サーフェイスモータを用いた六自由度精密 XY ステージの開発*

富田 良幸^{*1}, 杉峰 正信^{*2}, 小梁川 靖^{*1}Development of Six-Axis Precise Positioning System Driven
by Surface Motor

Yoshiyuki TOMITA, Masanobu SUGIMINE and Yasushi KOYANAGAWA

A newly developed six-axis precise positioning system incorporating a surface motor (SFM) is presented and its operational principle, mechanical and control system design, and some experimental results are described. The positioning system is levitated on a base plate by three air-bearing pads; being driven by simultaneous operation of three linear motors in the x -, y -, and z -directions and piezo elements in the z -, θ_x -, and θ_y -directions. A new design concept is discussed that incorporates (i) a mechanical design relative to the drive and sensing point locations which enables stabilization of the x -, y -, and z -directional planar motions and (ii) a six-axis position control method using a force disturbance observer for achieving high positioning resolution as well as quick response capabilities. Evaluation of experimental results indicates that the system is capable of achieving six-axis precise motion with 10-20 nm resolution in the x - and y -directions and that the proposed control strategy enables better positioning characteristics than the conventional PID-based servo control method.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Positioning, Servo Mechanism, Surface Motor, Piezo Element, Motion Control, Force Disturbance Observer

1. 緒 言

レーザ加工装置や半導体製造装置等, 近年めざましく発展している微細加工装置の分野では, 高速高精度な位置決め装置は必要不可欠な基本要素となっている。必要とされる位置決め精度は, 通常レーザ加工分野では 0.1 から 1.0 μm , 半導体露光装置では 0.05 μm 以下といわれており, また, 高スループット化を目的として高い応答性と三次元的な運動精度の向上が必要とされている。このようなことから著者らは, 従来のボールねじとサーボモータを主とする駆動方式に変わる方式として, サーフェイスモータ(SFM)を用いた位置決め装置について研究を進めている⁽¹⁾⁽²⁾。これまでの研究の結果, 試作したストローク 30 mm の XY ステージにより分解能 10~20 nm, 応答性 100 Hz を達成しその有効性を確認した。本駆動方式を上記システム用途で実用化するためには, 数 100 mm 程度 (xy) のストロークを実現する機械構成, 六自由度運動精度を実現する駆動系構成とその制御方式等についてさら

に検討する必要がある。

超精密位置決め方式については, これまでにも多くの報告がなされている^{(3)~(8)}。森山⁽³⁾らは, 圧電素子を用いた微動ステージとボールねじ駆動の粗動ステージとを組合せた方式, また, 二見⁽⁴⁾⁽⁵⁾らは AC リニアモータを用い転がり案内機構の変位特性に注目した非線形制御方式を提案し xy 平面内あるいは 1 軸方向の位置決めでの有効性を確認した。一方, 三次元的な運動誤差を考慮した制御方式としては, 高精度な直線運動を実現するため, 空気軸受を用い基準面との運動誤差を三次元的に補正する青山ら⁽⁹⁾の研究が知られている。しかし, 従来の報告では位置決め装置の動的な三次元運動特性を扱った研究は少なく, 1 軸あるいは xy 平面内での位置決めに関する報告が中心となっている。

このようなことから, 本論文では XY ステージの高帯域化と高精度化を目的として, SFM と圧電素子を用いた六自由度駆動機構と制御系の設計法について述べる。まず, 本ステージの機械構成と駆動原理について述べる。次に, 六自由度力学モデルを導出し, システムの安定化に必要な駆動点および計測点の配置条件について検討する。さらに, 六自由度系の制御方式として外乱オブザーバ⁽¹⁰⁾を用いたロバスト制御系の構

* 原稿受付 1995 年 8 月 30 日。

^{*1} 正員, 住友重機械工業(株)総合技術研究所 (〒254 平塚市夕陽ヶ丘 63-30)。^{*2} 住友重機械工業(株)総合技術研究所。

成, 設計法について述べる。最後に, 実験結果を示し, 本駆動方式の有効性について検討を行う。

2. サーフェイスマータを用いた 六自由度 XY ステージの構成

2.1 ステージの全体構成 本ステージでは, 高い応答性と三次元的な運動精度を確保するため, xy 平面運動系をサーフェイスマータを用いたダイレクトドライブ方式とするとともに, 圧電素子とエアベアリングによるレベリング機構を用いることで六自由度構成とした。開発したステージの全体概略構成を図1に示す。可動ステージは, 一辺約 400 mm のアルミニウムプレートからなり, 3組のエアベアリングにより平面上を非接触に案内される。駆動部は, xy 方向の長ストローク運動を行う SFM 駆動部と, z - θ_x - θ_y 方向の微動を行うレベリング駆動部より構成される。SFM 駆動部は, 可動ステージ裏面に締結された3組の永久磁石列とベースプレート上の3組のコイル列から構成されており, 可動部へのケーブル配線を避けるため, ムービングマグネット形構成とした。また, 各エアベアリングと可動ステージの間には圧電素子が組込まれており, これによりステージの z - θ_x - θ_y 方向のレベリング動作が行われる。ステージの x - y θ_z 変位はレーザ測長器(HP社製, 5501 A, 分解能 5.0 nm)により, また, z - θ_x - θ_y 変位は可動ステージに取付けられた3組の静電容量変位計(ADE社製, マイクロセンス)によりそれぞれ計測される。

従来, 高精度位置決め系では, アップの原理に基づき位置決め目標点と計測点を同一平面上に配置することでピッチング運動による位置計測誤差を最小とする方法が一般に用いられる。本ステージでは, 後述する

ようにピッチング運動がシステムの安定性に及ぼす影響を考慮し, SFM の駆動点およびレーザ干渉計の計測点をステージ重心点に対してベース側に配置することで xy 平面運動系の高帯域化を図った。また, アップ誤差補正を含むレベリング動作を圧電素子駆動機構によって行う構成とした。

2.2 駆動部の構成 図2に SFM 駆動部の詳細構成を示す。全体は3組(X , Y_1 , Y_2)の二相リニア DC モータから構成され, x 方向駆動用モータ(X), y 方向駆動用モータ(Y_1 , Y_2)をステージの3辺に配置する構造とした。各駆動部コイルは二相励磁方式によりそれぞれ独立に電流制御されており, モータ推力 $f_i = (f_{ix}, f_{iy1}, f_{iy2})^T$ により, xy 方向の並進力とステージ重心回りのトルクを得ている。本構成では, ステージ重心点と推力発生点の距離 l_x , l_{y1} , l_{y2} はステージ位置によらず一定となるため, x , y , θ_z 各軸の独立な制御が容易となる。なお, 磁石ピッチは, X 駆動部で 15 mm, Y_1 , Y_2 駆動部で 17.5 mm であり, その定格推力は 27 N(X), 19 N(Y_1 , Y_2)である。

レベリング駆動部の構成を図1にあわせて示す。可動ステージに圧電素子が固定され, その先端に設けられた球面ヒンジを介してエアベアリングが固定されている。エアベアリング内部には永久磁石が組込まれており, パッド部と案内面の間に磁路を構成することでエアベアリングに予圧を与えている。本機構では, 圧電素子への印加電圧を制御することでステージの並進および回転変位(z , θ_x , θ_y)の制御が行われる。なお,

Fig. 1 Outline of SFM positioning system

Fig. 2 Arrangement of the drive element coil/permanent magnet pairs

Table 1 Specifications of XY stage

Stage size		378 × 393 × 25mm
Travel stroke		(x, y) 200 mm, (z) 34 μm (θ _x) 87 μrad (θ _y) 90 μrad
Stage weight		24.9kg
SFM	Thrust	(X) 27N, (Y ₁) 19N, (Y ₂) 19N
	Rated current	5.0 A
	Time constant	(X) 0.20ms, (Y ₁ , Y ₂) 0.19ms
	Permanent magnet	Nd-Fe-B type, 279 kJ/m
	Air gap	1.0mm
Leveling unit	Actuator Stroke	Piezoelectric stack 34 μm/150V
Position sensor		(x, y, θ _z) Laser interferometer 5.0 nm/pulse (z, θ _x , θ _y) Capacitive transducer ±50 μm/±10V

圧電素子はストローク 34 μm(駆動電圧 150 V)のものをを用いた。

本ステージは、三自由度 SFM を用いたダイレクトドライブ構造をもつため、 x, y 各駆動軸を独立に構成する従来のステージと異なり全体構造が単純化され、高剛性化、高帯域化が容易となる。また、SFM による平面運動と圧電素子によるレベリング動作の組合せにより高速高精度な六自由度運動が可能である。本ステージの基本仕様を表 1 に示す。

3. 六自由度ステージの動力学モデルと安定条件

3.1 動力学モデル ステージの六自由度運動に関する力学モデルは、ステージ可動部を剛体と仮定し、SFM による x, y, θ_z 系の運動と、レベリング駆動部による z, θ_x, θ_y 系の運動より導出される。モデル化の条件として、SFM の二相励磁電流をその指令電流により代表し、圧電素子を電圧比例型の変位素子とばね・ダッシュポットとの直列結合系として扱う⁽¹¹⁾。ステージ重心点を原点とする $O\text{-}xyz$ 座標系に対して、SFM によるステージの xy 平面内三自由度系の運動 $\mathbf{x}_1 = \{x, y, \theta_z\}^T$ は、次式で表される。

$$\mathbf{M}_1 \ddot{\mathbf{x}}_1 = -\mathbf{D}_1 \dot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{P}_1 \mathbf{K}_f \mathbf{i}^* \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\mathbf{P}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ -l_x & l_{y1} & l_{y2} \end{pmatrix}$$

ここで、 $\mathbf{M}_1 = \text{diag}[M_1, M_1, J_{z1}]$ は $x\text{-}y\text{-}\theta_z$ 系のステージ慣性行列、 $\mathbf{D}_1 = \text{diag}[D_x, D_y, D_{\theta z}]$ はエアベアリングの粘性摩擦係数行列、 $\mathbf{K}_f = \text{diag}[K_{fx}, K_{fy1}, K_{fy2}]$ はモータ推力定数行列、 $\mathbf{i}^* = \{i_x^*, i_{y1}^*, i_{y2}^*\}^T$ は SFM のコイル電流ベクトル、 $\mathbf{P}_1$ はコイルの配置位置を表す行列、 l_x, l_{y1}, l_{y2} はコイルの駆動点座標を表す(図 2)。

次に、ステージの上下およびピッチング運動 $\mathbf{x}_2 =$

$\{z, \theta_x, \theta_y\}^T$ は、ステージと圧電素子間の弾性力 $\mathbf{f}_{s2}$ とダンピング力 $\mathbf{f}_{c2}$ およびモータの発生トルク $\boldsymbol{\tau}_i$ より次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}_2 \ddot{\mathbf{x}}_2 &= \mathbf{f}_{c2} + \mathbf{f}_{s2} + \boldsymbol{\tau}_i \\ \mathbf{f}_{c2} &= (\mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{D}_{pz} (\mathbf{A}_{pz} \dot{\mathbf{w}} - \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{x}}_2 + \dot{\mathbf{x}}_3) \\ \mathbf{f}_{s2} &= (\mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{K}_{pz} (\mathbf{A}_{pz} \mathbf{w} - \mathbf{J}^{-1} \mathbf{x}_2 + \mathbf{x}_3) \\ \boldsymbol{\tau}_i &= \mathbf{P}_2 \mathbf{K}_f \mathbf{i}^* \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\mathbf{M}_2 = \text{diag}[M_2, J_{x2}, J_{y2}]$ はエアベアリングを除く $z\text{-}\theta_x\text{-}\theta_y$ 系の可動ステージ慣性行列、 $\mathbf{D}_{pz} = \text{diag}[D_{pz1}, D_{pz2}, D_{pz3}]$ は圧電素子粘性係数行列、 $\mathbf{K}_{pz} = \text{diag}[K_{pz1}, K_{pz2}, K_{pz3}]$ は同剛性行列、 $\mathbf{A}_{pz} = \text{diag}[A_{pz1}, A_{pz2}, A_{pz3}]$ は同印加電圧/変位定数行列、 $\mathbf{w} = \{w_1, w_2, w_3\}^T$ は同印加電圧ベクトルである。なお、 $\mathbf{P}_2$ はコイルの配置位置を表す行列、 $\mathbf{J}$ はエアベアリングの z 方向変位とステージ変位間のヤコビアン行列であり次式で表される。

$$\mathbf{P}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -l_z & -l_z \\ l_z & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{J}^{-1} = \begin{pmatrix} l & \beta_1 & -\alpha_1 \\ l & \beta_2 & -\alpha_2 \\ l & \beta_3 & -\alpha_3 \end{pmatrix}$$

ここで、 l_z は駆動点座標を表す定数、 $\alpha_i, \beta_i (i=1-3)$ は平面案内機構の配置点の x, y 座標を表す(図 2)。エアベアリングの運動 $\mathbf{x}_3 = \{z_1, z_2, z_3\}^T$ についても同様に表される。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{x}}_3 &= \mathbf{f}_{c3} + \mathbf{f}_{s3} \\ \mathbf{f}_{c3} &= -\mathbf{D}_{pz} \mathbf{A}_{pz} \dot{\mathbf{w}} + \mathbf{D}_{pz} \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{x}}_2 - (\mathbf{D}_{pz} + \mathbf{D}_a) \dot{\mathbf{x}}_3 \\ \mathbf{f}_{s3} &= -\mathbf{K}_{pz} \mathbf{A}_{pz} \mathbf{w} + \mathbf{K}_{pz} \mathbf{J}^{-1} \mathbf{x}_2 - (\mathbf{K}_{pz} + \mathbf{K}_a) \mathbf{x}_3 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $\mathbf{M}_a = \text{diag}[M_a, M_a, M_a]$ はエアベアリング慣性行列、 $\mathbf{D}_a = \text{diag}[D_{a1}, D_{a2}, D_{a3}]$ は同 z 方向粘性摩擦係数行列、 $\mathbf{K}_a = \text{diag}[K_{a1}, K_{a2}, K_{a3}]$ は同 z 方向剛性行列である。

一方、レーザ干渉計で測定されるステージの位置計測値 $\mathbf{x}_{1m} = \{x_m, y_m, \theta_{zm}\}^T$ は、ステージ変位 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ およびステージ位置計測点を表す行列 $\mathbf{P}_3$ より次式のように表される。

$$\mathbf{x}_{1m} = \mathbf{x}_1 + \mathbf{P}_3 \mathbf{x}_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\mathbf{P}_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & l_m \\ 0 & -l_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

ここで、 l_m は位置計測点座標を表す定数である(図 2)。式(1)～(4)よりステージの六自由度運動が表される。系のブロック線図を図 3 に示す。

3.2 $x\text{-}y\text{-}\theta_z$ 運動制御系の同相安定条件⁽¹²⁾ 3.1 節の動力学モデルに基づき、SFM による xy 平面内の位置制御系に注目し、その安定条件について考察を行う。式(1)におけるモータ推力を次式により制御

Fig. 3 Block diagram of SFM stage's dynamics

座標系に対して非干渉化し、その際の目標推力を $\mathbf{f}_r = (f_{rx}, f_{ry}, \tau_{rz})^T$ とおく。

$$\mathbf{i}^* = (\mathbf{P}_1 \mathbf{K}_f)^{-1} \mathbf{f}_r \quad (5)$$

次に、圧電素子の剛性がエアベアリング剛性に比べ十分高く、さらに、エアベアリングの各剛性が等しく次式の配置条件を満たす場合、

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 &= 0 \\ \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 &= 0 \\ \alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2 + \alpha_3 \beta_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

系の運動は $x \sim \theta_y$, $y \sim \theta_x$ の各連成系と、 θ_z および z の独立な運動系に分離できる。いま、簡単のためダンピング項を零とし、 x および y 方向の自由度についてモータ推力 f_{rx} , f_{ry} からそれぞれ計測変位 x_m , y_m までの開ループ伝達関数を求めると、

$$\left. \begin{aligned} \frac{x_m}{f_{rx}} &= \frac{(J_y + M l_z l_m) s^2 + C_x}{M s^2 \{J_y s^2 + C_x\}}, \\ C_x &= k_a \sum_{i=1}^3 (\alpha_i^2) \\ \frac{y_m}{f_{ry}} &= \frac{(J_x + M l_z l_m) s^2 + C_y}{M s^2 \{J_x s^2 + C_y\}}, \\ C_y &= k_a \sum_{i=1}^3 (\beta_i^2) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

上式より、各伝達関数の極、零点は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} (x) \text{ 零点 } \omega_{zx} &= \sqrt{\frac{C_x}{(J_y + M l_z l_m)}}, \\ \text{極 } \omega_{px} &= \sqrt{\frac{C_x}{J_y}}, \\ (y) \text{ 零点 } \omega_{zy} &= \sqrt{\frac{C_y}{(J_x + M l_z l_m)}}, \\ \text{極 } \omega_{py} &= \sqrt{\frac{C_y}{J_x}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

この結果、両自由度の零点と極は $l_z l_m$ の符号により次のような関係となる。

- (a) $l_z l_m = 0$ 極零消去
- (b) $l_z l_m > 0$ $\omega_{zx} < \omega_{px}$, $\omega_{zy} < \omega_{py}$
- (c) $l_z l_m < 0$ $\omega_{zx} > \omega_{px}$, $\omega_{zy} > \omega_{py}$

条件(a)が成り立つ場合、ピッチングモードにおける位置計測点の運動方向と計測方向が直交し、振動モードの位置制御系への影響が除去される。一方、条件(b)では零点周波数が極周波数よりも低くピッチングモードが剛体モードと同相となるため同相安定化条件が成立する。したがって、ピッチングモードが位置制御ループ内に含まれても閉ループ系は安定となる。これに対して、条件(c)では極周波数が零点周波数よりも低く、同相安定条件に反するため閉ループ系が不安定となる。以上より、 x - y - θ_z 制御系を高帯域化するための駆動点と位置計測点の関係は、ピッチングモードを剛体モードと同相化する $l_z l_m \geq 0$ の関係を満たす必要があることが明らかとなった。本ステージでは、SFM 駆動点がステージ下面にあるためレーザ干渉計の位置計測点は可動ステージ重心点の下部 7 mm の点に配置した。

4. 制御系の設計

4.1 外乱オブザーバによる x - y - θ_z 制御系のロバスト化 x - y - θ_z 駆動系は非接触構造であるため機械摩擦等の非線形成分が少なく、高精度化に対して有利な構成であるが、その反面、負荷系の特性が直接精度に影響を与えるという問題がある。そこで、SFM のダイレクトドライブという特徴に着目し、外乱オブザーバ⁽¹⁰⁾によってこれらの外乱を補償し系の高精度化を図る。3章同様、式(5)によりモータ推力を非干渉化すると、SFM 駆動系は伝達関数表現により次式のように表される。

$$\mathbf{f}_r + \mathbf{f}_d + (\mathbf{M}_1 s^2 + \mathbf{D}_1 s) \mathbf{P}_3 \mathbf{x}_2 = (\mathbf{M}_1 s^2 + \mathbf{D}_1 s) \mathbf{x}_{1m} \quad (9)$$

ここで、左辺第2項はSFMの推力リップルあるいはエア配管抵抗等の外乱力、第3項はステージのピッチング運動による変位外乱である。これらの外乱力を推力指令値 $\mathbf{f}_r$ と位置計測値 $\mathbf{x}_{1m}$ から二次フィルタによって次式のように推定する。

$$\hat{\mathbf{f}}_d = \frac{\omega_{ob}^2}{s^2 + 2\zeta_{ob}\omega_{ob}s + \omega_{ob}^2} \times \{(\mathbf{M}_{1n} s^2 + \mathbf{D}_{1n} s) \mathbf{x}_{1m} - \mathbf{f}_r\} \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{M}_{1n}$, $\mathbf{D}_{1n}$ はステージ慣性およびエアベアリング粘性摩擦のノミナルモデルである。

この外乱推定値を推力指令値 $\mathbf{f}_r$ にフィードバックすることにより、外乱に対してロバストな制御系が得られる。ここでは、変位計測値 $\mathbf{x}_{1m}$ から加速力を推定する際の演算精度を確保するため次式の演算を用いる。

Fig. 7 Step response to a x -directional 30 mm step-motion command

は x 軸変位に残留振動が見られ、位置指令の払い出し時刻(図 7 中 0.8 s 時点)から目標値の ± 50 nm に整定するまでに約 1 s を要する。これに対して、方式 II では約 150 ms で整定していることがわかる。また、 y および θ_z 軸には、方式 I の場合それぞれ最大 $0.7 \mu\text{m}$ 、 $12 \mu\text{rad}$ の過渡的な干渉が見られ、特に y では約 700 ms の整定時間 (± 50 nm) を要する。これは、各モータの推力定数のばらつきによる推力の干渉が主要因と考えられる。方式 II では、これがオブザーバにより補償され大幅に改善されている。以上の結果は、 y 軸方向への動作結果においても同様に確認されており、オブザーバにより軌跡精度および位置決め精度、整定時間が効果的に改善されることがわかる。

5・2 微小位置決め性能 図 8(a), (b) は、それぞれ x および y 方向に 10 nm ステップの微小並進運動を行ったときの結果を表している。 x 変位、 y 変位ともに目標値にほぼ追従しており、また往復の変位量

Fig. 8 Step response to 10 nm step-motion command

Fig. 9 Response to a force disturbance applied to X -drive element

にはヒステリシスやバックラッシュ等は見られない。なお、 x 変位と y 変位に見られる変位量のばらつきは、制御系の分解能が座標変換マトリックス演算により理論上 x 方向で 5 nm、 y 方向で 2.5 nm となることが原因と考えられる。本結果より、 x 方向駆動時では $\pm$

(a) Without leveling control (b) With leveling control

Fig. 10 Z , θ_x , and θ_y -directional motion accuracy

15~20 nm, y 方向駆動時では $\pm 10 \sim 15$ nm の目標値追従精度を有することがわかる。

5.3 外乱抑圧特性 外乱オブザーバの推定結果をフィードバックし、位置制御系の外乱補償効果を評価した。結果を図9に示す。ここで、外乱はコイル励磁用アンプが20 kHzの高帯域を有することを考慮し、X駆動部A相コイルの電流アンプにステップ状の電圧外乱を加算する方法で印加した。図9より、位置誤差の最大値は方式Iの場合で最大 $\pm 2.2 \mu\text{m}$ (x), $\pm 7.5 \mu\text{rad}$ (θ_z)であり、オブザーバを付加した方式IIの場合にはそれぞれ $\pm 1.0 \mu\text{m}$, $\pm 3.0 \mu\text{rad}$ (θ_z)まで誤差が低減していることがわかる。また初期位置への整定時間も同様に短縮されていることがわかる。以上より、オブザーバが効果的に外乱を抑圧していることが確認できる。一方、方式Iに見られる y 軸変位の $\pm 10 \sim 20$ nm程度の微振動は、オブザーバ付加により ± 30 nm程度まで増大する傾向が見られるが、約0.15 s程度で減衰する傾向にある。なお、 x , θ_z 軸の各波形にはいずれも40~45 Hzの振動成分が観測されている。これは、圧電素子の曲げ剛性によるエアベアリングの振動モードの周波数と一致していることから、ステージの加振に伴い発生するエアベアリング振動の反力の影響と考えられる。

5.4 レベリング動作特性 図10は、前記ステップ動作時(図7)における z - θ_x - θ_y 系の運動誤差を

Fig. 11 Response to a θ_y -directional $5 \mu\text{rad}$ step-motion command

示している。図7(a)は、レベリング制御を用いない場合の結果であり、案内面の平面度誤差により z 方向に $0.5 \mu\text{m}$, θ_x および θ_y 方向にはそれぞれ $5 \mu\text{rad}$, $2 \mu\text{rad}$ 程度の運動誤差が見られる。一方、図7(b)はレベリング制御を行った場合の結果であり、 x - y - θ_z 系のステップ動作に伴い過渡的誤差が発生しているが、 x - y - θ_z 系の位置決めが完了する0.95 s時点では、ほぼ初期位置に整定していることがわかる。

図11はレベリング制御系の位置決め特性の一例であり、 θ_y 方向に $5.0 \mu\text{rad}$ のステップ動作を行ったときの結果を表している。 θ_y 変位は約40 msの時間定数で応答しており、 z 変位に見られる $0.1 \mu\text{m}$ 程度の干渉を除いてほぼ軸方向の独立な制御が実現できていることがわかる。 z 方向の干渉は θ_x , θ_y 制御系とのループゲイン差が原因と考えられる。

6. 結 言

本論文の結論を以下にまとめる。

(1) ステージ位置のアップ誤差を低減しつつ高い応答性を確保する一手法として、サーフェイスモータと圧電素子を用いた六自由度ステージ機構の構成を示した。

(2) 六自由度運動を考慮したステージの力学モデルを導出し、系の同相安定化条件を満たす駆動点および位置計測点の配置条件を示した。また、外乱オブザ

ーバを含む六自由度位置制御系の設計方法について述べた。

(3) 試作ステージにより位置決め性能の実験評価を行った。その結果、外乱オブザーバの適用により xy 平面内での位置決めおよび軌跡追従性能が従来方式に比べ大幅に向上することを確認した。また、圧電素子を用いた駆動機構との組合せにより、高速高精度な六自由度運動制御を実現した。

以上の結果より、提案する駆動制御方式の有効性が確認された。今後、レーザ加工機、露光装置等のシステムを対象に本駆動方式の実用化を図る予定である。

文 献

- (1) 富田良幸・ほか2名, 機論, 58-553, C(1992), 2836-2842.
- (2) Tomita, Y., ほか2名, *Precision Engineering*, **16**-3(1994), 184-191.
- (3) 森山茂夫・ほか2名, 精密機械, **50**-4(1984), 718.
- (4) 二見茂・古谷彰浩, 精密工学会誌, **57**-3(1991), 556-561.
- (5) 二見茂・古谷彰浩, 精密工学会誌, **57**-10(1991), 1808-1813.
- (6) 佐久田茂・ほか2名, 精密工学会誌, **57**-12(1991), 2133-2138.
- (7) 川瀬佳洋・ほか4名, 精密工学会誌, **57**-7(1991), 1211-1216.
- (8) 金井宗統・石原直, 精密工学会誌, **56**-12(1990), 2201-2206.
- (9) Aoyama, H., ほか3名, *Proceedings of The International Conference on ADVANCED MECHATRONICS*, (1988), 159-164.
- (10) 大石潔・ほか2名, 電学論, **107**-C, 3(1987), 292-298.
- (11) 富田良幸・ほか3名, 精密工学会誌, **57**-6(1991), 1078-1084.
- (12) 浜松弘・ほか2名, 機論, **60**-577, C(1994), 3051-3056.