

光透かしの高速検出方式

石川 安則[†] 上平 員丈^{‡†} 谷中 一寿[‡]

[†] 神奈川工科大学ヒューマンメディア研究センター

[‡] 神奈川工科大学情報学部

〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野 1030

E-mail: [†] yasu@yit-pe.com

あらまし 光透かしは、空間変調された照明光に透かし情報を含ませて実物体に照射しこれをデジタルカメラ等で撮影することで被写体の画像に透かし情報を埋め込むことができる技術である。対象の実物体に何ら手を加える必要が無くまた撮影手段に特別な仕掛けも必要としない。われわれは、これまでに透かし画像が見えにくい程度の埋め込み強度において 100%に近い検出精度が得られる方式を実証してきた。従来方式では、光透かしの実時間での処理が難しかったが、実用的な利用形態を考慮すると検出処理の高速化・自動化が必須である。本報告では、検出処理の高速化・自動化について検討を行った結果と、光透かし情報を時系列で埋め込んだ動画像からの検出結果について報告する。

キーワード 電子透かし, 光透かし, 空間変調光, 照明 (可視) 光通信

Fast Detection Technique of Optical Watermarking

Yasunori ISHIKAWA[†] Kazutake UEHIRA^{‡†} and Kazuhisa YANAKA[‡]

[†] Human Media Research Center, Kanagawa Institute of Technology

[‡] Faculty of Information, Kanagawa Institute of Technology

1030 Shimo-Ogino, Atsugi-shi, Kanagawa, 243-0292 Japan

E-mail: [†] yasu@yit-pe.com

Abstract Optical watermarking is a novel technology with which the images of real objects that are usually difficult to modify physically can contain invisible digital watermarking information, by using spatially modulated illumination that contains invisible watermarking information. We have proved that the detection accuracy near 100% is acquired with weak intensity of embedding watermark of which embedded watermarking image cannot easily be seen. In our previous study, real time processing of detection was difficult, although the improvement in the speed and automation is required when the practical forms of use are considered. In this report, we explain that fast and automated processing technique of detecting optical watermarking and the results of experiments in applying to moving picture that are embedded with time domain sequential information.

Keyword Digital watermarking, Optical watermarking, Spatially modulated illumination, Visible light communication

1. はじめに

光透かし方式は、照明光に透かし情報を含ませることにより実物体を撮影した画像データに透かし情報を埋め込むことができる技術であり、従来の電子透かし技術とは異なる特徴的性質を有している。これにより、デジタルカメラ等の撮像手段に何ら特別な仕掛けを必要とせずに画像データに透かし情報を埋め込むことができ、物理的に手を加えることが難しい美術館の芸術作品など、あらゆる実在する物体を撮影した画像データに透かし情報を埋め込むことが可能である。この結果、美術品や印刷物などの違法撮影防止など画像情報セキュリティ応用の他、不可視性を持つ一般的な情報

通信手段としての応用が考えられる。これまでの実証研究において、離散コサイン変換 (DCT), ウォルシュ・アダマール変換 (WHT), ハールウェーブレット変換 (Haar DWT) などの直交変換を用いて高い周波数成分に透かし情報を埋め込むことにより、透かし画像が見えにくい程度の透かし埋め込み強度において 100%に近い検出精度が得られることを示した。さらに、ハール DWT を利用して QR コード画像を埋め込む実験、最適でない撮影条件を考慮した幾何学歪み耐性を持つ方式の提案、立体物への適用可能性の提案など、実用化に向けた検討を行ってきた[1]。しかしながら、これまでの実証研究においては、処理の実時間性を重視し

ておらず、目視による手作業を含む逐次処理により検証を行ってきており、今後の実用システム構築に向けた処理の高速化・自動化が課題であった。特に、光透かし方式の大きな特徴である時系列情報の埋め込み、すなわち動画像応用においては、実時間処理が強く求められる[4]。ここでは、こうした課題の解決方法として、(1)撮影した画像データからの透かし画像照射領域の自動切り出し、(2)幾何学歪みの自動補正、という2つの課題について検討した結果を述べ、今後の実用化に向けた状況を説明する。

2.光透かし方式の概要

本節では、これまで行ってきた実証研究の結果について概要を説明する。

2.1.光透かしの生成と検出

照明光への透かし情報の重畳方法として、直交変換を利用して画像データの空間周波数領域における高周波数成分に透かし情報を埋め込む方法を用いた。すなわち、まず透かし情報を埋め込む画像の全体を $N \times N$ 画素のブロックサイズに分割する。分割した各ブロックの平均輝度値は、空間周波数領域における直流成分 (DC 値) で定めることができる。透かし情報は、水平および垂直方向の最高周波数成分 (HC 値) を利用して埋め込む。ここでは、HC 値の極性に従って 1 ビットの透かし情報を埋め込むようにしている。すなわち、埋め込む情報が “1” であればそのブロックの HC 値を正值とし、埋め込む情報が “0” であれば HC 値を負値とする。HC 値の大きさは、実空間における画素値の平均値 (DC 値) からの変動幅となり、透かしの埋め込み強度を制御するとともに透かしの不可視性に影響を与える。DC 値と HC 値以外の成分値 (交流成分) は、すべて “0” とする。このように各成分値を与えた空間周波数成分ブロックに対し、2次元逆直交変換を施して得られた実空間における $N \times N$ 画素ブロックの各画素値を透かし画像として用いる。DCT を用いる場合は、以下の式 (1) を用いる。

$$f_{i,j}(x,y) = \sum_u \sum_v C(u)C(v)F_{i,j}(u,v) \cos\left\{\frac{(2x+1)u\pi}{2N}\right\} \cos\left\{\frac{(2y+1)v\pi}{2N}\right\} \quad (1)$$

ここで $C(u)$ および $C(v)$ は、以下のように与えられる。

$$C(u) = \begin{cases} 1 & (u=0) \\ \sqrt{2} & (u \neq 0) \end{cases}, \quad C(v) = \begin{cases} 1 & (v=0) \\ \sqrt{2} & (v \neq 0) \end{cases}$$

また、WHT を用いる場合は、以下の式 (2) を用いる。

$$f_{i,j}(x,y) = \frac{1}{N} \sum_u \sum_v F_{i,j}(u,v) wh(x,u) wh(y,v) \quad (2)$$

を用いる。ここで、 $wh(i,j)$ は、 $N \times N$ 要素を持つウォルシュ・アダマール行列を表わす[2]。

一方、直交変換として Haar DWT を用いる場合は、1 階層の多重解像度画像において LL 成分画像全体を DC 値とし、HH 成分画像に $n \times n$ 係数ブロック毎に HC 値を与える。すなわち、埋め込む情報が “1” であれば HC 値を正值とし、埋め込む情報が “0” であれば HC 値を負値とする。HL および LH 成分画像は、すべて “0” を与える。これを逆 Haar DWT により実空間領域に変換して光透かしの画像データとする。

輝度が概ね均一な光源下においてデジタルカメラ等で撮影した画像データは、一般に空間周波数スペクトルは、水平・垂直方向とも低周波数領域に偏っていると考えられる。一方、光透かしを含む照明光は、直流成分 (DC 値) と水平・垂直方向の最高周波数成分 (HC 値) 以外の周波数成分は、ゼロである。このため、光透かしを含む照明光で照射された被写体の反射光の輝度分布は、低周波数成分に関しては、被写体の持つ空間周波数スペクトルが支配的であるのに対して、HC 値に関しては、透かし画像データの持つ周波数成分が支配的であると考えられる。そこで、撮影された画像データに対して、2次元直交変換を施すことにより、周波数空間における成分値から得られる HC 値は、光透かしに埋め込んだ HC 値を保存していると考えられることができる。DCT を用いる場合の検出は、以下の式 (3) による。

$$F_{i,j}(u,v) = \frac{C(u)C(v)}{N \times N} \sum_x \sum_y f_{i,j}(x,y) \cdot \cos\left\{\frac{(2x+1)u\pi}{2N}\right\} \cos\left\{\frac{(2y+1)v\pi}{2N}\right\} \quad (3)$$

$C(u)$ および $C(v)$ は、式 (1) と同じである。同様に、WHT を用いる場合は、次の式 (4) による。

$$F_{i,j}(u,v) = \frac{1}{N} \sum_x \sum_y f_{i,j}(x,y) wh(u,x) wh(v,y) \quad (4)$$

$wh(i,j)$ は、 $N \times N$ 要素のウォルシュ・アダマール行列である。式 (3) および (4) において、 $F_{i,j}(N-1, N-1)$

成分が HC 値を保持していると考えられるので、この値の正負を評価することにより埋め込んだ 1 ビットの情報を復元することができる。Haar DWT を用いる場合は、順変換により HH 成分画像を求め、 $n \times n$ 係数ブロック毎に係数の平均値を求めて HC 値とみなし、その正負を評価すれば、同様に 1 ビットの情報を復元することができる。

2.2.実証実験の結果

光透かし方式の実用性評価のため、表 1 に示す諸条件を用いて実証実験を行った。なお、検出率の評価においては、埋め込んだ光透かし情報が被写体の表面反射率が低い部分において喪失してしまう可能性をさけるため、1 ブロックに 1 ビットの情報を埋め込む「1

表 1 評価実験条件

光源	DLP プロジェクタ 解像度 (800×600 画素)
被写体	SCID N2, N5, N6 (A4 版プリント)
カメラ	解像度 (4288×2848 画素) ズーム (70mm)
撮影距離	1.3m (レンズ-被写体間距離)
画像形式	非圧縮 (TIFF), RGB (各 8bit)
透かし画像	生成方法 (DCT, WHT, Haar DWT) 生成データ (128×128 画素) 被写体上 (約 105mm×105mm) 撮影画像データ (約 850×850 画素)
評価項目	検出率, PSNR, 主観評価, JPEG 圧縮耐性 (1/20 圧縮程度)
評価パラメタ	DC=150 (固定) HC=2, 5, 7, 10, 15, 20, 25

ブロック法」の他に、適当な距離だけ離れた複数のブロックに同じビットを埋め込み、検出時に多数決により読み出し情報を決定する「多数決法」の 2 つの検出方法を用いた。検出率の評価結果は、主観評価において透かし画像のパターンが見えにくい透かし埋め込み強度 (HC=5) 以上の強度において、3 ブロックの多数決法による評価では、ほぼ 100% の正解率であり、1 ブロック法でも 90% 以上の正解率であった。光透かしによる画像品質劣化の評価は、PSNR の測定と主観評価を行った。PSNR は、上記の HC=5 の条件では、35dB 以上であった。主観評価実験は、6 名の評価者が約 2m の距離から 2～3 秒程度観察して行い、HC=5 の条件では、全員が透かし画像のパターンを認められないという評価結果であった。また、1/20 程度の圧縮率で JPEG 圧縮を行った画像と非圧縮の画像による評価を比較したが、ほとんど差は無かった。さらに、DCT と WHT との差異は、ほとんど認められないという結論であった。

そのほか、Haar DWT を用いて QR コードの画像パターンを埋め込む実験を行い、QR コードの誤り訂正能力を用いて光透かしの誤り耐性評価を行った[3]。また、撮影時の幾何学的歪みの補正や立体物に照射した光透かし画像の検出可能性など、実利用環境に即した評価実験を実施した。

3. 光透かし検出の自動化処理

本節では、撮影された画像データから埋め込まれた光透かし情報を抽出する処理の自動化について検討した結果について説明する。

3.1. 透かし画像領域の特定

これまでの実証実験においては、光透かしの照射・

検出実験は、2.1 節の方法で生成した透かし画像を被写体に照射して透かし画像領域とし、その領域外は相対的に低い輝度値を有しているため、撮影した画像データから輝度差を利用し透かし画像領域を切り出すことができる。生成した透かし画像は、矩形領域を持つ画像であり、頂点の 1 つとその対角線上にある頂点の合計 2 つの頂点座標で領域を特定できる。一方、撮影された光透かしを含む画像データにおける透かし画像領域は、一般に撮影時の歪みを含んでいる。これをデジタルカメラ等の光学系のみ依存する幾何学的歪みであると考え、透かし画像領域は、遠近法的歪みを有する四辺形とみなして良い。従って、この四辺形を特定するためには、4 つの頂点座標を求めればよい。ここでは、以下の手順により 4 頂点の座標を求めた。

- (1) 透かし画像領域の概ね中心点を通る水平線上の画素値を計測し、平均値を求めてこれを閾値とする。
- (2) 撮影画像データの 1 つの端点からスタートし、斜め 45° の線にある画素値を順次走査し、(1) の閾値を超える画素が 2 つ続く最初の点を 1 つの頂点座標とする。
- (3) 撮影画像データにおける他の 3 つの端点についても、(2) と同様の走査を行い、それぞれの頂点を求める。
- (4) x 座標および y 座標とも最外郭の画素から 1 画素だけ内側の点を頂点座標とするよう x または y 座標値を補正する。

3.2. 幾何学的歪みの補正

一般に、歪みのない座標系 (x, y) から幾何学的歪みを有する座標系 (x', y') への変換は、(5) 式で表わされる。

$$x' = h_1(x, y), \quad y' = h_2(x, y) \quad (5)$$

幾何学的歪みが遠近法的歪みであれば、この変換は、次の (6) 式に示す 1 次式で表わすことができる。

$$x' = ax + by + d, \quad y' = dx + ey + f \quad (6)$$

図 1 に示すように、任意の四辺形から元の矩形を復元するには、いずれかの対角線で 2 つの三角形に分割し、三角形ごとに (6) 式を適用して変換を行えば良い。すなわち三角形における変換前の頂点座標と変換後の頂点座標の合計 6 つの座標値を求め、(6) 式に代入して 6 連立 1 次方程式を解けばすべての係数を求めることができる。ここで、変換後の格子点座標値 (x, y) から求まる変換前の座標値 (x', y') は、一般には整数にならないので、近隣の画素を利用して濃度値を決定する必要がある。本報告では、図 2 に示す隣接 4 点の画素値から線形補間を行う「バイリニア補間法」を用いて濃度値を求める方法を用いた[11]。

このような方法で幾何学的歪み補正を行った画像は、被写体に照射された矩形領域の光透かし画像を正

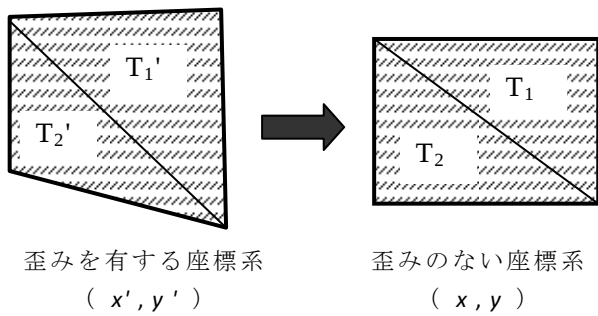


図1 幾何学的歪みの補正

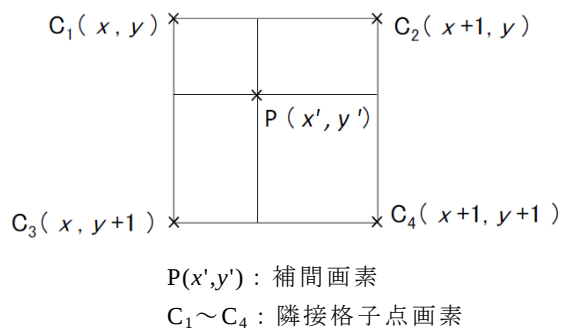


図2 隣接4画素からの線形補間（バイリニア補間法）

しく復元していると考えられる．透かし情報の検出は，2.2 節で概説したが，一端 256×256 画素に縮小しグレイスケール画像に変換した後，2次元直交変換を施して HC 値の復元を行った．

4.時系列情報の埋め込み実験

照明光に埋め込む透かし情報を時間的に変化させた時系列情報として被写体に照射し，これをビデオカメラなどで動画像データとして取り込めば，静止画と同様な処理を行って時系列情報を検出できると考えられる．そこで以下のような手順で実験を行った．

まず，時間領域における時系列透かし画像データとして， 8×8 画素ブロックが 16×16 ブロックからなる 128×128 画素のフレームを生成する．2 値情報として "1" と "0" の情報を埋め込んだ画素ブロックをチェッカーボードのように交互に配置する．図 3 に，DCT を用いて生成した "1" と "0" の情報を埋め込んだ画素ブロックの拡大画像を示す．"1" と "0" の埋め込み位相を交代させることにより，"Even" パターンフレームと "Odd" パターンフレームを生成し，2 つのフレームを交互に連続して接続し 10fps（フレーム/sec）の動画像データを生成する．全体で 100 フレームを接続することにより，10 秒間の動画像データとなる．図 4 に "Even" パターンフレームと "Odd" パターンフレーム画像の概念を示す．この

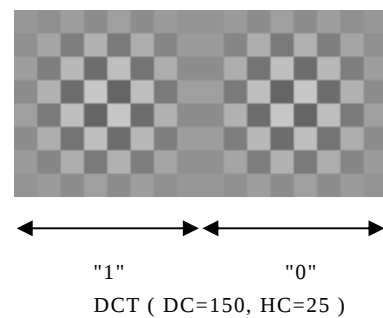


図3 1ブロックの透かし画像拡大図

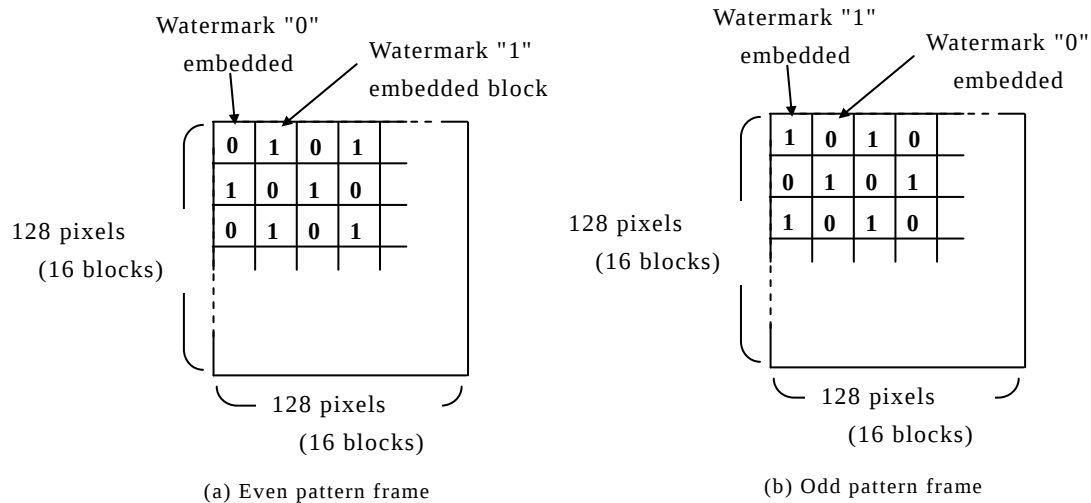


図4 透かし埋め込みパターンの概念図

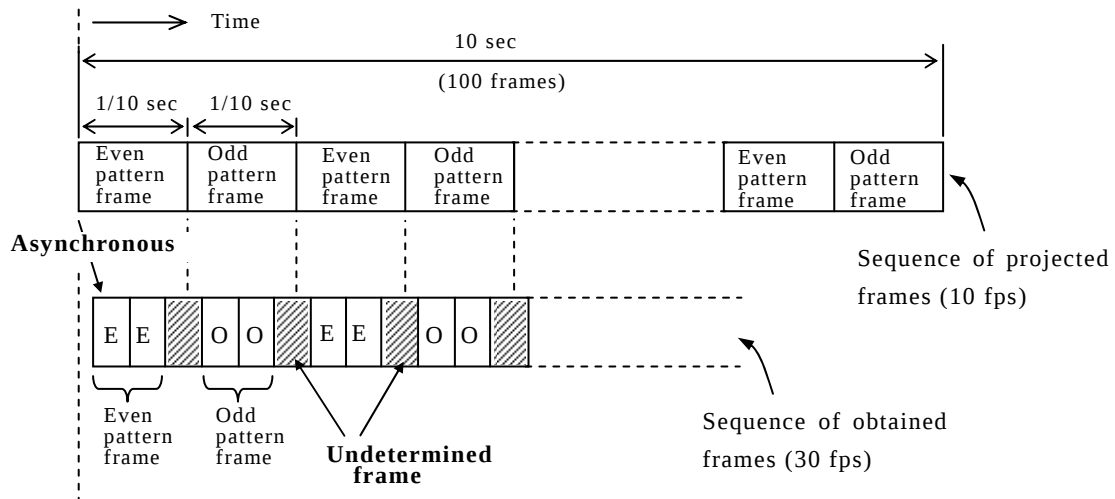


図5 光透かし照射と取り込みのフレームシーケンス説明図

動画像データを 800×600 画素の解像度を持つ DLP プロジェクタに入力して被写体に照射して撮影を行った。動画像の撮影には、30fps の時間解像度を有し Motion JPEG 圧縮の動画像データが得られるミラーレス一眼デジタルカメラを使用した。撮影された動画像データは、30fps の時系列静止画データ（フレーム）に分離され JPEG 復号された後、それぞれのフレームから埋め込まれた透かし情報を抽出した。図5は、プロジェクタから照射される 10fps の透かし動画像データシーケンスとデジタルカメラで撮影される 30fps の動画像データシーケンスのタイミングを説明する図である。

プロジェクタから照射される動画像データとデジタルカメラで撮影される動画像データは、時間軸で同期していないため、分離された時系列静止画データの連続する3つのフレームのうち1フレームは、照射される動画像データのフレームの切り替わり境界にまたがっており正しいデータが取り込まれていない可能性がある。このため、検出精度評価は、3つの連続するフレームのうち最も検出率の良いフレームの値を用いて行うことにした。

実験は、従来と同様に標準画像を A4 サイズにプリントした画像を被写体とし、DC 値を 150 に固定して HC 値を実験パラメタとして評価を行った。被写体上に照射された透かし画像領域は、約 $105\text{mm} \times 105\text{mm}$ のサイズであり、これを 1280×780 画素の解像度を持つミラーレス一眼デジタルカメラで撮影した。42mm のズームを用い、被写体とカメラとの距離は、約 70cm であった。撮影された画像データにおける透かし画像領域の画素サイズは、約 530×530 画素であった。このようにして撮影された動画像データを、第3節で説明した手順を用いて処理を行い、検出精度を評価した。

図6および図7は、撮影された動画像データの内の

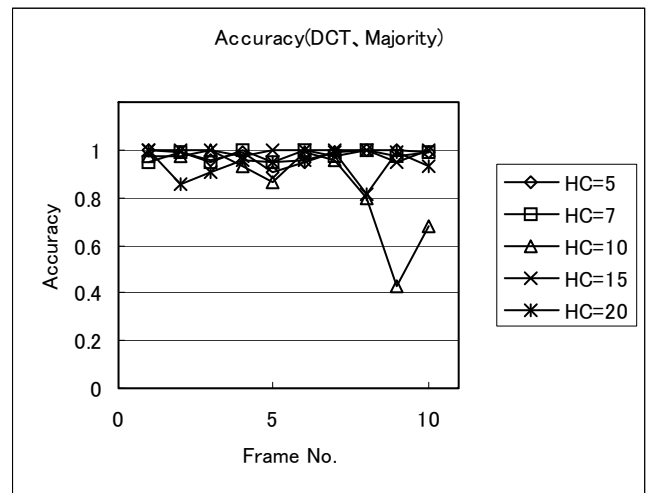


図6 時系列の検出精度（DCT）

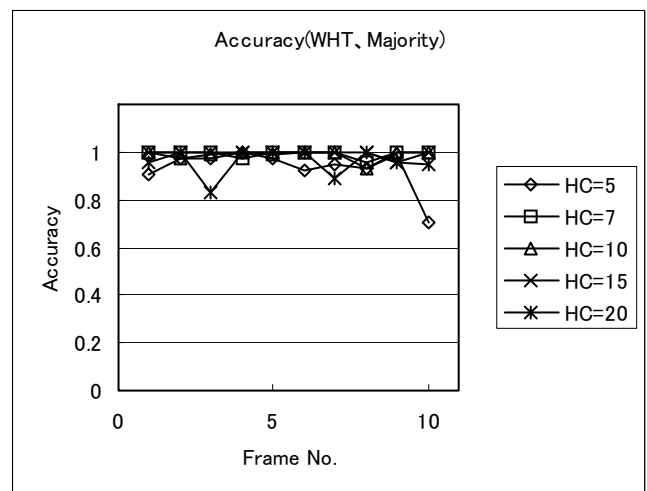


図7 時系列の検出精度（WHT）

連続する 10 フレームの検出率を時系列で示したものである。透かし画像の生成法として、図 6 は DCT を用い、図 7 は WHT を用いている。いずれも 3 ブロックの多数決法による検出率の評価値である。これらから、HC 値の大きさすなわち透かしの埋め込み強度による検出率の違いに相関はほとんど無いと考えられる。また、同一の HC 値においてもフレームにより検出率が大きく異なる場合があることが分かる。

5.考察

図 6 および図 7 の結果は、従来の検討結果と異なる傾向を示していると言える。すなわち文献[4]においては、3 ブロックの多数決法による平均検出率は、HC=5 および 7 の時に 0.9 程度であり、HC=10 以上ではほぼ 1.0 の平均検出率であった。実験条件の差異としては、文献[4]では解像度 720×480 画素のデジタルビデオカメラを用いており、透かし画像領域の画素数は、約 300×300 画素であった。本報告では、ミラーレス一眼デジタルカメラを用いており、透かし画像領域の画素数は、これより大きい。この結果、HC=5 および 7 のような埋め込み強度が低い場合でも、検出率が 1.0 となるフレームも多く、撮像デバイスの画像品質としては十分な性能を有していると考えられる。HC=10 以上の条件においても、検出率 1.0 のフレームが多数あり、同様の性能を示していると言える。実際に撮影した動画画像データを観察すると、フォーカスボケを生じているフレームが多く見られ、これが検出率に影響していると考えられる。このように、撮像デバイスを光学系全体としてみた時に、オートフォーカスの性能（追従性）に差があるのが妥当である。今回の実験では、ズームレンズの焦点距離を望遠側の 42mm として行ったが、広角側とすれば被写体深度が大きくなり、フォーカスボケの影響が軽減できると考えられる。

6.おわりに

本報告では、光透かし画像の検出処理における自動化・高速化について検討を行い、自動化処理のアルゴリズムを実装し、さらにこれを用いて時系列データを埋め込んだ光透かし動画画像データの検出実験を行った。この結果、基本的な検出能力としては十分な性能を有しているが、実験で用いたミラーレス一眼デジタルカメラのオートフォーカス性能による検出率の不安定性のあることが分かった。これに関しては、オートフォーカス性能の影響が少ない広角の焦点距離において取り込み画像の画素数が小さくなる場合の検出性能評価が今後の課題である。また、実用システムでの運用を考慮した動画画像データ検出における実時間性の評価も今後の課題である。さらに、より実用的な応用に向け

ては、透かし埋め込み領域を局所的でなく、広範囲に埋め込みを行って領域を自動抽出できる方式の検討が必要であると考えられる。

文 献

- [1] 石川安則, 上平員丈, 谷中一寿, “光透かしを用いた符号情報埋め込み技術”, 画電誌, vol.40, no.4, pp.707-712, Jul. 2011.
- [2] Y. Ishikawa, K. Uehira and K. Yanaka, "Practical evaluation of illumination watermarking using orthogonal transform", J. Display Technology, Vol.6, No.9, pp.351-358, Sept. 2010.
- [3] Y. Ishikawa, K. Uehira and K. Yanaka, "Embedding Watermarking into Real Object Image Data Using QR-code and Optical Watermarking Technique", Proc. ICIP2011, pp.34-38, Aug. 2011.
- [4] Y. Ishikawa, K. Uehira and K. Yanaka, "A Technique of Time Domain Sequential Data Embedding into Real Object Image Using Spatially Modulated Illumination", Proc. ISSPIT2011, pp.62-66, Dec. 2011.
- [5] 棟安実治, "情報伝達のための電子透かし", 信学基礎・境界ソサイエティ, Fundamentals Review, Vol.2, No.2, pp.53-62, Oct. 2008.
- [6] G. C. Langelaar, I. Setyawan and R. L. Lagendij, "Watermarking digital image and video data", IEEE Signal Processing Magazine, Vol.17, No.5, pp. 20-46, 2000.
- [7] J. Haitsma and T. Kalker, "A Watermarking Scheme for Digital Cinema", Proc. ICIP2001, Vol.2, pp. 487-489, 2001.
- [8] S. G. Narasimhan, S. J. Koppal, and S. Yamazaki. Temporal Dithering of Illumination for Fast Active Vision. Proc. E CCV: 830-844, 2008.
- [9] 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", 映情学誌, Vol.60, No.11, pp.1778-1788, Nov. 2006.
- [10] 越前功, 合志清一, 山田隆行, "人間とデバイスの感度の違いを利用した映像盗撮防止技術について", 画電誌, Vol.39, No.4, pp.494-499, Jul. 2010.
- [11] 昌達慶仁, "詳解画像処理プログラミング", ソフトバンククリエイティブ, pp.207-225, Mar. 2008