

# 懸垂形磁気浮上機構の制御

(ピエゾアクチュエータを常にオフセット位置で動作させる制御に関する研究)

高知工科大学 知能機械システム工学科  
吉田祐介

## 目次

- 1、 はじめに
  - 1 - 1、 背景
- 2、 懸垂形磁気浮上機構
  - 2 - 1、 懸垂形磁気浮上機構
  - 2 - 2、 浮上原理
  - 2 - 3、 研究の目標
- 3、 装置の構成
- 4、 モデル化
  - 4 - 1、 モデル化
  - 4 - 2、 運動方程式
  - 4 - 3、 伝達関数
- 5、 制御
  - 5 - 1、 浮上させるための制御
  - 5 - 2、 オフセット位置で動作させるための制御
- 6、 実験結果および考察
  - 6 - 1、 結果
  - 6 - 2、 考察
- 7、 結論
- 8、 参考文献
- 9、 謝辞

## 1、はじめに

### 1 - 1、背景

物品を搬送するために、工場や倉庫では台車やクレーンなどが使われる。これらの搬送装置は、減速機、ベアリング、車輪とレールなどの摺動部を持ち、その部分からの塵埃の発生は避けられない。このため精密機械や半導体の製造業などのクリーンルーム内で搬送を行う際には、発生する塵埃を低減するような特別な考慮が必要である。この問題を根本的に解決する方法として、原理上塵埃の発生しない磁気浮上装置を利用した非接触浮上機構を用いて搬送装置を構成する方法が考えられる。非接触搬送装置を構成する方法として、浮上に必要な磁石やセンサなどを移動体に搭載する方法と、レール側（固定側）に配置する方法が考えられるが、レール側に配置する方法は、搬送経路を作るために多数の磁石やセンサを必要とするために複雑で非常に高価なものになってしまう。よって、移動体側に磁石やセンサなど浮上要素を搭載する方法が望まれる。また、この方法は、搬送経路を作ることも簡単であり、かつ柔軟な経路の設定が可能である。よって、搬送装置としては、天井に施設された強磁性体のレールに磁気力によって非接触でぶら下がりながら搬送する方法が有効である。（図1）

## 2、 懸垂形磁気浮上機構

### 2 - 1、 懸垂形磁気浮上機構

懸垂形磁気浮上装置とは、永久磁石、センサ、アクチュエータ及び質量を持つベース部で構成された浮上体と、強磁性体の天井とで構成されている磁気浮上機構のひとつである。アクチュエータやセンサ、永久磁石などが浮上体側に取り付けられ、搬送装置に適している。

### 2 - 2、 浮上原理

図2に示すように浮上体には、鉛直上向きの力として強磁性体の天井と永久磁石の吸引力が働き、鉛直下向きの力として、重力が働いている。この吸引力と重力が釣り合ったときに非接触浮上は実現する。このときの位置を平衡位置と呼ぶ。アクチュエータは鉛直方向に伸縮するもので、永久磁石と下部にある質量との間の長さを制御できるものとする。このアクチュエータを制御しないと安定な浮上はできない。すなわち、永久磁石と天井の空隙が平衡位置より小さくなれば、吸引力は大きくなり浮上体は天井に衝突し、空隙が大きくなれば吸引力は小さくなり浮上体は落下する。

平衡状態から浮上体が上方に動いたときには、アクチュエータを縮める方向に駆動すると、アクチュエータの下部に質量があるため永久磁石は下方に駆動され天井の空隙は広がる。これにより吸引力は小さくなる。同様に浮上体が下方に動いたときには、アクチュエータを伸ばすことによって磁石を天井に近づけて吸引力を大きくする。このようなフィードバック制御を行うことにより、浮上体に平衡位置への復元力を与えることができる。このことにより、本来不安定な浮上体の運動を安定化することができる。

## 2 - 3、研究の目標

本研究では、懸垂形磁気浮上機構を用いた浮上装置のロバスト性を高める制御方法について考察する。現在使用している浮上体のアクチュエータの変位量は0.5mm程度であり、制御を行うために十分なものであると言えない。以下では、できるだけ制御量を大きくとれることを目的として、この変位の中心を常に平衡点とする方法について考察する。アクチュエータにかかる電圧をフィードバックさせることにより、アクチュエータを常にその可動範囲の中間位置で動作させることを試みるものである。

### 3、 装置の構成

ぶら下がり形浮上機構では、図3に示すように浮上体側にアクチュエータを配置するため、その自重を支持し、かつ伸縮の運動を行うための発生力が必要である。圧電素子は、小型軽量で発生力も大きいという特長を持っているが、変位量が小さいということと、引っ張り応力に弱いという欠点がある。これを補うために、図4に示すように変位拡大機構付き圧電アクチュエータ（秩父小野田（株）製）を用いた。これはてこを2つ用いて圧電素子の動きを1.4倍に拡大して出力するものである。このようなアクチュエータを用いることにより、自重を支持することができ、アクチュエータやセンサなどを浮上体に搭載できる。このアクチュエータの仕様は、150Vの電圧入力にて最大変位量500 $\mu$ m、最大発生力約10N、質量約0.34kgであり、その形状は、縦120mm、横65mm、厚さ5mmの板状である。

浮上体に取り付けたセンサは、渦電流式のセンサで、応答周波数20kHz、分解能0.5 $\mu$ mであり、対称に2つのセンサを取り付けた。この理由は、センサを対称に配置することにより、浮上体のアンバランスをなくして浮上体が傾斜することを防ぐ意外に、1自由度浮上装置の場合、制御できない浮上体の振れがセンサ信号に与える影響を少なくするためである。浮上体に振れがあっても、位置信号として左右のセンサ信号の値を加えたものを用いれば、振れの影響によるノイズを除去できると考えたからである。この2つのセンサは高精度に位置を設定する必要があるため、マイクロメータで位置決めできるようにした。

永久磁石は直径10mm、高さ5mmの円筒形の（株）マグナ製ネオジ磁石を用いた。表面磁束密度は0.35Tである。浮上体には永久磁石とセンサが天井に衝突しないように、保護する構造を組みこんだ。具体的には、永久磁石のまわりをアクリルで覆い、アクチュエータが最も伸びたときでもアクリルの上になれないような構造とした（図5）。この保護の機構は、浮上体のベース部に取りつけられている。このため、浮上体と天井との浮上

ギャップは、ベース部の運動で決定される。

## 4、 モデル化

### 4 - 1、モデル化

試作した浮上システムが浮上可能であることを理論的に確認するため、システムのモデルを作り、線形制御理論から浮上可能性を調べた(図6)。システムの入力は圧電アクチュエータへの入力電圧である。この電圧は圧電素子が発生する駆動力と比例関係にあると考えることができる。この駆動力は永久磁石部の質量  $m_1$  と浮上体本体の質量  $m_0$  の両方に働く。アクチュエータの正の方向は伸びる方向に働く力とする。アクチュエータは2次系であるので、バネとダンパで置き換えた。システムの出力は浮上体の位置とする。解析に用いる記号を以下に説明する。

$m_0$  : 浮上体ベース部質量、

$m_1$  : 永久磁石部質量、

$z_0$  : 浮上体ベース部位置、

$z_1$  : 永久磁石位置、

$f_a$  : アクチュエータの駆動力、

$f_m$  : 永久磁石の吸引力、

$k_1$  : アクチュエータのバネ定数、

$\xi$  : アクチュエータのダンピング係数、

$k_t$  : 推進力定数、

$k_m$  : 吸引力定数、

$u$  : 入力電圧

線形化による解析を行うため、位置、入力電圧、駆動力などの変数は平衡位置からの偏差とする。

#### 4 - 2、運動方程式

以上のモデルより運動方程式を求めると次のようになる。

$$m_0 \ddot{z}_0(t) = k_1(z_1(t) - z_0(t)) - \xi_0 \dot{z}_0(t) - f_a \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$m_1 \ddot{z}_1(t) = k_1(z_0(t) - z_1(t)) - \xi_1 \dot{z}_1(t) + f_a + f_m \quad \dots\dots\dots(2)$$

アクチュエータの入力電圧  $u$  と発生力  $f_a$  は比例関係にあり、次式で表される。

$$f_a = k_t u \quad \dots\dots\dots(3)$$

永久磁石の吸引力  $f_m$  は非線型であり、次式で表される。

$$f_m = \frac{k_m}{z_1^2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

これを線形化すると次式で表される。

$$f_m = k_m z_1 \quad \dots\dots\dots(5)$$

これにより、運動方程式は次式で表される。

$$m_0 \ddot{z}_0(t) = k_1(z_1(t) - z_0(t)) - \xi_0 \dot{z}_0(t) + k_t u(t) \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$m_1 \ddot{z}_1(t) = k_1(z_0(t) - z_1(t)) - \xi_1 \dot{z}_1(t) + k_t u(t) + k_m z_1(t) \quad \dots\dots\dots(7)$$

### 4 - 3、伝達関数

線形化を行った運動方程式より伝達関数を求めると次式で表される。

$$G_{(s)} = \frac{Z_{0(s)}}{U_{(s)}} \\ = \frac{k_m k_i - m_1 s^2 k_i}{m_0 m_1 s^4 + m_1 \xi s^3 + m_1 k_1 s^2 + m_0 \xi s^3 + m_0 k_1 s^2 - m_0 k_m s^2 - \xi k_m s - k_1 k_m} \dots\dots(8)$$

## 5、 制御

### 5 - 1、 浮上させるための制御

制御の仕組みは、図7に示すように渦電流センサで浮上体位置を検出し、そのアナログ信号をA/Dコンバータでデジタル信号に変換、その信号に基づいたPD制御を行う。その後、D/Aコンバータでアナログ信号に変換する。さらに、この信号に基づいた電圧をアンプにより発生させる。この電圧をアクチュエータにフィードバックさせることにより、浮上体を平衡位置に保つことが可能である（図8）。

### 5 - 2、 オフセット位置で動作させるための制御

piezoアクチュエータは負の電圧を使うことができない。このため、あらかじめ正のオフセット電圧を加えることにより、常に正の電圧で使用できるようにする。このオフセット電圧を加えた時のアクチュエータの位置をオフセット位置とする。このオフセット位置を、piezoアクチュエータの変位の中間位置にする。piezoアクチュエータの中間位置を平衡位置として動作させるために、アクチュエータにかかる電圧をフィードバックさせ、積分制御を用いてコントロールする。原点となるオフセット電圧との定常偏差をゼロにすることにより、アクチュエータをオフセット位置で動作させることができると考えられる（図9）。

## 6、実験結果および考察

### 6 - 1、結果

アクチュエータに電圧をかけていない状態では天井にくっかず、ある程度電圧を加えると天井にくっつく位置をみつけ調整した。

PD 制御を行うためのコントローラを設計し、浮上させるための制御をおこなっているが、今現在、浮上させることができていない。浮きかけてはいるが、斜めになってしまう。

### 6 - 2、考察

浮上させる制御を行うと、浮上体が斜めになって天井にくっついてしまうことから、浮上体の重心がずれていると考えられる。

今回使用したゲインが古いデータのもののためうまく浮上しないと考えられる。

## 7、結論

やはりきちんとゲインを測定してコントローラを設計しないと浮上体を制御するのは難しい。よって今後の課題としては、センサが直りしだい、アクチュエータの周波数応答より適切なゲインを求め、浮上体を浮かすことに専念したい。浮上体を浮かすことが出来次第、積分制御を加えたコントローラを設計し、アクチュエータをオフセット位置で動作させるための制御を行う。

## 8、参考文献

1. Trans.IEE of Japan, Vol.119-D,No.3,March,1999
2. コロナ社 工学博士 杉江 俊治、藤田 政之 共著 「フィードバック制御入門」

## 9、謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始懇切丁寧な指導を賜りました、指導教官の岡宏一先生に、深く感謝致します。

最後に、助言や励ましの御言葉をいただいた多くの方々に感謝の意を表します。

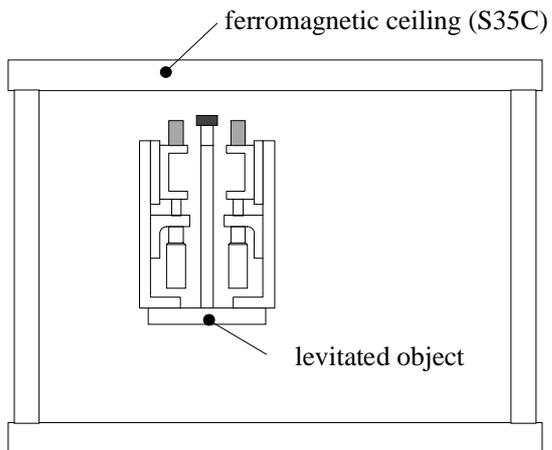


図1 浮上システムの構成

Fig.1 Hanging type magnetic levitation

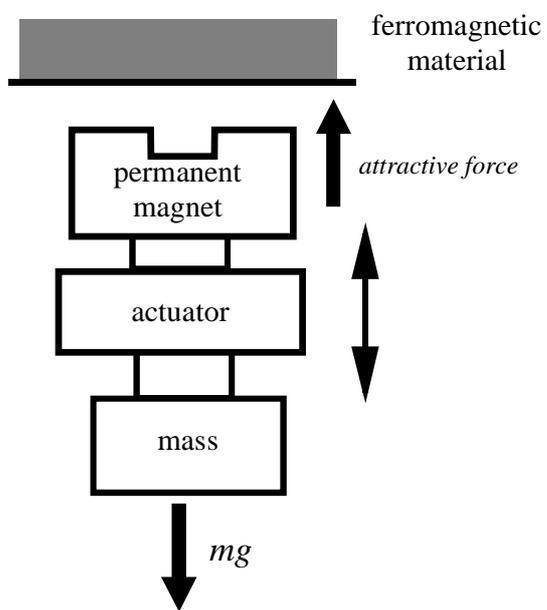


図2 懸垂形磁気浮上機構の概略

Fig.2 Outline of hanging type mag-lev system

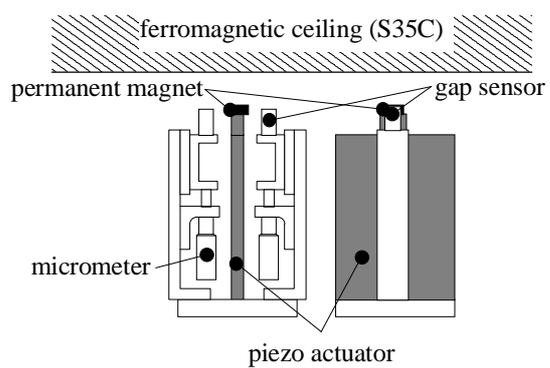


図3 浮上体の構成

Fig.3 Structure of levitated object

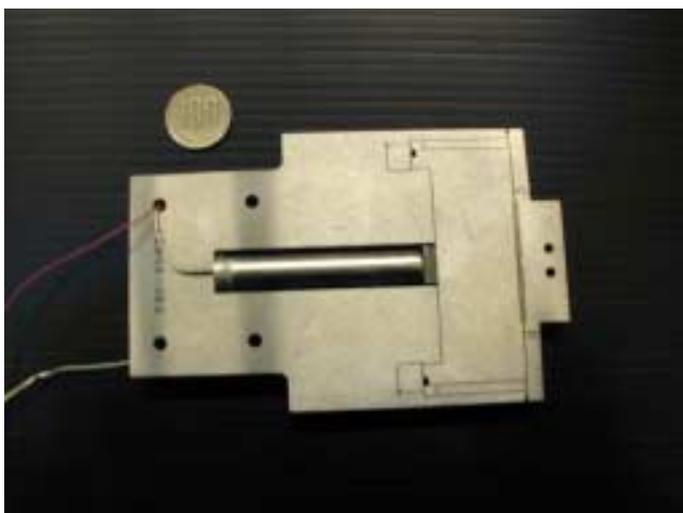


図4 圧電アクチュエータ

Fig.4 Piezoelectric

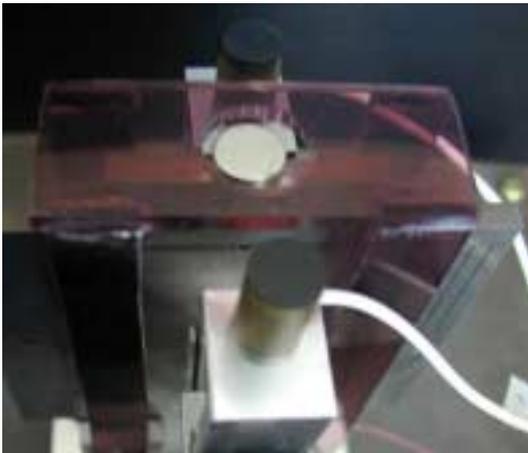
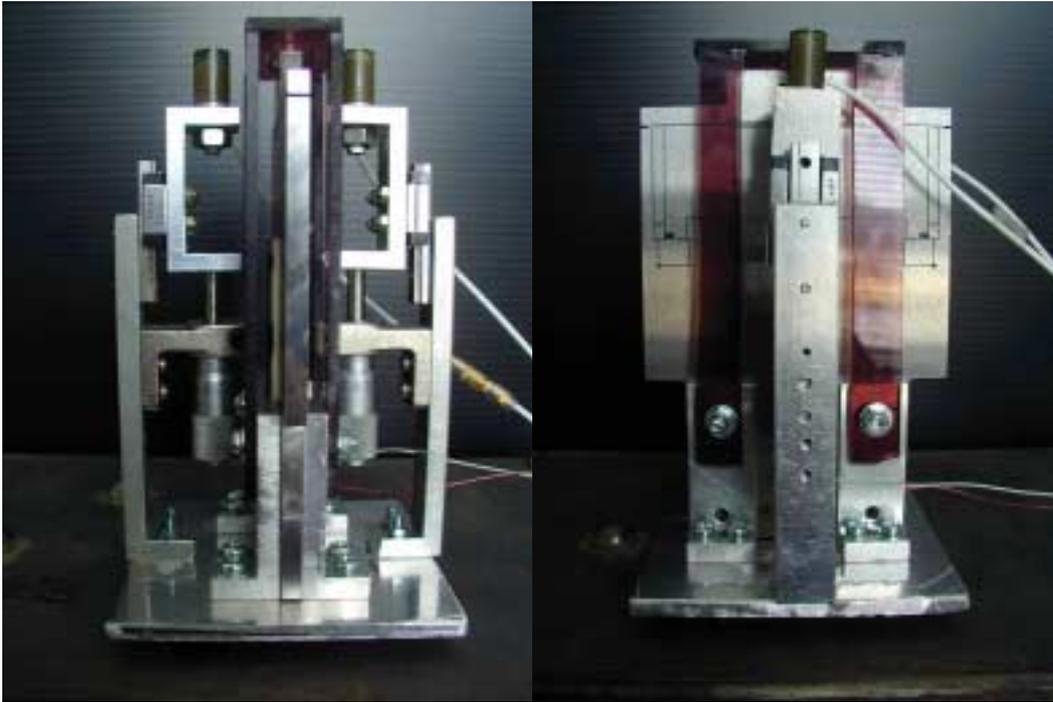


图5 浮上体

Fig.5 Levitated object

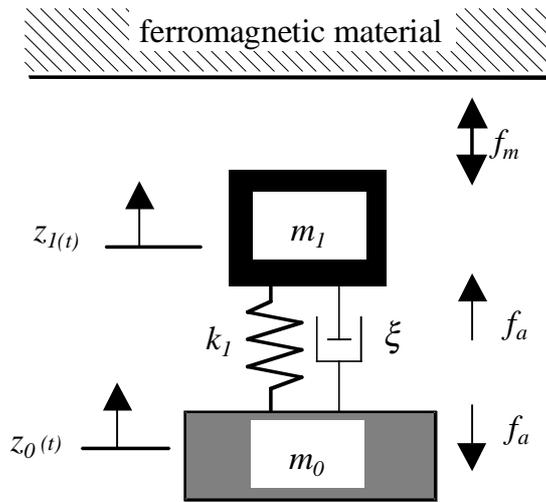


図6 浮上システムのモデル

Fig.6 Model of levitation

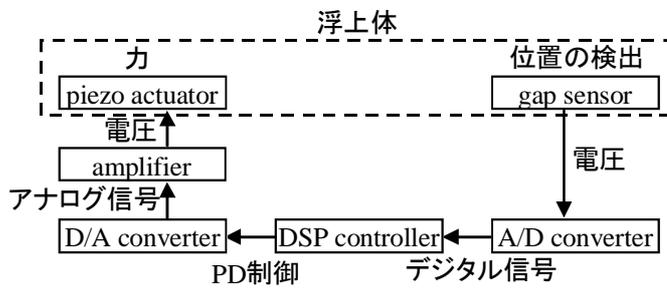


図7 流れ図

Fig.7 Flow sheet

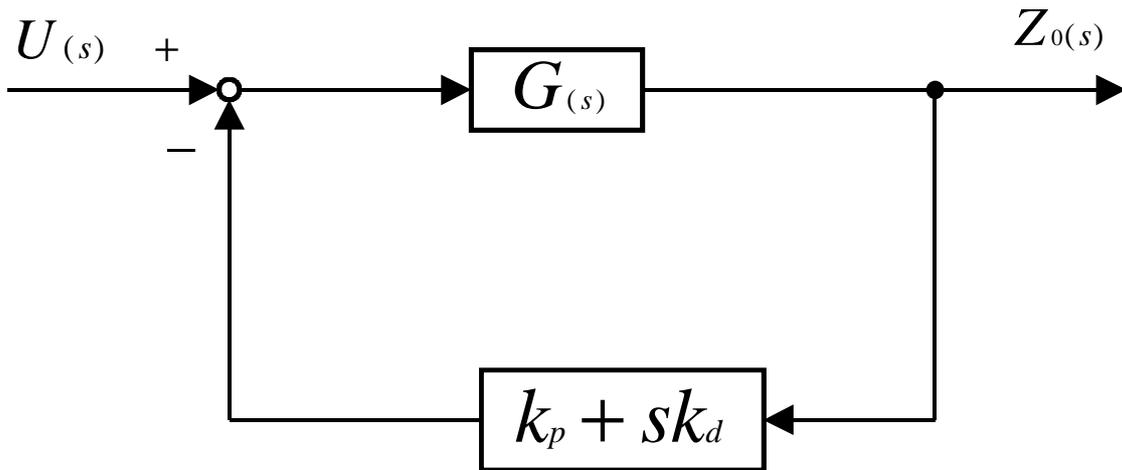


図8 ブロック線図 (PD 制御)

Fig.8 Block diagram (Proportional and Derivative control)

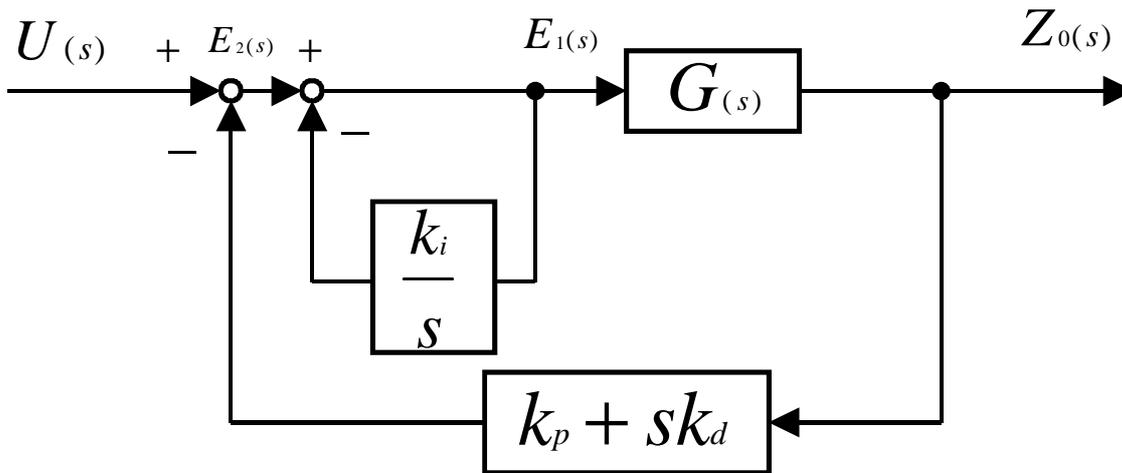


図9 ブロック線図 (PD 制御、I 制御)

Fig.9 Block diagram (Proportional and Derivative control, Integral control)