

## ウェーブレット変換を用いた画像圧縮耐性を有する電子透かし埋め込み位置決定問題

京都府立大学大学院  
01704426 京都府立大学井上大輔 INOUE Daisuke  
\*吉富康成 YOSHITOMI Yasunari

## 1. 緒言

デジタル画像の著作権保護のため電子透かし技術[1]が注目されている。電子透かしには、「埋め込みによる品質劣化が少ない」、「埋め込まれた情報を容易に除去できない」、「加工されても埋め込まれた情報が残る」という3点が要求される。

そこで本研究では、典型的な加工として、Joint Photographic Experts Group 圧縮法(JPEG)を取り上げた。そして、静止画像のウェーブレット展開係数の配列において、最も大きな JPEG 圧縮耐性を有する電子透かしの埋め込み位置を決定する最適化問題を作成し、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いてその近似最適解を求めた。

## 2. ウェーブレット変換[2]

2次元信号のウェーブレット展開係数を求める方法では、まず、画像信号の横軸(u)方向に一次元直交ウェーブレット変換を行い、展開係数を求める。次にその展開係数に対して縦軸(v)方向のウェーブレット展開係数を求める。原画像  $F(u, v)$  をレベル0の展開係数  $s_{u,v}^{(0)}$  とみなし(1)式によりレベル  $j+1$  の4種類の展開係数を求める。

$$\begin{aligned} s_{u,v}^{(j+1)} &= \sum_l \sum_k \frac{p_{k-2u} p_{l-2v}}{p_{k-2u} q_{l-2v}} s_{k,l}^{(j)} \\ w_{u,v}^{(j+1,h)} &= \sum_l \sum_k \frac{p_{k-2u} q_{l-2v}}{p_{k-2u} q_{l-2v}} s_{k,l}^{(j)} \\ w_{u,v}^{(j+1,v)} &= \sum_l \sum_k \frac{q_{k-2u} p_{l-2v}}{q_{k-2u} p_{l-2v}} s_{k,l}^{(j)} \\ w_{u,v}^{(j+1,d)} &= \sum_l \sum_k \frac{q_{k-2u} q_{l-2v}}{q_{k-2u} q_{l-2v}} s_{k,l}^{(j)} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $p_k$  はスケーリング関数の数列、 $q_k$  はウェーブレットの数列を表す。 $w_{u,v}^{(j+1,h)}$  は横軸方向にスケーリング関数、縦軸方向にウェーブレットを作用させた展開係数を示す。 $w_{u,v}^{(j+1,v)}$  は横軸方向にウェーブレット、縦軸方向にスケーリング関数を作用させた展開係数を示し、 $w_{u,v}^{(j+1,d)}$  は縦方向、横方向にウェーブレットを作用させた展開係数を示す。(1)式を繰り返し用いて  $j=0$  から最高レベル  $j=J-1$  までの展開係数を求める。ウェーブレット変換によって画像は図1のように分解される(L:低周波成分、H:高周波成分)。順次、 $j$  LL の部分のウェーブレット展開係数がウェーブレット変換される。

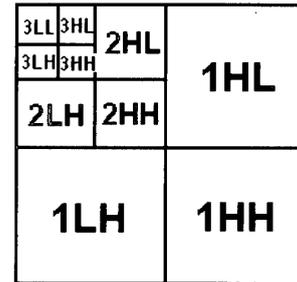


図1 Mallat 分割

## 3. 対象とする問題の定式化

JPEG 画像(JPEG 圧縮後に復号した画像)における電子透かし検出率  $d(x, y)$  に制約を課し、JPEG 圧縮および電子透かし埋め込みで生じる誤差  $e(x, y)$  を目的関数とし、目的関数を最小化する最適化問題(P)を下記のように定式化した。

$$P \text{ Minimize } e(x, y) \quad (2)$$

$$\text{Subject to } d(x, y) \geq a \quad (3)$$

$$e(x, y) = e_R(x, y) + e_G(x, y) + e_B(x, y) \quad (4)$$

$$e_l(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 \{f_{l,k}(i, j) - f_{l,k}^*(x, y, i, j)\}^2}{64m} \quad (5)$$

$$l = R, G, B$$

ここで、原画像のRGB成分を  $Y, C_r, C_b$  成分に変換し、Y成分の画像に対してウェーブレット変換を施し、その展開係数を図1のように配置された配列要素とした場合の2次元の要素番号を  $x, y$  (整数)とした(図1の左上の隅が  $x=0, y=0$  で、右方向、下方向が各々  $x, y$  の増加する方向)。そして、指定された展開係数から同一の展開係数領域(例えば、1LH)内でラスタースキャンの方向に順次電子透かしを導入した後、 $C_r, C_b$  成分の画像とウェーブレット逆変換して得られるY成分の画像をRGB成分画像に変換した。しかる後画像圧縮を施した。画像圧縮の手法としては、JPEGで使われている離散コサイン変換(DCT)符号化[3]を用いている。 $f_{l,k}, f_{l,k}^*$  は各々  $k$  番目のブロックの  $l$  ( $l = R, G, B$ ) 成分の原画における部分画像およびJPEG画像における部分画像である。 $m$  はブロック数で、 $a$  は定数である。電子透かしの検出は、JPEG圧縮後、復号して行った。

#### 4. GAにおけるコード化

GAにおける遺伝子を0,1で表現し、上位2ビットでそのレベルでの展開係数の配列領域番号 $n$ (例えば、 $n=0$ は1LHを示す)を表し、下位ビットの前半と後半でその領域内での透かし埋め込み開始位置の2次元配列の要素番号 $x_n, y_n$ (整数)(左上の隅

が $x_n=0, y_n=0$ で、右方向、下方向が各々 $x_n, y_n$ の増加する

方向)を各々2進数で表した。最も低い周波数領域である $(J-1)$ LL部分に透かし情報を埋め込むと画像に埋め込みの形跡が出やすいと考えられるので、その領域を埋め込み対象から除外した。このため、各レベルでの埋め込み対象の配列領域は3つとなる(図1)。また、配列領域の縦横の各大きさが2のべき乗と一致するとは限らない。この2つの理由で、埋め込み対象としないかまたは実存しない展開係数を個体が表現する場合は起こる。その場合は、致死遺伝子として取り扱う。

#### 5. 実験

実験環境として、Dell Optiplex GX260(CPU:Pentium IV 2.5GHz,メモリ:512M)、OSにWindowsXP、開発言語としてVisual C++6.0を使用した。

新情報処理開発機構の「画像データベース1999」、「標準用画像データベース(SIDBA)」から静止画像を取得し、 $480 \times 480$ (画素)の24ビットカラーBMP形式に変更した。埋め込む透かし情報としては $20 \times 20$ (画素)のモノクロBMP画像を用いた。そして、ウェーブレット変換をレベル3まで施した。この実験では、レベル1に対しての個体の遺伝子は18ビット、レベル2では16ビット、レベル3では14ビットとなった。下位ビット長は画像サイズで決まる。

自然画像にドベシのウェーブレット変換を施し、その多重解像度表現(MRR)部のウェーブレット展開係数のヒストグラムをとると0を中心とする分布になる[4]。本研究ではその現象を利用した電子透かし法[4]を用いた。

GAの条件として、世代数40、個体数300、ルーレット戦略、2点交叉(交叉率0.6)、1点突然変異(突然変異率0.1)を用いた。また、JPEG圧縮における量子化定数を0.5とした。制約条件は透かし検出率が93%以上( $a=0.93$ )、適応度には埋め込み後の画像の平均2乗誤差(4式)の逆数を用いた。計算は、レベル3から行い、ランダムに初期個体を300個体生成した時点で制約条件(2式)を満たすものが1個もない場合はGA処理を行わない。また、各レベルでの処理において、近似最適解が10世代更新されなければ、収束したとしてそのレベルでの計算を終了した。画像girl(図2a)を用いた場合の実験結果を図3,4に示す(実験で得られた埋め込み開始位置は、3LH領域、 $x_7=34, y_7=12$ 、検出率:99.0%、処理時間:1時間8分16秒)。ランダムに埋め込み位置を決めたもの(図3の丸)と比較して、本法(図3の四角)は高検出率と低い2乗誤差の両立という点で優れている(図3)。また図4に、埋め込み済みの画像について「量子化定数を変化さ

せる」、「adobe photoshop を用いてさまざまな圧縮率で圧縮を行う」という2つの条件での圧縮率と検出率の関係を示す。



(a)埋め込み前画像

(c)埋め込み後画像



(b)透かし画像



(d)検出された透かし画像

図2 電子透かし埋め込み例

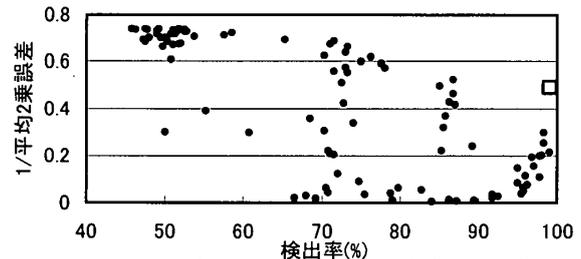


図3 ランダムに埋め込み位置を決定した場合 (●)と本法(□)との比較

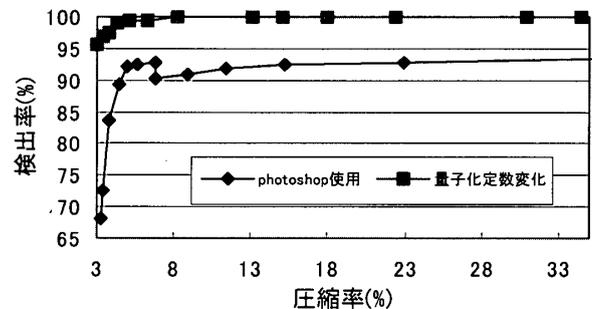


図4 圧縮率と検出率の関係

#### 6. 結言

画像のウェーブレット展開係数の配列において透かし情報埋め込み開始位置を決定するという最適化問題を作成し、GAを用いて近似最適解を求めた。本法により、画像ごとに最適に近い埋め込み位置を決定することができる。また、得られた近似最適解は透かし情報抽出の際の秘密鍵として用いることができる。

#### 参考文献

- [1] 松井甲子雄, 電子透かしの基礎, 森北出版, 1998.
- [2] 中野宏毅, 山本鎮男, 吉田靖夫, ウェーブレットによる信号処理と画像処理, 共立出版, pp.64-160, 1999.
- [3] 八木伸行, 井上誠喜, 林正樹, 奥井誠人, 合志誠一, C言語で学ぶ実践デジタル映像処理, オーム社, 1995.
- [4] 篠政義, 崔潤基, 相澤清晴, “ウェーブレット係数の可変閾値判定に基づく電子透かし法”, 信学技報 DSP2000-86, Vol.100, No.327, pp.29-34, 2000, Sept..