

法演算を用いる JPEG 2000 符号化画像への情報埋込法

金 弘林^{†a)} 藤吉 正明^{††b)} 関 裕介^{†††c)} 貴家 仁志^{††d)}

A Data Hiding Method for JPEG 2000 Coded Images Using Modulo Arithmetic

Hong Lin JIN^{†a)}, Masaaki FUJIYOSHI^{††b)}, Yusuke SEKI^{†††c)}, and Hitoshi KIYA^{††d)}

あらまし 本論文は JPEG 2000 符号化画像の量子化された離散ウェーブレット変換係数へ多値情報を埋める情報埋込法を提案している。提案法は、量子化された、すなわち、整数である離散ウェーブレット変換係数へ整数情報を加減算することで情報を埋めるため、JPEG 2000 符号化手順へ影響せず、JPEG 2000 符号化列の構造を保持する。また、法演算を用いることで、情報埋込による画質低下を低減する。更に、埋めた情報の抽出時に、操作した変換係数の位置の特定が不要である。したがって、任意の変換係数へ情報を埋めることが可能である。このことは、JPEG 2000 符号化が有する興味領域 (ROI) 機能を考慮した情報埋込に適している。シミュレーションにより提案法の有効性が示されている。

キーワード 離散ウェーブレット変換, 量子化, 係数和, 量子化誤差補償, 興味領域

1. ま え が き

近年、情報端末の普及に伴い、デジタル画像を取り扱う機会が急激に増加している。現在、デジタル画像は圧縮するために符号化されて扱われることが一般的であり、静止画像圧縮では JPEG (Joint Photographic Coding Experts Group) [1] や JPEG 2000 [2], [3] (以下 JP2 と省略)、動画圧縮では MPEG (Moving Picture Experts Group) [4] といった国際標準が広く使用されている。このようにデジタル符号化画像が増大する中、画像に付随する付加的な情報を、画像と同時に取り扱いたい場面も多くなってきている。例えば、画像を説明する文字情報などを付随させれば、テキストベースでの画像の検索などが可能になり利便性が向上する [5], [6]。また、伝送前に付加情報を画像へ

埋めることによって、受信側での画質の監視や推定が可能となり [7], [8]、そのほかにも、伝送中に発生する画像への誤りの検出や訂正が可能となる [9] ~ [11]。これらの技術は、著作権保護を目的とするいわゆる電子透かし技術とは異なり、情報埋込者が符号化することを前提に、そのような非可逆圧縮のもとでも情報を完全に抽出することを目的としている。

このような符号化画像に対する付加情報の埋込を実現する方法は二つに大別される。一方は、情報を符号化列へ直接埋める方式であり、JP2 符号化列などに含まれる符号語をビットまたはバイト単位で操作することで情報を埋める [5]。他方は、離散ウェーブレット変換 (Discrete Wavelet Transformation: DWT) 領域や離散コサイン変換 (Discrete Cosine Transformation: DCT) 領域などの変換領域で情報を埋める方式である [6], [12] ~ [14]。本論文で提案する情報埋込法は後者に属する。

変換領域で情報を埋める技術には、JP2 画像のような符号化画像に特化し、量子化され整数化された変換係数に対して、整数データを埋める方法がある [6]。一方、このような制約はなく、符号化画像に特化しない情報埋込法も提案されている [15] ~ [18]。本論文では、前者のように JP2 符号化における量子化後の DWT 係数に対して整数情報を埋める方法を提案する。前者は量子化後に情報を埋めるため、量子化によ

[†] 首都大学東京大学院工学研究科, 八王子市

Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University, 1-1 MinamiOsawa, Hachioji-shi, 192-0397 Japan

^{††} 首都大学東京システムデザイン学部, 八王子市

Faculty of System Design, Tokyo Metropolitan University, 1-1 MinamiOsawa, Hachioji-shi, 192-0397 Japan

^{†††} KDDI 株式会社建設・運用統括本部運用本部, 多摩市

Operations Division, Service Operations Sector, KDDI Corporation, Tama-shi, 206-0032 Japan

a) E-mail: jin@isys.eei.metro-u.ac.jp

b) E-mail: mfujiyoshi@m.ieice.org

c) E-mail: yusuke@isys.eei.metro-u.ac.jp

d) E-mail: kiya@eei.metro-u.ac.jp

る攻撃を受けない利点を有する。したがって、悪意のある攻撃や通信路誤りなどが無い限り、埋められた情報を 1 ビットの欠損もなく抽出することが可能である。また、抽出時は符号化画像を空間領域まで完全に復号する必要はなく、JP2 復号処理の途中段階である EBCOT (Embedded Block Coding with Optimized Truncation) [19] 復号まで行えば、埋められた情報を抽出可能である利点も有する。

JP2 符号化画像の量子化された DWT 係数へ情報を埋める手法は、従来いくつか提案されている [12] ~ [14]。これらは DWT 係数をビットプレーンへ分解し、複数係数のビット群 [12] と埋める情報の部分ビット群とを、若しくは、1 係数のビット [13], [14] を埋める情報の 1 ビットとを、それぞれ置換する。[12] は部分ビット群に対する変調処理の有無を [13], [14] は操作した係数の位置を、それぞれ補助情報として記録する必要がある。後者は操作する係数の位置を固定することで補助情報量を抑制可能であるが、係数固定により係数選択に対する制約が生じる。一方、操作対象係数の選択に制約がない埋込法も提案されている [20], [21] が、対象とする JPEG 符号化画像の 8×8 DCT ブロックにおいて制約がないだけで、操作対象係数を画像全体から選択可能なわけではない。

本論文では、法演算を用いる JP2 符号化画像のための新しい情報埋込法を提案する。提案法は、JP2 符号化中に量子化され整数化された DWT 係数へ L 値の整数を埋める。このとき、法演算を用いることで、情報埋込に要する変化量を低減し、その結果、情報埋込による画質低下を抑制する。また、抽出時には、情報を埋めるために操作した変換係数の位置に関する補助情報を必要とせず、したがって、情報埋込時に操作する係数に制約がない。この特徴は、量子化誤差を考慮して画質低下を更に抑制することや、JP2 において規格化されている興味領域 (Region Of Interest, ROI) [22] を考慮した情報埋込を可能とする。

2. JP2 符号化

本章では、JP2 符号化方式 [2], [3] について概説する。図 1 は JP2 符号化器のブロック図である。入力画像はまず、輝度値の直流レベルをシフトされ、更に、輝度値は $-1/2 \sim 1/2$ に正規化される。引き続き、DWT によってサブバンド分解され、その後、スカラー量子化を経て各サブバンドの DWT 係数が整数化される。量子化された DWT 係数は、オプションで ROI [22] を

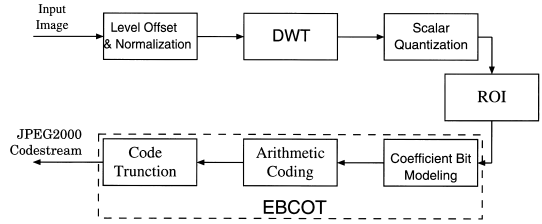


図 1 JP2 符号化手順 [2], [3]
Fig. 1 JP2 encoding process [2], [3].

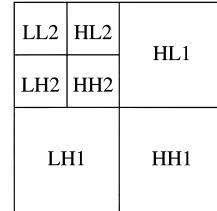


図 2 サブバンド $s_{\lambda, \theta}$ ($\Lambda = 2$ の例。 λ は分解レベル, θ は方向。 $\theta \in \{LL, LH, HL, HH\}$)
Fig. 2 Subbands $s_{\lambda, \theta}$ (An example for $\Lambda = 2$. λ and θ represent the decomposition level and the direction, respectively, in which $\theta \in \{LL, LH, HL, HH\}$).

設定された後、EBCOT アルゴリズム [19] によって符号化される。EBCOT は、係数ビットモデリング、算術符号化、ビット切捨て (レート制御) の三つに大別される。

以下では、量子化と ROI について更に説明する。

2.1 スカラー量子化

スカラー量子化器はサブバンドに応じて量子化幅を変更する。図 2 は $\Lambda = 2$ 回 DWT して得られた $3\Lambda + 1$ 個のサブバンドを表している。サブバンドは分解レベル $\lambda = 1, \dots, \Lambda$ と方向 $\theta \in \{LL, LH, HL, HH\}$ とで特定される。あるサブバンド $s_{\lambda, \theta}$ に対する量子化幅 $q_{\lambda, \theta}$ は式 (1) で決定される。

$$q_{\lambda, \theta} = \frac{\Delta}{\sqrt{f_{\lambda, \theta}}} \tag{1}$$

ここで、 Δ はユーザが与えるベースステップサイズであり、全サブバンドに共通な値である。また、 $0 < \Delta \leq 2$ であり、デフォルト値は $\Delta = 1/256$ である。なお、 $f_{\lambda, \theta}$ はサブバンド $s_{\lambda, \theta}$ のスケーリングファクタであり、サブバンド $s_{\lambda, \theta}$ の信号エネルギーと $s_{\lambda, \theta}$ を逆 DWT した空間領域の信号のエネルギーとを関係づけるものである。この $f_{\lambda, \theta}$ は逆 DWT に用いるフィルタ係数から導出することが可能である [23]。JP2 で用いられる CDF 9/7 フィルタに対する $f_{\lambda, \theta}$ を

表 1 CDF 9/7 フィルタに対するスケーリングファクタ $f_{\lambda, \theta}$ ($\lambda = 1, \dots, 5$)Table 1 Scaling factors $f_{\lambda, \theta}$ for the CDF 9/7 filter ($\lambda = 1, \dots, 5$).

λ	θ		
	LL	LH (HL)	HH
5	1659.4155	411.7132	102.1491
4	384.9947	94.7307	23.3092
3	88.5304	21.2001	5.0767
2	19.7794	4.4995	1.0236
1	4.1902	1.0649	0.2706

$\lambda = 1, \dots, 5$ の範囲で表 1 に示す。

一般に、JP2 符号化処理において多くの演算量を必要とする部分は EBCOT であり、特に係数ビットモデリング及び算術符号化にかかる演算量は、EBCOT に入力される DWT 係数のビット数に比例して増加する。そこで、符号化処理の演算量を低減するために、DWT 係数を十分に量子化することが多い。また、この DWT 係数の量子化は、算術符号化器が生成する符号化列を十分に短くする効果もあり、結果として、算術符号化後のビット切捨てが不要になる。

2.2 ROI

ROI 機能 [22] は、画像中の興味領域を優先的に符号化し、その画質を非興味領域に対して相対的に向上する機能である。JP2 符号化では、符号化器において特定領域に対応する DWT 係数をシフトアップすることで ROI 機能を実現する。シフトアップされた係数は、続く EBCOT において重要な係数として扱われるため、非興味領域と比較して優先的に符号化され、その結果、画質が相対的に向上する。JP2 Part 1 [2] では、非 ROI に含まれるどの係数よりも ROI に含まれる係数が優先的に符号化されるような Max-Shift 法が用いられる。

本章では、スカラー量子化器によって十分に量子化され、EBCOT でのビット切捨てによるレート制御が不要な条件下で、JP2 符号化画像の DWT 係数へ整数情報を埋める情報埋込法を提案する。提案法は、量子化によって整数化された係数へ整数情報を埋めるため JP2 符号化手順に影響しない。また、ROI に含まれる DWT 係数へ情報を埋めても、非 ROI に含まれる係数へ情報を埋めても、どちらの領域へ情報が埋められたかを示す補助情報を用いることなく、同一の手順での情報抽出を可能とする。

3. 提案法

提案法は、図 3 に示すとおり、JP2 符号化において、量子化された整数 DWT 係数へ情報を埋める情報埋込法である。提案法を説明するにあたり、入力画像の一つのサブバンドへ整数情報 w を埋めることを考える。ここで、 w は $0 \sim L - 1$ の整数値であり、本論文ではこの L を情報のダイナミックレンジと呼ぶ。例えば、 $L = 4$ であれば、 $\log_2 4 = 2$ [bit] であり、画像へ 2 ビットの情報を埋めることと等価である。ただし、提案法では L を 2 のべき乗とする必要はなく、任意の正整数値をとることが可能である。

3.1 埋込

ここでは、入力画像が DC レベルシフトされ、正規化され、 Λ 回 DWT され、 $3\Lambda + 1$ 個のサブバンドに帯域分割されるとする。また、上述のとおり、このうち一つのサブバンドへ情報を埋める手順について述べる。

[手順 1] 2. で述べた JP2 符号化手順に従い、入力画像は DC レベルシフト及び正規化される。次に Λ 回 DWT され、 $3\Lambda + 1$ 個のサブバンド $s = \{s_l \mid l = 1, \dots, 3\Lambda + 1\}$ に帯域分割される。引き続き、サブバンド s_l に含まれる DWT 係数は対応する量子化幅 q_l で量子化される。

[手順 2] 情報 w を埋める対象のサブバンド s_l を一つ選択する。サブバンド s_l は水平方向に X_l 個、垂直方向に Y_l 個の DWT 係数を含むものとする。

[手順 3] 式 (2) を用い、サブバンド s_l に含まれる量子化係数 $c = \{c_\chi \mid \chi = 1, \dots, X_l Y_l\}$ の総和 S を求める。

$$S = \sum_{\chi=1}^{X_l Y_l} c_\chi \quad (2)$$

[手順 4] 式 (3) を用い、求めた総和 S を情報のダイナミックレンジ L で割った剰余 r を求める。ただし、 $r \geq 0$ とする。

$$r = S \bmod L, \quad r \geq 0 \quad (3)$$

[手順 5] 式 (4) ~ (6) に従い、パラメータ d を求める。

$$d = \min(g_1, g_2) \quad (4)$$

$$g_1 = |w - r| \quad (5)$$

$$g_2 = L - g_1 \quad (6)$$

[手順 6] 式 (7) を用い、求めた d を S へ加算若しく

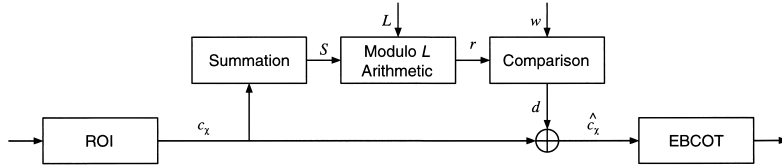


図 3 提案法
Fig.3 Proposed method.

は減算することで、情報 w をサブバンド s_l へ埋める。

$$\hat{S} = \begin{cases} S - d, & r > w \text{ and } g_1 < g_2 \\ S + d, & r > w \text{ and } g_1 \geq g_2 \\ S + d, & r < w \text{ and } g_1 < g_2 \\ S - d, & r < w \text{ and } g_1 \geq g_2 \\ S, & r = w \end{cases} \quad (7)$$

[手順 7] EBCOT 以降の符号化手順に従い、情報が埋められた JP2 符号化列が生成される。

手順 6 において、実際に加減算される対象は、総和 S を構成する量子化係数 c_x である。すなわち、一つ若しくは複数の c_x を操作し、総和 S を \hat{S} に変更する。ここで、操作対象となる c_x の選択、及び、選択された c_x の変更量には、ともに自由度が存在する。

なお、複数のサブバンドを埋込対象サブバンドとする場合、上述の手順を複数のサブバンドへ適用すればよい。本論文では詳細を割愛する。また、ダイナミックレンジが L である整数情報 w_m を M 個、すなわち、 $w = \{w_m \mid m = 1, \dots, M\}$ を入力画像の一つのサブバンド s_l へ埋めることは、 s_l を $B_X \times B_Y$ 個の係数で構成される M 個のブロック $h_l = \{h_{l,m} \mid m = 1, \dots, M\}$ へ分割し、 m 番目のブロック $h_{l,m}$ へ m 番目の情報要素 w_m を埋めることで実現可能である。

3.2 抽出

[手順 1] JP2 復号化手順に従い、情報が埋められた符号化列は EBCOT 復号され、 $3\Lambda + 1$ 個のサブバンド $\hat{s} = \{\hat{s}_l \mid l = 1, \dots, 3\Lambda + 1\}$ が得られる。

[手順 2] 埋込手順 2 に対応するサブバンド \hat{s}_l を一つ選択する。

[手順 3] 式 (8) を用い、 \hat{s}_l に含まれる量子化係数 $\hat{c} = \{\hat{c}_x \mid x = 1, \dots, X_l Y_l\}$ の総和 \hat{S} を求める。

$$\hat{S} = \sum_{x=1}^{X_l Y_l} \hat{c}_x \quad (8)$$

[手順 4] 式 (9) を用い、求めた総和 \hat{S} を情報のダイ

ナミックレンジ L で割った剰余 \hat{r} を求める。

$$\hat{r} = \hat{S} \bmod L, \quad \hat{r} \geq 0 \quad (9)$$

求めた剰余 \hat{r} が埋められた情報 w である。

以上のとおり、提案法では情報が埋められた JP2 符号化列を最後まで復号化することなく、量子化された DWT 係数まで復号化することで情報を抽出可能である。必要であれば、引き続き JP2 復号化手順に基づき、逆量子以降の処理を施すことで、復号画像を得ることができる。

上述の手順から、提案法は埋められた情報の抽出に操作された係数の位置情報を必要としない。また、提案法による情報埋込は、量子化後の整数 DWT 係数値である c_x を整数へ変更するだけであり、符号化手順に何ら影響を与えない。したがって、JP2 画像の標準構造を保持する。このことは、提案法によって生成された JP2 符号化列が、汎用の JP2 復号化器によって復号可能であることを意味する。

3.3 提案法の特徴

提案法の特徴は以下の 3 点である。

(1) 法演算を用いることで、情報埋込によって生じる雑音を抑制する

(2) 整数値情報を量子化 DWT 係数へ直接埋める

(3) 情報埋込のために操作した係数の位置を記憶不要である

特徴 (1) は 3.1 で述べた埋込手順において、手順 4~6 によって実現されている特徴である。これにより、情報埋込によって生じる最大 L の雑音が最大 $L/2$ に抑制される。特徴 (2) は、実数値を埋める相関型情報埋込とは異なり、整数値を整数 DWT 係数へ埋めることを意味する。この特徴によって、情報が埋められた DWT 係数も整数であることが保証され、情報埋込による JP2 符号化への影響が生じなくなっている。

提案法の特徴 (3) として、3.2 で述べたとおり、情報を埋めるために操作した DWT 係数の位置に関する補助情報なしに、埋められた情報を抽出可能である

ことが挙げられる．この特徴は，操作対象係数を制約なく自由に選択可能であることを意味する．3.4では，この自由度を活用し量子化誤差を補償する係数選択アルゴリズムについて述べる．また，JP2 符号化の ROI を考慮した埋込にも適している．例えば，非 ROI に含まれる係数だけを操作することで，情報埋込による画質劣化から ROI を保護することが可能である．逆に，ROI に含まれる係数のみを操作することも可能である．提案法は，ROI，非 ROI のどちらの係数を操作しても埋めた情報を同一の手順で抽出することが可能である．ROI を考慮した情報埋込例は 4. のシミュレーションで示す．

3.4 DWT 係数選択・操作の例

提案法は情報を埋めるために量子化係数 c_χ を選択し，操作するが，3.1 及び 3.3 で述べたとおり，任意の c_χ を選択することが可能である．また，3.1 で述べたとおり，選択した c_χ の変更量に関しても自由度が存在する．本節では，JP2 符号化において DWT 係数を量子化する際に生じる量子化誤差の補償を考慮した，係数選択・操作アルゴリズムについて述べる．情報を埋めた画像の画質は，係数に対する変更量の二乗和に反比例する [18]．したがって，一般に，単一の c_χ に対して $\pm d$ の変更を加える（二乗和： d^2 ）よりも， d 個の c_χ に対してそれぞれ ± 1 の変更を加える（二乗和： d ）方が，情報を埋めた画像の画質は向上する．このことから，本節で述べるアルゴリズムにおいては c_χ の変更量を ± 1 に限定している．

まず，JP2 符号化における量子化とその誤差について述べる．サブバンド s_l に含まれる DWT 係数 $\mathbf{a} = \{a_\chi \mid \chi = 1, \dots, X_l Y_l\}$ は，埋込手順 1 において，通常の JP2 符号化手順に従って量子化される．具体的には，式 (10) のとおり量子化幅 q_l で除算され，式 (11) によって整数へ丸められることで，量子化される．

$$b_\chi = \frac{a_\chi}{q_l} \quad (10)$$

$$c_\chi = \text{fix}(b_\chi) \quad (11)$$

ここで， $\text{fix}(p)$ は実数 p の整数部を返す関数である．このとき，量子化係数 c_χ に対する丸め誤差 e_χ は式 (12) で与えられる．

$$e_\chi = b_\chi - c_\chi \quad (12)$$

この誤差 e_χ は $0 \leq |e_\chi| < 1$ となる．以上のことを考

慮し，本節で述べる情報埋込法は，次のように量子化 DWT 係数 c_χ を選択し，操作する．

サブバンド s_l 内すべての DWT 係数 a_χ について誤差 e_χ を求めた後に， e_χ を降順に並べ換え，その順序を $\chi(k)$ に記憶する．ただし， $k = 1, \dots, X_l Y_l$ ．すなわち， $\chi(1)$ は正の方向へ最も大きい誤差を有する係数の位置を， $\chi(X_l Y_l)$ は負の方向へ最も大きい誤差を有する係数の位置を，それぞれ保持する．埋込手順 6 においては，この $\chi(k)$ をもとに操作する係数を選択する．式 (7) の演算が加算である場合には，以下のように係数を選択し操作する．

```

1:  $k \leftarrow 1$ 
2: while  $k \leq d$  do
3:    $c_{\chi(k)} \leftarrow c_{\chi(k)} + 1$ 
4:    $k \leftarrow k + 1$ 
5: end while

```

逆に演算が減算である場合には，今述べた手順の 3 で，以下のように係数を選択し操作する．

```

3:    $c_{\chi(X_l Y_l - k + 1)} \leftarrow c_{\chi(X_l Y_l - k + 1)} - 1$ 

```

すなわち，このアルゴリズムでは，演算が加算である場合には正の方向に大きな丸め誤差をもつ係数に対して加算し，演算が減算である場合には負の方向に大きな丸め誤差をもつ係数に対して減算する．この埋込アルゴリズムは丸め誤差と情報埋込による誤差との和を低減することが可能であり，したがって，情報を埋めた画像の画質を改善可能である．このことは 4. のシミュレーションによって示す．

4. シミュレーション

本章では，提案法の有効性をシミュレーションによって検証する．シミュレーションに共通な条件を表 2 に示す．本章ではダイナミックレンジ L の整数値 M 個で構成される整数系列 $\mathbf{w} = \{w_m \mid m = 1, \dots, M\}$ を一つの画像へ埋めるものとする．したがって，3.1 で述べたとおり，一つ若しくは複数の埋込対象サブバンドをブロックに分割する．

4.1 法演算による雑音抑制

3.1 で述べた手順 4~6 において，法演算を用いた

表 2 共通シミュレーション条件
Table 2 Common conditions for simulation.

原画像	Lena (512 × 512 画素, 8 ビット濃淡)
DWT フィルタ	CDF 9/7 (JP2 非可逆圧縮標準)
DWT 回数	$\Lambda = 5$ (JP2 標準)
JP2 コーデック	kakadu 4.1.2

雑音抑制が実現されている．この効果を確認するため，法演算を用いない埋込法と比較する．比較法は，式 (7) の代わりに式 (13) を用いる加算法と，式 (14) を用いる減算法の二つである．

$$\hat{S} = \begin{cases} S + g_2, & r > w \\ S + g_1, & r < w \\ S, & r = w \end{cases} \quad (13)$$

$$\hat{S} = \begin{cases} S - g_1, & r > w \\ S - g_2, & r < w \\ S, & r = w \end{cases} \quad (14)$$

ここで， g_1, g_2 はそれぞれ，式 (5)，(6) で与えられるパラメータである．

情報のダイナミックレンジが $L = 4$ である長さ $M = 4096$ の情報系列 w ，すなわち，8192 ビットの情報を，サブバンド HH1 (256 × 256 係数) へ，3.4 で述べた量子化誤差補償アルゴリズムを用いて埋める．ただし，ブロックサイズは JP2 のコードブロックサイズを考慮して $B_X = B_Y = 4$ としている．

ベースステップサイズを $\Delta = 1/2^k, k = 0, 1, \dots, 8$ と変化させたときの情報を埋めた画像の原画像と PSNR を図 4 に示す．なお，情報を埋めずに符号化した場合， $\Delta = 1/256$ のとき 1 画素当たり約 4 ビット (約 4 bpp) まで圧縮され， $\Delta = 1$ のとき約 0.04 bpp になる．図 4 より，式 (7) を用いる提案法は，式 (13) や式 (14) を用いる場合よりも高い PSNR を達成する

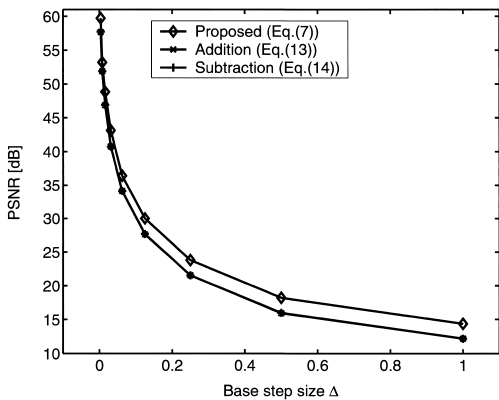


図 4 法演算による画質劣化低減の効果 (情報のダイナミックレンジ $L = 4$ ，情報系列 w の長さ $M = 4096$ ，埋込対象サブバンド HH1)

Fig. 4 Suppressing image degradation by modulo arithmetic (the dynamic range of data to be hidden $L = 4$, the length of an integer sequence $M = 4096$, the subband for hiding data is HH1).

ことが分かる．

4.2 量子化誤差補償による画質改善

3.4 で述べたとおり，提案法は JP2 符号化中の DWT 係数の量子化によって生じる量子化誤差を考慮して，操作する量子化 DWT 係数を選択する．この係数選択・操作アルゴリズムの効果を検証するため，情報を埋めた画像の画質を，操作対象の係数をランダムに選択するアルゴリズムと比較する．

JP2 のデフォルトのベースステップサイズ $\Delta = 1/256$ を用いて量子化した後に，情報のダイナミックレンジが $L = 4$ である情報要素 w_m を M 個含む情報系列 w を，3.1 で述べた手順を用いてサブバンド HH1 (256 × 256 係数) へ埋める．ブロックサイズはブロック数が M となるように，すなわち， $B_X = B_Y = 256/\sqrt{M}$ としている．

$M = 2^{2n}, n = 1, 2, \dots, 8$ ，すなわち， $2^{2n+1}, n = 1, 2, \dots, 8$ ビットの情報を埋めたときの情報を埋めた画像の原画像との PSNR を図 5 に示す．量子化誤差を考慮し，量子化誤差と情報埋込による誤差との和が小さくなるように DWT 係数を選択・操作するアルゴリズム (with QEC) は，ランダムに係数を選択するアルゴリズム (without QEC) より情報を埋めた

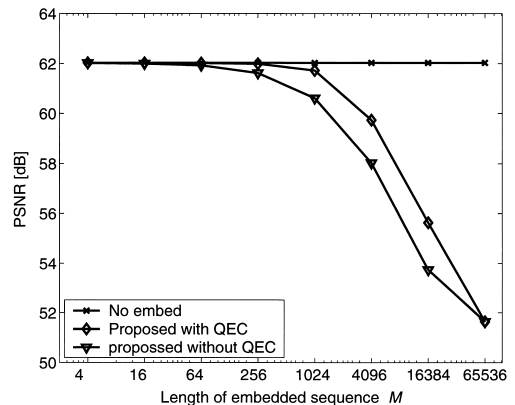


図 5 量子化誤差補償 (QEC) アルゴリズムの効果 (ベースステップサイズ $\Delta = 1/256$ ，情報のダイナミックレンジ $L = 4$ ，情報系列 w の長さ $M = 2^{2n}, n = 1, 2, \dots, 8$ ，ブロックサイズ $B_X = B_Y = 256/\sqrt{M}$ ，埋込対象サブバンド HH1)

Fig. 5 The effectiveness of the proposed quantization error compensation (QEC) algorithm (the base step size $\Delta = 1/256$, the dynamic range of data to be hidden $L = 4$, the length of integer sequence $M = 2^{2n}, n = 1, 2, \dots, 8$, the size of block $B_X = B_Y = 256/\sqrt{M}$, the subband for hiding data is HH1).

画像の画質が高いことが分かる。なお、 $M = 65536$ 、すなわち、 $B_X = B_Y = 1$ の条件下では両アルゴリズムの画質は等しくなる。これは DWT 係数選択の自由度がなくなるためである。ただし、この場合でも法演算によって雑音が抑制されていることに注意されたい。

4.3 埋込情報量の増加

提案法は、一つの入力画像へ $M \log_2 L$ ビットの情報を埋めることが可能であり、 M 及び L を増加することで埋込情報量が増加する。ここで、埋込対象サブバンドを全サブバンドに拡張し、かつ、ブロックサイズを $B_X = B_Y = 1$ とするとき、埋める情報系列 w の長さ M が最大となる。

M を最大に、ベースステップサイズを $\Delta = 1/256$ としたときに、 $L = 2, \dots, 8$ 、すなわち、 w_m が 1~3 ビットの情報を表す条件で情報を埋めた場合の情報を埋めた画像の原画像との PSNR を図 6 に示す。このとき、情報系列 w 全体が表す情報は、それぞれ、262144, 415488.4, 524288, 608679.5, 677632.4, 735931.2, 786432 ビットである。図 6 より、提案法は 786 k ビットの情報を埋めても、約 40 dB の PSNR を有する画像を生成可能であることが分かる。なお、この評価は $B_X = B_Y = 1$ の条件下で行っているため、4.2 で述べたとおり、DWT 係数選択の自由度は

存在しない。この場合でも、情報のダイナミックレンジ L によって埋込情報量と画質とを段階的に制御可能であることが図 6 から分かる。

4.4 ROI を考慮した埋込

3.3 で述べたとおり、提案法は情報埋込のために操作した係数の位置を記憶する必要がない。したがって、操作する係数に対する制約が存在せず、その結果、ROI 若しくは非 ROI へ限定した情報埋込が可能である。図 7 に ROI が設定された画像例を示す。また、図 7 の画像の非 ROI へ情報を埋めた画像例を図 8 に示す。なお、図 7、図 8 では、情報埋込による画質劣化が紙面でも知覚できるようにひずみを強調している。

図 8 に示すとおり、提案法は非 ROI のみへ情報を埋め、ROI の画質を低下させないことが可能である。

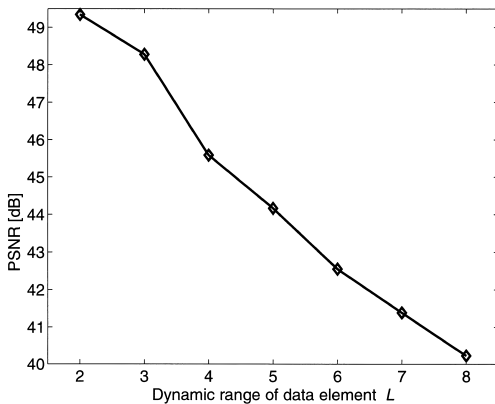


図 6 提案法における情報のダイナミックレンジ L 対情報を埋めた画像の PSNR (ベースステップサイズ $\Delta = 1/256$ 、情報系列 w の長さ $M = 262144$ 、ブロックサイズ $B_X = B_Y = 1$ 、埋込対象サブバンド：全サブバンド)

Fig. 6 The PSNR of image conveying data by the proposed method versus the dynamic range of data to be hidden L (the base step size $\Delta = 1/256$, the length of integer sequence $M = 262144$, the size of block $B_X = B_Y = 1$, all subbands is used for hiding data).



図 7 ROI が設定された画像
Fig. 7 A JP2 coded image with ROI.



図 8 非 ROI への情報埋込
Fig. 8 Hiding data in excepting for ROI.

逆に ROI のみへ情報を埋めることも可能である。なお、情報抽出に操作した係数の位置情報を必要としない提案法では、いずれの場合においても、パラメータの値も含めて完全に同一の手順で情報を抽出可能である。

以上のような性能を有する提案法は、主として

- 法演算による雑音抑制
- 量子化誤差補償アルゴリズムによる画質向上

によって、画質低下を抑制した画像を生成する。同時に、DWT 係数量子化後に情報を埋めるため、量子化による情報の欠損は本質的に存在せず、1 ビットの誤りなく情報を抽出可能である。以上のことは、量子化ベースステップサイズ Δ 、すなわち、ターゲットレートによらない特徴である。

更に、操作した係数の位置情報を必要としないことは、ROI の有無によらず、更には非 ROI への情報埋込、ROI への情報埋込にかかわらず、提案法が有する特徴である。

5. む す び

本論文では、JP2 符号化画像のための情報埋込法を提案した。提案法は、量子化後の DWT 係数へ情報を埋めるため、量子化による情報の欠損が生じず、また、空間領域まで復号することなく EBCOT 復号まで実施すれば情報を抽出可能である。また、整数化された DWT 係数へ整数情報を埋めるため、JP2 符号化に影響を与えず、標準の JP2 復号化器で画像をそのまま復号することも可能である。更に提案法は、情報を埋めるために操作した係数の位置に関する補助情報を用いることなく情報を抽出可能であり、この特徴を画質向上や ROI を考慮した情報埋込に活用することが可能である。

謝辞 本研究の一部は、平成 17 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] Information Technology — Digital Compression and Coding of Continuous-Tone Still Image: Requirements and Guidelines, International Standard ISO/IEC IS-10918-1, 1994.
- [2] Information Technology — JPEG 2000 Image Coding System — Part 1: Core Coding System, International Standard ISO/IEC IS-15444-1, 2000.
- [3] D.S. Taubman and M.W. Marcellin, JPEG 2000: Image Compression Fundamentals, Standards and Practice, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, U.S.A., 2002.
- [4] Information Technology — Coding of Moving Pictures and Associated Audio for Digital Storage Media up to about 1,5 Mbits/s — Part 2: Video, International Standard ISO/IEC IS-11172-2, 1993.
- [5] 安藤勝俊, 小林弘幸, 貴家仁志, “レイヤ構造を利用した JPEG2000 符号化画像へのバイナリデータ埋込み法” 信学論 (D-II), vol.J85-D-II, no.10, pp.1522–1530, Oct. 2002.
- [6] 貴家仁志, “JPEG, MPEG 画像へのバイナリデータの埋込み法” 信学論 (A), vol.J83-A, no.12, pp.1349–1356, Dec. 2000.
- [7] 杉本 修, 川田亮一, 和田正裕, 松本修一, “不可視マーカー信号埋込による自動客観画質評価方式” 信学論 (D-II), vol.J88-D-II, no.6, pp.1012–1023, June 2005.
- [8] 橘 高志, 藤吉正明, 貴家仁志, “放送監視のための非参照型画像電子透かし法” 信学論 (D-II), vol.J86-D-II, no.2, pp.233–241, Feb. 2003.
- [9] M. Kurosaki and H. Kiya, “An efficient error correction scheme allowing backward compatibility with JPEG2000 codestream,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E87-A, no.4, pp.816–822, April 2004.
- [10] D.L. Robie and R.M. Mersereau, “Video error correction using steganography,” EURASIP J. Applied Signal Processing, vol.2002, no.2, pp.164–173, Feb. 2002.
- [11] 岡田浩行, 宋 学燮, 藤田 玄, 尾上孝雄, 白川 功, “電子透かしの MPEG-4 ビットストリームエラー検出への応用” 画電学誌, vol.31, no.5, pp.900–908, Sept. 2002.
- [12] H. Noda, J. Spaulding, M.N. Shirazi, and E. Kawaguchi, “Application of bit-plane decomposition steganography to JPEG2000 encoded images,” IEEE Signal Process. Lett., vol.9, no.12, pp.410–413, Dec. 2002.
- [13] P.-C. Su and C.-C.J. Kuo, “Steganography in JPEG2000 compressed images,” IEEE Trans. Consum. Electron., vol.49, no.4, pp.824–832, Nov. 2003.
- [14] W. Liu, “Data hiding in JPEG 2000 code streams,” Proc. 2004 IEEE ICIP, no.TA-P5.3, pp.1557–1560, Singapore, Oct. 2004.
- [15] 松井甲子雄, 大西淳児, 中村康弘, “ウェーブレット変換における画像への署名データの埋込み” 信学論 (D-II), vol.J79-D-II, no.6, pp.1017–1024, June 1996.
- [16] C.I. Podilchuk and W. Zeng, “Image-adaptive watermarking using visual models,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.16, no.4, pp.525–539, May 1998.
- [17] 宮崎明雄, 椋島良聡臣, “画像の多重解像度解析を利用した電子透かし方式の改良” 信学論 (A), vol.J85-A, no.1, pp.103–111, Jan. 2002.
- [18] M. Fujiyoshi, O. Watanabe, and H. Kiya, “A method of guaranteeing image-quality for quantization-based watermarking using a nonorthogonal transformation,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E88-A, no.6, pp.1434–1442, June 2005.
- [19] D. Taubman, “High performance scalable image com-

pression with EBCOT,” IEEE Trans. Image Process., vol.9, no.7, pp.1158–1170, July 2000.

- [20] Y. Seki, H. Kobayashi, M. Fujiyoshi, and H. Kiya, “Quantization-based image steganography without data hiding position memorization,” Proc. 2005 IEEE ISCAS, no.C2L-R.5, pp.4987–4990, Kobe, Japan, May 2005.
- [21] 関 裕介, 小林弘幸, 藤吉正明, 貴家仁志, “埋込位置の特定を必要としない JPEG 画像へのデータ埋込法,” 信学論 (D-II), vol.J88-D-II, no.10, pp.2037–2045, Oct. 2005.
- [22] C. Christopoulos, J. Askelof, and M. Larsson, “Efficient methods for encoding regions of interest in the upcoming JPEG2000 still image coding standard,” IEEE Signal Process. Lett., vol.7, no.9, pp.247–249, Sept. 2000.
- [23] A. Biglin, P.J. Sementilli, F. Sheng, and M.W. Marcellin, “Scalable image coding using reversible integer wavelet transforms,” IEEE Trans. Image Process., vol.9, no.11, pp.1972–1977, Nov. 2000.

(平成 17 年 5 月 6 日受付, 10 月 3 日再受付,
10 月 31 日最終原稿受付)



関 裕介 (正員)

2003 都立大・工・電子・情報卒。2005 同大大学院工学研究科電気修士課程了。同年, KDDI (株) 入社, 現在に至る。在学中は符号化画像の情報埋込及び通信に関する研究に従事。



貴家 仁志 (正員)

1980 長岡技科大・工・電気電子システム卒。1982 同大大学院修士課程了。同年, 都立大・工・電気助手。2000 同大大学院工学研究科電気教授, 改組により, 2005 首都大・システムデザイン・情報通信システム教授, 現在に至る。工博。1995–1996 豪シドニー大 Visiting Fellow。デジタル信号処理, マルチレート信号処理, 適応フィルタ, 画像処理, マルチメディアセキュリティに興味をもつ。1998–2002 本会と文論文誌 A 編集委員。1998–2000 IEEE 論文誌 Signal Processing 編集委員。著書「高速フーリエ変換とその応用」, 「デジタル信号処理」, 「マルチレート信号処理」, 「よくわかる動画・静止画の処理技術」。映像情報メディア学会, 画像電子学会各会員。IEEE シニア会員。



金 弘林 (学生員)

1987 中国・延邊大・物理・物理卒。1987–2000 中国・延邊農業大・基礎部・物理教研究室に勤務。2000–2001 弘前大大学院理学研究科研究生。2004 同大大学院理学研究科修士課程了。同年, 都立大大学院工学研究科研究生。2005 より, 首都大大学院工学研究科博士後期課程在学中。変換符号化画像へのデータ埋込に関する研究に従事。



藤吉 正明 (正員)

1995 埼玉大・教養・教養卒。2001 同大大学院理工学研究科博士後期課程了。博士(学術)。同年, 都立大大学院工学研究科電気助手。改組により, 2005 首都大・システムデザイン・情報通信システム研究員, 現在に至る。画像処理, セキュア通信, スペクトル拡散通信に興味をもつ。2005 年 5 月より本会誌編集委員, スマートインフォメディア研究専門委員会委員。2001 本会学術奨励賞受賞。映像情報メディア学会, IEEE 各会員。