HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	複素振幅制御を用いた仮想位相共役技術による光情報処理に関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	後藤, 優太
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第13082号
Issue Date	2018-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/70522
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Goto_Yuta_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（情報科学）　氏名　後藤　優太

学 位 論 文 題 名

複素振幅制御を用いた仮想位相共役技術による光情報処理に関する研究
（Study on Optical Information Processing by Virtual Phase Conjugation Technique using Complex Amplitude Control）

散乱物体を通過することで位相歪みを受けた光波の位相共役波を再度同じ散乱物体に通過させると, その位相歪みが打ち消される. このような位相共役光の自動的な位相補正効果は光ファイバ中を伝搬する画像の画質回復, 生体計測, 適応光学, レーザ共振器など様々な分野に応用されてきた. 通常, 位相共役光は $LiNbO_3$ に代表される非線形光学媒質中において, 縮退 4 光波混合を行うことで発生させることができる. しかし, 縮退 4 光波混合は複数の光波を用いることによる高いアライメント精度の要求, 低い生成効率, 及び低い忠実度により光学系の自由度が大幅に制限されてしまう. 対して, デジタルホログラフィによって位相歪みを受けた光波の位相分布をコンピュータに記録し, その反転した分布を持つ光波を空間光変調器によって再現することで位相共役光を生成するデジタル位相共役技術が提案されている. 特に, 生体イメージングへの応用に向けて, デジタル位相共役技術を散乱体中でのフォーカススポットの生成に応用する研究が盛んに行われている. さらに, デジタルホログラフィを用いて記録された位相歪みを持つ光波に対して回折伝搬計算行うことで, 計算機上においてその位相共役波の挙動を再現した結果が報告されている. このような仮想的な光学系では大気揺らぎやアライメント誤差の影響を受けずに高い精度を保つことができる. しかしながら, これらは実際的なアプリケーションに応用された例は現状では報告されていない. もし, 仮想的な光学系と物理的な光学系とを組み合わせた新しい位相共役光学が完成すると, 従来と比べ高安定・高精度・小型, ひいては従来のより格段に自由度の高い光情報処理システムを創出できる可能性がある.

そこで本研究では, このような高安定・高精度・小型かつ自由度の高い新たなアプリケーションの創出を目的として, 仮想位相共役技術を用いた幾つかの光情報処理システムを提案する.

仮想位相共役技術を実現する要素技術の一つとして, 反復計測による高精度な参照光不要型ホログラフィックダイバーシティ干渉法を提案・実証する. 本手法は計測された位相画像を位相型空間光変調器を用いて内部参照光にフィードバックし, 反復計測を行うことで, 外部参照光を用いることなく高精度に複素振幅分布を計測することが可能となる.

仮想位相共役技術の基礎特性の一つとして, 光学ノイズ除去効果を検討する. 本手法はプローブ光の空間位相を事前に変調した後に任意の物理的な光学処理を行い, その後取得された光波に対して仮想位相共役によって事後復調を施すことノイズに埋もれた信号のみを抽出する. この事前変調と事後復調は全て計算機上の数値計算によって行われるため, 付加的な光学系を用いることなく種々の光学ノイズを除去することができる.

仮想位相共役技術による光情報処理システムとして, 以下に示す 3 つの具体的な応用を検討する. まず, スキャニング不要な共焦点顕微鏡の実現に向けて, 仮想 $4f$ 光学系及び仮想位相共役技術を用いたデジタル共焦点顕微鏡を提案する. 本手法は計算機上の仮想的なレンズで構成される仮想 $4f$ 光学系を用いて位相共役伝搬とピンホール関数の乗算を行うことで共焦点特性を得る. この仮想 $4f$ 光

学系をデフォーカスさせながら位相共役光による逆伝搬過程を反復的に計算することで, スキャニングをすることなく深さ方向の情報が得られる. よって, 機械的な駆動部を廃したデジタル共焦点顕微鏡を実現することができる. 次に, スキャニング不要なシングルショット 3 次元断層撮影の実現に向けて, 仮想位相共役技術を用いた光断層撮影を提案する. 本手法は仮想位相共役技術による光学ノイズ除去特性を効果的に用いることで計測物体の特定層の情報を抽出する. このとき, 自由空間伝搬計算を組み込むことで, スキャニングなしに完全な 3 次元断層像の取得が可能となる. 最後に, 高記録密度ホログラフィックメモリの実現に向けて, 仮想位相共役技術を用いたデジタル画像の多重分離を提案する. 本手法は予め複数の信号光をビームスプリッタで合波しておき, それを記録媒質に記録する. そして, 仮想位相共役技術による光学ノイズ除去特性を効果的に用いることで多重された画像データから特定のデータのみを抽出することが可能となる. よって, 従来のホログラフィックメモリにおける多重化方式とは異なり, 一度の露光で複数の画像データを記録することができるため, 媒質ダイナミックレンジの消費を抑制することができ, 記録密度が向上する.

以下に各章の要旨を示す.

第 1 章では, 本研究の背景及び目的・意義について述べた.

第 2 章では, まず, 仮想位相共役を実現する要素技術である光複素振幅制御技術の概要について述べた. また, 従来の光学的な位相共役光の生成方法及びデジタル位相共役について述べた.

第 3 章では, 仮想位相共役を実現する要素技術の一つとして, 反復計測による参照光不要型ホログラフィックダイバーシティ干渉法を提案し, その基本動作や特長を述べた. また, 実験により従来の参照光不要型ホログラフィックダイバーシティ干渉法と比べ本手法が高精度な複素振幅分布計測が可能であることを示した. さらに, 位相画像のフィードバック回数と内部参照光の波面精度における向上度合いの関係性を明らかにした.

第 4 章では, 仮想位相共役技術基礎特性の一つとして, 光学ノイズ除去効果を検討し, その基本概念や特長を説明した. また, レンズで構成される結像系が正しく結像されている状態を所望の信号成分, 結像系をあえて正しく結像させなかった状態を不要なノイズ成分とした基礎実験を行い, このノイズ除去効果によって信号成分だけが精度よく取り出せることを明らかにした.

第 5 章では, 仮想 $4f$ 光学系及び仮想位相共役技術を用いたデジタル共焦点顕微鏡を提案し, その基本動作や特長を説明した. また, 実験によってカバーガラスの深さ方向計測を行い, 本手法がスキャニングなしに深さ方向の計測が可能であることを原理的に示した. さらに, 本手法における仮想的なピンホールの径と深さ方向の分解能の関係を明らかにした.

第 6 章では, 仮想位相共役技術を用いた光断層撮影を提案し, その基本動作や特長を述べた. カバーガラスおよびカエル血球が封入されたプレパラート試料の計測実験を行い, 本手法が機械的なスキャニングを実行することなく完全な 3 次元断層像の取得が可能であることを示した. 加えて, 本手法の空間分解能および計測速度について考察した.

第 7 章では, 仮想位相共役技術を用いたデジタル画像の多重分離を提案し, その基本動作や特長を述べた. そして, 数値解析により従来のホログラフィックメモリの多重方式と比べ媒質ダイナミックレンジの消費を低減できることを示した. また,2 枚のデジタル画像を多重した実験を行い本手法の動作を実証した. 加えて, 媒質厚さ方向に多重記録する多層ホログラフィックメモリに本多重分離手法を適応した系も検討し, その動作を数値解析によって確認した.

第 8 章では, 本論文の総括と今後の課題について述べた.