

直交変換を利用した電子透かしにおける耐性実験

西堀 美夏 高橋 健一 上田 祐彰 宮原 哲浩

広島市立大学大学院 情報科学研究科

1 はじめに

電子透かしは、インターネットの急速な普及に伴い増加するマルチメディアの悪用を防止し、コンテンツの著作権保護に有効な技術の一つとして取り上げられている。電子透かしでは、コンテンツの品質を劣化させることなく、透かしと呼ばれる著作権固有の情報を識別できる符号をコンテンツ自体に埋め込む。現在では、テキスト、音声、動画、静止画など様々なマルチメディアデータが対象コンテンツとして扱われている。

その中でもデジタル画像への透かしには、可視あるいは不可視透かしが用いられている。不可視透かしは、画質を劣化させることなく、著作権者の情報を保つことができる。また、透かし手法は2つのカテゴリに分類され、画素値を直接操作する画素空間を利用する手法、様々な直交変換を使った周波数空間を利用する手法がある。

本論文では、透かしの頑健性について比較研究を行う。実験では、直交変換に離散コサイン変換(DCT)と離散ウェーブレット変換(DWT)を用い、静止画像の周波数領域に不可視透かしを埋め込む。この透かし入り画像を対象とし、様々な画像攻撃に対する透かしの復元率および透かし埋め込みによる画質劣化を評価する。

2 透かし埋め込みアルゴリズム

透かし埋め込み対象となる画像の輝度信号は2次元DCTや2次元DWTを施されることにより、画素空間上の信号から周波数空間上の信号に変換される。透かし符号はそのうちの中間周波数領域の各係数に埋め込まれる。

透かし符号 $w(n)$ を透かし情報のビット列 $b_k=\{0,1\}$ から、

$$w(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } b_k = 1 \\ -1 & \text{if } b_k = 0 \\ 0 & \text{if } b_k = \text{null} \end{cases} \quad (1)$$

として生成する。ただし、DWT透かし法では、 $n \neq \lfloor kMN / (8 \times m) \rfloor$ の場合も $w(n)=0$ とする。なお、 M, N はそれぞれ画像の高さと幅であり、 m は埋め込み文字数である。埋め込み位置 n の変換係数を $A(n)$ とすると、透かしビット埋め込み後の画素の変換係数 $A'(n)$ は以下で与えられる。

$$A'(n) = A(n) + \alpha \times w(n) \quad (2)$$

ただし α は透かし埋め込み強度である。

透かしを埋め込んだ各成分を逆変換し、透かし入り合成画像を得る。

表1 頑健性実験で用いた画像攻撃

攻撃の種類	
拡大・縮小	インデックスカラー
階調変換	周波数変換

3 透かし抽出アルゴリズム

透かし抽出処理は埋め込み処理と逆の手順を辿る。透かし入り画像の輝度信号は2次元DCTあるいは2次元DWTにより周波数空間に変換される。埋め込まれた情報のビット列は、透かし入り画素 $A'(n)$ の値を使うことにより復元される。

$$b'_k = \begin{cases} 1 & \text{if } A'(n) > 0 \\ 0 & \text{if } A'(n) \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

ただし、DWT透かし法では $n = \lfloor kMN / (8 \times m) \rfloor$ である。

4 実験・考察

4.1 画像攻撃に対する耐性評価

透かしの頑健性を評価するため、Stirmark [1] と同様に評価支援ツールとして知られるJEWELS 1.0c (JEita Watermark Evaluation Support system) [2] を用いて、Lena(512×512 画素)とMandrill(512×512画素)という2種のJPEG画像に対し、4種の画像処理(表1)を施した。ただし、透かし埋め込み強度 α の値は、192ビットの透かし符号を各画像に埋め込んだ際、透かしの抽出誤差率が最も低くなる値の中から最小値を選択する。これにより、LenaにはDCTとDWTでそれぞれ $\alpha=33$ と $\alpha=36$ を、MandrillにはDCTとDWTでそれぞれ $\alpha=72$ と $\alpha=125$ を採用した。

また、攻撃による画像への影響を認識しやすくするため、画質の評価基準PSNR(Peak Signal to Noise Ratio)を用いる。PSNRは

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \left(\sum_i \frac{255^2}{(y_i - y'_i)^2} \right) \quad [dB] \quad (4)$$

で定義される。ただし、 y_i と y'_i は、それぞれ透かし埋め込み後の画像と攻撃後の透かし入り画像の i 番目の画素値である。ここで、 PSNR_w を透かし入り画像のPSNRとし、 PSNR_A を攻撃後のPSNRとする。以後結果を示す表では、これを透かし入り画像からの低下率

$$DR = \frac{\text{PSNR}_A}{\text{PSNR}_w} \quad (5)$$

として示す。さらに、透かし情報の復元状況を調べるた

め、復元状況 R を次のように定義する。抽出した透かし符号の誤差率が0%であれば復元状況を“A”、10%未満であれば“B”、10%より高ければ“C”と表記する。

4.2 周波数変換を施した際のビット復元に関する実験

透かし入り画像に対し周波数変換である平滑化処理と先鋭化処理を施した際、埋め込んだ透かし情報の復元が可能であるか否かについて実験を行った。

透かし入り画像および周波数変換処理後の出力画像における (x, y) 座標の画素値をそれぞれ $I(x, y)$, $O(x, y)$ とし、 5×5 畳み込み演算適用後の (u, v) 座標の係数を $w(u, v)$ とすると、次式で示される。

$$O(x, y) = \frac{1}{W} \sum_{u=-2}^2 \sum_{v=-2}^2 w(u, v) \cdot I(x+u, y+v) \quad (6)$$

(ただし $W = \sum_{u=-2}^2 \sum_{v=-2}^2 w(u, v)$)

また、透かし入り画像の外周2画素は畳み込み演算ができないため、 $I(x+u, y+v)$ の代わりに元の画素値 $I(x, y)$ を使用する。図1にこの処理で使用するフィルタを、表2にそのパラメータを示す。このフィルタ処理は演算が平滑化か先鋭化かを指すパラメータを持ち、パラメータ1と2は平滑化処理、3と4は先鋭化処理を表す。

周波数変換後の R および DR を表3に、変換後の画像を図2に示す。表より、Lena, Mandrill いずれの画像においても先鋭化に比べ平滑化の DR は低い。また、Lenaでは DR が30%程度と低く、コンテンツの使用価値を持たなくなる。MandrillのDCT透かし法では DR が40%以上で R がA、DWT透かし法では30%程度で R がB、と画質と抽出率がトレードオフの関係にあることが分かる。

平滑化処理で透かし情報が抽出されにくい一因として、平滑化処理は画素値の差を減らすことが挙げられる。これは α の値を小さくすることと等しい。逆に、先鋭化処理は画素値の差を増やす処理であるため、 α の値も同時に強める結果となった。原画像に透かし情報を埋め込むため α の最適値を設定する際、抽出ビット誤差率と最適値は2次方程式のような関係をとる。このことから、 α の値を強めすぎた場合にも抽出ビット誤差率が高くなると考えられる。

また、DWT透かし法でより誤差率が高かった理由に、透かし符号の影響範囲が挙げられる。DCT透かし法では、 8×8 の1ブロックに対して1ビットの透かし符号が埋め込まれる。更に、DCTの計算もブロック単位で行われるため、値の変更を行ってもブロック内にしか影響を及ぼさない。一方、DWT透かし法では、4分割された原画像に対し等間隔で全ビットを埋め込み、隣接画素値の比によりDWTの計算をする。そのため、値の変更を行うと行・列全てに影響を与え、その範囲はDCT透かし法に比べ非常に大きいものとなる。よってDWT透かし法では、 α の影響力が分散しより多くの誤差を招いたといえる。

b	b	b	b	b
b	b	b	b	b
b	b	a	b	b
b	b	b	b	b
b	b	b	b	b

図1 周波数変換で用いるフィルタ

表2 周波数変換のフィルタ(図1)に対するパラメータ

Symbol	Parameter			
	Smoothing		Sharpening	
	1	2	3	4
a	8	40	56	40
b	1	1	-1	-1

表3 周波数変換後の透かし復元の評価

Test image	Parameter	DCT		DWT	
		R	DR [%]	R	DR [%]
Lena	1	B	28.37	B	28.12
	2	B	26.28	B	26.08
	3	A	28.54	A	28.92
	4	A	37.12	B	37.37
Mandrill	1	A	44.64	B	35.78
	2	A	41.15	B	31.81
	3	A	44.34	B	36.01
	4	A	54.85	B	47.81

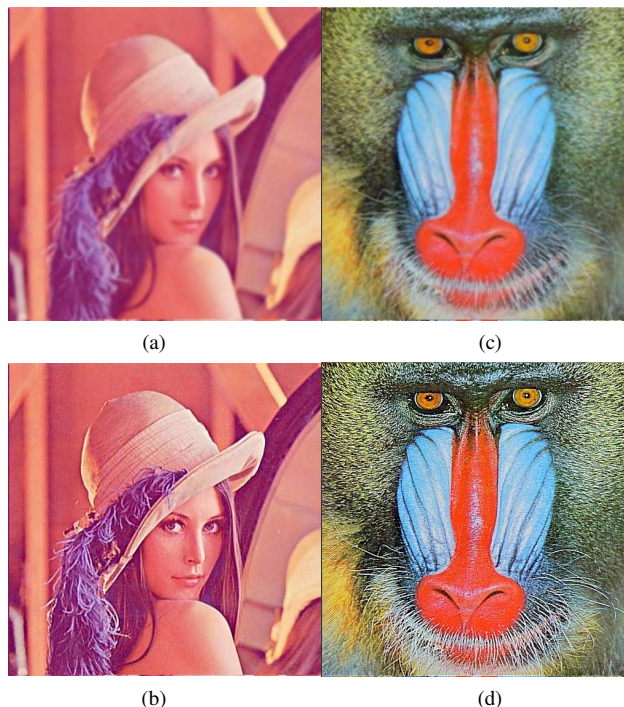


図2 DCT手法における周波数変換後の透かし入り画像 (a) パラメータ1の平滑化画像Lena, (b) パラメータ4の先鋭化画像Lena, (c) パラメータ1の平滑化画像Mandrill, (d) パラメータ4の先鋭化画像Mandrill

参考文献

- [1] Fabien A. P. Petitcolas and Markus G. Kuhn. (1997, November). StirMark, Tool for evaluating watermarks [Online]. Available: <http://www.cl.cam.ac.uk/~fapp2/watermarking/stirmark>
- [2] 社団法人 日本電子工業振興協会, “電子透かし技術に関する調査報告書”, 1999
- [3] 岩切豊, “離散ウェーブレット変換を用いた電子透かし法の基礎実験”, 広島市立大学 情報科学部 知能情報システム工学科 平成16年度卒業論文