

専用コードブックと汎用コードブックの 組み合わせによる画像のベクトル量子化

夏井 知義[†] 長谷山 美紀[†] 北島 秀夫[†]

[†] 北海道大学 大学院 工学研究科
〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目
TEL (011)706-7162
E-mail natsui@media.eng.hokudai.ac.jp

あらまし 本文では、静止画像を効率的に符号化するベクトル量子化器のための、代表ベクトルの生成方法を提案する。従来用いられているコードブックは、多数の学習画像をクラスタリングして生成される。しかし、高品質な再生画像を得るために、大量の代表ベクトルがコードブックに登録されるため、代表ベクトルのインデックスが長くなってしまふ。この問題を解決するために、従来手法はインデックスを効率的に符号化する。提案手法は別のアプローチとして、画像のエッジ部と平坦部にそれぞれ適合するような2種類のコードブックを用いて、代表ベクトルの数を削減する。提案手法は、原画像から得る代表ベクトルをフィルタリングして生成される専用コードブックと、疑似乱数を用いて生成される汎用コードブックを使用する。提案手法の符号化効率が、インデックスを効率的に符号化することなしで、従来手法のそれと同等であることを示す。

キーワード ベクトル量子化, 専用コードブック, 汎用コードブック, 代表ベクトル

Vector Quantization for Images Using both a Specific Codebook and a Universal Codebook

Tomoyoshi Natsui[†], Miki Haseyama[†], and Hideo Kitajima[†]

[†] Graduate School of Engineering, Hokkaido University
Kita-ku Kita-13 Nishi-8 Sapporo, 060-8628 Japan
TEL + 81-11-706-7162
E-mail natsui@media.eng.hokudai.ac.jp

Abstract A method of generating the representative vectors for encoding still images efficiently using a vector quantizer, is proposed in this paper. A conventional codebook is generated by clustering many training images. But, many representative vectors are registered in the codebook for obtaining the high quality reconstructed image, thus the index of the representative vector becomes long. To solve this problem, the conventional methods encode the index efficiently. The proposed method is another approach for reducing the number of representative vectors by using two codebooks adapted to edges and flat regions of the image respectively. It uses a specific codebook which is generated by filtering the representative vectors from the source image, and a universal codebook which is generated by using random numbers. It is shown that the coding efficiency of the proposed method is comparable to the conventional methods without encoding the index efficiently.

key words vector quantization, specific codebook, universal codebook, representative vector

1 はじめに

静止画像符号化方法のひとつであるベクトル量子化による画像符号化[1]-[6]においては、原画像の分割画像をベクトルとして扱う。符号化側・復号化側で用いられるコードブックは、分割画像を近似する代表ベクトルと、それらに割り当てられたインデックスから構成される。

ベクトル量子化による画像符号化の従来手法として、文献[1]-[4]では、多数の学習画像をクラスタリングすることによって生成される代表ベクトルを登録した汎用コードブックを用いている。これを用いて高品質な再生画像を得るためには、大量の代表ベクトルをコードブックに登録する必要がある。そこで従来手法は、代表ベクトルのインデックスを効率的に符号化することによって、インデックスに必要な符号量を削減している。

また、文献[5][6]では、LBGアルゴリズム[7]によって原画像から生成される代表ベクトルを登録した専用コードブックを用いている。この手法では、高品質な再生画像を得ることができるものの、専用コードブックそのものを符号化して復号化側に送信する必要があるため、インデックスを効率的に符号化する手法よりも符号量が增大してしまう可能性がある。

本文では、従来手法とは別のアプローチで、静止画像を効率的に符号化する手法を提案する。提案手法は、従来用いられているコードブックのうち、画像の平坦部を近似する代表ベクトルの種類が少なく、それ以外のエッジ部などを近似する代表ベクトルの種類が多いことに注目する。そこで提案手法は、画像の平坦部、エッジ部をそれぞれ近似する2種類のコードブックを組み合わせることで、代表ベクトルの数を減らす。これによって、インデックスに必要な符号量を削減しつつ、高品質な再生画像が得られる可能性がある。2種類のコードブックとは、原画像から得る代表ベクトルをフィルタリングして生成される専用コードブックと、疑似乱数を用いて生成される汎用コードブックである。専用コードブックはエッジ部に、汎用コードブックは平坦部に適合するように生成される。

シミュレーション結果から、提案手法の符号化効率が、インデックスを効率的に符号化することなしで、従来手法のそれと同等であることを示す。

第2章ではベクトル量子化による画像圧縮について説明し、汎用コードブックを用いる従来手法、専用コードブックを用いる従来手法について述べる。第3章では提案手法の概念とそれの実装の際に考慮すべき点、そしてその符号化アルゴリズムについて述べる。第4章ではシミュレーション結果について述べ、第5章で本文全体をまとめる。

2 従来手法

本章では、ベクトル量子化による画像圧縮について説明し、汎用コードブックを用いる従来手法、専用コードブックを用いる従来手法について述べる。

2.1 ベクトル量子化による画像圧縮

画像のベクトル量子化とは、一定のサイズのブロックで原画像を分割し、その分割画像を良好に近似する代表

ベクトルを探すことである。これを画像圧縮の用途に用いる場合には、分割画像を近似する代表ベクトルと、それらに割り当てられたインデックスから構成されるコードブックを設計する必要がある。ベクトル量子化による画像圧縮の概略を図1に示す。

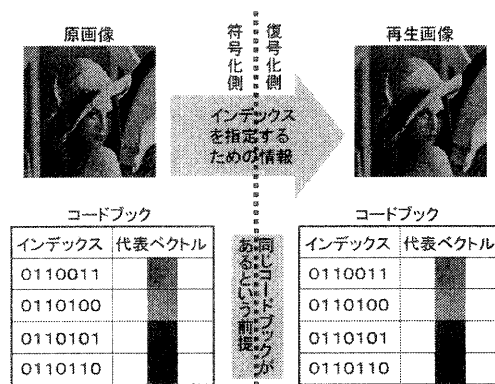


図1 ベクトル量子化による画像圧縮

図1に示されているように、復号化側にも符号化側と同じコードブックが存在するという前提で符号化/復号化処理は行われる。符号化処理は、分割画像を近似する代表ベクトルを探索し、そのインデックスのみを符号化する処理であり、その後インデックスは復号化側に送信される。復号化処理は、受信したインデックスに基づいて代表ベクトルをコードブックから取り出す処理であり、非常に単純である。

復号化の結果得られる再生画像の近似誤差は、分割画像と、それに対応するインデックスの指定する代表ベクトルとの不一致により発生する。それらをより正確に一致させようとするれば、大量の代表ベクトルが登録されたコードブックを必要とし、その結果それを指定するためのインデックスが長くなるので、符号量が増加する。

なお、ベクトル間の誤差は平均二乗誤差(MSE)で評価する。ベクトルの次元がM×Mで、比較の対象となる輝度値がそれぞれ x_{ij} , \hat{x}_{ij} とすると、MSEは以下の式で表される。

$$MSE = \frac{1}{M \times M} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M (x_{ij} - \hat{x}_{ij})^2 \quad (1)$$

また、得られた再生画像の画質を評価するためには、PSNR¹を用いる。単位はdBで、式は以下ようになる。

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{MSE} \quad (2)$$

¹Peak Signal to Noise Ratio の略。

2.2 汎用コードブックを用いる従来手法

画像のベクトル量子化のほとんどの従来手法は、多数の学習画像をクラスタリングすることによって生成される代表ベクトルを登録した汎用コードブックを用いている。高品質な再生画像を得るために、汎用コードブックには大量の代表ベクトルが登録されている。その結果、インデックスが非常に長くなるため、インデックスの効率的な符号化方法が文献[1]-[4]によって提案されている。以下において、これらを概説する。

文献[2]によるFSVQは、符号化器・復号化器を有限状態システムととらえ、DPCMに似た概念に基づいて、インデックスの符号量を削減している。具体的には、ラスト走査順に画像がブロック毎に復元されることを前提とし、位置がひとつ上のブロックと、ひとつ左のブロックに注目し、符号化対象ブロックに割り当てられたインデックスが持つ冗長性を削減している。

文献[3]によるSMVQは、FSVQで用いられている有限状態システムを改良し、ベクトル量子化による画像符号化の大きな問題点であったブロックノイズを大幅に削減している。さらに、画像の1次相関係数が低いような画像に対しても高品質な再生画像が得られるように、文献[4]によるTPSMVQは、SMVQを2段階で実行する。これは、最初の段階で符号化されたブロックの分散が、あらかじめ設定された閾値よりも大きい場合に、そのブロックを再び精細に符号化するという手法であり、さらに再生画像の画質を向上させている。

2.3 専用コードブックを用いる従来手法

本文で述べる専用コードブックとは、符号化の対象となる画像のみにおいて使用価値のある代表ベクトルが登録されたコードブックを指す。これを用いて画像をベクトル量子化した場合には、汎用コードブックを用いる場合よりも再生画像の画質が向上するもの、復号化側には専用コードブックを符号化して送信する必要が生じる。

文献[5]では、この専用コードブックのみを用いて画像をベクトル量子化する手法が提案されている。この手法ではLBGアルゴリズム[7]のようなクラスタリングアルゴリズムを用いて、原画像から専用コードブックを生成している。この手法では符号量が増加する可能性があるため、その符号化効率を後ほど改めて検証する。

また、文献[6]によるFVQは、フラクタル画像符号化にヒントを得た画像のベクトル量子化方法である。この手法は、基底ブロックの種類や、輝度値のスケーリング・オフセットパラメータによって専用コードブックを生成する。この手法の特長は、四分木構造に基づいて粗く近似された画像に対して後処理を施すことにより、ブロックノイズが目立たない、高品質な再生画像が得られることである。

3 提案手法

本章では、提案手法の概念とその実装の際に考慮すべき点、そしてその符号化アルゴリズムについて述べる。

3.1 提案手法の概念

第2章第2節で述べたように、従来手法で用いられるコードブックには、高品質な再生画像を得るために、大量の代表ベクトルが登録されるため、代表ベクトルのインデックスが長くなってしまふ。この問題を解決するために、従来手法はインデックスを効率的に符号化している。

従来用いられているコードブックは、画像の平坦部を近似する代表ベクトルの種類が少なく、それ以外のエッジ部などを近似する代表ベクトルの種類が多い。提案手法はここに注目し、画像の平坦部、エッジ部をそれぞれ近似する2種類のコードブックを組み合わせて用いることにより、代表ベクトルの数を減らす。これによって、インデックスに必要な符号量を削減しつつ、高品質な再生画像が得られる可能性がある。

提案手法は別のアプローチとして、原画像の分割画像を輝度値変化の激しいエッジ部とそうではない平坦部とで分類した場合に、エッジ部には専用コードブック、平坦部には汎用コードブックを使用する。このように、画像のエッジ部と平坦部にそれぞれ適合するような2種類のコードブックを用いることによって、代表ベクトルの数を削減し、インデックスに必要な符号量を削減する。

3.2 実装の際に考慮すべき点

提案手法を実装するにあたり、以下の4つの点を考慮しなくてはならない。

1. 分割画像が使用すべきコードブックをどのように判定するか
2. 専用コードブックに登録する代表ベクトルをどのように生成するか
3. 汎用コードブックに登録する代表ベクトルをどのように生成するか
4. 汎用コードブックと拡張専用コードブックをどのような割合で組み合わせるべきか

第1の点は符号化アルゴリズムそのものである。具体的な内容については後述する。

第2の点については、原画像からLBGアルゴリズムを用いて代表ベクトルを生成し、それらを回転・反転や輝度値オフセットなどのフィルタによって加工することによって代表ベクトルを生成する。フィルタの種類は暫定的なものである。専用コードブックの代表ベクトルは、LBGアルゴリズムによって収束した代表ベクトルに対して、収束とは逆の処理を施したものと考える。これによって、収束する前の代表ベクトルを良好に近似できる可能性がある。

第3の点については、周波数領域で代表ベクトルの各周波数成分に擬似乱数を代入し、それを変換して代表ベクトルを生成する。各周波数成分の分散値は、実際の画像から計算した分散値を、画像の平坦部に適合させるようにデフォルメしたものを用いる。また、従来手法の汎用コードブックの代表ベクトルは多数の学習画像をクラスタリングすることによって生成されているので、その一般性についての心配があった。提案手法は擬似乱数を

用いることによって汎用コードブックの代表ベクトルを生成するので、その心配がない。

第4の点については、さまざまな枚数でそれぞれのコードブックを組み合わせてシミュレーションし、その結果から組み合わせを決定する。

3.3 符号化アルゴリズム

符号化の手順を順番に示す。

1. 汎用コードブックに登録する代表ベクトルを、擬似乱数を用いて生成する。
2. 一定のサイズのブロックで原画像を分割し、分割画像を生成する。
3. LBG アルゴリズムにより、全ての分割画像をあらかじめ設定された個数のクラスターの重心でベクトル量子化する。その累積誤差が収束するまで LBG アルゴリズムを継続する。
4. いったん累積誤差が収束したら、もう一度 LBG アルゴリズムを再開する。その際、分割画像は、所属するクラスターの重心と、汎用コードブックに登録されている代表ベクトルとの間で MSE を計算し、MSE の小さい方に所属させる。もし分割画像が汎用コードブックの方に所属すべきであれば、以降、これを LBG アルゴリズムの処理対象から外す。再び累積誤差が収束するまで LBG アルゴリズムを継続する。
5. 専用コードブックを生成するための情報としてクラスターの重心を出力する。
6. クラスターの重心をフィルタリングして専用コードブックを生成する。
7. 全ての分割画像に対して、専用コードブックと汎用コードブックの中で最小の MSE となる代表ベクトルを探索し、そのインデックスを出力する。

上で述べたように、いったん LBG アルゴリズムで収束した結果得られた重心によって汎用コードブックの代表ベクトルとの比較を行うことで、専用コードブックは汎用コードブックとはまったく異なる性質のものとなる。

また、専用コードブックの代表ベクトルは、クラスターの重心をフィルタリングして生成するので、復号化側にはクラスターの重心を送信するだけでよい。つまり、このアルゴリズムの結果得られる送信すべき情報は、分割画像を近似する代表ベクトルのインデックスと、専用コードブックを生成するためのクラスターの重心の2つである。

4 シミュレーション

本章では、第3章で述べた提案手法の符号化アルゴリズムを実装し、実験画像を用いたシミュレーション結果を示す。まずは、提案手法を実装する際に必要となる、汎用コードブックの生成について述べ、実装とシミュレーション結果、提案手法によるクラスターの重心について述べ、最後に従来手法との画質と符号量の比較結果について述べる。

4.1 汎用コードブックの生成

本文は暫定的に、表1に示すような分散値をパラメータとする疑似ガウス乱数を DCT 係数に代入し、それを IDCT することにより汎用コードブックに登録する代表ベクトルを生成する。

表1 汎用コードブックを生成するための DCT 係数の分散値

| | | | | | | | |
|-------|------|------|---|---|---|---|---|
| 80000 | 4000 | 1600 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4000 | 1600 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1600 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

この値は実際の画像である LENA のブロック毎の DCT 係数から算出したものをデフォルメしたものであり、画像の平坦部を良好に近似させるために高周波数成分は0とした。生成された汎用コードブックの代表ベクトルを図2に示す。

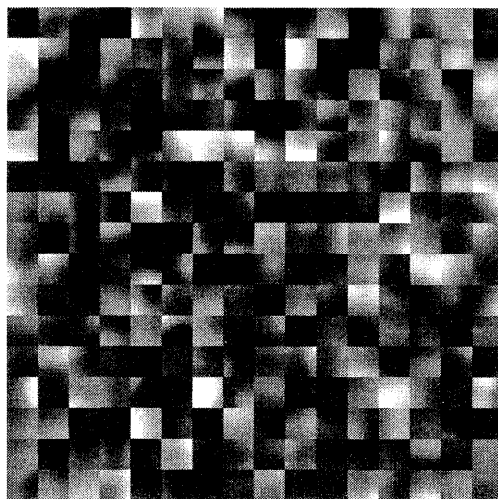


図2 汎用コードブックの代表ベクトル(一部)

4.2 提案手法の実装とそのシミュレーション結果

ここでは、提案手法がどのように実装されているかについて述べ、そのシミュレーション結果について述べる。シミュレーションにおいて使用する画像は LENA で、これは 512×512 画素の8ビット階調グレースケール画像である。これを 8×8 画素ごとのブロックで分割し、4096枚の分割画像を生成する。

提案手法の符号化アルゴリズムによって、分割画像を良好に近似する代表ベクトルを探索し、そのインデック

スを固定長符号で符号化する。提案手法は、インデックスを効率的に符号化しておらず、符号量削減の余地を残している。

代表ベクトルに割り当てられるインデックスは、代表ベクトルのラスタ走査順に整数値で与えられる。例えば、0~16383であれば専用コードブックの代表ベクトルを、16384~65535であれば汎用コードブックの代表ベクトルを表す。

専用コードブックの代表ベクトルは8×8画素ごとにDCTで変換、さらに量子化した後に可変長整数符号化とゼロ・ランレングス符号化を組み合わせ符号化する。専用コードブックの代表ベクトルの生成に用いられるフィルタは、回転・反転で7パターン、3×3と5×5平均値フィルタで2パターン、ネガ・ポジ反転で1パターン、2×2モザイクフィルタで1パターン、輝度値オフセット±1~±10までが20パターンで、合計31パターンからなる。

専用・汎用コードブックの組み合わせる枚数を変化させた結果、得られた再生画像の画質と符号量を表2に示す。なお、画質はPSNR(dB)で評価し、符号量の単位はbits/pixel(bpp)で示す。

表2 再生画像の画質と符号量

| 専用(枚) | 汎用(枚) | PSNR(dB) | 符号量(bpp) |
|-------|-------|----------|----------|
| 16384 | 0 | 30.90 | 0.388 |
| 0 | 65536 | 28.79 | 0.250 |
| 16384 | 49152 | 31.69 | 0.445 |

シミュレーションの結果から、専用コードブック16384枚と汎用コードブック49152枚を組み合わせた場合が最も高画質であることがわかった。この場合の再生画像を図3に示す。



図3 提案手法による再生画像
PSNR=31.69dB(0.445bpp)

画像のエッジ部においてブロックノイズが若干目立つものの、提案手法によって高画質な再生画像が得られた

ことが確認できる。なお、分割画像4096枚のうち、3369枚が専用コードブックを、727枚が汎用コードブックを使用していた。これは、LENNAのような画像においては、汎用コードブックが背景などの画像の平坦部にしか適合せず、その他のエッジ部などは専用コードブックを使用しないと良好な近似が得られないということである。

4.3 提案手法によるクラスタの重心

ここでは、提案手法がどのようなクラスタの重心を生成しているかを考察するために、専用コードブックのみで画像をベクトル量子化した場合のクラスタの重心と比較する。

専用コードブックのみで画像をベクトル量子化した場合のクラスタの重心を図4に示し、提案手法のクラスタの重心を図5に示す。

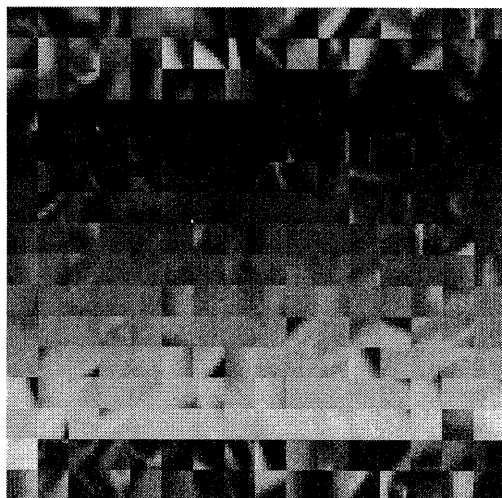


図4 専用コードブックのみの場合のクラスタの重心

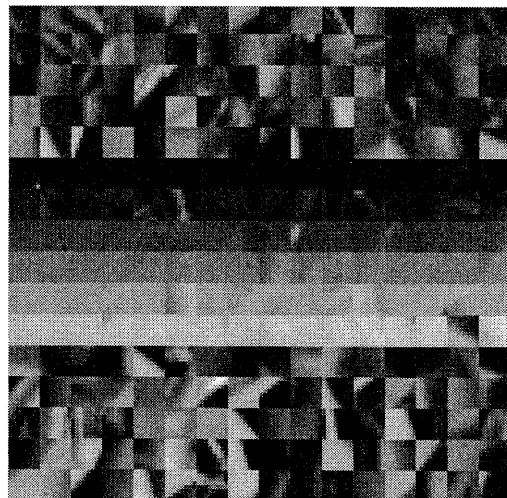


図5 提案手法のクラスタの重心

図4では低周波数成分のみからなる重心が多数存在するが、図5ではそのような重心が減少している。これは、平坦部を近似する重心がもし存在すれば、その重心の代わりに汎用コードブックの代表ベクトルで分割画像を近似させている結果である。

4.4 従来手法との比較結果

ここでは、従来手法でLENAを符号化した場合の画質・符号量を提案手法と比較する。それぞれの手法による再生画像の画質・符号量を図6に示す。なお、従来手法の値は、文献に記されている値である。

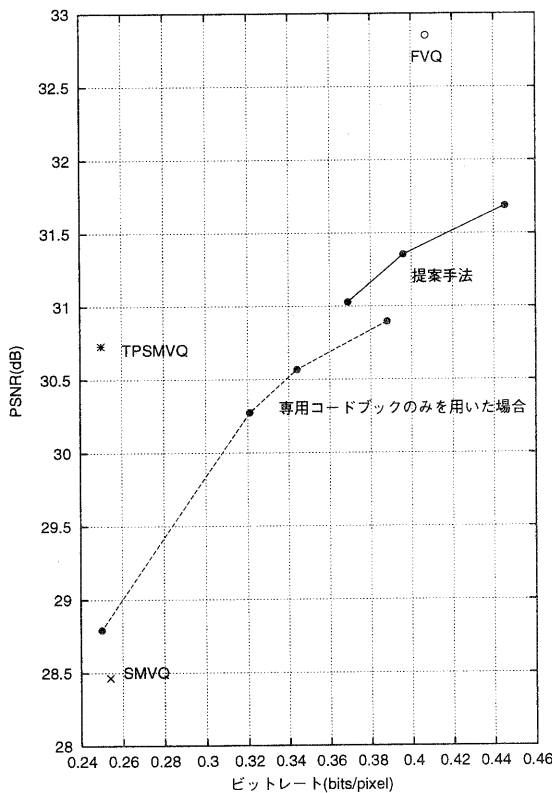


図6 提案手法・従来手法による再生画像の画質・符号量

提案手法は、文献[3]によるSMVQと比較して、同程度の符号量においては高品質な再生画像を得ることができる。また、文献[4]によるTPSMVQや文献[6]によるFVQと比較して、提案手法はTPSMVQよりも画質が上回るものの、倍近くの符号量を必要とするため、符号化効率とは劣ると言える。さらに、FVQは本文の提案手法の実装では到達できない高品質な再生画像を得ており、提案手法の効率的な実装方法が求められる。

5 まとめ

本文では、従来手法とは別のアプローチで、静止画像を効率的に符号化する手法を提案した。従来用いられているコードブックは、画像の平坦部を近似する代表ベクトルの種類が少なく、それ以外のエッジ部などを近似する代表ベクトルの種類が多い。提案手法はここに注目し、画像の平坦部、エッジ部をそれぞれ近似する2種類のコードブックを組み合わせて用いることにより、代表ベクトルの数を減らした。2種類のコードブックについては、専用コードブックはエッジ部に、汎用コードブックは平坦部に適合するように生成される。具体的には、専用コードブックは原画像から得る代表ベクトルをフィルタリングして生成され、汎用コードブックは疑似乱数を用いて生成される。

シミュレーション結果から、提案手法の符号化効率が、インデックスを効率的に符号化することをせずに、文献[3]のそれより上であることを示した。しかし、文献[4]によるTPSMVQや文献[6]によるFVQと比較すると、提案手法は良好な結果を得ることができていないことを確認した。

今後は、提案手法の効率的な実装方法を目標として、専用コードブック・汎用コードブックの代表ベクトルの生成方法に関して考察する。さらに、他の画像を用いた場合に提案手法が有効かどうかを調べるシミュレーションをする予定である。

参考文献

- [1] R.M.Gray: "Vector Quantization," *IEEE ASSP Mag.*, 1, pp.4-29, Apr. 1984.
- [2] J.Foster, R.M.Gray and M.O.Dunham: "Finite-State Vector Quantization for Waveform Coding," *IEEE Trans. Inform. Theory*, IT-31, 3, pp.348-359, May. 1985.
- [3] T.Kim: "Side Match and Overlap Match Vector Quantizers for Images," *IEEE Trans. Image Processing*, 1, 2, pp.170-185, Apr. 1992.
- [4] R.F.Chang and W.J.Kuo: "Images Coding Using Two-Pass Side-Match Finite-State Vector Quantization," *Journal of Information Science and Engineering*, 15, 1, pp.41-51, 1999.
- [5] M.Goldberg, P.R.Boucher and S.Shlien: "Image Compression Using Adaptive Vector Quantization," *IEEE Trans. Commun.*, COM-34, 2, pp.180-187, Feb. 1986.
- [6] Chang-Su Kim, Rin-Chul Kim and Sang-Uk Lee: "A Fractal Vector Quantizer for Image Coding," *IEEE Trans. Image Processing*, 7, 11, pp.1598-1602, Nov. 1998.
- [7] Y.Linde, A.Buzo and R.M.Gray: "An Algorithm for Vector Quantizer Design," *IEEE Trans. Commun.*, COM-28, 1, pp.84-95, Jan. 1980.