

氏名	おばら まさき 小原 正樹
本籍（国籍）	岩手県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博 第251号
学位授与年月日	平成26年 9月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	工学研究科電気電子・情報システム工学専攻
学位論文 題目	回転双曲面型体積インターフェログラムの計測に基づいた分光立体像取得と4次元分光結像特性の研究
学位審査委員	主査 准教授 吉森 久 副査 教授 西山 清 副査 教授 安倍 正人

論文内容の要旨

本論文は、以下の5項目の研究についてまとめたものである。

1. 一般的な3次元多色物体の連続スペクトルと3次元空間情報を同時取得する干渉計測法である3次元イメージング分光法において、合成開口処理に適用することが可能な選択律と、それにより生成される体積インターフェログラムの特徴、および3次元イメージングに適しているか、これらについて体系的に検討を行った。その結果、生成される体積型インターフェログラムには個別に異なる有用性があることを見いだした。
2. 1について体系的に検討を行った結果、新規な体積型インターフェログラム(回転双曲面型体積インターフェログラム)の発見に至った。この体積インターフェログラムを用いて、物体の連続スペクトルと3次元空間情報が取得可能かどうか、実験的検証を行った結果、スペクトル成分ごとの3次元像の取得に成功した。
3. また、上記2の回転双曲面型体積インターフェログラムを用いた3次元イメージング分光法は、従来法による実験結果と比較したところ、横方向の結像特性を劣化させることなしに奥行き方向に関して高い結像特性を有することが確認された。このことから、在来の同様な手法と比べて、奥行き方向において特に優れた結像特性を有するため、高分解能な形状計測や生体試料の3次元分光計測等の応用分野において有用と考えられる。
4. 3において、奥行き分解能が向上したという結果から、一般のホログラムから得られる3次元像の分解能は何によって決定されるのか、という問題が発生した。この疑問への足がかりとして、測定対象を単色点光源とした場合の、3次元イメージング分光法の計測の流れを解析し、4次元インパルス応答関数をclosed-formで導出した。この関数は、4次元 (x, y, z, ω) 空間上で定義されたインパルス応答関数

であるから、本干渉計測法の分光特性と 3 次元結像特性を同時に指定するものである。また、この 4 次元インパルス応答は、本干渉計測法だけでなく在来のデジタルホログラフィーにも適用しうると考えられる。

5. 上記 4 より、奥行き分解能の定量的な議論が可能となった。在来の様々な 3 次元イメージング法では、奥行き分解能は 2 次元画像のデフォーカスを基礎とした評価法であり、3 次元物体を 3 次元イメージとして評価する方法は確立していない。したがって、本論文で得られた知見は 3 次元イメージングの研究分野の進展に大きく寄与すると考えられる。

以下に、本論文の構成について示す。

第 1 章では、本研究の背景、目的、ならびに本論文の構成、概要について述べた。

第 2 章では、光波の一般的な数学的記述と、干渉計測と信号処理による分光立体像再生のプロセスとして、3 次元空間コヒーレンス関数計測の概念および再生処理について述べた。

第 3 章では、実験系である 2 光波折り畳み干渉計についてふれ、この干渉計により測定される空間コヒーレンス関数と、合成開口処理により生成される体積型インターフェログラムと 3 次元イメージングの関連性について述べた。

第 4 章では、回転双曲面型体積インターフェログラムを用いて分光立体像を再生する方法について述べ、またこの体積インターフェログラムが持つ主な特徴について議論した。

第 5 章では、回転双曲面型体積インターフェログラムを用いた 3 次元イメージングの実験的検証のため、単色点光源を測定対象として用いた際の実験結果について述べた。また、同じ実験データを用いて他の体積インターフェログラムを生成し、再生した結果との比較も合わせて示した。

第 6 章では、測定の流れを数学的に解析し、分光特性と 3 次元結像特性を同時に指定する 4 次元インパルス応答関数の解析解を導出した過程について述べた。一般に、インフォーカス面における再生像の横方向分解能を評価する基準としては、レイリーの規範が知られている。しかし、奥行き分解能に関する包括的な報告はほとんど見られない。そこで、今回導出した 4 次元インパルス応答関数を用いて、3 次元イメージング分光法による再生像の分解能、特に奥行き分解能の評価を行った。これは、光軸上の異なる位置に同一波長の点光源を配置し、その結像特性をレイリーの規範の考え方に基づいて評価したものである。従来、インフォーカス面における再生像の横方向分解能は、点像のスポットサイズで評価されており、これは厳密にはインコヒーレント結像系において適用されるものである。しかし、今回の解析から奥行き方向の再生像は、インフォーカス像とデフォーカス像が同時に再生されるため、2つの光源からの再生波面はコヒーレント加算によって再生像の強度分布が決定されることがわかった。

第 7 章では、研究成果をまとめ、今後の展望について述べた。

論文審査結果の要旨

本論文は、光の波動性に基づく干渉現象を利用した新規な3次元(3D)イメージング分光法の提案と、この手法の基礎となるデジタルホログラフィー(DH)の3D結像特性の評価法に関する一連の研究をまとめたものである。

光を利用した計測は、非接触・非破壊・非侵襲な計測が可能であるという特徴を有し、近年においては天文学、精密製品検査、医療分野における分子組成分析、生体組織・機能の観察など多岐にわたる場面で利用されている。いずれの分野においても3Dイメージング・3Dセンシングに対する需要は大きく、産業・医療支援分野のみならず映像機器、娯楽機器、車載用運転支援システムなど身近な技術に関しても要求は増すばかりである。

光を用いた干渉計測技術は、光の干渉性を利用して測定物体から放射される光の振幅や位相、連続スペクトルなどの情報を取得することが可能である。位相情報には光が伝搬した方位や距離の情報が含まれているため、物体の3D形状を回復することができる。また、連続スペクトルからは物体の色合いや材料組成を知ることができる。しかし、これまでに報告されている光干渉イメージング技術は、多色物体から分光された多数の2次元像を得る手法や単色光で照明された物体の3D像を得る手法が大部分であり、多色物体の分光と3Dイメージングを同時に行う計測原理・手法の報告は国際的にも稀であった。また、DHによる3D像の分解能は、レンズによる結像系により得られる2次元像と同等な考え方で評価されており、3D像としての分解能、特に奥行き分解能に関する包括的な報告はほとんど見られない。

そこで本論文では、空間的にインコヒーレントな多色物体の連続スペクトルと3D空間情報を同時取得する干渉計測法として、回転双曲面型(RH-type)体積インターフェログラムを用いた新規な3Dイメージング分光法を提案し、それが理論的・実験的に実現可能であることを示している。また、提案手法の3D像再生処理過程を解析することにより分光された3D像に関する多次元インパルス応答関数の解析解をはじめて導出している。さらに、このインパルス応答関数をDHによる3D像の分解能評価に適用し得られた、3D像の空間分解能評価に関する新規な規範を提案している。

本論文は全7章で構成されている。

第1章では、本研究の背景とその位置付け、および研究目的について述べている。

第2章では、光波の基本的な性質とその数学的記述、および干渉計測により分光された3次元像取得の概念について述べている。

第3章では、3Dイメージング分光法の実験系である2光波折り畳み干渉計を取り上げ、この系により測定される干渉縞データセットから3Dイメージングを可能とする体積型インターフェログラムを生成する合成開口処理について考察している。合成開口処理に関する体系的な検討により、生成される体積型インターフェロ

グラムは個々別々の有用性を持つことを示している。

第4章では, RH-type 体積インターフェログラムを用いた新たな 3D イメージング法の提案を行っている。そして, この体積インターフェログラムが持つ特徴について議論している。

第5章では, 提案手法による 3D イメージングの実験的検証について述べている。実験の結果, 提案手法により連続スペクトルと 3D 空間情報の同時取得が可能であることを確認している。また, 従来法による再生結果と比べ, 提案手法はスペクトル分解能と横方向分解能を劣化させることなく, 奥行き分解能が向上することを確認している。

第6章では, 3D イメージングのための新規な分解能評価法の確立への取り組みとして, 3D イメージング分光法におけるインパルス応答関数を解析的に導出した過程について述べている。また, インパルス応答関数の解析解の一般的な性質, およびこの解析解を利用して奥行き分解能を評価する試みについて述べている。

第7章は結論であり, 第2章から第6章までを総括し, 本研究で得られた成果をまとめている。また, 本論文の学術的意義や将来の展望・発展性についても述べられている。

以上, 本論文は, ①3D イメージング分光法において生成される体積インターフェログラムの体系的検討, ②RH-type 体積インターフェログラムを用いた新たな 3D イメージング分光法の提案, ③提案手法の実験的確認および従来法との比較, ④3D イメージング分光法の分光特性と 3D 結像特性を同時に指定する多次元インパルス応答関数の解析的な導出, ⑤DH による 3D 像の分解能評価法に関する規範の再検討, に関する総合的な研究であり, 新規かつ有益な知見が提示されている。したがって, 光干渉計測分野とくに 3D イメージング・3D センシングの研究分野の進展に寄与するところ大である。

よって, 本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。

原著論文名 (1編)

M. Obara and K. Yoshimori, "Coherence three-dimensional imaging spectrometry based on measurement of rotated-hyperbolic volume interferograms," *Opt. Rev.* **21**, (in press) (2014).