

電子透かしによる画質劣化の解析

堀田 裕弘, 大西 淳一, 阿蘇 賢一郎, 村井 忠邦
富山大学 工学部 電気電子システム工学科

〒930-8555 富山市五福3190

TEL: 076-445-6758, FAX: 076-445-6759

E-mail: horita@ecs.toyama-u.ac.jp

あらまし: 著作権保護のための1つのアプローチとして、画像や映像シーケンスへ電子透かしとして知られている目に見えない信号を埋め込む方法がある。電子透かしのアルゴリズムの1つとして、ウェーブレット変換によって画像を階層分解し、その最低周波数成分に透かし情報を埋め込む方法がある。本稿は、この透かし情報を埋め込むことにより伴う画質劣化の品質評価に注目する。この画質劣化の評価方法は、主観的な画質評価値に関連している画質評価モデルに基づいて行う。透かし情報の埋め込み強度とフィルタバンクの種類、階層分解の数と主観的な画質評価値との関係を考察する。さらに、この考察をJPEG符号化された埋め込み画像に対しても行う。

キーワード: 電子透かし, ウェーブレット変換, 画質評価

Analysis of the picture quality degradation by digital watermarking

Yuukou Horita, Jun'ichi Ohnishi, Ken'ichiro Aso, Tadakuni Murai
Department of Electrical and Electronics Engineering,
Faculty of Engineering, Toyama University

3190, Gofuku, Toyama 930-8555, Japan

TEL: 076-445-6758, FAX: 076-445-6759

E-mail: horita@ecs.toyama-u.ac.jp

Abstract: One approach for copyright protection is to introduce an invisible signal, known as a digital watermark, into an image and video sequence. As one of the algorithm of watermarking, there is the method of carrying out the hierarchal decomposition of the picture by Wavelet transformation, then embedding the watermark information through its minimum frequency component. This paper focuses on the estimation of the picture quality degradation which is accompanied by embedding watermark information. This estimation method of the picture quality degradation is based on the quality evaluation model which is associated with the subjective quality evaluation. The relations between the embedding intensity of watermark information, the kind of filter bank, the number of hierarchal decompositions, and quality evaluation value are considered. This consideration is also applied to JPEG coded pictures.

keywords: Digital watermarking, Wavelet transformation, Picture quality evaluation

1 まえがき

マルチメディア技術の発達により、一般ユーザやクリエイターが自己のマルチメディア作品に創意工夫して優れた物を作り上げ、これらの作品を個人のHP、電子図書館や電子出版物等の電子メディアを媒介して公開することが盛んに行われるようになってきた。この公開した作品の権利を主張するためにも、古来からの署名に相当する電子透かし技術が現在目覚しく発展してきている。

電子透かしには、(1) コンテンツ自身に埋め込むこと。(2) 透かし情報は編集、圧縮、伝送などの各種の処理に対して変質もしくは消失しないこと。(3) 電子透かしの改ざんや消去などの悪意ある攻撃に対して強いこと。(4) 透かし情報の埋め込みとその復元に必要な手続きは簡単で、その処理時間が短いこと。(5) ユーザの厳しい鑑識眼にも耐えられる劣化の範囲内でコンテンツの品質を保持すること。などの技術要件が課せられている。この要件を満たすべく、これまで多くの電子透かし法が提案されてきている [1]。しかしながら、これらが電子透かしを施す対象コンテンツに適したものかを比較検討する評価基準がいまだに示されていないのが現状である。

我々は、これまでに情報圧縮された静止画像に対する品質評価モデルを提案し、実用化レベルまでに特性改善してきた [2]。そこで、この品質評価モデルを電子透かしのメディア品質の評価に適用し、電子透かしを行う際の各種パラメータとメディア品質との関係について検討した。さらに、透かし情報を埋め込んだ画像に対して蓄積・配信する事を想定してJPEG符号化を施し、符号化パラメータと画質との関係を解析した。

2 電子透かしの評価基準

電子透かしの評価項目として、構造上、運用上、保全上の3分類があげられている [3]。

- 構造上の評価項目：情報容量、メディア品質、計算量、汎用性、柔軟性
- 運用上の評価項目：アフィン変換、加工処理、フィルタ処理、データ圧縮、D/A-A/D変換
- 保全上の評価項目：クローズドレベル、ブラックボックスレベル、オープンレベル

透かし情報を埋め込むと画像メディアに品質劣化をもたらす。したがって、その品質劣化をできるだけ抑制することが電子透かし技術にとって最大の要件である。それゆえ、どの程度のレベルまでならばユーザが許容してくれるかを検討しなければならないが、一般にメディアとニーズによって許容レベルには大差がある。人々の鑑賞に供する静止画ではユーザの厳しい鑑識眼に耐えられるレベルを要求されることになる。よって、構造上の評価項目として情報容量を含めたメディア品質の議論が重要であると考えられる。

また、透かしが埋め込まれている画像をユーザの好みでコンピュータ処理してしまうと、透かし情報までが失われてしまう問題もある。静止画像といえども画像メディアを保存し、伝送する際にデータ圧縮は重要となる。よって運用上の評価項目としては、データ圧縮に関する議論が重要であると考えられる。

3 電子透かしの方法

電子透かしの実現には多くの方法が提案されているが、今回用いたのはウェーブレット変換を用いて画像を階層的にオクターブ分割し、オクターブ分割された画像信号の最低周波数成分を利用するものである [4]。この方法の特徴は、JPEG圧縮、雑音付加、平滑化、階調変換、スケール変換などの画像処理に耐性を持っており、また、透かしの検出の際に原画像を必要としないことである。

3.1 電子透かしのアルゴリズム

原画像 P を $N_x \times N_y$ 画素サイズ (N_x, N_y は2のべき乗)、 n 階層目の最低周波数成分を $LL^n(i, j)$ ($0 \leq i \leq N_x/2^n, 0 \leq j \leq N_y/2^n$)、埋め込む透かし情報のビット列を $W = \{W_k | W_k = 0 \text{ or } 1; k = 1, 2, \dots, K\}$ とする。

3.1.1 埋め込みアルゴリズム

まず原画像 P をウェーブレット変換によってオクターブ分割し、その n 層目の最低周波数成分 $LL^n(i, j)$ を得る。つぎに $LL^n(i, j)$ を $b_x \times b_y$ 画素サイズのブロック B_k に分割し、そのブロック B_k の画素の平均値 M_k を求める。そして、以下の規則に従い、ブロッ

ク B_k に 1 ビットの透かし情報を埋め込む。

1. $q = \text{int}(M_k/Q)$ を計算する。ただし、関数 $\text{int}(m)$ は m の四捨五入則による整数化処理、 Q は量子化ステップサイズを表し、埋め込み強度と呼ぶ。
2. 小数点以下を切り捨てる関数 $\text{trunc}[\cdot]$ を用いて、量子化値 q との誤差 diff を求める。

$$\text{diff} = \text{abs}(q - \text{trunc}[M_k/Q]) \quad (1)$$

ただし、 $\text{abs}(\cdot)$ は絶対値を表す。

3. 透かし情報 w_k のビット値と量子化値 q の偶奇性に応じて、以下のように修正された量子化値 q' を求める。
 - (a) ($w_k = 0$ かつ量子化値 q が奇数)、または ($w_k = 1$ かつ量子化値 q が偶数) の場合、
 - $\text{diff} = 0$ のとき、 $q' = q + 1$
 - $\text{diff} = 1$ のとき、 $q' = q - 1$
 - (b) 上記以外の場合、 $q' = q$
4. $M'_k = q' \times Q$ を求め、平均値の誤差 $\delta M_k = M'_k - M_k$ をブロック B_k の画素すべてに加算する。

以上の操作をすべてのブロックに対して適用し、埋め込み処理が施された最低周波数成分 $LL'^n(i, j)$ を得る。さらに、 $LL'^n(i, j)$ の平均値 LM' を求める。最後に逆ウェーブレット変換を施して透かし入り画像 P' を得る。

3.1.2 取り出しアルゴリズム

透かし情報の取り出しは、埋め込みを行うときに利用したパラメータ n, b_x, b_y, Q, LM' を用いて行う。透かし情報を取り出したい画像を \hat{P} とすると情報ビットは以下の手順によって検出される。

1. 画像 \hat{P} に対して n 階層オクターブ分割を行い、最低周波数成分 $\tilde{LL}^n(i, j)$ を得る。
2. $\tilde{LL}^n(i, j)$ の平均値 \tilde{LM} を求め、平均値 \tilde{LM} との差 δm を求める。

$$\delta m = \tilde{LM} - LM' \quad (2)$$

表 1: 埋め込み可能なビット数 [bit]

block size	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
1	16384	4096	1024	256	64
2	4096	1024	256	64	16
4	1024	256	64	16	4
8	256	64	16	4	1
16	64	16	4	1	-

3. $\tilde{LL}^n(i, j)$ を $b_x \times b_y$ 画素サイズのブロック B_k に分割し、そのブロック B_k の平均値 \tilde{M}_k を求める。
4. 次式により量子化値 S を求める。

$$S = \text{int}((\tilde{M}_k - \delta m)/Q) \quad (3)$$

S が偶数であれば $w_k = 0$ 、奇数であれば $w_k = 1$ として透かし情報ビットを取り出す。

すべてのブロック B_k に対して上記のステップを適用し、透かし情報 W を検出する。

3.2 透かし情報量

ここで述べた手法では、最低周波数成分をブロック分割した部分画像に透かし情報を埋め込む。そこで、オクターブ分割の階層数 n とすると、埋め込み可能なビット数 k_{max} は、

$$k_{max} = \frac{(N_x/2^n) \times (N_y/2^n)}{b_x \times b_y} \quad (4)$$

となる。今、画像サイズを 256×256 画素、ウェーブレット変換の階層数 n を 1 から 5 とした場合の埋め込み可能なビット数は表 1 のようになる。

この表より、透かし情報を 64 ビット埋め込みたい場合は 5 通りの方法があることが分かる。

4 実験結果

透かし情報を入れることによる画質劣化を定量的に評価するために、先に提案されている画質評価モデル (PQS) を用いる。従来は PSNR を用いて評価される場合が多かったが、主観的な画質とはマッチしないことが従来から指摘されている。また、透かしアルゴリズムの優劣や透かし情報を埋め込む場合の各

種パラメータの最適化を埋め込んだ画像の品質をも含めて議論すること自体が困難であった。したがって、この評価モデルを用いることにより、埋め込んだ画像の主観的画質を評価基準として考えて議論することができる。

本実験で用いた画像はBarbara(bar), ITE標準画像の肌色チャート(hada), 天気予報(weth), チューリップ(tulip)の4種類を用い、256×256画素のモノクロ256階調画像を用いた。埋め込む透かし情報は64ビットになるように前述の5通りの方法を対象とする。この埋め込む透かし情報のビット列はランダムな"0","1"の系列である。なお、用いたフィルタバンクはHaar, 5/3タップのSSKFの2種類とした。なおSSKFの結果は画像"bar"のみを示す。

4.1 透かし情報の埋め込みによる画質

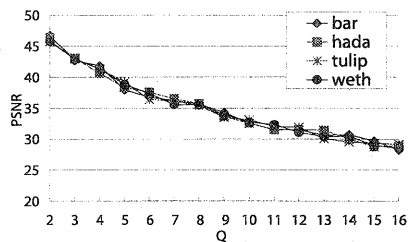
透かし情報を埋め込んだ画像に対する画質を検討する。図1, 図2には、埋め込み強度 Q に対するPSNRとPQS値(5段階の主観評価値)を示した。

どちらのフィルタバンクに対しても、埋め込み強度 Q を大きくすればPSNRは低下してしまう。また、PSNRでは画像の依存性があり見られないが、PQS値では透かし情報の埋め込みにより発生した画質劣化の知覚される度合いが、画像毎によって違うことがある程度明確に出ている。

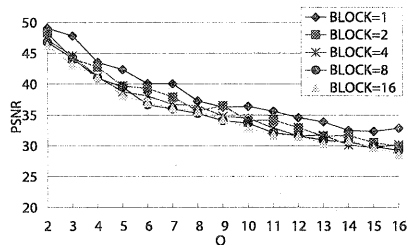
画像"tulip"のような細部が多い画像や画像"bar"のような輪郭部分が多い画像では、透かし情報の埋め込みによる画質劣化は検知されにくいと考えられる。一方、画像"hada","weth"のように平坦部が多くなだらかな輝度変化をしている部分がある画像では画質劣化は検知されやすいことになる。これは透かしアルゴリズムが最低周波数成分LLのブロック毎の平均値を操作しているので、埋め込み強度を大きくすると隣接ブロック間で平均輝度値に大きな差が生じるからである。

また、Haarの場合ではブロックサイズの影響は出ないが、SSKFの場合では階層数 n を大きくすることにより、画質が若干良くなる。これはブロックサイズが小さいほうがブロック毎の平均値を操作した影響の波及が小さくて済むからと考えられる。

よって、図2より、透かし情報を埋め込むことによる画質劣化の検知限JND(Just Noticeable Difference)(PQS値で4.5)は、埋め込み強度が $Q=5\sim$

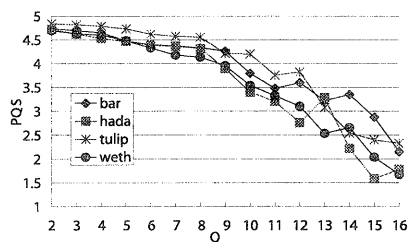


(a) Haar, 全画像

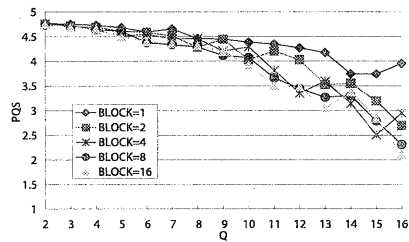


(b) SSKF, 画像"bar"

図1: Q-PSNR特性



(a) Haar, 全画像



(b) SSKF, 画像"bar"

図2: Q-PQS特性

8である。また、誤差の許容限JAD(Just Acceptable Difference)(PQS値で3.5)では、埋め込み強度が $Q=10\sim13$ である。この値はHaarでもSSKFでもほぼ同じ値である。

4.2 JPEG 符号化による画像品質

電子透かしを埋め込んだ画像においても情報圧縮は必須であり、これに伴う画質劣化と埋め込み情報の検出精度が問題となってくる。情報圧縮の手段としては JPEG 方式が一般的と考えられるので、埋め込み画像の JPEG 符号化に対する画質劣化の程度と検出精度との関係について検討した。JPEG 符号化は cjpeg[5] を用い、符号化パラメータとして QS(Qualitu Scale) が用いられる。これは、QS=1~100 をとり、数値が大きいほど画質が良い。

図 3 は、埋め込み強度 Q を 2 から 16 まで設定した場合の埋め込み画像に対して QS を 5 から 95 まで 5 ステップに変化させて JPEG 符号化を行い、その PQS 値をプロットしたものである。さらに、図 4 は、それぞれの透かし情報の検出率と符号化パラメータ QS との関係を示したものである。

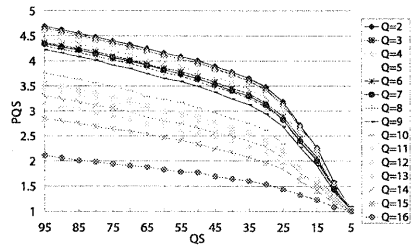
QS を低下させることにより JPEG 符号化された埋め込み画像は画質が低下していくが、QS = 30 前後で急激に劣化が顕著になってくる。そのため、検出精度も悪化していく傾向が見られた。

埋め込み強度 Q が 8 程度以下では埋め込み画像の品質も良く、JPEG 符号化を施しても画質は低下しにくい。QS を 30 以下にしてしまうと透かし情報の検出精度が悪くなってしまふ。また、 Q を上げれば検出精度は向上するが画質そのものが悪化するので、埋め込み強度 Q と画質とはトレードオフの関係にある。

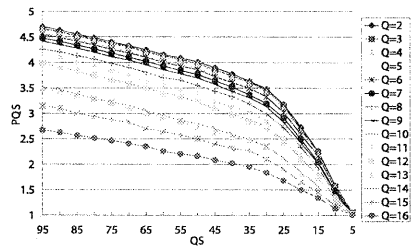
4.3 埋め込み強度 Q と符号化パラメータ QS との関係

次に、埋め込み画像に対して JPEG 符号化された場合の埋め込み強度 Q と符号化パラメータ QS との関係について検討した。透かし情報を埋め込んだ画像に対して JPEG 符号化を行い保存・配信する場合を想定しているため、画質的には誤差の検知限 (PQS 値で 4.5)、許容限 (PQS 値で 3.5) を検討の対象とする。図 5 は画像 "bar" における結果を示している。これらのプロット点は全て透かしの検出率が 100% のものである。

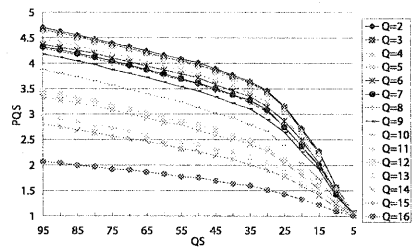
フィルタバンクが Haar の場合で画質が検知限 (JND) を想定した場合は、埋め込み強度 Q は 4 以下で符号化パラメータ QS が 80 以上でなければ



(a) Haar, 画像 "bar"



(b) SSKF, 画像 "bar", Block size=2 × 2



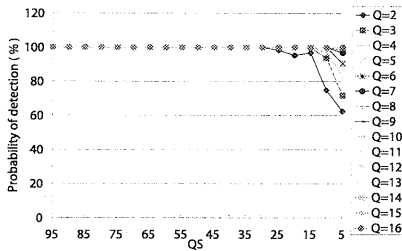
(c) SSKF, 画像 "bar", Block size=16 × 16

図 3: QS-PQS 特性

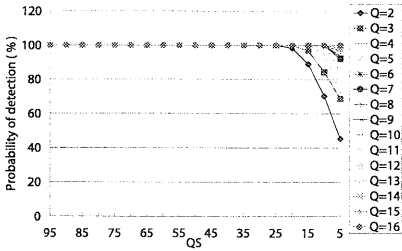
ならない。また、画質が許容限 (JAD) の場合では、図のような 2 次曲線的な関係を満足するパラメータを選択しなければならない。

また、SSKF では Haar の場合とほぼ同様な傾向が見られた。しかし、ブロックサイズの影響が見られ、ブロックサイズがより大きい場合は小さい場合よりも、より高い QS で符号化する必要があることがわかる。

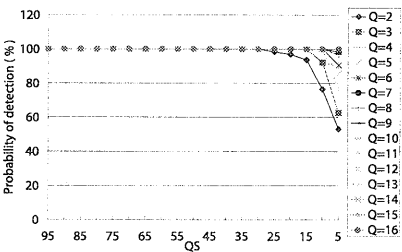
この関係を利用することにより、ユーザが満足する画質で透かしを埋め込んだ画像に対して JPEG 符号化による情報圧縮を施すことができ、かつ、各種画像処理にある程度耐性を持つ埋め込み強度 Q を選択することが可能となる。



(a) Haar, 画像"bar"



(b) SSKF, 画像"bar", Block size=2 × 2



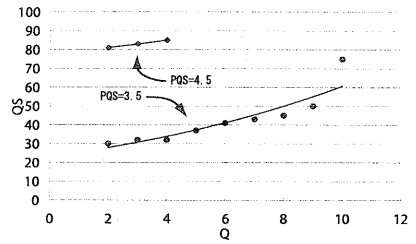
(c) SSKF, 画像"bar", Block size=16 × 16

図 4: JPEG 符号化に対するエラー耐性

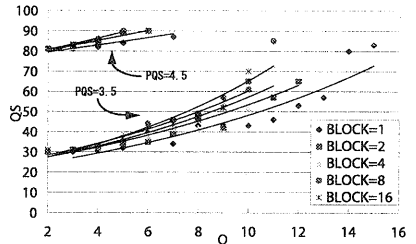
5 むすび

本稿では、電子透かしにおける画質劣化について検討した。原画像に電子透かしを埋め込むことにより画質劣化が生じるが、透かし情報の埋め込み強度、フィルタバンクの種類と階層数などと画質との関係を画質評価モデルを用いて検討した。さらに、埋め込み画像を保存・配信することを想定して、これらを JPEG 符号化した場合の画質劣化と埋め込み情報の検出率、符号化パラメータ、フィルタバンクの種類と階層数、埋め込み強度などの関係を検討した。

その結果、JPEG 符号化した場合の画質劣化を誤差の検知限、許容限とした場合に推奨される符号化



(a) Haar, 画像"bar"



(b) SSKF, 画像"bar"

図 5: 画像品質一定の Q-QS 特性

パラメータと埋め込み強度との関係を導き出した。

今後の課題として、これらの検討結果を踏まえて電子透かしの各種パラメータと埋め込み画像の画質との関係を用いて、電子透かしを施す際の最適パラメータの決定法を確立する必要がある。

参考文献

- [1] R.B.Wolfgang, C.I.Podilchuk, E.J.Delp, "Perceptual Watermarks for Digital Images and Video", Proc. of IEEE, Vol.87, No.7, pp.1108-1126 (July. 1999)
- [2] Y. Horita, Y. Inazumi, K. Kotani, T. Murai and V.R.Algazi, "Quality Estimation Model of Monochrome Still Picture Based on Distortion Factors and Texture Features", Proc. of IS & T's 1999 PICS Conference, pp419-424 (Apr. 1999)
- [3] 松井甲子雄: "電子透かしの基礎", 森北出版, 第 9 章 (1998)
- [4] 井上 尚, 宮崎明雄, 島津幹夫, 桂 卓史: "ウェーブレット変換を用いた画像信号に関する電子透かし方式", 映情メ学誌, Vol.52, pp.1832-1839 (Dec. 1998)
- [5] "CJPEG C ソースコード", ftp://ftp.uu.net/graphics/jpeg/jpegsrvc.v6a.tar.gz