

氏名	濱田 光
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	自博甲第19号
学位授与年月日	令和8年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
文部科学省報告番号	甲第883号
専攻名	創成理工学専攻
学位論文題目	周波数変調型デジタルホログラフィによる波面多重記録の高度化と計測応用に関する研究 (Advanced Wavefront Multiplexing by Frequency-Modulated Digital Holography and Its Application for Metrology)
論文審査委員	主査 島根大学教授 伊藤 文彦 島根大学教授 横田 正幸 島根大学教授 森本 卓也 島根大学講師 Kumar Varun

## 論文内容の要旨

物体と光の相互作用が作る回折光波（物体波面）は、物体に関する多様な情報を内包する。デジタルホログラフィ（DH）は、この物体波面を干渉縞（ホログラム）として電子的に記録し、計算機内で再生できる技術であり、これまで多様な計測応用へ展開されてきた。さらにDHの重要な特徴として、単一の光学系で複数の物体波面を時間的または空間的に重ねて記録し、独立に再構成できる多重記録性がある。DHにおける波面の多重記録は、多面的な物体情報を効率的に収集するうえで有効であり、その高度化は、近年盛んに議論されているフィジカル空間とサイバー空間の高度な融合に基づくデジタルツインに不可欠なマルチスケール（MS）・マルチモーダル（MM）情報を取得するための重要な基盤技術となる。

本論文では、多重化する波面数に依らず一定時間で記録でき、撮像素子の全空間周波数帯域を利用して多重化波面を個別に再構成可能な、時間周波数分割に基づく周波数変調型デジタルホログラフィ（FMCW-DH）を用いて、特に物体のMS情報の取得のための計測システムを提案することを通じ、FMCW-DHにおける多重記録性能の有効性を示すことを目的とした。

第1章では、本研究の背景と目的を述べ、DHにおける多重記録の意義と既存技術の課題点を整理し、MS・MM計測に向けた多数波面の多重化応用において、FMCW-DHが有効であることを述べた。

第2章では、本研究で扱うDHの記録・縞解析・再生の3つの基本プロセスの原理を説明した。さらに、従来研究のレビューを通じて各種多重化方式の特徴と課題点を概説した。

第3章では、MS情報の取得のための基礎として、FMCW-DHにより二波長ホログラムの多重記録手法を提案した。実証実験により、提案法を用いることで二波長に対応するホログラムを時間周波数領域で分離・抽出できることを確認し、さらに、得られた2つの位相分布を用いて、単一波長では計測困難な mm スケールの段差試料の三次元形状計測が可能であることを示した。また、実験系を模擬した数値計算を行い、実験から得られた精度評価の妥当性を検証した。加えて、数値計算により、実験系内の光学素子の裏面反射に起因する寄生干渉が高さプロファイルに周期的な歪みを生じさせ、計測精度を劣化させる要因であることを明らかにした。この結果に基づき、高さプロファイル上の寄生干渉に起因する歪の抑制手法を提案し、その有効性を数値計算により示した。

第4章では、第3章の内容を拡張し、三波長に対応するホログラムの多重記録を可能にする多波長 FMCW-DH を提案した。提案法により、取得した三波長分の位相画像を用いて、多波長位相アンラッピングを適用し、測定範囲の拡張と測定精度の向上の両立を試みた。多波長の利用により、二波長法の適用時に顕著であったスペckルおよび回折パターン由来の空間的な歪を効果的に抑制できることを示した一方で、アンラップに使用する合成波長を短くするほど、計測結果が段差試料の公称値から乖離する傾向が確認された。この結果から、多波長 FMCW-DH における位相計測では、時間周波数領域におけるスペクトル漏れ、および多重信号間のクロストークに起因して、各信号成分に異なる大きさの系統誤差が重畳することが、精度劣化の要因となる可能性を指摘した。

第5章では、FMCW-DHにおける多重化帯域の拡張を目的として、軸外し構成を導入した off-axis FMCW-DH を提案し、時空間周波数領域での多数波面の多重記録を実現した。実証実験では、異なる深さに配置した2つの物体に対し、二波長照明下で生じる合計6個のホログラムを単一光学系で同時に多重記録できることを示した。この計測応用として、両物体に対して二波長形状計測を実施した。既知段差を基準とした測定精度の評価から、両物体間で得られた精度が一致しないことを確認した。この原因として、第4章で指摘したスペクトル漏れおよびクロストークに起因する系統誤差が、各信号に異なる大きさで重畳し、実効的な合成波長が両物体間で一致しなかったためであると考察した。最後に、本手法における多重化限界を規定する要素について検討し、多重化帯域と分離条件に関する理論を示した。時空間周波数領域をホログラムの多重化可能帯域として利用する本手法は、同時に取得可能な波面数を増加させ、将来的な MS・MM 計測の基盤技術として有効であることを示した。

第6章では、第4章と第5章で指摘された、FMCW-DHにおける誤差要因の一つとして考えられたスペクトル漏れが位相抽出精度に与える影響を数値計算により評価し、その低減に向けた堅牢な信号処理法を提案した。ここでは、離散フーリエ変換 (DFT) とチャープ Z 変換 (CZT) による周波数解析と、Local Frequency (LF) 方式と Common Frequency (CF) 方式を組み合わせた4種類の信号処理 (DFT+LF、DFT+CF、CZT+LF、CZT+CF) を比較評価した。その結果、DFT+LF のみがスペクトル漏れに対して顕著に脆弱であることを確認した。続いて実施したクロストーク耐性の評価では、いずれの信号処理も一定の影響を受けノイズレベルが上昇する一方で、CF方式に基づく手法 (DFT+CF、CZT+CF) が相対的に堅牢であることが明らかになった。これらの結果は、FMCW-DHにおける信号処理設計の指針を与えるとともに、全章を通じて用いてきた DFT+CF 方式の妥当性を裏付けた。さらに、FMCW-DHにおける主要な誤差要因はクロスト

ークである可能性が高いことを示唆した。

第7章では、全章を総括し、FMCW-DHに基づく多重化技術が、MS・MM計測の実現に向けて有効な基盤技術であることを示した。今後の課題としては、4波長以上の導入に加え、偏光・屈折率・温度などの多様な物理量を同時に記録するMM計測への応用展開が求められる。また、位相計測の高精度化に向けては、多重信号間のクロストークの影響を低減する必要があるため、このために最適な窓関数の選定と信号間の分離条件を明確化することが重要であることを述べた。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、デジタルホログラフィ（DH）において光源の光周波数変調（FMCW）技術の導入による多重記録性の有効性を検証し、さらに軸外し記録も併用した時・空間周波数へとホログラム記録領域を拡張した技術に関して実験、数値計算により検討した結果をまとめたものであり、全7章から構成されている。

第1章は序論であり、当該研究の背景と研究目的について記載されている。

第2章は、本研究論文の基礎となるDHのホログラム記録・干渉縞解析・像再生の3つの基本プロセスの原理について説明し、従来研究のレビューを通じて各種ホログラム多重化方式の特徴と課題点について整理している。

第3章では、FMCW-DH法によるホログラム多重記録を実施し、二波長法による物体形状計測について述べている。提案法により二波長に対応するホログラム信号が時間周波数領域で分離・抽出できることを確認し、単一波長による計測では困難なmmスケールの段差試料の三次元形状計測が可能であることを示した。また、実験系を模擬した数値計算により、測定精度の妥当性を検証し、光学素子の裏面反射に起因する寄生干渉が計測精度を劣化させる要因であることを明らかにした。また、この寄生干渉に起因する歪の抑制手法を提案し、その有効性を数値計算により示した。

第4章では、三波長に対応するホログラム多重記録を行い、取得した三波長分の位相分布から多波長位相アンラッピング法を適用した形状計測法について述べている。多波長の利用により3章で述べた二波長法の適用時に顕著であったスペckルノイズや回折による空間的な歪を効果的に抑制できることを示した。同時に多波長位相アンラップにおいて重畳する系統誤差として時間周波数領域におけるスペクトル漏れ、信号間のクロストークが主な要因であることが示された。

第5章では、ホログラム記録帯域の拡張を目的として軸外し記録を併用した off-axis FMCW-DH による時・空間周波数領域でのホログラム多重記録法が示された。同法により異なる位置に配置した2つの測定対象に対し、二波長照明下で生じる合計6つホログラムを同時に多重記録できることが示された。さらに両対象に対して二波長形状計測を実施している。

第6章では、4、5章で明らかとなった測定誤差要因の一つであるスペクトル漏れが位相検出精度に与える影響を数値計算により評価し、その低減に向けた信号処理法を提案している。最終的にチャープZ変換（CZT）による周波数解析と Common Frequency（CF）方式を組み合わせた信号処理が有効であることを明らかにした。第7章では総括として、位相検出精度向上に必要な信号間クロストークの低減法について提案している。

以上の通り本論文では、デジタルホログラフィのホログラム多重記録化を拡張する画期的な方法の提案とその高精度化に関する新規性の高い研究成果を多く含んでおり、その学術的インパクトは非常に高いと評価できる。得られた成果の一部は申請者を筆頭著者とする2編の関連論文

として査読付き英字学術雑誌に発表されており、公聴会においてもその新規性や重要性が確認されている。以上を鑑みて、申請者の論文は博士の学位授与に値するものと審査委員が全員一致して判定した。