

## 論文

ウェーブレット画像符号化による  
品質・空間スケーラビリティ正会員 阿部 淑人<sup>†</sup>, 菊池 久和<sup>††</sup>, 佐々木 重信<sup>††</sup>Quality and Spatial Scalabilities Implemented  
by Using Wavelet Image CodingYoshito Abe<sup>†</sup>, Hisakazu Kikuchi<sup>††</sup> and Shigenobu Sasaki<sup>††</sup>

**Abstract** A scalable image coding method is presented. Spatial scalability is implemented by using a multiresolution representation produced by a wavelet expansion. Quality scalability is implemented by using a multiprecision representation produced by multistage zero run-length coding after nonlinear quantization. The data rate is controlled by threshold values and/or spatial resolution in the wavelet expansion. The coding method owes its fine scalability and higher compression to multiresolution decomposition, nonlinear quantization, multistage zero run-length coding and arithmetic coding. In addition to the simplicity in coding, edges and outlines are well preserved without blocking noise at low bit rates. A few examples are also given.

## 1. ま え が き

従来、医用、印刷など高精細、高品位を求められる分野では符号化を全く行わないか、予測符号化などの可逆符号化が主に用いられてきた。近年、印刷の製版工程などにおいてもデジタル化が進められつつあり、画像情報のデータベース化が有効かつ重要になってきている<sup>1)</sup>。しかしデータベースに蓄積された画像の検索や再利用の際に有用な、縮小画像表示やプログレッシブ再生等の利便はこれまで充分図られていなかった。表示装置の再生能力にあわせて複数の解像度の画像を保存しておく必要があり、保存スペースの有効活用の面からも不満足なものであった。

また広範囲にわたって解像度や品質の要求を満たすには、メディア統合が必要不可欠である。電子系画像メディアは伝達、蓄積、加工あるいは非電子系画像メディアとのメディア変換が容易であるという特徴を持っている。例えば超高精細画像 (SHD) による画像メディアの統合が提案されている<sup>2)3)</sup>。

これらの要求に柔軟に対応するために、復号側で必要に応じた部分情報のみから画像を再構成することができるように符号化を行う必要がある<sup>2)</sup>。表示装置に応じて再生画素数を変更したり縮小画像表示するには空間スケーラビリティが必要である。通信容量あるいは要求品質に応じて符号量を調整するには品質スケーラビリティが必要となる。本論文ではこれら2つのス

キーワード：ウェーブレット、多重解像度表現、閾値付き多段階ラン長符号化、多重精度表現、スケーラビリティ

1996年9月20日 国際会議 ISITA96 に発表

1996年12月26日受付, 1997年6月23日再受付

<sup>†</sup> 大日本印刷株式会社 生産総合研究所 (〒115 東京都北区赤羽南 2-3-6, TEL 03-3903-8203)

<sup>††</sup> 新潟大学 工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐 2 の町 8050, TEL 025-262-6744)

<sup>†</sup> Manufacturing Technology Integration Laboratory, Dai Nippon Printing Co., Ltd. (2-3-6, Akabane-minami, Kita-ku, Tokyo 115, Japan)

<sup>††</sup> Faculty of Engineering, Niigata University (2-8050, Igarashi, Niigata-shi, Niigata 950-21, Japan)

ケーラビリティを備えた符号化法を提供することを目的とする。

最近ではサブバンド符号化やウェーブレット変換符号化が熱心に研究されてきている<sup>4)~9)</sup>。変換符号化でしばしば問題となったブロック雑音、モスキート雑音といった視覚的に不快な雑音を発生しないためである。ブロック雑音の低減を目的として考える場合にはDCTに代えてLOTやMDCTを用いた変換符号化で充分その目的が達成されるが、モスキート雑音を低減することはできない。それに対してウェーブレット変換符号化はモスキート雑音を解決できる。加えて特徴的な性質は、多重解像度表現(MRR: Multi-resolution Representation)を提供することである。これにより容易に空間スケラビリティを実現できる。階層的符号化の代表例であるLaplacian Pyramid Coding<sup>10)</sup>では、符号化対象標本数が原画像の画素数を超えることによる符号化特性劣化の問題があったが、ウェーブレット展開による多重解像度表現ではそのような問題がない。さらに木構造のフィルタバンクによる再帰的な帯域分割と間引きによって処理できるため、演算効率も良い。

一方、品質スケラビリティを実現するには画像情報を多重精度表現(MPR: Multi-precision Representation)<sup>9)</sup>にする必要がある。例えば、数値表現で上位から下位に向かって桁数を増やしていくと表現精度が向上するように、情報量を増やすに従って画質を向上させることが目的である。多値画像のビットプレーン符号化も一種の多重精度表現といえるが、要求画質に対する表現の自由度が高いとはいえず、多重解像度表現と両立することも困難である。多重解像度表現における各スケールの係数の振幅は原画像の輪郭強度に相当するので、これを分類し階層構造的に記述できれば、多重解像度表現と多重精度表現の両立が可能であると考えられる。

多重精度表現により表現制度を変化させることは、すなわち品質制御と符号量制御を行うことである。多重精度表現が実現できれば、

- (1) 従来変換符号化やサブバンド符号化の符号量制御方法として多く見られた、変換係数や帯域毎のビット配分すなわち量子化器の符号ビット長を変える方法<sup>6)</sup>。
- (2) JPEGなどで見られるような各変換係数へのビット配分は一律に行い、変換係数に適当な定数を乗じた後に量子化し可変長符号化する方法。などの代替として符号量制御に使用し得る。前者では特に低レート時の画質劣化が激しく、符号量制御の自

由度も低い。これに対して後者では特に低レートでの特性が優れていることも指摘されている<sup>11)</sup>。したがって、ここでは基本的には後者の方法に沿って、帯域別にビット配分を行わず、量子化インデックスを可変長符号化する方法をもとに検討し、多重精度表現にしていく。さて品質スケラビリティを得る方法としては、

- (1) 量子化インデックスをビットプレーン符号化する方法。
- (2) MPEG-2のSNRスケラビリティで見られるような、まず粗い量子化を行い符号化した後に再度量子化誤差を細かく量子化し符号化する方法。
- (3) 低域の係数から順次符号化する方法。
- (4) 変換係数を多重に閾値処理する方法。

などが考えられるが、(1),(2),(3)は多重精度表現としては自由度が低い。(4)では閾値処理によって廃棄される係数を連続的に変化し符号量制御できるとともに、多重の閾値処理により自由度の高い多重精度表現を実現できると期待できる。したがってここでは、閾値処理に基づく多重精度表現を検討していく。

変換係数の閾値処理によって符号量制御を行う方法はこれまでもいくつか提案されている。例えば、DCT係数の閾値処理によって動的な符号量制御を行い、零ラン長-ハフマン符号により圧縮する方法<sup>12)</sup>。サブバンド符号化において高域係数を輪郭情報と雑音に分離するために閾値を設け、小振幅の係数を雑音として除去することで圧縮率の向上をねらい、有意部分(非零)と非有意部分(零)を区別するために、2値画像のラン長-ハフマン符号を導入する方法<sup>5)</sup>などである。これらはいずれも符号量制御などを主目的とした単一の閾値処理であり、多重精度表現を提供するものではない。一方、ウェーブレット展開係数のスケール間相関を利用して、木構造のSignificance map (Zero-Tree)を構成し、複数回の閾値処理により、高能率な品質スケラブル符号化を実現する方法<sup>9)</sup>では多重精度表現が提供されるが、ここでの閾値処理自体は符号量制御を直接の目的としたものではなく、2値化判定用と捉えられる。

本論文では、再生品質と空間解像度との両面でスケラブルな高精細画像符号化方式<sup>13)14)</sup>を提案する。今後の画像データベースの利便のためには、複数の異なる再生精度や解像度をもつ表示装置へ単一の情報源から情報提供できることが重要な要件であり、そのため、原情報は高精細画像であること、細かな品質・符号量制御を提供するための品質スケラビリティ、縮小画像表示や解像度変換を提供するための空間ス

ケーラビリティ, の双方が必要であると考えからである。

提案する方式はウェーブレット展開により得られる画像の多重解像度表現, 閾値付き多段零ラン長符号化により得られる振幅情報の多重精度表現により空間解像度と再生品質のスケラビリティを実現する。

以降, 2章では空間スケラビリティの実現について述べ, 3章では品質スケラビリティの実現について述べる。4章で提案手法の性能を評価する。

## 2. 空間スケラビリティと双直交ウェーブレット展開

空間スケラビリティを実現し画像の解像度変換を行うには, エイリアスを防ぐために, 帯域制限した後には間引きを行う必要がある。また低解像度画像の再生時に位相歪みが発生するのは好ましくないために, 線形位相フィルタによる帯域制限が必要である。双直交ウェーブレット展開による多重解像度表現は, この目的にかなった情報の階層構造化を提供し, 受信者はその部分情報から低解像度画像を再生することができる。受信側では低域側の部分情報が揃った時点で復号化でき,  $1/2$  倍,  $1/4$  倍, ... などに解像度の変換を行うことができる。特に最低周波係数(直流係数)のみを復号すれば縮小画像表示に利用することができる。

信号  $f \in L^2(\mathbf{R})$  のウェーブレット展開係数  $F(j, k)$  および平滑化成分  $A(j, k)$  は, それぞれ基本ウェーブレット  $\psi(x)$  とスケリング関数  $\phi(x)$  を離散スケリングと並進を施した関数群

$$\psi_{j,k}(x) = \frac{1}{2^j} \psi\left(\frac{x}{2^j} - k\right) \quad (1)$$

$$\phi_{j,k}(x) = \frac{1}{2^j} \phi\left(\frac{x}{2^j} - k\right) \quad (2)$$

と, 信号  $f(x)$  との内積により

$$F(j, k) = \langle \psi_{j,k}, f \rangle \quad (3)$$

$$A(j, k) = \langle \phi_{j,k}, f \rangle \quad (4)$$

と表される。これを用いて信号  $f(x)$  は

$$f(x) = \sum_{j=1}^J \sum_k F(j, k) \tilde{\psi}_{j,k}(x) + \sum_k A(J, k) \tilde{\phi}_{J,k}(x) \quad (5)$$

と展開される<sup>15)16)</sup>。ここで  $j, k$  はそれぞれ拡大および並進のインデックス,  $\tilde{\psi}_{j,k}(x), \tilde{\phi}_{j,k}(x)$  はそれぞれ  $\psi_{j,k}(x), \phi_{j,k}(x)$  の双対基底である。右辺の第1項を交流係数(以降 AC 係数), 第2項を直流係数(以降 DC

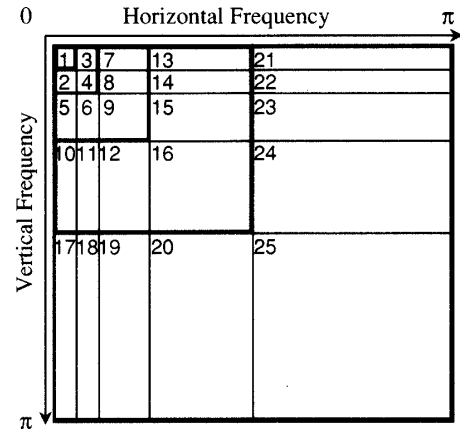


図1 走査順序  
Scanning order.

係数)と呼ぶことにする。

画像符号化では, ウェーブレット展開係数を垂直水平成分共に, 低周波となる成分のみを再帰分割する方法がよく用いられる。自然画像には人造物による水平線や垂直線も多く含まれるので, 上記分割法では空間冗長度が残存すると考えられる。そこで, 本符号化方式では水平基底, 垂直基底の直積を求め帯域分割を行った。そしてウェーブレット展開係数を, 図1に示した順序で低域成分から高域成分の順に走査することにより空間情報の階層構造化を実現する。4階層にウェーブレット変換した場合の帯域分割の様子を帯域幅に比例したサイズで示している。帯域番号1がDC係数であり, 順に2-4番, 5-9番, 10-16番, 17-25番がそれぞれ5種類の解像度成分のAC係数となる。

帯域内の係数の走査順序については, それぞれ

- (1) すべての帯域を水平走査
- (2) すべての帯域を垂直走査
- (3) すべての帯域をジグザク走査
- (4) 2,5,6,10-12,17-20 を水平, 3,7,8,13-15,21-24 を垂直, 4,9,16,25 をジグザク

と変更し, 後述の閾値付き零ラン長符号化, 算術符号化を行って, 単一閾値処理による符号量制御を行ったときの符号量変化を調べた。いずれの走査方法によっても符号量に大差はなく1%程度の差に収まった。このため各帯域内では常に水平方向の線順次走査を行うこととした。上記帯域分割法により空間冗長度が効果的に削減されているためと考えられる。一方, 一般に多用される帯域分割法では零係数の発生には方向性が生じるため零ラン長符号化の性能が左右され, 走査方法により符号量は大幅に変化すると考えられる。

### 3. 品質スケーラビリティと閾値付き多段零ラン長符号化

ここでは、まずウェーブレット展開係数の量子化と閾値付き零ラン長符号化による符号量制御について述べる。次に多段零ラン長符号化による品質スケーラビリティの実現について述べる。

図2に実際の画像のAC係数の振幅分布を示す。零近傍に非常に多数の係数が集中する。文献<sup>6)</sup>では画像のウェーブレット展開係数の分布モデルとして一般化ガウス関数が妥当なものとして示されている。図中に示した近似曲線は  $y = 0.696 \exp(-(\frac{x}{0.0084})^{0.394})$  で表される一般化ガウス分布関数である。このように集中度の高い分布の場合、線形量子化器では平均歪みが大きくなるため非線形量子化器を導入する。可変長符号の導入により線形量子化器でも、最適量子化器<sup>17)</sup>とほぼ同等のレート歪み特性曲線に乗ることが知られているが、8ビット程度の線形量子化器では符号化レートの低い領域が対象になる。高品位画像の符号化に適したより符号化レートの高い領域を対象とするために、より最適量子化器に近い特性の量子化器を用いることとする。ここでは入力信号の振幅と量子化インデックスの関係が平方根カーブになる特性の量子化器を用いる<sup>13)</sup>。後述の零ラン長および算術符号化を行ったのちの符号化特性は、最適量子化器を用いた場合と比較して遜色のないことを確認している。

閾値付き多段零ラン長符号化を構成するにあたって、各帯域毎の適応ビット配分は行わず一様に8ビットとする。DC係数を8ビット線形量子化し、AC係数を絶

対最大値による正規化ののち正負符号1ビット、振幅7ビット計8ビット非線形量子化を行う。符号器は量子化インデックスを出力し、復号器では対応する量子化係数が再生される。

先に述べたように、多数のAC係数が零近傍に集中するため閾値を設け、再生品質への寄与度が低い小振幅の係数を切り捨てることで大幅な符号量削減が期待できる。閾値処理はAC係数に対して直接ではなく、ラン長符号化の際に量子化インデックスに対して行う。この閾値処理によって等価的に不感帯つき量子化が行われる。図3に不感帯付き量子化の入出力特性を示す。正負とも絶対値が閾値未満の入力は零に丸められる。

AC係数の振幅は原画像の輪郭強度に相当すると考えられる。したがって、閾値を増加するに従って符号量が減少するとともに、弱い輪郭から順に消失していく。高圧縮時にも、本来ははっきりした輪郭線であったところは比較的正確に再現できると考えられる。また振幅強度順に分別し符号化すれば、品質スケーラビリティを実現できると期待できる。

さてAC係数の量子化インデックスは前記のとおり、正負符号1ビット、振幅7ビット、計8ビットで表している。これを次に述べる閾値付き零ラン長符号化するために無符号整数と見なして処理する。

符号ビットをLSBに配置したときのビット配置を表1に示す。±0から±127の値が表現でき、これをここでは0から255の無符号整数として扱う。

量子化インデックス(無符号)の閾値 $T$ 未満の値を0と見なすと大量の0インデックスが発生する。この0インデックスは連続して発生することが期待される。

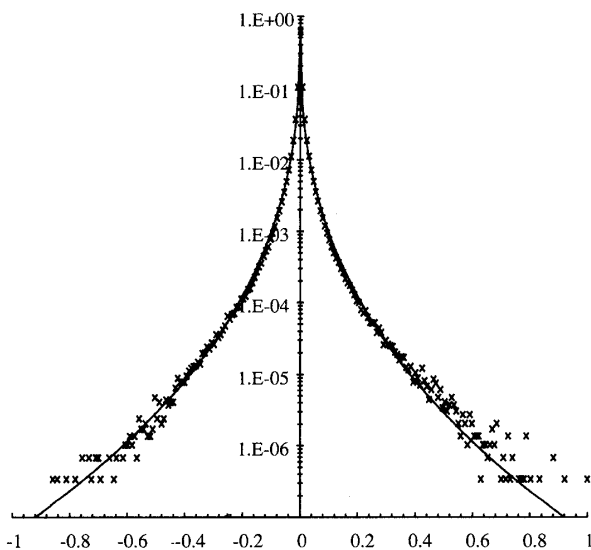


図2 振幅分布  
Amplitude distribution.

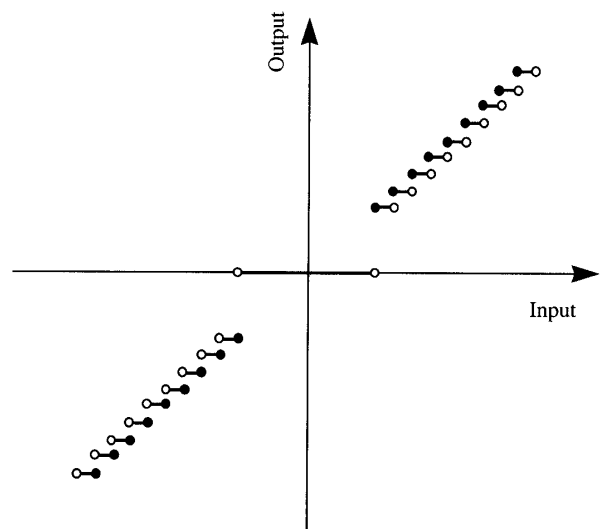


図3 不感帯付き量子化  
Dead-zone quantization.

表1 ビット配置  
Bit assignment.

MSB	b6	b5	b4	b3	b2	b1	LSB
64	32	16	8	4	2	1	±

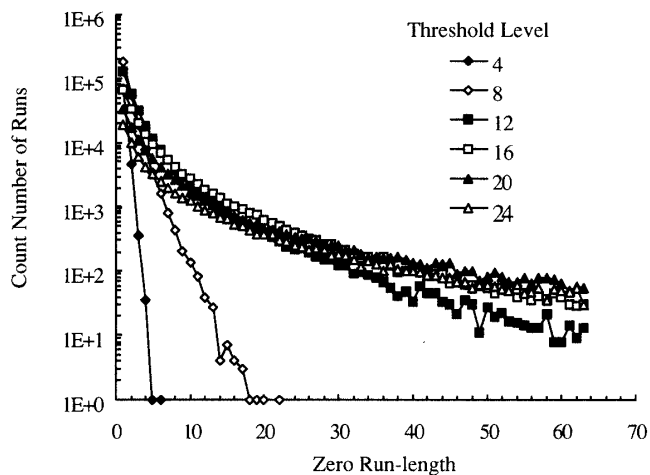


図4 零ラン長の分布  
Distribution of zero run-length.

図4に閾値の変化に伴う零ラン長の分布を示す。閾値を増加するに従いラン長の分布が広がって行くことがわかる。効果的に圧縮するには零ラン長符号化が効果的と考えられる。

閾値処理により量子化インデックスは0および $T, T+1, \dots, 255$ に限定されるので、 $0, 1, \dots, T-1$ の領域を零ラン長符号として用い、 $T, T+1, \dots, 255$ の領域を量子化インデックスとして用いることにする。ラン長と量子化インデックスを閾値によって区別できるので、単一の符号空間内に表現でき、高能率符号化が期待できる。ラン長 $K (\leq T)$ を $K-1$ と符号化し、ラン長 $K$ が $T$ より大きいときは複数に分割する。多数の画像について実験的に調べた結果、零ランが複数に分割されるのは零ラン全体の1%未満であることを確認している。

以下に符号化の例を示す。図5(a)に簡単のため2段のウェーブレット展開後の量子化インデックスの例を示す。これを無符号化すると図5(b)のように表すことができる。

図1に示した順序に従いインデックスを読み出した記号列は

$$\{65, 17, 86, 15, 11, 3, 12, 0, 34, 13, 10, 8, 7, 22, 15, 2\} \quad (6)$$

となる。閾値を18とすると

65	43	17	-6
-8	-7	5	4
-5	6	-3	11
-1	0	-7	1

(a) Signed Value

65	86	34
		22

(c) Pels to be coded

65	86	34	13
17	15	10	8
11	12	7	22
3	0	15	2

(b) Unsigned Value

		13	
17	15	10	8
11	12	7	
3	0	15	2

(d) Pels to be discarded

図5 符号化例  
Coding example.

$$\{65, 0, 86, 0, 0, 0, 0, 0, 34, 0, 0, 0, 0, 22, 0, 0\} \quad (7)$$

と見なされるので、符号化対象画素は図5(c)のようになり、棄却画素は図5(d)のようになる。これより符号列は

$$\{65, \underline{0}, 86, \underline{4}, 34, \underline{3}, 22, \underline{1}\} \quad (8)$$

と表される。下線部がラン長符号部分である。符号化残差列は

$$\{17, 15, 11, 3, 12, 0, 13, 10, 8, 7, 15, 2\} \quad (9)$$

となる。閾値を大きくすると符号量は小さくなるが、再構成精度が劣化する。符号化残差列を保存、伝送し復号器に入力すれば、完全に原記号列を再現できる。

さらにこの残差出力に対し、閾値を減少させて再度閾値付き零ラン長符号化することにより多重精度表現を行う。これを閾値付き多段零ラン長符号化と呼ぶこととする。図6に、2段目までの多段零ラン長符号器を示し、以下に符号化例を示す。

(9)式の符号化残差列を、閾値12で再度符号化すると第2次符号語は

$$\{17, 15, \underline{1}, 12, \underline{0}, 13, \underline{2}, 15, \underline{0}\} \quad (10)$$

となる。下線部がラン長符号部分である。第2次符号化残差列は

$$\{11, 3, 0, 10, 8, 7, 2\} \quad (11)$$

となる。以降同様に符号化が可能であり、逆の手順で

容易に復号化できる。

この閾値つき多段零ラン長符号化では、階層の段数と各段の閾値について自由度があるので、複数の階層

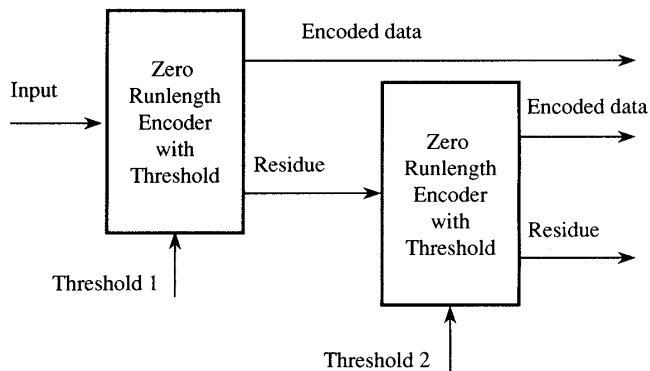


図6 多段零ラン長符号器 (2段)  
Multi-stage zero run-length encoder.

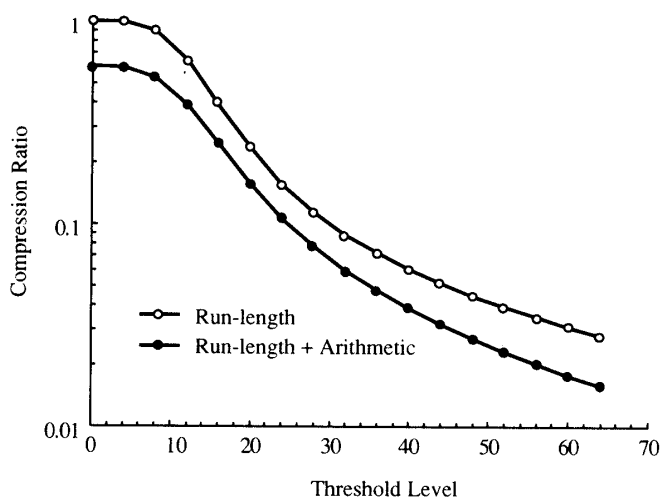


図7 算術符号化の効果  
Efficiency of arithmetic coding.

毎に閾値を設定し、スケーラブル符号化を実現することができる。あるいは単一の閾値処理による符号量制御のみを行って、通常非スケーラブル符号化として用いてもよい。

閾値付き多段零ラン長符号化により、零インデックスの効果的圧縮が達成できるが、まだ情報の偏りが残存すると考えられるので、さらに8ビットの符号語単位に算術符号化<sup>18)</sup>を行う。図7に閾値により符号量を制御し、閾値付き零ラン長符号単体で符号化した場合と、さらに算術符号を適用した場合の閾値と圧縮率の例を示す。いずれの閾値においても平均2/3程度に圧縮が行われていることがわかる。他の画像でも同様の結果となることを確認している。なお、スケーラブル符号化として用いる場合には各階層毎に符号語の発生確率が異なるので、それぞれの階層毎に算術符号化を行う。

#### 4. 性能評価

本符号化方式の全体構成を図8に示す。ここでは対象画像をモノクローム画像に絞って話を進める。ウェーブレット展開により入力画像を多重解像度表現する。図1に示した各帯域成分をそれぞれ $L_1, L_2, \dots, L_M$ と呼ぶこととする。量子化の後、多段零ラン長符号化、算術符号化することにより画像を階層的に符号化する。多段零ラン長符号化の出力は、複数の階層に分かれている。大振幅成分から小振幅成分に向かって順にそれぞれ $L^1, L^2, \dots, L^N$ 成分と呼び、添え字が大きい方を上段成分と呼ぶこととする。双方の分割を行った $m$ 帯域の $n$ 段成分を $L_m^n$ 成分と表記する。なお $L_1$ 成分はDC成分であるため多段零ラン長符号化による階層分割は行わない。すると符号列全体は

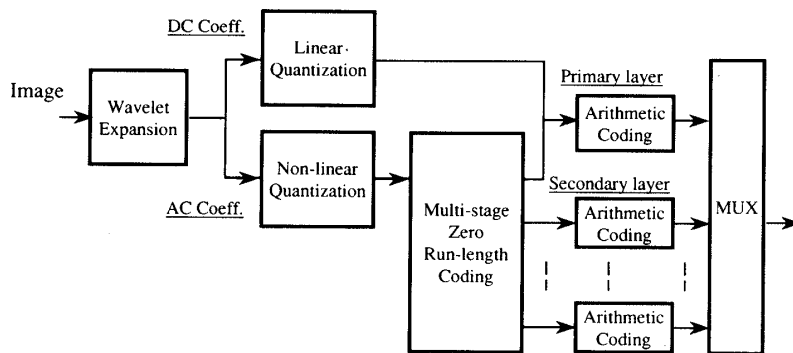


図8 符号化器全体構成  
Encoder block diagram.

$$\begin{bmatrix} L_1 & L_2^1 & \cdots & L_m^1 & \cdots & L_M^1 \\ & L_2^2 & \cdots & L_m^2 & \cdots & L_M^2 \\ & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ & L_2^n & \cdots & L_m^n & \cdots & L_M^n \\ & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ & L_2^N & \cdots & L_m^N & \cdots & L_M^N \end{bmatrix} \quad (12)$$

という行列要素で示されるように分解されていることになる。特に品質スケーラビリティを付加しない場合には単に

$$\begin{bmatrix} L_1 & L_2^1 & \cdots & L_m^1 & \cdots & L_M^1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

と分解されている。

ここで (12) 式の各成分の出力順序を考えてみる。

品質制御を主体にするためには (12) 式の各要素を水平方向に順次走査し

$$\{L_1, L_2^1, \dots, L_M^1, \dots, L_m^n, \dots, L_2^N, \dots, L_M^N\} \quad (14)$$

の順で出力すればよい。解像度変換を主体にするためには (12) 式の各要素を垂直方向に順次走査し

$$\{L_1, L_2^1, \dots, L_2^N, \dots, L_m^n, \dots, L_M^1, \dots, L_M^N\} \quad (15)$$

の順で出力すればよい。

前者では低品位の高解像度画像はビット列の初期段階で再生できるが、低解像度画像を再生するためには、途中の高域成分ビット列を破棄しながら復号する必要がある。一方、後者ではビット列の前方部分のみで低域の成分がそろわうため、初期段階に低解像度画像を再生できるが、低品位の高解像度画像を再生するには、ビット列の途中で上段成分を廃棄しながら復号する必要がある、という差がある。いずれの走査順序にしても、(12) 式のある特定の左上部分行列のみを取り出せば、余分な情報の受信なくして所望の品質と解像度を満たす画像を復号することが可能となる。

基本的には、後者型のビット列を出力し、目的に応じて最終段のマルチプレクサで前者型などに並べ替えを行い出力を行う。また、より複雑な並べ替えも可能であり、用途に合わせて検討する必要がある。

これ以降、符号化性能、階層化方法による品質スケーラビリティの差について考察を加える。

#### 4.1 符号化性能

非スケーラブル符号化に対するスケーラブル符号化の得失を明らかにするため、ここでは本スケーラブル

表2 符号化諸元  
Coding specifications.

対象画像	Cafeteria (N2A.TIF) <sup>19)</sup> より作成した輝度画像
画素数	1536 × 1920 pels, 8 bit/pel
Wavelet 展開	SSKF-9/7 タップ, 6 階層, 49 帯域
DC 係数	8 ビット線形量子化
AC 係数	展開係数の最大値で正規化の後, 0.5 乗特性で 8 ビット非線形量子化,
符号量制御	AC 係数インデックスを多段閾値処理
多段零ラン長符号化	8 段
プリアンプル	画像サイズ, 量子化器特性, ラン長符号各段閾値, L <sub>1</sub> 成分算術符号ヘッダほか, 合計 324 バイト

表3 フィルタタップ係数  
Tap coefficients.

Tap No.	High-pass	Low-pass
0	0.78848561508	0.85269867758
±1	-0.41809227252	0.37740285498
±2	-0.04068941754	-0.11062440423
±3	0.06453888252	-0.02384946498
±4		0.03782845544

表4 多段零ラン長符号化の閾値列  
Threshold values for multi-stage zero run-length coding.

stage	1	2	3	4	5	6	7	8
value	56	48	40	32	24	16	8	0

符号化方式と非スケーラブルなベースライン JPEG 方式\*と比較しながら性能評価する。高精細画像を対象としているために主として 1 bpp 以上 4 bpp 未満程度の符号化レートで最大 35 dB ないし 45 dB の品質を狙うものとする。符号化の実験諸元を表 2 に示す。ウェーブレット展開には直線位相特性を有し符号化利得の面でも優れる SSKF-9/7 タップを用いた。表 3 に分析側のフィルタタップ係数を示す。階層数は変換利得の点では 3 段以上では大差がなかったが、解像度変換の自由度を持たせるために、ここでは 6 階層とし、全体で 49 帯域に分割している。量子化器では、入力信号の振幅の最大絶対値を 1 に正規化した後平方根特性で量子化を行う。多段零ラン長符号化による階層数は 8 とする。

従来の方式と符号化性能を比較するために、品質制御を主体にした順序で出力する符号化を行った。多段零ラン長符号化の各段における閾値を表 4 に示す。初

\* T. Lane, et al, Independent JPEG Group,  
ftp://ftp.uu.net/graphics/packages/jpeg/jpegsrc.v6.tar.gz

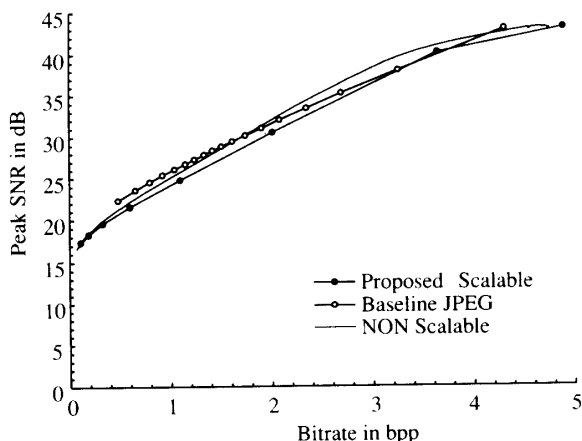


図9 符号化特性  
Coding performance.

段の算術符号化ヘッダ（各シンボルの発生確率表）は全体のヘッダ情報（プリアンプル）に含めるが、第2段以降の算術符号化ヘッダはそれぞれのビット列の最前部に配置する。

符号化特性のJPEG方式との比較を図9に示し、原画像の縮小図を図10に示す。図9で黒丸は本方式で各段の全帯域情報がそろった時点の特性をプロットしており、白丸がJPEGベースライン方式の符号化特性である。本方式では、少し性能が劣るが、品質スケラビリティ機能を付加しながらもほぼ同様の特性を示していることがわかる。

ここで示した閾値列は、特に最適化を行わず単に等差数列にしたものである。ラン長符号化段数や各閾値の変化により符号量も若干変化する場合があることを注意しておく。参考のため単一の閾値処理を行って非スケラブル符号化とした場合の符号化特性を破線で示す。この場合には1.5 bppから4.0 bppの範囲で若干性能の向上が見られるが、大きな差はない。本方式では品質スケラブルにすることによって増える情報は、各階層ごとの算術符号ヘッダと、埋め込みの零ラン長符号数である。ところが、上位の階層ほど伝送すべきシンボルの種類が減ってくるために、単一の階層で符号化する場合に比べて、算術符号化の効率が上位階層になるほど良くなる（情報源の偏りがより顕著になるため）ことが期待できる。例えば、2種類のそれぞれ128種類（7ビット）の情報源を混ぜて256種類（8ビット）として伝送するのに比べて、あらかじめ分離できておれば、それぞれ7ビットで伝送できるため伝送効率は7/8になる。このような効果により符号量の増加を相殺したものと考えられる。

図11に符号化レート約0.60 bpp時の再構成画像の



図10 原画像 Cafeteria  
Original image "Cafeteria".

一部を示す。本方式では強い輪郭は比較的忠実に再現されているものの、細部の形状は損失しほけが見られる。一方、JPEG方式では平坦部でブロックノイズや擬似輪郭の発生が認められるものの、細部の再現性においては本方式より優れている。このように低レート領域の符号化性能を比較すると、本方式はJPEG方式に比べ若干性能が劣っているが、JPEG方式ではいったん再生した画像の品質が充分でなかった場合、再度より符号化レートの高い情報を新規に再符号化しないと再生ができない\*。これに対し、本方式では再生品質が不十分であった場合、所要品質を与えるための差分情報のみを追加して復号化すればよい。データベースを維持する側から見ても複数の品質、解像度の情報をそれぞれ蓄積しておく必要がないので、保存スペースの面で有利である。また先に示したように、スケラビリティを付加したことによる符号量の増加はわずかであるため、プログレッシブ伝送を行う場合の符号量増加がほとんどなく、画像のデータベース検索や再利用を快適に行うことが可能になる。

\* プログレッシブJPEGという拡張仕様もあるが、ここでは評価していない。ベースライン仕様に比較して符号化性能は劣るものと思われる。





Original



Proposed method: 0.60 bpp/21.56 dB



JPEG :0.66 bpp/23.56 dB

図 11 再構成画像の一部 (Cafeteria)  
A part of reconstruction image "Cafeteria".

#### 4.2 品質スケーラビリティの比較

本方式で品質スケーラビリティは、これまで述べてきたように閾値付き多段零ラン長符号化による多重精度表現 (MPR) によって実現される。これに対して多重解像度表現 (MRR) を利用して品質スケーラビリティを実現すること、つまり高域成分の棄却により再生品質を制御することも可能である。ここではこれら2つの再生品質の差を比較し多重精度表現の必要性について検討する。

多重精度表現による品質スケーラビリティは、前節

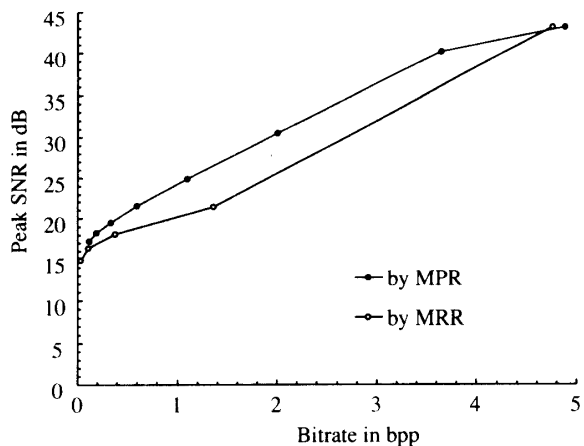


図 12 品質スケーラビリティの比較  
Comparison of quality scalability implemented by truncated amplitude scaling and spatial scaling.

で示した通りの内容である。一方、多重解像度表現による品質スケーラビリティは、多段零ラン長符号化の段数を1とし、閾値を0として、帯域情報をそれぞれ

$$\{L_1, L_2-L_4, L_5-L_9, L_{10}-L_{16}, L_{17}-L_{25}, L_{26}-L_{36}, L_{37}-L_{49}\} \quad (16)$$

に分離し順に復号することで実現し、この時の符号量と再生品質を調べた。

符号化特性の比較を図 12 に示す。黒丸は多重精度表現方式による品質スケーラブル符号化特性、白丸が多重精度表現方式による品質スケーラブル符号化特性である。これより、明らかに多重精度表現による品質スケーラビリティは多重解像度表現より再生品質が優れていることがわかる。これは、例えば、帯域幅を半分にして情報量を1/2にするのと、低域係数と高域係数の双方から優位な係数を選んで情報量を1/2にするの差に相当し、後者の方が再生品質の点で優るからである。したがって、多重解像度表現によるスケーラビリティはもっぱら解像度変換のための空間スケーラビリティに用いるのが得策と考えられ、品質スケーラビリティの実現には多重精度表現が有効であることがわかる。以上を前節の結果と併せると、画像データベース等に用いる場合は、基本的に品質スケーラビリティを主体としたビット列の形態で保存しておき、受信者の要求に合わせて、解像度変換が必要な場合には途中のビット列を無視し、必要な部分だけ取り出して伝送するのが良いと考えられる。また、プログレッシブ伝送や階層化伝送を行う場合にも、先に示した出力方法のうち後者の順序による方がより効率的であると考えられる。

## 5. む す び

本論文では、ウェーブレット展開による多重解像度表現と閾値付き多段零ラン長符号化による多重精度表現により、空間スケーラビリティと品質スケーラビリティを有するスケーラブル符号化を提案した。

閾値制御により符号量と再生品質の制御がほぼ連続的に見え、零ラン長符号と算術符号の組合せにより良好な符号化性能を得ることができた。多重解像度表現により画像の空間的相関を利用し、閾値付き零ラン長符号により零係数の連続性を利用することが符号化性能に大きく寄与している。ブロックノイズやモスキートノイズの発生もなく、低レート時にも比較的輪郭線のはっきりした再構成画像が得られるという特徴がある。

閾値付き多段零ラン長符号化による品質スケーラビリティの性能を評価した結果、8階層化した場合でも、非スケーラブル符号化のJPEG方式と比べて符号量はわずかしこ増加しないことを確認した。さらに、多重解像度表現と多重精度表現の2表現による品質スケーラビリティの再生品質を比較し、後者の方がSN比の面でよりすぐれていることを確認した。

より一層の性能向上のためには、ウェーブレット展開係数のスケール間相関を利用するのが有効と考えられる。今後の課題としてはこのほか、用途に応じたビット列出力順序の最適化、カラー画像や動画への適用などがあげられる。

本研究の一部は文部省科研費一般研究(C)課題番号07650419による。

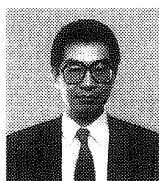
## 〔参 考 文 献〕

- 1) 佐藤, 磯前, 常包, 岡村, 石井: “デジタル化による工程変化とデータ活用”, 印刷雑誌, **79**, 2, pp.4-33 (Feb. 1996)
- 2) 谷本, 斎藤, 沢田, 藤井, 山品, 星野: “デジタル高精細/超高精細動画画像メディアの動向”, 信学誌, **78**, 12, pp.1234-1243, (Dec. 1995)
- 3) S. Ono, N. Ohta and T. Aoyama: “Super-High-Definition Images: Beyond HDTV”, Artech House Publishers, Boston, (1995) p.861-870 (July 1992)
- 4) J.W. Woods and S.D. O’Neil: “Subband Coding of Images”, IEEE Trans. Acoust. Speech & Signal Proc., **34**, 5, pp.1278-1288 (Oct. 1986)
- 5) H. Gharavi and A. Tabatabai: “Sub-band Coding of Monochrome and Color Images”, IEEE Trans. Circuits & Syst., **35**, 2, pp.207-214 (Feb. 1988)
- 6) M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu and I. Daubechies: “Image Coding using Wavelet Transform”, IEEE Trans. Image Proc., **1**, 2, pp.205-220 (Apr. 1992)
- 7) M. Ohta, M. Yano and T. Nishitani: “Wavelet Picture Coding with Transform Coding Approach”, IEICE Trans. Fundamentals, **E75-A**, 7, pp.776-785 (July 1992)
- 8) C.K. Cheong, K. Aizawa, T. Saito and M. Hatori: “Sub-band Image Coding with Biorthogonal Wavelets”, IEICE Trans. Fundamentals, **E75-A**, 7, pp.871-881 (July 1992)
- 9) J.M. Shapiro: “Embedded Image Coding using Zerotrees of Wavelet Coefficients”, IEEE Trans. Signal Proc., **41**, 12, pp.3445-3462 (Dec. 1993)
- 10) P.J. Burt and E.H. Adelson: “The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code”, IEEE Trans. Commun., **COM-31**, 4, pp.532-540 (Apr. 1983)
- 11) 太田 睦: “画像の変換符号化(1)-DCTを用いた画像圧縮の利点と問題点-”, 日経エレクトロニクス, 日経BP社, 672, pp.131-140 (Oct. 1996)
- 12) W.H. Chen and W.K. Pratt: “Scene Adaptive Coder”, IEEE Trans. Commun., **COM-32**, 3, pp.225-232 (Mar. 1984)
- 13) 阿部, 菊池, 佐々木, 渡辺: “レートスケーラブルな多重解像度画像符号化”, 第9回回路とシステム軽井沢ワークショップ(9th KWS on CAS)予稿集, pp.341-436 (Apr. 1996)
- 14) Y. Abe, S.Sasaki and H. Kikuchi: “High Definition Picture Coding with Spatial and SNR Scalability”, Proc. ISITA 96, pp.794-797, Victoria (Sep. 1996)
- 15) S.G. Mallat: “Multifrequency Channel Decompositions of Images and Wavelet Models”, IEEE Trans. Acoust. Speech & Signal Proc., **37**, 12, pp.2091-2110 (Dec. 1989)
- 16) S.G. Mallat: “A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation”, IEEE Trans. Pattern Anal. & Machine Intel., **11**, 7, pp.674-693 (July 1989)
- 17) J. Max: “Quantization for Minimum Distortion”, IRE Trans. Inf. Theory, **6**, 3, pp.7-12 (Mar. 1960)
- 18) 植松 友彦: “文書データ圧縮アルゴリズム入門”, CQ出版社 (Oct. 1994)
- 19) 画像処理技術標準化委員会監修: “高精細カラーデジタル標準画像データ(ISO/JIS-SCID)”, 財団法人日本規格協会 (Dec. 1995)



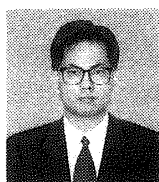
あべ よしと

**阿部 淑人** 1985年, 新潟大学工学部電子工学科卒業。1988年, 同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年, 大日本印刷(株)入社。生産総合研究所勤務。現在, 同研究所グループリーダー。印刷画像の評価, 符号化等の研究に従事。在職のまま新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程在学中。正会員。



きくち ひさかず

**菊池 久和** 1974年, 新潟大学工学部電子工学科卒業。1976年, 同大学大学院工学研究科修士課程修了。富士通(株), 新潟大助手を経て, 現在, 新潟大学工学部電気電子工学科教授。1992年度文部省長期在外研究員(UCLA)。デジタル信号処理, ウェーブレット解析, 画像処理等の研究に従事。工学博士。



ささき しげお

**佐々木重信** 1987年, 長岡技術科学大学工学部電子機器工学課程卒業。1989年, 同大学大学院修士課程修了。1992年, 同大学大学院博士後期課程満期退学。同年, 新潟大学工学部電気電子工学科助手。現在, 同講師。スベクトル拡散通信方式, 移動体通信, デジタル信号処理等の研究に従事。工学博士。