高速ナノメートル位置決めテーブルシステムに関する研究*

(繰返し制御による超精密位置決めの実現)

吉岡 勇人^{*1}, 橋 詰 等^{*2}, 新野 秀憲^{*2}

A Study on High Speed Nanometer Positioning Table System (Realization of Ultraprecision Positioning Using a Repetitive Control Method)

Hayato YOSHIOKA, Hitoshi HASHIZUME^{*3} and Hidenori SHINNO

^{*3} Tokyo Institute of Technology, Precision and Intelligence Laboratory,
4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 226-8503 Japan

In order to realize higher machining accuracy and higher productivity, it is required to materialize the table system which has capabilities of nanometer order positioning accuracy and high speed feed drive. In particular, nanometer order tracking accuracy is urgently required in semiconductor production systems. Accordingly, it is increasing to apply a linear motor and aerostatic guideway to the table systems. The linear motor-driven aerostatic table system has the advantage of non-contact direct drive, however, disturbances such as the force ripple of the linear motor deteriorate directly tracking accuracy of the table. In this paper, therefore, the performances of the linear motor-driven aerostatic table system using a repetitive control method were evaluated. Furthermore, through a series of experiments, it was proved that the repetitive control method could restrain tracking error caused by various factors.

Key Words: Ultraprecision, Positioning, Repetitive Control Method, Tracking Error

1. 緒 論

近年, 情報化社会の急速な発展に伴い, それを支える精密部品の加工技術に対する要求が年々厳しくなっている。その結果, 半導体製造装置や工作機械の主要構成要素である位置決めテーブルシステムに対しては更なる高速化・高精度化が迫られている。特に, 最近では, 単なる位置決め停止精度だけではなく, 高速・高加速度の駆動特性と目標値に対するナノメートルオーダーの同期追従精度を同時に実現することが要求されている。

そのような高速ナノメートル位置決めテーブルシステムを実現するためには, テーブルシステムの総合的な特性を支配する案内要素と駆動要素の選定段階において, 可能な限り非線形現象の発生を排除した上で高速・高加速度駆動と超精密駆動を実現することが必要となる。それらの観点から, 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, 摩擦や機械的な拘束が存在しないものの, リニアモータの推力が直接テーブルに作用するため, リニアモータの推力リップル等の外乱により目標値に対する追従誤差が直接的に発生する。また, リニアモータの採用によりテーブルの急激な加減速が可能となった半面, その反力によって励起される定盤振動の影響も顕在化してきている。

このような位置決め精度を悪化させる諸因子に関しては従来からさまざまな補償法が提案されている^{(4)~(8)}ものの, それらの補償法は各因子の影響について独立に検討が行われているため, 実際に多数存在する影響因子のそれぞれについて独立した補償法を適用することは困難であると考えられる。すなわち, 各影響因子を補償するためのセンサの増加やコントローラ内における演算処理の複雑化が避けられず, さらに各補償要素間の相互影響が新たな誤差要因となる可能性もある。

ところで, 同一の目標値パターンを対象とした場合, 複数の影響因子を独立して取り扱うことなく各因子の影響を一括して補償可能な制御法として繰返し制御法が挙げられる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。繰返し制御は, 高い運動再現

* 原稿受付 2000年10月31日。

^{*1} 正員, 東京工業大学大学院(〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)。

^{*2} 正員, 東京工業大学精密工学研究所。
E-mail: yoshioka@pms.titech.ac.jp

性を有するシステムほど効果の大きいことが予想され、非線形現象の発生を極力排除した超精密位置決めテーブルシステムに対する繰返し制御の適用は特に有効であると考えられる。これまでも非円形断面形状の旋削加工用工具台⁽¹¹⁾、リニアモータ駆動テーブル⁽¹²⁾、並びに磁気ディスク装置のヘッド位置決め⁽¹³⁾等に対する繰返し制御の適用が試みられ、その効果が検討されているが、超精密工作機械のテーブルシステムに代表されるような大質量のテーブルを有し長ストロークにわたりナノメートルオーダの位置決め精度を要求されるテーブルシステムを対象とした検討はほとんど行われていない。

本研究では、テーブルの高速駆動時におけるナノメートルオーダの目標値追従精度の実現を目的として、超精密位置決めテーブルシステムに繰返し制御を適用し、その有用性を明らかにしている。具体的には、著者により開発されたリニアモータ駆動と空気静圧案内を採用した高速ナノメートル位置決めテーブルシステム⁽¹⁾に繰返し制御機能を組み込み、実際のテーブル駆動実験により、繰返し制御の有効性について詳細な検討を行っている。

2. 繰返し制御系の構成

2.1 繰返し補償要素 繰返し制御は、周期的な目標値が入力される際に1周期前の偏差情報を利用することによって高い目標値追従精度を実現する方法である。一般的な繰返し制御系は、図1に示すように、周期 L に対応するむだ時間要素を含む繰返し補償要素を直列に挿入した構成となる。ここで、 $P(s)$ 、 $C(s)$ 、 $F(s)$ は

Fig.1 Block diagram of a repetitive control system

制御対象、安定化補償要素、ローパスフィルタをそれぞれ表している。このような制御系の特性は基本的に $F(s)=0$ 、すなわち繰返し補償要素を使用しない場合の特性に依存するため、テーブルシステムを構築する際には、まず、 $F(s)=0$ とした場合において制御対象 $P(s)$ に対する安定化補償要素 $C(s)$ の特性を最適化することが必要となる。換言すれば、通常の手順にしたがって構築したテーブルシステムに対して繰返し補償要素を追加することにより、テーブルの目標値追従精度の向上が可能となる。

一般に、位置決めテーブルシステムは任意の目標値パターンに対応可能であることが要求されるが、生産システムを対象とした場合、同一の目標値パターンを反復する要求が少なくない。そこで、同一目標値パターンが要求された場合に、その目標値パターンにおける目標値追従精度の向上を目的として繰返し補償要素を動作させることが有効であると考えられる。また、繰返し制御による追従誤差の収束が十分に高速であれば、あらかじめテスト駆動を行うことにより、任意の目標値パターンに対して繰返し制御による高精度化が実現できる。

そこで本研究では、複数の目標値パターンに柔軟に対応するため、データベースを利用した繰返し制御系を構築した。図2に構築した制御系を示す。図において、PID補償要素 $C(s)$ 及びテーブルの運動特性 $P(s)$ は次式のとおりである。

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$P(s) = \frac{K_a}{(1 + T_a \cdot s)(Ms + C)s} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

M : テーブルの質量

C : テーブルの減衰係数

T_a : 電流アンプの時定数

K_a : 電流アンプのゲイン

Fig.2 Block diagram of the positioning control system with the repetitive compensator

K_p : 比例ゲイン

K_i : 積分ゲイン

K_d : 微分ゲイン

である。なお、繰返し補償要素を使用しない場合、すなわちPID制御のみによるテーブルの位置決め特性は図3に示すとおりであり、バンド幅397Hz、ゲイン余裕10.8dB、位相余裕0.60radである。

構築したテーブルシステムの位置決め制御系は、図2から明らかなように、基本的にレーザフィードバックによるPID制御方式であり、制御出力であるリニアモータに対する推力指令値を繰返し補償要素の入力としている。まず、テーブルを駆動する際にリニアモータへの推力指令値をローパスフィルタにより高周波数成分を除去し、データベースに保存する。次に、同一の目標値パターンが要求された際には、データベースに保存されている推力値をPID補償器の出力に加算する。更に、その出力をデータベースに保存することにより、繰返し制御によるテーブルの追従精度の改善が可能となる。

Fig.3 Characteristics of the table without the repetitive compensator

Fig.4 Characteristics of the filters

2.2 ローパスフィルタ

構築した位置決め制御系において繰返し補償要素を動作させる際には、ローパスフィルタの特性により制御系全体の特性が変化する。ここで、ローパスフィルタの特性は、繰返し制御系の安定条件として次式を満足する必要がある。

$$|1 + C(s)P(s)| > |F(s)| \quad (3)$$

ローパスフィルタを用いてノイズ等の高周波成分を除去することにより、制御系の安定性は向上するが、繰返しにより補償される周波数帯域も同時に制限される。また、フィルタの位相遅れにより、追従誤差の抑制効果が制限されるため、位相遅れの存在しない理想的なローパスフィルタを採用する必要がある。

そこで本研究では、位相遅れの存在しないローパスフィルタとして、FFT アルゴリズムを使用したデジタルローパスフィルタ及びガウシアンデジタルフィルタ⁽⁴⁾を用いた。前者のFFTフィルタは、取得した時系列推力指令値をフーリエ変換し、カットオフ周波数以上の成分を0としたのち、逆フーリエ変換することにより実現される。一方、後者のガウシアンフィルタは表面あらさ曲線の処理等に使用される位相遅れの無い非巡回形フィルタであり、入力データを x_i 、出力データを y_i 、サンプリング周期を ΔT 、カットオフ周波数を f_c とすると、次式で示されるガウス分布をとる重み h_k とたたみ込み積分により実現される。

$$y_i = \sum_{k=-N}^N \frac{h_k x_{i+k\Delta T}}{K} \quad (4)$$

$$h_k = \exp\left\{-\pi\left(\frac{k\Delta T f_c}{\alpha}\right)^2\right\} \frac{f_c}{\alpha} \quad (5)$$

ここで、 K は次式を満足する補正係数である。

$$\sum_{k=-N}^N \frac{h_k \Delta T}{K} = 1 \quad (6)$$

また、 α は $f=f_c$ における信号伝達率を0.5とする係数であり、 $\alpha=0.4697$ である。なお、カットオフ周波数は式(3)を満足するように100Hzとした。図4には各フィルタの特性を示す。

3. リニアモータ駆動テーブルシステムの構造構成

繰返し制御による位置決め特性の評価に用いたテーブルシステムの構造構成を図5に、基本仕様を表1に示す。本テーブルシステムは高速駆動とナノメートルオーダの位置決め精度の両立を実現するため、コアレスタイプの3相通電方式ブラシレスDCリニアモータ、多孔質軸受による空気静圧案内、並びに分解能約0.63nmのレーザヘテロダイン干渉計によって構成し

Fig.5 Structural configuration of the linear motor-driven aerostatic table system

Table 1 Basic specifications of the table system

Travel length	300 mm
Mass of the table	19.15 kg
Maximum driving force	160 N
Maximum acceleration	6.4 m/s ²
Maximum velocity	320 mm/s
Sampling frequency	10 kHz

た. このような構造構成によって完全に非接触でテーブルを支持, 駆動, 並びに変位測定を行うことが可能となり, 摩擦力に代表されるような非線形性がほぼ無視できる再現性の非常に高いシステムとなっている. また, テーブルの基本構造材料としてアルミナセラミックスを採用するとともに, テーブルの中心位置にリニアモータを配置し, 軸対称構造及び重心駆動を実現することによって熱的及び力学的な誤差要因を極力排除した構造とした. なお, 高速・高精度駆動を実現するため, 位置決めコントローラの高速度をはかり, サンプル周波数は10kHzに設定した.

4. テーブル駆動実験による繰返し制御の有用性評価

4・1 繰返し制御系の基本特性 繰返し制御による位置決め特性の評価を行うために, 実際にテーブル駆動実験を行った. テーブルの目標値パターンは距離120mm, 最大速度200mm/s, 最大加速度5m/s²とし, 急激な加減速を避けるため加速度の微分であるジャークが連続となるような滑らかな目標値パターン⁽¹⁾⁽¹⁵⁾と

Fig.6 Jerk continuous reference

した. 実際に生成した目標値パターンは, 図6に示すように, 加減速時間は0.08秒, 全駆動時間は0.68秒である.

まず, 図7にPID制御のみで駆動を行った場合の目標値に対する追従誤差を示す. 図に示すようにPID制御のみで駆動を行った場合, 加減速時に最大約 $\pm 3\mu\text{m}$ の大きな追従誤差が発生し, 等速駆動時においてさえもモータの推力リップルに起因する周期的な追従誤差, さらにはテーブル停止後の定盤振動による減衰振動等が確認でき, さまざまな因子によって追従誤差を生じていることが分かる. そこで, 図7の駆動の際に記録した推力指令値を用いて繰返し制御により位置決

Fig.7 Tracking error under PID control

Fig.8 Tracking error at first repetition

めを行った。その結果を図8に示す。なお、ここではFFTフィルタを用いた。また、FFTフィルタの窓関数にはハミング窓を用い、図6における目標値パターンに対するFFTフィルタの周波数分解能は0.61Hzである。図8から明らかなように、繰返し制御を適用した場合、わずか1回の繰返しによってさえも駆動中の追従誤差が大幅に減少していることを確認できる。

次に、繰返しによる追従誤差の収束過程の一例を図9に示す。なお、使用したローパスフィルタはFFTフィルタである。図9から明らかなように、1回の繰返しにより大幅に減少した追従誤差は、その後繰返しを重ねるにしたがい、特に加減速時において抑制されていくことがわかる。繰返し数が4回以上になると追従誤差はほぼ定常状態に達し、駆動中の追従誤差が常に50nm以下に抑制されていることを確認できる。このことは、駆動中における追従誤差の標準偏差と繰返し回数との関係を示した図10からより明確に理解できる。また、繰返し数の増大により収束した追従誤差の標準偏差は約12nmであり、リニアモータによる高速・高加速度駆動時にナノメートルオーダの目標値追従精度を実現できた。なお、この追従誤差の収束値は、カットオフ周波数以上の帯域の外乱、システムの非再現性、変位センサの分解能、電流アンプ時定数、制御サンプリ

Fig.9 Transition of tracking error

Fig.10 Effect of repetition

ング周波数などにより決定され则认为られる。

以上のように、超精密位置決めテーブルシステムの運動制御に繰返し制御を適用することにより、わずかに数回の繰返しによって駆動中の追従誤差が大幅に減少すると共に速やかに収束し、ナノメートルオーダの目標値追従精度の実現が可能であることを明らかとした。このことは、テーブルシステムの設計段階において、摩擦等の非線形現象の発生を極力排除し、テーブルの高い運動再現性を確保したことによるものと考えられる。

4.2 ローパスフィルタによる影響 繰返し制御系におけるローパスフィルタの影響について検討を行う

(a) FFT filter

(b) Gaussian filter

Fig.11 Tracking error at cut-off frequency of 250Hz

(a) FFT filter

(b) Gaussian filter

Fig.12 Tracking error at cut-off frequency of 30Hz

ため、カットオフ周波数を変化させテーブル駆動実験を行った。図11と図12にはFFTフィルタ及びガウシアンフィルタのカットオフ周波数を250Hzと30Hzに設定し、3回の繰返し動作を行った際の追従誤差をそれぞれ示す。まず図11から、カットオフ周波数が250Hzの場合、繰返し制御により高周波成分が増幅され追従誤差が増大していることがわかる。なお、この周波数

(a) FFT filter

(b) Gaussian filter

Fig.13 Effect of cut-off frequency and repetition

はPID制御系の共振周波数230Hzとほぼ一致していることを確認した。また、FFTフィルタを用いた場合に、より大きな追従誤差が確認される。これは、図4に示したように、同一のカットオフ周波数においてはガウシアンフィルタに比較してFFTフィルタの安定余裕が小さいことが原因と考えられる。

次に、各フィルタのカットオフ周波数を30Hzに設定した際には、図12から明らかなように、繰返しによる追従誤差の抑制がかなり制限されていることがわかる。特に、FFTフィルタを用いた場合には、カットオフ周波数と等しい30Hzの振動波形が確認でき、急峻な特性を有するFFTフィルタのリングングが顕著に現れたと考えられる。また、ガウシアンフィルタを用いた場合には、テーブルの駆動開始前からすでに位置誤差が生じている。これは、式(5)に示したガウス分布の重み関数により必然的に生じる誤差と考えられる。

このように、繰返し制御の効果はローパスフィルタの特性に大きく影響を受けることが確認できる。そこで、その影響をより明確にするため、カットオフ周波数、繰返し回数、並びに駆動中の追従誤差の関係を図13に示す。図から、いずれのフィルタにおいても、カットオフ周波数が低い場合には繰返しの効果がほとんど

現れず、カットオフ周波数が200Hz以上の場合には繰返しの回数により追従誤差が著しく増大し発散することがわかる。FFTフィルタ及びガウシアンフィルタにおいて、式(3)から得られるカットオフ周波数の安定限界は、それぞれ約170Hz及び約280Hzであり、特にFFTフィルタの場合に実験結果とよく一致していることがわかる。また、実験の範囲内で得られた最小の標準偏差を比較しても、FFTフィルタを用いた場合に優れた結果が得られている。このことは、図4からも明らかのように、FFTフィルタが急峻な減衰特性を示すためと考えられる。

5. 結 論

本研究では、テーブルの高速駆動時におけるナノメートルオーダの目標値追従精度の実現を目的として、非接触支持・駆動を実現した高速ナノメートル位置決めテーブルに繰返し制御を適用し、その有用性について検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 複数の因子の影響を一括して補償可能な繰返し制御を超精密位置決めテーブルシステムに適用することにより、目標値追従精度の大幅な向上が可能であることを実際のテーブル駆動実験によって明らかにした。

(2) 構築したテーブルシステムにおいて、数回の繰返しにより追従誤差が速やかに収束し、高速・高加速駆動時においてもナノメートルオーダの追従精度が実現可能であることを示した。具体的には、最大速度200mm/s、最大加速度5m/s²の駆動条件における追従誤差の標準偏差12nmを実現した。

(3) 繰返し制御系におけるローパスフィルタの特性と位置決め特性との関係について検討を行った結果、ローパスフィルタのカットオフ周波数には最適値が存在し、構築したテーブルシステムにおいては100～150Hzの領域に存在することを明らかにした。また、より急峻な特性を有するフーリエ変換に基づくフィルタを使用した場合に、より高い追従誤差抑制効果が得られることを明らかにした。

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流体应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) 木下博雄・金井宗統・出口公吉・斎藤忠男, 空気浮上式高速XYステージの試作, 精密工学会誌, **52**-10 (1986), 1713-1718.
- (8) 涌井伸二・浅田克己・佐藤幹夫, 定盤加速度信号を用いたX-Yステージ位置決め制御系の解析, 機論, **60**-580, C (1994), 4183-4189.
- (9) 井上恵・中野道雄・久保忠志・松本啓・馬場斉, 陽子シンクロトロン電磁石電源の繰返し運転における高精度制御, 電学論, **100**-7, C (1980), 234-240.
- (10) 井上恵・岩井真一・中野道雄, プレイバックサーボ系の高精度制御, 電学論, **101**-4, C (1981), 89-96.
- (11) 樋口俊郎・山口智実, 逆伝達関数補償法を組合わせた繰返し制御を適用したバイトの位置決め制御, システムと制御, **30**-8 (1986), 503-511.
- (12) 江上正・西山武男, エアスライドリニアモータの最適予見繰返し制御, 計測自動制御学会論文集, **30**-1 (1994), 118-120.
- (13) 精密工学会 超精密位置決め専門委員会 次世代精密位置決め技術編集委員会, 次世代精密位置決め技術, (2000), 99, フジ・テクノシステム.
- (14) 原精一郎・塚田忠夫・伊藤公俊, 粗さ曲線のための位相補償デジタルフィルタ適用に関する研究(第2報) - Δ_k 導出のためのガウシアンローパスフィルタの適用条件 -, 精密工学会誌, **62**-7 (1996), 953-957.
- (15) 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.