# 同時摂動型最適化法を用いた適応型誤差拡散法による 計算機合成ホログラムの位相コーディング

Phase-Encoding of Computer-Generated Holograms by Adaptive Error-Diffusion Algorithm Using the Simultaneous Perturbation Algorithm

## 松 尾 大 樹<sup>†\*</sup>, 正会員 松 島 恭 治<sup>†</sup>

Daiki Matsuo<sup>†\*</sup> and Kyoji Matsushima<sup>†</sup>

**Abstract** In binary phase encoding of computer-generated holograms (CGHs), quantization usually decreases the quality of the reconstructed image. For reducing the quantization and coding noises, we developed an adaptive error-diffusion method by using the simultaneous perturbation algorithm in which the diffusion coefficients are adapted for the size and layout of the object. Furthermore, binary phase-encoded CGHs were fabricated by using a mask-transferring process. Its optical reconstructions and numerical reconstructions in a Fourier setup were demonstrated.

キーワード:誤差拡散法,同時摂動型最適化法,計算機合成ホログラム,ディジタル合成ホログラム,フォトポリマー,マスク転写

#### 1. ま え が き

近年のコンピュータの発達に伴い,仮想物体からの光波 の回折と干渉をコンピュータによりシミュレートすること によって,実在しない物体のホログラムを作成することが 可能となった.これを計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram,以下 CGH)と呼ぶ.しかしながら, 現在の CGH は,技術的な問題をいくつか抱えており,実 用的な3次元画像技術として成熟するには至っていない.

ディスプレイを用途として CGH を作成するためには, まず数値的に与えられた物体モデルからの光波(物体光波) をホログラム面上で求める必要がある.これを光波の数値 合成と呼ぶ.ディスプレイ用の CGH ではある程度以上の サイズと視域角を必要とするため,実用的な CGH ではそ の画素数が 10<sup>7</sup> ピクセル以上となり,光波の数値合成に莫 大な時間を要する.これが CGH の抱える問題点の一つと なっている.しかしながら,光波の数値合成によく用いら れる点光源モデル<sup>1)</sup> では,すでに種々の加速計算手法が提 案されており<sup>2)-5)</sup>,またポリゴンそのものを面光源とする

† Department of Electrical Engineering and Computer Science, Kansai University 光波回折法<sup>6)</sup> なども提案されており,計算機技術の発達も 相俟って,この問題は徐々に緩和されつつある.

次に,再生照明光の空間変調により,再生照明光を物体 光波に変換して初めて立体像が得られる.この時の空間 変調パターンを求める処理をコーディングと呼ぶ.従来 の写真型のホログラムの基本原理では,参照光波R(x,y)と物体光波O(x,y)の干渉によりこの空間変調パターン  $I(x,y) = |R(x,y) + O(x,y)|^2$ を得た.これがホログラ ム干渉縞であり,参照光波と同じ再生光波をI(x,y)で空間 変調することにより,物体光波が再生されることは理論的 に容易に示される.しかし,このコーディング方法では原 理的には振幅変調型の空間変調パターンとなるため,必然 的に再生照明光が減衰する.そのため,再生照明光を遮ら ない位相変調型の空間変調パターンを得ることが望ましい が,CGHの様な薄いホログラムでかつ変調量が一般に量 子化される場合には,このような参照光波との干渉による 方法で高い品質の再生像を得ることは困難である.

そこで CGH では, このような参照光との干渉によるの ではなく,数値合成した物体光波にできるだけ近い光波に変 換するための理想的な振幅,または位相の量子化変調パター ンを得るため,反復フーリエ変換法<sup>7)8)</sup>や,Direct Binary Search 法<sup>9)</sup>(以下,DBS 法),誤差拡散法<sup>10)</sup>等のコーディ ング手法がすでに研究されている.

反復フーリエ変換法は,フーリエ変換の反復計算により 位相または振幅の変調パターンを得る手法である.この手 法の問題点として,多数のフーリエ変換を反復するため, 莫大なサンプリング点を有するディスプレイ用 CGH では,

<sup>2004</sup>年3月,電子情報通信学会総合大会で発表

<sup>2005</sup> 年 9 月 1 日受付, 2005 年 11 月 10 日再受付, 2005 年 12 月 21 日 採録

<sup>†</sup> 関西大学 工学部 先端情報電気工学科

<sup>(〒 564-8680</sup> 大阪府吹田市山手町 3-3-35, TEL06-6368-0933)

<sup>\*</sup>現在,京セラ(株)勤務

<sup>(</sup>Yamate-cho 3–3–35, Suita, Osaka 564–8680, Japan) \* KYOCERA Corp.

計算に長時間を要することが挙げられる.DBS 法は,一般 にバイナリホログラムに適用される手法であり,各ピクセ ルを反転する度に再生像の品質を数値的に評価し,ピクセ ル数 N に対して, $2^N$ の組合せ中から最適解を探索する手 法である.そのため理想的には最良の変調パターンが得ら れるが,反復フーリエ変換法以上に時間のかかる手法であ り, $N \sim 10^7$  に達するディスプレイ用 CGH では,実用的 な時間で探索が終了しない.

一方,誤差拡散法<sup>10)</sup>は,量子化した際に生じる各ピクセ ルごとの階調誤差を周期的に周囲のピクセルに分配する手 法であり,上述の反復法や探索法とは異なり,すでに拡散 係数が決定されていれば,短時間にコーディングが終了す るという大きな利点がある.特にフーリエ型ホログラムで は,誤差拡散法によりコーディングされた再生像には,フ リーゾーンと呼ばれるノイズが減少する領域が生じる.し かし,従来用いられてきた固定的な拡散係数では,フリー ゾーンの形状が一定であるため,物体の位置や大きさによっ ては,ノイズ軽減効果が期待できない場合や逆効果になる 場合があった.

そこで本研究では,再生する物体の位置,大きさに応じた 拡散係数を同時摂動型最適化法<sup>11)</sup>(Simultaneous Perturbation Algorithm,以下 SPA)により求める適応型誤差拡 散法を提案する.この手法は,誤差拡散法の一種であるが, 再生物体の位置と大きさによって拡散係数を変化させると ころが,従来の誤差拡散法と異なっている.この手法では, 最適化された拡散係数を求めるために必要な時間は,反復 フーリエ変換法と同程度である.しかしながら,拡散係数 さえ求まっていれば,誤差拡散によるコーディング自体は これらの手法に比べて極めて短時間で終了する.したがっ て,再生物体の様々な位置と大きさに応じて,最適化した 拡散係数のテーブルを事前に作成しておき,再生物体に応 じて拡散係数を切り替えることにより,将来的には動画レ ベルでの高速コーディングも可能になると考えられる.

この種の適応型誤差拡散の手法としては,すでに遺伝的ア ルゴリズム (Genetic Algorithm,以下GA)による手法<sup>12)</sup> が提案され,効果があることが示されている.しかしなが ら,報告されている CGH は512×512 ピクセルと小型で 実用的とは言いがたく,そのためか数値実験結果のみしか 示されていない.これは,GA を用いた手法では収束が遅 く,実用的なサイズの実際のホログラムをコーディングす ることが困難であるためであると考えられる.

一方,当初ニューラルネットワークの学習則として提案 された SPA の特徴はすべてのパラメータ(拡散係数)を同 時に最適化することであり,拡散係数の個数に関わらず高 速な収束が期待できる.また,GAに比べて単調に収束す るため,収束の判定が容易であり,本格的なサイズのホロ グラムに適用可能であると考えた.

本研究では,フーリエ光学系で再生できる 4096 × 4096 ピクセルの実際的なサイズの CGH に適用できる拡散係数 の最適化を行った.この時,拡散係数の個数を増加した場合についても調べた.また,数値実験だけではなく,物体像が2次元画像の場合と立体物の場合について,位相変調パターンをフォトポリマーに転写する手法<sup>13)</sup>により,実際にバイナリー位相型 CGH を作製し,その光学再生像を確認した.

2. 位相変調型計算機合成フーリエホログラムの作成

#### 2.1 計算機合成フーリエホログラムの原理

計算機合成フーリエホログラム (Computer-Generated Fourier Hologram, 以下 CGFH) の数値合成の原理を図1 に示す.CGFHは,言い換えると,フーリエ光学系で再生 したい回折光を形成する空間変調器である.この回折光に は再生したい像が信号として含まれている.再生したい像 を含み,CGFH のコーディング処理において入力となる複 素振幅画像を本研究では入力画像 g(x,y) と呼ぶ.

入力画像の一部には再生したい信号を含んでおり,これ を物体像 f(x,y) と呼ぶ.再生面において光学再生したい物 体が 2 次元の平面画像である場合は,その振幅だけが重要 であるため,f(x,y) は実数分布として与えられる.一方, 立体物を光学再生したい場合は,再生面の前後に配置した 仮想物体 (数値モデル) からの光波複素振幅を再生面上で求 めておいて,それを物体像とする.したがって,立体物の場 合には,f(x,y) は振幅と位相を含む複素振幅画像となる.

入力画像 g(x,y) の逆フーリエ変換

$$G(u, v) = |G(u, v)| \exp[j\Phi(u, v)]$$
$$= \mathcal{F}^{-1}\{g(x, y)\}$$
(1)

がホログラム面での複素透過率分布を表す.しかしながら, 振幅と位相の両方を変調することは一般に困難であるため, 何らかの方法でG(u,v)の近似値となるホログラムG'(u,v)をコーディングする必要がある.これは,位相型 CGHの 場合には一般に

$$G'(u, v) = \exp[j\Phi'(u, v)]$$
  

$$\Phi'(u, v) = \mathcal{Q}\{\Phi(u, v)\}$$
(2)

と表される.ここで Q{·}は位相の量子化演算を表している.

G'(u,v)の位相分布を有するホログラムを作製し,その ホログラムをレンズを用いて,光学的フーリエ変換するこ とにより入力画像に類似した光学再生像 g'(x,y) を得るこ とができ,それには物体像が含まれている.

物体像 f(x,y)を埋込んだ入力画像 g(x,y)の構造を図 2 に示す.物体像 f(x,y)のサンプリング数を  $N_x \times N_y$  と する.本研究では,最終的に2値の位相型ホログラムを作 製するため,フーリエ変換の性質から,その再生像は同一 再生面上に点対称な共役像を含む,いわゆる双子像 (Twin image) となる.そのため,本研究では入力画像のサンプリ ング数を  $M \times N = 4N_x \times 4N_y$  とし,図2に示す入力画 像の座標系で物体像の位置を  $(x_0, y_0)$  とした.







図 2 物体像を埋め込んだ入力画像 An input image in which an object image is embedded.

2.2 位相変調型計算機合成フーリエホログラムの量子化 前節で述べたとおり G(u,v) は単純なフーリエ変換で求 まるものの,それは複素振幅分布であり,そのままでは実 際のホログラムとして作製できない.位相変調型ホログラ ムでは振幅透過率は1 であるため, $|G'(u,v)| \equiv 1$ となる ようにコーディングする必要がある.

また本研究では,振幅分布として作製したマスクをフォ トポリマーに転写することによって,位相型の CGFH を 作成する方法をとっているが,この転写マスクを描画する には,多値の濃度階調を有する高解像度の描画装置が必要 である.しかし,現存の機器でそれを実現するのは困難で あるため,本研究では,高解像度の業務用印刷機器である イメージセッタを用いた.イメージセッタは,画像を白黒 2 階調で描画するため,連続値の位相分布に相当する濃度 分布をさらに2 階調に量子化する必要がある.そのための コーディング手法として,本研究では次に述べる単純2値 化,誤差拡散法,そして,SPA による適応型誤差拡散法の 三つを用いている.

(1) 単純2値化

逆フーリエ変換することによって得た複素分布の振幅値が,最大1になるように正規化した分布を求め,図3に示すようにG(u,v)の位相角  $\Phi(u,v)$ が $-\pi/2 < \Phi(u,v) \le \pi/2$ の場合には, $\Phi'(u,v) = 0$ ,それ以外では  $\Phi'(u,v) = +\pi$ とする方法である.



図 3 位相の 2 値化 Binary quantization of phases.



(2) 誤差拡散法

誤差拡散法では,画像の各点を順次走査し,量子化によ り生じる複素値の誤差を拡散係数に従って,周囲のサンプ リング点に拡散する.本研究では図4に示すように,x方 向に左から右,y方向では右端から一段上の左端へと処理 していくラスタ走査を用いた.また本研究では,従来型の 固定的な拡散係数を用いる場合は,CGFHでも良好な結果 が得られることが知られている,Floyd-Steinberg 型の拡 散係数を用いた<sup>14)</sup>.

#### 3. 同時摂動型最適化法を用いた適応型誤差拡散法

誤差拡散法で Floyd-Steinberg 型拡散係数を用いた場合, CGFH の再生像の周辺部分に量子化ノイズが偏り,再生像 の中央部にフリーゾーンと呼ばれる量子化ノイズの少ない 領域が生まれる.このように,誤差拡散法でコーディング したホログラムの再生像の特性は,拡散係数に依存して大 きく変わる.そこで,拡散係数自体を再生したい物体の形 に合わせて変化させるのが適応型誤差拡散の考え方である. 以下,SPA を用いて拡散係数を最適化するための手順につ いて述べる.

3.1 同時摂動最適化法による拡散係数の最適化アルゴ リズム

SPA による拡散係数の最適化の流れを図 5 に示す.t回目の反復において,l個の拡散係数 $A^{(t)} = (A_1, ..., A_l)$ による誤差拡散位相コーディングを行い,フーリエ変換により数値再生像を求め,その評価値Eを求める.次にランダムな摂動cSを加えた拡散係数 $A_p^{(t)}$ を

$$\mathbf{A}_{\mathbf{P}}^{(t)} = \mathbf{A}^{(t)} + c\mathbf{S} \tag{3}$$

とする.ここで $\mathrm{S}=(S_1,\cdots,S_l)$ は+1または-1の乱数

論 文 同時摂動型最適化法を用いた適応型誤差拡散法による計算機合成ホログラムの位相コーディング

(85) 563



図 5 同時摂動型最適化法を用いた適応型誤差拡散法の流れ図 A flow diagram of the adaptive error diffusion using the simultaneous perturbation algorithm.



図 6 拡散係数パターン Patterns of diffusion coefficients.

値から成る符号ベクトル,cは摂動量を意味しており,小 さな実数値である.この拡散係数 $A_P^{(t)}$ を用いて,同様に誤 差拡散コーディングとフーリエ変換を行い再生像の評価値  $E_P$ を求める.

次に,この *E* と *E*<sub>P</sub> の二つの評価値から,次式の修正ベ クトル M を求める.

$$M = \frac{(E_{\rm P}^{-1} - E^{-1})S}{c}$$
(4)

この修正ベクトルにゲイン係数  $\alpha$  を掛けて拡散係数を修正 する.すなわち, t+1回目の反復では拡散係数は

$$\mathbf{A}^{(t+1)} = \mathbf{A}^{(t)} - \alpha \mathbf{M} \tag{5}$$

となる.ここで,ゲイン係数  $\alpha$  は正の定数である.以上を 反復して評価値が最小となるように,拡散係数の修正を繰 り返す.T回の反復計算を終えると,最適化された拡散係 数  $A^{(T)}$ が得られる.ここで,拡散係数の初期値は  $A^{(0)} \equiv 0$ と設定した.なお,摂動 c とゲイン係数  $\alpha$  は最適化の制御 パラメータであり,事前の試行により適切な値を選んでお く必要がある.

3.2 ホログラムの評価方法

(1) S/N

コーディングしたホログラム G'(u,v) の再生像

$$g'(x,y) = \mathcal{F}\{G'(u,v)\}\tag{6}$$

は元の g(x,y) に比べて劣化する . そこで次式で定義する S/N

$$R = \frac{\iint_{\mathbf{S}} |g'(x,y)|^2 dx dy}{\iint_{\mathbf{S}} |g'(x,y) - \beta f(x,y)|^2 dx dy}$$
(7)

で劣化の程度を評価した.ここで,積分範囲Sとして再生 光波の中でも物体像を含む部分のみをとるものとする.こ のS/Nは,物体像f(x,y)とコーディングしたホログラム の再生像に含まれる物体像部分の類似度を表しており,値 が大きいほうが類似度が高く,再生像の品質が高いといえ る.なおここで, $\beta$ はスケールファクタと呼ばれ,Rを最 大にする複素係数であり,

$$\beta = \frac{\iint_{\mathcal{S}} g'(x,y) f^*(x,y) dx dy}{\iint_{\mathcal{S}} |f(x,y)|^2 dx dy}$$
(8)

と定義する.なお,物体像として2次元画像を用いた場合 は,再生像の振幅のみが重要で位相分布は再生像の品質に 無関係であるため,複素振幅分布をその絶対値に置き換え て評価した.一方,立体物からの物体光波を物体像 f(x,y) とした場合にはその位相も重要であるため,式(7)のとお り,複素分布としての評価を行った.

(2) エネルギー効率

エネルギー効率 η は,ホログラムの再生光波全体のエネ ルギーに対する物体像領域のエネルギー比であり,次式で 定義する.

$$\eta = \frac{\iint_{S} |g'(x,y)|^2 dx dy}{\iint_{H} |g'(x,y)|^2 dx dy}$$
(9)

ここで,積分範囲Sは式(7)と同じであるが,Hは再生 光波全体である.エネルギー効率は再生像の明るさを表し ており,値が高いものほど明るい再生像が得られているこ とになる.

(3) SPA に用いる評価関数

SPA の最適化に用いる評価関数 E として,次式を用いた.

 $E = R^{-1} + w \cdot \eta^{-1} \tag{10}$ 

ここで,wは評価の荷重である.なお,SPA は評価関数の極小解を求めるアルゴリズムであるため,S/Nの逆数  $R^{-1}$ とエネルギー効率の逆数 $\eta^{-1}$ を評価値としている.

### 4. 数値実験とその結果

4.1 実験パラメータ

本研究では,物体像 f(x,y) を  $N_x = N_y = 1024$  でサ ンプリングしたため,ホログラム全体のサンプリング数を M = N = 4096 とした.実験に用いた共通のパラメータ を表 1 に示す.

2 次元物体像としては,図 7(a) に示す 1024×1024 ピク セルの平面画像を用いた.一方,立体物の物体像としては, 図 7(b) に示すワイヤーフレーム立方体からの物体光波を用 いた.この立方体は,再生面から 10[mm] 奥に位置し,そ の物体光波を点光源密度 5000[point/m]の漸化式を用いた 点光源法<sup>4)</sup> によって求めている.

なお,2次元物体像の場合はf(x,y)は位相を持たない振

564 (86)





(平面画像) 図 7 実験に用いた物体像

Object images used in experiments.



図 8 入力画像中の物体像の配置

The disposition of an object image in the input image.

表 1 CGFH 作成に用いた主なパラメータ .ı r. . **4 1**. ...:...: d fobuionti

Parameters used for synthesizing	and fabricating CGFHs.
入力画像のピクセル数 $M \times N$	$4096 \times 4096$ [Pixel]
物体像のピクセル数 $N_x  imes N_y$	$1024\times1024$ [Pixel]
サンプリング間隔 $\delta x, \delta y$	$6.25 \; [\mu m]$
再生面でのサンプリング間隔	$4.99 \; [\mu m]$
物体像サイズ	$5.10 \times 5.10 \ [mm^2]$
光源の波長	632.8 [nm]
焦点距離	202 [mm]

幅値のみのグレースケール画像であり,そのままでは逆フー リエ変換後の複素振幅 G(u, v) の中心付近にエネルギーが 集中する.これを防ぐため, f(x,y) の位相を  $-\pi$  から  $+\pi$ にわたって一様乱数化した.一方,3次元物体像の場合は, f(x,y)自体が位相を持つので位相の乱数化は必要ない.

4.2 拡散係数の個数による比較

図 6 に示す拡散係数の個数が,4個,12 個の2 種類の 拡散係数パターンにおいてそれぞれ最適化を行った.これ は拡散係数の個数の増加により,ノイズ軽減効果に差があ るかどうかを確めるためである.なお,本実験では物体像 の配置は,図8に示す配置1の場合で最適化を行い,荷重 w = 0とした.数値計算による再生像を図9,反復回数に 対する評価値の推移を図10に示す.

図9の数値的な再生像より,拡散係数の個数が異なって も、フリーゾーンの形状がわずかに異なるだけで再生像に ほとんど差がないことがわかる.しかし,S/Nを求めると 拡散係数の個数が多い方の値が高くなっていることが確認



図 9 2 種の拡散係数パターンに対する数値再生像 (w = 0) Numerical reconstructions of CGFHs encoded in the two patterns of diffusion coefficients (w = 0).



図 10 反復回数に対する評価値の推移 (w = 0) The change in values of the cost function with the number of iteration (w = 0).

できる.これは,最適化を行うパラメータが増えたことに よって,その自由度が増したことが理由と考えられる.ま た,図10より拡散係数の個数が増加しても,収束に要する 反復回数ほとんど変わらず,どちらにおいてもおよそ300 回までに収束した.なお、これらのシミュレーションでは 摂動 c とゲイン係数  $\alpha$  に関しては , c = 0.001 ,  $\alpha = 0.005$ に設定している.また,これらの最適化過程では,FFTを 用いた再生像評価が計算時間の大半を占めるため,拡散係 数の増加によるコーディング時間や拡散係数修正時間等の 増加は, 収束するまでに必要な計算時間全体にはほとんど 影響しない.

以上の結果から,以後の適応型誤差拡散法はすべて拡散 係数 12 個,反復回数を 300 回として最適化を行った.

4.3 物体像の配置に対する適応

入力画像中の物体像の位置に応じて,再生像のノイズ分 布が変化する適応型誤差拡散の効果を確認するため,図8 に示す四つの異なった配置の入力画像を数値実験に用いた.

ここでは、これらの物体像の配置で単純2値化と Floyd-Steinberg 型拡散係数による誤差拡散法,適応型誤差拡散 法の三つのアルゴリズムでの数値再生像を求め,S/Nとエ ネルギー効率の比較を行った.図11の(a)~(d)は単純2 値化による数値再生像で, (e) ~ (h) が Floyd-Steinberg 型 拡散係数を用いた誤差拡散法, (i) ~ (1) が w = 0 の適応型 誤差拡散法による数値再生像である.なお再生像はすべて 4096 × 4096 ピクセルである.これら数値再生像の S/N と エネルギー効率をそれぞれ図 12,図 13 に示す.

図 11 に示した (a) ~ (d) の単純 2 値化ではノイズの分布 には偏りがなく,再生像全体に均一に生じている.そのた



図 11 異なった物体像配置パターンに対する数値再生像 (w = 0)Numerical reconstructions for different dispositions of the object image (w = 0).



図 12 物体像配置パターンに対する S/N の比較 (w = 0) S/N ratios for different dispositions of the object image (w = 0).

め,特に再生像の白色部分が激しく劣化している.また当 然ながら,物体の位置に関わらず再生像の品質は一定であ る.一方,図11の(e)と(f)のFloyd-Steinberg型拡散係 数を用いた従来の誤差拡散法を用いた結果では,ノイズに 偏りが生じ,ノイズの少ないフリーゾーンが再生像中央部 に生じていることがわかる.(e)と(f)では,物体像が誤 差拡散法により生じたフリーゾーン内にあるため,(a)と (b)よりも物体画像の白色部分にノイズが少なく,再生像 が良好である.しかし,このような固定的な拡散係数の場



合,フリーゾーンの形状が一定で,(h)の場合などでは,物体像と量子化ノイズが重なってしまい,単純2値化による(d)よりも逆に再生像が劣化している.これらの結果に対して,適応型誤差拡散法の再生像(i)~(l)では,物体の位置に応じてフリーゾーンの形状が変化しているため,単純2値化のように,物体画像の白色部分にノイズを生じず,また,Floyd-Steinberg型係数を用いた従来の誤差拡散法の場合と比べて,物体の配置に依存せず,どのような場合でも再生像が良好になっていることがわかる.

図 12 から,単純2値化法では再生像の S/N がどの配置で も 11[dB] 程度で一定であったのに対して,Floyd-Steinberg 型拡散係数による誤差拡散法の場合には,物体像がフリー ゾーン内にあるときは S/N が 13[dB] 程度まで向上するこ とがわかる.しかし,配置3や4のように物体像がフリー ゾーン内から外れると,S/N が単純2値化よりも低下し, 逆効果となった.一方,本研究で提案する適応型誤差拡散 法を用いた場合,物体の位置に関わらず 17[dB] 程度以上の S/N が得られていることがわかる.

このように,本手法でフリーゾーンの位置や形状が再生 画像の位置と一致して変化するのは,(7)式で示したS/N が増加するように図5の過程で拡散係数を修正していくた めである.物体像を含む領域に設定する(7)式の積分範囲 S内にノイズが存在すると,S/Nの評価値が低下するため, Sを含む領域内のノイズが減少する方向に修正が進むこと になる.

図 13 から,単純2値化法では物体像の配置とは無関係 にエネルギー効率は35[%]程度であることがわかる.これ は,ノイズが再生像のほぼ全体に均一に拡散するため,そ れとともに光のエネルギーが全体に均一に拡散するためと 考えられる.一方,Floyd-Steinberg型拡散係数による誤 差拡散法の場合では,フリーゾーン内ではノイズだけでは なく,光のエネルギー自体が低下する.そのため,物体像 がフリーゾーン内にあるときは,エネルギー効率が3[%]程 度と極端に低下してしまうことがわかった.逆に,物体像



図 14 荷重 w の変化に対する S/N とエネルギー効率の推移 Changes of the S/N ratio and energy efficiencies with the weight w.

がフリーゾーン内から外れ周辺部に位置する場合は,ノイ ズが物体像と重なって計測されるため,数値上エネルギー 効率は向上しているが,この時はもちろん再生像は大きく 劣化している.

一方,本研究で提案する適応型誤差拡散法を用いた場合, エネルギー効率は14[%]程度と著しい低下はなく平均的に 高い値となった.このことから適応型誤差拡散法を用いる ことにより,視認性が向上した明るい再生像が得られると 考えられる.

## 4.4 エネルギー効率を含めた評価関数で最適化を行っ た場合

4.2 節と 4.3 節の数値実験では,w = 0とした.この場合,拡散係数の最適化を行うと,S/Nを向上させることはできるが,図13に示すとおり,エネルギー効率の低下を引き起こしてしまう.そこで本節では,エネルギー効率の低下を抑えるために, $w \neq 0$ として,エネルギー効率  $\eta$ を評価関数に組込んで,配置1の場合において最適化を試みた.荷重wの変化に対するS/Nとエネルギー効率の変化を図14に示す.

この結果から,荷重 w を適切に設定して最適化を行う ことにより,S/N をそれほど悪化させず,エネルギー効率 を向上できることがわかった.例えば,wの値を 0.25 と 設定したとき,S/N は 16.7[dB] であり,w = 0の場合の 17.4[dB] と比べ,わずかに低下しているが,エネルギー効 率は 19.6[%] とw = 0の場合の 14.4[%] よりも大きく向上 していることがわかる.

#### 5. 光学実験とその結果

#### 5.1 フォトポリマーによる位相型 CGH の作製

光学実験では,コーディング結果の2値の位相分布を,透 過率0と1の2値の振幅分布としてイメージセッタで描画 したものをマスクとして用い,そのパターンを屈折率分布 としてフォトポリマーに転写することにより,バイナリー 位相型 CGH を作製した<sup>13)</sup>.このときの転写方法は,図15 に示すとおり,マスクとフォトポリマーを密着してレーザ 光で露光するという簡単なものである.なお実験には,ダ



図 15 マスク転写法<sup>13)</sup> によるバイナリー位相型 CGH の作製 Fabrication of binary phase-encoded CGHs by a masktransferring process<sup>13)</sup>.

イソー (株) 製の厚さ 15μm のフォトポリマー<sup>15)</sup>を用い, 事前の試行により,露光時間や露光強度の最適値を求めて おいて,バイナリー位相型 CGH の作製を行った.

#### 5.2 作製した位相型 CGFH の光学再生像

作製したバイナリー位相型 CGFH の光学再生像を図 16 に示す.図中に記載の S/N とエネルギー効率は,光学再生 像から求めた測定値ではなく,4章のシミュレーションよ り求めた計算値であり,各手法によるコーディングの質を 示している.また,3次元入力物体では,真の像と共役像 が前後に 20[mm] ずれて再生されるため,図中に白枠で示 した真の像の方にカメラのピントを合わせて撮影した.

図 16 より, 誤差拡散法によって位相コーディングした CGFHの再生像(c)-(f)の方が,単純2値化の再生像(a)と (b)より, ノイズが減少していることが確認できる.また, 適応型誤差拡散法を用いたホログラムは,Floyd-Steinberg 型と比べエネルギー効率が高いため,その再生像(e)と(f) はFloyd-Steinberg型のそれに比べて明るい再生像となり, 視認性が向上していることが確認できる.

#### 6. む す び

本研究では,位相型の CGFH 作成の際,再生像に生じ るコーディングノイズを緩和するためのコーディングアル ゴリズムとして,誤差拡散法の拡散係数最適化に SPA を 用いた適応型誤差拡散法を提案し,再生像の改善を試みた. また,4096×4096という実際的なサイズのホログラムを 作製し,光学再生を行ってその効果を確認した.

拡散係数の個数が4個,12個の2種類でSPAによって 拡散係数の最適化を行った場合,拡散係数の個数が多い方 が,S/Nが高くなることが確認できた.SPAでは全係数を 同時に最適化するため,拡散係数の個数を増やしても最適 化に要する評価回数はほとんど変わらず,ほぼ300回まで には評価値が収束した.一方,GAでは,拡散係数4個の 場合で最適化を行った場合,評価回数を10000回要するこ とが報告されている<sup>12)</sup>.このことより,SPAを用いた拡 散係数の最適化では,処理の高速化が可能であると考えら れる.

数値実験で示されたS/Nは,単純2値化法ではどの物体像 配置でも一定の低い値であるのに対して,Floyd-Steinberg 型のような固定的な拡散係数では,物体像がフリーゾーン



(a)単純2値化 S/N 11.3(dB) エネルギー効率 35.5(%)

(C)過応生決定は低低 S/N 17.4(dB) エネルギー効率 14.4(%)

2次元物体像

S/N 11.6(dB) エネルギー効率 2.1(%)







(b)単純2個化 S/N 9.0(dB) エネルギー効率 36.1(%)

(d)FS型拡散係数(f)適応型誤差拡散法S/N 10.0(dB)S/N 13.5(dB)エネルギー効率 2.7(%)エネルギー効率 16.1(%)

#### 3次元物体像

図 16 作製したバイナリー位相型 CGFH の光学再生像.S/N およびエネルギー効率はシミュレーションによる評価 値であり,また(b),(d),(f)中の白枠はカメラのピン トが合っている方の再生像を示している.

Optical reconstructions of fabricated binary phaseencoded CGFHs. Note that the values of S/N ratio and energy efficiency are calculated by numerical simulations and the white frames in (b), (d) and (f) indicate the reconstructed image which is in focus.

にあるかどうかで大きく変化し,配置によっては逆効果となった.それに対して適応型誤差拡散法では,物体像の配置に応じてフリーゾーンの形状が変化するため,物体像配置に関わらず,S/Nの高い良好な再生像を得られることを確認できた.

また,数値実験のエネルギー効率測定から,固定的な拡散 係数で物体像がフリーゾーン内にある場合は,エネルギー 効率が著しく減少することも示された.これは,光学再生 した際に,暗い再生像となることを意味している.それに 対して,適応型誤差拡散法ではフリーゾーンそのものが変 化するため,エネルギー効率が高いことがわかった.また, エネルギー効率そのものを評価関数に組込むことにより, S/N をさほど減少させずにエネルギー効率を増加できるこ ともわかった.

最後に,マスク転写法を用いてバイナリー位相型 CGH を作製し,その光学再生像を観察したところ,本研究の適応 型誤差拡散法を用いた CGH の再生像は,数値実験で確認 されたとおり,単純2値化よりもノイズが少なく,Floyd-Steinberg 型誤差拡散法よりも明るい像であることが確認 できた.

フォトポリマーを提供して頂いたダイソー(株)に深謝い たします.また,興味深い最適化アルゴリズムを考案され, ご教示頂いた関西大学前田裕教授に感謝いたします.

- J. P. Waters: "Holographic image synthesis utilizing theoretical methods", Appl. Phys. Lett., 9, pp. 405–407 (1966).
- M. Lucente: "Interactive computation of holograms using a lookup table", J. Electronic Imaging, 2, pp. 28-34 (1993).
- 3) H. Yoshikawa, S. Iwase and T. Oneda: "Fast computation of Fresnel holograms employing difference", SPIE Proc. Practical Holography XIV and Holographic Materials VI, #3956, pp. 48– 55 (2000).
- 4) K. Matsushima and M. Takai: "Recurrence formulas for fast creation of synthetic three-dimensional holograms", Appl. Opt., 39, pp. 6587–6594 (2000).
- 5) 下馬場, 伊藤: "ホログラフィ専用計算機 HORN-4", 3 次元画像コン ファレンス'2001, pp. 9-12 (2001).
- 6) K. Matsushima: "Computer-generated holograms for threedimensional surface objects with shade and texture", Appl. Opt., 44, pp. 4607–4614 (2005).
- 7) F. Wyrowski and O. Bryndahl: "Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography", J. Opt. Soc. Am., A 5, pp. 1058–1065 (1988).
- 8) F. Wyrowski: "Iterative quantization of digital amplitude holograms", Appl. Opt., 28, pp. 3864–3870 (1989).
- 9) M. A. Seldwitz, J. P. Allebach and D. W. Sweedney: "Synthesis of digital holograms by direct binary search", Appl. Opt., 26, pp. 2788–2798 (1987).
- 10) S. Weissbach, F. Wyrowski and O. Bryngdahl: "Digital phase hologram: Coding and quantization with an error diffusion concept", Opt. Commun., 72, pp. 37–41 (1989).
- 11) Y. Maeda, H. Hirano and Y. Kanata: "A learning rule of neural networks via simultaneous perturbation and its hardware implementation", Neural Networks, 8, pp. 251–259 (1995).
- 12)田中: "GA による計算機ホログラムにおける最適誤差拡散の推定方法", 映情学誌, 54, pp. 394-401 (2000).
- 13)川淵,松尾,横山,松島: "フォトポリマーを用いた位相変調型計算機合成 ホログラムの作成",2003 年電子情報通信学会総合大会,pp. D-11-142 (2003).
- 14) R. Hauck and O. Bryngdahl: "Computer-generated holograms with pulse-density modulation", J. Opt. Soc. Am., A1, pp. 5–10 (1984).
- 15) K.Yokoyama, T.Matsuo and H.Tanigawa: "Photopolymer for recoding transmission and reflection volume phase holograms", SPIE Proc. Practical Holography XVI and Holographic Materials XIII, #4659, pp. 334–343 (2002).



<sup>ま つ ぉ だ い き</sup> 松尾 大樹 2003 年 , 関西大学工学部電気工学科 卒業 . 2005 年 , 同大大学院前期博士課程電気工学専攻修 了 . 同年 , 京セラ (株) 入社 .



松島 赤治 1984年,大阪市立大学工学部応用物 理学科卒業、1990年,同大大学院博士課程修了、同年, 関西大助手,2000年,ドイツ Friedrich-Schiller Jena 大学客員研究員、2003年,関西大助教授、計算機合成ホ ログラム,回折光学素子の研究に従事、工博、正会員、

#### 〔文 献〕