

再撮耐性電子透かしの時空間座標特定方法

Method to Specify Time and Space Axis of Digital Watermark against Re-shot Image

鈴木 光義[†] 山田 浩之[†] 浅井 光太郎[†] 村上 篤道[†] 真島 恵吾[‡] 阿部 正英^{††} 川又 政征^{††}
 Mitsuyoshi Suzuki Hiroyuki Yamada Kohtarō Asai Tokumichi Murakami Keigo Majima
 Masahide Abe Masayuki Kawamata

1. まえがき

デジタルシネマでは、映画館の ID と上映時刻を人に視認できない電子透かしで埋め込んで上映する。筆者らはこのシステムに搭載する再撮耐性をもつ電子透かし方式 [1][2] を研究開発している。

斜めの角度から盗撮され DVD 等で販売された映像は元の画面の位置や各フレームの時刻が不明であり、原画を用いない方法で時空間座標を特定する仕組みが必要である。そこで、埋め込み情報以外に、固定周期の矩形波で変調するブロックを画面の要所に埋め込んで空間座標の位置と矩形波の周期・位相を特定し、さらに時系列的に変調するスペクトル拡散パターンブロックも埋め込んで正確な時刻を特定する方法を提案し検証を行った。

2. デジタルシネマシステムの電子透かし

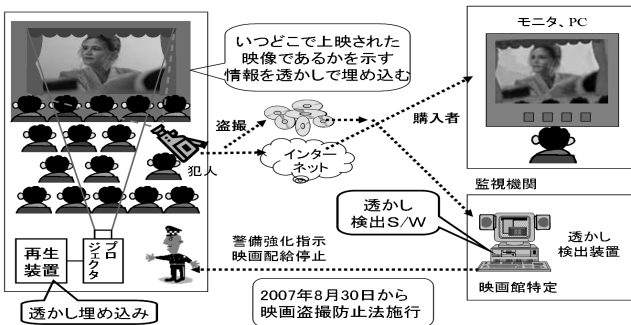


図1 電子透かしによるデジタルシネマの盗撮防止

DCI(Digital Cinema Initiatives)が規定するデジタルシネマ仕様では全ての映像に透かしを埋め込み、盗撮され海賊版で流出した映像の任意の5分間から35ビット(映画館ID、上映時刻)検出を実現する(図1)。再生装置は実時間で映像の特徴から透かしを生成して埋め込んで上映する。

映画は24Hzであり、盗撮する市販カメラは日本、米国ではNTSCで29.97Hz(正確には30/1.001)である。24:30の整数比ならば一度同期が取れるとそれ以降はフレームの対応が取れ水晶発信器の精度が100ppmならば5分でも1フレーム程度の誤差であるが、1.001の係数により5分で9フレーム(29.97Hz換算,0.3秒)程度ずれる。

また、隠れて盗撮した斜めの角度からの再撮映像は、射影変換され、透かしの埋め込み位置も不明である。

著作権上、検出時には原画を利用できないので、基準信号も透かしとして埋め込んで時空間座標を特定する方法を検証した。3., 4. はPC上で24Hzのフレームに同期した処理の数値計算のみの検証で、5. は実際に市販カメラで再撮を行った検証である。

3. 矩形波クロックによる位置特定

長方形の原画を任意の角度から撮影して得られる映像は、上映映像・ビデオカメラの歪みが無いとすると、次のような非線形な射影変換による任意の四角形となる。

$$(x,y) = ((A \times X + B \times Y + C) / (G \times X + H \times Y + 1), (D \times X + E \times Y + F) / (G \times X + H \times Y + 1))$$

但し、(X,Y)は変換前座標、(x,y)は変換後座標である。この式から、任意の4点の座標を代入すれば各係数A~Hは8元連立一次方程式で求められEXCELの逆行列関数で容易に計算でき、可逆に射影変換が可能である(図2)。

変換前の4点の座標:(X1,Y1)(X2,Y2)(X3,Y3)(X4,Y4)

変換後の4点の座標:(x1,y1)(x2,y2)(x3,y3)(x4,y4)

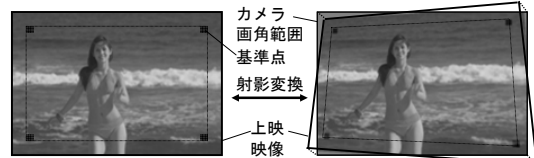


図2 四隅への矩形波埋め込み(左)と射影変換映像(右)

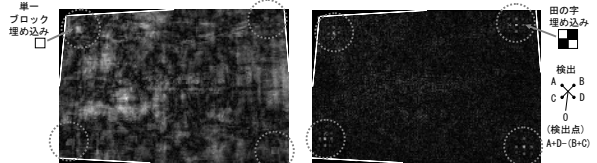


図3 矩形波変調のフーリエ変換の0.5Hzの振幅(白が強)、単一ブロック(左)と田の字4ブロック(右)

CoSME 評価映像(720×480, 24Hz, YUV, プログレッシブ, 256 階調)の四隅に0.5Hzで輝度値を±1加算する基準信号ブロックを電子透かしで埋め込み(図7の矩形波)、射影変換後、各画素をDFT(ディスクリットフーリエ変換, fs=24Hz)し、0.5Hzとその奇数高調波の強度を合計した(図3)。単一ブロックでは強度が弱くぼやけており、その形が明確でない。田の字4ブロックの隣どうしを逆相対で埋め込み、検出時に各画素から縦横4画素ずらした4点の差分(A+D)-(B+C)をフーリエ変換したものは田の字の中心の位置が鮮明に判り、画像の座標が正確に求められた。

4. スペクトル拡散パターンによる時刻特定

矩形波により2秒周期のクロックが復元できるが、時間方向にも多くのデータを埋め込む透かしでは時刻特定も必要である。DCI規定の5分以内の周期で同一情報を繰り返し埋め込むこととすれば、300秒/2秒=150クロックのカウント値が決定できればよい。時間特定方法としてスペクトル拡散パターンによる手法[3][4]などが提案されており、これを応用した。7ビットで127(<150クロック)周期のM系列信号を±1で埋め込み、検出時にM系列との相関をとる。M系列信号だけの自己相関は整合位相のみに強いピークが現れる(図4上)。CoSMEに埋め込んだ場合、単一ブ

[†]三菱電機株式会社 Mitsubishi Electric Corporation

[‡]日本放送協会 Japan Broadcasting Corporation

^{††}東北大学 Tohoku University

ックに2秒ごとに±1の変調では、整合位置以外の位相でも大きな数値があり、区別できない(中)。田の字型で2秒周期の midpoint で反転させる図6の波形では8ブロック間の差分をとることにより、映像信号を無効化することができ、整合位置でのみ強い信号が検出できた(下)。

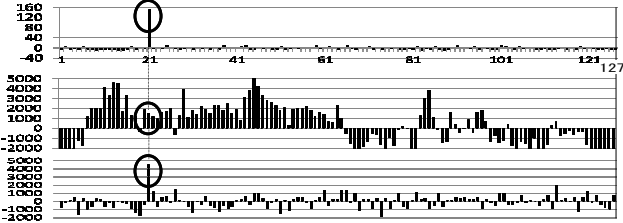


図4 M系列自己相関(上), 4つの単一ブロック合計(中), 4つの田の字差分の合計(下) (各位相21が整合位置)

5. 実際の再撮での位置, クロック, 時刻特定

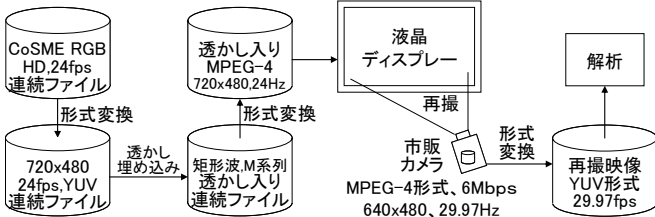


図5 再撮実験による検証の構成

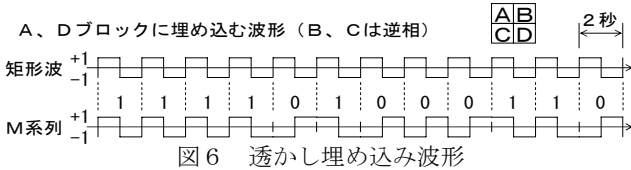


図6 透かし埋め込み波形



図7 基準信号の埋め込み位置(左, 信号を強調), 透かし強度±1で斜め再撮した映像(中央), 矩形波検出画像(右)

動画に実際に埋め込み, 再撮して検出する実験を行った(図5)。CoSME(1920×1080, RGB プログレッシブ, 24Hz)のBMP形式連続ファイルを720×480, YUVに形式変換して輝度信号に図6の信号を田の字で埋め込み(図7左), MPEG-4/AVC, 6Mbpsに形式変換して液晶ディスプレイに表示する。これを市販カメラ(MPEG-4/AVC, 640×480, 29.97Hz, プログレッシブ)で斜めから撮影し(図7中央), 連続ファイル(720×480, 29.97fps, YUV形式)に形式変換し解析する。任意の5分として, 映像の開始から1分~6分の期間を用いて検出した。DFTのサンプル周波数は $f_s=29.97\text{Hz}$ であり, $0.5/1.001\text{Hz}$ とその高調波の合計から矩形波(図7右)を検出し, 正確に埋め込み位置を判明できた。

矩形波の復元のため, 田の字4ブロックの差分信号をQの大きな $0.5/1.001\text{Hz}$ の101タップBPFを通した(図8上, 中)がきれいな正弦波とならず, 各立ち上がりエッジにジッターを含んでいる。精度を上げるため差分信号を30秒毎に区切ってDFTを行い, $0.5/1.001\text{Hz}$ の位相成分を求めた(図8下)。徐々に位相がずれていき, これを平均化することで各時刻での矩形波の位相を正確に特定できた。

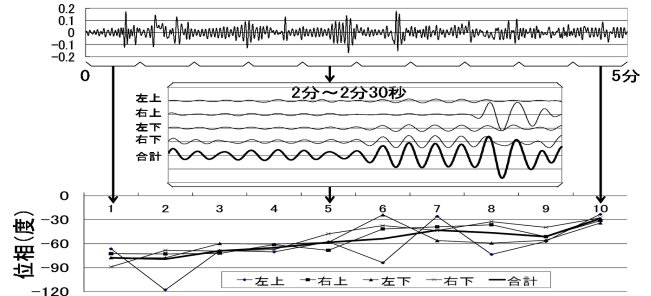


図8 BPFによる2秒周期クロックの復元(上), 拡大(中), 30秒ごとの $0.5/1.001\text{Hz}$ との位相(下)

射影変換式からM系列信号の埋め込み位置を求め, 矩形波クロックの各立ち上がりから $\pi/2$ と $3\pi/2$ の位相でサンプルして田の字8ブロックの差分値のM系列の相関を計算した(図9上)。再撮後の映像では信号が弱く, 整合位置でない位相でもピークが発生して間違える可能性が高い。そこで差分値を±1で振幅制限した後に相関の計算を行うと整合位置にだけ強いピークが出現した(図9下)。

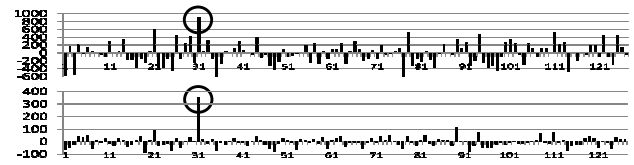


図9 再撮映像のM系列相関(上)と振幅制限した相関(下)

6. まとめと今後の課題

固定周期矩形波とM系列パターンを組み合わせる原面に埋め込み, 再撮映像(640×480, 29.97Hz)からクロック(0.5Hz の位相)と時刻(127カウント)を特定できた。誤差の精度は±2フレーム(時間), ±4画素(縦/横)程度である。

透かしにとって, わずかな±1の変調が信号, 映像がノイズである。矩形波, M系列パターンをそのまま埋め込むだけでは検出は困難であったが, 田の字ブロックで隣どうしを逆相にして埋め込み, 検出時に差分をとり, さらに振幅成分を制限してノイズのパワーを弱めることで, 精度のよい検出が可能となった。

本実験では4点で空間座標を決定したが, 実際はカメラレンズなどの歪みがあるので精度を上げるには点数を多く取り補正すべきである。

実際は動きのない部分では強度±1(256階調)でも視認される。逆に動きの激しい部分では±5でも視認されない。透かし強度に強弱をつけた場合の検出性能や, 実際のスクリーンを使つての視認性評価などが今後の課題である。

参考文献

[1]山田浩之, 藤井亮介, 鈴木光義, 伊藤浩, 高井重典, 谷愉佳里, 合志清一, 真島恵吾, 中村晴幸:“再撮耐性を有する電子透かしシステムの開発”, 画像電子学会 第237回研究会予稿. pp.159-164 (2008)
 [2]中村晴幸, 合志清一, 藤井亮介, 伊藤浩, 鈴木光義, 高井重典, 谷愉佳里:“CRT再撮映像に耐性を有する電子透かし”, 映像学誌, 60(11), pp.1778-1788 (2006)
 [3]山本奏, 中村高雄, 片山淳, 安野貴之:“単一周波数平面スペクトル拡散を利用した時間同期外し耐性をもつ動画電子透かし”, 信学論(D), J90-D(7), pp.1755~1764 (2007)
 [4]馬養浩一, 伊藤浩, 藤井亮介, 鈴木光義, 浅井光太郎, 村上篤道:“再撮画像から検出可能な電子透かし方式開発のための基礎実験”, 28th SITA (2), pp.479-482 (2005)