

分光立体画像取得のためのデジタル分光 ホログラフィー

吉 森 久

Digital Holographic Spectrometry for Obtaining a Set of Spectral Components of Three-Dimensional Images

Kyu YOSHIMORI

It is possible to obtain three-dimensional spatial information and continuous spectral information for spatially incoherent, polychromatic object under the illumination of natural light in terms of a fully passive interferometry coupled with digital signal processing. To realize such interferometric technique, we use the two-wavefront folding interferometer, enabled us to obtain the first experimental data of a set of spectral components of three-dimensional images. This article reviews recent progress in that interferometric technique including its physical basis, some experimental results and future plan.

Key words: digital holography, incoherent holography, three-dimensional imaging, interferometry, Fourier transform spectrometry

多色光源から伝搬した光波のコヒーレンスを測定する干渉計測に基づいて物体情報を得る計測法といえば、フーリエ変換分光法が第一に挙げられるであろう。しかし、このようなパッシブ干渉計測によって、空間的にインコヒーレントとみなされる多色光源分布（通常物体）の三次元立体形状情報（3D情報）と分光情報（連続スペクトル）を同時に得る計測法の確立は、統計光学の応用に関する未知領域の研究に属すると考えられる。実際、1998年以前にこのような意図をもってなされた研究報告は、筆者の知る限りみられない¹⁻³⁾。

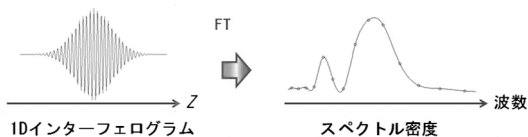
デジタル分光ホログラフィーは、自然光で照明された多色物体からの光波を干渉計測し、信号処理を施すことにより、連続スペクトルの各スペクトル成分に関する分光された立体画像を同時に得る計測技術として考案された。このような全干渉型三次元分光イメージングを実現するために、筆者は二光波折り畳み干渉法を考案し⁴⁾、原理検証実験とファーストイメージの取得に成功した^{5,6)}。

本稿では、この手法の計測原理を概説し、実験結果を紹介するとともに、今後の研究の展望にもふれる。

1. フーリエ変換分光法とデジタル分光ホログラフィー

デジタル分光ホログラフィーの原理を直感的に理解するためには、測定される干渉信号と信号処理の流れを、フーリエ変換分光法の場合と比較するとよい（図1参照）。フーリエ変換分光法で測定される観測量は、マイケルソン干渉計の光軸に沿って測定された入射光の一次元インターフェログラム（時間コヒーレンス関数）であり、これをフーリエ変換し正の波数成分を抽出することにより、入射光の連続スペクトル密度が得られる。そこでいま、この一次元インターフェログラムを、体積型ホログラムとよく似た、物体から伝搬した光の波面情報とスペクトル情報が同時に記録された三次元の体積インターフェログラムに置き換えたとして、この体積インターフェログラムが、次章で説明するような意味でわれわれの目的に対し適切なものであれば、体積インターフェログラムをその厚みに関しフーリエ変換し正の波数成分のみを抽出すると、物体から伝搬した入射光の多数の波数成分に関する二次元相互スペクトル密度が一挙に得られる。これらの相互スペクトル密

フーリエ変換分光法



デジタル分光ホログラフィー

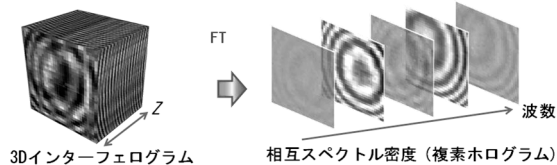


図1 フーリエ変換分光法（上）とデジタル分光ホログラフィー（下）の干渉信号と信号処理の流れ。

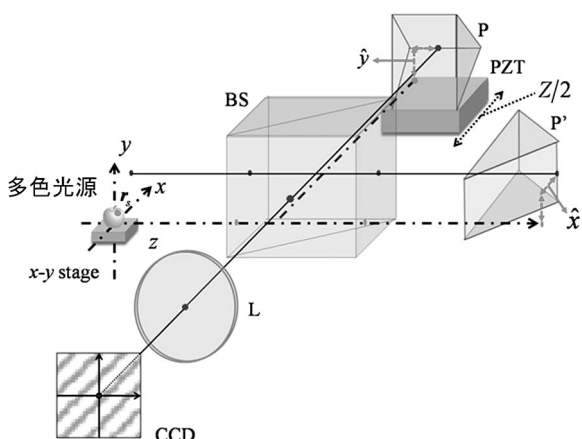


図2 二光波折り畳み干渉計を利用したデジタル分光ホログラフィーの実験系。

度は、干渉縞のコントラストがその波数におけるコヒーレンス度に比例する点を除くと、それぞれが物体の分光された特定の波数成分におけるホログラムと同等な情報をもっている⁶⁾。そこで、これらのホログラムから物体に関する多数の分光立体画像を独立に再生することができる。また、再生された立体画像上のある点におけるスペクトル強度の変化を調べるにより、立体画像の任意の点における連続スペクトルを得ることが可能となる。

以上がデジタル分光ホログラフィーの原理のあらましである。そこで問題は、この目的にかなった体積インターフェログラムをいかに取得するかである。

以下に述べる二光波折り畳み干渉計を利用する方法は、測定の際に特別な照明光を必要としないという意味で、原理的にはパッシブなインコヒーレントホログラフィーに分類される。また、干渉計で測定されるのはインターフェログラムのみであり、これに合成開口処理と分光処理を適用することによって、多数の波数成分に関するホログラムを得るという点で、計算イメージング・スペクトルセンシ

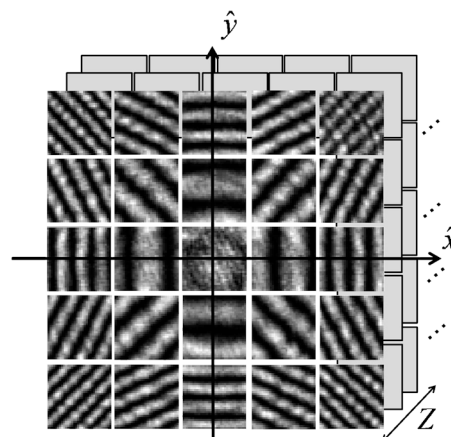


図3 デジタル分光ホログラフィーの実験系で取得された五次元干渉縞画像。

ングの典型と考えられる。この意味において、この手法は近年におけるデジタル情報技術の進展と伝統的な光学技術の融合によって初めて可能となった計測技術のひとつといえよう。

2. 手法の説明

二光波折り畳み干渉計を利用したデジタル分光ホログラフィーの実験系を図2に示す。 x - y ステージ上に置かれた、時間的に定常でかつ巨視的な意味で空間的にインコヒーレントな多色光源分布（測定物体）から自由に伝搬した光をビームスプリッターで2つに分け、2つの直角プリズムで反射させる。直角プリズムは互いに90度回転させており、2つの波面は入射波の波面を x 軸または y 軸に関し反転させたものとなる。反射された波面を再び重ね合わせてCCDで干渉縞画像を測定する。一方の直角プリズムはピエゾトランズレータPZTに設置されており、 z 軸方向の光路差 Z が導入される。

この実験系で取得される生データは、PZTと x - y ステージの3軸を走査して測定した多数の干渉縞画像であり、二次元干渉縞画像が三次元的に配列された、全体として五次元の配列をなすデータセットである。この様子を図3に示す。ここで、 \hat{x} と \hat{y} はプリズムP'およびPの稜線の x 座標と y 座標である。

分光立体画像再生の第1段階は、この五次元インターフェログラムに対し合成開口処理を適用し、三次元空間への射影をとることである。具体的には、おのおのの干渉縞画像から次の選択律、

$$(x, y) = (2\hat{x}, 0) \quad (1)$$

に従って1ピクセルのデータを選び、新たに定義した三次元空間

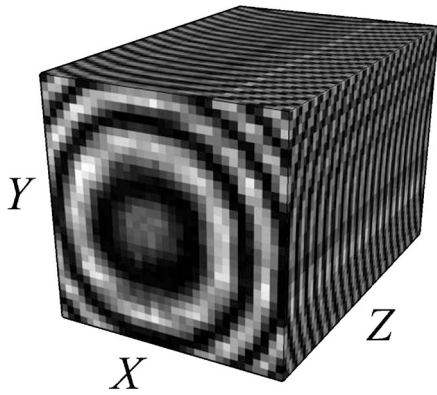


図4 光源から伝搬した光の全波長成分の波面形状が記録された三次元の体積インターフェログラム。

$$(X, Y, Z) = (2\hat{x}, 2\hat{y}, Z) \quad (2)$$

に再配列する^{4,6)}。後に述べるように、この処理には複数の有用なバリエーションがあるが^{7,8)}、上記の規則を採用すると、光源から伝搬した光の全波長成分の波面形状が記録された三次元の体積インターフェログラム (図4) が得られる。この体積インターフェログラムには

$$\Gamma(\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0 + \boldsymbol{\rho}) = \langle V^*(\mathbf{R}_0, t) V(\mathbf{R}_0 + \boldsymbol{\rho}, t) \rangle \quad (3)$$

なる形で表される伝搬光 $V(\mathbf{r}, t)$ の三次元空間コヒーレンス関数が記録されている。ここで、*は複素共役を、ブラケットは集合平均を表し、 $\mathbf{R}_0 = (0, 0, z_0)$ は観測面 $z = z_0$ の原点、 z_0 は x - y ステージに固定された空間座標の原点から測った、直角プリズム P の稜線までの z 軸方向に関する光学距離である。また $\boldsymbol{\rho} = (X, Y, Z)$ は \mathbf{R}_0 からみた三次元的な相対ずれで、体積インターフェログラム内の位置を指定する座標でもある。以下 $\boldsymbol{\rho}$ を光軸に平行な成分 Z と垂直な成分 $\boldsymbol{\rho}_\perp = (X, Y)$ に分けて、 $\boldsymbol{\rho} = (\boldsymbol{\rho}_\perp, Z)$ と表す。

次に、この体積インターフェログラムを、その厚み Z に関しフーリエ変換することにより分光処理を施すと、観測面における光波の相互スペクトル密度

$$W_\omega^{(z_0)}(\boldsymbol{\rho}_\perp) \equiv W_\omega(\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0 + \boldsymbol{\rho}_\perp) = \langle U_\omega^*(\mathbf{R}_0) U_\omega(\mathbf{R}_0 + \boldsymbol{\rho}_\perp) \rangle \quad (4)$$

のセットが得られる。このあたりの事情はフーリエ変換分光法と同じであるが、得られる物理量がスペクトル密度 $S_\omega^{(z_0)} \equiv W_\omega(\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) = \langle |U_\omega(\mathbf{R}_0)|^2 \rangle$ ではなく一般に複素の値をとる相互スペクトル密度であることに注意されたい。ここで、 $U_\omega(\mathbf{r})$ は角振動数 $\omega = 2\pi cf$ を有する複素振幅で、 c は光速、 $f = 1/\lambda$ は分光学で利用される波数であり λ は波長である。これらの相互スペクトル密度 (4) は、観測面上の複素振幅の相関関数であり $U_\omega(\mathbf{R}_0 + \boldsymbol{\rho}_\perp)$ に比例するから、部分コヒーレントな伝搬光の各スペクトル成分に関する複素ホログラムにほかならない。また、分光されたホログラムが複素であることは、これらのホログラムから再生

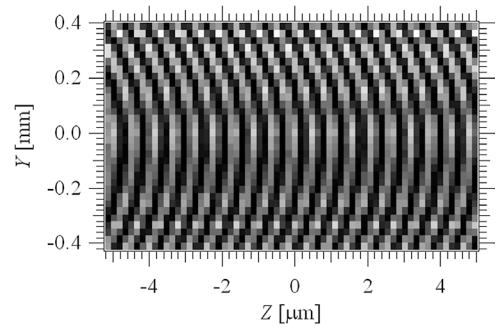


図5 Y-Z断面の干渉縞パターン。

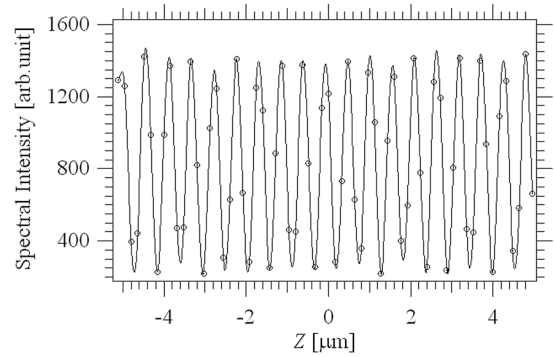


図6 Y-Z断面の干渉縞パターンの光軸上の強度分布。

される物体像は1次回折像のみであり、0次光や-1次回折光によって汚染されないことを意味する。このようにして、測定対象である多色物体の分光立体画像をスペクトルごとに再生することができる。

3. 実験結果

第1章と第2章で述べたデジタル分光ホログラフの原理と計測手法に関する最初の検証は、単色点光源 ($\lambda = 543 \text{ nm}$) を測定対象として行われた⁶⁾。本手法によって実験的に得られた体積インターフェログラムは、すでに図4に示してある。これは物体座標の原点付近に単色点光源を置いたときのものである。この体積インターフェログラムの光軸を含む Y - Z 断面の干渉縞パターンを図5に示す。単色点光源から伝搬した球面波の波面と波長が記録されていることがわかる。特に、図5の光軸上の強度分布を図6に示すが、これは単色点光源に対しマイケルソン干渉計を利用して測定したフーリエ変換分光法の一次元インターフェログラムとほぼ同じものである。これをフーリエ変換すると図7に示す観測面における伝搬光のスペクトル密度が得られるが、そのスペクトルピークは点光源のスペクトルと測定系のスペクトル分解能の範囲で一致している。次に、点光源のスペクトルピークにおける相互スペクトル密度、すなわち複素ホログラムの実部と虚部を図8に

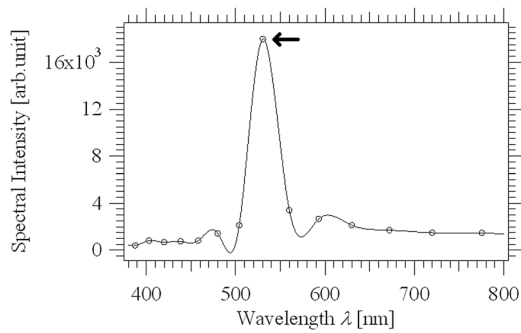


図7 観測面における伝搬光のスペクトル密度。

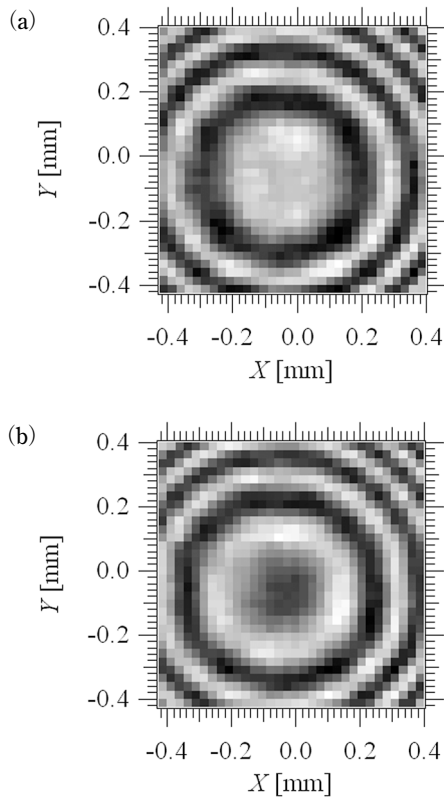


図8 点光源のスペクトルピークにおける相互スペクトル密度。複素ホログラムの実部 (a) と虚部 (b)。

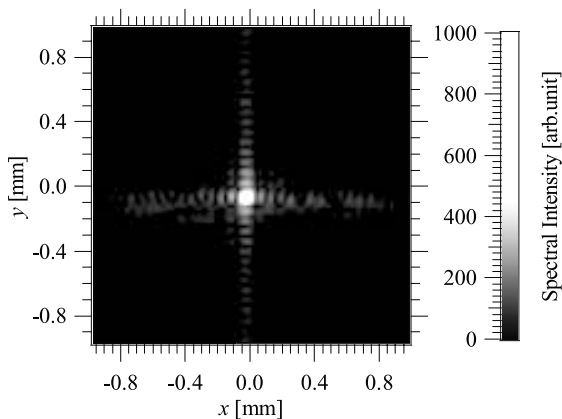


図9 ホログラムから再生した三次元像。奥行き 93 mm にある点光源のインフォーカス像であり、ホログラムの開口で決まる回折限界の点像が得られている。

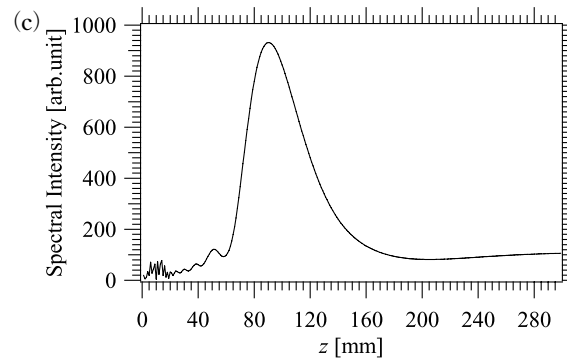
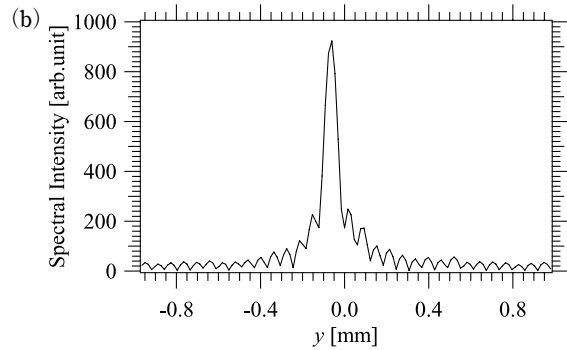
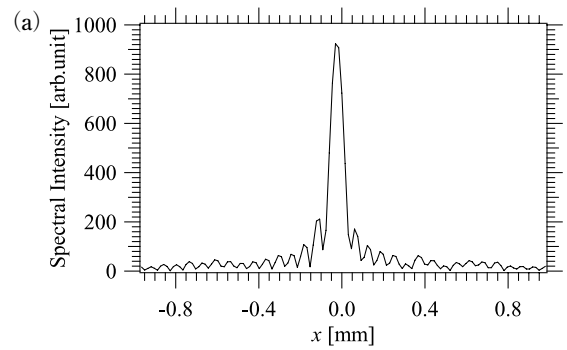


図10 (a)x方向, (b)y方向, (c)z方向に関する点像の強度分布。

示す。これらのホログラムから再生した三次元像を図9および図10に示す。図9は、奥行き 93 mm にある点光源のインフォーカス像であり、ホログラムの開口で決まる回折限界の点像が得られている。図10は、 x 、 y 、 z 方向に関する点像の強度分布である。強度分布の広がり方は奥行き方向が横方向に比べて大きい。これはホログラムの開口の大きさが再生距離に比べて小さいためである。

図7と図10を合わせた強度分布の組は、物体の分光立体画像が再生される四次元の (x, y, z, λ) 空間上で定義された本手法の四次元インパルス応答に対応している。これらは今回の実験条件を考慮した理論予想とよく一致することが確認された。

このように、純粋な干渉計測と計算機による信号処理だけで、単色点光源の三次元位置とスペクトルが再生可能で

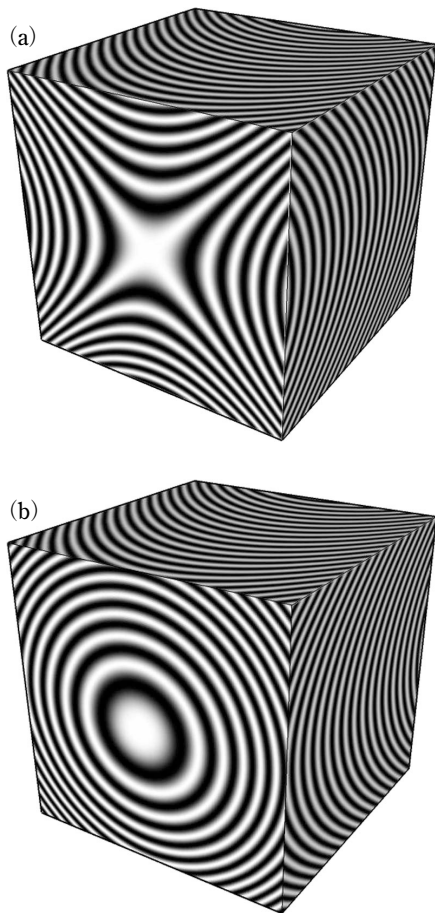


図11 (a) 干渉計の近くにある単色点光源に対して得られる典型的な体積インターフェログラム, (b) 規則(1)(2)を適用して得られる体積インターフェログラム.

あることが実際に確認された。さらに、その後に行った波長と位置の異なる互いにインコヒーレントな2つの単色点光源の測定では、2つの点光源に関し三次元位置とスペクトルを分離して独立に再生することに成功した^{9,10}。これらの実験結果と、一般にインコヒーレント物体は光強度に関する線形性を有するという事実から、本手法が通常の多色物体に対し原理的に適用可能であることが結論される。さらに、この結論の裏付けとして、連続スペクトルを有する物体や空間的広がりを持つ多色物体への本手法の適用にも成功している^{11,12}。

4. 双曲面型体積インターフェログラムの方法

二光波折り畳み干渉計の観測量である五次元インターフェログラムから三次元の体積インターフェログラムを生成する合成開口処理の規則は、第1章で述べた選択律(1)と再配列条件(2)であるが、これらの規則を変更すると、異なる性質をもつ体積インターフェログラムが得られる。それらのうちのいくつかは、分光立体画像再生におい

て有用であることがわかってきた。

いま、選択律と再配列条件がそれぞれ次のように与えられる場合を考えよう。

$$(x, y) = (0, 0) \quad (5)$$

$$(X, Y, Z) = (2\hat{x}, 2\hat{y}, Z) \quad (6)$$

このとき、干渉計の近くにある単色点光源に対して得られる典型的な体積インターフェログラムは、図11(a)のようになる。一方、第1章の規則(1),(2)を適用して得られる体積インターフェログラムは、図11(b)のようになる。これらを比較すると次のことがわかる。まず、規則(1),(2)は単色点光源に対し球面型の干渉縞を三次元的に記録した体積インターフェログラムを生成する。したがって、一般のインコヒーレント多色物体の場合は、物体から観測面に伝搬した光の波面形状が直接反映された干渉縞(インライン体積ホログラム)の、物体のスペクトル強度に関する総和を記録した体積インターフェログラムを生成する。ところが、規則(5),(6)によって得られる体積インターフェログラムに記録された干渉縞は、観測面における伝搬光の波面形状を直接反映したものではない。単色点光源に対する干渉縞は、双曲面群をなしていることがわかる。そこで、これを双曲面型体積インターフェログラムとよび、それに対し図11(a)のものを球面型体積インターフェログラムとよんで区別している。このような違いがあるが、記録された物体情報に注目すると、物体と観測面がともに近軸領域にある場合には両者は同等であり、双曲面型体積インターフェログラムから分光立体画像の再生が可能である。このことは、球面型干渉縞の位相の回転が X と Y の変化に関し同方向であるのに対し、双曲面型の位相回転は X と Y の変化に関し逆方向となることが両者の違いであることから了解できる。

特に、選択律(5)は光軸上の光強度のみを測定すればよいことを意味するから、干渉計の構成を最適化することによって双曲面型体積インターフェログラムを直接測定することも可能となる¹³。こういうわけで、双曲面型体積インターフェログラムの方法は第2章と第3章で述べた方法とは異なる利点と発展性を有すると考えられる。

コヒーレンス計測に基づく三次元分光計測という観点から、デジタル分光ホログラフィーの原理と初期実験結果、およびこの研究過程で考案された双曲面型体積インターフェログラムを利用する方法を紹介した。これまでの研究でわかったことは、自然光照明下にある多色物体から伝搬した光波の干渉計測と信号処理のみによって物体の三次元形状と物体上の各点における連続スペクトルを同時に取得することは可能だということである。また、双曲面型

体積インターフェログラムからデジタル分光ホログラフィーと同じ分光立体画像が再生できることも確認されている。

今後の研究課題として、まず本手法の基本観測量である五次元空間で定義される空間コヒーレンス関数の性質の解明が挙げられる。定常光の計測の応用を考えた場合、通常は六次元ではなく五次元の空間コヒーレンスが一般的と考えられるからである。次に、合成開口処理の計算規則である選択律の研究も重要である。この規則を変更すると、五次元空間コヒーレンスからさまざまな三次元空間コヒーレンスが得られるが、本稿では双曲面型の体積インターフェログラムを生成するものを紹介した。しかし、それ以外に結像特性の異なる体積インターフェログラムを生成する選択律も発見されており、コヒーレンス関数を五次元空間から三次元空間へ射影する方法と応用に関する体系的研究が望まれる。

実験的課題は、連続スペクトルを有する物体および空間的広がりを持つ物体へ本手法を適用し、高品質な分光立体画像を取得することである。

文 献

- 1) 吉森 久, 伊東一良: “3次元多色物体の干渉イメージング”, *Optics Japan '99* 講演予稿集 (1999) p. 201.
- 2) 吉森 久, 横山隆三: “3次元多色物体の干渉イメージング (II)”, *Optics Japan 2000* 講演予稿集 (2000) p. 145.
- 3) K. Yoshimori: “Interferometric spectral imaging for three-dimensional objects illuminated by a natural light source,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **18** (2001) 765–770.
- 4) K. Yoshimori: “Passive digital multispectral holography based on synthesis of coherence function,” *Proc. SPIE*, **6252** (2006) 625221.
- 5) K. Yoshimori and M. Sasamoto: “First experimental report for fully interferometric three-dimensional imaging spectroscopy,” *Proceedings of International Topical Meeting on Information Photonics 2008* 講演予稿集 (2008) p. 28
- 6) M. Sasamoto and K. Yoshimori: “First experimental report on fully passive interferometric three-dimensional imaging spectrometry,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48** (2009) 09LB03.
- 7) 吉森 久: “デジタル分光ホログラフィー”, *Optics & Photonics Japan (OPJ) 2009* (2009) p. 234.
- 8) 小原正樹, 吉森 久: “双曲面体積インターフェログラムを利用したホログラフィック分光立体映像法”, *Optics & Photonics Japan (OPJ) 2009* (2009) p. 392.
- 9) K. Yoshimori and M. Sasamoto: “Experimental report on fully interferometric three-dimensional imaging spectrometry,” *Proceedings of Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2009*, DWB34 (2009).
- 10) K. Yoshimori: “Multispectral wavefronts retrieval in digital holographic three-dimensional imaging spectrometry,” *Proceedings of Advanced Phase Measurement Method in Optics and Imaging 2010* (2010) pp. 167–170.
- 11) 笹本益民, 吉森 久: “全干渉型3次元分光イメージングの空間的広がりを有する多色光源への適用”, *Optics & Photonics Japan (OPJ) 2009* (2009) p. 394.
- 12) S. Teeranutrano and K. Yoshimori: “Application of digital holographic three-dimensional imaging spectrometry to a spatially incoherent, polychromatic object,” *Proceedings of Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2011*, DWB36 (2011).
- 13) T. Hashimoto and K. Yoshimori: “Fully interferometric three-dimensional imaging spectrometry using hyperbolic-type volume interferogram,” *Proceedings of Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2011*, DWB38 (2011).

(2011年6月20日受理)