

統計量の適応的可逆修正法に基づく可逆情報埋込法の改善

金 弘林<sup>†\*</sup>(学生員) 藤吉 正明<sup>††</sup>(正員)  
 貴家 仁志<sup>††</sup>(正員)

On Improvement of the Reversible Data Hiding Method by Reversibly Adaptive Modulation of Statistics

Hong Lin JIN<sup>†\*</sup>, Student Member, Masaaki FUJIYOSHI<sup>††</sup>,  
 and Hitoshi KIYA<sup>††</sup>, Members

<sup>†</sup> 首都大学東京大学院工学研究科, 日野市

Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino-shi, 191-0065 Japan

<sup>††</sup> 首都大学東京システムデザイン学部, 日野市

Faculty of System Design, Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino-shi, 191-0065 Japan

\* 現在, 韓国延世大学校工科大学

あらまし 本論文は, 埋込可能情報量の向上を目的に, 可逆情報埋込法を改善している. 従来の可逆情報埋込法は, 画素値から求められた統計量に基づき, 画素ブロックに対する情報埋込の可否を決定している. したがって, 画像によってはその統計量により, 埋込可能情報量が極めて少なくなる. 提案法は, 統計量を可逆に修正することで, そのような画像への埋込可能情報量を増加する. また, 画素ブロックに適応的に修正するため, 情報を埋めた画像の画質低下も抑制可能である.

キーワード 余弦, 局所情報, 法演算, 電子透かし, 医用画像

1. ま え が き

可逆情報埋込法は, 情報を埋めた画像(ステゴ画像)から情報を抽出するだけでなく, 更に, 原画像を復元可能, すなわち, 可逆な手法である [1], [2]. 画素の統計量に基づくパラメータを一つだけ用いる可逆情報埋込法が提案されているが, 画像によってはその統計量により, 埋込可能情報量が極めて少ない [1]. そこで, 埋込可能情報量を向上する手法が提案されているが, ステゴ画像の画質を低下する問題がある [2].

本論文では, 従来の可逆情報埋込法 [1] に対する改善法を提案する. 提案法は, 統計量を可逆に修正することで, 従来法 [1] の埋込可能情報量が極めて小さいか, 若しくは, 0 であるような原画像へ情報を埋めることが可能である. また, 修正は画素ブロックに対して適応的であるため, 従来の改善法 [2] よりも画質低下を抑制可能である.

2. 従 来 法

2.1 では, 従来法 [1] のアルゴリズムを概説する. 2.2 で, その問題点と改善法 [2] について述べる.

2.1 従 来 法

従来の可逆情報埋込法(以降, 従来法 I) [1] のブロック図を図 1 に示す. この手法は,  $K$  ビットで量子化された濃淡画像, すなわち, 画素値が  $0 \sim 2^K - 1$  の範囲にある画像に対して, 空間領域において画素値へ情報を埋める. この際, 図 2(a) に示すとおり, 一部が重複する  $3 \times 3$  画素のブロック  $B$  個へ画像を分割する. 各ブロックにおける埋込対象画素は, 図 2(b) に示すとおり, 中心画素  $g_b$  である. ここで,  $b = 0, 1, \dots, B-1$ . 埋める情報は 0 と 1 とからなる 2 値系列  $w$  である. 図 2(a) のように画像をブロック分割するため,  $X \times Y$  画素からなる画像  $f = \{f(x, y) \mid 0 \leq f(x, y) \leq 2^K - 1, 0 \leq x \leq X - 1, 0 \leq y \leq Y - 1\}$  に対しては, 最大で

$$B = \left\lfloor \frac{X-1}{2} \right\rfloor \left\lfloor \frac{Y-1}{2} \right\rfloor \quad [\text{bits}]$$

の情報を埋込可能である. ここで,  $[r]$  は実数  $r$  を超えない最大の整数である. ただし, この手法は, 可逆性を保証できないブロックへは情報を埋めなため, 実際に埋められる情報は  $0 \leq N \leq B$  であるような  $N$  ビットの情報である. したがって,  $w = \{w_n \mid w_n \in \{0, 1\}, n = 0, 1, \dots, N-1\}$  となる. また, この  $N$  は画像によって異なる.

次項では, ブロックに対する情報埋込の可否判定に用いられるパラメータ  $s$  について述べる. 続いて, この  $s$  を用いた情報埋込アルゴリズム, 情報抽出及び原

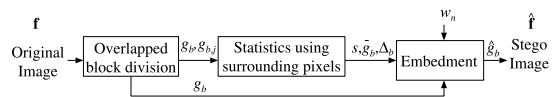


図 1 従来法 I [1]

Fig. 1 The conventional reversible data hiding method (conventional I) [1].

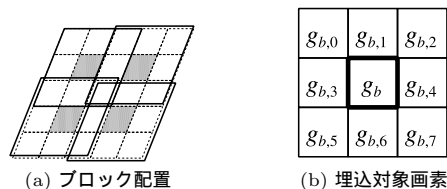


図 2 ブロックの重複配置と埋込対象画素

Fig. 2 A pixel block and its placement in the conventional [1], [2] and proposed methods.

画像復元アルゴリズムについて述べる．

### 2.1.1 パラメータ $s$ の導出

[手順 1]  $b := 0$  .

[手順 2] 式 (1) を用い、埋込対象画素  $g_b$  の 8 近傍の画素  $g_{b,j}$  ( $j = 0, 1, \dots, 7$ ) の平均  $\bar{g}_b$  を求める．更に、 $g_b$  と  $\bar{g}_b$  との差  $d_b$  を求める．

$$\bar{g}_b = \left[ \frac{1}{8} \sum_{j=0}^7 g_{b,j} \right] \quad (1)$$

$$d_b = g_b - \bar{g}_b \quad (2)$$

[手順 3] 式 (3) を用いて  $\Delta_b$  を求める．

$$\Delta_b = \begin{cases} g_{\max,b} - \bar{g}_b, & d_b \geq 0 \\ g_{\min,b} - \bar{g}_b, & d_b < 0 \end{cases}, \quad (3)$$

ここで、 $g_{\max,b}$ 、 $g_{\min,b}$  は、それぞれ  $g_{b,j}$  の最大値、及び、最小値である．すなわち、

$$g_{\max,b} = \max_j g_{b,j}, \quad g_{\min,b} = \min_j g_{b,j}$$

[手順 4] 式 (4) によってパラメータ  $s$  の候補  $s_b$  を求める．

$$s_b = \begin{cases} |\Delta_b|, & \bar{g}_b + 2d_b < 0 \text{ or} \\ & 2^K - 2 < \bar{g}_b + 2d_b \\ \infty, & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

[手順 5]  $b := b + 1$  .  $b < B$  であれば、手順 2 へ．

[手順 6]  $s_b$  の最小値を  $s$  とする．すなわち、

$$s = \min_b s_b \quad (5)$$

従来法 I は、式 (1)~(3) に示すとおり、原画像の画素値の統計量に基づきパラメータ  $s$  を導出する．また、式 (4) を用いて、ブロックの可逆性を考慮している．

### 2.1.2 情報埋込アルゴリズム

[手順 1]  $b := 0$  ,  $n := 0$  .

[手順 2] 式 (6) によって、情報を埋めた画素  $\hat{g}_b$  を求める．

$$\hat{g}_b = \begin{cases} \bar{g}_b + 2d_b + w_n, & |\Delta_b| < s \\ g_b, & \text{others} \end{cases} \quad (6)$$

[手順 3]  $|\Delta_b| < s$  ならば  $n := n + 1$  .  $b := b + 1$  .  $b < B$  ならば、手順 2 へ．

[手順 4]  $N := n$  .  $N$  ビットの情報が埋められたス

テゴ画像が得られる．

この埋込アルゴリズムは式 (6) に示すとおり、パラメータ  $s$  を用いて、埋込対象画素  $g_b$  への埋込を実行するか否かを制御する．したがって、埋込可能情報量  $N$  は  $s$  に依存する．

### 2.1.3 情報抽出及び原画像復元アルゴリズム

[手順 1]  $b := 0$  ,  $n := 0$  .

[手順 2] 式 (7) を用いて、 $\Delta_b$  を求める．

$$\Delta_b = \begin{cases} g_{\max,b} - \bar{g}_b, & \hat{g}_b - \bar{g}_b \geq 0 \\ g_{\min,b} - \bar{g}_b, & \hat{g}_b - \bar{g}_b < 0 \end{cases} \quad (7)$$

[手順 3]  $|\Delta_b| < s$  であれば、次式を用いて埋められている情報要素  $w_n$  を抽出する．

$$w_n = (\hat{g}_b - \bar{g}_b) \bmod 2 \quad (8)$$

[手順 4] 式 (9) を用いて、原画像の画素  $g_b$  を復元する．

$$g_b = \begin{cases} \bar{g}_b + \frac{\hat{g}_b - \bar{g}_b - w_n}{2}, & |\Delta_b| < s \\ \hat{g}_b, & \text{others} \end{cases} \quad (9)$$

[手順 5]  $|\Delta_b| < s$  であれば、 $n := n + 1$  .  $b := b + 1$  .  $b < B$  であれば、手順 2 へ．

[手順 6]  $N$  ビットの情報系列  $\mathbf{w} = \{w_n \mid w_n \in \{0, 1\}, n = 0, 1, \dots, N-1\}$ 、及び、原画像が得られる．

このアルゴリズムでは、情報埋込に用いたパラメータ  $s$  が分かっているものとする．手順 3, 4 に示すとおり、 $s$  だけを用いて、情報が埋められている  $\hat{g}_b$  を特定し、情報を抽出し、原画像を復元することが可能である．

### 2.2 従来法 I の問題点とその改善法

式 (4) 及び (6) に示すとおり、従来法 I [1] は可逆性を保証するために、埋込対象画素  $g_b$  が

$$0 \leq \hat{g}_b \leq 2^K - 1 \quad (10)$$

を満たす場合にのみ、情報ビット  $w_n$  を埋める．しかし、画像によっては、式 (10) を満たさない  $g_b$  が多く、したがって、埋込可能情報量  $N$  が著しく低下する．

$g_b$  が式 (10) を満たさない場合、 $\hat{g}_b$  がアンダフロー若しくはオーバフローを生じる．これは、近傍画素の平均  $\bar{g}_b$  が画素値のダイナミックレンジの上限 ( $2^K - 1$ )、若しくは、下限 (0) に極めて近い値を有する場合に多い．

そこで、改善法 (以降、従来法 II, 図 3 参照)[2] は、

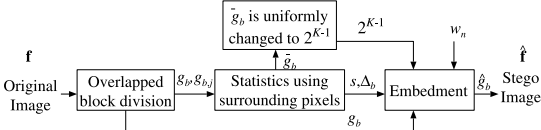


図 3 改善法 (従来法 II) [2]

Fig. 3 The conventional method (conventional II) [2].

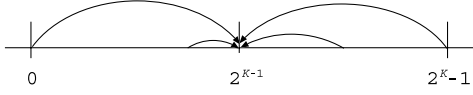


図 4 改善法 (従来法 II) [2] における式 (11) の概念図

Fig. 4 Concept of the conventional method (conventional II) [2].

式 (6) を

$$\hat{g}_b = \begin{cases} 2^{K-1} + 2d_b + w_n, & |\Delta_b| < s \\ g_b, & \text{others} \end{cases} \quad (11)$$

に変更している．すなわち，全ブロックにおいて  $\bar{g}_b$  を  $2^{K-1}$  へ一様に変更する（図 4 参照）ことで，埋込可能情報量  $N$  を増加させたが，ステゴ画像の画質を低下させる問題を有する．

次章では，従来法 I [1] が情報をほとんど埋められない画像に対して，従来法 II [2] と同量がそれ以上の量の情報を埋込可能とすると同時に，従来法 II よりも高画質なステゴ画像を生成可能な手法を提案する．

### 3. 提案法

提案法のブロック図を図 5 に示す．提案法は，埋込対象画素  $g_b$  の近傍画素  $g_{b,j}$  の統計量に応じて適応的に  $\bar{g}_b$  を置換する．

#### 3.1 パラメータ $s$ の導出

提案法は以下の手順でパラメータ  $s$  を導出する．

[手順 1]  $b := 0$  .

[手順 2] 式 (1) を用い  $\bar{g}_b$  を求める．更に，式 (12) を用いて  $D_b$  を求める．

$$D_b = g_{\max,b} - g_{\min,b} \quad (12)$$

[手順 3] 式 (13) を用いて  $\delta_b$  を求める．更に，式 (14) を用いて  $\Delta_b$  を求める．

$$\delta_b = g_b - \bar{g}_b \quad (13)$$

$$\Delta_b = \begin{cases} g_{\max,b} - \bar{g}_b, & \delta_b \geq 0 \\ g_{\min,b} - \bar{g}_b, & \delta_b < 0 \end{cases} \quad (14)$$

ここで，

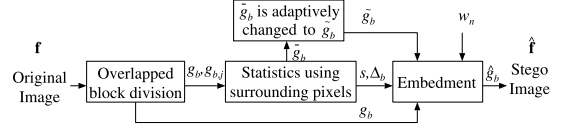


図 5 提案法

Fig. 5 Proposed method.

$$\tilde{g}_b = \bar{g}_b - \text{round} \left( (2 + D_b) \cos \left( \frac{\bar{g}_b}{2^{K-1}} \pi \right) \right) \quad (15)$$

である．

[手順 4] 式 (16) によって  $\Delta_b$  の絶対値を  $s_b$  とする．

$$s_b = \begin{cases} |\Delta_b|, & \tilde{g}_b + 2\delta_b < 0 \text{ or} \\ & 2^K - 2 < \tilde{g}_b + 2\delta_b \\ \infty, & \text{others} \end{cases} \quad (16)$$

[手順 5]  $b := b + 1$  .  $b < B$  であれば，手順 2 へ．

[手順 6]  $s_b$  の最小値を  $s$  とする．

従来法 I，従来法 II 同様，提案法も画素値の統計量に基づきパラメータ  $s$  を導出する．ただし，式 (16) に示すとおり，従来法 I の  $\bar{g}_b$  と  $d_b$  (式 (4))，従来法 II の  $2^{K-1}$  と  $d_b$  (式 (11)) の代わりに，式 (15)，(13) で与えられる  $\tilde{g}_b$  と  $\delta_b$  を用いる．この効果は 3.4 で述べる．

#### 3.2 情報埋込アルゴリズム

提案法は以下の手順で情報を埋める．

[手順 1]  $b := 0$  ,  $n := 0$  .

[手順 2] 式 (17) によって，情報を埋めた画素  $\hat{g}_b$  を求める．

$$\hat{g}_b = \begin{cases} \tilde{g}_b + 2\delta_b + w_n, & |\Delta_b| < s \\ g_b, & \text{others} \end{cases} \quad (17)$$

[手順 3]  $|\Delta_b| < s$  ならば  $n := n + 1$  .  $b := b + 1$  .  $b < B$  ならば，手順 2 へ．

[手順 4]  $N := n$  .  $N$  ビットの情報が埋められたステゴ画像が得られる．

3.1 で述べたとおり，提案法は  $s$  の導出に  $\tilde{g}_b$  を用いる．それに伴い，式 (17) においても  $\tilde{g}_b$  を用いている．

#### 3.3 情報抽出及び原画像復元アルゴリズム

提案法は以下の手順で情報を抽出し，原画像を復元する．

[手順 1]  $b := 0$  ,  $n := 0$  .

[手順 2] 式 (18) を用いて， $\Delta_b$  を求める．

$$\Delta_b = \begin{cases} g_{\max,b} - \bar{g}_b, & \hat{g}_b - \tilde{g}_b \geq 0 \\ g_{\min,b} - \bar{g}_b, & \hat{g}_b - \tilde{g}_b < 0 \end{cases} \quad (18)$$

[手順3]  $|\Delta_b| < s$  であれば、次式を用いて埋められている情報要素  $w_n$  を抽出する.

$$w_n = (\hat{g}_b - \tilde{g}_b) \bmod 2 \quad (19)$$

[手順4] 式 (20) を用いて、原画像の画素  $g_b$  を復元する.

$$g_b = \begin{cases} \tilde{g}_b + \frac{\hat{g}_b - \tilde{g}_b - w_n}{2}, & |\Delta_b| < s \\ \tilde{g}_b, & \text{others} \end{cases} \quad (20)$$

[手順5]  $|\Delta_b| < s$  であれば、 $n := n + 1$ .  $b := b + 1$ .  $b < B$  であれば、手順 2 へ.

[手順6]  $N$  ビットの情報系列  $w$ , 及び、原画像が得られる.

提案法では、式 (18)~(20) に示すとおり、 $\tilde{g}_b$  の代わりに  $\hat{g}_b$  を用いている.

### 3.4 提案法の特徴

提案法の特徴である、埋込可能情報量向上について述べる.

まず、 $\tilde{g}_b$  が画素値のダイナミックレンジの下限、すなわち、0 に近い場合は、式 (15) の

$$\cos\left(\frac{\tilde{g}_b}{2^{2^K} - 1} \pi\right) \quad (21)$$

は 1 に近い値となる. 逆に  $\tilde{g}_b$  がダイナミックレンジの上限、すなわち、 $2^{2^K} - 1$  に近い場合は、式 (21) は  $-1$  に近い値となる. 同様に、 $\tilde{g}_b$  がダイナミックレンジの中央、すなわち、 $2^{2^K - 1}$  に近い場合は、式 (21) は 0 に近い値となる. したがって、この項は  $\hat{g}_b$  がオーバーフロー、アンダフローを生じることを防ぐだけでなく、 $\tilde{g}_b$  の過剰な変動を抑制する礎となっている.

次に、近傍画素の最大値と最小値との差  $D_b$  は、 $b$  番目のブロックの画素値が平坦であるか変動しているかを表す.  $3 \times 3$  画素のブロックにおいて、 $D_b$  が小さい平坦なブロックでは、埋込対象画素  $g_b$  と近傍画素の平均  $\tilde{g}_b$  との差  $d_b$  も小さい. 逆に、変動しているブロックでは、 $D_b$  も  $d_b$  も大きくなる. したがって、 $D_b$  は  $d_b$  とともに変動する. ここで、式 (6) から可逆性を保証するためには、 $\tilde{g}_b$  に対する変動量を  $d_b$  に応じて決定する必要があり、したがって、式 (15) では

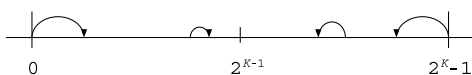


図 6  $\tilde{g}_b$  から  $\hat{g}_b$  への適応的な修正  
Fig. 6 Adaptive modulation from  $\tilde{g}_b$  to  $\hat{g}_b$ .

$d_b$  とともに変化する  $D_b$  で式 (21) のゲイン調整をしている.

以上のとおり、提案法は、画素ブロックの画素値の統計量に基づき、 $\tilde{g}_b$  を適応的に  $\hat{g}_b$  へ変化させる (図 6 参照). これにより、 $\tilde{g}_b$  が埋込への制限を抑え、埋込可能な  $g_b$  が増える.

### 4. シミュレーション

画像データベース [3], [4] から取得した 8 ビット量子化濃淡画像 ( $K = 8$ ) を評価に用いる. 埋込情報  $w$  は、等確率で生起する 0, 1 の 2 値乱数系列を用いる. 提案法は、埋込法 [1] では少量の情報しか埋められない画像に対して埋込可能情報量を増加する改善法である. したがって、ここでは、図 7 に示す画像 (Kodak15,

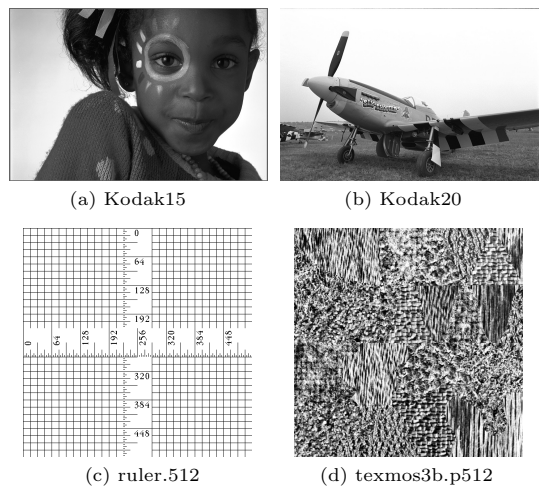


図 7 評価用画像  
Fig. 7 Images for performance evaluation.

表 1 従来法 [1], [2] と提案法との比較

Table 1 Comparisons in the capacity and the image quality of stego images among the conventional [1], [2] and proposed methods.

Image	ideal capacity $B$ [bits]	actual capacity $N$ [bits]		
		conv.I [1]	conv.II [2]	Proposed
Kodak15	97665	0	89967	92085
Kodak20	97665	0	93733	92483
ruler.512	65025	0	39974	39289
texmos3b.p512	65025	3	873	492

Image	payload [bits]	PSNR [dB]	
		conv.II [2]	Proposed
Kodak15	89967	15.8179	32.1482
Kodak20	92483	14.4428	32.6235
ruler.512	39289	14.3901	52.4150
texmos3b.p512	492	34.4546	53.2211

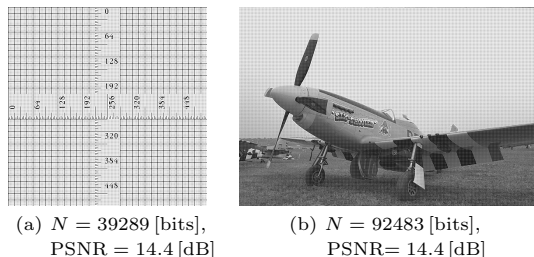


図 8 従来法 II [2] によるステゴ画像

Fig. 8 Stego images by the conventional method II [2].

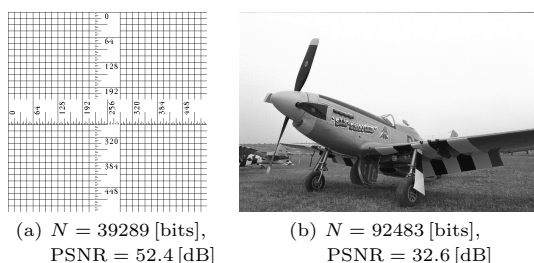


図 9 提案法によるステゴ画像

Fig. 9 Stego images by the proposed method.

Kodak20, ruler.512, texmos3b.p512)[2]を対象に提案法の性能を評価する。

従来法 [1], [2] と提案法との比較を表 1 に示す。同表から、従来法 II [2] と提案法は、同程度の情報を画像へ埋込可能であることが分かる。更に、提案法は従来法 II と同量の情報を埋めているにもかかわらず、そのステゴ画像の画質は従来法 II よりも高い。

従来法 I [1] では 1 ビットの情報も埋めることがで

きない画像 ruler.512 と Kodak20 に対する、従来法 II [2] と提案法とのステゴ画像を、それぞれ図 8, 図 9 へ示す。図 8, 図 9 より、適応的な修正を施す提案法は、一様な修正を施す従来法 II よりも高い画質のステゴ画像を生成することが分かる。

## 5. む す び

本論文では、画素値の統計量に基づき、画素ブロックへの情報埋込の可否を決定する可逆情報埋込法 [1] の改善法を提案した。提案法は、埋込制御に用いられる統計量を可逆に修正することで、従来法 [1] が情報を埋められない画像に対して、情報埋込を可能とする。更に、画素ブロックに適応的に修正するため、従来の改善法 [2] よりもステゴ画像の画質を向上可能である。

謝辞 本研究の一部は、平成 19 年度文部科学省科学研究費補助金若手研究 (B) (課題番号 17700119) によるものである。

## 文 献

- [1] H.L. Jin, M. Fujiyoshi, and H. Kiya, "Lossless data hiding in the spatial domain for high quality images," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E90-A, no.4, pp.771-777, April 2007.
- [2] 佐藤修治, 金 弘林, 藤吉正明, 貴家仁志, "可逆情報埋め込み法のための統計量算出領域の検討," 信学技報, SIP2006-1, April 2006.
- [3] Center for Image Processing Research, Rensselaer Polytechnic Institute, <http://www.cipr.rpi.edu/>
- [4] Signal & Image Processing Institute, University of Southern California, <http://sipi.usc.edu/services/database/>  
(平成 19 年 12 月 18 日受付, 20 年 3 月 24 日再受付)