

最適予測を用いた可逆電子透かしのための適応的予測誤差拡張手法

Adaptive Prediction Error Expansion Method for Reversible Watermarking Using Optimal Prediction

鈴木 裕一郎[†] 山登一輝[‡] 篠田 一馬[†] 長谷川 まどか[†] 加藤 茂夫[†]Yuichiro Suzuki[†] Kazuki Yamato[‡] Kazuma Shinoda[†] Madoka Hasegawa[†] Shigeo Kato[†]

1. はじめに

電子透かし[1]は、デジタルコンテンツの不正コピーや改ざんなどからのコンテンツの保護を目的として、コンテンツに微小な改変を加えることで、コンテンツそのものに秘密情報(透かし情報)を埋め込む手法である。画像を対象とする電子透かしの場合、埋め込まれる透かしの情報量に応じて、画素値へ加える改変も変化する。すなわち、埋め込まれる透かし情報量が大きい程、画像に発生する歪みも大きくなる。また、一般に、透かし埋め込み画像から埋め込まれた透かし情報を抽出することはできるが、透かし埋め込み画像を透かし埋め込み前の画質に復元することはできない。それゆえ、透かし情報の埋め込みによる画質劣化を抑制することが必要であり、人間の視覚特性を考慮した電子透かし[2]等が提案されている。

一方で、透かし埋め込み画像から透かし情報を抽出することで、透かし埋め込み画像を原画像に完全に復元できる可逆電子透かし[3]-[10]が近年提案されている。この手法は、医用画像やデジタルフォレンジックで利用されるような、画質劣化を許容できない画像に適した電子透かし手法であり、改ざん検知や画像の真正性検証のような画像の信頼性を高める分野への応用が期待されている。

これまでに提案された可逆電子透かしとして、画像の一部を可逆圧縮し、圧縮してできた空き部分を透かし情報と置き換える手法[3]や、画像の画素ヒストグラムに変更を加えることで透かし情報を埋め込む手法[4]などが挙げられる。さらに、後者のヒストグラムを利用した手法を発展させた手法として、差分拡張型手法[5]や予測誤差拡張型手法[6]-[8]、変換係数拡張型手法[9]などが提案されている。差分拡張型手法は、隣接する2画素の差分値からヒストグラムを作成し、透かし埋め込みに利用する手法である。予測誤差拡張型手法は、予測誤差値からヒストグラムを作成し、利用する手法、変換係数拡張型手法は、画像に整数ウェーブレット変換などの周波数変換を行うことで得られる変換係数からヒストグラムを作成し、利用する手法である。一般に、自然画像の隣接画素間には高い相関があることが知られており、差分値ヒストグラム、予測誤差ヒストグラム、そして変換係数ヒストグラムは、0を中心としたラプラス分布状になる。そのため、同量の透かし情報を埋め込んだ場合、これらの手法は、画素ヒストグラムを利用した手法より Peak Signal-Noise Ratio(PSNR)が高くなり、より効率的な透かし埋め込みが可能である。本稿では、予測誤差拡張型の手法に着目する。予測誤差拡張型の一手法である、Thodi らの手法[6]は、原画像から作成された予測誤差ヒス

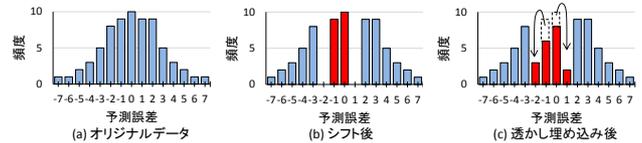


図1 Thodi らの手法における埋め込み規則

トグラムを基に透かし情報を埋め込む。具体的には予測誤差値が0と-1となる画素を透かし埋め込みに利用し、それ以外の画素は一定の変更(シフト)が施される。そのため、所望の透かし埋め込み容量の増減に対して、シフトのみが行われる画素の総数は一定である。すなわち、透かし埋め込み容量の大小にかかわらず、一定の画質変化が発生するという問題がある。しかし、シフトのみを行う画素を減らせば、この問題を解消できると考えられる。シフトのみを行う画素を減らすには、所望の透かし埋め込み容量に応じて、利用する埋め込みピンを適応的に変更可能な手法が望まれる。また、Thodi らの手法で用いられる予測式は、着目画素に対して左上方向の3画素を参照している。しかし、より多くの参照画素を予測に使用すれば、予測精度が向上し、より0付近に頻度の集中した予測誤差ヒストグラムを得られると考えられる。

そこで本稿では、以上の観点から、透かし埋め込み画像の画質向上を目的として、所望の透かし埋め込み容量に応じて、適応的に予測誤差値を変更可能な可逆電子透かし手法を提案する。提案手法では、ヒストグラムビンに対して最適な埋め込みを行う手法と、予測精度向上のための予測手法について検討する。まず、着目画素の近傍の平坦度を表す Noisy-Level(NL)[8]を算出し、NLが閾値 T_{NL} 以下の画素のみを用いて、予測誤差ヒストグラムを作成する。次に、予測誤差ヒストグラムにおいて、予測誤差値が0以上のビンを表す正側と、予測誤差値が0未満のビンを表す負側からそれぞれ1つずつ選択した2つのビンの頻度の総和が、所望の透かし容量よりも大きくなる組み合わせの中で、透かし埋め込み画像の PSNR が最大になる2つのビンを選択し、透かし情報の埋め込みに使用する。また、 T_{NL} が変化すると、選択される埋め込みピンは T_{NL} ごとに異なる。そのため、すべての T_{NL} において、PSNR が最も大きくなる場合の T_{NL} を所望の透かし埋め込み容量に対して最適な T_{NL} として決定し、そのときに選択された埋め込みピンが実際に透かし埋め込みに利用される。加えて、より0付近に頻度が集中する予測誤差ヒストグラムを作成するために、O'Neal の線形予測理論に基づく最適予測[11]を導入する。最適予測は、実際の輝度値と予測値の予測誤差電力を最小にする予測である。本手法では、着目画素の上下の画素を垂直方向、左右の画素を水平方向の画素の組とし、それぞれの組について、着目画素と予測値の予測誤差電力が最小となるよう

[†] 宇都宮大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Utsunomiya University

[‡] 宇都宮大学地域共生研究開発センター

Collaboration Center for Research and Development, Utsunomiya University

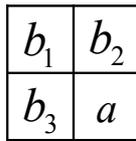


図 2 Thodi らの手法における参照画素

な最適予測係数を 1 枚の画像に 1 組算出する。さらに、画像中の局所的な特性の変化に対応するため、画像を 4 領域に分割し、分割領域ごとに 1 組の最適予測係数を設定することで予測誤差ヒストグラムを作成した場合についても検討を行った。これは、自然画像には、平坦な領域や、エッジ成分が多い領域などが存在し、領域ごとに最適な予測係数は異なると考えられるためである。実験により、従来手法と提案手法の比較を行った結果、同一埋め込み情報量において透かし埋め込み画像の PSNR が向上することを確認したので報告する。

2. 予測誤差ヒストグラムを利用した可逆電子透かし

Thodi らの予測誤差ヒストグラムを利用した可逆電子透かしでは、予測誤差ヒストグラムが 0 付近を中心としたラプラス分布状になることを利用して、出現頻度の高い予測誤差値 0 および-1 のヒストグラムビンに透かし情報を埋め込む。

まず、埋め込み処理について説明する。予測誤差値が 0 と-1 のビンに透かし情報を埋め込むため、図 1(b)に示すように、0 と-1 のビンの隣は出現頻度が 0 となるようにヒストグラムシフトを行う。次に、透かし情報に応じて、予測誤差-1, 0 を-2, 1 にそれぞれ変更することで、図 1(c)に示すようにビンの頻度が変化する。以上をまとめた埋め込み規則を式(1)に示す。

$$e_w = \begin{cases} 2e + c, & \text{if } e = 0, -1 \\ e + 1, & \text{if } e \geq 1 \\ e - 1, & \text{if } e \leq -2 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 e は予測誤差値、 e_w は透かし埋め込み後の予測誤差値、 $c \in (0, 1)$ は透かし情報を表す。

次に、予測式について説明する。Thodi らの手法で予測値を求めるために参照している画素を図 2 に、予測式を式(2)に示す。ここで、図中の a は着目画素、 $b_1 \sim b_3$ は参照画素であり、式(2)中の \hat{a} は予測値を表す。

$$\hat{a} = \begin{cases} \max(b_2, b_3), & \text{if } b_1 \leq \min(b_2, b_3) \\ \min(b_2, b_3), & \text{if } b_1 \geq \max(b_2, b_3) \\ b_2 + b_3 - b_1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

この予測式により予測値を求め、式(3)から予測誤差値を算出し、得られた予測誤差値 e に対して埋め込み処理を行う。

$$e = a - \hat{a} \quad (3)$$

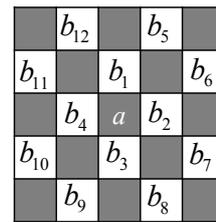


図 3 Shadow pixel と blank pixel

Thodi らの埋め込み規則は、シフトのみを行う画素の総数が、0 と-1 を除く予測誤差値の総頻度となる。そのため、透かし埋め込み容量の大小にかかわらず、一定の画質劣化が発生する。

なお、予測誤差値の変更による透かし情報の埋め込みを行うということは、着目画素の輝度値を 1 増加、あるいは 1 減少させることで実現している。透かし情報を抽出する場合、原画像の輝度値を持った画素から予測値を求め、着目画素との予測誤差を算出し、情報が埋め込まれているか、あるいはシフトのみが行われたかを判断する必要がある。そのため、画像に対して逆ラスタスキャン順に透かし埋め込み処理を行い、透かし情報の抽出は、画像に対してラスタスキャン順に行うことで、可逆性を維持することができる。一方で、この予測方法の場合、着目画素に対して左上方向の画素しか参照していない。処理手順を変更し、参照画素に上下左右の画素を利用できれば、より高い予測精度が得られると考えられる。

3. 適応的埋め込み手法の提案

提案手法では、予測精度を向上させるために、着目画素の上下左右の 4 画素を参照画素とし、得られた予測値から予測誤差値を求める。しかし、4 画素を予測に利用し、すべての画素に情報の埋め込みを行った場合、透かし埋め込み画像から算出した予測値は、透かし情報埋め込み前の画像の予測値と異なるため、可逆性を維持することができない。そこで、Sachnev らにより提案された rhombus prediction[10]を利用する。これにより、透かし埋め込み画像の可逆性が維持できる。rhombus prediction では、図 3 に示すように、画素を shadow-pixel(SP)と blank-pixel(BP)に分ける。透かし情報の埋め込みは SP にのみ行い、予測値は BP から求めることで、透かし情報の埋め込み処理によって SP の輝度値が変更された場合でも、透かし情報の抽出側では、BP から算出された予測値をもとに、SP に透かし情報が埋め込まれているか、シフトのみがされたかどうかを判別可能となり、可逆性を維持することができる。また、提案手法では、SP にのみ透かし情報の埋め込みを行っているが、まず SP へ透かし情報を埋め込み、そのあとに BP へ透かし情報の埋め込みを行っても可逆性は維持される。

3.1 Noisy-Level

NL とは、着目画素の近傍の平坦度を示す指標である。図 3 に NL の算出時の参照画素を示す。ここで、 a は着目画素、 $b_1 \sim b_{12}$ は参照画素を表す。次に、提案手法における NL の算出式を式(3)に示す。

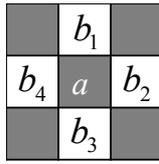


図 4 提案手法の最適予測における参照画素

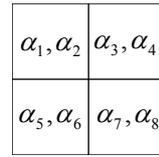


図 5 領域分割と各領域の最適予測係数

NL

$$\begin{aligned}
 &= |b_1 - b_2| + |b_2 - b_3| + |b_3 - b_4| + |b_4 - b_1| + |b_1 - b_3| \\
 &+ |b_3 - b_6| + |b_2 - b_6| + |b_2 - b_7| + |b_7 - b_8| + |b_3 - b_8| \\
 &+ |b_3 - b_9| + |b_9 - b_{10}| + |b_4 - b_{10}| + |b_4 - b_{11}| + |b_{11} - b_{12}| + |b_1 - b_{12}| \quad (3)
 \end{aligned}$$

式(3)に示すように、NL は輝度の差分絶対値 16 組の総和であり、輝度値が 8[bit/pe]で表現されている場合、最大値は 4080 となる。

この NL に対し、閾値 T_{NL} を設け、 T_{NL} 以下となる着目画素 a のみで予測誤差ヒストグラムを作成する。 T_{NL} が小さい場合、着目画素の近傍領域が平坦である画素が多くを占める予測誤差ヒストグラムとなる。一方で T_{NL} が大きい場合、着目画素の近傍領域がエッジ成分の多い領域である画素も予測誤差ヒストグラムを作成するための対象画素となる。そのため、0 付近を埋め込みビンとして利用する手法においては、シフトのみを行う画素数を減らすために、所望の透かし容量を埋め込めるだけの最低限の頻度を持つ予測誤差ヒストグラムを作成できる最小の T_{NL} が利用されてきた。しかし、 T_{NL} を大きくして、所望の透かし埋め込み容量を埋め込めるだけの頻度を持つ 0 付近よりも外側のビンを使った場合の方が、埋め込み効率が向上する場合も考えられる。

そこで、提案手法では、最小の T_{NL} を求めるのではなく、 T_{NL} ごとに予測誤差ヒストグラムを作成、所望の透かし容量を満たす最適な埋め込みビンを選択し、最も埋め込み効率が良い T_{NL} とそのときの埋め込みビンの位置を探索する。

3.2 最適予測

O'Neal の線形予測理論に基づく最適予測は、着目画素とその予測値の予測誤差電力が最小となるような予測係数を求める方法である。今回の検討では、予測を BP から行うため、図 4 に示す参照画素 $b_1 \sim b_4$ を用いた。ここで、 a は着目画素を表す。予測式を式(4)に示す。

$$\hat{a} = \alpha_1(b_1 + b_3) + \alpha_2(b_2 + b_4) \quad (4)$$

ここで、 α_1 は垂直方向の組に対する最適予測係数、 α_2 は水平方向の組に対する最適予測係数を示す。この予測値と実際の輝度値との予測誤差電力が最小となるような最適予測係数を求めるため、式(5)を解く。ここで M は画像の水平方向サイズ、 N は画像の垂直方向サイズを表す。

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (a - \hat{a})^2 \quad (5)$$

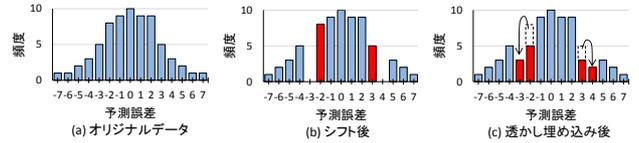


図 6 提案手法における埋め込み規則

式(5)を展開すると、式(6)のような項が現れるが、これは、式(7)に示す 2 次元自己相関関数であり、式(6)右辺のように、2 次元自己相関係数の式に書き換えることができる。ここで、式(7)の k は水平方向の画素間距離、 l は垂直方向の画素間距離を表す。

$$-2\alpha_1 \frac{1}{MN} \sum ab_1 = -2\alpha_1 P\rho_{0,1} \quad (6)$$

$$R_{ff}(k, l) = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} a_{i,j} a_{i+k, j+l} \quad (7)$$

式(6)を考慮して式(5)を展開し、相関係数の式で表したものを式(8)に示す。

$$\begin{aligned}
 \varepsilon^2 &= P(1 - 4\rho_{0,1}\alpha_1 - 4\rho_{1,0}\alpha_2 + 2\alpha_1^2 S_1 + 2\alpha_2^2 S_2 + 4\alpha_1\alpha_2 S_3) \\
 S_1 &= 1 + \rho_{0,2} \\
 S_2 &= 1 + \rho_{2,0} \\
 S_3 &= \rho_{1,1} + \rho_{1,-1}
 \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 P は電力、 ρ_{ij} は水平方向の画素間距離を i 、垂直方向の画素間距離を j とした場合の 2 次元自己相関係数を表す。この 2 乗誤差電力について α_1 と α_2 で偏微分し、 α_1 と α_2 についてまとめた式を式(9),(10)に示す。

$$\alpha_1 = \frac{S_3\rho_{1,0} - S_2\rho_{0,1}}{S_3^2 - S_1S_2} \quad (9)$$

$$\alpha_2 = \frac{S_3\rho_{0,1} - S_1\rho_{1,0}}{S_3^2 - S_1S_2} \quad (10)$$

この最適予測係数を式(4)に代入することで、予測値の算出を行う。

また、自然画像には、平坦な領域や、エッジ成分が多い領域など、様々な領域が存在し、領域ごとに最適な予測係

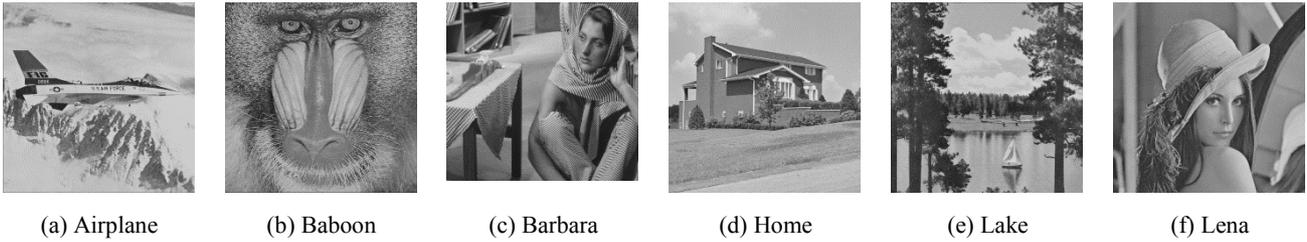


図 7 使用画像

数は異なると考えられる．そこで，画像を 4 領域に分割し，それぞれの領域で最適予測係数を算出する手法についても検討を行う．図 5 に示すように，画像を左上，右上，左下，右下の 4 領域に分割し，それぞれの領域で 2 次元自己相関係数を求め，式(8),(9)から最適予測係数を算出する．図中の $a_i (i=1,3,5,7)$ は各領域における垂直方向の組に対する最適予測係数， $a_j (j=2,4,6,8)$ は各領域における垂直方向に対する最適予測係数を表す．

3.3 最適埋め込みピンの決定

3.1 と 3.2 で述べた NL と最適予測を利用し，最適な埋め込みピンを決定する．提案手法による埋め込みピンの決定手順以下に示す．

- Step1 : 最適予測係数を算出する(画像を 4 領域に分割する場合，それぞれの領域において，最適予測係数を算出する)．
- Step2 : SP の近傍領域から NL を求め，初期値 $T_{NL}=2$ として， T_{NL} 以下の画素のみから予測誤差ヒストグラムを作成する．
- Step3 : 図 6 に示すように，得られた予測誤差ヒストグラムビンについて，2 つのビン $m, n (m < 0, n \geq 0)$ の頻度の総和 $h(m)+h(n)$ が所望の透かし容量 I [bit] より大きいものの中で，得られる透かし埋め込み画像の PSNR が最大になるビンを閾値 T_{NL} における最適な埋め込みピンとする．このときの埋め込み規則を式(11)に示す．ここで， e は予測誤差値， e_w は透かし情報埋め込み後の予測誤差値， $c \in (0,1)$ は透かし情報， $m, n (m < 0, n \geq 0)$ は透かし埋め込みに利用すると決定された予測誤差値を示す．

$$e_w = \begin{cases} e+c, & \text{if } e=n \\ e-c, & \text{if } e=m \\ e+1, & \text{if } e \geq n+1 \\ e-1, & \text{if } e \leq m-1 \end{cases} \quad (11)$$

- Step4 : T_{NL} の値を 2 増加させ，Step2 と Step3 の処理を T_{NL} が最大値 4080 になるまで繰り返す．

以上の手順により，所望の透かし埋め込み容量 I [bit] のときの最適な T_{NL} と，そのときの埋め込みピンが決定される．

また，画像を復元する場合は，式(12)により，埋め込み処理前の予測誤差値を得る．

$$e = \begin{cases} e_w - 1, & \text{if } e_w \geq n+1 \\ e_w + 1, & \text{if } e_w \leq m-1 \end{cases} \quad (12)$$

3.4 オーバーヘッド情報

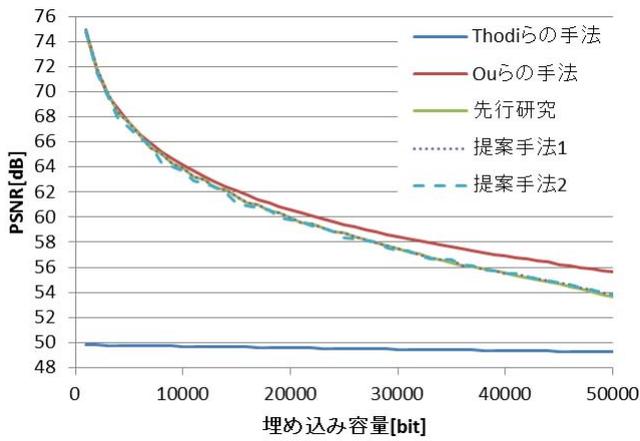
提案手法に必要なオーバーヘッド情報として 4 つの情報が挙げられる．1 つ目は予測誤差ヒストグラムを作成するために利用した閾値 T_{NL} である．最大値は 4080 であるため，12[bit]が必要となる．2 つ目は使用した埋め込みピンの予測誤差値であり，符号 1[bit]と値 8[bit]で合計 9[bit]となる．提案手法では，2 つの埋め込みピンが使用されるため 18[bit]が必要となる．3 つ目は最適予測係数である．最適予測係数の定義域は-1 から 1 であるため，小数点第 3 位までの情報を保存することを考えると，符号に 1[bit]，値に 10[bit]で合計 11[bit]となる．また，最適予測係数 a_1 と a_2 は，値の和が 0.5 になるため，一方の最適予測係数からもう一方の最適予測係数を算出することができるため，オーバーヘッドとしては片方の最適予測係数を保持することとする．なお，画像を領域分割した場合，分割した領域数分の最適予測係数が必要となる．4 つ目は透かし埋め込み容量である．SP にのみ透かし情報を埋め込むため，画像の総画素数の半分の画素が，予測誤差ヒストグラム作成の対象となる．よって 512×512[pixel]の場合は 17[bit]必要となる．

以上より，オーバーヘッド情報は，提案手法による埋め込み処理を，領域分割なしで行った場合，58[bit]，領域分割を行った場合，91[bit]となる．画像の上 2 行を埋め込み処理の対象外とし，オーバーヘッド情報の埋め込みに利用する．

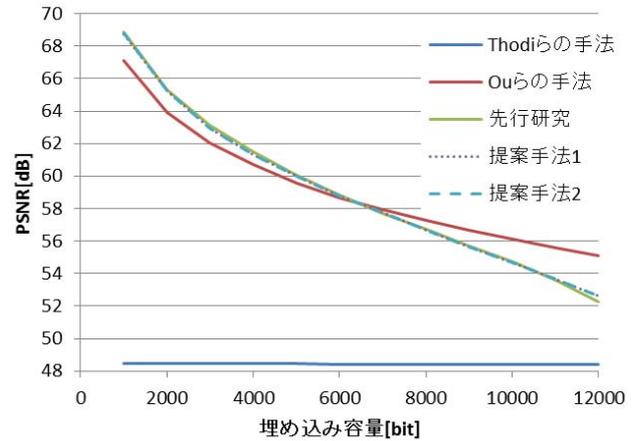
4. シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

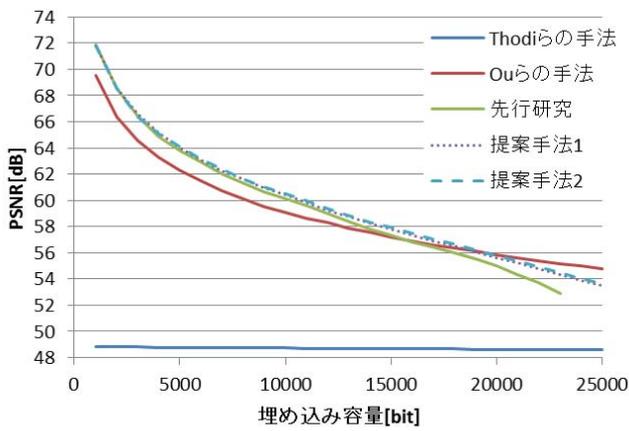
シミュレーションでは，図 7 に示す 6 枚のグレースケール画像を使用した．ここで，図 7(c) 以外は，は 512×512[pixel]，(c)は 512×480[pixel]である．比較手法として，Thodi らの手法[6]，Thodi らの手法を 2 次元へ拡張した Ou らの手法[7]，先行研究の手法[12]，画像全体に対して最適予測を行った提案手法 1，分割した領域ごとに最適予測を行った提案手法 2 を用いた．透かし情報は，一様分布に基づくランダムビット列を用いた．なお，図 3 より，NL を算出するための参照画素を考慮して，画像の上下の 2 行，左右の 2 列の画素に対しては埋め込み処理を行わない．また，本シミュレーションは，透かし情報の埋め込み処理による輝度値の変化によって，オーバーフローやアンダーフローが発生しない条件下で行った．ここで，輝度値のオーバーフローやアンダーフローとは，透かし情報の埋め込み



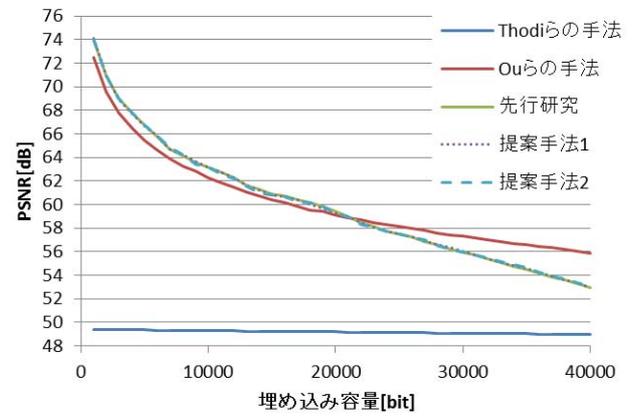
(a) Airplane



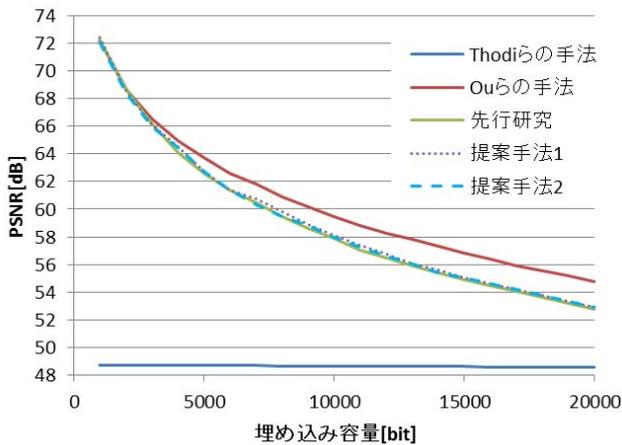
(b) Baboon



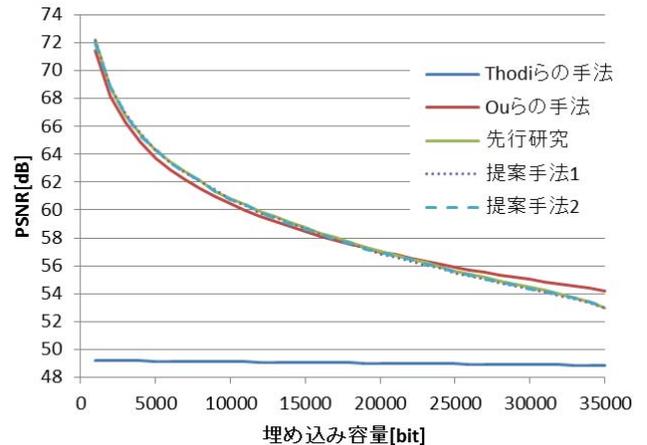
(c) Barbara



(d) Home



(e) Lake



(f) Lena

図8 埋め込み容量に対する透かし埋め込み画像の PSNR

により、画素値が変化した場合、輝度値が 0 未満や、256 以上になることを指す。

4.2 シミュレーション結果

各手法について、所望の透かし埋め込み容量と、透かし埋め込み画像の PSNR との関係性を測定した結果を図 8 に示す。まず、提案手法 1 と Thodi らの手法を比較すると、すべての透かし埋め込み容量において Thodi らの手法の透かし埋め込み性能を上回っている。次に、提案手法 1 と先行研究の手法を比較すると、Airplane では、透かし埋め込み容量が少ない場合に、下回る結果になったが、すべての画像において最大埋め込み容量付近に近づくにつれ、僅かながら提案手法の PSNR が向上している。Baboon や Barbara では 0.3[dB]から 0.6[dB]の PSNR の向上が確認できた。また、最大埋め込み容量の増加も確認できる。これは最適予測係数の導入により、予測誤差の値が小さくなり、より 0 に集中するヒストグラムが得られたため、埋め込みに利用するビンより外側の総頻度が減少し、PSNR の向上が見られたと考えられる。また、0 付近の 1 つのビン当たりの頻度が大きくなり、最大埋め込み容量が増加した。

提案手法 1 と Ou らの手法を比較すると、Airplane や Lake では、すべての透かし埋め込み容量において Ou らの手法を下回る結果となった。提案手法では、予測誤差ヒストグラムのビンの中で、最も埋め込み効率が良くなるビンを選択することで埋め込み効率の向上を目指したものであり、Airplane や Lake のような、平坦領域の多い画像では、埋め込みピンを適応的に選択することは、あまり効果的ではないということが言える。その一方で、Baboon, Barbara, Home, Lena においては、最大埋め込み容量の半分あたりの埋め込み容量で PSNR が上回る結果となった。特に、Barbara ではより多くの埋め込み容量まで PSNR が上回った。この傾向は、Barbara や Baboon などエッジやテクスチャのような輝度変化の大きい部分を多く含む画像において、顕著であった。以上の結果から、提案手法は、エッジやテクスチャを多く含む画像において、所望の透かし埋め込み埋め込み容量が小さい場合に、特に効率的な埋め込みが可能であると考えられる。

提案手法 1 と提案手法 2 を比較すると、ほとんどの画像では PSNR の差は僅かとなった。その中でも Barbara は、全体的に提案手法 1 よりも PSNR が向上し、最大埋め込み容量付近では 0.15[dB]程度の画質向上がみられた。図 5 のように画像を 4 領域に分割し、それぞれの領域において別々の予測係数を与え、予測を行うことも、エッジ成分やテクスチャ成分が多い画像においては、より効果的な予測を行うことが可能となり、埋め込み効率の向上が期待できる。

5. おわりに

本稿では、所望の透かし埋め込み容量に応じて適応的な埋め込みを行う手法と、着目画素の上下左右の画素を参照画素とした最適予測による予測値の予測手法を提案した。提案手法では、最適な埋め込みピンを決定するために、NL を利用した予測ヒストグラム作成手法を導入し、 T_{NL} ごとに最適な埋め込みピンを決定し、その中で最も PSNR が高くなる T_{NL} を選択した。加えて、予測精度を向上させるために、最適予測についても検討を行った。シミュレーション

の結果から、提案手法の埋め込み効率は、先行研究を上回ったが、平坦領域の多い画像においては Ou らの手法と比較すると、低くなることが確認された。一方で、エッジ領域やテクスチャ成分を多く含む画像では、所望の透かし埋め込み容量が小さい場合で、提案手法の有効性が確認された。また、画像を領域分割し、各領域において予測を行う手法についても、エッジ領域を多く含む画像で効果があると考えられる。

本稿におけるシミュレーションでは、透かし情報の埋め込み時に、オーバーフローやアンダーフローが発生しない輝度値 0 と 255 を持たない画像に対して行われた。しかし、透かし埋め込み処理によって、オーバーフローやアンダーフローが発生する画像の場合、可逆電子透かしの可逆性を維持することはできない。そのため、オーバーフローやアンダーフローも許容する場合は、輝度がダイナミックレンジに収まらない画素を記録したロケーションマップをオーバーヘッド情報として埋め込み、透かし抽出側には、対象の画素は埋め込みに利用しなかったことを伝えるなどの対策が必要となる。また、提案手法では、領域分割を、単純に左上、右上、左下、右下の 4 つの領域に分割したが、画像を分散や相関係数等を利用して、平坦な領域や、エッジが多く含まれる領域など、統計的性質が類似した領域に分類し、各領域で最適予測を行えば、より予測精度の高い予測が行うことができると考えられる。そのため、画像を特徴によって分割する手法の検討が、今後の課題として挙げられる。

参考文献

- [1] 松井甲子雄, "電子透かしの基礎," 森北出版株式会社, (1998).
- [2] H. Qi, D. Zheg, and J. Zhao, "Human visual system based adaptive digital image watermarking," Signal Process., vol.88, no.1, pp.174-188 (2008).
- [3] M. U. Celik, G. Sharma, A.M.Tekalo, and E. Saber, "Lossless generalized-LSB data embedding," IEEE Trans. Image Process., vol.14, no.2, pp.253-266 (2005).
- [4] J. Hwang, J. Kim, and J. Choi, "A reversible watermarking based on histogram shifting," in Proc. 5th IWDW 2006, pp.348-361 (2006).
- [5] X. Li, W. Zhang, X. Gui, and B. Yang, "A novel reversible data hiding scheme based on two-dimensional difference-histogram modification," IEEE Trans. Information Forens. Secur., vol.8, no.7, pp.1091-1100 (2013).
- [6] D. M. Thodi, and J. J. Rodriguez, "Expansion Embedding Techniques for Reversible Watermarking," IEEE Trans. Image Process., vol.16, no.3 (2007).
- [7] B. Ou, X. Li, Y. Zhao, R. Ni, and Y. Q. Shi, "Pairwise prediction-error expansion for efficient reversible data hiding," IEEE Trans. Image Process., vol.22, no.12, pp.5010-5021 (2013).
- [8] X. Li, B. Yang, and T. Zeng, "Efficient reversible watermarking based on adaptive prediction-error expansion and pixel selection," IEEE Trans. Image Process., vol.20, no.12, pp.3524-3533 (2011).
- [9] S. K. Jinna and L. Ganesan, "Reversible image data hiding using lifting wavelet transform and histogram shifting," IJCSIS, vol.7, no.3, pp.283-289 (2010).
- [10] V. Sachnev, H. J. Kim, J. Nam, S. Suresh, and Y. Q. Shi, "Reversible watermarking algorithm using sorting and prediction," IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., vol. 19, no.7, pp.989-999 (2009).
- [11] J. B. O'Neal, "Predictive Quantizing System (Differential Pulse Code Modulation) for the Transmission of Television Signals," BSTJ, vol.45, no.5, pp.689-721 (1966).
- [12] 鈴木裕一郎, 山登一輝, 篠田一馬, 長谷川まどか, 加藤茂夫, "予測誤差ヒストグラムに基づいた適応的埋め込みによる可逆電子透かしに関する検討," PCSJ/IMPS2014, 1-3-04 (2014).