

## 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制御\*

孫 鳳<sup>\*1</sup>, 岡 宏 一<sup>\*1</sup>Zero Power Control for Hanging Type Maglev System with  
Permanent Magnet and VCMFeng SUN<sup>\*2</sup> and Koichi OKA<sup>\*2</sup> Department of Intelligent Mechanical System Engineering, Kochi University of Technology,  
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami-shi Kochi, 782-8502 Japan

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, Maglev System, Permanent Magnet, Motion Control, Actuator

## 1. 結 言

磁気浮上機構には、機械的な接触をなくすことが可能なため、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 system) 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。このEMS機構は電磁石の吸引力を支持力として用いているため、非接触搬送装置に適用する場合、搬送装置の重量を常に支持する必要がある。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、重量を支持するための定常電流は駆動時間を長くするためのエネルギー消費が大きな問題となる。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制御について提案する。提案した零パワ制御のための機構では、バネが浮上機構の間に挿入され、電流積分フィードバックループがコントローラに用いられるので、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うと、アクチュエータは定常的には力を発生させる必要がなく、入力される電流は零となる。

\* 原稿受付 2008年9月19日。

<sup>\*1</sup> 正員, 高知工科大学大学院工学研究科(☎782-8502 香美市土佐山田町宮ノ口185)。

E-mail: oka.koichi@kochi-tech.ac.jp

まず懸垂型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ゼロパワ制御の可能性を検討する。

## 2. 懸垂型浮上原理

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<sup>8)</sup>により、永久磁石と質量体と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。

## 3. 零パワ制御の実現

### 3・1 試作装置での零パワ制御

**3・1・1 試作装置** 試作装置を図 2 に示す。図 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。この試作装置は永久磁石部とベース部から構成されて、全体の質量が 0.7468 kg 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 0.0795 kg 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 0.6673 kg 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 0.015 m 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 0.004 m であり、分解能が  $5 \times 10^{-7}$  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-

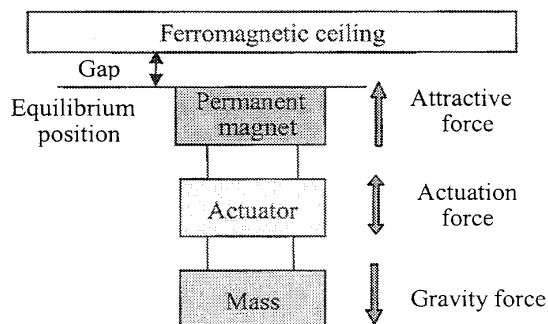


Fig.1 Suspension scheme of hanging maglev system

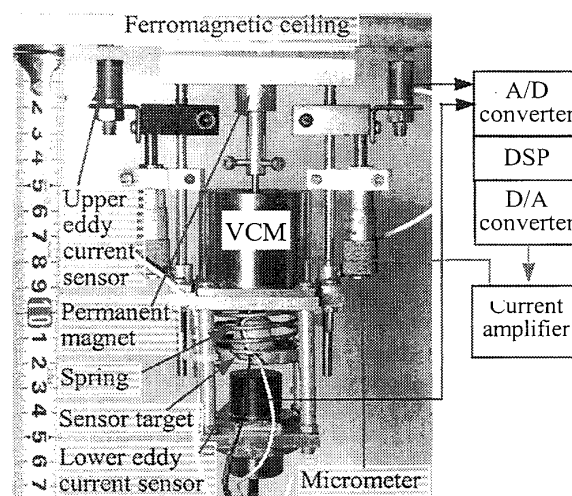


Fig.2 Photograph of suspending maglev system

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し、測定範囲が 0.01 m であり、分解能が  $5 \times 10^{-7}$  m である。

この浮上システムのコントローラの構成を図 2 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。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・1・2 試作装置での零パワ制御** 零パワ制御を実現するために、一つのバネが試作装置の永久磁石部とベース部の間に付けられている。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 を通じて永久磁石に伝わってしまい、そのため、VCM は常に力を発生させていなくてはならない；バネがあるときには、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る。この

ような方法により、試作装置での零パワ制御を実現することができる。

### 3・2 モデルでの零パワ制御の原理

**3・2・1 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。

$$m\ddot{z}_0 = c(\dot{z}_1 - \dot{z}_0) + k_s(z_1 - z_0) - f_a - m_0g \quad (1)$$

$$m\ddot{z}_1 = c(\dot{z}_0 - \dot{z}_1) + k_s(z_0 - z_1) + f_a + f_m - m_1g \quad (2)$$

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) [m]
- $z_1$  : 永久磁石部位置 (上向きを正) [m]
- $f_a$  : VCM の発生力(伸びる方向を正) [N]
- $f_m$  : 永久磁石吸引力 [N]
- $k_s$  : 用いるバネのバネ定数 600 [N/m]
- $c$  : 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 [N/(m/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。

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

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

ただし、

- $k_i$  : VCM の推進力定数 5 [N/A]
- $i$  : VCM の入力電流 [A]
- $k_m$  : 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]

### 3・2・2 モデルでの零パワ制御の原理

これらの運動方程式によって、浮上装置が定常状態のときには、微分項は 0 になり、加速度の項とダンピング力はゼロになる。バネがなければ、バネ発生力もゼロになる。そのため、 $f_a$  は  $m_0g$  と等しくなり 0 にできない。バネがあれば、バネ発生力と  $m_0g$  を等しくすると、 $f_a$  を 0 にすることができる。これが零パワ制御の原理である。

**3・3 零パワ制御のコントローラ** 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

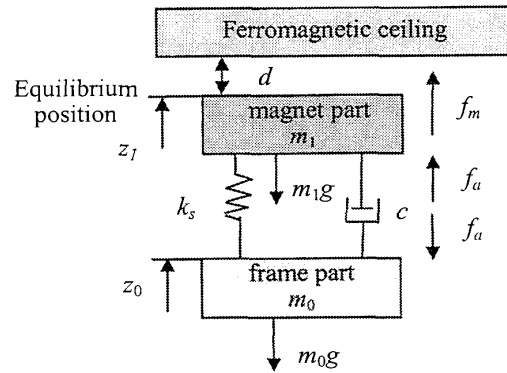


Fig.3 Model of suspension system

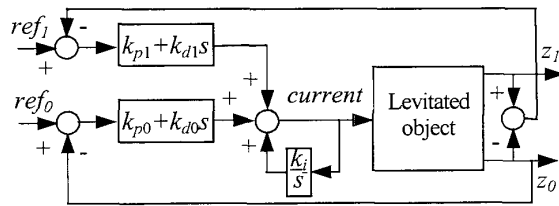


Fig.4 Block diagram of control system

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。

局所電流積分フィードバックループのゲインは  $k_i$  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、電流変化が速い場合は、システムの安定困難になる。システムに従って、 $k_i$  を適切な数値にする必要がある。

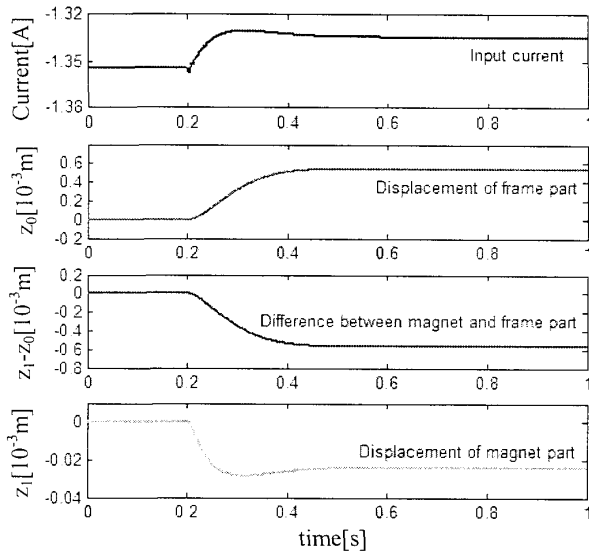


Fig.5 Simulation results without springs and without zero power control

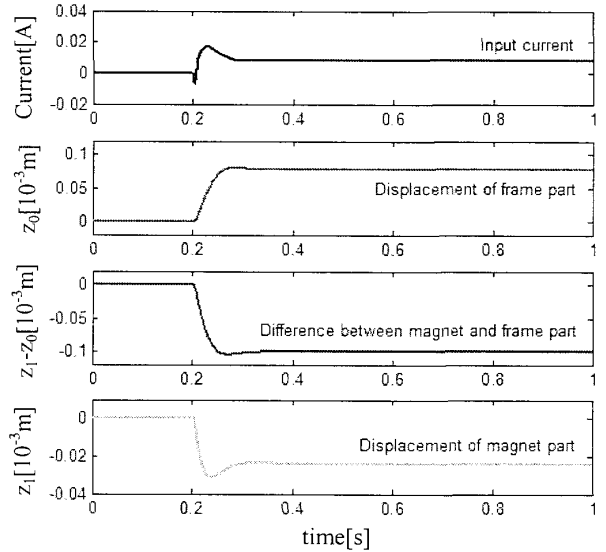


Fig.6 Simulation results with springs and without zero power control ( $k_s = 600$  N/m)

#### 4. シミュレーション結果

**4・1 シミュレーションの条件** 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。

Case1 バネがなくゼロパワ制御を行わない場合。

Case2 バネはあるがゼロパワ制御を行わない場合。

Case3 バネがありゼロパワ制御を行った場合。

シミュレーションは、安定浮上状態で、0.2 秒後に、0.01 kg の負荷をベース部から切り離したと仮定し、1 秒後までの応答を記録した。

#### 4・2 シミュレーション結果

Case 1 から Case 3 のシミュレーション結果を、それぞれ図 5 から図 7 に示す。図からわかるようにすべてのシミュレーション結果で、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。このことは、ベース部の動きがゼロパワ制御に重要であることがわかる。

Case 1 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

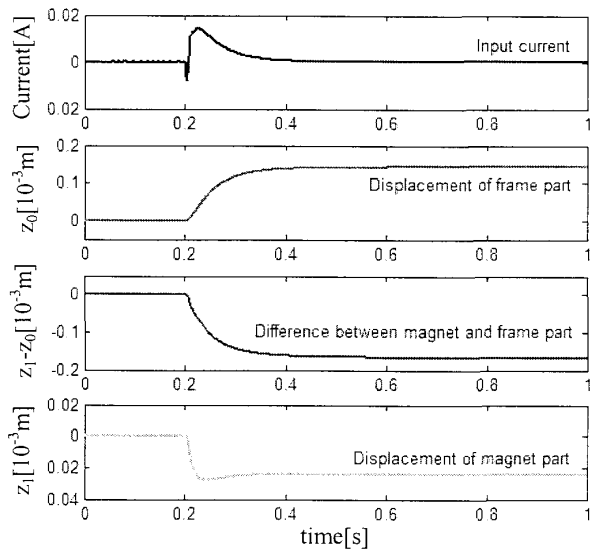


Fig.7 Simulation results with springs and with zero power control ( $k_s = 600$  N/m)

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。

Case 2 の結果を図 6 に示す。挿入したバネ定数の値は 600 N/m である。負荷を切り離した後の応答は、Case 1 の結果と変化の方向は同じである。しかし、VCM への入力電流とベース部の変化量は、定常状態では Case 1 の結果より小さい。これは、ベースの部の重量を支持するためにバネと VCM の両方の発生力が関与しているためである。前述したように永久磁石部の変位は同じであるので、Case 2 の場合にはベース部の変位および VCM の電流変化位置の差はともに小さくなる。しかし、バネを用いるだけでは、質量変化後の VCM の電流を零にできないことがわかる。

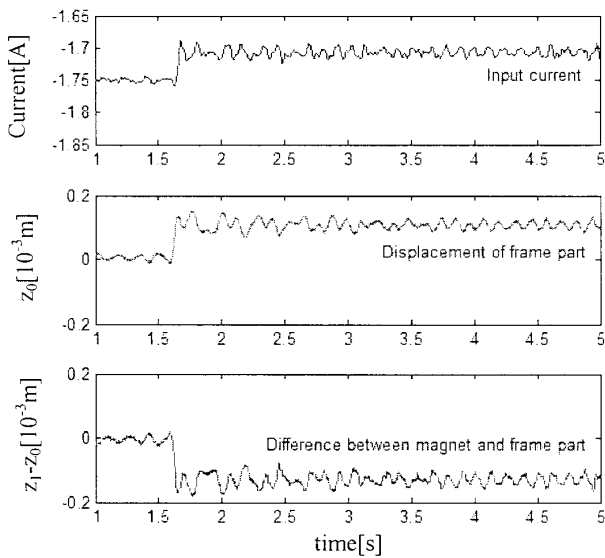


Fig.8 Experiment results without springs and without zero power control

Case 3 の結果を図 7 に示す。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 Case 2 の場合と同じである。この積分器のゲインは 35 である。Case 2 と Case 3 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わらず、定常状態に達する時間に違いが生じている。Case 2 に比べて Case 3 の方がより長い時間を要する。ただし、Case 3 の定常状態では VCM への入力電流が 0 に収束している。また、ベース部の変化量は Case 2 の結果より大きくなっている。これは、ベース部の変位が Case 2 の場合より大きくなることにより、より大きなバネの支持力が発生し、ベース部の質量すべてがバネの支持力で置き換わったためである。

これらのシミュレーション結果から、提案した零パワ制御制御が可能であることが確認できた。

## 5. 実験結果

次に試作装置を用いて実験を行い、浮上が可能なことを確認した。実験は、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たとき、5 秒後までの応答結果を計測した。Case1~3 の場合の実験結果を、図 8 から図 10 までに示す。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ためと考えられる。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、Case1 の場合の実験結果である図 8 からわかるように、零パワ制御を用いていないため、定常浮上

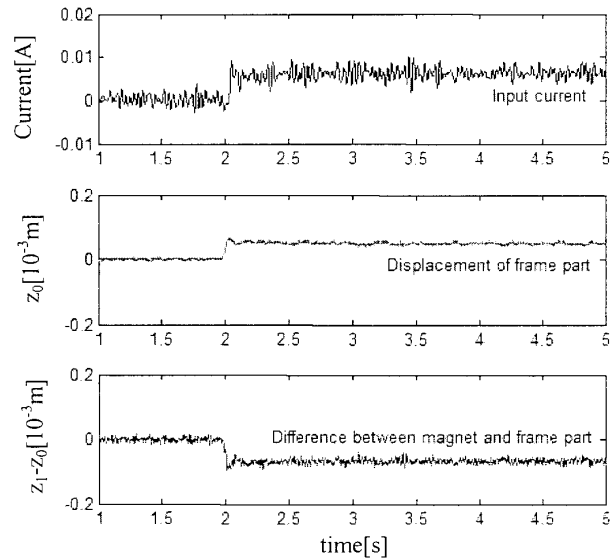


Fig.9 Experiment results with springs and without zero power control ( $k_s = 600$  N/m)

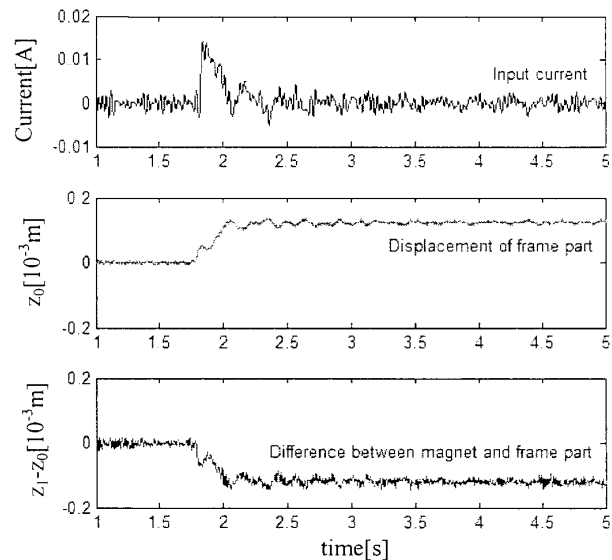


Fig.10 Experiment results with springs and with zero power control ( $k_s = 600$  N/m)

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。

Case2 の場合には、その結果を示す図 9 からわかるように、重量変化後の定常浮上時には、電流とベース部の変化量は Case 1 の実験結果より小さい。このことはシミュレーション結果と一致している。

図 10 には、Case3 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

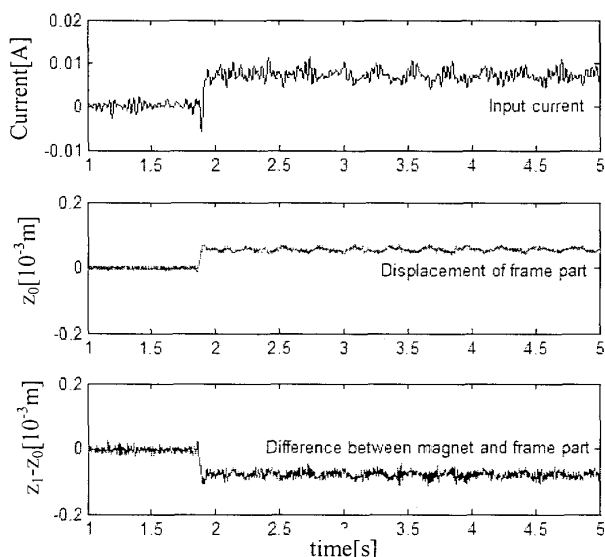


Fig.11 Experiment results with springs and without zero power control ( $k_s = 700$  N/m)

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図 9 より大きくなっている. この違いは電流積分フィードバックによるものである. 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れた負荷の重力が等しくなっている.

さらに, バネ定数が 700 N/m であるバネを用いた実験の結果を図 11 と図 12 に示す. また, この場合には, 同じゲインでは浮上が困難であったため, 積分フィードバックゲインを 35 から 25 に変更している. 他のフィードバックゲインは同じである. 異なるバネを用いた結果の比較により, 後者における変位は前者に比べて小さいことがわかる. これは, 同じ力を発生させるために, 強いバネの伸縮量は小さくてすむからである.

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. 結 語

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, モデルとコントローラにおける零パワ制御を分析し, またバネと電流積分フィードバックを用いた零パワ制御を提案した. 次に,

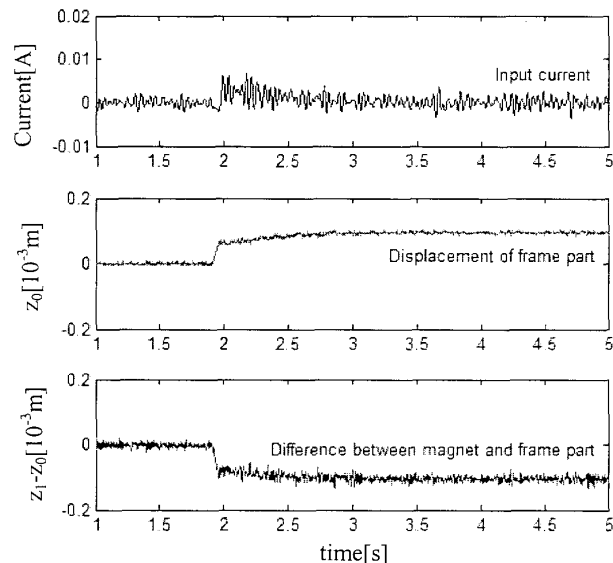


Fig.12 Experiment results with springs and with zero power control ( $k_s = 700$  N/m)

モデルと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, 提案した零パワ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.

## 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 Magnetics*, 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, *The Transactions of The Institute of Electrical Engineers 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, *Microsyyst Techno*, Vol.13 (2007), pp. 831-835