

## 放送監視のための非参照型画像電子透かし法

橘 高志<sup>†</sup>      藤吉 正明<sup>††</sup>      貴家 仁志<sup>††</sup>

A Watermarking Scheme without Reference Images for Broadcast Monitoring

Takashi TACHIBANA<sup>†</sup>, Masaaki FUJIYOSHI<sup>††</sup>, and Hitoshi KIYA<sup>††</sup>

あらまし CM や番組の素材コード送出確認に代表される放送監視の自動化を目的に、本論文では透かし系列抽出時に参照画像を必要としない非参照型画像電子透かし法を提案している。この提案法では、DCT 領域で埋込対象係数を離散化した後、標準正規乱数で構成した透かし系列を埋め込むことで、透かし系列の抽出時に参照画像を不要としている。更に提案法では、任意の画像において所望の画質 (PSNR) をもつ透かし画像を達成できるため、画像に依存せず常に画質を維持できる特長をもっている。したがって、画像ごとにパラメータを求めることなく常に同じ手順で動画へ透かし系列を埋め込み、更にその透かし系列を参照画像を用いずに抽出することが可能となる。HDTV デジタル VTR のガイドラインである 56 dB 以上の画質を透かし画像においても維持できること、参照画像を用いずに透かし系列が抽出できること、MPEG 耐性を有することをシミュレーションによって確認した。

キーワード 電子透かし, 放送監視, 画質保証

### 1. ま え が き

近年、通信衛星 (Communication Satellite) や放送衛星 (Broadcast Satellite) によるデジタル放送の進展に伴い放送局の多チャンネル化が進んでいる。2003 年からは大都市圏で地上波デジタル放送が開始され、更に多チャンネル化が進むと予想される。一方、現在各放送局では放送画像の画質や内容を送出マスタスイッチャー出力により有人監視している。監視は図 1 に図示するようにスイッチャーの現用系出力、予備系出力、チューナ出力の画像をテレビモニタにより確認することで行われている。しかし、放送局内の多チャンネル化が進む中、この放送画像の有人監視には限界が見えており、監視の自動化が急務の課題となっている。

このような背景から、放送監視の自動化のためにいくつかの方法が検討されている [1] ~ [7]。その一つは、CM 素材の自動送出確認を画像の垂直ブラン

ク期間へ多重された素材コードを用いて行う方法である [1]。しかし、局内の画像処理及び編集機器は一般にブランキングデータを保存することは前提としていないため、ブランキングデータを保存するためには専用装置の開発が必要となる。例えば、圧縮技術に基づく記録機器では、一般にブランキングデータを保存しない設定がデフォルトである。

また、データ探索の技術を放送監視に応用する研究も提案されている [2], [3]。この方法は画質を劣化させることがない方法であるが、特徴量の抽出に多くの処理量を必要とする。そのため、動画のリアルタイム

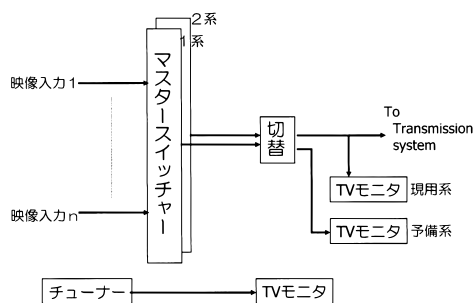


図 1 放送監視の例

Fig. 1 Example of broadcast monitoring.

<sup>†</sup> 日本電気エンジニアリング株式会社, 府中市  
NEC Engineering, Ltd., 5-22-5 Sumiyoshi-cho, Fuchu-shi,  
183-8502 Japan

<sup>††</sup> 東京都立大学大学院工学研究科電気工学専攻, 八王子市  
Department of Electrical Engineering, Tokyo Metropolitan  
University, 1-1 Minami-Osawa, Hachioji-shi, 192-0397  
Japan

監視のためには課題を残していると考えられる。

一方、電子透かしの技術を用いて素材コードを画像へ埋め込む方法の検討も行われている [4]~[7]。これらの方法は垂直ブランキングデータの保存が保証されていない各種機器の使用のもとでも適用可能である。しかしながら、電子透かしは画像データを劣化させること、そのデータ抽出が煩雑となる等の欠点をもっている。本論文では、後者の電子透かしの方法に属し、従来法のもつ問題を改善した新しい方法を提案する。

電子透かし技術を放送監視へ用いる場合には、次の要件を考慮する必要がある。

- ( a ) 画像に依存しないで自動的に所望の画質が維持できること
- ( b ) 参照画像の入手が困難な場合でもデータ抽出が可能であること
- ( c ) MPEG に代表される画像圧縮に耐性を有すること

これらの要件に対して、従来法 [4]~[6] では、条件 ( b ) を考慮するために画像と埋め込む擬似ノイズパターンとの間の無相関性を仮定したデータ抽出アルゴリズムを使用している。しかし、この無相関性の仮定が成立しない画像は多く存在し、その場合にはデータ抽出が困難となってしまう [8]。更に、これらの方法は要求条件 ( a ) も考慮されていない。このような問題に対して、従来法 [7] では、上述の無相関性を仮定しない非参照型のデータ抽出アルゴリズムを提案している。しかし、データ埋め込みに伴う画質劣化を制御するためには、パラメータを画像ごとに計算する必要がある。したがって従来法 [7] では、やはり要求条件 ( a ) の自動的に高画質を得ることは困難である。

一方、放送監視を主目的にしていないが多くの電子透かしの方法が研究されている。その中で、非参照型電子透かし法の研究も行われている。従来法 [9], [10] は先の方法 [4]~[6] と同様に変換係数と透かし系列との無相関性を仮定している。また、方法 [11], [12] は、そのような仮定を必要としないが、データ埋め込み後の画像に対して画像圧縮耐性を有していない。一方、任意の画像に対して所望画質を得る電子透かし法の研究も行われている [13]~[15]。しかし、それらの方法は参照画像が必要となるだけでなく、かつ画像ごとに制御パラメータを求める必要がある。

本研究の目的は、以上のような従来法がもつ問題点を解決し、条件 ( a ) ~ ( c ) を満たす電子透かし法を提案することにある。特に提案法では、要求条件

( a ) ~ ( c ) を考慮すると同時に、HDTV デジタル VTR のガイドラインである 56 dB 以上 [17] の画質を透かし画像においても維持できることを目指した。

## 2. 電子透かし法を用いた放送監視

### 2.1 放送監視システムと素材 ID 情報

放送監視を自動化するシステムの例を図 2 に示す。このシステムでは、電子透かし法を用いて画像へ素材 ID 情報などを埋め込み、監視ポイントでその ID を確認する。CM 確認を例にとれば、送出サーバへ素材をファイリングする際に素材コードを付加しマスタスイッチャー出力でコードの抽出を行う。CM はあらかじめ決められたオンエアリストに従って放送されるため、スイッチャー出力で抽出された素材コードとオンエアリストと照合することで送出確認が可能となる。送出サーバや VTR へ収録された番組、生番組でも同様の方法をとることで自動監視が可能となる。

放送監視では、透かし画像が高画質であり、その画質が画像に依存しないで維持できることが求められる。この背景には、デジタル機器の普及に伴い放送局で扱われる画像が非常に高画質となっており、放送画像へ情報を埋め込んで生じる画質劣化の許容限が非常に小さいことが挙げられる。例えば、HDTV 用デジタル VTR のガイドラインでは、8 ビット/画素でサンプリング時 56 dB 以上の SN 比が要求されている [17]。また、放送監視では素材コードを埋め込む場所と抽出する場所が離れているため、原画像を参照画像として利用することができない。

ここで、画像へ埋め込むデータ量、すなわち素材コードについて CM の送出確認を例にして述べる。素

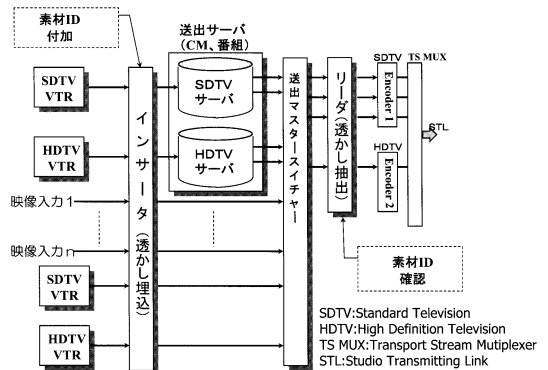


図 2 放送監視の自動化

Fig. 2 Automated broadcast monitoring.

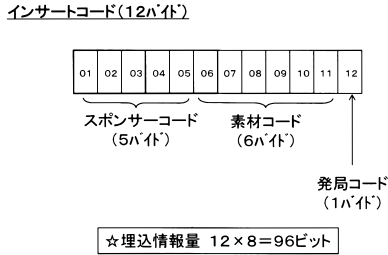


図 3 CM 素材コード例  
Fig. 3 Example of commercial ID codes.

材コードのフォーマットは、CM 素材の多いキー局の  
スポンサー数、素材数を勘案して図 3 に示すように最  
大 96 ビットが必要となる。このデータ量は静止画 CM  
も考慮すると 1 フレーム画像内に埋め込む必要がある。  
このことから、本論文では 1 フレーム画像内へ 96 ビッ  
トのデータ量を埋め込むことを前提とする。すなわち、  
インタレース画像では、1 フレームが 2 フィールドで  
構成されているため、1 フィールド画像へは、48 ビッ  
トのデータ量を埋め込むことを前提とする。

### 2.2 提案する電子透かしの要求条件

ここで、放送監視に用いる電子透かし法で考慮する  
べき点を整理する。

- 放送局で扱われる映像素材はテレビカメラで撮  
像した自然画像から CG のような人工画像まで多岐に  
わたっているため、画像と透かし系列との無相関性を  
前提にできない
- 放送局で扱われる映像素材は動画中心で画像ご  
とのパラメータを事前に計算するのは難しい
- 放送画像はオリジナル素材として再利用される  
可能性があるため、透かし画像においても高画質を維  
持する必要がある
- 埋め込んだ情報を取り出す場所では原画像を参  
照できない
- 放送局では、図 2 の送出サーバのように圧縮技  
術に基づく記録機器が使用されているため、画像圧縮  
耐性が必要となる。

以上のことをまとめると放送監視に適応した電子透  
かし法では下記の要求条件を満たす必要がある。

要求条件 1 画像に依存せず自動的に所望の画質  
(56 dB 以上)を維持できる

要求条件 2 データ抽出の際に参照画像がいらない

要求条件 3 MPEG に代表される画像圧縮に耐性  
を有する

表 1  $M$  ビットの埋込データの長さ  $L$  の透かし系列への  
写像

Table 1  $L$ -length watermark sequences corresponding  
to  $M$ -bits data to be embedded.

$i$	埋込データ $\mathbf{x}_i$	透かし系列 $\mathbf{w}_i$
1	$\mathbf{x}_1 = (0, \dots, 0)$	$\mathbf{w}_1 = (w_{11}, \dots, w_{1L})$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$i$	$\mathbf{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{iM})$	$\mathbf{w}_i = (w_{i1}, \dots, w_{iL})$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$2^M$	$\mathbf{x}_{2^M} = (1, \dots, 1)$	$\mathbf{w}_{2^M} = (w_{2^M1}, \dots, w_{2^ML})$

### 3. 提案の電子透かし法

提案法は、埋込データがある透かし系列に写像し、  
それを画像の離散コサイン変換 (DCT) 係数に埋め込  
み、相関の大小により透かし系列を抽出する相関利用  
型電子透かし法 [8] ~ [10], [13] ~ [16] に基づいている。  
以下、本方法について詳述する。

#### 3.1 埋込データと透かし系列の関係 [16]

最初に、提案法で使用する透かし系列について説明  
する。

まず、表 1 に示すように  $M$  ビットの埋込データ

$$\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM}), x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (1)$$

と  $2^M$  個の透かし系列との 1 対 1 対応を考える。透  
かし系列  $\mathbf{w}_i = (w_{i1}, \dots, w_{iL})$  は、各要素  $w_{ij}$  が分散  
 $\sigma_w^2$ 、平均 0 の正規分布に従う乱数で構成された実数  
値系列である。また、 $L$  は透かし系列の長さを表して  
いる。

次に各フレーム画像へ  $M = 96$  ビットのデータを埋  
め込む場合を考える。上述の方法を直接適用し、96  
ビット埋め込むためには系列長  $L$  の透かし系列が  $2^{96}$   
個必要となる。明らかに、その個数は膨大であり、そ  
の系列の発生、データの埋込みや抽出操作は非現実的  
なものになってしまう。そこで、 $M$  ビットの埋込デー  
タ  $\mathbf{x}_i$  をより短い  $M_s$  ビットごとに分割し (図 4 参  
照)、 $M_s$  ビットの各部分ビット列に対して系列長  $L_s$   
の透かし系列を  $2^{M_s}$  パターン準備し対応させる。こ  
の方法により透かし系列数を低減し、データ埋込みや  
抽出操作を容易にすることができる。

このとき、

$$M \leq M_s \times K \quad (2)$$

が成立する整数  $K$  を選択すると、各フレームに  $M_s \times K$   
ビット埋め込むことにより  $M$  ビットの埋込データ  $\mathbf{x}_i$

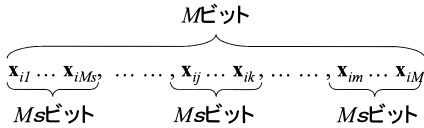


図4 透かし系列数の低減のための埋込データ  $x_i$  の分割  
Fig. 4 Deviding embedding data  $x_i$  for reducing the number of watermark sequences.

の情報を1枚のフレーム画像へ透かすことが可能となる。

### 3.2 埋込アルゴリズム

提案する埋込データの画像への埋込アルゴリズムを説明する。ただし、ここで使用する画像は、8ビット/画素の濃淡画像で、その輝度値は  $A = 2^8 - 1$  から0の範囲に存在することを仮定する。また、画像は、隣接するブロックに分割され、そのブロックサイズを  $N_x \times N_y$  とする。3.1では、 $M$ ビットの埋込データを  $M_s$ ビットでブロック分割し、その  $M_s$ ビットの部分ビット列に対して透かし系列を対応させることを述べた。ここでは、議論を簡潔にするため混乱のない限り、その  $M_s$ ビットの埋込データを

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{M_s}), x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (3)$$

と表し、そのデータに対応する実数値の透かし系列を

$$\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_{L_s}) \quad (4)$$

と略記する。

提案する埋込アルゴリズムは、 $M_s$ ビットのデータ埋込みにに対して、次のような手順で実行される。ただし、式の導出や詳細な説明は後述する。

[手順1] 透かし画像の画質劣化の目標値をPSNRで値  $\text{PSNR}_{\text{tar}}[\text{dB}]$  と設定する。

[手順2]  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  を用いてDCT係数の量子化ステップ値  $Q$  を式(5)及び(6)より求める。

$$Q = \frac{A \times \sqrt{D \times N_x N_y}}{10^{\frac{\text{PSNR}_{\text{tar}}}{20}}} \quad (5)$$

ただし、

$$D = \frac{12N_\sigma^2}{N_\sigma^2 + 3} \quad (6)$$

後述するが、本論文では  $N_\sigma = 3$  を選択するので  $D = 9$  となる。

[手順3] この  $Q$  から標準偏差値  $\sigma_w$  を式(7)より

決定する。

$$\sigma_w = \frac{Q}{2N_\sigma} \quad (7)$$

[手順4] 系列長  $L_s$  で標準偏差値  $\sigma_w$ 、平均0の正規分布に従う透かし系列を  $2^{M_s}$  パターン発生させる。ただし、 $w_i$  の大きさに次のような上限値を設定しこれを満たす系列のみを実際には使用する(本論文では  $N_\sigma = 3$  を選択)。

$$|w_i| < N_\sigma \sigma_w \quad (8)$$

[手順5]  $2^{M_s}$  パターンの中からデータ  $\mathbf{x}$  に対応した透かし系列  $\mathbf{w}$  を一つ選択する。

[手順6] 画像を  $N_x \times N_y$  画素のブロックへ分割し、ブロックごとに2次元離散コサイン変換(2D-DCT)を施す。

[手順7] 系列要素  $w_i$  が埋め込まれていないブロックを一つ選択する。そのブロックの  $N_x \times N_y$  個のDCT係数  $\mathbf{f} = (f_1, \dots, f_k, \dots, f_{N_x N_y})$  の中から埋込対象係数  $f_k$  を一つ選択する。次に、式(9)を計算し、離散化されたDCT係数  $\bar{f}_k$  を得る。

$$\bar{f}_k = \text{round}(f_k/Q) \times Q \quad (9)$$

ただし、 $\text{round}(p)$  は  $p$  の小数第1位を四捨五入し得られる整数を意味する。

[手順8] この  $\bar{f}_k$  へ透かし系列  $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_{L_s})$  の要素  $w_i$  を一つ選択し加算する。すなわち、

$$f'_k = \bar{f}_k + w_i \quad (10)$$

[手順9] 一つの係数に  $w_i$  が埋め込まれた  $N_x \times N_y$  個のDCT係数  $\mathbf{f}' = (f_1, \dots, f'_k, \dots, f_{N_x N_y})$  に逆2D-DCTを施す。

[手順10] 選択された透かし系列  $\mathbf{w}$  の  $L_s$  個の要素  $w_i, i = 1, 2, \dots, L_s$  がすべて画像へ埋め込まれるまで手順7~9を繰り返す。

手順7において、その係数の選択には、自由度があることに注意してほしい。すなわち、どの係数を選択しても画質は保証され、かつ抽出時に参照画像は必要ないが、埋め込む係数によりMPEG耐性が異なる。

以上のような提案アルゴリズムの特徴は、式(5)の量子化ステップ値  $Q$  の計算に  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  が考慮されていること、更に式(9)及び(10)に示すように、その  $Q$  を用いてDCT係数を離散化した後、系列要素  $w_i$  を埋め込むことにある。式(8)の制約のもとで、これ

らの特徴は後述するように非参照型でかつデータ埋込み時に画質の劣化を制御することを可能な電子透かし法となる。

各手順のもつ意味や、式の導出に関しては次に詳しく述べる。

### 3.3 提案法の特徴

3.2 で述べた提案法が、先の三つの要求条件を満たすことを述べる。

#### 3.3.1 非参照型電子透かし

ここで、前述した手順が非参照型となることを説明しよう。

式 (9) 及び式 (10) より、埋め込まれた系列要素  $w_i$  は、

$$w_i = f'_k - \text{round}(f_k/Q) \times Q \quad (11)$$

と与えられる。上式から、もし  $f'_k, f_k$  と  $Q$  が既知であれば、 $w_i$  を容易に決定できることがわかる。以下では、 $f'_k$  と  $Q$  のみから  $w_i$  を計算可能であることを述べる。

まず、式 (5) から目標画質  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  とブロックサイズ等の条件を与えると、量子化ステップ値  $Q$  は既知となる。したがって、透かし系列を抽出する際には、 $Q$  値を既知とする。また、DCT 係数  $f'_k$  は、系列要素  $w_i$  を埋め込む DCT 係数の場所をすべてのブロックで固定とすることにより、透かし系列を抽出したい画像に対して DCT を施すことにより、容易に知ることができる。一方、 $f_k$  を直接知るためには、系列を埋め込む前の画像、すなわち参照画像が必要となる。しかし、式 (11) における  $\text{round}(f_k/Q)$  は、 $f_k$  ではなく、 $f'_k$  を用いて計算可能である。理由は、次のとおりである。

今、 $2^{M_s}$  個ある透かし系列を構成するすべての要素  $w_{ij}$  の最大値の  $|w_{\max}|$  に対して

$$|w_{\max}| = \max_{ij} \{|w_{ij}|\} < \frac{Q}{2} \quad (12)$$

を仮定する。このとき、

$$\begin{aligned} \bar{f}_k &= \text{round}(f_k/Q) \times Q \\ &= \text{round}(f'_k/Q) \times Q \end{aligned} \quad (13)$$

が成立する。図 5 に示すように、 $\bar{f}_k$  は  $Q$  の整数倍であり、 $f_k$  と  $f'_k$  はともにその  $\pm \frac{Q}{2}$  の範囲に存在する。したがって、 $f'_k$  と  $f_k$  の差はステップ値  $Q$  による量子化誤差の範囲内である。ゆえに、上式を式 (11) に

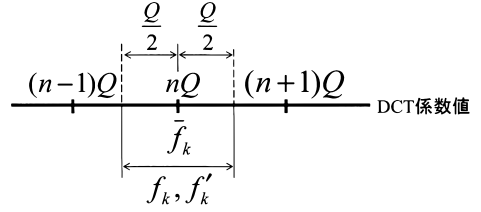


図 5 非参照型電子透かしの説明

Fig. 5 Explanation of watermarking scheme without reference images.

代入することで、

$$\begin{aligned} w_i &= f'_k - \text{round}(f'_k/Q) \times Q \\ &= f'_k - \bar{f}_k \end{aligned} \quad (14)$$

を得る。上式は系列要素  $w_i$  の抽出に  $f_k$  を必要としないことを意味する。

ここで、式 (12) の条件を仮定した。この仮定は、式 (8) の制約と

$$N_\sigma \sigma_w \leq \frac{Q}{2} \quad (15)$$

すなわち、

$$\sigma_w \leq \frac{Q}{2N_\sigma} \quad (16)$$

のように対応する。このことは、

$$|w_{\max}| < N_\sigma \sigma_w \leq \frac{Q}{2} \quad (17)$$

の関係を与える。

以上のことから、式 (7) 及び式 (8) の制約を課すことにより、式 (12) が満たされ、その結果提案法が非参照型電子透かし法となることがわかる。

#### 3.3.2 画質保証型電子透かし

画質保証型とは、画像に依存せずに自動的に所望の画質を達成できる電子透かし法のことである。提案法は画像ごとに画質制御パラメータを計算することなしに、所望の PSNR をもつ透かし画像を生成することを目指す。従来法として、この画質保証型という特徴をもつものは存在していない。以下で、提案法がある統計的仮定の下で画質保証型となることを説明しよう。

今、画像を  $N_x \times N_y$  のブロックに分割し、その一つのブロックに着目する。埋込みによるブロックの誤差エネルギー  $e_B^2$  は、原画像の各画素の輝度値を  $y(m, n)$ 、埋込画像の輝度値  $y'(m, n)$  とすると、

$$e_B^2 = \sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{n=0}^{N_y-1} (y'(m, n) - y(m, n))^2 \quad (18) \quad = \frac{Q^2}{D} \quad (25)$$

となる．使用する DCT を直交変換とするとエネルギー保存則が成立し，この誤差エネルギー  $e_B^2$  は，DCT 領域における誤差エネルギーと等価となる．したがって，原画像の DCT 係数  $f_k$  とそれに透かし要素  $w_i$  が埋め込まれた係数  $f'_k$  を用いると，

$$e_B^2 = \sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{n=0}^{N_y-1} (y'(m, n) - y(m, n))^2 = (f'_k - f_k)^2 \quad (19)$$

の関係が成立する．また上式は，式 (10) から，

$$e_B^2 = (\bar{f}_k + w_i - f_k)^2 = (\bar{f}_k - f_k)^2 + w_i^2 + 2w_i(\bar{f}_k - f_k) \quad (20)$$

と表現することもできる．

この結論は，一つのブロックに対するものであるが，次に集合平均，すなわち期待値

$$E[e_B^2] = E[(\bar{f}_k - f_k)^2] + E[w_i^2] + E[2w_i(\bar{f}_k - f_k)] \quad (21)$$

をとり，画像全体に対する結論に拡張しよう．ここで，式 (21) の右辺第 1 項は，DCT 係数を量子化ステップ値  $Q$  で離散化した際の量子化誤差であり，その誤差が一様分布であると仮定すると，

$$E[(\bar{f}_k - f_k)^2] = \frac{Q^2}{12} \quad (22)$$

となる．また，第 2 項は，透かし要素  $w_i$  が平均 0，分散  $\sigma_w$  の正規分布乱数で構成されていることから，

$$E[w_i^2] = \sigma_w^2 \quad (23)$$

と与えられる．第 3 項は，量子化誤差と透かし系列が独立であると仮定すると，

$$E[2w_i(\bar{f}_k - f_k)] = 0 \quad (24)$$

となる．ゆえに，式 (21) の  $E[e_B^2]$  は，式 (22)，(23)，(24) 及び式 (7) から

$$E[e_B^2] = \frac{Q^2}{12} + \sigma_w^2 = \frac{Q^2}{12} + \frac{Q^2}{4N_\sigma^2}$$

ただし，

$$D = \frac{12N_\sigma^2}{N_\sigma^2 + 3} \quad (26)$$

と表現される．

この結論は，画像信号のエルゴード性の仮定のもとで，透かし系列の埋め込まれたブロックの平均的誤差エネルギーに対応する．ゆえに，画像のすべてのブロックに透かし系列が埋め込まれたとすると，透かし系列の埋め込まれた画像の PSNR は，式 (25) より

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{N_x N_y A^2}{E[e_B^2]} = 10 \log_{10} \frac{A^2 \times D \times N_x N_y}{Q^2} \quad (27)$$

と求まる．上式において， $A, D, N_x, N_y$  は定数であることから，埋込画像の画質は，量子化ステップ値  $Q$  の関数であることがわかる．このことから， $Q$  を固定値にすれば，画像によらず自動的に埋込画像の画質は，一定となり，要求条件 1 を満足していることがわかる．

逆に，画質の目標値  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  が決まれば，量子化ステップ値  $Q$  を式 (27) から容易に導くこともできる．先の式 (5) はそのように導かれたものである．

以上の結論の導出には，いくつかの統計的仮定を使用した．後述のシミュレーションにより，それらの仮定の妥当性を更に検証する．

### 3.3.3 圧縮耐性

次に提案法が要求条件 3 を満たすこと説明する．

3.2 で述べたように，提案法は，DCT 領域における相関型電子透かし法の一つである．この DCT 領域及び相関型という条件は，従来から比較的画像圧縮耐性が高いことが知られている [13], [14], [16]．したがって，後でのシミュレーションでも検証するように，提案法も従来法のもつこの特徴を保持している．ただし，3.2 の手順 7 において埋込係数の選択方法により圧縮耐性は異なる．よく知られるように，埋込対象 DCT 係数として，高次係数より低次係数を選択した方が，一般に圧縮耐性が高いことを確認している．

### 3.4 抽出アルゴリズム

透かし系列の抽出アルゴリズムを説明する．

[手順 1] 画像を  $N_x \times N_y$  画素のブロックへ分割し，ブロックごとに 2 次元離散コサイン変換 (2D-DCT) を施す．

[手順2] 系列要素  $w_i$  を抽出していないブロックを一つ選択する. そのブロックの  $N_x \times N_y$  個の DCT 係数  $\mathbf{f} = (f_1, \dots, f'_k, \dots, f_{N_x N_y})$  の中から埋込対象係数  $f'_k$  を取り出す. 次に, 式 (28) により, 離散化係数  $\bar{f}_k$  を求める.

$$\bar{f}_k = \text{round}(f'_k/Q) \times Q \quad (28)$$

[手順3] DCT 係数  $f'_k$  と離散化係数  $\bar{f}_k$  の差分から透かし系列の要素  $w_i$  を抽出する.

$$w_i = f'_k - \bar{f}_k \quad (29)$$

[手順4] 透かし系列  $\mathbf{w}$  の  $L_s$  個の要素  $w_i, i = 1, 2, \dots, L_s$  がすべて抽出されるまで手順2~3を実行する.

[手順5] 抽出された  $L_s$  個の系列要素  $w_i$  から埋め込まれた透かし系列  $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_{L_s})$  を復元する.

[手順6] 復元された透かし系列  $\mathbf{w}$  と埋込側で発生させた  $2^{M_s}$  パターンの透かし系列  $\mathbf{w}_i$  との相関値を次式より求め, 最も高い相関値をもった系列を埋め込まれた透かし系列と決定する.

$$\text{sim}(\mathbf{w}_i, \mathbf{w}) = \frac{\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{w}}{\sqrt{\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{w}_i} \sqrt{\mathbf{w} \cdot \mathbf{w}}} \quad i = 1, \dots, 2^{M_s} \quad (30)$$

式 (30) は, 文献 [18] と同じ原理に基づいたものである. 手順5でされた透かし系列は, 一般にひずみを含んでおり, そのため式 (30) により真の埋込系列  $\mathbf{w}$  を相関の大小により推定するものである.

#### 4. シミュレーション

シミュレーションにより, 提案法の有効性を確認する.

##### 4.1 シミュレーション条件

シミュレーション条件を表2に示す.

量子化ステップ値  $Q$  は, 画質の目標値  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  と式 (5) から, 系列要素の分散  $\sigma_w^2$  は, 式 (7) からそれぞれ求めている. また, 埋込データは, 1 フレーム画像へ 96 ビット, すなわち, 1 フィールド画像へ  $M = 48$  ビットを埋め込む.

##### 4.2 画質保証型の検証

ここでは, 提案法が 3. で説明した画質保証型であることを検証する. すなわち, 画質の目標値  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  に対して得られる画質 (PSNR) をシミュレーションで検証する. ここでは, 評価画像の各フィールドに対して, 埋込係数を (2,2), 画質目標値を 58 dB とした

表2 シミュレーション条件  
Table 2 Simulation conditions.

評価画像 (動画)	① flower garden (704×240 8 bit)
	② foot ball (704×240 8 bit)
	③ mobile&calendar (704×240 8 bit)
ダイナミックレンジ	$A = 255$
ブロックサイズ	$N_x = 8, N_y = 8$
埋込ビット数	$M = 48$
分散上限値定数	$N_\sigma = 3$
透かし系列	分散 $\sigma_w^2$ , 平均 0 の正規分布乱数で構成
系列長	$L_s = 330$
部分ビット列	$M_s = 6$
埋込係数	(2,2) DCT 係数ブロックで DC 成分を (1,1) としたときの埋込係数を示す
画質目標値 $\text{PSNR}_{\text{tar}}$	58 dB
量子化ステップ値 $Q$	7.7046
分散 $\sigma_w$	1.2841

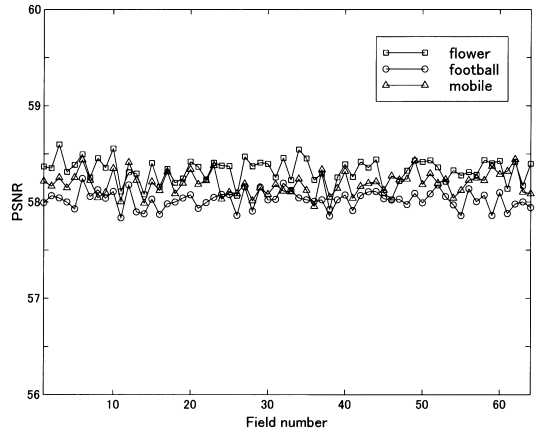


図6 画質評価 ( $\text{PSNR}_{\text{tar}} = 58 \text{ dB}$ )  
Fig. 6 Image quality evaluation ( $\text{PSNR}_{\text{tar}} = 58 \text{ dB}$ ).

場合の評価を図6に示す. 横軸は埋め込んだフィールドのナンバーを, 縦軸は画質 PSNR を表している. このシミュレーション結果から, 画質は, 画像に依存せず, 所望画質  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  をほぼ達成し, 維持していることがわかる. 本論文で使用したいいくつかの統計的仮定は, 厳密に成立することは保証できないが, 導かれた結論は自動的に画質を制御する目的において有効であることがわかる.

##### 4.3 MPEG 耐性の検証

評価画像 “flower garden”, “football” において, 画質目標値  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  が 58 dB の透かし画像を生成し, その画像に対して MPEG 圧縮を施し, 埋め込んだ系列が, 参照画像無しで抽出できるかどうか検証した.

シミュレーション結果を表3に示す. ここで, 抽出

表 3 PSNR<sub>tar</sub> = 58 dB, 埋込係数 (2,2) 時の MPEG 耐性  
 Table 3 Robustness against MPEG compression in DCT coefficients (2,2) and PSNR<sub>tar</sub> = 58 dB.

ビットレート ( Mbit/s )	flower (2,2)		football(2,2)	
	圧縮伸張画質 平均 PSNR ( dB )	抽出成功率 ( % )	圧縮伸張画質 平均 PSNR ( dB )	抽出成功率 ( % )
31	52.0902	100.0000	48.3034	100.0000
25	48.7745	100.0000	46.4137	100.0000
24	48.2571	100.0000	46.0435	100.0000
23	47.7462	99.7917	45.6653	99.7917
22	47.2319	99.7917	45.2955	99.5833
21	46.7400	99.5833	44.9073	98.3333
20	46.7400	99.5833	44.4947	98.9583
15	43.2838	85.2083	42.2522	72.9167
10	39.8674	47.0833	39.3939	23.5417

表 4 PSNR<sub>tar</sub> = 58 dB, 埋込係数 (4,4) 時の MPEG 耐性

Table 4 Robustness against MPEG compression in DCT coefficients (4,4) and PSNR<sub>tar</sub> = 58 dB.

ビットレート ( Mbit/s )	flower (4,4)	
	圧縮伸張画質 平均 PSNR ( dB )	抽出成功率 ( % )
31	52.1654	100.0000
25	48.8071	100.0000
24	48.2905	99.7917
23	47.7707	99.3750
22	47.2570	98.3333
21	46.7646	97.7083
20	46.7646	97.7083
15	43.3050	81.0417
10	39.8754	33.9583

成功率とは、埋め込んだ全系列中、抽出が成功した系列の割合 (%) を示している。抽出成功とは、式 (30) ( 相関値 ) の大小により推定された系列が、埋め込まれた真の系列と一致することを意味している。したがって ( 100 - 抽出成功率 ) が誤検出率に対応する。ビットレートが 24 Mbit/s 以上で、抽出が 100% 成功している。画質の目標値 58 dB に対して、圧縮伸張画像の平均画質が 48 dB 程度になるまで圧縮を施しても抽出できることがわかる。また、より低い PSNR<sub>tar</sub> を設定すると ( 例えば、PSNR<sub>tar</sub>=50 dB ), より低い 10 Mbit/s のビットレートまで 100% の抽出成功率であることも確認している。

表 4 に (4,4) の DCT 係数を選択しデータを埋め込んだ場合の結果を示す。この結果から、低次の係数を選択した方が耐性が高いことがわかる。

## 5. む す び

本論文では放送監視に適した電子透かし法を提案し

た。提案法では、① 画像に依存せず自動的に所望の画質 ( 56 dB 以上 ) を維持できる ② データ抽出の際に参照画像がいない ③ MPEG に代表される画像圧縮に耐性を有する特長をもっている。提案法が、これらの要件を満たしていることを説明するとともに、所望画質を得るための理論式を導出した。また、シミュレーションにより、透かし画像が所望画質を得られること、参照画像がなくても埋め込んだ透かし系列が正しく抽出できることを示した。更に、提案法が、MPEG 耐性をもつことも示した。

今後の課題としては、提案法のもつ各種パラメータの選択の自由度について、より実際の条件下での検討が挙げられる。また、透かし画像の輝度値の有限語長化が、画質に及ぼす影響 [19] についても、更に検討していく必要がある。

## 文 献

- [1] 村瀬康治, “CM キャッチシステム,” 放送技術, pp.129-134, Feb. 1998.
- [2] 柏野邦夫, 黒住隆行, 村瀬 洋, “ヒストグラム特徴を用いた音響信号の高速探索法—時系列アクティブ探索法,” 信学論 ( D-II ), vol.J82-D-II, no.9, pp.1365-1373, Sept. 1999.
- [3] 柏野邦夫, 黒住隆行, 村瀬 洋, “ヒストグラム特徴を用いた音や映像の高速 AND/OR 探索,” 信学論 ( D-II ), vol.J83-D-II, no.12, pp.2735-2744, Dec. 2000.
- [4] G. Depovere, T. Kalker, J. Haitsma, M. Maes, L. De Strycker, P. Termont, J. Vandeweghe, A. Langell, C. Alm, P. Norman, G. O'Reilly, B. Howes, H. Vaanholt, R. Hintzen, P. Donnelly, and A. Hudson, “The VIVA project: Digital watermarking for broadcast monitoring,” Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, no.26AP1.1, Kobe, Japan, Oct. 1999.
- [5] P. Termont, L. De Strycker, J. Vandeweghe, J. Haitsma, T. Kalker, M. Maes, G. Depovere, A. Langell, C. Alm, and P. Norman, “Performance mea-



surements of a real-time digital watermarking system for broadcast monitoring,” Proc. IEEE Int. Conf. on Multimedia Computing and Systems, vol.2, pp.220–224, Florence, Italy, June 1999.

- [6] L. De Strycker, P. Termont, J. Vandewege, J. Haitsma, T. Kalker, M. Maes, and G. Depovere, “Implementation of a real-time digital watermarking process for broadcast monitoring on a TriMedia VLIW processor,” IEE Proc. Vision, Image and Signal Processing, vol.147, no.4, pp.371–376, Aug. 2000.
- [7] 杉本 修, 川田亮一, 和田正裕, 松本修一, “MPEG 符号化による劣化を検出するリファレンス画像なしの画質客観評価手法,” 信学技報, CS2000-112, 2000.
- [8] 桜島良聡臣, 宮崎明雄, “相関利用型電子透かし方式に関する一検討,” 第 16 回デジタル信号処理シンポジウム, pp.355–359, Nov. 2001.
- [9] M. Barni, F. Bartolini, V. Cappellini, and A. Piva, “A DCT-domain system for robust image watermarking,” Signal Processing, vol.66, no.3, pp.357–372, May 1998.
- [10] 江島将高, 宮崎明雄, “相関利用型電子透かし方式の解析について,” 第 16 回デジタル信号処理シンポジウム, pp.349–354, Nov. 2001.
- [11] H. Kiya, Y. Noguchi, A. Takagi, and H. Kobayashi, “A method of inserting binary data into MPEG video in the compressed domain,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E82-A, no.8, pp.1485–1492, Aug. 1999.
- [12] 貴家仁志, “JPEG, MPEG 画像へのバイナリデータの埋め込み法,” 信学論 (A), vol.J83-A, no.12, pp.1349–1356, Dec. 2000.
- [13] M. Fujiyoshi and T. Hasegawa, “On the amount of embedded information of watermarking methods based on the parallel combinatorial spread spectrum scheme,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E84-A, no.4, pp.941–948, April 2001.
- [14] 藤吉正明, 貴家仁志, “透かしエネルギーのブロック適応に関する検討,” 2001 信学ソ大 (情報・システム), D-11-37, p.122, Sept. 2001.
- [15] 上条浩一, “電子透かしの耐性向上に関する考察と実験,” 信学技報, ISEC2001-2, May 2001.
- [16] 藤吉正明, 貴家仁志, “ブロック分割 DCT に基づく画質レベル一定電子透かし法,” 第 16 回デジタル信号処理シンポジウム, B4-2, pp.337–342, Nov. 2001.
- [17] NHK 放送技術研究所編, ハイビジョン技術, 日本放送出版協会, 東京, 1988.
- [18] I.J. Cox, J. Kilian, T. Leighton, and T. Shamoan, “Secure spread spectrum watermarking for multimedia,” IEEE Trans. Image Process., vol.6, no.12, pp.1673–1687, Dec. 1997.
- [19] 橋 高志, 藤吉正明, 貴家仁志, “放送監視のための画質保証可能な電子透かし法,” 信学技報, IE2001-118, Nov. 2001.

(平成 14 年 5 月 2 日受付)



橋 高志 (学生員)

1979 静岡大・工・電子卒. 1981 同大学院工学研究科修士課程了. 同年日本電気(株)入社. 放送スタジオ機器の開発に従事. 現在日本電気エンジニアリング(株)に所属. 映像情報メディア学会会員.



藤吉 正明 (正員)

1995 埼玉大・教養・教養卒. 2001 同大学院理工学研究科博士後期課程了. 博士(学術). 同年, 都立大大学院工学研究科電気工学専攻助手. 画像処理, スペクトル拡散通信, セキュア通信に興味をもつ. 2000 年度学術奨励賞受賞. IEEE 会員.



貴家 仁志 (正員)

1980 長岡技科大・工・電気電子システム卒. 1982 同大学院修士課程了. 同年東京都立大工学部電気工学科助手. 2000 同大学院電気工学専攻教授. 工博. 1995–1996 シドニー大(オーストラリア)客員研究員. マルチレート信号処理, 画像符号化及びメディアセキュリティに関する研究に従事. IEEE 論文誌 Signal Processing 編集委員(1998–2000). 本会和文論文誌 A 編集委員(1998–2002). 著書「高速フーリエ変換とその応用」, 「デジタル信号処理」, 「マルチレート信号処理」. 電子画像学会, 映像情報メディア学会各会員, IEEE シニア会員.