

審査の結果の要旨

氏名 肖木嶸

大型望遠鏡装置や X 線装置において、大型精密非球面ミラーやレンズが重要となっている。その中で、数百ナノメートル精度を持つ非球面形状の利用が増えている。しかし、大型非球面形状の高精度測定技術は困難な課題である。これまで、大型反射面の測定は主に干渉計測技術を用いていた。しかし、干渉技術では参照となる基準面が必要で、非球面形状測定に必要な高精度基準非球面の作成が困難であり、複雑な非球面にも適応できない。近年、角度走査法を用い、高精度平面度測定技術が開発されている。表面の法線方向角度の変化をセンサで走査し、積分により垂直方向の高分解能測定が行われているが、高精度の角度センサの測定範囲が狭く、角度変化の大きい曲面の測定は不向きである。

本研究の目標は表面法線角度走査法に基づく新たな測定手法を提案し、直径が 300 ミリメートル以上、表面角度変化が 10 度以上の非球面形状を 100 ナノメートルより小さい不確かさで測定することである。この目標を達成するために、本論文では以下の 3 つのことが行った。

1. 新たな角度走査測定方法の提案

従来の角度走査法の限られている角度測定範囲の問題について、本論文はまず回転装置を用いる新たな角度走査測定方法を提案した。提案手法の中で、走査リニアステージのピッチング誤差および回転ステージ位置決め精度の影響への対策として、3 種類の測定手法を提案した。これは、2 つのミラー測定法、ピッチングオフライン測定法およびピッチングオンライン測定法である。そして、3 つの手法の原理を理論的に検討し、角度データの処理方法を新しく提案した。

2. 提案した手法の理論的な誤差解析

提案した手法がどのような条件で、大型非球面形状を目的精度で測定できることを検証するために、理論的な誤差解析を行った。測定の繰り返し精度と絶対精度を解析するために、ランダム誤差解析と系統誤差解析を行った。

ランダム誤差解析では、まず提案手法のランダム誤差の全ての要因に対して、それぞれの誤差要因と測定結果の関係式を計算した。実際の測定における誤差を見積もりして、測定結果への影響の大きさにより、無視出来る誤差要因と重要な誤差要因に分けた。そして、重要な誤差要因を用い、角度誤差から形状誤差への伝搬プロセスを解明し、ランダム誤差解析シミュレーションモデルを作成した。

現実に達成できる測定装置のランダム誤差要因を用い、測定繰り返し精度を計算した。シミュレーションの結果により、提案した測定手法は大型非球面形状を100 ナノメートルより小さい繰り返し精度で測定できることを理論的に検証した。

系統誤差解析は、絶対精度を達成するための条件を分析するために行った。ランダム誤差解析結果と提案した測定手法により、重要な誤差要因を見つけて、目標絶対精度を達成するためにそれぞれの誤差要因への要求を計算した。重要な系統誤差要因の中でオートコリメータの感度誤差への要求が最も高いことがわかり、高精度の校正が必要だと誤差解析で分かった。

3. 提案した手法の実験的な検証

提案した手法は理論的の誤差解析によって、高精度で大型非球面形状を測定するための条件を分析したが、提案手法の原理と誤差解析モデルを検証するため、本論文は実験により提案手法の検証を行った。

まず、2つのミラー測定法とピッチングオフライン測定法を用いて二次元測定実験を行った。提案した手法を基づいて実験装置を作り、従来の角度操作法で測定できない凹面ミラーの測定実験を成功した。そして、繰り返し実験により2つミラー測定法とピッチングオフライン測定法の繰り返し精度を調べた。曲率半径が5000ミリメートルの凹面ミラーの測定に対して、2つのミラー測定法の繰り返し精度が20ナノメートル以下であり、ピッチングオフライン測定法は5ナノメートル以下であることがわかった。実験で得られた繰り返し精度とランダム誤差解析の結果と、よく一致していることも検証した。

さらに、実験結果の絶対精度を調べた結果により、実験を用いる四分割ダイオードセンサー付きオートコリメータは、曲面を測定する時大きな系統誤差があることが分かった。この問題を解決するために、解決手法を二つ提案し、理論的に問題を解決できることを証明した。三次元測定実験を行うための測定装置を作り、測定プロセスや三次元データ合成手法を提案し測定実験の準備を行った。

本論文の研究では、従来の測定困難な大型非球面形状を高精度で測定できる方法を提案した。誤差解析により提案した手法が、理論的に目標精度を達成できる条件を解析した。そして、二次元測定実験により、提案した手法の基本原理を検証し、誤差解析結果と合う高精度の繰り返し精度が得られた。最後に、実験結果の系統誤差の解決手法を提案し、三次元測定装置の製作により三次元測定の方向性を示した。本論文は大型非球面形状測定に関する研究に重要な貢献をした。

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。