

品質変動低減のための JPEG2000 符号量制御方式

佐野 雄磨[†] 内藤 整^{††} 渡辺 裕[†]

[†] 早稲田大学 大学院 国際情報通信研究科

〒169-0051 東京都新宿区西早稲田 1-3-10

^{††} 株式会社 KDDI 研究所

〒356-8502 埼玉県上福岡市大原 2 丁目 1 番 15 号

E-mail: tyuma@tom.comm.waseda.ac.jp

あらまし 近年、標準 TV のフォーマットが HDTV に移行しつつあり、HD 解像度の映像素材が用いられるようになった。高解像度の映像圧縮に関しては、高い符号化性能と符号化ストリームのスケーラブル性を兼ね備えた JPEG2000 が有効である。JPEG2000 はフレーム内符号化を利用した符号化方式であるため、高解像度の映像を低遅延で符号化することが可能である。一方で、JPEG2000 を単純に動画像へ適用すると主にビット配分の弊害に起因した品質劣化の発生が懸念される。従って、JPEG2000 を動画像符号化に応用するに当たり、動画像としての品質を考慮して符号化処理を行う必要がある。本稿では、シーケンスを構成する各フレームの特性を考慮してシーケンス全体として品質の変動が小さくなるような方式を提案する。後続予測、品質変動幅の制御、符号量制御を行うことによって、低遅延を維持した状態で品質の変動を低減可能であることを示す。

キーワード JPEG2000, HDTV, 低遅延符号化, 符号量制御,

JPEG2000 rate control for reducing quality fluctuation

Yuma SANO[†], Sei NAITO^{††}, and Hiroshi WATANABE[†]

[†] Graduate School of Global Information and Telecommunication Studies, Waseda University

Nishiwaseda 1-3-10, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-0051 Japan

^{††} KDDI Labs

Ohara 2-1-15, Kamihukkuokashi, Saitama, 356-8502 Japan

E-mail: tyuma@tom.comm.waseda.ac.jp

Abstract In recent years, HDTV is being used for standard TV format. JPEG2000 technology has been adopted for encoding high resolution pictures because of its high coding performance and the scalability. Since it includes the additional advantage of employing intra frame coding technology, it allows drastic reduction in the latency accompanied by encoding and decoding process. However, simple application of JPEG2000 to moving picture might cause picture quality fluctuation because of bit allocation. This paper proposes a bit allocation method of JPEG2000 for moving picture coding. The proposed method smooths the picture quality fluctuation without large delay by predicting rate-slope characteristic of following frames.

Key words JPEG2000, HDTV, low delay coding, rate control

1. はじめに

JPEG2000 [1] は、高い符号化性能と符号化ストリームのスケーラブル性を兼ね備えており、特に高解像度の映像圧縮に関して有効である [2]。近年、デジタル放送の開始されるなど、標準 TV のフォーマットが HDTV に移行しつつあり、HD 解像度の映像素材が用いられるようになった。放送局間などの無

線伝送では、伝送レートの制約から圧縮伝送を行う必要がある。特に、リアルタイム性を必要とする現場中継では、伝送遅延の低減が強く求められている。現在無線伝送において、最も普及している符号化方式として MPEG-2 が挙げられる。MPEG-2 は、DCT 変換と動き補償を用いる符号化アルゴリズムの原理上、300msec を上回るコーデック遅延が強いられている。これに対し、JPEG2000 はフレーム内符号化技術を利用しているた

め、動き補償を利用する符号化方式と比較してコーデック遅延を低減することが可能である。

一方で、JPEG2000 を単純に動画像へ適用すると主にビット配分の弊害に起因した品質劣化の発生が懸念される [3], [4]。これはフリッカーとして現れ、主観的品質を損なう原因となる。

また、シーケンスを構成する各フレームの特性が変化するため、各フレームを独立に符号化すると、動画像として品質が変動し、主観的に品質が劣化する可能性がある。

JPEG2000 を動画像符号化に应用するためには以上のような問題点を改善する必要がある。そこで本稿では、シーケンスを構成する各フレームの画像特性を考慮して、JPEG2000 を動画像符号化に应用する方式について検討を行う。具体的には、各フレームの RD 特性を考慮して符号化することによって、連続するシーケンスの品質の変化が滑らかになるような方式を提案する。

2. JPEG2000 を用いた動画像符号化

JPEG2000 は MPEG-2 などの動き補償が行われる符号化方式とは異なり、各フレームが独立に符号化される。これに起因して、JPEG2000 は動画像を扱う上で、品質の劣化する可能性がある。まず、各フレームが独立に RD(Rate-Distortion) 最適化に従って符号化されるために、MSE は最小になるが量子化歪が空間的に偏った分布となる。このため動画像符号化へ应用する際には、同分布が時間的に変化することで主観的品質を下げる恐れがある。この問題に対しては、文献 [4] がスカラー量子化とポスト量子化を併用し、量子化歪を制御している。

また、動画像においては各フレームの画像特性が異なるため、独立に符号化した場合シーケンスとして品質が大きく変動する可能性がある。主観的な品質を考慮すると、シーケンスを通して可能な限り一定の品質をとることが望ましい。MPEG-2 を用いた可変ビットレートでの符号化については先行研究が多く報告されている [5], [6], [7]。しかし、JPEG2000 の符号化処理に特化した可変ビット配分についてはいまだ十分な研究が成されていない。JPEG2000 を用いた可変ビットレート符号化について、文献 [8] では複数フレームを LeakyBucket に蓄積し、蓄積されたフレームのデータを踏まえて品質変動が小さくなるような符号化方法を取っている。フレームを大量に蓄積することによって、シーケンスの品質変動は低減されるが、伝送遅延の低減を考える上では、この方法は有効であるとはいえない。

そこで本稿では、後続予測を利用することによってフレームを蓄積せず、大きな遅延を生じることなく One-pass で符号化する方式を提案する。提案方式によって、シーケンス全体としての品質変動を低減することが出来ることを示す。

3. 提案方式

3.1 RD(Rate-Distortion) 最適化

JPEG2000 の符号量制御 [1] では、各フレームの RD 特性が用いられる。Wavelet 変換された後、Wavelet 係数は、EBCOT(Embedded Block Coding with Optimized Trunca-

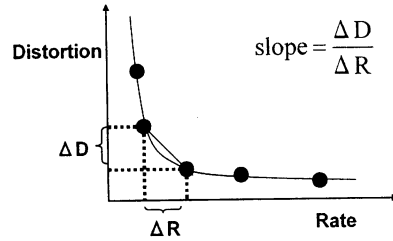


図 1 Rate,Distortion,slope の関係

tion) 処理によってビットプレーンさらには符号化パスに分解される。その後、歪が最小となるように、RD 最適化に基づいて、ビット量の調整が行われる。

JPEG2000 では、画像を符号化した後に、目標とするビットレート、歪 (画質) に適合するように、RD 最適化を用いて、各コードブロックのビットを調整する。

まず、画像全体の歪を D とすると、 D は以下のように表される。

$$D = \sum_i D_i^{n_i} \quad (1)$$

式 (1) において、 i はコードブロック、 n_i はコードブロック i におけるビット切捨て点を表し、 $D_i^{n_i}$ はコードブロック i の歪である。歪の計算には、ウェーブレット変換が直交変換であることより、MSE または重み付け MSE が用いられる。また画像全体の符号量を R とすると、 R は以下のように表される。

$$R = \sum_i R_i^{n_i} \quad (2)$$

式 (2) において、 $R_i^{n_i}$ はコードブロック i の符号量である。ここで、 R を最小にするためには、 D が最小となる n_i を決定することが必要である。これを解決するための方法として、Lagrange 未定係数法を利用でき、式 (3) で示される値を最小にすることによって最終的に最適歪となる符号列を得られる [1], [9]。

$$\sum_i R_i^{n_i} - \lambda D_i^{n_i} \quad (3)$$

そこで、各符号化パスで、 ΔR と ΔD を用いて、slope を計算で求め、ビット切捨て点を決定する。Rate と Distortion、さらに slope の関係を図 1 に示す。

$$\text{slope} = \Delta D / \Delta R \quad (4)$$

式 (3) で示される値を最小にするということは、すなわち符号量制御において、slope の値が小さい符号化パスから切り捨てて目標符号量に合わせることに同等である。

本提案手法の目的は、第一がフレーム間での品質の変動を抑えること、そして第二がシーケンス全体の品質を高く維持することである。第一の目的を達成するためには、全フレームを同じ Distortion を得る符号化パスでビットを切り捨て符号化することが最も有効な方法である。しかし、シーケンス全体の目標符号量に対して、歪みを最も少なくするためには、上記 RD 最適化の考え方から、ビット切捨ての基準として Distortion で

はなく、slope を用いる必要がある。シーケンス全体において、目標符号量に対して歪みを最少にするためには、シーケンス全体における R と slope の関係を求め、目標符号量に対応する slope を持つ符号化パスで、全フレームのビットを切り捨てればよい。

従って本提案手法では、Rate-Distortion の関係ではなく Rate と slope の関係を符号化の基準として考えることとする。

3.2 R-slope 曲線の近似

JPEG2000 の符号化処理の中で、各符号化パスにおけるレート R と slope の関係が記録される。この R と slope の関係から、R-slope 最適化による符号量制御が行われる。本手法では、この R と slope の関係を表した R-slope 曲線を各フレームの特性として扱い、複雑さを判断する。そこで、R と slope の関係を数式で表す必要がある。RD 曲線を近似する方法は、同様に R-slope 曲線の近似にも利用することが可能である。RD 曲線の近似には、以前にも三次曲線[10]や指数曲線[11]を用いるものがあった。しかしそれらは、近似式が複雑であり、近似精度も十分ではなかった。本手法では近似式の簡潔さから、JPEG2000 符号化処理の中で算出される各フレームの R-slope 曲線を、Marquardt 法[12]を用いた非線形回帰近似によってモデル化する。

3.3 R-slope 曲線の予測

Marquardt 法を用いて R-slope の関係は、以下のように非線形近似によって表される。ただし、 a, b, c は各フレームに依存する係数である。

$$\text{slope} = a + \frac{b}{R + c} \quad (5)$$

次に、この近似 R-slope 曲線の提案手法への適用を考える。まず、 a, b, c を時間方向の相関を考慮してフレーム数 k の関数として考える。シーケンスを符号化していく中で、符号化済みフレームの R-slope 曲線の係数 a, b, c を用いて、後続フレームの R-slope 特性を予測する。

後続フレームの RD 特性を予測することによって、今後シーケンスの複雑度がどのように変化するかを把握することが主な目的である。

フレーム数 k と a, b, c の関係を回帰によって求める。第 n フレームまで符号化した時点で、予測から求めた第 k フレーム ($k > n$) の R-slope 曲線における a, b, c をそれぞれ $a_n(k)$, $b_n(k)$, $c_n(k)$ と表す。すると第 k フレームの R と slope の関係は、 $a_n(k)$, $b_n(k)$, $c_n(k)$ を用いて式 (6) のように表される。

$$\text{slope}_n(k) = a_n(k) + \frac{b_n(k)}{R + c_n(k)} \quad (6)$$

3.4 R-slope 曲線の予測に基づくビット配分

次に、各フレームに割り当てる符号量を計算する。提案方式では、当該フレームから後続 N フレーム分に割り当てる符号量をビット過不足を考慮して計算する。具体的には、当該フレー

ム n から N 枚のフレームについて割り当てる平均符号量 $\overline{R(n)}$ を式 (7) により算出する。 B_W は 1 フレームに割り当てられる平均符号量である。

$$\overline{R(n)} = \frac{(N + n) \times B_W - \sum_{i=0}^{n-1} S(i)}{N} \quad (7)$$

$S(i)$: i 番目のフレームにて発生した符号化ビット数

また式 (5) より、R と slope の関係は式 (8) のように表される。

$$R = \frac{b}{\text{slope} - a} - c \quad (8)$$

そこで、第 n フレームから N フレーム分について、

$$\sum_{i=0}^{N-1} \left\{ \frac{b_n(n+i)}{\text{slope} - a_n(n+i)} - c_n(n+i) \right\} = \overline{R(n)} \times N \quad (9)$$

を満たすような slope を $\text{slope}(n)$ として、第 n フレームの符号化に用いる。

3.5 品質の変動幅の制御

前節で符号化済みフレームの情報から、後続フレームの特性を予測したが、これはあくまでも後続の R-slope 曲線の変化の傾向を把握するためのものであって、正確な予測は極めて困難である。従って、後続予測をすることによって、逆に品質の変動が大きくなる可能性も考えられる。そこで、過去フレームの符号化に用いた slope の値を利用して、当該フレームに与えられる slope の値を調整する。まず、式 (9) から求めた第 n フレームの符号化に用いる slope を $\text{slope}(n)$ とおく。次に、当該フレームを含まない直前 $M-1$ フレームで用いた slope 値の分散を求め、この値を $V1$ とする。さらに、 $\text{slope}(n)$ を含めて、当該フレームから直前 M フレームの slope 値の分散 $V2$ を求める。

$$V1 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=n-M}^{n-1} \{ \text{slope}(i) - \overline{\text{slope}_{M-1}(n-1)} \}^2 \quad (10)$$

$$V2 = \frac{1}{M} \sum_{i=n-M}^n \{ \text{slope}(i) - \overline{\text{slope}_M(n)} \}^2 \quad (11)$$

$V1$: 直前 $M-1$ フレームの符号化で用いた slope の分散

$V2$: 当該フレームを含む M フレーム分の slope の分散

$\overline{\text{slope}_{M-1}(n-1)}$: 第 $n-1$ フレームの直前 $M-1$ フレームの slope の平均値

$\overline{\text{slope}_M(n)}$: 第 n フレームの直前 M フレームの slope の平均値

そして、 $V1$ と $V2$ を比較する。式 (9) で計算した $\text{slope}(n)$ を用いて符号化することによって、slope の分散が急激に増加するようであれば、分散を考慮して $\text{slope}(n)$ を再計算する。具体的には、閾値 A を設定し、式 (12) を満たすような $\text{slope}'(n)$ を求める。

・ $V2 \leq A \times V1$ の場合

$\text{slope}(n)$ は式 (9) から求めた $\text{slope}(n)$ をそのまま使用.

・ $V2 > A \times V1$ の場合

$$\frac{1}{M} \left\{ \sum_{i=n-M}^{n-1} \{ \text{slope}(i) - \overline{\text{slope}_{M-1}(n-1)} \}^2 \right. \\ \left. + \{ \text{slope}'(n) - \overline{\text{slope}_{M-1}(n-1)} \}^2 \right\} = A \times V1 \quad (12)$$

3.6 バッファによる符号量制御

本方式では、後続フレームの RD 曲線の予測による画像複雑度の把握と符号化済みフレームにおけるビット過不足、さらに隣接フレームの品質差を考慮して、各フレームを符号化を行っている。しかし、この場合各フレームに割り当てられる符号量の変動は避けられないため、符号量の変動をバッファで吸収する必要がある。そこで、指定されたバッファサイズの下、符号量を割り当てることを検討する。当該第 n フレームのバッファ占有量から、今後 N フレームに関してバッファがフローしないような、当該フレームに割り当て可能な最大ビット量 $R_{\max}(n)$ と最小ビット量 $R_{\min}(n)$ を求める。 $R_{\max}(n)$ 、 $R_{\min}(n)$ はフレームごとに更新される。具体的には、まずバッファサイズを V 、初期遅延量を V_0 とする。当該第 n フレームのバッファ占有量を $V(n)$ とすると、第 n フレームに割り当てられるビット量の最大値 $R_{\max}(n)$ と最小値 $R_{\min}(n)$ は式 (13)、式 (14) のように表される。

$$R_{\max}(n) = \frac{V_0 + (N+n) \times R - \sum_{i=0}^{n-1} S(i)}{N} \quad (13)$$

$$R_{\min}(n) = \frac{V_0 + (N+n) \times R - \sum_{i=0}^{n-1} S(i) - V}{N} \quad (14)$$

N : 符号量制御に用いるウィンドウサイズ

この定められた範囲の中で、当該フレームにビットが割り当てられる。式 (12) で求めた $\text{slope}'(n)$ に相当するビット量を $R(n)$ とすると、当該フレームに割り当てられるビット量 $R'(n)$ は、 $R_{\max}(n)$ 、 $R_{\min}(n)$ を用いて以下のように決定される。

・ $R(n) > R_{\max}(n)$ の場合

$$R'(n) = R_{\max}(n)$$

・ $R(n) < R_{\min}(n)$ の場合

$$R'(n) = R_{\min}(n)$$

・ $R_{\min}(n) \leq R(n) \leq R_{\max}(n)$ の場合

$$R'(n) = R(n)$$

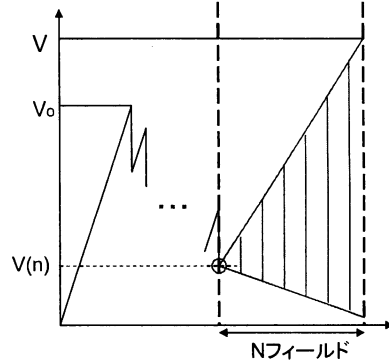


図2 バッファ占有量の遷移の制限

これらの処理を、バッファの占有量のグラフで表したものを、図2に示す。

当該フレームから、ウィンドウ分の N フレームについて、バッファの占有量の変化が図2の斜線領域内で変化すれば良い。このように、当該フレームについてのみ、割当てビット量がバッファフローしないのか確認するのではなく、当該フレームから N フレーム分の占有量の変化の領域を定めることで、割当てビットの急激な変化さらには品質の急激な変化を防ぐことが出来る。

3.7 バッファサイズと遅延

次に、バッファサイズについて検討する。各フレームに変な符号量を与えるために、MPEG-2やMPEG-4ではVBV(Video Buffering Verifier)が、H.264ではHRD(Hypothetical Reference Decoder)が定められている[13],[14]。

MPEG-2のメインプロファイルでは、メインレベルで最大ビットレートが15Mbps、最大VBVバッファサイズが1.835Mbitと定められている。これは122msecの遅延に相当する。また、メインプロファイルのHDTVレベルでは、最大ビットレートが50Mbps、最大VBVバッファサイズが10Mbitである。これは、200msecの遅延に相当する。

H.264では、メインプロファイルのレベル4(HDTVレベルに相当)で、最大HRDバッファサイズは20Mbitとされている。

本稿では、HDTVを主なターゲットと設定しているため、MPEG-2のHDTVレベルの最大VBVバッファサイズに合わせて、バッファサイズを10Mbitと設定する。

4. 性能評価

提案方式による符号化性能を評価する目的から、符号化実験を行った。今回行った符号化条件を表1示す。テスト画像はITE標準画像のStreetcarを用いた。

定めたバッファサイズの制限下でのシステムの動作を確認するために、バッファサイズを10Mbitと設定し、この制限下で、符号量制御を行うこととした。バッファサイズを10Mbitと決

表 1 符号化条件 1

入力画像	1920×1080 / 60Hz (インターレース) 4:2:2 コンポーネント (8 ビット)
符号化レート	0.8bit/pixel
DWT フィルタ	(9,7) 非可逆フィルタ
サブバンド分割レベル	3 レベル
バッファサイズ	10Mbit
ウィンドウサイズ N	60 フィールド

表 2 MSE の平均と分散 (Streetcar)

Label	MSE の平均	MSE の分散
constant bit rate	14.70	5.695
proposed	14.78	3.683

表 3 コーデック遅延量の推定値 (Streetcar)

Label	入力待ち時間 (msec)	バッファリング遅延 (msec)	合計遅延 (msec)
Constant bit-rate	16.68	16.68	33.3
Proposed	16.68	200	216.68

定した場合の、品質変動を図 3 に、MSE の平均と分散を表 2 に、その際のバッファの占有量の変化を図 4 に示す。品質変動については、各フレームに等ビットを配分する方式、各フレームを等しい slope で符号化する方式、そして提案方式の 3 つの方式で比較を行った。

表 2 より、提案手法が等ビット配分時と同程度の MSE の値を保持したままで、MSE の分散が減少している様子がわかる。MSE の差は、シーケンス全体に対して割り当てた符号量の違いによるものと考えられる。本実験では、ビットレートとして 50Mbps を想定しているので、10Mbit の VBV バッファサイズによって生じる遅延は 200msec となる。JPEG2000 を用いることによるコーデック遅延を推定する。各条件におけるコーデック遅延を比較したものを表 3 に示す。本方式では、符号化処理にかかる時間は瞬時であると仮定する。従って、コーデック遅延としては、バッファリング遅延に加えて、エンコーダにおける符号化対象画像の入力待ち時間を考える。対象画像の入力待ち時間は、インターレース 60Hz で符号化することから 16.68msec となる。まず、JPEG2000 を提案方式を用いず、各フレームに等ビットを与えて符号化した場合、バッファリング遅延は 16.68msec となり、入力待ち時間と合計すると 33.3msec となる。次に、動画像としての品質変動を考慮した提案方式を用いるとバッファリング遅延は 200msec であり、対象画像の入力待ち時間とバッファリング時間を加算すると 216.68msec となる。いずれの場合も、MPEG-2 の 300msec より小さい値に維持できる。従って、提案方式が動画像としての品質劣化に起因する問題を対処しつつ、目標となる遅延時間を維持していることがわかる。

また、動きの激しいシーケンスに対する提案手法の有効性を確認するために、HDTV サイズではないが、CIF のシーケンスを用いて、同様に提案手法を用いて実験を行った。動きの激しい標準画像の "Foreman" と "Football" の二つのシーケンスを

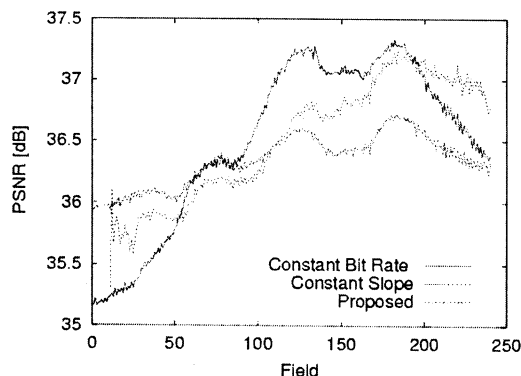
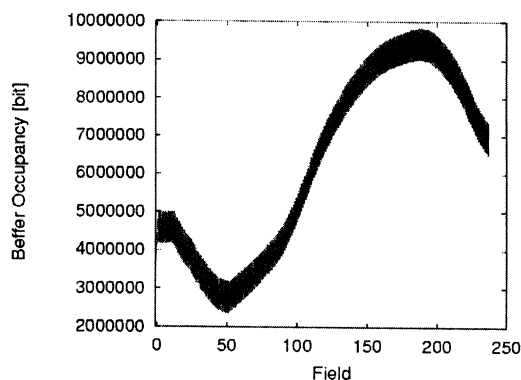
図 3 等ビット配分方式と提案手法の PSNR の比較
(バッファサイズ 10Mbit)図 4 提案手法によるバッファ占有量の遷移
(バッファサイズ 10Mbit)

表 4 符号化条件 2

入力画像	352×288 / 30Hz (プログレッシブ) 4:2:2 コンポーネント (8 ビット)
符号化レート	0.8bit/pixel
DWT フィルタ	(9,7) 非可逆フィルタ
サブバンド分割レベル	3 レベル
バッファサイズ	475136 bit
ウィンドウサイズ N	30 フレーム

用いた。画像サイズを考慮して、0.8bpp から計算し 2.5Mbps をこの実験の目標ビットレートとした。また、VBV バッファサイズは CIF サイズに相当する MPEG-2 の MP@LL で定められている最大バッファサイズの 475136bit を用いた。符号化条件については表 4 に示す。Football、Foreman の品質変動について MSE の平均と分散を表 5 に示す。結果より、HDTV の Streetcar の実験結果と同様、品質の変動が等ビット配分の場合と比較して、低減されている様子がわかる。バッファサイズを 475136bit に設定しているので、ビットレートが 2.5Mbps であ

表 5 MSE の平均と分散 (Football と Foreman)

Label	football		foreman	
	MSE の平均	MSE の分散	MSE の平均	MSE の分散
constant bit rate	26.97	361.6	18.37	106.3
proposed	26.10	307.8	18.05	74.68

表 6 コーデック遅延量の推定値 (Football と Foreman)

Label	入力待ち時間	バッファリング遅延	合計遅延
	(msec)	(msec)	(msec)
Constant bit-rate	33.3	33.3	66.6
Proposed	33.3	190	223.3

ることから考えて 190msec となる。従って、コーデックの合計遅延は表 6 示すように 223.3msec となる。

以上の実験より、定めたバッファサイズの下で、品質の変動を低減する効果があることがわかった。提案方式における品質変動はバッファサイズに依存しており、バッファサイズが無限であれば、品質変動はより低減される。コーデック遅延の低減については、筆者らは入力画像を分割して符号化する方式を検討してきた [15]。コーデック遅延を低減するためには、分割符号化方式は非常に有効である。しかし、動画としての品質の変動を考慮するためには、本方式のようにバッファサイズを定め、その範囲で遅延を許容することによって品質の変動を抑えることが可能である。

5. ま と め

本稿では、JPEG2000 を用いて動画像を符号化する際に、低遅延で品質変動を低減する方式について検討した。低遅延で品質の変動を低減するために、まず各フレームの Rate と slope の関係に注目した。Rate と slope の関係から、各フレームの複雑度を考慮し、品質の変動が小さくなるような符号量制御方式を提案した。提案手法によって、各フレームに等ビットを配分する方式と比較して、シーケンス全体として同程度の平均 MSE を維持し、MSE の分散も小さく抑えられることがわかった。その際に遅延は生じるものの、MPEG-2 などの動き補償処理を用いる符号化方式と比較して遅延を抑えることが出来ることを示した。

文 献

- [1] ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N1890, "JPEG2000 part I Final Draft International Standard," Sep. 2000.
- [2] D. Marpe et al. "Performance evaluation of Motion JPEG2000 in comparison with H.264/AVC operated in intra coding mode," in Proc. SPIE Conf. on Wavelet Applications in Industrial Processing, Oct. 2003.
- [3] T. Kuge, "Wavelet Picture Coding and Its Several Problems of the Application to the Interlace HDTV and the Ultra-high Definition Images," ICIP2002, Vol. III, pp.217-220 Sep. 2002.
- [4] S. Naito, A. Koike, S. Matsumoto, "Optimal JPEG2000 Encoder Mechanism for Low Delay and Efficient Distribution of HDTV Programs", Proceedings of ICASSP2004, May 2004.
- [5] M.Hamdi, J.W.Roberts, and P. Rolin, "Rate Control for VBR Video Coders in Broad-Band Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.15, No.6, Aug. 1997.
- [6] J.Bai, Q.Liao, X.Lin, X.Zhuang, "Rate-distortion model based rate control for real-time VBR video coding and low delay communications," Signal Processing, Image Communication 17, pp.187-199, 2002.
- [7] A.Jagmohan, K.Ratakonda, "MPEG4 One-Pass VBR Rate Control for Digital Storage," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol.13, No.5, May 2003.
- [8] J. C. Dagher, A. Bilgin, M. W. Marcellin, "Resource-Constrained Rate Control for Motion JPEG2000," IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 12, No. 12, pp. 1522-1529, Dec. 2003.
- [9] W. Chan, A. Becker, "Efficient Rate Control for Motion JPEG2000," Proceedings of DCC2004, 2004.
- [10] Mallat, S., Falzon, F., "Analysis of low bit rate image transform coding," IEEE Trans. Signal Processing, Apr. 1998.
- [11] Appadwedula, S., Jones, D.L, Ramchandran, K., Kozintsev, I., "Joint source channel matching for a wireless communications link," Proc. IEEE ICC-98, pp. 127-131, 1998.
- [12] Y. Charfi, R. Hamzaoui, and D. Saupe, "Model-based real-time progressive transmission of images over noisy channels," Proc.WCNC, New Orleans, Mar. 2003.
- [13] ISO/IEC 13818-2, "Information Technology Generic coding of moving pictures and associated audio information-Part2:Video," 1994.
- [14] ISO/IEC 14496-10, "Advanced Video Coding," ITU-T Rec. H.264, 2003.
- [15] 佐野, 内藤, 渡辺, "JPEG2000Precinct 構造を用いた低遅延符号化方式" 情報処理学会オーディオビジュアル研究会 Oct. 2004.