油圧シリンダ駆動による精密移動機構*

井戸 敏** 露寄晴夫** 高本喜一** 小俣富士夫**

An Accurate Positioning Stage Using Hydraulic Cylinder

Satoshi IDO, Haruo TSUYUZAKI, Kiichi TAKAMOTO and Fujio OMATA

An accurate positioning stage for an electron beam exposure system, equipped with hydrostatic bearing guides and hydraulic cylinder, has been built to achieve high speed, accuracy, and reliability. Theoretical analysis and experimental research on the dynamic characteristics for better accuracy and positioning time give the following results: (1) Control variables for stable and quick position control are theoretically investigated and their reasonable-

ness verified by experimental research. (2) Quick position control of the stage is attained; for $2\mu\text{m}$ allowance, the positioning time is 0.2 seconds in 2 mm step and 0.35 seconds in 5 mm step. (3) The positioning accuracy on the sub-micron order is achieved by hydraulic cylinder. (4) Mechanical characteristics are suitable for electron beam exposure system performances; the stiffness is $50\text{ kg}/\mu\text{m}$, the vertical displacement is $0.7\mu\text{m}$, and yaw is 2 seconds over stage travel.

Key words: stage, electron beam exposure system, hydrostatic bearing, hydraulic cylinder, position control, positioning accuracy, positioning time.

1. 緒 言

半導体 LSI の高集積化, 高性能化のすう勢により, 線幅 $1\mu\text{m}$ 以下のボタンを創成できる電子ビーム露光法が有望視されている。電子ビーム露光装置ではビーム偏向領域の寸法に限られるので, 試料をステップ・アンド・リピート¹⁾あるいは連続移動²⁾させて露光する。 $0.1\mu\text{m}$ オーダのボタン位置決め精度の要求および生産性の向上に対処するため, 電子ビーム露光装置に適合し, 高速度・高精度で信頼性の高い試料移動機構が要求される。

従来の電子ビーム露光装置用試料移動機構では, 直動案内として転がり軸受³⁾⁴⁾または空気軸受²⁾を用い, モータ駆動の送りねじによって直進移動させる方式がとられてきた。しかし, 転がり軸受と送りねじの組み合わせでは, 高周波振動の発生, 案内面の摩耗等により高速化, 高信頼化に限界があり, また空気軸受を用いた方式では装置が大型化するなどの欠点がある。

このため, 直動案内に静圧軸受を用い, 油圧シリンダによって駆動する試料移動機構について検討した。本移動機構のねらいは, ①案内面の非接触化による信頼性向上, ②静圧軸受用流体として低蒸気圧の拡散ポンプ油を用い, 移動機構本体を真空中に設置することによる装置の小型化, ③高加速が可能な油圧シリンダ駆動と静圧軸

受での油のダンピング効果とによる位置決め時間の短縮化などである。

本報では, 試作した 1 軸の試料移動機構について, 電子ビーム露光装置用として必要な基本特性を求め, 位置決め時間と精度に関して動特性の解析と実験から追求した。

2. 実 験 装 置

$0.1\mu\text{m}$ オーダのボタンの位置決め精度を達成するため, 電子ビーム露光装置用試料移動機構には表 1 に示すような条件が要求される。停止位置の誤差はビーム偏向系にフィードバックされて補正されるが, ボタンの描画精度向上の観点からは停止位置精度を高めて補正量を小さくすることが望ましい。本実験装置は表 1 の条件を考慮して試作した。図 1 に装置構成を示す。移動テーブルは, 円筒形パッドのジャーナル形静圧軸受 4 個で支持され, 2 本の平行なガイドバーに沿って, 両ロッド形油圧シリンダにより駆動される。油圧シリンダの流量制御に用いるサーボ弁には, トルクモータによってスプール変

表 1 電子ビーム露光装置用試料移動機構への要求条件

項 目	要 求 値
停止精度	$\pm 2\mu\text{m}$ 以下
垂直変位	$1\mu\text{m}$ 以下
ヨーイング	2 秒以下
温度変動	$0.1^\circ\text{C}/\text{h}$

* 原稿受付 昭和 54 年 7 月 16 日。昭和 54 年度精機学会春季大会学術講演会 (昭和 54 年 3 月 29 日) にて発表。

** 正 会 員 日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所 (武蔵野市緑町 3-9-11)

図1 実験装置構成

位を得る力フィードバック式流量制御弁を用いた。静圧軸受の端部は、PTFEとOリングを組合わせたスリップシールにより潤滑流体の漏れを防止している。電子ビーム露光装置への適用条件に合わせるため、油圧シリンダを除いた移動機構を 1×10^{-6} mmHgの真空中に設置している。静圧軸受の潤滑流体には蒸気圧が 1×10^{-9} mmHgの拡散ポンプ用作動油を用い、真空中での使用を可能とした。ピストンロッドの周囲は溶接ベローズで真空シールしている。ピストンロッドと移動テーブルはスラストベアリングによって結合し、相互のアライメント誤差を除去している。移動テーブルの上面には平面度 $\lambda/10$ のプレニミラーを固定し、真空容器の外側からレーザー測長器によって移動テーブルの位置計測を行う。移動テーブル、ピストンロッド、溶接ベローズ等の可動部分はすべて非磁性材料によって製作し、テーブル移動に伴う電子ビーム直下での磁場変動を2 mG以下に低減した。実験装置各部の諸元を表2に示す。また装置の概観を図2に示す。

図3は装置の作動油供給系統を示す。静圧軸受の毛細管絞りにおける発熱は、移動テーブルの熱膨張をひき起こし、位置決め誤差の原因となる。このため静圧軸受へ供給する油を油タンクにおいて熱交換器により一定温度に保持している。これにより移動テーブル上面での平衡状態における温度変動を 0.1°C/h 以下に抑制し、表1の要求条件に適合させている。油圧シリンダおよび静圧軸受に用いた油圧回路は一般に用いられているものである。サーボ弁は東京精密測器製3F-4.5L-30、可変吐出量ベーンポンプはコーシンラシン製PSV-DSSO-10 ERM、ギヤポンプは日本オイルポンプ製208 GAである。

本装置の位置決め制御系の構成を図4に示す。位置決め制御は、レーザー測長器からの位置計測信号に基づく閉ループ制御で行う。サーボ弁は飽和領域を有する非線形要素であるので、高精度・高速度位置決めを達成するた

表2 実験装置各部諸元

区 分	諸 元
移動機構	移動ストローク: 115 mm 移動速度: 最高 19 mm/s 移動テーブル重量: 83 kg
ジャーナル形 静圧軸受	軸受内径: $\phi 65$ mm 片側すきま: $20 \mu\text{m}$ 絞り形式: 毛細管絞り 潤滑流体: 拡散ポンプ用作動油
油圧シリンダ	ピストンストローク: 124 mm 受圧面積: 34 cm^2 供給圧力: 70 kg/cm^2
レーザー測長器	He-Ne ガスレーザによる2波長干渉 最小分解能: $0.02 \mu\text{m}$
真空容器	排気ポンプ: 回転ポンプ+拡散ポンプ 到達圧力: 1×10^{-6} mmHg

図2 実験装置概観

図3 作動油供給系統

図5 制御系モデル

表3 使用記号

A_K	サーボ増幅器ゲイン
T_A	サーボ増幅器時定数
A_D	速度帰還要素ゲイン
V	シリンダ内容積
P_t	シリンダ内差圧
k_x	サーボ弁のスプール変位に対する流量感度
k_p	サーボ弁の負荷圧力に対する流量感度
k	シリンダ・ステージ間ばね定数
M_1	ピストン質量
M_2	移動テーブル質量
β	作動油体積弾性係数
B_1	シリンダの粘性減衰係数
B_2	静圧軸受の粘性減衰係数
A	シリンダ受圧面積

分要素とする。このとき、各要素の伝達関数は次式のように記述される。なお以後の数式において使用する記号を表3にまとめて記す。

$$G_{CS} = \frac{k_x \omega_1^2 \omega_2^2 / k}{As(s^2 + 2\xi_2 \omega_2 s + \omega_2^2) / M_1 + (Vs / 4\beta A + k_p / A) \{ (s^2 + 2\xi_1 \omega_1 s + \omega_1^2)(s^2 + 2\xi_2 \omega_2 s + \omega_2^2) - \omega_1^2 \omega_2^2 \}} \quad (7)$$

ただし、

$$\omega_1 = \sqrt{k/M_1}, \quad \omega_2 = \sqrt{k/M_2}, \quad \xi_1 = B_1 / \sqrt{kM_1}, \quad \xi_2 = B_2 / \sqrt{kM_2}$$

以上より、この制御系の開ループ伝達関数 G_{OP} は各要素の直列結合として

$$G_{OP} = A_1 G_{SA} \cdot G_{SV} \cdot G_{CS} \quad (8)$$

となる。さらに速度帰還を加えた閉ループ伝達関数 G_{CL} は

$$G_{CL} = \frac{X_c(s)}{X_r(s)} = \frac{G_{OP}}{1 + (1 + G_{VC}/A_1)G_{OP}} \quad (9)$$

と表され、8次の系となる。

式(9)の系を8次元のベクトル形式で表される微分方程式群 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r, t)$ として扱い、Runge-Kutta-Gill法に基づくシミュレーションによって制御系の動特性を検討した。

4.2 制御系の安定性と応答性

式(8),(9)を用いて、制御系の安定性を確保し、高い応

図6 ゲイン余有と位相余有

$$G_{SA} = \frac{A_K}{1 + T_A s} \quad (1)$$

$$G_{SV} = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\xi \omega s + \omega^2} \quad (2)$$

$$G_{VC} = A_D s \quad (3)$$

次に、移動機構系についてスプール変位と移動テーブルの間の伝達関数 G_{CS} を導出する。サーボ弁のスプール、シリンダのピストン、移動テーブルの変位をそれぞれ x_1, x_2, x_3 とすると、サーボ弁とシリンダの間の作動油の出入流量の収支⁵⁾、ピストンおよび移動テーブルの運動に関して次の3式が成立する。

$$A\dot{x}_1 + V\dot{P}_t / 4\beta = k_x x_1 - k_p P_t \quad (4)$$

$$M_1 \ddot{x}_2 + B_1 \dot{x}_2 + k(x_2 - x_3) = AP_t \quad (5)$$

$$M_2 \ddot{x}_3 + B_2 \dot{x}_3 + k(x_3 - x_2) = 0 \quad (6)$$

式(4)~(6)をラプラス変換して整理すると、移動機構系の伝達関数 G_{CS} は次式で表される。

答性の得られるゲイン設定条件を理論的に求める。ここで導入した主なパラメータの値は、

$$T_A = 1.6 \times 10^{-4} \text{ s}, \quad \omega = 754 \text{ rad/s}, \quad \xi = 1.0, \quad A = 34.4 \text{ cm}^2, \quad V = 445 \text{ cm}^3, \quad \beta = 1.43 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2, \quad k_p = 0.375 \text{ cm}^5/\text{s} \cdot \text{kg}, \quad k_x = 3.13 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}, \quad M_1 = 9.3 \text{ kg}, \quad M_2 = 83 \text{ kg}, \quad B_1 = 1.7 \text{ kg} \cdot \text{s/cm}, \quad B_2 = 0.27 \text{ kg} \cdot \text{s/cm}$$

である。

図6は、式(8)で表される開ループ伝達関数 G_{OP} をもとに、理論的な開ループ周波数応答をゲイン $A_1 A_K$ について逐次求め、ゲイン $A_1 A_K$ に対するゲイン余有、位相余有の関係を整理したものである。図中における速度帰還の条件 $T_D=2$ は、実験装置において設定しうるほぼ最大に近い値である。速度帰還をかけることによって位相余有は大幅に上昇し、制御系の安定性を低下させることなくゲインを上げて応答性を高めることができる。制御系の安定性を確保するためには、ゲイン $A_1 A_K$ の理

図7 ステップ応答(理論値)

論的限界はほぼ2.5であることがわかる。

次に, ゲイン A_1A_K をパラメータとして理論的なステップ応答を求めた結果を図7に示す。縦軸は目標値に対する移動量を正規化した値である。速度帰還はかけていない。ゲイン A_1A_K の増加に伴い, 系の応答性は過減衰から周期的な振動状態に移行する。同図より, 移動機構の高速位置決めに適しようる条件は $A_1A_K=1.5\sim 2.0$ と考えられる。

5. 実験結果および考察

5.1 移動テーブルの剛性と直進性

電子ビーム露光装置への適用を図る場合, 描画精度を確保する上で移動テーブルの剛性および移動時の直進性が重要な判断基準となる。図8は移動テーブルの静剛性を測定した結果である。静圧軸受への潤滑流体の供給圧力をパラメータにとった場合, 供給圧力 35 kg/cm^2 以上から静剛性すなわち 垂直荷重/浮上量変位の増加傾向が鈍化する。このため本装置では静圧軸受への潤滑流体の供給圧力を常に 35 kg/cm^2 に設定することとした。このとき移動テーブルの静剛性は $50\text{ kg}/\mu\text{m}$ となり, 試料移動機構として十分な剛性を有している。

図9は移動テーブルの直進性を全ストロークにわたって測定した結果である。100 mm の移動範囲に対して, 垂直変位は $0.7\text{ }\mu\text{m}$, ヨーイングは約2秒 ($0.97\times 10^{-5}\text{ rad}$) であり, いずれも電子ビーム露光装置用試料移動機構に対する表1の要求条件を充足している。

5.2 制御系の応答性と安定性

理論検討においてゲイン A_1A_K の適正值は $1.5\sim 2.0$ であった。しかし電子ビーム露光装置では, 移動テー

図8 移動テーブルの静剛性

(a) 垂直変位

(b) ヨーイング

図9 移動テーブルの直進性

ルが目標位置の数 μm 以内に入ると, 移動テーブルの位置をビーム偏向器にフィードバックすることによってビーム照射位置が補正される。このため, 移動テーブルの位置決め時間を短縮するには, 目標停止位置近傍へ可能なかぎり高速に接近させておく方が有利となる。そこで実験においてはゲイン設定を $A_1A_K=2.0$ とし, これに速度帰還 $T_D=0.5$ をかけることとした。

図10は, ステップ入力に対する応答性を測定した結果であり, 同一のゲインにおける理論値を対比して示す。実験値での立上がり時間は約 10 ms , 整定時間は約 40 ms , 系の固有振動数は約 50 Hz であり, 理論値もほぼそれを裏づけている。速度帰還をかけた場合 ($A_D=0.5$), オーバシュートを低減し, 整定時間の短縮化に有効である。理論値と実測値との立上がり時間の差異の原因は, 理論値において油圧シリンダへの作動油の背圧降下, 静圧軸受のオイルシールとガイドバーとの摩擦力を考慮し

図10 ステップ応答(実験値)

図11 開ループ周波数応答

ていないためと考えられる。

図11に開ループ周波数応答を実測した結果を理論値と対比して示す。実測値と理論値はほぼ一致した傾向を示している。実測値において、ゲイン曲線は折点周波数44 Hz(理論値58 Hz)より低い周波数域で-20 dB/decの傾きであり、位相は90°近くの遅れを持つ。したがって、この周波数域で制御対象は近似的に積分要素とみなせるため、定常偏差を無視できる。折点周波数44 Hzより高い周波数域では-100 dB/decの傾きをもち、この系への高周波ノイズ等による影響は小さい。電子ビーム露光装置では高周波振動が描画精度を低下させる重要な原因となるため、本制御系の周波数特性は電子ビーム露光装置への適用を図る上で有効と考えられる。

図12は、閉ループ制御系を構成した場合の周波数応答を実測した結果であり、これによって制御上問題となる機械系共振点の存在は認められず、安定でかつ応答性の高い位置決め制御が可能となることがわかる。

5.3 移動機構の位置決め特性

図13に、移動テーブルを電子ビーム露光装置におけ

図12 閉ループ周波数応答

図13 ステップ送りに対する位置決め時間

図14 停止位置誤差分布

る駆動様式にならない、1~9 mmの距離をそれぞれステップ送りしたときの位置決め時間を測定した結果を示す。この場合の位置決め時間は、移動テーブルがその目標とする停止位置に対し、0.5、1.0、2.0 μmの位置偏差内にそれぞれ収束するまでに要する時間である。位置偏差±2 μmの場合、2 mmステップで0.2 s、5 mmステップ

で0.35 sを達成でき, 本制御系が高速位置決めに有効であることがわかる。

図14は, 2 mmのステップ送りを繰返し行った場合の停止位置誤差分布を求めた結果である。この場合は, 移動開始後0.8 s経過した後に停止位置を計測している。本移動機構によりサブミクロンオーダーの位置決め精度を達成できることがわかる。

6. 結 言

電子ビーム露光装置への適用を目的として, 油圧シリンダ駆動で, かつ直動案内としてジャーナル形静圧軸受を用い, 真空中において作動する精密移動機構を試作した。制御系に関する理論解析および実験検討を行うことによって以下の結果を得た。

- (1) 安定でかつ高速な位置決め制御を行う条件を理論検討によって明確にし, 結果の妥当性を実験により確認した。系の共振点は約50 Hzであり, 電子ビーム露光装置において特に問題となる高周波振動は存在しない。
- (2) ステップ送りにおける位置決め時間は, 目標位置からの偏差 $\pm 2 \mu\text{m}$ の場合, 2 mmステップで0.2 s, 5 mmステップで0.35 sを達成し, 本制御系が高速位置決めに有効であることがわかった。
- (3) 油圧シリンダ駆動によって, 移動テーブル整定後

サブミクロンオーダーの位置決め精度を確保できた。

- (4) 移動機構の基本特性を求めた結果, 移動テーブルの静剛性は $50 \text{ kg}/\mu\text{m}$, 移動範囲100 mmに対する垂直変位 $0.7 \mu\text{m}$, ヨーイング2秒であり, いずれも電子ビーム露光装置への適用条件を充足している。

謝 辞

終わりに, 本研究を行うにあたり終始ご指導いただきました武蔵野電気通信研究所・龍野剛一微細加工研究室長に厚く感謝いたします。また精密移動機構の製作にご協力いただいたセイコー精機(株)守友貞雄氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) A. D. Wilson et al.: Automation of Vector Scan I, Electron Beam Lithographic System, 7th Int. Conf. Electron and Ion Beam Sci. Tech., May (1976) 361.
- 2) D. R. Herriott et al.: EBES, A Practical Electron Lithographic System, IEEE Trans. Electron Devices, ED-22, 7, July (1975) 385.
- 3) 藤波明平ほか: 高精度電子ビーム露光装置EB-52, 電気通信研究所研究実用化報告, 27, 9 (1978) 2085.
- 4) O. Cohen et al.: Automatic Control of an Electron Beam Pattern Generator, 5th Int. Conf. Electron and Ion Beam Sci. Tech., May (1972) 92.
- 5) 油圧技術便覧編集委員会編: 油圧技術便覧, 日刊工業新聞社 (1976) 625.