

# 解説4 精密位置決めのためのセンサ活用

東北大学 清水 裕樹\*, 松隈 啓\*\*, 伊東 聡\*\*\*, 高 偉\*\*\*\*

\*しみず ゆうき：大学院工学研究科ファインメカニクス専攻 准教授

\*\*まつくま ひらく：大学院工学研究科ファインメカニクス専攻 助教

\*\*\*いとう そう：大学院工学研究科ファインメカニクス専攻 助教(富山県立大学知能ロボット工学科 准教授)

\*\*\*\*こう い：大学院工学研究科ファインメカニクス専攻 教授

## はじめに

精密位置決めシステムは半導体製造・検査装置や超精密加工システム、精密形状測定器などのステージに広く用いられているが、ナノメートル級の超精密位置決めには、各種センサによるフィードバック制御が必須であり、ステージ変位・姿勢を高精度に検出する位置決めセンサは重要な基盤技術の1つである。近年、リニアステージの長ストローク化、3自由度直交座標機構や多関節機構の多軸化の傾向が強まっており<sup>1)</sup>、それらに対応したセンサの研究開発も盛んに行われている<sup>2)</sup>。

本稿では、ステージの位置決めセンサとして広く用いられている回折光干渉型リニアエンコーダの基本原則を紹介するとともに、多軸精密位置決

めセンサに関する近年の研究事例を紹介する。

## 回折光干渉型リニアエンコーダの原理

リニアエンコーダはスケール上に等間隔に刻まれた直線状微細目盛りを基準として変位測定を行う測定機であり、精密工作機械のスライドなどに用いられる<sup>3)</sup>。現在市販されている高分解能リニアエンコーダの多くは数 $\mu\text{m}$ からサブ $\mu\text{m}$ の短ピッチ回折格子スケールを用いた回折光干渉型(図1)である。発光ダイオード(LED)から回折格子スケールに向けて光を照射して得られた $\pm 1$ 次回折光をビームスプリッタ上で干渉させ、干渉光の強度変化を受光素子により検出する。このとき、ピッチ $g$ のスケール格子に変位 $\Delta x$ が生じると、干渉光強度 $I_{LE}$ は以下のように変化する。

$$I_{LE} = 2A^2 \left\{ 1 + \cos \left( \frac{4\pi\Delta x}{g} \right) \right\} \quad (1)$$

$A$ は反射光の振幅である。ビームスプリッタにより分割されたもう1つの干渉光 $I_{LE}'$ は偏光素子により位相差 $\pi/2$  radが与えられた後、受光素子で検出される。この位相が異なる2つの信号を基に、位置検出に必要な内挿と移動方向識別が行われる。回折光の干渉信号を電氣的に分割することで、ナノメートルの分解能を実現できる<sup>4,5)</sup>。

現在市販されているリニアエンコーダは主にインクリメンタル測定方式とアブソリュート測定方式に大別できる。インクリメンタル測定方式では個々の基点からの測定ピッチ数をカウントし、相対的な変位を検出する。アブソリュート測定方式

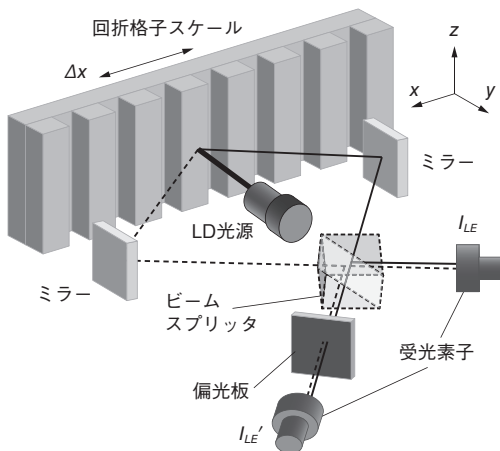


図1 回折干渉型リニアエンコーダの構成

では、ピッチの異なる複数のスケールを同時に用いることで起動直後から位置情報を読み出すことが可能であるため、位置決めシステムの原点復帰作業が不要となる。

### 3軸変位センサ・3軸角度センサの原理と6軸サーフェスエンコーダ

1軸変位センサを複数用いることで、多軸変位・姿勢計測が実現できる<sup>6)</sup>。しかしながら、システム全体が大型で複雑になり、小型位置決めシステムや計測・加工装置への応用が制限される。また、各センサ間のアライメント誤差や取付け誤差が位置決め精度低下の原因となる。そのため、単一のセンサにより多軸変位検出が可能な位置決めセンサの開発が進められている<sup>7,8)</sup>。

図2に、面内変位に加えて法線方向の変位も検出可能な回折光干渉型3軸サーフェスエンコーダの基本原則を示す<sup>9)</sup>。レーザ干渉測長機で用いられる参照鏡と移動鏡に替えて、同一の2軸格子パターンを有する2つの2軸格子スケールを用いる。ビームスプリッタにより分割したレーザビームをスケール格子と参照用格子に照射すると、 $X$ および $Y$ 方向に回折光が生じる。発生した $\pm 1$ 次回折光をビームスプリッタ上で重ね合わせて得られた干渉信号( $I_{X+1}$ ,  $I_{X-1}$ ,  $I_{Y+1}$ ,  $I_{Y-1}$ )を、光検出器によって検出する。2軸スケール格子の $X$ および $Y$ 方向変位 $\Delta x$ ,  $\Delta y$ は、回折光干渉型リニアエンコーダと同様の原理に基づいて検出する。一方、格子スケールの $Z$ 方向変位 $\Delta z$ は各回折光に共通の位相成分を演算処理することにより算出する。この3軸サーフェスエンコーダでは、ピッチ $1\ \mu\text{m}$ の2軸スケール格子により、サブナノメートルの分解能での3軸変位同時計測が可能であることが確認されている<sup>9)</sup>。

このスケール格子を従来のレーザオートコリメータと融合することで、従来の光学式オートコリメータでは実現できなかった、1本の測定レーザビームでの3軸角度変位の同時計測も実現できる。図3に、3軸角度センサの原理図<sup>10)</sup>を示す。従来の光学式オートコリメータの反射鏡に替えて、反射型回折格子を用いる。回折格子へのレーザビーム

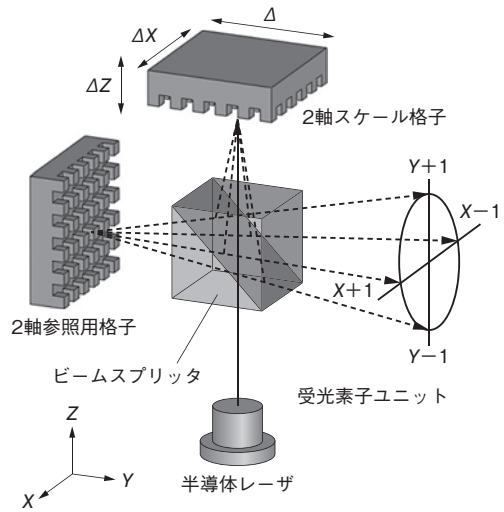


図2 2軸回折格子を用いた3軸検出可能な回折光干渉型サーフェスエンコーダの原理

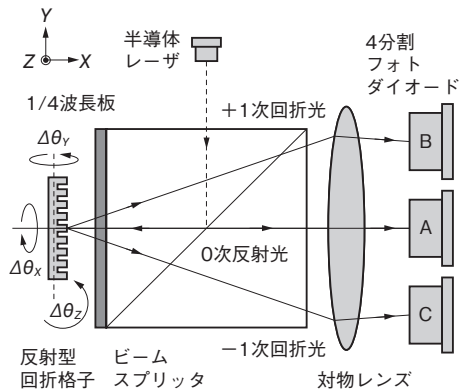


図3 回折格子スケールを用いた3軸検出可能な角度センサの原理

照射により発生した0次反射光と $\pm 1$ 次回折光を対物レンズにより集光し、3つの4分割フォトダイオード (QPD) で検出する。図3に示すように回折格子に $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ の各軸周り回転運動が生じると、QPD上の集光スポットは回転軸周りごとに異なる変位を示す。回折格子の $Y$ および $Z$ 軸周り角度変位では2軸オートコリメータと同様に3つのQPD上で同一方向にレーザスポットが変位するが、 $X$ 軸周りの微小角度変化では、QPD-A上のスポット位置は変化せず、QPD-BとQPD-C上に集光した $\pm 1$ 次回折光の集光スポットが相対する方向に

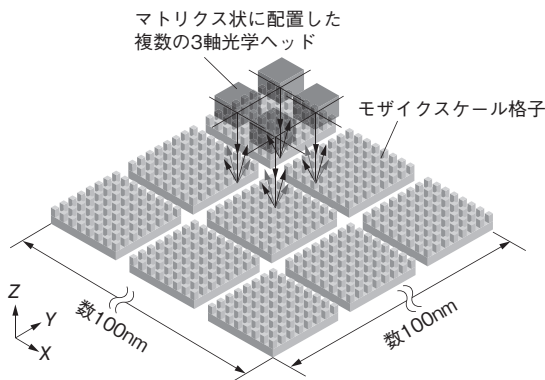


図4 モザイク格子サーフェスエンコーダ概念図<sup>11)</sup>

変位する。これら3つのQPD出力を同時に検出し、演算処理を行うことで、0.1 arc-second未滿の微小角度変位を3軸同時に検出することができる。

3軸角度センサと3軸サーフェスエンコーダは回折格子スケールをターゲットとして用いるため、回折格子と測定レーザービームを両方のセンサで共用することで、3軸変位と3軸角度変化の両方を一括計測可能な、6自由度サーフェスエンコーダが実現する<sup>8)</sup>。さらに単一のレーザービームにより6自由度測定ができるため、ナノからサブナノメートル精度を目標とする超精密多軸位置決めにおいても有用な手段になりうるものと期待される。

### モザイク格子適用による測定範囲の拡大

半導体産業においては、ウエハ直径の拡大(300 mm→450 mm)に伴い、位置決めステージにXY面内において500 mm×500 mm以上の駆動範囲が要求されており、計測システムにも同様の計測範囲が求められる。3軸サーフェスエンコーダのXY計測範囲は2軸スケール格子のサイズに依存するため、500 mm×500 mm以上の面積を有するスケールが必要となるが、そのような大面積スケール格子の製作は技術的にもコスト的にも容易ではない。さらに、大面積格子においては、格子自体の自重によるたわみが計測精度の低下を招く。

これらの問題を解決する手法として、小さいサイズのスケール格子を複数つなぎ合せてXY方向の計測範囲を拡大する、モザイク格子のコンセプト

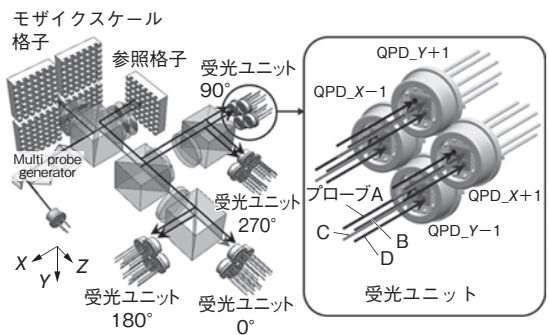


図5 マルチプローブセンサヘッドの構成<sup>11)</sup>

トが提案されている<sup>11)</sup>。この手法は、マルチプローブ光を有する光学ヘッドで複数の格子パターンを同時に読み取ることで、モザイク格子を1枚の大面積スケール格子として扱うものである。小型スケール格子は技術的にもコスト的にも製造が容易であり、かつこの手法では大型スケール格子で問題となる重力たわみの影響を回避できる。

図4に、複数の小型スケール格子をマトリクス状に並べて形成したモザイク格子を用いた3軸サーフェスエンコーダの模式図を示す。小型スケール格子間には物理的ギャップがあり、光学ヘッドからの測定レーザー光がこのギャップに入射した場合には変位計測が困難である。このギャップの問題は複数の測定レーザープローブを有するマルチプローブ型センサヘッド(図5)の適用により回避できる。2つのビームスプリッターを用いて1本のレーザービームを4本のマルチプローブに分割するとともに、受光素子ユニットに4分割フォトダイオード(QPD)を適用することで、コンパクトな光学ヘッドを構成している。4本のマルチプローブがモザイク格子および参照用格子に入射すると、各プローブでXY±1次回折光が発生し、計16の干渉信号が生成される。これらの干渉信号は、4つのQPDにより独立して検出できる。各素子で検出した干渉信号を従来のサーフェスエンコーダと同じ原理を用いて演算することで、各レーザープローブで独立してXYZ3軸変位を計測することができる。

マルチプローブの有効性を実験により確認した。図6に示すように、モザイクXY格子を1軸駆動のDCサーボモータステージに搭載し、X方向に変