幾何的変換に耐性を有する線画用電子透かしの提案

金城和志[†] 稲葉宏幸[†]

近年，2 値の線画である漫画，イラストやフォント等がディジタルデータとして扱われるようになってきている．しかし，これらに適した透かし手法はあまり検討されていない．そこで本論文では，線画に適した電子透かしの一手法を提案する．提案手法は，線画を構成する曲線を p 型フーリエ記述子で表し，周波数領域において埋め込みを行う手法である．この手法は，埋め込み後においても曲線の概形を保持でき，品質に大きな劣化を与えることなく埋め込みが可能である．また，拡大・縮小や回転，裏返し等の幾何的改変操作に対して高い耐性があることを示す．

Geometrical Transformation Resistant Digital Watermarking for Line Drawing

Kazushi Kaneshiro[†] and Hiroyuki Inaba[†]

Recently, a lot of binary line drawings such as comics, illustrations, and digital fonts are published by digital data. However, few studies of digital watermarking for the digital contents have been made. In this paper, we propose a new method of digital watermarking for a binary line drawing. A watermarked data is embedded into frequency domain to which a line drawing is converted by p-type Fourier transformation. The method makes it possible to embed a watermark without large deterioration in quality of image, and has high resistance in alteration of enlargement, reduction, rotation and reversal.

1. はじめに

ディジタルコンテンツは品質劣化を起こさずに種々の加工・編集が可能であるという性質を有しているが，その一方で不正コピーの蔓延等，著作権の侵害問題を引き起こす原因ともなっている．この問題の解決策の1つとして，電子透かし技術が注目を集めている．電子透かし技術は，著作権情報等の副情報をコンテンツ自体に人間に知覚できないように埋め込む技術である[1)]．

従来，写真等の多値静止画像に対する電子透かしは数多く提案されているが，最近，インターネット上にも数多く公開されるようになってきている漫画やイラスト等の 2 値の線画像に対する埋め込み手法はあまり検討されていない．2 値の線画像に対する埋め込み手法として従来検討されているものとしては，2 値画像に対する埋め込み手法[2)]，2 値の漫画を対象にした埋め込み手法[3)] 等がある．しかし，これらの手法はともに画素空間に対する埋め込み手法であり，回転や拡大・縮小等の改変操作に対する耐性は一般に高くない．そこで，本論文では回転や拡大・縮小に不変な形式の周波数変換を行い，その周波数空間に対して埋め込みを行う手法を提案する．

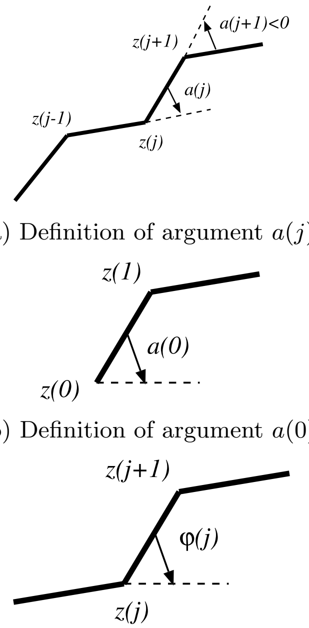
まず最初に，2 値の線画を構成する線幅 1 ドットの曲線そのものに対して離散フーリエ変換を行い，その冗長部分に透かし情報を埋め込む手法を提案する．次に，それを線幅が任意の曲線に対応できるように拡張する．また，本提案手法の有効性を確認するために計算機実験を行い，提案手法の性能と画質の評価を行う．

2. 準備

本章では，提案手法で用いる曲線のフーリエ変換技法の一種である p 型フーリエ記述子[4)] について簡単に述べる．

ある連続曲線 C を十分短い長さ δ の n 個の線分で構成される折れ線図形と考え，各線分の端点の座標を曲線の端から順に $(x(0), y(0)), (x(1), y(1)) \cdots$ と考える．これらの点を複素平面上の点と考え，$z(j) = x(j)+iy(j)$ と定義する．ここで，線分 $(z(j-1), z(j))$ と $(z(j), z(j+1))$ がなす角度を偏角 $a(j)$ $(-\pi \leq$

† 京都工芸繊維大学工芸学部電子情報工学科
Department of Electronics and Information Science, Faculty of Engineering and Design, Kyoto Institute of Technology



(a) Definition of argument $a(j)$.

(b) Definition of argument $a(0)$.

(c) Definition of $\varphi(j)$.

図 1　偏角 $a(j)$ と $\varphi(j)$ の定義
Fig. 1　Definitions of argument $a(j)$ and $\varphi(j)$.

$a(j) < \pi$) と定義する（**図 1** 参照）．ただし，$a(0)$ は，線分 $(z(0), z(1))$ が x 軸となす角度とする．これより全曲率関数 $\theta(j)$ を次式のように定義する．

$$\begin{aligned} \theta(0) &= a(0) \\ \theta(j) &= \theta(j-1) + a(j) \\ (j &= 1, \cdots, n-1) \end{aligned} \tag{1}$$

さらに，次式により p 表現 $\omega(j)$ を求める．

$$\begin{aligned} \omega(j) &= \exp(i\theta(j)) = \exp(i\varphi(j)) \\ &= (z(j+1) - z(j))/\delta \end{aligned} \tag{2}$$

式 (2) における $\varphi(j)$ は，線分 $(z(j), z(j+1))$ が x 軸となす角度である（図 1 参照）．

式 (2) で求めた p 表現をフーリエ変換したものを p 型フーリエ記述子と呼び，以下の式 (3) により定義される．

$$c_k = \frac{1}{n}\sum_{j=0}^{n-1}\omega(j)\exp\left(-2\pi i\frac{jk}{n}\right) \tag{3}$$
$$(k = 0, 1, \cdots, n-1)$$

式 (2) から，p 表現は曲線を構成する各点の相対的な位置関係により定義されていることが分かる．このことから，p 型フーリエ記述子は平行移動や拡大・縮小等の変換に対して不変であることが分かる．また，曲線が角度 ξ だけ回転した場合を考えると，式 (1) の $\theta(j)$ がそれぞれ ξ だけ増加することになり，したがって，式 (2) の $\omega(j)$ は，定数倍 $\exp(i\xi)$ だけ変化することになる．つまり，回転後の p 型フーリエ記述子 $\tilde{c}_k$ は，

$$\tilde{c}_k = \exp(i\xi)c_k \tag{4}$$

と表すことができる．また，詳細な説明は文献 4) に譲るが，原曲線が裏返しになった曲線の p 型フーリエ記述子 $\tilde{c}_k$ は，

$$\tilde{c}_k = \bar{c}_{n-k} \tag{5}$$

により表される．さらに，閉曲線の場合に始点の位置を $j = 0$ からではなく $j = s$ にとった曲線の p 型フーリエ記述子 $\tilde{c}_k$ は，

$$\tilde{c}_k = \exp\left(2\pi i\frac{s^k}{n}\right)c_k \tag{6}$$

と表される．

以上，p 型フーリエ記述子の主な性質をまとめると以下のようになる．

（1）　再生曲線の安定性
p 型フーリエ記述子による再生曲線は原曲線とほぼ一致する．つまり，原曲線が閉（開）曲線ならつねに再生曲線は閉（開）曲線となる．また，開曲線の場合に，曲線の端点の座標が保存される．

（2）　幾何学操作に対する p 表現の不変性
p 型フーリエ記述子は p 表現の定義から明らかに平行移動や拡大・縮小に関しては，不変である．また，回転や裏返し，始点位置の変更（閉曲線の場合）等の操作に関しても簡単な関係が成り立っている．

（3）　原曲線に対する近似の視覚的良さ
再生曲線は原曲線の近似となっていて，p 型フーリエ記述子の低域部分・高域部分はそれぞれ曲線の概形・細部に対応している．

（3）の性質より，p 型フーリエ記述子の中・高域部分に電子透かしの埋め込みを行っても曲線の形に大きな影響を与えないことが分かる．また，（2）の性質は，平行移動や回転等の改変操作に強い電子透かしを構成できる可能性を示唆している．

なお，曲線のフーリエ変換技法としては，本論文で用いている p 型フーリエ記述子のほかにも，文献 5) や 6) 等の手法が知られている．しかし，文献 5) は，原曲線が閉曲線であってもフーリエ記述子から再生される曲線は閉曲線にならない場合があり，また，文献 6) では曲線の端点の位置が保存されない等[4]，本論文の用途には適さないと考えられる．

3. 細線に対する透かし手法

3.1 埋め込みアルゴリズム

透かし情報の埋め込みは，p 型フーリエ記述子の絶対値を微小量だけ操作することで実現する．絶対値を操作する理由は，2 章で述べたように，曲線が回転された場合や，透かしの復号の際に p 表現の始点位置が変わった場合には，対応する p 型フーリエ記述子の位相成分が影響を受けるので，絶対値成分への埋め込みを行うことによりそれらの影響をなくすためである．

まず，埋め込みに用いる記述子の周波数を $e(k)$ $(0 \le e(k) \le n-1, k=0,1,\cdots,m-1)$ とする．また，m ビットの埋め込み情報を $I_k=\{0,1\}$ $(k=0,1,\cdots,m-1)$ とし，埋め込みの際に用いる擬似乱数系列 $P_k=\{-1,1\}$ $(k=0,1,\cdots,m-1)$ を用意する．

[透かし埋め込みアルゴリズム]

[STEP 1]

埋め込む対象の曲線を p 型フーリエ記述子で表し，埋め込み対象係数の記述子の絶対値 $z_{e(k)}$ を得る．

[STEP 2]

埋め込み情報 $I_k=\{0,1\}$ を式 (7) に従い，${I_k}'=\{-1,1\}$ のビット列に変換させた後，絶対値 $z_{e(k)}$ を式 (8) に従って変化させる．

$$\begin{aligned} {I_k}' &= (-1)^{I_k} \\ (k &= 0,1,\cdots,m-1) \end{aligned} \quad (7)$$

$$z'_{e(k)} = z_{e(k)}(1+\alpha \cdot {I_k}' \cdot P_k) \quad (8)$$

ここで α は埋め込み強度を調節する重みパラメータである．透かしを埋め込む係数によってその絶対値が異なるため，同じ埋め込み強度を用いると，大きく絶対値を動かしてしまう可能性があり，望ましくない．そこで，式 (8) により埋め込みを行うこととしている．

[STEP 3]

埋め込み操作が行われた記述子に対して，逆フーリエ変換操作を施し，線分の座標値を得る．

なお，埋め込みの際に使用した擬似乱数系列 P_k と情報を埋め込んだ記述子の周波数および埋め込む前の記述子の絶対値は透かし情報を復号する際に必要な秘密データとなる．埋め込み前の記述子の絶対値は，対象画像により異なる値となるが，原曲線そのものは復号時には必要とされないことに注意されたい．

3.2 復号アルゴリズム

透かし情報の復号は，透かしが埋め込まれた曲線の記述子と埋め込む前の曲線の記述子の絶対値の差に，埋め込みに使用した擬似乱数系列 P_k を乗算することによって実現できる．以下に復号方法を述べる．

[透かし復号アルゴリズム]

[STEP 1]

透かしが埋め込まれている曲線を p 型フーリエ記述子として表し，埋め込んだ係数の記述子の絶対値 $z'_{e(k)}$ を得る．

[STEP 2]

透かしを埋め込んだ係数の絶対値 $z'_{e(k)}$ と，秘密データである埋め込む前の絶対値 $z_{e(k)}$ との差をとる．

[STEP 3]

STEP2 で求めた差と秘密鍵である擬似乱数系列との乗算を行う．正負判定を行い，正なら透かし情報は 1，負なら透かし情報は 0 と復号する．

STEP 1 において，p 型フーリエ記述子を求める際に，場合によっては p 表現の始点位置が埋め込み時と異なってしまうことも生じる．しかし，この場合でも式 (6) の関係により，透かし情報には影響しないことが分かる．

以上に述べた埋め込み手法は，2 章で述べた p 型フーリエ記述子の特徴により，平行移動，拡大・縮小，回転，反転等の操作に対して耐性を有する．このことは，5 章において確認する．

上記のアルゴリズムは，いわゆる「一筆書き」が可能な線幅 1 の曲線に対して適用することができる．より一般的な場合，たとえば，一筆書きが可能でない曲線に対しては，その中から埋め込み対象とする曲線を部分的に選択することが必要となろうし，また，線幅が 1 でない場合には，曲線を細線化する等の前処理が必要となることが予想される．以下，4 章では，これら一般の場合への提案アルゴリズムの適用について述べる．

4. 線幅が任意の曲線に対する透かし手法

3 章で述べた透かし手法は，細線に対して埋め込みが可能であった．しかし線幅が任意の曲線に対してその手法を適用することには，問題点がある．

もちろん，線幅がある程度太ければ線自体の境界線に対して埋め込みをすることにすれば，3 章の手法を適用可能である．しかし，一般には隣り合う境界線が埋め込みによって重なり合う可能性等もあり，必ずしも適用できない．そこで，線幅が任意の曲線に対して

埋め込みを実現する手法として，もとの曲線の中心軸を求め，その中心軸に対して 3 章で述べた透かし手法を適用する手法を提案する．

4.1　中心軸抽出方法

図形を構成する線の中心線を求める方法として，骨格（スケルトン）☆を用いることを考える．骨格を求めるアルゴリズムは種々知られているが，ここでは，文献 7) に提案されている方法を用いる．これは，一般には骨格は元の図形の連結性を保存しないが，文献 7) の方法は元の図形の連結性を保持する性質を有しており，本論文における用途に適しているからである．

4.2　埋め込み・復号アルゴリズム

ここでは，原画像に対して 3 章の透かし手法を用いて埋め込みを行うために必要な埋め込み細線抽出アルゴリズムと画像再生アルゴリズム，そして埋め込み画像から透かし情報を埋め込んだ細線を取り出す復号細線抽出アルゴリズムについて簡単に述べる．**図 2** に埋め込みおよび抽出の流れを示す．

4.2.1　埋め込み細線抽出アルゴリズム

[埋め込み細線抽出アルゴリズム]

[STEP 1]

原画像 A に対してラベル付けを行い，埋め込み対象領域 S と非埋め込み対象領域 T に分ける．

$$A \rightarrow S + T \tag{9}$$

[STEP 2]

S に対して，連結性を保持した骨格化処理 f を施し，骨格画像 S^* と，復元時に必要となる距離情報 D を得る．

$$f(S) \rightarrow S^*, D \tag{10}$$

[STEP 3]

S^* に対して，細線化処理 g を施し，細線化画像 S^{**} を得る．これは，STEP2 で得られた骨格画像は線幅が必ずしも 1 ではないために必要な処理である．細線化処理により失われる点は，画像の再生時に必要であるので，式 (12) により，差分点の集合 $\{df\}$ を記録しておく．

$$g(S^*) \rightarrow S^{**} \tag{11}$$

$$\{df\} = S^* - S^{**} \tag{12}$$

[STEP 4]

S^{**} を埋め込み細線 C と非埋め込み細線 R に分け，C に対して埋め込みを行う．

$$S^{**} \rightarrow C + R \tag{13}$$

☆ ある図形の境界線からの距離が極大になるその図形中の点の集合を骨格という．

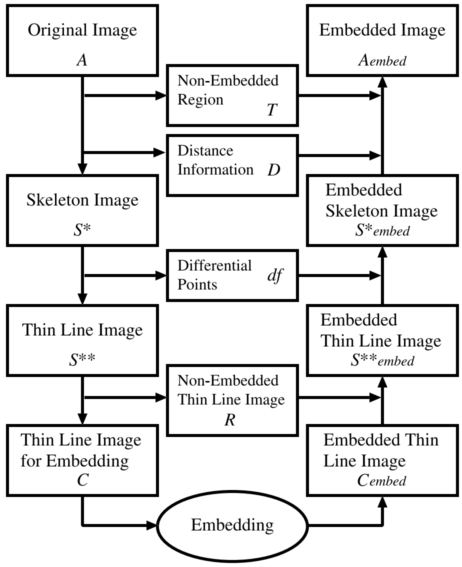


図 2　埋め込みの流れ図
Fig. 2　Flow diagram of embedding.

なお，埋め込み細線の始点，終点等の位置情報は復号時に必要な鍵情報として保持しておく．

STEP 4 において，埋め込み細線 C への埋め込みは，3 章で述べた方法により行うので，埋め込みの際に使用した擬似乱数系列と情報を埋め込んだ記述子の周波数および埋め込む前の記述子の絶対値も同様に保存しておく必要がある．これらの情報が利用できれば，細線に対する埋め込みの場合と同様に原画像そのものは復号時には必要ない．

4.2.2　画像再生アルゴリズム

[画像再生アルゴリズム]

[STEP 1]

埋め込み済み細線 C_{embed} と非埋め込み細線 R を基に，埋め込み済み細線化画像 S^{**}_{embed} を作成する．

$$C_{embed} + R \rightarrow S^{**}_{embed} \tag{14}$$

[STEP 2]

S^{**}_{embed} と差分点を基に，埋め込み済み骨格画像 S^{*}_{embed} を作成する．

$$S^{**}_{embed} + df \rightarrow S^{*}_{embed} \tag{15}$$

[STEP 3]

S^{*}_{embed} と距離情報 D を基に，埋め込み対象領域の埋め込み済み画像 S_{embed} を作成する．

$$f^{-1}(S^{*}_{embed}, D) \rightarrow S_{embed} \tag{16}$$

[STEP 4]

以下により，埋め込み済み画像 A_{embed} を作成

する．

$$S_{embed} + T \rightarrow A_{embed} \tag{17}$$

4.2.3 復号アルゴリズム

埋め込み済み画像から透かしを埋め込んだ細線を抽出するには，埋め込み時のアルゴリズムと同様の処理を行うことで実現できる．なお，細線化画像から埋め込み済み細線を探索する作業が必要となるが，本論文では埋め込みの際に鍵情報とした埋め込み細線の始点，終点等の情報を用いて，一致する細線を探す方法を用いている．

以上に述べたアルゴリズムにより，線幅が任意の曲線に対する埋め込みが可能となる．しかし，透かし情報を復号する際に，埋め込み細線の始点，終点等の座標値が必要であり，改変操作により座標値が変化した場合，そのままでは復号ができないことになる．その場合には，画像中の座標変換によらない特徴点を用いること等により，埋め込み位置の特定を行う必要が生じる．そこで，5 章では，拡大・縮小や回転等の座標変換のパラメータは与えられているものとして実験を行っている．

5. 計算機実験

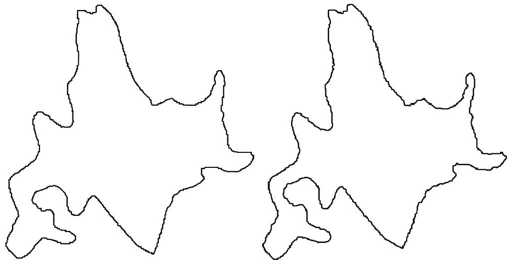
ここでは，3 章で述べた細線に対する透かし埋め込み手法と，4 章で述べた任意の線幅の曲線に対する埋め込み手法に関する計算機実験を行い，その結果と画質評価および改変操作への耐性等に関する考察を行う．

5.1 評 価 方 法

一般に，静止画像における画質評価尺度としてはSN比が用いられることが多い．しかし本論文では埋め込みによる細線の変化を評価したいので，埋め込み時に曲線を表すために用いたp表現自体を使用して，埋め込み前後のp表現の値を比較する評価方法（以後，p表現誤差比（PR）と呼ぶ）を新たに導入して評価を行った．PR は，埋め込み前後のp表現の差の2乗和をとることにより定義する．この値が小さいほど，原画像との差は大きくなる．p表現誤差比の定義式を以下に示す．

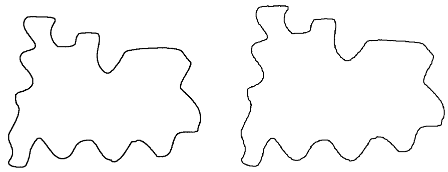
$$PR = 10\times \log_{10} \sum_{j=0}^{n-1} \frac{D}{|\omega'(j)-\omega(j)|^2}\ [\mathrm{dB}] \tag{18}$$

ただし，n はp表現の次元，$\omega(j)$，$\omega'(j)$ はそれぞれ埋め込み前後のp表現の値である．また，D は埋め込み前のp表現の2乗和であり，以下により定義される．



(a) Original image. (b) Embedded (PR=24.12 [dB]).

図 3 原画像と埋め込み済み画像（Case 1）
Fig. 3 Original image and embedded image (Case 1).



(a) Original image. (b) Embedded (PR=23.57 [dB]).

図 4 原画像と埋め込み済み画像（Case 2）
Fig. 4 Original image and embedded image (Case 2).

$$D = \sum_{j=0}^{n-1} |\omega(j)|^2 \tag{19}$$

なお，任意の線幅の曲線に対する埋め込み手法では，埋め込み画像に対する評価として通常のSN比を用いる．SN比の定義式を以下に示す．

$$SNR = 10\times\log_{10}\frac{A^2}{E}\ [\mathrm{dB}] \tag{20}$$

ただし，$A = 2^m - 1$ である（m は1画素あたりに使用されているビット数，本論文では $m = 1$）．また，E は平均自乗誤差である．

5.2 実験結果（細線）

5.2.1 埋め込みパラメータの決定

原画像として，線幅1の2枚の画像（Case 1，Case 2）を用いる．それらを**図 3** (a)，**図 4** (a) に示す．画像サイズはともに 800×600 画素で，曲線の長さ（画素数）は Case 1 が 1,747 画素，Case 2 は 1,976 画素である．

最初に，予備的実験として，記述子の全周波数領域に対して埋め込みを行ったところ，高域のp型フーリエ記述子は埋め込み，復号時に演算誤差によって値が変化することが多く，復号誤り率が高くなることが明らかとなった．そこで，これらの係数は，埋め込み対

表 1 埋め込み領域としきい値
Table 1 Embedded region and threshold value.

(a) Degree $n = 512$

	Embedded region (Threshold)	Embedded bit
Case 1	2〜11 (70), −7〜−2 (75)	7 bit
Case 2	2〜11 (44), −11〜−2 (75)	9 bit

(b) Degree $n = 1024$

	Embedded region (Threshold)	Embedded bit
Case 1	2〜11 (130), −14〜−2 (130)	11 bit
Case 2	2〜12 (80), −11〜−2 (140)	9 bit

(c) Degree $n = 2048$

	Embedded region (Threshold)	Embedded bit
Case 1	2〜12 (220), −8〜−2 (220)	11 bit
Case 2	2〜11 (160), −10〜−2 (250)	10 bit

象から除外することとしている．また，p 型フーリエ記述子の絶対値がある程度小さいものは，復号誤りを起こすことが多いことも明らかとなった．そこで絶対値にしきい値を設け，そのしきい値より大きい絶対値を有する係数に埋め込みを行うようにした．これらから，各実験画像における埋め込み領域としきい値を，p 型フーリエ記述子の次元数が 512，1,024，2,048 の各場合について**表 1** のように決定した．表 1 において埋め込み領域を表す周波数値 f は，式 (3) における周波数パラメータ k を用いて

$$f = \begin{cases} k & ; \quad k < \frac{n}{2} \\ k - n & ; \quad k \geq \frac{n}{2} \end{cases}$$

により表している．

表 1 より，Case 2 の場合は，次元数を大きくしてもほとんど埋め込みビット数は変化していないことが分かる．これは，Case 2 は比較的簡単な画像であるため，中高域周波数の記述子の絶対値が小さく，次元数を増加させた場合でも埋め込み可能領域がほとんど変化しなかったためと考えられる．

実験画像以外のほかの画像に対しても，p 型フーリエ記述子の次元数を変化させて埋め込み領域としきい値の関係を調べたが，埋め込み領域が全領域に占める相対的な位置はほぼ表 1 のデータの範囲内であった．また画像の絶対値のしきい値は，次元が 512 の場合，70〜80 程度，次元が 1,024 の場合，130〜140 の値であり，次元が 2,048 の場合，240〜260 程度の値にすればよいことが明らかとなった．

5.2.2 埋め込み結果と考察

次に，表 1 のパラメータに従って埋め込みを行い，

表 2 改変操作後の復号率（拡大・縮小）
Table 2 Decoding rate after enlargement or reduction.

Enlargement ratio	Case 1 Decoding rate (%)	Case 2 Decoding rate (%)
×0.5	97.2	97.7
×0.75	97.2	100.0
×1.25	100.0	100.0
×1.5	100.0	100.0

埋め込み画像に対する評価を行った．

ランダムな {0, 1} 系列を透かし情報として埋め込んだ結果，完全に復号が可能であった．次元数 $n = 1{,}024$ のときの埋め込み済み画像を図 3 (b)，図 4 (b) に示す．なお，3.1 節で述べた埋め込みパラメータ $\alpha = 0.08$ としている．これらから，埋め込み画像は原画像と比べてほとんど変化がないことが分かる．

また，評価指標に用いた PR と主観的評価との関係を確かめるために，同一の埋め込み領域・しきい値で，埋め込みパラメータ α のみを変化させた実験を行った．その結果，PR の値を，Case 1 では 19 [dB] 以上，Case 2 では 18 [dB] 以上にすれば，著者らが主観的に判断する限り良好な画質であった．したがって画像によって多少の違いはあるが，PR を 19 [dB] 以上にすれば主観的に良好な画質が得られると考えられる．

5.2.3 改変操作への耐性

次に提案方式の有効性を確かめるために，改変操作を加え改変操作後の画像から透かし情報が復号できるかを確かめた．

改変操作には各種存在するが，その多くは濃淡画像に対して有効であるものである．しかし，本論文の評価対象画像は 2 値画像であるためそのまま適用するのは難しい．また提案方式は，その性質から拡大・縮小，回転，反転の改変操作には耐性を持つと考えられる．そこで，上記の 3 つの改変操作への耐性についてのみ確かめた．埋め込み情報としてランダムな $\{0, 1\}$ 系列を発生させ数十回実験を行った．その結果を以下に示す．

[拡大・縮小]

画像の縦横の比率を維持して，画像サイズを 0.5，0.75，1.25，1.5 倍した場合の耐性評価を，**表 2** に示す．ほぼ完全に復号可能であったが，サイズを小さくした場合において多少復号誤りがあった．これは，縮小によって解像度が低下するためであると考えられる．

[回転]

画像を反時計回りに 1，3，45，90 度回転させた場合の耐性評価を**表 3** に示す．ただし，改変操作

表 3 改変操作後の復号率（回転）
Table 3 Decoding rate after rotation.

Angle (degree)	Case 1 Decoding rate (%)	Case 2 Decoding rate (%)
1	100.0	100.0
3	100.0	100.0
45	97.2	96.2
90	100.0	100.0

表 4 改変操作後の復号率（反転）
Table 4 Decoding rate after reversal.

Case 1 Decoding rate (%)	Case 2 Decoding rate (%)
100.0	97.7

後の画像から直接復号している．こちらもほぼ完全に復号可能である．しかし回転角 45 度において，復号誤りを起こしている．これは回転の際の演算誤差が原因であると考えられる．

[反転]

画像を左右反転した場合の耐性評価を**表 4** に示す．こちらも改変操作後の画像から直接復号している．この場合もほぼ完全に復号している．復号誤りについては，p 表現を得る際の演算誤差が原因と考えられる．なお，反転の場合は拡大・縮小および回転の場合と異なり，復号時に反転の有無の情報が必要となる．

以上より，上記 3 つの改変操作への耐性は十分に高いと考えられる．復号に失敗する場合の原因としては演算誤差が考えられるが，画質の劣化をある程度認めるならば透かし強度を強くすることによって，問題は解消されると思われる．

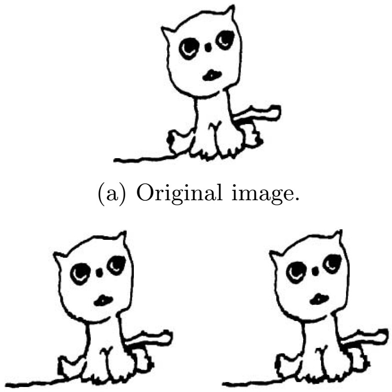
5.3 実験結果（任意の線幅の曲線）

5.3.1 実験条件の決定

図 5 (a) に原画像を示す．白黒 2 値画像，サイズは 800×600 画素である．まず予備実験として，以下の 2 つを行った．

1. 再生画像の評価

提案方式は，透かしの埋め込みを行わなくても，骨格化画像をもとに再生した再生画像は原画像とわずかに異なる．予備実験では，特に曲線部分が原画像に比べてなめらかではなくなっていることが判明した．これは，骨格化処理の際に距離の定義として 8 近傍距離を用いているためであると考えられる．そこで，再生画像に対してメディアンフィルタを施すことによりこの問題を軽減させることとした．これにより主観的な画質は改善され，SN 比もある程度改善することができる．



(a) Original image.

(b) Embedded (Pattern 1, S/N=18.55 [dB]). (c) Embedded (Pattern 2, S/N=20.21 [dB]).

図 5 原画像と埋め込み済み画像
Fig. 5 Original image and embedded images.

2. 埋め込み細線の決定

埋め込みに用いる細線の長さを長くすれば，埋め込みビット数を多くとれるが，主観的な画質の劣化が大きくなってしまう可能性がある．もちろん，透かし強度を弱くすれば主観的な影響は小さいが，4 章で述べた任意の線幅の曲線に対する埋め込み手法では，埋め込み済み細線と復号細線が多少異なる細線となるため，正しく復号するためにはある程度の透かし強度を必要とする．

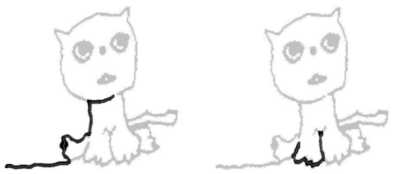
予備実験の結果，埋め込み細線の長さを制限して埋め込みを行うことで，ある程度の透かし強度を保ったまま，主観的な劣化を軽減することが可能であることが明らかとなった．

以上の予備実験より，埋め込みの際は，埋め込む細線の長さを制限して埋め込みを行い，埋め込み済み画像には画質を改善するため複数回メディアンフィルタを施すこととした．

実験条件は，埋め込む細線の長さを 200 以上 500 以下とし，また p 型フーリエ記述子の次元数を 2,048 と選んでいる．

5.3.2 埋め込み結果とその考察

実験条件を満たす埋め込み細線の選び方は種々に考えられるが，今回は細線パターン 1，2 の 2 つのパターンに対して実験を行った．細線の長さはパターン 1 は 453 画素，パターン 2 は 200 画素である．前述した実験条件で埋め込み実験を行った結果，パターン 1，パターン 2 ともに完全に復号可能であった．埋め込み済み画像（メディアンフィルタ処理後）をパターン 1 に関しては図 5 (b) に，パターン 2 に関しては図 5 (c)



(a) Pattern 1.　(b) Pattern 2.

図 6　埋め込み細線パターン
Fig. 6　Embedded thin line image.

表 5　埋め込みパラメータ
Table 5　Embedding parameters.

	Weight α	Embedded region (Threshold)	Embedded bit
Pattern 1	0.22	2〜13(250), −8〜−2(250)	5 bit
Pattern 2	0.26	2〜10(270), −9〜−2(270)	4 bit

に示す．なお，パターン 1 と 2 において，埋め込みを行った部分は，**図 6** において濃く表示されている部分である．またパターン 1，2 の各埋め込み細線に対して埋め込みを行った際の p 表現誤差比 PR はそれぞれ，19.57 [dB]，19.11 [dB] であった．なお，埋め込み領域・しきい値，透かしパラメータ α および埋め込みビット数を**表 5** に示す．

埋め込み画像の SN 比はパターン 1，パターン 2 でそれぞれ 18.55 [dB]，20.21 [dB] であった．著者らが主観的に判断する限り，原画像と埋め込み画像とを比較して著しい劣化が認められるところはなく，十分鑑賞にたえうる画質であると考えられる．なお，埋め込み領域としきい値は変化させずに，埋め込みパラメータ α のみを変化させて画質の変化を見たが，SN 比が 16〜17 [dB] 以上であれば主観的に良好な画像であることが確認できた．

5.3.3　改変操作への耐性

次に提案方式の改変操作に対する頑強性を調べるために，埋め込み済み画像に対して改変操作を加え，改変操作後の画像から透かし情報を復号できるかどうかを確認する．

ここでも細線に対して行った改変操作と同じく，拡大・縮小，回転，反転の 3 つの改変操作に対して提案方式の有効性を確かめるために，ランダムな $\{0, 1\}$ 系列を埋め込むことで，数十回実験を行った．その結果を以下に示す．

[拡大・縮小]

画像の縦横の比率を維持して，画像サイズを 0.5，0.75，1.25，1.5 倍した場合の耐性評価を，**表 6** に示す．いずれも改変操作後の画像から直接復号が可能であるが，復号細線抽出に必要である秘密鍵（埋め込み細線の開始位置等）に関しては，画像に加えたものと同一の倍率で演算を加えてから復号を行った．表 6 から，ほぼ完全に復号可能であることが分かる．

表 6　改変操作後の復号率（拡大・縮小）
Table 6　Decoding rate after enlargement or reduction.

Enlargement ratio	Pattern 1 Decoding rate (%)	Pattern 2 Decoding rate (%)
×0.5	94.0	97.5
×0.75	95.0	98.8
×1.25	100.0	98.8
×1.5	99.0	100.0

表 7　改変操作後の復号率（回転）
Table 7　Decoding rate after rotation.

Angle (degree)	Pattern 1 Decoding rate (%)	Pattern 2 Decoding rate (%)
1	97.0	100.0
3	97.0	97.5
45	90.0	93.8
90	100.0	100.0

表 8　改変操作後の復号率（反転）
Table 8　Decoding rate after reversal.

Pattern 1 Decoding rate (%)	Pattern 2 Decoding rate (%)
100.0	100.0

[回転]

画像を反時計回りに 1，3，45，90 度回転させた場合の耐性評価を**表 7** に示す．拡大・縮小の場合と同様に改変操作後の画像から直接復号しているが，復号細線抽出に必要な秘密鍵は，画像に加えたものと同一の回転演算を行って使用した．表から，ほぼ完全に復号可能であることが分かるが，回転角 45 度では若干復号率が低下している．この原因として考えられるのは，回転による演算誤差，あるいは，骨格化処理や細線化処理の結果が回転角度によって一般に異なってくることなどがあげられる．

[反転]

画像を左右反転した場合の耐性評価を**表 8** に示す．この場合は完全に復号している．ただし，復号細線抽出に必要な秘密鍵は，左右反転演算を加えてから復号している．

以上の結果から，提案手法は上記 3 種類の改変操作への耐性は十分に高いと考えられる．回転に対する耐

性がやや低いが，これは上述したように，骨格化・細線化処理の結果が回転角度によって異なる（回転に対する頑強性が低い）ためであると考えられるので，回転に対して頑強性がある骨格化方法[8] を用いることによって改善できる可能性がある．

6. むすび

本論文では，2 値の線画を構成する線幅 1 の曲線に対して離散フーリエ変換を行い，その冗長部分に透かし情報を埋め込む手法を提案し，さらに線幅が任意の曲線にも対応できるように拡張した．また，提案方式の有効性を検証するために計算機実験を行った．

その結果，提案方式は画質に大きな劣化を与えることなく透かしの埋め込み・復号が可能であった．また拡大・縮小，回転，反転の改変操作に対する耐性を調べ，提案方式はそれらの改変操作に対して高い耐性を有することを示した．今後の課題として，回転に対して頑強性が高い骨格化方法の適用，復号細線の抽出方法の改善，画像再生アルゴリズムの改良等があげられる．本研究は，近年ネット上に数多く公開されている 2 値画像である漫画やイラスト，ベクトルデータであるフォント等の著作物の権利を保護するうえで，有用なものになると考えられる．

謝辞　図 5 (a) の原画像を提供してくださった北川惠さんに感謝いたします．なお，本研究の一部は，日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究（C）（No.15560329）による．

参考文献

1) 小松尚久，田中賢一：電子透かし技術—ディジタルコンテンツのセキュリティ，東京電機大学出版局 (2004).
2) 阿部　悌，井上浩一，江尻公一：2 値画像への電子透かし，SCIS2000 予稿集，Vol.C-I, No.5, pp.1–8 (2000).
3) 小掘紀子，岩切宗利，松井甲子雄：画素分布による 2 値漫画への電子透かしの一方式，情報処理学会論文誌，Vol.42, No.3, pp.595–604 (2001).
4) 上坂吉則：開曲線にも適用できる新しいフーリエ記述子，信学論，Vol.J67-A, No.3, pp.166–173 (1984).
5) Zahn, C. and Roskies, R.: Fourier Descriptors for Plane Closed Curves, *IEEE Trans. Comput.*, Vol.21, No.3, pp.269–281 (1972).
6) Granlund, G.: Fourier Preprocessing for Hand Print Character Recognition, *IEEE Trans. Comput.*, Vol.21, No.2, pp.195–201 (1972).
7) Arcelli, C.: From Local Maxima to Connected Skeletons, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.3, No.2, pp.134–143 (1981).
8) Ge, Y. and MichaelFitzpatrick, J.: On the Generation of Skeletons from Discrete Euclidean Distance Maps, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.18, No.11, pp.1055–1066 (1996).

(平成 16 年 11 月 25 日受付)
(平成 17 年 6 月 9 日採録)

金城和志
平成 13 年京都工芸繊維大学工芸学部電子情報工学科卒業．平成 15 年同大学院工芸科学研究科博士前期課程修了．主に電子透かしの研究に従事．現在，富士ゼロックス（株）に勤務．

稲葉　宏幸（正会員）
昭和 62 年大阪大学工学部通信工学科卒業．平成 1 年同大学院工学研究科通信工学専攻修士課程修了．平成 4 年京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科博士後期課程修了．工学博士．同年京都工芸繊維大学工芸学部助手．平成 12 年同大学助教授，現在に至る．主に情報理論，符号理論，情報セキュリティの研究に従事．IEEE，電子情報通信学会，情報理論とその応用学会各会員．