

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560039

研究課題名(和文) 波面符号化並列位相シフト法による瞬時複素振幅情報取得に関する研究

研究課題名(英文) Single-exposure phase-shifting digital holography using a random-complex-amplitude encoded reference wave

研究代表者

野村 孝徳 (Nomura, Takanori)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：80222206

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：デジタルホログラフィは光波の複素振幅分布をデジタルデータとして取得でき、コンピュータによる数値伝搬で任意の距離において光波を再生できる技術である。しかし、一般的にホログラムには不要な成分が含まれているため、それを取り除く位相シフト法が不可欠である。本研究では汎用的な光学素子を用いて1枚のホログラムから物体光の複素振幅分布を算出できる単一露光一般化波面分割位相シフト手法を提案している。物体光の複素振幅分布の算出原理、参照光の満たすべき複素振幅条件を示した後、コンピュータシミュレーション、光学実験により提案手法の有用性を実証した。

研究成果の概要(英文)：The improved single-exposure phase-shifting digital holography using a random-phase reference wave is proposed. The algorithm for obtaining a complex amplitude of an object wave is improved. In the proposed algorithm, the reference wave is treated as not a random-phase but a random-complex-amplitude. Therefore, the algorithm uses proper amplitude information of the reference wave. Furthermore, the appropriate reference wave in single-exposure phase-shifting digital holography using a random-complex-amplitude encoded reference wave is experimentally investigated. Although the reference wave is generalized, the quality of reconstructed images depends on it. When the reference wave satisfies a certain condition, reconstructed images cannot be obtained in this method. After the certain condition is presented, the appropriate condition is studied using a speckle property. Experimental results are given to confirm the proposed method.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：デジタルオプティクス 情報フォトンクス 位相シフト法 干渉計測 デジタルホログラフィ

1. 研究開始当初の背景

デジタルホログラフィや干渉計測の分野において位相シフト法は必要不可欠な技術であり、幅広く用いられている。特に4ステップ法と呼ばれる参照光の位相を $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の4種類を用いて所望の情報のみを取得する方法が特に用いられている。位相シフト法には、位相シフトされた干渉画像を時々刻々と記録する時分割位相シフト法、画素毎に位相シフト量が異なる干渉画像を記録する波面分割位相シフト法、光路を振幅分割して記録する振幅分割位相シフト法がある。時分割位相シフト法は空間分解能は高いが、4種類の位相シフト量の異なる干渉画像の撮影時刻が異なるため動的現象の記録には適さない。振幅分割位相シフト法は、空間分解能も高く、4種類の干渉画像を同時に取得することができるが、撮像素子が4つ必要であるなど装置が大掛かりなものとなり実用的でない。

それに対し、空間分解能は他の手法に劣るものの動的現象への適用が可能な波面分割位相シフト法が最近では注目を浴び、数多く研究がなされている。これを実現するさまざまな方法が提案され、実験的に実証されているものもある。しかしながら、これらの手法のほとんどが画素毎に参照光の位相が $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ となるように、位相子や、偏光干渉を利用する場合には偏光子などが配置された特殊な素子を用いることを前提としている。このことは非常に高精度な製造技術、位置合わせ技術等が要求されることになり、実用的ではない。

2. 研究の目的

本研究では参照光の位相分布を $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ に限定することなく、ランダムな位相分布を用いて位相シフト法が実現できることを提案し、デジタルホログラフィを用いた実験により実証している。本手法の特徴は特殊な撮像素子を必要とせず、汎用な撮像素子を使用できる点にある。本研究では、これまでに提案している物体光複素振幅分布算出アルゴリズムの改良および、提案手法に適した参照光の性質を明らかにした上で再生像画質の向上を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

ホログラムの強度分布と参照光の複素振幅分布を用いた演算による物体光の複素振幅分布の算出原理に

基づき、光学実験による再生像の評価をおこなう。

4. 研究成果

(1) 物体光の複素振幅分布の算出原理

本手法では、ホログラムの強度分布と参照光の複素振幅分布を用いた演算により物体光の複素振幅分布を算出する。そのために、参照光の複素振幅分布は事前に既存の手法で取得する。

図1に示すような隣接する4画素間で演算をおこなう。本手法では4画素間において物体光の振幅値と位相値は一樣と仮定し、それぞれ a_o と ϕ_o とする。一方、参照光の各画素における振幅値は $a_{r1}, a_{r2}, a_{r3}, a_{r4}$ とし、位相値は $\phi_{r1}, \phi_{r2}, \phi_{r3}, \phi_{r4}$ とする。この場合の各画素におけるホログラムの強度値 I_1, I_2, I_3, I_4 は

$$I_1 = a_o^2 + a_{r1}^2 + 2a_o a_{r1} \cos(\phi_o - \phi_{r1}), \quad (1)$$

$$I_2 = a_o^2 + a_{r2}^2 + 2a_o a_{r2} \cos(\phi_o - \phi_{r2}), \quad (2)$$

$$I_3 = a_o^2 + a_{r3}^2 + 2a_o a_{r3} \cos(\phi_o - \phi_{r3}), \quad (3)$$

$$I_4 = a_o^2 + a_{r4}^2 + 2a_o a_{r4} \cos(\phi_o - \phi_{r4}) \quad (4)$$

となる。ここで、 a_o と ϕ_o を求めるために変数を定義する。ホログラムの強度値と参照光の振幅値・位相値を用いて

$$I_u = I_1 - I_2 - (a_{r1}^2 - a_{r2}^2), \quad (5)$$

$$I_l = I_3 - I_4 - (a_{r3}^2 - a_{r4}^2), \quad (6)$$

$$A = a_{r1} \cos \phi_{r1} - a_{r2} \cos \phi_{r2}, \quad (7)$$

$$B = a_{r1} \sin \phi_{r1} - a_{r2} \sin \phi_{r2}, \quad (8)$$

$$C = a_{r3} \cos \phi_{r3} - a_{r4} \cos \phi_{r4}, \quad (9)$$

$$D = a_{r3} \sin \phi_{r3} - a_{r4} \sin \phi_{r4} \quad (10)$$

とする。(1)式~(10)式から a_o と ϕ_o は

$$a_o = \frac{\sqrt{(I_u D - I_l B)^2 + (I_l A - I_u C)^2}}{2(AD - BC)}, \quad (11)$$

$$\phi_o = \tan^{-1} \frac{I_l A - I_u C}{I_u D - I_l B} \quad (12)$$

と求めることができる。ここで、算出した a_o と ϕ_o を図1のように4画素間の交点の値とする。すなわち、画素の交点の振幅値と位相値を算出する。この4画素間における演算をホログラムの全面に適用することにより物体光の振幅分布 $a_o(x, y)$ と位相分布 $\phi_o(x, y)$ を算出する。これらを用いて物体光の複素振幅分布 $A_o(x, y)$ は

$$A_o(x, y) = a_o(x, y) \exp\{i\phi_o(x, y)\} \quad (13)$$

となる。 $A_o(x, y)$ をコンピュータで伝搬させることにより再生像を取得できる。

なお、(5)式～(10)式が示すように定義した変数は横方向の隣接画素間の演算によるものである。これを縦方向、斜め方向とした場合でも a_o と ϕ_o を求めることができる。先に述べた物体光の複素振幅分布の算出原理において定義した変数 I_u, I_l, A, B, C, D は横方向の隣接する画素間の演算であった。これを縦方向、斜め方向とした変数を用いた場合も a_o と ϕ_o を求めることができる。縦方向の場合は、図1より

$$I_h = I_1 - I_3 - (a_{r1}^2 - a_{r3}^2), \quad (14)$$

$$I_m = I_2 - I_4 - (a_{r2}^2 - a_{r4}^2), \quad (15)$$

$$F = a_{r1} \cos \phi_{r1} - a_{r3} \cos \phi_{r3}, \quad (16)$$

$$G = a_{r1} \sin \phi_{r1} - a_{r3} \sin \phi_{r3}, \quad (17)$$

$$H = a_{r2} \cos \phi_{r2} - a_{r4} \cos \phi_{r4}, \quad (18)$$

$$J = a_{r2} \sin \phi_{r2} - a_{r4} \sin \phi_{r4} \quad (19)$$

としたとき、 a_o と ϕ_o は

$$a_o = \frac{\sqrt{(I_h J - I_m G)^2 + (I_m F - I_h H)^2}}{2(FJ - GH)}, \quad (20)$$

$$\phi_o = \tan^{-1} \frac{I_m F - I_h H}{I_h J - I_m G} \quad (21)$$

と求めることができる。同様に、斜め方向の場合は

$$I_n = I_1 - I_4 - (a_{r1}^2 - a_{r4}^2), \quad (22)$$

$$I_p = I_2 - I_3 - (a_{r2}^2 - a_{r3}^2), \quad (23)$$

$$K = a_{r1} \cos \phi_{r1} - a_{r4} \cos \phi_{r4}, \quad (24)$$

$$L = a_{r1} \sin \phi_{r1} - a_{r4} \sin \phi_{r4}, \quad (25)$$

$$O = a_{r2} \cos \phi_{r2} - a_{r3} \cos \phi_{r3}, \quad (26)$$

$$P = a_{r2} \sin \phi_{r2} - a_{r3} \sin \phi_{r3} \quad (27)$$

としたとき、 a_o と ϕ_o は

$$a_o = \frac{\sqrt{(I_n P - I_p L)^2 + (I_p K - I_n O)^2}}{2(KP - LO)}, \quad (28)$$

$$\phi_o = \tan^{-1} \frac{I_p K - I_n O}{I_n P - I_p L} \quad (29)$$

と求めることができる。

本研究では横方向の隣接画素間の演算により物体光の複素振幅分布を算出した。これに加えて、(14)式～(29)式による縦方向と斜め方向の演算を使い分けることにより突出する振幅値を減少できると考えられる。また、横方向において有意の位相シフト量が発生しない場合も、これらの演算を使い分けることにより縦方向または斜め方向の位相シフト量を用いることが可能である。これらのことから、隣接画

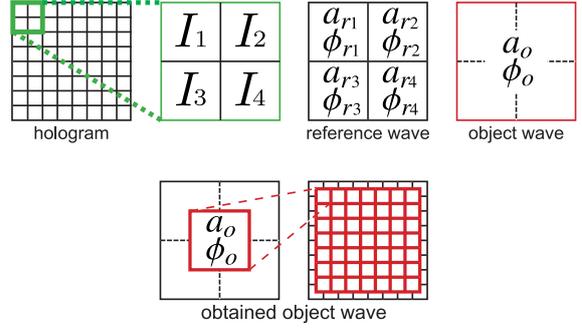


図1 物体光の複素振幅分布の算出原理の概念図。

素間の演算方向を変更することにより再生像の画質を向上できると考えられる

(2) 参照光の条件

本手法では、演算に用いる参照光の振幅値と位相値は定数である必要はない。しかし、

$$AD - BC = 0 \quad (30)$$

を満たしてはならない。(30)式は本手法において物体光の複素振幅の算出が不可能になる悪条件である。なぜなら、(30)式を満たした場合、(11)式より a_o が無限大になるためである。また、無限大でなくても、 a_o が突出する可能性がある。これは同様に a_o の分母が0に近い値になるためである。しかし、(30)式を満たすような参照光の振幅値と位相値の条件は解析的に導出できない。変数が4画素の振幅値と位相値、すなわち8つであるためである。

そこで一例として、4画素における参照光の振幅値が一様な場合を述べる。その振幅値を a_r とすると(30)式は

$$AD - BC = -4a_r^2 \sin\left(\frac{\phi_{r1} - \phi_{r2}}{2}\right) \sin\left(\frac{\phi_{r3} - \phi_{r4}}{2}\right) \times \sin\left(\frac{\phi_{r1} + \phi_{r2}}{2} - \frac{\phi_{r3} + \phi_{r4}}{2}\right) \quad (31)$$

と変形できる。したがって、整数を m とすると(31)式を満たす位相値は

$$\phi_{r1} - \phi_{r2} = 2m\pi, \quad (32)$$

$$\phi_{r3} - \phi_{r4} = 2m\pi, \quad (33)$$

$$(\phi_{r1} + \phi_{r2}) - (\phi_{r3} + \phi_{r4}) = 2m\pi \quad (34)$$

となる。以上より、本手法では平面波は参照光として使用できない。振幅分布が一様であり、入射角によっては位相分布が(32)式～(34)式を全面にわたって満たす恐れがあるためである。同様に振幅分布が

0	$\pi/2$	0	$\pi/2$
π	$3\pi/2$	π	$3\pi/2$
0	$\pi/2$	0	$\pi/2$
π	$3\pi/2$	π	$3\pi/2$

図2 他手法で用いる参照光の位相分布.

一様であり、位相分布が図2のような光波（横方向の隣接画素間の演算の場合）も使用できない。これは他手法で参照光として用いる光波である。また、球面波も適さない。位相の変化が連続的であり、その変化量が少ないためである。一方、ランダム位相光は、これらの光波とは違い、(32)式～(34)式を満たす画素は一部と考えられる。そのため、発生した一部の突出値を次に述べる信号処理により除去することにより再生像を取得できる。

(3) 光学実験による適した参照光の検討

単一露光一般化位相シフトデジタルホログラフィに適した参照光を実験により検討する。はじめにスペックルの性質と位相シフト量の関係から参照光として適した光波について考察する。その後、実験方法を述べ、取得した再生像と使用した参照光の関係から適切な参照光の条件を示す。

ランダム位相光はレーザー光を拡散板に透過させることにより作製する。すなわち、透過した光波は撮像素子面においてスペックルパターンを形成する。スペックルパターンにおいて、個々のスペックルの位相は等しいと考えられる。したがって、スペックルの平均直径を画素サイズに一致させた光波が参照光として適していると考えられる。隣接する画素間で位相が異なり、有意な位相シフト量が発生するためである。一方、個々のスペックルが複数画素にまたがる光波は参照光に適さないと考えられる。隣接する画素間で位相が等しく、有意な位相シフト量が得られないためである。また、個々のスペックルが画素サイズよりも小さい光波も参照光に適さないと考えられる。画素で位相が積分されるため、隣接する画素間で位相が等しくなる恐れがあるからである。このような場合、再生像の画質の悪化や、0次回折像・共役像の除去の失敗などを引き起こすと考えられる。

スペックルの大きさはレンズを用いて調節できる。

拡散板からの光波をレンズにより撮像素子に結像させると、撮像素子においてスペックルパターンが形成される。このとき、スペックルの平均直径はレンズの直径に依存する。レンズの直径を大きくすることによりスペックルの平均直径を小さくすることができる。

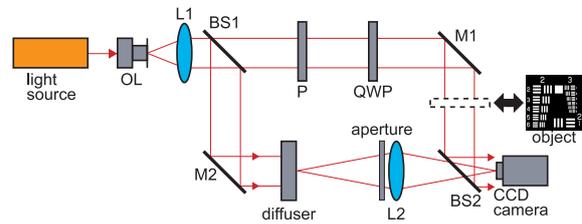


図3 実験光学系

実験光学系を図3に示す。図3において下側の光路では参照光を作製する。拡散板からの光波をレンズ(L2)によって撮像素子に結像させ、ランダム位相光とする。この際、L2の直前に配置した開口の大きさを変えることにより参照光のスペックルの大きさを調節する。一方、上側の光路は2つの役割がある。1つは平行光の作製であり、もう1つは物体光の作製である。撮影物体を配置していない状態では平行光を作製し、配置した状態では物体光を作製する。

はじめに平行光と参照光のホログラムを記録した。偏光子(P)と1/4波長板(QWP)を用いて位相シフトを実現した複数のホログラムを記録する。これに従来の位相シフト法を適用することにより参照光の複素振幅分布を算出した。次に撮影物体を上側の光路に配置し、物体光と参照光のホログラムを記録した。このホログラムに本手法を適用することにより物体光の複素振幅分布を算出した。算出した複素振幅分布を計算機で伝搬させることにより再生画像を得た。

光源には波長632.8 nmのHe-Neレーザーを用いた。画像の記録には画素数1024×768、画素サイズ4.65 μm×4.65 μmのCCDカメラを用いた。L2は拡散板が撮像素子に倍率1倍で結像するように配置し、結像距離は300 mmとした。拡散板は粒子の平均直径が8 μmのフロスト型拡散板を用いた。撮影物体には図4に示す解像度チャートを用い、撮像素子から205 mm離れた位置に配置した。

実験で使用した図4に示す撮影物体はガラス上に不透明膜を蒸着したものである。つまり、図4における黒の部分は振幅透過率が0である。取得した再生像において、その部分の画素値を画質悪化として

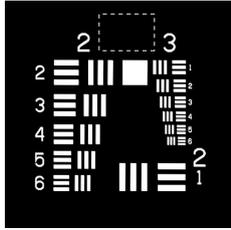


図4 実験で用いた撮影物体

評価する。取得した再生像における図4の上部中央黒領域の画素値の平均を N とし、再生画像全体の画素値の平均を M とする。これらを用いて、評価値 E を

$$E = \frac{N}{M} \quad (35)$$

と定義する。 E が 0 の場合、不透明膜部分の画素値が 0 であり、再生像の画質が良いことを示す。取得した各再生像で E を求め、使用した参照光との関係から本手法の参照光に適した光波を考察する。

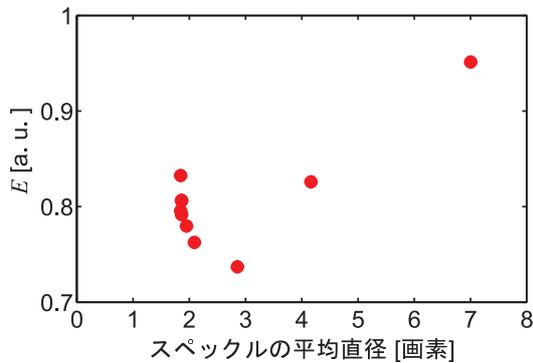


図5 参照光のスペックルの平均直径に対する評価値 E 。

評価値 E と使用した参照光のスペックルの平均直径の関係を図5に示す。図5からスペックルを小さくすることにより再生像の画質が向上していることがわかる。ただし、 E の最小値はスペックルの平均直径が 2.86 画素のときである。スペックルの平均直径が 2.09 画素以下では E が増加しており、再生像の画質が悪化していることを示している。このことを確認するために、得られた再生画像のうち、参照光のスペックルの平均直径が 7.00 画素、4.16 画素、2.86 画素、2.09 画素、1.95 画素、1.86 画素の場合を図6に示す。図5の結果と定性的に一致していることがわかる。

図5と図6から、スペックルを小さくしていくと、

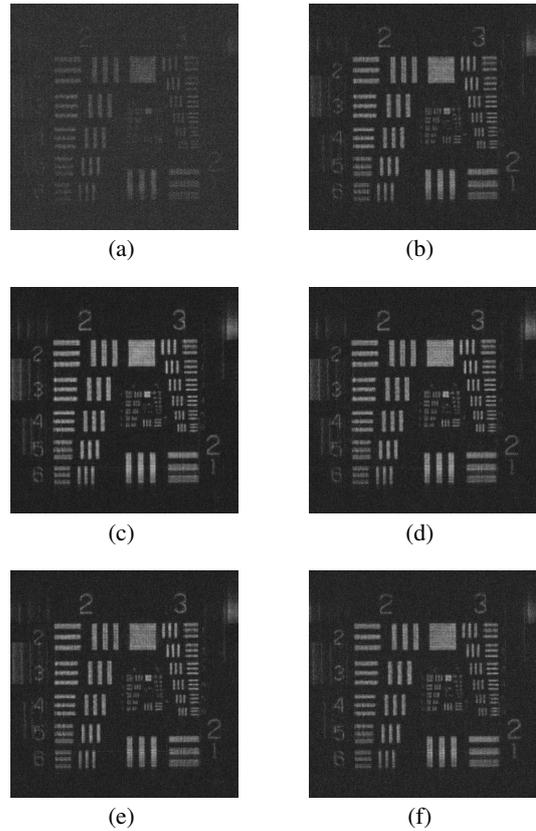


図6 再生画像: 用いた参照光のスペックルの平均直径は (a) 7.00 画素, (b) 4.16 画素, (c) 2.86 画素, (d) 2.09 画素, (e) 1.95 画素, (f) 1.86 画素である。

その平均直径が 2.86 画素のときが最も再生像の画質が良くなり、それ以降は悪化に転じるという結果が得られた。これはスペックルの大きさと位相シフト量の関係を考えると矛盾した結果である。しかし、求めたスペックルの大きさは平均直径である。すなわち、全ての画素において、この大きさが該当するわけではない。そのため、このような結果が得られたと考えられる。したがって、以上の実験結果から、スペックルの平均直径が 2.09 画素 ~ 2.86 画素の光波が参照光として適していると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)
[学術論文] (計 8 件)

1. Masatoshi Imbe and Takanori Nomura, "Selective calculation for the improvement of reconstructed images in single-exposure generalized phase-shifting digital holography," Opt. Eng.

- 53, 044102 (7 pages) (2014). 査読有 DOI: 10.1117/1.OE.53.4.044102
2. Masatoshi Imbe and Takanori Nomura, “Study of reference waves in single-exposure generalized phase-shifting digital holography,” *Appl. Opt.* **52**, 4097–4102 (2013). 査読有 DOI:10.1364/AO.52.004097
 3. Masatoshi Imbe and Takanori Nomura, “Single-exposure phase-shifting digital holography using a random-complex-amplitude encoded reference wave,” *Appl. Opt.* **52**, A161–A166 (2013). 査読有 DOI: 10.1364/AO.52.00A161

[学会発表] (計 18 件)

1. 井邊 真俊, 野村 孝徳, “単一露光一般化位相シフトデジタルホログラフィとその応用,” 第 4 回 HODIC 研究会 (日本光学会 (応用物理学会)), 2012 年 11 月 30 日, 和歌山.
2. Masatoshi Imbe and Takanori Nomura, “Dynamic recording and reconstruction in single-exposure generalized phase-shifting digital holography,” *The Second Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics*, 2012 年 11 月 20 日, 徳島.
3. Masatoshi Imbe and Takanori Nomura, “Selecting direction of calculation in single-exposure phase-shifting digital holography using a random-phase encoded reference wave,” *International Workshop on Holography and related technologies*, 2012 年 11 月 12, 13 日, Jung-Li (Taiwan).
4. 井邊 真俊, 野村 孝徳, “演算方向選択による単一露光位相シフトデジタルホログラフィの画質向上,” 日本光学会年次学術講演会, 2012 年 10 月 23 日, 東京.
5. Takanori Nomura and Masatoshi Imbe, “Single-exposure generalized phase-shifting digital holography,” (invited) *Proceedings of the International Seminar Optics and Photonics*, 2012 年 9 月 20 日, Issyk-Kul (Kyrgyzstan).
6. 井邊 真俊, 野村 孝徳, “単一露光一般化位相シフトデジタルホログラフィに適した参照光の複素振幅分布の定量的な検討,” 第 73 回応用物理学会学術講演会, 2012 年 9 月 12 日, 松山.
7. 井邊 真俊, 野村 孝徳, “単一露光一般化位相シフトデジタルホログラフィに適した参照光の複素振幅分布の検討,” 日本光学会年次学術講演会 OPJ2011, 2011 年 11 月 30 日, 大阪.
8. Takanori Nomura, “Single shot phase-shifting digital holography using a conventional camera,” (invited) *An ICO International Conference*, 2011 年 5 月 19 日, Ottawa (Canada).
9. Masatoshi Imbe and Takanori Nomura, “Single-exposure phase-shifting digital holography using random phase reference wave,” in *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, *Optical Society of America*, 2011 年 5 月 10 日, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野村 孝徳 (NOMURA, Takanori)
和歌山大学・システム工学部・教授
研究者番号：80222206

(2) 研究分担者

沼田 卓久 (NUMATA, Takuhisa)
和歌山大学・システム工学部・教授
研究者番号：80135673

似内 映之 (NITANAI, Eiji)
和歌山大学・産学連携・研究支援センター・准教授
研究者番号：00304189