

サブバンド処理を用いた画像電子透かし

Digital watermarking for images using sub-band processing

栗本 裕巳[†], 沢田 克敏^{††}, 中村 栄治^{†††}
Hiromi Kurimoto, Katsutoshi Sawada, Eiji Nakamura

Abstract This paper describes digital watermarking methods using sub-band image processing. A bi-level (1 bit/pixel) watermarking image has been embedded in target gray scale images. 1-stage and 2-stage sub-band processing methods have been employed. In the 1-stage sub-band, a target image is decomposed into LL, LH, HL and HH sub-band images, and watermarking information 1/0 is embedded in these LH, HL or HH sub-band images. In the 2-stage sub-band, the LL sub-band image is further decomposed into LL2, LH2, HL2 and HH2 sub-band images, and the watermarking information is also embedded in the LH2, HL2 or HH2 sub-band images. For processing each sub-band image, two embedding methods have been deployed. Pixel values of sub-band images are modified by the watermarking information 1/0. The experiments of these watermarking methods have been carried out. It is our findings that how much and what aspects of embedded image quality and watermark recovery accuracy relate to watermark embedding strength and watermark attacks.

1. はじめに

近年、インターネットの普及によりネットワーク上には大量の画像データや音声データが流れている。これらはコピーを行ってもほとんど劣化せずに利用可能で、加工するのも簡単である。そのためこれらを違法に利用することが問題となっており、このような違法な利用を防いで著作権を保護することが必要である。

電子的データが違法に利用された場合に、著作権侵害を証明する方法の一つとして電子透かし^{1),5),6)}がある。電子透かしとは画像や音声データに特定の別のデータを埋め込む技術である。例えば A と B という 2 枚の画像があるとして、A 画像に B 画像を埋め込む技術が電子透かしである。埋め込まれた B 画像は肉眼では確認できず、A 画像を見ても電子透かしが行われているのかどうか分からないようにする。また、抽出方法が分からないようにすれば第 3 者が勝手に B 画像を抽出する心配もない。そこで B 画像として著作権情報を示すものを埋め込むことにより、著作物が違法に利用された場合、これを抽出することで著作権侵害を証明することが可能となる。

本論文ではサブバンド処理を用いた画像電子透かし¹⁾について検討する。サブバンド処理については 2 章で詳しく述べるが、入力画像を空間周波数帯域ごとにサブバンド画像に分割し、また逆に合成する処理である。

適当なサブバンド画像に透かし情報を埋め込むことにより、埋め込まれた画像の品質低下を最小限に抑えることができる。また、どのサブバンド画像にどのように埋め込んだかは第 3 者には分からないので秘匿性を保持することもできる。さらに、サブバンド処理は画像の情報圧縮⁴⁾にも使用されていることを考えると、電子透かしと画像情報圧縮を組み合わせた方式の可能性もある。そこで、ここではサブバンド処理を用いた画像電子透かしについて検討していくこととする。

2. サブバンド処理

2・1 1 段階サブバンド分割・合成

2・1・1 1 段階サブバンド分割

サブバンド処理⁴⁾とは、入力画像を空間周波数帯域ごとにサブバンド画像に分割し、また逆に分割されたサブバンド画像を元の 1 枚の画像に合成する処理である。

図 1 にサブバンド分割処理の流れを示す。まず原画像に対して水平方向と垂直方向にフィルタリング⁴⁾と画素を間引くダウンサンプリング⁴⁾の処理を行う。このフィルタリングには、低周波フィルタ(LPF)と高周波フィルタ(HPF)を用いる。原画像に対して、まず水平方向に低周波フィルタと高周波フィルタをかけ、ダウンサンプリングをすると水平方向の画素数が 1/2 の低周波成分の L 画像と高周波成分の H 画像が得られる。次に、L 画像と H 画像に対して、さらに垂直方向にそれぞれ低周波フィルタと高周波フィルタをかけ、ダウンサンプリングをすることで LL、LH、HL、HH 画像が得られる。これら

† 愛知工業大学大学院 工学研究科 (豊田市)

†† 愛知工業大学 工学部 (豊田市)

††† 愛知工業大学 情報科学部 (豊田市)

をサブバンド画像⁴⁾と呼ぶ。

各サブバンド画像のサイズは水平・垂直方向ともに1/2（したがって画素数は原画像の1/4）で、各周波数成分は以下の通りである。

- LL : 水平・垂直方向とも低周波成分
- LH : 水平方向は低周波成分、垂直方向は高周波成分
- HL : 水平方向は高周波成分、垂直方向は低周波成分
- HH : 水平・垂直方向とも高周波成分

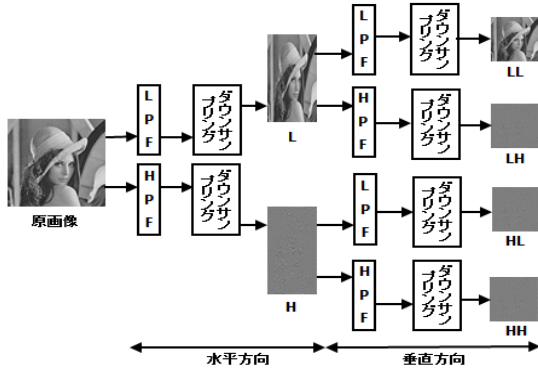


図1 サブバンド分割の流れ

2・1・2 1段階サブバンド合成

図2にサブバンド合成処理の流れを示す。まず、LL、LH、HL、HHの各サブバンド画像に対して垂直方向にアップサンプリングを行い、ダウンサンプリングで低減された画素数を元に戻す。具体的には各サブバンド画像の画素間に一つ置きに画素値0を挿入して画素数を2倍にする。次に、垂直方向の成分が低周波成分の画像(LL、HL)には低周波フィルタを、高周波成分の画像(LH、HH)には高周波フィルタをかける。そして水平方向の周波数成分が同じ画像どうし(LLとLH、HLとHH)を足し合わせることでL画像とH画像に戻す。さらにL画像とH画像に対して水平方向にアップサンプリングをして水平方向も元のサイズに戻し、L画像に低周波フィルタを、H画像に高周波フィルタをかけて、2枚の画像を足し合わせることで元の1枚の画像を再生する。

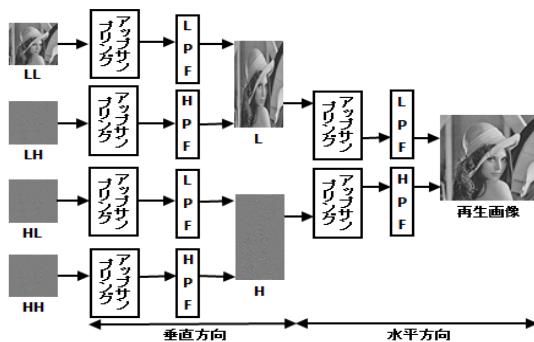


図2 サブバンド合成の流れ

2・2 2段階サブバンド分割・合成

2・2・1 2段階サブバンド分割

2段階サブバンド分割ではまず原画像にサブバンド分割を施し、LL、LH、HL、HHの各サブバンド画像に分割する。ここまでは1段階サブバンド分割と同じである。次に、LL画像に対してさらにサブバンド分割を行い、LL2、LH2、HL2、HH2のサブバンド画像に分割する。これら4つと先のLH、HL、HHを合わせて計7つのサブバンド画像に分割されることになる。図3にLL画像に対するサブバンド分割処理の流れを、図4に2段階サブバンド分割によって得られる7つのサブバンド画像を示す。このうちLL2、LH2、HL2、HH2の各サブバンド画像のサイズは水平・垂直方向ともに原画像の1/4（したがって画素数は原画像の1/16）で、各周波数成分はLLを基準にして以下の通りである。

- LL2 : 水平・垂直方向とも低周波成分
- LH2 : 水平方向は低周波成分、垂直方向は高周波成分
- HL2 : 水平方向は高周波成分、垂直方向は低周波成分
- HH2 : 水平・垂直方向とも高周波成分

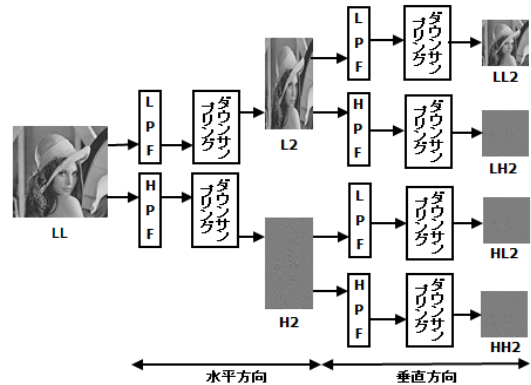


図3 LL画像に対するサブバンド分割の流れ

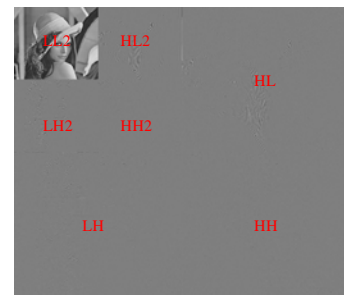


図4 2段階サブバンド分割画像

2・2・2 2段階サブバンド合成

2段階サブバンド合成の方法は処理回数が1段階増えるだけで、処理の流れは1段階サブバンド合成の場合と同じである。まず、LL2、LH2、HL2、HH2の各サブバンド画像にサブバンド合成を施してLL画像に戻す。こ

の LL 画像に対するサブバンド合成処理の流れを図 5 に示す。次に LL、LH、HL、HH サブバンド画像に対してサブバンド合成を施すことによって元の 1 枚の画像を再生する。この処理の流れは図 2 に示した通りである。

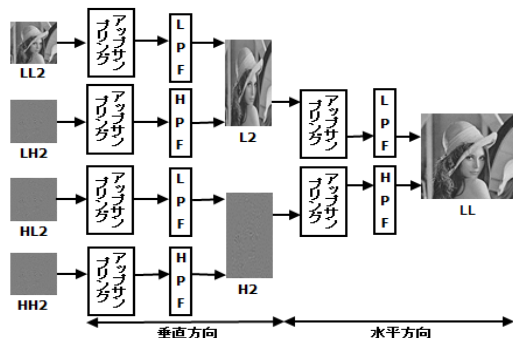


図 5 LL 画像に対するサブバンド合成の流れ

3. サブバンド処理を用いた画像電子透かし

3.1 サブバンド処理を用いた画像電子透かしの概要

3.1.1 1 段階サブバンド分割・合成の場合

1 段階サブバンド分割処理を用いた画像電子透かしの処理の流れを以下に示す。

- ①透かし情報を埋め込む対象画像にサブバンド分割を施し、LL、LH、HL、HH サブバンド画像に分割する。
- ②LH、HL、HH サブバンド画像を用いて後述の 3.2、3.3 で説明する 2 つの方法で透かし情報を埋め込む。
- ③サブバンド合成を施すことで透かし情報を埋め込まれた画像（透かし入り画像）が完成する。

透かし入り画像から透かし情報を取り出す処理の流れは以下の通りである。

- ①透かし入り画像にサブバンド分割を施し、LL、LH、HL、HH サブバンド画像に分割する。
- ②後述の 3.2、3.3 で説明する 2 つの方法で透かし情報を抽出する。

3.1.2 2 段階サブバンド分割・合成の場合

2 段階サブバンド分割処理を用いた画像電子透かしの処理の流れを以下に示す。

- ①透かし情報を埋め込む画像にサブバンド分割を施し、LL、LH、HL、HH サブバンド画像に分割する。
- ②LL サブバンド画像に対してさらにサブバンド分割を施し、LL2、LH2、HL2、HH2 サブバンド画像に分割する。
- ③LH2、HL2、HH2 画像を用いて後述の 3.2、3.3 で説明する 2 つの方法で透かし情報を埋め込む。

- ④サブバンド合成を施すことで透かし情報を埋め込まれた画像（透かし入り画像）が完成する。

透かし入り画像から透かし情報を取り出す処理の流れは以下の通りである。

- ①透かし入り画像にサブバンド分割を施し、LL、LH、HL、HH サブバンド画像に分割する。
- ②LL 画像にさらにサブバンド分割を施し、LL2、LH2、HL2、HH2 サブバンド画像に分割する。
- ③後述の 3.2、3.3 で説明する 2 つの方法で透かし情報を抽出する。

3.2 電子透かしの方法 1

3.2.1 透かし埋め込み方法

- ①LH、HL、HH サブバンド画像（1 段階サブバンドの場合）もしくは LH2、HL2、HH2 サブバンド画像（2 段階サブバンドの場合）に対して量子化を施す。具体的には、画素値を指定したステップサイズ s で割り、四捨五入する。④で述べるように、この s は透かしの埋め込み強度に対応する。

- ②量子化を施した 3 つのサブバンド画像の同一画素位置ごとに 3 つの画素値から最大値と最小値を求める。
- ③埋め込む透かし情報が 0 ならば、(最大値 - 最小値) / 2 の余り R が 0 になるように、透かし情報が 1 ならば R が 1 になるように、必要ならば最大値に 1 を加算することで透かし情報を埋め込む。すなわち、 $R = [(最大値 - 最小値) \% 2] = 0 \text{ or } 1$ を計算し、以下の処理を行う。

・埋め込む透かし情報が 0 のとき

$R=0$ ならば最大値、最小値ともそのまま保持

$R=1$ ならば最大値に 1 を加算、最小値はそのまま保持

・埋め込む透かし情報が 1 のとき

$R=0$ ならば最大値に 1 を加算、最小値はそのまま保持

$R=1$ ならば最大値、最小値ともそのまま保持

- ④画素値に逆量子化を施す。すなわち量子化した時と同じステップサイズ s を画素値にかける。したがって、③における $R=0、1$ に対する画素値の差は s 倍され、 s が大きいほど埋め込み強度は大きくなる。

3.2.2 透かし抽出方法

- ①LH、HL、HH サブバンド画像もしくは LH2、HL2、HH2 サブバンド画像の画素値に透かし情報を埋め込んだときと同じステップサイズ s で量子化を施す。
- ②量子化を施した 3 つのサブバンド画像の同一画素位置ごとに 3 つの画素値から最大値と最小値を求める。

③ (最大値－最小値) / 2 の余り R を計算して以下の通り透かし情報を抽出する。すなわち、 $R = [(最大値 - 最小値) \% 2] = 0 \text{ or } 1$ を計算し、以下の処理を行う。

- ・ $R=0$ ならば埋め込まれた透かし情報は 0 と判定
- ・ $R=1$ ならば埋め込まれた透かし情報は 1 と判定

3・3 電子透かしの方法 2

3・3・1 透かし埋め込み方法

方法 1 では (最大値－最小値) / 2 の余りを用いたが方法 2 では最大値 / 2 の余りを用いる。他は同じである。

① LH、HL、HH もしくは LH2、HL2、HH2 に対して量子化を施す。具体的には、画素値を指定したステップサイズ s で割り、四捨五入する。

② 量子化を施した 3 つのサブバンド画像の同一画素位置ごとに 3 つの画素値から最大値を求める。

③ 埋め込む透かし情報が 0 ならば、最大値 / 2 の余り R が 0 になるように、透かし情報が 1 ならば R が 1 になるように、必要ならば最大値に 1 を加算することで透かし情報を埋めこむ。すなわち、 $R = [最大値 \% 2] = 0 \text{ or } 1$ を計算し、以下の処理を行う。

- ・ 埋め込む透かし情報が 0 のとき
 - $R=0$ ならば最大値はそのまま保持
 - $R=1$ ならば最大値に 1 を加算
- ・ 埋め込む透かし情報が 1 のとき
 - $R=0$ ならば最大値に 1 を加算
 - $R=1$ ならば最大値はそのまま保持

④ 量子化した時と同じステップサイズ s を画素値にかけることにより逆量子化を施す。

3・3・2 透かし抽出方法

① LH、HL、HH サブバンド画像もしくは LH2、HL2、HH2 サブバンド画像に対して透かし情報を埋め込んだときと同じステップサイズ s で量子化を施す。

② 量子化を施した 3 つのサブバンド画像の同一画素位置ごとに 3 つの画素値から最大値を求める。

③ 最大値 / 2 の余り R を計算して以下の通り透かし情報を抽出する。すなわち、 $R = [最大値 \% 2] = 0 \text{ or } 1$ を計算し、以下の処理を行う。

- ・ $R=0$ ならば埋め込まれた透かし情報は 0 と判定
- ・ $R=1$ ならば埋め込まれた透かし情報は 1 と判定

4. サブバンド処理を用いた画像電子透かしの実験

4・1 実験方法

実験では、埋め込み対象画像 (透かしを埋め込まれる画像) として図 6 に示す Lenna 画像、透かし情報画像と

して図 7 の S 画像と図 8 の random 画像を使用する。

量子化ステップサイズは $s = 2, 4, 6, 8$ とする。3.2.1 で述べたように、これは透かしの埋め込み強度に対応し、 s が大きいほど埋め込み強度は強くなる。

透かし入り画像に対して、その透かし情報の抽出を妨害するような処理を“攻撃”⁶⁾ と呼ぶ。この攻撃が無い場合について、埋め込み強度 (s) ごとの透かし入り画像の品質 (SNR: 信号対雑音比) と透かし情報の抽出精度 (BER: ビットエラーレート) を調べる。さらに攻撃がある場合について、埋め込み強度ごとの透かし情報の抽出精度 (BER) を調べる。攻撃方法としては量子化²⁾ と JPEG 圧縮⁴⁾ の 2 つを用いる。

なお、以下の実験データでは、S 画像に対して、透かし入り画像の一例とその SNR、および抽出結果の画像の一例とその BER を示す。random 画像の場合も結果はほぼ同様であった。



サイズ : 512 × 512 [pixel]

図 6 Lenna 画像



サイズ : 128 × 128 [pixel]

図 7 S 画像



サイズ : 128 × 128 [pixel]

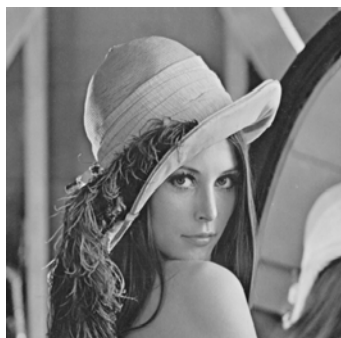
図 8 random 画像

4・2 電子透かしの方法1による実験結果

4・2・1 攻撃なしの場合

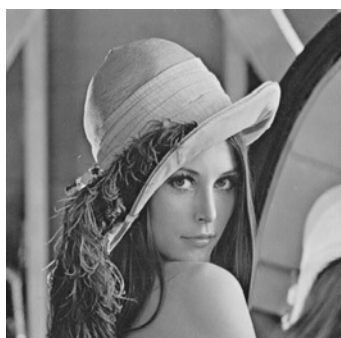
(1) 透かし入り画像

1段階サブバンド分割と2段階サブバンド分割それぞれについて、透かし入り画像の一例とそのSNRを図9、図10に示す。埋め込み強度は $s=2$ である。



$s=2$ 、 SNR=45.76[dB]

図9 透かし入り画像：1段階サブバンド分割



$s=2$ 、 SNR=40.25[dB]

図10 透かし入り画像：2段階サブバンド分割

図9、図10を見ても画品質の違いはほとんどは分からないが、2段階サブバンド分割の方がSNRは小さいので透かし入り画像の劣化が大きいことが分かる。これは、2段階サブバンド分割ではより重要な低周波成分の画素値が埋め込みによって変化すること、およびサブバンド処理回数が多い分だけ、画素に対する演算誤差が多くなることによる。

(2) 抽出透かし情報

1段階サブバンド分割と2段階サブバンド分割それぞれについて、抽出透かし情報の画像の一例とそのBERを図11、図12に示す。埋め込み強度は $s=2$ である。



$s=2$ 、 BER=0.018[%]

図11 抽出透かし画像：1段階サブバンド分割



$s=2$ 、 BER = 7.184[%]

図12 抽出透かし画像：2段階サブバンド分割

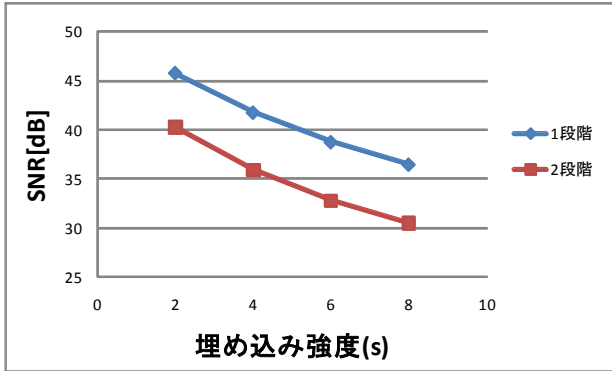
図11、図12を見ると2段階サブバンド分割の方がエラーが多い。これはサブバンド処理回数が多いため演算誤差が増えて誤りが発生しやすいからだと考えられる。

(3) 透かし入り画像のSNRと抽出透かし情報のBER

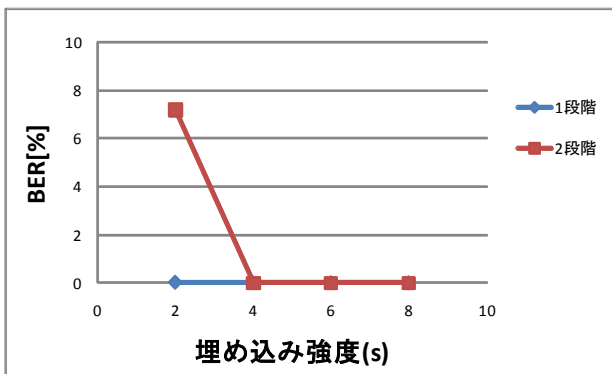
1段階サブバンド分割と2段階サブバンド分割それぞれについて、横軸に埋め込み強度(s)をとり、縦軸にSNRをとったグラフを図13に、縦軸にBERをとったグラフを図14に示す。

図13を見ると、埋め込み強度(s)を強くしていくと透かし入りSNRは低下していくことが分かる。これは埋め込み強度(s)が強いほど埋め込み時の量子化精度が粗くなり、また最大値に加算する値も大きくなるからである。1段階サブバンド分割と2段階サブバンド分割を比較すると、サブバンド処理回数が多い分だけ画素に対する演算回数が増えるため、2段階サブバンド分割の方がSNRは5dBほど低くなる。

図14を見ると、埋め込み強度が2の時だけ2段階サブバンドで抽出透かし情報にエラーが発生しているが、1段階サブバンド分割では誤りは無い。これは2段階サブバンド分割の方が処理演算の回数が多いため、画素値に誤差が発生しやすいからだと考えられる。埋め込み強



透かし情報：S 画像、 攻撃：なし
 図 13 方法 1 による透かし入り画像の SNR



透かし情報：S 画像、 攻撃：なし
 図 14 方法 1 による抽出透かし情報の BER

度を 4 以上にすると 1 段階、2 段階いずれもエラーはなくなる。

以上の結果から、攻撃が無い場合には、透かし入り画像の品質と透かし情報の抽出精度のどちらにおいても 1 段階サブバンド分割の方が優れていることがわかる。そして、透かし入り画像の所要品質と透かし情報の所要抽出精度を考慮した上でサブバンド分割回数および埋め込み強度 s を決める必要がある。

4・2・2 量子化攻撃の場合

量子化攻撃とは、透かし入り画像の画素値を量子化することによって透かし情報の抽出を妨害するものである。この実験では、まず透かし入り画像の画素値を量子化ステップサイズ $s=2, 4, 6, 8$ で割り、結果を四捨五入することにより量子化を施す。そして同じ量子化ステップサイズをかけることにより、逆量子化を施す。このときの量子化ステップサイズは攻撃のためのもので、先に述べた埋め込みの際の量子化と区別するため量子化攻撃ステップサイズ (rs) と呼ぶ。この量子化攻撃により、透かし入り画像の画素値が変わることで埋め込まれた透かし情報の抽出が妨害される。

(1) 抽出透かし情報の画像

1 段階サブバンド分割と 2 段階サブバンド分割それぞれについて、量子化攻撃を受けたときの抽出透かし情報の画像の一例とその BER を図 15、図 16 に示す。埋め込み強度は $s=2$ で、量子化攻撃ステップサイズは $rs=2$ である。



$s=2$ 、量子化攻撃 ($rs=2$)、BER = 8.368[%]

図 15 透かし抽出画像：1 段階サブバンド分割



$s=2$ 、量子化攻撃 ($rs=2$)、BER = 1.819[%]

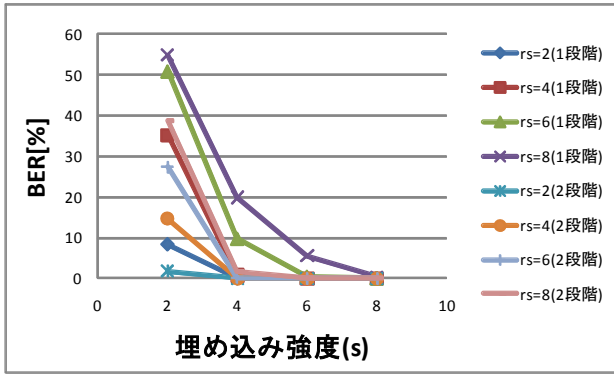
図 16 透かし抽出画像：2 段階サブバンド分割

図 15、図 16 を見ると 1 段階サブバンド分割の方がエラーが多い。1 段階サブバンド分割で用いる LH、HL、HH は、2 段階サブバンド分割で用いる LH2、HL2、HH2 と比べるとより高い周波数成分からなっている。そして高周波成分のサブバンド画像ほど統計的に画素値の絶対値は小さくなり、量子化攻撃の影響を受けやすくなる。このため 1 段階サブバンド分割の方がエラーが多くなるものと考えられる。

(2) 抽出透かし情報の BER

1 段階サブバンド分割と 2 段階サブバンド分割それぞれについて、横軸に埋め込み強度 (s) をとり、縦軸に BER をとったグラフを図 17 に示す。量子化攻撃ステップサイズを $rs=2, 4, 6, 8$ としている。

図 17 を見ると、量子化攻撃ステップサイズ (rs) を強くすると BER が大きくなることと、埋め込み強度 (s)



透かし情報：S 画像、 攻撃：量子化攻撃
 図 17 方法 1 による抽出透かし情報の BER

を強くすると BER が小さくなるのが分かる。つまり埋め込み強度 (s) が強いほど量子化攻撃に対して耐性が強くなるといえる。

1 段階サブバンド分割と 2 段階サブバンド分割を比較すると、2 段階サブバンド分割の方が BER が小さい。この理由は (1) で述べた通りであり、より低周波成分に埋め込む 2 段階サブバンド分割のほうが量子化攻撃の耐性が強くなる。

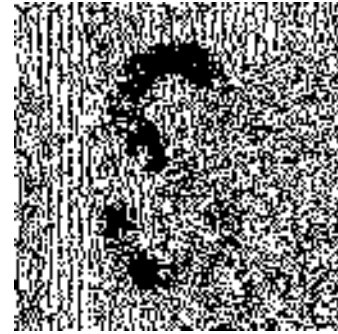
4・2・3 JPEG 圧縮攻撃の場合

JPEG 圧縮攻撃とは、透かし入り画像を JPEG 形式の画像に変換することによって透かし情報の抽出を妨害するものである。この実験では、透かし入り画像を raw ファイル画像から JPEG ファイル画像に変換する。JPEG 画像に変換されることにより、透かし入り画像は圧縮されるので画素値が変わってしまう。そのため埋め込まれた透かし情報の抽出が妨害される。なおこの実験における JPEG 圧縮率は約 1/5 である。

(1) 抽出透かし情報の画像

1 段階サブバンド分割と 2 段階サブバンド分割それぞれについて、JPEG 圧縮攻撃を受けたときの抽出透かし情報の画像の一例とその BER を図 18、図 19 に示す。埋め込み強度は s=4 である。

図 18、図 19 を見ると 2 段階サブバンド分割の方がエラーが少なく、JPEG 圧縮攻撃の耐性が強いことが分かる。JPEG 圧縮では高周波成分をより粗く量子化するため、高周波成分をより多く含むサブバンド画像を用いる 1 段階サブバンド分割の方がエラーが多くなるものと考えられる。



s=4、JPEG 圧縮攻撃、BER = 41.205[%]

図 18 透かし抽出画像：1 段階サブバンド分割

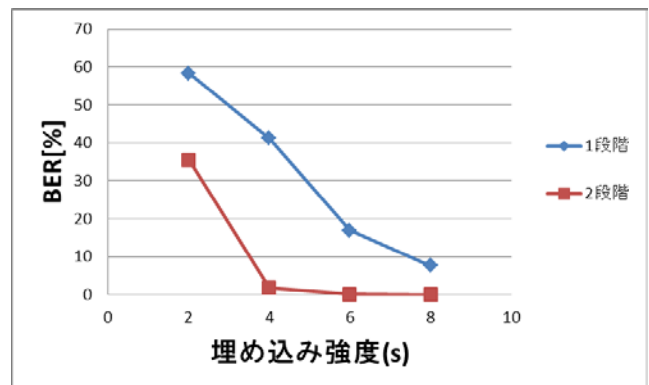


s=4、JPEG 圧縮攻撃、BER = 1.740[%]

図 19 透かし抽出画像：2 段階サブバンド分割

(2) 抽出透かし情報の BER

1 段階サブバンド分割と 2 段階サブバンド分割それぞれについて、横軸に埋め込み強度 (s) をとり、縦軸に BER をとったグラフを図 20 に示す。



透かし情報：S 画像、 攻撃：JPEG 圧縮攻撃

図 20 方法 1 による抽出透かし情報の BER

図 20 を見ると埋め込み強度 (s) を強くすると抽出透かし情報の BER が小さくなり、JPEG 圧縮攻撃の耐性が強くなるのがわかる。

1 段階サブバンド分割と 2 段階サブバンド分割を比較すると、2 段階サブバンド分割の方が BER が小さい。さらに 2 段階サブバンド分割の方が埋め込み強度 (s) を

強くした時のエラーの減少量も多い。この理由は(1)で述べた通りであり、JPEG圧縮は高周波成分をより粗く量子化するため、より低周波成分のサブバンド画像に埋め込んでいる2段階サブバンド分割の方がBERが小さくなるのである。よって2段階サブバンド分割の方がJPEG圧縮攻撃の耐性が強いことが分かる。

4・3 電子透かしの方法2による実験結果

4・3・1 攻撃なしの場合

(1) 透かし入り画像

1段階サブバンド分割と2段階サブバンド分割それぞれについて、透かし情報を埋め込まれた画像の一例とそのSNRを図21、図22に示す。埋め込み強度は $s=2$ である。



$s=2$, SNR = 45.52[dB]

図21 透かし入り画像：1段階サブバンド分割



$s=2$, SNR = 40.04[dB]

図22 透かし入り画像：2段階サブバンド分割

結果は方法1の場合の図9、図10とほぼ同様である。図21、図22を見てもの画像品質の違いはほとんど分からないが、SNRを見ると2段階サブバンド分割の方が透かし入り画像の劣化が大きいことが分かる。この理由は方法1の場合と同じである。すなわち、2段階サブバンド分割ではより重要な低周波成分の画素値が埋め込みによって変化すること、およびサブバンド処理回数が多い分だけ、画素に対する演算回数が増えることによる。

(2) 抽出透かし情報の画像

1段階サブバンド分割と2段階サブバンド分割それぞれについて、抽出透かし情報の画像の一例とそのBERを図23、図24に示す。埋め込み強度は $s=2$ である。



$s=2$, BER = 0.006[%]

図23 透かし抽出画像：1段階サブバンド分割



$s=2$, BER = 5.981[%]

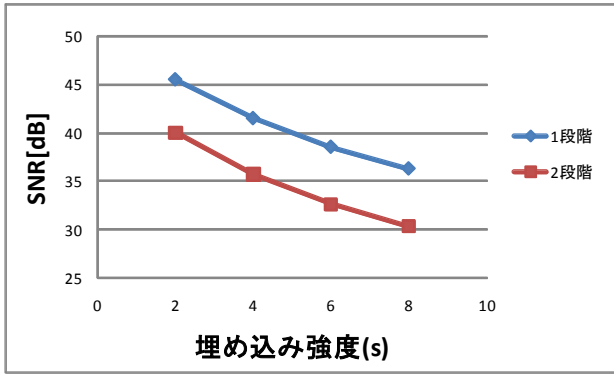
図24 透かし抽出画像：2段階サブバンド分割

図23、図24を見ると2段階サブバンド分割の方がエラーが多いことが分かる。この理由は方法1の場合と同様であり、サブバンド処理回数が多い分、誤差が発生しやすいからだと考えられる。

(3) 透かし入り画像のSNRと抽出透かし情報のBER

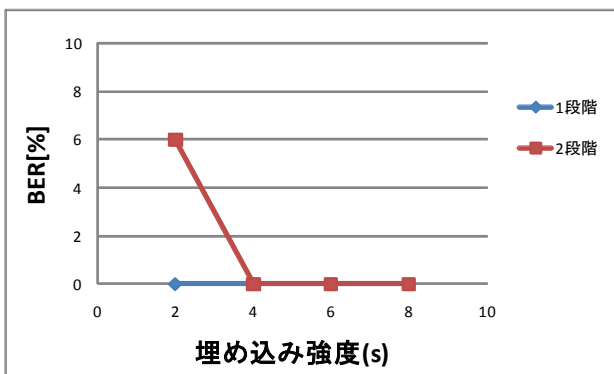
1段階サブバンド分割と2段階サブバンド分割それぞれについて、横軸に埋め込み強度(s)をとり、縦軸にSNRをとったグラフを図25に、縦軸にBERをとったグラフを図26に示す。

結果は方法1の場合の図13、図14とほぼ同様である。図25を見ると、埋め込み強度(s)を強くしていくと透かし入り画像のSNRは低下していくことが分かる。これは埋め込み強度(s)が強いほど埋め込み時の量子化精度が粗くなり、また最大値に加算する値も大きくなるからである。1段階サブバンド分割と2段階サブバンド分割を比較すると、サブバンド処理回数が多い分だけ画素に対する演算回数が増えるため、2段階サブバンド分割の方が透かし入り画像のSNRは低くなる。



透かし情報：S 画像、 攻撃：なし

図 25 方法 2 による透かし入り画像の SNR



透かし情報：S 画像、 攻撃：なし

図 26 方法 2 による抽出透かし情報の BER

図 26 を見ると、埋め込み強度が 2 の場合だけ 2 段階サブバンドで抽出透かし情報にエラーが発生しているが、1 段階サブバンド分割ではエラーは無い。これは 2 段階サブバンド分割の方がサブバンド処理回数が多く、したがって演算誤差が多くなるからだと考えられる。埋め込み強度を 4 以上にすると 1 段階、2 段階いずれもエラーはなくなる。

以上の結果から、攻撃が無い場合には、透かし入り画像の品質と透かし情報の抽出精度のどちらにおいても 1 段階サブバンド分割の方が優れていることがわかる。そして、透かし入り画像の所要品質と透かし情報の所要抽出精度を考慮した上でサブバンド処理回数および埋め込み強度 s を決める必要がある。

4・3・2 量子化攻撃の場合

(1) 抽出透かし情報の画像

1 段階サブバンド分割と 2 段階サブバンド分割それぞれについて、量子化攻撃を受けたときの抽出透かし情報の画像の一例とその BER を図 27、図 28 に示す。埋め込み強度は $s=2$ で、量子化攻撃ステップサイズは $rs=2$ である。



$s=2$ 、量子化攻撃 ($rs=2$)、BER = 6.268[%]

図 27 透かし抽出画像：1 段階サブバンド分割



$s=2$ 、量子化攻撃 ($rs=2$)、BER = 1.367[%]

図 28 透かし抽出画像：2 段階サブバンド分割

結果は方法 1 の場合の図 15、図 16 とほぼ同様である。

図 27、図 28 を見ると 1 段階サブバンド分割の方がエラーが多い。1 段階サブバンド分割で用いる LH、HL、HH は、2 段階サブバンド分割で用いる LH2、HL2、HH2 と比べるとより高い周波数成分からなっている。そして高周波成分のサブバンド画像ほど統計的に画素値の絶対値は小さくなり、量子化攻撃の影響を受けやすくなる。このため 1 段階サブバンド分割の方がエラーが多くなるものと考えられる。

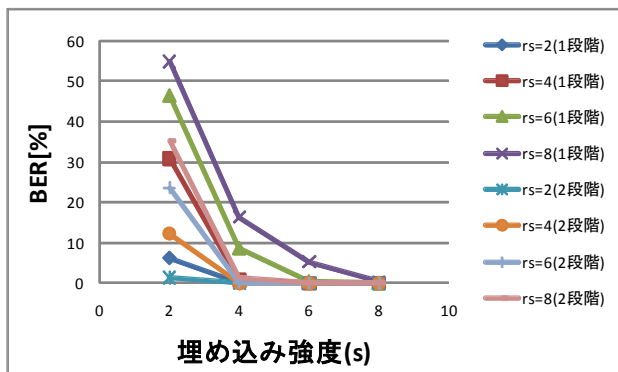
(2) 抽出透かし情報の BER

1 段階サブバンド分割と 2 段階サブバンド分割それぞれについて横軸に埋め込み強度 (s) を、縦軸に BER をとったグラフを図 29 に示す。パラメータとして量子化攻撃ステップサイズを $rs=2, 4, 6, 8$ としている。

図 29 を見ると埋め込み強度 (s) を強くすると BER が小さくなるのが分かる。つまり埋め込み強度 (s) を強くすると量子化攻撃の耐性が強くなる。量子化攻撃ステップサイズ (rs) が 8 以下では埋め込み強度 (s) が 6 以上あればほとんどエラーを発生させずに透かし情報を抽出できる。

1 段階サブバンド分割と 2 段階サブバンド分割を比較すると、2 段階サブバンド分割の方が BER が小さい。1 段階サブバンド分割の方は量子化攻撃ステップサイズ (rs) が 6 以上あるとエラーが多く発生してしまうが、2 段階サブバンド分割の方は量子化攻撃ステップサイズ (rs) が 6 以上あってもあまりエラーが発生せず、埋め

込み強度 (s) を 4 にすればエラーはほぼなくなる。



透かし情報：S 画像、 攻撃：量子化攻撃
図 29 方法 2 による抽出透かし情報の BER

4・3・3 JPEG 圧縮攻撃の場合

(1) 抽出透かし情報の画像



s=4、 BER = 39.172[%]

図 30 透かし抽出画像：1 段階サブバンド分割



s=4、 BER = 0.439[%]

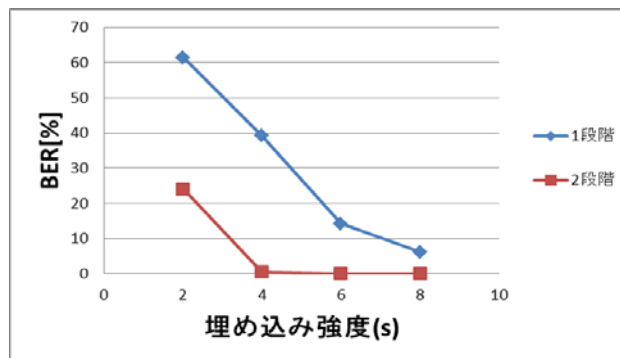
図 31 透かし抽出画像：2 段階サブバンド分割

1 段階サブバンド分割と 2 段階サブバンド分割それぞれについて、JPEG 圧縮攻撃を受けたときの抽出透かし情報の画像の一例とその BER を図 30、図 31 に示す。埋め込み強度は s=4 である。結果は方法 1 の場合の図 18、図 19 とほぼ同様である。

図 30、図 31 を見ると 2 段階サブバンド分割の方がエラーが少ないという結果となった。JPEG 圧縮は高周波

成分を削ることで画像を圧縮しているので高周波の成分に埋め込む 1 段階サブバンド分割よりも、低周波成分に埋め込む 2 段階サブバンド分割の方がエラーが少なくてすむと考えられる。

(2) 抽出透かし情報の BER



透かし情報：S 画像、 攻撃：JPEG 圧縮攻撃
図 32 方法 2 による抽出透かし情報の BER

1 段階サブバンド分割と 2 段階サブバンド分割それぞれについて、横軸に埋め込み強度 (s) を、縦軸に BER をとったグラフを図 32 に示す。結果は方法 1 の場合の図 20 とほぼ同様である。

図 32 を見ると埋め込み強度 (s) を強くすると BER が小さくなるのが分かる。つまり埋め込み強度 (s) を強くすると JPEG 圧縮攻撃の耐性が強くなる。

1 段階サブバンド分割と 2 段階サブバンド分割を比較すると、2 段階サブバンド分割の方は埋め込み強度 (s) を 4 にすればほとんどエラーはなくなるが、1 段階サブバンド分割の方は埋め込み強度 (s) を 8 にしてもエラーが生じる。よって 2 段階サブバンド分割の方が JPEG 圧縮攻撃の耐性が強いと言える。

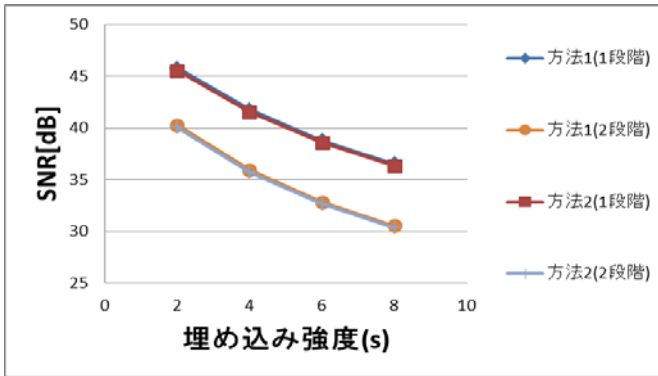
5. 電子透かし埋め込み方法の比較

4.2 と 4.3 で電子透かしの埋め込み方法 1、2 についての実験結果を個別に述べた。ここでは、2 つの方法をまとめて示し、比較検討する。

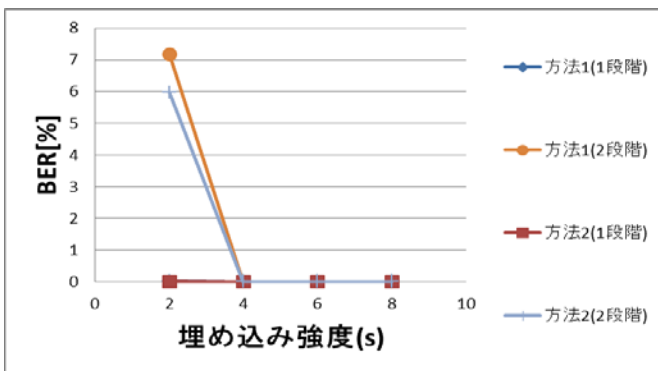
5・1 攻撃なしの場合の透かし入り画像の品質 (SNR) と抽出透かし情報の BER

(1) 透かし入り画像の SNR と抽出透かし情報の BER

1 段階サブバンド分割及び 2 段階サブバンド分割それぞれ、埋め込み方法 1、2 それぞれについて埋め込み強度 (s) を変えたときの SNR を図 33 に、BER を図 34 に示す。



透かし情報：S 画像、 攻撃：なし
 図 33 方法 1、2 による透かし入り画像の SNR



透かし情報：S 画像、 攻撃：なし
 図 34 方法 1、2 による抽出透かし情報の BER

図 33 を見ると、どちらの埋め込み方法においても埋め込み強度 (s) が強くなるほど透かし入り画像の SNR は小さくなるのが分かる。方法 1 と 2 で SNR にはほとんど違いは見られない。1 段階サブバンド分割と 2 段階サブバンド分割を比較すると、2 段階サブバンド分割の方の SNR が約 5dB 小さい。

図 34 を見ると、どちらの埋め込み方法においても埋め込み強度 (s) が強くなるほど抽出透かし情報の BER が小さくなる。方法 1 と 2 では BER にほとんど差は無い。1 段階サブバンド分割ではどちらの埋め込み方法においても埋め込み強度 (s) が 2 以上でほとんどエラーがないが、2 段階サブバンド分割ではどちらの埋め込み方法においても 1 段階サブバンド分割と比べて s=2 でエラーが生じている。

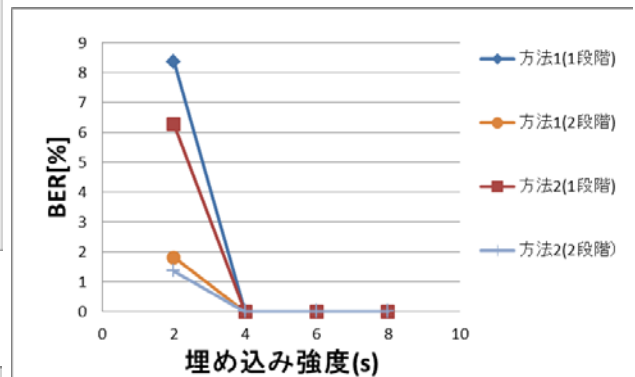
5・2 攻撃に対する抽出透かし情報の BER

5・2・1 量子化攻撃

(1) 抽出透かし情報の BER

1 段階サブバンド分割及び 2 段階サブバンド分割、および埋め込み方法 1、2 について、量子化攻撃 (rs=2) を受けたときについて、横軸に埋め込み強度 (s) を、縦

軸に抽出透かし情報の BER をとったグラフを図 35 に示す。



透かし情報：S 画像、 攻撃：量子化攻撃 (rs=2)
 図 35 方法 1、2 による抽出透かし情報の BER

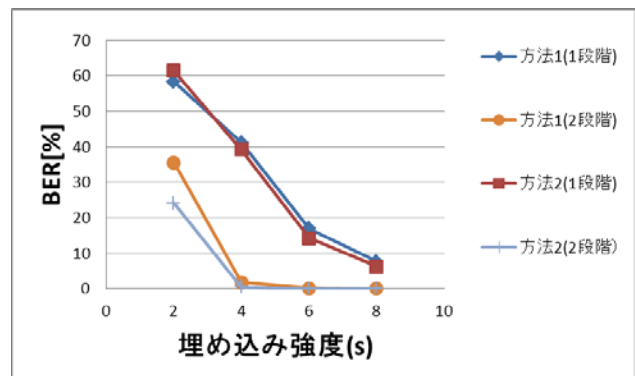
図 35 を見ると埋め込み強度 (s) が強くなると量子化攻撃の耐性が強くなり BER が小さくなるのが分かる。方法 1 と 2 では BER に大差は無い。

また 1 段階サブバンド分割と 2 段階サブバンド分割を比較すると、2 段階サブバンド分割の方が BER が小さくなった。

5・2・2 JPEG 圧縮攻撃

(1) 抽出透かし情報の BER

1 段階サブバンド分割及び 2 段階サブバンド分割のそれぞれ、および埋め込み方法 1、2 のそれぞれについて埋め込み強度 (s) を変え、JPEG 圧縮攻撃を行った。横軸に埋め込み強度 (s) を、縦軸に抽出透かし情報の BER をとったグラフを図 36 に示す。



透かし情報：S 画像、 攻撃：JPEG 圧縮攻撃
 図 36 方法 1、2 による抽出透かし情報の BER

図 36 を見ると埋め込み強度 (s) を強くするとどちらの埋め込み方法においても BER が小さくなるのが分

かる。また、埋め込み方法 1 と 2 の差は少ない。

1 段階サブバンド分割はどちらの埋め込み方法でも BER が大きい、2 段階サブバンド分割では埋め込み強度 (s) を 4 以上にするとどちらの埋め込み方法でも BER がほぼ 0% になった。このことから 2 段階サブバンド分割の方が JPEG 圧縮攻撃への耐性が強いことが分かる。

6. むすび

本論文では、サブバンド処理を用いた画像電子透かしについて検討し、透かし情報の埋め込み方法、透かし入り画像の品質、透かし情報の抽出精度について述べた。

サブバンド処理としては 1 段階サブバンド分割と 2 段階サブバンド分割の 2 つを用いた。1 段階サブバンド分割では透かし情報を埋め込む対象画像を、LL、LH、HL、HH の 4 つのサブバンド画像に分割し、2 段階サブバンド分割では LL サブバンド画像をさらに LL2、LH2、HL2、HH2 のサブバンド画像に分割する。

1 段階、2 段階サブバンド分割のそれぞれに対して 2 つの透かし埋め込み方法を検討した。1 段階サブバンド分割では LH、HL、HH サブバンド画像を、2 段階サブバンド分割では LH2、HL2、HH2 サブバンド画像を用いる。これらに対してまず量子化を施し、量子化された 3 つのサブバンド画像の同一画素位置ごとに最大値と最小値を求める。方法 1 では (最大値 - 最小値) / 2 の余りを、方法 2 では最大値 / 2 の余りを計算する。埋め込む透かし情報が 0 ならば余りが 0 になるように、透かし情報が 1 ならば余りが 1 になるように、必要ならば最大値に 1 を加算することで透かし情報を埋めこむ。画素値に逆量子化を施し、最後にサブバンド合成により透かし入り画像を得る。

透かし埋め込み、抽出の実験を行い、透かし入り画像の品質と透かし情報の抽出精度を調べ、2 つのサブバンド分割方法、および 2 つの埋め込み方法を比較検討した。透かし入り画像に対する攻撃としては量子化攻撃と JPEG 圧縮攻撃について検討した。

透かし入り画像の品質については、どちらのサブバンド分割方法、どちらの埋め込み方法においても埋め込み

強度を強くすると透かし入り画像品質は劣化する。埋め込み方法 1 と 2 を比較すると画像品質にほとんど差がなかった。一方、サブバンド分割方法を比較すると、1 段階サブバンド分割の方が画像品質は良かった。

透かし情報の抽出精度については、どちらのサブバンド分割方法、どちらの埋め込み方法においても、埋め込み強度を強くすると抽出透かし情報のエラーは少なくなった。埋め込み方法 1 と 2 を比較すると透かし情報の抽出精度にほとんど差がなかった。一方、サブバンド分割方法を比較すると、攻撃がない場合は 1 段階サブバンド分割の方が抽出精度は良かった。量子化攻撃と JPEG 圧縮攻撃を加えた場合には攻撃耐性は 2 段階サブバンド分割の方が強かった。

本研究により、サブバンド処理を用いた画像電子透かしにおけるサブバンド分割回数、埋め込み強度と透かし入り画像の品質、透かし情報の抽出精度の関係を明らかにした。今後の課題として、本論文で述べた攻撃以外の耐性についての検討も必要である。

参考文献

- 1) 松井甲子雄 著:「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-」, pp.70-71, 森北出版 (2012)
- 2) 栗本 他 著:「サブバンド処理を用いた画像電子透かし」, H24 東海支部連合大会, A-311 (2012.9)
- 3) 井研治、小西たつ美、沢田克敏 著:「情報通信工学実験Ⅱ指導書」, pp.156-157 (2009)
- 4) 小野文孝、渡辺裕 著:「高度映像技術シリーズ 1 国際標準画像符号化の基礎技術」, pp.84-97, pp.178-215, コロナ社 (1998)
- 5) 画像電子学会 編:小松尚久、田中賢一 監修:「電子透かし技術 デジタルコンテンツのセキュリティ」, pp.1-13, 東京電機大学出版局 (2004)
- 6) 松井甲子雄、岩切宗利 著:「情報ハイディングの基礎 ユビキタス社会の情報セキュリティ技術」, pp.22-25, 森北出版 (2004)

(受理 平成 25 年 3 月 19 日)