

最適化誤差拡散法を用いた イメージ型超高解像度 CGH の合成

High-Definition Image CGH Created by Optimized Error-Diffusion Algorithm

山下裕士¹ 有馬恭旭¹ 中村将樹¹
Hiroshi Yamashita¹ Yasuaki Arima¹ Masaki Nakamura¹
松島恭治¹ 中原住雄²
Kyoji Matsushima¹ Sumio Nakahara²

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関西大学 システム理工学部 機械工学科

²Department of Mechanical Engineering, Kansai University

ABSTRACT

An error diffusion technique is applied to creating binary-amplitude image CGHs in order to improve the object shading. Image-type CGH with binary amplitude fringe is commonly unable to reconstruct object shading, because amplitude information of the object field is removed by binarization if the object is close to the hologram. In our technique, a set of coefficients of the error diffusion are iteratively optimized so that brightness of a test pattern is correctly reproduced in simulated reconstruction. It is verified that the optimized coefficients are effective for creating binary-amplitude image CGHs.

Keywords: 計算機合成ホログラム, イメージ型ホログラム, 2値化, 誤差拡散法, 同時摂動型最適化法

1. はじめに

計算機合成ホログラム(以下 CGH)は数値的に合成した干渉縞を空間光変調器(SLM)やフリンジプリンタ,あるいは微細加工技術等により表示/描画し,立体画像を得る技術である。我々は,従来からポリゴン法とレーザーリソグラフィを用いた超高解像度CGHを報告してきた[1]。これらのCGHは,仮想物

体とホログラム間の距離が数 cm 以上あり,フレネル型ホログラムに分類されるものであった。しかしながら,これのCGHにおいて,仮想物体がホログラムと重なるように配置したイメージ型を作成すると,陰影が再生されないという問題が生じる。これは,レーザーリソグラフィや電子ビーム等の微細加工技術では一般に2値の干渉縞しか描画できず,伝搬距離の短いイメージ型では振幅情報が失われるためであると考えられている。そのため,電子ビーム描画ではその極めて高い解像度を活かして干渉縞を疑似的に多値化することも行われているが,レーザーリソグラフィではそれも困難である。

そこで本研究では,干渉縞の2値化において再生

山下裕士

<yamashita@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)

像シミュレーション[2]から拡散係数を修正する最適化誤差拡散法を用いることによって、再生像品質と陰影の再現性を大幅に向上した。

2. 拡散係数の最適化

2.1 輝度再現性確認用ホログラム

陰影の再現性を評価するために、8階調の光強度

$$\tilde{I}_n = \frac{n}{7} \quad (n=0,1,\dots,7) \quad (1)$$

を設定したテストパターンをテクスチャとした2次元物体を Fig.1 のようにホログラムより 10mm 前方に配置し、光波数値合成を行い、干渉縞を求めた。そして、干渉縞を振幅2値化したホログラムの波動光学的シミュレーション再生像から陰影再現性の評価を行った。ここで干渉縞の2値化には、次に述べる閾値による2値化(以下、単純2値化)と最適化誤差拡散法を行った。また比較のために、同じテストパターンを 100mm 後方に配置したフレネル型を単純2値化したものの再生像も求めた。

2.2 単純2値化

物体光波の複素振幅分布を $O(x, y)$ とし、参照光波を $R(x, y)$ とすると、物体像の再生には寄与しない項を除くことにより、干渉縞強度分布を

$$\hat{I}(x, y) = 2\text{Re}[O(x, y)R^*(x, y)] \quad (2)$$

と計算できる。 $\hat{I}(x, y)$ は正負両方の値をとるので、ここでは閾値を 0 として2値化した。

2.3 拡散係数の最適化を行った誤差拡散法

干渉縞強度分布に対して誤差拡散法を適用させるために、強度分布の定義を(2)式から

$$I(x, y) = \hat{I}(x, y) + B \quad (3)$$

とし、負値をとらないようにした。ここで B は $\hat{I}(x, y)$

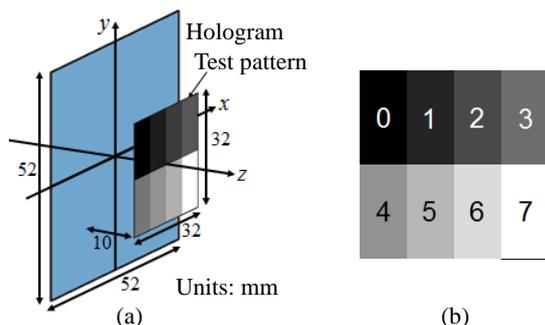


Fig.1 3D scene of the test CGH for evaluation of brightness reproducibility (a) and the test pattern (b).

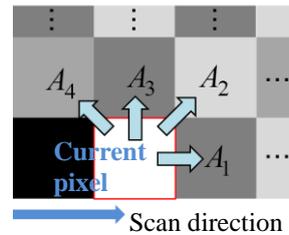


Fig.2 Coefficients for error-diffusion.

の最小値を符号反転した値である。このように定義した強度分布を $I(x, y)$ の最大値 I_{max} で除算することで、強度分布を $0 \leq I(x, y) \leq 1$ となるように正規化し、誤差拡散処理を行う。誤差拡散で用いる閾値を、単純2値化で用いた閾値 0 と同じにするため、 B/I_{max} を閾値として用いている。この閾値を用いて2値化した時の値を $I'(x, y)$ とすると、コーディング誤差

$$\varepsilon = I - I' \quad (4)$$

が生じる。誤差拡散法は、この誤差 ε をある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。

ホログラムに対して適切な拡散係数を求めるために、同時摂動型最適化法(Simultaneous Perturbation Algorithm, 以下 SPA)[3]を用いて、Fig.2 に示す4個の拡散係数 $A_1 \sim A_4$ を最適化した[4,5]。その時に用いた評価関数については、次で述べる。

2.4 最適化に用いる評価関数

2値化した際に再生される陰影が、式(1)で設定した光強度 \tilde{I}_n とどの程度ずれているのかを定量的に評価するために、平均2乗誤差平方根(Root Mean Squared Error, 以下 RMSE)を

$$E = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{n=0}^7 (\sqrt{\tilde{I}_n} - a_n)^2} \quad (5)$$

と定義した。ここで a_n は、Fig.3 に示すシミュレーション再生像(振幅像)において、テストパターンの各領域における平均振幅であり、これが $\sqrt{\tilde{I}_n}$ と良く一致するほど輝度(陰影)の再現性が高いことになる。

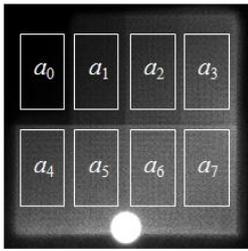


Fig.3 An example of simulated reconstruction of the test CGH and definition of evaluation areas.

3. シミュレーション結果

3.1 輝度再現性確認用ホログラム

再生シミュレーションに用いた CGH のパラメータを Table 1 に示し, SPA によって得られた最適化拡散係数を Table 2 に示す. シミュレーション再生像 Fig.4 はテストパターンをホログラムの奥 100[mm] に配置したフレネルホログラムを単純 2 値化した場合で, テストパターンの陰影が確認できる. それに対して, ホログラムの手前 10[mm] に配置したイメージ型を単純 2 値化した Fig.5 では, 陰影が再生されていないことがわかる. 同じイメージ型でも最適化拡散係数を用いて誤差拡散した Fig.6 では, 陰影の再現性が改善されているのが確認できる. 特に正面視点の再生像(b)では, RMSE も低い値を示しており良好な再生となっている. 紙面では陰影が分かりづらいので, それぞれの結果における正面視点(b)での平均振幅特性を Fig.7 に示す. これを見ると, イメージ型においては, 誤差拡散したほうが, 単純 2 値化より理想曲線に近いことがわかる. そこで, これ以降での誤差拡散には, Table 2 の拡散係数を用いる.

3.2 球のシミュレーション再生

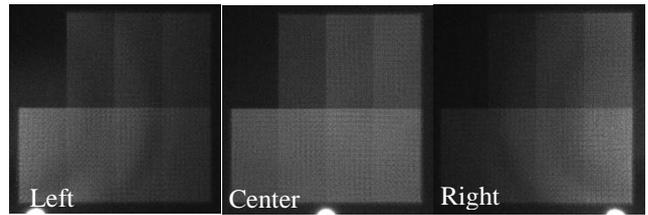
陰影についてさらに確認するために, ポリゴン数 168, 半径 15[mm]の球で, Table 1 のパラメータを用いてシミュレーション再生を行った. 球の中心をホログラム面の奥 100[mm]に配置したフレネル型の結果を Fig.8 に示す. また, 球の中心がホログラムに一致するように配置したイメージ型で単純 2 値化した場合を Fig.9, 誤差拡散した場合を Fig.10 に示す. Fig.10 では, Fig.9 の物体のまわりの白いノイズが消え, フレネル型の Fig.8 とほぼ同様な陰影が再生されていることが確認できる. しかし, 左側の視点から見た時はあまり明瞭に陰影が再生されていないこ

Table 1 Parameters for the test CGH.

Number of pixels	65,536×65,536
Pixel pitches	0.8μm×0.8μm
Dimension	5.24×5.24cm ²
Reconstruction wavelength	632.8nm

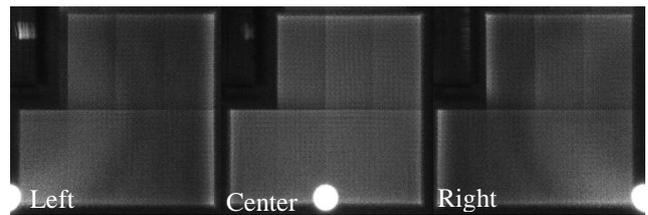
Table 2 Optimized coefficients of error-diffusion.

Coefficient	Value
A ₁	0.073498
A ₂	0.073498
A ₃	-0.073498
A ₄	-0.073498



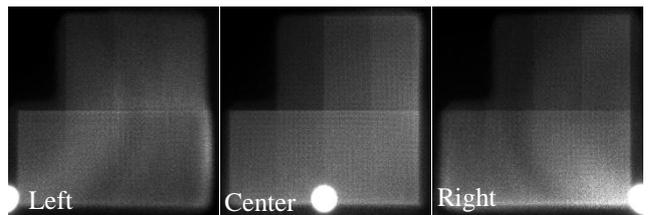
(a) RMSE: 0.623 (b) RMSE: 0.146 (c) RMSE: 0.220

Fig.4 Simulated reconstruction of binary-amplitude Fresnel CGHs encoded by simple threshold. $z = -100$ mm.



(a) RMSE: 0.621 (b) RMSE: 0.329 (c) RMSE: 0.210

Fig.5 Simulated reconstruction of binary-amplitude image CGHs encoded by simple threshold. $z = 10$ mm.



(a) RMSE: 0.211 (b) RMSE: 0.057 (c) RMSE: 0.104

Fig.6 Simulated reconstruction of binary-amplitude image CGHs encoded by error-diffusion. $z = 10$ mm.

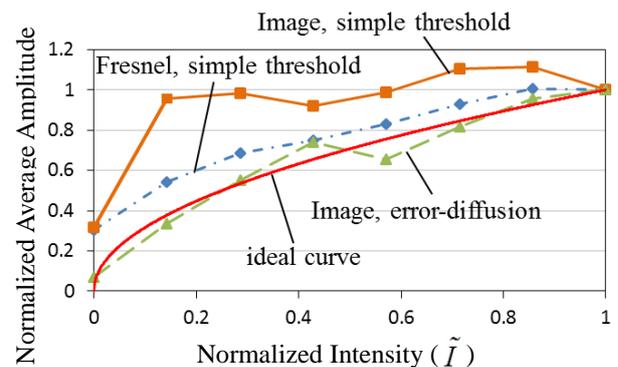


Fig.7 Average amplitudes of the numerically reconstructed patterns.

とがわかる.

3.3 “Emblem”のシミュレーション再生

以上の結果を踏まえ高解像度ホログラム“Emblem”を計算し, そのシミュレーション再生を行った. その3Dシーンを Fig.11 に示す. パラメータは Table 1 と同じである.

まずホログラム面の奥 100[mm]に物体を配置したフレネル型を Fig.12 に示す. 次に物体が手前に 12.5[mm]飛び出すイメージ型とし, 単純2値化した場合を Fig.13 に, 誤差拡散した場合を Fig.14 に示す. 前節の結果と同様, 誤差拡散した Fig.14 では, 単純2値化で生じる物体周辺のノイズが減少し, 再生像品質が向上している. しかし, フレネル型の Fig.12 ほどの品質にはなっていないことがわかる.

4. まとめ

2次元テストパターンのシミュレーション再生像の輝度再現性を向上するよう最適化した拡散係数が, 他の3次元物体に対してもある程度有効であり, 誤差拡散処理により陰影の再現性と再生像品質が向上することがわかった. しかし, 左右に視点を変えてホログラムを見たときには, 残念ながら, フレネル型ほどの再生像品質は得られないことがわかった.

本研究は日本学術支援振興会の科研費(215001114)の助成を受けたものである.

参考文献

- [1] K. Matsushima, S. Nakahara: Appl. Opt., **48**, H54-H63 (2009)
- [2] 村上, 圓山, 松島: 3次元画像コンファレンス 2009, 105-108(2009).
- [3] Y. Maeda, H. Hirano and Y. Kanata: Neural Networks, **8**, 251-259(1995).

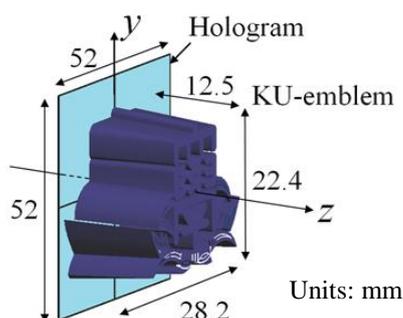


Fig.11 3D scene of image hologram “Emblem”.

[4] 松尾, 松島: 映情学誌 **60**, 561-568(2006).

[5] 細川, 松島, 堀越: 3次元画像コンファレンス 2009, 101-104(2009).

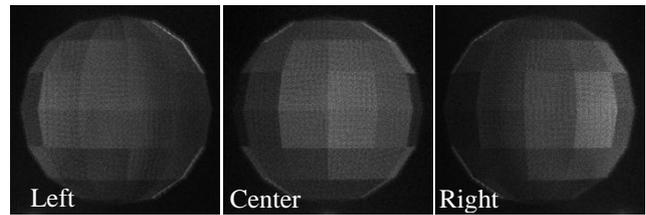


Fig.8 Simulated reconstruction of binary-amplitude Fresnel CGHs encoded by simple threshold. $z = -100$ mm.

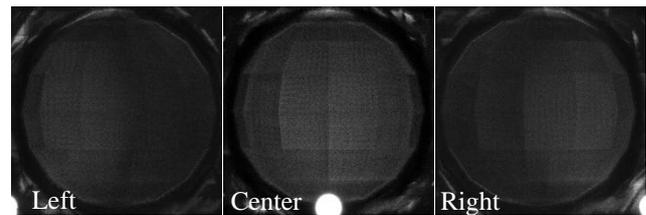


Fig.9 Simulated reconstruction of binary-amplitude image CGHs encoded by simple threshold. $z = 0$ mm.

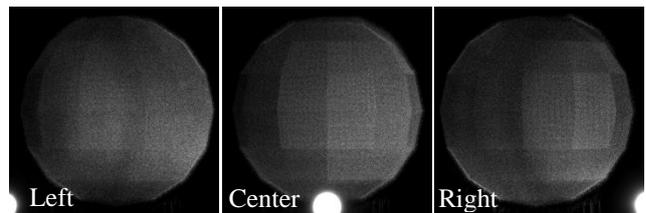


Fig.10 Simulated reconstruction of binary-amplitude image CGHs encoded by error-diffusion. $z = 0$ mm.



Fig.12 Simulated reconstruction of binary-amplitude Fresnel CGHs encoded by simple threshold. $z = -100$ mm.



Fig.13 Simulated reconstruction of binary-amplitude image CGHs encoded by simple threshold. $z = 0$ mm.

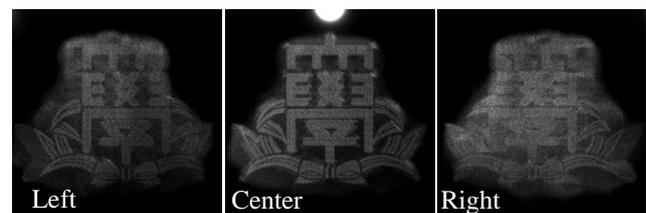


Fig.14 Simulated reconstruction of binary-amplitude image CGHs encoded by error-diffusion. $z = 0$ mm.