

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 芹沢 琢磨  
学位 博士 ( 工学 )  
学位記番号 新大院博 (工) 第 463 号  
学位授与の日付 平成 29 年 3 月 23 日  
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当  
博士論文名 位相分布の非線形性を考慮した高精度光波干渉計に関する研究

論文審査委員 主査 教授・鈴木 孝昌  
副査 教授・佐藤 孝  
副査 教授・小椋 一夫  
副査 准教授・大平 泰生

博士論文の要旨

干渉計測の利点は、高精度測定を高速かつ非接触にできることであり、波長を基準とし対象表面の形状や変位屈折率などの分布を縞画像として瞬時に得る。一方、測定範囲は半波長内に制限され半波長以上の物体測定は困難である。近年では、半波長を超える ( $\mu\text{m}$  以上) 形状測定を可能とするため二波長法や低コヒーレンス干渉計測が考案され、段差物体や薄膜形状が可能となり、なかでも OCT は生体応用への研究が盛んである。しかし、一般的に干渉計測は外乱の影響を受けやすく、高精度光波干渉計は光学系が複雑であること、また OCT では広帯域光源が必要となるため位相変化は非線形性を持つという問題があった。そこで本研究では、さらに高精度干渉計測を目指し、高コヒーレンス干渉計測及び低コヒーレンス干渉計測における新たな手法を提案している。

第 1 章序論では、干渉計測の原理を示すとともに、代表的な位相解析法としてヘテロダイン干渉法、位相変調干渉計測、フーリエ変換法による解析法、また白色干渉法や 2 波長法、OCT といった半波長を超える  $\mu\text{m}$  形状測定法についてそれぞれ述べている。その後、上記に述べた干渉計測の特徴と問題点を踏まえ、本研究の位置づけが示されている。

第 2 章では、直接変調における強度変化に依存する誤差の少ないパルス変調半導体レーザーを用いた位相シフト干渉計構成し、ダウンサンプリング法を用いた信号処理による高精度干渉計測法を提案している。実験において、2 つの干渉計を用い、正確な位相変化をもつ干渉信号を生成するとともに、ダウンサンプリング法を用いた信号処理系を使用し、位相シフト信号を低速 CCD で取得した。位相シフト法を適用し導出された位相をもとに物体の表面形状を導出したところ、平面ミラーでは測定誤差約 10nm、凹面鏡 (曲率半径  $R=2500\text{mm}$ ) では測定誤差約 30nm という結果が得られた。

第 3 章では、スペクトラル干渉計の原理及び信号処理の検討を行っている。はじめに低コヒーレンス光による干渉、回折格子の分光作用、スペクトラル干渉計の構成を説明した。次に線形リサンプリング法と CWT 解析法による信号処理を示し、数値シミュレーションを用い信号処理法の比較が行われた。シミュレーション結果より、連続ウェーブレット変換が非定常信号解析に適し、CWT 解析法は位相と波長の関係より簡単に光路差の精密測定可能である事が示された。

第4章では、スペクトラル干渉計による段差計測結果を示している。まず実験装置の構成を示し、マイケルソン干渉計と分光器を組み合わせた干渉計とガルバノミラーによるレーザ走査法が述べられている。実験では、マイケルソン型干渉計と分光器からなるSD-OCTシステムから波長が線形に変化する干渉信号を生成した後、CWT解析を用いて波長と一致する位相情報を特定し、光路差を導出した。このとき波長と位相の積が一定であることを確認した。また $40\mu\text{m}$ の段差物体の表面形状測定をしたところ、各面の光路差はそれぞれ $86.5\mu\text{m}$ 、 $126.4\mu\text{m}$ 、段差は $39.9\mu\text{m}$ で求められ、1ライン形状測定における繰り返し誤差は $65.1\text{nm}$ となった。三次元形状測定を行った際、理論形状との測定誤差は $0.17\mu\text{m}$ という結果が得られた。これらの結果からCWT解析を用いた本手法により、高精度な光路差測定が可能であることが示された。

第5章総論では、本研究の総括が示され、論文内で提案されたパルス変調半導体レーザを用いた高精度位相シフト干渉計および連続ウェーブレット変換を用いたスペクトラル干渉計に関する特徴および評価がまとめられている。

#### 審査結果の要旨

本論文では、光波干渉計における半導体レーザ光源をパルス駆動した際に生じる高速な波長変化を用いる高精度な干渉計、および広帯域半導体レーザ光源の波長を線形に空間展開した際に生じるスペクトラル干渉を用いる高精度干渉計測系を提案し、実験により、その特性、精度等を示している。前者では、非線形な波長変化によって生ずる非線形な位相の変化、後者では線形な波長分布に伴う非線形な位相変化を補償する独自の手法をそれぞれ考案し、有用性を明らかにした。

本研究は、光波干渉計測の分野に新たな信号処理の手法を加えるものであり、学術的にも重要な内容を含むとともに、干渉計測の高精度化において極めて重要な貢献ができる非常に価値のある研究であると評価できる。また本論文の研究成果は、権威ある学術雑誌に掲載されていることなどを考慮すると、研究水準も十分であると判断できる。

よって、本論文は博士（工学）の博士論文として十分であると認定した