矩形波駆動両電極形静電モータ*

正員 新野 俊樹 (理研)

正員 樋口 俊郎 (東大)

正員 柄川 索 (日立)

非会員 西口 登 (松下電工)

Dual Excitation Electrostatic Stepping Motor

Toshiki Niino, Member (The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN))

Toshiro Higuchi, Member (University of Tokyo)

Saku Egawa, Member (Hitachi Ltd.), Noboru Nishiguchi (Matsushita Electric Works, Ltd.)

Electrostatic motors have been believed to be weaker than electromagnetic motors which are typically used for mechatronic devices. However, electrostatic motors are preferable to electromagnetic ones for micro mechanical applications since their force per volume ratios increase as their dimensions are reduced. This follows that a large output should be obtained if a large number of such small sized motors with high force per volume ratios are linked and their outputs are aggregated. This paper proposes an electrostatic drive technology which is applicable to such a large output motor. The element motor, which is named *Dual Excitation Electrostatic Stepping Motor*, consists of a pair of plastic films, slider and stator. Both of the films have parallelly located electrodes embedded in them, and the slider moves along the surface of the stator when defined rectangular pulse voltages are applied to the electrodes both in the slider and the stator. Force generation characteristic of the electrostatic motor is calculated by surface charge method. A prototype fabricated using flexible print board technology weighs 7g and generates a thrust force of 1.9N at an excitation of $\pm 1000V$.

キーワード：静電モータ，静電アクチュエータ，静電力

1. まえがき

現在，メカトロニクス機器多くは，制御性の良さ，運転のしやすさ，出力の大きさなどの点から，磁気力によって駆動されるモータを動力源としている。しかし，これらのモータが出力の大きさにおいて，機器が必要としている性能を満足しているとは限らない。図1は，1995年現在において商業的に入手可能なアクチュエータを，単位重量あたり出力を縦軸，重量を横軸にとってプロットしたものである。この図を見ると，重量が100kgを上回る内燃機関では，大きな出力重量比を有するものが多いが，1kgかそれを下回る重量のモータについては，油圧や空気圧を用いたモータをのぞけば，100W/kg以下のモータしかきないという現状がわかる。一方，メカトロニクス機器が要求する出力重量比は，その用途によっても異なるが，たとえば人間と同じ程度にスマートで人間程度の仕事ができるようなロボットを構成するには，少なくとも1000W/kgが必要であると言われている(1)。

近年，ICプロセスなどの電気化学的な加工法を利用して製作される，1mm以下の次元を持ついわゆるマイクロマシンの研究が盛んに行われているが(2)~(4)，これらの機械の動力源としては磁気力よりも静電気力が注目されている(5)。この理由としては，静電気力を利用したモータは3次元的な構造をもつコイルを必要としないので，小さくても加工がしやすいという点と，静電モータは寸法が小さくなるにつれて体積

図1 様々なアクチュエータ出力／質量比

Fig. 1. Power/mass ratios of various actuators.

あたりの推力が増大するという寸法則の2点が挙げられる。

寸法が小さくなるとともにその単位体積あたりの推力が大きくなるのであれば，そのような小さなモータを多数製作し，それらの推力を集合することにより大きな推力を発生することも可能なはずである。筆者らはこの点に着目して，従

* この研究は主に東京大学で行われた。

来の電磁形のモータより強力な静電モータの開発を試みている(6)~(8)。これらのモータは、図2のように、フィルム状の移動子・固定子から構成され、それらを積層することによって推力を増大する。これまでに、フィルム状のモータとして、誘導電荷形モータ(6)、矩形波駆動両電極形モータ(7)、交流駆動両電極形モータ(8)の3種類を開発してきおり、本報では、それらの中から“矩形波駆動両電極形静電モータ”に関して、駆動原理、表面電荷法を用いた解析、試作、実験について述べ、静電モータの可能性を実証する。

図2 積層による高出力化

Fig. 2. Output multiplying by stacking layers.

2. 駆動原理

<2・1> 基本構造 モータは図3のように、移動子・固定子の2枚のフィルムから構成される。移動子・固定子内にはそれぞれ4相、3相の電極が、電極の相数の逆比のピッチで配置されている。これらの電極に適当な直流電圧を印加すると、移動子に静電力が働き、印加電圧を順次切り替えていくことにより、移動子は固定子表面上を電極に対して垂直な方向にステップ状に駆動される。

<2・2> 駆動原理 図4にモータの断面構造を示す。モータの最小単位は移動子の電極4本、固定子電極3本で構成される。以後、その大きさを u とする。移動子・固定子の電極に図4 aのような電圧を印加すると、移動子には図5に太い実線で示される水平方向の駆動力が働く。このとき、移動子・固定子間に摩擦がなければ、移動子は図5に○で示された2カ所の安定点のうちのどちらかに静止する(図4 aでは右側の安定点に静止したと仮定した)。次に印加電圧を図4 bのように切り替えると(移動子・固定子の印加電圧パターンをそれぞれローテートする)、移動子・固定子の電極の電圧状態はそれぞれ右に $u/4$ と $u/3$ だけ移動する。このことは、

図3 矩形波駆動両電極形静電モータの基本構造

Fig. 3. Basic structure of dual excitation electrostatic pulse motor.

移動子が左に $u/12$ 移動したと等価であり、したがって、移動子の安定点は右に $u/12$ 移動し、それに伴って、移動子

図4 矩形波駆動両電極形静電モータの駆動方法

Fig. 4. Operation principle

図5 移動子に働く静電力と、移動子の位置の関係の例(計算値)

Fig. 5. An example of calculated relationship between forces and position of slider

も $u/12$ 移動する (図 4 c)。印加電圧パターンをローテートすることにより、図 5 に破線で示される 12 通りの力を発生することができ、切り替えを繰り返すことで移動子は連続的に駆動される。

<2・3> 反発力による駆動 電圧印加を行ったとき垂直方向には図 5 に細線で示されるような力が働いているが、この力は安定点付近では吸引力となる。このため、摩擦がある場合、前節で述べたような安定点付近での駆動 (以下“吸引モードの駆動”と呼ぶ) はできないことが多い。実際には、移動子は安定点付近ではなく、垂直方向の力が正かつ水平方向の力が正 (負) の領域 (図 5 の X 軸上に太線で示した) 周辺を反発力によって駆動される (以下“反発モード”)。

反発モードの駆動プロセスを図 6 に示す。図中、黒丸は移動子の現在位置、太く示された線分は正方向の駆動可能領域を示す。はじめ、移動子の位置は駆動可能領域の外に静止しているとする (図 6 a)。電圧を切り替えていくと、駆動可能領域はそのつど $u/12$ ずつ移動し (図 6 b, c)、駆動可能範囲が $u/12$ よりも広げれば、電圧の切り替えを繰り返すうちに移動子の位置は必ず駆動可能領域内となる (図 6 d)。移動子が駆動されると、その位置は駆動可能領域の外に出るが (図 6 e)、さらに切り替えを繰り返すうちに (図 6 e, f)、いずれは駆動可能領域に入り (図 6 g)、再び駆動される。以上のプロセスを繰り返し、移動子は間欠的に駆動される。

反発モードでは、移動子の 1 回の移動距離は一定の値になるとはならないが、同期速度 v_{sync} は吸引モードで駆動されている場合と等しく、

$$v_{sync} = \frac{u}{12\tau} \quad (1)$$

となる。ただし、 τ は印加電圧の切り替え周期である。

<2・4> 電極の相数及び印加電圧パターン これまで、移動子・固定子の電極の相数として 4 相・3 相のものを示してきたが、これ以外の相数、例えば 6 相・5 相や 3 相・2 相といった組み合わせも可能である。相数を増やせば、1 回の電

図 6 反発力駆動時の駆動プロセス

Fig. 6. Operation process when driven by repulsive force

圧切り替えによって得られる安定点の移動距離が小さくなり、ステップの微小化がはかれるが、モータの製造コストが大きくなる。また、移動子・固定子の相数が等しくても駆動は可能である。しかしこの場合、異なる相数を用いた場合に比べて移動ステップが大きくなる。

印加電圧パターンについては、すでに示した移動子・固定子に $\langle +00 \rangle$, $\langle -+0 \rangle$ の電圧を印加するものの他にも組み合わせがあり、合計 112 通りが考えられる (表 1)。印加電圧パタンの比較は次節で行う。

表 1 印加電圧パタンの例

Tbl. 1. Examples of excitation pattern

移動子電極				固定子電極		
-V	-V	-V	-V	-V	-V	-V
-V	-V	-V	-V	-V	-V	0
-V	-V	-V	-V	-V	-V	+V
-V	0	+V	0	-V	0	+V
-V	0	+V	0	0	0	0
-V	+V	-V	+V	-V	-V	-V
0	0	0	0	-V	0	0
0	0	0	0	-V	0	+V
0	0	0	0	0	0	0

3. 表面電荷法による解析

<3・1> 計算方法 駆動原理の確認を行うために、図 7 示されるような簡略化されたモデルを用い、表面電荷法による計算を行った。計算の単純化のために導入した主な近似は以下の通りである。**a.** 電極は十分に長いとみなし、2次元電場で計算する。**b.** 電極の端部の形状による影響を無視し、電極の厚さを 0 とした。**c.** 各部の誘電率の差を無視し、1つの値で代表する。**d.** 1 基本単位の電極上の電荷のみを未知数に用い、注目している基本単位内の電荷と等量の電荷が、間隔 u 毎に存在すると仮定し、それらの影響を加算する。ただし、計算は近傍の有限個の和で打ち切る。**e.** 計算の便宜上、モータの下方 $100u$ に電位基準面を置く。

<3・2> 計算結果 電極はおのおの等間隔に 20 に分割し、前節 e の加算は左右各 20 単位について行った。電極寸法等は後述する試作機と等しくし、移動子・固定子の電極幅はそれぞれ $90\mu\text{m}$ と $130\mu\text{m}$ 、基本単位の大きさ u は $960\mu\text{m}$ とした。また、誘電率は、比誘電率 3.5 を選んだ。これらの値は、後述する試作機のものである。電圧振幅は $\pm 500\text{V}$ とした。

図 7 表面電荷法による計算のモデル

Fig. 7. Model of calculation using surface charge method.

図8に計算された移動子の位置と発生する力を示す。電極面間の距離については $80\mu\text{m}$ と $105\mu\text{m}$ の2種、印加電圧については表2に示される2種についての結果を示した。

<3・3> 駆動可能判別と推力 図8の各図は、駆動力と浮上力が共に正の領域が $u/12$ よりも広いので、いずれも反発モードの駆動が可能であることがわかる。

表2 印加電圧パターン

Tbl. 2. Voltage patterns.

	VP ₁	VP ₂
a ₁ a ₂ a ₃ a ₄	- + 0 0	- + - -
b ₁ b ₂ b ₃	- + 0	- + -

また、一定負荷の下で駆動した場合の推力は、次のように算出できる。

駆動可能範囲の中から $u/12$ の幅の領域を選び、その中で水平方向の力の最小値を求める。領域の選び方によって最小値は異なるが、それらの最小値の中で最大の値が反発モードでの駆動力となる。図8 b. の例では、モータの反発モードでの推力は 60N/m^2 と評価できる。

<3・4> 印加電圧パターン 印加電圧パターンについて、VP₁とVP₂を比較すると、力-位置曲線の形は類似しているが、VP₂の方が値が大きく、駆動には有利である。また、表1に示されるような全ての電圧印加パターンについて力の大きさを比較したところ、ここに示したVP₂が最適なパターンであることがわかった。

<3・5> 電極面間ギャップ 2種類のギャップの例を比較すると、ギャップが狭いほうが力は強い。しかし、ギャップを小さくしていくと、移動子・固定子間に生じる電場が強くなるので、ギャップ内での絶縁破壊が起こりやすくなり、印加可能な電圧が低下する。ギャップは狭いほど有利とはいえ、最適値が存在する。

4. 実験

<4・1> 製作 図9, 10に試作したモータの構造と断面を示す。電極は3ブロックに分けて構成した。これは、将来的に電極の一部を位置センサとして用いるためである。移動子・固定子の内の電極はそれぞれ4相と3相であり、電極ピッチはそれぞれ $240\mu\text{m}$ と $320\mu\text{m}$ である。各フィルムはフレキシブルプリント基板として製作された商業的に入手可能なものであり、重量は各々3.5gである。電極の本数は、各ブロック移動子が416本、固定子が312本であり、静電力を発生する有効電極部の面積は $70\text{cm}^2(70\text{mm} \times 100\text{mm})$ である。電極面間のギャップ D は、移動子・固定子間にポリイミドフィルム挿入して調整した。

<4・2> 実験結果 図12に切り替え周期10Hzでの、移動子の動きを示す。印加電圧パターンは表2のVP₁をもちい、印加電圧は $\pm 500\text{V}$ とした。1ステップの移動量が一定になっていないことから、この駆動は反発モードであることが

図8 移動子の位置と静電力の関係

Fig. 8. Calculated relationship between electrostatic force and slider's position

図9 試作機の構造

Fig. 9. Structure of prototype motor.

図10 試作機の断面

Fig. 10. Cross sectional view of prototype motor.

図11 矩形波駆動両電極形モータの外観

Fig. 11. Photo of prototype motor

わかる。このとき、移動子・固定子間の摩擦係数は0.1であった。次に、移動子・固定子間のギャップに直径 $20\mu\text{m}$ のガラスビーズを挿入して潤滑を行ったところ、摩擦係数は0.03となり、移動子の動きは図13に示されるような $u/12$ ($80\mu\text{m}$) 間隔のステップ状のものになった (100Hz で駆動)。この場合、モータの運転は吸引モードになっていると考えられる。

図14は VP_1 と VP_2 の2種類の印加電圧パターンを用い、 D を変化させて測定したモータの推力-印加電圧特性である。測定はモータに細紐を介しておもりの重力を加え、引き上げられる最大重量をもってモータの推力とした。

図12 移動子の動き (反発モード)

Fig. 12. Movement of slider (Repulsive force drive mode)

図13 移動子の動き (吸引モード)

Fig. 13. Movement of slider (Attractive force drive mode)

駆動力は印加電圧の2乗にほぼ比例したが、ある程度以上電圧が高くなると、電場により移動子・固定子間ギャップ内の空気が破壊し、推力が得られなくなった。

等しい印加電圧では、表面電荷法で得られた結果の通り、移動子・固定子間ギャップが小さい方が、大きな推力が得られた。しかし、空気の絶縁破壊がのために、印加電圧が制限され、最大推力は $D=92\mu\text{m}$ 、印加電圧パターン VP_2 、印加電圧 $\pm 550\text{V}$ によって、単位面積あたり $40\text{N}/\text{m}^2$ となった。

2種類の印加電圧パターンを比較すると、 VP_2 の方が大きな推力が得られることがわかる。このことは表面電荷法によって得られた結果とも一致する。

表面電荷法の計算結果と推力の絶対値を比較すると、 $D=80\mu\text{m}$ 、印加電圧パターン VP_2 、印加電圧 $\pm 500\text{V}$ のときに推力は $35\text{N}/\text{m}^2$ となり、計算値 $60\text{N}/\text{m}^2$ よりもかなり小さい。これは、電極の形状を単純化したり、誘電率を均一の値で近似したことによる誤差や、残存している摩擦の影響であると考えられる。駆動力の定量的な評価には、より複雑なモデルによる計算が必要である。

次に、移動子・固定子間のギャップの絶縁強度を向上する

図 14 印加電圧と推力の関係（絶縁液なし）

Fig. 14. Relationship between thrust force and applied voltage measured without use of dielectric liquid.

ために絶縁液を注入し、同じように推力の測定を行った。絶縁液としては、エステル油、シリコン油、フッ素系不活性液体（Fluorinert: 3M 製）の 3 種を用いた。推力-印加電圧特性は図 15 のように得られた。この結果から、絶縁液を用いることにより印加可能電圧が増大し大きな推力が得られることがわかった。今回の実験では印加電圧が $\pm 1000\text{V}$ 程度で移動子内の隣接する電極間での絶縁破壊が発生し、これ以上高い電圧は印加できなかった。

また、等しい電圧を印加した場合、誘電率の高い液体を用いたほうが大きな推力が得られることがわかった。推力の最大値はエステルオイルを用いたときに 1.9N であり、単位面積あたりになると 270N/m^2 である。

5. 電磁形モータとの比較

試作したモータにおいて、静電力を発生している部分の面

図 15 絶縁液を用いた運転の印加電圧と推力と関係

Fig. 15 Relationship between thrust force and applied voltage measured using various dielectric liquid.

積は 70cm^2 、フィルムの厚さは液体部分の厚さも含めて $390\mu\text{m}$ なので、推力発生に供した体積は $2.7 \times 10^{-6}\text{m}^3$ となり、単位体積あたり推力は $7.0 \times 10^5\text{N/m}^3$ となる。一方、現在市販されている磁気力のリニアモータの体積と推力とから計算できる単位体積あたり推力は、 $10^4 \sim 10^5\text{N/m}^3$ なので、静電モータの方が磁気力のモータより 10 倍近く強いことになる。推力重量比に関しては、磁気モータが密度の大きい磁性体や導電体を用いている一方、主に樹脂から構成されている静電モータは全体の密度が低いため、静電モータを用いることの効果は大きく、前述のリニアモータが $1 \sim 10\text{N/kg}$ であるのに対し、 270N/kg という大きな成果が得られた。

6. まとめ

高出力集合静電モータの要素モータとして、矩形波駆動両電極形静電モータを考案した。このモータは移動子・固定子の両方に電圧印加が可能な複数相の電極を有するという構造をとることで、反発力による駆動が可能になり、通常の摩擦軽減機構が用いにくい極薄モータの弱点を克服している。また、製造に関しては従来技術の応用が可能であり、大量生産も容易であるという特長を有している。

矩形波駆動両電極形静電モータの推力特性を表面電荷法を用いて解析した。その結果、モータの駆動が可能であることが確認され、最適な印加電圧パターンも導き出された。さらに、移動子・固定子間ギャップが推力に与える影響についても考察し、試作機を用いた実験と定性的な一致をみた。定量的な評価に関しては実測値との隔たりがあったが、この点に関しては、今後の課題とし、より正確なモデルを用いた解析の必要性が明らかになった。

フレキシブルプリント基板を用いてモータを試作し、その駆動に成功した。モータの推力は移動子・固定子間に空気がある場合、空気の破壊のためにモータの推力は最高で 0.3N 、単位面積あたり推力は 40N/m^2 しか得られなかった。これら

の値はこれまでに製作された静電モータ(12,13)に比べると大きな値であるが、さらに大きな推力を得るために、移動子・固定子間に絶縁液を注入した。その結果、印加可能電圧は $\pm 600\text{V}$ から $\pm 1000\text{V}$ まで向上し、モータの推力は約6倍の 1.9N にまで向上した。

最後に、実験的に得られた矩形波駆動両電極形静電モータの推力性能を、現在市販されているリニアモータと比較した。その結果、矩形波駆動両電極形静電モータの単位体積あたり推力と、単位重量あたり推力の値は磁気モータの10倍程度であることがわかった。

(平成7年8月2日受付, 平成7年11月22日再受付)

文献

- (1) 高野:「ロボットの高速化」, 精密工学会誌, **51**, 1, 68~72, (昭60-1)
- (2) L. S. Fan, Y. C. Tai and R. S. Muller: "IC-processed Electrostatic Micro-motor," *Proc. IEEE International Electron Devices Meeting*, 666~669, (1988)
- (3) M. A. Grétilat, P. Thiébaud, N. F. de Rooij, C. Linder: "Electrostatic Polysilicon Microrelays Integrated with MOSFETs," *Proc. 1994 IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, 97~102, (1994-1)
- (4) R. Zengerle, S. Kluge, M. Richter, A. Richter: "A Bidirectional Silicon Micropump," *Proc. 1995 IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, 19~24, (1995-1)
- (5) W. S. N. Trimmer and K. J. Gabriel: "Design Considerations for a Practical Electrostatic Micro-Motor," *Sensors and Actuators*, **11**, 2, 189~206, (1987-3)
- (6) S. Egawa, T. Niino and T. Higuchi: "Film Actuators: Planar Electrostatic Surface-Drive Actuators," *Proc. 1991 IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, 9~14, (1991-1)
- (7) T. Niino, S. Egawa, N. Nishiguchi and T. Higuchi: "Development of An Electrostatic Actuator Exceeding 10N Propulsive Force," *Proc. 1992 IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, 122~127, (1992-2)
- (8) 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 Electro Mechanical Systems*, 130~135, (1994-1)
- (9) M. Yamaguchi, S. Kawamura, K. Minami, and M. Esashi: "Distributed Electrostatic Micro Actuator," *Proc. 1993 IEEE*

Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, 18~23, (1993-1)

- (10) 稲垣, 斎藤:「積層形静電アクチュエータの試作」, 精密工学会誌, **59**, 10, 1635~1630, (1993-10)
- (11) R. E. Pelrine, J. S. Eckerle and S. Chiba, "Review of Artificial Muscle Approaches," *Proc. Third International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1~19, (1992-10)
- (12) B. Bollée: "Electrostatic Motors," *Philips Technical Review*, **30**, 6/7, 178~194, (1969)
- (13) 有本, 木村, 大橋:「梯子形静電リニアアクチュエータの拡大モデルによる性能評価」, 静電気学会誌, **19**, 2, 141~147, (1995-2)

新野 俊樹 (正員) 1966年9月18日生。95年3月東京大

学大学院博士課程修了。同年理化学研究所に基礎科学特別研究員として入所。静電モータ, 光造形装置の開発に携わる。IEEE, 精密工学会, ロボット学会, 静電気学会会員。博士(工学)。

樋口 俊郎 (正員) 1950年2月26日生。1977年東京大

学大学院博士課程修了。同年, 同大学生産技術研究所講師, 1978年同助教授, 1991年11月同大学大学院工学系研究科教授, 92年4月より, (財) 神奈川科学技術アカデミー樋口「極限メカトロニクス」プロジェクトリーダーを兼任, 現在に至る。工博。

柄川 索 (正員) 1965年6月16日生。1993年東京大

学大学院博士課程修了。同年, 日立製作所機械研究所入社。医療福祉機器の開発に従事。精密工学会, ロボット学会会員。博士(工学)。

西口 登 (非会員) 1964年8月22日生。1989年岡山大

学大学院修士課程修了。同年, 松下電工株式会社入社。生産技術の開発に従事。