

運動制御に基づく磁気浮上機構の零パワー制御

Zero Power Control of Maglev System Using Motion Control

高知工科大学 ○ 孫 鳳, 岡 宏一

F. Sun and K. Oka

Kochi University of Technology

Abstract This paper proposes a zero power control method for a mechanical magnetic suspension system using a spring in the device and an integral feedback loop in the controller. This system using this zero power control method will consume quasi-zero power when the levitated object is suspended in an equilibrium state. In this paper, a model and a prototype were set up, numerical simulations of zero power control with nonlinear attractive force were carried out based on the model, and experiments were completed to confirm the practicality of the prototype. All results indicate that this zero power control method is feasible and effective.

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であるため、高速回転機構の磁気軸受、リニアモーターカーおよびクリーンルーム中の磁気浮上搬送装置などが提案され、また実現されている。これらの浮上装置では、用いられている磁気浮上の多くは、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、浮上装置あるいは浮上体の重量を支持するための定常電流が大きくなり、エネルギー消費の問題がある。この問題を解決するため、森下らによりEMSシステムのためのゼロパワー制御方法が提案されている[1]。このゼロパワー制御方法では、永久磁石と電磁石を併用し、ほとんどの重量を永久磁石の吸引力で支持し、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。従って、定常浮上のエネルギーを大副に低減できる。また、このゼロパワー制御方法は多くの浮上装置に応用されている。例えば、水野らはゼロパワー磁気浮上を利用した除振装置を開発している[2]。石野らはゼロパワー制御を用いた剛性切り替え制御による磁気浮上系の高耐荷重化について研究している[3]。

能動形の磁気浮上機構の他の形式として、永久磁石を用いた機械的な磁気浮上機構が報告されている。機械的な磁気浮上機構では、浮上力が永久磁石の吸引力であり、永久磁石の起磁力は直接調整できないので、浮上力の調整方法として、磁気回路内に新たにリラクタンス調節機構を設ける方法及び浮上体との空隙の長さを制御する方法などがある[4]。

磁気回路を調節する方法を用いた浮上機構では、通常は磁気回路を変化させるアクチュエータは浮上体の重量

を支持する力を必要としないので、浮上体を安定浮上しているとき、ゼロパワー制御を実現することが可能である。例えば、水野らは、永久磁石の吸引力を利用した磁気浮上で、磁路中に挿入した強磁性体の位置を変化させることによって、永久磁石から浮上体に到達する磁束を調整する[5]。上野らは、磁歪素子と圧電材料を用いて磁路を制御する磁気浮上装置を研究している[6]。このシステムでは、永久磁石と浮上対象物から形成される磁路と並列な磁路に複合機構を挿入し、圧電材料による圧縮力によって磁路中の磁歪材料のリラクタンスを変化させて、吸引力を制御する。また、著者らは、円板磁石と回転モータを用いて浮上システムを構成することを提案している[7]。この浮上システムでは、ロータリアクチュエータに取り付けられた円板磁石の回転角度を制御することにより、円板磁石が発生した磁束の経路を変更し、浮上力を制御する。これらの磁気浮上機構では、ゼロパワー制御が実現されている。

また、永久磁石と浮上体の空隙を制御する形式を利用している浮上機構は多くの提案がされている[8][9][10]。しかし、このような磁気浮上機構では、リニアアクチュエータは常に浮上体の重量を支持しているため、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て、浮上体の空隙を制御する方式による磁気浮上機構におけるゼロパワー制御について提案する。提案するゼロパワー制御のための機構は、ばねを浮上機構の間に挿入し、電流積分フィードバックループをコントローラに用いる。このため定常浮上状態のときにばねの発生力が浮上体の重量と釣り合うため、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。

まず、浮上原理を説明する。次に、試作装置を紹介し、

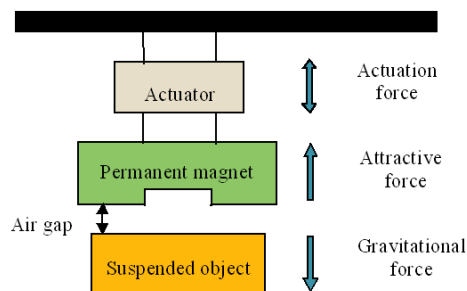


図 1: A magnetic suspension system scheme

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 浮上原理

リニアアクチュエータと永久磁石を用い、浮上体の空隙を制御する形式による磁気浮上機構の原理を図 1 に示す．この浮上機構は，アクチュエータと永久磁石と浮上体で構成され，強磁性体の浮上体を上から永久磁石で釣り上げる形式で，浮上の自由度は上下方向である．安定浮上する平衡位置は，永久磁石の吸引力と浮上体にかかる重力と釣り合う点である．また，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．図 2 に示すように，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上を動かす．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下を動かす．このことにより，浮上体は安定に非接触浮上できる．

3 試作装置とコントローラ

3.1 試作装置

試作装置の写真を図 3 に，浮上システムの概観を図 4 に示す．この試作装置は，永久磁石，VCM (Voice Coil Motor, アクチュエータ)，ばね及び二つの渦電流センサなどにより構成されている．分かりやすくするため，装置を浮上体と運動部とベース部との三つの部分に分ける．浮上体は直径が 30mm，重量が 109.8 g の鉄球であ

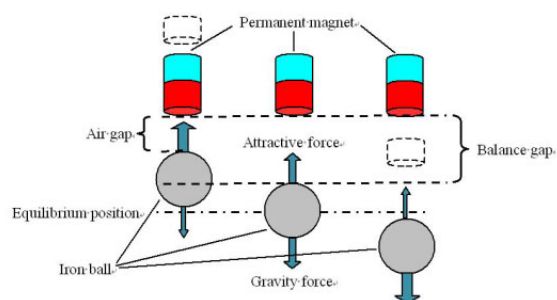


図 2: Relationship between attractive force and gravitational force

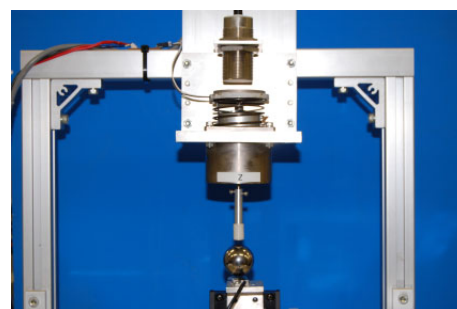


図 3: Photograph of experimental prototype

る．運動部は，永久磁石，VCM のスライダおよびセンサターゲットから成り，連結され，全ての重量が 147.8 g である．ベース部はばね，センサと VCM のステータに連結された動かない部分である．永久磁石は直径が 8mm，長さが 8mm のネオジム磁石である．VCM のは可動範囲は 15mm で，定格電流 2 A のときに推進力 20 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．上部のセンサはセンサターゲットにより永久磁石の位置を検出する．測定範囲が 10mm であり，分解能が 0.02mm である．下部のセンサは，浮上体の位置を検出し，測定範囲が 4mm であり，分解能が 0.001mm である．

3.2 試作装置でのゼロパワ制御

ばねは，運動部とベース部との間に付けられ，ばね定数が 400N/m であり，ゼロパワ制御を実現するためのものである．浮上システムにおいて定常浮上状態で，ばねがないときには，浮上体と運動部の重量は VCM を通してベース部に伝わってしまう．そのため，VCM は常に力を発生させていなくてはならない．ばねがあるときには，ばねで浮上体と運動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

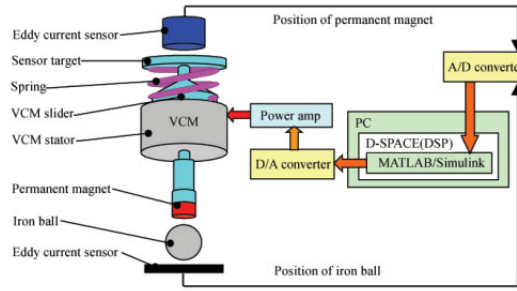


図 4: Configuration of magnetic suspension system

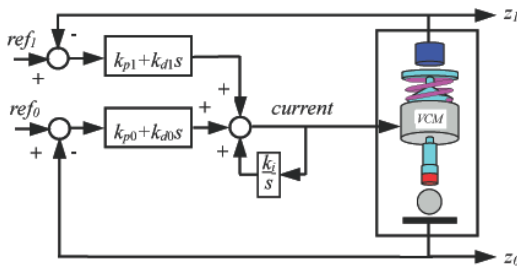


図 5: Block diagram of control system

より，試作装置でのゼロパワ制御を実現することができる．

3.3 コントローラでのゼロパワ制御

磁気浮上システムのコントローラには，ゼロ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．この浮上システムのコントローラの構成を図4に示す．二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．

さらに，制御システムのブロック線図を図5に示す．二つのPDフィードバックループは，上下のセンサの信号を用いVCMへの入力電流を計算し，浮上体の安定浮上を図るものである．上側のループは永久磁石の位置を測定し，下側のループは浮上体の位置を測定する．この二つのPDフィードバックループによって，浮上体が安定に浮上されている．また，図の中央付近にある別の局所積分フィードバックループは，ゼロパワ制御を実現するためのループである．このループは，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

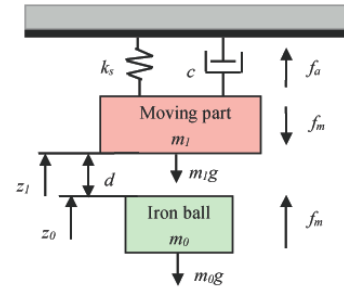


図 6: Model of suspension system

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には運動部とベース部の間隔を広げる力が発生する．このとき，挿入されているばねは伸ばされ，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，浮上体と運動部の重量は全てばねが支持することになり，VCMの電流は0になる．これより，コントローラでは，ゼロパワ制御を実現できると考えられる．

4 モデルとシミュレーション

4.1 モデル

この磁気浮上システムのモデル化を行い，図6に示す．図では，上の壁はベース部をとし，力 f_a はVCMが発生させる力を表し，二つの長方形は運動部と浮上体を表す．また永久磁石と浮上体との吸引力はそれらの距離の自乗に反比例すると仮定すると，浮上体と運動部の運動方程式は次のようになる．

$$m_0 \ddot{z}_0 = f_m - m_0 g \quad (1)$$

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

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

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

ただし，

m_0 : 浮上体の質量 [109.8g]

m_1 : 運動部の質量 [147.8g]

z_0 : 浮上体の位置 (上向きを正) [mm]

z_1 : 運動部の位置 (上向きを正) [mm]

f_m : 永久磁石の吸引力 [N]

f_a : VCMの発生力 (伸びる方向を正) [N]

k_s : ばね定数 [0.4N/mm]

c : システムのダンピング定数 [0N/(m/s)]

k_t : VCMの推進力定数 [10N/A]

i : VCMの入力電流 [A]

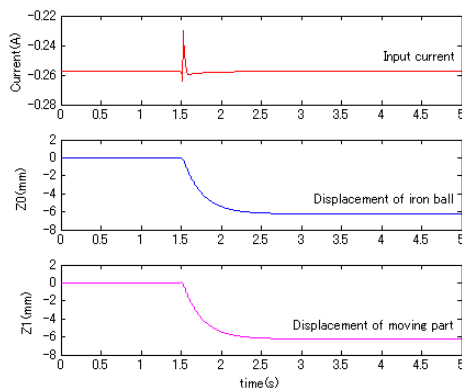


図 7: Simulation results in Case 1

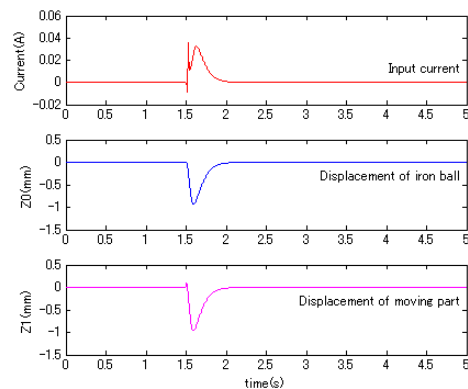


図 9: Simulation results in Case 3

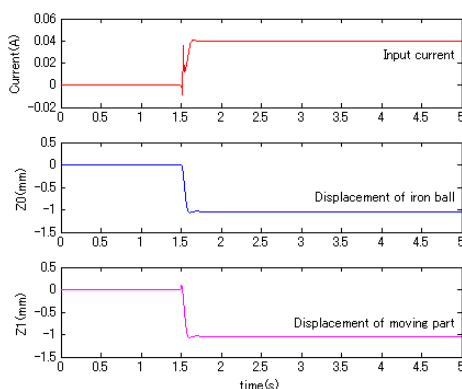


図 8: Simulation results in Case 2

k_m : 永久磁石の吸引力定数 [$3.76 \times 10^{-6} \text{Nm}^2$]

d : 浮上体と永久磁石との距離 [mm]

4.2 シミュレーション

4.2.1 シミュレーションを行う条件

試作システムとモデルによって、求めた運動方程式を用い、吸引力の非線形性を含む数値シミュレーションを行った。シミュレーションを行った条件としては、以下の三通りである。

Case1 ばねがなくゼロパワ制御を行わない場合

Case2 ばねはあるがゼロパワ制御を行わない場合

Case3 ばねがありゼロパワ制御を行った場合

シミュレーションは、浮上体が安定浮上しているときに浮上体を 1.5 秒時に下に 0.05mm 動かし、5 秒後までの応答を記録した。さらに、利用したフィードバックゲインは最適レギュレータを用いて、計算したものである。

4.2.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果の図では、上から VCM への入力電流、浮上体の位置及び運動部の位置を表している。

Case1 の結果を図 7 に示す。ステップ入力した後、浮上体が直ぐに安定浮上状態になっている。VCM への入力電流は元の同じ値になって、浮上体と運動部は下方へ移動した。定常浮上状態では、VCM への入力電流は -0.258A であり、浮上体と運動部の重量を支持する力を発生する。尚 VCM は負の電流により上向きの力を発生させている。浮上体を下に動かすとき、電流は、まず正に振れ、その後、元の電流値となった。

Case2 の結果を図 8 に示す。用いたばねの定数は 0.4N/mm である。ステップ入力した後、VCM への入力電流は 0.04A であり、下向きの力を発生し、運動部の変位によりばねの発生力と釣り合っている。このとき、ばねの発生力は、浮上体と運動部の重力及び VCM の発生力の合力に等しい。VCM への入力電流は Case1 の場合より小さくなっている。

Case3 の結果を図 9 に示す。この場合はばねがありゼロパワ制御を行ったのである。フィードバックゲインとばね定数は Case2 と同じであり、ゼロパワ制御のための電流積分フィードバックゲイン k_i (図 5 に示されている) は 6 である。この局所電流積分フィードバックループのゲインは電流の変化速度に影響する。ゲインが大きいとき、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、システムの安定が困難になる。システムに従って、 k_i を適切な数値にする必要がある。今回使っているゲインは何度か試みた後の最適なものである。ステップ入力した後は、VCM への入力電流がゼロになり、浮上体と運動部が元の位置に戻る。それは、ステップ入力する前後に、VCM の発生力がゼロになって、ばねの

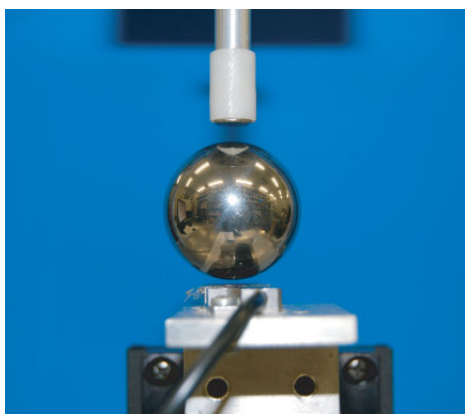


図 10: Photograph of suspended iron ball

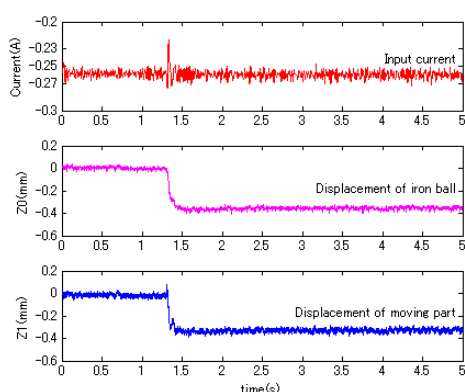


図 11: Experimental results in Case 1

発生力が浮上体と運動部の重量を支持していることわかる。これより、提案したゼロパワ制御が可能であることが確認できた。

5 実験結果

試作装置を用いてシミュレーションと同じような浮上実験を行った。鉄球を浮上している写真を図 10 に示す。しかし、試作装置では、上記の永久磁石の位置を測定するセンサの線形性が良くないために、使っているフィードバックゲインはシミュレーションより少し違っている。それらの実験結果を図 11 から図 13 に示す。電流結果はローパスフィルタに通した。

Case1 の実験結果を図 11 に示す。定常浮上状態では、VCM への入力電流が -0.26A ぐらいで、鉄球と運動部の重量が釣り合う力を発生する。ステップ入力したあとは、鉄球と運動部を一緒に同じ距離で下に動かして、VCM の電流が元の同じ電流値になっている。ステップは鉄球の位置を変えるだけで、鉄球の重量は変えないので、鉄

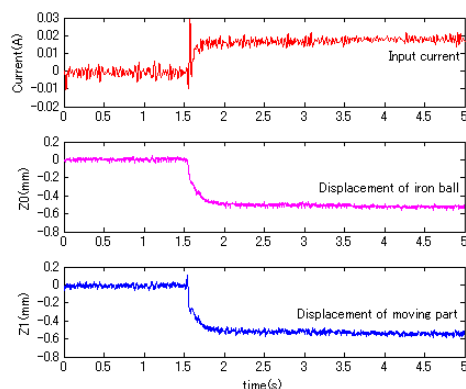


図 12: Experimental results in Case 2

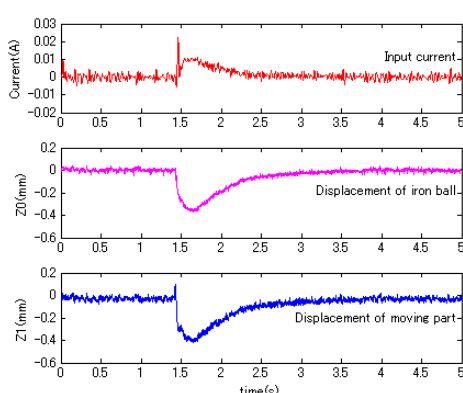


図 13: Experimental results in Case 3

球と永久磁石との間の距離及び VCM の発生力は変わらない。この場合では、鉄球と運動部の重量は全て VCM に支持し、大きな VCM への入力電流が必要になる。

Case2 の実験結果を図 12 に示す。この場合では、ばねがあるので、VCM は鉄球と運動部の重量の全てを支持する必要がなく、定常浮上しているときの電流が Case1 の場合より小さくなっている。使っているばねの定数は 0.4N/mm である。

Case3 の実験結果を図 13 に示す。この場合では、ばね定数は 0.4N/mm であり、コントローラの局所電流積分フィードバックループのゲインは 6 である。システムの応答は、シミュレーション結果の通りになっている。ステップを入力したあと、鉄球と運動部は一緒に鉄球と運動部の重力とばねの発生力と等しい位置に行き、VCM の発生力はゼロになっている。安定浮上状態では、VCM への入力電流がゼロになっている。コントローラの局所電流積分フィードバックループによって、鉄球を安定浮上することに基づいて、全ての重量をばねの発生力で支

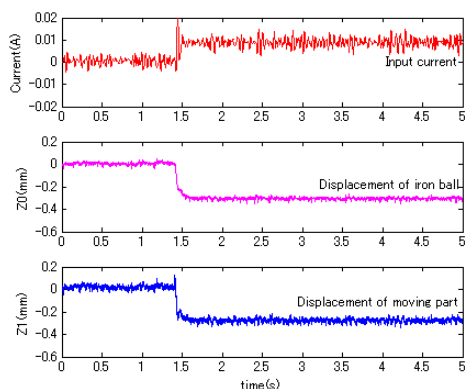


図 14: Results in Case 2 with different spring

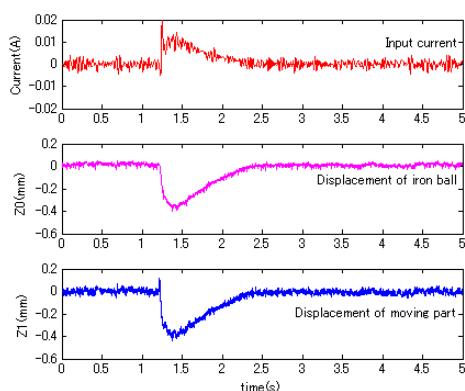


図 15: Results in Case 3 with different spring

持するため、VCM に入力される電流を打ち消しているためである。その結果、この場合の定常浮上状態では、VCM への入力電流はゼロになって、ゼロパワ制御が実現された。

さらに、ばね定数が 0.3N/mm であるばねを用いた実験の結果を図 14 と図 15 に示す。フィードバックゲインは図 12 と図 13 の場合と同じである。図 14 より、ステップ入力した後の安定浮上状態では、VCM の電流は 0.1A ぐらいであり、図 12 より小さくなっている。それは、弱いばねの発生力は小さい電流で釣り合うためである。また、図 15 では、電流と位置の変化は図 13 のほぼ同じの応答になって、ゼロパワ制御も実現された。

さらに、全ての場合で、VCM への入力電流は、ステップ入力しているときに、急激な変化があった。それは、VCM が鉄球を下に動かすための応答である。

6 おわりに

永久磁石と VCM を用いた機械的に磁気浮上機構におけるゼロパワ制御について検討した。このゼロパワ制御方法は、浮上装置中にばねを挿入し、コントローラに局所電流積分フィードバックループを用いた。また、試作装置を製作し、モデル化を行った。そして、数値シミュレーションと実験を行った。それらの結果によって、定常浮上状態では、VCM への入力電流がゼロになって、ゼロパワ制御が実現された。

参考文献

- [1] 森下明平，小豆沢照男：常電導吸引式磁気浮上系のゼロパワ制御；電気学会論文集，Vol. 108-D，No. 5，pp. 447–454（1988）
- [2] 水野毅，吉富亮一：ゼロパワ磁気浮上を利用した除振装置の開発（第 1 報，基本原理と基礎実験）；日本機械学会論文集（C 編），Vol. 68，No. 673，pp. 2599–2604（2002）
- [3] 石野裕二，水野毅，高崎正也：磁気浮上系の局所フィードバックによる剛性制御；日本機械学会論文集（C 編），Vol. 75，No. 754，pp. 1763–1769（2009）
- [4] 樋口俊朗，岡宏一：リラクタンス制御形磁気浮上システム - 永久磁石とリニアアクチュエータを用いた浮上機構；電気学会論文集，Vol. 113-D，No. 8，pp. 988–994（1993）
- [5] 平井雄三，石野祐二，高崎正也：磁路制御形磁気浮上に関する研究 - ボイスコイルモータを用いたシステムの開発；日本機械学会論文集（C 編），Vol. 72，No. 721，pp. 2869–2876（2006）
- [6] 上野敏幸，裴進浩，谷順二：超磁歪・圧電の複合化による磁気力制御用電磁変換素子とその磁気浮上への応用；日本機械学会論文集（C 編），Vol. 67，No. 658，pp. 1897–1904（2001）
- [7] K. Oka, N. Ninomiya, L. Chen and Y. Fujiwara : Magnetic Suspension System with Variable Flux Path Mechanism Using Rotary Actuator; Tenth International Symposium on Magnetic Bearings 2006, p. 86
- [8] 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，pp. 166–169（2003）
- [9] 催天時，岡宏一，政木慶次：永久磁石とリニアアクチュエータを用いた磁気浮上機構 - 両側吸引の場合の浮上特性について；第 17 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム，No. 2AM5，pp. 243–248（2005）
- [10] 藤原佑輔，催天時，岡宏一：永久磁石の運動制御を用いた磁気浮上装置 - 浮上体の回転機構に関する考察；Dynamic and Design Conference 2004，No. 517，CD-ROM，（2004）