

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

會森 彩*¹ 樋口 政和*² 明堂 絵美*³ 川崎 秀二*⁴ 小池 淳*⁵ 村上 仁己*⁶

A study on intensity transformations for high-quality decoding of a hidden image in
visual cryptography

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

ABSTRACT: In visual cryptography, a secret image is hidden into other images. We can decode the secret image by superposing share images produced in secret image hiding scheme. In the case of two binary halftone share images, the secret image is decoded 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 two gray-scale images and decode a gray-scale secret image hidden into their share images with high quality. However, the method needs changing intensities of each pixel of input images as a pre-processing in order to decode a high quality secret image. In this paper, we investigate intensity transformations to realize higher quality decoding of a secret image in myodo's method. As a result, histogram equalization is effective to decode a secret image with higher quality.

Keywords: Visual cryptography, Halftone image, Error diffusion, intensity transformation, Histogram equalization

(Received March 25, 2010)

1. はじめに

画像を用いた暗号技術の一つに画像割符と呼ばれる技術がある。これは、元来の割符の原理を画像に応用した技術である。すなわち、ある物をいくつか分割し複数人でそれらを保持することで、欠片を保持した人達のうち誰か一人でも欠けると、物を復元することができず、その人達がすべて揃い欠片をすべて持ち寄ることによりはじめて物を復元することができるようになるという原理を利用したものである。具体的には、秘匿したい画像の情報を複数の別の画像に分散させて埋め込み、情報が埋め込まれた画像がすべて揃っ

たときにのみ、電子的な処理によって秘匿画像を復号することができるという技術である。このとき、秘匿画像の情報が埋め込まれた画像は割符画像と呼ばれる。

画像割符において、特に割符画像が2値の白黒ピクセルで構成される場合、秘匿画像の復号は割符画像同士の光学的な重畳により実現でき、復号に際して電子的な処理を一切必要としない。このことから、画像割符の研究では白黒2値の割符画像の生成法に関するものが主である。先行研究としては、割符画像として意味の無いランダムドットパターンを生成するもの²⁾や意味のある擬似濃淡画像を生成するもの³⁾⁻⁶⁾、埋め込む秘匿画像として簡単な文字画像のような2値、3値の画像を取り扱うもの⁵⁾や自然画像のようなグレイスケール値の画像を取り扱うもの^{4), 6)}、更には本稿では議論の対象にしないがカラー画像を取り扱うもの³⁾まで多種多様に存在する。生成される割符画像は一般には n 枚であるが、白黒2値の割符画像生成においては、通常2枚の割符画像が生成される。これらの従来手法では、生成された2

*1: 理工学研究科理工学専攻修士学生

*2: 情報科学科博士研究員

*3: (株)KDDI 研究所

*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)

枚の割符画像の中に秘匿画像を埋め込んだことによるノイズが目立つ、生成された 2 枚の割符画像から高品質に秘匿画像を復号できない、割符画像の生成に多大な時間を要するなど、いくつかの問題点がある。

ところで、白と黒のピクセルを適当に配置して擬似濃淡を表現し自然な白黒 2 値画像を高速に生成することができる手法として、誤差拡散法という手法¹⁾が知られている。白黒 2 値の割符画像を生成する際にこの誤差拡散法を併用して行うことで、秘匿画像の情報を埋め込むことによるノイズを拡散させることができ、秘匿画像を埋め込んだことを目立たせることなく自然な白黒 2 値の割符画像を生成することができる。このことから、白黒 2 値の割符画像生成法に関する研究ではこの誤差拡散法を用いた生成法が特に注目されている。明堂らの手法⁶⁾では、白黒 2 値の割符画像生成に誤差拡散法を応用しており、自然画像のようなグレイスケール値の画像から高品質な白黒 2 値の割符画像の高速生成を実現している。さらに同手法では、グレイスケール値の画像を秘匿画像として埋め込むことができるうえに、比較的高品質にそれを復号することができる。しかしながら、割符画像生成のための前処理として、割符画像元の画像や秘匿画像の特徴に合わせた輝度変換が必要であり、その輝度変換の仕方によっては秘匿画像を高品質に復号することができない場合がある。逆にその輝度変換の仕方をうまく選ぶことによって秘匿画像をより高品質に復号することができる可能性もある。

本稿では、明堂法において、より高品質に秘匿画像を復号するための輝度変換について検討を行なった。その結果、ヒストグラム均一化(ヒストグラムイコライゼーション)が秘匿画像を高品質に復号するのに有効であることが分かった。

2. 従来手法の概要

明堂法の流れを図 1 に示す。割符画像元の 2 枚のグレイスケール濃淡画像をそれぞれ $G1$, $G2$ とし、同じくグレイ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' を入力する。そしてまず、 $G1'$ を誤差拡散法により単なる白黒 2 値画像に変換する。それを一枚目の割符画像 $W1$ 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、得られた画像を二枚目の割符画像 $W2$ とする。これにより、秘匿画像の情報が埋め込まれるのは $W2$ にだけということが分かる。(正確には S' の情報に応じて変化した $W1$ の情報が埋め込まれる) 手法の評価は $W1$ と $W2$ を重畳して得られる白黒 2 値の復号画像 C の復号度により行う。復号度とは C がどの程度 S を再現できているかとい

う度合いであり、本稿では S と C の PSNR などの値を復号度とする。この場合、その値が大きければ大きいほど、 C は S をより良く再現しているということになる。

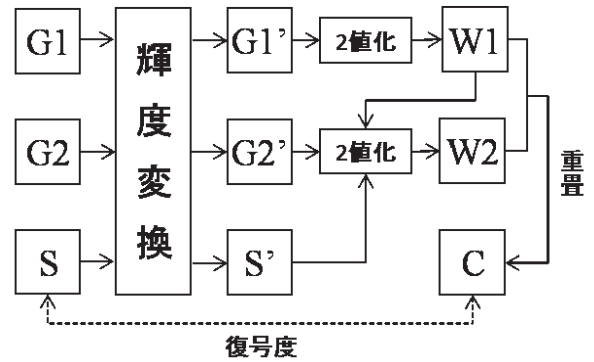


図 1 明堂法のフローチャート

なお、以後、 $G1$ と $G2$ および S の任意の画素値をそれぞれ $g1_k, g2_k, s_k$ で表す。また、それぞれの画素値は 0 ~ 1 までの連続階調値をとるものとする。0 は黒を表し、1 は白を表す。

2.1 誤差拡散法

多階調の画像を 2 階調の画像に変換するには、量子化を行う必要があるが、それには必ず量子化誤差が伴う。したがって、高品位な擬似濃淡画像を生成するには、量子化誤差を視覚的に目障りにならないように制御する必要がある。誤差拡散法の基本原理は人間の視覚特性を考慮して、量子化誤差を高域に変調することである。誤差拡散法の構成は 2 次元デルタ-シグマ変調とみなせるので、この処理により、量子化誤差を高域側に変調することができる。その結果、量子化の影響を比較的目につきにくい形で処理できる。

量子化は画像の左上のピクセルから右下のピクセルへ向けてラスタ走査により順次行われる。ラスタ走査において、処理中の画素の濃淡値を g_k とする。これに、処理中の画素に到達するまでの各画素で生じた量子化誤差に誤差拡散フィルタの重みを乗じて蓄積したもの(蓄積誤差 E)を加え、得られた値 $u_k = g_k + E$ を量子化閾値 T の量子化器で量子化し、2 階調の濃淡値 w_k を得る。そして、処理中の画素における量子化誤差 $e_k = u_k - w_k$ を求め、それを保持し次の画素に処理が移る。蓄積誤差 E は具体的には以下の式で計算される。

$$E = \frac{\sum_{i \in J_k} j_i e_i}{\sum_{i \in J_k} j_i} \quad (1)$$

ただし、 J_k は誤差拡散フィルタが適用される画像上の領域、 j_i は誤差拡散フィルタの重みを表す。明堂法では誤差拡散

フィルタに Jarvis, Judice&Ninke のフィルタを用いている。また、量子化閾値は $T = 0.5$ に設定している。

2.2 秘匿画像の埋め込み処理

まず、白黒2値の重畳規則を図2に示す。通常、ピクセル

w1	w2	重畳後
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

図2 白黒2値ピクセル同士の重畳規則

同士の重畳はピクセル濃度の積で表される。白黒2値の場合は0,1の論理積に対応している。

明堂法では秘匿画像の情報埋め込みは入力画像 $G2'$ の2値化の際に行われる。 $G2'$ のラスタ走査において、処理中の画素の濃淡値 $g2'_k$ に蓄積誤差を加えた値 $u2'_k$ が、

$$T - \Delta u < u2'_k < T + \Delta u \quad (2)$$

を満たしているときに、この画素の位置に秘匿画像の情報を埋め込む。ここで Δu は任意の正定数である。 Δu が微小量で式(2)が成り立っているならば $u2'_k$ は量子化閾値 T に近い値ということである。 $T = 0.5$ であれば、0および1から $u2'_k$ までの距離はほとんど同じとみなすことができる。このとき余計な情報を埋め込むことによって、本来の量子化結果と違った(反転した)情報になったとしても、0および1から $u2'_k$ までの距離はほぼ同じなので、誤差拡散法でこの後続の画素に配分される誤差は、余計な情報を埋め込む前と後とではほぼ同じとなり、情報を埋め込む際の画像劣化を抑えることができる。

秘匿画像の情報埋め込みの際は、ラスタ走査で処理している画素 $g2'_k$ の周辺のすでに処理済の画素領域を考え、それに対応する $W1$ の画素領域との重畳結果にガウシアンフィルタの一部を施し、重畳結果の領域が仮にグレイスケール濃淡を持っていた場合の処理画素位置での濃度 d (推定濃度) を算出する。その d と S' の画素 s'_k との差を考え、もし $s'_k - d > \varepsilon_d$ であれば、重畳結果が明るくなるように画素 $w2_k$ を調整する。すなわち $w2_k = w1_k$ とする。これにより重畳後のこの画素は確率 $\frac{1}{2}$ で白か黒となる。逆に $d - s'_k > \varepsilon_b$ であれば、重畳結果が暗くなるように画素 $w2_k$ を調整する。すなわち $w2_k = \overline{w1_k}$ とする。これにより重畳後のこの画素は必ず黒となる。ここで、 ε_d と ε_b はある正定

数であり、 d と s'_k が値としてどの程度離れていれば $d \neq s'_k$ とみなすかという判断値である。 d と s'_k が上記の条件を満たさなければ、 $d \simeq s'_k$ とみなし、 $w2_k$ は誤差拡散法の量子化によって得られる値とする。これにより重畳後のこの画素は確率 $\frac{3}{4}$ で黒となる。

2.3 復号度

復号度とは重畳画像 C が秘匿画像 S とどの程度似ているかという度合いである。通常、画像の類似度は PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) で計算する。PSNR では一画素ずつの誤差を評価するが、今の場合、重畳復号画像 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って得られる疑似濃淡で、画像 C をどの程度グレイスケール濃淡をもつ画像 S に似せられるか、ということの評価したいので、一画素ずつ評価する PSNR は適当ではない。そこで、いくつかのピクセルからなる微小領域を考え、その領域に含まれる白ピクセルの割合をその領域の濃度と定義し、微小領域単位による PSNR で復号度を評価する。あるいは、重畳復号画像 C にガウシアンフィルタを施し、グレイスケール画像に変換し、得られた画像と S を通常の PSNR で評価する。

2.4 適用例

明堂法の適用例を図3と4に示す。図3より、割符画像

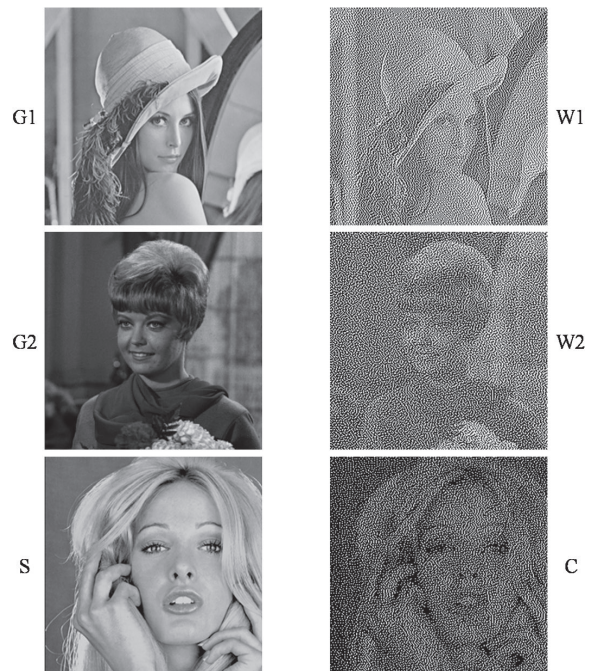


図3 明堂法の適用例1

$W1$ と $W2$ は高品質に生成できていることが分かる。また、

重畳画像 C も概ね良好に秘匿画像 S を復号できている。図 4 は、図 3 の例において、輝度変換を行わなかった場合の結果である。図 4 より、割符画像 W1 と W2 は高品質に生成できているが、重畳画像 C は秘匿画像 S を全く復号できていない。これらの例から、秘匿画像を高品質に復号するためには、前処理としての輝度変換が必要不可欠であるということが分かる。

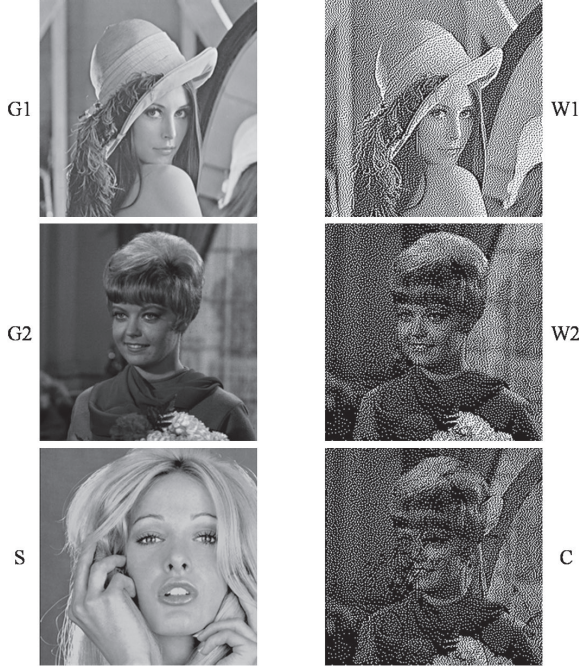


図 4 明堂法の適用例 2 (輝度変換無し)

3. 輝度変換についての考察

3.1 重畳後画素の濃度範囲

一般に、ある濃度 g_1, g_2 を持つ 2 つの画素を重畳したときの重畳後濃度は $g_1 \cdot g_2$ で表される。この重畳後濃度は

$$\max(0, g_1 + g_2 - 1) < g_1 \cdot g_2 < \min(g_1, g_2) \quad (3)$$

の範囲内の値を取り得る。2 値画像の場合は、いくつかの画素から構成される画素領域の重畳を考えたとき、その領域の濃度を領域内に含まれる白画素の割合と定義すると、式 (3) が成り立つ。

3.2 アフィン輝度変換

明堂法の基本原理は、G1 と G2 の重畳画像の濃度と、S の濃度との差が小さくなるように W2 の白黒画素配置を調整することにある。ここで、G1 と G2 のある画素 g_{1k} と g_{2k} を重畳し、S の対応する画素の濃度 s_k を実現したいと思ったとき、式 (3) より g_{1k} と g_{2k} の重畳後濃度は区間

$(\max(0, g_{1k} + g_{2k} - 1), \min(g_{1k}, g_{2k}))$ 内のある値となるが、 s_k がこの区間内に含まれていないときは、 g_{1k} と g_{2k} の重畳で s_k を実現することは不可能であり、重畳後濃度と s_k の誤差も必然的に大きくなる (図 5 の上部)。よって、明堂法でこの誤差が小さくなるように W2 の画素配置を調整したとしても、誤差はあまり小さくならず良好な結果は期待できない。しかしながら、あらかじめ S にある変換を施して S' とし、その画素濃度 s'_k が区間 $(\max(0, g_{1k} + g_{2k} - 1), \min(g_{1k}, g_{2k}))$ 内に含まれるようにすれば、 g_{1k} と g_{2k} の重畳で s'_k を実現できる可能性がでてくる。さらに s'_k を実現できなかったとしても、重畳後濃度との誤差は小さくなると期待できる (図 5 の下部)。よって、明堂法でこの誤差が小さくなるように W2 の画素配置を調整すれば、元々小さかった誤差がさらに小さくなり良好な結果が得られる。明堂法では、 s'_k が区間 $(\max(0, g_{1k} + g_{2k} - 1), \min(g_{1k}, g_{2k}))$ 内に含まれる割合を高くするために、G1 と G2 にも変換を施す。すなわち、上記の区間幅がより広くなるように画素濃度 g_{1k}, g_{2k} を調整する。式 (3) より、この区間幅が最も広くなるのは $g_{1k} = g_{2k} = 0.5$ のときなので、G1 と G2 にはその画素濃度が 0.5 付近に集中するような変換を施す。 $g_{1k} = g_{2k} = 0.5$ のとき、上記の区間は $(0, 0.5)$ となり最大の区間幅となる。

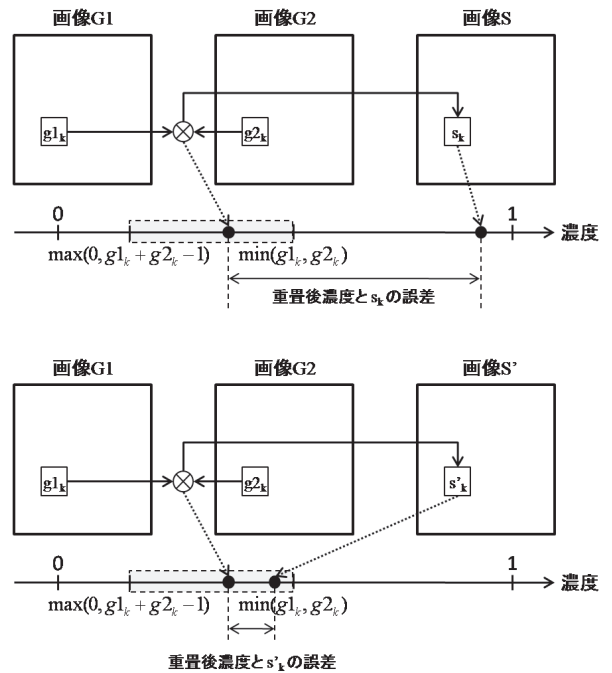


図 5 重畳後濃度と秘匿画素濃度の誤差

このときの G1 と G2 および S に施す変換として、明堂法ではアフィン輝度変換を用いている。G1 と G2 には $g'_k = 0.45g_k + 0.275$ なるアフィン変換を施し濃度値を 0.5 付近に集中させ、S には $s'_k = 0.45s_k$ なるアフィン (線形) 変換を施し濃度値が $[0, 0.45]$ の区間内の値となるようにし

ている．これにより，変換後画像 $G1'$ と $G2'$ の各画素の重畳後濃度は大体区間 $(0, 0.5)$ 内の値となり，変換後画像 S' の各画素の濃度は区間 $[0, 0.45]$ 内の値となるので，重畳後濃度と s'_k との誤差は小さくなり，明堂法によってさらにその誤差が小さくなるように $W2$ の画素配置が調整され，図 3 のような良好な結果が得られるのである．

3.3 ヒストグラム均一化

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に適用されていたアフィン変換では明暗がはっきりしない暗い画像を形成してしまう．したがって，明堂法によって生成された割符画像 $W1$ と $W2$ から得られる重畳復号画像 C も明暗がはっきりしない画像となってしまふ．そこで，我々は秘匿画像の明暗補正を行った後，明堂法を適用すれば明暗がはっきりとした重畳復号画像が得られ，より高品質に秘匿画像を復号できるのではないかと考えた．

画像のヒストグラムを考えた場合，一般にはそのヒストグラムが 0 から 1 までのすべての濃度に分布しているのが望ましい．それによって，すべての濃度値が使われ画像の明暗がはっきりとするからである．画像のコントラスト補正処理の一つに，ヒストグラム均一化（ヒストグラムイコライゼーション）と呼ばれる処理がある．我々は，この処理を明堂法の前処理として適用することを考えた．ヒストグラム均一化は以下の式で与えられる．

$$g' = \frac{\int_0^g p(r)dr - p(0)}{1 - p(0)}, \quad 0 \leq g \leq 1 \quad (4)$$

ここで p は画像の濃度値 r の分布関数である．ヒストグラム均一化は p の累積分布関数を直線型に補正する変換であり，頻度の大きいレベルでは隣のレベルとの間隔を広げるように調整し，頻度がまばらなレベルでは隣のレベルとの間隔が密になるように調整する．図 6 に，ヒストグラム均一化処理とアフィン変換処理の適応結果の例を示す．また，図 7 にそれらのヒストグラムを示す．同図において横軸は濃度，縦軸はその頻度を表している．図 6 のアフィン変換は，明堂法において秘匿画像に適用されるアフィン変換である．同図より，ヒストグラム均一化処理無しのアフィン変換画像では明暗がはっきりしない全体的に暗い画像となっているが，ヒストグラム均一化処理ありのアフィン変換画像では暗い画像ではあるが明暗がはっきりとした画像となっていることが分かる．

図 8 に明堂法においてヒストグラム均一化処理を併用した割符画像生成処理のフローチャートを示し，図 9 にそれを適用した結果の例を示す．また，図 10 に，ヒストグラム

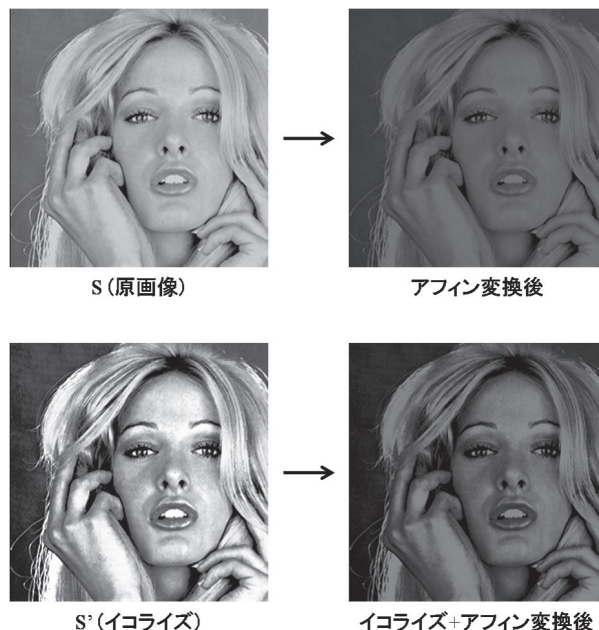


図 6 ヒストグラム均一化とアフィン変換適用例

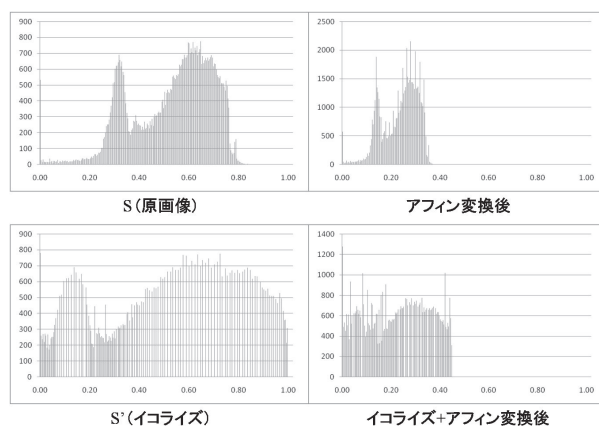


図 7 図 6 の画像に対するヒストグラム

均一化処理の有無における重畳復号画像の比較結果を示す．図 3 と図 9 を比較すると，割符画像 $W2$ はほとんど同じ品質で生成されていることが分かる．図 10 において，ヒストグラム均一化処理有りのほうが同処理無しの結果より視覚的に高品質に秘匿画像が復号できていることが分かる．これは，ヒストグラム均一化処理により変換後画像 S' において明るい部分と暗い部分が強調されたため，明堂法により，明るい部分はヒストグラム均一化有りと無しとで復号結果にあまり差は無く $W2$ が構成されるが，暗い部分はより暗く復号されるように $W2$ の画素配置が調整されるからである．したがって，ヒストグラム均一化処理有りと無しとでは，画像の暗い部分に大きな違いが生じ，ヒストグラム均一化処理有りのほうがその暗い部分がはっきりと復号されるので，同処理無しの結果よりも視覚的に高品質に見えるのである．

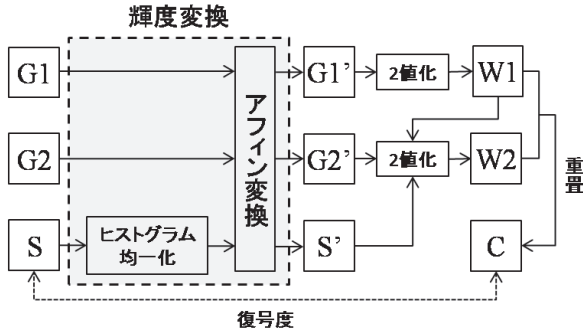


図 8 明堂法にヒストグラム均一化を含めたフローチャート

表 1 と表 2 にヒストグラム均一化処理の有無における定量的な評価結果を示す．表において，“PSNR A” というのは微小ピクセル領域単位で計算した PSNR である．白黒 2 値画像においてはその領域内に含まれる白画素の割合をその領域の濃度と定義し，グレイスケール濃淡画像においてはその領域内に含まれるピクセル濃度の平均をその領域の濃度と定義して計算を行った．以下に PSNR A の計算式を示す． $N \times M$ 画素のグレイスケール濃淡画像 G と白黒 2 値画像 W の任意の画素値をそれぞれ g_k, w_k とすると，

$$\begin{aligned} \text{PSNR}_A &= 10 \log_{10}(1/ER_A) \\ ER_A &= \frac{m^2}{NM} \sum_{k=1}^{\lceil NM/m^2 \rceil} (\hat{g}_k - \hat{w}_k)^2 \\ \text{ただし } \hat{g}_k &= \frac{\sum_{i \in R_k} g_i}{\sum_{i \in R_k} 1}, \quad \hat{w}_k = \frac{\sum_{i \in R_k} w_i}{\sum_{i \in R_k} 1} \end{aligned} \quad (5)$$

である．ここで，微小ピクセル領域は $m \times m$ の正方ピクセル領域とし， R_k は画像 G, W 上のある微小ピクセル領域である．本稿では $m = 8$ として計算を行った．“PSNR B” というのは白黒 2 値画像にガウシアンフィルタを施しグレイスケール濃淡画像に変換した後，通常の PSNR で計算した結果である．以下に PSNR B の計算式を示す． $N \times M$ 画素のグレイスケール濃淡画像 G と白黒 2 値画像 W の任意の画素値をそれぞれ g_k, w_k とすると，

$$\begin{aligned} \text{PSNR}_B &= 10 \log_{10}(1/ER_B) \\ ER_B &= \frac{1}{NM} \sum_{k=1}^{NM} (g_k - g'_k)^2 \\ \text{ただし } g'_k &= \frac{\sum_{i \in F_k} \alpha_i w_i}{\sum_{i \in F_k} \alpha_i} \end{aligned} \quad (6)$$

である．ここで， F_k はガウシアンフィルタが適用される画像 W 上の領域， α_i はガウシアンフィルタの重みを表す．ヒストグラム均一化処理は割符画像 $W1$ の生成には影響を及ぼさないで，同処理有り無しとで定量評価の値は変わらない．割符画像 $W2$ には，ヒストグラム均一化処理有りのほうが秘匿画像の情報が多く埋め込まれていると思われるため，定量評価においては同処理無しの結果より若干劣っている

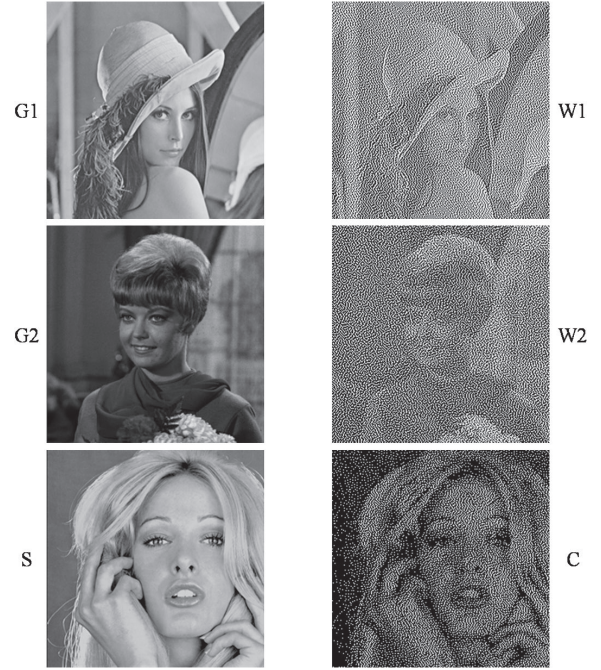


図 9 明堂法の適用例 3 (イコライズ有り)

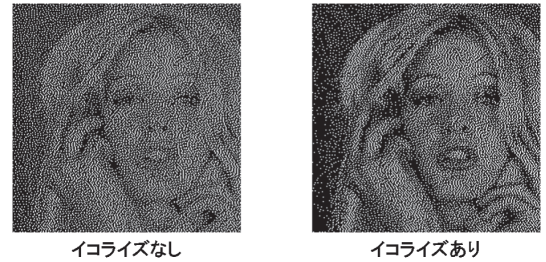


図 10 イコライズ処理有無における明堂法適用結果の比較

重畳復号画像 C においては，ヒストグラム均一化処理有りの結果のほうが同処理無しの結果より視覚的に高品質な復号を実現できているが，定量的評価ではヒストグラム均一化処理無しの結果のほうが同処理無しの結果より優れているとの結果となった．

表 1 ヒストグラム均一化処理無しにおける定量評価

	G1 v.s. W1	G2 v.s. W2	S v.s. C
PSNR A	20.657010	15.461315	9.899487
PSNR B	19.077949	15.148234	9.695089

表 2 ヒストグラム均一化処理有りにおける定量評価

	G1 v.s. W1	G2 v.s. W2	S v.s. C
PSNR A	20.657010	15.458008	9.686286
PSNR B	19.077949	15.145490	9.518309

4. まとめ

この論文では，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において，同手法の前

処理である輝度変換処理に着目し、より高品質な重畳復号画像を構成することのできる割符画像生成のための輝度変換についての検討を行った。その結果、前処理としてヒストグラム均一化が、より高品質に秘匿画像を復号するのに有効であると分かった。画像の濃淡値のヒストグラムを 0 から 1 までのすべての濃度に分布させる処理は、ヒストグラム均一化に限らず、いくつか存在する。しかしながら、ヒストグラム均一化以外のコントラスト補正処理では、高品質に秘匿画像を復号することができない場合がある。その理由はまだ明確にはなっておらず、その解明が今後の課題である。

また、ヒストグラム均一化処理は視覚的には高品質な重畳復号画像を得ることができるが、定量評価においては優れない結果となった。今後は、人間の視覚的特徴も考慮した定量評価も検討する必要がある。

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.