

## 画質と耐性の評価量を用いた適応的電子透かし埋込アルゴリズム

福田 洋介<sup>†</sup> 古川 利博<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 東京理科大学大学院 工学研究科 経営工学専攻

<sup>††</sup> 東京理科大学 工学部 経営工学科

〒102-0073 東京都千代田区九段北1-14-6

E-mail: †{y\_fukuta, furukawa}@ms.kagu.tus.ac.jp

あらまし 近年、デジタルデータの保護を目的として、画像に情報を埋め込む電子透かし技術が注目されている。従来法では、様々な周波数領域に情報を埋め込んでいるが、透かしの埋め込みたい画像と埋込情報によって、埋め込むべき周波数領域は異なり、事前に特定埋込領域を選択することは行われていない。また画質と耐性は埋込強度の値に依存するが、従来法において埋込強度の最適値を求めることは行われていないのが現状である。本論文では、画質と耐性に関する評価量を用いて、事前に最適な埋込領域と埋込強度を決定する埋込アルゴリズムを提案している。  
キーワード 電子透かし, ウェーブレット変換, 評価量, 演算量

## The Adaptive Algorithm for Embedding the Digital Watermark with the criterion about both the Image Quality and Robustness

Yousuke FUKUTA<sup>†</sup> and Toshihiro FURUKAWA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Department of Management Science, Faculty of Engineering,  
Graduate School of Tokyo University of Science

<sup>††</sup> Department of Management Science, Faculty of Engineering, Science University of Tokyo  
Kudankita 1-14-6, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-0073 Japan

E-mail: †{y\_fukuta, furukawa}@ms.kagu.tus.ac.jp

**Abstract** Recently, digital watermark technology for embedding information data is drawing attention as the purpose of protecting copyrights for digital data. In conventional method, information data is embedded in various frequency domains, but the previous selection of the embedded domain has not done in spite of that the domain to embed depend on the image for embedding watermark and information data. Image quality and robustness depend on the value of the embedded intensity, but it is actual condition that computing the optimized value of the embedded intensity has not done. In this work, we propose the algorithm for embedding to decide the embedded domain and the embedded intensity previously with the criterion about both the image quality and robustness.

**Key words** digital watermark, wavelet transform, criterion, amount of calculation

### 1. ま え が き

近年、パーソナルコンピュータやネットワーク技術の加速度的な進歩・普及によって、大量のデジタルデータの蓄積・伝送が容易に行えるようになってきた。これにより、誰でも簡単にデジタルデータを複製、編集できるようになり、デジタルデータの著作権保護をどのようにして実現するかが問題となっている。この問題の対応策の一つとして、デジタルデータに著作権情報などを人間には知覚できないように付加する技術である電子透かしが注目されている [1]。

電子透かしには、画素値に直接操作を行う方式と、画像をDCT(Discrete Cosine Transform) やDWT(Discrete Wavelet Transform)などの周波数変換を用いて周波数成分に変換し、特定の周波数成分を操作する方式 [2]~[4] とに大別される。特に、周波数領域で操作する方式は、処理が重くなるという欠点をもつものの、ある範囲に情報を拡散して埋め込めるため、各種画像処理に対して耐性があるという利点をもつ。

DCTを用いた電子透かしでは、画質を保ったまま、JPEG圧縮に対する耐性を確保している。しかし、DCT処理は画像を画素数が $8 \times 8$ のブロックに分割する必要があり、そのため

埋込済画像にブロックノイズやモスキートノイズが現れるという欠点がある。一方、DWTを用いた電子透かしは、画像をブロックサイズを任意に変更できるため、ブロックサイズを大きくとることで上記のDCTを用いた手法で生じた問題は回避できる。

DWTを用いた従来の手法は、(i) 中間周波数帯域への埋込と(ii) 低周波数帯域への埋込に大別され、(i) は人間の視覚特性を考慮に入れ、検知されにくいとされるエッジ部分や複雑なテクスチャ部分の高周波数域への埋込を行い、効果を上げている[2],[3]。しかし、この手法では画像圧縮など高周波数成分を損なう攻撃に対する耐性が低い。この問題を解決するためには、最低周波数成分へ透かし情報を埋め込むことが有効であると考えられるが、最低周波数成分への埋込は埋込済画像の画質を著しく劣化してしまう。

それに対して(ii)は、画像の局所の変化度によって雑音の検知度が異なるという視覚特性を利用することにより、最低周波数成分への埋込を可能としており、高周波成分を基準とする埋込ブロック検出による新しい雑音マスキング効果を利用した埋込アルゴリズムが提案されている[4]。このアルゴリズムを適用することで、圧縮率の高いJPEG圧縮及びその他の画像変換に対してより耐性を保ちつつ、画質の高い透かし画像を得ることができる。

しかし、この埋込アルゴリズムにおける埋込ブロック検出アルゴリズムは2つのSTEPから成っており、STEP1で埋込に必要なブロック数を確保できなかった場合、STEP2においてSTEP1よりも緩和された条件の下で埋込可能ブロックを検出している。そのため、STEP1で検出されたブロック数より埋込情報量が多い場合には、埋込による画質の劣化が顕著に生じる可能性がある。この埋込ブロック検出アルゴリズムに関しては、2.2で説明する。

また、(i)、(ii)に共通して言えることとして、画質と耐性が埋込強度の値に依存しており、埋込強度が小さいほど画質は良くなるが耐性は悪くなり、大きいほどその逆となる。従来の研究において、この埋込強度の最適値を求めることは行われておらず、埋込済画像に対する画質評価、耐性評価は出力後に行っているのが現状である。そのため、最適な埋込強度による埋込済画像を得るには、異なる埋込強度ごとによって得られる埋込済画像に対する画質評価、耐性評価を行う必要があり、演算量の面で不利である。

そこで本論文では、画質と耐性に関する評価量を設け、これにより事前評価を行い、原画像と埋込情報量に応じて最適な埋込領域と埋込強度を決定する埋込アルゴリズムを提案する。このアルゴリズムでは、まず(ii)で用いる埋込ブロック検出アルゴリズムのSTEP1によって埋込可能ブロック数を求める。次に、求めた埋込可能ブロック数と埋込情報量の大小関係により、適切な埋込領域を選択する。このとき、埋込可能ブロック数より埋込情報量の方が大きい場合は(ii)による埋込を行い、逆の場合は(i)による埋込を行う。その後、画質評価量にPSNR、耐性評価量に検出率を用いて、埋込済画像のPSNRが40[dB]以上、検出率が90%以上となるような埋込強度の範囲を算出

する。最後に、求められた埋込強度の範囲の中央値を埋込強度の最適値として埋込を行う。この埋込アルゴリズムを用いて最適な埋込領域と埋込強度を埋込前に決定することで、画質と耐性のバランスがとれた埋込済画像を1回の処理で得ることが出来る。また、後述するように従来法と提案法の総演算量を比較し、提案法の有効性を示す。

## 2. 従来法

本章では、本論文の従来法である中間周波数帯域への埋込手法[3]、低周波数帯域への埋込手法[4]について簡単に説明する。

### 2.1 中間周波数帯域への埋込[3]

この手法では、埋込に用いるパラメータとして、埋込強度  $m$ 、埋込情報量  $b$ [bit]、埋込情報  $W(k)$  ( $k = 1, \dots, b$ ) を考慮している。ただし、 $m$  は透かしの強度を表し、大きければ攻撃に対して耐性は向上するが、画質が下がるというトレードオフを伴う変数である。さて、この手法ははじめに、原画像に対して2次元ウェーブレット変換を行い、各サブバンドに分割する。図1はサンプル画像 lenna とウェーブレット変換後の画像、図2は画像のサブバンド分割を表している。



図1 サンプル画像 lenna とウェーブレット変換後の画像

LL2	HL2	HL1
LH2	HH2	
LH1		HH1

図2 画像のサブバンド分割

図1のLL, HL, LH, HHはサブバンドのラベルであり、それに続く数字は各サブバンドの分割レベルを表している。次に、サブバンドHL2・LH2から透かしを埋め込むサブバンドを選択する。その後、埋込に用いるウェーブレット係数  $C$  を選択するために、閾値  $T_1, T_2$  を設定する。 $T_1 = m$  であり、 $T_2$  は  $T_1 \leq |C| \leq T_2$  を満たす  $C$  の数が  $b$  となるように設定される。埋込は  $C$  を  $|C'| = T \pm m$  ( $T = (T_1 + T_2)/2$ ) に変更することで行われる。ただし、 $W(k) = 1$  で  $|C'| > T + m$  ならば、 $C' = C$  とする。 $W(k) = 0$  のときも同様である。これらを式

で表すと以下の通りである。ここで、 $\text{sgn}(x)$  は  $x$  の符号を表す関数である。

i)  $W(k) = 1$  のとき

$$C' = \begin{cases} \text{sgn}(C) \cdot (T + m) & (|C| \leq T + m) \\ C & (|C| > T + m) \end{cases} \quad (1)$$

ii)  $W(k) = 0$  のとき

$$C' = \begin{cases} \text{sgn}(C) \cdot (T - m) & (|C| \leq T - m) \\ C & (|C| > T - m) \end{cases} \quad (2)$$

電子透かしの検出には、 $C'$ 、 $T_1$ 、 $T_2$  を用いる。 $C'$  に応じて次式のように  $W(k)'$ 、( $k = 1, \dots, b$ ) を決定している。

$$W(k)' = \begin{cases} 0 & (|C'| \leq T) \\ 1 & (|C'| > T) \end{cases} \quad (3)$$

## 2.2 低周波数帯域への埋込 [4]

この埋込手法では、画像を小領域のブロックに分割し、図3のように埋込対象ブロックと比較対照ブロックに分けて処理を行っている。これらのブロック間における周波数成分の変化に着目し、それらが大きく変化しているブロックに対して埋込を行うと、低周波成分にデータを埋め込んでもマスキング効果によって、埋め込んだ痕跡を隠すことができると考えられている。この手法では、低周波成分の変化の度合でなく、局所的な領域に含まれる高周波成分の強さを埋込の尺度としている。しかし、単一のブロックの高周波成分のみを考慮して埋込を行った場合には、輪郭周辺も埋込領域としてしまう可能性があるため、図3のように各ブロックの上下左右のブロックを比較対照ブロックと考える。ただしブロックの役割を固定せず、上下左右の比較対照ブロックがある一定の複雑さの条件を満たしていれば、埋込ブロックとする。そのため全ブロックが埋込対象となっていることに注意する。

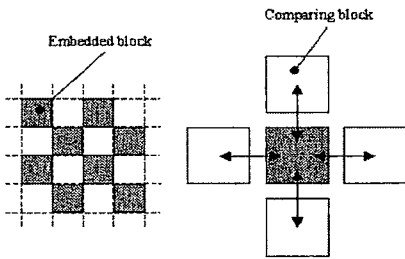


図3 埋込対象ブロックと比較対照ブロック

このように比較対照ブロックを設けることで、輪郭周辺への埋込を回避できる。これは、埋め込まれて欲しくない輪郭部分は輪郭以外に強い高周波成分を有していないので、周辺ブロックの高周波成分はさほど大きくならないためである。更に、埋込対象ブロックそのものもある一定の複雑さの条件を満たしていれば、より確かな雑音マスキング効果が得られると考えられる。

これらを踏まえた埋込ブロック検出アルゴリズムを以下に示

す。このアルゴリズムは二つのステップに分けることができる。STEP1は、周囲のブロックがある一定以上の高周波成分を含んでおり、かつ埋込対象ブロックもある一定以上の高周波成分をもつブロックを検出しており、より確かな雑音マスキング効果を得ることができる。STEP2は、STEP1では埋込に必要なブロック数を確保できなかった場合に行う操作であり、埋込対象ブロックと比較対照ブロックの高周波成分がある一定以上となっている部分を検出する。まず、STEP1の条件を示す。(STEP1の条件1) すべての比較対照ブロックは、次式を満たしていなければならない。

$$\sum |C_h| \geq T_1 \quad (4)$$

(STEP1の条件2) 埋込対象ブロックは、次式を満たしていなければならない。

$$\min(|C_h|) \geq T_2 \quad (5)$$

ここで、 $C_h$  は高周波成分のウェーブレット係数、 $T_1$ 、 $T_2$  は閾値、 $\min()$  は最小値を求める演算を示す。すべてのブロックに対してこの条件判定を行い、条件1と条件2を満たしていれば、そのブロックの位置を埋込対象ブロックの位置として記憶する。もしSTEP1で、埋込に必要なブロック数を確保できなかった場合、STEP2を実行する。

(STEP2の条件) 埋込対象ブロック及びすべての比較対照ブロックは、次式を満たしていなければならない。

$$\sum |C_h| \geq T_3 \quad (6)$$

ここで、 $T_3$  は閾値を示す。条件2では、はじめに設定した  $T_3$  を用いて、埋込に必要なブロック数を確保できなかった場合、必要なブロック数が確保できるまで、徐々に  $T_3$  を減らしていく。

STEP1は、埋込対象ブロック、比較対照ブロックともに強い高周波成分を含む埋込対象ブロックを検出するために用いられ、この部分に埋め込むことが望ましい。STEP2は埋込対象ブロックを含む周辺のブロック全体で強い高周波数成分を含むという条件であり、一部のブロックは必ずしも強い高周波数成分を含むとは限らないため、STEP1よりもエッジ部分を含む可能性があり好ましくない。したがって、STEP1でブロックを確保するのが望ましいが、画像の性質と埋込情報量とのトレードオフになるので注意が必要である。

埋込処理の手順を以下に示す。埋込情報として、 $W(k)$  を用意する。 $W(k)$  によって、以下のようにウェーブレット係数を変更することで埋込を行う。

$$C' = \begin{cases} C + m & (W(k) = 1) \\ C - m & (W(k) = 0) \end{cases} \quad (7)$$

透かしを検出するには、原画像のウェーブレット係数、埋込位置の情報が必要となる。検出は以下の手順で行われる。

$$W(k)' = \begin{cases} 0 & (|C'| \leq |C|) \\ 1 & (|C'| > |C|) \end{cases} \quad (8)$$

以上より、従来法 [3], [4] の問題点として、画像に応じて最適な

埋込領域と埋込強度を求めることは行われていないことが挙げられる。そのため、最適な埋込領域へ、最適な埋込強度で埋込を行った画像を得るには、異なる埋込領域、埋込強度ごとに埋込済画像を出力する必要があり、演算量が増加してしまう。

### 3. 提案法

本章では、従来法 [3], [4] の問題点を改善を目的とした、埋込アルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムでは、画質と耐性に関する評価量を用いて埋込前に評価を行い、原画像と埋込情報量に応じて最適な埋込領域と埋込強度を 1 回の処理で選択できる。これにより、前述の問題点である埋込済画像の出力回数の削減や事後評価の省略が可能となり、演算量の軽減が見込まれる。

#### 3.1 埋込アルゴリズム

全体の埋込手順は (i) ~ (iv) である。

- (i) 低周波領域における埋込可能ブロック数  $a$  の計算
- (ii) 埋込領域の選択
- (iii) 画質・耐性評価量から埋込強度の最適な範囲を算出
- (iv) 透かし情報の埋込

以下に各々の手順の具体的な説明を行う。まず、(i) で埋込可能ブロック数  $a$  を算出する。これは、低周波数帯域への埋込の従来法で説明した、埋込ブロック検出アルゴリズムを基に算出される。ここで、STEP1 で検出されたブロックに透かしを埋め込んだ場合は確かな雑音マスキング効果が得られるが、STEP2 で検出された埋込ブロックは STEP1 で検出されなかったブロックであり、このブロックに透かしを埋め込むと埋込済画像の画質が大きく劣化する可能性がある。そのため、STEP2 による埋込ブロック検出は行わず、STEP1 で検出されたブロック数のみを  $a$  とする。

次に、(ii) で埋込情報量  $b$  と  $a$  を比較し、その大小関係によって埋込領域を決定する。もし  $a \geq b$  ならば、全情報を STEP1 で検出されたブロックに埋め込むことが可能なので、低周波数帯域へ埋め込んでも画質の劣化は小さいと考えられる。逆に  $a < b$  ならば、全情報を STEP1 で検出されたブロックに埋め込むことが出来ないため、低周波数帯域に埋め込む場合、STEP2 で検出されたブロックにも埋込を行わなければならない。そのため画質が大きく劣化する恐れがあるので、中間周波数帯域に透かしを埋め込む方が画質の劣化は抑えられると考えられる。以上のことから、埋込に用いる周波数領域をとして、 $a \geq b$  ならば低周波数帯域、 $a < b$  ならば中間周波数帯域を選択する。

処理 (iii) では埋込強度の範囲を算出する。まず、各々の評価量に関する説明をする。画像評価量には  $PSNR$  (Peak Signal to Noise Ratio) を用いる。 $PSNR$  は以下の式で与えられる。

$$PSNR = 20 \log\left(\frac{255}{\sqrt{MSE}}\right) \quad (9)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M (X'(i, j) - X(i, j))^2}{M^2} \quad (10)$$

ここで、 $X(i, j)$  は原画像の画素値、 $X'(i, j)$  は埋込済画像の画素値、 $M$  は画像のサイズを表している。

耐性評価量には検出率を用いる。検出率は以下の式で与えら

れる。

$$\text{検出率} = \frac{\text{正確に検出できたデータ数}}{\text{全埋込データ数}} \times 100 \quad (11)$$

また、本論文では検出率を「埋込済画像に対して 1/10 の情報量にするよう JPEG 圧縮を行い、その圧縮済画像から検出可能な埋込情報の割合」としている。

ここで、検出の正否条件を以下のように表す。また、 $C$  は原画像のウェーブレット係数、 $C'$  は埋込済画像のウェーブレット係数、 $C''$  は圧縮済画像のウェーブレット係数、 $A1, A2$  はそれぞれ  $A1 = C' - C$ ,  $A2 = C'' - C$  である。

$$\text{検出可} \begin{cases} A1(i, j) = m \quad \text{and} \quad A2(i, j) > 0 \\ A1(i, j) = -m \quad \text{and} \quad A2(i, j) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{検出不可} \begin{cases} A1(i, j) = m \quad \text{and} \quad A2(i, j) \leq 0 \\ A1(i, j) = -m \quad \text{and} \quad A2(i, j) \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$PSNR < 40$ [dB] になると、埋込済画像の画質が顕著に劣化してしまうため、最低でも  $PSNR > 40$ [dB] となるような埋込強度を選択する必要がある。ここで、原画像の画素値とウェーブレット係数を  $X, C$ 、埋込済画像の画素値とウェーブレット係数を  $X', C'$  とすると、 $C' = C + m$  であり、 $X'$  は  $C'$  を逆ウェーブレット変換したものとなる。 $C' = C + m$  であることから  $X' \neq X$  であり、 $m$  の値が大きくなるほど  $X'$  の変化量は大きくなる。 $m$  の値を大きくすると、(10) 式より  $MSE$  の値は大きくなり、(9) 式より  $PSNR$  の値は小さくなる。これより、 $PSNR > 40$ [dB] を満たすような  $m$  を計算することで、埋込強度の最大値  $m_{max}$  が算出できる。

検出率が低いと、埋込情報を正確に取り出せなくなるが、JPEG 圧縮による多少の誤りを許容しても検出率が 90 % 以上となることを本論文における検出率の条件とする。ここで、圧縮済画像の画素値とウェーブレット係数を  $X'', C''$  とすると、JPEG 圧縮によって  $X' \neq X''$  となり、 $X', X''$  をそれぞれウェーブレット変換して得られる  $C', C''$  の関係も  $C' \neq C''$  となる。このとき、埋込位置によっては (13) 式の検出不可条件を満たしてしまうのだが、埋込強度  $m$  の値を大きくするほど (13) 式を満たさない埋込位置が増加する、つまり埋め込んだ情報を正確に検出できるようになる。これより、検出率が 90 % 以上を満たすような  $m$  を計算することで、埋込強度の最小値  $m_{min}$  が得られる。

最後に (iv) で情報を埋め込むのだが、埋込強度の値のとり得る範囲は  $m_{min} \leq m \leq m_{max}$  である。ここで、埋込強度  $m$  を  $m = (m_{min} + m_{max})/2$  として情報を埋め込む。埋込は以下のようなウェーブレット係数の変更により行う。

$$C' = \begin{cases} C + m & (W(k) = 1) \\ C - m & (W(k) = 0) \end{cases} \quad (14)$$

以上の埋込手順をまとめたものを次頁の表 1 に示す。

表 1 埋込手順のまとめ

手順	
(i)	埋込可能ブロック数 $a$ の計算 低周波数帯域における埋込可能ブロック数を埋込ブロック検出アルゴリズムの STEP1 によって計算
(ii)	埋込領域の選択 (埋込データ数: $b$ ) $a \geq b \Rightarrow$ 低周波数帯域へ埋込 $a < b \Rightarrow$ 中間周波数帯域へ埋込
(iii)	埋込強度 $m$ の選択 画質評価量: $PSNR > 40$ [dB] を満たす $m$ の最大値 $\Rightarrow m_{max}$ 耐性評価量: 検出率 $> 90$ [%] を満たす $m$ の最小値 $\Rightarrow m_{min}$
(iv)	透かしの埋込 $m = (m_{min} + m_{max})/2$ として埋込を行う $C' = \begin{cases} C + m & (W(k) = 1) \\ C - m & (W(k) = 0) \end{cases}$

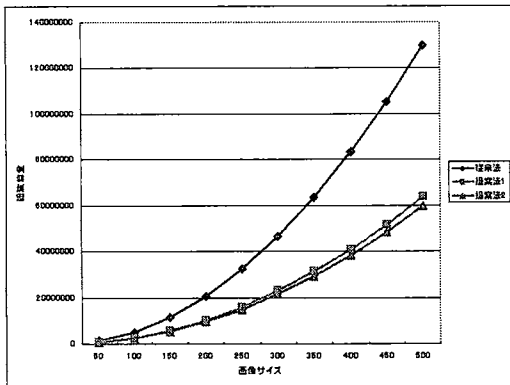


図 4 演算量の比較 ( $N$  固定)

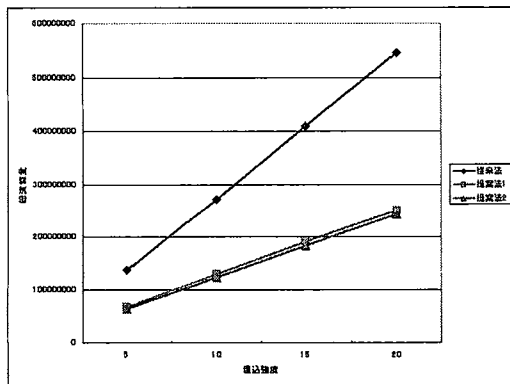


図 5 演算量の比較 ( $M$  固定)

### 3.2 演算量の比較

画像のサイズを  $M \times M$ , 埋込強度の選択数を  $N$  とすると, 従来法の演算量は以下ようになる.

$$(104M^2 + 12)N \quad (15)$$

提案法は画像によって埋込領域が異なるので, 中間周波数帯域に埋め込む場合と低周波数帯域に埋め込む場合の 2 通りの演算量を以下に示す.

$$\text{中間周波数帯域} \quad \frac{41}{2}M^2 + (47M^2 + 6)N \quad (16)$$

$$\text{低周波数帯域} \quad 10M^2 + (46M^2 + 6)N \quad (17)$$

式 (15)~(17) を比較した図を図 4, 5 に示す. 図中の提案法 1 は中間周波数帯域, 提案法 2 は低周波数帯域へ埋め込む場合の演算量を表している.

図 4 は埋込強度を  $N = 5$  に固定したときの画像サイズと演算量の関係を表している. 図 5 は画像サイズを  $M = 512$  に固定したときの埋込強度と演算量の関係を表している. 両図から, 提案法において中間周波数帯域, 低周波数帯域のどちらに埋め込んだ場合においても, 従来法に比べ演算量は約半分にて軽減できていることが分かる.

## 4. むすび

本論文では, 透かし情報の埋込前に, 埋込ブロック検出アルゴリズムの STEP1 から最適な埋込領域を選択し, 画質と耐性の評価量を用いて原画像と埋め込み情報に応じて最適な埋込強度を決定する埋込アルゴリズムを提案した. これにより, 1 回の出力で画質と耐性のバランスがとれた埋込済画像を得ることができ, 従来法に比べ約半分の演算量で全ての処理が行える.

本論文では埋込強度  $m$  の最適値を  $m = (m_{min} + m_{max})/2$  としたが, 画質と耐性の条件である  $PSNR > 40$  [dB], 検出率  $> 90$  [%] を満たす埋込強度の範囲  $m_{min} \leq m \leq m_{max}$  における埋込強度の選択基準については, 検討の余地があると考えられる.

## 文 献

- [1] 画像電子学会 編, 小松尚久, 田中賢一 監修, “電子透かし技術 デジタルコンテンツのセキュリティ,” 東京電機大学出版局, 2004.
- [2] H.Inoue, A.Miyazaki, A.Yamamoto, T.Katsura, “A Digital Watermark Based on the Wavelet Transform and its Robustness on Image Compression,” IEEE ICIP'98, Vol.2, pp.391-395, 1998.
- [3] 小川 裕一, 尾川 浩一, “ウェーブレット変換を用いた画像の電子透かし法の提案,” 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J88-D-II, No.1, pp.142-147, 2005.
- [4] 大江 孝輔, 榎安 実治, “雑音マスキング効果を利用した電子透かし手法,” 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J88-A, No.10, pp1137-1145, 2005.