

PNGのフィルタを用いた領域分割に基づく 自然人工混在画像の圧縮

戸塚 遊[†], 内田 理^{††}

[†] 東海大学大学院工学研究科情報理工学専攻 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117

^{††} 東海大学情報理工学部情報科学科 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117

E-mail: [†] t25-yu11@beer.ds.u-tokai.ac.jp ^{††} o-uchida@tokai.ac.jp

自然画像を圧縮する方式で人工画像を圧縮すればノイズが目立ち、人工画像を圧縮する方式で自然画像を圧縮すると圧縮率が低くなってしまふ。従って、自然画像領域と人工画像領域が混在する画像に対して、既存の方式で圧縮すると、圧縮率が悪くなることや、画像が大きく劣化する原因となる。本論文では、画像を人工画像領域と自然画像領域に分割し、人工画像領域をPNGで、また、自然画像領域をJPEGで圧縮する方法を提案する。本手法では、PNGで用いられているフィルタを領域分割をする際に用いており、PNG圧縮に適した領域のみを適切に分割できることを示す。

Compression of Natural and Synthetic Compound Image Based on Region Segmentation by Using PNG Filter

Yu TOTSUKA[†] Osamu UCHIDA^{††}

[†] Graduate school of Engineerings, Tokai University

1117 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa, 259-1292, Japan

^{††} Dept. of Human and Information Science, Tokai University

1117 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa, 259-1292, Japan

E-mail: [†] t25-yu11@beer.ds.u-tokai.ac.jp ^{††} o-uchida@tokai.ac.jp

Compressing synthetic images by compression methods for natural images causes the noise of compressed images, and compressing natural images by compression methods for synthetic images causes the deterioration of compression ratio. Then applying usual compression methods into natural and synthetic compound images causes the deterioration of compression ratio or the visual degradation of compressed images. In this paper, we propose a new compression method for natural and synthetic compound image. In our method, the area of synthetic image and natural image is compressed by PNG and JPEG, respectively, by segmenting original image into two regions. The proposed method uses the PNG filters for region segmentation and we show that our method can pick out the area suitable for PNG compression from natural and synthetic compound images.

1 はじめに

JPEGやJPEG2000に代表されるような自然画像の圧縮方式は、画像を周波数分解し、高周波成分を切り捨てることにより圧縮が行われている。このような圧縮方式で、エッジ部分と単色の領域により構成される人工画像を圧縮すると、高周波成分切り捨てによるノイズが目立ちやすい。一方、人工画像を圧縮する方式であるPNG¹⁾は、隣接画素との差分を取って圧縮する方式が取られており、隣接画素の変化の量が一定ではない自然画像を圧

縮すると効率が悪い。同じ人工画像を圧縮する方式であるGIFでは、画像を256色に減色しなければならないため、色数が多い自然画像には不向きである。従って、自然画像と人工画像が混在するような画像(以下、自然人工混在画像と呼ぶ)は自然画像の圧縮方式で圧縮するとノイズが乗りやすく、人工画像の圧縮方式で圧縮すると圧縮率が悪いことになり、効率よく圧縮することはできない。近年、デジタルカメラや高機能な画像処理ソフトの普及によって、個人が写真を自由に加工するこ

とが多くなった。そのため、自然人工混在画像が作成されることが多くなり、それに適した圧縮技術が必要になる。そのような、自然人工混在画像は、全く特性の違った領域が混在するので、それぞれを同じ方法で圧縮するよりも、それぞれの領域に適した圧縮方式で個別に圧縮するほうが効率が良いと考えられる。

本論文では、自然画像と人工画像を個別の圧縮方式で圧縮するため、画像の領域分割を行い、自然画像を自然画像を圧縮する方式である JPEG で圧縮し、人工画像を人工画像を圧縮する方式である PNG で圧縮する手法を提案する。本手法の目的は、JPEG で圧縮したときにノイズが発生するのを最小限に抑え、全て JPEG で圧縮したときのファイルサイズと、本手法で圧縮したときのファイルサイズを比べたときの、サイズの増大を最小限にすることである。人工画像領域を圧縮する方式として、PNG を採用した理由としては、その他の人工画像を圧縮する方式としては GIF があるが、色数が 256 色に限定されることや PNG よりも圧縮率が低いことから、それらの性能で上回る PNG を用いることにした。自然画像を圧縮する方式として JPEG を採用した理由としては、JPEG2000 など、他の方式にも圧縮率が高い方式やノイズが現れにくいとされる方式も存在するが、符号化時に 8×8 ブロックに分割する処理を、領域分割の効率化に利用できると考え採用した。

2 提案手法の概要

領域分割アルゴリズムは、PNG のフィルタによる分割と、エッジの抽出により構成される。まず、PNG のフィルタリングアルゴリズムを用いて人工画像の特徴を持つ領域を PNG 圧縮用領域として抽出する。そうすることで、PNG で圧縮しやすい領域を適切に抽出することが出来る。更に、JPEG 圧縮時にノイズ発生の原因となるエッジ部分を PNG 圧縮用領域として抽出する。PNG のフィルタリングアルゴリズムによる抽出と、エッジの抽出により抽出されなかった領域は、JPEG で圧縮する処理に渡される。領域分割を行うと、後で元の画像に復元する必要があるので、領域分割と同時に、復号時に PNG 用領域と JPEG 用領域を結合するための座標値を作成し、容量を減らすため圧縮する。領域分割された画像は、PNG 圧縮用領域と JPEG 圧縮用領域のどちらか片方の領域に割り当てられるため、その領域に分割された画素以外は、値の決められていない空白になる画素として存在することになる。それらの空白画素は、PNG や JPEG で圧縮する際の妨げにならないように処理を行う。図 1 に全体の概要を示す。

3 領域分割アルゴリズム

領域分割はまず、PNG のフィルタを用いて、PNG 圧縮用領域を抽出し、抽出されなかった部

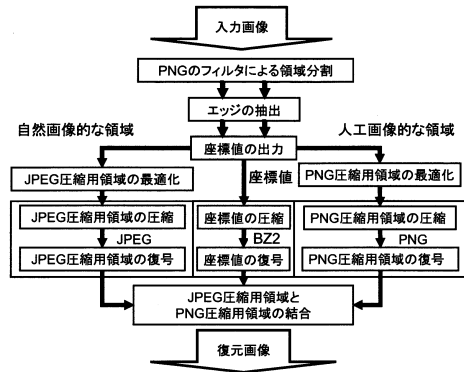


図 1 提案手法の概要

分を、JPEG 圧縮用領域とする。その後、JPEG で圧縮するとノイズが発生する原因となる、隣接画素と比べて変化の大きいエッジ部分を人工画像領域として抽出する。領域分割処理は RGB 成分それぞれに対して個別に行う。

本手法では PNG での圧縮に適した領域を抽出するので、自然画像であっても PNG の圧縮に適した領域であれば抽出され、人工画像であっても PNG での圧縮に適していない領域であれば抽出されないことになる。

3.1 PNG のフィルタによる領域分割

本手法では、PNG での圧縮に適した領域を抽出する方法として、PNG のフィルタを用いる。PNG の圧縮アルゴリズムは、画像の RGB 成分それぞれをフィルタに通し、フィルタを通った値が LZ77 による符号化とハフマン符号化により構成される deflation アルゴリズムにより圧縮される。PNG で圧縮したときに高い圧縮率の得られる画素を抽出すれば、必然的に PNG 圧縮用領域が抽出できると考えられる。

PNG での圧縮に適した領域を抽出するには、全ての PNG のアルゴリズムを考慮した抽出法が最適と考えられるが、全てのアルゴリズムを考慮すると実装アルゴリズムが複雑になるので、今回は最も効果の高いと思われるフィルタリングアルゴリズムのみを考慮した領域抽出を行う。

PNG のフィルタは、画像の横ラインごと、None, Sub, Up, Average, Paeth の 5 つのフィルタから選択し適用することで、後の deflation アルゴリズムによる圧縮の精度を高めている。それぞれの横ラインにどのフィルタを用いるかは処理系の自由とされている。PNG の 5 つのフィルタは、画像の特徴に応じて得意不得意があるが、すべてのラインにおいて最も適したフィルタを適用しようとするれば、処理時間が多くなってしまふ。そこで本手法

では、最適なフィルタの選択が処理時間を要さずにできるように、フィルタを適用した時の画素値を各画素ごと計算し、閾値 PNG_{th} 以下であればその画素を PNG 圧縮に適した領域として抽出し、抽出した画素数の合計値を元に4つのフィルタから実際に領域分割するフィルタを選択する²⁾。ただし、フィルタ None はインデックスカラー方式を用いる場合に採用されるフィルタであり、今回の領域分割アルゴリズムでは考慮しなかった。また、PNG 圧縮用領域として抽出された画素が離れた場所に点在していると PNG で圧縮したとき効率が悪い。そのため、横に連続して閾値 LEN_{th} 以上並んでいなければ、人工画像領域として抽出しないようにした。Up, Average, Paeth による領域分割を行うと、Sub を用いたときよりも多くの画素を分割できる可能性があるが、注目ラインの上のラインも領域分割の対象としなければならないため、上のラインで抽出した PNG に適した画素は、その下のラインの領域分割によって、適している画素のみが抽出されている可能性が低下してしまう。それを改善するアルゴリズムとして、Sub, Up, Average, Paeth それぞれの領域分割に利用する閾値 $RAT_{th}S$, $RAT_{th}U$, $RAT_{th}A$, $RAT_{th}P$ に変化をもたせる処理を行った。

以下に、アルゴリズムの詳細を示す。まず、画像の横ライン一列に注目する。次に、注目したラインに対し、左から順に、Sub, Up, Average, Paeth のフィルタをそれぞれ順に適用する。次に、フィルタを適用した値があらかじめ設定した閾値 PNG_{th} 以下ならばフィルタにかけた画素全てを PNG 用領域候補として抽出する。この際、連続していくつ並んでいるか判断するためのカウントに1を加えておく。この処理は、PNG 用領域候補が抽出され続けるまで繰り返す。ここで利用する閾値 PNG_{th} は、0 を適用すれば、隣の画素との変化のない部分のみが抽出されやすく、1 以上を適用するとグラデーション部分も抽出されやすくなる。あまり大きな値を設定しすぎると PNG で圧縮されにくい領域が抽出される可能性が高くなる。次に、PNG 圧縮用領域が抽出されなかった場合、PNG 圧縮用領域が点在しないようにするため、連続していくつ並んでいるかのカウントが閾値 LEN_{th} を上回っているか判断する。ここでの閾値 LEN_{th} は経験的に7画素とした。7画素以上並んでいなかった場合、それまで連続して抽出した PNG 用領域候補画素を JPEG 用領域とする。連続して並んでいた画素数が7より少なかった場合、それまで連続して抽出した PNG 圧縮用領域候補をそのフィルタの PNG 圧縮用領域として記録しておく。ここまでの、PNG 圧縮用領域の抽出を全てのフィルタについて行う。1つの横ライン全てが終了したら、フィルタで抽出できた画素の合計が、Sub で抽出できた画素数を基準とした比率による閾値 $RAT_{th}S$, $RAT_{th}U$, $RAT_{th}A$, $RAT_{th}P$ を、最も大きく上回ったフィル

タの PNG 圧縮用領域を採用する。比率による閾値は、Sub で抽出できた画素数 $RAT_{th}S$ を基準の閾値とした場合、Up と Average の閾値である $RAT_{th}U$ と $RAT_{th}A$ は $RAT_{th}S$ の 1.5 倍、Paeth の閾値である $RAT_{th}P$ は $RAT_{th}S$ の 2 倍であり、それ以上抽出出来なければ領域分割として用いるフィルタとして Sub を採用するものとする。領域分割に利用することになったフィルタは、PNG 圧縮用画素を抽出したときに計算に利用した画素全てを PNG 圧縮用領域として抽出する。ここまでの処理が終了したら、次のラインを取り出し全ての横ラインに対して同じ処理を繰り返す。

3.2 エッジの抽出

PNG のフィルタをもとに PNG 圧縮用領域を抽出した画像は、あくまで PNG で圧縮しやすい部分を抽出した画像である。PNG に適した領域のみを PNG で圧縮するようにしてしまうと、同じ値が連続して存在する領域のみが抽出されてしまい、JPEG で圧縮するのに適さない、ノイズの現れやすい隣接画素との輝度の差が大きいエッジ部分は抽出されず残ってしまう。そのため、JPEG 圧縮用領域として抽出された画像に対して、JPEG で圧縮するとノイズが目立ちやすい部分を可逆圧縮するために、エッジの抽出処理として PNG 圧縮用領域に再度分割処理を行い、ノイズが現れないようにする。エッジは基本的に、PNG での圧縮に適していない領域である。従って、不要な領域を抽出してしまえば、圧縮データの増加につながってしまうため、細かな処理が必要になる。

エッジ抽出のおおまかな手順は次の通りである。まず注目画素とその周辺の 3×3 ブロックの平均との差分を求めることによってエッジ抽出を行う。次に、PNG フィルタによる領域分割によって分割された領域周辺のエッジを抽出しないようにする処理をし、最後に 8×8 ブロックごとのエッジ抽出を行う。以下に、この手順の詳細を述べる。

(a) 隣接画素との差によるエッジの抽出

エッジの抽出はまず、隣接画素との差を計算し、差が閾値 $EDGE_{th}$ 以上の場合にエッジと判断し、PNG 圧縮用領域として抽出する。抽出処理においては、 3×3 のブロックの平均値と、注目画素との差を計算し、閾値 $EDGE_{th}$ 以上の場合にエッジと判定する。エッジの抽出のための基本式は次式で与えられる。

$$h(i, j) = \sum_{x \in B} |x(i, j) - A(i, j)| \quad (1)$$

$$A(i, j) = (1/9) \sum_{u, v=-1, 1}^{1, 1} x(i+u, j+v) \quad (2)$$

ここで B は $A(i, j)$ を中心とする 3×3 ブロックの画素の集合である。 $h(i, j)$ がエッジ強度となる。エッジの抽出処理は、座標値を確認し、自然画像領

域に割り当てられている領域に対して行う。このとき、エッジ強度が閾値以上だった場合 PNG 圧縮用領域として抽出することを基本とするが、(b)、(c)の条件に当てはまった場合には抽出されたエッジに対し個別に処理を行う。本論文では閾値 $EDGE_{th}$ を経験的に 35 とした。以下に、個別の処理を施す条件を示す。以下の条件は (b)、(c) の順に行われるものとし、既にエッジとして抽出しないと判断した画素は条件判断を行わない。

(b) 人工画像領域周辺のエッジ抽出の選択

PNG のフィルタによる領域分割によって、既に PNG 圧縮用領域として抽出されている部分の周辺の画素は、その部分だけでエッジの抽出はされている。その上、隣接画素を抽出すると、周辺の自然画像まで抽出され、PNG 圧縮の際圧縮率が低下してしまうので抽出が不要である。そのため、注目画素を中心とした 6×6 ブロックの中に、既に PNG 圧縮用領域として割り当てられている画素が閾値 ART_{th} 以上あった場合は、人工画像領域に隣接した自然画像とみなし、エッジの抽出を行わない。ここで、 ART_{th} は経験的に 3 とした。

(c) 8×8 ブロックでのエッジ抽出

地平線のような、自然画像の特徴を持つ領域の間にエッジがある場合、エッジの両側の値の差が大きいため、境目のみを抽出しても効果がない。そのような領域は、JPEG と同じ 8×8 ブロックで PNG 圧縮用領域として抽出する。JPEG と同じ 8×8 ブロックの領域を PNG 圧縮用領域として抽出することで、JPEG の量子化によるノイズの発生を防ぐことが出来る。

この処理を行うためにまず、エッジの両側が自然画像のみであることを確認するため、エッジの抽出を行う前の JPEG と同じ 8×8 ブロックの中に、人工画像領域がいくつ存在していたか合計を求める。次に、合計が 6 画素以下だった場合において、式 (1) とその他の条件によって、エッジとして新たに PNG 圧縮用領域に分割された画素数が閾値 $BLK_{th}U$ 以上 $BLK_{th}T$ 以下だった場合に、 8×8 ブロックで PNG 圧縮用領域として抽出する。ここで、 $BLK_{th}U$ と $BLK_{th}T$ は、経験的にそれぞれ 12、20 とした。これは、自然画像と自然画像の間のエッジを抽出することと、エッジが 8×8 ブロックを大きく横切っている場所を抽出することを目的とした抽出法である。エッジの両端の色の差を考慮していないが、これは今後の課題となる。

4 座標値の生成と圧縮

ここまでの処理を行った後の RGB の各色の PNG 圧縮用領域と JPEG 圧縮用領域に対し、PNG 圧縮用領域を 1、JPEG 圧縮用領域を 0 とした 2 値で座標値を生成する。自然画像領域と人工画像領域はある程度続けて現れる可能性が高いため、座標値はエントロピー符号化による圧縮の効果が高

いと思われる。そのため今回は、座標値を BZ2 により圧縮を行った。本手法では、座標値を BZ2 により圧縮したが、BZ2 はテキストを圧縮するための圧縮手法であり、今回の手法に最も適しているとは言い難い。今後の課題として、本手法における座標値の圧縮方法の検討が挙げられる。

5 最適化処理

領域分割後の、PNG 圧縮用領域と JPEG 圧縮用領域は、その領域に分割された箇所以外は、値の決められていない空白画素になっており、別の値を埋めるなどして補間しなければならない。また、ただ補間するのではなく、PNG や JPEG で圧縮するために適した補間方法で補完したほうが効率が良い。

5.1 JPEG 圧縮用領域の最適化

JPEG 圧縮用領域は、JPEG と同じ 8×8 ブロックに分割し、ブロックの画素値の平均値で埋める手法を用いる。ブロック中に、自然画像領域が存在しない場合は、全て 0 で埋める。ブロックごと分割することの利点として、JPEG で 8×8 ブロックごと処理を行うため、平均値で埋めるときの隣のブロックの境目のエッジ部分にノイズが現れないことが挙げられる。

5.2 PNG 圧縮用領域の最適化

PNG 圧縮用領域の空白画素はすべて 0 で埋めることとした。人工画像領域を PNG で圧縮する際、空白画素が元画像の値の間に多数入っていると効率が悪いので、全ての横ラインごと、最適値を計算し埋める方法など、より効率的な空白画素の補間方法も考えられるが、今回は実装を行っていない。

6 画像の復号

領域分割後の復号処理は、PNG 圧縮領域と JPEG 圧縮領域ともに PNG および JPEG の復号処理を行った後、座標値をもとに復号する。

7 評価実験

本手法の評価のために利用した画像は、自然人工混在画像と人工画像の 2 つの画像である。双方の画像とも、色数はフルカラー 24 ビット、サイズは 512×512 である。自然人工混在画像は、自然画像に文字とクリップアートを手動で追加したものである。本手法による符号量は、人工画像領域と自然画像領域と座標値をそれぞれの符号量を合計したものとなる。

7.1 提案手法による領域分割結果

図 2 と図 3 に自然人工混在画像の領域分割結果を示す。PNG の領域分割に用いる閾値は 0 に設定している。圧縮率が同程度になるように、通常の JPEG の圧縮精度を 80 とし、提案手法の JPEG の圧縮精度を 60 にしている。

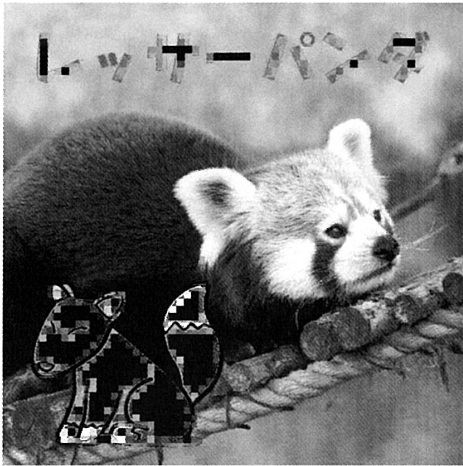


図 2 自然人工混在画像の分割結果：JPEG 圧縮用領域

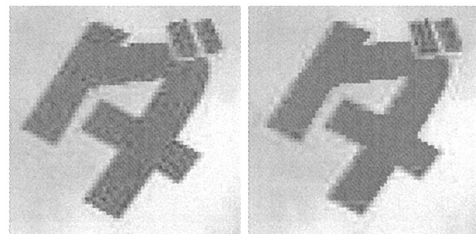
自然人工混在画像を分割し、PNG 圧縮用領域と JPEG 圧縮用領域と座標値をそれぞれの方法で圧縮したときのサイズは、PNG 圧縮用領域が 16.0KB、JPEG 圧縮用領域が 24.9KB、座標値が 7KB となった。それに対して、自然人工混在画像を JPEG で圧縮したときのサイズは 47.1KB であった。

自然人工混在画像の領域分割は、文字の領域とクリップアートの領域が PNG 圧縮用領域として抽出できている。しかし、連続して PNG 圧縮用領域が並んでいなかった場合に、抽出しない処理を行ったことが原因で、抽出できなかった領域が各所に見られる。そのほか、PNG のフィルタによる領域分割により、色の差がなかった背景の一部が短い横筋となって抽出されている。この領域は、圧縮率にそれほど影響ないと思われるが、JPEG 圧縮の際のノイズが現れるのを防ぐことも出来ないため、このような領域を抽出するべきか検討する必要がある。原画像は急激な変化のあるエッジの少ないため、少量しか抽出されていないが、髭の一部などの特にエッジが目立つ部分については抽出されており、満足できる結果となっている。ブロック単位で抽出されている箇所が少ないのもエッジが多くないことに起因していると考えられる。極端なエッジの部分はブロック単位で抽出されており、満足できる結果となっている。

JPEG 圧縮用領域は PNG 圧縮用領域に分割された画素が 8×8 ブロックの平均で埋められているのが分かる。しかし、完全に抽出されていれば 8×8 ブロックの中に、強いエッジ部分は残らないはずだが、少量残ってしまっている。これは、人工画像領域にアンチエイリアシング処理が施されて



図 3 自然人工混在画像の分割結果：PNG 圧縮用領域



(a) JPEG (b) 提案手法

図 4 自然人工混在画像の JPEG と提案手法による再生画像

いることが原因と考えられる。本手法は、同じ値が連続した領域のみを抽出するようになっているため、アンチエイリアシングが施された領域は同じ画素値ではないので抽出されない。そのため、このまま JPEG で圧縮するとノイズが現れる原因となる。アンチエイリアシングの対策は今後の課題となる。

7.2 提案手法と JPEG のノイズの比較

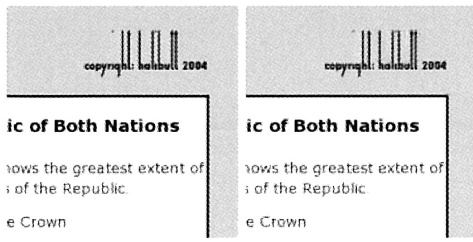
図 4 に自然人工混在画像の JPEG による圧縮の結果 (a) と提案手法による圧縮の結果 (b) を一部切り出して示す。

この結果を見ると、(b) の人工画像領域のノイズは大幅に少なくなっているが、自然画像領域のノイズは、局所的に減っている領域はあるものの基本的にはほぼそのまま表れており、圧縮精度を落としたためさらにノイズが目立っている。これは、ア



(a) JPEG 圧縮用領域 (b) PNG 圧縮用領域

図 5 人工画像の領域分割画像



(a) 原画像 (b) 提案手法

図 6 人工画像の提案手法の再生画像と原画像

ンチエリアシング処理が施された部分を JPEG で圧縮したことによるものである。ただ、人工画像領域のみが続いている場合などは、エッジを JPEG で圧縮してもノイズが発生しにくいので、人工画像領域が中心の自然人工混在画像においては、本手法の効果が現れやすいといえる。

7.3 提案手法と PNG による人工画像圧縮結果の比較

人工画像は JPEG で圧縮するとノイズが現れやすいことや、圧縮率の悪さから、通常 PNG によって圧縮される。しかし、PNG で圧縮する場合であっても途中で文字領域など急激に変化する領域が多数存在していると、その分圧縮効率が悪くなる。本手法を用いれば、人工画像領域はノイズが現れにくくなることや、PNG で圧縮しやすい領域のみが抽出できるため、本手法を人工画像に適用する実験を行った。本実験も自然人工混在画像と同様の条件の元に行う。図 5 に人工画像を提案手法で領域分割したときの、JPEG 圧縮用領域と (a) と、PNG 圧縮用領域 (b) を示す。また、図 6 に原画像 (a) と、人工画像を提案手法で再生したときの画像 (b) を示す。

ここで、図 5(a) は 25.7KB、図 5(b) は 21.2KB、座標値のファイルサイズは 6.8KB、原画像をそのまま PNG で圧縮すると 81.8KB である。図 6 をみ

るとノイズはほとんど見られなく、PNG 圧縮用領域と JPEG 圧縮用領域と座標値を合わせたファイルサイズも原画像を PNG で圧縮したものより小さい。よって、エッジの出現頻度が多い人工画像に対しては、本手法を適用すると効率が良いことが分かる。

8 まとめ

本論文では、自然人工混在画像に対して、効率的に圧縮できる方式を提案した。本手法を用いれば、自然人工混在画像において、JPEG で圧縮したときのモスキートノイズの発生を部分的に抑えることができる。さらに、人工画像を圧縮したときは、ノイズを目立たせず圧縮率を向上できる場合がある。

本手法はまだ不完全な部分があり、領域分割のときの人工画像領域のアンチエリアシング部分や、横一列に同じ値が続いていない場合において領域分割されない。それによって、ノイズが目立つ部分が残る原因となっている。

自然人工混在画像の圧縮は本手法以外にも存在するが^{3) 4)}、本手法における利点としては、JPEG の代わりに可逆圧縮が可能な手法を用いれば可逆圧縮の実装が可能なこと、処理時間が短時間なことが挙げられる。

今後の課題として、PNG のフィルタによる領域分割の精度の向上、エッジの抽出の精度の向上、アンチエリアシングに対する対応、座標値の圧縮の最適化などが挙げられる。

謝辞

本研究に対し有益なご助言をいただきました、東海大学情報理工学部情報科学科中西祥一郎教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) World Wide Web Consortium, "Portable Network Graphics (PNG) Specification (Second Edition)," <http://www.w3.org/TR/PNG/>, 2003. W3C Recommendation 10 November 2003.
- 2) Cosmin Truta. Permission to distribute freely. "A guide to PNG optimization," <http://www.cs.toronto.edu/~cosmin/pngtech/optipng.html>, October 2004.
- 3) 茂木 健, "領域分離に基づく自然人工混在画像の圧縮", 信学論, vol.J82-D-II, no.7, pp.1150-1160, July 1999.
- 4) 小林 正明, 鎌田 清一郎 "カラードキュメント画像の可逆圧縮法", 信学論, vol.J85-D-II, no.4, pp.584-593, April 2002.