

JIASC2011

平成23年



電気学会産業応用部門大会

Japan Industry Applications Society Conference

プログラム



会期 平成23年9月6日(火)～9月8日(木)

会場 琉球大学 千原キャンパス

環境負荷の低減をめざして ーパワーセービングに役立つ技術ー

岡 宏一 (高知工科大学) 鈴木 晴彦 (福島高専)
水野 毅 (埼玉大学)

In the Cause of Decreasing Environmental Impact - Useful Technologies for Power Saving -

Koichi Oka (Kochi University of Technology), Haruhiko Suzuki (Fukushima Technical College),
Takeshi Mizuno (Saitama University)

There are a lot of studies on power saving technologies for magnetic suspension systems. This paper introduces some kinds of recent power saving technologies such as zero-power control for mechanically controlled suspension system, passive suspension system using diamagnetic graphite, suspension system with reduction gear, and zero-power control for multiple suspension system. The performances of these studies are all examined by experimental examinations.

キーワード：磁気浮上システム，永久磁石，反磁性，ゼロパワー制御，並列磁気浮上

Keywords : magnetic suspension system, permanent magnet, diamagnetic graphite, zero-power control, multiple suspension system

1. はじめに

非接触浮上技術や磁気浮上技術は、「省エネルギー」、「省メンテナンス」、および「クリーン」の観点から注目され、電気工学、機械工学、およびそれらの融合領域において盛んに研究されている。本報告は、磁気浮上・磁気軸受の技術における「省エネルギー」に基づいた最近の話題を紹介するものである。

磁気浮上技術において、通常電磁石を用いる浮上機構は、浮上力発生のためにコイル電流が必要であり、電力を消費することになる。その解決策として、ゼロパワー制御という定常的な浮上力を永久磁石の磁力により得ることが提案され、実用化されている⁽¹⁾。2 章では、電気的な制御ではなく機械的な制御による浮上方式でゼロパワー制御を実現させた例を紹介する。次に 3 章では、超伝導と同じく受動安定可能であるが、冷却の必要のない反磁性体を用いた浮上方式を紹介する。4 章では減速機付きモータを用いた浮上方式を紹介する。これは、重量物を浮上させるときに減速機ギアを大きくすることで、消費電力を低減させようとする試みである。最後の 5 章では、1 つのアンプで複数のコイルを駆動し複数の自由度の浮上を実現し、かつそれらの浮上をゼロパワーで行うことにより、アンプ数の低減によるパワーセービング技術について紹介する。これらの技術

を用いることにより、電気的なロスだけではなく、非接触浮上技術が伝達機構に普及することによる摩擦低減による機械的なロスの低減につながる可能性があると考えられる。

2. 機械的な浮上方式によるゼロパワー制御⁽²⁾

〈2・1〉 機械的な制御による磁気浮上機構 永久磁石とリニアアクチュエータによる機械制御磁気浮上機構が提案されている。これは、図 1 に示すように永久磁石をアクチュエータによって駆動することにより浮上を行うものである。浮上対が復元力を得るための浮上の原理は、浮上体が落下する場合には、アクチュエータを伸ばし空隙を狭くして吸引力を大きくし、逆に平衡位置より上昇する場合には、アクチュエータを縮め空隙を広くし吸引力を小さくするものである。

この機構においてゼロパワーを実現するためには、駆動源であるリニアアクチュエータの発生力を補助する機構が必要である。電磁コイルによる浮上システムでは、永久磁石の起磁力を用いるように、この機構では図 2 に示すようにバネを用いて実現した。

〈2・2〉 モデル化とコントローラ 機械的浮上システムには安定化の制御が必要であり、その上にロパワー制御のための制御が必要となる。コントローラのフィードバック

クゲインを決めるために浮上機構のモデル化を、図 2 に基づいて行った。なお、アクチュエータは、その質量はフレーム部と永久磁石部に別れるものとし、力のみを発生する機構として考えた。

まず、フレーム部の運動方程式は、次式となる。
$$m_0 \ddot{z}_0 = k_s(z_1 - z_0) + c(\dot{z}_1 - \dot{z}_0) - f_a - m_0 g \dots\dots\dots (1)$$

次に、永久磁石部の運動方程式は、次式となる。
$$m_1 \ddot{z}_1 = k_s(z_0 - z_1) + c(\dot{z}_0 - \dot{z}_1) + f_a + f_m - m_1 g \dots\dots (2)$$

ここで z_0 はベース部の変位、 z_1 は永久磁石部の変位、 f_a はアクチュエータ発生力、 f_m は永久磁石吸引力、 k_s は用いるバネのバネ定数である。

このシステムを安定化させ、かつゼロパワー制御を行うために、図 3 のブロック線図に示すようなコントローラを用いた。安定化のために PD 制御を用い、ゼロパワ制御を実現するために積分制御を用いた。図に示すように PD 制御を行う 2 つのループがあり、これらは、浮上体と天井の相対位置のループと、ベース部と永久磁石部の相対変位のループである。ゼロパワー制御を実現する積分制御は、図の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補償してなくすようにするものである。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、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、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。

〈2・3〉 実験結果 実験結果の一例を図 4 に示す。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、5 秒後までの応答結果を計測した。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 となっていること、切り離し直後から電流の積分フィードバックにより VCM の発生力は減少し、ベース部と永久磁石部が相対変位していること、およびこの変位量とバネ定数に基づく演算によりバネの発生力と切り離れた負荷の重力が等しいことがわかった。

以上の結果より、機械的な磁気浮上機構に関しては、バネを用いることにより、ゼロパワー制御を実現できることがわかった。

3. 反磁性グラファイトを用いたゼロパワー制御⁽³⁾

〈3・1〉 反磁性グラファイト板を利用した磁気浮上機構
物質の反磁性を利用した室温パッシブ磁気浮上は、「浮上に関する制御機構の簡略化」や「総合的なエネルギー消費の低減」が可能となるため、特殊環境下での部品・製品搬送や、超微細加工を目的としたマイクロファクトリー、MEMS の構築において期待される要素の一つである。

ここでは、図 5 に示すように、2 次元に Hallbach 配列した永久磁石上でパッシブ磁気浮上する PG(Pylorytic Graphite) 板試料の二次元の駆動について述べる。この機構は、浮上している PG 板試料に永久磁石を近づけ、磁場分布を変化さ

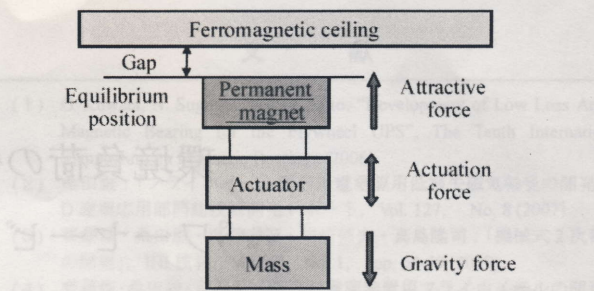


図 1 機械的懸垂型磁気浮上機構
Fig. 1 Magnetic suspension system using mechanical control

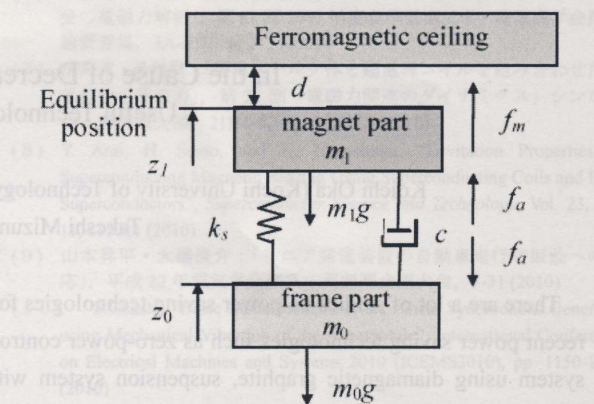


図 2 機械的磁気浮上機構のモデル
Fig. 2 Model of mechanical magnetic suspension system

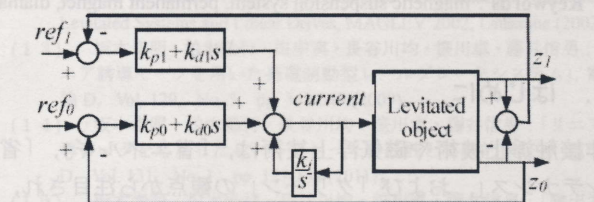


図 3 機械的磁気浮上機構の制御システムのブロック線図
Fig. 3 Block diagram of control system of mechanical suspension

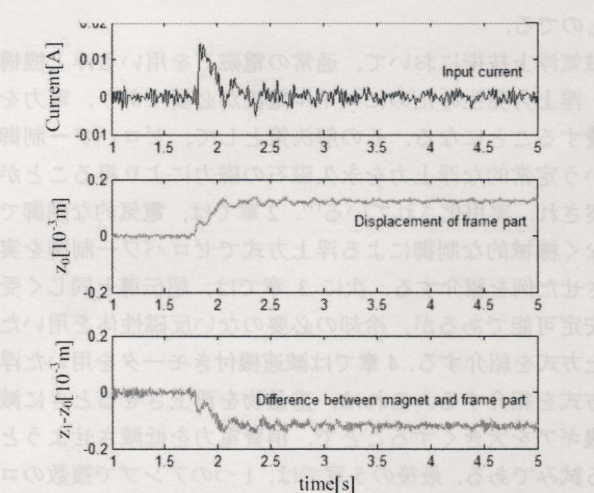


図 4 機械的磁気浮上機構のゼロパワー制御の実験結果
Fig. 4 Experimental result with zero power control on mechanical magnetic suspension system

せることで変位する。このとき PG 板試料の位置保持には一切のエネルギーを必要としない。つまり「ゼロパワーで位置決めできる二次元非接触マイクロモーションアクチュエータ」の開発と考えることができる。

〈3・2〉 反磁性体の磁気浮上の原理 外部から反磁性物質に磁界を加えると、物質の原子を構成する電子の軌道運動がわずかに影響を受け、強磁性体や常磁性体とは逆の磁気モーメントが生じ、加えられた磁界とは逆向きの磁界をわずかに生じる。このため、反磁性体は永久磁石を近づけた際、磁石の極性によらず反発力が生じる。

反磁性体のある点が外部磁界から受ける磁気力は単純な磁気浮上系においては次式のように表され、磁束密度と磁化率に依存する。今回用いる PG 板試料の $\chi_m = -450 \times 10^{-6}$ である。

$$\vec{f} = \frac{1}{2\mu_0} \chi_m \vec{\text{grad}}(B^2) \dots\dots\dots (3)$$

〈3・3〉 Hallbach 配列永久磁石上での浮上試料の位置決め 2 次元で浮上位置決め制御するためには、3 自由度の制御が必要である。ここでは図 6 に示すような 2 次元の Hallbach 配置を用いた永久磁石とその上で浮上する 8 角形の試料を考案した。このような形状にすることにより、x 方向、y 方向の位置、および z 軸周りの回転を固定することができる。

図 6 に示した配置の試料を位置決めするための機構を図 7 に示す。図のように Hallbach 磁石の上にパッシブ磁気浮上させた試料に、上方から永久磁石を近づけることによって、磁場勾配を試料に与えることができる。このことにより試料を水平方向に位置決めすることが可能である。今回の実験では、図 6 の中の Point A と Point B に上方から N 極を近づけることにより試料を変位させた。

結果を図 8 に示す。図は Point A における結果である。横軸に近づけた永久磁石と Hallbach 磁石とのギャップを示し、縦軸はそのときに試料が変位した量を示す。試料の変位は、レーザ変位計を用いて測定した。

永久磁石を近づけていくと、PG 板試料は徐々に A 点から遠ざかり、非線形な特性を描いて変化していくのがわかる。また、永久磁石を近づける場合と遠ざける場合に、ギャップと変位の関係は完全に一致しており、ヒステリシスのない再現性のよい関係であることがわかった。

4. 減速機付モータを用いた磁気浮上機構⁽⁴⁾

〈4・1〉 可変磁路制御形磁気浮上機構 減速機付モータを用いて磁気浮上機構を構成することが可能である。減速比を大きくすることで、重量物を非接触支持させる場合でもモータの消費電力を低減させ、浮上におけるパワーセービングに役立つ技術であると考えられる。以下では、この磁気浮上機構について紹介する。

浮上装置の概略と原理を図 9 に示す。この磁気浮上機構は、円盤磁石と左右二つの F 字型の強磁性体コアと直方体

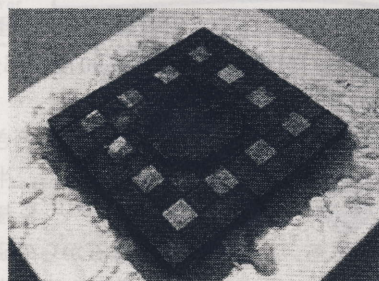


図 5 2 次元 Hallbach 配列した永久磁石上で浮上する 8 角形 PG 板試料の受動形磁気浮上

Fig. 5 Passive magnetic levitation of octagonal PG plate sample on 2D-Hallbach PM array at room temperature

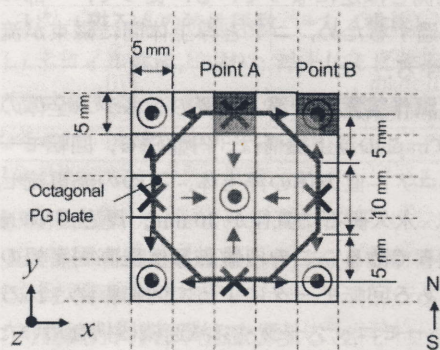


図 6 PG 試料板の形状と 2 次元 Hallbach 磁石の配置

Fig. 6 Design of octagonal PG plate sample and layout of PG sample on 2D-Hallbach PM array

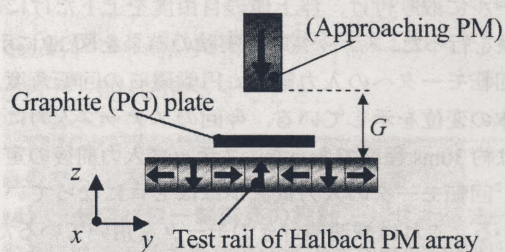


図 7 位置決めのための Hallbach 磁石と駆動用永久磁石の配置
Fig. 7 Layout of an approaching PM for positioning of PG plate on Hallbach PM array

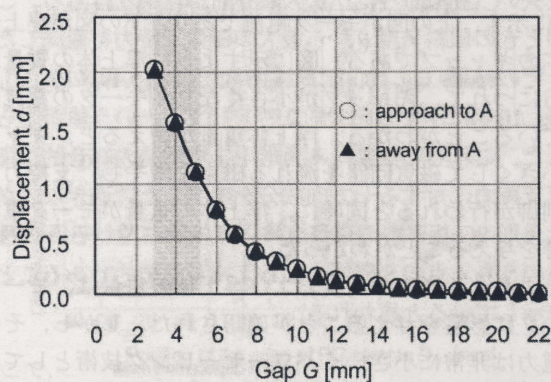


図 8 機械的磁気浮上機構のゼロパワー制御の実験結果
Fig. 8 Experimental result with zero power control on mechanical magnetic suspension system

の浮上体から構成されている。円盤磁石は、直径方向に着辞されており、原理の説明のためにある 90 度の部分が N 極、反対側の 90 度が S 極であると仮定する。

図(a)のように円盤磁石の N 極が真上にあるとき、上部の N 極から出発した磁束の半分は右側のコアに、半分は左側のコアに流れ込む。これらの磁束は各コアと S 極が面した部分から S 極に入る。よって、円盤磁石からの磁束は浮上体を通過せず、コアと浮上体間では吸引力は発生しない。次に、図(b)に示すように円盤磁石が右に回転したとき、上部の N 極から流出する磁束は左側のコアより右側のコアの方が多い。一方、下部の S 極と面する左右のコアの面積関係は、N 極側とは逆になっている。従って、一部の磁束が浮上体を通過するため、コアと浮上体間に磁束が流れ、吸引力が発生する。

〈4・2〉 試作装置 浮上装置のシステム全体の構成を図 10 に示す。この浮上機構は、円盤磁石、回転モータ、パーマロイのコア、直方体の浮上体、二つの渦電流センサで構成される。永久磁石は直径が 30 mm、厚さが 10 mm のネオジウム磁石である。この円盤磁石は垂直固定板の裏側に取り付けてある回転モータによって回転駆動される。回転モータは、ハーモニックドライブ減速機構を用いた DC モータであり、減速比は 50 である。円盤磁石の両側にある二つの F 字型のコアは、厚さが 10mm のパーマロイである。

〈4・3〉 浮上実験 浮試作した磁気浮上装置では、左右コアの発生力が等しくないために、直方体の浮上体をリニアレールに取り付け、浮上体の自由度を上下だけに制限して実験を行った。ステップ応答実験の結果を図 11 に示す。上から回転モータへの入力電流、円盤磁石の回転角度、及び浮上体の変位を示している。今回のステップ入力に対する応答は約 30ms 程度であった。ステップ入力前後の定常状態では、回転モータの入力電流がほぼゼロになっていることが分かる。これは減速機付きのモータを用いているため、浮上力を得るための電流がわずかでよいことを示している。

つぎに提案した浮上システムの評価として、浮上体の質量を変化させたときに必要なモータ電流を調べた。結果を図 12 に示す。上の図がモータ電流であり、下の図が浮上体とコアのギャップである。図に示すように浮上体の質量が増えるにつれて、ギャップが小さくなり、モータの電流が増えていることがわかる。浮上体重量が増えると、ギャップを小さくして磁気回路を流れる磁束を増やし、支持力を増す制御が行われると同時に、浮上体の重量がモータ電流に影響を与えることがわかった。

以上より永久磁石の角度および浮上体の重量は、モータのトルクに影響を与えることが確認された。しかし、その消費電力は非常に小さいくパワーセービング技術としては有用であると考えられる。また、この機構ではギャップを一定にして浮上体の重量を変化させることが可能である。これは、空隙一定でのゼロパワー制御の可能性を示している。

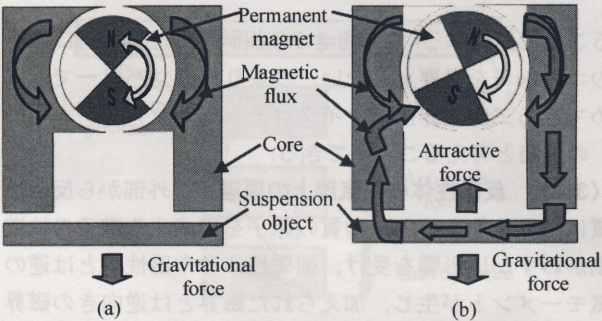


図 9 可変磁路制御形磁気浮上機構の原理
Fig.9 Principle of variable flux path control suspension system

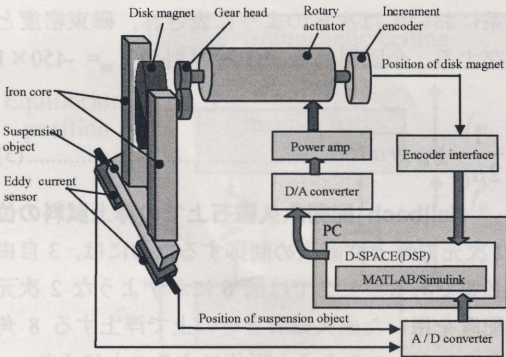


図 10 可変磁路制御形浮上機構の構成
Fig. 10 Configuration of variable flux control suspension system

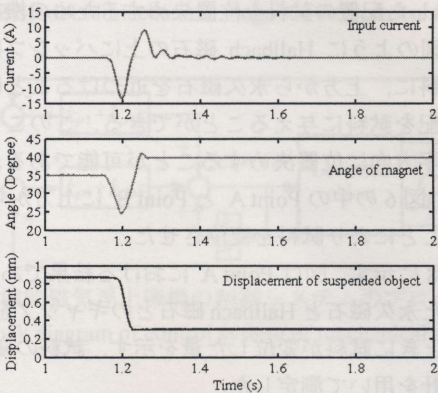


図 11 可変磁路制御形浮上機構におけるステップ応答実験結果
Fig. 11 Experimental result of variable flux control suspension system

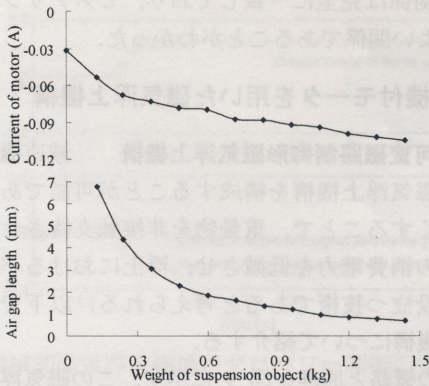


図 12 機械的磁気浮上機構のゼロパワー制御の実験結果
Fig. 12 Motor current and air gap about suspension force

k_c : 電流積分ゲイン.

可制御性について, 以下の定理が成立する.

《定理 2》条件(5)が満足されるとき, 式(9)で動特性が記述されシステムは可制御である.

(証明) $(\bar{A}_{cpr2}, \bar{b}_{cpr2})$ から構成される可制御行列 $\bar{M}_C^{cpr2}$ を計算すると,

$$\bar{M}_C^{cpr2} = \begin{bmatrix} 0 & b^{(1)} & 0 & a_{21}^{(1)}b^{(1)} & 0 \\ b^{(1)} & 0 & a_{21}^{(1)}b^{(1)} & 0 & (a_{21}^{(1)})^2b^{(1)} \\ 0 & b^{(2)} & 0 & a_{21}^{(2)}b^{(2)} & 0 \\ b^{(2)} & 0 & a_{21}^{(2)}b^{(2)} & 0 & (a_{21}^{(2)})^2b^{(2)} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

行列式を計算すると,

$$\det \bar{M}_C^{cpr2} = -a_{21}^{(1)}a_{21}^{(2)}\{(a_{21}^{(1)} - a_{21}^{(2)})b^{(1)}b^{(2)}\}^2 \quad (13)$$

したがって, 式(5)が成立するとき,

$$\text{rank} \bar{M}_C^{cpr2} = 5 \quad (14)$$

となるので, システム(9)は可制御である. Q.E.D

この定理から, ゼロパワーコントローラを組み込んだシステムは, 式(11)におけるフィードバックゲインを適切に選べば, 安定化できることがわかる.

《5・5》 実験装置 本実験で使用した装置の全体の概念図を図 14 に示す⁽⁷⁾. 本実験では, 鉄球を浮上体とする 1 自由度制御形磁気浮上装置 (以下では, 磁気浮上装置 1 と呼ぶ) と, 浮上体がシーソーとなっている磁気浮上装置 (以下では, 磁気浮上装置 2 と呼ぶ) の二つの実験装置を組み合わせる実験を行った.

コントローラのチューニングを試行錯誤的に行うことで, ゼロパワー制御を用いた電流制御形直列接続式並列二重磁気浮上を実現した. 磁気浮上装置 2 の外乱用電磁石へ矩形波を電流信号として入力したときの応答図 15 に示す. 図 15(b)から, 浮上体 (arm) が定常状態で外力と逆向きに変位するというゼロパワー制御特有の応答をしていることがわかる. また, 図 15(c)から制御電流が外乱によらず零に収束することも確認できる.

6. おわりに

磁気浮上機構において, パワーセービングを目指した最近の研究を紹介した. 今後, 環境対策, 節電などのためにますます省エネに対するニーズは増えることが予想される. 今回紹介した技術以外はほんの一例であり, 省エネに関するますますの技術革新が行われることと思われる.

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ー制御」, 電気学会論文誌, Vol.108-D, No.5, pp. 447-454, (1988)
著書名:「タイトル」, 雑誌名, Vol.巻数, No.号数, p.頁数 (発行年)

(2) 孫鳳, 岡宏一:「永久磁石と VCM を用いた懸垂型磁気浮上機構におけるゼロパワー制御」, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.75, No.753, pp. 1383-1388, (2009)

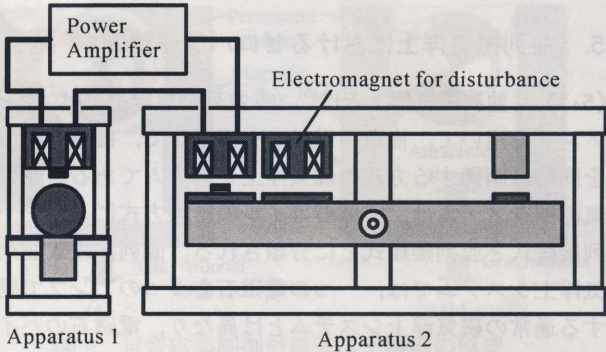


Fig.14 Experimental system on zero-power parallel suspension system

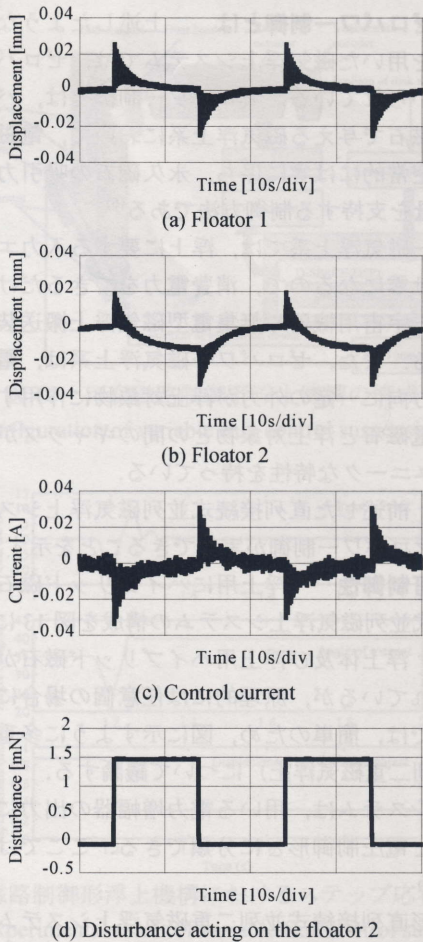


図 15 並列ゼロパワー浮上システムにおけるステップ応答
Fig.15 Step responses of the zero-power parallel suspension system

(3) 鈴木晴彦, 佐藤大地, 初瀬敬, 伊藤淳:「ゼロパワーで位置制御できる反磁性グラファイト板を用いた非接触二次元マイクロ駆動」, 日本 AEM 学会誌, Vol.17, No.1, pp. 150-155, (2009)

(4) 孫鳳, 岡宏一:「円盤磁石の回転を用いた磁路制御形非接触浮上機構の開発」, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.76, No.771, pp. 2916-2922, (2010)

(5) 水野 毅, 高崎正也, 石野裕二:「多重磁気浮上システム (第 1 報, 基本構想と基本定理)」, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.76, No.761, pp.76-83, (2010)

(6) Mizuno, T. and Takemori, Y., A Transfer-Function Approach to the Analysis and Design of Zero-Power Controllers for Magnetic Suspension System, Electrical Engineering in Japan, Vol.141, No.2, pp.67-75 (2002)

(7) Mizuno, T., Sakurada, T., Ishino, Y. and Takasaki, M., Zero-power control of parallel magnetic suspension systems, Proc. 10th International Conference on Motion and Vibration Control, CD-2A15 (2010)