

平面サーボモータPLANESERVとその要素技術

Surface Servo Motor "PLANESERV"

橋田 茂 ^{*1}	海保 文雄 ^{*1}
HASHIDA Shigeru	KAIHO Fumio
小泉 豊 ^{*1}	田村 哲司 ^{*1}
KOIZUMI Yutaka	TAMURA Tetsuji

現在の半導体製造装置において日増しに高まる加工の微細化，及び装置自身のCoO削減への要求に従ってそのプラットフォームとなるXYステージにおいても高精度，高タクトへの要求が高まっている。この要求に対し，我々は独自開発の半導体レーザ干渉計を搭載した面モータ構造の平面サーボモータPLANESERVを開発した。PLANESERVではXY 駆動モータの一体化，3軸レーザ干渉計，エアベアリング，3軸非干渉制御の要素技術により，高分解能(0.1 μ m)，高精度(平面内リニアリティ1 μ m)，可動部軽量化，高速整定(20ms@1 μ m)を実現した。

Recently the demand for more precise and high-tact XY-stage is increasing dramatically with the increasing demand for fine fabrication of semiconductor devices and for reducing CoO of those manufacturing equipment. To respond this requirement, we have developed totally new servo XY-stage system named PLANESERV. The slider, which consists of 3-axis laser interferometer and integrated 3-axis driving motor, moves on the surface of platen without any friction because it floats by air bearing, achieving high-resolution(0.1 μ m), high-precision(linearity:1 μ m), high-tact time(20ms @1 μ m settling) positioning. High performance motor driver is also developed with the non-interactive digital control system.

1. はじめに

半導体・液晶・電子部品のさらなる微細化に伴い，高精度・高タクト位置決め装置の要求が高まっている。しかし，リニアモータやボールネジを組み合わせた従来のXYステージでは，今まで以上に精度を上げるには，限界がきている。今回開発したPLANESERVでは平面モータ構造を採用することで可動部を小型軽量化した。更に独自開発の波長安定化半導体レーザを用いた干渉計を可動部に搭載し，エンドポイントフィードバックを行うことで，高タクト高精度位置決めを実現した。図1にPLANESERVの外観を示す。本報告ではPLANESERVの特長と要素技術について紹介する。

2. 特長

(1) 高精度・高分解能

半導体レーザ干渉計とヘテロダイン信号処理により位置検出分解能は0.027 μ m。干渉計信号によるXY

軸のエンドポイントフィードバック制御とエアベアリングによる平面度に対する平均化効果により，XY平面分割精度(リニアリティ)は $\pm 1\mu$ m以下，位置繰り返し性は $\pm 0.1\mu$ m以下である。

(2) 高速整定

微小電流での追従性を高めた高精度・高速インバータ，XY 軸間の非干渉制御，エアベアリングによる摩擦の解消，面モータ構造による可動部の軽量化・高剛性化などにより，整定幅 $\pm 1\mu$ mでの整定時間は20msを実現している。



図1 PLANESERVの外観

*1 モーション&メジャメント事業部 技術1部

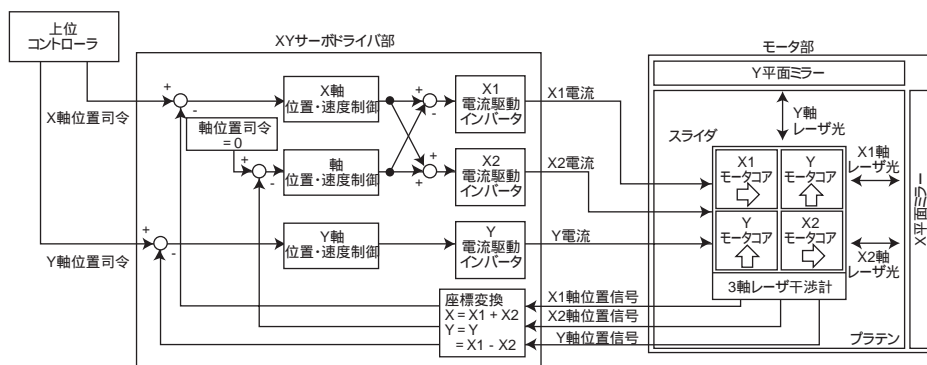


図2 PLANESERVのシステム構成

(3) 小形軽量

半導体レーザを使用した干渉計，XY 駆動モータを一体化した平面モータ構造により可動部質量は6 kgである。これは，同ストロークの従来品に比べて約 $\frac{1}{3}$ の質量である。

その他の仕様は，以下の通りである。

推力：100 N以上

ストローク：最大500 × 500 mm

最大速度：0.5 m/s

搭載荷重：最大20 kg

Z(垂直)方向押付け力：最大50 kg(可動部中央)

位置指令分解能：0.1 μm

軸受け給気圧：0.2 MPa

軸受け剛性：100 N/μm以上

3. PLANESERVの構成

PLANESERVのシステム構成を図2に示す。システムは可動部であるスライダ，土台となる平盤(プラテン)及び位置センサであるレーザー干渉計用の2本の平面ミラーから構成されるモータ部，及び上位コントローラから与えられる位置指令に従ってスライダを移動させるための電流を駆動し制御するサーボドライバ部とから構成される。スライダは平面モータとレーザー干渉計から構成されている。平面モータにはX1, X2, Yモータコアが点対称となるよう配置されている。X1とX2は別個の電流駆動用インバータに接続されており，X1とX2に逆方向の電流を流すことで回転トルクを発生させることができる。

スライダに搭載された3軸レーザー干渉計はX1, X2, Y軸の位置検出を行う。検出した各軸の位置信号はサーボドライバに伝えられ，そこでX, Y, 軸位置に変換される。軸角度はX1とX2の差から算出している。

サーボドライバ内部で位置と速度制御はX, Y, 軸に対して独立に行い，X1, X2, Y軸電流駆動インバータへ

の指令に変換する箇所X軸と 軸の非干渉化を行っている。これにより，X, Y, の制御ゲインは独立に設定することが可能となっている。

X軸とY軸に関しては上位コントローラからの位置指令に従ってスライダを移動させ位置決めを行うが，軸では軸方向の角度振れを0に抑えるのが使命である。角度振れが±0.1度を越えるとレーザ干渉計にX, Yミラーからの反射光が戻らなくなり，位置検出ができなくなる危険があるので，軸制御はX, Y軸制御より重要である。本ドライバでは3軸非干渉制御と，これまでに行ってきたDYNASERV等ダイレクトドライブモータの開発により培われたI-PD制御技術により，軸の角度振れは $\frac{1}{60}$ 度以下に抑えることができた。図3は，8 kg負荷を40 mm偏芯搭載時の振れである。制御系はシミュレーションによる検証を行い，実測値とよく一致していることを確認した。

4. 3軸レーザー干渉計

PLANESERVでは1つの半導体レーザからの出射光を分岐させ，3軸レーザ干渉計を実現している。ここに使われている半導体レーザは独自に開発した波長安定度の高いものであり，主な仕様を表1に示す。

3軸レーザ干渉計の1軸当たりの構成を図4に示す。半導体レーザから出た光はHM(ハーフミラー)で分岐さ

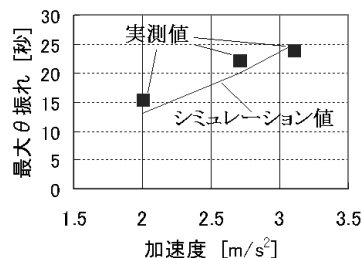


図3 偏芯負荷搭載時の振れ

表1 半導体レーザーの主な仕様

波長	852 nm	typ
光出力	5 mW	typ
波長安定度	2 pm	20,000hr実績
スペクトル線幅	1 MHz	max

れ、PBS(偏光ビームスプリッタ), 1/4板を通してスライダから出射される。その光がモータ部に固定されたミラーで反射されてスライダに戻り、コーナキューブによって反射されて再び反射ミラーに向かい、再度反射された光がスライダに戻って、参照光と重なりあうことで干渉縞を生じる。スライダが動くと干渉縞は横方向へ移動するので、これをPDA(フォトダイオードアレイ)で電気信号に変換して変位を検出する。レーザー光はスライダ-反射ミラー間を2往復するので干渉縞の明暗1ピッチの移動はレーザー光の波長の1/4移動に相当する。

PLANESERVではPDAから出力された信号を6 MHzの正弦波で変調させた後、XYドライバに信号出力している。ドライバ部ではその信号の位相検出を内挿処理を行うことにより、レーザ信号の強度変化に対するマージンをもたせると共に0.027 μmという高分解能を実現している。

PLANESERVでは、干渉計信号を元にフィードバック制御を行っているため、可動部が方向にずれることによってレーザ光が干渉計に戻らなくなると制御不能となる。これを防ぐために、スライダが反射ミラーから最も遠い位置でも振れが±0.1度以下ならば、位置検出ができるよう、レンズなどの光学系部品を最適化している。

5. 高精度・高速インバータ

PLANESERVでは軸受けにエアベアリングを採用しているため摩擦がなく、スライダが停止した状態ではモータにはわずかな電流しか流れない。このため微小電流時

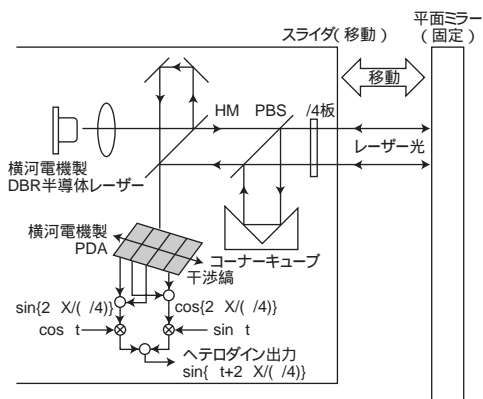


図4 レーザ干渉計の構成(1軸分)

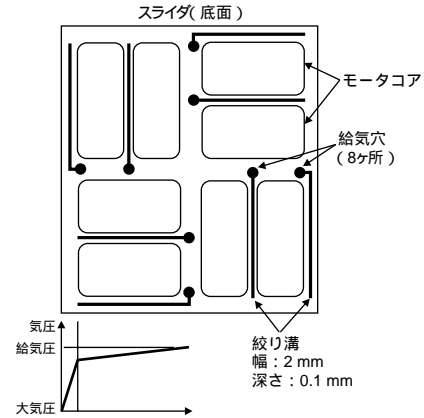


図5 エアベアリングの構造

の制御特性が停止時微振動に大きな影響を与える。

電流を駆動するインバータでは、モータコイルに流す電流の方向が切り替わる瞬間の電子スイッチの瞬時的な短絡を防ぐために、全素子をオフ状態にする時間、いわゆるデッドタイムを挿入する必要がある。この時間領域では出力電圧が不定となり、電流波形の微小領域での歪みの原因となる。これを防ぐために、PLANESERVでは出力電圧帰還回路を設けて、微小電流時の追従性を高めたモータドライバを新たに開発した。これにより、停止時微振動を±0.1 μm以下に抑えることができた。

6. エアベアリング

PLANESERVでは、静圧軸受けの一種である溝絞り方式によるエアベアリングを採用している。図5にエアベアリングの構造を、図6に給気圧0.2 MPaでの軸受け特性を示す。スライダに供給されている空気は8箇所の給気穴から噴出され、絞り溝に導かれてスライダ底面から吐き出される。これによって得られる浮上力が、永久磁石によるモータ・プラテン間の吸引力、スライダ重量、負荷荷重、垂直方向押し付け力の総和と釣り合う時点でスライダは静止する。モータ・プラテン間の吸引力は

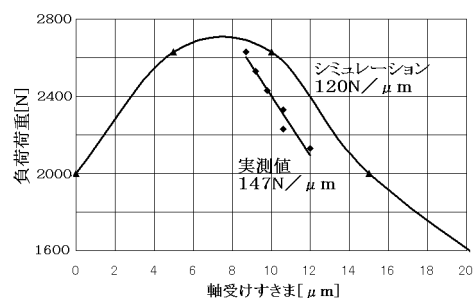


図6 エアベアリングの特性

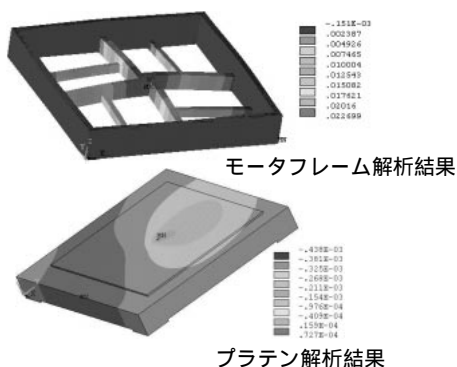


図7 有限要素法による解析結果

約2000Nであるため、PLANESERVでは軸受け隙間は約13 μ mである。その隙間は負荷荷重や押し付け力で変化する。軸受け剛性が高いほどその変化は小さく、PLANESERVでは150 N/ μ mである。これは、XY積み重ね方式のXYステージの機械剛性に比べて遜色ない剛性である。

7. 有限要素法による構造解析

ミクロンレベルの位置決めを行う場合には、スライダ自身やスライダが移動する土台であるプラテン自身の变形による影響が無視できなくなる。よってPLANESERVEの開発においては有限要素法を用いてスライダ自身、プラテン、更には架台の剛性について解析を行うことで各要素の構造設計を最適化した。図7に解析例を示す。プラテンの20 kg荷重による变形はシミュレーションの結果3.7 μ mであり実測値4 μ m、モータフレームはシミュレーションの結果22 μ mと実測22.5 μ mとよく一致した。

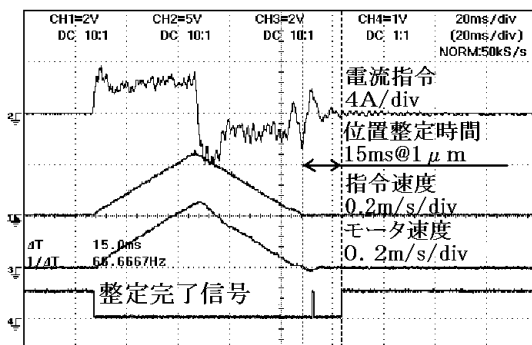


図8 PLANESERVの整定時間

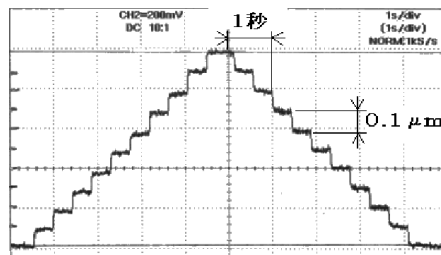


図9 0.1 μ m送り指令に対する応答

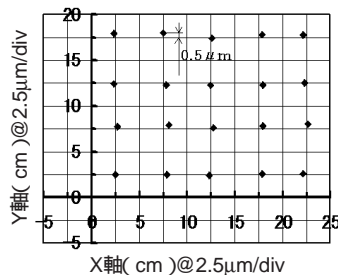


図10 平面分割精度測定結果

8. 総合特性

図8に位置決め整定時間の測定結果を示す。負荷6 kg、移動距離10 mm、位置制御帯域40 Hz、速度制御帯域120 Hzの条件で整定時間は15 ms (整定幅 \pm 1 μ m)である。従来のXY軸積み重ね方式のステージでは100 ms以上の整定時間を要しており、整定時間を $\frac{1}{6}$ にすることができた。

図9は上位コントローラから0.1 μ mずつ指令パルスを与えた場合のモータ位置波形である。PLANESERVでは、従来のXYステージに比べて、停止時の微振動も小さく \pm 0.1 μ mの位置決め繰返し性を達成している。図10は平面分割精度(リニアリティ)の測定結果である。キャリブレーションにより \pm 1 μ m以下の高精度を実現している。

9. おわりに

以上、PLANESERVの特長とその要素技術について紹介した。本製品は2000年8月より出荷されており、現在はユーザーニーズに対応すべく、高推力化、長ストローク化の開発を押し進めている。

参考文献

- (1) 伊庭, "気体軸受の諸問題と最新技術", 機械の研究, vol. 41, no. 7, 1989, p. 31-35

* PLANESERV, DYNASERVは横河電機(株)の登録商標です。