

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390085

研究課題名(和文) 単一露光一般化並列位相シフト法を用いた多次元複素振幅情報取得に関する研究

研究課題名(英文) Multi-dimensional complex-amplitude recording by use of single-exposure generalized phase-shifting method

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：提案手法である単一露光一般化並列位相シフト法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、このことはすでに光学実験により実証している。すなわち、位相シフト量が $\pi/2$ の整数倍に限定されず、偏光情報も使用していないため、提案手法では分光情報や偏光情報を同時に取得できる。本研究では、参照光に要求される条件を空間周波数の観点からより明確にした後、単一露光一般化並列位相シフト法を用いた分光情報を含む複素振幅データの取得および単一露光一般化並列位相シフト法を用いた偏光情報を含む複素振幅データの取得をおこなった。

研究成果の概要(英文)：The generalized phase-shifting method has been proposed. Arbitrary phase-shifting quantities not restricted to a multiple of $\pi/2$ can be used. The method does not use polarimetric information. Therefore not only complex-amplitude but also spectroscopic information or polarimetric information can be obtained by the method. In this research, the constraints on the reference wave is confirmed in terms of its spatial frequency. The optical experiments shows the suitable characteristics of the reference wave by its spatial frequency distribution and the reconstructed images. For the spectroscopic imaging, the experiment using a transparent object consisting of color cellophane papers as an object confirmed the proposed method. For the polarimetric imaging, a method using generalized phase-shifting method was not succeeded. However, the idea of the polarimetric imaging, Mueller matrix imaging for a quarter wave plate was shown by the optical experiment.

研究分野：情報フォトンクス

キーワード：デジタルホログラフィ 定量位相計測 分光計測 偏光計測

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よく用いられている。以下、4ステップ法を用いて従来手法と提案手法の違いを説明する。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、光路を振幅分割して記録する振幅分割位相シフト法、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、4台の撮像素子が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。

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、実用的ではないばかりではなく、以下に述べるような短所をもちあわせている。位相子の場合には位相シフト量が波長に依存し、所望の位相シフト量($\pi/2$ の整数倍)を与えることのできる波長はある単一波長に限定され、分光情報を同時に取得することはできない。偏光子の場合は固有の偏光情報をもった光波を参照光および物体光として使用するために、物体の偏光情報を取得することができない。すなわち、従来手法は分光情報や偏光情報を犠牲にすることによって波面分割位相シフト法を実現している。

これに対し、提案手法である単一露光一般化並列位相シフト法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、光学実験により実証している。すなわち、位相シフト量が $\pi/2$ の整数倍に限定されず、偏光情報も使用していないため、提案手法では分光情報や偏光情報を同時に取得できる可能性

を秘めている。

2. 研究の目的

そこで本研究では、(1)単一露光一般化並列位相シフト法を用いた分光情報を含む複素振幅データの取得および(2)単一露光一般化並列位相シフト法を用いた偏光情報を含む複素振幅データの取得をおこなうことを目的とする。(1)と(2)を実現する前に、提案している単一露光一般化並列位相シフト法を確固たるものとするため、参照光に要求される条件をより明確にする。(1)に関しては、ベイヤー型配列のカラー撮像素子を用いたカラー位相シフトデジタルホログラフィによって実証する。(2)に関しては偏光を用いた波面分割位相シフト法の実績をもとに、試料のジョーンズ行列に留まらずミューラー行列の取得を目指す。

3. 研究の方法

これまでに得られている成果をもとに単一露光一般化並列位相シフト法を確固たるものとするため、空間周波数帯域幅に注目した適切な参照光に要求される条件をより明確にする。その後、(1)単一露光一般化並列位相シフト法を用いた分光情報を含む複素振幅データの取得技術をし、(2)単一露光一般化並列位相シフト法を用いた偏光情報を含む複素振幅データの取得技術の確立を目指す。

4. 研究成果

(1) 空間周波数帯域幅に注目した適切な参照光の検討

空間周波数帯域幅を指標に用いた別の観点から適切な参照光について述べる。はじめに、参照光の空間周波数帯域幅の調節方法と算出方法を述べる。次に、3通りの空間周波数帯域幅を考え、単一露光一般化位相シフト法に適した参照光を考察する。

参照光は図1のように拡散板をレンズを用いて撮像素子面に結像させることにより作製する。これに対して、参照光の空間周波数帯域幅の調節方法を図2に示す。図2では、拡散板の複素振幅分布、レンズの点像分布関数、撮像素子面における複素振幅分布のフーリエ変換の振幅分布を示し、これらの空間周波数領域における関係を表現している。この系では、拡散板からの光波がレンズにより空間周波数フィルタリングされ、撮像素子面に到達する。したがって、拡散板からの光波がレンズに到達した際にレンズの

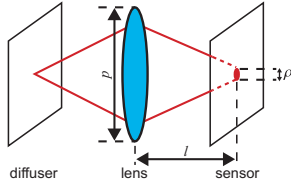


図1 空間帯域幅積の異なる参照光の調節方法.

直径よりも十分に広がる場合、この空間周波数フィルタリングにより参照光の空間周波数帯域幅は決まる。なぜなら、この系の光学的伝達関数は図3のように遮断周波数 μ_c を境にすべてを透過および遮断するからである。

光源の波長、レンズの直径、レンズと撮像素子間の距離をそれぞれ λ, p, l とすると、 μ_c は

$$\mu_c = \frac{p}{2l\lambda} \quad (1)$$

であるので、撮像素子面において形成される参照光の複素振幅分布の空間周波数帯域幅 W_r は、図3のように

$$W_r = 2\mu_c = \frac{p}{l\lambda} \quad (2)$$

である。なお、レンズは円形とした。すなわち、直径 p は x 方向および y 方向で等しいので、撮像素子面における参照光の空間周波数分布も図2のようにレンズと同様に円形になる。以上から、参照光の空間周波数帯域幅の調節は、レンズの直前に開口を配置し、その直径を変化させることにより実現する。

一方、使用した参照光の空間周波数帯域幅は取得した複素振幅分布を計算機によりフーリエ変換し、その振幅分布から空間周波数帯域幅を算出できる。ここで、撮像素子の画素が x 方向および y 方向で等しく、画素サイズが $\Delta xy \times \Delta xy$ であるとする、撮像素子の記録可能な最大空間周波数帯域幅は W_s は、

$$W_s = \frac{1}{\Delta xy} \quad (3)$$

である。ナイキスト定理から、 $W_r > W_s$ の場合、エイリアシングが発生する。

(2) 適切な参照光の考察

上述のような空間周波数帯域幅の調節と算出により、参照光の空間周波数帯域幅は図4のような3通りが考えられる。これらは撮像素子により離散化された参照光の複素振幅分布を計算機によりフーリエ変換したものである。(a), (b), (c) では、それぞれ $W_r < W_s, W_r = W_s, W_r > W_s$ である。(c) では、この

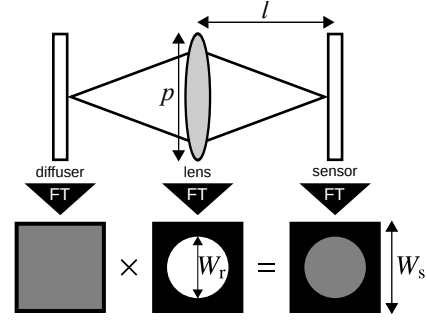


図2 参照光の空間周波数帯域幅の制御.

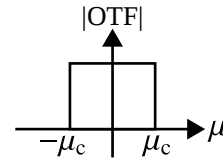


図3 光学的伝達関数における遮断周波数.

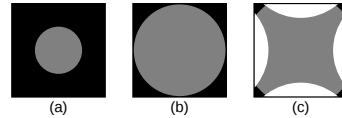


図4 3通りの空間周波数帯域幅.

状態で撮像素子によりサンプリングされ、計算機で離散フーリエ変換されたため、外部部が折られたため、エイリアシングが発生している。これらを (a), (c), (b) の順に考察する。

(a) の場合では、高周波数成分が欠落している、参照光の複素振幅は隣接画素間において等しくなる恐れがある。これまでの成果から、隣接画素間において複素振幅が異なる光波が参照光として適切である。したがって、(a) の場合の空間周波数帯域幅の光波は参照光として不適切と考えられる。(c) の場合では、エイリアシングの発生により、単一面素における複素振幅の積分の影響が (a) および (b) の場合に比べ大きい。なぜなら、(a) および (b) のエイリアシングが発生しない場合に比べ、(c) の場合は単一面素内における複素振幅の空間的な変化が激しいからである。すなわち、単一面素における積分により、物体光の複素振幅分布を算出するために記録されたホログラムに含まれている参照光の複素振幅分布と、その解析に用いる参照光の複素振幅分布は異なる。この不一致により、再生像の画質が悪化すると考えられる。この積分の影響は (a) および (b) の場合にも起こりうるが、(c) の場合の参照光ではエイリアシングが発生

している。すなわち，単一画素内における複素振幅の変化が激しいので，(a) および (b) の場合に比べて積分の影響が強いと考えられる。したがって，(c) の場合の光波も参照光として不適切と考えられる。

以上の考察から，図4で示した3通りのうち，適切な参照光の空間周波数帯域幅は (b) の場合と考えられる。高周波数成分を含むので隣接画素間で値が異なり，かつ，エイリアシングが発生していないので単一画素内における複素振幅の変化が小さいからである。この空間周波数帯域幅の光波は (2) 式および (3) 式より

$$\frac{p}{l\lambda} = \frac{1}{\Delta xy} \quad (4)$$

を満たすようにレンズ直前に配置した開口を調節することにより作製できる。

(3) 光学実験による適した参照光の評価

使用した参照光の複素振幅分布を計算機によりフーリエ変換し，スペクトルを算出した。図5(a)～(f)は，それぞれ図6(a)～(f)で示した再生像を取得するために使用した参照光のスペクトルである。図5(a)および(b)は高周波数成分が欠落，(c)は参照光の空間周波数帯域幅と撮像素子の記録可能な最大空間周波数が一致，(d)～(f)はエイリアシングが発生している場合であることがわかる。図6(c)で示した再生像が最も高画質であり，そのとき使用した参照光のスペクトルは図5(c)である。したがって，上述の考察と合致した結果が得られたといえる。

(4) 単一露光一般化並列位相シフト法を用いた分光情報を含む複素振幅データの取得

透過物体を用いて再生像取得実験おこなった。実験に用いた光学系を図7に示す。光源は波長632.8 nmのHe-Ne レーザ，波長532 nmの緑色半導体レーザ，波長450 nmの青色半導体レーザである。撮像素子には画素数1280×960，画素サイズ4.65 μm×4.65 μmのカラー CCD カメラを用いた。撮影物体には図8に示すようなカラーの透過物体を用いた。この透過物体は，AとDの部分に赤色のカラーセロハン，BとEの部分に緑色のカラーセロハンを付着させている。記録時間は0.005秒である。1/2波長板と1/4波長板は適応波長632.8 nmのものを用い，この2つの波長板の位相遅延量の組み合わせにより4つの位相シフト量を与えた。

He-Ne レーザを用いた場合，参照光の位相シフト量が0, 0.5π, π, 1.5π [rad] となるように各波長

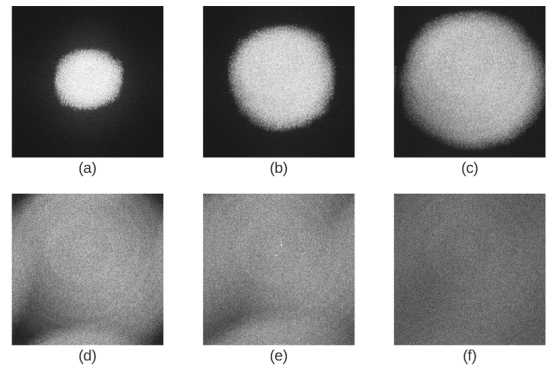


図5 使用した参照光のスペクトル: (a)～(f)はそれぞれ図6(a)～(f)で示した再生像を取得するために使用した参照光のスペクトルである。

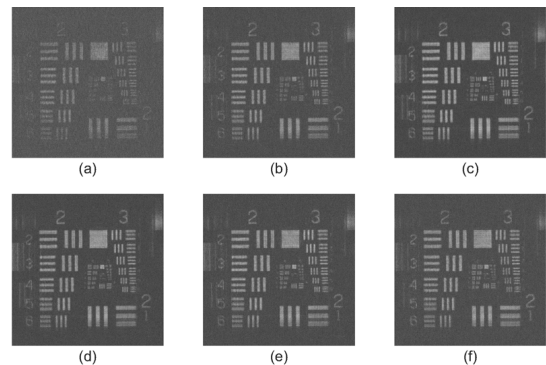


図6 光学実験により取得した再生像。

板の回転角を設定できる。この回転角において，緑色半導体レーザの参照光の4つの位相シフト量は0, 0.6π, 1.2π, 1.8π [rad]，青色半導体レーザの位相シフト量は0, 0.7π, 1.4π, 2.1π [rad]である。3つの光源を同時に照射して4回撮影をおこない，位相シフトに必要な4枚のホログラムを取得した。4枚のホログラムにニアレストネイバー方式のデイベイヤー処理をおこない，合計12枚のホログラムを取得

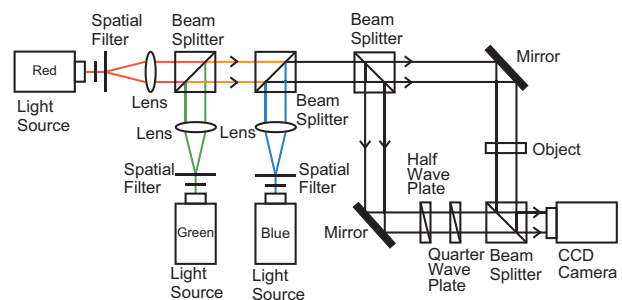


図7 カラーの透過物体の再生像取得実験光学系。



図 8 カラーの透過物体.

した. 取得したホログラムと各光源の参照光の4つの位相シフト量を4ステップ一般化位相シフト法に適用することにより, 各光源による物体光の複素振幅分布を算出した.

各成分の再生像を重ね合わせたカラーの再生像を図9に示す. 従来手法の4ステップ位相シフト法を用いたカラーの再生像では不要な光波が多く透過しない黒色の部分が青色になっているが, 提案手法を用いたカラーの再生像では不要な光波はなく黒色になっている. また, 定性的ではあるが提案手法を用いたカラーの再生像では撮影物体である図8と同等のカラー情報を含んでいる再生像が得られている. このことから, 提案手法によりカラーの情報を取得できることを示した.

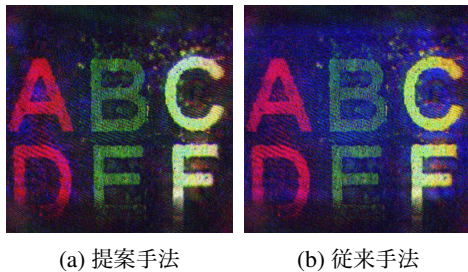


図 9 重ね合わせにより取得した透過物体のカラーの再生像.

(5) 偏光情報を含む複素振幅データの取得

単一露光一般化並列位相シフト法を用いた偏光情報を含む複素振幅データの取得には至らなかったが, 前段階として偏光情報を含む複素振幅データ~ミューラー行列~の取得に成功したので, その結果を述べる. 同一平面内で異なる偏光特性をもつ1/4波長板を用いた実験結果を述べる. 実験に用いた光学系を図10に示す.

試料に複屈折をもつ1/4波長板を用いて実験をおこない, 取得したホログラムをコンピュータ上で数値再生し, それらを用いて算出したミューラー行列

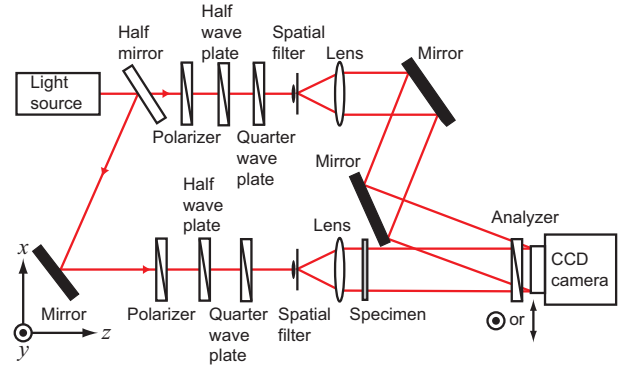


図 10 ミューラー行列分布取得実験光学系.

分布を図11に示す. ここで, ミューラー行列分布の

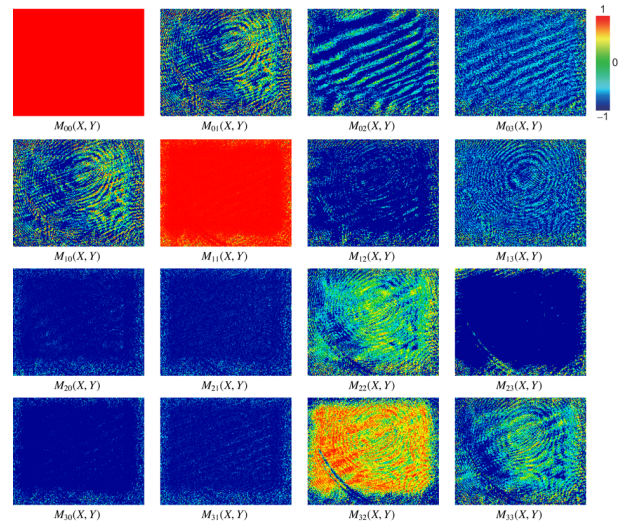


図 11 1/4波長板を試料として用いた場合のミューラー行列分布.

各要素は $M_{00}(X, Y)$ の値を用いて各画素で規格化をおこなっている. 取得したミューラー行列分布は一様な分布になると考えていたが, 縞模様が分布にあらわれている. これは, 再生像に存在する縞によるものであり, レンズの縁から回折等によるものである.

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10件)

- Osamu Matoba, Xiangyu Quan, Peng Xia, Yasuhiro Awatsuji, and Takanori Nomura, "Multimodal imaging based on digital holography," Proc. IEEE 105, 906-923 (2017). 査読有

DOI:10.1109/JPROC.2017.2656148

2. Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Multilevel recording of complex amplitude data pages in a holographic data storage system using digital holography,” *Opt. Express* **24**, 21001–21011 (2016). 査読有 DOI:10.1364/OE.24.021001
3. Toshitaka Kobata and Takanori Nomura, “Digital holographic three-dimensional Mueller matrix imaging,” *Appl. Opt.* **54**, 5591–5596 (2015). 査読有 DOI: 10.1364/AO.54.005591

[学会発表] (計20件)

1. Takanori Nomura, “Multi-exposure Generalized Phase-shifting Digital Holography,” *Proceedings of The Sixth Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2016)* (invited), 2016年12月21日, 札幌.
2. 篠村和磨, 野村 孝徳, “4 ステップ一般化位相シフト法によるカラー CCD カメラを用いたカラーデジタルホログラフィ,” 日本光学会年次学術講演会 OPJ2016, 2016年11月2日, 東京.
3. Takanori Nomura, “Generalized phase-shifting digital holography: from monochromatic to RGB color,” *The 8th International Conference on Information Optics and Photonics (2016)* (invited), 2016年7月18日, Shanghai (China).
4. Takanori Nomura, Takaaki Kawakami, and Kazuma Shinomura, “Generalized phase-shifting color digital holography,” *SPIE Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2016* (invited), 2016年4月19日, Baltimore (USA).
5. 川上貴照, 野村 孝徳, “ベイヤー配列型カラー CCD カメラを用いた単一露光一般化位相シフトカラーデジタルホログラフィ,” レーザー学会学術講演会第36回年次大会, 2016年1月12日, 名古屋.
6. 篠村和磨, 野村 孝徳, “4 ステップ一般化位相シフト法を用いた RGB デジタルホログラフィ,” 日本光学会年次学術講演会 OPJ2015, 2015年10月29日, 東京.
7. 川上貴照, 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を用いた3

次元位置および色情報計測,” 3次元画像コンファレンス2015, 2015年7月10日, 横浜.

8. Takanori Nomura and Masatoshi Imbe, “Generalized phase-shifting digital holography for single-exposure,” *The 2nd International Conference on Photonics Solutions (ICPS2015)* (invited), 2015年7月7日, Hua Hin (Thailand).
9. Takanori Nomura and Masatoshi Imbe, “Single-Exposure Generalized Phase-shifting Digital Holography,” *The 14th Workshop on Information Optics (WIO2015)* (invited), 2015年6月1日, 京都.
10. Takanori Nomura and Toshitaka Kobata, “Mueller matrix imaging by use of digital holography,” *The 2015 International Conference on Optical Instrument and Technology (OIT2015)* (invited), 2015年5月21日, Beijing (China).
11. Toshitaka Kobata and Takanori Nomura, “Digital Holographic Mueller Matrix Imaging,” *The Fourth Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2014)*, 2014年12月22日, 沖縄.
12. 小畑俊隆, 野村 孝徳, “デジタルホログラフィを用いたミューラー行列の取得,” レーザー学会第470回研究会, 2014年12月5日, 大阪.
13. 井邊真俊, 川上貴照, 野村 孝徳, “単一露光一般化位相シフトカラーデジタルホログラフィにおける各色の再生像の画質と参照光の空間周波数帯域幅の関係,” 日本光学会年次学術講演会 OPJ2014, 2014年11月7日, 東京.
14. Masatoshi Imbe and Takanori Nomura, “Effect of spatial frequency bandwidth of reference wave on quality of reconstructed image in single-exposure generalized phase-shifting digital holography,” in *International Workshop on Holography and Related Technologies (IWH2014)*, 2014年10月17日, Beijing (China).

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