カラー画像の2つの色成分の関係に基づいて多様な幾何変形に対応する画像電子透かし方式

大中雅憲[†1] 中山心太[†1] 後守裕介[†1]
越前功[†2] 吉浦裕[†1]

電子透かしの技術課題の1つとして幾何変形耐性があげられる．しかし，回転，拡大縮小，部分切り出し，ゆがみ変形のすべてに対応する方式はまだ提案されていない．本研究では，ゆがみ変形耐性を持った方式に，回転，拡大縮小，部分切り出し変形への耐性を加えることで，4つの幾何変形，およびそれらの組合せに耐性を持つ方式を提案する．実験により，各々の幾何変形攻撃を受けても，情報検出できる見通しを得た．

Picture Watermarking Survivability to Wide Range of Geometrical Transformations based on Relation between Two Color Components

Masanori Dainaka,[†1] Shinta Nakayama,[†1] Yusuke Atomori,[†1]
Isao Echizen[†2] and Hiroshi Yoshiura[†1]

Digital watermarking has a problem that it is weak to the geometrical transformations — Rotation, Scaling, Clipping, and Random Distortion. We propose a watermarking method that treats the four geometrical transformations and their combinations by adding Rotation, Scaling and Clipping tolerance to our previous method that had distortion tolerance. By experiment evaluations, we obtained the prospect that our method can detect embedded data, after these transformations.

1. はじめに

絵画や映画，楽曲などのデジタルコンテンツの配信・流通がさかんになっている．しかし，デジタルコンテンツはコピーが容易であるため，不正コピーにより著作権が侵害されやすいという問題がある．そこで，デジタルコンテンツの著作権者情報や購入者情報をコンテンツ内部に埋め込むことで著作権保護を可能にする電子透かし技術が注目されている．

対象となるコンテンツが静止画である場合，電子透かしには，画質維持と画像処理耐性という基本課題が存在する．さらに画像処理耐性は，JPEG圧縮やフィルタリングなどの非幾何変形への耐性と，拡大縮小や回転などの幾何変形への耐性に分類される．本論文では，静止画用電子透かしの幾何変形耐性の向上について論じる．

幾何変形耐性を向上させる方式については，従来，回転，拡大縮小，部分切り出し（およびその結果生じるシフト）への耐性を持つ方式と，ランダム歪みへの耐性を持つ方式が提案されてきた．しかし，それら4種類の変形すべてに耐性を持つ方式はほとんど提案されていない．そこで，本論文では，従来方式の中からランダム歪みへの耐性を持つ方式[3)]を取り上げ，これをベースとして，回転，拡大縮小，部分切り出しおよびそれらの組合せへの耐性を加えた新しい電子透かし方式を提案する．提案方式は，サイズ，角度，縦方向シフト，横方向シフトを探索によって補正した後，従来方式の持つランダム歪み耐性を利用して埋め込み情報を検出する．本論文は以下のように構成される．2章で幾何変形耐性に関する従来方式を分析し，3章で提案方式について述べる．4章では，サンプル画像を用いて，4種類の幾何変形およびその組合せに対する補正の精度および補正後の情報検出におけるビット誤り率を評価する．5章では本論文の内容をまとめる．

†1 電気通信大学大学院電気通信学研究科
Graduate School of Electro-Communications, The University of Electro-Communications
†2 国立情報学研究所コンテンツ科学研究系
Digital Content and Media Sciences Research Division, National Institute of Informatics

2. 先行研究

2.1 幾何変形耐性を持つ電子透かし方式

2.1.1 回転，拡大縮小，部分切り出しへの対策

回転，拡大縮小，部分切り出し，およびそれらの組合せに耐性を持つために，幾何変形を探索する方式[4]や，幾何変形の影響を受けない透かしパターンを用いる方式[5),6)]，幾何変形の内容を推定可能な透かしパターンを用いる方式[7)–9)]が提案されている．

2.1.2 ランダム歪みへの対策

原画像との一致を探索することで透かしの検出を行う方式[10),11)]，ゆがみを無視できる程度の粗い透かしパターンを埋め込み，検出時に多数決論理を用いる方式[12)]，画像の特徴点に注目し，透かしの埋め込みと検出を行う方式[13)]，画像が持つ 2 つの色差平面に透かしを埋め込み，検出時には 2 つの色差平面の相関に基づいて情報を検出する方式[3)]が提案されている．

本論文では，2 つの色差平面の相関を用いる従来方式[3)]をベースとして，回転，拡大縮小，部分切り出しおよびそれらの組合せへの耐性を加えた新しい電子透かし方式を提案する．以下，2.2 節で従来方式[3)]の詳細について説明する．

2.2 2 つの色差平面の相関を用いる方式[3)]

2.2.1 定　　義

・カラー静止画像

カラー静止画像 P は，幅 W，高さ H の 3 種類のピクセル集合平面から構成される．たとえばビットマップ画像のピクセル集合平面は RGB という色空間で表現されており，このとき P は R，G，および B 平面上の画素値 $p_{i,j}^{(R)}$，$p_{i,j}^{(G)}$，$p_{i,j}^{(B)}$ を用いて次式で与えられる．

$$P=\left\{p_{i,j}^{(d)}\;\middle|\;0\le i\le W-1,\ 0\le j\le H-1,\ d\in\{R,G,B\}\right\}. \tag{1}$$

P を表現する色空間は変換可能である．色空間 YUV 上の画素値は RGB 上の画素値から線形変換により得られ，このとき P は式 (1) と同様に次式で与えられる．

$$P=\left\{p_{i,j}^{(d)}\;\middle|\;0\le i\le W-1,\ 0\le j\le H-1,\ d\in\{Y,U,V\}\right\}. \tag{2}$$

2 つの色差平面の相関を用いる従来方式[3)]では，色空間 YUV のうち，U および V 平面に電子透かし平面を重畳することにより，透かし埋め込み画像を生成する．

・電子透かし平面

電子透かし平面 WM は，式 (3) で表される．幅 W，高さ H のピクセル集合平面で構成され，値は擬似乱数により生成された $+1$ または -1 をとる．WM は $L\times L$ ピクセルのブロック単位で値が変わる．この L をブロックサイズと呼ぶ．

$$WM=\left\{wm_{i,j}\;\middle|\;wm_{i,j}=r_{\lfloor i/L\rfloor,\lfloor j/L\rfloor}\in\{+1,-1\},\ 0\le i\le W-1,\ 0\le j\le H-1\right\}. \tag{3}$$

ここで $r_{i,j}$ は ±1 の値をとる擬似乱数である．

2.2.2 1 ビット埋め込みと検出

ここでは簡単のため，1 ビット埋め込みと検出方法について説明する．複数ビット埋め込みと検出方法は 2.2.3 項で後述する．1 ビット埋め込み方式と検出方法の処理フローは以下のとおりである．

・埋め込み方法

Step E1

電子透かしを埋め込む色空間として YUV を使う．カラー静止画像 P から，色空間 YUV を構成する色差成分 $p_{i,j}^{(U)}$，$p_{i,j}^{(V)}$ を抽出する．

Step E2

擬似乱数 $r_{i,j}$ とブロックサイズ L から電子透かし平面 WM を作成する．

Step E3

次式に従って電子透かし平面 WM を $p_{i,j}^{(U)}$，$p_{i,j}^{(V)}$ に重畳する．

$$p_{i,j}'^{(U)}=p_{i,j}^{(U)}+\alpha\,wm_{i,j}, \tag{4}$$

$$p_{i,j}'^{(V)}=\begin{cases}p_{i,j}^{(V)}+\alpha\,wm_{i-s,j-s} & \text{if}\quad bit=1\\ p_{i,j}^{(V)}-\alpha\,wm_{i-s,j-s} & \text{if}\quad bit=0.\end{cases} \tag{5}$$

式 (4)，(5) の α は透かしの埋め込み強度であり，正値をとる．$\vec{S}=(s,s)$ をシフトベクトルと呼び，$p_{i,j}^{(V)}$ に埋め込む電子透かしを $p_{i,j}^{(U)}$ と比べて $\vec{S}$ だけずらす操作を表している．

Step E4

$p_{i,j}^{(Y)}$，$p_{i,j}'^{(U)}$ と $p_{i,j}'^{(V)}$ を用いて電子透かし埋め込み画像 P' を作成する．

・検出方法

Step D1

透かし埋め込み画像 P' から電子透かしを埋め込んだ平面 $p_{i,j}'^{(U)}$，$p_{i,j}'^{(V)}$ を抽出する．

Step D2

透かし検出時に生じる画像ノイズを低減させるため，$p_{i,j}'^{(U)}$ および $p_{i,j}'^{(V)}$ に対して以下の平滑化を行う．

$$p_{i,j}''^{(d)}=p_{i,j}'^{(d)}-\frac{p_{i-L,j}'^{(d)}+p_{i,j-L}'^{(d)}+p_{i+L,j}'^{(d)}+p_{i,j+L}'^{(d)}}{4}. \tag{6}$$

Step D3

$p'^{(U)}_{i,j}$ および $p'^{(V)}_{i,j}$ を用いて情報検出平面 $D = \{D_{i,j} \,|\, 0 \le i \le W-s-1,\ 0 \le j \le H-s-1\}$ を算出する．式 (7) の s はシフトベクトル $\vec{S} = (s, s)$ によるずらしを元に戻す操作である．式 (7) で算出した情報検出平面 D の要素の和を計算し，式 (8) により和の正負で埋め込んだビット値を判定する．

$$D_{i,j} = \left(p''^{(U)}_{i,j} - \overline{p''^{(U)}}\right) \times \left(p''^{(V)}_{i+s,j+s} - \overline{p''^{(V)}}\right), \tag{7}$$

$$bit = \begin{cases} 1 & \text{if} \displaystyle\sum_{i=0}^{W-s-1} \sum_{j=0}^{H-s-1} D_{i,j} > 0 \\ 0 & \text{if} \displaystyle\sum_{i=0}^{W-s-1} \sum_{j=0}^{H-s-1} D_{i,j} < 0 \\ \text{“未検出”} & \text{if} \displaystyle\sum_{i=0}^{W-s-1} \sum_{j=0}^{H-s-1} D_{i,j} = 0. \end{cases} \tag{8}$$

ここで，式 (7) の $\overline{p''^{(U)}}$，$\overline{p''^{(V)}}$ は，それぞれ $p''^{(U)}_{i,j}$，$p''^{(V)}_{i,j}$ の (i, j) 上での平均値を表す．

2.2.3 複数ビット埋め込みと検出

複数ビット情報，たとえば n ビット情報の透かしの埋め込みと検出には，透かしを埋め込む色差成分 $p^{(U)}_{i,j}$，$p^{(V)}_{i,j}$ を n 分割し，分割された各々に対し埋め込み処理を行う．また透かしの検出に用いる色差成分 $p'^{(U)}_{i,j}$，$p'^{(V)}_{i,j}$ も埋め込みと同様に n 分割し，分割された各々で検出処理を行うことで n ビットの情報を検出する．n ビット情報埋め込みと検出に対応した透かし平面 WM の分割の例を**図 1** に記す．

図 1 は 16 ビット情報の埋め込み例で，丸数字の領域がそれぞれのビットに割り当てられた透かし平面に対応する．なお，必ずしも埋め込み領域を図 1 のように分割する必要はなく，各ビットに対応した埋め込み領域をランダムに割り当てることも可能である．

2.2.4 ランダム歪みへの対応

従来方式[3] により電子透かしを埋め込んだ画像にランダム歪みが生じても，色差成分 $p'^{(U)}_{i,j}$，$p'^{(V)}_{i,j}$ は同じ歪み方をするため，検出時に歪みの補正を必要としない．すなわち，式 (7) により情報検出平面 D を算出する際に，探索を行わずに埋め込んだ情報を検出できる．

3. 多様な幾何変形耐性を持つ電子透かし方式の提案

3.1 方　針

本論文では，従来方式[3] が備えているランダム歪みへの耐性に加えて，回転，拡大縮小，部分切り出しへの耐性を備えることを目的としている．そこで，従来方式の基本的性質を維持しながら，上記幾何変形に対応可能な電子透かし方式を提案する．提案方式は，サイズ，角度，縦方向シフト，横方向シフトを探索によって補正した後，従来方式の持つランダム歪み耐性を利用して埋め込み情報を検出する．以下，3.2 節では，上述の探索機能を備えるために従来方式[3] に改良を加えた電子透かし方式について述べる．3.3 節では，攻撃として受けた幾何変形の探索方法など幾何変形ごとの具体的な処理方法について述べる．

3.2 提案する透かし方式

3.2.1 定義の変更

本項では，多様な幾何変形耐性を持つ電子透かし方式の提案にあたり，あらたに定義する概念について述べる．具体的には 2.2.1 項で述べた従来方式の定義のうち，改良を加えたものと，新たに定義したものを説明する．

・カラー静止画像分割（セル化）

対象となるカラー静止画像 P を面積 $cw \times ch$ ピクセルの $P_{[k]}$（$0 \le k \le m-1$）に m 分割する．$P_{[k]}$ は式 (2) と同様に次式で与えられる．

$$P_{[k]} = \left\{ p^{(d)}_{[k]i,j} \,\middle|\, 0 \le i \le cw-1,\ 0 \le j \le ch-1,\ d \in \{Y, U, V\} \right\}. \tag{9}$$

m 個のセル画像 $P_{[k]}$ をそれぞれ 1 つのカラー静止画像と見なし，それぞれの $P_{[k]}$ に対し透かし埋め込み処理を行う．P と分割された m 個の $P_{[k]}$ の関係を**図 2** に記す．

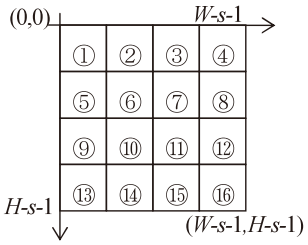


図 1 平面 WM を 16 分割したときの様子（$n = 16$）
Fig. 1 Watermarking plane WM ($n = 16$).

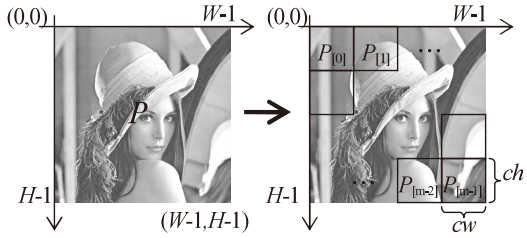


図 2 P と分割された $P_{[k]}$ の関係
Fig. 2 Relation between P and $P_{[k]}$.

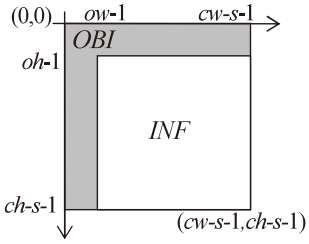


図 3 透かし平面 WM の INF と OBI の分け方
Fig. 3 INF and OBI of watermarking plane WM.

・透かし平面（*INF* と *OBI*）

埋め込み透かし平面 WM を，従来の情報埋め込み領域 INF と，帯領域 OBI に分ける．帯領域 OBI は INF と同様に擬似乱数により生成される $+1$ または -1 という値をとるが，埋め込む色差成分 $p^{(U)}_{[k]i,j}$，$p^{(V)}_{[k]i,j}$ によって独立した擬似乱数を用いる．異なる乱数を用いることで，$p^{(U)}_{[k]i,j}$，$p^{(V)}_{[k]i,j}$ に埋め込まれるそれぞれの帯領域を無相関にすることができる（相関係数 $\fallingdotseq 0$）．**図 3** と式 (10) に INF と OBI の分け方を記す．

$$INF = \{(i,j) \,|\, ow \le i \le cw - s - 1, \quad oh \le j \le ch - s - 1\},$$
$$OBI = REC \setminus INF. \tag{10}$$

ただし，

$$REC = \{(i,j) \,|\, 0 \le i \le cw - s - 1, \quad 0 \le j \le ch - s - 1\}. \tag{11}$$

よって提案方式の透かし平面 WM' と各要素 $wm'_{i,j}$ は，式 (12)，(13) のように定義される．

$$WM' = \{wm'_{i,j} \,|\, 0 \le i \le cw - s - 1, \quad 0 \le j \le ch - s - 1\}, \tag{12}$$

$$wm'_{i,j} = \begin{cases} r_{\lfloor i/L \rfloor, \lfloor j/L \rfloor} & \text{if } (i,j) \in INF \\ s^{(d)}_{\lfloor i/L \rfloor, \lfloor j/L \rfloor} & \text{if } (i,j) \in OBI. \end{cases} \tag{13}$$

ここで $s^{(d)}_{i,j}$ は，$r_{i,j}$ と同様に ± 1 の値をとる擬似乱数であるが，$d = U$，V によって乱数シードが異なる．

3.2.2 1 ビット情報埋め込みと検出

ここでは 1 ビット情報埋め込みと検出方法について述べる．複数ビット埋め込みと検出方法は 3.2.3 項で述べる．3.2.1 項での変更しなおした新たな定義により，提案する 1 ビット情報埋め込みと検出方法の処理フローは以下のとおりとなる．

・埋め込み方法

Step E1′

カラー静止画像 P を $cw \times ch$ ピクセルのセル画像 $P_{[k]}$（$0 \le k \le m-1$）に m 分割する．各 $P_{[k]}$ に対して色空間 YUV を構成する平面 $p^{(U)}_{[k]i,j}$，$p^{(V)}_{[k]i,j}$ を用意する．

Step E2′

擬似乱数 $r_{i,j}$ とブロックサイズ L，セルサイズ $cw \times ch$，帯の縦幅 oh，横幅 ow，シフトベクトル $\vec{S} = (s,s)$ から透かし平面 WM を作成する．すべてのセル画像に対して行う．

Step E3′

透かし平面 WM を $p^{(U)}_{[k]i,j}$，$p^{(V)}_{[k]i,j}$ に埋め込む．埋め込みは式 (14)，(15) に従う．このとき埋め込む透かし $wm'_{i,j}$ は式 (11) に従う．すべてのセル画像に対して行う．

$$p'^{(U)}_{[k]i,j} = p^{(U)}_{[k]i,j} + \alpha\, wm'_{i,j}, \tag{14}$$

$$p'^{(V)}_{[k]i,j} = \begin{cases} p^{(V)}_{[k]i,j} + \alpha\, wm'_{i-s,j-s} & \text{if } bit = 1 \\ p^{(V)}_{[k]i,j} - \alpha\, wm'_{i-s,j-s} & \text{if } bit = 0. \end{cases} \tag{15}$$

Step E4′

m 分割されたすべての $p^{(Y)}_{[k]i,j}$，$p'^{(U)}_{[k]i,j}$，$p'^{(V)}_{[k]i,j}$ を用いて透かし埋め込み画像 P' を作成する．

・検出方法

Step D1′

透かし埋め込み画像 P' をセル画像 $P'_{[k]}$（$0 \le k \le m-1$）に m 分割し，各セル画像に対応した色差成分 $p'^{(U)}_{[k]i,j}$，$p'^{(V)}_{[k]i,j}$ を抽出する．

Step D2′

各セル画像の $p'^{(U)}_{[k]i,j}$，$p'^{(V)}_{[k]i,j}$ に対して以下の平滑化を行う．

$$p''^{(d)}_{[k]i,j} = p'^{(d)}_{[k]i,j} - \frac{p'^{(d)}_{[k]i-L,j} + p'^{(d)}_{[k]i,j-L} + p'^{(d)}_{[k]i+L,j} + p'^{(d)}_{[k]i,j+L}}{4}. \tag{16}$$

Step D3′

各セル画像 $P_{[k]}$ から式 (17) により情報検出平面 $D_{[k]}$ を作成する．さらに式 (18) により作成した m 個の平面 $D_{[k]}$ の要素の和を計算し，修正情報検出平面 $D' = \{D'_{i,j} \,|\, 0 \le i \le W - s - 1, 0 \le j \le H - s - 1\}$ を算出する．

$$D_{[k]i,j} = \left(p''^{(U)}_{[k]i,j} - \overline{p''^{(U)}_{[k]}}\right) \times \left(p''^{(V)}_{[k]i+S,j+S} - \overline{p''^{(V)}_{[k]}}\right), \tag{17}$$

$$D'_{i,j} = \sum_{k=0}^{m-1} D_{[k]i,j}. \tag{18}$$

式 (18) で得た修正情報検出平面 D' を用いて各種幾何変形探索処理を行う．具体的な方法については 3.3 節の幾何変形探索方法で述べる．

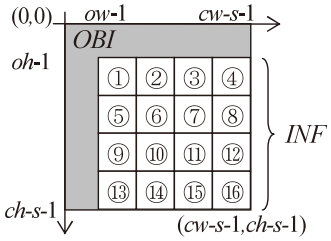


図 4 平面 WM の INF を 16 分割した様子（$n = 16$）
Fig. 4 New watermarking plane WM ($n = 16$).

Step D4′

修正情報検出平面 D' の要素の和から埋め込んだビット値を判定する．ただし，当該平面のうち領域 OBI にあたる部分は省かれ，INF 部分だけで判定が行われる．

$$bit = \begin{cases} 1 & \text{if} \sum_{i=ow}^{cw-s-1} \sum_{j=oh}^{ch-s-1} D'_{i,j} > 0 \\ 0 & \text{if} \sum_{i=ow}^{cw-s-1} \sum_{j=oh}^{ch-s-1} D'_{i,j} < 0 \\ \text{“未検出”} & \text{if} \sum_{i=ow}^{cw-s-1} \sum_{j=oh}^{ch-s-1} D'_{i,j} = 0. \end{cases} \tag{19}$$

3.2.3 複数ビット情報埋め込みと検出

複数ビット情報，たとえば n ビット情報の透かしの埋め込みと検出には，透かしを埋め込む色差成分 $p^{(U)}_{[k]i,j}$，$p^{(V)}_{[k]i,j}$ の領域 INF を n 分割し，分割された各々に対し各ビットの埋め込み処理を行う．また透かしの検出に用いる色差成分 $p'^{(U)}_{[k]i,j}$，$p'^{(V)}_{[k]i,j}$ も埋め込みと同様に領域 INF を n 分割し，分割された各々で検出処理を行うことで n ビット情報を検出する．透かし平面 WM の INF 部分を n 分割（ただし $n = 16$）した例を**図 4** に記す．

3.3 提案方式の幾何変形対応方法

本節では，**Step D3′** 後に行う各幾何変形攻撃への対応方法について述べる．本論文では，幾何変形対応方法として以下の方法を提案する．

- **「回転」「拡大縮小」**

従来方式ですでに備えているシフトベクトルと情報検出平面 D の要素の符号反転の程度を測る新たな指標 NFC を用いた探索（3.3.1 項）．

- **「部分切り出し」**

透かし平面のセル化および帯（OBI）付与と NFC を用いた探索（3.3.2 項）．

- **「ゆがみ」**

従来方式[3] による相関を利用した透かし検出．

以下，3.3.1〜3.3.4 項で具体的な対応方法について述べる．

3.3.1 回転と拡大縮小への対応

回転と拡大縮小といった幾何変形を探索し，幾何変形前に戻す復元指標 NFC を定義する．NFC とは，*Not Flat Count* の略で，情報検出に用いる修正情報検出平面 D' の符号反転の程度を測るもので，平面 D' 内の縦方向，横方向ともに $D'_{i,j}$ 値の符号反転している箇所を数える．平面 D' は横幅 cw，縦幅 ch なので，NFC は次式で与えられる．

$$NFC = \sum_{i=0}^{cw-s-1} \sum_{j=0}^{ch-s-1} nfc_{i,j}. \tag{20}$$

ただし，

$$nfc_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if } D'_{i,j} \times D'_{i,j+1} < 0 \\ & \text{かつ } D'_{i,j} \times D'_{i+1,j} < 0 \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{21}$$

電子透かし埋め込み画像が「回転」や「拡大縮小」といった幾何変形攻撃を受けていた場合，シフトベクトル $\vec{S}$ によるずれが生じるため，修正情報検出平面 D' が正しく計算されない．なぜならば，「回転」は画像の向きを，「拡大縮小」は画像の大きさを変更しているからである．提案方式では **Step E3′** で述べた埋め込み時にシフトベクトルによるずらしを加え，検出時には **Step D3′** で述べたずれを元に戻す逆向きのシフトを行うことで情報埋め込み時のシフトベクトルを打ち消し，情報検出を行う．「回転」「拡大縮小」といった幾何変形は，このシフトベクトルを打ち消す操作を妨害する．つまり正しい「回転角度」や「拡大縮小率」以外では逆向きのシフトを行ってもシフトベクトルを打ち消し，色差成分 $p'^{(U)}_{[k]}$，$p'^{(V)}_{[k]}$ に生じる透かしのずれを解消することができない．提案方式は **Step D4′** 内の式 (19) より，色差成分 $p'^{(U)}_{[k]}$ と $p'^{(V)}_{[k]}$ の相関（共分散）の偏り度合いで埋め込んだ情報を判断するが，ずれが直らないと上記の偏りが生じない．つまり，幾何変形の探索を行い，正しく幾何変形の復元を行ったときは修正情報検出平面 D' の要素の和は埋め込んだ情報ビットによって正もしくは負に偏る．反対に，誤った復元のときはその偏りがなくなり，修正情報検出平面 D' 上の値は正負の値が散在する．そこで正負の散在の程度，つまり NFC を測定し，その値が極小になったときを正しい角度と拡大縮小率の復元とする．そのときの回転角度と拡大縮小率のパラメータで D' 平面を作成し情報検出を行うことで正しい情報を得ることができる．

3.3.2 部分切り出しへの対応

3.2.1 項で述べた透かし平面のセル化と帯（OBI）

付与によって，「部分切り出し」が施されても情報検出が可能となっている．

セル化とは，対象となるカラー静止画像 P を分割し，各々のセル画像に複数ビットの情報を埋め込む操作のことである（3.2.1 項および 3.2.3 項）．切り出された画像がセル画像のサイズより大きければすべての情報を検出可能となる．

帯（OBI）付与とは，埋め込む透かし WM に情報領域とは別に設けた帯状の領域のことで，セル画像の先頭位置（左上部の角部分）を探索するために使われる（3.2.1 項および 3.2.3 項）．切り出された画像の先頭位置がセル画像の先頭位置ではなくても，帯部分を探索し，セル画像の先頭位置を特定することで情報検出平面を修正し，情報検出が可能となる．

帯の探索には NFC を用いる．色差成分 $p^{(U)}_{[k]i,j}$ と $p^{(V)}_{[k]i,j}$ の帯領域（OBI）には独立な疑似乱数を用いて透かしが埋め込んである．よって帯領域（OBI）の場合，$p^{(U)}_{[k]i,j}$ と $p^{(V)}_{[k]i,j}$ の共分散である修正情報検出平面の $D'_{i,j}$ 値は正負の値が散在した偏りのないものになっている．一方，色差成分 $p^{(U)}_{[k]i,j}$ と $p^{(V)}_{[k]i,j}$ の情報埋め込み領域（INF）は，同じ擬似乱数を用いて，埋め込んだ情報ビットによって同じパターンの透かしもしくは反転パターンの透かしを埋め込んである．よって情報埋め込み領域（INF）の $D'_{i,j}$ 値は，埋め込んだ情報ビットによって正もしくは負に偏るようになっている．

つまり，修正情報検出平面 D' の中で帯領域（OBI）に注目したとき，その領域は偏りがなく，D' は正負に散在した値をとっているため符号反転の箇所が多くなり，NFC が高くなる．反対に情報埋め込み領域（INF）の D' は正か負に偏っているため，D' 上での符号反転が数えられる箇所は少なく，NFC は低い．

よって「部分切り出し」への対応方法としては，切り出された画像から帯領域に相当する面積の NFC（通常の NFC と区別するため以後帯 NFC と呼ぶ）を測定し，最大となる位置を探すことで透かしの先頭位置を特定し，位置を修正後，通常の透かし検出を行う．なお，帯 NFC は縦帯，横帯別々に測定することで任意の切り出し位置に対応する．**図 5** に部分切り出しの対応方法概要図を記す．

3.3.3 ランダム歪みへの対応

2 つの画像平面の相関を用いて情報を検出する従来方式[3] の基本処理を継承しているので，ランダム歪みが生じた画像から探索を行わずに情報を検出することが可能である．

3.3.4 幾何変形組合せへの対応

幾何変形を組み合わせた攻撃を受けたときは，前述した各幾何変形への対応 3.3.1〜3.3.3 項の組合せで解決できる．すべての幾何変形攻撃を受けたときは，「回転」と「拡大縮小」への対応（3.3.1 項）を行い，そこで得たパラメータの下で「部分切り出し」への対応（3.3.2 項）を行う．先に「回転」と「拡大縮小」への対応を行うのは「回転」や「拡大縮小」が正しくない場合は，帯が水平垂直ではなかったり帯の太さが異なっていたりするためである．なお，幾何変形組合せ攻撃時でもゆがみの探索は行わなくてよい．

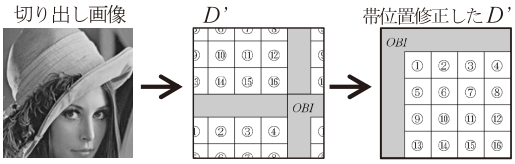


図 5 部分切り出し攻撃時の D' の修正
Fig. 5 Fix of D' in the cutting transformation.

3.3.5 幾何変形対応の処理フロー

3.3.1〜3.3.4 項で述べた幾何変形への対応方法が 3.2.2 項の検出処理フローにどのように組み込まれるかを以下に示す．下記ステップのうち，**Step D1′**〜**Step D3′**，および **Step D4′** が 3.2.2 項で説明した提案方式の基本検出フローである．幾何変形への対応は，上記フローの最初と **Step D3′** 以降に付加処理を追加することで実現する．下記フローで，幾何変形対応処理に用いる回転角度 [deg]（復元回転角度）および拡大縮小率 [%]（復元拡大縮小率）のパラメータをそれぞれ r $(r = r_{\min}, r_{\min}+\delta_r, r_{\min}+2\delta_r, \ldots, r_{\max}-\delta_r, r_{\max})$，$s$ $(s = s_{\min}, s_{\min}+\delta_s, s_{\min}+2\delta_s, \ldots, s_{\max}-\delta_s, s_{\max})$ とする．

ここで，δ_r，δ_s はパラメータ r，s のステップ幅を表す．

Step D0-1′

パラメータ r，s を $r = r_{\min}$，$s = s_{\min}$ にセットする．

Step D0-2′

パラメータ r，s に従い，入力画像に回転，拡大縮小変換を施す．

Step D1′，Step D2′，Step D3′

3.2.2 項の Step D1′，Step D2′，Step D3′ と同一の処理を行う（セル分割，平滑化，修正情報検出平面の算出処理）．

Step D3′-1

Step D3′ で算出した修正情報検出平面 D' について，3.3.1 項の式 (20) に従い NFC を算出し，パラメータ r，s の値とともに，NFC の値を記録する．

Step D3′-2

$r < r_{\max}$ であれば，$r = r+\delta_r$ として，Step D0-2′

に進む．$r = r_{\max}$ であれば，Step D3′-3 に進む．

Step D3′-3

$s < s_{\max}$ であれば，$r = r_{\min}$，$s = s + \delta_s$ として，Step D0-2′に進む．$s = s_{\max}$ であれば，Step D3′-4 に進む．

Step D3′-4

Step D3′-1 で記録した NFC から極小値を特定し，そのときのパラメータ r，s を求める．当該パラメータに従い，入力画像に回転，拡大縮小変換を施し，変換後の画像からあらためて修正情報検出平面を作成する．

Step D3′-5

部分切り出しに対応するために 3.3.2 項で述べた処理を行う．すなわち，Step D3′-4 で作成した修正情報検出平面から帯領域に相当する NFC を算出し，NFC 値が最大となる領域を特定することで，帯領域の位置を特定する．

Step D3′-6

図 5 に示すように，Step D3′-5 で特定した帯領域の位置情報に基づいて，帯領域が埋め込み時の位置になるように修正情報検出平面を修正し，当該画像から修正情報検出平面 D' を再計算する．

Step D4′

3.2.2 項の Step D4′ と同一の処理を行う（ビット値判定処理）．

3.3.6 NFC の極小値の決定

3.3.5 項で述べた処理フローのうち，NFC の極小値の決定（Step D3′-4）については，下記の課題がある．

1. オリジナル画像の性質によって，誤った回転角度，拡大縮小率で NFC が小さくなる（局所最適解を持つ）場合がある．NFC の極小値の決定では，このような局所最適解を避け，大域的な極小解を求める必要がある．
2. 拡大縮小率のパラメータ s が増加すると，透かし平面の形状は画像サイズに比例して大きくなる．そのため，s の増加による透かし平面の符号反転の度合いは，画像全体ではほとんど変化しないが，単位面積あたりでは小さくなる．すなわち，セルサイズあたりの透かし平面の符号反転度合いを表す NFC の値も小さくなる．NFC の極小値の決定では，パラメータ s の増加による NFC 減少の影響を除いたうえで，大域的な極小解を求める必要がある．

そこで，NFC のデータ列から大域的極小解を安定して求めるために，当該データ列に対して，ガウシアンフィルタによる平滑化（課題 1 への対策）を行った後，ラプラシアンフィルタによるエッジ検出処理（課題 2 への対策）を行い，処理後のデータ列から最大値を求めることとした．すなわち，3.3.5 項の NFC の極小値の決定（Step D3′-4）は下記となる．

Step D3′-4

Step D3′-1 で記録した NFC に対して，ガウシアンフィルタによる平滑化および，ラプラシアンフィルタによるエッジ検出処理を実施する．処理後の NFC から最大値を特定し，そのときのパラメータ r，s を求める．当該パラメータに従い，入力画像に回転，拡大縮小変換を施し，変換後の画像からあらためて修正情報検出平面を作成する．

4. 評価—幾何変形耐性

本章では，提案方式が個々の幾何変形（「ゆがみ」「回転」「拡大縮小」「部分切り出し」），およびそれらの組合せ攻撃を加えても埋め込んだ情報を検出可能かどうかという評価について述べる．

4.1 評価方法

以下の処理フローに従って評価を行った．

Step 1

512 × 512 ピクセルの異なる性質を持つ 2 種類の 24 ビットカラー静止画像（Mandrill，Milkdrop）に，**表 1** のパラメータにより 3.2.2 項での透かし埋め込みを行う．人間の目は低周波成分の変化には敏感だが，高周波成分の変化に鈍感である．この視覚特性を利用すると，Mandrill 画像は動物の顔部分に毛など高周波成分が多いため，透かし埋め込み強度 α の値を高く設定することができる．反対に Milkdrop 画像は，平坦な色使いで高周波成分が少ないことから透かし埋め込み強度 α の値は小さく設定する必要がある．

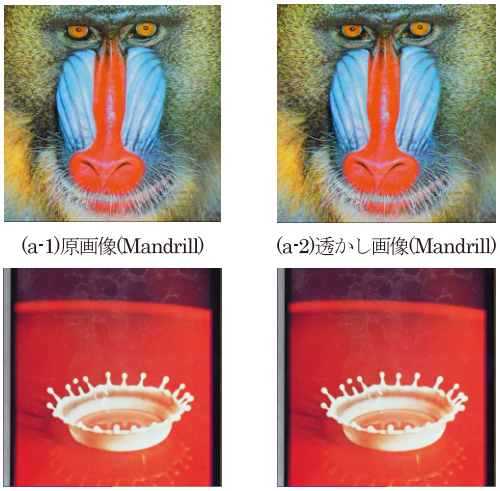
本評価では，Mandrill 画像は $\alpha = 6$，Milkdrop 画像は $\alpha = 3$ に設定した．なお，本提案方式の基本的な性質を確認するために，透かし埋め込み強度 α は，平面に対して一律とした．

表 1 透かし埋め込み時のパラメータ
Table 1 Parameter in the embedding watermark.

パラメータ設定対象	設定値	
透かし埋め込み強度 α	Mandrill	6
	Milkdrop	3
埋め込みビット数	64 ビット	
帯の幅 ow，oh	8 ピクセル	
ブロックサイズ L	4 ピクセル	
シフトベクトル $\vec{S} = (s, s)$	(10,10) ピクセル	
1 セルの面積 $cw \times ch$	136×136 ピクセル	

表 2 加える幾何変形
Table 2 Adding geometrical transformation.

実験	原画像	幾何変形攻撃
実験 1	Mandrill	・ゆがみ（100 種類）
	Milkdrop	Stirmark3.1 使用
実験 2	Mandrill	・回転（4 種類）
	Milkdrop	±5 度，±10 度
実験 3	Mandrill	・拡大縮小（4 種類）
	Milkdrop	75%，90%，110%，125%
実験 4	Mandrill	・部分切り出し（3 種類）
	Milkdrop	面積 300×300 ピクセル
実験 5	Mandrill	・幾何変形組み合わせ ゆがみ，+5 度回転，110%拡大， (106,020)-(406,020)切り出し
	Milkdrop	・幾何変形組み合わせ ゆがみ，−10 度回転，90%縮小， (40,30)-(340,330)切り出し



(a-1)原画像(Mandrill) (a-2)透かし画像(Mandrill)

(b-1)原画像(Milkdrop) (b-2)透かし画像(Milkdrop)

図 6 原画像と透かし画像
Fig. 6 Original image and image with watermark.

Step 2

透かしを埋め込んだ画像に**表 2** に記した幾何変形を加える．画像処理補間法はバイキュービックを用いる．

Step 3

幾何変形攻撃を受けた透かし埋め込み画像に，3.3 節で説明した各種幾何変形攻撃への対応を行う．そして幾何変形攻撃前の状態に画像を元に戻し，修正情報検出平面 D' からビット値を判定し情報を得る．

4.2 評価結果

評価に使用した原画像と電子透かし埋め込み画像を**図 6** に記す．

表 3 検出情報誤り数による分布率
Table 3 Error distribution rate.

	情報誤り数[ビット]			
	0	1	2	Else
Mandrill	98.1%	1.8%	0.1%	0%
Milkdrop	96.3%	3.3%	0.4%	0%

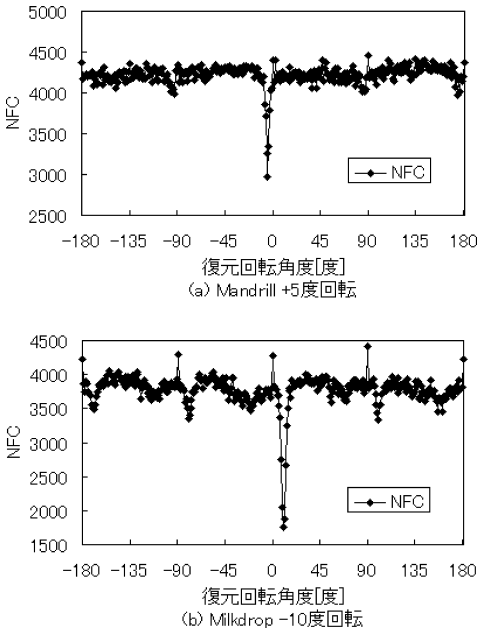


図 7 回転攻撃時の NFC 結果
Fig. 7 NFC of rotation for Mandrill and Milkdrop.

4.2.1 実験 1 —ゆがみ

透かし埋め込み画像（Mandrill，Milkdrop）それぞれに Stirmark3.1 [1),2)] によるゆがみ（乱数シードの異なる 1,000 種類）を加えたときの検出情報誤り数の結果を**表 3** に記す．

4.2.2 実験 2 —回転

透かし埋め込み画像（Mandrill，Milkdrop）それぞれに ±5 度，±10 度の回転を加えたときの幾何変形復元の結果（NFC 測定）の一部を**図 7** に記す．図 7 (b) において，幾つかの誤った角度で NFC が極小値（局所最適解）をとっていることが分かる．そこで，3.3.6 項で述べたように，NFC にガウシアンフィルタによる平滑化処理およびエッジ検出処理を加えた．ガウシアンフィルタには $\sigma = 2$，マスクサイズ $= 9$（1 次元）を用いた．処理後の NFC の結果を**図 8** に記す．

図 8 では，図 7 の局所最適解を平滑化することで，誤った角度による幾何変形復元の可能性を少なくし，かつ，加えられた回転を元に戻す角度（Mandrill：−5 度，Milkdrop：+10 度）で NFC が最大となってい

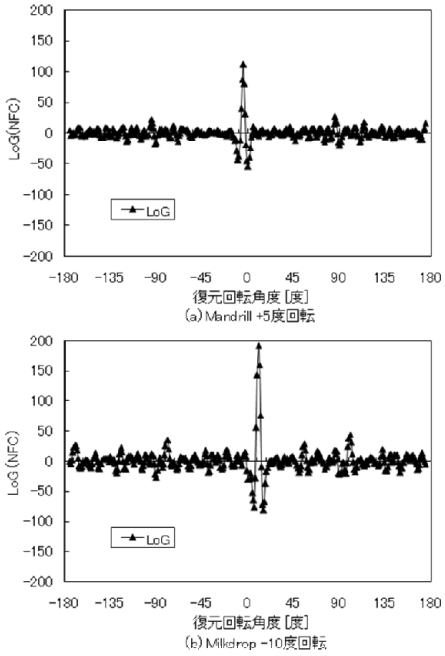


図 8 回転攻撃時の NFC 結果（フィルタ処理後）
Fig. 8 NFCs after rotation for Mandrill and Milkdrop (with filtering operation).

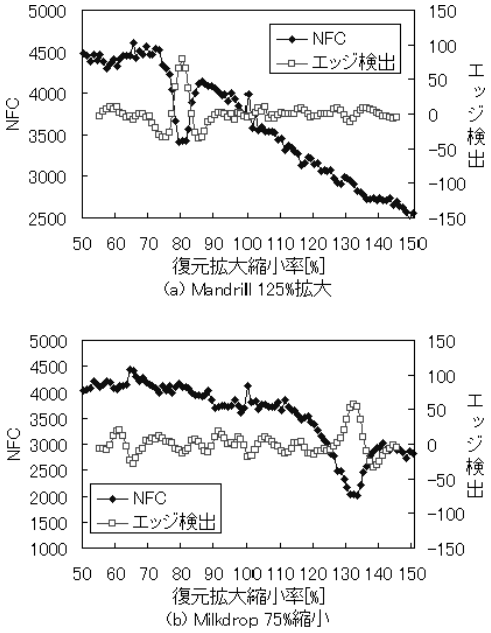


図 9 拡大縮小攻撃時の NFC とエッジ検出
Fig. 9 NFC and Edge detection of scale up/down for Mandrill and Milkdrop.

る．以上より回転攻撃の復元に成功した．その他の条件でも同様に回転攻撃の復元に成功した．情報検出の結果，すべての条件で情報誤り数は 0 ビットであった．

4.2.3 実験 3 —拡大縮小

透かし埋め込み画像（Mandrill，Milkdrop）それぞれに 75%縮小，90%縮小，110%拡大，125%拡大といった拡大縮小攻撃を加えたときの幾何変形復元の結果（NFC 測定）の一部を**図 9**（グラフ◆，メモリ左軸）に記す．

図 9 より，拡大縮小攻撃後の透かし埋め込み画像を元の画像サイズに復元する拡大縮小率（(a) Mandrill：125%拡大攻撃では，$1/1.25 \times 100 = 80\%$，(b) Milkdrop：75%縮小攻撃では $1/0.75 \times 100 = 133\%$）で NFC 値が極小になっていることが分かる．また，3.3.6 項の課題 2 で述べたように，拡大縮小率が増加するにつれて，NFC の値は右肩下がりとなるため，得られた NFC から極小値を探索する必要がある．上記対策のため，NFC にガウシアンフィルタによる平滑化処理およびエッジ検出処理を加えた結果を図 9（グラフ □，メモリ右軸）に記す．なお，ガウシアンフィルタのパラメータは，4.2.2 項と同様である．

図 9 より，正しい復元拡大縮小率時でエッジ検出のピークを得ることができ，拡大縮小攻撃の復元に成功した．その他の条件でも同様に拡大縮小攻撃の復元に成功した．情報検出の結果，すべての条件で情報誤り数は 0 ビットであった．

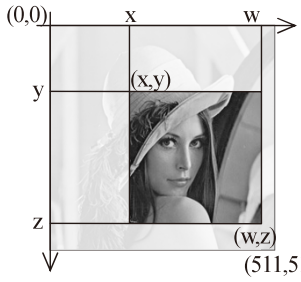


図 10 部分切り出し画像と切り出し座標例
Fig. 10 Example of cutting image and coordinates.

4.2.4 実験 4 —部分切り出し

切り出し部分の左上端 (x, y) と右下端 (w, z) の位置関係例を**図 10** に記す．切り出した座標 (x, y)-(w, z) は，Mandrill は (100, 100)-(400, 400)，(106, 20)-(406, 320)，(190, 200)-(490, 500) の 3 種類，Milkdrop は (40, 30)-(340, 330)，(131, 177)-(431, 477)，(200, 200)-(500, 500) の 3 種類である．

切り出し画像の帯 NFC の測定結果の一部を**図 11** に記す．

図 11 より帯 NFC の最大値をとる座標が，切り出し位置の開始座標（ただし開始座標がセルサイズ幅 136 ピクセル以上のときは開始座標からセルサイズを

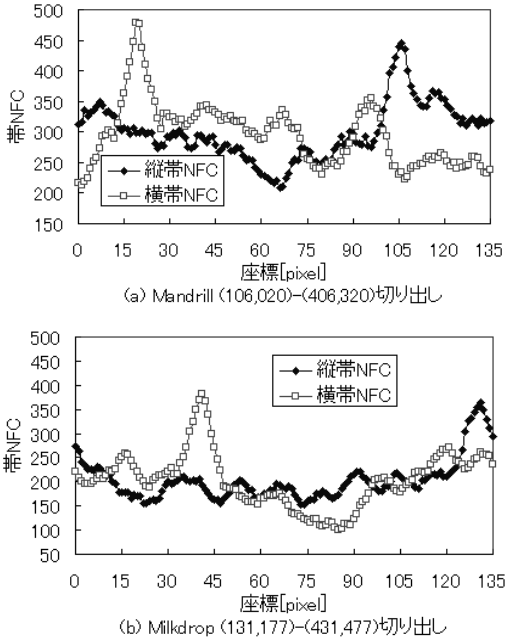


図 11 部分切り出し攻撃時の帯 NFC
Fig. 11 OBI-NFC of cutting Mandrill and Milkdrop.

表 4 検出情報誤り数 [ビット]
Table 4 Number of error bits.

原画像	切り出し位置	誤り数
Mandrill	(100,100)-(400,400)	0
	(106,020)-(406,320)	0
	(190,200)-(490,500)	0
Milkdrop	(040,030)-(340,330)	0
	(131,177)-(431,477)	1
	(200,200)-(500,500)	1

減算した値）と一致しており，評価を行ったすべてのケースで帯位置の特定に成功した．検出情報誤り数の結果を**表 4** に記す．Milkdrop の一部でビット誤りが生じたのは，画像内に白色成分が多く，透かしによる値の変更を行えない領域が多いからだと考えられる．

4.2.5 実験 5 —幾何変形組合せ

透かし埋め込み画像 Mandrill に表 2 の実験 5 に記した幾何変形組合せ攻撃を加えた．原画像と幾何変形攻撃後の画像を**図 12** に記す．

幾何変形組合せ攻撃を受けた画像の回転と拡大縮小を復元するために，回転角度と拡大縮小率をパラメータにして NFC を測定した．さらに，3.3.6 項で述べた理由により NFC のガウシアンフィルタによる平滑化およびラプラシアンフィルタによるエッジ検出処理後の値を測定した．ガウシアンフィルタには $\sigma = 2$,

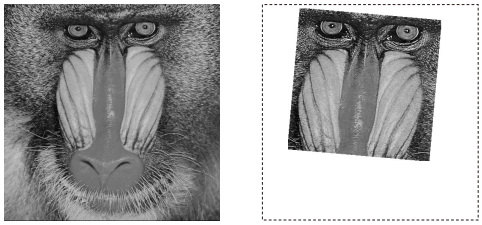


図 12 原画像と幾何変形攻撃後の画像
Fig. 12 Original image and transformed image with watermark.

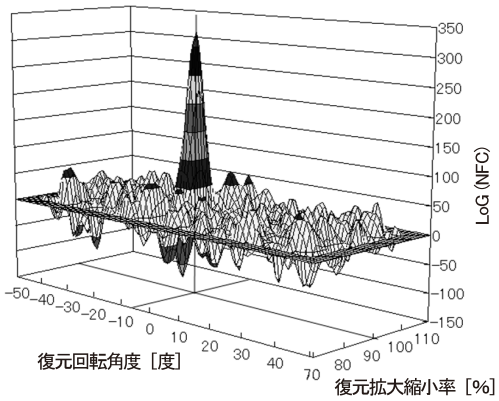


図 13 幾何変形組合せ攻撃時のエッジ検出
Fig. 13 Edge detection of geometrical transformed Mandrill's NFC.

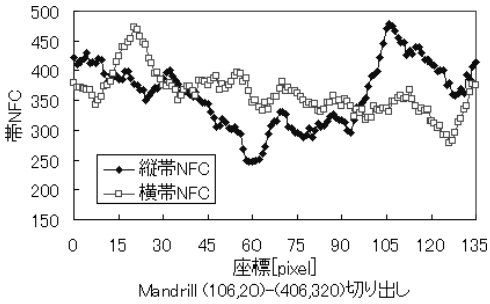


図 14 幾何変形攻撃時の Mandrill の帯 NFC
Fig. 14 OBI-NFC of geometrical transformed Mandrill.

マスクサイズ $= 9 \times 9$（2 次元）を用いた．NFC の平滑化・エッジ検出の結果を**図 13** に記す．

図 13 より，「回転」と「拡大縮小」を元に戻すパラメータでエッジ検出のピークを得ることができ，復元に成功した．この 2 次元エッジ検出の操作はラプラシアンガウシアン（LoG）フィルタに通す操作に該当する．

次に，上記操作により回転角度と拡大縮小率を元に戻した条件で，帯位置検出を行う．帯位置 NFC の結果を**図 14** に記す．

図 14 より，縦帯 = 106，横帯 = 20 で帯 NFC が最大となり，正しい帯位置の探索に成功した．よって，回転，拡大縮小，部分切り出しすべての探索に成功した．また Milkdrop に表 2 の実験 5 に記した幾何変形組合せ攻撃を加えたときの復元にも同様に成功した．ともに情報検出を行ったところ，情報誤り数は 0 ビットであった．なお，ゆがみは探索なしで情報検出できるので考慮しなくてもよい．

4.2.6 アフィン変形への対応

2 次元アフィン変形は，平行移動，回転，拡大縮小，剪断の 4 つの変形の組合せによって表現される[14]．平行移動は縦移動と横移動の組合せであり，拡大縮小は「縦横比を固定した拡大縮小」と「縦横比変更」に分解できるため，合計 6 つの自由度を持った変換になる．提案方式では，これらのうち平行移動（縦と横），回転，縦横比を維持した拡大縮小の 4 つの変形およびその組合せに対応している．具体的には，平行移動が 4.2.4 項の実験 4，回転が，4.2.2 項の実験 2，縦横比を維持した拡大縮小が 4.2.3 項の実験 3，これらの組合せ変形が 4.2.5 項の実験 5 の評価に対応しており，いずれも検出情報誤り数は 0 ビットであった．

5. 従来方式との比較

本章では，回転，拡大縮小，部分切り出しへの耐性について，従来方式と提案方式を比較し，提案方式の有効性を検証する．以下，5.1 節で，提案方式がベースとした 2 つの色差平面の相関を用いる方式[3] との比較を行い，5.2 節でその他の従来方式との比較を行う．

5.1 2 つの色差平面の相関を用いる従来方式[3] との比較

本節では，回転，拡大縮小，部分切り出しの程度を 0 から少しずつ変化させた際の従来手法の検出情報誤り数を測定し，提案方式との比較評価を行った．従来方式の評価結果を**図 15** に示す．図 15 (c) 中の横軸（切り出しサイズ）は，画像の中央部分から上下左右対称に切り出した正方形の 1 辺のサイズを表す．

図 15 に示すように，回転角度が ±1 度，拡大縮小率が 99〜101%，切り出しサイズが 512〜504 ピクセル程度であれば，従来方式の検出情報誤り数はほぼ 0 ビットであるが，上記範囲を超えると検出情報誤り率が急激に増加し，回転角度が ±5 度，拡大縮小率が 90%または 110%，切り出しサイズが 456 ピクセル程度になると，埋め込みビット数のほぼ半分を誤っている．また，上記と同じ評価を提案方式で行ったところ，すべてのケースで検出情報誤り数が 0 ビットであった．

次に，4 章で行った提案手法の幾何変形耐性の評価を従来方式に対して行った．具体的には，表 2 の実験 2 から実験 5 に記載の幾何変形攻撃を従来方式による透かし埋め込み画像に加え，検出情報誤り数を測定した．評価結果を**表 5** に示す．

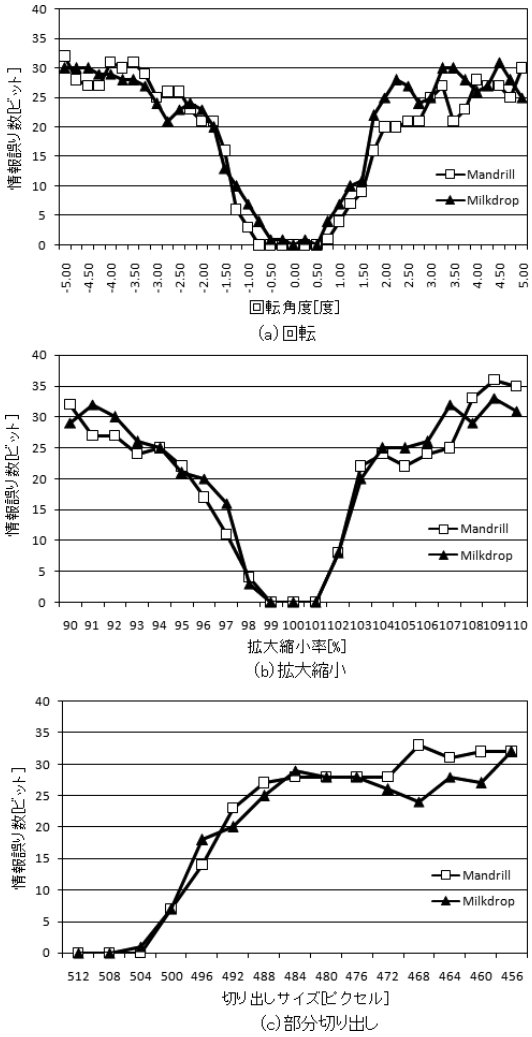


図 15 幾何変形攻撃時の従来方式[3] の検出情報誤り数
Fig. 15 Number of error bits of previous method[3] after geometrical transformations.

表 5 が示すように，評価したすべての幾何変形攻撃において，従来方式の検出情報誤り数は 25 ビットから 38 ビット程度となり，提案方式の誤り数に比べて大きい値をとった．

以上，図 15 に示した微小変形の結果とあわせると，提案方式は，従来方式[3] に対して，回転，拡大縮小，部分切り出し耐性に優位性があると考えられる．

5.2 その他の従来方式との比較

2.1 節で述べた従来方式の中で，拡大縮小，回転，部分切り出しのうち少なくとも 1 種類の耐性評価を行っ

表 5 従来方式[3] の検出情報誤り数 [ビット]
Table 5 Number of error bits of previous method [3].

実験	原画像	幾何変形攻撃	誤り数
実験 2	Mandrill	-10 度回転	28
		-5 度回転	32
		+5 度回転	30
		+10 度回転	29
	Milkdrop	-10 度回転	26
		-5 度回転	30
		+5 度回転	25
		+10 度回転	36
実験 3	Mandrill	75%縮小	29
		90%縮小	32
		110%拡大	35
		125%拡大	31
	Milkdrop	75%縮小	30
		90%縮小	29
		110%拡大	31
		125%拡大	32
実験 4	Mandrill	(100,100)-(400,400) 切り出し	38
		(106,20)-(406,320) 切り出し	36
		(190,200)-(490,500) 切り出し	31
	Milkdrop	(40,30)-(340,330) 切り出し	34
		(131,177)-(431,477) 切り出し	30
		(200,200)-(500,500) 切り出し	36
実験 5	Mandrill	ゆがみ, +5 度, 110%, (106,20)-(406,20) 切り出し	33
	Milkdrop	ゆがみ, -10 度, 90%, (40,30)-(340,330) 切り出し	26

ているのは方式 5), 6), 8), 9), 11), 13) の 6 例である．そこで，上記 6 例のうち，基本論文として広く引用されている方式 5), 13) と最近報告された方式 9), 11) を取り上げ，これら 4 つの従来方式と提案方式の幾何変形耐性を比較した．

表 6 は 4 つの従来方式の幾何変形耐性の評価をまとめたものである．表 6 は，報告されているデータに基づいて，従来方式に加えた幾何変形攻撃の種別，回転角度，拡大縮小率などの幾何変換のパラメータ，評

表 6 従来方式の幾何変形評価
Table 6 Evaluation of previous methods for survivability against geometric transformations.

従来方式	幾何変形	ﾊﾟﾗﾒﾀ	評価ｻﾝﾌﾟﾙ数	評価結果
方式 5)	回転→拡大縮小	143 度回転 75%縮小	1 ｻﾝﾌﾟﾙ (1 種類の画像に 1 種類の情報を埋め込み)	全 1 ｻﾝﾌﾟﾙから全ﾋﾞｯﾄを正しく検出
方式 13)	回転	10 度	12 ｻﾝﾌﾟﾙ (12 種類の画像に 1 種類の情報を埋め込み)	全ｻﾝﾌﾟﾙから全ﾋﾞｯﾄを正しく検出
	拡大縮小	80%		11 ｻﾝﾌﾟﾙから全ﾋﾞｯﾄを正しく検出
方式 9)	回転	10, 30 度	6 ｻﾝﾌﾟﾙ (6 種類の画像に 1 種類の情報を埋め込み)	3 ｻﾝﾌﾟﾙから所定の誤り確率(6×10^{-4})以下で有意なﾋﾞｯﾄ数を検出
	拡大縮小	70, 150, 200%		5 ｻﾝﾌﾟﾙから所定の誤り確率(6×10^{-4})以下で有意なﾋﾞｯﾄ数を検出
		90%		全ｻﾝﾌﾟﾙから所定の誤り確率(6×10^{-4})以下で有意なﾋﾞｯﾄ数を検出
方式 11)	回転→部分切り出し(*)	0.25, 0.5, 0.75 ,1 度	10000 ｻﾝﾌﾟﾙ (1 種類の画像に 10000 種類の異なる情報を埋め込み)	全ｻﾝﾌﾟﾙから全ﾋﾞｯﾄを正しく検出
		2 度		75.2%のｻﾝﾌﾟﾙから全ﾋﾞｯﾄを正しく検出
		5 度		全ｻﾝﾌﾟﾙからﾋﾞｯﾄｴﾗｰ
	回転→部分切り出し(*)→拡大(**)	0.25, 0.5, 0.75 ,1 度		全ｻﾝﾌﾟﾙから全ﾋﾞｯﾄを正しく検出
		2 度		39.6%のｻﾝﾌﾟﾙから全ﾋﾞｯﾄを正しく検出
		5 度		全ｻﾝﾌﾟﾙからﾋﾞｯﾄｴﾗｰ

(*) 回転後の画像から埋め込み直後の画像と同じ形（同じ縦横比率で切り出しサイズ最大）に切り出す処理，幾何変形パラメタは回転角度になる

(**) 回転，部分切り出し後の画像を埋め込み直後の画像と同じサイズに拡大する処理，幾何変形パラメタは回転角度になる

表 7 従来方式[11] との比較
Table 7 Comparing previous method [11] of proposed method.

(a) 回転→部分切り出し

回転角度	従来 (Lenna)	提案 (Mandrill)	提案 (Milkdrop)
0.25	100.0%	92.3%	99.8%
0.50	100.0%	98.6%	99.6%
0.75	100.0%	75.6%	99.9%
1.00	100.0%	83.8%	100.00%
2.00	75.2%	66.4%	100.00%
5.00	0%	89.3%	100.00%

(b) 回転→部分切り出し→拡大

回転角度	従来 (Lenna)	提案 (Mandrill)	提案 (Milkdrop)
0.25	100.0%	60.6%	100.0%
0.50	100.0%	67.1%	100.0%
0.75	100.0%	55.6%	99.9%
1.00	100.0%	52.0%	99.7%
2.00	39.6%	44.8%	99.5%
5.00	0%	64.7%	99.8%

価サンプル数および評価結果をまとめたものである．提案方式の評価では，表 6 に示したすべての幾何変形について，2 種類の評価画像（Mandrill と Milkdrop）の検出情報誤り数を測定した．その結果，方式 5)，9)，13) の幾何変形に対して，上記 2 種類の評価画像の検出情報誤数は 0 ビットであった．従来方式との単純な比較はできないが，方式 5)，9)，13) が評価したすべての幾何変形に対して，提案方式が耐性を持つことを確認した．

表 6 の従来方式のうち，方式 11) の評価サンプル数は 10,000 であり，他の方式の評価サンプル数に比べて 3 桁程度大きい．そこで，方式 11) が実施した幾何変形評価については，提案方式の評価サンプル数を 10,000 として，さらに詳細な評価を行った．具体的には，提案方式の 2 種類の評価画像（Mandrill と Milkdrop）のそれぞれについて，10,000 種類の異なる情報を埋め込み，10,000 枚のサンプル画像を作成した．次に方式 11) の幾何変形攻撃それぞれについて，10,000 枚のサンプルのうち，すべてのビットを正しく検出できたサンプル数の比率（検出率）を測定した．

評価結果を**表 7** に示す．表が示すように，従来方式[11] の検出率は，回転角度が 0.25，0.50，0.75，1.00 度では 100%となり，ほとんどのケースで従来方式が提案方式を上回るが，回転角度が 2.00，5.00 度では，逆にほとんどのケースで提案方式の検出率が従来方式を上回る．特に回転角度が 5.00 度の場合，従来方式の検出率が 0%になるのに対し，提案方式は 60〜100%程度となる．これは，従来方式[11] が画像内の特徴点を用いて幾何変形を補正するため，幾何変形の程度が増大すると，部分切り出しによって一部の特徴点が欠落し，補正が失敗するためと考えられる．このように，幾何変形の程度が微小な場合は，従来方式の検出率は提案方式に比べて高くなるが，変形の程度が大きくなるにつれて，従来方式[11] の検出率は急激に減少し，提案方式より低くなる．一方，提案方式の検出率は，変形の程度に依存せず，一定の検出率を維持している．また，従来方式[11] は検出時に原画像の特徴点を必要とするが，提案方式は不要である．以上に鑑みると，幾何変形パラメータの範囲が広範な場合，提案方式は，従来方式[11] に比べて幾何変形耐性に優位性があり，かつより実用的な方式であると考えられる．

6. おわりに

本論文では，多様な幾何変形耐性を持つ電子透かし方式を確立すべく，ランダム歪み耐性を持った電子透かし方式[3] をベースとし，以下の 2 つの機構を加えることで，新しい電子透かし方式を提案した．

(1) 回転角度と拡大縮小率を探索するための復元指標 NFC およびそれを用いた角度とサイズの復元
(2) 部分切り出しに対応したセル化，切り出し位置を探索するための帯型透かしパターンと帯 NFC，およびそれを用いた原点位置の復元

提案方式を実装し，幾何変形耐性の評価を行った．評価は 2 種類の画像に対して，64 ビットの情報を埋め込み，回転 4 種類，拡大縮小 4 種類，部分切り出し 3 種類，ランダムゆがみ 100 種類および，これらの組合せ 2 種類への耐性を評価した．その結果，回転，拡大縮小については，回転角度，拡大縮小率を探索することで，元の形に復元でき，かつ検出情報誤り数は 0 ビットであった．部分切り出しは，帯位置を探索することで，情報検出に用いる平面（D'）を修正でき，検出情報誤り数は最大で 1 ビットであった．ゆがみは，無探索で対応し，検出情報誤り数は最大 2 ビットであった．幾何変形組合せは，各幾何変形の復元にすべて成功し，そのとき検出情報誤り数は 0 ビットであった．以上の評価結果から，提案方式は回転，拡大縮小，部分切り出し，ゆがみ，およびそれらの組合せに対する耐性の見通しを得た．

提案方式の今後の課題として，回転角度と拡大縮小率の組合せ探索における計算量の削減があげられる．提案方式は，3.3.5 項で述べたように，幾何変形率の探索において，回転角度と拡大縮小率のパラメータ r，s のすべての値について NFC を算出するため，計算量の増加が問題となる．計算量削減のための具体的対策として，パラメータ r，s のステップ幅を荒くした概略探索と細かいステップ幅の詳細探索による 2 段階探索により，探索処理を軽量化する手法が考えられる．今後はこの 2 段階探索の有効性および，回転角度と拡大縮小率の組合せ探索を不要化するなどの，より本質的な改良方法についても検討する必要がある．

その他の課題として，アフィン変形への完全な対応があげられる．提案方式は，4.2.6 項で述べたように，アフィン変形のうち平行移動（縦と横），回転，縦横比を維持した拡大縮小の 4 つの変形およびその組合せに対応しているが，縦横比の変更および剪断には対応していない．また厳密には，縦横比を維持した拡大縮小のうち，反転をともなう拡大縮小には対応していない．これらの変形に対応するには新たな変形探索処理の追加など提案方式の拡張が必要である．以上の方式拡張および評価を実施し，アフィン変形に完全対応することが必要である．

参 考 文 献

1) Petitcolas, F.A.P., Anderson, R.J. and Kuhn, M.G.: Attacks on copyright marking systems, *Proc. 2nd International Workshop on Information Hiding*, LNCS 1525, pp.219–239 (Apr. 1998).
2) Petitcolas, F.A.P.: A watermarking schemes evaluation, *IEEE Signal Process. Lett.*, Vol.17, No.5, pp.58–64 (Sep. 2000).
3) Yoshiura, H. and Echizen, I.: Color picture watermarking correlating two constituent planes for immunity to random geometric distortion, *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, Vol.E87-A, No.9 (2004).
4) Powell, R.D. and Nitzberg, M.J.: Method for encoding auxiliary data within a source signal, United State Patent 6,385,330 (May 2002).
5) O'Ruanaidh, J.J.K. and Pun, T.: Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking, *Signal Process.*, Vol.66, No.3 (1998).
6) Lin, C.Y., Wu, M., Bloom, J.A., Cox, I.J., Miller, M.L. and Lui, Y.M.: Rotation, scale, and translation resilient public watermarking for images, *SPIE*, Vol.3971, pp.90–98 (Jan. 2000).
7) Bender, W., Gruhl, D., Morimoto, N. and Lu, A.: Techniques for data hiding, *IBM Syst. J.*, Vol.35, No.3&4, pp.313–336 (1996).
8) Nakamura, T., Ogawa, H., Tomioka, A. and Takashima, Y.: An improvement of watermarking robustness against moving and/or cropping the area of the image, *Proc. SCIS'99*, pp.193–198 (Jan. 1999).
9) Tone, M. and Hamada, N.: Scale and rotation invariant digital image watermarking method, *IEICE Trans. Inf. & Syst.* (*Japanese Edition*), Vol.J88-D-I, No.12 (2005).
10) Kuribayashi, M. and Tanaka, H.: Watermarking schemes using the addition property among DCT coefficients, *IEICE Trans. Fundamentals* (*Japanese Edition*), Vol.J85-A, No.3 (2002).
11) Hisanaga, R., Kuribayashi, M. and Tanaka, H.: Improvement Scheme of watermark detection ability based on blockwise image compensation for geometrical distortions, *IEICE Trans. Fundamentals* (*Japanese Edition*), Vol.J88-A, No.10 (2005).
12) Iwata, M. and Shiozaki, A.: Improvement of watermark robustness against affine transform by Hilbert scanning key generation and local search, *IEICE Trans. Inf. & Syst.* (*Japanese Edition*), Vol.J84-D-II, No.7 (2001).
13) Bas, P., Chassery, J.-M. and Macq, B.: Geometrically invariant watermarking using feature points, *IEEE Trans. Image Process.*, Vol.11, No.9 (2002).
14) Tamura, H. (Ed.), *Computer Image Processing*, pp.289–290, Ohmsha (2002).

(平成 19 年 6 月 15 日受付)
(平成 19 年 12 月 4 日採録)

大中　雅憲

2007 年電気通信大学大学院電気通信学研究科人間コミュニケーション学専攻修了．同年三井住友銀行入社，現在に至る．在学中，電子透かしの研究に従事．

中山　心太（学生会員）

2007 年電気通信大学電気通信学部電子工学科卒業．現在，同大学大学院博士前期課程在学中．電子透かし，フィッシング検知の研究に従事．

後守　裕介（学生会員）

2007 年電気通信大学電気通信学部人間コミュニケーション学科卒業．現在，同大学大学院博士前期課程在学中．電子透かしの研究に従事．

越前　　功（正会員）

1997 年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了（応用物理学）．同年日立製作所入社，システム開発研究所を経て，2007 年より国立情報学研究所コンテンツ科学研究系准教授．メディアセキュリティ，メディア情報処理，情報ハイディングの研究に従事．博士（工学）．2004 年度情報処理学会論文賞受賞，2006 年 IEEE IIH-MSP06 Best paper award 受賞．IEEE，電子情報通信学会，映像情報メディア学会各会員．

吉浦　　裕（正会員）

1981 年東京大学理学部情報科学科卒業．日立製作所を経て，2003 年より電気通信大学電気通信学部人間コミュニケーション学科勤務．現在，同教授．自然言語処理，知識処理の研究を経て，現在，情報セキュリティ，著作権保護の研究に従事．理学博士．電子情報通信学会，システム制御情報学会，人工知能学会，IEEE 各会員．2000 年日立製作所社長技術賞，1990 年情報処理学会学術奨励賞，2004 年度情報処理学会論文賞，2005 年システム制御情報学会産業技術賞受賞．