

第12回「電磁力関連のダイナミックス」 シンポジウム

The 12th Symposium on Electromagnetics and Dynamics
講演論文集



開催日：平成12年6月29日（木）～7月1日（土）

会場：メルパルクOKINAWA「郵便貯金会館」

主 催：電気学会

共 催：日本機械学会，日本AEM学会

協 賛：日本原子力学会，日本シミュレーション学会，精密工学会
日本鉄鋼協会，計測自動制御学会，静電気学会，
高速信号処理応用技術学会，磁性流体研究連絡会，
日本工業技術振興協会，低温工学協会，日本応用磁気学会，
那覇市，日本工業新聞社，日刊工業新聞社

ギャップ制御を用いたマイクロ浮上機構の基礎的研究

森田 剛*(理研) 清水 勝己(東大院) 長谷川 昌幸(富士通)
岡 宏一(高知工大) 樋口 俊郎(東大院)

Micro levitation system using motion control

Takeshi MORITA *(RIKEN), Katsumi SHIMIZU (Univ. of Tokyo), Masayuki HASEGAWA(Fujitsu),
Koichi OKA (Kochi Univ. of Technology) and Toshiro HIGUCHI(Univ. of Tokyo)

Abstract

In 1980s, micro electrical mechanical systems (MEMS) attracted great attentions, and a few types of levitation system were reported. These systems used the magnetic coils for attractive force, although magnetic coils have complicated constructions and the heat problem may be severe in the micro field.

In this paper, we propose a micromanipulation systems using gap control. The permanent magnet was driven by PZT and the gap was controlled to levitate the small iron ball. The diameter of a levitated iron ball was 2.0 [mm].

キーワード : マイクロマニピュレーション、ギャップ制御、PD制御、圧電アクチュエータ
(Keywords : Micro manipulation, motion control, PD control, piezoelectric actuator)

1. まえがき

1980年代後半にフォトファブリケーションを利用して製作したマイクロモータが発表されたのを契機に、MEMS(Micro Electrical Mechanical System)が様々な観点から研究されるようになった。マイクロマシンの様に非常に微小なパーツはハンドリングが非常に困難になる。これは、壊れやすいことと、静電気力による固着等に起因する。よって、マイクロ領域での非接触マニピュレーションの実現に期待が集まっている。また、現状では位置検出センサ等に技術的な問題があり困難であると考えられるが、近い将来には原子や分子単体を非接触でハンドリングする技術が実現できる可能性がある。

このような背景から、微小物体を浮上させたり、浮上させて回転させたりする技術が開発されている。しかし、これらの研究では電磁コイルに流す電流を制御して浮上体と電磁コイルとの間に発生する磁力を変化させていた[1,2]。電磁コイルは複雑な形状であるために小型化には向かないし、浮上している安定状態でも電磁コイルには電流が流れるために、発熱の問題が生じると予想される。さらに、浮上体の材料が強磁性体に限定されてしまう。

本研究で提案する手法では、電磁コイルではなく永久磁石を用いる。吸引力の制御は永久磁石と浮上体との距離を調節することにより行う[3]。拡大変位機構付き圧電素子の先端に永久磁石を接着し、駆動する。圧電素子は、シンプルな構造である上に、定常位置では電流を流す必要はないために、放熱の点でも有利であると考えられる。

磁気力はギャップの2乗に反比例するという観点から見ると、静電気力や原子間力と共通している。従って、本手法は静電気力や原子間力を浮上力に用いる場合にも応用できるはずである。

本報告では、基本的な実験として行った、直径2.0[mm]の鉄球の1自由度浮上実験について述べる。

2. 装置の構成

浮上装置は浮上体、永久磁石、永久磁石を上下に駆動するアクチュエータ部、永久磁石と浮上体の位置を検出するセンサから構成される。装置と制御の概観をFig.1に示す。浮上体として用いた微小鉄球は直径は2.0[mm]、重量は

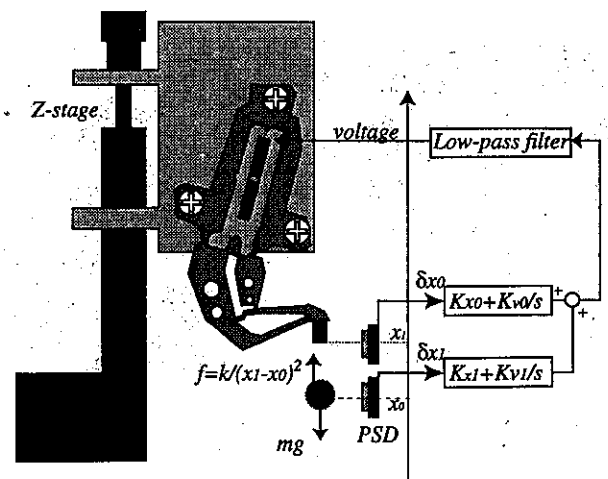


Fig.1 ギャップ制御型マイクロ浮上機構全体図

32.8[mg]である。永久磁石と微小鉄球のギャップと吸引力の関係を図2に示す。この結果が示すように、吸引力はギャップの2乗に反比例する。浮上時には、永久磁石による吸引力と重力が釣り合うようなギャップを保つように制御される。

アクチュエータは、矢野らがドットインパクトプリンタ

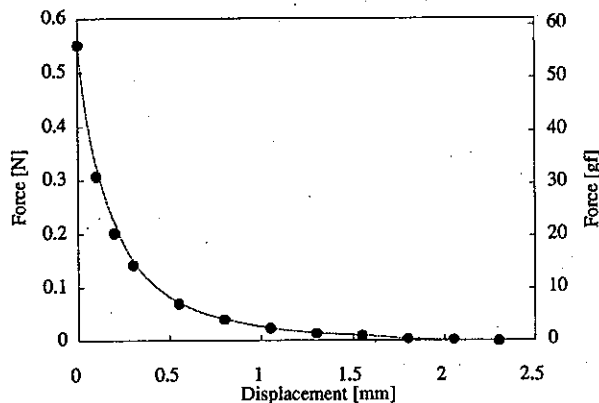


Fig.2 永久磁石と浮上体のギャップと吸引力の関係

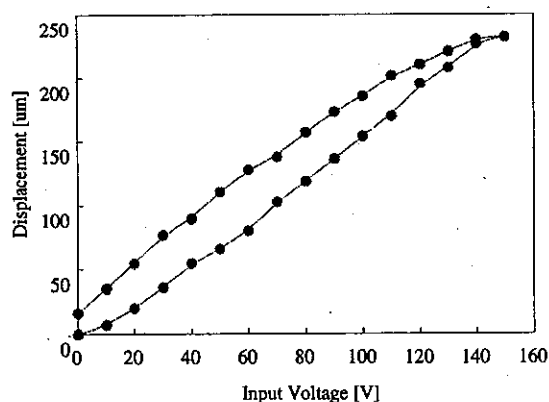


Fig.3 拡大機構付圧電素子の入力電圧と変位の関係

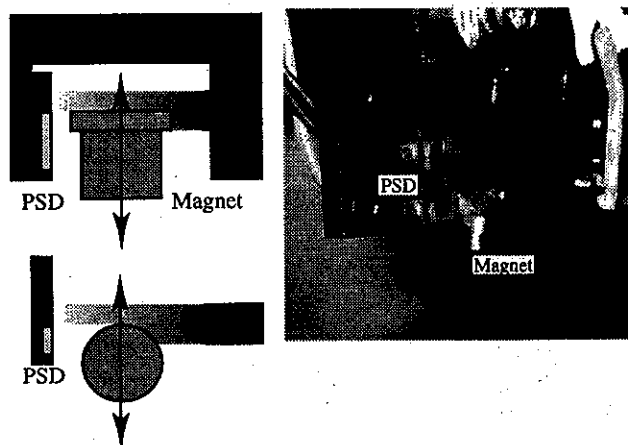


Fig.4 位置検出の原理と永久磁石測定用PSDの写真

ヘッド用に開発した拡大機構付積層圧電素子[4]を流用した。圧電素子への入力電圧と先端での変位量の関係をFig.3に示す。最大入力電圧は150[V]とし、このときの変位は230[um]であり、多少のヒステリシスが観測された。

Fig.4に浮上体と永久磁石の位置検出の概念図を示す。浮上体と永久磁石それぞれに赤色LEDを照射し、対向したPSD(浜松ホトニクス)の検出面に当たる光量に変化することにより位置検出を行った。

制御は浮上体と永久磁石の位置に基づいたPD制御とした。PSD出力のオフセット、微分要素、ゲイン調整部、出力時のローパスフィルタ(cut off 1[kHz])などはアナログ回路で製作した。駆動部の最低共振周波数は約2[kHz]である。出力電圧は電圧増幅器(NF製)を介して、圧電素子に輸入される。

3. モデル化

測定結果からも明らかのように、浮上体と永久磁石に働く吸引力 F はギャップの2乗に反比例する。この吸引力と浮上体の重力 m_0g による力が釣り合う点で安定浮上することになる。すなわち、 k を定数とすると磁力 F ギャップ d の関係は

$$F = k \frac{1}{d^2}$$

で示され、安定状態でのギャップ d_0 は

$$\begin{aligned} k \frac{1}{d_0^2} &= m_0 g \\ d_0 &= \sqrt{\frac{k}{m_0 g}} \end{aligned}$$

と計算される。測定より k は $4.98 \times 10^{-8} [\text{Nm}^2]$ である。安定点からのずれを d_{gap} とし、そのときに浮上体に働く力 f は

$$\begin{aligned} f(d_{\text{gap}}) &= F - m_0 g = \frac{k}{(d_0 + d_{\text{gap}})^2} - m_0 g \\ &= \frac{k}{d_0^2} \frac{1}{1 + 2 \frac{d_{\text{gap}}}{d_0} + \left(\frac{d_{\text{gap}}}{d_0}\right)^2} - m_0 g \\ &\approx \frac{k}{d_0^2} \left(1 - 2 \frac{d_{\text{gap}}}{d_0}\right) - m_0 g \\ &= -2 \frac{k}{d_0^3} d_{\text{gap}} \equiv -k_m d_{\text{gap}} \end{aligned}$$

と線形化できる。ここで、

$$\frac{d_{\text{gap}}}{d_0} \ll 1$$

の近似を用いた。

浮上体と永久磁石の安定点から変位を x_0, x_1 とすると、上記の d_{gap} は

$$d_{\text{gap}} = x_1 - x_0$$

である。浮上体に働く力は

$$F_{\text{object}} = -k_m(x_1 - x_0)$$

であるから、運動方程式より、

$$\ddot{x}_0 = \frac{k_m}{m_0}(x_0 - x_1)$$

となる。一方、永久磁石を含む駆動部は分布定数系とみなせるが、アドミタンス特性などからバネマス系の集中定数系に変換することができる。駆動部に働く力は、浮上体との間に働く吸引力と、変位及び速度により生じるバネマス系からの力、さらに圧電素子に入力される電圧による駆動力の合計で示される。等価質量、等価バネ係数、等価減衰係

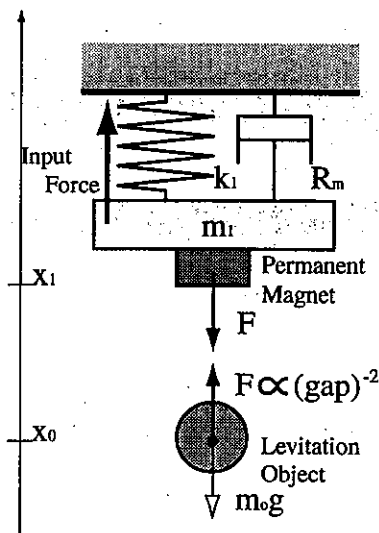


Fig.5 浮上実験のモデル

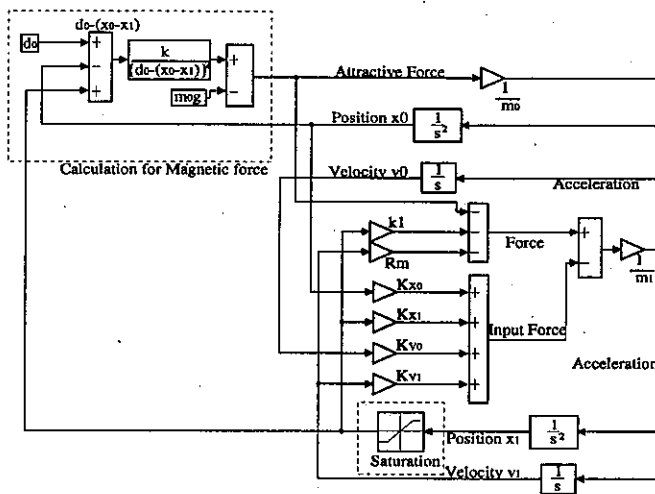


Fig.6 MatLabを用いたシミュレーション

数をそれぞれ \$m_1, k_1, R_m\$ とし、駆動力を \$u\$ とすると

$$F_{\text{magnet}} = k_m(x_1 - x_0) - k_1 x_1 - R_m \dot{x}_1 + u$$

であるから、同様に運動方程式から、

$$\ddot{x}_1 = -\frac{k_m}{m_1}x_0 + \frac{k_m - k_1}{m_1}x_1 - \frac{R_m}{m_1}\dot{x}_1 + u$$

が得られる。以上より、下記の関係を得る。

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{x}} &= \begin{pmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{x}_1 \end{pmatrix} = \frac{d\mathbf{\ddot{x}}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{\ddot{x}} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{A} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_m}{m_0} & 0 & -\frac{k_m}{m_0} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k_m}{m_1} & 0 & \frac{k_m - k_1}{m_1} & -\frac{R_m}{m_1} \end{pmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

ここで、

m_0	浮上体重量	32.8[mg]
m_1	駆動部の等価質量	174[mg]
k_1	等価バネ定数	26.6[mN/m]
R_m	等価減衰定数	1.12[mNs/m]

である。

入力 \$u\$ は永久磁石が圧電素子から受ける力である。圧電素子の力係数を \$A_{\text{piezo}}\$、単位入力電圧あたりの永久磁石の駆動変位を \$d_{\text{piezo}}\$ (1.6[um/V]) とすると、先の \$k_1\$ を用いて

$$A_{\text{piezo}} = k_1 d_{\text{piezo}}$$

となる。さらに、入力電圧 \$V\$ と制御入力 \$u\$ の関係は

$$u = A_{\text{piezo}} V$$

で示される。

このシステムを最適レギュレータ問題としてとらえ、MatLabによって最適フィードバックゲインを求めた。重み行列 \$Q = \text{diag}[1000 \ 100 \ 1000 \ 100], r=1\$ としたときのゲインの値は \$[K_{x0}, K_{v0}, K_{x1}, K_{v1}] = [-54000 \ -1360 \ 794 \ 10.0]\$ であった。

このモデルにより MatLab を用いてシミュレーションを行った。Fig.6 に示すように、吸引力の計算に非線形性と、PZT の変位の限界値を考慮している。今後の小型化の検討時には、これらのパラメータが重要となることが予想される。このシミュレーションの結果については後述する。

4. 実験結果及び考察

アナログ回路でゲインを調節し、浮上実験を行った。まず、制御を始める前に Z ステージに固定された永久磁石駆動部全体(永久磁石位置検出用の PSD も含まれる)を、浮上体から十分離しておく。この状態で制御を始めると、永久磁石と浮上体のギャップは十分離れているので、これを

縮める方向に向かって圧電素子が駆動される。すなわち、リミット限界まで永久磁石は下降する。この状態で駆動部全体をマイクロメータによってゆっくりと下降させていくと、浮上体の重力と磁石の吸引力が釣り合う付近で浮上体が浮き上がる。この時点でマイクロメータを動かすのをやめる。すると、浮上体用及び永久磁石用のPSDからの信号によって制御信号が計算され、浮上に至るわけである。

はじめに、フィードバックゲインを計算結果に一致させて実験をしたが、鉄球速度を示す信号にノイズが大きく、浮上には至らなかった。そこで、速度ゲインを小さくして $[K_{x0}, K_{v0}, K_{x1}, K_{v1}] = [-44900 \ -201 \ 25300 \ 9.60]$ と調整することにより、浮上に成功することができた。その様子を Fig.7 に示す。浮上位置は初期位置から約 40[μm] 上方である。一旦浮上すると Fig.8 に示す様に安定な浮上が実現できたが、Z ステージを上下させることにより両者の信号が上下することも確認した。約 20[μm] 程度ならば浮上体を制御することができそうであった。

浮上には成功したが、Fig.7 からわかるように立ち上がり時の振動が大きい。浮上させるには多大な努力が必要であった。これは、ノイズの為に浮上体速度のゲインを上げられなかったためである。Fig.9 に示すシミュレーション結果の様に、最適ゲインとすることにより制御性が向上すると予想される。

5. 今後の課題

今回は LED 光を利用して、浮上体及び永久磁石の影から PSD により位置検出を行った。しかし、PSD の本来の使用方法は PSD の受光面にレーザスポットを照射してその位置を検出するのである。よって、検出信号の SN 比が不十分であった。また、光源、被検出物、PSD の距離が離れていることもこの原因に挙げられる。出力信号の SN 比を向上させ、最適ゲインでの実験を試みたい。

さらに、研究の最終目的を考えると実験したサイズはまだ非常に大きいレベルである。今後は、より小さな浮上体でのシミュレーション、および実験を行っていく。また、静電気力等の磁気力以外の吸引力を利用した浮上実験も試みていく予定である。

6. 謝辞

本研究を進める上で理化学研究所工学基盤研究部の新野俊樹助教授に有益な助言を多数いただきました。有り難うございました。また、試作加工等でお世話になりました。理化学研究所基盤技術開発室の妹尾克己氏をはじめとする皆様に感謝致します。

参考文献

- [1] Buleuler, Kawakatsu, Tang, Hsieh, Miu, Tai, Mosesner and Rohner: Proc. of the 4th Int. Symp. on Magnetic Bearings, 349 (1994)

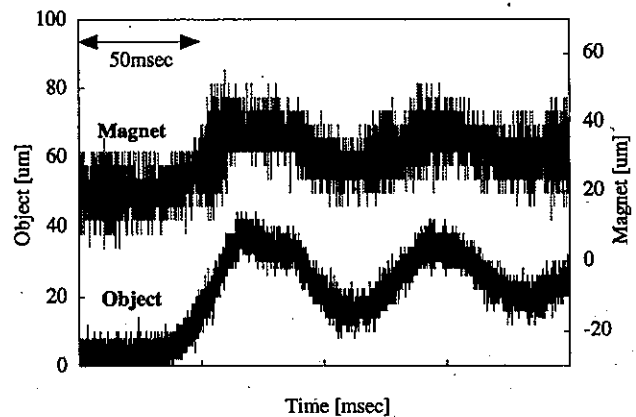


Fig.7 浮上開始時の浮上体と永久磁石の位置

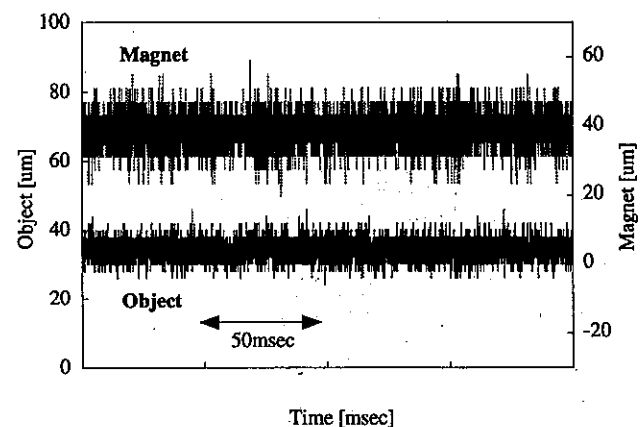


Fig.8 浮上時の浮上体と永久磁石の位置

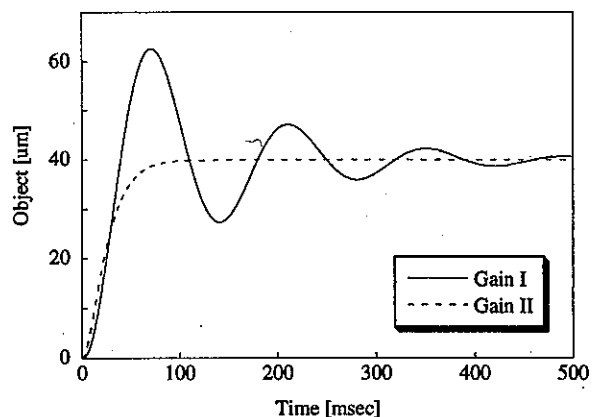


Fig.9 実験でのゲイン(GainI)と最適ゲイン(GainII)でのシミュレーション結果の違い

- [2] R. Muller, H. Bleuler, U. Schlaepfer and M. Meer: Proc. of Fifth International Symposium on Magnetic Bearings, 401 (1996)

- [3] 樋口, 岡: 電気学会論文誌 D, vol.113-D, No. 8, 988 (1993)

- [4] 矢野健, 浜付武重, 福井泉, 佐藤栄一: 信学会全国大会講演論文集 1-157 (1984 春)