

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 — 両側吸引浮上に関する考察 —

Magnetic Levitation System using Permanent Magnet and Linear Actuator - Study of Push-Pull Levitation Mechanism -

崔 天時^{*1} (学生員), 岡 宏一^{*1} (正員), 政木 慶次^{*2}

TianShi CUI (Stu. Mem.), Koichi OKA (Mem.), Keiji MASAKI

This research aims the development of the noncontact manipulation mechanism. As a step of the research, this paper describes a 2 DOF magnetically suspended manipulation system for multi-DOF levitation. The suspension mechanism is that air gap adjusting controls suspension forces. The feature of this mechanism is use of permanent magnets and linear actuators for levitation. First a prototype of levitation system are introduced and modeled. There are three actuators for controlling forces. The suspended object is an iron ball. As values of magnetic forces are important for modeling, FEM analyses are examined on three types of arrangements of magnets. Step response and frequency response are examined. As the results, it is verified that the iron ball can be operated up to 3 Hz.

Keywords: magnetic levitation, permanent magnet, linear actuator, multi-DOF, push-pull control.

1 緒言

永久磁石をアクチュエータで制御することにより、強磁性体の非接触浮上が可能である[1]-[5]。この浮上機構の原理は、永久磁石と浮上体の空隙を調整することにより、その間に働く支持力を制御して非接触浮上を行わせるものである。本報告ではこの浮上原理を用いた物体の非接触把持について考察する。非接触把持を考えた場合、横方向の安定性、対象物の形状への対応、操り動作などの点から現在提案されている1自由度浮上システムでは不十分であり、2自由度、3自由度の浮上機構を考える必要がある。しかし、このように多自由度にした場合、永久磁石を用いた浮上方式では磁路が閉じるようになっていないこと、浮上体の大きさに対して空隙が比較的長いことなどを考慮する必要があり、ラジアル形の磁気軸受のように各支持力を独立に考えることができない可能性がある。

そこで本報告では操りのための多自由度化のステップとして、垂直平面内に浮上機構を2つ配置した2自由度の浮上機構について考察する。まず、2自由度浮上システムの試作装置を紹介し、モデル化を行う。モデル化のための磁石の吸引力特性は、有限要素法を

用いて解析した。この解析は、永久磁石の配置を考慮しながら行った。最後に試作装置において浮上実験を行った結果として、ステップ応答と周波数応答の結果を示す。

2 非接触浮上機構の原理

ここでは、非接触浮上に利用される磁気浮上機構の説明を行う。永久磁石をアクチュエータによって駆動し、浮上体との空隙を制御することによって吸引力を制御する形式の磁気浮上機構の概略図を Fig. 1 に示す。これは、浮上体である強磁性体を上から永久磁石で釣り下げる形式の浮上機構で、浮上の自由度は上下方向である。永久磁石の吸引力と浮上体に加わる重力とが釣り合う点が平衡位置である。永久磁石は、上下方向の運動が可能のように支持されており、アクチュエータによって駆動力を与えられる構造になっている。

この機構においてアクチュエータに入力を加えない場合、浮上体が平衡位置より磁石に近づけば浮上体に対して吸引力が大きくなり、ますます磁石に近づき、逆に遠ざかれば吸引力が小さくなり、ますます遠ざかる。このため能動的な制御がないときには安定な浮上はできない。

浮上体の位置を検出し、能動制御を行うことによってはじめて浮上が可能となる。すなわち、浮上体が平衡位置より磁石に近づけばアクチュエータに上向きの、

連絡先： 岡 宏一, 〒782-8502 高知県香美郡土佐山田町
宮ノ口 185, 高知工科大学知能機械システム工学科,
e-mail: oka.koichi@kochi-tech.ac.jp

^{*1}高知工科大学 ^{*2}松下溶接システム株式会社

遠ざかれば下向きの、力を発生させる。このことにより、空隙の距離を変化させ、吸引力を調整し、浮上体を非接触支持することが可能である。

3 2自由度浮上装置

3.1 試作装置

浮上体の2自由度の運動を制御できる装置を試作した。その写真を Fig. 2 に示す。また浮上システムの構成を Fig.3 に示す。この装置は、写真の中央に位置する白く塗られた鉄球を非接触浮上させ、その鉛直方向と左右方向の運動を非接触で制御するものである。運動制御のために、鉄球の左右に2つ、上に1つの永久磁石を配置している。それぞれの永久磁石は、ボイスコイルモータ (VCM) の駆動軸に取り付けられており、VCM によって軸方向に直線的に駆動される構造となっている。VCM の駆動軸は、永久磁石と渦電流式のギャップセンサのターゲットとを VCM の内部を貫いてつながっている。よって永久磁石の運動の検出はこの渦電流式センサによって行われる。また、浮上体の運動は光学式のセンサによって、その上下左右方向が同時に検出される。

鉄球の直径は、19mm であり、その質量は 63g である。永久磁石は、直径 8mm、長さ 10mm の円筒形のネオジ磁石であり、その軸方向に着磁されている。永久磁石、駆動軸、およびセンサターゲットを永久磁石部と呼び、この質量は 375g である。VCM は、15mm の可動範囲を持っており、定格電流 2A に対して 10N の力を発生させることができる。永久磁石の運動を検出するセンサの検出範囲は 10mm であり、解像度は 10 μ m である。浮上体の運動を検出するセンサは、2軸の光学式センサであり、各軸の検出範囲は 20mm であり、解像度は 5 μ m である。

制御システムの構成を Fig. 3 に示す。浮上体、および永久磁石の運動を測定した信号は、A/D コンバータを介して DSP コントローラに取り込まれる。コントローラは VCM への適切な電流値を制御演算によって求め、その値を D/A コンバータに出力する。D/A 変換された値は電流アンプを介して VCM を駆動する。

3.2 試作システムのモデル化

試作したシステムの解析やフィードバックゲインを求めるために、試作システムのモデル化を行った。今回のモデルは、鉛直方向と水平方向の運動は互いに干渉せず独立であるものと仮定した。鉛直方向の運動

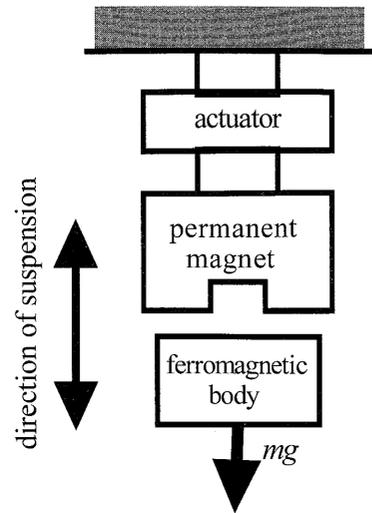


Fig. 1 Outline of suspension system

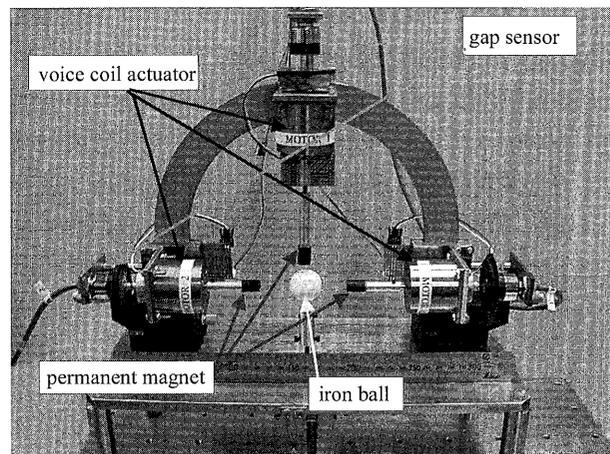


Fig. 2 Photograph of prototype suspension system

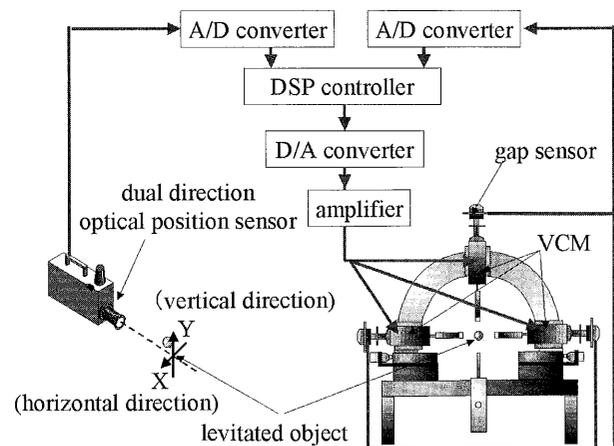


Fig. 3 Configuration of suspension system

に関してはすでに解析が行われているため、以下では1つの浮上体と2つの永久磁石による水平方向の運動に関して述べる。モデル化で利用する記号は、以下の

通りである。

- z_0 : 浮上体の水平方向変位,
- z_1, z_2 : 左右永久磁石の変位,
- m_0 : 浮上体の質量,
- m_1, m_2 : 左右の永久磁石部質量,
- f_{a1}, f_{a2} : VCMの発生力,
- f_{m1}, f_{m2} : 浮上体と左右の永久磁石の間に働く吸引力。

上に示した変位および力は、右方向を正とする。また、VCMのガイドなどのクーロン摩擦や空気による粘性などの影響はないものと仮定する。このとき、浮上体、および永久磁石の運動方程式は、次式のように表すことができる。

$$m_0 \ddot{z}_0 = f_{m2} - f_{m1} \quad (1)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 = f_{m1} - f_{a1} \quad (2)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 = f_{a2} - f_{m2} \quad (3)$$

永久磁石と浮上体との間の吸引力は、種々の影響を受ける非線形な関数である。今回は特に永久磁石の起磁力による磁路が閉じた構成としていないため数式で表すことは困難であると考えられる。本報告では、吸引力は空隙の関数であると考え、浮上体および左右の永久磁石の変位により次式により表す。

$$f_{m1} = f_{m1}(z_0 - z_1) \quad (4)$$

$$f_{m2} = f_{m2}(z_2 - z_0) \quad (5)$$

この吸引力の値は、非接触浮上を行うために重要な要素であるため、数値的な解析を行った。

4 磁石の配置方法を考慮した磁場解析

試作装置の永久磁石は円筒形の軸方向に着磁されており、その磁路が閉じるように構成されていない。よって、永久磁石の配置方法によって吸引力が大きく影響される可能性がある。また、永久磁石の吸引力は空隙の関数として仮定したが、浮上システムの制御のために具体的な大きさを見積もる必要がある。このような理由から、効果的な磁石の配置方法を検討し、吸引力の大きさを求めるため有限要素法により磁場解析を行った。

4.1 磁石の配置方法

磁石の配置方法として、Fig. 4 に示す3つの方法について検討した。配置法は、左から SSS 配置, SNN 配置, SNS 配置と名付けた。これらの配置法の名称は、上, 左, 右の順で永久磁石が浮上体に向けている磁極を表したものである。つまり、SSS 配置は、すべての

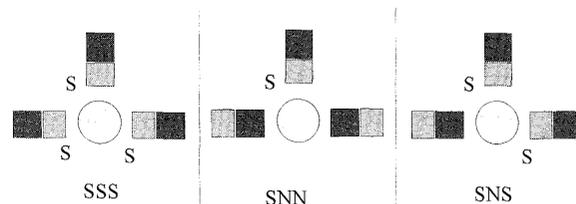


Fig. 4 Three types of arrangement of permanent magnets

永久磁石の磁極が浮上体方向を向いていることになる。また、解析では対称性を考慮し、N NN 配置は SSS 配置の逆であるが、発生する吸引力は同じであると考えた。この考えに基づくすべての磁石の配置はこの3つで代表されることになる。

有限要素法による解析は、2次元による解析と3次元による解析を行った。しかし、3次元解析は分割要素数の不足のため大きな誤差が認められた。よって本報では2次元解析の結果のみを報告する。解析は磁路解析により吸引力の定性的な分析を、磁力解析により吸引力の定量的な分析を行った。

4.2 有限要素法による磁路解析

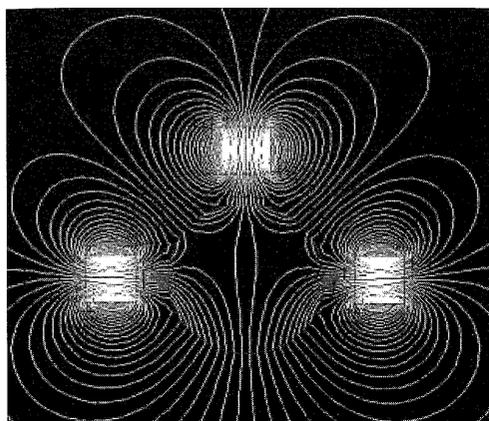
磁路解析の結果を Fig. 5 に示す。図の中で白く見える3つの部分が永久磁石であり、永久磁石の中心部に円形の浮上体がある。すべての永久磁石と浮上体との空隙は5mmである。上部の磁石は下側がS極であるため、この面から磁束が流入していることがわかる。

まず、Fig. 5(a) に、SSS 配置の結果を示す。図からわかるように、3つの磁石のN極から出た磁束はそのほとんどが、それぞれの磁石の他の面のS極に流入している。上部の磁石は左右の磁石と反発しており、上部の磁石の磁束はあまり浮上体の中を通過していないことがわかる。

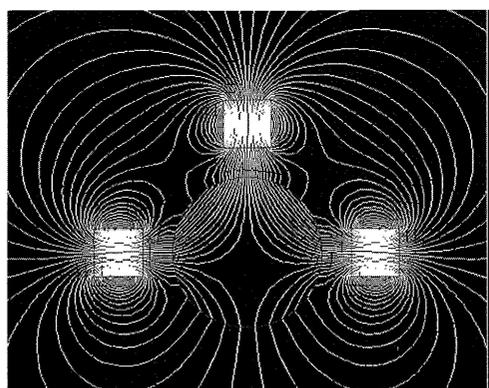
次に、Fig. 5(b) に、SNN 配置の結果を示す。この配置では、左右の磁石から出た磁束の多くは浮上体の中を通過し、上部の磁石に流入していることがわかる。これより各磁石と浮上体との吸引力は、SSS 配置に比べて大きいことが予想される。

最後に、Fig. 5(c) に、SNS 配置の磁路解析の結果を示す。この図では、左の磁石からの磁束が上と右の磁石に流入していることがわかる。このことは左右の磁石の吸引力に差があることを示しており、それは磁束線が左右対称でないことから想像できる。

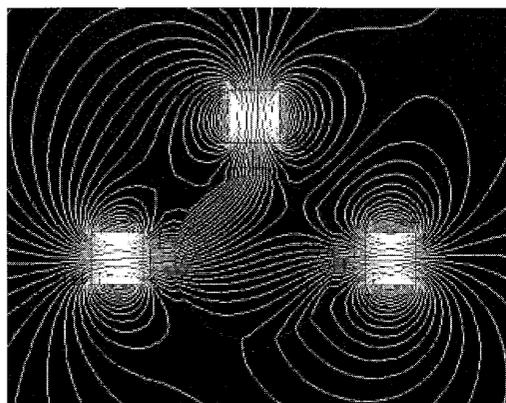
以上の結果から SSS 配置では浮上力の不足が、また SNS 配置では左右の吸引力の不均衡が懸念される。浮



(a) SSS arrangement



(b) SNN arrangement



(c) SNS arrangement

Fig. 5 Magnetic flux diagram by FEM analyses
(air gap = 5mm)

上装置に適した磁石の配置方法を検討するためには、これらのことの定量的な解析が不可欠である。

4.3 有限要素法による磁力解析

吸引力の定量的な分析を行うために有限要素法に

よる磁力の計算を行った。磁力は浮上体の運動を制御するものであるため、種々の空隙において求める必要があるが、ここでは簡単のために3つの永久磁石位置は固定し、浮上体位置 z_0 だけを左右に動かしたときの計算を行った。計算は、浮上体に加わる上下方向の磁力と左右方向の磁力について計算した。

4.3.1 垂直方向の磁力

垂直方向の磁力は浮上体の浮上力を表すものである。そのためにこの磁力は、浮上体の重量と同程度であることが求められる。また、今回の制御システムでは鉛直方向と水平方向の運動を独立したシステムとして扱うため、浮上体の横方向の運動が垂直方向の磁力に及ぼす影響はできるだけ少ないことが望まれる。

垂直方向の磁力の計算結果を Fig. 6 に示す。浮上体が上部の永久磁石の真下にあるときの変位を零として、浮上体変位 z_0 を左右にそれぞれ 3mm 水平方向に動かしたときの垂直方向の力を計算した結果である。図中の実線は仮想仕事による計算結果であり、破線はマクスウェル応力テンソル法での計算結果であるが、これらの計算方法の違いはほとんどないことがわかる。また変位が 3mm 付近では計算方式による違いが見られ、この付近の計算結果は誤差を含むものと推測される。

3つの配置法による計算結果の違いは顕著である。SNS 配置の計算結果は他の2つに比べて大きな磁力を得る結果を得ている。またこの配置法では浮上体の変位がゼロ付近で大きく、左右への変位が大きいくほど磁力が小さくなることがわかる。

SNS 配置の計算結果は、磁力の大きさとしては3つの配置法の間である。しかし計算結果の線は右下がりとなっている。このことは浮上体の右方向への運動と左方向への運動とで違った結果が得られることになり、制御システムの構成が複雑になる可能性が考えられる。

最後に SSS 配置の結果であるが、これは3つの配置法の中では磁力が一番小さく、その浮上力が不足するという問題の可能性がある。しかし、浮上体を左右に変位させても浮上力にほとんど変化は認められず、鉛直方向の運動が独立に制御できるという利点が予想される。

今回試作した装置の浮上体の質量は 63g であるため、SSS 配置では 5mm の空隙距離では浮上できない。また SNS 配置では既に述べたように制御が複雑になる

可能性がある。

4.3.2 水平方向の磁力

水平方向の磁力は左右の磁石と浮上体との間に働く吸引力の合力であると考えられる。この磁気力は不安定力であるが、制御の容易さを考慮すると線形であることが望まれる。

水平方向の磁力の計算結果を、Fig. 7 に示す。横軸はFig. 6 と同じく浮上体の変位 z_0 であり、縦軸は右方向への磁力である。図からわかるように SSS 配置と SNN 配置の結果は、ほぼ同じであり、原点付近ではほぼ直線である。このため原点付近ではシステムを線形とみなして制御が可能である。

一方 SNS 配置の結果は浮上体が原点にあるときに左方向への力が生じている。これは前に述べた磁束解析から予想された結果と同じである。水平方向の力が零となるのは原点から右に約 1mm のところであり、この配置法を使うと左右の異なる空隙距離によって平衡位置を定めなければならない。このことから SNS 配置は浮上システムに適してないと考えられる。

5 試作装置による浮上実験

有限要素法による解析の結果、実験に用いる配置法は SNN 配置とした。制御システムのブロック線図を Fig. 8 に示す。制御対象は、左右の VCM への制御電流が入力となり、左右の永久磁石および浮上体の位置が出力となる 2 入力 3 出力系である。また、参照入力 は浮上体位置となる。今回の制御システムでは、図に示すように浮上体位置は参照入力と比較されて左右の VCM に入力され、また左右の磁石位置はそれぞれの VCM にフィードバックされる構成となっている。このコントローラと浮上装置を用いて、浮上実験を行い、非接触浮上に成功した。そのときの浮上の様子を Fig. 9 に示す。

5.1 ステップ応答

浮上装置の動特性を把握するためにステップ応答実験を行った。浮上体の初期位置を上部の磁石の真下とし、2mm の左方向へのステップ状入力を加えた。このときの左右の磁石と浮上体の変位を記録した。結果を Fig. 10 に示す。

磁石は最初右方向に動く。これにより浮上体である鉄球は左方向に動く。その後安定化のための動作が行われ、約 0.5 秒で収束している。また、鉄球の変位は

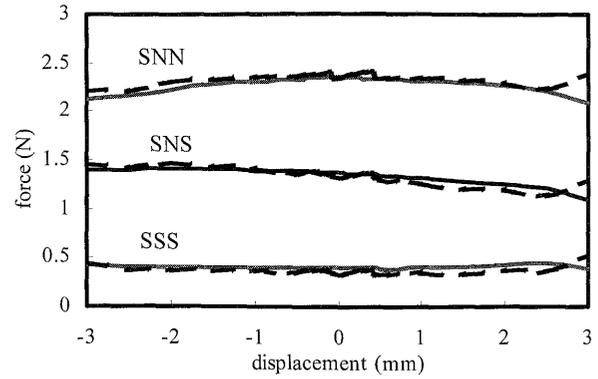


Fig. 6 Attractive force in the vertical direction

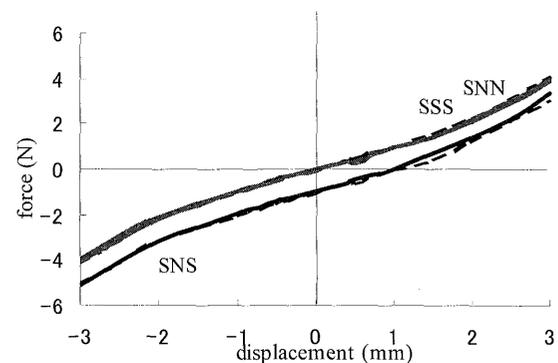


Fig. 7 Resultant force in the horizontal direction

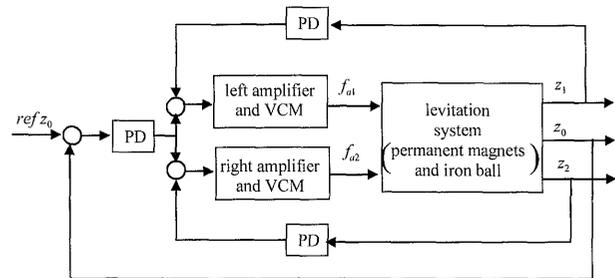


Fig. 8 Block diagram of levitation system

永久磁石変位より大きい。これは上部の磁石によって浮上体が真ん中に引きつけられている結果であると考えられる。

5.2 周波数応答

次に周波数応答によって浮上システムの動特性を評価した。振幅幅を 1mm、周波数を 0.02Hz から 10Hz まで変化させてボード線図を求めた。結果を Fig.11 に示す。

図のゲイン線図よりわかるように、ほぼ 4Hz までゲイン曲線が伸びていることがわかる。そのときの周波

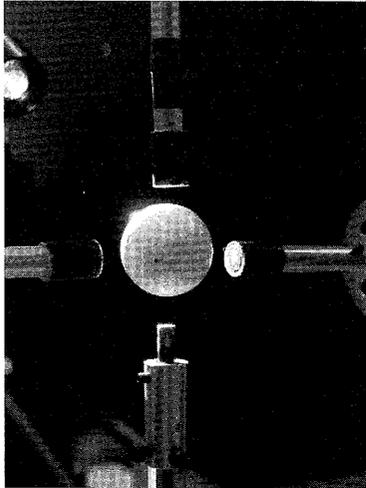


Fig. 9 levitated object during levitation

数応答もほとんど遅れがないことがわかる。その後共振周波数が 5 Hz 付近にあり、180 度の遅れが生じている。以上のことから、本浮上システムでは 3Hz 程度の応答が可能であることが確認された。この値は本システムを用いて物体を操る場合などには十分な値であると考えられる。

6 結言

浮上体と永久磁石の空隙を制御する形式の吸引力調整機構を持つ浮上装置において、浮上体の両側に磁石があるときの浮上性能について考察を行った。これは多自由度の浮上を行うための 1 つの段階である。本報告では、試作した浮上システムに対して次の 2 つの知見が得られた。一つは、有限要素法による解析の結果より、永久磁石を 3 つ用いたときの配置法は上部磁石と水平磁石の磁極を異なる配置にすることがわかったことである。他の一つは、試作装置による浮上実験の結果から、提案の浮上システムを操りのための装置と考えたとき、2mm 程度の可動範囲と 3Hz 程度の応答が可能であることが確認できたことである。今後は本浮上システムを用いて対象物の操りが可能なように浮上体の種々の自由度の非接触駆動機構について研究を行っていく予定である。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(B)(2)(12450099))の援助を受けて行われたものである。

(2005年6月4日受付, 2005年11月25日再受付)

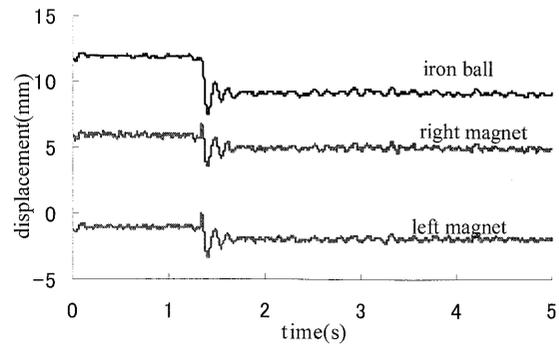


Fig. 10 Step response in horizontal direction

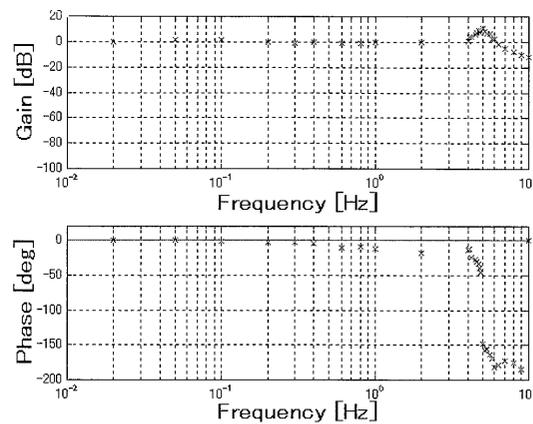


Fig. 11 Bode diagram

参考文献

- [1] 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*, Vol. 4, No. 4, p. 369-375, 1994.
- [2] K. Oka, T. Higuchi, Y. Shimodaira, Noncontact Conveyance Using Robot Manipulator and Permanent Magnet, *Proc. of Fifth Int. Symp. on Magnetic Bearings*, p. 447-452, 1996.
- [3] 岡宏一, 樋口俊郎, 白石卓也, 永久磁石の運動制御による懸垂型磁気浮上機構, *電気学会論文誌 Vol 119-D*, No. 3 p. 291-297, 1999.
- [4] T. Morita, K. Shimizu, M. Hasegawa, K. Oka, T. Higuchi, A miniaturized levitation system with motion control using a piezoelectric actuator, *IEEE trans. On Control System Technology*, Vol. 10, No. 5, pp. 666-670, 2002.
- [5] T. Mizuno, H. Hoshino, M. Takasaki and Y. Ishino, Flux Path Control Magnetic Suspension, *Proc. of Ninth Int. Symp. on Magnetic Bearings*, CD-ROM, 2004.