

## ポストプロセスを考慮に入れた電子透かし埋め込み方式

上條 浩一†

デジタルコンテンツの著作権保護，不正コピーの防止，改竄の検出，抑止等の手段として，電子透かしが注目されている。高耐性型電子透かしの大きな基本技術項目として，耐性と画質（音質）があるが，これらは trade off の関係にある。埋め込み後のコンテンツの画質，音質を一定に保ったまま，耐性を向上させる方法が多数提案されているが，殆どのは埋め込み直後の検出強度が最大になるような埋め込み方式を提案している。しかし，埋め込み直後の状態では大抵の場合検出強度は十分強く，耐性が問題になるのは，圧縮，アナログ変換等ポストプロセスがかかった後の状態である。本論文では，電子透かしの耐性を，ポストプロセスがかかった後の検出強度を考慮に入れて埋め込みを行なうことにより向上させる方法について議論し，実験によりその有用性を確認する。

### An Watermark Embedding Method which Takes Post-Processing into Consideration

KOICHI KAMIJO†

Watermark technology is focused as a solution for rights management of digital contents. In watermarking, robustness and fidelity are very important technology items, but they are trade-offs, and it's an important research item to analyze how to improve the robustness under the restricted fidelity. Many of the papers which deal with this problem target to achieve the maximum watermark strength just after embedded, but the real problem is how to keep the robustness after each post-processing is performed. In this paper, we propose an watermark embedding method which takes post-processing into consideration to improve the robustness, and report the experimental results which prove the effectiveness of the method.

#### 1. はじめに

デジタル化の急速な発達により画像，映像，音楽の複製，配信，編集が容易に出来るようになった。しかし，その反面，それらデジタルコンテンツに対する著作権保護が重大な問題となってきた。電子透かしはその問題を解く鍵として，期待されている。

電子透かしは，デジタルコンテンツに不可視，不可聴の形で付加情報を埋め込み，検出を行なう技術であるが，その用途，目的によって“高耐性型電子透かし (robust watermarking)”と“低耐性型電子透かし (fragile watermarking)”の2つに大別され，前者は更に，画素空間利用型と周波数領域利用型に分類される。本論文では，高耐性型周波数領域利用型電子透かしに関して議論を進める。

電子透かしが実用化されるようになると，その技術の成熟度が高いことが要求されるだけではなく，実際に使われる環境も考慮されなくてはならない。例えば，透かしを動画に埋め込む場合，その動画が将来 MPEG 圧縮や VHS への録画，再生等される可能性が非常に高い場合，埋め込み時にそれらの耐性を考慮して埋め込みを行なう必要がある。

耐性を強くすることは高耐性型電子透かしにおいて非常に重要な技術要素であるが，耐性と埋め込みコンテンツの画質，音質とは trade off の関係にある。埋め込み強度を強くすれば耐性は向上するが，画質，音質は低下する。また，逆も真である。そのため，画質，音質が一定の条件のもとで，出来る

だけ耐性を向上させる，というのが電子透かしの一つの重要なテーマになってきている。

通常，透かしを埋め込む場合，透かしを“信号”と考えたと，埋め込み対象コンテンツは“ノイズ”として扱われてきた。これらの埋め込み手法を，“blind embedding”と呼ぶ。それに対し，Miller ら<sup>1),2)</sup>によって，原画をノイズとしてではなく，情報として用いる“informed embedding”という手法が提案された。これは，透かしの埋め込み前に原画を予め解析し，効率よく透かしを埋め込む手法であり，例えば，原画を幾つかの細かい部分に分割し，各部分から透かしの強度を測定し，強度の強い部分には透かしを弱めに，強度の弱い部分には強めに埋め込みを行う。Miller らは，透かし埋め込み後に施される攻撃，ポストプロセスをランダムノイズで代表させ，埋め込み後の画質が一定の条件のもとで，埋め込み後にランダムノイズが加わった場合の透かしの耐性を向上させる埋め込み方式を提案している。

しかし，ポストプロセスがある程度予測できる場合では，それらのポストプロセスの特徴を考慮に入れて埋め込みを行う方が得策と思われる。例えば DVD や Sattelite 経由で配信する動画に電子透かしを埋め込む場合は，MPEG 圧縮がかかることは間違いなく，その後，VHS 録画/再生等のプロセスがかかる可能性が高い。MPEG/JPEG 等の圧縮がかかっているようなコンテンツに対し，それらの量子化値を変えずに圧縮ドメインで埋め込みを行うような場合，埋め込み直後に既知の圧縮がかかるのと同様である。本論文では，埋め込み後のコンテンツの画質，音質が一定の条件の元で，原画のみでなく予測されるポストプロセスも情報として用い埋め込みを行う透かしの埋め込み方式を提案する。尚，本手法は，動画，

† 日本アイ・ビー・エム 東京基礎研究所  
Tokyo Research Laboratory, IBM Japan  
kamiyoh@jp.ibm.com

静止画，音声の何れにも対応可能だが，以下の説明においては簡単のため静止画に限定して議論を行う．また，本提案方式で取り扱うポストプロセスとしては，原画の大きさ，角度を変えてしまうようなもの（回転，拡大，縮小，print and scan等）は含まない．

埋め込み画像の画質は式 (1) で計算される PSNR (peak-signal-to-noise ratio) で評価する．

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{NI_{max}^2}{\sum_{x,y} (I'(x,y) - I(x,y))^2} \right) (dB) \quad (1)$$

ここで， $I(x,y)$  と  $I'(x,y)$  はそれぞれ原画と埋め込み画像のピクセル  $(x,y)$  の輝度値， $N$  は画像のピクセル数， $I_{max}$  は輝度値の最大値であり，通常  $I_{max} = 255$  である．

本論文の構成は以下のとおりである．先ず 2 章で，我々の用いる透かしの検出方法について論じ，3 章では，Miller らの方法と我々の提案する埋め込み方法を論じ，予測されるポストプロセスとして量子化を取り上げ，我々の埋め込み方法の効果をシミュレーションする．4 章では実験結果を報告し，5 章で結論を述べる．

## 2. 検出方法

本論文では，電子透かしの検出において，相関法を使う．まず， $n$  次元の透かし信号ベクトル  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  を検出対象コンテンツから計算し，検出ベクトル  $W = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}$  との相関値  $D(X)$  を，

$$D(X) = \frac{X \cdot W}{\|X\| \|W\|} \quad (2)$$

によって計算する．ここで， $\cdot$  は内積をあらわす． $|D|$  が大きければ大きいほど  $X$  と  $W$  の相関が強く，透かしの信号強度が強いことになる．この検出方法は，false positive (false alarm) 率 (以下  $Fp$ )，つまり透かしの埋められていないコンテンツから誤って透かしを検出してしまふ確率が予め条件として決められているような場合に有効な方法であり，検出 threshold はその決められた  $Fp$  から計算される．各  $X_i$  はベクトル  $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$  の  $m$  個のコンポーネントの和として，

$$X_i = \sum_j x_{ij} = \sum_j u_{ij} v_{ij} \quad (3)$$

のように計算する．ここで， $u_{ij} (j = 1, 2, \dots, m)$  は対象画像のある周波数成分の係数， $v_{ij}$  は十分長い周期を持った擬似乱数列の値であり，1 または -1 の値をとる．これらの  $u_{ij}$  の計算方法， $W$ ， $\{v_{ij}\}$  は鍵情報として埋め込み時と共通に使用される．サンプル値  $x_{ij}$  の  $j$  に関する分布が正規分布に従わない場合，式 (3) のように単にサンプル値を足し合わせたものを使うより，サンプル値にある変換を施してから足し合わせた方が一定の  $Fp$  における検出能力を更に向上させることが出来ることが知られている<sup>4)</sup> が，本論文の主な目的は，埋め込み方法の違いによる耐性の比較なので，議論を簡単に進める意味も含めて，式 (3) を採用することとする．

尚，本論文では  $D$  の値のみによって検出強度を評価するが，各  $X_i$  を埋め込み情報を codeword 化した各ビットに対応させることによって，多ビット埋め込みへも適応することが出来る．

## 3. 埋め込み

本章では，先ず Miller らの埋め込み方法<sup>1),2)</sup> を紹介し，次に，我々の埋め込み方法を紹介する．次に，我々の埋め込みの効果をポストプロセスとして量子化を取り上げシミュレーションで評価する．

### 3.1 Miller らの方法

入力コンテンツの透かし信号ベクトル  $X$  に電子透かし  $S$  が埋め込まれたベクトルを  $Y = X + S$  とすると， $Y$  にランダムノイズ  $R$  が加わった後の検出値  $D(Y + R)$  は以下のように計算される．

$$D(Y + R) = \frac{(Y + R) \cdot W}{\|Y + R\| \|W\|} \approx \frac{Y \cdot W}{\sqrt{\|Y\|^2 + \|R\|^2} \|W\|} \quad (4)$$

Miller らの方法では， $Fp$  から計算される閾値  $T$  と，画質の制限  $L$  が予め与えられている場合， $\|S\| = L$  の条件のもとで， $D(Y + R) = T$  を満たす  $S$  のうち  $\|R\|$  を最大にするものを選び，それを透かし信号として埋め込むことにより，ランダムノイズに対する耐性を持たせる．

### 3.2 提案埋め込み方法

Miller らの方法は，ポストプロセスを全て  $R$  で代表させているが，本方式では，埋め込み前に，埋め込み + 予測されるポストプロセスが施されたあとの検出値を解析することにより，ポストプロセス後の検出強度が強くなるように埋め込みを行う．予測されないポストプロセスは，ランダムノイズとして扱う．いま， $Y$  に予測されるポストプロセスが施され  $Z$  になり，更に予測されないポストプロセス  $R$  が施されたとすると，検出値  $D(Z + R)$  は式 (4) の  $Y$  を  $Z$  に置き換えたものになるが，更に，

$$D(Z + R) \approx \frac{\|Z\| \cos \theta}{\sqrt{\|Z\|^2 + \|R\|^2}} \quad (5)$$

と書くことが出来る．ここで， $\theta$  は  $Z$  と  $W$  の間の角度である．この式からわかるように， $D(Z + R)$  は  $\|Z\|$  と  $\theta$  の関数となり， $|D|$  を大きく保つためには， $\|R\|$  に関係なく  $\|Z\|$  と  $\cos \theta$  を各々大きく保つ必要があることが解る．以下では，埋め込み + ポストプロセス後に  $\|Z\|$  と  $\cos \theta$  を大きく保つ方法を各々  $\|Z\|$  問題， $\cos \theta$  問題として別々に議論する．また，各問題に関して，ポストプロセスとして最も可能性の高いものの一つである量子化を取り上げ，本方式を採用した場合の議論を行う．

### 3.3 $\|Z\|$ 問題

ここでは，ポストプロセス後の  $\|Z\|$  を大きく保つ問題を，各  $Z_i$  を大きく保つ問題として議論する．但し， $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$  である．いま， $s(x)$  を，サンプル値  $x_{ij}$  の値が  $x$  の時の埋め込み値の値を表す関数とすると，今まで提案されてきたものの多くは以下の式で表される．

$$s(x) = a|x|^b + c \quad (6)$$

$b = c = 0$  とすると， $x$  の値に関わらず同一の値を埋め込む方式<sup>6)</sup>， $b = 1, c = 0$  とすると  $|x|$  の値に比例して埋め込む方式<sup>6)</sup>，また，単に  $b = 1$  とすると，11) の方式になる．また， $c = 0$  の状態で， $b$  の値を色々変化させ，幾つかのポストプロ

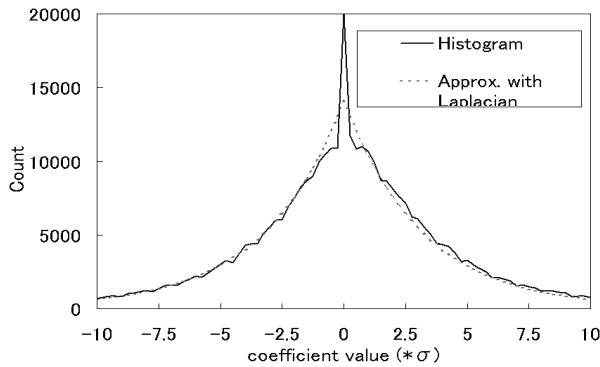


図1 DCT係数のヒストグラム例



図2 実験画像

セスによる影響を調べたものもある<sup>10)</sup>。以下の議論においては、 $c = 0$  とする。

これらの埋め込み方のうちの埋め込み方式が適しているかは、予測されるポストプロセスや、 $x_{ij}$  の分布の状態等を考慮に入れて決定する必要があるが、 $b = 0$  とすると DA/AD 変換、VHS 録画 + 再生等に、 $b = 1$  とすると量子化等に耐性が良い、と報告されている<sup>9),10)</sup>。

### 3.3.1 量子化に対する埋め込み

ここでは  $x_{ij}$  の  $j$  に対する分布を離散値としてでなく連続関数で表し、 $b$  の値を変化させたときの量子化に対する耐性を議論し、式 (6) で  $b = 1$  が  $b = 0$  より耐性が高いことを確認する。

いま、 $p(x)$  を  $x_{ij}$  の  $j$  に対する確率密度関数 (probability density function, PDF) とすると、 $i$  に対する埋め込み直後の透かしの信号強度、つまり  $Y_i$  の期待値は以下の式で計算される。

$$E[Y_i] = \int_{-\infty}^{\infty} s(x)p(x)dx \quad (7)$$

$x_{ij}$  が画像の周波数成分の係数の場合、 $p(x)$  は式 (8) のように平均 0 の一般ガウス分布 (generalized Gaussian distribution, GGD) に従うことが期待できる<sup>5)~7)</sup>。

$$p(x) = \frac{\nu\alpha(\nu)}{2\sigma_x\Gamma(1/\nu)} \exp\left[-\left(\frac{\alpha(\nu)}{\sigma_x}|x|\right)^\nu\right] \quad (8)$$

但し、

$$\alpha(\nu) = \sqrt{\frac{\Gamma(3/\nu)}{\Gamma(1/\nu)}} \quad (9)$$

であり、 $\Gamma(\cdot)$  はガンマ関数である。因みに  $\nu = 2$  の場合ガウス分布に、 $\nu = 1$  の場合ラプラス分布になる。自然画等一般的な画像を周波数変換した際の係数の分布の場合、 $\nu$  は 0.3 から 1.0 までの値をとることが多い<sup>5)</sup>。図 1 は、図 2 の 1536 ピクセル  $\times$  1024 ピクセルの非圧縮画像を  $8 \times 8$  ブロックに分割し、各々のブロックを DCT 変換して得られた 16 の輝度の中周波成分を各々の成分毎に係数の標準偏差 ( $\sigma$ ) で正規化したもののヒストグラムと、それを  $\nu = 1.0$  (ラプラス分布) で近似したグラフである。

埋め込み画像に対して、一律に  $q$  の量子化が施された場合、量子化後の  $Z_i$  の期待値は以下の式で計算される。

$$E[Z_i] = q \sum_{j=-\infty}^{\infty} j \int_{\text{Round}(\frac{s(x)+x}{q})=j} p(x)dx \quad (10)$$

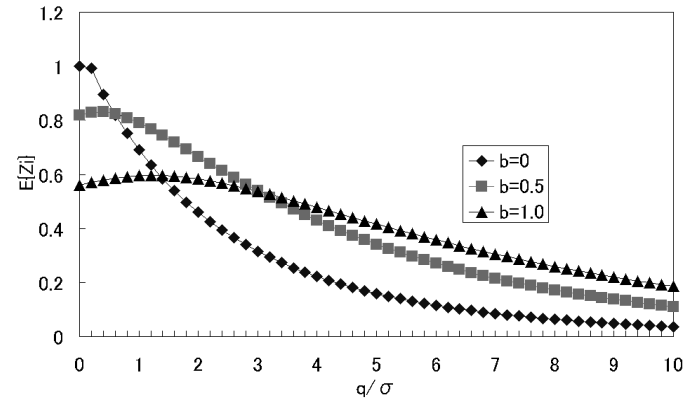


図3 埋め込み後の PSNR 一定のもとでの  $E[Z_i]$  の正規化された量子化値に対する理論値、 $\nu=1.0$ 。

図 3 は、埋め込み後の PSNR 一定の条件下で、 $\nu = 1.0$  の場合において、式 (6) の  $b$  の値を 0, 0.5, 1 と色々変化した場合の、 $q$  と  $E[Z_i]$  の関係を表したものである。ここで、式 (1) の PSNR 一定の制限は

$$V^2 = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(x)p(x)dx \quad (11)$$

と近似できる。但し、 $V (> 0)$  は PSNR の制限から決定される固定値である。また、 $\sigma$  は  $p(x)$  の標準偏差で、

$$\sigma = \left(\int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x)dx\right)^{1/2}$$

によって計算される。また、 $q = 0$  は量子化をしない場合に該当する。図 3 より、 $q$  が小さい場合、 $b$  の値が小さい場合 ( $b = 0$ ) の検出強度が一番強く、 $q$  が大きくなるにつれて、 $b$  が大きい方が検出強度が強くなる。但し、この結果より  $b$  が大きければ大きいほど良い、という結論になるわけではなく、 $b$  が大きくなるに従い、検出値を最大にする  $q$  も大きくなるため、考えられるポストプロセス時の  $q$  を想定して  $b$  を決定することが望ましい。

### 3.4 $\cos \theta$ 問題

ここでは、ポストプロセス後の  $\cos \theta$  を大きく保つ問題を議論する。予測されるポストプロセス  $\mathfrak{R}_l$  が  $K$  個ある場合 ( $l = 1, 2, \dots, k$ )、 $m$  個のコンポーネントからなる  $x_i$  を更に  $K$  個のサブグループに分割する。いま、 $G_k = \{j | mk/K + 1 \leq j < m(k+1)/K + 1\}$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$  とし、 $Z_{l,i,k}(a)$  を埋め込み時の式 (6) のパラメータ  $a$  ( $b$  は固定、 $c = 0$ ) で埋め込

みを行い、プロセス  $\mathcal{R}_l$  がかったあとの  $\sum_{j \in G_k} z_{ij}$  の値を示すものとする。すると、以下の式が満たされるとき、全てのポストプロセスに対して  $\cos \theta = 1$  となる。

$$\begin{aligned} \sum_k Z_{1,i,k}(a_{ik}) &= C_1 \text{ for } \forall i \\ \sum_k Z_{2,i,k}(a_{ik}) &= C_2 \text{ for } \forall i \\ &\dots \\ \sum_k Z_{K,i,k}(a_{ik}) &= C_K \text{ for } \forall i \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $a$  を  $a_{ik}$  のように添え字をつけてあらわしているのは、各  $i, k$  によって独立な  $a$  の値を設定するという意味である。このように  $a_{ik}$  の値を埋め込み場所によって変更すると埋め込み後の画質の劣化が懸念されるが、画像上での  $a_{ik}$  に対応する場所をインターリーブすることによって、劣化は解りにくくなる。

また、画質の制限は以下の式で表される。

$$\sum_i \left( \sum_k (a_{ik}^2 \sum_{j \in G_k} |x_{ij}|^{2b}) \right) = C_0 \quad (13)$$

ここで、 $C_0$  は画素空間での PSNR の制限値を周波数空間に変換したものである。これは、埋め込み直後の画質に対する制限であるが、各ポストプロセス  $\mathcal{R}_l$  後の画質制限を  $(K-1)$  個まで加えることも可能である。

次に、式 (12)、(13) の連立方程式を解くことにより  $\{a_{ik}\}$  を求める。この際、画質の制限が埋め込み直後に対する場合、変数が  $((m+1)K)$  個に対し、等式は  $(mK+1)$  個のため、 $(K-1)$  個の変数は自由に設定することが出来る。具体的には、 $C_k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) のうちの  $(K-1)$  個を自由に設定するのがよい。式 (12)、(13) を解く際、 $a$  に関する関数  $Z_{l,i,k}(a)$  を広域の  $a$  に対して求めるのが困難な場合、各ポストプロセス  $\mathcal{R}_l$  に対して先ず  $a_{ik} = a$  for  $\forall k, i$  と仮定して式 (13) から  $a$  を求め、その近辺での  $a$  と  $Z_{l,i,k}(a)$  の関係を調べ、 $Z_{l,i,k}(a)$  を一次関数等簡単な関数で置き換えることにより求める方法がある。ポストプロセスが定式化できる場合、上記関係は理論的に調べることが出来るが、定式化できない場合、実際に  $a$  を変化させてポストプロセスをかけて  $Z_{l,i,k}(a)$  を測定して関係を調べる方法がある。

### 3.4.1 量子化に対する埋め込み

次に、ポストプロセスが量子化の場合について議論する。ここでは、予測されるポストプロセスは量子化 1 つ、画質値の制限は、埋め込み直後の場合に関してのみ、とする。すると、 $K=1$  であり、 $Z_i = Z_{1,i,1}$  は以下の式で計算される。

$$Z_i = \sum_{j \in G_1} q_{ij} \text{Round}((x_{ij} + a_{i1}|x_{ij}|^b)/q_{ij}) \quad (14)$$

ここで、 $q_{ij}$  は  $x_{ij}$  に対する量子化値である。

図 4 は  $x_{ij}$  の  $j$  に関する分布の PDF が式 (8) で  $\nu = 1.0$  の場合の幾つかの  $(q, b)$  の値に対する  $Z_i(a)$  の様子である。但し、 $q$  は  $i, j$  に関して一定値を取るものとしている。この図から、 $a$  と  $Z_i$  の関係は一次式の関係に近いことがわかる。

### 3.5 シミュレーション

次に、実際の画像に近い  $x_{ij}$  の  $j$  に対する分布の PDF を幾つか仮定して、本方式の有効性をシミュレーションで確認

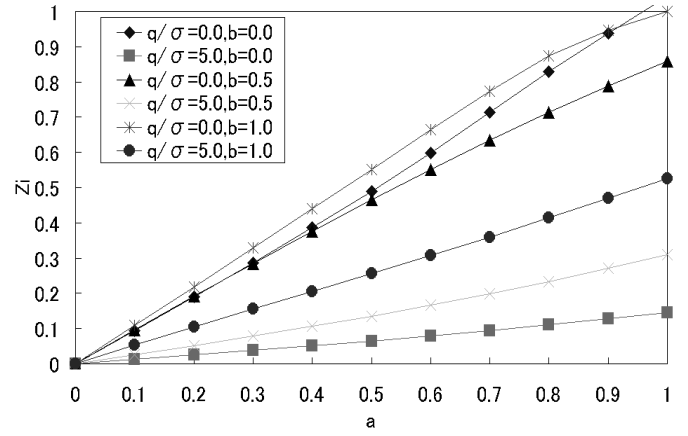


図 4  $Z_i$  の  $a$  に対する理論値。  $\nu=1.0$ 。

する。サンプル値として  $8 \times 8$ -DCT 係数等を使う場合、サンプル値のヒストグラムの PDF は式 (8) のような GGD になることが期待される。しかし、図 1 から解るように、実際の画像では、ヒストグラムの曲線がきれいな GGD 曲線に乗るとは限らない。また、式 (8) の場合、 $X_i = 0$  となってしまうが、多くの場合  $X_i \neq 0$  となったり、各  $i$  によって、 $\sigma_x$  の値が違ふことが予想される。そこで、実際の画像での各  $i$  に対するサンプル値のヒストグラムの PDF として以下のように左右非対称なラプラス分布を仮定する。

$$p_i(x) = \begin{cases} \exp(-\sqrt{2}|x|/\sigma_{il})/(\sqrt{2}\sigma_{il}), & x < 0 \\ \exp(-\sqrt{2}|x|/\sigma_{ir})/(\sqrt{2}\sigma_{ir}), & x \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

この場合、 $X_i$  の値は

$$X_i = \int_{-\infty}^{\infty} xp_i(x)dx = \frac{\sigma_{ir} - \sigma_{il}}{2\sqrt{2}} \quad (16)$$

によって計算され、 $\sigma_{il} \neq \sigma_{ir}$  である限り 0 にならない。

パラメータは、 $b = 1, K = 1, n = 2, W = \{1, 1\}$ ,  $q = q_{ij}$  for  $\forall i, j$ , とし、 $\sigma_{ir}$  と  $\sigma_{il}$  に関して以下の 2 つの場合についてシミュレーションを行う:

Case 1.  $\sigma_{2l} = \sigma_{2r} = \sqrt{2}\sigma_{1l} = \sqrt{2}\sigma_{1r}$

Case 2.  $2\sigma_{2l} = \sigma_{2r} = \sqrt{2}\sigma_{1l} = \sqrt{2}\sigma_{1r}$

Case 1. は 2 つの左右対称な PDF だが、2 つの PDF の幅 (標準偏差) が違う場合で、 $(X_1, X_2) = (0, 0)$  であるのに対し、Case 2. は 対称な PDF と非対称な PDF の場合で、 $(X_1, X_2) \neq (0, 0)$  である。

上の各々の場合に対し、埋め込み後の画質値が一定という条件下で、次の 3 つの埋め込み方式で埋め込みを行い、量子化を行なった際の検出値をシミュレートした。

#### Normal embedding method (NME)

この方法は、入力画像の性質を全く調べない埋め込みを行なう “blind embedding” 方式で、全ての  $i$  に対し、 $a_{i1} = a$  として埋め込みを行う方法である。

#### Content-independent informed embedding (CIE)

この方法は、1) で提案している “informed embedding” 方式で、入力画像の信号ベクトル  $X$  を計算し、ポストプロセスをラン

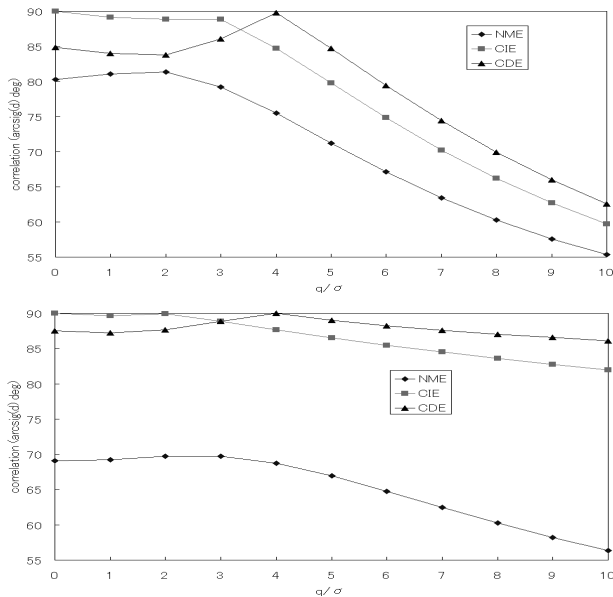


図5 量子化値に対する検出値のシミュレーション. Case 1.(上), Case 2.(下).

ダムノイズで代表させて、与えられた  $F_p$  の threshold に対して最大のランダムノイズの耐性を与える埋め込み方法である。本シミュレーションでは実験では、 $F_p$  の目標をが  $10^{-15}$  に設定して埋め込みを行う場合を想定する。本方式は、入力コンテンツの  $X$  のみ調べ、それ以上の解析を行っていないところからコンテンツ非依存型埋め込み方式 (CIE) と名づける。

**Content-dependent informed embedding (CDE)**  
これは本論文で提案している埋め込み方法である。本シミュレーションでは、ポストプロセスとして  $q/\sigma = 4$  なる量子化を想定して埋め込みを行なう。本方式は、入力コンテンツに対して  $X$  以上に更に詳しく解析を行うので、コンテンツ依存型埋め込み方式 (CDE) と名づける。

図5はCase 1., Case 2. の分布を持つコンテンツに画質値一定の条件のもとで上記各埋め込みを行い、更に  $q$  で量子化を行った場合の検出強度をプロットしたものである。ここでは、検出強度として、

$$\varphi = 180(\arcsin d)/\pi \quad (17)$$

で計算される角度  $\varphi$  を使用している。この図から、 $q$  が想定された量子化値と実際の量子化値が一致した場合だけでなく、実際の量子化値の方が大きい場合、Case 1., Case 2. の何れの場合でも、CDE, CIE, NME の順に検出強度が強い事がわかる。

#### 4. 実験結果

次に、実際の画像を複数使用して、各埋め込み方式で埋め込み + ポストプロセスを行い、検出強度を観測した。画像はサンプラー<sup>12)</sup>より、風景、人物、動物等様々なジャンルの画像を100枚選んだ(図2は一例)。全ての画像は1536ピクセル  $\times$  1024ピクセルの大きさで、埋め込みのサンプル値  $x_{ij}$  として、 $8 \times 8$ -DCT ブロックの中周波の16個のDCT係数をインターリーブして用い、埋め込み、検出時の各  $x_{ij}$  は各周波数成分毎に正規化した値を用いた。また、 $n$  と  $m$  はそれぞれ

		No post-processing	JPEG compressed	JPEG + Gaussian noise
		b=0/ b=1.0	b=0/ b=1.0	b=0/ b=1.0
NME	Ave	81.96/ 71.31	40.95/56.11	25.72/ 42.86
	Max	88.94/ 83.09	57.92/ 67.14	47.71/ 59.62
	Min	59.87/ 28.93	1.14/ 19.14	-3.31/ 9.15
CIE	Ave	85.80/ 81.99	42.73/ 62.17	26.37/ 44.46
	Max	89.85/ 89.66	61.76/ 74.64	49.74/ 65.42
	Min	64.14/ 35.50	1.08/ 21.61	-4.41/ 0.09
CDE	Ave	74.31/ 78.53	39.97/ 68.19	25.01/ 46.77
	Max	80.69/ 83.94	57.32/ 77.04	51.27/ 64.27
	Min	50.67/ 37.33	0.01/ 22.60	-7.44/ 13.21

表1 実験結果. 各埋め込み方法に関し各々  $b = 0, b = 1$  で透かしを埋め込み、各ポストプロセスを施したあとの検出値  $\varphi$  の平均, 最大値, 最小値.

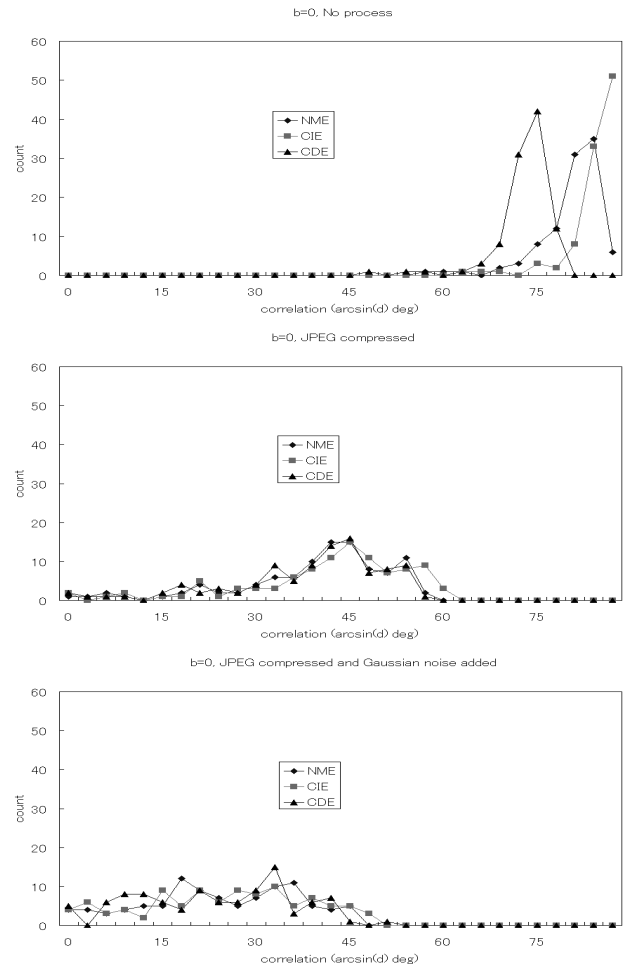


図6  $b=0$  における検出値, (上より) 1) 埋め込み直後, 2) JPEG 圧縮後 (Qfactor=15), 3) 2) に更に10パーセントガウシアンノイズ付加

128, 192 とした。

埋め込み関数としては、式(6)において  $c = 0$  に固定し、 $b = 0, b = 1$  の2種類に対して  $a$  を埋め込み変数  $a_{i1}$  とした。CDEではポストプロセスとしてCJPEG<sup>13)</sup>を使ってQuality factor(Qfactor)=50でJPEG圧縮がかかる場合を想定して埋め込みパラメータ  $a_i$  を設定した。埋め込みは各画像に対してPSNRが40(dB)になるように各々NME, CDI, CDEの埋め込みを行い、各々の埋め込み画像に対して、1) ポストプロセスを何もかけない, 2) JPEG 圧縮, 3) JPEG 圧縮後ランダムノイズ付加、の各々のプロセス後の画像から検出強度を測定した。JPEGはCJPEGを用いて圧縮率Qfactor=15で

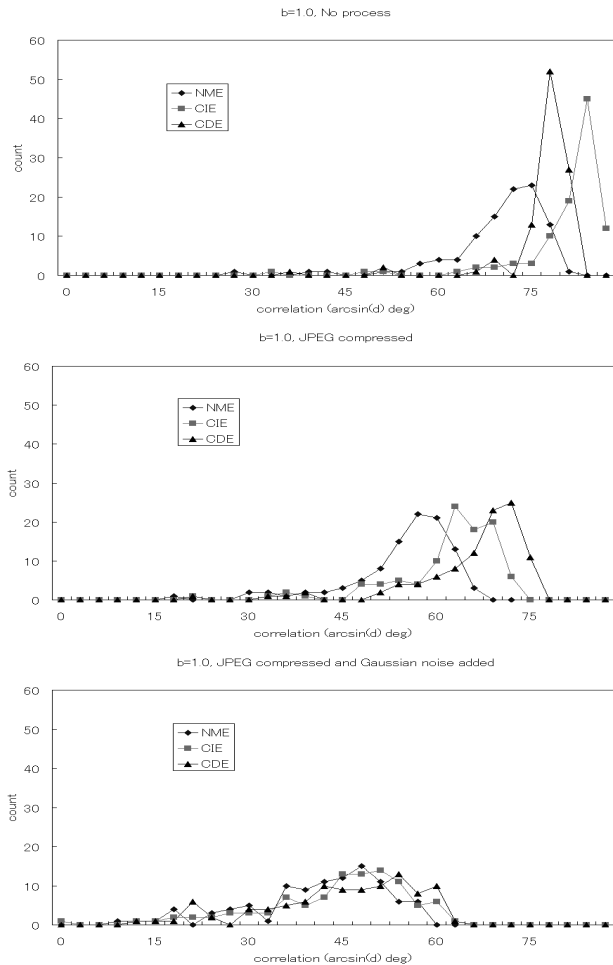


図7  $b=1$  における検出値, (上より) 1) 埋め込み直後, 2) JPEG 圧縮後 (Qfactor=15), 3) 2) に更に 10 パーセントガウシアンノイズ付加.

圧縮し (100 枚の画像の平均圧縮率=1/65.4), ランダムノイズは Adobe PhotoShop 6.0 で 10 パーセントガウシアンノイズ付加を利用した.

図6と図7が各埋め込み方式でそれぞれ  $b=0$ ,  $b=1.0$  の場合の検出値のヒストグラムであり, 表1は実験の結果をまとめたものがある. 検出値  $D$  は式 (17) のように, 角度 (デシマル) で表している. 因みに,  $D$  と  $F_p$  の関係は,  $F_p = 10^{-15}$  が約  $39^\circ$  に,  $F_p = 10^{-20}$  が約  $45^\circ$  に対応する<sup>2)</sup>.

これらの実験結果から以下のことがわかる:

- (1) 埋め込み直後の状態では, CIE,  $b=0$  で埋め込みを行なった場合が一番検出強度が強い.
- (2) JPEG 圧縮をした後は, CDE,  $b=1$  で埋め込みを行なった場合が一番検出強度が強い.
- (3) JPEG 圧縮を行い, 更にガウシアンノイズを加えた場合も, CDE,  $b=1$  で埋め込みを行なった場合が一番検出強度が強い.

これらのことから, CDE,  $b=1$  での埋め込みが, 量子化だけではなく, 更なるガウシアンノイズ付加に対する耐性も向上させることが出来たことがわかる.

## 5. おわりに

本論文では, 埋め込み画像の画質値一定の条件下で予測さ

れるポストプロセスに対して耐性を持たせるため,  $\|Z\|$  を大きくする,  $\cos\theta$  を大きくする, という2つのアプローチで埋め込みを行う方法を提案し, その効果を実験により確認した. また, 量子化の場合, 予測されるポストプロセスのパラメータ (量子化値) まで厳密に予測できなくても, それより大きい量子化がかかった場合に効果があることも確認された. 今後, ポストプロセスが2つ以上の場合や量子化以外のポストプロセスがかかった場合の効果, 予測されるポストプロセスが全て外れた場合の検出値等を解析, 実験して行く必要がある.

## 参考文献

- 1) Matt L. Miller, Ingemar J. Cox, and Jeffery A. Bloom, "Informed Embedding: Exploiting Image And Detector Information During Watermark Insertion," Proc. IEEE Intl. Conf. on Image Processing, Vol. 3, pp.1-4, September 2000.
- 2) Ingemar J. Cox, Matt L. Miller, and Jeffery A. Bloom, Digital Watermarking, Prentice Hall, 2001.
- 3) 松井甲子雄, 電子透かしの基礎, 森北出版, 東京, 1998.
- 4) S. Kay, Fundamentals of statistical signal processing, detection theory, Prentice Hall, 1998.
- 5) P. Moulin and J. Liu, "Analysis of multiresolution image denoising schemes using generalized-gaussian priors," Proc. IEEE TFTS Symposium, pp. 633-636, Pittsburgh, PA, October 1998.
- 6) M. Barni, F. Bartolini, A. De Rosa, and A. Piva, "Capacity of the watermark-channel: how many bits can be hidden within a digital image?," Proc. SPIE, Vol. 3657, pp. 437-448, San Jose, CA, January 1999.
- 7) R.L. Joshi and T.R. Fischer, "Comparison of Generalized Gaussian and Laplacian Modeling in DCT Image Coding," IEEE Signal Processing Letters, Vol. 2, No. 5, pp. 81-82, May 1995.
- 8) I.J. Cox, J. Kiliant, T. Leighton, and T. Shamoon, "Secure spread spectrum watermarking for multimedia," IEEE Transactions on Image Processing 6, pp. 1673-1687, December 1997.
- 9) Shu Shimizu, "Performance Analysis of Data Hiding," IEEE Pacific-Rim Conference on Multimedia, Vol. 3, pp. 391-398, Beijing, October 2001.
- 10) K. Kamijo, "Optimizing Watermarking to Improve the Robustness without affecting the Fidelity," Proc. IEEE ITCC Conference, pp. 95-102, Las Vegas, NV, April 2001.
- 11) 宮崎明雄, 桜島良聡臣, "画像の多重解像度解析を利用した電子透かし方式の改良," 信学論 (A), vol.J85-A, no.1, pp.103-111, Jan. 2002.
- 12) <http://www3.corel.com>
- 13) <http://www.ijg.org>
- 14) Jae S. Lim and Image Processing, Prentice Hall, 1990.
- 15) B. Widrow, I. Kollár, and M. Liu, "Statistical Theory of Quantization," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 45, No. 6, pp. 353-361, 1995.
- 16) ISO/IEC 10918-1, "Information technology - Digital Compression and Coding of Continuous-tone Still Images"