

## 種々の統計分布をもつ透かし系列に適用可能な画質保証型 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 Retaining the Desired Image Quality in order  
to be Applicable to Watermarks with Various Distributions

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

あらまし 動画像ヘリアルタイムで透かしを埋め込むことを目的に、埋込みに伴う画質劣化を自動的に制限する画質保証型の電子透かし法を提案している。この提案法は、画像に依存せず常に所望の画質 (PSNR) をもつ透かし画像の生成を可能とする。更に、透かし抽出時に原画像を必要としない非参照型電子透かし法の特徴も有する。従来の画質保証型電子透かし法では、透かし系列要素は実数値でありかつ正規分布に限定されるが、提案法ではこれらの制約は解除され、種々の統計分布をもつ透かし系列に適用可能である。また、提案法は、透かし系列を抽出することなく、埋め込んだ透かし系列の消去が可能であり、消去することによって画質を向上できる。シミュレーションでは、一様分布の 2 値系列を透かし系列として埋め込み、画質が保証されること、透かし系列の消去により画質が向上することを確認している。

キーワード 電子透かし, 画質保証

### 1. ま え が き

近年、電子透かし技術 [1] ~ [3] は、著作権保護にとどまらず、テレビ放送局での放送監視への応用が検討されている [4] ~ [8]。この応用での電子透かし法では、抽出時に参照画像 (原画像) を必要としない非参照型であるとともに、透かしを埋め込まれた画像に対して所望の画質 (PSNR が 56 dB 以上 [9]) を維持するように、画質劣化を制御できることが要求されている。更に、放送監視特有の課題として、次の要求条件も満足する必要がある。

- (a) 動画像に対する透かしの埋め込み/抽出がリアルタイムに実行可能
- (b) 放送監視のために埋め込まれた局内運用情報 (透かし) を放送画像から消去可能

これに対して、従来の電子透かし法 [4], [5], [10], [11] は、非参照型ではあるが、透かしを埋め込まれた画像が所望の画質を維持するように制御することが困難である。また、従来法 [12], [13] は、所望の画質を維持するように制御できるが、要求条件 (a) を満たす上で次に述べるような問題がある。

要求条件 (a) では、単位時間当りの処理量を意味するスループットやデータがある入力に対応して実際出力が得られるまでの時間を意味するレイテンシを考慮する必要がある。

映像と音声とが同期するテレビ放送では、映像のみに 46 ミリ秒 (1.4 フレーム時間) 以上のレイテンシを生じると視聴者が音進みを知覚する [15]。また、音声に遅延を付加し、映像と音声の同期をとると、中継番組ではスタジオと中継先との会話に衛星中継時のような不自然さを生じる。画像ごとに画質の制御パラメータを計算する透かし法 [12], [13] では、画面走査されたデータを得るのに少なくとも 1 フィールド (or 1 フレーム) 時間のレイテンシを生じてしまう。この問題を解決する方法として、画像に依存した制御パラメータを用いずに自動的に画質を制御することができる画

<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

画質保証型電子透かし法がある [6], [7] .

一方, スループットは, 使用する電子透かしアルゴリズムに要する計算量とそれを実行する環境により決定される. そのため, 専用 LSI の利用や高性能プロセッサのマルチプロセッサ化がスループット向上のために検討されている [14]. 従来法 [6], [7] では, 透かし系列として実数系列を使用しなければならず, 情報データから透かし系列への写像や抽出時の相関等に多くの計算を必要とし, スループット向上の妨げとなっている. また, 要求条件 (b) についても他の多くの透かし法と同様に検討されていなかった.

要求条件 (b) は, 透かしとして埋めた CM コード [7] 等の局内運用情報が局外へ放送されることを防ぐためのものである. この条件は, 局内放送監視特有のものであり, 著作権保護を目的とする多くの電子透かし法と相反するものである.

本論文では, 画質保証型及び非参照型の性質を維持し, 種々の統計分布をもつ透かし系列を埋め込むことが可能な電子透かし法を提案する. 提案法は, 画質保証型という特徴をもつことによって, 従来法 [6], [7] と同様に上述したレイテンシ問題を解決している (要求条件 (a)). 同時に, 適用可能な透かし系列の拡張によって, 写像や相関計算等を省略し, スループットを向上 (要求条件 (a)) することが可能となる.

更に, 本論文では, 透かし系列の消去について考察する. 提案法は, 埋め込まれた透かし系列を抽出することなく, 透かし系列を画像から消去可能であること, またその透かし系列の消去によって画質が向上することを述べる. 最後に, シミュレーションにおいて, 一様分布した 2 値データの透かし系列を埋め込んだ画像の画質が保証されていること, 透かし系列の消去により画質が向上することを示し, 提案法の有効性を確認している.

## 2. 透かし系列と画質保証型電子透かし法

最初に, 提案法の前提条件とその目的を明らかにする.

本論文では情報データと透かし系列という二つの表現を用いる. 以下にこのことを簡単に説明する.

情報データ  $x_i$  を  $M$  ビットの 2 進数

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

とする. この  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 2^M$  は, 例えば CM コード [6], [7] などのような目的の情報直接表現する

ものである. 電子透かし法は, この  $x_i$  を直接画像に埋め込むものと,  $x_i$  を他の系列  $w_i$  に写像し, 系列  $w_i$  を画像に埋め込むものに大別される. この画像に埋め込まれる系列は, 情報データと 1 対 1 に対応しており, 本論文では透かし系列と呼ぶ. 情報データを直接埋め込む応用では, 透かし系列は情報データと一致する. 本論文では, いずれの場合も研究の対象としている.

従来法 [6], [7] では, 要素が実数である透かし系列  $w_i$  を考えた. すなわち,

$$\mathbf{w}_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{iL}), w_{ij} \in R \quad (2)$$

とした. 更に, 透かし系列の要素  $w_{ij}$  は正規分布した実数値乱数から選択された. 実数かつ正規分布という制約のもとで, 従来法は画質保証型という特徴をもつことが可能となった. 画質保証型電子透かし法とは, 透かし系列の埋込時に画質劣化の度合を指定可能で, かつその度合を制御するパラメータが, 画像に依存しない電子透かし法である [6], [7].

図 1 は, 画質保証型電子透かし法の処理手順の概略である [6], [7]. 情報データ  $x_i$  は, 透かし系列  $w_i$  へ写像 (全単射) され, 更に, 目標画質  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  から決められたエネルギー調整を施されて, 画像へ埋め込まれる透かし系列要素  $w'_{ij}$  に対応づけられる. 本論文では, このエネルギー調整された透かし系列  $w'_{ij}$  を調整透かし系列, その要素  $w'_{ij}$  を調整透かし系列要素と呼ぶ. また, 目標画質  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  は, 透かし画像と原画像の各画素における誤差の 2 乗和と輝度値のダイナミックレンジの 2 乗和の比である PSNR 値を用いて与えられる.

一方, 透かし系列の埋込みは, 原画像を隣接したブロックへ分割し, DCT 等の直交変換を施した変換領域で行う. 変換領域では, ブロックごとに選択された変換係数  $f_k$  を, 目標画質  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  から決定される

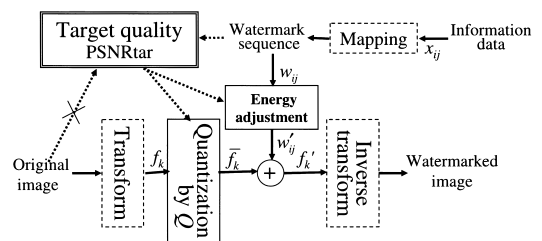


図 1 画質保証型電子透かし

Fig. 1 Quality-retaining watermarking scheme.

量子化ステップ値  $Q$  によって離散化し、調整透かし系列要素  $w'_{ij}$  を加算する。次に、系列要素  $w'_{ij}$  が埋め込まれた変換係数  $f'_k$  を含むすべての変換係数を逆変換して透かし画像を得る。従来法 [6], [7] は、透かし系列  $w_i$  を正規分布した実数値乱数から選択することを仮定し、目標画質の値である  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  を達成する電子透かし法である。

### 3. 提案の電子透かし法

図 1 の手順に従い、従来法 [6], [7] のもつ制約を緩和した方法を提案する。

#### 3.1 透かし系列のエネルギー調整

透かし画像の画質を目標画質に維持するためには、目標画質から決定されたパラメータによって、透かし系列のエネルギー調整が必要である。

提案法では、透かし系列要素  $w_{ij}$  として実数値または整数値を想定する。しかし、ここでは議論を単純にするために、 $N$  個の要素をもつ整数の集合  $F = \{0, 1, \dots, N-1\}$  ( $N \geq 2$ ) に属する要素から構成された長さ  $L$  の透かし系列

$$\mathbf{w}_i = (w_{i1}, \dots, w_{iL}), w_{ij} \in F \quad (3)$$

を考える。ここで、要素  $w_{ij}$  の統計分布は特に限定しないが、要素  $w_{ij}$  の平均値  $\bar{w}_{ij}$  と要素  $w_{ij}$  の分散  $\sigma_w^2$  が既知であり、かつ平均との差  $|w_{ij} - \bar{w}_{ij}|$  が有限であると仮定する。この有限の仮定は、

$$|w_{ij} - \bar{w}_{ij}| \leq N_\sigma \sigma_w \quad (4)$$

と表現できる。ここで、 $N_\sigma$  は適当な正数とする。上述した整数の集合  $F$  が最大値  $N-1$  と最小値  $0$  をもつことから、適当な  $N_\sigma$  の選択によって式 (4) は成立する。

この透かし系列  $\mathbf{w}_i$  を調整透かし系列  $\mathbf{w}'_i = (w'_{i1}, \dots, w'_{iL})$ ,  $w'_{ij} \in R$  へ、式 (5) によってエネルギー調整する。

$$w'_{ij} = a(w_{ij} - \bar{w}_{ij}) \quad (5)$$

ただし、変換定数  $a$  は、

$$a = \frac{M_\sigma Q}{2N_\sigma \sigma_w} \quad (6)$$

を満たす正数とする。 $Q$  は DCT 係数を離散化するための量子化ステップ値を表し、 $M_\sigma$  は調整透かし系列要素の分布範囲を制限する上限値制限定数で、

$$0 < M_\sigma < 1 \quad (7)$$

である。

この変換の結果、調整透かし系列  $\mathbf{w}'_i$  は、エネルギー調整前の透かし系列  $\mathbf{w}_i$  とは異なる平均と分散をもち、それらの値は、平均  $\bar{w}'_{ij} = 0$ 、分散  $\sigma_{w'}^2 = (a\sigma_w)^2$  となる。式の導出や詳細な説明は後述する。

#### 3.2 埋込アルゴリズム

画像は、 $m$  ビット/画素の濃淡画像で、その輝度値は  $A = 2^m - 1$  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。

提案する埋込アルゴリズムは、データ埋込みに対して、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  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  [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 (8) 及び (9) より求める。

$$Q = \frac{A \times \sqrt{D \times N_x N_y}}{10^{\frac{\text{PSNR}_{\text{tar}}}{20}}} \quad (8)$$

ただし、

$$D = \frac{12N_\sigma^2}{N_\sigma^2 + 3M_\sigma^2} \quad (9)$$

後述するが、本論文では透かし系列の分布モデルに応じて  $N_\sigma$  と  $M_\sigma$  を選択する。正規分布の場合、 $N_\sigma = 3$ 、 $M_\sigma = \bar{1}$  を選択すると、従来法 [6], [7] と同じ結論が得られる。ただし、 $\bar{1}$  は、 $1$  に十分近いが、 $1$  を超えない値を表現している。

[手順 3] 変換定数  $a$  を、量子化ステップ値  $Q$ 、上限値制限定数  $M_\sigma$ 、標準偏差値  $\sigma_w$  から式 (6) より決定する。

[手順 4] 埋め込む透かし系列  $\mathbf{w}_i$  を一つ選択する。

[手順 5] 式 (5) を用いて、透かし系列  $\mathbf{w}_i$  を分散  $\sigma_{w'}^2 = (a\sigma_w)^2$ 、平均  $0$  の分布に従う調整透かし系列  $\mathbf{w}'_i$  へエネルギー調整する。

[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] 調整透かし系列要素  $w'_{ij}$  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 (10) を

計算し、離散化された DCT 係数  $\bar{f}_k$  を得る .

$$\bar{f}_k = \text{round}(f_k/Q) \times Q \quad (10)$$

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  $\bar{f}_k$  へ調整透かし系列  $w'_i = (w'_{i1}, \dots, w'_{iL})$  の要素  $w'_{ij}$  を一つ選択し加算する . すなわち、

$$f'_k = \bar{f}_k + w'_{ij} \quad (11)$$

[手順 9] 一つの係数に  $w'_{ij}$  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  $w_i$  の  $L$  個の要素  $w_{ij}$ ,  $j = 1, 2, \dots, L$  がすべて画像へ埋め込まれるまで手順 3.2~3.2 を繰り返す .

以上のような提案アルゴリズムの特徴は、式 (8) 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 (10) 及び (11) に示すように、その  $Q$  を用いて DCT 係数を離散化した後、上限値制限定数  $M_\sigma$  等で規定された変換定数  $a$  を用いて透かし系列要素  $w_{ij}$  からエネルギー調整された調整透かし系列要素  $w'_{ij}$  を埋め込むことにある .

### 3.3 抽出アルゴリズム

抽出の際には、埋込み時の変換ブロックサイズ  $N_x \times N_y$ 、透かし系列が埋め込まれた変換係数  $f'_k$  のブロック内での位置、量子化ステップ値  $Q$ 、変換定数  $a$  (式 (6) 参照)、透かし系列要素の平均値  $\bar{w}_{ij}$  が既知であると仮定している .

従来、一般に明示されていないが、抽出は透かし系列の取出しと透かし系列の特定とで構成される . 提案法における前者の手順を次に示し、その後、後者について述べる .

[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] 透かし系列要素  $w_{ij}$  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 (12) により、離散化係数  $\bar{f}_k$  を求める .

$$\bar{f}_k = \text{round}(f'_k/Q) \times Q \quad (12)$$

[手順 3] DCT 係数  $f'_k$  と離散化係数  $\bar{f}_k$  の差分から

調整透かし系列の要素  $w'_{ij}$  を求める .

$$w'_{ij} = f'_k - \bar{f}_k \quad (13)$$

[手順 4] 調整透かし系列要素  $w'_{ij}$  に対して、式 (14) を用いて透かし系列要素  $w_{ij}$  を求める .

$$w_{ij} = \left( \frac{w'_{ij}}{a} + \bar{w}_{ij} \right) \quad (14)$$

[手順 5] 透かし系列  $w_i$  の  $L$  個の要素  $w_{ij}$ ,  $j = 1, 2, \dots, L$  がすべて求められるまで手順 2~4 を実行する .

[手順 6] 求められた  $L$  個の透かし系列要素  $w_{ij}$  から透かし系列  $w_i = (w_{i1}, \dots, w_{iL})$  を構成する .

以上の手順により、画像から透かし系列  $w_i$  が取り出される .

取り出された透かし系列  $w_i$  は、実数精度の限界から埋めた透かし系列  $w_i$  と完全に一致することはない . したがって、埋めた透かし系列要素  $w_{ij}$  を実数精度で特定するには、 $w_i$  と  $w_i$  の相関計算によって特定しなければならない [6], [7] . 一方、 $w_{ij}$  が 2 値や整数値である場合には、取り出した  $w_{ij}$  を 2 値化または整数化することによって、埋めた  $w_i$  を特定できる . したがって、整数値透かし系列へ適用可能である提案法は、相関計算の省略、すなわちスループットの改善を可能としている .

### 3.4 提案法の特徴

上述の提案法のもつ特徴を四つの観点から説明する .

#### 3.4.1 非参照型電子透かし

ここで提案法が、従来法 [6], [7] 同様に非参照型と呼ばれる、透かしの抽出時に参照画像 (原画像) を必要としない方式となることを述べる .

式 (10) 及び式 (11) より、埋め込まれた調整透かし系列要素  $w'_{ij}$  は、 $w'_{ij} = f'_k - \text{round}(f_k/Q) \times Q$  と与えられる . このとき、調整透かし系列を構成するすべての要素  $w'_{ij}$  のとり得る最大値  $w'_{\max} = \max_{ij} \{|w'_{ij}|\}$  に対して

$$w'_{\max} < \frac{Q}{2} \quad (15)$$

を仮定すれば、 $\text{round}(f_k/Q) \times Q = \text{round}(f'_k/Q) \times Q$  が成立する . ゆえに、 $w'_{ij}$  の抽出に  $f_k$ 、すなわち参照画像を必要としない、非参照型の透かし法であることを意味している [7] .

ここで、提案法が式 (15) を満たすことを説明する . 式 (4)、(6) より、

$$|w'_{ij}| \leq \frac{M_\sigma Q}{2} \quad (16)$$

である。したがって、式 (7), (16) より、

$$w'_{\max} = M_\sigma \frac{Q}{2} < \frac{Q}{2} \quad (17)$$

となり式 (15) が成立する。

以上のことから、提案法は新しいパラメータ  $M_\sigma$  を導入したことで実数値正規分布に従う透かし系列 [6], [7] 以外の種々の統計分布に従う透かし系列に対しても非参照型であることが分かる。

### 3.4.2 画質保証型電子透かし

次に、提案法が、従来法 [6], [7] と同様に、ある統計的仮定のもとで画質保証型となることを説明する。

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、埋込手順 7 の  $f_k$  の離散化 (式 (10)) と手順 8 での  $w'_{ij}$  の加算 (式 (11)) に起因し、 $f_k$  の離散化誤差と  $w'_{ij}$  とが無相関である条件のもとで、

$$E[e_B^2] = \frac{Q^2}{12} + \sigma_{w'}^2 \quad (18)$$

と表現される。ここで、 $\sigma_{w'} = a\sigma_w$  であり、式 (6), (9) より、

$$E[e_B^2] = \frac{Q^2}{12} + (a\sigma_w)^2 = \frac{Q^2}{D} \quad (19)$$

となる。

画像信号のエルゴード性の仮定のもとで、画像のすべてのブロックに調整透かし系列要素が埋め込まれたとすると、調整透かし系列の埋め込まれた画像の PSNR は、式 (19) より

$$\begin{aligned} \text{PSNR} &= 10 \log_{10} \frac{A^2 N_x N_y}{E[e_B^2]} \\ &= 10 \log_{10} \frac{A^2 D N_x N_y}{Q^2} \end{aligned} \quad (20)$$

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分かる。このことから、文献 [7] 同様に、 $Q$  を固定すれば、埋込画像の画質は、画像によらず自動的に一定となる。逆に、式 (20) に基づき、画質の目標値  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  から  $Q$  を式 (8) のように導くことができる。

また、変換係数  $f_k$  の選択法としては、すべてのブ

ロックで、同じ位置の係数を選択する方法と、可変にする方法が考えられる。提案法は、どちらにも適応可能であり、どちらの場合にも画質を保証することができる。すべてのブロックで同じ位置を選択する場合は位置の情報を伝送する必要がないが、可変にする場合には位置の情報の取り扱いが問題となる。その問題の回避法の一つに、整数乱数発生アルゴリズムの使用がある。ある指定された範囲の整数をランダムに発生させ、その値を各ブロックの埋込み位置とする方法である。この場合には、使用した発生アルゴリズムとその初期値のみが鍵として追加される。

変換係数の位置と視覚的な画質や耐性については、従来から課題とされ、様々な検討がされている [16], [17]。

### 3.4.3 種々の統計分布をもつ透かし系列に適用可能な電子透かし

3.4.1 及び 3.4.2 で述べたように、提案法は、種々の統計分布をもつ透かし系列  $w_i$  に対して非参照型かつ画質保証型の電子透かしとなる。そのため、提案法では、情報データを透かし系列として直接埋め込むことが可能であり、かつ整数化によって埋めた透かし系列を特定できる。すなわち、提案法は、従来法 [6], [7] では必ず必要であった、情報データから透かし系列への写像やその逆写像、透かし系列特定のための相関計算を省略することも可能にした。

また、種々の統計分布をもつ透かし系列に適用可能な電子透かしであるという特徴は、上限値制限定数  $M_\sigma$  を導入して透かし系列をエネルギー調整することにより、実現可能となった。ここで、上限値制限定数  $M_\sigma$  が、透かし系列の抽出成功率に影響するパラメータとなっていることに注意してほしい。この  $M_\sigma$  の役割と決定法については、3.5 で述べる。

### 3.4.4 透かし系列の消去による画質向上

ここでは、埋め込んだ透かし系列を画像から消去することについて考察する。

多くの電子透かし法 [4], [5], [10] ~ [13] では、原画像や埋められた透かしが既知でなければ、埋められた透かしを抽出 (参照) できても、透かしを画像から消去できるとは限らない。提案法は、上述した種々の特徴をもつと同時に、原画像や透かし系列が既知でない場合でも、画像から透かし系列を消去可能である。更に、透かし系列を消去することによって画質を向上できる。

提案法においては、調整透かし系列要素  $w'_{ij}$  が埋め込まれた DCT 係数  $f'_k$  を  $Q$  で離散化すること (式 (12)) によって、透かし  $w'_{ij}$  を消去した DCT 係数  $\bar{f}_k$

を、透かし系列を抽出することなく求めることができる。この  $\bar{f}_k$  を用い、逆 DCT を行って画像を復元したとき、画質が向上できる。

透かし系列の消去によって、向上する画質  $PSNR_{UP}$  は、

$$\begin{aligned} PSNR_{UP} &= 10 \log_{10} \frac{A^2 N_x N_y}{Q^2/12} - 10 \log_{10} \frac{A^2 D N_x N_y}{Q^2} \\ &= 10 \log_{10} \frac{N_\sigma^2 + 3M_\sigma^2}{N_\sigma^2} \end{aligned} \quad (21)$$

によって理論的に求まる。この結論は、後述のシミュレーションにより検証する。

### 3.5 上限値制限定数 $M_\sigma$ の役割と決定法

提案法と従来法 [6], [7] との大きな相違点の一つに、上限値制限定数  $M_\sigma$  の導入がある。提案法では、透かし系列  $w_i$  の分布モデルが与えられると、その系列要素の平均値  $\bar{w}_{ij}$  と分散  $\sigma_w$  から式 (4) により分散上限値定数  $N_\sigma$  が決まる。次に、 $N_\sigma$ 、及びあらかじめ設定された  $M_\sigma$ 、目標画質  $PSNR_{tar}$  から式 (8) により量子化ステップ値  $Q$  が決まる。更に、 $\sigma_w$ 、 $N_\sigma$ 、 $M_\sigma$ 、 $Q$  から、式 (6) より透かし系列  $w_i$  を調整透かし系列  $w'_i$  へ変換する変換定数  $a$  が求まる。以上のように、 $M_\sigma$  は、 $Q$  の決定と変換定数  $a$  の決定にかかわっている

#### 3.5.1 $M_\sigma$ の役割

DCT 係数  $f_k$  を量子化ステップ値  $Q$  で離散化して得られる離散化係数  $\bar{f}_k$  は  $nQ$  ( $n$ : 整数) となる。透かしを埋めた DCT 係数  $f'_k = \bar{f}_k + w'_{ij}$  の分布は、 $\bar{f}_k = nQ$  を平均値とした  $w'_i$  の分布が現れ、その分布が  $\bar{f}_k$  が取り得る離散値  $\dots (n-1)Q, nQ, (n+1)Q, \dots$  ごとに繰り返し現れる。図 2 は、縦軸を確率密度関数

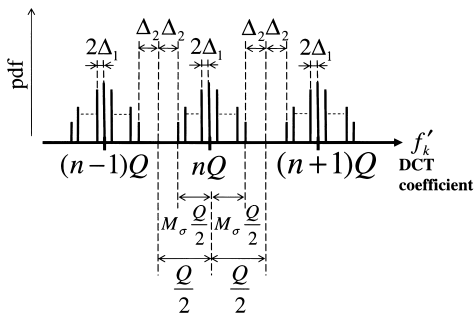


図 2 上限値制限定数  $M_\sigma$  の役割  
Fig. 2 Role of the parameter  $M_\sigma$ .

(pdf), 横軸を変換係数  $f'_k$  にとり、この様子を例示したものである。この図において、同一分布内の隣接した系列要素の距離を系列要素間距離  $2\Delta_1$  と呼び、 $nQ$  中心に繰り返される系列分布において分布左右端系列要素と  $nQ \pm Q/2$  との距離を系列分布間距離  $\Delta_2$  と呼ぶ。同図では、系列要素間距離はすべて  $2\Delta_1$  と等しく、分布は左右対称と仮定して例示していることに注意してほしい。

また、 $N_\sigma$  によって規定された透かし系列  $w_i$  の分布は、エネルギー調整されて  $\pm(M_\sigma Q)/2$  の範囲へ収められる。したがって、上限値制限定数  $M_\sigma$  を大きくとった場合に、系列要素間距離  $2\Delta_1$  は大きくなるが、 $\Delta_2$  は 0 に近づき、分布端付近の要素では隣接した分布の要素と誤検出される。一方、 $M_\sigma$  を小さくすると、 $\Delta_2$  は大きくなるが  $2\Delta_1$  が 0 に近づき、同一分布内で隣接する系列要素が接近し、有限語長の影響や種々の耐性が低下する。

以上のことから、上限値制限定数  $M_\sigma$  は、系列要素間距離  $2\Delta_1$  と系列分布間距離  $\Delta_2$  を同時に制御する役割を担っていることが分かる。 $M_\sigma$  を適切に選択することによって、系列分布も、系列要素も重ならない状態を達成し、透かしの耐性を向上することができる。

#### 3.5.2 $M_\sigma$ の決定法

ここで、二つの距離  $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$  を考慮する度合を設定するために、重み付け  $r$  ( $r > 0$ ,  $r \in R$ ) を導入する。前述の考察から、 $\Delta_1$  と  $r\Delta_2$  (重み付けした  $\Delta_2$ ) をともに大きくする  $M_\sigma$  が耐性を向上するには望ましい。したがって、ここでは  $\min\{\Delta_1, r\Delta_2\}$  に最大値を与える  $M_\sigma$  が最適値と考える。この条件を満たす  $M_\sigma$  の決定法を以下に示す。

今、透かし系列の要素  $w_{ij}$  がとり得る値の個数は、 $w_{ij}$  が属する集合  $F$  の要素数  $N$  となる。 $\Delta_1$ 、 $r\Delta_2$  は、 $N$ 、 $Q$ 、 $w'_{max}$  (式 (17)) を用いて与えられ、更に式 (8)、(9) を  $Q$  へ代入することにより、 $M_\sigma$  の関数として、次式により表せる。

$$\begin{aligned} \Delta_1(M_\sigma) &= w'_{max}/(N-1) \\ &= \frac{A\sqrt{12N_\sigma^2 N_x N_y}}{2(N-1)10^{\frac{PSNR_{tar}}{20}}} \frac{M_\sigma}{\sqrt{N_\sigma^2 + 3M_\sigma^2}} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} r\Delta_2(M_\sigma) &= r(Q/2 - w'_{max}) \\ &= \frac{rA\sqrt{12N_\sigma^2 N_x N_y}}{2(N-1)10^{\frac{PSNR_{tar}}{20}}} \frac{1 - M_\sigma}{\sqrt{N_\sigma^2 + 3M_\sigma^2}} \end{aligned} \quad (23)$$

$M_\sigma$  の区間  $(0, 1)$  において, 式 (22) の導関数が常に正, 式 (23) の導関数が常に負であることから,  $\Delta_1$  は狭義の単調増加,  $r\Delta_2$  は狭義の単調減少である.

ここで,  $\Delta_1(M_\sigma)$  と  $r\Delta_2(M_\sigma)$  が  $M_\sigma$  の区間  $(0, 1)$  に交点をもつこと, またその交点の値を示す. 交点  $g$  は,

$$\Delta_1(M_\sigma) = r\Delta_2(M_\sigma), \quad r > 0 \quad (r \in R) \quad (24)$$

を満たす  $M_\sigma$  である. ゆえに,  $g$  は式 (22), (23) より

$$g = \frac{r(N-1)}{r(N-1)+1} \quad (25)$$

となる. 式 (25) より,  $\forall r (r > 0), \forall N (N \geq 2)$  に対して,  $g$  は区間  $(0, 1)$  に入り, かつ一意に定まる.

したがって, 関数  $\min\{\Delta_1, r\Delta_2\}$  は

$$\min\{\Delta_1, r\Delta_2\} = \begin{cases} \Delta_1 & 0 < M_\sigma \leq g \\ r\Delta_2 & g < M_\sigma < 1 \end{cases} \quad (26)$$

となる. この関数は, 区間  $(0, g]$  では狭義の単調増加, 区間  $(g, 1)$  では狭義の単調減少することから, 区間  $(0, 1)$  において, この関数が最大値をとり得るのは,  $M_\sigma = g$  の場合である. ゆえに, 最適な  $M_\sigma$  は, 式 (25) によって与えられる.

以上の結論から, 例えば 2 値 ( $N = 2$ ) の透かし系列を用い, 距離  $\Delta_1, \Delta_2$  の重み付けを等しく ( $r = 1$ ) すれば,  $M_\sigma$  の最適値は 0.5 と与えられる.

また, この結論は, 整数値系列において得た結論であるが, これは実数値系列の場合へ拡張することもできる. 実数値系列においては,  $N$  を十分大きくすると, 式 (25) から, 上限値制限定数  $M_\sigma$  は, 1 に十分近い値をとり,  $M_\sigma = \bar{1}$  を選択するという従来法 [6], [7] の結論と一致する.

なお, 上述した  $M_\sigma$  の決定法は, 一例であり, 個別のケースでは, 更に別の決定法も考えられる. 例えば, 個々の系列要素間距離が等間隔ではなく, 透かし系列分布が左右非対称な情報データを透かし系列として直接用いる場合には, すべての要素間距離の最小値を  $2\Delta_1$ , すべての分布間距離の最小値を  $\Delta_2$  とおくことによって, 上述の議論を展開できる. 本論文では, 個別の決定法については割愛する. また, 重み付け  $r$  の決定法についても考察の余地がある.

いずれの決定法においても,  $M_\sigma$  は重要なパラメータであり, その導入の重要性については以上の議論により明らかになったと考える.

表 1 シミュレーション条件  
Table 1 Simulation conditions.

評価画像 (動画)	704 × 240 8 bit 64 fields ① flower garden ② foot ball ③ mobile&calendar
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	2640 ビット/1 フィールド画像
分散上限値定数	$N_\sigma = 1$
上限値制限定数	$M_\sigma = 0.1 \sim 0.9$
透かし系列	2 値 {0, 1} の一様乱数で構成
系列長	$L = 2640$
埋込係数	(2, 2)
*DCT 係数ブロックで DC 成分を (1, 1) とした時の埋込係数を示す	
画質目標値	$\text{PSNR}_{\text{tar}} = 56 \text{ dB}$
量子化ステップ値	$Q = 6.5543$
変換定数	$a = 5.2424$

## 4. シミュレーション

提案法の有効性を, シミュレーションにより確認する.

### 4.1 シミュレーション条件

シミュレーション条件を表 1 に示す. シミュレーションでは, 透かし系列要素として一様分布した 2 値データを用いるため, 分散上限値定数として  $N_\sigma = 1$  を選択する. また, 上限値制限定数  $M_\sigma$  の値に応じて, 画質の目標値  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  と式 (8) から量子化ステップ値  $Q$  を, 式 (6) から変換定数  $a$  を, それぞれ求めている. 表 1 では,  $\text{PSNR}_{\text{tar}} = 56 \text{ dB}$ ,  $M_\sigma = 0.5$  のときの  $Q$  と  $a$  を示している. また, 埋込データは, 1 フレーム画像へ 5280 ビット, すなわち, 1 フィールド画像へ 2640 ビットを埋め込む.

### 4.2 画質保証型の検証

結果を図 3 及び図 4 に示す. 正規分布とは異なる一様分布した 2 値の透かし系列を埋め込んだ画像の画質 ( $\text{PSNR}$ ) が,  $M_\sigma$  の値や画像種類によらず, 画質目標値  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  を維持している.

このシミュレーション結果から, 提案法は従来法とは異なった統計分布をもつ透かし系列を埋め込んでも, 画質は画像に依存せず, 目標画質  $\text{PSNR}_{\text{tar}}$  をほぼ維持していることが分かる.

### 4.3 $M_\sigma$ の検証

上限値制限定数  $M_\sigma$  を 0.1 から 0.9 まで変化させたシミュレーション結果を表 2 に示す. 表中, 抽出成功率は, (抽出に成功した要素数)/(埋めた全要素数) と定義している. 透かしが参照画像無しで抽出できたこ

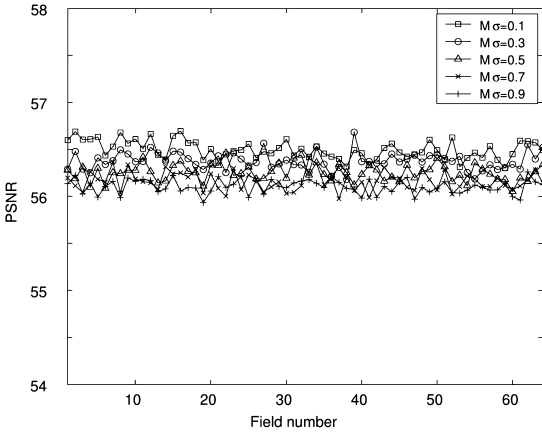


図 3 上限値制限定数と画質 (画像 “flower garden”, PSNR<sub>tar</sub> = 56 dB)

Fig. 3 Parameter  $M_\sigma$  and Image quality evaluation (“flower garden”, PSNR<sub>tar</sub> = 56 dB).

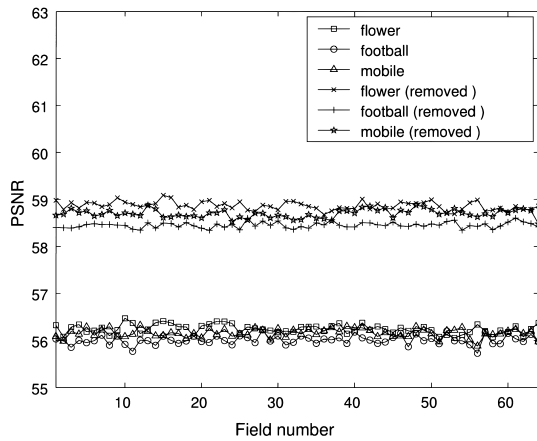


図 4 画質評価と透かし系列消去による画質向上 (PSNR<sub>tar</sub> = 56 dB,  $M_\sigma = 0.5$ )

Fig. 4 Image quality evaluation and image quality improvement by erasing watermarks (PSNR<sub>tar</sub> = 56 dB,  $M_\sigma = 0.5$ ).

とを示している。3.5 の式 (25) から、透かし系列が 2 値、すなわち  $N = 2$  では、 $M_\sigma = 0.5$  が適切な値と求められる。これに対して、表 2 より、 $M_\sigma = 0.5$  では抽出に 100% 成功しており、 $M_\sigma = 0.1, 0.3, 0.9$  では、抽出成功率が 100% でないことから、提案法へ導入した上限値制限定数  $M_\sigma$  及びその決定法の有効性が分かる。特に  $M_\sigma = 0.9$  で抽出成功率が 100% にならないことは、従来法 [6], [7] の単純な適用、すなわち  $M_\sigma$  を十分 1 に近づけては、一様分布の 2 値透かし系列を

表 2 画像 “flower garden”, PSNR<sub>tar</sub> = 56 dB, 埋込係数 (2, 2) 時の上限値制限定数  $M_\sigma$  による抽出成功率

Table 2 Extraction success rate for the parameter  $M_\sigma$  (“flower garden”, coefficients (2, 2), PSNR<sub>tar</sub> = 56 dB).

flower (2,2)	
上限値制限定数 $M_\sigma$	抽出成功率 (%)
0.1	51.3
0.3	86.7
0.5	100.0
0.7	100.0
0.9	81.8

抽出できないことを意味している。

また、 $M_\sigma = 0.7$  において抽出成功率が 100% であることから、 $M_\sigma = 0.5$  に対して、非対称な結果となっている。これは、目標画質が高画質領域における現象で、53 dB 以下では、 $M_\sigma = 0.5$  に対して対称な結果となることを確認している。これは、有限語長による影響が  $\Delta_1$  と  $\Delta_2$  に対して一様ではないことに起因するものと考えている。目標画質に応じたより厳密な  $M_\sigma$  の決定は、式 (25) における  $r = 1$  以外の重み付けの選択問題に帰着できると考えられる。

なお、このシミュレーション結果は、3.3 で述べたように、2 値系列  $\hat{w}_i$  を取り出した後、相関計算を使わずに特定した場合のものである。したがって、実数系列を使用する従来法において必要であった相関計算を用いずに抽出が可能となっている。

#### 4.4 透かし系列消去による画質向上の検証

透かし画像から、透かし系列を消去することによって画質が向上することをシミュレーションにより検証する。画質向上の度合は、式 (21) によって理論的に与えられる。ここで、透かし系列要素は一様分布した 2 値データであるため、分散上限値定数として  $N_\sigma = 1$ 、上限値制限定数  $M_\sigma = 0.5$  を用いている。このことから、理論的には PSNR<sub>UP</sub> = 2.4304 dB の画質改善となり、透かし系列消去後の画質は 58.4304 dB と推定できる。図 4 に示すシミュレーション結果から、透かし系列を消去することによって、理論どおりに画質が改善されていることが分かる。このように、提案法は、原画像や透かし系列が既知でない場合でも、画像から透かし系列を消去可能であり、更に、透かし系列を消去することによって画質を向上できる。

#### 5. む す び

本論文では、種々の統計分布をもつ透かし系列に適



用可能な，従来法をより一般化した画質保証型電子透かし法を提案した．提案法は，新しい制御パラメータ  $M_\sigma$  を導入することにより，統計分布に対する制約条件を緩和することができた．また，透かし系列を抽出することなく埋め込んだ透かし系列を消去可能であり，消去することによって画質を向上できる点についても考察した．シミュレーションでは，透かし系列要素として一様分布した 2 値系列データや多値系列データを動画像へ埋め込み，画質が保証されていることを確認した．抽出においては，参照画像を用いなくても埋め込んだ透かし系列を取り出すことができ，相関計算を利用せずに透かし系列を特定することも確認した．また，この一般化により，提案法を他の非画質保証型電子透かし法へ適用し，画質保証型にすることも可能である [18]．

## 文 献

- [1] B.M. Macq, ed., "Special issue on identification and protection of multimedia information," Proc. IEEE, vol.87, pp.1059-1276, July 1999.
- [2] G.C. Langelaar, I. Setyawan, and R.L. Lagendijk, "Watermarking digital image and video data," IEEE Signal Process. Mag., vol.17, no.5, pp.20-46, Sept. 2000.
- [3] 松井甲子雄，電子透かしの基礎，森北出版，東京，1998.
- [4] G. Depovere, T. Kalker, J. Haitsma, M. Maes, L. De Strycker, P. Termont, J. Vandewege, 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. 1999 IEEE Int. Conf. on Image Processing, no.26AP1.1, Kobe, Japan, Oct. 1999.
- [5] 杉本 修，川田亮一，和田正裕，松本修一，"不可視マーカ信号の特長量抽出と統計的検定に基づく映像障害検出方式の検討"，信学技報，IE2002-59, Sept. 2002.
- [6] T. Tachibana, M. Fujiyoshi, and H. Kiya, "A watermarking scheme without using reference images for monitoring on-air video images," Proc. Int'l Conf. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, no.SS2-2, pp.6-11, March 2002.
- [7] 橋 高志，藤吉正明，貴家仁志，"放送監視のための非参照型画像電子透かし法"，信学論 (D-II)，vol.J86-D-II, no.2, pp.233-241, Feb. 2003.
- [8] 山田隆亮，吉浦 裕，越前 功，小川一人，室田逸郎，大竹剛，合志清一，"コンテンツの著作権保護における電子透かしの利用方法"，映像学誌，vol.57, no.9, pp.1155-1167, Sept. 2003.
- [9] 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.
- [10] M. Barni, F. Bartolini, V. Cappellini, and A. Piva, "A DCT-domain system for robust image watermarking," Signal Process., vol.66, no.3, pp.357-372, May 1998.
- [11] M. Barni, F. Bartolini, and A. Piva, "Improved wavelet-based watermarking through pixel-wise masking," IEEE Trans. Image Process., vol.10, no.5, pp.783-791, May 2001.
- [12] 宮崎明雄，桜島良聡臣，"画像の多重解像度解析を利用した電子透かし方式の改良"，信学論 (A)，vol.J85-A, no.1, pp.103-111, Jan. 2002.
- [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] 寺田光一，藤川義文，藤井由紀夫，越前 功，吉浦 裕，西岡清和，"メディアプロセッサを用いた HDTV 対応リアルタイム電子透かし装置"，信学技報，IE2002-56, Sept. 2002.
- [15] 赤井田卓郎，黒住幸一，岡田清孝，林 俊一，深谷崇史，"リップシンク・映像と音声のタイミング"，NHK 技研だより，pp.11-18, May 1997.
- [16] 福岡義秀，松井甲子雄，"フーリエ変換による画像への電子透かしの一方法"，1998 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS '98)，pp.1-7, Jan. 1998.
- [17] 安達丈晴，長谷川まどか，加藤茂夫，"DCT を利用した静止画像の電子透かし法についての検討"，信学技報，HSC99-43, Oct. 1999.
- [18] 橋 高志，藤吉正明，貴家仁志，"透かし系列の統計分布を限定しない画質保証型電子透かし法"，第 17 回デジタル信号処理シンポジウム，no.D4-2, Nov. 2002.

(平成 15 年 4 月 23 日受付，10 月 6 日再受付)



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。同年，都立大学院工学研究科電気工学専攻助手・博士(学術)。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。映像情報メディア学会，

IEEE 各会員。



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ア技術に関する研究に従事．IEEE 論文誌 Signal Processing 編集委員（1998～2000）．本会論文誌 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．