

# 劣化信号の復元に関する基礎的考察 I

大島 静夫

## Basic Study on Restoration of Degraded Signals I

Shizuo OHSHIMA

(2001年11月30日受理)

We are interested in restoration of degraded signals on old acoustic media. As an example, this paper treats a method to restore the signals recorded on an elongated and narrowed magnetic tape using digital signal processing technique. We assumed the case where the magnetic tape was deformed with a certain inclination and considered a signal-restoring algorithm in the case where the deformed dimensions were measurable. We evaluated the performance of our program by numerical experiments and found as a result that the energy error of the restored waveform with respect to the original waveform was 2 ~ 3% for restoration of a continuous sinusoidal wave at 500 Hz and 3 ~ 4% for restoration of an announcer's voice. The results of numerical experiments show the effectiveness of the proposed method.

### 1. はじめに

現在ではほとんど用いられなくなった音響機器として、レコードプレーヤやオープンリール式テープレコーダなどがある。これらの機器用の古い記録媒体の中には、貴重な記録も多く含まれている。しかしながら、経年変化や不注意な取り扱い等による様々な信号劣化が考えられる。レコードに関しては、円盤のそりによるワウやキズによるスクラッチノイズ、磁気テープ（以降テープと呼ぶ）に関しては、熱的な変形や張力によるテープの伸びなどである。

このような劣化信号は、現在のデジタル信号処理技術を利用すれば復元可能な場合も多く、貴重な資料の損失を防ぐ意味で興味深い分野である。

ここでは、テープレコーダ用の磁気テープが伸張変形した場合の信号復元法について検討したので報告する。

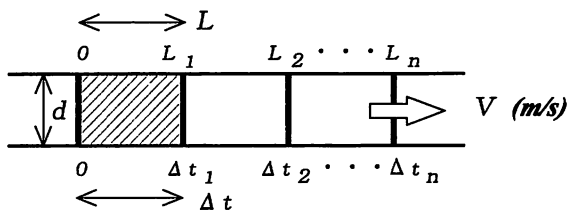


図1 正規テープの一定間隔パルス記録位置

### 2. テープ変形による信号記録位置の変化

#### 2.1 一定幅で伸張する場合

走行速度  $V (m/s)$  のテープレコーダを用い、パルス信号を一定の時間間隔  $\Delta t (s)$  で録音するとき、その記録位置は図1の縦実線のように表されるものとする。

図1において  $n$  番目のパルス記録位置  $L_n (m)$  および記録時間  $\Delta t_n (s)$  は、始めのパルスを基準とすれば(1)式で与えられる。

$$L_n = n \cdot L, \quad \Delta t_n = n \cdot \Delta t \quad (1)$$

次に、テープが図2のように幅が  $d$  から  $d'$  と狭くなり、記録されたパルス信号の間隔が  $L$  から  $L'$  に伸びたとする。その信号を正規のテープ走行速度  $V$  で再生したとすれば、(2)式の関係が成立する。

$$L_n' = n \cdot L', \quad \Delta t_n' = n \cdot \Delta t' \quad (2)$$

一方、テープがこのような変形を受けたとしても、

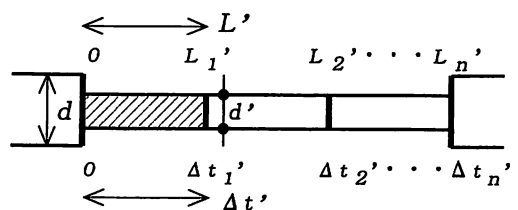


図2 一定幅で伸張する場合の記録位置(TYPE I)

図1と図2の斜線部の面積は等しく、(3)式が成立する。

$$L \cdot d = L' \cdot d' \quad (3)$$

これらの関係を整理すると、(4)式が得られる。

$$L_n' = \frac{d}{d'} n \cdot L, \quad \Delta t_n' = \frac{d}{d'} n \cdot \Delta t \quad (4)$$

(4)式より、一定幅で伸張したテープの  $d/d'$  が定まれば、パルス記録位置および記録時間が求められる。以降このような変形を TYPE I と呼ぶ。

### 2. 2 一定値で傾斜する場合

次に、テープが図3のように一定値で傾斜する場合を考える。図3において、テープの走行速度  $V$  が一定なら図3のパルスの記録間隔は(5)式で与えられる。

$$L_1'' = V \cdot \Delta t_1'', \quad L_n'' = V \cdot \Delta t_n'' \quad (5)$$

また、(5)式に対応する傾斜部の各面積が一定なことより(6)式が、更に斜線部の傾き  $m$  が一定なことより(7)式が得られる。

$$\frac{d+d_1}{2} L_1'' = d \cdot L, \quad \frac{d+d_n}{2} L_n'' = nd \cdot L \quad (6)$$

$$m = \frac{d-d_1}{L_1''} = \frac{d-d_n}{L_n''} \quad (7)$$

ここで(6)の右側の式に(7)式を代入すると

$$\frac{d+d-m \cdot L_n''}{2} L_n'' = nd \cdot L$$

となり、これを  $L_n''$  について解き、整理すると

$$L_n'' = \frac{d}{m} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{mL}{d} 2n} \right\} \quad (9)$$

が得られる。(9)式において、傾斜が無く  $m = 0$  の場合、 $L_n''$  は不定形となるが、ロピタルの定理を用い、 $m \rightarrow 0$  の極限值を求めると、

$$\lim_{m \rightarrow 0} L_n'' = n \cdot L$$

となる。これは傾斜が無い場合、 $L_n''$  が  $nL$  になることを意味しており実際と一致する。

更に  $L$  と  $L_n''$  に(1)(5)(7)式の関係代入し整理すると(10)式となる。

$$\Delta t_n'' = \frac{d}{mL} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{mL}{d} 2n} \right\} \Delta t \quad (10)$$

(9)(10)式より、 $mL/d$  が定まればパルスの記録位置および記録時間が求められる。以降このようなテープの変形を TYPE II と呼ぶ。

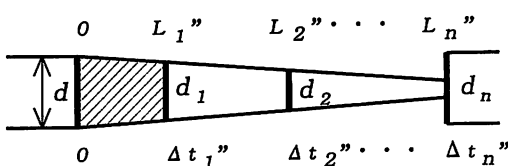


図3 一定値で傾斜する場合の記録位置(TYPE II)

テープの変形形状としては、曲線の場合が一般的であるが、曲線を微小な間隔で直線近似できると考えると、テープの変形はこの2つのTYPEの組み合わせで近似可能と言える。

### 3. 信号の復元アルゴリズム

ここでは、変形したテープを通常の走行速度で再生し、サンプリング時間  $\Delta t$  で読みとり、そのデータから元の信号を復元するアルゴリズムについて検討を加える。以降において、原信号列とそのサンプリング時間列を  $Vs[n] \cdot ts[n]$ 、再生で得られる信号列と時間列を参照信号  $Vi[n] \cdot ti[n]$ 、復元信号列と時間列をそれぞれ  $Vo[n] \cdot to[n]$  と表現する。

テープレコーダの録音方式は、いうまでもなくアナログ方式であり、信号は連続して記録されている。今正規のテープに記録された一周期の三角波をサンプリング時間  $\Delta t$  で読み出すとき、そのサンプリング数  $Ndata$  が8個であったとすれば、データ値とサンプリング時間は図4の○と実線のようなになる。

次にテープが  $d/d' = 1.25$  のTYPE Iの変形を受け、その信号を再生したとすれば、原信号  $Vs[n]$  とその記録時間  $ts[n]$  (○と実線) および参照信号  $Vi[n]$  と記録時間  $ti[n]$  (●と点線) との関係は、図5のようなになる。図5において再生時に取得されるデータ数  $Rdata$  は、(4)式より  $L_n' = 10L$  となるので10個である。また原信号の記録位置  $ts[n]$  は、(4)式の  $\Delta t_n'$  で定まる。

同様にTYPE IIの変形において、テープの傾斜  $mL/d = 0.04$  と仮定した場合の原信号  $Vs[n]$  と記録時間  $ts[n]$ 、および参照信号  $Vi[n]$  とその記録時間  $ti[n]$  の関係を図6に示す。

この場合のテープの伸張した長さ  $L_n''$  は、(6)式より  $10L$  となり、再生時に得られるデータ数  $Rdata$  は10個となる。また原信号の記録位置  $ts[n]$  は、(10)式の  $\Delta t_n''$  で定まる。

図5および図6において、参照信号列は  $Vi[j = 0 : Rdata]$  であり、そのデータを用いて復元すべき

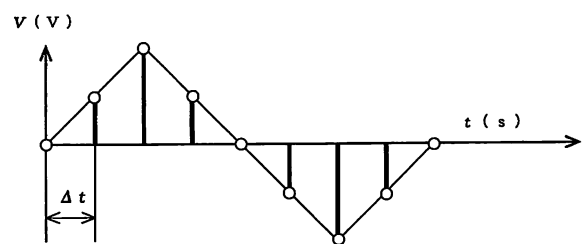


図4 正規のテープのデータサンプリング位置

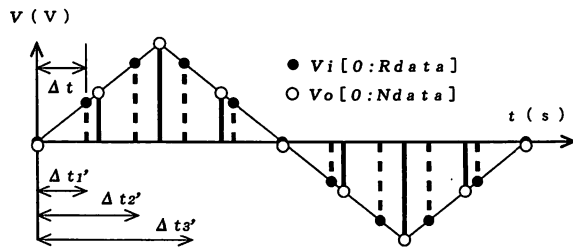


図5 データサンプリング位置 (TYPE I)

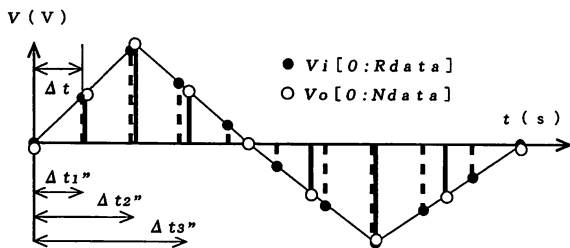


図6 データサンプリング位置 (TYPE II)

データ列は  $Vs[i = 0 : Ndata]$  である。一方、参照データの時間列  $ti[j = 0 : Rdata]$  は、サンプリング時間  $\Delta t$  の整数倍であり、また復元すべきデータの時間列  $ts[i = 0 : Rdata]$  は(4)式および(10)式で定まる。

このことより、復元信号  $Vo[n]$  は、 $ts[n]$  が隣り合う  $ti[n]$  の間に挟まれる条件 (図では点線で挟まれる実線) の時に隣り合う  $Vi[n]$  を用いて補間すれば良いことになる。この補間方法として直線近似を採用すれば、復元信号列  $Vo[n]$  は隣り合うデータ間の傾きを  $m'$  として(11)式で表現される。

$$m' = \frac{Vi[i+1] - Vi[i]}{ti[i+1] - ti[i]}$$

$$Vo[j] = m' \cdot (INT(ts[j])) - ti[j]) + Vi[i] \quad (11)$$

ここでは前述したようなアルゴリズムを実現するプログラムを作成し、信号の復元を試みた。以降でその性能を数値実験により検討する。

#### 4. 信号復元手法の数値実験

##### 4.1 正弦波を用いた数値実験

まず始めに、連続する500(Hz)の信号を3秒間録音したテープがあったとして、1~2秒間の信号が、図2に示す  $d/d' = 1.25$  のTYPE Iの変形を受けたとする。図7(a)に変形境界前半部付近の原信号  $Vs[n]$  を、また(b)に変形テープの再生によって得られる信号  $Vi[n]$  を示す。

この信号をサンプリング周波数11025(Hz)で読みとり、前述のアルゴリズムで復元した信号  $Vo[n]$  を図7(c)に示す。同図には、併せて誤差  $Vs[n] - Vo[n]$  を点線で示す。ただし誤差が小さいため、その電

圧値を10倍にして表示している。

図7において、変形区間における原信号  $Vs[n]$  と復元信号  $Vo[n]$  のエネルギー誤差を2乗値の差分の比として計算すると、2.00%であり、良好に信号を復元していることがわかる。

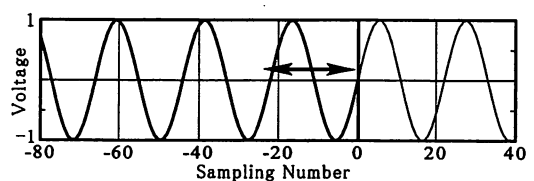
同様に、 $mL/d = 0.04$  の傾斜で変形した場合の変形境界後半部付近の、テープ再生によって得られる信号  $Vi[n]$  を図8(b)に、再現信号  $Vo[n]$  およびオリジナル信号  $Vs[n]$  との誤差を図8(c)に示す。誤差は電圧値を10倍して表示している。図8においても、そのエネルギー誤差は2.17%であった。

##### 4.2 音声データを用いた数値実験

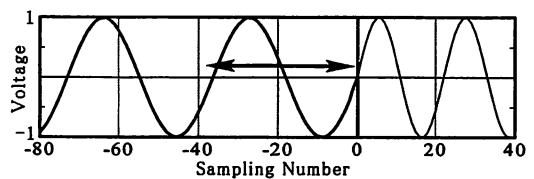
前節で取り扱った信号は、連続した正弦波であり、数値の補間が比較的滑らかに行われる可能性もある。そこで、図9(a)に示すアナウンサーの朗読を用いその性能を確認することにした。

図9(b)にTYPE Iの場合の変形境界前半部の再生信号  $Vi[n]$  を、(c)に復元信号  $Vo[n]$  ならびに3倍した誤差信号を示す。この場合のエネルギー誤差は、3.20%であった。

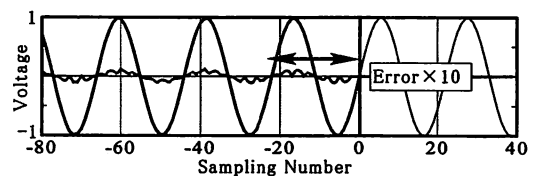
同様に図9(d)にTYPE IIの場合の変形境界後半部の再生信号  $Vi[n]$  を、(e)に復元信号  $Vo[n]$  ならびに3倍した誤差信号を示す。この場合のエネルギー誤差は、3.98%であった。



(a) 原信号  $Vs[n]$



(b) 再生信号  $Vi[n]$



(c) 復元信号  $Vo[n]$  と誤差

図7 変形境界前半部の信号波形 (TYPE I)

劣化信号の復元に関する基礎的考察 I

5. まとめ

変形したテープに録音されている劣化信号の復元方法について検討した。テープの変形を TYPE I お

よび TYPE II の 2 種類に分類し、その各々の場合の信号復元アルゴリズムの性能をアナウンサーの音声を用いた数値実験で確認した。また、原信号と復元信号の音の違いは聴感上ほとんど識別できない。これらのことより、変形テープの信号の復元が比較的少ないエネルギー誤差の範囲で理論上可能であることが確認された。

今後は、実際に変形させたテープの劣化信号がここで述べた手法でどの程度の精度まで、復元可能なのかを引き続き検討したい。また、会話・楽音におけるピッチの変化に注目すれば、同様な手法で信号を復元することも可能と思われる。この問題についても検討を加えたい。

参考文献

- 1) 津野尾忠明：テープレコーダ, 日刊工業新聞社, 1971, 全般的に
- 2) 山内, 森口, 一松：数値計算法 I, 培風館, (1977), 主に補間法について
- 3) 谷尻かおり：はじめての Visual Basic6, (1999), 主にプログラム開発に関して
- 4) McClellan, J.H., Schafer, R.W, and Yoder, M. A, "DSP First A Multimedia Approach", Prentice Hall, (1998)

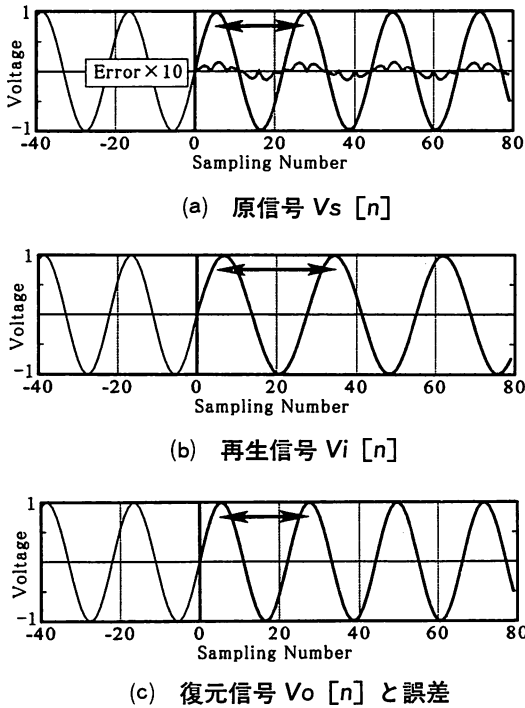


図 8 変形境界後半部の信号波形 (TYPE II)

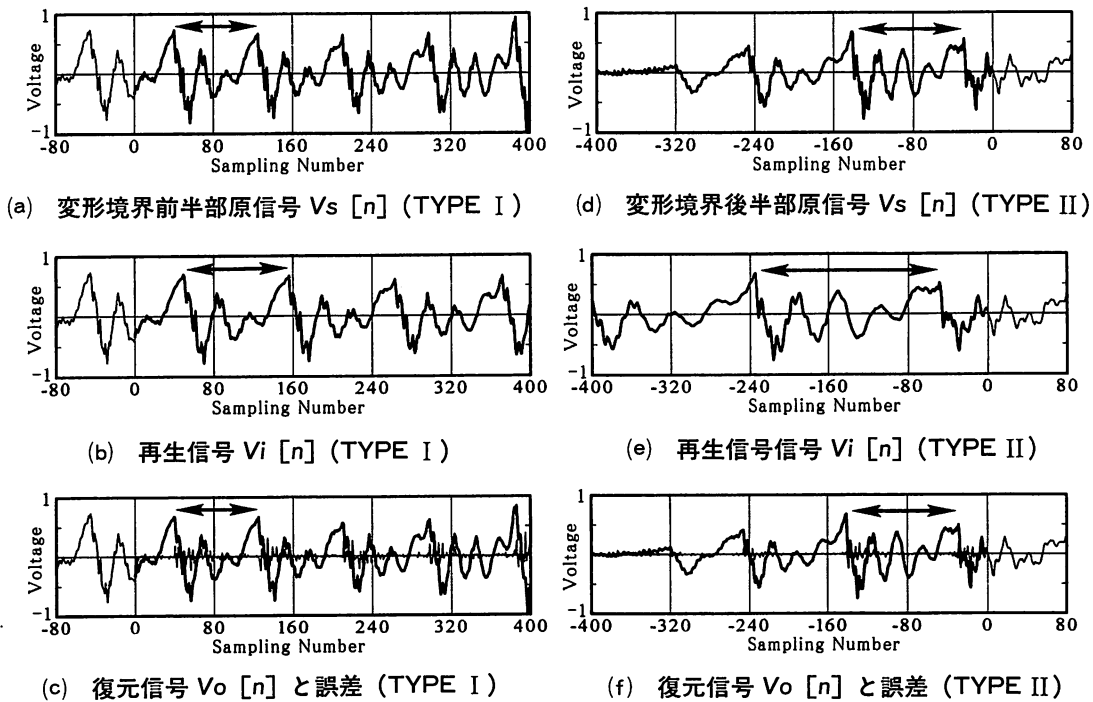


図 9 アナウンサーの音声を用いた場合の復元信号