

カラー画像に対するデジタルゴースト透かし方式

小田 弘[†] 家坂 宏樹[†] 阪田省二郎[†]

[†] 電気通信大学 〒182-8585 東京都調布市調布ケ丘 1-5-1

E-mail: †{koda,iesaka,sakata}@ice.uec.ac.jp

あらまし 本稿では、カラー画像に対するデジタルゴースト透かし方式を提案する。まず、モノクロ画像用のデジタルゴースト透かし方式の基本アルゴリズムについて述べる。次に、上記のアルゴリズムをカラー画像に効果的に応用するために、 RGB 色空間から $YCbCr$ 色空間への座標変換を導入する。そして、輝度成分 (Y) と色差成分 (C_b, C_r) のどちらがデジタルゴースト透かしの埋め込みに適しているかを調べる。最後に、テスト画像に対する計算機シミュレーションによって、透かし入り画像が白色雑音、画像圧縮、クリッピングの攻撃を受けた時でさえも各画像中の透かし情報が提案方式によって敏感に検出されることを示す。

キーワード 電子透かし、デジタルゴースト、カラー画像、色空間

A Scheme of Digital Ghost-Watermarking for Color Images

Hiromu KODA[†], Hiroki IESAKA[†], and Shojiro SAKATA[†]

[†] The University of Electro-Communications

Chofugaoka 1-5-1, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: †{koda,iesaka,sakata}@ice.uec.ac.jp

Abstract This paper proposes a scheme of digital ghost-watermarking for color images. First we describe the basic algorithm of digital ghost-watermarking for monochrome images. Next we introduce the transformation of RGB color space into $YCbCr$ color space in order to apply the algorithm to color images efficiently, and then we examine which of luminance component (Y) and chrominance components (C_b, C_r) is suitable for embedding digital ghost-watermarks. Finally by means of computer simulation for test images, we show that the watermark information in each image can be detected sensitively by our scheme even when the watermarked images are subjected to white noise, lossy coding and clipping.

Key words digital watermarking, digital ghost, color image, color space

1. はじめに

インターネットの急速な普及拡大につれて、マルチメディアの需要が増大している。その一方で画像や電子文書などのデジタルなコンテンツがユーザーなどによって不正にコピーされてしまう問題がクローズアップされてきた。その対策の一つとして、マルチメディアに電子透かし処理を行うことが提案されている。

これまでのデジタルゴースト透かし方式の研究は濃淡画像を対象に行ってきたが [1], 実用面を考慮すると、より多くのコンテンツに対応しなければならない。そこで、本研究では新たにカラー画像を対象とし、デジタルゴースト透かしの埋め込む方法を検討する。

2. デジタルゴースト透かしの基本原理

原信号 $x(n)$ に対して、混合信号 $g(n)$ とその相補的信号 $\hat{g}(n)$ は次式で与えられる。

$$g(n) = (1 - a)x(n) + ax(n - M) \quad (1)$$

$$\hat{g}(n) = (1 - \bar{a})x(n) + \bar{a}x(n - M), \quad \bar{a} = -a \quad (2)$$

但し、 $x(n) (= 0(n < 0))$ であり、パラメータ a は混合率 ($|a| \leq 0.5$), M はゴーストの遅延である。これより、 $(g(n), \hat{g}(n))$ をバイポーラゴーストモデルと呼び、 $(g(n), x(n))$ をユニポーラゴーストモデルと呼ぶ [1]。

バイポーラゴーストモデルに対するケプストラム差分は次のように表される。

$$d_{pc}(g) = Z^{-1}[\log|Z[g(n)]|^2] - Z^{-1}[\log|Z[\hat{g}(n)]|^2] \quad (3)$$

ここで、 $Z^{-1}[\cdot]$ は z 変換 $Z[\cdot]$ の逆変換である。

図 1 は混合率 a に対するバイポーラゴーストモデルのケプストラム検出係数 $d(=d_{pc}(M)-d_{pc}(0))$ とユニポーラゴーストモデルのケプストラム検出係数 $d_0(=e_{pc}(M)-e_{pc}(0); e_{pc}(q)=Z^{-1}[\log Z[g(n)]^2]-Z^{-1}[\log Z[x(n)]^2])$ を示すものである。図 1 から次のことがわかる。

- (P1) $a > 0$ の時は $d > 0$ で、 $a < 0$ の時は $d < 0$ である。
- (P2) $d \approx c \cdot a$ となり、ここで c は定数である。
- (P3) $0 < |a| \leq 0.2$ において、 $|d| > |d_0|$ 。

バイポーラゴーストモデルに対する上記の性質 (P1) を利用して、透かし入り画像から透かし情報を検出する。そして時間領域での混合信号対 $(g(n), \hat{g}(n))$ の代わりに、透かし情報を埋め込むのに適している、DCT 領域における中帯域の混合信号対 $(g(m), \hat{g}(m))$ に対して透かし情報を埋め込む。

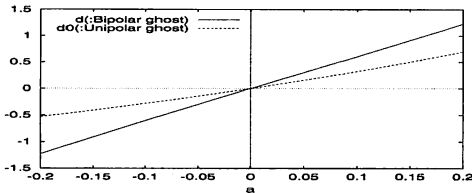


図 1 混合率 a によるバイポーラモデルのケプストラム検出係数 d (—) とユニポーラモデルのケプストラム検出係数 d_0 (---) の値の違い

3. 埋め込み・検出の基本アルゴリズム

第 2 節で述べた性質を利用して、モノクロ画像への透かし情報の埋め込みと検出を行う手順を以下に示す [1]。なお、後述するカラー画像への応用では、カラー画像中の 1 つの成分 (モノクロ画像) に透かし情報を埋め込み、検出する際に、下記の基本アルゴリズムを適用する。

◇ 埋め込みアルゴリズム

- (S1) カウンタ i を 0 にセットする。
- (S2) 原画像の i ライン目のデータを取り出し、偶数番目と奇数番目の 2 つの系列に分ける。
- (S3) 各系列を n 点の DCT で周波数領域に変換し、中帯域に透かし情報を埋め込む。この時、透かし情報が “0” (“1”) ならば偶数項に対する混合率の符号を負 (正) として埋め込みを行う。一方、奇数項に対しては偶数項の逆の符号で埋め込みを行う。
- (S4) IDCT で逆変換した後、2 つの系列を合わせる。
- (S5) i が最終ラインならば処理を終了する。そうでなければ $i = i + 1$ とし、(S2) に戻る。

◇ 検出アルゴリズム

- (S1) カウンタ i を 0 にセットする。
- (S2) 透かし入り画像の i ライン目のデータを取り出し、偶数番目と奇数番目の 2 つの系列に分ける。そして DCT を使って各系列を周波数領域に変換する。
- (S3) 上記の各中帯域の系列から式 (3) のケプストラム差分 $d_{pc}^{(i)}(q)$ を求める。
- (S4) 更に、ケプストラム検出係数 $d(i)(=d_{pc}^{(i)}(M)-d_{pc}^{(i)}(0))$ を計算し、埋め込まれた混合率の符号を判定する。
- (S5) i が最終ラインならば処理を終了する。そうでなければ

$i = i + 1$ とし、(S2) に戻る。

4. 硬判定相互相関 (HCC) の定義と閾値

$d(i)(=d_{pc}^{(i)}(M)-d_{pc}^{(i)}(0))$ は i ライン上の検出された系列、 $p(i)$ は元の PN 系列 $\in \{1, -1\}$ とする。 $d(i)/|d(i)|$ と $p(i)$ の硬判定相互相関 (HCC) を次式で定義し [3] [4]、HCC が指定された閾値を超えた場合に検出可能とする。

$$HCC(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{d(i)}{|d(i)|} \cdot p(i+\tau) \quad (4)$$

但し、 $d(i)/|d(i)| \in \{1, -1\}$ であり、 $d(i)$ の符号を判定して、 ± 1 を求めることができる。上式で、 $d(i)/|d(i)|$ と $p(i)$ の符号が全て一致する場合、 $HCC(0) = \frac{1}{N} \cdot N = 1$ であることに注意されたい。以上のことから、硬判定相互相関では、整数の積和演算となり、相関計算を効果的に実行できる。

また、硬判定相互相関の閾値は統計学 [2] に基づき、相関が無い場合に閾値を超える確率を表 1 のように計算できる [3] [4]。

表 1 硬判定相互相関の閾値とその閾値を超える確率

硬判定相互相関の閾値 T	閾値 T を超える確率
0.1875	1.35×10^{-3}
0.2500	3.17×10^{-5}
0.3125	2.87×10^{-7}
0.3750	9.87×10^{-10}
0.4375	1.28×10^{-12}

5. YC_bC_r 空間での埋め込み実験

◇ YC_bC_r 成分への埋め込み方法

次式のように RGB 信号をデジタルテレビや JPEG 圧縮などに用いられている YC_bC_r 色空間へと変換する [5]。次に、 Y, C_b, C_r のいずれかの成分にデジタルゴースト透かしを埋め込み、その後、逆変換し、透かし入り画像を生成する。輝度成分 Y に埋め込む場合と、色差成分 C_b, C_r に埋め込む場合のどちらがデジタルゴースト透かし方式の埋め込みに適しているかを計算機シミュレーションで明らかにする。

$$\begin{pmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.169 & -0.331 & 0.500 \\ 0.500 & -0.419 & -0.081 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.000 & 0 & 1.402 \\ 1.000 & -0.344 & -0.714 \\ 1.000 & 1.772 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{pmatrix} \quad (6)$$

◇ シミュレーション条件

“ISO/JIS-SCID” [6] より切り出した図 2, 図 3, 図 4 のようなカラー画像 “CAFETERIA” (256 × 256 画素, RGB 各 8[bit], 256 階調) をテスト画像として用いる。そして、遅延 $M = 2$ 、混合率 $|a|$ は Y 成分には 0.01 ~ 0.20 まで 0.01 刻みで、 C_b, C_r 成

分には 0.01 と 0.05~0.70 まで 0.05 刻みでデジタルゴースト透かしを埋め込み、攻撃をする。なお、Y 成分と C_b , C_r 成分で混合率を変えているのは、後述の結果から C_b , C_r 成分の方が SNR が下がりにくいからである。その後、検出した系列と標準系列との硬判定相互相関を式 (4) から計算し、閾値による透かし検出を行う。閾値は、表 1 の結果から $T = 0.3125$ とし [3] [4], 埋め込み透かしデータは 8 次の Gold 系列 [7](周期 255) の最後に “0” を付加し、周期 256 のデータとした系列とする。

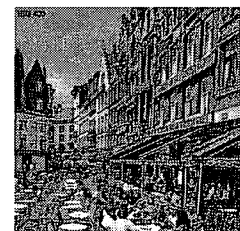
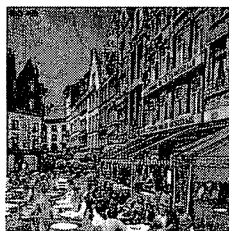


図 2 CAFETERIA の R 成分 図 3 CAFETERIA の G 成分

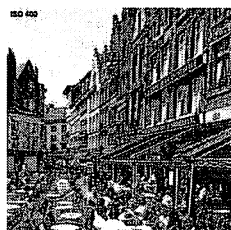


図 4 CAFETERIA の B 成分

◇ 基本要件の検討

シミュレーションで使用するデジタルゴースト透かし方式に対して、基本的な透かし要件を検討する。要件として以下の 5 つが挙げられる [8]。

- (1) 不可知性：透かし情報の埋め込みは人間の視覚特性を考慮して行っているため、不可知である。
- (2) 有効埋め込み量：今回のシミュレーション条件では、周期 256 の系列を使っている。よって、文字情報としての透かしビットは 256[bit] である。しかし、透かし情報として使うためには Gold 系列としての性質を持っていないといけないため、シリアル番号の有効埋め込み量は 16[bit] である。
- (3) 強固性：攻撃に対する透かしの耐性であり、後述するシミュレーションでいくつかの攻撃に対する耐性を調べる。
- (4) 安全性：埋め込み・検出のアルゴリズムが知られても、鍵となる PN 系列およびデジタルゴーストの遅延を知らなければ透かし情報を完全に取り除くことは不可能であり、安全であるといえる。
- (5) 忘却・非忘却：相関法を用いて透かし検出を行うため原画像を必要としない、忘却型の電子透かしである。

◇ 結果と考察

(A) 攻撃前の透かし入り画像の特性

透かし情報を入れる前の Y, C_b , C_r 成分のモノクロ画像を図

5, 図 6, 図 7 に各々示す。各モノクロ画像に対して、第 3 節の方法で透かし情報を入れたときの透かし入り画像の特性を調べる。

まず、デジタルゴースト透かしの混合率 $|a|$ と透かし入り画像の SNR との関係を図 8 に示す。デジタルゴースト透かし方式では混合率 $|a|$ は埋め込みの強さを表し、混合率が大きくなると、SNR は小さくなる。つまり、画質の劣化が大きくなる。Y 成分に埋め込む場合、混合率が大きくなると急激に SNR が減少する傾向にあるが、 C_b , C_r 成分に埋め込む場合は、混合率が大きくなるとゆるやかに SNR が減少する。

次に、透かし入り画像の SNR と検出した HCC のピーク値との関係を図 9 に示す。HCC のピーク値が閾値を上回る場合、検出が可能である。Y 成分への埋め込みより、 C_b , C_r 成分に埋め込む方が良好な性能を示した。

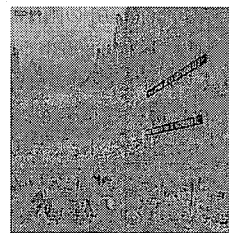
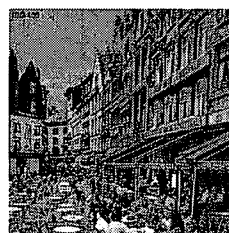


図 5 CAFETERIA の Y 成分 図 6 CAFETERIA の C_b 成分 (+128)

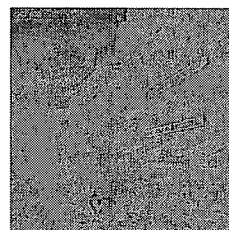


図 7 CAFETERIA の C_r 成分 (+128)

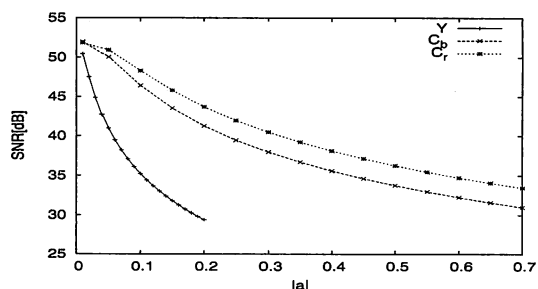


図 8 混合率 $|a|$ と SNR

(B) 攻撃を加えた画像からの検出

デジタルゴースト透かしを埋め込んだ画像に攻撃を加えたときの検出性能について調べる。

図 10 は攻撃前の透かし入り画像の SNR と白色雑音付加後の

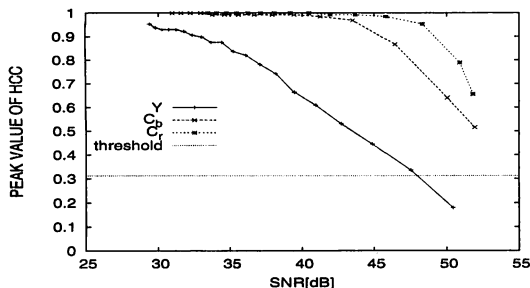


図9 SNRとHCCのピーク値

HCCのピーク値との関係を示す。その際、白色雑音の標準偏差は $\sigma = 32, 64, 96$ とした。Y成分への埋め込みでは、攻撃前のSNRが約 $40.0[\text{dB}]$ の画像に $\sigma = 64$ の白色雑音を付加したときのSNRは約 $13.3[\text{dB}]$ であった。これほど劣化した画像からでも検出が可能であり、白色雑音付加に対して強い耐性を有することがわかる。一方、 C_b, C_r 成分への埋め込みではHCCのピーク値が非常に小さくなり、検出が困難であった。

図11は攻撃前の透かし入り画像のSNRとJPEG圧縮(圧縮比 $\frac{1}{8}$)による攻撃を加えたときのHCCのピーク値との関係を示す。JPEG圧縮に対してはY成分への埋め込みでは十分な耐性があるが、 C_b, C_r 成分への埋め込みでは全く検出ができない。これは、JPEG圧縮時に色差成分である C_b, C_r 成分を間引くことでデータの圧縮を行っているためであると考えられる。

図12は攻撃前の透かし入り画像のSNRとJPEG2000圧縮(圧縮比 $\frac{1}{8}$)による攻撃を加えたときのHCCのピーク値との関係を示す。JPEG圧縮の場合とは異なり、 C_b, C_r 成分への埋め込みでもある程度の耐性はあるが、Y成分への埋め込みの方が高いSNR時に相対的に優れた耐性を示している。

図13は攻撃前の透かし入り画像のSNRとクリッピングによる攻撃を加えたときのHCCのピーク値との関係を示す。クリッピングは50%, 75%の場合について調べた。クリッピングでは基本的に攻撃無しの場合の耐性に大きく依存するため、 C_b, C_r 成分への埋め込みの方が良い耐性を持つ。ただし、どちらの成分への埋め込みにおいても、デジタルゴースト透かし方式はクリッピングに対し強い耐性を持っていることがわかる。これはクリッピングした部分のケプストラム差分は0となり、相関計算においてピークだけでなく、サイドローブも弱めるためであると考えられる。

(C) まとめ

カラー画像に対するデジタルゴースト透かし方式で、 YC_bC_r の輝度成分と色差成分への埋め込み特性を比較した。その結果、白色雑音付加、JPEG圧縮に対する耐性の無い色差成分への埋め込みよりも輝度成分に対する埋め込みの方が優れていることがわかった。

6. 極座標空間での埋め込み実験

前節の計算機シミュレーションにより、デジタルゴースト透かし方式は輝度成分に対して埋め込みを行う方が有効である

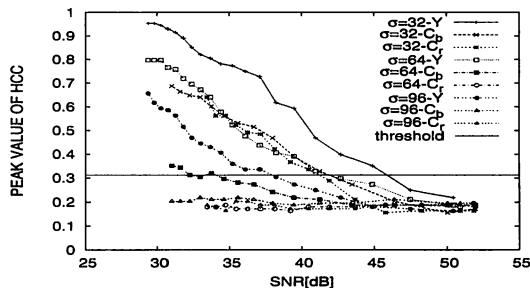


図10 SNRと白色雑音付加後のHCCのピーク値

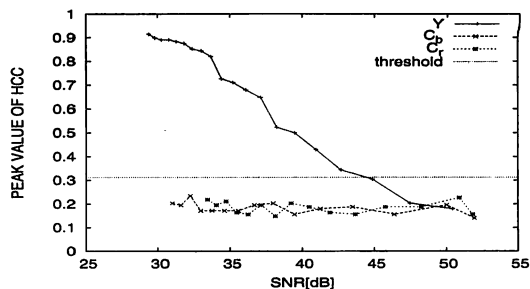


図11 SNRとJPEG圧縮後のHCCのピーク値

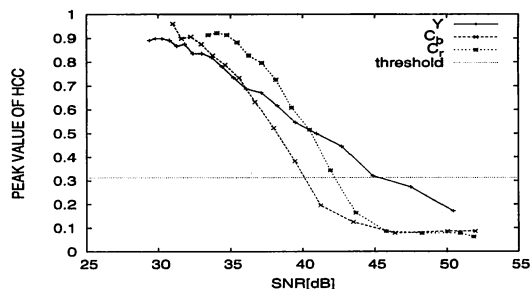


図12 SNRとJPEG2000圧縮後のHCCのピーク値

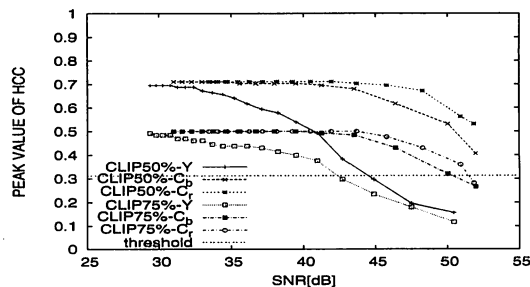


図13 SNRとクリッピング後のHCCのピーク値

ことがわかった。次に、他の変換方式との比較を考える。

◇ 極座標空間での埋め込み方法

RGBを直交座標と考えると、円柱座標など様々な座標空間が考えられるが、今回は次式によって極座標空間へ変換する(図14)[9]。そして、 r 成分(=輝度成分に相当するもの)へ透かしデータを埋め込み、逆変換を行う。なお、前節の YC_bC_r 空間へ

の変換は直交変換であったが、この方式は非直交変換である。

$$\begin{pmatrix} r \\ \theta \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{R^2 + G^2 + B^2} \\ \tan^{-1} \frac{\sqrt{R^2 + G^2}}{B} \\ \tan^{-1} \frac{G}{R} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \sin \theta \cos \phi \\ r \sin \theta \sin \phi \\ r \cos \theta \end{pmatrix} \quad (8)$$

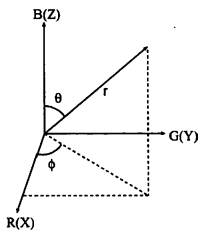


図 14 極座標空間

極座標空間での埋め込みと前節の YC_bC_r 空間での埋め込み特性を比較するため、以下のように方式を定義する。

- 方式 1(RTP) : 式 (7), (8) により極座標空間へ変換した後, r (= 輝度成分に相当するもの) 成分への埋め込みを行う。
- 方式 2(YC_bC_r) : 式 (5), (6) により YC_bC_r 空間へ変換した後, Y 成分への埋め込みを行う。

◇ シミュレーション条件

カラー画像 “CAFETERIA” (256 × 256 画素, RGB 各 8[bit], 256 階調) に, 遅延 $M = 2$, 混合率 $|a|$ は 0.01 ~ 0.20 まで 0.01 刻みでデジタルゴースト透かしを埋め込み, 攻撃をする。その後, 検出した系列と標準系列との硬判定相互相関を式 (4) から計算し, 閾値による透かし検出を行う。閾値は, 表 1 の結果から $T = 0.3125$ とし [3] [4], 埋め込み透かしデータは 8 次の Gold 系列 [7] (周期 255) の最後に “0” を付加し, 周期 256 のデータとした系列とする。

◇ 結果と考察

(A) 攻撃前の透かし入り画像の特性

透かし情報を入れる前の r, θ, ϕ 成分のモノクロ画像を図 15, 図 16, 図 17 に各々示す。その時, θ, ϕ 成分は値が小さいため 100 倍して表示している。各モノクロ画像に対して, 第 3 節の方法で透かし情報を入れたときの透かし入り画像の特性を調べる。

まず, デジタルゴースト透かしの混合率 $|a|$ と透かし入り画像の SNR との関係を図 18 に示す。方式 1(RTP), 方式 2(YC_bC_r) とも同じような特性を示した。

次に, 透かし入り画像の SNR と検出した HCC のピーク値との関係を図 19 に示す。こちらもほとんど同じような特性であった。

(B) 攻撃を加えた画像からの検出

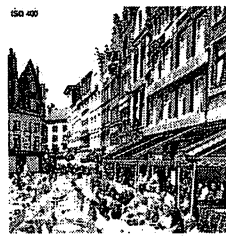


図 15 CAFETERIA の r 成分

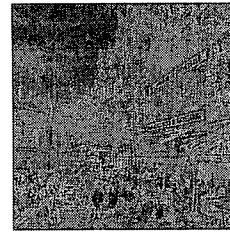


図 16 CAFETERIA の θ 成分 ($\times 100$)



図 17 CAFETERIA の ϕ 成分 ($\times 100$)

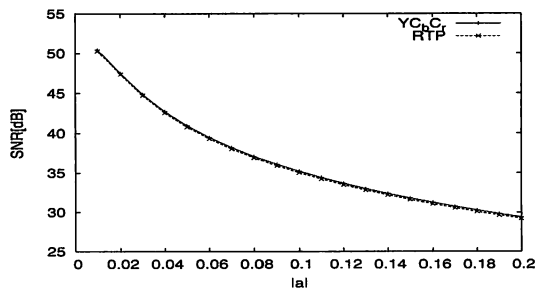


図 18 混合率 $|a|$ と SNR

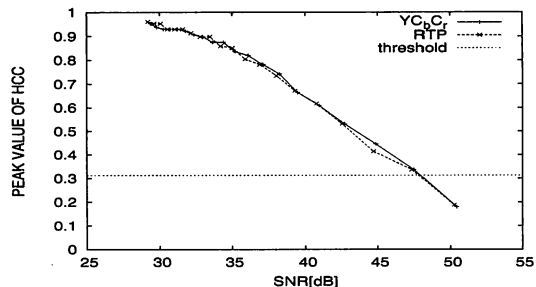


図 19 SNR と HCC のピーク値

デジタルゴースト透かしを埋め込んだ画像に攻撃を加えたときの検出性能について調べる。

図 20 は攻撃前の透かし入り画像の SNR と白色雑音付加後の HCC のピーク値との関係を示す。このとき, 白色雑音の標準偏差は $\sigma = 32, 64, 96$ とした。白色雑音が強くなると方式 1(RTP) が方式 2(YC_bC_r) よりも良い性能を示した。

図 21 は攻撃前の透かし入り画像の SNR と JPEG 圧縮 (圧縮比 $\frac{1}{8}$) による攻撃を加えたときの HCC のピーク値との関係を示す。JPEG 圧縮に対しては, 白色雑音の場合とは逆に方式

2(YC_bC_r)が若干良い性能を示した。これは JPEG 圧縮時に色差成分を間引いているため、JPEG 圧縮と同じ方式の輝度成分に透かしデータを埋め込んだ方が影響が少なかったのではないかと考えられる。

図 22 は攻撃前の透かし入り画像の SNR と JPEG2000 圧縮 (圧縮比 $\frac{1}{5}$) による攻撃を加えたときの HCC のピーク値との関係を示す。方式 1(RTP), 方式 2(YC_bC_r) でそれほど違いは見られず、JPEG 圧縮時と似た特性を示した。

図 23 は攻撃前の透かし入り画像の SNR とクリッピングによる攻撃を加えたときの HCC のピーク値との関係を示す。クリッピングは 50%, 75% の場合について調べた。これも方式 1(RTP), 方式 2(YC_bC_r) ともほとんど同じような特性を示した。

(C) まとめ

カラー画像に対するデジタルゴースト透かし方式で、2 種類の色変換方式の輝度成分への埋め込み特性を比較した。その結果、白色雑音付加では方式 1(極座標変換)が、JPEG 圧縮では方式 2(YC_bC_r 変換)が相対的に優れた性能を示した。また、他に"ISO/JIS-SCID"より切り出した"FRUITS"のカラー画像 (256 × 256 画素, RGB 各 8[bit], 256 階調) に対しても同様のシミュレーションを行い、ほぼ同じ特性を確認した。

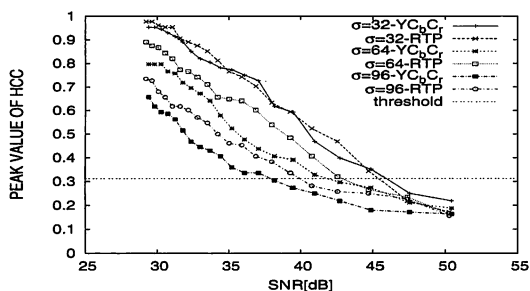


図 20 SNR と白色雑音付加後の HCC のピーク値

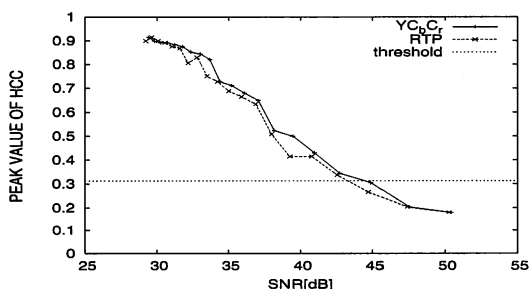


図 21 SNR と JPEG 圧縮後の HCC のピーク値

7. 結 論

本論文では、これまで濃淡画像を対象にしてきたデジタルゴースト透かし方式をカラー画像に応用した。まず、輝度成分と色差成分への埋め込み実験では、輝度成分に埋め込みを行っ

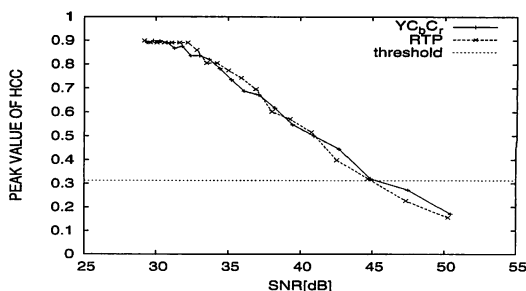


図 22 SNR と JPEG2000 圧縮後の HCC のピーク値

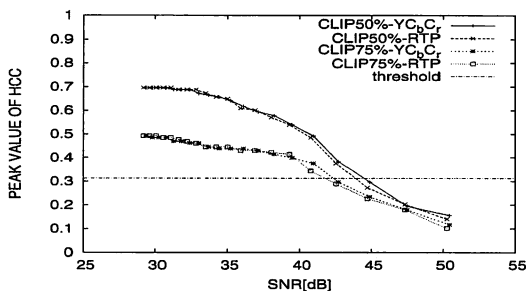


図 23 SNR とクリッピング後の HCC のピーク値

た方が白色雑音付加、JPEG 圧縮の各攻撃に対して良い耐性を持つことがわかった。また、極座標変換と YC_bC_r 変換の後に輝度成分に埋め込みを行った場合は、白色雑音付加に対しては極座標変換が、JPEG 圧縮では YC_bC_r 変換が相対的に優れた特性を示した。全体として、デジタルゴースト透かし方式は各攻撃に対し、十分な耐性を持っていることがわかった。

今後の課題としては、より良い耐性を持つ他の色空間への変換方法を検討することが挙げられる。

謝辞 本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金萌芽研究 (課題番号 18656111) の援助による。

文 献

- [1] H. Koda, H. Kadowaki and S. Sakata: "A scheme of ghost-based watermarking in DCT domain using cepstral difference and Gold sequence", *Proc. of ISITA 2004*, Italy, pp.557-562(Oct. 2004).
- [2] 押川, 阪口:基礎統計学, 培風館 (1989).
- [3] 家坂, 小田, 阪田: "デジタルゴースト透かし方式の相関検出に関する一検討", 第 49 回システム制御情報学会研究発表講演会, pp.161-162(2005-05).
- [4] 家坂, 小田, 阪田: " 硬判定相互相関を利用したデジタルゴースト透かし方式", 信学技報, IT2006-39, pp.25-30(2006-07).
- [5] 磯:デジタル画像処理入門, 産業能率大学出版社 (2005).
- [6] 画像処理技術標準化委員会:高精細カラーデジタル標準画像データ ISO/JIS-SCID, 日本規格協会 (1996).
- [7] R. Gold: "Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing", *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. IT-13, No. 4, pp.619-621(Oct. 1967).
- [8] A.Hanjalic, et al.:Image and Video Databases, *Elsevier* (2000).
- [9] 栗田:基礎数学選書 11 座標, 裳華房, pp.149-150(1974).