可変しきい値による多値誤差拡散法の高品質化

正員 末竹 規哲* 非会員 富樫 昌訓**

High Quality Multi-level Error Diffusion Method Employing Variable Threshold

Noriaki Suetake*, Member, Masanori Togashi**, Non-member

We propose a new multi-level error diffusion method employing the variable threshold, which realizes half toning with high quality. In the proposed method, dissimilar textures around quantization levels, which are the cause of the low image quality and obtained by a conventional method, are decreased by using the variable threshold. In this paper, we apply the proposed method to various standard digital images. And the simulation results show that the method is superior to other multi-level error diffusion methods.

キーワード：誤差拡散法，テクスチャ，階層化多値誤差拡散法，可変しきい値

Keywords: error diffusion method, texture, layered multi-level error diffusion method, variable threshold

1. はじめに

誤差拡散法は階調表現能力に優れており，多階調の濃淡画像を2値化する場合に広く用いられている^{(1)~(3)}。白黒の2値化だけでなく，灰色等の中間レベルをも含んだ数階調化が可能な場合に対しては多値誤差拡散法があり，2値化に比べて高品質な画像を得ることができる。また，多階調出力が可能なインクジェットプリンタ等が開発されるにつれて，近年，その重要性は大きくなっている。この多値誤差拡散法は，量子化レベル数が多い場合，すなわち利用できる階調レベル数が多い場合に得られる画質が非常に良く，有効な手法である。しかし，量子化レベル数が3~5のように比較的少ない場合には，単純に適用するだけでは画質が悪く実用には向かなかった。

その原因の一つとして，階調再現性の低下があげられる。以下に，原画信号の取り得る範囲，すなわちダイナミックレンジが0~255レベルの場合の3値化処理を例に，階調再現性について述べる。3値化処理では，階調レベル0，128，255の3つが量子化レベルとなり，これらのいずれかが出力レベルとして出力される。従来手法では原画信号の階調レベルが中間量子化レベルである128レベルに近い値であ

る場合に，アルゴリズム上，そのほとんどが単一の出力レベル(128レベル)に変換される。結果として，誤差拡散法に特有のランダムパターンが一部生成されず，原画像(256階調)を擬似的に再現する能力が低下する。これが階調再現性の低下である。これを防ぐ方法として，原画信号に規則的なパターンを重畳し，テクスチャの均一化⁽⁴⁾を行う方法が考えられる。しかし，この方法では，原画信号上に本来はない情報が重畳されることで量子化誤差が増大し，誤差拡散法の長所である“誤差の最小性”を損なうという問題がある。

一方，2値化処理後に3値化処理を，3値化処理後に5値化処理を行う，処理を階層化した高品質多値誤差拡散法が提案されている^{(5),(6)}。この方法では，各階層で量子化誤差を独立に扱い，ある中間量子化レベルの近傍に2種類以上の出力レベルを混在させることで，すなわち中間量子化レベル近傍に交流成分を補充することで階調再現性の低下を防いでいる。さらに，この方法はテクスチャの均一化という点にも優れており，従来，高品質化が困難であった3~5値の多値誤差拡散法を実用可能なレベルに向上させている。しかしながら，2値の誤差拡散処理と同様の処理を複数回繰り返して行うことで多値誤差拡散処理を実現しているために，従来の多値誤差拡散法と比較して，数倍の処理時間を要する。これは，プログレッシブ符号化等⁽⁷⁾，処理を階層化することに意義がある場合を除いては問題となる。また，過剰な交流成分の補充による画像平坦部における量子化誤差の増大等も問題としてあげられる。

本論文では，原画信号に基づいた可変しきい値を導入し，処理を階層化することなしに交流成分の補充を行い，高品質な画像を得ることのできる多値誤差拡散法を提案する。

* 筑波大学機能工学系

〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1

Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan

** 筑波大学第三学群工学システム学類

〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1

College of Engineering Systems, Third Cluster of Colleges, University of Tsukuba

1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan

1 3 5 3 1	1 5 3
3 5 7 5 3	7 * - /16
5 7 * - - /48	
(Jarvis)	(Floyd)

図1 誤差拡散の重み係数

Fig. 1. Weights of error diffusion method.

さらに、提案手法を種々の画像へ適用し、その妥当性、有効性を検討する。

2. 多値誤差拡散法と画品質の劣化

〈2・1〉多値誤差拡散法 多値誤差拡散法は、各画素における量子化誤差を近傍画素に拡散し、処理画像における出力レベルの近傍平均値を原画像の階調レベルに等しくするというものである。具体的には、以下に示す計算式に従って処理される。画像信号のダイナミックレンジが0～255レベルの場合の m 値誤差拡散法において、 i 番目画素の出力レベル $L(i)$ は、

$$L(i) = L_l = 255 \times \frac{l-1}{m-1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここで、 $L_l (l=1, \dots, m)$ は量子化レベルであり、条件

$$\bar{X}(i) < L_l + d/2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

を満たす最も小さなものとして求められる。ここで、 d は量子化間隔であり、

$$d = \frac{255}{m-1} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。 $\bar{X}(i)$ はレベル積算値であり、原画像における画信号 $X(i)$ と j 番目画素における量子化誤差 $e(j) (= \bar{X}(j) - L(j))$ を用いて、

$$\bar{X}(i) = X(i) + \sum \alpha_{ij} e(j) \quad \dots\dots\dots (4)$$

で表される。 α_{ij} は j 番目画素から i 番目画素への誤差拡散の重み係数である。重み係数 α_{ij} の代表的なものとしては、図1に示すように、Jarvis らや Floyd らのものが、広く利用されている。

〈2・2〉テクスチャの変化 従来の多値誤差拡散では、原画信号の階調レベルが量子化レベル近傍である場合に、出力レベルが単一量子化レベルのみとなる。このことから、量子化近傍に特有のランダムパターンが生じず、テクスチャが著しく変化し、画品質が劣化する⁽⁵⁾⁽⁶⁾。その様子を図2に示す。図2は、白から黒のグラデーションパターン(8bit, gray-scale)をJarvisの重み係数を用いて黒、灰色、白の3値に量子化したものである。黒、灰色、白は、それぞれレベル0, 128, 255を示す。図2より、白と灰色の中間の領域は白画素と灰色画素が混合したディザで、黒と灰色の中間領域は黒画素と灰色画素が混合したディザで表現されてい

図2 3値量子化の画信号レベルとそのテクスチャ

Fig. 2. Output levels of conventional method.

ることがわかる。しかし、0, 128, 255レベル近傍、つまり量子化レベル近傍では、単一量子化レベルの帯状パターンとなっている。このうち、白と黒に近いレベルでの帯状パターンは、階調のダイナミックレンジの両端であるので画品質劣化に対して大きく影響しない。しかしながら、中間の灰色量子化レベルでの帯状パターンは、出力画像におけるテクスチャの相違を目立たせるので、画品質を著しく劣化させる原因となる。

〈2・3〉階調再現性の低下 本論文では、文献(6)と同様に画像の階調レベルと階調再現性の関係を調べた。具体的には、次式で示されるように階調レベル y が水平方向に正弦波状に変化する画像(8bit, gray-scale, 256×256画素)を、誤差拡散法で処理し、そのときの量子化誤差の変化を調べた。

$$y = A + 16 \sin(2\pi x/T) \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(5)において、 x は水平距離、 T は変化の周期、 A は平均値である。ここでは、量子化誤差として、誤差拡散法による処理を施した処理画像と原画像を比較して求めたRMSE(root mean square error)を用いた。図3に、Jarvisらの重み係数を用いた3値誤差拡散法による量子化誤差の変化を示す。横軸は式(5)で与えられる画信号の平均値 A の値、縦軸はRMSEである。入力画像は階調レベル A の近傍で変化しているので、縦軸のRMSE値は、横軸で与えられる階調レベル近傍処理時に発生する誤差の程度を表す。また、図4に、誤差拡散処理後、平滑化処理を行った場合の量子化誤差の変化を示す。平滑化処理に用いたフィルタを図5に示す。

図3に示すように、フィルタ処理を行わない場合、量子化レベル近傍において量子化誤差は小さい。しかし、フィルタ処理を行った場合には、高周波成分が除去されるので、量子化誤差は、量子化レベル近傍以外では小さくなり、量子化レベル近傍では相対的に大きくなる(図4)。これは、階調レベルが量子化近傍にある場合に、処理画像に交流成分が

図3 正弦波状の画像に対する量子化誤差 (フィルタなし)

Fig. 3. Quantization errors for images of sine curves (without filter).

図4 正弦波状の画像に対する量子化誤差 (フィルタあり)

Fig. 4. Quantization errors for images of sine curves (with filter).

ほとんど存在しないことに起因している。本論文では、誤差拡散処理後に平滑化処理を行った場合の RMSE を階調再現性の指標とする。すなわち、その RMSE が大きいほど階調再現性が低く、RMSE が小さいほど階調再現性が高いと考える。これより、従来の多値誤差拡散法では、量子化レベル近傍で、ディザパターンが発生せず交流成分が欠落し、階調再現性の低下が生じているといえる。

3. 可変しきい値を用いた多値誤差拡散法

量子化レベル数が 3~5 のように比較的少ない場合に、従来の多値誤差拡散法が実用にならなかった原因は、中間の量子化レベル近傍でのテクスチャの変化と階調再現性の低下にあった。これは、中間の量子化レベル近傍に交流成分を補充することで解消できる。しかしながら、加える交流成分は、ノイズとしても作用するので、必要最低限に抑える必要がある。従来手法では、レベル積算値 $\bar{X}(i)$ の大き

```

1 2 3 2 1
2 4 6 4 2
3 6 8 6 3
2 4 6 4 2
1 2 3 2 1 /80

```

図5 平滑化フィルタ

Fig. 5. Smoothing filter.

図6 提案手法 (3 値)

Fig. 6. Proposed method (3 values).

さのみに着目し、それに対して固定しきい値による処理を行い出力レベルを決定していた。これに対して本論文では、原画信号 $X(i)$ の値をも考慮して出力レベルを決定することを考える。すなわち、 $X(i)$ の大きさに応じてしきい値を設定し、それを用いて $\bar{X}(i)$ にしきい値操作を施すことで出力レベルを決定する。これより、仮に $\bar{X}(i)$ が同じ値であっても、従来手法とは異なる量子化レベルを出力することが可能となり、交流成分の補充が実現される。以上より、本論文では、可変しきい値を導入し、交流成分を補充することで高品質な処理画像を得ることのできる新しい誤差拡散手法を提案する。

以下にダイナミックレンジが 0~255 レベルにおける 3 値化処理を例に、図を用いて提案方式の基本アルゴリズムを説明する。ここでは、図 6 に示すように原画信号 $X(i)$ の大きさに応じて、 $X - \bar{X}$ 平面を 4 つの領域に分割し、その領域毎にしきい値を設定する。図 6 より、従来手法 (図 7) では原画信号レベルに関係なく一定であったしきい値が、原画信号レベルに応じて変化している様子がわかる。提案手法では、この領域毎に設定されたしきい値を用いて出力レベル $L(i)$ を決定し、従来手法と同様に誤差 $e(i) = \bar{X}(i) - L(i)$ を未処理の近傍画素へ配分することで誤差拡散処理を行う。ここで、従来手法と異なる出力レベルが交流成分となり、図 8 の灰色で示された領域で交流成分が発生する。図 8 中、左上と右下の正方領域で発生する交流成分は、 $X(i)$ と $\bar{X}(i)$

図7 従来手法 (3 値)

Fig. 7. Conventional method (3 values).

図8 交流成分 (3 値)

Fig. 8. AC components (3 values).

図9 提案手法 (4 値)

Fig. 9. Proposed method (4 values).

の差が著しく大きい場合、すなわち累積誤差 (周辺画素における量子化誤差の重み付き和) が著しく大きいときに発生することを意味しており、その発生頻度は低いと考えられる。そのため、図8の中央部分で発生する交流成分がその大半をしめることになる、したがって、提案手法における交流成分の補充の度合いは、図6におけるパラメータ k と a の大きさに大きく影響されることになる。

4 値化処理の場合、各領域としきい値は図9に示すようになる。また、本アルゴリズムでは、量子化レベル数 m と量子化間隔 d を変更するだけで3 値化や4 値化のみならず、 m 値化処理を容易に実現することができる。提案する m 値化手法における領域分割と各領域におけるしきい値を以下に示す。

[領域 1]: $0 \leq X(i) < d/2$

$$L(i) = \begin{cases} L_1 & \bar{X}(i) < th1, \\ L_2 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$th1$ はこの領域におけるしきい値であり、 $128 - (m/2 - 1)k$ である。 k は、混入させる交流成分に関するパラメータであり、この値が小さいほどその割合が増加する。

[領域 2]: $d(2l - 1)/2 \leq X(i) < dl, (l = 1, 2, \dots, m - 2)$

$$L(i) = \begin{cases} L_l & \bar{X}(i) < th2, \\ L_{l+1} & th2 \leq \bar{X}(i) \leq th3, \\ L_{l+2} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$th2, th3$ はこの領域におけるしきい値であり、それぞれ $128 - (m/2 - l)k, 128 - (m/2 - l - 1)k + a(dl - X(i))$ である。また、 a はしきい値変化の勾配であり、これも混入させる交流成分の量に関するパラメータである。この値が小さいほど混入する交流成分が増加する。

[領域 3]: $dl \leq X(i) < d(2l + 1)/2, (l = 1, 2, \dots, m - 2)$

$$L(i) = \begin{cases} L_l & \bar{X}(i) < th4, \\ L_{l+1} & th4 \leq \bar{X}(i) \leq th5, \\ L_{l+2} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$th4, th5$ はこの領域におけるしきい値であり、それぞれ $128 - (m/2 - l)k + a\{X(i) - d(2l + 1)/2\}, 128 - (m/2 - l - 1)k$ である。

[領域 4]: $d\{2(m - 1) - 1\}/2 \leq X(i) \leq 255$

$$L(i) = \begin{cases} L_{m-1} & \bar{X}(i) \leq th6, \\ L_m & \text{otherwise.} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$th6$ はこの領域におけるしきい値であり、 $128 + (m/2 - 1)k$ である。

4. 計算機シミュレーション

〈4・1〉 パラメータ k と a の決定 提案手法を種々の画像へ適用するにあたり、パラメータ k と a の値を決定する必要がある。ここでは、提案手法 (3 値化) に対して式 (5) で示される画像を用い、そのときの量子化誤差の変化を調

図10 正弦波状の画像に対する量子化誤差 (フィルタあり (図5参照)) (a) $T=8$ (b) $T=64$

Fig. 10. Quantization errors for images of sine curves (with filter). (a) $T=8$ (b) $T=64$

図11 グラデーションパターンの処理例

Fig. 11. Output images of gray scale pattern.

べ、実験的にパラメータの値を決定した。具体的には、 k を $15 \leq k \leq 25$ の範囲で1ずつ、 a を $0 \leq a \leq 0.5$ の範囲で0.1ずつ変化させた実験を行い、そのとき得られた結果について、各周期 $T(=8, 16, 32, 64)$ における RMSE 値

が平坦で、かつその平均値が小さいことを基準に、筆者らの主観を加味して $k=18$, $a=0.1$ とした。図10に、 $k=18$, $a=0.1$ における量子化誤差の変化の様子を示す。図10より、従来法と比較して、RMSEは中間量子化レベル近傍以外で多少増加しているが、グラフが周期によらずほぼ平坦な形状をしており、階調再現性の低下を防いでいることがわかる。また、図11に白から黒のグラデーションパターンの3値化処理例を示す。提案手法では、多少テクスチャに乱れを生じてはいるものの、従来手法における中間量子化レベル付近での均一パターンがほぼ解消されている様子がわかる。

〈4・2〉種々の画像への適用 提案手法の有効性、妥当性を検証するために、種々の画像を用いたシミュレーション実験を行った。実験では、ダイナミックレンジが0~255で、サイズが 256×256 画素の標準画像 “Airplane”, “Barbara”, “Boat”, “Bridge”, “Building”, “Cameraman”, “Girl”, “Lax”, “Lena”, “Lighthouse”, “Text”, “Woman” を用いた。提案手法では、すべての処理において $k=18$, $a=0.1$ とした。

図12, 13, 14に処理結果の例を示す。これらの画像より、画質が大きく改善されていることがわかる。ここでは、紙面節約のため、平坦部と詳細部が混在した画像 “Boat” と顔画像を含む “Barbara”, 文字画像である “Text” ののみを示しているが、すべての画像に対して同様な結果が得られた。また、処理例より、原画像と比較して、若干コントラストの強い画像が得られていることがわかる。提案手法では、対象画像にもよるがアルゴリズム上、出力レベル0, 128, 255がほぼ等確率で出現することになり、ヒストグラム均等化法と同様な効果を得ているためだと考えられる。

表1に3値化処理で得られた画像の RMSE を示す。フィルタには、図5に示すものを用いた。表より、“誤差の最小性”を有する従来手法と比較して、フィルタなしの場合は、提案手法がいずれの場合も劣っていることがわかる。提案手法では、中間量子化レベル (128レベル) 近傍に、交流成分、すなわちノイズを画像に付加しているため、このことは当然の結果である。しかしながら、フィルタありの場合は、従来手法とほぼ同等である。交流成分が過剰に混入されている場合、フィルタ処理後の RMSE は従来手法と比較して大きく異なるものと考えられる。これより、提案手法では、交流成分の混入をできるだけ抑えた処理がなされていると思われる。

図15に4値化の処理例 (“Boat”) を示す。この場合も3値化と同様に良好な結果を得ていることが確認される。

また、同一のコンピュータ上で処理時間を計測した結果、従来手法と比較して、提案手法では、3値化処理で約1.4倍、4値化処理で約1.6倍、5値化処理で約2倍の処理時間となった。これは、3値化で従来手法の2倍、5値化で3倍程度の処理時間がかかる文献(5), (6)の手法と比べて高速な処理が実現されているといえる。

(a)

(b)

(c)

図12 出力画像 (Boat, 3 値化) (a) 原画像 (b) 従来手法 (c) 提案手法

Fig. 12. Output images (Boat, 3 values) (a) An original image (b) Conventional method (c) Proposed method.

(a)

(b)

(c)

図13 出力画像 (Barbara, 3 値化) (a) 原画像 (b) 従来手法 (c) 提案手法

Fig. 13. Output images (Barbara, 3 values) (a) An original image (b) Conventional method (c) Proposed method.

表 1 RMSE 評価

Table 1. RMSE evaluation.

	Without filtering		After filtering	
	Conventional	Proposed	Conventional	Proposed
Airplane	55.3	68.5	13.7	13.7
Barbara	48.2	75.7	18.9	18.0
Boat	48.4	72.6	11.4	10.4
Bridge	46.2	78.6	19.8	19.4
Building	43.5	74.0	13.4	13.0
Cameraman	46.2	66.6	15.2	14.6
Girl	52.6	65.6	8.73	8.98
Lax	51.8	76.7	19.8	19.1
Lena	48.5	69.0	11.3	11.0
Lighthouse	42.9	70.6	18.6	18.3
Text	50.1	65.5	16.8	17.3
Woman	49.5	72.1	11.6	10.9

(a)

(b)

(c)

図 14 出力画像 (Text, 3 値化) (a) 原画像 (b) 従来手法 (c) 提案手法

Fig. 14. Output images (Text, 3 values) (a) An original image (b) Conventional method (c) Proposed method.

(a)

(b)

図 15 出力画像 (Boat, 4 値化) (a) 従来手法 (b) 提案手法

Fig. 15. Output images (Boat, 4 values) (a) Conventional method (b) Proposed method.

5. おわりに

本論文では、原画信号に基づいた可変しきい値を導入した、高品質な多値誤差拡散法を提案した。さらに、提案手法を種々の画像へ適用し、その有効性を確認した。

提案手法は、カラー画像へも適用可能であり、プリンタ等へ用いれば有用であると考えられる。

今後の課題としては、画像パターンに応じてパラメータ値を変化させる適応処理の導入や、一様なテクスチャの実現による更なる画質の向上等が挙げられる。

(平成 14 年 8 月 19 日受付, 平成 15 年 1 月 30 日再受付)

文 献

- (1) 貴家仁志:「よくわかるデジタル画像処理」, CQ 出版 (1996)
- (2) R.W. Floyd and L. Steinberg: "An adaptive algorithm for spatial greyscale," *Proc. of the S. I. D.*, Vol.17, No.2, pp.75-77 (1976)
- (3) J.F. Jarvis, C. N. Judice, and W.H. Ninke: "A survey of techniques for the display of continuous tone pictures on bilevel displays," *Comput. Graph. Image Process.*, Vol.5, No.1, pp.13-40 (1976)
- (4) 安居院猛・中嶋正之:「画像工学の基礎」, 昭晃堂 (1986)
- (5) H. Ochi: "High quality multilevel error diffusion method with layered structure," *J. of IIEEJ*, Vol.24, No.1, pp.10-17 (1995-1) (in Japanese)
越智 宏:「階層化処理による高品質多値誤差拡散法」, 画像電子学会誌, **24**, 1, pp.10-17 (1995-1)
- (6) H. Ochi: "High quality multilevel error diffusion method," *Trans. on IEICE*, Vol.J79-D-II, No.5, pp.826-833 (1996-5) (in Japanese)
越智 宏:「多値誤差拡散法の高品質化」, 信学会論誌 D-II, **J79-D-II**, 5, pp.826-833 (1996-5)
- (7) T. Morita and H. Ochi: "Progressive Transmission of Continuous Tone Images Using Multi-Level Error Diffusion Method," *Trans. on IEICE*, Vol.E82-B, No.1, pp.103-111 (1999-1)

末 竹 規 哲 (正員) 1992 年 3 月九州工業大学情報工学部制御

システム工学科卒。1994 年 3 月同大学院情報工学研究科情報科学専攻修士課程修了。2000 年 3 月同博士後期課程修了。博士 (情報工学)。1994 年 4 月沖電気工業 (株) 電子通信システム研究所入社 (~1997 年 3 月)。2000 年 4 月日本学術振興会研究員。2001 年 6 月筑波大学機能工学系講師, 現在に至る。ソフトコンピューティングに基づいた知的

信号処理に関する研究に従事。日本ファジィ学会, 電子情報通信学会各会員。

富 樫 昌 訓 (非会員) 1980 年 5 月生まれ。2002 年 3 月筑波

大学第三学群工学システム学類卒業見込み。現在に至る。擬似階調表現手法に関する研究に従事。