

第一部

情報の表現の研究—動画像の圧縮 (MPEG)— A Compression of Movie Pictures - MPEG

加賀谷由佳子

Yukako KAGAYA

あらまし コンピュータが文字データばかりでなく、画像や音声を扱うことが日常的となってきた現代において、世界中で標準方式として普及している、動画像の圧縮符号化方式 (MPEG) についての解説を行なう。MPEG は 1987 年に結成された専門家グループで、その MPEG の文字がそのまま国際標準方式の名前となっている。また、圧縮構成法の 1 つである「離散コサイン変換」という数学的な変換についての圧縮アルゴリズムを解説する。

キーワード 圧縮, MPEG, 離散コサイン変換

1 はじめに

1.1 背景 [1]

1980 年代、蓄積装置 CD (Compact Disc) の普及で、メディアを画像データの蓄積装置に使う試みは CD-ROM の規格化をはじめ、急速に発展した。そして、1987 年の末頃から動画を CD に入れたいという発想により、蓄積用動画像符号化の検討が開始されることになった。その専門家グループを MPEG (Moving Picture Expert Group) と呼び、MPEG の文字がそのまま国際標準方式の名前となっている。

1.2 動機

近年のコンピュータやインターネットの普及はめざましく、ネットワークと情報処理はますます身近なものになってきた。また、コンピュータは文字データだけでなく、画像や音声を扱うこともごく普通になってきた。このように、画像情報が日常的なものになるとともに、

その扱いを容易にするための情報量削減手段として、画像情報の圧縮符号化技術が発達してきた。その中でも、動画像の圧縮符号化方式「MPEG」は世界レベルでの標準方式として広く普及しつつあり、その中でも画像圧縮の圧縮構成法の 1 つである「離散コサイン変換」に注目した。

1.3 目的

本研究では、次の事を取り上げる。

①動画像圧縮の全体的解説

動画像は、画面内での被写体の位置が少しづつずれている画像を連続的に表示することにより構成されている。その圧縮について、構成法の利用の理解を深める。

②圧縮アルゴリズムの詳細の解説

①における圧縮構成法の 1 つである離散コサイン変換 (DCT : Discrete Cosine Transform) という数学的変換についてのアルゴリズムを解説する。

2 準備 [3]

2.1 用語

圧縮 … データの蓄積や交換においてその実際的な量（ビット数）を減らす方法標準的に使われているものとして、静止画像の圧縮符号化方式としての JPEG，動画像の圧縮符号化方式としての MPEG などがある。

MPEG … 動画像の圧縮符号化方式

NTSC 規格

- … National Television System Committee
- 米国標準テレビ画面フォーマット，
- 走査線 525 本

PAL 規格 … Phase Alternation by Line

- ヨーロッパ標準テレビ画面フォーマット，
- 走査線 625 本

離散コサイン変換

(DCT : Discrete Cosine Transform)

- … 圧縮技術の 1 つで、画素値で与えられる画像情報を省略しやすいような形態に変換する方法

DCT 係数 … 周波数成分の大きさを表す値

3 動画像 [3]

3.1 デジタル画像信号の概要

画像を電気信号に変換するには図 1 のように小領域に分割して、その小領域ごとに色を読み取る。そして、その色を矢印に示すように左上から右下に向けて順次

デジタル信号で表現する。

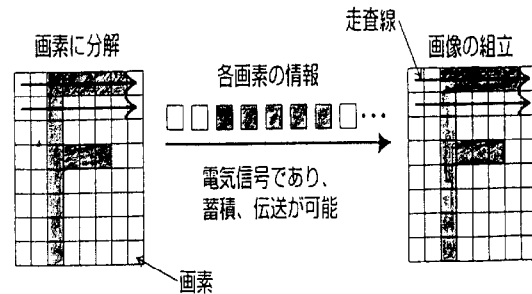


図 1 画像の画素への分解と組立

図 1 の場合、大きく F という文字が描かれた白と黒だけの画像である。白を 1，黒を 0 で表示すれば画像を 1 と 0 だけで表現できる。この 1，0 の系列を電気信号で表現すれば記憶したり、あるいは通信回路を通じて伝送できる。このとき画像を分割した小領域を画素という。また矢印の順に画素を選択することを「走査」という。

3.2 動画像信号の構成

動画像は、画面内での被写体の位置が少しずつれている画像を連続的に表示することにより構成されている。また、動画像の情報量は、縦方向の画素数と横方向の画素数の掛け算で表される 1 画面当たりの画素数に、さらに 1 秒当たりの画像枚数を掛けたものである。1 画素は 8 ビットで構成されているので実際の動画像の情報量は全画素数の 8 倍となる。そこで、放送や通信など伝送を目的とした標準のテレビ信号では、画素数を増大することなく、画像のきめ細かさや動画像の動きの滑らかさを同時に満たす工夫をしている。

4 MPEG [4][5]

4.1 MPEG の現在の状況

- ① MPEG - 1 : 家庭で視聴する程度の画像品質で 1.5M b / s 程度の符号化。(1992 年仕様確定)
- ビデオ CD に適用されている (CD-ROM に記録した MPEG-1 動画像

を再生する側が復号側である.)

< MPEG - 1 の入力画像信号形式 >

トップフィールドのみを入力画像とし、ボトムフィールドの信号は初めから省略している。また、1ライン当たりの画素数は、デジタルテレビ信号の符号化パラメータの1つとして、NTSCでもPALでも720画素と決められている。MPEG - 1では、高圧縮実現のため、これを1画素ずつ間引くことにより、横方向の画素数を360にしている。

- ・NTSC規格 (525 / 60方式)
 - 1フレーム当たり 525 ライン、有効ライン数 480、
 - 1秒当たり 60 フィールド
 - 縦方向の画素数 (ライン数) は 240
 - よって、360 画素 × 240 ライン × 29.97 フレーム / 秒
- ・PAL規格 (625 / 50方式)
 - 1フレーム当たり 625 ライン、有効ライン数 576、
 - 1秒当たり 50 フィールド
 - 縦方向の画素数 (ライン数) は 288
 - よって、360 画素 × 288 ライン × 25 フレーム / 秒

② MPEG - 2 : 通信, 放送, 蓄積用, また, 標準テレビおよび将来の高品質テレビ (HDTV) 用に共通な符号化方式。通信速度は適用対象に応じて, 設定可能。(1994年仕様確定) デジタルビデオディスク (DVD), 国内のハイビジョン放送, 各国のデジタル放送に適用されている。

< MPEG - 2 の入力画像信号形式 >

- I MPEG - 1 のようにトップフィールドのみを入力画像信号とする方法
- II トップフィールドとボトムフィールドの両画像を入力信号とする方法

の2種類ある。

- ・NTSC規格
 - Iの方法
 - 360 画素 × 240 ライン × 29.97 フレーム / 秒
 - IIの方法

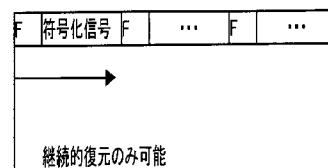
720 画素 × 480 ライン × 29.97 フレーム / 秒

- ・PAL規格
 - Iの方法 360 画素 × 288 ライン × 25 フレーム / 秒
 - IIの方法 720 画素 × 576 ライン × 25 フレーム / 秒

- ③ MPEG - 3 : 1992年に自動消滅。
- ④ MPEG - 4 : 低ビットレート符号化方式。携帯用TV電話や、携帯用情報端末などへの新たな需要を喚起した。Version1は、1998年12月のローマ会議で最終原案が承認された。携帯型の映像再生 / 録画端末、TV電話、ビル等の遠隔保安監視などに適用される予定である。

4.2 MPEG への要求機能

動画像圧縮のためには、入力画像信号と予測画像信号との差分信号を伝送するという、フレーム間予測符号化が基本である。このとき、復元側はあらかじめ復元されている予測画像信号と、送られてきた差分信号とで原画像を復元する。すなわち、図2のように符号化信号が連続的に受信される場合にのみ、画像の再生が可能である。



F:フレーム間符号化符号

図2

しかし、蓄積用符号化のMPEGとしては、早送り機能と逆送り機能が必要である。そこで、MPEGにはIピクチャ、Pピクチャ、Bピクチャの3種類がある。

- ・Iピクチャ
 - Iピクチャは過去や未来の画像信号を予測信号として使用せず、図3のようにIピクチャ符号

化信号の先頭を表すフレーム内符号化符号をみつけて、その画像を復元し、その後はこの I ピクチャをフレーム間の予測画像として用いる。よって、画像の復元が可能になる。

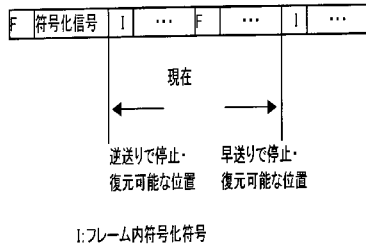


図 3

・P ピクチャ

P ピクチャは動き補償予測で前方向予測を行なう。これは、符号化済みの過去の画像信号のみを予測信号として用いる。

・B ピクチャ

B ピクチャは動き補償予測で双方向予測を行なう。これは、過去の画像信号だけでなく、未来の画像信号も予測信号として用いる。

以上より、図 4 が MPEG の早送り・逆送りのイメージ図である。早送りにおいて、 $I \rightarrow P \rightarrow P \rightarrow \dots \rightarrow I$ を $I \rightarrow I \rightarrow \dots$ のように P ピクチャをとばしてやればもっと速い早送りが可能になる。

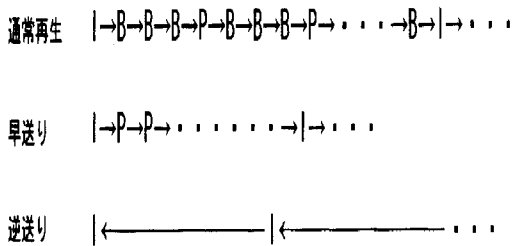


図 4

このように MPEG では一定周期に I ピクチャを挿入する。この I ピクチャはフレーム内符号化で処理されるため、フレーム間符号化より符号化効率が悪く、発生情報量も多くなる。よって、I ピクチャをどの程度の割合で挿入するかは、符号化側の設計者に任せられている。

4.3 MPEG の基本構成

MPEG の最も重要な点は、動画像圧縮のための早送り・逆送りの実現である。そのための 3 種類の P ピクチャ、B ピクチャ、I ピクチャを符号化するため、MPEG では図 5 のような構造を持っている。図 5 において、予測用画像メモリの中には、既に符号化された過去の複数フレーム分の画像信号が記憶されている。また、入力画像は一旦時間調整用画像メモリに数フレームにわたって記憶される。

・P ピクチャを符号化する場合

予測用画像メモリの出力を入力画像に対する予測信号として、前方向予測を行ない、予測誤差を得る。

・B ピクチャを符号化する場合

時間調整用画像メモリから符号化すべき画像を読み出し、この画像に対しての過去および未来のフレームの受信画像に相当する画像を予測用画像メモリの中から読み出し、これらを予測画像として双方向予測を行ない、予測誤差を得る。時間調整用画像メモリに記憶されている数フレーム前の画像を基準に処理すれば、それより後のフレームは未来の画像ということになり、予測画像メモリ中の未来の画像との比較が可能になる。

・I ピクチャを符号化する場合

入力画像をそのまま使用する。

切替回路は、I、P、B ピクチャに応じてそれぞれの信号を切り替えられたそれぞれの信号は DCT により DCT 係数に変換される。この DCT 係数がエントロピー符号化により、発生確率の高い信号には短い符号を、低い信号には長い符号を割り当てられ、符号化信号として蓄積・伝送される。

また、復元側と同じ予測信号を作るためには、図 5 に示すように、符号化側でも DCT 係数を逆 DCT により予測誤差信号に変換し、得られた予測誤差を用いて、I、P、B ピクチャを復元し、続く入力画像のための予測信

号として予測用画像メモリに蓄積する。

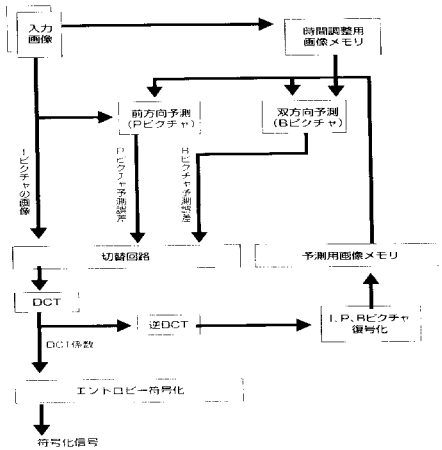


図5 MPEGの基本構成

5 離散コサイン変換 (DCT : Discrete Cosine Transform) [2][6]

離散コサイン変換は 1974 年に, N.Ahmed, T.Natarajan, K.R.Rao らにより IEEE で発表された画像圧縮法である。

次に示すような演算を行なうことにより, 画素値と等価な情報量の DCT 係数が与えられる。各画素の明るさは 0 ~ 255 の正の整数で表され, 0 は黒, 255 は白, その他は灰色を表す。MPEG では, 8 × 8 の 64 画素を 1 ブロックとして, この単位で DCT 係数値を符号化する。また, 受信側では DCT の逆演算 (逆 DCT) を行ない, DCT 係数から画素値を求め, 原画像を再現する。

5.1 DCT の演算式

画素数 $N \times N$ のデジタル画像情報が与えられたとき, DCT の演算式は (1) のようになる。すなわち, 横方向位置 x , 縦方向位置 y の画素値を $pixel(x,y)$ とするとき, 周波数軸上での横方向位置 i , 縦方向位置 j の DCT 係数は $DCT(i,j)$ で与えられる。

$$DCT(i,j) = \frac{2}{N} C(i) C(j) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} pixel(x,y) \cos\left[\frac{(2x+1)i}{2N}\pi\right] \cos\left[\frac{(2y+1)j}{2N}\pi\right] \quad (1)$$

$$C(x) = \begin{cases} 1/\sqrt{2} & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases}$$

逆に, DCT 係数 $DCT(i,j)$ が与えられたとき, 画素値 $pixel(x,y)$ を求める逆 DCT の演算式は (2) のようになる。

$$pixel(x,y) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} C(i) C(j) DCT(i,j) \cos\left[\frac{(2x+1)i}{2N}\pi\right] \cos\left[\frac{(2y+1)j}{2N}\pi\right] \quad (2)$$

$$C(x) = \begin{cases} 1/\sqrt{2} & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases}$$

5.2 画素値と DCT 係数 (2 × 2 画素の例)

DCT 演算式の (1), (2) を実際に画素数 4 の画像で考えてみる。下の図 6 は画素値がそれぞれ 200, 150, 100, 70 の画像の例である。

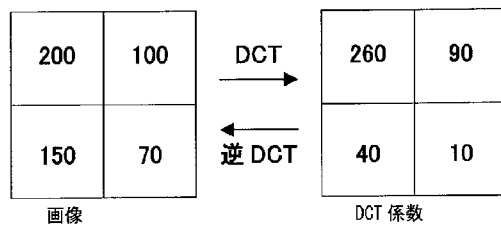


図6

・ DCT

2 × 2 画素なので, (1) の式において $N = 2$ とおく。すると

$$DCT(i,j) = C(i) C(j) \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 pixel(x,y) \cos\left[\frac{(2x+1)i}{4}\pi\right] \cos\left[\frac{(2y+1)j}{4}\pi\right]$$

そして, 次のように DCT を行ない, DCT 係数が得られる。

$$DCT(0,0) = 1/2 \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 pixel(x,y)$$

$$\begin{aligned}
 &= 1/2 (200+100+150+70) \\
 &= 260 \\
 \text{DCT}(0,1) &= 1/\sqrt{2} \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 \text{pixel}(x,y) \cos\left(\frac{(2y+1)}{4}\pi\right) \\
 &= 1/\sqrt{2} \{ \text{pixel}(0,0) \cos(\pi/4) \\
 &\quad + \text{pixel}(0,1) \cos(3\pi/4) \\
 &\quad + \text{pixel}(1,0) \cos(\pi/4) \\
 &\quad + \text{pixel}(1,1) \cos(3\pi/4) \} \\
 &= 1/\sqrt{2} \{ 200 \times 1/\sqrt{2} + 150 \times (-1/\sqrt{2}) \\
 &\quad + 100 \times 1/\sqrt{2} + 70 \times (-1/\sqrt{2}) \} \\
 &= 40
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{DCT}(1,0) &= 1/\sqrt{2} \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 \text{pixel}(x,y) \cos\left(\frac{(2x+1)}{4}\pi\right) \\
 &= 1/\sqrt{2} \{ \text{pixel}(0,0) \cos(\pi/4) \\
 &\quad + \text{pixel}(0,1) \cos(\pi/4) \\
 &\quad + \text{pixel}(1,0) \cos(3\pi/4) \\
 &\quad + \text{pixel}(1,1) \cos(3\pi/4) \} \\
 &= 1/\sqrt{2} \{ 200 \times 1/\sqrt{2} + 150 \times 1/\sqrt{2} \\
 &\quad + 100 \times (-1/\sqrt{2}) + 70 \times (-1/\sqrt{2}) \} \\
 &= 90
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{DCT}(1,1) &= \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 \text{pixel}(x,y) \cos\left(\frac{(2x+1)}{4}\pi\right) \\
 &\quad \cos\left(\frac{(2y+1)}{4}\pi\right) \\
 &= 1/\sqrt{2} \{ \text{pixel}(0,0) \cos(\pi/4) \cos(\pi/4) \\
 &\quad + \text{pixel}(0,1) \cos(\pi/4) \cos(3\pi/4) \\
 &\quad + \text{pixel}(1,0) \cos(3\pi/4) \cos(\pi/4) \\
 &\quad + \text{pixel}(1,1) \cos(3\pi/4) \cos(3\pi/4) \} \\
 &= 200 \times 1/\sqrt{2} \times 1/\sqrt{2} + 150 \times 1/\sqrt{2} \\
 &\quad \times (-1/\sqrt{2}) + 100 \times (-1/\sqrt{2}) \times (-1/\sqrt{2}) \\
 &\quad + 70 \times (-1/\sqrt{2}) \times (-1/\sqrt{2}) \\
 &= 10
 \end{aligned}$$

以上より、260, 40, 90, 10 が DCT 係数である。

・逆 DCT

また、逆に DCT 係数から画素値を求める。よって、

(2) の式は

$$\text{pixel}(x,y) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} C(i)C(j) \text{DCT}(i,j) \cos\left(\frac{(2x+1)i}{2N}\pi\right) \cos\left(\frac{(2y+1)j}{2N}\pi\right)$$

となる。

$$\begin{aligned}
 \text{pixel}(0,0) &= \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 C(i)C(j) \text{DCT}(i,j) \cos(i\pi/4) \cos(j\pi/4) \\
 &= C(0)C(0)\text{DCT}(0,0) \\
 &\quad + C(0)C(1)\text{DCT}(0,1)\cos(\pi/4) \\
 &\quad + C(1)C(0)\text{DCT}(1,0)\cos(\pi/4) \\
 &\quad + C(1)C(1)\text{DCT}(1,1)\cos(\pi/4)\cos(\pi/4) \\
 &= 1/2 (260+90+40+10) \\
 &= 200
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{pixel}(0,1) &= \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 C(i)C(j) \text{DCT}(i,j) \cos(i\pi/4) \cos(3j\pi/4) \\
 &= C(0)C(0)\text{DCT}(0,0) + C(0)C(1)\text{DCT}(0,1)\cos(3\pi/4) \\
 &\quad + C(1)C(0)\text{DCT}(1,0)\cos(\pi/4) \\
 &\quad + C(1)C(1)\text{DCT}(1,1)\cos(\pi/4)\cos(3\pi/4) \\
 &= 1/2 (260-90+40-10) \\
 &= 100
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{pixel}(1,0) &= \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 C(i)C(j) \text{DCT}(i,j) \cos(3i\pi/4) \cos(j\pi/4) \\
 &= C(0)C(0)\text{DCT}(0,0) \\
 &\quad + C(0)C(1)\text{DCT}(0,1)\cos(\pi/4) \\
 &\quad + C(1)C(0)\text{DCT}(1,0)\cos(3\pi/4) \\
 &\quad + C(1)C(1)\text{DCT}(1,1)\cos(3\pi/4)\cos(\pi/4) \\
 &= 1/2 (260+90-40-10) \\
 &= 150
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{pixel}(1,1) &= \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 C(i)C(j) \text{DCT}(i,j) \cos(3i\pi/4) \cos(3j\pi/4) \\
 &= C(0)C(0)\text{DCT}(0,0) \\
 &\quad + C(0)C(1)\text{DCT}(0,1)\cos(3\pi/4) \\
 &\quad + C(1)C(0)\text{DCT}(1,0)\cos(3\pi/4) \\
 &\quad + C(1)C(1)\text{DCT}(1,1)\cos(3\pi/4)\cos(3\pi/4) \\
 &= 1/2 (260-90-40+10) \\
 &= 70
 \end{aligned}$$

以上より、200, 100, 150, 70 の画素値が求められた。

6 DCT 係数の量子化 [3]

6.1 DCT 係数

185	177	172	167	161	156	151	150
183	173	167	161	156	149	149	147
183	172	165	159	148	145	145	144
186	172	165	157	145	143	144	142
194	174	159	150	144	142	140	138
199	177	160	152	142	140	149	147
197	178	158	150	140	132	127	126
190	170	153	145	135	129	112	112

図7 画信号例

57	49	44	39	33	28	23	22
55	45	38	33	28	21	21	19
55	44	37	31	20	17	17	16
58	44	37	29	17	15	16	14
66	46	31	22	16	14	12	10
71	49	32	24	14	12	21	19
69	50	30	22	12	4	-1	-2
62	42	25	17	7	1	-16	-16

図8 レベルシフトした画信号

DCTの準備として、画像は8×8の64画素にブロック分割され、各画素は画素数を-128～127の範囲にするためにレベルシフトが行なわれる。レベルシフトは各画素値から128を差し引く。図7は図8のようになる。

224	130	40	16	11	8	-2	-1
41	-34	-14	-10	-4	0	-1	3
-7	10	-12	2	2	-5	1	-1
22	-7	9	2	0	0	-3	2
-8	4	-6	3	-1	-2	4	-1
5	2	-1	-4	0	1	-1	-1
4	-5	3	-1	0	2	0	-1
-5	5	-2	3	0	-2	1	-1

図9 DCTにより得られるDCT係数

図9は図8の画像をDCTしたものである。通常の画像では高い周波数成分は少ないので、DCT係数は、左上が大きく右下が小さい結果になる。また、図7のように、DCT前には普通1画素8ビット(0～255の256レベル)で表されている。このとき、各DCT係数の絶対値は最大でも1024を超えることはなく、-1024から1023の間の数になるので、小数点以下を四捨五入すると11ビットの整数で表すことができる。しかし、これでは元の画像が8ビットだったのに対し、11ビットになるわけだから符号量が増えてしまう。そこで、1画素あたりの符号量を少なくするために画品質の劣化を最

小限にして情報の一部を省略する。

28	22	8	2	1	0	0	0
7	-6	-2	-1	0	0	0	0
-1	1	-2	0	0	0	0	0
3	-1	1	0	0	0	0	0
-1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

図10 量子化した近似DCT係数

6.2 DCT係数量子化の考え方

DCTの目的は1画素あたり8ビットの情報をもっと少ない符号量で表現することだから、DCT係数1つあたりの符号量を8ビット以下にする必要がある。逆に、もともと8ビットなのだから8ビット程度まで情報を減らしても画質はほとんど劣化しない。11ビットの情報を8ビットに減らすには、 $2^{11}/2^8 = 2^3 = 8$ だから、各係数を8で割ればよい。この処理は一定間隔ごとに代表値をとるので、「量子化」とよばれる。また、代表値の間隔を「量子化ステップ」とよぶ。この例の場合は、量子化ステップ8で、量子化による誤差は、±4以下になる。

7 画像の情報省略と符号化・復号化の概要 [3]

7.1 符号化

符号化の各段階を整理すると次のようになる。図11を参照。

- ① 画像を8×8のブロックに分割し、1ブロックの画像(A)を得る。
- ② 0～255の画素値をレベルシフトして、-128から127の信号に変換する(B)。
- ③ DCTのより、DCT係数を求める(C)。
- ④ DCT係数を量子化(D)。

- ⑤ (D) の値をエントロピー符号化 (出現頻度の多いものに短い符号を割り当てる方法) することにより, 符号化信号 (圧縮データ) が得られる.

7.2 復号化

受信側での復号過程はつぎのようになる. 図 1 2 を参照.

- ① 符号化信号を復号して, 量子化 DCT 係数 (D) の値を復号する.
- ② (D) の信号を逆量子化し, DCT 係数を得る.
- ③ (C) を逆 DCT して, (B) のようにレベルシフトした画素値が復元する.
- ④ (B) に逆レベルシフトの値 128 を加えて, (A) の画像を得る.
- ⑤ 最後に各ブロックごとの画像を合成して, 復号画像を得る.

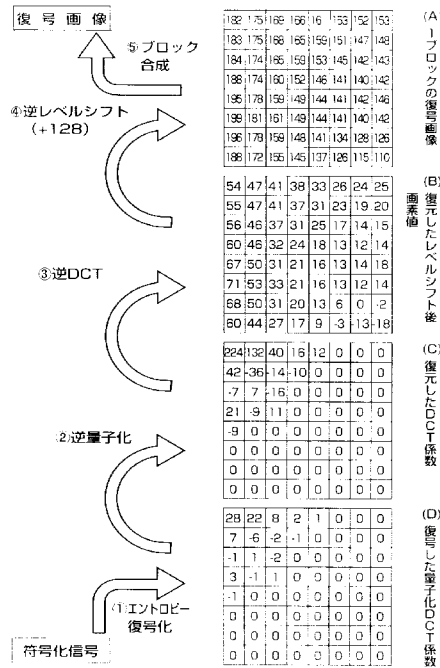


図 1 2 画像の復号化過程

図 1 1, 図 1 2 のそれぞれの (A) の画像を比べると DCT 係数を近似値に置き換え, DCT 係数の多くが 0 になっているにもかかわらず, 明るさを表す画素値の誤差はほとんど ± 2 以下であり, よく一致している様子がわかる.

8 おわりに

本研究において, MPEG の現状と圧縮アルゴリズムについて解説をした. 現在, MPEG (グループ) は, 20 カ国 300 人の専門家による年 4 回程度の会合を開催している. また, MPEG-4 に関しては, 21 世紀の符号化方式として標準化活動が進められている. 今後も, 画像情報がより日常的になるのと同時に, 常に最新の技術を取り入れて進化しつづけることが期待される.

また, この本研究のほかに, MPEG のデコーディングシステムについての研究も行ない, デコードの効率化についての論文 (参考文献 [7]) を解説した.

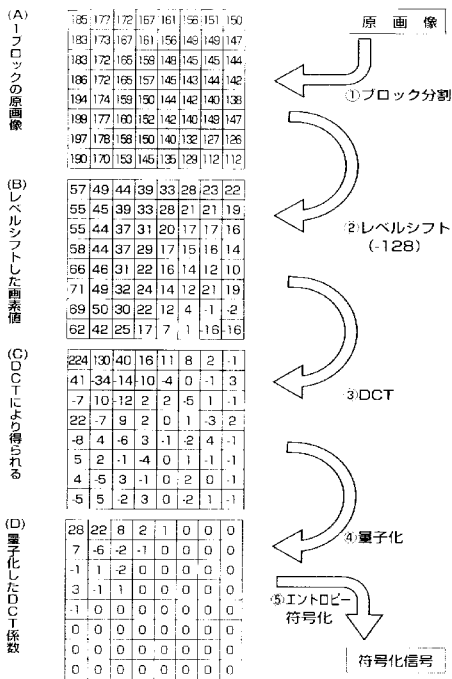


図 1 1 画像の符号化過程

参考文献

- [1] 安田 浩, 小暮 拓世,MPEG (動画像音声圧縮符号化方式), 電子情報通信学会誌 Vol.82,No.5(1999),432-434
- [2] M. ネルソン 著, 萩原剛志・山口英 訳,”データ圧縮ハンドブック Cプログラマのための圧縮技法紹介”, トッパン,1994, 東京都,401
- [3] 越智 宏・中村洋一郎,”JPEG・MPEG 図解でわかる 画像圧縮技術”, 日本実業出版社,1999, 東京都,202
- [4] 三木俊雄, 移動通信における音声・画像符号化技術, 電子情報通信学会誌 Vol.80, No.9(1997),960-968
- [5] MPEG ホーム ページ,
<http://drogo.cselt.cselt.stet.it/mpeg/>
- [6] Jar-Ferr YANG, Chin-Peng FAN, Fast Structural Two Dimensional Discrete Cosine Transform Algorithms, IEICE TRANS.FUNDAMENTALS, VOL.E81-A, NO.6(1998),1210-1215
- [7] Hideo OHIRA, Fumitoshi KARUBE, A Memory Reduction Approach for MPEG Decoding System, IEICE TRANS, FUNDAMENTALS, VOL.E82-A, NO.8 (1999),1588-1591