium on Electromagnetics and Dynamics
講演論文集



開催日：平成12年6月29日（木）～7月1日（土）

会場：メルパルクOKINAWA「郵便貯金会館」

主 催：電気学会

共 催：日本機械学会，日本AEM学会

協 賛：日本原子力学会，日本シミュレーション学会，精密工学会

日本鉄鋼協会，計測自動制御学会，静電気学会，

高速信号処理応用技術学会，磁性流体研究連絡会，

日本工業技術振興協会，低温工学協会，日本応用磁気学会，

那覇市，日本工業新聞社，日刊工業新聞社

永久磁石の運動制御法式による2自由度浮上機構における考察

岡 宏一 (高知工科大学), 長谷川 昌幸 (富士通株式会社)
森田 剛 (理化学研究所), 樋口 俊郎 (東京大学)

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

Koichi OKA (Kochi University of Technology), Hasegawa Masayuki (Fujitsu)
Takeshi MORITA (RIKEN), and Higuchi Toshiro (University of Tokyo)

Abstract

Stability of a 2 D.O.F. magnetic suspension system is studied compared with a 1 D.O.F. system. 2 D.O.F. means that the suspension system controls an object in an x-z (vertical) plane. The suspension mechanism is featured by the method of controlling the supporting forces. To control supporting forces, system adjusts the air gap length by permanent magnet movements. First, the outline of the proposed 2 D.O.F. system is introduced, and modeled. Two models are considered by the difference of the input of suspension system. The input of one model is the position, and the other is the force. Two models are compared with 1 D.O.F. systems by numerical simulations.

キーワード: 磁気浮上機構, 2自由度システム, 永久磁石, 運動による浮上機構, シミュレーション
(Keyword: magnetic suspension system, 2 d.o.f. system, permanent magnet, motion control, simulation)

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.

本報告では浮上体の2自由度の浮上機構を実現するために, 垂直平面内に浮上機構を2つ配置した場合についての考察を行う. まず, 今回考察する2自由度浮上システムについて説明し, そのモデル化を行う. モデル化は,

浮上システムの入力位置である場合と力である場合の2つに分けて行う. その後, モデルに基づいた数値シミュレーションを行い, 1自由度浮上システムと比較しその違いを述べる.

2. 2自由度浮上装置

図1に2自由度および1自由度浮上装置の概略を示す. 2自由度浮上装置では, O を原点とし, (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. 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.

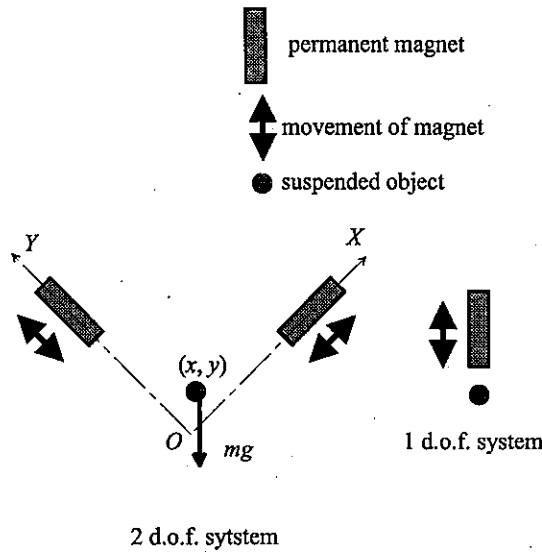


Fig. 1: Outline of two types of suspension system

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。

$$\text{吸引力} = \frac{k}{\text{空隙}^2}$$

3.1 浮上系の運動方程式

浮上体に働く吸引力は

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

4. 数値シミュレーション

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、システムの可能な単純化を行った。シミュレーションを次のように定数などを正規化して行った。

$$m = m_m = m_{my} = k = k_b = l_0 = 1, \quad k_e = 6 \quad (14)$$

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

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

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

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 入力が永久磁石位置である場合

浮上システムの入力を X, Y 軸の永久磁石の位置とし、永久磁石の位置は入力に遅れなく追従すると考える。永久磁石位置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 軸の各永久磁石の位置を独立に PD 制御するものである。具体的には、 k_p, k_d をゲインとして次の式に従うものとする。

$$x_m = k_p x + k_d \dot{x} + x_{m0} \quad (8)$$

$$y_m = k_p y + k_d \dot{y} + y_{m0} \quad (9)$$

3.3 システムの入力が永久磁石への力である場合

浮上システムの入力を X, Y 軸の永久磁石を駆動する力とする。システムの出力は浮上体位置だけであるので、永久磁石は弾性特性と減衰特性をもった機構で支持する必要がある⁽⁵⁾。フィードバック制御は、この場合も同様に浮上体位置に基づいて各軸の永久磁石位置を独立に PD 制御を行うものとする。このときの制御則は次式となる。

$$F_x = k_p x + k_d \dot{x} + F_{x0} \quad (10)$$

$$F_y = k_p y + k_d \dot{y} + F_{y0} \quad (11)$$

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。

$$m_m \ddot{x}_m = -f_{xx} - m_m g/\sqrt{2} - k_e x_m - k_b \dot{x}_m + F_x \quad (12)$$

$$m_m \ddot{y}_m = -f_{yy} - m_m g/\sqrt{2} - k_e y_m - k_b \dot{y}_m + F_y \quad (13)$$

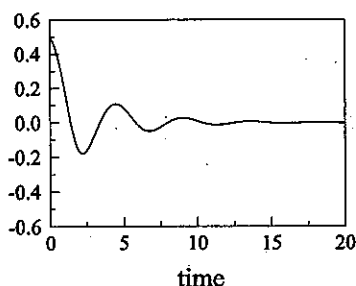


Fig. 2: Simulation result of 1 d.o.f. system $(k_p, k_d) = (2, 0.3)$

4.1 入力が永久磁石位置である場合

まず、ゲインを $(k_p, k_d) = (2, 0.3)$ 、初期位置を1自由度システムでは平衡位置から0.5だけ磁石に近づけた状態、2自由度システムでは $(x, y) = (0.5, 0)$ としてシミュレーションを行った。

1自由度系ではこのゲインは安定領域にあり、その浮上体の応答を Fig. 2 に示す。横軸は時間、縦軸は浮上体の変位である。このように振動しながら収束するゲインとなっている。2自由度システムでの結果を、Fig. 3 に示す。こちらは浮上体が $X-Y$ 平面内でどのように運動したかを記録した。矢印に従って浮上体が運動したことを示す。この場合も同様に、浮上体は楕円を描きながら収束することがわかり、1自由度と同じような収束の可能性を示している。

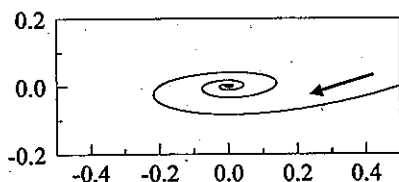


Fig. 3: Simulation result of 2 d.o.f. system $(k_p, k_d) = (2, 0.3)$

つぎに、ゲインを $(k_p, k_d) = (1, 0.3)$ としてシミュレーションを行った。初期位置は前のシミュレーションと同じで、1自由度では結果をわかりやすくするために、初期速度 $\dot{x} = -0.1$ とした。このゲインは1自由度システムでは比例ゲインが安定限界となるものであり、その応答は Fig. 4 のようになる。このゲインでは、システムは収束もしないが発散もしない。これに対し、2自由度システムの応答は Fig. 5 となり、浮上体が安定に原点に収束していることがわかる。これは、 X 方向に対しては Y 軸の磁石が安定性を上げるように働くためであると考えられる。

つぎに、フィードバックゲインを $(k_p, k_d) = (2, 0)$ と

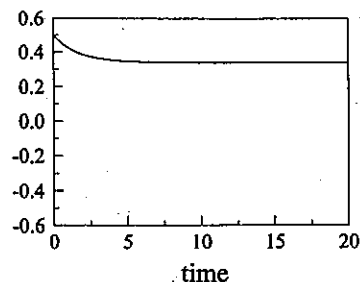


Fig. 4: Simulation result of 1 d.o.f. system $(k_p, k_d) = (1, 0.3)$

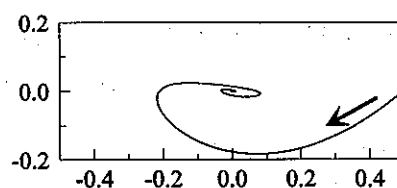


Fig. 5: Simulation result of 2 d.o.f. system $(k_p, k_d) = (1, 0.3)$

してシミュレーションを行った。初期位置は前のシミュレーションと同じである。このゲインは1自由度システムでは微分ゲインが安定限界となるものであり、その応答は Fig. 6 のようになる。線形システムでは残留振動が無限に続く状態であるが、今回の制御対象では永久磁石の非線形成分によりこの振動は大きくなる。この状態は図からは見えない。これに対し、2自由度システムの応答は Fig. 7 となり、浮上体の振動の大きさが急速に増大していることがわかる。浮上体が横方向の運動成分を持つことにより、減衰特性がより悪化していることが考えられる。

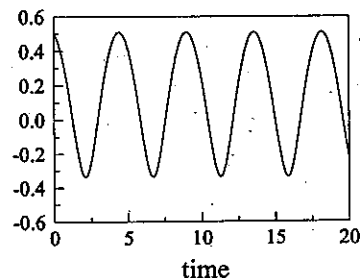


Fig. 6: Simulation result of 1 d.o.f. system $(k_p, k_d) = (2, 0)$

このように1自由度システムと2自由度システムでは、システムを安定にするゲインが異なり、1自由度システムに分離して考察を行うことは妥当ではないことがわ

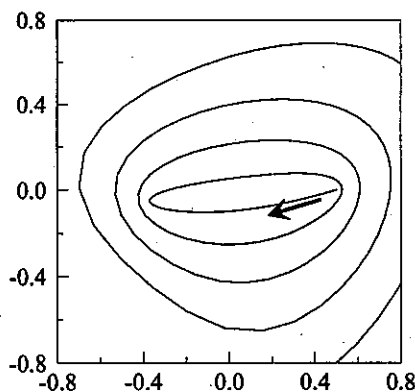


Fig. 7: Simulation result of 2 d.o.f. system $(k_p, k_d) = (2, 0)$

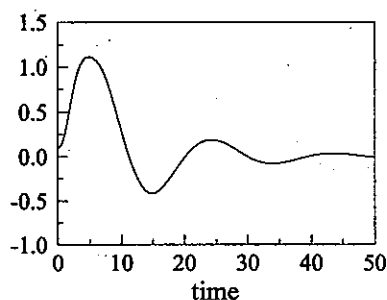


Fig. 8: Simulation result of 1 d.o.f. system with force input

かった。

4.2 システムの入力が永久磁石への力である場合

システムの入力が力である場合、ゲインが大き過ぎると浮上システムを安定化できない⁽⁶⁾。また、初期位置に対しても注意深く選ぶ必要がある。ここでは、フィードバックゲインを $(k_p, k_d) = (2.1, 1.2)$ とし、初期位置を $(x, y) = (0.1, 0)$ として、シミュレーションを行った。

1自由度システムの応答は、Fig. 8 となり、0 に収束していることがわかる。しかし、2自由度システムでは、このゲインで浮上状態を実現することができなかった。永久磁石への力を入力とするシステムでは位置を入力とするシステムに比べ、1自由度と2自由度のシステムの差が大きいことが考えられる。

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

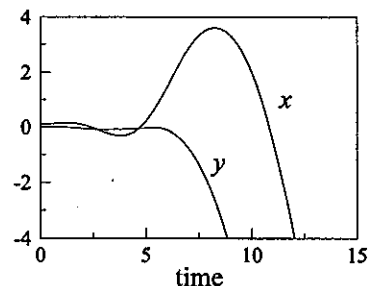


Fig. 9: Simulation result of 2 d.o.f. system with force input

ムのものと少し異なることがわかった。今後は、力入力の場合についてシステムを線形化し、安定なゲインの条件を求めることが必要であろう。その後、実際に2自由度浮上システムを製作し、今回の結果についての検証を行う予定である。

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*, Transacitons 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