

# 局所特徴量を用いた二値画像用電子透かしの画質維持方式

藤井 康 広<sup>†</sup> 中野 和 典<sup>†</sup> 越 前 功<sup>†</sup>  
吉 浦 裕<sup>††</sup> 手 塚 悟<sup>†</sup>

文書や図面などといった二値画像は、電子データとして広く流通しており、その著作権保護は重要な課題である。二値画像用の電子透かし方式として、輪郭部分を改変して情報を挿入するさまざまな方式が提案されているが、これらの従来方式では、輪郭部分すべてを改変の対象とするために、不適切な画素の改変を行い、画質の劣化を招いていた。本論文では、人間の視覚特性をもとに、改変が目立たない部分を優先的に選び出すための判断基準を与え、さらに、この基準を具体的に構築するためには、二値画像の局所的な特徴量として知られている交差数の概念が有用であることを明らかにする。提案方式は従来方式と比較して、耐性を維持したまま画質を改善できることを、評価実験を通じて実証する。

## A Method of Maintaining the Image Quality of Digital Watermarking for Binary Images Using Local Measures

YASUHIRO FUJII,<sup>†</sup> KAZUNORI NAKANO,<sup>†</sup> ISAO ECHIZEN,<sup>†</sup>  
HIROSHI YOSHIURA<sup>††</sup> and SATORU TEZUKA<sup>†</sup>

Binary images are circulated widely as digital datas. It is thus important to protect those copyrights. Many methods of watermarking embed copyrights into binary images by altering pixels on edges, however, those previous methods then deteriorate the image quality. Based on the human visual system, this paper proposes a new criteria for determining pixels whose alterations are imperceptible by using local measures for binary images. Experimental evaluations show that the proposed method enhances the image quality of watermarked images without a loss of robustness.

### 1. はじめに

作成者や配布先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、著作権の保護を可能にする電子透かしの技術が注目されている<sup>1),2)</sup>。特に二値画像は、文書、表、グラフ、漫画などを中心に電子データとして広く流通しており、その著作権保護は重要な課題である。

二値画像は白と黒だけで表現されるため、変化が知覚されないように情報を挿入することは、多値画像と比べてきわめて困難である。そのため、従来の二値画像の電子透かし方式は、適用範囲を文書などに限定したうえで、その構造を利用して情報を挿入する方式が多かった。たとえば、文書からなる画像には、フォ

トの間隔や形状に微妙な改変を施すことで、情報が挿入される。

しかし近年、文書などに適用範囲を限定せず、表や漫画など、一般の二値画像に対して適用可能な電子透かし法が提案されつつある<sup>3)~6)</sup>。これらの方法では、二値画像に含まれる文字や図形の輪郭部分に着目し、この輪郭部分に微妙に改変を加えることで透かし挿入を試みる。透かし挿入のため改変する輪郭部分は、特別なパターンとのマッチングや、画素値が変わる点を走査することで選び出される。輪郭部分を改変して情報を埋め込むことで、行間を変えるなど画像の構造を利用して情報を挿入する方式と比較して、画像圧縮や拡大・縮小などに耐性を持つことが実証されている<sup>6)</sup>。

ただし、これらの従来方式では、改変する輪郭部分を選定する際、画質について考慮していない。輪郭部分にも改変が目立ちやすい部分とそうでない部分があり、改変が目立たない部分を優先的に選び出すことで、画質の劣化を避けて、同じ量の透かし情報を挿入できるはずである。

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

<sup>††</sup> 電気通信大学電気通信学部  
Department of Electro-Communications, The University of Electro-Communications

本論文では、人間の視覚特性をもとに、輪郭部分を改変するための判断基準を与える。さらに、この基準を実現するためには、二値画像の局所的な特徴量として知られている交差数の概念が有用であることを示す。2章で従来の二値画像電子透かしの問題点をあげる。3章で二値画像の局所的な特徴量の1つである「交差数」の概念を導入し、画質劣化を回避して情報を挿入するための判断基準を構築する。4章で画質および耐性の評価を行う。

## 2. 従来方式とその問題点

二値画像を対象とした電子透かしの従来方式について述べる。従来方式は、フォントの間隔を変えるなど二値画像特有の画像構造に特化した方法と、輪郭を改変する方法の、大きく2つに大別できる。それぞれについて概略を述べ、従来方式の課題を明らかにする。

### 2.1 画像構造を利用する方法

文書など二値特有の画像に対して、その画像構造に着目した透かし方法が、電子透かし初期のころから提案されてきた<sup>2)</sup>。たとえば、文書からなる画像に適した方法として、フォントを微妙に操作する方法<sup>7),8)</sup>、行間を制御して情報を埋め込む方法<sup>2),9)</sup>などが知られている。また、多値画像を擬似的に二値で階調表現した擬似階調画像に対する透かし方法として、濃度パターンや組織的ディザ法を用いる方法<sup>10),11)</sup>や誤差拡散法を利用した方法<sup>12)</sup>なども提案されている。また、擬似階調表現された部分をランダムパターンと見なすことで、コンジューゲート演算に基づいた方法<sup>13)</sup>を適用することも可能である。

しかし、これらの方法はそれぞれ文書画像、擬似階調画像に特化した方法であるため、利用形態に限られる。本論文では、より適用範囲が広い、輪郭を改変する方法を中心に考察する。

### 2.2 輪郭を改変する方法

設計図や漫画など、二値画像一般に適用可能な従来の電子透かし方式として、平坦部を避け、輪郭部分の画素を反転させることで透かし挿入を試みる、次の方式が知られている。

- (a) 画像を小さなブロックに分解し、各ブロックの輪郭部分をあらかじめ選定したパターンに変更する方法<sup>3),4)</sup>。
- (b) 画像をブロックに分割し、各ブロック内の白黒の割合が透かし情報に対応するように輪郭を改変する方法<sup>5),6)</sup>。

方式 (a) は、挿入する情報をビット列に置き換え、情報ビット  $b = 0, 1$  に対応するパターン  $P_b$  をあらか

じめ決めておき、それに似たパターンをすべて  $P_b$  に変更することで情報を埋め込む方式である。 $P_b$  として、輪郭部分に相当し、かつ出現確率が低いパターンを、各  $b = 0, 1$  について選定しておく。

$P_b$  の出現確率が低いことから、この方式によって画質をほとんど損なわずに二値画像に情報を挿入することができる。しかしその反面、単位面積あたりの埋め込める情報は少ない。たとえば、文献 3) では、 $P_b$  として、出現確率が 0.05% の大きさ  $3 \times 3$  のパターンを 4 個用いているが、この場合、実用として要求される 64 ビットの透かし情報<sup>14)</sup> を挿入するためには、最低  $500 \times 500$  の領域が必要となる。

また、方式 (a) は、パターンを出現確率が低いものに固定するため、情報量を調整するための自由度がないといえる。

方式 (b) は、画像をブロックに分解し、各ブロックの白黒の割合が透かし情報に対応するように、輪郭部分の画素を反転させて透かしを埋め込む方式である。この方式では、画像を走査して、白黒が反転する画素をすべて変更の対象にする。したがって、方式 (a) よりも多くの透かし情報を挿入することができる。また、ブロックの大きさを変えることで、透かしの情報量や耐性を調整できる自由度もある。

しかし、方式 (b) では、輪郭部分すべてを改変の候補にしているため、方式 (a) と比べて、輪郭が乱れ、画質の劣化を引き起こしやすい。

以上、従来方式の問題点として、

- 方式 (a) は画質劣化が回避できる反面、挿入可能な情報量が少ない。また、挿入情報量を調節できない。
- 方式 (b) は、情報量や耐性を調整できる反面、輪郭すべてを変更の候補にするため、画質の劣化が大きい。

の 2 点があげられる。

### 2.3 改善案

上で述べた問題を解決して従来方式 (a), (b) を改善するには、

- (i) 改変しやすい部分を選定して画質劣化を回避すること、
- (ii) 透かし挿入量や耐性に応じて、改変する輪郭の量を調整できること、

の 2 点を同時に満たさなければならない。

条件 (i), (ii) を満たす方法の 1 つとして、輪郭部分を表すパターンを 1 種類だけではなく数種類用意し、これらのパターンと照合することで輪郭部分を改変する方法が考えられる。ただし、これらのパターン

には改変による画質劣化の度合いに応じて、改変の優先順位を設定しておく。

パターンと合致した輪郭部分だけに改変を施すことで、条件 (i) を満たすことができる。さらに、改変の優先順位を設けたことにより、条件 (ii) の透かしの強度調整が可能になる。なぜならば、埋め込む透かし情報が少ない場合、改変する画素数は少なくすむので、改変による画質劣化が少ないパターンを優先的に用いて改変することで、画質の劣化を回避できるためである。逆に、挿入情報量を増やす場合には、用意した多くの種類のパターンを用いることで、より多くの画素を改変する。このように、改変可否を決定するパターンを導入し、それを用いて画素を改変して透かし情報を埋め込むことで、上の条件 (i), (ii) を満たすように従来方式を改善できる。

改変を許可するパターンを、優先順位をつけて数種類用意するためには、人間の視覚的特性を考慮したうえで、改変が可能なパターンを選定し、かつその優先度を定量化しなければならない。たとえば、もともと整っている輪郭線が透かし挿入により途切れたり乱れたりした場合、そのような改変は知覚されやすいが、初めから乱れている輪郭部分には、改変を施しても目立ちにくいと考えられる。このように輪郭部分にも改変しやすい部分とそうでない部分とがあり、従来方式の画質を改善するためには、人間のこのような視覚的特性を定量化し、二値画像特有の明確な基準を新たに確立する必要がある。

本論文の目的は、この基準を提案することである。この基準と照合することで、画質の劣化をできるだけ回避して、従来方式と同様の透かし情報が挿入できる。

ただし、この基準をそのまま適用するためには、たとえば、パターンの大きさが  $3 \times 3$  の場合、 $2^9 = 512$  個のパターンについてあらかじめ改変を許可するパターンを設定しておく必要がある。また、透かし挿入の際、各画素について、毎回 512 個のパターンとの照合を行って改変の可否を判断しなければならないので、計算量が多い。

そこで本論文では、このような問題を回避するために、画質劣化防止のための基準をあげるだけでなく、提案した改変基準を統一的に扱うための指標が存在することを示す。二値画像では、多値画像と異なり、各画素が 1 ビットで表現されるため、その単純さゆえにさまざまな局所特徴量が定義でき、幾何学的性質や視覚的な特性に基づいて局所パターンを系統的に類別できることが知られているが<sup>15)~17)</sup>、本論文では、輪郭部分を改変するための判断基準の定量化には、局所特

徴量の中の 1 つである「交差数」が適していることを明らかにする。交差数を計算することで、輪郭の改変可否が判断でき、従来の二値画像電子透かし方式の画質を改善できることを示す。

次章で視覚特性に基づいた判断基準と、交差数といった局所特徴量の定義、およびそれを用いた画素の改変条件の実現について述べる。

### 3. 局所特徴量を用いた透かし挿入方式

二値画像について輪郭部分を改変するための判断基準を設けるために、まず人間の視覚特性について説明する。

#### 3.1 視覚特性

人間の視覚特性について、認知科学の立場からさまざまな事実が解明されているが、その中の 1 つとして、外界から光情報として網膜に入った画像情報から、輪郭の方向を選別し、輪郭をその方向上に平滑化してから認知する、視覚の方向選択性が知られている<sup>18),19)</sup>。この事実は、輪郭の方向で平滑化するフィルタを施し輪郭の乱れを取り除くことで、人間にとって画像を自然な形で整形できることを暗示している。多値画像においては、この特性を利用したさまざまなフィルタや、平滑化した画像と原画像との差分情報から、透かしの強度を決定する電子透かし方法が提案されている<sup>20),21)</sup>。

ただし、二値画像の場合、人間の視覚は、輪郭の方向選択性だけでなく、不規則部分や画素の連結性により敏感に感知することが確かめられている<sup>18),19)</sup>。たとえば、改変により白色の背景に黒点のノイズが現れたり、線分にわずかながら切れ目が生じたりした場合、このような不連続性を簡単に発見することができる。

文献 18) によると、人間の視覚は画像の乱れを次の順序で知覚することが、実験により確かめられている。

- (1) 図形にわずかに切れ目ができるといった連結性の破れ。
- (2) ノイズ状に画素が反転したことによる不規則な部分の発生。
- (3) 輪郭の乱れ。

また「単純な図形はより単純になるように知覚される」という、認知科学における結果(ゲシュタルトの法則)がある<sup>17),18)</sup>。これを採用すれば、次の改変を行っても、人間はそれを画像の劣化と見なさない。

- (1') 図形のわずかな切れ目をふさぎ連結性を持たせる。
- (2') ノイズを取り除く。

これらの条件を満たす場合、その画素は積極的に改変を行うべきである。すなわち、条件 (1'), (2') は改

変に対する優先度が高い条件といえる。いずれも直感的には明らかである。

なお、上記の画像の乱れ (1)~(3) および改変 (1'), (2') は、すべて局所的であることに注意する。すなわち、画像から小領域を取り出し、その領域内の白黒のパターンを照合することで、図形のわずかな切れ目やノイズなどを見つけ出すことができる。

### 3.2 判断基準

二値画像の上記のような局所的な性質は、注目点を 1 画素ずつ全画面走査し、その周辺からなるブロックの形状とこれらの条件を照合することで抽出できる。選定のための優先度は、上であげた視覚特性の順番から決定される。

上記の視覚特性 (1)~(3) および (1'), (2') から、注目点の改変の判断基準およびその優先度は、注目点を中心とするブロックのパターンの関係として、次のようにまとめることができる。

#### 判断基準および優先度

- (1) ブロックが図形の一部を含み、注目点だけが異なる画素値を持つ場合、注目点は改変すべきである。
- (2) ブロックのパターンがノイズ状になっているとき、注目点は改変できる。
- (3) 注目点が輪郭に属する場合、その輪郭を平滑化するように注目点を変更できる。
- (4) 注目点が輪郭に属する場合、その輪郭が乱れるように注目点を改変する。

数字が大きくなるほど優先度が低くなり、(4) は画質劣化を引き起こしやすい、できるだけ避けるべき改変の条件である。なお、これ以外の場合は、ノイズが発生したり図形に切れ目が生じたりなど、画素の改変が知覚されやすく、電子透かしの従来方式においても改変を施していないため、注目点の改変を行わない。

この基準に従い、優先度の高い判断基準をもとに画素を改変することによって、従来方式よりも画質劣化を回避できることが期待される。後の 4.2 節で、この改変条件が人間の視覚特性に実際によく合致すること、すなわち、同じ個数の画素を、改変条件に従って改変した場合とそうでない場合とで明確な違いが出ることを、主観評価を行い明らかにする。

この判断基準によって、画素の改変による画質の劣化を回避することができる。しかし、この基準を適用するためには、各画素について、周辺ブロックのパターンと照合して改変の可否を判断しなければならないため、計算量が多い。次に、この基準が交差数の概念に帰着されることを示し、改変画素を見つけ出す具

4	3	2
5	0	1
6	7	8

図 1 注目点を中心とする 3×3 ブロック  
Fig.1 3×3 block around the marking point.

体的な手順を提案する。

### 3.3 局所特徴量

二値画像においては、各画素が白と黒の 2 通りしかないことから、局所的なブロックの幾何学的な特徴や視覚的特性を表現するさまざまな量が定義されている<sup>15)~17)</sup>。たとえば、連結の度合いを測る連結数、輪郭の方向を与える曲率係数や、ブロックの複雑さを測る尺度などが知られており、これらはいずれも人間の視覚的な感性によく合致する測度であることが知られている<sup>16),17)</sup>。

本論文では、ブロックの大きさとして 3×3 をとり、3×3 ブロックの幾何学的特徴を測る量の 1 つ「交差数」が上記の条件の判別に適した指標であることを明らかにする。そして、具体的に改変可能な輪郭成分を抽出する方法を提案する。まず用語を定義する。

注目点を中心とする 3×3 ブロックを考える。注目点を  $k=0$ 、その周りの 8 つの画素を  $k=1, \dots, 8$  とラベリングする (図 1)。

各  $k=0, \dots, 8$  について  $\delta_k$  を、画素  $k$  が黒いとき 1、白いとき 0 になるように定める。同様に  $\bar{\delta}_k$  を、画素  $k$  が白いとき 1、黒いとき 0 になるように定める。

このとき、文献 15), 16) に従って、交差数  $C$  を

$$C = \sum_{k=1}^8 \delta_{k+1} \bar{\delta}_k, \quad (1)$$

と定義する。ただし  $\delta_9 = \delta_1$  とおく。交差数は、0 から 4 までの値をとり、 $k=1$  から反時計回りに一周したときに画素値が 0 から 1 に遷移する回数を与える。

また、注目点を除くブロック内の黒画素の個数を

$$S = \sum_{k=1}^8 \delta_k, \quad (2)$$

白画素の個数を

$$\bar{S} = \sum_{k=1}^8 \bar{\delta}_k, \quad (3)$$

とかく、 $S, \bar{S}$  は 0 から 8 までの値をとる。

### 3.4 交差数を用いた改変条件

交差数は注目点の周辺画素が同じ画素値で並んでいるほど小さくなり、白黒の並びが乱雑になるほど大きくなる。特に、交差数が 1 に等しいとき、ブロックは白と黒の 2 つの領域に分割でき、ある図形の輪郭の一部分を表すことになる。

ここで、交差数は、ブロック内の画素の分布だけに依存し、注目点の画素値や、ブロック内の黒画素、白画素の個数  $S$ ,  $\bar{S}$  によらないことに着目する。したがって、これらの量も使用することで、ブロック内に現れた輪郭の形状をさらに絞り込めるはずである。

たとえば、交差数が 1 のとき、仮に  $S$  の値が小さく、かつ注目点が黒画素 ( $\delta_0 = 1$ ) であるとすると、ブロック内には白画素が多いため、黒い注目点が輪郭から突起している可能性が高い。このような画素は高い優先度で改変可能である。逆に、 $S$  の値が大きい場合は、ブロック内は黒画素が多く、注目点が輪郭内に埋もれていると予想される。この場合、注目点の改変は輪郭の乱れを招く。

このように、交差数  $C$  の値と、 $S$ ,  $\bar{S}$ , および注目点の画素値から、ブロックの形状の種類を限定でき、これらの値から、注目点の改変可否およびその優先度、すなわち 3.2 節の判断基準と等価な条件が導出されると予想される。実際、以下が成り立つ。

#### 交差数を用いた改変条件

注目点を中心とする  $3 \times 3$  ブロックを考える。 $\delta_0 = 1$  のとき、3.2 節の判断基準は次に等価である。

- (1)  $C = 0, S = 0$  のとき  $\delta_0 = 0$  に改変する。
  - (2)  $C = 3, 4$  のとき  $\delta_0 = 0$  に改変する。
  - (3)  $C = 1, 1 \leq S \leq 4$  のとき  $\delta_0 = 0$  に改変する。
  - (4)  $C = 1, 5 \leq S \leq 7$  のとき  $\delta_0 = 0$  に改変する。
- 番号 (1)~(4) は 3.2 節の判断基準に対応している。大きくなるほど改変の優先度が低くなり、画質の劣化を招く。

$\delta_0 = 0$  すなわち  $\bar{\delta}_0 = 1$  のときは、 $S$  を  $\bar{S}$  に置き換えて、上と同じ条件が成り立つ。

この条件によって、交差数を計算することで改変の可否およびその優先度が求められるようになった。

この判断基準が 3.2 節の判断基準と等価であることを示そう。まず、注目点の画素値を黒 ( $\delta_0 = 1$ ) と仮定したうえで、 $S = 0, \dots, 8$  に関して場合分けを行う。注目点の周り  $3 \times 3$  ブロックのパターンについて 3.2 節の条件を調査することで、等価性を明らかにする。

なお、交差数は、もともと注目点の改変可否を判断する指標として導入された量ではないので、交差数の



図 2  $S = 0$  のパターン  
Fig. 2 Pattern of  $S = 0$ .



図 3  $S = 1$  のパターン  
Fig. 3 Example for  $S = 1$ .

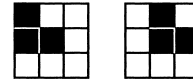


図 4  $S = 2$  のパターン  
Fig. 4 Examples for  $S = 2$ . From the left side they yields  $C = 1, 2$ , respectively.

定義式 (1) だけから 3.2 節の判断基準を導出することは困難である。したがって、多少初等的ではあるが、場合分けによって判断基準との等価性を示すことにした。

$S$  に関する場合分けのうち、 $S = 0$  から  $S = 2$  までを以下にあげる。

- $S = 0$ : このとき  $C = 0$  である (図 2)。  
注目点だけが周りと異なる画素値をとるので、3.2 節の判断基準 (1) より、優先度 1 で  $\delta_0 = 0$  に改変できる。
- $S = 1$ : このとき  $C = 1$  である (図 3)。  
注目点は別の図形からの枝の端点と見なせる。判断基準 (3) よりこのような枝は取り除けるので、優先度 3 で  $\delta_0 = 0$  に改変できる。
- $S = 2$ : このとき  $C = 1, 2$  である (図 4)。  
 $C = 1$  のとき、注目点は凸点となり、輪郭を乱しているため、判断基準 (3) より、優先度 3 で  $\delta_0 = 0$  に改変できる。  
 $C = 2$  のとき、注目点は線分の連結点となるため改変は許されない。

他の  $S = 3$  から  $S = 8$  については付録にまとめる。

注目点の画素値が  $\delta_0 = 1$  の場合についても、 $S$  を  $\bar{S}$  に置き換えて同様の議論が成り立つ。交差数を用いた改変条件と 3.2 節の判断基準の等価性が示された。

### 3.5 透かし挿入方式

交差数を用いた改変条件は、透かし情報挿入のために改変可能な領域を判定するものであり、透かし挿入の方法には依存しない。したがって、この条件は輪郭を変えて情報を埋め込む種類の、多様な二値画像用電子透かし方式に対応可能である。

後の主観評価のために、交差数を用いた透かし挿入

方式の具体的な手順を以下にあげる．

#### (1) 挿入制御処理

注目点  $(x, y)$  とその周辺画素から交差数を計算し、注目点の改変の可否およびその優先度  $n(x, y)$  を求める．注目点を 1 画素ずつ全画面走査して、各画素について改変の優先度を決定する．共通の優先度を持つ画素からなる集合を

$$A_m = \{(x, y) | n(x, y) = m\}, \quad (4)$$

とかく  $(m = 1, 2, 3, 4)$ ．

#### (2) 情報挿入処理

透かし挿入のために改変する画素からなる集合を  $A$  とかく．(1) で得られた改変画素の集合  $A_m$  のうち、優先度が最も高い集合  $A_1$  を改変対象の画素にして、透かし情報を挿入する．すなわち、

$$A = A_1 \quad (5)$$

とおき、画素  $(x, y) \in A$  だけを変更する．

#### (3) 検証処理

(2) において透かし情報のすべてを正しく挿入できなかった領域がある場合、優先度  $m$  を下げて、

$$A = A_1 \cup A_2 \quad (6)$$

として、挿入できなかった領域について (2) の処理をやり直す．改変する画素をさらに多くする必要がある場合には、優先度をもう 1, 2 段階下げて、 $A = \bigcup_{k=1}^m A_k$  ( $m = 3, 4$ ) として、(2) の処理を行う．

2 章で述べたように、従来の電子透かし方式においては、画質劣化を防止することと、透かし挿入量や耐性に応じて改変する画素の個数を調整できることの双方を同時に満たすような (1) の挿入制御処理はなかった．交差数の概念を導入することによって、双方を同時に満たす制御処理を具体的に構成することができた．

次章で、提案した改変条件によって、透かし挿入による画質の劣化を回避できることを主観評価を通じて実証する．

なお、交差数を用いた改変条件の優先度が 4 段階であるのは、視覚特性から得られた 3.2 節の判断基準に対応した結果であり、たとえば、優先度 3, 4 の条件を  $S$  の値で区分することなどで、改変条件の細分化は可能と考えられる．本論文では、まず提案した 4 段階の条件によって画質が改善されることを明らかにし、細分化については今後の課題とする．

## 4. 評価

本章では、3 章で提案した視覚特性に基づく画素の改変基準を、主観評価を通じて評価する．まず画質について従来方式と提案方式との比較を行い、次に耐性

を評価する．

### 4.1 従来方式の概略

提案方式が画質の劣化を防止することを明らかにするために、二値画像用電子透かしの従来方式として、挿入する情報量を自由に換えられる点と、耐性が実験で評価されている点を考慮して、小堀らの方法<sup>6)</sup> を採択する．

この透かし方式の概略を以下にまとめる．透かし情報は以下の手順で挿入される．

(E1) 透かし情報をビット列  $\{d_i\}$  で表し、しきい値  $p$ 、ブロックサイズ  $m \times n$  を決めておく．

(E2) 画像を  $m \times n$  ブロックに分割する．各ブロックの黒画素の個数  $B_i$  が  $p \leq B_i \leq m \times n - p$  を満たすとき、 $b_i = B_i \bmod p$ 、および区間  $(0, 1)$  の乱数  $r_i$  を用いて、対応するビット  $d_i$  が 1 のとき、

$$c_i = p/2 + r_i p/2 - b_i \quad (7)$$

$d_i$  が 0 のとき、

$$c_i = r_i p/2 - b_i \quad (8)$$

を計算する．ただし、 $B_i + c_i > m \times n - p$  のとき  $c_i$  から  $p$  を引き、 $B_i + c_i < p$  のとき  $c_i$  に  $p$  を加える．

(E3) 画素値がその 4 近傍と異なっている画素  $a$  を、輪郭に属する画素と見なす．もし  $a$  が白でかつ  $c_i$  が正ならば、 $a$  を白から黒に変える．もし  $a$  が黒でかつ  $c_i$  が負ならば、 $a$  を黒から白に変える．この操作をブロック内の黒画素の個数  $B'_i$  が

$$B'_i = B_i + c_i \quad (9)$$

を満たすまで続ける．

こうして埋め込まれた透かし情報は以下の手順で復号される．

(D1) 画像を  $m \times n$  ブロックに分割する．各ブロックの黒画素の個数  $B'_i$  が  $p \leq B'_i \leq m \times n - p$  を満たすとき、ビット

$$d'_i = \begin{cases} 1 & (B'_i \bmod p \geq p/2) \\ 0 & (B'_i \bmod p < p/2) \end{cases} \quad (10)$$

を求める．

(D2) 得られたビット列  $\{d'_i\}$  から透かし情報を復号する．

この方式で実際に画素に改変を加えるのは処理 (E3) である．この処理では、透かし情報を挿入するために、輪郭部分すべてを改変の候補にしている．(E3) を提案方式に置き換えることによって画質の劣化を抑制できることを、主観評価により明らかにする．

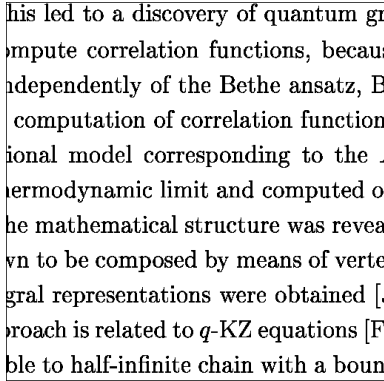


図 5 英文書画像 (512 × 512)  
Fig.5 English document.

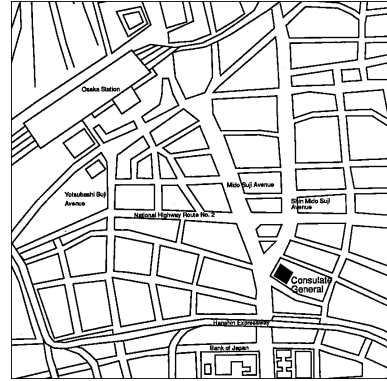


図 7 地図画像 (512 × 512)  
Fig.7 Map.

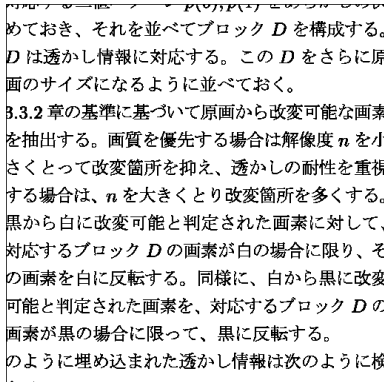


図 6 和文書画像 (512 × 512)  
Fig.6 Japanese document.

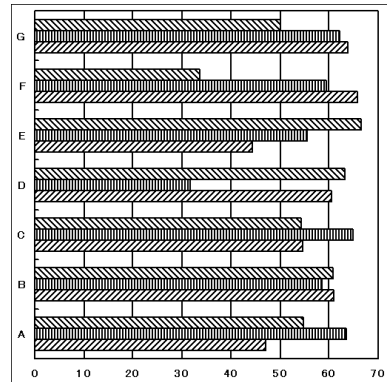


図 8 棒グラフ画像 (512 × 512)  
Fig.8 Bar graph.

4.2 画質評価

本論文中で提案した画素の改変条件が、従来方式と比べて画質劣化を防ぐことを明らかにするために、  
(A) 提案方式に従って画素を改変した画像  
(B) 従来方式に従って画素を改変した画像  
の 2 種を作成し、それぞれについて劣化の度合いを原画と比較する。

評価画像については、代表的な二値画像と思われる、  
(i) 文書からなる画像：英文書、和文書 (図 5, 図 6)  
(ii) 図形からなる画像：地図、棒グラフ (図 7, 図 8)  
の 2 種類計 4 枚を用意した。大きさはすべて 512 × 512 である。それぞれの画像に対して、提案方式と従来方式で透かしを埋め込む。

透かし情報として 0, 1 からなるランダム列をとり、  
(1) 制御情報として要求される 8 ビット<sup>22)</sup>  
(2) 実用として要求される 64 ビット<sup>14)</sup>  
の 2 種類を、パラメータ  $m, n, p$  を調整することで挿入した。さらに、文献 6) で用いられているプロッ

表 1 挿入ビット数  
Table 1 Number of embedded bits.

透かし情報挿入処理	( $m, n$ )	$p$	挿入ビット数
(1)	(140, 140)	140	8
(2)	(64, 64)	128	64
(3): 英文書	(40, 40)	128	140
(3): 和文書	(40, 40)	128	134
(3): 地図	(40, 40)	128	143
(3): 棒グラフ	(40, 40)	128	137

クサイズ  $m, n, p$  の値、  
(3)  $m = n = 40, p = 128$   
についても評価を行った。

$m, n, p$  の値と実際に埋め込まれたビット数との関係を表 1 にまとめる。 $m, n, p$  の値を先に設定した場合、画像中の白黒の割合によって実際に埋め込まれるビット数が変わることには注意する。(3) の挿入処理によって、どの画像も大体 140 ビットの情報が挿入された。

例として、透かし情報を 64 ビット埋め込んだ画像

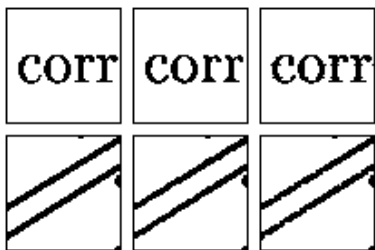


図 9 変更の例．左から原画，提案方式，従来方式．画像サイズは 64 × 64

Fig.9 Examples for altered images. From the left side, original, altered by the proposed method and altered by the previous method.

から，特徴的と思われる 64 × 64 の大きさを切り抜いた画像を図 9 にあげる．従来方式は，提案方式と比べて，文字のにじみや斜め線の輪郭の欠けが目立つといえる．

以上のように透かし情報が挿入された画像に対して画質の評価を行う．なお，画質評価には，一般に SN 比が用いられることが多いが，二値画像の場合，輝度値は 0 と 1 の 2 種類しかとれないため，SN 比は改変した画素の個数だけに依存することに注意する．したがって，提案方式 (A) と従来方式 (B) で改変する画素数  $\sum c_i$  を等しくとっている以上，SN 比で (A) と (B) の違いを正しく計測することはできない．

そのため，本論文では，主観評価によって劣化の度合いの比較を行うことにする．ただし，二値画像に対する画質の主観評価法を見つけることができなかったため，主観評価法として，文献 (23)，(21) を参考にして，多値画像の主観評価法の 1 つである MOS (Mean Opinion Score) 法を採用した．これは次の手順で行われる．

- 1) 評価者に，原画と，提案方式によって改変された画像 (A)，および従来方式によって改変された画像 (B) を提示する．
- 2) 原画に対する (A) および (B) の劣化の度合いを，「劣化が分からない」「劣化が分かるが気にならない」「劣化が分かり少し気になる」「劣化が分かり気になる」「劣化が分かり大変気になる」の 5 個の評価で類別し，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，透かし入り画像の劣化度合値を 10 人の評価者の評点の平均値で表わす．

主観評価の結果を図 10, 11, 12, 13 に，また，提案方式によって画素を改変したときに各優先度の参照された頻度を，表 2 にまとめる．

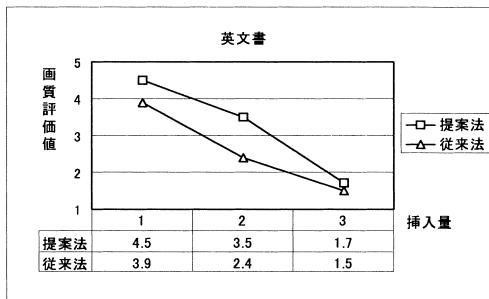


図 10 主観評価結果 (英文書)  
Fig. 10 Result of MOS (English document).

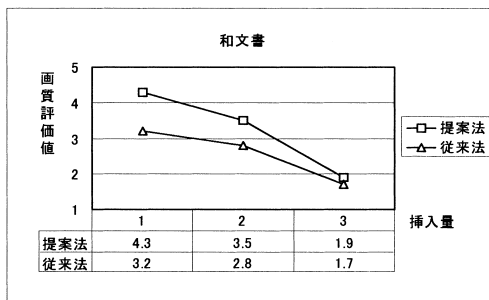


図 11 主観評価結果 (和文書)  
Fig. 11 Result of MOS (Japanese document).

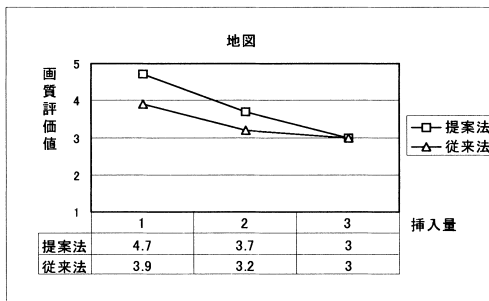


図 12 主観評価結果 (地図)  
Fig. 12 Result of MOS (map).

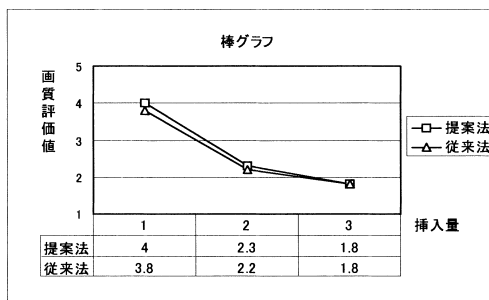


図 13 主観評価結果 (棒グラフ)  
Fig. 13 Result of MOS (bar graph).



表 2 優先度の参照頻度 (%)

Table 2 Referred frequency of priorities.

画像名	優先度 1	優先度 2	優先度 3	優先度 4
(1): 英文書	0.0	0.0	100.0	0.0
和文書	0.0	0.0	100.0	0.0
地図	0.0	0.0	100.0	0.0
棒グラフ	0.0	0.0	50.0	50.0
(2): 英文書	0.0	0.0	95.3	4.7
和文書	0.0	1.6	98.4	0.0
地図	0.0	0.0	90.6	9.4
棒グラフ	0.0	0.0	43.7	56.3
(3): 英文書	0.0	0.0	35.0	65.0
和文書	0.0	0.7	61.2	38.1
地図	0.0	0.0	55.2	44.8
棒グラフ	0.0	0.0	27.0	73.0

これらの結果より以下の事実が考察される。

- (i) 文書からなる画像に関しては、8ビットを埋め込んだ場合(1)と64ビット埋め込んだ場合(2)で、提案方式のほうが画像の劣化が少ないと評価された。挿入量が多い(3)では主観評価に差が見られないが、この場合、挿入量すなわち改変する画素の個数が多かったために、提案方式は優先度3による埋め込みだけでは対応できず、輪郭部分をすべて改変の候補とするような、従来方式と同じ優先度4の条件を多く参照したためと考えられる。事実、表2によると、挿入量が多い(3)では、優先度4を参照した頻度が(1)、(2)と比べて高い。また、透かし挿入量に比例して画質劣化の度合いが急激に悪化しているが、その理由として、英語、日本語を問わず、文字はその形状から意味を読み取る必要があるため、人間の視覚は輪郭の乱れに特に敏感であったと考えられる。
- (ii) 図形からなる画像に関しては、地図画像の場合、(1)と(2)では、どちらも提案方式のほうが画像の劣化が少ないと評価された。挿入量が多い(3)では主観評価に差が見られないが、上と同じように、優先度4の条件で改変された画素が多かったためと考えられる。棒グラフ画像では、挿入量にかかわらず、優先度4が参照された頻度がつねに高かった。したがって、提案方式と従来方式との画質の差がほとんど見られなかった。その理由として、棒グラフ画像では輪郭が整った直線成分が多く、もともと改変できる輪郭部分が少なかったためと考えられる。
- (iii) 表2によると、参照されている優先度は実質3と4だけになっており、特に、優先度1の条件はすべての画像に対して適用されていない。これには、評価に用いた画像にはもともとノイズや切れ目が

表 3 Stirmark 攻撃後の正復号率 (%)

Table 3 Correct decode rates after Stirmark attack.

画像名	提案方式	従来方式
英文書	54.7	51.6
和文書	53.1	57.8
地図	48.4	50.0
棒グラフ	56.3	54.7
平均	53.1	53.5

少なかったことと、本論文で提案した交差数を用いた方法では、これらの特徴を抽出しきれなかったことが、原因として考えられる。ノイズや線分の切れ目をより正確に抽出する方法として、たとえば、文献(13)、(17)で導入された、複雑さを表す指標を組み合わせることが有効であると思われる。その実現は今後の課題である。

以上の結果から、文字や斜線など、輪郭にもともと多少の凹凸があるような画像に対しては、提案方式によって画質劣化が回避できたといえる。また、いずれの画像も、実用面で要求される64ビットの情報<sup>(14)</sup>を挿入した場合、提案方式によって画質劣化を回避できたと結論される。

#### 4.3 耐性評価

提案方式によって透かし挿入後の画質を改善することができた。しかし、画質が向上した分、圧縮や拡大・縮小処理といった画像加工に対する耐性が弱まった可能性がある。この章では、実用面で要求される64ビットの情報<sup>(14)</sup>を挿入したとき、提案方式が従来方式と同水準の耐性を維持することを実験で検証する。耐性を評価するために、4.2節と同じ画像を原画として、(A)提案方式に従って64ビット情報を挿入した画像(B)従来方式に従って64ビット情報を挿入した画像を作成し、それぞれに画像処理を加えて、透かし情報検出を試みる。画像処理として、文献(6)と同様の、以下の処理を採用した。

- (i) 画像を多値化した後、画像サイズが3%、8%、10%になるようにJPEG圧縮し、これを再び二値化する。
- (ii) 透かし情報への攻撃ソフトウェアの1つであるStirMark3.1をかける。ただし、改変パラメータを文献(6)と同様にとる。すなわち、画素の変更量を0におき、他をデフォルト値にとる。
- (iii) 2倍、4倍拡大、および1/2、1/4縮小する。ただし画素の補間法として、バイキュービック法を用いた。

これらの劣化処理後に透かし情報を検出し、正しく透かし情報を復号できたビット数を求めて正復号率を

表 4 拡大・縮小後の正復号率 (%)

Table 4 Correct decode rates after enlargement and reduction.

拡大率	画像名	提案方式	従来方式
×4	英文書	100.0	100.0
	和文書	100.0	100.0
	地図	100.0	100.0
	棒グラフ	100.0	100.0
	平均	100.0	100.0
×2	英文書	100.0	100.0
	和文書	100.0	100.0
	地図	100.0	100.0
	棒グラフ	100.0	100.0
	平均	100.0	100.0
×1/2	英文書	60.9	50.0
	和文書	70.3	59.3
	地図	57.8	51.6
	棒グラフ	71.9	68.8
	平均	65.2	57.4
×1/4	英文書	59.4	45.3
	和文書	43.8	50.0
	地図	53.1	51.7
	棒グラフ	32.8	32.8
	平均	46.7	45.0

計算した。

まず、JPEG 圧縮については、提案方式、従来方式いずれにおいても、1 ビットの誤りもなく情報が復号できた。その理由として、二値画像透かしにおいては画素の白黒を反転させることで情報が挿入されるので、JPEG 圧縮による輝度値の変化の影響を受けなかったためと考えられる。

次に、Stirmark 攻撃による結果を表 3 にまとめる。提案方式、従来方式双方において、Stirmark をかけることによって正復号率が半減したが、2 方法の間に復号率の差はほとんど見られない。したがって、Stirmark 攻撃においては、提案方式と従来方式は同程度の耐性を持つといえる。

拡大・縮小による正復号率の変化を表 4 に与える。拡大率  $r$  に応じて、ブロックサイズ  $m, n$  が  $r$  倍、画素値のしきい値  $p$  の値が  $r^2$  倍になることに注意する。拡大した場合、提案方式、従来方式ともに透かし情報が、1 ビットの誤りもなく復号できた。

しかし、縮小した場合、提案方式のほうが従来方式よりも正復号率が高い傾向がある。とくに、2 分の 1 縮小ではその差は大きい。その原因として、従来方式は提案方式より輪郭が乱れやすいため、縮小処理によって別の図形に変形されやすかったことが考えられる。

画像劣化処理 (i) ~ (iii) に対して、提案方式は従来方式と同程度の耐性を維持することが検証された。提案方式を用いることで、耐性を変えずに透かし情報挿

入後の画質を向上できると結論される。

## 5. ま と め

従来の二値画像用電子透かし方式では、輪郭部分すべてを改変の対象とするために、透かし情報を挿入した結果、画質の劣化を招いていた。本論文では、透かし情報の挿入によるこのような画質の劣化を回避するために、方向選択性やゲシュタント原理といった人間の視覚特性に基づいて、改変のための判断基準を与えた。さらに、この基準を系統的に扱うためには、二値画像の局所的な特徴を計測する交差数の概念が有用であることを明らかにし、この交差数を用いて画素の改変可否を決定する条件を構築した。このような提案方式によって実際に画質の劣化が回避されることを主観評価によって確かめ、さらに、耐性が従来方式と同水準であることを実証した。

今後の課題として優先度の細分化があげられる。提案方式では、優先度 3 で透かし情報を挿入できなかった場合、従来方式と変わらない優先度 4 を参照して輪郭部分を改変したが、より画質を向上させるためには、交差数だけではなく、ブロック内の画素の個数  $S, \bar{S}$  や、さらには文献 13), 17) で定義されているような別の指標も導入して、優先順位を細分化する方法が考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) Cox, I.J., Miller, M.L. and Bloom, J.A.: *Digital Watermarking*, Morgan Kaufmann Publishers (2001).
- 2) 松井甲子雄: 電子透かしの基礎, 森北出版 (1998).
- 3) 阿部 悌, 井上浩一, 江尻公一: 2 値画像への電子透かし, 2000 年暗号と情報セキュリティシンポジウム, SCIS2000-C05 (2000).
- 4) Tseng, Y.C. and Pan, H.K.: Data Hiding in 2-Color Images, *IEEE Trans. Comput.*, Vol.51, No.7, pp.873-880 (2002).
- 5) Deseilligny, M.P. and Le Men, H.: An algorithm for digital watermarking of binary images, application to map and text images, *International Workshop on Computer Vision*, Hong Kong (1998).
- 6) 小堀紀子, 岩切宗利, 松井甲子雄: 画素分布による 2 値漫画への電子透かしの一方式, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.3, pp.595-604 (2001).
- 7) 中村康弘, 松井甲子雄: 和文書へのシール画像による電子透かし, 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.11, pp.2356-2361 (1997).
- 8) 辻合秀一, 上辻雅義: 文字形状を利用したレタ

リングへの電子透かし法, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J82-DII, No.11, pp.2175-2177 (1999).

- 9) 中村康弘, 松井甲子雄: 著作権保護のための電子文書のハードコピーへの署名の埋め込み, 情報処理学会論文誌, Vol.36, No.8, pp.2057-2062 (1995).
- 10) 岡 一博, 中村康弘, 松井甲子雄: 濃度パターン法を用いたハードコピー画像への署名の埋め込み, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J79-DII, No.9, pp.1624-1626 (1996).
- 11) 岡 一博, 松井甲子雄: 組織的ディザ法によるハードコピー画像への署名情報の埋め込み, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J80-DII, No.3, pp.820-823 (1997).
- 12) 荻原剛志, 小出晋也, 金田悠紀夫: 誤差拡散法を利用した2値画像への情報埋め込み手法, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J82-A, No.10, pp.1555-1562 (1999).
- 13) 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 D-II, Vol.J81-DII, No.6, pp.1132-1140 (1998).
- 14) コンテンツ ID フォーラム(編): cIDf Specification 1.1 (2002).
- 15) 横井茂樹, 鳥脇純一郎, 福村晃夫: 標準化された二値図形のトポロジカルな性質について, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.56-D, No.11, pp.662-669 (1973).
- 16) 鳥脇純一郎: 画像理解のためのデジタル画像処理(II), デジタル信号シリーズ7, 昭晃堂(1988).
- 17) 谷口倫一郎, 河口英二: 二値画像の複雑さと多値画像の閾値処理に関する考察, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J70-D, No.1, pp.164-174 (1987).
- 18) 淀川英司, 東倉洋一, 中根一成: 視聴覚の認知科学, 電子情報通信学会編(1998).
- 19) 南雲仁一: 生体における情報処理, 岩波講座情報科学 24 (1982).
- 20) 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 D-II, Vol.J79-DII, No.8, pp.1347-1353 (1996).
- 21) 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).
- 22) Interim Report, Results of Phase I and II, Issued by DHSG, CPTWG (1998).
- 23) 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).

## 付 録

3章であげた交差数を用いた改変条件の証明を完全にするために, 残りの  $S = 3$  から  $S = 8$  の場合分けを以下に示す.

- $S = 3$ : このとき  $C = 1, 2, 3$  である(図14).  
 $C = 1$  のとき, 黒画素は矩形もしくは線分を構成する. 線分の場合, 注目点は線分の凸点となり, 輪郭を乱しているため, 判断基準(3)より優先度3で  $\delta_0 = 0$  に改変できる. 矩形の場合, 判断基準(3)より輪郭部分を平滑化してよいことから, 優先度3で  $\delta_0 = 0$  に改変できる.  
 $C = 2$  のとき, 注目点は線分の連結点となるため, 改変は許されない.  
 $C = 3$  のとき, パターンはノイズ状と見なせるので, 判断基準(2)より, 優先度2で  $\delta_0 = 0$  に改変できる.
- $S = 4$ : このとき  $C = 1, 2, 3, 4$  である(図15).  
 $C = 1$  のとき, 黒画素は矩形を構成するため, 判断基準(3)より輪郭部分を平滑化してよいことから, 優先度3で  $\delta_0 = 0$  に改変できる.  
 $C = 2$  のとき, 注目点は線分の連結点となるため, 改変は許されない.  
 $C = 3, 4$  のとき, パターンはノイズ状と見なせるので, 判断基準(2)より, 優先度2で  $\delta_0 = 0$  に改変できる.
- $S = 5$ : このとき  $C = 1, 2, 3$  である(図16).  
 $C = 1$  のとき, 黒画素は図形の輪郭部分を構成

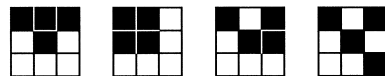


図14  $S = 3$  のパターンの例. 左から順に  $C = 1, 1, 2, 3$   
 Fig. 14 Examples for  $S = 3$ . From the left side they yields  $C = 1, 1, 2, 3$ , respectively.

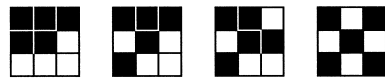


図15  $S = 4$  のパターンの例. 左から順に  $C = 1, 2, 3, 4$   
 Fig. 15 Examples for  $S = 4$ . From the left side they yields  $C = 1, 2, 3, 4$ , respectively.

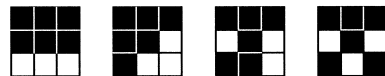


図16  $S = 5$  のパターンの例. 左から順に  $C = 1, 1, 2, 3$   
 Fig. 16 Examples for  $S = 5$ . From the left side they yields  $C = 1, 1, 2, 3$ , respectively.

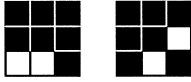


図 17  $S = 6$  のパターン例 . 左から順に  $C = 1, 2$   
 Fig. 17 Examples for  $S = 6$ . From the left side they  
 yields  $C = 1, 2$ , respectively.



図 18  $S = 7$  のパターン例  
 Fig. 18 Example for  $S = 7$ .



図 19  $S = 8$  のパターン  
 Fig. 19 Pattern of  $S = 8$ .

する . このとき注目点は線分の輪郭を構成するため , 判断基準 (4) より , 優先度 4 で  $\delta_0 = 0$  に改変できる .

$C = 2$  のとき , 注目点は線分の連結点となるため , 改変は許されない .

$C = 3$  のとき , パターンはノイズ状と見なせるので , 判断基準 (2) より , 優先度 2 で  $\delta_0 = 0$  に改変できる .

- $S = 6$  : このとき  $C = 1, 2$  である ( 図 17 ).  
 $C = 1$  のとき , 白画素が線分を構成するため , 判断基準 (4) より , 優先度 4 で  $\delta_0 = 0$  に改変できる .  
 $C = 2$  のとき , 注目点は線分の連結点となるため , 改変は許されない .
- $S = 7$  : このとき  $C = 1$  である ( 図 18 ).  
 注目点の周囲には別の図形からの枝の端点がある . 判断基準 (4) より , 優先度 4 で  $\delta_0 = 0$  に改変できる .
- $S = 8$  : このとき  $C = 0$  である ( 図 19 ).  
 反転によりノイズが生成されるので , 改変は許されない .

以上の結果から , 交差数を用いた改変条件と 3.2 節の判断基準との等価性が示される .

(平成 14 年 12 月 5 日受付)

(平成 15 年 4 月 3 日採録)



藤井 康広 (正会員)

2001 年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了 (物理学) . 同年日立製作所入社 . 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 . 情報セキュリティ技術 , 著作権保護技術 , 電子透かしの研究開発に従事 . 博士 (理学) . 電子情報通信学会会員 .



中野 和典

1992 年山形大学大学院修士課程修了 . 同年日立製作所入社 . 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) 研究員 . 衛星画像処理 , 電子透かしの研究開発に従事 . 電子情報通信学会会員 .



越前 功 (正会員)

1997 年東京工業大学大学院修士課程修了 (応用物理学) . 同年日立製作所入社 , システム開発研究所配属 . 情報セキュリティ技術 , 画像用電子透かし技術の研究開発を担当 . 現在 , 同研究所第 7 部 (セキュリティシステム研究部) 研究員 . 博士 (工学) . 映像情報メディア学会会員 .



吉浦 裕 (正会員)

1981 年東京大学理学部情報科学科卒業 . 同年日立製作所入社 , 日立研究所 , システム開発研究所に勤務 . 2003 年より , 電気通信大学電気通信学部人間コミュニケーション学科助教授 . 自然言語処理 , 知識処理 , 情報セキュリティ , 著作権保護の研究に従事 . 理学博士 . 電子情報通信学会 , 人工知能学会各会員 .



手塚 悟 (正会員)

1984 年慶應義塾大学工学部数理工学科卒業 . 同年日立製作所入社 , 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ー勤務 . 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 システムの研究を経て , 現在 , セキュリティシステム , 特に電子認証の研究開発に従事 . 工学博士 .