

DCT および VQ を用いた画像電子透かし

Digital watermarking for images using DCT and VQ

柴田 且崇[†], 沢田 克敏^{††}, 中村 栄治^{†††}
Katsutaka Shibata, Katsutoshi Sawada, Eiji Nakamura

Abstract This paper describes two digital watermarking methods using DCT (Discrete Cosine Transform) and VQ (Vector Quantization). A bi-level (1 bit/pixel) watermarking image has been embedded in target gray scale images. In the DCT watermarking method, DCT coefficients of target gray scale images are modified by watermarking information 1/0. In the VQ watermarking method, a VQ code book is divided to 2 groups which are assigned to watermarking information 1/0, respectively. Experiments have been carried out. The SNR (Signal to Noise Ratio) of embedded target images and the BER (Bit Error Rate) of extracted watermarking information have been studied. Our Experimental results have shown that the DCT method is superior to the VQ method.

1. はじめに

インターネットの急速な普及拡大により、文書、音声、画像といった様々な情報がデジタル化され、ネットワーク上にあふれている。これらのデジタルコンテンツはコンピュータ上で編集や複製、配布といった作業が容易に行えることから、無断で複製し配布するといった著作権侵害の問題も生じている。このような著作権問題の対策の一つとして、電子透かし^{1),2)}が知られている。電子透かしとは、画像や音声等のデジタルコンテンツに対して、そのコンテンツ自体とは別の情報を、視覚的には知覚できないように埋め込む技術である。例えば、デジタルコンテンツの中に著作者固有の識別情報を埋め込むことで、不正コピー者に無言の圧力を加え、あるいは著作権侵害に対する検証の道具として用いることができる。

電子透かしに求められる要件としては、(1) 透かし情報の埋め込みによってコンテンツ自体の品質が大きく劣化しないこと、(2) 「透かし情報を改ざんまたは消去しようとする攻撃に対して耐性が強いこと、が挙げられる。

本論文では静止画像を対象とした電子透かしとして、DCT (Discrete Cosine Transform) および VQ (Vector Quantization) を用いた電子透かしを検討する。以下、第 2 章では DCT を用いた電子透かしについて、また第 3 章では VQ を用いた電子透かしについて、それぞれの原理と実験結果を述べる。第 4 章では DCT 方式と VQ 方式

の性能を、透かしを埋め込まれた画像の品質と抽出された透かし情報の品質の両面から比較検討する。最後に第 5 章で本論文のまとめを述べる。

2. DCT を用いた電子透かし

2.1 DCT の概要

DCT^{3),4)} (Discrete Cosine Transform: 離散コサイン変換) とは、画像の情報圧縮符号化に広く用いられている技術であり、画像の圧縮形式である jpeg にも採用されている。DCT では画素値を、余弦関数を基底とする線形和の係数 (DCT 係数) へ変換する。これにより、画像領域の値から空間周波数領域の値に変換することができる。逆に DCT 係数から画素値に戻すことを IDCT (Inverse Discrete Cosine Transform: 逆離散コサイン変換) という。なお、DCT と IDCT により理論的には元の画素値を復元できるが、余弦関数が実数値であるため、実際の演算では丸め誤差が生じる。

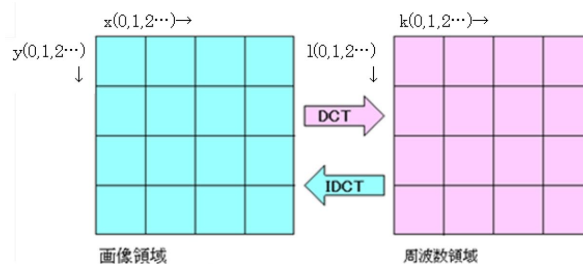


図 2.1 DCT における画像領域と周波数領域

[†] 愛知工業大学大学院 工学研究科 (豊田市)

^{††} 愛知工業大学 工学部 (豊田市)

^{†††} 愛知工業大学 情報科学部 (豊田市)

DCT は画素値ブロック単位で行う。図 2.1 に DCT における画像領域 (画素値領域) と周波数領域 (DCT 係数領域) の対応を示す。M×N の画素値に対して DCT を行うと M×N の DCT 係数が生成される。

図 2.2 に示すように、DCT ブロックの一番左上の部分つまり位置座標 (0,0) の成分を DC (直流) 成分と言い、これは変換前の対応する画素値ブロックの平均輝度値に比例する値である。残りの成分は AC (交流) 成分と言い、ブロックの平均輝度値からの変化分に比例する値である。完全に平坦な画像ブロックでは AC 成分の値は全て 0 となる。(0,0) に近い成分を低周波成分、(0,0) から離れるにつれて高周波成分とよぶ。画像の DCT 係数の特徴として、画素値の変化が少ない平坦な画像では低周波成分の絶対値が大きく、非平坦な画像領域が多くなると高周波成分の値が増加する。DCT 係数はブロック内での座標位置によって画像に対する視覚的な影響に差異がある。一般に、逆変換された画像の品質への影響は高周波成分の DCT 係数ほど少ないことが知られている。

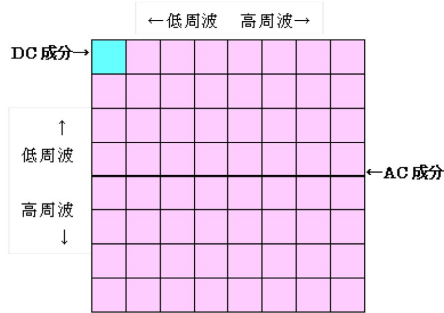


図 2.2 DCT 係数の構成

DCT は任意の M×N のブロックに対して適用可能であるが、本研究では 8×8 のブロックに対し DCT を行う。変換前の画像ブロックにおける座標 (x,y) での画素値を G_{xy} 、変換後の DCT 係数ブロックにおける座標 (k,l) での DCT 係数を V_{kl} とすると、8×8 画素ブロックに対する DCT は式(2.1)で表される。^{3),4)}

$$V_{kl} = \frac{1}{4} C_k C_l \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 G_{xy} \cos \frac{(2x+1)k\pi}{16} \times \cos \frac{(2y+1)l\pi}{16} \quad (2.1)$$

$$C_i = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & : i = 0 \\ 1 & : i \neq 0 \end{cases}$$

また、IDCT は式(2.2)で表される。^{3),4)}

$$G_{xy} = \frac{1}{4} \sum_{k=0}^7 \sum_{l=0}^7 C_k C_l V_{kl} \cos \frac{(2x+1)k\pi}{16} \times \cos \frac{(2y+1)l\pi}{16} \quad (2.2)$$

$$C_i = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & : i = 0 \\ 1 & : i \neq 0 \end{cases}$$

2.2 DCT を用いた電子透かしの原理

ここでは、DCT を用いた電子透かしの原理を説明する。対象画像に透かし情報を埋め込む手順は次の通りである。

- (1) 埋め込み対象画像に対して DCT を行う。
- (2) ブロック毎に指定された DCT 係数に対して透かし情報を埋め込む。具体的な方法は後述する。
- (3) IDCT により画素値へ逆変換を行い、透かし情報が埋め込まれた画像を得る。

埋め込まれている透かし情報を抽出する手順は次の通りである。

- (4) 透かし情報が埋め込まれた画像に対して再度 DCT を行う。
- (5) 指定された DCT 係数から埋め込まれている透かし情報を取り出す。具体的な方法は後述する。

ここでは、1つの DCT ブロックに対して 1つの白/黒の画素値を埋め込むこととする。すなわち、1 ブロックに 1/0 の 1 ビットを埋め込むことになる。DCT は 8×8 のブロックで行うから、埋め込み対象画像全体での DCT ブロック数は全画素数の $1/(8 \times 8) = 1/64$ となる。そこで、埋め込み対象画像に対して縦横それぞれ 1/8 のサイズの 2 値 (白黒) 画像を埋め込むこととする。

透かし情報を埋め込む方法として、今回は DCT 係数に対して指定した値を加算する方法を用いる。具体的には、ブロック内で指定された座標位置の埋め込み対象 DCT 係数値を X、埋め込み後の DCT 係数値を X'、透かし情報を Y (=1/0)、埋め込み加算値を A (>0) として、式 (2.3) により埋め込む。すなわち、埋め込む透かし情報が Y=1 の場合には DCT 係数値 X の絶対値を A だけ増加させ、Y=0 の場合には X のままとする。これは A の値が大きいくほど埋め込み強度が高いことを意味する。なお埋め込み前の DCT 係数値 X も保存しておく。

$$X' = \begin{cases} X + A & : X \geq 0 \cap Y = 1 \\ X - A & : X < 0 \cap Y = 1 \\ X & : Y = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

埋め込まれた透かし情報 Y=1/0 の取り出しは、埋め込みの式(2.3) に対応して式(2.4) に基づいて行う。

$$Y = \begin{cases} 1 & : |X - X'| \geq \frac{A}{2} \\ 0 & : |X - X'| < \frac{A}{2} \end{cases} \quad (2.4)$$

原画像と透かしを埋め込まれた画像それぞれの DCT 係数値を比較して Y=1/0 を判定している。埋め込みおよび取り出しの演算、DCT→IDCT→DCT の過程で実数値の丸め誤差が生じるため、また後述する量子化攻撃のため、埋め込み情報の取り出しの際に誤りを生じる可能性がある。この誤りを出来るだけ小さく押さえるために、取り出しの判定には余裕を持たせて、埋め込み加算値 A に対して取り出しの判定閾値は A/2 としている。

2.3 実験方法

(1) 用語の説明

最初に、ここで用いるいくつかの用語を説明する。

(1) 量子化攻撃

透かし情報を改ざんまたは消去するために、埋め込まれた画像に対してわざと画素値の量子化⁵⁾(近似)を行うものである。このときの近似の刻み幅を量子化攻撃ステップサイズとよび、本論文ではその値を S で示す。透かしが埋め込まれた画像の画素値は量子化攻撃によって変化するため、そこから取り出される透かし情報には誤りが生じる可能性がある。

(2) 埋め込み強度 (A)

式(2.3)、(2.4)における $A (>0)$ の値であり、透かし情報の埋め込みの強さを表す。A の値が大きいほど攻撃に対する耐性強度は高くなり、取り出される透かし情報の劣化(誤り)が少なくなるが、埋め込まれた画像の劣化は大きくなる。

(3) 信号対雑音比⁵⁾(SNR : Signal to Noise Ratio)

画像の品質を表す指標のひとつである。その画像が本来のものにどれだけ近いかを表す数値であり、単位は [dB] を用いる。画像サイズを $I \times J$ 、画素値を $0 \sim 255$ (8ビット精度)、座標 (i, j) における原画像の画素値を x_{ij} 、処理画像の画素値を y_{ij} とすると、処理画像の SNR は式(2.5)で与えられる。

$$SNR = 20 \log_{10} \frac{S_{pp}}{N_{rms}}$$

$$N_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} (x_{ij} - y_{ij})^2}{I \times J}} \quad (2.5)$$

$$S_{pp} = 255$$

(4) 符号誤り率 (BER : Bit Error Rate)

ビット情報の誤り率で単位は [%] を用いる。この実験では取り出した透かし画像 (2 値画像) の白/黒 (したがって 1/0) 情報の誤り率を示し、透かし情報がどの程度劣化しているかを表す指標となる。

(2) 実験方法

本実験の手順を図 2.3 に示す。

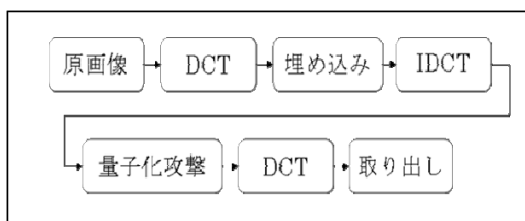


図 2.3 DCT による電子透かし実験の手順

画像に透かし情報を埋め込んだ場合、埋め込まれた画像の品質は一般に劣化する。そこで、埋め込み強度 A と

画品質の関係を検討する必要がある。また、透かしを取り出す場合、すべての透かし情報を誤り無く取り出せるとは限らない。それは、透かし入り画像に対して改ざん等の他者からの攻撃などがあるからである。したがって、その埋め込み方式の攻撃耐性を検討する必要がある。今回の実験では、透かしの攻撃耐性評価のために透かしを埋め込まれた画像に対して量子化攻撃を加え、それにより透かし情報がどれだけ劣化するかを検討する。

図 2.4 および図 2.5 に透かしが埋め込まれる対象画像を示す。512×512 画素、8 ビット/画素 (グレースケール 256 値) である。図 2.6 に埋め込む透かし情報画像を示す。64×64 画素、1 ビット/画素 (白黒 2 値) である。

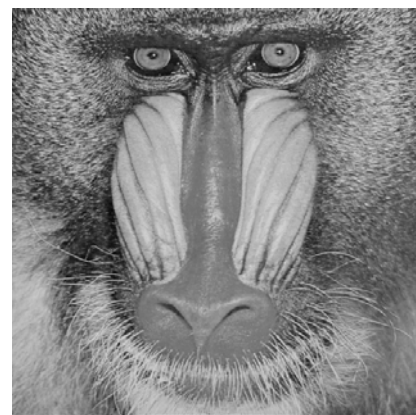


図 2.4 Baboon 原画



図 2.5 Lenna 原画像



図 2.6 透かし情報用画像 (Sample64)

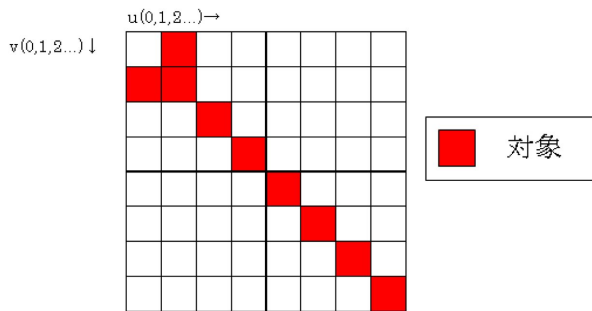


図 2.7 埋め込み DCT 係数の位置

最初の実験では、埋め込み対象の DCT 係数のブロック内での位置座標と埋め込まれた画像の品質 (SNR) の関係を調べ、埋め込むのに適切な位置座標を検討する。

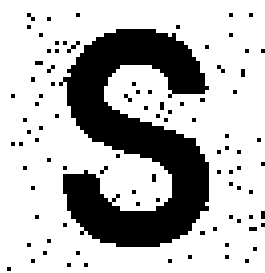
図 2.7 は DCT の 1 ブロックを示しており、図 2.2 と同様に一番左上の成分が DC 成分、それ以外が AC 成分である。埋め込みは、図で印を付けた各成分に対して行う。DC 成分から離れるにつれて画像に対する DCT 係数の影響力が下がるという事実の確認をも目的としている。座標 (1,0)、(0,1) については、DC 成分から等距離でも位置の違いでどのような差が出るかを確認するためである。

次の実験では、透かしを埋め込まれた画像に対して量子化攻撃を加え、取り出された透かし情報の品質を符号誤り率 (BER) で評価する。

2.4 実験結果と考察



SNR 57.628[dB]



BER 2.905[%]

図 2.8 実験結果の一例

図 2.8 に透かしを埋め込まれた画像とそこから抽出された透かし画像の一例を示す。埋め込み座標は $(y,x) = (1,1)$ 、埋め込み強度は $A=2$ 、量子化攻撃は無し、である。埋め込まれた画像に視覚的な劣化は見られない。一方、抽出された透かし画像には誤りが生じている。

埋め込み強度を上げた場合について、DCT 係数の位置座標による画像品質の違いを図 2.9 に示す。上が座標 (1,1)、下が (7,7) の場合である。



A=256 埋め込み座標 (1,1)



A=256 埋め込み座標 (7,7)

図 2.9 埋め込む DCT 係数の位置座標による違い

ここでは、見やすいように埋め込み強度を極端に大きな値 ($A=256$) にしている。座標 (1,1) では埋め込まれた透かし情報パターンがはっきり見えるのに対して、座標 (7,7) ではほとんど見えない。(1,1) は低周波成分、(7,7) は高周波成分に当たるので、これは高周波であるほど画像への視覚的な影響が少ないことを示している。

以上では視覚的な画像品質を示したが、数値的に表した SNR を図 2.10 に示す。横軸に埋め込み対象 DCT 係数の座標、縦軸に埋め込まれた画像の SNR を示す。埋め込み強度をパラメータとしている。図より埋め込み強度が高くなるにつれて SNR が低下しているのがわかる。一方、座標による SNR の違いはあまりない。先の実験で示した

DCT および VQ を用いた画像電子透かし

ように低周波成分に埋め込んだ場合には画像の劣化が見えたが、SNR はどの座標位置に埋め込んででもあまり変わらないと言える。しかし、視覚的な画質劣化を抑えるには高周波の成分の座標位置への埋め込みが適している。

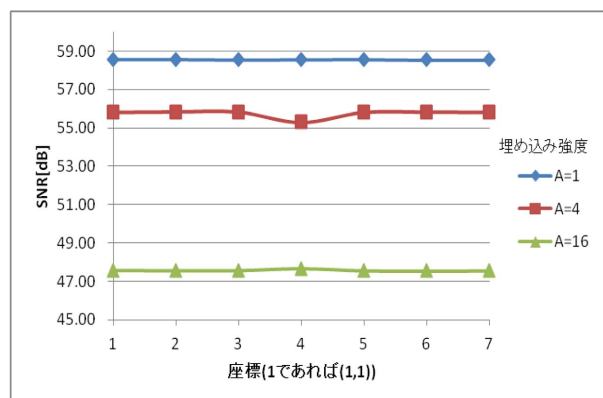


図 2.10 DCT 係数の座標位置と画像品質

次に透かし情報の量子化攻撃耐性について述べる。抽出された透かし情報の BER を図 2.11 と図 2.12 に示す。埋め込み強度 $A=1, 4, 16$ と埋め込み座標 $(1,1), (4,4), (7,7)$ の組み合わせをパラメータとして、横軸に量子化攻撃のステップサイズ S を、縦軸には BER を示す。

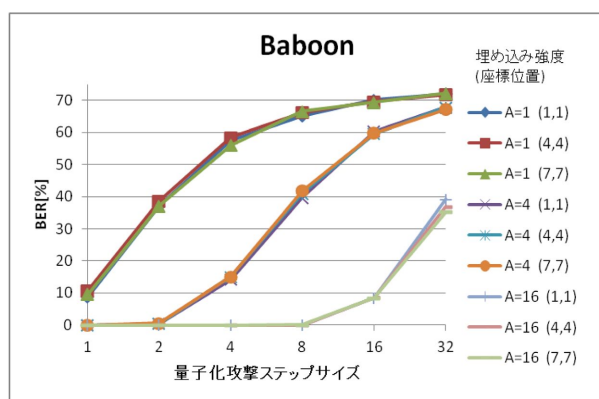


図 2.11 Baboon 画像の BER

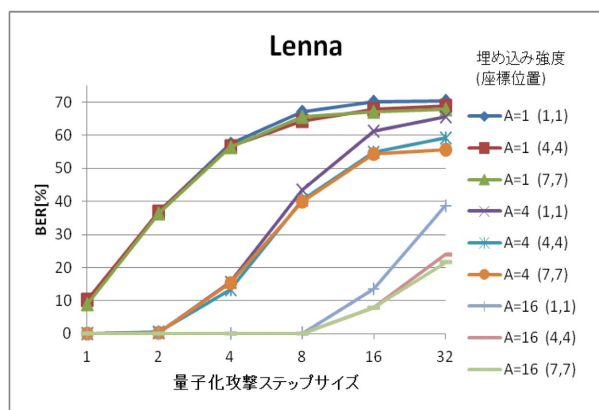


図 2.12 Lenna 画像の BER

これらの結果から、まず、強度 A が大きいほど BER は小さく、透かし情報の攻撃耐性が大きいことがわかる。数値的には Lenna の場合の BER が多少高いが、Lenna、Baboon どちらにおいても同じ傾向が見られる。座標別で見ると、Lenna の場合には量子化攻撃のステップサイズ S の増加にともないある程度の差が出ている。座標 $(1,1)$ に近いほど（すなわち低周波成分ほど）BER が高い傾向にある。これに対して Baboon では全体的に座標による差はほとんどない。

Lenna は画素値が平坦な領域が多い画像であるが、一方、Baboon は非平坦な領域が多い画像である。DCT 係数の特性として、平坦な画像では低周波成分への値の集中が大きく、非平坦な画像であれば高周波成分の値が増える。従って平坦な画像領域の多い Lenna では低周波成分の DCT 係数の値が多く、一方、Baboon では高周波成分の値が Lenna より多い。このことから大きな値を持つ AC 成分へ埋め込むことで透かし情報はより劣化すると考えられる。したがって、DCT 係数の絶対値の小さい高周波成分へ埋め込みを行えば BER は少なく抑えられるということになる。

以上のことから埋め込みの位置座標を選択する場合には、画像品質や抽出効率を考えるとなるべく高周波の AC 成分に埋め込むのがよいと言える。

3. VQ を用いた電子透かし

3.1 VQ の概要

画像の量子化 (Quantization) とは、画素値を近似することである。画素値ひとつひとつを個別に量子化するスカラー量子化に対してベクトル量子化^{3), 4)} (VQ: Vector Quantization) とは、複数の画素をまとめて量子化する方式であり、画像の情報圧縮にも用いられている。

スカラー量子化とベクトル量子化の概要を対比させて図 3.1 に示す。左図はスカラー量子化を示す。入力された値 S に対して、1 次元数直線上にある量子化代表値 $r_1 \sim r_n$ の中から S に最も近い量子化代表値を選び出して出力する。量子化代表値は設定されたステップサイズ（近似の刻み幅）により決定される。ステップサイズが大きいほど近似される代表値が減るため情報量は減少するが、画質は劣化する。本実験で扱う量子化攻撃でもこのスカラー量子化を用いている。

右図はベクトル量子化 (VQ) を示す。ベクトル量子化とは、複数の画素値をまとめて一度に量子化する方式であり、複数の画素値をベクトルとして扱うのでベクトル量子化と呼ばれる。図は 2 画素づつまとめて量子化を行う 2 次元ベクトル量子化の例である。複数のベクトルを集めクラスタリングによって、ひとまとまりのクラスタを複数作成する。線で区切られているのがそれぞれのクラスタである。次に、各クラスタ内でそれぞれ量子化に

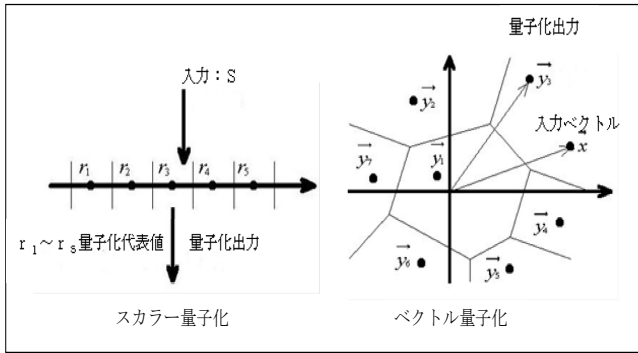


図 3.1 スカラー量子化とベクトル量子化

使う代表ベクトルを選出する。入力されたベクトルに対し、予め用意された量子化代表ベクトルの集まりの中から最もよく似ているベクトルを出力することで VQ を行う。図の例では入力ベクトル x に対して、同クラスタ内の量子化代表ベクトルである y_3 が出力される。この量子化代表ベクトルの集まりをコードブックと言ひ、コードブックの設計は LBG アルゴリズム^{3), 4)} を用いて行われる。コードブック内の量子化代表ベクトルの個数をレベル数と言う。コードブックのレベル数が高いほど、量子化画像の表現に多くの代表ベクトルを用いることが出来るので画質は向上するが、情報量は増大する

3.2 VQ を用いた電子透かしの原理

2 値 (0/1) の透かし情報の埋め込みを例にとりて VQ を用いた電子透かしの原理を述べる。VQ の 1 つのベクトル毎に 1 ビットを埋め込む。そのために VQ のコードブックを構成している量子化代表ベクトルを 2 グループ G0 と G1 に分け、それぞれに対して透かし情報 0, 1 を割り当てる。このグループ分けにおいては、最近傍 (最短距離) の 2 つのベクトルを組みにして G0 と G1 に割り振っている。

埋め込み対象画像のあるベクトル (入力ベクトル) に 0 を埋め込むときには 0 を割り当てられているグループ G0 からその入力ベクトルに最も近い量子化代表ベクトルを選ぶ。逆に 1 を埋め込む場合には 1 を割り当てられているグループ G1 から量子化代表ベクトルを選ぶ。このような VQ により入力ベクトル毎に 1 ビットの透かし情報を埋め込まれた画像が得られる。

透かし情報を取り出すには、埋め込み時と同じコードブックを用いる。埋め込まれた画像のベクトルに対して、それに一番近い量子化代表ベクトルをコードブックから検索し、その量子化代表ベクトルがグループ G0 と G1 のいずれかに属しているかを調べることで透かし情報 0, 1 の取り出しを行う。

すなわち、埋め込まれた画像のベクトルがグループ G0 に属する量子化代表ベクトルに一番似ているなら 0 を、

G1 に属する量子化代表ベクトルに一番似ているなら 1 を出力する。これを埋め込まれた画像の全ベクトルに対して繰り返して行うことにより透かし情報を取り出す。透かし用 VQ のコードブックの場合、通常の VQ コードブックと比べて代表ベクトルの総数は同じだがグループ G0 と G1 それぞれ半分の量子化代表ベクトルしかもたない。そのため通常の VQ と比べて画質は劣化する。

3.3 実験方法

VQ による電子透かしの実験でも、DCT で行ったのと同様に、埋め込みによる画質の劣化および量子化攻撃に対する透かし情報の耐性について検討を行う。実験手順を図 3.2 に示す。

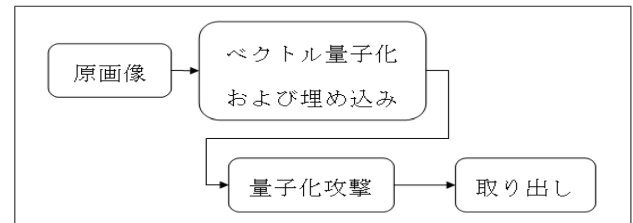


図 3.2 VQ による電子透かし実験の手順

VQ のコードブックとしては 4×4 画素の 16 次元のコードブックを用いる。透かし埋め込み対象画像は DCT 方式の場合と同様に図 2.4 の Lenna および図 2.5 の Baboon を、透かし情報画像は図 3.3 の Sample128 (128×128) を用いる。16 次元 VQ は 4×4 のブロック単位で行うため、埋め込み対象画像サイズ 512×512 に対して透かし情報画像サイズは $(512 \times 512) / (4 \times 4) = (128 \times 128)$ とする。



図 3.3 透かし情報画像 (Sample128)

3.4 実験結果と考察

図 3.4 に透かしを埋め込まれた画像とそこから抽出された透かし画像の一例を示す。コードブックのレベル数 (CB レベル数) 512、量子化攻撃ステップサイズ $S=4$ の場合である。なお、SNR は量子化攻撃が無い場合のものである。埋め込まれた画像に視覚的な劣化はみられない。一方、取り出された透かし画像は劣化している。

透かし埋め込み用コードブックのレベル数 (CB レベル数) と埋め込まれた画像の SNR の関係を図 3.5 に示す。



SNR 30.325[dB]



BER 1.379[%]

16次元、CBレベル数：512

図 3.4 実験結果の一例

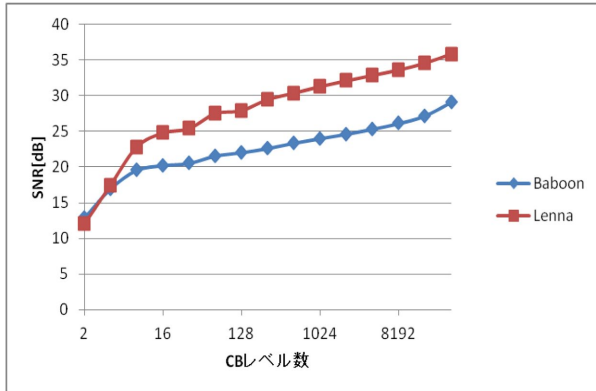


図 3.5 VQ の CB レベル数と SNR

図 3.5 を見ると、CB レベル数が高くなるにつれて SNR が向上しているのがわかる。これは、レベル数が高くなると量子化代表ベクトルの数が増えるためである。Lenna と Baboon で SNR に差がある。これは、平坦な画像 Lenna に比べて非平坦な画像 Baboon の方がベクトルのバラツキが大きく、代表ベクトルとのマッチングが悪いためと考えられる。

次に取り出した透かし画像の BER を検討する。図 3.6 と図 3.7 に攻撃ステップサイズ S をパラメータとして CB レベル数と BER の関係を示す。

図より、攻撃ステップサイズ S が大きいほど BER は高くなることが分かる。また、多少バラつきはあるが CB レベル数が高いほど BER が高い傾向にある。CB レベル

数が高い、すなわち代表ベクトルの数が増えると、量子化攻撃により画素値がわずかに変化するだけでも元とは異なる近傍の別の代表ベクトルを検出する可能性が生じる。ところで代表ベクトルのグループ分けでは、最近傍（最短距離）の 2 つのベクトルを組みにして G0 と G1 に割り振っているため、CB レベル数が増えれば元とは異なるグループから代表ベクトルを検出するという事態が生じる。この場合には透かし検出は誤りとなり、BER は増加することとなる。

VQ を用いた電子透かしでは、CB レベル数が重要となる。レベル数が多ければ透かしを埋め込まれた画像の SNR が高くなる。従って、画像品質を優先して埋め込みを行う場合にはレベル数の高いコードブックを使用すれ

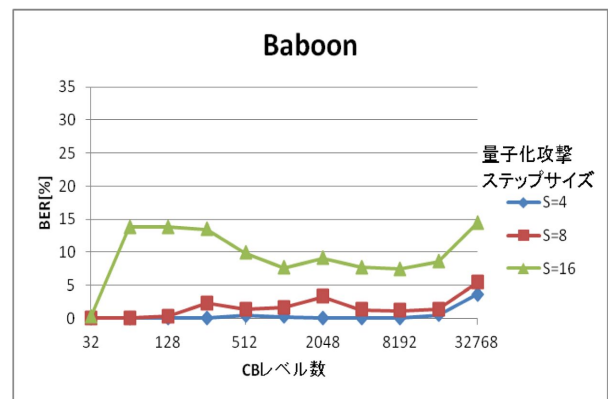


図 3.6 Baboon 画像の CB レベル数と BER

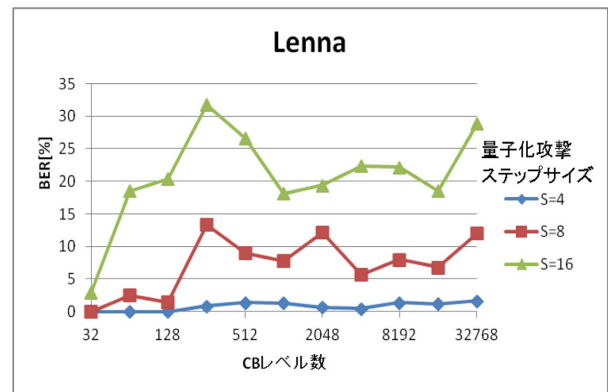


図 3.7 Lenna 画像の CB レベル数と BER

ばよい。しかし、レベル数の高いコードブックでは透かし情報を抽出する際に誤検出する確率が高くなる。従って、透かし情報の攻撃耐性を優先するならば、なるべくレベル数の低いコードブックを用いる必要がある。

4. DCT および VQ を用いた電子透かしの比較

前述した DCT および VQ を用いた電子透かしの両方式について比較検討を行う。

4.1 比較条件

両方式の埋め込み制御パラメータとしては、DCT 方式では埋め込み強度 A 、VQ 方式ではコードブックのレベル数 (CB レベル数) という違いがある。強度 A の値が大きいほど透かしの抽出誤りは少なくなるが、埋め込まれた画像の品質は劣化する。一方、CB レベル数が大きいほど埋め込まれた画像の品質は劣化するが、透かしの抽出誤りは少なくなる。このため対等な条件の比較を行う場合にはこの 2 つのパラメータを扱うことはできない。そこで、対等に比較するために以下の条件を設定する。

- ① 埋め込み対象画像は Lenna、透かし画像はサイズ 64×64 (sample64) に統一
- ② 埋め込まれた画像の SNR と取り出された透かし画像の BER を基準に比較

4.2 比較検討結果

透かし方式 (DCT/VQ) と量子化攻撃ステップサイズ S の組み合わせをパラメータとして、埋め込まれた画像の SNR を横軸に、取り出された透かし画像の BER を縦軸に取って図 4.1 に示す。ただし、SNR については埋め込みの影響のみを考慮した (すなわち量子化攻撃の影響を含まない) 値である。

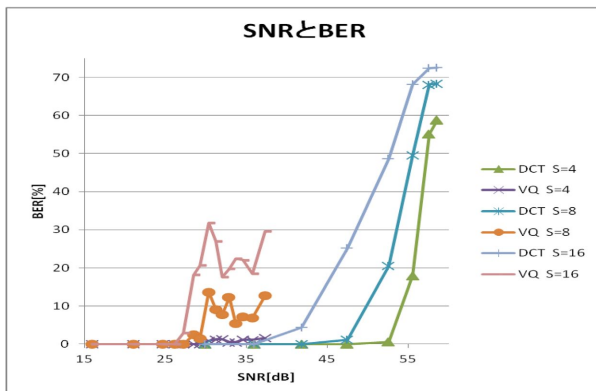


図 4.1 VQ 方式と DCT 方式の比較

DCT、VQ の両方式とも SNR が増加するにつれ BER の値が上昇する傾向にある。前述したように各方式の SNR はそれぞれ埋め込み強度 (A) とコードブックレベル数 (CB レベル数) に依存している。図 4.1 では図の右に行くほど、DCT 方式では埋め込み強度 A が小さく、VQ 方式では CB レベル数が高いことになる。

図 4.1 により DCT、VQ 両方式の性能を比較する。まず両方式において、埋め込まれた画像の SNR を一定として取り出された透かし情報の BER を比較検討する。例えば SNR ≈ 37 dB とすると、DCT 方式では量子化攻撃ステップサイズ $S=8$ 、 $S=16$ のいずれの場合でも BER $\approx 0\%$ である。一方、VQ 方式では $S=8$ で BER $\approx 7\%$ 、 $S=16$ で

BER $\approx 30\%$ となる。SNR ≈ 45 dB とすると、DCT 方式では $S=8$ で BER $\approx 0\%$ 、 $S=16$ で BER $\approx 15\%$ となる。一方、VQ 方式ではデータが示されていないが、図の傾向および CB レベル数が増大することになるので前述のように BER はさらに増大することになる。したがって、同じ SNR において BER の少ない DCT 方式の方が優れていると言える。

次に両方式において、取り出された透かし情報の BER を一定としたときの埋め込まれた画像の SNR を比較検討する。例えば、量子化攻撃ステップサイズ $S=8$ に対して BER $\approx 0\%$ とするために達成できる SNR は、DCT 方式では SNR ≈ 47 dB、VQ 方式では SNR ≈ 27 dB となる。 $S=8$ に対して BER $\approx 10\%$ とすると、DCT 方式では SNR ≈ 50 dB、VQ 方式では SNR $\approx 28 \sim 37$ dB となる。また $S=16$ に対して BER $\approx 10\%$ とすると、DCT 方式では SNR ≈ 43 dB、VQ 方式では SNR ≈ 27 dB となる。どの場合でも同じ BER に対して高い SNR を達成できる DCT 方式の方が優れていると言える。

両方式において透かしの埋め込まれた画像の例を図 4.2～図 4.5 に示す。いずれも量子化攻撃ステップサイズ $S=8$ に対して BER $\approx 0\%$ となる SNR の画像である。



SNR=47.5dB

図 4.2 DCT 方式の画質 (強度 $A=16$)



SNR=41.8dB

図 4.3 DCT 方式の画質 (強度 $A=32$)



SNR=27.5dB

図 4.4 VQ 方式の画質 (レベル数 64)



SNR=22.8dB

図 4.5 VQ 方式の画質 (レベル数 8)

DCT 方式では埋め込み強度が高くなると画質劣化が検知されるようになる。図 4.3 の肩の部分などを見ると、埋め込まれた透かし情報パターンが検知される。従って、埋め込み強度が高い場合には 2.3 で述べたように高周波成分の位置座標を選択して埋め込みを行い視覚的な劣化を抑える必要がある。

VQ 方式では埋め込まれた透かし情報パターンが検知されるというよりは、画像全体の劣化が激しく、DCT 方式に比べて画像品質はかなり低下する。

以上述べたように、透かしを埋め込まれた画像の品質 (SNR で評価) と取り出された透かし情報の品質 (BER で評価) の観点から、DCT 方式の方が VQ 方式よりも優れていると言える。

5. むすび

本論文では、DCT および VQ を用いた電子透かしについて、主に透かしを埋め込まれた画像の品質と透かし情報の攻撃耐性について検討した。

まず、DCT の概要と DCT を用いた電子透かしの原理について述べ、透かし埋め込みと抽出の実験を行った。その結果、埋め込み強度が高いほど透かし情報は攻撃耐性を持つが埋め込まれた画像の品質は劣化することを示した。DCT ブロック内の各座標への埋め込みに対して SNR の違いはほとんど見られなかった。しかし、埋め込み強度が高い場合には、低周波成分への埋め込みでは視覚的に画質が劣化することがわかった。抽出した透かし情報については、Baboon 画像では座標による BER の差はなかったが、Lenna 画像では低周波成分へ埋め込んだときの BER が高くなった。以上のことから、なるべく高周波成分の DCT 係数への埋め込みが適切であることがわかった。

次に、VQ (ベクトル量子化) の概要と VQ を用いた透かしの原理を述べ、透かし埋め込みと抽出の実験を行った。VQ ではコードブックのレベル数が高いほど、埋め込まれた画像の SNR が高くなることがわかった。一方、抽出透かし画像については、コードブックのレベル数が高いほど BER が高くなりやすいことを示した。以上より、画像の品質を優先するならレベル数の高いコードブックを、透かし情報の耐性を優先するならレベル数の低いコードブックを使用するとよいことがわかった。

最後に、前述した二つの方式について比較検討を行った。その結果、VQ に比べて DCT は同じ SNR での BER が低く (同じ BER での SNR は高く) なり、DCT の方が VQ よりも優れていることがわかった。

今後の課題としては、Lenna、Baboon 以外の各種の画像に対する実験、DCT 方式では埋め込む係数の位置座標を変えての比較実験、VQ ではコードブックを変更しての実験等があげられる。また、量子化攻撃以外の攻撃に対する耐性の検討や、またカラー画像を対象とする検討も必要である。

参考文献

- 1) 松井甲子雄：電子透かしの基礎、森北出版、2000
- 2) 小松尚久、他：電子透かし技術、東京電気大学出版局、2004
- 3) 原島博：画像情報圧縮、オーム社、1991
- 4) 小野、渡辺：国際標準画像符号化の基礎技術、コロナ社、1998
- 5) 愛知工業大学電子情報工学専攻編：電子情報工学実験 6 指導書、2011

(受理 平成 24 年 3 月 19 日)