

Direct Binary Search 法によるマルチトニング

平野祐樹 中野浩嗣

(広島大学大学院 工学研究科)

概要

本論文では、多値 DBS 法を連続階調画像に適用したときに最も明るい領域と暗い領域に加えて中間調の領域でドットが打たれないクリッピングと呼ばれる現象に対応するために、多値 DBS 法と多値組織的ディザ法のハイブリッドマルチトニング手法の提案を行う。

1. マルチトニング

マルチトニングとは、連続階調画像を白と黒と中間色の少数値からなる多値画像に変換することである。画像データの取り扱いには以下のように定める。

- 入力画像の輝度階調は $[0, 255]$ の 256 階調とする。このとき "0" は黒に対応し、"255" は白に対応している。
- 出力画像の階調数を L 階調とする。
- 入力画像である連続階調画像を I とし、位置 (i, j) での入力画像のピクセル値を $I(i, j)$ とする。
- 出力画像である多値画像を O とし、位置 (i, j) での出力画像のピクセル値を $O(i, j)$ とする。出力画像 O は多値画像なので、各ピクセル値は $\frac{255}{L-1}$ の整数倍の整数値のみをとる。

2. 多値組織的ディザ法

多値組織的ディザ法は、ピクセル毎に異なる閾値を適用するマルチトニング手法である。このとき閾値を格納したディザ行列と呼ばれる行列を使用する。

今、 $M \times N$ のディザ行列を D とし、 D には 0 から $MN - 1$ までの異なる整数値が格納されているとすると、位置 (i, j) でのディザ行列の値は $D(i \bmod M, j \bmod N)$ に対応し、出力画像となる多値画像 $O(i, j)$ は次のような式で表される。

$$D' = \lfloor \frac{255}{MN(L-1)} (D + \frac{1}{2}) \rfloor$$

$$O(i, j) = \text{Quantizer}\{I(i, j) + D'(i \bmod M, j \bmod N)\}$$

ここで、 $\text{Quantizer}\{\}$ 演算は次のように定義する。

$$\text{Quantizer}\{F\} = \lfloor \frac{255}{L-1} \lfloor \frac{F(L-1)}{255} \rfloor \rfloor$$

ディザ行列生成法の例としては、Bayer 法や void-and-cluster 法が挙げられる。Bayer 法は新聞などの印刷に使用され、void-and-cluster 法は視覚的に満足なブルーノイズ特性を持った出力画像を得ることができる [1]。

3. 多値 Direct Binary Search 法

多値 DBS 法は、入力画像 I と出力画像 O の誤差 ε を最小にする二値化法である。ここで、出力画像 O を得るために二値画像 O' を使用する。二値画像 O' の条件は次のとおりである。

- 二値画像 O' は、"0" か "1" の二値のみをとり、"1" は "0" よりも一階調分明るいことを意味している。

多値 Direct Binary Search 法のアルゴリズムは次のとおりである。

1. 初期二値画像 O' を作成する
2. 入力画像 I と出力画像 O から誤差 ε を計算する
3. ピクセルの更新が出来なくなるまで、以下の操作を繰り返す
 - (a) 次の操作の内どの操作が最も ε を減少させるかを調べる
 - ピクセル $O'(i, j)$ とその 8 近傍のピクセルの交換を行う
 - ピクセル $O'(i, j)$ の反転を行う
 - (b) 上記の内最も ε を減少させる操作を行う
 - (c) ε を更新する

誤差 ε は次のように定める。

$$\varepsilon = \sum |\tilde{e}|^2$$

$$\tilde{e}(x, y) = \tilde{p} * (O - I)(x, y)$$

$$O(x, y) = \text{Quantizer}\{I(x, y)\} + \lfloor \frac{255}{L-1} O'(x, y) \rfloor$$

多値 DBS 法で使用される誤差 ε の関数は、人間の視覚特性のモデルに基づいている。関数中に使用されている \tilde{p} は人間の視覚特性に合ったローパスフィルタを意味し、* は二次元の畳み込み演算を意味している。 \tilde{p} は 4.1 節に表されるガウスフィルタが使用される。初期二値画像 O' はランダムなホワイトノイズ画像が用いられる。

多値 DBS 法による出力画像は、人間の視覚特性に基づいて作成されているため、前章で紹介した void-and-cluster 法のディザ行列を使用した多値組織的ディザ法に比べて高品質のものになっている。しかし、全てのピクセルについてフィルタ係数との二次元畳み込み演算を行わなければならないため、既存手法に比べて処理時間がかなり長いという欠点がある。

多値 DBS 法は非常に高品質な出力画像を得ることができる一方で、ランプ画像のように連続的に輝度値が変化する入力画像に対する出力画像を得るとき、入力画像の輝度値が $\frac{255}{L-1}$ の整数倍の周辺で、連続的にドットが打たれないクリッピングという現象が発生する。クリッピングが発生する原因は、誤差 ϵ の計算方法にある。誤差 ϵ の計算方法は二乗誤差の総和なので、入力画像の輝度値が $\frac{255}{L-1}$ の整数倍の周辺でドットを打つと、その点における誤差が極端に増え、ドットを打たなかったときの誤差を超えてしまうからである。そのため、入力画像の輝度値が $\frac{255}{L-1}$ の整数倍の周辺ではドットが打たれることはない。

4. 提案手法

この章ではクリッピングを考慮した多値 DBS 法による多値化法について提案手法を述べる。

クリッピングの発生する領域を R 、閾値を T と定める。 R は入力画像の輝度値が $\frac{255}{L-1}$ の整数倍の周辺(距離 T 以内)の領域であるとして、次のように定めることができる。

$$t = I(i, j) \bmod \lfloor \frac{255}{L-1} \rfloor$$

$$R = \{(i, j) : (t \leq T) \cup (t \geq \frac{255}{L-1} - T)\}$$

$$Z(a) = \sum_{i=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sum_{j=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \left(\left(\frac{a}{255} - \frac{\tilde{p}(i, j)}{L-1} \right)^2 - \left(\frac{a}{255} \right)^2 \right)$$

$$T = \min\{a | Z(a) \leq 0\}$$

閾値 T は出力階調数 L とガウスフィルタの設定により増減する。今回の実験の場合、閾値 T の値は“4”となる。

次に、提案手法のアルゴリズムを示す。

1. $M \times N$ の void-and-cluster 型ディザ行列 D を作成する。
2. 次の計算により、 D を標準化する。

$$D' = \lfloor \frac{255}{MN(L-1)} (D + \frac{1}{2}) \rfloor$$

3. $(i, j) \in R$ を満たす全てのピクセル (i, j) に対して多値組織的ディザ法を適用する。

$$O(i, j) = \text{Quantizer}\{I(i, j) + D'(i \bmod M, j \bmod N)\}$$

4. 多値組織的ディザ法を適用することにより R の領域に出現する残したいドットを確定ドットとし、確定ドットに対してはピクセルの変更を加えないように多値 DBS 法を適用し、出力画像 O を得る。

5. 実験結果

図 1 はランプ画像に対して多値 DBS 法を適用したものである。図の左端、中央、右端においてドットが打たれないクリッピングが発生し、連続階調を上手く表現できていないことがわかる。

それに対して、図 2 はランプ画像に対して提案手法を適用したものである。図 1 と比べて、クリッピングを排除した高品質な出力画像を得ることに成功していることがわかる。

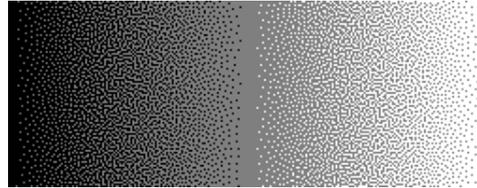


図 1: 多値 DBS 法

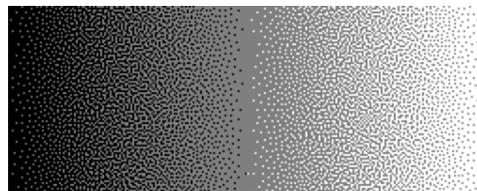


図 2: 提案手法

6. まとめ

本論文では、既存のマルチトニング手法について紹介し、クリッピングを考慮した多値 DBS 法を提案した。結果として、提案手法はクリッピングを排除した出力画像を得ることに成功した。

R の領域に適用するマルチトニング手法として、void-and-cluster 型のディザ行列を利用した多値組織的ディザ法を使用することにより、多値 DBS 法と同様に視覚的に満足できるブルーノイズ特性を持った模様を表現可能となった。

計算コスト面では、多値組織的ディザ法のコストは多値 DBS 法の計算コストに比べてかなり小さいため、多値 DBS 法と多値組織的ディザ法のハイブリッド多値化法である提案手法の計算コストは、通常の高値 DBS 法と比べてあまり変わらないといえる。

参考文献

- [1] Robert Ulichney, *The void-and-cluster method for dither array generation*, Proceedings SPIE, Human Vision, Visual Processing, Digital Displays IV, vol.1913, pp.332-343, 1993.