

テクニカルノート

適応的コードブック構成によるベクトル量子化の画像符号化

木ノ本 耕士^{†,††} 杉 岡 一 郎^{††}

平均値分離型ベクトル量子化の一種である適応的直交変換は、エッジと滑らかな部分が混在する画像に対しても高い圧縮率を実現している。しかし、ベクトル量子化は数千ブロック程度の大きなコードブックを用いており、符号化時の算術演算が多い。本稿では、予測によって得られた画像ブロックでコードブックを構成する手法を提案する。この手法によって、コードブックを32ブロックに設定しても、高い圧縮率が維持できることを確認した。

Image Coding by Vector Quantization Using Adaptation Code Book Composition

YASUSHI KINOMOTO^{†,††} and ICHIRO SUGIOKA^{††}

Adaptive orthogonalized transform, which is a type of average separated vector quantization, has a high compression rate even with images consisting of intermingled edges and smooth portions. However, since vector quantization uses a code book which has thousands of blocks, it must perform many arithmetic operations for coding. We propose a technique of creating a code book using predicted image block. Using this technique, we show a high compression rate can still be maintained even using a code book of 32 blocks.

1. はじめに

パーソナルコンピュータのスペック向上にともない多量のメディア情報を扱うアプリケーションソフトが増えている。一般に静止画像の符号化形式には、その長所短所を考慮して JPEG や GIF などが使われている。しかし、多種多様な画像を扱う場合には適切な使い分けができないことも多い。

縮小アフィン変換に基づくフラクタル符号化では LIFS 符号化¹⁾ が主流となっている。文献 2), 3) では、平均値分離形 LIFS 符号化⁴⁾ に適応的直交変換を導入することで高い符号化効率を実現している。また文献 5), 6) では、適応的直交変換に比べ縮小アフィン変換の符号化効率への貢献が低いことを指摘し、適応的直交変換を主体とする符号化方式の提案を行っている。適応的直交変換は、画像ブロックをコードブック内のブロック情報で量子化するという点でベクトル量子化の一種である。さらに画像ブロックごとに直交基底系を構成する方式でもあり、直交変換符号化の性質を兼ね備えている。つまり、エッジの再現性が高いベクトル

量子化と、滑らかな部分の再現性が高い直交変換との中間的な性質を持っており、エッジと滑らかな部分が混在する画像に対しても安定して高い符号化効率が見られる。しかし、適応的直交変換もベクトル量子化と同様に数千ブロックの大きなコードブックを用いており符号化に多くの算術演算が必要である。適応的直交変換⁶⁾ では、原画の低周波情報（ブロック平均値の分布）からあらかじめ 8,192 個のコードブックを生成して用いている。コードブックの小さいベクトル量子化としては、新ベクトル量子化⁷⁾ の普遍的コードブックで 2,048 個が発表されているが、適応的直交変換は複数ブロックを組み合わせて扱う方式であり、ベクトル量子化よりも小さいコードブックで高い符号化効率の実現が期待できる。

本稿では、適応的直交変換の技術を用いた画像圧縮方式に対して、ブロック数が少なくても符号化効率が低下しないコードブックの構成法を提案する。少ないブロックで画像ブロックをベクトル量子化するには、画像ブロックに似たブロックでコードブックを構成することが望ましい。そこでブロックごとに低周波情報などから画像ブロックを予測し、その予測結果をコードブックに用いる（以降、これを予測ブロックと呼ぶ）。しかし、予測では高周波成分が不足する傾向があるので、スカラー量子化した画像ブロックの情報をコード

[†] 北都システム株式会社

Hokuto System Co., Ltd.

^{††} 室蘭工業大学

Muroran Institute of Technology

ブックに含める．これは処理の過程においてベクトル量子化では効率良く符号化できず，スカラー量子化して保存したブロック情報である．この構成法を本稿では適応的コードブック構成と呼ぶ．

2. 適応的直交変換の手順

ベクトル量子化がコードブックの1つのブロックで画像ブロックを量子化するのに対して，適応的直交変換は複数のブロックで量子化を行う．つまりコードブック内の複数のブロックをスケール変換・加算して近似ブロックを生成し，画像ブロックと置換する方式である．もちろん，組み合わせるブロックは少ない方が効率は良い．**図1**を用いてブロックの選択手順を述べる． $\vec{a}$ の初期状態はコードブック内のブロック $\vec{c}$ ， $\vec{d}$ の初期状態は画像ブロックとする．まず， $\vec{d}$ に最も近似する $\vec{a}$ を第1基底として選択し，これを基準に $\vec{d}$ ， $\vec{a}$ を直交変換 * して $\vec{d}'$ ， $\vec{a}$ を更新する($n=1$)(**図1(a)**，**(b)**)．同様に， $\vec{d}'$ に最も近似する $\vec{a}$ を第2基底として選択し， $\vec{d}'$ ， $\vec{a}$ を更新する($n=2$)．つねに $\vec{d}'$ は残差ベクトル， $\vec{a}$ はそれに対する候補ベクトルを表す．この操作を $\vec{d}'$ の自乗和が許容値 Z 以下になるまで繰り返し，直交基底系を導く．最後に $\vec{c}$ を基底とする非直交基底系に変換する(**図1(c)**)．

本研究では，高速化のため $\vec{d}'$ ， $\vec{a}$ の直交変換を省いた手順を用いる．なお， K はコードブック・サイズ， M は組み合わせるブロック数の上限を示す．変数の D ， P ， U は自乗和， R ， Q は内積， W ， V はスケール比， I はインデックス番号を保存する．

(1) $n=1$ として， $\vec{d}'$ ， $\vec{c}$ の自乗和 D ， P と内積 Q を算出 ** ．

$$D = \|\vec{d}'\|^2 \cdot \{P_i = \|\vec{c}_i\|^2\}_{i=1}^K \cdot \{Q_i = (\vec{d}' \cdot \vec{c}_i)\}_{i=1}^K.$$

(2) $\vec{d}'$ にスケールを近似した $\vec{a}$ の自乗和 U を算出． $\{W_{n,i} = Q_i/P_i\}_{i=1}^K$ ． $\{U_i = Q_i W_{n,i}\}_{i=1}^K$ ．

(3) U が最大の $\vec{a}$ を直交基底として選択 *** (**図1(a)**)．

$$I_n = \max_{1 \leq i \leq K} U_i. \quad D = D - U_{I_n}.$$

(4) $Z \geq D$ or $n \geq M$ のとき， $N=n$ として(7)へ移行．

(5) 直交基底と $\vec{a}$ の内積 R を導き， P ， Q を更新(**図1(b)**)．

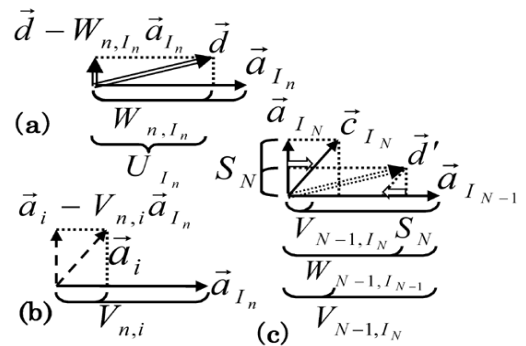


図1 適応的直交変換の手順

Fig. 1 Procedure of adaptive orthogonalized transform.

$n=1$ のとき， $\{R_{1,i} = (\vec{c}_i \cdot \vec{c}_{I_1})\}_{i=1}^K$ ．

$n \neq 1$ のとき，

$$\left\{ R_{n,i} = (\vec{c}_i \cdot \vec{c}_{I_n}) - \sum_{m=1}^{n-1} V_{m,I_n} R_{m,i} \right\}_{i=1}^K.$$

$\{V_{n,i} = R_{n,i}/P_{I_n}\}_{i=1}^K$ ． $q = Q_{I_n}$ ．

$\{P_i = P_i - V_{n,i} R_{n,i}\}_{i=1}^K$ ． $\{Q_i = Q_i - q V_{n,i}\}_{i=1}^K$ ．

(6) n に1を加えて(2)に戻る．

(7) スケール変換比率を変換．

$$S_N = W_{N,I_N} \cdot \left\{ S_n = W_{n,I_n} - \sum_{j=n+1}^N V_{n,I_j} S_j \right\}_{n=N-1}^1.$$

W は直交基底のスケール変換比率なので，手順(7)で $\vec{c}$ のスケール変換比率 S に変換する．(7)では N から1番目の S までを逆順に導く．まず， $N-1$ 回目の直交変換によって N 番目の直交基底から失われたベクトルをもとに戻し，その分を $N-1$ 番目の直交基底から減じる(**図1(c)**の白矢印)． $N-1$ 番目の W から，このベクトル分を引いて S を導く．さらに $N-2$ 回目の直交変換で失われたベクトルを N ， $N-1$ 番目の直交基底に戻し，これらのベクトルを $N-2$ 番目の直交基底から減じる．同様に繰り返してすべての W を S に変換する．

復号ブロックは I ， S ， N ， $\vec{c}$ から次式で復号できる．

$$\vec{d}' = \sum_{j=1}^N S_j \vec{c}_{I_j}.$$

3. 適応的コードブック構成

図2は画像ブロックの符号化を表すブロック図である．二重矢印線は，あらかじめ画像全体に対して行うDCの処理，通常矢印線は，後に画像ブロック単位で行うACの処理を示す．DCは予測符号化部で2次元DPCMなどを施し，エントロピー符号化を行う．復号DC画像は各DCを平坦なブロックに拡張し，復号

* グラム・シュミットの直交化法を用いて，基底ベクトルに直交するベクトルに変換する³⁾．

** $(\vec{d} \cdot \vec{c})$ はベクトル $\vec{d}$ とベクトル $\vec{c}$ の内積を表す．また， $\|\vec{d}\|^2$ は $(\vec{d} \cdot \vec{d})$ を表す．

*** $\max_{1 \leq i \leq K} U_i$ の処理は $1 \leq i \leq K$ を満たす i に対して， U_i が最大になるとき i の値を返す．

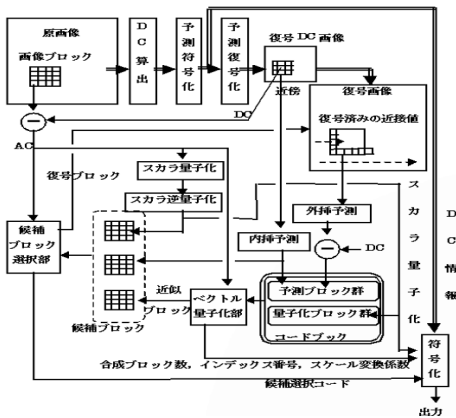


図2 提案方式による画像ブロックの符号化

Fig. 2 Coding of an image block by the proposed method.

画像の初期状態とする。ACは、候補ブロック選択部で誤差が許容値 Z 以下の候補ブロックを選択し、それを再構成するのに必要な情報をエントロピー符号化する。なお、復号画像は選択した候補ブロックで随時更新する。

コードブックには、予測ブロック群と量子化ブロック群という2種類のブロック情報を用いる。予測ブロック群は、内挿予測、外挿予測によって得られるブロック情報であり、必要に応じて生成する。量子化ブロック群は、処理の過程においてスカラー量子化で保存したブロック情報である。初期状態は空であるが、量子化保存とともに追加し、ある定数を満たした後は新しく獲得したブロック情報を優先して保持する。

予測ブロック群には画像ブロックに似たブロックが含まれる頻度が高い。しかし、画像ブロックに含まれる高周波成分の分布は複雑であり、予測では生成できない場合が多い。特に内挿予測はDCを基に算出するため、高周波の少ないブロックが生成される。そこで、高周波を多く含む画像ブロックは量子化保存される場合が多いことに着目し、量子化ブロック群でコードブックを補強した。なお、ベクトル量子化の際にはブロック群を区別せず、1つのコードブックとして扱う。また、いずれのブロック情報も取得時に平均値分離正規化することで、 S の量子化誤差のパラツキを軽減する。

図3は、画像ブロックの復号化を表すブロック図であり、二重矢印と通常矢印の区別は図2と同様の意味である。予測ブロックは必要に応じて生成する。

4. 実験

実験は、すべてのブロックサイズを 4×4 画素として行った。内挿予測は、ブロックの平均値を T 、その四近傍を U, B, L, R として、図4(a)に示す $T_1 \sim T_4$ の

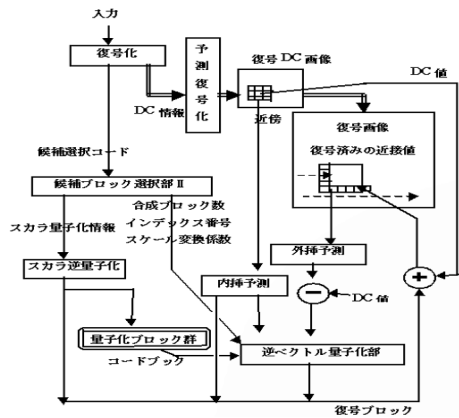


図3 提案方式による画像ブロックの復号化

Fig. 3 Decoding of an image block by the proposed method.

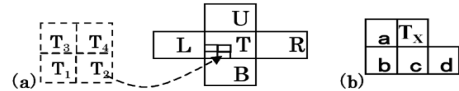


図4 予測する画素の位置

Fig. 4 Position of the pixel to predict.

4つの画素値を $T_1 = (2L + 2B - U - R - 2T)/8 + T$, $T_2 = (2B - U - R)/8 + T$, $T_3 = (2L - U - R)/8 + T$, $T_4 = (2T - U - R)/8 + T$ の式で導く^{*}。他の12個の画素も同様の式を適用して計算し、1個の予測ブロックを生成した。外挿予測では、近接するブロックの復号値と、 $T_x = a$, $T_x = (a + b)/2$, $T_x = b$, $T_x = (b + c)/2$, $T_x = c$, $T_x = (c + d)/2$, $T_x = d$ の式を用いる。 T_x は予測する画素値、 a, b, c, d は図4(b)に示す近傍値である。1つの式を使ってブロック内の16画素を左下から右上に向かって算出し、7種の予測ブロックを生成した。

実験には8bit/pixelのモノクロ画像を用い、符号化効率(bpp)に対する歪み率(dB)で性能を評価した。歪み率は、 $PSNR = 20 \log_{10} (255/\text{誤差の標準偏差})$ を用いた。高周波の劣化は視覚で判別し難いので、DC, AC, S の量子化係数は1:4:4の比に設定した。 Z はACの最大量子化誤差($4 \times AC$ 量子化係数2)とした。予備実験で M は5以上の方が符号化効率の良いことを確認しているが、その差はわずかなので演算量を抑えて4とした。

図5に画像4枚の符号化効率と歪み率をJPEG, GIFと比較したグラフを示す。▲がJPEG, ×がGIF, ■と○はコードブック・サイズが256個と32個の提

^{*} 文献3)で用いられた段階的交流成分予測を、2段階(4×4)に限定して式を簡略化した非段階的交流成分予測である⁽⁶⁾。

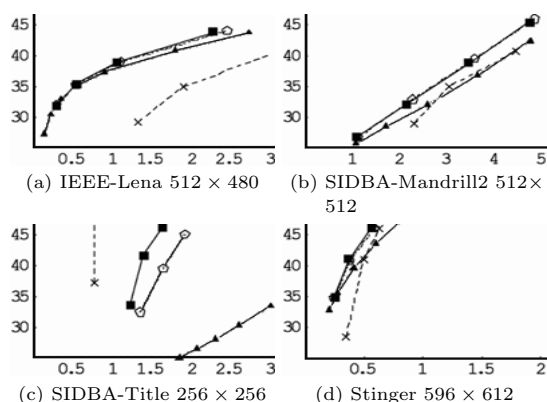


図5 符号化方式による性能比較 (縦: PSNR[dB] 横: bits/pixel)
Fig. 5 Performance comparison by the coding system (Vertical axis: PSNR[dB], Horizontal axis: bits/pixel).

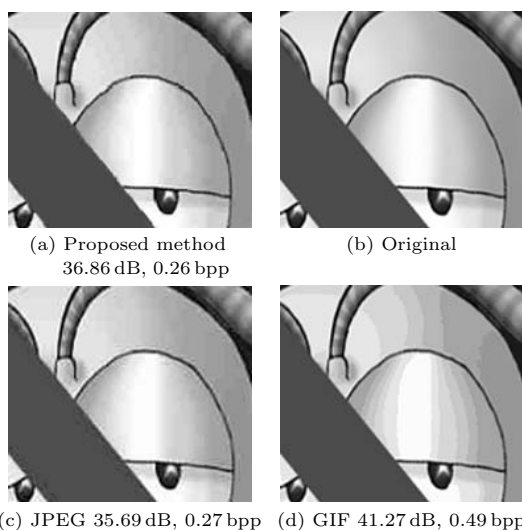


図6 画像“stinger”の復号画像の比較
Fig. 6 Comparison between decoded images of “stinger”.

案方式の実行結果を表す。提案方式のグラフ上の点は左から DC 量子化係数が 8, 4, 2, 1 の結果である。

GIF は (c) のような階調の少ない画像に対して効率が良い。JPEG は (a) のような滑らかな部分の多い写真などで効率が良い。提案方式はいずれの画像に対しても安定して高い符号化効率を示している。また 2 つのコードブック・サイズでは結果にほとんど差がない。量子化ブロック群は近似ブロックを生成する際の調整的役割が強く、24 個から 248 個に増やしてもその効果は大きく変わらないためと考えている。

低ビットレートにおける復号画像の劣化を見比べる。コードブックは 32 個、DC 量子化係数は 6.73 とした。図 6 は CG イラスト “Stinger” の復号画像の拡大である。GIF は 2 倍近い符号化効率であるが、疑似輪郭が目立っている (d)。JPEG はエッジでモスキート歪み

が目立っている (c)。提案方式は主にエッジで多くの歪みが発生している。外挿予測の影響で 45 度間隔の方向にあわないエッジで歪みが強く、エッジのつながりに不自然な部分が見られる。また滑らかな部分、たとえば右上の縞模様の部分では JPEG よりも劣化している。しかし、全体としては提案方式の画質が最も良い。

5. おわりに

本研究では、適応的直交変換の技術を用いた画像符号化処理に対して適応的コードブック構成を導入した。これによって、コードブックを 32 個に少なく設定しても JPEG や GIF よりも安定して高い符号化効率が見られる。実験の結果、JPEG との歪み率の差は、写真などで 1~3 dB、切り立ったエッジを含む画像では 5~20 dB であった。また低ビットレートにおける画質劣化を見比べ、JPEG や GIF よりも歪みが目立たないことを確認した。また適応的直交変換の手順からベクトル演算を省くことで高速化を行った。

今後は、パーソナルコンピュータ上でアプリケーションに搭載してカラー画像の符号化速度を検証する。

参考文献

- 1) Jacquin, A.: A novel fractal block-coding technique for digital image, *Proc. ICASSP' 90*, pp.2225-2228 (1990).
- 2) 兪 炫培, 高橋隆史, 長谷川友紀, 徳永隆治: コンデンセーション変換の拡張による LIFS 画像符号化法の改良, 信学論 (D-II), Vol.J81-D-II, No.7, pp.1576-1583 (1998).
- 3) 兪 炫培, 高橋隆史, 河野裕之, 徳永隆治: LIFS 画像符号化法の画品質改善—グラム・シュミットの直交化を用いたコンデンセーション変換の複合, 信学論 (D-II), Vol.J81-D-II, No.12, pp.2731-2737 (1988).
- 4) 井田 孝, 駄竹健志: 反復変換符号化による画像圧縮, 第 5 回路とシステム軽井沢ワークショップ論文集, pp.137-142 (1992).
- 5) 三浦高志, 板垣史彦, 村上 聡, 川島深雪: 適応的直交変換を併用した LIFS 符号化に関する一考察, 信学論 (D-II), Vol.J82-D-II, No.11, pp.2169-2174 (1999).
- 6) 三浦高志, 板垣史彦, 村上 聡, 川島深雪: 適応的直交変換によるカラー画像圧縮—有効性の検証と JPEG との比較, 信学論 (A), Vol.J83-A, No.6, pp.802-811 (2000).
- 7) 大見忠弘, 譽田正宏, 中山貴裕, 家村広継: 新ベクトル量子化による画像圧縮技術の開発, *bit*, Vol.32, No.7, pp.29-36 (2000).

(平成 14 年 8 月 12 日受付)

(平成 15 年 2 月 4 日採録)