

論文内容の要旨

論文題目 高真空・クリーン環境用静電浮上リニアモータの開発

氏名 保井 秀彦

1. はじめに

今日、メカトロニクス技術は様々な産業で利用されており、人間の生活と切り離せないと言っても過言ではなくなっている。また、メカトロニクス技術の重要性が高まり、発展するにつれ、その用途はますます多様化してきている。現在、多くのメカトロニクス機器には、これまで求められてきた仕様に十分な性能を有しており、かつその扱いやすい種々の特性を持っているという理由から電磁モータが用いられている。しかしながら、用途の多様化に伴い特殊な条件下では電磁モータだけでは対応しきれない場合も考えられるようになってきた。このような場合、それぞれの用途に適合する特性を持つアクチュエータの開発をしていくことが必要である。

以上の観点から電磁モータ以外にもメカトロニクス機器に対応できる多くのアクチュエータが開発され、現在も積極的に研究が進められている。その一つの方法として電荷間に生じるクーロン力を利用する静電アクチュエータがある。その中でも電磁モータに劣らない出力性能を持つ静電アクチュエータとして、フィルム状の電極を用いた交流駆動両電極形静電モータと呼ばれる高出力静電モータが開発されている。従来の研究では、通常の大気環境のもとで絶縁液に浸した状態で駆動及び性能評価を行っており、最高出力密度 230W/kg、閉ループ制御による nm オーダーでの位置決めなどを実現している。

交流駆動両電極形静電モータは図 1 に示すように、3 相の電極が等ピッチで配置された移動子、固定子から構成されている。本研究では移動子・固定子はポリイミドフィルムをベースとしたフレキシブルプリント回路基板により作製した。推力リップル軽減のために、移動子電極は波形になっている。交流駆動両電極形静電モータは、移動子、固定子の各 3 相電極に互いに相順を反転して 3 相交流電圧を印加することで、図 2 に示すように電極に発生する進行電位分布間の静電気力により駆動される同期モータである。

2. 本研究の目的

本モータは高電圧駆動のため電磁モータに比べ微小電流で同じパワーを発揮できるため、電場発生は大きいものの磁場発生は小さいと考えられる。電場は磁場に比べて容易にシールドす

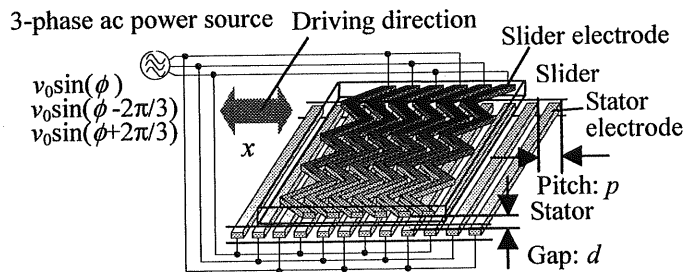


Fig. 1 Structure of high power electrostatic motor

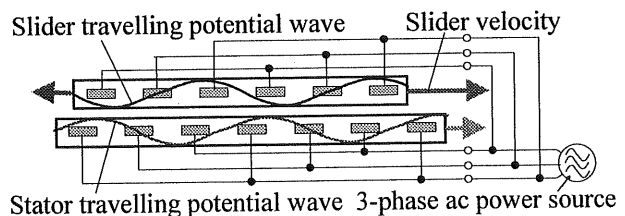


Fig. 2 Driving principle

ることが可能であることを考慮すると、全体としての電磁界の漏洩を電磁モータに比べ大幅に低減できると期待できる。構造的な面に着目すると、交流駆動両電極形静電モータは減速器無しで高出力を発揮する直動リニアモータであり薄型・軽量である。したがって、真空チャンバ内のような限られた空間において導入器無しで利用することができる。そのため、SEM や EB ステツパ用駆動機構のように真空環境、かつ低電磁場漏洩を必要とする用途において電磁モータの代替として利用することが期待できる。

実用的なアクチュエータとして広く用いられている電磁モータの特徴を省みると、原理的に磁気作用を用いるために大きな磁場発生を伴うことが避けられない。したがって、磁場発生を嫌う用途には決定的な問題となり、直接の利用は出来ないと考えられる。産業界における非磁性モータ開発への要求は大きく、特に高スループット EB ステツパを実現するためには不可欠であると考えられている。現在、半導体製造工程でのリソグラフィにおいて、パターン形成にはレーザー光源を利用した縮小投影露光装置が用いられている。しかし、光を利用したステツパでは解像度に限界があると言われており、解像度 70nm 以下を目標に X 線や EB を利用した次世代リソグラフィ装置の開発が急がれている。EB を利用する場合、ステージを駆動するモータが発生する磁場の影響を抑えることが必要であり、装置の構造上スループットが低くなる。ステージ駆動に真空環境、クリーン環境に対応した非磁性モータを用いることができればこの問題を解決することが可能であり、その開発が強く求められている。

本研究では、以上のように静電モータが真空環境での利用に適していること、及び真空用非磁性モータへのニーズに注目し、真空環境用静電モータ、及び静電浮上モータの開発を目的とする。真空環境用静電モータは高流駆動両電極形静電モータを真空環境に導入したもので、クロスローラガイドで移動子を保持することにより実現するものである。また、静電浮上モータは交流駆動両電極形静電モータの固定子電極・移動子電極間に発生する吸引力を利用して移動子を浮上させることにより真空環境に導入される。

3. 真空環境用静電モータ

従来の大気環境下絶縁液中での駆動実験では、摩擦潤滑を兼ねて直径約 20 μm のガラスビーズを移動子、固定子間に散布することで、吸引力から生じる摩擦を低減している。しかし、真空チャンバ内では、飛散の恐れがあるガラスビーズは使用できないため、これに代わる潤滑方法が必要である。そこで本研究では、移動子、固定子の電極フィルムを金属製のベース台に接着剤で貼り付け、真空対応のクロスローラガイドで移動子をガイドし、ギャップを保持する構造とした。このときギャップを狭く保つために、電極フィルムを装置に貼り付ける際に接着剤として粘性の高い接着剤を用い、電極表面の平面度を高くすることに留意した。

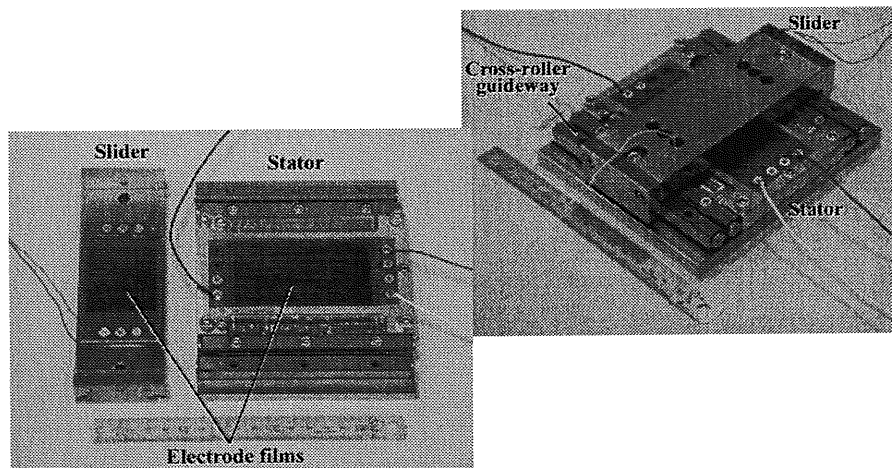


Fig. 3 Electrostatic motor for vacuum environment

製作した装置写真を図 3 に示す。図中左上に示したものが固定子、移動子の電極表面であり、図中右下が組立後である。電極ピッチ 200 μm のフィルムを用い、真空用にフッ素高分子コーティングを施したクロスローラガイドを取り付けた。駆動に寄与する有効電極面積は 16 cm^2 、移動子全体の重量は 1.08kg である。なお、本論文における真空中での実験は真空度 $3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 以下の高真空で行った。本モータは真空環境においても大気環境と同様なオープンループ特性を持つことが確認でき、単位面積あたりの発生推力で最大 2.82 kN/m^2 (印加電圧 3.4kV) を実現できた。また、真空環境で問題となるモータの発熱について評価するためにモータを 15 時間にわたり連続駆動したところ、モータ表面の温度に変化は見られなかった。

製作した装置写真を図 3 に示す。図中左上に示したものが固定子、移動子の電極表面であり、図中右下が組立後である。電極ピッチ 200 μm のフィルムを用い、真空用にフッ素高分子コーティングを施したクロスローラガイドを取り付けた。駆動に寄与する有効電極面積は 16 cm^2 、移動子全体の重量は 1.08kg である。なお、本論文における真空中での実験は真空度 $3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 以下の高真空で行った。本モータは真空環境においても大気環境と同様なオープンループ特性を持つことが確認でき、単位面積あたりの発生推力で最大 2.82 kN/m^2 (印加電圧 3.4kV) を実現できた。また、真空環境で問題となるモータの発熱について評価するためにモータを 15 時間にわたり連続駆動したところ、モータ表面の温度に変化は見られなかった。

4. 駆動電極兼用位置センサを利用した制御

メカトロニクス機器に交流駆動両電極形静電モータをサーボモータとして応用するためには、その制御のために移動子位置を検出するセンサが必須である。従来の研究では、交流駆動両電極形静電モータ用に、移動子・固定子のフィルム上に駆動電極に加えセンサ用電極を内蔵したセンサを利用して移動子位置の検出を行っている。ここで、この位置センサ電極形状に着目すると、駆動電極とまったく同じ形状をしており、駆動電極を用いて移動子位置を検出できる可能性が考えられる。この駆動電極を兼用した位置センサにより限られたスペースをより効率よく用いることが可能になると考えられる。

本センサでは、図 4 に示すようにモータ電極に印加する駆動電圧に対して、トランスを介して低電圧の高周波数センサ信号を重畳することで、3 相電極それぞれからの出力の位相ずれを利用してモータ駆動と同時

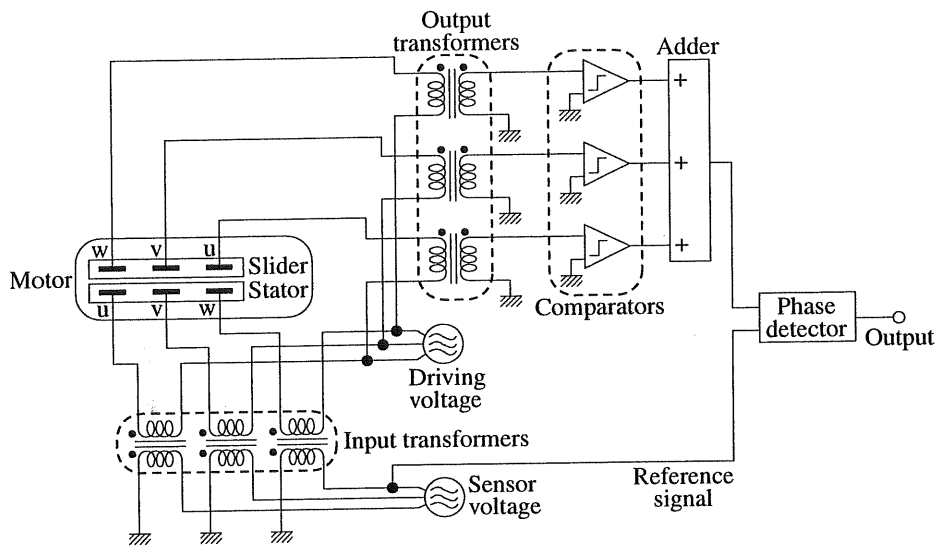


Fig. 4 Position sensor circuit using motor driving electrodes

に位置検出できる。移動子変位に伴い、センサ検出回路側のトランスで検出される3相の電圧位相はそれぞれに変化する。移動子位置が電極3ピッチ分変化するごとに移動子と固定子の位置関係は元にもどるため、検出信号の位相ずれも電極3ピッチごとに繰り返す。よって、この位相ずれから移動子位置を検出する。開発したセンサの出力をレーザ変位計と比較した結果を図5に示す。

さらに、本センサを真空環境用モータに適用して真空環境において位置決め制御を行い、制御特性を調査するとともにセンサの利用可能性を示した。PID制御を行ったときの10mmステップ応答を図6に示す。

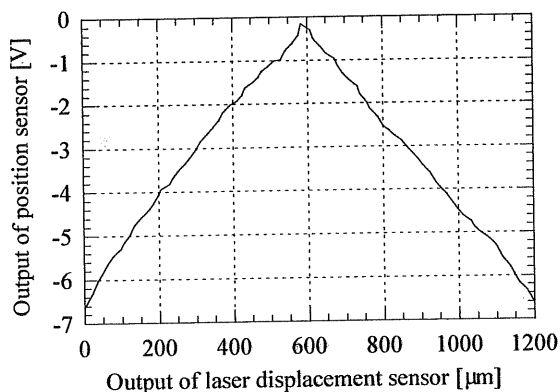


Fig. 5 Output of position sensor

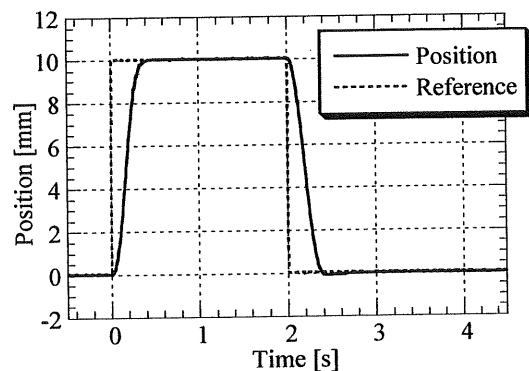


Fig. 6 Response to 10mm step input in vacuum environment

5. 静電浮上モータ

本研究においては、交流駆動両電極形モータの駆動用電極を浮上吸引力発生にも兼用する静電浮上モータを取り扱う。固定子・移動子間ギャップを検出するセンサとしてはモータ電極面に平面状電極を形成した静電容量式センサを用いることとし、その開発も行った。

静電浮上モータを実現するにあたっては、固定子・移動子間の浮上ギャップに対する推力と吸引力の関係明らかにしなくてはならない。そこで、固定子・移動子間ギャップの変動も含めて取り扱うことのできる静電浮上モータのモデルを提案し、静電浮上モータに関する理論的検討を行った。また、駆動電極を用いた移

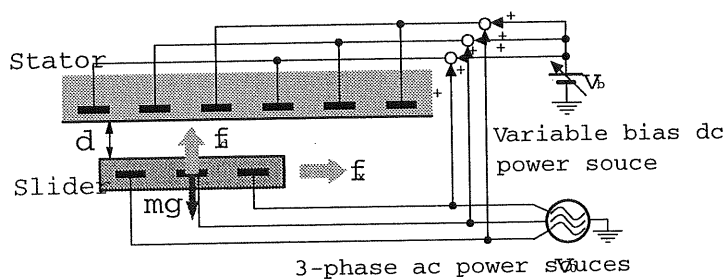


Fig. 7 Schematic view of electrostatic levitated motor with additional bias voltage

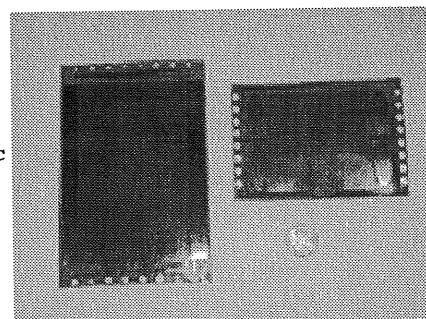


Fig. 8 Electrode films for electrostatic levitated motor

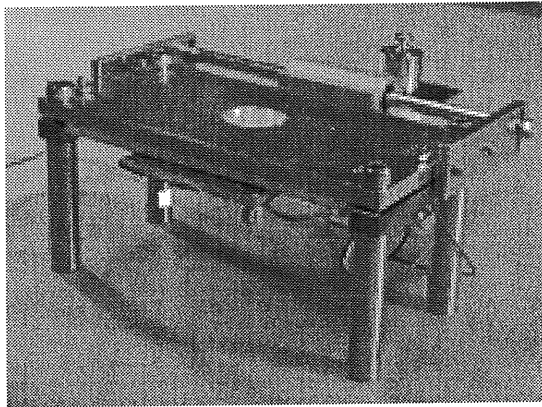


Fig.9 Electrostatic levitated motor with linear slide unit

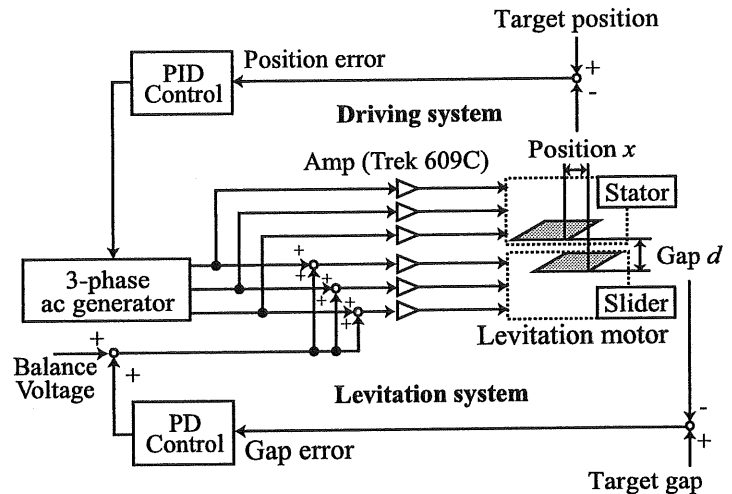
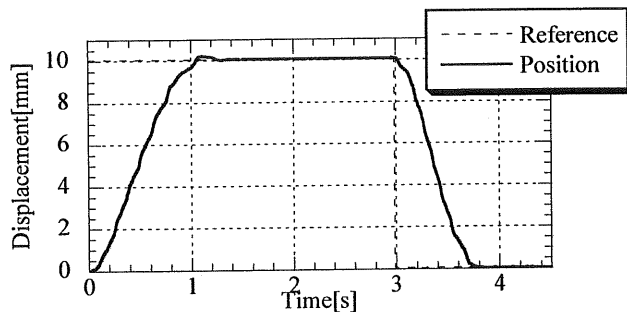
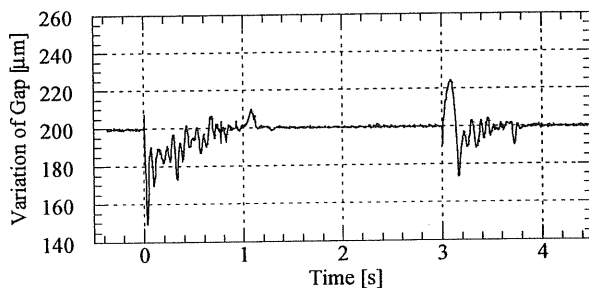


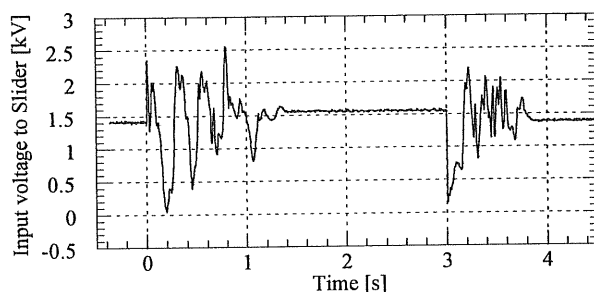
Fig. 10 Control system for electrostatic levitated motor



(a) Displacement of slider in x direction



(b) Gap variation during levitation and driving



(c) Voltage variation during levitation and driving

Fig. 11 Response to 10mm step input of electrostatic levitated motor

動子の浮上制御には図 7 に示す概略図のように通常の駆動電圧にバイアス電圧を付加することを提案する。静電浮上用のモータ電極として図 8 に示すような駆動方向位置センサ及びギャップセンサ電極を持つ電極ピッチ 500 μm 、有効電極面積 24 cm^2 の電極を製作した。この電極を用いて図 9 に示す支持機構付静電浮上モータを試作することにより実験的に原理の検証を行った。カウンタバランスの付加により端点における移動子の質量を 30g とした。

その結果、図 10 に示すブロック図のような制御系を用いて浮上と駆動を同時に行うことに成功した。移動子駆動方向位置に 10mm のステップ入力を与えたときの応答と、そのときのギャップ変動、印加電圧を図 11 に示す。駆動電圧を 1.4kV に制限した状態で速度約 20mm/s で変位し、最大 20 μm のギャップ変動を生じた。

6. まとめ

本研究では、静電モータが真空環境での利用に適していること、及び真空用非磁性モータへのニーズに注目し、真空環境用静電モータ、及び静電浮上モータの開発を行った。真空環境用静電モータは高流駆動両電極形静電モータを真空環境に導入したもので、クロスローラガイドで移動子を保持することにより実現した。また、静電浮上モータにバイアス電圧を導入することを提案し、交流駆動両電極形静電モータの固定子電極・移動子電極間に発生する吸引力を利用して移動子を浮上させる静電浮上モータを実現した。