

地上波デジタル中継用 HDTV コーデックの開発

内藤 整 松本 修一

KDD 研究所 画像通信グループ

あらまし

地上波デジタル放送の国内標準方式に準じて実用規模の実験を行う目的で、「地上デジタル放送研究開発用共同利用施設」の整備が通信・放送機構により実施された。筆者らは本実験用施設において素材伝送を実現する MPEG-2 HDTV コーデックの開発を行っており、MPEG-2 の枠組における高画質化はもちろんのこと、低遅延伝送、各種データチャンネルのサポート、タイムスタンプのユーザ設定といった従来のコーデックでは満たされていなかったユーザ要求に対応した。本稿では装置の概要とユーザ要求に合わせて導入された特徴的なコーデック機能について報告する。

Development of HDTV codec for primary distribution applications in terrestrial digital TV broadcasting service

Sei NAITO and Shuichi MATSUMOTO
KDD R&D Laboratories Inc.

Abstract

“Research and Development Facilities for Terrestrial Digital Broadcasting System for Cooperative Usage” has just become in service by Telecommunications Advancement Organization of Japan, which was equipped for the practical experiments based on national terrestrial digital TV standard. For those facilities, we have developed MPEG-2 codec which can be applied for primary distribution applications of HDTV programs, and this system enables various user functions which has not been supported by conventional codecs so far, that is not only highly efficient coding based on MPEG-2 but also low delay coding, data channels for any embedded data, user setting of presentation time stamp and so on. In this paper, the outline of this system and the detail of characteristic functions introduced to meet user requirements are shown.

1 はじめに

2003 年のサービス開始を目指し、地上デジタル放送の方式検討が電通技審や ARIB により進められ、放送方式としてはほぼ確定した状況にある。ここで成立した国内標準方式に準じて実用規模の実験を行う目的で、「地上デジタル放送研究開発用共同利用施設」の整備が通信・放送機構により実施された [1]。本施設は図 1.1 に示すように、全国 8 局をリング状に ATM 回線(155Mbps)で接続した実験用ネットワークならびに各局で実験的に使用する素材伝送システムなどから成り、素材伝送システムは ATM 交換機とビデオコーデックにより構成される。先に筆者らは本実験用施設において素材伝送システムを構成する HDTV を対象とした MPEG-2 コーデックの開発を行った。本コーデックは MPEG-2 メインプロファイルの枠組の中で、高画質化はもとより、低遅延伝送、各種データチャンネルのサポート、タイムスタンプのユーザ設定といった従来のコーデックでは満たされていなかったユーザ要求に対応したものである。本稿では装置の概要とユーザ要求に合わせて導入された特徴的なコーデック機能について報告する。

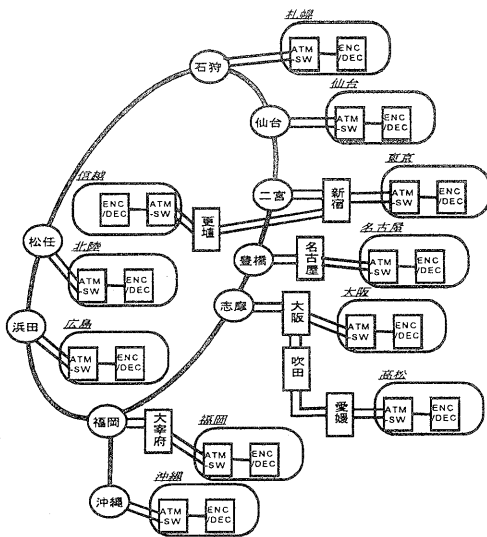


図 1.1 ネットワーク構成

2 装置概要

HDTV コーデックの主要諸元を表 2.1 にまとめて示す。以下コーデックの概要を説明する。HDTV エンコーダは、1125 ライン/59.94 フィールドあるいは 1125 ライン/60 フィールドの HDTV 信号 1 チャンネルを高品質オーディオ 2 チャンネル、データ放送用のデータ 1 チャンネル、Net-Cue 信号並びに誤り訂正符号を含めて、MPEG-2 トランスポートストリームとして DVB-ASI 経由で出力を行う。

入出力ビデオ信号は Y, Pb, Pr コンポーネント信号とし、エンコーダでは MPEG-2 ビデオ符号化標準 [2] の MP@ML 準拠の符号化ストリームを出力する。入出力オーディオ信号は AES/EBU 準拠のデジタル信号あるいはアナログ信号とし、(L,R)×2 組の計 4 チャンネルとする。入力がアナログ信号である場合、標準化周波数を 48kHz として A/D 変換する。得られたデジタルオーディオ信号は、MPEG-2 Audio Layer II により L, R のトータルに対して最大で 384kbps のビットレートで圧縮符号化される。Net-Cue 信号は映像信号とは別に RS-422A シリアル回線経由で 38.4kbps の固定ビットレートで入力され、エンコーダではこれを個別に符号化する。さらに、Net-Cue とは別にデータチャンネルを備えており、最大 1.5Mbps のデータ入力に対応可能である。

以上、ビデオ、オーディオ、Net-Cue、データの各符号化ストリームは、TS パケットとして多重され、必要に応じて RS(204,188)符号を付加した後に DVB-ASI 経由で出力される。

表 2.1 コーデック主要諸元

サイズ(W/H/D)	482×310×540mm
Coder	482×132×540mm
Decoder	
ビデオ	1125line/59.94Hz, 60Hz
SDI	SMPTE 292M
Analogue	YpbPr
オーディオ	(L, R)×2 の計 4 チャンネル
Digital	AES/EBU 準拠
Analogue	XLR 入出力
Net-Cue	38.4kbps 固定ビットレート (RS-422A)
データ	最大 1.5Mbps(RS-422A)
トランスポート	TS 入出力(DVB-ASI)

3 コーデック機能

表 3.1 に HDTV エンコーダにおけるビデオ符号化の条件を示す。HDTV エンコーダにおいては、充分な動き検出範囲を設けており高速な動きにも追従可能である。また 1 画面を複数に分割して並列処理する都合上、共通型バッファ制御を取り入れており、分割されたセグメントに対して最適なビット配分を実現している。

表 3.1 ビデオ符号化条件

符号化 syntax	MPEG-2 MP@HL
符号化領域	1920×1080, 4:2:0
符号化レート	最大 80Mbps
GOP 構造	(N,M)の設定可, 低遅延モード用に I フレームなしの All-P モードを選択可
Intra スライス	低遅延モード用にピクチャ単位で Intra スライスの挿入可
ピクチャ構造	フレームピクチャ/フィールドピクチャ
Motion タイプ	フィールド/フレーム/デュアルプライム予測適応
DCT タイプ	フィールド DCT/フレーム DCT 適応
動き検出範囲	±127.5(H)×±31.5(V) (1 frame 間隔)
プリフィルタ	ビデオ入力に雑音除去フィルタを適用 符号化難易度に応じたフィルタ係数の更新可
レート制御	シーンチェンジ検出に基づく最適なビット割当を実現

今回開発したコーデックは、実用規模の素材伝送システムにおける広範な利用ならびに各種ユーザ要求への対応を考慮し、従来のコーデックにはなかった機能を多く実装したものである。このような背景から本コーデックに導入された特徴的な機能を以下に説明する。

3.1 Net-Cue 対応

Net-Cue 信号は番組送出系において各種オペレーションのトリガーとなる時間管理用の信号であり、アナログ信号によりやりとりする場合には「NAB 技術基準 T016-1984 テレビネットキュー信号」に準じてビデオフィールドのブランキング期間に重畳されるケースが多い。しかし、本施設においてはディジタル中継網を介した局間でのやりとりを想定しており、さらにディジタル放送に移行した場合の Net-Cue 信号についての規格は未定であり、アナログ放送

の NAB 技術基準のような規格は無い。このため、本実験ネットワークにおいては Net-Cue 信号を 17 バイトの固定長パケットとして扱い、映像 1 フィールドに対し 1 パケットを送出する構成とした。ただし、パケットに格納されるデータ構成は極力 NAB 技術基準に合わせた形で定義した。

コーデック側では、Net-Cue 信号用のデータチャンネルを特別に設け、Net-Cue 信号とビデオフィールド信号の入力時刻に関する対応関係を MPEG-2 システムのタイムスタンプ制御により保持することで、Net-Cue 対応をサポートしている。具体的には、図 3.1 に示すとおりビデオフィールドの入力期間ごとに Net-Cue 入力をまとめて PES パッケージ化し、これに対応するビデオフレーム PES と PTS 値を同一にすることで、ビデオと Net-Cue の対応関係を保持している。

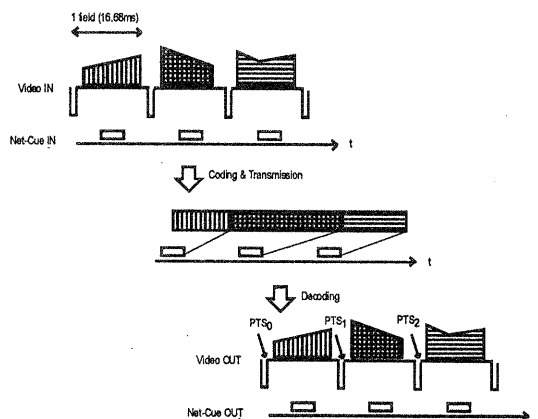


図 3.1 Net-Cue 信号と映像の同期

3.2 タイムスタンプのユーザ設定

MPEG-2 システムにおいて、デコーダにおけるデータ再生はシステムクロックおよび PTS(再生時刻タイムスタンプ)に基づき行われるが、従来よりデコーダにてビデオ出力の基準となるフィールド同期信号は PTS に無関係に生成される場合がほとんどであり、33bit という PTS の高い精度が有効に活用されているとはいえなかった。これに対し、本デコーダでは

PTS に合うタイミングでフィールド同期を生成しており、さらにエンコーダでは PTS の設定方法をビデオフィールドが入力された時刻に対する経過時間により指定可能としており、ユーザによる PTS 本来の意義に沿ったタイムスタンプ指定を実現している。

3.3 適応プリフィルタ制御

前処理として適用する雑音除去フィルタの係数は基本的には固定的に割り当てるが、シーンの符号化難易度の時間的な変動を考慮して、フィルタ強度を適応的に切り替えることが可能な適応プリフィルタモードをサポートした。本モードにおける符号化難易度は符号化対象ピクチャの符号化に先立ち算出され、当該ピクチャへの割り当て係数に反映される。

3.4 低遅延モード

今回導入の対象となる施設のように、中継回線に光区間を設けたネットワーク構成では、回線遅延(高々3 フレーム程度)に比べてコーデックの符号化遅延ははるかに大きく、特にリアルタイム中継においては低遅延モードのサポートが必須である。本コーデックにおいては低遅延モードとして、すべてのピクチャに P ピクチャを割り当てる GOP 構造を選択可能であり、この際の符号化遅延時間を 7frame 以内におさめることが可能である。

回線障害に対しては、ピクチャごとに Intra スライスの挿入を行う段階的リフレッシュ制御の併用により、回線復旧時の再生画質の早期回復が保証される。ここで、Intra モードと Inter モードでは符号化効率が一般に Inter の方が高く、同等の量子化精度の下で発生する符号量は Intra モードの方が多いため、TM5 [3]にみられるような代表的なレート制御を適用する場合、Intra 領域の符号化中は仮想バッファ占有量が継続的に増大する。このため、連続する Intra 領域直後の符号化領域では Intra 領域直前に比べて粗い量子化器が割り当てられることとなり、再生画質上に符号化モードの境界に沿った不連続性を生じる可能性がある。

以上を考慮して、仮想バッファ占有量の更新を次式に従い行うこととする。ただし、位置 j ($j = 0 \sim MB_{cnt} - 1$, MB_{cnt} は 1 ピクチャのマクロブロック数)のマクロブロックについて、符号化後の仮想バッファ占有量を d_j 、マクロブロック符号化による仮想バッファ占有量の増分(発生ビット数からマクロブロック換算のターゲットビット数を引いた値)を Δd_j とする。

i) mode=Intra かつ $\Delta d_j > 0$

$$d_j = d_{j-1} \quad (3.1)$$

$$\Delta D_j = \Delta d_{j-1} + \Delta d_j \quad (3.2)$$

ii) otherwise

$$d_j = d_{j-1} + \Delta d_j \quad (3.3)$$

本方式では、Intra 領域に対しては量子化精度の大幅な変動を防ぐ目的から、 Δd_j が正となる場合には占有量の更新を行わない。ただし、本条件が成立した際の Δd_j の値は別途保持した上で、ピクチャ単位の総和 ΔD_j を算出し、この持ち越し分を後続ピクチャのターゲットビットレートに反映させる。

3.5 シーンチェンジ検出に基づくレート制御

本装置ではシーンチェンジ発生時の画質劣化を解消する目的で、符号化に先立ち当該ピクチャと参照ピクチャの間でシーンチェンジが発生しているか否かに関する情報が得られるという前提の下、以下に示すシーンチェンジ発生時におけるレート制御部分での対策手法を導入した。

当該ピクチャの符号化に先立ち、シーンチェンジに関する情報が得られるものと仮定する。簡単な例として連続する P ピクチャ $[p_0, p_1, p_2]$ において p_1 がシーンの先頭である場合、 p_1 の符号化時に参照画像 p_0 が他のシーンに属することが既知であり、リアルタイムに p_1 のレート制御に反映される。3.4 節では、TM5 で規定される仮想バッファ制御に基づき MPEG-2 符号化を行う場合、Intra スライスなど連続する Intra マクロブロック領域の符号化に対しては

仮想バッファ占有量の変動を考慮しないことで、隣接する Inter 部分との画質の差異を抑える手法を示した。この制御は当該マクロブロック領域に割り当てられたターゲットビット数と Intra 符号化に要するビット数の mismatches を除去するものであり、p1 のように予測参照画像にシーン属性が全く異なるものをもつ P ピクチャの符号化に適用した場合でも、同様の mismatches が量子化制御に波及するのを防ぐ効果があると考えられる。以上を踏まえ p1 に対する具体的な処理として以下に定義する。

- 1) 符号化モードを強制的に all-intra とする
- 2) 符号化終了後 Global complexity measure の更新は行わない
- 3) 量子化制御で使用する仮想バッファ占有量 $d0'$ に対しピクチャの符号化終了まで次式に従う固定値を与える

$$d0' = W' \times d0 \quad (3.4)$$

ただし $d0$ は p0 符号化終了時の仮想バッファ占有量である。また W' は p1 の難易度が過度に高い際にもバッファの破綻を防ぐ目的で導入した重み係数であり、p1 に対して推定される難易度に応じて決められる。

また p1 の符号化終了を受け p2 の量子化制御で使用する仮想バッファ占有量に対しては、p2 符号化開始時の値 $d0''$ を与えた上で以後通常どおり TM5 に従いマクロブロック単位での更新を行う。 $d0''$ の算出にあたっては直前ピクチャと同等の画質を維持するという観点から $d0'$ と同じ値にするのが妥当であると考えられるが、当該シーンにおいて動き補償による効果が著しく低い場合には過度に符号量を割り当てることとなり、後続ピクチャに十分な符号量が残されないという結果を招く恐れがある。このような最悪の場合を想定し、 $d0''$ の算出は次式により $d0'$ よりもやや高めに設定することとする。

$$d0'' = W_{cons} \times d0' \quad (W_{cons} > 1.0) \quad (3.5)$$

4 新規符号化技術の性能評価

3.4 および 3.5 にて述べた新規導入の符号化技術に関し、以下に性能評価を行った。

4.1 低遅延符号化

前節で述べた改善手法による効果を調べるため、符号化シミュレーション実験を行った。詳細な符号化方式は基本的に TM5 準拠とし、3.4 節で述べた仮想バッファ制御に関しては、改良手法を適用/非適用の双方について実験を行った。HDTV 素材としては ITU-R Recommendation BT.1210 の標準テストシーケンスを使用し、bit-rate は 22Mbps とした。結果の一例として、GOP 先頭の I ピクチャ以外では連続する Intra 領域を固定的に 2 スライス分(#30 および #31) 挿入する条件の下で、仮想バッファ制御の改良手法を適用/非適用とした場合のテスト画像 Whale show に対する符号化結果を図 4.1 に示す。横軸はあるピクチャにおけるスライス位置を示し、縦軸は PSNR ならびに仮想バッファ占有量を示す。仮想バッファ占有量は各スライスの符号化開始時の観測値を bit-rate で正規化した 0~31 の値で示しており、PSNR は各スライス平均の値で示す。結果から、改良手法の適用により、Intra 領域の符号化に起因する占有量の大幅な上昇分は吸収され、Intra 領域直後の画質劣化が抑制されていることが分かる。ここで、本実験では主観評価の便宜上、連続する Intra 領域を扱ったが、仮想バッファ制御に対する改良手法の導入は、Intra 領域がピクチャ内に散在する場合に対しても同様に有効であり、画面全体に対して Intra 領域の分布に依存しない均等な量子化特性を与えるものである。

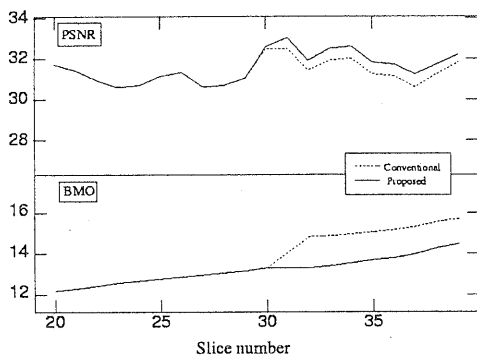


図 4.1 PSNR と仮想バッファ占有量の推移

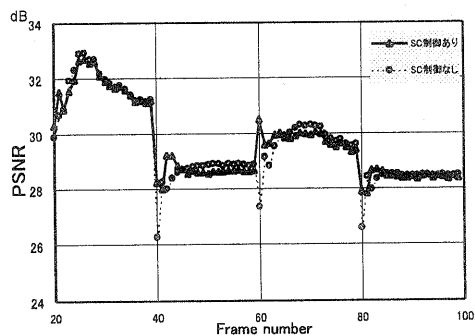


図 4.2 符号化結果

4.2 シーンチェンジ制御に基づくレート制御

3.5 節で挙げたレート制御手法を対象に、実機のデコード画像を取得しエンコーダ入力との比較により性能評価を行った。シーンチェンジ対策となる提案レート制御手法による効果を純粋に評価する目的から、全ピクチャに P ピクチャを割り当てる GOP 構造とした。入力には標準テスト画像(1920 画素×1035 ライン)を 20 フレームずつ 5 種類繋ぎ合わせることで、シーンチェンジが定期的が発生する素材を構成した。実験において式(3.4)の W^i は 0.8~1.1 の範囲で適応的に割り当て、式(3.5)の W_{cons} については 1.3 に固定した。図 4.2 に符号化レートを 40Mbps とした際に上述のレート制御手法が適用/非適用の各場合についてフレームごとに得られた PSNR を示す。図より従来の仮想バッファ制御においてはシーンチェンジ発生から 3~4 フレームの区間で著しい画質劣化が見られたが、シーンチェンジに対応した提案レート制御手法の導入によりこの問題が解消されているのが分かる。この点からも目標符号量と発生符号量のミスマッチがシーンチェンジに伴う一時的な画質劣化の主要因になっていたものと考えられる。

5 むすび

地上デジタル放送の中継ネットワーク伝送実験用に開発した HDTV 用 MPEG-2 コーデックに関し、その概要と各種ユーザ要求に対応するべく導入された特徴的なコーデック機能に関して述べた。HDTV コーデックを含む本実験施設は、地上デジタル放送の新技术・新サービスの開発を行う地域拠点として非常に重要な位置にあり、今後、様々な実験において幅広く活用されるものと期待される。

参考文献

- [1] 石川 哲夫, "地上デジタル放送研究開発支援用共同利用設備の概要", 映像情報メディア学会誌 Vol.53, No.11, pp1472-1475(1999)
- [2] ISO/IEC JTC1, "Information Technology - Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio-Video", ISO/IEC 13818-2(1994)
- [3] Test model Editing Committee, "Test Model 5", ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N0400(1993)