

氏名	ウ キエツ YU QI YUE
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第974号
学位授与の日付	平成27年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	デジタルホログラフィによる三次元形状の精密計測 (Precision Measurement of 3D Shape Using Digital Holography)
論文審査委員	主査 教授 梅崎 太造 教授 岩田 彰 教授 本谷 秀堅

## 論文内容の要旨

近年、工業製品の精密不良検査および医療用精密生体検査などを目的とした高精度三次元形状計測技術の需要が増加している。既存の三次元計測手法としては、1枚あるいは複数の投影パターンを利用した三次元画像計測法が広く使用されている。しかしながら、鏡面反射および透明な物体に対しては、投影パターンの撮影画像解析が困難であるため、三次元形状計測ができないという問題点が存在している。そこで、本稿ではデジタルホログラフィを用いて、鏡面反射および透明な物体に対する高速かつ高精度な三次元計測法を提案する。小型な計測装置および処理アルゴリズムについて研究開発を行い、その有効性を実証実験により示す。

1つ目の研究として、小型な計測装置の開発を行い、ナノメートルオーダーの精密三次元計測が可能であることを検証した。従来法としては、デジタルホログラフィを用いた三次元計測法の中、高精度の三次元形状計測の実現が可能な位相シフトデジタルホログラフィを用いた三次元計測法に関する研究が盛んに行われている。しかしながら、従来の位相シフトデジタルホログラフィでは、位相シフト干渉縞を生成するためには、高価なピエゾステージで平面ミラーを移動させることで物体光と参照光の光路差を制御する必要がある。また、ピエゾステージの制御精度が計測結果に悪影響を与えるという問題点が存在した。そこで、検波原理に基づいて偏光板の回転を利用した位相シフト干渉縞の生成手法を提案する。回転ステージの制御精度はピエゾステージに比べて高いため、位相シフト干渉縞を高精度に

生成可能である。回転ステージはピエゾステージより安価であるため、計測装置の低価格化も実現した。さらに、インパルス応答関数を用いたフーリエ変換のみを使用した簡易なフレネル変換式を提案する。提案法は、従来のフレネル変換式に比べて実装が容易であり、実利用上の便利性も高い。

2つ目の研究として、ワンショット位相シフトデジタルホログラフィ三次元計測法を確立して、提案法により鏡面反射や透明物体の高精度な三次元計測が可能であることを検証した。1つ目の研究でも述べた位相シフトデジタルホログラフィによる計測では、計測の際に4枚の位相シフト干渉縞撮影画像を取得するために、偏光板の回転制御およびカメラによる複数回の撮影が必要であるため、高速な三次元計測には不向きである。また、計測環境に振動が存在する場合には、撮影された位相シフト干渉縞画像間に位相誤差が生じてしまうなど、安定かつ高速の三次元計測の実現が困難であるという問題点が存在した。そこで、本稿では、光干渉計測分野に応用されている干渉縞の周波数解析法をデジタルホログラフィ分野に応用することで、ワンショット位相シフトデジタルホログラフィ三次元計測法を提案する。4枚の位相シフト干渉縞を用いずにワンショットで三次元計測を行うため、安定した精密三次元計測が実現できる。また、一般的な光学部品でワンショット計測が可能であるため、並列位相シフトアレイ素子をCMOSセンサ表面に貼り付けた特殊カメラを用いる従来のワンショット計測に比べて、安価に計測装置を構築できる。

3つ目の研究として、医療分析用三次元生体顕微鏡を開発した。医療分析では、人間の血液に存在する赤血球の三次元形態を解析することで、健康状態を判断する血液検査が行われている。通常の血液検査では、光学顕微鏡および画像処理を用いた自動検査が広く利用されているが、染色などの手間がかかり、検査に時間がかかるという問題が存在している。既存の生体三次元顕微鏡でも、計測精度が低く、計測時間が長いという問題が存在している。そこで、本稿では、顕微鏡レンズシステムを計測装置に使用した三次元顕微鏡を提案する。赤血球に対する三次元計測実験を通して将来の精密医療検査への適用可能性を検証した。実験により、ワンショット計測により赤血球形状を用いた精密三次元検査が可能であることを確認した。

本稿は、全7章で構成されている。第1章で研究の概要について述べ、第2章で研究背景について述べ、第3章で研究に関する基礎理論について述べる。第4章で位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法を述べた。第5章でワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測法を述べた。4枚の位相シフト干渉縞撮影画像を用いずにワンショットで位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測法を実現して、計測精度および計測安定性向上を検証した。第6章で本研究の実用化に関する検討を述べた。計測装置に使用する顕微鏡レンズシステムを検討して、三次元顕微鏡を開発し、将来の精密医療分析に応用可能であることを検証した。第7章では、研究のまとめを述べた。

## 論文審査結果の要旨

工業製品の精密不良検査および医療用精密生体検査などを目的とした高精度三次元計測技術の需要が増加している。既存の三次元計測手法としては、1枚あるいは複数の投影パターンを利用した三次元画像計測法が広く使用されている。しかしながら、鏡面反射および透明な物体に対しては、投影パターンの撮影画像解析が困難であるため、三次元計測できないという問題点が存在した。そこで、本論文ではデジタルホログラフィを用いて、鏡面反射および透明な物体に対する高速かつ高精度な三次元計測手法を提案している。小型な計測装置および処理アルゴリズムについて研究・開発を行い、その有効性を実証実験により示している。

第1章「はじめに」では、本論文の目的および概略を示している。

第2章「研究背景」では、各種三次元計測手法の概略と比較特性を述べている。

第3章「基礎理論」では、デジタルホログラフィの概要およびそれに関する理論について述べている。

第4章「位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法」では、小型な計測装置の開発を行い、ナノメートルオーダの精密三次元計測が可能であることを検証した結果を示している。従来の位相シフトデジタルホログラフィでは、位相シフト干渉縞の生成には、高価なピエゾステージが必要であり、ピエゾステージの制御精度が計測結果に悪影響を与えるという課題が残る。提案法ではピエゾステージに比べて安価な回転ステージと検波原理を利用した位相シフト干渉縞の生成手法を提案している。さらに畳み込み原理を利用した実装上簡便なフレネル変換式を提案している。精度評価実験では、平均計測誤差7.1 [nm]で精密計測が可能であることを示している。構築した計測装置のサイズは40×83 [mm]であり、計測装置の小型化が実現している。

第5章「ワンショット位相シフトデジタルホログラフィ」では、1枚の撮影画像から動体を含む鏡面反射や透明物体の高精度な三次元計測が可能であることを検証している。従来の位相シフトデジタルホログラフィによる計測では、三次元計測には4枚の位相シフト干渉縞撮影画像の取得が必要である。しかしながら、撮影時の計測環境に振動が存在する場合には、撮影された位相シフト干渉縞画像間に位相誤差が生じてしまい、安定した三次元計測の実現が困難である。提案法では、干渉縞の周波数解析法を利用したワンショット位相シフトデジタルホログラフィ三次元計測法を実現している。1枚の干渉縞で三次元計測を行うため、安定かつ高速な精密三次元計測が可能であることを示している。さらに、位相をシフトするためのハードウェアが不要であるため、安価かつ小型な三次元計測装置を実現している。

第6章「三次元顕微鏡に関する検討」では、医療分析用三次元生体顕微鏡を開発した。既存の医療用三次元顕微鏡では、計測精度が低く、計測時間が長いという問題が存在する。そこで顕微鏡レンズシステムを計測装置に使用した三次元顕微鏡を提案している。赤血球に対する三次元計測実験を通して将来の精密医療検査への適用可能性を検証した。

第7章「おわりに」では、本論文で得られた知見を総括して結論を述べている。

以上、本論文はデジタルホログラフィを用いて、鏡面反射および透明な物体に対する高速かつ高精度な三次元計測法を提案しており、実証実験を通して安定かつ小型な三次元計測装置を構築可能であることを示している。よって、本論文は工学上および社会的に価値のあるものと考えられ、博士(工学)の学位にふさわしいものと認める。