

画素分布による2値漫画への電子透かしの一方式

小堀 紀子[†] 岩切 宗利[†] 松井 甲子雄[†]

電子出版の普及にともない、書籍をパソコンや携帯端末上で読む時代となってきた。これにともない、著作権保護の問題が発生するが、漫画の特長を生かした電子透かし技術は見当たらない。そこで、この論文では、インターネットを介して電子的に取り引きされるデジタル漫画に注目し、漫画を2値画像としてとらえ、そこに電子透かしを埋め込む一方式を提案する。本方式は、漫画の特徴である線画を利用し、線分や絵を構成する黒画素の領域を従来法とはまったく異なる面積としてとらえて透かし情報を埋め込む方法である。この方法によれば、画像の黒画素領域のエッジ部分を一樣に拡大または縮小しながら利用するため、視覚的にも画像への影響が少なく、各種の攻撃にも耐えられることを示す。

A Digital Watermarking Scheme to Binary Comic Image by Pixel Distribution

NORIKO KOBORI,[†] MUNETOSHI IWAKIRI[†] and KINEO MATSUI[†]

Recent developments of electronic publication enable us to read books on a personal terminal and bring a serious problem of copyright protection on World Wide Web or Internet at the same time. This paper pays attention to a digital comic book in such a style. More robust techniques for comic pictures are not presented to embed the copyright data, yet. We propose a simple scheme of comic watermarking, which expands or shrinks the area of black pixels uniformly so as to represent a digit of copyright data with pixel distribution. The watermarked comic resists unintentional attacks of JBIG/JPEG processing and is robust for intentional attacks such as StirMark, also.

1. はじめに

インターネットの普及および端末の小型化にともない、ネットからデータをダウンロードし、パソコンや携帯端末で読む「電子書籍」の市場が広がりつつある。また、日本は「漫画文化の国」¹⁾といわれるほど多種多彩な漫画の著作物がある。漫画の特性として、言葉と絵という異種の記号が複合した表現であること、コマの連続によって物語が進行すること²⁾、手書きの線画が基本であることなどがあげられる。漫画の描画に用いられる線は図1のように多種多様であり、太いものもあれば、細いものもあり、また、長いものもあれば、短いものもある。また、線と線の間に入ればカラー画像になり、入らなければ2値画像と見なせる。

マルチメディアコンテンツの著作権保護法として様々な電子透かし法³⁾が研究されている。濃淡画像を対象としたものとして、画素値の周波数領域を利用す

るもの⁴⁾やビットプレーン構造を利用するもの⁵⁾などがある。しかし、これらの方法をそのまま2値画像へ応用することは難しい。一方、2値画像を対象とした電子透かし法には、ファクシミリのランレングスの偶数/奇数を利用して情報を埋め込むランレングス符号化方式⁶⁾、上下の走査線間の垂直モードの偶数/奇数を利用する二次元符号化方式⁷⁾がある。そのほかにも、2次元のウィンドウパターンを検出し、それを変更する方法⁸⁾も提案されている。文書画像に適した方法としては、欧文の行間や語間の距離を制御する方式⁹⁾、和文のフォントを微少に操作する方式¹⁰⁾が提案されている。さらに人間の視覚的積分効果に着目して、濃淡画像の自由度を利用する濃度パターン法¹¹⁾、組織的ディザ法¹²⁾、誤差拡散法¹³⁾などがある。しかし、これらの手法は電子透かしの初期の頃に開発されたもので、最近のStirMark¹⁴⁾などの攻撃に弱い欠点がある。

そこで本論文では、漫画の特徴の中で「手書きの線画」という点に着目し、いくつかの攻撃にある程度まで耐えられるような2値画像の画素分布を利用した電

[†] 防衛大学校情報工学科
Department of Computer Science, National Defense
Academy



図 1 4コマ漫画の例

Fig. 1 An example of binary comic image.

子透かし法を提案する。手書き文字の場合、線自体が情報を持っているのに対し、線画の場合は線で囲まれた部分の形状が情報を持っている。また、人間の感性ではその形状を曖昧に知覚するため、その輪郭の画素を操作しても画素変更の影響（線が消えるなど）が出にくいと考えられる。また、漫画の場合は手書きのため、線自体にも太い箇所や細い箇所が存在し、曲率も一定ではない。よって、画素数が若干変化しても読者の目には大きな違和感として入ってこないと考え、画素面積を変更させることによって情報を埋め込む手法を検討した。

その手法は、まず各コマを1つの画像として切り出した後、それを矩形に分割し、その中の黒と白の画素数を調べ、その平面的な広がりを通かし情報に従って操作するものである。このとき、画像の視覚的な変化を抑制するために、操作する画素をエッジ部分に限定する。この透かし情報の埋め込みによって、漫画のエッジ部分の線の幅がわずかに変化するが、読者にあまり違和感を与えないで済ませることができる。また、本方式はJBIG¹⁵⁾、JPEG¹⁶⁾などのデータ圧縮や、拡大・縮小などのサイズ変換に耐えられることを実験的に確認した。

まず、2章では漫画の特徴を生かした透かしの埋め込み方法を述べ、3章でその抽出方法を述べる。4章では、2章で述べる埋め込み法に乱数を用いた改良案を述べ、5章で本手法による電子透かしを4コマ漫画に施した実験結果を示し、本方式の長所・短所を考察する。

2. 埋め込み法

4コマ漫画の中から1コマを $M \times N$ 画素の画像として抽出し、その画像内の座標 (x, y) の画素値を $a(x, y)$ で表現する。この1コマの画像を大きさ $m \times n$ 画素の矩形（以下単位矩形とよぶ）に分割する。各単位矩形 A_i ($i = 1, 2, 3, \dots$)ごとに黒画素数 B_i と白画素数 W_i を求める。この方法においては、背景色（白色）の画素値を“0”，ラインや文字などの描画オブジェクト（黒色）の画素値を“1”とする。したがって、座標 (x_i, y_i) を基点とする $m \times n$ 画素の単位矩形 A_i における B_i, W_i の値は、

$$B_i = \sum_{l=0}^{n-1} \sum_{k=0}^{m-1} a(x_i + k, y_i + l) \quad (1)$$

$$W_i = m \times n - B_i \quad (2)$$

として算出することができる。

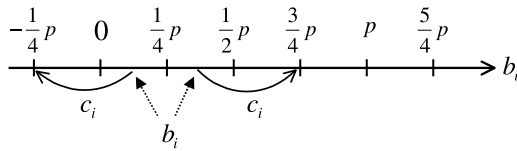
ここで求めた B_i の値を用いて、透かし情報の埋め込み可能領域と不可能領域を分類する。たとえば、単位矩形領域内がすべて黒画素ならばそこに白画素を導入すると画質劣化になり、一方、全面が空白の単位矩形領域に黒画素を散在させることも好ましくない。これらの特殊事情を排除するために次の条件を導入する。

$$p \leq B_i \leq m \times n - p \quad (3)$$

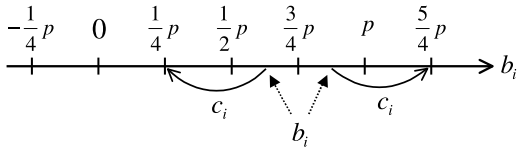
これは、一定値 p 個以上の黒画素と同時に p 個以上の白画素を含む領域を通かし情報の埋め込み可能領域とよぶことにする。ここで、式(3)を満たす画像内の単位矩形数を E で表す。

この式(3)の条件を満たした矩形に対し、透かし情報 d_i の値により黒画素数 B_i を増減する。ただし、透かし情報は文字または数字列を2進数に展開した著作権データからなるものとし、 $d_i = 0$ または1 ($i = 1, 2, 3, \dots, E$)とする。

そこで図2に示すように透かし情報が“1”のときには、原則として p による黒画素数の剰余が $\frac{3}{4}p$ になるように一部の画素値を変更する。一方、透かし情報が“0”のときには、黒画素数の剰余が $\frac{1}{4}p$ になるように黒画素の値を一部変更する。この方法により透かし情報を黒画素の面的な広がり（分布）情報に代替して埋め込むことが可能となる。



(a) if $d_i = 1$.



(b) if $d_i = 0$.

図 2 埋め込みの原理

Fig. 2 The principle of embedding.

この埋め込み原理に従い、まず、

$$b_i = B_i \bmod p \tag{4}$$

を求める。次に、 d_i の値により変更すべき黒画素の増減数 c_i を求める。ところで、前述の原則により $d_i = 1$ に対してつねに剰余値 $\frac{3}{4}p$ を維持するように画素値を変更していると、 $b_i < \frac{1}{4}p$ のときには変更すべき画素数 c_i が必ず $\frac{1}{2}p$ より多くなる欠点がある。そのまま実行すると著しく画質を損なうことになる。なぜならば、この $|c_i|$ 分の原画素の変更は画質劣化に直結しているからである。そこで本方式では

$$-\frac{1}{4}p \equiv \frac{3}{4}p \pmod{p} \tag{5}$$

の関係を利用して、 $d_i = 1$ かつ $b_i < \frac{1}{4}p$ の場合には法 p のもとの黒画素数の剰余 b_i が $-\frac{1}{4}p$ になるように c_i を決定する。この処置により画素値の変更量をほぼ $|c_i| \leq \frac{1}{2}p$ に抑えることができる。

一方、 $d_i = 0$ に対しても画質の劣化を防ぐために同様な処置を施す。その結果、次のようになる。

もし $d_i = 1$ ならば (図 2(a) 参照)

$$c_i = \begin{cases} -\frac{1}{4}p - b_i & \text{if } b_i < \frac{1}{4}p \\ \frac{3}{4}p - b_i & \text{if } b_i \geq \frac{1}{4}p \end{cases} \tag{6}$$

とし、 $d_i = 0$ ならば (図 2(b) 参照)

$$c_i = \begin{cases} \frac{5}{4}p - b_i & \text{if } b_i > \frac{3}{4}p \\ \frac{1}{4}p - b_i & \text{if } b_i \leq \frac{3}{4}p \end{cases} \tag{7}$$

である。さらに、式 (6) または式 (7) から出力された c_i だけ画素数を変更したとき、黒画素数の合計値 $B_i + c_i$ が埋め込み可能領域内にあるか否かを調べる。

もし領域外に出るならば c_i を次式により

$$c_i \leftarrow \begin{cases} c_i - p & \text{if } B_i + c_i > m \times n - p \\ c_i + p & \text{if } B_i + c_i < p \end{cases} \tag{8}$$

と修正する。

次に、単位矩形内のエッジ部分を検出する。2 値漫画は、白色領域に様々な太さの黒色の線で描かれているため、その線の両サイド、すなわち変色点をここではエッジとする。エッジへの埋め込み法として様々な手法が考えられるが、ここでは簡単に矩形内の画素を左右上下に走査しながら白から黒へ変化している画素の並びを検出し、 c_i が正ならば白から黒へ、負ならば黒から白へ $|c_i|$ 個反転させる。すなわち $a(x, y) \neq a(x + 1, y)$, $a(x, y) \neq a(x, y + 1)$, $a(x, y) \neq a(x - 1, y)$, $a(x, y) \neq a(x, y - 1)$ を満たすような $|c_i|$ 個の画素を $0 \rightarrow 1$ もしくは $1 \rightarrow 0$ へ変更し、

$$B'_i \leftarrow B_i + c_i \tag{9}$$

とする。

この処理を施すと、図 2 のように単位矩形内の黒画素数 B'_i は

$$B'_i \bmod p = \begin{cases} \frac{3}{4}p & \text{if } d_i = 1 \\ \frac{1}{4}p & \text{if } d_i = 0 \end{cases} \tag{10}$$

となる。この操作を透かし情報 d_i に従って各単位矩形 A_i に施すことにより、透かし情報を漫画のコマ内に埋め込むことができる。

ここで使用した矩形サイズ m 画素、 n 画素およびしきい値 p は埋め込み情報を抽出する際の秘密鍵となる。

3. 復号法

まず、2 値漫画の 1 コマを正規化し、埋め込み時と同サイズの単位矩形に分割する。単位矩形 A_i ごとに黒および白の画素数 \tilde{B}_i, \tilde{W}_i を求める。黒画素数が透かし情報の埋め込み可能条件式 (3) を満たすならば、その単位矩形には透かし情報が埋め込まれているものと判断し、

$$\tilde{d}_i = \begin{cases} 1 & \text{if } \tilde{B}_i \bmod p \geq \frac{1}{2}p \\ 0 & \text{if } \tilde{B}_i \bmod p < \frac{1}{2}p \end{cases} \tag{11}$$

を求め、透かし情報として \tilde{d}_i を出力する。

この操作を各単位矩形 A_i ($i = 1, 2, 3, \dots, \tilde{E}$) に適用し、透かし情報を復号する。ただし、 \tilde{E} はノイズや

第3者の攻撃により埋め込み済み領域数 E と必ずしも同じになるとは限らないことに注意する。

4. 乱数を用いた埋め込み法

2章で述べた埋め込み法は、透かし情報が“1”のときには、原則として法 p による黒画素数の剰余が $\frac{3}{4}p$ になるように、透かし情報が“0”のときには、黒画素数の剰余が $\frac{1}{4}p$ になるように黒画素の値を一部変更するというものであった。しかし、この2つの値にだけ修正を施すと、画素の分布が極端に偏り、明らかに人為的な作為を察知されてしまう。したがって、全数探索法を用いるとこの方法では、 $M \times N$ 通りの矩形サイズに対し、各々矩形サイズの $\frac{1}{2}$ 通り黒画素数の剰余を計算することで黒画素の偏りを見いだすことができる。つまり、たかだか $MN(M+1)(N+1)/8$ 回の試行錯誤で秘密鍵である m, n および p を求めることができてしまう。また2章で述べた方法では、情報の埋め込みが施されている矩形の黒画素数 B_i は

$$B_i = x_i p + \frac{p}{4} k_i = p(x_i + \frac{1}{4} k_i) \quad (12)$$

$(x_i : \text{自然数}, k_i : 1 \text{ or } -1)$

のように p の倍数として表現できる。よって、埋め込みが施されていると思われる矩形の黒画素数を統計的に調べることで p を求めることができてしまう。

そこで本章では、透かし情報が“1”のときには法 p による黒画素数の剰余が区間 $(\frac{1}{2}p, p)$ にランダムに分布し、一方、透かし情報が“0”のときには、黒画素数の剰余が区間 $(0, \frac{1}{2}p)$ に分布するように黒画素の値を一部変更する方法を述べる。この方式を用いると、埋め込み後の黒画素数の剰余が一定値に偏る現象を回避できるため、秘密鍵の探索を困難にできる。

まず、乱数生成器を用いて区間 $(0, 1)$ の乱数 r_i を求める。2章で述べた方式と異なるのは、式(6)および式(7)に示した c_i の求め方である。すなわちもし $d_i = 1$ ならば、

$$c_i = \frac{1}{2}p + \frac{1}{2}p \times r_i - b_i \quad (13)$$

とし、 $d_i = 0$ ならば

$$c_i = \frac{1}{2}p \times r_i - b_i \quad (14)$$

である。2章の場合と同様に、式(13)または式(14)から出力された c_i による変更後の黒画素数が埋め込み可能領域の外にあるならば、式(8)により c_i を修正する。以下、2章と同様に黒画素数を変更することにより、法 p による変更後の黒画素数の剰余が偏ることなく透かし情報を埋め込むことができる。



(a) Case 1.



(b) Case 2.

図3 実験用原画像 (800 × 500)
Fig. 3 Original images for computer simulation.

なお、透かしの復号方法は3章のとおりである。

5. 実験結果と考察

本研究で用いた実験画像を図3^{17),18)}に示す。これらは、4コマ漫画の1コマを画像サイズ800 × 500の2値画像として抽出したものである。

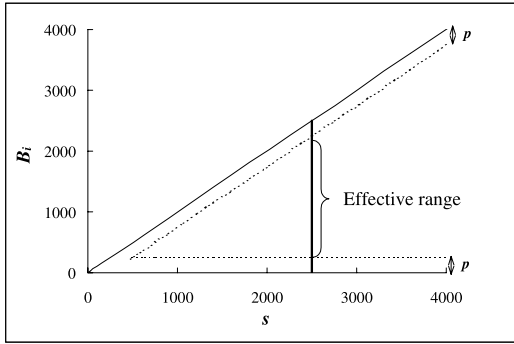
5.1 埋め込み可能情報量

単位矩形 A の画素数は $m \times n$ である。いま、実験の便宜上 $m \times n$ の値をまとめて A のブロックサイズ s とよぶことにする。

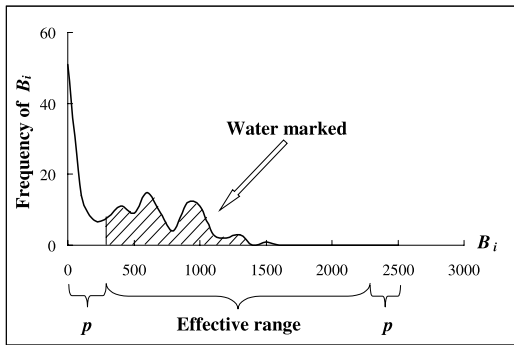
任意のブロックサイズ ($s = m \times n$) における矩形数 E はしきい値 p が設定されていなければ、図4(a)の縦線上に分布する矩形の総数、すなわち

$$E = \left[\frac{M}{m} \right] \times \left[\frac{N}{n} \right] \quad (15)$$

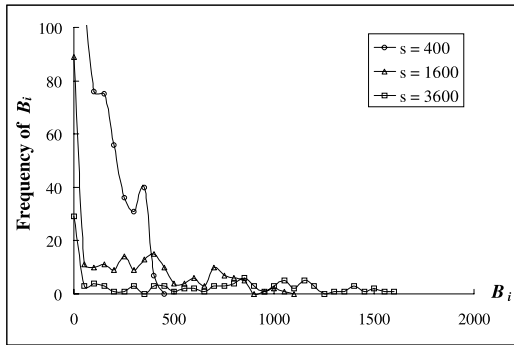
で表される。この式から s について B_i の可能な組数をプロットすると図4(a)が得られる。たとえば、しきい値 $p = 256$ に対して条件式(3)を適用すると、埋め込み可能な黒画素数 B_i は図4(a)の点線で挟まれる領域に限定される。そこで、特に $s = 2500$ における B_i とその出現頻度の関係を図4(b)に拡大してみる。すると、この斜線部の面積がしきい値 p のもと



(a) Number of black pixels to block size.



(b) Frequency distribution of B_i at $s = 2500$.



(c) Frequency of black pixels (Case 1).

図 4 黒画素の頻度としきい値の関係

Fig. 4 Frequency of black pixels and the threshold.

での埋め込み可能な領域数 E に相当することになる。このとき左右の幅 p の小領域が、画質劣化を防ぐために透かし情報を埋め込まないブロックに相当する領域である。さらに Case 1 の実験画像 (図 3 (a)) に対してブロックサイズ $s = 400, 1600, 3600$ のとき、黒画素数の頻度を求めると図 4 (c) になる。これらの分布から、 p の値を一定に保持してブロックサイズ s を小さくすると、埋め込み条件を満たさない矩形 A_i が増加することが分かる。

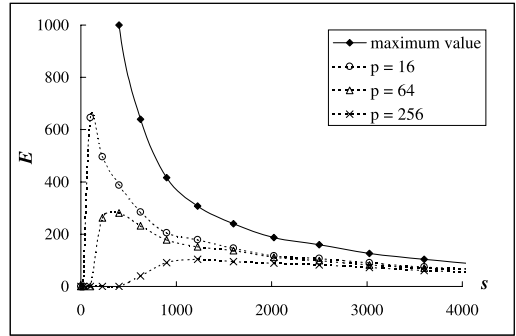


図 5 ブロックサイズに対する埋め込み可能情報量

Fig. 5 Amount of embeddable bits to block size.

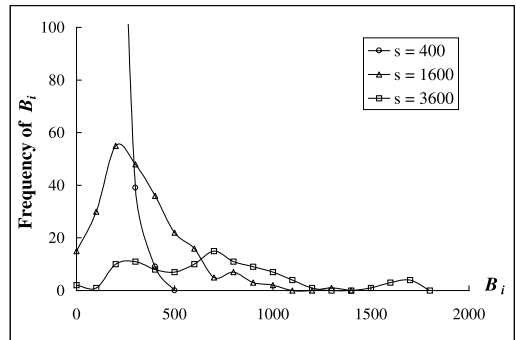


図 6 黒画素の頻度 (Case 2 の場合)

Fig. 6 Frequency of black pixels (Case 2).

そこで p について各ブロックサイズごとに埋め込み可能な矩形数 E を調べたところ、図 5 が得られた。ブロックサイズが大きくなれば、画像全体を分割する矩形の総数が減少するため、一般に埋め込み可能な矩形数 E も減少する。しかし、ブロックサイズを小さくしても、埋め込み可能情報量がつねに増加するとはいえない。これは図 4 で示したように矩形サイズが小さいほど、条件式 (3) により排除される矩形の割合

$$\varepsilon = 1 - \frac{E}{\left\lfloor \frac{M}{m} \right\rfloor \times \left\lfloor \frac{N}{n} \right\rfloor} \quad (16)$$

が増加するためである。

また、埋め込み可能情報量は画像の種類によっても大きく変化する。Case 2 の実験画像に対し、図 4 (c) と同じ条件で黒画素数の頻度を求めると図 6 が得られた。この実験画像のように黒画素数が多く複雑な画像のほうが、白地の画像に比べグラフの左方向への偏りが少ないため、条件式 (3) で排除されにくく、埋め込み可能情報量は多くなりやすいと考えられる。

5.2 画像の複雑性と埋め込みによる影響

図 3 に対し、2 章に述べた方法により $s = 40 \times 40$,

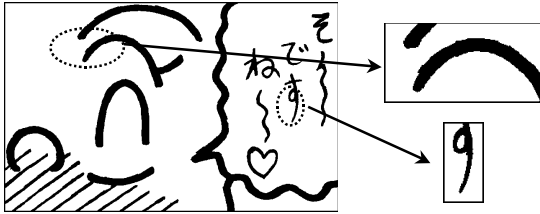
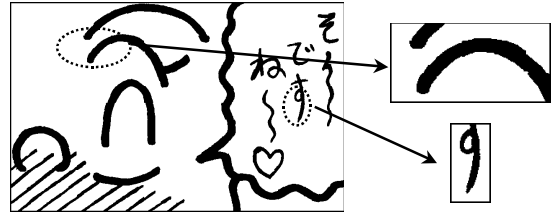
(a) Case 1 ($E = 123$).(b) Case 2 ($E = 187$).図7 $m = 40, n = 40, p = 128$ の場合 (800×500)Fig. 7 Case of $m = 40, n = 40$ and $p = 128$.(a) Case 1 ($E = 123$).(b) Case 2 ($E = 187$).図9 $m = 40, n = 40, p = 128$ の場合 (800×500)Fig. 9 Case of $m = 40, n = 40$ and $p = 128$.(a) Case 1 ($E = 95$).(b) Case 2 ($E = 111$).図8 $m = 40, n = 40, p = 256$ の場合 (800×500)Fig. 8 Case of $m = 40, n = 40$ and $p = 256$.

表1 埋め込み情報量

Table 1 Amount of embedded bits.

| p | 128 | 256 |
|--------|-----|-----|
| Case 1 | 123 | 95 |
| Case 2 | 187 | 111 |

$p = 128$ および $p = 256$ のしきい値条件で埋め込みを施すと図7, 図8が得られた. このときの各画像への埋め込みビット数を表1に示す.

Case 1, 2ともに, $p = 256$ の場合のほうが埋め込み量が少ないにもかかわらず, $p = 128$ の場合に比べ

埋め込みの影響が目立つ. これは, p/s の値が図7では8%であるのに対し, 図8では16%であることに起因する. 埋め込みによって変更される画素数は, 1つの矩形において最大でも $\frac{3}{4}p$ である. p の値が小さければ埋め込み操作をする画素数は少なく, 逆に大きければ埋め込み操作をする画素数が多くなる. そのため, ブロックサイズが等しい場合には p の値が大きいほど画質の劣化につながる. また, 図7, 図8の(a)と(b)をそれぞれ比較すると, Case 2はCase 1ほど, 画像の乱れが目立たないことが分かる. これは, Case 2の方がCase 1に比べ全般にエッジ部が多く, 高周波成分が大きいため, 画素の変更箇所が広い範囲に分散されることに起因すると考える.

次に, 図3に対し, 4章で述べた乱数を用いる方法により $s = 40 \times 40, p = 128$ の条件で埋め込みを施すと図9が得られた.

図7および図9を比較したとき, 画質の乱れから埋め込み方法の違いを見いだすことはほとんどできない.

ここで, 図3(a)と図7(a)の差分画像図10を用いて変更した画素の位置を示す. この図から, 本手法による画素の変更箇所は, 原画像のエッジ部分に限定されていることが分かる. ただし, 本手法では透かし情報を復号するために原画像を必要としないことに注意する.

5.3 低解像度画像への埋め込みの影響

次に, 原画像の解像度を 256×160 に下げた後, 2章の方法により埋め込みを施したものを図11に示す. これは, 現在普及している携帯端末での表示を考

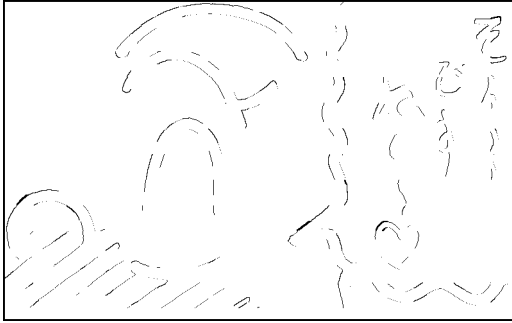


図 10 原画像と埋め込み済み画像の差分 (800 × 500)
 Fig. 10 Difference between original and hidden documents.



(a) Case 1 ($E = 136$).



(b) Case 2 ($E = 211$).

図 11 低解像度の場合 (256 × 160)
 Fig. 11 Case of low resolution.

慮したものである．解像度に対する矩形サイズとしきい値が図 7 と同程度になるよう， $m = 12$ ， $n = 12$ ， $p = 12$ として埋め込みを施した．

解像度が低いため，個々の画素の持つ情報量が大きくなっており，滑らかさに欠けている．しかし，画像全体を通して同じように乱れており，かつオリジナルを知らない場合には違和感を感じずに漫画としての情報を十分に得られるものと考えられる．

5.4 攻撃への耐性

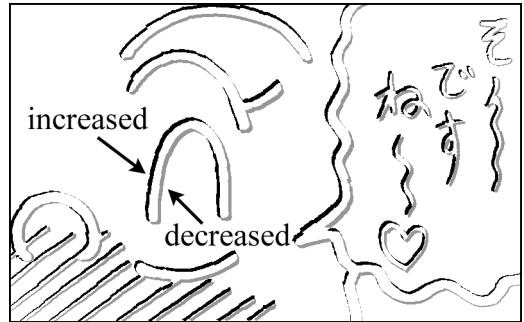
5.4.1 耐圧縮性

2 章および 4 章の埋め込み方法を用いて透かし情報を埋め込んだ 2 値画像に対し，2 値画像の可逆圧縮符号化方法である JBIG-2¹⁵⁾ と連続階調静止画像圧縮符号化方法である JPEG¹⁶⁾ の 2 種類を用いて圧縮符号化への耐性を調べた．JBIG-2 は可逆圧縮のため，圧縮・解凍した画像から問題なく，すべての透かし情報を復号することができた．

JPEG は，本来多値画像に対する圧縮方法であるが，非可逆圧縮への耐性を調べるために用いることにした．圧縮率 10%，8% および 3% でそれぞれ圧縮した後，解凍された実験画像を 2 値化し，その後埋め込み済みの



(a) StirMark attack.



(b) Difference between original and attacked comics.

図 12 StirMark 攻撃の影響 (800 × 500)
 Fig. 12 An effect of StirMark attack.

透かし情報を抽出したところ，いずれの圧縮率においても透かし情報を正しく復号することができた．

5.4.2 StirMark

電子透かしの耐性を検証するツールとして，StirMark¹⁹⁾ とよばれる透かし情報への攻撃ソフトウェアが広く知られている¹⁹⁾．StirMark 攻撃は，画質の視覚的品質を維持しながら，スケーリング，ぼかし，メディアフィルタリング，微小回転，JPEG 圧縮などの処理を複合的に行い，署名情報の破壊を試みるものである．図 7 (a) に対し，StirMark の改変パラメータを中心の移動距離 (-b)，角の内側への移動距離 (-i) および外側への移動距離 (-o) をデフォルト値，画素の変更量 (-d) は 2 値画像の画質を大きく劣化させるため 0 として StirMark 攻撃を行ったものを図 12 (a) に示し，図 7 (a) との差分画像を図 12 (b) に示した．ここで，図 12 (b) の黒色領域は StirMark 攻撃により黒画素が増加した部分，灰色領域は減少した部分を示している．この結果から，StirMark 攻撃によりブロック同期が崩れることが分かる．さらに図 12 (b) に埋め込みデータと復号データの関係図を重ねると，図 13 が得られた．実線で囲まれている矩形は透かし情報が正しく復号された箇所を，点線で囲まれている矩形は

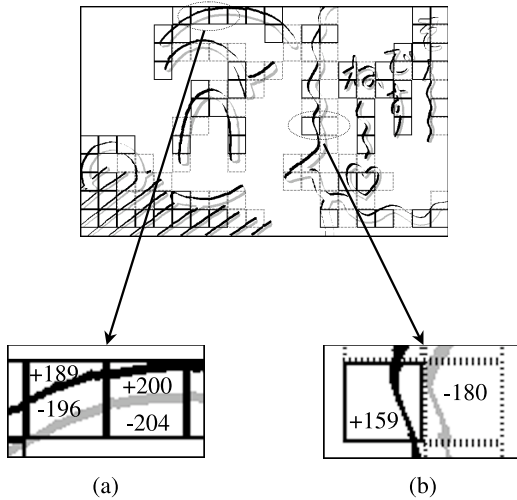


図 13 画素の変更量と復号データの関係

Fig. 13 Amount of changed pixels and decoded data.

透かし情報を埋め込んだにもかかわらず、復号されなかったか、もしくは誤って復号された箇所を示している。また、図 13 中の数値は抜き出した矩形における黒画素の変更量である。

図 7(a) に対して StirMark 攻撃が施された場合の復号率は、平均 53.7%であった。また、図 13(a) のように黒画素の増加と減少がともに発生する矩形と図 13(b) のように増加もしくは減少のみの矩形が存在する。増加量と減少量が相殺されるような場合には埋め込み情報は正しく復号されるが、増加もしくは減少のみの場合や、増減量の偏りが大きい場合には誤検出されやすいことが分かった。本実験ではしきい値を $p = 128$ に設定したため、黒画素の増減量の p による剰余値が $\frac{1}{4}p = 32$ 以上になると誤検出されることになる。

これに対し、図 9(a) に対して StirMark 攻撃が施された場合の復号率は、平均 61.5%であった。乱数を用いて黒画素数の収束値を散らした結果、この攻撃への耐性を 7%程度向上でき、全数探索による鍵パラメータ (m, n, p) の解読攻撃も回避できる利点がある。

しかし、StirMark 攻撃を受けた画像からすべての透かし情報を正しく抽出することは難しい。この対策として、透かし情報を繰り返し挿入する一方で、ブロック同期を補正することや、StirMark による変換を逆変換すること²⁰⁾を考へなければならぬ。また、図 13 に関する考察から、埋め込み可能矩形のうち攻撃による画素数の増減量をうまく相殺できるような領域に限定して透かし情報を埋め込むことも考えられる。このような埋め込みに適した領域の判断法については今後

表 2 画像編集ツール

Table 2 Image editing tool.

| | tool | version | OS |
|--------|-----------------|---------|------------|
| Soft A | Adobe Photoshop | 5.5 | Windows 98 |
| Soft B | Image Magick | 5.2.0 | Solaris 8 |

表 3 図 7(a) の復号率 (%)

Table 3 Decoding rate in case of Fig. 7(a). (%)

| times | 4 | 3 | 2 | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{3}$ | $\frac{1}{4}$ |
|--------|-----|-----|-----|---------------|---------------|---------------|
| Soft A | 100 | 100 | 100 | 99.2 | 43.1 | 91.1 |
| Soft B | 100 | 100 | 100 | 76.4 | 44.7 | 56.1 |

表 4 図 9(a) の復号率 (%)

Table 4 Decoding rate in case of Fig. 9(a). (%)

| times | 4 | 3 | 2 | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{3}$ | $\frac{1}{4}$ |
|--------|------|------|------|---------------|---------------|---------------|
| Soft A | 100 | 100 | 100 | 94.3 | 44.7 | 81.3 |
| Soft B | 91.7 | 94.3 | 77.2 | 67.5 | 41.5 | 51.2 |

の課題とする。

5.4.3 拡大・縮小

図 7(a) および図 9(a) に対し、2 倍、3 倍、4 倍の拡大、および $\frac{1}{2}$ 倍、 $\frac{1}{3}$ 倍、 $\frac{1}{4}$ 倍の縮小を表 2 に示した 2 種類の画像編集ツールで施し、その後透かしの抽出を試みた。

ただし、この倍率は縦横サイズの拡大・縮小率である。また、画像の視覚的品質を保つために、縦横ともに同じ倍率で処理された場合を想定した。拡大の場合、縦横 (m, n) が 2 倍に拡大されるとブロック内のピクセル数は 4 倍となり、3 倍されると 9 倍になる。よって抽出の際は、ブロックサイズを拡大率と等倍にし、しきい値 p は拡大率の 2 乗値を用いる。一方、縮小に関しては、拡大時と同様に、ブロックサイズおよびしきい値を再計算する。たとえば、 $\frac{1}{2}$ 倍および $\frac{1}{4}$ 倍のときには、単位矩形サイズ $m \times n$ およびしきい値 p を整数値で求めることができる。しかし、 $\frac{1}{3}$ 倍のときには (m, n, p) をうまく割り切ることができない。そのため、矩形サイズを $\lfloor \frac{m}{3} \rfloor \times \lfloor \frac{n}{3} \rfloor$ 、しきい値を $\lfloor \frac{p}{9} \rfloor$ とした。各倍率ごとに透かしの復号率を調べると表 3 および表 4 のような結果を得た。

まず、図 7(a) への実験結果について考察する。上記の条件で透かし情報の復号を試みると、拡大の場合、Soft A、Soft B どちらのツールを用いても拡大率にかかわらず、透かし情報を正しく抽出することができた。

縮小に関しては、Soft A を用いた場合、 $\frac{1}{2}$ 倍および $\frac{1}{4}$ 倍では、90%以上の確率で透かし情報を復号することができたが、 $\frac{1}{3}$ 倍では 50%以下の復号率しか得られなかった。これは、矩形サイズおよびしきい値設定の際の切り捨てによる誤差の影響と思われる。一方、Soft B を用いて縮小した場合には、いずれの場合

も高い復号率を得ることができなかった。

このように画像処理ツールによって復号率に差が出る原因として、拡大・縮小処理方法の違いが考えられる。通常、画像の解像度を変更せずに画像サイズを変更するには、ピクセル数を増減させなければならない。この際に画素の輝度レベルの割合を保つように代表値を求める方法と単純に再サンプリングする方法が考えられる。どちらの方法でも視覚的に大きな違いは感じられないが、画素数によって透かしを復号する本システムでは、復号率に大きな影響が生じることが分かった。また、縮小率を上げるに従い復号率が減少する原因として、拡大の際にはしきい値に設けておいた冗長性が増加するのに対し、縮小の際には冗長性が減少することが考えられる。また、 $\frac{1}{3}$ の縮小率では矩形サイズ $m \times n$ およびしきい値 p の設定誤差も影響すると考えられる。

次に、図9(a)への実験結果について考察する。まず拡大についてであるが、Soft A を用いた場合には正確に透かし情報を抽出することができたのに対し、Soft B を用いた場合には復号率が低下した。縮小においては、図7の場合よりも復号率は低下した。図9に施された埋め込み法は、乱数を用いて黒画素数の収束値を分散させたために、図7に比べ冗長度の低い矩形が存在してしまっただけでなく、縮小において図7の場合よりも低い復号率しか得られなかったものと思われる。拡大においては、画像処理ツールの違いが図7のときには冗長性によりカバーされていたが、図9においては影響を及ぼし、Soft B による処理後の復号率を低下させたものと考えられる。

6. おわりに

本論文では、2値のデジタル漫画への電子透かし方式を提案した。本方式は、画素値の持つ値の深さではなく平面的な横の広がり、つまり面積(画素数)分布を利用することによって透かし情報を埋め込むものである。この方法により著作権情報を埋め込めば、比較的強い耐性を持たせることができることを明らかにした。その結果、電子書籍としての漫画の配信における大きな問題点であった著作権保護問題の解決に寄与することができれば幸いである。

今後の課題としては、StirMark に対する耐性の向上策、および拡大・縮小された場合の復号法に関する検討があげられる。また、本方式では線全体の太さを制御するような埋め込み領域を直接操作する攻撃に脆弱である。この対策として、他の電子透かし法との併用などが考えられるが、さらなる検討が必要である。

参考文献

- 1) コミック学のみかた, 朝日新聞社 (1997).
- 2) 清水 勲: 漫画の歴史, 岩波書店 (1991).
- 3) 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).
- 4) 中村高雄, 小川 宏, 高嶋洋一: デジタル画像の著作権保護のための周波数領域における電子透かし方式, 1997年暗号と情報セキュリティシンポジウム, SCIS'97-26A (1997).
- 5) 清水周一, 沼尾雅之, 森本典繁: ピクセルブロックによる静止画像データハイデング, 第53回情報処理学会全国大会論文集(平成8年後期), Vol.2, pp.257-258, IN-11 (1996).
- 6) 田中 清, 中村康弘, 松井甲子雄: MH ファクシミリ通信における情報の多重化, 画像電子学会誌, Vol.18, No.1, pp.2-8 (1989).
- 7) 田中 清, 中村康弘, 松井甲子雄: 情報の2重化伝送可能なMR ファクシミリ符号化方式, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J72-B-I, No.4, pp.368-376 (1989).
- 8) 阿部 悌, 井上浩一, 江尻公一: 2値画像への電子透かし, 2000年暗号と情報セキュリティシンポジウム, SCIS2000-C05 (2000).
- 9) 中村康弘, 松井甲子雄: 著作権保護のための電子文書のハードコピーへの署名の埋め込み, 情報処理学会論文誌, Vol.36, No.8, pp.2057-2062 (1995).
- 10) 中村康弘, 松井甲子雄: 和文書へのシール画像による電子透かし, 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.11, pp.2356-2361 (1997).
- 11) 岡 一博, 中村康弘, 松井甲子雄: 濃度パターン法を用いたハードコピー画像への署名の埋め込み, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J79-D-II, No.9, pp.1624-1626 (1996).
- 12) 岡 一博, 松井甲子雄: 組織的ディザ法によるハードコピー画像への署名情報の埋め込み, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-D-II, No.3, pp.820-823 (1997).
- 13) 小出晋也, 萩原剛志, 金田悠紀夫: 誤差拡散法および平均濃度近似法を用いた画像深層暗号方式の提案, テレビジョン学会技術報告, Vol.20, No.5, pp.7-14 (1996).
- 14) Kuhn, M.G.: StirMark, URL: http://www.cl.cam.ac.uk/~fapp2/watermarking/image_watermarking/stirmark/ (1997).
- 15) JBIG-2, URL:<http://sppmg.ece.ubc.ca/jbig2/> (1999).
- 16) 安田 浩, 藤原 洋 (監訳): デジタル放送・インターネットのための情報圧縮技術, 共立出版 (1998).
- 17) 朝雲, No.2302, 平成10年3月5日号, 朝雲新聞社 (1998).
- 18) 朝雲, No.2337, 平成10年11月12日号, 朝雲

新聞社 (1998).

- 19) 谷本次郎, 岩田 基, 汐崎 陽: 平均値画像の作成法改良により StirMark への耐性を高めた電子透かし法, 2000 年暗号と情報セキュリティシンポジウム, SCIS2000-C07 (2000).
- 20) Dugelay, J.-L. and Petitcolas F.A.P.: Possible counter-attacks against random geometric distortions, Security and Watermarking of Multimedia Contents II, Vol.3971, pp.338-345 (2000).

(平成 12 年 7 月 27 日受付)

(平成 13 年 1 月 11 日採録)



小堀 紀子

昭和 48 年生. 平成 8 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電子透かしに
関する研究に従事. 電子情報通信学

学生会員.



岩切 宗利 (正会員)

昭和 45 年生. 平成 5 年防衛大学
校情報工学科卒業. 平成 10 年同大
学校理工学研究科情報数理専攻修了.
平成 11 年同大学校情報工学科助手.
マルチメディア符号化, 情報セキュ
リティ, 電子透かしに関する研究に従事. 電子情報通
信学会, 日本音響学会各会員.



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. 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.