

学位論文要約

平成 26年 9月 12日

学位申請者 小原 正樹

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

学位論文要約

第1章 序論

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、これまで球面波型(Spherical-type: S-type)法と双曲面型(Hyperbolic-type: H-type)法を提案している。この2手法は、合成開口処理で用いる選択律が異なる。そこで本論文では、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結果について示す。また、体系的検討により、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について示す。合わせて、S-type法による実験結果との比較結果についても示す。そして、回転双曲面型(Rotated Hyperbolic type: RH-type)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、S-type法による実験結果と比較したところ、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。この事実から、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、3次元イメージング分光法において、測定対象を単色点光源とした場合の応答、つまりインパルス応答関数(Impulse response function: IRF)について述べる。そして、実験結果とIRFの計算結果との対応を示す。

第2章 光波の干渉とコヒーレンス関数

本章では、光波の表記法や干渉という性質について述べた。そして、2つの光波による時間的、空間的な相関関係を示したコヒーレンス関数について説明し、本手法に深く関連するものとしてファンシッター・ゼルニケの定理とフーリエ分光法について述べた。ま

た、空間的にインコヒーレントな多色光源分布の3次元空間情報と連続スペクトルを同時取得するための方法として、1. 3次元空間コヒーレンス関数の測定概念、2. 3次元空間コヒーレンス関数と相互スペクトル密度の関係、3. 相互スペクトル密度からの3次元像再生手法として、フレネル回折積分法と角スペクトル法、の大きく分けて3つの項目について述べた。

第3章 2光波折り畳み干渉計と体積型インターフェログラムの生成

本章では、3次元空間コヒーレンス関数を測定する為に考案された、比較的単純な光学設計により構築できる2光波折り畳み干渉計について述べ、この干渉計により測定される空間コヒーレンス関数の数学的記述についても述べた。2光波折り畳み干渉計で取得される空間コヒーレンス関数は5次元であり、5次元データセットから3次元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必要がある。そこで、3次元空間への射影を取る処理として合成開口処理について述べ、用いることが可能な選択律と、それにより生成される体積型インターフェログラムが3次元イメージングに適しているか、体系的に検討を行った結果について述べた。

この検討により、生成される体積型インターフェログラムは、個別の異なる特徴・メリットを有することを確認した。また、今回の検証により RH-type 体積インターフェログラムという新たな体積インターフェログラムの発見に至った。これまでの研究では知られていないものであり、1次位相因子および2次位相因子を含むことから3次元イメージングが可能である。

第4章 RH-type 体積インターフェログラムからの分光立体像再生

本章では、RH-type 体積インターフェログラムを用いた分光立体像再生として、まず体積インターフェログラムの形状と含まれる空間コヒーレンス関数の数学的記述について述べた。また、再生方法および RH-type 体積インターフェログラムの主な特徴についても述べた。

第5章 単色点光源による実験検証

本章では、RH-type 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を実証するため、単色点光源を測定対象とした実験的検証について述べた。その結果、測定対象のスペクトル形状と3次元空間情報の再生に成功した。空間的にインコヒーレントな多色物体は、無相関な点光源の集合として表されるため、RH-type 法は、原理的には通常の多色物体にも適用可能である。そして、S-type 法との比較の結果、RH-type 法は他の特性の低下なしに、優れた奥行き分解能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。

また、奥行き分解能を評価した結果、3次元イメージング分光法と経験則 λF^2 には大きな隔たりがあった。経験則は、3次元物体を2次元画像上へ投影するレンズによる結像システムの分解能と同様の考え方であるから、3次元イメージングとしての別の分解能評価法が必要であると考えられる。

第6章 3次元イメージングの分解能とは

本章では、3次元イメージング分光法の計測の流れを解析し導出したインパルス応答関数について述べた。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。スペクトル分解能はフーリエ分光法と同様に、体積インターフェログラムの厚みにより指定される。横方向分解能は、レイリー規範と同様に、ホログラムのサイズにより指定される。そして、奥行き分解能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、コヒーレントな重ね合わせによって強度分布が決定される。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。

このインパルス応答関数によって、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。

第7章 結論

3次元イメージング分光法における合成開口処理について、体系的な検討により新たに発見した、回転双曲面型(RH-type)体積インターフェログラムを用いた3次元イメージング法の提案および実験的検証を行った。そして、3次元イメージング分光法の分光特性と3次元結像特性を同時に指定する新しい4次元インパルス応答関数を解析的に導出し、それを用いて分解能について定量的な評価を行った。