

# ヒストグラムの疎性を利用した HDR 画像のためのパラメタ記憶不要な可逆情報埋込法

大石 涼<sup>†</sup> 藤吉 正明<sup>†</sup> 貴家 仁志<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 首都大学東京大学院システムデザイン研究科情報通信システム学域 〒 191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6  
E-mail: †oishi-ryo@ed.tmu.ac.jp, †mfujiyoshi@m.ieice.org, †kiya@tmu.ac.jp

あらまし 本稿は、高ダイナミックレンジ (high dynamic range, HDR) 画像を対象とする可逆情報埋込法を提案している。HDR 画像は従来の低ダイナミックレンジ (low dynamic range, LDR) 画像と比較して輝度域と色域とが広く、それを表す画素値の段階も多い。そのため画素値の分布を表すヒストグラムが疎であり、提案法はそのことに着目した手法になっている。提案法はヒストグラムに基づき画像を歪ませることで、情報を HDR 画像へ知覚できないように重畳する、すなわち、埋める。提案法はまた、画像から情報を抽出し、さらに、歪んだ画像から原画像を復元することが可能な可逆情報埋込法である。従来 LDR 画像を対象とした可逆情報埋込法は、情報埋込に用いた画像依存のパラメタを情報抽出と原画像復元とに必要とするためパラメタの記憶を必要としている。一方、提案法は HDR 画像のヒストグラムの疎性を活用した埋込によって、画像依存のパラメタなく情報抽出と原画像復元とが可能になっている。

キーワード ロスレス、情報埋め込み、浮動小数点数、不等間隔量子化

## Parameter Memorization-Free Reversible Data Hiding for HDR Images

Ryo OISHI<sup>†</sup>, Masaaki FUJIYOSHI<sup>†</sup>, and Hitoshi KIYA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Department of Information and Communication Systems, Tokyo Metropolitan University  
6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065 Japan  
E-mail: †oishi-ryo@ed.tmu.ac.jp, †mfujiyoshi@m.ieice.org, †kiya@tmu.ac.jp

**Abstract** This paper proposes a reversible data hiding (RDH) method for high dynamic range (HDR) images. In HDR images, in contrast to ordinary low dynamic range (LDR) images, many possible pixel values are used to represent wider luminance range and broader color space. Thus, the histogram, the distribution of pixel values, of HDR images is practically sparse, and the proposed method well utilizes the sparseness of the histogram. The proposed method distorts an HDR image based on its histogram to hide data to the image imperceptibly. The method also extracts the hidden data from the distorted image and further recovers the original image from the distorted image, i.e., the proposed method is a RDH method. Conventional RDH methods for LDR images uses an image dependent parameter to hide data to an image and it needs the parameter to extract the hidden data and to recover the original image from the distorted image, i.e., the methods have to memorize an image dependent parameter per image. On the other hand, the proposed method extracts the hidden data and recover the original image from the distorted image without any image dependent parameter by data hiding which utilizes the sparseness of HDR images' histogram.

**Key words** lossless, information embedding, floating point numbers, non-linear quantization

### 1. はじめに

画像情報埋込技術は、画像を歪ませることによって、ペイロードと呼ばれる別の情報を画像へ知覚できないように重畳する技術である [1-3]。本稿では以降、ペイロード重畳前の画像を原画像、重畳後の歪んだ画像をステゴ画像とそれぞれ呼ぶ。一般に、画像情報埋込法は埋めたペイロードをステゴ画像から

抽出する。画像情報埋込技術黎明期の手法や著作権保護などのセキュリティ応用を前提とする手法は、ペイロードを抽出はしても、ステゴ画像は歪んだままである [4,5]。すなわち、非可逆な手法である。

後に、とくに医用・軍用を目的に、可逆な画像情報埋込技術が提案された [6,7]。可逆画像情報埋込技術は、ステゴ画像からペイロードを抽出するだけでなく、ステゴ画像から原画像を完

全に復元することが可能である。可逆画像情報埋込技術の代表的なクラスの一つはヒストグラム操作型 [8–10] であり、画像の画素値のヒストグラムに基づいてペイロードを原画像へ埋める。

これらの情報埋込技術の多くは、従来の低ダイナミックレンジ (low dynamic range, LDR) 画像を対象としている。一方、より広いダイナミックレンジを持つ高ダイナミックレンジ (high dynamic range, HDR) 画像が、天文、コンピュータ・グラフィクス、車載カメラや監視カメラなどから一般のスマートフォンまで広範に利用され始めている [11, 12]。HDR 画像に対する情報埋込技術も提案されているが、非可逆 [13, 14]、あるいは、特定の画像形式を対象として原画像から生成される LDR 画像 [15–17] とステゴ画像から生成される LDR 画像とが同一となる手法 [18, 19] で、可逆情報埋込法の検討は不十分である。

そこで本稿では、HDR 画像に対する可逆な情報埋込法を提案する。提案法は、HDR 画像が疎なヒストグラムを有することに着目し、原画像のヒストグラムを考慮しながら画素を選択、操作することで、ペイロードを埋める。従来 LDR 画像に対してヒストグラム操作型情報埋込法も提案されている [8] が、LDR 画像が等間隔量子化された整数値で表される一方、HDR 画像は不等間隔量子化された浮動小数点数で表されるため、この従来法を HDR 画像へ直接適用することはできない。また、従来法はペイロード埋込に用いた画像依存のパラメタをペイロード抽出と原画像復元とに必要とするが、提案法は画像依存パラメタを用いることなくペイロード抽出と画像復元とが可能となっている。

## 2. 準備

本節では、まず、LDR 画像に対するヒストグラム操作型画像情報埋込法 [8] (以下、従来法) について述べる。次に、提案法が対象とする HDR 画像 [11, 12] について、LDR 画像との違いを中心に述べる。

### 2.1 従来法

図 1 (a) に示すとおり、従来法 [8] はまず、1 画素あたり  $B_{\text{LDR}}$  ビットの濃淡原画像  $\mathbf{f}_{\text{LDR}} = \{f_{\text{LDR}}(x, y)\}$  からヒストグラム  $\mathbf{h}_{\text{LDR}} = \{h(v_{\text{LDR}})\}$  を求める。ここで、 $v_{\text{LDR}} = 0, 1, \dots, 2^{B_{\text{LDR}}} - 1$ 、 $h(v_{\text{LDR}}) = |\{(x, y) \mid f_{\text{LDR}}(x, y) = v_{\text{LDR}}\}|$ 、 $0 \leq h(v_{\text{LDR}}) \leq XY$ 、 $\sum_{v_{\text{LDR}}=0}^{2^{B_{\text{LDR}}}-1} h(v_{\text{LDR}}) = XY$  である。続いて、二つの濃淡値  $v_{\text{LDR}, \min} = \arg \min h(v_{\text{LDR}})$  と  $v_{\text{LDR}, \max} = \arg \max h(v_{\text{LDR}})$  とを求める。なお、簡単のために、ここでは、 $h(v_{\text{LDR}, \min}) = 0$ 、 $v_{\text{LDR}, \min} < v_{\text{LDR}, \max}$  と仮定する。なお、以降では、頻度が 0 であるヒストグラムピンをゼロヒストグラムピン、最高頻度を有するヒストグラムピンをピークヒストグラムピン、とそれぞれ呼ぶ。

次に、 $\mathbf{h}_{\text{LDR}}$  の一部を  $h(v_{\text{LDR}, \min})$  方向へシフトする。

$$\tilde{f}_{\text{LDR}}(x, y) = \begin{cases} f_{\text{LDR}}(x, y) - 1, & v_{\text{LDR}, \min} < f_{\text{LDR}}(x, y) < v_{\text{LDR}, \max} \\ f_{\text{LDR}}(x, y), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{f}}_{\text{LDR}} = \{\tilde{f}_{\text{LDR}}(x, y)\}$  はヒストグラムがシフトされた画像であり、 $\tilde{f}_{\text{LDR}}(x, y) \in [0 \dots 2^{B_{\text{LDR}}} - 1]$  である。したがって、 $\tilde{\mathbf{f}}_{\text{LDR}}$

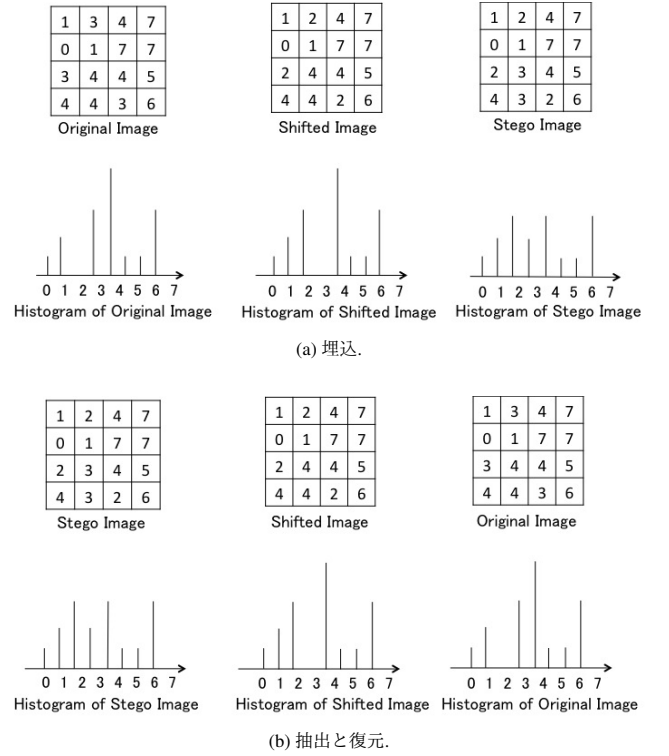


図 1 LDR 画像を対象とするヒストグラム操作型情報埋込 [8] ( $B = 3$ ,  $X = Y = 4$ ,  $\mathbf{p} = \{1, 0, 1, 1, 0\}$ ,  $L = 5$ ).

のヒストグラム  $\tilde{\mathbf{h}}_{\text{LDR}} = \{\tilde{h}(v_{\text{LDR}})\}$  において、ゼロヒストグラムピンの隣にピークヒストグラムピンが位置する。すなわち、 $\tilde{h}_{\text{LDR}}(v_{\text{LDR}, \max}) = \max \tilde{h}_{\text{LDR}}(v)$ 、かつ、 $\tilde{h}_{\text{LDR}}(v_{\text{LDR}, \max} - 1) = \tilde{h}_{\text{LDR}}(v_{\text{LDR}, \min}) = 0$  である。

最後に、ペイロードビット  $p(l)$  に応じて濃淡値が  $v_{\text{LDR}, \max}$  である画素の濃淡値を変更することで、 $L$  ビットペイロード  $\mathbf{p} = \{p(l)\}$  を埋めたステゴ画像  $\hat{\mathbf{f}}_{\text{LDR}} = \{\hat{f}_{\text{LDR}}(x, y)\}$  が生成される。

$$\hat{f}_{\text{LDR}}(x, y) = \begin{cases} \tilde{f}_{\text{LDR}}(x, y) - 1, & (x, y) = m_l \text{ and } p(l) = 0 \\ \tilde{f}_{\text{LDR}}(x, y), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $m_l$  は集合  $M = \{(x, y) \mid f_{\text{LDR}}(x, y) = v_{\text{LDR}, \max}\}$  の  $l$  番目の要素であり、 $\hat{f}_{\text{LDR}}(x, y) \in [0 \dots 2^{B_{\text{LDR}}} - 1]$ 、 $p(l) \in \{0, 1\}$ 、 $l = 0, 1, \dots, L-1$  である。なお、ペイロードサイズ  $L$  ビットは埋込可能容量  $|M| = h(v_{\text{LDR}, \max})$  ビット以下となる。濃淡値  $v_{\text{LDR}, \max}$ 、 $v_{\text{LDR}, \min}$  が与えられると、濃淡値が  $v_{\text{LDR}, \max}$  と  $(v_{\text{LDR}, \max} - 1)$  との画素を走査することで、 $\mathbf{p}$  は容易に抽出される (図 1 (b))。

$$p(l) = \begin{cases} 0, & (x, y) = m_l \text{ and } \hat{f}_{\text{LDR}}(x, y) = v_{\text{LDR}, \max} - 1 \\ 1, & (x, y) = m_l \text{ and } \hat{f}_{\text{LDR}}(x, y) = v_{\text{LDR}, \max} \end{cases} \quad (3)$$

さらに、濃淡値が  $(v_{\text{LDR}, \max} - 1)$  の画素の画素値に 1 を加えることでヒストグラムをシフトした画像  $\hat{\tilde{\mathbf{f}}}_{\text{LDR}}$  が得られ、ヒストグラムの一部を逆方向にシフトすることで原画像  $\mathbf{f}_{\text{LDR}}$  が復元される。すなわち、

$$\hat{\tilde{f}}_{\text{LDR}}(x, y) = \begin{cases} \hat{f}_{\text{LDR}}(x, y) + 1, & \hat{f}_{\text{LDR}}(x, y) = v_{\text{LDR}, \max} - 1 \\ \hat{f}_{\text{LDR}}(x, y), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$f_{\text{LDR}}(x, y) = \begin{cases} \tilde{f}_{\text{LDR}}(x, y) + 1, & v_{\text{LDR},\min} \leq \tilde{f}(x, y) < v_{\text{LDR},\max} \\ \tilde{f}_{\text{LDR}}(x, y), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

なお、式(3)~(5)のとおり、この手法はペイロード抽出と原画像復元に画像依存のパラメタである濃淡値  $v_{\text{LDR},\max}$ ,  $v_{\text{LDR},\min}$  を必要とする。画像依存のパラメタを用いるためには、ペイロード抽出前に画像を特定するか別の可逆情報埋込法によってパラメタも埋める必要があるが、前者はステゴ画像から原画像を特定することは容易ではない上にコストが大きく [20]、後者は複数の手法を必要とするため煩雑になる。

また、この手法では、高い頻度を有するヒストグラムビンを複数用いることで埋込可能容量を増加することができるが、埋込に用いる各ヒストグラムビンに対して式(2)による埋込を施すため、同数のゼロヒストグラムビンを必要とする。次節で示すとおり、LDR 画像のヒストグラムは密であり、ゼロヒストグラムビンが不足する可能性が高く、その場合には、最小頻度を有するヒストグラムビンに対応する画素値と画素の位置とを記憶した上で、これらの画素の画素値を他の画素値へ変更することで、ゼロヒストグラムビンを創出することになる。さらに、複数の高頻度ヒストグラムビンを埋込に用いる場合、各々のヒストグラムビンに対して、上述した画像依存の2つのパラメタを記憶する必要がある。

## 2.2 HDR 画像と LDR 画像との比較

HDR 画像、LDR 画像どちらも、カラー画像については赤、緑、青のカラーチャンネルを保有しており、LDR 画像は各々のチャンネルの1画素が  $B_{\text{LDR}}$  ビットの等間隔量子化された整数画素値  $[0 \dots 2^{B_{\text{LDR}}} - 1]$  で表現される（一般に  $B_{\text{LDR}} = 8$ ）。一方で、HDR 画像の画素は1カラーチャンネルあたり  $B_{\text{HDR}}$  ビットの浮動小数点数で表現されていて（HDR 画像の主要な形式 [21,22] では  $B_{\text{HDR}} = 16$ ）、不等間隔量子化された画素値となっている。よって、一般的に HDR 画像は1画素・1チャンネルあたり  $2^{16} = 65536$  通りの画素値を取りうることになるが、必ずしもすべての画素値が画像中に存在するわけではない。その結果、ヒストグラムにはゼロヒストグラムビンが多く存在し、疎なヒストグラムとなる。

HDR 画像とその HDR 画像に対しトーンマッピング処理 [15] を施して生成した LDR 画像（図2）について、ヒストグラムの疎性率を表1に示す。ヒストグラムの疎性率は以下の式で与えられる。

$$S = 100 \times \left(1 - \frac{N_e}{2^B}\right) \quad (6)$$

ここで、 $S$  は疎性率、 $N_e$  は各チャンネルで実際に使用されている画素値の総数、 $B$  は LDR 画像では  $B_{\text{LDR}}$ 、HDR 画像では  $B_{\text{HDR}}$  である。したがって、LDR 画像では  $1 \leq N_e \leq 2^{B_{\text{LDR}}} - 1$ 、HDR 画像では  $1 \leq N_e \leq 2^{B_{\text{HDR}}} - 1$  であり、 $S$  が大きいほど疎なヒストグラムであることを意味する。

表1から分かるように、HDR 画像と LDR 画像のヒストグラムの疎性率を比較すると、HDR 画像の疎性率が高い事が明らかである。一方、LDR 画像はトーンマッピングによってダイナ

表1 HDR 画像と LDR 画像の疎性率の比較 (LDR 画像はトーンマッピング処理 [15] で HDR 画像から生成)。

画像	HDR 画像			LDR 画像		
	R	G	B	R	G	B
memorial	93.39	95.51	96.22	8.98	3.91	5.86
Desk	91.66	94.51	93.95	22.66	7.81	11.72
AtriumNight	93.06	93.38	95.83	23.44	16.80	12.11
dani_cathedral	93.77	97.01	96.85	2.34	3.12	3.12
rosette	91.52	94.96	94.29	18.36	13.28	12.11
StillLife	91.82	95.05	96.66	0.78	4.30	0.78
MtTamWest	92.51	96.12	95.58	17.58	20.70	7.42
nave	90.59	94.05	93.23	11.72	7.81	8.59
dani_belgium	92.90	95.66	95.63	3.51	7.42	3.12
dani_synagogue	94.52	97.72	97.79	1.56	4.29	1.56
Tree	91.50	94.77	94.53	2.34	3.13	1.17

表2 HDR 画像と LDR 画像の比較。

	HDR 画像	LDR 画像
量子化ビット数	16	8
画素値	不等間隔量子化	等間隔量子化
ヒストグラム	疎	密

ミックレンジを狭められ、さらに、1画素あたりのビット数も少ないため、多くの画素値を用いることになる。すなわち、ヒストグラムが密になり、疎性率  $S$  も必然的に小さくなることがわかる。

以上のことを、表2にまとめる。次節では、この表を踏まえ、HDR 画像に適し、かつ、ペイロード抽出や原画像復元に画像依存のパラメタを必要としない可逆情報埋込法を提案する。

## 3. 提案法

本節では、HDR 画像を対象とする可逆情報埋込法を提案する。提案法は HDR 画像のヒストグラムの疎性を活かした手法であり、さらに HDR 画像の画素値が不等間隔量子化された浮動小数点数で表現されることも考慮した手法である。加えて、ペイロード抽出と原画像復元に画像依存のパラメタを必要としない手法となっている。

### 3.1 方針

疎なヒストグラムを有する HDR 画像は多くのゼロヒストグラムビンと隣接していることから、提案法では  $K$  個の高頻度ヒストグラムビンを埋込に用いる。同時に、画像依存のパラメタを用いることなく、埋込に用いた  $K$  個のヒストグラムビンおよび画素数に制約を施す。具体的なアルゴリズム例は次節で説明する。

### 3.2 アルゴリズム

以下に提案法を実装した例を説明する。ここでは、 $L$  ビットのペイロード  $\mathbf{p} = \{p(l)\}$  を  $X \times Y$  画素の HDR 画像の1つのカラーチャンネル  $\mathbf{f}_{\text{HDR}} = \{f_{\text{HDR}}(x, y)\}$  に、両側がゼロヒストグラムビ

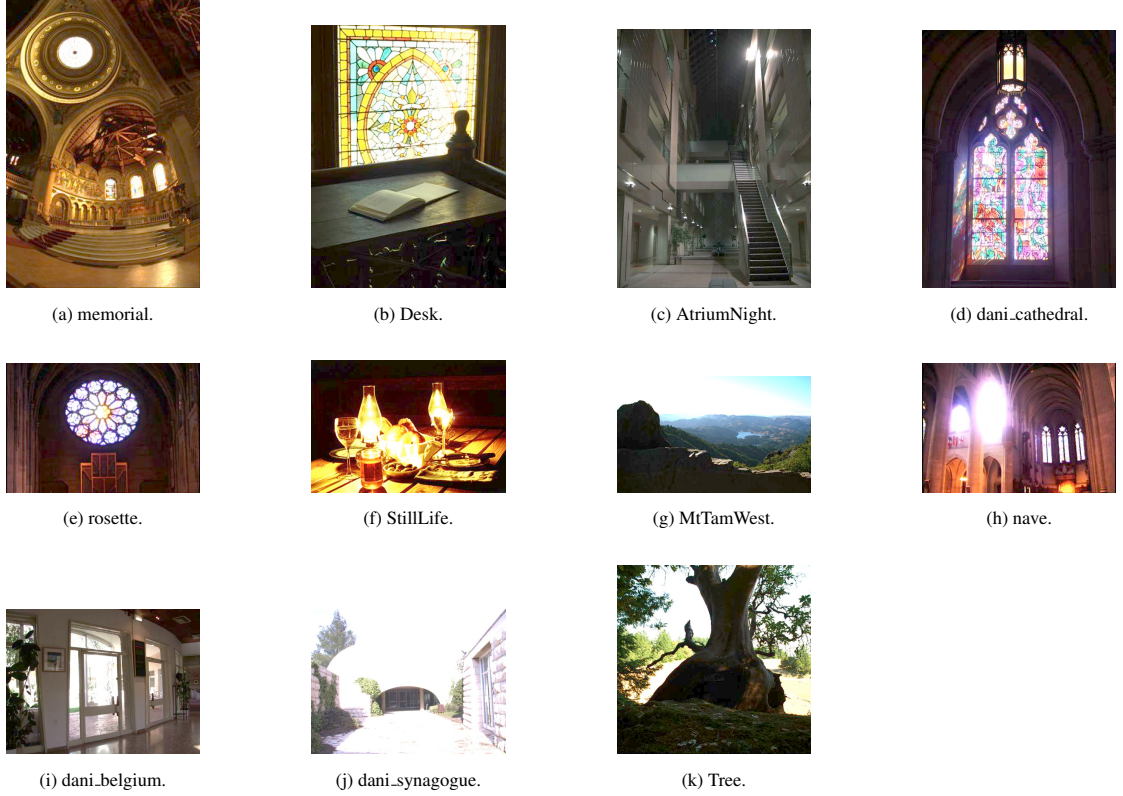


図2 HDR 画像例 (トーンマッピング処理された [15] LDR 画像) .

ンである  $K$  個の高頻度ヒストグラムビンを用いて埋めるものとする。ここで  $x = 0, 1, \dots, X-1$ ,  $y = 0, 1, \dots, Y-1$ ,  $p(l) \in \{0, 1\}$ ,  $l = 0, 1, \dots, L-1$  であり,  $K$  は画像によらず共通な値とする。

### 3.2.1 ペイロード埋込

1. 原画像  $\mathbf{f}_{\text{HDR}}$  から画素値のヒストグラム  $\mathbf{h}_{\text{HDR}} = \{h(v_{\text{HDR}})\}$  を得る。ここで  $h(v_{\text{HDR}}) = |\{f_{\text{HDR}}(x, y) = v_{\text{HDR}}\}|$  であり,  $v_{\text{HDR}}$  は  $2^{B_{\text{HDR}}}$  段階に不等間隔量子化された浮動小数点数の画素値を表す。また,  $v_{\text{HDR},d}$  をその  $d$  番目の画素値とする ( $d = 0, 1, \dots, 2^{B_{\text{HDR}}} - 1$ ) .
2. 両側がゼロヒストグラムビンである画素値の集合  $W = \{v_{\text{HDR},d} \mid h(v_{\text{HDR},d-1}) = h(v_{\text{HDR},d+1}) = 0\}$  を求める。  $W$  の要素を頻度  $h(v_{\text{HDR},d})$  の降順に並び替え, 並べ替えた  $W$  の最初の  $(K+1)$  個の要素を新たな集合  $U$  とする。
3. 以下の式でステゴ画像  $\hat{\mathbf{f}}_{\text{HDR}} = \{\hat{f}_{\text{HDR}}(x, y)\}$  を得る。

$$\hat{f}_{\text{HDR}}(x, y) = \begin{cases} f_{\text{HDR}}(x, y) - \alpha_k, & (x, y) = c_{j_k} \text{ and } p(l) = 0 \\ f_{\text{HDR}}(x, y), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

ここで,  $c_{j_k}$  は集合  $J_k$  の  $j_k$  番目の要素である画素であり, 集合  $J_k$  は集合  $U$  の  $k$  番目の要素である  $v_{\text{HDR},\delta_k}$  を画素値とする画素の集合である。すなわち,  $J_k = \{(x, y) \mid f_{\text{HDR}}(x, y) = v_{\text{HDR},\delta_k}\}$ 。また,  $k = 1, 2, \dots, K$ ,  $j_k = 0, 1, \dots, h(v_{\text{HDR},\delta_k}) - h(v_{\text{HDR},\delta_{k+1}}) - 1$  であり,

$$l = \begin{cases} j_k, & k = 1 \\ j_k + \sum_{n=1}^{k-1} (h(v_{\text{HDR},\delta_{\max,n}}) - h(v_{\text{HDR},\delta_{\max,(K+1)}}) - 1), & k > 1 \end{cases} \quad (8)$$

である。なお,  $\alpha_k$  は  $v_{\text{HDR},\delta_{\max,k}}$  と等しい画素値  $v_{\text{HDR},\delta_k}$  とその 1 つ小さい画素値  $v_{\text{HDR},\delta_{k-1}}$  との差である。すなわち,  $\alpha_k = v_{\text{HDR},\delta_k} - v_{\text{HDR},\delta_{k-1}}$  .

### 3.2.2 ペイロード抽出と原画像の復元

1. ステゴ画像  $\hat{\mathbf{f}}_{\text{HDR}}$  から画素値のヒストグラム  $\hat{\mathbf{h}}_{\text{HDR}} = \{\hat{h}(v_{\text{HDR}})\}$  を得る。ここで  $\hat{h}(v_{\text{HDR}}) = |\{(x, y) \mid \hat{f}_{\text{HDR}}(x, y) = v_{\text{HDR}}\}|$  である。
2. ヒストグラム  $\hat{\mathbf{h}}_{\text{HDR}}$  から  $(K+1)$  個の高頻度ヒストグラムビンに対応する  $(K+1)$  個の画素値を求め, 集合  $U$  とする。
3. 以下の式で  $\hat{\mathbf{f}}_{\text{HDR}}$  からペイロード  $\mathbf{p}$  を抽出する。

$$p(l) = \begin{cases} 0, & \hat{f}_{\text{HDR}}(x, y) = v_{\text{HDR},\delta_{\max,k}} - \alpha_k \text{ and } (x, y) = c_{j_k} \\ 1, & \hat{f}_{\text{HDR}}(x, y) = v_{\text{HDR},\delta_{\max,k}} \text{ and } (x, y) = c_{j_k} \end{cases} \quad (9)$$

4. 以下の式で  $\hat{\mathbf{f}}_{\text{HDR}}$  から原画像  $\mathbf{f}_{\text{HDR}}$  を復元する。

$$f_{\text{HDR}}(x, y) = \begin{cases} \hat{f}_{\text{HDR}}(x, y) + \alpha_k, & \hat{f}_{\text{HDR}}(x, y) = v_{\text{HDR},\delta_{\max,k}} - 1 \\ \hat{f}_{\text{HDR}}(x, y), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

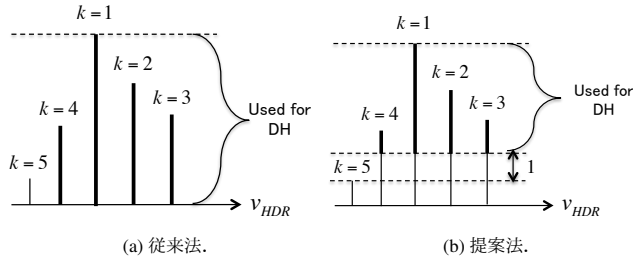


図3  $K$  個の高頻度ヒストグラムビンを用いた埋込 ( $K = 4$ ) .

### 3.3 提案法の特徴

3.1 で述べたとおり，提案法は HDR 画像が疎なヒストグラムを有することを考慮しており，3.2 に示したアルゴリズムもヒストグラム操作型に基づいている．なお，等間隔量子化された LDR 画像を対象とする従来法が，埋込に用いる画素値に関わらず整数 1 を用いてペイロードを埋める（式 (2) で）一方，不等間隔量子化された HDR 画像を対象とする提案法は，埋込に用いる画素値によって異なる実数値  $\alpha_k$  を用いる（式 (7)）．また，2.1 で述べたように LDR 画像では複数のヒストグラムビンを用いた埋込は困難な場合が多い一方，HDR 画像では非零ヒストグラムビンがゼロヒストグラムビンと隣接しているため，3.2 に示したとおり提案法は複数のヒストグラムビンを埋込に活用している．なお，このヒストグラムの特徴から，LDR 画像を対象とする従来法が必要としている式 (1) のヒストグラムシフトが，HDR 画像を対象とする提案法では不要になっている．

さらに，提案法は， $K$  個の高頻度ヒストグラムビンを埋込に用いるが，それらのヒストグラムビンに対応する画素の一部だけを埋込に用いることで，ペイロード抽出や原画像復元に画像依存のパラメタを不要としている．具体的には，従来法に基づく埋込が  $K$  個の高頻度ヒストグラムビンに対応する画素すべてを埋込に用いる（図 3 (a)）のに対して，提案法では， $(K + 1)$  番目の高頻度ヒストグラムビンの頻度  $h(v_{\text{HDR},(K+1)})$  よりも高くなるように， $k$  番目の高頻度ヒストグラムビンに対応する画素  $h(v_{\text{HDR},k})$  個のうち  $h(v_{\text{HDR},k}) - h(v_{\text{HDR},(K+1)}) - 1$  個だけを埋込に用いている（図 3 (b)）．この結果，ペイロード抽出と原画像復元とに画像依存パラメタである画素値を必要としないことを達成している．なお，従来法に基づいて  $K$  個の高頻度ヒストグラムビンを埋込に用いる場合の埋込可能容量が  $C = \sum_{n=1}^K h(v_{\text{HDR},n})$  であるのに対し，提案法の埋込可能容量は  $C = \sum_{n=1}^K h(v_{\text{HDR},n}) - Kh(v_{\text{HDR},\max(K+1)}) - K$  となる．

## 4. 数値実験

本節では，図 2 に示した HDR 画像を用いて，提案法の性能を評価する．なお，ペイロード  $\mathbf{p}$  は等確率で生起する 0, 1 からなる 2 値乱数列である．

図 2 (a) に示す HDR 画像 memorial に対して，提案法と  $K$  個の高頻度ヒストグラムビンに対応する画素をすべて埋込に利用する従来法に基づく埋込とを適用した場合の，1 画素あたりの埋込可能情報量，すなわち，埋込率  $C/XY$  ビット/画素を図 4 に示す． $K$  が増加するにつれて双方とも埋込可能情報量が増加す

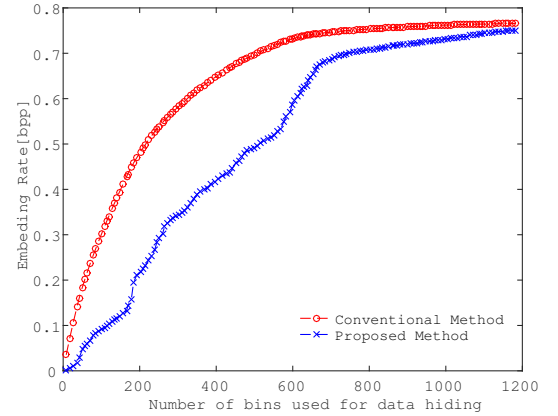


図4  $K$  個のヒストグラムビンを使用した場合の埋込率  $C/XY$  ビット/画素．

るが，3.3 で述べたとおり，提案法はすべての画素を埋込に使用するわけではないため，従来法に基づく埋込よりも埋込可能情報量が少なくなることが確認される．ただし，提案法はペイロード抽出と原画像復元とに画像依存パラメタを用いずに済むため，2.1 に述べた問題は生じない．

また，提案法と従来法に基づく埋込とを memorial に適用して生成されたステゴ画像の画質を評価した結果を図 5 に示す．同図 (a) と (b) は HDR 画像に対する画質評価尺度である HDR-VDP-2 [23] と modified peak signal-to-noise ratio (mPSNR) [24] とで評価した結果であり，同図 (c) はトーンマッピング処理で生成された LDR 画像を画質評価尺度 PSNR で評価した結果である．図 5 から，同じ埋込率において，提案法は従来法に基づく埋込と同程度の画質を達成することがわかる．

なお，他の画像に対しても同様の結果が得られていることを確認している．

## 5. おわりに

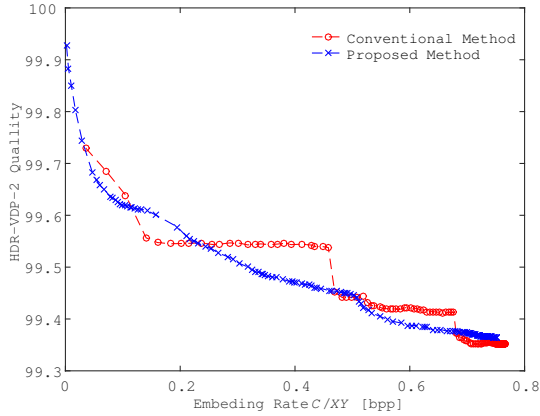
本稿では HDR 画像を対象とする可逆情報埋込込み法を提案した．提案法は HDR 画像のヒストグラムが疎であることに着目し，ヒストグラム操作型の埋込法によって HDR 画像へペイロードを埋める．提案法は従来の HDR 画像を対象とした情報埋込法と異なり，HDR 画像のまま原画像を復元可能である可逆情報埋込法である．また，LDR 画像に対する従来のヒストグラム操作型可逆情報埋込法と異なり，ペイロード抽出と原画像復元とに画像依存パラメタを必要としない特長も有する．

提案法を，疎なヒストグラムを活用する別の可逆情報埋込技術である一般化ヒストグラム操作型手法 [?, 25, 26] へ拡張する，あるいは，提案法と一般化ヒストグラム操作型手法とを統合することが，今後の課題としてあげられる．

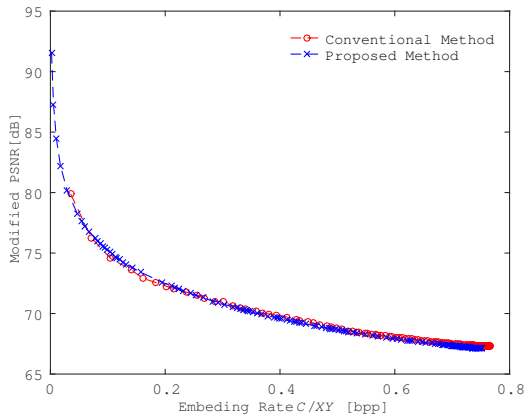
## 文 献

- [1] M. Wu and B. Liu, *Multimedia Data Hiding*, Springer-Verlag, 2003.
- [2] I.J. Cox, M.L. Müller, J.A. Bloom, J. Fridrich, and T. Kalker, *Digital watermarking and steganography*, 2nd ed., Morgan Kaufmann Publishers, 2008.
- [3] J. Fridrich, *Steganography in digital media*, Cambridge University Press, 2010.

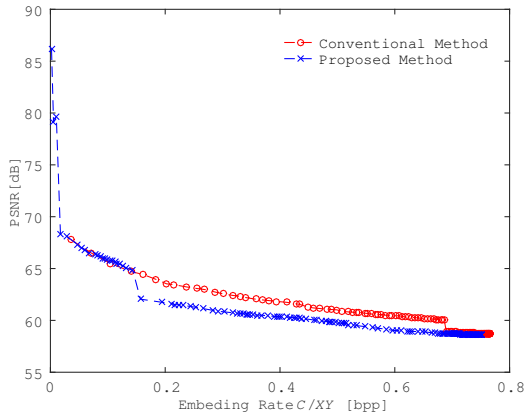




(a) HDR-VDP-2 [23].



(b) mPSNR [24].



(c) PSNR (トーンマッピング処理した [15] LDR 画像) .

図 5 画質の評価.

[4] S. Liu, M. Fujiyoshi, and H. Kiya, "An image trading system using amplitude-only images for privacy- and copyright-protection," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E96-A, no.6, pp.1245–1252, Jun. 2013.

[5] W. Sae-Tang, S. Liu, M. Fujiyoshi, and H. Kiya, "A copyright- and privacy-protected image trading system using fingerprinting in discrete wavelet domain with JPEG 2000," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E97-A, no.11, pp.2107–2113, Nov. 2014.

[6] R. Caldelli, F. Filippini, and R. Becarelli, "Reversible watermarking techniques: an overview and a classification," *EURASIP J. Inf. Security*, vol.2010, 2010.

[7] H.L. Jin, M. Fujiyoshi, and H. Kiya, "Lossless data hiding in the spa-

tial domain for high quality images," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E90, no.4, pp.771–777, Apr. 2007.

[8] Z. Ni, Y.-Q. Shi, N. Ansari, and W. Su, "Reversible data hiding," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol.16, no.3, pp.354–362, Mar. 2006.

[9] M. Fujiyoshi, "A separable lossless data embedding scheme in encrypted images considering hierarchical privilege," *Proc. EURASIP EUSIPCO*, 2013.

[10] I. Caciula and D. Coltuc, "Improved control for low bit-rate reversible watermarking," *Proc. IEEE ICASSP*, pp.7425–7429, 2014.

[11] E. Reinhard, W. Heidrich, P. Debevec, S. Pattanaik, G. Ward, and K. Myszkowski, *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting*, Morgan Kaufmann, 2nd ed., 2010.

[12] F. Dufaux, P. Le Callet, R. Mantiu, and M. Mrak, Eds., *High Dynamic Range Video: From Acquisition to Display and Applications*, Academic Press, 2016.

[13] F. Guerrini, M. Okuda, N. Adami, and R. Leonardi, "High dynamic range image watermarking robust against tone-mapping operators," *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, vol.6, no.2, pp.283–295, Jun. 2011.

[14] F. Atrousseau and D. Goudia, "Non linear hybrid watermarking for high dynamic range images," *Proc. IEEE ICIP*, 2013.

[15] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, and J. Ferwerda, "Photographic tone reproduction for digital images," *ACM Tran. Graphics*, vol.21, no.3, pp.267–276, Jul. 2002.

[16] T. Murofushi, M. Iwahashi, and H. Kiya, "An integer tone mapping operation for HDR images expressed in floating point data," *Proc. IEEE ICASSP*, pp.2479–2483, 2013.

[17] Y. Kinoshita, S. Shiota, M. Iwahashi, and H. Kiya, "An remapping operation without tone mapping parameters for HDR images," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E99-A, no.11, pp.1955–1961, Nov. 2016.

[18] C.-M. Yu, K.-C. Wu, and C.-M. Wang, "A distortion-free data hiding scheme for high dynamic range images," *Displays*, vol.32, no.5, pp.225–236, Dec. 2011.

[19] C.-C. Chang, T.-S. Nguyen, and C.-C. Lin, "A new distortion-free data embedding scheme for high-dynamic range images," *Multimed. Tools Appl.*, vol.75, no.1, pp.145–163, Jan. 2016.

[20] S. Han, M. Fujiyoshi, and H. Kiya, "A Reversible Image Authentication Method without Memorization of Hiding Parameters," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E92-A, no.10, pp.2572–2579, Oct. 2009.

[21] G. Ward, "Real pixels," *Graphics Gems II*, J. Arvo, Ed., Graphics Gems, pp.80–83, Academic Press, 1991.

[22] F. Kainz, R. Bogart, and D. Hess, "The OpenEXR image file format," *Proc. ACM SIGGRAPH*, 2003.

[23] R. Mantiuk, K.J. Kim, A.G. Rempel, and W. Heidrich, "HDR-VDP-2: A calibrated visual metric for visibility and quality predictions in all luminance conditions," *ACM Trans. Graphics*, vol.30, no.4, Jul. 2011.

[24] J. Munkberg, P. Clarberg, J. Hasselgren, and T. Akenine-Möller, "High dynamic range texture compression for graphics hardware," *ACM Trans. Graphics*, vol.25, no.3, pp.698–706, Jul. 2006.

[25] M. Arabzadeh, M.S. Helfroush, H. Danyali, and K. Kasiri, "Reversible watermarking based on generalized histogram shifting," *Proc. IEEE ICIP*, pp.2797–2800, 2011.

[26] M. Fujiyoshi and H. Kiya, "Generalized histogram shifting-based reversible data hiding with an adaptive binary-to- $q$ -ary converter," *Proc. APSIPA ASC*, 2012.