3. 画 像 の 符 号 化

3-1 画像符号化の基礎

NHK 総合技術研究所 藤 尾 孝
東京大学工学部 宮 川 洋

1. 符 号 化

符号化という言葉はいろいろな意味で用いられている。そのひとつは歴史的に PCM 方式のひとつのプロセスとしての符号化であり、他のひとつは通信理論的な意味での符号化である。この後者はさらに情報源の符号化と通信路の符号化の2つに分けられる。本節ではまずこれらの意味を簡単に説明する。

1.1 PCM 方式における符号化

PCM は、PAM や PPM の発明者である A. H. Reeves が、1937 年に発明したものである。彼は音声信号のひとつの伝送方式として、まず音声を適当な時間間隔でとり出し、この取り出した音声信号の振幅値を振幅上の適当な細かさの区間に分類し、さらにつぎにどの区間に入るかをパルスの有無の組合せであらわすことを考えた。これが PCM 方式の原理である。この3つの操作は、現在では、標本化 (sampling)、量子化 (quantization)、符号化 (coding) とよばれている。この逆のプロセスは復号と補間回復である。図1はこれを示す。

このように最もせまい意味での符号化は、各量子化区間（その代表値を量子化レベルという）をどのような2進符号に対応させるかという意味で用いられる。表1はこのような意味での各種の2進符号の代表例を示したものである。

図 1 PCM 方式の原理

"3. Picture Coding; 3-1 Fundamentals of Picture Coding" by Takashi Fujio (NHK Technical Research Laboratories, Tokyo) and Hiroshi Miyakawa (Faculty of Engineering, University of Tokyo, Tokyo)

表 1 各種2進符号と量子化レベルの対応

量子化レベル	自然2進	交番2進	折返し2進
0	000	000	011
1	001	001	010
2	010	011	001
3	011	010	000
4	100	110	100
5	101	111	101
6	110	101	110
7	111	100	111

(注) 折返し2進符号は2進符号の上半分だけ反転したものである。
交番2進符号はさらに細かく各区間ごとに反転したものである。

しかし、PCM 方式では通常、標本化、量子化、符号化の3つの一連の操作を符号化とよんでいる。

1.2 通信理論における符号化

通信理論における符号化は(i)情報源の符号化と(ii)通信路の符号化の2つに分類される。なおここでは説明を簡単にするために2進符号化に話を限ることとする。

(1) 情報源の符号化 (source coding)

情報源の出力信号を適当な変換器で別の信号に比較することであり、通常は、情報源の出力信号の中に含まれている冗長度をできるだけとり除いて、冗長度のない2進符号系列に変換することを目的としている。図2はこれを示す。通常、情報源の変換器は、情報源出力信号を、情報源の本質的な情報は失わずに、しかも冗長度のない信号に変換する。

図 2 情報源の符号化

しかし、情報源の出力が画像信号のようにアナログ信号のときは、各標本値は厳密に言えば無限の精度でこれを測定すれば、それぞれが無限の桁数を持ち、したがって、これを正しく伝達すれば無限の桁数が必要となる。

ところで通信理論によれば、このようなアナログ値でもその許容ひずみを定めると、平均として各標本値は有限の桁数の2進符号であらわせることが示されている。

このようにして、アナログ信号に対しても同図(b)のような復号器を用いることにより、2進符号からもとのアナログ信号をこの許容ひずみ以内で復元できることになる。

情報源の標本値が、平均として何ビットの2進符号であらわせるかは、情報源の性質すなわちスペクトルや相関関数と視覚がどれだけのひずみを許容し得るかに依存する。通信理論ではこれに関する理論は rate-distortion theory とよばれ、画像信号についてもいろいろの検討が加えられている。

また、具体的にこれを実現するための情報源符号化を帯域圧縮符号化あるいは高能率符号化とよんでいる。

(2) 通信路の符号化 (channel coding)

通信路の両端に変換器を接続し、変換器の前後で見かけ上、もとの通信路とは異なる特性の通信路に変換することである。図3はこれを示す。

その典型は通常の広帯域アナログ通信路の前後に FM 変換器を接続した場合で、このときは広帯域のアナログ通信路がより狭い帯域の高品質のアナログ通信路に変換されることとなる。帯域圧縮を伴わない通常の PCM 方式もこの一例であると考えられる。すなわち符号器と復号器が通信路の前後に挿入されることにより、比較的雑音やひずみの大きい通信路を符号化に伴う雑音以内で正しくアナログ値を伝送する通信路に変換するのが PCM 方式である。

2. 通信系のモデルと画像符号化に伴うひずみと雑音

さて、符号化は上記のように、いろいろの意味で用いられている。歴史的に言えば、PCM の発明によりアナログ信号は離散的なデジタル符号の系列に変換することが符号化の当初の意味であった。しかしその後、通信理論的に解明が進み、符号化が新しく情報源と通信路の整合をとる手段として見直され、上記の通信理論における符号化にまで体系化されたといつてよいであろう。

通信理論では、このように符号化を伴う通信系を図4のようにモデル化している。このモデルによると情報源

図3 通信路の符号化

(a) 送信系のモデル

(b) 受信系のモデル

図4 通信系のモデル

と通信路の整合は2つのプロセスを介して行われる。その第1は情報源の冗長度を取り除くプロセスであり、その第2はこのように冗長度がとり除かれた系列を高い信頼度で通信路で伝送するプロセスである。この第1のプロセスが情報源の符号化であり、第2のプロセスが通信路の符号化のプロセスである。

画像符号化でこれを説明すれば、画像信号はまず情報源の符号器、たとえば予測符号化などの高能率符号化で、なるべく冗長度の少ない2値系列に変換される。ところで、この2値系列に変換されたということ自体が、帯域の広さ、しかも通信路が低品質のときは、それと整合がとれた情報系列に変換されたということに他ならない。すなわち低品質の通信路に適した情報系列に変換することが同時に遂行されたこととなる。

しかし、通信路が高品質のとき、これを2進符号の伝送に用いるのは得策でない。このときは多値符号を用いる必要があり、2進符号は、2進-多値符号変換器で多値信号に変換される。

デジタルテレビは、画像符号化を基本的な手段として利用している。その目的とするところは、1章で詳述されているので、ここでは省略する。画像符号化で最も重要なのは、その主要な目的である上記のような冗長度の除去と通信路の整合であるが、実際上は、このような符号化によって各種のひずみや雑音が導入されることに留意する必要がある。

符号化に伴うひずみや雑音を列記するとつぎのようになる。

2.1 標本化に伴うひずみと雑音

(1) 折り返し雑音 (aliasing noise)

スペクトルの高域が標本化周波数で折り返されること

により生ずるものである。

(2) アパーチャの効果 (aperture effect)

標準化パルスの幅が有限なことから生ずるひずみである。

(3) 補間雑音

補間回路の特性が理想的でないことから生ずるひずみである。

(4) 標準化パルスジッターによる雑音

標準化パルスがジッターを持つことによるひずみである。

2.2 量子化に伴うひずみと雑音

(1) 量子化雑音

量子化レベル幅が有限であることに伴うひずみである。特に輝度、平坦部分での量子雑音は粒子状に見えるので、グラニューノイズ (granular noise) とよばれる。

(2) 偽輪郭効果 (false contouring effect)

量子化区間内のアナログ値はいずれも、その区間内の代表点であらわされるため、ゆるやかに画面の明るさが変化しているところでは、一種のしま模様が生ずる。これを偽輪郭とよぶ。これを軽減するにはウォープリングがよく用いられる。これは画像信号に正弦波あるいは雑音を重畳してから量子化を行い、量子化区間のはじめにある標準値はその隣接のレベルをもとり得るようにしてやる方法である。

(3) エッジビジネス (edge-busyness)

予測符号化などを行っているときは、画像中の鋭い境界線 (エッジ) の相対的位置がフレームごとにより一定でないため、エッジがちらついて見える。これをエッジビジネスという。Δ変調や、ΔPCM 等の予測符号化を行っていないくても、標準化周波数と水平走査線の同期が不完全のときにはこの効果を生ずる。

(4) 過負荷雑音

量子化が行われる範囲が有限であることに伴うひずみである。

量子化に伴うひずみを軽減するには、非直線量子化 (non-linear quantization) がよく用いられる。予測符号化も、一種の過負荷雑音を軽減し、しかも量子化雑音を小さくする手段のひとつと考えられる。

(5) 量子化レベルの誤差に伴うひずみ

2.3 伝送路の不完全さに伴うひずみと雑音

(1) 符号誤りによる雑音

伝送中に符号が誤ることによる雑音である。自然2進、交番2進、折り返し2進などの符号形式

表 2 高能率符号化の手段とそれに伴う画質の劣化

高能率符号化の手段	画 質 の 劣 化
同一走査線内の標本点の間引き (標本点補間)	水平解像度の低下
フィールドの間引き (フィールド補間)	垂直解像度の低下 動きのなめらかさの低下
フレーム間符号化	画面の動きがはげしいとき 不自然な動きをする。ジャークネス (jerkiness) という
Δ変調、DPCM における適応符号化	エッジビジネス、スロープオーバーロード

に依存する。さらに帯域圧縮符号化を行っているときは、その影響が大きく、最近では誤り訂正符号を用いて誤りの訂正を行うこともある。

(2) タイミングジッター

受信符号系列のタイミングを完全にとり直さないとそのジッターにより雑音を生ずる。

2.4 高能率符号化に伴うひずみと雑音

これに関しては、高能率符号化の各方式より上記雑音以外にそれぞれ固有の雑音が生ずるが、高能率化の主な手段とそれによるひずみの対応表を表2に示す。

(a) テレビジョン (アナログ系)

(b) ハイブリッド形態

(c) 全デジタル化形態

図 5 テレビ系のデジタル化

これらのひずみや雑音以外に、特にカラー画像では標本化周波数と色副搬送波や、水平走査周波数との関係で、いろいろの擬似信号が生ずる。

3. テレビ系のデジタル化と符号化の主要パラメーター

図5(a)はカメラからテレビ信号を送出するまでの放送局におけるテレビ系を示したものである。

放送技術をデジタル化するデジタルテレビ系としては、大別してデジタル化による利点を現行アナログ系の一部の技術システムにとり入れた図5(b)に示すようなハイブリッド形態と、カメラ出力の3原色信号を直接符号化し、番組切替やVTR記録、編集といった番組制作技術をすべてデジタル的に処理する(c)図に示すような全デジタル化形態が考えられる。

全デジタル化系は最終的な形態であるが、運行技術者の養成を含め、アナログ系の方が明らかに有利であるといった点のデジタル化など、今後いろいろな問題点を解決しなければならず、実現はかなり先になろう。しかし(b)図のハイブリッド形態は、現在はずでにテレビ方式の変換系、VTRの時間軸誤差補正系やテレビ信号のPCM伝送等の放送技術システムにとり入れられ運用されている。そしてこれらの系を信号の符号化という点から見ると、(b)図の系では複合カラーテレビ信号が符号器の入力信号となり、(c)図の系では撮像3原色信号が入力信号となる。

テレビ信号の符号化を行うには信号の性質や特性を知っておかねばならない。

テレビ信号は撮像管上に結像された、2次元の拡がりを持つ画像情報を走査によって1次元の時系列信号に変換したものである。よって、この信号の自己相関関数は水平(ライン)、垂直(フィールド)の両走査周期でくり返す周期関数となり、これのフーリエ変換によって得られるテレビ信号の電力スペクトルは、ライン周波数およびこれの高調波部にエネルギーが集中した不連続関数となっている(図6(a))。そしてこの信号の2次元画像情報との関係は図6(b)に示すように、

- (a) ライン周波数 f_h の高調波特性(信号の帯域特性)が2次元被写体画像の水平方向の空間周波数特性に対応し、
- (b) f_h およびこれの高調波の側波帯特性が垂直方向の空間周波数特性に対応している。

そしてまた、画像を知覚する視覚の空間周波数特性は中域周波数がブーストされた低域濾波(LPF)特性で、水平、垂直空間周波数ともその高周波部で感度が急峻に

(a) 周波数スペクトラム

(b) 2次元画像情報との関係

(V: 画像の垂直空間周波数
H: " 水平 "

図6 テレビ信号と2次元画像情報

低下するような特性をもっている。

この特性を図6のテレビ信号と対応させるとき、信号帯域の高周波部でかつ $(2n+1)f_h/2$ の周波数領域の信号やノイズ成分は視覚感度が低く、画面上ではあまり目立たない画像となってあらわれる。

連続した信号を符号化する場合、2節で述べたように、標本化や量子化の過程で折返し雑音や量子化雑音が発生するが、他の情報の場合と異なり、テレビ信号の符号化に際しては図6に示すような信号スペクトルの性質を利用し、これらの雑音が最も画質を損なわないような符号化の方法をとっている。

テレビ信号を符号化する場合の主要なパラメーターとしては、(a)標本化周波数、(b)量子化レベル数、(c)符号形式と符号誤り率、があげられる。

これらはいずれも画像の品質を定めるものであり、…用しようとする画像システムのいろいろな制約条件下での画質の主観評価試験をもとにして定めている。以下これらの主要パラメーターと画質の関係について述べる。

4. 標本化周波数と画質の関係

標準テレビ信号の帯域幅は4.2MHzであるため、標本化定理にしたがえば、標本化周波数は8.5MHz程度で充分なことになる。しかし3節で述べたような誤差を考えると理想的な標本化系の実現が困難なため、実際の標本化周波数は次のような諸点を考慮して決める。

- (a) 標本化による誤差の許容量
- (b) 標本化する画像信号との適合性
- (c) デジタル処理との適合性

(a)は4.2MHzの帯域内で振幅や位相特性が平坦で、急峻な遮断特性をもつ標本化の前置フィルターや補間フィルターを作ることが困難なため、これらのフィルターの実現性の点から少し余裕をとって標本化周波数を選ぶ

ことである。(b)は標準化誤差によるノイズを図6のどの周波数領域に落ち込むかといった信号スペクトルとの関連から標準化周波数を決めることで、特に複合カラーテレビ信号では色副搬送波とのビート妨害が目立たないような周波数を選ばねばならない。

また(c)は符号化したテレビ信号を伝送する場合にはPCM伝送路のハイアラーキ(hierarchy)に整合させねばならず、図5(c)の系ではデジタルエンコード処理によって直接NTSC信号の符号化信号を得るに都合の良い標準化周波数が必要となる。このように標準化周波数は符号化後のデジタル処理の適合性も考慮して、これに便利ように決めねばならない。

4.1 単色テレビ信号

Y信号やR, G, B原色信号またはクロミナンス信号といった単色テレビ信号はいずれも図6(a)のようなスペクトルの信号であるため、その性質を利用すると標準化周波数を最少ナイキスト周波数($2 \times$ 信号帯域 $=2f_b$)より低くすることができる³⁾⁴⁾。

標準化周波数を低くしたとき、標準化によるひずみとして折返し雑音が生ずるが、これは標準化周波数 f_s を $1/2$ ラインオフセット周波数 $f_s=(m+1/2)f_h$ (f_h :テレビの水平走査周波数)に選び、図7(a)のように雑音成分を原信号スペクトルのギャップ部(垂直空間周波数の高周波領域)に落ち込ませて符号化する。この折返し雑音はちょうどNTSCカラーテレビ信号における搬送色信号の多重法と同じ形でY信号の高周波部に落ち込むので、複合カラーテレビ信号から搬送色信号を取除くのに使用する図7(b)のような構成の楕円形フィルター(垂直空間周波数領域のLPF)を復号系に挿入((c)図)することによって除去できる。

このような楕円形フィルターによる画質の劣化は、標準テレビのY信号でも $(f_s-f_b)>2.0$ MHzのときあまり小さくなく⁵⁾、クロミナンス信号ではさらにその影響は少ない。

このように単色テレビ信号では信号の特性を利用し $1/2$ ラインオフセット周波数に選ぶという条件のもとでは、標準化周波数をかなり広い範囲にわたって任意に選択できる。このように標準化を最少ナイキスト周波数より低い周波数で行う方法を、サブナイキスト標準化または周波数インターリーブ標準化と呼んでおり、この方法はテレビ信号のデータ速度(標準化周波数 $\times$ 量子化ビット

サブナイキスト標準化

(a) 標準化信号のスペクトラム(折返し雑音)

(b) 折返し雑音除去用楕円形フィルター

(c) サブナイキスト標準化符号系

図7 サブナイキスト標準化によるテレビ信号の符号化

数)を低くできるので高効率符号化などによく用いられている。

実用例としては、カラーテレビ情報のY信号(4.5 MHz)、Iクロミナンス信号(1.5 MHz)、Qクロミナンス信号(0.5 MHz)をいずれも表3に示すように最少ナイキスト周波数の約70%の周波数インターリーブ標準化によって符号化して伝送する方式が報告⁶⁾されている。

しかし一方、図5(c)のようなデジタルテレビ系の符号化に際しては、R, G, Bの符号化信号から直接標準カラーテレビの符号化エンコード信号を得ることが必要となる。このような場合、標準化周波数は色副搬送波の整数倍の $f_s=3f_{sc}$ (f_{sc} :色副搬送波)または $f_s=4f_{sc}$ が良い。このときには色差信号の3相($f_s=3f_{sc}$ のとき)、または4相($f_s=4f_{sc}$ のとき)の加算演算(デジタル信号)で直接、符号化した形の搬送色信号を得ることができる⁷⁾。

表3 サブナイキスト標準化例

被標準化信号		標準化周波数(f_s) $=\left(m+\frac{1}{2}\right)f_h$		
信号	帯域幅(MHz)	f_s (MHz)	m	$f_s/2f_b$
Y	4.5	6.018	382	
I	1.5	2.006	127	0.67
Q	0.5	0.668	42	

4.2 複合カラーテレビ信号

単色テレビ信号の場合、標準化周波数はその目的によりかなり広い範囲内で選択ができたが、複合カラーテレビ信号では単一正弦波に近い色副搬送波がベースバンド内にあるので、これの量子化ノイズが標準化周波数と関連して映像帯域内に落ち込み、輝度や色度のビート妨害を生ずる¹⁾。この色副搬送波とのビート妨害は非常に目につきやすいので、このビート周波数が視覚感度の低い水平走査周波数とオフセット関係になる（垂直空間周波数の高周波領域に落ち込む）ようにしなければならない。これには標準化周波数を色副搬送波の3倍または4倍に選べばよい。

写真1は標準化周波数を $f_s=3f_{sc}$ にした周波数のロック状態と $f_s \approx 3f_{sc}$ という非同期的場合、搬送色信号の量子化ひずみにもとづく輝度の妨害がどのようになっているかを4ビットで符号化したカラーバー画像上で観察したものである。

写真1 複合カラーテレビ信号の標準化周波数と輝度のビート妨害

このように $f_s=3f_{sc}$ または $4f_{sc}$ に選ぶとき、ビート周波数は0および f_{sc} となり、画面上で明るさの変化となってあらわれるビート妨害は最も目立たなくなる。

ビート周波数が f_{sc} となることはクロミナンス信号の低周波ひずみが生ずることであり、この点からは標準化周波数をわずかに (Δf_s) ずらす方がよい。

この Δf_s の値はひずみを画像のどの方向の打消し効果で少なくするかによって下記のような値となる⁷⁾。

(a)	ひずみを水平空間周波数で打消す時、	$\Delta f_s = f_{sc}/2$
(b)	垂直	$\Delta f_s = f_v/2$
(c)	時間	$\Delta f_s = f_p/2$

ただし f_v : フィールド周波数, f_p : フレーム周波数
しかし複合カラーテレビ信号ではY信号にくらべ搬送色信号に必要な量子化ビット数が少なく¹⁾、量子化ビット数をY信号のひずみが目立たなくなる値に選ぶとき周波数をずらさなくてもクロミナンスのひずみは感じなくなる。このため図5(b)のような系における複合カラーテレビ信号の標準化周波数は一般には色副搬送周波数の3倍を選ぶ。

この他、複合カラーテレビ信号を直接符号化しかつデータ速度を低くしたいときに標準化周波数を $f_s=2f_{sc}$ としてサブナイキスト標準化を行う場合がある⁸⁾⁹⁾。この方式は f_{sc} が1/4ラインオフセット周波数であるPAL方式では $f_s=2f_{sc}$ 、 f_{sc} が1/2ラインオフセット周波数のNTSC方式では $f_s=2f_{sc} \pm (1/4)f_h$ を標準化周波数として符号化するものであるが、データ速度を低くして伝送するような特殊な用途であるため、ここでは省略する。

5. 量子化ビット数と画質の関係

テレビ信号を量子化する場合の量子化誤差は、信号の変化が急峻な部分ではエッジビジネスとなり、信号がゆ

写真2 量子化による偽輪郭 (3 bit/pel)

(a) 一般画像

(b) 傾斜のゆるやかなのこぎり波

写真 3 画像による偽輪郭の見え方 (5 bit/pel)

るやかに変化している所では、写真2のような偽輪郭となつてあらわれる。

このうち前者は振幅方向の誤差が時間軸の誤差に変換され、画像の輪郭部がぎざぎざして見えるもので、これは量子化ビット数を 6 bit/pel* 以上に選べば見えなくなる。一般に標準 PCM 方式では量子化数をこれ以上にとるのであまり問題にならない。しかし偽輪郭は量子化ビット数を決める上で問題で、この偽輪郭は写真3に示すように傾斜がゆるやかな画像ほど目立つ。これは、この場合の量子化誤差が視覚感度の良い2次元の低周波成分からなり、画面上静止して見えるためである。このようにテレビ信号の所要量子化数はどのような種類の信号を量子化するかによっても、また量子化過程のくり返しによっても異なる。

5.1 テレビ信号の直線量子化と輝度ひずみ⁷⁾

いま画像信号を e とし、画像再生系の画面輝度 I が、

$$I = ke^{\gamma} \quad (1)$$

図 8 画面輝度に対する $\Delta I/I$ 特性

* pel: picture element

** 一般の CRT ディスプレイ系

ただし、 γ : 表示系のガンマ
の場合について考える。この場合、信号の量子化誤差 Δe に対する画面上の輝度誤差 ΔI は、

$$\Delta I = k\gamma e^{\gamma-1} \Delta e \quad (2)$$

となつてあらわれる。

目が明るさの変化を識別する閾値 ΔI_c に関しては、その背景輝度を I_c とするとき $\Delta I_c/I_c = \text{一定}$ という Weber-Fechner の法則がある。このため、(1), (2) 式からテレビ信号を直線符号化して表示した画面上の Δe に対する $\Delta I/I$ は、

$$\Delta I/I = \gamma \cdot \Delta e/e \quad (3)$$

となり $\Delta I/I$ はテレビ信号のレベルに反比例して大きくなる。

この関係はカラーテレビ信号の場合も同じに考えてよく、背景色輝度 (白色で基準化) に対する $\Delta I/I$ の関係は図8のA¹⁾ のようになる。このためテレビ信号の直線量子化で量子化ひずみが目立つのは輝度が低い画像部で

(a) 復号波形

(b) 量子化による位相誤差, 振幅誤差

図 9 搬送色信号の量子化とそのひずみ

あり、所要の量子化数は低輝度域の偽輪郭を対象として定めればよい。

5.2 撮像3原色信号の直線量子化と輝度誤差⁷⁾

カラーカメラ出力の R, G, B 信号を直線量子化し、ガンマ補正を含めたプロセッシングをデジタル的に処理する図5(c)の系を考える。この場合エンコーダーには信号レベル e に対してその量子化ステップ $\Delta e'$ が、

$$\Delta e' = \Gamma \cdot e^{\Gamma-1} \Delta e \quad (4)$$

ただし $\Gamma = 1/\gamma$

で示される非線形量子化を行ったと同じ R, G, B 信号が加えられる。これは信号レベル e が小さいとき、量子化ステップが大きくなるので、この場合の $\Delta I/I$ は図8の直線Bのようになる。

この結果、カメラ出力の撮像3原色信号を直接符号化する場合の量子化は、(4)式の値を相殺するように黒レベル側の量子化精度を上げるような非線形符号化か、直線符号化の場合は5.1項の量子化ビット数よりさらに2～3 bit 量子化数を多くとる必要がある。

5.3 搬送色信号の量子化

図9は搬送色信号を1 bit 量子化時の状態を、標準化周波数が $f_s = 3f_{sc}$ の場合について示したものである。(a)図の点線は入力信号であり、これの $0^\circ \sim 60^\circ$ の信号に対してはAの波形が、 $0^\circ \sim 60^\circ$ の信号に対してはBの波形が、いずれも直流(輝度)ひずみおよび搬送色信号の振幅と位相ひずみをともなっておりあらわれる。

(b)図はこの振幅および位相ひずみを $0^\circ \sim 360^\circ$ の全位相域の搬送色信号について描いたもので、この場合、搬送色信号の位相、振幅は量子化され、最大 30° の位相誤差と振幅値が $4/3$ 倍となる振幅誤差を生ずる。写真4はこの状態から搬送色信号の振幅を大きくし、量子化数を増していった過程における振幅と位相ひずみの状態を色副搬送波ベクトルで示したものである¹⁾。

いま搬送色信号の振幅が d (p-p 値)で、 d が1量子化ステップ ΔA に対して充分大きいと仮定したときのひずみについて考える。

量子化による搬送色信号の p-p 最大誤差は1量子化ステップの ΔA となる。

また位相に関しては図9に示した正弦波信号の量子化のメカニズムからわかるように、最も振幅の傾斜が急な部分の1量子化ステップに対応する位相差が最大位相誤差となっておりあらわれると考えられる。

このため振幅の最大誤差 (p-p) は $\Delta A/d$ であり、位相誤差 $\Delta \theta_{pp}$ は $\Delta A/d$ rad となる。

バースト信号の振幅は複合カラーテレビ信号の p-p 振幅値を1Vとすると、0.23Vで、この複合カラーテレビ信号を8 bit/pel の PCM 符号化すると、 $\Delta A = 1/$

写真4 搬送色信号の量子化と位相、振幅誤差

256 V となる。この結果、バースト信号の各振幅ひずみ、位相ひずみの最大値は 1.7% および 1.0° となる。

5.4 量子化くり返しの影響¹⁾

図5(b)のように、デジタル系をアナログ系の一部に挿入して運用するハイブリッド方式では、一般に量子化過程のくり返しが行われることになる。

この場合、量子化をくり返す段階で復号信号の利得が1からずれると、それに比例して信号の一部で2つの量子化決定レベルにまたがる所ができ、その部分の量子化ステップが粗くなる。これは信号振幅のずれが大きいたとき、量子化をくり返すことによって1量子化ステップが2量子化ステップ、さらに3量子化ステップとだんだん粗くなる。そして、ずれがあまり大きくないときには2量子化ステップになる部分が多くなっていく。

このため A/D-D/A-A/D といった量子化をくり返す場合の量子化数は、あらかじめ劣化する分の余裕をとっておかねばならない。この値は量子化過程を3～4回くり返す Tandem 方式を想定するとき1 bit あればよい。

図 10 量子化ビット数と画質

しかし、わが国の放送網形態や、番組制作系において、制作効率、番組効果の向上のためにとられている VTR ダビング数の増加などを考えると、量子化くり返し数が増加の傾向にあり、将来の番組制作系を対象とするときには、2 bit 程度の余裕をとる必要があろう。

5.5 量子化ビット数の評価¹⁾¹⁰⁾¹¹⁾

図 10 にテレビ信号を PCM した画像の画質評価試験結果を示す。(a)、(b)は複合カラーテレビ信号について、標準化周波数と画像内容をパラメーターとし、量子化ビット数を変えたとき、量子化ノイズによって画質がどのようになるかを表 4 の妨害尺度で評価したものである。

表 4 主観評価の妨害尺度

1. Imperceptible (ひずみがわからない)
2. Just perceptible (わずかに認められる)
3. Definitely perceptible, but not disturbing (はっきり認められるが邪魔にならない)
4. Somewhat objectionable (少し不快である)
5. Definitely objectionable (不快である)
6. Unusable (使えない)

これらの結果から、直線 PCM したカラーテレビ信号の量子化ビット数は、標準化周波数 f_s が色副搬送波 f_{sc} と非同期 free running の場合、8 bit/pel 必要であり、 $f_s=3f_{sc}$ 、 $f_s=4f_{sc}$ のような周波数同期の場合では 7 bit/pel あれば充分であることがわかる。

また(c)図はカラーテレビ信号とモノクローム信号の

図 11 標準化周波数に対する量子化数と画質

図 12 符号誤り率と画質

PCM 画像を比較したものである。この場合ビット数が少ないときにはカラーテレビにくらべモノクロームテレビの画質が 1 ランクほど悪い。これはカラーテレビの Y 信号レベルが搬送色信号で脈動をうけ、これによってその量子化雑音が分散されて 1 bit 程度の画質改善効果があるためである。しかし(c)図からもわかるように、モノクローム画像に対しても量子化ビット数は 7 bit/peI あればまず充分である。

図 11 は複合カラーテレビ信号を標準化周波数が $f_s = 3f_{sc}$ の標準形と、 $f_s = 2f_{sc}$ のサブナイキスト標準化によって符号化したときの画質を比較したものである。この符号化は標準 PCM でなく、後記する DPCM と呼ばれている予測符号化によるものであるが、同じ画質を保つに必要な両者のビット数の差はこの図から推測でき、標準形にくらべサブナイキスト標準化方式では 1.5~2 bit 量子化数が多いことを示している。

6. 符号誤りと画質との関係¹⁾¹²⁾

デジタルテレビの符号化画質を規格するのに、いまひとつ符号誤りによる雑音がある。これは標準 PCM の場合、画面上に白黒のインパルス雑音となって妨害する。この符号誤りによる信号の振幅誤差は、同じ桁の符号が誤ってもその符号形式によって異なるので、符号誤りによる画像のノイズは符号形式や画像信号のレベル分布特性によって差異がある。

図 12 は標準 PCM 信号の符号誤り率と画質について主観評価した結果の一例である。(a)はモノクローム信号に対するものであり、(b)は複合カラーテレビ信号に対する評価結果である。

自然 2 進符号は 5.2 項で述べたように additive な符号であるため同じ桁の符号誤りによるアナログ出力の振幅誤差は信号のレベル分布に依存せず、上位桁の誤りは

どその影響が大きい。しかし交番 2 進符号ではその影響が振幅のレベル分布に依存し、白、黒両端付近の信号ではもちろん最上位桁の符号誤りが最も大きな振幅誤差となるが、ハーフレベルの符号では 2 桁目の誤りによる影響の方が大きくなる。

モノクロームテレビ信号で評価した(a)図において、交番 2 進符号の画質が画像内容によって異なり、同じ誤り率に対して、A の画像より“人物のアップショット”B で画質劣化が大きいのは、信号レベルの確率密度関数がハーフレベルで大きいためである。このためモノクロームテレビ信号では自然 2 進符号の場合 10^{-7} 、交番 2 進符号の場合一般の画像では 10^{-6} 程度、レベル分布が中心レベルに集中している種類の画像に対しては 10^{-7} の誤り率を確保することが必要となる。

しかし複合カラーテレビ信号では搬送色信号が信号のレベル分布を一様化するように働くので、交番 2 進、自然 2 進符号とも 10^{-7} 程度の符号誤り率が必要である。

以上は 1 ビット長の符号に対する誤り率の規格であるが、バースト長の異なる符号誤り率に対しては、これが $5 \mu s$ 以下のとき、ビット誤り率で定義した誤り率が上記規格値を満たせばよい。(昭和 51 年 7 月 16 日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 石田：テレビ PCM 伝送系の設計基準，信学論誌，154-A，11
- 2) 藤尾：画像信号の 2 次元処理，NHK 技術研究，25，3 (1973)
- 3) L.S. Golding: Frequency Interleaved Sampling of Color Television Signal, IEEE Trans., COM-19, 6
- 4) V.G. Devereux: Sub-Nyquist Sampling of PAL Color Signal, BBC Report, RD 1975/4
- 5) 藤尾：画像信号のスペクトルと画質，テレビ学会視覚研資料，24-2 (1971.7)
- 6) L.S. Golding: Digital Television Communication System for Satellite, INTELSAT/SEE SESSION-F.1 (1972)
- 7) 藤尾：デジタルテレビの符号化とその規格，昭 50 年電気四学会連大，262
- 8) V.G. Devereux: Differential Coding of PAL Color Signals using Same-line and Tow-Dimensional Prediction, BBC

- Report, RD 1975/20
- 9) Sub-Nyquist Encoding of PCM NTSC Color Television Signals, CCIR Documents, Doc. 11/67-E (Jan. 1976)
- 10) A. A. Goldberg: PCM Encoded NTSC Color Television Subject Tests, SMPTE, 82, 8 (1973)

- 11) V. G. Devereux: Subjective Study of Coding Parameters, BBC Report, No. 1971/40
- 12) V. G. Devereux: Subjective of Random Digit Errors, BBC Report, No. 1972/14

3-2 高能率符号化方式

沖電気工業株式会社 大 平 隆 夫

1. ま え が き

3-1 において、画像符号化の基礎について述べられたが、ここでは特に信号源としてカラーテレビ信号を対象とした高能率符号化方式について、線形変換符号化方式、予測符号化方式およびフレーム間符号化方式の具体的な代表例について簡単に述べる。

個々の方式について表1にまとめたが、主として公表された資料に基づいて記入したものである。

一般に高能率符号化の場合には、その性能評価に主観評価パラメーターが導入されるため、優劣の判定はできにくい。しかし、フレーム内符号化において予測符号化

方式は、3 bit/pel 以上の場合に適しており、それ以下では線形変換符号化方式のほうが有利と考えられる。

2. 線形変換符号化 (直交変換符号化)¹⁾

直交変換には、アダマール変換、傾斜直交変換、Haar変換、Karhunen-Löve変換等があるが、これら線形変換符号化装置については、カラーテレビ信号を対象として、前2者の方式がハードウェア試作も含めて広く検討されている。

本方式はテレビ信号に直交変換を施し、その変換出力を符号化伝送することにあるが、直交変換の操作はテレビ信号の特徴を表現するとみられるいくつかの基本成分

表1 カラーテレビ信号に対する高能率符号化方式の代表例

符 号 化 方 式		伝送速度 (Mb/s)	備	考	文献
フ レーム 内符号化	直交変換 符 号 化	OT-PCM	22 32	32次（4ライン×8サンプル）傾斜直交変換 2.25ビット/画素 衛星通信向 3ビット/画素 PCM 3次群向	1
			~34	アダマールおよびハール変換, Y, C ₁ , C ₂ 分離, 4, 8, 16次, 1次元, 2次元変換	
	予 測 符 号 化	DITEC	33.6	コムフィルターで Y, I, Q 分離後, A/D 変換して DPCM	2
		分離符号化	34	PAL 信号向, Y, R-Y, B-Y に分離して DPCM	3
		〃	22	Y, I, Q 分離, 2次元予測, 可変長符号を採用, シミュレーション	4
		〃		Y, I, Q 分離, 色度信号が一定の軌跡となるようにN ₀ を選ぶ方式のシミュレーション	5
		Planar Prediction	60 69	PAL TV 向, $f_s=3f_{sc}$, 衛星通信向 PAL TV 向, $f_s=3f_{sc}$, Terrestrial Connection, 放送用品質	6
		HO-DPCM	32	サブナイキスト標本化, 高次予測（3次）水平ブランキング期間の利用	7
		高 次 4M	64	線形 4M の第2積分器に共振回路を付加して構成	8
	Hybrid 方式			1次元16次アダマール変換後, コムフィルターで Y, C 分離して DPCM を行うシミュレーション	9
フ レーム 間符号化	フ レーム 差符号化	TRIDEC	6.3	サブナイキスト標本化, TDM 変換, 動領域解像度可変形復号差分方式	10
		NETEC	6~16	TDM 変換, conditional replenishment, 239/255 BCH 符号	11
	直接符号化	コムフィル ター復号法		$f_s=3f_{sc}$, カラー複合信号を直接フレーム間で予測符号化を行うシミュレーション	12

"3-2 High Efficiency Coding Systems" by Takao Ohira (Oki Electric Industry Co., Ltd., Tokyo)