

モニタに映し出された動画像から透かしを抽出できる電子透かし法 Digital Watermarking Method for the Ability to Extract a Watermark from the Watermarked Video Projected on the Monitor

仲辻 友博* 岩田 基* 黄瀬 浩一*
Tomohiro NAKATSUJI Motoi IWATA Kouichi KISE

あらまし 本稿では、スマートフォンを利用したサービスへ電子透かしを応用することを考える。例えば、透かし入り動画像に対してスマートフォンをかざすことによって、透かしを抽出して情報を得るサービスが考えられる。スマートフォンで透かし入り動画像を撮影すると、撮影した動画像が傾いていたり、透かし入り動画像以外の部分を含んで録画される。また、撮影した動画像はフレームレートが異なり、色合いが変化していることが想定される。本研究では撮影した動画像から透かし入り動画像の部分を検出し、補正したものから透かしを抽出することを考える。また、動画像の途中から撮影した場合でも情報を得られることが必要である。動画像の途中からでも透かしを取り出せる手法として、2007年に山本らが時間同期外しに耐性をもつ電子透かし法を提案している。山本らは動画像をブロック分割して3次元DFTを施し、一つの周波数平面のみを用いて全てのブロックに同じ3ビットの情報を埋め込んでいた。提案手法では、複数の周波数平面を用い、全てのブロックに個別の情報を埋め込んでも情報を抽出できるように変更する。山本らは一つのフレームセットから全てのビットを抽出していたが、ブロックごとに埋め込むビット0, 1に対応する系列との相関値の差の大きさが最大になる所を動画像全体を用いて探索するように抽出法を改良した。この抽出法を用い、実際にスマートフォンで撮影した透かし入り動画像を補正した動画像に対して抽出実験を行い、その有用性を示す。

キーワード 動画像, 電子透かし, 時間同期外し, 3次元DFT

1 はじめに

近年、映像や音楽コンテンツのデジタル化が進み、世の中に広く普及している。しかし一方で、インターネットの普及により、デジタルコンテンツが不正に配布されることによる著作権侵害が問題となり、コンテンツに著作権情報を埋め込んで保護することを目的とした電子透かしという技術が注目されている [1]。電子透かしとは、デジタルコンテンツに対して、人に知覚されないように情報を埋め込む技術である。以下、埋め込む情報を透かしと呼ぶ。

昨今では、電子透かしの用途はコンテンツの保護にとどまらず、電子透かしによってURL情報を埋め込んだコンテンツからスマートフォン等のカメラ付き携帯端末を利用してURL情報を取り出し、コンテンツに関するWebサイトへ誘導することも考えられている。

本稿ではデジタルコンテンツの中でも動画像に着目し、

動画像を対象とした透かしの埋め込みを考える。TVや街に設置されている液晶モニタ等で流す動画像コンテンツに透かしを埋め込んでおき、スマートフォン等の携帯端末をかざして情報を取得することができるというサービスへの応用が考えられる。スマートフォンで透かし入り動画像を撮影すると、撮影した動画像が傾いていたり、透かし入り動画像以外の部分を含んで録画される。本稿では、撮影した動画像から透かし入り動画像の部分を検出し、補正したものから透かしを抽出することを考える。また、動画像の途中から撮影した場合でも情報を得られることが必要である。動画像の途中からでも透かしを取り出せる手法として、文献 [2] で山本らが時間同期外しに耐性をもつ電子透かし法を提案している。この手法に基づいて、埋め込み法を変更し、抽出法を改良した手法を提案する。山本らは動画像をブロック分割して3次元DFTを施し、一つの周波数平面のみを用いて全てのブロックに同じ3ビットの情報を埋め込んでいた。提案手法では、複数の周波数平面を用い、全てのブロックに個別の情報を埋め込むように変更する。また、山本らは一つのフレームセットから抽出を行っていたが、ブロックごとに埋め

* 大阪府立大学大学院工学研究科 〒 599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1. Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1, Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai, Osaka, 599-8531 Japan.

込むビット 0, 1 に対応する系列と DFT 係数との相関値の差の大きさが最大になる所を動画像全体を用いて探索するように抽出法を改良した。この抽出法を用い、スマートフォンで撮影した透かし入り動画像を補正した動画像に対して抽出実験を行い、その有用性を示す。

以下、2章では、本手法で用いる、離散フーリエ変換について説明し、3章で時間同期外しについて説明し、4章で透かしの埋め込み法、提案した抽出法について述べる。そして、5章で実験結果と考察を示し、6章でまとめとする。

2 離散フーリエ変換

離散フーリエ変換 (DFT) は式 (1) で表される。

$$f(i) = \sum_{k=0}^{n-1} x(k)e^{-\frac{2\pi j}{n}ik} \quad (i = 0, \dots, n-1) \quad (1)$$

ここで、 j は虚数単位を表し、 $x(k)$ ($0 \leq k \leq n-1$) は入力される実数列の k 番目の要素を表し、 $f(i)$ ($0 \leq i \leq n-1$) は入力された実数列に DFT を施して得られる DFT 係数列の i 番目の係数を表す。DFT を施す際、入力する信号がすべて実数であれば信号に対するスペクトルには対称性が現れる。すなわち、実数列 $x(0), x(1), \dots, x(n-1)$ に対して DFT を施して得られる DFT 係数 $f(0), f(1), \dots, f(n-1)$ は $f(i) = f(n-i)^*$ という性質をもつ。ここで、 f^* は f の共役であることを意味する。以降、 \tilde{f} は f の対称の位置の係数を表すものとする。動画像のように平面上だけでなく時間軸方向にも画素値が存在するものを対象として扱う場合、三次元 DFT を適用できる。ここで、三次元 DFT とは一次元 DFT を水平方向、垂直方向、時間軸方向に施す処理のことである。入力する信号がすべて実数であれば、三次元 DFT を施した際の DFT 係数にも対称性が現れる。

3 時間方向シフトによる時間同期外し

時間方向シフトによる時間同期外し [3] は、連続する一部のフレームだけを切り出す操作によって生じる。切り出されたフレーム以外のフレームは失われるため、フレームごとに個別の透かしを埋め込む手法では、失われたフレームに埋め込まれていた透かしの抽出できなくなる。図 1 に時間同期外しによって start 番目から end 番目のフレームが切り出された例を示す。 $I = \{I_i\}$ は動画像の各フレームを表しており、 $i = 1, 2, \dots, N$ とする。また、 $w = \{w_i\}$ は動画像に埋め込まれた透かしの意味する。図 1 ではシーン切り出しにより $I_1, I_2, \dots, I_{start-1}$ と $I_{end+1}, I_{end+2}, \dots, I_N$ が失われる。これらのフレームに埋め込まれていた透かし情報 $w_1, w_2, \dots, w_{start-1}$ と $w_{end+1}, w_{end+2}, \dots, w_N$ も失われるため、全ての透かしの抽出することはできない。

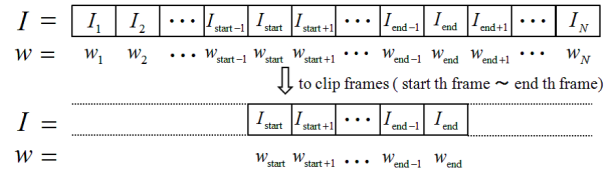


図 1: 時間同期外し

Fig.1 Temporal Desynchronization

4 透かしの埋め込み・抽出

4.1 埋め込み手順

(Step1) 透かしの定義

K ビットの透かしの、 $m = (m_1 m_2 \dots m_k \dots m_K)$, 透かしビットを $m_k \in \{0, 1\}$ と定める。

(Step2) 透かしのスペクトル拡散

周期 L の M 系列を作成し、その M 系列の 0 の部分を -1 に変更した $\{-1, 1\}$ で表される長さ L の系列 $q = \{q_l\}$ ($1 \leq l \leq L$) を用意し、式 (2)、式 (3) に従って、透かしビット 0, 1 に対応した長さ L の複素数列 $\xi^{(0)} = (\xi_1^{(0)} \xi_2^{(0)} \dots \xi_l^{(0)} \dots \xi_L^{(0)})$ と $\xi^{(1)} = (\xi_1^{(1)} \xi_2^{(1)} \dots \xi_l^{(1)} \dots \xi_L^{(1)})$ を生成する。

$$\xi_l^{(0)} = q_l + j q_l \quad (2)$$

$$\xi_l^{(1)} = \begin{cases} \xi_{l+1}^{(0)} & (l \neq L) \\ \xi_1^{(0)} & (l = L) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 j は虚数単位である。

(Step3) セット分割

フレームサイズ $X \times Y$ 画素、長さ Z フレーム (以下、 $X \times Y \times Z$ と表記する) の原動画像を T フレームずつに分割して $X \times Y \times T$ の動画像を $\frac{Z}{T}$ セット得る。各セットに等しく K ビットずつ透かしの埋め込む。以下、1つのセットに施す処理を (Step4)、(Step5) に示す。

(Step4) ブロック分割、離散フーリエ変換

1つのセット $X \times Y \times T$ の動画像をさらに $M \times M \times T$ の大きさのブロックに分割し、ブロックとしての座標 (p_x, p_y) のブロック内の座標 (x, y, t) の画素を $I_{p_x, p_y}(x, y, t)$ ($1 \leq p_x \leq \frac{X}{M}, 1 \leq p_y \leq \frac{Y}{M}$) と表す。ここで、 $1 \leq x \leq M, 1 \leq y \leq M, 1 \leq t \leq T$ である。各々のブロックに三次元 DFT を施し、DFT 係数 $f_{p_x, p_y}(u, v, w)$ を得る。以下の手順 (Step5) をラスタ走査順に全てのブロックに施す。

(Step5) 拡散系列の埋め込み

DFT 係数ブロックの $2 \leq w \leq W + 1$ を満たす W 枚の周波数平面それぞれの空間中周波数領域から選んだ L

個の係数値 $f_{p_x, p_y}(u_1, v_1, w), f_{p_x, p_y}(u_2, v_2, w), \dots, f_{p_x, p_y}(u_l, v_l, w), \dots, f_{p_x, p_y}(u_L, v_L, w)$ に対して、埋め込む透かし m_k に対応した $\xi^{(m_k)}$ の各要素を加算して $f'_{p_x, p_y}(u_1, v_1, w), f'_{p_x, p_y}(u_2, v_2, w), \dots, f'_{p_x, p_y}(u_l, v_l, w), \dots, f'_{p_x, p_y}(u_L, v_L, w)$ を得る。ここで、 W は埋め込みに用いる周波数平面の枚数である。なお、実信号に対するフーリエ係数の対称性のため、 $f_{p_x, p_y}(u_l, v_l, w)$ の原点对称位置の係数値 $\tilde{f}_{p_x, p_y}(u_l, v_l, w)$ には共役複素数列 $\xi^{(m_k)*}$ を加算する。

$$f'_{p_x, p_y}(u_l, v_l, w) = f_{p_x, p_y}(u_l, v_l, w) + \alpha \xi_l^{(m_k)} \quad (4)$$

$$\tilde{f}'_{p_x, p_y}(u_l, v_l, w) = \tilde{f}_{p_x, p_y}(u_l, v_l, w) + \alpha \xi_l^{(m_k)*} \quad (5)$$

(Step6) 逆離散フーリエ変換

透かし入りブロック $f'_{p_x, p_y}(u, v, w)$ をそれぞれ三次元逆 DFT し、透かし入り動画像を得る。

4.2 提案法による抽出手順

(Step1) ブロック分割

サイズ $X \times Y \times Z$ の透かし入り動画像から長さ T フレーム分を切り出し、 $M \times M \times T$ の大きさのブロックに分割し、透かし入りブロック $I''_{p_x, p_y}(x, y, t)$ を得る。

(Step2) 離散フーリエ変換

$I''_{p_x, p_y}(x, y, t)$ を三次元 DFT し、DFT 係数 $f''_{p_x, p_y}(u, v, w)$ を求める。

(Step3) 二つの系列の相関値の差の算出

$f''_{p_x, p_y}(u, v, w)$ の、4.1 節の (Step5) で用いたのと同じ位置の係数値を $f''_{p_x, p_y}(u_1, v_1, w), f''_{p_x, p_y}(u_2, v_2, w), \dots, f''_{p_x, p_y}(u_l, v_l, w), \dots, f''_{p_x, p_y}(u_L, v_L, w)$ とする。式 (6)、式 (7) により、 $\{f''_{p_x, p_y}(u_l, v_l, w)\}$ と複素数列 $\xi^{(0)}$ の相関値 $\lambda_k^{(0)}$ と、 $\{f''_{p_x, p_y}(u_l, v_l, w)\}$ と複素数列 $\xi^{(1)}$ の相関値 $\lambda_k^{(1)}$ を計算し、 $\lambda_k^{(0)}$ の絶対値 $|\lambda_k^{(0)}|$ と $\lambda_k^{(1)}$ の絶対値 $|\lambda_k^{(1)}|$ を求める。ここで、 $k = (p_y \times \frac{X}{M} + p_x) \times 10 + w$ である。

$$\lambda_k^{(0)} = \frac{1}{2L} \sum_{l=1}^L f''_{p_x, p_y}(u_l, v_l, w) \xi_l^{(0)*} \quad (6)$$

$$\lambda_k^{(1)} = \frac{1}{2L} \sum_{l=1}^L f''_{p_x, p_y}(u_l, v_l, w) \xi_l^{(1)*} \quad (7)$$

そして、 $\|\lambda_k^{(0)} - \lambda_k^{(1)}\|$ を算出する。

(Step4) 相関値の差が最大るとき透かしビットを抽出

切り出す T フレームを 1 フレームずつずらして (step1) (step2)(step3) を行い、計 $(Z - T + 1)$ 回 $\|\lambda_k^{(0)} - \lambda_k^{(1)}\|$

を求める。 $\|\lambda_k^{(0)} - \lambda_k^{(1)}\|$ が最大となるとき、 $m_k \in \{0, 1\}$ を式 (8) に従って透かしビットとして抽出する。

$$m_k = \begin{cases} 0 & (|\lambda_k^{(0)}| > |\lambda_k^{(1)}|) \\ 1 & (|\lambda_k^{(0)}| \leq |\lambda_k^{(1)}|) \end{cases} \quad (8)$$

4.3 時間同期外しによる影響

透かし入り動画像に対し時間シフト Δt が与えられたとき、DFT の性質から同一の時間周波数平面上の DFT 係数には等しい位相変位 $\Delta\theta = 2\pi\Delta t/T$ (T は時間周波数に対応する周期) が加わり、結果、係数値 f' は $f'' = f' e^{j\Delta\theta}$ へと変化する。

検出時に用いる DFT 係数列を f'' とし、 f'' と $\xi^{(m_k)}$ の相関値 λ_{m_k} を計算する。 f'' に $\xi^{(m_k)}$ が埋め込まれている場合、

$$\begin{aligned} \lambda_{m_k} &= f'' \cdot \xi^{(m_k)*} \\ &= (f + \alpha \xi^{(m_k)}) e^{j\Delta\theta} \cdot \xi^{(m_k)*} \\ &= (f \cdot \xi^{(m_k)*} + \alpha |\xi^{(m_k)}|^2) e^{j\Delta\theta} \end{aligned} \quad (9)$$

となる。ここで、 $\xi^{(m_k)*}$ は $\xi^{(m_k)}$ の各要素の共役複素数からなるベクトルであり、「 \cdot 」はベクトルの内積を表す。 f と $\xi^{(m_k)}$ が独立で L が十分大きければ、 $f \cdot \xi^{(m_k)*}$ の期待値は 0 となり、

$$\lambda_{m_k} \approx \alpha |\xi^{(m_k)}|^2 e^{j\Delta\theta} \quad (10)$$

となる。しかし異なる $\xi^{(m_k)}$ が埋め込まれている場合、 λ_{m_k} はほぼ 0 になるため、 λ_{m_k} の絶対値が大きい $\xi^{(m_k)}$ に対応する透かしビットが埋め込まれていると検出できる。

5 実験と考察

5.1 実験条件

実験には、704 × 480 画素、8Mbps、29.97fps、450 フレームの m2v 形式の動画像 susie, flower garden, table tennis[4] を ffmpeg[5] というツールを用いて 8Mbps、30fps で MPEG 圧縮し、MPEG4 形式にしたものを原動画像として用いた。動画像 susie は物体の動きが小さいという特徴を持ち、動画像 flower garden はテクスチャが細かいことや画面全体がパンするという特徴を持ち、動画像 table tennis はシーンチェンジを含み、物体が激しく動くという特徴を持つ。m2v 形式とは MPEG2 の動画像ファイルから映像部分のみをファイルにした形式であり、音声は含まれていない。以下の実験では $M = 128$ 、 $T = 32$ 、 $L = 1023$ とした。以下、長さ T のフレームを一つのフレームセットと呼ぶ。埋め込みには輝度成分を用いた。 $W = 10$ とし、埋め込み対象となる空間周波数領域は $16 \leq u_l \leq 47$ 、 $16 \leq v_l \leq 47$ とした。埋め込むビッ

表 1: 透かし入り動画の平均 PSNR[dB]

Tab.1 Average of PSNRs [dB] of watermarked frames

susie	flower garden	table tennis
38.95	32.87	35.18

トは $K = 150$ ビットとした. 透かしの性能評価には式 (11) で表される抽出率を用いた.

$$\text{抽出率} = \frac{\text{正しく抽出されたビット数}}{\text{埋め込まれたビット数}} \times 100(\%) \quad (11)$$

埋め込み強度は, 先頭から 1 つのフレームセットに対して強度 $\alpha = 1000, 2000, 5000, 10000$ で埋め込み, 動画を 8Mbps で再圧縮してから抽出した際に抽出率が 100% でなおかつ画質の最も良かった $\alpha = 5000$ を採用した.

画質の客観的評価には, 式 (12) に示す PSNR を, 実験に用いた総フレームで平均をとった, 平均 PSNR を用いた.

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{255^2}{\text{MSE}} \quad [\text{dB}] \quad (12)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{3XY} \sum_{i=1}^{3XY} (\text{org}_i - \text{emb}_i)^2 \quad (13)$$

ここで, org_i は原動画のフレームの RGB 色成分の画素値, emb_i は透かし入り動画のフレームの RGB 色成分の画素値である. PSNR の値が大きいほど画質の劣化が小さい.

5.2 透かし入り動画の画質

図 2 に原動画と透かし入り動画の 1 番目のフレームを示す. 主観的には, flower garden と table tennis については透かしの埋め込みによる画質の大きな劣化は見られなかったが, susie については注意して見るとテクスチャ状のノイズが知覚された. これは susie が動きの少ない動画であり, 同じようなフレームが継続するため, 他の動画に比べてノイズが人間の目に知覚されやすかったといえる. 表 1 に 150 ビット埋め込み後に 8Mbps で再圧縮した透かし入り動画の平均 PSNR を示す. flower garden や table tennis は susie よりも平均 PSNR が低いが, 主観的な評価では susie よりもノイズを知覚しにくかった. これは時間方向の周波数領域を埋め込みに用いているので, 人間の目はゆるやかな変化に鈍いため劣化が知覚できないのだと考えられる.

5.3 MPEG4 圧縮後の透かし入り動画に対する抽出実験

透かしの埋め込んだ後に MPEG 圧縮を施した動画に対して抽出実験を行った. 透かし入り動画の再圧縮にはビットレート 8Mbps, 6Mbps, 4Mbps, 2Mbps を用

表 2: MPEG4 圧縮後の抽出率 [%]

Tab.2 Extraction rate [%] after MPEG4 compression

video	bitrate	extraction rate [%]
susie	8Mbps	100
	6Mbps	100
	4Mbps	100
	2Mbps	99.3
flower garden	8Mbps	100
	6Mbps	100
	4Mbps	100
table tennis	2Mbps	96.0
	8Mbps	100
	6Mbps	100
	4Mbps	100
	2Mbps	100

いた. 表 2 に抽出率を示す. 2Mbps で再圧縮した際の susie と flower garden については抽出誤りが生じたが, それ以外の場合については全て 100% の抽出率が得られた. 抽出誤りが生じたケースについても, 95% 以上の高い抽出率が得られた. スマートフォンでの撮影処理を挟まない状況下において, 提案法を用いて高い抽出率で透かしを取り出せることがわかった.

5.4 iPhone で撮影した動画に対する抽出実験

透かし入り動画を PC のモニタに映し, iPhone で録画撮影した動画に対して抽出実験を行う.

5.4.1 実験手順

(Step1) 録画撮影

PC のモニタに透かし入り動画を映し, iPhone を固定して録画撮影を行う. 録画後に iPhone 内に保存される動画は 1920×1080 画素, 29fps の mov 形式の動画である.

(Step2) 射影変換

iPhone で録画撮影して iPhone 内に保存された動画に映っている透かし入り動画の領域に射影変換を施し, 補正を行う. 射影変換は式 (14), 式 (15) で表される.

$$u = \frac{gx + hy + i}{mx + ny + 1} \quad (14)$$

$$v = \frac{jx + ky + l}{mx + ny + 1} \quad (15)$$

ここで, x は変換前の X 座標, y は変換前の Y 座標, u は変換後の X 座標, v は変換後の Y 座標を表す. 本実験では, コーナー検出処理ではなく目視で透かし入り動画の領域の 4 隅の点を定める. ペイントツールで録画した動画



(a) Original susie



(b) Original flower garden



(c) Original table tennis



(d) Watermarked susie



(e) Watermarked flower garden



(f) Watermarked table tennis

図 2: 原動画と透かし入り動画の 1 番目のフレーム
Fig.2 The 1st frames of original videos and watermarked videos

の最初のフレームを開き, 肉眼で見て決定した 4 隅の座標 (278, 68), (1667, 93), (1709, 1034), (254, 1066) の透かし入り動画の領域を座標 (0,0), (704,0), (704,480), (0,480) の画像へ変換する. この処理を全てのフレームに施す.

(Step3) 抽出処理

提案した抽出手順に従って, 射影変換を用いて補正した後の動画像に対して抽出処理を行う.

5.4.2 抽出結果

表 3 に抽出率を示す. 704×480 画素の動画像 3 種類についていずれも 95% 以上の抽出率が得られた. MPEG 圧縮後の抽出率に比べて低くなっているのは, iPhone による再撮影時の色合いの変化やフレームレートの変更の影響によるものだと考えられる. また, 射影変換によって補正した後のフレーム画像には, 画像の最上部の中央付近に動画像再生プレイヤーの枠が一部たゆんで表示されていた. これを含んだ動画像に対して抽出実験を行ったため抽出誤りが生じたのではないとも考えられる.

文献 [2] の方法を目的のサービスに適用する場合, 録画した動画像の先頭から 1 フレームセット分を抽出対象とすることになる. たまたま, そのフレームセットがシーンチェンジや激しい動きの多い部分を含んでいる場合, 抽出率が低くなることが考えられる. これに対して, 文献 [2] の方法では, 時間軸方向のブロックを加算重畳したものに抽出処理を施すことで抽出率が向上するとあ

表 3: iPhone で撮影した動画像の抽出率 [%]
Tab.3 Extraction rate[%] of recorded videos

video	extraction rate[%]
susie	99.3
flower garden	95.3
tennis	98.7

た. しかし, 抽出の際に加算重畳を行うためにはフレームセット 2 つ以上の長さの動画像が必要となる. 提案法では, フレームセット 1 つ以上の長さの動画像に対して適用可能であるのでリアルタイム処理に向いている. 処理時間に関しては 1 つのフレームセット分の抽出処理に約 7 秒程かかっている. リアルタイム処理への応用を考えると処理時間の短縮が必要である.

6 おわりに

本稿では, 文献 [2] の時間同期外しに耐性をもつ電子透かし法を埋め込むビット数を増やすために複数の周波数平面を用いた埋め込み法に変更し, また, ブロックごとに埋め込むビット 0, 1 に対応する系列と DFT 係数との相関値の差の大きさが最大になる所を動画像全体を用いて探索する抽出法を提案した. また, 提案した抽出法を用い, 実際にスマートフォンで撮影した透かし入り動画像を補正した動画像に対して抽出実験を行った. 704×480 のサイズの 3 種類の動画像について 95% 以上の抽出率

を得ることができ、モニタに映った透かし入り動画像から透かしを取り出して情報を得るサービスに対する提案法の有用性を示した。今後の課題としては、リアルタイム処理へ応用することを考慮しての抽出処理にかかる時間の短縮や、テレビ放送に用いられる HD 画質の動画像に透かしを埋め込み、透かしを取り出せるようにすることなどがあげられる。

参考文献

- [1] 松井甲子雄, “電子透かしの基礎,” 森北出版, 1998.
- [2] 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,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J90-D, no.7, pp.1755–1764, 2007.
- [3] 齋藤真吾, 山口和彦, “ランプ型秘密分散法を利用した動画像向け電子透かし,” 信学技報 IEICE Technical Report IT2008-105, ISEC2008-163, WBS2008-118(2009-3), pp.409–414, 2009.
- [4] <http://bmerc.berkeley.edu/ftp/pub/multimedia/mpeg/mpeg2/conformance-bitstreams/Tektronix/>
- [5] ffmpeg, <http://ffmpeg.org/>