開発物語

MPEG開発物語

～ De-Facto と De-Jure 標準～

三菱電機株式会社 村上篤道
Tokumichi Murakami

まえがき

MPEG (Moving Picture Experts Group)は、ISO/IEC JTC1/SC29/Working Group11 の呼称であり、第1回会合(1988年)から2007年で20周年を迎え、2010年1月京都会合で91回目の開催となった。MPEGによって規格標準化された符号化技術は、放送・パッケージ・通信メディアにおけるコンテンツ流通に、国際的規模で採用され、既に250兆円以上の市場規模を創出している。

映像符号化技術は、学術的な研究開発のみならず、De-Facto(業界)標準やDe-Jure(国際)標準のプロセスを通して、50～100分の1の情報圧縮と映像品質の改善を目標に発展を遂げてきた。H.261の通信アプリケーションからMPEG-2、MPEG-4、AVC(Advanced Video Coding)/H.264によるコンテンツ流通サービスへの活用に至るまでの系譜を図1に示す。

本稿では、まず、アルゴリズム開発からMPEG以前の標準化の流れの中で採用された符号化ツールとハイブリッド符号化アーキテクチャについて紹介する。これらの技術は、MPEG以降、市場の要求条件に幅広く適合

すべくMPEG標準化作業における評価・検証のプロセスによって磨かれ進化してきた。次に、MPEG-1、2、4、AVCの各標準化作業を通して開発された符号化ツールについて紹介する。現在、ISO/IEC(MPEG)とITU-T(VCEG)が連携して、次世代のUHD TV(Ultra High Definition Television)に向けた新技術開発の挑戦が始まりつつある。

映像符号化アルゴリズムの開発

シャノンによって提唱された情報理論[1]を基点として、ウィーナフィルタ・デジタル信号処理[2]・量子化・可変長符号化を融合した映像符号化技術が発展してきた。符号化効率の評価尺度には、Rate-Distortion理論に基づき、所要情報量における入力映像信号と符号化による雑音(ひずみ)との比が用いられている。映像符号化のアルゴリズム開発は、本学会や映像情報メディア学会、情報理論とその応用学会、画像符号化シンポジウム(PCSJ)などに研究者が集まって議論・切磋琢磨することによって発展してきた。

応用面から見ると、1980年代における映像符号化・復号装置(コーデック)は冷蔵庫1台分ほどのサイズがあり、基幹回線における映像配信や産業用監視システム、業務用デジタルVTRに限定されていた。64 kbit/sをベースとしたISDN(Integrated Service Digital Network)が敷設されるにつれて、半導体集積度の向上と相まって、低価格なテレビ会議・電話用コーデックの需要が出てきた。こうした背景からCCITTにおける $p \times 64$ kbit/s用映像符号化方式の標準化に対応したアルゴリズム開発も始まった。

図1 H.261～MPEG標準と映像サービス

映像信号は空間的・時間的冗長度を有するため、初期の段階では、画面内の相関の高い隣接画素から予測を行うイントラ符号化と、時間的に隣接する映像フレームを用いて予測を行うインタ符号化が採用された。シミュレーション技術やLSIの高集積化技術の進化により、ブロックマッチングをベースとした動き補償予測符号化(図2)が可能になり、予測誤差電力が1けた以上減少することが実証され、圧縮効率が飛躍的に改善された。

- ① 現フレームを 8×8 画素または 16×16 画素ブロック $X_n(i, j)$ に分割する
- ② 画素ブロック単位に前フレーム内の画素ブロック $X_{n-1}^L(i, j)$ とのひずみ(差絶対値和: D^L)を計算する

$$D^L = \sum_{i,j} |X_n(i, j) - X_{n-1}^L(i, j)|$$
- ③ 現フレームの画素ブロックごとに、前フレームの中から最小ひずみを与える画素ブロックを決定し、両者の位置的なずれを動きベクトルとする

動き補償予測ループ内フィルタの提案→半画素精度予測画像符号化シンポジウム('80~'94)などで発表

図2 動き補償予測

映像信号を二次元の周波数領域に変換する直交変換符号化は、電力を低域に集中でき、効率的な量子化・符号割当が可能となる。標準化では、 8×8 画素ブロックに対する離散コサイン変換(DCT: Discrete Cosine Transform)が初めに導入された。DCTによる変換係数の量子化を行ってランレングス符号化と組み合わせる手法(図3)により、ベクトル量子化(VQ: Vector Quantization)[3]と同等の符号化性能が期待できる。

これら動き補償予測と変換符号化、可変長符号化を組み合わせ、ハイブリッド符号化アーキテクチャが生み出された(図4)。入力映像信号は、インタレース構造を持たない順次走査(プログレッシブ)信号として、CIF

図3 8×8 DCT係数の二次元ランレングス符号化

* "Table Tennis" (MPEG 標準画像)

図4 ハイブリッド符号化アーキテクチャ

(Common Intermediate Format, 352×288 画素), QCIF (Quarter CIF, 176×144 画素)を規定した。ブロック単位の符号化ツールをベースとしたため、下位から 16×16 画素ブロックからなるマクロブロック, GOB(Group of Blocks), ピクチャのレイヤ構造をとる。本方式は $p \times 64$ kbit/s テレビ会議・電話用国際標準符号化方式 H. 261 として勧告化された[4]。伝送レートの制御は、送信バッファの蓄積情報量に基づいてDCT変換係数の量子化器を制御することによって実現される。符号化映像品質は、Rate-Distortion理論に基づく最適化を行い、視覚的に劣化が目立つ箇所・目立たない箇所に応じて符号配分を調整することによって改善する。

通信・配送用映像コーデックの実用化

1980年代半ばになると、世界に先駆けた先端技術を競って、適応DCT技術による56 kbit/sの映像コーデックが米国WIDCOM社から発表され、日本でもKDD,

NTT, 三菱電機, NEC, 富士通から, 動き補償予測と VQ を組み合わせた, N-ISDN に接続できる 64 kbit/s コーデックが市場に供給された. やがて, ISDN 回線の世界的普及に相まって, 国際間で相互接続可能な映像コーデックの De-Jure 標準の必要性の認識が高まった.

これを受けて, CCITT SG15 において $p \times 64$ kbit/s の国際標準符号化方式の技術開発が加速され, 1990 年, H.261 方式として勧告化された. H.261 の標準化に当たっては, 符号化ツールを統合したりファレンスモデルをプラットフォームとして, 各国の専門家が符号化性能の改善に努力した. 1989 年, 勧告に先駆けた相互接続性検証に当たり, 日米欧の標準化活動参画機関がフレキシブル H/W を開発し, 国際回線を通した実証実験を行った. H.261 勧告と ISDN 回線の普及に伴い, テレビ会議・電話, 監視用途で, デスクトップサイズのカラー映像コーデックが市場に供給されるようになった.

1980 年代に, 映像符号化技術は精力的開発により目覚ましい進化を遂げ, MPEG 発足前には動き補償・変換符号化をベースとするハイブリッド符号化技術を用いたコーデックが製品化されていた.

MPEG の始まり

民生分野においては, デジタル映像の蓄積メディアへの記録のニーズが高まり, 各社対応機器の開発を独自方式で進めていた. 放送分野では, アナログとデジタル技術を融合させた映像圧縮符号化装置が開発されていたが, 1991 年の米国 NAB (National Association of Broadcasters) Show において, 米国 GI 社により, オールデジタルの DTV 用途を指向した DigiCipher コーデックのデモが行われ, 多大な反響を呼んだ.

一方, 安田 浩, L. Chiariglione 氏らは 1988 年, Ottawa (カナダ) において JTC1/SC2/WG8 会合を開き, 大きな市場が見込める民生分野の関連機関を巻き込み, 新たに映像符号化技術の標準化グループ設立を決めた. このグループが, 後に ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 として “CODING OF MOVING PICTURES AND AUDIO” を課題とする技術標準化グループ “MPEG” となった. 日本では, 情報規格調査会 (ITSCJ)・SC29 専門委員会が対応している.

図5 MPEG ピクチャフォーマット

MPEG-1 ~ MPEG-2

最初の規格 MPEG-1 では, SIF フォーマット (352 × 240 画素) を対象としたビデオ CD 向け高能率符号化方式の標準化を目指した. 符号化技術の公募に際しては, 映像品質評価の公平性を重視し, 提案アルゴリズムと符号化映像をセットとして提出することを求め, 1989 年の久里浜会合において提案技術に対する符号化映像の主観評価テストを実施した. MPEG-1 では蓄積メディアを対象にしたため, イントラフレームを周期的に挿入する GOP (Group of Pictures) 構造を定義し, ストリームレベルでランダムアクセスが可能なフレーム間予測構造をとった (図 5). また, 遅延時間の拘束条件が緩和され, バックワードピクチャ予測と半画素精度の動き補償予測の導入が符号化効率の改善に寄与した.

MPEG-1 の符号化技術開発の時点より, ワークステーションやパーソナルコンピュータ (PC) をプラットフォームとしたシミュレーション環境が急速な進歩を遂げ, 複雑なアルゴリズムの導入・評価が可能となった. MPEG-1 は 1993 年に IS (International Standard) として標準化され, SIF フォーマットを対象とした CD カラオケに採用, 製品化された. なお, サブバンド符号化に Modified DCT 技術を加えた MPEG-1 オーディオ Layer-III 規格は, “MP3” としてインターネット, PC の分野で世界的に普及している.

1990 年 7 月の Porto 会合 (ポルトガル) において, 通

信・放送・パッケージメディアに共通に使える“Generic Coding”の議論が開始された。ISO/IEC と ITU-T は、次の勧告 MPEG-2/H.262 を、コモンテキストとして Generic Coding の技術を規格化することに合意した（図 6）。また、MPEG-2/H.262 では、デジタル放送の民生用受信機や DVD 再生機器の小型化のため 1 チップ LSI デコーダが必要であり、デコーダの複雑度・実装規模が最小となるアルゴリズムの規格・標準化が指向された。MPEG-2/H.262 は、1994 年に IS として標準化され、デジタル放送・DVD を中心にディジタル映像サービスの世界的普及の原動力となった [4]～[6]。

MPEG-2/H. 262 は、プログレッシブ、インタレース両方の入力映像信号を符号化対象とすることとなった。インタレース信号を扱うために、新たにフレーム・フィールドピクチャ構造を加えたスライスレイヤと GOP ピクチャフォーマットの定義を行った。マクロブロック単位の動き補償予測・変換符号化に、フレーム・

图 7 MPEG-2 符号化方式

フィールド適応化技術が開発され、デジタルテレビ信号の符号化に対応可能となった。動き補償予測は半画素精度予測が必須となり、変換係数の適応スキャンが導入された。これらに対応した量子化とエントロピー符号化の最適化が行われた(図 7)。

MPEG-2 オーディオ規格は、AAC (Advanced Audio Coding) が Dolby 社 AC-3 方式と並んで放送・パッケージ向けの高品質コーデックとして広く採用された。MPEG-2 システム規格は、映像・音響信号の多重化パケットフォーマットとして広範囲なアプリケーションで利用されている。

Generic Coding を目指した MPEG-2 符号化技術は、採用済み符号化ツールを統合したテストモデルがアンカーとなり、主観評価テストを通して新規提案技術と比較して優劣を判断しながら性能改善を図る手法をとった。この過程で、当初 MPEG-3 として規格化を予定していた、より解像度の高い HDTV の符号化が MPEG-2 に統合された。

MPEG-2 は Generic Coding であるがゆえに、具体的なアプリケーション・使用分野に合わせたプロファイル・レベルによる規格仕様の勧告化を行った。プロファイルは符号化機能のセマンティクス（アルゴリズム）に対応し、レベルは解像度・ビットレートに対応している。放送では標準解像度（SDTV）はメインプロファイル・メインレベル、HDTV はメインプロファイル・ハイレベルに対応する勧告を使用する。

- MPEG-4 ~ AVC/H.264

MPEG-4 映像符号化技術の開発は、携帯、インターネットでの映像配信を主要ターゲットとして規格化が行われた。MPEG-4 標準は超低ビットレートの映像伝送を目指したため、より複雑な符号化アルゴリズムが提案され続けた。携帯電話・インターネットによる需要拡大と、CPU/DSP の高性能化がこれを支えることになった。MPEG-4 では、適応イントラ DCT 係数予測、動き補償予測 ($16 \times 16 / 8 \times 8$ 適応ブロックサイズ動き予測、 $1/4$ 画素精度動き予測)、低レートに最適化されたエン트로ピー符号化などの改善がなされた。また、モバイル用途向けにビデオ符号化データレベルで誤り耐性を強化した。MPEG-4 は 1999 年に IS として標準化され、3G 携帯電話のテレビ電話、映像配信サービス用途に採用された。

2001年には、ITU-T SG16/Q.6 (VCEG) と MPEG との間で結成された共同作業部会 JVT (Joint Video Team, 2001 年～) において、更なる圧縮率の向上を命題として MPEG-4 AVC/H.264 の標準化が開始された。2003 年にベースライン・メインプロファイルの勧告化が行われ、2005 年に HDTV 対応のハイプロファイルが勧告化された。

AVC/H.264 の標準化作業により、イントラ空間予測、動き補償予測（階層的マルチブロックサイズ動き予測、マルチ参照フレーム、1/4 画素精度動き予測）、整数精度変換符号化、ループ内ブロックひずみ除去フィルタ、CABAC（コンテキスト適応算術符号化）など、ハイブリッド符号化アーキテクチャの徹底した最適化がなされた [7]。これにより MPEG-2 に比べ、符号化器の複雑度は 10 数倍に増加したが、ほぼ 2 倍の圧縮率の向上が得られている（図 8）。

1990 年代の MPEG-2 ～ MPEG-4 の成功を通して、MPEG 会合への参加者人数は増加し続け、年 4 回の会合に 300 名以上の技術者が参画し標準化技術の開発に貢献した。その結果 100 件以上の標準を発行している。

図 8 MPEG-4 AVC/H.264 符号化方式

デジタル映像サービスの 主役となった MPEG

MPEG 映像符号化技術の国際標準化が世界的に認知されるようになったのは、実際のデジタル放送システムや DVD 規格の標準化機関（図 6）に基幹部分として採用され、世界的規模でデジタル映像サービスが普及したことによる。1995 年 NHK・三菱電機による MPEG-2 準拠 HDTV コーデックの開発と評価実験を経

図 9 MPEG 標準を活用した製品とサービス

て、日米のデジタル放送に拍車がかかった [8]。現在では、MPEG-2 は世界のデジタル放送や DVD に採用され、PC 上でも日常的に利用されている。液晶テレビの普及により、1,920 × 1,080 画素のリアルなフル HD コンテンツが家庭で享受できるようになった。MPEG-4 は 3G 携帯電話の動画機能として搭載され、インターネット上で活用されている。MPEG-4 AVC/H.264 は ARIB 規格でワンセグ放送に導入され、Blu-ray ディスクや iPod にも採用されている。ブラジルの地上波デジタル放送や IPTV の規格としても採用が進められている。

図 9 は、ビットレートと映像解像度に基づいて規定された MPEG 標準とデジタル映像製品・サービスの関係を示す。

MPEG のような世界中の広い分野の研究開発機関から専門家が集まって開発された技術の知財権の処理の解決策として、標準化の技術開発と並行してパテントプールのアイデアが検討され、1996 年、MPEG-LA が設立された。こうして、製造業に負担をかけない RAND (Reasonable And Non-Discriminatory) 条件で MPEG 技術のライセンスが供与され、IPR が包括的に運用されるようになった。MPEG 技術を用いた世界的規模のサービス実現に大きく貢献する一因となった。

次世代映像符号化

MPEG-2 ～ AVC/H.264 に至る MPEG 標準は、図 1 に示すように広範なデジタル映像アプリケーションに採用され、活用されてきた。しかし、従来の MPEG 標準は色成分の間引きを行った原信号を主な符号化信号として規格化を進めてきたため、色再現性に課題を残して

図10 次世代映像符号化に向けて

いる[9]。

現在のカメラ、ディスプレイはRGB4:4:4カラーフォーマットを標準的に扱っている。薄型液晶テレビでHDTVが鑑賞できたように、近い将来、画素ピッチの小さい有機ELシートテレビにより、グラビア風の高い色再現性を持ったUHDTVコンテンツを家庭で享受できるシステム構築環境が整備されてきている[9]。更に、デジタル変復調技術・LDPCなどの誤り制御技術・フォトリックネットワークの進化による伝送路の広帯域化、フラッシュメモリ・垂直磁気ハードディスク等の蓄積系の大容量化に加えて、映像符号化技術にも更なる進歩が期待できる。図10に、これらの技術が統合され、次世代映像アプリケーションに至る方向性を示す[9]、[10]。

現在、ISO/IEC、ITU-Tが連携して、QVGAからUHDTV(8k×4k)[11]までの解像度に対応する次世代符号化技術(High-Efficiency Video Coding)の標準化作業を開始した。同標準は、AVC/H.264の2倍の圧縮効率を目指す。2010年1月MPEG京都合にて技術公募要綱(Joint Call for Proposals on Video Compression Technology)が発行された[12]。

むすび

本稿では、通信・放送・パッケージ・PC分野において必須の基幹技術となっているMPEG符号化技術と、それにより創出されたデジタル映像サービスの歴史を振り返ってみた。MPEG規格を基盤とした日本のARIB

規格は南米の放送方式として採用され、2016年のリオデジャネイロオリンピックに向けての普及も期待されている。UHDTVを扱う次世代符号化技術の策定に当たっては、処理すべき情報量が膨大になるため、符号化方式の定量的な評価関数としてRate-Distortionに複雑度(Complexity)のファクタを加える必要があろう。

文献

- [1] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication", Bell System Tech. J., vol. 27, pp. 379-423, July, Oct. 1948.
- [2] A. V. Oppenheim and R.W. Schaffer, Digital Signal Processing, Prentice Hall, 1975.
- [3] 村上篤道, 伊藤 敦, 浅井光太郎, "画像のダイナミック多段ベクトル量子化," 信学論, vol. J68-B, no. 1, pp. 69-76, 1985.
- [4] ITU-T Recommendations: H.261, H.262, H.263, H.264
- [5] ISO/IEC 13818-2 (MPEG-2 Video), 14496-2 (MPEG-4 Visual), 14496-10 (MPEG-4 AVC).
- [6] 安田 浩, 渡辺 裕, デジタル画像圧縮の基礎, 日経BP社, 1994.
- [7] 小野定康, 村上篤道, 浅井光太郎, 動画像の高効率符号化, オーム社, 2005.
- [8] 村上篤道, 山口哲成, T. C. Poon, P. A. Ratliff, 野間口有, "デジタル放送の現状と課題," 三菱電機技報, vol. 72, no. 8, 1998
- [9] 村上篤道, 高効率符号化技術の将来, MPEG 発足20周年記念行事講演, Nov. 2008.
- [10] 浅井光太郎, "次世代映像符号化技術の国際標準化動向," 情報技術標準化フォーラム, July 2009.
- [11] 久保田啓一, "臨場感豊かな放送をめざして," URCFシンポジウム, June 2009.
- [12] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11/N11113, Jan. 2010.

村上篤道 (正員:フェロー)

昭46 東北大・工・通信卒, 同年三菱電機株式会社入社。情報、通信、マルチメディア分野の製品・システム技術の研究・開発を先導。ITU, ISO/MPEGなどの国際標準策定に貢献。現在、開発本部フェロー。博士(情報科学)。IEEE論文賞、特許庁長官賞、映像情報メディア学会功績賞、本会業績賞などを受賞。IEEE Fellow。映像情報メディア学会フェロー。日本工学アカデミー会員。情報処理学会副会長。