擬似雑音法による階調平滑化効果

正会員 小 寺 宏 嘩[†]

あらまし ハードコピーの高画質化にとって、滑かな階調再現は最重点課題である。階調数が少ない場合や階調に不連続な飛びがあると、偽輪郭の発生により著しい画質劣化が生じる。本論文では擬似雑音法による偽輪郭対策を取り上げ、階調平滑化作用と雑音電力分布の解析を行った。具体的なハードコピーの特性例を参考として、階調の局所的なひずみをジャンプモデルで表し、その平滑化作用を明らかにした。また視覚上有害となる低周波の雑音スペクトルに対して、これを高域ヘシフトさせる作用をもつ交番型擬似雑音法を提示し、雑音分布の改善効果を示した。通常の擬似雑音法では平滑化作用と引換えにランダム雑音が目立つが、交番型では空間的な規則性が付与され雑音電力の高域集中性が良くなるので、雑音を押えて平滑化効果を引出せる。実際の描画システムに適用してその有効性が確認されている。

1. ま え が き

ハードコピーにおける階調再現は画質を決定する最も重要な要素であるため、種々の改善・工夫が試みられている。階調数が少ない場合や階調特性に不連続な飛びがある場合には、地図の等高線のような偽輪郭が発生し画質を著しく損うことは周知の通りである。

量子化ステップが大きいときに生ずる偽輪郭を軽減するための手段としては、画像信号にあらかじめ擬似雑音を加えたのち量子化する方法が、テレビ信号の符号化圧縮を目的として Roberts により試みられたのが最初である¹⁾。この擬似雑音法を2値に適用したのが、現在のディザ法の源になっている²⁾。擬似雑音法は階調のステップ差を視覚的に平滑化するので、偽輪郭を抑制するのには効果的である。しかし一方で、平滑化効果と引換えに粒状性雑音が加わるので、そのトレードオフが問題となる。

筆者らはさきに、擬似雑音を交番化して加えることにより、視覚的な雑音の少ない階調平滑化作用を引出しインクジェットプリンタに適用して効果を得た³⁾⁴⁾。

本論文では、擬似雑音法の階調平滑化作用について

解析し、交番化による雑音スペクトル分布の改善効果を明らかにしたので報告する。

2. 階調のジャンプモデル

現在、各種ハードコピーでは面積階調法、濃度階調法、あるいはこれらの組合せにより、中間調を表現するための種々の工夫がなされている。画像における調子再現は、顔写真などの滑らかに濃淡が変化する部分で重視され、空間周波数領域では低周波の階調特性の連続性が要求される。

階調数が少ない場合はもちろんのこと、多階調であっても階調特性に部分的な非直線性やジャンプがある場合には、全体の調子再現に著しい障害となる。図1(a)は筆者らの開発によるインクジェットプリンタの階調特性の一例で、全体としてはほぼ直線的な階調を得ているものの、局所的に不均一なステップがみられる⁵⁾。このため、写真1(a)に示すようにハイライト部および中間濃度の一部分に偽輪郭を生じている。図1(b)は後述するように階調平滑化処理を施した結果を示し、写真1(b)はこれによる改善画像である。

偽輪郭はこのようなジャンプ性の階調ひずみによって生じ、現実の系に見られる局所ひずみはおおよそ図2のようにモデル化できる。以下ではこのモデルをもとに、ひずみを平滑化するための擬似雑音法について論ずる。モデルAは直線階調に対して正(または負)の

[†] 松下技研株式会社
"Smoothing Effect in Gray Scale Characteristics Using a Pseudo-Noise Method" by Hiroaki Kotera (Matsushita Research Institute Tokyo, Inc., Kawasaki)

図 1 局所的な階調ひずみとその平滑化例
An example of local distortion of gradation curve and its smoothing characteristic.

片方向にジャンプを生じた場合、B は正負両側にジャンプを生じて局所的に S 字形（または逆 S 字形）の階調ひずみが現れたモデルを示す。図示のように、直線からはずれている部分は、正または負方向の階調ジャンプ区間と直線に戻るまでの階調圧縮区間からなる。

いま簡単のため、出力の量子化ステップを 1 として階調ジャンプの大きさを M ステップ、階調圧縮区間を N ステップ相当とする。この場合、階調圧縮区間のステップ幅の比率は、

$$m = N / (M + N - 1) < 1 \quad (1)$$

で与えられる。図 2(a) では入力レベルで $M + N$ ステップの区間、(b) ではその 2 倍の区間で階調特性がひずみを受けていることを表している。

(a) 偽輪郭発生例

(b) 偽輪郭消去例

写真 1 偽輪郭とその平滑化例

An example of false contour and smoothing process.
(a) with false contour, (b) without false contour.

(a) モデル A: 片側ジャンプ

(b) モデル B: 両側ジャンプ

図 2 階調のジャンプモデル

Jumping model of gradation curve.

(a) Model A: one-side jump, (b) Model B: both-side jump.

3. 擬似雑音による階調平滑化

3.1 階調特性の平滑化作用

擬似雑音法は、入力のアナログ信号にあらかじめ雑音を加えて、揺さぶり（ディザ）をかけたのち量子化を行うもので、視覚の積分作用により量子化ステップの粗さが平滑化されて見える。図2では入力は充分細かく量子化されているのに対し、出力に入力ステップに比して大きなジャンプを生じているため、入力に対してデジタルな擬似雑音を加えることにより同様の平滑化を行うことができる。

図3は、図2(a)のモデルAに対して、入力画素値に一樣乱数を加えた場合の、出力画素値の振幅変調の様子を1次元座標で描いたものである。

そこでまず、平滑化特性として出力画素値の期待値を求めてみよう。乱数の瞬時振幅を d とし、平坦なグレイレベルをもつ入力画素値 k が d により瞬時値、

$$x = k + d \quad (1)$$

なる変調を受けているものとする。 k は図3のようにジャンプ発生点を基点として番号付けすると、 x に対する出力レベル L_x は、モデルAおよびBについてそれぞれ次式で与えられる。

モデルA：

$$L_x = \begin{cases} M + (x-1)m\Delta; & M+N \geq x > 0 \\ x\Delta; & x \leq 0 \text{ または } x > M+N \end{cases} \quad (2)$$

モデルB：

$$L_x = \begin{cases} \text{SGN}(x)\{M + (|x|-1)m\Delta; & M+N \geq |x| \\ x\Delta; & |x| > M+N \end{cases} \quad (3)$$

図4 擬似雑音として一樣乱数を用いる場合の生起確率
Probability density of uniform random number as a pseudo-noise source.

ただし、 $\text{SGN}(x)$ は x の符号、 Δ は出力の量子化ステップの大きさを表す。

いま d が図4のように振幅レンジ $-D \sim +D$ の範囲で生起確率が一定な一樣乱数であるとする。

$$\Delta = R_{\max}/(L-1) \quad (4)$$

ただし $R_{\max}$ は出力の最大反射率を表す。

を持つとき、入力 k に対する出力の期待値 $L(k)$ は、

$$L(k) = E[L_x] = \left(\frac{1}{2D+1} \right) \sum_{d=-D}^D L_{k+d} \quad (5)$$

で与えられる。 E は平均化操作を表す。

また Δ が濃度リニアな階調ステップ、

$$\Delta = D_{\max}/(L-1) \quad (6)$$

ただし $D_{\max}$ は出力の最大濃度を表す。

で測られるとき、出力の濃度での期待値 $L(k)$ は、

$$\begin{aligned} L(k) &= -\log_{10} E[L_x] \\ &= -\log_{10} \left(\frac{1}{2D+1} \right) \left(\sum_{d=-D}^D 10^{-L_{k+d}} \right) \\ &= \log_{10}(2D+1) - \log_{10} \left(\sum_{d=-D}^D 10^{-L_{k+d}} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

で計算される。

モデルAおよびBについて、 $L(k)$ の計算例を図5および図6に示す。濃度階調の場合は、変調をうけた画素の期待値が濃度の加法平均とはならないために、出力曲線がやや下方ヘシフトした形となる。いずれも

図5 擬似雑音による階調の平滑化作用：モデルA
Smoothing effect in gradation by pseudo-noise: model A. (a) The case of linear-reflectivity step, (b) The case of linear-density step.

(a) 反射率リニア階調の場合

(b) 濃度リニア階調の場合

図 6 擬似雑音による階調の平滑化作用：モデル B

Smoothing effect in gradation by pseudo-noise : model B.

(a) The case of linear-reflectivity step, (b) The case of linear-density step.

(a) 反射率リニア階調の場合

(b) 濃度リニア階調の場合

図 7 擬似雑音振幅と階調再現誤差：モデル A

Reproduction error of gray scale vs. pseudo-noise amplitude : model A.

(a) The case of linear-reflectivity step, (b) The case of linear-density step.

(a) 反射率リニア階調の場合

(b) 濃度リニア階調の場合

図 8 擬似雑音振幅と階調再現誤差：モデル B

Reproduction error of gray scale vs. pseudo-noise amplitude : model B.

(a) The case of linear-reflectivity step, (b) The case of linear-density step.

入力に加える擬似乱数の振幅 D を増すにつれて階調のジャンプ部分が平滑化され、 D が階調のひずみ区間 $M+N$ に相当する値のときは直線に近づくことがわかる。

3.2 階調再現誤差

出力階調の期待値 $L(k)$ の直線階調からのずれは、

$$\Delta L(k) = L(k) - k\Delta \quad (8)$$

で与えられる。そこで k のある範囲 $k = K_1 \sim K_2$ について、階調の再現性を平均 2 乗誤差、

$$\varepsilon L = \sqrt{\sum_{k=K_1}^{K_2} \{\Delta L(k)\}^2 / (K_2 - K_1 + 1)} \quad (9)$$

で評価する。 k の範囲はひずみ区間の前後充分な区間を含むように定める。

図 7 および図 8 に εL の計算例を示す。これらは先の図 5 および図 6 に相対しており、反射率で測った場合は、乱数の振幅

D が大きくなるほど $L(k)$ は限りなく直線に近づくので εL は単調減少曲線となる。一方、濃度階調の場合は、前述した $L(k)$ の下方シフトが D と共に増すので、 εL はおよそ $D \approx M+N$ のとき最小となる。

4. 擬似雑音電力分布と交番化による改善⁶⁾

4.1 擬似乱数の交番化

以上では平滑化作用を、期待値としての階調特性および再現誤差の点から論じた。これらはもちろん画像を眺めるときの視距離に対して、擬似雑音のピッ

チが眼の積分作用に耐える細かさを持つときに成立する。

しかしながら実際の画像では、偽輪郭を十分に消去しようとするれば、擬似乱数自身による粒状性雑音が視認され問題となる。粒状性雑音が目立つ原因は、画素の濃淡の空間的な乱弾性にあり、空間周波数についていえば、特に低周波の雑音スペクトルが障害となる。

そこで改善策として、図 9 のように擬似乱数の極性を交番化して空間的な規則性を付与したところ、粒状性雑音の軽減に効果的であった⁴⁾。以下では雑音スペクトルの解析をもとに、この効果について論じる。

図 9 乱数の型

Type of random number.

- (a) Conventional random number,
(b) Alternative random number.

図 9 は入力に加えられる乱数の 1 次元座標でのシーケンスを示し、(a) は通常の擬乱数、(b) は交番乱数である。(a) はピッチ p 、(b) はピッチ $2p$ 毎に 1 つの擬乱数が対応している。(b) の場合、入力には $2p$ を交番周期とする正負対称振幅の乱数が加えられる。ただし先のモデル A および B ともに不均一な階調ひずみを持つために、出力階調が受ける振幅変調は一般に非対称となる。出力に現れる正負の非対称性は、入力レベル k の位置と乱数の振幅 D により異なる。

4.2 出力雑音の自己相関関数

雑音分布を調べるために、まず図 9 の入力に対する出力の自己相関関数を求めてみよう。

入力レベル k に擬乱数 d が加わったときの出力レベルの振幅変位を $l(k, d)$ で表せば、

$$l(k, d) = L_{k+d} - L_k \quad (10)$$

(a) の非交番型の乱数入力の場合、出力雑音はピッチ p で瞬時振幅 $l(k, d)$ を持つ乱弾波となる。自己相関関数 $\varphi_a(\tau)$ は、この乱弾波を空間座標で τ だけずらしたものと自身との平均化操作によって求められる。図 10 を参考にとると、

$$\varphi_a(\tau) = \begin{cases} A_1(p - \tau) + B_1\tau; & |\tau| \leq p \\ B_1 & ; |\tau| > p \end{cases}$$

ここで、 $A_1 = E[l(k, d)^2]$

$$B_1 = E[l(k, d) \cdot l(k, d')] \quad (11)$$

ただし d と d' は互いに独立な無相関の乱数入力を表す。

一方、(b) の交番型乱数を入力に加えた場合は、

$$\begin{aligned} \varphi_b(\tau) &= A_2(p - \tau) + B_2\tau; & p \geq |\tau| \\ &= B_2(2p - \tau) + C_2(\tau - p); & 2p \geq |\tau| > p \\ &= C_2\{(2n+1)p - \tau\} + D_2\{\tau - (2n)p\} \\ &\quad ; (2n+1)p \geq |\tau| > 2np \\ &= D_2\{(2n+2)p - \tau\} + C_2\{\tau - (2n+1)p\} \\ &\quad ; (2n+2)p \geq |\tau| > (2n+1)p \end{aligned}$$

ただし n は正整数を表す。ここで、

図 10 出力の自己相関参考図：

Schematic diagram of output auto-correlation.

- (a) Conventional random number,
(b) Alternative random number.

図 11 出力雑音の自己相関関数

Auto-correlation function of output noise.

- (a) Conventional random number,
(b) Alternative random number.

図 12 出力雑音の自己相関関数：モデル A

図 12 出力雑音の自己相関関数：モデル A

- Auto-correlation function of output noise : model A.
(a) Conventional uniform random number,
(b) Alternative uniform random number.

図 13 出力雑音の自己相関関数：モデル B
Auto-correlation function of output noise : model B.
(a) Conventional uniform random number,
(b) Alternative uniform random number.

$$A_2 = E[l(k, d)^2]$$

$$B_2 = \frac{1}{2} \{E[l(k, d) \cdot l(k, -d)] + E[l(k, d) \cdot l(k, -d')]\}$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \{E[l(k, d) \cdot l(k, d')] + E[l(k, -d) \cdot l(k, -d')]\}$$

$$D_2 = \frac{1}{2} \{E[l(k, d) \cdot l(k, -d')] + E[l(k, d') \cdot l(k, -d)]\} \quad (12)$$

$\varphi_a(\tau)$ および $\varphi_b(\tau)$ は図 11 のような関数となる。

(a) の通常の擬乱数の場合には $\varphi_a(\tau)$ は $|\tau| > p$ において無相関となるが、(b) の交番乱数の場合

図 15 出力雑音の電力スペクトル分布：モデル A
Power spectrum distribution of output noise : model A.
(a) Conventional uniform random number, (b) Alternative uniform random number.

$\varphi_b(\tau)$ にはピッチ $2p$ を周期とする強い相関が現れ、空間的な規則性が付与されたことが示される。図 12、図 13 に具体的な計算例を掲げる。自己相関関数の形は入力レベル k により変化する。

4.3 出力雑音の電力スペクトル分布

出力雑音の電力スペクトルは、Wiener-Khinchin の定理により、自己相関関数 $\varphi_a(\tau)$ および $\varphi_b(\tau)$ のフーリエ変換によって求められる。図 11 からこれらを計算すると以下のとおりである。

$$W_a(f) = \mathcal{F}\{\varphi_a(\tau)\}; \mathcal{F} \text{ はフーリエ変換記号}$$

$$= (A_1 - B_1) \{\sin(\pi p f) / (\pi p f)\}^2 \quad (13)$$

$$W_b(f) = \mathcal{F}\{\varphi_b(\tau)\}$$

$$= \{(A_2 - C_2) + 2(B_2 - D_2) \cos(2\pi p f)\} \cdot \{\sin(\pi p f) / (\pi p f)\}^2 \quad (14)$$

(13) 式は矩形ランダムパルスの電力スペクトル分布の形状に一致する。 $W_a(f)$ と $W_b(f)$ の間には、

$$W_b(f) = Q(f) \cdot W_a(f)$$

$$Q(f) = \left[\frac{(A_2 - C_2) + 2(B_2 - D_2) \cos(2\pi p f)}{(A_1 - B_1)} \right] \quad (15)$$

なる関係がある。 $Q(f)$ をスペクトル整形関数と呼ぶことにする。ここで、各定数は(12)式より、

$$A_1 > B_1 > 0, A_2 > C_2 > 0, B_2 < D_2 < 0 \quad (16)$$

なる関係にあるから、 $Q(f)$ は一般に図 14 のような関数形となる。

すなわち、交番化を行うと、 $Q(f)$ のスペクトル整形作用によって低周波の雑音スペクトルが抑制され、

図 14 スペクトル整形関数 $Q(f)$
Spectrum forming function $Q(f)$.

(a) 通常の一樣乱数

(b) 交番型一樣乱数

図 16 出力雑音の電力スペクトル分布：モデル B

Power spectrum distribution of output noise : model B.

(a) Conventional uniform random number, (b) Alternative uniform random number.

交番周波数 $f_0=1/2p$ のまわりへ雑音電力の分布がシフトすることがわかる。図 15, 図 16 に $W_a(f)$, $W_b(f)$ の計算例を掲げる。

以上のように交番型擬似乱数を用いると、出力雑音の電力分布を高域へシフトすることができ、低周波雑音による視覚上のざらつき感が軽減される。また、交番周期により、網点印刷におけるスクリーン周波数に相当する搬送波の作用が加わるので、空間的な規則性が不快な乱弾性を抑止する効果を生むものと考えることができる。

5. 適用結果

交番型擬似雑音法を実際のインクジェットプリンタに適用した結果、図 1 (a) の階調特性は同 (b) のように、また写真 1 (a) は同 (b) のように改善され、粒状性雑音の少ない状態が偽輪郭を消去できた。この例のプリンタは濃度リニア入力で作動し、図 9 (b) に示した擬似乱数源を図 3 のように入力画素の濃度値を正負に変位させるように加えている。

図 5～図 8 に示したように、十分な平滑化効果をもたせるには、擬似乱数の最大振幅 D は、ほぼ階調のひずみ区間に相当する大きさが必要である。写真 1 の例でも、これに準じた変位を加えている。

交番型擬似雑音法の基本的な特質は、画素値の振幅方向にはある種の乱弾性を持ったスクランブルを加えて平滑化を行い、一方、空間的には搬送波的な規則性を導入して周波数シフトによる雑音軽減を図るところにある。雑音源としては一樣乱数以外に、位相をランダム化した正弦波や組織的ディザ法の閾値行列なども利用が可能である⁷⁾。これらについては機会があれば稿を改めたい。

6. む す び

画像における雑音は本来画質を損うものとして除か

れるべきものであるが、意図的に利用することにより効果を生む場合がある。本論文では、そのような使い方として擬似雑音による偽輪郭消去問題を取り上げ、局所的な階調ひずみに対する平滑化効果と雑音電力の特性を明らかにした。人間の視覚にとって、低周波でランダムな雑音は不快であるが、規則的な雑音もまたテクスチャやモアレが妨害となる。ここで提示した交番型擬似雑音法は、極く単純ではあるが、ランダム性と規則性の中間に改善策を見出したものである。

本論文では多値の階調平滑化について議論したが、ランダム性と規則性の問題は、2 値のディザ画像においても類似の画質要因となる。今後はさらにランダム性と規則性の整合問題、および解像度特性についても検討を進めたい。

終りに、本研究に当り終始適切なご助言を戴いた、富士写真フィルム(株)堀内部長、福島課長、竹原氏、小田原氏ほか、松下技研(株)の関係各位に謝意を表します。

(昭和 61 年 1 月 13 日受付、昭和 61 年 2 月 18 日再受付)

【参 考 文 献】

- 1) L. G. Roberts : "Picture Coding Using Pseudo-Random Noise", IEEE Trans., Inf. Theory, 8, pp. 145-154 (1962)
- 2) J. O. Limb : "Design of Dither Waveforms for Quantized Visual Signals", Bell Syst. Tech. J., 48, pp. 2555-2582 (1969)
- 3) 小寺, 吉田ほか : "カラー画像複製システム", 第 12 回画像工学コンファレンス, 5-4, pp. 117-120 (1981)
- 4) 小寺, 吉田ほか : "高品位拡大カラーインクジェット描画システム", 画像電子誌, 12, 1, pp. 9-17 (1983)
- 5) 津田, 中ほか : "インクジェットによる中間調記録の検討", テレビ全大, 8-16 (1982)
- 6) H. Kotera, et al. : "A Poster-Size Color Ink-Jet Printing System", Proc. SID, 25, 4, pp. 321-330 (1984)
- 7) 竹原, 小田原ほか : "高品位カラーインクジェットプリントシステム", 第 1 回ノンインパクト・プリンティング・シンポジウム, 6-7, pp. 153-158 (1984)