ハイブリッドリニア駆動機構による超精密位置決め*

橋 詰 等^{*1}, 新 野 秀 憲^{*1}

Ultraprecision Positioning Using a Hybrid Linear Driving System

Hitoshi HASHIZUME^{*2} and Hidenori SHINNO^{*2} Tokyo Institute of Technology, Precision and Intelligence Laboratory,
4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 226-8503 Japan

With the increasing demands for higher accuracy and higher productivity, high speed ultraprecision table positioning technology is urgently required. In order to realize nanometer positioning accuracy and high speed feed drive, it is effective to minimize error factors in the table system by using a linear motor of a noncontact type. In such a linear motor-driven table system of a noncontact type, however, force ripple of the linear motor deteriorates directly tracking accuracy of the table. In this paper, therefore, we proposed a hybrid linear driving system constructed from a voice coil motor and a coarse driving mechanism, *e. g.*, a wire drive mechanism. Furthermore, we actually developed a hybrid linear motor-driven aerostatic table system, and clarified availabilities of the proposed driving system for ultraprecision table systems.

Key Words: Hybrid Linear Motor, Voice Coil Motor, Ultraprecision Positioning, Table System

1. 緒 論

超精密工作機械や半導体製造装置の高度化が進展するに伴い、それらの重要な構成要素であるテーブルシステムに対する高性能化の要求が一段と高まっている。特に、最近では、単なる位置決め停止精度だけではなく、生産性向上に直接寄与する高速・高加速度駆動特性、3次元複雑形状部品の加工やステップ&スキャン露光を実現するための目標値に対するナノメートルオーダの同期追従精度、さらには加工対象の大型化に対応するためのロングストローク化を同時に実現することが要求されている。

一般的にテーブルシステムは案内要素と駆動要素から構成され、それらの要素の特性はテーブルシステム全体の総合的な特性を左右する重要な因子である。特に、ナノメートルオーダの位置決め精度を要求される超精密位置決めテーブルシステムにおいては、可能な限り非線形現象の発生を排除した上で高速・高加速度駆動を実現するため、空気静圧案内や磁気案内とリニ

アモータ駆動を採用し、テーブルの完全非接触による支持及び駆動を具体化することが有効であると考えられる^{(1)~(3)}。しかし、このような構造構成のテーブルシステムの場合、案内要素の摩擦やねじ要素等による機械的な拘束がテーブルに作用しないため、テーブル送り方向の静的・動的特性は駆動要素であるリニアモータの特性と位置決めコントローラの特性のみにより決定される。そのため、例えば、駆動要素として多極式リニア同期モータを採用した場合、その推力リップルによりテーブル駆動時において目標値に対する追従誤差が直接的に発生する。

このような課題に対して、従来、オブザーバによる推力リップルの推定・補償法⁽⁴⁾⁽⁵⁾、推力リップル測定に基づく正弦波近似による補償法⁽⁶⁾、推力リップルデータベースに基づく補償法⁽¹⁾等、様々な補正方法が提案されている。しかし、これらの補償法は、オブザーバにおける位相遅れやテーブル運動の非再現性の問題により、特に高速・高加減速時等テーブルの広範な駆動条件の全てに対応することが困難であると考えられる。また、半導体露光装置を対象とした単相形リニアモータの開発⁽⁷⁾が行われているものの、テーブルのストロークを超える長さのコイルが必要であり、ストロークの延長に伴うコイルインダクタンスや発熱の増

* 原稿受付 2000年5月22日。

^{*1} 正員、東京工業大学精密工学研究所(〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)。

E-mail: hashizum@pi.titech.ac.jp

大、スペース効率の低下、コストの上昇等が問題になると考えられる。

そこで本研究では、ナノメートルオーダーの位置決め精度及びロングストローク化を同時に実現可能な新たな駆動機構を提案し、その有用性を明らかにする。具体的には、推力リップルを発生せず、テーブルの非接触駆動が可能な単極形リニア直流モータ（ボイスコイルモータ）を基本駆動要素に採用し、ロングストローク化を実現するための粗動機構を組み合わせたハイブリッドリニア駆動機構と名付けたテーブル駆動機構を提案するとともに、実際に空気静圧案内方式の非接触支持・駆動形位置決めテーブルシステムを構築することにより、提案した駆動機構によるテーブルの超精密・高速位置決め特性について検討を行っている。

2. ハイブリッドリニア駆動機構の構成

2.1 基本構造 本研究で提案する駆動機構は、図1に概念を示すように、基本的に微動機構であるボイスコイルモータを粗動機構と組み合わせることにより非接触支持されたテーブルを超精密・高速駆動する機

Fig. 1 Basic concept of the proposed hybrid linear driving system

Fig. 2 Cross section of the table

構であり、ボイスコイルモータの超精密・高速駆動要素としての優れた特性を最大限に発揮することを目的としたもので、ハイブリッドリニア駆動機構と名付ける。主要構成要素であるボイスコイルモータは、推力がコイル電流に比例する、コイルインダクタンスが小さく応答特性に優れる、推力リップルが存在しない、可動子-固定子間に磁気吸引力が存在しない、可動部が軽量である等のテーブル駆動系として有用な数多くの特徴を有していることから、超精密・高速位置決めに最も適した駆動要素であると考えられる。しかし、長距離にわたる均一な磁界を形成することが困難であることから、他のリニアモータに比較してストロークが短いことが欠点となっている。そこで、提案するハイブリッド駆動機構においては、ストロークの短いボイスコイルモータと十分なストロークを有する粗動機構を組み合わせ、ボイスコイルモータの固定子を一定の相対距離に保持しながらテーブルに追従させることにより、ロングストローク全域にわたって超精密・高速駆動を実現する。本駆動機構においては、永久磁石の数量及びコイル長がテーブルのストロークに無関係であり、また、電流アンプも1台のみで推力を制御可能であるため、低コスト化に対しても有効であると考えられる。

本駆動機構においては、従来から数多く開発されている圧電素子等を用いた粗微動位置決め機構⁽⁸⁾との大きな相違点として、粗動機構とテーブルとの間に機械的接触が存在しない点が挙げられる。したがって、テーブルの完全非接触支持・駆動が可能になると同時に、粗動機構の運動誤差がテーブルに直接伝達しないため、粗動機構の低精度化・低コスト化が可能である。また、ボイスコイルモータのストロークは、圧電素子に比較して格段に大であり、微動機構のストローク飽和の観点からも有効であると考えられる。

図2及び図3に構築した位置決めテーブルシステムの可動部の構造と全体構造を、表1に基本仕様を示す。

Table 1 Basic specifications of the table system

Overall travel length	120 mm
Mass of the table	4.2 kg
Stiffness in vertical plane	350 N/ μ m
Stiffness in horizontal plane	210 N/ μ m
Stroke of the voice coil motor	30 mm
Maximum driving force of the voice coil motor	64 N
Diameter of the lead wire	1.3 mm

Fig.3 Configuration of the table system

Fig.4 Block diagram of the positioning control system

テーブルの案内には空気静圧案内方式を採用し、提案したハイブリッド駆動機構を組み合わせることにより、テーブルの非接触支持・駆動を実現している。微動機構を担うボイスコイルモータは、2組の永久磁石の間隙に樹脂モールドコイルを配した構造であり、ボイスコイルモータ固定子の案内・駆動には、コンパクト化及び構造の簡素化を考慮して、リニア転がり案内と速度制御形DCサーボモータによるワイヤ駆動を採用した。

2・2 位置決め制御系の構成 図4に構築した位置決め制御系の構成を示す。ここで、図中の各記号は以下の通りである。

- X_{ref} : 位置指令
- K_p : 比例ゲイン
- K_i : 積分ゲイン
- K_f : 加速度フィードフォワードゲイン
- A, B : 位相進み補償定数
- K_g : 電流ループゲイン
- L : ボイスコイルのインダクタンス
- R : ボイスコイルの抵抗
- I : ボイスコイルの電流
- K_m : ボイスコイルモータの推力定数
- F : ボイスコイルモータの発生推力
- M : テーブルの質量

X : テーブルの位置

X_c : 粗動機構の位置

K_{p2} : 粗動機構の位置制御比例ゲイン

K_{i2} : 粗動機構の位置制御積分ゲイン

$G_c(s)$: 粗動機構の運動特性

本駆動機構においては、テーブルの位置決め動作を実現するため、テーブルの位置偏差からボイスコイルモータに供給する電流を制御するコントローラAと、ボイスコイルモータ固定子をテーブルの運動に追従させるためのコントローラBが必要である。しかし、図1及び図4から明らかなように、各コントローラは完全に独立している。実際に構築したコントローラは、図5に示すようにパーソナルコンピュータによるデジタル制御方式であり、サンプリング周波数は20kHzとした。テーブルの位置を測定するセンサAは、その特性が直接テーブルの位置決め精度を決定するため、分解能約9.9nm ($\lambda/64$)、測定範囲40mのレーザーヘテロダイン干渉測長器を用いた。一方、テーブルとボイスコイルモータ固定子の相対距離を測定するセンサBは、その特性がテーブルの位置決め精度に対してほとんど影響を及ぼさないことから、分解能1.5 μ m、測定範囲40mmの三角測量方式レーザー変位計を用いた。

3. テーブルの運動特性解析

構築した位置決めテーブルシステムにおいては、テーブルの非接触支持・駆動が実現されているため、粗動機構の運動誤差がテーブルに直接伝達することはない。しかし、図4から明らかなように、テーブルと粗動機構との相対速度に応じた逆起電力がボイスコイルに発生するため、駆動反力や外乱により生じる粗動機構の送り方向振動等がテーブルの位置決め精度を低下させる可能性がある。そこで、図4に基づき、粗動機構の運動がテーブルの運動特性に与える影響についてシミュレーションにより検討を行った。

Fig. 5 Hardware configuration of the positioning control system

まず、粗動機構を固定した場合 ($X_c = 0$) における位置指令 X_{ref} からテーブル位置 X までの伝達関数は次式で与えられる。

$$\frac{X}{X_{ref}} = \frac{K_g K_m (C_a(s) + K_f s^2)}{M L s^3 + M (R + K_g) s^2 + K_m^2 s + K_g K_m C_a(s)} \quad (1)$$

ただし、

$$C_a(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left(\frac{s+B}{s+A} \right) \quad (2)$$

である。次に、位置指令 $X_{ref} = 0$ とした場合における粗動機構の位置 X_c からテーブル位置 X までの伝達関数は次式で与えられる。

$$\frac{X}{X_c} = \frac{K_m^2 s}{M L s^3 + M (R + K_g) s^2 + K_m^2 s + K_g K_m C_a(s)} \quad (3)$$

これらの式により得られる周波数応答を図6及び図7にそれぞれ示す。ここで、各パラメータを表2に示す値とし、図6においては $K_f = 0$ とした。これらの図から明らかなように、粗動機構の運動誤差がテーブルの運動に与える影響はテーブルの位置決め制御系の共振周

Fig. 6 Frequency response of X/X_{ref} for $K_f = 0$

Fig. 7 Frequency response of X/X_c

波数近傍 (約 150Hz) で最大ゲイン約 -77dB (1.4×10^{-4}) を示すものの、他の周波数領域では大きく減衰している。このように、懸念されたテーブルと粗動機構の相対運動により発生する外乱は図 4 中に示す電流ループにより十分抑制されていることがわかる。また、運動誤差の伝達率 (X/X_c) がテーブルの位置決め制御系の共振周波数近傍で最大となることから、粗動機構の構造及び制御系の設計段階においては、その共振周波数をテーブルの位置決め制御系の共振周波数と一致しないようにすることが有効であると言える。さらに換言すれば、本研究で採用したワイヤ駆動機構のように、提案したハイブリッドリニア駆動機構においては低剛性かつ低コストな粗動機構の組み合わせでも所要の性能を実現する上で十分かつ有効であると考えられる。

4. テーブルの位置決め特性評価

提案したハイブリッド駆動機構の有用性を明らかにするため、以下の基本的な駆動パターンによりテーブルの位置決め動作を行い、その際に得られたレーザー

Table 2 Specifications of the positioning control system

M	4.2 kg	K_p	1.44×10^6 A/m
L	2.7 mH	K_i	1.28×10^8 A/ms
R	2.4 Ω	A	2.81×10^3 s $^{-1}$
K_m	8.4 N/A	B	5.62×10^2 s $^{-1}$
K_g	1.8×10^2 V/A	K_f	4.92×10^{-1} As 2 /m

Fig. 8 20nm stepwise positioning

Fig. 9 5nm stepwise positioning

ヘテロダイン干渉測長器のフィードバックデータを基に位置決め特性の評価を行った。

4.1 微小ステップ駆動 図 8 及び図 9 に 20nm 及び 5nm のステップ駆動によるテーブルの応答をそれぞれ示す。いずれの図からも明らかなように、測定データにはレーザーヘテロダイン干渉測長器の分解能に相当する約 10nm の変動が常時含まれているものの、テーブルは指令値に追従し、ステップ的に移動していることが確認できる。また、図 8 において指令値が増大するに伴い位置決め誤差が上方に偏在していることが観察される。これは、レーザーヘテロダイン干渉測長器の分解能が約 9.9nm ($\lambda/64$) であり、指令値のステップ量と一致していないことによる結果である。すなわち、図 9 から明らかなように、テーブルの平均的な位置に着目した場合には、位置センサの分解能以下の位置決め分解能が得られていると考えられる。なお、図 8 及び図 9 におけるテーブルの追従誤差のばらつき (標準偏差 σ) はそれぞれ 3.08nm, 3.85nm であり、位置センサの分解能のほぼ 1/3 となっている。

このような微小ステップ駆動時には粗動機構はほとんど停止しており、テーブルの運動特性はボイスコイルモータの特性のみにより決定されと考えられ、応答性の高いボイスコイルモータと高速位置決めコントローラによりテーブルの超精密位置決め動作が可能になったと考えられる。

(a) Position of the table

(b) Filtered position of the table
(cut off frequency = 200Hz)

Fig. 10 Tracking response at feed rate of 100nm/s

4.2 低速駆動 光ディスクの原盤露光工程等で重要となるテーブルの低速駆動特性について検討を行うため、秒速100nmの定速駆動を行った。その結果得られたテーブルの応答を図10に示す。図10においては、駆動時間が1秒であり、駆動終了後におけるテーブルの目標位置は100nmである。図10(a)より、テーブルはレーザーヘテロダイン干渉測長器の分解能に等しい約10nmのステップ的な移動を行っているように見える。これは、デジタル方式の測長器を用いていることが原因であり、得られた応答波形に対してカットオフ周波数200Hzのデジタルローパスフィルタ処理を施した図10(b)から明らかなように、実際にはテーブルが一定速度で正確に駆動されていることが確認できる。すなわち、デジタル方式の位置センサによるフィードバック制御においてもテーブルの連続的な低速駆動が可能であり、このことは、応答性の高いボイスコイルモータによるテーブルの非接触駆動を実現したハイブリッド駆動機構の有用性を示している。

4.3 ロングストローク駆動 急激な加減速による振動の発生等を抑制するため、ロングストロークの位置決め駆動では余弦関数を用いたジャーク連続軌跡(1)(9)を生成し実験を行った。具体的には、駆動の最大速

度(V_{max})及び最大加速度(A_{max})から加速度($A(t)$)を次式より算出した。

$$A(t) = \frac{A_{max}}{2} \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{t}{T_a} \right) \right) \quad (4)$$

ここに、

$$T_a = \frac{2 V_{max}}{A_{max}} \quad (5)$$

図11及び図12に最大速度を50mm/s及び200mm/sに設定した場合において得られたボイスコイルモータのストローク30mmを上回る80mmの位置決め駆動によるテーブルの応答、追従誤差、並びにテーブルと粗動機構との相対変位を示す。なお、最大加速度は加速時間(T_a)がいずれも0.08秒となるように設定し、また、駆動距離はレーザーヘテロダイン干渉測長器の分解能の整数倍とした。

まず、図11(c)及び図12(c)より、テーブルの加減速時においてテーブルと粗動機構との間には大きな相対変位が発生し、等速駆動時においても粗動機構の固有振動と考えられる周期的な相対変位の発生が確認できる。しかし、図11(b)及び図12(b)と比較することにより、このような粗動機構の運動誤差がテーブルの運動にほとんど悪影響を及ぼさないことがわかる。すなわ

Fig. 11 80mm point-to-point positioning
(Maximum feed rate = 50mm/s)

Fig. 12 80mm point-to-point positioning
(Maximum feed rate = 200mm/s)

ち、第3章で示したようなテーブルに対する粗動機構の運動誤差の伝達が僅少であることを実験的にも確認できた。また、テーブル停止時において粗動機構の運動が継続しているにもかかわらず、テーブルの位置偏差は速やかに収束し、オーバーシュートや残留振動はほとんど発生していないことがわかる。さらに、テーブル駆動時における最大追従誤差は駆動速度200mm/sの場合においても $\pm 80\text{nm}$ 程度であり、テーブルの超精密・高速駆動に対して提案したハイブリッドリニア駆動機構が十分な性能を有していることが明らかとなった。なお、テーブルの加減速時においても顕著な追従誤差の発生は確認できないが、これは図4に示した加速度フィードフォワードによる効果と考えられる。

5. 結 論

本研究では、ナノメートルオーダの位置決め精度及びロングストローク化を同時に実現可能な新たな駆動機構として、ボイスコイルモータと粗動機構を組み合わせたハイブリッド駆動機構と名付けたテーブル駆動機構を提案するとともに、実際に空気静圧案内方式の非接触支持・駆動形位置決めテーブルシステムを構築し、提案した駆動機構の有用性について詳細な検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 提案したハイブリッド駆動機構をモデル化し、粗動機構の運動誤差がテーブルに与える影響について検討を行った結果、構築したテーブルシステムの場合、その最大ゲインは約-77dBであり、テーブルの超精密位置決めを実現する上で十分であることを明らかにした。また、ハイブリッド駆動機構の設計の際には、送り方向における粗動機構とテーブルの共振周波数を一致させないことが重要であることを指摘した。

(2) ハイブリッド駆動機構を組み込み構築したテーブルシステムが、ナノメートルオーダの位置決め分解能を有することを20nm及び5nmの微小ステップ駆動の結果から明らかにした。

(3) 構築したテーブルシステムにおいて、毎秒100nmの低速駆動を行った結果、分解能約10nmのレーザーヘテロダイン干渉測長器によるフィードバック制

御であるにもかかわらず、正確な低速における等速駆動が実現できた。

(4) 基本駆動要素であるボイスコイルモータのストローク30mmを上回る80mmの位置決めを行った結果、テーブルと粗動機構の間には大きな相対変位が発生するものの、粗動機構の運動誤差はテーブルの運動にほとんど影響を及ぼさないことを明らかにした。結果として、駆動速度200mm/sの高速駆動においてさえも最大追従誤差が約80nmの超精密駆動を実現することができた。

以上のように、本研究で提案したボイスコイルモータの特性を最大限に発揮した新たなハイブリッドリニア駆動機構の有用性を明らかにした。

文 献

- (1) 橋詰等・新野秀憲, 高速ナノメートル位置決めテーブルシステムの開発と基本特性評価, 機論, **64**-626, C (1998), 4103-4108.
- (2) 橋詰等・新野秀憲, ER流体応用ナノメートル位置決めテーブルシステムに関する研究, 機論, **65**-630, C (1999), 786-792.
- (3) Kim, W.-J. and Trumper, D.L., Linear Motor-Levitated Stage for Photolithography, *Annals of the CIRP*, **46**-1 (1997), 447-450.
- (4) 家沢雅宏・今城昭彦・富沢正雄, ACサーボモータ位置決め系の摩擦補償による高精度化, 機論, **59**-568, C (1993), 3811-3816.
- (5) 佐藤宏和・牧野辰夫・松井信行, DDモータのトルク脈動自動補償システム, 電学論, **112**-10, D (1992), 966-971.
- (6) Van Den Braembussche, P., Swevers, J., Van Brussel, H. and Vanherck, P., Accurate Tracking Control of Linear Synchronous Motor Machine Tool Axes, *Mechatronics*, **6**-5 (1996), 507-521.
- (7) 是永伸茂, 単相付きリニアモータとその制御, 機講論, No. 98-1, VI (1998-3), 244-245.
- (8) 例えば, 佐久田茂・小川潔・上田勝宣, 超精密位置制御に関する研究 - 粗・微動の連動制御 -, 精密工学会誌, **57**-12 (1991), 2133-2138.
- (9) Y. Tomita, K. Makino and M. Sugimine, High-Response X-Y Stage System Driven by In-Parallel Linear Motors, *Annals of the CIRP*, **45**-1 (1996), 359-362.