高出力静電リニアモータを用いた高精度位置決め制御*

山本 晃生** 新野 俊樹*** 樋口 俊郎†

High Precision Positioning Control using High-Power Electrostatic Linear Drive

Akio YAMAMOTO, Toshiki NIINO and Toshiro HIGUCHI

Positioning control with a resolution of nm order is performed using high-power electrostatic linear drive. The authors have developed high-power electrostatic drive called DEMED (Dual Excitation Multiphase Electrostatic Drive). DEMED, especially its linear type, has performed superior dynamic performances such as a power per weight ratio of 230W/kg and a maximum acceleration of over 100G. In this paper, the first trial of servo control of linear-type DEMED is described. Firstly, the thrust force of DEMED is simply modelled for designing controller and one method of feedback control for single frequency driving method is proposed. Secondly, an electrode position sensor, which is necessary for feedback control, is proposed and fabricated. Finally, high precision positioning control is performed. For the experiments, a linear table which equips an optical linear encoder with a resolution of 6.25nm is fabricated. A linear and stacked type of DEMED is mounted on the linear table. By feeding two different feedback gains depending on the positioning error, positioning control within ± 1 pulse ($=6.25\text{nm}$) is achieved.

Key words : electrostatic motor, linear motor, servo motor, feedback control, positioning control, linear sensor

1. はじめに

近年、マイクロマシンの分野において、静電モータの研究が数多くなされている(1)~(3)。マイクロマシンとして静電モータが好まれる理由は、主として次の2点であると思われる。

- (1) 静電モータは平面的な構造で製作できるため、半導体製造プロセスを適用しやすく、製作が容易である。
- (2) 磁気モータがその寸法にかかわらず、ほぼ一定のエネルギー密度を有すると考えられるのに対し、静電モータにおいては、寸法の微細化によりエネルギー密度が高まる。

静電モータは、既に18世紀中にいくつかのモデルが考案され、その歴史は磁気モータより長い(4)。しかし、それら静電モータの性能は、後から登場した磁気モータと比べ大幅に弱く、マイクロマシンの分野で注目を集めるまで、静電モータは弱い力しか出せないものと考えられてきた。しかし、微細化により静電モータのエネルギー密度が高まるのであれば、微細モータ要素を多数集積し一つの大型モータとすることで、高出力の静電モータが実現可能であると考えられる。この考えに基づき、筆者らは数種の高出力静電モータを開発してきており(5)~(7)、中でも交流駆動両電極形リニアモータと呼ぶタイプにおいては、磁気モータに匹敵する230W/kgの出力密度や、100 Gを越える最大加速度を達成している(7)。このモータは、高い出力性能に加え、薄型化が容易である等の特徴を有しており、小型化・高性能化の進む各種メカトロニクス機器やロボットシステム等においての利用が期待される。

上記の各システムへの適用に際しては、高い制御性能が必要とされるが、交流駆動両電極形静電モータにおいては、いまだ制御の検討は十分に行われていない。通常、交流駆動両電極形静電モータはフィルムにより構成される。駆動中には、それらフィル

ムが擦れ合うため摩擦外乱が多く、制御性能の劣化を招くことも懸念される。そのため、制御性能の評価は極めて重要である。

交流駆動両電極形静電モータには、これまで、数種の駆動法が開発しているが(7)、本報では、1周波数法を用いた場合の位置決め制御に関して報告を行う。本報では、まず、モータの制御方法、制御系の構成法について述べる。さらに、フィードバック制御を行う上で不可欠な電極位置検出の方法について述べる。最後に、精密位置決め実験を行い、10nmオーダでの位置決めが可能であることを示す。

2. 交流駆動両電極形静電モータ

2.1 動作原理(1周波数法)(7)

図1に交流駆動両電極形静電モータ(Dual Excitation Multiphase Electrostatic Drive, 以下DEMEDと略記)の模式図を示す。本モータは、等ピッチの3相帯状電極を有する移動子、固定子から構成される。両3相電極に3相正弦波を互いに逆順に印加することで、移動子・固定子上に進行電位分布が生じ、両電位分布間に生ずる静電気力により移動子が駆動される(図2)。印加正弦波の周波数を f 、電極配置ピッチを p とすると同期駆動速度 u は、

$$u = 6pf \quad (1)$$

と表される。

静電気力の発生には、電極の面積が重要であり、厚みは重要で

Fig. 1 Dual Excitation Multiphase Electrostatic Drive (DEMED) operated using single frequency method

* 原稿受付 平成10年4月23日

** 学生会員 東京大学工学系研究科(東京都文京区本郷7-3-1)

*** 正会員 理化学研究所(和光市広沢2-1)

† 正会員 東京大学工学系研究科

はないため、出力密度の観点からは、移動子・固定子はできる限り薄型であることが望ましい。薄型化を実現する有力な方法は移動子・固定子をフィルム状部材で構成することである。既に、フレキシブルプリント基板フィルムを用いることにより、モータ単体で、230W/kgの出力密度、100Gを越える最大加速度、2.7m/sの最高速度等の性能を実現している⁷⁾。

図3に示すように、フィルムを用いて薄型に製作された移動子・固定子を積層することで、容易に高出力化ができる。過去の試作例では、電極対向面積1600cm²のフィルム状の移動子・固定子を50組積層し、300Nを越える推力を発生している⁶⁾。本報では、このような積層型を用いて実験を行う。

DEMEDは軽量なフィルムを構成要素とすることで、高い出力/重量比や加速性能を実現している。しかし、フィルムを利用した場合、移動子・固定子間のギャップ維持が困難なため、移動子・固定子は常に擦れ合いながら駆動される。よって、摩擦低減のため、通常、移動子・固定子フィルム間に直径20μm程度のガラスビーズを少量散布している。また、推力は印加電圧の2乗に比例して増大するが、大気中では高電圧の印加が困難で、高性能が得られないため、通常は絶縁液中に浸して駆動を行っている。

モータの制御においては、リップルの少ない滑らかな推力特性が重要である。本研究では、推力リップル低減のため、移動子電極として図4のようなスキューを施した電極を用いる。この電極形状により、推力リップルの7割以上が抑制される⁸⁾。

2.2 変調駆動法⁹⁾

上記の1周波数法によりモータを静止、もしくは低速駆動すると、ほぼ直流の電圧が各電極間に印加される。直流高電圧をモータの各電極間に印加し続けると、モータ構成部材の界面近傍に空間電荷が発生し、モータ内部の電界を乱すため、推力低下や動作の乱れが発生する。そこで、静止時および低速駆動時には、図5に示す変調駆動法を用いる⁹⁾。これは、1周波数法の3相の印加電圧

Fig. 2 Operation principle of DEMED in single frequency method

Fig. 3 Output enlargement by stacking films

Fig. 4 Skewing of driving electrodes

By skewing slider's electrodes as in this figure, force ripple of DEMED is reduced by 75%.

を、比較的高い周波数の搬送波で変調するものである。変調駆動法では、静止時においても搬送波周波数の周期でDEMED内部の電界が交番するため、空間電荷の発生を抑制できる。変調駆動法は低速時以外にも利用可能であるが、後に示すように推力が通常と比べ半減するため、本報では、通常の駆動法と切り替えることで、低速時にのみ用いる。

Fig. 5 Modulated driving method

3. 制御方法

3.1 推力

DEMEDの推力は、モータの各電極間の静電容量と印加電圧から決定される。移動子・固定子の6相の電極に対し、図6のように1～6の番号を振り、各相への印加電圧を v 、容量係数行列を C 、移動子・固定子電極の相対変位を x_e とすると、推力 f_x は、

$$f_x = \frac{1}{2} v^t \frac{\partial C}{\partial x_e} v \quad (2)$$

と表される。容量係数行列 C は、各電極の対称性を考慮し、さらに1次のフーリエ変換で近似すると、次のように表される。

$$C = \begin{bmatrix} -2C_n - 3C_0 & C_n & C_n \\ C_n & -2C_n - 3C_0 & C_n \\ C_n & C_n & -2C_n - 3C_0 \\ C_m(0) & C_m(-\frac{2\pi}{3}) & C_m(+\frac{2\pi}{3}) \\ C_m(+\frac{2\pi}{3}) & C_m(0) & C_m(-\frac{2\pi}{3}) \\ C_m(-\frac{2\pi}{3}) & C_m(+\frac{2\pi}{3}) & C_m(0) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C_m(\phi) = C_0 + C_a \cos(\frac{2\pi}{3}x_e + \phi) \quad (4)$$

但し、 C_s , C_n , C_0 , C_a は定数である。

1周波数法の場合、印加電圧ベクトル v は、次式で表される。

$$v = [v_0 \sin(\phi), v_0 \sin(\phi - \frac{2\pi}{3}), v_0 \sin(\phi + \frac{2\pi}{3}), v_0 \sin(\phi), v_0 \sin(\phi + \frac{2\pi}{3}), v_0 \sin(\phi - \frac{2\pi}{3})]^t \quad (5)$$

このとき、推力 f_x は、

$$f_x = \frac{3\pi}{2p} C_a v_0^2 \sin(\frac{2\pi}{3}x_e - 2\phi) = \kappa_f v_0^2 \sin(\frac{2\pi}{3}x_e - 2\phi) \quad (6)$$

となる。定数 κ_f によりモータの推力性能を表す。一方、変調駆動法においては、モータの印加電圧ベクトルを v_m とすると、通常時

Fig. 6 Simple analyzed model of DEMED

の印加電圧ベクトル $\mathbf{v}$ をもとに、

$$\mathbf{v}_m = \cos(\omega_c t) \cdot \mathbf{v} \quad (7)$$

となる。但し、 ω_c は搬送波の角周波数である。変調駆動時の推力を f_{xm} とすれば、

$$f_{xm} = \cos^2(\omega_c t) f_x \quad (8)$$

となる。すなわち、推力は $2\omega_c$ の角周波数で増減を繰り返すことになるが、仮に ω_c が十分に高く、その周波数における推力変動を無視できるものとすれば、平均的に f_{xm} は次式のように表される。

$$\bar{f}_{xm} = \frac{1}{2} f_x \quad (9)$$

すなわち、変調駆動法における推力は、その値が半分となる以外は通常時と同等である。

3.2 制御原理—印加電圧の決定法—

単に推力のみに注目して制御を行うものとする。正負の最大推力を得るためには、式(6)より、

$$\varphi = \frac{\pi}{3p} x_e + \frac{\pi}{4} \quad (10)$$

となるように、電極位置 x_e をもとに印加電圧の位相を制御すれば良いことがわかる。そのように位相が制御された場合、推力 f_x は、

$$f_x = \pm \kappa_f v_0^2 \quad (11)$$

となり、単に電圧振幅 v_0 の2乗に比例する。すなわち、推力指令 f_x^* が与えられた場合、その符号に応じて、式(10)のように印加電圧の位相を決定し、

$$v_0 = \sqrt{\left| \frac{f_x^*}{\kappa_f} \right|} \quad (12)$$

として、電圧振幅を決定すればよい。

4. 電極位置センサ

4.1 動作原理

上述のように、DEMEDの制御には、移動子・固定子の電極相対位置の検出が重要である。本報では、モータ内部に容易に内蔵可能な電極位置センサを試作する。

図7に電極位置センサの構成を示す。本センサは、駆動用電極と同一構造の電極を用いて動作する。

$$\mathbf{v}_s = [v_a \sin(\omega_s t), v_a \sin(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}), v_a \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}), 0, 0, 0]^T \quad (13)$$

式(13)のように、固定子側3相電極に3相正弦波を印加し、移動子側の3相をGNDに接続すると、各相の電極には、次式で表される電流が流れる。

$$\mathbf{I} = \frac{\partial \mathbf{C} \cdot \mathbf{v}_s}{\partial t} = [I_s(0), I_s(\frac{2\pi}{3}), I_s(-\frac{2\pi}{3}), I_m(0), I_m(\frac{2\pi}{3}), I_m(-\frac{2\pi}{3})]^T \quad (14)$$

$$\text{但し, } I_s(\phi) = -3(C_0 + C_n)\omega_s v_a \cos(\omega_s t + \phi)$$

$$I_m(\phi) = \frac{3}{2} v_a C_a (\omega_s + \frac{2\pi}{3p} \frac{dx_e}{dt}) \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3p} x_e + \phi)$$

よって、移動子側にて電流を測定し、印加電圧との位相差を検出することで、電極相対位置の検出が可能である。

Fig. 7 Electrode position sensor
The electrodes of this sensor have the same structure as those of DEMED.

4.2 特性

図8は、後述する実験装置において、テーブルに取り付けた光学式リニアエンコーダの出力と電極位置センサの出力を比較したものである。センサ出力には $\pm 10\mu\text{m}$ 程度の直線性誤差がみられるが、式(10)に基づき制御された場合、この誤差が電圧位相に与える影響は $\pm 3^\circ$ であり、これによる推力の誤差は0.15%以下である。

本センサは、進行方向により出力に $1\mu\text{m}$ 程度の偏差がみられ、往復に際して、両センサの出力は必ずしも一致しない。これは、フィルムの低剛性のために、フィルム内部の電極とテーブルとの位置関係が一定に保たれないためと思われる。そのため、この誤差は力の加わり具合に応じて変化する可能性があり、直線性誤差と異なり補正が困難である。仮に、本センサを位置決め用センサとしても用いる場合は、この点に十分注意する必要がある。但し、フィルムの積層を行わず、駆動対象物にフィルムを張り付けた場合や、直接電極を加工した場合は、この限りではない。

4.3 センサの設置法

本報では、図9のように、積層された電極フィルムの中の1組を他のフィルムと電気的に絶縁し、センサ用電極として用いている。センサの設置法としては、これ以外に、駆動信号にセンサ信号をトランス等を介して重畳し、駆動電極そのものを用いてセンシングするという方法も考えられる。設置スペースの点や、駆動電極の位置を直接検出している点を考慮すると、こちらの方法がより理想的である。しかし、この手法によりセンサを設置したところ、駆動信号の印加に応じてセンサ出力が変動し、正確な位置検出が行えなかった。原因は、駆動電圧が1kV前後と高いため、駆動電圧の印加によりフィルムを構成する高分子誘電体内の分極が進み、電極間の静電容量がわずかに変動するためと思われる。この構成を実現するためには、誘電緩和の少ないフィルム材料を用いる必要がある。

Fig. 8 Output of electrode position sensor

Fig. 9 Setup of electrode position sensor

5. 位置決め制御

5.1 システム構成

図10に実験に用いたモータの電極フィルムを示す。電極ピッチは200 μm 、移動子・固定子の電極対向面積は1組あたり16 cm^2 、ストロークは4 cm である。フィルム質量は移動子1.2 g 、固定子2.2 g である。移動子側には図4に示した電極スキューが施されている。

図11は、位置決め用のリニアテーブルである。2組のボールリニアガイドにより案内され、分解能6.25nmの光学式リニアエンコーダ(ミットヨ製LHS20+PSU12)が取り付けられてある。可動部重量はリニアスケールを含めて約600gである。このテーブルに図10の電極フィルムを、8組積層して組み込んだ。その内、下から4組目のフィルムはセンサ用として用い、駆動信号のセンサへの干渉を防ぐため、下から4層目と5層目の固定子フィルムは、裏面に銅箔を施し、電界を遮蔽した。各フィルム間には直径20 μ mのガラスビーズを少量散布し、テーブル内部は絶縁液(住友3M製Fluorinert FC-77)で満たした。実験に用いたモータの定数 k_f は6.6x10⁻⁶ N/V²である。

テーブルに付けたリニアエンコーダは、最高応答速度が25mm/sと低いため、1mm以下の微動に対してはリニアエンコーダを、それ以外の粗動には、電極位置センサを位置センサとして用いた。

駆動用電源装置は、NF回路ブロック製の高電圧増幅器(AS-123改)を用いた。制御系および印加電圧信号発生には、DSP(TI製TMS320C30)を用いた。サンプリング周期は20kHzである。

5.2 制御系概要

図12に制御ブロック図を示す。速度制御ループは通常のPI制御系であるが、位置制御ループには、微動時の摩擦の影響を排除するため、位置偏差により2種の異なるゲインを与えた。ゲインの切り替え点は $\pm 100\text{nm}$ であり、微動用のゲインは 30015s^{-1} 、粗動時は $200\mu\text{m}$ のオフセットを与え、 15s^{-1} のゲインをかけている。速度

Fig. 10 DEMED films fabricated using FPC technique

Fig. 11 Linear sliding table and DEMED

制御ループの比例ゲインは 330s^{-1} 、積分時間は 30ms である（いずれも通常駆動時の値）。波形発生器では、制御器からの推力指令値および電極位置センサの出力をもとに、先の制御原理に基づき電圧指令値を発生し、出力 1000 倍の高電圧増幅器へと出力する。但し、駆動用電極の絶縁保護のため、波形発生器において電圧振幅 v_0 の上限を 1.5V （増幅後に 1.5kV ）に制限した。

低速時および静止時には、変調駆動法で駆動する必要があるため、速度に応じて変調駆動法と通常の駆動法との切り替えを行っている。切り替え速度は1mm/sとした。切り替え時の出力電圧の連続性を考慮して、変調駆動法の搬送波の振幅は1とし、制御系は通常駆動時と共通のものをを用いた。そのため、推力の半減に伴い、変調駆動時の速度制御ループのゲインは通常駆動時の半分となる。同様に、出力電圧が連続となるよう、変調駆動法から通常駆動法への切り替えは、搬送波の値が1となる瞬間のみに行った。

図13は、実験用モータをテーブルに組み込んだ状態で、モータに正弦波状の推力指令値を与え、推力-変位の伝達を調べたものである。モータへの印加電圧は振幅1kV（推力6.6N相当）に固定した。変調駆動法を用いる際には、図13に従い推力変動がテーブル変位に反映されるため、許容される振動を考慮した上で、搬送波周波数を十分に高い値に設定する必要がある。本実験では、高電圧増幅器のゲイン低下の無視できる範囲および、出力電流の限界を考慮した上で、搬送波周波数を500Hzに設定した。

5.3 制御結果

図 14 は、10nm のステップ入力に対する応答である。エンコーダ出力の ± 1 パルス (=6.25nm) の範囲で位置決めが達成されている。図 15 は、50nm の微小ステップ駆動を試みた結果である。微小なステップに対しても ± 1 pulse (=6.25nm) の精度で追従しており、本システムが 10nm オーダの位置決め分解能を有していることがわかる。

これらの応答において、テーブルの動作には、微細な振動が含まれている。これは、変調駆動によるものであり、搬送波周波数により応答の様子は異なる。図16は、搬送波周波数50Hz、250Hzおよび通常駆動（周波数0）の3種類の場合の、50nmのステップ応答である。通常駆動の場合にはほとんど振動は見られず、他の場合には、搬送波の周波数が低いほど、大きな振動が観測されて

Fig. 12 Control block diagram

Fig. 13 Frequency response of linear table with DEMED
This plot was measured with an amplitude of 1kV for
applied voltage of DEMED

いる。

通常駆動を用いた場合の、空間電荷発生程度の、印加電圧の大きさおよび継続印加時間により異なる。そのため、無負荷で、かつ微動および静止時間が数分以内であれば、動作に異常をきたすことなく通常駆動のまま位置決めが可能である。しかし、負荷が加わっている場合は、静止状態でも大きな電圧が印加されるため、負荷の程度にもよるが、概して数秒以内で動作不能となる。一方、変調駆動を組み合わせた場合には、負荷のある状態でも安定した駆動が可能である。

図17は、200gのおもりをテーブルからプーリを介してつり下げた場合の応答である。負荷は移動方向と反対方向に加わっている。無負荷時とはほぼ同様な応答を示しているが、印加電圧が無負荷時

Fig. 17 Response to 10mm step input under a load of 200gf

よりも大きくなるため、より大きな振動が発生し、一定位置には収束しない。負荷状態においても、無負荷時と同様の位置決め精度を得るためには、より高い搬送波周波数を用いる必要があるだろう。

6. 結 論

交流駆動両電極形静電モータの制御手法およびシステム構成の一例を示し、実験を通し、静電モータの制御性能の一端を明らかにした。本報での主な成果を以下に示す。

- ・ DEMED の推力モデルを求め、制御法の提案を行った
- ・ DEMED への内蔵が容易な電極位置センサを示した。
- ・ DEMED がサーボモータとしての基本性能を備えていることを明らかにした。
- ・ 位置制御器に位置偏差に応じて2種類のゲインを与えるシンプルな制御により、nm オーダでの位置決めを実現した。
- ・ 変調駆動時における搬送波周波数の位置決め性能への影響について議論した。

本報においては、変調駆動により生ずる振動の点で問題を残しているが、DEMEDには2周波数法と呼ぶ変調駆動を必要としない駆動法も存在する。2周波数法には今回とは異なる制御手法が要求されるため、この点についての検討も進めていきたい。

参 考 文 献

- 1) L. S. Fan, Y. C. Tai and R. S. Muller : IC-processed Electrostatic Micro-motor, Proc. IEEE Int. Electron Devices Meeting, (1988) 666.
- 2) M. A. Grétilat, P. Thiébaud, N. F. de Rooij and C. Linder : Electrostatic Polysilicon Microrelays Integrated with MOSFETs, Proc. 1994 IEEE Workshop on Micro Electrostatic Electro Mechanical Systems, (1994) 97.
- 3) R. Zengerle, S. Kluge, M. Richter and A. Richter : A Bidirectional Silicon Micropump, Proc. 1995 IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, (1995) 19.
- 4) 静電気学会編：静電気ハンドブック、オーム社、(1981).
- 5) S. Egawa, T. Niino and T. Higuchi : Film Actuators : Planar Electrostatic Surface-Drive Actuators, Proc. 1991 Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, (1991) 9.
- 6) T. Niino, S. Egawa, H. Kimura and T. Higuchi : Electrostatic Artificial Muscle : Compact, High-Power Linear Actuators with Multiple-Layer Structures, Proc. 1994 IEEE Workshop on Micro Electrostatic Mechanical Systems, (1994) 130.
- 7) 新野俊樹, 樋口俊郎, 柄川 素：交流駆動両電極型静電モータ, 日本ロボット学会誌, 15, 1 (1997) 97.
- 8) 山本晃生, 新野俊樹, 坂 高寿, 樋口俊郎：スキュー電極を用いた高出力静電モータ, 電気学会論文誌D, 117, 9 (1997) 1139.
- 9) 新野俊樹, 山本晃生, 樋口俊郎：交流駆動両電極型静電モータの変調駆動, 平成9年電気学会全国大会講演論文集, 5 (1997) 158.

Fig. 14 Response to 10mm step input
Carrier frequency of modulated drive is 500Hz.

Fig. 15 Response to 50nm step input
Carrier frequency of modulated drive is 500Hz.

Fig. 16 Response to 50nm step input with different carrier frequencies

Vertical : position (10nm/div), horizontal : time (0.5s/div)