

スペクトル評価型誤差拡散を用いた イメージ型 CGH のバイナリコーディング Binary Coding of Image CGHs Using Error-Diffusion Optimized by Spectral Evaluation

山下裕士¹ 松島恭治¹ 中原住雄²
Hiroshi Yamashita¹ 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

Binary amplitude CGHs commonly lost the object shading and texture if the object is too close to the hologram like image-type holograms. In addition, floating images reconstructed by binary amplitude CGHs usually suffer from very intense quantization noise occurring at the edge of the viewing zone. In this paper, a novel error diffusion technique using the Hilbert path and evaluation of reconstructed spectrums is presented for reducing these problems of binary amplitude CGHs. An actual large-scale high-definition CGH is created by the proposed technique to verify its validity.

Keywords: 計算機合成ホログラム, イメージ型, バイナリホログラム, 誤差拡散

1. はじめに

近年, LCD や DMD などの表示デバイスの発達により, 自宅で気軽に 3D 映像を楽しめるようになった. しかし, 現在普及している 3D 方式では生理的な奥行き感のうち両眼視差と輻輳のみを刺激する 3D 映像が再生されるため, 眼精疲労などのために手前への飛び出し量は制限されている. そのため, 物体からの光を完全に再現できる計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram:CGH)が注目されて

いる. 計算機合成ホログラムは数値的に合成した干渉縞を空間光変調器(SLM)や高解像度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. 我々が従来から報告してきたレーザーリソグラフィ技術を利用した高解像度 CGH では古典的なホログラムに匹敵するほどの美しい空間像が再生できる[1-3].

しかし, これらは 2 値の振幅変調型ホログラムであるため, 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あった. これは, 干渉縞が 2 値の場合, 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[4], レーザー

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)

リソグラフィではそれも困難である.そこで我々は, シミュレーション再生像[5]の表面輝度から拡散係数を修正する最適化誤差拡散法を用いて干涉縞を2値化してイメージ型CGHを作成する手法を提案し, 再生像品質と陰影の再現性の向上を報告している[6,7]. しかしながら, このコーディング法では再生像の視域が狭まってしまうという問題点があった. さらに, 再生像がホログラムの前方に飛び出すフローティング型に近くなると, 2値化によって再生光の高周波領域に強い量子化ノイズが現れ, 視域の端から像を見た場合, 像が著しく劣化するという問題もあった.

そこで本研究では, 再生光波のスペクトルを評価関数とし, 最適化誤差拡散の走査にヒルベルト曲線を使用することで視域を減少することなく干涉縞の2値化を行う手法[8]を提案する. 本報告では特に, 提案手法がイメージ型での視域の問題を緩和するだけでなく, フローティング型における量子化ノイズの問題にも効果を発揮することを示す.

2. ヒルベルト曲線を用いた誤差拡散[9]

数値的な干涉から求まる双極性干涉縞強度分布を $\hat{I}(x, y)$ とすると, $\hat{I}(x, y)$ は正負両方の値をとるため, 閾値を0として2値化することができる. 本研究では, これを単純2値化と呼ぶ[6].

次に, $\hat{I}(x, y)$ が負値とならないようにオフセット値を加算した連続値干涉縞強度分布を $I(x, y)$ とし, これを単純2値化と等価な閾値で2値化した時の2値干涉縞を $I'(x, y)$ とする. 干涉縞の誤差拡散法は, 干涉縞画像を走査し, 各ピクセルに生じるコーディング誤差 $\epsilon = I - I'$ 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る[6].

本研究では, 従来法とは異なり, 走査方法として Fig.1 に示す空間充填曲線の一つであるヒルベルト

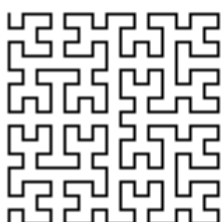


Fig.1 Hilbert path.

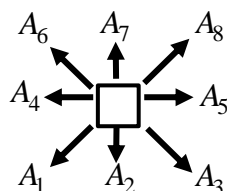


Fig.2 Diffusion coefficients.

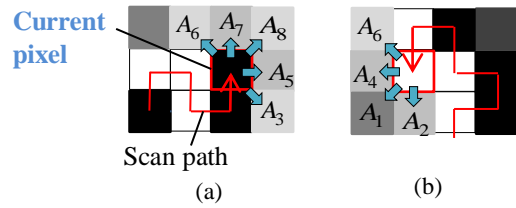


Fig.3 Examples of error-diffusion with Hilbert path.

曲線[9]を用いた. このときの拡散係数の定義を Fig.2 に示す. ヒルベルト曲線による走査では1つのピクセルは1度しか走査されないが, Fig.3 に例を示す通り, カレントピクセルによって既走査のピクセルと未走査のピクセルが異なる. すでに1度通ったピクセルについては誤差拡散を行わないため, Fig.2 の拡散係数が毎回すべて用いられるのではなくカレントピクセル毎に使用される係数が異なる点が, 従来のラスタースキャンによる誤差拡散とは異なる.

3. 再生光波スペクトルによる係数最適化

3.1 評価関数と最適係数探索の手順

参照光波を $R(x, y)$ とすると, 2値化後の干涉縞からの再生光波スペクトルは

$$B(u, v) = F\{I'(x, y)R(x, y)\} \tag{1}$$

で与えられる. ここで, $F\{\}$ はフーリエ変換を表す. 再生光波のスペクトルの一例を Fig.4 に示す. 2値化前の連続値干涉縞からの再生光波のスペクトルは同様に

$$G(u, v) = F\{I(x, y)R(x, y)\} \tag{2}$$

と表される. ここで, 2値化前後での再生光波のスペクトルの類似性を評価するために,

$$SNR_A = \frac{\iint_A B(u, v)dudv}{\iint_A B(u, v) - \alpha G(u, v)dudv} \tag{3}$$

を用いた. ここで, 積分範囲 A は Fig.4 に示す3つの評価領域であり, α は

$$\alpha = \frac{\iint_A B(u, v)G^*(u, v)dudv}{\iint_A |G(u, v)|^2 dudv} \tag{4}$$

で与えられる定数である.

最適化に用いる評価関数は, それぞれの領域で計算した SNR の荷重平均として

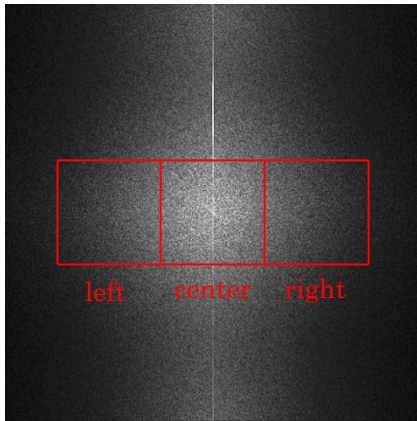


Fig.4 An example of spectral amplitude of the field emitted from a binary fringe and definition of evaluation areas.

$$SNR_{WA} = \frac{4}{9} SNR_{left} + \frac{1}{9} SNR_{center} + \frac{4}{9} SNR_{right} \quad (5)$$

と定義した. この値が高いほど, 2 値化後の再生光波の水平方向スペクトルは 2 値化前のそれに類似することになる. ここで, 2 値化によって高周波成分が失われないように高周波領域の荷重を重くしている.

このような評価関数を用い, Fig.5 に示す手順で拡散係数の最適化を行った. すなわち, 初期値の係数で誤差拡散処理した CGH の再生光を(5)式で評価し, 係数を修正する処理を反復した. この時, 同時摂動

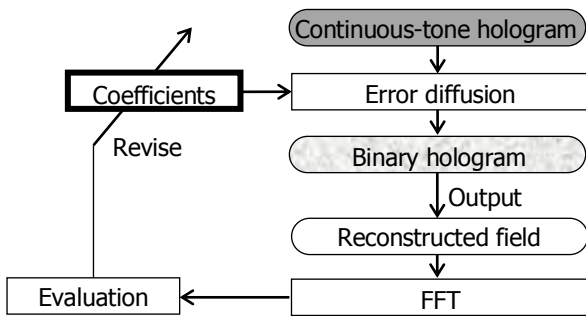


Fig.5 Flowchart for optimizing diffusion coefficients.

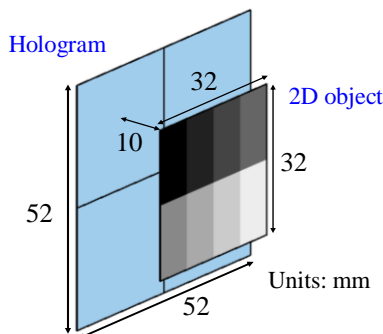


Fig.6 3D scene of the test CGH used for evaluation of spectrum.

Table 1 Parameters of the test CGH.

Number of pixels	65,536×65,536
Pixel pitches	0.8μm×0.8μm
Sizes of CGH	52.4×52.4mm ²
Reconstruction wavelength	632.8nm
Type of reference wave	plane wave
Direction of reference wave (unit vector)	(0, 0.20, 0.98)

Table 2 Optimized coefficients of error-diffusion.

Coefficient	Value	Coefficient	Value
A ₁	0.008854	A ₅	0.020724
A ₂	-0.014733	A ₆	0.008711
A ₃	0.01043	A ₇	-0.017724
A ₄	0.021808	A ₈	0.008099

型最適化法[10]を用いて修正を行った.

3.2 拡散係数最適化用テスト CGH と探索結果

Fig.6 に示すように明度変化のあるテストパターンをテクスチャとした 2 次元物体をホログラムの前方 10 mm に配置して光波数値合成を行い, 連続直干渉縞を求めた. そして, Fig.5 の手順で最適化係数を探索した. このテスト CGH のパラメータを Table 1 に示し, 278 回の反復で探索された最適拡散係数を Table 2 に示す. スペクトル評価領域のサンプリング数は各領域 16,384×16,384 ピクセルである.

係数修正の反復回数に対する SNR の推移を評価領域別に Fig.7 に示す. 水平線は単純 2 値化の場合の評価値を示している. どの評価領域においても, 単純 2 値化より SNR が向上していることがわかる.

4. フローティング型 CGH “i-Shion V3”

手前に最大 80 mm 飛び出すように見える超高解像度 CGH “i-Shion V3”を作成した. その 3D シーン

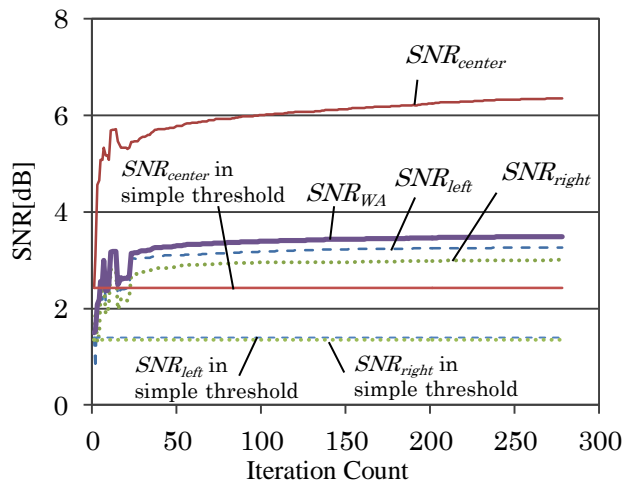


Fig.7 Variation of SNRs in optimization.

を Fig.8 に示す. 物体モデルは 3D スキャナで計測した人顔である[2]. 視域を広げるため, ピクセル数を 131,072×131,072 とし, ホログラムサイズを物体モデルよりかなり大きくとっている. それ以外のパラメータは Table 1 と同じである.

波動光学的シミュレーション[5]で求めた単純2値化の場合の再生像を Fig.9 に, 提案手法を用いた場合の再生像を Fig.10 に示す. 左右の視点から見ると, 単純2値化では像の片側のみが明るくなりすぎており, また物体のまわりに高輝度のノイズが表れている. それに対して, 誤差拡散では物体周辺のノイズが減少し, 陰影も再生され, 再生像品質と陰影の再現性の向上が確認できる. 一方, 本手法では垂直方向のスペクトル類似性を評価していないため, 縦方向の視差については, 単純2値化と誤差拡散とあまり変化が見られなかった.

5. まとめ

ヒルベルト曲線を用いた最適化誤差拡散を提案した. この時, 2値化後に陰影が失われず, 視域が狭まらないような拡散係数を求めるため, テストパターン CGH において再生光波のスペクトルの水平方向高周波成分の類似性を評価し, 最適拡散係数を探索した. 求めた拡散係数を用い, 再生像が手前に最大 80 mm 飛び出す超高解像度 CGH を作成した結果, 閾値による単純2値化に比べて, 良好な結果を得ることができた.

謝辞

本研究は, 日本学術支援振興会の科研費(215001114), およびの平成 23 年度関西大学学術研

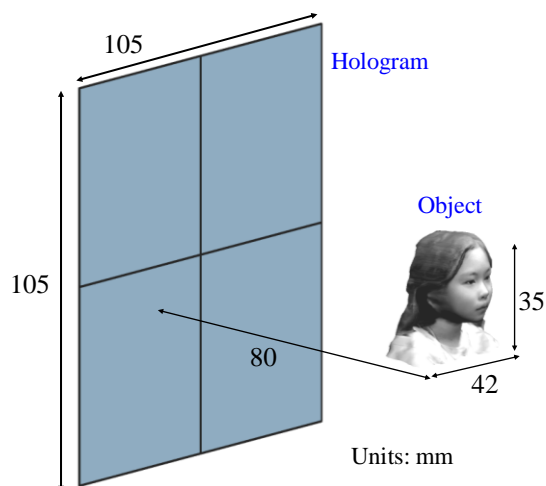


Fig.8 3D scene of the CGH "i-Shion V3".

究助成金(共同研究)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] K. Matsushima, H. Nishi, S. Nakahara: J. Electron. Imaging **21**, 023002(2012).
- [3] H. Nishi, K. Matsushima, S. Nakahara: Appl. Opt. **50**, H245-H252 (2011).
- [4] 北村, 浜野, 吉川: 3次元画像コンファレンス '99, 314-319(1999).
- [5] 村上, 松島: 映情学誌 **65**, 12, 1793-1800 (2011).
- [6] 山下, 有馬, 中村, 松島, 中原: 3次元画像コンファレンス 2011, 122-125(2011).
- [7] H. Yamashita, K. Matsushima, S. Nakahara: IWH2011, 7-8(2011).
- [8] H. Yamashita, K. Matsushima, S. Nakahara: SPIE Proc. #**8281**, 82810Z(2012).
- [9] L. Velho and J. M. Gomes, Computer Graphics **25**, No.4, 81-90 (1991).
- [10] Maeda, H. Hirano and Y. Kanata: Neural Networks **8**, 251-259(1995).

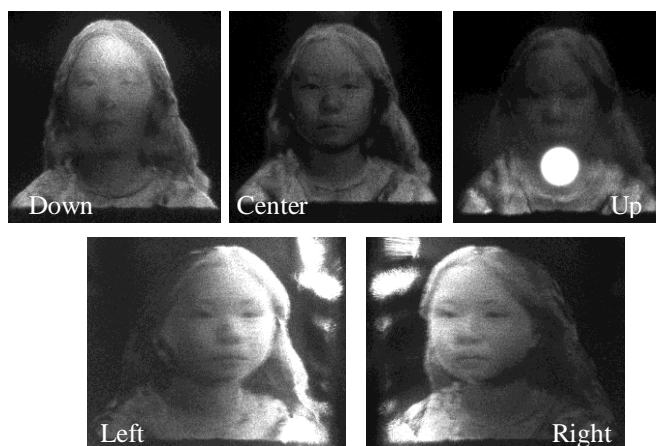


Fig.9 Simulated reconstruction of the binary-amplitude CGH encoded by the method by the simple threshold.

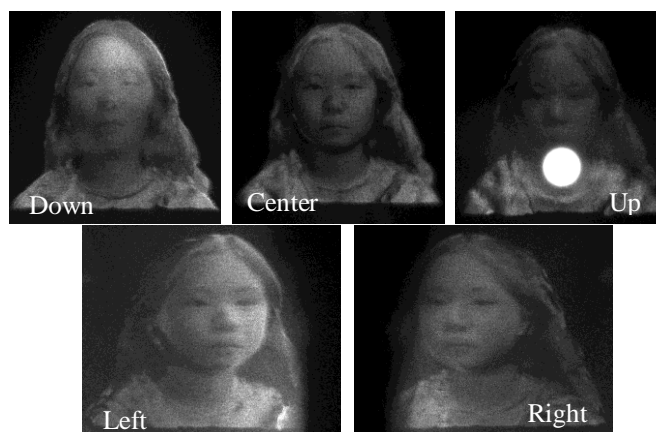


Fig.10 Simulated reconstruction of the binary-amplitude CGH encoded by the proposed error-diffusion.