

## 審査の結果の要旨

氏名 楊平

半導体生産技術の高精度化、微細化が進展しており、それに対応してより高い測定精度が求められている。これを満たすような高精度な三次元測定機（micro-CMM: micro Coordinate Measuring Machine）はこの十年間で開発されてきた。それらの micro-CMM では測定範囲が数十マイクロメートルから数十ミリまで、測定の不確かさが数十ナノメートル程度の精度が達成されている。本研究は、160 mm×160 mm×100 mm の測定可能範囲をもつ開発中の micro-CMM（M-CMM）を用いて、測定領域 30 mm×30 mm×10 mm 内で測定不確かさ 50 nm の従来以上の高精度な三次元測定機の開発を目指す。この M-CMM を開発するために、各軸ステージの運動誤差の校正が必要になる。各軸ステージの運動誤差を校正および補正した後、各並進誤差は 10 nm 以下、各回転誤差は 1  $\mu$ rad 以内にすることが要求される。従って、以下の目標を設定した。

1. 各軸ステージの運動誤差を測定する新しい校正手法を開発する。
  - a) ステージの繰り返し誤差が小さい場合には、1 軸に対して 1 つ、計 3 つのスケールと補正テーブルを作成する。
  - b) ステージの繰り返し誤差が大きい場合には、基準ミラーを用いて、すべての自由度に対して常に校正をかけることで、測定と同時にステージ運動誤差を求める。
2. 上記の校正手法を達成するために、ステージの繰り返し誤差および基準ミラーの形状の測定手法を開発する。また、測定手法における不確かさを評価する。

本論文は、これら目標を満たすため、高精度な走査型多点法（MPSM: Multi-Probe Scanning Method）という校正手法を提案した。MPSM は基準誤差を分離できる走査測定手法として、複数の変位センサと 1 つの角度センサを利用する手法である。この方法では、変位、角度センサから得られたデータに対して、データ処理を加えることによってステージの並進誤差、回転誤差、基準面の形状を同時に求めることができる。この測定で変位センサおよび角度センサの不確かさに依存した校正ができ、基準ミラーの不確かさより高精度な校正が行える。加えて、センサの数を増やすことができ、最小二乗法を適用することで系統誤差への対応が可能である。

まず、MPSM の原理とデータ処理技術を確立した。MPSM の性能に対して、シミュレーションにより、基準平面ミラーの形状の測定不確かさを評価できた。これを利用して適切な MPSM の構成を選択することが可能になる。2 つのレーザ干渉計とオートコリメータの構成において、変位センサ間隔を変えたときの比較シミュレーションを行った。このシミュレーション結果から、変位センサと角度センサの不確かさによって、センサの不確かさを見積もることができ

れば、要求精度から必要となるセンサ間隔およびサンプリング回数が得られることが分かった。一方、この構成の性能を確認するため、予備実験を行った。予備実験の結果により、複数の運動誤差および基準ミラーの形状が測定でき、実験的に求めた標準偏差と、シミュレーションで求めた不確かさがほぼ 10 nm で一致する結果が得られた。

つぎに、測定の横分解能を高くするために、3つのレーザー干渉計とオートコリメータの構成方法を新しく提案した。シミュレーション結果から、横分解能を小さくでき、サンプリング回数が増えることに応じた不確かさの減少が確認できた。この構成においても予備実験を行い、複数の運動誤差および基準ミラーの形状が測定されて、横分解能も向上した。また、予備実験結果はセンサ不確かさから、理論的に推定した 10 nm の範囲にできていることを確認した。さらに、基準ミラーの形状を、白色干渉計による測定結果とで比較して測定結果が一致するため、測定が妥当であることを検証した。この手法の系統誤差について検討した。非線形モデルとしてアライメントパラメータとヨーイング誤差を新たに導入したモデルを提案し、センサ出力への非線形項の大きさを見積もった。このモデルを用いて、形状パラメータを再構成するシミュレーションを行った。その結果、予備実験環境での非線形のパラメータ条件で、最大で 17 nm 程度の系統誤差の可能性を指摘した。また、実験装置条件によりこの系統誤差の大きさは変化し、最終的な目的である M-CMM ステージでの校正実験では無視できる可能性を示した。

実際に、M-CMM に MPSM の光学系の配置を設計し、M-CMM の XY ステージで実験を行うために、各センサの安定性を測定した。干渉計の安定性試験によると、XY ステージは数百 nm の範囲で振動していること、および干渉計の測定結果はこのテーブルの振動から影響を受けていることを確認した。従って、一般的なレーザー干渉計は、M-CMM の上で不安定であるため、差動の変位センサを適用することを提案した。

本論文では、高精度三次元測定機の校正手法として、走査型多点法による方法を提案し、3つのレーザー干渉計とオートコリメータを利用する方法の理論的な解析とシミュレーションにより、測定の不確かさを推定する手法を確立した。さらに、実験により手法の妥当性を検討し、基準ミラーを 10 nm 以下の不確かさで測定できることを示した。また、実際の M-CMM の環境で実験を行い、校正の方向性を示した。これにより、高精度三次元測定機を校正する手法の確立を行うことができた。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格として認められる。