

V C Mを用いた懸垂型磁気浮上装置

高知工科大学 知能機械システム工学科
田村 東志行

目次

- 1 . はじめに
- 2 . 懸垂型磁気浮上装置
 - 2 - 1 . 懸垂型磁気浮上装置
 - 2 - 2 . 浮上原理
- 3 . 試作した懸垂型磁気浮上装置の説明
- 4 . モデル化
 - 4 - 1 . モデル化
 - 4 - 2 . 運動方程式
- 5 . シミュレーション
 - 5 - 1 . シミュレーション方法
 - 5 - 2 . P D制御による制御
 - 5 - 3 . 制御幅を広げるための制御
 - 5 - 4 . 定常電流の零化による省エネ制御
- 6 . 結果と考察
 - 6 - 1 . 結果
 - 6 - 2 . 考察
- 7 . 結論
- 8 . 今後の課題
- 9 . 参考文献
- 10 . 謝辞

1. はじめに

工場や倉庫内において、物品を搬送するために、ベルトコンベアやクレーンあるいは台車などが一般的によく使われているが、これらの搬送装置は、減速機、ベアリング、ベルトとローラー、車輪と床あるいはレールなどの擦れ合う部分を持っているために、それらの箇所から、塵埃が発生することは避けられない。このため、以上のような搬送装置では精密機械や半導体の製造業などのクリーンルーム内で使用する際、塵埃の発生を低減させる必要がある。

この問題に対する有効解決策として、原理上塵埃が発生しない磁気浮上を用いる非接触な搬送方法が挙げられる。磁気浮上を用いる搬送装置の構成方法として浮上対象物の浮上と搬送に必要な磁石やセンサ、アクチュエータ等をレール側（固定側）に配置する方法があるが、この方法の欠点として、搬送経路が限られてしまうことや搬送経路を作るために多数の磁石やセンサが必要になるために複雑かつ高価な装置になってしまう。これに対して移動体側に浮上と搬送に必要な要素を搭載させて、移動する方法が考えられる。この方法ならば搬送経路を作ることも簡単かつ、柔軟な経路設定も可能になり、より有用であると考えられる。このような磁気浮上を用いる搬送装置として、永久磁石の吸引力を利用して、鉄などの強磁性体を天井とする搬送経路をもつことで、浮上装置が非接触で、ぶら下がる形で搬送できるものが考えられる。

本研究では、試作した懸垂型磁気浮上装置の紹介とシミュレーションによる浮上可能性を理論的に確認し、考察する。

2 . 懸垂型磁気浮上装置

2 - 1 . 懸垂型磁気浮上装置

懸垂型磁気浮上装置は、鉄などの強磁性体を天井とし、浮上に必要な磁石やセンサやアクチュエータ等を浮上体に配置し、浮上体が磁石等の磁力によって、天井から、ぶら下がっている形で浮上している装置である。

2 - 2 . 浮上原理

永久磁石の吸引力が強磁性体の天井との間に鉛直上向きの力として働いている。鉛直下向きの力としては、重力による浮上装置の重さがある。吸引力と浮上装置の重さ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する。

天井と浮上装置ベース部との距離の変化をギャップセンサで検出し、この値に基づいてコントローラはP D制御を行い、これをアクチュエータの駆動電流に反映させる。これにより永久磁石を上下運動させて、天井と磁石との距離を変え、磁石の吸引力を変化させる。つまり、浮上装置が落下しそうになれば磁石を天井に近づけ、浮上装置が天井にくっつきそうになればアクチュエータを下に下げ磁石と天井との距離を広げることで吸引力を弱める。

3 . 試作した懸垂型磁気浮上装置の説明

試作した懸垂型磁気浮上装置の写真を Fig.1 、 Fig.2 に示す。Fig.1 は装置を横から見た写真であり、Fig.2 は上方から見た写真である。

この装置の特徴は、磁石を天井に近づけたり、離したりするためのアクチュエータとしてモータ軸が直線運動できる V C M (voice coil motor) を用いたこと、磁石のガードとシャフトの間に V C M の力を補助するバネを取り付けたこと、装置をできるだけ軽くするために一つの部品に複数の役割を持たせたことである。このことについては、例えば、磁石のガードを支える支柱にセンサとセンサ位置を調節するマイクロメータを取り付けられるようにすることで、支柱という一つの部品に複数の役割を持たせた。この様にして、装置が軽くなるようにした。

装置の質量は全体が約 640 g で、磁石部とベース部から成る。磁石部は磁石とそれと共に動く部分であり、Fig.2 の真中に見える磁石とそれを V C M と繋ぐシャフト、V C M のコイル部、スプリングなどが含まれている。その部分の質量は 60 g である。ベース部は装置のその他の部分のことで V C M やマイクロメータ、センサ等が含まれ、その質量は 580 g である。

主要な部品について説明する。V C M は、可動範囲約 11mm、最大推進力が 10N の力を発生するアクチュエータである。浮上装置ベース部の位置をセンシングするセンサには分解能 0.5 μ m の渦電流センサを使用する。センサを 2 つ使用したのは、浮上体左右のアンバランスをなくすためと、2 つの信号を加えることにより、コントロールできない振れによるノイズの影響を少なくできると考えたためである。また、センサの位置は高精度な設定を必要とするためマイクロメータで調整できるようにした。さらに、永久磁石が天井にくっつかないように Fig.1 に示すような、位置の調整が可能なガードを取り付けた。

4 . モデル化

4 - 1 . モデル化

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に、Fig. 3のようにモデル化した。天井の位置を原点とし、鉛直下向きを正にして考える。システムの入力はV C Mへの入力電流である。この電流はV C M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と浮上装置ベース部の両方に働く。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。システムの出力は天井から浮上装置ベース部までの距離である。解析に用いる記号を以下に説明する。

m_0 : 浮上装置ベース部質量

m_1 : 永久磁石部質量

$z_0(t)$: 浮上装置ベース部位置

$z_1(t)$: 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

k_i : アクチュエータの推進力定数

k_m : 永久磁石の吸引力定

ξ : アクチュエータのダンピング係数

$i(t)$: 電流

g : 重力加速度

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。

(1) は浮上装置ベース部について、(2) は永久磁石部についての運動方程式である。

$$m_0 \ddot{z}_0(t) = k_1 [z_0(t) - z_1(t)] + \xi \dot{z}_0(t) - \xi \dot{z}_1(t) + f_a - m_0 g \dots \dots \dots (1)$$

$$m_1 \ddot{z}_1(t) = -k_1 [z_0(t) - z_1(t)] - \xi \dot{z}_0(t) + \xi \dot{z}_1(t) - f_a + f_m - m_1 g \dots \dots \dots (2)$$

アクチュエータの入力電流 と発生力 は比例関係にあり、(3) 式で表される。永久磁石の吸引力は (4) 式で表される。

$$f_a = k_t i(t) \dots \dots \dots (3)$$

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

5 . シミュレーション

5 - 1 . シミュレーション方法

運動方程式により非線形のまま浮上可能性のシミュレーションを行う。

5 - 2 . P D制御による制御

浮上可能性を調べるためにP D制御のみによる制御のシミュレーションを行う。

5 - 3 . 制御幅を広げるための制御

V C Mの可動範囲であれば、どの位置でも浮上可能だが、可動範囲の上下両端に近づけば近づくほど制御できる幅が狭くなる。制御できる幅を大きくとるためにはV C Mの可動量の間位置を常に平衡点にもってくるための制御のシミュレーションを行う。これは可動範囲の間位置で動作するためのオフセット電流を与え、入力電流との偏差を無くすことで可能である。偏差をなくするための制御として積分制御を用いる。

5 - 4 . 定常電流の零化による省エネ制御

平衡状態にあるとき、アクチュエータはほとんど動かない。V C Mの駆動電流が零であれば省エネに有効である。これはV C Mに流れ込む電流をフィードバックして積分制御を行うことにより可能である。この可能性についてシミュレーションを行う。

6 . 結果と考察

6 - 1 . 結果

シミュレーションの結果を Fig. 4 から Fig. 6 に示す。これらの図ではモデル化したときと同様に鉛直下向きを正とした。よってシミュレーション結果の図中における線の動きと実際の物体の動きは逆である。浮上体が浮上中に外から力を受けても浮上可能かどうかを調べるため、3 秒後に 10 g の外乱を入れた。

6 - 2 . 考察

Fig. 4 は、PD 制御による制御を行ったシミュレーションの結果である。グラフは上から順に、ベース部の変位、磁石部の変位、フィードバック電流を表している。

3 秒後に外乱が加わると同時に浮上体が上昇し、その後、平衡状態を保っていることが分かる。

Fig. 5 は、制御幅を広げるための制御をシミュレーションで行った結果である。グラフは上から順に、ベース部の変位、磁石部の変位、VCM の可動部中央からの変位、フィードバック電流を表している。図からわかるように外乱が加わる前後でともに VCM の可動範囲の中間位置に収束していることが分かる。

Fig. 6 は、定常電流の零化による省エネのための制御を、シミュレーションで行った結果である。グラフは上から順に、ベース部の変位、磁石部の変位、フィードバック電流を表している。これも 3 秒後に外乱が入った後、再び 0 A に駆動電流が収束している。

7 . 結論

本研究では簡素化された永久磁石とVCMを用いた懸垂型磁気浮上装置を製作し、その浮上可能性についてシミュレーションを行った。考察を以下に示す。

外乱が加わっても落ちることなく安定していることから、試作した懸垂型磁気浮上装置は浮上可能であると考えられる。

VCMの可動範囲の中間位置を平衡状態にもってこることが可能なことから制御量が大きく取れると考えられる

駆動電流が0Aのときを平衡状態にもってこる制御が可能のため、消費電力を小さくできると考えられ、電池駆動による搬送装置の実現が可能であると考えられる。

8 . 今後の課題

今後の課題としては、シミュレーションによる浮上実験結果より、試作した懸垂型磁気浮上装置は浮上可能であると考えられるので、実際に浮上させる実験を行う。

9 . 参考文献

Trans.IEE of Japan,Vol.119-D,No.3,March,1999

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」

吉田 祐介（高知工科大院）懸垂型磁気浮上機構の制御

吉田 祐介（高知工科大院）永久磁石を用いた懸垂型磁気浮上装置の開発

10 . 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
ならびに、大学院生の吉田祐介さんに、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きました多くの方々に感謝の意を表します。

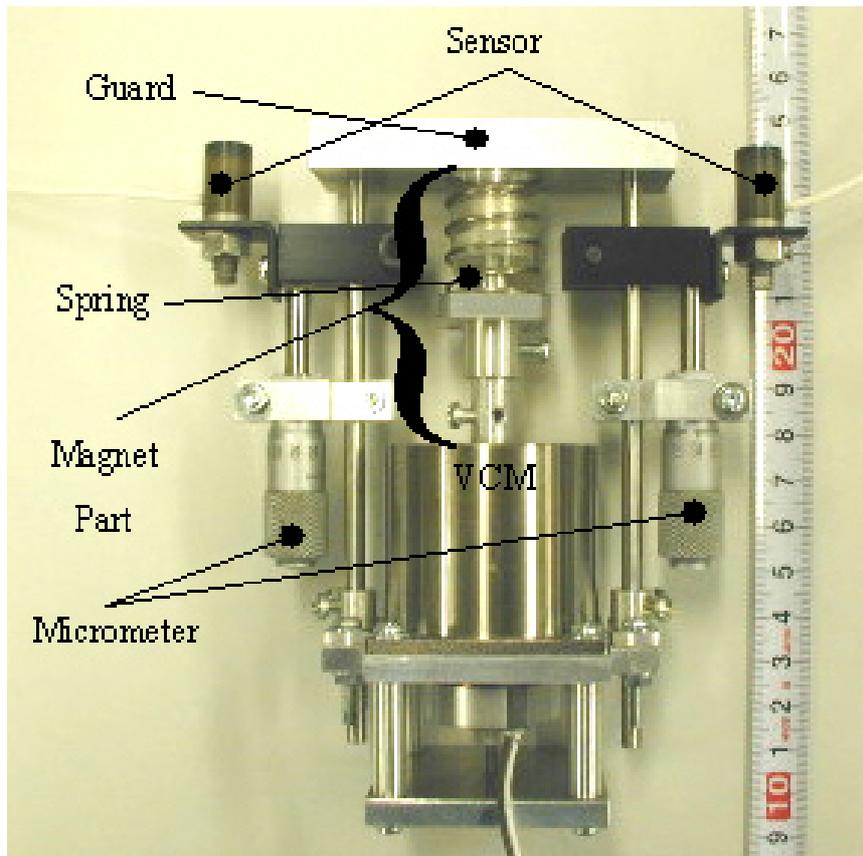


Fig.1. Photograph of levitation system

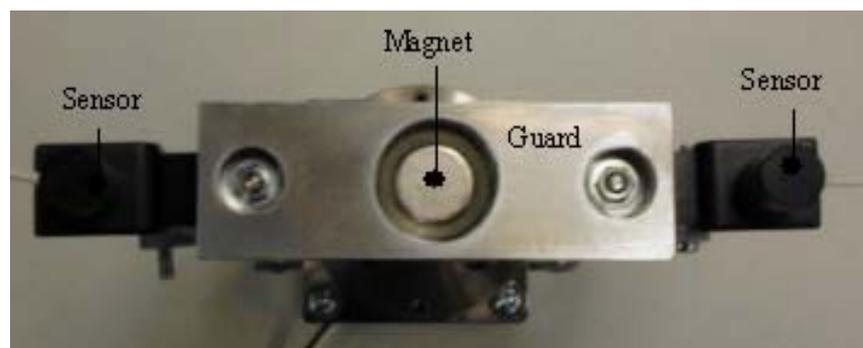


Fig.2. Upper angle

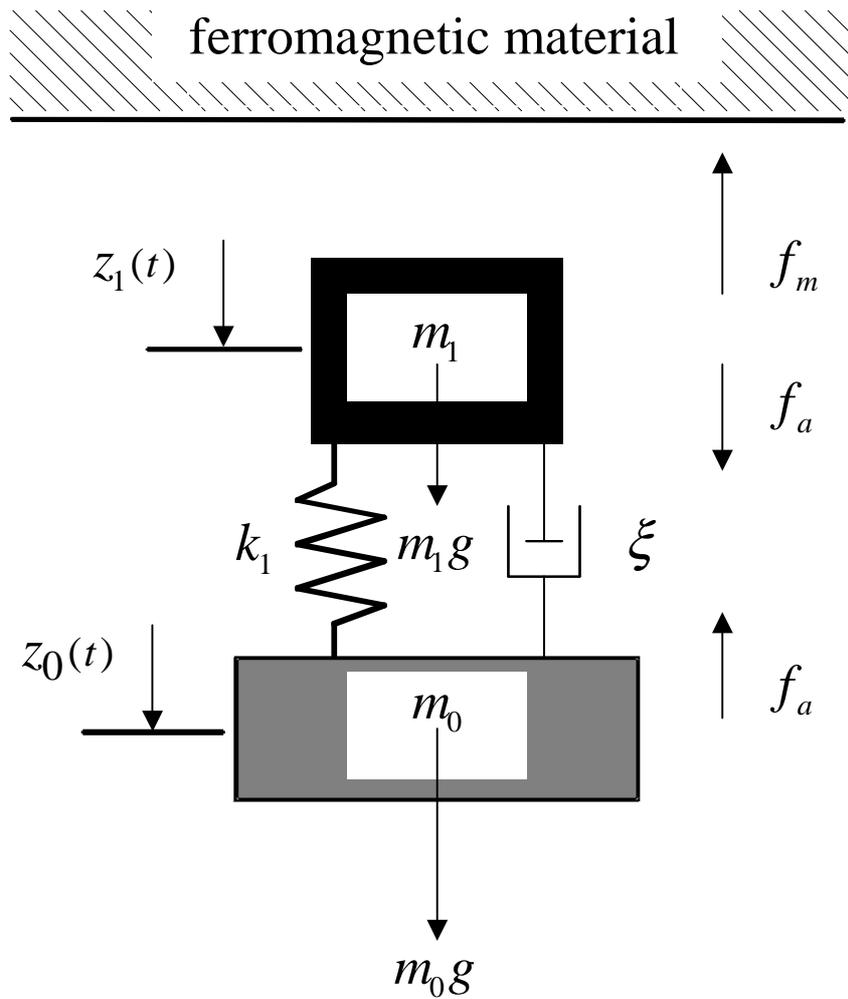


Fig.3. Model of levitation system

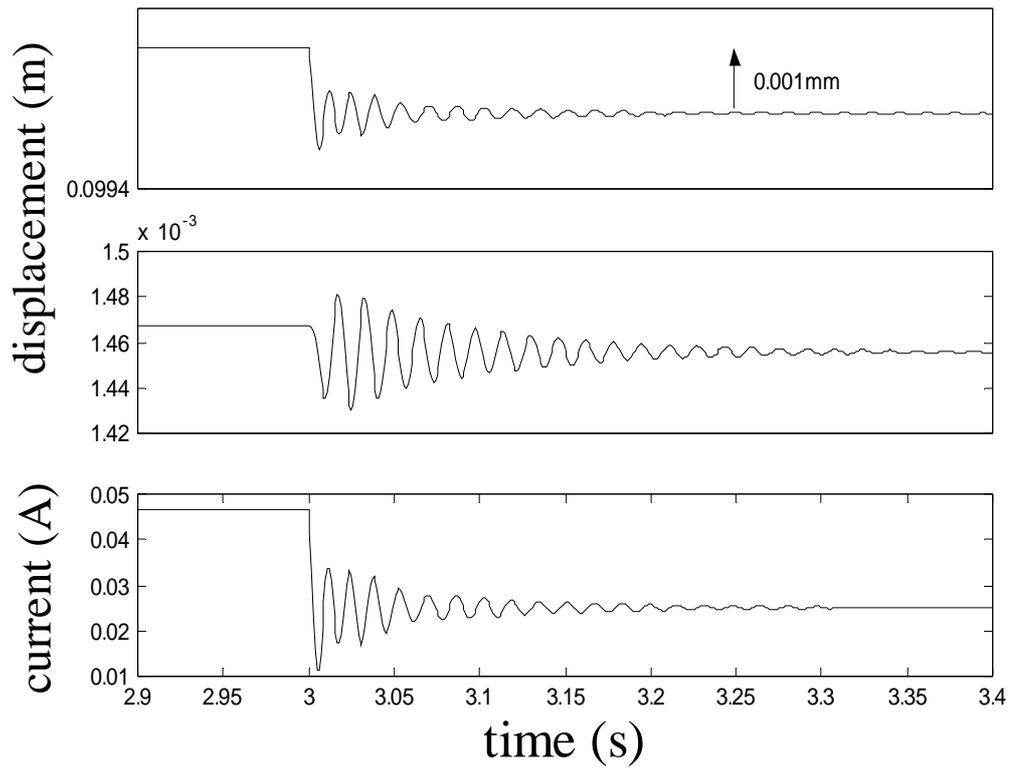


Fig.4. Displacement of levitation system

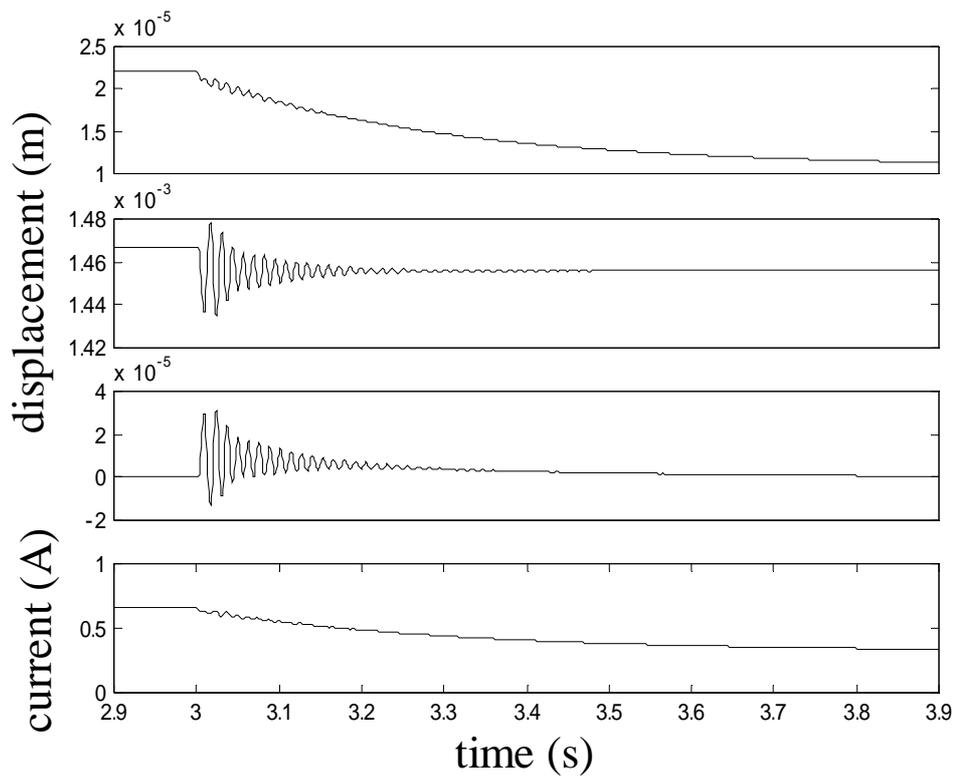


Fig.5. Control at offset position

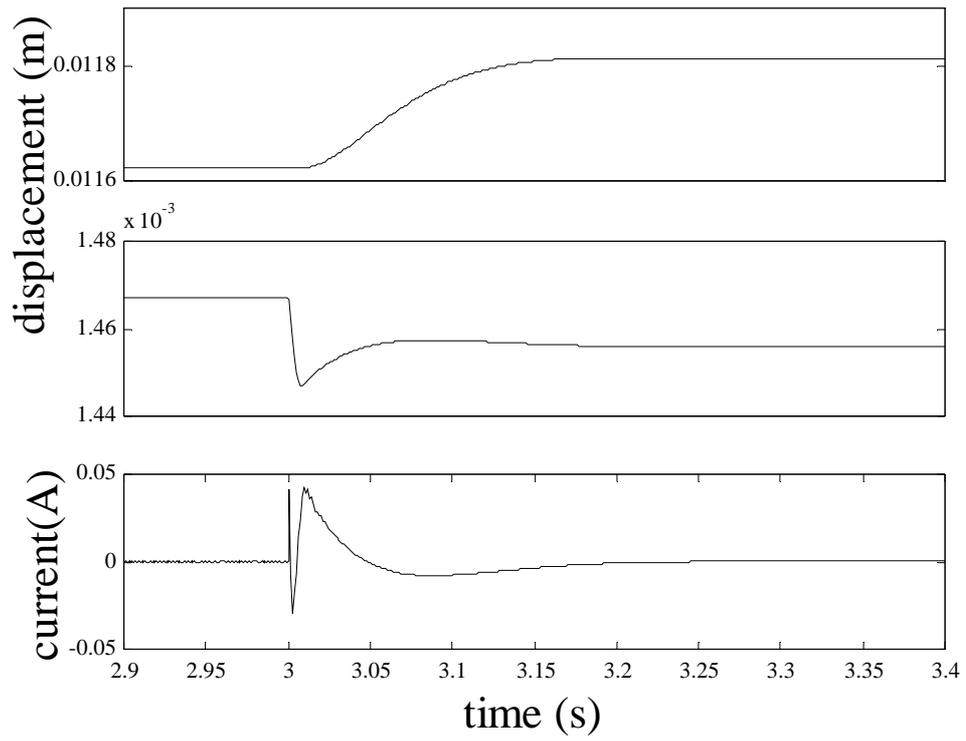


Fig.6. Control of current