バッファを破綻させないMPEG-2ビデオストリームへの電子透かし埋込み制御方法

Embedding Control for Preventing Buffer Overflow in Watermarking MPEG-2 Video Bitstreams

正会員 伊藤 浩[†], 正会員 馬養 浩一[†], 高井 重典^{††},
木村 智広[†], 正会員 鈴木 光義[†], 正会員 浅井 光太郎[†]

Hiroshi Ito[†], Koichi Magai[†], Shigenori Takai^{††}, Tomohiro Kimura[†], Mitsuyoshi Suzuki[†] and Kohtaro Asai[†]

Abstract We developed a technique for watermarking an MPEG-2 video stream. Our method keeps the bit rate strictly within that of the input stream. Although the need for keeping the rate of a watermarked stream under control has been recognized for many years, most proposals have controlled the watermark embedding at the DCT level. We have analyzed the syntax change due to watermarking and show that the change is closed in the slice containing the DCT coefficient to be modified, although it could propagate beyond the block boundary, sometimes even into successive macroblocks. Based on this analysis, we developed a new embedding algorithm to adjust the bit rate of the resulting stream precisely at the end of every slice. In our experiments, about 30-60% of watermarks were successfully embedded into 6-Mbps (bit/second) video streams without any increase in bit rate compared to unrestricted embedding.

キーワード: 電子透かし, 著作権保護, MPEG-2, 符号量制御

1. ま え が き

電子透かしは、コンテンツのデータ部分に情報を付与することができるので、コンテンツの著作権保護や流通経路の特定などへの応用が期待されている。これらの応用においては、電子透かしを流通の途中段階で柔軟に埋込むことがしばしば要求される。コンテンツがビデオ信号の場合には、通信や蓄積の段階でストリームの形態に圧縮符号化されている場合が多い。このため、ストリームを完全に復号することなく、その形式をできるだけ変えずに情報の埋込みを行う手法が提案されている^{1)~4)}。

一定のビットレートの下で通信されているストリームに、直接電子透かしを埋込む場合には、電子透かしの埋込みによって、符号量が増加することは許されない。特に、ビデオストリームの復号器に符号量の変動を吸収するためのバッ

ファが設けられている場合には、電子透かしによる符号量の変化は、このバッファがオーバフローしない範囲に制限されなければならない。この問題に対して、Hartung¹⁾らは、電子透かしの埋込みを符号量が増加しない場合だけ許可する制御を行っている。Alattar²⁾は、電子透かしを一度埋込んだビデオストリームに対して、符号量の制約を満たすように、一部のDCT(Discrete Cosine Transform)係数の値を小さくする制御を提案している。Langelaar³⁾らは、電子透かしの埋込みを常にDCT係数の電力を下げるように行うことによって、この問題を回避している。

しかし、従来の手法の多くは、電子透かしの埋込みをDCT係数を符号化する可変長符号の長さに基づいて制御していた。このような手法は、電子透かしによるストリームの変化が、そのDCT係数を含むブロックに閉じている場合には有用である。ところが、DCT係数の変調はストリームの他の部分まで影響を与える場合がある。このようなブロック外に及ぶストリームの変化は、従来ほとんど言及されてこなかった。Alattarらの手法²⁾では、電子透かしを埋込んだDCT係数の可変長符号はメモリーに蓄えられ、VOP(Video Object Plane)内のすべてのデータが処理された段階でストリームに再符号化されているので、ブロック外に及ぶストリームの変化は、この再符号化において処理されると考えられる。しかし、この再符号化で生じる符号長の変化は、

2005年3月11日受付, 2005年12月1日最終受付, 2006年1月16日採録

[†]三菱電機(株) 情報技術総合研究所

(〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1, TEL 0467-41-2111)

^{††}三菱電機エンジニアリング(株) 鎌倉事業所

(〒247-0065 神奈川県鎌倉市上町屋 730, TEL 0467-44-1611)

[†]Mitsubishi Electric Corp., Information Technology R&D Center
(5-1-1, Ofuna, Kamakura, Kanagawa, 247-8501, Japan)

^{††}Mitsubishi Electric Engineering Corp., Kamakura Works
(730, Kamimachiya, Kamakura, Kanagawa, 247-0065, Japan)

図 1 透かし信号の基本パターン
Minimum units of watermark patterns.

図 3 ブロックに分割された透かし信号
Watermark patterns divided in blocks.

図 2 透かしパターンの例
Example of a watermark pattern.

図 4 透かし信号を埋込む DCT 係数
DCT coefficients modified by watermarking.

電子透かしの埋込み制御に利用されていない。また、再符号化器は、ブラックボックスとして扱われ、シンタックスの変化は詳細に検討されていない。そのため、電子透かしの埋込みのために VOP の長さの遅延が生じていた。

さらに、Hartung ら¹⁾や Langelaar ら³⁾の手法は、電子透かしを埋めれば必ず符号量が小さくなるので、通信レートを一定に保つためには、ストリームに情報のないスタッフビットを付加しなければならず、電子透かしの埋込みによって、通信路の利用効率が低下するという問題もある。

本文では、MPEG-2 のビデオストリーム⁵⁾に電子透かしを埋込むときの符号量の変化をシンタックスレベルで解析し、その結果に基づいて新しい埋込み制御のアルゴリズムを提案する。MPEG-2 では、ビデオデータは階層的に記述され、DCT 係数は最も下位のブロック層に存在する。また、このブロック層のデータが集まってマクロブロックを構成し、マクロブロックが集まってスライスを構成している。本文では、まず、電子透かしによって DCT 係数の量子化値を変調する場合、それに伴うストリームの変化は、その DCT 係数を含むスライスに閉じていることを示す。次に、このことを利用して、スライスの境界で符号量が増加しないように、電子透かしの埋込みを制御するアルゴリズムを与える。この手法は、スライスの境界の符号量の条件が満たされれば、局所的に符号量が増加する場合にも、電子透かしの埋込みを行うので、Hartung らの手法に比べて、多くの透かし信号を埋込むことができる。また、埋込み制御を充分高速に行えば、電子透かしの埋込みによる遅延をスライスの長さまで小さくすることができる。

以下、第 2 章で、電子透かしを埋込むための DCT 係数の変調方法について述べ、第 3 章で、この変調を符号量を増加させることなく実行するための埋込み制御のアルゴリズムを説明する。第 4 章では、計算機シミュレーションによってその効果を確認し、最後に第 5 章で、本文で得られた成果をまとめる。

2. 電子透かしの埋込み

ビデオストリームに電子透かしを埋込む場合には、ストリームから DCT 係数を復号し、この係数に透かし信号を DCT 変換した結果を加算すればよい¹⁾。ただし、電子透かしの埋込みは、原信号に一定のパターンを加えることによって行い、その検出は画像信号とこのパターンとの相関に基づいて行うものとする。以下、この条件を満たす一つの例として、文献⁶⁾の電子透かしを考える。

文献⁶⁾の電子透かしは、画像がアナログ信号に変換され、VTR などて記録された後にも情報が残るように、水平の低域周波数側の信号成分に埋込まれている。この透かしパターンの最小単位は、図 1 に示すように、 16×4 画素からなる格子状のブロック（基本パターン）となる。図で、 δ は透かしの強度を決めるパラメータである。この基本パターンを画面全体に敷き詰めて、全体を N 組に分割し、各組に 1 ビットの情報を割り当てる。このとき、ビット毎にパターンの位相を反転させることにより、0 または 1 の情報が埋込まれる。例えば、図 2 の左の図は、 96×96 画素の画像に 2 ビットの情報を埋込むときの透かしパターンの例を表示したものである。このパターンは情報の各ビットに対応して、二つの組に分割でき、それぞれの組に対応する領域を図の中央と右側に示した。これらの組の間では、基本パターンの位相が反転されている。また、この例のように、同じ組に属するパターンは必ずしも連結した一領域を形成する必要はない。

透かし信号と DCT ブロックの境界を一致させれば、一つの DCT ブロックに含まれる透かし信号のパターンは、図 3

図 5 MPEG-2 ビデオストリームの階層構造
Layered structure of MPEG-2 video stream.

に示す 4 通りだけである。このパターンは水平方向には変化しない。したがって、その DCT 係数を $c_{ij}(i, j = 0, \dots, 7)$ とすると、 $j > 0$ に対して、 $c_{ij} = 0$ である。ただし、 i, j はそれぞれ、垂直方向（行）と水平方向（列）のインデックスである。また、このパターンの垂直方向の変化には規則性がある。このため、このパターンを DCT 変換すると一つの係数に電力が集中する。この係数は、図 3 の 1 番目と 2 番目のパターンでは c_{30} 、3 番目と 4 番目のパターンでは c_{20} である。したがって、電子透かしの埋込みは、これらの係数だけを変化させて行うことにする。図 4 の上段にこれらの係数の位置を示した。

MPEG-2 では、インタレース画像に対応するため、DCT のブロッキングをフレームとフィールドの間で適応的に切り替えている。図 1 の透かし信号はフレームに対応するものである。フィールドブロッキングされた DCT 係数に対して、同様のパターンを埋込むためには、図 3 の 1 番目と 2 番目のパターンでは c_{70} 、3 番目と 4 番目のパターンでは c_{40} を変更すればよい。これらの係数を図 4 の下段に示した。このとき、マクロブロックの垂直方向に隣接するブロックは独立に変化できないので、これらのブロックのパターンは同一にしておく必要がある。

3. 埋込みの制御

3.1 MPEG-2 ビデオのシンタックス構造

MPEG-2 のビデオストリームは、図 5 に示すような階層構造になっている。それぞれの層は、ヘッダ部分とデータ部分からなり、データ部分は、下位の層を一つ以上並べて構成される。ビデオ信号の DCT 係数は最下位のブロック層に含まれる。スライス層以上の層の長さはバイト (8 ビット) 単位でなければならない。端数がある場合は、規定のビットを付加して、整数バイト長となるようにしている。

マクロブロック (以下 MB と表記する) は、表 1 に示すように、含まれる情報によって幾つかのタイプに分けられる。フレーム内符号化される I ピクチャの MB は Intra だけである。フレーム間で予測符号化される P ピクチャと B ピクチャの MB は、Intra のほかに、動きベクトルを含むかどうかによって MC と No MC、有意な (0 でない) DCT 係数を含むかどうかによって Coded と Not Coded に分類される。また、動きベクトルも DCT 係数も含まない MB は Skip となり、全く情報は伝送されない。No MC Coded

表 1 マクロブロックのタイプと伝送される情報
Macroblock types and transmitted information.

picture	macroblock	m_vector	coeffs
I-pictures	Intra (Q)		○
P-pictures	MC, Coded (Q)	○	○
	No MC, Coded (Q)		○
	MC, Not Coded	○	
	Intra (Q)		○
B-pictures	Skip		
	MC, Coded (Q)	○	○
	MC, Not Coded	○	
	Intra (Q)		○
	Skip		

は P ピクチャで定義されるが、B ピクチャには存在しない。B ピクチャでは、動きベクトルを含む MB は、予測の方向によって更に細かく分類されるが、これは電子透かしの埋込み制御に影響しないので、本文ではすべて MC として扱う。DCT 係数の量子化スケールは MB 毎に更新してよい。この更新がある MB は、新しい量子化スケールを与える情報として量子化スケールコードを含む。表 1 では、このことを (Q) で表示した。この更新は有意の DCT 係数がない MB では発生しない。

Intra 以外で DCT 係数を含む MB では、どのブロックにそれが存在するかを示す CBP (Coded Block Pattern) と呼ばれる情報が伝送される。この情報は可変長符号化されている。また、P ピクチャと B ピクチャでは MB がスキップされる場合があるので、スライス内の MB の位置を示す MB アドレスが伝送される。この情報も可変長符号化される。電子透かしの埋込みでは、これらの可変長符号の変化に注意しなければならない。

3.2 電子透かしの埋込みによるシンタックスの変化

電子透かしの埋込みによって、有意の係数が他の有意の係数に変化する場合は、この変化はブロックの外に影響しない。しかし、有意の係数が 0 になったり、0 の係数に電子透かしを埋込んで、それが有意になる場合には、以下に述べる変化が生じる。ただし、電子透かしの埋込み前後で量子化スケールは変化しないものとする。

(1) MB タイプの変化

I ピクチャはすべて Intra であるので、MB タイプの変化はない。また、Intra には CBP が存在しないので、電子透かしの埋込みによって変化する可変長符号は DCT 係数だけである。

P ピクチャでは、MC Coded の MB は、電子透かしの埋込みによってすべての DCT 係数が 0 になるとき、CBP を失って、MC Not Coded に変化する。逆に、MC Not Coded の MB に電子透かしを埋込むと、MC Coded に変化する。このとき、対応する CBP を付加する必要がある。同様に、No MC Coded の MB は、有意の DCT 係数がなくなると Skip に変化し、Skip の MB に電子透かしを埋込むと No MC Coded に変化する。Intra の MB はタイプが変化することはない。この遷移を図 6 に示した。

図 6 P ピクチャのマクロブロックタイプの変化
Transition of macroblock types in P-pictures.

図 7 B ピクチャのマクロブロックタイプの変化
Transition of macroblock types in B-pictures.

B ピクチャでは、No MC Coded の MB は存在しない。有意の DCT 係数がある Intra 以外の MB には、すべて動きベクトルが付加される。また、Skip の MB では、動きベクトルが伝送されないで、前の MB の動きベクトルをそのまま継承することになっている。したがって、MC Coded の MB において、電子透かしの埋込み後にすべての DCT 係数が 0 になるとき、その動きベクトルが前の MB と同じであれば、Skip に変化し、そうでなければ MC Not Coded に変化する。また、逆に、Skip と MC Not Coded の MB に電子透かしを埋込めば、CBP を付加して MC Coded に変化する。Intra については変化はない。この遷移を図 7 に示した。

なお、MPEG-2 には、スライスの最初と最後の MB は Skip でないという規定がある。したがって、これらの MB で動きベクトルと有意な DCT 係数がなくなる場合は、動きベクトルを符号化するなどして、Skip 以外の MB とする必要がある。

(2) MB アドレスと量子化スケールの継承

P ピクチャと B ピクチャにおいて、MB タイプが Skip に変化する場合は、その MB が持っていた MB アドレスの情報を次の (Skip でない) MB に継承しなければならない。MB アドレスはその MB のスライス内の絶対的な位置と前の (Skip でない) MB の位置との相対的な距離として与えられるので、MB が Skip に変化すると次の MB のアドレスが正しくなくなる。したがって、この MB アドレスを修正する必要がある。

また、量子化スケールコードを持つ MB が Not Coded に変化する場合は、量子化スケールの情報を次の (DCT 係数を含む) MB に継承する必要がある。量子化スケールは一度変化すると、スライス内では、明示的な指示がない限り

図 8 電子透かしの埋込み制御
Embedding control of watermarking.

同じ値が継続的に使われる。しかし、Not Coded の MB は量子化スケールコードを持つことができないので、量子化スケールはこのコードを持つことができる次の MB で更新しなければならない。

スライスの最後の MB は Skip でないから、MB アドレスの継承はスライスを超えて行われることはない。また、量子化スケールコードはスライスヘッダに必ず含まれ、量子化スケールはスライスの最初で更新される。したがって、量子化スケールを継承すべき MB がそのスライス内ない場合には、これを継承する必要はない。

(3) シンタックスの変化の範囲

以上のように、ビデオストリームへの電子透かしの埋込みでは、ストリームの変化は変調する DCT 係数が含まれるスライスに閉じている。

すなわち、まず、DCT 係数が 0 と有意の値の間で変化しなければ、ストリームの変化はブロックに閉じている。次に、DCT 係数が 0 と有意の値の間で変化する場合は、ストリームの変化は、ブロック外に及ぶ場合があるが、そのブロックが存在する MB に閉じている。さらに、MB のタイプが変化する場合には、ストリームの変化は他の MB へ及ぶ場合があるが、遅くともその次に符号化される DCT 係数を持つ MB、またはスライスが終了する時点で完了する。

したがって、MPEG-2 のビデオストリームに電子透かしを埋込む場合には、スライス単位のストリームの書き換えを行えば充分である。

3.3 電子透かしの埋込み制御

ここでは、スライスの区切りにおいて、電子透かしを埋込んだストリームの符号長がもとのストリームの符号長を超えないように、電子透かしの埋込みを制御することにする。すなわち、一つのピクチャに注目して、このピクチャの最初から k 番目 ($k = 1, \dots, K$) のスライスまでの符号長を P_k とし、これが電子透かしの埋込みによって、 P_k^w に変化するとき、

$$P_k - P_k^w \geq 0 \quad (1)$$

が常に成り立つように制御を行う。ここで、ピクチャヘッダの符号長を H 、 k 番目のスライスの符号長を L_k とすれば、 $P_k = H + \sum_{i=1}^k L_i$ である。以下、具体的な制御方法を説明する。

MPEG-2のスライス、図8に示すように、ヘッダとMB、およびスライスの長さをバイト単位とするための付加ビットから構成されている。 k 番目のスライスにおける、これらの符号長をそれぞれ、 H_k 、 $M_{k,i}(i=1, \dots, N)$ 、 b_k とすれば、このスライスの符号長は、

$$L_k = H_k + \sum_{i=1}^N M_{k,i} + b_k \quad (2)$$

で与えられる。ただし、SkipのMBに対しては $M_{k,i} = 0$ とする。スライスの最初から n 番目のMBまでの符号長は、

$$L_{k,n} = H_k + \sum_{i=1}^n M_{k,i} \quad (3)$$

で与えられる。電子透かしが埋込まれたストリームにおける、 $L_{k,n}$ に対応する符号長を $L_{k,n}^w$ とする。

k 番目のスライスの開始時には、スライスの最後に付加されたビットを含めると、電子透かしの埋込みのために、

$$B_{k,0} = P_{k-1} - P_{k-1}^w + b_k \quad (4)$$

ビットの余裕がある。付加ビットは、バイト区切りのものであって、画像信号の情報を持たない。したがって、この部分は電子透かしの埋込みによって侵食してよい。

このスライスに電子透かしを埋込むには、電子透かしを埋込むすべてのDCT係数について、その変更が式(1)を満たすかどうかを順番に判定し、満たされる場合に限り電子透かしの埋込みを行うようにする。ここで、 n 番目のMBの一つのDCT係数に電子透かしを埋込むとき、ストリームの変化が $n+j$ 番目のMBまで影響するとすれば、電子透かしの埋込み制御は、

$$\begin{aligned} B_{k,n+j} &= B_{k,0} + L_{k,n+j} - L_{k,n+j}^w \\ &= B_{k,0} + \Delta L_{k,n+j} \geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

に基づいて行えばよい。ストリームの変化が現在のMBに閉じている場合は $j=0$ とする。式(5)が成り立つとき電子透かしを埋込み、そうでないときは、埋込みを禁止してストリームを変化させない。当然、 $L_{k,n+j}^w$ には、MBタイプの変化などすべての符号長の変化が反映されていなければならない。

この制御によれば、DCT係数の変化によって符号長が増加しないときは、電子透かしは必ず埋込まれる。符号長が増加するときは、式(5)が成り立つ範囲で電子透かしが埋込まれる。また、この式において、 $n+j$ 番目のMBはストリームの変化が及ぶ最後のMBであり、このMBは k 番目のスライスに含まれるから、式(5)が成り立てば、式(1)は常に満たされる。

3.4 ドリフト補償

ストリームの途中で導入された歪みが、フレーム間の予測符号化によって後続の信号に伝播することをドリフトという。このドリフトを軽減するには、電子透かしによる信号の

図9 ドリフト補償を含む電子透かしの埋込み部分
Watermark embedder incorporated with drift canceller.

図10 電子透かし埋込みのための全体ブロック図
Diagram of the whole watermarking system.

変化を打ち消す信号を次のフレームで挿入すればよい¹⁾²⁾。

図9にドリフト補償を含む電子透かし埋込み回路のブロック図を示す。簡単のため、Iピクチャで透かし信号を埋込み、これを次のPピクチャで補償する場合を考える。入力ストリームから復号されたDCT係数の量子化値からなるブロックを $\hat{x} = [\hat{x}_{ij}] (i, j = 0, \dots, 7)$ 、これに埋込む透かし信号のブロックを $\hat{w} = [\hat{w}_{ij}]$ と表すと、このブロックを復号して得られる画像信号は、電子透かしがない場合は

$$y = T^{-1}Q^{-1}\hat{x} \quad (6)$$

であり、電子透かしを埋込んだ場合は、

$$y^w = T^{-1}Q^{-1}Q(Q^{-1}\hat{x} + Q^{-1}\hat{w}) \quad (7)$$

となる。ただし、 T^{-1} 、 Q 、 Q^{-1} はそれぞれ、逆DCT変換、量子化、逆量子化の演算子である。電子透かしの埋込みは、 $\hat{x}$ と $\hat{w}$ を同じ Q^{-1} によって逆量子化したものを加算することによって行われている。上の式の y と y^w の差をフレームメモリに保存し、次のフレームで入力DCT係数から減算すれば、予測画像から電子透かしの影響を除くことができる。電子透かしとして $\hat{w}$ を与え、これを逆量子化した後に入力信号に加算することによって、入力ストリームの量子化スケールに応じた強度で電子透かしを埋込むことができる。

図10は、全体の処理の流れを示すブロック図である。最初に、入力ビットストリームからスライスが抽出されて、

バッファに蓄積される。このスライスから更に DCT 係数が復号されて電子透かしが埋込まれる。図 9 の回路で置き換えられる部分を点線で示した。電子透かしが埋込まれた DCT 係数は、再びスライスに符号化され、スライスバッファの内容は、埋込み制御にしたがって、選択的にこの新しい情報で書き換えられる。スライスの処理が終われば、バッファの内容が読出され、ビットストリームとして出力される。

4. 計算機実験

計算機実験によって、前章で述べた埋込み制御方法の性能を評価した。

4.1 実験条件

電子透かしは、第 2 章の方法によって、すべてのフレームに同じ情報を埋込むものとし、透かしパターンはフレーム内で $N = 64$ 組に分割する。これによって 64 ビットの情報がビデオ信号に埋込まれる。ここで、透かしパターンの分割は、同じ組に属する基本パターン (図 1) が画面上でランダムに配置するように行った。ただし、第 2 章で述べたフィールドブロッキングのための条件を満たすようにする。この透かしパターンは GOP 内で一定とし、GOP 間ではランダムに位相を反転させる。GOP の大きさは 15 フレームとし、その中の P ピクチャの周期は 3 とした (IBBPBB...PBB の構造)。

DCT 係数の変調は、該当の係数に $\Delta_{ij} = \pm 1$ を加算して行う。この変調は、量子化された DCT 係数に対して行われるので、 ± 1 は画像信号に変化を与えられる最も小さい値である。この変調によって、画像信号には基本パターン (を近似する) 信号が重畳される。その強度 (δ の値) は量子化の特性に依存するので、画像やピクチャタイプにより一定ではないが、実験では、6Mbps のストリームに電子透かしを埋込んだ場合、 $\Delta_{ij} = \pm 1$ に対して平均的に $\delta = \pm 1 \sim \pm 3$ 程度であった (I ピクチャの場合)。

ここで、電子透かしの埋込みに関して、DCT 係数を含まない MB に透かしを埋込むと符号量の増加が大きいので、以下の実験では、このような MB には電子透かしを埋込まないものとした。これにより、電子透かしの埋込み対象となる MB は I ピクチャのすべての MB、P ピクチャの Intra, MC Coded, No MC Coded の MB、B ピクチャの Intra, MC Coded の MB となる。

入力するビデオストリームは、「スージー (Susie)」、「チアリーダ (Leaders)」、「和室 (Room)」、「ヨーロッパの市場 (Market)」の四つのテスト画像を、それぞれ、3, 6, 9Mbps(bit/second) に圧縮したビデオストリームとする。

埋込まれた電子透かしの強度を評価するパラメータとして、埋込まれた信号の電力と相関係数を用いる。ここで、埋込まれた信号の電力は、

表 2 符号量の変化と埋込まれた電子透かし強度 (制御なし)
Bit increase and watermark robustness (no control).

ctrl	variable	sequence				mean
		Susie	Leaders	Room	Market	
no	Δr (%)	+8.157	+3.299	+5.275	+4.452	+5.296
	$\rho\sigma$ I	0.740	2.981	1.485	2.295	1.875
	P	0.837	3.015	1.559	2.455	1.967
	B	1.015	3.560	1.758	2.804	2.284
	all	0.949	3.376	1.687	2.677	2.172

$$\sigma^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i^w - y_i)^2 \quad (8)$$

で定義する。ただし、 y_i と y_i^w ($i = 1, \dots, M$) はそれぞれ、入力ストリームと電子透かしを埋込んだストリームを復号して得られる画像信号の信号系列、 M は 1 フレームの画素数である。上式において、 $y_i^w - y_i$ は、理想的には透かし信号であるが、実際にはドリフト補償の不完全によって、幾分かのドリフト成分を含んでいる。そこで、その中の情報伝達に寄与する成分の大きさとして、次式の相関係数 ρ ($-1 \leq \rho \leq 1$) を定義する。

$$\rho = \frac{(1/M) \sum_{i=1}^M (y_i^w - y_i) \cdot p_i}{\sigma \cdot \sigma_p} \quad (9)$$

ただし、 p_i は埋込もうとする電子透かし信号、 σ_p^2 はその電力である。以下、 p_i として、量子化スケールを一定としたストリームの I ピクチャに制御なしで埋込んだときの透かし信号を固定的に用いる。したがって、 p_i と σ_p は、 $y_i^w - y_i$ に依存しない既定のパラメータである。これに対して、 ρ と σ は $y_i^w - y_i$ に依存するパラメータである。

埋込まれた電子透かしの強度は ρ と σ の積で評価できる。すなわち、相関の高い信号が多く存在するほど、電子透かしは強く埋込まれていると判断する。ここで、

$$\rho\sigma = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i^w - y_i) \cdot (p_i / \sigma_p) \quad (10)$$

であるから、 $\rho\sigma$ は単位電力に正規化した透かし信号と実際に埋込まれた信号との相関値であることに注意されたい。 $\rho\sigma$ の積算範囲は画面全体としているが、このときの $\rho\sigma$ は、埋込まれた 64 ビットのそれぞれに対する $\rho\sigma$ の平均値であることに注意されたい。

以下、電子透かしの強度というときには、実際に埋込まれた電子透かしの強度を意味し、 Δ_{ij} または δ の値ではなく、 $\rho\sigma$ の値を指すものとする。また、特に断らない限り、ドリフト補償を有効とする。

4.2 埋込み制御の効果

まず、6Mbps のストリームに、制御を行わずに電子透かしを埋込む実験を行った。この場合、対象となるすべての MB に電子透かしが埋込まれる。表 2 はこのときの符号量の変化 (Δr , 入力ストリームに対する百分率) と埋込まれた電子透かしの強度 ($\rho\sigma$) を示す。表の最後の列は四つの画像に対する平均値である。表から、符号量はすべての画像

表 3 符号量の変化と埋込まれた電子透かし強度 (制御あり)
Bit increase and watermark robustness (under control).

ctrl	variable		sequence				mean
			Susie	Leaders	Room	Market	
A	Δr (%)		-0.002	-0.001	-0.076	-0.001	-0.020
	$\rho\sigma$	I	0.614	2.635	1.412	1.918	1.645
		P	0.387	2.222	0.954	1.542	1.276
		B	0.224	1.757	0.740	1.282	1.001
		all	0.294	1.939	0.842	1.394	1.117
B	Δr (%)		-0.003	-0.001	-0.076	-0.002	-0.021
	$\rho\sigma$	all	0.284	1.878	0.817	1.363	1.085
C	Δr (%)		-0.399	-0.418	-0.531	-0.520	-0.467
	$\rho\sigma$	all	0.077	0.527	0.255	0.466	0.331

図 11 符号量増加の時間変化 (Cheer Leaders, 6Mbps)
Temporal change in bit rate increase.

に対して約3～8%増加していることがわかる。また、埋込まれた電子透かしの強度は画像によって異なっているが、これは、平均的な量子化スケールの値が画像により一定でないためである。

次に、同じストリームに、制御を行って電子透かしを埋込んだ結果を表3のA欄に示す。すべての場合に、符号量はわずかに減少している。これは埋込み制御が働いたことを示すものである。図11は、この中のチアリーダについて、フレーム毎の符号量の変化を、埋込み制御がない場合と比較して、プロットしたものである。ただし、入力ストリームの符号量を1とした。制御がなければ、符号量の増加は0～12%の間で変動しているが、制御を有効とすれば、符号量の変動は確実に入力ストリームの範囲内に制御されていることがわかる。

表3を表2と比較すれば、埋込み制御によって、埋込まれる電子透かしの強度は下がることがわかる。これは、制御によって埋込まれる信号の電力が下がることと、ドリフト補償が不完全となることによって、PピクチャとBピクチャで相関係数が低下することによる。埋込まれた電子透かしの強度の平均値は、ピクチャタイプによって異なるが、ストリーム全体では、制御を行わない場合の50%以上の値が確保されている。

図12は、チアリーダについて、 $\rho\sigma$ の値をフレーム毎にプロットしたものである。埋込み制御をした場合は、全体に値が小さくなっているが、特に、PピクチャとBピクチャ

図 12 埋込まれた電子透かし強度の時間変化 (Cheer Leaders, 6Mbps)
Temporal change in watermark robustness.

表 4 異なるビットレートに対する埋込み制御の効果 ($\rho\sigma$ は制御なしとの比で表してある)
Effect of embedding control for different bit rates.

variable		Susie			Leaders		
		3Mbps	6Mbps	9Mbps	3Mbps	6Mbps	9Mbps
Δr (%)		-0.000	-0.002	-0.012	-0.001	-0.001	-0.001
$\rho\sigma$	I	0.737	0.830	0.939	0.588	0.884	0.935
	P	0.314	0.463	0.481	0.432	0.737	0.812
	B	0.200	0.221	0.249	0.277	0.494	0.609
	all	0.273	0.309	0.331	0.340	0.574	0.674

でIピクチャよりも下がっていることがわかる。これは、PとBのピクチャで、主に相関係数が減少するためである。また、 $\rho\sigma$ の値が急激に減少するフレームがいくつかあるが、これらは透かしパターンの位相が反転するフレームである。このようなフレームでは、前のフレームの透かし信号を補償した上で、新たな信号を埋込まなければならないが、埋込み制御のためにこれが充分に行われていない。しかし、そのようなフレームは、位相が反転する最初のフレームに限られており、また、その相関係数も負ではないので、全体の強度に与える影響は小さい。

表3のB欄は、多くの従来手法のように、DCT係数を符号化する可変長符号の長さだけに基づいて、電子透かしの埋込み制御を行った場合の結果を示す。この結果は、具体的には、第3章のアルゴリズムにおいて、DCT係数の可変長符号以外の変化を禁止することによって得た*。この制限によって、埋込まれた電子透かしの強度は数%小さくなっている。また、表のC欄は、Hartung¹⁾らの手法のように、電子透かしによってDCT係数の可変長符号が長くなる場合は、埋込みを禁止した場合であり、この場合は明らかに埋込まれる電子透かしの強度は小さい。また、電子透かしの埋込みによって頻繁に符号長が短くなるので、符号量の減少が他に比べて大きくなっている。

異なるビットレートのストリームに提案手法を用いて、電子透かしを埋込んだ場合の結果を表4に示す。ただし、埋込まれた電子透かしの強度は制御がない場合との比で表示

* Alattar²⁾らの手法は、結果的に他の符号が変化することを許可しているので、これよりも多くの電子透かしを埋込めるものと考えられる。

表 5 検出のビット誤り率 (DA/AD 変換後, 単位%, 6Mbps)
Bit error rate in watermark detection.

frames	sequence				average
	Susie	Leaders	Room	Market	
30	6.3750	0.4271	3.7708	2.8854	3.3646
60	1.6875	0.0313	1.8056	1.0243	1.1372
90	0.9688	0.0000	1.2396	0.2118	0.6050
120	0.7639	0.0000	0.4306	0.0000	0.2986
150	0.4479	0.0000	0.3229	0.0000	0.1927
180	0.0000	0.0000	0.0938	0.0000	0.0234

図 13 電子透かしの妨害の時間変化 (Cheer Leaders, 6Mbps)
Temporal change in watermark distortion.

した。どのレートにおいても符号量が増加することはない。ビットレートを増やすと強度は増加するが、これは、ビットレートが高いほど、DCT 係数の変調が符号量に与える影響が小さくなるためと考えられる。また、スージーで相対的な強度が小さいのは、この画像が比較的小さい動きも少ないために、信号が低域の DCT 係数に集中し、DCT 係数の変調が符号量を増加する機会が多いためと思われる。

4.3 情報の検出

電子透かしを埋込んだストリームを復号して、埋込んだ情報の検出を行った。表 5 は、6Mbps で符号化された画像を復号し、さらに D/A 変換と A/D 変換を行った画像から検出した情報のビット誤り率を示す。ただし、透かし信号と画像信号の相関係数が正ならば正検出、これが 0 以下ならば誤検出とした。また、相関を計算する画像信号のフレーム数を 30 ~ 180 の範囲で変化させた。表から、誤り率はフレーム数を多くとるほど減少し、180 フレームでほとんど 0 となる。このことは、埋込み制御による強度の減少が電子透かしの検出を不能とするほどではないことを示す。また、この電子透かしが持つアナログ耐性が充分保持されることがわかる。他のビットレートについても同様の結果が得られた。

4.4 ドリフト補償の効果

最後に、ドリフト補償の効果を示す。図 13 は、6Mbps で圧縮したチアリーダのビデオストリームに、制御を行って電子透かしを埋込んだときの σ^2 を PSNR (Peak to Peak Signal to Noise Ratio) の値でプロットしたものである。ただし、PSNR は次式で定義する。

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{255 \times 255}{\sigma^2} \quad (11)$$

この値は、電子透かしの埋込みによって発生した歪みとみなすことができる。図で、実線はドリフト補償を行った場合、点線はドリフト補償がない場合の結果である。ドリフト補償がない場合には、B、P ピクチャで歪みが増加し、PSNR が減少していくことが明らかである。この歪みの増加は、ドリフト補償を行うことによって軽減されている。

I ピクチャの歪みを 1 としたときの、P、B ピクチャの σ^2 の値は、6Mbps の四つの画像の平均値で、ドリフト補償がない場合は、それぞれ、1.86 と 1.65、ドリフト補償がある場合は、それぞれ、1.22 と 1.20 であった。ドリフト補償によって、ピクチャタイプによる歪みの変動が抑えられることがわかる。

なお、以上の実験結果は、IPB のすべてのピクチャに電子透かしを埋込んだ場合に対するものであった。例えば、ドリフト補償をせずに、I ピクチャだけに電子透かしを埋込み、P、B ピクチャの静止部分で透かしが伝播するのを期待するなどの方針があるかもしれない⁸⁾。しかし、実験によれば、このような方法では、動きの少ない画像においても、P、B ピクチャにおける透かしの減衰が大きい場合があった。これは、静止部分でも、 ± 1 程度の微妙な動きベクトルが存在すること、intra の MB では、I ピクチャで埋込んだ透かしが伝播しないことなどが理由と考えられる。ドリフト補償を行ってすべてのピクチャに透かしを埋込む方法は、安定な情報の埋込みに有効である。

5. む す び

電子透かしが MPEG-2 のビデオストリームに与える影響をシンタックスレベルで解析し、符号量を増加させることなく、電子透かしをストリームに埋込む方法を示した。この方法によれば、電子透かしを埋込んだストリームの符号量は、スライスの区切りにおいて、もとのストリームの符号量を超えることはない。したがって、スライス長の遅延で多くの透かし信号を埋込むことができる。ドリフト補償を併用して、IPB のすべてのピクチャに電子透かしを埋込めば、安定した情報の埋込みが可能であることを示した。提案した制御方法は、文献⁹⁾に限定されることなく、一定のパターンを加算し、相関によって情報を検出する他の電子透かしの方式に対応できる。

今後の課題として、次の二つの問題が挙げられる。まず、提案方式が原理的に動作することは確認されたが、埋込み制御を含む電子透かしの埋込み処理が充分高速でなければ、スライス長の遅延を実現することはできない。効率的な処理方法の検討が必要である。次に、電子透かしの画質への影響について、歪みが目立ちやすい変化の少ない画像では、一般に量子化スケールが小さいので、電子透かしの電力は小さくなると期待されたが、実験では、復号画像に電子透かしによる妨害が認められる部分があった。このような妨

害を軽減するため、さらに高度な局所適応処理を検討しなければならない。

近年、MPEG-4やH.264⁷⁾などの、より高効率な符号化方式が提案されているが、MPEG-2はDVD(Digital Versatile Disk)やデジタル放送で採用されていること、その構造が単純で他の符号化方式の基本となっていることから、その重要性は小さくない。本文のアルゴリズムは、適当な修正によって他の規格で符号化されたストリームにも適用することができるであろう。

本研究は、独立行政法人・情報通信研究機構の委託研究「アナログ耐性を持つ電子透かし技術の研究開発」の補助を受けた。

【文 献】

- 1) F. Hartung and B. Girod, "Digital Watermarking of MPEG-2 Coded Video in the Bitstream Domain," Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (1997).
- 2) A. M. Alattar, E. T. Lin, and M. U. Celik, "Digital Watermarking of Low Bit-Rate Advanced Simple Profile MPEG-4 Compressed Video," IEEE Trans. Circuits and Syst. for Video Technology, vol. 13, no. 8, pp. 787-800 (Aug. 2003).
- 3) G. C. Langelaar and R. L. Legendijk, "Optimal Differential Energy Watermarking of DCT Encoded Images and Video," IEEE Trans. Image Processing, 10, 1, pp. 148-158 (Jan. 2001).
- 4) 酒澤茂之, 滝嶋康弘, 中島康之, 和田正裕, 「ドリフト補償を伴ったMPEGストリームへの直接電子透かし挿入方式」, 平 16 信学総全大, D-11-1 (2004).
- 5) Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information: Video, ISO/IEC 13818-2 (1995).
- 6) 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」, 画電学誌, 33, 5, pp. 783-791 (Oct. 2004).
- 7) T. Wiegand, G. J. Sullivan, G. Bjøntegaard, and A. Luthra, "Overview of the H.264/AVC Video Coding Standard," IEEE Trans. Circuits and Syst. for Video Technology, 13, 7, pp. 560-576 (July 2003).
- 8) 藤田昌克, 「電子透かし情報埋め込み方法及び装置」, 公開特許公報, 特開 2002-171494 (June 2002).

いとう ひろし
伊藤 浩 1983年, 京都大学大学院工学研究科電気工学第二修士課程修了。同年, 三菱電機(株)入社。テレビ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。1996-1998年, 三菱電機米国研究所に勤務。博士(情報学)。

まがい こういち
馬養 浩一 1996年, 慶応義塾大学理工学部計測工学科卒業。1998年, 同大学院修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。当初通信システムエンジニアリングに従事。その後情報技術総合研究所に移り, 超高精細画像表示PCの開発, MPEG-7による部分領域検索技術の研究を経て, 現在電子透かし技術の研究に従事。

たかい しげのり
高井 重典 1988年, 幾徳工業大学電気工学科卒業。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。

きむら ともひろ
木村 智広 1988年, 東京農工大学工学部数値情報工学科卒業。同年, 三菱電機(株)入社。算術符号化方式など画像の高効率符号化の研究に従事。現在, 同社情報技術総合研究所に所属し, 電子透かし技術の研究に従事。

すずき みつよし
鈴木 光義 1984年, 電気通信大学大学院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, 三菱電機(株)情報技術総合研究所に所属し, 電子透かし技術の研究に従事。

あさいこう たろう
浅井光太郎 1981年, 東京大学工学部電気工学科卒業。同年, 三菱電機(株)に入社。1992-1993年, コロンビア大学客員研究員。現在, 三菱電機(株)情報技術総合研究所に所属。画像の高効率符号化, 伝送方式の研究開発, MPEG, ITU-Tなどの国際標準化活動に従事。