

印刷耐性のある電子透かし方式の検討

小野 東[†] 江川 雄 毅^{††}

デジタルコンテンツの著作権保護手段として電子透かしが用いられている。しかし、最近是不正コピーの形態も変化しつつある。デジタルデータを不正にコピーする問題以外に書店などでカメラ付き携帯電話により書籍のコンテンツを無断撮影することが社会問題となっている。本論文ではこのような印刷物からの画像撮影に対して抑止力として電子透かしが利用できるか否かを主眼に、印刷耐性のある電子透かしの提案と問題点について検討した。

A Study of Digital Watermark for Printed Image

TSUKASA ONO[†] and YUKI EGAWA^{††}

A digital watermark is used as a copyright protection of digital contents. However, illegal copy tools are changing and developing recently. These becomes such a social problem as taking a picture of the book without permission by using the cellular phone with the camera in the bookstore. In this study, a digital watermarking scheme which is robust against such pictures is proposed. Moreover, the watermark is examined for the robustness when the scheme is applied to the image of printed media.

1. はじめに

電子透かしはデジタルコンテンツの著作権保護の目的で利用されている。WEB上の画像や配信データ、過去の貴重な画像資産などに電子透かしを入れることにより万一デジタル的にコピーされても著作権情報も含まれるため著作権者を特定できる^{1),2)}。しかし、最近紙などに印刷された画像からスキャナやデジタルカメラなどを利用して撮影し再デジタル化する行為や、スクリーンに映し出された画像をビデオカメラで撮影して販売するテレシंकといわれる不正コピー法が増加している³⁾。なかでも最近問題となっているのがカメラ付き携帯電話による撮影である。カメラ付き携帯電話はその手軽さもあり、書籍の画像その他を撮影するいわゆる「デジタル万引き」が頻発し書店にとっては本の盗難以上にやっかいな問題となりつつある⁴⁾。このような事例では、仮に印刷前のデジタルデータに電子透かしを埋め込んでおいても撮影により画像情報の一部欠落と同時に電子透かし情報も消滅し、結果として著作権保護技術としての用をなさない。

一方、携帯電話に搭載されているカメラは100万画素以上となり、すでに数年前のデジタルカメラの性能を凌駕しており、容易に高画質の画像を手に入れることができる。いまでは販売される携帯電話のほとんどがカメラ付きであり、さらに書類や写真などを写すための接写機能付きのものや専用の接写レンズも登場している。現状では無断撮影され再利用されるリスクは一段と高くなっていると考えられる。一方、逆に透かし情報の埋め込まれた画像をカメラにより撮影し画像の中から埋め込まれているURL情報に基づき顧客を誘導するようなサービスも試みられている⁵⁾。

しかし、いずれにしても印刷物からの電子透かしの検出は通常の電子透かしが持つ技術的課題以外に、紙の変形、回転の影響や紙と撮影面の角度、色変化の影響なども考慮しなければならない。すでに印刷物からの撮影や画像取り込みに対応するためにはいくつかの電子透かし手法が検討されている。印刷物からのスキャナによる再デジタル化に対応した方式として水本ら⁶⁾による研究などがある。また、スクリーンに投影された画像の撮影対策として中村ら⁷⁾の研究などがあるが、撮影対策にはいまだに多くの課題が残されている。

本論文では、主として、印刷媒体の撮影あるいはスキャナによる再デジタル化に対応した電子透かしの埋め込み方法について提案し、評価検討を行う。また、

[†] 筑波技術短期大学視覚部情報処理学科
Computer Science Division, Tsukuba College of Technology

^{††} 興和株式会社開発本部先端研究所
Kowa Company, Ltd.

カメラ付き携帯電話による撮影についてもその課題を含めて言及する。

2. 印刷物からの電子透かし検出

2.1 従来方式の概要

一般的なデジタル画像と異なり、画像の印刷、撮影は電子透かしにとっては複合的かつきわめて大きな改変であると考えられる。たとえば、印刷時には色表現方法の変化、インクの発色、紙質、解像度などが変化する。撮影時にはさらに幾何学的な影響、すなわち傾きや部分撮影などの影響を受ける。これらの影響があっても電子透かしが消滅しないような十分な頑健さを持たせる工夫が必要となる。電子透かし方法は DCT (Discrete Cosine Transform) を用いた方法、パッチワーク法、Wavelet 変換¹⁾ を用いた方法など多数報告されている。本研究では、そのなかで、印刷物の撮影に耐性のある電子透かしとして報告されている水本らの方式⁶⁾ に着目した。その方法を図 1 に示す。

なお、DCT、IDCT (Inverse Discrete Cosine Transform) はそれぞれ二次元離散コサイン変換、逆変換であり、入力画像を $f(x, y)$ 、変換によって得られる係数を $F(u, v)$ 、入力画像の画素数を $N \times N$ とすると式 (1)、(2) でそれぞれ表される。

$$F(u, v) = \frac{2c(u)c(v)}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \times \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2N} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2N} \quad (1)$$

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} c(u)c(v)F(u, v) \times \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2N} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2N} \quad (2)$$

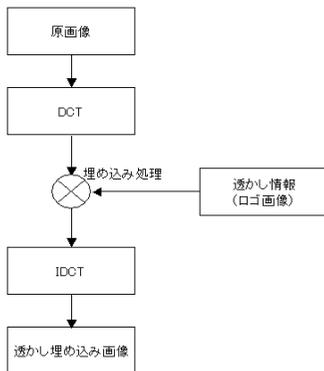


図 1 埋め込み処理

Fig.1 Embedding process.

ここに、

$$c(u), c(v) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & (u, v = 0) \\ 1 & (u, v \neq 0) \end{cases}$$

図 1 において、画像を DCT 演算により周波数領域に変換しロゴとして準備された透かし情報を付加した後、逆 DCT 演算により透かし埋め込み画像を得る。電子透かしの検出時には透かしの埋め込まれた画像を DCT により周波数領域へ変換すればロゴ成分が逆変換される結果、ロゴ画像を目視により確認できる。

本方式は以下の理由により印刷耐性を有すると考えられる。第 1 には DCT 演算時にブロック分割を行わないため、撮影などで生じる幾何学的変化の影響によるブロック位置合わせの問題を軽減できる。一般に、埋め込みの高速化や JPEG 処理との相性を考慮し 8×8 画素程度の小さなブロックに分割して埋め込む方法が採用されることが多い。しかし、このようなブロック分割法を用いると、電子透かしを検出するとき、画像の回転や紙の変形などにより埋め込み時に用いたブロック位置と同期がとれなくなり透かし情報の検出が困難となる⁶⁾。第 2 の理由として、前述のように透かし情報としてロゴ画像を用いるため、透かし検出時に再生ロゴ画像が一部不鮮明に再生されても、人の目の認識能力により文字パターンとして判読できる点がある。

しかしながら、反面この方式は必然的に次のような 3 つの課題と背中合わせにならざるをえない。第 1 にはブロック分割しないため DCT 演算負荷がきわめて大きくなる。この点は本方式が印刷耐性を持つためにブロック分割をしないことと相反する課題である。第 2 には透かし情報はロゴ画像であり、透かし情報検出時においても人の目視認識によらなければ透かし情報を読み取ることができないことである。すなわち透かし情報の確認に人が介入することが必須である。しかし、一般に電子透かし情報を目視確認して終わることはほとんどなく、コンテンツデータベースなどのインデックスあるいは他の情報へのリンクとなるような利用法が多いものと思われる。そのためには電子透かし情報は人の介入を必要とするロゴパターンのような画像ではなく、テキスト情報あるいはビット情報として取り出せることが望ましい。「デジタル万引き」への応用においても同様である。第 3 は透かし情報が人の目による画像認識をとる以上、その視認性を良くするためにはロゴ画像サイズをキャリア画像に対して相対的に大きくする必要がある。すなわち、小さなロゴを用いると IDCT 変換によりロゴ画像が再生されたとき

印刷、撮影などの影響により不鮮明となって判読が困難となる⁷⁾。大きなロゴを用いることは低周波数領域から高周波数領域まで埋め込み周波数が広がることにほかならない。低周波数領域に分布すれば画像の DC レベル分を上げる結果となり画質を著しく損ない、高周波数領域に分布すれば JPEG 圧縮などにより透かし情報が消滅することとなる。ロゴ画像は文字を画像化したものであり、その形状は任意には作成できないため、必然的にある程度の周波数領域に分布することになる。

したがって、本方式では埋め込み可能なロゴの文字数すなわち情報量は数文字の範囲とならざるをえない。この点については 3.2 節でより具体的に述べる。

2.2 提案方式の概要

提案方式は前記方式の利点を生かしつつその固有の課題、すなわち演算時間の短縮とロゴの目視方式を解決することで検討した。まず、図 1 の方式を下記のような変換処理として表記しなおす。ただし、 f は入力画像、 T は DCT、 F は周波数領域へ変換された画像、 s は透かし情報、 $+$ は透かし埋め込み操作、 T^{-1} は IDCT、 f' は透かし埋め込み画像をそれぞれ表すものとする。

$$F = fT \tag{3}$$

$$F' = F + s \tag{4}$$

$$f' = F'T^{-1} \tag{5}$$

ここで、式 (5) に注目すると次式のように簡略化できる。

$$f' = (F + s)T^{-1} = f + sT^{-1} \tag{6}$$

すなわち式 (6) によって、画像に対する DCT, IDCT を経ることなくロゴに対する 1 回の IDCT 演算で等価な結果が得られることが示される。画像の DCT 演算は $O(n^2)$ の演算であり同じ画像であってもブロック分割しないことによる演算時間の増大は著しい。しかし提案方式によれば電子透かし埋め込み時に演算負荷を半減できることになり実装上の効果はきわめて大きい。これに基づき新たな電子透かし埋め込み方法を構成した。図 2、図 3 にそれぞれ電子透かし埋め込み処理と検出処理を示す。

このとき、透かし情報をロゴ画像の目視確認ではなくテキスト情報として取り出すため透かし情報に対応したビットパターン画像を作成しロゴとして用いる。図 4 にビットパターンロゴ画像の構造例を示した。このビットパターンは透かし情報領域に配置され 1 点が 1 ビットを表し、それぞれは数画素で構成されていることに注意する。また、ロゴには図中丸で示したように基準となるマーカシグナルがある。マーカも数画素

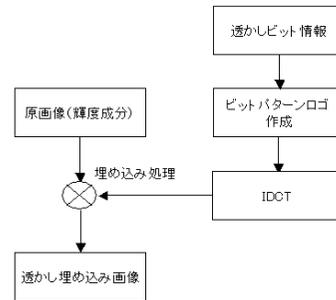


図 2 提案方式の埋め込み処理
Fig. 2 Proposed embedding scheme.

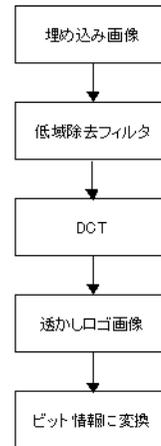


図 3 検出処理
Fig. 3 Detecting scheme.

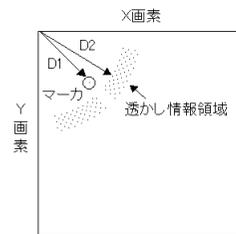


図 4 透かしロゴの構造
Fig. 4 Logo pattern.

で構成され、ロゴ画像の左上端部から D1 の位置に、透かし情報は D2 の位置にそれぞれ配置される。D1 は D2 より左上、すなわち DC 成分寄りのところにあることが重要である。この結果、マーカは JPEG 圧縮などにより除去されにくく、わずか数画素のため DC 成分寄りの場所に配置しても画質に与える影響を最小限にすることができる。検出のときはマーカを検出すれば図 4 の D1 と D2 の比から透かし信号の位置を探索し透かし情報を容易に特定できることになる。このロゴパターンに式 (2) により IDCT 演算を行うと図 5

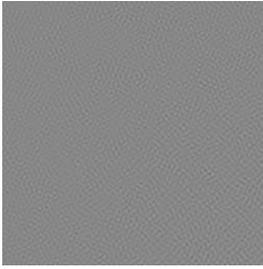


図 5 逆 DCT 後のロゴ
Fig.5 Logo pattern after IDCT.

に見られるノイズ状の画像となる。このノイズパターンはロゴが全面に拡散したもので、局所的にもロゴ画像情報が含まれることになる。そのパターンはロゴの空間周波数およびレベルに依存する。逆に電子透かしを検出する場合は透かし埋め込み画像に式 (1) により DCT 演算を施せば画像は周波数領域へ拡散されロゴはパターン画像となって表示され、パターンから透かしテキストデータに変換できる。

2.3 埋め込みおよび検出の処理ステップ

図 2 で示される提案方式の電子透かしの埋め込み手順をステップで以下に示す。

埋め込み手順

- STEP1: 原画像を YCbCr 変換し輝度信号を作る。
STEP2: 透かし情報としてテキストデータを準備しビット列に分解する。
STEP3: ビット列から対応した透かしビットパターンロゴ画像を生成する。このとき、マーカと透かし情報はそれぞれあらかじめ決めた D1 と D2 に配置される。
STEP4: ビットパターンロゴ画像を IDCT 変換する。
STEP5: 上記信号を画像に対して埋め込み処理を行う。
STEP6: RGB 信号へ戻し透かし埋め込み画像を得る。

次に上記で作成された透かし埋め込み済みの画像から透かし検出する場合の手順を図 3 に基づきステップで示す。

検出手順

- STEP1: 透かし埋め込み画像を YCbCr 変換する。
STEP2: DCT 変換を行う。画像が周波数領域へ拡散し、同時にビットパターンロゴ画像が復元される。
STEP3: 復元されたビットパターンロゴ画像からマーカ位置 (D1) を検出する。
STEP4: D1 から一定距離にある D2 の位置を探索

する。

- STEP5: D2 にあるロゴのビットパターン画像をビット情報へ変換し該当するテキストデータへの変換を行う。

上記検出手順のように D2 の位置にある透かし情報を読むために D1 を最初に探索する。次に D1 から所定の位置にある D2 の領域を探索する。D2/D1 の位置関係から透かし情報は簡単に読み出すことができ、さらに回転、拡大縮小などを受けても改変に応じて探索範囲を変えれば対応できる。これらについては次章、3.3 から 3.5 節で述べる。また、ロゴは目視ではなく、ロゴ自身がビット列を反映した画像となっているため簡単な処理でビットデータ、テキストデータとして取り出せる。かつこの過程で人の目の介入を必要としない。従来方式はあくまで目によりロゴ画像を確認するだけであるから応用上の制限は大きい。提案方法ではコンテンツの ID 番号などとして利用できる利点がある。今回は 48 ビットのビットパターンロゴ画像、すなわち 48 ビット埋め込みとしたが、透かし情報領域のビットパターンを増加させることにより 48~96 ビットの埋め込みが可能である。

3. 実験

本章では提案方式が演算速度、PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) について従来方式とくらべてどのように改善されたかの評価を最初に行う。次にロゴビットパターンなど、本提案方式がスキャナ撮影耐性を有するかどうか幾何学的変化を中心に評価する。これによって印刷対応の電子透かしの基本的な特性を明らかにしスキャナ撮影に対する抑止力としての評価とする。次の章では撮影時の自由度を上げたモデルとしてカメラによる撮影について実験的に評価する。そのうえで印刷物のカメラによる不正撮影、すなわち「デジタル万引き」などに対して電子透かしが抑止力になりうるか、またその実現のためにはどのような課題があるかの検討を行う。

3.1 埋め込み処理速度

電子透かし情報を埋め込むとき演算負荷となるのはファイル操作、DCT 演算、埋め込み操作などが主たる要素である。とくに、印刷耐性を持たせるため全域 DCT 方式を採用すると副作用として DCT 演算負荷は $O(n^2)$ のオーダーで増加するので 8×8 画像などに分割した場合に比べてきわめて大きい。提案方式ではその改善を意図しているので実際にその効果について確認した。表 1 はその結果を示している。表中、従来方式は DCT + IDCT が、提案方式はロゴの IDCT がそれ

表 1 DCT 演算速度の測定
Table 1 Experimental result of DCT.

画像サイズ	従来方式(sec)			提案方式(sec)	埋め込み処理(sec)
	画像のIDCT	画像のDCT	DCT+IDCT	ロゴのIDCT	
256×256	0.015	0.015	0.030	0.015	0.016
512×512	0.086	0.086	0.172	0.086	0.055
1024×1024	0.344	0.344	0.688	0.344	0.203

それぞれの演算時間を示している。使用環境は Pentium4 プロセッサ, 2.26 GHz, 256 MB であり DCT 演算には 2^n の高速 DCT を用いた。

この結果から、従来方式、提案方式いずれも処理過程において DCT 計算が最大の演算負荷となること、また画像サイズが大きくなるにつれて演算時間はほぼ $O(n^2)$ のオーダで増加していることが分かる。しかし、提案方式では明らかに従来方式に比べ演算時間は半減している。たとえば、 256×256 画素の画像の場合、従来方式では 0.03 秒であるが提案方式では 0.015 秒であり、ロゴ 1 回の IDCT 演算方式の効果が現れていることが確認できる。これによって、印刷耐性を維持しつつ従来方式より埋め込み処理速度の改善を実現することができる。

3.2 画像の PSNR

本章の実験は以下の手順で行う。まずデジタル画像を準備し提案方式の電子透かしを埋め込む。次にその画像をプリンタで印刷する。印刷された画像を再度スキャナで取り込み、電子透かしの検出の可否を評価した。

本実験で使用した機材および透かし情報の条件を下記に示す。

- 画像：256 × 256 画素以上の JPEG 画像 (Photoshop, JPEG オプション画質 3, 標準)
- 埋め込みデータ：48 ビット
- プリンタ：インクジェット方式 (EPSON PM-830C) 300 DPI
- 印画紙：EPSON PM 写真用紙
- スキャナ：フラットベッド方式 (EPSON GT-7700U) 300 DPI

図 6 に本方式により埋め込んだ画像の一例を示す。

また、この実験では印刷物のスキャナによる撮影において想定される以下の基本的な特性を評価した。透かし検出の判定方法はロゴの視認ではなくロゴテキスト変換による自動検出を行うため透かし情報の検出の可否によった。画像に透かし情報を埋め込みその情報が完全に取り出せた回数と全試行回数 (20 回) の比で示した。

- 画像の回転



図 6 埋め込み画像
Fig. 6 Embedded image.

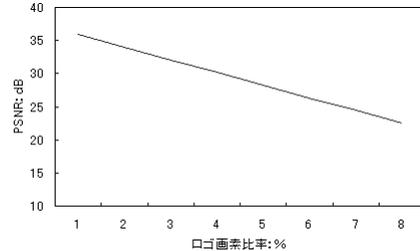


図 7 透かし画素比率と PSNR
Fig. 7 Relationship between portion of logo and PSNR.

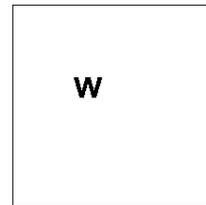


図 8 透かしロゴ文字
Fig. 8 Logo character.

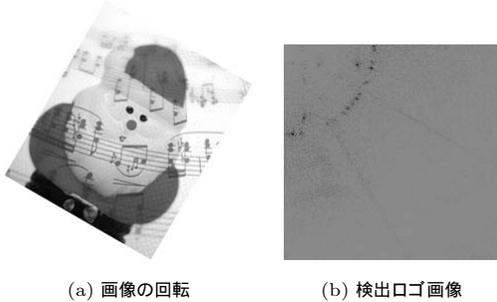
- 部分的撮影
- 画像の拡大あるいは縮小

なお、本方式の基本的特性として画像に対するロゴの画素数が画質に影響を及ぼす。そこであらかじめロゴ画素数と画像の PSNR の関係を求め、透かし情報がどの程度画質を変化させるかを調べた。図 7 はその結果である。本実験に用いた透かし情報の場合、ロゴ画素比率は 3.2% となり、複数キャリア画像における平均 PSNR として約 30 ~ 32 dB が得られた。ただし、マーカ位置を含めた電子透かし埋め込み領域は画像の横方向、縦方向それぞれ 64 画素から 127 画素とした。水本ら⁶⁾は 64 画素から 192 画素を埋め込み領域としているものの、ロゴサイズを規定していないため同様の比較を単純にできない。そこで水本らの方式と PSNR を比較するため、本研究で使用した上記埋め込み領域に図 8 のようなロゴ文字を複数埋め込んだと想定して図 7 より PSNR を求めた。

その結果を表 2 に示す。なお、ロゴ文字サイズは

表 2 ロゴ文字を埋め込んだ場合の PSNR
Table 2 PSNR when embedded logo character.

ロゴ画素サイズ	ロゴ画素比(%)	PSNR(dB)
32	4.7	28
48	10.5	20以下
64	18.8	20以下



(a) 画像の回転 (b) 検出ロゴ画像

図 9 画像の回転

Fig. 9 Rotated picture and logo.

64 × 64, 48 × 48, 32 × 32 画素のそれぞれについて本研究と同じ 48 ビットすなわち 6 文字埋め込みとし、占有画素数は各文字サイズ画素数の 50% であると仮定した。結果より明らかなように同じ情報量を埋め込んだ場合、すべての文字サイズで PSNR はきわめて低くなる。さらに基本的な問題として、実際に図 8 のロゴを用いて 6 文字を画像の特定位置に埋め込もうとしても単純に水平方向あるいは垂直方向に並べただけですでにキャリア画像と同じサイズとなってしまう。そのためこの 6 文字という情報量の埋め込みは PSNR 以外にも実現の難しい要素があることに注意する。また、ロゴをさらに小さくした場合は前述のように判読が困難となる。

3.3 画像回転の影響

スキャナ、カメラなどの撮影では画像が撮影面内において回転した状態、すなわち傾いた画像が撮影されることがある。そこで、回転角を段階的に変化させて画像をスキャンし検出結果を評価した。図 9 の (a) は 30 度回転して撮影した場合の画像で、(b) はその画像から検出された透かしパターンである。この例に見られるように画像が回転した場合マーカは同心円状に 2 つ現れる。回転は周波数領域では二次元的な時間移動となり高周波側ほど位相が大きくずれ、DCT 成分と DST (Discrete Sine Transform) 成分が分離することによる。2 つのマーカが画像の左上隅を望む角度は回転角に依存する。この特性を利用し、図 10 に示すように左上隅と 2 つのマーカで形成される角度の 1/2 だけ逆方向に回転させて透かし検出を行うことができ

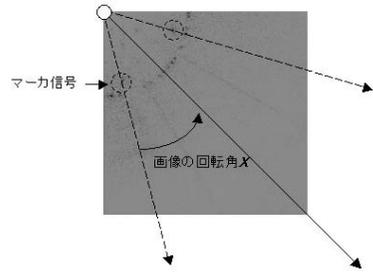


図 10 回転角の検出

Fig. 10 Detection method of rotation angle.



図 11 部分的撮影画像

Fig. 11 Partial scanned picture.

る。このような操作を回転角ごとに行い、0 度から 5 度ごとに 90 度まで回転させて画像取り込み、透かし検出を行った結果、いずれにおいても正しく透かし情報を検出した。なお、実際の回転角検出処理は回転角が 2~3 度以下の少ない場合にはマーカ位置を検出した後、透かし情報位置を探索し透かし情報を取り出す。回転角が大きい場合には回転角を図 10 の方法で検出したあと画像を角度分だけ戻し電子透かし情報の検出を行う。

3.4 部分的撮影の影響

スキャナあるいはカメラでは画像の一部だけ撮影する状況が考えられる。いわゆる切り取り耐性に相当する。そこで、全画面に対して部分画像の残存比率と電子透かしの検出可否の関係について確認した。部分的撮影は周波数領域においてはサンプリング数の変化となるため信号成分自体が小さくなる。実験は図 11 のように画像の取り込み画素数を変化させて撮影し透かし検出の可否を調べた。

表 3 はこれらの結果をまとめたものである。本提案方式では、表に示されるように画像の 40% の画素数が撮影されていれば電子透かしがコピーされ、透かし検出に成功する。

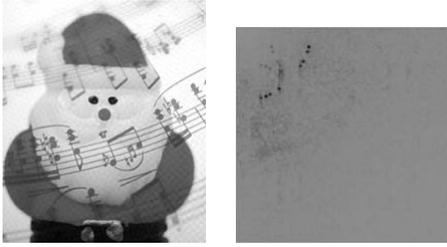
3.5 画像の拡大縮小の影響

画像が拡大あるいは縮小されて印刷された場合の電子透かしへの影響を調べた。拡大画像を図 12 (a) に示

表 3 部分的撮影からの透かし検出結果

Table 3 Detection result of partial scanned picture.

位置ずれ量 (画素)	原画像に対する 画素数(%)	検出結果(%)
0	100	100
50	80	100
100	60	100
150	40	100
200	20	0
250	0	0



(a) 120%拡大画像 (b) 検出ロゴ画像

図 12 画像の拡大
Fig. 12 Enlarge.

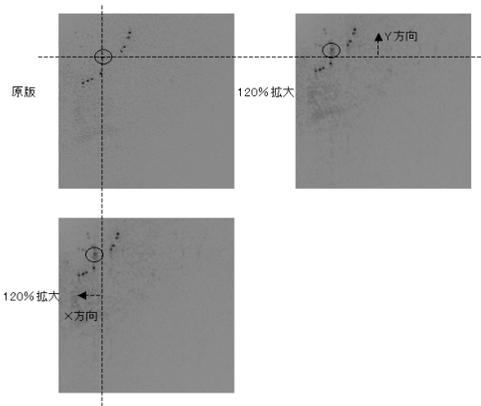


図 13 拡大検出の方法
Fig. 13 Detection procedure of enlarge.

す。同じくロゴの変化を図 12 (b) に示す。拡大によってマークは左上に移動し、また逆に縮小によって右下に移動する。

この性質からつねにマークを検出すればその相対位置によって容易に透かし情報を検出できる。この関係を図 13 の 120%拡大の例で示す。まずマークを検出し、次にマークから一定距離にある透かし情報領域を探索する。マーク位置 $D1$ は拡大縮小倍率を α とするとき $\alpha D1$ となる。それにともない、透かし情報位置を示す $D2$ も $\alpha D2$ となり当該領域の探索を行うことにより容易に透かし情報を探索、読み取ることが可能となる。

実験より、120%の拡大、50%の縮小に対して電子

透かしの検出が可能であるが拡大にやや弱い特性がある。この理由についてはマークの移動方向との関係があるものと思われる。拡大にともない、マークは左上、すなわち DC 分の強い場所へ移動し S/N 比が下がり検出が困難となる。逆に縮小の場合はマークは右下へ移動するため、DC 成分の影響は受けにくい。しかし、画像の JPEG 圧縮により高周波成分が影響を受けるとマーク検出自体が困難になり電子透かしの検出ができなくなる。

4. カメラ付き携帯電話による撮影

4.1 実験の目的と概要

3章で評価した提案方式の基本的な印刷、撮影への耐性はスキャナ撮影の一定の画像操作、変化であれば電子透かし情報が検出でき、不正コピーの抑止力たりうることを示している。しかし、本章で検討するカメラ撮影は、三次元空間の自由度を持つため幾何学的な変化の影響を大きく受ける厳しい攻撃となる。その点からは3章の実験は比較的ゆるい攻撃ともいえる。ここで改めて問題点を整理する。

- (1) 回転：3.3 節で評価した画像の回転に相当する。カメラによる撮影では光軸を中心とした回転となる。
- (2) 部分撮影：3.4 節で評価した画像の部分撮影に相当する。カメラで撮影するときも同様に画像の一部のみを撮影することがあると考えられる。
- (3) 拡大、縮小：3.5 節で評価した画像の拡大あるいは縮小の影響である。全視野を撮影しようとするれば縮小され、部分撮影しようとするれば拡大される。
- (4) 画像とカメラの距離：スキャナでは考慮する必要のない要素である。距離の変化によりフォーカスの変化と拡大縮小の複合された効果が現れる。
- (5) 像の歪み：画像を光軸より斜めから撮影する場合には三次元的な幾何変換となり周波数領域では局所的な非線形歪みとなる⁷⁾。さらに上記 4 項目の要素が複合された歪みであって、現実の「デジタル万引き」では最も想定すべき状況と考えられる。さらにカメラ付き携帯の場合は接写撮影の可能性もありレンズの光学歪みなども加味された複雑なものとなる。

印刷物へ埋め込まれた電子透かしはカメラ撮影に対して上記の影響を単独あるいは複数受けることになる。したがって高い撮影耐性を要求されるが、それらについては未知の点が多々ある。そこで、本章ではカメラ

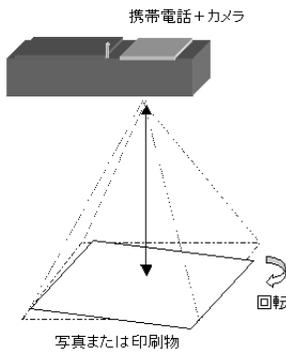


図 14 回転画像の撮影

Fig. 14 Shot effect in picture rotation.



図 15 画像回転のある場合のカメラによる撮影画像

Fig. 15 Rotated picture shot by cellular phone with camera.

撮影に対し、本論文の主題である印刷耐性を持つ電子透かしの特性を個別に把握し、そのうえで必要なことを明らかにすることとした。

カメラ付き携帯電話（以下、カメラ付き携帯とする）による評価実験の環境を以下に示す。なお、電子透かし画像の作成、印刷および透かし埋め込みの条件はこれまでと同一である。

- 使用携帯電話：J-phone J-SH09（SHARP 製）、接写モード付き
- カメラ性能：CCD 方式、30 万画素（640 × 480 画素）
- 焦点距離：50 mm、接写モード使用時
- 画像ファイル形式：JPEG
- インタフェース：USB

4.2 カメラ付き携帯による電子透かし検出実験

スキャナと同様、画像の回転、部分撮影、拡大縮小について評価を行った。実験はすべて、あらかじめ電子透かしが埋め込まれた印刷画像をカメラ付き携帯で撮影し、USB 接続された PC に画像を取り込み透かしの検出を行う方法である。回転実験の方法を図 14 に示す。図のようにカメラ付き携帯は固定し画像側をカメラと画像の法線軸中心に回転させる。焦点距離 50 mm で固定して回転させたときの画像を図 15 に示す。回転実験の結果を表 4 に示す。

表 4 カメラ付き携帯における画像回転の影響
Table 4 Detection result of rotated picture.

回転角度(度)	検出結果(%)
0	100
5	100
10	100
15	100
20	95
30	100
40	75
50	90
60	100
70	100
80	70
90	100

表 5 部分撮影の影響
Table 5 Detection result of partial picture.

位置ずれ量 (画素)	原画像に対する 画素数(%)	検出結果 (%)
0	100	100
50	80	100
100	60	95
150	40	65
200	20	0
250	0	0

また、部分撮影についてはスキャナの実験と同様に画像を隠す方法により行った。表 5 に部分撮影の結果を示す。

表より、カメラ付き携帯の透かし情報検出実験では回転に対する検出率が特定の角度でやや低い。この要因についてはロゴマーク探索の実装上の問題を検討中であるが、おおむね一定の耐性を有すると判断できる。部分撮影については 40% のとき検出率が低下するが、おおむねスキャナ実験から予想される範囲の結果とみられる。なお、3 章で行った実験のうち、拡大、縮小については今回は行わなかった。今回使用したカメラの接写モードではフォーカスが固定されているため、4.3 節のなかで検討した。

4.3 画像とカメラの距離の影響

カメラによる撮影における三次元自由度の 1 つとして被写体との距離の変化がある。そこで、カメラ付き携帯と被写体との距離が変わった場合の検出率への影響について図 16 に示す実験を行った。表 6 にその結果を示す。距離が変わることによりフォーカスが変化し、同時に像倍率も変化する。したがってこの結果はその 2 つが複合されたものとみることができる。表 6 より、光軸方向のカメラ移動の影響については ± 5 mm の範囲内であれば電子透かし情報を検出可能であることが示される。このときの画像を図 17 (a), (b) に示す。

距離の移動に対してはカメラの焦点距離に対して ± 5 mm、10% の変化が検出限界である。しかし撮影

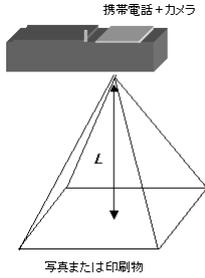


図 16 カメラ付き携帯と印刷物との距離
Fig. 16 Distance from camera.

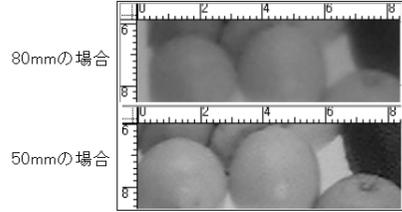


図 18 距離の変化による画像倍率の相違
Fig. 18 Picture size affected by distance.

表 6 距離変化と検出結果
Table 6 Detection result of varied distance.

距離(mm)	検出の可否
65	0
60	0
55	95
50	100
45	90
40	0
35	0

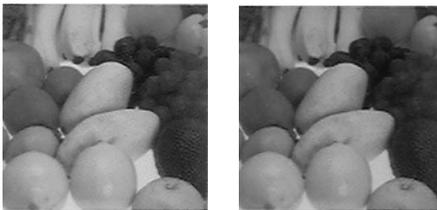


図 17 撮影距離による影響
Fig. 17 Effect of distance.

画像からは像倍率の変化やデフォーカスの著しい現象は目視では認められない。そこでどの程度の画像サイズの変化が生じているかを 80 mm の位置から撮影した画像と比較することによって測定した。図 18 は Photoshop により画像の同じ場所を切り取りスケールを入れて比較しやすくした画像である。これより 80 mm すなわち焦点距離に対して 1.6 倍の位置から撮影した画像は約 2.5%程度縮小していることが分かる。したがって、距離を変化させたときの検出範囲 45 ~ 55 mm においては像倍率の変化はさらに小さくなる。3 章の拡大縮小の結果から 50 ~ 120%の画像拡大縮小に対して電子透かし情報の検出が可能であることから、約 2.5%の画像サイズの変化は検出には影響を与えていないものと判断される。一方 80 mm の位置ではフォーカスはかなり不鮮明となっている。しかし、45 ~ 55 mm では肉眼的に気づくほど不鮮明にはなっ

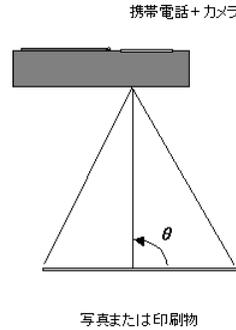


図 19 傾いた撮影での影響
Fig. 19 Shot effect in paper angle.

ていない。不鮮明ではないにもかかわらず電子透かし情報が検出できなかった理由については未検討である。したがって、今回の実験結果は使用した機材についてはフォーカスの影響が支配的であろうと推測できるものの、結論を出すにはいならず今後の課題である。ただ、「デジタル万引き」という観点からは焦点のズレが ± 5 mm より大きくなった場合、画像も次第に不鮮明となる。結果的に不正撮影されたとしても画像としての価値も低くなることを考慮すると距離変化に対応できる能力は極端に高くなくてもよいと思われる。

4.4 台形歪みの影響

現実の不正コピーでは三次元空間の任意の自由度においてカメラで撮影される。すなわち図 19 のように被写体画像がカメラの法線に対して角度 θ だけ傾いて撮影される場合を評価する必要がある。この結果撮影される画像は台形歪みを受けることになる。図では 1 軸の変化で示してあるが現実には画像の X, Y 2 軸の同時変化であろう。さらにこの台形歪みは距離の影響も強く受けるので XYZ の複雑な因果関係から構成されるが、ここではまず簡略なモデルとして 1 軸の台形歪みの影響を評価する。

角度 θ を変えた場合、画像は図 20 に示すように台形歪みが与えられた画像となる。実験の結果より角度 θ が約 ± 3 度以内であれば透かし検出が可能であった。予想外に低い結果であったが、以下のように 2 つ



図 20 カメラ撮影面と印刷面との傾き
Fig. 20 Picture affected by shot angle.

の理由が考えられる．第 1 は台形歪みにより透かし情報が高周波領域へ移動し，カメラの画像データ保存形式である JPEG 圧縮の影響でマーカ信号成分が消滅し透かし情報の読み取りに失敗する．他の理由として，台形歪みは場所によって移動量が変化する非線形の変化となることによる．すなわち，本提案では電子透かし情報を検出する場合，マーカを検出後，マーカから $D2/D1$ 倍の位置に電子透かし情報があるものとして探索を行うようになっている．そのため拡大縮小などの線形操作には対応できるものの，非線形の変形が加わると探索位置が予測範囲内から外れ，電子透かし情報の読み出しに失敗するものと思われる．ところで，台形歪みはスクリーンの撮影時にも同様の問題が生じる．カメラ撮影による台形歪みの影響に関しては中村ら⁷⁾により検討が試みられている．透かし情報としてロゴを目視確認する方法を採用しているが，それでも判読性が著しく悪くなりロゴサイズを大きくする必要がありとしている．カメラ付き携帯による不正な撮影に対して電子透かしが抑止力となりうるかについて論じれば ± 3 度はいまだ十分であるとはいえない． ± 3 度の場合，図 20 に見られるように，撮影画像は歪んではいないものの画質的には比較的良好である．したがって，目的によっては十分に再利用できる範囲と考えられる．また手持ち撮影では ± 3 度は容易に生じることからも不十分であるといえる．今回の提案方式では台形歪みの影響を予想していなかったためこのような結果となったが，歪みの特性をさらに確認したうえで，その影響を意識した対策は考えられる．その点については 5 章で述べる．

5. ま と め

印刷画像のスキャナ，カメラによる不正撮影に対して電子透かしを抑止力として利用するための電子透かし方法の提案と実験評価を行った．印刷物の不正コピーの抑止力として電子透かしを用いる利点は，画像自体にいったん埋め込んでおけば Web などでの利用から印刷まで 1 つのソースで多目的に利用できること

にある．本論文ではこのような立場で印刷耐性を持つ方式の提案ならびに抑止力としての評価実験を行ったが，いまだ緒についたばかりである．本提案方式は 3 章のスキャナを用いた実験によって印刷，撮影に対しては比較的耐性の高い電子透かしであることが確認できた．またそのような耐性を維持しつつ演算の高速化もある程度実現できた．したがって提案方式はこの範囲内では一定の抑止力を有すると判断できる．しかしスキャナは三次元空間の自由度を持つとはいえ，撮像面と被写体の距離が固定され実質的には二次元である．しかし，4 章におけるカメラによる撮影では自由度が完全な三次元空間となり多くの要因からなる歪みをともなった画像となる．ことに，台形歪みは印刷画像への電子透かしにとって最大の攻撃であり克服すべき課題あることが示された．カメラ付き携帯で撮影するとき，被写体を無意識に全画面に収めるような撮影をしたり，あるいは逆に接近して一部だけを拡大して撮影する場面がある．また印刷物の湾曲やカメラの姿勢が正しくとれなかったため斜めから撮影することになる場合もある．カメラ自体のレンズなどによる歪みの影響なども考慮しなければならないであろう．これらはすべて結果として歪みを生じる．本研究で提案した方式には台形歪み対策は考慮されていない．したがって現段階ではカメラ付き携帯による不正コピー，いわゆる「デジタル万引き」に対して提案方式は限定的な抑止力にすぎない．しかし，今後，台形歪み対策をとることができれば十分な抑止力となる可能性を持つ．対策であるが，台形歪みは局所性を持つので 1 つの解決法は画像自体から歪み量を測定し補正後電子透かしの検出を行うものである．他の方法は今回利用したマーカの考え方の延長として局所性を反映するようなマークを画像中に点在させていく手法である．また，電子透かしの埋め込み法自体については今回は全域 DCT の手法を採用したが Wavelet 変換，パッチワークなどを用いた印刷，撮影耐性を有する他の手法についても検討していきたい．これらによりカメラ付き携帯などによる印刷物不正コピーに対する抑止力としての電子透かし技術に近づくものと思われる．

参 考 文 献

- 1) 松井甲子雄：電子透かしの基礎，森北出版 (1998)．
- 2) 小野 束：電子透かしとコンテンツ保護，オーム社 (2001)．
- 3) 水面下で広がる海賊判映画のネット販売．
<http://www.zdnet.co.jp/news/0005/15/movie.html>

- 4) 「デジタル万引き」やめて、日経新聞 2003 年 6 月 30 日 .
- 5) <http://www.digimarc.com/products/mediabridge/default.asp>
- 6) 水本 匡, 松井甲子雄: DCT を用いた電子透かしの印刷取り込み耐性の検討, 信学論 (A), Vol.J85-A, No.4, pp.451-459 (2002).
- 7) 中村圭介, 岩切宗利, 松井甲子雄: 電子透かしの非線形変換耐性に関する一検討, コンピュータセキュリティシンポジウム, Vol.33, No.12, pp.1512-1526 (2002).

(平成 15 年 8 月 14 日受付)

(平成 16 年 1 月 6 日採録)



江川 雄毅

平成 4 年北海道大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了 . 興和株式会社開発本部先端研究所勤務 . 主たる研究分野は電子透かし, 光計測, 画像処理 .



小野 束 (正会員)

昭和 50 年北海道大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程修了 . 工学博士 . 現在は筑波技術短期大学視覚部情報処理学科教授 . 視覚障害者教育と研究に従事 . 専門は電子透かし, 情報セキュリティ全般 . 著書: 『電子透かしとコンテンツ保護』(オーム社, 2001).