

分布推定手法を用いた電子透かしの検出誤り確率推定方式

越前 功[†] 吉浦 裕[†]
安細 康介[†] 佐々木 良一^{††}

電子透かしは不正コピー者の特定や機器の制御に用いるので、挿入した情報とは異なる情報を誤って検出し、それを信用して処理を進めると、不正者の誤認や機器の誤動作などの重大な問題を引き起こす可能性がある。この問題への1つの対策は、誤検出を防止することであるが、完全な防止は困難である。そこで、検出した情報が誤っている確率を知り、その大きさによって検出情報を適切に利用することが重要である。ところが、この誤り確率を推定する方式は従来提案されていなかった。本論文では、画像の統計量に基づく電子透かし方式を前提として、誤り確率の推定方法を提案した。提案方式は、検出情報のビットに対応した統計量を分析し、これら統計量が従う正規分布の推定を通じて、誤り確率を推定する。正規分布の推定手段としてEMアルゴリズムを用いることで具体的なシステムを実現し、実際の画像を用いて、情報埋め込み直後および様々な圧縮強度のJPEG処理を行った画像からの検出実験を行った。その結果、誤り確率の実測値と推定値の比は、0.4から2.2であり、安全係数を2.2とすることで、提案方式を信頼して利用できることを明らかにした。

Estimating the Bit-error-rate in Digital Watermarking Using Inferential Statistics

ISAO ECHIZEN,[†] HIROSHI YOSHIURA,[†] KOUSUKE ANZAI[†]
and RYOICHI SASAKI^{††}

Bit-errors in detecting digital watermarks could cause critical failures because the detected bits are used to identify persons who illegally copied the digital contents and to control equipment that copy and playback the contents. It is difficult, however, to prevent bit-error completely. Estimating the ratio with that the detected bits are not correct is therefore important to use these bits appropriately and to avoid critical failures. This paper proposes a method for this estimation. The proposed method can be applied to statistic-based watermark methods. The method takes statistical values corresponding to the detected bits to infer Gaussian model that exists behind these values. It then estimates the ratio based on this model. Experimental evaluations have shown that the actual error ratio divided by the estimated ratio is 2.2 in the worst case and that the method can be reliably used with this margin.

1. はじめに

絵画や音楽、映画などのコンテンツをデジタル化して配信するコンテンツビジネスが近年さかになってきた。しかし、デジタルコンテンツは、取扱いが容易な反面、不正コピーにより著作権が侵害されやすいという問題がある。そこで、配布先名称やコピーフラグなどの情報をコンテンツ自身に挿入することで不正コピーを防止し、著作権を保護する電子透かし技術が注

目されており、多方面で研究が進められている^{1),2)}。

電子透かし技術により情報を挿入したコンテンツは、制作や流通の過程で様々なメディア処理が施される。たとえば、コンテンツが静止画の場合には、圧縮、フィルタリング、部分切り出し、拡大・縮小、回転などがある。さらに、不正コピー者により、挿入した情報を除去するための意図的なメディア処理が施される場合もある。このような多種多様なメディア処理の結果、情報検出時に、挿入した情報とは異なる情報を検出する可能性がある。電子透かしの情報は、不正者を特定したり、機器を制御したりするために用いる場合が多いので、上記の透かし情報の検出誤りにより、不正者の誤認や機器の誤動作などの重大な問題が生じてしまう。

[†] 株式会社日立製作所システム開発研究所
Systems Development Laboratory, Hitachi, Ltd.

^{††} 東京電機大学工学部情報通信工学科
Department of Information and Communication Engineering, School of Engineering, Tokyo Denki University

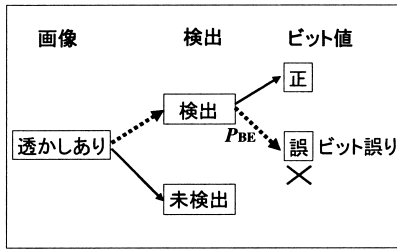


図 1 ビット誤り確率
Fig. 1 Bit-error-rate.

透かし情報の検出誤りに対処する方法は、従来から研究されているが、その多くは誤りの防止方法に関係するものである。ところが、コンテンツに施されるメディア処理は多種多様で、かつ予測できないので、誤りがないことの保証は困難である。そこで、検出した情報が誤まっている確率を推定し、それに従って検出情報を適切に利用することが重要であり、そのためには、誤り確率の推定が必須である。

本論文では、静止画用電子透かしを対象として、検出情報の検出誤り確率を推定する方式を提案する。以下、2章では、従来の電子透かしにおける検出誤り対策を概観し、その問題点を述べる。3章では、確率分布の推定手法に基づく検出誤り確率の推定方式を提案し、4章では、提案方式の有効性を評価する。

2. 従来の電子透かしにおける検出誤り対策

2.1 電子透かしの検出誤り

電子透かしの検出誤りには、以下の2種類がある。

- (1) False Positive (FP)
情報を挿入していない画像から、情報を検出する。
- (2) ビット誤り
情報を挿入した画像から、挿入情報とは異なる情報を検出する。

FPの従来研究としては、文献3), 4)などがある。

本論文では、上記のうち、(2)のビット誤りについて論ずる。図1は、画像、検出、ビット値の状態を表した遷移図である。図中の点線部分で示した遷移確率をビット誤り確率と定義し、 P_{BE} で表すことにする。本論文では、上記のビット誤り確率を推定する方式を提案し、次節でビット誤りに関する従来研究を概観する。

2.2 従来のビット誤り対策方法

電子透かしのビット誤り対策としては、以下の3種類が提案されている。

- (1) ビット誤りの防止

画質が劣化しない範囲で、できるだけ透かしを強く挿入する^{1),5)~7)}、透かし挿入箇所を多重化する⁸⁾、画像処理の影響を受けにくい低周波成分に挿入する^{9),10)}などの方法がある。

- (2) ビット誤りの検知および訂正
本来挿入したい情報以外に誤り訂正符号を挿入することで、検出情報の誤り検知および訂正を行う方法¹¹⁾がある。
- (3) ビット誤り確率の推定
ビット誤り確率の傾向を分析、推定する¹²⁾。

電子透かしでは、上述したように、対象となる画像は多種多様で、施される画像処理も多種多様である。したがって、上記(1)の誤りの防止を行っても、誤りがないことを保証するのは困難である。また、上記(2)のような誤り訂正符号を用いた方法では、挿入したい情報のほかに誤りの検知および訂正を行う符号を挿入しなければならず、画質劣化や実情報量の制限などの新たな問題が生じる。このように、誤りの防止や誤りの検出および訂正は、いずれも完全な対策ではなく、これを補う対策として(3)のビット誤り確率の推定が必要である。(3)の誤り確率の推定が可能であれば、検出情報をその誤り確率に従って適切に利用することで、誤りの問題を回避あるいは緩和することができる。

たとえば、不正コピーされたコンテンツから購入者のIDを検出し、不正者を特定するという応用を考える。この応用では、検出した購入者IDの誤り確率が十分に小さい場合には、検出した購入者を不正者と特定することができる。しかし、購入者IDの誤り確率が十分に小さくない場合には、ただちに検出した購入者を不正者と特定せず、その誤り確率に応じて、他の不正コピーコンテンツから、透かし情報の検出を試みるのが妥当であろう。このような意思決定のためには、検出情報からの誤り確率の分析、推定が必須である。

ビット誤り率の推定に関する従来研究としては、特定画像処理後の誤り率の分析¹²⁾がある。文献12)は、動画用透かしを対象として、画像処理の影響によってビットの判定値の生起確率が変化する結果、ビット誤り確率が增大することを明らかにし、MPEGなどの数種類の画像処理について、ビット誤り確率の最悪値を明らかにした。しかし、文献12)は、検出者の手元にある個々の画像におけるビット誤り確率の推定方法については、提案していない。

本論文では、「個々の検出情報のビット誤り確率を推定する方式」を提案する。

3. 分布の推定手法を用いた検出誤り確率推定方式

以降では、まず最初に、提案方式の前提となる透かし方式について説明し、次に提案方式の詳細を述べることにする。

3.1 前提となる透かし方式

本節では、提案方式の前提となる情報挿入および情報検出方式を説明する。この方式は、上述した誤り確率推定の従来方式¹²⁾において前提とされており、電子透かしの基本方式の1つである。

この方法では、透かし情報を表すパターンを画像に重畳して透かし画像を作成し、検出時には、そのパターンと透かし画像との相関をとることで、相関値の大きさから透かし情報を統計的に判定する方式である。以下では、簡単のため、まず最初に1ビットの透かし方式についてその原理を述べた後、複数ビット(m ビット)の透かし方式の原理を述べることにする。

3.1.1 1ビット透かし方式

透かし挿入 n ピクセルからなる原画像の輝度値の集合を $\mathbf{I} = \{I_i \mid 1 \leq i \leq n\}$ とする。透かしパターン $\mathbf{M} = \{M_i \mid 1 \leq i \leq n\}$ を透かし情報のビット値 b に従って、次式により重畳し、透かし画像 \mathbf{I}' を生成する。

$$\mathbf{I}' = \begin{cases} \mathbf{I} + \delta\mathbf{M} & \text{if } b = 1 \\ \mathbf{I} - \delta\mathbf{M} & \text{if } b = 0 \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 δ は透かしの挿入強度を表す。

透かし検出 透かしパターン \mathbf{M} と透かし画像 \mathbf{I}' との相関をとり、ビット判定値 v を算出する。すなわち、

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{n} \sum_i M_i I'_i = \frac{1}{n} \sum_i M_i (I_i \pm \delta M_i) \\ &= \frac{1}{n} \sum_i M_i I_i \pm \frac{\delta}{n} \sum_i M_i^2 \end{aligned} \quad (2)$$

である。原画像での判定値 v は、式(2)の第1項のみとなる。上式の M_i を平均0の擬似ランダム列にすることで、画像内からランダムに I_i を選択することと等価になる。すなわち、 $1/n \sum_i M_i I_i$ の各項 $M_i I_i$ は、任意の自然画像の輝度値集合に対して、互いに独立な確率変数と考えることができる^{8),12)}。したがって、中心極限定理により、透かしパターンの要素数 $n(\mathbf{M}) = n$ が十分に大きければ、原画像の v は、平均0、分散 σ^2 の正規分布

$$v \sim N(0, \sigma^2) \quad (3)$$

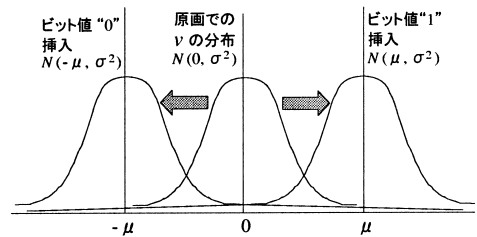


図2 透かし挿入による分布の遷移

Fig. 2 Transition of the distribution by watermarks.

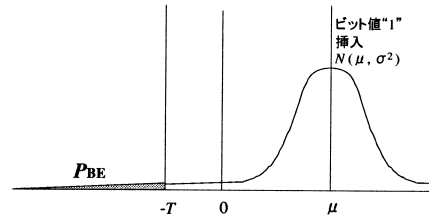


図3 1ビット検出でのビット誤り確率

Fig. 3 The bit-error-rate of the one-bit-detection.

に従い、透かし画像の v は、式(2)の第2項を $\delta/n \sum_i M_i^2 = \mu$ とおくと、

$$v \sim \begin{cases} N(\mu, \sigma^2) & \text{if } b = 1 \\ N(-\mu, \sigma^2) & \text{if } b = 0 \end{cases} \quad (4)$$

に従う。

図2は、透かし挿入による透かしビット判定値 v の確率分布の遷移を表している。透かし挿入により v の分布が $N(0, \sigma^2)$ から $N(\mu, \sigma^2)$ または $N(-\mu, \sigma^2)$ に遷移する。上記の分布の性質から、あるしきい値 T を用いて、 $|v| > T$ であれば「透かし検出」と確率的に判定できる。

ビット値判定 判定値 v としきい値 T の大小を比較して、ビット値 b を判定する。すなわち、

$$b = \begin{cases} 1 & \text{if } v \geq T \\ 0 & \text{if } v \leq -T \\ \text{“未検出”} & \text{if } -T < v < T \end{cases} \quad (5)$$

である。

図3は、ビット値“1”を透かし挿入した直後のビット誤り率について模式的に表した図である。図に示すように、ビット値“1”を挿入した場合のビット誤り確率は、ビット値“1”を誤まって“0”と判定する確率、すなわち、確率分布 $N(\mu, \sigma^2)$ の灰色部分の面積として次式で表される。

$$P_{BE|b=1} = \int_{-\infty}^{-T} f(v; \mu, \sigma^2) dv \quad (6)$$

ただし、 $f(v; \mu, \sigma^2)$ は、正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ の確率密

度関数である．同様に，ビット値“0”を挿入した場合のビット誤り確率は，

$$P_{BE|b=0} = \int_T^\infty f(v; -\mu, \sigma^2) dv \quad (7)$$

で表される．式(6)，(7)において， $P_{BE|b=1} = P_{BE|b=0}$ であるので，任意の挿入ビット値に対するビット誤り確率は， $f(v; \mu, \sigma^2)$ を用いて次式で表される．

$$P_{BE} = \int_{-\infty}^{-T} f(v; \mu, \sigma^2) dv \quad (8)$$

3.1.2 複数ビット透かし方式

複数ビット (m ビット) の場合には，画像を m 個の領域に分割して，各領域で各ビットに対応した透かしパターンにより1ビットの情報挿入・検出を行うなど，1ビットの場合の拡張により対処する．

透かし挿入 3.1.1 項で述べた原画像の輝度値の集合

\mathbf{I} を m 個の領域に分割し， $\mathbf{I}^{(k)} = \{I_i^{(k)} \mid 1 \leq k \leq m, 1 \leq i \leq \lfloor n/m \rfloor\}$ とする．分割された画像領域ごとに，透かしパターン $\mathbf{M}^{(k)} = \{M_i^{(k)} \mid 1 \leq k \leq m, 1 \leq i \leq \lfloor n/m \rfloor\}$ を式(1)と同様に，透かし情報の k 番目のビット値 b_k に従って，次式により重畳し，透かし画像 $\mathbf{I}'^{(k)}$ を作成する．

$$\mathbf{I}'^{(k)} = \begin{cases} \mathbf{I}^{(k)} + \delta \mathbf{M}^{(k)} & \text{if } b_k = 1 \\ \mathbf{I}^{(k)} - \delta \mathbf{M}^{(k)} & \text{if } b_k = 0 \end{cases} \quad (9)$$

透かし検出 透かしパターン $\mathbf{M}^{(k)}$ と透かし画像 $\mathbf{I}'^{(k)}$ との相関をとり， m 個のビット判定値 v_k を算出する．すなわち，

$$v_k = \frac{1}{\lfloor n/m \rfloor} \sum_i M_i^{(k)} I_i'^{(k)} \quad (10)$$

3.1.1 項の透かし検出と同様に，式(10)の m 個の透かしパターン $\mathbf{M}^{(k)}$ として，互いに独立な擬似ランダム列を用いると，各透かしパターンごとに，画像内からランダムにピクセルを選択することと等価になる．すなわち，1ビットの例と同様に， $\mathbf{M}^{(k)}$ の要素の数 $n(\mathbf{M}^{(k)}) = \lfloor n/m \rfloor$ が十分に大きければ， m 個の判定値 v_k は，中心極限定理より，任意の自然画像の輝度値集合に対して，以下の正規分布に独立に従う．

$$v_k \sim \begin{cases} N(\mu, \sigma^2) & \text{if } b_k = 1 \\ N(-\mu, \sigma^2) & \text{if } b_k = 0 \end{cases} \quad (11)$$

ビット値判定 判定値 v_k としきい値 T の大きさを比較して， k 番目のビット値 b_k を判定する．すなわち，

$$b_k = \begin{cases} 1 & \text{if } v_k \geq T \\ 0 & \text{if } v_k \leq -T \\ \text{“未検出”} & \text{if } -T < v_k < T \end{cases} \quad (12)$$

である．

m ビットの情報検出におけるビット誤りは， m ビットのすべてが「透かし検出」され，かつ，そのうちの少なくとも1ビット以上が誤まって判定される事象である．すなわち，任意の挿入ビット値に対する m ビットでのビット誤り確率は，1ビットと同様の考察により， $f(v; \mu, \sigma^2)$ を用いて次式で表される．

$$P_{BE} = \left\{ 1 - \int_{-T}^T f(v; \mu, \sigma^2) dv \right\}^m - \left\{ \int_T^\infty f(v; \mu, \sigma^2) dv \right\}^m \quad (13)$$

3.2 ビット誤り確率推定における問題の明確化

ビット誤り確率を算出するには，式(13)の誤り確率算出の式が示すように，正規分布の平均 μ と分散 σ^2 が必要である．すなわち，判定値 v_k が従う正規分布を知る必要がある．ところが，この正規分布の推定を行うには，下記の問題を解決する必要がある．

(1) 判定値からの分布の推定

与えられた透かし画像から得られる情報は，判定値 v_k であり，判定値が従う正規分布ではない．すなわち，ある判定値 v_k が得られたときに，そこから，判定値の背後にある正規分布を推定する必要がある．

(2) 判定値の分布判別の必要性

検出しようとするビットの値として，“0”と“1”の2つの可能性がある．したがって， μ, σ^2 を推定するためには，判定値が式(11)のどちらの正規分布に属するのかを判別し，その判別結果に基づいて， μ, σ^2 を推定する必要がある．

(3) 画像処理による判定値の変化

透かし画像に画像処理を施すと，画像の劣化が進むに従って，判定値の正規分布の平均値 μ ，分散 σ^2 が変化する¹²⁾．たとえば，透かし画像にランダムノイズを重畳した場合には，画素間の変動が増大するので分散 σ^2 が大きくなり，平滑化フィルタを施した場合には，隣接画素間の平均化処理により，画素間の変動が減少するので，分散 σ^2 が小さくなる．一方，画質の観点から，透かしパターン内の輝度増減の単位を， 1×1 ，あるいは 2×2 ピクセルのように小さくする，すなわち，透かしパターンを高周波化する

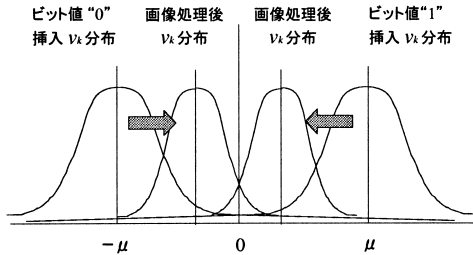


図4 画像処理による分布の遷移

Fig. 4 Transition of the distribution by the image processing.

ることで、透かし挿入による画質劣化を防止する
 ことが多い。このような透かし画像に、JPEG
 圧縮のような画像の高周波成分を除去する処理
 を施すと、透かしパターンが除去されるととも
 に、画素間の変動が減少するので、図4のよう
 に判定値の正規分布の平均値 μ が0に近づき、
 分散 σ^2 が小さくなる。

上記のような判定値の分布変化の中でも特に、
 分布の平均値が0に近づいたり、分散が大きくな
 ると、式(11)の2つの分布の重なりが大き
 くなるので、個々の分布の判別が困難になる。
 このような場合においても、分布の判別および
 μ 、 σ^2 の推定を正確に行う必要がある。

3.3 ビット誤り確率推定方式の提案

本節では、上記問題の解決策となる誤り確率の推定
 方式を提案する。

3.3.1 判定値からの分布の推定

与えられた透かし画像から、判定値 v_k が従う正規
 分布を推定するために、 m 個の判定値をすべて利用す
 ることで、正規分布の μ 、 σ^2 を推定することを考え
 る。以下、説明のために、まず最初に、挿入情報の m
 個のビット値が既知であり、かつ、ビット値をすべて
 “1”とした場合 ($\forall k, b_k = 1$) について、提案手法の基
 本的な原理を述べた後、一般の未知なビット値を挿入
 した場合について、その原理を述べることにする。

(1) 挿入ビット値がすべて“1”の場合

m 個の判定値 v_k によるヒストグラム
 (横軸: v_k , 縦軸: 頻度)をとると、各判定値
 は 3.1.2 項で述べたように独立に正規分布
 $N(\mu, \sigma^2)$ に従うので、ヒストグラムは、図5
 に示すような正規分布の形状になる。したがっ
 て、 m が十分大きければ、次式により μ 、 σ^2
 を推定することが可能である。

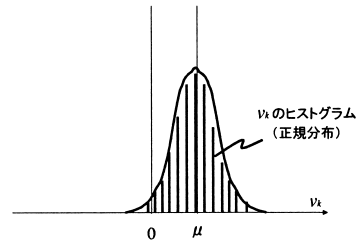
図5 v_k のヒストグラム (正規分布)

Fig. 5 The v_k -histogram (normal distribution).

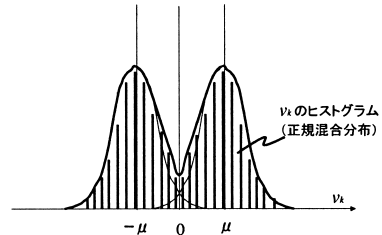
図6 v_k の k 分布 (正規混合分布)

Fig. 6 The v_k -histogram (mixture normal distribution).

$$\mu = \frac{1}{m} \sum_k v_k \quad (14)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{m} \sum_k v_k^2 - \mu^2 \quad (15)$$

(2) 一般の未知な挿入ビット値の場合

m 個の判定値 v_k は、挿入ビット値 b_k に依存
 して、正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ または、 $N(-\mu, \sigma^2)$
 に独立に従う。したがって、 m 個の判定値 v_k
 によるヒストグラムは、(1)のような正規分布
 の形状ではなく、図6に示すように2つの正
 規分布が混合した分布(正規混合分布)の形状
 になる。このような混合分布から μ 、 σ^2 を推
 定するために、まず各々の判定値が、2つの正
 規分布のどちらかに属するかを判別し、混合分
 布(図6のヒストグラムに対応)から正規分布
 (図5のヒストグラム)への変換を行った後に
 μ 、 σ^2 を推定する。

以降では、上記(2)における判定値の判別および推
 定手法について、複数の統計量を用いた分布の推定手
 法であるEMアルゴリズム^{14)~16)}を取り上げ、その
 原理を述べるとともに、EMアルゴリズムを用いた具
 体的な μ 、 σ^2 の推定方式を提案する。

3.3.2 EMアルゴリズムによる分布推定の具体例

EMアルゴリズムは、確率分布に従ったデータから確
 率分布のパラメータを推定する手法である。図6のよう
 に、確率分布が2つの正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 、 $N(-\mu, \sigma^2)$
 による混合分布の場合、本アルゴリズムにより、 m 個

の判定値 v_k から，以下の内部パラメータを得ることができる．

(1) 判定値 v_k が正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に属する確率 w_k ($N(-\mu, \sigma^2)$ に属する確率は， $1 - w_k$)．

(2) 正規分布の μ, σ^2 ．

上記 (2) の μ, σ^2 は，上記 (1) の確率 w_k を用いて，次式で表される．

$$\mu = \frac{1}{m\alpha} \sum_k w_k v_k \quad (16)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{m\alpha} \sum_k w_k v_k^2 - \mu^2 \quad (17)$$

ただし α は，混合分布に対する正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ の寄与率 $\alpha = 1/m \sum_k w_k$ を表し，挿入ビット値の“0”，“1”の割当て数と画像処理に依存する．式 (14)，(15) と式 (16)，(17) を比較すると，図 6 の混合分布に従う m 個の判定値 v_k を，確率 w_k で重み付けすることにより，図 6 の混合分布から図 5 の正規分布への変換が行われていることが分かる．

すなわち，3.3.1 項で述べた判定値の判別および推定において，上記 (1) が判定値 v_k の判別に対応し，上記 (2) が正規分布の μ, σ^2 の推定に対応する．本論文では，この EM アルゴリズムを用いることで，図 6 の混合分布に従う m 個の判定値 v_k から，正規分布の μ, σ^2 を推定する（具体的な μ, σ^2 算出の手順については，付録を参照のこと）．EM アルゴリズムにより推定した μ, σ^2 から，式 (13) の誤り確率の算出式により，ビット誤り確率を算出する．

3.3.3 ビット誤り確率の推定

下記のステップにより，3.1.2 項の m ビット透かし方式におけるビット誤り確率を推定することができる．

Step 1. 入力した透かし画像から，各ビットに対応した $M^{(k)}$ ($k = 1, \dots, m$) の挿入位置を特定し，式 (10) より， m 個の判定値 v_k を求める．

Step 2. 上述した EM アルゴリズムなどの手法により， m 個の判定値 v_k から μ, σ^2 を推定する．

Step 3. 式 (13) により， μ, σ^2 からビット誤り確率 P_{BE} を求める．

4. 評価

4.1 評価方法

3.1 節の挿入方式に従って， 2000×2000 ピクセルの 8 ビットグレイスケール画像の輝度成分に透かしを挿入した．生成した透かし画像に対して，様々な圧縮強度で JPEG 圧縮を行った後，3.3.3 項の処理フローに従って，ビット誤り確率の推定を行い，JPEG の各圧縮強度ごとに，提案方式により推定したビット誤り

確率（推定値）と実際のビット誤り確率（実測値）との比較を行った．透かし挿入・検出に必要な各種パラメータおよび評価画像については，以下の値を用いた．

(1) 透かしパターンの要素数 $n(M^{(k)})$

3.3.1 項で述べたように， m 個の透かし判定値 v_k が正規分布に従うためには，透かしパターン $M^{(k)}$ の要素数 $n(M^{(k)})$ を十分に大きくする必要がある．文献 17) によると， $n(M^{(k)}) = 4000$ にすれば十分であるので，本評価では，その要素数とした．

(2) 挿入ビット数 m

挿入ビット数 m は，評価画像のピクセル数 n を上記要素数で分割した値 $2000 \times 2000 / 4000 = 1000$ ビットとした．

(3) 透かし判定しきい値 T 本評価では，ビット誤り確率を評価するので，式 (12) の判定しきい値 T を $T = 0$ とし，検出ビットが“未検出”にならずに必ず判定が行われるようにした．

(4) 透かし強度 δ

挿入時の透かし強度 δ が小さすぎたり大きすぎたりすると，JPEG 圧縮後の誤り確率の大半が，1 または 0 となり，JPEG 圧縮強度や画像内容による誤り確率の傾向を分析できなくなる．そこで，誤り確率が 0 から 1 へ全域で分布するように透かし強度 δ を設定することにした．予備実験の結果，適切な透かし強度として $\delta = 4$ に設定した．なお，透かし強度が小さい場合（誤り確率がほとんど 1 の場合），および透かし強度が大きい場合（誤り確率がほとんど 0 の場合）を含め，様々な強度により，さらに詳細な評価を行うことが，今後の課題として必要と考える．

(5) EM アルゴリズムの繰返しステップ数 τ

EM アルゴリズムは， m 個の判定値 v_k から μ, σ^2 を逐次改良していく繰返しアルゴリズムである（付録を参照のこと）．文献 14) での数値実験によれば， μ, σ^2 が十分な精度を得るために必要な繰返しステップ数 τ は， $m = 1000$ の場合， $\tau = 3500$ 程度であるので，本評価では，そのステップ数とした．

(6) 評価画像

前提としている透かし方式のビット誤りは，透かしパターン $M^{(k)}$ と輝度値集合 I との相関値である判定値 v_k の変化により生じ，その変化の度合いは，画像内の輝度値分散 $Var(I)$ に大きく依存する．そこで， $Var(I)$ の異なる 3

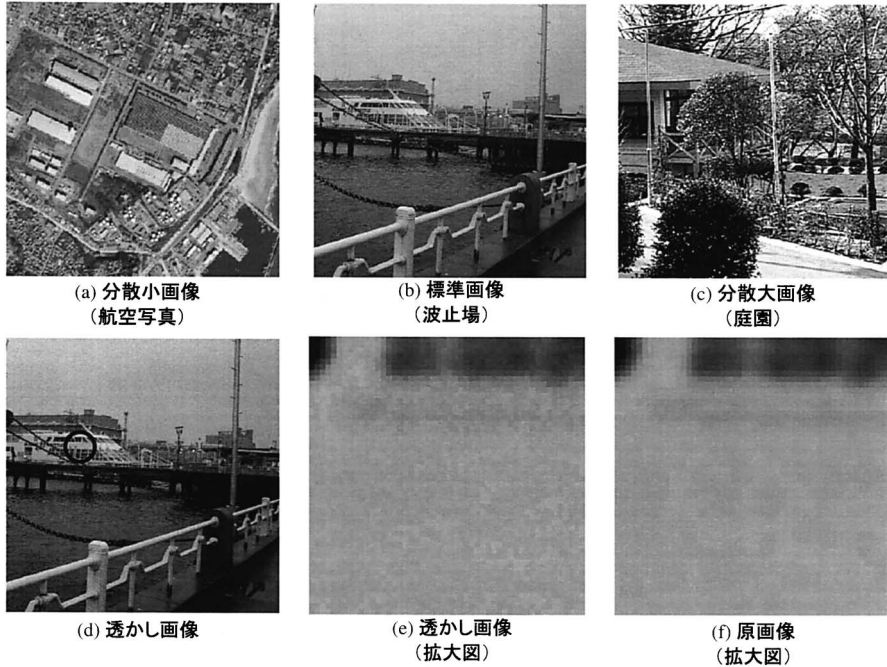


図 7 評価画像

Fig. 7 Experimental images.

種類の 2000×2000 ピクセル 8 ビットグレイスケール画像を評価画像とした．具体的には，文献 8) が平均的な画像の輝度値分散としている $Var(I) = 3500$ 程度の画像を標準画像とし，それに加え，分散がより大きい画像とより小さい画像について評価を行った．評価画像とその輝度値分散は以下のとおりである．

- 分散小画像 (航空写真): $Var(I) = 1644$
- 標準画像 (波止場): $Var(I) = 3413$
- 分散大画像 (庭園): $Var(I) = 5007$

図 7 (a), (b), (c) に上記 3 種類の評価画像を示す．

ビット誤り確率の推定値と実測値の比較評価は，各評価画像ごとに以下の手順で行った (図 8 参照)．

- 評価画像に 1000 通りの異なる透かしパターンを挿入し，1000 枚の透かし画像を生成する．
- (a) で生成した 1000 枚の透かし画像に JPEG 圧縮を施し，圧縮された 1000 枚の透かし画像から透かし情報を検出する．
(検出を誤まった透かし画像の枚数) / (透かし画像の枚数 = 1000 枚) により，誤り確率の実測値を求め，誤り確率の推定値と比較する．

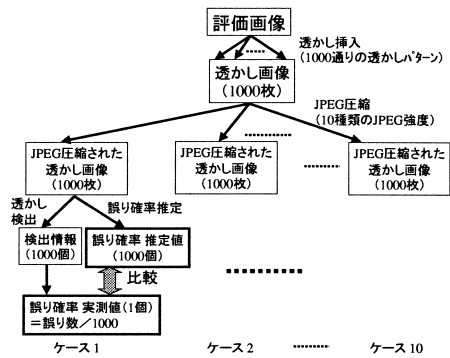


図 8 評価概要

Fig. 8 An overview of the evaluation.

- 上記 (b) を 10 種類の異なる JPEG 強度について測定する．すなわち，各評価画像ごとに 10 の測定ケースにおいて，推定値と実測値を比較する．

上記手順の (a)，すなわち，透かし挿入は，3.1.2 項の透かし挿入方式に従い，下記ステップ (Step 1~4) により透かしパターンの異なる 1000 枚の透かし画像を生成した (図 9 参照)．

Step 1. 疑似乱数 $S1$ を用いて，挿入ビット数 $m = 1000$ に対応して，原画像の輝度値の集合 I (2000×2000 ピクセル) を 1000 個の領域

図 7 (a) は，国土地理院より提供していただいた．

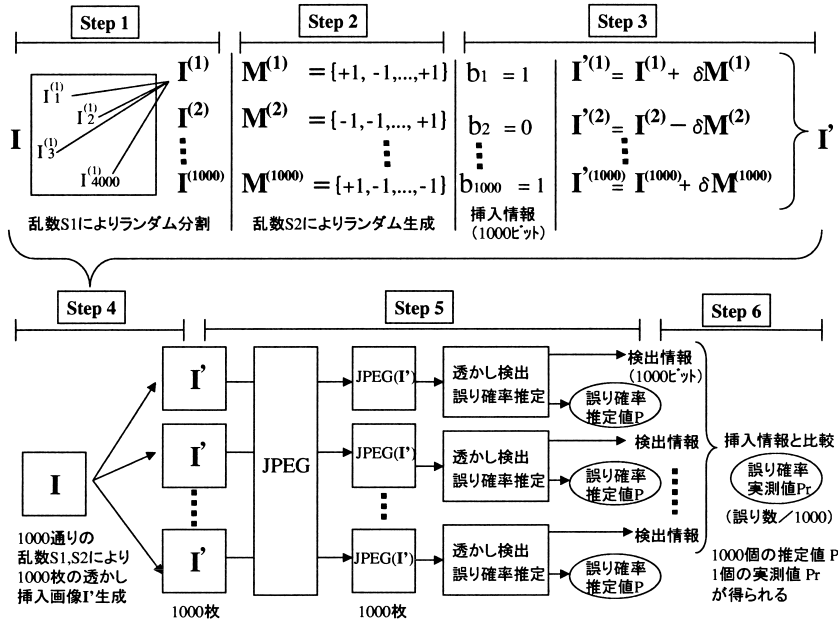


図 9 評価手順

Fig. 9 The procedure for the evaluation.

$I^{(k)} = \{I_i^{(k)} \mid 1 \leq k \leq 1000, 1 \leq i \leq 4000\}$
に重複のないようにランダムに分割.

Step 2. 疑似乱数 $S2$ により, 上記 1000 個の各領域 $I^{(k)}$ ($k = 1, \dots, 1000$) に重畳する透かしパターン $M^{(k)}$ を生成する. $M^{(k)}$ の要素は, $M_i^{(k)} = +1$ or -1 ($i = 1, \dots, 4000$) からなる疑似乱数列である.

Step 3. 透かし情報の挿入ビット値 $b_k = +1$ or -1 ($k = 1, \dots, 1000$) をランダムに生成. 生成した挿入ビット値 b_k に従い, 式 (9) により, 領域 $I^{(k)}$ に透かしパターン $M^{(k)}$ を重畳する. その結果, 1000 ビットの透かし情報が挿入される.

Step 4. 1000 通りの乱数の組 $S1, S2$ により, 透かしパターンの異なる 1000 枚の透かし画像を上記 Step 1~3 に従い作成する.

上記手順の (b), すなわち, 各 JPEG 圧縮強度における, 推定値と実測値の測定方法は, 文献 3) の測定方法に倣い, 下記ステップ (Step 5, Step 6) に従った (図 9 参照).

Step 5. Step 4 で作成した 1000 枚の透かし画像に, 所定の圧縮強度で JPEG 圧縮を行った後, 重畳時と同じ透かしパターンとの相関により, 1000 枚の画像から情報を検出する. この検出の過程で, ビット誤り確率の推定を行い. 1000 個の誤り確率の推定値を算出する. 本ステップにより, 検出

情報 ($m = 1000$ ビット) と誤り確率の推定値の組が 1000 通り得られる.

Step 6. 上記 1000 個の検出情報を, 各々挿入情報と比較することで, 検出誤り数をカウントし, 誤り数/1000 をビット誤り確率の実測値とする. すなわち, 各測定ケースにおいて, 1000 個の推定値と 1 個の実測値が得られることになる.

4.2 評価結果

図 7 (d) に, 本評価に用いた透かし挿入画像 (標準画像の場合) を示す. また, 図 7 (e), (f) に透かし挿入画像と原画像の拡大図 (図 7 (d) の黒枠部分 50×50 ピクセル) をそれぞれ示す. 透かし挿入画像の PSNR は, 強度 $\delta = 4$ の透かしパターンを重畳しているので, 3 種類の評価画像とも 36.0dB であった. PSNR は, 式 (18) により算出した.

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(255^2 n / \sum_{i=1}^n (I'_i - I_i)^2 \right) \quad (18)$$

図 10 に, 前述した各測定箇所に対する, ビット誤り確率の推定値と実測値の測定結果を示す.

図 10 の横軸は, JPEG の圧縮強度パラメータである量子化ステップサイズ q ($q = 1, \dots, 99$) であり, q の値が大きいくほど強い圧縮が施される. 図 10 の縦軸は, ビット誤り確率を表す. 図中の ●印は, 実測値を表す. 推定値については, 1000 枚の透かし画像で変動があるので, 1000 個の推定値の変動を線分で表している. たとえば, 図中の量子化ステップサイズが 5 の箇所の ●印は, 実測値が 0.059 であることを表し, 同

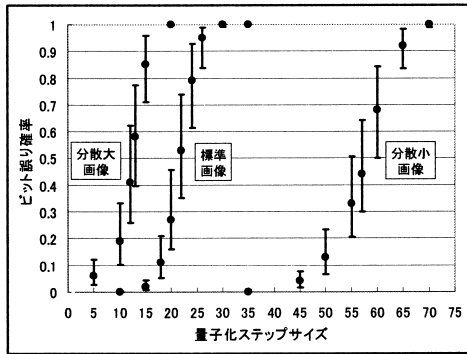


図 10 JPEG 量子化ステップとビット誤り確率の関係
Fig. 10 Relation between the quantum-step-scale of JPEG and the bit-error-rate.

じ箇所は、1000 枚の透かし画像での推定値が最大 0.122, 最小 0.027 であることを表している。なお、図の見易さの観点から、一部の測定箇所での推定値と実測値のデータを図中から省略した。

図 10 の評価結果から、各測定箇所における推定値の性質について、次のように考察される。

- (1) 推定値は、実測値を中心として変動している。このことは、提案方式が基本的に妥当であることを表している。
- (2) 上記変動の大きさは、推定の誤差に相当する。実測値を P_r , 推定値の最大値と最小値をそれぞれ P_{\max} , P_{\min} とすると、推定の誤差の最大値は、実測値と推定値の比を用いて

$$\max\left(\frac{P_r}{P_{\min}}, \frac{P_{\max}}{P_r}\right)$$

で表される。

次に、提案方式の精度を評価するために、図 10 の評価結果に基づいて、各評価画像の実測値と推定値の比を算出した。算出結果を図 11 に示す。図の横軸は、ビット誤り確率の推定値であり、縦軸は、実測値/推定値の最大値 γ_{\max} と最小値 γ_{\min} を表している。図 11 から、推定値と実測値の定量的関係、および提案方式の精度に関して以下が考察される。

- (1) ビット誤り確率の推定値が P である場合に、推定値 P に依存した係数 $\gamma_{\max}^{(P)}$, $\gamma_{\min}^{(P)}$ により、 $\gamma_{\min}^{(P)}P < P_r < \gamma_{\max}^{(P)}P$ の誤差範囲で、提案方式は実測値 P_r を推定可能である。たとえば、透かし画像の推定値が 0.2 の場合、図 11 より、 $\gamma_{\max}^{(0.2)} \sim 1.75$, $\gamma_{\min}^{(0.2)} \sim 0.45$ なので、実測値 P_r は、 $0.09 < P_r < 0.35$ の範囲に存在し、上記透かし画像の検出情報は、最大 0.35 のビット誤り確率を持つといえる。

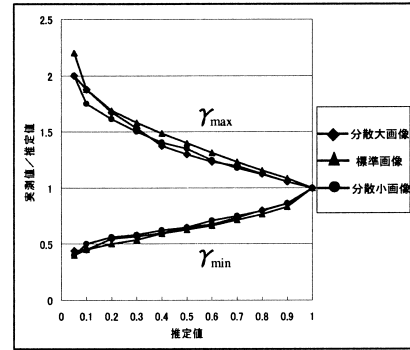


図 11 実測値/推定値
Fig. 11 Measurement/estimate ratio.

- (2) 本評価で測定した推定値 P の範囲 ($0.05 \leq P < 1$) における実測値/推定値の最大値と最小値はそれぞれ、

$$\max_P \gamma_{\max}^{(P)} = 2.2, \quad \min_P \gamma_{\min}^{(P)} = 0.4$$

であり、いずれも $P = 0.05$ の場合に最大、最小となる。

- (3) 電子透かしの実用化において、特に問題となるのは、推定時に実際のビット誤り確率を少なく見積もる場合である。この問題の対策としては、実測値/推定値の最大値である $\max_P \gamma_{\max}^{(P)} = 2.2$ を推定値 P の係数とすればよい。すなわち、安全係数を 2.2 にすることで、提案方式を信頼して利用することができる。
- (4) 提案方式による推定値 P の誤差範囲は、評価画像や JPEG の圧縮強度に依存せず、ほぼ同じである。すなわち、提案方式は、推定値 P のみに依存して、ビット誤り確率の誤差範囲を見積もることができる。

上記の推定値 P の範囲が $P < 0.05$ の場合については、実測値の測定に用いた透かし画像のサンプル数が 1000 であるため、推定値と実測値の関係について十分な測定ができなかった。このようなビット誤り確率が小さい領域についての提案方式の分析は、より多くのサンプルを用いた評価実験が必要であり、今後の課題である。

5. 結 論

電子透かしの検出においてビット値の誤り確率を推定することは、検出情報の適切な利用のために必須であり、電子透かしの実用化における本質的な課題である。ところが、この課題は従来ほとんど研究されておらず、ビット誤り確率の推定方式は提案されていな

かった。

本論文では、統計量に基づくビット誤り確率の推定方法を提案した。また、EM アルゴリズムを用いて具体的なシステムを実現し、実際の画像を用いて評価実験を行った。その結果、誤り確率の実測値と推定値の比は、0.4 から 2.2 であり、安全係数を 2.2 とすることで、提案方式を信頼して利用できることを明らかにした。

提案方式は、ビット値を判定するための統計量が、それぞれ独立に正規分布に従うことを本質的な前提としている。そこで、3.1 節で述べた透かしパターン重畳型の以外の電子透かし方式、たとえば、量子化誤差を利用する電子透かし方式²⁾についても、上記の本質的な前提条件を満たす場合には、提案方式の適用が可能であると考えられる。また、静止画だけではなく、動画や音楽用の電子透かし方式への適用も考えられる。そこで、提案方式の適用範囲をより明確化するとともに、方式を一般化することが今後の課題となる。

他の課題としては、以下があげられる。

- (1) 実測値と推定値の誤差の原因を(たとえば、EM アルゴリズムによる推定時の誤差の原因について)より詳細に分析することで、提案方式をより精密化する。
- (2) より多くのサンプルを用いた評価実験により、誤り確率が 0.05 以下について提案方式の評価を行う。
- (3) JPEG 以外の画像処理(各種のフィルタ、拡大・縮小など)を施した場合について、提案方式の信頼性を明らかにする。

謝辞 本研究に関して、ご指導ご助言をいただきました広島市立大学情報科学部の高忠雄教授、大阪大学大学院基礎工学研究科の藤原融教授、岩手県立大学ソフトウェア情報学部の高田豊雄教授、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科の楯勇一助教授、電子技術総合研究所の渡辺創博士に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Swanson, M., Kobayashi, M. and Tewfik, A.: Multimedia Data-Embedding and Watermarking Technologies, *Proc. IEEE*, Vol.86, No.6, pp.1064-1087 (1998).
- 2) 松井甲子雄: 電子透かしの基礎, 森北出版(1998).
- 3) Linnartz, J.-P., Kalker, T. and Depovere, G.: Modelling the False Alarm and Missed Detection Rate for Electronic Watermarks, *Proc. Information Hiding*, LNCS, Vol.1525, pp.329-343

(1998).

- 4) 小林誠士, 上條浩一, 清水周一: 近傍ピクセルの性質を用いたデータハイディング—近傍ピクセルの統計的性質, 第 56 回情報処理学会全国大会論文集, 1V-03 (1998).
- 5) 新見道治, 野田秀樹, 河口英二: 複雑さによる領域分割を利用した大容量画像深層暗号化, 電子情報通信学会論文誌, J81-D-II, No.6, pp.1132-1140 (1998).
- 6) Delaigle, J.F., De Vleeschouwer, C. and Macq, B.: Watermarking algorithm based on a human visual model, *Signal Processing*, Vol.66, pp.319-335 (1998).
- 7) 越前 功, 吉浦 裕, 安細康介, 田口順一, 黒須 豊, 佐々木良一, 手塚 悟: 輪郭保存に基づく電子透かしの画質維持方式, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.6, pp.1828-1839 (2000).
- 8) Bender, W., Gruhl, D. and Morimoto, N.: Techniques for data hiding, *Proc. SPIE*, Vol.2020, pp.2420-2440 (1995).
- 9) 石塚裕一, 酒井康行, 櫻井幸一: 周波数変換に基づいた電子透かし技術の画質評価に関して, 信学技報, ISEC-97-22, pp.87-96 (1997).
- 10) 酒井康行, 石塚裕一, 櫻井幸一: 著作権保護のためのウェーブレット変換を用いた電子透かし方式の安全評価, 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.12, pp.2640-2647 (1997).
- 11) 山口和彦, 岩村恵市, 今井秀樹: 誤り訂正符号を用いたアルゴリズム公開型電子透かし, 1999 年暗号と情報セキュリティシンポジウム講演論文集, SCIS'99-T4-2.2 (1999).
- 12) 杉原 亮: 動画の電子透かしにおける信頼性評価, 2000 年暗号と情報セキュリティシンポジウム講演論文集, SCIS2000-N02 (2000).
- 13) 小野定康, 鈴木純司: JPEG/MPEG2 の実現法, オーム社 (1995).
- 14) Redner, R. and Walker, H.: Mixture densities, maximum likelihood and the EM algorithm, *SIAM Review*, Vol.26, pp.195-239 (1984).
- 15) 赤穂昭太郎: EM アルゴリズムの幾何学, 情報処理, Vol.37, No.1, pp.43-51 (1996).
- 16) 栗田多喜夫: 統計的画像処理手法 (1999). <http://www.etl.go.jp/%7Ekurita/lecture/statimage/>
- 17) Gruhl, D. and Bender, W.: Information Hiding to Foil the Casual Counterfeiter, *Proc. Information Hiding*, LNCS, Vol.1525, pp.1-15 (1998).

付録 EM アルゴリズムによる μ, σ^2 算出の手順^{15), 16)}

図 6 の混合分布の確率密度関数 $g(v; \alpha, \mu, \sigma^2)$ を次式により定義する。

$$g(v; \alpha, \mu, \sigma^2) = \alpha f(v; \mu, \sigma^2) + (1 - \alpha) f(v; -\mu, \sigma^2) \quad (19)$$

ただし, $f(v; \mu, \sigma^2)$, $f(v; -\mu, \sigma^2)$ は, 正規分布の確率密度関数であり, α ($0 \leq \alpha \leq 1$) は, 3.3.2 項で述べた正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ の寄与率である.

上式の混合分布に従う m 個の判定値 v_k から, 下記に示す繰返しステップにより, μ, σ^2 を推定する.

Step 1. 式 (19) の正規分布のパラメータ $\alpha^{(t)}, \mu^{(t)}, \sigma^{2(t)}$ の初期値を適当な値 $\alpha^{(0)}, \mu^{(0)}, \sigma^{2(0)}$ にとる.

Step 2. $t = 0, 1, 2, \dots, \tau$ に対して, 以下のステップを繰り返す.

Step 3. m 個の v_k に対して, 次式に従って $w_k^{(t)}$ を算出する.

$$w_k^{(t)} = \frac{\alpha^{(t)} f(v_k; \mu^{(t)}, \sigma^{2(t)})}{g(v_k; \alpha^{(t)}, \mu^{(t)}, \sigma^{2(t)})} \quad (20)$$

$w_k^{(t)}$ は, 判定値 v_k が, 式 (19) の第 1 項の正規分布 $N(\mu^{(t)}, \sigma^{2(t)})$ に従う確率を表している. すなわち, $w_k^{(t)}$ により, 判定値 v_k が, 2 つの正規分布のどちらに従うかを確率的に判別している.

Step 4. Step 3 で算出した $w_k^{(t)}$ から, 各正規分布のパラメータ $\alpha^{(t)}, \mu^{(t)}, \sigma^{2(t)}$ を以下の式で更新する.

$$\alpha^{(t+1)} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m w_k^{(t)} \quad (21)$$

$$\mu^{(t+1)} = \frac{1}{m\alpha^{(t+1)}} \sum_{k=1}^m w_k^{(t)} v_k \quad (22)$$

$$\sigma^{2(t+1)} = \frac{1}{m\alpha^{(t+1)}} \sum_{k=1}^m w_k^{(t)} v_k^2 - \mu^{(t+1)2} \quad (23)$$

式 (22) と式 (23) は, $w_k^{(t)}$ で重みづけされた平均と分散を表している.

(平成 12 年 12 月 11 日受付)

(平成 13 年 6 月 19 日採録)



越前 功 (正会員)

1995 年東京工業大学理学部応用物理学科卒業. 1997 年同大学大学院修士課程修了 (応用物理学). 同年 (株) 日立製作所入社. 現在, システム開発研究所第 7 部 (セキュリティシステム研究部) に勤務. 情報セキュリティ, 電子透かしの研究開発に従事.



吉浦 裕 (正会員)

1981 年東京大学理学部情報科学科卒業. 同年 (株) 日立製作所入社. 日立研究所を経て, 現在, システム開発研究所第 7 部 (セキュリティシステム研究部) に勤務. 自然言語処理, 知識処理, 情報セキュリティ, 著作権保護の研究開発に従事. 理学博士 (東京大学). 電子情報通信学会, 人工知能学会各会員. 1990 年情報処理学会学術奨励賞受賞.



安細 康介 (正会員)

1996 年東北大学理学部物理学科卒業. 1998 年同大学大学院修士課程修了 (物理学). 同年 (株) 日立製作所入社. 現在, システム開発研究所第 7 部 (セキュリティシステム研究部) に勤務. 情報セキュリティ, 電子透かしの研究開発に従事.



佐々木良一 (正会員)

1971 年東京大学卒業. 同年 (株) 日立製作所入社. システム開発研究所にてシステム高信頼化技術, セキュリティ技術, ネットワーク管理システム等の研究開発に従事し, ネットワーク管理システム NETM や各種セキュリティシステム等の製品化に貢献. 同研究所第 4 部 (ネットワーク関連部) 部長やセキュリティシステム研究センター長, 主管研究長などを経て 2001 年 4 月より東京電機大学工学部教授. 工学博士 (東京大学). 1983 年電気学会論文賞受賞. 1998 年電気学会著作賞受賞. 著書に「インターネットセキュリティ 基礎と対策技術」(共著, オーム社, 1996), 「インターネットセキュリティ入門」(岩波新書, 1999), 「インターネットコマース 新動向と技術」(共編著, 共立出版, 2000) 等. IEEE, 電子情報通信学会, 電気学会等の会員. 情報処理学会コンピュータセキュリティ研究会主査.