

琉球大学学術リポジトリ

Wavelet変換を用いたカラー画像電子透かし

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2008-09-02 キーワード (Ja): キーワード (En): Watermarking, Wavelet, Image 作成者: 屋良, 朝心, 山城, 毅, Yara, Choshin, Yamashiro, Tsuyoshi メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/7107

Wavelet 変換を用いたカラー画像電子透かし

屋良 朝心*

山城 毅**

Digital Watermarking of Embedding Color Image Using Wavelet Transform

Choshin YARA*

Tsuyoshi YAMASHIRO**

Abstract

Digital Watermarking is a technique to protect digital contents that are image, music, document etc. In general copyright informations are embedded in contents as binary data. If it is possible to embed color image like author's face, authors will enable to claim strongly for illegality and ownership of digital contents. To realize this method we tried to process by Discrete Wavelet Transform.

Key Words: Watermarking, Wavelet, Image

1. まえがき

インターネットの普及に伴い、画像や音楽といったデジタルコンテンツが我々の娯楽になくはならないものになっている。デジタルコンテンツは高品質で劣化がないという長所のため、容易にコピーでき、音楽の違法ダウンロードのように、不特定多数の人が容易に入手できてしまう。これによって著作者は正当な報酬を得ることができなくなり、さらには新たな創作の妨げになる事も考えられる。

この様な問題を解決するために考案された技術が電子透かしである[1][2]。電子透かしは、紙幣の「透かし」のように本物であるという証拠を

埋め込むものである。しかし電子透かしの場合、デジタルコンテンツの価値を損なわず、ヒトが知覚できないように「透かし」を埋め込む必要がある。画像の場合はヒトに見えないように透かしの埋め込み、音楽の場合はヒトに聞こえないように透かしの埋め込み。埋め込む透かしには、ロゴ、著作者名、製作日、コンテンツの ID などの情報が挙げられる。これにより不正利用を行った者に著作権の主張ができる。またコンテンツに埋め込んだ ID により、不正利用を行った購入者を割り出すことも可能である。

このように、デジタルコンテンツの保護技術として電子透かしは有効な手段である。しかし、デジタルコンテンツは利用者が容易に加工することができるので、加工されても「透かし」が消えないような電子透かしでなければならない。電子透かしの分野ではデジタルコンテンツに

受理: 2008 年 3 月 14 日

平成 18 年度 電子情報通信学会総合大会にて発表

*大学院理工学研究科 電気電子工学専攻

(Graduate Student, Electrical and Electronic Eng.)

**電気電子工学科

(Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Fac. of Eng.)

対する加工を一般に「攻撃」という。最も多い攻撃の種類として、圧縮が挙げられる。画像では JPEG 圧縮、音楽では MP3 圧縮が一般的である。電子透かしは様々な攻撃に対して頑健であることが理想的である。

本稿では、画像電子透かしに Wavelet 変換を用いて、カラー画像をロゴとして埋め込む手法について述べる。ロゴは一般に 2 値画像であるが、著作者の顔画像をロゴとしてとらえれば、より強力な著作権主張が可能になると考えられる。

2. Wavelet 変換

ウェーブレット変換では $\phi(t)$ で表される「アナライジングウェーブレット関数」を用いる。ウェーブレット変換の基本的な考え方は、アナライジングウェーブレット関数を用意して、これを時間軸上で平行移動や拡大・縮小して得られる相似的な関数が、分析対象の関数中に局所的に現れていないかどうかを分析するというものである[3]。

アナライジングウェーブレット関数は式①に示す条件を満たす 2 乗可積分関数で、平均値が 0 で $t=0$ を中心に局在するような関数となる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\phi(t)|^2 dt < \infty \quad - \text{①}$$

式①の条件を満たす $\phi(t)$ を t 軸上で平行移動や拡大・縮小して得られる関数は、式②のようになる。

$$\phi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad - \text{②}$$

ここで、 a は拡大・縮小のためのパラメータ、 b は平行移動のパラメータである。

ウェーブレット変換は式②のアナライジングウェーブレット関数と対象関数 $f(t)$ との内積として定義され、式③で表される。この式による変

換は、ウェーブレット変換の結果が連続的な関数となるため、「連続ウェーブレット変換」と呼ばれる。

$$(W_{\phi} f)(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad - \text{③}$$

また、式③のウェーブレット変換により得られた結果を、式④によりウェーブレット逆変換すれば、元の関数 $f(t)$ を復元することができる。

$$f(t) = \frac{2}{C_{\phi}} \int_b^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \{(W_{\phi} f)(b, a) \phi_{ab}(t)\} db \right] \frac{da}{a^2}$$

$$C_{\phi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2}{|\omega|} d\omega \quad - \text{④}$$

ウェーブレット変換と窓フーリエ変換は似ている所があり、結果としては対象関数の局所的な特性の変化を時系列的に得ることができる。ウェーブレット変換が窓フーリエ変換と大きく異なる点は、基底関数の形である。

フーリエ変換は、周波数成分を求める処理であるが、これは「様々な周期の三角関数の中で、対象関数(データ)がどの三角関数に似ているかを示すものである」と考えることができる。例えば、「高周波成分が高い」ということは、「対象となる関数と周波数の高い三角関数との類似度が高い」と言い換えることができる。しかし、三角関数は、基本的には無限に続く関数であるため、窓フーリエ変換のように有限区間内での解析に向いていないと考えられる。

これに対してウェーブレット変換のアナライジングウェーブレットは、ある区間内に集中的に値が存在する関数であるから、有限区間内でのデータ特性を解析する場合には三角関数より適していると考えられる。

連続ウェーブレット変換では、平行移動や拡大・縮小を行うためのパラメータが連続的な値をとるが、これらが離散的な値をとるときは、「離散ウェーブレット変換」と呼ばれる処理になる。一般にデジタル信号を扱う場合には離散ウェーブレット変換を利用する。

ウェーブレット変換では、多重解像度解析という重要な概念がある。これは、任意の関数をスケーリング関数 $\phi(t)$ の総和で表すものである。スケーリング関数は、対象関数を観測するための尺度として用いられることからこのような呼び方をされる。最も簡単なスケーリング関数として、式⑤と図1に示すハール(Haar)のスケーリング関数がある。

$$\phi(t) = \begin{cases} 1 & (0 \leq t \leq 1) \\ 0 & \text{その他} \end{cases} \quad - \text{⑤}$$

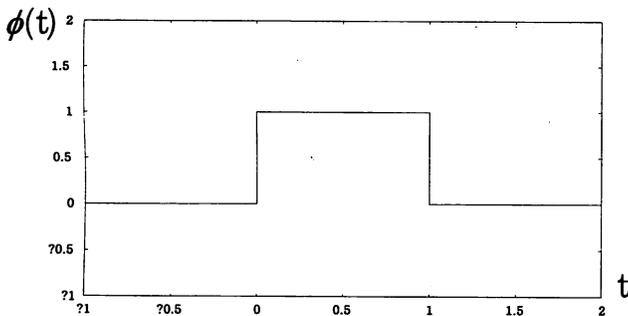


図1 ハールのスケーリング関数

これは矩形のパルス波となり、このスケーリング関数を用いると任意の関数 $f(t)$ を式⑥に示す $f_0(t)$ のように近似することができる。

$$f_0(t) = \sum_k s_k \phi(t-k) \quad - \text{⑥}$$

$$s_k = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \phi(t-k) dt = \int_k^{k+1} f(t) dt$$

このようなハールのスケーリング関数を平行移動や拡大・縮小したものは式⑦のように表され、この $\phi_{j,k}$ を用いたレベル j の近似 s_k を用いて式

⑧のように定義する。このとき、 s_k をスケーリング係数と呼ぶ。

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \phi(2^{-j}t - k) \quad - \text{⑦}$$

$$f_j(t) = \sum_k s_k^{(j)} \phi_{j,k}(t) \quad - \text{⑧}$$

$$s_k^{(j)} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \phi_{j,k}(t-k) dt$$

式⑧において、レベル数である j が大きくなるとスケーリング関数の幅が大きくなるため、レベル数が大きいほど近似が粗くなり元の関数からかけ離れたものとなる。すなわち、 $f_1(t)$ は $f_0(t)$ に比べて情報が欠落していることを意味している。この欠落分を $g_1(t)$ とすると式⑨が成り立つ。

$$f_0(t) = f_1(t) + g_1(t) \quad - \text{⑨}$$

この $g_1(t)$ をレベル1のウェーブレット成分と呼び、正負対称に振動する矩形となるため、その構成要素は式⑩、図2の関数で表される。この関数はハールのウェーブレットと呼ばれる。

$$\phi(t) = \begin{cases} 1 & (0 \leq t < \frac{1}{2}) \\ -1 & (\frac{1}{2} \leq t < 1) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad - \text{⑩}$$

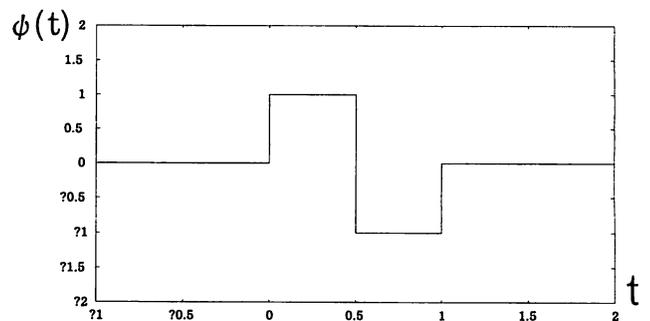


図2 ハールのウェーブレット

一般に、ウェーブレット ϕ は式⑩のように、平行移動や拡大・縮小した関数 $\phi_{j,k}$ を得る。この $\phi_{j,k}$ を用いると、 $g_1(t)$ は式⑫のように表される。ここで、 $\omega_k^{(1)}$ をレベル1のウェーブレット展開係数と呼ぶ。

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \phi(2^{-j}t - k) \quad - \text{⑪}$$

$$g_1(t) = \sum_k \omega_k^{(1)} \phi_{1,k}(t) \quad - \text{⑫}$$

以上より、レベル0近似関数 $f_0(t)$ は、レベル1の近似関数 $f_1(t)$ とレベル1のウェーブレットによって表現される関数 $g_1(t)$ に分解され、式⑬のように表される。

$$\begin{aligned} f_0(t) &= f_1(t) + g_1(t) \\ &= \sum_k s_k^{(1)} \phi_{1,k}(t) + \sum_k \omega_k^{(1)} \phi_{1,k}(t) \quad - \text{⑬} \end{aligned}$$

これを一般化して、レベル j の近似関数をレベル $j-1$ から求めるには式⑭を利用する。

$$\begin{aligned} f_{j-1}(t) &= f_j(t) + g_j(t) \\ f_j(t) &= \sum_k s_k^{(j)} \phi_{j,k}(t) \quad - \text{⑭} \\ g_j(t) &= \sum_k \omega_k^{(j)} \phi_{j,k}(t) \end{aligned}$$

これを繰り返し利用すると、レベル0の近似関数 $f_0(t)$ はレベル1, 2, ..., j の近似関数を用いて式⑮のように表される。

$$\begin{aligned} f_0(t) &= g_1(t) + g_2(t) + \dots + g_j(t) + f_j(t) \\ &= \sum_{k=1}^j g_k(t) + f_j(t) \quad - \text{⑮} \end{aligned}$$

このように、関数 $f_0(t)$ を幅の異なる(解像度の異なる)ウェーブレット成分の和で表現する解析方法を「多重解像度解析」(MRA: Multi-Resolution Analysis)と呼ぶ。

実際に画像を多重解像度解析すると、図3のようになる。ウェーブレット変換は「完全再構成」(perfect reconstruction)性を持っているので、分解・再構築が可能である。



(a) 原画像 (b) 1回分解 (c) 2回分解

図3 画像の多重解像度解析

3. 処理方法

一般的な画像電子透かしは、著作権情報を示す2値画像のロゴを埋め込むものであり、多値画像を著作権情報として埋め込むことはあまりない。2値画像の一般的な埋め込み方法は、画像情報の任意のbitについて偶数・奇数による1bitの情報の埋め込みであるが、この方法ではカラー画像を埋め込むことは困難である。

本稿ではWavelet変換後の数値(Wavelet係数)を利用することでカラー画像の埋め込みを行った。以下にその方法を述べる。なお、スケーリング関数とウェーブレットは、式⑤と式⑩のハール関数を用いている。

図4に示すように、原画像を離散Wavelet変換(以下DWTと略記)する。4つの領域に分かれ、左上をLL成分、右上をHL成分、左下をLH成分、右下をHH成分とそれぞれ呼ぶ。ここでH(High)は周波数が高いことを示し、L(Low)は周波数が低いことを意味している。また、HL成分はx方向のエッジ部分を取り出した画像、LH成分はy方向のエッジ部分を取り出した画像、HH成分はx、

y両方向のエッジ部分を取り出した画像をそれぞれ示している。



(a) 原画像 (b) Wavelet 変換後の画像

図4 原画像と Wavelet 変換後の画像

- ① 原画像について DWT を行う。
- ② DWT 後の画像について、HH 成分(右下のブロック)を取り出して更に4分割する。
- ③ 埋め込むカラー画像(ロゴ1)を赤、緑、青の3原色に分解する。
- ④ 左上のブロックにカラー画像の赤成分(R成分)、右上のブロックにカラー画像の緑成分(G成分)、左下のブロックにカラー画像の青成分(B成分)、右下のブロックに2値画像のロゴ(ロゴ2)をそれぞれ埋め込む。
- ⑤ 変更された HH 成分を元の位置に戻す。
- ⑥ Wavelet 逆変換(以下 IDWT と略記)により、透かし入り画像が得られる。

図5に埋め込み方法の流れを示す。①～⑥の流れの詳細は下記の順になる。

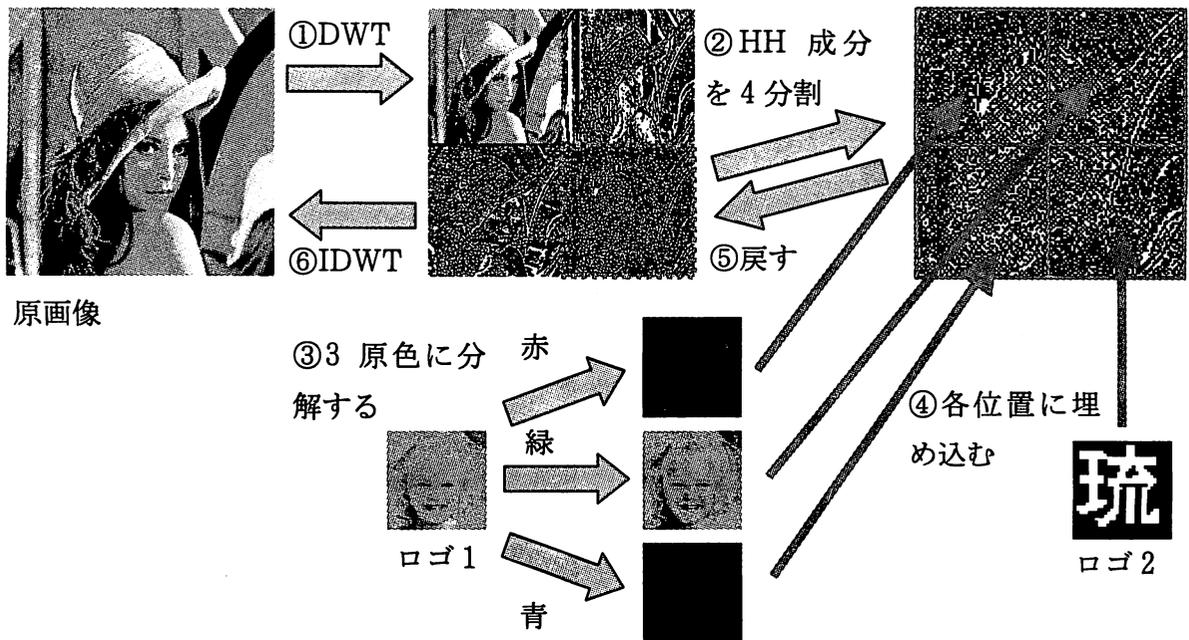


図5 処理の流れ

電子透かしを埋め込むとき、埋め込む画像に対応した数値の操作が必要になる。2値画像を埋め込む場合は、対応する画素の濃度値を偶数・奇数と分別、又は閾値を設けて2値化することにより、1bitの情報を埋め込むことができる。しかし、カラー画像は多値であり、偶数・奇数の判別による埋め込み方法は適用できない。そこで埋め込む画像の濃度値を任意のパラメータで割り、その値を

Wavelet 係数として用いる方法を用いた(図6)。

$$\begin{array}{c}
 \text{濃度値} \quad f(x, y) \\
 \downarrow \\
 \leftarrow \text{パラメータ } a \\
 \downarrow \\
 \text{透かし} \quad g(x, y)
 \end{array}$$

図6 Wavelet 係数への埋め込み

$f(x, y)$ は埋め込む画像の濃度値、 $g(x, y)$ は透かしを示している。a は埋め込みパラメータであり、 $f(x, y)$ の関数とすることで $g(x, y)$ を最適化できるが、簡略化のため本稿では定数とする。

図 4(b) の HH 成分の Wavelet 係数は図 7 に示す分布になる。一般に、風景画や人物画などの Wavelet 係数は 0 を中心とする山型の分布になることが知られている。図 7 の場合も同様であり、また大半の Wavelet 係数は $-5 \sim +5$ の間に分布していることが分かる。ヒトの眼は高周波成分には鈍感なので、この部分に透かしを埋め込むことが好ましい。

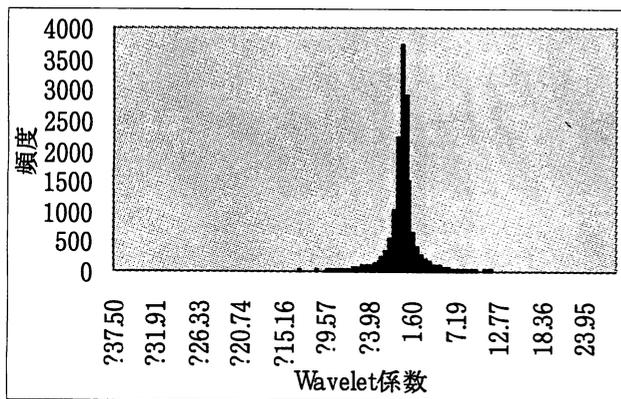


図 7 Wavelet 係数の分布

電子透かし埋め込み後の Wavelet 係数の分布は図 8 のようになる。

図 7 に比べて、分布が負の方向にシフトしている。これは元の Wavelet 係数の符号に関係なく負の方向にシフトする様な処理を行ったからある。元の Wavelet 係数と符号を同じにすると、誤差が少ない結果となることが予想され、実際に数値上の結果も良かった。しかし、主観的に、元の Wavelet 係数と同符号にする埋め込み方法より、負の方向へシフトする方法が良かったので、こちらの方法で電子透かしを行った。

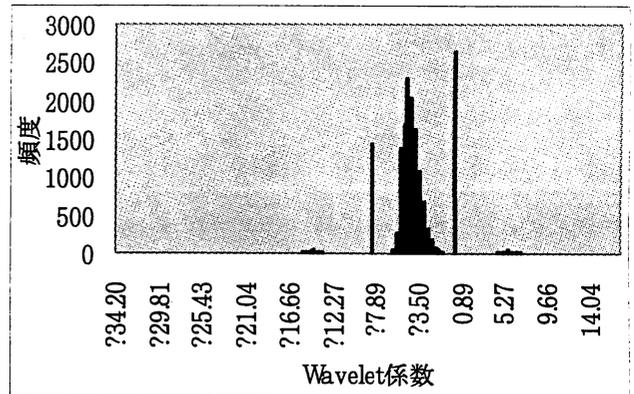


図 8 埋め込み後の Wavelet 係数の分布

透かしの検出は、埋め込みの逆を行う。つまり、透かし入り画像の Wavelet 係数にパラメータを掛けると透かしを検出できる。

4. 処理結果

原画像は 256 × 256 画素の濃淡画像、ロゴ 1 は 64 × 64 画素のカラー画像、ロゴ 2 は 64 × 64 画素の濃淡画像、パラメータは定数 30.0 としている。



(a) 原画像 (b) ロゴ 1 (c) ロゴ 2

図 9 処理に用いた画像



(a) 透かし入り画像 (b) ロゴ 1 (c) ロゴ 2

図 10 透かし入り画像と検出ロゴ

5. 評価

透かし入り画像と検出したロゴについて、処理結果の評価を行った。画像の評価尺度として PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) と相関値を用いた(表 1)。

PSNR は、処理後の画像が元の画像とどの程度の誤差があるか評価する尺度であり、式⑯により求まる。経験的に PSNR が 40[dB]以上なら、ヒトの目で元の画像との違いが知覚されないとされている。

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{255}{\sqrt{MSE}} \right) \text{ [dB]}$$

$$MSE = \frac{\sum_{x=0}^{N_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} \{f'(x, y) - f(x, y)\}^2}{N_x \cdot N_y} \quad - \text{⑯}$$

MSEは平均 2 乗誤差 (Mean Square Error)、 $f(x, y)$ は原画像、 $f'(x, y)$ は透かし入り画像、 N_x は画像の横幅の画素数、 N_y は縦幅の画素数をそれぞれ示している。PSNR を用いた評価は、透かし入り画像とロゴ 1 に対して行った。

相関値は、処理後の画像が元の画像とどの程度似た形であるかを評価する尺度であり、式⑰により求まる。相関値が 1 に近いほど元の画像との相関が高く、0 に近いほど元の画像との相関が低い。

$$C = \frac{\sum_{x=0}^{N_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} \phi(x, y) \varphi(x, y)}{\sqrt{\sum_{x=0}^{N_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} \phi(x, y)^2 \sum_{x=0}^{N_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} \varphi(x, y)^2}}$$

$$\phi(x, y) = f'(x, y) - \frac{\sum_{x=0}^{N_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} f'(x, y)}{N_x \cdot N_y} \quad - \text{⑰}$$

$$\varphi(x, y) = f(x, y) - \frac{\sum_{x=0}^{N_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} f(x, y)}{N_x \cdot N_y}$$

表 1 PSNR と相関値

	PSNR[dB]	相関値
透かし入り画像	33.78	
検出ロゴ 1	31.67	0.9520
検出ロゴ 2		0.9962

6. 攻撃

図 10(a) の画像に対して、様々な攻撃を行い、ロゴを検出できるか試みた。

6.1 JPEG 圧縮(21.69%)



(a) 透かし入り画像 (b) ロゴ 1 (c) ロゴ 2

図 11 JPEG 圧縮時の処理結果

表 2 JPEG 圧縮の PSNR と相関値

	PSNR[dB]	相関値
透かし入り画像	31.38	
検出ロゴ 1	11.27	0.2517
検出ロゴ 2		0.5531

6.2 平滑化フィルタ



(a) 透かし入り画像 (b) ロゴ 1 (c) ロゴ 2

図 12 平滑化フィルタ時の処理結果

表 3 平滑化フィルタの PSNR と相関値

	PSNR[dB]	相関値
透かし入り画像	29.78	
検出ロゴ 1	6.78	0.1246
検出ロゴ 2		0.4923

表 5 ノイズ付加の PSNR と相関値

	PSNR[dB]	相関値
透かし入り画像	30.32	
検出ロゴ 1	14.04	0.2154
検出ロゴ 2		0.5525

6.3 メディアンフィルタ



(a) 透かし入り画像 (b) ロゴ 1 (c) ロゴ 2

図 13 メディアンフィルタ時の処理結果

表 4 メディアンフィルタの PSNR と相関値

	PSNR[dB]	相関値
透かし入り画像	31.13	
検出ロゴ 1	9.26	0.2953
検出ロゴ 2		0.6783

6.4 ノイズ付加



(a) 透かし入り画像 (b) ロゴ 1 (c) ロゴ 2

図 14 ノイズ付加時の処理結果

7. まとめ

デジタルコンテンツの保護技術として、電子透かしが注目されている。画像電子透かしでは、画像中に、2 値画像を埋め込むのが一般的である。本稿では、著作者の顔画像を埋め込むことで、より強力な著作権主張が可能になると考え、Wavelet 変換を用いて多値のカラー画像を埋め込む方法を述べた。同時に埋め込んだ 2 値画像は攻撃に対してある程度の耐性があるが、カラー画像は脆弱であった。この脆弱性を利用して、画像の改ざん検知と位置の特定が可能と考えられる。

参考文献

- [1] 小野 束：「電子透かしとコンテンツ保護」、オーム社、2001
- [2] 松井甲子雄：「電子透かしの基礎 —マルチメディアのニュープロテクト技術—」、森北出版株式会社、1998
- [3] Charles K. Chui 著、桜井 明、新井 勉 訳：「ウェーブレット応用 信号解析のための数学的手法」、東京電機大学出版局、1997
- [4] 屋良朝心、山城毅：Wavelet 変換によるカラー画像を埋め込む電子透かし、2007 年電子情報通信学会総合大会講演論文集 D-11-40