425 可変磁路式磁気浮上に関する研究 (第6報：吸引力特性の評価と3自由度位置制御)

Flux Path Control Magnetic Suspension

(6th report : Attractive force measurement and three-dimensional positioning)

○准 古舘宗大 (埼玉大) 稲葉俊介 (埼玉大)
正 高崎正也 (埼玉大) 石野裕二 (埼玉大) 正 水野 毅 (埼玉大)

Munehiro FURUTACHI, Saitama University Shunsuke INABA, Saitama University
Masaya TAKASAKI, Saitama University Yuji ISHINO, Saitama University Takeshi MIZUNO, Saitama University

In the flux-path control magnetic suspension system, the force acting on the floator is controlled by moving a control plates made of ferromagnetic material, which is located between the permanent magnet and the floator. In this paper, the three-dimensional attractive forces acting on the floator were measured with a manufactured load cell. In addition, stable three-dimensional positioning was achieved by applying PD control. Several dynamic characteristics were measured in each direction

Key Words: Magnetic Suspension System, Variable Flux-path, Load cell, Ferromagnetic material.

A 1. はじめに

磁気浮上の1つの方式として可変磁路式という方式が提案されている。これまでに、質量100g程度の浮上体に対して、完全非接触浮上に加えて、鉛直方向及び水平方向での浮上体の位置制御が可能であることが示された。さらに、1kg級浮上体の浮上装置の設計及び製作を行い、鉛直方向での安定した位置制御が確認された。本研究では、この装置において、浮上体に作用する吸引力の定量的測定を行い、それをもとに、浮上体の3自由度での安定した位置制御を目指す。

A 2. 可変磁路式磁気浮上装置

Fig.A 1 に本研究の磁気浮上装置を示す。装置の寸法は、約 $300 \times 300 \times 300$ mm となっている。浮上体は直径63 mm、質量約1kgの鉄球である。可動部の上端には寸法 $4 \times 70 \times 25$ mmの強磁性体を取付けており、これが永久磁石と浮上体との間の磁束を調整する。この可変磁路機構を 120° おきにずらして3組用い、永久磁石から浮上体に作用する磁束を変化させ、 x , y , z の3自由度浮上を行える構造になっている。また、可動部の下部に取付けた強磁性体を電磁石で吸引し、渦電流センサにより、位置検出を行う。

A 3. 吸引力及び水平方向分力の測定装置

3つの可動部の開閉に対して浮上体に作用する力を測定するために、Fig.A 2 に示す2分力計を設計し、製作した。鉛直方向、歪ゲージを取付けた2本のリン青銅板によって水平方向の力を同時に計測できる。Fig.A 3 における強磁性体（以下遮束板）の先端から中心までの距離 W 及び永久磁石と浮上

Fig.A 1 Apparatus

Fig.A 2 Two axis load cell

Fig.A 3 F_x , F_y and F_z in actuating one actuator

体の間の距離 G を変化させた際の、浮上体の鉛直方向（以下 z 方向）及び水平方向（以下 x - y 方向）の力を測定した。 W は15 mm～22 mmの間で8段階、 G は17.4 mm～26.4 mmの間で4段階変化させ、その時の三方向の分力（ F_x , F_y , F_z ）を測定した。可動部の開閉時の力を、製作した2分力計によって x - z 方向を測定し、これを 90° 回転させて y - z 方向で同じ条件で測定を行った。これらで得られた結果を合成し、吸引力を算出した。

A 4. 実験結果

Fig.A 3 は可動部の1つを $W=15$ mm（全閉状態）から1 mmずつ広げていったときの三分力の変化をベクトルで表記した。これより、 G が小さいほど、また、 W が大きいほど浮上体に発生する力が大きくなり、水平方向では0 N～0.35 N、鉛直方向が2.05 N～11.3 Nの範囲で作用する力を制御できることがわかる。また、浮上体に作用する力の大きさは、可動部を1つずつ開くよりも2つずつ開く方が大きくなり、その増加の割合も大きくなっていることがわかった。

1. 緒言

磁気浮上の1つの方式として可変磁路式という方式が提案されている^[1]。これまでに開発された基礎実験装置により、提案されている方式で、浮上体質量 100 g 程度の浮上体に対して、完全非接触浮上に加えて、水平方向での浮上体の位置制御も可能であることが示された^[2]。また、1 kg 級浮上体の浮上装置の設計及び製作を行い、上下方向の1自由度での安定した位置制御が確認された^[3]。しかしながら、これまでの研究では可変磁路式磁気浮上システムの吸引力特性などの基本的特性が測定されておらず、制御系を設計する時の数学モデルを導出されていない。

そこで本研究では、この1 kg 級浮上体浮上装置において、浮上体に作用する吸引力の基本特性を評価する。さらに、浮上体の3自由度での安定した位置制御を実現する。

2. 可変磁路式磁気浮上の原理

Fig. 1 に可変磁路式磁気浮上の原理図を示す。磁力源である永久磁石と浮上体の間に遮束板(強磁性体)を挿入し、遮束板の開閉により、浮上体に作用する吸引力の大きさを变化させる。同図(a)のように遮束板の間隔を狭くすると、遮束板を通る磁束が増加し、浮上体に作用する吸引力は減少する。逆に、同図(b)のように、遮束板の間隔を広げると、浮上体に作用する吸引力は増加する。このように、浮上体の位置や速度に合わせて遮束板の間隔を調整することにより、安定浮上が可能となる。また、この方法では、同図(c)のように、遮束板を同じ方向に動かすことにより、磁束中心の移動に伴って浮上体位置も移動するため、浮上体の鉛直方向の位置制御だけでなく、水平方向の位置制御も可能となる。

3. 可変磁路式磁気浮上装置

Fig. 2 に本研究の磁気浮上装置を示す。装置の寸法は、約 $300 \times 300 \times 300$ mm となっている。浮上体は直径 63 mm、質量約 1 kg の鉄球である。永久磁石にはネオジウム磁石 $\phi 50 \times 10$ 、磁束密度 380 mT のものを使用している。可動部の上端には寸法 $4 \times 70 \times 25$ mm の遮束板を取付けており、これが永久磁石と浮上体との間の磁束を調整する。これは、変位拡大機構を利用し、電磁石吸引部のストローク ± 1.5 mm に対し、

強磁性体部では ± 5 mm のストロークが得られる。この可変磁路機構を 120° おきにずらして3組用い、永久磁石から浮上体に作用する磁束を变化させ、x, y, z の3自由度浮上を行える構造になっている。また、可動部の下部に取付けた強磁性体を電磁石で吸引し、渦電流センサにより、位置検出を行う。

Fig. 2 Apparatus

Fig. 1 Principle of flux-path control magnetic suspension

Fig. 3 Photograph of the apparatus

4. 吸引力の測定

4.1. 吸引力測定装置

3つの可動部の開閉に対して浮上体に作用する力を測定するために、Fig. 8に示す2分力計を設計し、製作した。測定装置の寸法は $50 \times 50 \times 70$ mmで、定格10 Nのロードセルにより鉛直方向、歪ゲージを取付けた2本のリン青銅板によって水平方向の力を同時に計測できる。

2分力計をFig. 2に示す磁気浮上装置の浮上体下部に取り付け、Fig. 9における強磁性体（以下遮束板）の先端から中心までの距離 W 及び永久磁石と浮上体間の距離 G を変化させた際の、浮上体の鉛直方向（以下 z 方向）及び水平方向（以下 x - y 方向）の力を測定した。 W は15 mm～22 mmの間で8段階、 G は17.4 mm～26.4 mmの間で4段階変化させ、その時の3方向の分力（ F_x , F_y , F_z ）を測定した。

可動部の開閉時の力を、製作した2分力計によって x - z 方向を測定し、これを 90° 回転させて y - z 方向で同じ条件で測定を行った。これらで得られた結果を合成し、吸引力を算出した。

4.3 吸引力測定結果

2分力計による測定及びベクトルの合成で、Fig. 4～Fig. 7で示す吸引力の特性を得られた。Fig. 4は可動部の1つを $W=15$ mmから1 mmずつ広げていったときの三分力の変化をベクトルで表記した。Fig. 5は $G=20.4$ mmの時のみ、それを x - y 平面からみた分力の分布図である。それに対し、Fig. 6, Fig. 7は可動部を2つずつ同時に広げていったと

Fig. 8 Two axis load cell

Fig. 9 Definition of axis and parameters

Fig. 4 F_x , F_y and F_z in actuating one actuator

Fig. 5 F_x and F_y in actuating one actuator

Fig. 6 F_x , F_y and F_z in actuating two actuators

Fig. 7 F_x and F_y in actuating two actuators

きの測定結果を示した. Fig. 5 及び Fig. 7 では 120° ずつに配置した可動部が, 開閉した方向に力が働いたことを表している.

この結果から遮束板 1 だけを動かした時の吸引力は, 以下のように表せる.

$$F_x = 0.022(W-15) \quad [\text{N}]$$

$$F_y = 0.034(W-15) \quad [\text{N}]$$

$$F_z = 0.190(W-15) + 4.43 \quad [\text{N}]$$

また, 遮束板 1, 2 を同時に動かした時の吸引力は, 以下のように表せる.

$$F_x = 0.056(W-15) \quad [\text{N}]$$

$$F_y = 0.007(W-15) \quad [\text{N}]$$

$$F_z = 0.431(W-15) + 4.43 \quad [\text{N}]$$

以上の結果より, G が狭いほど, また, W が大きくなるほど浮上体に発生する力が大きくなり, 水平方向が $0\text{N} \sim 0.35\text{N}$, 鉛直方向が $2.05\text{N} \sim 11.3\text{N}$ の範囲で作用する力を制御できる. また, 浮上体に作用する力の大きさは方向を問わず, 可動部を 1 つずつ開くよりも 2 つずつ開く方が大きくなり, その増加の割合も大きくなっていることがわかる.

5. 浮上実験(z 方向)

5.1. z 方向の浮上の制御系

本実験の z 方向の制御方式のモデルを Fig. 10 に示す.

各パラメータは, 次の諸量を示している.

m : 可動部質量 K : 系のばね定数

K_v : 変換ゲイン P_d : 比例ゲイン

P_v : 微分ゲイン e_k : 指令信号

w_k : 遮束板の変位 M : 浮上体質量

K_q : 遮束板の変位に対する吸引力の変化定数

浮上体の変位信号に対して PD 制御を行い, その信号を分割して, 各可変磁路機構への指令信号とする. それらの信号をもとに制御する電磁石への入力信号が決まり, 可動部の開閉距離を制御する. また, それぞれの可動部についても PD 制御を行い, 剛性と減衰特性を持たせている.

5.2. 位置制御

Fig. 11 に z 方向ループの指令値 e_z を変化させた際の浮上体 z 方向の位置の変化を表した. これにより, z 方向に関して指令値にほぼ比例しているため, 浮上体の位置制御できていることがわかる.

5.3. ステップ応答

発信器により, z 方向ループの指令値として $e_z = 1.4$ [V], 0.05 [Hz] の矩形波を入力した. Fig. 12 は $P_v = 0.03$ [As/m] の時の様子である. これにより, かなり良好な減衰特性が取得されていることがわかる.

6. 浮上実験(x 方向)

6.1. 三自由度浮上の制御系

本実験では DSP 内で Fig. 13 に示すブロック線図をもちいて, 鉛直方向と同様, 水平方向にも PD 制御を行った. 概略図を Fig. 14 に示す. 本研究では, 浮上体に対して垂直に 2 つの渦電流センサを取り付け, これにより位置検出を行う. Fig. 14 において, A1, A2, A3 は 120° ずつに配置された可動部の方向を示していて, x , y はテーブルに対して垂直な方向である. 今, 浮上体に図中の矢印の外乱が加えられたならば, 各可動部を動かし, 元の位置に戻すように制御しな

Fig. 10 Control system for the vertical motion

Fig. 11 Displacement in z direction

Fig. 12 Step response in the z direction

ければならない. つまり, 矢印と逆方向に動かす. そこで, そのベクトルをまず, x , y 方向に分解し, 次に A1~A3 方向に合成して, それぞれの可動部が動く量を算出し, DSP 内でこの処理を行い, 水平方向の PD 制御を行った.

6.2. 位置制御

x 方向について, DSP 上で PD ループの指令値を変化させた時の浮上体の変位を測定した. その結果を Fig. 15 に示す. これより, 入力電圧にほぼ比例した位置制御を行うことができた事がわかる. y 方向に関して, ほぼ同様の結果が得られたため, 水平方向に対して指令値に比例した位置制御を行うことを確認できた.

Fig. 13 Block diagram of whole control system

Fig. 14 Arrangement of sensors

6.3.ステップ応答

x 方向のループの指令値として、 $e_x = 1.4$ [V]、 0.1 [Hz]の矩形波を入力した。その結果を Fig. 12 に示す。図には上から順に、3つの可動部と浮上体の変位を示した。これにより、可動部の開閉に対し、浮上体の動きが追従できていることがわかる。また、浮上体の動きに減衰が見られたため、微分が効いていることがわかる。 y 方向に関してもほぼ同様の結果を得ることができた。

6.4.周波数応答

Fig. 17 に浮上体の x 方向の周波数応答を示す。測定時のソース電圧は 300 [mV]、 $P_d = 1.3 \times 10^3$ [V/m]、 $P_v = 3.3$ [As/m]である。これより共振周波数は約 1.7 [Hz]であり、鉛直方向に対して周波数応答を行った時の共振周波数に比べ、かなり低い値となった。これは、この装置の構造上、浮上体に対して鉛直方向と比べ、水平方向には吸引力を発生できないことが原因として考えられる。

7. 結言

可変磁路式磁気浮上装置において、2分力計の設計及び製作を行った。これにより、3自由度制御の指標となる、浮上体に発生する力の特性を得た。これらの吸引力の結果を基に、浮上体の3自由度制御のモデリングを行い、PD制御による3自由度浮上を実現した。また、浮上時の水平方向における、ステップ応答、周波数応答を取得した。

参考文献

[1]水野毅：「磁路方磁気浮上に関する研究」，日本機械学会関東支部ブロック合同講演会(pp177-178, 2002)

Fig. 15 Displacement in x direction

Fig.16 Step response in the x direction

Fig. 17 Frequency response of floator in x direction

[2]平井雄三：「可変磁路式磁気浮上の研究」，埼玉大学機械工学科卒業論文(2004)

[3]稲葉俊介：「可変磁路式磁気浮上に関する研究（第5報，kg級浮上体の浮上実験）」，機械学会関東支部第13期総会講演会(2007)