カラー静止画像の国際標準 符号化方式 —JPEG アルゴリズム—

遠 藤 俊 明[†]

1. ま え が き

近年、カラー画像入出力装置の普及、カラー印刷物の普及など、画像メディアのカラー化が急速に進むにつれて、カラー静止画像の効率的な伝送・蓄積を可能とする高効率な符号化方式のニーズが高まってきている。

ISO IEC/JTC 1/SC 29/WG 10 と CCITT SG VIII CCIC の共同グループである JPEG (Joint Photographic Expert Group) は、カラー静止画像の高効率圧縮が可能で、しかも汎用性の高い符号化方式 (JPEG 方式) の国際標準化を進めており、現在、その最終段階を迎えている。本稿では最新の勧告草案[†]をもとに JPEG 方式を解説する。

2. 標準化の目的

JPEG は種々のサービス (アプリケーション) で利用できるカラー画像符号化方式の標準化を目的としている。新しいサービスにも対応できるように、以下の点が考慮されている。

- (1) Sequential build-up と Progressive build-up : Sequential build-up とは画像の上から下へ順次再生する方式である。一方、Progressive build-up とは少ない情報量で画質は不充分でも大まかな画像を瞬時に表示し、その後、その画質を向上させる方式である。利用者は、すぐに画像内容が理解できるように、例えば、高効率な画像データベース検索が可能となる。
- (2) 画質の選択性 : ユーザの要望に応じた画質の選択が可能である。
- (3) 可逆符号化 : 情報の劣化がない完全な画像再生が可能である。
- (4) 高効率符号化方式 : 通信コストを安く、蓄積メモリー量を軽減できる高効率な符号化方式である。

3. 標準方式の概要

3.1 標準方式のカテゴリー分け

JPEG 方式は図 1 に示すように大きく 2 つの圧縮方式に

分けられる。第 1 の方式は 2 次元 DCT (Discrete Cosine Transform) を基本とした方式であり、第 2 の方式は DPCM (Differential PCM) を用いた可逆符号化方式である。DCT 方式はさらにベースラインプロセスと拡張 DCT プロセスの 2 つに分類される。これらの方式と別に上記の方式を組合せて Progressive build-up を実現するハイアラキカルプロセスがある。表 1 に各プロセスの必須機能を整理する。

(1) ベースラインプロセス

ベースラインプロセスは、DCT 方式をサポートするすべての復号器が持たなければならない最少限の機能である。

(2) 拡張 DCT プロセス

拡張 DCT プロセスは、より広い領域のアプリケーションを満足させるために用意されたベースラインプロセスの付加機能である。代表的な機能として、Progressive build-up 機能がある。

図 1 JPEG 方式のカテゴリー分け

表 1 各符号化プロセスに必要な機能

ベースラインプロセス (すべての DCT を基本とした復号器に要求される機能)	
<ul style="list-style-type: none"> • DCT を基本とした処理 • 原画像 : 8 ビットサンプル (各コンポーネントに対して) • シーケンシャル • ハフマン符号化 : 2 つの AC および 2 つの DC テーブル 	
拡張 DCT プロセス	
<ul style="list-style-type: none"> • DCT を基本とした処理 • 原画像 : 8 ビットまたは 12 ビット • シーケンシャルまたはプロGRESSIVE • ハフマンまたは算術符号 : 4 つの AC または 4 つの DC テーブル 	
可逆プロセス	
<ul style="list-style-type: none"> • 予測処理 (DCT を基本とした処理ではない) • 原画像 : N ビットサンプル ($2 \leq N \leq 16$) • シーケンシャル • ハフマンまたは算術符号 : 4 つのテーブル 	
ハイアラキカルプロセス	
<ul style="list-style-type: none"> • マルチプルフレーム • 拡張 DCT または可逆プロセスの利用 	

[†] 国際電信電話株式会社 ネットワーク開発本部 開発部
“International Standard Coding Scheme for Color Still Images—JPEG Algorithm—” by Toshiaki Endoh (KDD, Network Development Headquarters, Tokyo)

図2 ベースラインプロセスの基本ブロック図

(3) 可逆プロセス

可逆プロセスは効率良く原画像を完全に再生することができる可逆符号化である。DCT方式は可逆符号化に適した方式ではないため、DCT方式を補完する目的でDPCM方式を用いた可逆符号化方式を定めた。この方式は、上記に示すDCTを用いた符号化とは独立のアルゴリズムである。

(4) ハイアラキカルプロセス

Progressive build-upを実現するひとつの方法で、最初に解像度の粗い画像を符号化し、その後に、徐々にその解像度を向上させる方式である。

3.2 ベースラインプロセス

(1) 基本ブロック構成

図2にベースラインプロセスの基本ブロックダイアグラムを示す。ベースラインプロセスはSequential build-upのみをサポートする。入力画像は符号化器においてDCT変換、量子化、エントロピー符号化が行われ、符号化データが出力される。復号化器では符号化データに対してエントロピー復号化、逆量子化、逆DCT(IDCT)が行われ、復号画像が出力される。以下、ベースラインプロセスの符号化手順を示す。

(2) DCT変換

入力画像のビット精度は8ビットである。入力画像は8×8画素のブロックに分割される。そのブロック内の画素の値を P_{xy} と示す。その分割された8×8画素のブロックに対して次式による2次元DCT変換を行う。

$$S_{uv} = \frac{1}{4} C_u C_v \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 (P_{xy} - 128) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{16}$$

ただし、 x, y = ブロック内の画素の位置

u, v = DCT係数の位置

$$C_u, C_v = \frac{1}{\sqrt{2}}; u, v = 0$$

= 1; その他

変換後の係数 S_{00} はDC係数と呼ばれ、残りの63個の係数はAC係数と呼ばれる。

図3 DC係数の符号化

表2 DC係数の差分値のグループ化

SSSS グループ番号	DC 差分値	付加ビット数
0	0	0
1	-1, 1	1
2	-3, -2, 2, 3	2
3	-7, -4, 4, 7	3
4	-15, -8, 8, 15	4
5	-31, -16, 16, 31	5
6	-63, -32, 32, 63	6
7	-127, -64, 64, 127	7
8	-255, -128, 128, 255	8
9	-511, -256, 256, 511	9
10	-1023, -512, 512, 1023	10
11	-2047, -1024, 1024, 2047	11
12	-4095, -2048, 2048, 4095	12
13	-8091, -4096, 4096, 8091	13
14	-16383, -8192, 8192, 16383	14
15	-32767, -16384, 16384, 32767	15

(3) 量子化

係数 S_{uv} は量子化テーブル Q_{uv} を用いて係数位置毎に異なるステップサイズで線形量子化される。量子化された係数 r_{uv} は次式で求まる。

$$r_{uv} = \text{round}(S_{uv}/Q_{uv})$$

roundとは、最も近い整数への整数化を意味する。

量子化テーブル Q_{uv} を変化させることにより、画質と符号量を制御することができる。量子化テーブルは2個設定でき、色成分毎に切り替えて用いることができる。デフォルトの量子化テーブルはJPEG標準では規定されない。通常、符号化データのヘッダ情報に使用した量子化テーブルを付加して伝送する。受信側ではその量子化テーブルを用いて逆量子化を行う。ただし、アプリケーションごとにデフォルトの量子化テーブルを定めることができる。その場合、デフォルトの量子化テーブルを用いている限り量子化テーブルを伝送する必要はない。

(4) エントロピー符号化

量子化された r_{uv} 係数はエントロピー符号化されて符号データが出力される。エントロピー符号化としてハフマン符号を用いる。DC係数(r_{00})とAC係数(r_{00} 以外)は符号化方法が異なる。

(a) DC係数の符号化 DC係数のハフマン符号化

図 4 AC 係数の符号化

図 5 ジグザグスキャン

のブロックダイアグラムを図3に示す。1つ前に符号化した同一色成分のブロックのDC係数との差分(ΔDC_i)を符号化する。表2に従って、DC係数との差分値がどのグループに属するか求める。DC差分値はこのグループ番号(SSSS)を示すハフマン符号と付加ビットで表現される。例えば、グループ2には8個のDC差分値が含まれるので3ビットの付加ビットで符号化される。

- (b) AC 係数の符号化 AC 係数のハフマン符号化のブロックダイアグラムを図4に示す。AC 係数は図5に示すように、まずジグザグスキャンによって1次元に並べ変えられた AC 係数は、連続する0の係数(無効係数)の長さを示すラン長と、0以外の係数(有効係数)値を用いて符号化される。すなわち、無効係数のラン長(NNNN)と有効係数のグループ番号(SSSS)とを用いてハフマン符号化する。NNNN と SSSS の組合せに対しハフマン符号が割当てられている。DC 係数の符号化と同様に SSSS は有効係数が属するグループを限定するだけで、その中の特定の値を示すために付加ビットが用いられる。

図6に2次元ハフマン符号化の構成を示す。ブロック内の最後の AC 係数が0の時には、最後の有効係数に対する符号の直後に EOB(End of Block)をつけ、ブロックの符号化を終了する。また無効係数のラン長が15を越える場合には、16の無効係数のラン長を表す ZRL を残りのラン長が15以下になるまで繰り返し符号化した後に、残りのラン長を NNNN として符号化する。

ハフマン符号テーブルは2個設定でき、色成分毎に切り

NNNN : 0 から 15 の無効係数のラン長を示す
SSSS : 有効係数のグループ番号

但し SSSS=0 の場合は
NNNN=0 : EOB
=1-14 : 拡張用 (EOB のラン)
=15 : 16 の無効係数ラン
(16 以上のランはこれを繰り返す)

図 6 2次元ハフマン符号化の構成

替えて用いることができる。デフォルトのハフマン符号テーブルは量子化テーブルと同様に JPEG 標準では規定されない。通常、符号化データのヘッダ情報に使用したハフマン符号テーブルを付加して伝送する。ハフマン符号テーブルの転送は符号テーブルそのものを送るのではなく、この符号テーブルを生成するための情報として次の2つの情報を送る。

- (a) 何ビット長の符号が何個あるかというテーブル。
ただし、ハフマン符号の最長ビット長は16。
(b) 発生頻度順に並べた符号化要素。(DC 係数なら SSSS, AC 係数なら NNNSSSS)

受信側ではこれらの情報をもとに、ハフマン符号テーブルを生成できる必要がある。また、量子化テーブルと同様にアプリケーションごとにデフォルトのハフマン符号テーブルを定めることができる。

3.3 拡張 DCT プロセスのアルゴリズム

拡張 DCT システムの大きな特長は Progressive build-up 機能である。Progressive build-up を実現する次の3つの方式が定められている。Spectral Selection(SS), Successive Approximation(SA)と Hierarchical Mode(HM)の3つである。SS および SA 方式は DCT の係数符号化に工夫を施し、Progressive build-up を行う。SS および SA 方式は拡張 DCT プロセスに定められている。ベースラインプロセスでは、1つのブロックに対して量子化された64個の DCT 係数がすべて符号化されてから次のブロックの DCT 係数が符号化される。それに対して、SS および SA 方式では、1つのブロックの DCT 係数を複数のスキャンに分割して送る。

SS 方式は、64 個の DCT 係数を複数のグループ(Band)に分割し、第1スキャンで画像内全ブロックに対して最初の Band のみを符号化し、以後のスキャンで残りの Band を1つずつ符号化する方式で、DCT 係数の周波数成分を徐々に向上させる符号化である。

SA 方式は、DCT の全係数に対してまず MSB から複数ビットを画像内全ブロックに対して符号化し、以後のス

キャンで残りのLSB側のビットを1ビット/スキャンで符号化していく方式で、DCT係数のビット精度を徐々に向上させる符号化である。

SSとSA方式を組合せて用いることも可能である。

Progressive build-up機能の他に、拡張DCTプロセスに認められている主な機能を以下に示す。

- (1) ハフマン符号テーブルは4個設定できる。これは、印刷画像のような4色(YMCK)利用を想定している。
- (2) ビット精度は最大12ビットまでサポートできる。
- (3) エントロピー符号化としてハフマン符号だけでなく算術符号⁴⁾も利用できる。一般的に、算術符号の方が符号化効率が高い。

3.4 可逆プロセスのアルゴリズム

DPCMを用いた可逆符号化方式である。符号化画像の近傍に位置する、すでに符号化を終えた画像を用いて予測値を得る。その予測値と符号化画像値との差分値をエントロピー符号化する。エントロピー符号化としてハフマン符号だけでなく算術符号も利用できる。ハフマン符号テーブルは4個設定できる。

ビット精度は2ビットから16ビットまでサポートする。

3.5 ハイアラキカルプロセスのアルゴリズム

SSとSA方式の他にProgressive build-up表示を実現する方法としてハイアラキカルプロセスがある。これは解像度の向上によるProgressive build-up表示を実現する方法である。入力画像を $1/2$, $1/4$, $1/8$, ..., $1/2^n$ とピラミッド的に縮小し、ピラミッドの各階層でDCT方式を用いて符号化する。まず、最も縮小した画像 $1/2^n$ を符号化し、次にこの符号に対する復号画像を2倍に拡大した画像 $1/2^{(n-1)}$ と入力画像を同一サイズに縮小させた画像との差分画像を符号化する。この処理を画像サイズが入力画像と等しくなるまで繰り返す。

4. む す び

最新の勧告草案¹⁾をもとに、JPEG方式の基本であるベースラインプロセスを中心にアルゴリズムを解説した。ISO/IECでは現在、DIS(Draft International Standard)の段階で、順調に進めば本年早々にIS(International Standard)になる予定である。CCITTでは本年4月に加速勧告化手続きに入ることが認められた。

現在、JPEGではハードウェアおよびソフトウェアで実装されたJPEGアルゴリズムの適合試験(Compliance Testing)²⁾に関する勧告草案の作成を進めている。ISO/IECでは現在CD(Committee Draft)の段階である。

紙面の制限のため充分な解説ができなかった点もある。さらに興味のある方は参考文献^{1)~6)}を参考にして頂きたい。

(1992年6月3日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) ISO/IEC: "Digital Compression Coding of Continuous-tone Still Images Part I: Requirements and Guidelines", DIS 10918-1 (Jan. 1992)
- 2) CCITT SG VIII: "Draft Rec. T.83: Digital Compression Coding of Continuous-tone Still Images Part II: Compliance Testing", COM VIII-172 (Jan. 1992)
- 3) 大町, 小野: "カラー静止画像符号化国際標準方式(JPEG)の概説(その1)", 画電会誌, **20**, 1, pp.50-58 (Feb. 1991)
- 4) 大町, 小野: "カラー静止画像符号化国際標準方式(JPEG)の概説(その2)", 画電会誌, **20**, 2, pp.113-120 (Apr. 1991)
- 5) 遠藤: "カラー静止画像の国際標準符号化方式—JPEGアルゴリズム—", インターフェース, No.12, pp.160-182 (Dec. 1991)
- 6) 安田編著: "マルチメディア符号化の国際標準", 丸善

遠藤 俊明 (とんどう としあき) 昭和56年、九州大学大学院電子工学専攻修士過程修了。同年、KDDに入社。以来、研究所にて静止画像符号化、テレマティクス通信に関する研究に従事。現在、ネットワーク開発本部開発部研究開発課担当課長。工学博士。