動画像符号化技術の進歩 ——研究，標準化，そして普及——

Progress of Video Coding Technology : Study, Standardization and Spreading

杉山賢二 Kenji SUGIYAMA

アブストラクト 20年前までほとんどなかったデジタル動画は、現在それがないことが想像できないほど、社会に浸透している。現代人はそれが情報圧縮されていることを意識せずに使っているが、デジタル動画がこのように広く普及したのは、高能率符号化により大幅な情報圧縮が実現できたからにほかならない。このような動画像符号化は「英知の結晶」といえるもので、その技術は極めて高度化している。この解説においては、この技術がどのように進歩してきたかを、まず標準化と応用の観点から説明する。そして、長らく主流となっている動き補償フレーム間予測＋離散コサイン変換を中心に、なぜ効率が良いかを丁寧に解説する。そして、それがどのように改良されてきたか、どのように符号化すべきかについて述べる。

キーワード 動画像符号化，高能率符号化，国際標準規格，動き補償，離散コサイン変換

Abstract The use of digital video was very limited until 20 years ago. We cannot now imagine a society without it. The wide spread use of digital video is a result of the realization of significant information compression by high-efficiency coding. However, people are not conscious of information being compressed. Video coding is a “result of wisdom”, and, its technology has reached a high level. Herein we review how this technology advanced. First, I explain its standardization and application. Focusing on the motion compensated interframe prediction and discrete cosine transform, which long been the mainstream for long. I explain politely why it's efficient. Further more, I describe how it has been improved as well as how to encode efficiently.

Key words Video coding, High-efficiency coding, International Standard, Motion compensation, Discrete cosine transform

1. はじめに

本解説論文の題目にある「符号化」には、本来「情報圧縮」の意味はない。正しくは「高能率符号化」とすべきであるが、そう呼ばれることは少なくなっている。現在、ほぼ全ての動画が高能率化（情報圧縮）されているためである。

伝送では、通常送り手（encoder）と受け手（decoder）が離れているため、明確な符号化処理の規定が必要となる。そのため国際標準化が行われ、その成果が実際に使われている。ネットを中心に非標準方式も使われているが、技術的には似たものになっている。

符号化効率（情報圧縮率）は、1990年前後に急激に向上した。H. 261（1990）以前の方式とMPEG-1（1992）を比べると、僅か数年で4倍近く向上している。それからHEVCまでの改善も4倍近いが、20年以上を要している。合わせると1980年代末から最近までの約30年間で15倍（bitrateで1/15）程度の改善となる。

このように全体として大幅な改善がなされているが、高能

率符号化における一技術の改善量はbitrateで1%削減に満たないものも多い。しかし、効率改善は世界中の全ての放送や通信にそのまま影響するので、たとえ1%でも意義は大きい。見方を変えると、大きな効率改善は非常に多くの技術の積み重ねで達成されており、今日の動画像符号化技術は、極めて高度で、非常に複雑なものになっている。

符号化の基礎技術や各規格の技術内容を解説した書籍は多く存在する^{(1)~(10)}。しかし、なぜ効率が良いか、いかに改善されたか、どのように処理制御すべきかまで書かれているものは少ない。これらを踏まえ、本解説論文では、従来あまり解説されていない内容を中心に説明することとする。

まず動画像符号化の標準化と実システムへの応用を中心とした変化、そして被符号化映像フォーマットの変化について解説する。次に現在最も一般的な符号化処理である動き補償フレーム間予測と離散コサイン変換を組み合わせた方式について、基礎技術、発展技術について述べ、いかに効率改善されたかをデータを示しながら説明する。

解説では、基礎事項は教科書類に譲り、ポイントとなる事項に重点を置く。理解しやすくするため主観的な表現や私見も含めるが、表現上有益と思えるので、ご容赦頂きたい。

最後に今まで公開されていないMPEG-1, 2標準化での裏話を幾つか載せた。私的な内容も含み恐縮であるが、当時の標準化活動の様子が分かり、今後の研究計画や標準化活動に対する示唆を含んでいると思う。

杉山賢二 正員 成蹊大学理工学部
E-mail sugiyama@st.seikei.ac.jp
Kenji SUGIYAMA, Member (Faculty of Science and Technology, Musashino-shi, 180-8633).
電子情報通信学会 基礎・境界サイエンス
Fundamentals Review Vol.14 No.3 pp.194-204 2021年1月
©電子情報通信学会 2021

2. 時代別概況

技術的詳細は次節とし、時代背景を踏まえながら主に標準化と応用の観点から動画像符号化技術の歴史を振り返る（図1）。

2.1 研究主体の1980年代

静止画像の高効率符号化や処理は1970年代から研究されていたが、動画像については、いかにデジタル化するかが問題であった。デジタルの目的も、伝送や保存のためではなく、処理（加工）や一時記憶であった。

1980年代に入って映像制作用のデジタル信号規格⁽¹¹⁾とそのVTR（video tape recorder）⁽¹²⁾が標準化された。これがD1（BT. 601）規格で、デジタルSDTV信号としてDVDや放送で現在でも使われており、アナログのNTSCより長寿命になるかもしれない。

この規格の目的は効率化ではなく、画質（信号品質）の保持で、非常に高画質な映像の記録伝送は、デジタルでないと実現しにくいためである。しかし、伝送帯域の観点から、基本的に1サンプルあたり1bitを下回らないと、アナログの方が有利となる。

一方、応用面としては、1980年代中頃からテレビ会議の要望が出てきた⁽¹³⁾。被写体があまり動かない映像のシステムで、国内外の多くの企業から提案があったが、H. 261としてCCITT（後にITU-T）で標準化された⁽¹⁴⁾。当時話題のISDNに対応するもので、bitrateが64 kbpsの整数倍となっている。商品化もされたが、民生機器ではないので、一般人には知られていなかった。

このころISO/IEC SC2 WG8でJPEGの標準化が始まり、1988年にはほぼ決定した⁽¹⁵⁾。しかし、対象が静止画像で、応用システムもはっきりしないので、関連技術者にもさほど興味をもたれることなく、しばらく放置されることになる。

WG8では次のテーマとしてCD-ROMに記録する動画像符号化について標準化することとし、参加者を募った。これがMPEGである。これはRCA（後にIntel）からDVI

（digital video interactive）⁽¹⁶⁾の動画機能が発表されたのも影響している。MPEG-1標準化については、6.1、6.2で紹介する。

この頃、一般的なテレビ技術者が注目していたのは、ハイビジョン（MUSE）⁽¹⁷⁾とこれに対抗したNTSCの拡張であるクリアビジョン（Extended Definition TV）⁽¹⁸⁾である。いずれもアナログであるが、この頃デジタル放送は、空想の世界の話という感じであった。一方、著者は、1988年に非圧縮の1920×1035画素映像を見て感銘を受け、デジタルの優位性を確信した。

当時の映像技術に関する国際状況は、現在とは全く異なっていた。日本が非常に強く、それにヨーロッパは束になって対抗し、米国は、今もだが自国または個人主義であった。国際競争より国内競争が激しく、韓国や中国は全く無関係という時代であった。

2.2 実用化開発の1990年代

1990年代に入ると、MPEG規格はVideo-CD⁽¹⁹⁾として商品化されたが、そのプロトタイプとなるのがビクター独自のカラオケ専用システムDVであった。規格決めの際、議論したのが画素数で、VGA系の320×240とするか、D1系の360×240とするかであった。結果的にはクロック発生LSIの都合から360×240としたが、このことはDVDまで影響したかもしれない。なお、前述のDVIは320×240であった。

Video-CDは、ビデオ（VHS）より小さく便利だが、画質が劣るので国内ではあまり普及しなかった。しかし、ビデオが普及していなかった中国では爆発的にヒットし、アジア各国で1990年代の主要映像メディアとなった。

MPEGが予想以上に高画質だったので、目的や画素数を限定しないMPEG-2の標準化が提案され、当初のMPEG規格はMPEG-1と区分された。

この頃、後にDirecTV⁽²⁰⁾となる米ヒューズ・エレクトロニクスのデジタル衛星放送の企画や、米GI（General Instrument）⁽²¹⁾のデジタルHDTVの提案などもあり、放送応用の機運が一挙に高まった。一方、後にDVDとなる高

図1 動画像符号化の標準化と応用システム

密度光ディスクによる動画像メディアの思惑もあり、MPEG-2 に対する期待は非常に高まった。

MPEG-2 標準化後、関連技術者の多くはシステム実現に注力した。96 年に DVD と PerfecTV が始まり、デジタル映像元年となったが、ワイドクリアビジョン放送⁽²²⁾に対応するとされたワイドテレビがはびこる時代となった。これは、4:3 映像用伝送路で 16:9 映像を送るもので、非常に無理があり、結果的にほとんど実施しなかった。また、ワイドテレビで通常放送を見るとおかしな映像となった。

標準化としては、MPEG-2 として実用的汎用方式ができたので、画期的な新技術を期待して超高圧縮方式を標準化をすることになった。これが MPEG-4 である⁽²³⁾。しかし、画期的な技術は出てこず、中途半端な規格になった⁽²⁴⁾。符号化は総合力を要する技術なので、たとえよいアイデアがあっても新規格にまとめるのは難しいということである。

規格が普及すると、ライセンスの問題が生じる。JPEG はフリーとされたが、後に厄介な特許訴訟が起こることになる。MPEG-2 は、MPEG-LA⁽²⁵⁾で特許をプールし、ライセンスすることになった。当初の 1 台 4 ドルは、今考えると破格であるが、徐々に安くし、多くの事業者が正規ライセンスを得て、対応機器を作った。まさに標準化の成功例といえよう。

国際情勢で見ると、標準化も応用も先進国主体であったが、MPEG-2 標準化末期から韓国企業がオブザーバー的に参加しだした。そして会議で得た情報をもとに多くの特許出願を行っていた。

2.3 改良発展期の 2000 年代以降

1989 年から実験放送していたアナログハイビジョンは、本放送に移行することなく終了し、2000 年からデジタルハイビジョン放送が始まった⁽²⁶⁾。

アナログハイビジョンは、伝送ノイズが少ないと高画質が得られるが、そのためには 60 cm 以上のパラボラアンテナが必要となる。通常 BS 用の 35 cm アンテナを使うと、ノイズで適応補間処理がうまく機能せず、非常に見にくい映像になる。

この頃になると DVD が普及し、ビデオ (VHS) を駆逐することになる。DVD-R/RW は遅れたので、過渡期には DVD は再生のみで、録画は VHS というものもあったが、後に HDD 録画が一般化した。

MPEG-4 が ASP (advanced simple profile) でくすぶっている頃、ITU 側でやや異なった視点で標準化が進められ、非常にキレイな画像の得られる方式が提案された。この方式は、符号化処理に恐ろしく時間がかかるのも話題になった。HD-DVD9 (2 層板で HDTV を記録)⁽²⁷⁾の標準化のタイミングで出てきたので、そこで評判となった。結果的に HD-DVD9 自体は普及しなかったが、Blu-ray の方で採用され、H. 264/MPEG-4AVC (advanced video coding) として普及した。標準化は MPEG と Joint となり、元々低解像度向け

だったので、Main-Profile より拡張版である High-Profile がよく使われることになった。いわゆる AVC-HD である。地上波デジタル放送は、BS 同様に MPEG-2 であるが、ワンセグは H. 264 となった。

この頃になると、いわゆるネット動画も増えた。符号化は H. 264 やそれに類似する独自方式が使われた。ネットでは、デコーダを自動更新できれば、符号化方式は自由に換えられる。特許が気になるが、基本的なものは大体切れている。

2012 年にアナログ放送が終了し、アナログ映像は非常に限定的なものになった。終了前の数年はテレビが何倍も売れ、終了後は全く売れなくなった。そこで出てきたのが 4K 映像で、AVC の 2 倍の効率を目標にした HEVC (high efficiency video coding) がよいタイミングで標準化され、4K 用符号化として使われることになった。なお、HEVC はインターレース対応でないので、HDTV (60i) には使えない⁽²⁸⁾。

2.4 被符号化映像フォーマット

カラー画像は、3 原色 (RGB) で撮像・表示されるが、伝送ではより合理的な輝度と色差の形式が使われる。情報圧縮前の被符号化映像の変遷について述べる。

デジタル放送以前、テレビ信号は NTSC であった。色差信号の帯域は輝度の 1/3 以下であり、色相変化も起こりやすかった。放送用 VTR では 1990 年代 D2 方式⁽²⁹⁾が使われていたが、これは NTSC を非圧縮デジタル化したものである。NTSC は時空間高域に色信号が変調されて多重化されており、動き補償の適用ができないので、圧縮に不向きである。

高能率符号化で使われるカラー映像は、専ら輝度と色差を別にしたコンポーネント方式となる。なお、アナログでもコンポーネント方式はあり、取材用の VTR (ベータカム) で使われていた。非圧縮信号源は、当初は以前からある D1 が使われたが、徐々にフレーム内圧縮タイプに代わった。

この頃 HDTV も非圧縮デジタルのフォーマットが議論され、ハイビジョンは 16:9 で有効走査線数 1080 本になった⁽³⁰⁾。しかし走査方法はインターレースのままであった。日本でインターレース走査が支持された理由にブラウン管がある。ブラウン管で最も電力を必要とするのは水平偏向であるが、それは偏向周波数の 2 乗に比例とのことで、周波数が 2 倍になる順次走査は、コストと消費電力の点から不利だった。しかし、地デジが普及し始めた 2000 年代後半には、液晶やプラズマが一般化し、結局ブラウン管のハイビジョンテレビが使われることは少なかった。

符号化効率でいうと通常の 1080/60i は、同じ垂直解像度の 1080/60p より多くの bitrate が必要になる⁽³¹⁾。しかし、最近の 1080/60i は垂直解像度が 50% ぐらいしかない映像が多く、この場合、540/60p 相当の画質かつ符号化効率となる。

インターレース走査のほかの問題点は、4:2:0 の解像度で、フィールドサブサンプルとなるので、色差の垂直解像度

は1/4となってしまう。色解像度の低下はさして問題ではないが、彩度の高い部分では輝度成分も色差信号で伝送されるので、輝度解像度も低下する。

これらの問題を回避するため、4K/8K映像は順次走査のみになっている。4K映像は以前よりあったが、8K規格に追加する形で正式に規格化（BT. 2020）された。

3. 基礎技術

3.1 全体構成

音声、静止画とともに初期の代表的高能率符号化手法はDPCM（differential pulse code modulation）である。圧縮率は1/2からせいぜい1/4で、符号誤りに弱い。静止画像符号化は、1980年代中頃までBTC（block truncation coding）⁽³²⁾や、ブロック内の信号振幅を正規化する手法⁽³³⁾などが提案されていたが、徐々にブロック間予測＋直交変換⁽³⁴⁾に収束し、JPEGで一段落する。この手法は、Wavelet符号化を除いて、現在まで続く流れである。これはDCT（discrete cosine transform）など直交変換符号化として知られるが、その後改善されているのは主にブロック間予測の方である。

ほかのトピックは、ベクトル量子⁽³⁵⁾である。研究され応用が期待された処理であったが、H. 261標準化を境に影が薄くなる。通常のスカラー量子化に比べて、主観画質制御やbitrate制御が行いにくいのが原因だったと思う。

量子化の結果はほとんど0で、僅かに±の値が出る形になるので、固定長のbit割り当ては、困難になる。そこで、ハフマン符号に代表される可変長符号化（variable length coding）が行われることになる。これにより、動画像に限らず高能率符号化の処理構成として図2の形が一般的になる。しかし、ポイントとなるのは、「情報抽出」である。

3.2 予測と直交変換の比較

情報抽出の2大手法「予測」と「直交変換」についてその違いと特徴を説明する。最もシンプルなケースとして隣接2画素間の処理の場合を表1に示す。表中 P は画素、 C は係数、 d は差分で、 $\odot'$ は量子化誤差を含む再生値である。直交変換はアダマール変換だが、この場合はDCTでも同じになる。なお、理論式では、変換、逆変換ともに $1/\sqrt{2}$ を乗じる。

予測では、復号化で源画素値は得られないので、符号化の予測でも再生値を使う必要がある。直交変換では、符号化での変換処理で再生値は使われない。

図2 高能率符号化の基本処理構成

予測の次の処理は、 $x=3$ に対するもので、2の再生値から予測される。その次は3から4で、連鎖処理となる。直交変換は、1、2がペアで処理され、次は3、4の処理となる。この処理単位がブロックで、直交変換はこのブロック単位で独立となる。

処理範囲が拡張される場合、予測は予測信号の参照画素のみが増える。被予測画素は原則1画素であるが、ブロック間予測の場合は、1ブロック分の予測信号がまとめて形成される。直交変換ではブロックが大きくなり、画像では二次元化されるのが一般的である。表2に特徴を比較したものを示す。

動画像符号化は、時間方向と空間方向に直交変換と予測のどちらかを使うかで表3のような組み合わせが考えられる。両方予測は古典的な方法で、実用性が高いが、高圧縮に適さない⁽³⁶⁾。

両方直交変換は三次元DCTとして知られ、1980年代に著者を含め多くの研究者が試みたが、結果がよくないのでこの時代の研究報告は少ない。直交変換が時間方向処理に適さない理由は、動き補償が使えず、時間軸は折返し成分が多いため、実装上も多くのフレームメモリが必要で、フレーム遅延も顕著になる。

時間が直交変換、空間が予測は研究例がないと思う。最もよいのはその逆で、時間方向に予測し、その残差を空間で直交変換するものとなる。詳述は後述する。

表1 予測と直交変換の処理比較

項目	予測	直交変換
処理の様子		
符号化	$d(1)=P(1)-P'(0)$ $d(2)=P(2)-P'(1)$	$C(1)=P(2)+P(1)$ $C(2)=P(2)-P(1)$
復号化	$P'(1)=d'(1)+P'(0)$ $P'(2)=d'(2)+P'(1)$	$P'(1)=\{C'(1)+C'(2)\}/2$ $P'(2)=\{C'(1)-C'(2)\}/2$

表2 予測と直交変換の特徴比較

項目	予測	直交変換
誤差	画素	ブロック拡散
遅延	原則無し	ブロック×2
メモリ	画素～フレーム	ブロック×2
動き補償	可能	困難
局部復号	要	不要

表3 動画像符号化構成と特徴

時間方向	空間方向	動き補償	効率
予測	予測	可能	高レート
	直交変換	可能	最適
直交変換	予測	不可	最悪
	直交変換	不可	良くない

3.3 離散コサイン変換 (DCT)

画像符号化の場合、DCT のサイズは 8×8 が最も一般的である。ほかでは、 4×4 が多く、インターレース走査では、画素密度に合わせて 8×4 も使われた。効率的には大きいほどよいが、量子化誤差の見え方から 8×8 より大きいブロックはあまり使われない。サイズが限定的だとブロック間相関が残るので、ブロック間予測が併用される。

一方、DCT は可逆符号化 (lossless) や超高画質 (near loss less) には適さない。中画質では、多くの係数をばっさり切る (0 としてしまう) ことができるが、量子化ステップを細かくすると微小に残るためである。

8 bit 画像の 8×8 DCT では、可逆のためには 18 bit 精度の演算が要求され、変換後の係数は 12 bit 精度が必要になる。つまり情報量は増加する。演算精度の問題は、ブロックが大きくなると顕著になる。

重要な問題として、DCT 基底の精度がある。DCT に対して IDCT は正確である必要があるが、基底の値は DCT の計算値と同じである必要は必ずしもない。この場合、厳密には DCT でなくなるが、5~7 bit 精度の整数値で符号化性能は損なわれない。この値は具体的に決めておく必要があるが、JPEG ではそれができなかったのも、無駄に高い精度で演算処理を行うことになる。決められなかったのは LSI 設計方法や特許の利害関係のためで、MPEG-1, 2 も同様となっ

図3 画像／予測残差と DCT 係数の様子 64×64 画素、MC は $8 \times 8 - 0.5$ pixel (6 tap)、DCT は 8×8 で DC 係数はそのまま、AC 係数は 2 倍しグレーに重畳。

た。2000 年代からソフトウェアデコーダが一般的なり、AVC 以降は規格で決めるようになった。

また、初期の規格では 8×8 DCT 一本であったが、後に 4×4 DCT など多様化することになる。ただし、動き補償ブロックより大きいのは望ましくない。隣接ブロックにまたがって処理しない方がよいので、Wavelet 変換が動画画像符号化に向かないのも同様な理由による。

画像と予測残差に対する DCT 係数の様子を図 3 に示す。係数は集中し、予測残差を変換すると、ほとんどなくなってしまふ様子が分かる。

3.4 動き補償と DCT の組み合わせ

フレーム間予測は、画像が静止していれば、予測残差がなくなるが、実際には被写体の動きもあれば、カメラも変化する。そこで、画像の動きに合わせて予測信号を空間的に移動させる動き補償 (MC: motion compensation) を行う。

MC はいろいろなフレーム間処理で使われるが、符号化の場合は、復号で同じ処理を行う必要がある。処理内容の情報を伝送する必要がある。予測では局部復号が必要となるので、MC-DCT 処理構成は図 4 のようになる。

この方式がよい理由として、残差を極めて少なくできる MC と、静止画符号化として効率のよい DCT で符号化するためと考えられがちである。しかし、静止画像と予測残差は信号の状況が大きく異なるので、DCT が単純に最適とはいえない。静止画像は低い周波数成分に集中するが、予測残差は細線となり高い周波数成分が多い。

実情としては、DCT により「MC ずれ」による誤差と「被写体変化」による誤差を分けて処理できるためである。「MC ずれ」は微小係数に拡散するので、全て 0 となり、符号化されない。符号化されずに放置された誤差は再生画像に残留する。誤差を含む参照画像で動き推定 (ME: motion estimation) すると、巡回予測で「MC ずれ」が増加することはない。

一方、「被写体変化」は徐々に大きくなり、所定量に達した段階で符号化される。複数フレーム分の誤差がまとめて符号化されるので、合理的である。この機能は、残差フィルタリングや微小非 0 係数の非符号化でより顕著にできる。

残差を積極的に非符号化とした場合の主観画質は、MPEG-1, 2 レベルの MC だと不自然さを伴うが、ノイズ感 は少なくなる。MC 性能が向上すると、不自然さも少なくな

図4 MC-DCT 構成

る。

MEであるが、最終的MV (motion vector) 決定では誤差を含んだ局部復号画像の参照が望まれる。しかし、局部復号画像は劣化しているの、粗段階のMEは原画か原画のサンプルダウン画像を使った方がよい。また、MEは誤差(MSE)を最小にすべきか、MVを安定させるべきかがある。PSNRは前者が優れるが、主観画質の観点から後者とすべきである。

3.5 エントロピー符号化

初期の高効率符号化では低減したbit数の半固定的に符号割り当てを行っていたが、DCT係数などでは負の値も生じ、頻度分布も広がる。固定長符号は限界となり、可変長符号化(variable length coding)を行う必要がある。

VLCの問題点は、符号設計で用いた頻度分布と実際の頻度分布のずれをいかになくすかということである。これには、頻度分布が画像や量子化によりなるべく変化しないような情報抽出を行う。

また符号化を細かな単位で行うとロスが多いので、多くの情報をまとめるのが肝心である。MPEG-1, 2でもモード情報などは個々のVLCだが、肝心のDCT係数のLevelとRunは二次元で符号表を形成している。

AVCでは、頻度分布の変化を許容し、VLCテーブルを適応的に切り替えるCA(context-based adaptive) VLCが使われている。

そして、ハフマン符号から算術符号へと変化するが、動画像の場合、画質や大幅な符号量軽減につながるものではないので、詳細はほかを参照されたい。

4. 発展技術

4.1 双方向予測

動画像符号化のフレーム間予測において重要なのは、picture (frame) 予測構造である。これはpictureを相互の予測関係により3種類のタイプに分けるものである。この様子を図5に示すが、予測なしのIntra-picture、片方向予測の

図5 ピクチャタイプと予測関係

Predictive picture, 双方向予測のBi-directional predictive pictureがある。P-pictureの間にB-pictureを挟むことで符号化効率は飛躍的に改善される。

これには二つの理由がある。一つは、B-pictureの予測改善で、内挿により基本的予測性能が改善されるほか、予測信号のノイズ軽減効果もある⁽³⁷⁾。更にブロック単位での適応化(順方向/逆方向/内挿の切り替え)により、オクルージョン(見え隠れ)に対応し、実効的にMC精度も向上する⁽³⁸⁾。

もう一つはB-pictureは予測に使われない点である。予測に使われないので、多少劣化していても、他フレームへの波及はない。B-pictureの量子化を最適化することで、効率も主観画質もよくなる。

一方、P-pictureの予測フレーム間距離が長くなるが、MEサーチレンジ内ならMCずれは大差なく、増えるのは変化分だけとなるので、予測残差は距離に比例しない。トータルで見るとP-pictureの符号量は少し増えるが、大幅に軽減されたB-pictureが多数存在し、総合的に顕著な改善となる。MPEG-1, 2レベルのMCの場合は、最適化により符号量を半減できるが、MC性能がよいとそこまでの差は出ない。

実装上のデメリットは、必要フレームメモリの増加と遅延であるが、前者は現在では全く問題とならない。

4.2 インターレース走査対応

テレビ信号は、基本的にインターレース走査であった。これは、撮像や表示において電子ビームを細めることで、静止時の解像度を改善できるためである。現在の個体センサや平面ディスプレイでは、効果を得られないが、日本のテレビ放送では使い続けている。

一方、動画像符号化では、まず順次走査映像に対応した処理を構築する。これをそのままインターレース走査映像に適用すると、符号化効率が低下するので、対応処理を追加することになる。なお、H. 261やMPEG-1は、片方のフィールドのみを順次走査と同様に符号化したので、インターレース走査への対応は特に必要なかった。

MPEG-2標準化においては、早期にMPEG-1をベースとすることが決まり、インターレース走査対応方法が主に検討された。I/B/Pを含めてフィールド構造のPure-Field、フィールド構造だがI/B/Pはフレーム単位のFiled-Picture、フレーム構造を基本としてMacroblock単位でMC/DCTを切り替えるFrame-Pictureが提案された⁽³⁹⁾。これらを表4

表4 インターレース対応方法3種

Item	Pure-Field	Field-picture	Frame-picture
I/B/P	Field	Frame	Frame
Picture	Field	Field	Frame
MC/DCT	Field	Field	Frame/field

に示すが、検討を経て最終的に、Field-Picture と Frame-picture が規格採用された。

その後 AVC では Frame-Picture を改良したものが使われている。しかし、基本処理が複雑な HEVC にインターレース走査対応を入れるのは困難で、対応を諦める結果になった。

オルタナティブな対応は、インターレース走査を順次走査に変換してから符号化することである。全ての平面ディスプレイは、順次走査変換を行うが、送信側で行った方が高画質化しやすい。より合理的な方法は、参照画像のみ順次走査にするものであるが、順次走査変換方法も規格に入れる必要がある⁽⁴⁰⁾。

近年は、デジカメや PC 系のカメラは順次走査になっており、ネットを流れる映像は（30 fps が多いのは残念だが）順次走査となっている。しかし、放送はいまだにインターレース走査（1080i）が主流である。

4.3 レート制御と画質

VLC の使用で、大幅な圧縮が可能になったが、発生符号量は処理が終わるまで分からず、画像状況により大きく変化するようになった。そのため、出力前にバッファを設け、発生符号量を制御する必要がある。

制御は量子化ステップ幅を変化させるが、MPEG-4 までは、実処理値に比例した整数値なので、高画質側が粗くなりがちであった。AVC 以降はより広い範囲を、スムーズに変化させるため対数型（+6 で 2 倍）の設定となり、合理的に制御できる。

発生符号量は、画像の動きの程度に大きく依存する。bitrate 制御を、フィードバック制御のみで行うのは大変である。バッファでかなり遅延すること考えれば、先行調査で発生符号量を予測し、多くなりそうな場合は、早めに抑えるのが望ましい。これは、本符号化の前に仮符号化を行ういわゆる「2パス」で実現できる。処理構成を図6に示す。

問題は、仮符号化をどの程度先行させるかで、先行が僅かなら遅延は少ないが、効果は少ない。逆に、オフライン（パッケージ）型メディアの DVD や BD では、メディア全体で最適化できる。伝送路に合わせた bitrate 制御は、映像技術と通信技術の境界にあり、両方を理解していないと対応できない。

もう一つの制御は、主観画質に合わせる処理で、H. 261 に

はなく MPEG からの考えである。一般的にエッジ部は誤差が目立ちにくいので粗く、フラット部は目立ちやすいので細かく量子化する。ただし、ブロック内に誤差が拡散する DCT の場合は、やや複雑となる。また、複雑な動き部分では誤差は目立たないので、量子化を粗くするが、予測残差が増えるので情報量を抑えると自動的にこのような処理になる。

より高度な主観画質制御は、学術的研究も進んでいるが、まだ人が見て調整するのが現実的である。これは、映画 BD の制作などで行われているが、音楽系の制作では当たり前の作業である。

最後に各規格の主観画質について考える。MPEG-1, 2 は画質に影響する空間フィルタが使われていない。また、半画素精度 MC が線形補間なので周波数特性が悪く、鮮鋭度に欠けノージーだが、不自然さがない。

MPEG-4 以降、特に AVC は、MC フィルタ改善で鮮鋭度が上がり、非線形フィルタにより平坦部のノイズが軽減されているので、キレイな絵となる。しかし、やや人工的で不自然に見える。これ以降このような傾向は強くなっているが、一般人は非圧縮原画を見る機会が少ないので、このような再生映像を見ても不自然と感じにくいのかもしれない。

5. 効率改善

5.1 概要

動画像符号化の進展は、少し変わっている。規格は順次新しくなり、効率も向上しているが、本質的な処理技術は変わっていない。どちらかというと、処理量的に困難だった手法が、半導体技術の進展で可能になり規格に採用されるといったケースが多い。実際 AVC や HEVC での新手法は、MPEG-1, 2 の段階で既に提案されていたものも多い。

具体例として、MPEG-1 において最高評価を得た JVC 提案と数年後の MPEG 規格、10 年以上後の AVC の主要処理を表5に示す。JVC 提案は AVC の方に近い。表にないが、JVC 提案は Intra のみ Spatial Scalable 符号化となっている。Scalable 符号化は MPEG-1, 2 では不採用だが、AVC 以降規格になっている。

以降に効果の大きい改良点を示すが、ほかにも改良点はた

表5 符号化処理比較

方式	JVC 提案	MPEG-1	AVC
発表年	1989	1991	2003
Picture	IBBBBBI	IBBP	IBBP
MC Size	8×8	16×16	4×4-16×16
Accuracy	1/6 pixel	1/2 pixel	1/4 pixel
Filter	6 tap	Average	6 tap
DCT	4×4 int	8×8	4×4 int

図6 2パス型符号化処理

表6 フレーム内符号化でのブロック間予測

規格	MPEG1, 2	MPEG-4	AVC	HEVC
処理	DC 係数 予測	DC/AC 係数 適応予測	8 方向, 平均,	33 方向, 平均, 0
モード	1	3	9	35

くさんある。僅かでも残った無駄（冗長＝相関）を徹底的につぶしていくことになる。

5.2 フレーム内符号化の改良

DCT 符号化は JPEG で確立し、基本処理は改良の余地がほとんどない。効率的にはブロックが大きい方がよいが、主観画質は必ずしも大きくない方がよいので、AVC 以降はサイズを可変にしている。

フレーム内符号化の改良は主にブロック間予測の改良である。具体的には、予測に右向きや下向きなど方向性をもたせ、複数の中から適切なものを選ぶ。著者は、これについて 1997 年に提案しているが、早すぎたのか注目されなかった⁽⁴¹⁾。各規格のブロック間予測方法を表 6 に示すが、モード数の増加は顕著である。

5.3 動き補償（MC）の改良

フレーム間予測で残差を減らすためには、その発生原因を検討する必要がある。誤差の原因は複雑で、区分すると以下のようなになる。

- MC 性能によるマッチング限界
- 平行移動以外の複雑な動き
- 照明（輝度レベル）変化
- 折返し歪成分（インターレース走査で顕著）
- 源画像に含まれるノイズ

a., b. は、MC の小ブロック化（16×16 から 4×4）、空間移動精度の向上（1 画素から 0.25 画素）が有効であるが、特に前者は b. に、後者は a. に効果的である。Girl at Square 映像のカメラ移動フレームでの MSE（mean square error）を図 7 に示すが、小ブロック化・移動精度による誤差軽減は顕著である。更に、両者には相乗効果がある。

c. は MPEG-2 でも検討されたが、対応処理は入らなかった。2000 年以降の規格では対応したものもあるが、基本的に B-picture が有効である。d. は非常に難しく、最後まで残る誤差である。順次走査にしてしまうのが最も簡単な解決策である。e. は DCT 符号化で消されるので、ある程度まではさほど問題にならない。

一方、MC 処理方法の情報は、復号側に伝送される必要がある。その情報量は、ブロックが小さいほど、精度が高いほど多くなる。MPEG-2 までの符号化は、比較的簡単な MC で、その情報量は予測残差の情報量より十分少ないので、MC は固定的に行うのが一般的であった。AVC 以降は MC

図7 動き補償（MC）パラメータと予測残差 720×480 画素、フレーム間隔は 1/30s、16×16 ⇒ 4×4 の変化と、1.0 pixel ⇒ 0.25 pixel の変化を乗ずると MSE は 24% となるが、実際には 18% まで低減している。

図8 画素以下精度移相フィルタの違いによる残差 処理条件は図 7 と同じで、画素精度は 0.5 画素、ブロックが小さい方で MSE 軽減効果が大きい。

のパラメータを変えて、予測残差の情報量とで最適化するのが常識となっている。

5.4 画素以下精度フィルタの改良

MC で画素以下精度を実現するためには、画素の空間移動を行う必要がある。その処理は、位置だけずらすリサンプリング（移相フィルタ）となる。リサンプリングではフィルタ次数（タップ数）により周波数特性が異なり、高次理理想に近づく。図 8 にフィルタタップ数の違いによる予測残差（MSE）を示す。高タップ化は効率面でも有効であるが、実際には、再生画像の鮮鋭度の差が大きい。

移相フィルタが徐々に高次になったのは、処理に必要な画素数に違いがあるためである。図 9 に 8×8 画素、4 タップの場合と 4×4 画素、8 タップの場合の MC 画素（緑）と必要画素（オレンジ）の様子を示す。MC 画素数は 4 倍違うが、必要画素数は同じとなっている。つまり 4 倍の画素を使

図9 動き補償に必要な周辺画素

う必要がある。このため、MPEG-2では必要画素が最小限で済む線形補間（Liner）が使われたが、時代とともに多くの画素の使用が許容されるようになった。

6. MPEG 裏話

MPEGは非常に成功した国際標準化方式であり、業界のみならず世間一般からも注目された。その誕生や活動はいろいろと紹介されている^{(42)~(44)}。しかし、やや表向きの話が多いので、ここでは技術的な事項を中心に今だから話せる話を紹介したい。

6.1 MPEG と JVC の関係

MPEG-1, MPEG-2の標準化において、各社提案方式の評価と方向付けの会議を1989年11月と1991年11月にJVC（日本ビクター(株)、現在JVCケンウッド）の久里浜技術センターで行っている。MPEGにおけるこの会議の重要性とJVCに対する感謝は、議長のキャリアーネ氏が何度となく講演で語っている。しかし、何の実績もなかったJVCがなぜそのような会議を行ったのか、不思議に思っていた人は多いだろう。

1987年秋、JVC青池常務から入社3年めの著者に「テレビジョン学会誌のJPEG標準化の記事⁽¹⁵⁾を見たか」と電話があった。著者は符号化研究の特命を受けていたのである。常務も私も標準化が行われていたことに驚き、「何かせねば」ということになった。間もなくWG8議長のNTT安田氏らに著者研究中の符号化画像を見せようことになった。その際、葉山の料亭で接待しているが、バブル期らしい話である。

このような活動の結果、国内でDAPA（Digital Audio Picture Architecture）研究会、WG8でMPEGが発足した。これらにはSONY, Panasonic, JVCの3社が参加したが、JVCの力の入れ方は他2社とは大きな差があった。そして、MPEG議長キャリアーネ氏が熱望していた評価会議に名乗り出たわけである。会議名を「久里浜」としたのは、事業所の名前もあるが、NTTの横須賀通研と間違えられないよう

にする意図があった。

そしてJVCは動画像符号分野で注目される企業になった。これは多くの関係者のお陰であるが、青池常務の符号化に対する先見の明と情熱、そして、技術的期待に応えた著者の存在が大きかったことは間違いない。

このことの影響はJVC1社に留まらない。当時のJVCの活動や久里浜会合がなければ、MPEGは泡沫^{うたかた}の夢に終わっていたかもしれない。更に、その先の標準化や実用化、デジタル放送なども異なっていたに違いない。

6.2 B-picture 誕生

MPEG-1久里浜会合が終了した土曜の午前に、主要メンバーのみで方針の検討が行われた。しかし、結論は出なかった。午後にJVCの会議参加者3名で打ち合わせを行い、日高氏からJVC方式が最高評価を得たのだからJVCから何か提案すべきだとの話が出た。すぐに著者がフレーム間予測構造に基づく提案方式の区分を考え、走り書きで図とそれぞれの提案企業を書いた。その区分は以下である。

- 1) 順方向予測のみ（H. 261と同じ）
- 2) フレームを間引いて符号化し、間は内挿
- 3) 周期イントラの間は全て双方向

翌週の大阪会議で日高氏が説明したが、その際に用いたOHPは、メモ書きそのままであった。メモに提案企業名も書いたので1)がよくないのが一目瞭然となり、希望企業は0となった。2), 3)はB-pictureを含むので、この瞬間にB-pictureの採用が実質確定した。

その後、2)をGroup 1, 3)をGroup 2として、2グループで規格文書作成を進めたが、二つはマージ可能と分かりMPEG規格が誕生した。B-pictureは著者の発明であるが、標準化採用も自ら勝ち取ったのである（ベル研のBally Haskellらも発明者だが、特許出願は著者の方が先である）。

6.3 インターレース対応

MPEG-2でのインターレース走査対応の結果は、効率面や各提案企業にとってはよいことであったが、著者提案のPure Field方式なら、遥かに合理的なシステムが構築できたと思う。Pure-Fieldは、予測距離が短くB-pictureを増やしやすいためインターレース走査に対して最も性能がよい。Field-pictureはフレーム単位でFrame-pictureと切り替えられるが、実行例はあまりないだろう。

では、なぜPure-Frameが嫌われFrame-pictureに固執するメンバーが多かったのか。非リアルタイム（ノンリアルタイム）画像編集機では、Frame単位で画像を入出力する。符号化の研究では、通常そのような装置を使うが、実際の映像信号は、Field単位で入出力される。映像機器を作っていない海外企業参加者がその点を理解していたか疑問で、彼らが常にFrame単位で入出力だと思っていたなら、誠に残念な話である。

Pure-Field が拒絶されたほかの理由として、この技術が非常に特徴的と思われ、特許が懸念された可能性がある。実際には、特許性は希薄で、出願もしていなかった。不出願は半ば意図的であった。

実は、Video 議長の Le Gall 氏には、MPEG-2 が始まる前に紹介し、上手い方法と感心されていた。結果的に Pure-Field は本会議以前の国内委員会で排除されたが、本会議の前に Le Gall 氏にこのことを告げると、大変残念がっていた。

6.4 一次元 DCT

MPEG-2 標準化において、Field-Picture では 8×8 DCT が縦長になり、折返し成分もあるので、効率・画質ともに問題がある。そこで、非 8×8 DCT のモードが検討され、3 種類の処理が提案された。この中で最後まで残ったのが、一次元-DCT であった。これは、元々 NHK 鹿喰氏の発案⁽⁴⁵⁾であるが、デコーダの特許が出願されていないこともあり、自己発案にこだわらず提案した。

議論も煮詰まった頃に D1 を用いて効果のデモをした。三菱電機の浅井氏が、「ほう、これはすっきりしていいね」といっていると、後ろの方から見たことのない女性が「何の違いいない」と大きな声で発言し、びっくりした。半導体メーカーが送り込んだ刺客である。MPEG-2 デコーダは、各社が開発着手しており、 8×8 DCT コアは既に開発済みのところが多く、変えてもらっては困るということである。

結局、一次元 DCT は不採用となったが、これは最初から決まっていたことだったのかもしれない。ただ、「Field-Picture でしか有効でないため」という理由は納得できなかった。Frame-Picture でしか使えない技術はたくさんあるのである。

なお、MPEG-1 においても、著者は 4×4 DCT にこだわりのもっていたが、当然不採用となった。 352×240 画素で 8×8 DCT は大きすぎると思っていたが、これは後日 AVC で証明された。

後半の話は妬み節のようになってしまい恐縮である。「気にしすぎでは」と思われる読者も多いかもしれない。しかし、これは皆さんが毎日何時間も見ている映像の話なのである。

7. むすび

著者が画像高効率符号化の研究を始めたのは、修士修了後に就職した 1985 年であるが、1986 年に画像符号化シンポジウム (PCSJ) が始まっており、符号化研究が活発になったのもその頃からである。なお、PCSJ は現在運営委員長を拝命している。

それから現在までの 35 年間、技術的には MPEG-1 が、標準化としては MPEG-2 が最も重要であったと思う。MPEG-1 は予想を超える性能が実現できたが、最初から通

過点にすぎないと考えていた。符号化の目的はテレビ放送や VHS に代わるメディアであり、そのための検討は MPEG-2 発足前から始めていた。MPEG-2 は今日でも主幹メディアで使われているが、この状況は当時予想したとおりである。

一方、MPEG-2 に満足していたわけではないので、H. 264/AVC の内容に関与できなかったのは残念である。MPEG は大組織で成功体験もあったので、標準化にいろいろと制約が多く、身動きのよい ITU のチームにしてやられたという感じである。

HEVC は悪い方式ではないが、標準化の進め方のためか、スマートさに欠けるように思える。今 VVC が決まろうとしているが、AOMedia の AV1 もあり、応用については不透明である。

今後であるが、これら以上の効率をもつ方式が必要かどうかは分からない。しかし、この言葉も過去何度も聴かれた言葉である。

文 献

- (1) 安田浩 (編著), MPEG/マルチメディア符号化の国際標準, 丸善, 1994.
- (2) 小野文孝, 渡辺裕, 国際標準画像符号化の基礎技術, コロナ社, 1998.
- (3) 吹抜敬彦, 画像・メディア工学, コロナ社, 2002.
- (4) 半谷精一郎, 杉山賢二, JPEG・MPEG 完全理解, コロナ社, 2005.
- (5) 江藤良純, 梅本益男, 映像システムの基礎—ディジタル化への要素技術とその応用—, コロナ社, 2006.
- (6) 亀山渉, 渡部裕, 金子格, そこが知りたい最新技術—オーディオ・ビデオ圧縮, インプレス R, 2007.
- (7) 貴家仁志, 吉田俊之, 鈴木輝彦, 広明敏彦, 画像情報符号化, コロナ社, 2008.
- (8) 角野真也, 菊池義浩, 鈴木輝彦, H. 264/AVC 教科書, 大久保榮 (監), インプレス, 2004.
- (9) 鈴木輝彦, 高村誠之, 中條健, H. 265/HEVC 教科書, 大久保榮 (監), インプレス, 2013.
- (10) 浅井光太郎, 関口俊一, 高効率映像符号化技術—HEVC/H. 265 とその応用, 村上篤道 (編), オーム社, 2013.
- (11) 清水孝雄, “規格化の動向”, テレビ誌, vol. 36, no. 3, p. 252, 1982.
- (12) 清水孝雄, “CCIR におけるディジタル VTR 標準化の動向”, テレビ学技報, vol. 9, no. 37, pp. 19-24, 1986.
- (13) 大久保榮, “テレビ会議用 1.5 Mb/s 映像符号化方式の標準化動向”, テレビ誌, vol. 40, no. 3, pp. 178-183, 1986.
- (14) 山本英雄, 羽鳥好律, “テレビ電話/テレビ会議の研究動向—カラー動画低レート符号化技術”, 信学誌, vol. 70, no. 9, pp. 939-944, 1987.
- (15) 安田浩, “記録と伝送における高効率符号化 高効率符号化の標準化動向”, テレビ誌, vol. 43, no. 10, pp. 1011-1019, 1989.
- (16) https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_Video_Interactive
- (17) 二宮佑一, 大塚吉道, 和泉吉則, 合志清一, 岩館祐一, “ハイビジョン衛星伝送方式—MUSE—”, テレビ誌, vol. 42, no. 5, pp. 468-477, 1988.
- (18) 河内正孝, “EDTV 方式 I 方式の標準化と審議状況”, テレビ誌, vol. 43, no. 5, pp. 435-441, 1989.
- (19) 宮下脛, 樋山憲夫, “ビデオ CD 規格: 規格とソフト制作”, テレビ学技報, vol. 17, no. 78, pp. 13-18, 1993.
- (20) <https://www.directv.com/>
- (21) https://en.wikipedia.org/wiki/General_Instrument
- (22) 高橋正隆, “ワイドクリアビジョン放送運用の実際”, テレビ学技報, vol. 20, no. 3, pp. 41-45, 1996.
- (23) 亀山渉, “動画画像符号化 (MPEG-4) の標準化動向”, 画電学

- 誌, vol. 23, no. 4, pp. 250-254, 1994.
- (24) 三木俊雄, “小特集 マルチメディアを目指す MPEG-4 標準化動向”, 映情学誌, vol. 51, no. 12, pp. 1958-2003, 1997.
  - (25) <https://www.mpegla.com/>
  - (26) 吉野武彦, “デジタルハイビジョン時代がやってくる”, 映情学誌, vol. 52, no. 11, 巻頭, 1998.
  - (27) <https://www.weblio.jp/content/HD-DVD9>
  - (28) 岡田実, 杉山賢二, 森住俊美, 田中祥次, 小島敏裕, 津田貴生, “映像情報メディア学会の研究会活動～過去から未来へ～1-5 放送技術研究委員会”, 映情学誌, vol. 74, no. 5, pp. 27-31, 2020.
  - (29) 稲垣カツヒコ, “D-2 NTSC コンポジットデジタル VTR (録画研究会)”, テレビ誌, vol. 42, no. 1, p. 89, 1988.
  - (30) 西沢台次, “ハイビジョンとその動向”, 日本写真学会誌, vol. 56, no. 4, pp. 309-317, 1993.
  - (31) 西田幸博, Stroppiana Mario, Muratori Mario, “テレビジョン信号の順次走査と飛越し走査における符号化効率,” 信学技報, IE94-6, 1994.
  - (32) https://en.wikipedia.org/wiki/Block_Truncation_Coding
  - (33) 斎藤隆弘, 小松隆, 原島博, 宮川洋, “ベクトル量子化手法を用いた画像信号の特異値展開符号化方式”, テレビ誌, vol. 39, no. 10, pp. 876-884, 1985.
  - (34) 山根延元, 森川良孝, 浜田博, “画像の新しい高能率符号化法—外挿予測—離散サイン変換符号法(1次元符号化の場合)”, 信学論(B), vol. 69, no. 7, pp. 686-697, 1986.
  - (35) 田崎三郎, 山田芳郎, “ベクトル量子化”, 信学誌, vol. 67, no. 5, pp. 532-536, 1984.
  - (36) 松本修一, 村上仁己, 羽鳥好律, 山本英雄, “15/30 Mb/s 動き補償フレーム間・フィールド間・フィールド内適応予測符号化方式”, テレビ誌, vol. 39, no. 10, pp. 861-868, Oct. 1985.
  - (37) 杉山賢二, “蓄積メディアに適した動画像符号化の一手法”, 画像符号化シンポジウム 89, pp. 71-72, Oct. 1989.
  - (38) 杉山賢二, “蓄積系メディアに適した前後フレーム適応予測符号化方式”, テレビ学技報, vol. 13, no. 60, pp. 13-18, Nov. 1989.
  - (39) 杉山賢二, 上田基晴, 森田一彦, “高レート動画像符号化に適したフィールド間予測方法”, 画像符号化シンポジウム 91, pp. 263-266, Oct. 1991.
  - (40) 杉山賢二, 小原剛, 半谷精一郎, “予測参照画像を順次走査変換する飛越し走査符号化手法”, 映情学誌, vol. 56, no. 3, pp. 431-436, March 2002.
  - (41) 杉山賢二, 高岡勝美, “静止画像のブロック間内挿予測 DCT 符号化”, 画像符号化シンポジウム 97, pp. 109-110, Oct. 1997.
  - (42) レオナルド・キャリオネ (著), 和田正裕 (訳), “MPEG のなぜ”, 映情学誌, vol. 53, no. 4, pp. 474-475, 1999.
  - (43) 安田浩, “JPEG・MPEG 標準化苦労話”, 映情学誌, vol. 53, no. 4, pp. 515-519, 1999.
  - (44) 大久保榮, 杉山賢二, “勧告 H. 262 | ISO/IEC 13818-2”, ITU ジャーナル, vol. 38, no. 5, pp. 9-14, 2008.
  - (45) 鹿喰善明, “動き補償予測誤差信号の符号化に関する一検討”, 信学論(B-I), vol. 75, no. 10, pp. 647-657, 1992.

(IMQ 研究会提案, 2020 年 9 月 23 日受付,
2020 年 10 月 10 日再受付)

杉山賢二 (正員: シニア会員)

1983 東京理科大・工・電気卒. 1985 同大学院修士課程修了. 同年日本ビクター(株)入社. 以来, 画像符号化, 映像信号処理, 符号化応用システムの研究開発及び標準化に従事. 2004 成蹊大学教授. PCSJ/IMPS 運営委員長, 博士(工学). PCSJ/IMPS Grand Best Paper 最優秀賞受賞, 著書『基礎と実践 画像処理入門』など.