

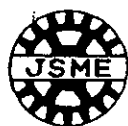
# 中国四国支部第 41 期総会・講演会

## 講演論文集

No.035-1

開催日：平成15年3月6日(木)

会場：鳥取大学工学部



発行 日本機械学会中国四国支部

〒739-8527

東広島市鏡山一丁目4番1号

広島大学工学部内

電話 (0824) 24-7533

平成 15 年 2 月 24 日発行

# 901 永久磁石の運動制御を用いた2自由度磁気浮上システムの開発

Development for 2 d.o.f. suspension system using permanent magnet

政木 慶次 (高知工科大院) ○岡 宏一 (高知工科大学)

Keiji Masaki (Kochi University of Technology)

Koichi Oka (Kochi University of Technology)

## 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。本報告ではこの浮上原理を用いた物体の非接触把持について考察する。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。しかし、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ようになっていないこと、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。

そこで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、多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。これらの結果に基づいて、多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Fig.1に示す。ボイスコイルアクチュエータを3つ持ち、それぞれが永久磁石を駆動する。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、その位置によって駆動方向が調整可能である。浮上体は鉄球であり、それを3つの永久磁石で浮上制御と、水平方向の位置制御をする形式となっている。永久磁石の動きは渦電流式センサによって、浮上体の鉛直平面内2自由度の動きは光学式センサによって検出可能である。

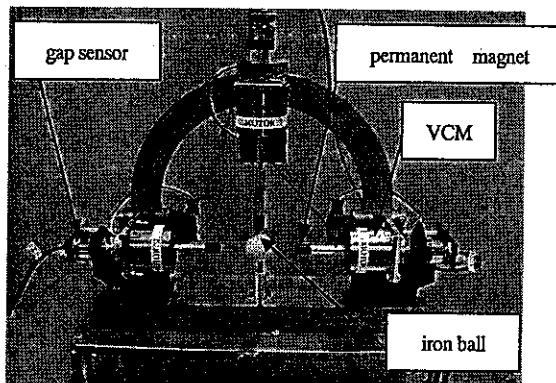


Fig.1 Photograph of experimental setup

Fig.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Fig.2に示す。今回は鉛直方向と水平方向の運動を図のように分けて考えることにする。

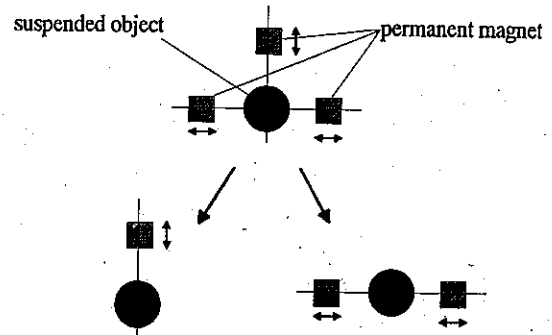


Fig.2 Outline of two types of suspension system

## 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の浮上方向の考察はすでに行われているので今回は水平方向の位置制御について考察を行う。また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。

$z_0$ : 浮上体位置,  $m_0$ : 浮上体質量,  $D$ : 浮上体の直径,  $z_1$ : 右側磁石の先端位置,  $z_2$ : 左側磁石の先端位置,  $m_1$ : 右の磁石質量,  $m_2$ : 左の磁石質量,  $K$ : 磁石の係数,  $f_{a1}$ ,  $f_{a2}$ : 各磁石に対する駆動力,  $f_{m1}$ ,  $f_{m2}$ : 各磁石が浮上体に及ぼす吸引力,  $d_1$ ,  $d_2$ : 各磁石と浮上体表面までの距離,  $k_1$ ,  $k_2$ : 磁石を支持するばね定数,  $c_1$ ,  $c_2$ : 磁石支持部の減衰係数,  $g$ : 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  $K$  を定数として空隙の二乗に反比例すると仮定する。

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

浮上体に働くZ軸方向の吸引力は

$$m_0 \ddot{z}_0 = f_{m1} + f_{m2} \quad (2)$$

ここで

$$\begin{aligned} f_{m1} &= \frac{K}{d_1^2} & d_1 &= z_1 - z_0 \\ f_{m2} &= \frac{K}{d_2^2} & d_2 &= \left(z_0 - \frac{D}{2}\right) - z_2 \end{aligned}$$

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Z軸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。

$$m_1 \ddot{z}_1 + c_1 \dot{z}_1 + k_1 z_1 = f_{a1} - f_{m1} \quad (3)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + c_2 \dot{z}_2 + k_2 z_2 = f_{a2} + f_{m2} \quad (4)$$

浮上システムの入力水平方向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。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に基づき  $k_p, k_d$  をゲインとして次の制御則に従うものとする。

$$f_{d1} = k_p z_1 + k_d \dot{z}_1 + F_{z0} \quad (5)$$

$$f_{d2} = k_p z_2 + k_d \dot{z}_2 + F_{z0} \quad (6)$$

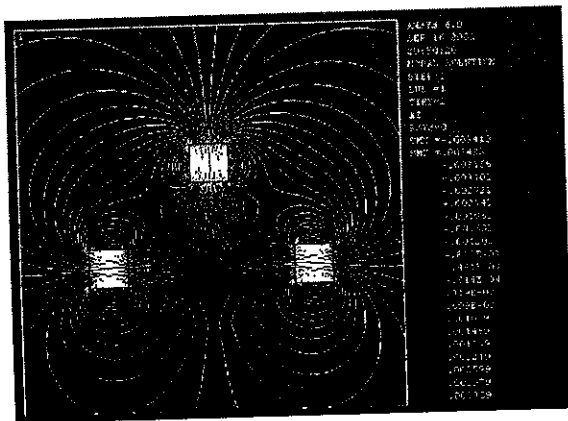


Fig.3 line of magnetic flux diagram

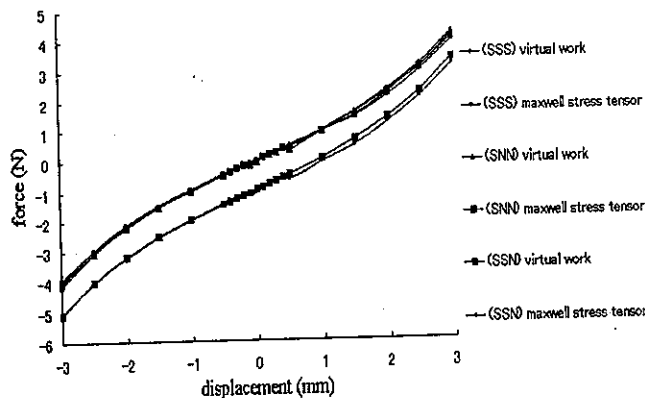


Fig.4 Result of magnetic field analysis

#### 4. 磁場解析

永久磁石の効果的な配置方法の検討や (1) 式に  $K$  の見積もりのために ANSYS による磁場解析を行った。

Fig.3 と Fig.4 に結果の一例を示す。Fig.3 は解析時の磁束線図を表している。図中の線は磁束線を表しておりそれが集まり白く見える部分が磁石であり、中央付近の円形が浮上体である。磁石と浮上対象のギャップは全て 5mm である。これを初期値として水平方向に  $\pm 3\text{mm}$  の範囲で任意の位置に浮上体を動かし磁場解析を行った。磁石の極性は浮上体表面に対して鉛直方向は S 極、水平方向はともに N 極を対向させている。これを SNN 配置と本研究は表記する。SNN は前から鉛直方向の磁極、右の永久磁石の磁極、左の永久磁石の磁極を表す。解析結果から磁束が浮上体の中心付近で反発しあうように通っているのが分かる。また同様の磁場解析を磁石の極配置を変え、SSN 配置、SSS 配置についても行った。Fig.4 はそれらの水平方向における磁力の解析結果であり、virtual work と maxwell stress tensor の 2通りの結果を示している。SSS 配置と SNN 配置の解析結

果はほぼ同じである。SSN 配置は原点付近で浮上体に左向きの力が働いていることがわかる。

#### 5. 浮上実験

実験では磁石の配置を水平方向の力が原点付近で 0 となり鉛直方向の磁力が大きい (SNN) 配置を使用した。

以上の結果、解析から最適フィードバック理論に基づき PD 制御におけるフィードバックゲインを導出、2 自由度のシステムにおいて  $d_1 = d_2 = 8\text{mm}$  と  $12\text{mm}$  で浮上実験を行い、これに成功した。Fig.5 と Fig.6 は浮上時の水平方向に周波数 0.02~100Hz、振幅 1mm の正弦波を入力として与えたときの周波数応答の結果である。この結果、水平方向で 3Hz 程度の応答が可能なが示され、本方式による非接触把持が可能であることがわかった。

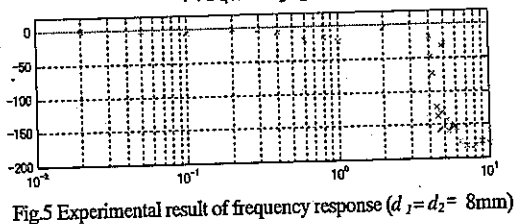
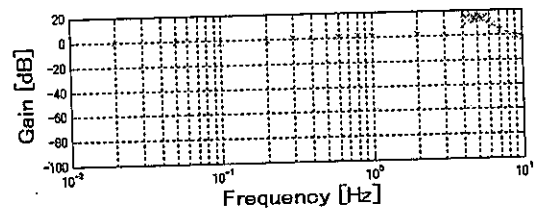


Fig.5 Experimental result of frequency response ( $d_1 = d_2 = 8\text{mm}$ )

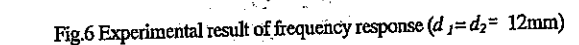
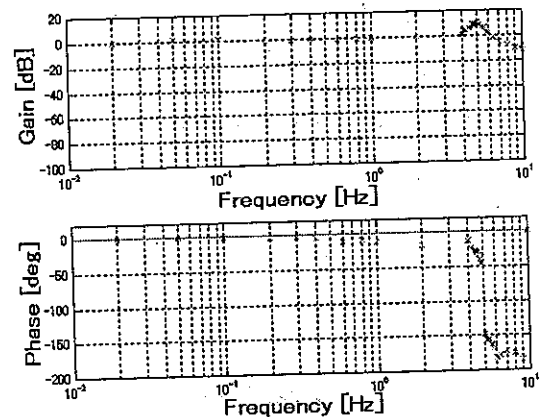


Fig.6 Experimental result of frequency response ( $d_1 = d_2 = 12\text{mm}$ )

#### まとめ

永久磁石の運動を制御して安定化を図る浮上システムを開発、そのシステムをモデル化し、PD 制御を用いて浮上実験を行った。その結果、浮上の安定化が実現でき、物体の非接触把持および操り動作が可能なが確認できた。

今後は 3 自由度以上の多自由度浮上システム、浮上対象の形状、微細化などへの対応を検討する予定である。

#### 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.