# 永久磁石を用いた非接触多自由度浮上\* (垂直面内2自由度位置制御機構)

岡 宏一<sup>\*1</sup>, 鶴身 輝<sup>\*2</sup>, 森光 利至<sup>\*1</sup>

# Multi DOF Non-Contact Manipulation Using Permanent Magnet (Positioning Control in a Vertical Plane)

Koichi OKA\*1, Akira TSURUMI, and Toshiji MORIMITSU

\*1 Intelligent Mechanical Engineering, Kochi University of Technology Miyanokuchi 185, Tosayamada-cho, Kami, Kochi, 782-8502, Japan

This paper describes non-contact manipulation mechanism of multi-DOF (degrees of freedom) magnetically suspended system. This manipulation system uses unique suspension mechanism whose suspension force is controlled by air gap length. This mechanism is composed of permanent magnets and linear actuators. We study the stability of a 2 DOF suspension system which manipulate the object in the vertical plane. To analyze the stability of the system, we assume that the attractive force acts on the direction from the magnet tip to the center of the object, and is inversely proportional to the square of the air gap length. In this paper, the principle of the suspension mechanism is explained and a prototype 2 DOF system is introduced. We make a linearized model of the system and the feedback gains are calculated by linear control theory. Numerical simulations on the nonlinear 2 DOF system are carried out. In experimental system, the magnetic field analysis is investigated on the system by an integral element method and the characteristics of the system are studied. Non-contact suspension is examined experimentally. Numerical and experimental results support the feasibility of the multi-DOF non-contact manipulation system.

Key Words : Magnetic Manipulation System, 2 D.O.F. System, Permanent Magnet, IEM analysis, Mechanical Control

## 1.はじめに

産業,民生機器などの精密化と小型化は目まぐるしく進展しており,埃の発生を抑えるクリーンルーム工場,機能的な小型の機械パーツの組立装置,搬送中の精度保持などが求められている.非接触でパーツを操作することができれば,接触が起因となって発生するパーツの変形,またそれに伴う精度低下や埃の発生の低減が可能であると考えられる.

非接触でハンドリングできる機構には,空気圧,静電気,磁力などの利用が考えられる.空気圧を用いるもの は,強力なエアにより比較的強い発生力を得られるが,エアの噴出により埃を巻き上げることによりクリーン環 境には不向きだと考えられる.また,対象物にエア圧を受ける面積を有することが必要で,対象物の形状に制限 がある.静電気力は,放電破壊を考慮すると発生力が小さく,対象物は面積の広いものに限られる.磁力を用いた 場合,磁力の発生源次第で大きな発生力が可能であり,埃の発生の問題もなくクリーン環境にも向いていると思 われる.しかし磁力を発生させるための対象物は,強磁性体に限定される.以上のように,非接触浮上機構には 一長一短があるが,本報告では発生力の点から磁力を用いた非接触把持機構について考察するものとする.

磁力を用いた非接触支持機構には種々のものが提案,開発されているが,近年、永久磁石を用いた支持機構に よる,多自由度の浮上が提案されている.例えば,永久磁石のリニア駆動や回転駆動を用いて,鉛直軸とその周 りの回転を行うものさせるもの<sup>(1)(2)</sup>や,永久磁石のリニア駆動を用いた鉛直面内の2自由度の位置を制御するも

<sup>\*</sup> 原稿受付 2012 年 7 月 17 日

<sup>\*1</sup> 正員,高知工科大学システム工学群(〒782-8502高知県香美市土佐山田町宮ノ口185)

<sup>\*2</sup> 高知工科大学大学院知能機械システムコース (〒 782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185)

Email: oka.koichi@kochi-tech.ac.jp



Fig. 1 Outline of 2 DOF Suspension System



Fig. 2 Model of 2DOF suspension system

の<sup>(3)</sup> などである.永久磁石を用いる利点としては,磁力の発生源の体積を小さくできるため小型の浮上体に適している点が上げられる.

微小な浮上体を操るためには,対象物に対するより多くの自由度を制御する必要があると考えられる.しかし, 提案されている機構<sup>(1)(2)(3)</sup>は,鉄球の鉛直上から吊り下げるように浮上を行なっているため水平面の軸周りに回転 させることが難しいと考えられる.本報告では、鉄球の多自由度回転を目指し,鉛直方向から永久磁石をつり下 げるように浮上体を支持するのではなく,斜め方向に駆動する永久磁石の位置を制御することにより浮上を行う 機構の設計,開発を行った.このことにより,水平軸の周りに浮上体を回転させるときに,問題となる浮上体の頂 点付近の磁束の集中を減じることが可能である.

始めに,浮上機構の試作装置を紹介し,制御システムを示す.次に,装置のモデル化を行い,シミュレーション による可能性を検討する.その後実験装置の浮上特性を IEM 解析によってい行った結果を示す.最後に,試作装 置を用いて浮上実験を行った結果を示す.

### 2. 2 自由度浮上装置

2.1 装置の概要

浮上機構は永久磁石と鉄球との空隙距離を制御する方法を用いている.浮上機構の概略図を図1に示す.浮上 機構は永久磁石,ボイスコイルモータ(VCM),センサターゲット,渦電流センサで構成されている.永久磁石 は VCM の先端に取り付けられており,リニア駆動を行う.鉄球の変位は下部の渦電流センサにより検出し,永久 磁石の変位は上部の渦電流センサにより検出する.

2·2 モデル化

図2に浮上装置のモデル図を示す.2自由度浮上装置では,のを原点とし,(x,y)で示される赤い球形のものが 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軸上にある青い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きるとする.両軸は鉛直方向から π/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力は上記の吸 引力の横方向成分と一致するものとする.

モデル化のための記号を以下に示す.

x, y: 浮上体位置

m: 浮上体質量

xm:X軸上の磁石の先端位置

ym: Y 軸上の磁石の先端位置

*m<sub>m</sub>*: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

fyx, fyy: Y 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

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<sub>m0</sub>, y<sub>m0</sub>: 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<sub>b</sub>: 力制御の場合の磁石支持部の減衰係数

*F<sub>x</sub>*, *F<sub>y</sub>*: 力制御の場合の各磁石に対する駆動力

*l*<sub>0</sub>:平衡位置にあるときの空隙距離

*F<sub>x0</sub>, F<sub>y0</sub>*: 平衡状態を実現するための力

g:重力加速度

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.まず,永久磁石と浮上体の吸引力 fx, fv は,

$$f_x = \frac{k}{l_x^2}, \ f_y = \frac{k}{l_y^2}$$
 (1)

ただし,

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

と表すことができる.このとき,浮上体に働く吸引力は

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

$$f_{xy} = -ky/l_x^3 \tag{3}$$

$$f_{yx} = -kx/l_y^3 \tag{4}$$

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

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.

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

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

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.

2.3 制御システム

2.3.1 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<sub>p</sub>,k<sub>d</sub> をゲインとして次の式に従うものとする.

$$x_m = k_p x + k_d \dot{x} + x_{m0} \tag{8}$$

$$y_m = k_p y + k_d \dot{y} + y_{m0} \tag{9}$$

2.3.2 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<sup>(4)</sup>.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.

$$F_x = k_p x + k_d \dot{x} + F_{x0} \tag{10}$$

$$F_y = k_p y + k_d \dot{y} + F_{y0} \tag{11}$$



Fig. 3 Simulation result of 1 d.o.f. system  $(k_p, k_d) = (2, 0.3)$ 



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



Fig. 4 Simulation result of 2 d.o.f. system  $(k_p, k_d) = (2, 0.3)$ 



Fig. 6 Simulation result of 2 d.o.f. system  $(k_p, k_d)=(1, 0.3)$ 

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.

$$m_m \dot{x_m} = -f_{xx} - m_m g / \sqrt{2} - k_e x_m - k_b \dot{x_m} + F_x \tag{12}$$

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

3. 数値シミュレーション

2 自由度浮上システムの特徴を把握するため,シミュレーションでは,次のように定数などを正規化して行った.

$$m = m_{mx} = m_{my} = k = k_b = l_0 = 1, \ ke = 6 \tag{14}$$

3.1 入力が永久磁石位置である場合

3.1.1 安定なゲインを用いた場合の結果

まず,ゲインを  $(k_p, k_d) = (2, 0.3)$ ,とし,初期位置を (x, y) = (0.5, 0)としてシミュレーションを行った.1自由度の応答を,図3に示す2自由度システムの浮上体の応答を,図4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った.

3-1-2 比例ゲインが安定限界となる場合の結果

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 である.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,図5のよう になり,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,図6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.

3-1-3 微分ゲインが安定限界となる場合の結果

つぎに,フィードバックゲインを $(k_p,k_d) = (2,0.)$ 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. 7 Simulation result of 1 d.o.f. system  $(k_p, k_d)=(2, 0.)$ 



Fig. 8 Simulation result of 2 d.o.f. system  $(k_p, k_d)=(2, 0.)$ 

図7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 形成分によりこのご振動は大きくなる.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, 図8となり,浮上体の振動の大きさが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.

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かった.

3.2 入力が永久磁石駆動のための力である場合

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<sup>(5)</sup>.また,初期位置に対しても注意深く選ぶ必要がある.1自由度の場合にはシステムを安定化できるゲインの範囲は比較的簡単に計算できる.しかし2自由度の場合には,安定化できるゲインの範囲を示すことが困難である.今回は微分ゲインを固定したときに,安定化のための比例ゲインの範囲を求めた.具体的には,微分ゲインを*k*<sub>d</sub> = 1.2 としたときに,ラウスフルヴィッツのの方法により,比例ゲインを求めた.

結果として,1自由度システムの場合には,安定な比例ゲインの範囲は,

$$6 < k_p < 6.32$$
 (15)

となり,2自由度システムの場合には,

$$4 < k_p < 5.12.$$
 (16)

となった.両者ともに上限と下限があり,2自由度システムのゲインは,1自由度システムのゲインより小さいことがわかった.

また,力制御システムは,位置制御システムよりロバスト性では劣ると考えられるため,初期変位は,(x, y) = (0.1, 0)と小さくして計算した.比例ゲインは,上式の中の中間的な値を選び,1自由度システムの場合には, $(k_p, k_d) = (6.1, 1.2)$ ,2自由度システムの場合には, $(k_p, k_d) = (4.5, 1.2)$ としてシミュレーションを行った.

1 自由度システムの結果を,図9 に示す.図に示すように,平衡位置に収束している.2 自由度システムの場合の結果を,図10 に示す.2 自由度システムでは,システムは安定化できずに,図に示すように落下していることがわかる.

次に初期変位を小さくして,同様の計算を行った.用いた初期変位は,(x,y) = (0.03,0)である.このときの結 果を図 11 に示す.ゲインは,図 10 のものと同じであるが,今回は出力が安定に収束していることがわかる.こ れらの結果から2自由度浮上システムを構築する場合には,初期変位が重要であり,これはシステムが非線形で あることが原因であると考えられる.また,実験では浮上位置を調整するための機構が必要であると思われる.





Fig. 9 Simulation Result of 1 DOF System with Force Input

Fig. 10 Simulation Result of 2 DOF System with Force Input



Fig. 11 Simulation Result of 2 DOF System with Force Input (initial deviation = 0.03)



Fig. 12 Photograph of Prototype Device Setup



Fig. 13 Configuration of 2 DOF Non-contact Suspension System

4. 実 験 装 置

# 4.1 制御システム

浮上機構の装置の写真を図 12 に,制御システムを図 13 に示す.鉄球の変位,左右の永久磁石の変位をそれぞ れフィードバックし,PD コントローラを用いて浮上を実現している.また,左右の永久磁石の運動を同期させる ため,右の永久磁石を基準に左の永久磁石の運動を PD コントローラにより制御する.



Fig. 14 Analysis Model



Fig. 15 Analysis result of Horizontal force. (d=0mm ~ 2mm)

## 4·2 磁気力解析

試作した浮上機構の特性について検討するため,磁場解析ソフトを用いて解析を行った.用いたソフトウェア は株式会社エルフの ELF/MAGIC である.解析方法は後述する2つの条件で鉄球を左右に動かし,各永久磁石が 鉄球に及ぼす力の解析を行った.それぞれの条件で解析に用いたモデルの概略図を図14に示す.図中,*a*は左右 の永久磁石の中心線が交わる点と,鉄球の天頂との距離であり,*d*は,永久磁石の駆動方向の変位である.永久磁 石の変位*d*の原点は,鉄球を鉄球の重さが鉛直方向の力とつり合った状態となる空隙距離とする.

### 4.2.1 平衡状態から左右の永久磁石を動かした場合

パラメータ *a*=0 に固定し,*d* を徐々に大きくし(*d*=0mm~2mm),水平方向の力の解析を行った.解析結果を図 15 に示す.グラフは縦軸が鉄球に働く水平方向の力であり,横軸は鉄球の位置である.また,縦軸の正の値は図 14 における右方向の力であり,負の値は左方向の力である.図から鉄球を左に動かした場合,右方向の力が徐々 に大きくなっていることがわかる.このことから,鉄球に対して元の位置に戻ろうとする復元力が働き,グラフ 上で右下がりに0と交わる点で安定しようとする.よって,鉄球が図14の中心位置で安定して浮上できる.パラ メータ*d* を大きくしていくにつれ,鉄球に働く復元力が小さくなることもわかる.

4.2.2 パラメータ a を変化させた場合

鉄球の鉛直上(鉄球表面の頂上)から永久磁石により吊り下げるように浮上を行った場合,磁束が頂点に集中し,鉄球を多自由度に回転させることが困難である.永久磁石の延長線上の交点 *a* の値を大きくすることで,磁束の集中を減じられると考えられる.このときに,鉄球に働く水平方向と鉛直方向の力がどのように変化するかを検討するための解析を行った.永久磁石位置 *h* は,パラメータ*a* を変化させた後,鉄球の重量と永久磁石の吸引力が釣り合う位置に固定した.この後,鉄球を左右に変位させて計算を行った.

水平方向の力の解析結果を図 16 に,鉛直方向の力の解析結果を図 17 に示す.それぞれのグラフは縦軸が鉄球 に働く水平方向の力,鉛直方向の力であり,横軸は鉄球の位置である.まず,図 16 において,*a*=0mm では前節で 示したように鉄球に対して水平方向の復元力が働く.

しかし, *a*=1 mm では鉄球を左右に変位させたとき,その方向と同じ方向に力が働いていることがわかる.また,鉄球の位置が±3mm 付近では逆に復元力が働き,安定点が±3.5mm 程度のところにあることがわかる.このとき,図17より鉛直方向の力は,大きくなることがわかる.同様の結果が*a*を大きくしていった場合にも,見られる.

このことより,磁束の集中を避けるために, *a* の値を大きくすると,水平方向の運動は不安定となり制御による 安定化が必要であることがわかった.

### 5. 浮上 実験

試作装置を用いて浮上実験を行った.浮上実験では,水平方向と鉛直方向のステップ入力に対する応答を記録 した.

鉛直方向の実験では,鉄球を安定浮上させた後,センサに1mmのステップ入力を加え,その応答性を検証した. 実験結果を図18に示す.図の縦軸は鉄球の位置であり,横軸は時間である.図より,入力したステップに応じて



Fig. 16 Analysis result of Horizontal force.(a=0mm ~ 3mm,center)



Fig. 18 Experimental Result in Vertical Motion



Fig. 17 Analysis result of Vertical force.(a=0mm ~ 3mm,center)



Fig. 19 Experimental Result in Horizontal Motion

鉄球が追従し,約1秒で収束していることがわかる.

水平方向の実験では,0.2mmのステップ応答の実験を行った.結果を図19に示す.図に示すように,鉛直方向の実験に比べて,早く収束しているが,残留振動が多いことがわかる.この原因は,フィードバックゲインの調整不足以外にも,横方向のセンサにレーザセンサを利用したことが考えられる.レーザセンサは速いサンプリングでは精度が低下するためである.

これらの実験結果より,提案した機構により,水平方向と垂直方向の2自由度に関し,位置決め制御が可能であることが確認された.

## 6. おわりに

鉄球を多自由度に回転させるため,従来の浮上方法である永久磁石の鉛直方向の運動ではなく,斜め方向の運動 により浮上を行う2自由度の非接触支持機構の設計,開発を行った.まず,システムをモデル化し,シミュレー ションにより浮上可能性を調べた.この結果,永久磁石を力制御で駆動する場合,初期位置の調整が重要である ことがわかった.また,試作した装置を用いて浮上実験を行い,IEM解析により浮上機構の特性について解析を 行った.解析結果より,実際の試作装置を用いて浮上させる場合では,鉄球の水平方向の変位を計測し,それを用 いて永久磁石の位置を制御することが必要であることがわかった.これらの結果に基づき,浮上実験を行った結 果,2自由度の安定位置決め浮上に成功した.

#### 文 献

- (1) 藤原佑輔,崔天時,陳麗,岡宏一,"永久磁石リニア駆動によるマニピュレーション-鉄球の回転制御-",第17回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, No.2AM3, pp.231-236.
- (2) 孫 鳳,岡 宏一,"アクチュエータ駆動による非接触回転駆動機構-円板磁石の回転による駆動-",第 21 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, No.20B4-1, pp.207-212.

- (3) 崔 天時,岡 宏一,政木 慶次永久磁石とリニアアクチュエータを用いた磁気浮上機構 -両側吸引浮上に関する考察-日本 AEM 学会誌 Volume14 Number1 March2006 (ISSN 0919-4452) p.120 ~ p.125
- (4) K. Oka and T. Higuchi, Magnetic levitation system by reluctance control -levitation by motion control of permanent magnet-, Int. J. of Applied Electromagnetics in Materials, 4, pp.369-375, 1994
- (5) T. Higuchi and K. Oka, Reluctance Control Magnetic Suspension System Suspension System with Permanent Magnet and Linear Actuator, Trans. IEEJ, 113-7, pp.988-994, 1994