CRT再撮映像に耐性を有する電子透かし

A Digital Watermark that Survives after Re-shooting the Images Displayed on a CRT Screen

正会員 中村 晴幸^{†1}, 正会員 合志 清一^{†1}, 藤井 亮介^{†2}, 正会員 伊藤 浩^{†2},
 正会員 鈴木 光義^{†2}, 高井 重典^{†3}, 谷 愉佳里^{†3}
 Haruyuki Nakamura^{†1}, Seiichi Gohshi^{†1}, Ryouyuke Fujii^{†2}, Hiroshi Ito^{†2},
 Mitsuyoshi Suzuki^{†2} and Shigenori Takai^{†3}, Yukari Tani^{†3}

Abstract Digital watermark is a technology that protects digital intellectual property from being illegally copied and distributed by embedding it with information such as copyrights. By presenting the copyrights, digital watermarks serve as available technology for protecting the rights governing use of intellectual property. Recently, distribution of images taken from CRTs or other kinds of screens has become a problem. This is because current methods have difficulties detecting digital watermarks in the re-shot images. We present a method that can detect digital watermarks in moving images taken with a consumer camera from a CRT monitor connected to an NTSC signal system. The method can embed information in both temporal and spatial domains. It is embedded for a relatively long time and in low spatial frequencies to avoid degradation of images. The method can also detect digital watermarks in re-shot images that degrade in high frequencies. In addition, it can detect digital watermarks in real time without using the original images. This paper describes the method, presents an experimental system based on it, and verifies its effectiveness with various types of moving images. We also examine various aspects of the robustness needed for watermarks embedded with this method.

キーワード：電子透かし，再撮映像，再撮耐性，デジタルシネマ

1. ま え が き

デジタル技術は，この10年間に劇的に発展しており，多くのデジタルコンテンツが作成されている．デジタル技術により，コンテンツへ，これまでのアナログ技術ではできなかったような映像効果を持たせること等の新しいことが可能になった一方で，劣化のない流通や保存が可能であるため，オリジナルと差異のない状態での不正コピーも可能である．このような状況は，コンテンツの所有者にとって著作権を侵害される恐れがあり，そのコンテンツの所有者へ著しい不利益をもたらすことから，コンテンツ流通の妨げとなっている．

放送コンテンツの不正流通を抑制するための権利保護技

術の代表的なものに暗号がある．正当な復号鍵が得られない場合には権利保護として有効なこの方法でも，暗号文から一度復号されたコンテンツについては有効なものとはならない．例えば，暗号化映像が，一度，復号されてモニターへ表示されてしまうと，これを保護する策として充分ではない．

近年，CRTやPDPそしてLCD等の民生機表示装置の性能は，高画質で大画面なものへと著しい向上が見られており，また民生用カメラも小型で高画質なのが，非常に安価に入手可能となっている．これらの民生機を使って，一般の家庭において，高品質な再撮影映像が得られるようになってきている．このように民生機の高性能化に伴い，表示されたものへの保護策が極めて重要である．

再撮による不正流通は，すでに，映画界における問題となっており，例えば，ハリウッド映画産業について，年間30億ドルの被害報告がされている¹⁾．これに対しては，アクティブな方法²⁾が提案されている．しかし，この方法は，映画館等の公共性の高く特定の環境において有効な方法であるものの，CRTなどの一般の家庭で行われるものまでは，有効な策とはならない．

電子透かしは，著作権の明示のみならず，認証(Authentication)，追跡，コピーコントロールやその防止

2006年4月3日受付，2006年9月15日最終受付，2006年10月5日採録

†1 NHK 放送技術研究所

(〒157-8510 世田谷区砧1-10-11, TEL 03-5494-3474)

†2 三菱電機株式会社 情報技術総合研究所

(〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船5-1-1, TEL 0467-41-2462)

†3 三菱電機エンジニアリング株式会社

(〒247-0065 神奈川県上町屋730, TEL 0467-47-2653)

†1 NHK, Science & Technical Research Laboratories

(1-10-11 Kinuta Setagaya-ku, Tokyo, 157-8510, Japan)

†2 Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corp.

(5-1-1 Ofuna Kamakura-shi, Kanagawa, 247-8501, Japan)

†3 Mitsubishi Electric Engineering Corp.

(730 Kamimachiya, Kamakura-shi, Kanagawa, 247-0065, Japan)

(装置制御, 所有者識別), そして秘匿通信等のアプリケーションへ適用可能な技術であり, このようなCRTと民生用カメラで行われるものへの策として有効な策の一つとなりえると考えられる. しかし, 一度モニタ等の表示装置を経由して得られた映像(再撮映像)の特徴として, 2章で後述するとおり, 中域以上特に高域の周波数特性が大きく減衰する. そのため, 透かしが埋込まれているデジタル情報が直接得られる場合に有効となる, 周波数の高域に埋込む従来法^{3)~5)}では, 再撮映像からの透かしの検出は困難であると考えられる.

埋込みに周波数の低域を利用する方法としては, 文献6)~8)がある. 文献6)では, 低い周波数から高い周波数まで埋込み信号を分散させることで, 主に低周波成分の変化による画質の視覚的劣化を抑制する方法を提案している. しかし, 再撮映像では中域以上の周波数特性が減衰することから, 埋込んだ信号の一部を検出できず, 再撮映像からの検出率は悪化すると考えられる. 文献8)の提案は, N画素×N画素ブロックにおいてDCTを行い, 直流成分を除いた値の大きなDCT係数の周波数に電子透かしを埋込む方式である. したがって, この方式は, 実際の映像の特徴から, 低い周波数近辺に透かしが埋込まれる傾向にある. 2章で後述するとおり, 再撮映像では, 極低い周波数を除いて低域であっても大きく周波数特性が減衰するため, この方式では, 検出が困難になる場合があると考えられる. さらに, 検出の際オリジナル画像が必要な方式であるので, オリジナル画像が入手できない場合, 検出が不可能である.

本研究では, NTSC信号のシステムに接続されたCRTモニタを民生用カメラで再撮影された動画画像から透かしを検出可能な方法を提案する. 本方式はまた, 検出対象を再撮映像でなく, オリジナル映像により近く条件が良い透かし入りのオリジナル映像に置き換えることで, 透かし入りオリジナル映像からの透かしの検出も容易に可能である. これまでに, 再撮映像のための透かし法として, DCT,DFTを用いて周波数領域に埋込む方法⁹⁾¹⁰⁾等が提案されている. 文献10)では, プロジェクタでスクリーンに投影した静止

画を対象としており, また, 動画画像を対象とした方法¹¹⁾では, 画像の時間方向のみを利用した埋込み法となっており, 動画画像の特徴を十分に利用したものとはいえない.

我々の提案法では, 画像の時間および空間の両方を利用した埋込みが可能であり, 比較的長時間にかつ空間周波数の直流に近い低域に直接画素値を変化させることで埋込む. 本方式は, 文献6)8)の方式と比較すると, 再撮映像において周波数特性の減衰が少ない, ほぼ直流と見なされるような非常に低い周波数のみを利用する方式である. また, 本方式は, オリジナル画像を用いずにリアルタイムで検出が可能である. よって, 本方式は他の方式と比較し, 再撮映像からの電子透かしの検出において非常に有利と考える.

周波数領域に電子透かしを埋込む場合, 低域に埋込むと画質への影響が大きい¹⁵⁾. 従来法^{3)~5)}のように周波数の高域に埋込む場合は, 一般的にエッジ部分の劣化が顕著となる傾向が見られる. 比較的長時間にかつ極低い周波数に直接画素値を変化させて電子透かしを埋込むこの提案方式では, 5.1で後述する通り, 埋込み強度を低く抑えることで, 画質評価が良好であることを確認した.

また, 走査線で映像の表示を行うCRTを対象とするために, 全面発光のスクリーンにはない, 時間方向を利用した検出を有効に行える特徴がある. さらに本稿では, 提案法に基づいた結果を示した後, 透かしの耐性について論じる.

2. 民生用NTSCカメラによる再撮映像の周波数特性

再撮映像の特性について調査を行うため, NTSC用CRTモニタにスイープ信号を映し出し, 民生用NTSCカメラで再撮した映像の周波数特性を調べた. ここで使用したスイープ波形は, 低周波から高周波まで均一の電圧を含んだ信号のことである. これにより再撮映像の画質について定量的な確認を行う. ここで用いたスイープ波形は, 200kHz~5.75MHzの周波数を含んだ波形である. 測定系統図を図1に示す. 民生用カメラの出力がDV信号のため, DV-SDI変換を行い, また, 波形測定器の入力がアナログ入力のため,

図1 NTSCカメラによる再撮映像の周波数特性測定系統図
Setup for measuring frequency characteristics of re-shot image using an NTSC camera.

DA変換を行っている。ルート2の周波数特性が最良になるように、CRTモニタのコントラストやブライツネスを調整した。

図2には、図1のルート1およびルート2の周波数特性が示されている。同図から、カメラ経由の信号の方が、中域以上、特に高域での信号の振幅が低くなっているが、高域周波数成分まで残存しているため、この程度の劣化であれば、再撮影した実際の画像は低品質なものとはならない。つまり、再撮映像の品質は悪いものではないことが伺える。

一方、再撮映像において、中域以上、特に高域での信号の振幅が低くなっていることから、従来の周波数領域に電子透かしを埋込む方法では、中域以上に埋込んだ場合、電子透かし信号が失われ、検出が困難になる恐れがある。図2の周波数特性は最良の場合であり、実際は、CRTモニタのコントラストやブライツネスの設定により、極低い周波数を除いて大きく減衰している。我々の時間および空間周波数の極低域に電子透かしを埋込む方法の方が有利と考えられる。

以上より、これまで映画館で行われたことが一般の家庭でも行われた場合、その再撮映像の品質は低いものでないことが、この実験から明らかであり、CRTの再撮映像から

検出可能な電子透かし法の開発は重要である。そして、再撮環境の自由度を考慮すると、映画館等におけるものと比較して、家庭で使われる映像に対する透かし耐性はより強いものが求められる。これについては、第5章で述べる。また同章において、このような信号の周波数特性の比較ではなく、動画像としての比較も行う。

3. 再撮耐性を有する電子透かしアルゴリズム

3.1 埋込み方法

本方式の特徴は、動画像を対象に、画像の時間および空間の両方を利用した埋込みが可能であり、比較的長時間にかつ空間周波数の低域に埋込む。それにより、画質劣化を抑えつつ、周波数の中域以上が劣化した再撮映像から電子透かしの検出が可能であり、また、オリジナル画像を用いずにリアルタイムで検出が行える方式である。さらに本方式は、強力な耐性を有すると考えられるため、さまざまな耐性実験を行った。

提案法では、映像の輝度信号に対して、電子透かしの埋込みが行われる。輝度値のレンジは0から255である。時間を t 、表示装置(映像モニタ)の水平と垂直の座標を x, y とすると、映像信号の輝度値 f は、

$$f(x, y, t) \quad (1)$$

と表される。 f は、直流成分および交流成分に分けられるので、次のように記述できる。

$$f(x, y, t) = f_{DC}(t) + f_{AC}(x, y, t) \quad (2)$$

ここで f_{DC} および f_{AC} は、映像の直流と交流成分である。透かし信号 g を、

$$g(x, y, t) = g_1(x, y)g_2(t) \quad (3)$$

と定義する。そして、

$$\begin{aligned} \int_0^B \int_0^A g_1(x, y) dx dy &= 0 \\ \int_{-t_0}^{t_0} g_2(t) dt &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

の条件を満たすものとする。 A は、映像モニタの全幅、 B は、映像モニタの全高とする。 $-t_0$ から t_0 は、電子透かし信号の1周期とする。例えば、 g を $\sin x$, $\cos x$ とし、 $-\pi$ から π まで積分したとき式(4)を満たす。

後述する検出法のために、この g は、①埋込み画像中に透かしが視覚的な影響を与えないような信号として、ある領域である時間積分した時にその値が0となる信号であること、②映像信号 f に対して、空間的・時間的に低い周波数特性を有する信号であること、③映像の交流成分である f_{AC} と直交するような信号であること、これら①～③の条件を同時に満たす信号が必要である。

このような g と f_{AC} の積の積分は、

$$\int_{-t_0}^{t_0} \int_0^B \int_0^A f_{AC}(x, y, t) g_1(x, y) g_2(t) dx dy dt \quad (5)$$

図2 スイープ信号(200kHz~5.75MHz)(上、ルート1)および再撮映像(下、ルート2)の周波数特性
Frequency characteristics of sweep signal (200 kHz - 5.75 MHz) (top, root1) and re-shot image (bottom, root2).

となり、前述の条件が満たされれば、この値は0となる。ただし、実際の映像へ適用した場合には、時間積分を行うことで限りなく0に近い値として観測されることになる。

映像信号に電子透かしを埋込んだ信号は次の通り記述できる。

$$f(x, y, t) + g(x, y, t) \quad (6)$$

式(2)より、電子透かしを埋込んだ映像信号式(6)は、次のように記述できる。

$$f_{DC}(t) + f_{AC}(x, y, t) + g(x, y, t) \quad (7)$$

3.2 検出方法

本方式の検出は、電子透かしを埋込んだ映像信号と電子透かし信号との相関関係を調べることで検出を行う。よって、検出時に原画像を用いなくて、電子透かしを検出可能である。

電子透かしを埋込んだ映像信号式(6)から、埋込まれた透かし信号式(3)を検出するために、映像信号と透かし信号の関係について述べる。

映像信号式(7)と透かし信号式(3)の積の積分を次のように計算する。

$$\begin{aligned} & \int_{-t_0}^{t_0} \int_0^B \int_0^A (f_{DC}(t) + f_{AC}(x, y, t) + g(x, y, t)) g(x, y, t) dx dy dt \\ &= \int_{-t_0}^{t_0} \int_0^B \int_0^A f_{DC}(t) g(x, y, t) dx dy dt \\ &+ \int_{-t_0}^{t_0} \int_0^B \int_0^A f_{AC}(x, y, t) g(x, y, t) dx dy dt \\ &+ \int_{-t_0}^{t_0} \int_0^B \int_0^A g^2(x, y, t) dx dy dt \\ &= \int_{-t_0}^{t_0} f_{DC}(t) g_2(t) dt \int_0^B \int_0^A g_1(x, y) dx dy \\ &+ \int_{-t_0}^{t_0} \int_0^B \int_0^A f_{AC}(x, y, t) g_1(x, y) g_2(t) dx dy dt \\ &+ \int_{-t_0}^{t_0} \int_0^B \int_0^A g^2(x, y, t) dx dy dt \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、埋込まれた電子透かし信号が式(4)を満たすものを選択し、かつ、式(5)が上記仮定を満たす場合、式(8)の第一項は0、第二項は0に近い値となる。式(8)の第三項のみが下式のような値となる。

$$\int_{-t_0}^{t_0} \int_0^B \int_0^A g^2(x, y, t) dx dy dt \neq 0 \quad (9)$$

よって、適当な閾値を設定することで、電子透かしが埋込まれていると思われる映像信号(検出対象信号)から電子透かし信号が重畳されているか否かを式(8)から判定することが可能である。つまり、検出対象信号と埋込まれていると思われる電子透かし信号(例 $g(x, y, t)$ 信号)との関係を式(8)のように調べ、ある閾値(式(9)の値以下に設定)以上の値の場合、透かし信号(ここでは $g(x, y, t)$ 信号)が埋込まれていると特定可能である。その閾値以上となる、全体に占める割合を検出率と定義する。式(5)での仮定が実際の映像によっては満たされない(0とならない)ため、閾値を上記式の通りには規定できない。この閾値を実際の

映像においてどの程度の値に設定するのが妥当であるかを導き出すために、さまざまな映像に基づく実験を行うこととした。

ここで、以上のアルゴリズムについて例を挙げて説明する。ここでは簡単なように、透かし信号を1次元関数 $g(x)$ とする。例えば、+1という情報を埋込むとき $g(x)$ を $\sin x$ 、0を埋込むとき $-\sin x$ と仮定する。+1の情報が埋込まれている信号から埋込まれた信号を検出する場合、検出したい信号に $\sin x$ および $-\sin x$ を各々掛け合わせて値を調べる。積分する周期を0から 2π まで行くと、 $g(x)$ は、式(4)を満たす。よって、 $\sin x$ 、 $-\sin x$ の場合、各々計算結果は次式となる。

$$\int_0^{2\pi} \sin x \sin x dx = \pi \quad (10)$$

$$\int_0^{2\pi} (-\sin x) \sin x dx = -\pi \quad (11)$$

計算結果がある閾値以上の場合、掛け合わせた信号が埋込まれた信号といえるので、閾値を π 以下に設定すれば、 $\sin x$ つまり +1 が埋込まれていると判定可能である。

時間方向に埋込む電子透かし信号を変化させる場合は、ある一定時間同じ透かし情報を繰り返し埋込み、これらを並列して検出することで同期検出に代えることが可能である。また、空間 x, y についても埋込みおよび検出において x, y 座標を一致させる必要があるが、位置合わせが不充分の場合、検出率が大きく低下することが考えられるため、検出の前処理として手動でモニタの映像部分の位置合わせを行うこととする。これらの処理の自動化に関しては、時間的には、別途同期信号となる信号をある決まったパターンで埋込むことで対応する手法も考えられる。また空間的には、特定の同期パターンを特定箇所に埋込み、それを再撮映像から検出し、歪み補正することで対応する手法が考えられるが、いずれも今後の課題として取組む。今回の実験では、電子透かしの埋込み開始タイミングは予めわかっているものとし、カメラで再撮する画像の画格も予め決めておくことで、検出を行うこととする。

本アルゴリズムを基本に電子透かしの検出を行うが、3.1で述べた条件があるため、実際の映像においてこの証明が妥当であることを次章の実験により示す。

4. 実験装置および方法

3.1で述べた方法で埋込む電子透かしを、3.2で述べた方法で検出を行う実験内容を示す。

実験は図3のように、モニタは30インチのNTSC用CRTモニタを、カメラは、1/3型CCD固体撮像素子(約38万画素)の民生用NTSCカメラを使用した。民生用カメラに一般的に付いているAGC (Automatic Gain Control) 機能は通常使用どおりONとした。そのとき、輝度レベルが大きく変化するカットチェンジ等で、再撮映像が1秒弱の間、白飛びまたは黒つぶれを起こす場合があるので、検出はその後の輝度レベルが安定してから行うこととした。

図3 実験概念図
General configuration of the experimental setup.

電子透かしを埋込んだ映像を映像再生機より再生し、30インチモニタに映し出す。それを民生用カメラで再撮し、その再撮信号を電子透かし検出機に入力し、透かしの検出を行う。電子透かしの埋込みはリアルタイムでないが、検出はリアルタイムの実験装置 (Pentium4, 2.8GHz CPU) を開発し、使用した。ここでのリアルタイムの検出とは、再撮カメラで電子透かし埋込み画像を撮影してから透かし信号を検出するまでのリアルタイムの検出処理のことである。

ここで、初期的な実験のため $g_2(t)$ は用いず、電子透かし信号として式 (4) を満たす次の三つの2次元関数を選択した。

$$g_1(x, y) = -\alpha \cos\left(\frac{\pi x}{A}\right) + \alpha \cos\left(\frac{\pi y}{B}\right) \quad (12)$$

$$g_1(x, y) = \alpha \sin\left(\frac{2\pi x}{A}\right) + \alpha \cos\left(\frac{2\pi y}{B}\right) \quad (13)$$

$$g_1(x, y) = \alpha \sin\left(\frac{2\pi x}{A}\right) \times \alpha \cos\left(\frac{2\pi y}{B}\right) \quad (14)$$

モニタの水平座標を x 、垂直座標を y 、電子透かしの埋込み強度を a と定義する。 A を画面の全幅、 B を画面の全高とする (図3)。

式 (13) は、式 (12) に対して $\cos$ と $\sin$ での実験結果の差異を見るため直交成分を足し合わせたものであり、さらに周期も変更した。また、式 (13) と式 (14) は、直交成分を足した場合と掛けた場合で実験結果に差異が生じるかどうかを調べるために用意したものである。

輝度値は0~255の整数値であるため、電子透かし信号も整数値である必要がある。そこで例えば、式 (14)、 $a=1$ のとき、電子透かしを埋込んだ信号式 (6) を次の通りとする。

- (1) $g_1(x, y) \geq 0.5$ の場合 $f(x, y) + 1$ (映像信号 + 1)
- (2) $g_1(x, y) \leq -0.5$ の場合 $f(x, y) - 1$ (映像信号 - 1)
- (3) それ以外の場合 $f(x, y)$ (映像信号)

つまり、 $a=1$ のとき、式 (14) の取りうる値の範囲は -1 から +1 となる。同様の方式とすると、式 (12)、式 (13) の取りうる値の範囲は -2 から +2 となる。すなわち、式 (14) では、透かし埋込みによる画素の輝度値の変化幅が小さいので、電子透かし埋込みの強度は、式 (12)、式 (13) に比べ弱い。 a が2の場合、式 (12)、式 (13) の取りうる範囲も式 (14) の取りうる範囲も -4 から +4 である。しかし式 (13)

表1 実験に用いた標準動画像
Standard moving images used in the experiment.

Picture names	Source	Frame number
①Woman with Birdcage	ITE	1~450
②Buddhist Images	ITE	451~900
③Buildings along a Canal	ITE	901~1350
④Character Pattern	ITE	1351~1800
⑤Chromakey (Flowers)	ITE	1801~2250
⑥Church	ITE	2251~2700
⑦Flash Photography	ITE	2701~3150
⑧Ice Hockey	ITE	3151~3600
⑨Horse Race	ITE	3601~4050
⑩Group Game	ITE	4051~4500
⑪Overlap	ITE	4501~4950
⑫Skyscrapers	ITE	4951~5400
⑬Whale Show	ITE	5401~5850
⑭Bicycles	MPEG	5851~6300
⑮Cheerleaders	MPEG	6301~6750
⑯Flower Garden	MPEG	6751~7200
⑰Football	MPEG	7201~7650
⑱Carousel	MPEG	7651~8100
⑲Susie	MPEG	8101~8550
⑳Wool	MPEG	8551~9000

に対して式 (14) の方が $\sin$ 、 $\cos$ の積であるので、 a を除くと1より小さな数の積であることから、値は小さくなる。つまり、埋込み強度は弱いこととなる。 a が3の場合は、前者が -6 から +6 であるのに対し、後者は -9 から 9 であるので、式 (14) での埋込み強度の方が強い。

本実験では、1秒 (30フレーム) で2ビットの情報埋込む。実験では、表1のようにITEおよびMPEG標準動画像 (20種類、各15秒 (450フレーム)、計300秒) を使用した。また、電子透かしとして埋込む信号は、映像に対して非常に低い周波数のため、影響を受け検出が困難と思われる下記の映像を基準に選別した。

- (1) 時間的に低い周波数成分を含むゆっくりのパンおよび早いパンのある映像
- (2) 直流成分の変動が大きいカットチェンジ、フェードインおよびフェードアウトを含む映像

式 (8) のように、電子透かしを埋込んだこれらの映像信

号と電子透かし信号の積の積分値を計算した。この積分値は、透かし信号と埋込まれた透かし信号が一致している場合に、式 (9) のように正の値となる。この計算結果に対して閾値を設定することで、電子透かしの埋込み可否が判定可能となる。この値がある閾値以上となるフレームには、透かしが埋込まれていると考えられる。

5. 結果と考察

5.1 画質評価

電子透かしの必要条件の一つは、オリジナル映像と比較し画質が劣化せず、透かしが視覚的に認識できないことであるため¹⁵⁾、目視による画質劣化の確認を、表1の動画像を含む複数の標準動画像¹⁴⁾で行った。

一例として、その標準動画像の1フレーム映像の画像比較を図4に示す。上図は、Buildings Along a Canalのオリジナルの映像、中図は、その再撮映像、下図は、式 (14) の透かし信号を埋込み強度1で埋込んだ映像の再撮映像である。この図4の下図からは、電子透かしを視覚的に確認できないことがわかる。

複数人による主観評価により、標準動画像への電子透かし埋込みによる画質劣化は視覚的にほぼ認識されることが確認できた。また、再撮映像は、元の映像に比べ解像度

図4 オリジナル映像(上)、再撮映像(中)および電子透かし埋込み再撮映像(下)の例

Original image (top), re-shot image (middle), re-shot image with embedded watermark (bottom).

表2 各式における埋込み強度別PSNR
PSNR by embedding strength on each equation.

Intensity	PSNR (dB)		
	1	2	3
Eq. (12)	47.6	42.0	38.5
Eq. (13)	47.6	42.0	38.5
Eq. (14)	52.5	42.0	35.0

の劣化は認められるが、主観的に充分鑑賞に堪えるレベルであることも確認できた。

電子透かしの埋込み映像において、埋込み強度を3にした場合、映像により透かしの映像が見えてしまう場合が実験より確認されたため、2以下が望ましいことが主観評価からわかった。

画質の客観的な評価として、電子透かし埋込み映像の、オリジナル映像に対するPSNR¹⁶⁾を測定した。結果を表2に示す。いずれの式においても、埋込み強度が2以下であれば、PSNRは40dB以上を確保しており、良好である。

5.2 電子透かし検出率

電子透かしの検出率について論ずる前に、透かし情報として埋込む情報量の要求条件について述べる。要求条件の一例として、DCI (Digital Cinema Initiative) では、5分間で35ビットの情報を埋込み、最大30分で検出することを求めている¹⁷⁾。

本方式では、1秒間に2ビットの情報を埋込むことが可能であるが、15秒間同じビットを埋込み、多数決判定を行うことを想定している。その場合、5分間で40ビットの情報を埋込むことが可能である。さらに、検出には、最大30分まで許容されるので、5分毎6回同一の情報を埋込み検出すれば良いことになる。前述の多数決判定の件と合わせると、同一ビットが90回埋込まれるので、そのうち45回以上正しければ、正しいビットが検出されることになる。このとき誤りと判定されるのは、90回中46～90回誤った場合なので、検出率を $d(\%)$ としたとき、誤り率は次のように計算される。

$$\sum_{n=46}^{90} {}^{90}C_n \times (d/100)^{(90-n)} \times (1-d/100)^n \quad (15)$$

ここで検出率を80%とした場合、式 (15) は下式のように計算される。

$$\sum_{n=46}^{90} {}^{90}C_n \times (80/100)^{(90-n)} \times (1-80/100)^n \quad (16)$$

$$= 5.06095 \times 10^{-11}$$

一般的な誤り訂正符号において、64ビット中4ビット誤り訂正符号を付加すれば、訂正前の誤り率が 10^{-4} 程度のとき、訂正後 10^{-24} となるので¹⁸⁾、今回の場合、同様に40ビット中3ビットを誤り訂正符号とすれば、訂正後誤り率が 10^{-24} 以下となることは明白である。よって、5分間で35ビットの情報を取得することが可能である。

検出率が80%となるように、式 (8) の計算結果の閾値を設定することとする。このとき誤り率は、上述したように、誤り訂正後 10^{-24} 以下となる。

電子透かし信号として式 (12)～式 (14) を適用し、埋込み強度 a が1の場合の実験結果を図5に示す。 x 軸はフレーム番号で、 y 軸は計算結果(式 (8))である。

さまざまな映像を含む標準動画像による今回の実験の結果、検出率が80%以上となる、透かし判定を行う式 (8) の閾値は、20,000近辺であったので、20,000に設定すること

図5 埋込み強度1のときの式 (12) (上), 式 (13) (中), 式 (14) (下) の実験結果 (一部)

Results of equations 12 (top), 13 (middle), and 14 (bottom) when the embedding strength is 1.

図6 埋込み強度2のときの式 (12) (上), 式 (13) (中), 式 (14) (下) の実験結果 (一部)

Results of equations 12 (top), 13 (middle), and 14 (bottom) when the embedding strength is 2.

とした。この場合、埋込み強度1のとき、各式において、約93.9%, 92.5%, 83.0%のフレームで式 (8) の値がその閾値以上になることが確認でき、電子透かしが埋込まれていると判定される (図5)。すなわち、式 (4) を満たすような電子透かし信号を選択すれば、電子透かしに求められる必要条件の一つである、非常に高い電子透かしの検出率¹⁵⁾を得られることが明らかになった。図5から、式 (8) の値はあるオフセット値を中心に値が正負に振れているのが確認できるが、これは映像により0とならない式 (8) 第2項の成分によるものである。

同様に、埋込み強度を2, 3にした場合の実験結果を各々図6, 図7に示す。以上の結果から、各埋込み強度における各式の電子透かしの検出率を表3にまとめる。表から、埋込み強度が1でも83%以上の検出率を確保しており、埋込み強度を強めれば、いずれの式においてもほぼ100%に近

づくことが確認できる。よって、上述した誤り訂正を行うことで、いずれの場合も、誤り率が 10^{-24} 以下となる。

5.3 画質と検出率に関する考察

5.1の主観的および客観的画質評価の結果、埋込み強度 a が2以下であることが画質的に望ましい。一方、 a が2の場合でも検出率は、すべての式において96%以上確保しているので、誤り訂正を行えば、誤り率は 10^{-24} 以下となるので良好である。よって本方式は、 a を2以下に設定すれば、再撮した映像からでも検出可能な電子透かしの方式として有効である。

また式 (14) は、式 (12), 式 (13) に比べ、 a が1, 2までの場合、画素の輝度値の変化幅が小さいため透かし埋込みによる画質への影響が小さいが、 a が2のとき同等の検出率が得られる。

CRTを再撮した場合、カメラとの解像度の違い等による

図7 埋込み強度3のときの式(12)(上), 式(13)(中), 式(14)(下)の実験結果(一部)

Results of equations 12 (top), 13 (middle), and 14 (bottom) when the embedding strength is 3.

表3 式毎の埋込み強度別電子透かし検出率
Watermark detection percentage by embedding strength.

Intensity	Watermark detection percentage		
	1	2	3
Eq. (12)	93.9%	97.6%	99.0%
Eq. (13)	92.5%	96.8%	98.4%
Eq. (14)	83.0%	97.2%	99.6%

干渉縞が発生する場合があるが, 実際不正な再撮が行われる場合, そのような干渉縞が発生しない距離, 画格, シャッタースピード等で試みられることになる。撮影時の不手際等により, 干渉縞が再撮映像に残ってしまっても, 本方式では映像信号に比べ, 空間的に低い周波数の透かし信号を

図8 映像別の検出率(○数字は表1の映像)
埋込み強度1: 上, 2: 中, 3: 下

Detection percentage by image, with the embedding strength 1 (top), 2 (middle), and 3 (bottom).

埋込むため, 検出に大きな影響を与えることがなく, 良好な検出率を確保している。

5.4 電子透かし信号に関する考察

電子透かし信号として用いた式(12)～式(14)に関する考察を行う。各式毎の評価映像別の検出率を図8に示す。

この図からわかることは下記のとおりである。

- (1) 埋込み強度1のとき、すべての式で検出率が85%以下の映像は、ITEの⑦Flash Photography, MPEGの⑮Cheerleadersや⑰Football.
- (2) 埋込み強度1のとき、式(12)、式(13)は、⑨Horse Race以外ほぼ同様な傾向。
- (3) 埋込み強度1のとき、式(12)および(13)と式(14)で検出率が10%以上異なり、式(14)で85%以下の映像は、ITEの①Woman with Birdcage, ⑫Skyscrapers, ⑬Whale Show, MPEGの⑭Bicycles, ⑰Football.
- (4) 上記の映像は、埋込み強度を2にすれば、Football以外すべて検出率85%以上に改善。

以上のことから、式(12)、式(13)と式(14)では映像による有効性が異なる可能性がある。

そこで、評価画像の詳細な映像内容別検出率を調査した。ほとんど動きのない映像の場合、検出率はほぼ100%であり、図9に、上記(1)および(3)で該当する映像のみ(表1①、⑦、⑫、⑬、⑭、⑮、⑰)の結果を示す。上記(1)に該当する映像(表1⑦、⑮、⑰)における映像内容を調べると、画像効果のパンやズームアウトを含んでおり、(3)に該当する映像(表1①、⑫、⑬、⑭、⑰)の場合は、パンやズームアウト、ズームイン、高周波の映像を含んでいる。図9より、検出率は、⑬、⑰の数箇所を除き、式によらずほぼ同様な傾向である。上記(1)および(3)の該当番号以外の映像内容別の検出率も、式を問わずほぼ同様な傾向を示しているため、映像の内容による式の有効性の差異はないことが明らかになった。よって、検出率が悪い映像で(3)のような式による差異が発生するのは、映像による各式の有効性の差異ではなく、埋込み強度が1のときに式(14)で

はオリジナル映像に対する輝度値の変化率が小さいため起こるのが主原因であり、いずれの式を用いても電子透かしとして有効であることが明らかになった。

同様に、図8のように埋込み強度を強めたとき、式(14)が他式より検出率が著しく改善されるのは、映像内容による有効性の差ではなく、オリジナル映像に対する輝度値の変化率が他式より大きいことが主原因であることも明らかになった。

以上の考察より、本方式は、標準動画像において、埋込み強度 a を2以下に設定した、式(12)～式(14)のような式(4)を満たす電子透かし信号を用いたとき有効である。

その他、明らかになった傾向は以下の通りである。

- (5) ゆっくりの動きであれば、ズームイン、ズームアウト、パンでも検出率が100%近く。
- (6) 早いパン、早いズームインの場合、検出率が非常に悪くなる傾向。

埋込み強度を強めず、早いパンや早いズームインなど動きが激しい映像における検出率向上のための対策として、本アルゴリズムのように、時間的な低周波数領域にも埋込むことが有効であると考えられる。これにより検出時、オリジナル映像の内容から影響を受けづらくなり、電子透かしをより検出しやすくなるからである。

5.5 電子透かしの耐性

本方式の電子透かしとしての耐性について述べる。第2章で述べたとおり、家庭で使われる映像に対する透かし耐性は、再撮影環境の自由度を考慮すると、映画館等におけるものと比較してより強いものが求められる。そのため、実際に起こりうる状況でのモニタ再撮や、その再撮映像がいろいろな形態で不正流通された場合でも本方式の透かし

図9 埋込み強度1のときの詳細な映像別検出率(○数字は表1の映像)

Detection percentage in greater detail when the embedding strength is 1 (Numbers in circles correspond to those in Table 1).

が検出可能かどうかについて、図3と同等な環境で実験を行った。

(1) 斜め方向からの再撮による耐性

正面から水平に45度斜め方向から再撮した場合について実験を行った。評価映像はITEのTanningを使用した。斜め方向からの再撮映像は歪んだ映像であるが、正面から撮影した映像にできるだけ近似するように撮影することで、今回特に歪み補正を行わずに、検出を行った。その結果、検出率は、通常の正面から再撮した場合、99.6%、正面から斜め45°の方向から再撮した場合、86.1%であった。検出率が80%以上であるので、前述したように誤り訂正を行うことで誤り率が 10^{-24} 以下となる。

(2) 再撮カメラレンズの遮蔽による耐性

再撮カメラのレンズを縦方向または横方向半分隠した場合について実験を行った。これは、画面の一部を切り取る電子透かしに対する攻撃に相当し、例えば、画面の半分ずつを異なるところで撮影して、その二つの再撮映像を合成する場合が考えられる。このとき半分の映像からでも電子透かしを検出できることが必要であり、実験の結果、レンズを遮蔽しない場合と同等の検出率が得られることを確認した。

(3) コピー耐性

再撮した映像の不正流通として考えられるのは、DVDやビデオなどにコピーして販売することである。DVDなど画質の劣化がほとんどないデジタルデータで流通される場合、空間的に電子透かしを埋込む本方式では、コピーの世代を重ねても、問題なく検出可能である。

共著者の論文¹⁹⁾では、本方式とは異なる方法のアナログ耐性の電子透かしを提案している。この方式では、電子透かしを埋込んだ動画をVHS標準モード(SPモード)で1回録画後に電子透かしを検出可能である。

そこで、S-VHSビデオによるアナログテープでのコピーを行った場合の本方式による電子透かしの耐性について実験を行った。評価映像はITEのJapanese Roomを使用した。不正流通が行われる場合、コピーが何度か行われることになるが、画質的に商品価値があるのは何回までコピーされた映像か、次の二通りについて調査を行った。

(a) オリジナル映像での複数回アナログテープコピー
(各SPモード、EPモード)

(b) 再撮映像での複数回アナログテープコピー (SPモード)

主観評価の結果、再撮を行わないオリジナル映像では3回のコピーまで、再撮映像では2回のコピーまで商品価値があることを実験により確認した。

そこで、アナログコピーの電子透かし耐性実験として、上記の2種類の映像を対象に行うこととした。前述のオリジナル映像については、民生用アナログビデオ(S-VHS)にSPモード、EPモード各々でコピーし、各モードで5回までダビングしたときの映像に対する電子透かし検出について実験を行った。後述の再撮映像については、SPモードで5

図10 アナログコピー回数別の検出率

Relationship between detection percentage and copying frequency.

回までのコピーを対象に実験を行った。

本実験ではまず、非圧縮のデジタルディスクレコーダから、電子透かしを埋込んだオリジナル映像を再生し、D/A変換してS端子入力でS-VHSへコピーをすることから行った。ビデオ間のダビングはアナログ端子で行った。再撮映像の場合、民生用カメラのアナログ出力をビデオ入力しコピーした。

結果を図10に示す。透かしを埋込んだオリジナル映像の場合、3回のコピーまではSPモードで84.5%、EPモードで82.7%、再撮映像の場合、2回のコピーまでは84.4%の高検出率であった。前述したとおり、誤り訂正前の検出率が80%以上であれば、訂正後誤り率が 10^{-24} 以下になるので、本方式はアナログ耐性を有することが明らかになった。

他方式との再撮に対する耐性強度の比較を行う。文献9)では、正面からの再撮映像、障害物のある再撮映像、24fpsの動画の再撮映像において、正しく情報が検出できたとしている。一方、サイズが小さい再撮映像、右斜め前からの再撮映像では、映像により検出に失敗している。本方式では、上述のとおり、正面からの再撮映像はもちろんのこと、斜め45°方向からの再撮映像、カメラレンズ半分遮蔽での再撮映像から、誤り訂正後、誤り率 10^{-24} 以下で透かしを検出可能であり、さらに、再撮映像のアナログコピー耐性も2回まで有することを確認しているため、非常に強力な耐性を有するといえる。

6. む す び

民生用の表示および撮影機器の高性能化により、近い将来、家庭用テレビモニタの再撮影からも高品位なコピーが可能となり、このような不正なコンテンツによる問題が発生すると予想される。このような不正なコピーを電子透かしで防ぐことはできないが、コンテンツ著作権やコンテンツを追跡するための情報等を埋込むことにより、このよ

うなコピーの抑制効果が得られると考えられる。

本稿では、NTSC信号システムによるCRTモニタおよびそれを民生用カメラで再撮影した映像から電子透かしの検出を可能とする方法について提案した。実験結果から、

- (1) 提案手法のための透かし信号として、 $\sin$ と $\cos$ の組合せからなる式による透かしの検出が行えること。
- (2) 検出率¹⁷⁾および映像品質¹⁵⁾に関する要件を満足するような埋込み画像が作成可能であること。
- (3) アナログ耐性(オリジナル映像および再撮映像からのアナログコピー耐性)を有すること。

が明らかとなった。

今回の実験では、空間方向の埋込みを行ったが、時間項を含めた実験については今後の課題である。時間方向の処理を加えた3次元関数による透かし信号を用いた埋込みでは、時間的な低周波領域に埋込むため、検出時にオリジナル映像の内容から影響を受けづらくなり、より耐性の強い透かしとすることが可能である。

本アルゴリズムは、電子透かしの埋込みを空間的な低周波数領域だけでなく、時間的な低周波数領域にも埋込むため、電子透かし埋込み判定の閾値を柔軟に設定することで、CRTのみならず、発光特性の異なるPDPやLCDに対して、さらにはスクリーン投影映像に対しても有効な策となると考えられる。本技術を実用化するべく、2005年6月に、デジタルシネマのための著作権保護技術の標準化の規格審議組織であるSMPTE DC28技術委員会に本方式の提案を行った。今後は、埋込み関数の拡張や電子透かしの検出精度の向上、時間方向および空間方向の同期検出の自動化、そして対応するモニタやカメラの拡張について検討を行っていく予定である。

〔文 献〕

- 1) <http://www.sarnoff.com/news/>
- 2) <http://www.trakstar.net/diagram.htm>
- 3) 小野東：“電子透かしとコンテンツ保護”，オーム社，p.93 (2001)
- 4) 小林弘幸，野口祥宏，貴家仁志：“JPEG符号化列へのバイナリデータの埋込み法”，信学論，J83-D-II，6，pp.1469-1476 (2000)
- 5) 木野将人，和田成夫：“ビットデータを埋込み可能なウェーブレット画像透かし法”，信学論，J86-A，2，pp.160-167 (2003)
- 6) 沖原健一，稲積泰宏，木下宏揚：“埋込みビット量と視覚的劣化を考慮した電子透かし”，映像学誌，58，10，pp.1465-1467 (2004)
- 7) F. Hartung, M. Kutter: "Multimedia Watermarking Techniques", Proc of the IEEE, 87, 7, pp.1079-1107 (July 1999)
- 8) I.J. Cox, J. Kilian, F.T. Leighton, and T. Shamoon: "Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia", IEEE Trans. On Image Processing, 6, 12, pp.1673-1687 (Dec. 1997)
- 9) 山下武士，宮崎明雄：“スクリーンの撮影に対してロバストな電子透かし方法の検討 (その2)”，2004年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2004)，3D4-3 (Jan. 2004)
- 10) 中村桂介，岩切宗利，松井甲子雄：“電子透かしの非線形変換耐性に関する一検討”，コンピュータセキュリティシンポジウム2002，pp.443-448 (Oct. 2002)
- 11) J. Haitsma and T. Kalker: "A Watermarking Scheme for Digital Cinema", Proceedings of IEEE International Conference on Image

Processing (ICIP), pp.487-489 (2001)

- 12) J. Haitsma and T. Kalker: "On Digital Cinema and Watermarking", Security and Watermarking of Multimedia Contents, Proceedings of SPIE-IS & T Electronic Imaging, SPIE 5020, pp.526-533 (2003)
- 13) S. Gohshi, H. Nakamura, H. Ito, R. Fujii, M. Suzuki, S. Takai, and Y. Tani: "A New Watermark Surviving after Re-shooting the Images Displayed on a Screen", KES2005, LNAI3682, pp.1099-1107 (2005)
- 14) http://www.ite.or.jp/products/testchart_index.html
- 15) 松井甲子雄：“電子透かしの基礎”，森北出版，pp.7-9，p.103 (1998)
- 16) 半谷精一郎，杉山賢二：“JPEG・MPEG完全理解”，コロナ社，p.181 (2005)
- 17) System Spec v5 2b 05-26.doc, DCI, LLC
- 18) 例えば，江藤良純，金子敏信：“誤り訂正符号とその応用”，オーム社，p.172 (1996)
- 19) 馬養浩一，伊藤浩，鈴木光義，浅井光太郎：“アナログ耐性を持つ電子透かし方式”，画像電子学会誌，33，5，pp.783-791 (May 2004)

中村 晴幸 1992年，早稲田大学理工学部電子通信学科卒業。1994年，同大学院理工学研究科修士課程了。同年，NHK入局。同放送技術局，同技術局開発センター（ニュース・番組技術）を経て，2003年より，同放送技術研究所（次世代符号化）に勤務。現在，同放送技術研究所（システム）専任研究員。電子透かし，サーバー型放送などの研究に従事。正会員。

合志 清一 1981年，早稲田大学大学院理工学研究科博士前期課程了。同年，NHK入局。1984年より，放送技術研究所において，映像信号のデジタル処理・伝送の研究に従事。1995年，同技術局に転じ，デジタル伝送機器の開発・整備に従事。現在，同所映像情報主任研究員。工学博士。正会員。

藤井 亮一 1990年，早稲田大学理工学部応用物理学科卒業。同年，三菱電機（株）入社。3Dグラフィックエンジン開発，デジタル放送受信機開発等を経て，現在，同社情報技術総合研究所に所属。電子透かし技術の研究に従事。IEEE会員。

伊藤 浩 1983年，京都大学工学研究科電気工学第二修士課程終了。同年，三菱電機（株）入社。テレビジョン信号のデジタル信号処理とその応用に関する研究に従事。1993年，米メリーランド大学客員研究員。1996年～1998年，三菱電機米国研究所に勤務を経て，現在，三菱電機（株）情報技術総合研究所に所属。電子透かし技術の研究に従事。1985年，IEEE論文賞。博士（情報学）。正会員。

鈴木 光義 1984年，電気通信大学電気通信研究科修士課程修了。同年，三菱電機（株）入社。画像圧縮符号化方式の研究とテレビ会議システムの設計開発に従事。現在，同社情報技術総合研究所に所属。電子透かし技術の研究に従事。正会員。

高井 重典 1988年，幾徳工業大学電気科卒業。同年，三菱電機エンジニアリング（株）入社。標準化や試験装置用アプリケーション開発等を経て，現在，電子透かし技術の研究に従事。

谷 愉佳里 1990年，産能短期大学経営能率科卒業。同年，三菱電機エンジニアリング（株）入社。標準化や試験装置用アプリケーション開発等を経て，現在，電子透かし技術の研究に従事。