

画像割符における輝度変換のパラメータ調整による秘匿画像高品質再現

樋口 政和*¹ 會森 彩*² 川崎 秀二*³ ガンバ ジョナ*⁴ 小池 淳*⁵ 村上 仁己*⁶

High-Quality Reconstruction of Secret Images by Tuning Parameters of Intensity Transformations in Visual Cryptography

Masakazu HIGUCHI*¹ Aya EMORI*² Shuji KAWASAKI*³ Jonah GAMBA*⁴
Atsushi KOIKE*⁵ Hitomi MURAKAMI*⁶

ABSTRACT: In a kind of visual cryptography, a secret image is encrypted to plural share images. Then, we can reconstruct the secret image by using share images produced in secret image encoding scheme. In the case of two binary share images, the secret image is reconstructed by printing the two share images onto transparencies and stacking them together without any special electronic calculation. Myodo's method based on error diffusion can produce two high quality binary halftone share images from three input images, that is, two gray-scale images and a gray-scale secret image, and restore the gray-scale secret image with high quality by decoding their share images. The method changes intensities of each pixel in input images as a pre-processing in order to restore a high quality secret image. We have improved the qualities of secret images by adding histogram equalization to Myodo's method. In this paper, we propose a method that automatically tunes parameters of intensity transformations in our scheme according to input images in order to restore high quality secret images for any input images.

Keywords: Visual cryptography, Halftone image, Superimposing, Error diffusion, Intensity transformation, Affine transformation

(Received September 22, 2010)

1. はじめに

視覚復号型暗号技術は、人間の視覚特性を利用した画像暗号化の技術である。その方式では、暗号化された秘匿画像は電子的な計算なしで視覚的に復号することが可能となる。本稿では、視覚復号型暗号技術として、画像割符と呼ばれる技術について議論する。これは、一般には、1枚の秘匿画像を“割符画像”と呼ばれる n 枚の画像に暗号化する技術であり、その n 枚のうちの任意の k 枚の割符画像を重ね合わせる、すなわち重畳することによって元の秘匿画像を人間の目で復号することができるという特徴をもつ。

先行研究として、Noar と Shamir は白黒2値のテキストのような簡単な画像を、白黒2値のランダムドットパターンを持つ n 枚の画像に暗号化する手法を提案した²⁾。また、割符画像として自然画像のような意味のある白黒2値画像を出力する手法の研究^{3)–8)}も多数報告されている。それらでは、割符画像を生成する際にハーフトーン技術¹⁾が利用されている。ハーフトーン技術で代表的なものは、誤差拡散法であり、その基本原理は2次元デルタ-シグマ変調により量子化誤差を高域側に変調することである。その結果、量子化の影響を比較的目につにくい形で処理でき、自然な疑似濃淡白黒2値画像を生成することができる。秘匿画像として、Fu と Au は2値、3値の簡単な文字画像のような画像を取り扱っている⁵⁾が、現在はグレイスケール値の画像を取り扱う研究^{4), 6)–8)}が主流である。また、カラー画像を秘匿画像として取り扱っている研究³⁾もある。これらの従来手法では、生成される割符画像とそれらの割符画像を復号し

*1: 情報科学科博士研究員

*2: 理工学研究科理工学専攻修士学生

*3: 情報科学科ユビキタス工学研究室客員研究員

*4: 情報科学科ユビキタス工学研究室客員研究員

*5: 情報科学科教授

*6: 情報科学科教授 (hi-murakami@st.seikei.ac.jp)

て再現される秘匿画像の品質、割符画像の生成時間などに問題点がある。明堂らは、自然画像のような3枚のグレースケール値の画像から2枚の高品質な白黒2値の割符画像の高速生成を実現している⁶⁾。同手法では、3枚の入力画像のうちの1枚は秘匿画像であり、生成される割符画像から比較的高品質にそれを再現することができる。明堂らの手法では、割符画像生成のための前処理として、入力画像に線形型の輝度変換を施している。著者らは、明堂らの手法にヒストグラム修正型の輝度変換を取り入れることで、主観評価で割符画像の品質は明堂法のそれと同程度だが、秘匿画像は明堂法よりも高品質に再現することができる手法を提案した^{7), 8)}。しかしながら、その手法では入力画像の種類に関わらず一定の輝度変換を行なうので、入力画像の種類によっては秘匿画像を高品質に再現できない場合がある。

本稿では、著者らの前手法において輝度変換のパラメータを画像に適した自動調整をすることで、入力画像に関わらず秘匿画像を高品質に再現することを試みた。そして、いくつかの入力画像の組に対して各種の評価実験を行ない、客観的・主観的な両方の立場から提案パラメータ調整の有効性を検証した。その結果、パラメータ不変の場合で低品質な秘匿画像が再現される入力画像の組に対して、パラメータ自動調整を適用することで秘匿画像を高品質に再現できることを確認した。

2. 画素重畳の基本原則

画像割符において、秘匿画像は白黒2値の割符画像を重畳することによって、白黒2値の疑似濃淡画像として再現される。再現された秘匿画像の品質は、割符画像重畳後の各画素領域の明るさに依存する。この節では、画素の重ね合わせの基本原則について述べる。

一般に、あるグレースケールレベルの輝度 g_1, g_2 を持つ2つの画素を重畳したときの重畳後の輝度 s は $g_1 \cdot g_2$ で表される。この重畳後の輝度 s は

$$\max(0, g_1 + g_2 - 1) \leq s \leq \min(g_1, g_2) \quad (1)$$

の範囲内の値を取り得る。特に、白黒2値画素の場合は、画素の重畳操作は論理積で表現される(図1)。このとき、1画素同士の重畳後画素の輝度は当然、式(1)を満たすが、更に、いくつかの画素から構成される画素領域の疑似的な輝度をその領域内に含まれる白画素の割合と定義し、ある2つの画素領域同士の重畳を考えると、得られる重畳画素領域の疑似的な輝度も式(1)を満たす。その場合では、重畳元の画素領域内の白黒画素の配置のされ方によって、それぞれ同じ輝度をもつ領域同士でも重畳後領域の輝度が異なってくる。その様子は図2に示される。図2のCase Aにおいて、2つの3×3の白黒

Pixel A	Pixel B	Pixel C
g_1	g_2	s
0	0	→ 0
0	1	→ 0
1	0	→ 0
1	1	→ 1

図1 白黒2値画素同士の重畳規則

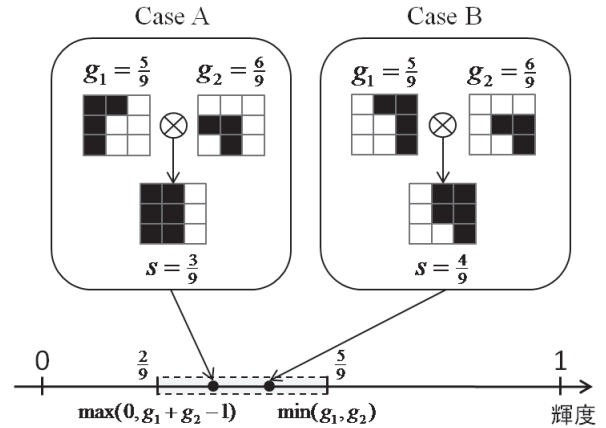


図2 白黒画素領域同士の重畳例

画素領域の輝度はそれぞれ $g_1 = 5/9$, $g_2 = 6/9$ であり、それらを重畳して得られる画素領域の輝度は $s = 3/9$ である。これは、区間 $[\max(0, g_1 + g_2 - 1), \min(g_1, g_2)] = [2/9, 5/9]$ に含まれる。Case B では、2つの白黒画素領域の輝度はCase A でのそれぞれと同じだが、白黒画素の配置が異なる。それらを重畳すると輝度が $s = 4/9$ の画素領域が得られ、その輝度も区間 $[2/9, 5/9]$ に含まれる。

このように、画素領域同士の重畳から得られる画素領域の輝度は、重畳元の領域内の白黒画素配置に依存する。理論的には、重畳元の領域が十分な画素数を持っていれば、重畳元領域の輝度を変えずに白黒画素配置を変更することによって、式(1)で表される区間内の任意の輝度を持つ重畳領域を得ることができる。画像割符の基本原則は、割符画像内の白黒画素配置を変更し、再現される秘匿画像内の疑似的な明るさを調整することに基づいている。

3. 従来手法の概要

3.1 フローチャート

本稿で議論の対象となる手法は、明堂法に基づいて構成されている。明堂法の流れを図3に示す。割符画像元の2枚のグレースケール濃淡画像をそれぞれ G_1, G_2 とし、同じくグレースケール濃淡を持つ秘匿画像を S とする。明堂

法では、前処理として $G1$ と $G2$ および S に輝度変換を施し、得られた変換後画像 $G1'$ と $G2'$ および S' を入力とする。まず、 $G1'$ を誤差拡散法により白黒 2 値画像に変換する。それを 1 枚目の割符画像 $W1$ とする。次に、 $W1$ と S' の情報を考慮しながら $G2'$ を誤差拡散法により白黒 2 値画像に変換し、得られた画像を 2 枚目の割符画像 $W2$ とする。秘匿画像の情報が埋め込まれるのは $W2$ のみである。手法の評価は $W1$ と $W2$ を重畳して得られる白黒 2 値の画像 C に対して行なう。ここで、重畳画像 C は白黒 2 値の画像であり、いくつかの白黒ピクセルの適当な配置により得られる疑似濃淡表現で、画像 C がどの程度グレースケール濃淡をもつ画像 S を再現できているか、ということの評価したいので、1 画素ずつ評価する従来の評価尺度である PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) は適当ではない。そこで、本稿では新たな評価方法としてブロック PSNR という尺度を定義し、それを用いて C と S の類似度を評価する。

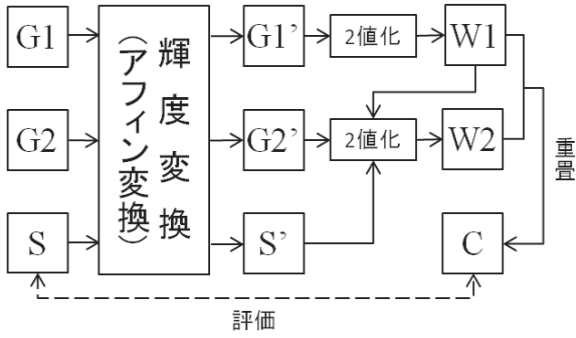


図 3 明堂法のフローチャート

3.2 輝度変換の役割

画像割符の基本原理は、割符画像内の白黒配置を変えることによって、再現される秘匿画像内の疑似的な明るさを調整することにある。再現される秘匿画像内の局所領域の疑似的な明るさが元の秘匿画像のそれと近ければ、再現される秘匿画像は高品質になる。しかしながら、2つの割符画像内の局所領域とそこに対応する秘匿画像内の画素の輝度が式 (1) を満たさなければ、割符画像内の局所領域の白黒配置をいくら変更しても、所望の輝度をもつ重畳領域を得ることはできない。そこで、式 (1) が満たされるように明堂法では前処理として入力画像に適当な輝度変換が施される。

式 (1) の区間幅が最も長くなるのは、 $g_1 = g_2 = 0.5$ のときであるので、入力画像の $G1$ と $G2$ にはそれらの輝度が 0.5 付近に集中するように輝度変換が施される。すなわち、 $G1$ と $G2$ には以下のアフィン型の輝度変換が適用される：

$$g' = 0.45g + 0.275, \quad (2)$$

ここで、 g は $G1$ または $G2$ の画素の輝度を表し、 g' は変換後の輝度を表す。この輝度変換により、 $G1$ と $G2$ に対応する白黒疑似濃淡画像 $W1$ と $W2$ の局所領域の疑似的な輝度も 0.5 付近に集中し、 $W1$ の局所領域とそこに対応する $W2$ の局所領域を重畳することによって得られる領域の疑似的な輝度は区間 $[a, b]$ 内のある値となる。ここで、 a は 0 に等しいかそれに近い正の値、 b は 0.5 に等しいかそれに近い正の値を表す。

入力画像の S には、その輝度が区間 $[0, 0.45]$ に属するように輝度変換が施される。すなわち、 S には以下の線形型の輝度変換が適用される：

$$s' = 0.45s, \quad (3)$$

ここで、 s は S の画素の輝度を表し、 s' は変換後の輝度を表す。

図 4 は明堂法のメカニズムを表している。 $W1$ の局所領域とそこに対応する $W2$ の局所領域からは、ほぼ最大幅を与える重畳区間 $[a, b]$ が得られる。したがって、 $W1$ と $W2$

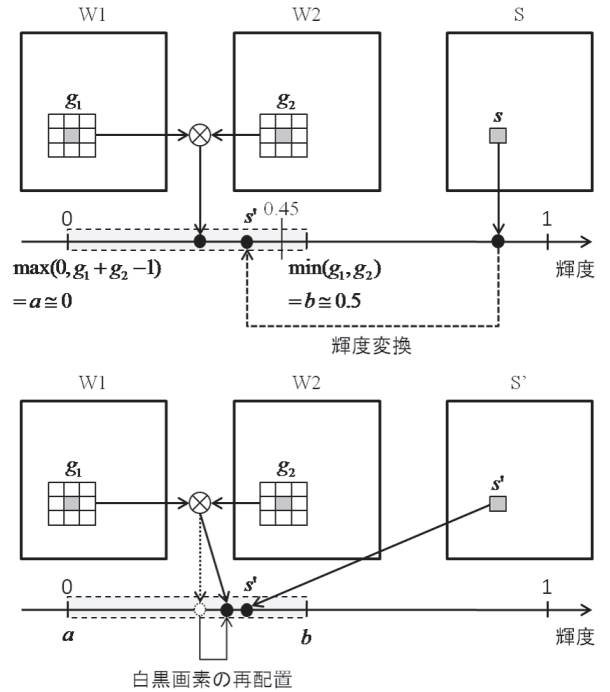


図 4 明堂法のメカニズム

の局所領域に対応する S の画素の輝度 s を 0.45 以下に変換することにより、変換後の輝度 s' はほぼ区間 $[a, b]$ に属することになる。よって、 $W1$ と $W2$ の局所領域内における白黒画素の配置を変更することで、 s' に近い疑似的な輝度を持つ重畳領域を作り出すことができ、 $W1$ と $W2$ から秘匿画像の輝度変換後の画像に近い疑似濃淡画像を生成できる。明堂法では、秘匿画像を式 (3) により輝度変換した画像を再現するため、再現画像はやや暗くなる。

4. 従来法の輝度変換に関する改良

4.1 フローチャート

アフィン変換では、すべての画素が一様に変換されてしまうため、明堂法において秘匿画像は明暗が明確ではない暗い画像に変換されてしまう。したがって、明堂法によって生成された割符画像 $W1$ と $W2$ から得られる重畳画像 C も明暗が明確ではない暗い疑似濃淡画像となってしまふ。そこで、著者らは明堂法に秘匿画像の明暗補正を行なうヒストグラム均一化処理を追加し、より高品質な秘匿画像の再現を実現した。著者らの提案法（会森法）の流れを図5に示す。

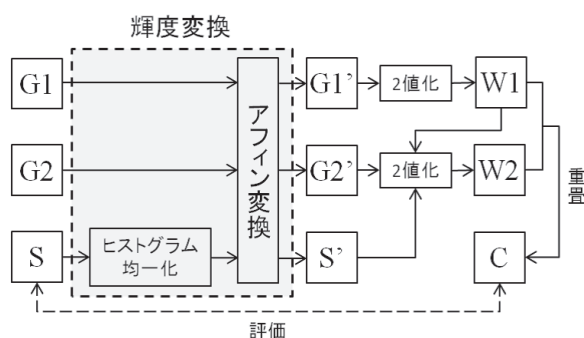


図5 会森法のフローチャート

4.2 適用例

図6に明堂法と会森法の適用例を示す。同図において、 $(W1_M, W2_M)$ と $(W1_E, W2_E)$ はそれぞれ明堂法と会森法から生成された割符画像を表し、 C_M と C_E はそれぞれ $(W1_M, W2_M)$ の組と $(W1_E, W2_E)$ の組から得られた秘匿画像の再現画像を表す。 $W1_M$ と $W1_E$ は両手法で同じ画像である。 $W2_M$ と $W2_E$ は主観的に同品質である。 C_E は C_M より主観的に高品質であることが分かる。

別の例を図7に示す。図6と同様に、 $W2_M$ と $W2_E$ は主観的に見分けがつかない。再現された秘匿画像 C_M と C_E は、明堂法と会森法ともに低品質である。このように、 $G1$ と $G2$ の両方が全体的に高い階調の輝度を持つ画像のときは明堂法・会森法ともに秘匿画像をほとんど再現できない。明堂法と会森法では、 $G1$ と $G2$ に施すアフィン変換は厳密には輝度を0.5付近に集中させる変換ではなく、単に画像の輝度のダイナミックレンジを $[0, 1]$ から $[0.275, 0.725]$ に縮小する変換であり、元の $G1$ と $G2$ の輝度の分布が高い階調値に集中していると、アフィン変換後の輝度の分布も縮小されたダイナミックレンジ内の高い階調値に集中する。図8にその様子を示す。図8のグラフにおいて、横軸は画素の輝度、縦軸は頻度を表す。その結果、 $W1$ と $W2$ の局所領域を重畳したときに十分な幅の重畳区間が得られず、しかも

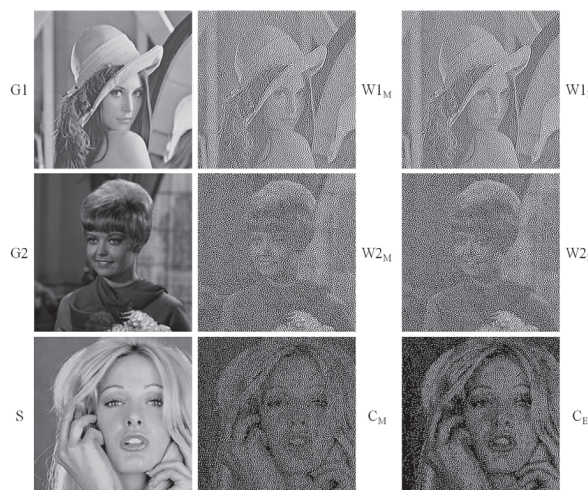


図6 明堂法のと会森法の比較例1

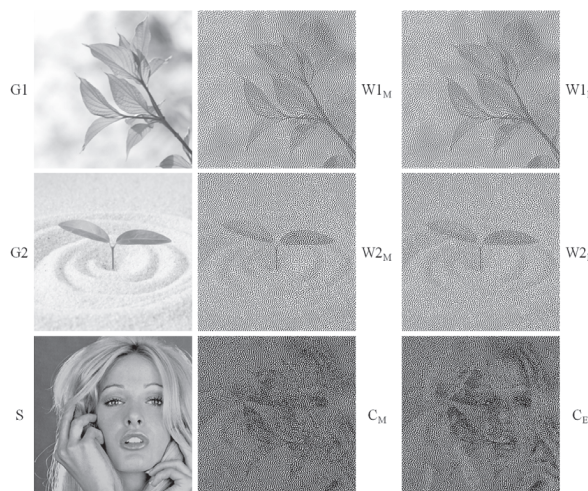


図7 明堂法のと会森法の比較例2

その区間はやや高い階調値寄りの区間となる。一方において、秘匿画像は0.5よりも低い階調の輝度を持つ画像に変換されているので、重畳領域において輝度変換後の秘匿画像の局所的な輝度を実現することが困難となる。これが、図7において、明堂法・会森法ともに秘匿画像を再現できない原因である。このように、明堂法および会森法では入力される画像の種類によっては高いパフォーマンスを得ることができない。

5. アフィン変換のパラメータ調整

5.1 パラメータ自動調整法の提案

本節では、会森法でのアフィン変換において、変換パラメータを入力画像に応じて自動的に調整し、任意の入力画像に対して高品質な秘匿画像の再現を実現する方法を提案する。前節により、全体的に高い階調の輝度を持つ入力画像に対して高品質な秘匿画像の再現が困難な原因は、入力画像

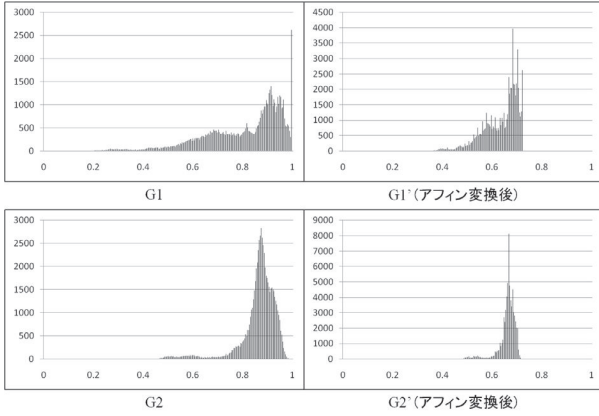


図 8 (G1, G1') と (G2, G2') の輝度分布の例 1

のアフィン変換後の輝度分布がダイナミックレンジ内の高い階調値に集中するからである。したがって、我々は入力画像の輝度の平均値を輝度の中間階調に変換し、ダイナミックレンジを適当な幅に縮小するアフィン変換を提案する。具体的には、G1 と G2 に対して、以下のステップでアフィン変換のパラメータを決定する。

1. 入力画像の平均輝度 m を求める。
2. 入力画像のダイナミックレンジを $[g_{min}, g_{max}]$ 、アフィン変換後の画像のダイナミックレンジを $[L, U]$ とする。

3. $|m - g_{min}| \leq |m - g_{max}|$ ならば

$$p_1 = \frac{U - 0.5}{g_{max} - m}, p_2 = 0.5 - \frac{U - 0.5}{g_{max} - m}m$$

とする。

4. $|m - g_{min}| > |m - g_{max}|$ ならば

$$p_1 = \frac{0.5 - L}{m - g_{min}}, p_2 = 0.5 - \frac{0.5 - L}{m - g_{min}}m$$

とする。

5. 入力画像に以下のアフィン変換,

$$g' = p_1 g + p_2 \quad (4)$$

を適用する。ここで、 g は G1 または G2 の画素の輝度を表し、 g' は変換後の輝度を表す。

式 (4) で表されるアフィン変換を、前節の図 7 における G1 と G2 に適用した場合の G1' と G2' の輝度分布を図 9 に示す。図 8 と図 9 を比べると、図 9 のほうが輝度の分布が 0.5 付近に集中していることが分かる。

これにより、G1' と G2' を元にして生成される W1 と W2 の局所領域を重畳した結果、ほぼ最大幅を与える重畳区間 $[a, b]$ が得られ、秘匿画像は式 (3) により 0.45 以下の輝度を持つ画像に変換されるので、入力画像の種類に関わらず

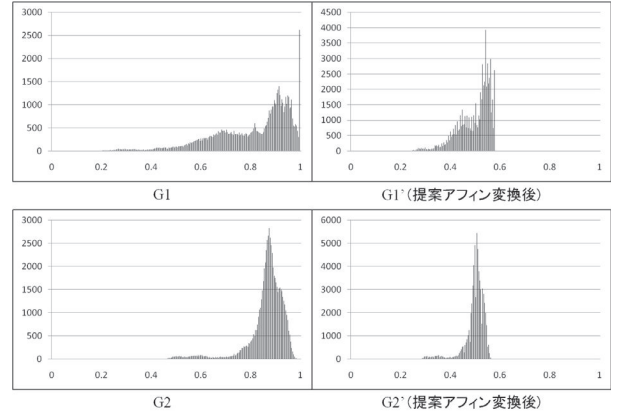


図 9 (G1, G1') と (G2, G2') の輝度分布の例 2

式 (1) が満たされ、輝度変換後の秘匿画像の再現性が増す。ここで、 a は 0 に等しいかそれに近い正の値、 b は 0.5 に等しいかそれに近い正の値を表す。

5. 2 パラメータ自動調整を取り入れたフローチャート

先に提案した輝度変換のパラメータ自動調整を会森法に組み入れたフローチャートを図 10 に示す。パラメータの自

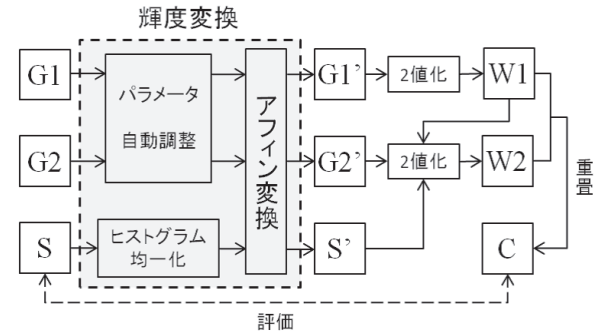


図 10 パラメータ自動調整を含んだ会森法のフローチャート

動調整はアフィン変換のみに対して行なわれるので、本質的にはこの手法は、明堂法において G1 と G2 に施すアフィン変換のパラメータを自動調整することと同じである。明堂法において G1 と G2 に適用するアフィン変換のパラメータを調整することで、任意の入力画像に対する秘匿画像の再現性に関して一定のパフォーマンスが得られ、それに秘匿画像へのヒストグラム均一化処理を追加することで、秘匿画像の再現性を更に向上させる、という仕組みである。

5. 3 適用実験

ここでは、提案された輝度変換パラメータ自動調整法の性能を評価する。以下の図 11 に示される入力画像の組に対して、図 10 の処理により生成される再現画像の品質を客観

的および主観的の両方の立場から検証する。客観評価に関



図 11 入力画像の組

しては、微小領域単位で計算される誤差の割合を用いて行なう。我々は、それを“ブロック PSNR”と名付け、bPSNRと表記する。白黒 2 値画像においてはいくつかの画素からなる微小領域内に含まれる白画素の割合をその領域の疑似的な輝度と定義し、グレースケール濃淡画像においては対応する領域内に含まれる画素の輝度の平均をその領域の平均輝度と定義して微小領域単位で疑似的輝度と平均輝度の誤差を計算する。以下に bPSNR の計算式を示す。 $N \times M$ 画素のグレースケール濃淡画像 G と白黒 2 値画像 W の任意の画素値をそれぞれ g_i, w_i とすると、

$$\text{bPSNR} = 10 \log_{10}(1 \cdot 1/ER)$$

$$\text{ただし } ER = \frac{m^2}{NM} \sum_{k=1}^{\lceil NM/m^2 \rceil} (\hat{g}_k - \hat{w}_k)^2 \quad (5)$$

$$\hat{g}_k = \frac{\sum_{i \in R_k^G} g_i}{\sum_{i \in R_k^G} 1}, \quad \hat{w}_k = \frac{\sum_{i \in R_k^W} w_i}{\sum_{i \in R_k^W} 1}$$

である。ここで、微小画素領域は $m \times m$ の正画素領域とし、 R_k^G と R_k^W はそれぞれ画像 G, W 上の対応するある微小画素領域である。本稿では $m = 4$ として計算を行なった。

また、式 (4) における変換パラメータ p_1 と p_2 を求める際に、本実験では $L = 0.25, U = 0.75$ として実験を行なった。

実験結果を図 12 から図 15 に示す。それぞれの図において、 $(W1_E, W2_E)$ と $(W1_{Ep}, W2_{Ep})$ はそれぞれノーマル

な会森法とパラメータ調整を含む会森法から生成された割符画像を表し、 C_E と C_{Ep} はそれぞれ $(W1_E, W2_E)$ の組と $(W1_{Ep}, W2_{Ep})$ の組から得られた秘匿画像の再現画像を表す。また、各入力画像の組における結果に対する客観評価を表 1 に示す。

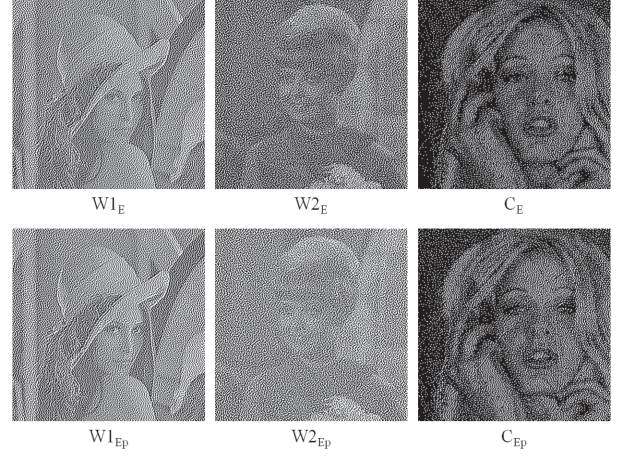


図 12 入力画像 Set1 に対する結果

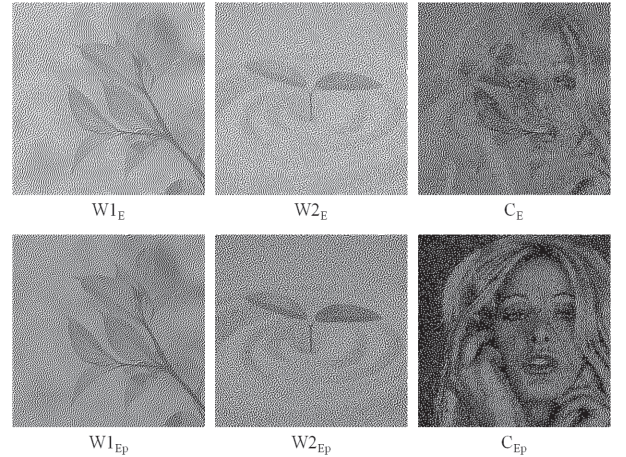


図 13 入力画像 Set2 に対する結果

5. 4 考察

ここでは、先の実験結果に対する考察を述べる。式 (4) の変換により、 $G1$ および $G2$ の輝度の平均は輝度の中間階調に変換されるので、変換後の各輝度は 0.5 の付近に分布する。よって、 $W1_{Ep}$ と $W2_{Ep}$ は $W1_E$ および $W2_E$ よりも全体的に中間的な階調の輝度を持った画像となる。図 12 においては、 $W1_E$ と $W1_{Ep}$ は見た目ではほとんど同じである。 $W2_{Ep}$ は $W1_E$ よりも輝度の階調レベルが若干高くなっている。図 13 から図 15 では $(W1_{Ep}, W2_{Ep})$ は $(W1_E, W2_E)$ よりも輝度の階調レベルが低くなっている。表 1 から、客観評価では図 12 の $W1_{Ep}$ を除くすべての $W1_{Ep}$ と $W2_{Ep}$ において、

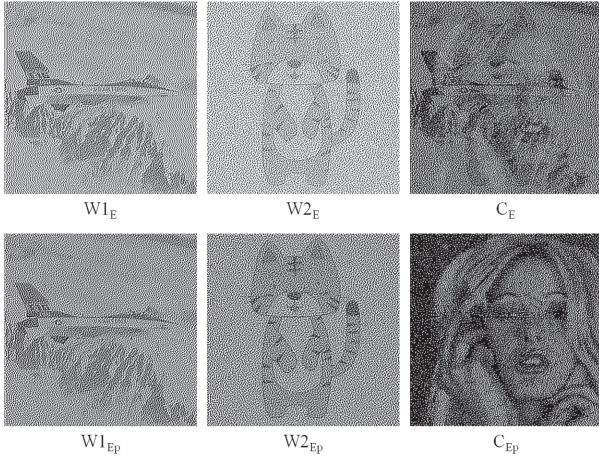


図 14 入力画像 Set3 に対する結果

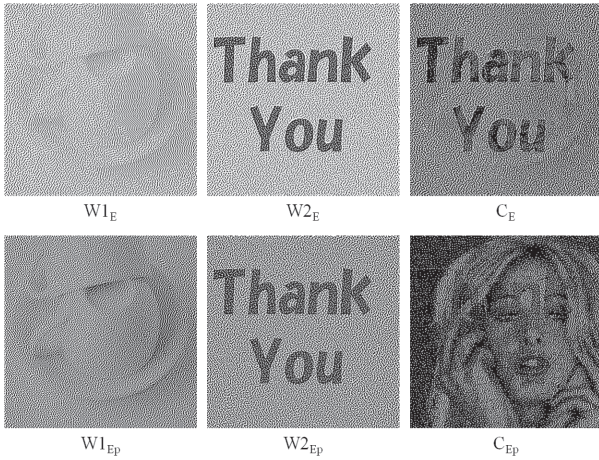


図 15 入力画像 Set4 に対する結果

各図で対応する $W1_E$ と $W2_E$ よりも大幅に $bPSNR$ の値が低くなっている。これは元々の画像 $G1$ と $G2$ が全体的に階調レベルの高い輝度を持っていたからである。

再現画像の評価に関しては、図 12 において C_{Ep} には C_E よりも若干ノイズが含まれている。それ以外の図ではすべて C_{Ep} のほうが C_E よりも主観的に高品質に秘匿画像を再現できている。また表 1 より、再現画像の客観評価に関しては、主観評価と逆の結果が得られた。

6. まとめ

本稿では、画像割符において、誤差拡散法を併用し白黒 2 値疑似濃淡割符画像を生成することのできる明堂法で用いられている入力画像に対する輝度変換を改良することにより、再現される秘匿画像の品質を改善することを試みた。

生成される割符画像の元となる 2 つの入力画像に施すアフィン変換において、その変換パラメータを入力画像の種類に応じて自動的に調整する方法を提案した。それにより、任意の入力画像に対して、秘匿画像の再現性に関して一定

表 1 各入力画像の組における結果に対する客観評価

入力	手法	G1 v.s. W1	G2 v.s. W2	S v.s. C
Set1	E	19.153504	14.978257	9.552375
	Ep	19.658996	10.723931	10.038815
Set2	E	14.119923	13.526957	12.216182
	Ep	9.725124	8.654935	9.992877
Set3	E	16.367332	12.013536	12.163775
	Ep	12.608413	7.111635	10.020200
Set4	E	12.241195	11.465161	12.889661
	Ep	7.252077	7.396327	9.907558

のパフォーマンスが得られた。そして、本稿以前に提案された秘匿画像へのヒストグラム均一化処理を併用することにより、秘匿画像の再現性を更に向上させることを実現した。

再現画像の画質の評価に関しては、客観的・主観的の両方の立場で行なった。客観評価では、グレイスケール濃淡画像と白黒 2 値疑似濃淡画像を比較する評価尺度として、ブロック PSNR を新たに定義した。それは、微小画素領域単位での誤差の割合である。客観評価では、今回提案した手法による再現画像の品質は、以前に提案した我々の手法のそれよりも優れない結果となった。しかしながら、主観的にはほぼ以前の結果を上回っており、任意の入力画像に対して一定のパフォーマンスを得ることを確認した。

今回は、秘匿画像に施す輝度変換の改良については一切関知していない。今後は、それについても検討する。また、客観評価と主観評価で符合した結果が得られるように、人間の視覚的特徴も考慮した新たな客観評価手法も検討する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、戦略的研究基盤形成支援事業の援助を受けていることをここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) R. A. Ulichney, “Digital halftoning”, MIT Press, Cambridge, 1987.
- 2) M. Noar, A. Shamir, “Visual Cryptography”, Proc. Eurocrypt’94, pp.1–12, 1994.
- 3) H. Koga and H. Yamamoto, “Proposal of a lattice-based visual secret sharing scheme for color and gray-scale images”, IEICE Transaction on Fundamentals, Vol.E81-A, No.6, pp.1262–1269, 1998.
- 4) M. Nakajima and Y. Yamaguchi, “Extended visual cryptography for natural images”, Journal of WSCG, Vol.2, pp.303–310, 2002.
- 5) M. S. Fu, O. C. Au, “A novel method to embed watermark in different halftone images: data hiding by conjugate error diffusion (OHCED)”, Proc. IEEE

Int. Conf. on Multimedia and Expo, Vol.1, pp.609–612, 2003.

- 6) 明堂 絵美, 高木 幸一, 酒澤 茂之, 滝嶋 康弘, 「誤差拡散法を用いた自然画像埋め込み可能な割符生成方式」, IEICE Technical Report, SIP2006-2, IE2006-2, pp.7–12, 2006.
- 7) 會森 彩, 樋口 政和, 明堂 絵美, 川崎 秀二, 小池 淳, 村上 仁己, 「画像割符における埋め込み画像を高品質に復号するための輝度変換に関する検討」, 成蹊大学理工学研究報告, vol.47, No.1, pp.67–73, 2010.
- 8) 會森 彩, 樋口 政和, 川崎 秀二, 小池 淳, 村上 仁己, 「画像割符における高品質復号画像生成のための輝度変換に関する考察」, ITE Technical Report, vol.34, No.31, AIT2010-106, pp.53–56, 2010.