

積層用両面駆動型静電フィルムアクチュエータを用いた 薄型直動テーブルと小型駆動装置の開発

西嶋 隆 山本 晃生* 樋口 俊郎* 稲葉 昭夫

A Thin Linear Motor Table using Both Sides Drive Type Electrostatic Film Actuator and Downsized Driving Unit

Takashi NISHIJIMA Akio YAMAMOTO* Toshiro HIGUCHI* Akio INABA

あらまし 積層用両面駆動型静電フィルムアクチュエータを用いた薄型直動テーブルとその小型駆動装置を開発した。直動テーブルの筐体はアクリル樹脂を用い、サイズは180mm×55mm×10mm、重さ約100gである。直動テーブルに用いた両面駆動型の静電フィルムアクチュエータは、フィルム積層時に効率的に推力を得ることが可能であり、従来の静電フィルムアクチュエータと比べておよそ2倍の推力を発生した。小型駆動装置は静電フィルムアクチュエータの汎用性を高めるため、バッテリー駆動が可能な変調駆動法を用いて試作し、電源に±14.4Vのバッテリーを用いたとき約2500V_{pp}の変調駆動電圧を出力した。駆動装置全体の寸法は180mm×130mm×70mmである。小型駆動装置の設計では、トランス静電アクチュエータ負荷によるインピーダンス特性から、変調に用いる最適な搬送波周波数を決定した。試作した小型駆動装置を用いて直動テーブルの推力測定を行ったところ、最適な搬送波周波数を印加することで大きな推力が得られ、最大約5.9Nの推力を発生した。

キーワード 静電フィルムアクチュエータ, 積層用両面駆動型, 小型駆動装置

1. はじめに

筆者らは、軽量、高出力^[1]、柔軟^[2]な静電フィルムアクチュエータの開発を行っている。このアクチュエータをより使い易くするためには、直動テーブルなどの駆動部やそれらの駆動電源装置、位置センサ類をコンパクトにモジュール化することが重要であると考えられる。

今回、静電フィルムアクチュエータの駆動部のモジュールとして軽量・薄型の直動テーブルを試作した。直動テーブルには両面駆動型の静電フィルムアクチュエータを用いており、従来の片面駆動型の静電フィルムアクチュエータと比べて、フィルム積層時に効率的に推力を増加させることが可能である。駆動装置のモジュールとしては、変調駆動法を用いた小型駆動装置を開発した。本駆動装置はバッテリー駆動で小型であるため、アクチュエータを移動ロボット等に搭載する場合などに有効であると考えられる。

本報告では2章に静電フィルムアクチュエータについて、3章に両面駆動型静電フィルムアクチュエータとそれを用いた直動テーブルについて、4章に変調駆動型の小型駆動装置について、5章に小型駆動装置を用いた直動テ

ブルの駆動実験について述べ、6章にまとめる。

2. 静電フィルムアクチュエータ

静電フィルムアクチュエータの移動子・固定子フィルムは薄型のFPC(Flexible Printed Circuit)フィルムで構成されており、フィルム内部には3相結線された帯状電極が埋め込まれている。図1に示すように、基本的な静電フィルムアクチュエータは、一對の移動子・固定子フィルムで構成する。駆動原理は図2に示すように、移動子・固定子の帯状電極にそれぞれ逆順に3相電圧を印加し、それぞれのフィルム上に互いに逆方向に進行する電位分布を励起させる。互いの電位分布にはそれらの空間的な位相差に応じた静電気力が発生し、移動子は固定子の表面上を電極の長さ方向と垂直な方向に駆動する。図2による駆動方法は固定子・移動子共に同一の駆動電圧を印加する方法であり1周波数法とよぶ。この場合、移動子速度 u は以下

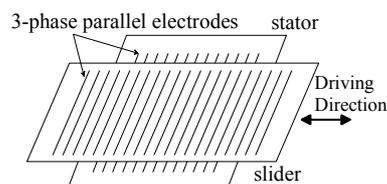


図1 静電フィルムアクチュエータの基本構成

* 東京大学大学院工学系研究科

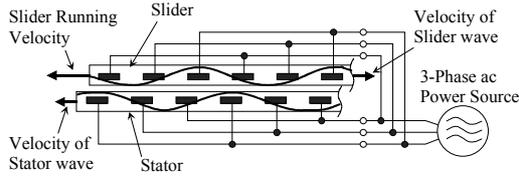


図2 駆動原理

のように表される.

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

ここに p は電極ピッチ, f は駆動電圧の周波数である. フィルム間には, 摩擦の低減を図るため直径 $20\mu\text{m}$ のガラスビーズを散布し, また, 空気の絶縁破壊を防ぐために絶縁液 (シリコンオイルまたはフロリナート, FC-77, 3M製) に浸してある.

3. 両面駆動型静電フィルムアクチュエータ

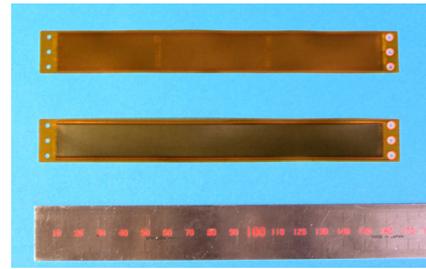
静電フィルムアクチュエータの推力は, 固定子・移動子電極の接触面積 (有効電極面積) に比例して増加するため, 移動子・固定子フィルムを積層することによって, 容易に推力を増大することが可能である^[3]. 従来は一对の移動子・固定子フィルムで1面の駆動面を得ているため, 移動子・固定子フィルムそれぞれ n 枚用いて, n 面の駆動面を得ることになる. 一方, 両面駆動型は同じ条件で駆動面は $2n-1$ 面得ることが可能となり, 推力の増加が可能となると考えられ, 今回, 設計・試作を行う.

3. 1 フィルム設計

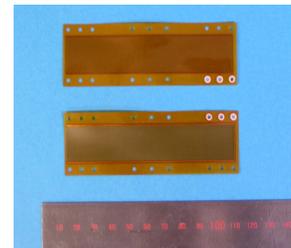
図3に今回開発した両面駆動型静電フィルムアクチュエータの固定子フィルムと移動子フィルムの写真を示す. 固定子・移動子とも電極幅 $60\mu\text{m}$ の3相の帯状電極が $160\mu\text{m}$ ピッチで埋め込まれている. サイズは移動子, 固定子それぞれ $20\text{mm} \times 160\text{mm}$, $32\text{mm} \times 100\text{mm}$, 1駆動面あたりの有効電極面積は $96\text{mm} \times 14\text{mm}$, 厚さは約 $100\mu\text{m}$ (スルーホールが無い部分) である.

FPCフィルムの帯状電極を3本毎に結線するには, 必ず配線の立体交差が必要であるため, FPCフィルムは厚さ方向に2層の電極基板を用いている. 図4に3相結線の模式図を示す. 駆動に関与する電極部分はすべて表面に配置されているが, それら電極に電圧を導く集合線は, 2相分が表面, 残る1相はスルーホールを設けて裏面電極に設けている. 図5はフィルムの厚さ方向の模式図を示す. 図5(a), 図5(b)はそれぞれ, 従来の片面駆動型と今回開発した両面駆動型の断面図を示す. 表面電極はベースフィルム (ポリイミド) にエポキシ系の接着剤を用いて圧延接着されており, その上から表面カバーフィルム (ポリイミド) をエポキシ系の接着剤で接着し, 外部と絶縁している. 裏面電極の集合線はスルーホールを介して結線し, 裏面電極にも裏面カバーフィルムが接着剤で貼られている.

静電フィルムアクチュエータが推力を発生するためには, 電極ピッチに対する, 固定子電極と移動子電極まで



固定子 表面 (上), 裏面 (下)



移動子 表面 (上), 裏面 (下)

図3 試作した固定子・移動子フィルムの写真

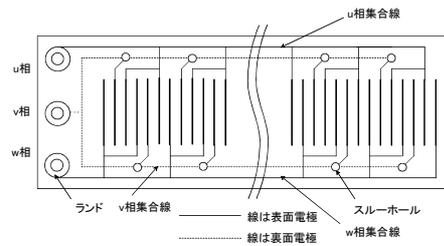


図4 3相結線方法

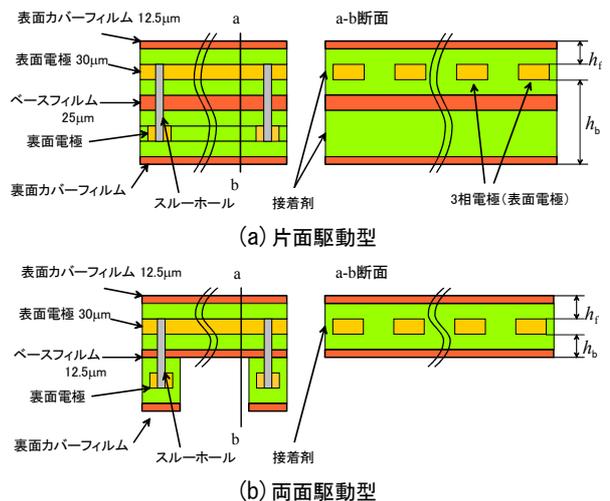


図5 フィルムの断面模式図

の最適な距離が解析されており^[4], 従来型のフィルムにおいて, 移動子フィルムと固定子フィルムを重ねる場合, それぞれの表面同士を対向させた状態ではフィルム間に推力が発生し, 裏面を用いた場合は推力が発生しない. これは図5(a)からわかるように, 従来のフィルムでは裏

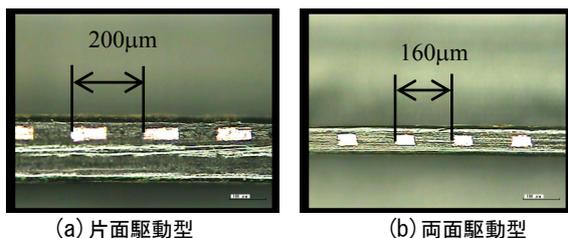


図6 フィルム断面写真

面と表面では3相電極の表面からフィルム裏面または表面までの距離 (h_b と h_p) が異なっているためである。

今回試作した両面駆動型のフィルムは、図5(b)に示すように、ベースフィルムを従来の半分の $12.5\mu\text{m}$ とし、裏面のカバーフィルムは集合線のみを部分的にカバーする構造にする。したがって、スルーホールが無い電極部分では、 h_f と h_b はほぼ同じ距離になる。そのため、裏面と表面を対向させても、裏面同士を対向させても推力が発生する。図6に片面駆動型と両面駆動型のフィルムの断面写真(a-b断面)を示す。

3. 2 推力測定

試作した両面駆動型静電フィルムアクチュエータの推力を測定した。図7に推力測定を行った実験装置の模式図を示す。固定子フィルムは、その一端を力センサLTS-2KA（共和電業株式会社）に取り付ける。移動子フィルムはリニアガイド上に固定し、リニアガイドの摺動面はばねを介して定盤に固定する。アクチュエータの推力は移動子を一定速度で駆動し、推力がばねの復元力に降伏したときに検出される力センサの出力とした。移動子の移動速度は 10mm/s （駆動電圧の周波数 $f=10.42\text{Hz}$ ）、駆動電圧は $600\sim 1600V_{0-p}$ とした。

3.1節で述べたように、フィルムの表面は全面にカバーフィルムが貼られているため平坦であるが、裏面は集合線の上に部分的にカバーフィルムが貼られているため、表面と違い凹凸のある断面をしている。したがって、アクチュエータの駆動面は、表面-表面、表面-裏面、裏面-裏面の3通りを区別する必要がある。実験では1対の移動子・固定子を用い、駆動面を表面-表面、表面-裏面、裏面-裏面の3通りにした状態で推力を測定した。結果を図8に示す。

図8に示すように、表面-表面で構成する駆動面が最も大きな推力を発生し、裏面-裏面の組み合わせが最も小さいことがわかる。表面-表面で構成する駆動面の単位面積あたりの推力は駆動電圧が $1600V_{0-p}$ 時に約

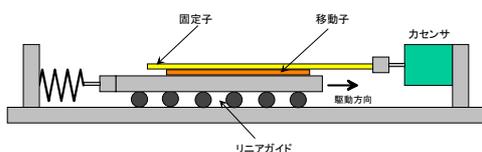


図7 実験装置の概略図

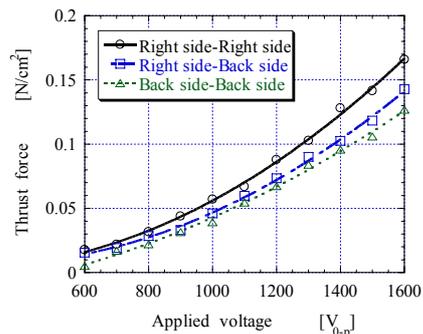


図8 単層時における駆動電圧と推力の関係

$0.17\text{[N/cm}^2\text{]}$ であった。裏面を用いた場合に推力が減少するのは、裏面には集合線のカバーフィルムによる凹凸があり、その部分でフィルム間に若干の隙間が出来るためであると考えられる。

3. 3 両面駆動型静電フィルムアクチュエータを用いた直動テーブル

両面駆動型静電フィルムアクチュエータを用いた直動テーブルを試作した。直動テーブルの写真を図9に示す。ステージのサイズは $180\text{mm}\times 55\text{mm}\times 10\text{mm}$ 、重量は約 100g である。ステージの最大ストロークは 50mm である。筐体はアクリル樹脂を削り出して製作し、リニアガイドには小型リニアガイドLWL3（日本トムソン株式会社）を用いた。固定子フィルムは7枚、移動子フィルムは8枚であり、駆動面は全部で14面となる。そのうち表面-表面による駆動面が7面、裏面-裏面による駆動面が7面となるように積層した。固定子フィルムはステージに固定し、移動子フィルムは小型リニアガイドを介して設置したスライダに固定した。

4. 変調駆動法を用いた小型駆動装置

静電フィルムアクチュエータを1周波数法で駆動する場合、式(1)に示したような関係があるため、アクチュエータを低速駆動するには低周波の高電圧3相交流が必要となる。そこで、高電圧を得るためにトランスを利用すると低周波数では磁気飽和が発生することが問題となる。この対策の一つにはトランスコアを大型にすることが考えられるが、装置の大型化が避けられない問題となる。また、静電フィルムアクチュエータは低速駆動時（低周波数時）に推力が低下するため、これらの対策として変

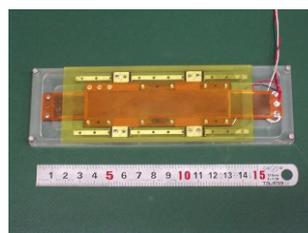


図9 直動テーブルの写真

調駆動法^[5]の提案がなされた。

変調駆動法とは3相の駆動電圧を高周波数の搬送波で乗算し、搬送波周波数帯域まで駆動電圧を変調した後、トランスで駆動電圧を昇圧しアクチュエータを駆動する方法である。本駆動装置は変調駆動法を用いて試作し、モジュール化を図った。

4. 1 変調駆動法の構成回路

回路構成図を図10に示す。駆動用3相電圧信号はワンチップマイコンH8/3664(HITACHI 製)を用い3相PWM波形を発生させ、その信号をLPF(カットオフ周波数483Hz 4次)に通して得る。駆動用3相電圧の周波数は、外部からの駆動速度制御信号により制御可能で0~約190Hzの範囲で可変である。乗算器はAD534(ANALOG DEVICES 製)を用い、搬送波の信号発生器にはICL8038(HARRIS SEMICONDUCTOR 製)を用いた。終段増幅器にはLM12CLK(National Semiconductor 製)を用いた。昇圧用トランスには、PC44PQ32/30コア(TDK 製)を用い1次側15ターン、2次側1500ターン、コアのエアギャップを0.5mmとした。試作した小型駆動装置を図11に示す。

アクチュエータの駆動周波数 ω_d は、搬送波周波数 ω_c を入力とする乗算器の変調によって $\omega_c \pm \omega_d$ へと搬送波周波数帯へ変換される。変調の様子を図12に示す。

4. 2 直動テーブルの静電フィルムアクチュエータとトランスによる負荷のインピーダンス特性

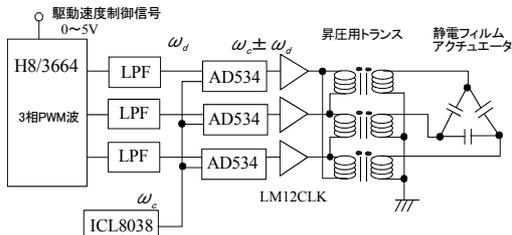


図10 回路構成図



図11 小型駆動装置とバッテリー

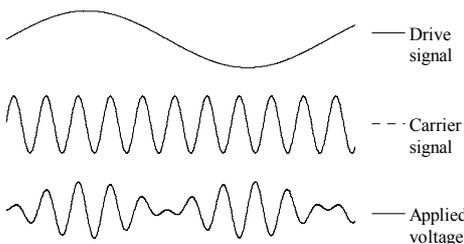


図12 乗算器による変調

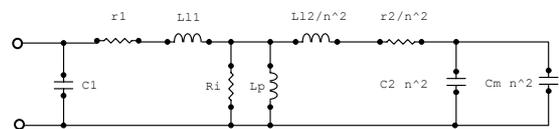
終段増幅器の負荷を考慮すると、駆動装置のトランス1次側からみたトランス-静電フィルムアクチュエータ負荷のインピーダンス特性の把握が必要である。トランス-静電フィルムアクチュエータ容量性負荷の等価回路を図13に示す。なお等価回路は2次側の各パラメータを1次側に換算し、トランス2次側の静電アクチュエータの容量性負荷も1次側に換算し理想トランスを取り除いたものである。同図の C_m は静電フィルムアクチュエータの容量性負荷である。

図13は低域では L_p に比べて L_{l1}, L_{l2} は非常に小さいため L_{l1}, L_{l2} は短絡と仮定する。低域から周波数を上げると、 $C_1, n^2 C_2, n^2 C_m$ の容量と L_p による並列共振となり終段増幅器側から見たインピーダンスのピークが現れる。

試作したトランスとアクチュエータのパラメータをインピーダンスアナライザ(HP4194A HP製)で測定したところ、 $C_1=481\text{nF}$ 、 $C_2=59.8\text{pF}$ 、 $L_p=60.7\mu\text{H}$ 、 $C_m=4.4\text{nF}$ であった。1次側からみた静電フィルムアクチュエータの容量性負荷 $n^2 C_m$ は $44\mu\text{F}$ 、2次巻き線浮遊容量 $n^2 C_2$ は 598nF となり、共振周波数 f_r はおよそ次式となる。

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p(C_1 + n^2 C_2 + n^2 C_m)}} \quad (2)$$

測定した各パラメータから f_r は約3.04kHzとなる。式(2)から、搬送波周波数を決定するパラメータとして L_p 、 C_1 及び $n^2 C_m$ 影響が大きいことがわかる。



- r_1 :1次巻き線抵抗
- r_2 :2次巻き線抵抗
- L_{l1} :1次巻き線漏れインダクタンス
- L_{l2} :2次巻き線漏れインダクタンス
- C_1 :1次巻き線浮遊容量
- C_2 :2次巻き線浮遊容量
- C_m :静電アクチュエータ容量
- L_p :1次巻き線インダクタンス
- R_i :鉄損
- n :巻き線比 (試作機では100)

図13 負荷の等価回路

搬送波周波数は制御するアクチュエータの容量性負荷に依存するため、様々な駆動モジュールに対して汎用的に本駆動装置を利用するためには各駆動モジュールに対して搬送波の周波数を最適にする必要がある。自動的に搬送波周波数を調整する機能の付加は今後の課題である。また、本駆動装置は、搬送波周波数が可聴域の周波数であるため、騒音を発生する点が問題である。この対策も今後の課題とする。

実際に3相トランスの入力側(終段増幅器側)を Δ 結線、出力側(アクチュエータ負荷側)をY結線し、負荷に直動テーブルを繋げた状態で1次側からのインピーダンス

を測定した。測定にはLCZメータZM2355(エヌエフ回路設計ブロック(株)製)を用いた。結果を図14に示す。結果からおよそ2.5kHzあたりが共振点となることが確認できる。終段増幅器の負荷を考慮すると搬送波の周波数を約2.5kHzに設定すると良いと考えられる。実際の回路インピーダンスより求められた共振周波数と回路モデルによる共振周波数との誤差は回路のモデル誤差によるものと考えられるが、オーダとしては近い値となる。

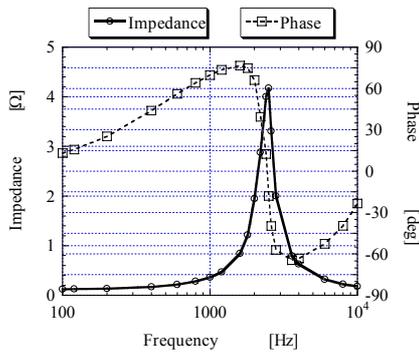


図14 トランス-静電フィルムアクチュエータのインピーダンス

5. 小型駆動装置による直動テーブルの駆動実験

5.1 直動テーブルを用いた回路負荷測定

試作した小型駆動装置のンプを用いて、4章で求めた搬送波周波数付近において直動テーブルを駆動した時のトランス1次電圧、1次電流、2次電圧、2次電流を測定した。測定にはデジタルオシロスコープTDS3034B(Tektronix製)、高電圧プローブP3000(Tektronix製)、電流プローブTCP202(Tektronix製)を用いた。測定時、1次電圧は無負荷時に30V_{p-p}になるように設定した。結果を図15(a)~(d)に示す。図15(a),(b)において2050Hz付近が共振点であると考えられ、1次電圧の振幅は最大となり1次電流は最小となる。1次電圧が周波数に対して一定とならない理由は、低域、高域では負荷のインピーダンスが小さくなり、終段増幅器が飽和するためである。2次電圧に関しても2kHz付近で最大となる。2次電流は低域で少なく、高域で大きくなりピークを過ぎると減少する。

図15によって推測される共振点は4章で測定した値と比較すると低域にシフトしているが、これはアクチュエータ駆動時にフィルム間の吸引力によってフィルム間の距離が狭まり容量が増加することや、LCZメータでの測定電圧レベルと実際の駆動時の電圧レベルが大きく異なるためであると考えられる。

5.2 直動テーブルの推力測定

搬送波周波数と直動テーブルの推力の関係を実験によって調べた。カセンサは3.2節と同様のものを用いた。終段増幅器の出力電圧は前節と同様に無負荷時に30V_{p-p}に設定した。結果を図16に示す。

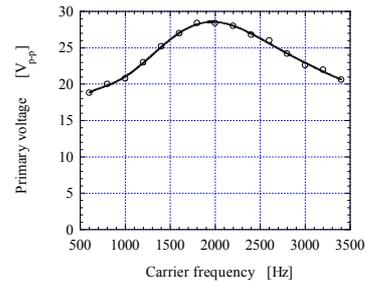


図15(a) トランス1次電圧

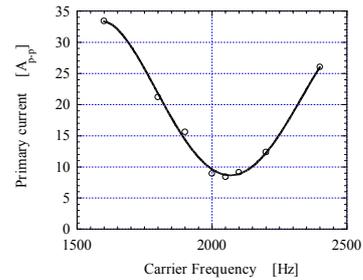


図15(b) トランス1次電流

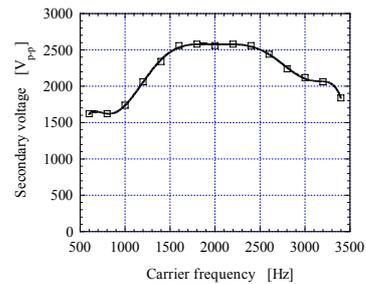


図15(c) トランス2次電圧

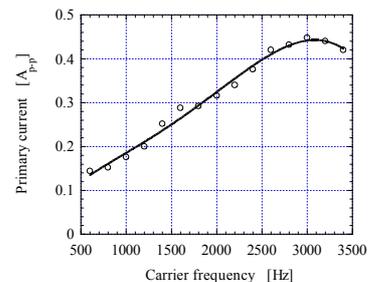


図15(d) トランス2次電流

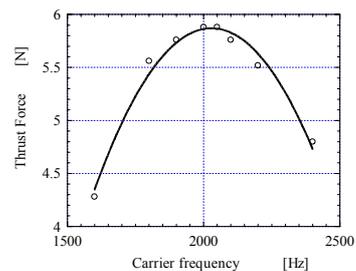


図16 搬送波周波数と直動テーブルの推力の関係

この結果から、推力が最大に達する時の搬送波周波数は、図15と照らし合わせると共振点での周波数であることが確認できる。このときアクチュエータの推力は最大で約5.9N(駆動面単位面積あたり0.063N/cm²)であった。ステージの最大速度は駆動装置の設計上約180mm/sであった。

6. まとめ

両面駆動型静電フィルムアクチュエータを設計・試作した。試作した静電フィルムアクチュエータは両面で駆動することを確認し、1600V_{0p}の駆動電圧を印加した場合、表面同士の駆動面では0.17N/cm²の推力を発生した。本アクチュエータ積層した場合、従来のアクチュエータと比べ約2倍の推力を得られた。

両面駆動型静電フィルムアクチュエータを用いた薄型直動テーブルと変調駆動法を用いた小型駆動装置を開発した。直動テーブルの静電フィルムアクチュエータと小型駆動装置の昇圧用トランスのインピーダンス特性を調べ、変調駆動法での最適な搬送波周波数の決定を行った。

試作した小型駆動装置を用いて直動テーブルの推力測定を行ったところ、最適な搬送波周波数を与えたときに変調駆動電圧1.28kV_{0p}を発生し、約5.9N(0.063N/cm²)の推力を発生した。今後は今回問題となった自動的に搬送波周波数を調整する機能、騒音の問題を検討したい。また、ロボット関節等に用いる静電フィルムアクチュエータによる回転型のクラッチモジュール、位置センサモジュールの開発や各モジュール間の統合に関する問題に取り組む予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、機械設備購入のために補助金を頂いた日本自転車振興会に深く感謝いたします。

文献

- [1] 新野俊樹, 樋口俊郎, 柄川索 “交流駆動両電極形静電モータ”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.1, pp97-102(1997).
- [2] 西嶋隆, 山本晃生, 樋口俊郎, 稲葉昭夫 “柔軟な構造を有する静電フィルムアクチュエータの開発—推力特性評価—”, 精密工学会誌, Vol.69, No.3, pp443-447(2003).
- [3] T.Niino, S.Egawa, H.Kimura and T.Higuchi, “Electrostatic Artificial Muscle: Compact, High-Power Linear Actuators with Multiple-Layer Structures” Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems 130-135(1994).
- [4] T.Niino, T.Higuchi and S.Egawa, “Dual Excitation Multiphase Electrostatic Drive” Conf. Record of 1995 IEEE IAS annual meeting 1318-1325(1995).
- [5] 新野俊樹, 山本晃生, 樋口俊郎 “交流駆動両電極形静電モータの変調駆動”, 電学論D, 118巻11号, pp.1287-1291(1998).