

HEVC 技術解説[直交変換符号化と量子化処理]

HEVC technical description [transform coding and quantization process]

市ヶ谷 敦郎†
Atsuro Ichigaya

1. まえがき

HEVC はブロック単位のイントラ/インター予測と直交変換を用いたハイブリッド符号化方式であり、従来の符号化方式の枠組みを踏襲している。本稿では HEVC の直交変換処理とその情報量を削減するための量子化処理について述べる。

2. HEVC の変換処理

映像信号は一般的に画素間の信号相関が高く、空間周波数の低い信号で大部分を構成していることが知られている。また、人の視覚特性は空間周波数の低い信号に感度が高く、高い信号に対する感度が低いことから映像符号化においては映像信号をそのまま扱わず、直交変換による空間周波数領域への信号変換を施したうえで処理を行っている。直交変換によって信号を空間周波数別に分解すると、周波数ごとに品質制御が可能となり、視覚的に応答感度の低い信号成分から情報量の削減が可能となり、高能率な信号圧縮を達成することができる。また、予測技術の高度化により、動き補償予測に加え、面内予測も符号化方式に採用されるようになった。これにより、近年の符号化方式では直交変換の対象は画像信号そのものではなく、予測後の残差信号を対象としている。

HEVC もまた面内予測と動き補償予測を用いた信号予測を採用し、予測残差信号を直交変換の対象としている。HEVC の予測技術は従来の符号化方式の予測技術より高度化されており、予測方式ごとの残差信号に特徴的な信号の偏りが顕著となってきた。そこで HEVC では予測方法に応じて異なる直交変換が採用されている。また、HEVC の直交変換は演算精度および実装面から整数精度直交変換が用いられている。

i) 面内予測、輝度・4x4 変換ブロックに対する変換処理

HEVC の面内予測では方向性予測、DC (直流成分) 予測、また、新たな予測として Planar 予測が用いられている[1]。方向性予測は AVC/H.264 の手法から高精度化が図られており、符号化対象ブロックに隣接する既に符号化/局所復号済み信号を参照信号とした予測を行う処理である。一般的に画像信号は空間の相関が高いため、参照信号を用いて外挿することにより信号の予測が可能で、参照信号近傍の予測精度は高く、遠方の信号の予測精度が低くなる。このため、予測残差は参照信号側で少なく、他端において多いという特徴的な偏りを示す(図 1)。

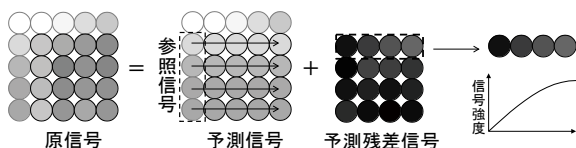


図 1. 面内予測 (水平予測の例) と予測残差信号の性質

Saxena らはこの偏りを定性的に分析し、残差信号が DST タイプ 7 に収束することを示した[2]。JCT-VC では HEVC における DST の効果を評価し、ブロックサイズが大きくなると効果が下がること、また、実装コストとのバランスから 4x4 の輝度信号変換ブロックに対して DST を採用することとなった。

当初、方向性予測に対して 1 次元 DST を予測方向によって水平または/かつ垂直に適用することによってパフォーマンスを最適化していた。しかし、判定処理、水平/垂直適用の切り替えコストなどを評価し、全ての方向の予測残差信号に対し、常に 2 次元 DST が適用されることとなった。また、DC 予測の後処理として採用された平滑化フィルタ[3]によってブロック境界における予測残差信号も少なくなった。これにより、DC 予測においても 2 次元 DST が採用された。同様に、Planar 予測も参照信号とその周辺における予測信号の相関が高いことから 2 次元 DST が適用されている。これらを除く条件において、直交変換は整数 DCT が用いられている。HEVC で用いられている整数 DST 変換行列を以下に示す。

$$DST_{7,round} = \text{round} \left(128 * \frac{2}{\sqrt{2N+1}} \sin \left(\frac{(2i-1)j\pi}{2N+1} \right) \right)$$

$$= \begin{bmatrix} 29 & 55 & 74 & 84 \\ 74 & 74 & 0 & -74 \\ 84 & -29 & -74 & 55 \\ 55 & -84 & 74 & -29 \end{bmatrix}$$

ii) その他の予測残差信号に対する変換処理

輝度・4x4 変換ブロック以外において変換処理は整数化された DCT を採用している。HEVC では変換ブロックサイズは 4x4, 8x8, 16x16, 32x32 の 4 種が選択可能である。そのため 4 種の異なるサイズの DCT をコーデックは備える必要がある。AVC/H.264 では 4x4 と 8x8 の 2 種の整数精度 DCT を備えていた。これらの直交変換は整数精度に丸めたことにより生じる演算精度の低下を、成分ごとに異なる正規化項を用い、かつ量子化処理と同時に処理することで抑制している。このため、4x4 と 8x8 は個別の変換処理として実装されていた。HEVC でこのような実装を行うと特に大サイズの変換の実装コストがかさむことから HEVC では Chen のパタフライ演算を用いた実装が行えるように直交変換が規定されている[4][5]。以下に HEVC で用いられている 4x4 と 8x8 の整数 DCT 変換行列を示す。

a) DCT4x4 変換マトリックス

$$DCT_{4x4} = \begin{bmatrix} 64 & 64 & 64 & 64 \\ 83 & 36 & -36 & -83 \\ 64 & -64 & -64 & 64 \\ 36 & -83 & 83 & -36 \end{bmatrix}$$

b) DCT8x8 変換マトリックス

$$DCT_{8 \times 8} = \begin{bmatrix} 64 & 64 & 64 & 64 & 64 & 64 & 64 & 64 \\ 89 & 75 & 50 & 18 & -18 & -50 & -75 & -89 \\ 83 & 36 & -36 & -83 & -83 & -36 & 36 & 83 \\ 75 & -18 & -89 & -50 & 50 & 89 & 18 & -75 \\ 64 & -64 & -64 & 64 & 64 & -64 & -64 & 64 \\ 50 & -89 & 18 & 75 & -75 & -18 & 89 & -50 \\ 36 & -83 & 83 & -36 & -36 & 83 & -83 & 36 \\ 18 & -50 & 75 & -89 & 89 & -75 & 50 & -18 \end{bmatrix}$$

4x4の変換行列は8x8の変換行列の奇数行、左側に内包される(右側はその対称)形で構成される。同様の包含関係を8x8と16x16, 16x16と32x32の変換行列も持っており、大きいサイズの変換行列の実装において小さい変換処理を再利用可能な設計となっている(図2)。

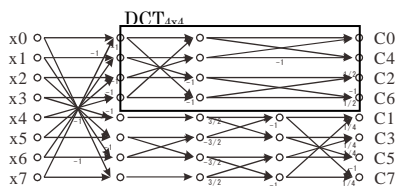


図2. $DCT_{8 \times 8}$ のバタフライ線図
(x_i は入力信号, C_i はDCT係数)

iii) 変換スキップモード

HEVCでは前述したDCTおよびDSTのほかに直交変換を適用しない変換スキップモードが新たに導入された[6]。変換スキップモードは予測残差信号をそのまま符号化するモードであり、予測残差信号の変動が少なく、急峻なエッジなどを含む信号において効果を発揮する。つまり、信号を空間周波数に分解した時に低域成分が主でない信号に対して効果を発揮する。DCTやDSTは三角関数を基底とした信号分解手法であるので、量子化によって信号を削減するとエッジがなまる劣化を生じる。このような劣化は主観的なぼやけ感を生じるが、変換スキップの場合にはエッジの鮮鋭感を保存することができる。4x4の変換ブロックに対して直交変換と選択的に用いられる。

3. HEVCの量子化処理

HEVCの量子化は前述した変換処理の出力に対して適用される。AVC | H.264同様、量子化ステップを直接制御するのではなく、量子化ステップの対数と比例する値(量子化パラメータ: qP)によって制御する。これは量子化ステップの対数とSN比が比例関係にあるため、AVC | H.264から導入された手法を踏襲している。qPが6増加すると量子化ステップが2倍となり、qPの値は0から51(Mainプロファイルの場合)まで規定されている。このqPはCUと呼ばれる符号化ブロック単位で制御され入力信号に応じた局所的な品質制御を可能としている。

また、量子化において人間の視覚特性を反映するために量子化マトリックスもまた、従来の符号化方式同様採用されている。HEVCでは変換ブロックサイズが4x4から32x32までであるため各ブロックサイズごとに量子化マトリックスが必要になる。そこでメモリ量の削減のためにHEVCでは4x4および8x8の量子化マトリックスの初期値のみ規定し、16x16および32x32の量子化マトリックスは

8x8のマトリックスを拡張して用いている。

図3. a, bにイントラ符号化時における8x8の量子化マトリックスの初期値と16x16量子化マトリックスの初期値を示す。同様の拡張によって32x32量子化マトリックスの初期値も決定される。

$$\begin{bmatrix} 16 & 16 & 16 & 16 & 17 & 18 & 21 & 24 \\ 16 & 16 & 16 & 16 & 17 & 19 & 22 & 25 \\ 16 & 16 & 17 & 18 & 20 & 22 & 25 & 29 \\ 16 & 16 & 18 & 21 & 24 & 27 & 31 & 36 \\ 17 & 17 & 20 & 24 & 30 & 35 & 41 & 47 \\ 18 & 19 & 22 & 27 & 35 & 44 & 54 & 65 \\ 21 & 22 & 25 & 31 & 41 & 54 & 70 & 88 \\ 24 & 25 & 29 & 36 & 47 & 65 & 88 & 115 \end{bmatrix}$$

a. 8x8量子化マトリックス初期値

$$\begin{bmatrix} 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 17 & 17 & 18 & 18 & 21 & 21 & 24 & 24 \\ 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 17 & 17 & 18 & 18 & 21 & 21 & 24 & 24 \\ 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 17 & 17 & 19 & 19 & 22 & 22 & 25 & 25 \\ 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 17 & 17 & 19 & 19 & 22 & 22 & 25 & 25 \\ 16 & 16 & 16 & 16 & 17 & 17 & 18 & 18 & 20 & 20 & 22 & 22 & 25 & 25 & 29 & 29 \\ 16 & 16 & 16 & 16 & 17 & 17 & 18 & 18 & 20 & 20 & 22 & 22 & 25 & 25 & 29 & 29 \\ 16 & 16 & 16 & 16 & 18 & 18 & 21 & 21 & 24 & 24 & 27 & 27 & 31 & 31 & 36 & 36 \\ 16 & 16 & 16 & 16 & 18 & 18 & 21 & 21 & 24 & 24 & 27 & 27 & 31 & 31 & 36 & 36 \\ 17 & 17 & 17 & 17 & 20 & 20 & 24 & 24 & 30 & 30 & 35 & 35 & 41 & 41 & 47 & 47 \\ 17 & 17 & 17 & 17 & 20 & 20 & 24 & 24 & 30 & 30 & 35 & 35 & 41 & 41 & 47 & 47 \\ 18 & 18 & 19 & 19 & 22 & 22 & 27 & 27 & 35 & 35 & 44 & 44 & 54 & 54 & 65 & 65 \\ 18 & 18 & 19 & 19 & 22 & 22 & 27 & 27 & 35 & 35 & 44 & 44 & 54 & 54 & 65 & 65 \\ 21 & 21 & 22 & 22 & 25 & 25 & 31 & 31 & 41 & 41 & 54 & 54 & 70 & 70 & 88 & 88 \\ 21 & 21 & 22 & 22 & 25 & 25 & 31 & 31 & 41 & 41 & 54 & 54 & 70 & 70 & 88 & 88 \\ 24 & 24 & 25 & 25 & 29 & 29 & 36 & 36 & 47 & 47 & 65 & 65 & 88 & 88 & 115 & 115 \\ 24 & 24 & 25 & 25 & 29 & 29 & 36 & 36 & 47 & 47 & 65 & 65 & 88 & 88 & 115 & 115 \end{bmatrix}$$

b. 16x16量子化マトリックス初期値
(8x8用の量子化マトリックスをスケール)

図3. 量子化マトリックス(イントラ用)

これらの量子化処理により視覚的に顕著な劣化を抑制しつつ、情報量の削減を実現している。

4 まとめ

本稿ではHEVCにおける直交変換処理と量子化処理について解説した。量子化制御に関してはエンコーダの設計に委ねられており、今後のエンコードアルゴリズムの改善により符号化品質のさらなる向上が行われていく。

5 参考文献

- [1] A. Saxena, and F. C. Fernandes, "DCT/DST-based transform coding for intra prediction in image/video coding," IEEE trans. on Image Process, 2013 June 3.
- [2] R. Chivukula and Y. Reznik, "Fast Factorizations of Discrete Sine Transforms of Types VI and VII" in IEEE ICASSP, March 2012.
- [3] K. Sugimoto and K. Iguchi, "CE6.f: verification report on LUT-based adaptive filtering on intra prediction samples," ITU-T & ISO/IEC JCTVC-E069, Mar. 2011.
- [4] W-H. Chen, C. Harrison Smith and S. C. Fralick. "A Fast computational Algorithm for the Discrete Cosine Transform", IEEE Trans. Communications, No. 9, Sept. 1977
- [5] A. Fuldseth, G. Bjøntegaard and M. Budagavi (TI), "CE10: Core transform design for HEVC," ITU-T & ISO/IEC JCTVC-G495, Nov. 2011.
- [6] C. Kan et al, "Intra transform skipping," ITU-T & ISO/IEC JCTVC-I0408, May, 2012.
- [7] X. Peng et al, "Inter transform skipping," ITU-T & ISO/IEC JCTVC-J0237, July, 2012