係数反転バイラテラルフィルタによる誤差拡散ハーフトーニング

Coefficient-reversed Bilateral Filter for Image Halftoning with Error Diffusion

傅 曉 宇[†], 学生会員 王 濤[†], 浦 浜 喜 一[†]

Xiaoyu Fu[†], Tao Wang[†] and Kiichi Urahama[†]

Abstract We present a new method for halftoning images by scanning the pixels in a random order and diffusing the errors by using a coefficient-reversed bilateral filter. The random traversal of pixels avoids creating artificial dot patterns that usually appear in conventional halftone images by raster scanning the pixels. The coefficient-reversed bilateral filter is effective at enhancing the edges. We apply this halftoning method to the non-photorealistic rendering of stippling images.

キーワード：ハーフトーニング，誤差拡散，係数反転バイラテラルフィルタ，エッジ強調

1. ま え が き

濃淡画像を2値化するハーフトーニング法として誤差拡散が広く用いられている。誤差拡散法の問題点として、人工的な模様の生成とエッジの不鮮明化が知られている。

人工的な模様は、虫 (worm) パターンと呼ばれる線状模様であり、画素をラスタースキャン順に2値化していくことと誤差拡散フィルタの非対称性に起因する。人工模様の抑制法としては、折り返しスキャンや空間充填曲線スキャンなどが提案されているが、各スキャン法特有の模様が依然として生じてしまう¹⁾。これについて本稿では、誤差拡散フィルタのウィンドウを対称化し、ランダム順に画素をスキャンすることで人工模様の発生を抑える。

またエッジの不鮮明化は、誤差拡散フィルタの係数が画素値に無関係に固定されていることによる。エッジを強調する誤差拡散法も提案されている^{2)~4)}が、ラスタースキャン順に基づいているものが多い。これについて本稿では、バイラテラルフィルタ (BF)⁵⁾ のようにフィルタ係数を画素値に応じて変え、アンシャープマスキングのようにエッジを強調するハーフトーニング法として、BFの重みの係数の符号を反転した係数反転BFが有効であることを示す。

以上のように本稿での新規性は、ランダム順スキャンに

よる人工模様の抑制と係数反転BFによるエッジ強調の2点である。特にランダム順スキャンは、点描画やタイル画などのノンフォトリアリスティックレンダリング (NPR) に有用であることも併せて示す。

2. ランダムスキャン誤差拡散

通常の誤差拡散では図1(a)のように、画像の左上の画素から右下の画素まで、ラスタースキャン順に2値化していく。白と黒は既に2値化した画素で、緑色は未処理の画素である。中央の画素で生じた誤差は矢印の4画素へ分配される (図1(a)はFloyd-Steinberg拡散フィルタ)。赤枠は拡散フィルタのウィンドウである。フィルタ係数の和は1とする。

本稿では、図1(b)のようにランダムな順番で画素を2値化していく。中央の画素で生じた誤差は、図1(a)と同じくウィンドウ内の未処理の画素に拡散する。

モノクロ入力画像のサイズ (画素数) を n とし、画素 (i, j) の濃淡値を $d_{ij} \in [0, 255]$ とすると、以下の手順で出力2値

図1 誤差拡散
Error diffusion.

2011 年 7 月 11 日受付, 2011 年 10 月 4 日再受付, 2011 年 10 月 24 日採録

[†]九州大学 大学院芸術工学研究院 視覚情報部門

(〒 815-8540 福岡市南区塩原 4-9-1, TEL 092-553-4512)

[†] Faculty of Design, Kyushu University

(4-9-1, Shiobaru, Minami-ku, Fukuoka-shi, 815-8540 Japan)

画像の画素値 $f_{ij} \in \{0, 255\}$ を求める．画素 (i, j) が処理済みかどうかを表す変数を u_{ij} とし，画素 (i, j) が 2 値化済みなら $u_{ij} = 0$ ，未処理なら $u_{ij} = 1$ とする．

step1) すべての画素にランダムに番号 $k \in [0, n]$ を付ける．

step2) $k=0$ とし，すべての画素で $u_{ij}=1$ と初期設定する．

step3) k を 1 増やし， $k=n$ なら終了． $k < n$ なら step4 へ．

step4) 番号が k の画素の d_{ij} が 127 以下なら，その画素の f_{ij} を 0 とし， $d_{ij} > 127$ なら $f_{ij} = 255$ とする．この画素の u_{ij} を 0 に更新する．

step5) 画素 (i, j) を中心とするウィンドウ内の画素 $(i+l, j+m)$; $-p \leq l \leq p, -p \leq m \leq p$ に誤差 $e_{ij} = d_{ij} - f_{ij}$ を拡散する (図 1 は $p=1$ の例)．すなわち未処理の画素の $d_{i+l, j+m}$ を $d_{i+l, j+m} + w_{ijlm}e_{ij}$ に更新する (係数 w_{ijlm} については次節で説明する)．

step6) step3 へ戻る．

3. 係数反転バイラテラルフィルタによる誤差拡散

上記の step5 の拡散係数 w_{ijlm} は

$$w_{ijlm} = u_{i+l, j+m} v_{ijlm} / \sum_{l=-p}^p \sum_{m=-p}^p u_{i+l, j+m} v_{ijlm} \quad (1)$$

図 2 通常の誤差拡散
Standard error diffusion.

図 3 ランダムスキャン誤差拡散
Random scanning error diffusion.

図 4 係数反転 BF による誤差拡散
Error diffusion with coefficient-reversed BF.

とする． u_{ij} は上記の処理済みチェック変数で， v_{ijlm} はフィルタ係数であり，本稿ではバイラテラルフィルタ (BF)⁵⁾ に倣って $v_{ijlm} = e^{-\alpha(l^2+m^2)-\beta(d_{ij}-d_{i+l, j+m})^2}$ とする．ただし，このなかの d_{ij} は上記の手順で更新された値ではなく，入力濃淡画像での濃淡値とする．BF では $\alpha > 0, \beta > 0$ である． $\alpha > 0, \beta = 0$ のときがガウスフィルタ (GF) である．

3.1 人工画像での予備実験

図 2(a) の人工的な画像 (112×112) で予備実験する．この市松模様の画像は左から右に少しずつ暗くなっている．

(1) 通常のラスタースキャン誤差拡散法

図 2(b)~(d) は通常よく用いられるラスタースキャン順の誤差拡散法で図 2(a) を 2 値化した結果である．(b) が Floyd-Steinberg, (c) が Burkes, (d) が Stucki の誤差拡散法である．点が各区画の右下に偏っていたり，所々で点が連続して並んで人工的な模様が生じている．

図 5 実画像例 1
Example 1 of real image.

図 6 実画像例 2
Example 2 of real image.

(2) ランダムスキャン誤差拡散法

ランダムスキャン誤差拡散法の結果を図 3 に示す。図 3(a) は $\beta = 0$ すなわち GF の場合で、(b) は $\beta = 0.01$ すなわち BF の場合である。 $p = 5, \alpha = 0.1$ とした。これらでは図 2(b)~(d) のような人工的な模様は見られない。図 3(b) ではエッジが図 3(a) よりも不明瞭になっている。これは BF では、誤差はウィンドウ内の画素値に近い画素だけに拡散され、したがって、エッジを跨っては拡散されないためである。GF では、エッジに係わらず誤差はウィンドウ内の

図 7 点描画の例
Examples of color stippling images.

図 8 一様分布の点
Uniformly distributed points.

図 9 点描画での誤差拡散
Error diffusion for stippling images.

すべての未処理画素に分配される。

3.2 係数反転 BF による誤差拡散

図 3(b) のように、 $\beta > 0$ にすると $\beta = 0$ の図 3(a) よりもエッジが不鮮明になることから、逆に $\beta < 0$ にすればエッジが明瞭になるものと思われる。 $\beta < 0$ のフィルタを係数反転 BF と呼ぶことにする。実際、図 4 のように β が負になるほどエッジが強調される。図 4(a) は $\beta = -0.0001$ で (b) は $\beta = -0.001$ である。これは、 $\beta > 0$ の BF だと誤差は画素値に近い画素、すなわちエッジの同側に拡散されるが、 $\beta < 0$ の係数反転 BF では画素値が遠い対側へ分配されるためである。例えば、エッジの明るい側で $d_{ij} > 127$ とすると $f_{ij} = 255$ となり、そこで生じた負の誤差 $e_{ij} = d_{ij} - f_{ij}$ は、BF だとエッジの同側画素を、係数反転 BF では対側画素を暗くするように拡散される。したがって BF ではエッジの明るい側が、係数反転 BF では暗い側が暗くなる。よって BF ではコントラストが下がり、係数反転 BF では上がる。ただし、図 4(b) のように β を大きく負にし過ぎると、アンシャープマスキングのようにエッジ近辺のハローが強くなり過ぎるので、適度の負の値がよい。この画像例での係数反転 BF の計算時間は、Windows Vista, 2.2GHz CPU, 2GB RAM, C 言語で 0.28 秒である。

3.3 実画像での比較実験

実画像での結果を図 5 と 6 (どちらも 175×175) に示す。両図とも (a) が入力、(b) は GF、(c) は $\beta = 0.1$ の BF、(d) は $\beta = -0.001$ の係数反転 BF (CRBF) である。 $p = 5, \alpha = 0.5$ とした。図 3 と同じく BF は GF よりもエッジがぼけており、係数反転 BF では強調されている。また図 5(e)、図 6(e) は Li のエッジ強調誤差拡散法⁴⁾の結果であり、本提案法のほうが Li の結果よりもエッジが明瞭である。係数反転 BF の計算時間は図 5, 6 とも 0.67 秒である。

4. 点描画への応用

次に、以上のハーフトニング法を図 7 のような点描画の NPR に応用する。図 7 左 (lena の眼の部分) は黒の背景に RGB の 3 色の点、右 (ハスの花と葉の 1 部) は白の背景に多色の点が打たれている。

このようなカラー点描画を作るために、本稿ではカラー画像を入力し、R,G,B3 枚に分解し、各モノクロ画像を 2 値化する。まず最初に、図 8 のように画像に一様に点を打つ。

図 8 の画像はサイズが 1000×1000 で点が見えないので、

図 10 カラー点描画
Color stippling images.

右に 1 部分を拡大表示している。R,G,B それぞれについて、図 8 の点以外の背景を灰色として、これらの点を白か黒に 2 値化する。図 8 の点配置は R,G,B 3 枚で共通して使用する。各 R,G,B 成分画像での誤差拡散は図 9 のようになる。灰色の画素は点以外の背景で、黒、白、緑が図 8 の点である。黒と白は 2 値化済みの点、緑は未処理の点である。中央の画素で生じた誤差はウィンドウ（この場合 5×5 ）内の未処理の画素へ分配される。

画素 (i, j) が未処理の点かどうかを u_{ij} で表し、画素 (i, j) が点で、かつ未処理の場合（図 9 の矢印の先の 2 画素）のみ $u_{ij} = 1$ で、その他の場合 $u_{ij} = 0$ とする。

この場合、点だけを 2 値化すればよいから 2 節の手順で「画素」と書いていたものは「点」になる。点の総数を n とする。R,G,B の 3 枚の画像それぞれで以下の手順を行う。
step1) すべての出力画素値を $f_{ij} = 127$ に初期設定する。
step2) すべての点にランダムに番号 k を付ける。
step3) $k=0$ とする。すべての点で $u_{ij} = 1$ と初期設定する。
step4) k を 1 増やし、 $k=n$ なら終了。 $k < n$ なら step5 へ。

step5) 番号が k の点の d_{ij} が 127 以下なら、その点の $f_{ij} = 0$ とし、 $d_{ij} > 127$ なら $f_{ij} = 255$ とする。

step6) 点 (i, j) を中心とするウィンドウ（図 9 の赤枠）内の点に誤差 $e_{ij} = d_{ij} - f_{ij}$ を拡散する。すなわち未処理の点の $d_{i+l, j+m}$ を $d_{i+l, j+m} + w_{ijlm}e_{ij}$ に更新する (w_{ijlm} は式 (1) と同じ)。

step7) step4 へ戻る。

R,G,B の 3 枚をこの手順で 2 値化してからカラー画像に戻す。カラー画像での点の色は $2^3 = 8$ 色になる。

結果の例を図 10 に示す。(a) と (d) が入力画像 (1000×1000)、(b) と (e) が点描画である。 $p = 10, \alpha = 0.001, \beta = -10^{-5}$ とした。計算時間は両方とも 58.3 秒である。背景は灰色で点だけをカラーにしているの、全体的に灰色がかっており、コントラストが低い。そこで各点を母点として画像をボロノイ分割し、各ボロノイセルにそれぞれの母点の色を塗ったのが (c) と (f) である。ボロノイ画像ではすべての画素はカラーなのでコントラストが回復している。このように、本提案法は点がランダムに配置されている場合でもそのまま適用できる。

5. む す び

ランダム順に画素を 2 値化する誤差拡散ハーフトニング法を提案し、エッジを強調するために係数反転バイラテラルフィルタで誤差を拡散した。フィルタパラメータの自動的な設定法を開発するのが今後の課題である。

〔文 献〕

- 1) N. Damera-Venkata, B. L. Evans, and V. Monga: "Color error diffusion halftoning", IEEE Signal Process. Mag., **20**, 4, pp.51-58 (2003)
- 2) R. Eschbach and K. Knox: "Error-diffusion algorithm with edge enhancement", J. Opt. Soc. Am. A, **8**, pp.1844-1850 (1991)
- 3) T.-H. Kang, T.-S. Lee, S.-Y. Ohn and B.-W. Hwang: "A novel edge enhanced error diffusion", Proc.DICTA, pp.539-548 (2003)
- 4) X. Li: "Edge-directed error diffusion halftoning", IEEE Signal Process. Lett., **13**, 11, pp.688-690 (2006)
- 5) C. Tomasi and R. Manduchi: "Bilateral filtering for gray and color images", Proc. ICCV, pp.839-846 (1998)

傅 暁宇 2008 年、中国浙江工業大学卒業。2009 年、九州大学大学院芸術工学研究院研究生。画像情報処理に関する研究に従事。

王 濤 2010 年、中国四川大学修士課程修了。同年、九州大学大学院芸術工学府博士後期課程入学。画像情報処理に関する研究に従事。学生会員。

浦浜 喜一 1980 年、九州大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年、同大学助手。1989 年、九州工業大学助教授。現在、九州大学大学院芸術工学研究院教授。パターン認識、画像情報処理の研究に従事。