

2つのステガノグラフィ法における埋め込み率の検討

安藤 百恵^{*1} 福田 幸子^{*1} 古田 壮宏^{*2} 真野 芳久^{*1}

秘密データをダミーデータの中に秘密裏に埋め込むステガノグラフィでは、埋め込まれる情報の量が多いことが求められる。本論文では2つのステガノグラフィ法について、そこに埋め込むことのできる情報の量をダミーデータサイズに対する比率の観点から検討する。複雑な領域に秘密データを埋め込むステガノグラフィではBMP非圧縮画像を対象として、データに応じて閾値を変動させることで埋め込み率を改善できること、およびより少ない計算量でもほぼ同様の結果を得られることを示す。JPEG2000のレイヤ構造を利用するステガノグラフィでは一定以上のS/N比となる条件下での埋め込み率を実験的に求め、圧縮画像でも十分に大きな埋め込み率を達成できることを示す。

1 はじめに

ネットワークを介した情報通信が広く行われるようになったが、その中には通信の内容を他人に知られないだけでなく、秘密の通信をしていることをも秘密にしたい場合がある。盗聴・解読への強力な防御策の観点からもそれが望まれることがある。メディアデータ中に秘密データを隠し、他人に気付かれることなく保存・伝達する技術としてステガノグラフィがある。画像に秘密データを隠すことが多く、秘密データを隠す画像のことをダミー画像と呼ぶ。電子透かしもまた秘密データを埋め込むが、著作権保護などを目的としており、秘密通信を目的とするステガノグラフィとは異なる。ステガノグラフィでは、大量の情報を埋め込むことが求められる。

ダミー画像としてBMP非圧縮画像を使用する場合、ビットプレーン分解しその一部を置換する方法[2]では埋め込み率(ダミー画像サイズに対する埋め込まれる秘密データ量の割合)が約12.5%、複雑さを応用した[3]では約36%という報告がある。ダミー画像としてJPEG2000圧縮画像を使用する場合、[4]では圧縮率が1.0bpp(bit/pixel)で埋め込み率が約15%の報告があり、[1]では画質の劣化を抑えつつ大きな埋め込み率を実現しているようであるが、電子透かし技術の視点のため、埋め込み率の限界には言及されていない。

本研究では、扱うダミー画像は白黒濃淡画像とし、BMP非圧縮画像では複雑さの閾値を操作することで埋め込み率の増加をはかる。また、JPEG2000圧縮画像に対しては[1]の技法に基づいて埋め込み率の限界を求める。

なお、人の眼から見て劣下度が目立たないS/N比の下限を32dBとして、埋め込み率を求めることとする。

2 BMP画像における複雑さ利用型

[3]で提案されている複雑さ利用型ステガノグラフィについて述べる。3節では、各画像の性質を反映して閾値を変動させることで、より多くの情報を埋め込む手法と実験結果について述べる。

1画素8ビットの濃淡画像では、画像を8枚のビットプレーンに分けることができる。この各ビットプレーン上の画素は二値で表現されている。ここで8枚のビットプレーンを最下位(LSB)から最上位(MSB)まで順に第 n ビットプレーン($n=0,1,\dots,7$)と呼ぶ。

ビットプレーン分解で得られる二値画像は「画像に対して有効な情報を保有している領域と保有していないノイズ状の領域」に分割できる[3]。二つの複雑なノイズ状の二値画像を人間の視覚で区別することは困難である。そのため、秘密データがノイズ状であるならば、ノイズ状の画像領域を秘密データと置き換えても人の感覚にはほとんど影響がない。これを利用することで情報を埋め込むことができる(図1参照)。

二値画像がノイズ状であるか否かの判定は、二値画像の“複雑さ”に基づいて行う。 $2^m \times 2^m$ 画素からなる画像を考え、その画像内において色が変わる境界線の数 k を使って、複雑さ α は $\alpha = \frac{k}{2 \times 2^m \times (2^m - 1)}$ で定義される。 α の最小値は0(すべて白またはすべて黒の場合)、最大値は1(市松模様の場合)である。

ダミー画像の各ビットプレーンを $2^m \times 2^m$ の小領域に分け(次節で述べる実験では $m=3$)、各小領域ごとに複雑さ α を求める。 α がある閾値より高ければノイズ状、閾

*1 南山大学 数理情報学部 情報通信学科

*2 南山大学 経営学研究科



図2 (lenna.bmp) 左から右に：第0, 第4, 第7ビットプレーン

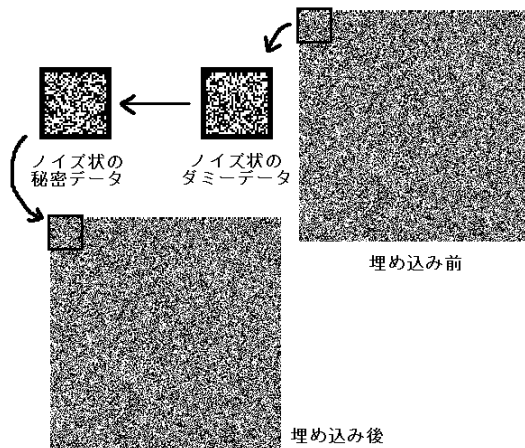


図1 ノイズ状領域の置換

値より低ければ非ノイズ状と判断し、ノイズ状領域に秘密データを埋め込む。

秘密データが非ノイズ状の場合には、単純なパターンをノイズ状パターンに変換するコンジュゲート演算 (画像と市松模様との画素毎の排他的論理和) を行う。可逆演算であるコンジュゲート演算前後の画像の複雑さ α と α^* の間には、 $\alpha^* = 1 - \alpha$ の関係が成立する。

3 閾値の変動による埋め込み率の変化

一般にどの画像も画像の形状を表わす有効な情報がビットプレーン毎に異なる (図2参照) ため、閾値をビットプレーン毎に変更することで埋め込みデータ率の増大をはかることができると考えられる。[3] では平均的に適した閾値を求めているが、ビットプレーン毎に閾値を変化させた時の埋め込み率の変化については述べられていない。

第 i ビットプレーン ($0 \leq i \leq 7$) の閾値を α_i として、最適な閾値の組 $\vec{\alpha} = (\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_7)$ を求めることを考える。ここで、 $\vec{\alpha}$ が最適であるとは次のように定義する。

タミー画像 D と秘密データ S があり、 S/N 比の下限を

L とする。 (D, S, L) に対して、この閾値に基づいて D に S (の一部) を埋め込んだ画像を D' として、

- D' の S/N 比 $\geq L$
- 埋め込まれた S (の一部) の量は、他の任意の閾値の組によって “ S/N 比 $\geq L$ ” の条件の下で S を埋め込んだ時の量以上である

の性質を持つ。

実験と結果

最適な閾値の組は S/N 比とも関係するために正確に求めることが困難であるため、その近似値を求めることとした。 S/N 比の下限 L を 32 dB とし、埋め込むデータはランダムなビットパターンとした実験を行った。

実験では、

- 下位のビットプレーンは画像に対して有効な情報をほとんどもっていない、
- 上位のビットプレーンは複雑であっても有効な情報を持っている、
- すべてのビットプレーンで複雑さを利用する方法と、下位のビットプレーンに優先的に埋め込む方法とを比較して、同量のデータを埋め込んだ場合には経験的に後者の方が高い S/N 比となる、

という理由により、最下位の3枚のビットプレーンには無条件で埋め込むこととし、第3~第5ビットプレーンに対して複雑さの閾値の準最適な値を求めた。そこでは、第3ビットプレーンに対しては閾値を0.01刻みで変化させ、そこで得られた S/N 比が L 以上の閾値を0.05刻みで選び第4ビットプレーンに対する閾値を0.05刻みで変化させた。第5ビットプレーンに対しても同様に行った。

閾値一定の場合とビットプレーン毎に閾値を変動した場合とを比較した。 Couple 画像を例としての結果を図3に示す。横軸をビットプレーン番号、左縦軸を S/N 比 (dB)、右縦軸を埋め込み率 (%) としている。第2ビットプレーンあたりから両者の違いが見られ、第3ビットプレーンで

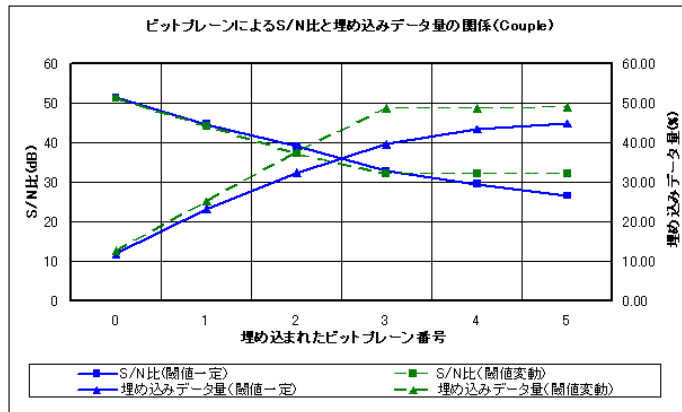


図3 (例: Couple.bmp) ビットプレーン毎に埋めたとときの閾値とS/N比

差が大きくなっている。

第5ビットプレーンまで閾値を変更して得た埋め込みデータ率とS/N比とを、他は同じ条件で閾値を第5ビットプレーンまで一定 ($0.5 - 4 \times d$, ただし $d = 0.047$ ([3]にある値)) にして得た埋め込みデータ率とS/N比と比較した(表1)。この方法ではダミー画像データの約42~55%の埋め込み率を達成でき、閾値一定の場合に比べ埋め込み率(%)が2~10程度増加した。他の画像の多くでも、Coupleと同様に、第3ビットプレーンから差が見られた。

表1 閾値の操作によるS/N比(dB)と埋め込み率(%)

画像	閾値一定 (dB, %)	閾値変動 (dB, % ; 第3~第5閾値)
Couple	32.7, 39.5	32.0, 47.0 ; 0.05, 0.50, 0.40
Girl	32.1, 45.4	32.1, 48.9 ; 0.15, 0.00, 0.00
Milkdrop	32.6, 37.0	32.5, 47.7 ; 0.30, 0.00, 0.00
Hawaii	33.0, 44.0	33.0, 46.1 ; 0.33, 0.00, 0.00

閾値を変動させる方法の中でも、第0~3ビットプレーンに埋め込んだ画像と第4~5ビットプレーンをも利用して埋め込んだ画像の埋め込みデータ率やS/N比を比較したところ、多くの場合、前者で既に準最適な値が得られていた。Coupleにおいても、第3~第5閾値が(0.18, 0.00, 0.00)の時にS/N比32.7dB、埋め込み率47.9%の場合があった。

このことから、埋め込むビットプレーンを最下位から4枚とし、最下位から3枚のビットプレーンは無条件に埋め込み、第3ビットプレーンのみ閾値を変動する方法が、適した閾値を求める計算量と得られる効果とのバランスの観

点からすぐれた方法であると言えると思われる。

4 JPEG2000 画像におけるレイヤ構造利用型

JPEG2000 符号化では、前処理、離散ウェーブレット変換、量子化、ROI (Region Of Interest) スケーリング、算術符号化、ビット列構成から構成される(図4参照)。前処理、離散ウェーブレット変換の後、ウェーブレット係数は量子化される。量子化の後、ROI スケーリングと呼ばれる注目領域を優先的に処理するオプションが用意される。量子化ウェーブレット係数は、コードブロックと呼ばれる小ブロック毎に算術符号化される。その後、各コードブロックのビット列は、パケットやレイヤと呼ばれる単位にまとめられ、希望する圧縮率(ビットレート)でビット列が生成される。

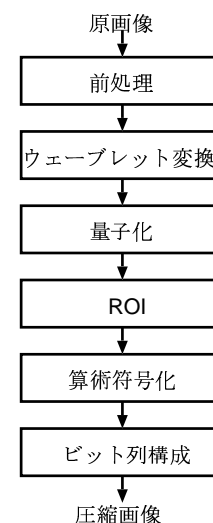


図4 JPEG2000 符号化

レイヤとは、算術符号化したものを、複数の画質で順次再生できるように、グループ分けしたものである。符号列は、各レイヤの位置、長さが記録されたヘッダ部と、いくつかのレイヤからなる。この時、画質への影響が高い情報ほど上位のレイヤに含まれ、下位のレイヤほど画質への影響が低い情報が含まれている (図 5 参照)。

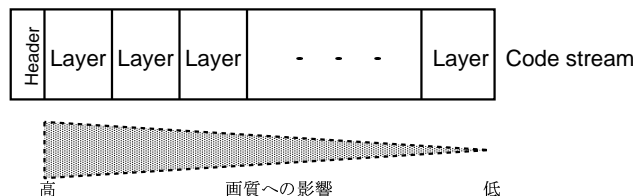


図 5 JPEG2000 符号列の構成

JPEG2000 では希望する圧縮率で符号化できるという機能がある。これは、符号列の下位のレイヤを切り捨てることにより実現する。この考えをデータ埋め込みにも適応し、下位のレイヤに秘密データを埋め込むという方法が [1] で提案されている。JPEG2000 圧縮画像へのこの埋め込み方法では、多くの情報の埋め込みが期待できそうであるが、埋め込みデータ量の限界に対して言及されていない。次節では、この方法での埋め込みデータ量の限界についての実験結果を報告する。

5 レイヤ構造利用型の実験と結果

利用したダミー画像はいずれも 8 bpp, 512 × 512 画素または 512 × 480 画素の白黒濃淡画像である。圧縮率は 1/8 すなわち 1.0 bpp で統一し、埋め込む秘密データはランダムなビットパターンとした。

実験では、JPEG2000 符号列を構成する過程において、圧縮率を 1.0 bpp とするための下位レイヤの切り捨てを行った後に、下位レイヤから順に秘密データで置き換えていく操作を行って得た画像の S/N 比を計測することを繰り返し、S/N 比の下限とした 32dB 以上となる限界を求めた。

Lenna と Milkdrop (ともに 512×512 画素) を用いた場合の S/N 比と埋め込み率の関係を表したグラフを図 6 および図 7 に示す。このグラフから、Lenna の場合、32dB 以上の S/N 比の条件で約 34% の埋め込み率を得ていることが分かる。

この実験で得られた画像のいくつかを図 8 および図 9 に、(埋め込み率、S/N 比) の情報とともに示す。

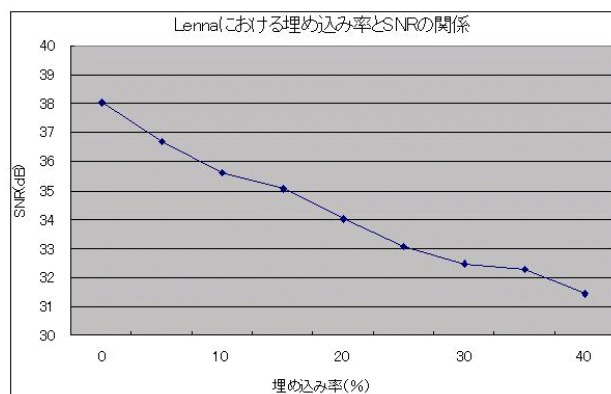


図 6 Lenna における S/N 比と埋め込み率の関係

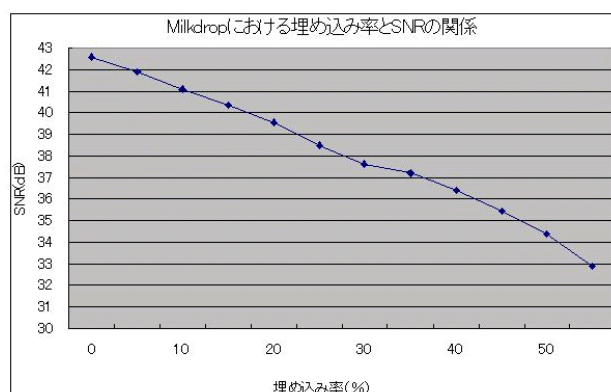


図 7 Milkdrop における S/N 比と埋め込み率の関係

他の画像 (いずれも 512×480 画素) も含めた結果を表 2 に示す (Mandrill は 1 bpp に圧縮した時点で 32dB 以下となったため、埋め込み実験はできなかった)。埋め込み率は画像によって大きく異なるが、15~50% 程度の値を得られることが分かる。

表 2 埋め込み実験結果

画像	埋め込みなし		埋め込みあり	
	圧縮率	S/N 比 (dB)	埋め込み率 (%)	S/N 比 (dB)
Lenna	1/8	38.0	34.2	32.3
Milkdrop	1/8	42.6	53.7	32.9
Barbara	1/8	37.6	19.6	32.8
Blackboard	1/8	43.1	48.7	33.4
Boat	1/8	40.6	39.1	32.2
Zelda	1/8	42.1	48.9	33.1
Mandrill	1/8	28.9	—	—



図 8 左から：原画像、(14.7%, 35.1 dB)、(19.6%, 34.0 dB)、(24.5%, 33.1 dB)

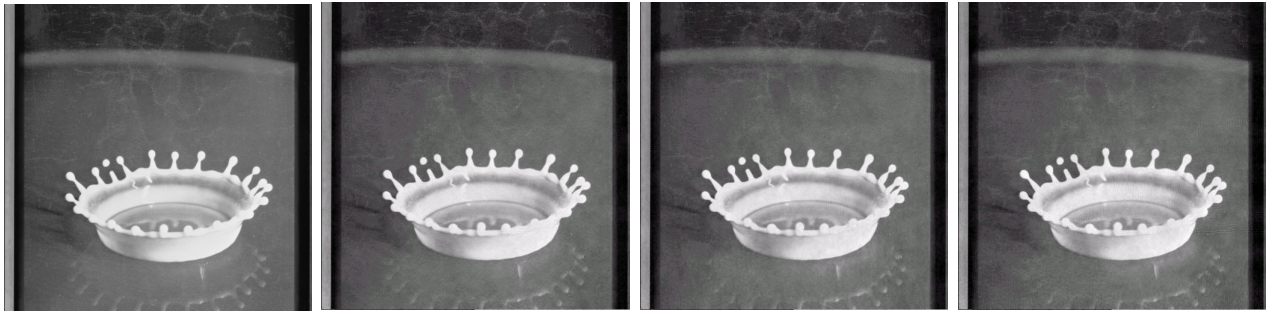


図 9 左から：原画像、(43.9%, 35.4 dB)、(48.7%, 34.4 dB)、(53.7%, 32.9 dB)

6 おわりに

非圧縮画像については、複雑な領域に秘密データを埋め込む複雑さ利用型 [3] を用い閾値を変動させることで、ダミー画像の約 42～55% まで埋め込むことができた。これは閾値をすべて一定にした場合に比べ埋め込み率 (%) が 2～10 程度増加したことになる。埋め込むビットプレーンを制限して計算量を減らした場合もほぼ同様の結果を得ることができ、より多くの情報を埋め込む要求の強い場合に利用可能であることを確認した。

圧縮画像については、レイヤ構造を利用した埋め込み方法 [1] を試み、埋め込み率の限界を求めた。その結果 19～53% の埋め込み率を得た。これにより、画像によっては、圧縮画像でも非圧縮画像と同程度の埋め込み率を得られることが確認できた。

今後の課題としては、精度の良い最適な閾値を高速に求める手法の開発や、耐性を考慮したレイヤ構造利用法の検討などがある。また、BMP や JPEG2000 以外の他の形式の画像、さらに白黒濃淡画像だけではなくカラー画像に対しても同様の検討が望まれる。

本研究での実験プログラム作成のために BmpViewer[5] および JJ2000[6] プログラムを使わせていただいた。これらのプログラムの開発者の方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] 安藤勝俊, 小林弘幸, 貴家仁志: “レイヤ構造を利用した JPEG2000 符号化画像へのバイナリーデータ埋め込み法”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J85-D-II, No.10 pp.1522-1530 (2002.10).
- [2] 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.
- [3] 新見道治, 野田秀樹, 河口英二: “複雑さによる領域分割を利用した大容量画像深層暗号化”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-D-II, No.6, pp.1132-1140 (1998.6).
- [4] 野田 秀樹: “逐次近似圧縮されたメディアデータへの情報秘匿に関する研究”, 電気通信普及財団研究調査報告書第 17 号, pp.561-567 (2002).
- [5] BmpViewer, <http://www.ktrim.or.jp/~taichan/java/apps/BmpViwer/>.
- [6] JJ2000 - An Implementation of the JPEG2000 Standards in Java, <http://jj2000.epf.ch/>.