

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¹ 中野 和典¹ 越前 功¹ 吉浦 裕² 手塚 悟¹

概要

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。本発表では、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 Quality of Digital Watermarking for Binary Images Based on Local Measures

Yasuhiro Fujii¹, Kazunori Nakano¹, Isao Echizen¹, Hiroshi Yoshiura² and Satoru Tezuka¹

Abstract

Many methods of watermarking embed copyrights into binary images by altering pixels on edges, however, those previous methods then deteriorate the quality. Based on human visual features, 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 quality of watermarked images without the 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。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、多値画像と比べて極めて困難である。そのため、従来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上で、その構造を利用して情報を挿入する方式が多かった。例えば、文書からなる画像には、フォン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 [1]。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。

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。

本発表では、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。

¹ 日立製作所システム開発研究所

² 電気通信大学

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。前者の方法は文書画像に特化した方法であるため、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。

2.1 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方式が知られている [1]。

この方式では、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の埋め込む。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がある。

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

2.2 改善案

この従来方式を改善するために、本発表では、

- (i) 改変しやすい部分を選定して画質劣化を回避できること。
- (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点を同時に満たすことを要請する。

条件 (i), (ii) を満たすように従来方式を改善する方法の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上で、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。例えば、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。

本発表の第一の目的は、このような基準を明確化することである。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、例えば、パターンの大きさが 3×3 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。このような設定を統一的行うために、本発表では、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。これが第二の目的である。

次章でこれら第一、第二の目的の実現方法について述べる。

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、その中のひとつとして、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 [2]. 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、画像を人間にとって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 [3].

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はなく、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 [2]. 例えば、変化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も切れ目が生じた場合、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 [2] 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 [2]. これを採用すれば、次の変化を行っても、人間はそれを画像の劣化とみなさない.

- (1') 図形のわずかな切れ目をふさぎ連結性をもたせる.
- (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変化を行うべきである. すなわち、条件 (1'), (2') は変化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.

3.2 判断基準

上記の画像の乱れ (1) ~ (3) および変化 (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て出すことができる.

このような局所的な性質は、注目点とその周辺からなるブロックの形状で測ることが可能である. すな

わち、注目点を 1 画素ずつ全画面走査し、これらの条件を当てはめることで、画素の改変可能箇所が選定できる. 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、その一例として次のようにまとめられる.

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. 以下、この判断基準・優先度を基にする. 後の 4.2 章で、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、各画素が白と黒の二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

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.

視覚的特性を表現するさまざまな量が定義されている [4]. 例えば, 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 [4].

本発表では, 上記の測度の 1 つである「交差数」が 3.2 章の条件の判別に適した指標であることを明らかにして, 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. そのために, 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 δ_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 [4] 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 (S), 白画素の個数 (\bar{S}) を

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

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を表すことになる.

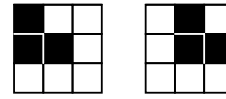


図 2: $S = 2$ のパターンの例. 左から順に $C = 1, 2$.

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. 従って, 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.

例えば, 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 章の判断基準と等価な条件が導出されよう. 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 3×3 ブロックを考える. $\delta_0 = 1$ のとき, 3.2 章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 章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 章の判断基準と等価であることは, 多少初等的ではあるが, S, \bar{S} に関する場合分けによって示される. 例として, $S = 2$ の場合を以下にあげる.

- $S = 2$: このとき $C = 1, 2$ である (図 2).
 $C = 1$ 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.

他の場合についても同様の手順で, 交差数を用いた改変条件と 3.2 章の判断基準の等価性が示される.

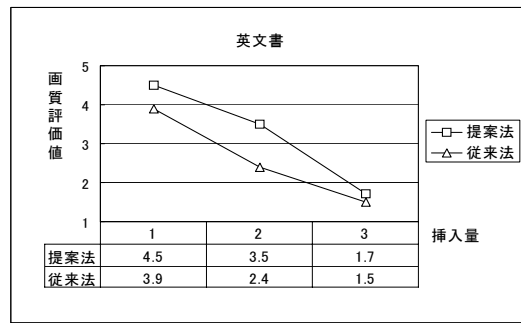


図 3: 主観評価結果 (英文書).

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, 次に耐久性を評価する.

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変えられる点と, 耐性が実験で評価されている点を考慮して, 小堀, 岩切, 松井の方法 [1] を採択する.

この方式で実際に改変された画素数と同じ数だけ, 提案法に従い画素を改変し, 画質の違いを評価することにする.

4.2 画質評価

本発表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
- (ii) 図形からなる画像: 地図, 棒グラフ

の 2 種類計 4 枚を用意した. 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 [5]
- (2) 実用として要求される 64 ビット [5]
- (3) 文献 [1] で用いられている 128 ビット前後

の 3 種類を挿入し, 評価を行った.

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. 従って, 提案方式 (A) と従来方式 (B) で改変する画素数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, 本発表では, 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 [3] 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) 原画に対する (A) および (B) の劣化の度合いを, 「劣化がわからない」から「劣化がわかり大変気になる」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あらわす.

主観評価の結果を図 3~6 にまとめる. これらの結果より以下の事実が考察される.

- (i) 全体を通じて, 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. また, 挿入量が多い (3) では主観評価に差が見られな

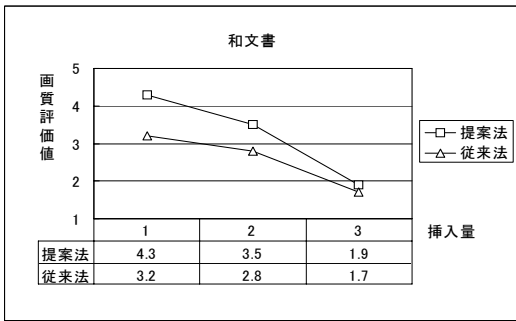


図 4: 主観評価結果 (和文書).

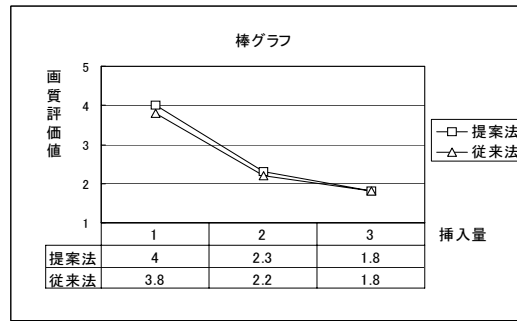


図 6: 主観評価結果 (棒グラフ).

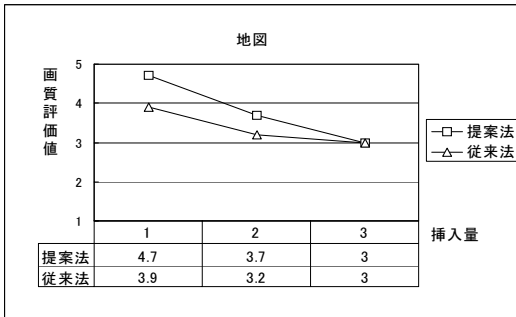


図 5: 主観評価結果 (地図).

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。

- (iii) 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常に高かった。従って、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。

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。

5 まとめ

本発表では、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た。

今後の課題として、強度調整のための優先度の細分化や、二値画像用透かしにより適した局所特徴量の定式化があげられる。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] Interim Report, Results of Phase I and II, Issued by DHSG, CPTWG (1998).