画像記録のための信号処理(2)

—符号誤り訂正—

正会員 上 條 晃 司[†], 正会員 上 原 年 博[†]

1. ま え が き

マルチメディアシステムのキーデバイスとして、画像情報のデジタル記録機器がある。その記録機器としては、デジタルVTR、磁気ディスク、光ディスク、半導体メモリー等が用いられている。

記録機器では、媒体等から発生する雑音により記録符号に誤りを生じるので、誤り訂正技術はデジタル記録にとって必要不可欠な技術である。現在、記録機器の高密度化が急激に進んでおり、高密度化による誤りの増大に対処するために、誤り訂正技術の重要性はますます高まっている。

今回は、記録技術の観点から誤り訂正技術について解説する。誤り訂正技術の基本は符号理論である^{1)~5)}。符号理論は代数学としての美しい理論体系を持つが、ここでは数式の厳密な展開は紙面の関係から省略して、物理概念の解説に重点を置く。さらに、デジタルVTR、磁気ディスク、光ディスクにおいて用いられている誤り訂正符号を具体的に説明する。

2. 通信路モデル

2.1 記録再生系の通信路モデル

デジタル通信では、情報に検査ビット(パリティ)を付加することにより、通信路で発生する符号誤りを訂正・検出することができる。誤り訂正符号は、そのシステムの誤りの性質を把握して適切に選択する必要がある。

誤り訂正符号は、その性質からブロック符号と畳み込み符号に分類される。ブロック符号は、一定長の情報列(ブロック)単位で処理が完了する符号である。畳み込み符号は、ブロック単位で処理が行われるが、過去のブロックが現在のブロックにも影響を与える符号である。実用化されているデジタル映像記録機器ではすべてブロック符号が用いられているので、ここではブロック符号を中心に話を進める。

記録再生系は離れた場所で、あるいは時間的に遅れて情報のやり取りを行うので、一種の通信路と見なすことができる。そこで、記録再生系を図1に示すように通信路としてモデル化し、その性質を考える。

図1 記録再生系の通信路モデル

[†] NHK 放送技術研究所

“Digital Image Recording Technologies — Toward Multimedia Era — ; (3) Signal Processing Technology for Video Recording (2)” by Koji Kamijo and Toshihiro Uehara (NHK Science and Technical Research Laboratories, Tokyo)

情報源から発生する0, 1のビット列は、定量的な取扱いを容易にするためにブロック符号に変換される。初めに、情報ビット列は符号器において k ビット毎のブロックとしての情報列 $\mathbf{i}=(i_1, i_2, \dots, i_k)$ に区切られる。次に p ビット($n-k>0$)のパリティが付加され、 n ビットの記録符号語 $\mathbf{w}=(a_1, a_2, \dots, a_n)$ が構成される。ここで、 n を符号長、 k を情報ビット長という。符号語全体の集合を符号といい、符号長が n 、情報ビット長が k である符号を (n, k) ブロック符号と呼ぶ。

記録再生系では、変調器から記録媒体、記録再生ヘッド、復調器に至る部分を通信路と考える。符号誤りの原因となる雑音は主に記録媒体から発生する。この通信路を線形と仮定すると、再生符号語 $\mathbf{y}$ は記録符号語 $\mathbf{w}$ に誤り系列 $\mathbf{e}=(e_1, e_2, \dots, e_n)$ を加算することで得られ、

$$\mathbf{y} = \mathbf{w} + \mathbf{e} \quad (1)$$

で表現される。誤り系列 $\mathbf{e}$ は、誤りパターンと呼ばれる。誤りパターンは通信路によってそれぞれ性質が異なり、この性質の把握が誤り訂正符号を選択する上で重要である。

復号器では再生符号語 $\mathbf{y}$ をもとに記録された情報列 $\mathbf{i}$ を推定し、推定情報列 $\hat{\mathbf{i}}$ を得る。

2.2 記録再生系の誤りパターン

誤りをその性質から分類すると、ランダム誤りとバースト誤りになる。ランダム誤りは個々のビットに独立して発生する誤りであり、記録再生系では、主に媒体雑音やヘッドインピーダンス雑音等により発生す

る。バースト誤りは複数ビットにわたり連続的に発生する誤りであり、記録媒体の傷等に起因して発生する。一方、 m ビットからなるシンボル(バイトと呼ぶ)毎に処理を行う符号において、バイト単位で発生する誤りを、特にバイト誤りという。

一般に通信路の誤りは、ランダム誤りとバースト誤りの混在した複合誤りになる⁴⁾。VTRの誤りパターンの一例を図2に示す⁹⁾。同図より、VTRの誤りパターンはバースト誤りが比較的多い複合誤りであることがわかる。磁気ディスク⁷⁾、光ディスク⁸⁾の誤りパターンも同様にバースト誤りが多い複合誤りとなる。

3. 誤り訂正・検出の原理

3.1 誤り訂正・検出の概念

誤り訂正・検出は、符号語間のハミング距離の差を利用する。ハミング距離とは、2つの符号語 $\mathbf{u}, \mathbf{v}$ において対応する位置のビットが異なっている箇所の数をいう。ある符号において、各符号語間のハミング距離の最小値を最小ハミング距離 d_{min} という。

誤りが発生すると、一般に誤り位置と誤りパターンがわからない。しかし、4.3節で説明する積符号のように、符号を工夫することで、誤りパターンはわからないが、誤り位置を知ることができる。前者の場合に用いられる誤り訂正方法を単に誤り訂正といい、後者に用いられる方法を消失誤り訂正(イレージャ訂正)¹⁾²⁾⁴⁾と呼ぶ。

まず、誤り訂正・検出の概念について説明する。 (n, k) ブロック符号において、 k ビットの情報列は k 次元信号空間で表すと、図3(a)に示すようにハミング距離が1となり情報列が隣合うので、誤りの発生を判別できない。そこで、誤り訂正・検出を行うために、この情報列に適切なパリティを付加することで、図3(b)に示すような n 次元空間で最小ハミング距離が d_{min} となるように、符号長が n ビットの符号語を構成する。すなわち、 2^n 個の符号語を割り当てられる信号空間に 2^k 個だけ記録符号語を割り当てることで、最小ハミング距離 d_{min} を確保している。ここで、各符号語が正しく訂正できる領域を復号領域と呼び、どの符号語の復号領域にも属さない部分を誤り検出領域と呼ぶ。復号領域は図3(b)のように重複しない位置に配置される。

この信号空間における復号では再生符号語が、①記録符号語に対応する復号領域に入る場合、②記録符号語と異なる復号領域に入る場合、③記録符号語と異なる復号語に一致する場合、④誤り検出領域に入る場合

図2 VTRの誤りパターンの一例⁹⁾

がある．①は正しい記録符号語が推定されるので正しい訂正，②は誤った推定がなされるので誤訂正（ごていせい），③は誤りを検出できないので誤り見逃し，④は誤り検出と呼ばれる．誤訂正と誤り見逃しを併せ

て復号誤りという．復号誤りが少ないことは，誤り訂正符号の重要な条件のひとつである．

次に，図3(b)中の2つの符号語を抜き出し，最小ハミング距離と誤り訂正・検出の関係を考える²⁾．

d 個以下の誤り（ d 重誤り）を検出するための条件は，ある符号語の誤り検出領域が隣の符号語に接しないことである（図4(a))．すなわち

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

となればよい．

t 重誤りを誤り訂正するためには，それぞれの符号語の復号領域が接しなければよい（図4(b))．その条件は

$$d_{\min} \geq 2t+1 \quad (3)$$

である．

t 重誤りまで誤り訂正し，それ以上 $t+d$ 重まで誤り検出する場合は，ある符号語の復号領域が隣の符号語の誤り検出領域と接しなければよいので（図4(c))

$$d_{\min} \geq 2t+d+1 \quad (4)$$

を満足すればよい．

t_e 重の誤りを訂正する消失誤り訂正では，誤り位置がわかっているので，復号（消失訂正）領域は他の符号語に接しなければよい（図4(d))．すなわち

$$d_{\min} \geq t_e+1 \quad (5)$$

図3 誤り訂正・検出の概念

図4 誤り訂正・検出と最小距離

という条件である。

このように、誤り訂正と検出に本質的な差はない。つまり、最小ハミング距離を訂正能力と検出能力に分配しているわけである。一般に、 d_{min} が大きくなるほど、誤り訂正・検出能力が向上する。

誤り訂正能力は(3)式から次のように表せる。すなわち、ブロック中の誤り訂正可能なビット数 t は

$$t \leq (d_{min} - 1) / 2 = p / 2 \quad (6)$$

となり、パリティ数の $1/2$ までの誤りを訂正できる。

一方、消失誤り訂正の訂正能力は、ブロック中の消失誤り訂正可能なビット数を t_e とすると、(5)式から

$$t_e \leq d_{min} - 1 = p \quad (7)$$

で表される。(6)式に比べ復号領域が2倍に拡大する。

3.2 符号多項式による誤り訂正・検出

誤り訂正符号として多く用いられている巡回符号を例に、符号多項式を用いて誤り訂正・検出を説明する。

巡回符号とは、任意の符号語 $w = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ に対して、巡回置換（各ビットを順次右にずらすこと）を実行した符号語 $w' = (a_n, a_1, \dots, a_{n-1})$ が常に符号語となっている符号をいう。巡回符号は符号器、復号器をシフトレジスタで容易に構成できるので、実用システムに多く採用されている。

ここで、体（たい）という数学的な概念を導入する。体とは四則演算が行える集合のことであり、例えば有理数、実数、複素数全体の集合はそれぞれ体である。元（要素）の数が有限である体をガロア体といい、元の数が q のガロア体を $GF(q)$ と表す。

$GF(2)$ 上の符号語 $w = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ は符号多項式で

$$W(x) = a_1 + a_2 \cdot x + \dots + a_n \cdot x^{n-1} \quad (8)$$

と表すことができる。

記録符号語の符号多項式表現を記録符号多項式と呼ぶと、記録符号多項式 $W(x)$ は、すべての符号語を割り切ることのできる生成多項式 $G(x)$ を用いて

$$W(x) = Q(x)G(x) \quad (9)$$

と表される。ここで $Q(x)$ は商多項式である。

誤りパターン多項式を $E(x)$ とすると、再生符号多項式 $Y(x)$ は記録符号多項式と誤りパターン多項式の和となる。すなわち

$$\begin{aligned} Y(x) &= W(x) + E(x) \\ &= Q(x)G(x) + E(x) \end{aligned} \quad (10)$$

で表される。

余りを求める演算を mod と定義すると、再生符号多項式を生成多項式で除算を行ったときの剰余多項式 $S(x)$ は

$$\begin{aligned} S(x) &= Y(x) \bmod G(x) \\ &= \{Q(x)G(x) + E(x)\} \bmod G(x) \\ &= E(x) \bmod G(x) \end{aligned} \quad (11)$$

となる。これをシンドローム多項式あるいは単にシンドロームと呼ぶ。シンドロームとは病気の症候群の意味であり、符号理論では誤りの状態(症状)のことを表す。(11)式より、 $S(x)$ は記録符号多項式に関わりなく、再生符号語が復号領域内にあるならば誤りパターン多項式により一意に定まる。

誤り検出を行う場合は $S(x) = 0$ か否かをチェックすればよい。誤り訂正は再生符号語が復号領域内の場合に、 $S(x)$ をもとに $Y(x)$ と最小ハミング距離にある $X(x)$ を演算することで実現できる^{1)~5)}。

4. 記録系に用いられる誤り訂正符号

4.1 誤り訂正符号の選択

代表的な誤り訂正符号の特徴と使用例を表1に示す⁹⁾。記録再生系に適する誤り訂正符号の要求条件を考えると、次のようになる。

記録再生系の誤りパターンは、2.2節で示したよう

表 1 代表的な誤り訂正符号

符号の種類		符 号	特 徴	使用例
ランダム誤り訂正符号	ブロック符号	ハミング符号	効率が良い、高速符号化・復号が可能	半導体メモリー
		BCH 符号	設計の自由度が高い、効率が比較的良好	衛星通信
	畳み込み符号	ビタビ復号を用いた畳み込み符号	誤り率を最小にする最適復号が可能	衛星通信 深宇宙通信
バースト誤り訂正符号	ブロック符号	ファイア符号	効率が余り良くない、装置が簡単、高速	磁気ディスク
	畳み込み符号	岩垂符号	効率が良い、装置が非常に簡単	移動通信
バイト誤り訂正符号	ブロック符号	RS 符号	誤り訂正能力・符号長など設計の自由度が高い、効率が非常に良い、装置が比較的良好	デジタル VTR, CD, 磁気ディスク等

にバースト誤りの比較的多い複合誤りである。したがって、誤り訂正符号は、ランダム誤り、バースト誤りのいずれに対しても高い訂正能力を持つ必要がある。しかも記録容量が限られていることから、少ないパリティの付加率で、復号誤りが実用上問題ない程度に少なく、かつ訂正能力の高い誤り訂正符号が望まれる。

この要求条件を満たす誤り訂正符号として、一般の記録システムではバイト誤り訂正符号であるRS (Reed-Solomon) 符号が採用されており、一部の磁気ディスクではバースト誤り訂正符号であるファイア符号が用いられている。

4.2 RS (Reed-Solomon) 符号

RS 符号は、 m ビットを1シンボルとして扱い、シンボル単位で誤り訂正を行う。この符号は符号長を N シンボル、データ長を K シンボル、パリティ長を P シンボル、最小ハミング距離を D_{min} とすると

$$\left. \begin{aligned} \text{符号長: } N &\leq 2^m - 1 \\ \text{データ長: } K &= N - P \\ \text{最小ハミング距離: } D_{min} &= P + 1 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

の条件を満たす。この関係にあるRS符号をRS(N, K)符号と呼び、その構成を図5に示す。RS符号はシンボル単位でデータを扱うので、ビット単位の符号との混乱を避けるために、ここではシンボル数を表すアルファベットを大文字で示すことにする。

RS符号の誤り訂正能力は3.1節の議論と同様に表され、ブロック中の誤り訂正可能な誤りシンボル数 T は

$$T \leq (D_{min} - 1) / 2 = P / 2 \quad (13)$$

となる。消失誤り訂正の場合、訂正可能なシンボル数 T_e は

$$T_e \leq D_{min} - 1 = P \quad (14)$$

で表される。

RS符号は、ある最小ハミング距離を得るためのパリティ数が理論上最小で、訂正能力の高い符号である。この符号の特徴としては、符号長、データ長、パリティ長を、ある範囲内で任意に選ぶことができること、巡回符号の一種であり回路構成が容易なこと、復号アルゴリズムが比較的簡単であることなどがあげられる。

図5 RS(N, K)符号

さらに高い訂正能力を得るために、次節で説明する積符号構成として用いられることが多い。

4.3 RS 積符号

RS積符号は、行方向に内符号ブロックRS(N_1, K_1)、列方向に外符号ブロックRS(N_2, K_2)を図6に示すように2次的に配置した符号である。この符号の最小ハミング距離は、それぞれの符号の最小ハミング距離の積となるので、誤り訂正能力が大幅に向上する^{2)~4)}。

積符号の特徴は、通信路に適した符号構成とすることが可能であり、ランダム誤りとバースト誤りを別々に訂正する設計が、比較的容易に実現できることである。さらに、消失誤り訂正を用いて誤り率の改善を図れることも特徴のひとつである。

RS積符号の誤り訂正能力は、復号方法により異なるが、ここではVTRに用いられている訂正方法の一例を説明する¹⁰⁾。

積符号の誤り訂正は、図7(a),(b)に示すように、内符号訂正、外符号訂正の順で行う。

内符号訂正ではまず誤り検出を行い、次に誤り訂正を誤り検出で得られた誤りシンボルの数により以下の3種類に分けて行う。①誤りのシンボル数 T がパリティ長 P の1/2よりも小さい場合($T < P/2$)は誤り訂正が可能であり、誤りを訂正するとともに復号誤りのチェックを行う。②誤り訂正能力の限界($T = P/2$)となる場合は誤り訂正を行うが、復号誤りのチェックができないので、内符号ブロック内のすべてのシンボルに誤りフラグを立てて出力する。③誤り訂正能力を越える場合($T > P/2$)は誤り訂正を行わず、内符号ブロック内のすべてのシンボルに誤りフラグを立てて出力する。

内符号訂正ではランダム誤りのほか、数シンボルの

図6 RS積符号構成

図 7 VTR に用いられている誤り訂正アルゴリズムの一例

短いバースト誤りを訂正する。

外符号訂正では、誤り訂正能力の範囲内である場合 ($T < P/2$) は誤り訂正を行う。誤り訂正能力の限界まで訂正が必要な場合 ($T = P/2$)、および誤り訂正能力を越える場合 ($T > P/2$) は、誤り訂正を行わず消失誤り訂正に任せる。この時、内符号訂正において付加された誤りフラグの数 F がパリティ長 P 以下の場合 ($F \leq P$) は誤りフラグを位置情報として消失誤り訂正を行い、消失誤り訂正能力を越える場合 ($F > P$) は誤りフラグを消去せずに付加したまま出力する。この積符号構成では、消失誤り訂正により最大 $N_1 \times (N_2 - K_2)$ シンボルのバースト誤りを訂正可能である。

ランダム誤りに対する内符号、外符号による誤り訂正後の誤り率の一例を図 8 に示す。外符号による誤り訂正、消失誤り訂正の効果が大きいことがわかる。

4.4 誤り修整

誤り訂正において、訂正不能となり誤りフラグを付加された映像・音声データについては、隣接サンプルとの相関を利用して元の値に近い値を推定して置き換える操作を行う。これを誤り修整(コンシールメント)という。

画像の修整方法として、コンポジット映像信号を記

図 8 ランダム誤りに対する誤り訂正能力の一例

録する D-3 VTR の場合を例に説明する¹⁰⁾。修整は図 9 に示す画素を用いてプライオリティの高い順に、すなわち (a) ~ (e) の順に行う。

(a) は、修整する画素の左右それぞれ 4 画素すべてに誤りがない場合に、すべての画素を用いて修整する。この場合が最も精度良く修整できる。(b) は、図

図 9 修整に用いる画素と修整のプライオリティ

図 10 インターリーブとシャフリング

に示す画素すべて、または修整する画素のラインを含む上半分、または下半分の画素すべてに誤りがない場合に、(c)は、修整する画素を中心に点対象な2つ以

上の画素に誤りがない場合に、(d)は、図中の1つ以上の画素に誤りがない場合に、これらの画素を用いて修整する。(e)は、1フレーム前の同じ位置の画素と置き換えることで修整を行っている。

4.5 インターリーブとシャフリング

インターリーブとシャフリングの概念を図10に示す。インターリーブは交錯法とも呼ばれ²⁾、列方向に誤り訂正ブロックを構成し、誤り訂正方向と直交する方向にシンボルを記録再生することであり、バースト誤りを誤り訂正ブロック上で分散させる働きを持つ。このことにより、バースト誤りに対する誤り訂正能力をランダム誤りへの訂正能力と同程度まで向上させることができる。RS積符号において外符号ブロックを構成することもインターリーブの一種である。

シャフリングは、映像・音声データの記録において、誤り修整能力を高めるために行う。記録されるデータが映像の場合は画面上において、音声の場合は時間軸上において、隣接サンプルが記録媒体上で互いに離れるように、ある規則にしたがって分散される。このことから、誤り訂正能力を越えるバースト誤りが発生しても、シャフリングを行うことにより、隣接サンプルが誤る確率が小さくなることから、精度の高い修整ができる。

一般に、磁気ディスク、光ディスクではインターリーブを、デジタルVTRではインターリーブとシャフリングを組合せて使用している。

5. 記録機器における誤り訂正の具体例

5.1 デジタルVTR

現在までに開発された放送用デジタルVTRの誤り訂正符号の構成を表2に示す。

誤り訂正符号は、ランダム誤りとバースト誤りを効率良く訂正するために、GF(2⁸)上のRS積符号がすべてのデジタルVTRに採用されている。この符号の最大符号長は255である。

表2に示した符号構成を見ると、VTRの開発年とともに内符号、外符号中に付加されるパリティ数が増え、積符号ブロックも大きくなっている。積符号ブロックの大きさによるD-1、D-2、D-3、D-6 VTRの訂正能力を図11に比較して示す。誤り訂正能力は、パリティ付加率を増やすことで高まる。一方、パリティ付加率が同程度であっても、積符号ブロックを大きくして積符号ブロック中のパリティ数を増やせば、最小ハミング距離が長くなるので誤り訂正能力を高めることができる。積符号ブロックは年々大きくなり、1985年に開発されたD-1 VTRを基準にすると、

表 2 VTR の誤り訂正符号構成の比較

VTR の種類	RS 積符号構成 ^{*1}		パリティ 付加率(%)	ブロック の大きさ ^{*2}	開発年
	内符号	外符号			
D-1	(64, 60)	(32, 30)	13.8	1.0	1985
D-2 ^{*3}	(95, 87) (93, 85)	(68, 64)	16.0	3.2	1986
1'-D ^{*4}	(110, 104)	(64, 60)	12.8	3.4	1987
D-3	(95, 87)	(136, 128)	16.0	6.3	1990
D-5	(95, 87)	(128, 120)	16.5	5.9	1993
D- β ^{*5}	(178, 164)	(106, 96)	19.8	9.2	1993
D-6 ^{*6}	(227, 211)	(254, 240)	13.9	28.2	1993

*1 GF (2⁸) 上で RS 符号を構成

*2 D-1 の誤り訂正符号ブロックの大きさで正規化

*3 シンクブロックは 2 つの内符号ブロックで構成され、1 番目は RS (95, 87)、2 番目は RS (93, 85)

*4 ハイビジョン用 1 インチデジタル VTR

*5 デジタルベータカム

*6 ハイビジョン用 3/4 インチデジタル VTR

図 11 各種 VTR のランダム誤りに対する誤り訂正能力

1993 年に開発されたデジタルベータカム¹¹⁾では 9.2 倍である。さらに、同年に開発された D-6 VTR¹²⁾では 28.2 倍となり、内符号ブロックの符号長が 227、外符号ブロックの符号長が 254 であり、各符号ブロックの符号長は理論限界近くに達している。それにともない誤り訂正能力も向上している。これは、近年 LSI の高集積化、高速化、低消費電力化が急速に進んだことによって可能になったものである。

5.2 磁気ディスク

記録データの構成方法により、可変データブロックの CKD (Count Key Data) 方式と固定ブロックの

FBA (Fixed Block Architecture) 方式がある。CKD 方式には当初ファイア符号が用いられてきたが、最近では RS 符号が使われ始めている。FBA 方式は当初から RS 符号を用いたものが主流である。IBM 3770 ディスクシステム¹³⁾では、FBA 方式が採用されており、GF(2⁸)上で RS(174, 171)符号を 3 回インタリーブすることによって、バースト誤りの訂正能力を高めている。

5.3 光ディスク

ISO/IEC 規格の 130 mm 光ディスク¹⁴⁾における誤り訂正符号は、1024 バイト/セクタの場合、GF(2⁸)上の RS(120, 104)符号が採用されている。データは 10 回インタリーブされ、10 組の誤り訂正符号ブロックに分割される。したがって、80 バイトまでのバースト誤りを訂正可能である。さらに、復号誤りのチェックのため、10 組の誤り訂正符号ブロックに対して、4 バイト検査バイトを付加している。

CD-ROM は、CD の音声データ領域内にデジタルデータと誤り訂正符号を記録するものである。CD では音声データに誤り訂正符号として GF(2⁸)上の積符号 RS(32, 28)、RS(28, 24)を適用している¹⁵⁾。一方、CD-ROM では、さらに音声データ領域内に積符号 RS(26, 24)、RS(45, 43)を構成し、全体で 4 重に符号化している。その上に、この積符号中に復号誤りのチェックのために 4 バイトの検査バイトを付加することによって、訂正能力を向上させている¹⁶⁾。冗長度は 34%と高いが、これにより CD でのビット誤り率が 10⁻³ のとき、CD-ROM ではビット誤り率を 10⁻²⁰ 程度まで低減できる。

6. む す び

現在、VTR、磁気ディスク、光ディスクのほとんどに RS 積符号が用いられ、実用化されている。この理由は、RS 符号の訂正能力が高いこと、符号構成の自由度が高いこと、シンボル単位の処理ができ復号アルゴリズムが比較的簡単であることなどがあげられる。

誤り訂正能力を向上させるために積符号ブロックの符号長は長くなる傾向にあり、高集積化、高速化、低消費電力化といった LSI の進展とともに、高度な復号アルゴリズムも実用化されるに至っている。RS 符号による誤り訂正は成熟期にはいったといってもいいであろう。

今後は LSI の進歩に合わせた RS 符号の誤り訂正能力の向上、高速処理可能な復号化方式の研究が望まれる。

一方、誤り訂正能力でRS符号を越える性能を持つ畳み込み符号も、最尤復号と組合せて記録再生系に適用されると考えられる。さらに、システムとして最適設計を行うために、誤り訂正符号化と変調、等化等を融合させた符号化変調方式を記録再生系に適用するための研究も進められるものと思われる。

〔参 考 文 献〕

- 1) 羽物：“講座，わかりやすいデジタル符号の誤り検出と誤り訂正の話”，放送技術，**38**，6～39，4（1983）
- 2) 横山，金子ほか：“講座，符号理論の手ほどき”，テレビ誌，**44**，7～45，11（1990）
- 3) 宮川，原島，今井：“情報と符号の理論”，岩波書店（1983）
- 4) 今井：“符号理論”，電子情報通信学会（1990）
- 5) F. J. MacWilliams and N. J. A. Sloan：“The Theory of Error Correcting Codes”，North-Holland Publishing（1977）
- 6) 泉田，三田，土居，今井：“誤りパターンを推定するリードソロモン符号用高能率復号法”，信学論誌，**J72-B-1**，4，pp. 353-359（1989）
- 7) 今井：“誤り検出・訂正符号の最近の動向”，情報処理，**25**，7，pp. 688-696（1984）
- 8) 斉藤，武田：“光ディスクにおけるビット誤り特性の解析”，テレビ誌，**40**，6，pp. 528-534（1986）
- 9) 河野，今井：“誤り訂正符号の応用”，画電学誌，**17**，4，pp. 221-229（1988）
- 10) 大場ほか：“特集，放送用1/2インチデジタルVTR(D-3)の開発研究”，NHK技研R&D，**17**（1991）
- 11) 坂本，須田，喜田：“デジタルベータカムVTRの開発”，テレビ学技報，**17**，59，pp. 27-32（1993）
- 12) 能弾，遠藤，中鹿，木津：“D6フォーマットHDTVデジタルVTR”，信学技報，MR 94-36，pp. 7-12（1994）
- 13) S. Lin and D. J. Costello Jr.：“Error-Control Coding”，pp. 528-531 Prentice-Hall（1983）
- 14) ISO/IEC 9171-2: 1990：“Information Technology-130 mm Optical Disk Cartridge, Write Once, for Information Interchange-Part 2: Recording Format”
- 15) 佐古，小高，古谷：“CD用ECC，CIRCの訂正能力について”，信学技報，IT 82-12，pp. 21-28（1982）
- 16) 佐古，鈴木，古谷，古川：“CD-ROMのデータクオリティについて”，信学技報，IT 85-31，pp. 59-64（1985）

かみじょう こうじ

上條 晃司 昭和53年，電気通信大学応用電子工学科卒業。同年，NHKに入局。室蘭放送局を経て，56年より，同放送技術研究所に勤務。ハイビジョンVTR，超広帯域記録技術に関する信号処理の研究に従事。現在，同所記録・機構研究部主任研究員。正会員。

うえはら としひろ

上原 年博 昭和56年，慶応義塾大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年，NHKに入局。宮崎放送局を経て，59年より，同放送技術研究所記録・機構研究部に勤務。デジタルVTRの高密度記録と信号処理の研究に従事。正会員。