

標本化格子の位相変調に基づく動画像電子透かしの提案

石田 和己† 稲葉 宏幸‡

京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科情報工学専攻
606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町 1
ishida11@sec.kit.ac.jp †, inaba@kit.ac.jp ‡

あらまし 静止画像向け電子透かしの方式の一つに標本化格子の位相変調を用いる方式が知られている。この方式は画質の劣化が比較的小さく、埋め込み容量が大きい、といった特長を有するが、復号時に原画像が必要となるため動画像に適用する際には大きな問題となる。本論文では標本化格子の位相変調を用いた電子透かしを動画像に適用し、なおかつ復号時に原動画像を用いない方式を提案する。コンピュータシミュレーションにより、PSNR、復号率などの各種性能を評価する。

Proposal on Video Watermarking Based on the Phase Modulation of Sampling Lattice

Kazuki Ishida† Hiroyuki Inaba‡

Dept. of Information Science, Kyoto Institute of Technology.
Matsugasaki Hashikami-cyo, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto 606-8585, JAPAN
ishida11@sec.kit.ac.jp †, inaba@kit.ac.jp ‡

Abstract Watermarking using a phase modulation of sampling lattice is known as one of the watermarking methods for images. This method has several features that degradation of picture quality in PSNR is relatively small, and having a high embedding capacity. However serious problem occurs for the method applied to video because original movie is required for decoding. In this paper, we present the video watermarking method based on the phase modulation of sampling lattice, which has no requirement of original video for decoding. By computer simulation, we will evaluate various performance such as PSNR and decoding rate.

1 はじめに

近年、情報機器の高性能化や普及により、多くの利用者が動画像を利用・投稿することが可能となった。その反面、違法コピーや不正配布といったデジタルコンテンツの著作権侵害が問題となっている。著作権侵害の対策技術として、著作権情報等を電子透かしとして埋め込むことが考えられている [1]。

電子透かしの要件のひとつとして復号時に原画像を必要としないことが挙げられる。動画像

の場合、原動画像の保持に多くの容量が必要となるため、この要件はほとんど必須となる。既存の動画像電子透かしとして、MPEG 圧縮後の動きベクトルや DCT 係数を利用する手法や、3次元周波数変換を用いた手法などがある [2]。本論文では、静止画像向け電子透かしの一手法である、標本化格子の位相変調に基づく電子透かし [3] を動画像へと適用する。この手法は 1 画像当たり埋め込める情報量が多く、画質の劣化も比較的小さいといった利点があるが、復号

時に原画像が必要となる．そこで，原画像を参照せずに復号する方式を提案する．

2 標本化格子の位相変調

静止画像向け電子透かしの手法の一つに，デジタル画像の標本化格子点に微小な変更を加えて画像を再標本化することで付加情報を埋め込む手法がある [3]．この手法は標本化格子の2次元位相変調と呼ばれている．以下ではこの手法について簡単に説明する．

2.1 埋め込み処理

原画像をブロックに分割し，ブロックごとに付加情報を複製して埋め込むことでインターリーブを実現する．画像の改ざんは空間的に近い位置に加えられることが多いほか，情報を埋め込めない画素も空間的に近い位置に生じ得るため，インターリーブを施すことで復号できるようにする．

原画像の大きさを $W \times H$ 画素，ブロックの大きさを $M \times N$ 画素とし，標本化格子点の集合を

$$L_{k,l} = \{(m,n) \mid (m \bmod M = k) \cap (n \bmod N = l)\}, \quad (1)$$

$$0 \leq m \leq W, 0 \leq n \leq H, \quad (2)$$

$$k = 0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{W}{M} \right\rfloor - 1, \quad (3)$$

$$l = 0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{H}{N} \right\rfloor - 1, \quad (4)$$

と定義する．ここで $[x]$ は床関数であり， x を超えない正整数を表す． $L_{k,l}$ に属する標本化点の画素ごとに，2値情報 $d_{k,l} \in \{0, 1\}$ を埋め込む．すなわち，各ブロックの相対的に同じ位置にある標本化点には同じ情報を埋め込む．図1に標本化格子の位相変調の例を示す．図1では，2値情報 "111010" を埋め込んでいる．

標本化格子点に加える微小変位を $(\varepsilon(m,n), \delta(m,n))$ とし， $d_{k,l}$ に応じて以下の式で定める． $d_{k,l} = 0$ であれば， $f(m,n) \in L_{k,l}$ に対して

$$(\varepsilon(m,n), \delta(m,n)) = (0, 0), \quad (5)$$

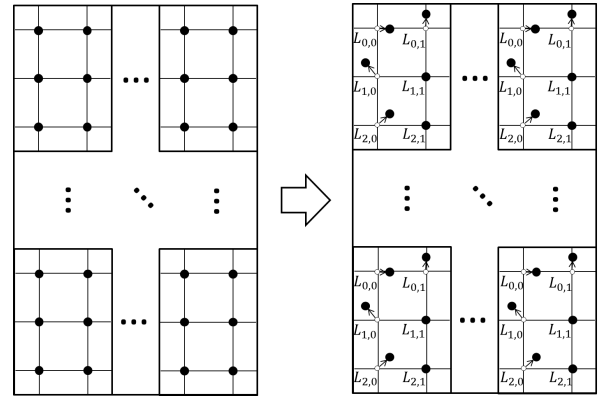


図 1: 2次元位相変調を施した一例

とおく． $d_{k,l} = 1$ であれば， $f(m,n) \in L_{k,l}$ に対して

$$(\varepsilon(m,n), \delta(m,n)) = (a \cdot \text{Re}[e^{i\theta}], a \cdot \text{Im}[e^{i\theta}]), \quad (6)$$

$$0 < a \ll 0.5, \quad (7)$$

$$\theta = 0, \pi/4, \pi/2, \dots, 7\pi/4, \quad (8)$$

とおく．ここで， a は位相シフト量を表す定数であり， θ は位相方向を表す．位相シフト量 a を調整することで埋め込み強度を調整することができる．位相方向 θ は，埋め込み前後の画素の輝度値の2乗誤差

$$E_{k,l}^\theta = \sum_{(m,n) \in L_{k,l}} (f(m,n) - f'(m,n,\theta))^2, \quad (9)$$

により選択する．位相方向は8相に限ることとする． $E_{k,l}^\theta$ が最大となる θ を選択する場合はSNRが最小となる変調方向を選択することとなり， $E_{k,l}^\theta$ が最小となる θ を選択する場合はSNRが最大となる変調方向を選択することとなる．ただし， $E_{k,l}^\theta = 0$ となるときは位相変調を行わない場合と区別がつかないため，次に $E_{k,l}^\theta$ が最小となる方向を選択する．

位相変調後の画像 $\{f'(m,n)\}$ は，原画像 $\{f(m,n)\}$ に補間処理を施すことにより近似的に求める．

2.2 復号処理

復号時には原画像 $\{f(m,n)\}$ から $L_{k,l}$ ごとに出現可能なパターンを生成し，埋め込み画

像 $\{f'(m, n)\}$ の $L_{k,l}$ と比較することで復号する。 $L_{k,l}$ の出現可能なパターンは 8 相に位相変調したパターンと位相変調を行わないパターンの計 9 種類存在する。 これら 9 種類のパターンと $\{f'(m, n)\}$ との 2 乗誤差が最小となる位相方向 θ を選択し、対応する $d_{k,l}$ を求める。

この復号法は、 $\{f(m, n)\}$ の $L_{k,l}$ の輝度値を要素とするベクトルの集合をコードブックとし、 $\{f'(m, n)\}$ の $L_{k,l}$ の輝度値を要素とするベクトルを入力ベクトルとしたときの全探索ベクトル量子化の方法に等しい。

3 提案手法

本論文では、前述の手法を動画像へ適用する手法を提案する。 前述の手法は復号時に原画像を必要とし、動画像に適さないため、原画像を用いない復号方法を考える。 一般に、動画像の連続するフレームは変化が小さいと考えられるため、最も簡単な方法として直前のフレームを原画像とみなすことが考えられる。 しかしながら、フレーム間の変化は微小とはいえ、そのまま原画像として用いるとうまく復号することができないことを予備実験により確認した。 そこで、ブロックごとに画素を平均化することで得られる縮小画像に対し、標本化格子の位相変調を施すことを考える。 画像を縮小することでフレーム間の差異を小さくすることが期待できる。 画像を縮小・拡大すると画質が大きく劣化するので、平均化する際に元の画像との偏差も求めておき、埋め込み後の画像に加えることとする。

また、透かしを埋め込んだフレームを原画像として用いると、原画像の透かし入り画素と埋め込み画像の透かし入り画素の輝度差がなくなり、透かしを検出できないことがある。 そのため、1 フレームおきに埋め込みを行い、2 フレームに 1 回埋め込み情報を復号することとする。

加えて、縮小画像を生成する前に直前のフレームに対して動き補償を行い、現在のフレームとの差異をより小さくして復号することも検討する。

埋め込み処理を以下に示す。 また、図 2 に埋め込み処理の流れ図を示す。

[埋め込み処理]

step1 偶数番目の全てのフレームについて以下の処理を行う。

step2 原画像 $F = \{f(x, y)\}$ を $P \times Q$ 画素ごとにブロック $B_{p,q}$ に分割し、ブロックごとに輝度値の平均値 $\mu(p, q)$ を求める。 すなわち、

$$\mu(p, q) = \left[\frac{1}{PQ} \sum_{f(x,y) \in B_{p,q}} f(x, y) \right], \quad (10)$$

ここで、 $p = \lfloor x/P \rfloor, q = \lfloor y/Q \rfloor$ である。 また、このとき平均値と各画素の輝度値の偏差画像 $D = \{d(x, y)\}$ も求めておく。 すなわち、あるブロック $B_{p,q}$ における偏差画像の画素値は

$$d(x, y) = f(x, y) - \mu(p, q), \quad (11)$$

により求められる。

step3 step2 で求めた平均値 $\mu(p, q)$ から原画像 F を $W' \times H'$ に縮小した画像 $M = \{\mu(p, q)\}$ を生成する。 ここで、 $W' = W/P, H' = H/Q$ である。

step4 M に対して標本化格子の位相変調を施し、埋め込み画像 $M' = \{\mu'(p, q)\}$ を得る。

step5 M' の各画素を平均値と見なし、step2 で求めた偏差に加えることで埋め込み画像 $F' = \{f'(x, y)\}$ を生成する。 すなわち、ブロック $B_{p,q}$ における埋め込み後の画素値は

$$f'(x, y) = \mu'(p, q) + d(x, y), \quad (12)$$

により与えられる。

次に、復号処理を以下に示す。 また、復号処理の流れ図を図 3 に示す。

[復号処理]

step1 偶数番目の全てのフレームについて以下の処理を行う。

step2 直前の（奇数番目の）フレーム F_{2n-1} と現在の（偶数番目の）フレーム F_{2n} から動きを検出し、 F_{2n-1} に対して動き補償を行う。 ここで、 $1 \leq n \leq (\text{総フレーム数})/2$ である。

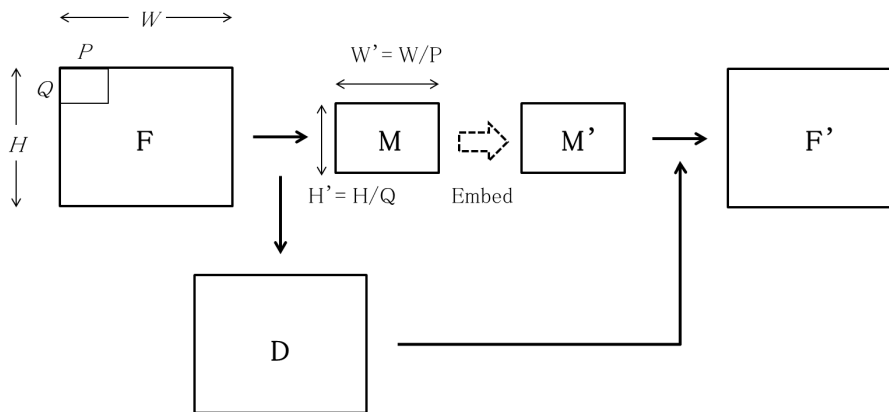


図 2: 埋め込み処理

- step3 F_{2n-1} を, 埋め込み時と同様に $P \times Q$ 画素ごとにブロック B_{pq} に分割し, $W' \times H'$ 画素の縮小画像 M_{2n-1} を生成する.
- step4 F_{2n} から, step3 と同様に $W' \times H'$ 画素に縮小した画像 M_{2n} を生成する.
- step5 M_{2n-1} を原画像, M_{2n} を埋め込み画像と見なして復号する.

各動画像の詳細は次の通りである.

- 1920 × 1080 画素
- 3 チャンネル
- 900 フレーム
- 30 fps
- 1493014 kbps

4 提案手法の評価

4.1 評価実験用の動画像データ

評価には図 4 に示す IHC 評価用動画像 (a)~(e)[4] を用いる. 加えて, 図 5 に示す IHC 評価用静止画像 (a)[4] (4608 × 3456 画素) の左上端からサイズ 1920 × 1080 の部分画像を 1 フレームとして 1 ピクセルずつ右へずらしながら切り出して仮想的に作成した動画像を用いる.



図 5: IHC 評価用静止画像 ((a)Flower garden)

$P = Q = 4$, $M = 16$, $N = 9$ とし, これらの動画像に対し, 114bit の付加情報を埋め込む. すなわち, 1920 × 1080 画素の画像を 480 × 270 画素の画像に縮小し, 縮小した画像を 16 × 9 画素のブロックに分割して付加情報を埋め込む. 付加情報は乱数により生成している. 位相シフト量 $a = 0.1$ とし, 位相変調の方向は SNR が最小となる方向とする. 画素の補間処理は 1 次補間である.

また, 動き補償には OpenCV 2.4.10[5] に含まれている Gunnar Farneback のアルゴリズムに基づくオプティカルフローを用いる. F_{2n-1} の画素を検出した動き量 (m_x, m_y) の小数点以下を四捨五入した整数画素分だけ動かし, 動きを補償した画像を生成する.

計算機シミュレーションにより PSNR[dB], 動き補償を行わない場合の復号率 [%] と動き補償を行った場合の復号率 [%] を求める.

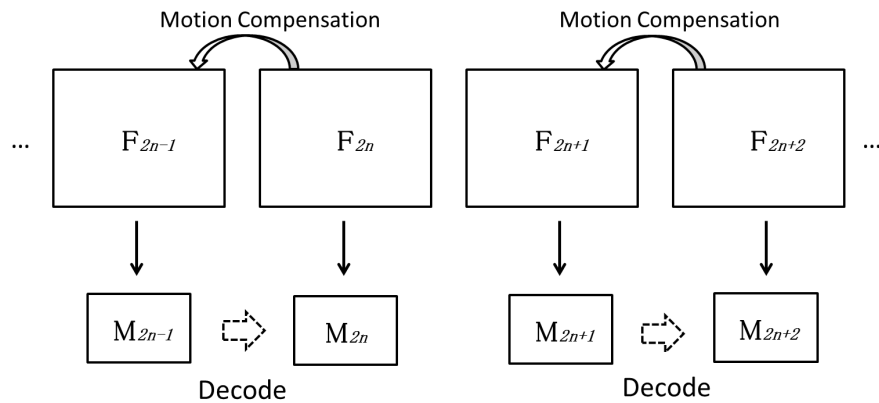


図 3: 復号処理

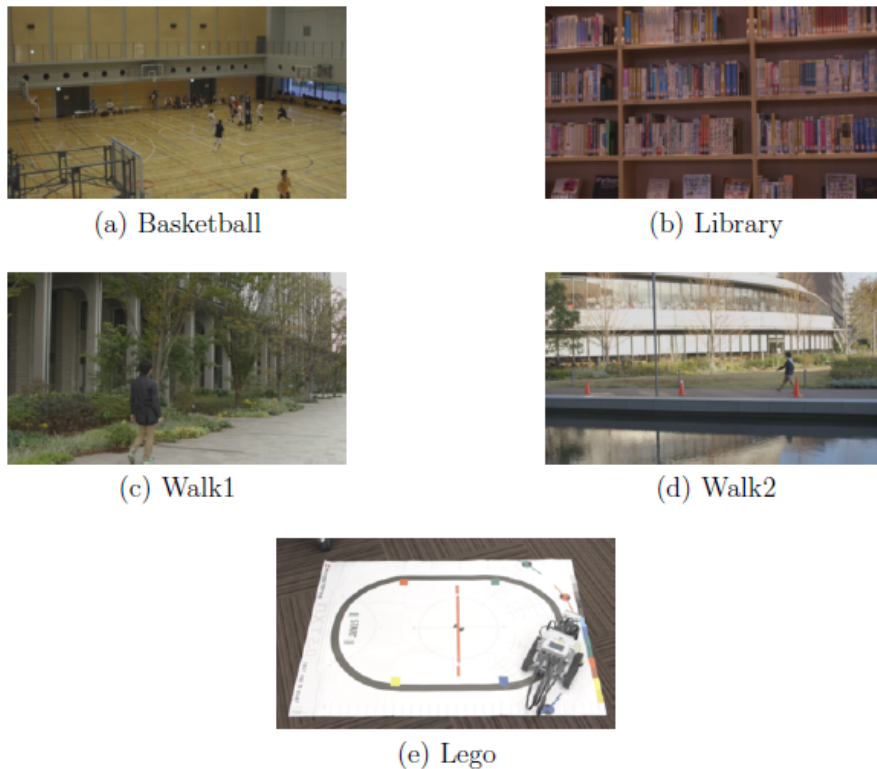


図 4: IHC 評価用動画像

4.2 シミュレーション結果

シミュレーションの結果を表 1 に示す。結果より、IHC 評価用動画像において 40dB 以上の高い PSNR を実現していることが確認できた。仮想的に作成した Flower garden の動画像では PSNR がわずかに低下し、38.1dB となった。

動き補償を施さない場合、固定カメラで撮影された Basketball, Walk1, Walk2, Lego は比較

的復号率が高いのに対して、画面全体が左右へ移動している Library や Flower garden では復号率が低くなることがわかった。これは画面全体が移動するような動画像では、各フレームを縮小したとしてもフレーム間の差異が依然として大きいため、復号率が低くなると考えられる。

動き補償を施すことにより、どの動画像においても復号率は向上している。特に画面全体が

表 1: シミュレーション結果

動画像	PSNR[dB]	復号率（動き補償なし）[%]	復号率（動き補償あり）[%]
Basketball	49.4	96.8	99.9
Library	46.1	66.2	98.5
Walk1	45.6	99.9	99.9
Walk2	44.3	91.5	97.7
Lego	41.6	84.7	98.7
Flower garden	38.1	50.0	100

移動するような動画像 Library や Flower garden において復号率が大きく改善している。仮想的な動画像である Flower garden において復号率が 100% となっていることから、フレーム間の動きベクトルが単純かつピクセル単位である場合には、動き補償は確実にできていると考えられる。他の一般的な動画像についても 95% 以上の復号率が得られているため、複数のフレームの結果から多数決をとる等の方法により容易に復号率 100% を達成できると考えられる。

[3] 南憲明, 山田芳郎, 田崎三郎, “標本化格子の位相変調に基づく情報埋め込み”, 画像電子学会誌, vol.28, no.3, pp.278-283, 1999.

[4] 情報ハイディング及びその評価基準委員会, <http://www.ieice.org/iss/emm/ihc/>.

[5] OpenCV, <http://opencv.org/>.

5 まとめと今後の課題

本論文では、比較的画質の劣化が小さく、埋め込み容量が大きいという特長を持つ標本化格子の位相変調に基づく電子透かしを動画像へと適用する手法を提案した。計算機シミュレーションの結果、38~49dB 程度の高い PSNR を実現できることがわかった。また、動き補償を適用することにより 95% 以上の復号率が実現できた。MPEG 圧縮に対する耐性評価を行うこと等が今後の課題である。

参考文献

- [1] 松井甲子雄, 岩切宗利, “情報ハイディングの基礎”, 森北出版, 2004.
- [2] 画像電子学会 (編), “電子透かし技術 デジタルコンテンツのセキュリティ”, 電機大出版局, 2004.