

氏名（本籍）	井邊 真俊（和歌山県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第71号
学位授与日付	平成27年3月25日
専攻	システム工学専攻
学位論文題目	汎用光学素子を用いた単一ホログラムからの物体光の複素振幅分布算出法の研究
学位論文審査委員	(主査) 教授 野村 孝徳 (副査) 教授 土谷 茂樹 教授 松本 正行

論文内容の要旨

1 はじめに

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、計算機上で任意の伝搬距離において光波を再生することができる。この特徴を活かし、生体計測¹⁾、形状計測²⁾、三次元ディスプレイ³⁾、光ストレージ⁴⁾など多様な分野に応用されている。デジタルホログラフィでは、光学処理によりホログラムを記録し、計算処理により光波を再生する。しかし、ホログラムには所望の情報である物体光の複素振幅分布の他に不要光波成分が含まれている。そのため、記録と再生の間に「ホログラムから物体光の複素振幅分布の算出」というもう一段階の処理が必要である。しかし、従来の算出手法では、再生像の画質の低下⁵⁾、複数のホログラムの記録が必要なため運動物体への適用が困難⁶⁾、特殊な光学素子が必要⁷⁾という問題があった。そこで、汎用の光学素子を用いて単一のホログラムから物体光の複素振幅分布を算出することを目的とした。そのために、単一露光一般化位相シフト法とフレネル領域フィルタリング法を提案した。

2 単一露光一般化位相シフト法 [発表実績 1-3]

単一露光一般化位相シフト法では、記録した単一のホログラムの強度分布と使用した参照光の複素振幅分布を用いた解析により物体光の複素振幅分布のみを算出する [発表実績 1]。従来の算出手法では、参照光の位相を特定の分布に変調する必要があり、そのために検光子アレイ⁷⁾などの専用の特殊な光学素子を用いる必要があった。これに対して、単一露光一般化位相シフト法では、その算出原理において参照光の複素振幅を一般化した。これにより、特定の分布に変調する必要がなく、汎用の光学素子を用いて実現可能である。ただし、隣接画素間において値が異なる必要がある。そこで、ランダム複素振幅光を参照光に用いている。この光波は撮像素子面の各画素において異なる値をもち、かつ、拡散板により容易に作製可能であるので、参照光として有用である。計算機シミュレーションおよび光学実験によりこの手法による単一ホログラムからの物体光の複素振幅分布算出を実証した。

算出原理の提案後、取得する再生像の画質向上のための研究をおこなった。1つめは、単一露光一般

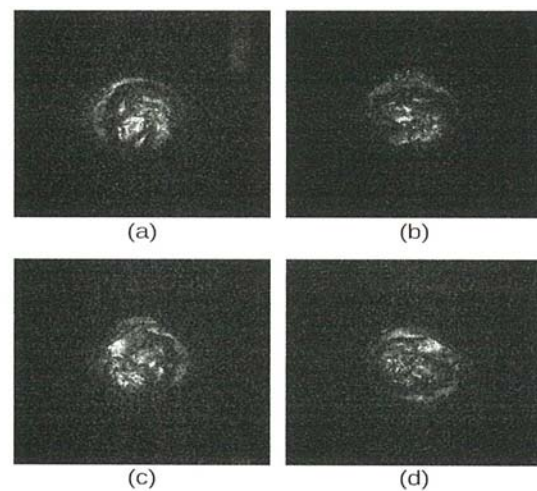


図1 演算選択法により取得した運動物体の再生像: 異なるフレームのホログラムから取得し、それぞれのフレーム番号は (a) 163, (b) 356, (c) 603, (d) 790 である。

化位相シフト法に適した参照光の検討 [発表実績 2] である。参照光の複素振幅は隣接画素間において異なる必要があり、もし有意な差が得られなければ再生像の画質が劣化する恐れがある。一方、参照光の作製は拡散板によりおこなうので、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は個々のスペックルは等位相という性質をもつ。したがって、単一露光一般化位相シフト法では、参照光のスペックルの大きさを調節することにより再生像の画質を向上可能と考えられる。光学実験をおこない、取得した再生像の画質と使用した参照光の関係を調査した。定量的な評価と定性的な評価の両方から、参照光のスペックルの大きさを調節することにより再生像の画質を向上可能なことを実証した。

2つめの再生像の画質向上のための研究は演算選択法 [発表実績 3] である。上述の物体光の複素振幅分布の算出では、1種類の演算式のみを用いて算出していた。これに対して、3種類の演算式の中から最適な演算式をホログラムの各画素において使い分け、物体光の複素振幅分布を算出する手法が演算選択法である。演算式の選択のためにパラメータを定義し、これを用いることにより演算式の選択を可能

にした。2種類の光学実験を実施し、両方において1種類の演算式を用いた場合に比べ、高画質な再生像の取得に成功した。また、2種類のうちの1つでは上述の参照光のスペックルの大きさとの関係も調査した。この実験結果から、スペックルの大きさを調節した参照光を用いてホログラムを記録し、演算選択法を適用することにより、现阶段で最も高画質な再生像を取得可能と考えられる。2つめの光学実験では運動物体を用い、単一露光一般化位相シフト法の動的現象への適用も実証した。運動物体のホログラムを連続撮影し、演算選択法により各再生像を取得した。図1に取得した再生像の一部を示す。運動物体は10セント硬貨を回転ステージに取り付けたものであり、記録時刻の異なるホログラムから各再生像の取得に成功した。演算選択法では別のホログラムを新たに記録する必要がないので、単一露光一般化位相シフト法の特徴を損なうことなく、再生像の画質向上が可能である。

3 フレネル領域フィルタリング法 [発表実績 4]

フレネル領域フィルタリング法では、単一露光一般化位相シフト法とは異なり、参照光には平面波を用いる。これらの干渉によるホログラムを撮影物体の配置位置まで伝搬させると、所望の情報である物体光は合焦し、不要光波成分は拡散する。これに対して、伝搬の方向を逆にすると、先程とは反対に、物体光は拡散し、不要光波成分は合焦する。この性質を利用してホログラムから物体光の複素振幅分布を算出する。逆方向に伝搬させ、合焦した不要光波成分をマスク処理により除去する。その後、元の方向に伝搬させ、再生像のみを取得する。ただし、光学実験による検証の結果、撮影物体に対する依存性が見られた。図2はその実験結果の一部である。(a)では再生像のみの取得に成功したが、(b)では再生像の中央部が欠落した。これは、(b)で用いた撮影物体は中央部が粗面ではなく鏡面に近かったためと考えられる。フレネル領域フィルタリング法では光波の合焦と拡散の性質を利用するので、撮影物体は全面において粗面である必要があると考えられる。

4 まとめ

汎用光学素子を用いて単一のホログラムから物体光の複素振幅分布を算出するために、単一露光一般化位相シフト法とフレネル領域フィルタリング法を提案した。前者は汎用性に富み、後者は簡便性に富む。単一露光一般化位相シフト法では、粗面物体だ

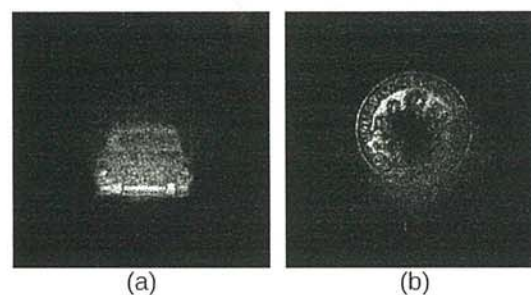


図2 フレネル領域フィルタリング法再生像: (a) および (b) は異なる撮影物体を用いて取得した。

けでなく鏡面物体や透過物体にも適用できる。そのため、計測や三次元ディスプレイの入力データの情報取得などに有用と考えられる。これに対して、フレネル領域フィルタリング法は撮影物体は粗面である必要がある。しかし、単一露光一般化位相シフト法とは異なり、参照光は平面波で実現でき、拡散板の使用すら必要ない。そのため、三次元ディスプレイの入力データの情報取得などに有用と考えられる。また、両手法の共通の長所は、特殊な光学素子を用いずに単一のホログラムから実現可能なことである。この長所からデジタルホログラフィの当該分野への応用が容易であり、これらの発展に貢献できると考えられる。

発表実績 (抜粋)

1. M. Imbe and T. Nomura, "Single-exposure phase-shifting digital holography using a random-complex-amplitude encoded reference wave," *Appl. Opt.* **52**, A161–A166 (2013).
2. M. Imbe and T. Nomura, "Study of reference waves in single-exposure generalized phase-shifting digital holography," *Appl. Opt.* **52**, 4097–4102 (2013).
3. M. Imbe and T. Nomura, "Selective calculation for the improvement of reconstructed images in single-exposure generalized phase-shifting digital holography," *Opt. Eng.* **53**, 044102 (7 pages) (2014).
4. M. Imbe, D. Neylon, T. Pitkääho, T. Nomura, and T. J. Naughton, "Automated reconstruction and noise reduction of three-dimensional objects encoded in digital holograms," in *Photonics Ireland 2013* (2013), IMP6.

参考文献

- 1) P. Marquet et al., *Opt. Lett.* **30**, 468 (2005).
- 2) C. Wagner et al., *Appl. Opt.* **38**, 4812 (1999).
- 3) M. Paturzo et al., *Opt. Express* **18**, 8806 (2010).
- 4) A. Okamoto et al., *Opt. Express* **19**, 13436 (2011).
- 5) M. Takeda et al., *J. Opt. Soc. Am.* **72**, 156 (1982).
- 6) I. Yamaguchi et al., *Opt. Lett.* **22**, 1268 (1997).
- 7) J. C. Wyant, *Appl. Opt.* **52**, 1 (2013).

論文審査の結果の要旨

論文内容を審査し、博士論文として必要な条件を満たしていると認められた。本研究は、物体光のみの算出にあたり、これまで複数必要であったホログラムを1枚のみから算出する方法を二つ提案したものである。類似の従来研究では特別に作られた偏光素子アレイなどの特殊な光学素子を必要としていたが、提案手法はそのような特殊な光学素子を必要とせず、汎用的な光学素子と巧みな信号処理のみで実現可能である。一つ目は当該分野でよく使われている位相シフト法を一般化し、任意の位相シフト量で位相シフトが実現できる手法の提案である。提案手法を用いて信号対雑音比の高い像を得る条件も明らかにしている。二つ目はフレネル領域フィルタリング法の提案であり、当該手法が有効な物体の条件も明らかにしている。いずれの手法もアイデアとともに実験による裏付けも示される。以上のことからこれらの研究の新規性優位性が示され学位論文に値するものと認められた。

最終試験の結果の要旨

公聴会・最終試験を2015年2月10日に実施した。論文の内容および関連する事項に関する試問をおこなった結果、質疑応答が適切であり、最終試験に合格と判断した。

論文審査および最終試験の結果を総合的に検討し、博士学位授与に価すると判断した。