

博士学位論文

高品質HDTV伝送サービスのための  
符号化制御の最適化に関する研究

Encoding Control Optimization for High Quality  
HDTV Transmission Service

2006年2月

早稲田大学大学院 国際情報通信研究科

内 藤 整

## 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景	1
1.1.1	映像伝送サービス	1
1.1.2	動画像圧縮符号化方式	2
1.1.3	次世代映像メディア	2
1.2	本研究の目的	3
1.2.1	放送サービスにおける低ビットレート HDTV 伝送の実現	3
1.2.2	専用線サービスの高機能化	3
1.3	本論文の構成	4
<b>第 2 章</b>	<b>高品質 HDTV 伝送のアプローチ</b>	<b>7</b>
2.1	まえがき	7
2.2	想定する映像伝送サービス	7
2.3	符号化メカニズム	8
2.3.1	放送サービス	9
2.3.2	専用線サービス	9
<b>第 3 章</b>	<b>動き補償予測の性能比較</b>	<b>12</b>
3.1	まえがき	12
3.2	比較する方式	12
3.2.1	方式 A(通常のブロックマッチング)	13
3.2.2	方式 B(アフィン変換を用いた動き補償)	13
3.2.3	方式 C(Warping 予測)	14
3.2.4	方式 D(グローバル動き補償)	14
3.3	符号化シミュレーション	15
3.3.1	シミュレーション条件	15
3.3.2	シミュレーション結果	19
3.3.3	考察	20
3.4	むすび	23
<b>第 4 章</b>	<b>視差補償の高度利用による 3D-HDTV 符号化方式</b>	<b>26</b>
4.1	まえがき	26

4.2	共通型バッファ制御の導入	27
4.3	GOP 構造の検討	28
4.4	符号化要素技術の高度化手法	30
4.4.1	改良型動き検出	30
4.4.2	差別型ビット割当	32
4.5	検討結果ならびに性能評価	33
4.5.1	符号化シミュレーション条件	33
4.5.2	GOP 構造の比較検討	34
4.5.3	高度化技術の性能評価	36
4.5.4	視差補償導入の意義	38
4.6	むすび	39
<b>第 5 章</b>	<b>高精度なビット配分による画質改善</b>	<b>41</b>
5.1	ピクチャ単位ビット配分の最適化方式	42
5.1.1	歪み最小化型レート制御の導入	42
5.1.2	提案高度化手法	46
5.1.3	性能評価	47
5.1.4	R-D 関数のパラメータ推定	53
5.2	視覚優先度を考慮した量子化制御方式	53
5.2.1	提案要素技術 - マクロブロック単位量子化制御の高精度化 -	54
5.2.2	性能評価	58
5.3	むすび	60
<b>第 6 章</b>	<b>符号化構造の適応選択方式</b>	<b>61</b>
6.1	まえがき	61
6.2	ピクチャタイプの適応選択	62
6.2.1	前提条件	62
6.2.2	適応選択により得られる効果	63
6.2.3	1パス型適応選択手法	64
6.3	マクロブロック符号化モードの適応選択	66
6.3.1	前提条件	66
6.3.2	マクロブロック符号化ビット数の推定	67
6.4	性能評価	69
6.4.1	実験結果	69
6.4.2	考察	72
6.5	オーバーヘッドビット数の推定	73
6.6	むすび	74

<b>第 7 章 低遅延 HDTV 符号化方式</b>	<b>78</b>
7.1 まえがき	78
7.2 検討の前提条件	79
7.2.1 想定する符号化器	79
7.2.2 従来技術の問題点	79
7.3 提案符号化制御	81
7.3.1 符号量制御	81
7.3.2 シーン適応型符号化タイプ選択	83
7.4 性能評価	84
7.4.1 提案方式の性能評価	85
7.5 コーデック遅延量の試算	89
7.6 バッファリング遅延量の導出	91
7.7 むすび	93
<b>第 8 章 結論</b>	<b>94</b>
8.1 総括	94
8.2 今後の課題	96
謝辞	97
参考文献	98
図一覧	102
表一覧	104
研究業績	106

# 第1章

## 序論

近年のデジタル放送（BS，CS110度，地上）ではHDTVを標準の映像フォーマットとして位置づけている．これはデジタル放送のサービス開始に伴い，放送で扱われる映像フォーマットが従来のNTSCに代表されるSDTV（Standard Definition Television）よりHDTV（High Definition Television）に移行する流れがもたらされることを意味する．総務省の計画では，2011年にはSDTVを基本とするアナログ放送が完全に廃止され，同時期をもってHDTVへの完全移行が予定されている．テレビ放送の視聴者数規模の大きさから，以上の変革は放送業界に閉じたものではなく，ブロードバンドサービスやコンテンツビジネスにおけるHDTV化の流れを牽引するものである．以上の社会的情勢を鑑み，今後HDTVコンテンツの流通が急速に高まるものと予想され，これに備えた基盤整備として，通信インフラの拡充や映像伝送サービスの高度化が急務となっている．このうち映像伝送サービスの高度化とは，放送サービス，専用線サービスの双方において，高品質かつ高機能なHDTV伝送サービスの安定的な提供が実現されることを意味している．近年，通信インフラの広帯域化が加速してはいるものの，HDTV信号の情報量は1Gbpsを上回り，HDTV伝送手段としては動画像圧縮の適用が現実的であるといえる．このため，HDTV伝送サービスの品質および機能に密接に関連する技術要素として，高性能な動画像圧縮符号化技術の確立が極めて重要である．以上の問題意識を研究の動機として，本論文は，HDTVを対象に映像伝送サービスの高度化を実現する上で不可欠といえる動画像符号化制御の最適化について，研究成果をまとめたものである．

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1 映像伝送サービス

映像伝送サービスとは，放送に代表される2次分配，放送局間での素材交換や番組中継などの1次分配，および撮影現場から最寄りの中継ポイントまでの伝送に相当する素材伝送に大別される．1次分配と素材伝送において，要求品質に関しては特別な差異はないため，本論文ではこれらを一括りにして扱い，単に専用線サービスと呼ぶこととする．ユーザの品質要求に関して，放送サービスにおいては放送帯域という極めて限られたビットレートにおいて安定的に高画質を実現することが求められ，専用線サービスにおいては伝送帯域の制約が

比較的緩いため、符号化効率の追求よりはむしろ伝送遅延の低減が強く求められる。つまり映像伝送サービスの品質尺度の主要因は画質と遅延量であるといえる。

### 1.1.2 動画像圧縮符号化方式

MPEG-2 に代表される、いわゆる MC+DCT ハイブリッド符号化は、動き補償 (MC: Motion Compensation) と離散コサイン変換 (DCT: Discrete Cosine Transform) の併用により構成される符号化手法の総称であり、この原理に基づく動画像圧縮技術の標準化は 1990 年の H.261<sup>(2)</sup> を皮切りに発展を繰り返してきた。一方で上述のいずれの伝送サービス形態においても、従来の伝送サービスは MPEG-2<sup>(1)</sup> をベースとするものが大半を占めている。伝送サービスの HDTV 対応を考えた場合、MPEG-2 の符号化フォーマット自体は HDTV にも対応可能であり、単にフレームあたりに処理すべき画素数を拡張することで伝送システム自体の構築は可能であるが、単純なエンコーダ実装では高い品質レベルを期待できない。これは MPEG-2 に代表される標準の符号化方式は、符号化データの記述規則、およびこれを扱うデコーダの動作規定を明確化したものにすぎず、エンコーダの詳細な実装方式は開発者に委ねられているためである。品質尺度として挙げた画質と遅延量はともにエンコーダの符号化制御に依存する部分が大きく、リファレンス的な制御手法は存在するものの、入力素材特性に応じた最適化を行うことで大幅なパフォーマンス改善がもたらされる。さらに遅延量に関しては、MPEG-2 をベースとする場合、符号化効率を優先した実装を行うと、B ピクチャの挿入による並べ替え遅延、ピクチャタイプごとの符号量の偏りを吸収するためのバッファリングといった要因が積み、結果として 300msec を上回るコーデック遅延量を強いられている状況である。このため、大幅な低遅延処理を達成する上では、採用する符号化方式の選定も含めて見直す必要があるといえる。

### 1.1.3 次世代映像メディア

HDTV に続く次世代映像メディアとして代表的なものに 3D 映像がある。3D 映像は、スポーツシーンを始めとする、立体視により臨場感を味わえるコンテンツを主な対象とし、イベント会場での中継表示、さらには一般家庭向け放送と、その利用形態は今後ますます広がっていくものと思われる。人間が物体を立体的に知覚する最大の要因として両眼視差が挙げられる。両眼視差とは左眼で知覚する像と右眼で知覚する像のあいだに生じるズレのことを指し、このズレは左右の眼が互いに離れているために生じる。人間はこの両眼視差により、とらえた物体ごとの奥行き位置を推定し、立体感のある像として頭の中に描いている。3D 映像の典型例として 3D-HDTV について説明する。3D-HDTV は上述の立体視の仕組みに着目し、左右の眼に相当する 2 台の HDTV カメラで撮影した映像を、それぞれ左眼、右眼に対して別個に表示することにより、自然視している際と全く同様に立体感のある像を頭の中に形成する。2 つの映像を左右の目に対して別個に表示する方法としてはメガネなしによる方式と、偏光メガネ式とに大別される。メガネなしによる方式としては、レンチキュラレンズ方式とイメージスプリッタ方式が有名であり、ともに製品化例が存在する。<sup>(3)</sup>

## 1.2 本研究の目的

上述の背景を踏まえ、本論文では高品質な HDTV 伝送を実現する上で不可欠といえる、符号化制御の最適化を課題として掲げるものである。具体的な研究目的は以下のとおりである。

### 1.2.1 放送サービスにおける低ビットレート HDTV 伝送の実現

HDTV の放送サービスに関連して、2000 年 12 月より、BS を用いたデジタル放送、110 度 CS を用いたデジタル放送がともに同一の技術基準で標準化され、サービス開始されている。また、地上デジタル放送も方式に係わる標準化作業を終了し、2003 年 12 月より東京、名古屋、大阪において本放送を開始した状況にある。現状の技術レベルで HDTV 放送品質を得るには、22Mbps のビットレートが必要との報告が ARIB 衛星デジタル放送システム開発部会映像符号化方式作業班からなされており<sup>(4)</sup>、BS デジタル放送では、これに基づいてスロット割り当てが行われたが、地上デジタル放送においては、放送帯域を携帯端末向けのワンセグサービスと共用する前提から実効的な映像符号化レートは 15Mbps 程度となり、放送方式を変えることなく HDTV 放送品質を達成するには、符号化性能の改善が必須となる。以上を踏まえ、地上デジタル放送の放送方式の枠組の中で、MPEG-2 符号化の圧縮率を上げ、放送品質を満足するのに必要となる符号化レートを引き下げることで、高品質な HDTV 放送サービスが安定的に提供されることを目的とする。既存の放送方式の枠内での研究に集中する意義として、研究成果の適用先は放送局内で番組送出に使用されるエンコーダのみとし、既に相当数が市場に出回っているとされるデジタル放送用受信機(チューナ、チューナ内蔵型デジタルテレビ)との互換性が保持される点が挙げられる。

### 1.2.2 専用線サービスの高機能化

専用線サービスの高機能化要素として、まず次世代映像メディアの流布に備えたサービス提供基盤技術の確立を考える。次世代映像メディアとしてはこれまでに多くの国際的なイベントにおいて実績のある 3D-HDTV を対象とし、従来の HDTV 伝送サービスと同様の回線条件、伝送帯域において高品質なリアルタイム伝送が可能となるよう、低ビットレートでの 3D-HDTV 符号化技術の確立を目的とする。

一方で、HDTV コンテンツ流通をより一層促進させるためのコア技術確立の観点から、リアルタイムによる HDTV の素材伝送や番組中継を活用したコンテンツ制作の運用性を改善することを目的に、従来の HDTV 伝送サービスで強いられていた 300msec 超のコーデック遅延量を大幅に削減可能な圧縮符号化技術を確立する。検討に際しては、ベースとする符号化方式の選定から入念な検証を行い、低遅延のみならず、高い符号化効率を達成できることを要求条件として掲げ、従来の HDTV 伝送サービスと同等の伝送帯域において素材伝送品質を満足可能とする。

### 1.3 本論文の構成

以下、各章ごとに概要を述べる。

第1章「序論」では、研究の背景、および目的について述べている。背景および目的を説明する一連の流れにおいて、本研究が対象とする映像フォーマットである HDTV の定義、ならびに HDTV 用伝送サービスの分類を行っている。伝送サービスとしては、2次分配、1次分配、素材伝送について言及し、特に2次分配については代表例である日本のデジタル放送を取り上げ、放送方式の概説を行っている。さらにサービス分類別にユーザ要求を明らかにした上で、従来の HDTV 伝送サービスの実現手段の傾向とその問題点を述べ、本論文で扱う課題、ならびに目標を明確化している。

第2章「高品質 HDTV 伝送のアプローチ」では、本研究が扱う符号化制御の最適化対象となる符号化メカニズムの導入を行う。具体的には、放送サービスの低ビットレート化、専用線サービスの高機能化のそれぞれについて、ベースとなる符号化メカニズムについて説明した上で、性能改良が見込まれる符号化制御の最適化ポイントを明確にしている。

第3章「動き補償予測の性能比較」では、MC + DCT ハイブリッド符号化の性能を大きく左右する動き補償予測に着目し、既に報告例のある代表的な方式について性能比較を行っている。比較対象としては、MPEG-2 で採用されているブロックマッチング方式に加えて、同方式の効率改善を目的に提案された方式として、アフィン変換を用いた予測方式、Warping 予測方式、グローバル動き予測方式を取り上げている。比較に際しては、放送品質に沿った公正性を保ちつつ、客観品質評価を行うため、符号化方式に MPEG-2 (ブロックマッチング方式以外は動き予測に関する記述のみ拡張)、入力画像に ITU テストシーケンスを用いてテスト条件を共通化し、符号化実験を行っている。符号化実験結果より、ブロックマッチング方式の性能に対して、同手法の改良手法として提案された各方式による著しい性能改善は見られないことから、デジタル放送で想定される運用に限っては、ブロックマッチング方式の選択が妥当であることを符号化効率の観点より結論付けている。

第4章「視差補償の高度利用による 3D-HDTV 符号化方式」では、HDTV の応用による高臨場感の映像メディアとして、素材が左目用と右目用の HDTV 映像により構成される 3D-HDTV を対象に、MPEG-2 Multi View Profile の枠組の中で、視差補償予測を活用した符号化性能の改善手法について検討をしている。具体的には、左右画像間の画質差を安定的に低く保つことで主観評価における不自然さを軽減する目的から、共通型バッファ制御の導入により符号量制御の最適化を図っている。加えて、3D-HDTV 符号化における符号化効率の改善を図る目的から、3D-HDTV 符号化の GOP 構造に関する検証を行い、左目用、右目用の各シーケンスに割り当てるピクチャタイプパターンの組合せについて最適化を図っている。さらには、視差補償に基づいて実現可能な動き検出および符号量制御の高度化手法を提案している。動き検出に関しては、予測性能を改善するアプローチとして、視差補償ベクトルと左目用シーケンスに対して検出した動きベクトルをもとに、右目用シーケンスの動きベクトル検出を実現する手法を提案している。符号量制御に関しては、上述の共通型バッファ制御により画質差が十分に低く抑えられた理想的な条件を基準として、あるレベルの画質差



を許容可能であると仮定した際の符号化効率の改善手法を提案している．符号化実験結果より，提案したいずれの最適化アプローチも 3D-HDTV 符号化の効率改善において極めて有効であることを確認した．

第5章と第6章においては，デジタル放送への応用を目的とし，MPEG-2に基づく低ビットレート HDTV 符号化に対して高画質化アプローチの提案を行っている．

第5章「高精度なビット配分による画質改善」では，MPEG-2の符号量制御をピクチャ単位の大局的な制御とマクロブロック単位の局所的な制御に二分した上で，それぞれについて高精度化のアプローチを導入している．

前半部分においては，ピクチャ単位の大局的な符号量制御に関してひずみ量を最小化する規範で符号量配分を行う，いわゆるひずみ最小化型レート制御に着目し，同方式の導入を行うとともに，同方式の高度利用に基づく最適化アプローチの提案を行っている．まず，ひずみ最小化型レート制御手法の導入に際しては，ピクチャごとの符号量配分方式を明らかにした上で，予備実験を通じて方式単独の有効性を確認している．次に同方式との併用により有効に働く高画質化手法として，ピクチャ単位に設定される量子化マトリクスの最適化手法を導入している．量子化マトリクスとは，DCT 係数の量子化に関連して，量子化精度の重み付けを係数位置に応じて与えるパラメータテーブルを指し，ピクチャごとに記述可能である．同パラメータの記述を省略した場合には，予め用意されたテーブルが適用されるが，同テーブルは比較的高ビットレートを想定したものであるため，低ビットレートの符号化において，符号量制御を安定的に機能させる上では，適応的なテーブル更新が必須となる．このため，量子化マトリクスの更新に対して，レート制御の精度を高め，高難易度素材に対する符号化破綻を最小限に抑えるという意味での最適化アプローチを提案している．提案方式をひずみ最小化型レート制御に組み込んで行った符号化実験結果より，提案方式の導入による効果として，レート制御の制御誤差が改善される結果，低ビットレートや高難易度素材への適用においても高いロバスト性が認められることを確認している．

後半部分においては，ピクチャ単位での検証結果を受けて，ひずみ最小化型レート制御との併用によるさらなる高画質化手法として，マクロブロック単位量子化制御の高精度化手法を導入している．従来型のマクロブロック単位量子化制御では，マクロブロックごとの視覚優先度パラメータの決定をマクロブロックの輝度分散など簡易に抽出可能な指標のみを基準として行っていた．これに対し提案手法では，視覚優先度パラメータに人間の視覚特性を忠実に反映させる目的から，オブジェクト解析を導入し，同パラメータの算出をより厳密に行っている．視覚優先度パラメータの具体的な算出は，オブジェクトの特徴量として動き量と周囲に対する変化度を，マクロブロックのテクスチャ属性として輝度分散を考慮し，これらを引数とする非線形関数により行っている．実験結果より，マクロブロックごとの優先度付けの最適化による主観画質の向上を確認している．特に人物の顔など平坦部分におけるブロック歪みの改善，ならびに各種輪郭の忠実な再現といった改善効果が見られる．

第6章「符号化構造の適応選択方式」では，MPEG-2の符号化構造をピクチャレイヤとマクロブロックレイヤに大別した上で，ピクチャレイヤでは，画面ごとの符号化方法の特徴づけるピクチャタイプの適応選択を最適に行う手法を提案し，マクロブロックレイヤでは，

16画素×16ラインの矩形画像領域単位の符号化方法を示すマクロブロック符号化モードの選択を発生符号量最小化の規範で行うアプローチを導入している。ピクチャタイプの適応選択については、レート制御手法に依存しない汎用的な手法に加え、第4章と第5章が前提とするひずみ最小化型レート制御に特化した最適化アプローチの導入を合せて行っている。マクロブロック符号化モードの選択においては、マクロブロックごとの符号化に際し、選択可能なすべての符号化モードについて、予測誤差信号と量子化ステップサイズをもとに発生符号量の近似推定を行った結果、最小の発生符号量を与える符号化モードを抽出するアルゴリズムを提案している。実験結果より、レイヤ別に提案した最適化手法に関して、それぞれ単独で適用した際の効果を確認した上で、両技術の併用時においても双方の効果が期待通りに発揮されることを確認している。

第7章「低遅延HDTV符号化方式」では、第4章から第6章において最適化対象としたMPEG-2に基づくコーデック処理によると原理的に500msec弱の遅延量が強い点の問題として捉え、コーデック処理遅延の大幅な短縮を実現する符号化方式の導入を行っている。具体的には、遅延発生の主要因であった動き補償予測を非適用として、高性能なフレーム内符号化方式であるJPEG2000をベースに、低遅延と高画質の両立に寄与する要素技術を導入している。高画質化ポイントとしては、符号量制御の最適化、符号化タイプの適応選択に着目し、提案方式を導入している。符号量制御については、従来手法として位置づけられるポスト量子化に基づくR-D最適化アプローチが抱える問題点を解消する目的から、Explicit量子化とポスト量子化の併用に基づく最適化手法の提案を行っている。符号化タイプの適応選択は、符号化効率の改善を追及する目的から、DWTフィルタの適用単位としてフレーム処理とフィールド処理をフレームごとに適応的に選択するものであり、これに対する最適化アプローチとして、入力画像の特徴量抽出に基づく符号化タイプの決定方式を提案している。さらに、低遅延性を追及するため、JPEG2000の符号化ツールとして、分割画面単位の符号化処理に適合するタイルやプレシントを活用した超低遅延符号化構造を導入している。結果として、一連の提案技術の導入は、符号化効率の改善と、コーデック遅延量の削減において極めて有効であることを確認している。

第8章では本論文で得られた成果をまとめた上で、関連する課題のうち、本論文では解決できていないポイントを客観的に考察した上で、今後の検討課題を明確に示唆している。

## 第2章

### 高品質 HDTV 伝送のアプローチ

#### 2.1 まえがき

本章では、本研究が扱う符号化制御の最適化対象となる符号化メカニズムを導入している。具体的には、放送サービスの低ビットレート化、専用線サービスの高機能化のそれぞれについて、ベースとなる符号化メカニズムについて説明した上で、性能改良が見込まれる符号化制御の最適化ポイントを明確にしている。

#### 2.2 想定する映像伝送サービス

本研究は HDTV を扱う映像伝送サービスを主対象としている。ここで HDTV とは High Definition TeleVision の略語である。あくまでも TV 方式を画面解像度 (画面を構成する画素数) により大まかに分類するために使用される用語であり、NTSC(720x480) など従来サービスは SDTV に分類し、これと比べて遥かに解像度の高い 1080i や 720p などが HDTV に分類される。HDTV フォーマットの比較を表 2-1 に示す。参考のため SDTV に分類される 480i についても合わせて示す。国内の放送方式においては、1080i、720p のいずれも運用例が存在するが、大半が 1080i によるものである点を考慮し、本研究で扱う HDTV は 1080i に限定することとした。

表 2-1: HDTV フォーマットの比較

	1080i	1080p	720p	480i
有効映像サイズ (画素数)	1920 × 1080		1280 × 720	720 × 480
アスペクト比	16:9			4:3
走査方式	インターレース (飛越し走査)	プログレッシブ (順次走査)		インターレース (飛越し走査)
フィールド/フレーム周波数	59.94Hz			
デジタル放送での運用	極めて多い	なし	少ない	HDTV へ移行予定

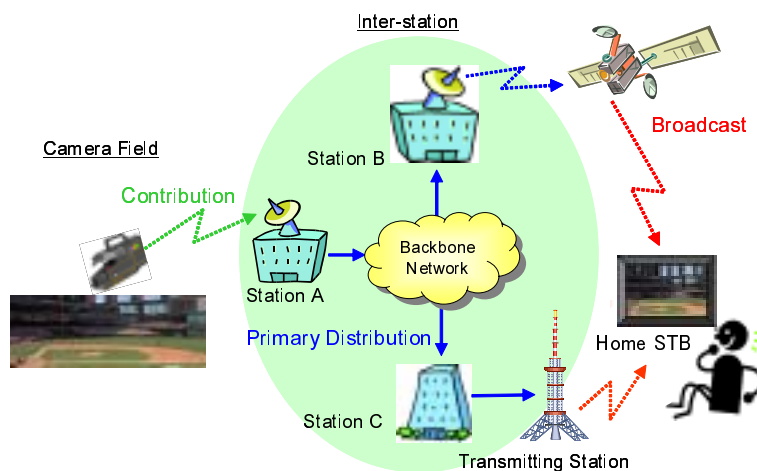


図 2-1: 映像伝送サービス

次に映像伝送サービスの明確化を行う．本研究で扱う映像伝送サービスの範囲を図 2-1 に示す．図中，左より素材伝送，一次分配（放送局間伝送），二次分配（放送）に該当し，本論文では各サービスでのユーザ要求品質の違いから，二次分配のみを区別して扱い，単に放送サービスと呼び，素材伝送と一次分配（放送局間伝送）は専用線サービスと総称することとした．ここでいずれのサービスに関しても，現行のサービス運用の規定，あるいは慣例を鑑み，想定する回線種別は CBR（Constant Bit-Rate）に限定することとした．放送サービスと専用線サービスでは，求める品質レベルが異なっており，一般に前者は放送品質レベル，後者は素材品質レベルと呼ばれる．素材品質レベルが放送品質に比べてより高画質なのは明らかであるが，これらの違いは ITU-R 勧告 BT.1122 で明確に規定されている<sup>(5)</sup>．符号化方式もターゲットする品質レベルに適した選択を行う必要があり，HDTV に関しては概ね以下の選択が行われている．

- 放送品質：MPEG-2(Main プロファイル)，H.264，Windows Media など
- 素材品質：MPEG-2(422 プロファイル)，MPEG-4(Studio プロファイル)，JPEG2000 など

### 2.3 符号化メカニズム

本研究の目的である放送サービスの低ビットレート化，専用線サービスの高機能化のそれぞれについて，以下にベースとなる符号化メカニズムについて説明した上で，符号化制御の改良により性能改善が見込まれるポイントを明確にしている．

### 2.3.1 放送サービス

放送サービスに対しては、対象とするデジタル放送が既にサービス開始している点を踏まえ、国内の放送方式に遵守した形で、MPEG-2 の枠組の中での符号化制御の改良により低ビットレート化を目指すこととした。MPEG-2 の符号化器の構成を図 2-2 に示す。同図に示すとおり、MPEG-2 は動き補償予測と DCT によるハイブリッド符号化に基づく符号化アルゴリズムであり、この仕組み自体は H.261 から H.264/MPEG-4 AVC<sup>(6)</sup> に至るまで基本的に変わらず継承されている。動き補償予測は、動画像信号の時間的な相関を利用して、冗長度を削減するためのアプローチであり、当該ピクチャ(画面)の予測値を、近傍の符号化済みピクチャと動き情報により生成し、予測値の原信号に対する誤差信号を符号化するものである。DCT(Discret Cosine Transform: 離散コサイン変換) は直交変換符号化の代表例であり、上記動き補償予測で得られた誤差信号において、空間的な冗長度を削減する目的で適用される。以上により実質的に符号化・伝送すべき対象は、動き情報、および誤差信号の DCT 係数となる。

MPEG-2 エンコーダに実装される符号化制御のレイヤ構造、ならびに各レイヤにおける最適化ポイントを図 2-3 にまとめる。また同図に関連し、各レイヤでの最適化ポイントを以下に導入する。

- ベースバンドレイヤ：符号化に先立って画像信号に適用される前処理を指す。例えば、低ビットレート時には予め高周波成分を除去するローパスフィルタを適用することで、符号化難易度を適切に調節可能となり、主観画質の改善に寄与する。
- ピクチャレイヤ：画面単位に適応選択が可能な符号化設定として、ピクチャタイプ、量子化マトリクス、符号量配分などに着目した性能改善の余地がある。
- マクロブロックレイヤ：マクロブロック(16 画素 × 16 ラインの矩形領域、画面内に規則的に配置)単位に適応選択が可能な符号化設定として、動きベクトル検出、符号化モード判定、符号量配分を高精度に行うことで、性能改善が見込まれる。
- ブロックレイヤ：DCT ブロック(8 × 8 の DCT 適用単位に相当する DCT 係数群)に閉じて、例えば再生画質への寄与度が低い係数をゼロ化する操作を適切に行うことで、符号化効率の改善効果が見込まれる。

本論文では、以上で挙げた最適化ポイントのうち、特に改善効果が高いと思われるものとして、ピクチャレイヤとマクロブロックレイヤでの検討を対象を限定し、集中的に方式改良を目指すこととした。

### 2.3.2 専用線サービス

#### 2.3.2.1 3D-HDTV 伝送

本伝送方法を構成する 3D-HDTV 用符号化装置の基本原理を以下に示す。ある時刻に左眼、右眼でとらえた映像は互いにかなり似通っていることから、左用に映像は単独で符号化

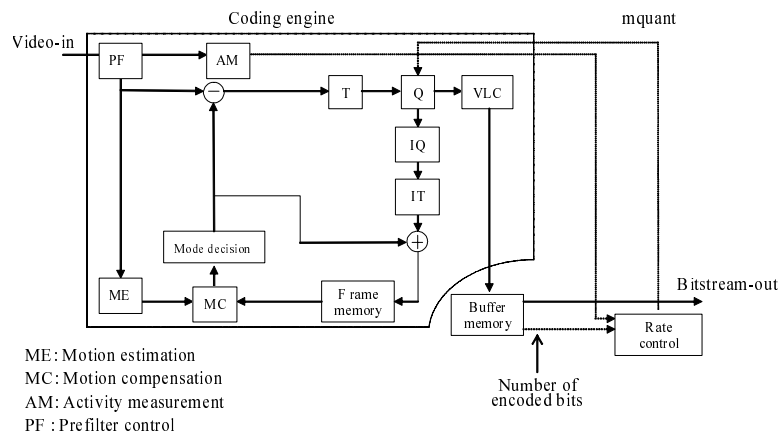


図 2-2: 動き補償と DCT によるハイブリッド符号化

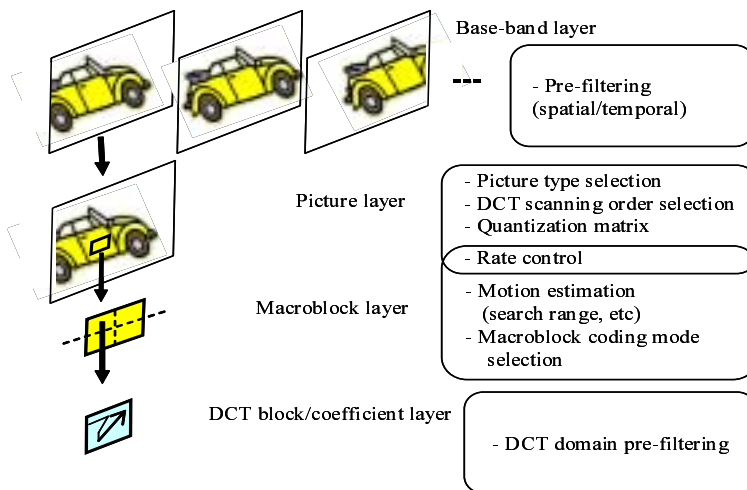


図 2-3: MPEG-2 符号化の最適化ポイント

するが、右用の映像は左用の映像と補助的な情報（視差の大きさなど）により表現される。ここで、受信側において左用の映像は復号化により得られることから、右用に対してはこの補助的な情報のみ送ることで、結果的に右用の映像は復号化可能となる。これにより右用の符号化情報は左用に比べて格段に少なくすることができる。以上の考えに基づく立体映像の圧縮符号化方式は視差補助符号化と呼ばれ、これに対応した符号化方式の国際標準として MPEG-2 Multi-View プロファイルがある。

立体映像の性能指標としては、左用映像、右用映像それぞれの画質はもちろんのこと、左右映像の画質のバランスが極めて重要である。一方の画質が他方に比べてはるかに劣るような場合には、立体映像として見た場合には、その損失は明らかに検知され、部分的に立体感が失われてしまうためである。視差補償符号化に基づく立体映像を固定ビットレートで符号化する場合、右用の符号化効率が左用の符号化効率よりもはるかに高いため、受信側で得られる左右の画質のバランスを維持するためには、左用映像のビットレートの配分を右用映像に比べて高く設定する必要がある。ただし、左用映像と右用映像の符号化効率の差は、時間的に、および画像の種類により大きく変動することが確認されており、この配分を固定的に定めたのでは再生画像のバランスを保つのは困難である。この点を考慮して、左右のビットレートでの符号化効率の大小に応じて適切に決定することにより、受信側で得られる左右の画質のバランスが保持されるものと期待される。

### 2.3.2.2 低遅延伝送

MPEG-2 コーデックによる従来の運用と比較し大幅に低遅延での動画像符号化を実現するためには、動き補償を適用せずに、フレームまたはフィールドといった画面内で処理が完結するイントラ符号化技術の採用が有効であると考えらる。イントラ符号化方式自体は、MPEG-2 においても I フレームの単独適用により実現可能であるが、符号化効率に関してより高性能な JPEG2000<sup>(7)</sup> の採用が有効であるといえる。JPEG2000 は静止画像符号化方式の国際標準であるが、同方式が有する高い符号化性能から、動画像符号化へ応用する動きが見られ、国際標準としては 2001 年に Motion JPEG2000 と呼ばれる動画像対応のファイルフォーマットが規格化完了し<sup>(8)</sup>、さらに米国のデジタルシネマ規格においては JPEG2000 が正式採用された<sup>(9)</sup>。ここで JPEG2000 は上述のとおり静止画用圧縮符号化方式の国際標準であり、動画像符号化に単純に応用した場合に、ビット配分の不安定性やインターレース信号の扱いにおける非効率性といった懸念点があることが知られている。これらの問題解決により符号化性能を改善し、かつ低遅延での符号化が実現できると期待される。

## 第3章

### 動き補償予測の性能比較

#### 3.1 まえがき

本章では，MC + DCTハイブリッド符号化の性能を大きく左右する動き補償予測に着目し，既に報告例のある代表的な方式について性能比較を行っている．動画像の動き補償に関して，実に様々な方式がこれまで提案されている．各種動き補償方式の提案において，性能に関する優劣は，一般に従来の代表的な方式であるブロックマッチングとの比較により，個々に議論されている．これらの議論は，符号化実験を行った結果にもとづいているが，実験において，符号化レート，フレーム周波数，画像サイズ，画像の内容に関していえば，提案方式が対象とする枠組の中で従来のブロックマッチングと比較し，その優劣を述べているものが多い．このため，提案方式を報告した文献中のブロックマッチングとの比較では，実験に使用した条件が提案方式に時として有利となるように働いた可能性がある．また，従来方式の性能改良を目的として提案された各方式について，性能に関する優劣を総合的に評価した例はないのが現状である．

そこで本章では，符号化方式にMPEG-2<sup>(1)</sup>，入力画像にITUテストシーケンスを使用し，共通のプラットフォームを構築することにより，放送品質に沿った公平性を保ちつつ，各種動き補償方式を客観的品質評価により比較検証したので報告する．ただし，本章でいう放送品質とは，解像度が現行の標準テレビジョン相当であり，原則的に再生画質がブロック歪みのような明らかにノイズとして検知される劣化が存在しないレベルのものを指す．標準テレビジョンサイズの画像に対して放送品質を満たすために必要となるビットレートは，事前の主観画質評価，および現行の衛星デジタル放送で採用されている伝送レートを考慮して3～16Mb/sとした．

本章では，2.2で，比較の対象とする代表的な動き補償方式を列挙し，各方式について処理の概要を述べる．2.3で，符号化シミュレーションの概要とその結果を示し，各方式の性能の優劣について考察を行う．2.4で，結論を述べる．

#### 3.2 比較する方式

動き補償に用いられる代表的な手法は，以下の4つの手法に大別される．



表 3-1: 各種動き補償方式の特徴

	方式 A	方式 B	方式 C	方式 D
BM 法の 適応選択	-	あり	なし	あり
動きモデル	平行移動	平行移動, 回転, 伸縮	平行移動, 回転, 伸縮	カメラ操作 (パン, ズーム)
動き パラメータ	2 個/MB,	2 個/MB 5 個/領域	2 個/格子点	2 個/MB 3 個/frame
予測単位	MB	MB, 領域	パッチ	MB, frame

- 方式 A(通常のブロックマッチング)
- 方式 B(アフィン変換を用いた動き補償)
- 方式 C(Warping 予測)
- 方式 D(グローバル動き補償)

表 3-1 に、各方式の特徴をまとめた。表においては、ブロックマッチングを BM 法と表記し、マクロブロックを MB と表記した。以下に、各方式の処理の概要を示す。

### 3.2.1 方式 A(通常のブロックマッチング)

通常のブロックマッチングにより動き補償を行う。

ブロックマッチングは、固定サイズブロック単位の動き検出方式であり、H.261 や MPEG においても採用されている。ブロックマッチングでは、動領域の動きとして平行移動のみを考慮しており、物体の伸縮、回転などの動きには対応できない。また、隣接ブロック間で動きが互いに異なる場合には、予測画像上に不連続なブロック歪みを生じるという欠点がある。

### 3.2.2 方式 B(アフィン変換を用いた動き補償)

基本的には、マクロブロック単位でブロックマッチングによる動き補償を行うが、ブロックマッチングによる予測誤差がある閾値より大きなマクロブロックについては領域分割し、領域ごとにアフィンパラメータの探索を行い、領域単位で動き補償を行う。例えば、文献<sup>(10)</sup>。

マクロブロックの領域分割は K 平均クラスタリングにより行う。また、アフィンパラメータ探索では、まず、平行移動パラメータを 1 画素単位で確定した(第 1 段の探索)後に、その近傍で全パラメータの探索を行う(第 2 段の探索)ことによりアフィンパラメータを決定する。

アフィン変換では、動領域の動きとして、平行移動、伸縮、回転を考慮しており、現フレーム内での画素位置  $(x, y)$  を入力とし、次に従い参照フレーム内での対応する画素位置  $(x', y')$  の計算を行う。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_x & 0 \\ 0 & C_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

上式において、 $t_x, t_y$  は平行移動ベクトル、 $C_x, C_y$  は伸縮のスケール、 $\theta$  は回転角を表す。領域単位のアフィン動き補償において、5つのアフィンパラメータの算出は、アフィンパラメータ空間において領域内画素の予測誤差を最小とするようなパラメータ値を探索することにより行われるため、ブロックマッチングに比べ、極めて膨大な演算量を要する。このため、領域単位のアフィン動き補償は、ブロックマッチングなどの比較的演算量の少ない方式が適さない領域に対してのみ、補足的に用いられるのが一般的である。

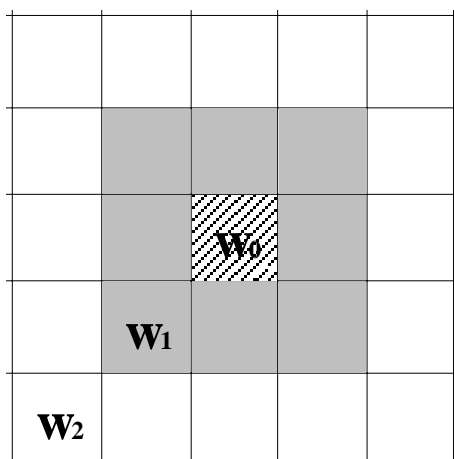
### 3.2.3 方式 C(Warping 予測)

予測の単位となるパッチの頂点を格子点とし、格子点の動ベクトルから、パッチ内画素の動ベクトルをベクトル内挿により算出する。ここで、格子点の動ベクトルは、格子点を中心としたブロックのマッチングにより算出する。例えば、文献<sup>(11)</sup>,<sup>(12)</sup>。ただし、通常のブロックマッチングでは、平行移動パラメータの探索基準として、ブロック内画素の誤差の絶対値和を用いるが、ここでは格子点を中心とする矩形ブロック内の画素ごとの誤差に対し、格子点となる画素からの距離に応じた重みを掛けた値の絶対値和を用いる。図3-1に、矩形ブロック内の画素位置と重みの関係を示す。図において、サイズが最小の正方形はブロック内の画素を表し、中心に位置する正方形は格子点画素を表す。パッチサイズは固定サイズとし、パッチの形状は三角形(方式 C-1)または四角形(方式 C-2)とする。

Warping 予測では、ベクトル内挿により、動領域の動きとして、平行移動に加え、伸縮、回転にも対応することが可能である。また、隣り合うパッチは格子点を共有しているため、ブロックマッチングの結果予測画像上に見られたようなブロック歪みはなく、パッチの境界における連続性は保たれる。しかし、互いに異なる動きをもつ動物体の境界にまたがるパッチに Warping 予測を施した場合、境界付近に歪みが発生する場合があります。このようなパッチには Warping 予測は適さないといえる。

### 3.2.4 方式 D(グローバル動き補償)

ブロックマッチングにより算出した各ブロックの動ベクトルから、カメラの水平/垂直方向のパン、ズームにより決まるグローバル動きパラメータを算出し、このパラメータを用いて各マクロブロックの動ベクトルを決定する。全マクロブロックに対し、ブロックマッチングによる動き補償、およびグローバル動き補償をそれぞれ行い、マクロブロックごとにいずれかの方式を予測誤差の大小に従い選択する。例えば、文献<sup>(13)</sup>。



/// : grid pel ,  $w_0 \geq w_1 \geq w_2$

図 3-1: 画素位置に対する重み

グローバル動き補償では，グローバル動きパラメータ (水平方向のパンにより決まる  $H$ ，垂直方向のパンにより決まる  $V$ ，ズームにより決まる  $Z$ ) により，現フレーム内での画面の中心を原点とする画素位置が  $(x, y)$  であるとき，次式に従い参照フレーム内への動きベクトル  $(v_x, v_y)$  の計算を行う．

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z & 0 \\ 0 & Z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} H \\ V \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

グローバル動き補償は，フレーム間のカメラ操作による動きを補償するものであるため，ブロックマッチングとの適応選択により，ブロックマッチングが適さない領域に対してのみ，補足的に用いるのが一般的である．

### 3.3 符号化シミュレーション

#### 3.3.1 シミュレーション条件

2章で挙げた各方式の性能を比較する目的で，各方式を MPEG-2 の動き補償部分に組み込み，量子化ステップサイズ  $Q$  を一定 ( $Q = 10, 16, 40$  の3通り) とし，表 3-2 に示すテストシーケンスを用いて，符号化シミュレーションを行った．表 3-2 に示すテストシーケンスは，放送品質の評価画像として妥当であること，画像がこの分野の研究者にとってごく一般的であることという観点から選択して使用したものである．画像フォーマットとしては，標準テレビジョンを想定して  $720 \times 486$  を使用した．また，本研究で対象とする放送品質に沿うも

表 3-2: シミュレーションで用いるテストシーケンス

画像フォーマット	720×486, 4:2:2 176×144, 4:2:0
シーケンス	"Flower Garden" "Mobile and Calendar" "Football" "Cheer Leader"

のではないが、低解像度下での特性についても検証を行う目的で 176 × 144 の画像フォーマットに関しても実験を行った。各シーケンスの性質を以下に簡単に示す。

- "Flower Garden"  
比較的高速な水平方向のパニングを伴う。ローカルな動きを伴う物体なし。
- "Mobile and Calendar"  
緩やかなパニングを伴う。画面内のごく一部分にローカルな動きを伴う動物体が存在。
- "Football"  
緩やかなパニングを伴う。ローカルな動きを伴う動物体が画面の大半を占める。
- "Cheer Leader"  
カメラ操作なし。ローカルな動きを伴う動物体が画面の大半を占める。

符号化において、GOP 構造は  $N = 15$ ,  $M = 3$  とし、動き補償部において、動きパラメータの決定は輝度信号の予測誤差をその判断基準として行うものとした。P ピクチャ、B ピクチャにおけるマクロブロックごとの Intra/Inter の判定においては、各動き補償方式による予測誤差の二乗和がマクロブロック内画素の分散値よりも大きく、かつ既定値 (各方式に共通) よりも大きい場合に限り Intra マクロブロックとした。

次に、各方式の具体的なシミュレーション条件を示す。

#### 方式 A

ブロックマッチングによる動き検出において、平行移動の範囲は  $\pm 11.5$  画素とし、ステップは半画素とした。図 3-2 に方式 A における動ベクトル探索範囲を示す。まずこの範囲で 1 画素精度の候補動ベクトルを決定し、候補動ベクトルの周辺  $\pm 0.5$  画素での探索により、半画素精度の動ベクトルを決定する階層探索を行う。方式 B, 方式 D において、方式 A を選択した場合にも、この条件の下で動き検出が行われるものとする。

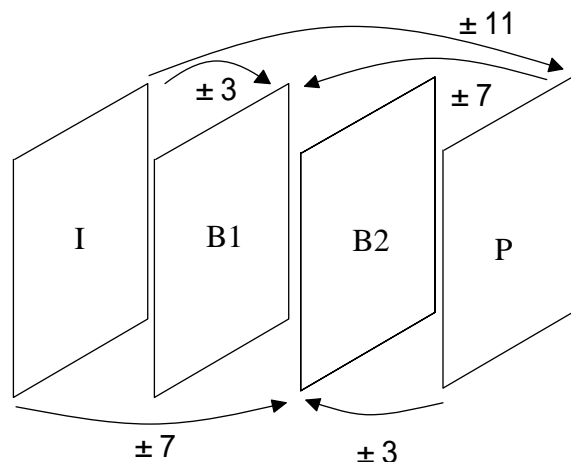


図 3-2: フレーム間隔ごとの探索範囲

表 3-3:  $E_{th}$  と  $S_{min}$  の値

画像フォーマット	$E_{th}$	$S_{min}$ 画素
720×486, 4:2:2	24	16
176×144, 4:2:0	6	4

## 方式 B

方式 B では、ブロックマッチングと領域単位アフィン動き補償の適応選択を行うが、ブロックマッチングによる輝度値の平均予測誤差が閾値  $E_{th}$  より大となるマクロブロックに対してのみ、領域分割を行い、領域単位アフィン動き補償を適用することとした。領域分割処理においては、領域の最小面積を  $S_{min}$  画素とし、それより小さな領域は隣接領域に統合する。 $E_{th}$ 、 $S_{min}$  としては、画像フォーマットごとに表 3-3 に示す値を用いることとした。

方式 B では、動き補償方式の適応選択を行うため、マクロブロックごとに、領域分割の ON/OFF 識別に用いる 1bit の付加情報を符号化し、ON となるマクロブロックに対しては、領域ごとに領域形状とアフィンパラメータを符号化する。ここで、領域形状により発生する符号量は、チェーン符号により符号化したものとして計算する。また、アフィンパラメータのうち、平行移動パラメータ  $(t_x, t_y)$  については、DPCM により符号化するものとし、また、伸縮、回転のパラメータ  $(C_x, C_y, \theta)$  については、可変長符号を割り当てた場合を想定し、エントロピー計算により符号量を見積もった。

方式 B では、分割された各領域に対して、アフィンパラメータの探索を 2 段階で行うが、各段のアフィンパラメータ探索における探索範囲およびステップは表 3-4 に従うものとした。

表 3-4: アフィンパラメータ探索の条件

	平行移動 ( $t_x, t_y$ )	回転 ( $\theta$ )	伸縮 ( $C_x, C_y$ )
第1段	範囲: $\pm 11$ 画素 ステップ: 1	-	-
第2段	範囲: $\pm 1$ 画素 ステップ: 0.5	範囲: $0 \sim \frac{7}{4}\pi$ ステップ: $\frac{\pi}{4}$	範囲: 0.5 ~ 1.2 ステップ: 0.1

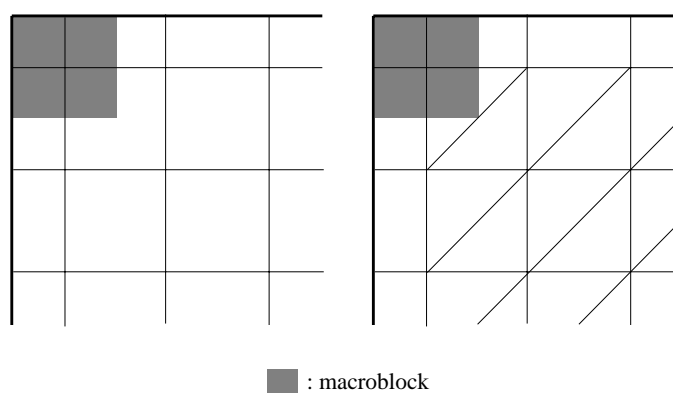


図 3-3: パッチの配置

## 方式 C

Warping 予測で使用するパッチの形状が三角形の場合と四角形の場合について、それぞれシミュレーションを行う。図 3-3 に、フレーム内のパッチの配置を示す。四角形パッチのサイズは  $16 \times 16$  画素とし、この四角形パッチを対角線で 2 分割することにより、2 つの三角形パッチとした。

パッチ内画素の動ベクトルの算出は、パッチが三角形の場合はアフィン変換により行い、パッチが正方形の場合は共 1 次内挿により行った。

## 方式 D

マクロブロックごとに、グローバル動き補償の ON/OFF 識別のために、1bit の付加情報を符号化する。また、フレームごとに算出されるグローバル動きパラメータについては、可変長符号を割り当てた場合を想定し、エントロピー計算により符号量を見積もった。

方式 D では、フレームごとにグローバル動きパラメータの算出を行うが、グローバル動きパラメータは、表 3-5 に示す範囲とステップに従う値をとるものとした。

表 3-5: グローバル動きパラメータ

	パン (H, V)	ズーム (Z)
範囲	± 11.5 画素	-127/1024 ~ 127/1024
ステップ	1/4	1/1024

表 3-6: 各方式による発生符号量 (720×486)

Q	方式	符号量 ×10 <sup>6</sup> bit			
		FLOWER	MOBILE	FOOT	CHEER
10	A	19.36	14.06	16.06	15.58
	B	19.74	14.18	16.49	16.35
	C-1	19.40	14.43	16.63	16.25
	C-2	19.34	14.35	16.56	16.11
	D	19.44	14.35	16.09	15.52
16	A	12.04	8.11	10.32	9.61
	B	12.44	8.26	10.78	10.40
	C-1	12.20	8.38	10.81	10.07
	C-2	12.17	8.32	10.78	10.01
	D	12.07	8.26	10.35	9.58
40	A	4.33	2.66	4.37	3.68
	B	4.79	2.82	4.77	4.34
	C-1	4.56	2.77	4.77	3.93
	C-2	4.55	2.74	4.75	3.91
	D	4.33	2.67	4.40	3.69

### 3.3.2 シミュレーション結果

3.3.1 節で示した条件の下で符号化シミュレーションを行い、動き補償の行われる P, B ピクチャとして符号化された 30 フレーム分について、各種符号化制御情報を含めた発生符号量、予測画像の平均二乗誤差、復号画像の SN 比を測定した。

表 3-6, 表 3-7 に、各動き補償方式を組み込んだ MPEG-2 によりテストシーケンスを符号化した際の発生符号量を示す。表中の発生符号量は、各種符号化情報も含めて計算した値である。

表 3-8, 表 3-9 に、予測画像における 1 画素あたりの平均二乗誤差を示す。

表 3-10, 表 3-11 に、復号画像における SN 比を示す。本研究の符号化シミュレーションは、ある量子化ステップサイズの下で等間隔量子化を行うものであり、復号画像の量子化誤差は基本的に動き補償の方式によらず一定となる。このことから、表 3-6, 表 3-7 において

表 3-7: 各方式による発生符号量 (176×144)

Q	方式	符号量 ×10 <sup>3</sup> bit			
		FLOWER	MOBILE	FOOT	CHEER
10	A	1120	1134	1430	1729
	B	1158	1192	1480	1821
	C-1	1186	1103	1516	1861
	C-2	1151	1094	1495	1843
	D	1102	1061	1434	1730
16	A	693	658	885	1102
	B	744	748	957	1208
	C-1	713	641	933	1180
	C-2	735	644	948	1196
	D	683	618	888	1104
40	A	245	195	313	390
	B	317	323	428	522
	C-1	257	192	345	426
	C-2	248	190	338	420
	D	243	187	315	390

ある量子化ステップサイズについて各方式により発生する符号量は、ともに同レベルの復号画像品質を実現するのに必要とされる値であるといえる。

方式 B, 方式 D に関しては、マクロブロック単位で動き補償の方法を切り替えている。ここで、方式 B に関して、表 3-12, 表 3-13 に、フレーム内の全マクロブロックのうち、領域単位アフィン動き補償が選択されたマクロブロックの割合を示す。また、方式 D に関して、表 3-14, 表 3-15 に、フレーム内の全マクロブロックのうち、グローバル動き補償が選択されたマクロブロックの割合を示す。

### 3.3.3 考察

まず、表 3-6, 表 3-7 の結果から、発生符号量に関して考察する。ある量子化ステップに着目し、発生符号量を比較すると、一般に方式 A と方式 D による符号量は、方式 B と方式 C による符号量に比べて少ないことがわかる。方式 B では、マクロブロックに対して、領域単位アフィン動き補償が適用されると、領域の数だけ、領域形状とアフィンパラメータを付加情報として符号化する必要があるため、表 3-12, 表 3-13 に示した割合が大きいほど、方式 A に比べて符号量が増大している。方式 C の Warping 予測では、P ピクチャ、B ピクチャにおけるイントラ符号化マクロブロックに対しても、格子点の動ベクトルを符号化する必要があるため、他方式に比べて符号量が多くなったものと考えられる。方式 D では、マ



表 3-8: 各方式による平均二乗誤差 (720×486)

Q	方式	平均二乗誤差			
		FLOWER	MOBILE	FOOT	CHEER
10	A	431.5	146.2	646.0	547.5
	B	419.1	144.0	631.9	532.1
	C-1	579.1	196.6	828.5	663.6
	C-2	574.7	196.5	820.1	660.5
	D	427.3	140.8	642.8	546.9
16	A	440.2	163.9	649.3	550.8
	B	427.6	161.9	635.3	535.0
	C-1	585.8	217.5	828.0	665.6
	C-2	584.6	216.6	822.7	664.4
	D	436.2	158.3	646.2	549.9
40	A	488.5	261.1	677.0	579.6
	B	476.0	258.5	661.4	564.3
	C-1	633.1	319.8	830.6	688.8
	C-2	625.7	320.0	824.5	685.3
	D	481.3	255.3	673.8	578.4

クロブロックに対して、グローバル動き補償が適用されると、当該マクロブロックの動ベクトルは符号化されないため、表 3-14、表 3-15 に示した割合が大きいほど、方式 A に比べて符号量が低減している。

次に、表 3-8、表 3-9 の平均二乗誤差の結果から、予測性能に関して考察する。方式 B と方式 D は、ブロックマッチングを適応選択する方式であるため、通常のブロックマッチングである方式 A よりも低い予測誤差が保たれている。方式 B と方式 D の間で予測性能を比較すると、一般に方式 B の方が予測誤差は低いが、テストシーケンス “Mobile and Calendar” に対しては、ほぼ同等の予測誤差である。これは、表 3-14、表 3-15 の結果から、テストシーケンス “Mobile and Calendar” のような、方式 D においてグローバル動き補償が高い確率で選択されるシーケンスには、グローバル動き補償が対応可能なカメラの動きを多く含んでいるために、高い予測結果を示したものと考えられる。また、方式 C は、ブロックマッチングに基づく方式 A に比べて、予測誤差で大きく上回っている。Warping 予測においては、格子点の動き検出の精度が予測性能に大きく影響することから、格子点の動き検出方法として、方式 C のように単純に格子点を中心とするブロックのマッチングを用いるだけでは不十分であると考えられる。この点を改良する目的で、すでにパッチを可変形状とする方式<sup>(14)</sup>、マクロブロックごとにブロックマッチングと Warping 予測を適応選択する方式<sup>(15)</sup>などが提案されており、今後はこのような拡張方式も踏まえた検証を行う予定である。

以上で述べたように、今回の実験結果からは、BM 法の改良手法として比較した方式 B が

表 3-9: 各方式による平均二乗誤差 (176×144)

Q	方式	平均二乗誤差			
		FLOWER	MOBILE	FOOT	CHEER
10	A	200.0	122.3	447.9	553.9
	B	192.0	111.6	412.9	508.8
	C-1	258.5	118.5	594.5	681.1
	C-2	250.2	117.3	572.2	675.6
	D	194.2	106.3	446.4	553.9
16	A	217.4	139.5	449.7	562.5
	B	205.5	129.5	416.3	519.3
	C-1	271.1	136.3	596.5	689.5
	C-2	263.2	135.3	570.8	682.2
	D	211.7	124.4	448.1	562.5
40	A	302.6	247.9	479.6	629.0
	B	292.8	237.2	442.5	581.5
	C-1	352.2	248.3	611.8	748.6
	C-2	346.0	247.0	584.5	738.8
	D	296.7	235.6	476.6	626.6

ら方式 D の 3 方式は、発生符号量、予測性能に関していずれも BM 法をはるかにしのいでいるとはいえない。ここで、発生符号量を動き情報とフレーム間差分信号に分けて測定した結果をもとに、その要因について考察する。まず、表 3-16 に、 $720 \times 486$  テストシーケンスに対し量子化ステップサイズが 16 の場合について、各方式による発生符号量のうち、動き情報とフレーム間差分信号の配分を示す。

- 方式 B

実験で使用した一般的な実画像 ( $720 \times 486$ ) に対しては、領域単位アフィン動き補償を選択することにより、BM 法と比較して動き情報について 20~40% のロスがあるが、差分信号についてのゲインは 1% にも達していない。このため、全体の符号量としては BM 法をはるかに下回るものとはなっていない。

- 方式 C

実験で使用した一般的な実画像 ( $720 \times 486$ ) に対しては、Warping 予測により、BM 法と比較して動き情報についてゲインが見られるが、これは予測誤差がある閾値より大きなマクロブロックにイントラ符号化を適用したためである。また、差分信号については、格子点動ベクトルの算出精度に起因する予測性能の低下により 2~3% のロスがある。このため、全体の符号量としてはほとんどのシーケンスに対して BM 法より多

表 3-10: 各方式による復号画像のSN比 (720×486)

Q	方式	SN比			
		FLOWER	MOBILE	FOOT	CHEER
10	A	37.21	36.16	37.90	37.54
	B	37.20	36.16	37.89	37.53
	C-1	37.11	36.16	37.77	37.42
	C-2	37.13	36.16	37.78	37.44
	D	37.21	36.20	37.90	37.55
16	A	33.79	32.73	35.00	34.49
	B	33.77	32.73	34.97	34.47
	C-1	33.69	32.71	34.85	34.35
	C-2	33.71	32.71	34.88	34.38
	D	33.79	32.78	35.00	34.51
40	A	27.71	26.80	29.82	29.13
	B	27.68	26.80	29.79	29.09
	C-1	27.64	26.71	29.72	28.99
	C-2	27.66	26.74	29.74	29.02
	D	27.70	26.83	29.81	29.14

い値となった。

- 方式D

実験で使用した一般的な実画像 (720 × 486) に対しては、BM法と比較してグローバル動き補償の選択割合が高いほど動き情報についてゲインが見られるが、差分信号についてはBM法と同程度である。期待された予測性能が十分に発揮されなかった大きな要因として、グローバル動き補償が得意とするようなまとまったズームシーンがシーケンス中に存在しなかった点が挙げられる。

### 3.4 むすび

動画像の代表的な動き補償方式を分類した上で、各方式を互いに公平な条件の下で符号化シミュレーションを行い、性能に関して比較検討した。

その結果、まず、発生符号量に関しては、マクロブロックごとにブロックマッチングとグローバル動き補償を適応選択する方式、および従来のブロックマッチングが同程度の性能を示し、他方式よりも優れていることがわかった。また、予測性能に関しては、マクロブロックごとにブロックマッチングと領域単位アフィン動き補償を適応選択する方式が最も優れていることがわかった。結果として、従来のブロックマッチングと比較すると、発生符号量と

表 3-11: 各方式による復号画像のSN比 (176×144)

Q	方式	SN比			
		FLOWER	MOBILE	FOOT	CHEER
10	A	36.07	35.45	36.43	35.80
	B	36.09	35.45	36.38	35.77
	C-1	36.01	35.44	36.23	35.73
	C-2	35.98	35.44	36.25	35.71
	D	36.09	35.44	36.43	35.80
16	A	32.37	31.74	32.92	32.00
	B	32.36	31.73	32.87	31.95
	C-1	32.30	31.70	32.75	31.93
	C-2	32.29	31.71	32.80	31.92
	D	32.38	31.76	32.92	32.00
40	A	26.13	25.65	27.22	25.67
	B	26.14	25.67	27.22	25.62
	C-1	26.07	25.58	27.11	25.56
	C-2	26.10	25.58	27.14	25.59
	D	26.15	25.68	27.23	25.69

予測誤差のいずれに関しても、本章で対象とした提案方式による著しい向上は見られていないといえる。今回の検証で用いたテスト画像はSDTVとQCIFに限定しているが、比較対象とした要素技術はいずれも画像サイズに依らないアプローチであることから、ここで得られた結果は、本論文で扱うHDTVにおいても同様にあてはまるといえる。

低ビットレート符号化用に提案された動き補償方式をMPEG-2のような比較的高いビットレート用の符号化方式と比較検証することは必ずしも正当ではないが、ひとつの結論として、これまで性能改良で提案されてきた動き補償方式は、MPEG-2上ではいずれも従来のブロックマッチングを性能上はるかにしのぐものではないことを明らかにした。<sup>(16)</sup>

表 3-12: 領域単位アフィン動き補償が選択された割合 (720×486)

Q	マクロブロックの割合 %			
	FLOWER	MOBILE	FOOT	CHEER
10	3.17	0.43	3.64	3.26
16	3.23	0.44	3.72	3.32
40	3.38	0.51	3.83	3.45

表 3-13: 領域単位アフィン動き補償が選択された割合 (176×144)

Q	マクロブロックの割合 %			
	FLOWER	MOBILE	FOOT	CHEER
10	11.4	13.2	29.6	23.4
16	13.5	19.4	30.6	24.6
40	19.0	26.5	35.4	28.2

表 3-14: グローバル動き補償が選択された割合 (720×486)

Q	マクロブロックの割合 %			
	FLOWER	MOBILE	FOOT	CHEER
10	6.4	23.6	3.0	10.0
16	6.4	24.9	2.9	10.1
40	6.7	23.8	1.2	5.4

表 3-15: グローバル動き補償が選択された割合 (176×144)

Q	マクロブロックの割合 %			
	FLOWER	MOBILE	FOOT	CHEER
10	13.5	25.3	2.5	0.0
16	11.9	24.1	2.8	0.6
40	11.6	19.2	3.3	6.3

表 3-16: 各方式による発生符号量の配分 (720×486).

方式	符号量 $\times 10^3$ bit							
	FLOWER		MOBILE		FOOT		CHEER	
	動き	差分	動き	差分	動き	差分	動き	差分
A	340	10895	246	7104	427	9037	355	8441
B	438	10866	303	7101	539	9023	499	8470
C-1	289	11105	171	7454	417	9543	326	8933
C-2	289	11070	171	7397	419	9508	325	8871
D	352	10913	232	7244	454	9040	368	8407

## 第4章

# 視差補償の高度利用による3D-HDTV符号化方式

### 4.1 まえがき

本章では、HDTVの応用による高臨場感の映像メディアとして、素材が左目用と右目用のHDTV映像により構成される3D-HDTVを対象に、MPEG-2 Multi View Profileの枠組の中で、視差補償予測を活用した符号化性能の改善手法について検討をしている。HDTVに続く高精細映像アプリケーションとして3D-HDTVが注目されている。3D-HDTVは左右の視点からとらえた映像に対応する2本のHDTV信号から成り、自然視している際と同様に左右映像を個別に左目、右目により視することで、立体感ならびに奥行感が再現される。以下では3D-HDTVのようなステレオシーケンスを構成する2本の映像のうち、左目、右目の視点に対応する映像をそれぞれ総称し、L(Left)チャンネル、R(Right)チャンネルとする。

3D-HDTVを初めとするステレオ動画の符号化においては、従来の動き補償+DCTによる時間方向および空間方向の冗長さの圧縮に加え、左右画像間の高い相関を利用した視差冗長さの圧縮が実現される。この考えに基づくステレオ動画符号化の国際標準としてISO/IECによりMPEG-2マルチビュープロファイルが規定されており、Lチャンネルには動き補償に基づくチャンネル内に閉じた符号化を施し、Rチャンネルには動き補償に加えて視差補償の適用も可能としている<sup>(17)</sup>。本プロファイルに基づくステレオ動画符号化におけるピクチャの参照関係を図4-1に示す。図中、矢印は各ピクチャが予測に使用される方向を示す。本プロファイルは基本的に時間方向のスケラビリティをステレオ符号化用に拡張したものであり、Rチャンネルに拡張レイヤを割り当てることで、再生時刻が同一となるLチャンネルピクチャの復号画像を参照する視差補償予測と動き補償予測の併用を可能とする。

ここでMPEG-2マルチビュープロファイルに基づくステレオ動画符号化方式は、各チャンネルに別々の予測符号化を適用することでトータルの符号化効率の向上を目指すものである。これに対し、マルチビュープロファイルに基づくステレオ動画符号化の実験ならびに研究においては従来より、レート制御は符号化に先立ち各チャンネルの符号化レートを固定的に与え、それぞれ独立して行うのが一般的であった<sup>(18),(19)</sup>。しかし、チャンネルごとの符号化効率の違いの大小は入力シーケンスに依存するため、予め決められたビット配分の下で、マルチビュープロファイルに基づくステレオ動画符号化を適用する場合、各チャンネル

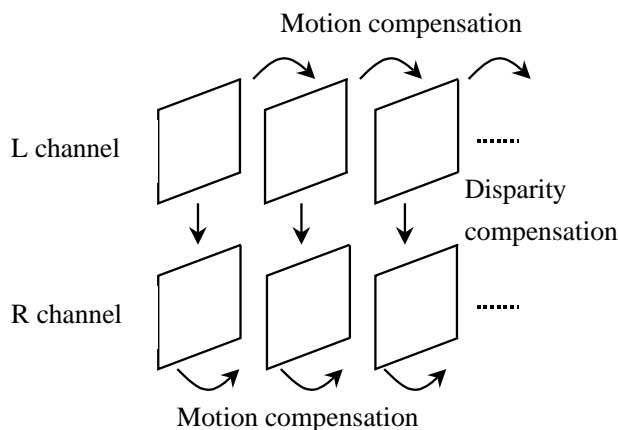


図 4-1: ステレオ動画像符号化

ルへのビット配分は必ずしも適切ではなく，チャンネル間の画質差が顕著となる可能性が大いにあると考えられる．なるべく自然の立体視に近い形での動画像の知覚を可能にするという，ステレオ動画像本来の意義からして，各チャンネルの再生画質が高く保たれることはもとより，入力シーケンスの特性に依らずチャンネル間の再生画質差が低く抑えられることはステレオ動画像符号化方式への要求事項として必須であるといえる．

本章では3D-HDTVを対象とし，MPEG-2マルチビュープロファイルの枠組の中でチャンネル間の画質差の低減，ならびに視差補償に基づく各種要素技術の高度化に主眼を置き，3D-HDTV動画像符号化方式の検討を行った．以下では，3.2でチャンネル間画質差を低く抑える上で必要となる共通型バッファ制御を導入した上で，3.3でMPEG-2マルチビュープロファイルに基づく符号化の性能に直接係わる部分としてGOP構造に着目し，検討対象とするGOP設定を列挙する．3.4では視差補償導入による効果を最大限引き出す目的で，視差補償に基づいた動き検出およびレート制御の高度化を提案する．最後に3.5では，詳細な実験結果に基づいた方式検討ならびに性能評価を行い，考察を加える．

## 4.2 共通型バッファ制御の導入

TM5にみられるような代表的な非ステレオ符号化器において，レート制御，つまり発生符号量の制御は仮想バッファの占有量をもとに量子化パラメータ(mquant)を決定することで行われる<sup>(20)</sup>．仮想バッファは量子化パラメータ算出のため便宜上設けられた仮想的なバッファであり，符号化に伴い発生したビットの入力を受け，ターゲットビットレートに従う固定レートでのビット出力を行う構成をとり，本バッファの占有量は符号化難易度の指標とされる．仮想バッファ占有量はマクロブロックの符号化を開始する都度，次式により更新される．

$$d_j = d_0 + S_j - T \frac{j}{MB_{cnt}} \quad (4.1)$$

$MB_{cnt}$  : ピクチャ内マクロブロック数

$j$  : 左上端からのピクチャ内マクロブロック位置 ( $j = 0, \dots, MB_{cnt} - 1$ )

$d_j$  : 位置  $j$  のマクロブロック符号化開始時における仮想バッファ占有量

$d_0$  : 当該ピクチャ符号化開始時における仮想バッファ占有量

$T$  : ピクチャに割り当てられたターゲットビット数

$S_j$  : 現時点までに当該ピクチャの符号化に費したビット数

本節ではステレオ符号化のレート制御に必須となる項目として以下の2点を挙げ、これらを満たすべく上述の非ステレオ符号化用レート制御方式に改良を加えた共通型バッファ制御を導入する。

1. 各チャンネルの符号化難易度に応じたビット数の配分
2. 左右チャンネルの再生画質に関するバランスの保持

以下に共通型バッファ制御の説明を行う。本方式では再生時刻の近いLチャンネルピクチャ、Rチャンネルピクチャが同時刻に符号化されることを前提とする。本方式では図4-2に示すようにLチャンネル、Rチャンネルに対し仮想バッファを共通に設け、各チャンネルで参照する仮想バッファ占有量を共通とし、割り当てられる量子化精度を合わせることにしている。仮想バッファに対する出力レートの規定は、GOP単位で両チャンネルに対して共通のターゲットビットレート(2チャンネル相当)を割り当て、ピクチャの符号化開始時には、GOP内残ビット数の更新を行い、残ピクチャ対の数により除算することで当該ピクチャへの割当ビット数(2チャンネル相当) $T^{L+R}$ を決定することで行う。このような共通型の仮想バッファを用いることにより、双方のチャンネルの符号化難易度に応じたビット配分を実現し、結果としてチャンネル間の統計多重効果が得られるものと考えられる。

本方式において、各チャンネルの量子化パラメータ算出に使用する仮想バッファ占有量( $d_j^L, d_j^R$ )はマクロブロックの符号化を開始する都度、次式により更新される。式のとおり、同時刻に符号化される各チャンネルのマクロブロックには、同一の仮想バッファ占有量をもとに量子化パラメータが算出される。

$$d_j^L = d_j^R = \frac{1}{2} \left( d_0^{L+R} + S_j^L + S_j^R - T^{L+R} \frac{j}{MB_{cnt}} \right) \quad (4.2)$$

先に筆者らは3D-HDTVの符号化実験結果を踏まえ、3D-HDTV符号化に対する上述の共通型仮想バッファ制御の導入は、入力画像やトータルの符号化レートに依存せず、チャンネル間の画質差を低く保つために必須であることを示している<sup>(21)</sup>。冒頭で述べたとおり、本章は3D-HDTV符号化の性能指標としてチャンネル間画質差の低減を重要視しているため、以下で扱う方式検討や性能評価のための各種実験において、レート制御は共通型バッファ制御に基づくこととする。

### 4.3 GOP構造の検討

本節では、MPEG-2に基づく符号化の効率を大きく左右する要因としてGOP構造に着目し、3D-HDTV動画の符号化において有効に働くGOPの設定に関して検討する。まず



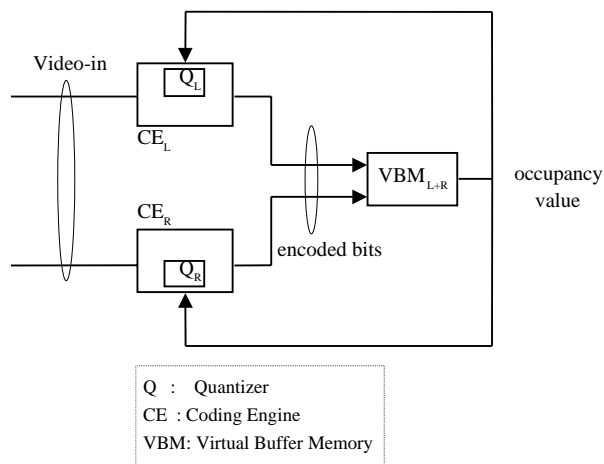


図 4-2: 共通型バッファ制御

マルチビュープロファイルに準じた符号化を対象とし、R チャンネルでは視差補償による予測効果を最大限得る目的からすべてのピクチャで視差補償予測を適用することを前提として選定した GOP 構造を Type1 から Type3 として図 4-3 に示し、各 GOP 構造の特徴を表 4-1 にまとめる。ただし、これらマルチビュープロファイル対応の GOP 構造とは別に、双方のチャンネルが MP@HL により別個に符号化されるサイマルキャスト構成について、各チャンネルに一般的な  $N=15, M=3$  の GOP 構造を割り当てる場合を検討対象に加え、これを Type4 とした。

図において矢印は各ピクチャが R チャンネル符号化の予測に使用される方向を示し、番号は各ピクチャが符号化される時刻を指す。Type1 から Type3 では R チャンネルのすべてのピクチャで視差補償予測を適用し、GOP の先頭に位置する P ピクチャ以外では動き補償予測を併用し B ピクチャを割り当てる。また、いずれの R チャンネル符号化もマルチビュープロファイルの規定に準ずるよう、視差補償予測に際しては再生時刻が同一の L チャンネルピクチャを参照し、動き補償予測はデコーダにて当該ピクチャの直前にデコードされるピクチャを参照して行う。Type1 と Type2 に関しては、再生時刻が同一のステレオピクチャ対は同時刻に符号化されるという前提のもとで、L チャンネルの GOP 構造について差別化しており、Type1 では  $N=15, M=1$ 、Type2 では  $N=15, M=3$  とした。また Type3 におけるピクチャタイプの割当は Type2 と全く同様であるが、R チャンネルにおける動き補償予測フレーム間隔を 1 フレームに限定している点で Type2 とは異なり、これを可能とするため R チャンネルの GOP 符号化を L チャンネルに対して 1 ピクチャ分遅らせる構成とした。このため再生時刻が同一のピクチャ対の同時符号化は保証されず、最悪時には再生時刻が互いに 3frame 離れたピクチャが同時に符号化される。以上で挙げた 4 種類の GOP 構造を対象とし、5 節にて符号化実験結果に基づく比較検討を行う。

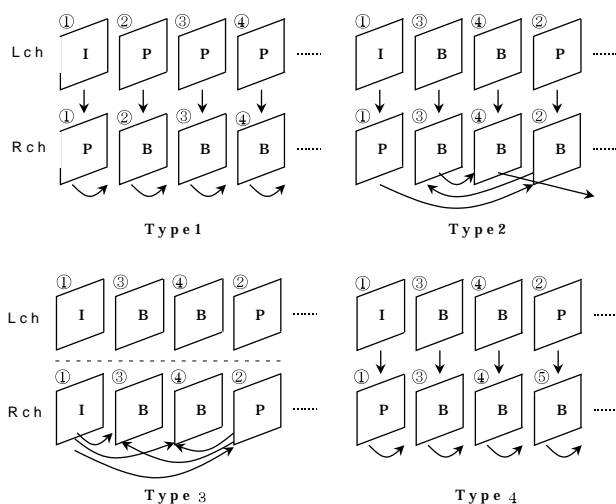


図 4-3: マルチビュープロファイル対応の GOP 構造

表 4-1: GOP 構造の特徴

Type	GOP 構造 (Lch)	再生時刻と 符号化時刻の対応	MC 予測間隔の 最大値 (Rch)
1	N=15, M=1		1frame
2	N=15, M=3		4frame
3	N=15, M=3	×	1frame

#### 4.4 符号化要素技術の高度化手法

##### 4.4.1 改良型動き検出

MPEG-2 マルチビュープロファイルに基づく符号化方式では、Rチャンネルに動き補償と視差補償を併用し高い予測効率を実現している一方で、Lチャンネルのピクチャは、L,R双方のピクチャにより参照されている。このため、Lチャンネルの動きベクトル検出は、高速な動きにも対応可能な十分な検出範囲を設け、高精度に行うのが妥当である。本節では、Rチャンネルにおいても、高速な動きを伴うシーケンスに対応し、かつ高精度な動き検出を実現する目的から、改良型動き検出を提案する。本章で提案するRチャンネル動き検出符号化法を図4-4に示す。

まず、本方式の前提条件として以下の2点がある。再生時刻が $t$ のRチャンネルピクチャ $B(t)$ 内のマクロブロックの符号化においては、動きベクトル検出に先立ち、視差ベクトルの検出を行うこととする。Rチャンネルピクチャの符号化時には、当該ピクチャ $B(t)$ ならびに再生時刻が同一のLチャンネルピクチャ $P(t)$ に対して、既に検出された動きベクトルがテーブルに保存されており、これを参照可能であるとする。

視差ベクトルは、 $B(t)$ 内符号化対象マクロブロック(以降、当該マクロブロックと呼ぶ)に

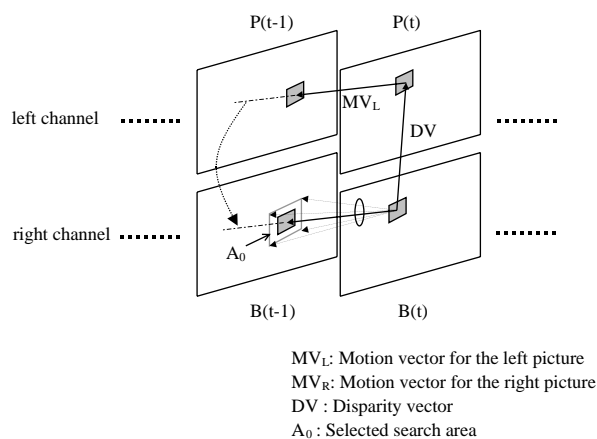


図 4-4: R チャンネル動き検出符号化法

対し、再生時刻が同一の  $P(t)$  上対応セグメント (16 画素  $\times$  16 ライン) を指している。画面内に存在する各オブジェクトについて、視差の時間的な変動はごくわずかであることから、対応セグメントの近傍マクロブロックに対して検出された動きベクトル  $MV_L$  をもとに、当該マクロブロックの動きベクトル  $MV_R$  を決定する。具体的には、 $MV_L$  を当該マクロブロックにスライドさせた際に  $MV_L$  が  $B(t-1)$  上で指す点を起点とし、その近傍領域  $A_0$  を対象とするサーチにより  $MV_R$  を決定する。ただし対応セグメントの近傍マクロブロックとは、視差ベクトルが L チャンネル上に指す対応セグメント (必ずしもマクロブロックに重ならない) に最も近いマクロブロックを指す。

サーチ領域  $A_0$  の信頼性が低いと考えられる場合には、 $A_0$  を対象とするサーチを行うと誤検出の可能性が高くなる。このため、当該マクロブロックの近傍に位置するマクロブロックに対して既に検出された動きベクトルを同様にスライドさせ、これが  $B(t-1)$  上で指す点を起点とする近傍領域  $A_1$  もサーチ対象の候補に加え、最終的なサーチ対象を  $A_0$  と  $A_1$  から選択する。表 4-2 にサーチ対象の選択テーブルを示す。表中、 $MB_L$  は  $P(t)$  における対応セグメントの近傍マクロブロックを、 $MB_R$  は  $B(t)$  内当該マクロブロックの近傍に位置するマクロブロックを意味する。本テーブルでは検出ベクトルの信頼性を考慮し、以下に挙げる 2 つの条件のうち、いずれか一方でも真となった場合に限り  $A_1$  を選択し、それ以外には  $A_0$  を選択することとした。

- $MB_L$  の符号化モードが Intra である。  
( $MV_L$  の信頼性が低い)
- $MB_R$  の符号化モードが視差補償予測、双方向予測のいずれにも該当しない。  
( $DV$  の信頼性が低い)

表 4-2:  $MV_R$  に対するサーチ対象の選択テーブル

		Type of $MB_R$			
		Intra	MC	DC	MC/DC
Type of $MB_L$	Intra	$A_1$			
	MC	$A_1$	$A_0$		

MC: 動き補償予測, DC: 視差補償予測, MC/DC: 双方向予測

#### 4.4.2 差別型ビット割当

2節においてチャンネル間の画質差を低く抑えるというステレオ動画像符号化の要求事項を満たす目的で、共通型バッファ制御を導入した。ここで、ステレオ動画像符号化の画質差に対する要求としては、できるだけ低く抑えるべきという一般的な見解はあるものの、具体的にどのレベルまで抑えるのが妥当であるかという定量的な実証は未だ行われていない。このような状況を踏まえ、本節では共通型バッファ制御により画質差が十分に低く抑えられているという理想的な条件を設定し、これを基準としてあるレベルの画質差を許容可能であると仮定した際の符号化の効率化に関し検討を行う。

視差補償に関して、LチャンネルのピクチャはRチャンネルのピクチャの予測参照画像となっており、Lチャンネルの復号画質はRチャンネル符号化時の予測効率に大きく影響し、Lチャンネルの復号画質が高く保たれるほど、Rチャンネルの符号化効率も高められると考えられる。ステレオ画像の符号化におけるこの特性を最大限利用するためには、一方のチャンネルへのビット割当は他方のチャンネルへのビット割当に依存して行う必要がある<sup>(22)</sup>。

Rチャンネルに対する符号化ビット数がある程度削減され、ここで削減されたビットがLチャンネルの符号化に費された場合、Rチャンネル符号化において予測参照画像の高画質化が十分なレート削減効果をもたらしている限り、Rチャンネルの復号画質はそのままLチャンネルの復号画質を向上させることが可能である。この観点から本節では、レート制御方式として2節で述べた共通型バッファ制御の適用を前提とし、差別型ビット割当をステレオ動画像符号化に導入する。

差別型ビット割当において、Rチャンネルへの割当ビット数の削減は、Rチャンネルの発生ビット数を大きく左右する量子化パラメータを重み係数によりLチャンネルに比べてやや大きめに設定することで行う。ここで、量子化代表値が大きくなるにつれRチャンネルのビット削減による効果は小さくなるため、このビット数削減制御は符号化開始時の共通バッファ占有量から算出された量子化代表値が充分小さい場合に限り行うこととする。Rチャンネルの符号化において、最終的な量子化パラメータを $Q_l$ とすると、 $Q_l$ は重み係数 $W_Q$  ( $W_Q > 1.0$ )と量子化代表値に対する閾値 $R_{th}$ を用いて次式により算出する。ここで $Q$ と $S$ はそれぞれ、仮想バッファメモリ占有量の初期値から算出された量子化パラメータと量子化レベルである。係数 $W_Q$ の重み付け制御により、Lチャンネルに比べてデッドゾーンが

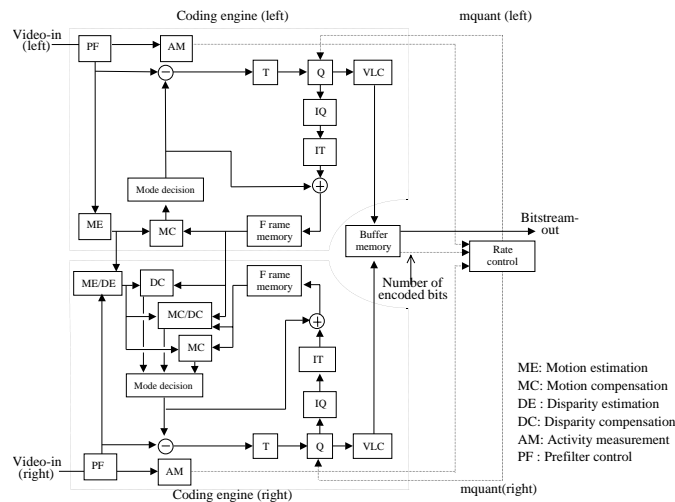


図 4-5: 符号化器の構成

やや広い量子化器が R チャンネルに適用されることとなり，R チャンネルに対する効率的な発生ビット数の削減が可能となる．

i)  $Q \times S < R_{th}$  (ビット数削減による効果が大)

$$Q' = W_Q \times Q (W_Q > 1.0) \tag{4-3}$$

ii) otherwise

$$Q' = Q \tag{4-4}$$

## 4.5 検討結果ならびに性能評価

### 4.5.1 符号化シミュレーション条件

3 節で検討した各種 GOP 構造の性能比較ならびに 4 節で導入した新技術の性能評価を行う目的で，3D-HDTV の符号化シミュレーション実験を行った．本シミュレーション実験において想定する符号化器を図 4-5 に示し，符号化条件を表 4-3 に示す．レート制御には 2 節で導入した共通型バッファ制御に基づく方式を適用した．入力となる 3D-HDTV テストシーケンスとしては，映像情報メディア学会の 3D-HDTV 標準テスト画像 Tulip garden と Festival に加え，3D-HDTV 素材として使用頻度の高いスポーツシーンを想定し，高速な動きを含む Soccer の計 3 種類を使用した．表 4-4 に使用 3D-HDTV シーケンスの特徴を示す．

表 4-3: シミュレーション条件

符号化領域	1920 画素 × 1035 ライン, 4:2:0
フレーム数	30 フレーム
符号化レート	40Mbps, 60Mbps
ピクチャ構造	フレームピクチャ
動き補償	フレーム予測/フィールド予測適応
動き検出	ブロックマッチング法 ± 127.5 画素 × ± 31.5 ライン, 半画素 (1frame 間隔相当)
視差補償	フレーム予測/フィールド予測適応
視差検出	ブロックマッチング法 ± 63.5 画素 × ± 3.5 ライン, 半画素

#### 4.5.2 GOP 構造の比較検討

図 4-6, 図 4-7 に符号化ビットレートをそれぞれ 40Mbps, 60Mbps としたときの Type1 から Type4 の検討 GOP 構造に対する復号画像の PSNR を示す。図中, 各 Type の PSNR を 2 本の隣接する帯により表現しており, 左から L チャンネルの PSNR, R チャンネルの PSNR を示す。

ここで, 本節で扱う実験とは別に多種の画像入力に対して行った 3D-HDTV 符号化の予備実験の結果から, R チャンネルの符号化において, マクロブロックごとに選択される符号化モードとしては動き補償予測モードが大半を占めていることを確認している。本実験においても例外ではなく, 例えば, 図 4-6 および図 4-7 の Type1 に対しては, 表 4-5 に示すモード選択比率となっている。このことから R チャンネルの符号化においても, 動き補償予測の効率低下が直接符号化効率の低下につながり, 高い符号化効率を維持するためには, 動き補償予測フレーム間隔は最小, つまり 1frame に保つのが望ましいと考えられるが, 実験結果より動き補償予測フレーム間隔が最大 4frame となる Type2 においても Type1 とほぼ同等の PSNR が得られ, これに起因する明らかなロスを確認されなかった。

次に L チャンネルの符号化に関し, Type1 と Type3 の結果より, L チャンネルを B ピクチャありの GOP 構造とすることで, R チャンネルでの符号化に遅延を生じるものの, 一部のシーケンスで主観画質がやや向上することが確認される。L チャンネルに B ピクチャを適用することで, 符号化効率の低下を招くことは特になく, B ピクチャの適用/非適用の問題は非ステレオ符号化時と全く同様に扱えることが分かる。

また, 再生時刻と符号化時刻の対応に関して以下のように考察した。一連の符号化シミュレーション実験では共通型バッファ制御を導入し, 符号化時に各チャンネルから参照する仮想バッファを一本化し, 互いに再生時刻の近い各チャンネルのピクチャ符号化を並行して行っている。再生時刻が同一のピクチャについてチャンネル間画質差を低く保つという本制

表 4-4: 3D-HDTV テストシーケンスの特徴

シーケンス	特徴
Tulip garden	<ul style="list-style-type: none"> <li>・チューリップ畑の通路を女性がゆっくりと歩く。</li> <li>・前方に位置する花や背景となる木の枝といった精細な部分を多く含む。</li> </ul>
Festival	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大勢の人混みの中で御輿を上下に揺らす祭のシーン。</li> <li>・垂直方向に激しい動きを伴う。</li> <li>・御輿の模様，紙吹雪といった精細部分を多く含む。</li> </ul>
Soccer	<ul style="list-style-type: none"> <li>・サッカーのコーナーキックのシーン。</li> <li>・カメラ操作として比較的高速なパニングを含む。</li> <li>・画面中央部で複数の選手が絡む激しい動きを伴う。</li> </ul>

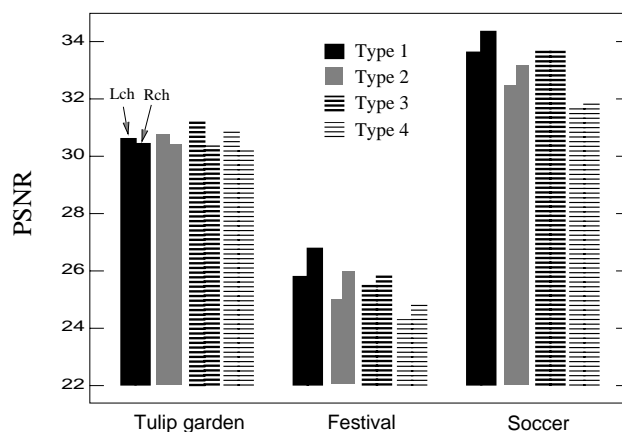


図 4-6: 検討 GOP 構造に対する PSNR(40Mbps)

御の主旨から考えて，互いに再生時刻の近い各チャンネルのピクチャを対として同時に符号化するのが望ましいと考えられる．しかし，再生時刻が同一のピクチャ対に対する同時符号化が保証されない Type3 の結果において，これに起因する特別な画質劣化は見られていない．これより，Lチャンネル，Rチャンネルで再生時刻が同一のピクチャの符号化時刻に関しては，その差が高々3frame程度であれば特に問題ないものといえる．

以上の実験結果より，検討対象にあげた GOP 構造のうち視差補償に基づく Type1 から Type3 に関しては符号化結果に有意な差が特になく，これらを適用した際の効果はほぼ同等であるとみなされるが，以後の各種要素技術の評価実験においては便宜上 Type1 を統一的に適用することとする．

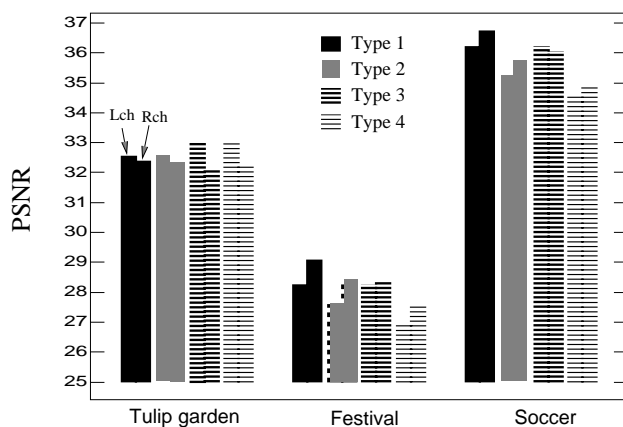


図 4-7: 検討 GOP 構造に対する PSNR(60Mbps)

表 4-5: 符号化モードの選択比率

bit-rate	画像	モード比率 %		
		動き補償	視差補償	双方向
40Mbps	Tulip	53.0	7.4	38.9
	Festival	23.9	12.2	62.6
	Soccer	53.4	8.6	36.9
60Mbps	Tulip	52.0	7.3	40.1
	Festival	22.4	13.6	62.9
	Soccer	54.2	9.0	35.9

### 4.5.3 高度化技術の性能評価

#### 4.5.3.1 改良型動き検出

Rチャンネルの動き検出に改良型動き検出を適用し、Lチャンネルの動き検出にはフルサーチを適用した際の符号化実験を行い、客観品質指標として復号画像のPSNRおよび予測画像の平均二乗誤差を算出した。改良型動き検出の最終的なサーチは±8画素×±8ラインの範囲に対して半画素精度で行うこととし、比較のためRチャンネルの動き検出方法をLチャンネルと同一にした際の実験も合わせて行った。動き検出手法に対するPSNRおよび平均二乗誤差の結果を表4-6に示す。結果より、Rチャンネルの符号化においてフルサーチの代わりに提案動き検出手法を適用した場合、いずれのシーケンスに対しても予測誤差の増加は高々5%程度で、PSNRの低下は0.1dB以内に抑えられていることを確認した。このことから、提案動き検出手法により、Rチャンネルのベクトル検出を左チャンネルと同様、高精度に行うことが可能であるといえる。さらに、提案動き検出手法は±8画素×±8ラインという格段に縮小された検出範囲のもとでさえも有効に機能しており、左チャンネルに適



表 4-6: 動き検出手法に対する PSNR と MSE

	bit-rate	PSNR		MSE	
		全探索	8 × 8	全探索	8 × 8
<b>Tulip</b>	40Mbps	30.63	30.63	87.01	88.24
	60Mbps	32.55	32.55	74.07	74.80
<b>Festival</b>	40Mbps	25.98	26.00	276.69	289.97
	60Mbps	28.28	28.29	227.68	239.37
<b>Soccer</b>	40Mbps	34.10	34.01	45.81	48.67
	60Mbps	36.22	36.16	39.53	41.89

表 4-7: 最終段のサーチ範囲に対する PSNR と MSE

	PSNR			MSE		
	± 1	± 2	± 4	± 1	± 2	± 4
<b>Tulip</b>	30.64	30.66	30.66	96.77	94.09	94.29
<b>Festival</b>	25.55	25.76	25.88	344.66	316.34	301.97
<b>Soccer</b>	33.50	33.78	33.87	69.79	62.32	56.71

用されているような  $\pm 128$  画素  $\times$   $\pm 32$  ラインという広範囲をカバーするフルサーチと同等の検出性能を発揮しているといえる。

上記検討をさらに進め、最終段のサーチ範囲と画質の関係を見極める目的から、40Mbps の符号化レートの下で同サーチ範囲をそれぞれ  $\pm 4$  画素  $\times$   $\pm 4$  ライン、 $\pm 2$  画素  $\times$   $\pm 2$  ライン、 $\pm 1$  画素  $\times$   $\pm 1$  ラインとして符号化した際の結果を表 4-7 に示す。結果より、最終段のサーチ範囲を  $\pm 8$  画素  $\times$   $\pm 8$  ラインよりも縮小する場合、高速な動きを伴う素材に対しては縮小の度合を高めるにつれて徐々に再生画質の劣化を招き、本劣化は最も狭い範囲として設定した  $\pm 1$  画素  $\times$   $\pm 1$  ラインの下でとくに顕著となることが分かる。よって、本手法の適用による全探索に対するロス目標値を 0.1dB 以内に設定した場合、最終段のサーチ範囲としては  $\pm 8$  画素  $\times$   $\pm 8$  ライン程度で充分であるといえる。

#### 4.5.3.2 差別型ビット割当

差別型ビット割当に関して、符号化ビットレートを 40Mbps および 60Mbps に設定した際の実験結果をテストシーケンスごとに図 4-8 から図 4-10 に示す。差別型ビット割当の制御パラメータとして重み係数  $W_Q$  と量子化代表値に対する閾値  $R_{th}$  があるが、本実験では、 $W_Q$  を 1.0(制御なし)、1.5、2.0 の 3 通りに設定し、 $R_{th}$  を当該ピクチャの符号化開始時における量子化パラメータに等しい値とした。図 4-8 から図 4-10 において、横軸は  $W_Q$  の各設定値において L チャンネルに費されたビットレートを R チャンネルを 1.0 とした際の比率で

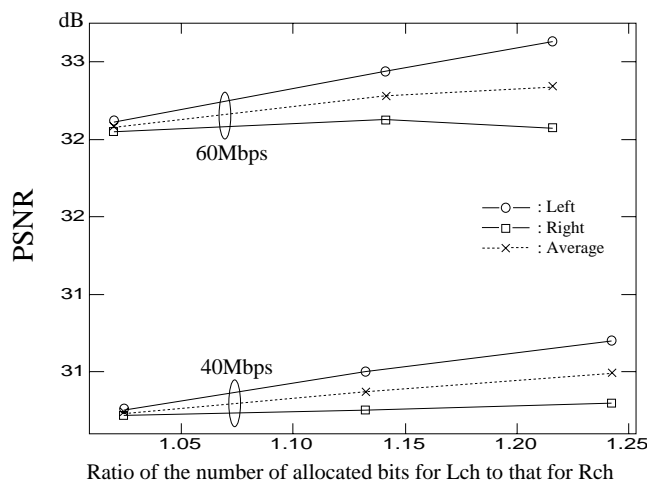


図 4-8: L チャンネルに費したビット数に対する PSNR(Tulip garden)

示し、縦軸は各チャンネルの復号画像の PSNR を示す。さらに、ステレオ画像の画質の評点は L, R 各チャンネルに対して算出された評点の平均により近似できるという報告に基づき<sup>(23)</sup>、3D-HDTV の客観品質指標として、L, R 両チャンネルの復号画像の平均二乗誤差から算出した、PSNR の 2 チャンネル平均を各図に重ねて示した。つまり、図において垂直方向に連なる一連の 3 プロット (Left, Right, Average) は符号化条件ならびに画像入力に関して同一の実験から得られた結果に相当する。

$W_Q$  を 1.0 より大きな値とした際の結果から、差別型ビット割当の適用時には、R チャンネル符号化におけるビット数の削減は特別な画質劣化につながっておらず、効果的に L チャンネルの復号画質が高められていることが分かる。さらに、PSNR の 2 チャンネル平均が  $W_Q$  を大きくするにつれて高く保たれている結果からも、差別型ビット割当と共通型バッファ制御の併用により、3D-HDTV 符号化のさらなる高効率化が実現されているといえる。

#### 4.5.4 視差補償導入の意義

ステレオ動画画像符号化への視差補償の導入により得られる直接的な効果は予測効率の向上である。表 4-5 の結果を例にとると、Festival のような元々動き補償が十分に効かないテスト画像に対しては、視差補償が動き補償と相補的な役割を果たしており、予測誤差の低減をもたらしている。ここで、図 4-6 と図 4-7 の結果から、マルチビュープロファイルに対応した符号化 (Type1 から Type3) のサイマルキャスト符号化 (Type4) に対するゲインは最大で 2dB 程度であり、これは視差補償を導入し、かつ GOP 構造を最適に設定した場合においてでさえも、視差補償により直接的に得られるゲインが高々 2dB 程度であることを意味している。

しかし、本章で提案した動き検出の高精度化やレート制御の最適化は、視差補償と併用して実現される技術であり、これら高度化技術により得られる効果も視差補償の導入に起因するものである。さらに、本章で提案した以外にも、ステレオ動画画像の特性に着目した各種高

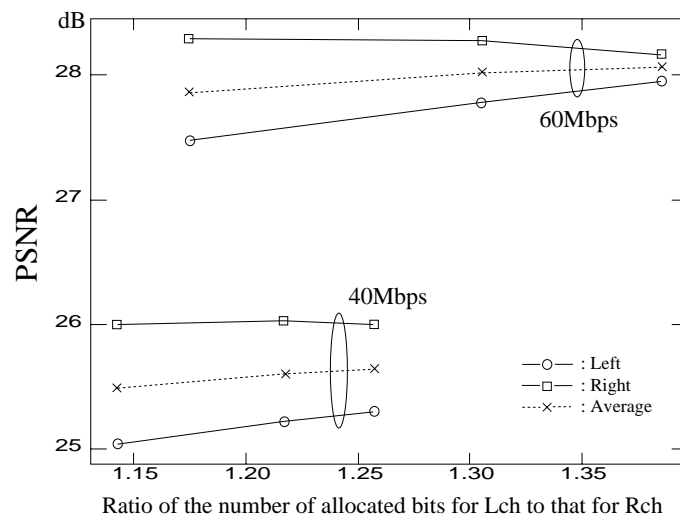


図 4-9: Lチャンネルに費したビット数に対するPSNR(Festival)

度化技術の導入余地は残されており，これらの積み重ねが3D-HDTV符号化のさらなる高効率化につながるものと考えられる．つまり，視差補償導入の本来の意義は，予測効率の向上のみならず，視差補償に基づく各種高度化技術の受け皿を実装する点にもあるといえる．

#### 4.6 むすび

チャンネル間の画質差の低減，ならびに視差補償に基づく各種要素技術の高度化に主眼を置き，MPEG-2マルチビュープロファイルの枠組の中で3D-HDTV動画像符号化方式の検討を行い，シミュレーション実験の結果をもとに性能評価を行った．

具体的には，チャンネル間画質差を低減する目的で共通型バッファ制御を導入した上で，3D-HDTV符号化に最適なGOPの設定を明らかにした．さらに，視差補償に基づいて実現可能な動き検出およびレート制御の高度化手法を提案し，本章で最適としたGOP設定における性能評価実験を通じて，いずれの高度化技術も3D-HDTV符号化のさらなる高効率化に効果的であることを示した．<sup>(24)</sup>

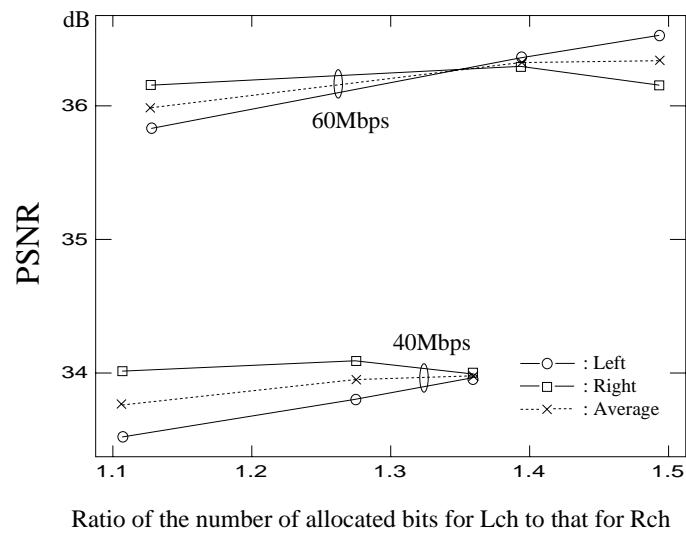


図 4-10: Lチャンネルに費したビット数に対するPSNR(Soccer)

## 第5章

### 高精度なビット配分による画質改善

本章では、MPEG-2の符号量制御をピクチャ単位の大局的な制御とマクロブロック単位の局所的な制御に二分した上で、それぞれについて高精度化のアプローチを導入している。

デジタル放送やDVDなど、MPEG-2をベースとする家庭用の映像アプリケーションはHDTV化の流れにある。これらに代表されるような限られた伝送帯域・記録容量の条件下で、HDTV品質を維持することは極めて困難であり、MPEG-2の枠内で新規符号化制御の導入による効率改善が急務である。これに対し、低ビットレートのHDTVに限らず、MPEG-2の枠組の中でさらなる高効率化を実現する要素技術の検討例は既に多く見られ、対象とする符号化構造別に以下のように整理できる。このうち再生画質に大きく関係する部分として、本章ではレート制御に着目している。

- ピクチャレイヤ

- 1) ピクチャ構造

近傍の符号化結果に基づきピクチャ構造の適応選択を行う<sup>(25)</sup>。

- 2) レート制御

ピクチャごとのビット配分をレート - 歪みの関係を考慮して最適に行う<sup>(26),(27)</sup>。

- 3) ピクチャタイプ

Bピクチャの挿入頻度を適応的に更新する。非リアルタイム系を想定したアプローチ<sup>(28)</sup>とリアルタイム系を想定したアプローチ<sup>(29),(30),(31)</sup>に大別される。

- マクロブロックレイヤ

- 4) マクロブロック符号化モード

マクロブロックごとの符号化方法を発生ビット数最小化の規範で適応的に選択する<sup>(31),(32)</sup>。

- 5) 動きベクトル検出

動きベクトルの選択を単なる誤差最小化規範ではなく、コスト関数などの導入により符号化ビット数を考慮して行う<sup>(33),(34),(35)</sup>。

## 5.1 ピクチャ単位ビット配分の最適化方式

本節では、ひずみ最小化型レート制御手法について導入を行い、ピクチャごとの符号量配分方式を明らかにした上で、予備実験を通じて方式単独の有効性を確認している。次に同方式との併用により有効に働く高画質化手法として、ピクチャ単位に設定される量子化マトリクスの最適化手法を導入している。

まずレート制御の導入目的は以下に集約される。

a) コーデック処理の連続性保持

発生ビット数の長時間平均を一定量に抑え、デコーダ処理において破綻 (VBV バッファのオーバーフロー/アンダーフロー) を生じさせない。

b) 一定符号化レート下での画質向上

a) が満足される範囲内で、発生ビット数の割振りを時間方向、空間方向で最適化する。

上記 2) で挙げた検討例は b) を目的とする代表的なアプローチとして位置づけられる。同方式はピクチャ単位の大局的なレート制御に関し、ピクチャごとのレート - 歪みの関係を考慮し、歪み最小化の規範でビット配分を行うもの (以下、歪み最小化型レート制御と呼ぶ) であり、方式単体の有効性が確認されている。しかしながらレート制御全般の最適化という意味では、同方式をベースとした拡張によるさらなる改善ポイントを a) および b) の両面から見出すことができる。

以上の背景から本節では MPEG-2 による HDTV 符号化を対象に、歪み最小化型レート制御の導入を前提とし、同手法の高度利用に基づく最適化アプローチとして、マクロブロック単位量子化制御の高精度化、および量子化マトリクスの最適割当に着目し方式検討を行った。前者は目的 b) に沿って主観画質の向上を、後者は目的 a) に沿って低レートにおけるコーデック処理の安定性向上を目的とし提案するものである。

本節では、5.1.1 で想定する歪み最小化型レート制御の導入を行う。5.1.2 では歪み最小化型レート制御に対する拡張方式の提案を行う。5.1.3 では基本性能評価として、歪み最小化型レート制御の導入により得られる直接的な効果の検証を行った上で、高度化手法の導入がもたらす間接的な効果の大小を検証し、考察を加える。

### 5.1.1 歪み最小化型レート制御の導入

本研究で想定する歪み最小化型レート制御手法の導入を行う。前提として、ビット配分は DCT 係数部分とサイド情報部分に分けて行うこととする。このうち、サイド情報部分の割当は近傍の同一ピクチャタイプの符号化結果から確定的に行うことが可能であるので、ビット配分の検討対象はピクチャに費やす全符号化ビットのうち DCT 係数部分に限定することとする<sup>(26),(27)</sup>。

## 5.1.1.1 ピクチャレイヤ

歪み最小化型レート制御においては、ピクチャタイプごとに R-D 関数 (レート - 歪みの関係) を定式化し、式 (5.1) から式 (5.4) により、当該ピクチャの目標符号化ビット数の算出を行う。

$$\begin{cases} D_I = f_I(R_I, \sigma_{xI}^2) \\ D_P = f_P(R_P, \sigma_{xP}^2) \\ D_B = f_B(R_B, \sigma_{xB}^2) \end{cases} \quad (5.1)$$

$$f(R, \sigma_x^2) = \gamma_x^2 \sigma_x^2 2^{-2mR}, 0 \leq \gamma_x^2 \leq 1 \quad (5.2)$$

$$D_I = D_P = \frac{1}{w_B} \times D_B \quad (5.3)$$

$$R_{SOP} = N_I \times R_I + N_P \times R_P + N_B \times R_B \quad (5.4)$$

$D_I, D_P, D_B$	: 量子化誤差電力
$R_I, R_P, R_B$	: 目標符号化ビット数
$\sigma_{xI}^2, \sigma_{xP}^2, \sigma_{xB}^2$	: 量子化器入力信号の分散
$f_I, f_P, f_B$	: R-D 関数
$\gamma_x^2$	: 量子化器入力信号のスペクトル 分布に応じて決まる定数
$w_B$	: B ピクチャの量子化誤差に対する 重み係数
$R_{SOP}$	: SOP 内配分可能ビット数
$N_I, N_P, N_B$	: SOP 内残ピクチャ枚数

式 (5.1) 中、 $(D_I, D_P, D_B)$  ならびに  $(\sigma_{xI}^2, \sigma_{xP}^2, \sigma_{xB}^2)$  の算出対象はピクチャ内で量子化対象となるすべての輝度信号ブロックおよび色差信号ブロックとし、 $(D_I, D_P, D_B)$  は 1 画素あたりの値に換算して算出し、 $(\sigma_{xI}^2, \sigma_{xP}^2, \sigma_{xB}^2)$  は DCT ブロックごとに分散を求めた上で、ピクチャ平均により算出する。

式 (5.1) において関数  $(f_I, f_P, f_B)$  はピクチャタイプごとの R-D 関数であり、式 (5.2) により表現される<sup>(36), (37)</sup>。式 (5.2) において  $m$  は R-D 曲線の勾配を示すパラメータである。式 (5.3) において  $w_B (> 1.0)$  はトータルの符号化効率を向上させる目的から、予測参照されない B ピクチャに許容する量子化誤差を I ピクチャおよび P ピクチャよりも高めに維持する重み係数である。式 (5.4) ではビット配分の制御単位となる一連のピクチャセットの表記に SOP という用語を用いた。SOP は、MPEG-2 で定める GOP (Group of Pictures) と区別するため、ピクチャセット (Set of Pictures) の略語として便宜上定義したものであり、参考までに Test Model 5<sup>(20)</sup> のレート制御では SOP は GOP に一致する。SOP の割当ビット数  $R_{SOP}$  の算出方法は、再生画質を安定的に維持する目的から、以下を考慮して定めることとした。

- 符号化済ピクチャにおける目標ビット数に対する発生ビット数の過不足は、SOP 内残ピクチャの符号化により吸収するよう制御が働くため、SOP 内残ピクチャ枚数を余裕

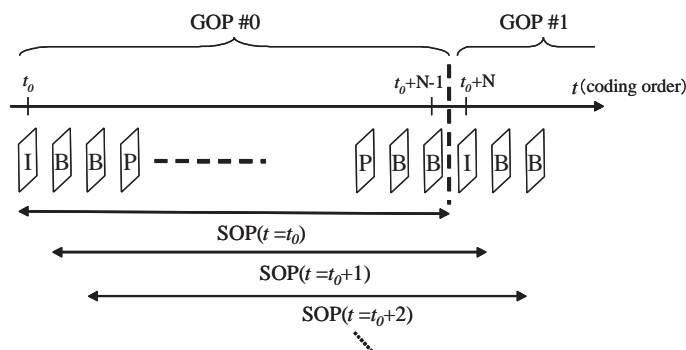


図 5-1: SOP の割当

度として捉えた場合，残ピクチャ枚数はピクチャ位置に依らず一定であることが望ましい。

- 5.1 で述べたとおり，ビット配分による高画質手法導入の前提となる a) の要件を安定的に満たす上で，デコーダの VBV バッファ占有量を考慮した，ピクチャ単位の目標符号化ビット数の算出がデコーダ処理の破綻防止に極めて有効である。

具体的には，SOP 内残ピクチャ数が常に一定となるよう，SOP の割当領域をオーバーラップさせることとした<sup>(38)</sup>．当該方式における SOP の扱いを図 5-1 に示す．図中  $t$  はピクチャ位置を符号化順で 0 からの連番により示すものである．符号化順とは符号化ストリーム中にピクチャデータが出現する順序を指し，B ピクチャが存在する場合には表示順序と異なる．ここで，当該ピクチャを起点とする SOP に配分可能なビット数  $R_{SOP}$  の算出は式 (5-5) に従い行うこととする． $N_{SOP}$  は SOP 内ピクチャ数，つまり SOP 長を指し，GOP 長の整数倍とする．図 5-1 では SOP 長が GOP 長に等しい場合の例を示している． $i$  は GOP 先頭ピクチャを 0 としたときのピクチャ位置を指し， $i$  番目のピクチャにつき  $R(i)$ ， $S(i)$  はそれぞれレート制御上の目標ビット数，実際の発生ビット数を指す．同式は，当該ピクチャの符号化開始時における VBV バッファ占有量について実測値 (第 2 項) の理想値  $v_T$  に対する過不足を，当該 SOP にて補償するという前提のもと  $R_{SOP}$  を算出するものである．また VBV バッファ占有量の算出に関し， $R(i)$  の部分には 1 ピクチャあたりの平均的な符号化ビット数を代入するのが通例である． $R(i)$  にピクチャタイプに依存しない固定値  $bit\_rate/frame\_rate$  を与えた場合，GOP 先頭では I ピクチャの存在からピクチャごとの発生ビット数が大きく異なり，結果として算出される占有量が不安定となる．以上より， $R(i)$  はピクチャ  $i$  のレート制御上の目標ビット数とした．VBV バッファ占有量の理想値  $v_T$  はピクチャタイプに依らない固定値とし，フロー防止の観点から VBV バッファサイズの  $1/2$  を適用することとした．

$$R_{SOP} = N_{SOP} \times \frac{bit\_rate}{frame\_rate} + \{v_0 + \sum_{i=0}^{n_p-1} (R(i) - S(i))\} - v_T \quad (5-5)$$



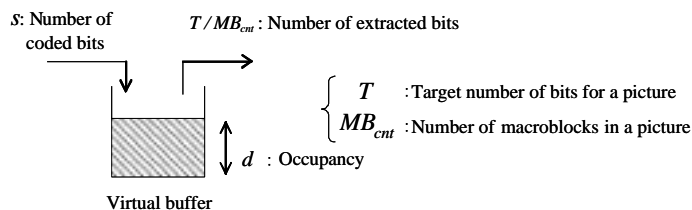


図 5-2: Test Model 5 による量子化パラメータの割当

- $n_p$  : GOP 内符号化済ピクチャ枚数
- $v_0$  : GOP 先頭でピクチャデータの引抜きが開始される VBV バッファ占有量
- $v_T$  : 理想とする VBV バッファ占有量

### 5.1.1.2 マクロブロックレイヤ

マクロブロック単位ビット配分に関し、Test Model 5 に見られる仮想バッファをベースとする方式が代表的である。同手法の概念図を図 5-2 に示す。 $s, T, MB_{cnt}$  はそれぞれ、マクロブロックの発生ビット数、ピクチャの目標ビット数、ピクチャ内マクロブロック数を指す。

仮想バッファは、量子化制御へのフィードバック情報として、マクロブロックの符号化が終了する都度、発生ビット数の目標ビット数に対する過不足を占有量 (図中  $d$ ) として蓄積するために規定される仮想的なバッファである。具体的には、あるマクロブロック (以下、 $k$  により識別する) の量子化パラメータは、直前マクロブロック符号化終了時の仮想バッファ占有量  $d$  の正規化値に視覚感度重み係数を掛けることで決定される。同手法が抱える問題点として以下が指摘されており、マクロブロックごとの符号化特性・視覚特性に応じた柔軟なビット配分を実現する上で理想的な手法とはいえない。

- マクロブロックごとの発生ビット数を平滑化する作用が働くため、細かい制御が実現できない。
- 仮想バッファ占有量  $d$  のピクチャ内の変動により、意図に反して再生画質に関する不均一性が画面内に生じる可能性がある<sup>(39)</sup>。

以上の問題点を踏まえ、マクロブロックごとの優先度付けを忠実、かつ安定的に反映する目的から、マクロブロック単位ビット配分の改良手法を以下に導入する。

5.1.1 で導入した手法に準じ、当該ピクチャの符号化開始時には目標量子化誤差電力 ( $D_I, D_P, D_B$ ) と目標符号化ビット数が与えられることとする。このうち、マクロブロック単位量子化制御においては目標量子化誤差電力のみを参照し、目標符号化ビット数の参照は式 (5-5) における SOP 内残ビット数の更新時に限定されることとする。提案方式では、まずピクチャの目標量子化誤差電力を達成するという条件のもと、ピクチャ内で共通的に基準とする量子化パラメータ  $Q_{AVE}$  を設定した上で、同値とマクロブロック単位の視覚優先度パラメータ  $w(k)$  の積算により、量子化パラメータ  $Q(k)$  の算出を行う。算出方法を式 (5-6) に示す。

$$Q(k) = Mq(w(k) \times Q_{AVE}) \quad (5.6)$$

$w(k)$  は例えば式 (5.7)(Test Model 5 の例) により, マクロブロック単位に予め算出されていることとする. 同式において  $act(k)$  は当該マクロブロックにおける輝度ブロック分散の最小値を示し,  $avg\_act$  は  $act(k)$  のピクチャ平均を示す.

$$w(k) = \frac{2 \times act(k) + avg\_act}{act(k) + 2 \times avg\_act} \quad (5.7)$$

関数  $Mq$  は量子化パラメータとして選択可能な値 (量子化スケールタイプにより決まる) のうち, 引数に最も近いものを返す.  $Q_{AVE}$  は基準となる量子化パラメータを示す定数であり, ピクチャ単位に量子化誤差電力が目標値  $D$  に近い値をとるよう設定されることとする. 具体的には, 候補とする  $Q_{AVE}$  の範囲 ( $q_{min}, q_{max}$ ) を式 (5.8) により限定した上で,  $q_{max}$  を先頭に順次  $d_q$  ずつ減じた値を候補として評価していくことで  $Q_{AVE}$  のサーチを行う. 式中  $qsc_{min}, qsc_{max}$  はそれぞれ, 量子化スケールとして表現可能な最小値, 最大値を指し, 例えば非線形の量子化スケールタイプ適用時にはそれぞれ 1.0, 112.0 となる.  $d_q$  はサーチのステップ幅であり, 本研究では便宜上 1.0 に設定する. 評価値としては当該候補を  $Q_{AVE}$  とした際に得られるピクチャの量子化誤差電力を算出し, 同評価値が目標値を下回る候補を検出した時点でサーチを終了し, 同候補を  $Q_{AVE}$  として選択する.

$$\begin{cases} q_{min} &= qsc_{min} / \max_k w(k) \\ q_{max} &= qsc_{max} / \min_k w(k) \end{cases} \quad (5.8)$$

以上により当該ピクチャのビット配分を行った場合, P ピクチャおよび B ピクチャに限っては, 予測効率の高さから当該ピクチャに対する目標量子化誤差電力  $D$  が量子化器入力信号電力  $D_0$  (割当ビット数を 0 としたときの量子化誤差電力に相当) を上回るケースがある. この場合  $D$  は実現不可能につき, 制御上の目標値として不適切であるため, 当該ピクチャの符号化は  $D$  を  $D_0$  で置き換えた上で, Intra ブロックを除くすべてのブロックを非符号化ブロックとして行うこととする.

### 5.1.2 提案高度化手法

5.1.1 で導入した歪み最小化型レート制御に対し, 拡張的に実装することでさらなる性能改善が見込まれる高度化手法を以下に提案する.

#### 5.1.2.1 量子化マトリクスの最適割当

MPEG-2 の量子化制御において, DCT 係数の次数  $(\alpha, \beta)$  ( $\alpha, \beta = 0, \dots, 7$ ) ごとの量子化ステップサイズ  $\Delta_{\alpha, \beta}$  は, 次式のとおり量子化パラメータと量子化マトリクスにより決定される.  $QM_{\alpha, \beta}$  は量子化マトリクスの要素を示す.

$$\Delta_{\alpha, \beta} = QM_{\alpha, \beta} \times Q(k) \quad (5.9)$$

式 (5.9) が示すとおり，MPEG-2 ではピクチャの大局的な量子化精度を量子化マトリクスとして割り当て，マクロブロック単位の局所的な優先度付けを量子化パラメータの割当に反映する．また，MPEG-2 では比較的高ビットレートを想定したマトリクス設定（以下，初期設定マトリクスと呼ぶ）が予め用意されており，量子化マトリクスを一切更新しない場合にはこれが適用されるが，本節で想定する低ビットレート下でレート制御を安定的に機能させるためには，量子化マトリクスの適応的な更新が必須となる．以上の背景より，当該ピクチャに対し制御誤差を解消し，かつ画質劣化を最小限に抑えるという意味で最適な量子化マトリクスを選択するアプローチを以下に導入する．

5.1.1.2 で導入したマクロブロック単位量子化制御の仕組みに沿って，当該ピクチャにおける，ある量子化マトリクス設定に対する基準量子化パラメータ  $Q_{AVE}$  を算出可能であるため，同値の大小によりレート制御上の適性を評価することとする．簡単のため Intra, Inter 双方に対し，選択可能な量子化マトリクスは式 (5.10) に準じて得られるものに限定することとする． $s (s = 0, 1, \dots, s_{max})$  は量子化マトリクスの識別子であり  $QM_{\alpha,\beta}(0)$  は初期設定マトリクスを指す． $s_{max}$  は Intra, Inter のそれぞれについて，マトリクス要素の最大値として，規格上表現可能な上限値 255 を上回る値を与える  $s$  の最小値とする．

$$QM_{\alpha,\beta}(s) = \min(\lfloor \frac{16+s}{16} \times QM_{\alpha,\beta}(0) \rfloor, 255) \quad (5.10)$$

まず  $Q_{AVE}$  としてサーチ範囲の上限値  $q_{max}$ ，あるいは下限値  $q_{min}$  が選択された場合，目標値に対し適切な候補が見つからなかったことを意味し，マトリクス設定としては不適切であると判断される．加えて，マクロブロックごとの量子化パラメータは式 (5.6) により算出され， $w(k)$  は 1.0 を中央値として定義されるため， $w(k) < 1.0$  となるマクロブロックは視覚的に優先すべきものに分類されるものの， $Q_{AVE} > q_{sc_{max}}$  という条件下では， $Q(k)$  の上限が  $q_{sc_{max}}$  であるという制約から，同重み付けが最終的な  $Q(k)$  の値に反映されない可能性がある．以上を考慮し， $Q_{AVE} \leq q_{sc_{max}}$  という拘束条件を与え，これを満足するもののうち，最も細かい量子化マトリクスを最適解として選択することとする．

### 5.1.3 性能評価

5.1.2 で述べた提案手法の性能評価を行う目的から符号化シミュレーション実験を行った．本節で使用する共通の符号化条件を表 5-1 に示す．入力には ITE HDTV 標準テスト画像 (1920 画素 × 1080 ライン) より，以下の 4 種類を使用した．

(a) Whale show

シャチの動きを追う素材．水平方向に高速なパニングを伴う区間あり．観客席に精細部を含む．

(b) Opening ceremony

入場行進を撮影したもので，カメラ操作はほとんどなし．高精細部分が大半を占める．

(c) Green leaves

並木道をズームしながら撮影したシーン．高精細部分が大半を占める．

表 5-1: 共通の符号化条件

符号化方式	MPEG-2 MP@HL(4:2:0)
符号化レート	11Mbps, 15Mbps
GOP 構造	N: 15 M: M=3 または M=1 (素材ごとに最適なものを固定割当)
動き補償	フレーム予測/フィールド予測適応
動き検出	$\pm 63.5$ 画素 $\times$ $\pm 31.5$ ライン, 半画素 (1frame 間隔に対して)
DCT タイプ	フレーム DCT/フィールド DCT 適応
量子化制御	量子化スケールタイプ: 非線形

## (d) Sprinkling

人物と背景のクロマキー合成からなるシーン．背景部ではシャワーが撒かれ，これに伴い難易度が極めて高くなる．

GOP 構造を決める M 値に関しては，M=3 および M=1 の中から素材ごとに最良値を選択し，素材 (a) および (d) には M=1 を，それ以外には M=3 を適用することとした．式 (5-2) の R-D 関数のパラメータ  $m$  と  $\gamma_x^2$  は，事前の実験結果からピクチャタイプ毎に推定するのが適切であると判断し，ピクチャ毎に適応的に推定した値を用いた (5.1.4 参照)．式 (5-3) の  $w_B$  は事前実験にて，B ピクチャの画質低下が主観的にフリッカとして検知されない範囲内で PSNR の長時間平均を最大化する値を選択した結果， $w_B = 1.2$  とした．視覚優先度パラメータ  $w(k)$  の算出は Test Model 5 に合わせ式 (5-7) に従い行うこととした．

## 5.1.3.1 基本性能評価

5.1.3.1.1 ピクチャレイヤ 5.1.1 にて前提条件として導入した歪み最小化型レート制御手法の基本性能を評価する．符号化シミュレーション条件として，SOP 長は GOP 長と同一とし，マクロブロック単位のビット配分はピクチャの目標符号化ビット数をもとに仮想バッファ制御を適用することとし，マクロブロック  $k$  の量子化パラメータ  $Q(k)$  の算出は式 (5-11) に従い行うこととした．関数  $M_q$  の定義は式 (5-6) と同一とし， $Q_{VB}(k)$  は仮想バッファ占有量より割り出されるパラメータである．

$$Q(k) = M_q(w(k) \times Q_{VB}(k)) \quad (5-11)$$

表 5-2 に 15Mbps の符号化レートで得られた PSNR のシーケンス平均をまとめる．ここで導入したレート制御方式のポイントとして，i) ピクチャごとの目標ビット数の算出方式，ii) SOP の割当方式が挙げられ，各部単体の性能評価を行う目的から，Test Model 5 をベースとし，i) および ii) の併用，i) のみ適用，ii) のみ適用，双方を非適用の 4 方式を比較し，それぞれ

表 5-2: PSNR の結果 (15Mbps)

素材	I/P ピクチャ (dB)				B ピクチャ (dB)			
	RD+SOP	RD	SOP	TM5	RD+SOP	RD	SOP	TM5
(a)	26.81	26.81	26.80	26.78	割当なし			
(b)	26.95	26.78	26.60	26.55	26.55	26.48	26.46	26.46
(c)	24.61	24.17	23.92	23.87	24.09	24.02	24.01	23.77
(d)	23.83	23.82	23.82	-	割当なし			

- : 評価対象外

表 5-3: PSNR の結果 (11Mbps)

素材	I/P ピクチャ (dB)			B ピクチャ (dB)		
	RD+SOP	RD	SOP	RD+SOP	RD	SOP
(a)	25.45	25.44	25.43	割当なし		
(b)	25.77	25.53	25.52	25.77	25.65	25.68
(c)	22.48	21.94	22.13	22.73	22.46	22.60

RD+SOP, RD, SOP, TM5 として結果を同表に示す。I/P ピクチャと B ピクチャは制御上別扱いされる点を考慮し、PSNR は個別に取得した値で示した。表 5-3 に 11Mbps の符号化レートにおいて同様に取得した結果をまとめる。ただし表中 RD+SOP(11Mbps), RD(11Mbps) および SOP(11Mbps) による素材 (d), TM5(15Mbps) による素材 (d), TM5(11Mbps) によるすべての素材については、VBV バッファのアンダーフローが確認されたため該当部分については除外した。コーデック処理が破綻する素材の少なさから、導入方式のうちピクチャごとの目標ビット数算出部分は、コーデック処理の安定性改善に大きく寄与することが分かる。

画質改善に関しては、表 5-2 および表 5-3 において、RD の TM5 に対するゲイン、SOP の TM5 に対するゲインから、上記方式 i) の単独効果、方式 ii) の単独効果がそれぞれ読み取れる。また RD+SOP の TM5 に対するゲインから両方式の併用によるゲインを読み取れる。結果より双方につき単独の効果が認められ、加えて併用による有効性が確認できる。傾向として、Test Model 5 に対する画質改善は、B ピクチャの挿入を伴う GOP 構造における I/P ピクチャにて顕著であり、これは歪み最小化型のレート制御により、I/P ピクチャと B ピクチャ間の量子化誤差に関する大小関係が、符号化効率を高めるという意味で適切となるように目標ビット数の算出を行っていることによる。またピクチャ符号化中に発生する仮想バッファ占有量の変動が量子化制御に及ぼす影響を評価する目的から、式 (5.11) 中のパラメータ  $Q_{VB}(k)$  を監視し、同パラメータのピクチャ内平均値による正規化値を算出した。15Mbps, 11Mbps における算出結果をそれぞれ表 5-4, 表 5-5 に示す。結果はピクチャタイプ別に同正規化値が分布する範囲を最小値と最大値で示した。ピクチャ符号化中の仮想バッファ占有

表 5-4: パラメータ  $Q_{VB}(k)$  の変動範囲 (15Mbps)

素材	I	P	B
(a)	0.79-1.24	0.96-1.06	割当なし
(b)	0.91-1.27	0.92-1.08	0.98-1.01
(c)	0.91-1.04	0.85-1.09	0.96-1.01
(d)	0.97-1.08	0.83-1.23	割当なし

表 5-5: パラメータ  $Q_{VB}(k)$  の変動範囲 (11Mbps)

素材	I	P	B
(a)	0.80-1.20	0.97-1.05	割当なし
(b)	0.96-1.11	0.80-1.11	0.99-1.01
(c)	0.76-1.25	0.90-1.05	0.97-1.01

量の変動は、結果として 0.75 ~ 1.25 の重み係数として、マクロブロック単位の量子化制御に反映されており、ピクチャタイプ別にみると I ピクチャおよび P ピクチャでの影響が比較的大きく、B ピクチャでは無視できるレベルである。本実験では視覚優先度パラメータ  $w(k)$  の算出に式 (5.7) を適用しているが、この場合  $w(k)$  の取り得る範囲は 0.5 ~ 2.0 である。これに対し 0.75 ~ 1.25 の範囲で意図しない重み付けが施される可能性を有していることは、主観画質向上を狙ったマクロブロック単位適応量子化制御を十分な精度で行えないことを示唆しており、改善が求められる。

5.1.3.1.2 マクロブロックレイヤ 表 5-2 および表 5-3 中の RD+SOP に相当する歪み最小化型レート制御に対し、5.1.1.2 にて導入したマクロブロック単位ビット配分手法を導入した場合の符号化実験を行い、取得した PSNR の結果を表 5-6 に示す。表中 11Mbps における素材 (d) については、VBV バッファのアンダーフローが確認されたため除外した。これより、提案方式の導入によりコーデック処理の破綻する状況に大きな変化はなく、コーデック処理の安定性は導入前と同等であるとみなせる。

画質改善に関しては、表 5-2 および表 5-3 との比較により、仮想バッファによる不安定性を排除したことに起因する効果を確認できる。素材 (c) では 0.2 ~ 0.4dB 程度の効果が確認できる一方で、素材 (b) については仮想バッファベースの方が高々 0.1dB であるが高い PSNR を示している。これは提案方式の適用時には、量子化精度に関するマクロブロック間の関係が式 (5.7) に一致するのに対し、非適用時には仮想バッファ占有量の大小に起因する成分が加味される理由から、必ずしも同式に一致する関係とはならないため起こり得るものといえる。

また提案量子化制御方式の導入による、サイド情報の符号化ビット数の増減を検証する目的から、同方式の適用時、非適用時の双方につき、量子化パラメータの符号化に費やし

表 5-6: PSNR の結果 (提案マクロブロック単位量子化制御適用時)

素材	15Mbps (dB)		11Mbps (dB)	
	I/P ピクチャ	B ピクチャ	I/P ピクチャ	B ピクチャ
(a)	26.80	割当なし	25.41	割当なし
(b)	26.93	26.45	25.77	25.69
(c)	24.81	24.13	22.88	22.87
(d)	23.82	割当なし	-	

- : 評価対象外

表 5-7: 量子化パラメータの平均符号化ビット数

素材	15Mbps		11Mbps	
	適用	非適用	適用	非適用
(a)	22341	22407	16241	17076
(b)	8604	9790	7059	8174
(c)	12242	13880	10315	11725
(d)	6572	6786	-	

- : 評価対象外

たビット数のピクチャ平均を表 5-7 に示す。結果より、提案方式の非適用時には、仮想バッファ占有量の変動による量子化パラメータの更新を強いられるのに対し、提案方式では量子化パラメータの更新頻度が必要最小限に抑えられる分、サイド情報の符号化ビット数が削減されていることが分かる。

ここで提案方式では、仮想バッファベースの手法において表 5-4 および表 5-5 で確認したような、量子化パラメータに関するピクチャ内の不確定な変動成分が皆無となる。このため、画面内でマクロブロックごとの優先度付けを量子化制御に忠実に反映することが可能である<sup>(40)</sup>。

### 5.1.3.2 提案方式の性能評価

5.1.3.2.1 量子化マトリクス of 最適割当 歪み最小化型レート制御上で 5.1.1.2 の提案方式と 5.1.2.1 で導入した量子化マトリクス of 最適割当を併用した際の符号化実験を行い、取得した PSNR の結果を表 5-8 に示す。また同手法による符号化制御の安定性を評価する目的から、素材 (d) に対しピクチャごとの歪み量に関する制御誤差を算出した結果を図 5-3 に示す。比較のため、量子化マトリクス固定時の結果を同図に重ねて示す。ここで制御誤差はピクチャの量子化誤差電力に対する (実測値 - 目標値)/目標値により算出し、目標値とは式 (5.1) から式 (5.4) により算出される目標量子化誤差電力を指す。

表 5-8: PSNR の結果 (量子化マトリクス適応選択時)

素材	15Mbps (dB)		11Mbps (dB)	
	I/P ピクチャ	B ピクチャ	I/P ピクチャ	B ピクチャ
(a)	26.74	割当なし	25.41	割当なし
(b)	26.93	26.45	25.78	25.70
(c)	24.83	24.13	22.88	22.87
(d)	23.80	割当なし	22.40	割当なし

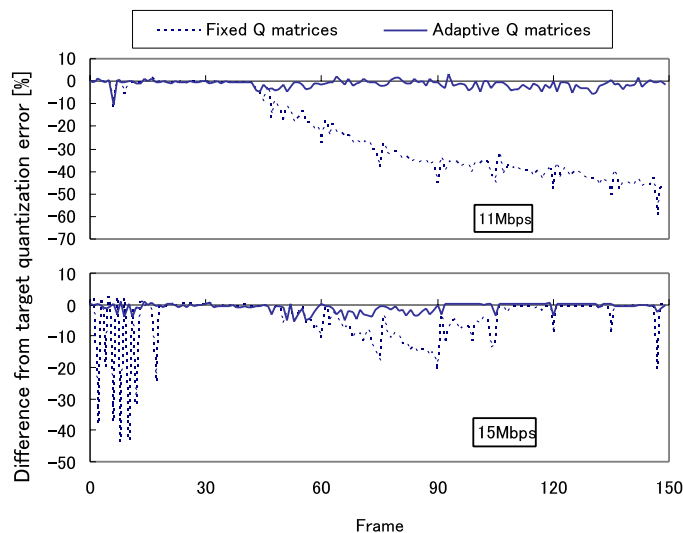


図 5-3: 量子化マトリクス適応選択時の歪み量に対する制御誤差

表 5-8 の結果より同手法の適用により, 素材 (d) に対し非適用時には不可能であった 11Mbps の符号化を破綻なく可能としているのに加え, いずれの素材においても符号化効率の低下は特に認められない. さらに図 5-3 の結果から, 量子化マトリクスの適応設定により, 制御誤差の大幅な改善が確認できる. 式 (5.5) より明らかであるが, 提案方式において制御誤差が小さいということは, VBV バッファ占有量が理想とするポイントに安定的に保たれることと等価である. よって同手法の適用は, コーデック処理の連続性をより確実に保持し, レート制御が第一に果たすべき機能を実現する上で効果的といえる.

### 5.1.3.3 歪み最小化型レート制御導入の意義

歪み最小化型レート制御は, 大局的なビット配分の改善手法として従来より検討がなされており, 導入による第一の利点は, I/P ピクチャと B ピクチャの量子化誤差に関する大小関係を, 主観画質の低下なく符号化効率を最大となるように保ちつつ, ピクチャごとのビット配分を適切に実現できる点にあることを確認した.

しかしながら, 歪み最小化型レート制御をベースとする高度利用を考えると利点はこれに



限定されない。本研究では高度利用技術の代表例として、局所的なビット配分の改善に着目し、マクロブロック単位の量子化制御につき新規提案を行い、導入による効果として、コーデック処理の安定性を低下させることなく、ピクチャ内で基準とする量子化精度を一定レベルに保ち、マクロブロック単位の優先制御を忠実に実現できることを示した。

マクロブロック単位の優先度付けを視覚特性を考慮して最適化するアプローチは、既存の検討例が少ないものの、特に低レート符号化においては主観画質の向上が大いに見込まれる部分であり、今後も効果的な新規技術の導入が期待される。本研究で導入した高度利用技術は与えられた優先度付けを高精度に実現できる点から、これら新規技術を有効に機能させるための受け皿として、極めて有用であるといえる。

#### 5.1.4 R-D 関数のパラメータ推定

本文中式 (5-2) より、歪み量  $D$  を SNR に換算した場合、R-D 曲線は式 (5-12) により示される。

$$\begin{aligned} SNR &= 10 \log_{10} \frac{\sigma_x^2}{D} \\ &= 6.02 \times m \times R + A \\ A &= 10 \log_{10} \frac{1}{\gamma_x^2} \end{aligned} \quad (5-12)$$

上式において、一般に十分なビット数が割り当てられるという前提の下では 6dB/bit の関係により  $m$  は 1.0 に等しくなるが、本節で扱うような低ビットレート下では、 $m$  は固定値として扱えないことを確認済である。以下に実測値をもとにパラメータ  $m$  および  $A$  の推定を試みた。

まず式 (5-12) に相当する  $SNR$  と  $R$  の関係を、実際に Test Model 5 による符号化ストリームから抽出した結果を図 5-4 に示す。素材は ITE HDTV 標準動画 Opening ceremony を使用した。図中のプロットは、符号化レートを 11 ~ 15Mbps の範囲で 0.5Mbps 刻みで設定して得たピクチャごとの実測値を示す。結果よりパラメータ  $m$  および  $A$  の推定はピクチャタイプ別に行うのが望ましく、加えてその他の素材に対する結果より、素材ごとに適合するパラメータは必ずしも一致しないことを確認している。

以上を考慮し、パラメータ  $m$  および  $A$  の推定をピクチャタイプ別に行うこととし、 $m$  および  $A$  の更新はピクチャの符号化を完了する都度、 $D$ ,  $\sigma_x^2$  の実測値をもとに  $SNR$  を算出し、当該シーン内で既取得の  $SNR$  値に対する誤差二乗和最小化の規範で行うこととした。

## 5.2 視覚優先度を考慮した量子化制御方式

本節では、5.1 の結果を受けて、ひずみ最小化型レート制御との併用によるさらなる高画質化手法として、マクロブロック単位量子化制御の高精度化手法を導入している。デジタル放送や DVD など、MPEG-2 をベースとする民生用の映像アプリケーションは、HDTV 化の流れにある。これらに代表されるような限られた伝送帯域・記録容量の条件下で、従来型

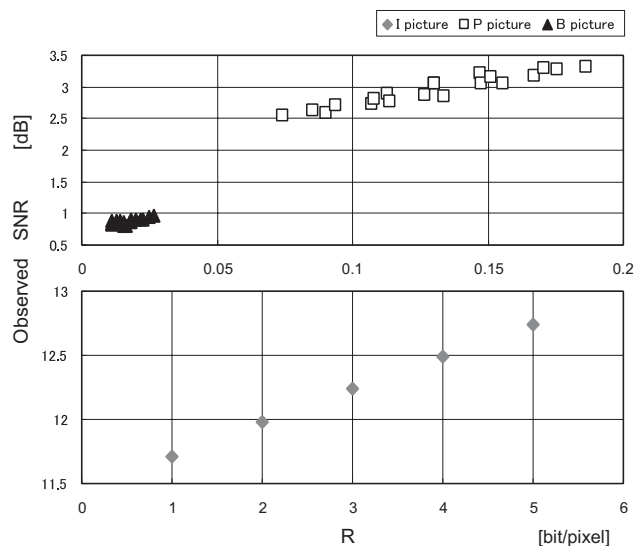


図 5-4: *PSNR* の実測結果

の MPEG-2 符号化制御により HDTV 品質を維持することは極めて困難である。これに対し、低ビットレートの HDTV に限らず、MPEG-2 の枠組の中で、さらなる高効率化を実現する要素技術の検討例が既に多く見られるのは、本章の冒頭で述べたとおりである。

筆者らは、先にビット配分の最適化アプローチとして、歪み最小化型のビット配分方式を提案した<sup>(42)</sup>。導入による効果として、符号化効率の向上に加え、画面内のマクロブロックごとの優先度付けを、量子化制御に忠実に反映する枠組を提供できるという意味で、主観画質の改善に極めて有効であることを確認した。

以上の背景から、本節ではデジタル放送での応用を想定し、MPEG-2 による低ビットレート HDTV 符号化を対象とした高画質化アプローチとして、歪み最小化型ビット配分の導入を前提に、同手法との併用により性能改善が見込まれる適応符号化制御として、マクロブロック単位量子化制御の高精度化、ならびにピクチャタイプの最適割当に着目し、方式検討を行った。

本節では、5.2.1 で、歪み最小化型ビット配分の高度利用技術として提案する、マクロブロック単位量子化制御の高精度化を述べる。5.2.2 では、符号化シミュレーション実験により提案方式の性能評価を行う。

### 5.2.1 提案要素技術 - マクロブロック単位量子化制御の高精度化 -

式 (5.7) に代表されるように、従来型のマクロブロック単位量子化制御は、基本的にマクロブロックの輝度分散のみを基準として視覚優先度パラメータを決定しており、人間の視覚感度を厳密に推定するものとはなっていない。この問題点を踏まえ、図 5-5 に示す階層構成をとるビット配分手法の提案を行う。図中、ピクチャレイヤ処理では 5.1.1.1 で述べた手法に沿ってピクチャ単位に目標量子化誤差電力を設定し、マクロブロックグループレイヤ (以

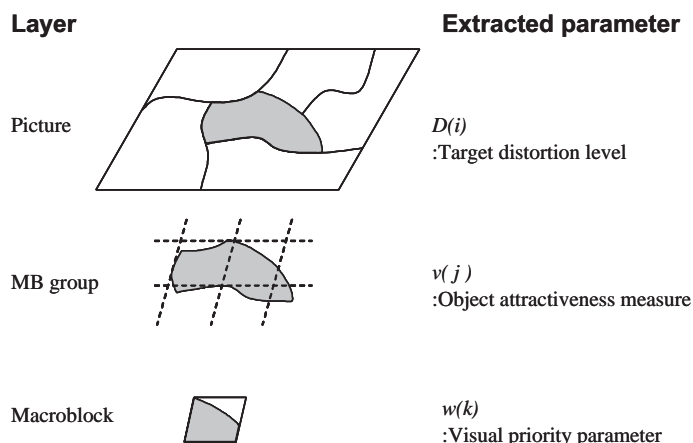


図 5-5: 提案ビット配分方式の処理フロー

下, MB グループと呼ぶ) 処理およびマクロブロック処理では, 上述の視覚優先度パラメータ  $w(k)$  を決定する. MB グループレイヤでは, 画面をオブジェクト単位で扱う目的から, 画面を構成する全マクロブロックに対し, グループ化に相当するクラスタリング処理を行う. 提案するビット配分方式に関し, MB グループレイヤにおけるクラスタリング処理とマクロブロックレイヤにおける視覚優先度パラメータの算出に分けて, 以下に述べる.

5.2.1.0.1 MB グループレイヤ クラスタリング処理で使用する分類基準値は, 色差成分  $P_b, P_r$  ならびに動き量から成る計 3 指標の組合せにより定義する. ここで便宜上,  $P_b, P_r$  はそれぞれ 5 段階に, 動き量は 2 段階に分けた上で扱うことにより, 最大で 50 種類の属性が存在することとする.  $P_b, P_r$  の評価にはマクロブロック平均値を使用し, 動き量の評価には直前(再生順)フレームを参照して得られた動きベクトル  $V_f(k)$  に対し, カメラ操作(パン, ズーム)に起因する成分を除去して得られるベクトル  $V_g(k)$  の長さ  $|V_g(k)|$  を使用することとした. カメラ操作に起因する動きベクトル成分の算出には, グローバル動きパラメータを使用した<sup>(13)</sup>. 以上のクラスタリング処理により分類された各 MB グループにおいて, その面積が小さい場合, 分類基準値の近い隣接 MB グループ(隣接は上下左右の 4 方向とする)に統合する. 統合処理は, すべての MB グループの面積が予め決められた閾値を上回るまで繰返し実行することとする.

次に, オブジェクト別の注視度を抽出する目的から, MB グループ単位に注視度パラメータ  $v(j)$  を定義する.  $j$  は MB グループの識別に用いる変数である. 注視度パラメータの推定に際しては, 以下の動視力特性および注視特性を考慮することとした.

(I) 人間の動視力特性において, 動きが小さい部分の方が良く見える傾向がある<sup>(44)</sup>.

(II) 人間は色の変化が大きい部分あるいはエッジ部を注視する傾向がある<sup>(45)</sup>.

上記 (I),(II) の特性を注視度パラメータの算出に反映させるため, MB グループごとの動き量に関する指標と, 周囲に対する変化度に関する指標を以下に定義する.

(I) 動き量に関する指標 まず MB グループの純粋な動き量を  $L(j)$  とおき, 式 (5-13) に従い算出する. 式中  $l(l=0,1,\dots)$  は MB グループ  $j$  内のマクロブロックの識別に用いられる変数であり,  $\overline{V}_f(j,l)$  は前述のベクトル  $V_f(k)$  の長さ  $|V_f(k)|$  に関する, MB グループ  $j$  内のマクロブロック平均を示す. また, MB グループがある一定量  $TH_L$  以上の動きを含む際に, 内部に含まれるマクロブロックごとの動きベクトルが散乱しているような場合には, 注視度を低く設定すべきという配慮から, MB グループ内動きベクトルの散乱度を  $R(j)$  とおき, 式 (5-14) から式 (5-16) に従い算出することとした. 式 (5-15) および式 (5-16) において,  $R(j,l,l')$  は MB グループ  $j$  に属するマクロブロック  $l$  の隣接マクロブロック (同一 MB グループに含まれる,  $l'$  により識別) に対する  $V_g(k)$  の散乱度を示す. 式 (5-15) 中,  $(V_{gx}(l), V_{gy}(l))$  は前述のベクトル量  $V_g(k)$  の成分であり,  $C_R$  は  $R(j,l,l')$  に対して設ける上限値である. 式 (5-16) 中  $\overline{R}(j,l,l')$  は  $R(j,l,l')$  に関する MB グループ  $j$  内の平均値を示す.

$$L(j) = \max(\overline{V}_f(j,l), 1) \quad (5-13)$$

$$R(j) = \overline{R}(j,l,l') \quad (5-14)$$

i)  $L(j) > TH_L$

$$R(j,l,l') = \min\left(\frac{(|V_g(l)| + |V_g(l')|)^2}{(V_{gx}(l) + V_{gx}(l'))^2 + (V_{gy}(l) + V_{gy}(l'))^2}, C_R\right) \quad (5-15)$$

ii) otherwise

$$R(j,l,l') = 0 \quad (5-16)$$

(II) 周囲に対する変化度に関する指標 周囲に対する変化度を  $K_b(j)$  とおき, 式 (5-17) および式 (5-18) に従い算出する. 式 (5-18) 中  $K_b(j,j',p)$  は, MB グループ  $j$  が異なる MB グループ ( $j'$  により識別) に隣接する, あるマクロブロック境界 ( $p$  により識別) において算出した変化度を示し,  $\overline{K}_b(j,j',p)$  は  $K_b(j,j',p)$  に関する MB グループ  $j$  内の平均値を示す.  $w_v$  は動き量の変化度に与える重み係数である. また, 同変化度が注視度に与える影響は, 当該 MB グループと同様の属性を有するオブジェクトの発生頻度が小さいほど大きくなると考え, マクロブロックごとの分類基準値に関し, 画面内のヒストグラム (該当するマクロブロック数) を求める関数  $freq$  を導入する.

$$K_b(j) = \overline{K}_b(j,j',p) \quad (5-17)$$

$$K_b(j,j',p) = w_v \times (V_g(j) - V_g(j'))^2 + (Pb(j) - Pb(j'))^2 + (Pr(j) - Pr(j'))^2 \quad (5-18)$$

以上で導入したパラメータおよび関数をもとに, 式 (5-19) から式 (5-21) により注視度パラメータの算出を行うこととする. ただし, 関数  $Sig$  は引数の増加につれて, 出力を徐々に漸近線に近づけるシグモイド関数である. 指標 (I) に関しては, 動き量  $L(j)$  および散乱度  $R(j)$  に対し, 共に反比例となる特性をもたせることとした. 指標 (II) に関しては, 当該 MB グループの有する分類基準値の画面内ヒストグラムに反比例する関数と変化度  $K_b(j)$  の積を

$K(j)$  とおき，式 (5-21) により定義した上で， $K(j)$  が閾値を上回る場合に限り， $K(j)$  に対し比例する特性を与えることとした．式 (5-21) 中  $C_a$ ， $C_b$  は，画面内ヒストグラムに反比例する関数を定義するために用いる定数である．

i)  $K(j) > 1$

$$v(j) = \text{Sig}\left(\frac{K(j)}{L(j) \times R(j)}\right) \quad (5-19)$$

ii) otherwise

$$v(j) = \text{Sig}\left(\frac{1}{L(j) \times R(j)}\right) \quad (5-20)$$

$$K(j) = \left(\frac{C_a}{\text{freq}(V_g(j), Pb(j), Pr(j))} + C_b\right) \times K_b(j) \quad (5-21)$$

5.2.1.0.2 マクロブロックレイヤ マクロブロック視覚優先度パラメータ  $w(k)$  の算出に関し，従来方式ではマクロブロックに閉じた属性のみを考慮し，式 (5-7) を用いて行っている．これに対し提案方式では，(1) で算出したオブジェクトの注視度パラメータ  $v(j)$  と，当該マクロブロックが含むテクスチャの属性を示すパラメータ  $t(k)$  (以下，テクスチャ属性パラメータ) をもとに式 (5-22) により算出することとする．ここで  $t(k)$  は，マクロブロック  $k$  において，量子化歪みがどの程度検知され易いかを示す指標に相当する．同指標の算出方法は，基本的に低周波数成分を多く含むほど大きな値を与える目的から，式 (5-7) の改良により以下に導入する．まずテクスチャ属性パラメータを，式 (5-7) に沿って  $act(k)$  に基づき決定した際の問題として，精細なマクロブロック中に平坦なブロックが単独に存在する場合でも  $act(k)$  が低い値となり，マクロブロック全体で量子化が精細に行われ，過度のビット配分を招く可能性がある．

$$w(k) = \frac{t(k)}{v(j)} \quad (5-22)$$

本問題を解決する目的から，視覚優先度パラメータの算出に使用する輝度分散については，当該ブロックおよび上下左右に隣接するブロックの計5ブロックの輝度分散値に rank order filter を適用し，2番目に小さな値を当該ブロックの補正輝度分散として抽出する．ここで，マクロブロックを構成するブロックの補正輝度分散に関する最小値を  $cact(k)$  とし，式 (5-7) にて  $act(k)$  を  $cact(k)$  で代用して得られる値を  $cw(k)$  とおき，同値をマクロブロックのテクスチャ属性パラメータ  $t(k)$  として用いることとする． $t(k)$  の導出過程を，式 (5-23)，式 (5-24) にまとめる． $avg\_cact$  は  $cact(k)$  のピクチャ平均を示す．

$$t(k) = cw(k) \quad (5-23)$$

$$cw(k) = \frac{2 \times cact(k) + avg\_cact}{cact(k) + 2 \times avg\_cact} \quad (5-24)$$

ここで，MB グループ境界に位置するマクロブロック (以下，BMB と呼ぶ) では，隣接する MB グループの属性が混在している可能性が高く，加えて前述の注視特性 (II) に該当する可

表 5-9: 共通の符号化条件

符号化方式	MPEG-2 MP@HL(4:2:0)
符号化レート	11Mbps, 15Mbps
GOP 構造	N: 15 M: M=3 または M=1
動き補償	フレーム予測/フィールド予測適応
動き検出	$\pm 63.5$ 画素 $\times$ $\pm 31.5$ ライン, 半画素 (1frame 間隔に対して)
DCT タイプ	フレーム DCT/フィールド DCT 適応
量子化制御	量子化スケールタイプ: 非線形

能性が高い．よって  $t(k)$  の算出に関して，当該マクロブロックが BMB に該当する場合には，例外的に式 (5-23) を適用せず，式 (5-25) を用いることで量子化制御上優遇することとした．同式において， $v_{max}$  および  $cw_{min}$  はともに，BMB および上下左右に隣接する計 5 マクロブロックより抽出するパラメータであり，それぞれオブジェクト注視度パラメータ  $v(j_0)$  の最大値， $cw(k)$  の最小値である． $j_0$  は識別子  $k$  で示されるマクロブロックが属する MB グループの識別子である．

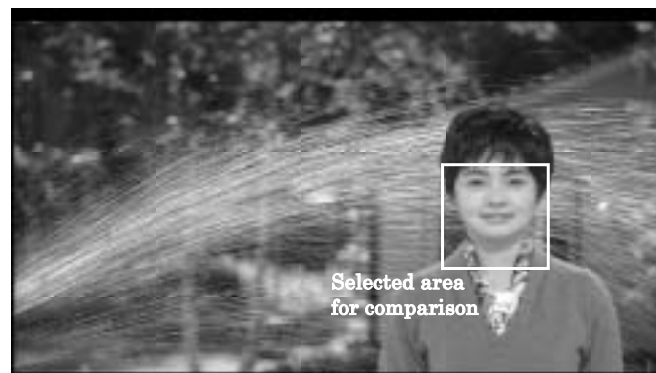
$$t(k) = \frac{v(j_0)}{v_{max}} \times cw_{min} \quad (5-25)$$

## 5.2.2 性能評価

5.2.1 で導入した提案要素技術の性能評価を行う目的から符号化実験を行った．以下で共通に使用する符号化シミュレーション条件を表 5-9 に示す．事前の実験結果より，素材および符号化レートに依らず，式 (5-2) の  $\gamma_x^2$  は 1.0 に設定し，式 (5-3) の  $w_B$  は 1.4 に設定した．

**5.2.2.0.3 マクロブロック単位量子化制御の高精度化** 5.2.1 で導入した提案方式の適用により，どの程度の画質向上が見込めるかを検証する目的から，マクロブロックごとの優先度付けを，より厳密に行った際の画質改善を評価した．歪み最小化型ビット配分の制御下で，5.2.1 で提案した視覚優先度パラメータの割当方式を組んだ上で，符号化実験を行った．事前の実験結果より，式 (5-15) における  $TH_L$ ， $C_R$ ，式 (5-18) における  $w_v$ ，式 (5-19) および式 (5-19) における関数  $Sig$ ，式 (5-21) における  $(C_a, C_b)$  については次式の設定を用いた．

$$\left\{ \begin{array}{l} TH_L = 3.0 \\ C_R = 10.0 \\ w_v = 0.1 \\ Sig(x) = \frac{4.0}{\exp(0.5-x) \times 2.0 + 1.0} \\ (C_a, C_b) = (100.0, 0.1) \end{array} \right. \quad (5-26)$$



(a) Original picture

ConventionalProposed

(b) Coded picture

図 5-6: 再生画質の比較

一例として、ITE HDTV 標準テスト画像”Sprinkling”を入力とし、15Mbps の符号化レートで得られた再生画像を図 5-6 に示す。事前の実験結果より M 値は最良値として  $M=1$  に設定した。比較方式として、同一の符号化条件下で 5.1.1.2 に相当する方式を適用した際の結果を同図中”Conventional”として示す。比較方式において視覚優先度パラメータの算出は式 (5-7) に準じて行った。ただし、再生画像は画質の違いが顕著な部分として、人物の顔周辺領域のみを切り出して示した。結果より、マクロブロックごとの優先度付けの最適化による主観画質の向上が見られ、特に顔の平坦部分におけるブロック歪みの低減、ならびに目やスカーフなど各種輪郭の忠実な再現といった、改善効果が見られる。その他の素材に対する実験結果も踏まえ、提案方式の導入による主観画質の向上は、方式の性質上、一般に以下の条件を満たす素材において特に顕著であることを確認した。

- 画面を構成するオブジェクトが、動き量と色差により特徴づけられる。
- 実際の注視領域が特定オブジェクトに偏って存在し、周辺オブジェクトに対する注視度の差が激しい。

### 5.3 むすび

MPEG-2 の枠組の中でさらなる高効率化を実現するための要素技術としてレート制御の最適化に着目し、ピクチャレイヤでの大局的な制御と、マクロブロックレイヤでの局所的な制御に分けて方式検討を行った。

ピクチャレイヤの検討では、歪み最小化型レート制御をベースとした拡張方式の提案を行った。性能評価としては、歪み最小化型レート制御の導入による直接的な効果として、方式単独の効果を検証した上で、間接的な効果として、提案拡張方式との併用による、主観画質の向上、ならびに低レート化でのコーデック処理の安定性改善を確認した。<sup>(41)</sup>

マクロブロックレイヤでの検討では、提案手法として、歪み最小化型ビット配分に基づき実現される、マクロブロック単位量子化制御の高精度化につき検討を行った。符号化実験結果より、提案方式の導入による効果として、高難易度素材に対する主観画質の向上、および符号化効率の改善を確認した<sup>(46)</sup>。



## 第6章

### 符号化構造の適応選択方式

#### 6.1 まえがき

本章では、MPEG-2の符号化構造をピクチャレイヤとマクロブロックレイヤに大別した上で、ピクチャレイヤでは、画面ごとの符号化方法を特徴づけるピクチャタイプの適応選択を最適に行う手法を提案し、マクロブロックレイヤでは、16画素×16ラインの矩形画像領域単位の符号化方法を示すマクロブロック符号化モードの選択を発生符号量最小化の規範で行うアプローチを導入している。2003年の地上波デジタル放送サービスの開始に向けて、放送局設備のデジタル化が急がれている。地上波デジタル放送では、各放送局でユーザ配信に割り当てられる帯域が従来型の固定受信に加え、移動受信、携帯受信の計3サービスに振分けで運用されるため、固定受信サービス(HDTV)に割当て可能なビットレートが11~15Mb/sと極めて低いと予想される。このため、BSデジタル放送にて利用されているような従来型のMPEG-2エンコーダを単純に適用した場合、受信側で得られる最終画質はHDTV解像度、ならびにHDTV放送品質を十分に維持できない可能性が高い。以上の背景から、このような厳しい条件下においても放送品質の維持を可能とする低レートHDTV符号化方式の確立は急務である。

本章では、低レートHDTV符号化を対象とし、MPEG-2符号化効率の改善に大きく寄与する部分として、ピクチャレイヤではピクチャタイプの適応選択に、マクロブロックレイヤでは、マクロブロック符号化モードの適応選択に着目して方式検討を行った。まず、ピクチャタイプの適応選択に関して、本検討は放送への適用を考慮してリアルタイム系を対象とし、既提案のアプローチと比較して最適なピクチャタイプの割当をより高精度に実現するものである<sup>(47)</sup>。次に、マクロブロック符号化モードの適応選択に関して、本検討は既提案のアプローチと同様、基本的に発生ビット数最小化の規範で実現するものであるが、発生ビット数の推定関数をより厳密に定義した点と、低ビットレートに特化したモード選択条件を導入している点で改善を図っている。

本章では、6.2で、ピクチャタイプの適応選択に関し、まず適応選択による効果を検証した上で、候補とすべきピクチャタイプの選択パターンを限定し、同候補からの適応選択手法について提案する。6.3では、マクロブロックの符号化モード適応選択手法について検討し、DCT係数の符号化ビット数推定に基づく、発生ビット数最小化規範での符号化モード選択

手法の提案を行う。6.4では、符号化実験により提案方式の性能評価を行い、提案方式の導入による効果について検証ならびに考察を行う。最後に6.5で結論を述べる。

## 6.2 ピクチャタイプの適応選択

### 6.2.1 前提条件

ピクチャタイプの選択に関する最適解を求めるにあたり、主観画質上、理想とされる各ピクチャタイプ間の画質の関係を明らかにしておく必要がある。MPEG-2に対する符号化制御の参照方式である Test Model 5<sup>(20)</sup> や文献<sup>(26)</sup>,<sup>(27)</sup> では、ピクチャごとに割当ててる目標符号化ビット数に関しピクチャタイプごとの配分を決め、結果としてピクチャタイプ間で画質に差を設けている。しかしながら、低レート符号化においては、全ビット数に占めるブロックレイヤ以外（以下、オーバーヘッド部分と呼ぶ）のビット数の割合が極めて大きく、加えてこの割合が入力素材ごとに大きく異なるため、上記ビット数配分が再生画質上に及ぼす振舞も確定的ではない。以上を考慮し、本章では、ピクチャタイプ間に設ける画質の関係を安定的に維持する目的で、ピクチャタイプ間の量子化精度の関係を定める制御係数を直接扱うこととする。具体的には、MPEG-2 符号化で適用可能なピクチャタイプを、予測参照される I, P ピクチャと予測参照されない B ピクチャとに大別し、I, P ピクチャの符号化で適用する量子化パラメータを 1 とした際に、B ピクチャの符号化で適用する量子化パラメータを  $k(\geq 1.0)$  とし、これを制御係数とする。ただし、本制御係数の最適解は P ピクチャの挿入間隔 (M) ごとに決められるものと推測され、各種テストシーケンスに対し、数パターン (M, k) を適用した符号化実験を行い、再生画質を評価することで、パラメータ M ごとに最適な制御係数 k を決定することとする。実験ではレート制御が安定的に機能している際の性能評価を行う目的から、15Mb/s をターゲットとし、 $k = \{1.0, 1.4, 1.8\}$  の3通りに対し、量子化パラメータ (mquant) 固定のもとで符号化を行い、客観画質および主観画質を評価した。表 6-1 に従う符号化条件のもと、M=3 および M=5 とした場合に3種類のシーケンス (各 150 フレーム) に対して測定した PSNR の結果を表 6-2 から表 6-4 にまとめる。ここで mquant の設定は、各シーケンスに対し 15Mb/s つまり 75Mb 相当の発生ビット数を目標値とし、 $\pm 3\%$  の誤差の範囲内で仮想バッファ占有量を適切なレベルに固定することにより行った。

結果より、 $k = 1.0 \sim 1.8$  のレンジにおいて、 $k$  を増すにつれ平均的な PSNR は概ね高い値を示すことがわかる。Whale show と Opening ceremony においては、同図にみられるゲインが主観評価でも同様に確認できたが、高域周波数成分を多く含む Green leaves に限っては  $k = 1.8$  とした場合にちらつきが目立ち、直接的なゲインは確認できなかった。表にはないが  $k > 1.8$  とした場合、 $k = 1.8$  の結果と比べ平均的な PSNR に大差はないが、I, P ピクチャと B ピクチャ間の画質差は拡がる方向にあり、主観評価ではフリッカ成分が増える傾向にあることを確認した。

表 6-1: 符号化条件

符号化方式	MPEG-2 MP@HL(4:2:0)
レート制御	仮想バッファ占有量固定方式 (15Mb/s 相当)
ピクチャ構造	フレームピクチャ
動き補償	フレーム予測/フィールド予測適応
動き検出	$\pm 63.5$ 画素 $\times$ $\pm 31.5$ ライン, 半画素 (1 フレーム間隔に対して)
DCT タイプ	フレーム DCT/フィールド DCT 適応

表 6-2: k 値と PSNR の関係 (Whale show)

(M,k)		PSNR dB		
		I, P ピクチャ	B ピクチャ	Total
M=3	k=1.0	25.85	26.34	26.18
	k=1.4	26.64	26.33	26.43
	k=1.8	27.70	26.84	27.13
M=5	k=1.0	24.76	25.13	25.06
	k=1.4	25.67	25.16	25.26
	k=1.8	26.81	24.50	25.75

### 6.2.2 適応選択により得られる効果

ピクチャタイプの適応選択に関する方式検討に先立ち, 同最適化による有効性を評価する目的で符号化実験を行った. 実験では, 最適なピクチャタイプが選択された場合, 従来の M=3 固定の符号化に比べて, どの程度の画質向上が見込めるかを検証するため, ピクチャタイプ選択についてとり得るすべてのパターン (P と B の組合せ) について量子化パラメータ固定で符号化を行い, 発生ビット数を評価した. 符号化条件は表 6-1 に従うこととし, 加えて以下の条件に従うこととした.

- 符号化フレーム数は 6 (先頭フレームは I ピクチャに固定).
- 連続挿入する B ピクチャの最大枚数は  $4(M - 5)$ .
- 6 フレーム目以後も参照画像として使うが, ビット数のカウントには入れない.
- 6.2.1 での検討結果をもとに  $k = 1.4$  固定とする.

実験で用いる素材として, HDTV 標準テスト画像より, 計 10 カットを選択した. 選択したカットの内容を図 6-1 にまとめる.

表 6-3: k 値と PSNR の関係 (Opening ceremony)

(M,k)		PSNR dB		
		I, P ピクチャ	B ピクチャ	Total
M=3	k=1.0	26.57	26.83	26.74
	k=1.4	27.40	27.02	27.15
	k=1.8	27.79	27.04	27.29
M=5	k=1.0	26.38	26.59	26.55
	k=1.4	27.46	26.96	27.07
	k=1.8	27.97	27.00	27.20

表 6-4: k 値と PSNR の関係 (Green leaves)

(M,k)		PSNR dB		
		I, P ピクチャ	B ピクチャ	Total
M=3	k=1.0	22.65	23.22	23.03
	k=1.4	23.93	23.78	23.83
	k=1.8	24.26	23.93	24.04
M=5	k=1.0	22.37	22.82	22.74
	k=1.4	24.07	23.55	23.66
	k=1.8	24.87	23.71	23.96

ピクチャタイプの選択を総当たりの行った際の最適パターンによる M=3 に対するゲインとして、固定量子化適用時のビット数削減率を図 6-2、図 6-3 に示す。参考までに M=1 による M=3 に対するビット数削減率も同図に重ねて示した。比較を容易にするため、M=3 に比べ B ピクチャを減らすことで、最適パターンが得られた素材をタイプ A に分類し、結果を図 6-2 にまとめ、それ以外の素材をタイプ B に分類し、結果を図 6-3 にまとめて示す。Whale Show, European Market, Crowded Crosswalk といった比較的大きい動きを含む画像では、B ピクチャをまったく入れない方が発生ビット数を 20% 前後も少なく押さえられるという結果が得られた。また、その他の画像に関しては M=3 および M=1 ではカバーできない選択パターンが最適解となっているものの、そのビット削減効果は高々 5% であることがわかった。

### 6.2.3 1 パス型適応選択手法

従来より、ピクチャタイプの適応選択を厳密に実現する検討例は、一般に非リアルタイムでの符号化を対象としており<sup>(28)</sup>、本章で扱うような放送用アプリケーションにおいて直接適用することは困難であった。本章では、6.2.2 で得られた結果より、M=3 および M=1 の 2

パターンからの選択により，各種入力素材に対し符号化効率を高めるという意味で適したピクチャタイプの選択が実現できるとした上で，放送での適用を考慮し1パスで  $M=3/M=1$  の適応選択を高精度に実現する方式に関し検討を加える．ここで，1パスで適応選択が可能であるとは，本線の符号化とは別系統で事前符号化を行うことなく，一般的なエンコーダシステムと同様に当該フレームの前処理および近傍フレームの符号化結果をもとに，1系統で適応制御を実現できることを意味する．

MPEG-2 符号化においてはピクチャタイプとして I,P,B の3種類の併用が可能である．ピクチャ単位の適応制御による効果が高いと考えられるものにシーンチェンジ点が挙げられ，シーンチェンジ点での画質劣化を防止する目的から，割当ビット数の算出やIピクチャの挿入タイミングに関する対策を検討した例がみられる<sup>(36),(48)</sup>．本検討においてもIピクチャの挿入は，シーンチェンジ点にリンクして行うこととし，符号化に先立ち当該ピクチャのシーンチェンジ情報が得られるという前提を設ける．ただしIピクチャに関しては，本研究の対象が放送であることから，受信機でのチャンネル切替を考慮し定期的な挿入を義務付ける(例えば0.5秒に1回)必要がある．次に，Bピクチャの挿入について考える．一般に，Bピクチャによる予測効率はPピクチャよりも高く，代表的なGOP構造( $N=15, M=3$ )においても，全ピクチャの大半をBピクチャに割当てている一方で，Bピクチャ挿入による弊害として以下が挙げられる．

- (a) Bピクチャ符号化ビット数に占めるオーバーヘッド部分の割合が高く，ブロックレイヤ(DCT係数部分)に十分なビット数が割当てられない可能性がある．
- (b) Bピクチャの挿入枚数が多いほどPピクチャの予測フレーム間隔が増加し，予測効率が低下する可能性がある．
- (c) エンコーダ，デコーダ双方で発生する並べ替え遅延が増加する．

(a)，(b)の問題は入力特性に依存して発生することから，これら事象の発生を踏まえて，Bピクチャ挿入の有無を判断することで，効果的なピクチャタイプの適応選択が実現されるものと考えられる．以上を踏まえ， $M=3/M=1$ の選択に使用する判定指標(以下，単に判定指標と呼ぶ)を以下に導出する．前提として，シーンの先頭においては初期状態として  $M=3$  を選択し，以降はPピクチャの挿入を行うタイミングに合わせ(Iピクチャを参照する場合を除く)，更新の判定を行うこととする．

(a)の問題に関連し， $M=3$ と $M=1$ の場合についてDCT係数符号化に割当て可能なビット数をそれぞれ  $R_{M3}$ ， $R_{M1}$  とし，式(6.1)および式(6.2)に従い算出する．ただし  $M=3$  におけるピクチャタイプ配列の周期性を考慮し，算出単位は近傍符号化済ピクチャ3枚( $M=3$ :PBB， $M=1$ :PPP)の合計とし，当該ピクチャ符号化時に非適用としている  $M$  に関してはオーバーヘッドビット数の推定を行う必要がある(6.5参照)．

(M=3)

$$R_{M3} = R - H_{M3}(B) \times 2 - H_{M3}(P) \quad (6.1)$$

(M=1)

$$R_{M1} = R - H_{M1}(P) \times 3 \quad (6.2)$$

- $R$  : 残ビット数 (3 フレーム相当)  
 $H_{M3}(B)$  : B ピクチャ (M=3) オーバヘッドビット数  
 $H_{M3}(P)$  : P ピクチャ (M=3) オーバヘッドビット数  
 $H_{M1}(P)$  : P ピクチャ (M=1) オーバヘッドビット数

上式において、M=1 適用時に P ピクチャ 1 枚あたりに割当て可能な DCT 係数符号化ビット数は  $R_{M1}/3$  により表せる。また M=3 に関して、事前実験の結果より B ピクチャの DCT 係数符号化に要するビット数は P ピクチャと比較して格段に少ない点を考慮し、P ピクチャに割当て可能な DCT 係数符号化ビット数を  $R_{M3}$  と仮定する。ここで P ピクチャ符号化の観点から M=1 に対する M=3 の優位性を示す指標  $V_{M3}$  を式 (6.3) により定義し、式 (6.4) が真となる場合に限り M=1 を適用する。 $TH_V$  は  $V_{M3}$  に対して定義する判定閾値である。

$$V_{M3} = \frac{R_{M3}}{(R_{M1}/3) \times W_{Err}} \quad (6.3)$$

$$V_{M3} < TH_V \quad (6.4)$$

ただし、 $W_{Err}$  は (b) の問題に関連して導入する重み係数であり、予測フレーム間隔の増加に伴って P ピクチャの予測効率が低下する度合を反映しており、算出手順を以下に説明する。1 フレーム間隔の順方向予測誤差信号の算出において、トップフィールドとボトムフィールドについて参照フィールドを限定しない場合の誤差 2 乗和を計算し、それぞれ  $E_{top}$ 、 $E_{btm}$  とする。加えて、トップフィールドとボトムフィールドについて参照可能なフィールドを、予測距離が大きい一方に限定した場合の誤差 2 乗和を計算し、それぞれ  $E'_{top}$ 、 $E'_{btm}$  とする (図 6-4 参照)。このとき次式により  $W_{Err}$  を決定する。

$$W_{Err} = \min\left(\frac{E'_{top}}{E_{top}}, \frac{E'_{btm}}{E_{btm}}\right) \quad (6.5)$$

## 6.3 マクロブロック符号化モードの適応選択

### 6.3.1 前提条件

MPEG-2 符号化では、マクロブロックレイヤの符号化を以下のように適応的に行うことが可能であり、本章では、これを総称して単に符号化モード選択と呼ぶ。

(a) Intra / Inter 符号化の区別

(b) Motion タイプ (Frame 予測 / Field 予測) の区別

表 6-5: 符号化モードの定義

$m$	(a)	(b)	(c)
0	Intra		
1	Inter	Frame	順方向
2		Field	
3		Frame	逆方向
4		Field	
5		Frame	双方向
6		Field	

(c) 予測に用いる参照画像の区別 (順方向/逆方向/双方向)

以上の定義から，MPEG-2 符号化においてマクロブロックごとに符号化モード  $m$  が取り得る候補は表 6-5 のようにまとめられる．

Test Model 5 などにみられる一般的な MPEG-2 符号化制御において，符号化モードの選択は単に予測誤差信号の絶対値和や分散値を基準として行われており，動きベクトルビット数ならびに Frame DCT/Field DCT(以下，DCT タイプと呼ぶ) の選択を考慮した最適化手法に関する検討例は少ない．このため，同制御のもとでは，発生ビット数最小化という意味で最適な符号化モードの選択は保証されず，特に，全ビット数に占めるオーバーヘッド部分の割合が高い低レート符号化に対しては，オーバーヘッド部分に費やすビット数も加味した符号化モード選択の改善による効果が大きいと予想される．以上の背景から，本章では，符号化モードの適応選択手法に関して最適化を試み性能評価を行った．前提条件として，符号化モード選択時には，Intra モードを除く各符号化モードにおいて最適とされる動きベクトルは特定されており，マクロブロック単位に各符号化モード選択時の輝度信号に対する予測誤差信号 (16 画素 × 16 ライン) を取得可能であるとする．以上の前提のもとで符号化モードおよび DCT タイプの選択手法について最適化を図る．

### 6.3.2 マクロブロック符号化ビット数の推定

6.3.1 の前提をもとに符号化ビット数の推定を行う．ここですべての DCT 入力ブロックに対し，一旦 DCT を施して実際のビット数を得るのは現実的ではないため，DCT 入力ブロックの統計量として分散値を抽出し，同分散値をもとに各ブロックに要する符号化ビット数を推定することとする．具体的には固定量子化器 (量子化パラメータ:  $\Delta$ ) の下で分散値 と発生ビット数の関係を非線形関数により近似可能であることを利用し，式 (6.6) で示す非線形関数  $f$  によりブロックの発生ビット数を推定する．

$$f(\sigma^2, \Delta) = a \times \log_2 \sigma^2 + b \quad (6.6)$$

ただし関数  $f$  を決める実数  $(a, b)$  は、符号化種別 (Intra/Inter の2種類) と量子化精度の組合せに応じて、最適な解をもつと考えられ、符号化器にはすべての組合せに対応する  $(a, b)$  が予め用意されていることとする。ここで MPEG-2 における量子化精度は、量子化パラメータと量子化マトリクスの乗算により決まるが、一例として Intra, Inter のそれぞれにつき、量子化マトリクスを1種類に固定し、量子化スケールタイプを非線形タイプに限定した場合、ブロックごとに適用される量子化精度としては量子化パラメータ (MQQUANT 値) で表現できる計 31 種類に特定でき、2種類 (符号化種別)  $\times$  31種類の計 62種類の  $(a, b)$  を用意する必要がある。式 (6-6) を用い、各候補  $(m, n)$  ( $m$ :符号化モード,  $n$ :DCT タイプ) に対するマクロブロックの符号化ビット数は次式により推定可能である。6.3.1 で設けた前提から、算出対象は輝度信号のみとした。

i)  $m = 0$  (Intra モード)

$$V(m, n) = d + s + C(m, n) \quad (6-7)$$

$$C(m, n) = \sum_{k=0}^3 f_a(\sigma_k^2(m, n), \Delta) \quad (6-8)$$

ii)  $m > 0$  (Inter モード)

$$V(m, n) = r + s + C(m, n) \quad (6-9)$$

$$C(m, n) = \sum_{k=0}^3 f_b(\sigma_k^2(m, n), \Delta) \quad (6-10)$$

式 (6-8), 式 (6-10) において,  $f_a, f_b$  はそれぞれ, Intra, Inter のマクロブロックに対し, 式 (6-6) に準じてブロックレイヤの符号化ビット数を推定する関数であり,  $f_a$  に限っては Intra DC 係数を除く DCT 係数を推定対象とする。式 (6-7), 式 (6-9) において,  $d, s, r$  はともに確定的に計算されるビット数成分であり, 以下の定義に従う。

$d$  : Intra DC 係数符号化ビット数 (輝度信号 4 ブロック分)

$s$  : 動きベクトルを除くオーバーヘッド部分 (マクロブロックレイヤ) のビット数

$r$  : 動きベクトル符号化ビット数

マクロブロックごとの符号化モード選択は、取り得るすべての候補  $(m, n)$  について符号化ビット数  $V(m, n)$  の推定を行った上で以下に従いビット数最小化の規範で行う。

i)  $C(m, n) = 0$  なる候補が存在する場合

ブロックレイヤのビット数が極めて少ないと推定されるため、符号化モードとして優先的に選択することとする。複数存在する場合には、誤差電力の総和を比較し最小値を与えるものを選択する。

ii) otherwise

$\min_{m,n} V(m, n)$  を与える  $(m, n)$  を選択する。



表 6-6: 符号化条件

符号化方式	MPEG-2 MP@HL(4:2:0)
符号化レート	15Mb/s
レート制御	Test Model 5 準拠
量子化制御	量子化マトリクス固定， 非線形量子化スケール
ピクチャ構造	フレームピクチャ
動き補償	フレーム予測/フィールド予測適応
動き検出	$\pm 63.5$ 画素 $\times$ $\pm 31.5$ ライン，半画素 (1 フレーム間隔に対して)
DCT タイプ	フレーム DCT/フィールド DCT 適応

## 6.4 性能評価

### 6.4.1 実験結果

以上で提案した要素技術の評価を行う目的で符号化実験を行った．本章で使用する共通の符号化条件を表 6-6 に示す．以降で示す結果はすべて，Test Model5 準拠のレート制御が安定的に機能した際の符号化データに基づくものである．

#### 6.4.1.1 ピクチャタイプの適応選択

まず，6.2.3 で提案した  $M=3/M=1$  の判定指標  $V_{M3}$  の有効性を評価する目的で，各種テスト画像入力に対して得られた  $V_{M3}$  の値を図 6-5 に示す． $V_{M3}$  の値としては， $M=3$  および  $M=1$  の符号化による実測値と， $M=1$  の符号化中に得られる値 ( $M=3$  を推定)， $M=3$  の符号化中に得られる値 ( $M=1$  を推定) の 3 通りを重ねて示した．テスト画像は図 6-1 で選定したものと同一 10 カットを使用した．図 6-5 は便宜上 6.2.2 で確認された  $M=1$  による  $M=3$  に対するゲインが大きいものから順にサンプルを示している．

図 6-5 の結果より，提案した判定指標に対して適切な閾値処理を設けることで， $M=1$  による符号化ゲインの高いものを適応的に抽出できることがわかる．さらに，実際の符号化における 1 パスでの適応選択を想定し， $M=3$  および  $M=1$  適用時にオーバーヘッドビット数の推定を行いつつ  $V_{M3}$  を算出した結果より，オーバーヘッド推定に起因して発生する誤差は少なく，安定的に正しい選択を行う上で問題ないレベルであることを確認した．今回提案した  $M=3/M=1$  適応選択の方法は P ピクチャの DCT 係数符号化に残されたビット数の比較に基づくものであり，適用対象は  $M=3/M=1$  からの絞込みに限定されず，B ピクチャの挿入に関し選択肢をさらに広げたケースにおいても同様に有効であるといえる．

次に，判定指標  $V_{M3}$  を用いた適応選択手法を評価する目的から，符号化実験を行った．入力としては図 6-1 で選定した 10 カットにつき，各カットの近傍 30 フレームを選択し，これ

表 6-7: ピクチャタイプの適応選択による PSNR の結果

テスト画像	ビット削減率 % (M=3 1 とした場合)	PSNR dB		
		Proposed (M 値)	TM5(M=3 固定)	
			Total	B 以外
European market	26.7	34.31(M=1)	32.98	32.86
Crowded crosswalk	23.4	35.67(M=1)	34.42	34.77
Whale show 2	17.6	25.37(M=1)	24.94	25.00
Whale show 1	15.6	28.11(M=1)	27.42	27.39
Street car	3.2	34.77(M=1)	34.38	34.55
Japanese room	-1.6	35.00(M=3)	34.96	34.45
Ice hockey	-4.5	37.46(M=1)	36.94	36.86
Weather report	-8.7	36.07(M=3)	35.97	35.84
Green leaves	-12.3	23.10(M=3)	23.13	23.00
Opening ceremony	-15.6	25.63(M=3)	25.45	25.36

をランダムに連続再生することで 300 フレームのシーケンスを用意した。以降で示す符号化実験の入力にはすべて同シーケンスを用いることとする。式 (4) における  $TH_V$  は、式 (3) にて  $R_{M3}$  のうち P ピクチャが占める割合が実質 70~80% である点を考慮し、1.3 に設定した。表 6-7 に提案したピクチャタイプの適応選択を適用した際の PSNR の結果、ならびに割当 M 値をカットごとに示した。割当 M 値としては、M=3/M=1 の適応選択の結果、適用された時間が長かったものを選択した。参考までに、各テスト画像ごとに 6.2.2 で明らかにした M=1 の M=3 に対するビット数削減率を併記し、比較のため M=3 固定割当の符号化による結果も合わせて記載した。M=3 固定割当の符号化結果については、B ピクチャを除くピクチャに限定した平均 PSNR と全体の PSNR に分けて示した。

結果として、提案したピクチャタイプの適応選択により、符号化効率の観点から M=1 による効果が高いと思われるテスト画像を中心として M=1 が適用される結果が得られ、従来の M=3 固定割当に比べ、PSNR で平均して 0.4dB から 1.3dB のゲインが得られた。Whale show でカメラをパンする部分など、特に高速な動きを伴う区間においては、最大で 2dB 程度のゲインが確認された。さらに M=3 固定割当において、予測参照されない B ピクチャの画質は、一般に I, P ピクチャに比べ低く保たれる点を考慮し、従来方式の結果として B ピクチャを除外した平均 PSNR の評価も行ったが、提案方式の優位性は保たれることを確認した。また、提案手法により M=3 が適用されたテスト画像に関しては、M=1 の適用により効率が低下するまたは同等であることを確認しており、適応選択が適切に機能していることが裏付けられる。

表 6-8: マクロブロック符号化モードの適応選択による PSNR の結果

テスト画像	平均 PSNR dB		PSNR のゲイン dB	
	Proposed	TM5	最大	最小
European market	32.93	32.98	2.37	-0.53
Crowded crosswalk	34.36	34.42	1.68	-0.20
Whale show 2	25.34	24.94	2.91	-0.62
Whale show 1	27.50	27.42	0.80	-0.36
Street car	34.63	34.38	1.08	-0.10
Japanese room	36.06	34.96	2.53	-0.48
Ice hockey	37.16	36.94	1.23	-0.08
Weather report	36.52	35.97	1.67	-0.05
Green leaves	24.06	23.13	1.95	0.18
Opening ceremony	25.88	25.45	1.27	0.30

#### 6.4.1.2 マクロブロック符号化モードの適応選択

6.3 で述べた高画質化手法の性能評価を行う目的で、符号化実験を行った。まず、図 6-6 に式 (6-6) の DCT ブロック符号化ビット数の推定関数について実測値 (Opening ceremony, Inter マクロブロック, 量子化パラメータ=16) との比較結果を示す。ただし関数  $f$  の決定に際しては、事前実験により、量子化パラメータごとに、ブロックの分散値と発生ビット数の実測値を与え、これに最良の近似を与える設定値を実数  $(a, b)$  の最適値として選択した。結果より、実測値は多少の幅をもって分布しているものの、中心となる曲線は式 (6-6) の非線形関数により忠実に近似できていることがわかる。同傾向は素材、符号化種別、量子化パラメータの大小に依らず確認された。

次に、マクロブロック符号化モードの適応選択に関し、提案方式を適用した際に得られた平均 PSNR を表 6-8 にまとめる。符号化モード選択の改善による効果を純粹に評価する目的から、GOP 構造は  $N=15, M=3$  固定とした。比較のため、従来方式として Test Model 5 により符号化した際の結果も合わせて示す。加えて、両方式につきフレームごとの PSNR を比較した上で、提案方式の従来方式に対するゲインを最大値と最小値で示した。結果より、使用したカットの約半数において平均 PSNR で最大 0.4dB から 1.0dB のゲインが確認され、これに相当する部分においては主観評価においても明らかな画質向上が認められた。素材に依存して効果の程度にばらつきはあるものの、提案手法の導入が効率低下を招くものではないことを確認した。

## 6.4.2 考察

### 6.4.2.1 トータルの符号化効率に関して

本章では、MPEG-2 符号化構造を最適化の対象とし、ピクチャレイヤ、マクロブロックレイヤのそれぞれにおいて、適応選択をより厳密に行う方式を提案した。6.4.1 にて個々の要素技術を単独で導入した際の効果が大きいことは確認できたものの、双方の技術を同時に実装した際の各技術の因果関係を明らかにしておく必要がある。

まずマクロブロック符号化モードの適応選択に関し、選択された符号化モードの分布について、提案方式と従来方式の比較結果を以下にまとめる。全体的に Motion タイプと DCT タイプの選択に起因して、提案方式によるゲインが得られたものといえる。DCT タイプの選択については、従来方式では単にフィールド DCT ブロックの相関をもとに決定しているため、ビット数最小化の規範で厳密な選択を行う提案方式の結果とは大きく異なる傾向を示したものと見える。

- ・ Intra : 選択数に大差はない。
- ・ 予測タイプ : 提案手法では双方向予測の選択比率が 10 %程度少ない。
- ・ Motion タイプ : 提案手法では Frame 予測をより多く選択する傾向にある。
- ・ DCT タイプ : 選択の傾向が大きく異なる。

さらに、固定量子化器適用時の実験結果から、提案方式による従来方式に対するビット数削減は、P、B ピクチャで得られる部分が大半を占め、中でも B ピクチャにおける効果が顕著であることを確認した。加えて、M=3 および M=1 の符号化時に、それぞれマクロブロックレイヤでの改善手法を適用した際の比較結果より、M=3 での効果が明らかに高いことを確認した。これは、B ピクチャの符号化ビット数に占めるオーバーヘッド部分の比率が高く、このような条件下では、オーバーヘッド部分のビット数を考慮しない従来方式が選択する符号化モードと、実際に最適な符号化モードとの乖離が大きいためといえる。

以上の考察を踏まえ、トータルの符号化性能を評価する目的から、双方の技術を併用した際の符号化実験を行った。表 6-9 に平均 PSNR および Test Model 5 に対する平均 PSNR のゲインを示す(表中, Hybrid)。比較のため、平均 PSNR のゲインに関し、ピクチャタイプの適応選択のみ適用時の結果(表中, P-type)、およびマクロブロック符号化モード適応選択のみ適用時の結果(表中, MB-mode)を合わせて示す。結果より、符号化ゲインに関しては、素材に依らず、双方の技術を併用した場合が最も優れていることがわかる。また、双方の技術を併用した場合のピクチャタイプの割当パターンは、ピクチャタイプの適応選択を単独で適用した際の結果とほぼ同様であり、トータルの符号化ゲインの内訳として、M=3 の割当が行われる素材においてはマクロブロック符号化モード適応選択のみの効果が忠実に反映されていることを確認した。

結論として、従来の一般的な MPEG-2 符号化構造として、M=3 固定のピクチャタイプ選択(ピクチャレイヤ)と Test Model 5 に準拠したマクロブロック符号化モード選択(マクロブロックレイヤ)の組合せを比較対象とすれば、本章で提案した各レイヤの要素技術は相補的に機能し、M=3 が適する素材に対しては主にマクロブロックレイヤで改善を図り、M=1

表 6-9: 提案要素技術の併用による PSNR の結果

テスト画像	平均 PSNR dB	PSNR のゲイン dB dB		
		Hybrid	P-type	MB-mode
European market	34.41	1.43	1.33	-0.05
Crowded crosswalk	35.51	1.09	1.25	-0.06
Whale show 2	26.17	1.23	0.43	0.40
Whale show 1	28.29	0.87	0.69	0.08
Street car	34.94	0.56	0.39	0.25
Japanese room	36.14	1.18	0.04	1.10
Ice hockey	37.66	0.72	0.52	0.22
Weather report	36.45	0.48	0.10	0.55
Green leaves	24.08	0.95	-0.03	0.93
Opening ceremony	26.23	0.78	0.18	0.43

が適する素材に対しては主にピクチャレイヤで改善を図るといった構図になるといえる。

#### 6.4.2.2 提案要素技術の高度化

まずピクチャタイプの適応選択に関し、本章では放送アプリケーションを想定し、Iピクチャの挿入間隔を15フレーム以下に制限した上で、 $M=3/M=1$ の選択に関して検討を行ったが、Iピクチャの符号化難易度が極端に高い場合においては、同制限を緩くすることでトータルの符号化効率向上に大きく寄与するものと考えられ、同制限の適応設定に関し検討の余地があるといえる。

次に、マクロブロックの符号化モード選択に関し、本検討では符号化モード選択の改善による効果を純粋に評価する目的から、符号化モード選択部の制御を動きベクトル検出部とは切り離して考えているため、当該マクロブロックの符号化モードを選択する時点で各符号化モードに対応する動きベクトルは既に決定されている。しかしながら、低レート符号化における動きベクトルのビット数は無視できず、各符号化モードに対する動きベクトルの選択に幅を持たせた上で、本提案手法の適用を行うことで、より一層の効率化につながるものと考えられ、さらなる検討課題としたい。

### 6.5 オーバヘッドビット数の推定

例として、 $M=1$ での符号化中に $M=3$ 適用時のBピクチャにおけるオーバヘッドビット数 $H_{M3}(B)$ を推定する手順を以下に説明する。

- i) Pピクチャ( $M=1$ )の符号化結果より動きベクトルの平均ビット数を計算し $b_{AVG}$ とおく。

- ii) 初期状態の符号化結果より，B ピクチャ(M=3) の符号化モード分布を推定し，発生する Frame 予測ベクトル，Field 予測ベクトルの本数を動きベクトルのエフコード設定  $(f_x, f_y)$  ( $f_x, f_y$ : 水平方向エフコード, 垂直方向エフコード) ごとにカウントし，それぞれ  $n_{FR}(f_x, f_y)$ ,  $n_{FI}(f_x, f_y)$  とする．
- iii) B ピクチャの動きベクトル符号化ビット数  $b_{M3}$  を次式に従い推定する．

$$b_{M3} = \sum_{f_x} \sum_{f_y} S(f_x, f_y) \quad (6-11)$$

$$\begin{aligned} S(f_x, f_y) &= n_{FR}(f_x, f_y) \times \{b_{AVG} + (f_x - f_{xM1}) \\ &\quad + (f_y - f_{yM1})\} \\ &\quad + n_{FI}(f_x, f_y) \times \{b_{AVG} + (f_x - f_{xM1}) \\ &\quad + (f_y - f_{yM1}) + 2\} \end{aligned} \quad (6-12)$$

$S(f_x, f_y)$  :  $(f_x, f_y)$  のエフコード設定下で発生する  
動きベクトルの総ビット数

$(f_{xM1}, f_{yM1})$  : M=1 の P ピクチャ符号化で使用した  
エフコード設定

上式では，エフコードの大小により動きベクトル符号化ビット数の固定長成分を見積り，Field 予測に関しては参照フィールド識別フラグの符号化ビット数を考慮している。

以上の算出手順に基づいて得られたオーバーヘッドビット数の推定値を図 6-7 に示す．比較のため M=3 での符号化による実測値を重ねて示す．結果より，上記手順によりオーバーヘッドビット数の推定が高い精度で実現されていることが確認できる．P ピクチャのオーバーヘッドビット数についても同様の手法で推定可能であることを確認している．

## 6.6 むすび

地上波デジタル放送で想定される低ビットレート下での HDTV 放送品質の維持を目的とし，HDTV 符号化方式の高効率化に関し検討を行った．具体的には，MPEG-2 の符号化構造のうちピクチャレイヤとマクロブロックレイヤに着目し，各レイヤにおいて適応選択をより厳密に行う高効率符号化方式に関して検討を行った．

符号化実験結果より，各レイヤについて提案した高効率化手法について，それぞれ単独で適用した際の効果を確認した上で，入力素材に依らず安定的に高画質化を実現するという観点から，両技術の併用が有効であることを確認した．

本章で提案した要素技術は，あくまでも MPEG-2 符号化構造の最適化に特化したものである．今後，対象を符号化前処理，動きベクトル検出，量子化制御と広げていくことで，さらなる高画質化要因の積上げが見込まれている．

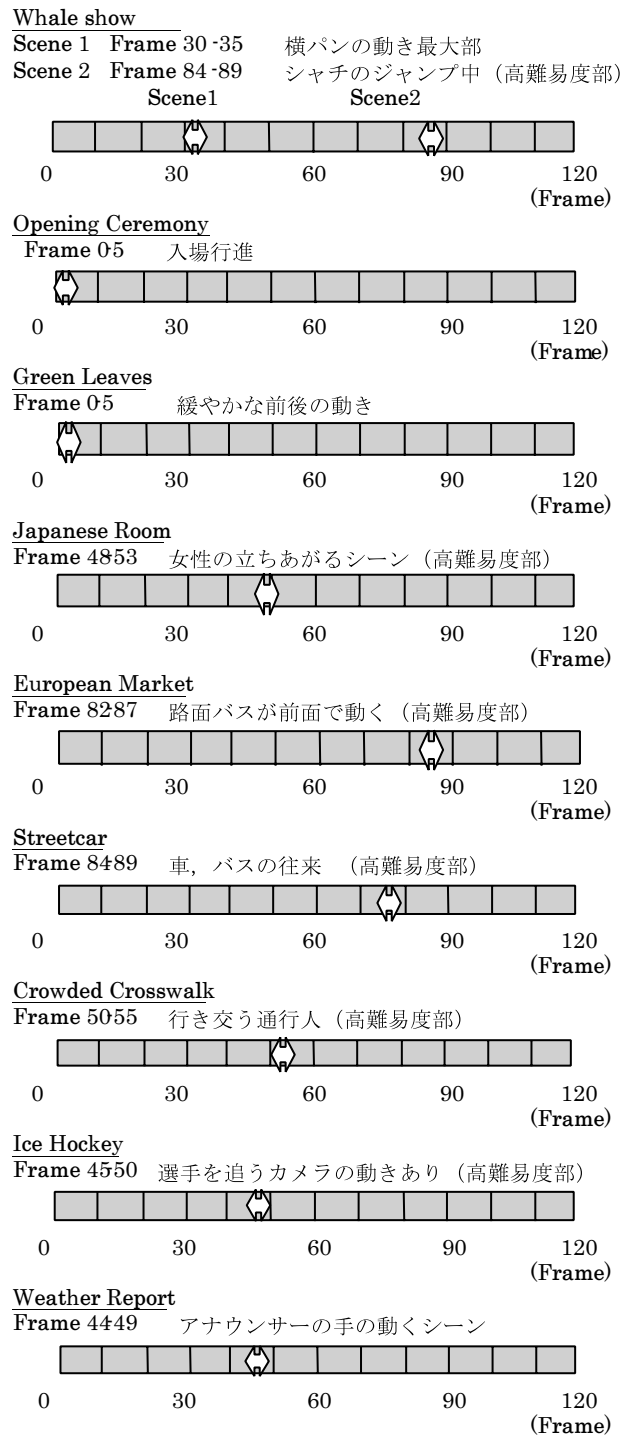


図 6-1: 実験で使用したテスト画像

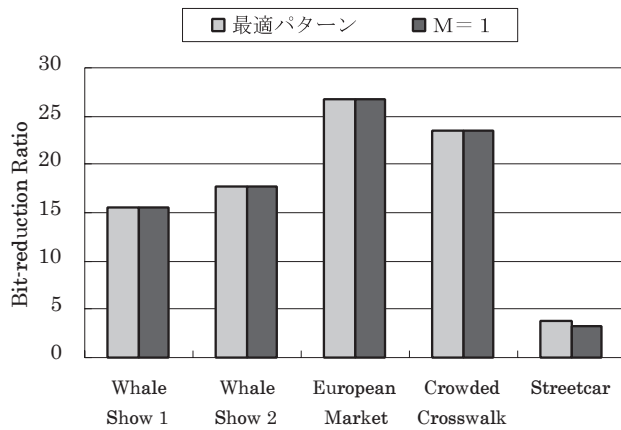


図 6-2: ピクチャタイプ適応選択によるビット削減率 (タイプ A)

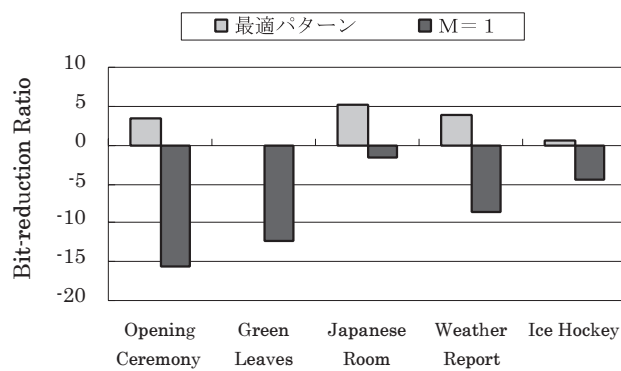


図 6-3: ピクチャタイプ適応選択によるビット削減率 (タイプ B)

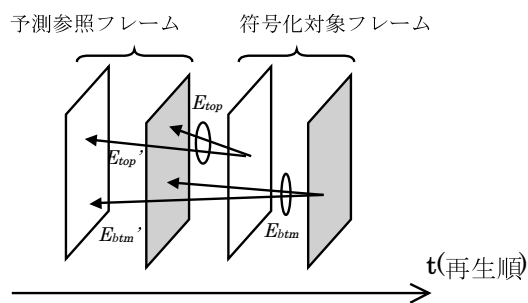


図 6-4: 重み係数  $W_{Err}$  の算出



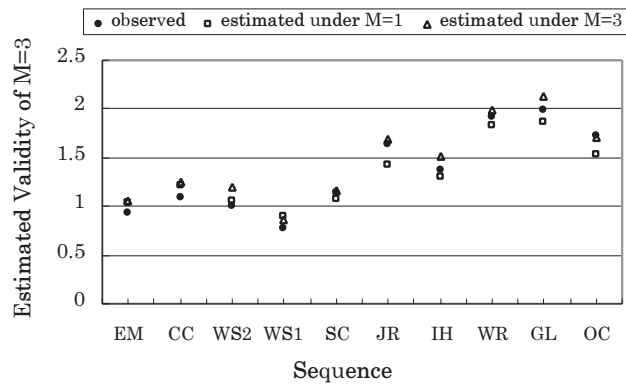


図 6-5:  $V_{M3}$  の算出結果

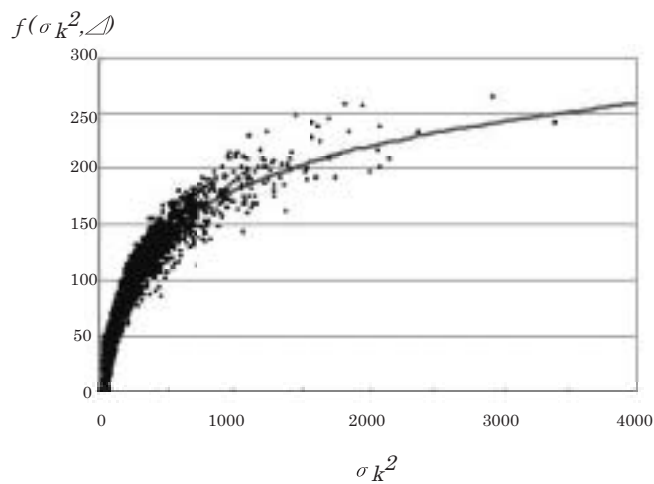


図 6-6: ブロック符号化ビット数の比較 (Inter マクロブロック,  $\Delta = 16$ )

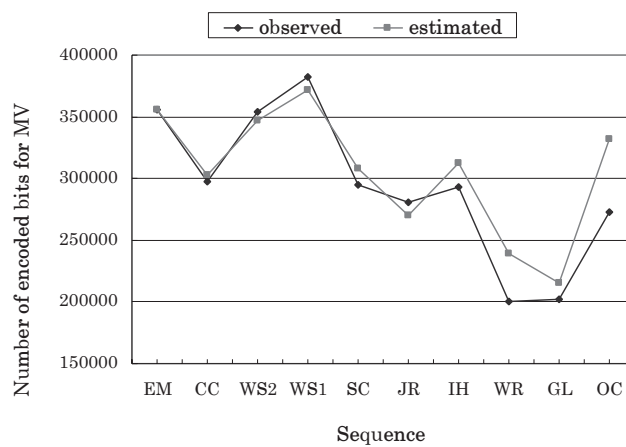


図 6-7: オーバヘッドビット数の推定結果

## 第7章

# 低遅延HDTV符号化方式

### 7.1 まえがき

本章では、第4章から第6章において最適化対象としたMPEG-2に基づくコーデック処理によると原理的に500msec弱の遅延量が強いられる点を問題として捉え、コーデック処理遅延の大幅な短縮を実現する符号化方式の導入を行っている。映像素材の伝送サービスに対するユーザ要求品質に関して、主に系列放送局間の番組配信や現場からのTV中継の用途では、画質はもちろんのこと、伝送遅延の低減が重要視されている。素材伝送クラスの圧縮伝送において、従来よりMPEG-2に準拠したコーデック技術の利用例が多く、その伝送遅延の大半をコーデック処理時間が占めていた。これはMPEG-2が動き補償とDCTの併用を基本とし、一般的に適用される符号化パラメータでは、符号化効率を優先し、動き予測におけるフレームの並べ替え遅延や、CBR (Constant Bit-Rate) 符号化に適合させるためのバッファリング遅延が大きいことに起因する。

一方で従来技術と比較し大幅に低遅延での動画像符号化を実現するためには、動き補償を適用せずに、フレームまたはフィールドといった画面内で処理が完結するイントラ符号化技術の採用が有効であると考えらる。イントラ符号化方式として、特に符号化効率の高さから、JPEG2000を動画像符号化へ応用するためのファイルフォーマットとして、Motion JPEG2000の国際標準化が既に完了しており<sup>(8)</sup>、デジタルシネマの規格に採用される見込みである<sup>(9)</sup>。ここでJPEG2000は静止画用圧縮符号化方式の国際標準であり、動画像符号化に応用する上での問題として、以下が報告されている。

- 符号量制御として、静止画像用の従来技術であるR-D最適化手法をそのまま適用すると主観画質の低下を招く可能性がある<sup>(49)</sup>。
- 1080iなどインターレース信号に対し、単純にフレーム単位の符号化処理を適用すると、符号化効率の低下を招く可能性がある<sup>(50)</sup>。

これらの問題解決により符号化性能を改善し、かつ低遅延での符号化を実現する目的から、本章では代表的な映像フォーマットとしてHDTVを対象とし、JPEG2000をベースに低遅延かつ高効率な符号化を実現するための符号化制御技術を提案し、性能評価を行う。本章では、7.2で提案方式を検討する上での前提条件につき導入を行う。7.3では符号化構造の

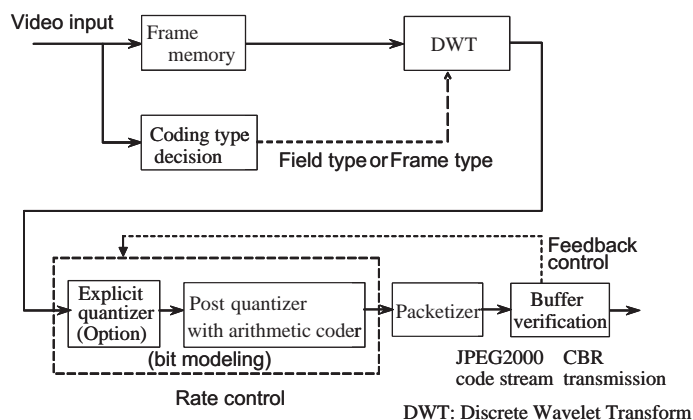


図 7-1: 想定する符号化器のブロック図

最適化を実現する要素技術として、符号量制御方式、ならびに符号化タイプの適応選択方式について、最適化技術の提案を行う。7.4 では基本性能評価として、提案要素技術の導入により得られる直接的な効果の検証を行う。7.5 では一連の要素技術の導入により達成されるコーデック遅延量につき考察を加える。最後に 7.6 で結論を述べる。

## 7.2 検討の前提条件

### 7.2.1 想定する符号化器

本研究で想定する符号化器のブロック図を図 7-1 に示す。映像入力としては 1080i の HDTV を想定し、フィールドまたはフレーム単位に JPEG2000 符号化が順次適用される構成である。本章では JPEG2000 符号化の適用対象となる映像信号の単位を単にピクチャと呼ぶ。動画像符号化方式において、エンコーダ出力が CBR の回線に適合することを裏付けるためには、MPEG-2 Video の VBV (Video Buffer Verifier) に代表されるバッファモデルの規定が不可欠である。バッファモデルの導入による問題として、検証用バッファ (以下、検証バッファと呼ぶ) のバッファサイズに比例してコーデック遅延の増加を招くため、同バッファサイズの低減は符号化遅延を短縮する上で必須の課題であるといえる。

### 7.2.2 従来技術の問題点

#### 7.2.2.1 符号量制御

JPEG2000 による静止画像符号化の符号量制御手法としては、Explicit 量子化を適用せずに、ビット切捨てによるポスト量子化を MSE 最小化規範で行うのが一般的であり、同手法の適用をベースとした動画像符号化の実装例が報告されている<sup>(51)</sup>。ここで Explicit 量子化とは、図 7-1 で示すとおりポスト量子化器の前段で適用されるスカラー量子化を指し、規格上はオプション扱いである。符号量制御をポスト量子化の単独適用により行う場合、R-D

表 7-1: 切捨てパス数の時間的な変動 (最悪時)

サブバンド	切捨てパス数の統計量	
	分散	平均
3LL	1.00	12.13
3HL	0.59	11.42
3LH	0.07	11.03
3HH	0.74	11.80
2HL	2.10	12.22
2LH	20.50	26.65
2HH	20.33	13.27
1HL	72.06	18.73
1LH	65.99	15.20
1HH	72.10	18.72

(Rate-Distortion) 最適化手法であるため MSE は最小となるが、サブバンド内でコードブロックごとに符号化された符号化パス数に開きが生じ、これが 2 のべき乗のオーダで量子化誤差に反映される結果、歪み量は空間的に偏った分布となり得る。このため動画像符号化への応用時には、同分布が時間的に変化することで、主観画質を低下させる可能性がある。以下に同弊害を定量的に評価する。まず動画像符号化においてポスト量子化の単独適用により符号量制御を実装した際の、コードブロックごとの切捨てパス数を観測した結果を表 7-1 に示す。同表はコードブロックごとの切捨てパス数について、時間的な変動割合を評価する目的から、同パス数の時系列サンプルより分散値を求め、サブバンドごとに最大値を与えるコードブロックを最悪時として抽出した上で、最悪時の分散値と平均値を示している。符号化条件は後述の表 7-2 に従い、符号化対象として ITE HDTV 標準動画像の Opening Ceremony より 60 フレーム分を使用した。符号化タイプはフレームタイプとした。簡単のためピクチャごとの割当符号量は同一とした。結果より、ポスト量子化の単独適用に基づく符号量制御を施した場合には、特定のコードブロックにて切捨てパス数の時間的な変動が大きくなり、この傾向は高域サブバンドにおいて顕著であることが分かる。

#### 7.2.2.2 インターレース信号の扱い

HDTV に代表されるインターレース信号を JPEG2000 で扱う場合、符号化タイプとしてフィールドタイプとフレームタイプのいずれかを選択可能である。一般に符号化効率の高さからフレームタイプを固定的に割り当てる例が多いが、フレームタイプは再生時刻が 1 フィールド間隔離れた 2 つのフィールドをマージし、一括して符号化処理を行うため、高速な動きを伴う素材に対しては効率が低下する。

### 7.3 提案符号化制御

#### 7.3.1 符号量制御

##### 7.3.1.1 基本原理

7.2.1 で挙げた低遅延符号化に向けた課題，ならびに 7.2.2.1 で挙げた問題点を踏まえ，以下の前提に基づき符号量制御手法の検討を行った．

- (a) Q-table による Explicit 量子化を基本とする．Q-table の算出式を式 (7-1) に示す． $band$ ， $delta[band]$  はそれぞれ，サブバンド識別子，サブバンドごとの量子化ステップサイズである． $cq$  は各サブバンドに一律で適用される重み係数であり，ピクチャの符号化が完了する都度更新される． $dqt$  は量子化テーブル  $delta$  の初期値として参照される値を指す．

$$delta[band] = dqt[band] \times cq \quad (7-1)$$

(b) ポスト量子化において廃棄する符号化パス数はすべてのコードブロックで同一とする．ここで，(a) にて Explicit 量子化の併用を基本構成としたのは以下の理由による．仮に (b) のみでの制御を考えた場合，ピクチャに対する符号量配分のパターン数は符号化パス数により制限され，符号量制御の観点からは取り得る選択肢が極めて限られており，粗い制御となる点が懸念される．よって，符号量制御において十分な精度を得る上で，Explicit 量子化の併用は必須であるといえる．

##### 7.3.1.2 処理手順

提案する符号量制御手法について，具体的な処理手順を以下に説明する．

(i) 目標符号量の算出 7.2.1 で述べたとおり，検証バッファサイズの低減により符号化遅延の短縮を図る目的から，検証バッファの占有量に関して理想値に対する誤差を吸収する仕組みを取り入れることとし，当該ピクチャ（時刻： $t$ ）の目標符号量  $R(t)$  を式 (7-2) により算出する．目標符号量の導出は，MPEG-2 符号化における有効性が確認されているスライディングウィンドウ型の算出モデル<sup>(41)</sup>に基づき行った．

$$R(t) = \frac{v_0 + (L_W + t) \times B - (v_T + \sum_{i=0}^{t-1} S(i))}{L_W} \quad (7-2)$$

$$B = \frac{bit\_rate}{picture\_rate} \quad (7-3)$$

$L_W$  : 符号量制御のウィンドウサイズ

$v_0$  : 検証バッファにて先頭ピクチャが引き抜かれる直前のバッファ残量

$v_T$  : ピクチャの引抜き直後における検証バッファ残量の目標値

$S(i)$  :  $i$  番目のピクチャにて発生した符号化ビット数

(ii) ポスト量子化 すべてのコードブロックで均等に廃棄する符号化パス数を  $np$  とし、当該ピクチャにおいて  $np$  に対する発生符号量  $r(t, np)$  は予め算出可能であるとする。このとき  $|r(t, np) - R(t)|$  を最小とする  $np$  を全探索により特定する。

(iii) Q-tableの更新 ピクチャの符号化完了時には、後続ピクチャの符号化に備え、 $cq(t)$  の更新を式 (7.4)、式 (7.5) により行う。式 (7.5) において関数  $f(x)$  は式 (7.6) に示すとおり、当該ピクチャにおける  $np$  と  $r(t, np)$  の実測結果より、量子化ステップサイズ  $x$  と発生符号量  $y$  の関係を近似するために用いられる。式 (7.5) において関数  $f(x)$  は式 (7.6) により定義される関数であり、引数  $x$  はポスト量子化により切り捨てた符号化パス数を量子化ステップサイズに換算した値を指す。同関数は、当該ピクチャにおける  $np$  と  $r(t, np)$  の実測結果をもとに、 $x$  に対する発生符号量  $y$  の近似値を与える。次に式 (7.4)、式 (7.5) の導出根拠を示す。まず Explicit 量子化の直後で得られる発生ビット数が、既に目標符号量を下回るケースが発生する点を懸念し、Explicit 量子化の直後では目標値  $R(t)$  に比べて、1 ビットプレーン、つまり3つの符号化パスに相当する余剰ビットが得られることを理想とした。一方で当該ピクチャ  $t$  に対し  $cq(t-1)$  による Explicit 量子化のもと目標符号量  $R(t)$  を達成するためには、 $x = x_T$  相当のポスト量子化が適用される。これに対し上記理想に適うためには  $x = 2$  を満たすことが必要であるため、 $x_T$  の2に対する乖離分を Explicit 量子化の量子化ステップサイズで吸収することとした。

$$cq(t) = cq(t-1) \times \frac{x_T}{2} \quad (7.4)$$

$$f(x_T) = R(t) \quad (7.5)$$

$$\begin{cases} y = f(x) \\ x = 2^{\frac{np}{3}}, y = r(t-1, np) \end{cases} \quad (7.6)$$

### 7.3.1.3 タイル分割符号化への応用

JPEG2000 では符号化処理、および復号処理を並列実装する上で有用な符号化ツールとして、タイル分割符号化がサポートされている。タイルとは符号化対象画像を固定サイズの矩形エリアに分割したものを指す。符号化ツールとしてタイルを用いる場合、通常の符号化処理でピクチャに対して適用される符号化処理、および復号処理が、それぞれタイル単位に個別に施される仕組みとなる。

提案した符号量制御手法をタイル分割符号化時にも同様に適用するため、(i) でピクチャに対して得た  $R(t)$  をタイルごとに分配した上で、(ii) のポスト量子化をタイルレベルで独立して行うこととする。 $R(t)$  の分配方法は式 (7.7)、式 (7.8) に従うこととする。 $r_j(t, 3)$  は  $r(t, 3)$  のうち  $j$  ( $j = 0, 1, \dots, \text{tile\_cnt} - 1$ ) 番目のタイルに相当する符号量であり、 $\text{tile\_cnt}$  はピクチャを構成するタイルの総数である。タイル化歪み抑制の観点から  $cq$  は全タイルで共通の値を使用するという前提のもと (iii) の Q-table 更新はピクチャレベルで行うことと

する。

$$R_j(t) = R(t) \times \frac{r_j(t-1, 3)}{r(t-1, 3)} \quad (7.7)$$

$$r(t, 3) = \sum_{j=0}^{tile\_cnt-1} r_j(t, 3) \quad (7.8)$$

### 7.3.2 シーン適応型符号化タイプ選択

7.2.2.2 で挙げた問題に対処するアプローチとして、量子化制御や前処理フィルタによる対策に関する検討例がある<sup>(50)</sup>。これらの検討は、フレーム処理を前提としたアプローチであったが、本稿では符号化タイプ自体を最適値で更新することでさらなる改善効果が得られると考え、以下に方式提案を行う。前提として図7-1で示したとおり、入力画像はまずフレーム単位で符号化タイプ決定部に入力され、解析により、当該フレームに対する最適な符号化タイプがJPEG2000符号化部に設定されることとする。提案方式において、符号化タイプの決定は式(7.9)から式(7.12)に従い行われる。 $I(x, y)$ は入力画像の輝度信号成分である。 $(x, y)$ は当該フレーム上の画素位置を指す( $0 \leq x \leq hsize - 1, 0 \leq y \leq vsize - 1$ )。 $hsize, vsize$ はそれぞれフレームを構成する水平画素数、垂直ライン数である。フレームは1ラインおきに第1フィールドと第2フィールドがマージされた構成をとる。基本原理として、提案方式は候補となる符号化タイプごとに、垂直方向の相関を推定した上で、より相関の高い一方を選択するアプローチである。ただし式(7.11)に示すとおり、両符号化タイプにて発生するサイド情報量の違いを考慮し、重み係数 $a(R)$  ( $a(R) > 1.0$ )を導入している。 $a(R)$ は符号化レートにより定まる定数である。

一般的なJPEG2000エンコーダの実装において、符号量制御部では主観画質向上の目的から、Visual weightingと呼ばれる視覚感度を考慮したサブバンド単位の優先制御が導入される。一方でフレームタイプの符号化では、当該フレームを構成するフィールド間の動きが大きくなるにつれライン間相関が低下し、結果として1LHサブバンドの係数レベルを増大させる<sup>(50)</sup>。典型例として、図7-2にカメラ操作を伴うテスト画像におけるDWT (Discrete Wavelet Transform) 係数の分布例を示す。Visual weightingの適用時には、ポスト量子化におけるR-D最適化で評価するピクチャの歪み量は、サブバンドごとの歪み量に対して、重み付け総和をとったものである。ここで用いられるサブバンドごとの重み係数のうち、視覚的な優先度を反映させる成分は特にCSF (Contrast Sensitivity Function) 係数と呼ばれ、LLサブバンドを1.0とした相対値により表現される。通常CSF係数は1.0以下に設定され、高周波のサブバンドには低めの値が適用される結果、高周波成分を粗く量子化する作用が働く。以上を踏まえ、符号化タイプの選択は1LHサブバンドに対する重み係数を加味して行うのが妥当であるといえる。提案方式では、係数 $a(R)$ を式(7.12)に示す $a(R, w_v)$ に置き換えることとする。 $w_v$ は1LHサブバンドのCSF係数を示し、 $b(R)$ は符号化レートに応じて定まる定数とする。

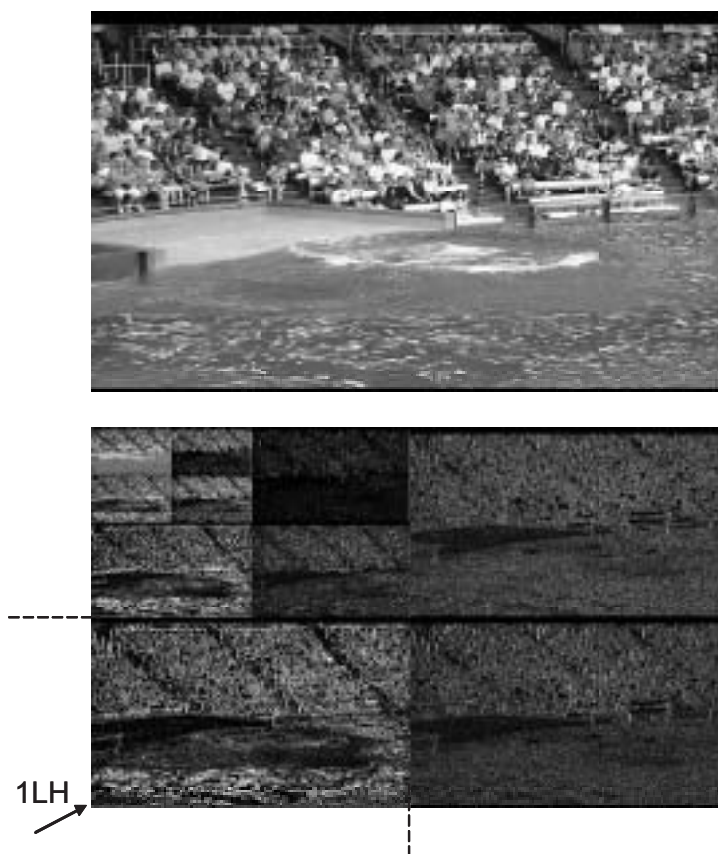


図 7-2: HDTV フレーム画像に対するサブバンド信号分布の例 ( 上段 : 原画像 , 下段 : DWT 係数 )

$$c_I = \sum_{y=0}^{vsize-3} \sum_{x=0}^{hsize-1} |I(x, y) - I(x, y + 2)| \quad (7.9)$$

$$c_P = \sum_{y=0}^{vsize-3} \sum_{x=0}^{hsize-1} |I(x, y) - I(x, y + 1)| \quad (7.10)$$

$$i) \quad c_P < a(R) \times c_I \quad (7.11)$$

フレーム処理を選択

$$ii) \quad otherwise$$

フィールド処理を選択

$$a(R, w_v) = b(R) \times \log_2 w_v + a(R) \quad (7.12)$$

#### 7.4 性能評価

7.3 で述べた提案手法の性能評価を行う目的から符号化シミュレーション実験を行った . 本章で使用する共通の符号化条件を表 7-2 に示す . 提案要素技術の符号化シミュレーション



表 7-2: 共通の符号化条件

入力画像	1920×1080 / 59.94Hz (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	50Mbit/s (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
コードブロックサイズ	64 × 64

ツールのソフトウェア実装は、Motion JPEG2000 の参照ソフトである VM version 4.1<sup>(52)</sup> をベースに行った。入力には ITE HDTV 標準テスト画像より、以下の 3 種類を使用した。以後、特に言及しない限りタイル分割については非適用とする。

- European market  
画面中央を汽車が移動する。カメラ操作はなし。汽車の色調が鮮明であるが精細部は少ない。
- Whale show  
シャチの動きを追う素材。水平方向に高速なパニングを伴う区間あり。観客席に精細部を含む。
- Opening ceremony  
入場行進を撮影したもので、カメラ操作および高速な動きをほとんど含まない。高精細部分が大半を占める。

#### 7.4.1 提案方式の性能評価

##### 7.4.1.1 符号量制御

提案符号量制御手法の安定度を評価するため、検証バッファの占有量の時間遷移を観測した結果を図 7-3 から図 7-5 に示す。符号化タイプはフレームタイプを用いた。ピクチャ単位の目標符号量の算出に際し、式 (7.2) の  $L_W$  は 15 に設定した。また理想的なケースに対する占有量の振れ幅を観測することで安定度の検証が行えると考えた。ここで提案方式の目的は、以下の両立であり、これを理想的に満足するケースとして、ポスト量子化は非適用とし、Explicit 量子化単独の制御により各ピクチャの符号化ビット数が互いに同一に保持される場合（以下、最小ケースと呼ぶ）を想定した。

- ポスト量子化をコードブロックごとに一様に扱う。
- 所要の検証バッファサイズを低減する。

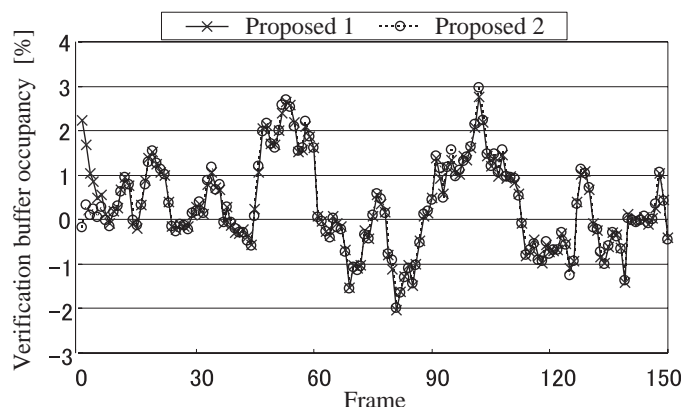


図 7-3: 提案方式による検証バッファ占有量の結果 (European market)

このため式 (7-2) における  $v_0$ ,  $v_T$  は式 (7-13) に従い最小ケースで適用すべき設定を与えた。一連の図において、縦軸は占有量を 1 ピクチャあたりの平均符号化ビット数で正規化した値をパーセンテージで示す。

$$\begin{cases} v_0 = B \\ v_T = 0 \end{cases} \quad (7-13)$$

参考のため、1 フレームを 1920 画素 × 270 ラインの 4 タイル構成で符号化した際の結果も合わせて示す。図中、タイル分割の非適用時、適用時の結果をそれぞれ、Proposed 1, Proposed 2 と表記する。結果より、検証バッファ占有量の変動分は ± 6 % に抑えられており、これは本章で扱う以外の様々なテスト画像に対して行った実験結果においても、同様に成立していることを確認した。図 7-3 から図 7-5 で示される検証バッファ占有量の変動分のうち、マイナス分はアンダーフロー防止のために確保すべき初期遅延量の増分に相当し、変動幅はアンダーフローおよびオーバーフローを防止するための所要バッファサイズの増分に相当する。この点から提案方式の導入による所要バッファサイズの増分は、最小ケースに比して高々 12 % であると見込まれる。ただし最小ケースの符号化は、各ピクチャの Q-table として、全ピクチャに共通の目標符号量を達成するものを事前に探索することで実現したものであり、1 パスの符号化システムにて実現することは困難である。ここでいう 1 パスの符号化とは、各ピクチャの符号化にて、最適な符号化制御を決定するための予備的な符号化処理を伴わないことを意味する。また提案手法を用いない場合の符号量変動例として、Explicit 量子化において Q-table を固定的に与え、ポスト量子化を非適用とした場合の結果を測定した。結果、最小ケースに対する所要バッファサイズは、European market, Whale show, Opening ceremony に対してそれぞれ、6.3 倍、9.1 倍、1.2 倍であることを確認した。Q-table の固定値は先頭ピクチャの符号量が  $B$  に一致するように選定し、検証バッファに入力される符号化レートは総符号量をもとに算出した。以上より、提案した符号量制御手法はコーデック遅延を短縮する上で有効であるといえる。

以上の符号化実験において、符号化効率の評価のために取得した提案方式による PSNR のシーケンス平均を表 7-3 にまとめる。参考のため、上述の最小ケース、MSE 最小化によ

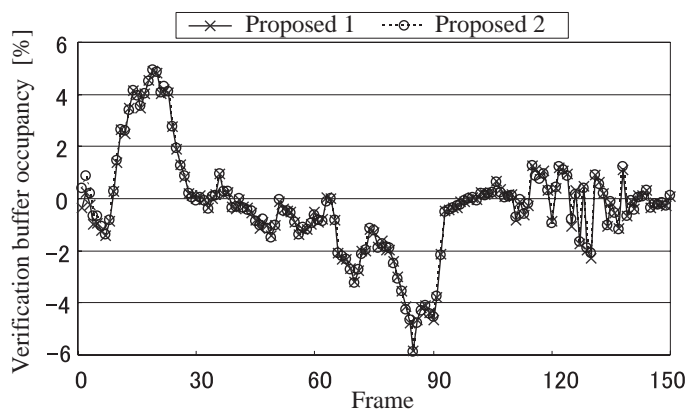


図 7-4: 提案方式による検証バッファ占有量の結果 (Whale show)

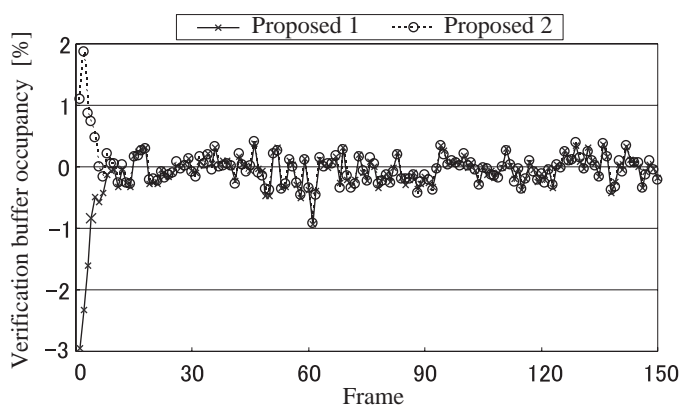


図 7-5: 提案方式による検証バッファ占有量の結果 (Opening ceremony)

る結果も合わせて示す（同表にてそれぞれ、「最小ケース」、「MSE 最小」と表記）。結果より提案手法の適用による符号化効率の低下は少なく、最小ケースに対する PSNR の低下は無視できるレベルであることを確認した。

また提案方式により符号量制御を実装した際の切捨てパス数について、時間方向の分散値と平均値を観測した結果を表 7-4 に示す。提案方式の導入による効果を純粋に評価するため、符号化条件および入力画像は表 7-1 の実験と全く同一に設定した。参考のため、1 フレームを 1920 画素 × 270 ラインの 4 タイル構成で符号化した際の切捨てパス数について、各タイル別に集計した統計量を合わせて示す。タイル番号は上端のタイルを 1 とし、下方向に順次連番を与えた。提案方式の原理上、サブバンドごとの結果はいずれも表中に記載の値と同一である。表 7-1 に対する比較結果より、提案手法の適用による効果として、7.3.1.1 で指摘のポスト量子化に起因する問題が解消されていることが分かる。さらに主観品質の改善効果を確認する目的から主観評価試験を行った。同試験における評価条件は ITU-R 勧告 BT.500 に従い、画質評価には 2 重刺激連続品質尺度 (DSCQS) を用いた。モニタは 24 インチ CRT、被験者は非専門家 15 名とした。従来方式として、ポスト量子化の単独適用方式 (表 7-1 に

表 7-3: 提案方式による PSNR の結果

素材	Proposed 1	Proposed 2	最小 ケース	MSE 最小
European market	38.26	38.21	38.26	38.48
Whale show	33.05	32.98	33.05	33.18
Opening ceremony	29.23	29.17	29.22	29.44

表 7-4: 切捨てパス数の時間的な変動 (提案手法)

タイル分割	タイル番号	切捨てパス数の統計量	
		分散	平均
なし		0.15	3.05
4 分割	1	0.02	3.02
	2	0.27	3.07
	3	0.27	3.07
	4	0.15	3.05

相当)についても評価対象に加えた。表 7-5 に評価試験結果として、原画像に対する品質差平均を示す。結果より、いずれの素材においても提案方式により主観画質が改善しているといえる。Opening ceremony における効果が顕著である理由は、他素材に比べて静止部分が多く、特に芝生部分では、従来方式にて局所的な画質変動が目立っているのに対し、提案方式ではこれを抑制できていることによる。

#### 7.4.1.2 シーン適応型符号化タイプ選択

提案した符号化タイプ選択方式による PSNR の結果を図 7-6 から図 7-8 に示す。適応選択による符号化ゲインを評価する目的から、符号化タイプとしてフレームタイプ、フィールドタイプをそれぞれ固定的に割り当てた場合の結果を合せて示す。また一連の図は、Visual weighting を非適用とした場合、適用した場合の二つの結果を含んでいる。Visual weighting

表 7-5: 主観画質評価試験結果

素材	品質差平均 %		
	Proposed 1	Proposed 2	MSE 最小
European market	7.24	7.42	7.58
Whale show	10.71	10.88	12.68
Opening ceremony	16.02	16.38	22.63

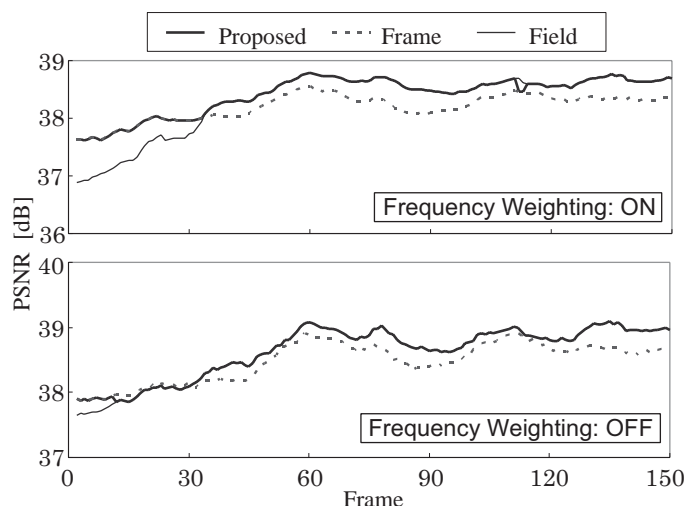


図 7-6: 提案方式による PSNR の結果 (European market)

を適用する場合のサブバンドごとの CSF 係数は, JPEG2000 IS annex J<sup>(7)</sup> に従う値を用いた。事前実験の結果より, 式 (7-11) および式 (7-12) における  $a(R)$ ,  $b(R)$  はそれぞれ, 1.27, -0.12 に設定した。

結果より提案方式の導入による画質劣化は特に発生していないことが分かる。Opening ceremony については, 素材の性質上, 性能でフレーム処理がフィールド処理を常に上回るため, 提案方式とフレームタイプ固定方式の曲線が一致する結果となった。結論として提案方式の導入により, 符号化タイプとしてより効率の高い一方が高い精度で選択される結果, 従来型の固定割当方式に対する PSNR ゲインが確認できる。特にフレームタイプを固定的に適用したケースに対する PSNR ゲインは, フレームタイプの符号化において高速移動など, フィールド間変化が激しい場合に起こり得る 1LH サブバンド係数の増大に対応した適応制御が有効に働いていることを示すものである。

## 7.5 コーデック遅延量の試算

本稿で提案した要素技術の組合せに基づくエンコーダおよびデコーダのハードウェア実装を想定し, 見込まれるコーデック遅延量を試算する。まずコーデック遅延は主に以下の処理時間の積み重ねにより発生する。

- 符号化単位 (画面またはタイル) の入力待ち時間 (エンコーダ)
- 符号化処理時間 (エンコーダ)
- ストリーム送付待ち時間 (エンコーダ)
- 復号開始待ち時間 (デコーダ)
- 復号処理時間 (デコーダ)

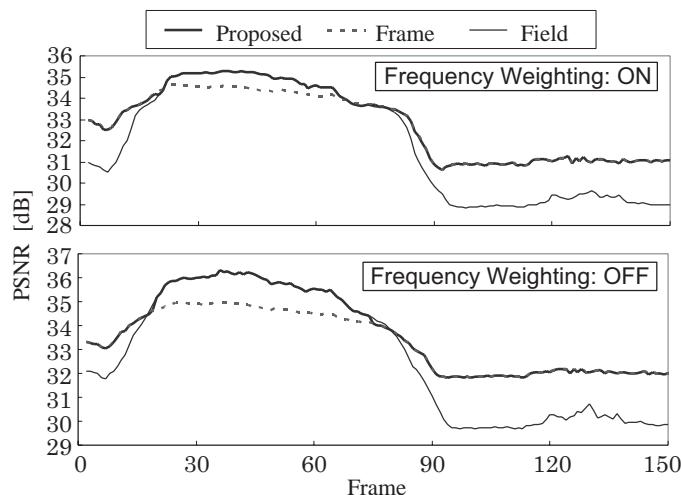


図 7-7: 提案方式による PSNR の結果 (Whale show)

ここで提案した要素技術の組合せとコーデック遅延量の関係を表 7-6 に示す。遅延時間の単位は HDTV のフィールド周期 (約 16.68msec) とした。先に列挙した遅延項目のうち、符号化単位ごとに施される符号化処理、および復号処理は一般に専用 LSI により行われることを想定すると、その処理時間は無視できるため同表から除外した。またストリーム送出待ち時間と復号開始待ち時間の合計は、検証バッファサイズを符号化レートで除した値により表せる点から (導出根拠を 7.6 に示す)、これら 2 項目の合算値を送受信バッファの欄に記載した。符号量制御に関して、提案手法を導入する際に確保すべき送受信バッファサイズの算出は、7.4.1.1 で得られた知見より最小ケースと比して 12% の増分を見込むという前提をもとに行った。

表 7-6 より符号化単位について、提案手法を適用した際の遅延量は、従来手法として位置づけられるフレーム処理の固定適用時と同レベルであることが分かる。また符号量制御について、いずれの符号化単位を適用した条件においても、提案手法を適用するために見込むべき遅延量は、達成される再生品質および遅延量に関し理想的なケースといえる最小ケースに比して高々 6% 増である。参考までに従来手法として位置づけられるポスト量子化の単独適用に関し、毎ピクチャの符号量が同一となるよう制限を加えた場合の遅延量は最小ケースに一致するため、同方式と比較した提案手法の遅延量増加分も全く同レベルであるといえる。

以上の試算結果より明らかとなっており、低遅延性と符号化性能はトレードオフの関係にあり、符号化単位ならびに符号量制御の組合せは、ユーザ要求に見合うものを選択すべきである。さらなる低遅延化の要素として、符号化単位の入力待ち時間については、JPEG2000 でサポートされているタイルやプレシントといった、画面分割に基づく符号化ファンクションを効果的に活用することで、さらなる改善が図れるものと予想される<sup>(53)</sup>。

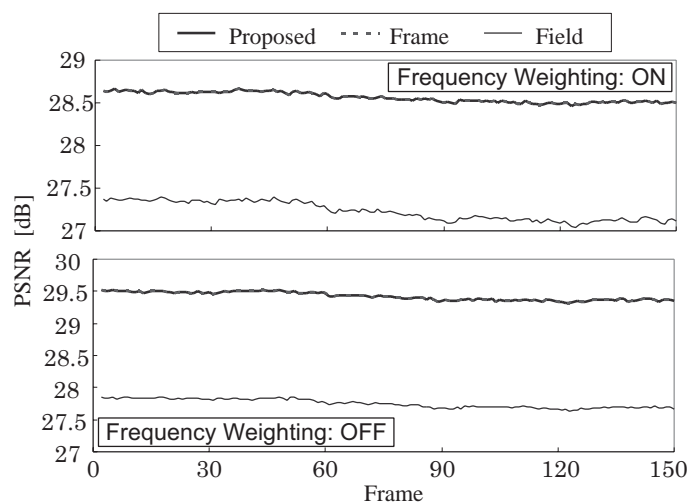


図 7-8: 提案方式による PSNR の結果 (Opening ceremony)

表 7-6: 提案手法によるコーデック遅延時間

符号化単位	符号量制御	遅延時間 フィールド		
		符号化単位の 入力待ち時間	送受信 バッファ	合計
フィールド固定	提案	1.00	1.12	2.12
	最小ケース	1.00	1.00	2.00
フレーム固定	提案	2.00	2.24	4.24
	最小ケース	2.00	2.00	4.00
提案	提案	2.00	2.24	4.24
	最小ケース	2.00	2.00	4.00

### 7.6 バッファリング遅延量の導出

以下に、バッファモデル導入時における送信側および受信側で発生するバッファリング遅延量の総和を推定する。受信側において、検証バッファのサイズ、検証バッファより再生時刻が  $t$  ( $t = 0, 1, \dots$ ) であるピクチャが引き抜かれた直後の占有量をそれぞれ、 $L_v, v(t)$  とするとき式 (7-14)、式 (7-15) が成立する。 $v_0, B, S(i)$  の定義は本文中 7.3.1.2 に従うこととする。

$$v(t) = v_0 + t \times B - \sum_{i=0}^t S(i) \tag{7-14}$$

$$0 \leq v(t) \leq L_v \tag{7-15}$$

検証バッファとは一般に、受信側に実装される仮想的なバッファを意味するが、送信側および受信側で発生するバッファリング遅延量の総和を導出する目的から、以下に送信側の

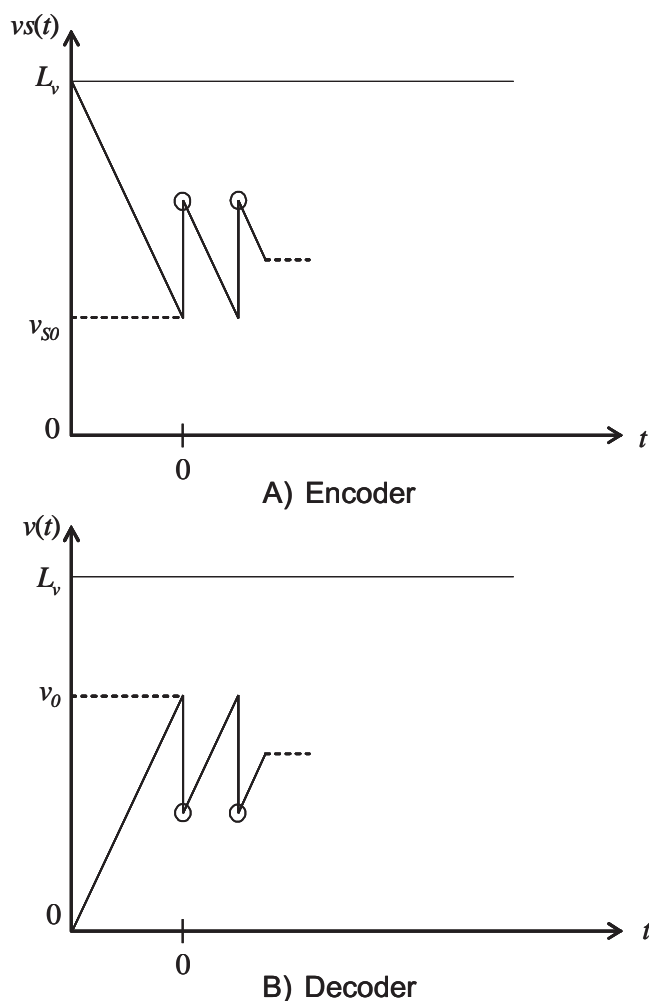


図 7-9:  $v(t)$  と  $v_s(t)$  の遷移

検証バッファの振る舞いを検証する．まず受信側の検証バッファと比較して，入力と出力の関係が逆になる点から，バッファサイズは受信側と同一であるとする．検証バッファにピクチャ  $t$  ( $t = 0, 1, \dots$ ) が書き込まれた直後の占有量  $v_s(t)$  は式 (7-16) により算出される． $v_{s0}$  は先頭ピクチャの書込みが行われる直前の占有量である．実際には  $v_{s0}$  に相当するデータは符号化ストリームに関係しないため，実装上は  $v_{s0}$  のデータ送信にかかる時間だけ送信待ちを入れるなどの処理が想定される．参考のため， $v(t)$  と  $v_s(t)$  の遷移イメージを図 7-9 に示す．図中，実線はバッファ占有量の遷移を示し，丸印は  $v(t)$  と  $v_s(t)$  のサンプルを示す．検証バッファの破綻防止のため，式 (7-17) に示す条件が常に満足される必要があるが，これは  $v_{s0}$  として式 (7-18) に従う値を選択することで実現できる．よって，送信側でのストリーム送出待ち時間，および受信側での復号開始待ち時間の合計を  $T_w$  とおくと，同値は式 (7-19) に示すとおり，検証バッファサイズを符号化レートで除した値により表せる．

$$v_s(t) = v_{s0} + \sum_{i=0}^{t-1} S(i) - t \times B \tag{7-16}$$



$$0 \leq vs(t) \leq L_v \quad (7-17)$$

$$vs_0 = L_v - v_0 \quad (7-18)$$

$$\begin{aligned} T_w &= \frac{v_0 + vs_0}{B} \\ &= \frac{L_v}{B} \end{aligned} \quad (7-19)$$

## 7.7 むすび

HDTV の素材伝送を対象とし、JPEG2000 の枠組の中で低遅延かつ高効率な圧縮符号化を実現するための要素技術として、符号量制御の最適化、符号化タイプの適応選択に着目し、提案方式の導入を行った。性能評価として、符号化シミュレーション結果より、提案技術の導入による効果を定量的に検証した上で、想定されるコーデック遅延量について考察を加えた。<sup>(54)</sup>

デジタル放送での運用を例にとると、素材伝送や一次分配のコーデック方式と、二次分配で使用する MPEG-2 とはタンデム接続の関係にあるが、MPEG-2 どちらのタンデム接続においては、I ピクチャ挿入位置のミスマッチなどが符号化効率の低下要因となるのに対し、今回の提案方式と MPEG-2 のタンデム接続においてはこの問題が内在しておらず、本研究の目的であるユーザ視聴画質を高く保持するという点で好材料といえる。

HDTV を対象とした低遅延および高圧縮を両立する圧縮符号化技術の確立は、FPU やワイヤレスカメラといった主に放送事業者をユーザとする素材伝送用途に加え、コンシューマ向けブロードバンド回線を介した HDTV テレカンファレンスなど、幅広い用途での需要が見込まれる。本研究に関連する要素技術のさらなる性能改善の積み重ねを通じ、インタラクティブ性に優れた映像伝送サービス普及の一助としたい。

## 第8章

### 結論

本章では本論文で得られた成果をまとめた上で、関連する課題のうち、本論文では解決できていないポイントを客観的に考察した上で、今後の検討課題を明確にする。

#### 8.1 総括

第3章「動き補償予測の性能比較」では、動画像の代表的な動き補償方式を分類した上で、各方式を互いに公平な条件の下で符号化シミュレーションを行い、性能に関して比較検討した。その結果、まず、発生符号量に関しては、マクロブロックごとにブロックマッチングとグローバル動き補償を適応選択する方式、および従来のブロックマッチングが同程度の性能を示し、他方式よりも優れていることがわかった。また、予測性能に関しては、マクロブロックごとにブロックマッチングと領域単位アフィン動き補償を適応選択する方式が最も優れていることがわかった。結果として、従来のブロックマッチングと比較すると、発生符号量と予測誤差のいずれに関しても、本章で対象とした提案方式による著しい向上は見られていないといえる。

低ビットレート符号化用に提案された動き補償方式を MPEG-2 のような比較的高いビットレート用の符号化方式で比較検証することは必ずしも正当ではないが、ひとつの結論として、これまで性能改良で提案されてきた動き補償方式は、MPEG-2 上ではいずれも従来のブロックマッチングを性能上はるかにしのぐものではないことを明らかにした。

第4章「視差補償の高度利用による 3D-HDTV 符号化方式」では、チャンネル間の画質差の低減、ならびに視差補償に基づく各種要素技術の高度化に主眼を置き、MPEG-2 マルチビュープロファイルの枠組の中で 3D-HDTV 動画像符号化方式の検討を行い、シミュレーション実験の結果をもとに性能評価を行った。具体的には、チャンネル間画質差を低減する目的で共通型バッファ制御を導入した上で、3D-HDTV 符号化に最適な GOP の設定を明らかにした。さらに、視差補償に基づいて実現可能な動き検出およびレート制御の高度化手法を提案し、本章で最適とした GOP 設定における性能評価実験を通じて、いずれの高度化技術も 3D-HDTV 符号化のさらなる高効率化に効果的であることを示した。

第5章から第6章にかけては、デジタル放送への応用を目的とし、低ビットレート HDTV 符号化の高画質化アプローチとして、MPEG-2 適応符号化制御の最適化手法を提案した。

第5章「高精度なビット配分による画質改善」では、MPEG-2の符号量制御をピクチャ単位の大局的な制御とマクロブロック単位の局所的な制御に二分した上で、それぞれについて高精度化のアプローチを導入した。

前半部分では、MPEG-2の枠組の中でさらなる高効率化を実現するための要素技術としてレート制御の最適化に着目し、特にピクチャ単位のビット配分を高精度に実現する要素技術として、歪み最小化型レート制御をベースとした拡張方式の提案を行った。性能評価としては、歪み最小化型レート制御の導入による直接的な効果として、方式単独の効果を検証した上で、間接的な効果として、量子化マトリクスの適応選択など、各種拡張方式との併用による、主観画質の向上、ならびに低レート化でのコーデック処理の安定性改善を確認した。歪み最小化型レート制御の2次利用による間接的な効果はここで示した内容に限定されない。例えば、目標値として算出される歪み量がある符号化条件下での性能指標として捉えることで、低レート符号化に必須とされる適応符号化制御(ピクチャタイプ、VBR符号化における符号化レートなどの適応選択)の最適化を実現するための更新判定指標として有用であると考えられる。

後半部分では、4章にて導入を行った歪み最小化型のレート制御に基づいて実現される、マクロブロック単位量子化制御の高精度化につき検討を行った。符号化実験結果より、提案方式の導入による効果として、高難易度素材に対する主観画質の向上、および符号化効率の改善を確認した。ここで扱ったマクロブロックレイヤの最適化対象は、MPEG-2の符号化シンタックス上考えられる、適応符号化制御のごく一部に閉じたものであり、例えば、動きベクトル検出や符号化モード判定など、最適化対象を広げ、方式単体のゲインを積み上げていくことで、低ビットレートでのHDTV放送品質確保が、より確実なものになると期待され、さらなる検討課題としたい。

第6章「符号化構造の適応選択方式」では、MPEG-2の符号化構造のうちピクチャレイヤとマクロブロックレイヤに着目し、各レイヤにおいて適応選択をより厳密に行う高効率符号化方式に関して検討を行った。

符号化実験結果より、各レイヤについて提案した高効率化手法について、それぞれ単独で適用した際の効果を検証した上で、入力素材に依らず安定的に高画質化を実現するという観点から、両技術の併用が有効であることを確認した。

本章で提案した要素技術は、あくまでもMPEG-2符号化構造の最適化に特化したものである。今後、対象を符号化前処理、動きベクトル検出、量子化制御と広げていくことで、さらなる高画質化要因の積上げが見込まれている。

第7章「低遅延HDTV符号化方式」では、HDTVの素材伝送を対象とし、JPEG2000の枠組の中で低遅延かつ高効率な圧縮符号化を実現するための要素技術として、符号量制御の最適化、符号化タイプの適応選択に着目し、提案方式の導入を行った。性能評価として、符号化シミュレーション結果より、提案技術の導入による効果を定量的に検証した上で、想定されるコーデック遅延量について考察を加えた。

HDTVを対象とした低遅延および高圧縮を両立する圧縮符号化技術の確立は、FPUやワイヤレスカメラといった主に放送事業者をユーザとする素材伝送用途に加え、コンシューマ

向けブロードバンド回線を介した HDTV テレカンファレンスなど、幅広い用途での需要が見込まれる。本研究に関連する要素技術のさらなる性能改善の積み重ねを通じ、インタラクティブ性に優れた映像伝送サービス普及の一助となることが期待される。

## 8.2 今後の課題

密接に関連する研究課題のうち、本論文では解決できておらず、かつ重要性が高いと思われるものを以下に示す。

まず放送、ブロードバンドサービスを想定した低ビットレート圧縮符号化方式に関して、本論文で扱った符号化制御の最適化アプローチは、放送方式として MPEG-2 を取り上げ、最適化ポイントとして符号化モード判定および符号量制御に着目し、ともにピクチャレイヤとマクロブロックのレイヤの双方において符号化効率を最大化する規範のもとで高精度化を実現したものである。符号化モード判定と符号量制御はいずれも動き補償予測と DCT による MPEG 型の符号化方式に共通して必要な要素技術であり、加えて提案最適化技術の MPEG-2 への依存性は少ない。例えば放送用符号化方式として MPEG-2 の後継と評される H.264/MPEG-4 AVC において、さらなる高性能化に向けた符号化制御の最適化は極めて重要な研究課題であり、これを実現するアプローチとして上記方式の導入および拡張を検討し、リファレンス方式に対する改善の度合いを確認する必要がある。

次に 3D-HDTV を含む、HDTV を応用した次世代映像メディアの高能率符号化方式に関して、本論文では、3D 映像の素材フォーマットとして、左眼用、右眼用の映像が個別に提供される、いわゆるステレオフォーマットのみを対象としたものであった。3D 映像の表現方法はこれに限定されず、例えば基準映像と奥行き情報によりデータを構成するものなど、実に様々な形態が候補に挙げられている。加えて、視点数を 2 眼に限定せずに、無限とすることで、自由視点型の映像表現も検討されつつある。以上を踏まえ、今後の課題として、本論文で提案した視差補償の高度利用技術を非ステレオの 3D 映像表現、ならびに自由視点映像に拡張するための適用技術が求められる。

最後に素材伝送サービスの高度化技術として位置づけられる低遅延圧縮符号化方式に関して、本論文は JPEG2000 をベースとするフレーム内符号化方式を前提に最適化アプローチの検討を行ったものであるが、素材伝送といえども、回線構成やコストの兼ね合いから、低ビットレート化のニーズは常に存在しており、これに応えるためには以下のいずれかのアプローチでの研究が求められ、重要な研究課題として位置づけられる。

- フレーム内符号化方式の圧縮性能をさらに高める（JPEG2000 の枠組みにおけるパラメータ最適化、あるいは独自符号化方式の創出）。
- 動き補償予測を適用する MPEG 型の符号化アルゴリズムにおいて低遅延符号化の実装メカニズムを構築する。

## 謝辞

本研究は早稲田大学大学院国際情報通信研究科 渡辺 裕教授の御指導のもとに進められました。渡辺教授には、素晴らしい研究の機会を与えて頂き、日頃から終始熱心に御指導を賜りました。ここに改めて厚く御礼申し上げます。

本研究の機会を与えて下さり、貴重な時間を割いて研究の方向性を御指導頂きました早稲田大学理工学部コンピュータネットワーク学科及び早稲田大学大学院国際情報通信研究科 富永 英義 教授に心から感謝致します。

本研究を進めるにあたり、日頃から惜しみなく御指導して頂きました早稲田大学国際情報通信研究センター 浦野 義頼 教授に深く感謝致します。

松本 修一氏 (株式会社 KDDI 研究所 取締役) には、筆者の研究業績の大半において、上司として熱心な御指導、御鞭撻を頂くとともに、研究の細部に亘り有益な御教示、御討論を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

本研究における第7章は、佐野 雄磨氏 (修士課程2年) の平成17年度修士論文の研究を筆者と共同で行ったものであり、研究を進める上で有益な御討論、実験等での御助力を頂きました。

以上の方々をはじめとして、研究だけでなく様々な活動を共にし、日頃より多方面にわたり筆者を支えて下さいました早稲田大学渡辺研究室の皆様、株式会社 KDDI 研究所の方々ならびに関係者各位に心から感謝申し上げます。

平成18年2月

内藤 整

## 参考文献

- (1) ISO/IEC 13818-2, International Standard: "Information technology- Generic coding of moving pictures and associated audio information:Video", 1996
- (2) ITU-T Recommendation H.261, International Standard: "Video codec for audiovisual services at px64kbit/s", 1990
- (3) 安東 孝久, 増谷 健, "メガネなし立体ディスプレイ", 映情学会誌, Vol.55, No.8/9, pp.1071-1075, Aug. 2001
- (4) 中須 英輔, "デジタル放送の符号化画質評価実験" 映情学技報, Vol.22, No.19, BCS98-3, March 1998
- (5) ITU-R Recommendation BT.1122-1: "USER REQUIREMENTS FOR EMISSION AND SECONDARY DISTRIBUTION SYSTEMS FOR SDTV, HDTV AND HIERARCHICAL CODING SCHEMES", 1994
- (6) Joint Video Team, "Draft ITU-T Recommendation and Final Draft International Standard of Joint Video Specification", ITU-T Rec. H.264 and ISO/IEC 14496-10 AVC, 2003
- (7) ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N1890, "JPEG2000 part I Final Draft International Standard", Sept. 2000
- (8) ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N2250, "Motion JPEG2000 Final Draft International Standard 1.0", Sept. 2001
- (9) Digital Cinema Initiatives, "Digital Cinema System Specification version 4.3", Dec. 2004
- (10) 如澤 裕尚, "アフィン変換を用いた動き補償予測に関する検討", 信学技報, IE94-36, July 1994
- (11) J.Nieweglowski, T.G.Campbell, P. Haavisto, "A Novel Video Coding Scheme based on Temporal Prediction Using Digital Image Warping", IEEE TR. on Consumer Electronics, 39, 3, Aug. 1993
- (12) G.J.Sullivan, R.L.Baker, "Motion Compensation for Video Compression Using Control Grid Interpolation", Proc.ICASSP'91 pp.2713-2716, May 1991
- (13) 上倉 一人, 渡辺 裕, "動画像符号化におけるグローバル動き補償法", 信学論 B-I, J76-B-I, No.12, Dec. 1993
- (14) 中屋 雄一郎, 原島 博, "3角形パッチによる動き補償の基礎検討", 信学技報, IE90-106, March 1991

- (15) 横山 裕, 宮本 義弘, 太田 睦: "適応 Warping 予測を用いた超低ビットレート動画像符号化", 信学技報, IE96-5, Apr. 1996
- (16) 内藤 整, 川田 亮一, 松本 修一, "各種動き補償方式の実画像による比較検証", 映像情報メディア学会 Vol.51, No.9, pp.1560-1567, Sep. 1997
- (17) ISO/IEC 13818-2 Amendment 3: "Information Technology - Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio:Video", , Sep. 1996
- (18) Test and Video Subgroup, "Results of MPEG-2 Multi-View Profile Verification Test", ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N1373, Sep.1996
- (19) 今泉 浩幸, 酒井 美和, 蓑毛 研, 岩館 祐一, "MPEG2 MVP@HL による HDTV 立体符号化における左・右画像へのレート配分", 情処研報 Vol.97, no.82, Sep.1997
- (20) Test model Editing Committee, "Test Model 5", ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N0400, Apr.1993
- (21) 内藤 整, 松本 修一, "3D-HDTV 符号化におけるレート制御方式", 信学技報 IE98, no.17, Jun.1998
- (22) W.Woo and A.Ortega, "Dependent Quantization for Stereo Image Coding", VCIP, SPIE Vol.3309, pp.902-913, Jan.1998
- (23) W.J.Tam and L.B.Stelmach, "Perceived Image Quality of MPEG-2 Stereoscopic Sequences", Human Vision and Electronic Imaging II, SPIE Vol.3016-34, Feb.1997
- (24) 内藤 整, 松本 修一, "視差補償の高度利用に基づく MPEG-2 準拠 3D-HDTV 符号化方式", 信学論 B, Vol. J83-B, No.5, pp.739-747, May 2000
- (25) 黒住 正顕, 神田 菊文, 杉本 智彦, 中須 英輔, 大塚 吉道, "画像構造適応選択による MPEG-2 低ビットレート符号化の検討", 映像学技報告, BCS2001-12, pp.13-18, March 2001
- (26) 甲藤 二郎, 太田 睦, "MPEG 圧縮効率の理論解析とその符号量制御への応用", 信学技報, IE-95-10, April 1995
- (27) 水野 修, 鹿喰 善明, 野尻 裕司, 大塚 吉道, 田中 豊, "ピクチャ別レートひずみ特性に基づいた符号量配分手法の検討", 信学論, J82-D-II, pp.1239-1251, Aug. 1999
- (28) J. Lee and B. W. Dickinson, "Rate-Distortion Optimized Frame Type Selection for MPEG Encoding", IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 7, No. 3, pp.501-509, 1997.
- (29) 米山 暁夫, 中島 康之, 柳原 広昌, 菅野 勝, "シーンアダプティブな可変 GOP 構造を持つ MPEG 符号化アルゴリズム", 1999 信学全大, D-11-10, March 1999

- (30) 横山 裕, "MPEG-2 ビデオ符号化における適応 GOP 構造選択", 2000 信学全大, D-11-40, March 2000
- (31) 内藤 整, 小池 淳, 和田 正裕, 松本 修一, "MPEG-2 符号化構造の最適化に基づく低レート HDTV 符号化方式", 映情学会誌, Vol. 56, No.2, pp.253-262, Feb. 2002.
- (32) H. Sun, W. Kwok, M. Chien, C. H. John, "MPEG Coding Performance Improvement by Jointly Optimizing Coding Mode Decisions and Rate Control", IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 7, No. 3, pp.449-458, 1997
- (33) M. C. Chen, A. N. Willson, "Motion-Vector Optimization of Control Grid Interpolation and Overlapped Block Motion Compensation using Iterated Dynamic Programming", IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 9, No. 7, pp.1145-1157, 2000
- (34) 青木 勝典, 浜田 宏一, 小西 宏一, 水野 修, 神田 菊文, 中須 英輔, 湯山 一郎, "MPEG2 映像符号化の画質改善の基礎検討", 映情学技報, BCS97-41, pp.49-54, May 1997
- (35) 大塚 吉道, 黒住 正顕, 神田 菊文, 西田 幸博, 中須 英輔, "動きベクトル情報量低減による MP@HL 符号化の画質改善の検討", 映情学技報, BCS98-1, pp.1-6, March 1998
- (36) M. Lee, S. Kwon, J. Kim, "A SCENE ADAPTIVE BITRATE CONTROL METHOD IN MPEG VIDEO CODING", VCIP, SPIE Vol. 3024, pp.1406-1416, 1997.
- (37) 酒澤 茂之, 滝嶋 康弘, 和田 正裕, 羽鳥 好律, "マルチエンコーダシステムによる動画像符号化制御方式", 映情学会誌, Vol. 50, No.7, pp.958-964, July 1996
- (38) 滝嶋 康弘, 和田 正裕, "蓄積伝送型ビデオコーデックにおける符号化制御方式", 映情学会誌, Vol. 47, No.10, pp.1304-1312, Oct. 1993.
- (39) G.Keesman et al., "Bit-rate control for MPEG encoders", Signal Processing: Image Communication, Vol. 6, pp.545-560, 1995.
- (40) 石原 剛一, 内藤 整, 高木 幸一, 和田 正裕, 松本 修一, 羽鳥 好律, "量子化制御の高度化に基づく放送用 HDTV 符号化方式の高画質化", 映情学技報, BCS2002-11, March 2002.
- (41) 内藤 整, 小池 淳, 和田 正裕, 松本 修一, 羽鳥 好律, "歪み最小化型レート制御の高度利用に基づく MPEG-2 ビット配分方式の最適化", 信学論 D-II, Vol. J86-D-II, No.11, Nov. 2003
- (42) 内藤 整, 和田 正裕, 松本 修一, 羽鳥 好律, "ビット配分の最適化に基づく放送用 MPEG-2 符号化制御の検討", 映情学技報, BCS2002-1, Feb. 2002



- (43) 内藤 整, 小池 淳, 和田 正裕, 松本 修一, "歪み最小化型ビット配分の高度利用に基づくデジタル放送用 MPEG-2 符号化制御の最適化", 映情学技報, BCS2002-38, Oct. 2002
- (44) 高木 幸一, 小池 淳, 和田 正裕, 松本 修一, "次フレームでの符号化参照の有無による量子化制御方式", 信学ソ大, D-11-5(Sep. 2000)
- (45) 田中 昭二, 井上 正之, 井上 誠喜, 中津 良平, "誘目性に寄与する物理的特徴量を基にした画像注目領域の注出", 映像学会誌, Vol. 52, No. 6, pp.881-890, June 1998
- (46) 内藤 整, 小池 淳, 松本 修一, 羽鳥 好律, "歪み最小化型ビット配分に基づくデジタル放送用 MPEG-2 符号化制御の最適化", 映情学会誌, Vol. 57, No. 11, Nov. 2003 (2001)
- (47) 内藤 整, 小池 淳, 和田 正裕, 松本 修一, "ピクチャタイプの最適割当に基づく高圧縮 HDTV 符号化方式", 信学技報, IE2001-43, July 2001
- (48) 内藤 整, 松本 修一, "シーンチェンジ検出に基づく MPEG-2 符号化レート制御の高度化", 2000 信学全大, D-11-35, March 2000
- (49) S. Naito, A. Koike, S. Matsumoto, "Optimal JPEG2000 Encoder Mechanism for Low Delay and Efficient Distribution of HDTV Programs", Proceedings of ICASSP2004, May 2004
- (50) 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, Sept. 2002
- (51) W. Chan, A. Becker, "Efficient Rate Control for Motion JPEG2000", Proceedings of the Data Compression Conference (DCC2004), 2004
- (52) ISO/IEC JTC1/SC29 WG1 N2144, "Motion JPEG2000 Verification Model ver.4.1", June 2001
- (53) 佐野 雄磨, 内藤 整, 渡辺 裕, "JPEG2000 Precinct 構造を用いた低遅延 HDTV 符号化方式", 情処学研報, 2004-AVM-46, Oct. 2004
- (54) 内藤 整, 佐野 雄磨, 渡辺 裕, 小池 淳, 松本 修一, "低遅延高效率 HDTV 伝送のための JPEG2000 符号化制御の最適化", 信学論 D-II, Vol. J88-D-II, No.12, Dec. 2005

## 図一覧

2-1	映像伝送サービス	8
2-2	動き補償とDCTによるハイブリッド符号化	10
2-3	MPEG-2符号化の最適化ポイント	10
3-1	画素位置に対する重み	15
3-2	フレーム間隔ごとの探索範囲	17
3-3	パッチの配置	18
4-1	ステレオ動画像符号化	27
4-2	共通型バッファ制御	29
4-3	マルチビュープロファイル対応のGOP構造	30
4-4	Rチャンネル動き検出符号化法	31
4-5	符号化器の構成	33
4-6	検討GOP構造に対するPSNR(40Mbps)	35
4-7	検討GOP構造に対するPSNR(60Mbps)	36
4-8	Lチャンネルに費したビット数に対するPSNR(Tulip garden)	38
4-9	Lチャンネルに費したビット数に対するPSNR(Festival)	39
4-10	Lチャンネルに費したビット数に対するPSNR(Soccer)	40
5-1	SOPの割当	44
5-2	Test Model 5による量子化パラメータの割当	45
5-3	量子化マトリクス適応選択時の歪み量に対する制御誤差	52
5-4	PSNRの実測結果	54
5-5	提案ビット配分方式の処理フロー	55
5-6	再生画質の比較	59
6-1	実験で使用したテスト画像	75
6-2	ピクチャタイプ適応選択によるビット削減率(タイプA)	76
6-3	ピクチャタイプ適応選択によるビット削減率(タイプB)	76
6-4	重み係数 $W_{Err}$ の算出	76
6-5	$V_{M3}$ の算出結果	77
6-6	ブロック符号化ビット数の比較(Interマクロブロック, $\Delta = 16$ )	77
6-7	オーバーヘッドビット数の推定結果	77

7-1	想定する符号化器のブロック図	79
7-2	HDTV フレーム画像に対するサブバンド信号分布の例 ( 上段 : 原画像 , 下段 : DWT 係数 )	84
7-3	提案方式による検証バッファ占有量の結果 ( European market )	86
7-4	提案方式による検証バッファ占有量の結果 ( Whale show )	87
7-5	提案方式による検証バッファ占有量の結果 ( Opening ceremony )	87
7-6	提案方式による PSNR の結果 ( European market )	89
7-7	提案方式による PSNR の結果 ( Whale show )	90
7-8	提案方式による PSNR の結果 ( Opening ceremony )	91
7-9	$v(t)$ と $vs(t)$ の遷移	92

## 表一覧

2-1	HDTV フォーマットの比較	7
3-1	各種動き補償方式の特徴	13
3-2	シミュレーションで用いるテストシーケンス	16
3-3	$E_{th}$ と $S_{min}$ の値	17
3-4	アフィンパラメータ探索の条件	18
3-5	グローバル動きパラメータ	19
3-6	各方式による発生符号量 (720×486)	19
3-7	各方式による発生符号量 (176×144)	20
3-8	各方式による平均二乗誤差 (720×486)	21
3-9	各方式による平均二乗誤差 (176×144)	22
3-10	各方式による復号画像の SN 比 (720×486)	23
3-11	各方式による復号画像の SN 比 (176×144)	24
3-12	領域単位アフィン動き補償が選択された割合 (720×486)	24
3-13	領域単位アフィン動き補償が選択された割合 (176×144)	25
3-14	グローバル動き補償が選択された割合 (720×486)	25
3-15	グローバル動き補償が選択された割合 (176×144)	25
3-16	各方式による発生符号量の配分 (720×486)	25
4-1	GOP 構造の特徴	30
4-2	$MV_R$ に対するサーチ対象の選択テーブル	32
4-3	シミュレーション条件	34
4-4	3D-HDTV テストシーケンスの特徴	35
4-5	符号化モードの選択比率	36
4-6	動き検出手法に対する PSNR と MSE	37
4-7	最終段のサーチ範囲に対する PSNR と MSE	37
5-1	共通の符号化条件	48
5-2	PSNR の結果 (15Mbps)	49
5-3	PSNR の結果 (11Mbps)	49
5-4	パラメータ $Q_{VB}(k)$ の変動範囲 (15Mbps)	50
5-5	パラメータ $Q_{VB}(k)$ の変動範囲 (11Mbps)	50
5-6	PSNR の結果 (提案マクロブロック単位量子化制御適用時)	51

5-7	量子化パラメータの平均符号化ビット数	51
5-8	PSNR の結果 (量子化マトリクス適応選択時)	52
5-9	共通の符号化条件	58
6-1	符号化条件	63
6-2	k 値と PSNR の関係 (Whale show)	63
6-3	k 値と PSNR の関係 (Opening ceremony)	64
6-4	k 値と PSNR の関係 (Green leaves)	64
6-5	符号化モードの定義	67
6-6	符号化条件	69
6-7	ピクチャタイプの適応選択による PSNR の結果	70
6-8	マクロブロック符号化モードの適応選択による PSNR の結果	71
6-9	提案要素技術の併用による PSNR の結果	73
7-1	切捨てパス数の時間的な変動 (最悪時)	80
7-2	共通の符号化条件	85
7-3	提案方式による PSNR の結果	88
7-4	切捨てパス数の時間的な変動 (提案手法)	88
7-5	主観画質評価試験結果	88
7-6	提案手法によるコーデック遅延時間	91

## 研究業績

	題 名	発表年月	発表掲載誌	連名者
1. 論文誌 論文				
(1)	各種動き補償方式の実画像による比較検証	1997年9月	映像情報メディア学会誌 Vol.51, No.9, pp.1560-1567	内藤 整 川田 亮一 松本 修一
(2)	視差補償の高度利用に基づくMPEG-2準拠3D-HDTV符号化方式	2000年5月	電子情報通信学会論文誌 B Vol. J83-B, No.5, pp739-747	内藤 整 松本 修一
(3)	MPEG-2符号化構造の最適化に基づく低レートHDTV符号化方式	2002年2月	映像情報メディア学会誌 Vol.56, No.2, pp.253-262	内藤 整 小池 淳 和田 正裕 松本 修一
(4)	歪み最小化型レート制御の高度利用に基づくMPEG-2ビット配分方式の最適化	2003年11月	電子情報通信学会論文誌 D-II Vol. J86-D-II, No.11	内藤 整 小池 淳 和田 正裕 松本 修一 羽鳥 好律
(5)	歪み最小化型ビット配分に基づくデジタル放送用MPEG-2符号化制御の最適化	2003年11月	映像情報メディア学会誌 Vol.57, No.11, pp.1567-1575	内藤 整 小池 淳 松本 修一 羽鳥 好律
(6)	Personal Mobile DTV Terminal Designed for Service Trial of Digital Terrestrial Broadcasting with Full Use of Internet Connectivity	2004年10月	情報処理学会論文誌 Vol.45, No.10, pp.2254-pp.2260	S.Naito A.Kobayashi K. Takagi A.Koike S.Matsumoto

	題 名	発表年月	発表掲載誌	連名者
(7)	動的に更新される背景バッファを用いた自由視点映像に対する補完方式	2005年6月	映像情報メディア学会誌 Vol.59, No. 6, pp.901-908	松村 篤志 内藤 整 川田 亮一 小池 淳 松本 修一
(8)	低遅延高効率HDTV伝送のためのJPEG2000符号化制御の最適化	2005年12月	電子情報通信学会論文誌 D-II Vol. J88-D-II, No.12, pp.2311-2320	内藤 整 佐野 雄磨 渡辺 裕 小池 淳 松本 修一
(9)	動的に更新される多層背景バッファを用いた高精度な自由視点映像生成方式	2004年10月	映像情報メディア学会誌 Vol.58, No.6, pp.850-853	松村 篤志 内藤 整 川田 亮一 小池 淳 松本 修一
2. 国際学会				
(10)	34/45Mbps 3D-HDTV Digital Coding Scheme Using a Modified Motion Compensation with Disparity Vectors	1999年1月	1999 Visual Communications and Image Processing (VCIP'1999), Volume 3653, pp.1082-1089	S.Naito S.Matsumoto
(11)	Advanced Rate Control Technologies for 3D-HDTV Digital Coding Based on MPEG-2 Multi-View Profile	1999年10月	1999 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'1999), Volume I, pp.281-285	S.Naito S.Matsumoto
(12)	Advanced HDTV Digital Coding for Terrestrial Digital Broadcasting	2000年7月	2000 World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI'2000), Volume VI, pp144-149	S.Naito S.Matsumoto
(13)	Optimal MPEG-2 Encoder Design for Low Bit-rate HDTV Digital Broadcasting	2002年9月	2002 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'2002), Volume III, pp.705-708	S.Naito A.Koike M. Wada S.Matsumoto
(14)	Personal Mobile DTV Terminal Designed for Service Trial of Digital Terrestrial Broadcasting with Full Use of Internet Connectivity	2004年1月	1st International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU'2004), pp.198-203	S.Naito A.Kobayashi K. Takagi A.Koike S.Matsumoto

	題 名	発表年月	発表掲載誌	連名者
(15)	Optimal JPEG2000 Encoder Mechanism for Low Delay and Efficient Distribution of HDTV Programs	2004年5月	2004 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'2004), Volume V, pp.81-84	S.Naito A.Koike S.Matsumoto
(16)	Effective Interpolation for Free Viewpoint Images Using Multi-layered Dynamic Background Buffers	2004年10月	2004 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'2004), pp.1377-1380	A. Matsumura S.Naito R.Kawada A. Koike S.Matsumoto
(17)	Personal Mobile DTV Terminal for Digital Terrestrial Broadcasting Service with Full Use of Internet Connectivity	2004年12月	14th International Packet Video Workshop (PV'2004)	S.Naito A.Kobayashi K. Takagi A.Koike S.Matsumoto
(18)	Effective Rate Control Method for Minimizing Temporal Fluctuations I Picture Quality Applicable for MPEG-4 AVC/H.264 Encoding	2005年9月	2005 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'2005), Volume I, pp.569-572	A. Matsumura S.Naito R.Kawada A. Koike
3. 国内研究会				
(19)	MPEG-2における各種動き補償方式の比較検証	1997年2月	電子情報通信学会技術研究報告,IE96-13, pp.77-82	内藤 整 川田 亮一 松本 修一
(20)	プログレッシブ構造とインターレース構造における符号化効率に関する理論検証	1997年5月	電子情報通信学会技術研究報告,IE97-11, pp.17-22	内藤 整 小池 淳 松本 修一
(21)	立体ハイビジョンにおける視差補償符号化の検討	1997年12月	情報処理学会研究報告,AVM19-5, pp.25-30	内藤 整 松本 修一



	題 名	発表年月	発表掲載誌	連名者
(22)	3D-HDTV 符号化におけるレート制御方式	1998年6月	電子情報通信学会技術研究報告, IE98-17, pp.9-16	内藤 整 松本 修一
(23)	BS デジタル放送における MPEG-2 HDTV 符号化の多段接続特性	1998年9月	電子情報通信学会技術研究報告, IE98-54, pp.25-30	内藤 整 松本 修一
(24)	地上波デジタル中継用 HDTV コーデックの開発	2000年6月	情報処理学会研究報告, Vo. 2000, No. 58, pp.19-24	内藤 整 松本 修一
(25)	ピクチャタイプの最適割当に基づく高圧縮 HDTV 符号化方式	2001年7月	電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 101, No. 200, pp.167-172	内藤 整 小池 淳 和田 正裕 松本 修一
(26)	ビット配分の最適化に基づく放送用 MPEG-2 符号化制御の検討	2002年2月	映像情報メディア学会技術報告, Vol. 26, No. 17, pp.1-6	内藤 整 和田 正裕 松本 修一 羽鳥 好律
(27)	HDTV 高圧縮技術 ~ MPEG-2 低ビットレート化の検討 ~	2002年3月	映像情報メディア学会技術報告, Vol. 26, No. 31, pp.25-30	内藤 整 猪股 秀樹 大塚 吉道
(28)	歪み最小化型ビット配分の高度利用に基づくデジタル放送用 MPEG-2 適応符号化制御の最適化	2002年10月	映像情報メディア学会技術報告, Vol. 26, No. 67, pp.1-4	内藤 整 小池 淳 和田 正裕 松本 修一
(29)	デジタル放送用最適化 MPEG-2 符号化方式の性能評価	2003年2月	映像情報メディア学会技術報告, Vol. 27, No. 14, pp.17-20	内藤 整 小池 淳 松本 修一
(30)	デジタル放送における通信・放送融合サービス実証用端末テストベッドの開発	2003年8月	情報処理学会研究報告, Vol. 2003, No. 81, pp.1-4	内藤 整 小林 亜令 高木 幸一 小池 淳 松本 修一
(31)	地上デジタル放送携帯受信用データコンテンツオーサリングツールの開発	2004年2月	映像情報メディア学会技術報告, Vol.28, No.13, pp.25-28	内藤 整 小池 淳 松本 修一

	題 名	発表年月	発表掲載誌	連名者
(32)	JPEG2000 Precinct 構造を用いた低遅延 HDTV 符号化方式	2004 年 10 月	情報処理学会研究報告, Vol.2004, No.99, pp.7-12	佐野 雄磨 内藤 整 渡辺 裕
(33)	Motion JPEG2000 低遅延符号化のための時間方向ビット配分	2004 年 12 月	情報処理学会研究報告, Vol.2004, No.126, pp.143-148	佐野 雄磨 内藤 整 渡辺 裕
(34)	JPEG2000 符号化の並列処理実装に関する一検討	2005 年 3 月	情報処理学会研究報告, Vo. 2005, No. 23, pp.1-6	内藤 整 小池 淳
4. 国内大会				
(35)	MPEG-2 における各種動き補償方式の比較検証	1997 年 3 月	電子情報通信学会 1997 年総合大会, D-11-62, p.62	内藤 整 川田 亮一 松本 修一
(36)	3次元 DCT を用いたプログレッシブ構造とインターレース構造の符号化効率に関する理論的検証	1999 年 7 月	映像情報メディア学会 1997 年年次大会, 19-4, pp,230-231	内藤 整 小池 淳 松本 修一
(37)	750P,1125I 両 TV フォーマットの符号化効率に関する理論比較	1997 年 9 月	電子情報通信学会 1997 年ソサイエティ大会, D-11-18, p.110	内藤 整 小池 淳 松本 修一
(38)	3次元 HDTV の右チャンネル動き検出符号化法の提案	1998 年 3 月	電子情報通信学会 1998 年総合大会, D-11-39, p.39	内藤 整 松本 修一
(39)	3D-HDTV 符号化におけるバッファ制御方式の検討	1998 年 7 月	映像情報メディア学会 1998 年年次大会, 22-6, pp.321-322	内藤 整 松本 修一
(40)	3D-HDTV 符号化における視差補償導入の意義	1998 年 9 月	電子情報通信学会 1998 年ソサイエティ大会, D-11-3, p.118	内藤 整 松本 修一
(41)	デジタル HDTV 放送に向けた MPEG-2 符号化の多段接続特性の検討	1998 年 12 月	映像情報メディア学会 1998 年冬季大会, 4-2, p.61	内藤 整 松本 修一

	題 名	発表年月	発表掲載誌	連名者
(42)	MPEG-2 による 3D-HDTV 符号化のための GOP 構造の検討	1999 年 3 月	電子情報通信学会 1999 年総合大会, D-11-9, p.9	内藤 整 松本 修一
(43)	地上波デジタル中継網用 MPEG-2 コーデックの開発	1999 年 8 月	映像情報メディア学会 1999 年年次大会, 5-5, pp.75-76	内藤 整 松本 修一
(44)	符号化モードの違いに起因する画質劣化に関する一検討	1999 年 9 月	電子情報通信学会 1999 年ソサイエティ大会, D-11-9, p.95	内藤 整 松本 修一
(45)	シーンチェンジ検出に基づく MPEG-2 符号化レート制御の高度化	2000 年 3 月	電子情報通信学会 2000 年総合大会, D-11-35, p.35	内藤 整 松本 修一
(46)	医用 3D 動画像符号化に適した符号化構造の検討	2000 年 8 月	映像情報メディア学会 2000 年年次大会, 13-1, pp.186-187	内藤 整 松本 修一
(47)	シーン適応型低遅延 MPEG-2 符号化方式の検討	2000 年 9 月	電子情報通信学会 2000 年ソサイエティ大会, D-11-7, p.117	内藤 整 和田 正裕 松本 修一
(48)	ピクチャタイプ適応選択に基づく高効率 HDTV 符号化の検討	2000 年 12 月	映像情報メディア学会 2000 年冬季大会, 6-9, p.95	内藤 整 杉本 修 和田 正裕 松本 修一
(49)	配信用 HDTV 符号化における適応モード選択の一検討	2001 年 3 月	電子情報通信学会 2001 年総合大会, D-11-56, p.56	内藤 整 小池 淳 和田 正裕 松本 修一
(50)	高圧縮 HDTV 符号化のための適応符号化制御に関する一検討	2001 年 8 月	映像情報メディア学会 2001 年年次大会, 18-1, pp.260-261	内藤 整 小池 淳 和田 正裕 松本 修一
(51)	低レート HDTV 符号化におけるピクチャタイプ割当の更新制御に関する検討	2001 年 9 月	電子情報通信学会 2001 年ソサイエティ大会, D-11-19, p.104	内藤 整 小池 淳 和田 正裕 松本 修一

	題 名	発表年月	発表掲載誌	連名者
(52)	低レートHDTV符号化における適応ビット配分方式の検討	2001年12月	映像情報メディア学会 2001年冬季大会, 4-9, p.79	内藤 整 高木 幸一 和田 正裕 松本 修一
(53)	MPEG-2符号化制御の高度化に基づく低レート高画質HDTV符号化方式	2002年3月	電子情報通信学会 2002年総合大会, SD-3-1, pp.377-378	内藤 整 小池 淳 和田 正裕 松本 修一
(54)	Motion JPEG2000を利用したIPベース超高精細映像配信システムの一検討	2002年8月	映像情報メディア学会 2002年年次大会, 11-8	内藤 整 和田 正裕 松本 修一 村上 仁己 田中 健二 中川 晋一
(55)	歪み最小化ビット配分に基づくMPEG-2適応符号化制御の最適化	2002年11月	映像情報メディア学会 2002年冬季大会, 5-7	内藤 整 小池 淳 和田 正裕 松本 修一
(56)	前処理解析に基づくHDTV用JPEG2000符号化方式の高効率化	2003年3月	電子情報通信学会 2003年総合大会, D-11-19, p.19	内藤 整 小池 淳 和田 正裕 松本 修一
(57)	デジタル放送における通信・放送融合型テストベッドの試作 サービスイメージおよびトータルシステム	2003年8月	映像情報メディア学会 2003年年次大会, 3-5	内藤 整 小林 亜令 高木 幸一 小池 淳 松村 欣司 国分 英樹
(58)	デジタル放送用低ビットレートHDTV符号化方式の性能評価	2003年9月	FIT2003, LJ-002, pp.211-213	内藤 整 大塚 吉道 猪股 秀樹
(59)	低遅延素材伝送用JPEG2000符号化方式	2003年12月	映像情報メディア学会 2003年冬季大会, 9-5	内藤 整 川田 亮一 小池 淳 松本 修一

	題 名	発表年月	発表掲載誌	連名者
(60)	地上デジタル放送向け通信 放送連携コンテンツオーサ リングツールの開発	2004年3月	電子情報通信学会 2004年総 合大会, D-11-77, p.77	内藤 整 小林 亜令 高木 幸一 小池 淳 松本 修一
(61)	地上デジタル放送携帯受信 用TSのストリーミング配信 手法に関する検討	2004年8月	映像情報メディア学会 2004 年年次大会, 5-11	内藤 整 小林 亜令 高木 幸一 小池 淳 松本 修一
(62)	地上デジタル放送携帯受信 端末に対する番組配信用ス トリーミング方式の検討	2004年9月	FIT2004, J-002, pp.203-204	内藤 整 小林 亜令 高木 幸一 小池 淳 松本 修一
(63)	JPEG2000 Precinct 構造に よる低遅延 HDTV 符号化方 式	2004年9月	FIT2004, J-076, pp373-374	佐野 雄磨 内藤 整 渡辺 裕
(64)	低遅延素材伝送用 HDTV コーデックの開発	2004年12月	映像情報メディア学会 2004 年冬季大会, 12-4	内藤 整 川田 亮一 小池 淳
(65)	超高精細映像用 JPEG2000 符号化の分散処理実装に関 する一検討	2005年3月	電子情報通信学会 2005年総 合大会, D-11-64, p.64	内藤 整 松村 篤志 小池 淳
(66)	JPEG2000による HDTV 低 遅延符号化のための符号量 制御方式	2005年9月	FIT2005, J-062, pp.325-326	佐野 雄磨 内藤 整 渡辺 裕
(67)	地上デジタル放送携帯受信 における通信連携サービス	2005年11月	2005年電気関係学会関西支 部連合大会, S10-5	内藤 整

	題 名	発表年月	発表掲載誌	連名者
5. 著書				
(68)	広域ネットワーク(第5章)	2002年9月	ネットワーク技術 基本からブロードバンドまで(オーム社)	内藤 整
(69)	1セグ放送の放送網とインターネットによる双方向通信(第6章)	2002年9月	1セグ放送教科書(インプレス)	内藤 整
6. 解説記事				
(70)	3Dシアターとその伝送用機器	1998年6月	映像情報メディア学会誌, Vol. 52, No. 6, pp786-788	内藤 整 松本 修一
(71)	映像配信ネットワーク	2001年9月	映像情報メディア学会誌, Vol. 55, No. 8/9, pp.1104-1110	内藤 整 松本 修一
(72)	ワールドカップサッカーのメガビジョン中継	2002年10月	映像情報メディア学会誌 Vol. 56, No. 10, pp.1559-1561	内藤 整 大場 省介 松信 章一