

AVC/H.264による4:4:4映像符号化方式に関する一検討

A Study on AVC/H.264 based 4:4:4 Video Coding

関口 俊一 井須 芳美† 杉本 和夫†
Shun-ichi Sekiguchi Yoshimi Isu Kazuo Sugimoto

山田 悦久† 浅井 光太郎†
Yoshihisa Yamada Kohtarō Asai

1. まえがき

デジタル放送、薄型大画面TV、HDTV対応のDVD規格やビデオカメラ、大容量HDDを備えるDVRなど、一般家庭で扱われる標準映像コンテンツがHDTVへ置き換わるためのインフラが整いつつある。これを背景として、次世代の映像コンテンツとして4K x 2Kのデジタルシネマ、8K x 4K解像度を誇るスーパーハイビジョンなど現行HDTVの表現力を遥かに凌ぐ超高精細デジタル映像を扱う機運が高まっている[1]。これら超高精細映像においては色空間の扱いも含めて議論が高まっているところであり、HDTVまでのY,Cb,Cr空間を基準とする既存標準符号化方式の適用については議論の余地が残されている。本検討ではこのような超高精細映像を扱う符号化方式として定められているAVC/H.264のHigh 4:4:4 Profileについて、イントラ符号化性能の最適性と課題を議論する。

2. AVC/H.264 High 4:4:4 Profileの概要

AVC/H.264 High 4:4:4 Profile [2]は、当初より業務用映像素材を扱うことを想定し、8ビットを超える多階調画素、色成分のサブサンプルがない4:4:4クロマフォーマットをサポートしている。4:4:4クロマフォーマットにおいては色空間変換に伴う情報損失が品質上の問題となるため、従来の映像符号化方式が主として扱ってきた4:2:0フォーマットとは異なり、必ずしもY,Cb,Cr空間での入力を必要とせず、符号化入力映像の色空間定義には自由度がある。符号化方式自体は、4:2:0, Y,Cb,Cr空間を前提とするHigh Profile (HDTV向けDVDにて採用)の各種符号化ツールを8ビットを超える階調を持つ画素サンプルにも適用できるよう拡張したものである。High 4:4:4 Profile固有のツールとしては、RGB入力を前提とした場合に色成分間の相関を除去して符号化効率を適応制御するResidual Color Transform (RCT)という機構がサポートされているが、RCTは整数変換係数の処理をY,Cb,Cgと呼ばれる色成分間相関を除去した空間において行うものであり、イントラ符号化の圧縮効率を大きく左右するイントラ予測については、符号化入力映像の色空間上で行われる。それに関わらず、High 4:4:4 Profileのイントラ予測処理は4:2:0のY,Cb,Cr空間を想定したイントラ予測処理を単純拡張した方式になっている。超高精細映像の色空間表現としては、例えば4K x 2Kの業務用デジタルシネマの事実上の業界標準となりつつあるDCI(Digital Cinema Initiative)仕様 [3]が定めるX'Y'Z'空間がある。同色空間はデジタルシネマ制作時の色表現を上映時にも確実に再現することを目的として定められている。

映像再生時の色再現性までを考慮した符号化を行うことを想定すれば、色空間変換による色情報の損失を伴わずに圧縮処理が可能な映像符号化方式であることが望ましい。

3. X'Y'Z'色空間に対するHigh 4:4:4 Profileの性能

本稿では、前節に述べた理由からX'Y'Z'色空間を取り上げ、色変換のロスなく符号化を行うケースを想定してAVC/H.264 High 4:4:4 Profileのイントラ符号化性能を議論する。本評価では、イントラ符号化性能を左右するファクタのうち最も影響があると考えられるイントラ予測の効率に着目する。High 4:4:4 Profileのイントラ予測が4:2:0, Y,Cb,Cr空間のもとで最適設計された方式であるため、それが4:4:4, X'Y'Z'空間においては必ずしも最適な解ではないとの仮説に基づいて評価を行う。参照方式として、AVC/H.264で輝度信号成分のみからなるモノクロ画像の圧縮を扱う4:0:0符号化モードを、各色成分を独立に適用する方式を用いる。参照方式では、どの色成分に対しても同じイントラ予測モードセットを用いるため、イントラ予測の効率そのものはHigh 4:4:4 Profileのそれよりも高いと考えられるが、R-D性能としてみる場合、イントラ予測モードを各色成分独立に符号化する必要があるため、オーバーヘッドの符号量の負荷が重くなると考えられる。このバランスについて評価を行う。

3.1 評価条件

テスト画像として、DCI標準の符号化品質評価用映像「StEM」5フレーム分を用いた。符号化入力映像の解像度は4096画素×1714ライン、色空間はX'Y'Z'、4:4:4フォーマット、画素階調は12ビットとした。参照方式、High 4:4:4 Profileともに参照ソフトウェアJM9.6を使用し、1ピクチャ1スライス、R-D最適化ON、RCTはOFFとした。

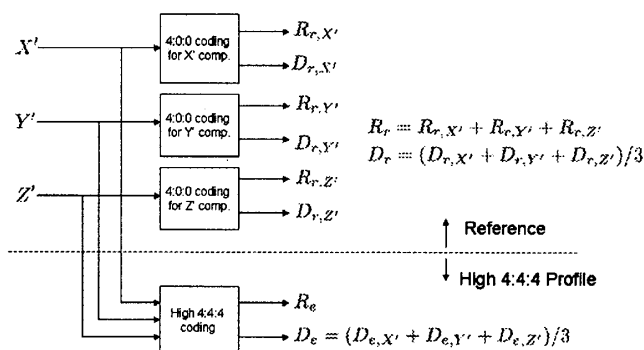


Figure 1. Evaluation Scheme

比較評価系を Figure 1 に示す。同図において、 R_p , R_e はそれぞれ参照方式、High 4:4:4 Profile によるピクチャ符号量(5フレーム平均)、 D_p , D_e はそれぞれ参照方式、High 4:4:4 Profile による符号化歪で3つの色成分の平均(さらに5フレーム平均)をとったものである。これらの値によりレート・歪特性を比較する。

3.2 客観評価結果

符号化歪を PSNR としてあらわした場合のレート・ひずみ曲線を Figure 2 に示す。この結果より、入力色空間を X'Y'Z' 空間とした場合に、現行の AVC/H.264 High 4:4:4 Profile では個々の色成分を独立に輝度信号として扱って符号化するよりも性能が落ちてしまうことがわかる。

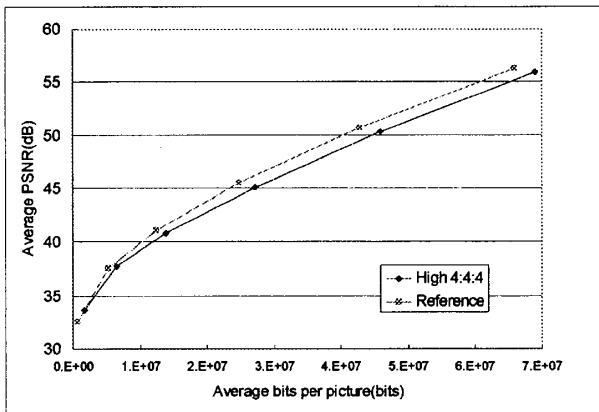


Figure 2. Objective Quality (Rate-Distortion Curve)

3.3 イントラ予測の効果

Figure 2 の結果は、イントラ予測モードのオーバーヘッド情報を色成分ごとに伝送したとしても予測残差低減の効果がそれを上回るほど大きいことを示唆している。そこで、実際の予測誤差低減の度合いとイントラ予測モードのオーバーヘッドビットについて比較を行った。

Table 1 はイントラ予測による予測誤差を RMSE で測定した結果である。この結果から、X', Z' 成分については輝度成分(Y')用に定義されたイントラ予測モードを色成分ごとに個別に適用して選択することにより大幅な予測性能の向上が見られることがわかる。

Table 1. Intra Prediction Error (RMSE)

	High 4:4:4	Reference
X'	241.0003	99.12197
Y'	101.9417	101.4682
Z'	314.8386	161.4597

Table 2 にマクロブロックレベル情報のビットカウントの結果を示す(Qp=18, 5 フレーム中の先頭フレームのみ)。本結果より、参照方式における符号化モード、CBP、予測モードなどのオーバーヘッド情報が High 4:4:4 Profile に比べてほぼ 3 倍となっているのに対し、係数データの符号量がそれを遥かに上回って削減されていることがわかる。Table 1, 2 の結果は、「イントラ予測モードのオーバーヘッド情報を各色成分ごとに伝送することを許容しても、各色成

分ごとにイントラ予測モードを最適選択することでトータル符号化性能を改善できる余地を含んでいる」ことを示す。

Table 2. Coded bits for Macroblock-level Information

	High 4:4:4	Reference	diff.
MB type	12394	31984	19590
CBP Y/C	6714	20049	13335
Intra pred. mode	445622	1178215	771868
Coeff	26278963	23095615	-3183348

一方、Table 1 からわかるように、同一のイントラ予測モードセットを使用して予測した場合の RMSE が X' と Y' ではほぼ同じとなっており、各色成分ごとに最適なイントラ予測モードを選択したとしても、選択される予測モードには色成分間で相関があることが期待される。この相関を利用してイントラ予測モードのエントロピー符号化を context-adaptive に設計すれば、さらなる符号化効率の改善が期待できる。参照方式において、2つの色成分間で同一空間位置のマクロブロックで完全にイントラ予測モードが一致するケースの比率を Table 3 に示す(Table 2 と同条件で採取)。絶対量としてみた場合の予測モードの色成分間相関は決して高くはないが、ほぼ同等の予測効率となる X'-Y' 間では他の成分間に比べて同一位置でのイントラ予測モードの共通性が高い。より小さい予測単位で見た場合の相関も合わせて評価を行う必要がある。

Table 3. Number of MBs where intra prediction modes of two color components are identical

Y-Z'	Y-X'	X-Z'
2.02%	7.54%	2.00%

4. まとめ

超高精細映像の符号化に着目して、AVC/H.264 が現状規格で定める High 4:4:4 Profile のイントラ符号化性能について評価を行い、入力色空間として X'Y'Z' 空間を想定した場合の符号化性能の最適性について検討を行った。現行 High 4:4:4 Profile のイントラ予測方式は X'Y'Z' 空間の信号を直接符号化する場合には予測性能が十分でないことがわかった。今後、他の色空間、インター符号化などを含め多面的に High 4:4:4 Profile の性能評価を行い、4:4:4 フォーマットに対する最適映像符号化方式についてさらなる検討を行う。

なお、本研究は文部科学省の委託研究「デジタルシネマの標準技術に関する研究」の一部として実施した。

参考文献

- [1] 「リビングで向き合う放送と通信～第2部く画像> HDTV の次は「リアリティー」を送り届ける」、日経エレクトロニクス、2005.7.4号、No.903、pp.106-113
- [2] ITU-T Recommendation H.264, "Advanced Video Coding for generic audiovisual services" | ISO/IEC 14496-10, "Information technology, Coding of audio-visual objects - Part 10: Advanced video coding", March, 2005.
- [3] Digital Cinema System Specification V5.2, June, 2005