階調制御技術および限定色絵柄表現技術の研究

阿部 淑人 *　　五十嵐 宏 *　　長谷川 直樹 *

Tone Controllability and Restricted Color Image Rendition

ABE Yoshito*, IKARASHI Hiroshi* and HASEGAWA Naoki*

抄録

プラズマディスプレイ (PDP)、液晶ディスプレイ (LCD) をはじめとして有機 EL(OLED)、電界放射ディスプレイ (FED) などフラットパネルディスプレイの研究開発が盛んに行われ市場拡大が期待されているが、多くのフラットパネルディスプレイが CRT と異なる点の一つに連続階調を表現するのが困難であることが上げられる。原理的に PDP や OLED は発光時間により輝度を制御するために概ね 64 階調程度しか表示できず、そのままでは疑似輪郭などのある低品質な表示となってしまう。そのため通常はディザ法などの処理により疑似濃淡表示を行っている。従来より良く用いられる方法に組織的ディザ法と誤差拡散法が有るが、いずれを用いるにも尖鋭度の調整を伴うには前置のフィルタ回路などを別途必要とし回路規模の増大をまねいていた。本研究では限定色表示装置に疑似濃淡階調表現を行う際に、別途フィルタ回路を用いることなく同時に尖鋭度の調整を行うことができるような方法を検討した。疑似濃淡化処理にわずかな構造要素を追加するだけで尖鋭化または平滑化を同時に処理できることが確認された。

1　緒言

疑似濃淡化でもっとも基本的な組織的ディザ [2] はその単純さゆえの表示性能の低さから一般には利用される事が少ないが、印刷ではインク転移を改善するためドット形状制御の必要からクラスタードット (clustered-dot) 型の組織的ディザが利用されている [27]。標本化密度の増加があるため処理方式の差自体による画質の影響は少ない。ディザマトリクスの設計如何でいかなる形状のドットも発生できるためブルーノイズマスク [9]、グリーンノイズマスク [12, 27] などの検討が行われている。なお処理方式によらずクラスタードットを発生させる事 [10, 12, 14, 17, 20, 27] は印字 (印刷) 用疑似濃淡化に共通の話題である。

誤差拡散法（ED)[3] および平均誤差最小法 (MAE)[4] は、疑似濃淡化の主力方式として多用され、引き続き改良・検討が続けられている [6, 8, 13, 15, 18, 19, 22, 25, 26]。類似の方法として、量子化画素列の加重平均を対象画素値に近似することにより尖鋭化と疑似濃淡化を同時に行う決定論的補間戦略 (DIS)[1] およびそれと等価の平均濃度近似 (MDA)[5]、クラス行列によって走査順序を制御するドット拡散法 (DD)[7, 21]、ランダム空間充填曲線 (RSFC) による変型走査 1 次元拡散法 [16]、平均濃度近似を一般化したドット決定法 [28] 等も提案されている。より高度な方法としては遺伝的算法 (GAs) や模擬焼鈍 (SA) などメタ戦略の最適化手法によるもの [11, 23, 24] があるが、平均濃度と輪郭形状の再現性を高めるだけであれば誤差拡散法の改良手法などでおおむね同等の目的が達せられるため、より多くの演算資源を必要とする最適疑似濃淡化はそれほど利用価値を認められていない。しかしながら今後より強力な演算性能が手に入った場合には、

* 下越技術支援センター

表示デバイスの各種物理条件を制約にした最適化により、著しい性能向上をもたらすことも期待できるため引き続き検討を行なう必要があると考える。

一方、実用面において、疑似濃淡化と同時に尖鋭化や平滑化を行ないたいという要求があるものの、従来は別途前置フィルタによるしか術が無く、処理負荷の点で無駄が多かった。そこで本研究では誤差拡散法を、わずかな付加要素で疑似濃淡化と同時に尖鋭化または平滑化を行なえるように拡張した。以下、次章で誤差拡散法を拡張し、第 3 章では信号伝達関数 (STF) と雑音伝達関数 (NTF) を手がかりに疑似表示能力と画質制御機能の解析を行なうなど各種表示性能について解析を行なう。

2　拡張誤差拡散法による疑似濃淡化処理

画像の疑似濃淡化に利用される誤差拡散法は、量子化誤差のフィードバックにより白色量子化雑音の青色化を行う方式である。それによって階調表現能力に制約のあるデバイスにおいても近似的に平均輝度表現を維持することができる。量子化は信号伝達系から見ると白色雑音の印加であり、誤差拡散法の形式では信号伝達関数 (STF) を全通過に保ったまま雑音伝達関数 (NTF) を高域通過にしてノイズシェーピングの効果を得ていることになる。

2.1　拡張誤差拡散法の処理過程

例として 8-bit 階調のグレイスケール画像 $C(m,n)$ を L 階調の画像 $H(m,n)$ へと減色することを考える。ここで $(0 \le m < M), (0 \le n < N))$ である。通常の誤差拡散による疑似濃淡化処理は量子化の前後での誤差を拡散フィルタを介して入力にフィードバックするものであるが、提案手法では量子化の前後の値を二つの異なる拡散フィルタで処理した後に差分し入力にフィードバックするように変更する。入力信号側のフィルタを V、出力信号側のフィルタを W として入出力関係を記述すると、

$$H(m,n) = Q_{l_{m,n}}; r$$
$$l_{m,n} = \arg\min_{l\in\lambda} \left|\tilde{C}(m,n) - Q_l\right|, \quad (1)$$
$$\tilde{C}(m,n) = \alpha C(m,n) + D(m,n), \quad (2)$$
$$D(m,n) = D_V(m,n) - D_W(m,n), \quad (3)$$

$$D_V(m,n) = \sum_{(i,j)} V(i,j)\tilde{C}(m+i, n+j), \quad (4)$$

$$D_W(m,n) = \sum_{(i,j)} W(i,j)H(m+i, n+j). \quad (5)$$

となる。ここで フィルタの直流利得 $\delta_V \left(= \sum_{(i,j)} V(i,j)\right), \delta_W \left(= \sum_{(i,j)} W(i,j)\right)$ は拡散率を表し通常は 1 である。減色後のカラーマップは $\{Q_l; l \in \lambda_L = \{0, 1, ..., L-1\}\}$ であらわされる。$L = 4$ で例えば $Q_0 = 0, Q_1 = 85, Q_2 = 170, Q_3 = 255$ である。D は印加するディザ信号、V, W は拡散フィルタである。原画像 C にディザ D を印加したものが $\tilde{C}$ であり、単純に C を量子化するのでなく $\tilde{C}$ を量子化することで疑似濃淡化が実現される。α は信号伝達関数の直流利得を 1 に保つための全域利得係数である。

2.2　拡張誤差拡散法の伝達関数

入力拡散フィルタ V の 2 次元 Z 変換を $V(\boldsymbol{z})$、出力拡散フィルタ W の 2 次元 Z 変換を $W(\boldsymbol{z})$ と書くと信号伝達関数は、

$$T_{\mathrm{S}} = \frac{1 - \delta_V + \delta_W}{1 - V(\boldsymbol{z}) + W(\boldsymbol{z})} \quad (6)$$

と表され、同様に雑音伝達関数は

$$T_{\mathrm{N}} = \frac{1 - V(\boldsymbol{z})}{1 - V(\boldsymbol{z}) + W(\boldsymbol{z})} \quad (7)$$

と表される。δ_V および δ_W はそれぞれ拡散フィルタ (V,W) の直流利得であり、信号伝達関数の直流利得を正規化するために予め入力信号を増幅している。この式からわかるように、$V = W$ の時は明らかに通常の誤差拡散法になり信号伝達関数は恒常的に 1 となるが、一般的には周波数特性を持つために尖鋭化や鈍化の前処理を内蔵することが可能になる。雑音信号の直流利得

を 0 にするための必要十分条件は $1 - V(\boldsymbol{z})$ の直流利得が 0 になることである。

また特に $V = \beta W; 0 \le \beta$ とした場合にその信号伝達関数は、

$$T_{\mathrm{S}} = \frac{1 + (1-\beta)\delta_W}{1 + (1-\beta)W(\boldsymbol{z})} \tag{8}$$

と表され、同様に雑音伝達関数は

$$T_{\mathrm{N}} = \frac{1 - \beta W(\boldsymbol{z})}{1 + (1-\beta)W(\boldsymbol{z})} \tag{9}$$

となる。入力拡散フィルタ $V = \beta W$ が直流利得 1 の低域通過フィルタであれば、量子化雑音は高域通過成分のみが出力されることになる。拡散フィルタの通過帯域幅が広いほど雑音の帯域幅が狭くなるので SN 比の良い疑似濃淡化が達成される。

β が 0 に近いほど平均濃度近似法と同等の振る舞いをし、高域強調するようになる。β を大きくし 1 に近づけるほど通常の誤差拡散法と同等の振る舞いをするようになり、1 を越えると高域抑制になる。β を少なくすることによって高域強調が出来る半面、$\beta = 0$ では雑音伝達関数の直流利得を 0 にすることができなくなる。

雑音信号の直流利得が特に問題となるのは平坦部であり、輪郭部ではそれほど重要視されないことから、平坦部で β を大きくとって通常の誤差拡散とし輪郭部で β を小さくとって平均濃度近似とするような輪郭感応型の適応制御も有効であると考えられる。

またフラットパネルディスプレイ (FPD) 類では概ね 64 階調程度表現できるため、これに用いて、高域の強調・抑制を統合的に処理することができる。64 階調程度の表現能力があれば、雑音伝達関数が 0 にならないことの影響は微小である。

3 特性解析

本節では前節で拡張した誤差拡散法の特性について解析を行う。図 1 にテスト画像 Eye と Target、Grayscale を JJN[4] 法で 16 階調化した画像を示す。それぞれ 512×512 画素の 8-bit 濃淡画像が原画像である。

誤差拡散フィルタの拡散係数を

$$V_\sigma(i,j), W_\sigma(i,j) = \begin{cases} \frac{1}{\kappa}\exp(\frac{i^2+j^2}{\sigma^2}) & \text{既量子化領域、} \\ 0 & \text{それ以外,} \end{cases} \tag{10}$$

とガウシアンフィルタ型とし、正規化係数 κ で直流利得を制御するものとする。

3.1 平均輝度再現性

前記拡散フィルタを $\sigma_V^2, \sigma_W^2 =$ { 0.4, 0.5, 0.64, 0.8, 1, 1.25, 1.6, 2, 2.5, 3.2, 4, 5, 6.4, 8, 10,12.5, 16, 20, 25, 32, 40} と変えて、2 値化を行った場合の平均輝度再現精度を測定した。精度測定の尺度としては疑似濃淡化の前後の画像をそれぞれ $\sigma^2 = 2.5$ のガウシアンフィルタでぼかすことにより濃淡階調を復元して RMSE を測定した。ガウシアンフィルタの分散は数々の実験より 256 階調の画像を、解像度変換なしに 2 階調に疑似濃淡化した場合の再現性評価に適切と判断された値である。なお各拡散フィルタの直流利得はどちらも 1 である。

図 2 にそれぞれのテスト画像の RMSE 値のプロットを示す。いずれも $\sigma_V^2 = 0.4$ 付近、$\sigma_W^2 = 1$ 付近で最小値となっている。図 3 にはそれぞれの画像で RMSE 値が最小となった時の疑似濃淡画像を示す。おおむね $0.5 \le \sigma_V^2 \le 1.6$、$1.0 \le \sigma_W^2 \le 3.2$ 付近で良好な平均輝度再現が行われることがわかる。なお最小値は、Eye が $\sigma_V^2 = 0.50, \sigma_W^2 = 1.25$ の時の 4.89, Target が $\sigma_V^2 = 0.40, \sigma_W^2 = 0.64$ の時の 7.01、Grayscale が $\sigma_V^2 = 0.40$、$\sigma_W^2 = 1.60$ の時の 5.47、であった。なお JJN[4] フィルタによる一般的な平均誤差最小法では Eye が 7.53、Target が 12.78、Grayscale が 7.06 である。

3.2 輪郭精度再現性改善のための高域強調

ここでは輪郭強調を制御するために式 (8) のタイプの伝達関数を適用し、JJN 係数を β, δ_W で

制御した。

拡散フィルタ $V = \beta W$ として帰還率 $0 \leq \beta \leq 1.6$ を変化すると同時に、フィルタ W の直流利得 $0 \leq \delta_W \leq 1.6$ を変化することで高域強調度を変化させた。このときの平均輝度再現性が許容範囲内であれば、雑音伝達関数の影響も軽微であるといえる。

図 4 に 16 階調化を行った場合に β および δ_W を変えたときの RMSE の推移を示す。なおこの RMSE はぼかしを入れない生の状態での値である。β と δ_W の積が 1 を越えると極端に誤差が増える場合があるがそれ以外では概ね良好な特性である。帰還率が 1 に近いほど一般の誤差拡散に近いため信号伝達関数はフラットになり、帰還率が 0 に近いほど平均濃度近似に近いため信号伝達関数は高域増幅される。またフィルタ W の直流利得が小さいほど、単純量子化に近づくため平均輝度再現が低下すると同時に輪郭再現が向上する。逆に直流利得が大きいほど変調度が高くなり (中心画素の寄与度低下) 平均輝度再現が向上すると同時に輪郭再現が低下する。

図 5 には $\beta = 0, \delta_W = 1.6$ の平均濃度近似状態での疑似濃淡画像をしている。輪郭が強調されていることがわかるが、特に Grayscale で低域雑音の残留により等色領域が発生していることも見受けられる。

4 結言

本稿では疑似濃淡化処理で利用価値の高い誤差拡散法を拡張し、疑似濃淡化と同時に尖鋭化または平滑化を行なえるようにした。

(1) 拡張誤差拡散法は平均濃度近似法を含み平滑化または尖鋭化機能を内包することができる。
(2) 拡散フィルタを 2 つに分け入力値列と出力値列をそれぞれ別々に拡散することで、さまざまな特性を持たせる事が可能となった。
(3) 特に入力値列の帰還率を制御する形態では帰還抑止の場合が平均濃度近似法に相当し尖鋭化が最大限発揮されるがその代償として、雑音伝達関数の直流利得を 0 にすることができなくなる。
(4) 減色程度が顕著な 2 値化では雑音伝達関数の直流利得は重要な要素であるが、電子表示デバイスなどでは 64 階調程度の表示が出来るので、小規模で尖鋭化機能が付加でき効果的である。

本研究成果について下記の名称で特許出願済みである。

【発明の名称】

画像の階調処理方法および処理装置

【出願番号】

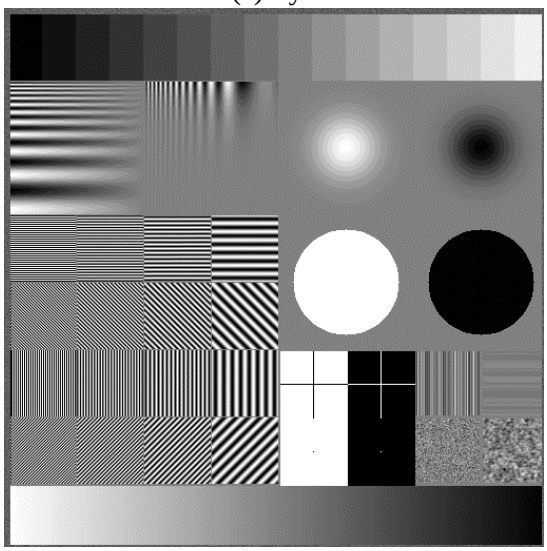
特願 2004-070556

参考文献

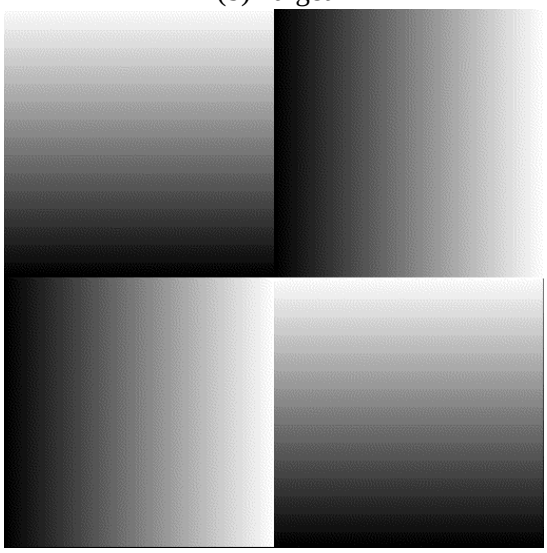
1) Manfred R. Schroeder, “Images from Computers,” *IEEE Spectrum*, vol. 6, 1969 , pp.66–78.
2) B. E. Bayer, “An Optimum Threshold for Two-level Rendition of Continuous-tone Pictures,” *Proc. ICC.*, vol.1, 1973, pp.26.11–26.15.
3) R. Floyd and L. Steinberg, “An Adaptive Algorithm for Spatial Gray Scale,” *SID Digest of Tech. Papers*, vol.4.3, 1975, pp.36–37,
4) J. F. Jarvis, C. N. Judice, and W. H. Ninke, “A Survey of Techniques for The Display of Continuous Tone Pictures on Bilevel Displays,” *Proc. CGIP*, vol.5, No.1, 1976, pp.13–40
5) 黒沢由明, “平均濃度近似による濃淡画像の 2 値化表示方式”, 情報処理学会論文誌, vol.26, no.1, 1985, pp.153–160.
6) Robert Ulichney, “*Digital Halftoning*,” M.I.T. Press, Cambridge, 1987
7) D. E. Knuth, “Digital Halftones by Dot Diffusion,” *ACM Trans. Graph.*, vol.6, 1987, pp.245–273.
8) Robert Ulichney, “Dithering with Blue Noise,” *Proc. IEEE*, vol.76, no.1, 1988, pp.56–79.
9) Theophano Mitsa and Kevin Parker, “Digital Halftoning Using a Blue Noise Mask,” *Proc.*

IEEE ICASSP 1991, 1991.
10) Raph Levien, “Output Dependent Feedback in Error Diffusion Halftoning,” *Proc. IS&T NIP8*, 1992, pp.280–282.
11) N. Kobayashi and H. Saito, “Halftone algorithm using genetic algorithm,” *IEICE Trans. Inf.&Syst.*, vol.J78–D–II, no.10, 1995, pp.1450–1459.
12) Shen-Ge Wang, “Stoclustic (Stochastic Clustered) Halftone Screen Design,” *Proc. IS&T NIP13*, 1997, pp.516–521.
13) T. Kakutani, “Threshold Control Technique for Error Diffusion Method,” *J. of Society of Electrophotography of Japan (SEPJ)*, vol.37, no.2, 1998, pp.50–56.
14) Daniel L. Lau, Gonzalo R. Arce and Neal C. Gallagher, “Green–noise Digital Halftoning,” *Proc. of the IEEE*, vol.86, no.12, 1998, pp.2424–2442.
15) T. Kimoto, T. Fujii, and M. Tanimoto, “Adaptive Error Diffusion for Step Edges of Image Signals,” *IEICE Trans. Inf. and Syst.*, vol.J82–D–II, no.2, 1999, pp.205–215.
16) T. Asano, “Digital Halftoning Algorithm Based on Random Space-filling Curve,” *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E82-A, no.5, 1999, pp.553–556.
17) Daniel L. Lau, Gonzalo R. Arce and Neal C. Gallagher, “Robust Halftoning with Green-noise,” *Proc. 1999 Image Processing, Image Quality, Image Capture Systems Conference*, Savannah, Ga. USA, 1999, pp.26–28.
18) J. Shimuzu, “An Error–Diffusion Based on a 2–D Teager Filter Using the Adaptaion of Error Diffusion Ratio,” *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.J82–A, no.7, 1999, pp.1167–1170.
19) Keith T. Knox,“Evolution of Error Diffusion,” *J. of E.I.*, vol.08, no.04, 1999, pp.422–429.
20) Victor Ostromoukhov and Roger D. Hersch, “Stochastic Clustered-dot Dithering,” *J. of E.I.*, vol.08, no.04, 1999, pp.439–445.
21) Murat Meşe, and P. P. Vaidyanathan, “Optimized Halftoning Using Dot Diffusion and Methods for Inverse Halftoning,” *IEEE Trans. Image Proc.*, vol.9, no.4, 2000, pp.691–709.
22) M. Muneyasu, T. Oda, Y. Nakata, and T. Hinamoto, “Adaptive Error Diffusion Using Fuzzy Reasoning for Step Edges,” *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.J83-A, no.7, 2000, pp.859–867.
23) K. Tanaka, “Improvement of halftone images using SA,” *J. of ITEJ*, vol.54, no.7, 2000, pp.1104–1106.
24) H. Aguirre, K. Tanaka, and T. Sugimura, “Accelerated Halftoning Technique Using Improved Genetic Algorithm,” *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E83–A, no.8, 2000, pp.1566–1574.
25) Victor Ostromoukhov, “A Simple and Efficient Error–Diffusion Algorithm,” *Proc. ACM SIGGRAPH 2001*, 2001, pp.567–572.
26) Pierre–Marc Jodoin and Victor Ostromoukhov, “Error-Diffusion with Blue-Noise Properties for Midtones,” *Proc. SPIE*, vol.4663, 2002, pp.293–301.
27) Y. Abe, “A New Method of Designing a Dither Matrix,” *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E85-A, no.7, 2002, pp.1702–1709.
28) Y. Abe, “Dot Decision Algorithm for Image Rendition,” *Proc. IEICE 18th DSP Symposium*, Iseshima, 2003.

(a) Eye

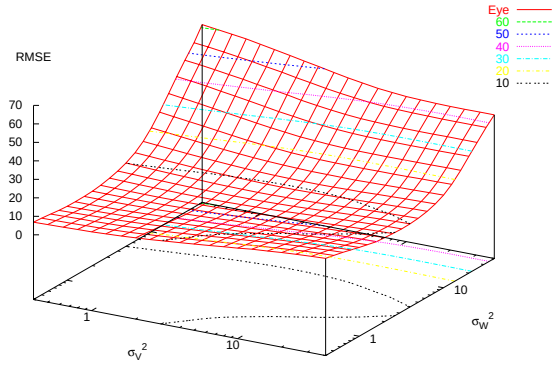


(b) Target

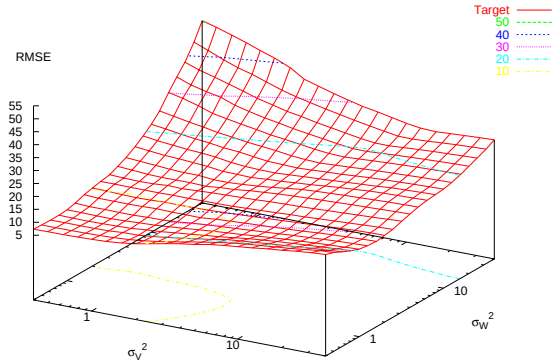


(c) Grayscale

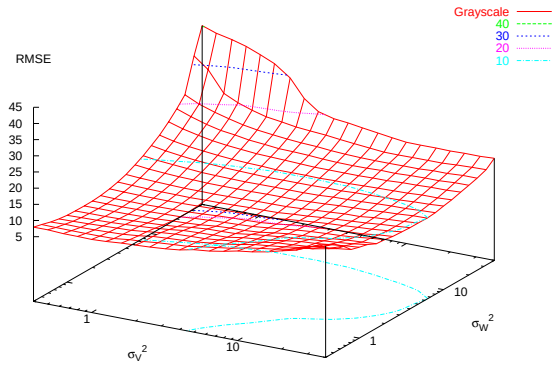
図 1: JJN 法による 16 階調疑似濃淡画像



(a) Eye



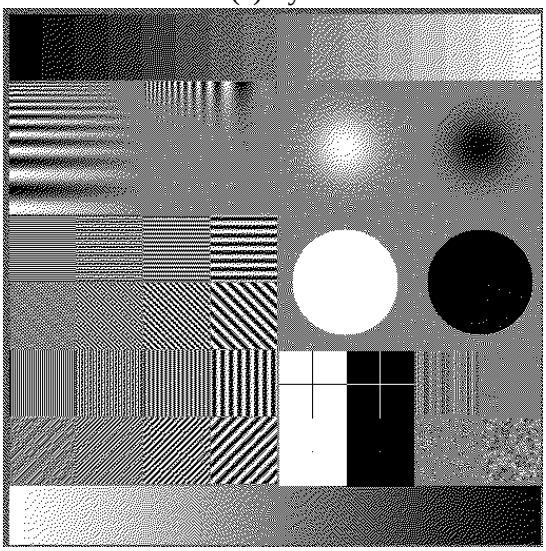
(b) Target



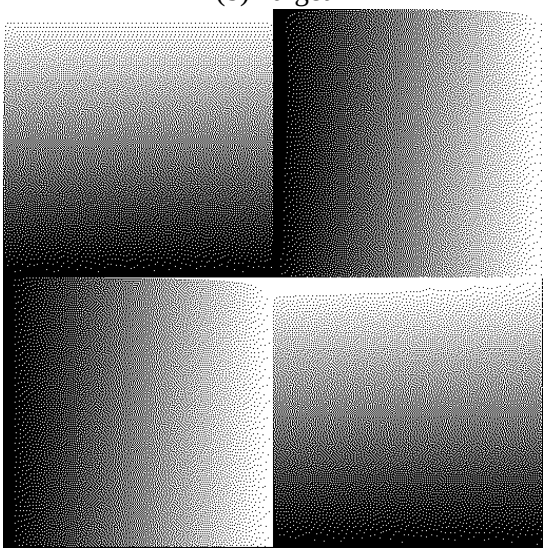
(c) Grayscale

図 2: σ_V と σ_W を変化したときの RMSE 値

(a) Eye

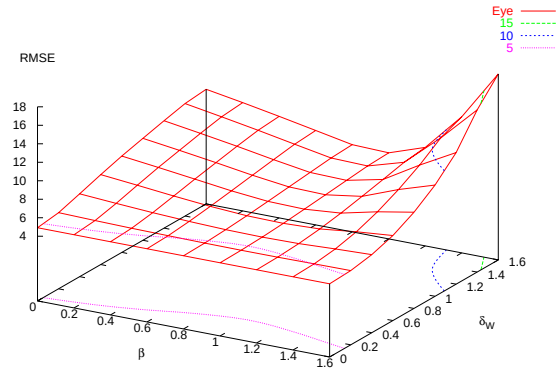


(b) Target

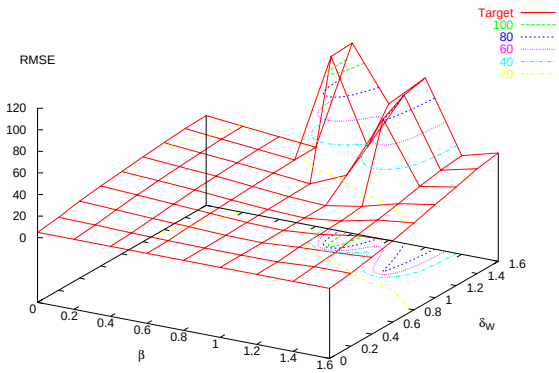


(c) Grayscale

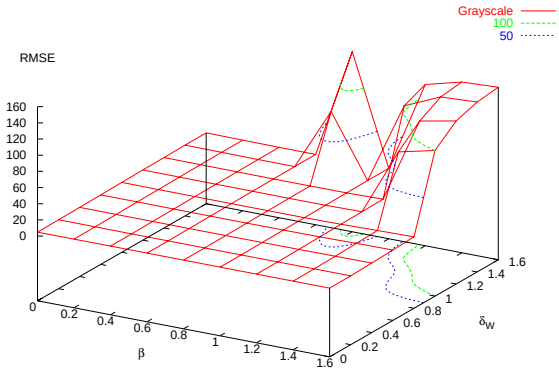
図 3: **最小** RMSE **の時の** 2 **階調疑似濃淡画像**



(a) Eye



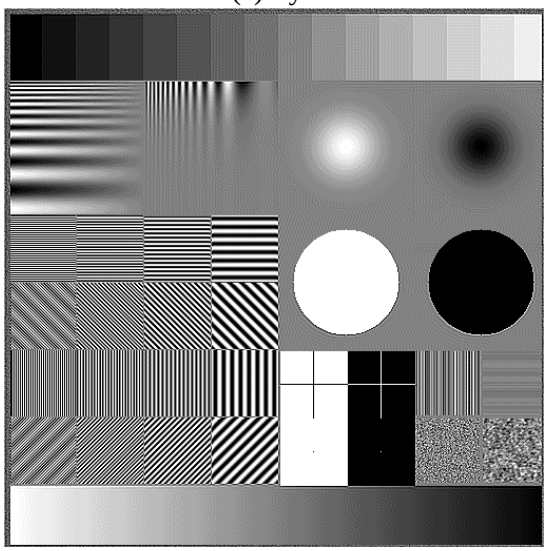
(b) Target



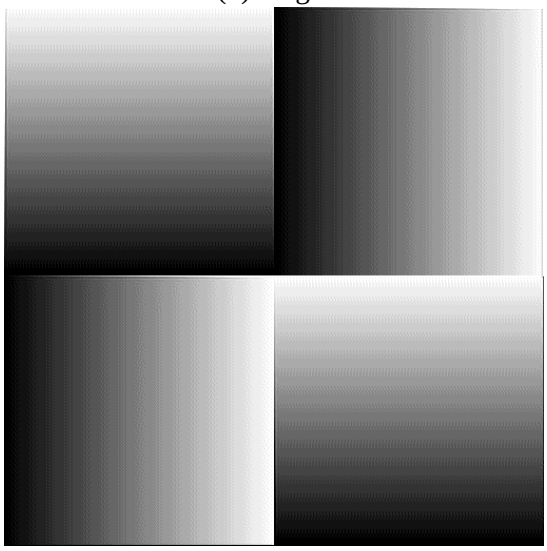
(c) Grayscale

図 4: vβ **と**δ_W **を変化した時の** RMSE **値**

(a) Eye



(b) Target



(c) Grayscale

図 5: 16 **階調尖鋭化疑似濃淡画像**