多重式磁気浮上システムの開発* (第2報: 並列2重磁気浮上の実現)

櫻田 巧^{*1}, 水野 毅^{*2}, 高崎 正也^{*3}, 石野 裕二^{*4}

Multiple Magnetic Suspension Systems (2nd Report: Realization of Double Parallel Magnetic Suspension)

Takumi SAKURADA, Takeshi MIZUNO^{*2}, Masaya TAKASAKI and Yuji ISHINO

^{*2} Department of Mechanical Engineering, Saitama University,
Shimo-Okubo 255, Sakura-ku, Saitama, 338-8570 Japan

The feasibility of parallel magnetic suspension is studied experimentally. Parallel magnetic suspension suspends multiple floaters with a single power amplifier. Parallel magnetic suspension systems are classified according to the number of floaters (multiplicity), the output type of amplifier and the connection method of coils. This paper focuses on the current-controlled double suspension system with series connected coils. An experimental system is built by combining two magnetic suspension systems. A simultaneous stable levitation of the two floaters was achieved by using PD control with a single power amplifier. Several dynamics characteristics were measured. They agreed with simulation results in tendency.

Key Words : Magnetic Suspension, Magnetic Bearing, Controller, Mechatronics, Motion Control, Controllability

1. 結 言

電磁石の吸引力を制御した磁気浮上系では能動的な制御によって安定化することにより, 非接触で浮上体を支持する. このため, 真空中やクリーンルームなどの特殊環境下で使用できることや振動・騒音の低減, メンテナンスが容易になるなど多くのメリットがある. このような吸引制御型磁気浮上システムは, 基本的には浮上の対象となる物体(以下, 浮上体と呼ぶ)が単一で, アクチュエータである電磁石を最小で一個, 多自由度の運動を制御する場合は複数個用いる. また, 各電磁石について, 励磁を行う電力増幅器(以下, アンプと呼ぶ)を一台用いている. したがって, 磁気浮上系ではアクチュエータの数と同数のアンプが必要となる. このため, 複数の電磁石を用いた磁気軸受の場合, 多くのアンプを使用するため高価格になってしまう. そこで, 著者らはこれまでに, 単一のアンプを用いて複数の浮上体を支持する多重式磁気浮上システムを提案し⁽¹⁾, その可制御性及び可観測性を理論的に明らかにした^{(1)~(4)}. さらに, シミュレーションで実現可能性を検証しているが, これまでに実験的に実現した例は報告されていない. そこで本報では, 実験装置として鉄球を浮上体とする1自由度制御形磁気浮上装置と浮上体がシーソー型となっている磁気浮上装置を組み合わせる実験システムを構築し, 単一の電流出力形アンプを用いて, 並列2重磁気浮上を実現した結果について報告する. なお, 並列多重磁気浮上システムではバイアス電流を個別に設定することができないため, それぞれの磁気浮上装置にはバイアス電流の代わりに永久磁石を用いてバイアス磁束を与えている.

* 原稿受付 2010 年 12 月 9 日

^{*1} 埼玉大学大学院理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

^{*2} 正員, フェロー, 埼玉大学大学院理工学研究科

^{*3} 正員, 埼玉大学大学院理工学研究科

^{*4} 埼玉大学総合研究機構

E-mail: mizar@mech.saitama-u.ac.jp

2. 基本構想

2・1 基本モデル

電磁石の吸引力を利用した磁気浮上システムの基本構成を図1に示す．ここでは，浮上体は強磁性体（ここでは鉄）とする．浮上体に作用する重力と永久磁石による吸引力とがつり合っている状態からの浮上対象物の垂直方向の変位を x で表すと，この系の運動方程式は式(1)のようになる⁽¹⁾．

$$m\ddot{x}(t) = k_s x(t) + k_i i(t) \quad (1)$$

- m : 浮上対象物の質量,
- k_s : 電磁石の特性係数 (=力/変位),
- k_i : 電磁石の特性係数 (=力/電流),
- i : 電磁石のコイル電流.

この場合，電磁石のコイル電流を制御入力として扱うことができるので，制御系の状態方程式及び各行列，パラメータは以下のように示される⁽¹⁾．

$$\dot{\mathbf{x}}_c(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c(t) + \mathbf{b}_c i(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_c = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_{21} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \end{bmatrix},$$

$$a_{21} = \frac{k_s}{m}, \quad b_0 = \frac{k_i}{m}.$$

2・2 並列2重磁気浮上システム

図2(a)と図2(b)に並列多重式磁気浮上システムの概念図を示す．図では浮上体及び電磁石が2個の場合を示しているが，原理的には任意個に拡張できる^{(1)・(4)}．また，並列多重磁気浮上では，それぞれの磁気浮上装置にバイアス電流を個別に設定することができないため，バイアス電流の代わりに永久磁石を用いてバイアス磁束を与えている．以下では，電磁石と永久磁石を組み合わせた磁石をハイブリット磁石と呼ぶ．並列多重磁気浮上システムは図2(a)や図2(b)のように電磁石コイルの接続方法によって直列接続式と並列接続式に分類される．図2(a)は直列接続式並列2重磁気浮上システムであり，図2(b)は電磁石コイルが並列に接続されている並列接続式並列2重磁気浮上システムである．本報では，電磁石の励磁に電流出力形アンプを用い，電磁石コイルの接続方式を直列とした，電流制御形直列接続式並列2重磁気浮上システムを対象としている．以下では，簡単のため，「電流制御形」及び「直列接続式」は省略し，単に並列2重磁気浮上システムと呼ぶことにする．

Fig.1 Basic model of magnetic suspension system

(a) Series connection

(b) Parallel connection

Fig.2 Parallel Magnetic Suspension System

2・3 可制御性

並列2重磁気浮上システムの状態方程式を表す際、 k 番目の浮上体とそれに対応する電磁石とから構成される仮想的な磁気浮上システムに関わる行列やパラメータを $A_c^{(k)}$ や $a_{21}^{(k)}$ のように括弧付きの上添え字で表すことにすると、式(3)のようになる⁽¹⁾。

$$\dot{\mathbf{x}}_{cs2}(t) = \mathbf{A}_{cs2} \mathbf{x}_{cs2}(t) + \mathbf{b}_{cs2} i(t) \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_{cs2} = \begin{bmatrix} x_c^{(1)} \\ x_c^{(2)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{cs2} = \begin{bmatrix} A_c^{(1)} & 0 \\ 0 & A_c^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21}^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_{21}^{(2)} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_{cs2} = \begin{bmatrix} b_c^{(1)} \\ b_c^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_0^{(1)} \\ 0 \\ b_0^{(2)} \end{bmatrix}.$$

この並列2重磁気浮上は、次の式(4)の条件が成立するとき、可制御となることが証明されている⁽¹⁾。

$$a_{21}^{(1)} \neq a_{21}^{(2)} \quad (4)$$

3. 実験装置

3・1 並列2重磁気浮上装置

本実験で使用した装置の全体の写真を図3に示し、概略図を図4に示す。本実験では、鉄球を浮上体とする1自由度制御形磁気浮上装置（以下では、磁気浮上装置1と呼ぶ）と、浮上体がシーソーとなっている磁気浮上装置（以下では、磁気浮上装置2と呼ぶ）の二つの実験装置を組み合わせる実験を行った。磁気浮上装置1及び磁気浮上装置2の位置検出には、渦電流形変位センサを用いている。アンプとして市販の4現象パイプーラ電源(高砂製作所製 BWS 40-15)を電流出力モードで用いた。アンプは後述する磁気浮上装置2の電磁石を負荷とした場合にバンド幅が約850[Hz]であるので、電流制御形磁気浮上システムとして扱っても問題ないと考えられる。

3・2 磁気浮上装置1

本実験で使用した磁気浮上装置1の概略図を図5に示す。磁気浮上装置1の浮上体には鉄球を用い、浮上体の上部に浮上用電磁石を、下部に位置センサを配置している。浮上体の鉄球は、球状という形状のため積層することが難しく、ソリッドのものを使用している。通常、このようなソリッドの浮上体では、渦電流の影響などが大きくなるが、後述するように、実現された浮上系では応答がそれほど速くないので、本実験ではその影響を考慮せずに制御系の設計を行っている。

浮上用電磁石の鉄心部分にはバイアス磁束発生用の永久磁石が取り付けられている。用いた永久磁石は、円筒状のネオジウム磁石（直径：10[mm]，厚さ：0.5[mm]）であり、浮上体質量はおおよそ70[g]であり、浮上体の直径

Fig.3 Photo of experimental apparatus

Fig.4 Schematic view of experimental apparatus

Fig.5 Schematic view of suspension system 1

Fig.6 Schematic view of suspension system 2

は 26[mm]である。また、磁気浮上装置 1 の電磁石の特性係数 $a_{21}^{(1)}$ 、 $b_0^{(1)}$ は、並列 2 重磁気浮上が実現した時の浮上位置での値を実験的に求め、それぞれ以下の値を得た。

$$a_{21}^{(1)} = 9.59 \times 10^3 [\text{N/m}], \quad b_0^{(1)} = 10.9 [\text{N/A}].$$

また、渦電流や磁気ヒステリシスの影響を考慮しない場合、磁気浮上装置 1 の運動方程式は、以下のように表される（式(1)参照）。

$$m^{(1)} \ddot{x}^{(1)}(t) - k_s^{(1)} x^{(1)}(t) = k_i^{(1)} i(t) \quad (5)$$

3・3 磁気浮上装置 2

本実験で使用した磁気浮上装置 2 の概略図を図 6 に示す。磁気浮上装置 2 は、浮上体が中央のベアリングを中心に 1 自由度の回転運動方向に拘束されているシーソーになっており、シーソーのバランスが取れていない状態に設定されている。浮上体等価質量は 1.97[kg]である。浮上用電磁石及びバイアス磁束発生用の永久磁石は、シーソー左端上部に取り付けてある。永久磁石は、角型のネオジウム磁石（15[mm]×10[mm]×2[mm]）である。さらに、外乱用電磁石を浮上用電磁石の右側に取り付けてある。また、磁気浮上装置 2 の電磁石の特性係数、 $a_{21}^{(2)}$ 、 $b_0^{(2)}$ は並列 2 重磁気浮上が実現した時の浮上位置での値を実験的に求め、それぞれ以下の値を得た。

$$a_{21}^{(2)} = 0.783 \times 10^3 [\text{N/m}], \quad b_0^{(2)} = 0.950 [\text{N/A}].$$

また、この装置の浮上体は中央のベアリングを中心に回転運動するが、定常状態での回転角度 θ の変化は微小なため回転運動を直動運動へ線形近似することで浮上体変位を $x^{(2)}$ で表すことができる。さらに、シーソーを回転支持するベアリングでの摩擦の影響を無視できないため、摩擦の影響を減衰として扱うことにすると、磁気浮上装置2の運動方程式は、式(6)のように表せる。

$$m^{(2)}\ddot{x}^{(2)}(t) - k_s^{(2)}x^{(2)}(t) + c\dot{x}^{(2)} = k_i^{(2)}i \quad (6)$$

摩擦による減衰の大きさを表すパラメータ c は実験的に求め、以下の値を得た。

$$c = 4.00[\text{Ns/m}].$$

4. シミュレーション

実験的に求めた各パラメータを用いて並列2重磁気浮上のシミュレーションを行った。シミュレーションでは渦電流や磁気ヒステリシスの影響を無視している。シミュレーションに用いた各パラメータは以下に示す。

$$\dot{\mathbf{x}}_{cs2}(t) = \mathbf{A}_{cs2}\mathbf{x}_{cs2}(t) + \mathbf{b}_{cs2}i(t),$$

$$\mathbf{A}_{cs2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 9.59 \times 10^3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.783 \times 10^3 & -2.03 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{b}_{cs2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 10.9 \\ 0 \\ 0.950 \end{bmatrix}.$$

このシステムは、磁気浮上装置2の軸受部の減衰がないとした場合でも、式(4)が成立しているので可制御となっている。したがって、次のような状態フィードバックによって安定化することができる。

$$i(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t), \quad (7)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} P_d^{(1)} & P_v^{(1)} & P_d^{(2)} & P_v^{(2)} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

ここで、 $P_d^{(1)}$ 、 $P_v^{(1)}$ は磁気浮上装置1で用いる比例ゲイン及び微分ゲインである。また、 $P_d^{(2)}$ 、 $P_v^{(2)}$ は磁気浮上装置2で用いる比例ゲイン及び微分ゲインである。シミュレーションを行う際、フィードバック係数行列は実験で用いた値と同様の値であり、式(9)～(12)に示す。

$$P_d^{(1)} = 3.00 \times 10^3 [\text{A/m}], \quad (9)$$

$$P_v^{(1)} = 7.70 [\text{As/m}], \quad (10)$$

$$P_d^{(2)} = -2.50 \times 10^3 [\text{A/m}], \quad (11)$$

(a) Floator 1 (steel ball)

(b) Floator 2 (arm)

(c) Coil current

(d) Disturbance acting on the floator 2 (arm)

Fig.7 Simulation result

$$P_v^{(2)} = -8.10[\text{As/m}]. \quad (12)$$

図7に並列2重磁気浮上のステップ応答の計算値を示す。ステップ外乱は周波数0.1[Hz]、振幅は1.5[mN]を浮上体2に入力している。浮上体2へ外力が入力されると浮上体1と浮上体2は外力と同じ方向に変位することが確認できる。また、浮上体1は外乱が入力されると定常状態から0.017[mm]上方向に変位し、浮上体2は0.015[mm]上方向に変位し、コイル電流は0.015[A]変動することが確認できる。

図8に並列2重磁気浮上における周波数応答の計算値を示す。図8(a)は入力 e_0 に対する浮上体1の応答結果を示しており、図8(b)は入力 e_0 に対する浮上体2の応答結果を示している。図8(a)(b)での2.45[Hz]の共振周波数は磁気浮上系2の固有振動数であり、20.75[Hz]の共振周波数は磁気浮上系1の固有振動数である。

Fig.8 Frequency response to parallel suspension system

Fig.9 Block diagram of controller

5. 実験

5・1 制御系

本実験で用いた制御系のブロック線図を図9に示す。本実験では、並列2重磁気浮上を実現するためにそれぞれの磁気浮上装置の変位センサからの信号を用いて制御を行った。実験において、 $P_d^{(1)}$ 、 $P_v^{(1)}$ 、 $P_d^{(2)}$ 、 $P_v^{(2)}$ のチューニングを試行錯誤的に行った。

5・2 浮上実験

コントローラのチューニングを試行錯誤的に行うことで、並列2重磁気浮上を実現した。また、浮上を確認するために磁気浮上装置2の外乱用電磁石へ矩形波を電流信号として入力し、ステップ応答を取得した。この時、応答結果を図10に示す。入力した矩形波は周波数0.1[Hz]、振幅は1.5[mN]である。また、実験に用いたフィードバック係数行列の各パラメータはシミュレーションで用いた値と同様の値となっている。このため、実験に用いた K 行列は以下の式になる。

Fig.10 Response of parallel suspension system to step disturbance acting on the floator 2

$$\mathbf{K} = [-3.00 \times 10^3 \quad -7.70 \quad 2.50 \times 10^3 \quad 8.10]$$

図10より, 浮上体2へ外力が入力されると浮上体1と浮上体2は外力と同じ方向に変位することが確認できる. また, 浮上体1は外乱が入力されると定常状態からおおよそ0.025[mm]上方向に変位し, 浮上体2はおおよそ0.02[mm]上方向に変位することが確認できる. さらに, それぞれの磁気浮上装置に入力されるコイル電流は定常状態からおおよそ0.02[A]変動していることが確認できる.

5・3 周波数応答

図11に並列2重磁気浮上の周波数応答を示す. 図11(a)は入力 e_0 に対する浮上体1の応答結果を示しており, 図11(b)は入力 e_0 に対する浮上体2の応答結果を示している. 図11(a)(b)での2.88[Hz]の共振周波数は磁気浮上系2の固有振動数であり, 22.9[Hz]の共振周波数は磁気浮上系1の固有振動数である. また, 図10(c)はコイル電流の応答結果を示している. コイル電流は図11(a)及び(b)と同じ共振周波数が存在する. このことから図10(c)はそれぞれの浮上体の共振周波数が影響していることがわかる. シミュレーション結果と実験結果を比較すると, 概

Fig.11 Frequency response to parallel suspension system

ね傾向は一致しているが、共振のピークについては差異が生じている。これは、磁気浮上装置1の浮上体が垂直方向1自由度の並進運動しかアクティブに制御しておらず、他の自由度(水平方向の並進運動)は端効果によるパッシブな支持となっているため、特に共振周波数付近では、水平方向に振動してしまうことが原因の一つのと考えられる。さらに、浮上体1の自転、渦電流や磁気ヒステリシスの影響なども差異の要因と考えられる。

また、実現した並列2重磁気浮上は、減衰が小さく振動的な特性を持っていることがわかる。理論的には、可制御なシステムなので、より減衰が大きくなるように閉ループ系の極を配置することが可能である。しかし、実際にはこのように極を配置しようとする速度フィードバックゲインが大きくなり、現在使用しているアンプでは電圧が飽和してしまうので実現できない。この問題は、より高出力のアンプを用いれば解決できると考えられる。

6. 結 言

異なる特性を持つ二つの磁気浮上装置を選定し、試行錯誤的にフィードバックゲインを調整することで並列2重磁気浮上を実現した。浮上を確認するために、外乱用電磁石を用いてステップ応答と周波数応答を取得した。

また、同様にシミュレーションにおいても、外乱用電磁石を用いたステップ応答と周波数応答を取得し、概ね一致していることを確認することができた。

文 献

- (1) 水野毅, 高崎正也, 石野裕二, “多重式磁気浮上システムの開発 (第1報: 基本構想)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.761 (2010), pp.76-83.
 - (2) 丸山裕, 大芝優介, 石野裕二, 高崎正也, 水野毅, “多重式磁気浮上システムの開発 (第2報: 直列多重磁気浮上系の可制御性と可観測性)”, Dynamics and Design Conference 2009 CD-ROM 論文集 (2009), 442.
 - (3) 水野毅, 高崎正也, 石野裕二, 丸山裕, “多重式磁気浮上システムの開発 (第3報: 基本定理の証明)”, 第11回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集 (2009), pp.448~451.
 - (4) 櫻田巧, 丸山裕, 石野裕二, 高崎正也, 水野毅, “多重磁気浮上システムの開発 (第4報: 並列二重磁気上の実現)”, 第52回自動制御講演会講演論文集 CD-ROM (2009), G5-2.
-