

等価信号変換によるカラー画像への電子透かし

ウイセツスト ピヤピスト[†] 松井 甲子雄[†]

この論文では、カラー画像の表示方式である RGB 表色系と YC_bC_r 表色系との間の色変換に着目し、デジタルデータの著作権保護のために、静止カラー画像に電子透かしを埋め込む一方法を提案する。その原理は、まず、各画素ごとに RGB 色信号を YC_bC_r 信号に変換するための色信号変換行列に透かし情報を付加する。この改訂変換行列を用いて YC_bC_r を求める。逆に、 YC_bC_r 信号から RGB 色信号にもどす際には公知の逆色信号変換行列を用いる。この方法によるとカラー画像の各画素に 1 ビットの透かし情報を埋め込むことができる。この透かし情報は原画像情報を所有する者のみが統計的に復号可能であり、また画像の切り抜きや標準 JPEG 圧縮、上書き攻撃、StirMark 攻撃などにも耐性を持つことを示す。

Digital Watermarking to Color Image by Equivalent Signal Transform

WISETSUIT PIYAPISUIT[†] and KINEO MATSUI[†]

In this paper, we propose how to embed a digital watermark into color image which uses a color transformation between the RGB and YC_bC_r color systems for protecting the copyright of digital data. This scheme is to add a watermark into color signal transform matrix from RGB to YC_bC_r signal in each pixel and then to transform the pixel by this revised matrix. In conversion process from YC_bC_r to RGB signal, we use the ordinary inverse color signal transform matrix. By using this method, we can embed a single bit of watermark in each pixel. It is possible for the author to decode the watermark statistically using the original color image. Our scheme may be robust against such the clipping, JPEG compression, overwriting and StirMark attacks.

1. ま え が き

最近の情報化社会においては、情報のデジタル化が進み、多くのユーザが著者に断わりなく、容易にデータをそのまま複製できるような環境になりつつある。そのため、不正コピーにともなう著作権侵害の問題が注目されている。このような著作権の侵害を防止するために、著作権情報を第三者に見えない形で密かにデータに埋め込み、いつでもデータから著作権情報を検出できるような電子透かしシステムが検討されている¹⁾。

ところで、濃淡画像に対する透かしの埋込みの研究はすでに多くなされているが、それらはカラー画像の Y 成分に対しても同様に適用可能であることはよく知られている¹⁾。しかし、カラー画像にはカラー特有の性質があり、それらの特徴を活かした電子透かし法の提案はいまだ少ない。たとえば、関沢ら²⁾はカラー

プリントの色空間を利用した透かし法を検討し、また谷垣ら³⁾は視覚特性を巧みに利用したモデル構成型の透かし法を提案している。前者はカラーハードコピー用のものであり、また後者はモデルが煩雑で透かしの埋込み処理が簡単でない弱点を持っている。さらに、橋田ら⁴⁾は RGB 表色系において透かしパターンとランダム系列との積を重みづけたものを透かし情報として加算しているが、これはカラー画像の下位ビットに透かしを埋め込む方法の変形版である。したがって、この方法もカラー画像に特有の性質を利用したものとはいえない。

そこで、この論文では、カラー画像をデジタル機器で取り扱う際に、JPEG や MPEG 等で基本となっている RGB 表色系から YC_bC_r 表色系への色信号変換に注目する。その際に、必要となる色信号変換行列にわずかな修正量を導入して YC_bC_r 信号を算出する。すなわち、この修正量を透かし信号と見なす色彩固有の性質を利用した電子透かし法である。この透かしを埋めた YC_bC_r 信号から公知の逆変換行列で、 RGB 色信号に変換して署名済画像が得られる。 RGB 画像

[†] 防衛大学校情報工学科

Department of Computer Science, National Defense Academy

には、透かし情報が埋め込まれているが、他人に公開しても察知することはできない。なぜならば、透かし情報を取り出す際には、鍵として原画像が必要となるからである。この署名済画像に対して、クリッピングや JPEG 圧縮などの処理を行っても透かし情報を取り出すことができる利点がある。以下、2章において色信号の変換処理の概要を述べ、3章で透かし情報の埋込み原理を示す。4章では、透かし情報の復号処理方法を述べる。5章では、本手法を用いて各攻撃に対する実験を行った結果を示し、検討する。

2. 色信号変換の概要

この章では、 RGB 表色系で表現されたカラー画像データを YC_bC_r 表色系に変換する方法をまとめておく。

一般に YC_bC_r 信号は次の既知の色信号変換行列によって得られる⁵⁾。

$$\begin{bmatrix} y \\ c_b \\ c_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.169 & -0.331 & 0.500 \\ 0.500 & -0.419 & -0.081 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、 YC_bC_r 信号から RGB 信号にもどす際に、次の逆変換行列を用いている。

$$\begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000 & -0.001 & 1.402 \\ 1.000 & -0.344 & -0.714 \\ 1.000 & 1.772 & 0.001 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ c_b \\ c_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、記述を簡潔にするため、次の記号を定義しておく。 $P = [r, g, b]^t$, $F = [y, c_b, c_r]^t$, $A: RGB \rightarrow YC_bC_r$ 変換行列, A^{-1} : 同上逆変換行列。ただし、添字 t は転置を表す。

この定義に従い、式 (1), (2) をそれぞれ

$$F = AP \quad (3)$$

$$P = A^{-1}F \quad (4)$$

と書くことにする。

この論文では、上記の変換行列を用いて、透かし情報の埋込みを行う。以下、その具体的な方法について述べる。

3. 透かしの埋込み方法

電子透かしの重要な条件として透かしの埋込みによる画質劣化をできるだけ防ぐことが必要である。このため、いかに透かし情報を埋め込めばよいか重要な課題となる。そこで、式 (1) の変換行列 A の各行の成分の和に注目する。すなわち、変換行列の各要素の和が一定となるような関係を保持するように次の透か

し行列 X を準備する。

$$X = \begin{bmatrix} 0 & -x & x \\ x & 0 & -x \\ -x & x & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ただし、 x は透かし情報であり、実数値をとるものとする。この行列 X は式 (1) の係数の和を一定に保持したまま要素 x の値を変えることにより色信号を自由に変更できるので、ここでは、特にこの操作を等価信号変換とよぶことにする。

この透かし行列 X を用いて、カラー画像に電子透かしを施す。すなわち、ある画素 P に対して

$$F(X) = (A + X)P \quad (6)$$

とする。この演算処理をすべての画素に対して実行すると透かしの埋込みが完了する。この $F(X)$ 信号に対して、公知の逆変換行列 A^{-1} で復号すると

$$\begin{aligned} P(X) &= A^{-1}F(X) = A^{-1}(AP + XP) \\ &= A^{-1}AP + A^{-1}XP \\ &= P + A^{-1}XP \end{aligned} \quad (7)$$

を得る。この $P(X)$ は透かし情報 x が埋め込まれた RGB 色信号を表示している。

式 (7) から明らかなように、画素ベクトル $P(X)$ は本来の信号 P に透かし情報 x を含む $A^{-1}XP$ からなるノイズが重畳された形式で表されることになる。たとえば、 $-0.1 \leq x \leq 0.1$ に対して、この変換を施した画像を図 1 に示す。透かし情報 x の値に従ってなめらかに色彩が変化していることがこの図から判断できるのであろう。

ここで、 RGB 信号のデータは整数値であるが、 YC_bC_r 信号のデータは式 (1) により実数化されてしまうため、 $YC_bC_r \rightarrow RGB$ 逆変換するとき、整数化しなければならない。このとき、式 (2) で逆変換し、整数化する際に、画素値が負となり、アンダフローを発生するか画素値の上限を超えて、オーバフローとなることがある。この問題を解決するため、ここではアンダフロー補正およびオーバフロー補正を行う。すなわち、画素値が負となった場合には 0 とし、そのビット表現の上限 (たとえば 255) を超えるならば、その上限値を採用するものとする。

4. 透かしの復号方法

まず、透かし情報 x が埋め込まれた画像 $P(X)$ が公開されていると仮定する。この画像から透かし情報 x を復号するためには、原画像 P が必要である。

いま、 $P(X)$ に対して公知の色信号変換行列 A を乗ずると



図1 x が埋め込まれた透かし画像の一例
Fig. 1 Samples of image watermarked with x .

$$\begin{aligned}\tilde{F}(X) &= AP(X) = A(P + A^{-1}XP) \\ &= AP + AA^{-1}XP = AP + XP \quad (8)\end{aligned}$$

が得られる。

そこで、原画像を行列 A で変換した信号 F を $\tilde{F}(X)$ から引けば、その差分は

$$\tilde{F}(X) - F = (AP + XP) - AP = XP \quad (9)$$

となる。ここで、差分 XP の成分を y_1, y_2, y_3 とし、行列に表現すれば、

$$XP = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -x & x \\ x & 0 & -x \\ -x & x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} \quad (10)$$

になる。この式を分解して

$$\begin{aligned}y_1 &= bx - gx \\ y_2 &= rx - bx \\ y_3 &= gx - rx\end{aligned} \quad (11)$$

に表現することができる。したがって、これらの各成分から x 値を求めることができる。すなわち

$$\begin{aligned}x_1 &= y_1/(b - g) \\ x_2 &= y_2/(r - b)\end{aligned} \quad (12)$$

$$x_3 = y_3/(g - r)$$

しかし、式 (12) において、つねに x の値を一意に正確に求められるとは限らない。なぜならば、 x の値に対して、次の誤差が含まれてくるからである。まず、埋込みの際に、アンダフロー補正およびオーバフロー補正を行うため、補正された要素の値が実際の値と異なり、 x を正確に求められなくなる。また、式 (12) において分母が 0 に近くなると誤差を招き、さらに、ノイズが加わることも考えられる。これらの要因から x をより正確に推定するために、次の 2 つの条件を満たす画素のみを用いることにする。

条件 1: 透かし埋込み後の画素 $P(X)$ における要素の値のいずれも 0 または 255 ではないこと。

条件 2: 式 (12) における差分の絶対値 (k とする) が r より大きいこと。

この条件 2 における k の値について実験的に調査すると、 k が小さくなるに従い、データの範囲が拡散して x の推定に正確さを欠き、一方、 k が大きくなると、推定値が埋込み値に近づくが、次第にデータ数が減り、信頼性が低下する。よって、本論文では、 $k = 5$

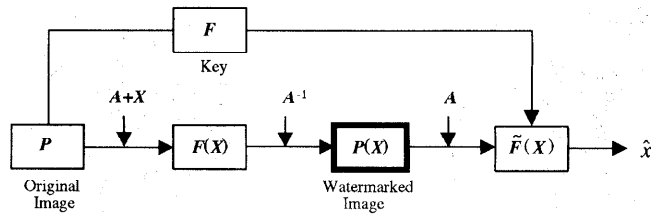


図 2 透かし情報の埋込みと復号処理過程
Fig. 2 Embedding and decoding process of watermark.

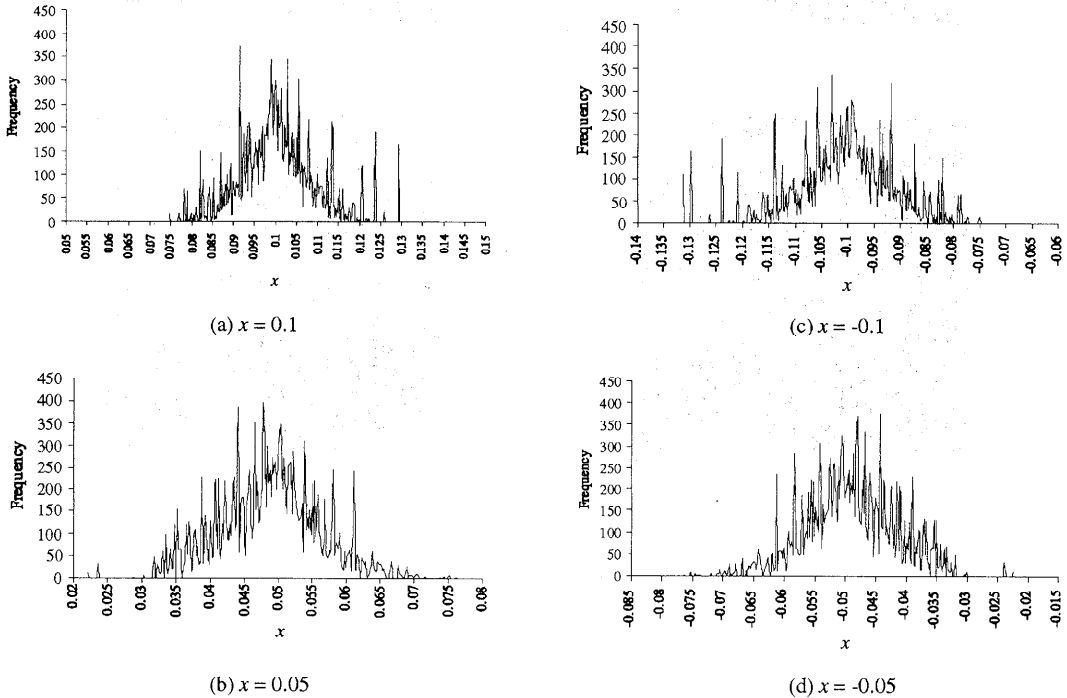


図 3 各画像における透かし \hat{x} の推定
Fig. 3 Estimation (\hat{x}) of a watermark in each image.

を採用している。

以上の 2 つの条件を設けて、 $P(X)$ の要素が条件 1、 P の要素が条件 2 を満たすかどうかを判定する。もし、両者とも満たすならば、式 (12) を用いて、 (x_1, x_2, x_3) を求め、これらの 3 つの値から、その平均値

$$\hat{x} = (x_1 + x_2 + x_3) / 3 \tag{13}$$

を算出し、この \hat{x} をもって、透かし情報 x の推定値に代えることにする。

この方法により、透かし情報 x の推定を各画素ごとに実行し、統計的に最も確からしい \hat{x} をもって透かし情報とする。この処理過程を図 2 に示す。

5. 実験結果

この論文では、前述の埋込み手法を用いて、透かし情報 x を図 1 のカラー画像 GIRL (256 × 256 画素、

RGB 各 256 階調) に埋め込み、実験した。

透かし情報 x を指定して、埋込み処理後に復号アルゴリズムに従い、 x の推定値を求めた。その出現頻度を図 3 に示す。各 x の値に対応してヒストグラムの山が \hat{x} として推定されていることが確かめられる。復号時の推定誤りを少なくするには、 x の絶対値が大きいほど有利であるが、式 (7) から明らかなようにその値が大きいほど画質の劣化を引き起こすことになるので、注意が必要である。逆に、 x の絶対値が小さすぎると \hat{x} を判定するのが困難になる。この判定を容易にするためには、できるだけ多くの画素を対象に同一の x 値で変換することが望ましい。この実験ではフレーム全体に 1 つの x の値を埋め込んでいることに注意する。そのため、図 3 の結果から、 \hat{x} の推定値は埋め込んだ x 値の付近に集中してくるので、多く

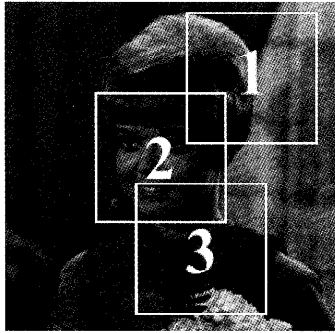


図4 切り抜き画像 ($\alpha = 0.1$)
Fig. 4 Clipped images with $\alpha = 0.1$.

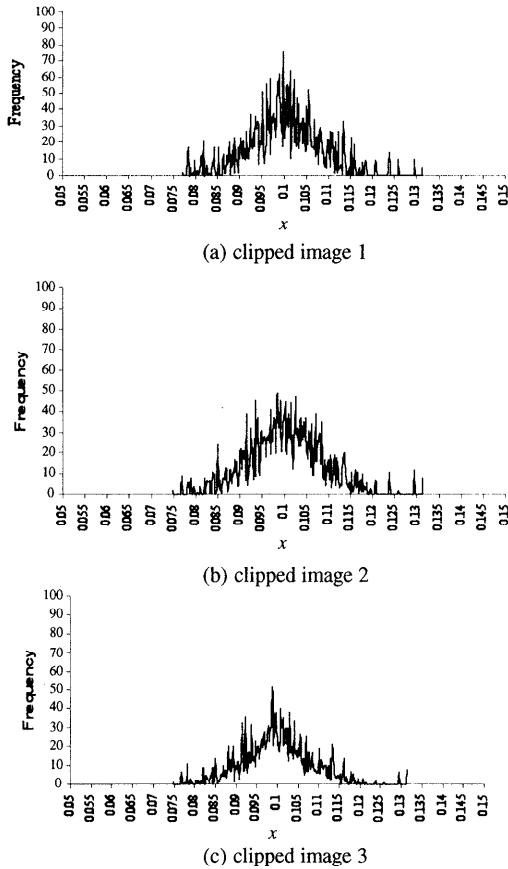


図5 切り抜き画像からの α の推定
Fig. 5 Estimation of a watermark in clipped images.

の場合誤りなく判定することができた。

次に、第三者の攻撃に対する耐性を評価するために、 $\alpha = 0.1$ の署名済画像図1(a)を用いて、次の実験を試みた。

(1) 切り抜き

まず、署名済画像を図4に示す3つの部分画像(100×100画素)にクリップ(切り抜き)した場合、各クリッ

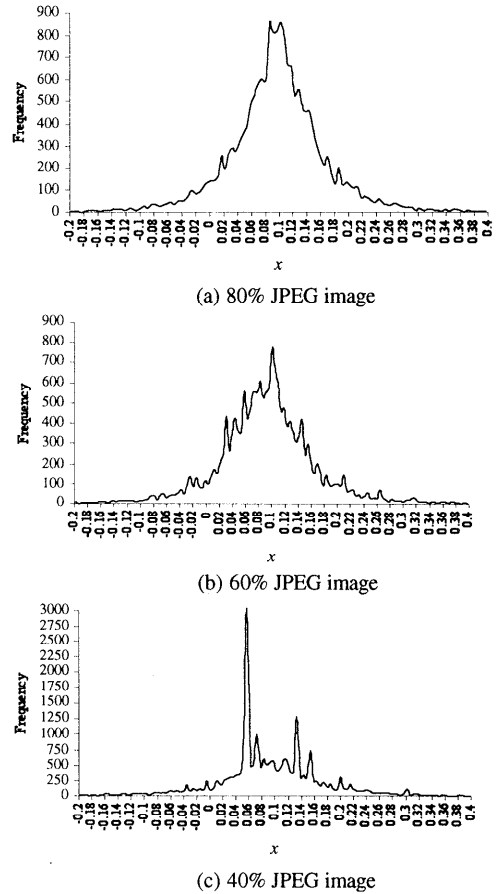


図6 各 JPEG 圧縮画像からの α の推定
Fig. 6 Estimation of a watermark in images compressed by JPEG.

プ画像から取り出した $\hat{\alpha}$ の値は図5のように分布した。この署名済画像は部分的にクリップされても $\hat{\alpha}$ の値をおおむね正しく推定することが可能であると思われる。ただし、クリップされた部分領域に含まれる画素数が少ないと $\hat{\alpha}$ の推定の信頼度は低下することになる。

(2) JPEG 圧縮

次に、署名済画像を JPEG 圧縮した場合に、 $\hat{\alpha}$ の推定値がどのように変化するかを調査した。その際に、80%、60%、40%の画質設定で圧縮した。各 JPEG 圧縮後の画像から取り出した $\hat{\alpha}$ の推定結果を図6に示す。これらの結果から画質設定を80~60%程度の圧縮では、JPEG 画像から $\hat{\alpha}$ を推定できるが、それ以上に高圧縮すると、 $\hat{\alpha}$ を推定するのは難しい。しかし、40%画質の圧縮画像では、画質劣化が著しく、実用に供するのは特殊な場合に限定される。したがって、原画像に著しく劣らない程度の圧縮比では十分に $\hat{\alpha}$ を推定可能であると思われる。

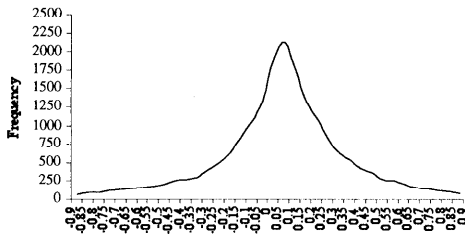


図7 StirMark 攻撃後の画像からの x の推定
Fig. 7 Estimation of a watermark in image attacked by StirMark.

(3) アフィン変換

この透かし法は画素ごとに透かし情報を埋め込むため、自然画像における少量のアフィン変換に対しては、隣接画素間に多くの冗長性があるため、ほとんど影響を受けない。

(4) StirMark 攻撃

文献 6) に示された攻撃ツール StirMark を用いて図 1(a) への攻撃を試みた。ただし、各パラメータはデフォルト値を用いた。その結果を図 7 に示す。同図から x の推定は可能であろう。また、画像の拡大・縮小、RGB 変更、低域フィルタのパラメータに対してはほぼ x を推定できるが、高域フィルタのパラメータに対しては推定するのが難しい。したがって、この透かし法は、軽度の StirMark 攻撃にはほぼ耐えられるものと思われる。

(5) 上書き攻撃

透かし情報 $x_1 = 0.1$ を埋め込んだ画像図 1(a) に対して、さらに、透かし情報 $x_2 = -0.1$ ($\neq x_1$) を上書きしたとき、その識別が可能か否かを検討した。上書きされた画像に対して、いままで説明した復号方法のように透かし情報を推定すると図 8(a) のようになる。この結果、 $x = 0$ においてピーク値が発生し、偽の透かし情報を示すことになる。そこで、原画像の代わりに x_1 を埋め込んだ画像を Key として用いて推定すれば、同図 (b) に示したように推定結果が x_2 の値になるので、こうして上書き情報 x_2 を分離することができる。したがって、この上書き攻撃にも対応できると推定される。

6. む す び

この論文では、色信号変換行列を用いて透かし情報をカラー画像に埋め込む方法を提案した。本手法を用いれば、各画素の統計値から埋込み情報を推定できることが示された。カラー画像の各画素成分に透かし情報が埋め込まれるため、クリッピング、JPEG 圧縮、拡大・縮小、座標変換などにも耐えることができ、さ

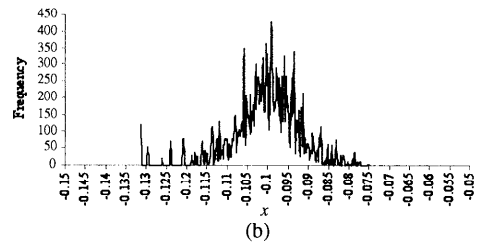
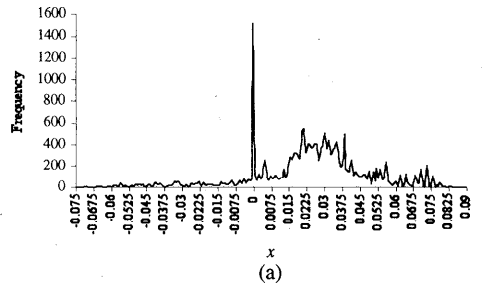


図 8 同一画像への 2 重上書きの識別

Fig. 8 Identification of watermarks overwritten in the same image.

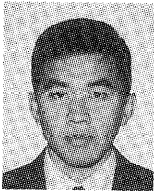
らに、軽度の StirMark 攻撃にも対応できる手法であることが明らかとなった。しかしながら、本手法で透かし情報を復号するには、複数の画素から推定することが必要となるという欠点があるので、フレーム内に埋込み可能な情報量は 1 ビットに限定されてしまう。さらに、多くのビット容量を埋め込むためには、画像フレームを分割して、各領域ごとに x を変更するなどの工夫が必要となる。

参 考 文 献

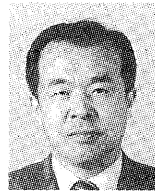
- 1) 松井甲子雄：電子透かしの基礎—マルチメディアのニュープロテクト技術，森北出版 (1998)。
- 2) 関沢秀和，川上晴子，山本直史：カラー画像の深層情報記録，画像学会，年次大会予稿集，Vol.7，No.20，pp.47-48 (1995)。
- 3) 谷垣芳博，田中 清，杉村立夫，近藤昭治：視覚特性を考慮した色彩透かしの一手法，IMPS 97，I-3.14，pp.45-46 (1997)。
- 4) 橋田賢一，汐崎 陽：デジタル画像への電子透かし埋め込みの一手法，SITA 97，Vol.2，pp.541-544 (1997)。
- 5) 日本色彩学会：新編色彩科学ハンドブック (第 2 版)，第 27 章，pp.1137-1151，東京大学出版会 (1998)。
- 6) Kuhn, M.G.: *StirMark*, http://www.cl.cam.ac.uk/~fapp2/watermarking/image_watermarking/stirmark (1997)。

(平成 10 年 11 月 6 日受付)

(平成 11 年 1 月 8 日採録)

**ワイセツストピヤピスト**

昭和 48 年タイ王国生。平成 10 年防衛大学校情報工学科卒業。現在防衛大学校理工学研究科情報数理専攻在学中。情報セキュリティと画像への電子透かしに関する研究に従事。

**松井甲子雄（正会員）**

昭和 14 年生。昭和 36 年防衛大学校電気工学科卒業。昭和 40 年九州大学大学院工学研究科電子専攻修了。昭和 56 年防衛大学校電気工学科教授。平成元年同大学校情報工学科教授。この間暗号学、情報セキュリティ、電子透かし、音声・画像データの符号化に関する研究に従事。著書「電子透かしの基礎」（森北出版）。工学博士。電子情報通信学会、画像電子学会、映像情報メディア学会各会員。
