

静止画像符号化方式における伝送路誤り伝搬の影響

正員 海野 健弘<sup>†\*</sup>      正員 高橋 健一<sup>†</sup>      正員 田坂 修二<sup>†</sup>

Effects of Error Propagation on the Performance of Coding Schemes for Still Pictures

Takehiro UNNO<sup>†\*</sup>, Kenichi TAKAHASHI<sup>†</sup> and Shuji TASAKA<sup>†</sup>, Members

あらまし 本論文では、伝送路上での雑音によるビット誤りが、静止画像の圧縮符号化方式の性能に対して及ぼす影響について検討している。取り上げた符号化方式は、(1)アダプティブ・コサイン変換符号化、(2)DPCM符号化、(3)アダプティブ・ブロック符号化、(4)ベクトル量子化による符号化の4種である。まず、これらの各符号化方式において誤り制御を行わない場合の、伝送路誤りによるビット誤り率、SN比、符号量の関係について比較・検討する。また、アダプティブ・コサイン変換符号化とアダプティブ・ブロック符号化は、適応化制御のための符号化制御情報を必要とするので、その影響を調べるため、この制御情報に伝送誤りが発生する場合とそうでない場合についても考察する。次に、符号化制御情報に対して誤り制御を行う場合を取り扱う。誤り制御方式としては、誤り検出による再送を行う方式と誤り訂正を行う方式を考える。これらの場合において、誤り検出/訂正符号の付加や再送による符号量の増加、誤り訂正能力を越えた際のSN比の劣化について検討を加える。なお、用いた誤り検出・訂正符号はBCH符号である。

1. ま え が き

情報ネットワークにおいて、画像は音声、データと共に重要な情報の一つである。画像は、動画像と静止画像とに大別できる。本論文では、静止画像について取り扱う。

近年、活発に検討されているビデオテキストや文字多重放送などの情報提供サービスシステムでは、画情報としては図形が現在用いられている。更に今後、サービスの向上のために、写真画像のように階調数が多く表現力の豊かな自然画像も情報媒体として重用されていくものと考えられる。また、互いに離れた地点にあるパーソナルコンピュータ同士を公衆回線でつないで通信を行うパソコン通信においても、自然画像を情報媒体として利用できるようになると便利である。

このように、自然画像は、持つ情報量が多く、静止画像の中でも重要な位置を占める一方、データ量が極めて大きいという特徴を持つ。それ故、伝送時間や外部記憶装置の効率化を図るために、これまでに数多く

の自然画像を対象としたデータ圧縮符号化方式が提案・研究されてきた<sup>(1)</sup>。これらの符号化方式では、より少ない平均符号長で、視覚的な劣化のより少ない、すなわち符号化により混入する符号化雑音のより少ない復号画像を得ることに主眼が置かれている。そのため、これまでの研究において用いられてきた符号化性能の定量的な尺度は、平均2乗誤差と平均符号長であった。また、このような観点から、代表的な圧縮符号化方式の性能が比較・検討され、既に報告されている<sup>(2)</sup>。

これらの研究では、伝送路上での誤りのない送受信が行われることを前提としている。しかし、実際の伝送においては、伝送路上の雑音などにより伝送誤りが発生する。データ通信用に設計されていない、公衆電話回線などの低品質の回線を用いるパソコン通信やビデオテキストに対しては、この伝送誤りの影響の程度を調べる必要がある。一方、高品質の通信回線を用いる場合には、伝送誤りの発生はわずかであり、その影響はあまり問題にならないかもしれないが、検討の余地はあろう。また、符号化データの伝送においては、処理の最も簡単な無手順で伝送する場合と、符号誤りのない伝送を実現するために、誤り制御を行う場合がある。無手順伝送のときには、伝送誤りによる画質の劣化の程度、符号化方式の雑音に対するぜい弱

<sup>†</sup> 名古屋工業大学工学部電気情報工学科, 名古屋市 Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466 Japan

\* 現在, 三菱重工業株式会社名古屋航空機製作所

性が問題となる。誤り制御を行うときには、画質は保証されるが、制御処理が加わることおよび応答の遅延が問題となる。このどちらの方式を選ぶかは、処理の簡易さと復号画像の了解性に依存してくる。例えば、画像の検索のような場合、端末においては、伝送誤りのため符号化画像とまったく同じ復号画像を再生できなくても必要な情報を得ることができさえすれば、応答時間が短い方がよい。一方、復号画像が認識できないほど劣化するようなときには、応答時間が遅くなくても誤り制御を行うことになる。このような場合、誤り制御のオーバーヘッドに起因する応答時間の増加と誤り制御を行わない場合の画質の劣化の度合いとの得失を検討することが必要である。

これまで、伝送路誤りを考慮した符号化の検討については、ファクシミリ信号の圧縮符号化に対するものはなされているが<sup>(3)</sup>、多値静止画像の圧縮符号化を対象としたものは見あたらない。そこで、本論文では代表的と考えられる4種の静止画像圧縮符号化方式を取り上げ、まず誤り制御を行わない場合の伝送路誤りによるビット誤り率、SN比、符号量の関係について比較・検討する。取り上げた符号化は、(1)アダプティブ・コサイン変換符号化<sup>(4)</sup>、(2)DPCM符号化<sup>(5)</sup>、(3)アダプティブ・ブロック符号化<sup>(6)</sup>、(4)ベクトル量子化<sup>(7)</sup>による符号化である。次に、符号化制御情報に対して誤り制御を用いた場合を取り扱う。ここでは、符号化制御情報をブロックに分割し、それぞれに誤り検出符号を付加して誤り検出・再送を行ったときの符号量の増加、および誤り訂正符号を用いたときの符号量の増加と誤り訂正能力を越えた際のSN比の劣化について検討する。誤り検出、訂正に用いた符号は、巡回符号の中で代表的なBCH符号である。

以下、本論文では、2.で4種の符号化方式の概要を述べる。3.では、誤り制御を行わなかった場合に対する計算機シミュレーション結果を示し、各符号化方式においてビット誤り率がSN比に及ぼす影響について検討する。続いて、4.で、本論文で取り扱った誤り検出・再送および誤り訂正方式について述べ、増加符号量、SN比の劣化について検討する。最後に、5.で結論を述べる。

## 2. 各符号化方式の概要

本論文で対象とした、(1)アダプティブ・コサイン変換符号化、(2)DPCM符号化、(3)アダプティブ・ブロック符号化、(4)ベクトル量子化による符号化、

の4種の符号化方式について概要を述べる。

### 2.1 アダプティブ・コサイン変換符号化<sup>(4)</sup>

アダプティブ・コサイン変換符号化は、これまでに提案されている符号化方式の中で最も圧縮率の高い符号化方式の一つである。本符号化方式では、カルーネン・レーベ変換に最も近い符号化効率を得られる直交変換のコサイン変換を用いている。本符号化の処理アルゴリズムを以下に示す。

- (1) 画像を  $N \times N$  のサブブロックに分割する。
- (2) 各サブブロックに対して2次元コサイン変換を行う。ブロック内の位置  $(i, j)$  の画素濃度値を  $f_{ij}$ 、コサイン変換値を  $F(u, v)$  とすると、2次元コサイン変換は次式で表される。

$$F(u, v) = \frac{4 \cdot C_u \cdot C_v}{N \cdot N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f_{ij} \cos \frac{(2i+1)u\pi}{2N} \cdot \cos \frac{(2j+1)v\pi}{2N} \quad (1)$$

但し、

$$C_w = \begin{cases} 1/\sqrt{2} & \text{for } w=0 \\ 1 & \text{for } w=1, 2, \dots, N-1 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2)$$

- (3) 変換されたサブブロックを、そのACエネルギーの大きさにより四つのクラスに分類する。このとき、各クラスに含まれるサブブロックの数が同じになるようにする。ここで、 $(m, l)$  番目のサブブロックにおけるACエネルギー  $E_{m,l}$  は、次式で定義される。

$$E_{m,l} = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} [F_{m,l}(u, v)]^2 - [F_{m,l}(0, 0)]^2 \quad (3)$$

- (4) 各クラス内の各変換値の分散を次式により求める。

$$\sigma_k^2(0, 0) = \frac{N^2 K}{M^2} \sum_{m=1}^{M/(N\sqrt{K})} \sum_{l=1}^{M/(N\sqrt{K})} [F_{m,l}(0, 0)]^2 - 4a^2 \quad (4)$$

$$\sigma_k^2(u, v) = \frac{N^2 K}{M^2} \sum_{m=1}^{M/(N\sqrt{K})} \sum_{l=1}^{M/(N\sqrt{K})} [F_{m,l}(u, v)]^2, \quad (u, v) \neq 0 \quad (5)$$

ここで、 $M$  は画像の垂直、水平方向の画素数、 $K$  はクラスの数、 $a$  は各クラスにおける  $F_{m,l}(0, 0)$  の平均値を表している。

- (5) 各クラスのサブブロック  $B_k$  に対するビット割当てを次式により決定する。

$$N_{Bk}(u, v) = \frac{1}{2} \log_2 [\sigma_k^2(u, v)] - \log_2 [D] \quad (6)$$

ここで、 $D$  は割当てビット数をコントロールするパラメータであり、この値を変えることにより望む平均符

号長を得ることができる。

(6) 変換値を、正規化係数  $\sigma_k(u, v)$  により正規化する。

$$\sigma_k(u, v) = c \cdot 2^{N_{Bk}(u, v)-1}, \quad (u, v) \neq (0, 0) \quad (7)$$

ここで、 $c$  は割当てビット数が 1 である要素の最大偏差である。

(7) Max の量子化器により量子化を行い、符号化する。

なお、本論文では  $N=8$  のブロックサイズを用いた。

## 2.2 DPCM 符号化<sup>(5)</sup>

DPCM 符号化は、予測符号化の代表的なものである。本論文では、3 画素を用いて予測を行う DPCM 方式を用いた。符号化手順は以下のとおりである。

(1) 予測濃度値  $\hat{f}_{ij}$  を次式により求める。

$$\hat{f}_{ij} = a_1 \cdot \hat{f}_{i-1, j} + a_2 \cdot \hat{f}_{i-1, j-1} + a_3 \cdot \hat{f}_{i, j-1} \quad (8)$$

ここで、 $a_1, a_2, a_3$  は予測係数である。

(2) 予測誤差  $e_{ij}$  を求める。

$$e_{ij} = f_{ij} - \hat{f}_{ij} \quad (9)$$

(3) 予測誤差を非線形量子化し、符号化する。用いた量子化器の構成は文献(8)による。

## 2.3 アダプティブ・ブロック符号化<sup>(6)</sup>

アダプティブ・ブロック符号化は、アダプティブ・コサイン変換符号化と異なり、ブロックサイズを適応的に変えて効率の良い圧縮を行おうとするものである。ブロック符号化法の基本原理を以下に述べる。

ブロック符号化法では、まず画像を  $N \times N$  画素より構成されるブロックに分割し、各ブロックで次式で表される符号化を行う。ここで、 $y_{ij}$  は符号化後の画素濃度値、 $f_{ij}$  は原画素の濃度値を表す。

$$y_{ij} = \Phi_{ij} \cdot a_0 + \Phi_{ij} \cdot a_1 \quad (10)$$

$$\Phi_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{for } f_{ij} < f_t \\ 1 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (11)$$

$$a_0 = \frac{1}{N_0} \sum_{f_{ij} < f_t} f_{ij}, \quad a_1 = \frac{1}{N_1} \sum_{f_{ij} \geq f_t} f_{ij} \quad (12)$$

但し、 $N_0$  は  $f_{ij} < f_t$  であるような画素の数を、 $N_1$  は  $f_{ij} \geq f_t$  であるような画素の数を示す。また、 $f_t$  は次式で定義される。

$$f_t = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f_{ij} \quad (13)$$

本符号化では、ブロックサイズ  $N$ 、階調成分  $a_0, a_1$ 、分解能成分  $\Phi_{ij}$  が符号化、伝送される。

アダプティブ・ブロック符号化では、ブロックサイズ  $N$  を画像の局所的な性質に応じて切り換える。符号化手順は以下のとおりである。

(1) まず、ブロックサイズ  $N=4$  とし、階調成分として  $a_0, a_1$  を、分解能成分として  $\Phi_{ij}$  を用いてブロック符号化する。[モード B]

(2) (1) の符号化によりブロック内平均 2 乗誤差があるしきい値  $t_1$  を越えた場合、ブロックサイズ  $N=2$  とし、階調成分  $a_0, a_1$ 、分解能成分  $\Phi_{ij}$  を用いて符号化する。[モード C]

(3) (1) の符号化による階調成分  $a_0, a_1$  の差  $(a_1 - a_0)$  が、しきい値  $t_2$  以下の場合、ブロックサイズ  $N=4$  のままで、階調情報  $a_m = (a_0 + a_1)/2$  だけを用いて符号化する。[モード A]

## 2.4 ベクトル量子化を用いた符号化<sup>(7)</sup>

ベクトル量子化の基本概念を以下に示す。入力信号系列の  $k$  個のサンプルをブロック化して入力ベクトル  $X = [x_1, x_2, \dots, x_k]$  とし、これの属する  $K$  次元ユークリッド空間を  $R$  とする。次式を満たすように  $R$  を  $N$  個の部分空間  $R_i$  に分割する。

$$\bigcup_{i=1}^N R_i = R, \quad R_i \cap R_j = \phi \quad (i \neq j) \quad (14)$$

また、 $R_i$  の代表点  $Y_i$  を次のように表し、その集合を  $Y$  とする。

$$Y_i = [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ik}] \in R_i \quad (15)$$

このとき、ベクトル量子化は  $X$  から  $Y$  へのマッピングとして、次式で表される。

$$Q(X) = Y_i \quad \text{if } X \in R_i \quad (16)$$

本論文では、 $4 \times 4$  のブロック内の 16 個の各画素濃度値よりブロック平均値を除去してベクトル量子化する直流分離ベクトル量子化を行う。このとき、ブロック平均値は別に 8 ビットでスカラ量子化される。

## 3. 計算機シミュレーション

上記の 4 符号化方式に対して、伝送路雑音によるビット誤りが SN 比に及ぼす影響を計算機シミュレーションにより調べた。用いた画像は、 $256 \times 256$  画素、256 階調を持つ SIDBA 標準画像の GIRL と AERIAL である。シミュレーションの条件は、以下のとおりである。

(1) ビット誤り率 BER のランダム誤りを計算機で発生させた。

(2) 各画像に対して、各回ごとに異なった初期値で発生させたランダム誤りを用いて、10 回計算機シミュレーションを行った。各符号化方式に対する SN 比として、10 回のシミュレーションで得られた SN 比の平均値を用いた。用いた SN 比の定義を次に示す。MSE

は、原画像に対する復号画像の平均2乗誤差 (mean square error) である。

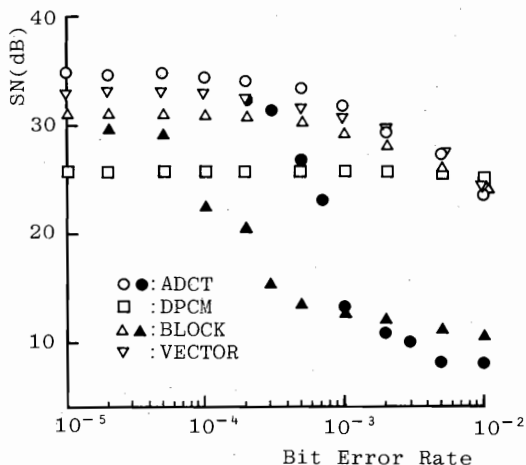
$$SN = 20 \log_{10} \frac{255}{\sqrt{MSE}} \quad (17)$$

(3) 4種の符号化方式において、アダプティブ・コサイン変換符号化のコサイン変換値およびアダプティブ・ブロック符号化のモード情報以外は、固定長符号を用いた。但し、コサイン変換値の符号語長はビット割当て情報で規定される。従って、モード情報以外では、ある符号において発生したビットの誤りが、ハフマン符号を用いたときのように符号語自身の性質により連続的に他に波及するという事はない。

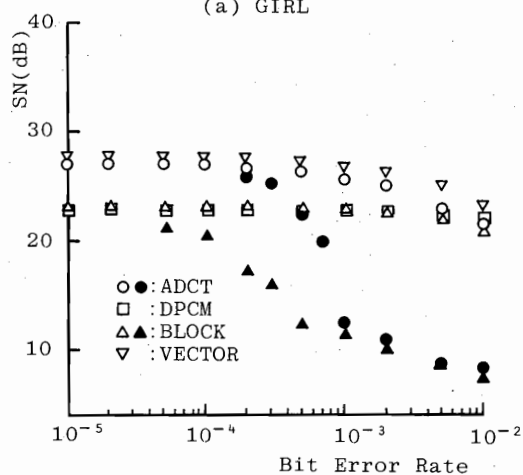
(4) アダプティブ・コサイン変換符号化においては、ブロック分類情報、正規化因子  $c$ 、各クラスのビット割当て情報が重要である。また、アダプティブ・ブロック符号化においては、モード情報が重要な位置を占める。これらの情報にビット誤りが発生した場合、アダプティブ・コサイン変換符号化においてはコサイン変換値の、アダプティブ・ブロック符号化においては階調成分、分解能成分の解釈に誤りが生じ、それ以降に連続的に多大な影響を与えることが予想される。これらを以下では符号化制御情報と呼び、それ以外の符号化データとは区別する。これらの2方式に対しては、符号化制御情報への伝送誤りの影響度を見るため、符号化データにはビット誤りが発生するが、符号化制御情報にはビット誤りが発生しないという仮定を置いた場合と、制御情報にも他の符号化データと同様ビット誤りの発生が起り得る場合の両方についてSN比を求めた。

図1(a), (b)に、それぞれGIRL, AERIALを対象画像とし、平均符号長を約1 bit/pelとしたときのビット誤り率 BER とSN比との関係を示す。また、表1に各符号化方式による平均符号長および設定パラメータを示しておく。図1および表1において、ADCT, DPCM, BLOCK, VECTORはそれぞれアダプティブ・コサイン変換符号化, DPCM符号化, アダプティブ・ブロック符号化, ベクトル量子化による符号化を表している。塗りつぶしたシンボルとそうでないシンボルは、符号化制御情報にビット誤りが発生する場合とそうでない場合を示す。図から、次のようなことが観察される。

(1) 図1(a)では、伝送路誤りがほとんど発生しない場合、アダプティブ・コサイン変換符号化が最も高いSN比を達成し、以下ベクトル量子化による符号化, ア



(a) GIRL



(b) AERIAL

図1 SN比とビット誤り率の関係  
Fig.1 Signal-to-noise ratio vs. the bit error rate.

表1 各符号化方式における平均符号長 (bit/pel)

符号化方式	GIRL		AERIAL	
	平均符号長	設定パラメータ	平均符号長	設定パラメータ
ADCT	0.997	N=8	0.997	N=8
DPCM	1.055	$a_1 = 0.809$ $a_2 = -0.412$ $a_3 = 0.597$	1.055	$a_1 = 0.755$ $a_2 = -0.537$ $a_3 = 0.767$
BLOCK	0.988	$t_1 = 400$ $t_2 = 20$	0.968	$t_1 = 2500$ $t_2 = 55$
VECTOR	1.000	出力ベクトル 256個	1.000	出力ベクトル 256個

表2 ベクトル量子化に対する SN 比 (dB)

符号化画像	トレーニング画像	
	GIRL	AERIAL
GIRL	33.03	31.75
AERIAL	23.63	27.71

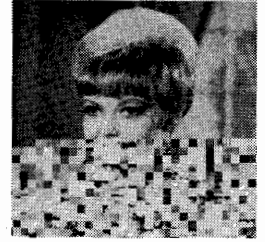
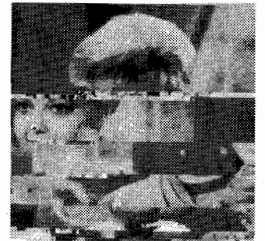
アダプティブ・ブロック符号化, DPCM 符号化の順になっている。一方, 図1(b)では, ベクトル量子化による符号化が最も高い SN 比を達成している。しかし, ベクトル量子化の効率は, トレーニングシーケンスと符号化画像の統計的性質の適合性に依存する。図1のベクトル量子化では, 各対象画像のブロックをトレーニングシーケンスとして, 画像ごとに別々の出力ベクトルセットを抽出したため, 最適な量子化効率を得られている。ところが実際の適用においては, 符号化するいくつかの画像に共通な出力ベクトルセットを用いるであろうから, 図1で得られている結果より SN 比は悪くなることが予測される。表2に, 符号化画像と異なるトレーニング画像を用いた場合の SN 比を示す。但し, 制御情報にビット誤りが発生しないとしたときのものである。この表では, GIRL で約 1 dB, AERIAL で約 4 dB SN 比が劣化している。これらのことを考慮すると, ベクトル量子化による SN 比は, アダプティブ・ブロック符号化による SN 比とほぼ同等であると考えられる。

(2) 伝送路誤りの余り発生しない, BER が  $10^{-4}$  以下の場合には, 各符号化方式とも SN 比の劣化は余り見られない。

(3) BER が  $10^{-4}$  を越えると, 徐々に SN 比が劣化していく。しかし, DPCM 符号化に関しては, ビット誤り率の影響を受けず SN 比は余り劣化していない。これは, 平均符号長 1 bit/pel が DPCM に対しては過酷な条件であり, SN 比の劣化が量子化誤差の中に吸収されてしまうためと考えられる。後の図3で示すように, 平均符号長を長くしたときには SN 比は劣化する。

(4) アダプティブ・コサイン変換符号化, アダプティブ・ブロック符号化において, BER が  $10^{-4}$  以下では, 制御情報を保護しない場合と保護する場合の差はほとんどない。しかし, BER が  $10^{-4}$  を越えると, 制御情報を保護しない場合, SN 比は大きく劣化し始め, BER が  $10^{-3}$  程度になると SN 比はかなり悪化する。

図2に, 復号画像の例を示す。図2(a), (b)は, アダプティブ・コサイン変換符号化において制御情報

(a)ADCT  
with no errors in the  
control information(b)ADCT  
with errors in the  
control information(c)BLOCK  
with no errors in the  
control information(d)BLOCK  
with errors in the  
control information

(e)DPCM



(f)VECTOR

図2 復号画像例 (BER =  $10^{-3}$ )

Fig. 2 Examples of decoded images.

にビット誤りが発生しない場合と発生した場合の復号画像, 図2(c), (d)は, アダプティブ・ブロック符号化において制御情報にビット誤りが発生しない場合と発生した場合の復号画像, 図2(e), (f)はそれぞれ DPCM 符号化, ベクトル量子化を用いた符号化による復号画像である。これらの復号画像からわかるように, 制御情報が保護されている場合には, ビット誤りが生じても復号画像の概要は認識できるが, 制御情報にビット誤りが発生した場合, 復号画像の認識は著しく困難となっている。従って, 符号化制御情報を持つアダプティブ・コサイン変換符号化, アダプティブ・ブロック符号化では, BER が  $10^{-4}$  を越えると制御情報の誤り制御が必要となる。そのための処理量や符号

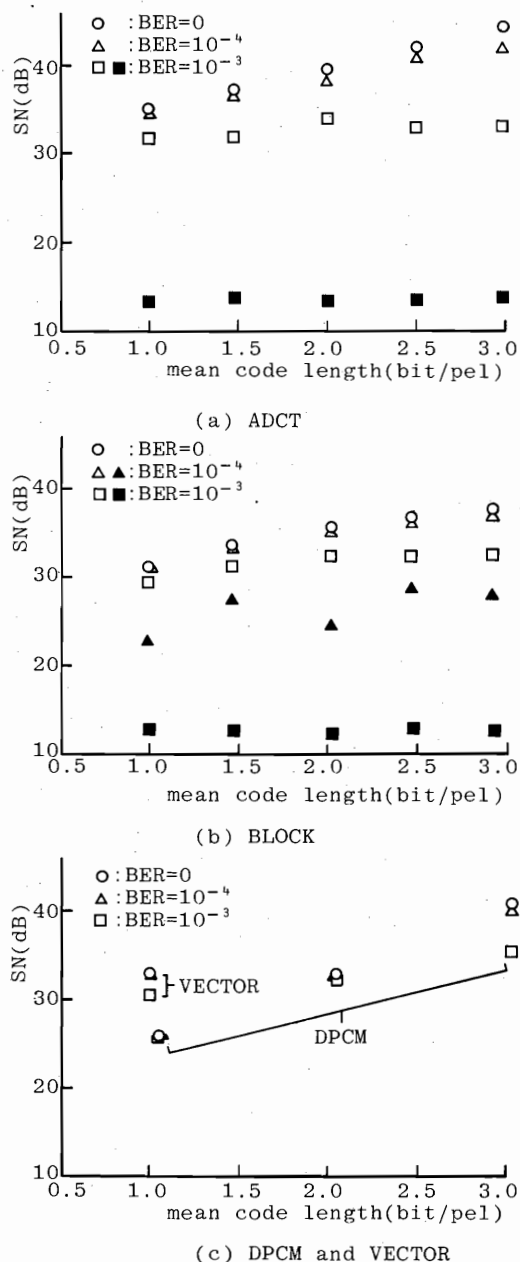


図3 SN比と平均符号長の関係

Fig. 3 Signal-to-noise ratio vs. the mean code length.

量の増加を考えると、BERが $10^{-3}$ 程度ではベクトル量子化による符号化が有利である。

更に、図3に各符号化方式による平均符号長(mean code length)を1, 2, 3 bit/pelとしたときの、BERが0,  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ に対するSN比を示す。符号化画像はGIRLである。図中、○はBER=0におけるSN比を、

△, □は、制御情報にビット誤りが発生しない場合の、それぞれBER= $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ におけるSN比を、▲, ■は、制御情報にビット誤りが発生する場合の、それぞれBER= $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ におけるSN比を表している。得られた結果は、当然、平均符号長が大きくなるに従いSN比が大きくなっている。また、ビット誤りによるSN比の劣化の度合いは、平均符号長が長くなるにつれ大きくなっていることが分かる。アダプティブ・コサイン変換符号化、アダプティブ・ブロック符号化では、図1にも示されているように、制御情報にビット誤りが発生する場合、BERが $10^{-3}$ ではSN比がかなり悪く、その値は平均符号長に関わらず一定となっている。この図3から、平均符号長を変えても図1とほぼ同様の傾向が見られることがわかった。

#### 4. 誤り制御

本章では、符号化制御情報をブロック化し、各ブロックに対して誤り検出/訂正符号を付加して誤り制御を行う場合について検討する。

##### 4.1 誤り検出/訂正符号<sup>(9)</sup>

ある符号が与えられたとき、その符号に属するあらゆる符号語間のハミング距離の中で、最小の値をその符号の最小距離 (minimum distance of the code) と呼び、 $d_{\min}$ で表す。符号の最小距離 $d_{\min}$ と誤り検出/訂正の関係は次の定理1, 定理2で与えられる。

[定理1]

符号の最小距離 $d_{\min}$ が,

$$d_{\min} \geq 2t + 1 \quad (18)$$

を満たすならば、この符号は $t$ 個以下のいかなる誤りも訂正することができる。

[定理2]

符号の最小距離 $d_{\min}$ が,

$$d_{\min} \geq t + 1 \quad (19)$$

を満たすならば、この符号は $t$ 個以下のいかなる誤りも検出することができる。

本論文では、誤り検出/訂正符号として、巡回符号の中で最も代表的な符号であるBCH符号を用いることにする。この符号は、誤り訂正能力が高く、かつ広範に研究されている符号の一つである。BCH符号の中でも、原始BCH符号は最も重要である。このBCH符号は、符号長 $n=2^m-1$ 、冗長ビット数 $n-k \leq mt$ 、最小距離 $d_{\min}=2t+1$ をもつ符号系であり、 $t$ 個以下の誤りを訂正、もしくは $2t$ 個以下の誤りを検出できる。本論文ではこのBCH符号を用いることにし、以下では

$(n, k)$ BCH 符号と記すことにする。

4.2 計算機シミュレーション結果

誤り検出・再送, 誤り訂正については, 次のような形で計算機シミュレーションを行った。但し, 符号化制御情報だけを誤り制御の対象とし, それ以外の符号化データは, そのまま無手順で伝送することにする。

(1) 符号化制御情報を  $k$  ビットごとのブロックに区切り, 誤り検出による再送を行う。再送は, 符号誤りのない制御情報が得られるまで繰り返し行う。誤り検出の見逃しは起きないと仮定する。但し, 制御情報以外の符号化データに対しては誤り制御を行わないので, この場合の SN 比は, 図 1 で示した, 制御情報にビット誤りが発生しない場合と同じになる。

(2) 符号化制御情報を  $k$  ビットごとのブロックに区切り, 誤り訂正を行う。ビット誤りの個数が符号の誤り訂正能力を越えた場合には, 誤って復号化されてしまう。その際, どのような符号に復号されるかは復号アルゴリズムに依存する。しかし, 本論文では, 簡単のため, 受信された符号がそのまま復号器の出力として現れると仮定する。

対象とした符号化方式は, 符号化制御情報を持つアダプティブ・コサイン変換符号化とアダプティブ・ブロック符号化である。図 4 に, GIRL をアダプティブ・コサイン変換符号化し,  $(31, 21)$ ,  $(63, 51)$ ,  $(127, 113)$  BCH 符号を用いて誤り検出・再送 (ARQ: automatic repeat request) を行ったときの伝送ビット増加率  $r$  を示す。このとき, 共に誤り検出能力  $2t=4$  である。伝送ビット増加率  $r$  の定義を次に示す。

$$r = \frac{(\text{ブロック長}) \times (\text{全送信ブロック数}) - (\text{元の制御情報ビット数})}{(\text{元の制御情報ビット数})} \quad (20)$$

但し, 1 ブロックには, 制御情報  $k$  ビットと誤り検出符号  $(n-k)$  ビットが含まれている。例えば, ブロックの再送がない, すなわち各ブロックの送信回数が 1 のとき,  $r = (\text{付加した誤り検出符号の総ビット数}) / (\text{元の制御情報ビット数})$  となる。図から, あるビット誤り率までは, 伝送ビット増加率は割りと平たんであるが, ビット誤り率が大きくなると, 急激に伝送ビット増加率が上昇することが分かる。また, ビット誤り率が小さいところではブロック長を大きくする方が有利であ

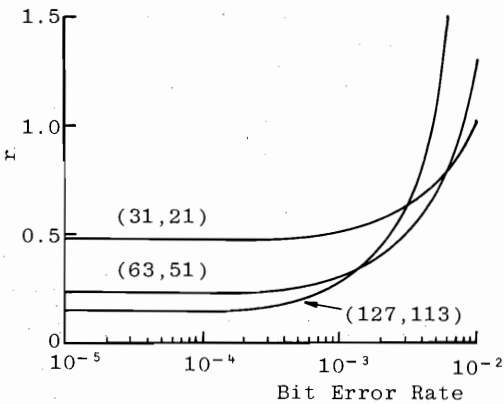
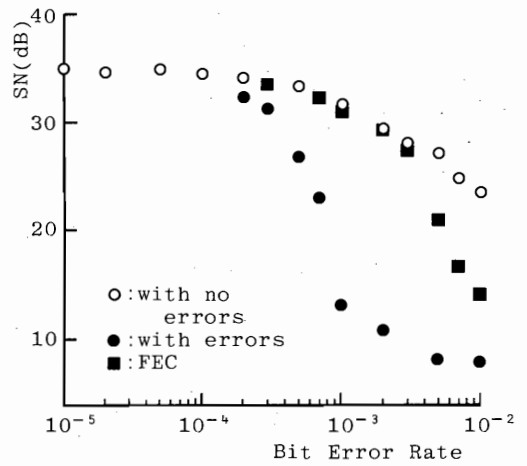
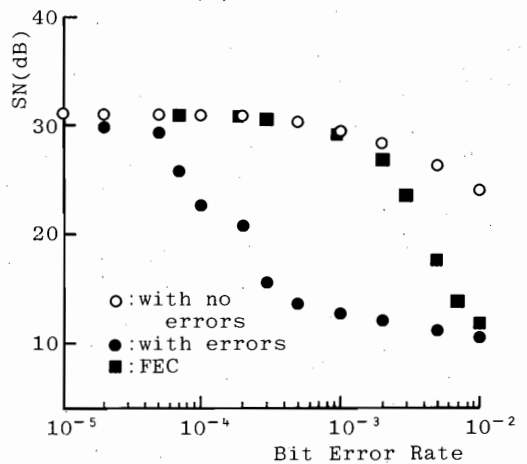


図4 誤り検出・再送を行ったときの伝送ビット増加率  $r$  とビット誤り率の関係  
Fig. 4 Increase rate  $r$  of transmitted bits vs. the bit error rate for the ARQ scheme.



(a) ADCT



(b) BLOCK

図5  $(127, 106)$  BCH 符号により誤り訂正を行ったときの SN 比とビット誤り率の関係  
Fig. 5 Signal-to-noise ratio vs. the bit error rate for the FEC scheme with  $(127, 106)$  BCH code.

る。しかし、ビット誤り率が大きくなるにつれ、ブロック長の大きい方がブロック内での誤りの発生が頻繁になるため、急激に伝送ビット増加率が上昇する。従って、使用する通信回線の品質により最適なブロック長が存在する。図5に、GIRLをアダプティブ・コサイン変換符号化、アダプティブ・ブロック符号化し、制御情報に対して誤り訂正(FEC: forward error correction)を行ったときのSN比の変化を示す。用いた訂正符号は(127, 106) BCH符号で、訂正能力 $t=3$ である。この場合に伝送された制御情報の符号量は、アダプティブ・コサイン変換符号化が元符号量2848ビットに対して3429ビットになり、アダプティブ・ブロック符号化が元符号量8147ビットに対して9779ビットになっている。図中、○, ●, ■はそれぞれ制御情報にビット誤りの発生しない場合、発生する場合、誤り訂正を行った場合のSN比を示している。図から、誤り訂正による改善効果が見られる。特に、アダプティブ・コサイン変換符号化よりアダプティブ・ブロック符号化の方が改善効果がより大きく、有効であるといえる。また、両方式とも用いたBCH符号ではビット誤り率が $10^{-3}$ を越えると、訂正能力を失い、従って急激にSN比が劣化している。ビット誤り率が $10^{-3}$ 以下の通信回線では、(127, 106) BCH符号が適当と思われる。

これらの結果から、当然のことではあるが、ある程度誤り訂正能力に余裕を持たせた誤り訂正方式の方が、誤り検出による再送方式よりも有利であることが分かる。但し、誤り訂正能力が大きくなると、復号器の構成が複雑になるので、この点との兼ね合いが問題である。

## 5. むすび

上記で得られた結果を、SN比、誤り制御の処理量の観点からまとめる。

(1) ビット誤り率が $10^{-4}$ 以下の場合、各方式ともほとんど復号誤りを生じないので、誤り制御の必要がない。このような条件では、SN比の最も高いアダプティブ・コサイン変換符号化が有効である。

(2) ビット誤り率が $10^{-4}$ から $10^{-3}$ 程度では、ビット誤りによるSN比の劣化が見られる。アダプティブ・コサイン変換符号化、アダプティブ・ブロック符号化では、符号化制御情報にビット誤りが生じた場合、SN比の劣化の度合いが大きい。そのため、制御情報に対する誤り制御を必要とし、処理量が増す。一方、ベク

トル量子化による符号化では、制御情報を必要とせず、SN比の劣化の度合いもわずかである。従って、SN比を最優先する場合は、処理量は増えるが、アダプティブ・コサイン変換符号化が適し、処理量が少ない方がよい場合はベクトル量子化による符号化が適している。

(3) ビット誤り率が $10^{-3}$ 以上となると、アダプティブ・コサイン変換符号化、アダプティブ・ブロック符号化では制御情報の誤り制御のオーバーヘッドが大きくなり、かなり効率が悪くなる。この程度のビット誤り率では、誤りの広がりがあるブロック内に留まるベクトル量子化による符号化が有利である。

なお、上記の結果はSN比と誤り制御による処理量だけを考慮したものであり、符号化・復号化処理量を考慮していない。これらの処理量も考慮した検討が今後の課題である。

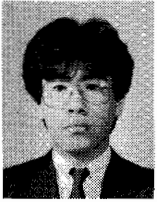
謝辞 SIDBA標準画像を御提供頂いた東京大学生産技術研究所多次元画像情報処理センター関係者各位に感謝致します。

## 文 献

- (1) W. K. Pratt: "Digital image processing", John Wiley & Sons (1978).
- (2) 保坂, 三ツ矢, 末永: "静止画像用符号化方式の比較検討", 信学技報, **IE83-106**(1984-02).
- (3) D. Bodson and R. Schaphorst: "Compression and error sensitivity of two-dimensional facsimile coding techniques", Proc. IEEE, **68**, 7, pp. 846-853 (July 1980).
- (4) W. Chen and C. H. Smith: "Adaptive coding of monochrome and color images", IEEE Trans. Commun., **COM-25**, 11, pp. 1285-1292 (Nov. 1977).
- (5) A. Rosenfeld and A. C. Kak: "Digital picture processing", Academic Press (1976).
- (6) 岸本, 三ツ矢, 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 (昭54-01).
- (7) 村上, 浅井, 太田: "画像信号のベクトル量子化器", 信学技報, **IE82-39**(1982-07).
- (8) 下野, 北島, 竹村, 小川: "DPCM伝送方式における伝送路エラーと予測係数について", 信学技報, **IE84-109**(1985-03).
- (9) 宮川, 岩垂, 今井: "符号理論", 昭晃堂(1974).

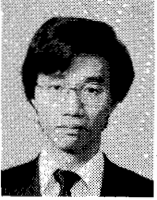
(昭和62年2月20日受付)





**海野 健弘**

昭 60 名工大・工・情報卒，昭 62 同大学院修士課程了。現在，三菱重工株式会社名古屋航空機製作所勤務。在学中，画像の圧縮符号化に関する研究に従事。



**高橋 健一**

昭 52 名工大・工・情報卒，昭 54 同大学院修士課程了。同年同大情報助手。現在，同大講師。この間，画像の強調処理およびデータ圧縮符号化の研究に従事。工博，IEEE，画像電子学会各会員。



**田坂 修二**

昭 46 名工大・工・電気卒，昭 51 東大大学院博士課程了。同年名工大情報勤務。現在，同大助教授。昭 59 UCLA 客員研究員（文部省在外研究員）。計算機網の性能評価の研究に従事。IEEE，情報処理学会各会員。著書「Performance Analysis of Multiple

Access Protocols」(MIT Press)。