

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 スターダム ウィロート

本論文では、三次元座標測定機（CMM: Coordinate Measuring Machine）の精度検査のため、光周波数コムレーザ（光コム）によるパルス干渉計を用いた新しい光学測定手法を提案している。本論文で提案している絶対長さ測定手法は、ファイバーエタロンを含む光コムパルス干渉計とターゲットとして用いるボールレンズの組み合わせによって実現した。光コムの周波数は、国際単位系にルビジウム周波数標準によって直接トレーサビリティを確立している。また、使用する光コムの繰返し周波数は、必要とされる測定長さに対応して、ファイバーエタロンによって調整している。屈折率 2 のボールレンズは、干渉計の三次元的なターゲットとなる。さらに、干渉縞の包絡線を利用した自動的なピーク検出方法によって、実時間で測定が行えるシステムが開発された。提案された測定技術は、従来のステップゲージを利用した CMM の検査方法と比較され、提案手法がより短い時間で、より高精度で検査可能なことが示された。

ISO および JIS で規定された CMM の受入検査と定期検査は、標準長さ（アーティファクト）の測定によって行われている。アーティファクトとしては、一連のブロックゲージ、ステップゲージおよびボールプレートが使われるが、アーティファクトの長さの制限により小型および中型の CMM（測定範囲が 1 m³ 以下）に限定されている。1 m 以上の長さを持つアーティファクトを使用した CMM の検査は、アーティファクトの重量、取り扱いの難しさ、校正の精度が低いなどの理由により実用化が難しい。このため、長さ測定にレーザ測長機が使われるようになってきているが、レーザ測長機は変位測定のため、測定中に光路を遮ることができないという問題を持っている。一方、光コムは、直接的に長さのトレーサビリティを確立することができ、パルス列の間隔が基準長さとして利用される。パルス列の間隔は、光コムの繰返し周波数、光速度によって決定される。この研究では、繰返し周波数をファイバーエタロンによって変更している。100 MHz の繰返し周波数を持つ光コムを、ファイバーエタロンにより 1 GHz の繰返し周波数にすることで、約 300 mm のパルス列の間隔を得ることができ、150 mm の整数倍の位置に対する絶対長さ測定が可能となった。

最初に、粗面を持つ金属ボールをターゲットとして用いた。この場合、真球度と表面粗さの 2 つの要因が測定に影響を与えた。直径 25 mm で表面粗さが 0.1 μm の金属ボールをターゲットとして選択した場合、1.5 m までの絶対距離を測

定することが可能であった。しかし、測定範囲および測定精度とも十分な結果を示さなかった。次に、屈折率 2 のボールレンズをターゲットとして利用することを提案した。ボールレンズをターゲットとした場合の精度は、ガラス材料の屈折率とボールレンズの真球度に依存するが、一次元の長さ測定の場合は、レーザは同一方向から照射されるので、ボールレンズの真球度は光路長に影響を与えない。照射位置がボールレンズの中心から変位すると、反射された光線の強さは急速に減少する。良好な干渉縞が生成されるには、レーザの照射位置が中心から 0.3 mm 以内の場合がよい。この場合のコサインエラーは 50 nm 以下となる。ボールレンズをターゲットとして、最長 10 m の距離まで測定可能であり、中型から大型 CMM の測定範囲をカバーできることを示した。

提案された測定方法により、CMM の対角方向の検査結果を行い、ステップゲージを利用した方法と比較した。実験結果は、測定精度が気流変動と機械振動によって起こされる干渉縞のノイズに依存することを示した。しかし、測定の不確かさは、温度変化の影響がステップゲージのようなアーティファクトを利用した場合より少ないため、全体としての不確かさは提案手法のほうが小さくなった。さらに、提案された方法の測定時間は、温度ならしの時間が不要なことを含めて、アーティファクトによる従来の方法より、60%以上少なく、光学系のアライメントは、ボールレンズを利用することで容易であった。

本論文では、ボールレンズをターゲットとして光コムによるパルス干渉計により CMM の検査を行うことを目的とし、絶対の長さ測定システムのプロトタイプと自動的な測定ソフトウェアが開発された。プロトタイプは干渉計のための走査用のボックスと測定用装置のボックスから構成されている。両方のボックスがシングルモード光ファイバを通して接続されている。さらに、自動的な測定ソフトウェアは LabVIEW プログラムを利用して開発した。ピークの検出機能は、干渉縞の包絡線を利用して行った。ピークの検出誤差は、約 10 nm であった。さらに、プロトタイプの基本性能は、標準的な固定長と比較することで評価した。測定繰返しは 10 nm の分解能で約 30 nm であり、短期安定度は約 130 nm であった。測定不確かさとして、測定長さが L (mm) の場合、 $[(0.24)^2 + 0.10 \times 10^{-3} L]^2$ (μm) と評価された。CMM の精度検査のために十分な性能となり、座標計測において種々の非接触絶対距離測定に応用可能であることが実証された。

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。