輪郭保存に基づく電子透かしの画質維持方式

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[†]

画質劣化の防止は，電子透かしの本質的な課題であり，その方法としては，画像のうち透かしの目立ちにくい場所に透かしを挿入することが有効である．しかし従来方式は，目立ちにくい場所の選定基準が不適切なため，物体の輪郭部に透かしを挿入し，輪郭を崩していた．本論文では，画像の各部分において最も輝度変動の小さい方向を求め，その方向線上での輝度の偏差を当該部分における透かしの目立ちにくさの程度とする．評価実験を通じて，提案方式は従来方式に比べ，物体の輪郭の崩れが防止できることを示すとともに，同画質での透かし挿入量が増大することを明らかにする．

Maintaining Image Quality in Digital Watermarking Based on Contour Preserving

Isao Echizen,[†] Hiroshi Yoshiura,[†] Kousuke Anzai,[†]
Jun'ichi Taguchi,[†] Yutaka Kurosu,[††] Ryoichi Sasaki[†]
and Satoru Tezuka[†]

Maintaining image quality is an essential requirement for digital watermarking. Previous methods for maintaining image quality, however, embedded watermarks onto contours of objects and distorted the contours because they used inadequate criteria for deciding which portions of an image is suitable for hiding watermarks. This paper proposes a new criterion that avoids distortion of object contours. Experimental evaluations have shown the effectiveness of the proposed method and also have shown that a embedded quantity of proposed method can be more than that of previous methods on the same image quality.

1. はじめに

絵画や音楽映画などのコンテンツをディジタル化して配布するコンテンツビジネスがさかんになってきた．ディジタルコンテンツは取扱いが容易で，使用による劣化がない反面，不正コピーが容易で著作権が侵害されやすいという問題がある．そこで，配布先名称などの情報をコンテンツ自身に埋め込むことで不正コピーを防止し，著作権の保護を可能にする電子透かしが注目されている．本論文では，静止画を対象とした透かし挿入方法について述べる．

電子透かしの保護対象となる画像は，美術画像や証拠写真などデリケートな画像なので，透かし挿入による画質の劣化は許されない．すなわち，画質劣化防止は，電子透かしにおける重要な技術課題である．電子透かしの画質劣化防止については，従来から多くの研究があるが，従来方式の多くは，ピクセル値の変化が激しい箇所に透かしを多く挿入するため，視覚的に重要な輪郭部分を崩してしまう．

本論文では，濃淡情報変更型の電子透かしを対象として，上記の問題への解答を提案する．以下 2 章では，従来の電子透かしにおける画質劣化の防止を概観する．3 章では，変更許容度に基づく画質劣化防止の方式を提案し，4 章では，提案方式の有効性を評価する．さらに，5 章では，本研究の位置づけを述べ，6 章では結論を述べる．

2. 従来の電子透かしにおける画質劣化の防止

透かしの挿入方式は，ピクセル値を直接変更する方式と周波数成分を変更する方式[1)~3)] に大別される．周波数変更方式はピクセル値変更方式に比べ，圧縮や位置シフトなどの処理に強い一方，挿入量が少ないため，

† 株式会社日立製作所システム開発研究所
Systems Development Laboratory, Hitachi, Ltd.
†† 株式会社日立製作所ソフトウェア事業部
Software Division, Hitachi, Ltd.

情報の冗長度を大きくできず，正しい情報が検出しにくくなる．どちらの方式が優れているかは一概にいえない．本論文では，ピクセル値を直接変更する方式を対象とする．ピクセル値変更方式は，さらにピクセルのカラー情報を変更する方式[4),5)]と濃淡情報（輝度値）を変更する方式に分類できるが，本論文ではそのうちの濃淡情報変更方式を対象にする．

2.1 電子透かしの技術課題

電子透かしに要請される技術課題は，以下の 3 つに大別される．

- 画質劣化防止
  透かし挿入による視覚的劣化が小さい．
- 画像処理耐性向上
  透かしを挿入した画像に圧縮，拡大・縮小，各種フィルタなどの処理を施しても，挿入した情報が消失しない．
- 誤検出防止
  挿入時の情報と検出時の情報が異なってしまったり，透かしを挿入していない画像から何らかの情報を検出してしまう可能性が十分に少ない．

本論文では，画質劣化防止の観点から従来の電子透かしを概観し，その問題点を述べることとする．

2.2 用語の定義

- 透かし挿入：画像に情報を挿入するためにピクセルの輝度値を変更すること．すなわち，n ピクセルからなる入力画像の輝度値を l_i $(i = 1, \ldots, n)$ とすると，透かし挿入画像の輝度値 l'_i は埋め込み演算 E により，
  $$E : l_i \rightarrow l'_i$$
  で表される．
- 透かし挿入強度：透かしの挿入にともなうピクセルの輝度値の変更量．ピクセル i の挿入強度 f_i は，
  $$f_i = |l'_i - l_i|$$
  で表される．
- 透かしの挿入量：画像内の全ピクセルの透かし挿入強度の和．挿入量を Q とすると
  $$Q = \sum_{i=1}^{n} f_i$$
  で表される．

2.3 従来方式の問題点

画質劣化防止の従来方式には以下の 2 種類がある．

(1) 検出しやすい場所や画像処理の影響を受けにくい場所に挿入することで挿入量を削減し，間接的に画質劣化を防止[6)~9)]．

(2) 視覚的に透かしの目立ちにくい場所に挿入[10)~12)]．

従来方式 (1) の一例として，2 組のピクセル集合 $\{a_i\}$，$\{b_i\}$ の輝度値に統計的な有意差を与えるパッチワーク方式[13)]において，より少ない変更で検出可能とする方法[8)]がある．具体的には，対応するピクセル a_i，b_i として，隣接ピクセルを選択することで，少ない変更で有意差を検出できるようにする．このようにして，方式 8) は，検出に必要なピクセルの変更を低減し，間接的に画質劣化を防止する．一方，従来方式 (2) は，視覚に依存して透かしを挿入することで，直接的に画質劣化を防止する．本論文では，画質劣化防止の観点から従来方式 (2) に着目し，その問題点について述べることにする．

従来方式 (2) の一例として，マスキング効果を用いる方式がある[11),12)]．この方式は，強い信号（マスキング信号）の近傍に存在する弱い信号は知覚されにくいという視覚のマスキング効果を利用して，画像の乱雑な部分，すなわち輝度値の変化が激しい部分に透かしを挿入する．

具体的には，透かし挿入箇所とその近傍にあるマスキング信号の周波数が等しい場合，輝度値のコントラスト C を
$$C = \frac{2(l_{\max} - l_{\min})}{l_{\max} + l_{\min}}$$
で定義すると，透かし挿入箇所の許容コントラスト C_{s} は，
$$C_{\mathrm{s}} = C_0 \max\left[1, \left(\frac{C_{\mathrm{m}}}{C_0}\right)^{\epsilon}\right]$$
で与えられる．ただし，C_{m} はマスキング信号のコントラスト，C_0 はマスキング効果を考慮しないときの許容コントラストを表し，ϵ は周波数に依存した次数で $0.6 \leq \epsilon \leq 1.1$ の値をとる．この許容コントラスト C_{s} を透かしの目立ちにくさの判断基準として，C_{s} が大きいほど透かしを多く挿入する．

ところが，上記の基準に従って透かしを挿入すると，強い信号の近傍では C_{s} が大きくなり，透かしを多く挿入するので，物体の輪郭という視覚的に重要な部分を崩してしまう．たとえば，**図 1** (a)，(b) は原画とその輪郭部分の拡大図の例であり，図 1 (c) は上記 C_{s} の基準に基づいて挿入した透かし画像である．図が示すように，図 1 (c) では物体の輪郭が崩れている．これは輪郭の外側と内側の輝度差が大きいため，輪郭上での C_{s} の値が大きくなり，透かしを強く挿入したためである．

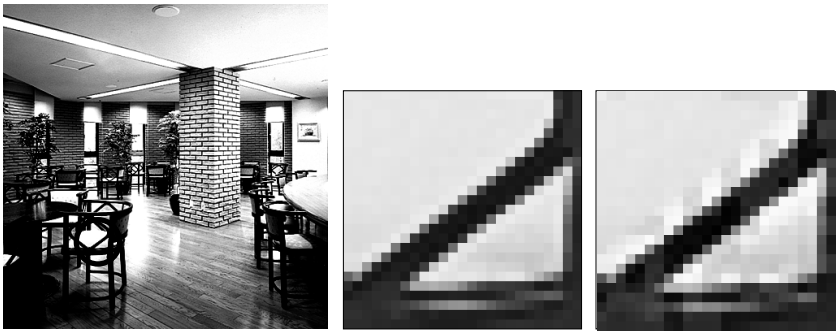


図 1 従来方式の問題点
Fig. 1 A problem of previous method.

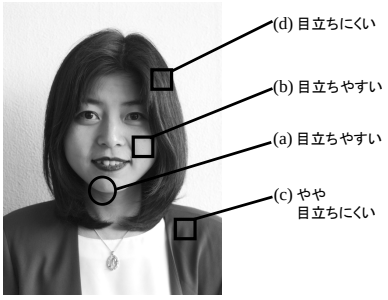


図 2 透かしの目立ちにくさの例
Fig. 2 An example of watermarks visibility.

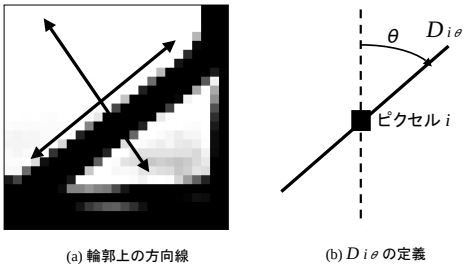


図 3 方向に依存した輝度の変動
Fig. 3 A change of luminance level dependent on the direction.

3. 一次元最小偏差に基づく画質劣化防止方式

3.1 透かしの目立ちやすさの判断基準

本節では，透かしの目立ちにくさを判断するための新しい基準を提案する．

3.1.1 基準の満たすべき性質

画像の性質と透かしの目立ちにくさとの関係を画質評価により分析した結果，以下が判明した．新しい基準は，この実験結果と整合する必要がある．

- 前述の図 1 (b) および**図 2** (a) のような輪郭部分では透かしは目立ちやすい．
- 輪郭部分以外では図 2 (b) のような高周波成分の少ない部分では透かしは目立ちやすく図 2 (c), (d) のように高周波成分が増加するほど透かしは目立ちにくくなる．

3.1.2 基準の具体例

図 3 (a) のように，輪郭をまたぐ方向線上ではピクセル輝度の変動は大きいが，輪郭に沿う方向線上では，ピクセル輝度の変動は小さい[14),15)]．また，図 2 (b) のような高周波成分の少ない部分では，どの方向でもピクセル輝度の変動は小さい．一方，図 2 (d) のような高周波成分の多い部分では，どの方向でもピクセル輝度の変動は大きい．

以上から，画像の部分における透かしの目立ちにくさの基準を各方向線上のピクセル輝度の標準偏差を計算したときの最小値とする．すなわち，i 番目のピクセルでの目立ちにくさの基準 S_i は，図 3 (b) に示すように，ピクセル i を中心とする傾き θ の方向線上の輝度値の集合を $D_{i\theta}$ とすると，

$$S_i = \min_{\theta} \sqrt{\sigma^2(D_{i\theta})}$$

で表される．ただし，$\sigma^2(\bullet)$ は集合内要素の分散を求める演算である．この値 S_i をピクセル i の一次元最小偏差と呼ぶことにする．S_i が大きいほど透かしが目立ちにくいと判断する．

この基準によれば，輪郭部分では S_i は小さい値となるので，透かしが目立ちやすいと判断する．高周波成分の少ない部分では，S_i は小さいので，透かしが目立ちやすいと判断し，高周波成分が多くなるほど目立にくいと判断する．したがって基準は妥当と考える．

3.1.3 方向線の長さと数

方向線 $D_{i\theta}$ が長すぎる場合，分散の計算対象となるピクセルの数が多いので，処理時間が増大する．逆に短すぎる場合，自然画像などの隣接ピクセルどうしは高い相関を持つので，方向線上のピクセルの輝度変動は，どの方向でも小さくなる．その結果，画像内で S_i の分布が小さい値に集中するので，S_i によって目立ちにくさの程度を識別しにくくなり，目立ちにくさの適切な判断ができなくなる．

また，方向の数が多すぎる場合は，分散の計算時間が方向の数に比例して増大し，最小値を求める際のソーティング時間も増大する．逆に方向の数が少なすぎる場合，たとえば，方向線が縦横 2 方向のみの場合には，斜め方向の輪郭上では，どの方向線も輪郭をまたぐので，S_i が増大する．その結果，輪郭上に透かしを多く挿入し，輪郭を崩してしまう．本論文では，方向線の長さと数を変えて予備評価を行い，その結果から方向線の長さを 5 ピクセル，方向の数を 8 とした．

また，方向線の長さと数を画像の性質に合わせて調整すれば，より適切な目立ちにくさの判断が可能になる．たとえば，隣接ピクセルの相関が高い画像では，方向線の長さをより長くすればよい．しかし，本論文では，まず，提案方式の基本的な特性を明らかにするべきと考え，方向線の長さと数を画像の性質にかかわらず一定とした．

3.2 透かし挿入方式

一次元最小偏差による透かし挿入方式の構成を**図 4** に示す．本方式は，挿入処理と挿入制御処理から構成されている．各処理は以下の性質を有する．

- 挿入制御処理
  1 次元最小偏差 S_i に基づいて，透かしの目立ちにくさを判定し，挿入処理に制御情報を出力する．この制御情報は，画像の部分ごとに透かし挿入の優先度を指定する．

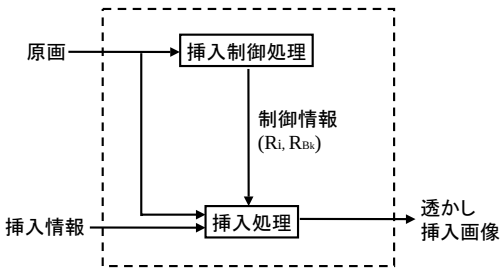


図 4 提案方式の構成
Fig. 4 A structure of proposed method.

- 挿入処理
  挿入制御処理から制御情報を用いることで，画質劣化の少ない透かし挿入を行う．

挿入制御処理は，汎用的な制御情報を介して挿入処理と連動しているので，挿入処理に依存せず，多様な透かし挿入システムに対応可能である．また，上記の制御情報は，ピクセル単位とブロック単位に大別される．一般に，ピクセル輝度値変更型の電子透かしでは，1 または，複数のピクセルからなるブロックに画像を分割し，ブロック単位で輝度値を変更する．ブロックの輝度値変更は，そこに含まれるピクセルの輝度値変更により実現される．したがって，画質劣化防止のための制御情報として，下記の 2 種類を設ける．

(1) ピクセルの変更許容度 R_i
ピクセルに変更を加えたときの目立ちにくさの程度．たとえば，ピクセル 1 の変更許容度 R_1 がピクセル 2 の変更許容度 R_2 より大きいとは，ピクセル 2 に変更を加えるよりもピクセル 1 に変更を加えるほうが目立ちにくいことを示す．R_i の意味は，先に定義した S_i の意味と一致するので，

$$R_i = S_i$$

と表される．

(2) ブロックの変更許容度 R_{B_k}
ブロックに変更を加えたときの目立ちにくさの程度．m 個のピクセルからなる k 番目のブロック B_k の変更許容度 R_{B_k} は，関数 G を用いて

$$R_{B_k} = G(S_{k_1}, \ldots, S_{k_m})$$

で表される．ただし，$k_1, \ldots, k_m$ はブロック k 内の m 個のピクセルを示すサフィックスである．また，R_{B_k} の性質については，ブロック内の個々のピクセルでの透かしの目立ちにくさが増大すれば，ブロック全体の目立ちにくさも増大すると考えられる．そこで，1 から m の任意の i に対して，関数 G は，

$$\frac{\partial G(S_{k_1}, \ldots, S_{k_m})}{\partial S_{k_i}} \geq 0$$

を満たす必要がある．これは，関数 G が単調増加関数であることを示している．しかし，この性質は G の満たすべき必要条件であって，十分条件ではない．したがって G の特定には，候補となる関数が，透かしの目立ちにくさの実験データに沿っているかを確認する必要がある．ここでは，G の最初の候補として最も単純な平均演算，すなわち，

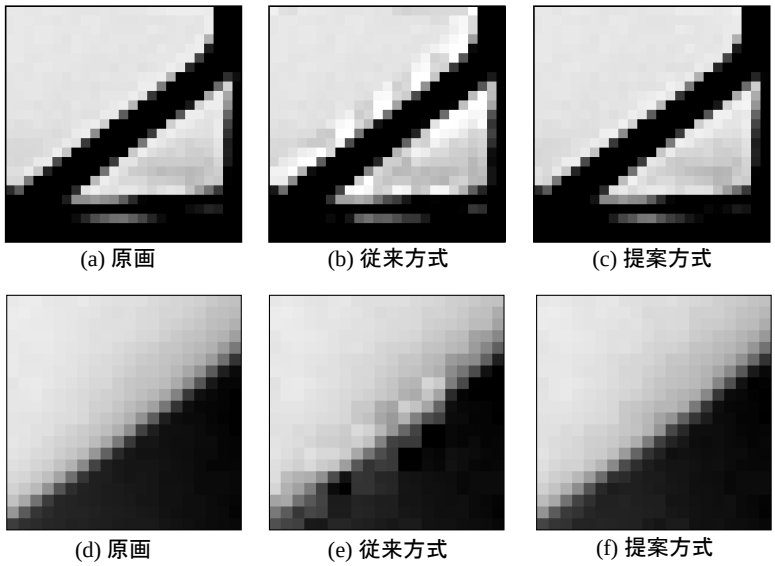


図 5 提案方式による透かし挿入画像
Fig. 5 Watermarked images using proposed method.

$$G(S_{k_1},\ldots,S_{k_m}) = \frac{S_{k_1}+\ldots+S_{k_m}}{m}$$

を取り上げ，その妥当性は実験により示すことにした．

挿入制御処理は上記 2 つの制御情報 R_i，R_{B_k} を出力し，挿入処理において，透かし挿入箇所の選択，および挿入強度の決定を行い，透かしを挿入する．

3.3 挿入方式の具体例

挿入方式の具体例を処理フローにより説明する．Step 1 から Step 3 までが，挿入制御処理による処理フローであり，Step 4 から Step 5 までが，挿入処理による処理フローである．

Step 1. 入力画像の輝度値 l_i $(i=1,\ldots,n)$ に対し，一次元最小偏差 S_i を算出，$R_i = S_i$ として，ピクセルの変更許容度 R_i を求める．

Step 2. 入力画像を m ピクセルからなるブロック B_k $(k=1,\ldots,\lfloor n/m \rfloor)$ に分割，各ブロックに対し，次式によりブロックの変更許容度 R_{B_k} を求める．

$$R_{B_k} = G(S_{k_1},\ldots,S_{k_m}) = \frac{S_{k_1}+\ldots+S_{k_m}}{m}$$

Step 3. 算出した R_i，R_{B_k} を制御情報として挿入処理の入力とする．

Step 4. R_{B_k} の大きいブロックから M $(<\lfloor n/m \rfloor)$ 個のブロックを選択，透かし挿入ブロックとする．

Step 5. 選択した M 個の透かし挿入ブロック内の m 個のピクセルに対し，

$$l'_i = l_i + \alpha R_i$$

として透かしを挿入する．ただし α は，挿入情報ビットを挿入ブロックにどのように割り当てるかに依存し，1 または -1 の値をとる．

4. 評　　価

4.1 輪郭の崩れの防止

提案方式により，256×256 ピクセルの 24 ビットカラー画像に透かしを挿入した．カラー画像への挿入方法は以下のとおりである．

(1) 24 ビットカラー画像を 8 ビット輝度成分画像 (Y) と 8 ビット色差成分画像 (C_b, C_r) に分離[16)]

(2) 輝度成分画像 (Y) を 2×2 ピクセルのブロック $(m=4)$ に分割し，3.3 節で述べた処理フローに従って，8 ビット輝度成分を変更 $(E: Y \rightarrow Y')$

(3) 変更した輝度成分画像 (Y') と色差成分画像 (C_b, C_r) を合成して，透かしカラー画像作成

図 5 に提案方式での透かし挿入画像を示す．図 5 (a), (b), (c) は，図 1 (a) の輪郭部分の拡大図，図 5 (d), (e), (f) は図 2 の輪郭部分の拡大図である．従来方式と提案方式を比較すると，画像全体の透かし挿入量 Q は，図 1 (a) と同じであるが，各ピクセルの透かし強度 f_i は異なっている．結果として輪郭のくずれが解消している．

4.2 主観評価による画質評価

4.2.1 評 価 内 容

256×256 ピクセルの 24 ビットカラー画像を原画と

し，全画像の 4/5（2 × 2 ピクセルのブロック 13107 個分）の 8 ビット輝度成分に透かしを挿入した．同一の挿入量 Q において，提案方式に基づいて挿入した場合，従来方式によってマスキング効果に基づいて挿入した場合，透かし挿入ブロックと挿入強度をランダムに決定して挿入した場合の各々について，画質レベルを主観評価により求めた[17),18)]．

提案方式 4.1 節と同様に，R_{B_k} の大きいブロックから透かし挿入ブロック 13107 個を選択．選択した各挿入ブロックに対し，α をランダムに割り当て，輝度値を増大させるブロックと減少させるブロックに分類．所定挿入量 Q を挿入するために，R_i の比にあわせて Q を挿入ブロック内の各ピクセルに分配し，輝度値を変更した．

従来方式 各ピクセルでの許容コントラスト C_{s} をブロック単位で平均し，その値の大きいブロックから透かし挿入ブロック 13107 個を選択．選択した各挿入ブロックに対し，提案方式と同様に輝度値の増大/減少ブロックに分類．各ピクセルの C_{s} の比にあわせて，所定挿入量 Q を挿入ブロック内の各ピクセルに分配し，輝度値を変更した．

ランダム方式 透かし挿入ブロック 13107 個を画像内からランダムに選択．選択した各挿入ブロックに対し，提案方式と同様に輝度値の増大/減少ブロックに分類．挿入ブロック内の各ピクセルに，0 から 1 までの一様乱数を与え，その比にあわせて所定挿入量 Q を分配し，輝度値を変更した．

評価画像については，3.1 節の分析結果より，以下の観点から，256 × 256 ピクセル 24 ビットカラー画像を分類した．

- 輪郭部分の多少
- 輪郭部分以外の高周波成分の多少

具体的には，上記 2 つの基準がどちらも中程度である画像（woman）を標準的な画像とした．さらに，以下に示す 4 種類の画像についても評価を行った．

woman（女性の顔） 高周波成分と輪郭部分が中程度

CG_plain（単純な構成の CG） 高周波成分少なく，輪郭部分も少ない

CG_comp（複雑な構成の CG） 高周波成分少なく，輪郭部分多い

aerial（航空写真） 高周波成分多く，輪郭部分少ない

mandrill（マンドリルの顔） 高周波成分多く，輪郭部分多い

上記の評価画像のうち，aerial については，SIDBA の aerial（256 × 256, 24 bit/pixel）を使用し，mandrill については，SIDBA の mandrill（512 × 512, 24 bit/pixel）を 256×256 に縮小した画像を使用した．

画質の主観評価[19)] は以下の手順で行った．

(1) 評価者に原画と透かし画を同時に提示．

(2) 原画に対しての透かし画の妨害の度合いを「妨害が分からない」「妨害が分かるが気にならない」「妨害が分かるが少し気になる」「妨害が分かり気になる」「妨害が分かり大変気になる」の 5 つの評価語で表し，それぞれ順に 5，4，3，2，1 の評点を与える．

(3) 手順 (1) と (2) を 10 人の評価者に対して行い，透かし画の妨害度合値を 10 人の評価者の評点の平均値で表す．

以上の評価は，提示画像を等倍表示した場合と，2 倍拡大表示した場合について行った．実際に透かし画の画質を評価する著作権者などの評価者は，透かし画を拡大して透かしの不可視性を確認する場合があるからである．

4.2.2 評価結果

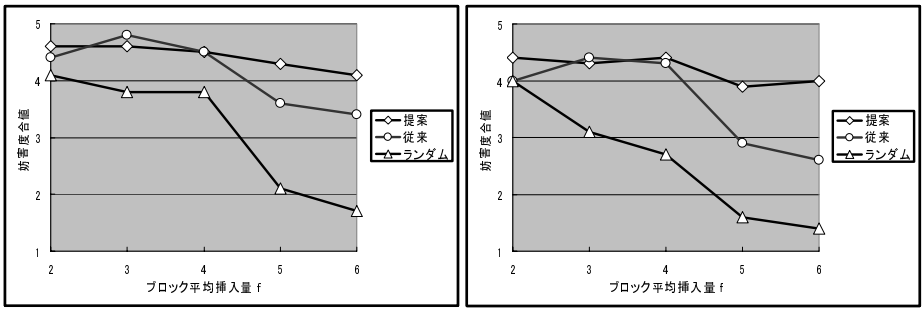
最初に，標準的な画像（woman）に対する評価結果を**図 6** (a)，(b) に示す．図の横軸は，1 ブロックあたりの平均挿入量

$$f = Q/13107$$

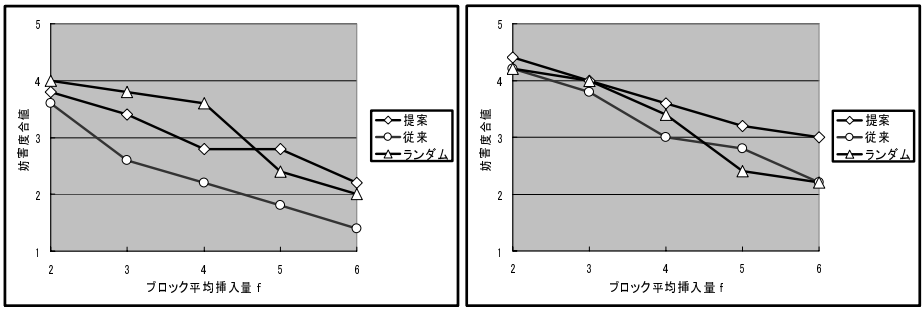
を表す．縦軸は妨害度合値である．

この評価結果から，標準的な画像における 3 方式の主観評価による画質と挿入量に関して，以下が考察される．

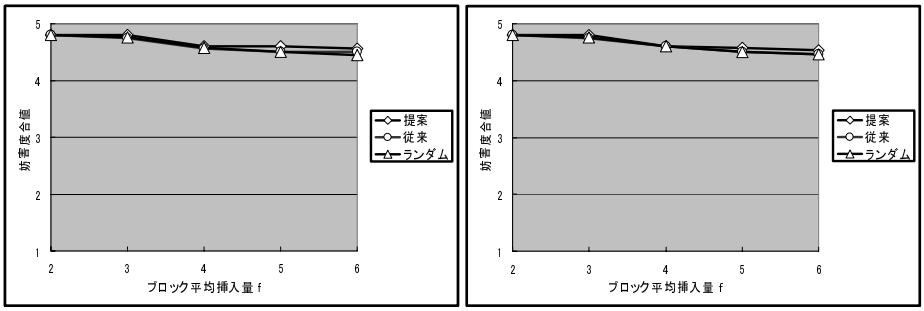
- 挿入量増大にともなう画質劣化の度合いは，ランダム方式が最も悪く，提案方式が最も良い．この傾向は 2 倍拡大表示でより顕著になる．
- 同等画質，たとえば電子透かしの要求レベルの一例である妨害度合値 4「妨害が分かるが気にならない」における 3 方式の挿入量を比べると，等倍表示では，提案方式は従来方式の約 1.3 倍，ランダム方式の約 2.4 倍の透かし挿入が可能であり，2 倍表示では，従来方式の約 1.4 倍，ランダム方式の約 3 倍の透かし挿入が可能である．この結果から，提案方式は，画質を維持しながら，従来方式に比べて，より多くの透かし挿入が可能なことが分かる．
- 同等の挿入量で提案方式の画質を他の 2 方式と比較すると，ランダム方式との比較では，評価したすべての f で，提案方式の画質が上回る．従来方式との比較では，$f \leq 4$ では両者の画質はほぼ同じであり，$f > 4$ では，提案方式の画質が上回るが，$f = 3$ 近傍では，提案方式の画質が従来方式を下回る．この点に関し，評価者にコメントを求



(a) woman（等倍） (b) woman（2倍）



(c) CG_plain（等倍） (d) CG_comp（等倍）



(e) aerial（等倍） (f) mandrill（等倍）

図 6 透かし挿入量と画質劣化の関係
Fig. 6 Relation between embedded quantity and visual degradation.

めたところ，提案方式による透かし画像の平坦部分に劣化が認められることが判明した．これは，以下が原因と考えられる．$f = 3$ 程度の挿入量では，従来方式の輪郭部分挿入による画質劣化は知覚されにくい．一方，提案方式は，輪郭部分に挿入できない分を，乱雑な領域だけでなく平坦な領域にも挿入するので，平坦領域での画質劣化が知覚される．したがって，$f = 3$ 近傍では，提案方式の画質は従来方式を下回る．

次に，高周波成分の少ない画像（CG_plain, CG_comp）に対する評価結果（等倍表示）を図 6 (c), (d) に示す．

この評価結果から，以下が考察される．

- CG_plain に関しては，従来方式が最も悪く，提案方式も $f < 5$ でランダム方式を下回っている．このように，平坦な領域が多く，輪郭部分が少ない画像では，従来方式の透かし挿入は，輪郭部分に集中するため，ランダム方式に比べて画質が劣化する．また，提案方式も，**図 7** に示すような輪郭部分において，方向線の最小方向が輪郭に接触する領域（灰色部分）で S_i が増大するので，透かしがその領域に集中し，画質が劣化する．
- CG_comp に関しては，CG_plain と比べて輪郭部分が多い分，提案方式および従来方式の挿入箇

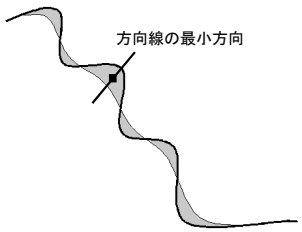


図 7 透かしが集中する輪郭部分
Fig. 7 The contour where watermarks are embedded.

所が分散されるので，両方式の画質は CG_plain に比べて向上する．その結果，提案方式および従来方式の画質がランダム方式に近づく．

次に，高周波成分を多く含む画像（aerial, mandrill）に対する評価結果（等倍表示）を図 6 (e), (f) に示す．この評価結果から，同等挿入量での 3 方式の画質について，以下が考察される．

- 高周波成分を多く含む画像に関しては，評価したすべての f で，3 方式ともほとんど差が見られず，妨害度合値は 5 から 4 の値をとった．これは，3.1 節で述べたように，画像の大部分を透かしの目立ちにくい高周波成分が占めているので，輪郭部分の多少にかかわらず，3 方式とも画質の劣化が知覚されにくいためと考えられる．

以上の考察をまとめると，以下のようになる．

- 標準的な画像では，すべての挿入量で，提案方式がランダム方式を上回る．また，提案方式は，挿入量が多い場合には，従来方式を上回るが，特定の挿入量（$f = 3$ 近傍）で，従来方式を下回る．
- 高周波成分の少ない画像では，提案方式および従来方式がランダム方式を下回る場合がある．特に輪郭部分の少ない画像では，その差は顕著である．このような画像に対しては，提案方式は，ランダム挿入を併用するなどの工夫が必要である．
- 高周波成分の多い画像では，3 方式の画質はほぼ同じである．
- 全体として，提案方式の画質が他の 2 方式に比べ向上したことにより，ブロックの変更許容度 R_{B_k} として S_i の平均を用いたことの妥当性が示された．

4.3 提案方式を用いたシステムの例

提案方式を用いて，電子透かしシステムを開発した．その開発において，ブロックおよびピクセルの変更許容度を利用することで，高画質の電子透かしを実現することができた．本システムの概要を下記に述べる．

- 仕様：256 × 256 ピクセルの 24 ビットカラー画像に，著作権者 ID と購入者 ID，合計 40 ビットを挿入．
- 挿入：4.1 節と同様の処理により透かし挿入．ただし，挿入情報ビットに冗長性を持たせるため，各ビットに対し 300 個の透かし挿入ブロック（2 × 2 ピクセル）を割り当て，透かし挿入ブロック数 M を 12000 とした．ビット値が 1 であれば，割り当てられた 300 個すべてのブロック内輝度値を上げ，0 であれば，ブロック内輝度値を下げるものとする．
- 検出：各ビットに割り当てられた 300 個のブロックについて，原画の輝度値より高いブロックの数と低いブロックの数をカウントし，その結果を多数決処理することで，ビット値の 1，0 を判定．
- 結果：

挿入時間 Pentium II☆ 300 MHz 搭載 PC 上のソフトウェアで実行したときの透かし挿入時間は，画像 1 枚あたり 100 msec であり，ランダム挿入時の約 2 倍であった．また，挿入時間 100 msec のうち，一次元最小偏差 S_i の計算時間が 80 msec であり，挿入時間全体では，S_i の計算時間が支配的である．S_i の計算時間は入力画像のピクセル数 n に比例するので，全体の挿入時間は，近似的に入力画像のピクセルサイズに比例すると考えられる．実際のコンテンツビジネスで扱う標準的な画像のサイズ（たとえば，デジタルカメラで撮影可能な写真サイズ）は，1000 × 1000 ピクセル程度であり，このサイズへの透かし挿入時間は，上記挿入時間を 1000 × 1000 ピクセルサイズに換算すると，1.6 sec 程度となる．これは，透かし挿入時に，特にリアルタイム性を要求される場合や，計算能力の低いマイコンなどで処理する場合を除いて，実用的であると考えられる．

画質，耐性 画質については，原画と透かし挿入画像をモニター上に並べて表示し，透かし挿入個所を教えても相違の判別が不可能であった．画像処理耐性については，4.2.1 項で用いた 5 つの評価画像に対して，一般に使用されている耐性評価ソフト[20] により画像処理を加えた後，1 ビットに対応する 300 個のブロックの多数決の内訳を測定した．測定結果を**表 1** に示す．表は，画像処理前に正 300 ブ

☆ Pentium II は Intel の登録商標です．

ロック：誤0ブロックであったのが，画像処理の結果どうなったかを，5つの評価画像の全200ビット（40ビット×5サンプル）について，その平均値と最悪値について表したものである．表1によると，1/30までのJPEG圧縮，任意角度の回転，1/2から2倍までの拡大・縮小，ガウシアンフィルタなどの各種画像フィルタに対して，多数決処理の結果，正しくビット値を判定できることを示している．すなわち，上記画像処理に対して，本システムは耐性を持つことを確認した．

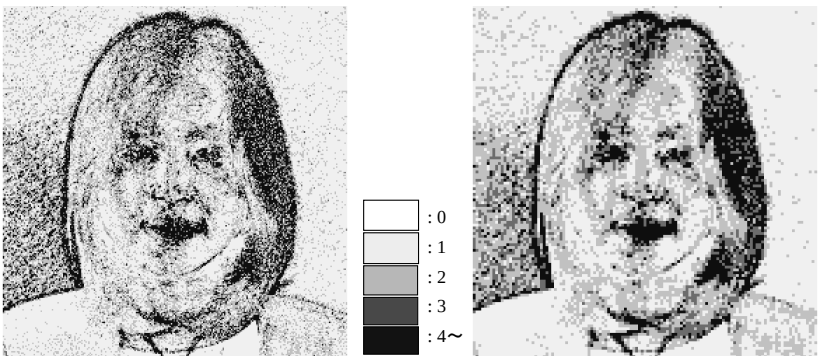
表1 各種画像処理に対する300個のブロックの多数決の内訳
Table 1 The list of 300 pixel blocks after image processings.

	平均値（正：誤）	最悪値（正：誤）
JPEG 1/10	278:22	245:55
JPEG 1/20	244:56	198:102
JPEG 1/30	206:94	174:126
0.5 倍縮小	215:85	178:122
0.75 倍縮小	262:38	214:86
0.9 倍縮小	274:26	241:59
1.1 倍拡大	285:15	265:35
1.5 倍拡大	294:6	270:30
2 倍拡大	297:3	281:19
−2 度回転	280:20	246:64
−1 度回転	277:23	246:54
−0.75 度回転	275:25	249:51
−0.5 度回転	271:29	232:68
−0.25 度回転	282:18	257:43
0.25 度回転	270:30	222:78
0.5 度回転	276:24	248:52
0.75 度回転	273:27	234:66
1 度回転	283:17	250:50
2 度回転	281:19	240:60
5 度回転	280:20	232:68
10 度回転	283:17	221:79
15 度回転	288:12	247:53
30 度回転	292:8	266:34
45 度回転	293:7	275:25
90 度回転	297:3	279:21
Gaussian filtering	222:78	185:115
2×2 median filtering	239:61	208:92
3×3 median filtering	230:70	186:114
4×4 median filtering	216:84	184:116

上記システムで，挿入制御処理が出力するピクセルの変更許容度 R_i の分布図，および 2×2 ブロックの変更許容度 R_{B_k} の分布図を**図8**に示す．図が示すように，あごのような輪郭部分では，変更許容度は小さく，透かしがほとんど挿入されていない．しかし，輪郭の中でも，髪の毛の輪郭部分や鼻の下の輪郭部分では変更許容度が大きく，透かしが挿入されている．これは，輪郭線が複雑に重なりあっているので，髪の毛の部分と同様に，どの方向でもピクセル輝度の変動が大きくなるためである．しかし，これらの部分は，視覚的にも髪の毛の部分と同様に乱雑であり，透かしは目立ちにくいと考えられる．画質評価でも，これらの部分の画質劣化は指摘されなかった．以上から，これらの輪郭部分への透かし挿入は，問題ではないと考える．

5. 本研究の位置づけ

本研究は，ピクセル値変更型の電子透かし，特に，ピクセルの濃淡情報（輝度値）を直接変更する電子透かしに関するものである．濃淡情報変更型の電子透かしは，多くの研究成果が報告されており[6),11),12)]，また，広く実用化されており[21)]，電子透かしの重要な一分野である．そこで，前章までは，この分野の中での



(a) R_iの分布 (b) R_{B_k}の分布

図8 変更許容度の分布
Fig. 8 Distribution of acceptable upper bounds.

新規性と有効性を論じてきた．

本章では，関連研究との比較を通じて，この分野内での位置付けをより明確化するとともに，周波数領域の電子透かしを含むより広い範囲での位置付けを述べる．

5.1 濃淡情報変更型における位置づけ

マスキング効果を用いて画質劣化を防止する方法が多いが，これらの方法との比較は 2.3 節で述べた．マスキング効果以外の代表的な方法としては，新見らの方法[10]があげられる．新見らは，濃淡画像をビットプレーンに分割し，ビットプレーンごとに透かしの目立ちにくさを判定した．具体的には，ビットプレーンを 2 値画像と見なし，白部分と黒部分の境界線の長さを規格化した値を 2 値画像の複雑度と定義し，複雑度が大きいほど透かしが目立ちにくいとする．新見らは，この複雑度を用いて，透かし挿入のしきい値 T を決定した．すなわち，複雑度が T 以上の画像であれば，目立たない挿入が可能である．提案方式でもしきい値を決定しようとすると，濃淡画像をビットプレーンなどの要素に分解するアプローチが必要となる．

一方，新見らの方式をさらに高度化していこうとすると，上位ビットプレーンほど透かし挿入が画質に与える影響が大きいので，上位ビットプレーンでの透かし挿入しきい値を下位に比べて上げるなどの工夫が必要である．また，下位ビットプレーンの変更の目立ちにくさは，上位ビットプレーンの複雑度に依存するので，上下のビットプレーン間の関係を考慮する必要がある．したがって，新見らの方法をさらに高度化するためには，濃淡情報に着目する必要があると思われる．このように，新見らの方法と提案方式は，相互に補い合う関係にあると考えられる．

5.2 周波数成分変更型との比較

画像処理には，JPEG 圧縮や平滑化フィルタ（メディアンフィルタ）のように高周波成分を棄却するものが多い．周波数成分変更型の電子透かしでは，透かしを中および低周波成分に選択的に埋め込むことができるため，これらの画像処理への耐性が大きいと考えられる．提案方式は，ピクセル値を直接変更する方式であるため，このような選択的な埋め込みは困難である．しかし，一方では 2×2 ピクセルなどの細かい単位で透かしを埋め込むため，情報の多重度を増やすことが可能であり，周波数成分変更型に比べて，画像処理耐性が大きいか小さいかは一概にはいえない．

以下では，周波数成分変更型の中でも近年注目されている，ウェーブレット変換を用いる方式[2]を取り上げ，提案方式の画像処理耐性との比較を行う．

表 2 JPEG 圧縮およびメディアンフィルタに対する 188 個のブロックの多数決の内訳
Table 2 The list of 188 pixel blocks after JPEG compressions and median filterings.

	平均値（正：誤）	最悪値（正：誤）
JPEG 1/10	171:17	150:38
JPEG 1/20	157:31	121:67
JPEG 1/30	132:56	108:80
2×2 median filtering	153:35	124:64
3×3 median filtering	141:47	112:76
4×4 median filtering	138:50	111:77

大西ら[2]は，256×256 ピクセルの画像に様々なビット数を埋め込み，その画像処理耐性を評価している．そのうち本論文の評価（40 ビット埋め込み）に最も近いものは，64 ビットでの評価である．そこでは，JPEG 圧縮後およびメディアンフィルタ後の検出におけるビット値の誤り率は 0 である．

この数値との公平な比較を行うために，提案方式の埋め込みビット数を 40 から 64 に増やし，JPEG 圧縮およびメディアンフィルタに対する耐性を再評価した．総変更量を変えないために，1 ビットあたりの変更ブロック数を 300 から 188（$300 \times 40/64$）に減らして，画像処理後の多数決の内訳を測定した．評価画像は 4.2.1 項で述べた 5 枚であり，各々から 64 ビットを検出した．その評価結果を**表 2** に示す．表は，5 つの評価画像の全 320 ビット（64 ビット $\times$ 5 サンプル）について，その平均値と最悪値について表したものである．表によると，JPEG 1/30 まで正しくビット値を判定できることを示している．JPEG の標準的な圧縮率は 1/10 であり，1/20 以上は画質劣化のためほとんど用いられない[22]．したがって，提案方式の JPEG 圧縮後の検出誤り率は，実用的な範囲においては 0 である．また，同じく表 2 によると，メディアンフィルタに対しても，提案方式の誤り率は 0 である．

以上から，ここで評価した範囲では，周波数成分変更型と提案方式の画像処理耐性には有意差は見られなかった．

6. ま と め

画質劣化の防止は，電子透かしの重要な技術課題であるが，従来の画質劣化防止の方式には，透かし挿入により物体の輪郭が崩れるという問題があった．この問題を解決するために，本論文では一次元最小偏差に基づいて，透かし挿入量を制御することで輪郭の崩れを防止する方式を提案し，評価実験を通じてその有効性を示すとともに，標準的な画像に対しては，従来方式に比べて，同画質での透かし挿入量が，約 1.4 倍に

増大可能であることを確認した．

今後の課題としては，以下があげられる．

- 高周波成分の少ない画像における方式の改良（ランダム挿入との併用など）
- 画像内容に依存した方向線の数および長さの調整
- ブロックの変更許容度の計算に用いた関数 G の最適化

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嵩忠雄教授，大阪大学大学院基礎工学研究科の藤原融教授，岩手県立大ソフトウエ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楫勇一助教授，渡辺創助手に感謝いたします．

参 考 文 献

1) Cox, I., Kilian, J., Leighton, T. and Shamoon, T.: A Secure, Robust Watermark for Multimedia, *Proc. Information Hiding*, LNCS, Vol.1174, pp.185–206 (1996).
2) 大西淳児，松井甲子雄：多重解像度解析と PN 系列を利用した電子透かし法，電子情報通信学会論文誌，J80-D-II, No.11, pp.3020–3028 (1997).
3) 中村高雄，小川 宏，高嶋洋一：ディジタル画像の著作権保護のための周波数領域における電子透かし方式，1997 年暗号と情報セキュリティ・シンポジウム，SCIS97-26A (1997).
4) ウィセスト ピヤピスト，松井甲子雄：等価信号変換によるカラー画像への電子透かし，情報処理学会論文誌，Vol.40, No.4, pp.1801–1807 (1999).
5) 関沢秀和，川上晴子，山本直史：カラー画像の深層情報記録，画像電子学会年次大会予行集，Vol.7, No.20, pp.47–48 (1995).
6) 清水周一，沼尾雅之，森本典繁：ピクセルブロックによる静止画像データハイディング，第 53 回情報処理学会全国大会論文集，1N-11 (1996).
7) 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).
8) 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).
9) 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).
10) 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).
11) Swanson, M., Kobayashi, M. and Tewfik, A.: Multimedia Data-Embedding and Watermarking Technologies, *Proc. IEEE*, Vol.86, No.6, pp.1064–1087 (1998).
12) 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).
13) Bender, W., Gruhl, D. and Morimoto, N.: Techniques for data hiding, *Proc. SPIE*, Vol.2020, pp.2420–2440 (1995).
14) 木戸邦彦，田口順一，佐野耕一：方向依存型フィルタを用いた MRI 画像の画質改善，電子情報通信学会論文誌，J79-D-II, No.8, pp.1347–1353 (1996).
15) 田口順一，木戸邦彦，佐野耕一：エッジ部と平たん部の切分けを行った方向依存型画像フィルタ，電子情報通信学会論文誌，J80-D-II, No.9, pp.2345–2350 (1997).
16) 日本放送協会（編）：NHK テレビ技術教科書（上），日本放送出版協会 (1989).
17) 越前 功，吉浦 裕，田口順一，佐々木良一：エッジ保存型電子透かし方式，情報処理学会コンピュータセキュリティシンポジウム '98 論文集，pp.51–56 (1998).
18) Echizen, I., Yoshiura, H., Arai, T., Kimura, H. and Takeuchi, T.: General Quality Maintenance Module for Motion Picture Watermarking, *IEEE Trans. Consumer Electronics*, Vol.45, No.4, pp.1150–1158 (1999).
19) テレビジョン学会（編）：テレビジョン画像の評価技術，コロナ社 (1986).
20) Kuhn, M.G.: StirMark, http://www.cl.cam.ac.uk/~fapp2/watermarking/image_watermarking/stirmark (1997).
21) 高橋史忠：「電子透かし」がマルチメディア時代を守る，日経エレクトロニクス，No.683, pp.99–124 (1997).
22) 電子透かし技術専門委員会（編）：電子透かし技術に関する調査報告書，pp.64–68, 日本電子工業振興協会 (1999).

(平成 11 年 6 月 11 日受付)
(平成 12 年 3 月 2 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セキュリティシステム研究センタに勤務．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セキュリティシステム研究センタ勤務．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

1996 年東北大学理学部物理学科卒業．1998 年同大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セキュリティシステム研究センタに勤務．情報セキュリティ，電子透かしの研究開発に従事．



田口　順一（正会員）

1984 年九州大学理学部物理学科卒業．1986 年同大大学院修士課程修了．同年（株）日立製作所入社．同社システム開発研究所所属．以来，核磁気共鳴診断装置（MRI），衛星画像処理，音響信号処理の研究開発に従事．電子情報通信学会，写真測量学会各会員．工学博士．



黒須　豊

1986 年早稲田大学理工学部機械工学科卒業．同年（株）日立製作所入社．ソフトウエア事業部にて CAD，電子透かし，EC，XML 等の製品開発に従事．現在，同事業部第 1 アプリケーションソフト設計部主任技師．



佐々木良一（正会員）

1971 年東京大学医学部保健学科卒業．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．現在同研究所主管研究長兼セキュリティシステム研究センタ長．工学博士（東京大学）．著書に，「情報科学入門—教養としてのコンピュータ」（日本理工出版会，1995 年），「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 年），「インターネットセキュリティ入門」（岩波新書，1999 年）等．IEEE，電子情報通信学会，電気学会等会員．1983 年電気学会論文賞受賞．1998 年電気学会著作賞受賞．立教大学，香川大学等の非常勤講師を経験．



手塚　悟（正会員）

1984 年慶応義塾大学工学部数理工学科卒業．同年（株）日立製作所入社．マイクロエレクトロニクス機器開発研究所に勤務し，パーソナルコンピュータのオペレーティング・システム，デバイス・ドライバ，LAN システム等の研究開発に従事．その後，システム開発研究所に勤務．以来，パーソナルコンピュータを中心とした LAN システムの構築・運用管理の研究開発，さらにセキュリティシステムの研究開発に従事，現在に至る．