

ウェーブレットを利用した著作権保護のための画像符号化

大西 淳 児[†] 松井 甲子雄[†]

この論文では、多階調のデジタル画像に8階調の署名画像を埋め込む方法を提案する。その原理はウェーブレット変換によって得られる多重解像度表現を利用して原画像に3ビットの署名画素情報を埋め込む。この署名は再生画像の中に密かに分散して埋め込まれる。もし署名者が必要とするならば、原画像をキーとして再生画像から差分をとればウェーブレット変換により署名画素情報を正確に再現することができる。この際に、再生画像に何らかの手を加えた痕跡も検出することが可能となる。しかし、この再生画像から署名情報を盗視しても画素単位の局所性から署名画像を復元できない。したがって、原画像の安全な保管さえ保証されれば、この方法はデジタル画像に著作権を表示する簡易な手段を提供し、マルチメディアにおける著作権保護に役立つものと思われる。

Image Coding for Copyright Protection by Using Wavelet

JUNJI ONISHI[†] and KINEO MATSUI[†]

In this paper, we propose how to embed a gray-scaled seal image into a picture under wavelet transform. We use the relationship between both the multi-resolution representations of the original and the embedded pictures for our method. A pixel of the seal image is expressed in three bits and is added to each element of multi-resolution representations, respectively. When these are transformed inversely, the information of the seal are dispersed on the reproduced picture and cannot be recognized at sight. If the author wants to get it, he can extract the seal from the embedded picture by subtracting the original picture, exactly. At the same time, some vestiges of seal are detected when somebody tried to change or delete it. We can use our method as a copyright protection tool for multimedia.

1. ま え が き

ネットワーク上を伝送される画像を始め、多くの流通画像にはその著作権に関する情報は含まれていない。したがって、その取扱いは、利用者の良識にまかされている。また商用デジタル画像の著作権情報は別のファイルで管理することが多い。マルチメディア技術の発展にともない、映像情報の処理と伝送が容易になるにつれ、その著作権保護のための手段が必要になってくる^{1)~3)}。その手段として、すでに二、三の方法が提案されている。まず、画像の中に文字を埋め込む方法⁴⁾では、多重解像度のクラス数が少なく、文字ビットの秘匿効果が低い欠点がある。また、画像に二値のシールを埋め込む方法⁵⁾では、その原理を察知されると、第三者に自動的に再現できる弱点を内包している。

一方、近年ウェーブレット変換を用いた符号化方式が種々の特徴を有する方法として注目されている。画

像信号にウェーブレット変換を行うことにより、画像全体を解像度の異なる成分に分割し表す多重解像度表現が得られ、それぞれの解像度信号に対して視覚特性にあった処理を行うことができる。また、画像全体をブロックに分割する処理を行わないため、離散コサイン変換などのブロック処理を行う符号化のようにブロック歪を生じることなく、視覚的に優れた復元画像を得ることができる。

そこで、この論文ではウェーブレット変換を利用して、画像の著作権保護のために署名として階調数の低い画像を用いて秘匿効果を上げた埋め込み法を提案する。この方法ではデジタル画像に著作権を示す8階調の署名画像を埋め込み公開する。一方、作者のみが所持しているオリジナル画像を鍵として秘匿保管する。まず、署名情報に従って直交ウェーブレット変換で生成される3種類の多重解像度表現(これをLH成分、HH成分、HL成分と呼ぶ)を操作する。この処理はラジオなどのアナログ信号の変調に相当する。この処理済データをウェーブレット逆変換し、画像を再構成する。それを流通用の画像とする。この画像は原画像

[†] 防衛大学校情報工学科

Department of Computer Science, National Defense Academy

とはほ同じに見え、第三者に署名画像を察知され難い。もし、署名画像を必要とするならば、オリジナルの鍵画像と流通用画像から容易に署名画像を再現することができる。流通用画像になんらかの不正な工作がなされた場合には、この検証過程でその証拠が顕在化するので、不正ユーザの発見に寄与するものと考えられる。

以下、2章ではウェーブレット変換の概要とその特徴を述べる。3章では画像に署名情報を合成する方法を具体的に述べる。4章では、標準画像を用いて実験を行った結果を示し、検討する。

2. ウェーブレットの局所的な考察

提案する手法ではウェーブレット変換によって階層化された画像信号に対して署名を埋め込むための符号化処理を行う。この階層化の理論は多重解像度解析として Mallat により考案された⁶⁾。

まず、次のような階層化された空間 V_i を仮定する。
 $\dots \subset V_{-2} \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset V_2 \dots$ (1)

ここで、 V_i は次のような性質を持つ。

信号として時間 x の $f(x)$ 関数を考える。もし、 $f(x) \in V_i$ ならば $f(2^n x) \in V_{i+n}$ となる。 W_i を V_i における直交補空間とすると

$$W_i \oplus V_i = V_{i+1} \quad (2)$$

と書ける。したがって、 W_i は V_i から V_{i+1} を構成する際に必要な詳細部分を表している。

上式を再帰的に使用すると次式が得られる。

$$V_{i+1} = W_i \oplus W_{i-1} \oplus \dots \quad (3)$$

これは、ある解像度の空間はその詳細部分の和として表すことができることを示している。

この論文では、ウェーブレットの直交基底として計算が比較的簡単なハール基底を選ぶ。ハール基底に対応する直交ウェーブレット関数は次のように与えられる。

$$\psi(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x < 1/2 \\ -1 & 1/2 \leq x < 1 \\ 0 & \text{その他} \end{cases} \quad (4)$$

また、そのときのスケール関数は、次のようになる。

$$\phi(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x < 1 \\ 0 & \text{その他} \end{cases} \quad (5)$$

これを2次元画像に適用した例を図1に示す。2x2画素からなる原画像の画素値を I_i ($i = 1, 2, 3, 4$) で同図(a)のように表す。これをウェーブレット変換すると同図(b)となる。このとき、各領域のウェーブレット係数は

I_0	I_1
I_2	I_3

(a) Original image(V_0)

w_0	w_3
w_1	w_2

(b) Results of wavelet transform

図1 2次元のウェーブレット変換
 Fig.1 Two-dimensional wavelet transform.

$$\begin{bmatrix} w_0 \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

となる。 w_0 は、多重解像度近似 (MRA) と呼ばれ、原画像のスケールを半分にした近似画像を表している。 w_1, w_2, w_3 は多重解像度表現 (MRR) と呼ばれ、それぞれ画像の詳細部分を表している。これらの要素は画像の輝度成分の変化を意味しており、互いに深い関係がある。そこで、この3つの領域の成分を1つにまとめて $\mathbf{w} = (w_1, w_2, w_3)$ で表し MRR ベクトルと呼ぶことにする。

この MRR ベクトルの3つの要素にそれぞれ a, b, c の任意の値を加算してみよう。すなわち、 $\mathbf{w}' = (w_1 + a, w_2 + b, w_3 + c)$ を考える。これをウェーブレット逆変換して、画像に復元したとき、原画にノイズを加えたことと同じ効果が現れる。たとえば、式(6)の逆変換により画像を再構成すると図2(a)になる。そこで、原画像図1(a)を保持しているならば、図2(a)の再構成画像からそれを差し引くと、MRR ベクトルの要素に加えられた未知の値を図2(b)のように推定することが可能となる。また、この際 (a, b, c) が原画像へ与える影響は、その値の大きさに依存する。この操作で利用したエッジ部分におけるノイズは人間にとって検知され難いため、この値が小さければ人間の視覚感覚に対する影響はほとんどないと考えられる。次章ではこの特徴を巧みに利用して多値の署名画像を埋め込む方法を具体的に示す。

I_0+ $a+b+c$	I_1+ $a-b-c$
I_2+ $-a-b+c$	I_3+ $-a+b-c$

(a) Composed picture

$a+b+c$	$a-b-c$
$-a-b+c$	$-a+b-c$

(b) Difference picture

図2 再構成画像とウェーブレット係数の関係

Fig. 2 The relationship between a picture and wavelet coefficients.

3. 署名画像の埋込み方法

この論文の目的は、多値画像データに署名画像を合成することにある。署名が合成されることによって画像自身に著しい画質劣化があっては好ましくない。そこで、画質劣化を防ぐために、人間の視覚特性とウェーブレット変換によって出力される係数の特性を利用する。一般に、人間の眼は周波数の高い領域におけるノイズを見逃しやすく、平坦部分すなわち周波数の低い領域でのノイズを検知しやすい。ウェーブレット変換出力のMRR成分は画像の高周波部分を表しており、MRA部分は画像の低周波部分に相当する。そこで、本手法では署名情報を記録するために、第三者に察知されにくい画像の高周波部分を利用することを試みる。すなわち、MRR成分に対して署名情報を埋め込むことを考える。まず、 256×256 画素からなる入力画像を G 、 128×128 画素の埋め込み用の署名画像を S とする。また、その画素をそれぞれ $g(i, j) \in G$ ($0 \leq g(i, j) \leq 255$) および $s(i, j) \in S$ ($0 \leq s(i, j) \leq 7$) とする。ここに、 $i, j = 0, 1, \dots, 255$ かつ $k, l = 0, 1, \dots, 127$ である。さらに、入力画像をハール基底により直交ウェーブレット変換して得られる1階層目のMRAの要素を $w_0(k, l)$ で表し、MRRの要素をベクトル形式で

$$\mathbf{w}(k, l) = [w_1(k, l) \quad w_2(k, l) \quad w_3(k, l)] \quad (7)$$

$$(k, l = 0, 1, \dots, 127)$$

とおく。このときLL, LH, HH, HLの各領域のウェーブレット係数は次式により求められる。

$$\begin{bmatrix} w_0(k, l) \\ w_1(k, l) \\ w_2(k, l) \\ w_3(k, l) \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \mathbf{H} \begin{bmatrix} g(2k, 2l) \\ g(2k+1, 2l) \\ g(2k, 2l+1) \\ g(2k+1, 2l+1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{ただし, } \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \text{ とする.}$$

また、署名情報 $s(k, l)$ を次式のように表す。

$$s(k, l) = [2^2 \quad 2^1 \quad 2^0] \begin{bmatrix} y_1(k, l) \\ y_2(k, l) \\ y_3(k, l) \end{bmatrix} \quad (9)$$

ただし、 $y_i(k, l)$ は0または1の2値をとるものとする。この署名情報に従って、次式により $\mathbf{w}'(k, l) = [w_1'(k, l) \quad w_2'(k, l) \quad w_3'(k, l)]$ を求める。

$$\mathbf{w}'(k, l) = \mathbf{w}(k, l) + \mathbf{y}(k, l) \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{y}(k, l) = [y_1(k, l) \quad y_2(k, l) \quad y_3(k, l)]$ とする。

式(2)から $w_0'(k, l) \leftarrow w_0(k, l)$ とにおいて、画像を再構成する。すなわち流通用の公開画像 G' を式(11)で作成する。ただし、 $g'(i, j) \in G'$ である。

$$\begin{bmatrix} g'(2k, 2l) \\ g'(2k+1, 2l) \\ g'(2k, 2l+1) \\ g'(2k+1, 2l+1) \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} w_0'(k, l) \\ w_1'(k, l) \\ w_2'(k, l) \\ w_3'(k, l) \end{bmatrix} \quad (11)$$

以上の操作により署名情報を含んだ画像が作成される。この画像から署名情報 S を取り出すには鍵としてオリジナルの画像が必要である。画像 G' から画像 G を求めることは難しく、また、故意に画像 G' に手を加えると署名情報自身にもその痕跡が現れる。なぜならば、 $g'(i, j)$ から $\mathbf{w}'(i, j)$ を求めて、 $y_i(k, l)$ を推定分離しても、その画素情報を署名画像に再構成するには、膨大な計算量と何が署名かという手がかりを必要とするからである。

次に、画像の署名を検証する手順をまとめておく。上記のアルゴリズムから署名情報はオリジナル画像 G および流通画像 G' との差分データを算出することにより求めることができる。差分データは式(8)、式(10)、式(11)より

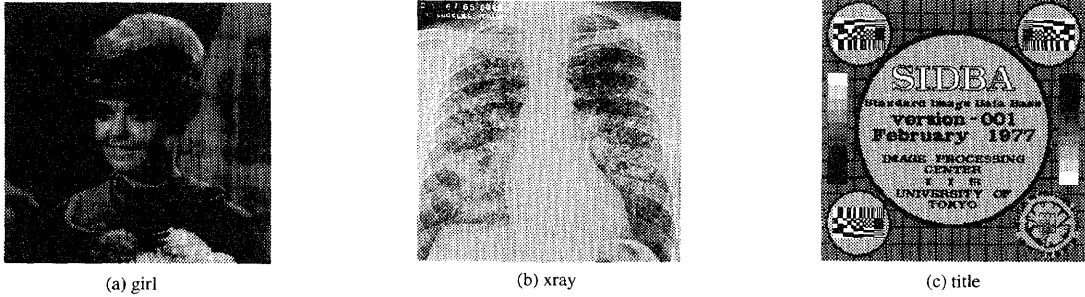


図3 テスト画像

Fig. 3 Test pictures (from SIDBA).

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} g'(2k, 2l) & -g(2k, 2l) \\ g'(2k+1, 2l) & -g(2k+1, 2l) \\ g'(2k, 2l+1) & -g(2k, 2l+1) \\ g'(2k+1, 2l+1) & -g(2k+1, 2l+1) \end{bmatrix} \\
 &= \mathbf{H} \begin{bmatrix} w'_0(k, l) - w_0(k, l) \\ w'_1(k, l) - w_1(k, l) \\ w'_2(k, l) - w_2(k, l) \\ w'_3(k, l) - w_3(k, l) \end{bmatrix} \quad (12) \\
 &= \mathbf{H} \begin{bmatrix} 0 \\ y_1(k, l) \\ y_2(k, l) \\ y_3(k, l) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$



図4 署名画像

Fig. 4 Seal picture (128 × 128 pixels).

の関係を満たしているので、容易にベクトル $\mathbf{y}(k, l)$ を求めることができる。さらに署名情報 $s(k, l)$ は式 (9) から復元することができる。

4. 実験結果

前述の手順を用いて多値画像に署名情報を埋め込み、多値画像にどの程度影響を及ぼしているか調べてみた。多値画像 G には、標準画像データベース (SIDBA) の girl, xray, title (図3) を用いた。その結果を次に示す。

まず、画像の高周波部分は圧縮のためにその大部分を削除することが多いため、多重解像度表現部分を式 (13) により量子化する。

$$w_i \leftarrow \text{int}(w_i/q) \quad (13)$$

ただし、式中の $\text{int}(\cdot)$ は整数化処理、 q は量子化ステップサイズを表す。

この処理を行った後、3章の手順により各対象画像に対して図4の署名情報を埋め込む。その結果出力される画像を図5に示す。このとき、そのS/N比は表1になる。S/N比は量子化ステップが大きくなる

表1 出力画像の画質

Table 1 S/N ratios between input and output pictures under quantization control.

q	girl	xray	title
1	42.68	42.66	43.96
2	38.08	38.06	39.20
3	34.71	34.49	35.38
4	32.41	30.47	33.08

(dB)

につれ劣化する。しかし、この実験結果では、署名が埋め込まれていることに気づかれる可能性は低いと思われる。また、圧縮符号化した際に、署名の埋め込みがどの程度画像に影響するか調査した。図6は、署名情報を含まない多重解像度表現部分の係数と署名を含む場合の係数の分布である。署名情報の合成により、分布のばらつきが少し広がるのが分かる。したがって、署名を合成すれば圧縮の効果が若干低下すると考えられる。

一方、量子化されたデータから署名画像を検出するには逆量子化による影響を考慮しなくてはならない。式 (10), (12), (13) から署名画素情報と差分データとの関係は

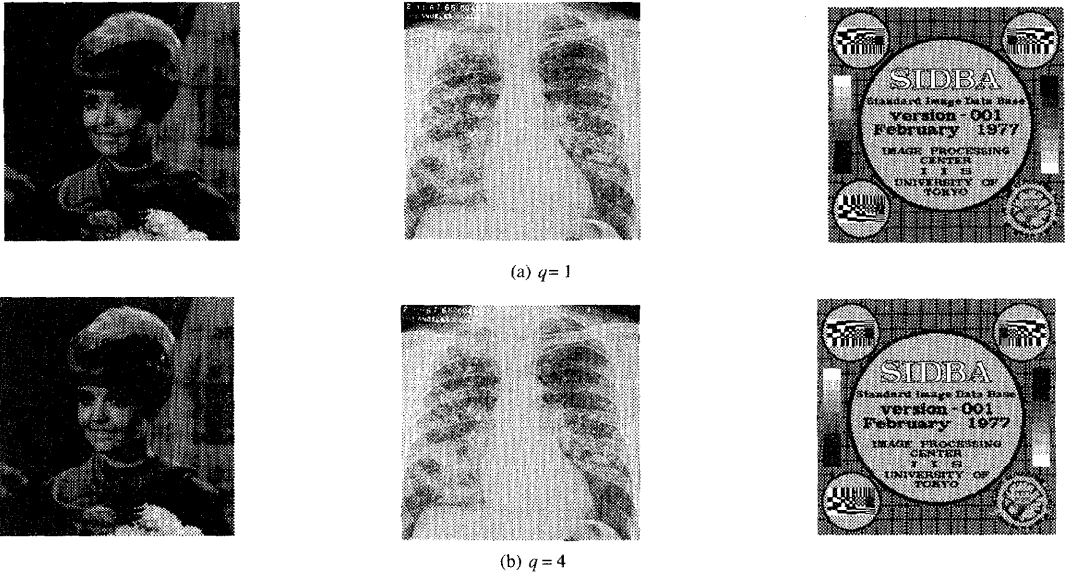


図5 署名を含んだ画像
Fig. 5 Signed output pictures under quantization control.

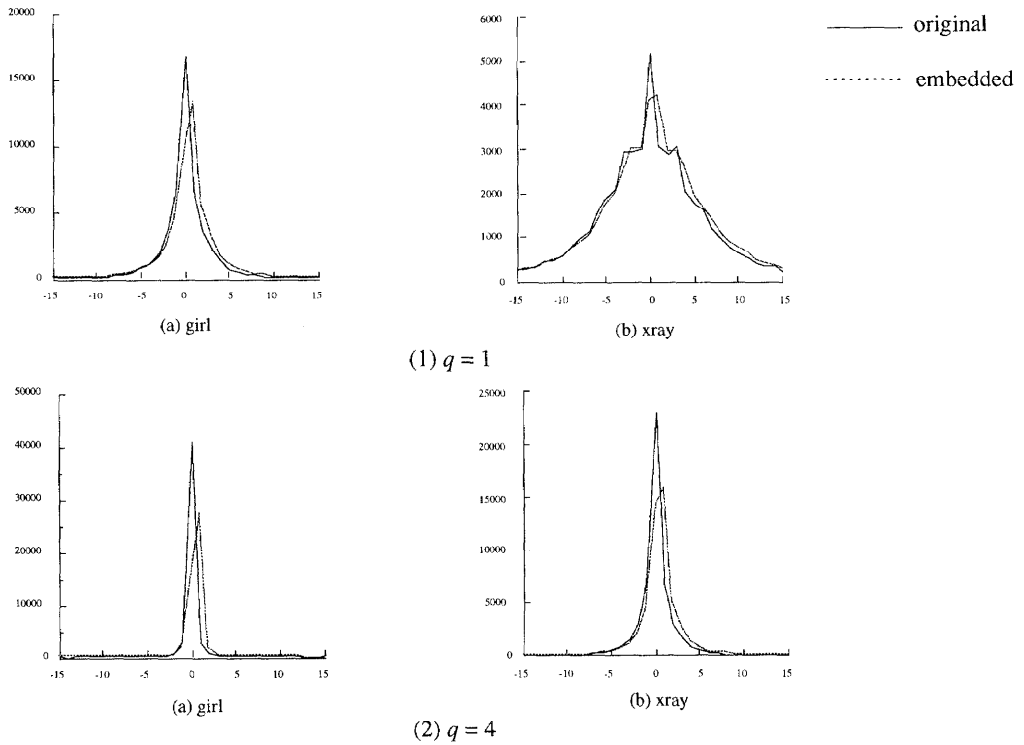


図6 ウェーブレット係数の分布
Fig. 6 Distribution of wavelet coefficients.

$$\begin{bmatrix} g'(2k, 2l) & -g(2k, 2l) \\ g'(2k+1, 2l) & -g(2k+1, 2l) \\ g'(2k, 2l+1) & -g(2k, 2l+1) \\ g'(2k+1, 2l+1) & -g(2k+1, 2l+1) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$= q \cdot \mathbf{H} \begin{bmatrix} 0 \\ y_1(k, l) \\ y_2(k, l) \\ y_3(k, l) \end{bmatrix}$$

を満たす。この式を利用すれば、量子化を行わない場合と同様に署名情報を取り出すことが可能である。

最後に、署名削除などの攻撃を受けた場合について考える。提案手法では、有限回の計算で署名情報のすべての組合せを検出することが可能である。しかし、署名情報が画像であるため、攻撃によっても、その画像を特定できなければ、各画素値が何であるかを決められない。結局、人間が推定せざるをえない。しかも、外見では署名画像と思われるものは複数検出されるために、正確な署名画像を断定することは困難であると考えられる。さらに、故意に画像に手を加えたとしても、画質に大きな影響を及ぼす可能性がある。逆に、画質に影響の少ない範囲で偽造しても、署名情報にダメージを与えることになるため、署名者が容易に著作権侵害の不正行為を見抜くことが可能である。したがって、提案する署名法は著作権保護の役割を十分に果たすための実用可能なセキュリティ強度を持っていると考える。

5. むすび

この論文では、多値画像をウェーブレット変換する際に、対象画像にその著作権等を表示する署名情報を埋め込む方法を提案した。その方法は、ウェーブレット変換によって得られる多重解像度表現部分を、署名情報に従ってデジタル変調するものである。この方法では、画質を大きく低下させることなく、署名情報を埋め込むことができる。署名情報を確認するには、原画像と署名情報を含んだ画像との差分データを求めることで、容易に取り出すことができる。復号された署名情報は著作者が秘密裏に保管している署名と比較してまったく劣化していない。したがって、第三者が署名を改ざんすれば、簡単にその不正行為を見抜くことができる。ただし、この署名法では正規ユーザに対して署名を合成した画像データをエラーなくそのまま配布する必要がある。また、署名情報の改ざんや消去を防止するために、著作権所有者が他に漏れないように

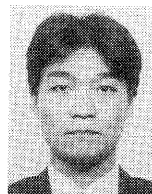
原画像および署名情報を保管することも重要である。今後は、実システムに組み込む際に考えられるデータ欠損対策やデータ圧縮に対する配慮、さらに高画質を維持できる署名法について検討する予定である。

参考文献

- 1) 小池範行, 松本 勉, 今井秀樹: デジタル画像の著作権保護方式, SCIS93, 13C (1993).
- 2) 半田正夫: 転機にさしかかった著作権制度, 一粒社 (1994).
- 3) 辻井重男: 総論—文明構造の変革と情報セキュリティ, テレビジョン学会誌, Vol.49, No.12, pp.1561–1566 (1995).
- 4) 大西淳児, 中村康弘, 松井甲子雄: ウェーブレット変換によるカラー画像への署名の埋め込み, 第23回年次大会, *Visual Computing '95*, pp.45–46 (1995).
- 5) Ohnishi, J. and Matsui, K.: Embedding a Seal into a Picture under Orthogonal Wavelet Transform, *IEEE Multimedia Systems '96, Proc. International Conference on Multimedia Computing and Systems*, pp.514–621 (1996).
- 6) Mallat, S.: Multifrequency Channel Decompositions of Images and Wavelet Models, *IEEE Trans. Acoustics Speech and Signal Processing*, Vol.37, No.12, pp.2091–2110 (1989).

(平成8年9月30日受付)

(平成8年12月5日採録)



大西 淳児

1968年生。1991年防衛大学校電気工学科卒業。1996年同大理工学研究科オペレーションズ・リサーチ専攻修士課程修了。現在、同大情報工学科研修生。著作権保護のための画像符号化について研究中。電子情報通信学会会員。



松井甲子雄 (正会員)

1939年生。1961年防衛大学校電気工学科卒業。1965年九州大学大学院工学研究科電子専攻了。1981年防衛大学校電気工学科教授。1989年同大情報工学科教授。この間暗号学、情報セキュリティ、画像データの符号化に関する研究に従事。著書「画像深層暗号」(森北出版)。工学博士。電子情報通信学会、画像電子学会、日本TV学会各会員。