

動き検出に基づく動画用電子透かしの画質維持方式

越前 功[†] 吉浦 裕[†] 田口 順一[†]
中野 和典[†] 佐々木 良一^{††}

電子透かしの挿入では、画質の維持と画像処理への耐性を両立することが重要である。この両立のためには、画質劣化を防止しながら、透かしをできるだけ強く挿入することが必要である。動画の電子透かしでは、画像の内容に動きがある場合には透かしが目立ちにくいので、動きを利用することで、透かし強度を増大できる可能性がある。ところが、従来研究では、この可能性を追求していなかった。本論文では、動き検出を用いて透かし強度を調整する方式を提案する。動きベクトルと変化量に基づいて透かしの目立ちにくさを判定する方法、その判定値に基づく透かし強度調整の方法を提案する。また、動き検出を行わない従来の透かし方式と比較評価し、従来方式に比べ、同画質での透かし挿入量を30%増大可能であり、MPEG2圧縮への耐性が向上することを明らかにする。

Maintaining Image Quality in Motion Picture Watermarking Based on Motion Detection

ISAO ECHIZEN,[†] HIROSHI YOSHIURA,[†] JUN'ICHI TAGUCHI,[†]
KAZUNORI NAKANO[†] and RYOICHI SASAKI^{††}

Compatibility between maintenance of image quality and robustness of image processing is an essential requirement for watermark embedding. Therefore, it is necessary to embed watermarks into the contents as much as possible without visual degradation. Because watermark is inconspicuous on moving objects among frames, there is the possibility of increasing watermark strength by considering the properties of the motion. Previous methods, however, embedded watermarks into each frame independently. This paper proposes a method that controls watermark strength based on motion vectors and variations in the motion detection. Experimental evaluations show that new method enables us to raise the embed information as much as 30% with the same quality as the previous method and improve the survivability of MPEG2 encoding.

1. はじめに

絵画や音楽、映画などのコンテンツをデジタル化して配布するコンテンツビジネスがさかんになってきた。特に今後は、ネットワークのブロードバンド化、テレビ放送のデジタル化、可搬媒体(DVDなど)の大容量化にともない、動画像を対象とするコンテンツビジネスの発展が期待されている。

デジタルコンテンツは取扱いが容易で、使用による劣化がない反面、不正コピーが容易で著作権が侵害されやすいという問題がある。そこで、配布先名称な

どの情報をコンテンツ自身に挿入することで不正コピーを防止し、著作権の保護を可能にする電子透かし技術が注目されている。本論文では、特に動画を対象とした電子透かしの挿入方法について述べる。

動画用電子透かしは、一般に、原画像に微小な変更を加えることで情報を挿入するが、電子透かしの保護対象となる映像は、映画や証拠ビデオなどデリケートな映像なので、電子透かしによる画質の劣化は許されない。すなわち、画質劣化防止は、電子透かしにおける重要な技術課題である。電子透かしの画質劣化防止については、従来から多くの研究があるが^{(1)~(6)}、静止画を対象とした研究がほとんどであり、動画に固有の問題については、ほとんど研究されていなかった。

本論文では、濃淡情報変更型の動画用電子透かしを対象として、上記の問題への解答を提案する。以下2章では、従来の動画用電子透かしにおける画質劣化

[†] 株式会社日立製作所システム開発研究所
Systems Development Laboratory, Hitachi, Ltd.

^{††} 東京電機大学工学部情報メディア学科
Department of Information System and Media Design,
School of Engineering, Tokyo Denki University

の防止を概観する．3章では，動き検出に基づく画質劣化防止の方式を提案し，4章では，提案方式の有効性を評価する．最後に5章で結論を述べる．

2. 従来の動画用電子透かしにおける画質劣化の防止

動画透かしの挿入方式には，ピクセル値を直接変更する方式^{5),7)}とMPEGのDCT係数などの周波数成分を変更する方式^{7),8)}が多いが，フレーム間の動きベクトルを変更する方式⁹⁾も提案されており，これらの方式の優劣については結論が出ていない．本論文では，ピクセル値を直接変更する方式を対象とする．ピクセル値変更方式は，さらにピクセルのカラー情報を変更する方式^{10),11)}と濃淡情報(輝度値)を変更する方式に分類できるが，本論文ではそのうちの濃淡情報変更方式を対象にする．

2.1 電子透かしの技術課題

電子透かしに要請される技術課題は，以下の3つに大別される．

- 画質劣化防止
透かし挿入による視覚的劣化が小さいこと．
- 画像処理耐性向上
透かしの挿入した画像に圧縮，拡大・縮小，各種フィルタなどの処理を施しても，挿入した情報が消失しないこと．
- 誤検出防止
挿入時の情報と検出時の情報が異なってしまったり，透かしの挿入していない画像から何らかの情報を検出したりしてしまう可能性が十分に少ないこと．

本論文では，画質劣化防止の観点から従来の電子透かしの概観し，その問題点を述べることにする．

2.2 用語の定義

一般に，濃淡情報変更方式による動画像への情報挿入は，動画像を構成するフレーム単位で行われる．各フレームは，縦 n ピクセル，横 m ピクセルからなる静止画像である．

- 透かし挿入
画像に情報を挿入するためにピクセルの輝度値を変更すること．すなわち， $n \times m$ ピクセルからなる t フレーム目のフレーム画像の輝度値集合を $\mathbf{Y}^{(t)} = \{Y_{i,j}^{(t)} \mid 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m\}$ とすると，透かし挿入フレーム画像 $\mathbf{Y}'^{(t)}$ は埋め込み演算 E により，

$$E : \mathbf{Y}^{(t)} \rightarrow \mathbf{Y}'^{(t)}$$

で表される．

- 透かし強度
透かしの挿入にともなうピクセルの輝度値の変数量． t フレーム目の位置 (i, j) におけるピクセルの透かし強度 $f_{i,j}^{(t)}$ は，

$$f_{i,j}^{(t)} = |Y'_{i,j}^{(t)} - Y_{i,j}^{(t)}|$$

で表される．

- 透かし挿入量
フレーム画像内の全ピクセルの透かし挿入強度の和． t フレーム目のフレーム画像における透かし挿入量を $Q^{(t)}$ とすると

$$Q^{(t)} = \sum_{i,j} f_{i,j}^{(t)}$$

で表される．

2.3 従来方式の分析

画質劣化防止の従来方式には以下の2種類がある．

- (1) 検出しやすい場所や画像処理の影響を受けにくい場所に挿入することで挿入量を削減し，間接的に画質劣化を防止^{12)~14)}．
- (2) 視覚的に透かしの目立ちにくい場所に挿入^{3)~6)}．

従来方式(1)の一例として，2組のピクセル集合 $\{a_i\}$ ， $\{b_i\}$ の輝度値に統計的な有意差を与えるパッチワーク方式¹⁵⁾において，より少ない変更で検出可能とする方法¹²⁾がある．具体的には，対応するピクセルを a_i ， b_i として，隣接ピクセルを選択することで，少ない変更で有意差を検出できるようにする．このようにして，方式12)は，検出に必要なピクセルの変更を低減し，間接的に画質劣化を防止する．方式13)，14)も同様である．しかし，これらの方式は，いずれも動画の個々のフレームとなる静止画を対象としたものであり，動画に固有の画質劣化防止方式ではない．

一方，従来方式(2)(目立ちにくい場所に挿入)は，輝度変化の大きな箇所や高周波成分の多い箇所を透かしの目立ちにくい箇所とし，そこに透かしの優先的に挿入する．しかし，従来方式(2)でも，従来方式(1)の場合と同様に，動画の個々のフレーム(静止画)を対象としたものがほとんどである．従来方式(2)のうち，動画に固有な検証を行ったものとしては文献5)があげられる．文献5)は，フレーム間で透かし強度 $f_{i,j}^{(t)}$ の変化が大きいと，動画再生時にちらつきによる画質劣化が生じることを明らかにし，透かし強度の変化量にしきい値を設けて，しきい値以上の強度変更を行わないことで画質劣化を防止する．

動画の電子透かしでは，後述するように，画像内容

に動きがある場合には、透かしが目立ちにくいので、画像内容の動きに応じた透かし強度の増大が可能である。しかし、上述したように従来方式は、このような動きを考慮した透かし強度の調整を行っていなかった。

本論文では、フレーム間の動きを考慮した動画用電子透かしの画質劣化防止方式を提案する。具体的には、MPEG 圧縮などで汎用的に用いられている動き検出手法^{16),17)}を利用して、動きがある箇所に対して透かし強度を増大するような、目立ちにくさの新しい尺度を提案する。本方式により、動画再生時の画質劣化を防止しながら、透かし挿入量を増大することが可能になる。

3. 動き検出に基づく画質劣化防止方式

3.1 透かしの目立ちにくさの判断基準

透かしの強度は「目立ちにくさの判断」によって調整される。すなわち、目立ちにくい箇所には強く、目立ちやすい箇所には弱く挿入される。そこで、動きを考慮した、目立ちにくさの新しい判断基準を確立することが本研究の主眼である。本節では、この新しい判断基準を提案する。

3.1.1 基準の満たすべき性質

画像内容の動きと透かしの目立ちにくさとの関係を予備実験により分析した結果、以下が判明した。新しい基準は、この実験結果と整合する必要がある。

- (1) 図 1(a)のように、画像内容がフレーム間で平行移動する箇所では、透かしの目立ちにくさは画像内容の平行移動する速度に依存し、当該箇

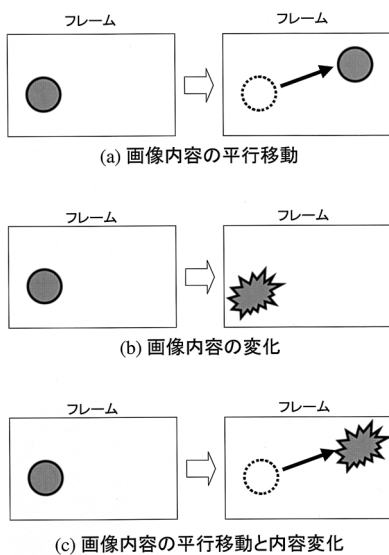


図 1 画像内容の動き

Fig. 1 Object movement and deformation.

所の速度が増加するほど透かしは目立ちにくくなる。

- (2) 図 1(b)のように、画像内容がフレーム間で変化する箇所では、透かしの目立ちにくさは画像内容の変化量に依存し、当該箇所の変化量が増加するほど透かしは目立ちにくくなる。
- (3) 図 1(c)のように、上記(1)および(2)が同時に起こる場合、すなわち、画像内容がフレーム間で平行移動し、かつ画像内容に変化がある箇所では、透かしの目立ちにくさは画像内容の平行移動の速度および変化量の双方に依存する。すなわち、上記速度および変化量が増加するほど、透かしは目立ちにくくなる。

上記分析結果より、動画用透かしにおける透かしの目立ちにくさの程度は、従来研究で取り上げた個々のフレームの性質（輝度変化の大小、輪郭部分の多少）に加えて、平行移動の速度や変化量などの画像内容の動きに依存すると考えられる。

以下では、代表的な動き検出手法であるブロックマッチング法の概要を述べた後、動き検出を利用した判断基準の具体例について述べる。

3.1.2 動き検出手法（ブロックマッチング法）

ブロックマッチング法^{16),17)}は、MPEGのマクロブロック（16×16ピクセル）ごとに動きベクトルを推定する代表的な動き検出手法である。具体的な手順は以下のとおりである。

- Step 1. フレーム画像 $Y^{(t)}$ 内のマクロブロックと上記ブロック位置から (k, l) だけずれた $Y^{(t-1)}$ 内のマクロブロックとの差分和 $D(k, l)$ を次式により算出（図 2 参照）。

$$D(k, l) = \sum_{i,j=0}^{15} |Y_{b_x+i, b_y+j}^{(t)} - Y_{b_x+k+i, b_y+l+j}^{(t-1)}|$$

ただし、 (b_x, b_y) は、マクロブロックの始点を表

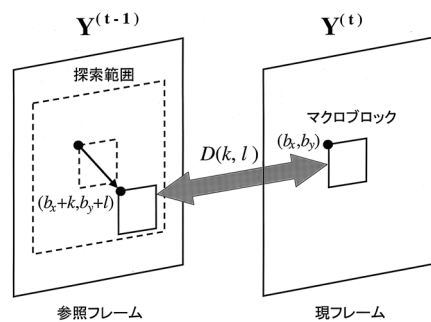


図 2 動き検出の概要

Fig. 2 Outline of the motion detection.

すピクセル位置である．

Step 2. Step1 で算出した差分和 $D(k, l)$ を k, l の探索範囲内 ($-15 \leq k, l \leq 15$ が一般的である¹⁶⁾) に渡って算出する．すなわち, 31×31 個の差分和 $D(k, l)$ が生成される．

Step 3. Step2 で算出した 31×31 個の差分和 $D(k, l)$ の中で, 最小の $D(k, l)$ をとるベクトル (k_0, l_0) を求め, 動きベクトルとする．すなわち,

$$d = \min_{k,l} D(k, l)$$

$$\mathbf{v} = (k_0, l_0) = \arg \min_{k,l} D(k, l)$$

において, $\mathbf{v} = (k_0, l_0)$ が画像内容の平行移動の速度を表す動きベクトルであり, d が画像内容の変化量である．

3.1.3 動き検出を利用した判断基準の具体例

ピクセル輝度値変更型の電子透かしでは, 各フレームのピクセルの輝度値を変更する．したがって, 画質劣化防止のための判断基準として, フレーム画像内の位置 (i, j) におけるピクセルの変更許容度 $R_{i,j}$ を以下に定義する．

ピクセル変更許容度 $R_{i,j}$ ピクセルに変更を加えたときの目立ちにくさの程度． $R_{i,j}$ の値が大きいほど透かしが目立ちにくいと判断する．たとえば, 位置 $(1, 0)$ におけるピクセル変更許容度 $R_{1,0}$ が位置 $(2, 0)$ における変更許容度 $R_{2,0}$ より大きいとは, ピクセル $(2, 0)$ に変更を加えるよりもピクセル $(1, 0)$ に変更を加えるほうが目立ちにくいことを示す．

3.1.1 項の画像の分析結果から, 動画像におけるピクセル変更許容度 $R_{i,j}$ は, 静止画の性質を考慮した値 $S_{i,j}$ に加え, 上述の動きベクトル \mathbf{v} および変化量 d に依存する．すなわち, ピクセル変更許容度 $R_{i,j}$ は, ある関数 F を用いて

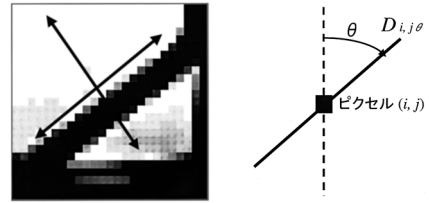
$$R_{i,j} = F(d, \mathbf{v}, S_{i,j}) \quad (1)$$

で表される．以下では, 式 (1) の $S_{i,j}$ と関数 F について, 具体的に検討する．

(1) $S_{i,j}$ の検討

静止画の性質に基づいた透かしの目立ちにくさを判断する基準としては, 2.3 節で述べたような様々なものが提案されている．ここでは, 一例として, その有効性が詳細に実証されている方式 (6) を取り上げる．方式 (6) では, 以下の基準により透かしの目立ちにくさを判断している．

- 輪郭部分では, 透かしは目立ちやすい．
- 輪郭部分以外では, 輝度変化が小さい箇所では, 透かしは目立ちやすく, 輝度変化が



(a) 輪郭上の方向線 (b) $D_{i,j,\theta}$ の定義

図 3 従来方式の判断基準

Fig. 3 Criteria of the previous method.

大きな箇所では, 透かしは目立ちにくい．以下では, この方式を具体的に説明する．

図 3 (a) のように, 輪郭をまたぐ方向線上ではピクセル輝度の変動は大きい⁸⁾, 輪郭に沿う方向線上では, 輝度の変動は小さい^{18), 19)}．また, 輪郭以外の輝度変化が大きい箇所では, どの方向線でも輝度の変動は大きい．そこで, 画像の部分における透かしの目立ちにくさの基準を各方向線上のピクセル輝度の標準偏差を計算したときの最小値とした．すなわち, フレーム内の位置 (i, j) におけるピクセルでの目立ちやすさの基準 $S_{i,j}$ を, 図 3 (b) に示すように, ピクセル (i, j) を中心とする傾き θ の方向線上の輝度値の集合を $D_{i,j,\theta}$ として,

$$S_{i,j} = \min_{\theta} \sqrt{\sigma^2(D_{i,j,\theta})} \quad (2)$$

で表した．ただし, $\sigma^2(\bullet)$ は集合内要素の分散を求める演算である． $S_{i,j}$ が大きいほど透かしが目立ちにくいと判断する．この基準によれば, 輪郭部分では $S_{i,j}$ は小さい値となるので, 透かしが目立ちやすいと判断する．輝度変化の小さい箇所では, $S_{i,j}$ は小さいので, 透かしが目立ちやすいと判断し, 輝度変化が大きくなるほど目立ちにくいと判断する．方向線 $D_{i,j,\theta}$ の長さ⁹⁾と方向の数 (θ の個数) については, 方式 (6) に従い, 長さを 5 ピクセル, 方向の数を 8 とした．

(2) 関数 F の検討

F の候補となる関数は無数にある¹⁰⁾が, 動き検出による透かし強度の調整は, 従来研究されておらず, F を求める手掛かりはない．そのため, 最初から最適な関数を求めることは困難である．したがって, 本論文では, F として最適な関数を求めるのではなく, F が存在すること (すなわち, 動き検出の利用によって, 従来に比べて画質と透かし強度のトレードオフが改善できること) の実証を目指すこととした．

本論文では、 F の最も単純な候補として、動きベクトル \mathbf{v} と変化量 d に依存した 2 段階の関数を用いることとし、その妥当性は実験により示すことにした。具体的には、まず、3.1.1 項で分析した透かしの目立ちにくさの観点から、動きベクトル長 $|\mathbf{v}|$ と変動量 d のしきい値 T_v 、 T_d を用いて、各フレームをマクロブロック単位で静止箇所と動き箇所に分類した。

静止箇所 動きベクトル長 $|\mathbf{v}|$ が一定値以下、かつ変動量 d が一定値以下の箇所
 $(d < T_d, |\mathbf{v}| < T_v)$ 。

動き箇所 動きベクトル長 $|\mathbf{v}|$ が一定値以上、または、変動量 d が一定値以上の箇所
 $(d \geq T_d \text{ or } |\mathbf{v}| \geq T_v)$ 。

次に、上記分類から、静止箇所では、画像内容が静止していると考え、従来方式による静止画レベルの変更許容度 $S_{i,j}$ を適用した。また、動き箇所では、単純に $S_{i,j}$ を定数倍することとした。以上より、ピクセル変更許容度 $R_{i,j}$ を次式の 2 段階関数により定義した。

$$R_{i,j} = F(d, \mathbf{v}, S_{i,j}) = \begin{cases} S_{i,j} & d < T_d, |\mathbf{v}| < T_v \\ \alpha S_{i,j} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 $\alpha > 1$ である。

この基準によれば、画像内容が静止している箇所（静止箇所）では、従来方式による静止画レベルの変更許容度 $S_{i,j}$ をそのまま適用する。一方、フレーム間で画像内容の平行移動や変化が生じる箇所（動き箇所）では、上記 $S_{i,j}$ を α 倍した値を適用するので、画像内容が同一であれば（同一の $S_{i,j}$ であれば）、静止箇所に比べ動き箇所は、より透かしが目立ちにくいと判断する。したがって基準は妥当と考える。

3.1.4 しきい値 T_v 、 T_d と係数 α の設定

式 (3) のしきい値 T_v 、 T_d の値を大きくすると、フレーム内で動き箇所に分類されるマクロブロックの個数は減少するが、分類された動き箇所の動きベクトル \mathbf{v} や変化量 d は大きな値をとる。したがって、動き箇所の個数は少ないが、係数 α を大きくして、動き箇所に強い挿入を行うことが可能になる。一方、 T_v 、 T_d の値を小さくすると、動き箇所の個数は増大するが、動きベクトル \mathbf{v} や変化量 d は小さい値をとるものも存在する。したがって、動き箇所の個数は多いが、係数 α を小さくして、弱い挿入を行う必要がある。このように、提案方式の効果を最大にする（すなわち、

動き箇所への埋込み強度増大により、同等画質での挿入量 Q を最大化する）ためには、 T_v 、 T_d 、 α の最適な組合せを求める必要がある。ところが、上述した関数 F の場合と同様に、従来研究には最適な組合せを求める手掛かりはない。以上から、最適な組合せを求めるのは、関数 F の場合と同様に困難である。

そこで、本論文では、最適な T_v 、 T_d 、 α の組合せを求めるのではなく、有効な組合せ（すなわち、従来方式に比べて、画質と埋め込み強度のトレードオフが改善されるような組合せ）が存在することの実証を目指すことにした。具体的な手順は、以下のとおりである。

- 標準的な動画像²⁰⁾を用いて、 T_v 、 T_d を実験的に決定する。
- 上記で決定した T_v 、 T_d に対して、 α を実験的に決定する。

以下では、上記手順の詳細について説明する。

(1) T_v 、 T_d の設定

下記の手順により、透かしが目立ちにくい箇所の測定を行った。

Step 1. 静止画の性質のみを考慮した従来方式 (6) により、所定挿入量 Q を挿入。

Step 2. Step1 で生成した透かし画像を画質評価し、被験者に透かしが目立ちにくい箇所を指摘してもらう。

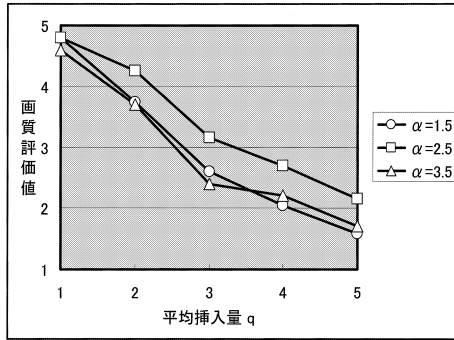
Step 3. Step2 で指摘された箇所の動きベクトルと変動量を測定する。

上記の測定を数種類の挿入量 Q について行った。その結果、 $T_v = 6$ 、 $T_d = 5000$ とすれば、上記で指摘された透かしの目立ちにくい箇所を、式 (3) により動き箇所として分類できることが判明した。

以下では、 T_v 、 T_d をこれらの値に固定して、 α の値を求めることにする。なお、これらの T_v 、 T_d の値は、厳密な根拠に基づき決定したのではなく、1 つのサンプル画像での目視評価に基づいて試行錯誤的に取り決めたものである。したがって、これらの値の有効性（これらの値を用いることで画質と埋込み強度のトレードオフが改善できること）は、実験により示すことにする。

(2) α の設定

提案方式の動き箇所の係数 α が小さすぎると、従来方式との差がなくなり、 α が大きすぎると、動き箇所の画質が劣化すると考えられるので、 α を適切な値に設定する必要がある。したがって、標準的な画像を対象として、主観評価によ

図4 α の評価結果Fig. 4 Evaluation results of α .

り α の値の設定を行う(主観評価の方法については, 4.1.1 項を参照のこと)。

標準的な動画像²⁰⁾(Walk through the Square) に対して, 3種類の係数 ($\alpha = 1.5, 2.5, 3.5$) により透かしを挿入し, それぞれの画質レベルを評価した。評価結果を図4に示す。図の横軸は, 1ピクセルあたりの平均透かし挿入量 q を表す。縦軸は主観評価による透かし動画像の画質評価値であり, 値が大きいくほど原画像の画質に近いことを表す。この評価結果から, 以下が考察される。

- 挿入量増大にともなう画質劣化の度合いは, $\alpha = 1.5$ が最も少ない(画質が良い)。同等の挿入量で3種類の画質を比べると, $q = 1$ では, ほぼ同じ画質だが, $q \geq 2$ では, $\alpha = 2.5$ の画質が他のケースを上回る。
- $\alpha = 2.5$ の場合に比べて $\alpha = 1.5$ および $\alpha = 3.5$ の画質評価値が低かった理由について評価者にコメントを求めたところ, $\alpha = 1.5$ の場合には, 静止箇所での画質劣化が知覚され, $\alpha = 3.5$ の場合には, 逆に動き箇所での劣化が知覚されていたことが判明した。これは, 以下が原因と考えられる。動き箇所での変更許容度の係数 α が 1.5 程度では, 静止箇所での透かし強度を透かしの目立ちにくい動き箇所へ分散することが不十分なため, 従来方式と同様に静止箇所での画質劣化が知覚される。逆に $\alpha = 3.5$ 程度では, 透かし強度の動き箇所への分散量が多すぎるため, 動き箇所での劣化が知覚される。

上記の評価結果より, α の値を $\alpha = 2.5$ に設定した。

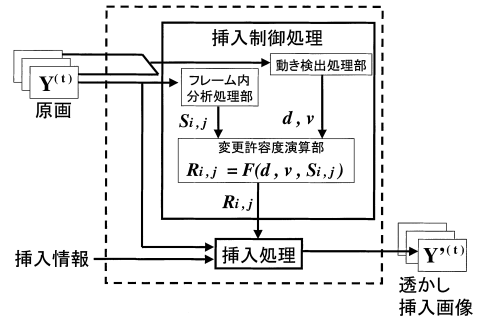


図5 提案方式の構成

Fig. 5 System structure of the proposed method.

3.2 透かし挿入方式

ピクセル変更許容度 $R_{i,j}$ による透かし挿入方式の構成を図5に示す。本方式は, 挿入処理と挿入制御処理から構成されている。各処理部は以下の性質を有する。

挿入制御処理 入力した各フレーム画像について, 透かしの目立ちにくさを判定し, 挿入処理にピクセル変更許容度 $R_{i,j}$ を出力する。本処理は, 下記の3つの処理部から構成されている。

- フレーム内分析処理部
透かしの挿入対象フレームに対して, 式(2)に従い, $S_{i,j}$ を算出。
- 動き検出処理部
透かしの挿入対象フレームと参照フレームに対して, 3.1.2 項の手法に従い, マクロブロック単位で動きベクトル v と変化量 d を算出。
- 変更許容度演算部
上記2つの処理部が出力した $d, v, S_{i,j}$ から, 式(3)に従い, 変更許容度 $R_{i,j}$ を算出。

挿入処理 挿入制御処理が出力した変更許容度 $R_{i,j}$ を用いて, 透かし強度の決定を行い, 挿入情報に従って, 対象フレームに画質劣化の少ない透かし挿入を行う。

挿入制御処理は, 変更許容度 $R_{i,j}$ のみを介して挿入処理と連動しているため, 挿入処理に依存せず, 多様な透かし挿入システムに対応可能である。

3.3 挿入方式の具体例

1ビット挿入方式の具体例を処理フローにより説明する。Step 1, Step 2が, 挿入制御処理であり, Step 3, Step 4が, 挿入処理である。複数ビットを挿入する場合には, 各フレーム画像を複数の領域に分割して, 各領域で1ビットの情報挿入を行うなど, 1ビットの場合の拡張により対処する。下記の挿入方式に対応した透かし検出方式^{21), 22)}については, 付録を参照のこと。

Step 0. $t = 1, 2, \dots$ に対して, 以下のステップを繰り返す.

Step 1. フレーム内分析処理部により, 入力画像の輝度値 $Y^{(t)}$ を入力として, $S_{i,j}$ を出力. また, 動き検出処理部により, $Y^{(t)}, Y^{(t-1)}$ を入力として, マクロブロック単位で d, v を出力.

Step 2. 変更許容度演算部により, Step 1 で算出した $d, v, S_{i,j}$ を入力として, ピクセル変更許容度 $R_{i,j}$ を出力. 挿入処理への入力とする.

Step 3. Step 2 で出力したピクセル変更許容度 $R_{i,j}$ を用いて, 挿入処理により透かしを挿入. 所定の透かし挿入量 Q を挿入するために, 次式により $R_{i,j}$ の比にあわせて Q を各ピクセルに分配し, 透かし強度 $f_{i,j}^{(t)}$ を算出.

$$f_{i,j}^{(t)} = \frac{R_{i,j}}{\sum_{ij} R_{i,j}} Q \quad (4)$$

Step 4. ± 1 の疑似ランダム列からなる透かしパターン $M = \{M_{i,j} = +1 \text{ or } -1 \mid 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m\}$ を透かし情報のビット値 b に従って, 次式により重畳し, 透かし画像 $Y'^{(t)}$ を生成する.

$$Y'_{i,j}{}^{(t)} = \begin{cases} Y_{i,j}^{(t)} + f_{i,j}^{(t)} M_{i,j} & \text{if } b = 1 \\ Y_{i,j}^{(t)} - f_{i,j}^{(t)} M_{i,j} & \text{if } b = 0 \end{cases} \quad (5)$$

4. 評価

4.1 主観評価による画質評価

本節では, 主観評価により, 提案方式の画質維持の程度を従来方式と比較検証する.

4.1.1 評価方法

提案方式と従来方式⁶⁾により, 720×480 ピクセルの 24 ビットカラー動画像 (450 フレーム, 15 秒分) の 8 ビット輝度成分に透かしを挿入した. 各フレームのカラー画像への挿入方法は以下の手順のとおりである.

Step 1. 24 ビットカラー画像を 8 ビット輝度成分画像 ($Y^{(t)}$) と 8 ビット色差成分画像 ($C_b^{(t)}, C_r^{(t)}$) に分離²³⁾.

Step 2. 3.3 節で述べた処理フローに従って, 8 ビット輝度成分 ($Y^{(t)}$) を変更 ($E: Y^{(t)} \rightarrow Y'^{(t)}$).

Step 3. 変更した輝度成分画像 ($Y'^{(t)}$) と色差成分画像 ($C_b^{(t)}, C_r^{(t)}$) を合成して, 透かしカラー画像作成.

同一の透かし挿入量 Q において, 提案方式により挿入した場合, 従来方式により静止画ベースで挿入した場合の各々について, 画質レベルを主観評価により求めた^{5),6)}. 各方式の概要は以下のとおりである.



(a) Walk



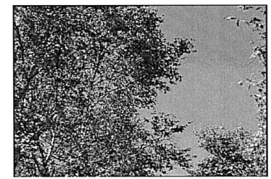
(b) Flamingoes



(c) Whale



(d) Hall



(e) Leaves

図 6 評価画像

Fig. 6 Evaluated pictures.

提案方式 3.3 節の処理フローに従い, 挿入ビット値を $b = 1$ として, 所定挿入量 Q を挿入.

従来方式 3.3 節の処理フローにおいて, ピクセル変更許容度 $R_{i,j}$ を静止画ベースの変更許容度 $S_{i,j}$ に置き換えた処理フローに従い, 挿入ビット値を $b = 1$ として, 所定挿入量 Q を挿入.

評価画像については, 3.1.1 項の予備実験の結果をふまえ, 下記に示す画像内容の動きの性質に着目して, 主観評価用の標準動画像²⁰⁾ から 5 種類の動画像を選定した.

- 画像内容の平行移動の大小
- 画像内容の変化の大小

具体的には, 各標準動画像における被写体の動きの分析結果²⁰⁾ を参考にして, 上記 2 つの基準がどちらも中程度である動画像 (Walk through the Square) を選定し, 標準的な画像とした. さらに, 以下に示す 4 種類の動画像についても同様な選定を行った (図 6 参照).

- Walk through the Square (Walk)
画像内容の平行移動と変化が中程度
人々が花壇の周りを動く.
- Flamingoes (Flamingoes)
画像内容の平行移動は大きい, 変化は小さい

フラミンゴの群れが水平に移動する．

- **Whale Show (Whale)**
 画像内容の平行移動は小さいが，変化は大きい
 水しぶきが上がり，水面が激しく揺れる．
- **Entrance Hall (Hall)**
 画像内容の平行移動は小さく，変化も小さい
 3人の静止人物が立ち話する．
- **Rustling Leaves (Leaves)**
 画像内容の平行移動は大きく，変化も大きい
 木立が風で激しく揺れる．

動画像の画質の主観評価は，文献 24) に従い，以下の手順で行った．

Step 1. 評価者に原画を提示した後，透かし画を提示．

Step 2. 原画に対しての透かし画の妨害の度合いを「妨害が分からない」「妨害が分かるが気にならない」「妨害が分かるが少し気になる」「妨害が分かり気になる」「妨害が分かり大変気になる」の5つの評価語で表し，それぞれ順に5, 4, 3, 2, 1の評点を与える．

Step 3. Step 1 と Step 2 を 10 人の評価者に対して行い，透かし動画像の画質評価値を 10 人の評価者の評点の平均値で表す．

4.1.2 評価結果

最初に，標準的な画像 (Walk) に対する評価結果を図 7 (a) に示す．図の横軸は，1 ピクセルあたりの平均透かし挿入量

$$q = \frac{1}{720 \times 480} Q$$

を表す．縦軸は主観評価による透かし動画像の画質評価値である．この評価結果から，標準的な画像における，2 方式の画質と挿入量の関係について，以下が考察される．

- 挿入量増大にともなう画質劣化の度合いは，提案方式のほうが少ない．同等の挿入量で両方式を比べると， $q = 1$ では，両方式の画質はほぼ同じだが， $q \geq 2$ では，提案方式の画質が上回る．
- 同等画質，たとえば電子透かしの要求レベルの一例である画質評価値 4 「妨害が分かるが気にならない」における，提案方式と従来方式の挿入量 q を比べると，提案方式は従来方式の約 1.3 倍 (30% 増大) の透かし挿入が可能である．この結果から，提案方式は，従来方式に比べて，画質を維持しながらより多くの透かし挿入が可能である．

図 8 に透かし強度の分布図を示す．図 8 (a) のように，花壇の後ろを人物が動くフレームにおいて，同一

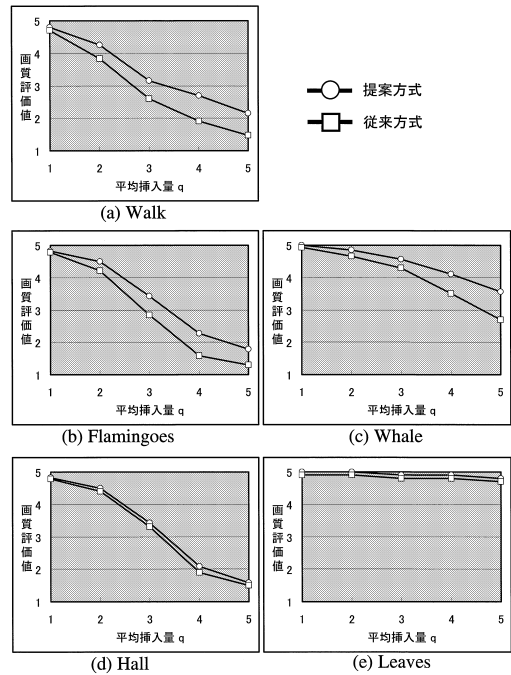


図 7 透かし挿入量と画質劣化の関係
 Fig. 7 Relation between embedding quantity and visual degradation.

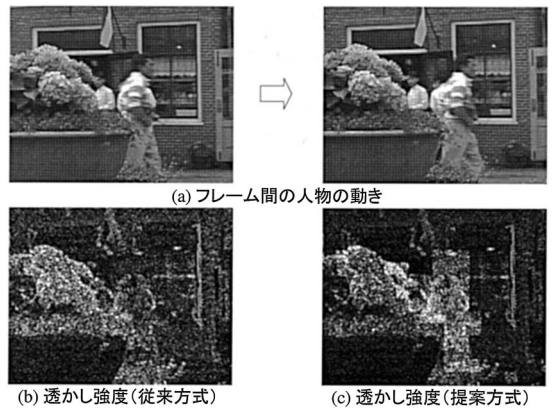


図 8 透かし強度の比較
 Fig. 8 Comparison of watermark strength.

挿入量での 2 方式の透かし強度 (図 8 (b), (c)) を比較すると，提案方式の透かし強度は，人物が動く箇所ではより大きく，花壇や背景などの静止箇所ではより小さくなる．このように，提案方式は，静止箇所での透かし強度を透かしの目立ちにくい動き箇所へ分散することにより，従来方式の画質を上回ることが分かる．

次に，画像内容の平行移動と変化のどちらか一方が大きい画像 (Flamingoes, Whale) に対する評価結果を図 7 (b), (c) に示す．この評価結果から，以下が考察される．

- 双方の画像とも、挿入量増大にともなう画質劣化の度合いは、提案方式のほうが少ない。また、標準的な画像(Walk)と比較すると、提案方式の画質向上の度合いは、ほぼ同じである。これは、標準的な画像の場合と同様に、静止箇所への透かし強度を動き箇所に分散するためと考えられる。なお、Whale(内容変化が大)に関しては、提案方式と従来方式のいずれにおいても、標準的な画像の場合に比べて、画質劣化の度合いは少ない。これは、フレーム画像中の動き箇所の占める割合が、標準的な画像が1フレーム平均7.2%であるのに対して、Whaleは、58.9%と大きいことから、標準的な画像に比べて透かしが目立ちにくい箇所の割合が大きいためと考えられる。

次に、画像内容の平行移動と変化がともに小さい画像(Hall)に対する評価結果を図7(d)に示す。この評価結果から、以下が考察される。

- 提案方式の画質が従来方式を上回るが、その差は小さい。すなわち、標準的な画像の場合に比べて、提案方式の効果は小さい。これは、フレーム画像の大部分を静止箇所が占めていることから、目立ちにくい動き箇所への分散が不十分であるためと考えられる。

最後に、画像内容の平行移動と変化がともに大きい画像(Leaves)に対する評価結果を図7(e)に示す。この評価結果から、以下が考察される。

- Hallと同様に、両方式の画質はほぼ同じであり、提案方式の効果は小さい。これは、フレーム画像の大部分を動き箇所が占めているため、静止箇所と動き箇所間で透かし強度を変える提案方式の効果が発揮されないためと考えられる。

5つの評価画像それぞれについて、提案方式の効果および分析を表1にまとめる。

以上の評価結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 標準的な画像および、画像内容の平行移動と変化量のどちらか一方が大きい画像については、ピクセルあたり1階調程度の挿入量では、提案方式の画質は従来方式とほぼ同じだが、2階調以上の挿入量であれば、提案方式は従来方式を上回る。
- (2) 標準的な画像については、提案方式により、同等画質での透かし挿入量を30%程度増大可能である。
- (3) 画像内容の平行移動と変化量がともに大きい画像および、ともに小さい画像については、提案方式と従来方式の画質はほぼ同じであり、提案

表1 提案方式の効果と分析

Table 1 Effects and analyses of the proposed method.

評価画像	特徴	効果	分析
Walk 標準的な 画像	平行移動: 中 内容変化: 中	同等挿入量 で画質向上	静止箇所への透かし強度を透かしの目立ちにくい動き箇所に分散して画質を向上
Flamingoes	平行移動: 大 内容変化: 小	同等挿入量 で画質向上	静止箇所が大部分を占めるため動き箇所への分散が不十分
Whale	平行移動: 小 内容変化: 大	同等挿入量 で画質向上	動き箇所が大部分を占めるため提案方式の効果が現れにくい
Hall	平行移動: 大 内容変化: 小	効果なし	
Leaves	平行移動: 大 内容変化: 大	効果なし	

方式の効果はほとんどない。

- (4) すべての画像について、提案方式の画質は従来方式に比べて同等または上回る。すなわち、提案方式の有効性が実証された。

4.2 画像処理耐性の評価

本節では、提案方式による画像処理耐性の向上について評価する。具体的には、前節の画質評価で用いた5つの動画を対象とし、従来方式と提案方式を用いて同等画質となるように透かしを挿入した場合の画像処理耐性を比較評価する。画像処理としては、最も一般的に用いられるMPEG圧縮を取り上げる。画質評価で用いた5つの動画は、テレビ標準規格(720×480ピクセル)であるが、この規格の動画に対する最も一般的なMPEG圧縮は、デジタル放送用のMPEG2圧縮であり、ビットレートは3Mbps(ビット/秒)から8Mbps程度である^{25),26)}。そこで、MPEG2の3Mbpsと8Mbpsを取り上げることにした。電子透かしの画像処理耐性は、挿入および検出する情報量(ビット数)によって、評価結果が異なる。ここでは、一例として、コンテンツの識別番号の表現に必要な64ビット²⁷⁾とした。

4.2.1 評価方法

4.1.1項の5つの評価画像について、下記手順によりMPEG2圧縮への耐性を評価した。

Step 1. 4.1.2項の画質評価の結果から同等画質(画質評価値4)での提案方式と従来方式の平均挿入量 \hat{q} を求める。たとえば、標準的な画像(図7(a))の場合、画質評価値4における提案方式の平均挿入量は $\hat{q} = 2.2$ であり、従来方式では $\hat{q} = 1.8$ である(なお、図7(e)のLeavesについては、提案、従来方式ともに画質評価値が4以上なので、挿入

量の最大値である $\hat{q} = 5$ とした)。

Step 2. 3.3 節の処理フローに基づき、提案方式と従来方式のそれぞれについて、フレーム内を 64 個の領域に分割し、各領域に 1 ビットの情報挿入を行うことで、450 枚の各フレームに 64 ビットのコンテンツ識別番号を挿入する。その際、平均挿入量が Step 1 で求めた \hat{q} となるように透かしを挿入し、提案方式と従来方式で同等画質の透かし画像を生成する。

Step 3. Step 2 で生成した 2 方式の透かし画像に、文献 28) により MPEG2 圧縮を施し、MPEG データを生成する。ビットレートは、上述した 3 Mbps と 8 Mbps とした。

Step 4. Step 3 の MPEG データを解凍して 450 枚のフレームを生成し、付録の透かし検出方式に従って、各フレームから 64 ビットの情報を検出する。

Step 5. 各フレームから検出した 64 ビットの情報と、Step 2 で挿入した 64 ビットのコンテンツ識別番号との一致を検証し、全 450 フレームのうち、コンテンツ識別番号を正しく検出したフレーム数を測定する。

4.2.2 評価結果

表 2 に測定結果を示す。表 2 は、圧縮前にすべてのフレームから正しい情報を検出できたのが、MPEG 圧縮の結果どうなったかを、5 つの評価画像について、全 450 フレーム中の正検出フレーム数の割合で表したものである。表 2 によると、すべての評価画像およびすべてのビットレートにおいて、提案方式の正検出フレームの割合は、従来方式に比べて同等または上回ることが分かる。すなわち、提案方式により MPEG 圧縮への耐性を向上させることが可能である。

表 2 の個別の内容を見ると、ビットレート 8 Mbps の場合、Flamingoes, Hall, Leaves の検出率については、提案方式と従来方式の差はほとんどないが、Walk, Whale については、5%程度の提案方式の向上が認められる。一方、ビットレート 3 Mbps の場合、Hall, Leaves については、提案方式と従来方式の差はほとんどないが、Walk, Flamingoes, Whale については、20%から 30%程度の顕著な向上が認められる。

動画の著作権保護の場合、必ずしも 1 フレームから透かしを検出する必要はなく、複数フレームの透かしを統合することで検出率を向上してもよい。そこで、ビットレート 3 Mbps の場合について、下記手順に示す複数フレームからの検出方法を用いることにした。

Step 1. 連続する N フレームから各々 64 ビットを

表 2 MPEG 圧縮後の正検出フレームの割合 (%)
Table 2 Detection ratios after MPEG encoding.

	MPEG	MPEG
	3 Mbps	8 Mbps
Walk (提案)	63.6	99.6
(従来)	40.2	94.0
Flamingoes (提案)	51.8	100
(従来)	32.7	100
Whale (提案)	50.4	76.9
(従来)	19.8	71.8
Hall (提案)	99.6	100
(従来)	98.9	100
Leaves (提案)	91.6	96.7
(従来)	90.7	96.4

表 3 多数決後 ($N = 3$) の正検出フレームの割合 (%)
Table 3 Detection ratios by the majority decision ($N = 3$).

	MPEG 3 Mbps
Walk (提案)	83.9
(従来)	58.4
Flamingoes (提案)	80.5
(従来)	62.4
Whale (提案)	70.5
(従来)	50.3
Hall (提案)	100
(従来)	100
Leaves (提案)	98.7
(従来)	98.7

検出する。

Step 2. 同じビット位置 (1 番から 64 番) における N 個の値から、多数決により、その位置のビット値を決定する。

上記方法による $N = 3$ の場合の正検出率を表 3 に示す。表 2 の結果と比較すると、複数フレームからの検出により両方式の検出率の向上が認められるが、いずれの場合も提案方式の検出率が上回っている。

次に、上述した複数フレームからの検出を用いて両方式の MPEG 圧縮への耐性を詳細に評価した。すなわち、ビットレート 3 Mbps の Walk について、全 15 秒中の 1 秒おきに透かし検出の開始地点を設け、各開始地点 (0 秒, 1 秒, ..., 14 秒) で 64 個のビット値を正しく検出するのに要するフレーム数 \tilde{N} を測定した。両方式の測定結果を表 4 に示す。表 4 によると、すべての検出開始地点において、提案方式の検出フレーム数 \tilde{N} は従来方式に比べて同等かまたは少なく、64 ビットの情報を正しく検出するのに、従来方式では平均 6.9 フレーム必要なのに比べ、提案方式は平均 3.8 フレームで済むことが分かる。これは、動画の時間方向の切り抜きが行われた場合に、従来方式に比べて提案方式は、より短い時間の動画から情報を検出で

表 4 検出フレーム数 \tilde{N}
Table 4 Detection period \tilde{N} of frame.

開始地点 (秒)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	平均
Walk (提案)	1	1	1	1	1	5	3	5	5	9	3	5	7	5	5	3.8
(従来)	3	1	1	1	5	9	3	11	9	9	11	11	13	11	5	6.9

きることを意味する。すなわち、提案方式により動画の切り抜き耐性の向上が可能である。

以上の評価結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 提案方式により MPEG 圧縮への耐性を向上させることができる。
- (2) 複数フレームからの検出を行うことで、提案方式により動画の切り抜きへの耐性を向上させることができる。

なお、より厳密な実用性評価のためには、MPEG2 以外の画像処理 (MPEG4, 部分切り出し, 解像度変換, 画像フィルタなど) への耐性評価も必要である。また、デジタル放送以外に、ブロードバンドネットワークなどでの利用を考えると、QSIF (160 × 120 ピクセル) などの小画像から検出評価も必要であり、今後の課題として、これらの多面的な評価を行う必要がある。

5. ま と め

画像の電子透かしでは、画質の維持と画像処理耐性の両立が本質的な課題である。この両立のためには、画質劣化を防止しながら、透かしをできるだけ強く挿入することが重要であり、画像のうち透かしの目立たない箇所に透かしを強く挿入することが必要となる。

本論文では、動画の電子透かしを対象として、画像のうち動きのある箇所では透かしが目立たないことを明らかにするとともに、動きベクトルと変更量に基づいて透かしの目立ちにくさを定量的に算出する関数、この関数を用いて透かしの埋込み強度を調整する方式を提案した。評価実験を通じて提案方式の有効性を示すとともに、標準的な画像の場合に、従来方式に比べて、同等画質での透かし挿入量を 30% 程度増大可能であり、MPEG2 圧縮への耐性や動画の切り抜き耐性が向上することを明らかにした。

今後の課題としては、以下があげられる。

- 透かしの目立ちにくさの算出関数 F を改良する。
- MPEG2 以外の画像処理 (MPEG4, 解像度変換など) への耐性を評価する。
- ブロードバンドネットワークなど、多方面への適用を想定した画質および耐性の評価を行う。

謝辞 本研究は、平成 13 年度 TAO (通信・放送機構) の委託研究「学校ネットワーク向けセキュリティ技術の研究開発」として行ったものである。本研究に

関して、ご指導ご助言をいただきました東京工業大学フロンティア創造共同研究センターの大山永昭教授、広島市立大学情報科学部の高忠雄教授、大阪大学大学院基礎工学研究科の藤原融教授、岩手県立大ソフトウェア情報学部の高田豊雄教授、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科の梶勇一助教授、渡辺創助手に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Swanson, M., Kobayashi, M. and Tewfik, A.: Multimedia Data-Embedding and Watermarking Technologies, *Proc. IEEE*, Vol.86, No.6, pp.1064-1087 (1998).
- 2) Podilchuk, C. and Zeng, W.: Image-Adaptive Watermarking Using Visual Models, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.16, No.4, pp.525-539 (1998).
- 3) Delaigle, J.F., De Vleeschouwer, C. and Macq, B.: Watermarking algorithm based on a human visual model, *Signal Processing*, Vol.66, pp.319-335 (1998).
- 4) 新見道治, 野田秀樹, 河口英二: 複雑さによる領域分割を利用した大容量画像深層暗号化, 電子情報通信学会論文誌, J81-D-II, No.6, pp.1132-1140, (1998).
- 5) Echizen, I., Yoshiura, H., Arai, T., Kimura, H. and Takeuchi, T.: General Quality Maintenance Module for Motion Picture Watermarking, *IEEE Trans. Consumer Electronics*, Vol.45, No.4, pp.1150-1158 (1999).
- 6) 越前 功, 吉浦 裕, 安細康介, 田口順一, 黒須 豊, 佐々木良一, 手塚 悟: 輪郭保存に基づく電子透かしの画質維持方式, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.6, pp.1828-1839 (2000).
- 7) Hartung, F. and Girod, B.: Digital Watermarking of Raw and Compressed Video, *Proc. SPIE*, Vol.2952, pp.205-213 (1996).
- 8) 小川 宏, 中村高雄, 高嶋洋一: DCT を用いたデジタル動画における著作権情報埋め込み方法, 1997 年暗号と情報セキュリティ・シンポジウム, SCIS97-31G (1997).
- 9) 中沢英徳, 小館亮之, ジェフモリソン, 富永英義: MPEG2 における「デジタル透かし」の利用による著作権保護の一検討, 1997 年暗号と情報セキュリティ・シンポジウム, SCIS97-31D (1997).
- 10) ウィセツトピヤピスト, 松井甲子雄: 等価信号変換によるカラー画像への電子透かし, 情報処理

- 学会論文誌, Vol.40, No.4, pp.1801–1807 (1999).
- 11) 関沢秀和, 川上晴子, 山本直史: カラー画像の深層情報記録, 画像電子学会年次大会予行集, Vol.7, No.20, pp.47–48 (1995).
 - 12) 小林誠士, 上條浩一, 清水周一: 近傍ピクセルの性質を用いたデータハイディング—近傍ピクセルの統計的性質, 第56回情報処理学会全国大会論文集, 1V-03 (1998).
 - 13) 石塚裕一, 酒井康行, 櫻井幸一: 周波数変換に基づいた電子透かし技術の画質評価に関して, 信学技報, ISEC-97-22, pp.87–96 (1997).
 - 14) 酒井康行, 石塚裕一, 櫻井幸一: 著作権保護のためのウェーブレット変換を用いた電子透かし方式の安全評価, 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.12, pp.2640–2647 (1997).
 - 15) Bender, W., Gruhl, D. and Morimoto, N.: Techniques for data hiding, *Proc. SPIE*, Vol.2020, pp.2420–2440 (1995).
 - 16) 安田 浩, 渡辺 裕: デジタル画像圧縮の基礎, 日経 BP 出版センター (1996).
 - 17) 黒崎正行, 村松正吾, 貴家仁志: 2種類の低階調画像を用いた動画の動き推定法, 電子情報通信学会論文誌, J83-A, No.12, pp.1434–1440 (2000).
 - 18) 木戸邦彦, 田口順一, 佐野耕一: 方向依存型フィルタを用いた MRI 画像の画質改善, 電子情報通信学会論文誌, J79-D-II, No.8, pp.1347–1353 (1996).
 - 19) 田口順一, 木戸邦彦, 佐野耕一: エッジ部と平坦部の切分けを行った方向依存型画像フィルタ, 電子情報通信学会論文誌, J80-D-II, No.9, pp.2345–2350 (1997).
 - 20) 映像情報メディア学会(編): 標準テレビジョン方式・システム評価用標準動画解説書, NHK エンジニアリングサービス (1999).
 - 21) 杉原 亮: 動画の電子透かしにおける信頼性評価, 2000 年暗号と情報セキュリティシンポジウム講演論文集, SCIS2000–N02 (2000).
 - 22) 越前 功, 吉浦 裕, 安細康介, 佐々木良一: 分布推定手法を用いた電子透かしの検出誤り確率推定方式, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.8, pp.2006–2016 (2001).
 - 23) 日本放送協会(編): NHK テレビ技術教科書(上), 日本放送出版協会 (1989).
 - 24) テレビジョン学会(編): テレビジョン画像の評価技術, コロナ社 (1986).
 - 25) 安田靖彦: 放送のデジタル化と情報処理, 情報処理, Vol.40, No.4, pp.409–413 (1999).
 - 26) 橋本和彦: CS デジタル衛星放送計画—Perfec-TV, 画像電子学会メディア統合技術研究委員会第6回研究会予稿集, MT6-S1-1 (1996). <http://www.is.oit.ac.jp/mitc/mitc6/mt6s11.html>
 - 27) コンテンツ ID フォーラム(編): cIDf Specification 1.0 (2000).
 - 28) MPEG Software Simulation Group: MPEG-2

encoder/decoder version 1.2. <http://www.mpeg.org/MPEG/MSSG>

付録 検出方式の具体例^{21),22)}

3.3 節の 1 ビット挿入方式に対応した検出方式の具体例を下記処理フローにより説明する.

Step 0. $t = 1, 2, \dots$ に対して, 以下のステップを繰り返す.

Step 1. 透かしパターン M と透かし画像 $Y^{(t)}$ との相関をとり, ビット判定値 v を算出する. すなわち,

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{nm} \sum_{ij} M_{i,j} Y'_{i,j}{}^{(t)} \\ &= \frac{1}{nm} \sum_{ij} M_{i,j} (Y_{i,j}{}^{(t)} \pm f_{i,j}^{(t)} M_{i,j}) \\ &= \frac{1}{nm} \sum_{ij} M_{i,j} Y_{i,j}{}^{(t)} \pm \frac{1}{nm} \sum_{ij} f_{i,j}^{(t)} \quad (6) \end{aligned}$$

である. 原画像での判定値 v は, 式 (6) の第一項のみとなる.

式 (6) の $M_{i,j}$ は ± 1 の擬似ランダム列なので, $\frac{1}{nm} \sum_{i,j} M_{i,j} Y'_{i,j}{}^{(t)}$ の各項 $M_{i,j} Y'_{i,j}{}^{(t)}$ は, 任意の自然画像の輝度値集合に対して, 互いに独立な確率変数と考えることができる¹⁵⁾. したがって, 中心極限定理により, $nm \gg 1$ であれば, 式 (6) の第 1 項 (原画での判定値) は, 平均 0, 分散 σ^2 の正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従うので, 判定値 v は, 式 (6) の第 2 項を $\frac{1}{nm} \sum_{ij} f_{i,j}^{(t)} = \mu$ とおくと,

$$v \sim \begin{cases} N(\mu, \sigma^2) & \text{if } b = 1 \\ N(-\mu, \sigma^2) & \text{if } b = 0 \end{cases} \quad (7)$$

の正規分布に従う.

Step 2. 判定値 v としきい値 T の大小を比較して, ビット値 b を確率的に判定する. すなわち,

$$b = \begin{cases} 1 & \text{if } v \geq T \\ 0 & \text{if } v \leq -T \\ \text{“未検出”} & \text{if } -T < v < T \end{cases} \quad (8)$$

である.

(平成 13 年 12 月 12 日受付)

(平成 14 年 6 月 4 日採録)



越前 功 (正会員)

1995年東京工業大学理学部応用物理学科卒業。1997年同大学大学院修士課程修了(応用物理学)。同年日立製作所入社。現在、システム開発研究所第7部(セキュリティシステム研究部)に勤務。情報セキュリティ、電子透かしの研究開発に従事。



吉浦 裕 (正会員)

1981年東京大学理学部情報科学科卒業。同年日立製作所入社。日立研究所を経て、現在、システム開発研究所第7部(セキュリティシステム研究部)に勤務。自然言語処理、知識処理、情報セキュリティ、著作権保護の研究開発に従事。理学博士(東京大学)。電子情報通信学会、人工知能学会各会員。



田口 順一 (正会員)

1984年九州大学理学部物理学科卒業。1986年同大学大学院修士課程修了。同年日立製作所入社。同社システム開発研究所所属。以来、核磁気共鳴診断装置(MRI)、衛星画像処理、音響信号処理、電子透かしの研究開発に従事。電子情報通信学会、写真測量学会各会員。工学博士。



中野 和典

1990年山形大学工学部電子工学科卒業。1992年同大学大学院修士課程修了。同年日立製作所入社。現在、システム開発研究所所属。衛星画像処理、電子透かしの研究開発に従事。



佐々木良一 (正会員)

1971年東京大学卒業。同年日立製作所入社。システム開発研究所にてシステム高信頼化技術、セキュリティ技術、ネットワーク管理技術等の研究開発に従事。2001年4月より東京電機大学工学部教授。各種セキュリティ対策技術の研究と教育に従事。工学博士(東京大学)。1983年電気学会論文賞受賞。1998年電気学会著作賞受賞。2001年度情報処理学会論文賞受賞。著書に「インターネットセキュリティ基礎と対策技術」(共著, オーム社, 1996年)、「インターネットセキュリティ入門」(岩波新書, 1999年)、「インターネットコマース新動向と技術」(共編著, 共立出版, 2000年)等。IEEE等の会員。IFIP TC11 日本代表。