

静電浮上搬送システムにおける
半導体ウエハのピックアップ制御

高知工科大学知能機械システム工学科

山下 泰弘

目次

1. 緒言

1.1 要旨

1.2 研究背景

2. 研究内容の説明

2.1 ピックアップ制御

2.2 浮上原理

3. 静電気力に対する検討

3.1 静電気力とその特性

3.2 搬送技術としての実用性

4. ピックアップ機構

4.1 実験装置

4.2 運動方程式とモデル化

4.2.1 運動方程式の導出

4.2.2 線形化

4.2.3 状態方程式

4.2.4 制御システム

5. 実験結果と考察

5.1 実験結果

5.2 考察

6. 結言

謝辞

参考文献

1. 緒言

1.1 要旨

現在、あらゆる分野において使用されている機械的な支持機構は、支持する対象物と直接接触して、その動きや位置を制御するというものが主流になっている。このような支持機構の場合、そこには必ず摩擦が発生し、塵埃発生の原因となる。このため、高いクリーン度を要求する分野における支持機構の場合非接触で動きや位置を制御することが望まれる。本研究では、こういった場合が想定される半導体工場でのシリコンウエハの能動的な制御を、静電気力を用いた非接触浮上装置で考える。

1.2 研究背景

従来、極限環境におけるシリコンウエハの搬送システムには、塵埃の発生を防ぐため、ロボットアームを使用したものが多く支持されてきた。ところが、近年、目覚ましい技術進歩による回路パターンの微細化、高集積化が進む中、搬送による塵埃の発生を更に抑制することが望まれてきている。しかしながら、現在、搬送システムの主流を担っているロボットアームでの搬送システムでは限界がある。

なぜなら、ロボットアームによる搬送システムでは、アームがシリコンウエハに直接接触するため、どうしても接触部へ塵埃の微粒子が付着しやすく、これが近年の非常に微細な高集積回路の場合、パターン露光の障害や、欠損の原因となってしまうからである。そこで、直接対象物に触れる搬送システムではなく、非接触での搬送システムが実用可能となれば、より多く塵埃の発生を抑制することが期待できるのである。

非接触での搬送では、磁力・空気圧・静電気力を、吸引もしくは浮上力として用いる場合が多いが、それぞれ大きく特性が異なってくる。磁力の場合、

吸引力は大きく多少重量のあるものでも浮上させられるが、浮上対象が磁性体でなければならない。空気圧の場合、これも浮上力は大きく出せるがエア－を使うため塵埃を巻き上げてしまう。静電気力の場合、吸引力は他の二つと比べかなり小さいが浮上体が絶縁体でない限り材質上での制限は特にない。以上のことを踏まえると、シリコンウエハのような面積が広く重量の小さい物の非常にクリーン度の高い非接触搬送システムを考えた場合、静電気力を用いた非接触搬送が最も適していると考えた。

そしてまた、実際の半導体工場を想定した場合、シリコンウエハを浮上させるだけでは搬送システムとしては不完全である。シリコンウエハを浮上させた状態のまま、自由に移動させることが可能でなければ実用化にはいたらない。そこで、本研究では、ボイスコイルモータを使用して浮上させたままの状態での鉛直方向への上下運動（ピックアップ）を試みる。

2. 研究内容の説明

2.1 ピックアップ制御

本実験は静電気力を用いた非接触浮上装置を使用して鉛直方向にハンドリングさせる搬送システムの確立を目的とする。Fig. 2.1に示すように、まず電極を浮上体（ウエハ）に近づけるようVCMで下降させる。そして、電極と浮上体との位置が近づいてくると電極に電圧がかかり、静電気力を発生させて浮上・吸着させる。最後にその状態を保ったまま上昇させる。これがピックアップ制御である。

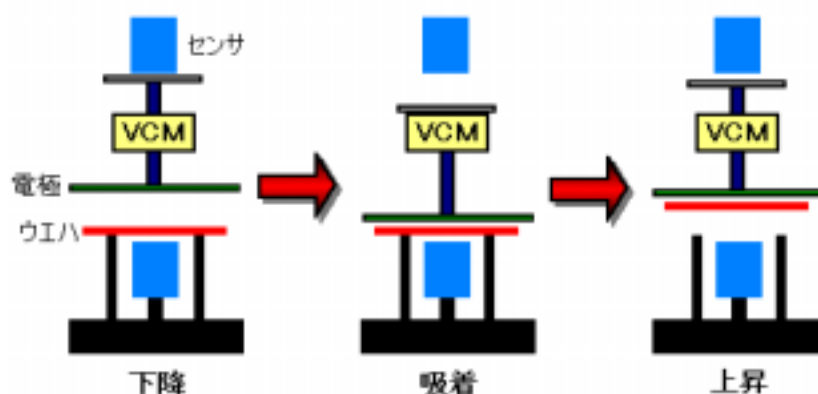


Fig. 2.1 ピックアップ制御

2.2 浮上原理

磁石でN極とS極が引き合うように、電子においてもプラスの電子とマイナスの電子が引き合う力が発生する。この力はクーロン力と呼ばれるものであり、このクーロン力を発生させる方法として、電極にプラスとマイナスの電圧をかけるという方法がある。このことにより、電極表面にプラスとマイナスそれぞれの電子が誘起し、絶縁体でない浮上体の表面にはそれと対になる電子が誘起する。これにより、電極と浮上対象との隙間にクーロン力が発生する。これを、浮上のための吸引力とした。

3. 静電気力に対する検討

3.1 静電気力とその特性

Fig. 3.1に示すように、2枚の電極を組み合わせた平行板コンデンサにおいて極板間に電圧Vをかけたとき、2枚の極板の間にはプラスの電荷とマイナスの電荷が引き合うクーロン力により次式で示される静電吸引力 f が働くことがわかっている。

$$f = \frac{\epsilon S V^2}{d^2} \quad (3.1)$$

ここで、 ϵ は大気中の誘電率、 S は電極の面積、 d は電極間の隙間である。

次にFig. 3.2に示すように2つの電極を上へ平行に配置し、その下に導体版を置いた場合、2つの電極間の距離が隙間に比べて十分広いため、電極間に相互干渉がなければ平行板コンデンサが2つ組み合わせられたものとみなすことができる。2つの電極の面積をそれぞれ、 s_a 、 s_b 、 $s_a + s_b = S$ とし、両電極間に電圧Vをかけると、上下の板の間には次式の吸引力が働く。

$$f = \frac{\epsilon V^2}{2 S^2 d^2} (s_a^3 + s_b^3) \quad (3.2)$$

ここで、

$$s_a = s_b = \frac{S}{2} \quad (3.3)$$

とすれば、Fig. 3.2の上下の板間に働く吸引力は、次式となる。

$$f = \frac{\epsilon S V^2}{8 d^2} \quad (3.4)$$

以上のことは、シリコンウエハの板を使用した場合でも同様に成り立つことが分かっており、この吸引力を利用して非接触浮上を行う。

しかし、大気中での静電気力の使用においては、絶縁破壊の問題が存在し、吸引力には限界があることが考えられる。以下では、その静電気力の限界を知り、静電気力での浮上可能な物体の制限に関する見当を行う。

大気中での絶縁破壊は 3.5×10^6 (V/m)であるので、Fig. 3.2に任意の電圧Vをかけたとき、絶縁破壊距離 d_{max} は、

$$d_{max} = \frac{V}{2 \times 3.5 \times 10^6} \quad (3.5)$$

電圧が高くなれば吸引力は大きくなると考えられるため、最大の吸引力 f_{max} は(3.4)式に(3.5)を代入すると、

$$f_{max} = \frac{\epsilon S V^2}{8 \times (d_{max})^2} \quad (3.6)$$

$$= 5.5264(KgW)$$

これにより、最大の吸引力は電圧に関わらず一定であり、静電気力により浮上可能で、単位面積あたりの質量が、 0.55 (g/cm²)以下であればよいことがわかる。

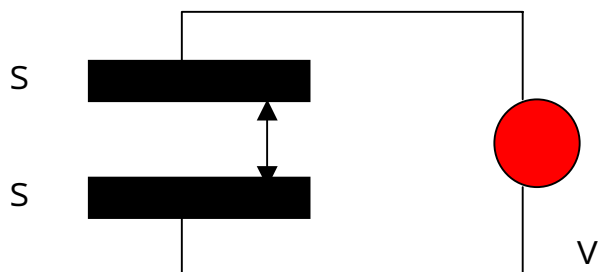


Fig.3.1 平行板コンデンサ

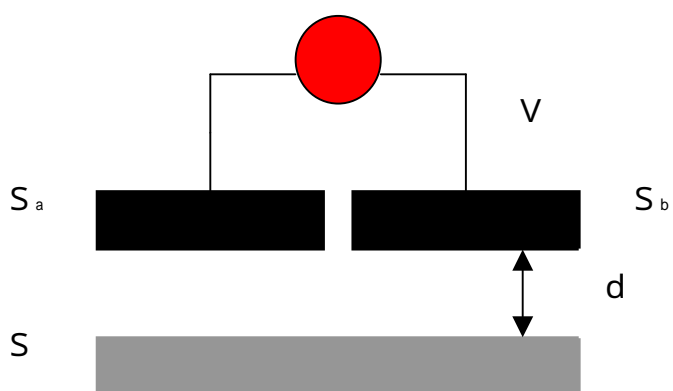


Fig.3.2 並列に電極を配置したコンデンサ

3.2 搬送技術としての実用性

先に述べたとおり静電気力を用いた浮上では、絶縁体以外で表面積が広く、重量が小さければ浮上の可能性がある。これより、今回のような半導体工場でのシリコンウエハの搬送において、静電気力を用いた浮上装置は有効な手段なので、非接触浮上搬送システムの安定化とその精度向上が実現できれば、十分にロボットアームによる搬送システムに取って代われる技術と言える。

4. ピックアップ機構

4.1 実験装置

実験装置はFig. 4.1に示す通り浮上させる力である吸引力を発生させる電極、浮上対象であるシリコンウエハ、電極の位置決め装置であるボイスコイルモータ（VCM）、両者をつなぐユニバーサルジョイント、電極と浮上体の位置を検出する上下のセンサ（渦電流式，レーザー式）で構成される。上下のセンサにより、電極の位置と浮上体の位置を上下から把握することでその隙間の距離を得ることができる。

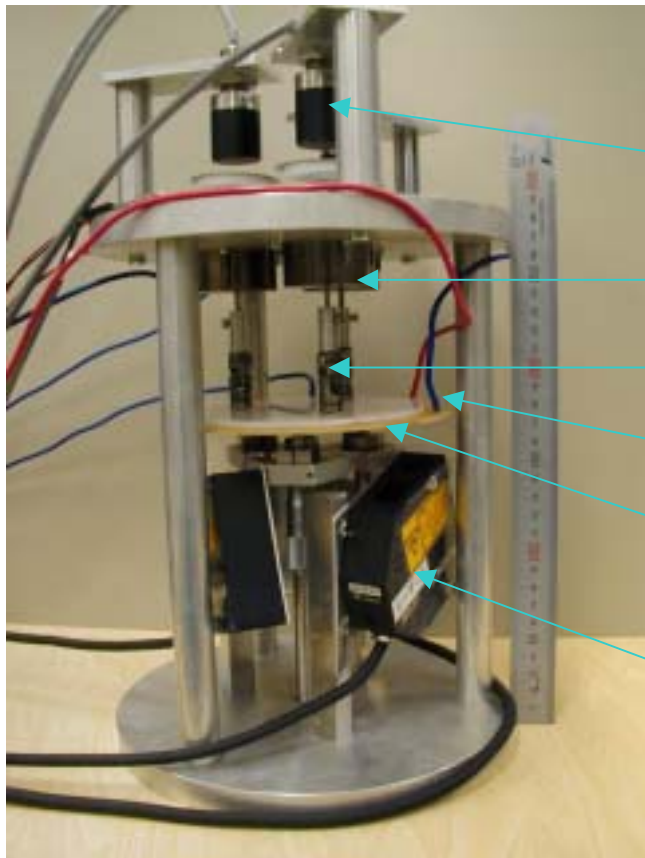
VCMをアクチュエータとして使用したわけは、吸引力に限界があるため、浮上対象に対する電極の位置を把握して絶縁破壊を起こさないようにするためである。電極の形状はFig. 4.2に示す通り中心をマイナスの電極としそれをプラスの電極で囲むように配置する。プラスの電極は3分割されており、この1つとマイナスの電極の1/3とが1つの組として考える。また、電極の総面積と浮上対象の面積はほぼ同じにしてある。

それぞれの面積と質量は

質量：電極・・・187.73g，ウエハ・・・17.74g

面積：電極 = ウエハ・・・ $2.25 \times 10^{-3} m^2$

電極の厚さ、及び半径は本研究では必要ないので測定していない。



変位センサ（渦電流式）

ボイスコイルモータ

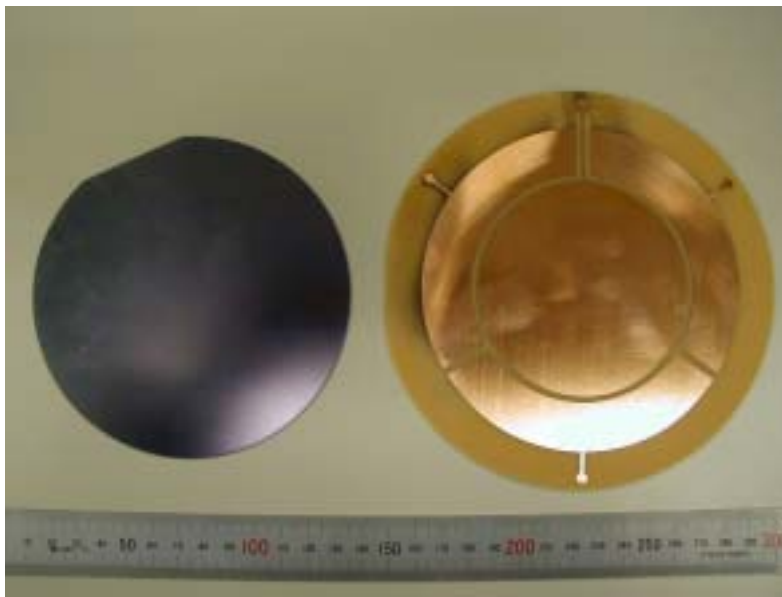
ユニバーサルジョイント

電極

ウエハ

変位センサ（レーザー式）

Fig. 4.1 実験装置



電極とウエハは同じ面積

Fig. 4.2 ウエハと電極

4.2 運動方程式とモデル化

4.2.1 運動方程式の導出

これより前節で紹介した実験装置から、運動方程式を導出しモデル化を行う。また、本研究では装置を均一に3分割し、3つのサブシステムと考える。システムの簡素化を試みた。各々のサブシステムは1自由度浮上システムで、システムの考察の中で次のことを仮定しておく。

1. 装置は中心軸とアクチュエータ軸を含む面に対して対象である
2. 3つのプラスの電極と3つのVCMの特性は同じである
3. マイナスの電極にはプラスの電極の平均を加える
4. VCMのベアリング摩擦はないものとする
5. 電極、浮上対象の隙間などに生じる空気の粘性やダンピング力は無視できるものとする

本研究では分散システムとして考えるため、装置を均一に3分割して制御を行う。このため、渦電流変位センサ、VCM、3分割されたマイナスの電極、1つのプラスの電極、レーザー式変位センサ、浮上対象の面積・質量の $1/3$ をワンセットとして考える。このときシステムは鉛直方向のみを考え、1自由度のシステムとして表す。

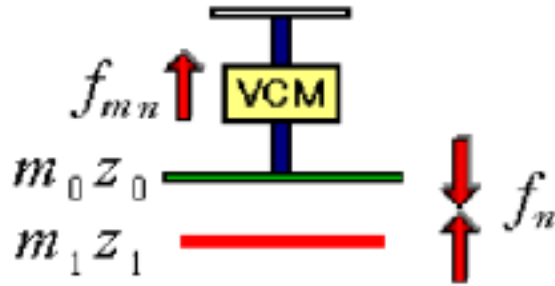


Fig . 4 . 3 モデル化

記号の説明

m_1 : 浮上体の重さ

m_0 : 電極の重さ

A : 浮上体、電極の面積 (浮上体 = 電極)

z_1 : 浮上体位置

z_0 : 電極位置

f_{m1}, f_{m2}, f_{m3} : V C M の発生力

f_1, f_2, f_3 : 電極と浮上対象の隙間に発生する静電吸引力

d_1, d_2, d_3 : 電極と浮上対象の隙間の距離

V_1, V_2, V_3 : 電極に加える電圧

i_1, i_2, i_3 : ボイスコイル電流

k_m : 静電吸引力の比例定数

k_i : ボイスコイル電流の比例定数

ε : 大気中の誘電率

VCMの発生力と電流の関係は

$$f_{mn} = k_i \cdot i_n \quad (4.1)$$

ただし、下付添え字の n は分散システムによる各々のサブシステムを表し、 $n = 1, 2, 3$ である。(以下同様)

電極と浮上対象の関係は

$$d_n = z_1 - z_0 \quad (4.2)$$

電極と浮上体の隙間に働く吸引力は

$$f_n = \frac{\varepsilon AV_n^2}{8 \times (d_n - x)^2} \quad (4.3)$$

浮上体の運動方程式は

$$m_0 \ddot{z}_1 = f_n - m_0 g \quad (4.4)$$

電極の運動方程式は

$$m_1 \ddot{z}_0 = f_{mn} - m_1 g - f_n \quad (4.5)$$

浮上している時 $\dot{z}_1 = 0, x = 0$ なので、(4.3), (4.5) 式より

$$m_0 g = \frac{\varepsilon AV_n^2}{8 d^2} \quad (4.6)$$

実験装置を分散システムとして扱うことにより運動方程式は、以上の(4.1), (4.2), (4.3), (4.4), (4.5), (4.6) で表すことができる。次にこれにより釣り合いの位置での線形化を行う。

4.2.2 線形化

平衡点周りでの微細な動きを考えると、本実験では

$$f_n = f(d, V)$$

より

$$\Delta f_n = \frac{\partial f}{\partial d} \Delta d_n + \frac{\partial f}{\partial V} \Delta V_n$$

よって

$$\Delta f_n = k_m \Delta d_n + k_v \Delta V_n \quad (4.7)$$

ここで

$$\Delta d_n = \Delta z_n - \Delta s_n$$

VCMの発生力については

$$\Delta f_{mn} = k_i \Delta i_n \quad (4.8)$$

となる。これにより、(4.4)式より

$$m_0 \ddot{z}_1 = f_{n0} + \Delta f_n - m_0 g$$

ここで、釣り合っている時 $f_{n0} = m_0 g$ なので

$$m_0 \dot{z}_1 = \Delta f_n$$

$$\ddot{z}_1 = \frac{\Delta f_n}{m_0} = \frac{k_m (\Delta z_n - \Delta s_n)}{m_0} + \frac{k_v \Delta V}{m_0} \quad (4.9)$$

(4.5)式より

$$\begin{aligned} \ddot{z}_0 &= \frac{\Delta f_{mn}}{m_1} - \frac{\Delta f_n}{m_1} \\ &= \frac{k_i \Delta i_n}{m_1} - \frac{k_m (\Delta z_n - \Delta s_n) + k_v \Delta V}{m_1} \end{aligned} \quad (4.10)$$

4.2.3 状態方程式

サブシステムの状態ベクトル x は

$$x = (\Delta z_0 \quad \Delta z_1 \quad \dot{z}_0 \quad \dot{z}_1)$$

入力 u は

$$u = (\Delta i_n \quad \Delta V)$$

分散システムの状態方程式は

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.11)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_m}{m_1} & -\frac{k_m}{m_m} & 0 & 0 \\ -\frac{k_m}{m_0} & \frac{k_m}{m_0} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{k_i}{m_1} & -\frac{k_v}{m_1} \\ 0 & \frac{k_v}{m_0} \end{bmatrix}$$

ここで、分散システムなので

$$m_1 = \frac{1}{3} m_1 \quad m_0 = \frac{1}{3} m_0 \quad \text{として考える。}$$

サブシステムの出力は上下のセンサであるから

$$y = (\Delta z_0 \quad \Delta z_1)$$

出力の状態方程式は

$$y = Cx \quad (4.12)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{となる。}$$

4.2.4 制御方法

ピックアップ制御をブロック線図にして示すと Fig. 4.4 のようになる。電極位置と浮上体位置を上下のセンサにより検出し、そのうちの電極位置をフィードバックさせ PD 制御にかけ電流を VCM に流してやる。そして、電極位置と浮上体位置のギャップを検出し、その差をフィードバックさせ PD 制御を行い電圧を電極にかけてやる。つまり、VCM の力と電極の電圧が 2 入力となり、電極位置と浮上体位置が 2 出力のシステムとなる。

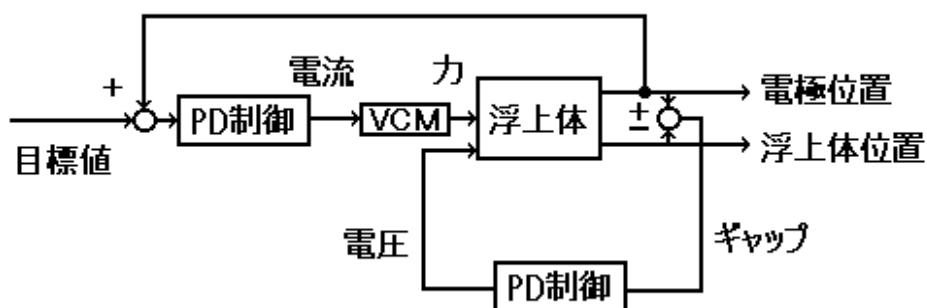


Fig. 4.4 ブロック線図

そして、制御系を含めた装置全体の概略図が以下のように示される。

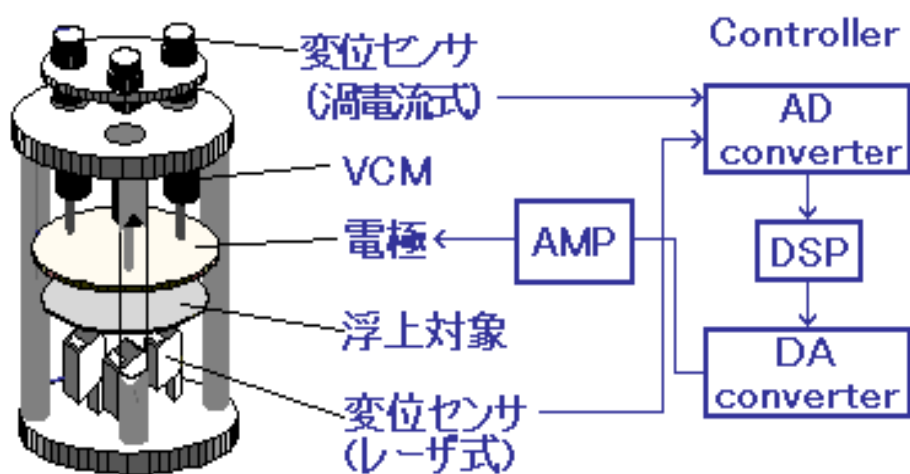


Fig. 4.5 制御装置

5 . 実験結果と考察

5 . 1 実験結果

VCMを固定した状態での浮上は成功し、静電吸引力は確認できたが、そのまま浮上状態を維持したままでのピックアップには成功しなかった。

5 . 2 考察

今回の実験では、浮上には成功したもののピックアップを行うことができなかった。しかし、その制御方法、シュミレーションにおいては問題なく、理論上でのピックアップは可能である。そこで、今回の失敗の原因と考えられる点を2つ挙げる。

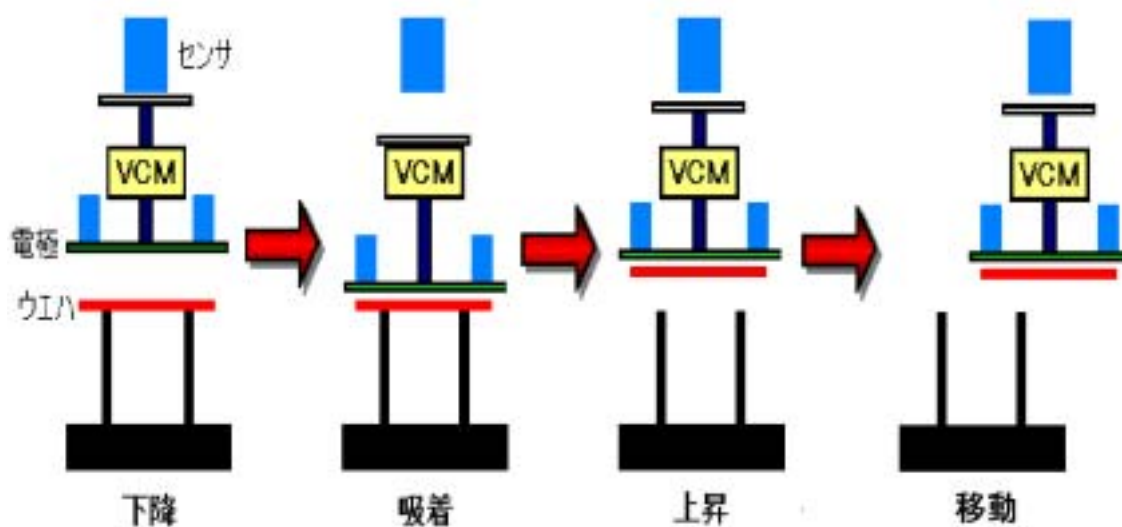
1つは、空気の影響によるものである。静電浮上では、電極と浮上体が広い面積、非常に狭い空隙で対向するために、ピックアップのような鉛直方向への運動を行うと、空気の粘性によりダンピング力が発生してしまう。これが安定した浮上の妨げになっていると思われ、ピックアップ制御を行う場合、空気のダンピング力は無視できないと考えられる。

2つめとしては、装置の精巧さが欠けていたことである。先にも記したように、静電浮上は非常に小さな空隙において行われる。そのため、電極が少しでも湾曲したりしていた場合、浮上体は横方向に流れるように移動したり、電極にくっついてしまったりする。実際、今回の実験においても劣化のためか電極が非常に微小ではあるが湾曲してしまい。上記のような現象がおこり、VCMを固定した状態でも安定した浮上が行えないことがあった。

そして、ピックアップのため電極を浮上体に接近させていくときにも、電極と浮上体との間が正確に平行状態にないと、電極が湾曲したときと同じような現象が起きてしまう。

以上のことを考えると、新たに空気のダンピング力を視野に入れた運動方程式の構築、そして、精度の高い電極の製作と、浮上体を正確に電極の真下に位置するための位置制御、電極と浮上体を常に平行状態に保つための措置などを施せば、ピックアップ制御は成功するものと考えられる。

そしてまた、今回使用した装置では、鉛直方向への移動は可能だが、水平方向への移動が不可能である。そこで、下部に取り付けてあるレーザ式のセンサを、電極の上に載せるような形で取り付けてやる。そうすれば、水平方向への移動は可能となる。そしてさらに、センサの位置を電極と等しい位置に取り付けてやることによって、予備実験で行ったVCMを固定しての浮上実験と同じ理論で浮上させてやることも可能になる。この理論だと、レーザ式センサが浮上体の位置を検出し、電極にかける電圧を調整してやれば、浮上は可能であり、鉛直方向への移動に関しては、上部の渦電流式センサがVCMの位置を検出し独立して行える。こうしてやることにより、比較的容易に安定した浮上ができ、制御システムもより簡素化することが可能になると考えられる。F i g . 5 . 1 に示す。



F i g . 5 . 1 水平移動可能な装置

6 . 結言

本研究では、VCMをアクチュエータとして用いた、非接触搬送システムによる静電気浮上装置の開発を目的とし、吸引力として用いた静電気力の特徴や装置のモデル化、制御系におけるゲインの測定方法について論じた。また、製作した3自由度の装置について述べ、ピックアップの制御方法を示した。

今回の実験ではVCMを固定した状態での浮上は確認できたが、ピックアップ制御に成功することはなかった。しかしながら、ピックアップ制御を実現するための改善点をいくつか発見することができた。電極と浮上体の空隙に起こるダンピング力を視野に入れたモデル化・運動方程式の構築。電極の精度向上や浮上体の位置を電極の真下へ正確に制御すること。そして、実際の工場での搬送を考えて新しい装置の開発。これらのことを行えば、浮上だけでなく、ピックアップ制御が行えると考えられ、上記した改善点をよく考察し、ピックアップ制御の安定化を図りたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、終始懇切丁寧なご指導を賜りました、指導教官の岡宏一先生に深く感謝いたします。

最後に助言や励ましの御言葉をいただいた政木慶次氏、吉田祐介氏、田上浩士氏に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- [1]岡宏一 著 永久磁石の運動制御による磁気浮上機構
- [2]東京大学院工学系研究科 研究代表者 樋口俊郎
静電気をを用いた超クリーン非接触搬送システム
- [3]杉江俊治 藤田政之 共著 フィードバック制御入門
- [4]土谷武士 江上正 共著 現代制御工学
- [5]大槻義彦 著 改訂新版 基礎教養 物理学
- [6]西本敏彦 著 微分積分学講義
- [7]大西清 著 J I S による機械製作図の読み方・書き方(改訂2版)
- [8]政木慶次 著 非接触搬送を目的とした静電気浮上装置の提案