動画像符号化に関わる標準規格

数井 君彦[†]

1. ま え が き

本講座では、11回にわたり、画像符号化に用いられる各種技術を解説してきた。最終回では、動画像符号化技術の実用化とサービス普及に大きく貢献してきた、標準規格について解説する。本稿では主に、1990年代初頭から2000年代末までの間に、主要な標準化団体であるISO/IEC JTC1^{*1}、ITU-T^{*2}、SMPTE^{*3}でそれぞれ規格化された、MPEGシリーズ^{*4}、H.26xシリーズ、およびVC-1について、用途、要素技術(符号化ツール)、圧縮性能等を解説していく。

これら標準規格の基本構成は、1990年代初期にはすでに固まっており、概ねY/Cb/Cr色表現、エントロピー符号化、周波数変換、量子化、ピクチャ内(イントラ)予測、ピクチャ間(インタ)予測、ループ内フィルタといった符号化ツールから構成され、最新規格HEVCでも同様である。図1および図2にそれぞれ、エンコーダ、およびデコーダの概略構造を示す。点線で囲った箇所は、両者で共通である。

各標準規格の基本構成は同じでも、IT技術の進歩、および各符号化ツールの地道な最適化によって、動画像解像度と圧縮効率は向上している。

2. 標 準 規 格

2.1 規格の範囲

動画像符号化の標準規格は、符号化動画像データ(ビットストリーム)の構造、および符号化動画像データの復号

図1 エンコーダ構造

図2 デコーダ構造

*1 ISO/IEC JTC1：国際標準化機構 (International Organization for Standardization) と国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission) との第一合同技術委員会 (Joint Technical Committee)。

*2 ITU-T：国際電気通信連合 (International Telecommunication Union) の電気通信標準化部門 (Telecommunication Standardization Sector)。

*3 SMPTE：米国映画テレビ技術者協会 (Society of Motion Picture and Television Engineers)。

*4 MPEGシリーズ：本規格化を担当した作業グループSC29/WG11のニックネームMPEG (Moving Picture Experts Group) が、規格のニックネームにもなっている。なお、MPEG規格は、動画像符号化以外にも、システム多重化やオーディオ符号化等の規格も含んでいる。

[†] 株式会社富士通研究所

"Basic Technologies of Image Coding (Final Study): Video Coding Standards" by Kimihiko Kazui (Fujitsu Laboratories Ltd., Kanagawa)

方法を規定の対象とする。入力動画像の符号化方法は規定の対象としない。この理由は、動画像の符号化処理は非常に複雑であり、かつ処理量が膨大なことに起因する。製品の圧縮率および実装コスト(両者は一般的に相反)への要求は、用途によって多岐にわたるため、特定の符号化方法を規定することは不適切であり、また事実上不可能である。逆に、各社製品の自由な性能競争が可能になり、動画像符号化市場の発展につながっている。

標準規格はまた、相互接続性(同一のビットストリームの復号結果が復号装置によらず同一であること)の実現支

援を目的に、参照ソフトウェアおよび試験用ビットストリームを規定する。参照ソフトウェアは、元々標準化作業の中で、開発方式の性能評価のために開発されたものである。

なお、各標準規格の間での互換性は、基本的にはない。

2.2 プロファイル

1990年代後半以降に策定された標準規格は汎用性を持ち、多様な動画画像フォーマット、ビットレート、符号化ツールをサポートする。製品がこれらすべてを満たすことはコスト的に困難であるため、標準規格では、プロファイルおよびレベルという仕組みを規定している。プロファイルは、主要用途毎に必要な符号化ツールのセットを、レベルは動画画像解像度やビットレートといった符号化ツールに依存しないパラメータのセットを、それぞれ階層的に規定する。標準規格は、あるプロファイルレベルに準拠した復号装置が、それより下位のプロファイルレベルに準拠したビットストリームを復号可能であることを義務付けている。

2.3 ライセンス

標準規格には、各企業・研究組織が保有する特許技術が、非常に多く含まれている。各標準化団体は、特許のライセンスには関与しないが、規格に含まれる技術は「妥当で公平なライセンス」(Reasonable and Non Discriminatory Licensing: RAND)であることを、提案企業(ランセンサ)に要請している。一方、製品を開発する企業(ライセンシー)が、すべてのランセンサに特許使用の個別交渉を行うことは、現実的ではない。そこで、ライセンサがライセンスプール(代表格はMPEG-LA)を立ち上げ、ライセンス処理を一括して行う仕組みを構築している。

3. 各標準規格の概要

以下、標準化時期の順番に紹介していく。

3.1 H.261

H.261は、ITU-T(当時CCITT)によって1990年に策定された規格である。用途は、デジタル回線上での実時間通信である。64kbpsのISDN回線を複数束ねて、QCIF(176×144)およびCIF(352×288)解像度の動画画像(4:2:0, 8ビット)を、1Hz～30Hzのフレームレートで伝送することを想定している。企業向けのテレビ会議システム等で製品・実用化されている。

H.261は、動画画像符号化の主要符号化ツールである、Y/Cb/Cr色表現、可変長符号化、直交変換(8×8、浮動小数点演算)、量子化、インタ予測を備えている。H.261の特徴は以下の通り。

- ・過去方向のみのインタ予測：処理量が増加する両方向は、実時間処理を優先するためサポートしない。
- ・マクロブロック(MB)を符号化単位とするピクチャ内分割：輝度成分の大きさは16x16画素であり、これは本解説で紹介しているすべての標準規格で共通である。
- ・Groups of Blocks (GOBs) 構造：スライス構造(画面内

分割)の原型、各GOBの位置と大きさは固定。

- ・整数精度の動きベクトル(MV)：小数精度とした以降の規格と同等な効果をもたらす、予測画像への2次元Low-pass filter (LPF) が採用されている。
- ・誤り修正 (Forward error correction: FEC)：以降の大半の規格では、外部で規定される。

3.2 MPEG-1 Video

MPEG-1 Video (ISO/IEC 11172-2) は、ISO/IEC JTC1により、1992年に策定された規格である。用途は、蓄積メディアへの保存である。1.5Mbps(当時の主流メディアであるCD-ROMの読出しレートに相当)以下のビットレートで、25Hzもしくは30HzのSIF画像(25Hzの場合は352×288, 30Hzの場合は352×240)を高効率に圧縮することを想定している。VideoCDやインターネット映像配信等で製品・実用化されている。

MPEG-1 Videoで新たに導入された技術は、以下の通り。

- ・両方向インタ予測：圧縮率向上に大きく貢献する。
- ・Group of Picture (GOP) 構造：蓄積用途に必須な機能であるランダムアクセス(ビットストリーム途中からの再生)の実現に不可欠である。
- ・1/2画素精度のMV
- ・量子化マトリクス：周波数成分毎に量子化値の調整が可能になる。主観画質の制御に用いられる。
- ・直交変換DC係数の予測符号化

3.3 MPEG-2 Video

MPEG-2 Video (ISO/IEC 13818-2) は、ISO/IEC JTC1により、1995年に策定された規格である。ITU-TでもH.262として規格化されている。用途は、蓄積、通信、放送と広く、高い汎用性を持った規格である。日本のデジタルテレビ放送や蓄積メディア(DVDおよびBlu-ray)等の分野で、現在も広く使用されている。MPEG-2 Videoは、インタレース形式の標準解像度テレビ(SDTV)および高精細テレビ(HDTV)をサポートする。

MPEG-2 Videoで新たに導入された技術は、以下の通り。

- ・フィールド・フレーム適応符号化:インタレース動画画像の各フィールド(トップおよびボトム)を個別のピクチャとして符号化するか、もしくは一つのフレームとしてまとめて符号化するか、柔軟に選択できる。
- ・インタレース対応の動き補償：フレームピクチャのMBは、フィールド毎に個別のMVを指定可能である。
- ・インタレース動画画像に適した直交変換、および直交係数のスキャン順序
- ・2通り(線形、非線形)の量子化スケール
- ・イントラ符号化時のDC成分の量子化精度向上
- ・可変長符号化テーブルの複数化
- ・4:2:2色差フォーマットのサポート：素材伝送等のプロフェッショナル用途向け。

またMPEG-2 Videoは、階層符号化に初めて対応した。

階層符号化は、複数の階層（例えば下位がCIF/15Hz/1Mbpsで、上位がSDTV/30Hz/4Mbps）のビットストリームをまとめて効率的に符号化する。上位ビットストリームは、下位ビットストリームとの差分となり、各階層を個別に符号化する場合（サイマルキャスト）に比べ、トータルのデータ量が削減可能である。階層化の方向は、時間方向（フレームレート）、空間方向（解像度）、品質方向（量子化値）、の3軸がサポートされている。また、時間方向階層化の応用として、3Dステレオ動画の符号化をサポートしている。階層符号化は、伝送路のビットレートや誤り率変動する状況に合わせて最良の画質を実現するために有効であるが、MPEG-2 Videoの階層符号化の実用例は僅かである。

MPEG-2 Videoでは、多くのプロファイルおよびレベルが定義されている。例えば、日本のデジタル放送で使用されているのは、MP@HL (Main プロファイル High レベル、両方向インタ予測あり、階層符号化なし、HDTV (1,920 × 1,080/30Hz/4:2:0) 対応) である。

3.4 H.263

H.263は、ITU-Tにより1996年3月に基本規格が策定された規格である。用途は、超低ビットレートの実時間伝送である。16CIF (1,408 × 1,152) までの解像度、プログレッシブ形式、4:2:0色差フォーマットに対応し、携帯電話上のテレビ電話やコンテンツ配信等で製品・実用化されている。

H.263の基本規格では、H.261と比較して、以下の符号化ツールが追加されている。

- ・1/2画素精度のMV：MPEG-1 Video等と同じ
- ・3次元可変長符号化

H.263の拡張規格では、多くの符号化ツールが追加導入されている。H.263以降の標準規格にも採用されている符号化ツールを以下に示す。なお、これらの符号化ツールの使用は、H.263外部の通信プロトコル規定に基づく、送受信間の能力ネゴシエーションによって決定される。

- ・画面外領域を示すMVの許容
- ・算術符号化：MPEG-4 AVCのCABACの原型
- ・8×8単位動き補償、およびオーバーラップ動き補償
- ・イントラ予測：直交係数DC/AC成分の予測符号化
- ・デブロッキングフィルタ

3.5 MPEG-4 Visual

MPEG-4 Visual (ISO/IEC 14496-2) は、ISO/IEC JTC1により、1999年に初版が策定された規格である。

標準化開始時の目的は、蓄積・通信時の圧縮率を大幅に向上することであった。当時注目を集めたオブジェクト符号化（顔等の被写体をモデル化し、少ないパラメータで画像を記述する）により、自然動画を数kbpsで符号化する、といった野心的なプロジェクトであった。

しかしながら、オブジェクト符号化の実用化は難しく、結局は、自然動画の符号化方式はH.263をベースとした

ものとなった。なお、自然動画用とは別に、CG画像向けに、顔オブジェクト記述および人体オブジェクト記述、2D/3Dメッシュ記述といった符号化ツールも規定されている。本規格の名称が"Video"でなく"Visual"とされているのは、自然動画およびCG動画を、個々の映像オブジェクトとして扱い、複数オブジェクトを合成して最終的な動画とするフレームワークの採用による。

自然動画向けの符号化ツールとして、以下のものが新たに導入されている（※を付けた符号化ツール以外は、以降の標準規格では採用されていない）。

- ・VOP (Video Object Plane)：映像オブジェクトの記述フレームワーク。オブジェクト形状の符号化を含む。
- ・オーバーラップ動き補償：H.263と同様
- ・スプライト符号化：全景を除いた背景全体を予め伝送しておき、個々のピクチャにて背景に前景を合成する。
- ・8ビット以上の画素精度※
- ・データパーティション、および逆方向からも復号可能な可変長符号化：誤り耐性向上に用いる
- ・ウェーブレット変換：静止画像符号化時のみ
- ・グローバルMV (GMV)：画面全体の動きの記述
- ・動的解像度変換：動き補償誤差信号の解像度を可変にして、圧縮率を向上する。
- ・4:2:2/4:4:4色差フォーマット対応※：スタジオ素材の蓄積・伝送向け
- ・1/4画素精度MV※
- ・階層符号化：品質を細かに制御可能なFine Granularity Scalability (FGS)

MPEG-4 Visualでは、自然動画およびCG動画向けに多くのプロファイルレベルが定義されているが、製品・実用化されているのは、自然動画向けのいくつかのプロファイル (Advanced simple等) に限られる。

3.6 AVC

AVC (Advanced Video Coding) は、ITU-TとISO/IEC JTC1との共同で作成された標準規格である。当初ITU-Tが、H.263の後継規格として検討を進めていたものである。正式名称は、ITU-T側ではH.264、ISO/IEC JTC1側ではISO/IEC 14496-10 (MPEG-4 AVC) である。2003年に初版が作成され、2005年に、現在広く使用されているHighプロファイルの拡張規格が作成された。

AVCは、幅広い画像フォーマットをサポートする。

- ・解像度：QCIFから4K (4,096 × 2,180) まで
- ・フレームレート：60Hzプログレッシブまで
- ・色差フォーマット：4:2:0, 4:2:2, 4:4:4に加えRGB等の色空間もサポート

AVCはMPEG-4 Visualと同様に、汎用的な低ビットレート符号化を目的とするが、既存方式と同じく、動き補償および直交変換という基本方式を継承している。

AVCで新しく採用された符号化ツールは以下の通り。

- ・整数精度直交変換：4×4および8×8 (High プロファイルで導入) の二つのサイズを持つ。既存規格は浮動小数点精度のため、復号装置の実装形式によって復号結果に±1の変動が生じていたが、AVCでは復号結果が完全に一致し、また実装コストも軽減している。
- ・動き補償ブロックサイズ：最大16×16、最小4×4ブロック単位での動き補償が可能となり、インタ予測の効率が向上している。
- ・イントラ予測：画素領域での予測が初めて導入された。9個の予測モード(予測方向)を持つ。イントラ予測の効率が大幅に向上している。
- ・エントロピー符号化：可変長符号化(VLC)の拡張であるCAVLC(コンテキスト適応VLC)に加え、CABAC(コンテキスト適応二値算術符号化)が採用されている。CABACは圧縮効率が10%程度高く、CALVCはスループット(クロック当たりの処理ビット数)および実装簡易性の面で勝る。用途に応じて両者を選択可能である。
- ・フィールド・フレーム適応符号化：ピクチャレベルの適応選択(PAFF)に加え、MB単位での適応選択(MBAFF)がサポートされた。
- ・デブロッキングフィルタ：基本規格から採用
- ・MVの予測符号化：隣接3ブロックのMVの中間値を予測値とする。
- ・ロスレス符号化：量子化をスキップする。その他、MB単位で画素値をそのまま伝送するPCMモードを持つ。
- ・参照ピクチャ：既存規格では、前方向参照ピクチャと後方向参照ピクチャは、GOP構造によって一意であった。AVCではインタ予測の効率向上のため、明示的に

参照ピクチャを指定可能にする仕組みが導入された。長時間過去のピクチャや、両方向予測ピクチャも参照可能になっている。

- ・重み付き動き補償：フェードシーン等での輝度値変動を考慮して、動き補償結果を補正することで、インタ予測効率を向上する。
- ・階層符号化：既存規格に比べ、符号化効率および汎用性が向上している。
- ・多視点動画画像符号化：インタ予測を拡張した視点間予測を導入し、最大1024視点の圧縮に対応する。

AVCは、日本のワンセグ放送、外国のデジタル放送、Blu-ray、インターネット映像配信(YouTube等)といった、幅広い分野で使用されている。

3.7 VC-1

VC-1(SMPTE 421M)は、マイクロソフト社のWindows Media Video 9をベースに、SMPTEが2006年に規格化したものである。VC-1の用途は、低ビットレートでのネットワーク伝送等であり、サポートされる動画フォーマットは、4:2:0色差、8ビット画素精度に限定される。インタレースおよびプログレッシブの両方、最大HDTV 60Hzの解像度・フレームレートに対応する。

VC-1の符号化ツールは、MPEG-4 Visualの自然動画画像符号化ツールに近い。ただし、スプライト符号化や、グローバルMCは含まない。他の規格にはないユニークな符号化ツールは以下の通り。

- ・画素値レンジ圧縮：入力8ビット動画画像のレンジを最大7ビットまで圧縮して符号化する。
- ・直交変換：整数画素であり、かつ8×8、8×4、4×8、

表1 各標準規格の比較

標準規格	H.261	MPEG-1	MPEG-2/H.262	H.263	MPEG-4 Visual	AVC(MPEG-4 AVC/H.264)	VC-1
標準化時期	1990	1992	1995	1996	1999	2003	2006
最大解像度	CIF	CIF	HDTV	16CIF	HDTV	4K	HDTV
色空間	4:2:0	←	4:2:0/4:2:2	4:2:0	4:2:0~4:4:4	4:2:0~4:4:4, RGB	4:2:0
画素精度	8ビット	←	←	←	8~10ビット	8~12ビット	8ビット
予測方向	片方向	両方向	←	←	←	←	←
MV精度	1	1/2	1/2	1/4	1/4	1/4	1/4
ME	16×16	←	16×16 8×16/16×8 Dual Prime	4×4(OBMC) 16×16 スプライト, GMV	16×16 8×16/16×8	4×4~16×16	8×8~16×16
イントラ予測	No	DCT係数DC成分	←	DCT係数DC/AC成分	←	画素領域9方向	DCT係数DC/AC成分
Entropy	VLC	←	←	VLC 算術符号化	3D VLC	CAVLC CABAC	VLC
ループ内フィルタ	Yes 動き補償用	No	No	Yes デブロッキング	No	Yes デブロッキング	←
MB size	16×16	←	←	←	←	←	←
DCT	8×8 浮動小数点	←	←	←	←	4×4/8×8 整数	4×4~8×8 整数
Scalability	No		Yes	←	←	←	No
Multi-view	No	No	Stereo	No	No	Yes	No

4×4の4種類をサポートする。

- ・ビットプレーン符号化：符号化モード等，MB単位の二値情報を，ピクチャ単位でまとめて可逆圧縮する。
- ・動き補償：LPF係数をBi-cubicおよびBilinearの二つに切替え可能にする。

VC-1は，Blu-rayにも採用されている。

4. 各標準規格の比較

4.1 対象動画フォーマットおよび符号化ツール

H.261からVC-1までの各標準規格が対応する動画フォーマット，および使用する符号化ツールを表1にまとめる。

4.2 圧縮性能

各標準規格の用途や対応動画フォーマットが異なるため，総括した比較は困難であるが，個々の比較では以下のようになっている。

- ・プログレッシブ動画の場合，MPEG-1とMPEG-2とは同等の圧縮性能
- ・MPEG-2を1とした場合のH.263およびMPEG-4 Visual，AVCの圧縮率はそれぞれ，2倍弱，2倍強である¹⁾。

5. む す び

本稿では，主要な国際標準化機関によって標準化された動画符号化規格の概要を解説した。詳細については，各標準化団体が発行する規格文書を参照されたい。以下のURLから，有償もしくは無償で入手可能である。

ISO/IEC: <http://www.iso.org/iso/store.htm>

ITU-T: <http://www.itu.int/en/ITU-T/publications/>

SMPTE: <http://store.smpte.org/>

(2013年2月28日受付)

〔文 献〕

- 1) J.R. Ohm et al. "Comparison of the Coding Efficiency of Video Coding Standards - Including High Efficiency Video Coding (HEVC)", IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 22, 12 (Dec. 2012)

数井 君彦 1993年，東京工業大学修士課程修了。現在，(株)富士通研究所勤務。動画符号化方式の研究開発，およびMPEG等の国際標準化に参加。

2013年7月号予定目次

- 【ふぉーかす】会長就任挨拶----- 理科大（新会長） 伊東 晋
- 【特別寄稿】テレビ放送開始60周年----- 総務省，NHK，日本テレビ，シャープ
- 【特 集】「新しい画像符号化技術」
1. HEVC (MPEG-H/ITU-T H.26x) 技術解説
 - 1-1 国際標準化作業----- Mitsubishi Electric Research Lab (USA) 杉本和夫
 - 1-2 HEVCの階層ブロック構造および変換・量子化----- NEC 蝶野慶一
 - 1-3 HEVC (High Efficiency Video Coding) の標準化動向----- ソニー 鈴木輝彦
 - 1-4 可変長符号化----- JVCケンウッド 福島 茂
 - 1-5 ループ内フィルタ----- 東 芝 中條 健
 - 1-6 ビットストリームの構成とその機能----- パナソニック 西 孝啓
 - 1-7 HEVCプロファイルレベルと拡張作業----- シャープ 山本智幸
 2. JCT-3Vにおける3次元映像符号化方式の標準化動向----- NTT 志水信哉
 3. SC29/WG1標準化動向----- 早 大 石川孝明・ソニー 福原隆治
- 【講 座】「ディスプレイの基礎」
- (開講に当たって)
- (第1回) 液晶ディスプレイの基礎----- 長岡技科大 木村宗弘
- 【映像情報メディア年報2013シリーズ】
- (第7回) 無線・光伝送技術の研究開発動向----- NHK 田中祥次・池田哲臣，東 芝 古川雄一，千葉大 齊藤一幸，NEC 福本正義，住友電工 太田順一
- 【知っておきたいキーワード】
- (第90回) ソーシャルキュレーション----- パナソニック 近藤敏志
- 【メディアウォッチ】
- (第17回) セコム株式会社IS研究所----- 電通大 早房長敏・竹内尚也・百瀬元気・宮鍋克麻・塩飽 淳