キノフォームタイプ電子ホログラフィにおける キャリア信号の導入と sinc 補正

The Introduction of Carrier Signal and Sinc-Compensation

into Kinoform-Type Electro-Holography

松田篤史細川俊彰松島恭治Atsushi MatsudaToshiaki HosokawaKyoji Matsushima関西大学 システム理工学部電気電子情報工学科Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

ABSTRACT

The electro-holography using phase modulation has the advantage of optical reconstruction without a conjugate image. However, a non-diffractive 0-th order light that interferes with observing the reconstructed image can not be eliminated even in phase modulation. In addition, the edge of reconstructed image is darkened by sinc modulation caused by rectangular pixels of a spatial light modulator. In this research, we demonstrate a technique to shift the reconstructed image by introducing carrier signal in order to separate the reconstructed image from the non-diffracting light. Furthermore, a sinc compensation technique is also attempted in order to enlarge the reconstruction area. Keywords: 空間光変調器, 計算機合成ホログラム, 非回折光, 位相型フーリエ CGH, sinc 補正

1. はじめに

反射型液晶パネルによる空間光変調器(Spatial Light Modulator、以下 SLM)を用いたホログラム再生に ついては、すでに非常に多くの研究が報告されている. しかし,そのほとんどが振幅変調型 SLM によるホログ ラムの再生である.そのため,再生像に必ず発生する 共役像を除去するために、4f光学系を用いたシングル サイドバンド法[1]や,シングルサイドバンド法とハーフ ゾーンプレート処理を組み合わせた方法[2]等が用い られる.また、同種の方法が解像度変換光学系でも用 いられている[3]. しかし, これらの手法は 4f 光学系を 前提としているため、システムが複雑で大型化すること が共通の問題点となる.一方,著者らは共役像が発生 せず,回折効率が高い位相変調型 SLM を用いたキノ フォーム型電子ホログラフィを報告している[4]. この手 法では共役像が発生せず、コンパクトな2f光学系で再 生可能であることが利点である.また,ポリゴン法[5]の ように波動光学的伝搬計算を用いる計算法では、4f光 学系に比べ1回分FFTの計算回数が少なくて済むと いう利点がある.

しかしながら, 位相変調型 SLM で 2f 光学系を構成

松田篤史

matsuda@laser.ee.kansai-u.ac.jp

関西大学システム理工学部電気電子情報工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

TEL 06-6368-1121(内線 5722)

した場合, 共役像は抑制できるものの, 非回折光を除 去することはできず, 像面の中央に生じる輝点により再 生像の観察が阻害される大きな問題点がある. また, 再生像の周辺部では回折効率が低下し暗くなる問題 点もある.

そこで本研究では、位相変調型 SLM に表示する位 相分布にキャリア信号を導入することにより、像面にお ける再生像の位置をシフトし、非回折光と分離する手 法を提案した. さらに、再生像の周辺部が暗くなる原因 が SLM 各セルの矩形開口による sinc 変調[6]であるこ とから、本研究ではこれを補正することも試みた.

2. 再生像シフトと sinc 補正の原理

本研究ではレンズを用いたフーリエホログラムとして 計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram, 以下 CGH)の再生を行っている.フーリエ型の CGH の 数値合成の原理を Fig.1 に示す.

フーリエ型 CGH では再生したい物体光波の複素振幅分布をg(x,y) で表すとき, その逆フーリエ変換

 $H(u,v) = F^{-1}[g(x,y)]$ (1)

の位相分布を 8bit で量子化して SLM に表示する.従って,その再生はフーリエ変換の種々の性質に依存する.

2.1 キャリア信号による再生像のシフト

2f 光学系による再生では、(1)式のとおり、SLM 面と 像面がフーリエ変換の関係となることから、SLM 面に



Fig.1 Theoretical optical model of computer-generated Fourier holograms.

表示する位相分布にキャリア信号を導入することにより、 再生位置をシフトすることができる. いま SLM 面上の 空間座標を (x_s, y_s) とし、SLM に表示する位相パター ンを

$$h(x_s, y_s) = \exp[i\varphi(x_s, y_s)] \tag{2}$$

とする. SLM 面でのフーリエ周波数(*u*,*v*)と空間座標 には

$$x_s = \lambda f u , \quad y_s = \lambda f v \tag{3}$$

の関係があることから,フーリエ周波数表記での位相 分布は

$$H(u,v) = h(\lambda f u, \lambda f v) = \exp[i\varphi(\lambda f u, \lambda f v)]$$
 (4)
となる. ここで, 空間周波数(v_x, v_y)のキャリア信号を

$$h_0(x_s, y_s) = \exp[i2\pi(v_x x_s + v_y y_s)]$$
⁽⁵⁾

とすると、空間キャリアがある場合の再生像の複素振幅 分布はフーリエ変換のシフト則により

$$F\{h(x_s, y_s)h_0(x_s, y_s)\} = F\{H(u, v)\exp[i2\pi\lambda f(v_x u + v_y v)]\}$$

$$= g(x - \lambda f v_x, y - \lambda f v_y)$$
(6)

となり、Fig.2 に示すとおり再生像の位置がシフトすることがわかる. すなわち, 再生像のシフト量を水平方向と 垂直方向にそれぞれ x_{shift}, y_{shift} とすると、シフト量は

$$\begin{cases} x_{\text{shift}} = \lambda f v_x \\ y_{\text{shift}} = \lambda f v_y \end{cases}$$
(7)

と表される. 従って, 必要なキャリア信号は

$$h_0(x_s, y_s) = \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda f}(x_{\rm shift}x_s + y_{\rm shift}y_s)\right]$$
(8)

となる.

このように、位相分布にキャリア信号を導入すること により、再生像の位置をシフトし、非回折光と分離する ことができる、これによりマスク等を用いて非回折光を 遮蔽することが可能となる.

2.2 再生像の sinc 補正

SLM は矩形のピクセル構造を有しているため、フー リエ CGH を再生すると再生像が sinc 関数型の変調を 受ける. 離散化した位相パターンを整数座標(k,l)を 用いて

$$h_{kl} = \exp[i\varphi(k\Delta x_s, l\Delta y_s)]$$
(9)



Fig.2 Spatial shift of reconstruction area.



Fig.3 Definition of rectangular pixels in a SLM.

と表し、Fig.3のようにピクセル構造の定義すると、

$$h'(x_{s}, y_{s}) = \sum_{k=-\frac{N_{x}}{2}}^{\frac{N_{y}}{2}-1} \sum_{l=-\frac{N_{y}}{2}}^{\frac{N_{y}}{2}-1} h_{kl} \operatorname{rect}\left(\frac{x_{s}-k\Delta x_{s}}{\Delta x_{s}}\right) \times \operatorname{rect}\left(\frac{y_{s}-l\Delta y_{s}}{\Delta y_{s}}\right)$$
(10)

となる. (4)式を用いたフーリエ周波数表記では $H'(u,v) = h'(\lambda f u, \lambda f v)$ (11) となるので,像面における複素振幅分布は

 $g'(m\Delta x, n\Delta y) = F\{H'(u, v)\}$

$$= a(m\Delta x, n\Delta y)\hat{F}^{-1}\{h_{kl}\}$$
(12)

$$a(m\Delta x, n\Delta y) = \frac{\Delta x_s \Delta y_s}{(\lambda f)^2} N_x N_y$$

$$\times \operatorname{sinc}\left(\frac{\Delta x_s}{\lambda f} m\Delta x\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{\Delta y_s}{\lambda f} n\Delta y\right)^{(13)}$$

となる. ここで, (m,n) は像面の整数座標であり, また \hat{F}^{-1} は連続関数のフーリエ積分でなく, 離散逆フーリ エ変換を表している. この結果より, フーリエ型CGHの 再生では, 再生像は単純なフーリエ変換ではなく, 水 平方向, 垂直方向ともに sinc 関数で変調され, 周辺部 が暗くなることがわかる.

これを軽減するためには,再生したい物体光波を事前に補正しておく方法が有効と考えられる.すなわち, (12)式をホログラムの複素振幅分布 *h*₄ について解くと,



Fig.4 The model of the two dimensional object.



Fig.5 Simulated reconstruction of CGHs without (a) and with the sinc compensation technique (b).

$$h_{kl} = \hat{F} \left\{ \frac{g'(m\Delta x, n\Delta y)}{a(m\Delta x, n\Delta y)} \right\}$$
(14)

となることから,再生したい物体光波 $g'(m\Delta x, n\Delta y)$ を あらかじめ $a(m\Delta x, n\Delta y)$ で除算することにより,再生像 の sinc 変調を緩和することができる.

以上の sinc 補正の効果を確認するため, シミュレーションを行った. Fig.4 にシミュレーションに用いた 2 次 元平面物体のモデルを示す. また, Fig.5 には位相分 布をオーバーサンプリングして行ったシミュレーション 再生像を示す. (a)は通常再生, (b)は sinc 補正を施して いる. 通常再生に比べて sinc 補正を施した方が再生像 の周辺部が明るく, 細部も鮮明に再生されていることが わかる.

3. 動画ホログラムの計算

位相型 SLM と提案手法を用いて動画ホログラムの 再生を行った. Fig.6 にホログラムの計算に用いた物体 モデルを示す. 3D シーンは超高解像度 CGH の The Venus と同様の構成とし[7], ホログラム面から奥行き 100[mm]の位置にチェック柄の壁紙を配置し, 50[mm] の位置にミロのビーナスを模した 3 次元物体を配置し ている. 物体光波計算にはポリゴン法を用い, ファント ムイメージとなることを防ぐためシルエット法[8]を用い ている.

物体光波の数値合成に用いたパラメータを Table 1 に示す.動画の再生を行うために、ビーナス像を 5° 間隔で回転させて物体光波計算を行った.得られた複 素振幅分布を sinc 補正処理した後、位相コーディング し、さらにキャリア信号で変調を行った.なお、計算はリ アルタイムではなく、計72枚分の位相分布を事前に計 算した.この時、リアルタイム計算用のチューニングは 特に行っていない状態で、計算時間は Core i7-860 を



Fig.6 The 3D scene used in optical reconstruction of the holographic movie.

Table 1	Parameters	used for	optical	reconstruction
Table 1	1 arameters	useu ioi	opuca	reconstruction

Hologram		
No. of pixels ($N_{xs} \times N_{ys}$)	1920×1080	
Pixel pitches	$8\mu\mathrm{m} \times 8\mu\mathrm{m}$	
Hologram dimensions	15.36mm×8.64mm	
Reconstruction wavelength	632.8nm	
Focal distance of Fourier lens	400mm	
Sampling interval in image plane	15.45 μ m	
Shift distance by carrier signal	13.0mm to right	
3D object and scene		
No. of polygons of the Venus	718	
(front face only)		
Height of Venus statue	16.3mm	
Dimension of wallpaper (W \times H)	20.0mm×20.0mm	

用いて 22 分程度であった. 得られた動画ホログラムは 最終的に 10[fps]で表示を行った.

4. 光学再生

光学再生実験に用いた光学系をFig.7 に示す. 光源 には波長 632.8[nm]の He-Ne レーザあるいは波長 532[nm]の DPSS レーザを用い, 平行光を SLM に入射 して焦点距離 400[mm]のフーリエ変換レンズを用いた. 位相変調型 SLM として, ピクセルピッチ 8.0[µm]で解 像度 1920×1080の HOLOEYE 社製 PLUTOを用いた. 再生時には, Fig.7 に示すようにフーリエレンズの後ろ 側焦点面に一辺が 20[mm]の正方形状の開口を置き, 非回折光を遮蔽した.

平面画像のシミュレーション再生(Fig.5)で用いた位 相分布から得られた光学再生像を Fig.8 に示す.この 結果より、シミュレーションと同様に、sinc 補正を施した 光学再生像では sinc 変調による影響が緩和され、周辺 部の光強度がわずかであるが改善されることがわかっ た.

次に,動画ホログラムの再生像の例をFig.9に示す. (a)は通常再生で,(b)はキャリア信号によりシフトさせた



Fig.7 Experimental setup for optical reconstruction of Kinoform-type electro-holography.

場合の再生像である. (a)では,再生像の中心の非回 折光が再生像の観測を阻害しているが, (b)の方では 再生像と分離した非回折光が開口により遮蔽されてい るため見やすい映像となっていることがわかる.



Fig.8 Optical reconstruction of Fourier CGHs without (a) and with the sinc compensation technique (b).



Fig.9 Optical reconstruction of a holographic movie without (a) and with the spatial shifting technique using a carrier signal (b).

5. まとめ

位相型フーリエ CGH による電子ホログラフィにおい て、キャリア信号による変調を行うことで再生像と非回 折光を分離する手法を提案した.さらに、sinc 補正を併 用することで像面における有効領域を拡大し、再生像 の周辺部の明るさの改善を試みた.ポリゴン法により計 算した動画ホログラムを再生した結果、良好な再生像 を得ることができた.しかし,シフトの量が大きすぎると 再生に十分な明るさを得ることができず,シフト量の最 適化が必要であることがわかった.

謝辞

本研究は日本学術振興会の科研費(21500114)の助 成を受けたものである.

The mesh data of The Venus object is provided courtesy of INRIA by the AIM@SHAPE Shape Repository.

参考文献

- O. Bryngdahl, A. Lohmann: J. Opt. Soc. Am. 58, 620-624(1967).
- [2] T. Mishina, F. Okano, I. Yuyama: Appl. Opt. 38, 3703-3713(1999).
- [3] 林, 高木: 3D コンファレンス 2008 講演論文集, 63(2008).
- [4] 細川, 松島, 堀越: 3Dコンファレンス 2009 講演論 文集, 101(2009).
- [5] K. Matsushima: Appl. Opt., 44, 4608-4614(2005).
- [6] M. A. Seldowitz, J. P. Allebach, D. W. Sweeney: Appl. Opt., 26, 2789(1987).
- [7] K. Matsushima, S. Nakahara: Appl. Opt., 48, H55-H60(2009).
- [8] 近藤, 松島: 電子情報通信学会論文誌 D-II, J87-D-II, 1487-1494(2004).