

ポリゴン法によるイメージ型超高解像度 CGH の合成と白色再生

山下 裕士[†] 松島 恭治[†] 中原 住雄[‡]

[†] 関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

[‡] 関西大学 システム理工学部 機械工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

E-mail: yamashita@laser.ee.kansai-u.ac.jp

あらまし 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 では、従来、フレネル型ホログラムが作成されていた。これは、2 値振幅変調ホログラムであるため、イメージ型を作成すると陰影が再生されない問題が生じるためであった。本研究では、拡散係数を修正する最適化誤差拡散法を用いて干渉縞を 2 値化することにより、再生像品質と陰影の再現性を向上させ、白色光再生が可能なホログラムの作成を試みた。

キーワード 計算機合成ホログラム, イメージ型ホログラム, バイナリホログラム, ポリゴン法, 白色光再生

High-Definition Image CGH Created by Polygon-Based Method and its Reconstruction by White Light

Hiroshi YAMASHITA[†] Kyoji MATSUSHIMA[†] Sumio NAKAHARA[‡]

[†] Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

[‡] Department of Mechanical Engineering, Kansai University

Yamate-cho 3-3-35, Suita, Osaka 564-8680, Japan

E-mail: yamashita@laser.ee.kansai-u.ac.jp

Abstract Image-type binary CGHs commonly lost the surface shading and texture-mapping in the optical reconstruction. This is caused by the binary amplitude fringe that is unable to reconstruct object brightness because amplitude information of the object field is removed by binarization if the object is close to the hologram. In this paper, an optimized error diffusion technique is proposed to improve shading and texture-mapping. Image-type high-definition CGHs created by the proposed technique can be reconstructed by white light.

Keyword CGH, Image-type hologram, Binary hologram, Polygon-based method, Reconstruction by white light

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,仮想物体からの光波をポリゴン法で計算し,レーザーリソグラフィを用いて描画することにより超高解像度の CGH を作成し, "The Venus"[1]や"Aqua 2"[2]など強い立体感を与える幾つかの CGH 作品をすでに報告してきた。これらの CGH は,仮想物体をホログラムの奥に数 cm 以上離して配置したものであり,フレネル型ホログラムに分類されるものであった。CGH では仮想物体の配置を変更することが容易であり,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ことも容易である

が,イメージ型では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,それぞれのポリゴンからの光波がホログラム面全体に広がらず重なり合わないため,2 値化により振幅情報が失われることが原因と考えられている。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[3],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 値化において再生像シミュレーション[4]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の向上を試みた。本報告では,この手法によ

って作成したイメージ型ホログラムは白色光再生が可能であることを示す。

2. 誤差拡散の係数の最適化

2.1. 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

$$\hat{I}(x,y) = 2\text{Re}[O(x,y)R^*(x,y)] \quad (1)$$

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 0 として 2 値化した。

2.2. 最適化誤差拡散による 2 値化

誤差拡散法を用いて干渉縞強度分布を 2 値化するために、強度分布の定義を(1)式から

$$I(x,y) = \hat{I}(x,y) + B \quad (2)$$

に変更し、負値にならないようにした。ここで B は $\hat{I}(x,y)$ 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、誤差拡散処理を行なった。なお、単純 2 値化と同じ閾値になるように、 B/I_{\max} を誤差拡散の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

$$\varepsilon = I - I' \quad (3)$$

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ピクセル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)[5] を用い、次に述べる 2 種の評価関数により、Fig.1 に示す 4 個の拡散係数 $A_1 \sim A_4$ を最適化した[6]。

2.3. 陰影再現性の評価関数

陰影の再現性を評価するために、8 階調の光強度

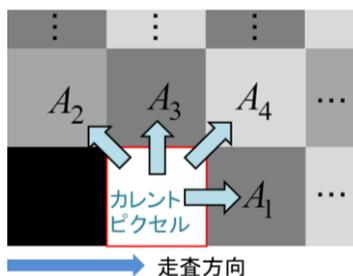


Fig.1 誤差拡散係数の定義

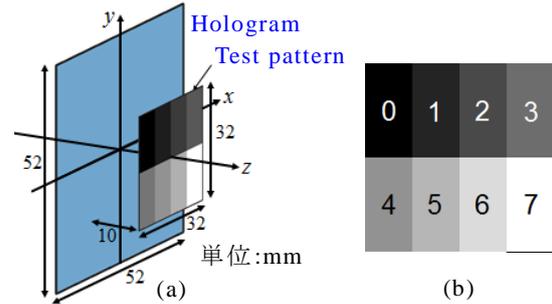


Fig.2 (a)輝度再現性確認用ホログラムの3Dシーン
(b)テストパターンのテクスチャ

$$\tilde{I}_n = \frac{n}{7} \quad (n=0,1,\dots,7) \quad (4)$$

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.2 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、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用いた。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。

再生される陰影が、式(4)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(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。

2.4. 多値 CGH 再生像との類似性による評価関数

平面テストパターンの陰影再現性による評価は、3 次元物体には適さない可能性がある。そこで、2 値化 CGH を 3 方向の視点からシミュレーション再生し、多値 CGH のシミュレーション再生像との類似性を評価値とした。

本研究では類似性の評価関数を次式で定義した。

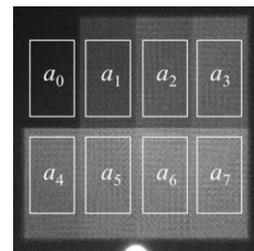


Fig.3 シミュレーション再生像の例と評価領域の定義

$$R = \frac{\iint_S f'(x,y) dx dy}{\iint_S f'(x,y) - \alpha f(x,y) dx dy} \quad (6)$$

ここで、 $f(x,y)$ と $f'(x,y)$ はそれぞれ、多値干渉縞と2値化干渉縞からのシミュレーション再生像である。 R は $f(x,y)$ と $f'(x,y)$ の類似度が高いと大きな値をとる。ここで、積分範囲 S はシミュレーション再生像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定数であり、次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{\iint_S f'(x,y)f(x,y) dx dy}{\iint_S \{f(x,y)\}^2 dx dy} \quad (7)$$

なお、SPAは最急降下法の一環であるため、実際の評価関数としては符号を反転した $-R$ を用いている。

3. シミュレーション結果

3.1. 輝度再現性確認用 CGH

輝度再現性評価による最適化に用いたCGHのパラメータをTable 1に示し、再生シミュレーションのパラメータをTable 2に示す。テストパターンをホログラムの奥100mmに配置した単純2値化フレネルホログラムのシミュレーション再生像をFig.4(a)に示す。この場合にはテストパターンの陰影が確認できる。それに対して、Fig.2の配置で単純2値化したイメージ型(b)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した拡散係数を用いて誤差拡散した(c)では、陰影の再現性が改善されていることが確認できる。最適化した係数を係数列AとしてTable 3に示す。

3.2. 3次元物体のイメージ型 CGH

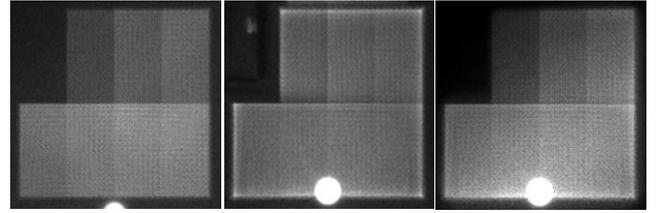
用いた3DシーンをFig.5に示す。このCGHを以下“i-Shion”と呼ぶ。3方向の視点から R を求めるため、注視点位置を $z=10$ mmとし、そこから250mm離れた位置に正面の視点を配置した。また、左右の視点は注視点を中心に半径250mm、角度 $\pm 13^\circ$ の位置に配置している。CGHとシミュレーション再生のパラメータはTable 1, Table 2と同じである。評価値 R の3方向の平均によって最適化した拡散係数のうち平均値が最大に

Table 1 輝度再現性確認用 CGH のパラメータ

ピクセル数	65536×65536[pixel]
ピクセルピッチ	0.8×0.8[μm]
ホログラムサイズ	5.24×5.24[cm ²]
再生照明光波長	632.8[nm]

Table 2 シミュレーション再生のパラメータ

結像面ピクセル数	8196×8192[pixel]
結像面ピッチ	1.0×1.0[μm]
瞳の大きさ	6[mm]
瞳～結像面間距離	24[mm]



(a) RMSE: 0.146 (b) RMSE: 0.329 (c) RMSE: 0.082
Fig.4 (a)フレネル型単純2値化 (b)イメージ型単純2値化 (c)イメージ型最適化誤差拡散

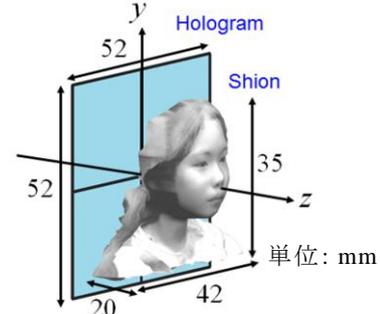


Fig.5 “i-Shion”の3Dシーン

なった拡散係数を係数列B, 最小になった拡散係数を係数列Cとし、それぞれTable 3に示す。

Fig.5の3Dシーンの多値CGHのシミュレーション再生像をFig.6に示す。この場合にはきれいな陰影が確認できる。一方、単純2値化したFig.7では陰影がほとんどない再生像となり、像の周りに白いノイズも発生している。係数列Bで誤差拡散した場合をFig.8, 係数列Cで誤差拡散した場合をFig.9に示す。評価値が高いほうがFig.6の再生像と類似度が高いはずだが、評価値が低いFig.9の方が陰影の再現性が高いように見えることから、 R は評価関数として適切ではないことがわかる。係数列Aで誤差拡散したFig.10では、正面と右側の視点で陰影の再現性が高い結果となった。左側では再現性が低下するものの、単純2値化したFig.7(a)に比べると、再生像品質が向上していることがわかる。従って2次元テストパターンのRMSEから最適化した拡散係数は3次元物体のホログラムに対しても有効であると考えられる。

4. 光学再生像

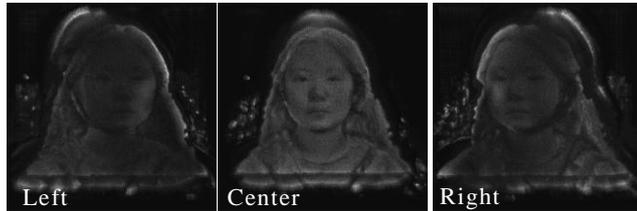
RMSEを用いて最適化した係数を用いた誤差拡散によって作成したイメージ型超高解像度CGH“Emblem”の3Dシーン[7]をFig.11に示し、白色光によるその光学再生像をFig.12に示す。

Table 3 最適化した拡散係数

	係数列 A	係数列 B	係数列 C
A ₁	0.063746	-0.015274	-0.002895
A ₂	-0.041257	-0.023842	-0.058603
A ₃	-0.064249	-0.013297	0.007588
A ₄	0.010386	-0.004901	-0.02298

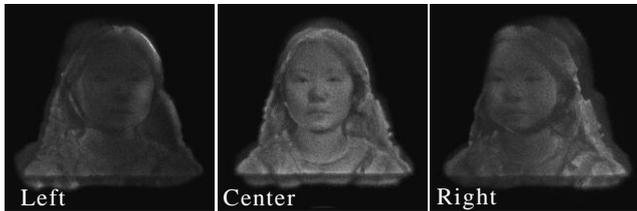


Fig.6 多値CGHのシミュレーション再生像



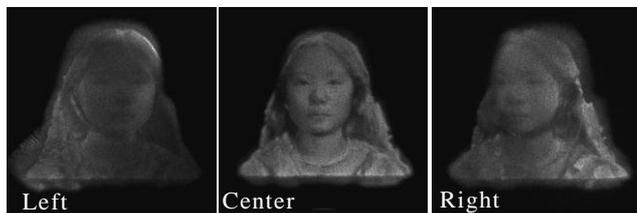
(a) 3.69[dB] (b) 5.54[dB] (c) 3.53[dB]

Fig.7 単純2値化CGHのシミュレーション再生像



(a) 7.04[dB] (b) 8.92[dB] (c) 11.23[dB]

Fig.8 係数列Bによる誤差拡散を用いたCGHのシミュレーション再生像



(a) -22.76[dB] (b) -10.56[dB] (c) -12.20[dB]

Fig.9 係数列Cによる誤差拡散を用いたCGHのシミュレーション再生像



Fig.10 係数列Aによる誤差拡散を用いたCGHのシミュレーション再生像

5. まとめ

2次元テストパターンに対してRMSEを評価関数として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、陰影の再現性が向上しない方向があり、残念ながら全方向に対して多値のホログラムと同等の再生像品質は得られ

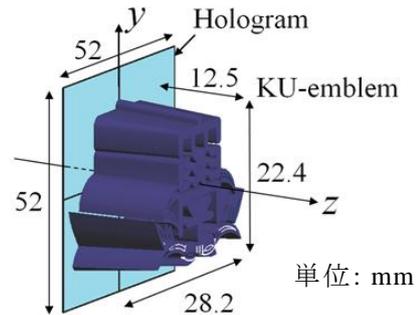


Fig.11 “Emblem”の3Dシーン



Fig.12 イメージ型CGH “Emblem”の白色光による光学再生

ないことがわかった。また、多値CGHのシミュレーション再生像との類似性を評価関数として3次元物体に対して最適化を行う手法は、陰影の再現性が低く、有効で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)、および平成23年度関西大学学術研究助成基金(共同研究)の助成を受けたものである。

文 献

- [1] K. Matsushima, S. Nakahara : “Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method”, Appl. Opt. **48**, H54-H63(2009).
- [2] 中村, 松島, 中原: “スパースな3Dシーンを有する超高解像度CGHにおける陰面消去の高速化”, 3次元画像コンファレンス2010講演論文集, 17-20 (2010).
- [3] 北村, 浜野, 吉川: “EB描画によるイメージ型バイナリCGH(3)”, 3次元画像コンファレンス’99, 314-319 (1999).
- [4] 村上, 松島: 計算機合成ホログラムの波動光学的再生シミュレーション, HODIC Circular **29**, No. 3, 7-10 (2009).
- [5] 前田, 金田: “時刻差分同時振動型最適化法”, 関西大学「技苑」**88**, 25-27(1996).
- [6] 細川, 松島, 堀越: “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”, 3次元画像コンファレンス2009講演論文集, 101-104 (2009).
- [7] 山下, 有馬, 中村, 松島, 中原: “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”, 3次元画像コンファレンス2011講演論文集, 122-125 (2011).