

氏 名	キッティホット ジェンワッタナーヌクン Kittiphot Jianwattananukul
本籍（国籍）	BANGKOK THAILAND
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博 第302号
学位授与年月日	令和 元年 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	<b>Multispectral incoherent holography based on measurement of differential wavefront curvature</b>
	(波面の曲率差の計測に基づく多重分光インコヒーレントホログラフィー)
学位審査委員	主査 准教授 吉森 久 副査 准教授 木村 彰男 副査 教授 永田 仁史 副査 教授 西山 清

## 論 文 内 容 の 要 旨

In this dissertation, a technique for multispectral incoherent holography based on measuring differential wavefront curvature is proposed. The differential wavefront curvature is measured and the principle of Fourier transform spectrometry is applied to provide a set of spectral components of three-dimensional (3D) images and continuous spectra for spatially incoherent, polychromatic objects. The mathematical formulation of the principle and the experimental results are presented. Spectral resolution and 3D imaging properties are investigated based on a four-dimensional (4D) impulse response function (IRF). The dissertation consists of the following six chapters.

In chapter 1, an overview of the dissertation is provided. The research background is introduced, the research objectives are stated, and the structure of the dissertation is presented.

In chapter 2, the theoretical background of the research is summarized. The properties of light are derived from the wave equation, including optical interference based on the superposition principle of two optical waves, optical

coherence, diffraction theory, angular spectrum method and Fourier transform spectrometry.

In chapter 3, the concept of multispectral incoherent holography is presented. An interferometer similar to the Michelson interferometer with one plane mirror replaced with a concave mirror is described. This interferometer detects the differential wavefront curvature between two split wavefronts. After the volume interferogram is obtained, the spectral profile of an object can be found in a way analogous to Fourier transform spectrometry. A mathematical theory that can be used to retrieve spectrally resolved 3D images is described. The optical intensity of interferograms is first expressed in terms of a spatial correlation function of the optical field. This function represents the interference of optical fields reflected by the plane mirror or the concave mirror. For a stationary field, the spatial correlation function recorded in the volume interferogram can be expressed as the superposition integral of the cross-spectral density function, where the cross-spectral density function is defined as the cross correlation between the monochromatic components of the optical field. This cross-spectral density function can be expressed in terms of the spectral density function of the measured object and is equivalent to a spectral component of the complex incoherent hologram. Thus, the 3D image for each spectrum can be reconstructed from the complex incoherent hologram by applying conventional inverse propagation techniques.

In chapter 4, two experiments are described. In the first experiment, the measured object is polychromatic. The 3D volume interferogram is measured with the interferometer. By performing a Fourier transform of the volume interferogram with respect to thickness, the spectral profile of the object and the complex incoherent hologram for each spectral component are obtained. The 3D image at the spectral peak is reconstructed from the complex incoherent hologram. The second experiment uses two polychromatic objects. The spectral profiles of the objects are analyzed at a point on the plane perpendicular to the optical axis. The experimental results show that the shape of the measured object is reconstructed well, the size of the object is close to that of the original, and the depth distance of the object is recovered.

In chapter 5, the imaging properties of multispectral incoherent holography are investigated theoretically by deriving an analytical solution of the IRF. The derivation is performed under the paraxial approximation. To confirm the mathematical analysis, the 3D images obtained from the analytical solution of the IRF are compared with the experimental results. In the mathematical

analysis, the measured object is assumed to be a monochromatic point source. The cross-spectral density function is expressed as a Fourier transform of the product of the spatial correlation function and the window function, the latter of which represents the spatial extension of the image detector. To find the IRF and reconstruct the 3D image, the inverse propagation formula is applied to the cross-spectral density function. Consequently, the final expression for the reconstructed image appears as the superposition integral of the input spectral density function and the IRF, with the IRF expressed in terms of the Fresnel integrals.

For comparison, the image is reconstructed as the IRF prediction. Another experiment is performed, in which the measured object is a monochromatic point source and the corresponding image is reconstructed. The two images are compared. The analytical solution of the IRF and the experimental results agree well, validating the method. The images obtained demonstrate the performance of the method.

The conclusions are provided in chapter 6.

## 論文審査結果の要旨

本学位論文は波面の曲率差の計測に基づく多重分光インコヒーレントホログラフイーの方法を提案している。この研究は新規な手法の提案、スペクトル成分毎の 3次元像を回復する数学理論、実験結果、および解析的に導かれた多重分光インコヒーレントホログラフイーの 4次元インパルス応答関数の解析解の導出とその実験的検証を含んでいる。

第1章では研究の背景、目的、学位論文の構成が示されている。

第2章では研究の理論背景を要約している。波動方程式から導かれる光の性質を例示することから始めて、重ね合わせの原理に基づく光波の干渉現象、光波のコヒーレンス、回折理論、角スペクトル法、そしてフーリエ分光法の原理を説明している。

第3章では多重分光インコヒーレントホログラフイーの方法を提案している。マイケルソン干渉計の1つの平面鏡を凹面鏡に置き換えた干渉計が導入される。この干渉計は、分割された光の波面の曲率差を検出する。得られた体積インターフェログラムから、物体光のスペクトル形状はフーリエ分光法と同様な方法で取得することができる。次に、スペクトル分解された3次元像を得るために利用できる数学理論を示している。体積インターフェログラムの光強度を光の場の空間相関関数で表すことから始められる。この関数は平面鏡と凹面鏡によって反射された光の場の干渉現象を表す。時間的に定常な場において空間相関関数は、相互スペクトル密度関数の重ね合わせ積分で表され、相互スペクトル密度関数は光の場の単色成分に關す

る相互相関で定義される。この相互スペクトル密度関数は、物体のスペクトル密度関数によって表されるが、この表式は、物体のスペクトル成分に関するインコヒーレントホログラムにほかならない。このインコヒーレントホログラムに逆伝搬法を適用することにより、スペクトル成分毎の3次元像を回復することができる。

第4章では2つの実験的研究に関する結果を示している。第一の実験では、測定物体は多色であり、体積インターフェログラムが干渉計によって測定される。この体積インターフェログラムを厚みに関しフーリエ変換することによりスペクトル形状とスペクトル成分に関する複素ホログラムが得られる。この複素ホログラムから、スペクトルピークにおける3次元像が回復される。第二の実験は、2つの多色物体を用いたものである。各物体のスペクトル形状は、光軸に垂直な平面上の特定の点において解析された。物体形状の再現性は良好である。すなわち、物体の大きさは現実のそれに近く、奥行き位置も再現されている。この実験における測定時間は従来法の約300分の1である。原理的にさらなる高速化が望めることから、生体試料の3次元分光観測の実用化に寄与するところが大きい技術であり、高く評価できる。

第5章ではインパルス応答関数の解析解を導出することにより多重分光インコヒーレントホログラフィーの結像特性を調べている。この数学解析の妥当性を検証するためにインパルス応答関数の解析解から得られた再生像と実験結果が比較された。単色点光源を測定物体とした実験を実施し、再生像を得ている。再生像は理論予測と良い一致を見せることが確認された。従来の研究において、本研究で導出されたインパルス応答関数ほど実験結果をよく説明する解析解は報告されておらず画期的な成果であり、高く評価できる。またこの実験結果は、提案手法により得られた再生像はこの手法の、ある条件の下における理論限界を与えることを示唆している。

以上のように本研究は多重分光インコヒーレントホログラフィーの方法を実験的・理論的に詳細に研究しており、その新規かつ斬新な成果は光情報処理分野及び情報フォトンクス分野の発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編を記載）

題 目 Multispectral incoherent holography based on

measurement of differential wavefront curvature

著者名 Kittiphot Jianwattananukul, Masaki Obara, Kyu Yoshimori

学術雑誌等名 Optical Review (To be published online, Springer,

DOI: 10.1007/s10043-019-00536-0)

発行年月 2019年 9月