三極円筒型圧電素子を用いた $X-Y-\theta$
微動テーブル*大 越 正 弘^{*1}, 坂 野 進^{*2}Microstep $X-Y-\theta$ Table Using Three-Pole Piezoelectric Tube Actuator

Masahiro OOKOSHI and Susumu SAKANO

This paper describes the basic concept of the micro $X-Y-\theta$ table system, which is a tool for manipulating microdevices and microorganisms, and the static and dynamic characteristics of the system. This microstep table consists in part of a cylindrical piezoelectric actuator. One electrode of the piezoelectric actuator is inside the cylindrical tube, and three pairs of electrodes are on the outside. The piezoelectric actuator is driven by a pulsatile waveform voltage and moves a specimen on the table along the X and Y axes, and rotates it about the θ axis precisely and exactly. The table is driven by the friction force between the piezoelectric actuator and the table. The stroke and the direction of the table movement are controlled with a personal computer using a mouse.

Key Words: $X-Y-\theta$ Table, Piezoelectric Actuator, Friction, Precise Positioning Table, Micromechanism, Tube Actuator

1. 緒 言

最近、通信、半導体、バイオ、医療。などの分野においてサブミクロンからナノオーダーの位置決め技術が必要となって来ている。光ファイバの軸合わせ、半導体基板の位置制御、SEM, STM, SPMなどの試料台の精密位置制御などに用いる μm オーダー以下の分解能を有する位置決め機構の実現が強く求められている。これまでに圧電素子の急速変形を利用した機構や円筒型アクチュエータを複数個用いた $X-Y-\theta$ テーブルの開発の報告がある。しかし、 $X-Y-\theta$ の3方向に対応して複数のアクチュエータを用いたもので、機構上あるいは制御を行うに単純ではない。今回、一個の三極円筒型圧電素子を用い、素子の3方向への変形を組み合わせることにより、移動テーブルを任意の直線方向および回転方向に微小移動可能な移動機構を

考案し、試作により μm 以下の微小移動が可能であることを確認した。一個のアクチュエータを利用した単純な機構で、移動テーブルをアクチュエータ上に置いて摩擦力で移動させるという単純な機構でありながらサブミクロンオーダーの微動が可能である。本報告では、まず、移動テーブルの駆動機構の構造と駆動原理について解析も含め、説明する。次に、 $X-Y-\theta$ 微動テーブルの構成と運動特性について述べる。開発した微動テーブルは $X-Y$ 方向ならびに計測などにおいて不可欠な回転方向 θ をも精密制御可能とするものであり、簡単な構造で高精度位置決めを提供するものである。

2. テーブル駆動方法と駆動特性

2.1 駆動の原理 圧電素子の変形を利用して圧電素子上の移動体を摩擦力で微動させる原理を図1に示す。図に示すように圧電素子に電圧を印加すると素子の軸方向に対して直角方向に変形を生ずる。バイモルフ型や円筒型素子の場合にこの様な変形を生ずる

* 原稿受付 1995年4月17日。

*¹ 正員, 福島県ハイテクプラザ(〒963 郡山市片平町山神館7-2)。*² 正員, 日本大学工学部(〒963 郡山市田村町徳定一(中河原1))。

圧電素子に急速に電圧を印加すると、移動体は圧電素子の変形に追従できず、滑りを生じながら右方向に微動する。次に、圧電素子への印加電圧を零とし、変形を元に戻す時に移動体は右方向への慣性により圧電素子の運動に追従できずにさらに右方向へ滑りを生ずる。圧電素子の変形が元の位置に戻った時に、移動体の右方向への滑りが零となるような条件を見出し、駆動条件とすると、圧電素子の印加電圧1サイクルで移動体の最大の滑り運動、すなわち最大の移動を得ることが可能となる。

Fig. 1 Principle of table movement

2.2 三極円筒型圧電素子 本研究で用いた圧電素子の概観を図2に示す。素子は円筒型圧電素子の電極を3分割したもので、電極は120度ずつ3分割されている。各々の電極は幅1mmの絶縁部により分割されている。円筒の内側が-極、外側が+極で、内側の極は分割せずに共通となっている。寸法は外径10mm、内径4mm、長さ30mmである。3分割された電極への電圧印加の組み合わせあるいは印加電圧の大小により素子の軸方向と直角方向への変位を与えることが可能である。また、各電極に順次に印加を繰り返すことにより移動体に回転方向の運動を与えることが出来る。

Fig. 2 Three-pole piezoelectric tube actuator

2.3 駆動運動の解析 これまでの報告では、圧電素子の周波数特性を考慮せずに周波数に対して一様な変形を用いて解析している。以下には、周波数特性を考慮した解析について述べる。図3に示す圧電素子と移動体のモデルにおいて圧電素子に以下のように変形を与える。

$$X = a(\omega) \{1 - \cos \omega t\} \quad (1)$$

ここに、 $a(\omega)$ は圧電素子の変形の振幅で周波数により変化する。移動体の移動量を x とすると、圧電素子の変形との間に以下のような式が成り立つ。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \pm m \mu g \quad (2)$$

ここに、 m は移動体の質量、 μ は圧電素子と移動体の間の摩擦係数、 g は重力加速度である。式(2)の±の符号の条件は次のとおりである。

$$\frac{dX}{dt} > \frac{dx}{dt} \quad \text{では、+符号} \quad (3)$$

$$\frac{dX}{dt} < \frac{dx}{dt} \quad \text{では、-符号} \quad (4)$$

なお、解析モデルは移動体が圧電素子上を滑りながら移動するものであり、 μ は動摩擦係数である。

2.4 移動体が最大変位を生ずる条件 図4に圧電素子のパルス状の電圧を印加した時の印加電圧の印加持続時間と圧電素子の変形および変形速度と移動体の移動速度との関係を示す。

Fig. 3 Model of microstep table

Fig. 4 Relation between supplied voltage period and velocity of table (calculation)

図4(a)のように印加持続時間が長い場合には、移動体の左右への滑り量が同じで、移動体は全く移動しないこととなる。図4(b)のように印加持続時間は少し短くすると移動体の慣性の影響が出てくる。左右の滑り量がことなり微動を生ずる。さらに印加持続時間が短くすると一方方向にのみ滑りを生じ、図4(c)のように移動量が大きくなる。しかし、圧電素子は一般に駆動周波数が高くなると変形は小さくなるので、印加電圧の印加持続時間を短くすれば大きな移動量が得られるとは限らず、最大移動を与える印加持続時間がある。

最大変位の条件を求めるために次の無次元量を導入する。

$$\gamma = \frac{a(\omega) \cdot \omega^2}{\mu \cdot g} \quad (5)$$

γ を用いることにより移動体の変位を求める式は時間(ωt)と γ とにより変位($x/2a(\omega)$)を表すことができる。図5に γ をパラメータとした移動体の変位を示す。 γ が小さい、駆動電圧の印加持続時間が短い場合には、移動量は小さく、最大の移動量を与える印加持続時間の条件があることを示す。 γ と移動量の関係を図6に示す。 γ が4前後で大きな移動量を得ることが可能である。最適な γ の値を解析的に求めることは困難であり、計算を繰り返し数値的に求めることとなる。

Fig. 5 Examples of table movement (calculation)

Fig. 6 Relation between γ and table movement (calculation)

2.5 円筒型圧電素子の周波数特性 圧電素子にパルス状の電圧(100V)を印加し周波数特性を測定した。印加電圧の周波数を100~2000Hz

まで変化させ、円筒型圧電素子の先端部の横方向変位をレーザドップラ振動変位系を用いて測定した。結果を図7に示す。共振周波数での変形を除けば、周波数が高くなるとともに素子の変位は小さくなる。用いる圧電素子によっては最大の移動量を生ずる γ で設計できるとは限らない。

Fig. 7 Frequency characteristic of piezoelectric element(experiment)

3. 微動テーブルの構成

3.1 X-Y-θ 微動テーブルの構造 3 極円筒型圧電素子の変形が $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ と非常に小さく圧電素子単体でテーブルを駆動しようとすると装置の加工精度あるいは組み立て精度など非常に高精度なものを要求される。そこで、加工あるいは組み立ての簡単化を図るために圧電素子と駆動されるテーブルの間に変位拡大機構を挿入することとした。図8に微動テーブルの構造と変位拡大機構を示す。変位拡大機構は図に示すように正三角形の単純な形状のもので、圧電素子の変位を8倍に拡大している。

Fig. 8(a) Structure of movement table

Fig. 8(b) Displacement magnification unit

3.2 X-Y-θ 微動テーブルの制御 X-Y-θ 微動テーブルを制御する制御システムの構成を図9に示す。本研究に用いた制御システムでは、パーソナルコンピュータ (PC-9801) を用いて圧電素子に印加するパルス電圧の印加持続時間および印加電極の選択などを行っている。パーソナルコンピュータからの指令により $0 \sim 5 \text{ V}$ の基本パルスが発生するパルス発生装置と $0 \sim 100 \text{ V}$ に昇圧する電圧制御装置を結合し任意の印加持続時間で駆動できる。制御システムを含めた微動テーブルの外観を図10に示す。

Fig. 9 Construction of control system

Fig. 10 Outline of experimental table

3.3 微動テーブルの運動特性 微動テーブルはステンレス製の200mm角で、圧電素子の上端面に変位拡大機構を取り付け圧電素子の変形が微動テーブルに伝えられる。圧電素子の変形を8倍に拡大し、摩擦力により微動テーブルを駆動した周波数特性を図11に示す。摩擦($\mu=0.2\sim0.3$)で駆動しているため、測定値は幾分ばらついている。圧電素子の周波数特性と印加持続時間とに対応する γ の値から理論値を求めた。横軸は圧電素子の変位の一秒間あたりの繰り返し数である。測定値は100回の繰り返しから求めた印加電圧1パルスに換算した値である。理論値と測定値はほぼ一致している。1300回/秒前後の繰り返し数で1パルスあたり0.2~0.25 μm の微動を与えることが可能である。さらに大きな移動量を与えるには、このままの機構では摩擦力の関係上不可能である。圧電素子の変形を大にする、拡大率の大きな拡大機構の採用などが必要となる。あるいは、摩擦力を大にする摩擦係数を大にすること、例えば、拡大機構の先端部をゴムとすることが解決となると考えられる。

Fig.11 Movement of table

また、回転方向の運動については、3個の各電極に順次パルス電圧を印加しテーブルに回転微動を与えた。パルス電圧の周波数が3300Hzで、時計方向および反時計方向への回転変位が安定な結果となり、0.012rp/sの回転速度が得られた。さらに、移動テーブルへの可搬重量について検討した。約30gまでの重量を搭載した場合に所期の直線方向の移動量と回転方向の移動量が得られる結果となった。

4. 結 言

三極円筒型圧電素子を用いた微動テーブルで一個のアクチュエータで任意の方向の直線運動のみならず回転運動をも可能とすることを示した。圧電素子の周波数特性をも含めた解析を行うとともに微動テーブルを試作し、テーブルをサブミクロンオーダで駆動可能なことを示した。本研究の結論は以下のとおりである

- (1) 三極に電極をコーティングした円筒型圧電素子によりX-Y- θ に微動可能なテーブルが実現できることを示した。さらに電極を多数にすることによりより微細な駆動制御が実現可能である。
- (2) 試作した微動テーブルで μm 以下の微動が可能であることを確認した。さらに分解能を高めるには、拡大機構の拡大率、材質などの検討が必要である。
- (3) 試作した微動テーブルでは30gまでの試料の可搬が可能であり、STMあるいは顕微鏡下での試料の操作など、実用に耐え得るものであることを示した。

参 考 文 献

- (1) 樋口・ほか2名、精密機械、54-11(1988), 2107.
- (2) 森山・ほか2名、精密機械、50-4(1984), 80.
- (3) Matuda, R. and Kaneko, R. Proc. of Micro Electro Mechanical Systems, (1991), 111.
- (4) Higuchi, H. et., Proc. of Micro Electro Mechanical Systems, (1990), 222.
- (5) Nagami, H. and Sakano, S. 9th International Conference on CAD/CAM, Robotics (1993)
- (6) Binnig, G. Rohrer, H. and Weibel, E. Appl. Phys. Letters, 40 (1982), 178.
- (7) Pohl, D. W. Instrum, 58-1 (1987), 54.
- (8) 谷口・ほか3名、機論、28-188、(1962), 485.
- (9) 原・ほか4名、精密工学、60-12、(1994), 1736.
- (10) 杉原、東条、精密機械、52-8、(1986), 1443.