静止画像の符号化方式

正会員 斎藤 隆弘[†], 正会員 安田 浩^{††}

1. ま え が き

本講座の第4回目から4回にわたって、予測符号化や変換符号化などの画像符号化のための基本的な符号化アルゴリズムが紹介されて来た。この他にも、これまでに数多くの静止画像符号化にも適用できるアルゴリズムが開発されている¹⁾²⁾。本稿ではその中から特に重要と思われるブロックトランケーション符号化(Block Truncation Coding)とサブバンド符号化(Sub Band Coding)とを紹介する。サブバンド符号化は、将来の広帯域 ISDN を実現する一方式として最近注目を集めている、ATM(非同期転送モード)用の符号化としてあるいは HDTV 信号用の符号化としても検討が進められている。

実際の静止画像符号化では、その用途に応じて要求条件が異なる。カラー印刷画像の符号化では、色信号の取り扱いが通常の写真画像とは異なり、さらに部分アクセス性という特性も要求される。本稿ではこの点についても述べる。また、画像データベースを狭帯域伝送路を介してユーザ端末と接続した場合、画像の迅速な検索および伝送を考慮した符号化方式が望まれる。そこで、画像を階層的に処理し、最初におおまかな画像を伝送し、次第に精細な画像となるように画像を段階的に伝送する階層的符号化(Hierarchical Coding)が考案されている。本稿では、その具体的例も紹介する。

また、最近解像度の異なる多様なカラー静止画像を用いた広範な応用分野を想定して、カラー静止画像符号化方式の国際標準化が行われ、適応的 DCT(離散的コサイン変換)符号化方式が国際標準化方式として採

用決定しており、今後種々の応用分野での画像符号化の実用化と普及とに寄与するものと期待されている。本稿では、この国際標準化方式の概要についても述べる。

2. カラー静止画像の符号化

——写真と印刷画像との違い——

カラー画像の符号化には、カラー複合信号を直接符号化するコンポジット符号化と、複数の原色信号成分を各成分ごとに符号化するコンポーネント符号化とがある。静止画像の符号化では、コンポジット符号化を採用しなければならない必然性は全くないことから、より高度な情報圧縮が可能なコンポーネント符号化が採用されている。

カラーテレビやカラー写真のように光の原色を混合してカラー化する加法混合における原色信号は R, G, B の3原色信号であるが、RGB 3原色信号間には高い相互相関が存在するので、各原色信号成分ごとに独立に符号化するのは非効率である。

一方、RGB 信号を線形変換して得られる伝送3原色信号、例えば輝度信号 Y と色差信号 $U(=R-Y)$, $V(=B-Y)$ は本講座第3回目で述べられているように、RGB の3原色信号に比較して相互相関が小さく、かつ分布の広がりも狭いため、コンポーネント符号化に適している。ここで、色差信号は輝度信号に比べて高域周波数成分が少ないので、サブサンプリングによって縦や横方向の解像度を下げ、標本点数を削減することができる。また、伝送3原色信号の各色成分は互いに独立なわけではなく、ある程度の相互依存性が存在する。例えば、輝度信号の大きな変化は多くの場合、色差信号の大きな変化をともしなう。このような性質を積極的に利用したカラー画像符号化法としてプラトー符号化(Plateau Coding)³⁾ と呼ばれる方式が提案されている。

印刷物のように、原色顔料や染料などを混合してカ

[†] 神奈川大学 工学部

^{††} NTT ヒューマンインターフェース研究所

"Introduction to Image Data Compression Techniques; (9) Still Picture Coding" by Takahiro Saito(Faculty of Engineering, Kanagawa University, Yokohama) and Hiroshi Yasuda (Human Interface Laboratories, NTT, Tokyo)

ラー化する減法混合では、原色信号はC(シアン)、M(マゼンタ)、Y(イエロー)の3原色信号である。カラー印刷画像⁴⁾では、CMYの3原色のインクの重ね刷りでは充分に表現することができない黒色を補足するために、通常CMYの他にK(黒)を用いる。結局カラー印刷画像はCMYKの4色で表現される。

印刷画像の空間解像度は通常の絵柄では16画素/mmであり、その階調を256レベル/色とすると、A4判サイズ(216mm×303mm)でのデータ量は約76MBとなる。このように印刷画像のデータ量は膨大であり、しかも解像度、色調、階調性に対する要求は非常に厳しい。また、印刷画像には製版工程で部分的色修正などの各種の画像処理が施されるので、印刷画像の符号化には原画像の特定の部分に対応した圧縮データにアクセスできる部分アクセス性も要求される。このような要求条件を満足するカラー印刷画像の符号化法として、CMYKの4原色信号をまとめて4次元ベクトルとして適応的にベクトル量子化する符号化法など⁴⁾が検討されている。

3. いろいろな静止画像符号化アルゴリズム ——まだ紹介されていなかった魅力的な仲間達——

ここでは、これまでの講座の中では紹介されなかった2, 3の静止画像符号化アルゴリズムや、狭帯域画像伝送や画像データベースにおいて特に重要な役割りを演じる階層的符号化について述べる。

3.1 ブロックランケーション符号化⁵⁾⁶⁾

この符号化はブロック符号化とも呼ばれている。この方式では、まず原画像を $n \times n$ 画素からなるサブブロックに分割し、サブブロック内の画素は互いに似た輝度値を有しているという性質を利用してサブブロック内に幾つかの適当な階調を割当て、この階調により各々の画素の輝度値を表現する。

ここでは簡単のため、サブブロック内の各画素を2つの階調で表現する場合について説明する。まず、ある閾値 X_T を定め、サブブロック内の各画素をその輝度値が閾値 X_T 未満となるグループ P_0 と、閾値 X_T 以上となるグループ P_1 とに分類して2値化し、 $n \times n$ のサイズのビットプレーン(分解能成分とも呼ばれている)を作る。送信側では、さらに、この分類結果に基づいてグループ P_0 と P_1 の代表値(階調成分とも呼ばれる) a_0, a_1 を算出し、この代表値 a_0, a_1 を適当に量子化して伝送するとともに、 $n \times n$ のサイズのビットプレーンをビットごとに、あるいはランレングス符号化などのエントロピー符号化法を用いて符号化、伝送する。

一方、受信側では、グループ分類を表すビットプレーンを参照しつつ、グループ P_0 に属する画素の輝度値を代表値 a_0 の復号値で、グループ P_1 に属する画素の輝度値を代表値 a_1 の復号値で再生する。

閾値 X_T や代表値 a_0, a_1 の計3種類の符号化パラメータは、符号化雑音電力(平均2乗誤差)が最小となるようにサブブロックごとに最適化する必要がある。最適化条件は以下の2条件に要約される。すなわち、

① 代表値 a_0, a_1 はそれぞれのグループにおける平均輝度で与えられる。

② 閾値 X_T は、代表値 a_0, a_1 の平均値 $(a_0 + a_1)/2$ で与えられる。

ここで、条件①と②は、本講座第6回目で述べられているベクトル量子化器の2つの最適化条件(代表点条件と分割条件)を1次元の問題に適用したものに相当している。したがって、閾値 X_T と代表値 a_0, a_1 の最適化は、サブブロック内の画素の輝度値を学習系列として用いて2レベルのスカラー量子化器を設計することに帰着する。

しかし、この最適化法ではくり返し演算が必要である。そこで、くり返し演算を必要としない簡便法が採用されることが多い。簡便法としては、閾値 X_T をサブブロック内の平均輝度 m とし、上記の最適化条件①のみを適用して代表値 a_0, a_1 を定める方法(2平均値法)が知られている。サブブロックサイズは通常 4×4 とされる。代表値 a_0, a_1 を8ビットPCMで伝送し、グループ分類を表すビットプレーンをビットごとに伝送すれば、画素当たりの符号化レートは2b/pelとなる。

サブブロックサイズを大きくしたり、サブブロック内で用いる階調数を1としたりすることによって、符号化レートをより低くすることができる。逆に、サブブロックサイズを小さくしたり、階調数を3以上としたりすることによって、符号化レートをより高くすることができる。また、画像の小部分における輝度分布に基づいてサブブロックサイズやサブブロック内で用いる階調数を適応的に切り換える方式も提案されている。

3.2 サブバンド符号化⁷⁾⁸⁾

サブバンド符号化は、初めは音声信号を対象として考案され⁷⁾、その後、画像信号へ適用された⁸⁾。1次元信号に対するサブバンド符号化の構成概念図を図1に示した。図1では、入力信号は帯域分離フィルタ〔図中の $h_l(n), h_u(n)$ 〕によって2つの帯域信号に分けられるとともに、2:1にサブサンプリングされる。さらに、送信側では、各帯域信号に適当に符号化ビッ

図 1 直交ミラーフィルタを用いたサブバンド符号化の構成概念図

ト数を配分し、各帯域信号をその性質に適合した符号化法によって符号化し、伝送する。受信側では、再生された各帯域信号を帯域合成フィルタ〔図中の $h_l(n)$, $-h_u(n)$ 〕によって補間しながら元の信号に再生する。

帯域分離・合成フィルタとしては、帯域分離・合成において折り返しにともなうひずみを生じることなく、元の信号をできるだけ忠実に再生することが可能な直交ミラーフィルタ(Quadrature Mirror Filter: QMF)が使用される。直交ミラーフィルタとしては、下記の(1)～(3)式の条件を満たす $h_l(n)$, $h_u(n)$ を単位インパルス応答として持つ偶数次数 N の対称あるいは反対称 FIR フィルタが用いられることが多い。

$$h_l(n) = h_u(n) = 0, n < 0 \text{ あるいは } n \geq N \quad (1)$$

$$h_l(n) = h_l(N-1-n), n=0, 1, \dots, N/2-1 \quad (2)$$

$$h_u(n) = -h_u(N-1-n), n=0, 1, \dots, N/2-1 \quad (3)$$

これらのフィルタは直線位相性を有しており、画像符号化にも適している。ここで、低域と高域の各帯域信号に混入した折り返し成分が帯域の合成の過程において相殺され、帯域の分離・合成において折り返しにともなうひずみが生じないようにするには、次式の条件が要求される。

$$h_u(n) = (-1)^n h_l(n), n=0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

この条件は、低域フィルタ $h_l(n)$ と高域フィルタ $h_u(n)$ の周波数応答 $H_l(e^{j\omega})$, $H_u(e^{j\omega})$ が角周波数 $\pi/2$ を中心として対称となっていることを意味している。さらに、符号化雑音がない場合に各帯域信号から原信号と同一の信号が再生可能であるためには、次の条件が必要となる。

$$|H_l(e^{j\omega})|^2 + |H_u(e^{j\omega})|^2 = 1 \quad (5)$$

(5)式の全域通過特性は、フィルタの次数 N が 2 または無限大の場合以外は完全に実現することができない。一方、各帯域の符号化において、原信号の折り返し成分の符号化によって生じる雑音は、原信号の折り返し成分そのものとは異なり、帯域の合成過程において相殺することが保証されないため、フィルタの次数 N をある程度高くして低域フィルタや高域フィル

タの遮断特性を急峻にすることが望ましく、このような場合は(5)式は近似とならざるをえない。文献7)には、このように近似を導入して設計した直交ミラーフィルタの単位インパルス応答が、フィルタ次数 N が 32 の場合について示されている。

画像のサブバンド符号化では、図2に示すように、1次元の直交ミラーフィルタ $h_l(n)$, $h_u(n)$ による帯域分離とサブサンプリングをまず縦方向に適用し、続いて横方向に同様な処理をくり返すことによって、図3に示すように入力画像を空間周波数領域において4つの帯域に分割する。帯域分割数を4以上としたい場合には、各帯域信号に図2の処理をくり返し適用すればよい。写真1には、画像“Barbara”に図2の処理を適用して分離した4つの帯域信号を示した。写真1に示したように、各帯域信号は異なる統計的性質を有しているため、それぞれに適した符号化法や符号化パラメータを採用する必要がある。例えば、予測符号化を採用した場合には、それぞれの帯域信号の空間的相関の強さに応じて異なる予測関数を用いる必要がある。

各帯域信号の符号化法としては、予測符号化の他にむしろ DCT 符号化などの各種の既存の符号化法も用いられており、帯域信号ごとにそれぞれの性質に適合した符号化法を採用することによって、DCT 符号化などの既存の符号化法と同等もしくはそれ以上の情報圧縮を実現することができる。

一般的にいて、低域の帯域信号には予測符号化や DCT 符号化が適しているが、高域の帯域信号ではこれを直接スカラ量子化あるいはベクトル量子化しても十分な情報圧縮が得られる。さらに、帯域信号ごとに符号化雑音に対する視感度が異なるため、このことを利用して、よりいっそう高効率な符号化を実現することが可能である。

また、ATM 網ではセル(固定長のパケット)が廃棄されて受信側へ伝送されない場合があるが、こうしたセル廃棄の対策として画像の低周波成分に対応したセルの優先度を高くして低周波成分を保護することが有

図 2 直交ミラーフィルタを用いた 2 次元の帯域分離 (4 帯域の場合)

図 3 空間周波数領域における図 2 の帯域信号の占有帯域

(a) $y_u(m, n)$

(b) $y_l(m, n)$

(c) $y_u(m, n)$

(d) $y_{uu}(m, n)$

写真 1 画像 “Barbara” における帯域信号

効であり、サブバンド符号化は、このようなセル廃棄対策に適した構造を持つことから、ATM 用の符号化としても検討が進められている。

3.3 階層的符号化

段階的画像伝送機能を有する (階層的な) 符号化法は、既存の符号化において伝送順序を入れ換えること

によって実現することができる。例えば、DCT 符号化やサブバンド符号化では、まず全画面にわたって低周波の変換係数や帯域信号を伝送し、続いて順次低周波から高周波へと伝送すればよい。また、通常の PCM では各画素ごとに MSB から LSB へと、あるいはこの逆に伝送されるが、これを最初全画面にわたって MSB を伝送した後、順次 LSB の伝送へと進むようにすればよい。この符号化は特にビットプレーン符号化(Bit Plane Coding)と呼ばれている。

上記の方法以外に、原画像に対してフィルタリングとサブサンプリングとを順次施して作成した空間解像度の異なる複数の画面からなるピラミッド形データ構造において、解像度の粗い画面から順次伝送する方法もある。このようなピラミッド形データ構造を用いる符号化法を特に階層的符号化と呼ぶ。

これまで数多くの階層的符号化方式が提案されて来たが⁹⁾¹⁰⁾、ここではラプラシアンピラミッド符号化(Laplacian Pyramid Coding)¹⁰⁾と呼ばれる方式を紹介する。図 4 にその構成を示した。

送信側では、まず、原画像 G_0 を縦・横方向とも半分の周波数帯域に制限し、これを縦・横方向ともに 2:1 にサブサンプリングしたものをガウシアンプレーン G_1 とする。この処理をくり返し適用し、ガウシアンピラミッド $G_0 \sim G_{M-1}$ を得る。次に、各ガウシアンプレーン G_i を補間しながら縦・横方向ともに 2 倍に拡大し、これを 1 階層下のガウシアンプレーン G_{i-1} から差し引いて得られたものをラプラシアン

プレーン L_{i-1} とする。このようにして得られたラプラシアンピラミッド $L_0 \sim L_{M-1}$ を上位階層から順次符号化、伝送する。

一方、受信側では、上位階層より順に再生ガウシアンプレーンを補間しながら縦・横方向とも 2 倍に拡大し、これを 1 階層下の再生ラプラシアンプレーンに加算していく。この操作をくり返し適用することによって原画像と同一サイズの再生画像を得る。

ここで、帯域制限が理想的であるとすれば、各ラプラシアンプレーン L_i は図 5 に示すような空間周波数帯域を占有することになる。

ラプラシアンピラミッド符号化では、符号化サンプルの総数が原画像の画素数よりも多くなるため、階層数 M を大きくするにつれ DCT 符号化などの既存の符号化に比較して符号化性能が劣化する。DCT 符号化などでは符号化雑音電力(平均 2 乗誤差) D は符号化レート R b/pel を増大するにつれ、ほぼ次式

$$D \propto 2^{-2R} \quad (6)$$

の比例関係に従って減少して行くのに対し、ラプラシアンピラミッド符号化では階層数 M が充分大きいときは符号化雑音電力 D は符号化レート R を増大するにつれ、ほぼ次式の比例関係に従って減少するに過ぎない¹¹⁾。

$$D \propto 2^{-1.5R} \quad (7)$$

そこで、(7)式で示されるような性能劣化を改善し、(6)式の DCT 符号化などの既存の符号化と同等の符号化性能を実現するためのいろいろな工夫が考案

図 4 ラプラシアンピラミッド符号化の構成概念図

図5 空間周波数領域におけるラプラシアンプレーンの占有帯域（3階層の場合）

されている。

4. カラー静止画符号化国際標準化方式の概要 ——画像符号化の実用化時代へ向けて——

ISO と CCITT とは自然画像の国際標準化機関として1986年にJPEG (Joint Photographic Expert Group) を設立して共同作業を開始し、多くの候補アルゴリズムの中から適応的DCT符号化方式を国際標準化方式として採用するとともに、広範な応用分野における多様な要求に応えるためその機能を基本システム (Baseline System)、拡張システム (Extended System)、独立システム (Independent System) に分類し、標準化の優先度を明確にしている。

ここでは、最も優先度の高い基本システムについてその概要を述べる。JPEGにおける方式選定の経緯や拡張システムおよび独立システムについては、例えば文献12)などを参照されたい。

〔基本システムの概要〕

図6に基本システムの構成概念図を示した。以下に項目ごとにその概要について述べる。

① サンプルング、A/D、カラー変換

入力画像の階調を256レベル/色とし、色数は4色まで扱えるものとする。よって、CMYKも取り扱える。ただし、色座標の選び方は応用に任せている。また、最も解像度の低い色成分の縦や横方向の解像度を1とした場合、他の色成分の縦や横方向の解像度はその1倍、2倍、4倍とすることができ、しかも解像度比の選択は縦方向と横方向で独立に行える。

② DCT変換

8×8画素のサブブロック単位で2次元DCT変換を行う。

③ 変換係数の線形量子化

図6 国際標準化方式の基本システムの構成概念図

量子化ステップサイズは変換係数ごとに異なる。各変換係数に対する量子化ステップサイズは、量子化雑音に対する視感度の変換係数ごとの相違を考慮した8×8の量子化マトリックス要素を 2^S 倍した値とする。ここで、 S は0または正負の正数であり、スケーリングファクタと呼ばれる。この S の値により画質や発生データ量が制御される。また、量子化マトリックスにはデフォルトが用意されているが、独自の量子化マトリックスを受信側にダウンロードして用いることも可能である。

④ 直流変換係数の符号化

量子化後、直流変換係数については、近傍サブブロック間で1次元予測され、予測誤差がハフマン符号化される。この予測誤差は、入力画像が8ビットの場合、-2047から+2047の範囲に入る。そこで、予測誤差の量子化出力を表1に示すように16のグループに分け、まず予測誤差の所属するグループの識別番号SSSSをハフマン符号化し、続いてグループ内のいずれの値であるかを等長符号で表わす。表1の場合は等長符号の符号長はグループ識別番号SSSSの値と等しくなっている。

なお、デフォルトのハフマン符号が用意されているが、これを用いずに独自のハフマン符号をダウンロードすることもできる。

⑤ 交流直交変換係数の符号化

交流直交変換係数の量子化出力を図7に示すように、低周波成分から高周波成分へとジグザグ走査しながら符号化する。すなわち、量子化出力が0でない変換係数（有意変換係数と呼ぶ）はその値により表2に示すように15のグループに分類し、そのグループの識別番号をSSSSとする。また、直前の有意変換係数との間にはさまれた量子化出力が0の変換係数（非有意変換係数と呼ぶ）の個数をラン長NNNNとする。

ここで、表3に示すようにグループ識別番号SSSSとラン長NNNNとを組みにしてハフマン符号化し、

表 1 量子化後の直流変換係数の予測誤差のグループ分け

グループ識別番号 SSSS	量子化後の直流変換係数の予測誤差
0	0
1	-1, 1
2	-3, -2, 2, 3
3	-7, -4, 4, 7
4	-15, -8, 8, 15
5	-31, -16, 16, 31
6	-63, -32, 32, 63
7	-127, -64, 64, 127
8	-255, -128, 128, 255
9	-511, -256, 256, 511
10	-1023, -512, 512, 1023
11	-2047, -1024, 1024, 2047
12	-4095, -2048, 2048, 4095
13	-8191, -4096, 4096, 8191
14	-16383, -8192, 8192, 16383
15	-32767, -16384, 16384, 32767

図 7 交流直交変換係数のジグザグ走査

続いて表 2 においてグループ内のいずれの値であるかを等長符号で表わす。

表 2 の場合は等長符号の符号長はグループ識別番号 SSSS の値と等しくなっている。なお、ラン長 NNNN の値が 16 以上となった場合には、表 3 の R 16 という符号を送り、NNNN から 15 を引くという操作を残り 15 以下となるまでくり返すことによって対処する。また、サブブロック内のすべての有意変換係数の符号化を完了したならば、最後に必ず表 3 の EOB(End of Block)という符号を送る。

表 3 のハフマン符号にはデフォルトが用意されているが、これを用いずに独自のハフマン符号をダウンロードして用いることも可能である。

⑥ 同期確立符号とパラメータフィールド

講座 □ 画像情報圧縮の手ほどき

表 2 交流直交変換係数の量子化出力のグループ分け

グループ識別番号 SSSS	交流直交変換係数の量子化出力レベル
1	表 1 の定義と全く同一の定義
2	
⋮	
15	

表 3 交流直交変換係数のハフマン符号化

		グループ識別番号SSSS										
		0	1	2	•	•	•	14	15			
ラン長 NNNN	0	EOB	NNNNとSSSSとの 組合せに対する ハフマン符号									
	1	使用 し な い										
	•											
	•											
	•											
14												
	15	R16										

EOB：1 つのサブブロックの符号化の完了を表わす区切り符号

R16：ラン長が 16 以上の場合に使用する符号

ビット誤りが生じても同期の回復を可能とするために、また空間分割型の符号化・復号化並列処理を可能とするために、2 バイトの同期確立符号（マーカーコード）およびその処理法が規定されている。また、符号化に先立って各種の符号化パラメータなどを規定するためのパラメータフィールドが定義されている。

写真 2 には、拡張システムの機能として挙げられている階層的符号化手法を基本システムに導入した方式によって得られた符号化結果を示した。写真 2 では、まず原画像を縦・横方向ともに 4：1 にサブサンプリングした 1/16 の縮小画像を符号化して、0.08 bit/pel の再生画像を得る。次に、原画像を縦・横方向ともに 2：1 にサブサンプリングした 1/4 の縮小画像と 0.08 b/pel の再生画像を縦・横方向ともに 2 倍に拡大したものとの差分を符号化し、0.25 b/pel の再生画像を得る。最後に、この再生画像を縦・横方向ともに 2 倍に拡大した画像と原画像との差分を符号化し、0.75 b/pel、2.25 b/pel の再生画像を得ている。

写真 2 では、0.75 b/pel で十分な画品質の再生画像が得られ、2.25 b/pel の再生画像は原画像と全く見分けがつかない。

(a) 原画像

(b) 0.08 b/pel

(c) 0.25 b/pel

(d) 0.75 b/pel

(e) 2.25 b/pel

写真2 国際標準化方式による階層的符号化結果 (画像: Toy & Girl)

5. む す び

今回も含め、これまでの講座で紹介されて来た画像符号化アルゴリズムは、画像を不規則信号とみなして、その波形レベルでの統計的冗長度を削減するものであった。これに対して最近、エッジなどの画像の構造情報に着目して情報圧縮を行う構造抽出符号化¹³⁾¹⁴⁾が研究されている(本講座の第12回目で紹介される予定)。今後、この方面の研究が進展し、その成果が高符号化品質が要求される実用的な画像符号化の、よりいっそうの高効率化のために活用されて行くことを期待したい。

〔参 考 文 献〕

- 1) 吹抜敬彦：“静止画像の符号化”，信学誌，**67**，1，pp. 56-61 (Jan., 1984)
- 2) 安田，加藤：“静止画像符号化とその応用”，信学誌，**71**，7，pp. 669-675 (July, 1988)
- 3) J. O. Limb and C. B. Rubinstein：“Plateau Coding of the Chrominance Component of Color Picture Signals”，IEEE Trans., **COM-22**，6，pp. 812-820 (June, 1974)
- 4) 藤田，東，会津：“印刷における画像処理技術”，テレビ誌，**42**，2，pp. 98-107 (Feb., 1988)
- 5) 岸本，三ッ矢，星田，釜江：“静止画像のブロック符号化法”，信学論(B)，**J62-B**，1，pp. 17-24 (Jan., 1979)
- 6) E. J. Delp and O. R. Mitchell：“Image Compression Using Block Truncation Coding”，IEEE Trans., **COM-27**，9，pp. 1335-1342 (Sep., 1979)
- 7) R. E. Crochiere：“Sub-band Coding”，Bell System Tech. J., **60**，7，pp. 1633-1653 (Sep., 1981)
- 8) J. W. Woods and S. D. O'Neil：“Subband Coding of Images”，IEEE Trans., **ASSP-34**，5，pp. 1278-1288 (Oct., 1988)
- 9) 安田，高木，加藤，栗野：“階層的符号化法による静止画像の段階的伝送および表示”，信学論(B)，**J63-B**，4，pp. 379-386 (Apr., 1980)
- 10) P. J. Burt and E. H. Adelson：“The Laplacian Pyramid as s Compact Image Code”，IEEE Trans., **COM-31**，4，pp. 532-540 (Apr., 1983)
- 11) 斎藤，秋吉，原島：“ラプラシアン・ピラミッド符号化法の改善”，信学論(B)，**J71-B**，12，pp. 1517-1527 (Dec., 1988)
- 12) 安田 浩：“高能率符号化の標準化動向”，テレビ誌，**43**，10，pp. 1011-1019 (Oct., 1989)
- 13) M. Kunt, A. Ikonomopoulos, and K. Kocher：“Second Generation Image Coding Techniques”，Proc. of IEEE, **73**，4，pp. 549-574 (Apr., 1985)
- 14) S. Carlsson：“Sketch Based Coding of Gray Level Images”，Signal Process., **15**，1，pp. 57-83 (July, 1988)

さいとう たかひろ
斎藤 隆弘 昭和51年，東京大学工学部電気工学科卒業。56年，同大学院博士課程修了。同年，神奈川大学工学部電気専任講師。現在，同大学助教授。画像通信，信号・画像処理，医用応用などの研究に従事。工学博士。正会員。

やすだ ひろし
安田 浩 昭和47年，東京大学大学院博士課程修了。同年，NTTに入社。画像信号符号化技術，通信処理技術の研究に従事。現在，NTTヒューマンインターフェース研究所画像メディア研究部部长。工学博士。正会員。