

柔軟構造を有する静電アクチュエータの開発

西嶋 隆 稲葉 昭夫 山本 晃生* 樋口 俊郎*

Development of a Flexible Electrostatic Actuator

Takashi NISHIJIMA Akio INABA Akio YAMAMOTO* Toshiro HIGUCHI*

あらまし 軽量高出力で柔軟な構造を有する静電フィルムアクチュエータを開発した。開発した静電アクチュエータは柔軟なポリイミドフィルムで構成されているため、軽量で柔軟である。本報告では移動子と固定子がそれぞれ1枚で構成される柔軟なアクチュエータを用いて、アクチュエータを曲げた場合における推力特性の理論式を導出し、実験によって推力特性を確認した。試作機では、アクチュエータを3rad以上曲げて駆動できることが可能で、6rad曲げた時に推力が0となる。さらに、移動子フィルムと固定子フィルムを積層し高出力化を図った。積層方法に関して3種類提案し、それぞれの方法において、アクチュエータの推力特性、柔軟性、出力の取り出し易さについて考察した。最後に、3相パルス波形駆動を用いた静電アクチュエータ駆動用の簡易ドライバを製作したので加えて報告する。

キーワード 静電気力、アクチュエータ、柔軟

1. はじめに

従来、ロボットは産業用として、工場内を中心に利用されてきたが、近年、玩具・ヒーリング用のペットロボットや、介護用パワーアシスト機器などに見られるように、民生用として一般家庭にも普及しつつある。それらは必然的に人と接触する状況で使用されることになる。このため、民生用ロボットは人を傷つけないために柔らかさが必要で、心理的な面でも柔らかいイメージが求められる。

現在の民生用ロボットに用いられるアクチュエータは電磁アクチュエータが多用されている。電磁アクチュエータは一般に磁石やコイル、減速機が必要であるため重量が大きい。また、ロボットの多くはシリアルリンクで構成されており、リンクの先の重量が大きいと必然的にリンク機構は高剛性で重いものとなる。そのため、減速機が不要でパワー密度の大きいアクチュエータはロボットのアクチュエータとして有効である。さらに、生物の筋肉のように柔軟で、人に優しいイメージを得るロボットを開発するには、軽量、柔軟、高出力かつ制御性の優れたアクチュエータの開発が望まれている。また、このような軽量で人に優しいという特徴は、人に接触して用いるデバイスとして、介護問題におけるパワーアシスト機器への応用も期待できる。このような要求には、制御性に優れ、電磁アクチュエータに匹敵するパワー密度が得られる高出力静電アクチュエータ^[1]が適していると言える。本研究では、この静電アクチュエータの素材の

もつ柔軟性に着目し、アクチュエータを曲げて使用した場合の推力特性について理論的解析と実験による評価を行う。また、高出力化を図るために積層型のアクチュエータを考察する。最後に、従来の静電アクチュエータ用のドライバは大型の高電圧アンプと任意波形発生器で構成され、重量が大きく、移動型のロボットには適していないため、それに替わる小型、軽量の静電アクチュエータ駆動用の簡易ドライバを製作したので報告する。

2. 単層の静電アクチュエータ

2.1 基本構成

本研究で製作した静電アクチュエータは、ポリイミドをベースにしたFPC (Flexible Printed Circuit) 基板に3相平行電極を埋め込んだものである。図1に移動子と固定子それぞれ1枚で構成する基本的な静電アクチュエータの模式図を示す。移動子は固定子の表面上を電極に対し、直角方向に駆動する。フィルム厚 t は150 μm 、電極幅 w は100 μm 、電極ピッチ p は200 μm 、重量は各約3.5gである。また、移動子と固定子の間には適切なギャップを維持す

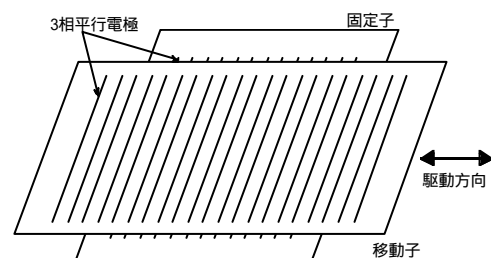


図1 基本的な静電アクチュエータの模式図

* 東京大学工学系研究科

るために、直径20 μm のガラスビーズが散布されている。また、フィルム間の空気の絶縁破壊を避けるため、不活性液体フッ素系FC-77(3M製)が満たされている。

2.2 推力特性

駆動原理は図2に示すように、移動子と固定子の3相平行電極に3相交流電圧を印加すると移動子と固定子には波線で示すような電位分布が励起される。移動子の移動速度 v は、電極ピッチ p 、印加電圧の周波数 f を用い式(1)で示される。

$$v = 6pf \tag{1}$$

本研究での静電アクチュエータは電極3本毎に同じ特性を周期的に繰り返すため、電極3ピッチ長さを1周期(2 p)となる電気角を導入すると理解しやすくなる。移動子と固定子の間には図3に示す電位分布の位相差に応じた推力が発生する^[2]。通常、移動子と固定子の電極ピッチは等しく、静電アクチュエータの推力 F は図3に示す印加電圧位相 q_v と移動子位置 x_e の関数となる。移動子位置 x_e は電気角 q_e で表すと、

$$q_e = \frac{2p}{3p} x_e \tag{2}$$

となる。単位面積あたりの推力 F_n を q_v 、 q_e で示すと式(3)で表現される^[3]。

$$F_n(q_v, q_e) = kV^2(C_1 \sin(2q_v + q_e) - C_2 \sin(2q_v - 2q_e) - C_3 \sin(3q_e)) \tag{3}$$

ここで、 k は定数、 V は印加電圧振幅、 C_1 、 C_2 、 C_3 はアクチュエータの形状や構造に依存する定数である。図4に各移動子位置における推力の変動の模式図を示す。推力は各移動子位置において交流電圧を印加して測定するが、印加電圧の位相に応じて推力の変動が生じる。図4に、各移動子位置で発生し得る最も大きな値を示す。ここで、各移動子位置において発生しうる推力の最大値を最大推力、最低値を鞍部点推力と定義する。鞍部点推力はいかなる移動子位置にあっても最低限保証される推力であるため、アクチュエータの推力性能の重要な因子である。

2.3 曲げた場合での推力特性

移動子と固定子それぞれ1枚の基本要素(これを単層と定義する)からなるアクチュエータを駆動軸方向に曲げた場合、図5に示すように移動子電極と固定子電極の接触面(駆動面)において、電極ピッチのずれ(ピッチシフト量)が生じることにより推力が変化する。ピッチシフト量をアクチュエータの電気角で表したものを p とすると、 p は、電極間距離 h 、電極ピッチ p 、駆動面の曲げ角 j を用いて、

$$p = j h \frac{2p}{3p} \tag{4}$$

となる、図5における角度 j の位置における単位面積あたりの推力は式(3)の移動子位置 x_e にピッチシフト量 p を加え、式(5)で表される。

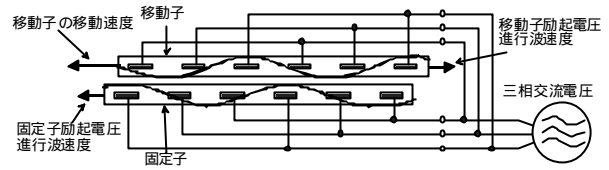


図2 駆動原理

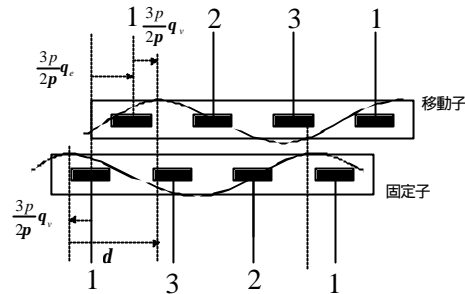


図3 励起される電圧の位相

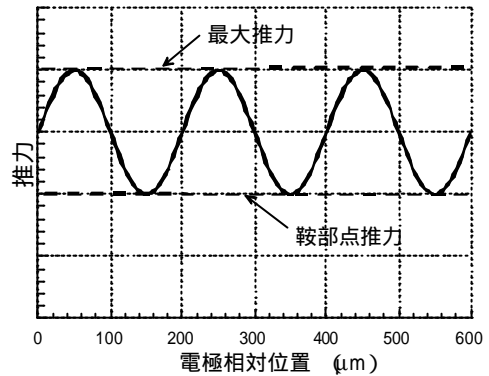


図4 移動子位置による推力の変動

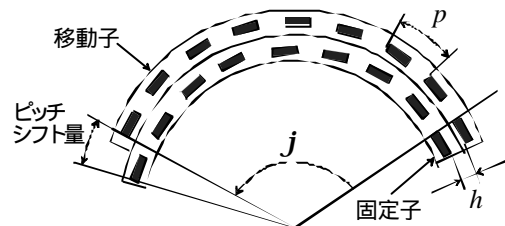
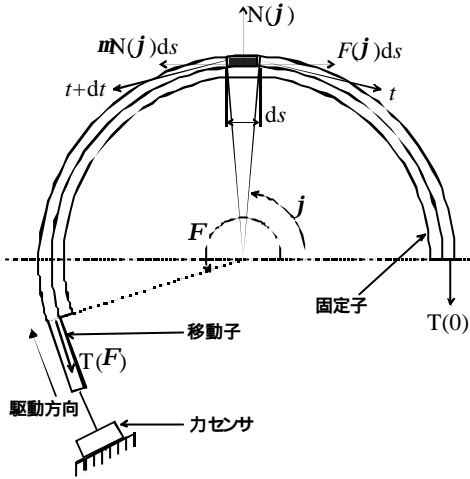


図5 曲げによる電極ピッチずれの様子

$$F(q_v, q_e, j) = kV^2(C_1 \sin(2q_v + q_e + j h \frac{2p}{3p}) - C_2 \sin(2q_v - 2q_e + j h \frac{2p}{3p})) - C_3 \sin(3(q_e + j h \frac{2p}{3p})) \tag{5}$$

ここで、図6の推力解析モデルにおいて、アクチュエータの形状や摩擦を考慮し、移動子の張力 $T(j)$ と駆動面の曲げ角 j の関係を求める。固定子は一定曲率で円筒に固定され、外側に移動子が時計回りに巻きつくように駆動すると仮定し、単位奥行きで解析する。



- m : 駆動面の摩擦係数
- r : 駆動面の曲率半径 [m]
- t : 移動子にかかる張力 [N]
- ds : 微小部分の面積 [m²]
- F : 駆動面の曲げ角 [rad]
- $N(j)$: 微小部分が受ける垂直抗力 [N/m²]
- $F(j)$: 微小部分から発生する推力 [N/m²]

図6 摩擦を考慮した推力解析モデル(断面図)

移動子の微小部分(図6の黒い部分)の半径方向、接線方向における力のつりあいから、式(6)、(7)となる。

$$(t + dt)\sin\frac{dj}{2} + t\sin\frac{dj}{2} = N(j)ds \quad (6)$$

$$F(j)ds + t\cos\frac{dj}{2} = \mu N(j)ds + (t + dt)\cos\frac{dj}{2} \quad (7)$$

dj と dt は微小で、 $ds = r dj$ を考慮し整理すると式(8)となる

$$\frac{dt}{dj} = rF(j) - \mu t \quad (8)$$

(8)、(5)から $T(0)=0$ の初期条件で $T(j)$ を求める。この $F(j)$ は式(5)を用いて算出する。この解析では、 q_v, q_e は j に関係しないため表記を省いた。センサにかかる推力は角度 F における移動子の張力 $T(F)$ である。アクチュエータ単位面積あたりの推力は駆動面の面積 rF で除し、 $T(F)/rF$ となる。 $T(F)/rF$ と F の関係の理論曲線を図7に示す。図7において、推力は曲げない状態での最大推力で正規化した。理論値の計算では、摩擦係数 μ は 0.06、 C_1, C_2, C_3 はそれぞれ 100, 40, 25、電極間距離 h は 100 μ m、電極ピッチ p は 200 μ m である。

2.4 実験及び結果

前節で導いた理論式の検証のために、単層の静電アクチュエータの推力測定実験を行った。実験に用いたフィルムの写真、実験で用いた装置の模式図をそれぞれ図8、図9に示す。実験装置は、固定子を円筒に貼り付け、図6のモデルのように移動子が固定子に巻きつくように駆動する。推力測定方法は、円弧状に固定した固定子を 20 μ m ずつ移動させ、移動子位置を変えていき、各移動子位置において交流電圧を印加し、そのときの発生し得る

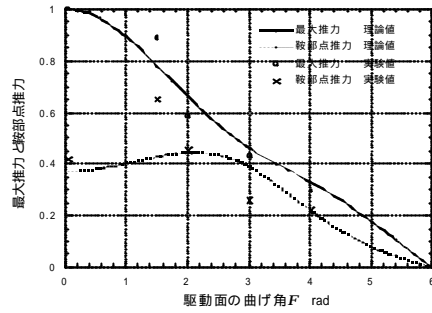


図7 アクチュエータ曲げ角と推力の関係

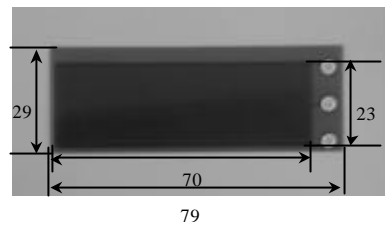


図8 実験に用いたフィルム(移動子・固定子)

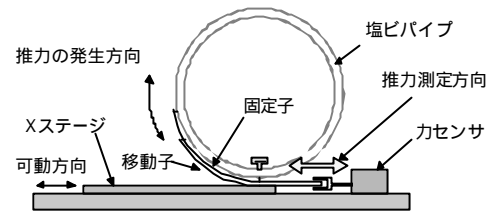


図9 実験装置の模式図

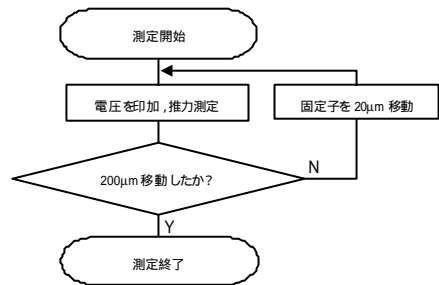


図10 推力測定手順

推力を測定する。図10に実験の手続きのフローチャートを示す。実験条件は印加電圧1200V_{0-p}、印加電圧周波数2.5Hz(3mm/s)で行った。実験結果を図7に示す。また、カセンサを外した状態において、移動子は駆動面の曲げ角 F が π rad 以上においても移動することが確認された。

2.5 考察

実験結果は理論値に近い傾向が得られたが、鞍部点推力には実験誤差がある。これは曲げた場合の摩擦力の変動や曲げていない時の推力が低く見積もられていたと考えられる。また、推力は理論値からも、実験結果からもおよそ 6 rad 曲げると推力が無くなるのがわかる。但し、この特性はフィルムの厚さに大きく依存することを留意しなくてはならない。

3. 積層型の柔軟な静電アクチュエータ

本アクチュエータに用いるフィルム(移動子,固定子)は非常に薄いため,積層することが可能で,その結果,高出力化が期待できる.アクチュエータを柔軟に曲げて使わない場合は,移動子,固定子のそれぞれの端で固定する積層方法で問題はない.しかし,柔軟な構造を維持し,推力を得るためには工夫が必要となる.最後に,提案した3つの積層方法の特徴を表1に記す.本章では3種類の積層方法について考察する.

3.1 積層方法の種類

移動子,固定子を交互に積層するためには,フィルム間にスペースが必要である.これは,直動ガイドの役割を兼ねる.スペースの取り付け方はアクチュエータを曲げた場合に駆動の妨げとならないことを考慮しなければならない.基本的なスペースの設置方法を図11に示す.本章で議論するのは,スペースとフィルムの接合方法(構造)である.ここでは特に,柔軟性,推力特性,出力の取り出し易さ,の3点について考慮しながら,積層方法を考察する.また,ここではアクチュエータ全体が伸縮する構造のみ考察する.スペースとフィルムの接着剤はエポキシ系弾性接着剤EP001(セメダイン株製)を用いた.

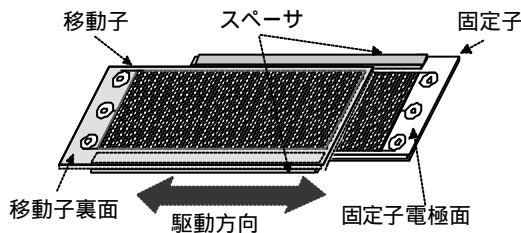


図11 スペースの設置方法

3.1.1 片持ち型

移動子,固定子の両端で固定する積層方法を図12に示す.これを片持ち型と定義する.片持ち型は移動子,固定子とも両端が束ねられており,出力の取り出しが容易な反面,推力特性がわるい.原因は,後述するように曲げた場合に各層において駆動面の移動子位置の初期ずれが生じるため,ある駆動面では伸びる方向に駆動しようとしても,ほかの駆動面では逆向きの縮む方向に駆動している場合が生じるからである.

次に,片持ち型を用いて一定曲率で曲げた場合のアク

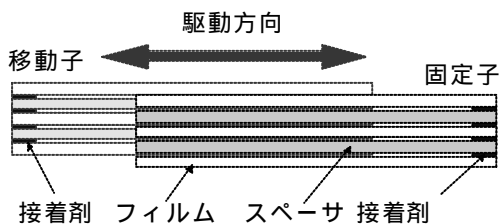
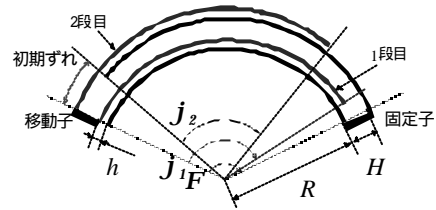


図12 片持ち型の積層方法



- j : アクチュエータ全体の曲げ角
- j_1 : 1段目の駆動面の曲げ角
- j_2 : 2段目の駆動面の曲げ角
- R : 曲げの中心から1段目の固定子までの距離
- H : 移動子(固定子)間距離
- h : 移動子・固定子間電極距離

図13 片持ち型推力解析モデル

チュエータの推力を電極位置のずれから求める.まず,図13に示す2つの駆動面があるモデルで考え,次に一般にn段の駆動面があるものを求める.

図13において下から数えて1段目の駆動面では左端で電極のずれが無い状態であり,右方に向かうにつれて電極ピッチのずれが生じているとする.1段目の推力は図6のモデルによる解析結果と同じであり,この面(1段目)の推力を式(5)を用い, $F_1(q_v, q_{e1}, j)$ と表す.次に2段目の推力を求めるため, j_1 と j_2 の関係を解くと,

$$j_2 = \frac{R^2 - H(H+h)}{R(R+H+h)} j_1 \quad (9)$$

となり,上の段ほど駆動面の曲げ角と移動子と固定子の接触している電極面積も小さくなる.したがって2段目でのピッチシフト量 q_{p2} は1段目の q_{p1} ($q_{p1} = q_p$)と比較すると,

$$q_{p2} = \frac{R^2 - H(H+h)}{R(R+H+h)} q_{p1} \quad (10)$$

となる.また図13の初期ずれと表記したように,1段目と2段目では,移動子と固定子の相対位置が大ききずれであり,この量は HF である.これを電気角で示すと,

$$\frac{2p}{3p} HF \quad (12)$$

となる.したがって1段目の移動子位置は q_{e1} であると仮定すれば,2段目の移動子位置 q_2 は

$$q_{e2} = q_{e1} + \frac{2p}{3p} HF \quad (13)$$

となる.また,式(13)と式(4)から,

$$q_{e2} = q_{e1} + \frac{H}{h} q_p \quad (14)$$

と表記できる.以上を考慮して2段目の推力を求めると,

$$F_2 = F_1(q_v, q_{e1} + \frac{H}{h} q_p, \frac{R^2 - H(H+h)}{R(R+H+h)} F) \frac{R^2 - H(H+h)}{R(R+H+h)} \quad (15)$$

となる.式(15)から,1段目の推力と2段目の推力の関係がわかる.次に一般にn段目の推力 F_n を求める.n段目における駆動面の曲げ角と,n-1段目の比を,駆動面の曲げ角(接触面)の減少率 D_n と定義し,式(16)を導入すると,

D_n は式(17)のように表される。

$$H_n=(n-1)H \quad (16)$$

$$D_n = \frac{R^2 - H_n(H_n+h)}{(R+H_n)(R+H_n+h)} \frac{(R+h)}{R} \quad (n=2,3,4,\dots) \quad (17)$$

以上のことをもとに n 段重ねの場合の推力 W_n とすると、

$$W_n = F_b(q_v, q_{e1}, j) + \sum_{k=2}^n \left\{ F_b(q_v, q_k + \frac{H_n}{h} q_p, D_k j) \cdot D_n \right\} \quad (18)$$

となる。式(18)をもとに、駆動面が4面ある場合の1段目の駆動面の曲げ角 j と推力の関係を求めたグラフを図14に示す。図14から曲げると推力が急激に減少し、曲げ角が1.2rad, 2.1rad付近で推力が大きくなる。これは、曲げるにより電極位置の初期ずれがピッチシフト量よりも急激に変動するため、ある駆動面では伸び、ある駆動面では縮む方向に駆動するからである。実際に片持ち型のアクチュエータを製作し、駆動させたところ、駆動面を p rad 曲げる間に駆動力が大きくなる曲げ角度が0の状態も含めて3ヶ所あることが確認された。

3.1.2 中央固定型

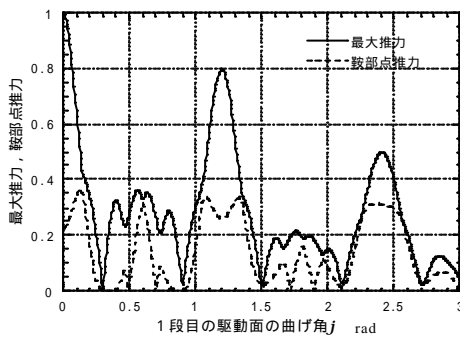


図14 片持ち型積層での出力特性

移動子、固定子をそれぞれの中央で固定する方法を図15に示す。これを中央固定型と定義する。この場合、図16に示すように片持ち型のような問題はなく、各層での移動子と固定子の相対位置は同じであり、単層と同様な推力特性が得られると考えられる。出力の取り出し易さは両端を束ねることができないため、両端からの出力の取り出しが困難になるが、アクチュエータの中央から推力を取り出すことができる。柔軟性の観点から見ると接着面が中央部分に集中し、中央が相対的に硬くなる。

3.1.3 交互固定型

中央固定型のように、曲げた状態でも各駆動面での電極初期ずれによる干渉が起こらない積層方法である。積層方法を図17に示す。固定子も移動子も構造が同様で、スペーサの接着部分が交互となる。図18に交互に接着するスペーサの様子を示す。推力特性は単層の場合と変わらないが、出力の取り出しはスペーサが座屈しやすいため困難である。柔軟性は各層間の接着は端面で行われるため比較的よい。弱い出力時には有効である。

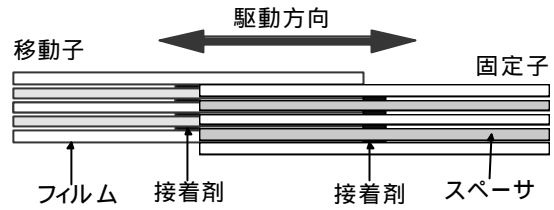


図15 中央固定型の積層方法



図16 中央固定型の3つの駆動面領域

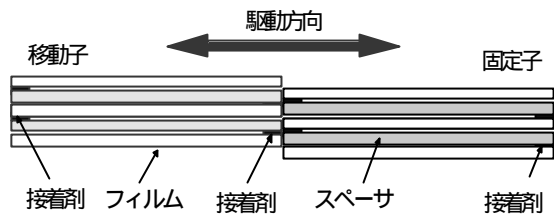


図17 交互固定型の積層方法

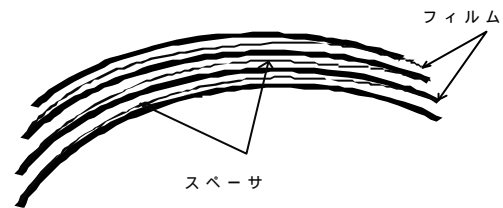


図18 交互に接着されるスペーサ

3.2 積層方法のまとめ

高出力化のための積層方法について3つの方法を提案し、単純な片持ち型の積層方法では、移動子位置の初期ずれが大きいため推力が得られず、柔軟なアクチュエータを得ることは困難であることを述べた。表1に3種類の積層方法の特徴についてまとめる。

表1 3つの積層方法の特徴

積層方法	評価項目		
	柔軟性	出力特性	出力の取り出し易さ
片持ち型		x	
中央固定型			
交互固定型			x

4. 静電アクチュエータ用簡易ドライバ

従来の駆動装置には、任意波形発生器(AG1200 横河電機(株)製)と、高出力増幅器(定格出力 ± 2.4 kV、 ± 30 mA エヌエフ回路設計ブロック(株)製)を用いていた。これは大型で重量が大きいため、可搬環境での使用や移動型口

ボットなどに応用する場合を想定すると不便であり、静電アクチュエータ用の小型ドライバが必要である。本章では今回開発した小型簡易ドライバについて報告する。

4.1 簡易ドライバの駆動原理

3相交流を用いた静電アクチュエータの駆動原理は2.2節で述べたとおりである。今回製作したドライバはパルス駆動を用いたものである。パルス駆動を用いることによって、ドライバをデジタル回路で構成することが可能で、簡単な部品で構成できる。移動子、固定子の結線

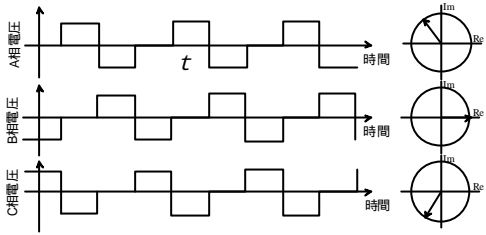


図 1 9 パルス駆動方法

方法は図2と同様である。各相でのパルス波形の時系列を図19に示す。同図の右の時間tにおけるフェーザ図に示すように、それぞれのパルス列は120°ずつ離散的に回転する3相交流であるとみなすことができ、アクチュエータをステップ状に駆動することが可能である。

4.2 仕様

ドライバの構成図を図20に示す。コントローラにはマイコン(PIC16F84)を使用し、アクチュエータの駆動速度と駆動方向を外部信号から制御可能である。高圧電源はDC-DCコンバータ(HPJ1000P/5-D12, HPJ1000N/5-D12)を用いた。入力電圧はAC100V、出力電圧は1000V_{0-P}で出力電流は最大5mAである。大きさは約100mm x 160mm x 100mm、重さ約500gである。

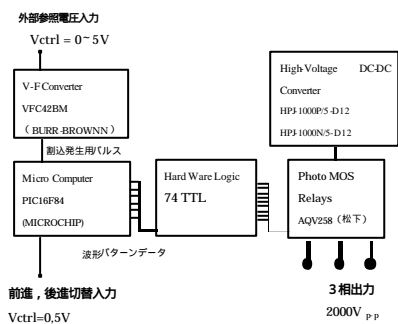


図 2 0 簡易ドライバの構成図

4.3 評価実験

従来の装置でパルス駆動したものと今回試作した装置を用いて、各電圧での推力測定を行った。推力は持ち上げ可能な分銅の重さを測定した。移動子速度3mm/s、移動子・固定子のサイズは120mm x 120mm x 0.2mm、80mm x 160mm x 0.2mmである。結果を図21に示す。

4.4 考察

この実験条件では大型アンプに近い性能が出ている。

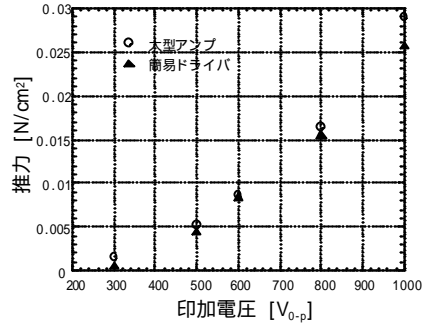


図 2 1 簡易ドライバと大型アンプの比較

しかし、従来のドライバでは1000mm/s以上の駆動速度、出力電圧、3000V_{0-P}が得られるが、本ドライバはスイッチングにフォトMOSリレーを用いているため、最高でも約13mm/sの駆動であり、出力電圧1000V_{0-P}までの駆動しかできないといった短所がある。また、パルス駆動では推力リップルが大きく、力制御には正弦波駆動の小型ドライバが必要である。

5. まとめ

柔軟な静電アクチュエータの推力特性について、単層では π rad以上曲げても駆動可能であることを理論解析と実験から確かめた。また、高出力化のために積層した場合での推力特性を解析し、単純な片持ち型の積層方法では推力が得られなくなることが理論的に示され、試作機でも確認された。また、中央固定型の積層方法が実質的に有効な積層方法であると言え、柔軟な静電アクチュエータの設計指針を示した。今後は、柔軟な静電アクチュエータのパッケージング方法の検討、応用について考える。パルス駆動型の簡易ドライバは低速領域(13mm/s)では十分な推力が得られることを確かめ、低速での応用には利用できる。しかし、今後は高速動作や力制御ができるよう、小型ドライバを改良する予定である。

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, pp.97-102, 1997
 [2] 新野俊樹, 大沢教之, 森本哲矢, 樋口俊郎, “静電アクチュエータの特性評価 - 第2報 印加電圧の位相及び移動子の位置と駆動力の関係 -”, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.669-670, 1994
 [3] 山本晃生, “静電モータを用いたサーボシステムに関する研究”, 東京大学大学院工学系研究科博士論文, 1998