マイクロ・マニピュレータの制御*

(第7報, 6自由度静電型マイクロ・アクチュエータ の動作原理と試作, 動作実験結果)

福田 敏 男^{*1}, 藤 吉 基 弘^{*2}
新 井 史 人^{*3}, 松 浦 英 雄^{*4}

Control of Micromanipulator (7th Report, Design and Experimental Result of 6 D. O. F. Micromanipulator with Electrostatic Actuators)

Toshio FUKUDA, Motohiro FUJIYOSHI,
Fumihito ARAI and Hideo MATSUURA

This paper deals with a new mechanism and the experiments of a 6 D. O. F. micromanipulator based on electrostatic actuations. This proposed micromanipulator is aiming at applications of biotechnology, microsurgery, and nanotechnology. Since operations in these fields grow rapidly and complicatedly, movable dexterous micromanipulators with multiple degrees of freedom such as 6 D. O. F. are desired. The salient features of this microactuator/manipulator are that: (1) it is structurally very compact since this micromanipulator is fabricated and assembled using methods of the photoetching process; (2) it has six degrees of freedom for motion control: the manipulator can move along three axes, and can also rotate along each axis; (3) it is easy to make the entire actuator. This paper demonstrates some of the static motions of the new actuators, and these functional merits will make it possible to operate the micromanipulator in a much more complicated environment under the microscope.

Key Words: Robotics, Microactuator, Micromanipulator, Electrostatic Force Actuator, Multiple Degrees of Micromotion, Photoetching Process

1. は じ め に

バイオテクノロジーやマイクロ・サージャリなどの製品や医療技術に対する要求は, 次第に大きくなり我々の生活の中で日常化しつつある。これらの要求に答えるためその作業環境はより高度化し, 使用されるシステムに対する要求も複雑化してきた。そこで著者らは今まで, 1自由度マイクロ・マニピュレータの機構と制御方法⁽¹⁾, 対象物の認識方法⁽²⁾, 3自由度静電マイクロ・アクチュエータ⁽³⁾⁽⁴⁾, 6自由度圧電マイクロ・マニピュレータ⁽⁵⁾, 生物画像の推論認識法⁽⁶⁾, について報告してきた。本報ではこれらに続き複雑な動きの可能な6自由度マイクロ・マニピュレータを静電アクチュエータによって試作し, 動作実験を行ったので報告する。

従来, マイクロ・マニピュレータとしては, 一般に油空圧式や減速装置を持つ電気機械式で, 3自由度以下のものが使用されてきた。しかし, 油空圧式の場合は

油圧装置のメンテナンスや空気の圧縮性などを考慮する必要があり, 電気機械式の場合はその機構上ギアのバックラッシュによるガタの問題があるので, 高分解能を得ようとしたときの障害になる。また自由度が少ないと複雑な作業を行うのには不便であり, マイクロ・マニピュレータで6自由度を有するものは既報⁽⁵⁾のほかにはあまり見当たらない。

さらに重要な要素として, 多自由度を持つマイクロ・マニピュレータがより小形化できるか否かは, 使用されているアクチュエータの性質に大きく依存する。既報⁽⁵⁾述べた圧電素子を用いたものでは, その限界は数センチオーダとなり, それ以上の小形化は圧電素子自体の大きさの制約などにより非常に難しい。それに比べ静電気力は平面により生ずるので小形化されるほど有利になる。またICなどに使われているフォトファブリケーション技術をそのまま用いることにより, 比較的容易に製作が可能となる。ただ, 従来の平面形の静電アクチュエータをそのまま用いたものでは, 3自由度が限界である。そこで本論文では小形, 多自由度を目的に3自由度静電形アクチュエータを基本とした, 6自由度静電形マイクロ・マニピュレータを考案, 試作した。

このマニピュレータの特長として, (1)フォトファ

* 原稿受付 平成2年6月4日。

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市中種区不老町1)。

^{*2} 名古屋大学大学院。

^{*3} 正員, 名古屋大学工学部。

^{*4} 名古屋大学工学部。

アプリケーションにより製作した静電アクチュエータを用いているので、小形化が容易である。(2)ギヤなど減速装置を用いない一体式なので、ガタやバックラッシュがない。(3)多自由度を持ち、作業領域の中でマニピュレータ先端部を任意の軌道で動かすことができる。(4)先端変位、回転角は微小だが高分解能を持つので、画像処理システム、STMなどと組合せ、マイクロ・マニピュレーションの自動化などが可能となる、が挙げられる。本報では、本マイクロ・マニピュレータの機構と静的特性について述べる。

2. 静電アクチュエータの動作原理

2.1 基本動作原理 1 図1のように2枚の極板が平行に向かい合わされているとき、この極板は平行平板コンデンサとなる。この極板間に電圧を印加することにより各極板には正電荷と負電荷が蓄積し、それらの間には各極板に対し垂直な静電引力が発生する。この力を引力 F_v とおけば F_v は式(1)で表される。

$$F_v = \epsilon_0 \epsilon (SV^2/2d^2) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

- ϵ_0 : 真空の誘電率
- ϵ : 空気比誘電率
- S : 極板面積 m^2
- V : 印加電圧 V
- d : 極板間隔 m

であ。この静電気力を並進運動や回転運動に変換すればアクチュエータとして利用できる。

アクチュエータが小形化されるほど静電気力が有利

図1 静電力1

図2 静電力2

になる理由は、次のように示すことができる。静電気力による単位体積当たりの出力は式(1)の F_v を使って式(2)のように表される。

$$\frac{F_v \cdot l}{l^3} = A \frac{Sl}{d^2 l^3} \dots\dots\dots (2)$$

ただし

$$A = \frac{\epsilon \epsilon_0 V^2}{2}$$

式(2)を次元解析すれば、式(3)で表され、

$$\frac{[L^2][L]}{[L]^2[L]^3} = \frac{1}{[L]^2} \dots\dots\dots (3)$$

となる。上式によれば、静電気力による単位体積当たりの出力は長さの二乗に反比例し、電磁力によるモーターなど長さの三乗に反比例するものと比べて有利となる。

2.2 基本動作原理 2 上述の平行平板コンデンサが図2のように a だけずれて配置されている場合、これらの極板間には基本原理1で表された極板に垂直方向の引力のほかに、極板に平行方向に引力 F_s が働く。この引力 F_s は以下の方法で求めることが可能である。図2に置ける座標系 α - β に対応させて、図3のように各極板ごとに独立な座標系 ξ - η , ξ' - η' をとれば、各座標 (ξ, η) , (ξ', η') における面積素 $d\xi d\eta$, $d\xi' d\eta'$ 間の静電エネルギー $dW(d\xi d\eta, d\xi' d\eta')$ は、面積素間の距離が $\sqrt{(\xi' + a - \xi)^2 + (\eta' - \eta)^2 + d^2}$ となるので、

$$\begin{aligned} dW(d\xi, d\eta, d\xi', d\eta') \\ = \frac{-\sigma^2 d\xi d\eta d\xi' d\eta'}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{(\xi' + a - \xi)^2 + (\eta' - \eta)^2 + d^2}} \end{aligned} \dots\dots\dots (4)$$

と表される。ただし各極板は一律な電荷密度 $\pm\sigma$ を持つと近似できるとする。まず dW を各極板全体に関して積分することによって全静電エネルギーを求め、次に W を α 軸方向に偏微分することによって F_s は求まり、以下のように表される。

$$F_s = -\frac{\partial W}{\partial a} \dots\dots\dots (5)$$

図3 二つの座標系

2.3 静電アクチュエータ動作形態

2.3.1 基本単位の略説 6自由度マイクロ・マニピュレータの基本単位として既報⁽⁴⁾で述べた静電アクチュエータを使用した。この静電アクチュエータは図4に示すように、絶縁板上に4枚のクワッド形電極を田形になるようにフォトリソグラフィにより形成し、これを固定極板とする。さらにこの固定極板の上に、ばねによって支持された平板状の可動極板を配置した。固定極板上の電極 No. 1 から No. 4 に印加する電圧の組合せにより、上に置かれた可動極板の間で静電気力を発生する。プローブの先端は、以下の方法で動作することが可能である。まず No. 1 と No. 2 または No. 3 と No. 4 の極板に電圧を印加することにより Y 軸まわりの回転、No. 2 と No. 3、または No. 1 と No. 3 に電圧を印加することにより X 軸まわり回転、そして全極板に電圧を印加することにより Z 軸方向の並進、の3自由度を持つアクチュエータとして動くものであった。

2.3.2 6 D. O. F 静電アクチュエータの動作形態 今回はこのアクチュエータを3組使用し、固定極板を三角柱の各側面になるように配置する。可動極板としては、平板状であったものを三角柱状に組合せ、固定極板の三角柱の中に宙吊りにする。固定極板の各側面を A, B, C とし、A, B, C 面の各クワッド形電極を No. 1 から No. 4 とすれば、電極に印加する電圧の組合せにより各自由度を生ずる。また今後、この静電アクチュエータの軸の先端を作業点と呼ぶことにする。

電圧の印加の仕方と生じる自由度の関係の類似性から六つの自由度を四つの動作モードに分類してに図5に示す。これらのモードは次の特長をもつ。モード1とは主にいくつかの側面の上側または下側の極板に電圧を印加することにより生ずるタイプで、作業点は

X 軸または Y 軸回りに回転する(2自由度)。モード2とは、主に多極板の左側、または右側の極板に電圧を印加することにより生ずるタイプで、作業点は Z 軸回りに回転する(1自由度)。モード3とは、主にいくつかの側面の右または左または全極板に電圧を印加することにより生ずるタイプで、作業点は X 軸または Y 軸方向へ並進する(2自由度)。モード4は主に各側面の極板のうち、上または下側全部に電圧を印加することにより生ずるタイプで、作業点は Z 軸方向に並進する(1自由度)。以上の6自由度の動作が可能である。モード1, 2, 3は、前述の『基本動作原理1』によって生じ、モード4は、『基本動作原理2』によって生ずる。

次に、実際に各自由度を達成するための、各極板に対する電圧の印加の主な組合せを各自由度ごとに示す。図5で、例えば側面 A の1番の極板であれば A1 と略記し、側面 B, C においても A における1, 2, 3, 4 と同じ位置関係にある極板を B1, C3 のように呼ぶことにする。

(1) X 軸方向への並進運動 全く電圧が印加されていない状態から極板 B1, B2, B3, B4, C1, C2 に電圧を印加した状態にする。さらにすべての電圧を零にして、今度は極板 A1, A2, A3, A4, C2, C4 に電圧を印加する。これを繰返せば、X 軸方向への並進運動を行う。

(2) Y 軸方向への並進運動 極板 C1, C2, C3, C4、または極板 A2, A4, B1, B2 に電圧を印加するこ

図4 動作モード(3D. O. F)

図5 動作モード(6D. O. F)

図 6 上からみたセンサ配置

図 7 下からみたセンサ配置

とを繰返せば Y 軸方向への並進運動を行う。

(3) Z 軸方向への並進運動 極板 A1, A2, B1, B2, C1, C2 または A3, A4, B3, B4, C3, C4 に電圧を印加することを繰返せば Z 軸方向への並進運動を行う。

(4) X 軸回りの回転運動 極板 A4, B3, C1, C2, または A2, B1, C3, C4 に電圧を印加することを繰返せば X 軸回りの回転運動を行う。

(5) Y 軸回りの回転運動 極板 A1, A2, C2, B3, B4, C4, または B1, B2, C1, A3, A4, C3 に電圧を印加することを繰返せば Y 軸まわりの回転運動を行う。

(6) Z 軸回りの回転運動 極板 A1, A2, B1, B2, C1, C2, または A3, A4, B3, B4, C3, C4 に電圧を印加することを繰返せば Z 軸回りの回転運動を行う。

以上の運動によって生ずるマニピュレータ先端作業点での姿勢変化は、次の条件を与えることにより数式的に表すことができる。

既にこのクワッドで位置サーボ系を構成できることを示したが、このセンサ出力を用いてマニピュレータ先端の座標を求めることにする。九つの変位測定用センサが、可動電極に対して図 5 の上図を上からみた図 6、および下からみた図 7 のように置かれておりとする。九つのセンサのうち、八つは極板 B1 から B4 および C1 から C4 の至近で固定電極側に置かれており、各可動電極の変位置量を測定する。また固定電極に対し、

図 8 各点の配置

可動電極が遠ざかる方向を正とする。これらのセンサに対し、例えば極板 B1 に付いているセンサは S_1^b と略記するものとする。

また一つのセンサは可動電極の下部に設置されている。これは Z 軸方向への変位を測定するものであり S_z と略記する。これらの測定値を $dS_1^f, dS_2^f, \dots, dS_8^f, dS_z$ とする。また可動電極の中心軸線上のうち、下側のセンサ S_z などの正面にあたる点を P, 上側のセンサ S_1^f などの正面にあたる点を Q, 作業点を R とおくと、PQ の長さを h , QR の長さを d であるとする (図 8)。また P は初め原点 $(0, 0, 0)$, Q は $(0, 0, h)$, R は $(0, 0, h+d)$ にある。

作業点における姿勢変化、すなわち座標系の各軸方向への微小変位置量 d_x, d_y, d_z および各軸回りの回転角 $d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z$ は P, Q の変位などより、式 (6) で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} dX_R \\ dY_R \\ dZ_R \end{bmatrix} = \left(\frac{h+d}{h} \right) \begin{bmatrix} -\frac{1}{2\sqrt{3}}(dS_1^f + dS_2^f + 2dS_3^b + 2dS_4^b) \\ -\frac{1}{2}(dS_1^f + dS_2^f) \\ h + dS_z \end{bmatrix} - \left(\frac{d}{h} \right) \begin{bmatrix} -\frac{1}{2\sqrt{3}}(dS_3^f + dS_4^f + 2dS_5^b + 2dS_6^b) \\ -\frac{1}{2}(dS_3^f + dS_4^f) \\ dS_z \end{bmatrix}$$

$$d\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{dS_1^f + dS_2^f - dS_3^f - dS_4^f}{2h} \right)$$

$$d\theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{dS_3^f + dS_4^f + 2dS_5^b + 2dS_6^b - (dS_1^f + dS_2^f + 2dS_3^b + 2dS_4^b)}{2\sqrt{3}h} \right), \quad d\theta_z = \tan^{-1} \left(\frac{dS_z^f - dS_z^b}{d_s} \right) \dots\dots (6)$$

ただし、 S_1^f と S_2^f との距離を L_s とする。

以上の式により、各センサ出力を使って6自由度マイクロ・マニピュレータの先端作業点における姿勢を制御することが可能となることがわかる。

3. 基本構造

このマイクロ・マニピュレータは、次の各部分から構成される。

- (1) 固定電極部
- (2) 可動電極部
- (3) ばね部
- (4) 軸(含作業点)

実際に製作したマイクロ・マニピュレータの概観写真を図9に、模式図を図10に示す。

3・1 固定電極部 固定極板は、0.8 mm厚のガラスエポキシ基板上に両面フォトリソを行うことにより製作した。エッチングの方法としては、両面

図9 概観写真

図10 模式図

図11 固定電極

銅はく付きガラスエポキシ基板に感光材を塗布後、マスク原図で覆い、露光、現像する。これを第二塩化銅でエッチングして製作した。

固定極板は図11のように四つの電極に分かれており、下部に設けられたスルーホールを通して裏面から給電する。今回はこの基本単位を三角柱の各側面になるように3枚組合せ図に示す配置とした。サイズは現段階では $L1(=7.18\text{ mm}) \times L2(=7.80\text{ mm})$ である。

3・2 可動電極部 可動電極部には、図12に示したパターンを固定電極と同様なフォトリソ法により作製した。また可動電極部はフォトリソ法により作製した。また可動電極部は既報で板状であったが、本報ではこの基本単位を3枚使用し三角柱状に結合して立体化した。ただし導体部分の中心軸方向の長さは固定極板の軸方向の長さより短くする。これは基本原理2によって極板を動かそうとする際必要で、図5におけるモード4を実現するためのものである。また、必ずしも三角柱状にする必要はなく、六角柱状等も考えられるが、本研究では製作の容易性から三角柱状を採用している。

この可動電極の上部に給電パッドが設けられ、三角柱の中心に差し込まれた軸を通して給電される。可動電極の三角柱は固定極板の三角柱の中に挿入され、一定の間隔を保って、ばねによって宙吊りにされる。今回は極板間距離を $100\text{ }\mu\text{m}$ とした。また固定、可動両電極は絶縁されている。

3・3 ばね部 軸および可動電極部が自由に動くためには既報のような板ばね状では実現不可能な自由

図12 可動電極

図13 ばね部

図 14 回転角の算出

図 15 並進運動の静特性 (Y 軸方向)

図 16 並進運動の静特性 (Z 軸方向)

図 17 回転運動の静特性 (X 軸回り)

度が生ずる。そこでばね部は図 13 に示すようなぜんまい形とし、しんちゅうはくに同様のエッチングプロセスを施すことにより加工した。軸・可動極板に対する給電はこのばねを通して行われ、可動極板の動きと余分な給電線により妨げることをない配慮をしている。

4. 特性実験方法と結果

作業点における変位、回転角は非常に小さいので、今回は顕微鏡により作業点を拡大し、CCD カメラを通して TV モニタの画面上で測定した。以下に使用した座標系は図に対応している。

また回転角 θ は図 14 に示すように、回転中心が可動電極の中心で起こると仮定し、作業点の変位 Δt と作業点-固定電極中心距離 l を用い、式(7)によって算出した。

$$\theta = \tan^{-1}(\Delta t/l) \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 l : 作業点-固定電極中心距離

このようにして測定した、印加電圧に対する作業点の Y 軸方向の並進運動の静特性を図 15 に、Z 軸方向への並進運動の静特性を図 16 に、また X 軸回りの回転角の静特性を図 17 に示す。作業点の Y 軸方向への最大変位は印加電圧 350 V において 3.15 μm 、Z 軸方向への最大変位は 0.8 μm 、最大回転角は $1.1 \times 10^{-2} \text{ deg}$ であった。なお X 軸方向への並進運動の静特性は、Y 軸方向への並進運動と動作モードが同じであり、ほぼ同じ特性を持つ。Y 軸回りの回転運動についても同様の理由で X 軸回りの回転運動とほぼ同じ特性である。

5. ま と め

本研究において、従来形より小形で多自由度をもつ静電アクチュエータを用いたマイクロ・マニピュレータ/アクチュエータの基本原則を示し、試作、動作実験を行った。このマイクロ・マニピュレータは、作業点において数 μm の可動範囲を有しており、この範囲ではどのような姿勢をとることも可能となる。またより精密なエッチング技術を応用することにより、さらに小形化できるものと思われる。今後の適用例としてナノ・オーダーの多自由度形 STM への利用が考えられる。

文 献

- (1) 福田・谷江・光岡, マイクロコンピュータの制御(第1報, マイクログリッパの基本特性とパラメータ制御の方法), 機論, 53-493, C (1987), 1950-1956.
- (2) 福田・長谷川, マイクロ・マニピュレータの制御(第2報, 画像セグメント法による生物の認識と同定), 機論, 55-512, C, (1989), 959-966.
- (3) 福田・中村・ほか3名, マイクロ・マニピュレータの制御(第3報, マイクロ・アクチュエータの機構と制御), 機論, 56-526, C, (1990), 1470-1474.
- (4) 福田・田中, マイクロ・マニピュレータの制御(第6報, 3自由度静電アクチュエータの機構と制御), 機論, 57-536 C, (1991), 掲載予定.
- (5) 福田・藤吉・松浦, マイクロ・マニピュレータの制御(第4報, 6自由度マイクロ・マニピュレータの試作と動作実験結果), 機論, 56-532, C, pp. 3287-3293 (1991).
- (6) 福田・長谷川, マイクロ・マニピュレータの制御(第5報, 任意の方向を向き、多セグメントに欠陥を有する生物画像の推論認識法), 機論, 57-536, C, (1991), 1279.