

周波数領域変換による電子透かし評価

村上 健自 上野 義人
創価大学工学研究科情報システム学専攻

電子透かし技術として、画像や音声などを周波数領域に変換し、電子署名などの透かしの埋め込み方法があり、主な周波数領域への変換方法としてDCT、DFT、DWTなどが研究対象となっている。これらの変換方式を用いた主な電子透かしの方法について方式の解析と諸特性、特に透かしの耐久性、埋め込み後の画像、アタックによる耐性などについて測定し考察した。

MPEG、JPEGなどの標準化方式では、DCTが標準変換方式であり、また、JPEG2000、MPEG4においてはウェーブレット変換が標準変換方式として提案されている。このため、これらの変換方式について改良すべき項目を抽出し、今後解決すべき課題について検討した。

Evaluation of Watermarking Methods by Frequency Domain Transformation

Kenji Murakami Yoshihito Ueno
Graduate School of Engineering, Soka University

Watermarking technologies embed digital signature into images and audio by the frequency domain transformation, mainly DCT, DFT, DWT, have been investigated. This paper describes the evaluation of these technologies, the endurance of watermarking, the watermarked image quality, and several kinds of attack.

MPEG and JPEG adapt DCT for the standard of transformation and also MPEG4 and JPEG2000 proposed DWT. Therefore, watermarking methods using DCT, DWT are considered for the improving items and further study problems.

1. 電子透かしによる著作権保護

電子透かしとは、マルチメディアコンテンツにおける著作権を守るために考えられた技術の一つであり、作者の情報を不可視の状態に埋め込んでおく技術である。この技術は違法コピー・違法使用などを抑止すると共に、実際に違法に使用された際に、埋め込まれた情報を取り出すことで著作権を主張することができる。この電子透かし技術は、近年研究が盛んな分野

であり、これまでも様々な手法が考えられてきている。

最近、Web上でのマルチメディアコンテンツの違法なやり取りが目立つようになり、特に音楽ファイルであるMPEG-Layer3(MP3)形式のファイルが無断配布され、著作権が守られていない状況になっている。これらマルチメディアコンテンツを守るためにも、早急に電子透かし技術を確立させる必要がある。

また、最近の注目すべき動きは RealNetworks 社と IBM 社による Web 上における安全な音楽ファイルを配布するシステムの開発や、Microsoft 社のメディアファイルの配信のためのシステムの開発など、実用段階に入りつつある。他にも様々な企業が著作権に対する開発に取り組んでおり、電子透かしを含む著作権を守る技術が実現されつつある。

2. 電子透かし技術

電子透かしには、空間領域に埋め込みを行う方法と周波数領域に埋め込みを行う方法の2方式がある。前者は、画素値を直接操作することで行われるが、埋め込み後の画質および透かしの強度を考えると実用的でないものが多い。後者は周波数領域に変換し、その値を変化させて透かしの埋め込み方法で、埋め込み後の画像にほとんど変化がみられないのが特徴である。しかし、現在のところ、どちらの技術にしても一長一短があり、電子透かしとしての要件である埋め込み後の画質、透かし強度、埋め込みおよび抽出の際の計算量、アタックによる耐性など、すべての特性を満足するものは見当たらない。さらに、電子鍵を用いた電子透かしが提案されているが、基本的な考えは空間領域および周波数領域への埋め込みである。そこで今回、本論文では、この基本操作である埋め込み方法のうち、周波数領域への埋め込みについて考察した。

3. 周波数領域変換による電子透かし

周波数領域に変換する方法には、主に3方式がある。その方法は、

- 離散コサイン変換 (DCT)
- 離散フーリエ変換 (DFT)
- 離散ウェーブレット変換 (DWT)

であり、すべてが画像工学において身近に用いられている変換方法である。以下に、これら変換方式に電子透かしの埋め込み方法を順次、説明する。

A. DCT による電子透かし

離散コサイン変換 (DCT) は JPEG などを使

われている変換方法で、通常、 8×8 のデータに対し変換を行っている。式は次の通り。

$$F(i, j) = \frac{1}{4} C(i) C(j) \sum_{m=0}^7 \sum_{n=0}^7 f(m, n) \cos \frac{i(2m+1)\pi}{16} \cos \frac{j(2n+1)\pi}{16} \dots (1)$$

$$\text{ここに、 } C(i), C(j) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & (i, j = 0) \\ 1 & (i, j \neq 0) \end{cases}$$

JPEG などは更に量子化を行い圧縮を行っているが、一般に透かしの埋め込みは、この量子化の際に行う場合が多い。埋め込み方法は、透かしのビットデータに直し、 $B(i)$ ($i = 1, 2, 3, \dots$) とする。また、量子化テーブルの値を $Q(x, y)$ 、量子化の結果を $R(x, y)$ とすると、

$$\text{if } (B(i) = 0)$$

$R(x, y) = F(x, y) / Q(x, y)$ の値を最近傍の偶数値に変換

$$\text{else if } (B(i) = 1)$$

$R(x, y) = F(x, y) / Q(x, y)$ の値を最近傍の奇数値に変換

というアルゴリズムで偶数奇数制御を行い、透かしの埋め込みを行う。また、量子化の前に DCT 係数を変換させて埋め込む方法もあるが、この圧縮の過程が、非可逆圧縮であるため、余り有効な方法ではない。

B. DFT による電子透かし

離散フーリエ変換 (DFT) は、画像処理の分野でよく使われているもので、主に、計算量の少ない高速フーリエ変換 (FFT) が用いられる。埋め込みに必要な要素は、フーリエ係数そのものである。まず、DFT の式は次の式で表される。

$$F(a,b) = \sum_{m=0}^7 \sum_{n=0}^7 f(m,n) e^{-j2\pi \left(\frac{am+bn}{8} \right)} \quad \dots (2)$$

この変換を行うと実数・虚数の値が求まり、通常、実数空間だけを利用して画像処理を行っている。このため、埋め込みは、一般にDC成分である $F(0,0)$ を変化させることで行われている。DCTと同様にビットデータを $B(i)$ ($i=1,2,3,\dots$)、埋め込み後のDFT係数の値を $R(x,y)$ とすると、

if ($B(i)=0$)

$R(x,y) = F(x,y)/M$ の値を最近傍の偶数値に変換

else if ($B(i)=1$)

$R(x,y) = F(x,y)/M$ の値を最近傍の奇数値に変換

というアルゴリズムで埋込み操作が行われる。ここで、Mは埋め込みのパラメータであり、これにより偶数奇数制御による埋め込みが可能となる。この値Mがなければ、丸め誤差などですぐに透かしが消えてしまう。

C. DWTによる電子透かし

ウェーブレット変換は画像全体を周波数領域にわたってオクターブ分割する。この変換は2次元サブバンドフィルタを使用することで実現し、ここでは基底関数として、ハール直交基底を採用する。このときフィルタとして用いるウェーブレット関数 $g(i)$ 、スケーリング関数 $h(i)$ は次式で表される。

$$g(i) = \begin{cases} 0.5 & (i=0,1) \\ 0 & (i \neq 0,1) \end{cases} \quad h(i) = \begin{cases} 0.5 & (i=0) \\ -0.5 & (i=1) \\ 0 & (i \neq 0,1) \end{cases} \quad \dots (3)$$

多重解像度解析により4つの周波数成分(低周波成分、縦方向・横方向・斜め方向高周波成

分)が得られる。現在まで様々な埋め込み方法が提案されているが、ここでは画質を優先する方法を取り上げて埋め込みを行う。それは視覚心理的に人間が輪郭の変化を捉えづらいという事実を利用するもので、「高周波成分の存在する場所=輪郭に近い」ことを利用する。

画像サイズをX, Yとして、ウェーブレット変換を行い得られる4つの成分を $W_{LL}(x,y)$ 、 $W_{LH}(x,y)$ 、 $W_{HL}(x,y)$ 、 $W_{HH}(x,y)$ とする。また、 $0 < x < X/2$ 、 $0 < y < Y/2$ となる。これより、

if ($W_{LH}(x,y)$ or $W_{HL}(x,y)$ or $W_{HH}(x,y) \neq 0$)
changeN($W_{LL}(x,y)$)

として埋め込みを行う。ここで、changeN()とは、透かしをビットデータに変換し、下位N ($N=1,2,\dots,8$) ビット目へ透かしビットを埋め込む。低周波の領域は元画像を1/2にしたものとはほぼ等しく、この方法での埋め込みが可能である。この埋め込み操作は周波数領域に変換したものであるが、空間領域での埋め込みと同じ操作となっている。

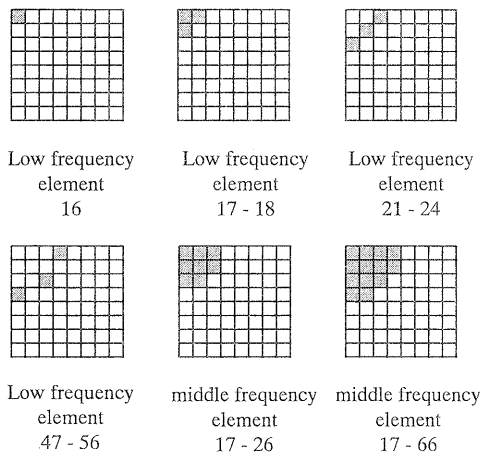
他の方法として、高周波領域への埋め込みや、さらにもう1段階ウェーブレット変換を施した高周波領域に埋め込む方法も考えられるが圧縮により、透かしの消失可能性が大きい。

4. 周波数領域による電子透かしの具体例

DCT、DFT、DWTのそれぞれの方法で透かしを埋め込み、画質の評価、透かしの誤り率を測定する。また、DCT、DFTでの埋め込みは、画質を考慮するため、視覚心理学的に、人間は色の変化より明るさに敏感であることを利用し、画像を Y 、 C_b 、 C_r に変換して、色差成分である C_b 、 C_r への埋め込みを行う。DCTでは埋め込み場所を量子化テーブルの値により決定する。6通りの埋め込み場所を図1に示す。また、標準的な画像圧縮に使われる色差信号の量子化テーブル $Q(u,v)$ を示す。

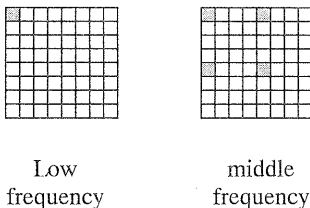
$$Q(u,v) = \begin{pmatrix} 17 & 18 & 24 & 47 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 18 & 21 & 26 & 66 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 24 & 26 & 56 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 47 & 66 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \end{pmatrix} \dots (4)$$

図1：DCTにおける埋め込み位置



DFTではDC成分以外の場所への埋め込みを確認するため、実数値のみをもつ場所(図2-右)への埋め込みも行う。

図2：DFTにおける埋め込み位置



5. アタックに対する耐性

アタックは、非可逆圧縮、画素値変換、雑音付加、画像編集、幾何変換、画像処理に分類されるが、この内、非可逆圧縮であるJPEG圧縮、画像処理として軽いぼかしを、画像編集としてクロッピング(切り抜き)などのアタックに対する耐性を検討した。どの範囲まで著作物と考

えるかで影響を受けるが、雑音が付加されれば、元の画像の画質は復元できないし、幾何変換(回転など)によるアタックであれば、元に戻して透かしを確認できる。今回、この3つのアタックを主なものとして、透かしの誤り率を測定し、耐性を調べた。なおアタックには市販されているAdobe PhotoShop4.0を用いた。

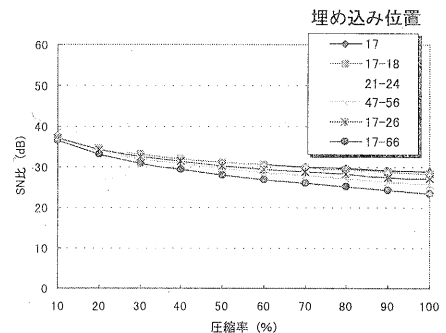
6. 測定結果および考察

画質評価にはSNRを用いた。

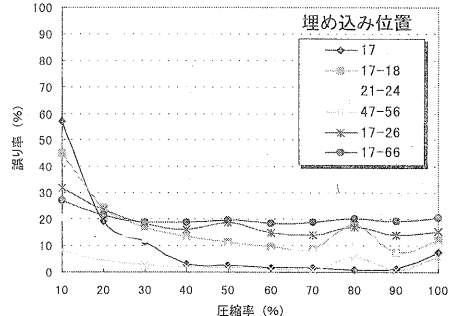
1) DCTによる埋め込み

画質と誤り率の測定結果を以下に示す。

グラフ1：埋め込みによる画質変化(DCT方式)



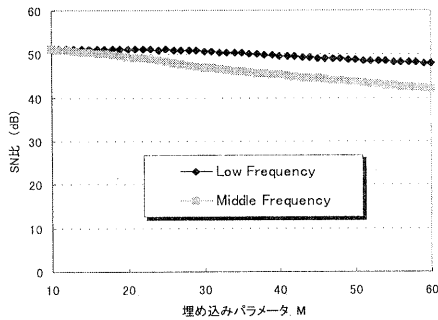
グラフ2：透かしの誤り率(DCT方式)



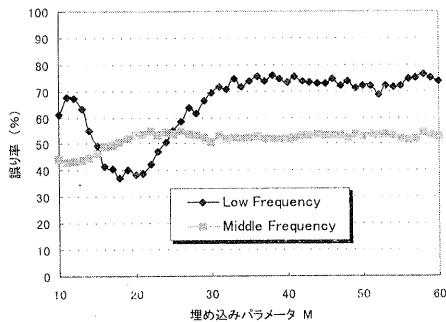
これらの結果から圧縮率20%以下の場合、埋め込み場所としての量子化程度の小さいもの、特に17、17-18への埋め込みは透かしの誤り率が大きく、検出できないことがわかる。その他の誤り率は20%と低く、検出は可能である。画質は圧縮率の高いものほどブロック化歪みははっきりと現れるようになり、埋め込みには適さない。圧縮率20%から40%で用いるのが最適である。

2) DFTによる埋め込み
測定結果を以下に示す。

グラフ3：埋め込みによる画質変化（DFT方式）

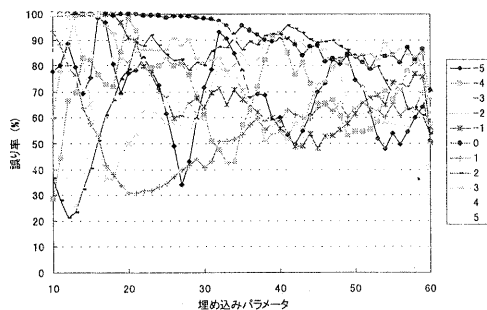


グラフ4：透かしの誤り率（DFT方式）



埋め込みパラメータMを変化させて、埋め込み状態を測定すると、結果から、最高でも誤り率が40%となり、これでは透かしを検出できない。しかし、低周波のみの場合、誤り率が埋め込みパラメータによって変化している。そこで、+1、0による偶数奇数制御の方法を、-5から+5までの制御値で行ってみた。グラフ5より変化させた量により誤り率にばらつきがあるのが分かる。最も誤り率の低い組み合わせを探る

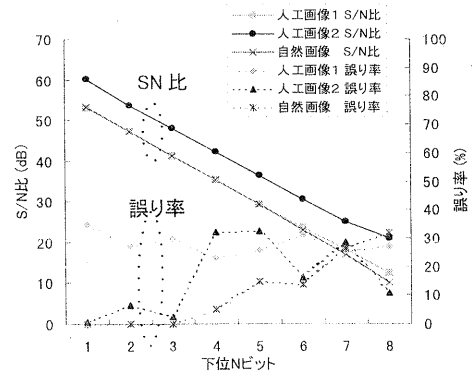
グラフ5：制御値による誤り率の変化（DFT方式）



と、埋め込みパラメータ13、制御数+2と-3のとき、誤り率が約25%と低減され、検出可能である。

3) ウェーブレット変換による埋め込み
測定結果を以下に示す。

グラフ6：画質の評価および透かしの誤り率（DWT方式）



この結果、画質および誤り率を考慮すると、下位3ビット目まで、透かしの埋め込み可能である。

これらの測定結果より、各方式で100%の検出率をもつ方式がないことが分かる。これは、透かしの埋め込んだ後、画像ファイルとして記録する際に、丸め誤差が出ている結果である。丸め誤差にも強い透かしの埋め込み方法が必要である。

4) アタックに対する耐性

測定結果を表7に示す。アタックの対象をDCT方式では圧縮率20%および30%、DFT方式では埋め込みパラメータ13、DWT方式では下位2および3ビット目とし、埋め込まれた透かしの耐性を測定した。これらの条件は、それぞれの方法の中でもっとも埋め込み特性の優れた方法を採用した。なおクロップの方法は場所を指定して行った。結果、画像処理以外のアタックに対してかなり耐性がある。したがって、今後、画像処理に対する耐性が強い方法について検討する必要がある。

表7：アタックに対する耐性

	DCT 圧縮率20%	DCT 圧縮率30%	DFT パラメータ13	DWT 下位2ビット	DWT 下位3ビット
ぼかし	40.36	69.76	49.02	46.87	45.11
JPEG圧縮	4.07	2.52	24.38	0	0
クロップ	3.63	2.25	24.56	0	0

7. おわりに

有効な電子透かしを検討するとき、制約条件として、MPEGやJPEGなどの圧縮技術の標準化傾向、また様々な画像ファイル形式があり、Web上での画像抽出や画像記録に主にDCTが用いられている。DCTによる埋め込みは、抽出まではほぼ確実に行われているが、アタックに対する強い耐性を実現する必要がある。また、JPEG2000には、ウェーブレット変換も採用されることが決まり、透かしの埋め込みを考える上で、この変換をもさらに検討する必要がある。

今後、DCTにおける閾値の取り方を変えることで、アタックに強い埋め込み方法を検討し、DWTでのより良い埋め込み方法を検討していく。

[参考文献]

1. 井上彰：電子透かし マルチメディア時代の暗号システム，丸山学芸図書，1997
2. 大西淳児，松井甲子雄：多重解像度解析とPN系列を利用した電子透かし法，電子情報通信学会論文誌，D-2 vol. J80-D-2 No. 11，pp. 3020-3028，November，1998
3. 早嶋広史，藤尾光彦：電子透かしにおけるウェーブレットの応用，信学技報，IE98-26，July 1998
4. 貴家仁志：よくわかるデジタル画像処理 フィルタ処理からDCT&ウェーブレットまで，CQ出版社，pp. 119-158，1998
5. Communications of the ACM，“Digital Watermarking/WISs”，vol. 41，No. 7，July，1998
6. 大網亮磨，宮本義弘，太田睦：電子透かしのアタックに対する耐性価値算出とその応用，映像メディア処理シンポジウム(IMPS98)，1-3. 04，October 1998
7. Christoph Busch，Wolfgang Funk，and Stephen Wolthusen：Disital Watermarking From Concepts to Real-Time Video Applications，IEEE Computer Graphics and Applications，January/February 1999