

空間的に変調された照明光を用いた電子透かし技術

石川 安則*, 上平 員丈*, 谷中 一寿*

目 次

原著論文

- 空間的に変調された照明光を用いた電子透かし技術……………石川安則, 上平員丈, 谷中一寿…384(2)
 一对の開口電極による導電性トナー雲制御……………李 凱, 星野坦之…393(11)

Imaging Today

「電子写真定着技術」

- Introduction……………美才治隆, 木村正利, 永戸一志, 竹内達夫…398(16)
 IH 定着技術……………木野内聡, 高木 修…399(17)
 QSU 定着技術……………安田恵三…406(24)
 SURF と ODF……………大塚康正, 奥田幸一…411(29)
 FBNF 定着技術……………上原康博…417(35)
 超高速連続帳票用モノクロレーザープリンターの定着プロセス技術
 ……………鈴木貴志, 澤畑 昌, 小野寺健…424(42)

教育講座

- 画像処理技術入門—撮像から出力の最適化に向けて—(IV)……………大塚秀一…432(50)

会報……………446(64)

会告……………450(68)

電子投稿のお知らせ……………451(69)

投稿案内……………455(73)

日本写真学会誌の目次……………456(74)

日本印刷学会誌の目次……………457(75)

画像電子学会誌の目次……………458(76)

Journal of Imaging Science and Technology の目次……………459(77)

画像閑話

平成 21 年編集委員

編集委員長 北久保 茂 (日 本 工 大)

編集幹事 鈴 木 弘 治 (リ コ ー 所 属)

編集副委員長 前 田 秀 一 (王 子 製 紙) 永 戸 一 志 (東 芝)

編集委員 (※本号 Imaging Today 欄担当)

安 達 靖 (シャープ) 内 藤 裕 義 (大阪府大) 村 井 朝 (富士フイルム)
 北久保 茂 (日本工大) 中 山 信 行 (富士ゼロックス) 山 口 智 貴 (ユーテック)
 ※木 村 正 利 (富士ゼロックス) ※永 戸 一 志 (東 芝) 山 崎 弘 (コニカミノルタビジ
 黒 沢 俊 晴 (コンサルタント) 長 山 智 男 (リ コ ー) ネステクノロジーズ
 鈴 木 弘 治 (リ コ ー 所 属) ※美才治 隆 (リ コ ー) 山 下 春 生 (パナソニック)
 ※竹 内 達 夫 (キヤノン) 前 田 秀 一 (王 子 製 紙)

論 文

空間的に変調された照明光を用いた電子透かし技術

石川 安則*, 上平 員丈*, 谷中 一寿*

(2009.5.21 受理)

Digital Watermarking Technique Using Spatially Modulated Illumination

Yasunori ISHIKAWA*, Kazutake UEHIRA* and Kazuhisa YANAKA*

This paper describes a novel technology with which the images of objects with no copyright protection can contain invisible digital watermarking, using spatially modulated illumination. This technology enables the photographed image of non-electrical objects such as classical pictures in museums to contain digital watermarking, without any physical modifications to the objects themselves. We conducted experiments where one-bit binary data were embedded in one block that consisted of 8×8 pixels using the phase of the highest frequency component generated by DCT. The experimental results revealed that embedded data could be read out with almost 100% accuracy. This amply demonstrates the feasibility of the technology described in this paper.

Keywords: Digital watermarking, Illuminated digital watermarking, Spatially modulated illumination, DCT, Illegal photographing protection

照明光に透かし情報を含ませて絵画や印刷物など実物体の被写体に照射することにより, 被写体の画像情報とともに透かし情報を埋め込む方式を提案する。本方式によれば, 電子透かしを埋め込むことが困難であった美術館の古典画などの非電子画像に対し, 何ら物理的な改変を加えることなく, 撮影された画像には不可視の電子透かし情報が埋め込まれる。離散コサイン変換(DCT)を用いて, 8×8 画素毎に最高周波数成分の極性に従って1ビットの情報を埋め込んだ照明光を被写体に照射し, 透かし情報を抽出する検証実験を行った。照明光の輝度および照明光への透かし情報の埋め込み強度を変化させ, 検出率の評価と, 透かし埋込みによる画像品質劣化の評価, およびJPEG非可逆圧縮に対する耐性評価を行った。この結果, 品質劣化が認めにくい程度の埋め込み強度においてほぼ100%に近い検出率が得られ, これより本方式の有効性を示すことができた。

キーワード: 電子透かし, 光による透かし, 空間変調光, DCT, 違法撮影保護

1. はじめに

近年, インターネット等による大容量のデジタルコンテンツ流通が普及し, またパーソナルコンピュータやデジタルカメラによるデジタル画像の作成がデスクトップ環境で容易に行えるようになり, デジタルコンテンツ流通量が飛躍的に増大している。このような環境下において, イメージ情報の著作権保護が喫緊の課題となり, 透かし技術を利用したデジタルコンテンツ保護が注目されている。

デジタル画像データへの透かし埋め込み技術としては, 従来より様々な提案が行われている¹⁻⁴⁾。このうち, 画像の空間周波数領域を利用して, 人の視覚において歪みが検知しにくくまた

一般の画像情報においては空間周波数スペクトル密度が低い高周波数領域に透かしを埋め込む手法は, 画像処理における種々の変換や圧縮処理に対して耐性が強く, 実用性が高いとされる。この方式として, 離散コサイン変換(DCT)を用いる方式や離散ウェーブレット変換(DWT)を利用する方式が提案されている⁵⁾。応用分野としては, Digital Cinema Initiativesが策定しているDigital Cinema System Specifications⁶⁾や, 一般家庭などでテレビジョン画像からの再撮影を防止する方式の提案がある⁷⁾。さらに, 書店や図書館で印刷物を密かに撮影する行為に対して, 印刷画像に透かしを埋め込む提案がなされている⁸⁻⁹⁾。これらの方式は, いずれもデジタル画像データの段階であらかじめ電子的に透かし情報を埋め込んでおき, 表示なし印刷された画像を撮影した時に埋め込まれた透かし情報が検出でき, これにより違法撮影等から保護することができるというものである。しかしながら, たとえば美術館の絵画などデジタルデータから生成されない非電子画像に対しては, こうした

* 神奈川工科大学

〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野 1030

* Kanagawa Institute of Technology, 1030 Shimo-ogino, Atsugi-shi, Kanagawa, 243-0292 Japan

違法撮影等に対する有効な防御手段がない。本論文の研究では、このような非電子画像に対する著作権保護の方法として、光を用いて透かし情報を付加する方式を検討する。すなわち、透かし情報を埋め込んだ光を照明光として絵画など保護したい対象物に照射し、撮影した画像データに透かし情報を埋め込む。また埋め込まれた透かし情報が検出可能かどうかの実証実験を行う。

光を用いる方法として中村らの研究があるが¹⁰⁾、これは、スクリーン上に投影した保護対象の画像にさらに透かし画像を投影する方法であり（2重投影方式）、保護対象の画像情報と透かし情報がいずれも光で与えられるので、これらの和が光情報となる。従って情報の媒体が異なるだけで従来のデジタルデータにあらかじめ透かし情報を加える方法と本質的な点で同様と見なせる。一方、本論文の研究は、対象物が実物体であるため透かし情報と保護すべき対象物の情報の形態が異なり、この点で文献10)の方式とは異なる。

本論文では、まず光による透かしの基本原理を述べたあと、実現性を評価するために実施した実験とその結果を述べ、本方法の実現性と有効性について論ずる。

2. 光による透かし方式と生成方法および埋め込みデータの再生方法

2.1 方式

Fig.1は、方式の考え方を説明する図である。被写体には、透かし情報を含む光が照射される。ここで用いられる光源は、例えばプロジェクタのように2次元分布情報を照射光に含む光源を用いる。照明光の輝度分布は、通常の照明光と同様に均一に見えなければならない。照明光が当たる被写体表面における輝度分布は、被写体の表面反射率と照明光の輝度の積に比例する。被写体を撮影した画像情報は、被写体表面の輝度分布に従い不可視であるが透かし情報を含むので、撮影した画像情報に対して透かし情報の埋め込み方式に対応した画像処理を施すことにより、透かし情報を取り出すことができる。

一方、文献10)の方式は、透かし情報を光で加える点で類似性があるが、対象物の情報も光で与えられ、かつスクリーンの反射率は場所によらず一定であり、画像の投影に対して理想的な反射特性を有する設計がなされているため、スクリーン上でこれらの情報は加算される。これに対して絵画や印刷物など

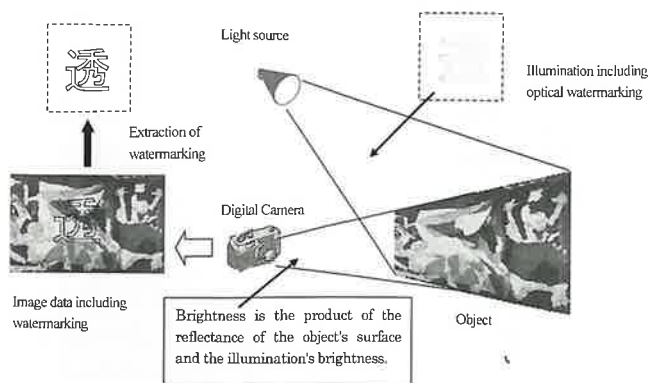


Fig. 1 Basic concept underlying proposed technology.

実物体の被写体に透かし画像を投影する場合を考えると、被写体の表面反射率は、一般に均一ではなく、また上述のように反射光の輝度値は、被写体の表面反射率と投影光の輝度値の積として表されるので、例えば暗い部分に投影された透かし情報は、喪失して正しく取り出すことができない可能性もある。

本方式が適切に機能すれば、実物体の被写体に対し光による透かし情報を付加することにより、透かし情報を電子的に埋め込むことが困難な対象物に対しても電子透かしによる保護機能を作作用させることができ、例えば芸術家が描いた絵画など美術館の展示物等に従来の電子透かし技術と同様な透かし情報を埋め込むことができる。

2.2 光による透かしの生成

次に、光による透かし（以下では、これを「光透かし」と言う）の生成方法について説明する。本論文では、基本的な方式として離散コサイン変換（DCT）を用いて高周波成分に透かし情報を埋め込む考え方を利用する。Fig.2に、照射光に埋め込む透かし情報の生成手順を示す。まず透かし情報を埋め込む画像の全体を所定のブロックサイズに分割する。分割した各ブロックの全体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、すなわち2値の透かし情報を埋め込むようにしている。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、実画像空間における画素値の振幅を制御するので、透かしの埋め込み強度を制御するとともに、視覚的な埋め込み情報の知覚限界に影響を与えることに注意すべきである。直流成分（DC値）と最高周波数成分（HC値）以外の成分値は、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、式(1)に従って2次元逆離散コサイン変換（IDCT）を施す。

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

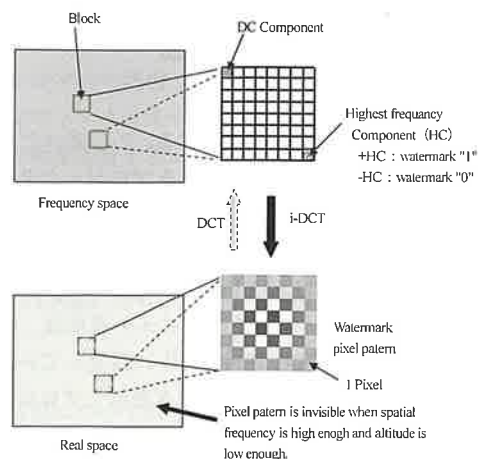


Fig. 2 Illumination watermarking procedure using DCT.

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

ここで, $f_{i,j}(x,y)$ は, 実画像空間における (i,j) ブロックの座標 (x,y) の画素値であり, $F_{i,j}(u,v)$ は, 周波数空間における (i,j) ブロックの (u,v) 成分値である. N は, 画素ブロックのサイズである. このようにして得られた実画像空間における $N \times N$ 画素ブロックの各画素値を透かし画像として用いる (以下, この画像を「光透かしパターン」という). $N \times N$ 画素ブロック内における各画素値の空間的变化は, DCT における最高周波数基底の制約を受け, 光透かしを照射された被写体表面を撮影したときの解像度が十分であれば, 視覚的に検知不可能な透かし情報とすることができる. こうして, $N \times N$ 画素ブロック当たり 1 ビットの透かし情報を埋め込むことが可能となる.

2.3 光透かしの照射と埋め込みデータの再生

輝度が概ね均一な光源下でデジタルカメラ等で撮影した画像データは, 一般に低周波成分に空間周波数スペクトルが集中しており, DCT 後の周波数成分は, 水平・垂直方向とも低周波数領域の値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, 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対象画像の反射光の輝度分布は, 低周波成分の空間周波数スペクトルは, 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 値は, 光透かしの持つ周波数成分が支配的であると考えられる.

光透かしを含む照明光で照射された被写体を撮影した画像データは, 上記のような空間周波数スペクトル分布を有すると考えられる. そこで, 撮影された画像データに対して, 式(2)により 2 次元 DCT を施す.

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

ただし, $C(u)$, $C(v)$ は, 式(1)と同じ.

M は, 周波数空間における成分ブロックのサイズである. 周波数空間における成分値 $F_{i,j}(u,v)$ から得られる HC 値は, 光透かしに埋め込んだ HC 値を復元していると考えられる.

3. 実験方法

3.1 実験手順

以下に, 実験の手順について説明する. 2. に述べた方法で生成した光透かしパターンの画像データをプロジェクタに入力して, 光源の空間光変調により透かしパターンを埋め込んだ照明光を対象物に照射する. プロジェクタは, 800×600 画素の解像度を持つ DLP (Digital Light Processing) プロジェクタを用いる. ホストコンピュータのグラフィック表示は, 解像度を 800×600 画素, 色数を RGB 各 8 ビットに設定している. 従って, ホストコンピュータのグラフィック表示とプロジェクタの表示画素数は, 一対一に対応している. ビデオインターフェイスは, DVI-I デジタルインターフェイスを用いている. プロ

ジェクタから照射する光透かしパターンの画素ブロックサイズは, 8×8 画素ブロックとし (それぞれ 1 ビットの透かし情報を含む), これを水平および垂直方向にそれぞれ 16 ブロックずつ並べることで全体で 128×128 画素のデータとする. 埋め込む透かし情報は, 16×16 ブロックにおいて水平方向および垂直方向に “0” と “1” を交互に市松模様状に埋め込む. 従って, 各ブロックの空間周波数スペクトルは, 最高周波数成分の符号としては交互にプラスとマイナスを持つ画像データとなる. 光透かしを埋め込む対象画像として, Fig. 3 に示す SCID 画像 3 種類 (N2 カフェテリア, N5 自転車, N6 蘭)¹¹⁾ を A4 サイズにプリントした画像を用いる. 参照として白紙に照射したデータも用いる. スクリーン上において光透かしが照射される領域のサイズは, 128×128 画素の照射データで約 105×105 mm である. 光透かしを埋め込む照明光の平均輝度を DC 値 (8 bit) として, 透かしの埋め込み強度を HC 値 (8 bit) としてそれぞれ与え, 実験のパラメータとして測定を行う.

次に, プロジェクタから発光した透かしパターンを対象画像に照射しデジタルカメラで撮影する. デジタルカメラの撮影条件は, シャッター速度: $1/15$ 秒, 絞り: F4.5, 画像ファイルフォーマット: TIFF (RGB) 非圧縮, 画素サイズ: 4288×2848 画素, 画素精度: RGB 各 8 ビットである. 撮影された画像データにおける光透かしの照射領域 (画像切り出し矩形領域) の画素数は, 約 850×850 画素である. なお, プロジェクタのレンズ面から対象画像までの距離は, 約 1150 mm, デジタルカメラから対象画像までの撮影距離は, ズームレンズ面から約 1350 mm, 70 mm ズームレンズを使用して撮影する.

プロジェクタによる画像照射領域の精度は, プロジェクタ固有の光学系精度の制約を受ける. またデジタルカメラによる光学系精度の制約もある. 実験においては, 台形歪みの発生をさけるため, 撮影された画像データ上で光透かし照射領域が正確な矩形となるようプロジェクタおよびデジタルカメラの設置精度やカメラ光学系の撮影条件を確保している.

以上のようにして撮影した画像データから透かし情報を抽出する手順を以下に説明する. 画像データ上の透かし照射領域を矩形領域として切り出し, 256×256 画素に縮小処理を行う. 縮小処理は, IrfanView ver. 4.25¹²⁾ を用い Lanczos フィルタによるリサンプル処理により行う. これを 16×16 画素ブロックに分割して 16×16 ブロック = 256 ブロックの画像データを取り出す. 各ブロックについて, 16×16 画素の DCT を施すことにより, 16×16 の 2 次元空間周波数成分ブロックを得る. なお, 元の透かしパターンは 8×8 画素ブロックで作成したが, 再生時に 16×16 画素ブロックとしたのは, プロジェクタ内での再サンプルや光学系による解像度低下などで最高周波数成分が消失または縮減されるのをさけるためである. 元の 8×8 画素の DCT 成分における HC 値は, 16×16 成分ブロックにおいては, 水平周波数成分 = 7, 垂直周波数成分 = 7 の成分に相当するので, この成分の符号を判定することにより埋め込んだビット値を再生する. 256 個のブロックには, 水平・垂直方向に交互に “0” と “1” のビットがあらかじめ埋め込まれているので, 各ブロックの再生結果と照合して正しく検出されたビットの数を全体の 256 個に対する正解率として評価する. これを 1



Fig.3(a) Image used in experiment (a) SCID N2.

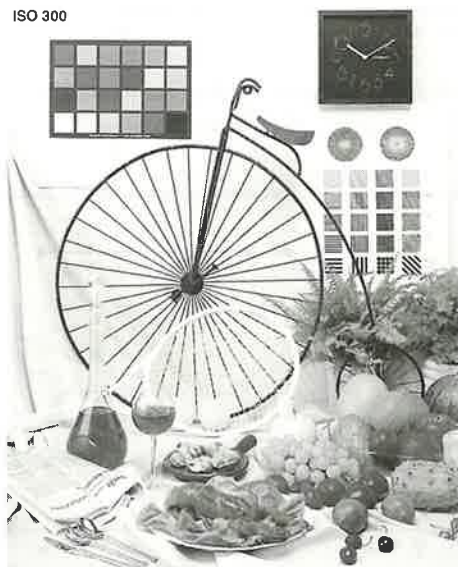


Fig.3(b) Image used in experiment (b) SCID N5.



Fig.3(c) Image used in experiment (c) SCID N6.

ブロックの正解率とする。また、被写体上の反射率の低い部分の検出が困難な場合を考慮し、同じ埋め込みビットのブロックを複数求めそれらの多数決による評価も行う。すなわち、当該ブロックの検出ビットと、水平・垂直方向に5ブロック離れたブロックの検出ビット、および同じく水平・垂直方向に10ブロック離れたブロックの検出ビットの3つの多数決により評価する。これを3ブロックの多数決による正解率とする。

3.2 画像品質の測定と評価方法

光透かしを含む画像の品質評価のため、客観評価値として撮影した画像の光透かし領域について PSNR 値を測定する。測定方法は、まず光透かしを埋め込まない画像データの照明光（すなわち、HC 値を“0”とする）を照射した領域を切り出し、これを基準画像データとする。次に HC 値を“0”以外の値として光透かしを埋め込んだ画像データの照明光を照射し、撮影した画像データから光透かし照射領域を切り出す。透かし再生の処理を行うとともに、基準画像データに対する PSNR 値を計算する。切り出した照射領域の基準画像データの画素値を $x_r(i, j)$ 、光透かしを埋め込んだ画像データの画素値を $x_p(i, j)$ とすると、

$$PSNR = -10 \log_{10} \frac{\sum_{i,j} \{x_r(i, j) - x_p(i, j)\}^2}{255^2 N} \quad (3)$$

である。ただし、画素値は8ビット表現とし、 N は切り出した領域のすべての画素数である。

また、光透かしを含む画像についての主観評価を次のように行う。透かしを埋め込まない領域と埋め込んだ領域を比較できるように左右の半面にのみ透かしを埋め込んだ画像データの照明光を用いて撮影を行い、得られた画像をプリントし（銀塩プリント、プリントサイズ：305 mm×210 mm）複数の評価者により透かしパターンの歪みによる画像品質の劣化度を評価する。スクリーンからの距離（すなわち視野角）により見かけの解像度が異なるので、ズームレンズの焦点距離を70 mm, 50 mm, 24 mmと変化させて撮影し、左右で違いが認められるか否かを評価する。

3.3 JPEG 圧縮による透かし妨害耐性の測定と評価方法

デジタルカメラによる一般的な撮影条件を考慮し、JPEG 非可逆圧縮方式による画像品質劣化に対する耐性評価を行う。JPEG 非可逆圧縮による歪みの視認が困難と考えられる圧縮率は、非圧縮の画像データ（本論文では TIFF (RGB) を用いる）に対して 1/10 から 1/20 程度である。この値は、一般的なデジタルカメラの画像ファイルフォーマットにおいて、JPEG 圧縮設定のファインモードあるいはノーマルモード等と呼ばれる程度の画像品質を想定している。ここでは、撮影した非圧縮の画像データに対して IrfanView ver. 4.25 による JPEG 非可逆圧縮により約 1/20 のデータ量に圧縮したのち再生した画像データに対して、3.1 で述べた手順により正解率の評価を行い、また 3.2 の手順により PSNR 値の測定を行う。

4. 結 果

実験結果について以下に説明する。

4.1 検出率の評価

白紙および3つの対象画像 (SCID N2, N5, N6) に対して光透かしを照射し、検出したビットの正解率を示した結果を Fig. 4~Fig. 7 に示す。それぞれの対象画像に、DC 値、HC 値を変化させて光透かしを照射し、撮影した画像から検出した透かしのビット値の正解率をまとめたものである。それぞれの対象画像について、1ブロックの正解率と3ブロックの多数決による正解率を示している。図に示すように、白紙を対象画像とした場合では、HC=5 以上ではすべて正解率は、1 であった。また3つの SCID 画像の結果においては、HC=5 以上の1

ブロックの正解率は、0.9 より大きな値を示しており、HC=5 以上での3ブロックの多数決による正解率は、一部を除いて1であり、例外の場合も0.95 以上の正解率であった。

なお、対象画像に照射する照明光の輝度値について輝度計を用いて次のような測定を行った。DC 値 (8 bit) のみを与え透かし情報を含まない (すなわち HC=0) 照明光を白紙に照射したスクリーンを輝度計により測定した結果、輝度の実測値は、DC=50 で 6.2 cd/m^2 、DC=100 で 28.9 cd/m^2 、DC=150 で 90.0 cd/m^2 、DC=200 で 300 cd/m^2 であった。

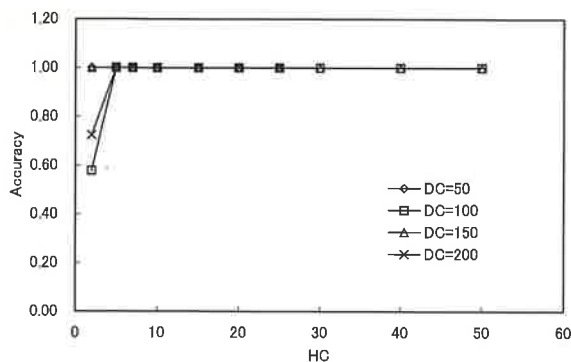


Fig. 4(a) Accuracy of reading out data: White-paper (1-block evaluation).

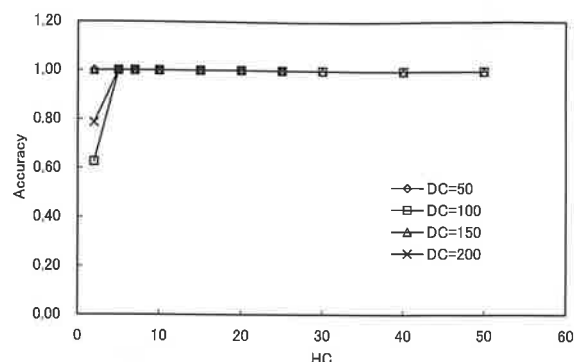


Fig. 4(b) Accuracy of reading out data: White-paper (Majority of 3-block evaluation).

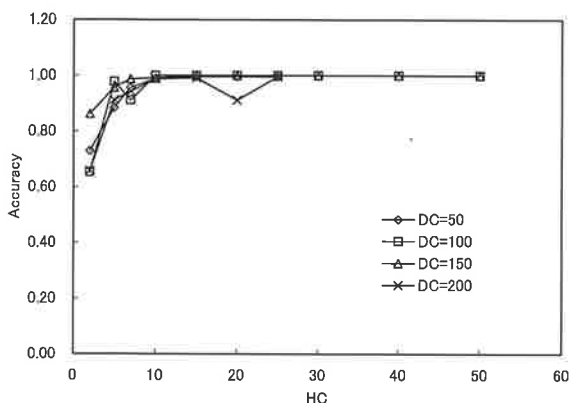


Fig. 5(a) Accuracy of reading out data: SCID N2 (1-block evaluation).

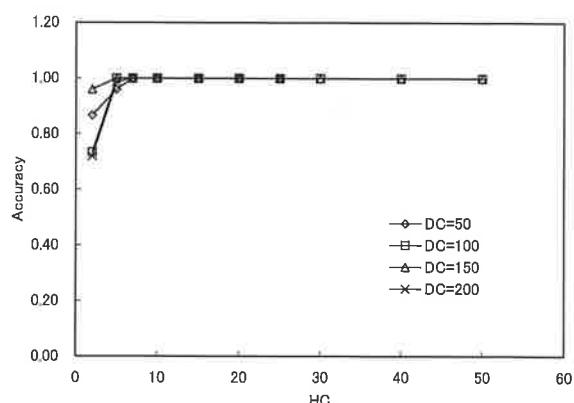


Fig. 5(b) Accuracy of reading out data: SCID N2 (Majority of 3-block evaluation).

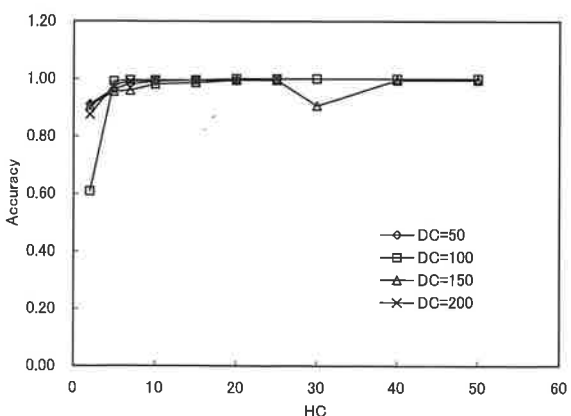


Fig. 6(a) Accuracy of reading out data: SCID N6 (1-block evaluation).

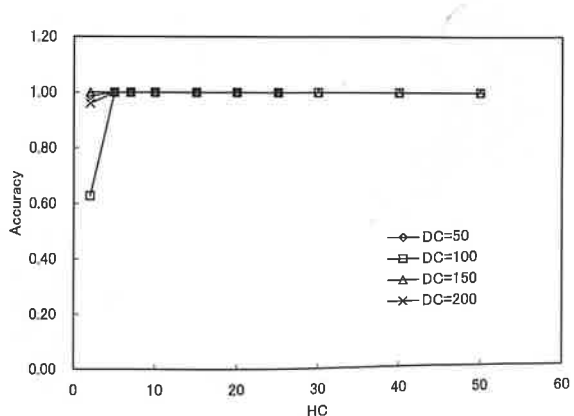


Fig. 6(b) Accuracy of reading out data: SCID N6 (Majority of 3-block evaluation).

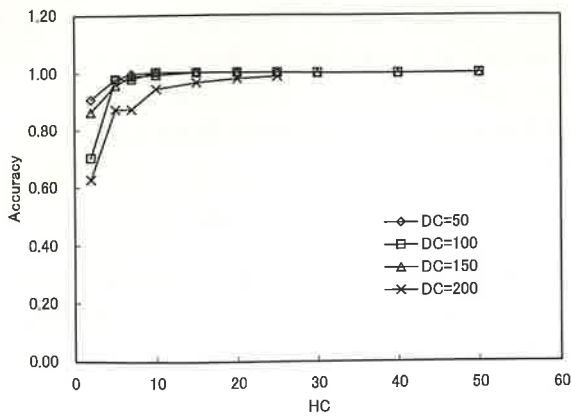


Fig. 7(a) Accuracy of reading out data: SCID N5 (1-block evaluation).

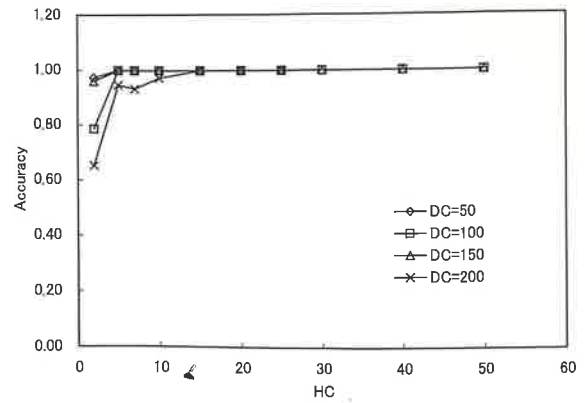


Fig. 7(b) Accuracy of reading out data: SCID N5 (Majority of 3-block evaluation).

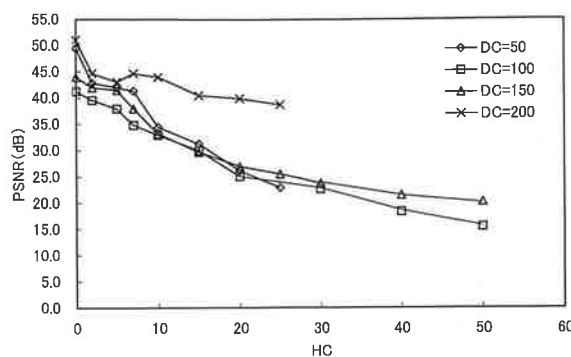


Fig. 8 PSNR of the image projected with illuminated watermark: White-paper.

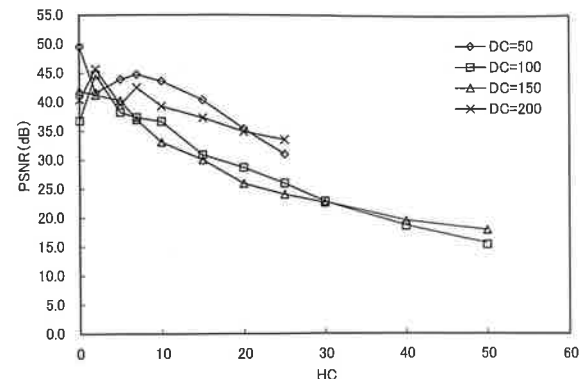


Fig. 9 PSNR of the image projected with illuminated watermark: SCID N2.

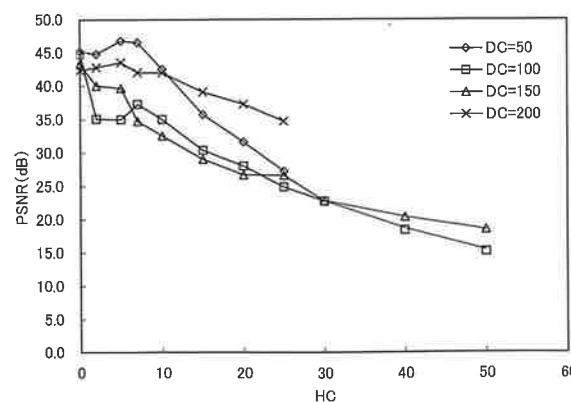


Fig. 10 PSNR of the image projected with illuminated watermark: SCID N6.

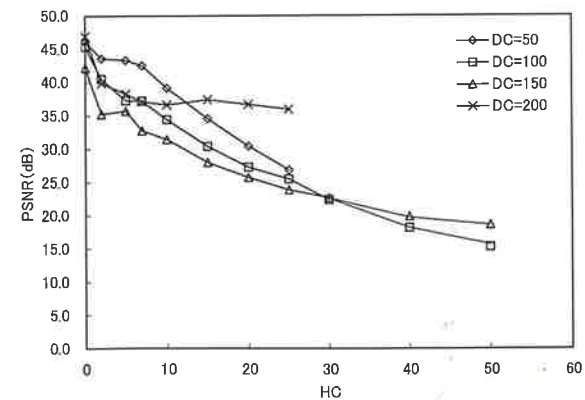


Fig. 11 PSNR of the image projected with illuminated watermark: SCID N5.

4.2 画像品質の評価

Fig. 8~Fig. 11 は、光透かしを照射した画像データにおける PSNR 値の測定結果を示す図である。基準となる画像データは、上述のように DC 値を固定し HC 値を“0”として透かしパターンを含まない均一な輝度の光を照射した画像を用いている。図において、HC 値が“0”の時の PSNR 値は、基準画像データと同じ透かしパターンを含まない光を照射して再度撮影を行い、基準画像データと同じ領域を切り出して得られた画像データの PSNR 値を求めたものである。図に示すように、HC=0 の時の PSNR 値は、36 dB 程度から 50 dB 程度である。

HC 値が 10 未満の画像データにおいては、概ね 35 dB 以上の PSNR 値となっているが値の増減は単調ではない。HC 値が 10 以上の値は、単調減少の傾向を示しており透かしパターンの振幅の絶対値の大きさに比例していると考えられる。

主観評価は、白紙だけを用いて DC=150 のときの画像を用い、画像処理の専門家 4 名の評価者により、プリント出力画像を 50 cm 離れた位置から 2~3 秒間観察して行った。HC=15 では、4 名ともいずれの焦点距離の画像でも左右の差が認められると評価された。HC=10 では、4 名全員の評価として、24 mm の焦点距離では差が認められず、50 mm と 70 mm の焦点

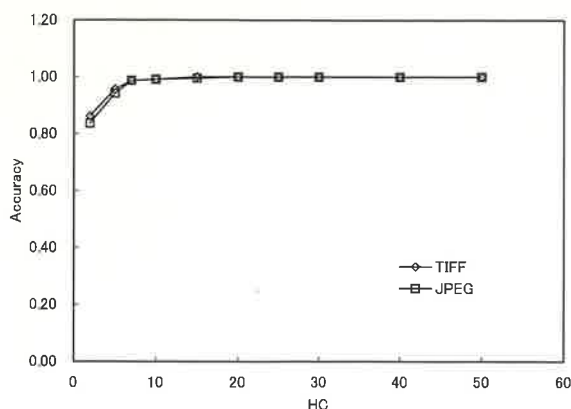


Fig. 12(a) Efficiency of JPEG compression to the accuracy of reading out data: SCID N2 (1-block evaluation).

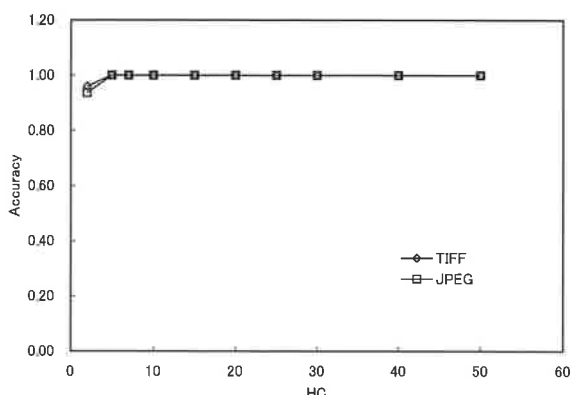


Fig. 12(b) Efficiency of JPEG compression to the accuracy of reading out data: SCID N2 (Majority of 3-block evaluation).

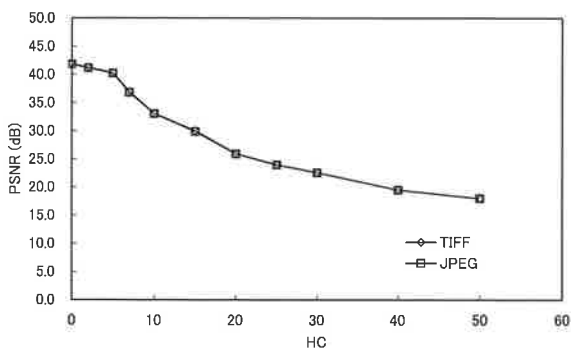


Fig. 13 Efficiency of JPEG compression to PSNR: (SCID N2).

距離では差が認められると評価された。HC=5では、24 mmでは全員が差を認められず、50 mmでは4名中3名が差が認められず、70 mmでは、4名中1名が差が認められないという評価結果であった。

4.3 JPEG 圧縮による透かし妨害耐性の評価

JPEG 非可逆圧縮を行った画像データによる検出率の評価結果として、SCID N2を対象画像としてDC=150で評価した結果をFig. 12(a)および(b)に示す。1ブロックの正解率および3ブロックの多数決による正解率とも非圧縮画像データ(TIFF (RGB))との差は小さいことが分かる。また、Fig. 13

に示すようにPSNR値も両者の差は非常に小さい。白紙およびSCID N5, N6を対象画像とした場合も同様の結果が得られており、歪みがほとんど発生しない1/20程度の圧縮率ではJPEG非可逆圧縮による画質劣化の影響はほとんどないと考えられる。

5. 考 察

検出率の評価においては、各対象画像におけるすべてのDC値において、HC=5以上の場合の1ブロックの正解率は、ほぼ0.9以上であり、またHC=5以上の場合の3ブロックの多数決による正解率は、ほぼ1という結果が得られた。一方、HC=2の測定結果においては正解率=0.5近くの場合があり、今回の測定実験では“0”と“1”のパターンを交互に埋め込んだ透かしパターンを用いて測定を行っており、正解率=0.5はほぼランダムな回答と考えてよい。

本論文では、高周波成分へ透かし情報を埋め込むためにDCTを用い、透かし情報の再生時には16×16画素ブロック単位のDCTを施すためブロック境界が正しく切り出されていないと正しい空間周波数成分が検出できない。すなわち、透かしパターンを含む実画像空間から周波数空間への変換に際して画素単位で正確な領域を切り出す画像処理が必要がある。今回の実験では、透かしパターンの照射領域を手作業で(数値を指定して)矩形領域を切り出しているが、実際の透かしパターン領域は、プロジェクタの光学系や設置条件、あるいは撮影に用いるデジタルカメラの光学系・設置条件により得られる画像データの幾何学変形が不可避であり、幾何学変形が加わった画像データから矩形領域を切り出した後相似形の変換を行うという方法では、光透かしパターン領域を正確に復元することは難しい。またプロジェクタ内の画像処理は、液晶やDMD(Digital Micromirror Device)など光変調デバイスに対応して機器固有の処理が行われており、階調処理などは個々の画素値に対する影響が大きいと思われる。透かしパターンの画素値がそのまま光透かしの照明光の輝度に比例してはいない可能性が高く、再生値に影響を与えていると考えられる。

PSNR値の評価では、HC=10以下の透かしパターンにおいては、概ね35 dB以上のPSNR値を示している。しかし、対象画像や測定条件による変動が大きい。また、HC値の増減に対して比例しない場合が多い。この原因として、以下の要因が考えられる。

- 前述のように、プロジェクタの照射領域や設置条件、カメラによる撮影の設置条件など矩形領域の精度不足による領域切り出し精度が均一でない。
- プロジェクタは、ある程度の距離(たとえば2 m以上など)で人が直接スクリーンを見たときに必要な画質がえられる設計がなされていると考えられる。従って、スクリーン面におけるミクロな画質劣化が現れても比較的問題にならないと考えられる。このように、一般にプロジェクタに対する要求仕様としては、スクリーン面における高精細な解像度の要求は小さいと思われる。

主観評価の結果については、次のように考えられる。実験に用いたDLPプロジェクタの製品仕様は、合焦距離の最短値が

約 1100 mm でありこのときの画面照射領域サイズは、約 650 mm×490 mm である。画素サイズが 800×600 画素であるので照射スクリーン上における 1 画素のサイズは、0.82 mm 角程度となる。このため、カメラの設置位置である対象画像から 1350 mm 程度の距離では 1 画素に対する視野角が十分小さいとはいえず、透かしパターンによる視覚的妨害度が大きくなると考えられる。また、1350 mm 程度の距離からみた焦点距離 70 mm レンズを用いたデジタルカメラによる視野角は、同一距離からの直視による視野角とほぼ等しく、この条件でのデジタルカメラの撮影領域は、スクリーン上で約 510 mm×350 mm であるので、主観評価に用いたプリントサイズ (305 mm×210 mm) への縮小率は、約 0.6 となる。従って、主観評価における観察距離としては、80 cm 程度が妥当な値と考えられる。今回行った主観評価の観察条件 (50 cm 距離からの観察) は、やや厳しい条件であると言え、この結果一般的な観察条件下で画像品質劣化が認めにくい場合においても、100% に近い検出率が得られると結論できる。本論文では、白紙以外の対象画像における主観評価は行わなかったが、一般に高周波成分が多く精細度が高い画像では、透かしパターンによる妨害が認識しにくくなると考えられる。

JPEG 圧縮による透かし妨害耐性の評価結果から、1/20 程度の圧縮率においては光透かしの検出率への影響は、非常に少ないと結論できる。これは、PSNR 測定値からも十分説明できる評価結果である。これにより、デジタルカメラによる一般的な撮影条件である JPEG 圧縮画像ファイルフォーマットにおいて JPEG 圧縮特有の歪みが目立たない程度の画像品質設定 (一般に、ノーマルモード等と呼ばれる程度の画像品質) を用いた場合でも、光透かしの検出率は、十分な実用性を有すると考えられる。

6. ま と め

照明光に透かし情報を埋め込み実物体の被写体に照射する光による透かし方式について、検証実験により実現性の検証を行った。実験においては、DCT を利用して高周波成分に透かし情報を埋め込むことで人の眼に検知しにくい透かし情報を生成する方法を利用し、8×8 画素毎に 1 ビットの透かし情報を埋め込んだ照明光による実験において、高周波成分の値による透かしの埋め込み強度と、検出率および透かし埋め込みによる画像品質劣化との関係性を評価した。この結果、画像品質劣化が認めにくい埋め込み強度において、100% に近い正解率が得られ、本方式の有効性を示すことができた。この方式は、実世界の対象物である絵画や印刷物、イラストなどに、対象物そのものに改変を加えることなく透かし情報を埋め込むことが可能であり、さらには 2 次元的な対象物だけでなく、彫刻、オブジェ、立体の商品、演劇における人体といった 3 次元的な対象物や動く対象物への適用可能性も考えられる。一方、透かしの埋め込み領域を正確に切り出す必要があるため、光透かしの光源や撮影時のカメラなどの傾斜等、照射領域の幾何学変形による誤差が復元精度に影響を与える。今後は、幾何学変形の補正による撮影条件の変動耐性を検証するほか、離散ウェーブレット変換 (DWT) など他の方法による光透かし埋め込み方式の検討

や、立体物・動物体への適用検討も行う予定である。

謝辞

有益な助言をいただいた NTT 情報流通プラットフォーム研究所・岡本龍明フェローに感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 松井甲子雄, “電子透かしの基礎”, 森北出版 (1998)
- 2) I. J. Cox, J. Kilian, F. T. Leighton and T. Shamon, “Secure spread spectrum watermarking for multimedia”, IEEE Trans. Image Process., 6, 12, pp. 1673-1687 (1997)
- 3) M. D. Swanson, M. Kobayashi and A. H. Tewfik, “Multimedia data-embedding and watermarking technologies”, Proc. IEEE, 86, 6, pp. 1064-1087 (1998)
- 4) M. Hartung and M. Kutter, “Multimedia watermarking techniques”, Proc. IEEE, 87, 7, pp. 1079-1107 (1999)
- 5) 沖原健一, 稲積泰宏, 木下宏揚, “埋込みビット量と視覚的劣化を考慮した電子透かし”, 映像学誌, 58, 10, pp. 1465-1467 (2004)
- 6) “Digital cinema system specification V1.2”, Digital Cinema Initiatives, Mar. (2008)
- 7) 中村晴幸, 合志清一, 藤井亮介, 伊藤浩, 鈴木光義, 高井重典, 谷倫佳里, “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)
- 8) 水本匡, 松井甲子雄, “DCT を用いた電子透かしの印刷取込み耐性”, 信学論 (A), J85-A, 4, pp. 451-459 (2002)
- 9) 江島将高, 宮崎昭雄, 丸山健司, “印刷画像に対する電子透かしの検討”, 信学論 (A), J82-A, 7, pp. 1156-1159 (1999)
- 10) 中村桂介, 岩切宗利, 松井甲子雄, “デジタルシアターにおける実時間電子透かし方式に関する一提案”, SCIS2003 予稿集, Vol. II, pp. 807-812 (2003)
- 11) “高精細カラーデジタル標準画像 (CMYK/SCID)”, 日本工業規格, JIS X 9201:1995.
- 12) <http://www.irfanview.com/> (09-8-8 参照)



石川 安則

1977 年東京大学工学部計数工学科卒。同年富士電機(株)入社, 1982 年(株)リコー入社, 2001 年(有)YIT コンサルティング設立・代表取締役, 組込システム開発, 画像処理・画像通信装置開発, 画像符号化の研究開発などに従事。現在, 神奈川工科大学博士後期課程在学中。技術士(電気電子, 情報工学, 総合技術監理)。電子情報通信学会, 映像情報メディア学会, 画像電子学会, 日本画像学会各会員。



上平 員丈

1981 年大阪府立大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所入所。以来、画像入力装置、超高精細大画面表示装置、立体ディスプレイ、臨場感通信システム等の研究開発に従事。2001 年神奈川工科大学教授。工学博士。映像情報メディア学会フェロー、SID 会員、電子情報通信学会会員。



谷中 一寿

1977 年東京大学工学部電子工学科卒業。1982 年同大学院博士課程（電気）修了。同年日本電信電話公社（現 NTT）入社。以来、画像通信の研究開発に従事。1997 年神奈川工科大教授。工学博士。電子情報通信学会、映像情報メディア学会、画像電子学会、日本画像学会、情報処理学会、IEEE 各会員。