

動きベクトルを用いた動画像電子透かしの検討

A Study on Video Watermarking using Motion Vectors

岡田慎輔† 中村栄治†† 沢田克敏††
Shinsuke OKADA, Eiji NAKAMURA, Katsutoshi SAWADA

Abstract Motion vectors are employed in motion compensation (MC) predictive coding for video sequences. This paper presents a watermarking algorithm using motion vectors, where watermark information is embedded in motion vector components (horizontal and/or vertical). The motion vectors are treated in terms of integer-pixel accuracy or half-pixel accuracy. According to “0” or “1” of the watermark bit code, vector components are forced to have odd or even values in the former case, and integer or half-pixel values in the latter case. In our simulation experiments, the influence of the watermarking process on coded-decoded image qualities is investigated. Better image qualities are obtained when watermark bits are embedded in horizontal components than in vertical components. The SNR degradation obtained is about 1dB compared with images without watermarking.

1. はじめに

近年、コンテンツのデジタル化が進み、利用者がそれらを容易に使用できるようになっているが、その反面で一つの問題が生じて来ている。それはコンテンツを容易にコピーできるという点で、このことは著作権保護の観点からすると不正コピーという由々しき問題を引き起こす恐れがある。そこで著作権を保護するために様々な対策が考えられているが、その一つに「電子透かし(1)」という技術がある。電子透かしとはデジタルコンテンツにそのコンテンツとは別の識別情報(著作権情報等)を埋め込むことである。

本稿では動画像を対象とした電子透かしについて検討する。動画像の圧縮方式としては動き補償(Motion Compensation: MC)フレーム間予測符号化(MC予測符号化)がMPEG2(2)等をはじめ広く用いられている。このMC符号化では符号化対象画像のフレーム間での動きを表すために動きベクトル(MCベクトル)を用いる。そこで動きベクトルに透かし情報を埋め込むことを考え、具体的な埋め込み方法を検討する。動きベクトルに透かしを埋め込めば最適ベクトルからのずれを生じるためにMC予測精度が低下し、復号画像品質に影響を及ぼす。そこで透かしを埋め込まれた画像の特性についても検討する。

以下、2章では動き補償予測符号化の概要と動きベクトルの

探索方法およびその性能について検討する。3章では動きベクトルへ電子透かしを埋め込む方法と埋め込まれた復号画像品質について検討する。最後に4章ではむすびを述べる。

2. 動き補償予測符号化(2)

2-1 動き補償予測符号化概要

動画像はフレームあるいはフィールドと呼ばれる連続した静止画の集りから構成されており、隣接するフレーム間やフィールド間には大きな相関がある。そこで既に符号化・復号化済みの過去の画像(前画像)から現在の符号化対象画像(現画像)を予測してその予測誤差を符号化して送信する。動き補償予測符号化の送信側と受信側の流れをそれぞれ図2.1と図2.2に示す。

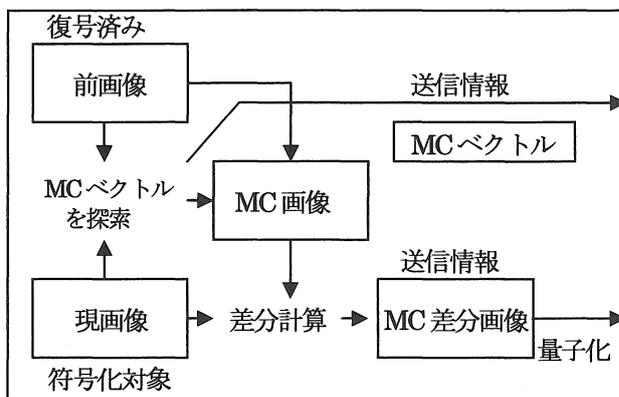


図 2.1 送信側の動き補償予測符号化の流れ

† 愛知工業大学大学院 電気電子工学専攻 (豊田市)

†† 愛知工業大学 工学部 情報通信工学専攻 (豊田市)

送信側では現画像と復号済み前画像との間で動きを表す動きベクトル (MC ベクトル) を探索し、得られた MC ベクトルと前画像から MC 予測画像を作る。これを動き補償予測という。現画像と MC 予測画像の差分を取り、MC 差分画像を作り、これを量子化して情報量をさらに低減させる。送信する符号化情報は MC ベクトルと量子化された MC 差分画像である。

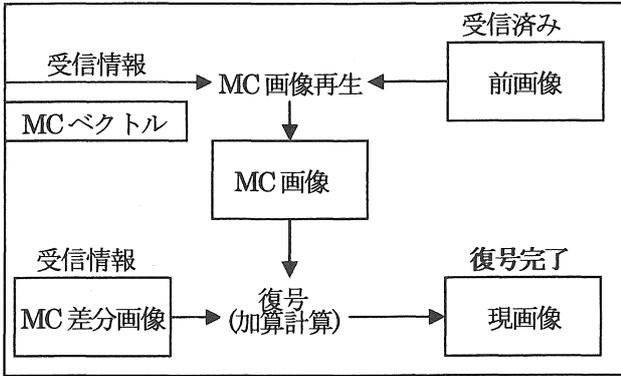


図 22 受信側の動き補償予測復号化の流れ

受信側では、受信 MC ベクトルとすでに受信・復号済みの前画像とから送信側と同じ MC 予測画像を作り、受信 MC 差分画像をこれに加算して現画像を復号する。

2・2 MCベクトルの探索方法

図 23 のように現画像をブロックに分割し、ブロック毎に現画像と前画像の間でブロックの差分絶対値和 (あるいは 2 乗和) が最小となる位置を前画像の探索範囲内で探索し、その位置を示すベクトルで表す。これを MC ベクトル、このようなベクトル探索方法をブロックマッチング法②という。

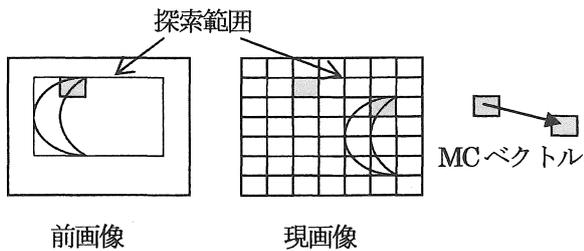


図 23 ブロックマッチング法

ここでは動き補償予測の画像はフィールド単位で構成する。現フレームの第 1 フィールドに対しては、前フレームの第 2 および第 1 フィールドを前画像とし、また現フレームの第 2 フィールドに対しては現フレームの第 1 フィールドおよび前フレームの第 2 フィールドを前画像として動き補償予測を行う。それぞれにおいてブロックごとに現画像ブロックと前画像ブロックの差分絶対値和が最小となるベクトルを検出する。その際にどちらのフィールドから MC ベクトルを選定したのかを識別する情報もベクトル情報として必要となる。

MC ベクトルの探索法としてここでは、(1) 1 画素探索 MC、(2) 階層的 1/2 画素探索 MC の 2 通りの方法について検討する。

(1) 1 画素探索 MC

探索精度が 1 画素単位、すなわち前画像の探索範囲の中で MC ブロックを 1 画素ずつずらして差分の絶対値和が最小となるブロックを探索する。これを 1 画素探索 MC とよぶ。

(2) 階層的 1/2 画素探索 MC

まず(1)で述べた 1 画素精度で探索し、MC ブロックとの差分の絶対値和が最少となる位置を見つける。次にその位置の周辺だけを 1/2 画素精度でさらに探索し、MC ブロックとの差分が最少となる位置を見つける。このように 2 段階の MC ベクトル探索を階層的 1/2 画素探索 MC とよぶ。1/2 画素精度で探索するときには、左右・上下の隣り合う 2 つの整数画素の平均値で 1/2 画素を補間する。図 24 に示すように 8 通りの 1/2 画素探索位置と最初の 1 画素探索位置の計 9 つの中から差分絶対値和が最少となる位置を求め、それを表す MC ベクトルを作る。1/2 画素探索の方が MC 予測精度は当然向上するが、MC ベクトルに必要な情報量は増える。

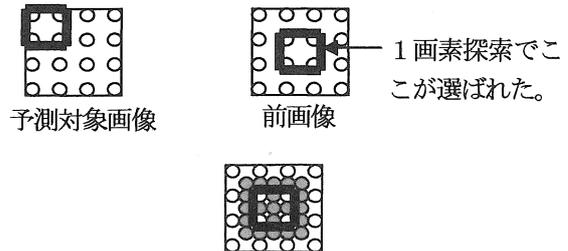


図 24 階層的 1/2 画素探索 MC の方法

2・3 MC の性能比較実験

(1) 実験条件

下記の実験条件で 1 画素探索 MC と階層的 1/2 画素探索 MC の性能を比較する。MC ベクトルの情報量と、各種ステップサイズで量子化したときの MC 差分画像の情報量との合計の情報量 (エントロピー) を求め、これと対応する復号画像の信号対雑音比 (SNR) の関係を検討する。

- ・対象画像: football (720×480[pixel/frame], 8[bit/pixel], 計 10 フレーム)
- ・MC 探索範囲: ±16 画素
- ・MC ブロックサイズ: 16×8 画素
- ・量子化ステップサイズ: s=2, 4, 6, 8, 10, 12

・エントロピーの式(6) : $H = - \sum_{k=0}^{L-1} p_k \log_2 p_k$ [bit/pixel]

$p_k = n_k / (I \times J)$: k 番目のレベルの画素の発生頻度
 n_k : k 番目のレベルの画素の発生数
 $I \times J$: 総画素数 (ここでは 720×480)
 L : 量子化の総レベル数

・SNR の式(6) : $SNR = 20 \log_{10} \frac{S_{pp}}{N}$ [dB]

S_{pp} : 原画像信号の PP 値 (ここでは 255)

N : 雑音実効値

$$N = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} (x_{ij} - y_{ij})^2}{I \times J}}$$

ただし

$I \times J$: 総画素数 (ここでは 720×480)

x_{ij} : 原画像の画素値、 y_{ij} : 復号画像の画素値

(2) 実験結果と考察

図 2.5 に“MC ベクトルのエントロピー+量子化 MC 差分画像のエントロピー”を横軸に、復号画像の信号対雑音比 (SNR) を縦軸にとって示す。階層的 1/2 画素探索 MC の方が同一エントロピーでより高い SNR が得られている。1/2 画素探索の方が MC ベクトルの情報量は増すが MC 差分画像の情報量が減少するために総合的には符号化性能が向上するといえる。

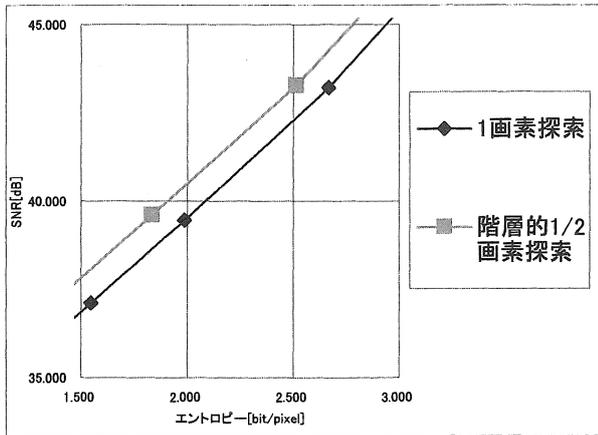


図 2.5 動き補償予測の性能比較

3. MC ベクトルを用いた電子透かし(3)

3-1 透かしの埋め込み方法

ここでは 1 画素探索 MC と階層的 1/2 画素探索 MC のそれぞれの MC ベクトルへ電子透かしを埋め込み、そのときの復号画像品質について検討する。

電子透かしを埋め込む方法として MC ベクトルの水平・垂直成分と透かし情報の 1、0 との間にあらかじめ対応関係を定め

ておく。探索された MC ベクトルがこの対応関係を満たさない場合には透かし情報に従って MC ベクトルを強制的にずらすことによって埋め込みを行う。

(1) 1 画素探索 MC ベクトルへの電子透かし埋め込み(3)

ここでは、1 画素探索 MC ベクトル 1 つあたりに 1 bit または 2 bit の電子透かしを埋め込むこととする。

1 MC ベクトルあたり 1 bit の電子透かしを埋め込む場合、MC ベクトルの水平、垂直成分のどちらか一方に埋め込めば良いので 2 通りの方法が考えられる。具体的な方法を図 3.1 に示す。以下では水平成分に埋め込む場合について説明するが、垂直方向についても同様である。

あらかじめ MC ベクトル水平成分が奇数ならば埋め込み情報が '0'、偶数ならば '1' と対応関係を定めておく。透かし情報と探索された MC ベクトル成分との対応が一致すればその MC ベクトルをそのまま用い、異なればベクトルを水平方向に 1 画素ずらす。ずらし方として ±1 の 2 通りがあるが、現画像 MC ブロックとずらしたベクトルによって指示された前画像ブロックの間の差分絶対値和の少ない方をとる。

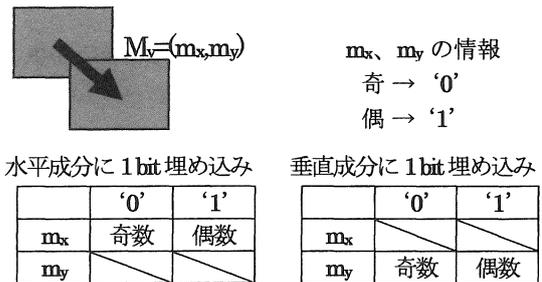


図 3.1 1 画素探索 MC ベクトルへ透かし 1 bit を埋め込む方法

1 MC ベクトルに 2 bit の電子透かしを埋め込む場合、透かし情報としては (0,0)、(0,1)、(1,0)、(1,1) の 4 通り考えられる。そこで MC ベクトルの (水平成分の偶/奇、垂直成分の偶/奇) と透かしの 2 bit を次のように対応させる。

(奇数, 奇数) : (0, 0)、(奇数, 偶数) : (0, 1)、
 (偶数, 奇数) : (1, 0)、(偶数, 偶数) : (1, 1)

探索された MC ベクトルがこの対応関係を満たさない場合には MC ベクトルを強制的にずらす。具体的な方法を図 3.2 に示す。



図 3.2 1 画素探索 MC ベクトルへ透かし 2 bit を埋め込む方法

(2) 階層的 1/2 画素探索 MC ベクトルへの電子透かし埋め込み

ここでは階層的 1/2 画素探索 MC ベクトル 1 つあたりに 1 bit、または 2 bit の電子透かしを埋め込むこととする。

1 bit の電子透かしを埋め込む場合、MC ベクトル水平成分が整数ならば埋め込み情報が '0'、小数 (= 整数 + 1/2) ならば '1' と対応関係を定める。したがって透かし情報が '0' ならば、第 1 回目の整数画素探索で得られた MC ベクトルをそのまま用い、透かし情報が '1' ならば、第 1 回目を選択されたブロックの周り (図 2.4 の 8 通り) だけさらに 1/2 画素精度で探索を行い、現画像ブロックとの差分絶対値和が最少となるブロック位置へ MC ベクトルをずらす。具体的には図 3.3 に示す。

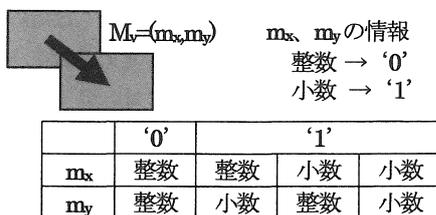


図 3.3 階層的 1/2 画素探索 MC ベクトルへ透かし 1 bit を埋め込む方法

2 bit の電子透かしを埋め込む場合、透かし情報は (0,0)、(0,1)、(1,0)、(1,1) の 4 通り考えられる。そこで MC ベクトルの (水平成分の整数/小数、垂直成分の整数/小数) と透かしの 2 bit を次のように対応づける。

(整数、整数) : (0, 0)、(整数、小数) : (0, 1)、
(小数、整数) : (1, 0)、(小数、小数) : (1, 1)

透かしの情報が (0,0) ならば第 1 回目の整数画素探索で得られた MC ベクトルをそのまま用い、透かしの情報が (0,1)、(1,0)、(1,1) ならば第 1 回目で選択された位置の周りだけ 1/2 画素精度で再度探索を行い、透かしの情報が '1' に対応するベクトル成分だけを 1/2 画素ずらす。具体的には図 3.4 に示す。

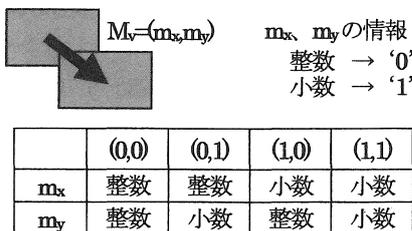


図 3.4 階層的 1/2 画素探索 MC ベクトルへ 2 bit 透かしを埋め込む方法

3・2 MC ベクトルを用いた電子透かしの実験

(1) 実験条件

下記の実験条件で 1 画素探索 MC と階層的 1/2 画素探索 MC の MC ベクトルへ電子透かしを埋め込んだときの復号画像の品質について検討する。具体的には所要符号化情報量 (MC ベクトルのエントロピーと各ステップサイズで量子化した MC 差分画像のエントロピーの合計) と復号画像の信号対雑音比

(SNR) の関係を検討する。今回使用する電子透かしデータは図 3.5 と図 3.6 に示す 2 値画像 (白: 1, 黒: 0) である。

- ・対象画像: football (720×480[pixel/frame]、8[bit/pixel]、計 10 フレーム)
- ・MC 探索範囲: ±16
- ・MC ブロックサイズ: 16×8
- ・量子化ステップサイズ: s=2, 4, 6, 8, 10, 12
- ・電子透かしデータ: 1 bit の場合、図 3.5 参照
2 bit の場合、図 3.6 参照

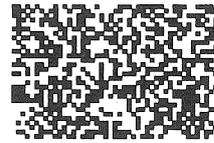


図 3.5 1 bit 電子透かしデータ (45×30)

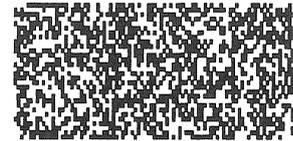


図 3.6 2 bit 電子透かしデータ (90×30)

(2) 実験結果と考察

図 3.7 に 1 画素探索 MC ベクトルへ電子透かしを埋め込んだときの所要符号化情報量 (エントロピー) と復号画像の品質 (SNR) の関係を示す。

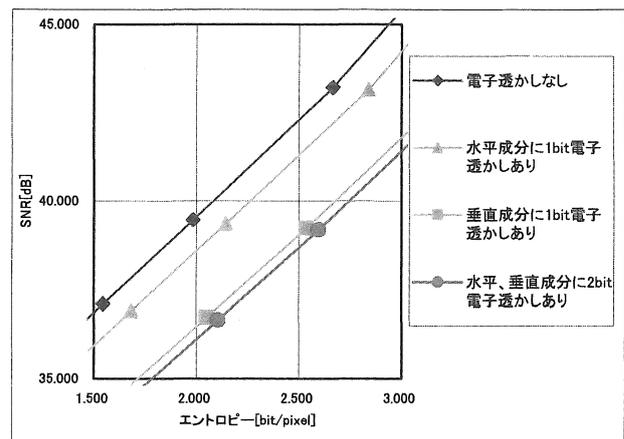


図 3.7 1 画素探索 MC ベクトルへの透かしの埋め込み

MC ベクトルの水平成分に埋め込む場合と垂直成分に埋め込む場合とを比べると、水平成分の方が SNR は約 2 dB 高く、透かし無しの場合からの低下は 1 dB 以下である。これは画像の性質によるものである。使用した画像は 1 フィールドあたり 720×240 画素という構造になっている。テレビ画面の縦横比が 3/4 であることを考えると、透かしを埋め込むことによって、MC

ベクトルが水平方向に1画素ずれるより、垂直方向に1画素ずれるほうが画像上ではずれの距離が大きいため、MC予測精度の低下もそれだけ大きくなり、復号画像の品質に差が出たと考えられる。

次に、1 bit埋め込む場合と2 bit埋め込む場合とを比べると1 bitの方が高いSNRが得られている。1 bit埋め込む場合にはMCベクトルの水平または垂直成分のいずれか一方しか影響を受けないのに対して、2 bitの場合には水平・垂直両成分とも影響をうけるから、これは当然の結果とも言える。ただし、垂直成分に1 bit埋め込んだ場合と比べると水平・垂直両成分に2 bit埋め込んだ場合のSNRの低下は約0.5 dBに収まっている。このように2 bit埋め込むことにより復号画像品質の低下はあるが、埋め込みビット数が2倍となるわけだから透かし破壊攻撃に対する耐性(4)(5)は当然強くなると考えられる。

図3.8に階層的1/2画素探索MCベクトルへ電子透かしを埋め込んだときの実験結果を示す。ただし、1画素探索MCベクトルへ透かしを埋め込んだ場合の先の実験結果を考慮して1 bitの埋め込みはMCベクトルの水平成分のみとしている。電子透かし無しの場合と比べて透かしを1 bitの埋め込んだ場合のSNRの低下は約1.1 dBである。2 bit透かしを埋め込んだ場合は1 bitのばあいより低下するがその差は0.6 bit低度である。

階層的1/2画素探索MCと1画素探索MCとを比べると、動き補償予測の性能差から、透かし無し、1 bit、2 bitのいずれの場合でも階層的1/2画素探索MCの方が高いSNRが得られている。また、水平成分に1 bit埋め込んだ場合と水平・垂直成分に2 bit埋め込んだ場合の復号画像品質の差は階層的1/2画素探索MCの方が少ない。

4. むすび

本稿では、動画の動き補償予測符号化で用いられるMCベクトルに電子透かしを埋め込む方法と、そのときの復号画像品質を検討した。

2では、電子透かしを埋め込む準備として、1画素探索MCと階層的1/2画素探索MCについて比較検討した。その結果、同一符号化情報量で階層的1/2画素探索MCの方がより高い復号画像品質を達成できることを示した。

3では、MCベクトルの水平成分または垂直成分を使って1 bitおよびその両者を使って2 bitの透かしを埋め込む方法について検討した。1 bit埋め込みの場合、水平成分に埋め込む方が垂直成分に埋め込むよりも復号画像の劣化が少なく、透かし無しの復号画像からのSNRの低下は約1 dBであることがわかつ

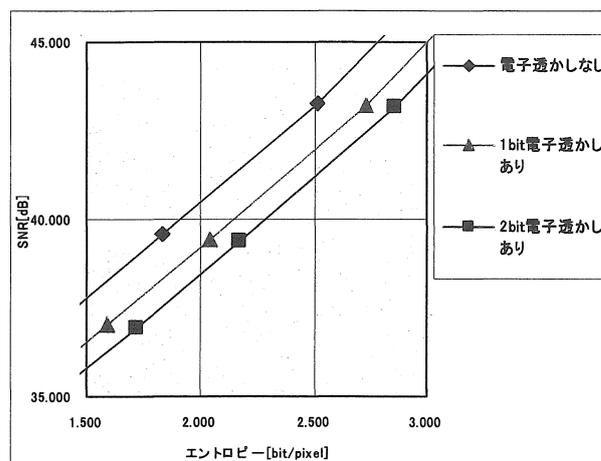


図3.8 階層的1/2画素探索MCベクトルへの透かしの埋め込み

た。1画素探索MCと階層的1/2画素探索MCについて比較すると、透かしを埋め込まれた復号画像の品質は階層的1/2画素探索MCの方が優れており、また2 bitを埋め込みと1 bit埋め込みとのSNRの差は0.6 dB程度というわずかなものであった。

本稿では、MCベクトルへ電子透かしを埋め込むという方法のみについて検討を行った。しかし、動画に対しては他にもまだ様々な電子透かしを埋め込む方法が考えられる。例えば、動画は連続した静止画像の集まりと見なせるので、静止画像に使われている各種の電子透かし埋め込み方法を適用することもできる。あるいはそれらと本稿で検討した方法とを組み合わせる方法も考えられる。今後、埋め込みによる画像劣化が少ないという点と透かし破壊攻撃に強いという点の両方を満たすような動画電子透かしを検討する必要がある。

参考文献

- 1) 松井 甲子雄：電子透かしの基礎、森北出版、2000
- 2) 越智 宏、黒田 英夫：JPEG&MPEG 図解でわかる画像圧縮技術(P92~P107)、日本実業出版社、2000年12月
- 3) 酒澤 茂之：動画電子透かし、画像電子学会誌、第31巻、第3号(2002)
- 4) 稲葉 宏幸：電子透かしの使用形態と耐性評価、画像電子学会誌、第32巻、第2号(2003)
- 5) 酒澤 茂之：画像電子透かし・攻撃技術の基礎、画像ラボ、2003.6
- 6) 井 研治、小西 たつ美、沢田 克敏：情報通信工学実験II 指導書、愛知工業大学情報通信工学科編、2005年4月

(受理 平成 18年 3月 18日)