誤差拡散法による計算機ホログラムからの3次元像再生

Three Dimensional Images Reconstruction from Computer-Generated Holograms using Error Diffusion Method

田中 賢一[†], 正会員 下村 輝夫[†]

Ken'ichi Tanaka[†] and Teruo Shimomura[†]

あらまし 断層タイプの計算機ホログラムに誤差拡散法を適用し、再生像について検討した。誤差拡散法を適用するといずれの面においてもパターンと雑音とを分離することができ、パターンを重なり合うように配置してもそれぞれのパターンが明確に再生された。

キーワード：誤差拡散法，計算機ホログラム，3次元像再生

1. ま え が き

計算機ホログラムはパターン認識¹⁾や、3次元像再生²⁾などさまざまな目的で作製される。計算機ホログラムの高画質化は3次元像再生の上で重要であるが、そのなかで誤差拡散法はパターンと雑音とを分離する方法として知られている^{3)~6)}。しかしながら、従来の誤差拡散法を用いた計算機ホログラムに関する研究は2次元像再生^{3)~6)}を行うものだけしか対象とされていなかった。2次元像再生に関して得られた知見を3次元物体を再生する計算機ホログラムに拡張することが必要とってくる。

本論文では、断層タイプの3次元計算機ホログラムに対して誤差拡散法を適用し、再生像について検討する。

2. 3次元物体再生計算機ホログラムへの適用

本章では、誤差拡散法により断層タイプの3次元計算機ホログラムを合成する方法について述べる。

再生パターンその位置を図1に示す。文字パターン“九州”、“工大”はともに画素数128(H)×64(V)の大きさを有し、その範囲で互いに重なり合うように配置している。作製される計算機ホログラムは画素数512×512で構成される。入力像 $g(m, n, z)$ を次式に従って離散フーリエ変換する。

$$G(k, l, z) = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^{(m+n)} g(m, n, z)$$

図1 再生パターンとその位置
Reconstruction patterns and their position.

$$\cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi(mk + nl)}{N} \right\} \quad (1)$$

ただし、 N は入力像平面における一辺当りの画素数であり、ここでは $N = 512$ である。断層タイプの計算機ホログラム記録される波面 $F(k, l)$ は、レンズの焦点面から d_2 なる距離に存在する結像する情報をもった波面 $G(k, l, z)$ の集合であり、次式により計算する。

$$F(k, l) = \sum_{d_2} G(k, l, z) \cdot \exp \left\{ \frac{\pi d_2 L^2}{j \lambda f^2 N^2} (k_1^2 + l_1^2) \right\} \quad (2)$$

$$(k_1, l_1) = \left(k - \frac{N}{2}, l - \frac{N}{2} \right) \quad (3)$$

ただし、 f はレンズの焦点距離、 L はホログラムパターンの大きさである。この $F(k, l)$ を誤差拡散法によって量子化し、白黒2値表示をすることによって、断層タイプの計算機ホログラムは作製される。

3. 実験結果

実験は計算機シミュレーションにより行った。計算機

1997年12月22日受付, 1998年1月20日採録

[†]九州工業大学 工学部 電気工学科

(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1, TEL 093-884-3272)

[†] Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

(1-1, Sensui, Tobata-ku, Kitakyushu 804-8550, Japan)

図 2 光学系
Optical system.

図 3 拡散係数
Diffusion coefficients.

シミュレーションは、図 2 に示す光学系を用いることを想定し、計算機プログラムに記録された波面を回折計算することによって行う。ただし、ホログラムからレンズまでの距離はレンズの焦点距離 $f(=300\text{mm})$ を等しくするものとし、ホログラムの大きさ L は 10mm としている。また、2つのパターン面の距離は 50mm としている。なお、光源には He-Ne レーザ ($\lambda = 6328\text{\AA}$) を用いるものとする。

計算機シミュレーションによる再生像は、強度を 256 階調でモニタに表示した後、写真撮影することによって得る。

まず、拡散係数に対する効果について論じる。誤差拡散法で用いた拡散係数は図 3 に示している。

図 4 に誤差拡散を適用しない場合の再生像を示す。いずれの面においても、雑音がパターンの周辺に強く現れているために、パターンがはっきりと現れていないことがわかる。

図 5～図 7 に誤差拡散法⁴⁾⁵⁾⁸⁾を適用した再生像を示す。拡散係数により拡散された雑音の形状が異なっているが、いずれの場合もパターンと雑音とを分離され、誤

(a) $d_2 = 0\text{mm}$ (b) $d_2 = 50\text{mm}$

図 4 再生像 (誤差拡散なし)
Reconstructed images (Non error diffusion).

(a) $d_2 = 0\text{mm}$ (b) $d_2 = 50\text{mm}$

図 5 再生像 (Floyd-Steinberg の係数)
Reconstructed images (Floyd-Steinberg's coefficient).

(a) $d_2 = 0\text{mm}$ (b) $d_2 = 50\text{mm}$

図 6 再生像 (Barnard の係数の変形)
Reconstructed images (Altered form of Barnard's coefficient).

(a) $d_2 = 0\text{mm}$ (b) $d_2 = 50\text{mm}$

図 7 再生像 (Hauck-Bryngdahl の係数)
Reconstructed images (Hauck-Bryngdahl's coefficient).

差拡散を適用しない場合と比較するとパターンが明確に再生される。しかしながら、図 5 に示す Floyd-Steinberg の係数を用いた場合ならびに図 6 に示す Barnard の係数の変形を用いた場合は、文字パターン“工大”が再生される領域に拡散された雑音が接しているため、再生像の改善が不十分である。パターンの上に雑音状のものが重畳しているが、これは他の面に再生されるべきパターンのぼけたものであると考えられる。

ここで、再生像を比較する。再生像の比較は、再生像の評価領域をパターンの存在する $128(\text{H}) \times 128(\text{V})$ 画素

表 1 再生像の比較 (MSE)
Comparison of diffusion coefficient (MSE).

拡散係数	“九州”	“工大”
誤差拡散なし	1.00	1.00
Floyd-Steinberg の係数	0.89	0.90
Barnard の係数の変形	0.92	0.97
Hauck-Bryngdahl の係数	0.76	0.81

図 8 再生像 (2つの面の距離:10mm)
Reconstructed images (distance of two planes: 10mm).

図 9 再生像 (2つの面の距離:70mm)
Reconstructed images (distance of two planes: 70mm).

の領域に限定し、その領域における平均 2 乗誤差 (MSE) により行う。

$$MSE = \left\langle \left| \frac{|g| - \langle |g| \rangle}{\sigma_{|g|}} - \frac{|r| - \langle |r| \rangle}{\sigma_{|r|}} \right|^2 \right\rangle \quad (4)$$

ただし、 $|g|$, $|r|$ は入力像、再生像の振幅の大きさ、 σ は添え字に関する標準偏差である。表 1 に、(4) 式によって計算された平均 2 乗誤差を誤差拡散なしの場合の値で正規化した値で示す。どの拡散係数においても、平均 2 乗誤差の値は小さくなっているが、なかでも Hauck-Bryngdahl の係数による誤差拡散法が、平均 2 乗誤差が最も小さいという理由で、最も優れた再生像を与える拡散係数であるということができる。したがって、2 次元像再生における結果と同様になったが、誤差拡散法の効果は断層タイプの計算機ホログラムに対して拡張を行っても、同様であるということができる。

次に、2 つのパターンの距離を変えた場合についての効果について検討する。ただし、先述の結果を基に、拡散係数については Hauck-Bryngdahl の係数を用いるものとする。

図 8, 図 9 は 2 つのパターンの距離をそれぞれ 10mm, 70mm とした場合の再生像である。パターンの距離が小さくなると他の面に再生されるべきパターンのぼけたものの影響が強くなり、逆にパターンの距離が大きくなる

と他の面に再生されるべきパターンのぼけたものの影響が弱くなっていることがわかる。したがって、パターンの距離を大きくしたほうが、お互いのパターンがそれぞれ明確に再生されるということができる。

4. む す び

本論文では、断層タイプの計算機ホログラムに誤差拡散法を適用し、再生像について検討した。

誤差拡散法を適用するとパターンと雑音とを分離することによってパターンが明確に再生されるようになるが、なかでも Hauck-Bryngdahl の係数を用いると、他の拡散係数と比較して平均 2 乗誤差が小さくなったため、良好な再生像を得ることができた。また、パターンが重なり合うように配置しても、お互いのパターンがそれぞれ明確に再生された。

これらの結果から、誤差拡散法は断層タイプの計算機ホログラムからの 3 次元像再生に対しても有効であることが明らかとなった。

今後の課題として、再生像の視覚特性や、誤差拡散における種々のパラメータ (走査、閾値、量子化数など) の影響を更に詳細に検討することが挙げられる。

本研究の一部は財団法人電気通信普及財団の補助を受けました。感謝の意を表します。

〔文 献〕

- 1) B. R. Brown and A. W. Lohmann: "Complex Spatial Filtering with Binary Masks", Appl. Opt., **5**, 6, pp. 967-969 (1966)
- 2) 尾上守夫, 金子正秀: "計算機ホログラムからの 3 次元再生像の性質", 信学論 (C), **J62-C**, pp. 771-776 (1979)
- 3) R. Eschbach: "Comparison of Error Diffusion Method for Computer Generated Holograms", Appl. Opt., **30**, 26, pp.3702-3710, (1991)
- 4) Hauck R. and Bryngdahl O.: "Computer-Generated Holograms with Pulse-Density Modulation", J. Opt. Soc. Am., **A1**, pp.5-10 (1984)
- 5) E. Barnard: "Optimal Error Diffusion for Computer-Generated Holograms", J. Opt. Soc. Am., **A5**, pp. 1803-1817 (1988)
- 6) 田中賢一, 下村輝夫: "誤差拡散法による 2 値に位相量子化した計算機ホログラムの再生像の改善", 信学論 (C-I), **J77-C-I**, 3, pp. 101-112 (1994)
- 7) 田中賢一, 下村輝夫: "計算機ホログラムからの 3 次元像再生シミュレーション", 光学, **24**, 12, pp. 739-744 (1995)
- 8) R. W. Floyd, L. Steinberg: "An Adaptive Algorithm for Spatial Gray-Scale", Proc. Soc. Inf. Disp., **17**, pp.75-77 (1976)

田中 賢一 1992 年, 九州工業大学工学部電気工学科卒業, 1994 年, 九州工業大学大学院修士課程修了。1996 年, 九州工業大学工学部助手。計算機ホログラフィを中心とした光情報処理, 画像計測, 画像処理などの研究に従事。工学博士。

下村 輝夫 1969 年, 九州工業大学工学部電気工学科卒業, 1971 年, 九州工業大学大学院修士課程修了。九州芸術工科大学助手, 九州工業大学工学部講師, 同助教を経て, 現在, 九州工業大学工学部教授。光計測, 画像評価, 画像処理の研究に従事。工学博士。正会員。