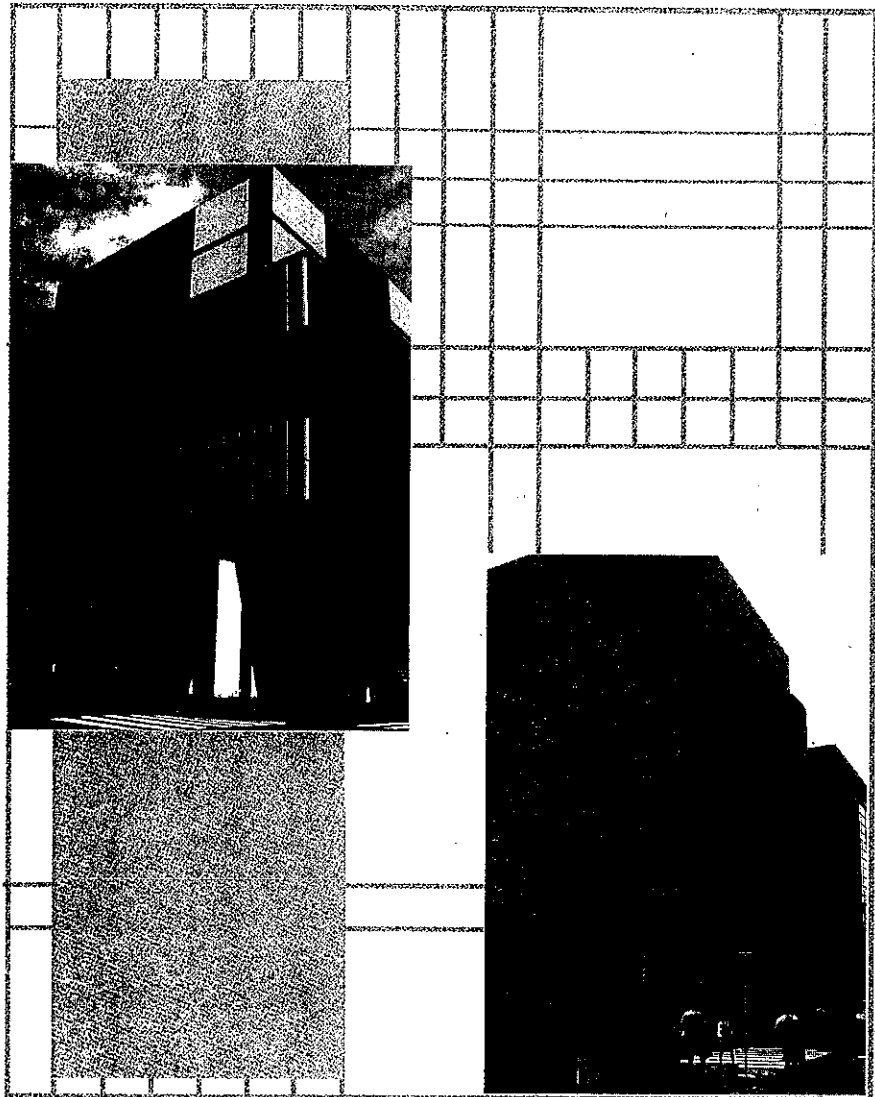




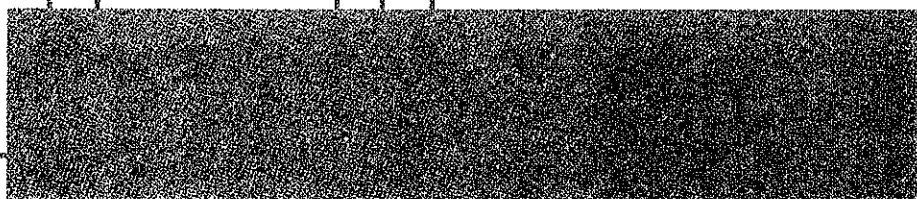
講演論文集

MoViC 2003

第8回「運動と振動の制御」シンポジウム

2003年10月30日(木)～11月1日(土)

中央大学駿河台記念館



主催：日本機械学会 機械力学・計測制御部門

共催：日本学術振興会 157委員会

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, バイオメカニズム学会,
日本ロボット学会, 日本フルードパワーシステム学会

Zero Power Control of Hanging Type Mag-Lev System
With Motion Controlled Permanent Magnet

○岡 宏一 (高知工科大学)

崔 天時 (高知工科大学)

Koichi OKA, Kochi University of Technology, Miyanoguchi 185, Tosayamada-cho, Kochi
TianShi CUI, Kochi University of Technology

This paper describes a control method of magnetic levitation system which uses actuators and permanent magnets. The control method is pseudo zero power control, in which there is a little power loss during the system is operated near the equilibrium. As the adjustment of the air gap length varies the suspension force and stabilizes the system, the zero power control can be achieved by such as a spring force. First an experimental device is introduced and the principle of levitation is explained. Numerical simulations for the zero power control are carried out based on the model of the device, and some experimental examinations are shown.

Key Words: Zero Power Control, VCM, Motion Control, Magnetic Levitation

1. はじめに

磁気浮上装置には多くの方式が提唱され、また実現されている。一つの利用法に、工場のクリーンルーム内での搬送装置がある。これは、磁気浮上装置が非接触浮上可能であり原理的に塵埃の発生しない支持機構であるという利点を利用したものである。しかし、磁気浮上装置には給電が必要であり、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る。どちらの方式にしても浮上機構には、電力の消費を極力抑えることが要求される。このために、電磁石を用いた磁気浮上機構では、永久磁石の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を行っている。このような制御法は、ゼロパワー制御と呼ばれている¹⁾。このゼロパワー制御は、近年エネルギー貯蔵用フライホイールのための浮上方式としても注目されている。

本報告では、VCM (ボイスコイルモータ) と永久磁石を用いて制御する懸垂形磁気浮上機構²⁾におけるゼロパワー制御について報告する。この浮上機構は、VCM が永久磁石と強磁性体の空隙を制御することにより安定化を行う磁気浮上機構である³⁾。懸垂形とは、天井に施設された強磁性体のレールにぶら下がり浮上する機構であり、浮上に必要な永久磁石、センサ、アクチュエータ、コントローラ、電源などを浮上体上に装備することによって完全に非接触で搬送を行う装置が構成できる。このような装置におけるゼロパワー制御を、実現するためにバネを用いることを提案する。

まず試作装置の紹介し、モデル化を行う。次に、ゼロパワー制御のためのコントローラの一例を示す。次に、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。最後にゼロパワー制御を用いた実験結果を示す。これらの結果からゼロパワー制御を実現できることが確認できる。また、制御のロバスト性を向上させるために、制御可能な範囲を最適に保つ制御方法についても述べる。

2. 試作装置

試作装置の正面から見た写真を Fig. 1 に示す。また浮上体の模式図とシステムの概略を Fig. 2 に示す。Fig. 1 に示すように、浮上体は強磁性体である天井からぶらさがるように浮上する。この浮上体からは、センサケーブル、VCM のための電力供給線などが外部に伸びており、コントローラ、モータドライバなどにつながれている。コントローラ、ドライバ、電源などは浮上体には搭載されていない。よってこの装置は、完全に非接触で浮上する装置とはなっていない。

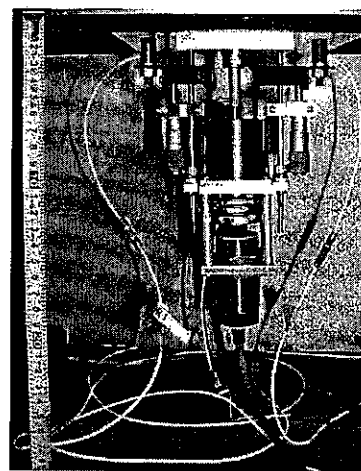


Fig. 1: Photograph of suspension system

浮上体の質量は全体が 794 [g] で、永久磁石部とベース部から成る。永久磁石は Fig. 2 で赤で示される円筒形の部分で浮上体の最上部にある。磁石が直接天井と衝突するのを防ぐため、ガードが取り付けられている。永久磁石部は磁石とともに動く部分であり、永久磁石、VCM のスライダ (コイル部)、磁石位置を検出するためのターゲット、およびこれらをつなぐためのシャフトなどが含まれる。Fig. 2 では

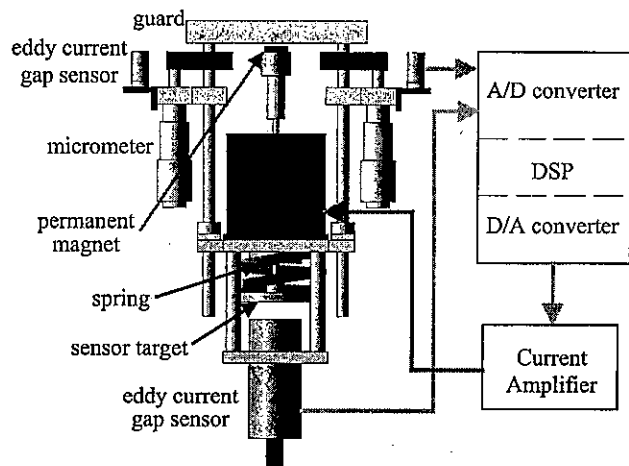


Fig. 2: Outline of suspended object and control system

黄色で表された部分であり、この部分の質量は、73.8 [g] である。ベース部は、浮上体の永久磁石部以外の部分で、図で青色で表された 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 720 [g] である。

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。浮上体ベース部の位置を検出する上部の渦電流センサは、測定範囲が 4 [mm]、分解能 0.5 [μ m] の渦電流センサを 2 つ使用する。センサを 2 つ使用することによって、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整できるようにした。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]、分解能が 5 [μ m] のものである。

永久磁石と天井間の吸引力は、永久磁石部に伝えられる。その力は VCM の発生力を介してベース部の支持力となる。この VCM の発生力を補助するために、Fig. 2 の中央部の緑色の部分に示すようにバネを取付けた。バネはステータ部と下部のセンサターゲットとの間にあり、永久磁石部が上に引き上げられる力をバネが縮むことによってベース部の上方向への力に変換している。浮上システムの平衡状態を、このバネの発生力がベース部の重量と等しいときとすることにより、平衡状態では VCM の発生力はゼロとなり、ゼロパワー制御が実現する。

上下の渦電流センサ信号は、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. 試作装置のモデル化とコントローラ

3.1 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システムのモデル化を行った。浮上体のモデルを、Fig. 3 に示す。用いる記号は以下のとおりである。

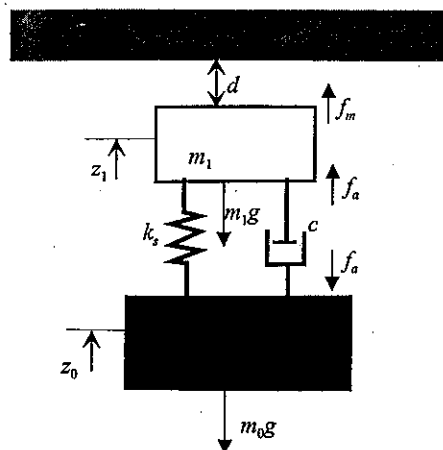


Fig. 3: Model of suspended object

- m_0 : ベース部質量
- m_1 : 永久磁石部質量
- 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 : アクチュエータ発生力 (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
- c : VCM のロータとスライダの間のダンピング定数
- k_t : VCM の推進力定数
- k_m : 磁石の吸引力をモデル化する係数
- i : 入力電流
- d : 天井と磁石の空隙

浮上体はベース部 m_0 と永久磁石部 m_1 で構成され、その間はバネと VCM で連結されている。VCM は Fig. 3 では力だけで表される。ダンピング定数 c はバネの減衰特性や VCM のベアリングの摩擦、空気の粘性摩擦など全てを考慮した値として考える。このとき、ベース部と永久磁石部の運動方程式は次式となる。

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

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

入力電流と VCM の発生力の関係は、

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

である。永久磁石の吸引力は、空隙の自乗に反比例すると仮定し、次式のように表される。

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

これらの運動方程式に基づいてシミュレーションなどを行う。

3.2 コントローラ

ゼロパワー制御を実現するための制御方法は、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。またそれとは別に、浮上のロバスト性を向上させるために、アクチュエータ変位をつねにそのストローク中心で操作させるような手法についても、積分制御を行うことで実現する方法についても考察を行う。

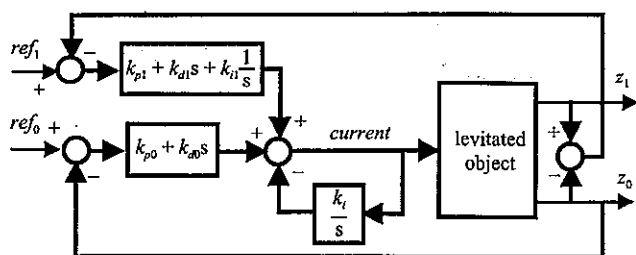


Fig. 4: Block diagram of control system

3.2.1 ゼロパワー制御システムのプロック線図を Fig. 4 に示す。コントローラは大きな2つのループを持っている。一つはベース部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。

ベース部のコントロールは、PD 制御を用い、浮上体が天井から一定の位置に保つような制御を行う。上側のループは PID 制御を用いる。このうち、PD 制御は安定化のために必要である。積分制御は、ゼロパワー制御を行うときには用いない。

今回、ゼロパワー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小さなループである。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、ベース部の重量はすべ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、永久磁石と天井の空隙は変化しない。この間の吸引力は常に浮上体全体の重量とつりあ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ゼロパワー制御が実現できる。

3.2.2 ロバスト性向上のための制御浮上の安定化のために、実験装置はリニアアクチュエータを用いている。このため、アクチュエータのストロークに余裕がない場合には、制御入力に対して浮上体のベース部と磁石部の運動の操作が十分にできずロバスト性が損なわれてしまう恐れがある。この対策として、アクチュエータを常にその可動範囲の中心位置で制御することが考えられる。このための制御として Fig. 4 に示された上部のループの積分制御を活用するものとする。積分ゲインを与えることによって、常にアクチュエータの中心で動作するようになる。ただし、このときにはゼロパワー制御は実現できない。

4. シミュレーションおよび実験結果

4.1 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型性の影響を、確認するために数値シミュレーションを行った。制御方式を PD 制御のみとした場合とゼロパワー制御を行ったときについて比較検討した。

シミュレーション結果を Fig. 5, Fig. 6 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)

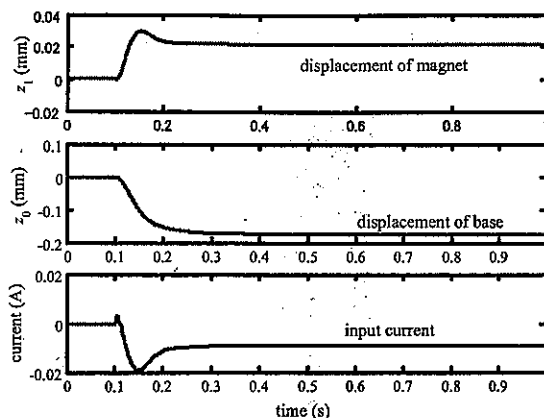


Fig. 5: Simulation results without zero power control

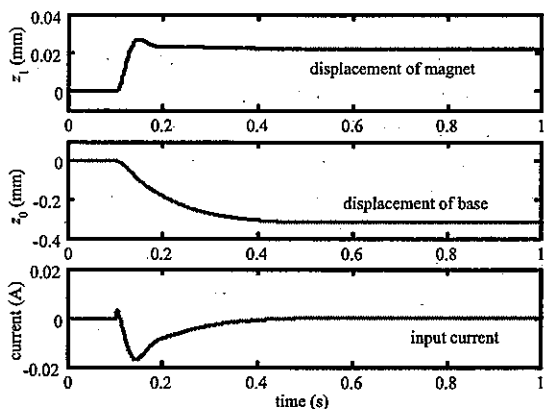


Fig. 6: Simulation results with zero power control

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。0.1 秒後に外乱が入力され 1 秒後までの応答を記録した。ベース部永久磁石部の変位は上向きを正として図に表した。

PD 制御のみを行った結果が Fig. 5 である。上から磁石部の変位、ベース部の変位、VCM への入力電流を表している。外乱が加わると同時に 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とがわかる。これにより永久磁石と天井の空隙を短くして、吸引力を高めていることがわかる。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ことがわかる。

ゼロパワー制御を行った結果を Fig. 6 に示す。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 への入力電流が 0 に収束していることがわかる。この結果、提案した制御手法によりゼロパワー制御が可能であることが確認できた。

アクチュエータが常にその可動範囲の中心位置で動作するような制御を行ったときの結果を Fig. 7 に示す。4 つ目の図として、浮上体のベース部と磁石部の変位を示したグラフを表示した。図からわかるように、ストロークは外乱の前後で 0 に収束していることがわかる。これにより、システムの入力に対して余裕のある制御が可能になると考えられる。

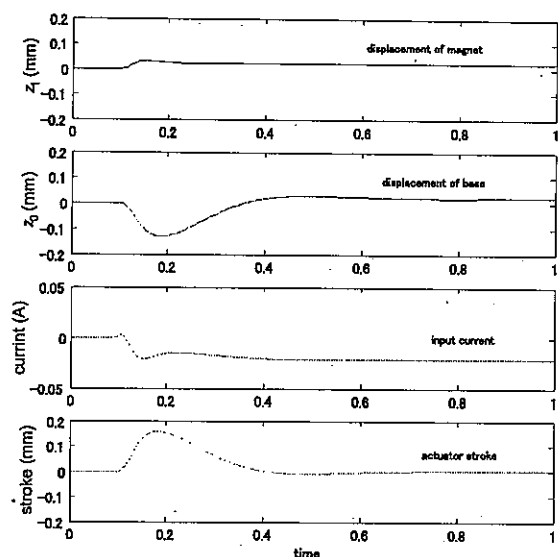


Fig. 7: Simulation results with actuator control

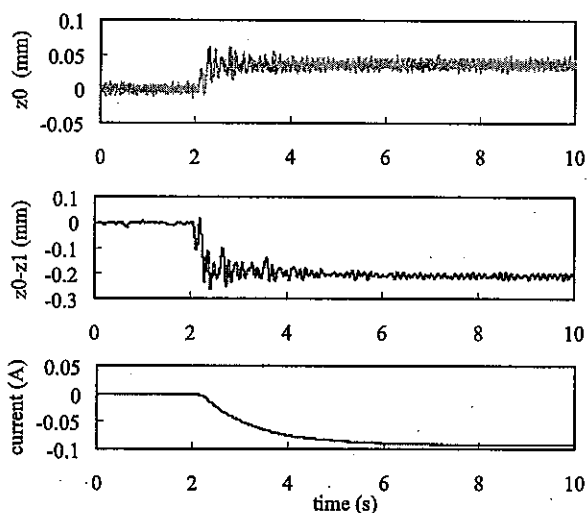


Fig. 8: Experimental results without zero power control

4.2 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った。まず浮上が可能であることを確認した後、シミュレーションと同様にPD制御のみの場合と、ゼロパワー制御を行った場合の外乱応答の結果を観測した。

結果を、Fig. 8とFig. 9に示す。ともに安定な浮上が実現できていることがわかる。なおこれらの図の電流のグラフは、フィルターを介してその信号を記録したものである。2つの図を比べるとわかるように、PD制御のみに比べてゼロパワー制御の場合は、十分な減衰が得られていない。これは積分制御を行っているために安定化のためのゲインの調整が難しいためと思われる。しかし、外乱の前で電流が0となっていることが確認できる。このことから、本システムにおいてゼロパワー制御が可能であることが確認できた。

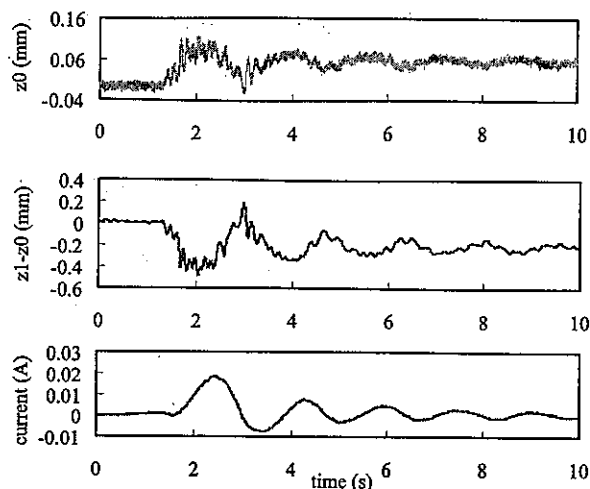


Fig. 9: Experimental results with zero power control

5. おわりに

永久磁石を用いた懸垂形磁気浮上装置におけるゼロパワー制御について検討した。まず、装置を紹介し、モデル化を行った。その後ゼロパワー制御のためのコントローラを提案した。このシステムにおいて、数値シミュレーションと実験を行い、ゼロパワー制御が可能であることを両方から確認した。実験では減衰特性に問題があることが考えられるが、ゼロパワー制御の可能性を確認するという目標は達成できた。今後の課題として、ゼロパワー制御を実現するためのより安定な制御方法について考察を行って行く予定である。

参考文献

- (1) 森下, 小豆沢, 常電導吸引式磁気浮上系のゼロパワー制御, 電学論, 108D, D(1988), 447
- (2) 吉田, 岡, 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 and T.Higuchi, Magnetic levitation system by reluctance control -levitation by motion control of permanent magnet-, Int. J. of Applied Electromagnetics in Materials, 4, 369-375 (1994)