

光透かしを用いた符号情報埋め込み技術

石川安則^{†,††}(正会員) 上平員丈[†](正会員) 谷中一寿[†](正会員)

[†]神奈川工科大学

^{††}(有) YIT コンサルティング

1. ま え が き

インターネットなどによる大容量のデジタルコンテンツ流通が可能となり、またパーソナルコンピュータやデジタルカメラを用いてデジタル画像の作成が誰でも容易に行える環境が整い、こうしたデジタル画像をはじめとしたコンテンツ流通量が飛躍的に増大しつつある。このような状況において、イメージ情報の著作権保護が喫緊の課題となり、デジタルコンテンツ保護手段としての電子透かし技術が注目されている^{1)~4)}。

デジタル画像データへの透かし埋め込み技術としては、様々な提案があり、例えば映画館や一般家庭などでスクリーンやテレビジョン画像からビデオカメラによる再撮影を防止する方式の提案や、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ある^{5)~12)}。

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、表示ないし印刷された画像を撮影したときに埋め込まれた透かし情報が抽出でき、これにより違法撮影など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、例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的画像に対しては、この方法は有効ではない。

本稿では、こうした非電子的な画像の著作権保護が可能であり、また人の目に意識されない情報伝達手段としても利用できる光を用いた符号情報の埋め込み技術について解説する。

2. 光透かし方式

我々が提案する「光透かし方式」とは、光を用いて透かし情報を付加する方式である。図1に、方式の基本概念を示す。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することにより、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、適切な画像処理を施すことにより、埋め込まれた透かし情報が抽出できる。この方式により、絵画や彫刻あるいは人物など、実存する物体を撮影した画像データに、デジタルカメラなどの撮像手段に特別な仕掛けを必要とせずに透かし情報を埋め込むことができる。

光透かし方式は、こうした画像情報のセキュリティ応用に限らず、不可視性を持つ一般的な情報伝達手段と考えることもでき、例えばバーコードのように視覚的に明らかな妨害となることなく、画像データに情報を埋め込むことができる。光を用いることによる特徴として、上記した従来困難であった非電子画像の著作権保護が可能となるほか、リアルタイムに透かしデータの書き換えが可能であること、二次元の被写体のみならず三次元物体(立体物)にも適用可能であるといった特徴をもつ。

なお、スクリーンに投影された画像に対する違法撮影の保護手段としては、文献13),14)の提案があり、映画などの違法撮影防止には有効と思われる。しかし一般に実在する物体の場合、被写体表面の反射スペクトルは、表面形状や反射率分布などに依存するため、画像投影に対し理想的な特性をもつスクリーンへの投影とは大きく条件が異なる。光透かし方式は、このような実物体画像にも適用できる頑健な方式であるといえる。

3. 光透かし方式の実用化研究

このように「光透かし方式」は、従来の電子透かし技術では得られなかった特徴的性質を有しているといえる。

※本技術は平成22年度画像電子技術賞を受賞しました。

“Embedding Code Information Using Optical Watermarking”
Yasunori ISHIKAWA^{†,††} (Member), Kazutake UEHIRA[†]
(Member), Kazuhisa YANAKA[†] (Member)

[†]Kanagawa Institute of Technology

^{††}YIT Consulting Co.

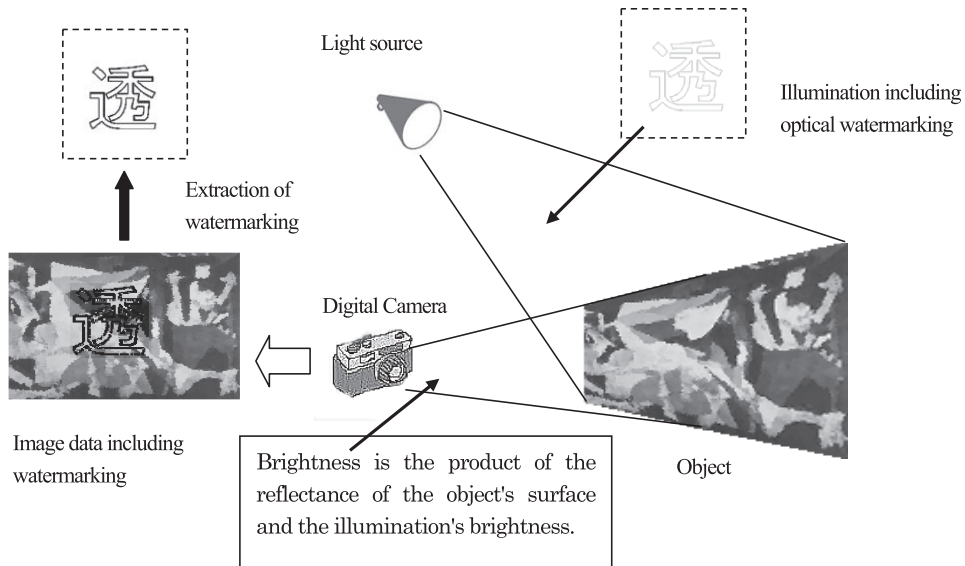


図 1 光透かし方式の基本概念図

ここでは、まず直交変換を用いた光透かし方式における透かし情報の生成および検出手順について説明する。次に、光透かし方式の実用的側面に焦点を当て、様々な条件下で実証的な評価を行った結果を説明する。

3.1 直交変換を用いた光透かしの生成および検出

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説明する。具体的には、直交変換として離散コサイン変換 (DCT) とウォルシュ・アダマル変換 (WHT) およびハールウェーブレット変換 (ハール DWT) を用いた。

直交変換として DCT を用いた場合の光透かし画像データの生成手順を、図 2 を用いて説明する。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、二次元逆離散コサイン変換 (IDCT) を施して得られた実空間における

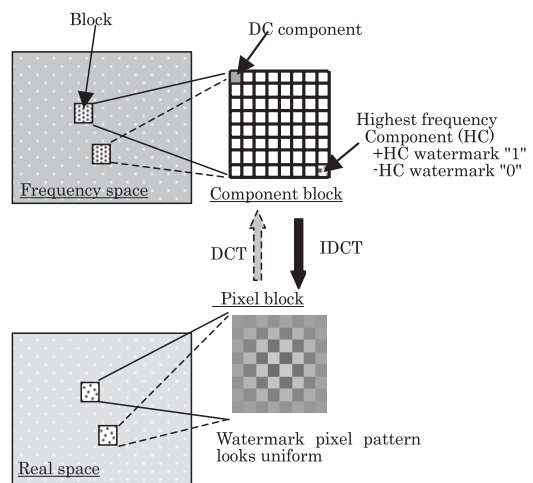


図 2 光透かしの生成手順 (DCT)

$N \times N$ 画素ブロックの各画素値を透かし画像として用いる。

輝度がおおむね均一な光源下においてデジタルカメラなど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、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、低周波数成分の空間周波数スペクトルに関しては、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

技術解説：光透かしを用いた符号情報埋め込み技術

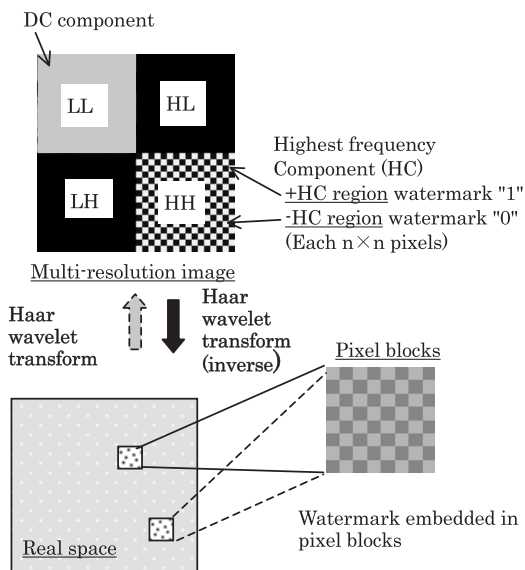


図3 光透かしの生成手順（ハール DWT）

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、こ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、二次元 DCT 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。ここでは、直交変換として DCT を用いる場合を述べたが、WHT を用いる場合も全く同様である。なお、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 ブロック法」のほかに、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」の二つの検出方法を用いた。

一方、ハール DWT を用いる場合の手順を、図3を用いて説明する。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 $n \times n$ 係数ブロックごとに 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。これを逆ハール DWT 変換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。

3.2 光透かし方式の実用性評価

評価実験は、様々な利用環境を想定して行ったが、基本的な実験条件としては、表1に示す条件を用いた。光源としてプロジェクタを用い、被写体は、標準画像データを A4 版にプリントした画像を用いた。埋め込んだ透かし情

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) 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)
評価パラメータ	DC=150 (固定) HC=2, 5, 7, 10, 15, 20, 25

報の検出は、撮影画像データから透かし画像の領域（約 850×850 画素）を切り出し、元の画素サイズ（128×128 画素）に縮小したのち直交変換を施し HC 成分の符号を評価することで行った。検出率の評価結果は、HC=5 以上の条件において、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を評価するため、PSNR の測定と主観評価を行った。PSNR は、HC=5 以下の条件で、35 dB 以上であった。主観評価は、6 名の評価者が約 2 m の距離から 2～3 秒程度観察して行ったが、HC=5 の条件では、全員が透かし画像のボタンを認められないという評価であった。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、ほとんど差はなかった。なお、上述の結果において、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。図4に、HC=15 の条件で SCID N2 を被写体として用いたテスト画像（DCT による光透かし）を示すが、この条件では、光透かしボタンが認識できることがわかる。

3.3 光透かし方式による QR コードの埋め込み

光透かしに符号情報を埋め込む方法として QR コードを用いた実験を行った¹⁹⁾。QR コードは、リードソロモン符号による誤り訂正能力を有しており、光透かしの読み出し誤り耐性の評価を行うことができる。光透かし画像の生成方式として、画素サイズの自由度が高いハール DWT を用いた。QR コードの 1 セルを多重解像度画像の HH 成分画像の 4×4 係数ブロックに割り当て、白セルを正の HC 値に黒セルを負の HC 値に置換する。実験用に作成した QR コードは、バージョン 3 (29×29 セル) を用い、ランダムな英数字を 35 文字埋め込み、誤り訂正能力は、最大のレベル H (30%訂正能力) とした。

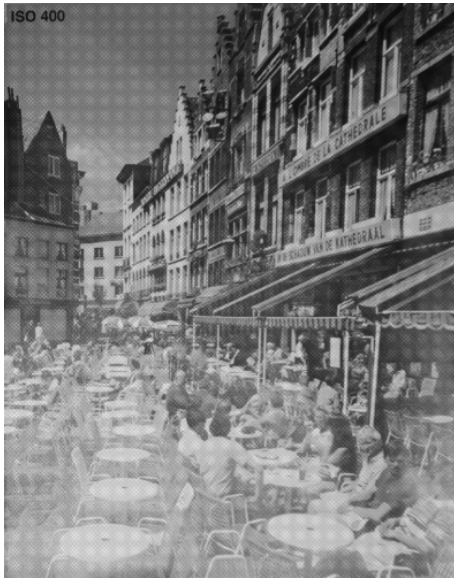


図 4 光透かしが照射された画像 (DCT)

QR コード画像の周囲に 3 セル幅の空白を加えることにより HH 成分画像のサイズを 128×128 画素とし, LL 成分画像には DC 値を, HL 成分画像と LH 成分画像にはすべて “0” を与え (それぞれ 128×128 画素), 逆ハール DWT により 256×256 画素の光透かし画像を生成した。

評価実験は, 前節と同様な条件で行ったが, HC 値は, 5, 7, 10, 15, 20, 25 の六つの値とした。撮影した画像データから透かし画像領域を切り出して 256×256 画素のサイズに縮小し, ハール DWT により HH 成分画像を求めた。埋め込んだ QR コードのセルが正しく再生できれば, 4×4 係数ブロックごとにすべての係数値に正の HC 値または負の HC 値が現れるはずである。しかしながら, このとき被写体の持つ空間周波数成分が HH 成分を含むとその係数ブロックにはノイズが重畳され, 誤った係数値が再生される可能性がある。そこで次の方法により読み出し処理を行った。まず, HH 成分画像における 4×4 係数ブロックごとに, 係数値の平均値を求めた。次にその平均値の位相により, 正值なら “1” を, そうでなければ “0” を 4×4 係数ブロックのビット情報とし, これを 2 値画像データとすることで埋め込んだ QR コードを復元した。

復元した QR コードを読み取りソフト²²⁾ を用いて復号した結果, HC=5~25 のすべての条件で QR コードを復号できた。なお, コードの誤り率は, HC=5 で 1.4%, その他の HC 値では, 0% であった。図 5 は, 撮影した画像データの一部を拡大した画像を示す。また埋め込



図 5 QR コードを照射した画像の一部 (拡大図)

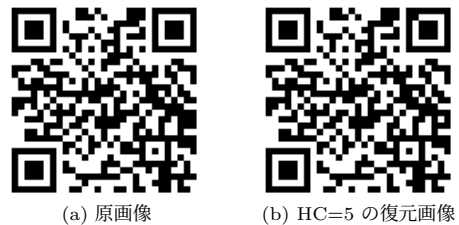


図 6 実験に用いた QR コード

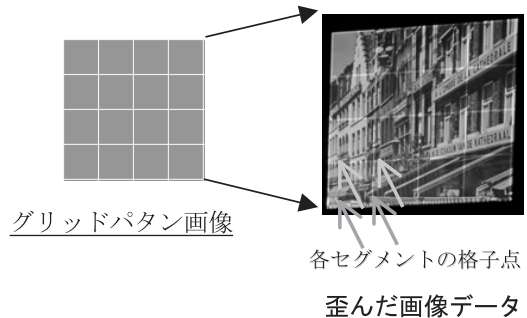


図 7 幾何学歪み耐性を有する光透かし方式 (グリッドパターン画像と格子点座標の説明)

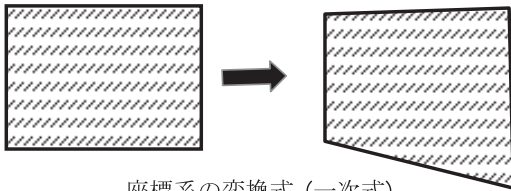
だ QR コードの原画像と HC=5 の条件で復元した QR コードの画像を図 6 に示す。位置検出パターン部を含む幾つかのセルに誤りが発生していることがわかる。

3.4 光透かし方式の幾何学歪み耐性と立体物への応用

光透かし方式の実利用環境において, 例えばカメラの傾きによる遠近法的歪みや, 被写体面が完全な平面でない場合, あるいは立体物表面に光透かしを照射した場合など様々な歪みの発生要因が考えられる。このような撮影時に発生する幾何学歪みに基づく検出誤り耐性を持つ方式の提案を行った¹⁸⁾。この提案では, 図 7 に示すように, まず透かし画像を小領域 (セグメント) に分割するグリッドパターンをあらかじめ被写体に照射してセグメントの格子点座標値を計測しておき, この値に基づき各セグメントが遠近法的な幾何学歪みを生じていると見なし

歪みのない座標系：
(x, y)

歪みを有する座標系：
(x', y')

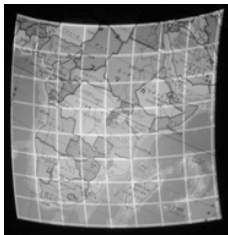


座標系の変換式（一次式）

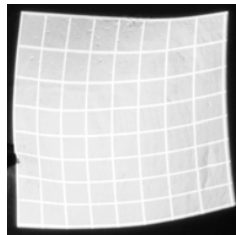
$$x' = ax + by + c$$

$$y' = dx + ey + f$$

図 8 遠近法的な幾何学歪みの補正



(a) 地球儀



(b) 人の頭部モデル

図 9 グリッドパターンを照射した立体物表面

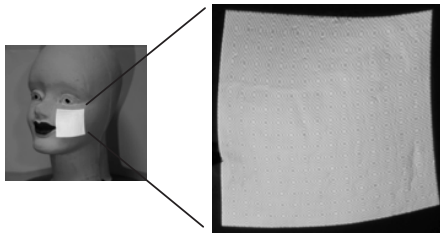


図 10 人の頭部モデルへの光透かしの照射と拡大図

て、図 8 に示す近似式を用いて歪み補正を行った。補間式は、隣接 4 近傍点を用いた線形補間法（“バイリニア補間法”）を用いた。このようにして歪み補正を行った画像データに対して透かし情報の読み出しを行った結果、埋め込む透かし情報として DCT および WHT を利用した場合のいずれの場合も 100%の精度で検出可能であることが検証できた。

同様な手順による立体物への光透かし方式の応用についても提案を行った²⁰⁾。被写体として白い半球および地勢図が描かれた地球儀、更に人の頭部モデルの顔表面を用いて実証実験を行った。立体物に照射された透かし画像は、デジタルカメラにより撮影され歪みを持つ画像データとして取り込まれるので、上述の方法と同じ補正方法を用いて幾何学歪み補正を行った画像データから、透かし情報の検出を行う方法で実験を行った。図 9 に、グリッドパターンを照射した立体物表面の画像を示す。また図 10

は、人の頭部モデルに光透かしを照射した様子と透かし画像領域の拡大図を示す。評価実験の結果、透かし画像情報の埋め込み方法として同様に DCT および WHT を利用した場合、一部の条件を除いて 100%の検出率が得られた。

4. 光透かし方式の今後の展開

本稿で説明した幾何学歪み補正方式は、光透かしの照射領域にあらかじめグリッドパターンを照射してセグメントに分割しておき、セグメントの座標値をあらかじめ計測するという手順が必要である。しかしながらこの方法では、リアルタイムでの補正は難しい。また動画像にも対応可能とするためには、光透かし画像とグリッドパターンもしくはこれに代わるマーカなどを同時に照射し実時間でセグメント単位の幾何学歪み補正を行う必要がある。

また、光透かし方式の持つリアルタイム性を利用すれば、光透かしに時系列情報を埋め込むことができる。このような時系列情報を埋め込んだ光を照射した実物体を、ビデオカメラなどで撮影することにより、動画像データから埋め込んだ時系列情報を抽出することができる。すなわち、物体に照射する透かし画像パターンを時間的に変化させ、このシーンをビデオカメラで撮影することで、透かし画像パターンが時間的な変化に追従して順次正しく再生できるはずである。このように時系列情報の埋め込みにより、より多くの情報伝達が可能となる。

情報セキュリティ以外への応用として、例えばミクスリアリティ（MR）における情報提示方法への応用がある。これまでの MR 研究では、例えば二次元のマーカを利用して仮想物体の表示情報を提示する方法をとっているため、実空間におけるマーカが人の視覚に目障りとなる欠点があった。マーカの代わりに光透かし方式を用いれば、こうした不都合が解消できる。

5. む す び

例えば美術館の展示物など実在の物体に、光を用いて符号情報を埋め込む光透かし方式について、これまで実施してきた基礎的な評価実験の結果と実利用環境を想定した様々な評価実験とその結果について説明した。光透かし方式は、従来の電子透かしでは得られない特徴的な性質を有しており、実世界に存在する実物体の著作権や肖像権などの保護が可能となること、更には人の目に不可視の情報伝達手段として利用可能であることを示した。

今後は、リアルタイム処理可能な方式の開発や、実際の運用システム構築と評価、また実用ソフトウェアライブラリの整備など、更に実用化に向けた研究開発を進めていく。

参考文献

- 1) 棟安実治: “情報伝達のための電子透かし”, 信学基礎・境界サイエティ, Fundamentals Review, Vol.2, No.2, pp.53-62 (2008-10).
- 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”, 東京電機大学出版局 (2004-1).
- 3) 小野 東: “電子透かしとコンテンツ保護”, オーム社 (2001-2).
- 4) 松井甲子雄: “電子透かしの基礎—マルチメディアのニュープロテクト技術”, 森北出版 (1998-8).
- 5) 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).
- 6) J. Haitsma and T. Kalker: “A Watermarking Scheme for Digital Cinema”, ICIP2001, Vol.2, pp.487-489 (2001).
- 7) “Digital cinema system specification V1.2”, Digital Cinema Initiatives (2008-3).
- 8) 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, Vol.60, No.11, pp.1778-1788 (2006).
- 9) 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), Vol.J85-A, No.4, pp.451-459 (2002).
- 10) Y. Horiuchi and M. Muneyasu: “Information Embedding to the Printing Images Based on DCT”, Proc. of ITC-CSCC2004, No.7F3P50-1-4 (2004).
- 11) 小野 東, 江川雄毅: “印刷耐性のある電子透かし方式の検討”, 情報学論, Vol.45, No.3, pp.880-890 (2004-3).
- 12) Z. Liu: “New trends and challenges in digital watermarking technology: Application for printed materials” in Multimedia Watermarking Techniques and Applications, B. Furlht and D. Kirovski, pp.289-305, Auerbach Publications (2006).
- 13) 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—提案”, SCIS2003 予稿集, Vol.II, pp.807-812 (2003).
- 14) 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 (2010-7).
- 15) K. Uehira and M. Suzuki: “Digital watermarking technique using brightness-modulated light”, Proc. ICME2008, pp.257-260 (2008).
- 16) 石川安則, 上平員丈, 谷中一寿: “空間的に変調された照明光を用いた電子透かし技術”, 画像学誌, Vol.48, No.5, pp.384-392 (2009).
- 17) 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 (2010-9).

- 18) Y. Ishikawa, K. Uehira, and K. Yanaka: “Optical Watermarking Technique Robust to Geometrical Distortion in Image”, Proc. ISSPIT2010, pp.67-72 (2010).
- 19) 石川安則, 上平員丈, 谷中一寿: “光透かしを用いた符号情報の埋め込み”, FIT2010 予稿, I-073 (2010).
- 20) Y. Ishikawa, K. Uehira, and K. Yanaka: “Protection of 3D Objects against Illegal Photography Using Optical Watermarking Technique with Spatially Modulated Illumination”, Proc. IMAGAPP2011, pp.49-52 (2011).
- 21) <http://www.denso-wave.com/qrcode/> (2011-7-7).
- 22) <http://tokasoft.matrix.jp/soft/> (2011-7-7).



いし かわ やす のり (正会員)

1977 年東京大学工学部計数工学科卒業。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。2011 年神奈川工科大学客員研究員(兼務)。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。技術士(電気電子, 情報工学, 総合技術監理), 博士(工学)。電子情報通信学会, 映像情報メディア学会, 日本画像学会各会員。



うえ ひら かず たけ (正会員)

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, IEEE 会員, 電子情報通信学会会員。



や なか かず ひさ (正会員)

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 年神奈川工科大学教授。工学博士。電子情報通信学会, 映像情報メディア学会, 日本画像学会, 情報処理学会, IEEE 各会員。