

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 陳 梅雲

近年、工業製品の性能向上のために機械部品の緻密化、小型化が進んでおり、高精度化と小型化の両立を目指した加工方法が開発され、部品の形状をナノメートルオーダーで加工することが要求されている。高精度の加工を実用的なものにするために、種々の形状に対してナノメートルオーダーで測定可能な形状測定技術が求められている。本論文では、高精度に加工された鏡面を持つ平面、球面、円筒面および非鏡面を高精度に測定するために、マルチビーム角度センサ（MBAS: Multi-Beam Angle Sensor）を提案した。

MBASは、オートコリメータの原理を複数点に拡張して、微小領域における形状の法線ベクトルの角度分布を測定することができる。ステージの誤差を除去するために、角度差情報を2度積分することで形状を計算する。MBASは、レーザ光を投光する部分と、反射したレーザ光をマイクロレンズアレイで複数点に分割しCMOS画像センサで受光する部分から構成されている。測定形状が理想的な形状の場合、マイクロレンズアレイを通じて分けられ、規則正しく並んだ光点がCMOS画像センサ上で検出される。測定対象物に傾きや表面形状の変化があった場合、それに応じて光点の位置が変化する。それぞれの光点の位置の変化から、形状の法線ベクトルの角度を計算することができる。MBASにおいてはこのうち任意の二点の角度データから得られる角度差データを測定値として用いる。

本研究の目的は、MBASを用いて種々の形状に対する高精度形状測定手法を開発することである。まず、平面形状をMBASで測定する場合に対して、精度をシミュレーションによって評価した。シミュレーションの結果から、適切なパラメータを指定すれば、MBASで目標としていたナノメートルオーダーでの測定が可能であることが分かった。MBASは、測定物の形状に対応して対物レンズを取り換えることで、平面、円筒面、球面、および非球面の測定が可能となる。測定範囲によって、使用するマイクロレンズアレイやデータ処理手法を変更することで、平面度や真円度だけでなく、非球面等の多様な形状を高精度で測定することが可能となる。データ処理手法としては、2つの方法を提案した。まず、広い範囲の測定に対して、MBASの零点誤差を消すために円状の走査を実施した。

フーリエ変換およびフーリエ逆変換を利用することで、零点誤差を含まず、高精度で形状測定を可能となった。また、狭い範囲に対して、スポット位置から角度を計算し、角度データを積分することにより形状を求める手法を提案した。この手法では、高速で測定できるが零点誤差を消すことができないので、MBASの校正を事前に行う必要がある。

広い範囲の測定に対して、基本性能を確認する実験として、プラスチック板および高精度平面ミラーの平面形状を測定した。この条件において、MBASの角度差測定の安定性は、 $0.8\ \mu\text{rad}$ 程度と非常に良いことが分かった。プラスチック板の形状測定結果を三次元測定機の結果と比較し、よい一致を得た。また、高精度平面ミラーの測定結果から、繰り返し精度は $10\ \text{nm}$ 程度と評価された。次に、円筒形状の測定を実施した。同じ測定物の真円度をMBASと半径法で測定し、ナノメートルオーダの精度で一致した。同様に、非球面の測定実験を行い、三次元形状を高精度で測定することができた。さらに、狭い範囲では、追跡法を用いてX軸、Y軸方向の形状を再構築し、測定物表面の三次元形状を計算することができた。シリンドリカルレンズの表面測定結果から、非球面の測定が可能なことを示した。

測定結果を高精度化するために、MBAS感度の校正を2つの異なる測定法で実施した。校正法として、平面鏡と傾斜ステージを利用する方法およびシリンドリカルレンズを円状に走査する方法を用いた。2つの校正法を比較したところ、校正した感度および不確かさの評価結果は整合性を示した。シリンドリカルレンズを用いた校正方法では、測定が簡単で直接感度を計算でき、不確かさも小さいため、有効な手法であることが確認できた。

以上のように、MBASを開発し適切なデータ処理を行うことで、平面、円筒面、球面、非球面などの種々の形状を高精度に測定することが可能となった。この手法では、走査ステージの影響、センサの零点誤差の影響を受けずに高精度の測定ができ、繰り返し誤差を $10\ \text{nm}$ 程度とすることが可能となった。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。