

秘密鍵を用いた画像圧縮耐性を有する電子透かし埋め込み法の開発¹

井上大輔²

京都府立大学大学院人間環境科学研究科⁴

吉富康成³

京都府立大学大学院人間環境学部⁵

1. 緒言

現在、静止画像に対する電子透かし手法についての研究は多数行われているが、その埋め込み位置について議論されたことは少ないのが現状である。我々はこの点に着目し、電子透かし埋め込み位置の最適化について研究を行っている[1]。

今回、埋め込み位置を決定する多目的最適化問題を作成し、更に画像特有の秘密鍵を用いて埋め込み・検出を行うことでセキュリティの向上を図った。なお、近似最適解は遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて求めた。

2. ウェーブレット変換

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(w)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(1a-d)式によりレベル $j+1$ の4種類の展開係数を求める。

$$s_{u,v}^{(j+1)} = \sum_l \sum_k \frac{p_{k-2u} p_{l-2v}}{q_{k-2u} q_{l-2v}} s_{k,l}^{(j)} \quad (1a)$$

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

$$w_{u,v}^{(j+1,v)} = \sum_l \sum_k \frac{q_{k-2u} p_{l-2v}}{q_{k-2u} q_{l-2v}} s_{k,l}^{(j)} \quad (1c)$$

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

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。

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 $e(x,y)$ と検出率 $d(x,y)$ を目的関数と

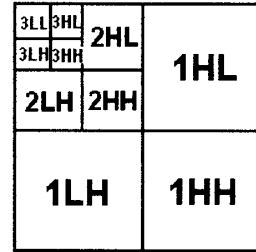


図1 Mallat 分割

した多目的最適化問題(P)を下記のように定式化した。

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

$$\text{Maximize } d(x,y) \quad (3)$$

$$\text{Subject to } d(x,y) \geq a \quad (4)$$

$$e(x,y) = e_R(x,y) + e_G(x,y) + e_B(x,y) \quad (5)$$

$$e_l = \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 \{f_{l,k}(i,j) - f_{l,k}^*(x,y,i,j)\}^2}{64m} \quad (6)$$

$l = R, G, B$

ここで、原画像のRGB成分を $YCbCr$ 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群の範囲(例えば、3LH)内で5章記載の秘密鍵で決まる電子透かし埋め込み位置に対して、埋め込み開始位置が (x,y) になるよう、全部の埋め込み位置をラスタースキャンの方向にずらして順次電子透かしを導入した後、 $CrCb$ 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)符号化を用いる。 $f_{l,k}, f_{l,k}^*$ 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 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

1: A method for embedding electronic watermark using secret key for reducing influence of picture compression
 2:Daisuke Inoue, 3: Yasunari Yoshitomi
 4: Graduate School of Human Environment Science, Kyoto Prefectural University
 5: Faculty of Human Environment, Kyoto Prefectural University

も低い周波数成分である $(J-1)LL$ 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、各レベルでの展開係数の配列領域の種類は3となる(図1)。この理由で、1/4の割合で埋め込み対象としない領域を個体が表現する場合が起こる。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 Dimension8400(CPU:Pentium IV 3.4GHz,メモリ:2GB)、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」、「標準画像データベース(SIDBA)」から画像(mandrill,lenna,aerial,earth,couple)計5枚を取得し、512×512(画素)の24ビットカラー-BMP形式に変換した。埋め込む透かし情報としては20×20(画素)のモノクロBMP画像を用いた。この実験では、ドブシのウェーブレット変換を透かしの耐性と画質を考慮してレベル3まで施し、このうちの最も低い周波数成分となる3HL、3LH、3HHの3領域に対して近似最適解の探索を行った。下位ビット長は画像サイズで決まるため、遺伝子長は14ビットとなる。自然画像に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[2]。本研究ではその現象を利用した電子透かし法[2]を用いた。

また秘密鍵には画像ごとに、レベル3の領域の大きさに相当する0~4096の範囲内で400個の乱数を発生させたものを各1個用意し、GAの個体表現で決まる位置のずらしを行った後、その数字に対応する位置で乱数の発生順序に従って透かしの埋め込み・検出を行うこととした。

GAの条件として、世代数20、個体数50、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圧縮におけるクオリティを90とした(JPEG圧縮にはIndependent JPEG Group's softwareのオープンソースを用いた[3])。制約条件は透かし検出率が90%以上($a=90$)、適応度には $(d(x,y)-a+1)/e(x,y)$ を用いた。

画像mandrill(図2a)を用いた場合の実験結果例を示す(実験で得られた埋め込み開始位置は、3LH領域、 $x_1=4, y_1=8$ 、検出率97.25%)。ランダムに埋め込み開始位置を決めた場合(◆)と本法によって求められた近似最適解(□)での埋め込みを行い比較した結果、本法により、検出率と画質が両立する良好な結果が得られることがわかった(図3)。また図4では、本法と最適化を試みない場合として3HL領域の左上隅を埋め込み開始位置とした(埋め込み開始位置をずらさない)場合での埋め込みを比較し最適化の効果を確認した。また、透かし埋め込み後、一般に用いられるTIFF(Tagged Image File Format)、PNG(Portable Network Graphics)形式へ変換(Jasc Paint Shop Pro 使用)した画像からも透かしの検出を行った。これらのファイル形式で100%電子透かしが検出できた。またJPEG2000による圧縮も行い良好な結果が出ることを確認した。

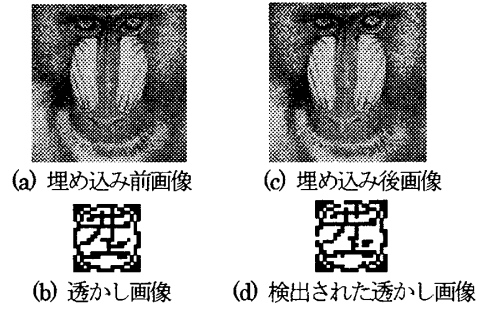


図2 電子透かし埋め込み例

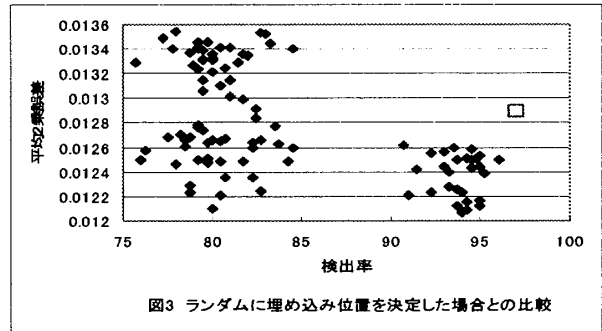


図3 ランダムに埋め込み位置を決定した場合との比較

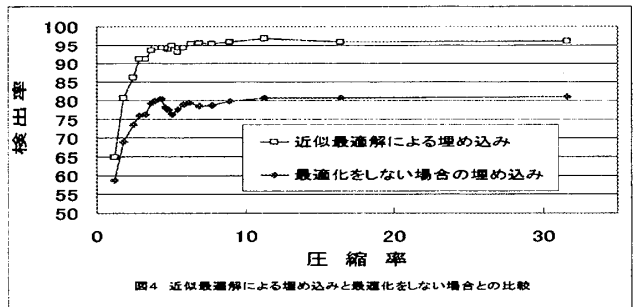


図4 近似最適解による埋め込みと最適化をしない場合との比較

画像 mandrill 以外の4枚の画像についても、検出率と誤差の関係で良好な特性が得られた。4枚の平均検出率は95.63%であった。また5枚の画像の近似最適解探索にかかる平均処理時間は4分24秒/枚(JPEG圧縮18.9%、ウェーブレット変換55.2%、その他25.9%)であった。

なお、ランダムに秘密鍵を多数発生させ、埋め込み開始位置をずらさない方法より本法のほうが高検出率と低い2乗誤差の両立の点で優れていることも確認した。

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多目的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、近似最適解として求められた埋め込み位置情報だけでなく、画像特有の秘密鍵を所有していなければ埋め込み・検出を行うことができず、セキュリティの点でも性能向上することができた。

参考文献

[1] 井上大輔, 吉富康成, “ウェーブレット変換と遺伝的アルゴリズムを用いた画像圧縮耐性を有する電子透かし法の開発”, FIT2004 情報技術レターズ, pp.287-288, 2004, Sept.
 [2] 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.
 [3] ftp://ftp.uu.net/graphics/jpeg/