

論 文

特異値分解 (SVD) と Haar 変換を用いたクロッピング耐性の高い
電子透かし手法

杉山 正晴[†] 後藤 宗弘^{††} コバチ シルベスタ^{†††}
松本 忠博^{††} 直井 徹^{††}

A Cropping-Robust Watermarking Method Based on Singular Value Decomposition and Haar Transformation

Masaharu SUGIYAMA[†], Munehiro GOTO^{††}, Szilveszter KOVACS^{†††},
Tadahiro MATSUMOTO^{††}, and Tohru NAOI^{††}

あらまし 本論文では、ホスト画像には Haar 変換を、透かし画像には特異値分解 (SVD) を適用した新しい電子透かし手法を提案する。本手法においては、まず透かし画像を特異値分解し、大きな特異値に対応する行列の要素のみを埋め込むことにより、ホスト画像に対する負荷を軽減する。また、ホスト画像に Haar 変換を適用し、その低周波成分に透かし情報を埋め込み、各種攻撃に対する耐性を高めた。更に、埋め込む際に重要な透かし情報をホスト画像の中心に集めることにより、クロッピングに耐性をもたせた。これらの工夫により、提案手法はホスト画像と同程度までの画素数の透かし画像を無理なく埋め込むことが可能で、かつ、クロッピング等に対する耐性が高いことを実験的に示した。

キーワード 電子透かし, 特異値分解, Haar 変換, wavelet 変換, クロッピング

1. ま え が き

デジタル画像の著作権保護のために電子透かし技術が利用され、多くの透かし挿入法が提案されている [1]~[6]。筆者らは、先に SVD (特異値分解) 法を用いて、静止画像に電子透かしを挿入する手法を提案した [7]。その方法では、ホスト画像の輝度値を一つの大きな $m \times n$ 行列 A と考え、 A の特異値による対角行列 D を用いて、 A を $A = UDV^T$ の形に SVD 分解し、それらの中の一つの正規直交行列 U に透かし情報を埋め込んでいる。この挿入法では、

(1) 透かし情報をできる限りホスト画像全体に拡散させ、ホスト画像の劣化を防止する、

(2) この拡散により、透かし情報の埋込み場所の特定を困難にする、

ことを目指した。提案された方法では、結果的に透かし画像 (情報) をホスト画像の行方向へ分散させているので、ある一定の環境の下では上記の条件を満たす透かし埋込み法であった。

しかし、透かし情報を行方向に分散させることは、クロッピングにより透かし情報も確実に失われることを意味しており、脆弱であるといえる。一方ホスト画像及び透かし画像に Haar 変換を適用してある程度クロッピング耐性を高める電子透かし手法も提案されている [4] が、透かし画像のサイズが制限されていることなどに注目すれば、なお改良の余地が残されている。そこで本論文では、透かし画像をあらかじめ SVD 法により分解し、その重要度を求めておき、それを Haar 変換されたホスト画像の低周波成分へ挿入する方法により、透かし攻撃に対する耐性を高めることを試みた。そして、各種攻撃特にクロッピングに対しては、提案法がかなり強い耐性をもつことを実験的に確認した。

以下に透かし挿入法と各種攻撃に対する耐性確認実験結果を報告する。なお、SVD 分解、Haar 変換につ

[†] 岐阜県生産情報技術研究所, 各務原市

Gifu Prefectural Research Institute of Manufacturing Information Technology, 4-179-19 Sue-cho, Kakamigahara-shi, 509-0108 Japan

^{††} 岐阜大学応用情報学科, 岐阜市

Department of Computer Science, Gifu Univ., 1-1 Yanagido, Gifu-shi, 501-1112 Japan

^{†††} ミシュコルク大学情報技術学部, ハンガリー

Department of Information Technology, University of Miskolc, Miskolc-Egyetemvaros, Miskolc H-3515, Hungary

いては、他の文献 [8], [9] にも詳しいので、その記述は本論文のアルゴリズム記述に必要な部分の紹介にとどめた。

2. SVD と Haar 変換

透かし挿入に利用される SVD と Haar 変換とそれらの特徴について述べる。

2.1 SVD

$m \times n (m \leq n)$ 行列 $A = [a_{i,j}]$ の SVD は、対称行列 AA^T の固有値 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ から特異値 $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$ を用いて、 A を次の形に分解することである。

$$A = UDV^T \quad (1)$$

ただし、 D は対角要素を大きさの順に並べ換えた σ_i と、その他の要素はすべて 0 の対角行列であり、 $U = [u_{i,j}], V = [v_{i,j}]$ はそれぞれ $m \times m, n \times n$ の正規直交行列である。したがって

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_m \geq 0 \quad (2)$$

ただし、 A の階数が r のとき、 $\sigma_{r+1} = \sigma_{r+2} = \dots = \sigma_m = 0$ であり、

$$1 \geq |u_{i,j}|, |v_{i,j}| \geq 0 \quad (3)$$

である。

A を画像ピクセルの輝度値からなる行列とすれば、式 (1) の分解後 U, V の列ベクトル u_i, v_i を用いて原画像は

$$A = \sum_{i=1}^r \sigma_i u_i v_i^T \quad (4)$$

により正確に復元することができる。

σ_i は大きさの順に並べてあるので、 $c (\leq r)$ 個の特異値を用いて画像 A の近似画像 \hat{A} を次式により求めることが可能である。

$$\hat{A} = \sum_{i=1}^c \sigma_i u_i v_i^T \quad (5)$$

原画像は $m \times n$ 個のピクセル値で表現されるが、分解後は $(m+n+1)r$ 個の行列要素値で A が表現できる。 A が人工的な画像の場合には、階数 r が小さくなり、更に微小な σ_i を省略することにより、より少ない $c (\leq r)$ 個の特異値を用いた $(m+n+1)c$ 個の要

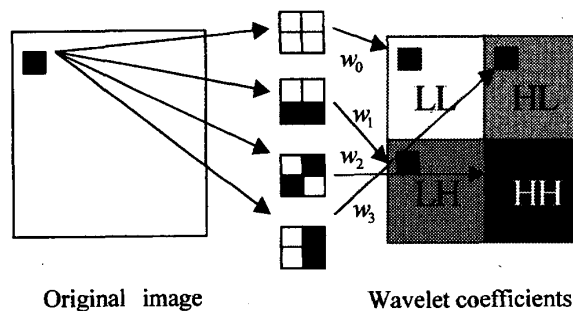


図1 2次元画像の Haar 変換
Fig. 1 Haar transformation of 2-D image.

素値で A が高い精度で復元あるいは近似できる。要素値 u_i, v_i, σ_i の表現精度にもよるが、これによって画像の圧縮も可能であることに注意する。

2.2 Haar 変換

本論文では図1のように、ホスト画像中の隣り合った4個のピクセル値 I_0, I_1, I_2, I_3 に対して式 (6) の Haar 変換を施す。

$$\begin{bmatrix} w_0 \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

この変換によって原画像の1/4のサイズの4種の画像 LL, LH, HL, HH が得られる (図1 参照)。また、逆 Haar 変換は同一の変換行列を用いて行われる。

LL 成分は原画像の低周波成分で多重解像度近似 (MRA: Multi Resolutional Approximation) といわれる。この成分は画像全体の情報を最も多く含んでいるので、この成分に透かしを挿入することは各種攻撃に強いが、ホスト画像の品質を大きく落とすことにもなる。

3. 電子透かしの埋込み手順

3.1 埋込み場所

本論文の透かし埋込み手法では、ホスト画像の LL 成分に透かし情報を埋め込むため、LL 成分で構成される画像に視覚的に大きなひずみを与えないようにする必要がある。文献 [11] ではモノクロ画像の評価指標として PEL を提案しており、その中でヒトのエッジ強調機能、ランダム性によるマスキング効果などを考慮した各画素のしきい値 $T(x, y)$ を定義している。しきい値 $T(x, y)$ は場所 (x, y) における各画素の輝度値を透かしなどで変更する場合の目立ちにくさを表して

おり、この値が大きな場所に透かし情報を埋め込むことで、目立ちにくい透かしの埋込みが可能になる。そこで本論文では、しきい値 $T(x, y)$ を透かし埋込みのガイドラインとして用いることにする。なお、このようなガイドラインを用いないでランダムに埋め込むことも可能であるし、文献 [6] で定義している 1 次元最小偏差 S_i を用いてもよい。

提案手法では、透かし画像情報の画素数が k 個の場合、LL 画像中の $T(x, y)$ が大きい k 個の画素の場所 (x, y) へ透かし情報を挿入することにする。したがって、各画素について $T(x, y)$ を調べ、大きさを k 番目の $T(x, y)$ の値を T_k とする。なお、PEL と $T(x, y)$ の定義、計算法については、一般になじみがないと思われるので、付録にまとめて示した [10], [11]。

3.2 埋込み情報とスケールパラメータ

原画像の輝度値は 8 ビットで $[0, 255]$ の整数を想定しており、LL 画像の輝度値も $[0, 255]$ の整数値である。しかし、SVD 分解されて得られる透かし情報は σ_i を除き $[-1, 1]$ の範囲の実数値である。そこで新たに、

$$E = [e_i] = [\sigma_i / \sigma_1] \quad (7)$$

として、 σ_1 を別に記憶することによって、透かし情報はすべて $[-1, 1]$ の範囲の値となる。しかしこれらの $U = [u_i]$, $E = [e_i]$, $V = [v_i]$ の値を整数の輝度値に直接加算しても多くの場合輝度変化を起こさないで、適当なスケールパラメータ α をあらかじめ与えて、挿入情報の α 倍を輝度値に加えることにする。したがって透かし情報を

$$W = [w_i] \\ = [u_1, e_1, v_1^T, u_2, e_2, v_2^T, \dots, u_c, e_c, v_c^T] \quad (8)$$

として、 e_i の大きさの順に α 倍して埋め込むことにする。一般に W の埋込場所はホスト画像のランダムに選ばれた場所であるが、文献 [13] によればクロッピング攻撃で失われる情報はホスト画像の端の方であるから、提案法では重要な透かし情報ほど中央に位置するように、 W を図 2 に示す渦巻き状に埋め込んだ。

3.3 埋込み手順

(a) 準備

ホスト画像 H , 透かし情報 $A(m \times n)$ を用意する。 H を Haar 変換し、その結果を H_0, H_1, H_2 及び H_3 とする。ただし、 $H_0 = [h_{x,y}^0]$ は LL 成分である。

A を SVD 分解して必要な特異値の個数 c を求める。

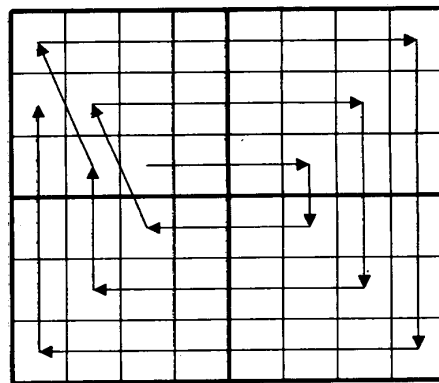


図 2 スキャンする順序 (6*8 画素の場合)

Fig. 2 The scanning order (the case of 6*8 pixels).

透かし情報

$$W = [w_i] \\ = [u_1, e_1, v_1^T, u_2, e_2, v_2^T, \dots, u_c, e_c, v_c^T] \quad (9)$$

を求める。 σ_1 は別に記憶する。

$$k = (m + n + 1)c \quad (10)$$

より k を求める。

LL 画像の $T(x, y)$ より、 T_k を求める。

(b) 埋込み

LL 画像を図 2 に従った順序でスキャンし、その輝度値 $h_{x,y}^0$ に w_i を次式に従って変更する。その場所の $T(x, y)$ がしきい値 T_k 以上の場合のみ透かし情報を埋め込む。すなわち、

$$h'_{x,y} = \begin{cases} h_{x,y}^0 + \alpha \times w_k & \text{if } T(x, y) \geq T_k \\ h_{x,y}^0 & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

(c) 透かし入り画像 B の作成

$H' = [h'_{x,y}]$, H^1, H^2, H^3 を用いて逆 Haar 変換して B を作成する。

3.4 透かし画像の抽出手順

透かし入り画像あるいはそれに何らかの攻撃が加えられた画像から透かしを求めるには、埋込みの逆の手順を踏む。

(1) 透かし入り画像 B を Haar 変換する。その LL 画像を H' とする。

(2) ホスト画像 H の Haar 変換の LL 画像を H^0 とする。

(3) H^0 から T_k を求め、式 (11) とは逆の計算を用いて H^0, H' から W を計算する。 W と σ_1 から U, D, V を計算し、透かし画像 $A = UDV^T$ を求める。



図3 実験に使用した画像
Fig. 3 Images used in this experiment.

4. 実験

4.1 画質の評価

透かし埋込み後の画質評価は一般に SNR が用いられているが、本論文ではよりヒトの感覚を考慮した評価をするために、PEL によって評価する。この指標は前述した $T(x, y)$ との比により定義されており [10], [11], 以下の性質をもつ。

(1) PEL 値は画像の内容（輝度値，ランダム性）に依存する。

(2) PEL 値が 0 dB 以上ならば，ヒトの視覚上，原画像との差は気づかれない。

参考のため，図3に本実験で使用する画像 [12] を，図4に画像 lenna に一様乱数を与えて劣化させた画像の SNR 及び PEL による評価値を示した。

4.2 c 値の検討

提案手法では，透かし画像情報，したがって透かし画像の質を決める c の値と，透かし入り画像の質とその攻撃に対する耐性とのトレードオフを決める α 値を前もって決定しておく必要がある。そして，いくつかの画像について c の値を PEL を用いて検討した。図5はアニメーションに近いもの，ランダムな部分が多いもの，中間的なものという特徴をもつイメージの実際の特異値の個数 r に対して，それを c 個に限定して復元されたそれぞれのイメージの PEL を，横軸 $c/r \times 100$ (%) で求めたものである。

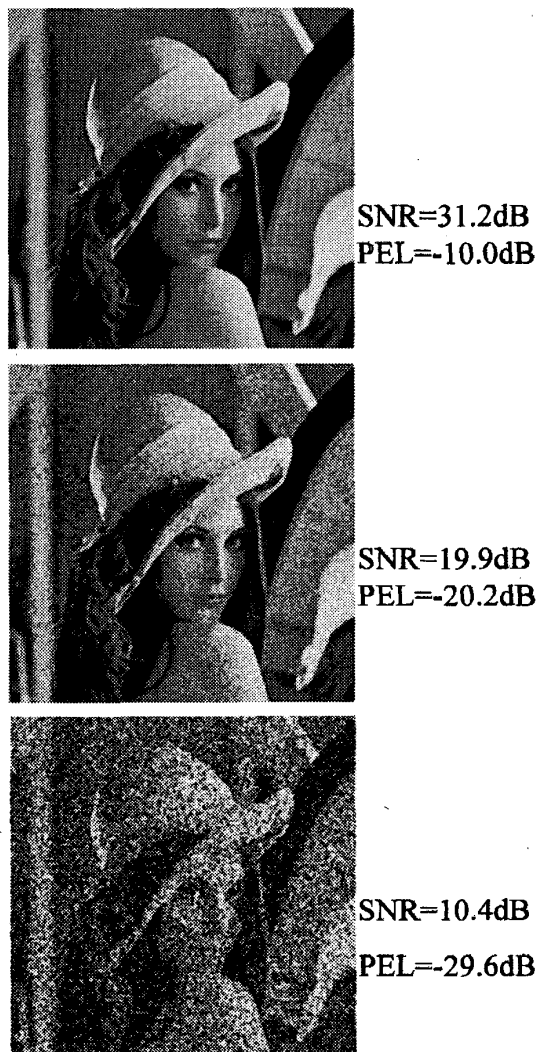


図4 PEL と SNR の比較
Fig. 4 The comparison of PEL and SNR.

ロゴマークに近いものでは，はじめの 30% 程度の特異値のみで十分良質な画像になるが，通常自然画像では，50~70% 程度必要である。図5よりテスト画像 a2 は最初の 70% 程度までの特異値を用いないと良質な画像が再構成できない。ここでは透かし画像として a2 を，ホスト画像として lenna を用いて以後の実験を行う。これは，Haar 変換の LL 成分に埋め込む場合，ホスト画像の 1/4 ピクセルまでのサイズの画像しか埋め込めないが，本手法によれば，このような大きなサイズの画像でも埋め込めることを示すため，及びこの画像を用いる場合が最も悪条件であるからである。したがって，以下の実験では，透かし画像として a2，特異値は最初の 20% を用いることとする。同時に参考として画像 a2 を面積で 20% に縮小した画像についても実験を行った。この場合画像 a2 の階数は $r = 168$ で

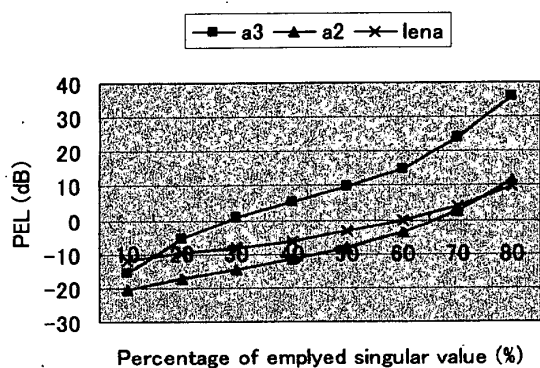


図5 特異値の数と画像品質

Fig. 5 The image quality and employed singular values.

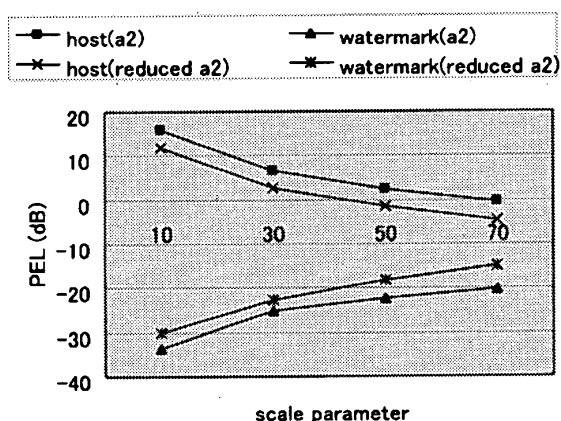


図6 スケールパラメータと画像品質

Fig. 6 The image quality and scale parameter.

ある。したがって特異値は最初の $c = 34$ 個を用いて実験を行った。

4.3 スケールパラメータ α の値の検討

スケールパラメータ α を 10~60 まで変化させて、ホスト画像と抽出された透かし画像の品質を見た。この結果を図6に示す。この過程で画質を悪化させる要因は、透かし画像を埋め込んだ後の量子化による情報のロスのみである。図6に示したとおり、スケールパラメータを大きくするほど、ホスト画像の品質は悪くなり、透かし画像は良くなるという、いわゆるトレードオフの関係にある。

PELによる評価では、0 dB以上が視覚上感知されないレベルであるので、実用的なスケールパラメータ α は原寸の a2 の場合で 50~70 程度、20%に縮小したもので 30~50 程度である。このとき、抽出された透かし画像は PEL で -20 dB (SNR で 21 dB) 程度である。このときのホスト、透かし画像の一例を図7に示す。なお、画像サイズにより最適なスケールパラ



図7 ホスト画像と透かし画像の一例

Fig. 7 The host image and extracted watermark image.

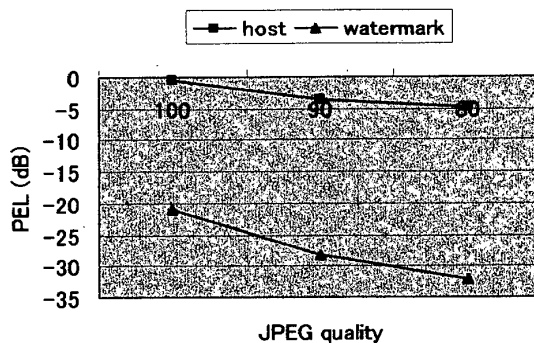


図8 JPEG 圧縮後のホスト、透かし画像の品質

Fig. 8 The image quality after JPEG compression.

メータ α が異なるのは、小さな画像ほどその画像行列を特異値変換したとき、行列 U, V の要素が広く分布しているためである。

4.4 JPEG 圧縮

前節の実験結果から、原寸の透かし画像に対してはスケールパラメータ α を 70 に固定して JPEG 圧縮に対する耐性を見た。この結果を図8に示す。この結果から JPEG 圧縮に対しては、quality=85~90 程度が限度であろうと推察される。

なお、本論文では原寸の透かし画像についてのみ実験結果を述べたが、20%に縮小した透かし画像では PEL で 1~2 dB 程度良い結果になることを付記する。

4.5 ビットプレーン削除

下位 1~3 ビットを削除したときの結果を図9に示

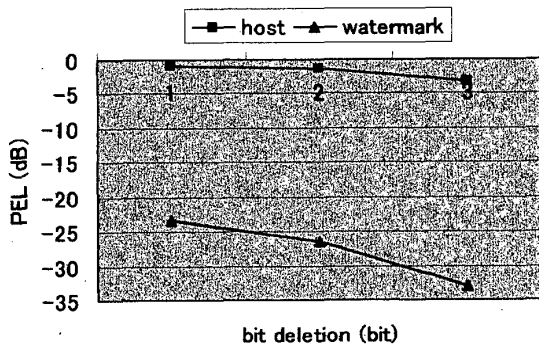


図9 ビットプレーン削除のホスト, 透かし画像の品質
Fig. 9 The image quality after deletion of low bits.

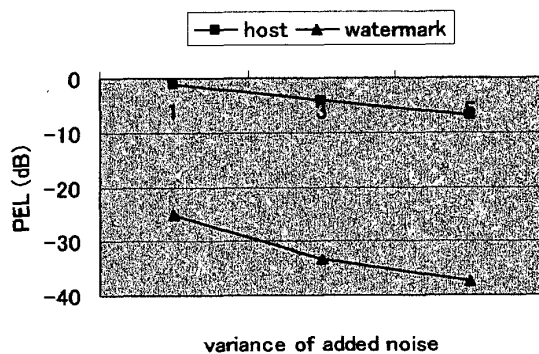


図10 ガウス雑音付加後のホスト, 透かし画像の品質
Fig. 10 The image quality after the addition of Gaussian noise.

す。この処理は低域フィルタや JPEG 圧縮と類似した処理であるため、実験結果も JPEG 圧縮と類似している。これによれば、3ビット目を削除したときに大きく画質が劣化しており、ここに透かし画像の情報が多く含まれていると考えられる。PEL 値から判断して3ビット削除した場合が著作権を主張する限界であろうかと考える。なお、ホスト画像の劣化は透かし画像と比較して少なく、 -3 dB 程度であった。

4.6 乱数の付加

透かしを入れた画像の全画素に乱数を加える攻撃を行った。正規乱数の分散を 1~5 まで変化させてホスト、透かし画像の品質を評価した。結果を図 10 に示す。これによれば、この種の攻撃に対しては、分散 3 までは耐えられると考えられる。

4.7 埋込み後ホスト画像の画素数の縮小

画像の流過程においては画像を縮小して用いることもある。ここでは、画像の縮小についての耐性を見た。透かしを埋め込んだホスト画像の画素数は 256×256 である。この画像を 243×243 から 198×198 まで 4 段階に縮小し、再びもとのサイズに戻した後、

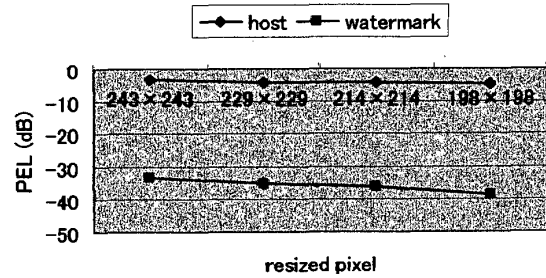


図11 ホスト画像の縮小と透かし画像の品質
Fig. 11 The image quality after the resizing of watermarked host image.

透かしを抽出して評価した。結果を図 11 に示す。これによればホスト画像に大きな画質の劣化は認められないが、透かし画像については、ホスト画像の画素数を 10% 縮小すると 2 dB 程度品質が落ちている。透かし画像の PEL が -30 dB 以下であるので、ホスト画像の画素数縮小に対しては大きな耐性はないと考える。

なお、ホスト画像の PEL は縮小後再び原画像と同じサイズに戻して計算した。

4.8 クロッピング

透かし画像は、画像の一部のみを切り取って使用するクロッピングに対しても耐性をもつ必要がある。電子透かしの耐性評価ベンチマークである Stirmark では透かしを埋め込んだ画像端からクロップする攻撃を採用している [13]。そこで本論文でも同様な攻撃を採用することにし、透かしを埋め込んだ画像の周囲をそれぞれ 10 行から 60 行まで除去し、透かしを抽出し、評価した。結果を図 12 に示す。本手法は前述したように、ホスト画像の中心ほど透かし画像の重要な情報 (大きな特異値に対するベクトル情報) が埋め込んであるため、大きな耐性を示している。実験においては、予備実験のところで述べたように、全体の 20% の特異値に関する情報のみが埋め込んであるため、抽出された透かし画像は -18 dB 以上にはなることがない。このような条件での実験であるにもかかわらず、各辺から 60 行を除去した後においても透かし画像の PEL は -24 dB 以上であった。JPEG 圧縮、乱数付加、ビットプレーン削除などの攻撃では PEL が -30 dB 以下になる場合が多いことから、これらの攻撃と比較するとクロッピングに対しては耐性が高いといえる。

4.9 複合攻撃

上記の実験においては、個別の攻撃に対する耐性について考察してきた。現実には不正使用に対する耐性を見るためにはいくつかの想定される攻撃を組み合

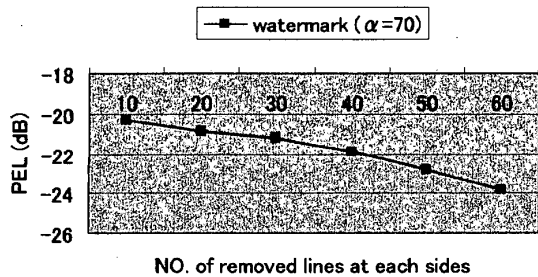


図 12 クロッピング後の透かし画像の品質。
Fig. 12. The image quality after the cropping.



SNR=8.7dB
PEL=-35.8dB

Size of watermark image : 222*176 pixels
Percentage of employed singular value : 20%
 $\alpha=70$, JPEG Quality=90, Bit deletion : 2
Variance of added noise : 1
Cropping : 20 lines at each sides

図 13 複合攻撃後の透かし画像の品質
Fig. 13 The image quality after the combined attacks.

わせて透かしの耐性を考慮する必要がある。そこで、常識的な攻撃として、JPEG 圧縮 (quality=90) した後、分散 1 の正規乱数を全画素に加え、下位 2 bit を削除し、最後に各辺から 20 行を削除した画像から、透かし画像を抽出した例を図 13 に示す。文献 [13] では、70 bit 以上の透かしを埋め込んだ画像に対してその耐性を見るのが望ましいとしているが、本実験でははるかに上回る画像情報を埋め込んでおり、極めて過酷な実験であるにもかかわらず、図に示したように、原透かし画像が推定できる画像が抽出されている。したがって画像を埋め込むタイプの電子透かし手法としてはかなり耐性が強いと考えられる。

5. むすび

Haar 変換と特異値分解を応用した新しい電子透かし手法を提案した。本手法は透かし画像を埋め込む前

に特異値分解を用いて前処理を行うもので、以下のような特徴を有する。

(1) 特異値分解による分解後の重要な行列要素のみを埋め込むことにより、大きな画素数の透かし画像の埋込みが可能である。

(2) Haar 変換後の LL 成分に透かし画像を埋め込むことで、各種画像処理に対する耐性がある。

(3) LL 成分に埋め込む際、ガイドラインとしてしきい値を適用することにより、画質劣化の少ない透かし埋込みが可能である。

(4) ホスト画像の中心部に大きな特異値に対応した情報を埋め込んであるため、クロッピングに対して耐性がある。

しかしながら、本手法はメジアンフィルタや画像の周辺部のみをクロッピングして使用するような攻撃に対してはなお脆弱である。今後これらに対する耐性を強化することが課題である。

また、同一情報を複数回埋め込むことにより、robust 性を求める方法もある。今後、このようなバリエーションも含めてより耐性のある手法に改良していく予定である。

謝辞 岐阜県生産情報技術研究所の Baranyi 博士には特異値分解について有益な助言を頂いた。また、本研究の一部は、内藤科学技術研究振興財団の支援を受けた。ここに記して深謝する。

文 献

- [1] 大西淳司, 小澤慎治, “多重解像度解析による署名検出可能な電子透かし法,” 信学論 (D-II), vol.J81-D-II, no.10, pp.2321-2329, Oct. 1998.
- [2] J.P.M.G. Linnartz and M. van Dijk, “Analysis of the sensitivity attack against electronic watermarks in images,” Lecture Note in Computer Science, Proc. Information Hiding, pp.258-272, Portland, Oregon, USA, April 1998.
- [3] 崔 潤基, 相澤清晴, “DCT 係数のブロック間相関を利用した電子透かし法,” 信学論 (D-II), vol.J83-D-II, no.7, pp.1620-1627, July 2000.
- [4] M. Sugiyama, M. Goto, T. Matsumoto, and T. Naoi, “A human perceptive based robust watermarking method against cropping,” Proc. 6th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia, pp.554-559, Gifu, Japan, Oct. 2000.
- [5] 酒井康行, 石塚裕一, 櫻井幸一, “著作権保護のためのウェーブレット変換を用いた電子透かし方式の安全性評価,” 情処学論, vol.38, no.12, pp.2640-2647, 1997.
- [6] 越前 功, 吉浦 裕, 安細康介, 田口純一, 黒須 豊, 佐々木良一, 手塚 悟, “輪郭保存に基づく電子透かしの画質維持方式,” 情処学論, vol.41, no.6, pp.1828-1839,

June 2000.

- [7] 杉山正晴, 後藤宗弘, パラーニ ピーター, 松本忠博, 直井 徹, “特異値分解 (SVD) を用いた電子透かし法,” (投稿中).
- [8] Y. Yam, P. Baranyi, and C.T. Yang, “Reduction of fuzzy rule base via singular value decomposition,” IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol.7, no.2, ISSN 1063-6706, pp.120-131, 1999.
- [9] P. Baranyi and Y. YamIngemar, “Fuzzy rule base reduction,” in Fuzzy IF-THEN Rules in Computational Intelligence: Theory and Application, ed. D. Ruan and E.E. Kerre, pp.135-160, Kluwer, 2000.
- [10] 杉山正晴, 後藤宗弘, “ヒトの感覚を考慮した画像評価指標,” 第22回情報理論とその応用シンポジウム, pp.609-612, 湯沢, Nov.30-Dec.3, 1999.
- [11] M. Sugiyama, M. Goto, and T. Matsumoto, “An improvement of the human perception based evaluation index for watermarked monochromatic images,” Proc. 2000 International Symposium on Information Theory and Its Applications, pp.822-825, Honolulu Hawaii, USA, Nov. 5-8, 2000.
- [12] <http://prop.tuwien.ac.at/Research/ImageDatabase/Imchar/./Query/index.html>
- [13] F.A.P. Peticolas and R.J. Anderson, “Evaluation of copyright marking systems,” Proc. IEEE Multimedia Systems'99, vol.1, pp.574-579, Florence, Italy, June 7-11 1999.

付 録

評価指標 PEL について

画像の場所 (x, y) における画素の輝度値を $D_{x,y}$ とするとき, 輝度値に由来するしきい値 $B(D_{x,y})$ は実験的に次式で求められる.

$$B(D_{x,y}) = 286 / (D_{x,y} + 8.5) - 0.0253 D_{x,y} + 6.49 \quad (\text{A.1})$$

一方, 周囲の輝度値変動が大きい場所ではマスクング効果が大きいことから, ランダムネスに由来するしきい値として $t(x, y)$ を以下のように定義した.

5×5ピクセルの領域を考え, その縦, 横及び斜め2方向に沿った輝度値の標準偏差 $LSD_{i,j}(x, y)$ を次式で定義する.

$$LSD_{i,j}(x, y) = \left(\frac{1}{5} \sum_{\alpha=-k}^k (D_{x+i\alpha, y+j\alpha} - m)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.2})$$

$$m = \frac{1}{5} \sum_{\alpha=-k}^k D_{x+i\alpha, y+j\alpha} \quad (\text{A.3})$$

ただし, パラメータ (i, j) は方向を表し, $(0, 1)$, $(1, 0)$, $(1, -1)$, 及び $(-1, 1)$ である. 場所 (x, y) におけるこれら4方向の標準偏差の最大値, 最小値をそれぞれ $LSD_{max}(x, y)$, $LSD_{min}(x, y)$ とし, その比 $r(x, y) = LSD_{min}(x, y) / LSD_{max}(x, y)$ が 0.34 以上であれば, 場所 (x, y) がランダムな領域, 未満であれば人工的な領域と判断している. そして, ランダムな領域では, そのランダム性に由来するしきい値として, 次式を定義した.

$$t(x, y) = \frac{\sum_{i=x-2}^{x+2} \sum_{j=y-2}^{y+2} |D_{i,j} - D_{x,y}|}{24} \quad (\text{A.4})$$

そして, 2種類のしきい値を用いて画像中の場所 (x, y) のしきい値は, 次式で定義される.

$$T(x, y) = \begin{cases} B(D_{x,y}) & \text{if } r(x, y) < 0.34 \\ \max(B(D_{x,y}), t(x, y)) & \text{if } r(x, y) \geq 0.34 \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

評価指標 PEL は, このしきい値を用いて以下のように定義される.

$$PEL = 20 \log(1/Z) \quad (\text{A.6})$$

$$Z = \left(\frac{1}{n_1 n_2} \sum_x \sum_y \left(\frac{P_{x,y} - P'_{x,y}}{T(x, y)} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.7})$$

ただし, n_1, n_2 は画像のサイズを, $'$ は透かし入り画像を表す. また, $P_{x,y}$ はヒトの視覚に見られるエッジ強調効果を評価値に盛り込むため, 輝度値の代わりに用いられるもので, 次式で表される.

$$P_{x,y} = D_{x,y} + 0.3(4D_{x-1,y} - D_{x+1,y} - D_{x,y-1} - D_{x,y} - D_{x,y+1}) \quad (\text{A.8})$$

透かし入り画像の $P'_{x,y}$ についても同様に計算される. このように PEL はヒトのエッジ強調効果, 輝度値, ランダム性に由来するしきい値を考慮した評価値である.

$T(x, y)$ に基づいて LL 成分の画素にひずみを与えた場合, LL 画像の PEL 値 PEL_{LL} と同じひずみを含んだ LL 画像を逆 Haar 変換して得られた画像 H の PEL 値 PEL_H の関係については次式

$$PEL_H = 0.969 PEL_{LL} + 2.85 \quad (\text{A.9})$$

論文/特異値分解 (SVD) と Haar 変換を用いたクロッピング耐性の高い電子透かし手法

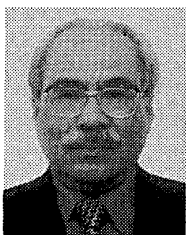
が得られており、極めて高い相関 (相関係数 = 0.99848) が見られる。したがって、LL 成分で良好な PEL 値を与える場所にひずみを与えれば、逆 Haar 変換後も視覚的に目立たない透かし画像が得られることが期待される。

(平成 13 年 5 月 10 日受付, 10 月 18 日再受付)



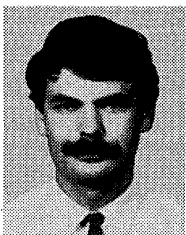
杉山 正晴 (正員)

昭 45 岐阜大・工・電気卒。昭 48 同大大学院工学研究科修士課程了。同年岐阜県公害研究所。岐阜県工業技術センターなどを経て平 11 より岐阜県生産情報技術研究所情報システム部長。この間主として騒音・振動, メカトロニクス関連の研究に従事。Japanese Hungarian Intelligent Integrated System Laboratory 会員。



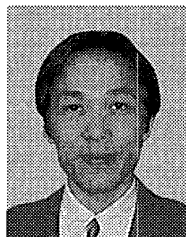
後藤 宗弘 (正員)

昭 38 名大・工・電子卒。昭 43 同大大学院博士課程了。工博。昭 43 岐阜大学講師, 助教授を経て, 現在, 同教授, 副学長 (企画担当)。この間主として算術演算符号, フォルトトレラントシステム, 算術演算の高速化, 電子透かしなどの研究に従事。著書に「計算機工学」(丸善), 共著に「算術符号理論」(コロナ社) などがある。情報処理学会, 人工知能学会, IEEE 各会員。



コバチ シルベスタ

1989 ブダペスト工科大学大学院修士課程 (電気工学専攻) 了。1998 Miskolc 大学より Ph.D. 同年より Miskolc 大学情報技術学部講師。知的制御に興味をもっている。Japanese Hungarian Intelligent Integrated System Laboratory 会員。



松本 忠博 (正員)

昭 60 岐阜大・工・電子卒。昭 62 同大大学院工学研究科修士課程了。同年岐阜大学工学部助手。並行システム, ソフトウェアの検証等の研究分野に興味をもつ。情報処理学会, ソフトウェア科学会各会員。



直井 徹 (正員)

昭 58 豊橋技科大・工・情報卒, 昭和 60 同大大学院修士課程了。昭 63 名大大学院博士課程了。同大助手を経て, 平 3 より岐阜大・工・応用情報・助教授。主にソフトウェア基礎理論, 計算モデル等に関する研究に従事。工博。平 2 年度丹羽記念賞受賞。EATCS, 情報処理学会, 日本ソフトウェア科学会各会員。