サーフェスモータ駆動型多自由度ステージの 位置決めの研究 (第2報) *

—ステージのダイナミック制御による微小位置決め実験—

出島秀一** 高 偉*** 矢内宏明** 清野 慧***

Precision Positioning of a Surface Motor-driven Multi-axis Stage Using a Surface Encoder (2nd report)
- Experiment of Dynamic Micro-positioning -

Shuichi DEJIMA, Wei GAO, Hiroaki YANAI and Satoshi KIYONO

This paper presents a surface motor-driven multi-axis stage system employing a surface encoder as the position feedback sensor. The surface motor consists of four two-phase linear motors, two pairs in X- and Y-directions. The thrust force generated by each of the linear motor's two phases was investigated for the purpose of constructing dynamic controller of the stage. It was confirmed that the thrust forces of the two phases were sinusoidal functions of positions with a shift in space by one-quarter of the motor pitch length of 5 mm. A simple commutation law was applied to the two-phase forces so that a constant force can be obtained throughout the full range of travel. A PC-based PID controller was designed and constructed for micro-positioning experiments of the stage. Experimental results indicated that dynamic micro-positioning can be carried out independently in X and Y-axes with a positioning resolution of 50 nm.

Key words: micro-positioning, measurement, surface encoder, dynamic control, multi-axis

1. 緒 言

近年、半導体製造装置などの精密/超精密製造・検査装置において、高い位置決め精度が要求されており、その実現のために高精度の多自由度位置決め装置が必要となっている¹⁾。現状で多用されているスタック型の2次元位置決め装置では、可動部の重心位置変動により、位置決め精度が低下する問題がある。また、ステージ可動部が重くなるため、位置決め的高速化という点で不利である²⁾³⁾。一方、ステージ制御で必要となるステージ位置検出にはレーザ干渉測長器が使用される場合が多い⁴⁾。レーザ干渉測長器は位置検出分解能が高く、高速な位置検出が可能であるが、1自由度に1つの測長器が必要であり、多自由度を検出するには、検出したい自由度分の測長器が必要となる。また、機器は非常に高価で、測定システム設置に要する調整が煩雑であるという欠点がある。さらに、大きな姿勢変化がある場合、位置検出ができなくなるため、回転を含む多自由度の位置決めで使用できない。

そこで筆者らは、多自由度検出センサの開発を中心として、サーフェスモータを利用した多自由度ステージを提案し、試作してきた⁵⁾。リニアモータを平面上に展開した構造のサーフェスモータは、ステージ可動部を軽くでき、重心変動もないため高速・高精度位置決めには有効である。また、ダイレクトドライブであるため、機械的な損失や非線形性があまりないという特長を有している。位置検出には、1つのセンサで多自由度の変位を検出できるサーフェスエンコーダ⁶⁾を使用している。このセンサはステージ内部に設置できるほどコンパクトであり、レーザ干渉測長器のように広い設置面積を必要としない。このよう

に、提案する多自由度ステージは次世代の多自由度位置決め装置として、有効であると考えられる。

前報では、サーフェスエンコーダによる位置検出に研究の重点を置いていたため、静的なステッピング駆動方式を採用し、サーフェスエンコーダの格子ピッチである300 μm を最小駆動ステップとしたXY2軸駆動実験を行った⁵⁾。本報では、ダイナミック制御系を構築するために必要な、モータ推力特性とエンコーダ出力特性を評価することで、課題となっていたXY2軸ダイナミック駆動におけるサブミクロンオーダーの微小位置決め実験を行った結果について報告する。

2. 多自由度ステージの概要⁵⁾

提案した多自由度ステージは、図1に示すようにアクチュエータとしてのサーフェスモータ、ステージ可動部位置検出のためのサーフェスエンコーダ、ステージのフィードバック制御を行う制御システムより構成される。サーフェスエンコーダのアナログ出力信号がA/Dボードを通してPCに取り込まれ、位置情報に変換される。PC内部でソフトウェアサーボを構築し、計算されたモータの制御信号はD/Aボードより出力され、アンプによって励磁電流に増幅変換された後、モータに入力される。

2.1 サーフェスモータ

サーフェスモータは、2組のコイルと永久磁石よりなる2相励磁DCリニアモータを正方形に配置し、平面に展開した構造である。200 mm四方のアルミ製ステージ可動部はセラミック球により4カ所で支持されており、2次元平面内で自由に運動できる。対向した2つのリニアモータを同方向に駆動させることにより、ステージ可動部はX方向とY方向への並進運動が可能である。また、逆方向に駆動させることでZ軸回りの回転が可能である。可動部はX,Y方向に40 mm並進、Z軸回りに約12度の回転性能を有する。

* 原稿受付 平成14年7月29日

** 学生会員 東北大学大学院(仙台市青葉区荒巻字青葉01)

*** 正会員 東北大学大学院工学研究科

Fig. 1 Schematic of the stage system

2.2 サーフェスエンコーダ

サーフェスエンコーダは2次元平面内の変位検出が可能なエンコーダで、2次元角度センサと2次元角度格子より構成されている。2次元角度センサは、レーザオートコリメーション法を利用した光学式角度センサで、受光素子に4分割PDを使用することで、直交した2方向の角度を独立して検出することができる。目盛りとして使用される2次元角度格子は、アルミニウム平板（φ55mm、厚さ10mm、A5052製）の一表面に、次式で表される正弦波形状が刻まれている格子である。

$$f(x, y) = A_x \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_x} x\right) + A_y \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_y} y\right) \quad (1)$$

ここで λ は格子周期 (300 μ m) , A は片振幅 (0.3 μ m) である。

角度センサで角度格子を検出すると、角度格子形状の偏微分に相当する値が、測定点における角度出力 m として次式のように X 方向, Y 方向に独立して得られる⁶⁾。

$$m_i = \frac{\partial f}{\partial i} = \frac{2\pi A_i}{\lambda_i} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_i} i\right) \quad i = x, y \quad (2)$$

角度格子が角度センサに対して相対的に変位すると、(2)式で表される角度センサ出力変化 m_x, m_y より変位 x, y がそれぞれ求められる。試作したセンサは、変位 150 μ m ごとに角度出力が 0 (以下、この点をゼロクロス点と呼ぶ) となるインクリメンタル型センサである。基準となる格子形状のばらつきを低減するため、同位相の形状を複数のレーザで同時に検出するマルチスポット法⁷⁾を採用している。この角度格子をステージ可動部に取り付け、角度センサをステージベースに設置することで、ステージ可動部の変位を検出する。

3. 特性評価

3.1 モータ推力特性

ステージシステムをモデル化し、ダイナミック制御器を設計する際に必要となるモータ推力定数を、モータ推力を評価して求める。図2に使用したサーフェスモータのうちの1つの X 方向 DC リニアモータ構造を示し、表1に構成要素の詳細を示

す。モータは、巻線の巻き方向が互い違いになっているコイルを2つ並べた構成となっている。2つのコイルは永久磁石に対して位相をずらした状態で配置される2相モータである。位相 A と位相 B は別々に励磁することができ、2相のコイルを同期駆動させることで推力を得る。励磁方法を決めるために、2相のコイルの推力についての関係を調べておく必要がある。まず、2組の対向する X 方向モータを同時に励磁し、コイルと永久磁石の相対位置に対する A 相の X 方向推力 (図2の F_A) をロードセルにて測定した。続いて、B 相の X 方向推力 (図2の F_B) について同様の測定を行った。励磁電流は 1.0 A とし、A 相の推力が 0 となる位置を原点とした。モータ変位は磁石2個分に相当する 20 mm まで測定した。測定結果を図3に示す。この結果より、それぞれの相について、推力が変位に対して正弦波状に変化していることがわかる。グラフには、正弦波のグラフを当てはめて示した。また、A, B 相の推力は 1/4 位相に相当する磁石半個分 (約 5 mm) だけずれていることがわかる。

Fig. 2 Schematic of the DC linear motor

Table 1 Motor specification

Permanent Magnet	material	Nd-Fe-B
	BH(max), Br	255~286 kJ/m ³ , 1.16T
	quantity	10
Coil	size (l × h × w)	10×5×20 mm
	winding number	126 turn / coil
	size (a _{coil} × b _{coil} × c _{coil})	4×10×64 mm
	coil gap (g _{coil})	15mm
Motor gap	quantity	2
	g _{air}	1 mm

Fig. 3 Phase difference between thrust forces generated by the two coils of the X-motor

次に、A相について、推力が最大となる位置で、励磁電流を1.0 A、0.6 A、0.3 Aと変化させ、電流による推力変化を測定した。図4が測定結果で、横軸に励磁電流、縦軸には推力の大きさを示している。これより、推力は電流に対してほぼ比例関係にあることがわかる。実測値は、計算により求めた結果とも良く一致していた。このグラフより推力定数は1.6 N/Aであることが確認される。なお、B相、及び、Y方向についても同様の結果が得られている。

以上の実測結果より、A、B相の変位 x に対するモータ推力 F_A, F_B は、励磁電流をそれぞれ i_A, i_B とし、磁石幅 l を用いて

$$F_A = K_f \sin(\pi x / l) i_A \quad (3)$$

$$F_B = K_f \cos(\pi x / l) i_B \quad (4)$$

と表されることが分かる。ここで、コイルA、Bの推力定数はほぼ同じであることが確かめられているので、ともに K_f とした。

測定されたモータ推力から、位置によらない一定の推力を得るために、モータコミュテーション電流 i_A, i_B を次式のように与える⁸⁾⁹⁾。

$$i_A = i \sin(\pi x / l) \quad (5)$$

$$i_B = i \cos(\pi x / l) \quad (6)$$

ここで、 i は指令電流である。このコミュテーションを適用することで、モータにより発生させられる推力 F は

$$\begin{aligned} F &= F_A + F_B \\ &= K_f \sin(\pi x / l) i \sin(\pi x / l) + K_f \cos(\pi x / l) i \cos(\pi x / l) \\ &= K_f i \end{aligned} \quad (7)$$

となる。得られる推力は、指令電流に比例し、ステージ可動部位置に依存せず一様な大きさとなる。また、Y方向についても同様の方法を実現することで、2次元平面内でステージ可動部位置によらない一様な推力を得ることができる。以上より、モータの推力定数は1.6 N/Aと求められた。

2次元平面内での高精度な制御のために、ステージ1方向の推力が他方向の位置によらず一定であることが望まれる。そこで、ステージのY方向の位置によらず、X方向推力が一定の推力特性を有することを確認した。図5はY方向位置を変えたときのX方向の推力特性結果である。Y方向位置を変えた場合のX方向推力は、Y方向位置にあまり干渉されないことが確認された。Y方向位置によるX方向推力のばらつきは0.43 N (3%)であった。また、Y方向推力についてもほぼ同様の結果を得て

Fig. 4 Relationship between the maximum thrust force and the applied current

Fig. 5 Measured thrust force distribution in XY plane of the X-motor

いる。したがって、支持球の弾性変形や摩擦などを無視できるとした場合、ステージシステムの運動方程式は、次式で表されることになる。

$$M\ddot{X} = K_f i \quad (8)$$

$$Li + Ri = V - K_e \dot{x} \quad (9)$$

慣性行列: $M = \text{diag}[m, m]$ 可動部位置行列: $X = [x, y]^T$

コイルインダクタンス行列: $L = \text{diag}[L_x, L_y]$

コイルレジスタンス行列: $R = \text{diag}[R_x, R_y]$

コイル電流行列: $i = [i_x, i_y]^T$

コイル印可電圧行列: $V = [V_x, V_y]^T$

逆起電力定数行列: $K_e = \text{diag}[k_{ex}, k_{ey}]$

X方向、Y方向が独立して制御可能であるため、制御器は各方向で別々に構成することにする。

3.2 サーフェスエンコーダ特性

角度センサに対して角度格子を相対的に大ストローク変位させた時の、角度センサ出力変化を見た。その結果の一例を図6に示す。(2)式で表されるように、角度センサと角度格子の相対変位により、角度センサ出力は角度格子形状の波長に相当する300 μm 周期の正弦波で出力されていることがわかる。また、ゼロクロスを中心に角度振幅 $\pm 60\%$ 程度の範囲で、変位に対するセンサ出力変化が大きい。高精度な位置検出が可能である。本報では、高精度な位置決めを目指し、ゼロクロス付近での微小位置決めを行うこととする。なお、角度センサの追加などにより、すべての測定範囲で高精度な位置検出も可能となる⁹⁾。

ゼロクロス点付近での角度センサ出力を測定した結果を、図7

Fig. 6 Angle sensor output

Fig. 7 X-output of angle sensor

Fig. 8 Y-output of angle sensor

に示す。横軸は角度格子の変位を外部よりマイクロセンサ（日本 ADE（株）製）にて測定した値で、縦軸はそのときの角度センサ出力を示している。X方向には角度センサ出力が変位しているが、Y方向の角度センサ出力はほぼ変化しないことより、X方向、Y方向の変位を分離して検出できていることがわかる。図に示す微小範囲における X 方向のセンサ感度はグラフより $0.042 \mu\text{m} / \text{arcsec}$ である。また、Y 方向についても同様の実験を行い、図8に示す結果より感度を $0.039 \mu\text{m} / \text{arcsec}$ と求めた。

ステージ可動部の位置決め分解能は、センサのノイズレベルに大きく依存する。そこで、センサ出力の短時間安定性を確認した。エンコーダを含めたステージシステムは空気バネ式除振台（明立精機（株）製、固有振動数 1.1Hz（垂直）、0.5Hz（水平））の上に設置され、除振台を含めたシステムは温度・湿度管理された室内に設置されている。サーフェスエンコーダの角度格子を固定した状態で、1 秒間の角度センサ出力を測定した結果を図9に示す。センサ出力は、先に求めた感度で変位に換算してある。この結果、センサは 50 nm 以下で安定していることが確認された。しかし、スパイクのようなノイズの急激な変化も見られ、これにより、制御系が不安定になる可能性がある。そこで、次節で示す制御則を適用することでノイズの影響を低減する。

4. ステージのダイナミック制御則

ステージ可動部のダイナミック制御には、設計・調整が比較的簡単な PID 制御器を用いることにした。通常の PID 制御では指令値がステップ状に変化した場合、システムが不安定にな

Fig. 9 Angle sensor stability

ることがある。そこで、次式に示すような目標値に対して微分制御を行わない微分先行型 PID 制御を採用する¹⁰⁾。

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau - K_D \frac{dx(t)}{dt} \quad (10)$$

ここで、 $u(t)$ は指令値、 $e(t)$ は位置偏差、 $x(t)$ は可動部位置であり、 K_p 、 K_I 、 K_D は比例、積分、微分のそれぞれのゲインである。システム全体のブロック図を図10に示す。この制御則において、閉ループ系の帯域幅が広くなると、図9で測定されたようなセンサノイズの影響が大きくなり、システム全体が不安定になる可能性がある。この影響は、高精度な位置決めほど顕著となる。そこで、微分要素として、次式で表される 1 次遅れフィルタを付加した不完全微分¹⁰⁾を用い、安定性向上を図った。

$$\frac{T_D s}{1 + \gamma T_D s} \quad (11)$$

ここで、 T_D は微分時間、 $1/\gamma$ は微分ゲインである。このフィルタのカットオフ周波数は 500Hz とした。上記の制御則を離散化し、PC ベースのソフトウェアサーボを実現した。制御周期は 1 ms とし、図10のブロック図を基に、ステージ可動部が、オーバーシュート $0.5 \mu\text{m}$ 、整定時間 20 ms を実現できるようなゲインをシミュレーションにより求め、最終的には実機にて微調整を行うことで決定した。シミュレーションに使用したステージの各定数、導出された PID パラメータを表2に示す。なお、モータ推力係数は、第3.1節で求めた結果を用いた。

5. 微小位置決め実験

ステージ可動部の位置決め分解能を見るため、1 秒ごとにセ

Fig. 10 Block diagram of the dynamic control system model

Table 2 System parameters

Parameter	Unit	Constant
Stage mass	kg	$m = 1.9$
Coil inductance	H	$L_x = L_y = 6.1 \times 10^{-4}$
Coil resistance	Ω	$R_x = R_y = 1.2$
Force/current gain	N/A	$K_f = 1.6$
Back emf constant	Vs/m	$K_e = 1.6$
PID parameter		$K_{px} = 2.0 \times 10^4$, $K_{ix} = 10.0$, $T_{Dx} = 8.0 \times 10^2$, $\gamma = 5$ $K_{py} = 2.0 \times 10^4$, $K_{iy} = 10.0$, $T_{Dy} = 8.0 \times 10^2$, $\gamma = 5$

ンサノイズレベル程度の 50 nm 微小ステップ送りを行った。その結果を図11に示す。この結果より、センサノイズレベルで決めた微小ステップ送りが可能であることが分かる。また、X方向の移動に対して、Y方向へは変位していないことから、X方向とY方向とがそれぞれ独立して制御できていることも確認できる。図9で確認したセンサノイズのほぼ限界までステージ可動部を制御できていることが分かる。

次にステージ可動部の指令追従性と各方向の独立制御性を確認するため、X方向、Y方向へそれぞれ異なるタイミングで立ち上がり速度 0.4 mm/s の 20 μ m 台形ステップ入力を行った。ステップ入力の結果、及び、入力指令と可動部位置の差を図12に示す。X方向、Y方向とも、入力指令に良く追従してほぼ独立に制御されていることが分かる。センサノイズの影響はあまりなく、フィルタを付加した不完全微分が機能していることが分かる。X方向、Y方向オーバーシュートはそれぞれ 約0.7 μ m、約1 μ mであった。また、入力指令払出し後に $\pm 0.5 \mu$ mに位置決めする整定時間はX方向 約40 ms、Y方向 約100 msであった。X方向、Y方向で特性が異なった原因としては、可動体位置による推力のばらつきや、可動部のヨーイング、可動部支持球の真球度、支持台の平坦度などによる影響であると考えられる。これらの誤差要因は、図12に見られるXY自由度間の相互

Fig. 11 Positioning resolution

Fig. 12 20 μ m step response

干渉にも寄与していると思われる。

以上の結果より、試作したステージシステムでは、XY2軸駆動において、センサの分解能で決まるサブミクロンオーダの微小位置決めを行えることが確認された。

6. 結 言

本研究は、前報で設計・試作した多自由度ステージの特性を評価し、ダイナミック制御による微小位置決めを行うことを目的として行われた。結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) サーフェスモータの推力特性を評価し、2次元平面内で1.6 N/A のような推力を得る手順を示した。また、X方向推力、Y方向推力が互いに干渉しておらず、それぞれ独立して制御可能であることを確かめた。
- (2) サーフェスエンコーダの感度及びノイズレベルを確認し、ステージのダイナミック制御用センサとして、サブミクロン程度の高分解能な位置検出が可能であることを確認した。
- (3) PID制御則をステージのダイナミック制御に適用することで、センサノイズレベルで決まる50 nm程度の微小駆動ができた。また、20 μ mのステップ入力駆動結果より、X方向、Y方向が独立して制御できることが明らかになった。
- (4) 今後の課題として、大ストロークにおけるダイナミック位置決めがあげられる。ヨーイングが検出できるサーフェスエンコーダへの改良¹¹⁾とヨーイング制御、可動部の空気静圧軸受支持による位置決め誤差要因の低減、形状精度の良い角度格子の作成¹²⁾、格子ピッチ間隔の校正などにより、大ストロークにおける位置決めの高精度化を検討する予定である。

謝 辞

本研究は、科研費基盤研究(S)及びメカトロニクス財団研究助成を受けて行ったことを記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) E. Shamoto, H. Murase and T. Moriwaki : Ultraprecision 6-Axis Table Driven by Means of Walking Drive, *Annals of the CIRP*, **49**, 1(2000)299.
- 2) Li Xu and Bin Yao : Output feedback adaptive robust precision motion control of linear motors, *Automatica*, **37**, 7(2001)1029.
- 3) 山崎敬則, 栗原知弘, 堤正臣 : モデルマッチング法を用いた数値制御工作機械送り駆動系の多軸制御, *精密工学会誌*, **65**, 5(1999)704.
- 4) H. Kunzman, T. Pfeifer and J. Fluggle : Scales vs. Laser Interferometers, Performance and Comparison of Two Measuring Systems, *Annals of the CIRP*, **42**, 2(1993)753.
- 5) 高偉, 中田衆得, 出島秀一, 清野慧 : サーフェスモータ駆動型多自由度ステージの位置決め研究-第1報- サーフェスエンコーダを用いた位置検出システムの構築-, *精密工学会誌*, **67**, 12(2001)1981.
- 6) S. Kiyono, P. Cai and W. Gao : An angle-based position detection method for precision machines, *Int. J. of JSME*, **42-1**, (1999) 44.
- 7) 高偉, 星野唯, 清水裕樹, 清野慧 : マルチスポット光源を用いたサーフェスエンコーダの研究, *精密工学会誌*, **68**, 1(2002)70.
- 8) Y. Tomita, Y. Koyanagawa and F. Satoh : A surface motor-driven precise positioning system, *Precision engineering*, **16**, 3(1994)184.
- 9) 海老原大樹, 高橋友勝, 和多田雅哉 : サーフェスモータの2次元サーボコントロール, *T. IEE Japan*, **115-D**, 9(1995)1186.
- 10) システム制御情報学会編 : システム制御情報ライブラリー PID 制御, 朝倉書店, (2000)47.
- 11) Y. Shimizu, W. Gao and S. Kiyono : A new surface encoder for multi-axis position detection, *Proc. of 16th ASPE*, (2001)333.
- 12) 荒木武, 高偉, 清野慧 : 2次元角度格子の高精度創成に関する研究, *日本機械学会東北支部第36期総会・講演会講演論文集*, **11**, 1(2001)186.