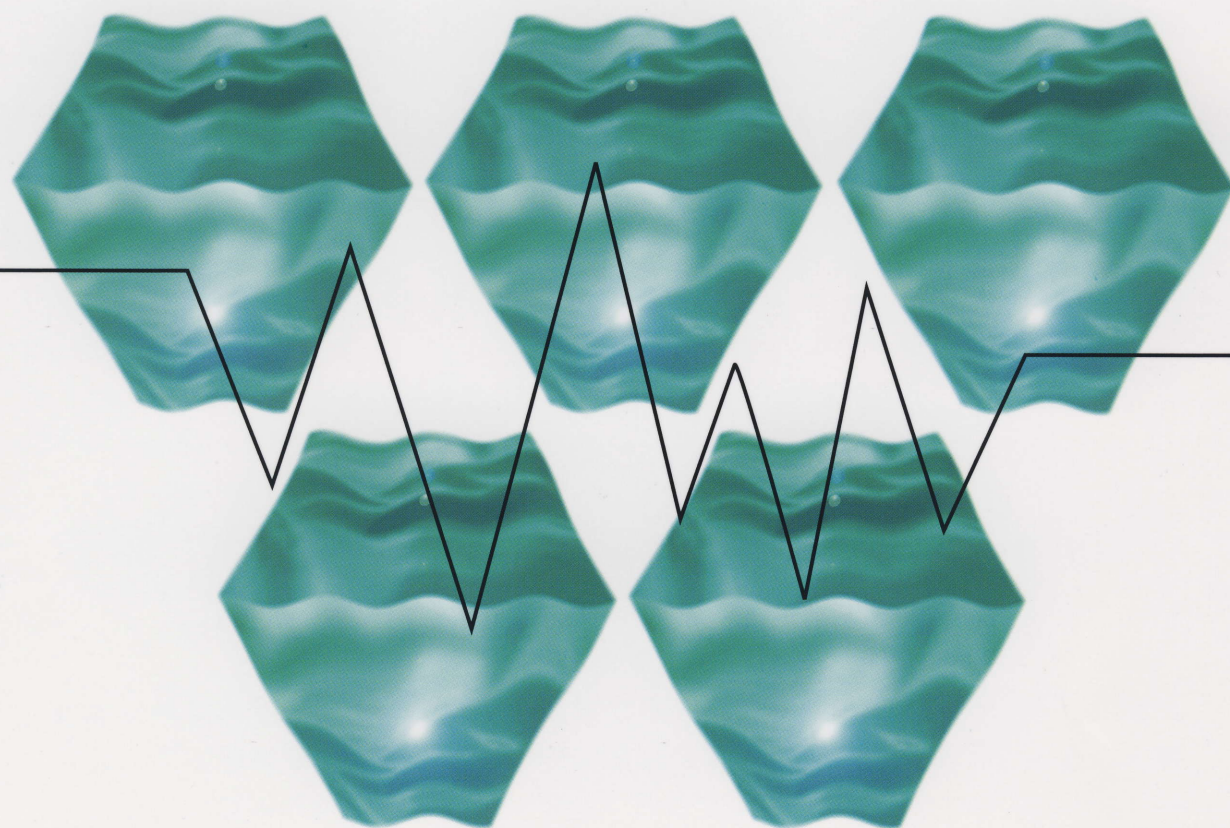




【No.09-30】

# 第11回 「運動と振動の制御」シンポジウム

## 講演論文集



2009年9月2日(水)～4日(金)

アクロス福岡

### 主 催

社団法人 日本機械学会 機械力学・計測制御部門

〒160-0016 東京都新宿区信濃町35番地 信濃町煉瓦館 5 階

TEL : 03-5360-3500 FAX : 03-5360-3508 URL <http://www.jsme.or.jp/>

### 協 賛

計測自動制御学会, システム制御情報学会, 人工知能学会, 精密工学会, 電気学会, 電子情報通信学会, 土木学会, 日本音響学会, 日本建築学会, 日本航空宇宙学会, 日本知能情報ファジィ学会, 日本フルードパワーシステム学会, 日本ロボット学会, バイオメカニズム学会

## B22 永久磁石とリニアアクチュエータを利用した非接触浮上機構の 零パワー制御

### Zero Power Control for Noncontact Levitation System Using Mechanical Magnetic Suspension System

○正 岡 宏一 (高知工大), 学 孫 鳳 (高知工大)

Koichi Oka, Kochi University of Technology, Miyanokuchi 185, Tosayamada-cho, Kami-city, Kochi 782-8502

Feng Sun, Kochi University of Technology, Miyanokuchi 185, Tosayamada-cho, Kami-city, Kochi 782-8502

**Abstract:** This paper describes a new zero power control strategy for a hanging type maglev system. In this maglev device, a permanent magnet generates the levitation force, and a Voice Coil Motor (VCM) maintains the device stably in an equilibrium-levitated position. In order to realize zero power control, a spring is installed in the maglev device so as to counterbalance the force of the actuator on the mass gravitation, and a current integral feedback loop is used in the controller so as to adjust the actuator current zero in the balance state. A prototype of the maglev system was constructed; a theoretical model was developed; a zero power controller was designed and constructed; and numerical simulations and experiments were performed. The results shown here suggest that this zero power control strategy is feasible and effective for the hanging type maglev system using a permanent magnet and VCM.

**Key Words:** Zero Power Control, Magnetic levitation, Spring, Magnetic Suspension, Mechanical Control.

#### 1. はじめに

磁気浮上機構には、機械的な接触をなくすることが可能なため、原理的に塵埃を発生させない機構が可能である。この利点は、半導体製造、バイオテクノロジー、材料製造などの分野におけるクリーン環境での非接触搬送装置に適している<sup>(1)</sup>。このような磁気浮上機構には多くの方式が提案され、また実現されている<sup>(2)</sup>。多く用いられている磁気浮上の形式は、EMS (electromagnetic suspension) という電磁石のコイル電流を調整して支持力を制御する機構を用いたものである。EMS を非接触搬送装置に適用する場合、搬送装置の重量を支持するために、常に電磁石に電流を流す必要がある。搬送装置を完全に非接触で構成するために電池駆動にすると、この定常電流はエネルギー消費の大きな問題となる。この解決策として浮上機構に永久磁石を併用し、搬送装置の重量は永久磁石の吸引力が支持し、安定化のための制御の支持力調整だけを電磁石のコイル電流制御により行う方法が提案されている<sup>(3)-(6)</sup>。

磁気浮上機構の他の形式として、永久磁石とアクチュエータを用いたものが報告されている。これは、支持力を調整するために、永久磁石と浮上体の空隙を制御する形式のものである<sup>(7)</sup>。このような磁気浮上機構は、永久磁石の吸引力を直接支持力としているため、近年の永久磁石の性能の向上により、微小な物体の浮上や吸引力を発生するための面積が小さいときなどに有用であると考えられる。よって、この方式を非接触搬送機構に用いると、電磁石を用いたものよりも、狭いレールにぶら下がりながら搬送が行えると考えられる。しかしこの機構を用いるときにも、アクチュエータの発生力のためのエネルギー消費が問題となる。

本報告では、リニアアクチュエータと永久磁石を用いた懸垂型磁気浮上機構における零パワー制御について提案する。提案した零パワー制御は、バネと電流積分フィードバックループを用いるものである。定常浮上状態のときに、バネの発生力が支持部の重量と釣り合わせアクチュエータの定常電流をなすことを目的とする。

まず懸垂型浮上機構の原理を説明する。次に、試作装置を紹介し、そのモデル化を行う。次に、零パワー制御のためのコントローラの一例を示し、このモデ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。最後に試作装置を用い

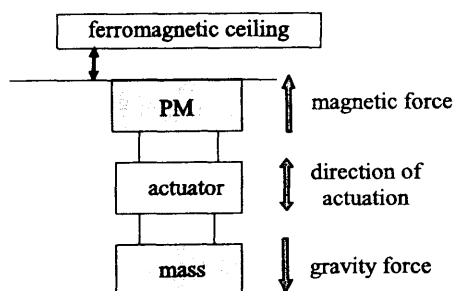


Fig. 1 Principle of Magnetic Suspension System

た実験結果を示す。これらの結果から提案した永久磁石とアクチュエータを利用した磁気浮上機構の零パワー制御が可能であることを示す。

#### 2. 運動制御によるぶら下がり型磁気浮上装置

**2-1. 浮上原理** リニアアクチュエータと永久磁石を用いた懸垂型浮上原理を図1に示す。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。浮上装置は鉛直方向に浮上し、永久磁石の吸引力は浮上装置の重量と等しいときに平衡状態となる。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。永久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を動かす。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を動かす。このことにより、浮上装置は安定に非接触浮上できる。

**2-2. 試作装置** 試作装置を図2に示す。図に示すように、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。この試作装置は永久磁石部とベース部から構成されて、全体の質量が746[g]である。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ー

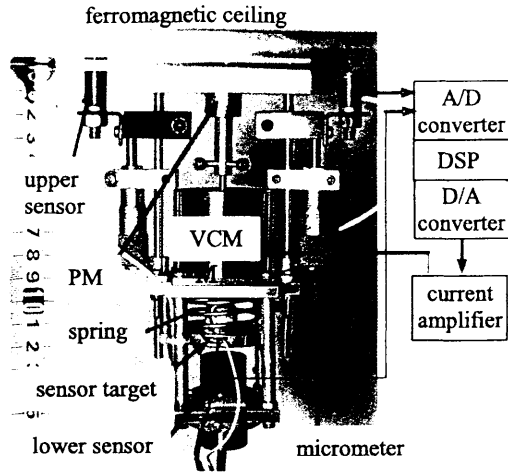


Fig. 2 Photograph of Prototype Suspension System

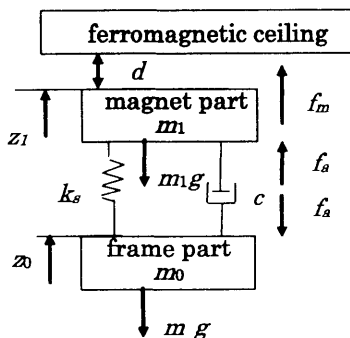


Fig. 3 Model of Suspension System

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、三つの渦電流センサなどが含まれる。この部分の質量は 667 [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 が浮上状態の安定化を制御する唯一のものである。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 [ $\mu$ m] である。センサを二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。浮上体下部の渦電流式センサは、ベース部と永久磁石部の相対変位を検出する。

この浮上システムのコントロールシステムの構成を図 2 の右に示す。三つのセンサの信号は、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。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。

**2-3. 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図 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。

$$m_0 \ddot{z}_0 = -f_a + c(\dot{z}_1 \dot{z}_0) + k_s(z_1 - z_0) - m_0 g \quad (1)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 = f_a + c(\dot{z}_0 \dot{z}_1) + k_s(z_0 - z_1) - m_1 g + f_m \quad (2)$$

ただし、

$m_0$ : ベース部質量 0.6673 [kg]

$m_1$ : 永久磁石部質量 0.0795 [kg]

$z_0$ : ベース部位置 (上向きを正)

$z_1$ : 永久磁石部位置 (上向きを正)

$f_a$ : VCM の発生力 (伸びる方向を正)

$f_m$ : 永久磁石吸引力

$k_s$ : 用いるバネのバネ定数 600 [N/m]

$c$ : ダンピング定数

である。また、入力電流と VCM の発生力の関係および永久磁石の吸引力と空隙の関係は次式のように表される。

$$f_a = k_t i \quad (3)$$

$$f_m = \frac{k_m}{d^2} \quad (4)$$

ただし、 $k_t$ : VCM の推進力定数 5 [N/A]

$i$ : VCM の入力電流

$k_m$ : 永久磁石の吸引力係数  $9.65 \times 10^{-5}$  [Nm<sup>2</sup>]  $d$ : 天井と永久磁石の空隙 [m]

である。

### 3. 零パワー制御

**3-1. 零パワー制御システムの構成** 零パワー制御を実現するために、バネを試作装置の永久磁石部とベース部の間に取り付けた。浮上装置が定常浮上状態において、バネがないときは、ベース部の重量は VCM を通して永久磁石に伝わってしまい、VCM は常に力を発生させていなくてはならない。バネがある場合には、バネでベース部の重量を支えるため、VCM の電流を 0 にすることが可能であり、零パワー制御を実現することができる。

式 (1), (2) の運動方程式では、浮上装置が定常状態のときには、微分項は 0 になる。バネがなければ、 $f_a$  は  $m_0 g$  と等しくなり、0 にできない。バネ成分  $k_s$  の項があることにより、バネ発生力と  $m_0 g$  を等しくすることが可能で結果的に  $f_a$  を 0 にすることができる。これが零パワー制御の原理である。

**3-2. 零パワー制御コントローラ** 磁気浮上システムのコントローラには、零パワー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、今回は電流積分フィードバックループを用いて実現する方法について考察する。零パワー制御を実現する制御システムのブロック線図を図 4 に示す。この制御システムは大きな二つの PD フィードバックループを持っている。図の下側のループ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、図の上側のループ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る。これらの二つの PD フィードバックループは、三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。

さらに、図の中央付近に示される局所ループは零パワー制御を実現するためのループである。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 に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、図 3 に示されるバネは伸ばされ、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。

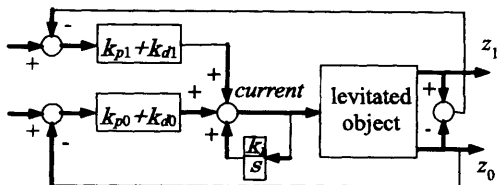


Fig. 4 Block diagram of feedback system

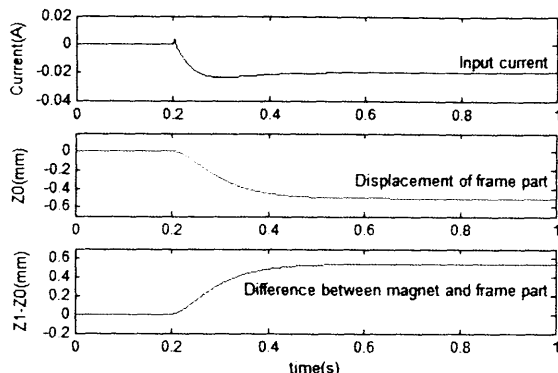


Fig. 5 Numerical simulation result (without zero power control)

#### 4. 実験

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と試作装置での実験を行った。実験は、安定浮上状態である浮上体から、0.01 kg の負荷をベース部から切り離したときの応答を記録した。

**4-1. 数値シミュレーション** シミュレーション結果を、図 5 と図 6 に示す。図からわかるようにシミュレーション結果での定常状態の永久磁石部の変位  $z_1$  は同じである。これは、支持する重量が空隙により決定されるからである。このことからベース部の動きが零パワー制御に重要であることがわかる。

零パワー制御を行わないときの結果を図 5 に示す。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および永久磁石部の変位を表している。外乱を切り離すと、装置の重量は永久磁石の吸引力より小さくなるため、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 を縮める方向に力が働き、磁石部は下方向に、ベース部は上方向に変位する。これにより永久磁石と天井の空隙を大きくし、吸引力を弱めている。浮上装置の重量と永久磁石の吸引力が再び等しくなるときに、平衡状態となる。0.01 kg の負荷重量を切り離したため、VCM の発生する力はその分減少し、VCM の定常電流は最初の電流に比べ約 0.02 A 減少している。

零パワー制御を行ったときの結果を図 6 に示す。定常状態では VCM への入力電流が 0 に収束している。これらのシミュレーション結果から、提案した零パワー制御が可能であることが確認できた。

**4-2. 試作装置による実験** 次に試作装置を用いて実験を行い、浮上が可能であることを確認した。実験でもシミュレーションと同じフィードバックゲインを用いた。これらの実験では、安定浮上状態を実現した後、1.5 秒後に 0.01 kg の負荷をベース部から切り離し、その後 5 秒の応答結果を計測した。実験結果を、図 7 と図 8 に示す。実験結果では、シミュレーションとは違い、振動的なノイズを含む結果となった。これは VCM が摺動ベアリングであるため非線形な固体摩擦の影響が大きいと考え

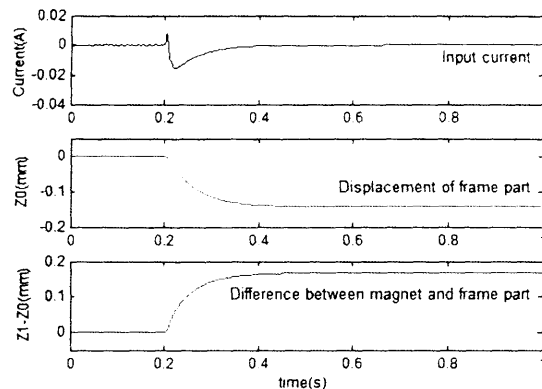


Fig. 6 Numerical simulation result (with zero power control)

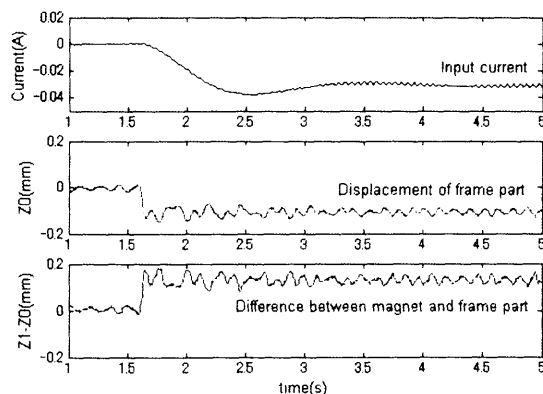


Fig. 7 Experimental result without zero power control

られる。しかし、結果の傾向はほぼシミュレーション結果と同じであった。

まず、零パワー制御を行わない場合の実験結果の図 7 からわかるように、定常浮上において電流は零になっていない。負荷を切り離した後、再び定常浮上状態に達したとき、VCM の入力電流は 0.05 A だけ小さくなっていることがわかる。シミュレーション結果と値が異なる原因として、装置からのセンサや VCM のコードの変形が装置の浮上力に影響していることが考えられる。

図 8 には、零パワー制御を行ったときの結果を示す。定常浮上状態では、負荷の切り離し前後ともに VCM の入力電流が 0 となっている。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 の発生力は減少していく。やがて、VCM の電流が 0 となり、ベース部の重量を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変化量が同じである。さらに、ベース部と永久磁石部の相対変位量は約  $1.65 \times 10^{-4}$  [m] である。この変位量とバネ定数によって、演算すると、バネの発生力と切り離した負荷の重力が等しくなっている。

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

#### 5. おわりに

永久磁石と VCM を用いた懸垂型磁気浮上機構における零パワー制御について検討した。まず、懸垂型浮上原理を説明し、試作装置を紹介した。そのモデルに基づき、バネと電流積分フィー

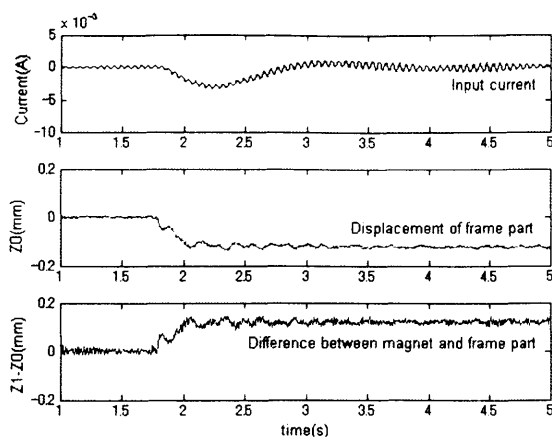


Fig. 8 Experimental result with zero power control

ドバックループを用いた零パワー制御を提案した。次に、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、提案した零パワー制御が可能であることが確認できた。このことから、この磁気浮上システムを応用することで低いエネルギー消費量の非接触搬送装置の実現が可能であるといえる。

#### 参考文献

- (1) Oka, K., Higuchi, T. and Shiraishi, T., Hanging Type Mag-lev System with Permanent Magnet Motion Control, *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 133, No. 3 (2000), pp.63-70.
- (2) Park, J.H. and Baek, Y.S., Design and Analysis of a Maglev Planar Transportation Vehicle, *IEEE Transaction on Magnetism*, Vol. 44, No. 7 (2008), pp. 1830-1836.
- (3) Morishita, M. and Azukizawa, T., Zero Power Control Method for Electromagnetic Levitation System, *Trans. IEE of Japan*, Vol.108-D, No.45 (1988), pp.447-454
- (4) Morishita, M. and Iton, H., The Self-gap-detecting Zero Power Controlled Electromagnetic Suspension System, *Trans. IEE of Japan*, Vol.126-D, No.12 (2006), pp.1667-1677
- (5) Mizuno, T. and Takemori, Y., A Transfer-Function Approach to the Analysis and Design of Zero Power Controllers for Magnetic Suspension System, *Trans. IEE of Japan*, Vol. 121, No. 9 (2001), pp. 933-940.
- (6) Ishino, Y., Mizuno, T. and Takasaki, M., Increasing the load Capacity of Magnetic Suspension by a Stiffness Switching Control, *Dynamics and Design Conference 2008*, No.08-14 (2008-9), p. 371.
- (7) Oka, K., Noncontact Manipulation with Permanent Magnet Motion Control, *Proceeding of the 4th International Symposium on Linear Drivers for Industry Applications*, (2003-9), pp. 259-262.
- (8) Shameli, E., Khamesee, M.B. and Huissoon, J.P., Nonlinear Controller Design for a Magnetic Levitation Device, *Microsyst Techno*, Vol.13 (2007), pp. 831-835