

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, 手塚 悟, 佐々木良一, 永川 忍†

(株) 日立製作所 システム開発研究所

† (株) 日立製作所 ソフトウェア事業部

あらまし 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增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, Satoru Tezuka, Ryoichi Sasaki
and Shinobu Eikawa†

Systems Development Laboratory, Hitachi, Ltd.

† Software Division, Hitachi, Ltd.

Abstract 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、音楽、映画などのデジタルコンテンツを配信するビジネスが盛んになってきた。デジタルコンテンツは取り扱いが容易で、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

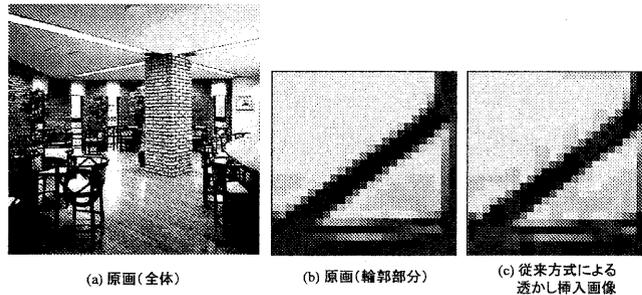


図 1: 従来方式の問題点

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、その多くは、ピクセル値の変化が激しい箇所に透かしの多くを挿入するため、視覚的に重要な輪郭部分を崩してしまう。

本論文では、輝度値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。なお、本論文の詳細については、[1]を参照頂きたい。

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に大別される。本論文では、ピクセル値（輝度値）を直接変更する方式を対象とし、画質劣化防止の観点から従来方式の問題点を述べることにする。

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。
- (2) 視覚的に透かしの目立ちにくい場所に挿入。

従来方式(1)が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のに対し、(2)は、視覚に依存した透かし挿入により、直接的に画質劣化を防止する。本論文では、従来方式(2)に着目

し、その問題点と解決策について述べることにする。

(2)の一例として、マスキング効果を用いる方式がある[2]。この方式は、強い信号の近傍にある弱い信号は知覚されにくいという視覚効果を利用して、輝度値の変化が激しい部分に透かしを挿入する。

ところが、上記基準に従った挿入では、物体の輪郭という視覚的に重要な部分を崩してしまう。例えば、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)はマスキング効果を用い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。これは輪郭内外の輝度差が大きいため、輪郭上に透かしの強く挿入したためである。

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。

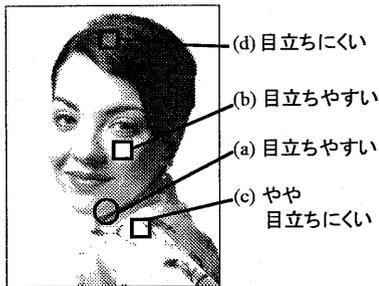


図 2: :透かしの目立ちにくさの例

- 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輝度変化は大きい、輪郭に沿う方向線上では、輝度変化は小さい。また、図 2 (b) のような高周波成分の少ない部分では、どの方向でも輝度変化は小さい。一方、図 2 (d) のような高周波成分の多い部分では、どの方向でも輝度変化は大きい。

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方向線上の輝度変化の最小値とする。すなわち、ピクセル i 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、

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

で表わされる。但し、 $\sigma^2(\bullet)$ 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。

この基準によれば、輪郭部分では S_i は小さく透かしが目立ちやすいと判断する。高周波成分の少な

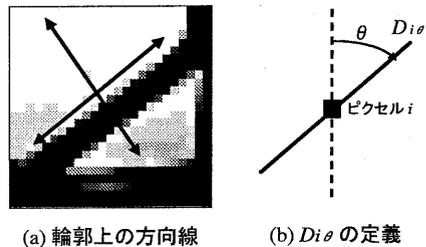


図 3: :方向に依存した輝度の変動

い部分では S_i は小さいので、目立ちやすいと判断し、高周波成分が多くなるほど S_i は大きくなり、目立ちにくいと判断する。従って基準は妥当である。

また、方向線 $D_{i\theta}$ の長さや数については、処理時間と画質に影響するため、 $D_{i\theta}$ の長さや数をえて画質の予備評価を行い、その結果から $D_{i\theta}$ の長さを 5 ピクセル、方向の数を 8 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、制御情報を出力する。
- 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。

一般に、輝度値変更型の電子透かしでは、複数ピクセルからなる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、ブロック内のピクセルの輝度値変更により実現される。従って、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

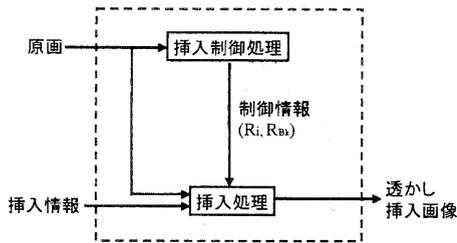


図4：提案方式の構成

の程度。 R_i の意味は、先に定義した S_i の意味と一致するので、次式で表される。

$$R_i = S_i$$

(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 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

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

で表される。 G 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、 G の候補としてもっとも単純な平均演算、すなわち、

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

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、透かしの挿入する。

4 主観評価による画質評価

図5に提案方式での透かし画像を示す。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は同じであるが、ピクセル毎の透かし強度は異なっている。結果として輪郭の崩れが解消している。

4.1 評価内容

256x256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の8ビット輝度成分に透かしを挿入した。同一挿入量で、下記の3方式による透かし画の画質レベルを主観評価により求めた。

提案方式 原画像をブロック(2x2ピクセル)に分割。 R_{B_k} の大きいブロックから全画像の4/5(13107個)を選択。 R_i の比にあわせて所定挿入量を選択ブロック内の各ピクセルに分配し、輝度値を変更。

従来方式 原画像をブロックに分割し、[2]に従ってコントラスト値を算出。その値の大きいブロックから13107個を選択。コントラスト値の比にあわせて所定挿入量を選択ブロック内の各ピクセルに分配し、輝度値を変更。

ランダム方式 原画像からブロック13107個をランダムに選択。選択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を分配し、輝度値を変更。

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

画質の主観評価[3]は以下の手順で行った。

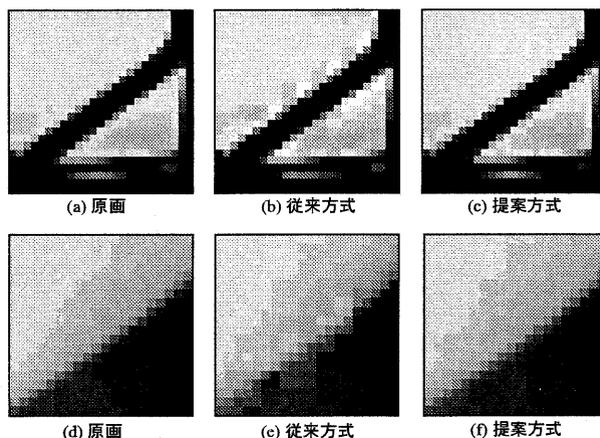


図5: 提案方式による透かし挿入画像

- (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」「妨害が分かり大変気になる」の5つの評価語で表わし、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わす。

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。

4.2 評価結果

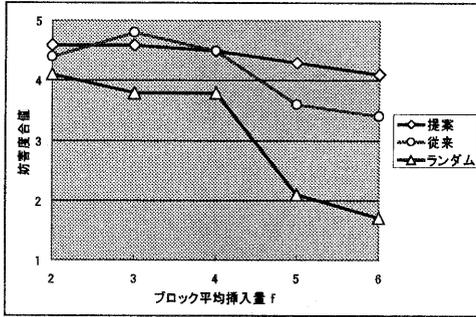
最初に、標準的な画像(woman)に対する評価結果を図6(a),(b)に示す。図の横軸は、1ブロックあたりの平均挿入量

$$f = Q/13107$$

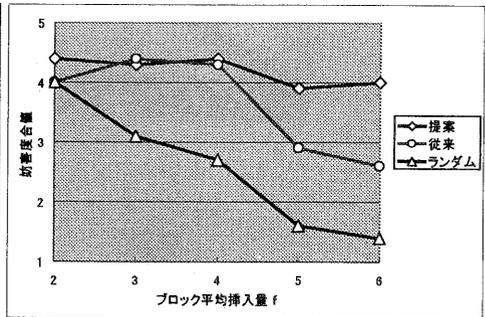
をあらわす。縦軸は妨害度合値である。この評価結果から、標準的な画像における3方式の画質と挿入量に関して、以下が考察される。

- 挿入量増大に伴う画質劣化の度合は、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、例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、評価した全ての 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。

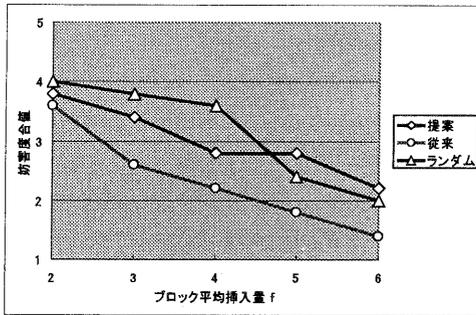
次に、高周波成分の少ない画像(CG_plane, CG_comp)に対する評価結果(等倍表示)を図6(c),(d)に示す。この評価結果から、以下が考察される。



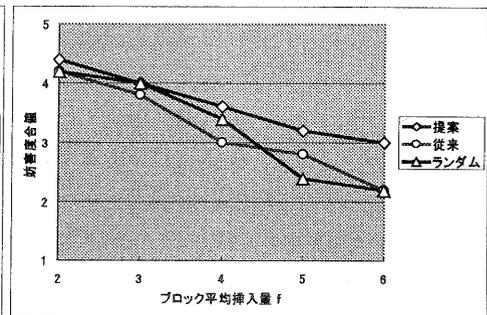
(a) woman (等倍)



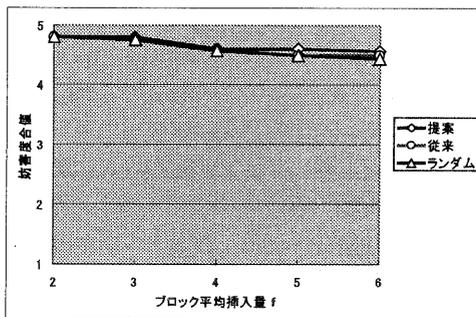
(b) woman (2倍)



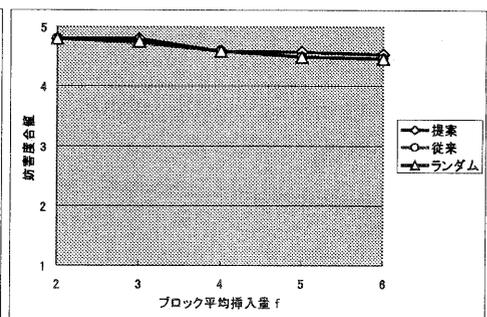
(c) CG_plane (等倍)



(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

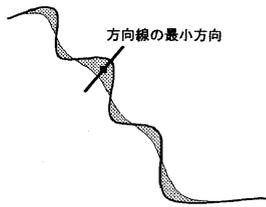


図7: :透かしが集中する輪郭部分

- CG_plane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る。このような画像では、従来方式の透かしは輪郭部分に集中するため、ランダム方式に比べ画質が劣化する。また、提案方式も、図7に示す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所が分散され、両方式の画質はCG_plainに比べて向上する。その結果、両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、以下が考察される。

- 評価した全ての 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であった。これは、画像の大部分が透かしの目立ちにくい高周波成分なので、輪郭部分の多少に関わらず、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。

上記の画質についての考察を以下にまとめる。

- 標準的な画像では、全ての挿入量で、提案方式がランダム方式を上回る。また、挿入量が多い場合には、提案方式が従来方式を上回る。
- 高周波成分の少ない画像では、ランダム方式

が他の2方式を上回る場合がある。特に輪郭部分の少ない画像では、その差は顕著である。

- 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。

5 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、従来方式では、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。なお、提案方式は動画用の電子透かしにも適用可能である[4]。

参考文献

- [1] 越前 ほか : 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, To appear in 2000.
- [2] J.F. Delaigle et al. : Watermarking algorithm based on a human visual model, *Signal Processing*, Vol. 66, pp. 319-335 (1998).
- [3] 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).
- [4] I. Echizen et al. : General Quality Maintenance Module for Motion Picture Watermarking, *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, Vol. 45, No. 4, pp. 1150-1158 (1999).