

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 30 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560458

研究課題名(和文) 情報ハイディングと画質改善法を用いた画像圧縮効率の向上

研究課題名(英文) Improvement of Image Compression Efficiency Using Information Hiding and Image Restoration

研究代表者

野田 秀樹 (NODA, Hideki)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：80274554

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：情報ハイディング技術の新たな応用として、画像情報圧縮への適用に関して検討を行った。JPEG 画像を対象に、エントロピー符号化された色差成分の離散コサイン変換(DCT)係数を輝度成分のDCT係数に埋め込むことによって、圧縮効率の向上を目指した。また、圧縮や埋め込みによる画質劣化を後処理で改善するため、最大事後確率推定を用いた画質改善法も併用した。性能評価実験の結果、色差成分の埋め込みによって一定の圧縮効率の向上が確認できたが、画質改善法の適用の方が効果が大きいことがわかった。また、埋め込みと画質改善法の併用が最も効果的であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：An application of information hiding to image compression is investigated to improve compression efficiency for JPEG color images, where entropy coded discrete cosine transform (DCT) coefficients of chrominance components are embedded into DCT coefficients of luminance components. To recover an image from degradation caused by compression and embedding, an image restoration method based on the maximum a posteriori estimation is also applied. Experimental results show that information hiding improves compression efficiency slightly and image restoration improves it more than information hiding does. It is found that the use of both information hiding and image restoration is most effective to improve compression efficiency.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 通信・ネットワーク工学

キーワード：情報ハイディング 画質改善 画像圧縮 カラー画像 QIM JPEG MAP推定

### 1. 研究開始当初の背景

情報ハイディング技術は、コンテンツに著作権情報などを埋め込む電子透かしや、ダミーのメディアデータに秘密情報などを埋め込むステガノグラフィに用いられている。本研究は、情報ハイディング技術の新たな応用として、画像情報圧縮への適用に関して検討を行うものである。情報ハイディングでは、情報を埋め込んだ後の表向きのメディアデータに不自然さを生じさせないことが望まれる。このような情報ハイディングの特質を損なわない応用として、標準規格の非可逆圧縮カラー画像を対象に、その圧縮効率の向上を目指す。

### 2. 研究の目的

圧縮カラー画像では通常、色情報は RGB (赤, 緑, 青) を線形変換して得られる YCbCr (Y は輝度, Cb と Cr は色差) で表現される。人間は輝度成分に比べて色成分に対する感度が低いことを利用して、CbCr 成分は Y 成分に比べて粗く (低い精度で) 表現される。例えば JPEG では、色差成分に対しては通常、間引き (ダウンサンプリング) を行って圧縮効率を高めている。更に、離散コサイン変換 (DCT) を適用した後、色差成分の DCT 係数は、輝度成分の DCT 係数に比べて粗く量子化される。その後、量子化 DCT 係数はハフマン符号でエントロピー符号化されて JPEG 圧縮画像となる。

本研究では JPEG 画像を対象に、エントロピー符号化された色差成分の DCT 係数を輝度成分の DCT 係数に埋め込む方式を検討する。原カラー画像が入力され、出力として輝度成分のみの圧縮濃淡画像が得られる。埋め込みによって色差成分の情報量は削減できるが、輝度成分の DCT 係数が変化する。それは画質を劣化させ、更に輝度成分の情報量を増加させる場合が多い。従って、JPEG カラー画像の圧縮効率を向上させるためには、埋め込みによる DCT 係数の変化ができるだけ少ない埋め込み法を用いる必要がある。そのためここでは、QIM (Quantization Index Modulation) を用いた埋め込み法を用いる。更に、圧縮や埋め込みによる画質劣化を後処理で改善する、最大事後確率推定 (MAP 推定) を用いた画質改善法の併用についても検討する。

情報ハイディング技術の画像圧縮への適用例として、藤村らの報告 (電子情報通信学会論文誌, vol. J92-D, no. 9, pp. 1672-1676, 2009) がある。その方法では、DCT 係数の内、符号化された直流成分を交流成分に埋め込んでいるため、表向きの出力は交流成分のみからなり、JPEG のフォーマットに合致していない。そのため、表向きは特殊なフォーマットで不自然に見えるため、この方法は情報ハイディングの特質を損なっていると言わざるを得ない。提案法では圧縮濃淡画像中に色情報が埋め込まれているが、表向きは自然

な JPEG 規格の濃淡画像であり、通常の復号器で濃淡画像を復号化できる。藤村らの方式では、埋め込み後の画像フォーマットは JPEG とは異なるため、通常の復号器では復号化できない。

MAP 推定を用いた画質改善法の適用も本研究の特色の一つである。その適用によって、圧縮や埋め込みによる画質劣化が改善され、それは圧縮効率の向上と同じ効果を生む。本研究は圧縮効率の向上が目的であるが、情報ハイディングの一つの利用形態 (濃淡画像は誰でも見ることができるとは、カラー画像は特定の人にだけ許可する) と見ることがもできる。

### 3. 研究の方法

(1) JPEG 画像に対する提案法の処理の流れを図 1 と図 2 に示す。符号化処理の流れを図 1 に、復号化処理の流れを図 2 に示す。処理の順序は番号で示している。CbCr 成分に対する処理の流れは破線で示している。図 1 の符号化では、原カラー画像の色空間を YCbCr に変換した後、Y 成分と CbCr 成分をそれぞれ DCT 変換する。CbCr 成分は、量子化とハフマン符号化されて埋め込み情報となる (図 1 の (3), (4), (5))。Y 成分の量子化時に、QIM を用いて埋め込み情報を埋め込む。その後、Y 成分の量子化 DCT 係数をハフマン符号化して JPEG 濃淡画像を得る。

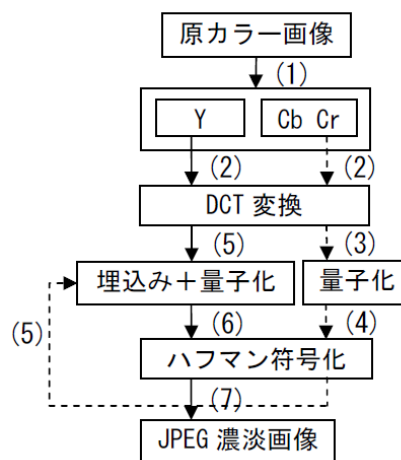


図 1 提案法の符号化処理のブロック図

図 2 の復号化では、JPEG 濃淡画像をハフマン復号化して Y 成分の量子化 DCT 係数を得る。その量子化 DCT 係数から埋め込み情報を抽出する。抽出された情報をハフマン復号化して CbCr 成分の量子化 DCT 係数を得る (図 2 の (3), (4))。Y 成分と CbCr 成分の量子化 DCT 係数を DCT 逆変換する。得られた YCbCr 成分に対して MAP 推定を用いた復元処理 (画質改善) を行う。

提案法で用いる、QIM を用いた DCT 係数へのデータ埋め込み法と MAP 推定を用いた画質改善法については、以降の (2) と (3) で述べる。

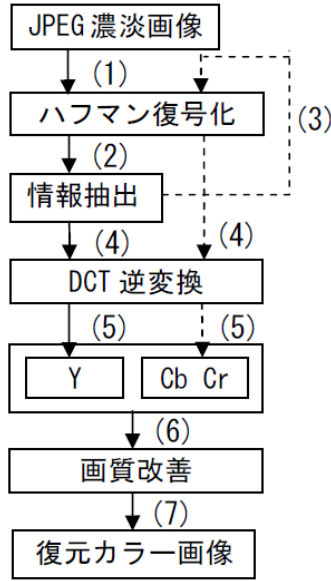


図2 提案法の復号化処理のブロック図

(2) 通常は量子化後の整数値 DCT 係数の値を変化させて埋め込みを行うが、QIM を用いた埋め込みでは、量子化前の実数値 DCT 係数を用いて量子時に行われる。各 DCT 係数に 1 つの 2 元メッセージ  $m \in \{0,1\}$  を埋め込む場合、コードブックが偶数からなる量子化器と奇数からなる量子化器を用意しておく。ここで、実数値 DCT 係数はあらかじめ、通常の JPEG 圧縮を行う際の量子化幅で割っておくとする。0 を埋め込む場合は前者の量子化器を用いて、実数値 DCT 係数に最も近い偶数を量子化 DCT 係数とする。1 を埋め込む場合は後者を用いて、当該 DCT 係数に最も近い奇数を量子化 DCT 係数とする。このアプローチによって埋め込み前後での係数の変化量を抑えることができ、埋め込みによる DCT 係数の変化量の二乗平均は、通常の LSB (Least Significant Bit) 埋め込み法の半分程度に減少する。QIM を用いた埋め込みは、現在のところ、埋め込み容量の大きな埋め込み法の中で、最も画質劣化が少ない方法であると考えられる。

(3) 本研究で用いる画質改善法の概要を述べる。2 次元格子  $L = \{(i,j); 1 \leq i \leq N_1, 1 \leq j \leq N_2\}$  上で定義される原カラー画像を  $x_L = \{x_{ij}; (i,j) \in L\}$ 、その圧縮カラー画像を  $z_L = \{z_{ij}; (i,j) \in L\}$  と表す。YCbCr 色空間での  $(i,j)$  画素の色ベクトル  $x_{ij}$  を、 $x_{ij} = (y_{ij}^x, cb_{ij}^x, cr_{ij}^x)^T$  と表す。ここで、 $y_{ij}^x$  は輝度成分、 $cb_{ij}^x$  と  $cr_{ij}^x$  は色差成分である。 $x_L$  は事後確率  $p(x_L|z_L)$  の最大化、すなわち、MAP 推定によって推定できると考えられる。MAP 推定値  $\hat{x}_L$  は、

$$\hat{x}_L = \arg \max_{x_L} p(x_L|z_L) \quad (1)$$

と表される。ここで、事後確率  $p(x_L|z_L)$  は、

$$p(x_L|z_L) = \frac{p(z_L|x_L)p(x_L)}{\sum_{x_L} p(z_L|x_L)p(x_L)} \quad (2)$$

と表される。 $x_L$  の探索空間は膨大なため、MAP 推定値  $\hat{x}_L$  を直接求めることは、現実的には不可能である。そこで以下、画素毎の局所的な MAP 推定に近似的に分解する。

非可逆圧縮によって生じる、 $(i,j)$  画素の誤差ベクトル  $e_{ij}$  ( $e_{ij} = z_{ij} - x_{ij}$ ) は、平均ベクトルが零ベクトルの i. i. d. (independent and identically distributed) ガウス分布に従うと仮定する。そうすると、 $p(z_L|x_L)$  は

$$p(z_L|x_L) = \prod_{(i,j) \in L} p(z_{ij}|x_{ij}) \quad (3)$$

$$p(z_{ij}|x_{ij}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} |\Sigma_E|^{\frac{1}{2}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (z_{ij} - x_{ij})^T (\Sigma_E)^{-1} (z_{ij} - x_{ij}) \right\} \quad (4)$$

と書ける。ここで、 $\Sigma_E$  は  $e_{ij}$  の共分散行列である。

原画像  $x_L$  のモデルとしてマルコフ確率場 (MRF) モデルを用いる。平均場近似をその根拠として、 $p(x_L)$  は、画素毎の局所条件付確率の積として近似できるとする。

$$p(x_L) \approx \prod_{(i,j) \in L} p(x_{ij}|x_{\eta_{ij}}) \quad (5)$$

ここで、 $\eta_{ij}$  は  $(i,j)$  画素の近傍画素の集合を表す。式(3) と式(5) を用いることによって、式(1) の画像全体の MAP 推定は、近似的に画素毎の局所 MAP 推定に分解できる。

$$\hat{x}_{ij} = \arg \max_{x_{ij}} p(x_{ij}|z_{ij}, x_{\eta_{ij}}) \quad (6)$$

ここで、画素毎の局所事後確率は次式で与えられる。

$$p(x_{ij}|z_{ij}, x_{\eta_{ij}}) = \frac{p(z_{ij}|x_{ij})p(x_{ij}|x_{\eta_{ij}})}{\sum_{x_{ij}} p(z_{ij}|x_{ij})p(x_{ij}|x_{\eta_{ij}})} \quad (7)$$

MRF モデルとして、局所条件付確率が次式で与えられるガウス MRF モデルを用いるとする。

$$p(x_{ij}|x_{\eta_{ij}}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} |\Sigma_X|^{\frac{1}{2}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (x_{ij} - \bar{x}_{\eta_{ij}})^T (\Sigma_X)^{-1} (x_{ij} - \bar{x}_{\eta_{ij}}) \right\} \quad (8)$$

$$\bar{x}_{\eta_{ij}} = \frac{1}{|\mathcal{N}|} \sum_{\tau \in \mathcal{N}} x_{ij+\tau} \quad (9)$$

ここで、 $\bar{x}_{\eta_{ij}}$  は、近傍画素の色ベクトル  $x_{\eta_{ij}} = \{x_{ij+\tau}, \tau \in \mathcal{N}\}$  の平均を表す。 $\mathcal{N}$  は  $(0,0)$  画素の近傍を表す。例えば、1 次近傍の場合、 $\mathcal{N} = \{(0,1), (0,-1), (1,0), (-1,0)\}$  であり、 $\tau = (0,1)$  ならば  $x_{ij+\tau} = x_{ij+1}$  である。 $\Sigma_X$  は  $x_{ij} - \bar{x}_{\eta_{ij}}$  の共分散行列である。

局所事後確率  $p(x_{ij}|z_{ij}, x_{\eta_{ij}})$  が 2 つのガウス分布、式(4) の  $p(z_{ij}|x_{ij})$  と式(8) の  $p(x_{ij}|x_{\eta_{ij}})$

の積に比例することから、局所 MAP 推定値  $\hat{x}_{ij}$  は、

$$\hat{x}_{ij} = (\Sigma_E^{-1} + \Sigma_X^{-1})^{-1} (\Sigma_E^{-1} z_{ij} + \Sigma_X^{-1} \bar{x}_{\eta_{ij}}) \quad (10)$$

で得られる。ただし、 $(i, j)$  画素に対して式 (10) を計算するには、その近傍画素の色ベクトル  $x_{\eta_{ij}}$  が必要である。このような問題の解は、繰り返し処理で求めるのが現実的である。 $p$  を繰り返し回数として、解の更新式は

$$x_{ij}^{(p+1)} = (\Sigma_E^{-1} + \Sigma_X^{-1})^{-1} (\Sigma_E^{-1} z_{ij} + \Sigma_X^{-1} \bar{x}_{\eta_{ij}}^{(p)}) \quad (11)$$

と書ける。初期値  $x_{ij}^{(0)}$  は、与えられた圧縮画像の色ベクトルとする。色差成分がダウンサンプリングされている場合は、補間してアップサンプリングされた値を用いる。

#### 4. 研究成果

実験には、 $512 \times 512$  画素、1 画素あたり 24 ビット (24bpp) で表現された、4 枚の標準カラー画像 (Lena, Mandrill, Milkdrop, Peppers) を用いた。提案法の性能を評価するために、画質評価実験を行った。ここでは、以下の 4 種類の画像に対して PSNR 値 (ピーク信号対雑音比の値) を求めた。

- (a) 通常の JPEG カラー画像
- (b) 色差成分が埋め込まれた濃淡画像から色差成分を抽出して復元したカラー画像
- (c) (a) に MAP 推定を用いた画質改善法を適用した画像
- (d) (b) に MAP 推定を用いた画質改善法を適用した画像

JPEG カラー画像の品質係数 (画質を制御する係数) は、50 から 90 まで 5 刻みで変化させた。

4 枚の標準画像に対する実験結果を図 3 に示す。図の横軸は bpp (bit per pixel) 値、縦軸は PSNR 値である。4 本の線は、(a) から (d) の画像に対する結果を表し、各線の左端は品質係数 50 の場合、右端は品質係数 90 の場合の結果である。(a) の線よりも上にある部分は、同一の bpp で PSNR が大きい (あるいは、同一の PSNR では bpp が小さくなる) ため、圧縮効率が向上していることになる。(a) と (b) を比べると、Peppers 以外では、(b) の方が (a) よりも上にある場合が多く、色差成分の埋め込みによって、一定の圧縮効率の向上が実現できていることがわかる。(a) と (c) を比べると、全ての画像において PSNR が向上している。特に Mandrill 以外ではかなり大きく PSNR が向上しており、大きな圧縮効率の向上に相当していることがわかる。一般的に (Mandrill 以外では) 埋め込みよりも画質改善法の適用の方が圧縮効率向上の効果が大きいことがわかる。(c) と (d) を比べると、殆ど (d) の方が (c) よりも上にあり、埋め込みと画質改善法の併用が最も効果的であることがわかる。

提案法によってどの程度 bpp 値が減少するかを述べる。Lena 画像の場合について、PSNR 値が 34dB の水平線にそって見てみると、埋め込みによって 0.07bpp 程度、画質改善法の適用によって 0.19bpp 程度、埋め込みと画質改善法の併用によって 0.27bpp 程度の削減が達成できていることがわかる。

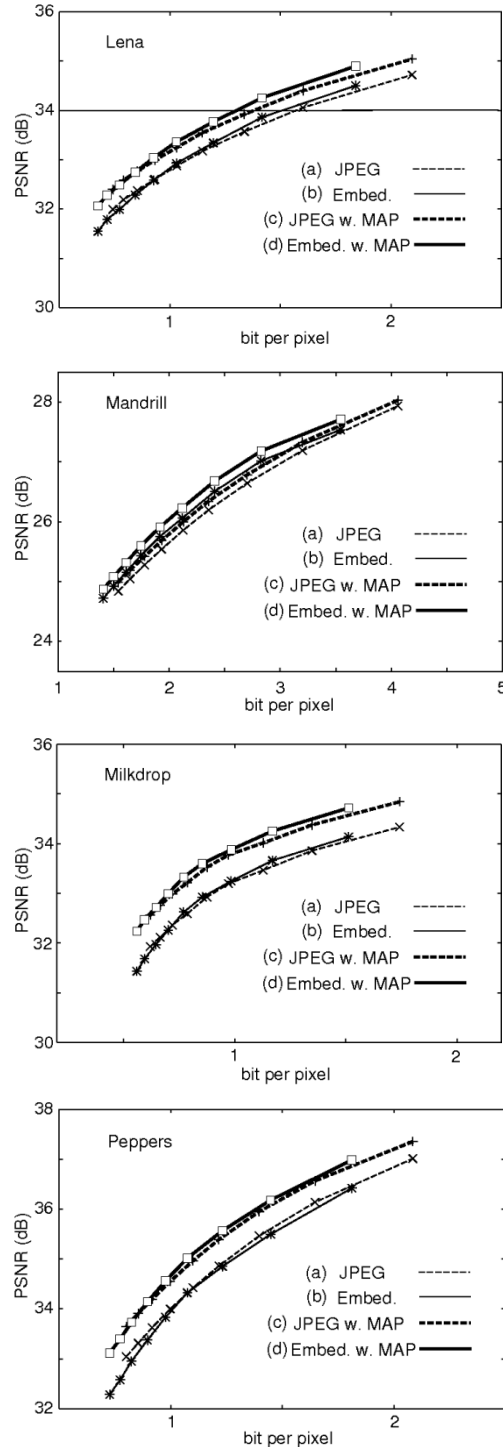


図 3 4 枚の標準画像に対する実験結果

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 梶谷冬樹, 新見道治, 野田秀樹: “可逆的情報ハイディングを利用した JPEG 画像のプライバシー保護”, 画像電子学会誌, 査読有, vol. 43, no. 1, pp. 21-27 (2014).  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/40020002421>
- ② K. Yamawaki, F. Nakano, H. Noda and M. Niimi: “Improvement of JPEG compression efficiency using information hiding and image restoration”, IEICE Trans. Information and Systems, 査読有, vol. E96-D, no. 5, pp. 1233-1237 (2013). DOI:10.1587/transinf.E96.D.1233
- ③ 山脇和美, 小波泰之, 野田秀樹, 新見道治: “JPEG 画像を対象とする現実的なステガナリシスに関する検討”, 電子情報通信学会論文誌, 査読有, vol. J94-A, no. 6, pp. 434-437 (2011).  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008662097>
- ④ H. Noda and M. Niimi: “Local MAP estimation for quality improvement of compressed color images”, Pattern Recognition, 査読有, vol. 44, no. 4, pp. 788-793 (2011). DOI:10.1016/j.patcog.2010.10.022

[学会発表] (計17件)

- ① 藤本明工, 新見道治, 野田秀樹: “拡張現実感を利用した建物内ナビゲーションシステムの開発”, 信学技報, vol. 113, no. 480, EMM2013-105, pp. 33-38, 2014年3月7日, 北陸先端大学.
- ② 石原敬之, 新見道治, 野田秀樹: “QRコードと互換性を持つ改ざん検出可能な二次元コード”, 信学技報, vol. 113, no. 480, EMM2013-106, pp. 39-44, 2014年3月7日, 北陸先端大学.
- ③ 新見道治, 野田秀樹: “Wet Paper 符号を利用した QR コードへの情報重畳”, 信学技報, vol. 112, no. 467, EMM2012-107, pp. 1-6, 2013年3月7日, ATR.
- ④ 梶谷冬樹, 新見道治, 野田秀樹: “再符号化に耐性を持つ可逆的情報ハイディングを利用した JPEG 画像のプライバシー保護”, 信学技報, vol. 112, no. 467, EMM2012-108, pp. 7-12, 2013年3月7日, ATR.
- ⑤ M. Niimi, F. Masutani and H. Noda: “Protection of privacy in JPEG files using reversible information hiding”, Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, pp. 441-446 (2012-11-06), New Taipei City, Taiwan.

- ⑥ K. Yamawaki, F. Nakano, H. Noda and M. Niimi: “Improvement of JPEG compression efficiency using information hiding and image restoration”, Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, pp. 436-440 (2012-11-06), New Taipei City, Taiwan.
- ⑦ 中野史也, 山脇和美, 野田秀樹, 新見道治: “情報ハイディングと画質改善法を用いた JPEG カラー画像の圧縮効率の改善”, 信学技報, vol. 111, no. 496, EMM2011-64, pp. 1-5, 2012年3月16日, 大阪大学.
- ⑧ 梶谷冬樹, 新見道治, 野田秀樹: “可逆的情報ハイディングを利用した JPEG 画像のプライバシー保護”, 信学技報, vol. 111, no. 496, EMM2011-69, pp. 31-36, 2012年3月16日, 大阪大学.
- ⑨ M. Niimi and H. Noda: “An application of steganalysis based on sparse code shrinkage to watermarking attack”, Proceedings of 2012 International Workshop on Advanced Image Technology, pp. 616-621 (2012-01-09), Ho Chi Min, Vietnam.
- ⑩ 新見道治, 野田秀樹: “スパースコード縮小に基づくステガナリシスの電子透かしアタックへの応用”, 信学技報, vol. 111, no. 334, EMM2011-58, pp. 13-18, 2011年12月9日, 機械振興会館.
- ⑪ M. Niimi and H. Noda: “An application of sparse code shrinkage to image steganalysis based on supervised learning”, Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, pp. 1981-1984 (2011-9-13), Brussels, Belgium.
- ⑫ 野田秀樹: “サイド情報を利用する情報ハイディング”, 信学技報, vol. 111, no. 74, EMM2011-1, pp. 1-6, 2011年5月30日, 国立情報学研究所.

[図書] (計1件)

- ① M. Niimi and H. Noda, “Introduction to Image Steganography and Steganalysis”, Multimedia Information Hiding Technologies and Methodologies for Controlling Data, IGI Global, pp. 209-237 (2012).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野田 秀樹 (NODA, Hideki)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号: 80274554