# 永久磁石の吸引力を利用した懸垂型磁気浮上機構における零パワ制御

Zero Power Control for Hanging Type Magnetic Suspension System Using Permanent Magnet

学孫鳳(高知工科大学)正岡宏一(高知工科大学)

Feng SUN, Kochi University of Technology, Tosayamada, Kami, Kochi Koichi OKA, Kochi University of Technology

This paper describes a zero power control method of a hanging type magnetic suspension system, using a linear actuator to control the permanent magnet attractive force to maintain the levitation device suspending. A spring was installed in the magnetic suspension device to counterbalance the force of the actuator on the mass gravitation, and an integral feedback loop was used in the controller to adjust the actuator current zero in the balance state. According to a theoretical model, numerical simulations and experiments were completed, and some results are shown here.

Key words: Zero Power Control, Hanging Type, Spring, Magnetic Suspension, Permanent Magnet

磁気浮上機構では,原理的に機械的接触による塵埃の発 生はない.この利点は,クリーン環境内での非接触搬送装 置に適すが,このような非接触バッテリなどを積載した自 走式の搬送装置の場合は節電の対策が必要である.本研究 は,リニアアクチュエータを用いて永久磁石と強磁性体と の間に働く吸引力を制御する方式を用いた,懸垂型磁気浮 上機構の零パワ制御について報告する.

試作した磁気浮上装置の浮上時の写真を Fig.A1 に示す. 浮上体は永久磁石部とベース部との2つの部分から構成さ れる.永久磁石部は,永久磁石, VCM(Voice Coil Motor, アクチュエータ)のスライダ部分およびセンサターゲット 部分から成り,連結されでいる.ベース部は, VCM のス テータに連結された部分であり,浮上体のほとんどの重量 を占める、この装置の浮上時の永久磁石の吸引力は、浮上 体の重量と等しい.この重量を VCM の発生力だけで支え ようとすると, VCM は常に力を発生させていなくてはな らず,定常電流による,エネルギが消費される.バネを永 久磁石部とベース部の間に付け,局所的積分フィードバッ クループを用いたコントローラを使用することで,定常的 な浮上状態では,バネの発生力がベース部の重量を打ち消 すことが可能である.VCM の発生力は安定性を保つだけ の制御をするだけでよい.この浮上装置のコントローラを Fig.A2 に示す.図の内側の積分ループにより VCM に入力 される電流が0になるように制御が行なわれる.

数値シミュレーションにより,試作したシステムの浮上の可能性と,吸引力の非線型性の影響を確認した後,試作装置と零パワ制御を用いて実験を行った.実験結果をFig.A3に示す.安定浮上状態を実現し,1.5秒の時に10[g]の負荷をベース部に加えた場合の応答結果を記録した.上の図は VCM に入力された電流であり,正の値は VCM のスライダを上に動かす力を示す.真中の図がベース部の変位であり,下の図がベース部と永久磁石部の相対変位である.上向きの方向の変位を正として記録してある.電流の図からわかるように,外乱の前後で定常的な電流が0となっている.この結果は,同様の条件で数値シミュレーションした場合の結果と同じであった.

以上の結果から,永久磁石の吸引力を利用した懸垂型磁 気浮上機構で,バネと電流積分フィードバックループを用 いた零パワ制御が可能であることが確認できた.



Fig.A1 Photograph of suspending mag-lev system



Fig.A2 Block diagram of control system



Fig.A3 Experiment results with zero power control

磁気浮上機構には多くの方式が提唱され,また実現さ れている<sup>1)</sup>.磁気浮上機構は,原理的に機械的接触による 塵埃の発生はないため,半導体製造,バイオテクノロジ, 材料製造などの分野のクリーン環境での非接触搬送装置と して有効である.しかし,このような浮上搬送機構が,完 全に非接触で操作するためには,電池駆動または非接触給 電を行う必要があり,定常的な浮上状態では,電力の消費 を極力抑えることが要求される.このために,電磁石を用 いた EMS 磁気浮上機構では,永久磁石を磁気回路中に用 いて,それが発生する磁力により浮上体の重量を支持し, 安定化制御のためだけに電磁石にコイル電流を流して吸引 力を調整するということを行っている.このような制御法 は,零パワ制御と呼ばれている<sup>2)</sup>.

本研究は,リニアアクチュエータを用いて永久磁石と強磁性体との間に働く吸引力を制御する方式を用いた,懸垂型磁気浮上機構<sup>3)</sup>の零パワ制御について報告する.このような浮上機構が浮上する時,アクチュエータは浮上機構の重量を支持する必要があり,節電の対策が必要がある.このような磁気浮上システムにおける零パワ制御を実現するために,浮上装置の間にバネを付けて,積分フィードバックループを用いるコントローラを使用することを提案する.

本報告では、まず永久磁石を用いた浮上原理を説明する.次に,試作装置を紹介し,そのモデル化を行う.次に,零 パワ制御のためのコントローラの一例を示し,このモテル とコントローラに基づいて行ったシミュレーション結果を 示す.最後に零パワ制御を用いた実験結果を示す.これら の結果からリニアアクチュエータによる浮上方式において 零パワ制御を実現できることを確認する.

#### 2. 浮上原理

本研究の浮上機構の原理を Fig.1 を用いて説明する.浮 上装置は、永久磁石とアクチュエータと質量体で構成され, 天井から永久磁石の吸引力により非接触でぶら下がって浮 上する.天井は強磁性体で作られており,浮上搬送装置の ためのレールと考えられる.アクチュエータは伸縮するこ とにより浮上の安定化制御を行う.装置が浮上していると き,能動浮上の方向は垂直で,平衡状態においては永久磁 石の吸引力は浮上装置の重量と等しい.磁石の吸引力は永 久磁石と強磁性体の空隙の自乗に反比例するという原理<sup>4)</sup> <sup>5)</sup>により,永久磁石と質量体の間の距離を制御することで, 空隙を調整し,磁気浮上システムの安定化を行う.空隙が 平衡状態の空隙より大きいときには,アクチュエータによ って永久磁石を上に動かす.空隙が平衡状態の空隙より小 さいときには,アクチュエータによって永久磁石を下に動 かす.このように,浮上機構は安定に非接触浮上できる.

## 3. 試作装置とモデル

#### 3·1 試作装置

試作装置の正面から見た写真を Fig.2 に示す .Fig.2 に示 すように,浮上装置は強磁性体である天井からぶら下がる ことにより浮上する.この試作装置は主に永久磁石, VCM(Voice Coil Motor),バネ,渦電流式センサ,ベースで 構成されている.浮上装置の質量は全体が 746.8[g]で,永



Fig.1 Outline of a suspension system



Fig.2 Photograph of suspending mag-lev system

久磁石部とベース部から成る.永久磁石部は,永久磁石, VCM(Voice Coil Motor,アクチュエータ)のスライダ部分お よびセンサターゲット部分から成り,連結されている.こ の部分の質量は 79.5[g]である.ベース部は,VCM のステ ータに連結された部分であり,VCM のステータ部,マイ クロメータ,センサなどが含まれる.この部分の質量は 667.3[g]であり,浮上装置のほとんどの重量を占める.

VCM は,可動範囲は 15[mm]であり,定格電流 2[A]の ときに推進力 10[N]を発生する.VCM は2つの部分があり, 1つはステータであり,主に永久磁石と鉄のコアから成り, ベース部の一部である.もう1つはスライダであり,コイ ルから成り,永久磁石部の一部である.VCM が浮上状態 の安定化を制御する唯一のものである.

渦電流センサは試作装置上に3つある.上部の2つの渦 電流センサは天井から浮上体ベース部の位置を検出する. 測定範囲が4[mm]であり,分解能が0.5[µm]である.センサ を2つ使用することにより,その平均値をベース位置の信 号として扱うことができ,浮上体が振れたときのノンコロ ケーション問題を低減することができる.これらのセンサ 位置は高精度な設定を必要とするためマイクロメータで調 節できるようにした.ベース部と永久磁石部の相対変位を 検出する浮上体下部の渦電流式センサは,測定範囲が 10[mm]であり,分解能が5[µm]である.

この浮上システムのコントローラは Fig.2 に示したよう

な DSP コントローラである .上下の渦電流センサの信号は, A/D 変換器によってデジタル化し,コントローラに入力さ れる.その信号に基づいて DSP は演算を行い適切な VCM の発生力を計算する.その結果は,D/A 変換器を通して VCM への電流信号として出力される.

#### 3・2 試作装置のモデル化

試作した浮上システムにおける,浮上可能性の理論的な 確認,数値シミュレーションの実行,およびコントローラ のフィードバックゲインの決定などのために,浮上システ ムのモデル化を行った、浮上装置のモデルを Fig.3 に示す. このモデルによって,ベース部と永久磁石部との運動方程 式は次式となる.

$$m_0 \mathscr{G}_{a} = k_s (z_1 - z_0) + c (\mathscr{G}_{a} - \mathscr{G}_{b}) - f_a - m_0 g \dots (A1)$$

$$m_1 \mathscr{G}_{t} = k_s (z_0 - z_1) + c (\mathscr{G}_{t} - \mathscr{G}_{t}) + f_a + f_m - m_1 g \dots (A2)$$

ただし,

- *m*<sub>0</sub>: ベース部質量(667.3g)
- m1: 永久磁石部質量(79.5g)

*z*<sub>0</sub>: ベース部位置 (上向きを正)

z<sub>1</sub>: 永久磁石部位置 (上向きを正)

f<sub>a</sub>: アクチュエータ発生力 (伸びる方向を正)

fm: 永久磁石吸引力

k: 用いるバネのバネ定数(0.6N/mm)

c: バネの減衰特性や VCM のベアリングの摩擦, 空気の粘 性摩擦などを全て含むダンピング定数(0N/(mm/s))

さらに,入力電流と VCM の発生力の関係,永久磁石の 吸引力と空隙の関係が次式のように表される

| $f_a = k_t i$                | (A3) |
|------------------------------|------|
| $f_m = \frac{k_m}{r^2}$      | (A4) |
| <i>d<sup>2</sup></i><br>ただし, |      |

k<sub>t</sub>:VCM の推進力定数(5N/A) *i*:VCM の入力電流 k<sub>m</sub>:永久磁石の吸引力係数(9.52\*10<sup>-5</sup>Nm<sup>2</sup>) *d*:天井と永久磁石の空隙

### 4.零パワ制御のコントローラ

## 4・1 零パワ制御法の提案

この磁気浮上システムが浮上しているとき,永久磁石と 天井間の吸引力の大部分は,VCM の発生力を介してベー ス部をつり下げる力となる.そのため,VCM は常に力を 発生させていなくてはならず,定常電流によるエネルギが 消費される.この VCM の発生力を補助するために,バネ を利用することを考える.このバネは Fig.2 に示すように VCM のステータと下部のセンサターゲットとの間に挿入 される.永久磁石部が上に引き上げられると,バネが縮み, ベース部を上方向に打ち上げる力が発生する.さらに,局 所的積分フィードバックループを用いたコントローラを使 用することにより,平衡状態にある浮上時において,バネ の発生力をベース部の重量と等しくし,VCM の発生力を ゼロとして,VCM に入力される電流を0にすることが可 能である.VCM の発生力は安定性を保つだけの制御をす るだけでよいことになる.



Fig.3 Model of suspension system



Fig.4 Block diagram of control system

#### 4・2 コントローラ

磁気浮上システムのコントローラには,零パワ制御を実 現するための制御方法として,オブザーバを用いるものな ど種々のものが考えられるが,今回は積分制御を用いて実 現する方法について考察する.零パワ制御を実現する制御 システムのブロック線図を Fig.4 に示す.この制御システ ムは大きな2つの PD フィードバックループを持っている. 一つは浮上体と天井の相対位置のフィードバックループで あり,これは図の下側のループである.他の一つはベース 部と永久磁石部の相対変位のフィードバックループであり, 図の上側のループである.これらの2つの PD フィードバ ックループは,3 つのセンサ信号に基づいて VCM の電流 値を計算することにより,浮上安定化を図るものである.

今回,零パワ制御を実現するための制御は,図では中央 付近に示される局所ループである.これは,VCMに入力さ れる電流を積分フィードバック補償するものである.VCM に入力される電流があるとそれを打ち消すようにフィード バック量が増えていく.フィードバック量が増えるとVCM は永久磁石部とベース部の間隔を広げる力が発生する.こ のとき,装置に組込まれたバネは圧縮され,その動きに従 って発生力が大きくなる.やがて,平衡位置に到達すると, ベース部の重量は全てバネが支持することになり,VCMの 電流は0になる.

このとき,天井と永久磁石の間の空隙は変化しない.こ の間の吸引力は常に浮上装置全体の重量と釣り合っていな ければならないので,空隙は一定である.ベース部のみが 動くことによって零パワ制御が実現される.

局所電流積分フィードバックループのゲインはk<sub>i</sub>であり, この値は,電流の変化速度に影響する.値が大きいとき, 電流がより速く0に近づく.しかし,速い電流変化の場合に, システムの安定はむずかしい.システムに従って,k<sub>i</sub>を適 切な数値にする必要がある.

## 5. シミュレーションおよび実験結果

## 5・1 数値シミュレーション

試作したシステムの浮上可能性や,吸引力の非線形性の 影響を確認するために,数値シミュレーションを行った. シミュレーションは,次の各場合について比較検討した. まずCase1.バネがなくゼロパワ制御を行わない場合,次に, Case2.バネはあるがゼロパワ制御を行わない場合,Case3. バネがありとゼロパワ制御を行った場合,Case4.種々のバ ネに換えた場合,およびCase5.k<sub>i</sub>を種々の数値に変えた場合.

本報告では, Case 1, Case 2, Case 3の3つの場合のシミ ュレーション結果をFig.5, Fig.6, Fig.7に示す.シミュレー ションは,浮上中に,ベース部に10[g]の外乱(重量の増加) があったと仮定し,そのときにどのような応答を示すかに ついて調べた.0.2秒後に外乱が入力され1秒後までの応答 を記録した.VCMの電流,ベース部の変位およびベース部 と永久磁石部との相対変位は上向きを正としてそれらの図 に表した.

Case 1の結果がFig.5である.上からVCMへの入力電流, ベース部の変位,ベース部と永久磁石部の相対変位を表し ている.外乱が加わると,装置の重量は永久磁石の吸引力 より大きくなるため,平衡状態が崩れる.そのため浮上シ ステムは,再び安定浮上状態にするために,VCMを伸ばす 方向に力が働き,磁石は上方向に,ベース部は下方向に変 位している.これにより永久磁石と天井の空隙を短くし, 吸引力を高めている.その後,安定化のための制御が行わ れ,VCMは外乱が入る前に比べて縮める方向に力が働いて いる.浮上装置の重量と永久磁石の吸引力がもう一度等し くなる時に,平衡状態となる.VCMが外乱である10[g]の重 量を引き受けるため,この時のVCMの電流は最初の平衡状 態の電流に比べ約0.02(A)増加している.

Case 2の結果がFig.6である.バネ定数は0.6 (N/mm)である.外乱が加わった直後の応答は,Fig.5と似ているが,定常状態では,VCMへの入力電流数値は約-0.01(A)であり, Fig.5の数値より約0.01(A)小さい.これは,バネの発生力と VCMの発生力の合成力が追加負荷を引き受けるからである.

Case 3の結果がFig.7である.電流積分フィードバックル ープのゲインを除けば,制御システムFig.6の場合と同じで ある.この積分器のゲインは35である.Fig.6とFig.7のシミ ュレーション結果を比較すると,同じバネ定数とフィード バックゲインを使用したにもかからわず,定常状態に達す る時間に違いが生じる.Fig.6に比べてFig.7の方がより長い 時間を要する.ただし,Fig.7では,定常状態ではVCMへの 入力電流が0に収束している.これは,バネがありゼロパワ 制御を行った場合には,ベース部の重量と追加負荷を全て バネが支持し,VCMがエネルギをほとんど消費しないため である.

これらのシミュレーション結果から,提案した制御手法 により零パワ制御が可能であることが確認できた.

## 5・2 試作装置による実験結果

次に実際の装置を用いて実験を行い.浮上が可能なこと を確認した.Fig.2 は試作装置の浮上時を正面から見た写真 である.実験は,数値シミュレーションと同様の各場合の 条件における外乱応答の結果を計測した.各場合の5つの







Fig.6 Simulation results with springs and without zero power control

spring constant  $k_s = 0.6$  N/mm





spring constant  $k_s = 0.6$  N/mm

実験結果を,図 Fig.8 から Fig.12 までに示す.これらの実 験では,まず安定浮上状態を実現し,次に1.5秒の時に10[g] の負荷をベース部に加えた場合の応答結果を記録した.尚 これらの図における電流は,フィルタを介して記録したも のである.

Fig.8 に示した実験は, Fig.5 に示したシミュレーション と同様の条件を用いた.Fig.8 のように,定常浮上のときに



Fig.8 Experiment results without springs and without zero power control

おいてもせず,浮上装置は平衡位置に静止しなく,平衡位置の周りで振動している.さらに,負荷を加え再び定常浮上状態に達した時は,VCMの入力電流はゼロから,-0.02(A)になった.

Fig.6とFig.7のシミュレーションに対応する実験結果を Fig.9とFig.10に示す .Fig.9に示すように ,定常浮上時には , 電流値は,約-0.005(A)であり,Fig.8中での電流値よりはる かに小さい. Fig.10も同様である. これは, バネの発生力 とVCMの発生力の合成力が追加負荷を引き受けるからで ある.しかし,追加負荷の後で,Fig.10の電流値が再び0と なっている,また,ベース部と永久磁石部の相対変位およ びベース部の変位もFig.9より大きい.この違いは電流積分 フィードバックループによるものである.電流積分フィー ドバックにより, VCMに入力される電流を打ち消すため, VCMの発生力は減小していく.やがて,VCMの電流が0と なり,追加負荷は全てバネが支持することになる.バネが 圧縮される長さは,ベース部と永久磁石部の相対変位であ り,重量をこのバネの上に直接置く場合と同じである.し かし,永久磁石と天井の間の空隙は影響を受けないので, Fig.10中のベース部の変位はFig.9中のより大きくなった.

さらに,異なるバネを用いた実験の結果をFig.11とFig.12 に示す.これらの実験ではバネ定数が0.7 (N/mm)であるバ ネを変更した.また,強いバネは小さいゲインが必要であ るため,Fig.12の電流積分フィードバックループのゲイン を35から25に変更した.両実験の他のフィードバックゲイ ンは同じである.Fig.9とFig.10,Fig.11とFig.12の2組の実 験結果を比べると,相違点がある.それは,後者の実験に おける変位は前者比べて小さい.また同じ負荷であっても, 強いバネの方が伸縮が小さい.

これらの実験結果により,本システムにおいて零パワ制 御が可能であることが確認できた.

#### 6. おわりに

永久磁石の吸引力を利用した懸垂型磁気浮上機構におけ る零パワ制御について検討した.まず、浮上原理を分析し、 試作装置を紹介し、モデル化を行った.そして、零パワ制 御のためのコントローラを提案した.次に、コントローラ を用いたシステムの数値シミュレーションと試作装置を用 いて実験を行った.それらの結果から、バネと電流積分フ



Fig.9 Experiment results with springs and without zero power control

spring constant  $k_s = 0.6$  N/mm





spring constant  $k_s = 0.6$  N/mm

ィードバックループを用いた零パワ制御が可能であること が確認できた.したがって,この磁気浮上システムを応用 することで非接触が低いエネルギ消費量の搬送装置の実現 が可能である.

#### 文 献

- (1) 岡 宏一,催 天時,VCM を用いた懸垂形磁気浮上 機構におけるゼロパワ制御,日本機械学会[No.03-8]第
   8 回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, (2003),166-169
- (2) 吉田 祐介,岡 宏一,永久磁石を用いた懸垂形磁気
  浮上機構の開発(第2報 VCM を用いた磁気浮上機構)
  機械学会中四国支部講演論文集,(2003),289-290
- (3) K. Oka, T. Higuchi and T. Shiraishi, "Hanging Type Mag-lev System with Permanent Magnet Motion Control", Electrical Engineering in Japan, Vol.133, No.3, pp.63-70, November 2000
- (4) K. Oka, "Noncontact Manipulation with Permanent Magnet Motion Control", Proceeding of the 4th International Symposium on Linear Drivers for

(5) Industry Applications, LDIA2003, pp.259-262, September 8-10, 2003, Birmingham, UK



Fig.11 Experiment results with springs and without zero power control spring constant k = 0.7 N/mm

spring constant  $k_s = 0.7 \text{N/mm}$ 

(6) Ehsan Shameli, Mir Behrad Khamesee and Jan Paul Huissoon, "Nonlinear Controller Design for a Magnetic Levitation Device", Microsyst Techno (2007), 13:831-83



Fig.12 Experiment results with springs and with zero power control

spring constant  $k_s = 0.7$  N/mm