

誤りのある通信路における音声符号化のための遷移を制約したベクトル量子化法について

正 員 埴 雅典<sup>†</sup>      正 員 長谷川孝明<sup>†</sup>

On the Constrained Transition-Vector Quantization Method for Noisy Channel Speech Coding

Masanori HANAWA<sup>†</sup> and Takaaki HASEGAWA<sup>†</sup>, *Members*

あらまし 本論文では、音声の情報源符号化と通信路符号化を融合した新しい符号化法について検討している。符号語間の遷移を制約したコードブックを用いるベクトル量子化法を提案し、これを用いて符号化を行うことで、誤り訂正符号化によって明示的な冗長ビットを付加しなくとも、符号に誤り訂正能力をもたせることができることが示されている。提案する手法と従来の情報源-通信路タンデム符号化方式の性能を比較するために、音声の線形予測ケプストラムを符号化する計算機シミュレーションの結果が示されている。通信路にビット誤りが存在する場合、提案する手法による復号ケプストラムひずみは通常のベクトル量子化法によるものに比べて大幅に低減される。また、通常のベクトル量子化や有限状態ベクトル量子化と畳込み符号を組み合わせたタンデム符号化との比較により、提案する手法は従来のタンデム符号化と同等以上の誤り耐性を有し、その誤り訂正能力は符号化率 1/2 の畳込み符号に匹敵することが示されている。

キーワード 情報源-通信路統合符号化、音声符号化、ベクトル量子化、誤り訂正符号、ビタビアルゴリズム

1. ま え が き

携帯電話などの移動通信システムが急速に普及している。このため、ユーザ数の増加に伴う同時通信局数のひっ迫が予想され、周波数を効率的に利用できる音声符号化法が必要となる。また無線通信路はビット誤り率が大きく非常に劣悪な伝送路であるため、移動通信における音声符号化法は通信路におけるビット誤りに対して強いことが要求される。

周波数の効率的な利用のためには符号から冗長を取り除く必要があり、ビット誤りに対する耐性の強化のためには符号に冗長を含ませなくてはならない。このように高能率化を目的とする情報源符号化とビット誤りに対する耐性の強化を目的とする通信路符号化は本来相反するものであり、独立して行われることが一般的であった。しかし近年、符号化システム全体での符号化特性の向上を目的として、情報源符号化と通信路符号化を融合した符号化方式の検討がいくつかなされ

てきている<sup>(1)-(8)</sup>。

日本のデジタルセルラシステム<sup>(2)</sup>や汎ヨーロッパ移動無線用のハーフレート符号化システム<sup>(3),(4)</sup> には、音声符号化器の出力するビット列の誤り感度(ビット誤りが復号音声に与える影響)を調べ、誤り感度の高いビットほど強力な誤り訂正符号化を行う符号化方式が提案されている。このような方式に対して Farvardin らは符号の誤り感度を下げるように模擬除冷法によってベクトル量子化の符号語への 2 進符号割当てを行うことを提案している<sup>(6)</sup>。また、Moriya は、二つのコードブックの符号語の和でベクトルを表現することで、演算量と記憶量を減らしつつ符号の誤り感度を下げるベクトル量子化法を提案している<sup>(8)</sup>。

このように、これまでに提案された音声の情報源符号化と通信路符号化を融合した符号化方式は、情報源符号の各ビットの誤り感度に応じて非一様な誤り訂正符号化を行う手法<sup>(1)-(4)</sup> と、最適符号配置や構造化ベクトル量子化によって情報源符号の誤り感度を下げる手法<sup>(5)-(8)</sup> の二つのカテゴリーに大きく分けることができる。これらの手法に対して本論文では、情報源符号に残される冗長を積極的に利用してビット誤りの影響

<sup>†</sup> 埼玉大学工学部電気電子工学科, 浦和市  
Faculty of Engineering, Saitama University, Urawa-shi, 338  
Japan

を低減する新しいカテゴリーに属する手法として、遷移を制約したベクトル量子化 (Constrained Transition Vector Quantization: 以下 CTVQ) を提案する。提案するベクトル量子化法を用いることで、明示的に冗長ビットを追加しなくとも、ベクトル量子化によって得られる符号に残存する時間的な冗長性を利用して、通信路で重畳するビット誤りの訂正が可能となる。

本論文の構成は以下のようになっている。まず 2. ではベクトル量子化をビット誤りのある通信路に適用した場合の問題点を明らかにする。3. では CTVQ について、符号化法、符号帳作成法およびビット誤りの訂正法について述べる。続く 4. では、ビット誤りのある通信路において CTVQ を用いて音声の線形予測ケプストラムを符号化する計算機シミュレーションを行った結果を示す。ビット誤りとしてランダムビット誤りを仮定し、復号後のケプストラムひずみにより諸特性の検討を行う。また、通常のベクトル量子化や有限状態ベクトル量子化と畳込み符号を組み合わせたタンデム符号化方式との比較検討を行った結果も示す。これらの結果より、提案する手法は高効率な情報源符号化方式に強力な誤り訂正符号を組み合わせたタンデム符号化方式と同等以上の誤り耐性を有し、高効率でビット誤りにも強い音声符号化法であることを示す。

## 2. ベクトル量子化による音声符号化

本章ではベクトル量子化を用いて音声のスペクトルパラメータを符号化する場合について考察する。

音声信号を一定の周期ごとに分析して得られるスペクトルパラメータは、記憶のある情報源からの出力と考えることができる。そこでスペクトルパラメータが  $P$  次元ベクトルで表されるものとして、離散時間ごとに  $P$  次元実数ベクトルを出力する記憶のある情報源を仮定し、時刻  $t$  における情報源出力ベクトル  $x_t$  をベクトル量子化を用いて符号化することを考える。このとき  $x_t$  の量子化ベクトル  $y_t$  と符号化出力  $\gamma_t$  は、符号語  $c_j$  とそれに対応する符号  $b_j$  を用いて次のように表される。

$$y_t = c_j, \text{ if } \delta(x_t, c_j) \leq \delta(x_t, c_k) \quad (j, k=1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

$$\gamma_t = b_j \quad (2)$$

ここで  $\delta(\cdot, \cdot)$  は二つのベクトルの間に定義される距離尺度であり、符号器は符号帳に含まれる  $N$  個の符号語の中から  $x_t$  に最も近い符号語を探し出し、その符号語に対応する符号を出力することがわかる。このと

き符号帳  $\mathcal{C}$  は以下のように表される。

$$\mathcal{C} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \dots & c_N \\ b_1 & b_2 & \dots & b_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

通信路にビット誤りが存在しない場合の復号ひずみは、符号帳の符号語数が限定されていることに起因する量子化ひずみのみである。しかし通信路にビット誤りが存在する場合には、量子化ひずみに加えて通信路におけるビット誤りに起因するひずみが生じる。式(2)で得られる符号は誤り訂正能力をもたないため、ビット誤りによるひずみを低減するためには通信路符号化、すなわち誤り訂正符号化が必要である。しかし誤り訂正符号化は冗長ビットの付加を必要とするため、高効率化と誤りに対する耐性の強化は相反する訳である。

次章では、符号系列に残存する冗長を利用して明示的な冗長ビットを追加することなくビット誤りによるひずみを低減可能な新しいベクトル量子化法について述べる。

## 3. 遷移を制約したベクトル量子化

本章では、誤りのある通信路への適用を前提とした新しいベクトル量子化法として遷移を制約したベクトル量子化を提案し、符号化法、符号帳作成法およびタビアルゴリズムを用いたビット誤りの訂正法について述べる。

### 3.1 遷移を制約したベクトル量子化法の提案

時点  $t-1$  の量子化ベクトル  $y_{t-1} = c_j$  に続く時点  $t$  の量子化ベクトルが  $y_t = c_k$  のとき、符号語  $c_j$  から  $c_k$  への遷移が可能であると定義する。通常のベクトル量子化では、情報源出力ベクトル  $x_t$  の量子化ベクトル  $y_t$  は、符号帳  $\mathcal{C}$  に含まれるすべての符号語の中から探索を行う。これは任意の符号語間の遷移が許されていることを意味する。

ベクトル量子化の対象として記憶のない情報源の出力を仮定している場合には、任意の符号語間の遷移が等確率で生じる。しかし音声のスペクトルパラメータのような記憶のある情報源の出力を量子化対象として仮定している場合には、符号語間の遷移確率にはばらつきが生じる。このばらつきが大きく、ある符号語間の遷移確率が他の遷移に比べて十分に小さい場合には、その遷移は起こらないものとみなしても復号後のひずみは大きく劣化しないと考えられる。そこで、遷移確率の小さい符号語間の遷移を禁止して、一時点前

に量子化ベクトルに選ばれた符号語から遷移可能な符号語の中から次の量子化ベクトルの探索を行う手法を提案する。以降、提案する手法を遷移を制約したベクトル量子化 (Constrained Transition Vector Quantization: 以下 CTVQ) と呼ぶ。

情報源出力ベクトル系列が禁止した遷移に対応する場合には、それを強制的に他の遷移で表現するために量子化ひずみは増加する。しかし、符号に重畳したビット誤りをピタビアルゴリズムを用いて訂正可能なため、ビット誤りによるひずみを大幅に低減することができるようになる。すなわち CTVQ は、遷移確率の小さな遷移を犠牲にすることで遷移確率の大きな遷移に重畳した誤りを減少させ、結果として全体の復号ひずみを低減させるベクトル量子化法と言える。

CTVQ は記憶のあるベクトル量子化の一種であり、符号語ごとに遷移可能な符号語が限定されるという点が有限状態ベクトル量子化 (FSVQ)<sup>(9),(10)</sup> と類似しているが、FSVQ がベクトル量子化の更なる高効率化を目的としているのに対して、提案するベクトル量子化法は通信路でのビット誤りに対する耐性の強化を目的とする点において FSVQ とは大きく異なる。

### 3.2 符号化アルゴリズム

2. の場合と同様に  $\mathbf{x}_t$  と  $\mathbf{y}_t$  を時点  $t$  における情報源出力ベクトルとその量子化ベクトル、 $\gamma_t$  を符号器が出力する符号とする。このとき、符号化は次の手順で行う。

(1)  $\mathbf{y}_0 = \mathbf{c}_1$ ,  $\gamma_0 = b_1$ ,  $t=1$  とする。

(2) 時点  $t-1$  における量子化出力  $\mathbf{y}_{t-1}$  から遷移可能な符号語の集合を  $\Gamma_{t-1}$  として、この中から量子化ベクトル  $\mathbf{y}_t = q_c(\mathbf{x}_t)$  の探索を行う。ここで  $q_c(\cdot)$  は遷移を制約したベクトル量子化を表し、次式で定義される。

$$q_c(\mathbf{x}_t) = \underset{c_i \in \Gamma_{t-1}}{\operatorname{argmin}} \{d(\mathbf{x}_t, c_i)\} \quad (4)$$

(3) 量子化出力  $\mathbf{y}_t = c_i$  に対応する符号  $b_i$  を時点  $t$  における出力符号  $\gamma_t$  とする。この符号を CTVQ 符号と呼ぶ。

(4)  $t=t+1$  として、(2)へ戻る。

通常のベクトル量子化との違いは、符号帳に含まれるすべての符号語の中から探索を行うのではなく、各時点で遷移可能な符号語の部分集合の中から探索を行う点である。このため探索に必要な計算コストは減少するが、各符号語から遷移可能な符号語を記憶しておく必要があるため記憶コストは増加する。CTVQ で用い

る符号帳は次のように表される。

$$\mathcal{C}_c = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \cdots & c_N \\ b_1 & b_2 & \cdots & b_N \\ t_1 & t_2 & \cdots & t_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

$t_i = [t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{iN}]$  は符号語  $c_i$  からの遷移の可否を 1, 0 で表現した行ベクトルで、 $t_{ij}=1$  は符号語  $c_i$  から  $c_j$  へ遷移可能、 $t_{ij}=0$  は遷移不可能なことを表す。この符号帳  $\mathcal{C}_c$  を遷移を制約した符号帳と呼ぶことにする。

### 3.3 遷移を制約した符号帳の作成

遷移を制約した符号帳  $\mathcal{C}_c$  の作成には符号語間の遷移確率が必要となる。いま、符号語間の遷移確率を符号語  $c_j$  に引き続いて  $c_k$  が出力される条件付き確率として定義し  $p_{kj} = p(c_k | c_j)$  で表す。 $p_{kj}$  は符号  $b_j$  から  $b_k$  への遷移確率  $p(b_k | b_j)$  でもあることに注意する。遷移確率  $p_{kj}$  の推定には HMM<sup>(11),(12)</sup> の推定法である Baum-Welch アルゴリズムを用いた。推定した遷移確率  $p_{kj}$  に従って符号語間の遷移に制約を与える。

制約の与え方としてはさまざまなものが考えられるが、今回は各符号語からの遷移確率が大きいものから  $M$  個の符号語にのみ遷移可能とした。以後、この  $M$  を遷移数と呼ぶことにする。

遷移を制約した符号帳  $\mathcal{C}_c$  の作成は次の手順で行う。

(1)  $N$  個の符号語をもつ通常のベクトル量子化用の符号帳  $\mathcal{C}$  を作成する。

(2) 符号帳  $\mathcal{C}$  の符号語を状態に対応させた、無相関単一正規分布エルゴディック HMM<sup>(11)</sup> を作成する。モデルの出力確率は各符号語を平均ベクトルとする無相関正規分布で表現し、正規分布の分散および状態間の遷移確率は乱数で初期化を行う。

(3) Baum-Welch アルゴリズムにより正規分布の分散と状態遷移確率の推定を行う。このとき、正規分布の平均 (符号語) は変化させない。

(4) 推定された状態遷移確率  $p_{kj}$  を符号語  $c_j$  からの遷移確率とし、符号語ごとに確率の大きい方から  $M$  個の遷移を残し ( $t_{jk}=1$ )、後の遷移を禁止する ( $t_{jk}=0$ )。

### 3.4 CTVQ 符号のビット誤り訂正

CTVQ を用いて符号化を行うことで、符号語間の遷移が限定される。この様子は図 1 のようなトレリス線図で表すことができる。遷移を制約することでトレリスの枝が限定され、符号器から出力される符号系列が限定されることがわかる。これによって通信路において

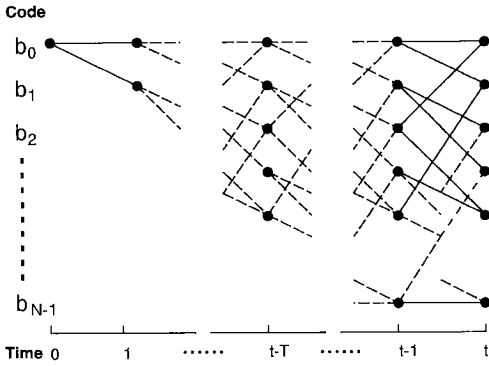


図1 符号間の遷移のトレリス線図  
Fig.1 A trellis diagram of code transitions.

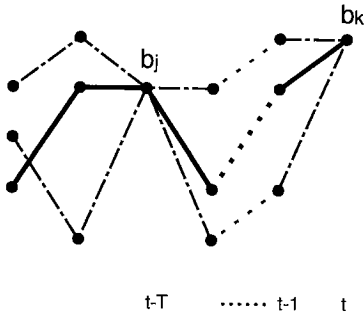


図2 受信系列との距離が最小の符号系列  
Fig.2 A minimum distance code sequence of the received code sequence.

符号に誤りが重畳した場合に、トレリス上では存在しない符号系列を復号器が受信する可能性が生じる。そこでトレリス上の符号系列と受信符号系列の間に距離尺度を導入し、トレリス上で受信系列との距離が最小になる符号系列を求めることで通信路で符号に重畳したビット誤りが訂正可能になる。

図2のように時点  $t-T$  で符号  $b_j$  を出力し、時点  $t$  で符号  $b_k$  を出力する符号系列を考える。実線は時点  $t$  までの受信系列との距離が最小の符号系列である。このとき、実線の符号系列は時点  $t-T$  までの距離が最小の系列でなくてはならない。これは、各時点でそれぞれの符号を出力する符号系列の中で受信系列との距離が最小のもの（生き残り系列）だけを残し、すべての符号を受信した時点で距離が最小の系列を受信符号系列の判定結果とすればよいことを意味する。これは符号がトレリスの枝ではなく節点に割り当てられていることを除けば畳込み符号のビタビ復号と同じで、遷移を制約したことでトレリス上でビタビアルゴリズム

を適用した誤り訂正が可能になる訳である。

しかし、上記のようにすべての符号を受信した後に受信符号系列の判定を行うと、生き残り系列の記憶量と判定遅延量が膨大なものになってしまう。このため、適当な判定遅延  $l_a$  の後に受信符号の判定をしなくてはならない。今、時点  $t$  の受信符号を  $\tilde{r}_t$  とし、時点  $t$  までの受信符号系列を  $R_t = \{\tilde{r}_1, \tilde{r}_2, \dots, \tilde{r}_t\}$  とする。ここで時点0で受信する符号は  $b_1$  と仮定し、すべての符号系列は  $b_1$  で始まるものとする。また時点  $t$  で符号  $b_j$  を出力する符号系列のうち、時点  $t$  までの受信系列との距離が最小の符号系列を生き残り符号系列  $S_{t,j}$  とする。このとき、次のような手順で受信符号系列の誤り訂正と判定を行う。

- (1) 時点0での生き残り系列  $S_{0,1} = \{b_1\}$ 、時点  $t=1$  とする。
- (2) 時点  $t-1$  の生き残り系列の中で時点  $t$  に符号  $b_i$  に遷移可能なすべての系列と時点  $t-1$  までの受信系列との距離を比較し、距離が最小の系列  $S_{t-1,j}$  を選択する。
- (3)  $S_{t-1,j}$  に符号  $b_i$  を連結したものを時点  $t$  の符号  $b_j$  における生き残り符号系列  $S_{t,i}$  とする。このとき、時点  $t$  までの受信系列  $R_t$  と  $S_{t,i}$  の距離  $\lambda_{t,i}$  は、時点  $t$  までの受信系列  $R_{t-1}$  と  $S_{t-1,j}$  の距離  $\lambda_{t-1,j}$  に  $\tilde{r}_t$  と  $b_i$  の距離を加えたものとする。
- (4)  $t > l_a$  ならば距離  $\lambda_{t,i}$  が最小の生き残り符号系列  $S_{t,i}$  の時点  $t-l_a$  における符号を時点  $t-l_a$  の受信符号の判定結果とする。
- (5)  $t = t+1$  として(2)へ戻る。

このようにして得られる符号系列に対応する符号語の系列を復号ベクトル系列とすることで通信路で重畳したビット誤りにより生じる符号語誤りを減少させ、これによって符号語誤りにより生じるひずみを低減することができる。

例として、図3のように遷移が制約された00, 01, 10, 11の四つの符号を出力する符号器を考える。図中の○印は符号を、弧は許された遷移を表す。また符号間の距離尺度としてはハミング距離を用いる。図3の符号では符号00の次には00か01しか出力されないため、復号器において符号00に続いて10や11が受信された場合には誤りが生じたことが検出できる。

図3の符号の誤り訂正の様子をトレリス上で表したものが図4である。図中の○は、その時点で受信される可能性のある符号を表している。また、実線の矢印は各時点でそれぞれの符号を出力する生き残り符号系

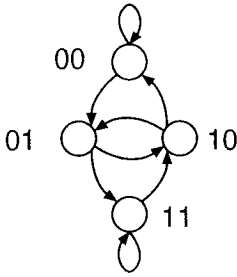


図 3 遷移が制約された符号の例

Fig. 3 An example of transition constrained codes.

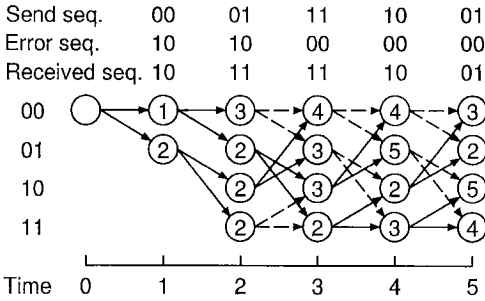


図 4 トレリス線図上での誤り訂正の例

Fig. 4 An example of error correction on the trellis diagram.

列  $S_{t,i}$ , 破線の矢印は捨てられた遷移, ○の中の数字はそこへ到達する生き残り系列が表現する符号系列と受信符号系列とのハミング距離  $\lambda_{t,i}$  である. 始めの二つの符号に誤りが重畳しているが, 時点 3 以降において  $\lambda_{t,i}$  が最小の符号 (例えば時点 5 の符号 01) から生き残り符号系列をたどることで誤りが訂正されもとの符号系列が復元されることがわかる.

このように CTVQ を用いて符号化を行った場合には, ビタビアルゴリズムを適用することで通信路において重畳したビット誤りが訂正可能となる. 次章では, 音声の線形予測ケプストラムを符号化する計算機シミュレーションを通して CTVQ の能力を検証する.

#### 4. 計算機シミュレーション

移動音声通信の普及に伴って極低ビットレート音声符号化方式を実現する際, ボコーダのスペクトルパラメータの高エネルギーで誤りに強い符号化法が重要になると考えられる. 音声信号はヒトの声道で調音されて発声されるが, 声道はあまり急激に変化することはないため, 音声信号のスペクトルも急激に変化することはない, 線形予測ケプストラムのようなスペクト

表 1 シミュレーション諸元

音声資料	男性 1 名 180 秒
標本化	10kHz, 8bit
分析次数	P=12
分析フレーム長	30ms
分析周期	5ms
エンファシス	なし
符号語数	N=256

ルパラメータも比較的緩やかに変化する. 言い換えると声道は記憶のある情報源であり, その出力である音声信号のスペクトルは急激な変化ができないがために連鎖性を有すると言える. そこで本章では, 種々の音声のスペクトルパラメータのうち, 良好な補間特性を有し, その 2 乗誤差として定義されるケプストラム距離がヒトの聴覚特性によく適合していると言われる線形予測ケプストラムを符号化し, 符号にビット誤りを重畳した後に復号する計算機シミュレーションを通して CTVQ の能力を検証する.

このシミュレーションの主な諸元を表 1 に示す. ベクトル量子化時のベクトル間の距離尺度としては 2 乗距離を用いた. すなわち,

$$\delta(x, y) = \sum_{i=1}^P \{x(i) - y(i)\}^2$$

である. ここで,  $x(i), y(i)$  はベクトル  $x, y$  の  $i$  番目の要素を表す.

##### 4.1 符号語間の遷移を制約する影響

ケプストラムは音声のスペクトル包絡を表現するパラメータであり, これをベクトル量子化する場合, 符号語間の遷移はスペクトル包絡の変化を表す. このため符号語間の遷移を制約することは表現可能なスペクトルの変化を制限することを意味し, 遷移数を減らすほど量子化ひずみが増加するものと思われる. そこで, 遷移を制約する影響を調べるために, 遷移数  $M$  による符号帳のエントロピー  $H_1$  と復号後のケプストラムひずみ  $D_{cep}$  の変化を調べたものが図 5 である. 横軸は遷移数  $M$  の 2 を底とする対数をとったものである.

このとき符号帳のエントロピーは, 符号帳を符号語  $c_k$  の発生確率  $p_k = p(c_k)$  と遷移確率  $p_{kj} = p(c_k | c_j)$  が与えられる単純マルコフモデルとみなして推定を行った.

$$H_1 = - \sum_{i=1}^N p_i \sum_{j=1}^M p_{ji} \log p_{ji} \quad (6)$$

ここで,  $p_{kj}$  は符号帳の作成時に推定したものをを用い,

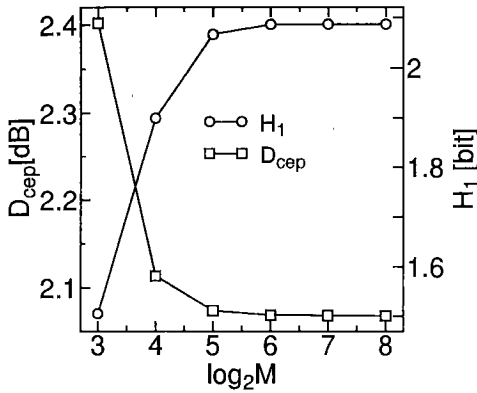


図5 遷移数によるコードブックのエントロピーと復号ケプストラムひずみの変化  
Fig.5 Entropy of codebook and decoded cepstrum distortion vs. the number of transitions.

各符号語の発生確率  $p_k$  は音声資料をベクトル量子化して求めたヒストグラムより推定した。

$$p_k = p(\mathbf{c}_k) = \frac{n_k}{\sum_{k=1}^N n_k} \quad (7)$$

但し  $N$  は符号帳に含まれる全符号語数,  $n_k$  は符号語  $\mathbf{c}_k$  に量子化されたベクトルの数である。

またケプストラムひずみ  $D_{cep}$  は次式で与えられる。

$$D_{cep} = \overline{d(\mathbf{x}_t, \mathbf{y}_t)} \quad (8)$$

$$d(\mathbf{x}_t, \mathbf{y}_t) = \frac{10}{\ln 10} \sqrt{2 \sum_{i=1}^P (x_t(i) - y_t(i))^2} \quad (9)$$

ここで,  $\mathbf{x}_t, \mathbf{y}_t$  は時点  $t$  におけるケプストラムベクトルとその量子化ベクトルであり,  $P$  はベクトルの次元数,  $\overline{d(\mathbf{x}, \mathbf{y})}$  はひずみの時間平均を表す。

全符号語数  $N=256$  なので,  $\log_2 M=8 (M=2^8=256)$  は全符号語に遷移可能な通常のベクトル量子化を表す。図5からわかるように,  $\log_2 M \geq 5$  ではエントロピー, ひずみともに大きな変化が見られないが,  $\log_2 M=4$  ではエントロピーが減少し, ひずみのわずかな増加が見られる。更に  $\log_2 M=3$  では, エントロピーが大幅に減少し, ひずみも大幅に増加している。これは遷移の数を減らしすぎたために音声スペクトルの変化を表現しきれなくなったことが原因と考えられる。

しかし,  $\log_2 M \geq 4$  ではひずみはほとんど増加していないことから, この範囲では符号語間の遷移を制約しても大きな影響はなく, 音声のケプストラムをベクトル量子化する場合にはCTVQを適用可能なことが

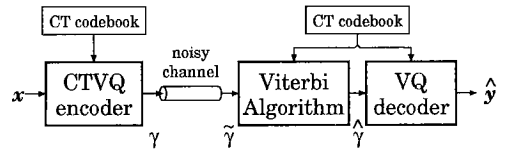


図6 CTVQを用いた通信システムモデル  
Fig.6 A communication system model with CTVQ.

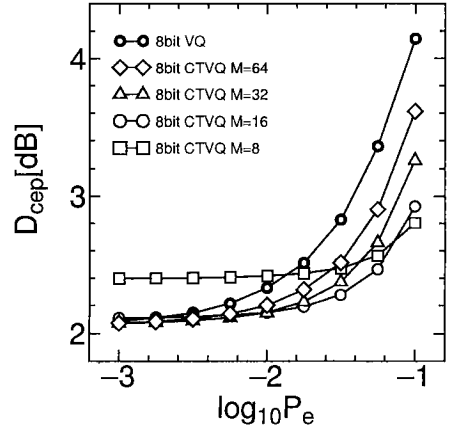


図7 ビット誤り率と復号ケプストラムひずみ (復号遅延  $l_d=1$  の場合)  
Fig.7 Decoded cepstrum distortion vs. bit error rate. (In case of  $l_d=1$ )

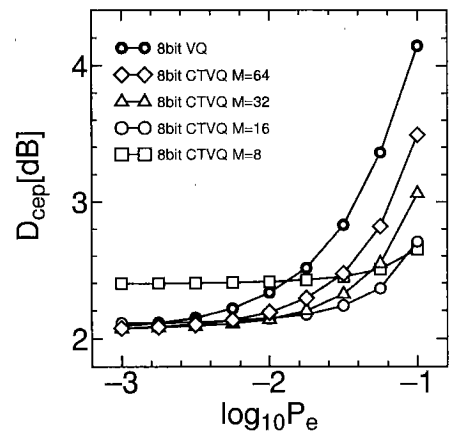


図8 ビット誤り率と復号ケプストラムひずみ (復号遅延  $l_d=5$  の場合)  
Fig.8 Decoded cepstrum distortion vs. bit error rate. (In case of  $l_d=5$ )

わかる。

#### 4.2 ランダム誤り下での基礎検討

次に, 通信路として誤り率  $P_e$  でランダムビット誤りが生じる2元対称通信路を仮定して, 音声のケプストラムの符号化/伝送/復号のシミュレーション(図6)

を行い、復号後のケプストラムひずみを調べた。2元通信路を対象としているため、トレリス上で誤り訂正を行う際の符号系列間の距離尺度としてはハミング距離を用いた。

#### 4.2.1 ビット誤り率と復号ケプストラムひずみ

図7と図8はビット誤り率が $10^{-3}$ から $10^{-1}$ における復号後のケプストラムひずみを表している。図7は誤り訂正時の判定遅延 $l_d$ が1フレームの場合、図8は5フレームである。どちらの図においても、 $M \geq 16$ のCTVQではほぼすべての誤り率において通常のVQに見られるような大きな復号ひずみは見られず、誤り率 $P_e=10^{-1}$ のときには $M=16$ で通常のVQに比べ1.5[dB]以上ひずみが小さくなっている。これより、誤り訂正によってビット誤りによるひずみが低減されていることがわかる。簡単な聴取実験を行った結果では、ビット誤りがない場合とほとんど違いがわからなかった。また $M=8$ では、誤り率が低いところでは遷移数の不足によって生じる量子化ひずみのためにひずみが最も大きくなっているが、誤り率が高いところでは逆にひずみが最も小さくなっていることがわかる。これらの結果より、CTVQを用いた符号化法はビット誤りの訂正が可能で、遷移数が少ないほど誤り訂正能力が高いことがわかる。

#### 4.2.2 遷移数に関する検討

誤り訂正能力を強化するためには遷移数を減らせればよいが、遷移数を減らしすぎると量子化ひずみが大きくなるため、誤り率が低い場合の復号品質とビット誤りの訂正能力は遷移数を通じてトレードオフの関係に

あることがわかる。図9は、誤り率が低い場合( $P_e=10^{-3}$ )と高い場合( $P_e=10^{-1}$ )について、遷移数による復号ケプストラムひずみの違いを調べたものである。

誤り率が低い場合には、遷移数 $\log_2 M$ が4以上ではひずみはほとんど変化しない。これに対して誤り率が高い場合には、遷移数 $\log_2 M$ が4を超えると急激にひずみが増加している。これより、今回行ったシミュレーションでは遷移数 $M$ は16( $\log_2 M=4$ )が最適であると言える。この遷移数の最適値は、量子化の対象とするパラメータや、分析周期、符号帳に含まれる符号語数によって異なる。

#### 4.2.3 判定遅延に関する検討

次に判定遅延 $l_d$ に関する検討を行う。図7と図8を比べると、判定遅延の大きい図8の方が復号ケプストラムひずみが小さい。これは判定遅延が大きい方が誤り訂正能力が高いことを示している。そこで $M=16$ の場合について、判定遅延(復号時の蓄積時間)による誤り訂正能力の相違を表したものが図10である。

誤り率が低い場合には判定遅延を増やしてもひずみの改善は見られないが、誤り率が $10^{-1}$ と高い場合には判定遅延を増やすことでひずみが改善している。しかしこの場合でも、判定遅延を3フレーム以上に増やしても大きなひずみの改善は見られないことから、判定遅延は3フレーム程度で十分であり、CTVQ符号の誤り訂正には大きな判定遅延を必要としないことがわかる。

#### 4.3 タンデム符号化との比較

現在、通信路におけるビット誤りに対しては情報源

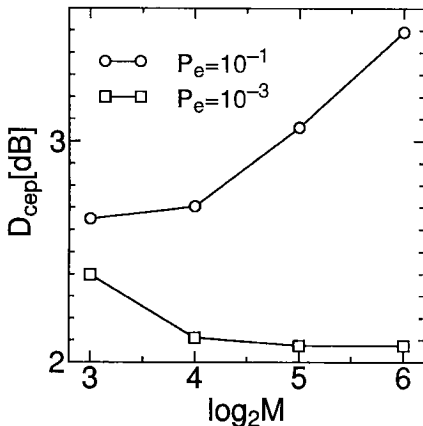


図9 ビット誤りがある場合の遷移数による復号ケプストラムひずみの変化(復号遅延 $l_d=5$ の場合)  
Fig.9 Decoded cepstrum distortion vs. number of transitions under bit errors. (In case of  $l_d=5$ )

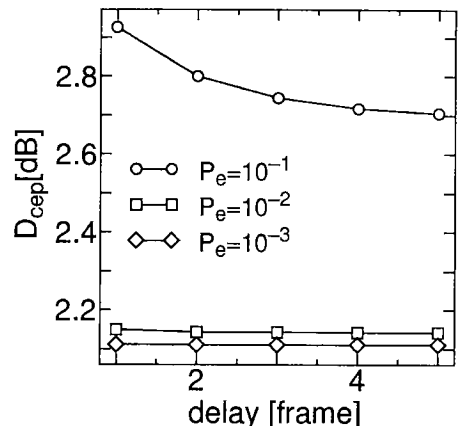


図10 判定遅延と復号ケプストラムひずみ(遷移数 $M=16$ の場合)  
Fig.10 Decoded cepstrum distortion vs. decision delay. (In case of  $M=16$ )

表 2 原符号<sup>(13)</sup>

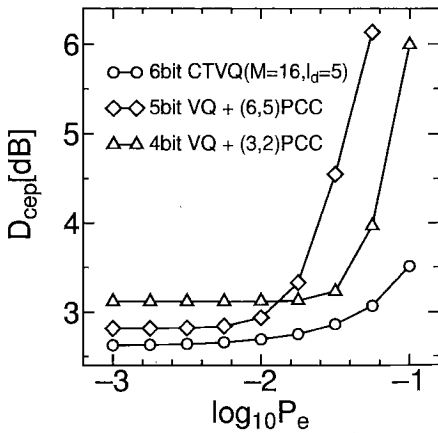
符号	拘束長	生成多項式の係数
(2,1)	7	133,171

注) 生成多項式の係数は 8 進表記

表 3 最適パンクチャド符号の構成法<sup>(13)</sup>

符号	消去マップ
(4,3)	1 1 0
	1 0 1
(8,7)	1 1 1 1 0 1 0
	1 0 0 0 1 0 1

注) 生成多項式の係数は上段 133, 下段 171



PCC: Punctured Convolutional Code

図 11 VQ-PCC タンデム符号化方式との比較

Fig. 11 Comparison with the tandem VQ-PCC coding schemes.

符号化方式と通信路符号化方式を縦列接続したタンデム符号化方式で対処することが一般的である。このようなタンデム符号化方式と比べて CTVQ がもつ利点を調べるために、情報源符号化方式として通常の VQ と有限状態ベクトル量子化(以下 FSVQ)、通信路符号化方式として畳込み符号を用いたタンデム符号化方式との比較を行った。畳込み符号としては、表 2 の (2, 1) 符号を原符号として表 3 の消去マップに従って構成した符号化率 2/3 と 5/6 のパンクチャド符号<sup>(13)</sup>を用い、復号にはビタビアルゴリズムを用いた<sup>(13)</sup>。

図 11 は、遷移数  $M$  が 16 で判定遅延  $l_d$  が 5 の CTVQ と通常の VQ とパンクチャド符号によるタンデム符号化方式 (以下 VQ-PCC タンデム方式) を比較したものである。前節までは CTVQ の符号語数が

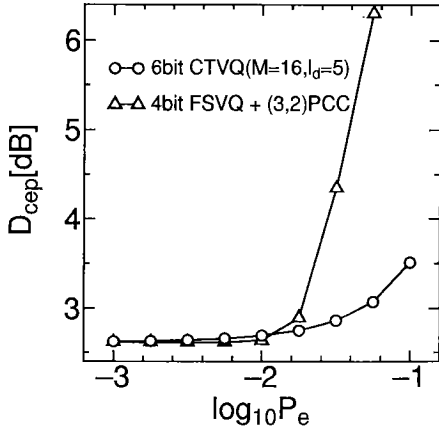
256 (8 bit/vector) の場合について検討を行ってきたが、ここでは符号語数を 64 (6 bit/vector) とすることで CTVQ 符号の誤り訂正に用いるトレリスとパンクチャド符号のビタビ復号に用いるトレリスの状態数をそろえた。CTVQ と VQ-PCC タンデム方式のビットレートをそろえるために、符号帳に含まれる符号語数を減らすことで情報源符号に必要なビット数を減らし、これによって生じた余剰ビットをパンクチャド符号に割り当てた。すなわち、5 bit の VQ に符号化率 5/6 のパンクチャド符号を、4 bit の VQ には符号化率 2/3 のパンクチャド符号を組み合わせて 6 bit/vector として比較を行った。

VQ-PCC タンデム方式ではある誤り率までひずみはほとんど変化しないが、誤り率がそれ以上になると急激にひずみが増大している。これは、畳込み符号では誤り訂正能力の限界まではほぼ完璧に誤り訂正が行われるが、限界を超えた途端に全くでたらめな符号が復号されることによるものと考えられる。これに対して CTVQ では通信路のビット誤り率の増加に伴って少しずつひずみが増加しているが、急激にひずみが増加することはない。以上の結果から、VQ-PCC タンデム方式に比べて CTVQ が優れていることがわかる。

情報源符号化方式として通常のベクトル量子化より更に高能率な符号化方式を用い、高能率符号化で生じた余剰ビットを誤り訂正符号にまわしたタンデム符号化方式と比較することで、提案する方式の性能をより明確にすることができると考えられる。そこで、FSVQ とパンクチャド符号を組み合わせた FSVQ-PCC タンデム符号化方式との比較を行った。FSVQ には条件付きヒストグラム法で状態遷移関数を決定した状態数が 256 の状態ラベル FSVQ<sup>(10)</sup> を用いた。ここでは各状態における状態コードブックに含まれる符号語の数を調節することで余剰ビットを生成してパンクチャド符号に割り当てた。

図 12 は、各状態で 16 個の符号語を含む状態コードブックをもつ 4 bit の FSVQ と符号化率 2/3 のパンクチャド符号のタンデム符号化方式を、 $N=64$ ,  $M=16$ ,  $l_d=5$  の CTVQ と比較した結果である。この場合、ビット誤りがない場合は両者のひずみは全く同じになる。誤り率が小さい場合 ( $\log_{10} P_e \leq 10^{-2}$ ) には CTVQ のひずみがわずかに大きいものの、それ以上では FSVQ-PCC タンデム方式のひずみが急激に大きくなっていくのに対して CTVQ ではわずかにひずみが増加するにとどまっている。また図 11 の 4 bit の VQ を





PCC: Punctured Convolutional Code

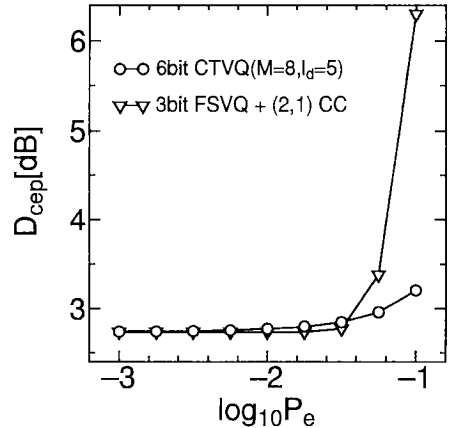
図 12 (3,2)パンクチャド符号を用いた FSVQ-PCC タンデム符号化方式との比較

Fig. 12 Comparison with the tandem FSVQ-PCC coding scheme with the (3,2) punctured code.

符号化率 2/3 の畳込み符号化したと比べてときの結果を比べると、通常の VQ では誤り率が  $10^{-1.5}$  までひずみが大きくは変化していないのに対して、FSVQ と組み合わせた場合には誤り率が  $10^{-2}$  より大きい範囲では急激にひずみが増加しており、同じ能力の誤り訂正符号を用いた場合、FSVQ を用いたタンデム符号化方式は通常の VQ を用いた場合に比べてビット誤りに弱くなることがわかる。これは、FSVQ では復号器側で遷移先の状態を決定する際に過去の復号ベクトルを直接参照して復号を行うために、誤り訂正符号の訂正限界を超えて一度誤った判定を行うと永久に誤りが波及することが原因と考えられる。FSVQ における誤りの波及を阻止するためには、一定時点ごとに補助情報としてその時点での状態を伝送したり、一定時点ごとに初期状態に戻すなどの方法が必要になる。これは伝送レートや復号ひずみの増加やシステムの複雑化を生じる。

これに対して CTVQ では、ビタビアルゴリズムでハミング距離を計算するとき以前に受信符号を利用するだけで復号ベクトルは直接参照することなく、復号ベクトルの決定に過去の決定が影響しないために誤りが波及することがない。このため CTVQ では誤り率が大きくなった場合にも急激にひずみが大きくなることなく、全体として良好な誤り訂正効果が得られるものと考えられる。

これまでの議論は更に強力な誤り訂正符号を用いた場合にも同じことが言える。これを確かめるために、



CC: Convolutional Code

図 13 (2,1)畳込み符号を用いた FSVQ-CC タンデム符号化方式との比較

Fig. 13 Comparison with the tandem FSVQ-CC coding scheme with the (2,1) convolutional code.

各状態で 8 個の符号語を含む状態コードブックをもつ 3 bit の FSVQ と表 2 の符号化率 1/2 の畳込み符号を組み合わせたタンデム符号化方式と  $N=64$ ,  $M=8$ ,  $l_c=5$  の CTVQ を比較した。この結果を図 13 に示す。図 12 の結果と同じように VQ-PCC タンデム符号化方式では畳込み符号の誤り訂正限界を超えたときひずみが急激に増加している。

このように、CTVQ は高能率な情報源符号化方式に強力な誤り訂正符号を組み合わせたタンデム符号化方式と比べて、誤り率が小さい場合には同等、誤り率が大きい場合にはより優れた誤り耐性を有し、その誤り訂正能力は CTVQ の符号語数と同数の状態をもつ符号化率 1/2 の畳込み符号と同等以上であることがわかる。

## 5. む す び

本論文では、遷移を制約したベクトル量子化法を提案し、性能の検討を計算機シミュレーションによって行った。

音声の線形予測ケプストラムを符号化する計算機シミュレーションによって性能の検討を行い、提案する手法ではビット誤りによる復号ケプストラムひずみを大幅に低減できることを示した。また、通常のベクトル量子化や有限状態ベクトル量子化を誤り訂正符号と組み合わせたタンデム符号化方式と比較し、提案する手法がタンデム符号化方式より優れた誤り耐性を有することを示した。これらの結果より、記憶のある情報

源の出力をベクトル量子化する場合には、提案する手法を用いることで高能率で誤りに強い符号化が可能であると考えられる。

今回の検討は2元対称通信路を仮定したが、提案した誤り訂正法では軟判定を比較的容易に導入でき、それにより更なるひずみの低減が期待できる。今後は軟判定を用いた加法性白色雑音通信路やフェージング通信路下での検討を進めていく予定である。

謝辞 日ごろ御指導頂く、埼玉大学の羽石操教授、小林禰夫教授に深謝致します。

### 文 献

- (1) Suda H. and Miki T.: "An Error Protected 16 kbit/s Voice Transmission for Land Mobile Radio Channel", IEEE J. Sel. Area. in Commun., **6**, 2, pp. 346-352 (Feb. 1988).
- (2) McLaughlin M. J.: "Channel Coding for Digital Speech Transmission in The Japanese Digital Cellular System", IEICE Technical Report, **RCS90-27** (Nov. 1990).
- (3) Salami R. A., Wong K. H. H., Steele R. and Appleby D. G.: "Performance of Error Protected Binary Pulse Excitation Coders at 11.4 kb/sover Mobile Radio Channel", Proc. ICASSP '90, pp. 473-476 (April 1990).
- (4) Iacovo R. and Sereno D.: "CELP Coding at 6.55 kbit/s for Digital Radio Communications", Proc. GLOBECOM '90, pp. 538-549 (Dec. 1990).
- (5) Kleijn W. B.: "Source-Dependent Channel Coding for CELP", Proc. ICASSP '90, pp. 1-4 (April 1990).
- (6) Farvardin N.: "A Study of Vector Quantization for Noisy Channels", IEEE Trans. Inform. Theory, **IT-36**, 4, pp. 799-809 (July 1990).
- (7) Phamdo N., Farvardin N., 守谷健弘: "多段ベクトル量子化を用いた LSP パラメータの情報源-通信路結合符号化", 信学技報, **SP90-52** (1990-10).
- (8) Moriya T.: "Two-Channel Conjugate Vector Quantizer for Noisy Channel Speech Coding", IEEE J. Sel. Area. in Commun., **10**, 5, pp. 866-874 (June 1992).
- (9) Foster J., Gray R. M. and Dunham M. O.: "Finite-State Vector Quantization for Waveform Coding", IEEE Trans. Inform. Theory, **IT-31**, 3, pp. 348-359 (May 1985).
- (10) Dunham M. O. and Gray R. M.: "An algorithm for the Design of Labeled-Transition Finite-State Vector Quantizers", IEEE Trans. Commun., **COM-33**, 1, pp. 83-89 (Jan. 1985).
- (11) Levinson S. E., Rabiner L. R. and Sondhi M. M.: "An Introduction to the Application of the Theory of Probabilistic Functions of a Markov Process to Automatic Speech Recognition", J. Bell Syst. Tech., **62**, 4, pp. 1035-1074 (April 1983).
- (12) Rabiner L. R. and Juang B. H.: "An introduction to Hidden Markov Models", IEEE ASSP Magazine, pp. 4-16 (Jan. 1986).

- (13) 安田 豊, 平田康夫, 小川 明: "ヴィタビ復号の容易な高符号化率畳込み符号とその諸特性", 信学論(B), **J64-B**, 7, pp. 573-580 (1981-07).

(平成5年7月27日受付, 12月27日再受付)



### 稿 雅典

平2埼玉大・工・電子卒。平4同大大学院博士前期課程了。現在、同大大学院博士後期課程在学中。音声信号処理、誤り訂正符号、ニューラルネットワークなどに興味をもつ。



### 長谷川孝明

昭56慶大・工・電気卒。昭61同大大学院博士課程了。工博。同年、埼玉大・工・電気助手。現在、同電気電子工学科助教授。スペクトル拡散通信システム、ニューラルネット、ヒューマンテクノロジーに興味をもつ。平2年度篠原記念学術奨励賞受賞。

著書に「スペクトラム拡散技術の基礎と応用」(分担執筆), 「スペクトラム拡散通信方式応用技術」(分担執筆), 「プライマリーC言語ノート」がある。IEEE, 情報理論とその応用学会各会員。