自重補償機構を備えた縦形の 超精密 XY ステージ*

——摩擦の影響を考慮した位置決め——

内田憲男** 高橋良彦** 山田 昇*** 広川利夫***

A Precise Vertical X-Y Stage with Weight Compensating Mechanism
—Friction Effects on Positioning Characteristics—

Norio UCHIDA, Yoshihiko TAKAHASHI, Noboru YAMADA and Toshio HIROKAWA

A vertical X-Y stage has been developed for X-ray lithography, using synchrotron orbital radiation. Horizontally and vertically moving stages are guided by linear ball bearings and driven by D.C. motors. Stage weight is counterbalanced by a counter-weight in the back of the stage frame. Stage positionings are carried out by a closed loop control with laser interferometers. The following results have been obtained. (1) Step response varies, depending on the step distance, even if a servo loop gain is fixed to a constant value. That is, a closer destination makes the response more stable than a more distant destination. It has been confirmed by the analysis that the phenomenon is caused by the friction forces at the ball screws and guide bearings. (2) Less than $\pm 0.03 \mu\text{m}$ positioning error and less than 1 second moving time for a 25 mm step motion have been achieved by the control system, in which the servo loop gain is increased to large values as the stage approaches the destination.

Key words: X-ray lithography, vertical X-Y stage, precise positioning, laser interferometer control, synchrotron orbital radiation, friction effects, weight compensating

1. 緒 言

近年、高集積回路を製造するための技術の進歩には目ざましいものがあり、VLSIの素子の寸法はサブミクロンに入りつつある。この進歩は露光装置の発展に負うところが大きい。現行の露光装置では、マスクに描かれたパターンがウエハ上のレジスト層に縮小投影レンズを通して紫外光で焼き付けられる。しかしながら、最小寸法が小さくなるにつれて、その寸法が回折による解像限界に近づきつつある。

そこで、 $0.1 \mu\text{m}$ よりも解像度が良いX線リソグラフィの開発が期待されている。X線源として、X線管やプラズマX線源があるが、いずれも相対的に強度が弱く、点光源である。一方、シンクロトロン放射光(SOR)からは強力で平行性の良いX線ビームが得られるので、SORはX線リソグラフィに最適なX線源

である¹⁾。

SORからのX線は水平方向に放射されるので、露光装置は縦形になり、鉛直平面内を上下・左右に移動し、高速で高精度な位置決めを行うXYステージが必要になる。水平面内を走行するXYステージでは、すでに高精度な位置決めが達成されているが^{2)~5)}、鉛直平面内を走行するものについての報告はない。鉛直平面内を走行するステージの設計で最も問題になるのは、ステージの自重の影響をいかに補償するかである。また、X線露光装置は減圧雰囲気中やHe雰囲気中使用される可能性もあるので、使うことのできる案内用軸受の種類も限られる。

著者らは、ステージの背面に設けたカウンタウエイトによって自重を補償する精密縦形XYステージを開発した。ステージの案内には直線転がり軸受を、駆動にはDCモータとボールねじを用いた。開発したXYステージにおいては、カウンタウエイトが位置決め特性に悪影響を及ぼさないように、自重補償機構の縦振動の固有振動数を高く設計した。

位置決め精度と応答速度の改善のために、位置決め

* 原稿受付 昭和62年4月24日。昭和61年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和61年10月11日)にて発表

** 正 会 員 (株)東芝(川崎市川崎区浮島町4-1)

*** (株)東芝

Fig. 1 Mechanical construction

特性に及ぼすボールねじと案内の摩擦の影響を実験と解析により調べた。その結果を有効に利用した制御方法により、水平 XY ステージと同等以上の高精度な位置決めを達成した。

本報では、ステージ構造、ステップ応答実験、摩擦を考慮した応答解析及び位置決め実験を示す。

2. ステージ構造

試作した XY ステージを図 1 に示す。Y 軸ステージは定盤に固定された架台 (Frame) 上を上下方向に走行する。X 軸ステージは Y 軸ステージ上を水平方向に走行する。各ステージは直線転がり軸受で案内され、DC モータとボールねじで駆動される。ステージの自重を補償するために、架台の背後に直線転がり軸受で支持されたカウンタウェイトが設けられており、プーリを介して鋼製のベルトで Y 軸ステージに連結されている。L 字形の平面鏡が X 軸ステージ上に設置され、レーザ干渉計でステージの位置が測定される。X 軸と Y 軸ステージはそれぞれの方向に 150 mm 移動できる。架台は空気式除振装置で支持された定盤上に固定されている。

ステージの自重を補償するために次のような方式が考えられる。(1) モータの駆動トルクの利用、(2) 定出力ばねの使用、(3) カウンタウェイトの使用。(1) の場合には、制御装置が複雑になり、精密位置決めが難しくなる可能性がある。また、モータには自重補償のための電流が常に流れるので、精密位置決めには好ましくない余分な発熱がモータから生じる。さらに、何らかの理由で制御システムがトリップしたり故障すると、ステージは下方に勝手に動き出す。(2) の定出力

Fig. 2 Control system

ばねは出力が小さく、ステージの自重を補償するには多数のばねが必要となる。(3) の場合には、ステージの縦方向の応答が可動質量の増加のために遅くなるという欠点がある。しかしながら、ステージとカウンタウェイト間の連結機構の剛性を十分大きく設計できるなら、精密な位置決めが期待できる。それ故、開発した XY ステージでは、カウンタウェイトを用いる方法を採用した。

図 1 に示す連結機構は、高い縦方向の固有振動数が得られるように、4 本の鋼製ベルトと 4 個のプーリからなる。鋼製ベルトとプーリの設計には次のことを考慮した。(1) プーリ部での曲げモーメントによってベルトが疲労破壊しないこと。(2) 自重補償機構の縦方向の固有振動数が十分に高いこと。

ベルト疲労が起きないように、プーリ直径とベルトの厚さはそれぞれ 20 cm と 0.2 mm とした。ステージのストロークを考慮して、ベルト長さを 71.4 cm に決め、縦方向に高い固有振動数が得られるようにベルトの幅を 10 cm とした。その結果、鋼製のベルトにかかる曲げ応力の計算値は 206 MPa となったので、SUS 304-cps-H (引張強さ 1 030 MPa) をベルト材料に使用した。自重補償系による縦方向の固有振動数は後章で計算されるように 229 Hz となり、他の機械的な固有振動数に比べて十分高い値が得られた。

3. 制御システム

ステージの位置決めは図 2 に示すレーザ干渉測長システム (HP-5518, 分解能 $\lambda/64$) を用いた閉ループ制御により行われる。

ホストコンピュータの指令に応じて、サブコンピュータ (Sub CPU) から速度関数が D/A コンバータを経由して補償要素に入力される。DC モータは速度関数に従って回転する。ステージは加速され、一定速度で走行する。ステージの速度はモータ軸端の速度

Fig. 3 Comparison between 1 and 20 μm step responses in vertical direction (experiment)

発電機 (TG) からの信号で制御される。ステージがあらかじめ設定された位置に到着すると減速が始まる (速度制御)。ステージが目標位置に近づくと, Sub CPU により速度制御は位置制御に切り換えられ, レーザ干渉計のコンパレータからの偏差信号が D/A コンバータに入力される。

案内とボールねじの摩擦の影響を低減するために, 補償要素は比例と積分からなり, さらに, アッテネータ (ATT) が D/A コンバータの下流に設置されている。本制御システムでは, ステージの目標位置への距離に応じて, Sub CPU で自動的に ATT の値を変化させ, サーボループゲインを自動的に変えることができる。

位置決めが完了したかどうかの判定は, レーザ干渉計の NULL 信号を用いて Sub CPU により行われる。

4. ステップ応答

ステップ応答試験結果と機構部の摩擦の影響を考慮したステップ応答の解析結果を比較した。

4.1 ステップ応答試験

Y (縦) 軸ステージの 1 μm と 20 μm のステップ応答結果を図 3 に示す。パラメータは ATT 値である。ATT 値が一定の場合には, サーボループゲインは同じ値となる。したがって, 線形な系では, 1 μm のステップ応答と 20 μm のステップ応答は相似となる。しかし, この系においては, 二つのステップ応答は相似にはならない。

ATT=1/20 の場合には, 二つの応答は非常にめづからであるが, 20 μm の応答の方が 1 μm の応答よりも速い。ATT の値を大きく (1/8) すると, 1 μm の応

Fig. 4 Vertical axis stage calculation model

答は, ATT=1/20 の場合に比べて速くなるが, 20 μm の応答では約 65 Hz の振動が生じる。この状態で ATT 値をさらに大きくすると, 20 μm の応答の振動は発散する。すなわち, サーボループゲインが同じ値でも, システムの安定性はステップ距離が短いほど良くなることがわかる。この現象は X (水平) 軸ステージにも観測された。したがって, システムは機構部の摩擦の影響で非線形になっていると考えられる。

4.2 ステップ応答解析

プールの慣性力は小さいので無視すると, Y 軸ステージは図 4 のようにモデル化できる。ボールねじの摩擦トルクを T_f , ステージおよびカウンタウエイトの案内の摩擦力をそれぞれ F_1, F_2 とすると, 運動方程式は,

$$m_1 \ddot{y}_1 + k_1(y_1 - q\theta) - k_2(y_2 - y_1) = -F_1 \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + k_2(y_2 - y_1) = -F_2 \quad (2)$$

$$I\ddot{\theta} - qk_1(y_1 - q\theta) = T - T_f \quad (3)$$

となる。ここで, y_1 : Y 軸ステージの変位, y_2 : カウンタウエイトの変位, θ : ボールねじの角変位, m_1 : ステージ可動部の質量 (25 kg), m_2 : カウンタウエイトの質量 (25 kg), I : ボールねじとモータの慣性モーメント (0.88 $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$), k_1 : ボールねじおよびボール

Fig. 5 Comparison between 1 and 20 μm step responses in vertical direction (calculation)

ねじとステージの連結機構の剛性 ($9.8 \times 10^4 \text{ N/cm}$), k_2 : 4本の鋼製ベルトのばね定数 ($2.35 \times 10^5 \text{ N/cm}$), T : モータの駆動トルク, p : ボールねじのピッチ (0.3 cm), q : ($=p/2\pi$).

図2を参照すると, e_i, e_{tg}, e_p は,

$$e_i = a \cdot \text{ATT} \cdot (y_0 - y_1) \quad (4)$$

$$e_{tg} = -K_{tg} \cdot \dot{\theta} \quad (5)$$

$$e_p = A(e_i + C \cdot e_{tg}) + \int B(e_i + C \cdot e_{tg}) dt \quad (6)$$

となる。ただし, y_0 : ステップ距離, a : D/A コンバータの係数 (5000 V/cm), K_{tg} : TGの電圧係数 ($0.136 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$), A, B, C : 比例と積分回路からなる補償要素の定数で $A=0.413$, $B=66.6$, $C=3.0$.

モータの駆動トルク T と電機子電流 i_a は,

$$L_a \dot{i}_a + R_a i_a + K_E \dot{\theta} = e_m = b \cdot e_p \quad (7)$$

$$T = K_t \cdot i_a \quad (8)$$

となる。ただし, L_a : モータのインダクタンス (2.6 mH), R_a : 抵抗 (1.25Ω), K_E : 誘導電圧定数 ($0.055 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$), K_t : トルク定数 ($5.6 \text{ N} \cdot \text{cm/A}$), b : パワーアンプのゲイン (20) である。

式(4)~(6)を式(7)に, 式(8)を式(3)に代入して, 式(1)~(3)と(7)を数値積分するとステップ応答が求まる。

ここで, 摩擦力の値をそれぞれ F_{10} (0.98 N), F_{20} (0.98 N) および T_{10} ($2.9 \text{ N} \cdot \text{cm}$) で表すと,

$$\dot{y}_1 \geq 0 \text{ のとき } F_1 = \pm F_{10} \text{ (複号同順)} \quad (9)$$

$$\dot{y}_2 \geq 0 \text{ のとき } F_2 = \pm F_{20} \text{ (複号同順)} \quad (10)$$

$$\dot{\theta} \geq 0 \text{ のとき } T_f = \pm T_{10} \text{ (複号同順)} \quad (11)$$

$\dot{y}_1, \dot{y}_2$ または $\dot{\theta}$ が零の場合には, 式(1)~(3)の摩擦力は次のようになる。

(1) $\dot{y}_1 = 0$ の場合: m_1 に作用するばね力は,

$$F_1' = -k_1(y_1 - q\theta) + k_2(y_2 - y_1) \quad (12)$$

となる。 $|F_1'|$ が F_{10} より大きい場合には, 式(1)の F_1 は F_1' と逆向きに作用する。すなわち, $|F_1'| > F_{10}$ の場合,

$$F_1' \geq 0 \text{ のとき } F_1 = \pm F_{10} \text{ (複号同順)} \quad (13)$$

となる。 $|F_1'| \leq F_{10}$ の場合には, F_1 は F_1' と釣り合うから,

$$F_1 = F_1' \quad (14)$$

(2) $\dot{y}_2 = 0$ の場合: m_2 に作用するばね力は,

$$F_2' = -k_2(y_2 - y_1) \quad (15)$$

となる。 $|F_2'| > F_{20}$ の場合には, 式(2)の F_2 は,

$$F_2' \geq 0 \text{ のとき } F_2 = \pm F_{20} \text{ (複号同順)} \quad (16)$$

となる。 $|F_2'| \leq F_{20}$ の場合には,

$$F_2 = F_2' \quad (17)$$

(3) $\dot{\theta} = 0$ の場合: I に作用するばねとモータによる駆動力は,

$$T_f' = T + qk_1(y_1 - q\theta) \quad (18)$$

となる。 $|T_f'| > T_{10}$ の場合には, 式(3)の T_f は,

$$T_f' \geq 0 \text{ のとき } T_f = \pm T_{10} \text{ (複号同順)} \quad (19)$$

となる。 $|T_f'| \leq T_{10}$ の場合には, T_f は T_f' と釣り合うから,

$$T_f = T_f' \quad (20)$$

となる。

図3に示した実験結果に対応するステップ応答の計算結果を図5に示す。ただし, $20 \mu\text{m}$ の応答計算においては, $\text{ATT}=1/8$ にすると振動が発散したので, $\text{ATT}=1/10$ を使用した。計算結果は実験結果と非常に良く一致し, 以下のことがわかる。(1) ATT 値を大きくすると, 応答は速くなる。(2) ステップ距離を変

Fig. 6 Velocity and displacement time-response for 25 mm vertical axis step

化させると応答曲線は相似な形にならない。すなわち、 $ATT=1/10$ のとき、 $1\mu\text{m}$ のステップ応答はなめらかな曲線になるが、 $20\mu\text{m}$ のステップ応答では、図 3 (d) とほぼ同じ振動数の振動が発生する。また、 $ATT=1/10$ とし、摩擦力 F_1, F_2, T_1 を零と置いた場合の $20\mu\text{m}$ の応答は発散した。これらのことから、摩擦力は減衰力として作用し、システムの安定性はステップ距離が短くなるほど良くなることがわかる。したがって、ステージが目標位置に近づくにつれてサーボループゲインを徐々に大きくすると、位置決め精度と応答速度は改善されと考えられる。

機械的な固有振動数 f_1, f_2 は式 (1), (2), (3) の右辺を零と置くと計算でき、 $f_1=70\text{ Hz}$ と $f_2=229\text{ Hz}$ になる。 f_1 はボールねじおよびボールねじとステージ間の連結機構の剛性 k_1 に起因し、 f_2 は自重補償機構の鋼製のベルト剛性 k_2 に起因する。本 XY ステージでは、図 3 (d) と図 5 (d) から明らかなように、 f_1 に対応する振動は生じるが、 f_2 に対応する振動は、 f_2 が f_1 より十分高いために観測されない。すなわち、カウンタウエイトと Y 軸ステージは剛体運動をしているとみなせるので、カウンタウエイトによる位置決め精度への悪影響は小さいと考えられる。

5. 位置決め実験

図 6 は Y (縦) 軸ステージを 25 mm 走行させたときの変位と速度線図で、図 7 は目標位置近くの変位の拡大図である。台形速度パターンで駆動されたステージが目標位置の前方 $18\mu\text{m}$ の点に到達したとき、速度制御から位置決め制御への切替えが行われる。図 7 では位置決めは約 0.8 s で完了しているが、位置決め時間は実験のたびに多少のばらつきが生じた。位置決め完了の定義は、ステージの位置を 1 ms 間隔で測定したとき、ステージの位置誤差が 20 ms (位置決め判定時間) の間継続して $\pm 0.02\mu\text{m}$ 以内に入る状態とした。位置決め精度と応答速度の改良のために、ステージが目標位置に近づくにつれて ATT の値を大きくし

Fig. 7 Enlarged expression of displacement time-response for 25 mm vertical axis step near the destination

Fig. 8 Positioning error distribution
N=1008

た。すなわち、目標値までの距離が $18\mu\text{m}$ から $0.1\mu\text{m}$ の領域では、摩擦力が多少変化しても振動が発散しないように ATT 値を選び、 $1/14$ から $1/8$ まで変化させた。 $0.1\mu\text{m}$ 以下の領域では、 ATT 値を $1/5$ と大きくした。

XY ステージを全ストローク ($150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$) にわたり、 25 mm のステップ&リピート運動で動かしたときの位置決め誤差の分布を図 8 に示す。位置決め誤差は、X 軸と Y 軸ステージが同時に位置決めを完了した 1 s 後にレーザ干渉計の偏差信号を用いて測定された。X 軸と Y 軸の誤差は近似的に正規分布と見なすことができるので、位置決め誤差を $(3\sigma + \bar{x})$ で定義するとき³⁾、位置決め誤差は X 軸、Y 軸ともに $\pm 0.03\mu\text{m}$ 以下となる。ただし、 σ は標準偏差、 $\bar{x}$ は平均値である。

制御システムの確認のために、 $0.1\mu\text{m}$ のステップ応答を静電容量形の変位計とレーザ干渉計により同時に測定した。両測定結果は図 9 に示すように非常に一致し、開発した縦形 XY ステージは $\pm 0.02\mu\text{m}$ より良い分解能を持つことがわかる。

Fig. 9 Comparison between laser interferometer measurement and capacitance micrometer measurement

もし、絶対精度を議論するならば、ステージ上の平面鏡の平面度誤差、雰囲気温度変化によるレーザ干渉計の波長の誤差や平面鏡を保持している材料の熱膨張などを考慮する必要がある。上記の誤差の最大値は次のように評価できる。平面鏡の平面度($\lambda/20$)は約 $\pm 0.015 \mu\text{m}$ 。ステージ周りの温度変化が $\pm 0.1^\circ\text{C}$ に制御されているとすると、波長補正器付きのレーザ干渉計の誤差は150 mmのストロークに対して $\pm 0.02 \mu\text{m}$ であり、平面鏡の保持材料としてセラミックスを使えば熱膨張は $\pm 0.06 \mu\text{m}$ となる。したがって、絶対的な位置決め精度については上記の誤差要因の改良が重要である。

次に20 msという判定時間の妥当性を確認するために、位置決め判定時間、位置決め時間および位置決め誤差の間の関係を調べた。判定時間が短すぎると位置決めが完了していないにもかかわらず、位置決めが完了したように判断されることがあるからである。

ステージを25 mmのステップ&リピート運動で全ストロークにわたり動かした。表1に位置決め判定時間を20 msから1000 msまで変化させたときの位置決め時間と位置決め誤差を示す。ここで、位置決め時間は判定時間を含む。位置決め誤差はX軸とY軸が同時に位置決めを完了した後にただちに測定された。

位置決め時間はすべての場合に(950 ms+判定時間)にほぼ等しいという関係がある。このことは、20 msという判定時間を採用しても、位置決め誤差は位置決め完了後 $\pm 0.02 \mu\text{m}$ 以内に保たれるということを意味している。というのは、判定時間20 msの位置決め誤差が位置決め完了後に $\pm 0.02 \mu\text{m}$ より大きくなるとすると、20 msより長い判定時間(例えば500 ms)の場合には、位置決め誤差は判定時間中に $\pm 0.02 \mu\text{m}$ を越えることになる。したがって、判定が繰り返し行われ、位置決め時間が長くなって、(950 ms+判定時間)にほぼ等しいという関係が成立しなくなるからである。

Table 1 Positioning characteristics for judging time variation

Judging time ms	Positioning time		Positioning error μm			
			Vertical		Horizontal	
	$\bar{t}$	σ_t	$\bar{y}$	σ_y	$\bar{x}$	σ_x
20	973	156	0.0007	0.0067	0.0024	0.0045
50	1001	160	0.0011	0.0071	0.0029	0.0045
100	1071	165	0.0010	0.0063	0.0005	0.0021
200	1185	157	0.0011	0.0066	0.0008	0.0028
500	1483	158	0.0007	0.0053	-0.0004	0.0024
1000	1992	156	0.0004	0.0039	-0.0007	0.0034

* Positioning time includes judging time

** σ : standard deviation

表1では、位置決め時間がすべての場合に(950 ms+判定時間)にほぼ等しいので、表1の中で最も短い判定時間20 msは開発した縦形XYステージに対して妥当な値であり、25 mmのステップ&リピート運動に対する位置決め時間が1 s以下であることがわかる。

6. 結 論

SORを線源とするX線リソグラフィの縦形XYステージを開発した。ステージは直線形の転がり軸受で支持され、DCモータにより駆動される。ステージの自重は架台の背面に設けたカウンタウェイトにより補償される。摩擦の影響を考慮した応答解析と位置決め実験とを行い、次の結果を得た。

- (1) サーボループゲインを一定にしても、ステップ応答はステップ距離の長短で変化し、ステップ距離が短いほどステップ応答は安定になる。
- (2) 上記の現象はボールねじと案内の摩擦力によって生じることが、解析により明らかになった。
- (3) 25 mmのステップ&リピート運動に対して $\pm 0.03 \mu\text{m}$ より小さい位置決め誤差が1 s以下で達成された。

これを実現するために、ステージが目標位置に近くにつれてサーボループゲインを大きくする制御方法を用いた。

参 考 文 献

- 1) 鳳 紘一郎：シンクロトロン放射光リソグラフィ，応用物理，**53**，1 (1984) 17.
- 2) D. S. Alles et al.: Step & Repeat Camera, Bell Sys. Tech. J., **49**, 9, (1970) 2145.
- 3) 森山茂夫ほか：圧電素子アクチュエータ微動機構を備えた超精密X-Y移動台，精密機械，**50**，4 (1984) 718.
- 4) 木下博雄ほか：空気浮上式高速XYステージの試作，精密機械，**52**，10 (1986) 1713.
- 5) 吉田庄一郎ほか：精密位置決めのためのセンサ計測技術，精密工学会第122回講習会資料 (1985) 11.