話速変換に伴う周波数変化修正の一方法

川澄正史(正会員)*, 大西孝史(非会員)**, 志村隆史(非会員)**, 平松啓二(正会員)***

A Correcting Method for Frequency Changes in Speech Speed Converting Process

Masashi Kawasumi*, Takafumi Ohnishi**, Takashi Shimura** and Keiji Hiramatsu***

Abstract

In order to listen to recorded speeches quickly or slowly (compared to normal speed), it is necessary to change the playback speed of player. Since the speech waveforms are compressed or expanded in time axis according to the playback speed, this operation obviously causes damage to tone quality of voice, individuality of speaker, and understanding of the recorded speech. To fix the quality of the affected speech, there are two approaches, namely, cutting or pasting of these damaged waveforms in time domain and correcting the shifted tone in frequency domain. The latter approach has advantages in holding frequency features of the speech through the process. We have been investigating a method of the approach in which the instantaneous frequency of signal is modifiable to any value. In this paper, this method is introduced and simulation results are discussed. In the results, both individuality of speaker and understanding of the recorded speech are almost fixed.

Key Words

Speech signal processing, Player, Play back speed, Listening aid, Elderly

1. はじめに

高齢者においては、早口の会話やメディアからの音声、放送等を聞き取りにくいと感じる場合が少なくない。このような音声は、録音されていれば標準再生速度よりも低速に再生することで聞き取りやすくなるといえる。また、カセットテープや VTR などに録音された音声を低速に再生

すると議事録の作成や外国語会話など内容の十分な確認にも役立ち、高齢者への伝達手段としても有効である¹⁾。逆に、高速に再生すれば録音内容の概要を短い時間で理解することができる。しかし、再生速度を変えることにより音声波形は時間軸上で伸び縮みし、高速再生はキンキン声に、低速再生は低くこもった声に変わり、個人性が失われ、話者の特定も困難となる。そのため再生速度を高速あるいは低速に変更すると同時に、声質を録音時のものに戻す修正処理が必要となる^{2,3)}。このような話速変換の処理は時間軸圧縮伸張処理と呼ばれる(以後、圧伸処理という)。

圧伸処理には、時間軸上で処理する方法と周波数軸上で処理する方法とがある。時間軸上での処理方法として、音声波形を有声、無声、無音の各区間に分類し、継足しあるいは間引きをおこなう方法などが考えられる⁴⁾。しかし、この方法は伸び縮みする前の元の音声波形の継ぎ貼りだから、圧伸処理後の音声における母音・子音・無音区間の時間比率は録音前の比率とは異なってしまう。

本論文では、再生速度比に応じた圧伸処理を周波数軸上で実現する一方法について、実時間処理可能なアルゴリズムを作成し、シミュレーションをおこなったので報告する。

1998 年 10 月 29 日 受 付・受 理

- * 東京電機大学工学部情報通信工学科
- ** 元東京電機大学大学院工学研究科修士課程
- *** 東京電機大学名誉教授, 東京電機大学総合研究所
東京都千代田区神田錦町2-2(〒101-8457)
- * Department of Information and Communication Engineering, College of Engineering, Tokyo
Denki University
- ** Graduate School of Tokyo Denki University
- *** Emeritus Professor, and Adviser of Research Institute for Technology, Tokyo Denki University
2-2 Kanda-nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8457

本方法では、音声が入音にすでに高速にあるいは低速に録音されている場合でも、元の音質に戻すことができる。音声波形の継足し・間引きではないので録音時の母音・子音・無音区間の時間比率を保ち、音質修正をおこなえる。すなわち時間情報を失うことなく圧伸率を自由に変えることができる。以下のシミュレーションはワークステーションでおこなっている。実時間処理のためのハード化を考慮し、1ステップずつ処理可能なプログラムで記述されている。

2. 圧伸処理方法

2.1 本方法の特徴

従来の話速変換では、波形に重点をおいた処理が主体であるために情報の欠落が目立ち、音質に期待できなかった。

Fig.1 Frequency spectra obtained from recorded same vowel /a/ played back (a) slowly, (b) normally and (c) quickly (Ratio α = playback ÷ recording speed) 2nd formants (marked) are shifted due to playback speed.

た。FFTと符号化方式による処理は整合等の手順が多く、自然性に問題があり、多くの補足処理⁹⁾が必要であった。VOCODER方式は音声パラメータに対して高い加工の自由度を有していることから高品質が期待される¹⁰⁾。信号抽出能力が劣化する高齢者を対象にする場合には高品質化が望まれる¹¹⁾。本方式ではVOCODER方式を取り入れている¹²⁾。しかし特にピッチ情報は抽出せず、後述する楕円フィルタを採用して基本周波数の高調波を分離しているため自然性が期待できる。解析信号を用いて得られる瞬時周波数の値を再生速度に応じた値に修正するという、原理に忠実な方式である。

2.2 圧伸処理の原理

圧伸係数 α を次式で定義する。

$$\alpha = \frac{\text{変更再生速度}}{\text{標準再生速度}} \quad (1)$$

α を0.5, 1, 2倍として再生したときの音声(母音/a/)の周波数スペクトルをFig.1に示す。圧伸係数0.5は低速再生された音声, 1はオリジナル音声, 2は高速再生された音声を意味する。フォルマント周波数はじめ音声の特徴が周波数軸上で移動してしまうことがわかる。

母音のような周期性信号は、基本周波数とその高次の成分より構成される。すなわち母音は次式で近似できる。

$$\sum_{i=0}^n A_i(t) \cos(2\pi i f_0 t + \phi_i) \quad (2)$$

ここで、 n は高次次数、 f_0 は基本周波数であり、 $A_i(t)$

および ϕ_i は i 次の振幅および位相をあらわす。

圧伸係数を任意に選び再生速度を変更した場合の母音は次式であらわされる。

$$\sum_{i=0}^n A_i(t/\alpha) \cos(2\pi \alpha i f_0 t + \phi_i) \quad (3)$$

位相の変化は、人間には感知されない。よって(3)式の位相項 ϕ_i は無視して考える。(3)式によれば任意の α に応じた母音の圧伸処理は、次の原理で実現できる。「 α 倍の速度で再生した音声の基本周波数の振幅と、基本周波数の高調波成分の振幅とを保存したまま周波数だけを $1/\alpha$ 倍することによって実現できる」

子音には、母音と違い調波構造が存在しない。子音の構造は、特定の帯域に集中するスペクトル分布構造で特徴づけられる。つまりスペクトルのエンベロープ情報を修正すればよい。再生速度を変更した場合には α 倍だけそのスペクトルがシフトされる。よって子音の圧伸処理は次の原理で実現できる。「母音と同様に、振幅を保存したまま周波数を $1/\alpha$ 倍すれば実現できる」

2.3 解析信号と瞬時周波数の定義

圧伸処理のために解析信号を用いる．解析信号より得られる瞬時周波数信号を $1/\alpha$ 倍に修正する．解析信号 $Sa(t)$ は実信号 $S(t)$ ，その位相を $\pi/2$ シフトさせた信号 $\hat{S}(t)$ とを用いて次式のように定義する． $\hat{S}(t)$ は $S(t)$ をヒルベルト変換して求める．

$$\begin{aligned} Sa(t) &= S(t) + j\hat{S}(t) \\ &= a(t) \exp(j\phi(t)) \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 式中の包絡線信号 $a(t)$ と位相 $\phi(t)$ は次式となる．

$$\begin{aligned} a(t) &= \sqrt{S^2(t) + \hat{S}^2(t)} \\ \phi(t) &= \tan^{-1} \frac{\hat{S}(t)}{S(t)} \end{aligned} \quad (5)$$

瞬時周波数信号 $f_i(t)$ は次式となる．

$$\begin{aligned} f_i(t) &= \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{S(t) \frac{d\hat{S}(t)/dt - \hat{S}(t) \frac{dS(t)/dt}{S^2(t) + \hat{S}^2(t)}}{S^2(t) + \hat{S}^2(t)} \end{aligned} \quad (6)$$

以上のように，ゆっくりと変化する音声信号 $S(t)$ の包絡線と，瞬時周波数信号とを分離して処理する．

2.4 圧伸処理の流れ

母音の基本周波数は低くても 80Hz 程度である．この場合，母音の周波数帯域全体を帯域幅 80Hz の隣接する帯域フィルタ群で分割すれば，基本周波数 80Hz の高調波は各帯域フィルタ(以後，BPF)の出力から正弦波状信号としてそれぞれ抽出できる．

Fig.2 に圧伸処理の流れを示す．各帯域内(すなわち各チャンネル内)では全く同じ処理をすればよい．再生速度が α 倍に変更された場合には，帯域幅 $80 \times \alpha$ [Hz] の各 BPF により各高調波を同様に抽出できる．次に帯域通過信号の包絡線信号と瞬時周波数信号を計算して求める．両者の値は時間的に変化する直流値となる．求めた瞬時周波数信号を $1/\alpha$ 倍し，この瞬時周波数信号で FM 変調する． $1/\alpha$ 倍された瞬時周波数に対応した周波数の一定振幅の波形が得られる．これに包絡線信号を乗じ，振幅情報を与える．最終段階で各チャンネルの出力信号すべてを加えれば，各高調波成分の合成として圧伸処理された音声を得られる．

子音についても母音と同様に 80Hz ごとに帯域分割して圧伸処理をおこなう．

3. シミュレーション

3.1 圧伸処理の実現方法

Fig.2 のブロックを実現するプログラムを作成し，シミュレーションをおこなった．

圧伸処理前の音声の帯域幅は，5kHz に設定した．対応できる再生速度は，0.5 倍速から 2.0 倍速までの任意の速

度とし，何倍速であるかの値は，再生装置のメカニズムより直接に得られるようにする．2.0 倍速のときは，約 10kHz までの処理の対象帯域となる．このためカットオフ周波数 10kHz の折り返し歪除去フィルタを使用する．遷移域において急峻な減衰特性を得るため，IIR 型 12 次連立チェビシェフ型フィルタを用いる．12kHz において -40dB の減衰量が得られるので，サンプリング周波数は標本化定理により 24kHz を選択した．サンプリング間隔 T は $41.6 \mu s$ である．

BPF は母音における基本周波数の各高調波成分の抽出に用いる．BPF の通過帯域幅は音声の基本周波数よりも狭い必要がある．BPF は遷移域の減衰特性が急峻で，阻止域の減衰量は大きくなければならない．ここでは少ない次数でこの特性が得られるチェビシェフ型 IIR フィルタを用い，次数を 12 次とする．帯域幅 80α [Hz] の BPF を用いて $80 \alpha \sim 4880 \alpha$ [Hz] の 60 チャンネルに音声を分割する．ヒルベルト変換は 90 度位相分割法により実現した．すなわち位相差分波器を用いて， 80α [Hz] の帯域幅において互いに 90 度の位相差を持つ 2 つの信号を得る．このフィルタの形式は 6 次の IIR 型である．

(7) 式中の微分計算にはラグランジェの補間多項式を使

Fig.2 Correcting procedure of affected speech
Ratio α should be given by speed controllable player.

った逐次数値微分法を用いた。すなわち微分値を求めたい点と隣接するいくつかの点との差分商を基に、ラグランジュの補間多項式を用いて差分商の近似多項式をたて、微分値を計算する。ここでは 6 つの隣接するデータ点を用いる。近似多項式はたたみ込みの式へと簡単化でき、この場合は 6 次の FIR 型フィルタにより実現できる。

FM 変調の一般式は搬送周波数を $f_c(t)$ 、変調信号を $f(t)$ として次式であらわせる。

$$[f_c(t)]_{FM} = A_c \cos[2\pi f_c(t) + k_{FM} \int f(t) dt] \quad (7)$$

圧伸処理中の FM 変調は瞬時周波数信号の正弦波状波形を共振させるものである。したがって搬送周波数は不必要となり、変調信号 $f(t)$ は瞬時周波数値 $f_i(t)$ となる。係数 k_{FM} はここでは瞬時周波数修正の係数として使用する。求めた瞬時周波数は α 倍だけずれている。したがって、 k_{FM} を $1/\alpha$ とすることで瞬時周波数を修正できる。また、包絡線との積により振幅制御をおこなうので $A_c=1$ とする。これより本方式で用いる FM 変調の式は次式となる。

$$[f_c(nT)]_{FM} = \cos[2\pi \frac{1}{\alpha} \int f_i(t) dt] \quad (8)$$

この式の積分部を台形則を用いて積分し、差分形であらわすと、次式となる。 $\cos$ の計算は正弦波関数を用いずに $\cos x$ を 7 項までマクローリン展開して計算する。

$$[f_c(t)]_{FM} = \cos[2\pi T \sum_{k=0}^n \frac{f_i(kT) + f_i(kT-T)}{2\alpha}] \quad (9)$$

3.2 シミュレーション 1

成人男声の「東京電機大学」を対象音声とする。サンプリング周波数を 24kHz、圧伸処理後の帯域を 80～4880Hz、圧伸係数 α を 0.625 (低速再生) および 1.875 (高速再生) として圧伸処理をおこなう。

はじめに、圧伸処理各過程における単チャンネル内の各波形例を示す。Fig.3 は第 5 チャンネル(帯域 $400\alpha \sim 480\alpha$ [Hz], $\alpha=0.625$, つまり帯域 250～300Hz)内の信号の例である。各波形は、(a)速度を変更して再生された音声の一部、(b)第 5-BPF 通過後、(c)ヒルベルト変換後の $S(t)$, (d)ヒルベルト変換後の $\hat{S}(t)$, (e) 包絡線信号、(f)瞬時周波数信号、(g) $1/\alpha$ 倍した瞬時周波数信号、(h)FM 変調波、(i)包絡線信号を乗じて振幅制御した波形、である。振幅制御後の波形(i)が第 5 チャンネルの最終出力波形である。この出力波形がチャンネルごとに同時に得られ、すべて加え合わせたのが、圧伸処理後の音声波形となる。

次に、音声波形を観察する。音声の一部について Fig.4 に、(a)標準速度での音声波形、(b)高速再生した音声波形 ($\alpha=1.875$)、(c)圧伸処理後の音声波形をそれぞれ示す。聴覚上に大きな影響を与えるピッチ周期が(a)の間隔に修正されていることが確認できる。 $\alpha=0.625$ の低速再生時の各波形も、同様の修正がなされていることを確認した。

Fig.5 には、処理前と処理後における音声全長の波形とスペクトログラムとを示す。スペクトログラムからはフォルマント位置や調波構造が復元されていることが確認できる。

次に、圧伸処理結果の音声を試聴した。個人性が保存さ

Fig.3 An example($\alpha=0.625$) of waveforms observed in #5 channel (400α Hz～ 480α Hz)

Fig.4 Three speech signals (a) is the recorded speech signal. (b) is affected by playback quickly ($\alpha=1.875$). (b) is put into the system. (c) is the output of the system. The pitches are corrected to 80ms.

Fig.5 Corrected speech signals and the spectrogram of a Japanese pronunciation, "To-kyo denki dai-gaku", played at (a) normal speed ($\alpha=1$), (b) fast speed ($\alpha=1.875$) and (c) slow speed ($\alpha=0.625$)

れた音質であった。子音部においては各音韻の区別は十分可能である。しかし高速再生時には若干明瞭度が下がる。この原因として、(a) 高速再生時には子音長も短くなるため必然的に明瞭度が落ちること、(b) 本処理で設定した圧伸処理帯域が約 5kHz 以下であること、(c) および子音についても母音と同様の圧伸処理をあてはめたために子音のスペクトル包絡を完全には再現できなかった可能性がある、の三つが原因の候補として考えられる。

(a)の原因は避けることができない。(b)について調べるため、圧伸処理の対象帯域を 6.5kHz まで拡張して圧伸処理をおこない、試聴した。この結果、破裂音や破擦音の明瞭度が上がることが確認できた。(c)について調べるため、全子音を対象として圧伸処理後のスペクトログラムを視察した。子音のスペクトル包絡はきれいに復元されていた。このことと、圧伸処理帯域を広げることで明瞭度が上がることから(c)は明瞭度を下げる原因ではないと考えられる。

以上のように、本論文で対象とした周波数帯域約 5kHz 以下については、期待した音質修正が可能であることが確

かめられた。子音の明瞭度を上げるためには対象帯域を広げればよい。つまりチャンネル数を単に増加させればよく、ただちに可能である。

3.3 シミュレーション2

中国語の会話音声圧伸処理したときの音質を評価する。対象音声は、「プリンストン大学は文学部だけの大学ですか。いいえ、総合大学です。」という意味の中国語の会話である。中国語を選んだ理由は、中国語特有の抑揚の急な変化、すなわちピッチの急変するような音声に対応できるかを調べるためである。圧伸係数 α を0.65および1.6として再生された音声に対し、圧伸処理後のスペクトログラムをFig. 6に示す。フォルマント位置、基本周波数が修正されているのがわかる。ネイティブの中国人に試聴してもらい、圧伸処理後の音声は個人性がよく保存されており、音質も良いとの評価を得た。このことから本圧伸処理は、ピッチの急変するような音声にも十分対応できると考えられる。

Fig.6 Corrected speech signals and spectrogram of a Chinese sentence at (a) slow speed ($\alpha=0.65$), (b) normal speed and (c) fast speed($\alpha=1.6$)

4. 考察

圧伸処理を波形処理により実現する方法では、処理以前の音声パラメータなどの情報はそこで途切れてしまう。本方式では単純な基本形だけの処理で圧伸処理をおこなっているため、情報は処理後も保存されている。新しく処理の追加が必要になった場合、たとえば子音の微妙な時間長とか話の間などの調整処理をおこなう場合にも、必要な情報は各チャンネル内にて保存されているため、これを利用しておこなえばよい。

圧伸処理のチャンネル数について述べる。BPF の通過帯域幅は、母音の基本周波数の高調波成分を 1 つだけ抽出するために 80α [Hz] に設定した。しかし、高域にほぼ連続に分布したスペクトルを持つ子音に対しては、必ずしも狭帯域である必要はないと考えられる。子音のスペクトル構造を保存しつつ、各 BPF の通過帯域幅を広げれば、あまりチャンネル総数を増やすことなく音質の改善が図れる。同様に音質を落とさずに圧伸処理チャンネル数を減らすことも可能であると考えられる。このことはシステム規模を縮小させる場合に有効である。

ハードウェアによる実現方法について述べる。ワークステーション上では、以上のシミュレーションの単チャンネルごとの実時間圧伸処理が可能であった。よってチャンネルごとに DSP を用いればハードウェア単体による実時間圧伸処理が可能である。ハードウェアシステムへの入力、再生機からの録音音声ならびに圧伸係数値である。全体構成が Fig.7 で示されるようなシステムとなる。ハードウェアは DSP を複数個使用した DSP システムとし、これに前述のアルゴリズムを移植すればよい。

この DSP システムは、各チャンネルでの処理が完全並列処理となるように構成される。まず考えられるのは各チャンネルごとに 1 個ずつの DSP を割り当てる構成である。ここで、1 つの DSP で複数チャンネルの処理が可能であればその出力を複数チャンネル分の加算結果となるように設計すればよく、DSP の個数は逆数的に減らすことができる。

Fig.7 Hardware components of the system

5. まとめ

本論文では、再生速度比に応じた圧伸処理を周波数軸上で実現する方法について述べた。実時間処理可能なアルゴリズムを作成し、そのプログラムをワークステーション上に実現し、シミュレーションをおこなった。次の結果を得た。

- (1) この圧伸処理アルゴリズムが、母音のような調波構造のスペクトルを持つ音声に対してよく適合することが確認できた。
- (2) 高い周波数に連続したスペクトル分布を持つ子音についても、圧伸処理後のスペクトル分布はよく復元される。処理後の音声を聞いても明瞭度の著しい低下はない。よって、この圧伸処理アルゴリズムは子音にも適用できるといえる。
- (3) 抑揚が急な中国語にもよく対応する。すなわちピッチの急変する場合にも対応できると考えられる。

以上のシミュレーションについて、ワークステーション上における単チャンネルの実時間圧伸処理を実現した。チャンネルごとに DSP を用いればハードウェア単体による実時間圧伸処理が可能である。高速再生することで短時間聞き取りに対して有効と考えられる。特に、低速再生することで高齢者に対する聞き取り支援等に有効と考えられる。

謝辞

本研究に携わった本学情報通信工学科情報システム研究室諸氏に感謝する。

参考文献

- 1) 中村 章, 清山信正, 池沢 龍, 都木 徹. 高品質リアルタイム話速変換システム. 信学技報 1992;SP92(9):41-48.
- 2) Schroeder MR, Flanagan JL and Lundry EA. Band-width compression of speech by analytic-signal rooting. Proc.IEEE 1967;55(3):396-401.
- 3) 戸塚良則. 解析信号法を用いた音声の継続時間の圧縮伸張. NHK 技研 1971;23(6):461-471.
- 4) 小坂雅博, 横堀進義, 藤田忠正. 会話の時間軸を圧縮/伸張するテープレコーダ. 日経エレクトロニクス 1976;76(7):92-130.
- 5) 河原英紀. 聴覚の情景分析が生み出した高品質 VOCODER:STRAIGHT. 日本音響学会誌 1998;54(7):521-526.
- 6) 都木徹. 放送における話速変換: 話者や音環境の多様性への対応. 日本音響学会誌 1998;54(7):533-538.
- 7) 宮坂栄一. 小特集に寄せて 感性の領域に迫る音処理技術. 日本音響学会誌 1998;54(7):506-507.
- 8) 志村隆史, 大西孝史, 小椋靖夫, 平松啓二. 解析信号法を用いた音声の時間軸圧縮伸張処理の実現. 電子情報通信学会. 1993;秋季大会講演論文集:A-126