ランダム位相フリー法を用いた位相型ホログラムの画質改善とシミュレーションおよび光学実験による検証

Improvement of Image Quality of Phase-Only Hologram using Random Phase-Free Method and Verification by Simulation and Optical Experiments

学生会員 山口由美[†], 長浜佑樹[†], 山本洋太[†],
正会員 下馬場朋禄[†], 正会員 角江 崇[†], 正会員 伊藤智義[†]
Yumi Yamaguchi[†], Yuki Nagahama[†], Yota Yamamoto[†],
Tomoyoshi Shimobaba[†], Takashi Kakue[†] and Tomoyoshi Ito[†]

あらまし ホログラフィは、光の波面を記録・再生する技術である。コンピュータ上での数値計算によって生成されたホログラムを計算機合成ホログラムという。ホログラムの計算手法の一つにランダム位相フリー法があり、これを振幅ホログラムに用いた場合、画質の良い再生像を得ることができる。しかし、位相型ホログラムにランダム位相フリー法を用いた場合、再生像が劣化するという問題があった。本研究ではランダム位相フリー法に、Liらによる位相型ホログラムのエンコード法を適用し、再生像の改善を図る。シミュレーションおよび光学実験により提案手法と従来手法の再生像画質の比較を行い、有効性を確認した。

キーワード：CGH, ホログラム, 位相型ホログラム, キノフォーム, ランダム位相フリー法, 誤差拡散法

1. ま え が き

ホログラフィは、光の干渉や回折現象を利用して光の波面を記録・再生する技術である。所望の光の波面を記録したホログラムはコンピュータ上の光伝搬シミュレーションによって生成することが可能であり、計算機合成ホログラム (Computer-Generated Hologram: CGH) と呼ばれる。CGHは3次元ディスプレイ¹⁾や、ホログラフィックプロジェクト^{2)~4)}といった装置への応用が提案されている。しかし、これらの技術的課題のひとつとして、スペckルノイズによる再生像の画質劣化が挙げられる⁵⁾。従来、CGHを生成するには元画像にランダム位相を付加して元画像からの光を拡散させ、ホログラムに光の波面を記録するランダム位相法が用いられていた。しかし、ランダム位相がホログラムの再生像にスペckルノイズを重畳させる一因となっていた。

その改善策として、ランダム位相の代わりに仮想的な球面波の位相パターンを用いるランダム位相フリー法が提案されている⁶⁾。このランダム位相フリー法は、振幅型ホログラムに対してはスペckルノイズの抑制効果が認められているが、位相型ホログラムに対しては直接適用できない。そのため、ランダム位相フリー法と誤差拡散法をキノフォーム (以降では、位相型ホログラムと呼ぶ) に適用させ

る手法が提案されている⁶⁾。しかし、再生像の画質が劣化するという課題があった。

本研究では、位相型ホログラムにランダム位相フリー法を適用させる新たな2つの手法を提案する。また、数値シミュレーションおよび光学実験を行い、従来手法に対して、再生像の画質、回折効率および計算時間について比較を行い、提案手法1および提案手法2の有効性を確認した。

2. ランダム位相フリー法

従来、CGHの計算において、元画像からの光を拡散させ、ホログラムに記録するためにランダム位相を掛け合わせていた。しかしそれにより、スペckルノイズが発生し、画質の低下を招いていた。光を拡散させる方法として、ランダム位相の代わりに、仮想収束光の位相パターンを用いる手法がランダム位相フリー法である。図1に元画像とホログラム、仮想収束光の位置関係を示す。

図1の元画像の面積は $S_i \times S_i$ であり、ホログラムの面積は $S_h \times S_h$ である。CGHをランダム位相フリー法で計算する手順は以下の通りである。まず、元画像 $u_i(x_i, y_i)$ に、式(1)で与えられる収束球面光 $w(x_i, y_i)$ を掛け合わせる。

$$w(x_i, y_i) = \exp(-j\pi(x_i^2 + y_i^2)/f_i\lambda) \quad (1)$$

ここで、 λ は波長、 $f_i = z_1 + z_2$ は収束球面光の焦点距離であり、 f_i は式(2)で与えられる。

2019年10月7日受付, 2019年12月28日再受付, 2020年1月20日採録

[†] 千葉大学大学院工学研究院

(〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

図1 ランダム位相フリー法

$$f_i: z_1 = S_i: S_h \quad (2)$$

次に、元画像からホログラム面への回折計算を行う。ホログラム面上における複素振幅 $u_h(x_h, y_h)$ は式(3)で与えられる。

$$U_h(x_h, y_h) = \text{Prop}_{z_2}\{u_i(x_i, y_i)w(x_i, y_i)\} \quad (3)$$

ここで、 $\text{Prop}_{z_2}\{\cdot\}$ は図1に示す元画像から距離 z_2 にあるホログラム面までの回折計算を意味している。 $u_h(x_h, y_h)$ の実部を取り出せば、振幅型ホログラムが生成でき、 $u_h(x_h, y_h)$ の位相を取り出せば、位相型ホログラムが生成できる。振幅型ホログラム $g(x_h, y_h)$ と、位相型ホログラム $\theta(x_h, y_h)$ はそれぞれ式(4)、式(5)で与えられる。本研究では、回折計算アルゴリズムとしてARSS (Aliasing-Reduced Shifted and Scaled) フレネル回折⁷⁾を用いている。

$$g(x_h, y_h) = \text{Pe}\{u_h(x_h, y_h)\} \quad (4)$$

$$\theta(x_h, y_h) = \text{Arg}\{u_h(x_h, y_h)\} \quad (5)$$

ここで、 $\text{Re}\{\cdot\}$ は実数部を取り出す演算子、 $\text{Arg}\{\cdot\}$ は偏角を取り出す演算子を表す。

ランダム位相フリー法では、従来の手法をさらに改良した手法として、物体光センタリング法が提案されている⁸⁾。ランダム位相フリー法では、実機再生を想定して空間光変調器からの直接光が再生像に重なるのを回避するために、ホログラムの中心と再生像の中心をオフセットによりずらしている。しかし、再生像の中心をずらす影響でホログラム面上の端部に画像情報が偏って記録されてしまう。そこで物体光センタリング法では、仮想収束光の光源の位置をずらすことで、元画像の光がホログラムの中心により近い場所に記録されるように式(1)の収束球面光の代わりに式(6)を用いる。

$$w(x_i, y_i) = \exp\left(\frac{-j\pi((x_i + x_{i0})^2 + (y_i + y_{i0})^2)}{\lambda f_i}\right) \quad (6)$$

式中の x_{i0} は x 軸方向オフセット、 y_{i0} は y 軸方向オフセットである。これにより元画像とホログラムの縁で発生する回折の影響を軽減し、リングアーティファクトと呼ば

表1 シミュレーション条件

元画像のピクセル数	512×512
拡大倍率	1.0
ホログラム面のサンプリング間隔	4.0 [μm]
投影距離	0.5 [m]
オフセット	400 [μm]
レーザ波長	532 [nm]

(a)元画像 (b)振幅型 (c)位相型

図2 ホログラムの再生シミュレーション像

れるノイズを除去することができる。その結果、画質の改善がはかれる。

表1にシミュレーション条件を示す。また、図2にランダム位相フリー法を用いた振幅型のホログラムと位相型ホログラムの再生シミュレーション像を示す。本研究における数値計算には、いずれも波動光学計算ライブラリーであるCWO (Computational Wave Optics)⁹⁾ライブラリーを用いた。表中の拡大倍率とは、元画像に対する再生シミュレーション像の倍率である。

図2(b)に示すように、振幅型ホログラムは所望の再生像を得ることができる。一方で図2(c)に示すように、位相型(式(5))は、所望の再生像が得られていない。このことから、ランダム位相フリー法は振幅型ホログラムには適用が可能であるが、位相型ホログラムに対しては直接適用できないことがわかる。

3. ランダム位相フリー法で得る複素振幅の位相型ホログラムへの変換手法

第2章で述べたように、ランダム位相フリー法は位相型ホログラムに直接適用できないという課題があり、この問題を解決するための手法が検討されている。本章ではランダム位相フリー法によって得た光の複素振幅を、位相型ホログラムへ変換する手法のうち、すでに提案されている誤差拡散法を組み合わせたランダム位相フリー法⁶⁾および、本論文で組み合わせを試みた、Liらによる位相型ホログラム¹⁰⁾を組み合わせたランダム位相フリー法について述べる。

3.1 誤差拡散法を組み合わせたランダム位相フリー法

誤差拡散法をランダム位相フリー法に組み合わせた手法は、ホログラム面上における複素振幅と、式(5)により得られた位相型ホログラムの差分を誤差とし、その誤差を画素単位で周囲のピクセルに拡散する。誤差拡散の重みづけは、フロイド・スタインバーグ係数¹¹⁾を用い、注目画素における誤差の7/16を直後のピクセルに分配し、次の列の3つのピクセルにそれぞれ3/16、5/16、1/16ずつ分配して誤

差を拡散する．この処理をラスタスキャンすることで，誤差拡散された位相型ホログラムが得られる．

3.2 振幅情報を用いた位相ホログラムエンコードを 組み合わせたランダム位相フリー法

CGHによって光の位相変調を行う場合，ホログラム面上の複素振幅からホログラムへの数値変換に，式(5)で与えられるキノフォームを用いることが多い．その一方で，写真乾板で作成する位相型ホログラムの考え方を適用した方法がLiらによって提案されている¹⁰⁾．Liらによって提案された位相型ホログラムは，式(7)で与えられる．

$$U'_h(x_h, y_h) = \exp(jg(x_h, y_h)) \quad (7)$$

ランダム位相フリー法に式(7)を組み合わせた手法はまだ提案されていない．そこで本研究では，まず提案手法1として，ランダム位相フリー法で生成した式(4)の振幅型ホログラムに対し，さらに式(7)の計算を行って位相型ホログラムを生成し，有効性を検証する．

次に，提案手法2として，物体光センタリング法⁸⁾にも提案手法1と同様の手法で式(7)の組み合わせを試みた．物体光センタリング法もまた振幅型ホログラムにのみ効果が確認されているため，有効性を検証する．

4. シミュレーションにおける検証結果

本章では，第2章と第3章で述べたランダム位相フリー法を，位相型ホログラムに適用する手法についてシミュレーションを行い，画質および回折効率，計算時間の観点で比較を行う．表2にシミュレーション条件を示す．図3に再生像，直接光，共役光の分布を示す．元画像のサイズよりも広い領域（ここでは元画像の3倍のサイズの範囲で観察した図3のE1の領域）で光の分布を観察すると，表示したい再生像の他にも，直接光や共役光が観察される．そこで，再生像（図3内のE2の領域）の振幅の総和を，再生像，共役光，直接光（図3内のE1の領域）の振幅の総和で割った値を回折効率として定義し，E1の領域にどの程度集光されているか相対的な寄与率を求めた．回折効率 η_i は式(8)で与えられる．

$$\eta_i = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\text{Re}(U_I(x_i, y_i))^2 + \text{Im}(U_I(x_i, y_i))^2}}{\sum_{i=1}^m \sqrt{\text{Re}(U_I(x_i, y_i))^2 + \text{Im}(U_I(x_i, y_i))^2}} \quad (8)$$

n は再生像のピクセル数で， m は再生像面上に照射されている光の全範囲のピクセル数である． U_I は再生像の複素振幅， $\text{Re}(\cdot)$ は実部の値， $\text{Im}(\cdot)$ は虚部の値を示している．

図4に各手法によって生成したホログラムの再生シミュレーション像（E2の領域の再生像）を示す．表3に再生シミュレーション像の数値評価の結果を示す．

図4(b)～(f)はランダム位相フリー法にそれぞれの手法を適用した再生シミュレーション像である．図4(b)の振幅型ホログラムは，元画像と同様のパターンが確認できる．

表2 シミュレーション条件

元画像のピクセル数	512×512
拡大倍率	3.0
ホログラム面のサンプリング間隔	4.0 [μm]
投影距離	0.5 [m]
オフセット	400 [μm]
レーザ波長	532 [nm]

図3 再生像の分布

(E1は再生像，共役光，直接光を含み，E2は再生像のみを含む)

図4 ホログラムの再生シミュレーション像

しかし，図4(c)の位相型ホログラム（式(5)）は輪郭の一部だけ再生されている．図4(d)の誤差拡散法を用いたホログラムは元画像と同様のパターンが確認できるが，輪郭の中心部や末端部が暗い．図4(e)の提案手法1は元画像と同様のパターンが確認でき，提案手法1が有効であることが示された．しかし，図4(e)は図4(d)と比較して輪郭が明瞭になっているが，再生像にリングアーティファクトの影響による縞状のノイズが見られる．図4(f)の提案手法2はホログラムの縁での回折に起因するリングアーティファクトが除去され，明瞭な再生像が得られた．

表3では，PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) および SSIM (Structural SIMilarity) を用いて再生シミュレーション像の再現性を評価した．PSNRとSSIMは元画像がどれ

表3 再生シミュレーション像の画質, 回折効率, 計算時間の比較
(計算時間は8回の平均)

ホログラムの種類	PSNR [dB]	SSIM	回折効率 [%]	計算時間 [ms]
(b)振幅型	15.3	0.75	12.5	277
(c)位相型 (式(5))	5.98	0.59	47.5	302
(d)誤差拡散法	11.0	0.66	19.0	330
(e)提案手法1	14.7	0.74	11.7	281
(f)提案手法2	15.6	0.82	15.0	291

だけ再現できたかを数値的に示す手法であり, 定量的な画質評価のために用いた。

位相型(式(5))は, PSNR, SSIM共に振幅型に比べ値が低く, 第2章で述べた課題が顕著にみられる。誤差拡散法は, PSNR, SSIM共に位相型に比べ値が高くなっている。提案手法1はPSNRが14.7 dB, SSIMは0.74であり, いずれも位相型に比べ値が高く, 振幅型と遜色ない数値が得られている。提案手法2は, PSNRが15.6 dB, SSIMが0.82であり, 最も画質が良くなる。

次に, 回折効率を比較した。振幅型は原理上, 領域E1内に強い直接光が発生するが, 位相型(式(5))は領域E1内に直接光が発生しないため, 回折効率が高くなる。誤差拡散法は回折効率が19.0%であり, 位相型(式(5))の47.5%より値が下がった。提案手法1は11.7%, 提案手法2は15.0%であった。いずれも計算の特性上, 直接光が発生するが, 提案手法2は画質, 回折効率ともに最も優れた再生像を得ることができる。

最後に計算時間を比較した。計算時間は8回計算を行った平均を取っている。振幅型の計算時間が最も速く, 位相型は計算時間が増し, 誤差拡散法は誤差を拡散するための処理を含んでいるため, さらに計算時間が増している。提案手法2は位相型のホログラムの中では最も計算時間が短く, 振幅型と同程度の計算速度であった。2つの提案手法は誤差拡散法よりも高速にホログラムを得ることができた。

5. 光学実験における検証結果

本章では, シミュレーションで得たCGHを用いて, 光学実験を行った結果について比較を行う。

図5に光学系の概略図を, 表4に光学再生の条件を, 図6および図7に光学系による再生像を示す。図6の再生像は図7(e)提案手法2におけるE1の領域に相当し, 図7の再生像はそれぞれの手法のE2の領域に相当する。なお, レーザ光源は半導体レーザーを用い, 空間光変調器(Spatial Light Modulator: SLM)には位相変調型Liquid crystal on silicon(LCOS)パネルを用いた。本実験では位相変調型LCOSを用いたので, 振幅型ホログラムの再生実験は行っていない。

光学実験では, CGHをオフセットにより光源の中心から表4の条件で離しているため, 再生像の右上方に光源の中

図5 光学系の概略図

表4 光学実験条件

元画像のピクセル数	1920×1080
拡大倍率	1
ホログラム面のサンプリング間隔	4.0 [μm]
投影距離	1.2 [m]
オフセット x 方向	1200 [μm]
オフセット y 方向	800 [μm]
レーザー波長	514 [μm]

図6 光学系による再生像(E1の領域)

心が位置している。図7(b)の位相型(式(5))はノイズが顕著で, 輪郭が強調された再生像となった。これはランダム位相を使用しないキノフォームでよく知られた現象である。図7(c)の誤差拡散法は元画像と同様のパターンが確認できるが, シミュレーションと同様に輪郭の末端や中心部が暗い。図7(d)の提案手法1も元画像と同様のパターンが確認され, ランダム位相フリー法に提案手法1を適用できることが光学実験からも示された。また, 図7(c)と比較して, 輪郭が明瞭になっている。図7(e)の提案手法2はさらに明瞭な再生像が得られ, 図7(d)で明度の低かった左下の輪郭も確認できる。図7(e)が, 本光学実験の再生像の中で最も像全体が明るく, 物体光センタリング法と式(7)を組み合わせた効果が位相型ホログラムでも実証された。

図7 光学系による再生像 (E2の領域)

6. む す び

本論文では、ランダム位相フリー法によって得た複素振幅を位相型ホログラムに変換する手法として、文献¹⁰⁾の手法を用いて画質改善を図った。提案手法1はシミュレーションにおいて、既存の手法である誤差拡散法を組み合わせたランダム位相フリー法と比べ、より画質の高い像が得られた。

画質評価・回折効率共に従来手法に比べ値が高くなり、提案手法1によってランダム位相フリー法を改善することができた。提案手法1に物体光センタリング法を適用することで、さらに画質・回折効率の向上が図れた。

計算時間も振幅型と比較して提案手法1は遜色ないことから、提案手法1を用いれば位相型ホログラムにおいてもランダム位相フリー法を適用できると言える。

光学実験においても、提案手法1は誤差拡散法を組み合わせた手法よりも明瞭な再生像を得ることができた。特に物体光センタリング法を用いた提案手法2が最も良い結果となり、シミュレーションに則した実験結果となった。しかし、提案手法2を用いた場合でも、元画像に対して再生像の中心部にリングの影響によるノイズが発生しているため、縞状に暗い部分が生じている。今後、更なる手法の改善により画質の向上が必要であると考えられる。

謝辞 本研究はJSPS科研費19 H01097および19 H04132の助成を受けたものです。

〔文 献〕

- 1) H. Sasaki, K. Yamamoto, K. Wakunami, Y. Ichihashi, R. Oi and T. Senoh: "Large size three-dimensional video by electronic holography using multiple spatial light modulators", Sci. Rep. 4, 6177 (2014)
- 2) M. Makowski, I. Ducin, M. Sypek, A. Siemion, A. Siemion, J. Suszek and A. Kolodziejczyk: "Color image reconstruction based on Fourier holograms", Opt. Lett. 35, 8, pp.1227-1229 (2010)
- 3) T. Shimobaba, T. Kakue and T. Ito: "Real-time and low speckle holographic projection", Proc. In IEEE 13th International Conference

on Industrial Informatics (INDIN), pp.732-741 (2015)

- 4) J. Amako, H. Miura and T. Sonehara: "Speckle-noise reduction kinoform reconstruction using a phase-only spatial light modulator", Appl. Opt. 34, 17, pp.3165-3171 (1995)
- 5) T. Shimobaba and T. Ito: "Random phase-free computer-generated hologram", Opt. Express 23, 7, pp.9549-9554 (2015)
- 6) T. Shimobaba, T. Kakue, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, S. Hasegawa, Y. Nagahama, M. Sano, M. Oikawa, T. Sugie and T. Ito: "Random phase-free kinoform for large objects", Opt. Express 23, 13, pp.17269-17274 (2015)
- 7) T. Shimobaba, T. Kakue, N. Okada, M. Oikawa, Y. Yamaguchi and T. Ito: "Aliasing-reduced Fresnel diffraction with scale and shift operations", J. Opt. 15, 7, 075405 (2013)
- 8) Y. Nagahama, T. Shimobaba, T. Kakue, Y. Takaki and T. Ito: "Image quality improvement of random phase-free holograms by addressing the cause of ringing artifacts", Appl. Opt. 58, 9, pp.2146-2151 (2019)
- 9) T. Shimobaba, J. Weng, T. Sakurai, N. Okada, T. Nishitsuji, N. Takada, A. Shiraki, N. Masuda and T. Ito: "Computational wave optics library for C++: CWO++ library", Comput. Phys. Commun. 183, 5, pp.1124-1138 (2012)
- 10) X. Li, J. Liu, J. Jia, Y. Pan and Y. Wang: "3D dynamic holographic display by modulating complex amplitude experimentally", Opt. Express 21, 18, pp.20577-20587 (2013)
- 11) R.W. Floyd, L. Steinberg: "An adaptive algorithm for spatial grey scale", Proceedings of the Society of Information Display, 17, 2, pp.75-77 (1976)

山口 由美 2000年、群馬大学工学部電気電子工学科卒業。2003年、同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。現在、千葉大学大学院工学研究科博士後期課程在学中。ホログラフィ応用技術の研究に従事。学生会員。

長浜 佑樹 2012年、千葉大学工学部電気電子工学科卒業。2015年、同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2017年、日本学術振興会特別研究員(DC2)。同年、千葉大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年、日本学術振興会特別研究員(PD)。2018年、東京農工大学工学研究科助教、ホログラフィ応用技術の研究に従事。博士(工学)。

山本 洋太 2016年、東京理科大学基礎工学部電子応用工学科卒業。2018年、同大学大学院基礎工学研究科電子応用工学専攻修了。同年、千葉大学融合理工学府基幹工学専攻博士後期課程入学。専用計算機による数値計算の高速化の研究に従事。

下馬場朋禄 2002年、千葉大学大学院自然科学研究科博士課程修了。同年、理化学研究所基礎科学特別研究員。2005年、山形大学工学部助教授。2007年、同大学院理工学研究科准教授。2009年、千葉大学工学研究科准教授。2019年、同大学教授。ホログラフィ応用技術の研究に従事。博士(工学)。正会員。

角江 崇 2008年、京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科電子システム工学専攻修了。2011年、日本学術振興会特別研究員(DC2)。2012年、京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科設計工学専攻修了。同年、千葉大学大学院工学研究科助教。ホログラフィに基づく3次元映像技術や3次元計測技術に従事。博士(工学)。正会員。

伊藤 智義 1992年、東京大学大学院総合文化研究科博士課程中退。同年、群馬大学工学部助手。1994年、同大学助教授。1999年、千葉大学工学部助教授。2004年、同大学教授。専用計算機による数値計算の高速化の研究に従事。博士(学術)。正会員。