

(様式 2)

## 学位論文の概要及び要旨

氏 名 西 本 弘 之 印

題 目 小型干渉顕微鏡による形状計測の高速・高精度化に関する研究

### 学位論文の概要及び要旨

近年、微細加工技術の高度化の進展によってマイクロマシン等の実現をめざした研究開発が活発に行われるようになってきた。評価対象としての微細領域での表面粗さや形状は、今日の情報化社会を支える機械に使用される材料や加工の評価として非常に重要な要素になっている。それに伴い、微細加工表面の微細領域での形状計測が重視されるようになってきている。

しかし、それらの評価は製造現場ではなく研究室や試験室で行われているのが現状である。なぜなら、現存する微細形状を計測できる装置は製造現場での使用には適さない高価・大型であるうえに、接触式による蝕針での評価が主流であり、この問題が更なる製造業の発展を妨げている原因のひとつといえる。したがって、これら微細加工表面を評価するにあたり、安価・小型な形状計測器の開発の必要性があると考えられる。

本研究は、精密加工、特にマイクロ/ナノ加工分野において、加工現場のような環境で微細形状を非接触、高精度かつ高速で計測するための微細形状計測装置を開発するための基礎的知見を得ることを目的として行ったものである。加工現場における要望は、高精度化についてはナノメートルオーダーでの計測と計測範囲の拡大であり、高速化では計測時間の短縮と実時間化である。さらに、システムの小型化も重要となる。そこで本研究では、精密計測分野への要望に着目して微細形状計測の高精度化および高速化として以下のことを行った。

本研究で対象とする三次元形状計測領域と計測範囲は、ナノメートルオーダーからマイクロメートルオーダー、分解能はナノメートルオーダーである。このような条件を解決するために、近年急速に発展している光学計測技術とコンピュータのハードウェア及びソフトウェア技術の多くの高度な技術を融合することにより達成する研究と位置づけを行った。光学技術としては、小型の干渉顕微鏡を構成し表面形状から干渉縞発生を行った。コンピュータハードウェアでは、干渉縞の取得のために点ごとの計測から画像分布計測できる CCD カメラを用いた。コンピュータソフトウェアとしては、取り込んだ干渉縞画像から画像処理ソフトウェアの形状計測演算を行った。

微細形状を高精度に計測するには干渉縞の位相を精度良く求めることと高精度化するためのアルゴリズム開発が必要である。本研究で開発した計測システムではナノメートル分解能の精度で  $3 \mu\text{m}$  以下の計測範囲を達成できた。また、高速に計測を行うためには位相演算アルゴリズムの最適化が必要とされる。本研究で提案したシステムでは、微細形状計測と表示を合わせて 10 秒以内で達成できた。これらの結果から、微細形状計測の高精度化および高速化を組み込んだ小型干渉顕微鏡の開発を達成することができた。

本研究は、6 章から構成されている。

第 1 章では、微細形状を非接触かつ高精度で計測する方法の現状を述べるとともに、走査型電子顕微鏡 (SEM)、走査型トンネル顕微鏡 (AFM)、光学式による計測法それぞれの

特徴と問題点を考察した。干渉計測法を顕微鏡に用いて小型化すれば高速・高精度な微細形状計測が可能なことを述べた。

第2章では、本研究で用いた計測原理であるフリンジスキャン法について述べ、小型干渉顕微鏡による光学システム開発について提案した。本研究で開発したシステムは、白色光源を用い、フィルタを透過させることで単色光を得ている。この方法を用いることで、レーザを用いた干渉法よりも光学系を簡素化することができた。干渉縞画像の検出には NTSC ビデオ信号を出力する CCD ビデオカメラを用いることで安価なシステムを可能とした。また、特にミロー型対物レンズにより小型干渉顕微鏡が構築できることを提案した。本研究で開発した小型干渉顕微鏡はマイクロメートルからナノメートルオーダーの測定が十分可能であり、また加工現場などの環境で使用可能であることを示した。

第3章では、干渉縞画像処理演算について、プログラム言語としてマトリクス演算可能な MATLAB による記述を行い、計測シミュレーションの手法を確立した。本シミュレーションによって、種々の形状を測定したときの処理時間および誤差などを検討することが可能となった。また、シミュレーションで用いた画像処理演算プログラムを本研究で開発した小型干渉顕微鏡の計測処理に用いて、演算時間の短縮を可能とした。

第4章では、従来のアルゴリズムでは位相接続処理が正常に行われられないような急勾配の表面でも形状計測可能な手法について提案した。高精度な形状計測アルゴリズムの特長であるフリンジスキャン法を使いつつ、急勾配の形状計測の時に起こる位相接続を可能とするため、画像処理データに補間法を用いる手法を新しく提案した。提案した補間法を用いれば、干渉縞のサンプリング周波数を高くするために高価な高解像度の CCD を用いなくても、低解像度の CCD でよいことを示した。本研究で提案した補間法は光学的な解像度は向上しない。しかし、本研究で目的としている加工現場などで使用可能な小型干渉顕微鏡の位相接続には有効であることを検証した。

第5章では、計測範囲を拡大する方法について考察した。単色光による干渉計測法の計測範囲は使用する光の波長によって制限される。そこで、干渉計測法の精度と簡便さを活かして、計測範囲を拡大する手法として二波長光源によるシステムを導入し、その有効性を検討した。二波長光源を用いる方法では、位相情報を得るための4ステップ法、5ステップ法などを用いるとき、計測範囲の拡大にもなって対象物の移動範囲を大きくする必要があり、しかし、顕微鏡の対物レンズの焦点深度の制約によって通常の4ステップ法、5ステップ法を用いると計測精度が低下する可能性があることを明らかにした。そこで、顕微鏡システムの対物レンズの焦点深度内で4ステップ法、5ステップ法を用いることによって計測できる方法を提案した。二波長干渉計測法によれば、位相接続を行わなくても計測対象物の表面形状計測が  $\mu\text{m}$  オーダーの広い計測レンジと十分な精度で計測できることを検証した。

第6章では、本研究の総括を行った。

精密計測分野のナノテクノロジーにおけるキーテクノロジーは超小型化である。干渉計測は光源の波長を測定の基準（目盛り）として、非接触、高分解能、かつ高精度に測長や形状計測が可能な技術である。以上のように、本研究で構築した小型干渉顕微鏡は、高精度と高速化を達成しながら計測機器の小型化の方向を示した。本研究で開発したシステムは、機械加工のマイクロファクトリの計測や微細表面加工の計測評価をオンマシンで利用できる可能性を持つものである。

このような計測機器の超小型化の最大のメリットはセンシングの局所化である。本研究で得られた知見を基礎として、検出系、演算系などの小型化、ハードウェア化、微細計測用モジュールの複合化などを行えば、今後更なる超小型精密微細形状測定システムの実現につながられるものと確信する。