

キノフォームタイプ電子ホログラフィと その位相コーディング手法

A Kinoform Type Electronic Holography and its Phase-Encoding Techniques

細川俊彰¹ 松島恭治¹ 堀越力²
Toshiaki Hosokawa¹ Kyoji Matsushima¹ Tsutomu Horikoshi²

¹ 関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

¹Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

²(株)NTT ドコモ 先進技術研究所

²Research Laboratories, NTT DOCOMO, INC

ABSTRACT

The electronic holography using amplitude modulation always reconstructs a conjugate image that degrades the optical reconstruction. We report conjugate-free optical reconstructions of CGHs by using phase-only spatial light modulator, because the conjugate image does not occur in phase-encoded holograms, i.e. kinoforms. However, when complex-valued wave fields are encoded to a phase-only distribution, it is well-known that strong noises occur especially in cases of a small number of phase-quantized levels. Therefore, in this research, we examine three types of phase-encoding techniques; simple phase encoding, Floyd-Steinberg error-diffusion, and optimized error-diffusion. Assessments of these techniques are presented by simulation and optical reconstruction.

Keywords: 空間光変調器, 計算機合成ホログラム, 共役像, 誤差拡散法, 同時摂動型最適化法

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、光学再生像には共役像が必ず発生し、SLM の視域角が狭いことと相まって再生像の劣化を招いている。共役像の除去には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]等がすでに知られており、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・大型化することが共通の問題点である。

一方、位相変調型のホログラムであるキノフォームでは、位相値の量子化レベル数が 3 値以上の場合、原理的に再生像に共役像が発生しないため、SLM の全ピクセルを有効に利用することができ、また光学系をコンパクトにできる。しかし、物体光波の複素振幅分布を位相値にコーディングした場合、特に量子化数が少ない場合には、著しいノイズが発生し、再生像が劣化してしまうことが知られている。

細川俊彰

<hosokawa@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)

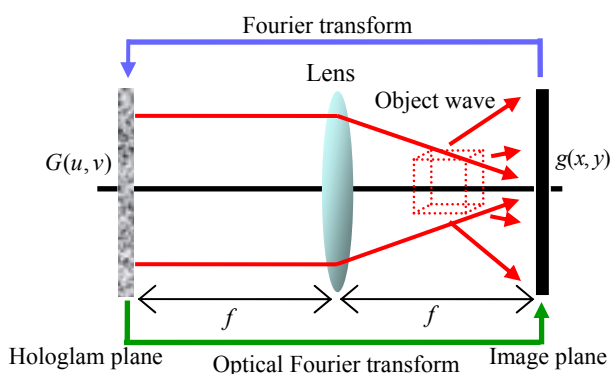


Fig.1 The model of computer-generated Fourier holograms.

そこで本研究では、位相変調型 SLM で共役像を抑制した像再生を行い、3種類の位相コーディング手法による光学的再生像の比較を行った。

2. キノフォームタイプへのコーディング

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. 再生したい物体光波の複素振幅分布を

$$g(x, y) = |g(x, y)| \exp[j\phi(x, y)] \quad (1)$$

で表すとき、その逆フーリエ変換を

$$G(u, v) = |G(u, v)| \exp[j\phi(u, v)] = FT^{-1}[g(x, y)] \quad (2)$$

とする. この $G(u, v)$ はホログラム面での複素振幅分布を表し, SLM に表示される像となる. ここで, u と v はそれぞれ x と y に対するフーリエ周波数である. 本研究では, この $G(u, v)$ に, 次に述べる 3 種類の位相コーディングを行い, シミュレーションと光学実験の両方で再生像の比較を行った.

2.1 単純位相コーディング

逆フーリエ変換することによって得た複素振幅分布 $G(u, v)$ において位相角は変化させずに振幅のみを定数 1 する. すなわち, Fig.2 に示すように, 処理前のピクセル (m, n) の複素値を $G_{m,n}$ とすると, $G_{m,n}$ の振幅値を 1 にして位相のみの分布にコーディングする. これを $\hat{G}_{m,n}$ とし, 実験で用いる SLM の特性に合わせて閾値により 8bit に位相量子化したものを $\bar{G}_{m,n}$ とする. この位相値を単純に SLM に表示する. これを単純位相コーディングと呼ん

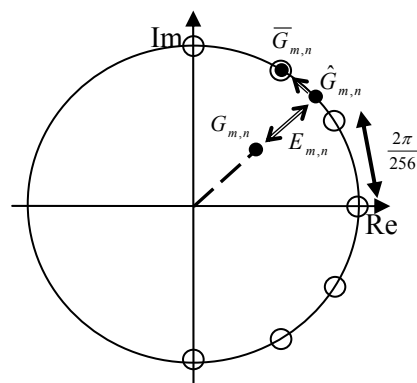


Fig.2 Phase encoding.

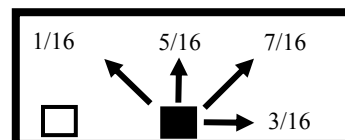


Fig.3 Floyd-Steinberg-type coefficients of error-diffusion.

でいる.

2.2 Floyd-Steinberg 型誤差拡散法

Fig.2 からわかるように単純位相コーディングでは複素コーディング誤差

$$E_{m,n} = \hat{G}_{m,n} - G_{m,n} \quad (3)$$

が生じる. この手法は, 誤差 $E_{m,n}$ を Fig.3 に示す Floyd-Steinberg 型の拡散係数に従って, 周囲のサンプリング点に拡散させる方法であり, 画像処理に用いられる誤差拡散法と本質的に同じものである. 本研究では, x 方向には左から右, y 方向には下から上へと処理していくラスタ走査を用いた.

2.3 拡散係数の最適化を行った誤差拡散法

この手法では, SLM の表示特性に合った良好なホログラム再生像を得るため, 同時摂動型最適化法(Simultaneous Perturbation Algorithm, 以下 SPA)を用いて, Fig.4 に示す 12 個の拡散係数を同時に最適化した[4]. なお, 本論文では文献[4]とは異なり, この 12 個の拡散係数は複素値としている. また SPA に用いた評価関数として, 符号を反転した

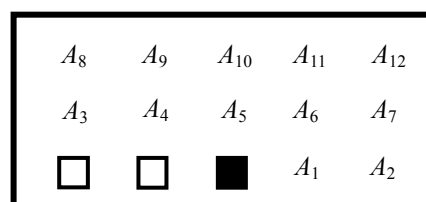


Fig.4 The pattern of coefficients of error-diffusion.

S/N 比を用いている. 最適化した拡散係数を用い, 前節の手法と同様にラスタ走査を用いて誤差を周囲のピクセルに拡散させる.

評価関数に用いた S/N 比は, 本来の物体光波の複素振幅分布 $g(x, y)$ と位相コーディング後のホログラムのシミュレーション再生像の複素振幅分布 $\bar{g}(x, y)$ より,

$$R = \frac{\iint_S |\bar{g}(x, y)|^2 dx dy}{\iint_S |\bar{g}(x, y) - \alpha g(x, y)|^2 dx dy} \quad (4)$$

と定義している. この R は $g(x, y)$ と $\bar{g}(x, y)$ の類似度が高いと大きな値をとる. ここで, 積分範囲 S は再生光波の中でも物体像を含む部分のみとする. また, α は R を最大にするような複素数であり, 次式で与えられる.

$$\alpha = \frac{\iint_S \bar{g}(x, y) g^*(x, y) dx dy}{\iint_S |g(x, y)|^2 dx dy} \quad (5)$$

3. シミュレーション結果

Fig.5 にシミュレーションを行った物体のモデルを示す. 物体は 1 辺が 7[mm] のワイヤフレームの立方体である. この物体光波の数値合成に用いたパラメータを Table 1 に示す. ここで, SPA による拡散係数の最適化に用いた評価領域は Fig.5 の物体が鮮明になるように選んでいる. この領域内における 3 種類の手法による S/N 比の比較を Fig.6 に示す. また最適化誤差拡散法で用いた拡散係数を Table 2 に示す. この係数を求めるために用いた SPA の制御パラメータは摂動 $c = 0.0007$ とゲイン係数 $g = 0.0001$ である.

Fig.6 からわかるとおり, シミュレーションでは

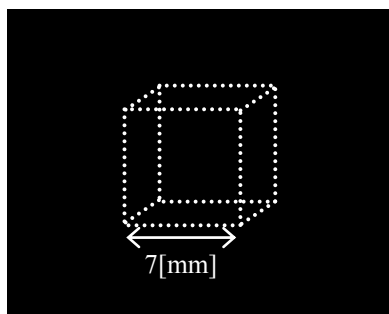


Fig.5 The schematic illustration of the model of the three-dimensional object.

Table 1 Parameters used for calculation of the object wave.

Focal distance of Fourier lens	300[mm]
Reconstruction wavelength	632.8[nm]
Number of samplings	2048×2048
Sampling distance	11.58[μm]
Linear density of point sources	5000 [point/m]
Depth of object	10[mm]
Pixel size of assessment area	1098×1123[Pixel]

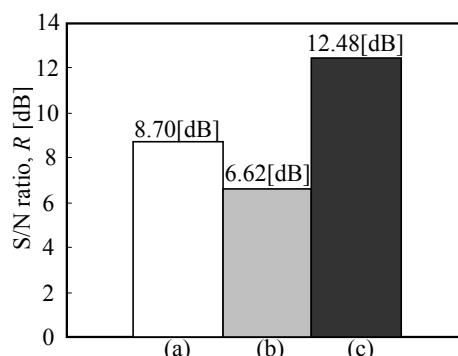


Fig.6 S/N ratio of simulated reconstruction of CGHs encoded by simple encoding (a), Floyd-Steinberg error-diffusion (b), and optimized error-diffusion (c).

最適化拡散係数を用いた誤差拡散法が最も S/N 比が高くなるという結果が得られた. 一方, Floyd-Steinberg 型誤差拡散法によるコーディングの S/N 比は単純位相コーディングより低い結果となった. これは, Floyd-Steinberg 型誤差拡散法では, 再生像の中央部分にフリーゾーンと呼ばれるノイズの少ない領域が生じる一方, 周辺部では逆にノイズが増加する性質があるためと思われる[4].

4. 光学再生

本研究では, Fig.7 に示す光学系を用いてキノフォームタイプ CGH の光学再生実験を行った. 光源には波長 632.8[nm] の He-Ne レーザを用い, 平

Table 2 The optimized coefficients of error-diffusion.

	Real	Imaginary		Real	Imaginary
A1	0.139103	0.025105	A7	-0.02415	0.002493
A2	-0.04828	-0.0182	A8	0.016532	0.015135
A3	-0.02404	-0.02063	A9	-0.03389	-0.00152
A4	0.06305	0.026453	A10	-0.05413	-0.00259
A5	0.121048	-0.01342	A11	-0.01759	0.00227
A6	-0.0031	0.003747	A12	0.019631	-0.00382

行光を SLM に入射し, 焦点距離 300[mm]のフーリエ変換レンズを用いてフーリエ変換した. 位相変調型 SLM として, ピクセルピッチ 8.0[μm]で解像度 1920 \times 1080 の HOLOEYE 社製の反射型 SLM である PLUTO を用いた. なお, シミュレーションではサンプリング数が 2048 \times 2048 であるため, SLM のサンプリング数にあわせて中央部分の 1920 \times 1080 ピクセルを切り取り, SLM に表示した.

本研究で用いた SLM は非回折光強度が 60%のため, 光学再生像の中心部に非常に強い非回折光が生じる. そのため, Fig.7 に示すようにフーリエレンズの後ろ側焦点面に 0.28[mm]径の線状遮蔽物を置き非回折光の除去を行った.

3 種類のコーディング手法で求めた位相分布を SLM に表示して得られた光学再生像を Fig.8 に示す. この結果より, 共役像を抑制した真の像のみが再生されていることがわかる. 単純位相コーディングによる再生像(a)では, 比較的明るい再生像が得られるが立方体の内部付近にノイズが生じている. また Floyd-Steinberg 誤差拡散法を用いた(b)では再生像が非常に暗いため, 鮮明な像が得られていない. 最適化拡散係数を用いた(c)では, (a)と比べると再生像の明るさはわずかに劣るものの, ノイズの大半が除去された再生像となっている. そのため, 3 つの手法の中で, 最適化拡散係数を用いたコーディング手法が最も明瞭なホログラム再生が可能であった. これは, Fig.6 のシミュレーションとも一致する結果である.

なお, Fig.8 の再生像全てにおいて, 影および中

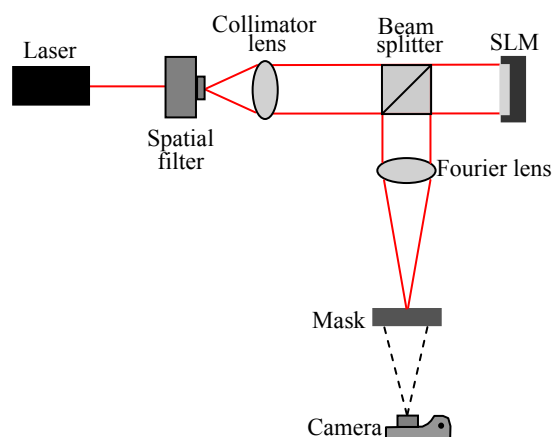


Fig.7 Experimental setup for optical reconstruction of phase-encoded CGHs.

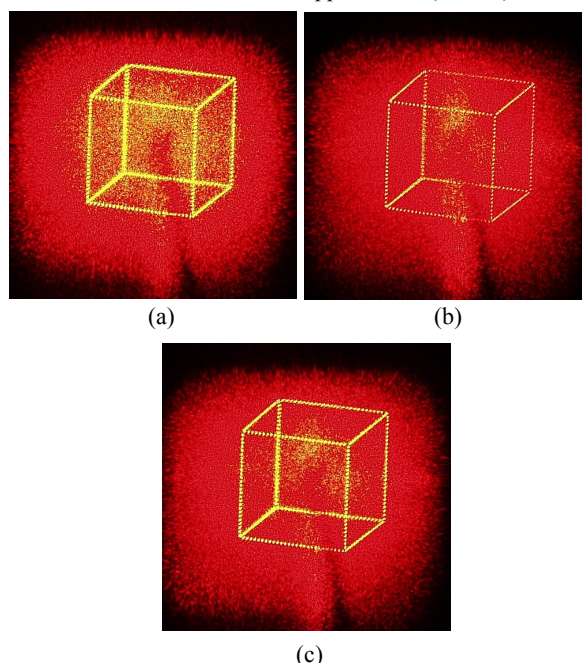


Fig.8 Optical Reconstruction of CGHs encoded by simple encoding (a), Floyd-Steinberg error-diffusion (b), and optimized error-diffusion (c).

央部の明るいノイズが生じている. これは非回折光を除去するための遮蔽物の影と除去しきれなかった非回折光である.

5. まとめ

位相変調型 SLM を用いて, 位相コーディングを行ったキノフォームタイプの CGH を光学再生したところ, 再生像として真の像のみを得た. またシミュレーションにおいて, 拡散係数を最適化した誤差拡散法による位相コーディングが最も高い S/N 比を与えることがわかった. 光学再生実験でもこの場合の再生像が最も良好であった. しかし, 非回折光が強く観測されたため, 遮蔽物によるその除去が不可欠であった. しかし, 非回折光は完全には除去できず, また再生像に遮蔽物の影が生じた.

参考文献

- [1] O. Bryngdahl, A. Lohmann: J. Opt. Soc. Am. **58**, 620-624(1967).
- [2] T. Mishima, 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] 松尾, 松島: 映情学誌 **60**, 561-568(2006).