双子型圧電駆動並進機構*

古川 英一** 水野 誠*** 北條 太郎***

A Twin-Type Piezo-Driven Translation Mechanism

Eiichi FURUKAWA, Makoto MIZUNO and Taro HOJO

A monolithic translation mechanism driven by two pairs of piezoelectric stacks is described which was devised primarily for the mechanical scanner of STM (scanning tunneling microscope). The layout of the mechanism is symmetrical with respect to the center lines of the base plate. Each pair of piezoelectric stacks is cemented at the outer ends between two movable elements of the flexure-hinged linkage which supports a moving platform, and is also cemented at the center on both sides of aluminium alloy square blocks provided on both ends of the base plate. An X-Y translation stage is readily formed by stacking one translation stage on another. It is possible to improve the accuracy of motion of the moving platform by properly adjusting the applied voltage to each piezoelectric stack. Relationship is examined experimentally between the applied voltage and the accuracy of motion in order to attain a high precision translation mechanism. It is demonstrated that the yaw of the moving platform produced by a $46\text{ }\mu\text{m}$ output displacement of the moving platform is reduced from 0.3 arcsec to less than 0.1 arcsec by adjusting the applied voltage to one of four piezoelectric stacks.

Key words: translation mechanism, flexure-hinged linkage, piezoelectric stack, mechanical scanner, scanning tunneling microscope

1. はじめに

近年、走査型トンネル顕微鏡 (STM) をはじめとして様々な原理に基づいた走査型顕微鏡の開発が行われているが、多くの場合、広い走査範囲、高い固有振動数、及び高い運動の精度を備えた機械式走査系 (スキャナ) を必要とする¹⁾。高い固有振動数と広い走査範囲を兼ね備えた圧電駆動並進機構が著者らによって開発されているが²⁾、この機構では運動の精度を表す可動台の寄生角変位は専ら機構の製作精度によって決まり、圧電駆動素子の出力変位には関係しない。もし圧電駆動素子によって機構の寄生角変位に影響を及ぼすことが可能であれば、機構の組立後に外部から機構の運動の精度を調整することが可能となる。

このような可能性を検討し高精度の並進機構を実現することを目的として、2対の積層型圧電素子によって駆動する並進機構を試作した。以下、この機構を双子型機構と呼ぶことにする。また、この機構は2組の機構を重ね合わせることによって、比較的簡単にX-

Y並進ステージを構成できるという利点を持っている。

本論文は、この機構の動作原理、設計式、及び運動の精度の補正について述べており、機構の動力学的特性を明らかにすることを主要な目的としている。

2. 双子型機構の動作原理

図1に双子型機構の動作原理を示す。図を参照して、2個の入力リンク、4個の連結リンク及び可動台がそれぞればね軸受によって連結されている。さらに、2個の入力リンクの両端にAからDの4個の圧電素子の一端が接着され、圧電素子の他端は機構の台板に接着されている。この機構の入-出力変位間の関係は、次式によって与えられる。

$$x = \left(\frac{a}{l}\right)y \left[1 + \left(1 + \frac{a^2}{l^2}\right)\frac{y}{2a} + \left(1 + \frac{a^2}{l^2}\right)\frac{y^2}{2l^2} + \dots \right] \quad (1)$$

ここに、 x は出力変位、 y は入力変位、すなわち1個の圧電素子の長さの変化、また a と l はリンク機構の形状を決めるパラメータである。式(1)はリンク機構の拡大倍率が (a/l) であることを示している²⁾。

双子型機構の場合、4個の圧電素子の出力変位の不同が運動の精度に影響を及ぼすと考えられ、理論上は

* 原稿受付 平成4年4月1日

** 正会員 中央大学理工学部 (東京都文京区春日1-13-27)

*** 学生会員 中央大学理工学部

Fig. 1 Principle of operation of the twin-type mechanism

4個の圧電素子の駆動電圧を変化させることによって運動の精度を補正することができる。

図1の $+\phi$ の方向に可動台のヨーが検出された場合には、AあるいはCの圧電素子の駆動電圧を、逆に $-\phi$ の方向にヨーが検出された場合には、BあるいはDの駆動電圧を下げることによってヨーを補正することができる。また、その際の可動台の変位は、4個の圧電素子の出力変位の平均値に対して式(1)を満足すると考えられる。

実際の機構の場合、1個の圧電素子だけの駆動電圧を著しく低減することは一部のばね軸受に大きな応力を発生させることになるので、圧電素子A及びC、あるいはB及びDのような対角の位置に配置された素子の駆動電圧を同時に変化させることが望ましい。また、このことによって1個の素子だけの調整の場合に比べてより大きな角度補正を行うことができる。

図2にX-Yステージの構造の概要を示す。動作原理は図1の双子型機構と同様であり、2組の機構の運動方向を直角にして積み重ねることによってX及びY方向の走査を可能にしている。上段となる機構(X機構)は、圧電素子を介して下段の機構(Y機構)の可動台に設けた角形の突起に接着、所定の位置に固定されている。

3. 試作した機構の詳細

図3に、試作した双子型機構の詳細を示す。設計式の妥当性の評価のために、倍率5倍(T-5)、倍率10

Fig. 2 Principle of operation of the X-Y stage

Fig. 3 Mechanical realization of the X-Y stage

倍(T-10)、及び倍率10倍のX-10とY-10を積み重ねた2成分(X-Y-10)の3種類の試料機構を試作し

Table 1 Design parameters of the twin-type mechanism

Specimen	a	l	Dimensions
T-5	10 mm	2 mm	52×48×7 mm
T-10	10 mm	1 mm	52×48×7 mm
X-10	10 mm	1 mm	52×48×7 mm
Y-10	10 mm	1 mm	72×52×7 mm

た。試料機構の主要な設計パラメータは表1に示してある。一体構造の試料機構 T-5, T-10 は、寸法 52×48×7 mm, Y-Y ステージとする Y 機構（下段）は、寸法 72×52×7 mm, X 機構（上段）は T-10 と同一寸法の ANP 79-T 651 アルミニウム合金のブランクから加工されている。

ばね軸受は、ジグボール盤によって精密に加工された直径 3 mm の 2 つの隣接する穴から成形されている。穴はまずドリルによって基準寸法よりも 0.4 mm 小さく加工し、次に公差 $\pm 2 \mu\text{m}$ で正確に基準寸法に仕上げたエンドミルリーマによって所定の直径に仕上げる。ばね軸受の加工誤差、すなわちばね軸受の回転中心の位置の誤差及びばね軸受の厚さの誤差は、主にばね軸受を構成する穴の中心線の位置決め精度によって決まる。さらに、工具の不適當な取付けなどによって起こる加工された穴のテーパも、ばね軸受の加工誤差に重大な影響を及ぼす。

ブランクの所要の輪郭、及び機構を構成するリンクは、ワイヤ放電加工による溝（溝幅 0.5 mm）を利用した。溝の加工の詳細は図3に太線で示してある。

圧電素子は寸法 5×5×9 mm, 厚さ 115 μm の圧電セラミックスの薄板が 72 枚積層されており、ブランクの所定の位置に接着されている。定格最大出力変位は 6.5 $\mu\text{m}/100 \text{ V}$ である。組立を容易にするために、最適な接着層の厚さ（1 層当たり 0.03 mm）を保证するように、入力リンクの間隔は狭い公差で仕上げてある。組立時に、駆動に使用する 4 個の圧電素子の出力変位の不同を低減するために、圧電素子の選択組立は行っていない。圧電素子の出荷時の試験表によると、出力変位の不同は最大出力変位の $\pm 1.5\%$ 以下であった。

ばね軸受を用いた機構の場合、ばね軸受のばね定数は重要な設計パラメータである。Paros らによって求められた、次の近似式は比較的正確な結果を与えることが証明されている³⁾。

$$k_b = \frac{2Eht^{5/2}}{9\pi R^{1/2}} \quad (2)$$

$$k_s = (Eh) \left[\pi \left(\frac{R}{t} \right)^{1/2} - 2.57 \right]^{-1} \quad (3)$$

Fig. 4 Schematic of a flexure pivot with circular cutouts **Fig. 5** Equivalent system of the twin-type mechanism

ここに、 k_b はばね軸受のねじりばね定数、 k_s はばね軸受の長手方向の伸びに対するばね定数、 E はばね材料のヤング率、 t はばね軸受の厚さ、 h はばね軸受の深さ、また R はばね軸受を形成する 2 つの穴の半径である（図4参照）。

4. 固有振動数

双子型機構の場合、圧電素子は本来の軸方向の伸縮に加えて、軸方向に垂直なせん断変形を受ける。可動台の運動方向の固有振動数は、圧電素子のせん断によって低下する可能性がある。

図5を参照して、連結リンクが剛体であり、ばね軸受の Y 方向の伸びを Δ （図示せず）、各ばね軸受の回転角を θ 、圧電素子の伸びを y 、入力リンクのたわみを λ とすると、幾何学的関係から、

$$y - 2\Delta - \lambda = l\theta \quad (4)$$

X 方向の可動台の変位を x_1 、入力リンクの変位を x_2 とすると、

$$\theta = \frac{x_1 - x_2}{a} \quad (5)$$

$k_0\lambda = k_s\Delta$ で定義する入力リンクのばね定数を k_0 と

すると、8個のばね軸受、2個の入力リンク、及び4個の圧電素子に蓄えられるひずみエネルギーは、

$$U = \frac{4k_B}{a^2}(x_1 - x_2)^2 + \frac{k_s}{1 + k_s/(2k_0)} \times \left\{ y - \frac{l}{a}(x_1 - x_2) \right\}^2 + 2K_T x_2^2 + 2Ky^2 \quad (6)$$

ここに、 K は圧電素子の長手軸方向のばね定数、 K_T は圧電素子のせん断ばね定数である。

また図5を参照して、系全体の運動エネルギーは、

$$T = \frac{1}{2}M\dot{x}_1^2 + m\dot{x}_2^2 + m\dot{y}^2 \quad (7)$$

ここに、 M は可動台の質量、 m は入力リンク1個あたりの質量である。

式(6)、式(7)を用いて x_1 , x_2 及び y に関するラグランジュの運動方程式を求めると、

$$M\ddot{x}_1 + Ax_1 - Ax_2 - By = 0 \quad (8)$$

$$2m\ddot{x}_2 - Ax_1 + (A + 4K_T)x_2 + By = 0 \quad (9)$$

$$2m\ddot{y} - Bx_1 + Bx_2 + Cy = 0 \quad (10)$$

ここに、

$$A = \frac{8k_B}{a^2} + \frac{2k_s}{1 + k_s/(2k_0)} \left(\frac{l}{a} \right)^2$$

$$B = \frac{2k_s}{1 + k_s/(2k_0)} \left(\frac{l}{a} \right)$$

$$C = \frac{2k_s}{1 + k_s/(2k_0)} + 4K$$

式(8)、式(9)、及び式(10)より、振動数方程式は、

$$\begin{vmatrix} A - M\omega^2 & -A & -B \\ -A & A + 4K_T - 2m\omega^2 & B \\ -B & B & C - 2m\omega^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (11)$$

ばね軸受を利用した拡大機構では、ばね軸受の伸びによって拡大倍率が低下する。試作した機構の場合には、最初に定義した拡大倍率 (a/l) が $(a/l)/(1+\mu)$ に低下する。したがって、機構の出力変位は、

$$x = \left(\frac{a}{l} \right) y (1 + \mu)^{-1} \quad (12)$$

ひずみエネルギー法を適用すると、係数 μ 及び圧電素子から機構へ作用する駆動力 F は次のように表すことができる。

$$\mu = \frac{4}{l^2} \left(\frac{k_B}{k_s} \right) \left(1 + \frac{k_s}{2k_0} \right) \quad (13)$$

$$F = \frac{8k_B}{l^2} y (1 + \mu)^{-1} \quad (14)$$

ここに、 y は1個の圧電素子の出力変位である。

入力リンクのばね定数 k_0 が既知であれば、 X 方向

Fig. 6 Equivalent system of the input bar

Fig. 7 The lowest natural frequency and the decrease in magnification plotted against the thickness of the input bar in T-5 specimen

(並進方向)の固有振動数は式(11)から計算することができる。入力リンクのばね定数は、図6の2点で支持されたはりから求めることができる。はりのせん断ひずみを考慮すると、 k_0 は次式のように表される。

$$k_0 = \frac{F}{\lambda} = \frac{Ehd^3}{2e^3} \left[3\frac{D}{e} - 4 + \frac{39}{20} \left(\frac{d}{e} \right)^2 \right]^{-1} \quad (15)$$

ここに、 h は入力リンクの深さ、 d は入力リンクの厚さ、 e は圧電素子の中心とばね軸受の間の距離、 D は2個の圧電素子間の距離である(図6参照)。

双子型機構の場合、 X 方向の固有振動数と倍率の低下は入力リンクのばね定数 k_0 に密接に関係している。式(15)から入力リンクのばね定数は、その厚さ d が増すにつれて向上することがわかる。しかし入力リンクの厚さが増すにつれてその質量も増大し、並進方向の固有振動数は必ずしも向上するとは限らない。図7に、試料機構T-5について、入力リンクの厚さと固有振動数及び倍率の低下の関係の計算結果を示す。なお、この場合入力リンクの質量は d に比例して増大するとして計算した。実際に試作した試料機構の場合、入力リンクの厚さ d は5 mmであり、厚さを増大させることによって、さらに固有振動数の向上が期待できることがわかる。

Table 2 The lowest resonance frequencies of the twin-type mechanism

Specimen	X Hz	Y Hz	Z Hz
T-5	2 056	4 312	4 150
T-10	1 084	4 150	4 262
X-Y-10	1 195	490	1 787

Table 3 Spring rates of the twin-type mechanism

Specimen	T-5, T-10 and X-10	Y-10
k_b Nmm	1.4×10^3	1.4×10^3
k_s N/mm	9.2×10^4	9.2×10^4
k_0 N/mm	1.4×10^4	3.5×10^4
K N/mm	1.3×10^5	1.3×10^5
K_T N/mm	1.9×10^4	1.9×10^4

5. 実験結果と考察

式 (11) の妥当性を評価するために、直交 3 軸 X 、 Y 及び Z 軸について共振振動数を測定した。ここに、 X 軸は T-5 及び T-10 機構については圧電素子によって発生する可動台の運動と平行な軸、X-Y-10 機構については X-10 (上段) の可動台の運動と平行な軸、 Y は横方向軸、 Z は可動台のサンプル搭載面に直角な軸である。 X 軸共振の場合、及び X-Y-10 の Y 軸共振の場合には、機構はその駆動要素である圧電素子によって駆動し、可動台の振幅は渦電流変位センサによって測定した。 Y 軸及び Z 軸共振の場合には、機構全体を動電型振動発生機によって加振し、可動台の振幅は可動台に接着した超小型加速度ピックアップ (質量 1.2 g) によって測定した。使用した振動発生機の動作振動数範囲の制約から、5 000 Hz 以上の共振振動数の検出は不可能であった。

表 2 に双子型機構の最低共振振動数の実測値を示す。 X 軸方向の共振振動数は、式 (11) によって計算することができる。このようにして計算した固有振動数は、表 2 の実測値とよく一致することが確認された。一致の精度は T-5 及び T-10 機構については 2% 以下であり、X-Y-10 機構の Y 軸方向、すなわち Y 機構の並進方向については 20% 程度であった。計算に使用したばね定数は表 3 に、設計パラメータは表 4 に総括してある。

運動の精度を評価するために、最小カウント 0.1 arcsec のレーザ測定装置 (Hewlett Packard 5528 A) 及び可動台に取り付けた鏡 (質量 340 g) によって可動台の寄生角変位を測定した。運動の精度の比較のために、表 5 に、4 個の圧電素子を同一電圧で駆動した

Table 4 Design parameters of the twin-type mechanism

Specimen	T-5	T-10 and X-10	Y-10
a mm	10	10	10
l mm	2	1	1
t mm	0.3	0.3	0.3
h mm	7	7	7
M g	9.5	9.5	40.7*
m g	5.6	5.6	7.4
$(1+\mu)^{-1}$	0.94	0.79	0.88
F^{**} N	16.7	57.5	64.1

* Y-10 の可動台の質量には、X-10 機構の総質量を含む

** 最大入力変位 6.5 μm に対する値

Table 5 Parasitic angular motions produced by a 26 μm displacement of moving platform in T-5 specimen, by a 45 μm displacement in T-10 specimen, and by a 45 μm X- and Y-displacement in X-Y-10 specimen

Specimen	T-5	T-10	X-Y-10
Pitch arcsec	-1.0	-0.2	2.5
Yaw arcsec	0.4	0.3	-0.6
Roll arcsec	-0.6	-0.5	0.9

ときの拡大倍率 5 倍と 10 倍の 2 種類の試料機構、T-5 及び T-10、ならびに試料機構、X-Y-10 に関する測定値を示す。

圧電素子の駆動電圧の調整によって運動の精度を改善する可能性の検討のために、試作した試料機構は圧電素子の駆動電圧の比を調整するための 4 個のポテンショメータを使用する簡単な回路を備えている。まず 1 個の圧電素子の駆動電圧を他の 3 個の圧電素子の駆動電圧より 0.1% だけ低く設定し、発生するヨーと可動台の出力変位の関係を測定した。つづいて駆動電圧を 0.1% だけ減少させるたびに同じ測定を繰り返した。この結果、ヨーを最小にするための最適駆動電圧比が存在することがわかった。実際には、組み立てた機構について、その都度このような試験を行って最適駆動電圧比を決定することが必要であって、かなりの時間を必要とする。

図 8 に、圧電素子の 2 種類の駆動条件に対する可動台の出力変位とヨーの関係を示す。T-10 機構の場合、表 5 に示すように、4 個の圧電素子を同一の駆動電圧で駆動することによって最大 0.3 arcsec のヨーが検出される (▲)。これを 1 個だけの圧電素子 A の駆動電圧の変化によって補正を行った結果を図 8 に示す (○)。この場合、圧電素子 A の最適駆動電圧は他

Fig. 8 Relationship between the output displacement and the yaw in T-10 specimen under two driving conditions of the piezoelectric stacks

の3つの圧電素子の駆動電圧に対して0.6%だけ低かった。

対角の2つの圧電素子の駆動電圧を変化することによって運動の補正を行った場合についても、図8と同様な試験結果を得ることができた。この場合、図1を参照して、圧電素子A及びCの駆動電圧をB及びDの駆動電圧に対してそれぞれ0.4%だけ下げて駆動している。

ピッチ及びロールについても、ヨーの場合と同様に駆動電圧の差と発生するピッチ及びロールについて広範な試験を行ったが、駆動電圧の変化はピッチ及びロールにほとんど影響を及ぼさないことが確認された。

電子マイクロメータによってX-Y-10機構の入力及び出力変位を測定し、式(1)の妥当性を確かめた。図9に、X-Y-10機構に関する測定結果を示す。試験はX-Y-10機構のX機構だけを駆動した場合について行った。図の実線は、X-Y-10機構のX機構の入出力変位間の関係を表す式(12)を満足する直線である。手持ちの20個の圧電素子から無作為に選んだ4

Fig. 9 Relationship between the input and output displacements of X-mechanism in X-Y-10 specimen

個の素子によって駆動したにもかかわらず、理論と実験値の一致はきわめて良好であった。

6. 結 論

- (1) 導いた設計式の妥当性を実験により確かめた。
- (2) 試作した機構は、運動の精度の補正に有効である。
- (3) 開発した機構は一体構造であり、比較的簡単にX-Yスキャナを構成することができる。

参 考 文 献

- 1) D. W. Pohl : Some Design Criteria in Scanning Tunneling Microscopy, IBM J. Res. Develop., 30, 4, (1986) 417.
- 2) 古川英一, 水野 誠 : リンク機構を利用した圧電駆動並進機構, 精密工学会誌, 58, 1 (1991) 127.
- 3) J. M. Paros & L. Weisbord : How to Design Flexure Hinges, Machine Design, 37, 11, (1965) 151.