

任意画像からの割符生成のためのダイナミックレンジ決定法

Dynamic Range Transformation to Generate Halftone Visual Cryptography Images from Various Input Images

明堂 絵美†
Emi Myodo

高木 幸一†
Koichi Takagi

宮地 悟史†
Satoshi Miyaji

滝嶋 康弘†
Yasuhiro Takishima

1. まえがき

2枚の画像を重畳することで、埋め込まれた画像を視覚的に復号可能な割符画像技術において、埋め込む画像(S)、及び、埋め込まれる画像(G1, G2)のそれぞれに自然画像を利用する場合、各々の画像に他の画像(G1, G2, Sのうちの残りの2枚の画像)からの残存形状が目立ちやすくなる。これに対処するため、例えば、従来の手法[1]では割符画像生成の前処理として3枚の入力画像のダイナミックレンジ(以下 DR)を縮小する手法が示されている。DRを縮小しすぎるとコントラストが弱くなり、オブジェクトを視認しにくくなるため、同手法では更に、画像の残存度とコントラストを両立させるため、DRを広く取った後に例外的な画素値のみ丸め込む画素値の誤差分散処理を行う手法を提案している。しかし、画像の残存度とコントラストを両立させるための定量的尺度がなく、試行錯誤でDR変換式を決定するため、多大な手間と時間を要した。そこで本稿では、画像の残存度を一定とする尺度を設け、その尺度を満たす範囲で最大のコントラストを取るDR変換式を一意に決定する手法を提案する。

2. 割符画像生成の前処理手法

2.1 割符画像生成の基本原則

割符画像の基本生成フローを図1に示す。入力画像 G1, G2 と秘密画像 S に対し、DR の変換、画素値の誤差分散処理の前処理を適用し G1'', G2'', S'' を得る。その後、割符生成の処理を G1'', G2'', S'' に施し、白黒2値の割符画像 W1, W2 が生成される[1]。

前述の手法により生成される W1, W2 や、それらを重畳して得られる画像 T (秘密画像が視覚復号される画像) は、割符生成処理によって2値化されたものとなる。しかし、割符画像の生成処理は、入力として与えられる G1'', G2'', S'' の各画像における画素値 $g1'', g2'', s''$ と、白黒2値の各割符画像の局所的な白黒濃度がほぼ同等となるように行われる。このため、与えられた画素値の組み合わせである画素組 $(g1'', g2'', s'')$ によっては、2値画像として表現不可能な組み合わせが存在する場合があります。この場合 W1 や W2 を生成できないか、生成できても他の画像の残存度(以下「残存度」と書く)に関する画質を制御できない原因となる。例えば、G1'', G2'' の画素値が双方とも一様に128(白濃度 1/2 の灰色)である場合、図2に示すように、S'' が一様に0(黒)や S'' が128(灰色)を表現可能な画素配置の組み合わせが存在するが、S'' が192(白濃度 3/4 の薄灰)を表現する組み合わせは存在しない。画素組が表現可能な組み合わせとなる条件は $\max(0, g1'' + g2'' - 255) \leq s'' \leq \min(g1'', g2'')$ (1) となる。 (1)式の範囲を図示すると、図3の4面体 defg で囲まれた領域となる。図3中の点 k', m', n' は図2の(a), (b), (c)の場合にそれぞれ対応する。

2.2 従来手法の問題点

従来前処理手法[1]では、各画像のコントラストを高めるため、(1)式を満たさない画素組も許容し、DRを広く取って変換している。図3の点 c' のように、DRの縮小だけでは式(1)を満たさない画素組は図1(b)の画素値の誤差分散処理が施される。例えば、DR縮小後の画素の画素値 $c'(g1'', g2'', s'')$ が図3の四面体に含まれない場合、図3で c' から最も近い位置にある四面体 defg 上の点 $c''(g1'', g2'', s'') = c'(g1'', g2'', s'') + e(e_{G1}, e_{G2}, e_S)$ を取ることで、c' の c'' に対する誤差 e を各々の画像に e_{G1}, e_{G2}, e_S だけ分散させる。

このとき、DRを広くするほどコントラストは高くなるが、他の画像からの残存が大きくなる問題がある。

同手法では他の画像の残存度とコントラストを両立する条件を、式(1)を満たす $(g1'', g2'', s'')$ の画素組の割合 Constraint fulfillment rate(CFR)を用いて評価しており、この値が0.6以下の場合には適さないという知見が得られている。ところが、CFRが一定値でも、実際には画像の組み合わせによって残存度に大きな差が生じるため、あまり有効な評価尺度とはいえない。例えば、画像中に小さなオブジェクトがあり、そのオブジェクトの位置の画素組が式(1)の範囲外となる場合、CFRは同一でもオブジェクトのコントラストが高いほど他の画像に残存しやすくなる。そこで本稿では、残存度を一定とする評価尺度を提案する。

また、同手法ではCFRは生成画像の評価のためにのみ用いられ、DR変換式を一意に決定する手法は提案されておらず、変換式の決定に多大な時間を要したため、本稿で、DR変換式を自動かつ一意に決定する手法を提案する。

3. 提案前処理手法

3.1 画質の評価尺度の定義

本稿では、残存度がCFRではなく、それぞれの濃淡画像に分散された誤差 e_{G1}, e_{G2}, e_S に比例すると考え、分散誤差 e_{G1}, e_{G2}, e_S の各絶対値の最大値 $e_{G1max}, e_{G2max}, e_{GSmax}$ を残存の画質の評価尺度とする。変換後の画素組が予め定めた分散誤差の範囲内となるように変換式を求めることにより、入力画像によらず各々の画像における他の画像の最大の残存度が一定となることが期待できる。

3.2 ダイナミックレンジ(DR)変換法の提案

前節で制限した分散誤差の最大値 $e_{G1max}, e_{G2max}, e_{GSmax}$ 以下になるように、各画像の変換式 $g1'' = 1 \cdot g1 + 1, g2'' = 2 \cdot g2 + 2, s'' = 3 \cdot s + 3$ を求める。以下簡単のため、分散誤差の最大値 $e_{max} = e_{G1max} = e_{G2max} = e_{GSmax}$ とし、変換後のDRの比を $DR(G1'') : DR(G2'') : DR(S'') = 1 : 1 : r$ (直方体)とした場合について述べる。

まず、DR変換後の取り得る $(g1'', g2'', s'')$ の画素組の範囲 X_c は図5に示す四面体 d_{e,c,f,c_g} となり、これは提案変換式決定フローに示す図4(a)の処理により四面体 defg のそれぞれの平面 efg, def, dfg, deg を法線ベクトル方向に $(0, 0, e_{max}), (e_{max}, 0, e_{max}), (0, e_{max}, e_{max}), (e_{max}, e_{max}, e_{max})$ だけ上げた四面体である。 X_c 内で最大のDRを取るためには、DR変換後の画素組が X_c に内接することが必要である。変換後の画素組が X_c に接するための変換式は従来と同様に探索的に求める必要があるが、それは時間を要する。

そこで、本稿では同式を一意に求める手法を提案する。変換前の原画像 G1, G2, S の画素組の存在範囲 Y は、各画像の画素のヒストグラムが一樣または両端に偏る場合、立方体の形状に分布し、中間階調に偏る場合、Yは立方体が膨張した形状に分布することが確認されている。ここではYが立方体形状を取ると仮定し、それを変換したY'が X_c に接する場合を考える。

初めに、変換前の画素組から変換後に分散誤差最大となる候補点を求め、候補点の中から各画像の最小・最大を求める(図4(b))。変換後の各画像 G1'', G2'', S のとり得る画素組の存在範囲 Y' が直方体形状となり X_c に接する場合、Y' は図5に示す直方体 a'-h' となる。このとき、4頂点 a', b', c', h', 2辺 a'b', b'c' が X_c に接し、その接点において e_{G1}, e_{G2}, e_S ともに最大の分散誤差 e_{max} を取るため(図4(c))、入力濃淡画像 G1, G2, S において変換後に X_c に接する可能性の高い画素組も、頂点 a, b, c, h および辺 ab,

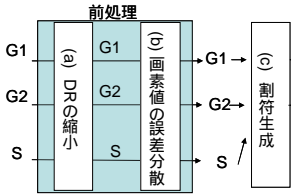


図1 割符画像生成フロー

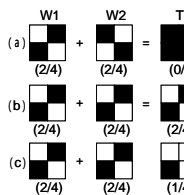


図2 濃度表現

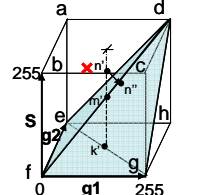


図3 表現可能濃度範囲

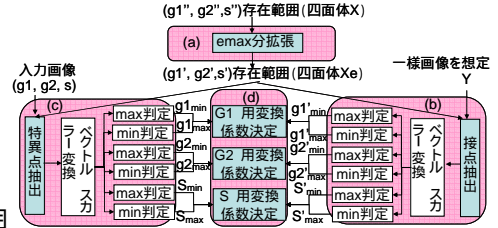


図4 提案変換式決定フロー

bc に最も近い 6 点からそれぞれ選択されることが予想される (図 4 (b)) . ここで、この 6 点の各画像 G1, G2, S における画素値をそれぞれ $n[p]_{g1}, n[p]_{g2}, n[p]_s$ ($p = a, b, c, h, ab, bc$) と表記すると、各画像の画素値の最小・最大は、 $(g1'_{min}, g1'_{max}) = (n[ab]_{g1}, \max(n[c]_{g1}, n[h]_{g1}))$, $(g2'_{min}, g2'_{max}) = (n[bc]_{g2}, \max(n[a]_{g2}, n[h]_{g2}))$, $(s'_{min}, s'_{max}) = (n[h]_s, \max(n[a]_s, n[b]_s, n[c]_s, n[ab]_s, n[bc]_s))$ となる。

次に、図 4 (b) の処理により、各画像に対し、求めた最小・最大の点に対応する変換後の画素値の最小・最大の点を求める。 s'_{min} は $s' = 0$ に、 s'_{max} は $s' = s'_{max}$ に変換されるとした場合、図 6 に示す $s' = 0, s' = s'_{max}$ の断面図から変換後の画素値の最小・最大候補点が求められ、それぞれ $(g1'_{min}, g1'_{max}) = (s'_{max} - 2e_{max}, 128 + 3e_{max}/2)$, $(g2'_{min}, g2'_{max}) = (s'_{max} - 2e_{max}, 128 + 3e_{max}/2)$, $(s'_{min}, s'_{max}) = (0, s'_{max})$ となる。ここで、 $(g1'_{max} - g1'_{min}) : (g2'_{max} - g2'_{min}) : (s'_{max} - s'_{min}) = 1 : 1 : r$ (DR の比) より、 $s'_{max} = \{(128 + 5e_{max}/3)r\} / (1+r)$ なので、 r と e_{max} を与えれば図 6 に示す各画像の変換後の画素値の最小・最大が求まる。

最後に変換式を求める (図 4 (d)) . DR 変換後の画素値は変換前の画素値 x を使って一般的に直線の式 $x + \dots$ で与えられるため、 $G1', G2', S'$ はそれぞれ $G1, G2, S$ の画素の最小・最大点を通る直線の式から一意に求まる。例えば、 $G1'$ 生成のための変換式は、 $(g1'_{min}, g1'_{min}) = (n[ab]_{g1}, s'_{max} - 2e_{max})$, $(g1'_{max}, g1'_{max}) = (\max(n[c]_{g1}, n[h]_{g1}), 128 + 2e_{max})$ の 2 点を通る直線の式から求められる。その後、図 1 に示す DR 変換、画素値の誤差分散処理を行う。

4. 実験

前節における提案評価尺度、DR 変換式決定法の有効性を確認するために以下 2 つの実験を行う。入力自然画像として標準画像および筆者らが撮影した画像から異なる 18 枚 (全 6 セット) を使用する。また、 $DR(G1') : DR(G2') : DR(S') = 1 : 1 : 1.4$ とする。

3.1 節における提案画質評価尺度 e_{max} と従来画質評価尺度 CFR をそれぞれ一定とした場合、主観的な残存度がそれぞれ一定となるが確認する。提案尺度 e_{max} を一定 ($e_{max} = 17$) として画像セット 1 ~ 6 から $G1'', G2'', S''$ をそれぞれ生成した結果、全画像セットにおいて残存から他の画像の形状を特定できないことを確認した。生成した画像の一例を図 7 (a) に示す。(a-1) - (a-3) の画像において、画像 (a-3) では画像 (b-2) からのノイズは知覚できるものの、飛行機の尾翼と知覚できない程度で、これは他の画像セットについても同様となり、主観的な画質が一定となることを確認した。これは e_{max} により各々の画像の誤差の最大が制限されているからだと考えられる。一方、従来尺度 $CFR = 0.899$ を一定 (画像セット 1 において $e_{max} = 17$ とした場合に得た値) の条件で、 $G1'', G2'', S''$ を生成した結果、画像セット 1 では残存の形状を認識できないものの、図 7 画像 (b-3) 上の画像 (b-2) の飛行機の尾翼と認識可能な画像セットも存在した。これは、分散誤差を制限していないことが原因と考えられる。以上により、CFR を一定とした場合は生成画像の主観的な残存度にばらつきがあるが、提案尺度 e_{max} を一定とすると生成画像の主観的な残存度はほぼ一定となることを確認した。

次に、3.2 節において提案した 6 点の画素組のみを用いた DR 変換式決定法を実際の $G1', G2', G3'$ 画像生成に用いた場合、予め設定した分散誤差 e_{max} に近い値となっているかを確認する。今回用いた 6 つの画像セットについて、分散誤差の最大値 ($e_{G1max}, e_{G2max}, e_{Smax}$) を実測したところ、それぞれ (16, 17, 17), (17, 17, 16), (16, 16, 16), (18, 18, 17), (17, 17, 18), (17, 17, 16) となり、制

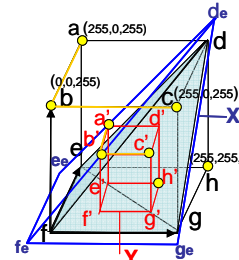


図5 変換後直方体

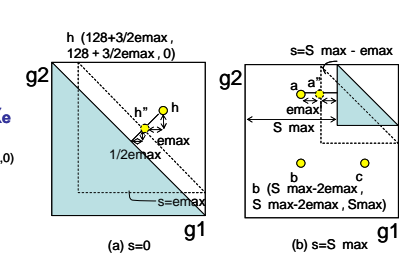


図6 直方体頂点の断面図

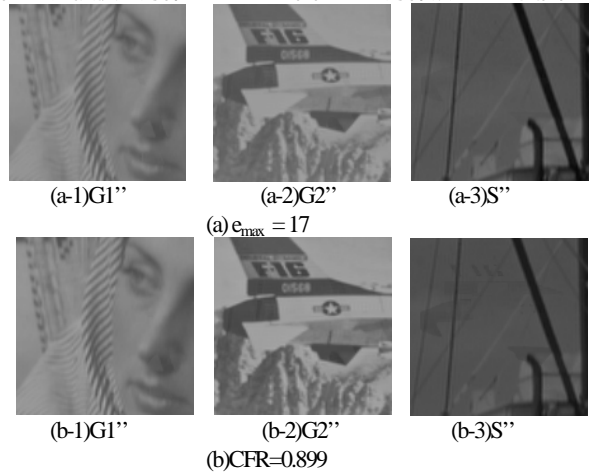


図7 画質評価尺度の違いによる画像残存度

限として与えた $e_{max} = 17$ に非常に近い値を取ることを確認した。これは、前節で e_{max} より求めた 6 点の画素組が想定通り入力自然画像セットにおいて最大誤差となる点の近傍にあったからだと考えられる。これにより入力画像から 6 点のみを求めれば、ほぼ所望の分散誤差に制限できることが分かる。以上 2 つの実験結果から、分散誤差に依存する主観画質が一定となる DR 変換式を 6 点の画素組のみから一意に決定できることを確認した。

5. まとめ

本稿では残存度とコントラストを両立する割符画像を生成するための前処理である DR 変換式決定手法を提案した。そのために、残存度を一定とする尺度として分散誤差の最大値を用い、分散誤差の範囲内で最大のコントラストを取る変換式を求めた。ここで、分散誤差が最大となることが予想される画素組 6 点を実際の入力画像から求め、想定した画像の画素組 6 点と対応させることで、一意に DR 変換式を求める手法を提案した。実験の結果、提案尺度により残存度をほぼ一定とすることができ、6 点のみの画素組から一意に決定した DR 変換式を用いても、設定した分散誤差と実際の分散誤差がほぼ等しくなることを確認した。以上により、主観的に一定な残存度と高いコントラストを両立するために従来は試行錯誤的に求めていた DR 変換式を、任意自然画像のセットから一意かつ高速に決定できるようになった。

参考文献

[1] M.Nakajima et al., "Extended visual cryptography for natural images," *Journal of WSCG*, vol.2, pp.303-310, 2002.