静止画符号化の新国際標準方式(JPEG 2000)の概要

上野 幾郎[†], 渥美 栄司[†], 小野 文孝[†]

ISOとITU-Tによる静止画像符号化標準機関JPEGにおいてカラー静止画像符号化方式JPEG 2000が標準化されている。JPEG 2000は高圧縮からロスレスまで広いビットレートでの高性能再生をプログレッシブに実現できるほか、指定ビット量/解像度での復号、指定領域優先符号化、伝送路誤り耐性など、従来標準にはない多様な機能を実現している。ここでは1999年12月に確定した基本方式(JPEG 2000 part-1)の符号化アルゴリズムを中心に解説する。

キーワード：静止画像符号化，国際標準，JPEG，ウェーブレット変換，算術符号化，スケーラビリティ

1. ま え が き

ISOとCCITT(当時)とが共同作業機関JPEG: Joint Photographic Experts Groupを設立し、静止画符号化の国際標準化を開始したのは1986年である。爾来、DCT変換を核としロッシー符号化をメインターゲットとするJPEGシリーズ(ISO/IEC 10918-1~4)、マルコフモデルに基づき高効率なロスレス/ニアロスレス符号化機能を持つJPEG-LS(14495-1)の標準化が行われ、印刷分野でのデジタル化、デジタルスティルカメラの普及、WWWの興隆などに大きな役割を果たしてきた。現在、JPEGはISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1とITU-T/SG 8/Q. 6の共同作業機関となっている。

さて、世の中の動きや関連技術の進歩と共に、さらに新たな符号化標準の要望が生まれるのも世の常であり、圧縮率の向上に加え、さまざまな性能改善や機能付加の要求を背景としてJPEG 2000プロジェクトがカラー多値画像符号化の新規課題(JTC 1.29.14; ISO/IEC 15444)として1997年1月締切の国際投票で承認され、検討が開始されることとなった。

具体的な提案は1997年11月会合から開始され、年間3回の国際会合毎に議論の内容を反映したVM(Verification Model)が作成されてきた。VMはVMソフトとVM文書からなり、現状の性能検証と、新提案の評価に供されている。最初の提案締切からほぼ2年経ち、1999年の12月会合でJPEG 2000の基本方式の符号化アルゴリズムを規定するpart-1のCD(Committee Draft)が作成され、技術的に凍結された。これまでの標準化の経緯等はすでに文献¹⁾²⁾で紹介されているので、本稿では主としてこのpart-1の技術解説を行う。

なお、part-2はextensionsとして追加機能を規定し、

[†] 三菱電機株式会社 情報技術総合研究所

"An Overview of the New ISO/ITU-T Still Image Coding Standard JPEG 2000" by Ikuro Ueno, Eiji Atsumi and Fumitaka Ono (Information Technology R & D Center, Mitsubishi Electric Corp., Kanagawa)

表 1 JPEG 2000 での実現目標

1	Superior low bit-rate performance
2	Unified compression for Continuous-tone and bi-level images
3	Lossless and lossy compression
4	Progressive transmission by pixel accuracy and resolution
5	Compression with fixed-rate, fixed-size, limited workspace memory
6	Random codestream access and processing
7	Robustness to bit-errors
8	Open architecture
9	Sequential build-up capability
10	Backwards compatibility with JPEG
11	Content-based description
12	Protective image security
13	Interface with MPEG-4
14	Capability to handle side channel spatial information

表 2 想定アプリケーション

1	Internet
2	Color Facsimile
3	Printing
4	Scanning (consumer, pre-press)
5	Digital Photography
6	Remote Sensing
7	Mobile
8	Medical
9	Digital Library
10	Electronic Commerce

part-3はMotion JPEG 2000としてシーケンス画像の符号化を、part-4はconformance test, part-5はreference softwareの規定をそれぞれ予定している。また、MPEG-4などの動画符号化との互換性は、JPEG 2000の実現目標として掲げられているものの、動画符号化と静止画符号化には主としてリアルタイム表示の要否に基づく根本的な課題の相違があり、実現に至っていない。

2. JPEG 2000 の機能とアプリケーション

JPEG 2000のCall for Proposalでは表1の要素が、実現目標として掲げられた。このうち、低ビットレートでの

図1 JPEG 2000 符号化基本ブロック構成

特性を重要視し、1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 1, 2 bit/pixelでの画像品質評価(SNRと主観評価)とロスレス符号化でのビットレートで第一次評価を行い、まず、たたき台となる符号化方式を選定し、以後、会合毎に符号器のブロック単位で新たな実験内容に基づく改訂を行っている。

JPEG 2000のアプリケーションとしては表2に示すものを想定し、各国からの要望、および医療関係のDICOM、画像フォーマットのDIGなどの各種業界団体を通じてアプリケーション要求を吸収している。その結果、各アプリケーションにおける必須機能、オプション機能が整理されてきている。

3. JPEG 2000 符号化アルゴリズム

JPEG 2000の基本ブロック構成を図1に示す。入力画像は、必要に応じて色座標変換を行った後、各成分を独立に(他の成分の情報は参照せず)符号化する。色座標変換としては、3成分に対するロスレスあるいはロッシーでの色座標変換が規定されており、入力原信号 I_0, I_1, I_2 から変換信号 Y_0, Y_1, Y_2 への順変換はそれぞれ(1)、(2)式で表される。

$$\begin{cases} Y_0(x, y) = \{I_0(x, y) + 2I_1(x, y) + I_2(x, y)\} / 4 \\ Y_1(x, y) = I_0(x, y) - I_1(x, y) \\ Y_2(x, y) = I_2(x, y) - I_1(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

($\lfloor \cdot \rfloor$: 切り捨て演算)

$$\begin{cases} Y_0(x, y) = 0.299 \cdot I_0(x, y) + 0.587 \cdot I_1(x, y) \\ \quad + 0.114 \cdot I_2(x, y) \\ Y_1(x, y) = -0.16875 \cdot I_0(x, y) - 0.33126 \cdot I_1(x, y) \\ \quad + 0.5 \cdot I_2(x, y) \\ Y_2(x, y) = 0.5 \cdot I_0(x, y) - 0.41869 \cdot I_1(x, y) \\ \quad - 0.08131 \cdot I_2(x, y) \end{cases} \quad (2)$$

(2)式で入力 I_0, I_1, I_2 がRGB信号の場合、YCbCr信号への変換となる。

また、JPEG 2000では、入力画像をタイルと呼ばれる複数の矩形ブロック(画面の端を除き同一サイズ)に分割して処理する機能を有している。各タイルは独立した画像として互いの相関は使わずに符号化され、1つのビットストリームを形成する。ただし、各タイルの符号をビットストリーム内にインタリーブして配置することも可能である。

以下、色座標変換、タイル分割以降の処理について、符号化側での処理を中心に説明する。

3.1 ウェーブレット変換

JPEG 2000では、低ビットレートでの画質維持、解像

度スケーラビリティ実現の容易性から、変換方式としてウェーブレットを用いることになった。変換フィルタは用途別に2種類用意する。ロッシー/ロスレス統一的符号化をサポートするための(5,3)可逆フィルタ³⁾と、ロッシー符号化をより高いレート対ひずみ特性で実現するための(9,7)非可逆フィルタ⁴⁾である。フィルタは、画像の縦横各方向で同一のものを用いる。ウェーブレット分割の方法は、1次元ウェーブレット変換を画像の縦横各方向に独立に施すことで画像を4つのサブバンドに帯域分割し、最低周波数成分を担うサブバンドを再帰的に4バンドに分割するMallat分割⁵⁾に限定される。なお、画像の端部分では、Symmetric extensionによりサンプル数を拡張してフィルタリングを行う。

ウェーブレット変換のインプリメントとしては、通常の畳込み演算の他、Lifting scheme³⁾が適用可能である。同手法では、まず、パラメータ指定されたモード(LP-firstあるいはHP-first)に従って、偶数番目・奇数番目の信号サンプルを、それぞれ低周波成分・高周波成分(LP-first)、あるいは、高周波成分・低周波成分(HP-first)の初期値とする。次に、高周波成分の各サンプル値を低周波サンプルの重み付き加算を用いて更新する。続いて、低周波成分の各サンプル値を高周波サンプルの重み付き加算により更新する。こうした更新処理をフィルタ長に応じた所定の段数((5,3)、(9,7)フィルタでは各1回)繰り返すことで、1次元1レベルのウェーブレット変換が実現される。Lifting schemeでは、フィルタリング処理(重み付き加算)の積和演算が畳込み演算に比べ少ない回数で実現できるため、インプリメントが効率化される。

たとえば(5,3)可逆フィルタのLifting schemeによる1次元1レベル変換・逆変換は(3)、(4)式のようにインプリメントされる。通常の畳込みによるインプリメントでは $H[n], L[n]$ の導出に3タップ、5タップのフィルタリングを要するのに対し、Liftingでは、それぞれ2タップのフィルタリングでよい。実際の演算は、それぞれ、加減算3回、乗算0回、右シフト演算1回で足りる。

順変換:

$$\begin{cases} Xe[n] = X[2n] \\ Xo[n] = X[2n+1] \\ H[n] = Xo[n] - (Xe[n] + Xe[n+1] - 1) / 2 \\ L[n] = Xe[n] + (H[n-1] + H[n] + 2) / 4 \end{cases} \quad (3)$$

図2 ラインベース変換⁽¹⁾

逆変換：

$$\begin{cases} Xe[n] = L[n] - [(H[n-1] + H[n+2])/4] \\ Xo[n] = H[n] + [(Xe[n] + Xe[n+1] - 1)/2] \\ X[2n+1] = Xo[n] \\ X[2n] = Xe[n] \end{cases} \quad (4)$$

ただし、 $X[n]$ ：画素値、 $Xe[n]$ ：偶数番目の画素値、 $Xo[n]$ ：奇数番目の画素値、 $L[n]$ ：低周波成分、 $H[n]$ ：高周波成分、 $[]$ ：切り捨て演算、 $[]$ ：切り上げ演算。

また、ウェーブレット変換に必要なメモリー量を低減したラインベースでのインプリメントが可能である(図2)。通常のウェーブレット変換では、画像データ全体をバッファリングし変換処理が施されるが、ラインベース変換では、一度にバッファリングするデータを垂直方向のフィルタリングに必要最小限なライン数とする。バッファ内のラインデータをそのつど更新しながら、垂直・水平方向の順に変換処理を施せば、画像全体をバッファリングして変換する場合と全く同一の変換係数が生成される。例えば(5,3)可逆フィルタを用いる場合、最小処理単位は1レベルのウェーブレット変換を実現するごとに5ラインであ

る。5ライン分の画像データから低周波・高周波成分が1ラインずつ生成され、5ライン中2ラインの画像データを更新すれば、次の単位に処理が移ることとなる。ラインベース変換は、特に画像をストライプ単位に符号化・復号するアプリケーションとの親和性に優れる。

3.2 量子化

ウェーブレット変換係数は、(5)式に示す量子化ステップサイズの2倍のデッドゾーンを持つミッドトレッド形線形量子化器により量子化される。

$$q = \text{sign}(a) * \lfloor |a|/\Delta \rfloor \quad (5)$$

ただし、変換係数値を a 、量子化値を q 、量子化ステップサイズを Δ とする。

可逆ウェーブレット変換と組合せたロッシー/ロスレス統一の符号化実現のためには、ステップサイズを1とする必要がある。この場合、ウェーブレット変換係数が最上位プレーンから最下位プレーンまで順次符号化・復号されてロスレスデータが生成される。この符号データのうち、下位の数プレーンに対応する部分を符号化データストリームの生成時あるいは復号時に廃棄(truncation)すれば、ロッシー符号化となるが、下位 N プレーンの廃棄は、ステップサイズ 2^N による量子化と等価となる。この方法では量子化ステップサイズが2のべき乗に限定されるため、ロッシー再生において必ずしもビットレートに応じた適切な量子化ステップサイズが選択できないという問題がある。

なお、ロスレス符号化を必要としない場合には、各サブバンド毎に2のべき乗に限らない量子化ステップサイズを設定し、より高いレート・ひずみ特性を実現することが可能である。

3.3 エントロピー符号化

JPEG 2000 のエントロピー符号化では、ウェーブレット変換係数を各サブバンドで固定サイズのブロック(以下、符号化ブロック)に分割し、各符号化ブロックを独立にビ

図3 符号化ブロックのビットプレーン符号化

ットプレーン表現した後、2 値算術符号化する⁷⁾。変換係数をブロック分割し、独立に処理するメリットとしては、

- ・特定領域へのランダムアクセスの容易さ。
- ・エントロピー符号化に要するメモリー量の削減。
- ・各符号化ブロックに対する符号量配分の最適化が可能。

などが挙げられる。以下、各処理の手順を順に説明する。

(1) ブロック分割

ウェーブレット変換係数を各サブバンド内で固定サイズ(例えば 64×64)の符号化ブロックに分割する。ただし、符号化ブロックの縦横のサイズは 4 以上 1024 以下、面積は 4096 以内とする。

(2) ビットプレーン化とスキャン順序

各符号化ブロック内の変換係数量子化値 q をサインビット χ ($=0$ if $q > 0$, 1 if $q < 0$) と絶対値に分け、絶対値は自然 2 進数によりビットプレーン表現し、図 3 に示すように上位プレーンから順にビットプレーン符号化する。ただし、符号化ブロックの全ビットが 0 であるビットプレーンが有効精度から定まる最上位のプレーンから何プレーン続くかは、ヘッダ情報として符号化ブロック毎に別途送信するので、実際の符号化は最初に必ずどこかにビット 1 が含まれるビットプレーン(図 3 の MSB(Most Significant Bit)プレーン)から開始される。ここで、ある変換係数において最初にビット 1 が発生した場合、直ちにサインビットを符号化する。各ビットプレーンは、ストライプ(例えば高さ 4)に分割し、上のストライプから順に、ストライプ内を左上から垂直方向にスキャンして符号化を行う。

(3) 符号化パスへの分割とコンテキストモデリング

符号化ブロック内の各ビットプレーン情報は、以下に示す 3 通りの符号化パスに分けて符号化され、この順序で符号化ビットストリームを形成する。符号化パスへの分割、算術符号化のためのコンテキスト生成には、図 4 に示す符号化対象係数 X と周辺 8 係数の有意/非有意情報(significance/insignificance)が参照される。ここで、非有意係数とはその変換係数の上位ビットでまだ 1 が発生していない変換係数、有意係数とは上位ビットですでに 1 が発生している変換係数を表し、各係数符号化のたびにその時点で有意/非有意情報を更新する。

① Significance pass

Significance pass では、図 4 の周辺 8 変換係数中に 1 つ以上の有意係数を含む非有意係数を符号化する。非有意から有意に変わる場合に画質への影響が大きいと考えられるため、高い優先度で符号化される。Significance pass での絶対値のビットプレーン符号化では、サブバンドによる方向性の違いも考慮して、周辺 8 係数の有意/非有意情報を表 3 に示す Context label 1 から 8 の 8 通りのコンテキストに縮退する。ただし、 Σh , Σv , Σd は、それぞれ水平、垂直、斜め方向の参照変換係数中の有意係数の個数を表す。ここで、ビット 1(非 0)が符号化され有意となった

d_0	v_0	d_1
h_0	X	h_1
d_2	v_1	d_3

図 4 参照変換係数

表 3 Significance pass/Cleanup pass でのコンテキスト

LH, LL Subband			HL Subband			HH Subband		context label
Σh	Σv	Σd	Σh	Σv	Σd	$\Sigma h + \Sigma v$	Σd	
2	—	—	—	2	—	—	≥ 3	8
1	≥ 1	—	≥ 1	1	—	≥ 1	2	7
1	0	≥ 1	0	1	≥ 1	0	2	6
1	0	0	0	1	0	≥ 2	1	5
0	2	—	2	0	—	1	1	4
0	1	—	1	0	—	0	1	3
0	0	≥ 2	0	0	≥ 2	≥ 2	0	2
0	0	1	0	0	1	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0

LL: low-pass, LH: vertically high-pass

HL: horizontally high-pass, HH: diagonally high-pass

表 4 サインビット符号化のコンテキスト

v_0 (or h_0)		v_1 (or h_1)		v (or h)	v	h	$\hat{\chi}$	context label
Sig	+	Sig	+	1	1	1	0	13
	−			0	1	0	0	12
Insig				1	1	−1	0	11
Sig	+		−	0	0	1	0	10
	−			−1	0	0	0	9
Insig				−1	0	−1	1	10
Sig	+	Insig		1	−1	1	1	11
	−			−1	−1	0	1	12
Insig				0	−1	−1	1	13

Sig: Significant, Insig: Insignificant

+: Positive, —: Negative

表 5 Refinement pass でのコンテキスト

$\Sigma h + \Sigma v$	First refinement for this coefficient	context label
—	false	16
≥ 1	true	15
0	true	14

場合には、続いて変換係数のサインビットを符号化する。サインビットの符号化では、左右、上下の変換係数の有意/非有意および正/負の組合せから、表 4 に示す h (左右方向)、 v (上下方向)という指標を算出し、更に h, v の組

合せを正負の対称性を利用して5通りのコンテキストに縮退する。縮退に伴い、サインビット χ とその予測値 $\hat{\chi}$ との排他的論理和 $\chi \oplus \hat{\chi}$ を算術符号化対象とする。

② Refinement pass

すでに現ビットプレーン以前に0以外の値を符号化し、有意係数であると判明している変換係数は、Refinement passで符号化する。コンテキストは、その変換係数が有意係数となったビットプレーンが前プレーンなのかそれ以前かを示す2値情報と、周辺変換係数における有意係数の総数から表5に示す3通りに分かれる。

③ Cleanup pass

Significance passで符号化されない非有意係数はCleanup passで符号化される。絶対値のビットプレーン符号化では、Significance passと同様の方法および、以下に示すランモードを組合せて使用する。ランモードの適用はスキャン方向に連続する4変換係数毎に検証され、それら4変換係数のすべてがCleanup passに分類され、更に4係数すべてにおいて周辺8係数が非有意係数の場合に適用される。ランモードでは、4変換係数の現プレーンの4ビットすべてが0の場合に0を、それ以外の場合には、まず1を独立コンテキストで算術符号化する。4ビット中に1が含まれる場合には、続いて、最初に発生した1の4係数中での位置を表す2ビット(先頭から00,01,10,11)を独立コンテキストで算術符号化する。更に、サインビットを表4に示すSignificance passの場合と同じコンテキストで算術符号化する。4係数のうち、最初にビット1が出現した後の係数および、もともとランモード対象でない係数は、表3に示すSignificance passと同じコンテキストで符号化する。

(4) 算術符号化

算術符号には、JBIG 2⁸⁾で規定される2値算術符号であるMQ-coderを使用する。MQ-coderでは、46種類のLPS(Less Probable Symbol)推定確率($Qe_index=0\sim 45$)が用意されており、各コンテキストにおいてLPS推定確率およびMPS(More Probable Symbol)値(0または1)を学習により逐次更新する。JPEG 2000での全19種類のコンテキストに対する初期推定確率(Qe_index)、MPS値の初期値を表6に示す。一部のコンテキストでは必ずしも初期値をLPS確率0.5($Qe_index=0$)に設定せず、より低い確率に設定し、初期学習期間の省略を図っている。また、ランモードでのビット1発生位置の符号化では確率

表6 推定確率, MPS 値の初期値

context	Qe_index	MPS
Run-mode	3	0
Context label 0 in Table 3.	4	0
All other contexts	0	0

推定の学習を行わず、 $Qe_index=0$ に常に固定としている。

算術符号系列を終端し、新たな算術符号系列の生成開始に備えるフラッシュは、各符号化ブロックの最後に行う。ただし、後述するビットストリーム形成の段階で、符号化ブロックの途中でフラッシュを行い、それ以降の符号を切り捨てることもある。

なお、エントロピー符号化には、用途に応じて選択可能な以下のオプションが用意されている。

・lazy モード

処理高速化および誤り耐性強化を図るために、特定の符号化パスでは算術符号化を行わずに、算術符号化対象となる2値シンボルを直接、符号とするモード。このモードでは、図3のMSBプレーンから4プレーン目以降のSignificance passおよびRefinement pass($P_{M-5,1}$, $P_{M-5,2}$, $P_{M-6,1}$, $P_{M-6,2}$, ...)で算術符号化を省略する。

・Stripe-causal コンテキストモデリング

並列処理を想定して、隣のスライプが参照係数に含まれる場合でも隣のスライプは参照せず、スライプ単位

図5 ROI変換係数の特定 (ROIマスク生成)¹¹⁾

図6 ROI変換係数のスケールアップ (Max-shift)

で閉じた処理を行うコンテキストモデリングである。

- ・符号化パス毎の算術符号化のフラッシュとリセット

各符号化パス後に算術符号化データをフラッシュし、次の符号化パスの符号化に備えパラメータをリセットする。Stripe-causal コンテキストモデリングと併用してストライプ符号化の並列処理を可能とする他、誤り耐性の強化にも有効である。

3.4 ROI 符号化

ROI (Region Of Interest) 符号化は、画像中の選択領域を他領域よりも優先して符号化し、復号再生画質を高める機能である。同機能の実現は、選択領域 (ROI) に対応するウェーブレット変換係数の特定 (ROI マスク生成、図 5)⁹⁾ と、特定された変換係数 (ROI 変換係数) への優先的情報割り当てよりなる¹⁰⁾。JPEG 2000 part-1 では、ROI 変換係数量子化値の全ビットプレーンが、残る領域の変換係数のどのビットよりも優先して符号化されるよう、変換係数の量子化値を S ビットシフトアップした上で、上位プレーンからビットプレーン符号化する (Max-shift 法、図 6、(6) 式)。これにより、ROI 変換係数の送信が最優先された符号化が実現される。

$$q'(x, y) = \begin{cases} q(x, y) & ((x, y) \in \text{ROI}^c) \\ q(x, y) * 2^s & ((x, y) \in \text{ROI}) \end{cases} \quad (6)$$

$q(x, y)$: 位置 (x, y) における変換係数量子化値,

$S : 2^S > \max\{q(x, y) \mid ((x, y) \in \text{ROI}^c) \}$ を満たす整数,

ROI^c: ROI 以外の領域.

復号時には、エントロピー復号された変換係数のうち ROI を担う変換係数を特定し、シフトダウンする必要があるが、Max-shift 法の下では、非 0 の ROI 係数の量子化値は必ず 2^S 以上となるので、ヘッダ情報として送信されるシフト数 S だけ、 2^S 以上の値をとる ROI 係数をシフトダウンすることで、容易に ROI 係数を再生することができる。

3.5 エラー耐性

JPEG 2000 では、無線での利用などを想定し、伝送路誤り耐性の強化機能を有している。符号化ブロックを独立

にエントロピー符号化することは、エラーの伝播を符号化ブロック内に留めるという点で、それ自体エラー耐性を有しているといえるが、更に以下のオプションが用意されている。

- ・再同期マーカの挿入

各パケットの先頭にシーケンシャル番号を含む再同期のためのマーカーセグメントを挿入し、マーカーセグメントの検出タイミングと復号したシーケンシャル番号から、エラーを検出する。

- ・セグメンテーションシンボルの挿入

各符号化パスの最後に4ビットのセグメンテーションシンボル“1010”を符号化する。復号時に符号化パスの最後にセグメンテーションシンボルが正しく復号されない場合には、その符号化パスでエラーが発生したことが検出される。なお、セグメンテーションシンボルの算術符号化は、確率推定の学習を行わず、常に固定された確率($Q_{e_index} = 0$)として行う。

この他、符号化パス毎の算術符号化データのフラッシュ、リセット、算術符号化を行わない符号化パスの設定(3.3参照)など、エラーの伝播範囲を縮小する効果のあるオプションが設定されている。

3.6 ビットストリーム形成

JPEG 2000 の符号化ビットストリームは、各符号化ブロックのデータを4つの軸(ビットプレーンの重要度、空間解像度、ブロック位置、色成分)の組合せに従って並べることで、SNR プログレッシブ、空間解像度プログレッシブに代表される5つの progression order を提供する。各種 order を体系的に実現するためレイヤの概念が導入されており、各符号化ブロックごとに生成された符号化データが分割管理される。図7に示すように、レイヤの各階層は、各符号化ブロックの符号データを分割したデータを、再生画像の SNR 向上への寄与度の高いものほど上位レイヤとし、寄与度の近いものどうしをブロック横断的に分類した構成となる。ここで、各符号化ブロックの符号データを分割する位置は、各符号化パスの終了時点に限定され

図 7 符号化ブロックデータによるレイヤの構成¹¹⁾

図 8 SNR プログレッシブ符号化ビットストリーム¹⁾ 図 9 解像度プログレッシブ符号化ビットストリーム¹⁾

る。各符号化ブロックから各レイヤに割り振られるデータは、エントロピー符号化時のスキャン順に従う。

各レイヤに属するデータを適切な順序で並べることで、各種 progression order が実現される。ここで、データの並びを制御する単位としてパケット $K_{\lambda}^{l,c}$ の概念が導入される。各パケットは、同一レイヤに属するデータのうち、同じ空間解像度レベルを担う符号データをグループ化したものである(レイヤ: $\lambda=1$ (最上位), $2, \dots, \Lambda$ (最下位); $l=0$ (最低解像度), $1, \dots, L$ (最高解像度); 色成分インデックス: $C=1, 2, \dots$)。例えば、色成分が1種類の場合の SNR プログレッシブ progression order は、同一レイヤに属するパケットを対応する空間解像度の低い順にまとめ、これらをレイヤ順位の高い順に並べることで形成される(図 8)。一方、空間解像度プログレッシブの order は、同一の空間解像度を担うパケットを対応するレイヤ順位の高い順にまとめ、これらを空間解像度の低い順に並べることで形成される(図 9)。

各パケットは、ヘッダとボディより構成される。ヘッダには、ボディを構成する符号データの属性が各符号化ブロックごとに示される。つまり、(1)各ブロックのデータがボディを構成するか否か、構成する場合、(2)それはいく

つの符号化パス分で、(3)何バイトのデータか、(4)そのブロックのデータがビットストリーム構成に利用されるのが最初である場合、最上位ビットプレーンから最初のビット1が出現するまでのビットプレーン数が示される。各符号化ブロックの属性データはサブバンドごとに所定の順に結合された後、HL(水平方向高周波)、LH(垂直方向高周波)、HH(斜め方向高周波)の順に並べられる。最後にバイト境界化処理をして各パケットのヘッダとなる。ボディを構成する各ブロックの符号データは、ヘッダ部での属性記述と同一順序で並べられる。

4. む す び

JPEG 2000 part-1 の標準化動向と、その技術内容について紹介を行った。用いられている技術は low complexity, high compression, fast execution という汎用的な目標に向けての綿密な検討結果に基づくものであり、SC 29/WG 1 で JPEG/JBIG 標準以来培われてきた、職人芸的伝統が、メンバーの構成は変わっても脈々と生き続けているといえる。

JPEG 2000 part-1 は CD 投票のあと、FCD(Final Committee Draft)投票、FDIS(Final Draft International

Standard)投票を経て、2001年3月にはIS(International Standard)となる予定である。他のpartについても、逐次標準化のステップが進められてゆく予定である。

JPEGとJBIGが相次いで誕生したとき、JPEGがその勢いでJBIGを上回った原因として、JPEGには先行標準がなく、JBIGには先行標準(MMR)があるということが大きな原因とされた。JPEG 2000がJPEGという既存標準を退け、静止画符号化の主流となることができるのか、あるいは、いつ主流となるのかというのは、極めて興味深い問題である。すでに技術をフリーズした段階では、標準化に関わってきた者として、今後JPEG 2000が大きく育つことをただ祈る心境である。(2000年1月11日受付)

〔文 献〕

- 1) 小野, 上野, 渥美: “JPEG 2000 の動向”, 映像学誌, **52**, 12, pp. 1779-1784 (Dec. 1998)
- 2) 佐藤, 梶原: “JPEG 2000 の最新動向”, 画電学誌, **28**, 3, pp. 291-296 (1999)
- 3) A. R. Calderbank, et al.: “Wavelet Transforms that Map Integers to Integers”, Applied and Computational Harmonic Analysis, **5**, pp. 332-369 (July 1998)
- 4) M. Antonini, et al.: “Image Coding using Wavelet Transform”, IEEE Trans. IP, **1**, pp. 205-220 (Apr. 1992)
- 5) S. G. Mallat: “A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation”, IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., **11**, pp. 674-693 (July 1989)
- 6) C. Chrysafis and A. Ortega: “An Algorithm for Low Memory Wavelet Image Compression”, ICIP-99, 27 AP 3.5 (1999)
- 7) D. Taubman: “High Performance Scalable Image Compression with EBCOT”, ICIP-99, 27 AP 3.3 (Oct. 1999)

- 8) ISO/IEC 14492, “FCD 14492 Lossy/lossless coding of bi-level images” (Nov. 1999)
- 9) D. Nister and C. Christopoulos: “Lossless Region of Interest with a Naturally Progressive Still Image Coding Algorithm”, ICIP-98 (1998)
- 10) E. Atsumi and N. Farvardin: “Lossy/Lossless Region-of-Interest Coding based on Set Partitioning In Hierarchical Trees”, ICIP-98 (1998)
- 11) “JPEG 2000 Verification Model 5.2”, ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1 N 1422 (Oct. 1999)

うえの いくろう
上野 幾朗 1989年、東京理科大学理工学部電気工学科卒業、1991年、同大学院修士課程修了。同年、三菱電機(株)入社。現在、情報技術総合研究所にて、画像符号化の研究に従事。

あつみ えいじ
渥美 栄司 1991年、東京大学工学部電子工学科卒業、1993年、同大学院修士課程修了。同年、三菱電機(株)入社。現在、情報技術総合研究所にて、画像処理、画像符号化の研究に従事。1997～1998年、米国メリーランド大学客員研究員。

おの ふみたか
小野 文孝 1971年、東京大学工学部電子工学科卒業、1973年、同大学院修士課程修了。同年、三菱電機(株)入社。以来、画像符号化・画像処理の研究に従事。1982～1983年、米国イリノイ大学客員研究員。工学博士。

画像処理と応用シリーズ

第2巻 画像計測

本会編・昭晃堂刊
土屋 裕 著

今日の工場やオフィス、研究所、病院などでは、画像情報を利用する計測が広く普及している。本書は、各種の産業分野や研究開発分野で利用されている画像計測装置について、基礎から最先端までの技術や応用をまとめたものである。著者は産業界で長年、画像計測あるいは光計測の研究開発に携わってきたので、実戦的なノウハウについても多くの紙面をさいている。日常の業務と並行して読まれることをお勧めする。

A5判 196頁。定価(本体 3,800円 [税別])

第4巻 医用画像処理

本会編・昭晃堂刊
今里悠一・大橋昭南 共著

本書は、デジタル医用画像処理についてできるだけ広範囲に解説している。前半では機器そのものの説明を行い、そこでデータ収集の方法について記し、後半の画像処理技術においては数式をできるだけ用いないで説明を行い、できるだけ広く一般に使用されている用語を用いて技術内容が容易に理解できるように考慮してある。あらゆる技術分野において高度に専門化が進んでいる中で、本書は医用画像機器および医用画像処理全体を概観するために、さらには、医用画像処理をこれから学ぼうとしている方々に役立つ。

A5判 226頁。定価(本体 3,500円 [税別])