

2 値透かし系列のための画質保証型電子透かし法

A Watermarking Method Allowing the Desired Image Quality for Binary Sequences

学生会員 松井勝之[†], 正会員 橋高志^{††}, 正会員 藤吉正明[†], 正会員 貴家仁志[†]

Katsuyuki Matsui[†], Takashi Tachibana^{††}, Masaaki Fujiyoshi[†] and Hitoshi Kiya[†]

あらまし 2 値整数系列を画像に埋める画質保証型電子透かし法を提案している。提案法は、任意の画像に対して透かし後の画質を保証する画質保証特性、および原画像を用いずに透かしを抽出する非参照型特性を保持しつつ、2 値整数系列の埋込みに特化することで、従来の画質保証型電子透かし法と比べて、耐性を向上している。シミュレーションにより、提案法が画質保証型かつ非参照型であること、従来法より耐性が向上していることが確認されている。

キーワード: 電子透かし, 画質保証, 2 値系列, 耐性, 埋込み強度, 符号間距離, JPEG

1. ま え が き

電子透かし技術は、著作権保護¹⁾を目的とするだけでなく、ラベリング他の目的にも応用されており²⁾、放送関連への応用も盛んに研究されている^{3)~5)}。

画像電子透かし法は、埋める情報量、強度などの点から一般に変換領域で透かしを埋める^{6)~8)}。変換領域で透かしを埋める手法に、画質劣化が画像に依存しない画質保証型電子透かし法がある⁴⁾⁹⁾。この手法は、画質制御パラメータを画像ごとに求めることなく、任意の画像に対して画質 (PSNR, Peak Signal-to-Noise Ratio) を保証する。

従来の画質保証型電子透かし法は、透かしとして 2 値整数系列、多値整数系列、実数値系列など様々な系列を用いることが可能である反面、系列によらず同じ埋込み法を用いる⁹⁾。このため、系列の性質を考慮した埋込み法を用いることで、耐性を向上する余地が存在する。

そこで本稿では、2 値整数系列の埋込みに特化した画質保証型電子透かし法を提案する。提案法は、従来法に比べ透かし埋込み強度を向上し、かつ、透かしの符号間距離を拡大することによって、画質保証型および透かし系列抽出に原画像を必要としない、非参照型の双方の特徴を保持したまま、従来法より耐性を向上する。

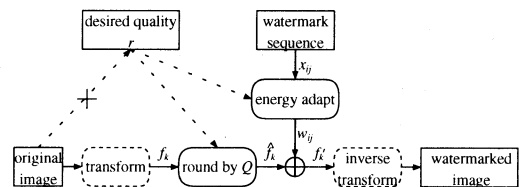


図 1 提案する画質保証型電子透かし法
Proposed watermarking method allowing the desired image quality.

2. 提案の電子透かし法

提案法の処理概略を図 1 に示す。図 1 に示すとおり、提案法は画像依存のパラメータを用いない画質保証型電子透かし法であり、透かし系列を変換領域で埋める。

2.1 埋込みアルゴリズム

提案法の埋込みアルゴリズムを説明する。ただし、ここで使用する画像は 8 ビット濃淡画像で、その輝度値は $c = 2^8 - 1 \sim 0$ の範囲に存在すること、画像は $N_x \times N_y$ 画素のブロックに分割されることを仮定する。

手順 1 透かし画像の画質劣化の目標値を尺度 PSNR で r [dB] と設定する。

手順 2 r を用いて離散コサイン変換 (DCT, Discrete Cosine Transform) 係数の量子化幅 Q を式 (1) より求める。ただし、 $D = 3$ 。

$$Q = \frac{c\sqrt{DN_xN_y}}{10^{0.05r}} \quad (1)$$

これは、従来法⁹⁾で式 (2) を用いて、上限値制限定数に $M_s = 1$ 、分散値上限定数に $N_s = 1$ をそれぞれ選択したことと同じ結論である。

$$D = \frac{12N_s^2}{N_s^2 + 3M_s^2} \quad (2)$$

2002 年 12 月, メディア工学研究会で発表

2003 年 3 月 3 日受付, 2003 年 4 月 11 日採録

[†] 東京都立大学大学院 工学研究科 電気工学専攻

(〒192-0397 八王子市南大沢 1-1, TEL 0426-77-2745)

^{††} 日本電気エンジニアリング株式会社

(〒183-8502 府中市住吉町 5-22-5, TEL 042-333-9717)

[†] Dept. of Electrical Engineering, Tokyo Metropolitan University

(1-1 MinamiOsawa, Hachioji-shi, Tokyo 192-0397, Japan)

^{††} NEC Engineering, Ltd.

(5-22-5 Sumiyoshi-cho, Fuchu-shi, Tokyo 183-8502, Japan)

手順3 埋める原透かし系列 \mathbf{x}_i を一つ選択する。ここで、 \mathbf{x}_i は一様分布する0,1で構成される長さ L の2値整数系列である。すなわち、 $\mathbf{x}_i = \{x_{ij} | x_{ij} \in \{0,1\}, j = 1, 2, \dots, L\}$ 、平均 $E[x_{ij}] = 0.5$ 、標準偏差 $\sigma_x = 0.5$ である。

手順4 変換定数 a を Q とする。これは、従来法で式 (3) を用いて、 $M_s = 1, N_s = 1$ を選択したことと同じ結論である。

$$a = \frac{M_s Q}{2 N_s \sigma_x} \quad (3)$$

手順5 式 (4) を用いて、原透かし系列 \mathbf{x}_i を平均0、分散 $(a\sigma_x)^2$ の分布に従う透かし系列 \mathbf{w}_i へエネルギー調整する。

$$w_{ij} = a(x_{ij} - E[x_{ij}]), j = 1, 2, \dots, L \quad (4)$$

手順6 画像を $N_x \times N_y$ 画素のブロックへ分割し、ブロックごとに2次元DCT (2D-DCT) を施す。

手順7 透かし系列要素 w_{ij} が埋込まれていないブロックを1つ選択する。そのブロックの $N_x \times N_y$ 個のDCT係数 $\mathbf{f} = (f_1, \dots, f_k, \dots, f_{N_x N_y})$ から埋込み対象係数 f_k を1つ選択する。次に、式 (5) を計算し、離散化されたDCT係数 \hat{f}_k を得る。

$$\hat{f}_k = \text{round} \left(\frac{f_k}{Q} \right) Q \quad (5)$$

ただし、 $\text{round}(p)$ は p の小数第一位を四捨五入し得られる整数を意味する。

手順8 この \hat{f}_k へ透かし系列 $\mathbf{w}_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{iL})$ の要素 w_{ij} を一つ選択し、式 (6) に従い加算する。ただし、 m は整数。

$$f'_k = \begin{cases} \hat{f}_k + w_{ij}, & \text{round} \left(\frac{f'_k}{Q} \right) = 2m \\ \hat{f}_k - w_{ij}, & \text{round} \left(\frac{f'_k}{Q} \right) = 2m + 1 \end{cases} \quad (6)$$

手順9 一つの係数に w_{ij} が埋められた $N_x \times N_y$ 個のDCT係数 $\mathbf{f}' = (f'_1, \dots, f'_k, \dots, f'_{N_x N_y})$ に逆2D-DCTを施す。

手順10 透かし系列 \mathbf{w}_i の L 個の要素 $w_{ij}, j = 1, 2, \dots, L$ がすべて画像へ埋められるまで手順7~9を繰り返す。

2.2 提案法の特徴

提案法は従来法⁹⁾ に比べ、透かし埋込み強度を増加し、かつ、符号間距離を拡大することで、耐性を向上している。以下、この2点について述べる。

(1) 透かし埋込み強度の増加

提案法の画質劣化は、手順7の離散化に伴う雑音と手順8の透かし要素加算に伴う雑音の二者に起因し、1ブロックあたりの雑音エネルギー $E[e_b^2]$ は従来法⁹⁾ 同様、

$$E[e_b^2] = \frac{Q^2}{12} + (a\sigma_x)^2 \quad (7)$$

与えられる。ただし、式 (7) の右辺第1項は離散化に伴う雑音エネルギーを、第2項は透かし要素加算に伴う雑音エネルギーを、それぞれ表す。

手順3で述べた $\sigma_x = 0.5$ の条件の下、従来法⁹⁾ では $M_s = 0.5, N_s = 1$ であるため、式 (3) より $a = 0.5Q$

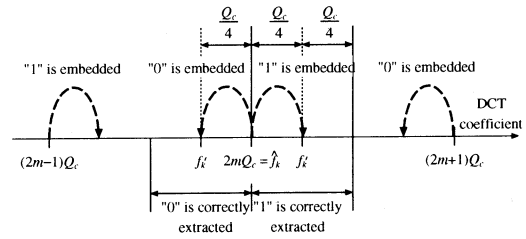


図2 従来法⁹⁾ における符号間距離
Code distance in the conventional method⁹⁾.

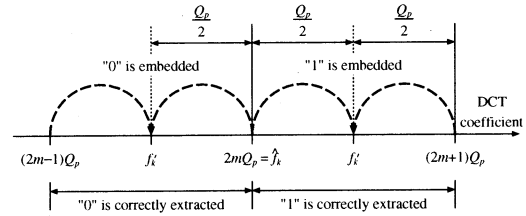


図3 提案法における符号間距離
Code distance in the proposed method.

となる。したがって、

$$\frac{Q^2}{12} : (a\sigma_x)^2 = 4 : 3 \quad (8)$$

である。一方、提案法では、手順4で述べたとおり $a = Q$ であるため、

$$\frac{Q^2}{12} : (a\sigma_x)^2 = 1 : 3 \quad (9)$$

となる。式 (8), (9) より、提案法は従来法と比べ、7/4倍のエネルギーを透かし要素加算に与えている。このことは、同じ画質劣化量において、提案法は従来法より透かしを強く埋める、つまり、透かし埋込み強度を増加していることを意味する。

(2) 符号間距離の拡大

提案法、従来法ともに、透かしを埋めた画像になんらかの処理が施され、透かしを埋めたDCT係数 f'_k が変化すると、抽出した透かしに誤りが生じる。ただし、従来法では図2に示すとおり、 f'_k の変化量 d が $\pm Q_c/4$ 未満であれば、抽出した透かしに誤りは生じない。同様に、提案法では図3に示すとおり、 f'_k の変化量 d が $\pm Q_p/2$ 未満であれば、抽出した透かしに誤りは生じない。ここで、 Q_c, Q_p は同一の所望画質 r [dB] を保証する従来法の量子化幅と提案法の量子化幅とをそれぞれ表す。

透かしが正常に抽出できる f'_k の変化の許容量を耐性と定義すると、図2, 3に示す符号間距離が耐性を表す。ここで、耐性は透かし画像に対して施された処理の内容には関係しないことに注意。すなわち、耐性は処理内容に関わらず、 f'_k の変化量 d に関係する。この定義に従うと、従来法、提案法の耐性は図2, 3より、それぞれ $Q_c/4, Q_p/2$ である。ここで、量子化幅 Q_c, Q_p は式 (1) より

$$Q_c = \frac{c\sqrt{\frac{48}{7} N_x N_y}}{10^{0.05r}}, Q_p = \frac{c\sqrt{3 N_x N_y}}{10^{0.05r}} \quad (10)$$

表 1 共通シミュレーション条件
Common conditions.

ダイナミックレンジ	$c = 255$
ブロックサイズ	$N_x = 8, N_y = 8$
透かし系列	{0,1} の一様乱数で構成
埋込み係数	(2, 2)
DCT 係数ブロックで DC 成分を (1, 1) とする	

であるので,

$$\frac{Q_p}{2} = \frac{\sqrt{7}}{2} \times \frac{Q_c}{4} \quad (11)$$

となる. 式 (11) より, 同一画質における提案法の耐性は従来法に比べ, $\sqrt{7}/2 \approx 1.33$ 倍に増加していることがわかる. これは, 手順 8 において, 非画質保証型の従来法⁵⁾を応用し, 量子化された係数 $\text{round}(f_k/Q)$ の偶奇に応じて, 透かし要素の加算方向を反転することで, 符号間距離を拡大したことによる.

また, 従来法と提案法とが同一耐性を有する場合,

$$\frac{Q_c}{4} = \frac{Q_p}{2}, \quad (12)$$

であり, これは式 (1) より,

$$\frac{c\sqrt{\frac{48}{7}N_xN_y}}{4 \times 10^{0.05r_c}} = \frac{c\sqrt{3N_xN_y}}{2 \times 10^{0.05r_p}} \quad (13)$$

となる. ここで, r_c, r_p は同一耐性を提供する従来法の画質と提案法の画質とをそれぞれ表す. 式 (13) より,

$$r_p = r_c + 20 \log_{10} \frac{\sqrt{7}}{2} \text{ [dB]} \quad (14)$$

である. 式 (14) より, 同一耐性における提案法の画質は従来法に比べ, 常に $20 \log_{10}(\sqrt{7}/2) \approx 2.43$ dB 向上することがわかる.

3. シミュレーション

シミュレーションにより, 提案法の有効性を確認する.

3.1 共通シミュレーション条件

共通シミュレーション条件を表 1 に示す.

3.2 画質保証型の検証

ここでは, 提案法が画質保証型の特徴を保持していることを検証する. すなわち, 所望画質 r [dB] に対して得られる画質 (PSNR) を, シミュレーションで検証する. 評価用画像 Flower Garden, Football, Mobile & Calendar (すべて 704×240 画素, 8 ビット濃淡画像 64 フィールド) の各フィールドに対して, 埋込み係数を (2, 2), 所望画質を 56 dB とし, $L = 2640$ [bits] の透かし系列を埋めた場合の結果を図 4 に示す. 図 4 より, 提案法は従来法同様⁴⁾⁹⁾, 画像によらず画質を保証することがわかる.

3.3 耐性の検証

ここでは, 2.2 で考察した耐性を検証する. 透かしを埋めた DCT 係数 f'_k の値を変化させた画像から, 原画像を用いずに抽出した透かしのビット誤り率 (BER, Bit Error

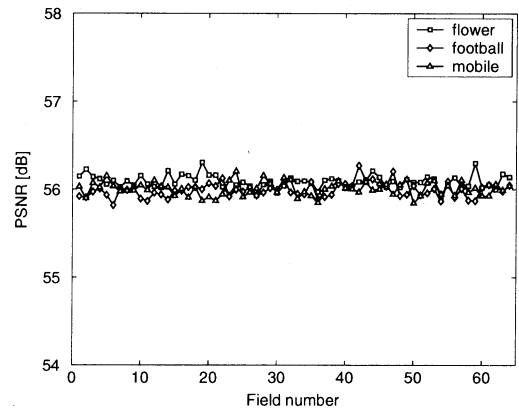


図 4 画質評価 (所望画質 $r = 56$ [dB], 系列長 $L = 2640$)
Image quality evaluation (desired quality $r = 56$ [dB], the length of a watermark sequence $L = 2640$ [bits]).

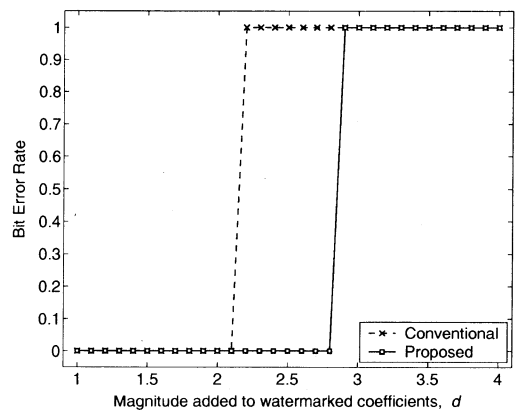


図 5 透かしを埋めた DCT 係数の変動量 d 対抽出した透かしのビット誤り率 (評価用画像 Lena, 所望画質 $r = 56$ [dB], 系列長 $L = 4096$ [bits])

Bit error rate of extracted watermark sequence versus variation of the watermarked coefficients (the used image is Lena, the desired quality $r = 56$ [dB], the length of a watermark sequence $L = 4096$ [bits]).

Rate) をシミュレーションで検証する. なお, f'_k の値の変化は f'_k に d もしくは $-d$ を加算することで実現する.

評価用画像 Lena (512×512 画素, 8 ビット濃淡画像), 所望画質 $r = 56$ [dB], 系列長 $L = 4096$ [bits] の条件下での変化量 d と BER との関係を図 5 に示す. 図 5 より, 提案法は原画像を用いずに透かしを抽出可能であることがわかる. さらに, 2.2 での考察どおり, 同一画質の条件下で提案法の耐性は, 従来法と比べ約 1.33 倍に向上していることが確認される.

評価用画像 Lena, 変化量 $d = 2.1$ の条件下での所望画質 r と BER との関係を図 6 に示す. 図 6 より, 2.2 での考察どおり, 提案法は同一耐性の条件下で従来法と比べ, 約 2.4 dB 高い画質の画像を生成することが確認される.

3.4 JPEG 圧縮伸長後の透かし抽出性能の考察

2.2 で述べたとおり, 提案法が向上している耐性は透かし画像に対する処理の内容に依存せず, 透かしを埋めた DCT 係数値 f'_k の変化に対する許容量にのみ関係するものである

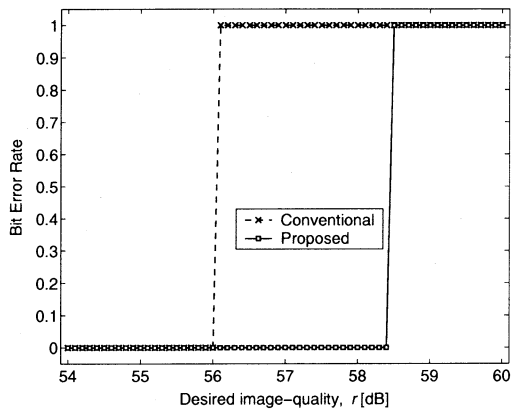


図 6 所望画質 r 対抽出した透かしのビット誤り率 (評価用画像 Lena, 透かしを埋めた DCT 係数の変動量 $d = 2.1$, 系列長 $L = 4096$ [bits])

Bit error rate of extracted watermark sequence versus the desired image quality (the used image is Lena, the variation of the watermark coefficients $d = 2.1$, the length of a watermark sequence $L = 4096$ [bits]).

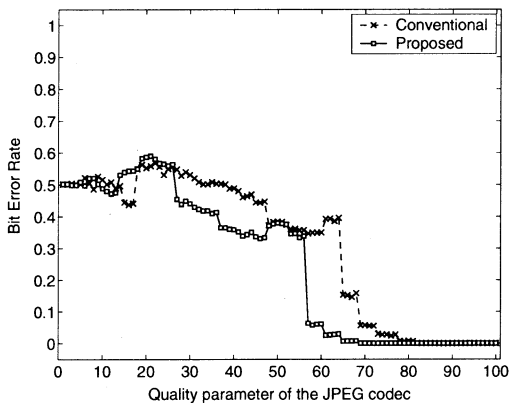


図 7 JPEG 圧縮伸長のビット誤り率 (評価用画像 Lena, 所望画質 $r = 50$ [dB], 系列長 $L = 4096$ [bits])

Bit error rate of extracted watermark sequence versus the JPEG compression parameter (the used image is Lena, the desired quality $r = 50$ [dB], the length of a watermark sequence $L = 4096$ [bits]).

が, ここでは, 一例として, 透かしを埋めた画像を JPEG コーデック¹⁰⁾によって圧縮伸長した画像から抽出した透かし系列の BER を考察する.

評価用画像 Lena, 所望画質 $r = 50$ [dB], 系列長 $L = 4096$ [bits] の条件下での結果を図 7 に示す. 図 7 の横軸は, 評価に用いたコーデックのパラメータであり, 値が小さいほど, 画質が低く抽出した透かしのビット誤り率が高くなる. 図 7 より, 従来法がパラメータ値 83 (約 0.16 ビット/画素) まで BER が 0 であるのに対し, 提案法はパラメータ値が 69 (約 0.11 ビット/画素) まで BER が 0 である. このように, 一般の画像処理においても, 提案法は従来法より耐性を向上していることがわかる.

なお, 上述したとおり, この結果は透かし画像に施される処理の内容によらず, f'_k の変化に対する許容量の観点から導かれるものであるため, 他の処理に関してもこの結果

同様に提案法が従来法より優れた耐性を有することに注意.

4. むすび

本論文では, 2 値整数透かし系列のための画質保証型電子透かし法を提案した. 提案法は, 2 値整数透かし系列に特化した埋込み法を用いることで, 従来法より透かし埋込み強度を増加し, 符号間距離を拡大している. その結果, 提案法は従来法より耐性を向上している. シミュレーションにより, 提案法が画質保証型かつ非参照型であり, 従来法より耐性を向上していることが確認された.

〔文 献〕

- 1) B.M. Macq, ed: "Special Issue on Identification and Protection of Multimedia Information", Proc. IEEE, **87**, 7, pp.1059-1276 (1999)
- 2) G.C. Langelaar, I. Setyawan, and R.L. Lagendijk: "WaTermarking Ditigal Image and Video Data", IEEE Signal Processing Mag., **17**, 5, pp.20-46 (2000)
- 3) 渡部 重彦, 川畑 優, 三嶋 英俊, 長谷川文雄: "GOP 構造を保持するための電子透かしを利用した MPEG-2 高画質編集の一検討", 映像学技報, **27**, 9, pp.129-133 (2003)
- 4) 橋 高志, 藤吉 正明, 貴家 仁志: "放送監視のための非参照型電子透かし法", 信学論, **J86-D-II**, 2, pp.233-241 (2003)
- 5) 杉本 修, 川田 亮一, 和田 正裕, 松本 修一: "MPEG 符号化による劣化を検出するリファレンス画像無しの画質客観評価手法", 映像学技報, **24**, 79 (2000)
- 6) 松井 甲子雄, "電子透かしの動向", 映像学誌, **56**, 7, pp.1053-1054 (2002)
- 7) A. Nikolaidis and I. Pitas: "Optimal Detector Structure for DCT and Subband Domain Watermarking", Proc. IEEE ICIP, WA-P7.3 (Sept. 2002)
- 8) A. Miyazaki and A. Okamoto: "Analysis of Watermarking Systems in the Frequency Domain and Its Application to Design of Robust Watermarking System", IEICE Trans. Fundamentals, **E85-A**, 1, pp.117-124 (2002)
- 9) T. Tachibana, M. Fujiyoshi, and H. Kiya: "A Watermarking Scheme Allowing the Desired Image Quality with no Limitation on the Distribution of Watermark Sequences", Proc. IEEE IS-PACS, C6-3 (Nov. 2002)
- 10) Independent JPEG Group: "JPEG Software", rel.6b, <http://www.ijg.org/files/jpegsrc.v6b.tar.gz> (March 1998)



まつい かつゆき
松井 勝之 2002年, 東京都立大学工学部卒業. 同年, 同大学院工学研究科修士課程入学. 現在, 在学中. 情報圧縮, 情報メディアセキュリティに関する研究に従事. 学生会員.



たちばな たかし
橋 高志 1979年, 静岡大学工学部卒業. 1981年, 同大学院工学研究科修士課程修了. 同年, 日本電気(株)入社. 放送スタジオ機器の開発に従事. 現在, 日本電気エンジニアリング(株)に勤務. 正会員.



ふじよし まさあき
藤吉 正明 1995年, 埼玉大学教養学部卒業. 2001年, 同大学院理工学研究科博士後期課程修了. 同年, 東京都立大学大学院助手. 博士(学術). 画像処理, スベクトル拡散通信, セキュア通信に関する研究に従事. 2001年3月電子情報通信学会学術奨励賞受賞. 正会員.



きや ひとし
貴家 仁志 1980年, 長岡技術科学大学工学部卒業. 1982年, 同大学院工学研究科修士課程修了. 同年, 東京都立大学助手. 2000年, 同大学院教授. 工学博士. 画像・音声情報処理, 情報圧縮, 情報メディアセキュリティに関する研究に従事. 正会員.