

Developping a system for dialog support to the hard of hearing via speech recognition and character display

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-02-20 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Funada, Tetsuo メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00057105

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



軽度難聴者との対話支援用
音声認識・提示システムの開発

18500127

平成18年度～平成19年度科学研究費補助金
(基盤研究(C)) 研究成果報告書

金沢大学附属図書館



1300-05161-2

平成 20 年 5 月

研究代表者 船 田 哲 男
金沢大学自然科学研究科教授

著 者 寄贈

<はしがき>

○ 本研究は、加齢に伴う難聴などに由来する軽度の聴覚障害者が、音声による対話を行う際に、文字情報を同時表示することにより、聞き返しを減らしてスムーズに対話を進めることを支援するシステムの作成を目的とする研究である。軽度の難聴の場合は、雑音環境での音声が聞き取りにくくなり、対話の途中に何度も聞き返したり、誤って違う単語として認識してしまうことが多い。このような場合、発声者の発声内容が文字で相手に同時表示できると、対話の際に有用である。

研究組織

研究代表者 : 船田哲男 (金沢大学自然科学研究科教授)

研究分担者 : 野村英之 (金沢大学自然科学研究科助教)

交付決定額(配分額)

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
平成18年度	500,000	0	500,000
平成19年度	600,000	180,000	780,000
総計	1,100,000	180,000	1,280,000

研究発表

- (1) 雑誌論文 なし
- (2) 学会発表 (黒田弥文、信頼性を考慮した孤立発声単音節認識システム、
2007日本音響学会春季研究発表会 等)
- (3) 図 書 なし

研究成果による産業財産権の出願・取得状況

なし

1. まえがき 一研究の背景と目的

本研究は、加齢に伴う難聴などに由来する軽度の聴覚障害者が、音声による対話をを行う際に、文字情報を同時表示することにより、聞き返しを減らしてスムーズに対話を進めることを支援するシステムの作成を目的とする研究である。



軽度の難聴の場合は、雑音環境での音声が聞き取りにくくなり、対話の途中に何度も聞き返したり、あるいは誤って違う単語として認識してしまうことが多い。このような場合、発声者の発声声容が文字で相手に同時表示できると、対話の際に有用である。

現在、音声認識技術は急速な発展をしており、特定の条件の下では、実時間で認識できる装置が商品として世に送り出されるようになっている。しかし、雑音が混在する実環境下で対話音声を機械で認識することは一般に誤りが多く、信頼性に欠けることも現実であるので、安全性が要求される現場で利用するには問題が多い。

発声者の音声が機械で認識され、その結果を発声者自身が確認できる場合、認識結果が間違つておれば再度発声しなおして正しい認識結果を表示できるように修正できる。本研究で作成する対話支援システムの利用条件はこのような状況を想定しており、誤認識した場合はその場で確認できるので再発声して訂正できる実用上の問題がないシステムである。また、認識内容としては連続音声でなくとも、発声者の意図を表すキーワードを認識・提示することで、対話支援システムとしての目的を達成できるので、認識システムとしては比較的シンプルに構成できる。雑音環境下で利用することも考慮すると雑音耐性をもつ認識システムを実現することが必要である。

しかし、キーワードを対象とするだけでは利用範囲が限定されるため、本システムでは日本語環境での使用を条件とし、日本語単音節音声を認識できるようにし、かつ単音節系列を「かな漢字変換」することにより、任意の文章を提示できるシステムに機能拡大することも考える。

2. 解決のための方法

ヒトが音声認識を行うには聴覚内耳の蝸牛管で事実上の周波数分析がなされ、スペクトルパターンの時間変化に関する情報が抽出されている。この情報は機械で音声認識する場合にも不可欠であり、これらの特徴を抽出するために「LPCケプストラム」や「MFCC」とよばれる特徴量が標準的に用いられている。これらの特徴量はスペクトルパターンの概形を、周波数軸方向に再度フーリエ変換を行い、その低次成分である少数のパラメータで周波数情報を特徴付ける方法である。

しかし、この処理方法はスペクトルパターンに含まれている雑音や収録環境の影響をそのまま含んで得られる特徴量であり、そのためこれらの変動による認識性能の低下が大きいという問題をもっている。

この問題を克服するため、我々は新しい特徴量FTTS (Fourier Transform of Ternarized Spectral Slope)を提案し、雑音耐性をもつことを実験的に確認している(論文[6])。この特徴量は、聴覚内耳における神経インパルス発生のメカニズムに着想を得たものであり、スペクトルパターンの周波数点ごとのスペクトル傾斜に閾値を設け、閾値を超えたときだけ発火するインパルスを発生させ、その時系列を時間軸上で平滑化することにより、雑音に由来する変動分を除去し、音声本来のスペクトルを強調した情報から特徴量を求める手法である。

ここまで結果は、雑音重畠した音声に対する有効性をすでに実験的に確認済みであるが、今回の研究では、さらに時間軸方向でも同様に特定の周波数におけるパワー成分の時間方向の増減に対し、閾値を超えたときにのみ発火するインパルスを発生させ、その時系列を平滑処理することにより雑音が重畠した音声に対しても、雑音に依存しない特徴量として抽出しようという手法である。この方法の有効性は本研究を進める過程で確認する。

さらに、本研究の目的に適うようにするには、発声者が容易に身につけることができるよう小型化する必要がある。そこで、本学の集積回路工学研究室の協力を得て、提案する特徴量の計算過程と、認識のための確率モデルの適合度計算過程を実現するカスタムVLSIを設計し、また認識結果を表示するためにこれも同研究室の協力を得て、マイクロディスプレイ装置に出力するシステムを完成することを計画したが、浮動小数点演算機構をVLSIに組み込むための設計が大掛かりになること、および近年市販のモバイル型パーソナルコンピュータ(以下、モバイルパソコン)が小型化しつつ動作速度も速いことから、モバイルパソコンで本システムを実現することにする。

3. 本研究の特色

本研究ではスペクトルの周波数軸方向および時間軸報告の傾斜を利用することと、それに閾値処理を適用することに特色がある。

スペクトルの周波数軸方向の傾斜を利用する研究は、古くは B.A.Hanson, et al:IEEE Trans, Vol.ASSP-35,pp.968-973(1987)や、最近では J.Chen, et al:Speech Communication, Vol.41, pp.469-484 (2003)が挙げられる。しかし、これらの論文で提案されている方法はスペクトル傾斜値をそのまま利用する方法であり、雑音による影響が直接含まれてしまうことに問題がある。それに対し、本研究では傾斜値に閾値処理を適用し、雑音や収録環境特性の影響を軽減する点が独創的である。

スペクトルの時間軸方向に関する傾斜を利用する点に関しては、前述の特徴量「LPCケプストラム」や「MFCC」の時間変化（これらは、習慣上 Δ 量とよばれている）を利用する方法は、音声認識の技法では通常利用されているが、このような特徴量に変換した後での時間変化を抽出することは、聴覚の処理過程とは無縁な手法である。本研究では、聴覚のメカニズムで観測されているスペクトル成分の時間変化および周波数軸方向での増減を検出するニューロンを模して考案した方法である。このように、 Δ 量ではない時間方向の特徴量を音声認識システムに取り入れる手法が本研究の特色である。

4. 学術的課題

音声認識機能をもった機械を実現するための基礎的な技法として、HMM (Hidden Marokov Model)とよばれる確率モデルが世界的に主流となっている。「LPCケプストラム」や「MFCC」を用いる場合に比べ、本研究で提案する特徴量を用いることにより、より安定したHMMが学習できることを実験的に確認しているが(井上、船田、野村:日本音響学会秋季研究発表会,1-P-5(2004))、本研究課題を遂行する過程でこの理由を解明していくことが学術的課題として挙げられる。

本研究で得られる特徴量を使用することにより、乗り物や街の雜踏、レストラン、オフィスなど実際的な環境の下で、軽度の聴覚障害があってもスムーズに対話を進める支援システムの実現が期待できる。

5. 従来の研究経過

音声分析や認識の研究に関して、本研究の代表者船田らは、従来から音声分析のための新しい手法の提案（T.Funada:Signal Processing, Vol.13, pp.15-28(1987)、T.Funada:J.Acoust. Soc. Of Jpn(E), Vol.10, pp.349-355(1989)、最近では論文[5], [9]）、話者認識（船田、戸田、胡:電子情報通信学会論文誌, Vol.J73-DII, pp.937-939(1990)）、音声ピッチ抽出（T.Funada:Speech Communication, pp.203-216 (1990)、最近では論文[10]）、ニューラルネットワークによる音声符号化（森田、船田:電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-A, pp.1171-1178(1997)、最近では論文[3]）、話速変換やピッチ変換などの音声強調（論文[4]）、スペクトル傾斜を利用した耐雑音性をもった頑健な特徴パラメータの提案（船田、続木:電子情報通信学会論文誌, Vol.J82-DII, pp.2184-2187(1999)）、などの研究を行ってきている。

このように本研究の特色であるスペクトル傾斜を利用した方法の着想はすでに学会論文誌で発表しているが、この手法は計算量を少なくするため、スペクトル傾斜の計算を簡略化した方法であった。

いっぽう、本研究で利用するスペクトル傾斜の計算法は、研究代表者船田が提案した方法であり（T.Funada:IEICE(電子情報通信学会英文論文誌), Vol.E62, pp.382-388(1979)）、スペクトル傾斜を正確に計算するアルゴリズムを用いた方法である。発表当時は、コンピュータの計算能力からして実時間計算することは不可能であったが、近年のハードウェア技術の向上により、実時間でも問題なく適用できる状況になっている。

この方式による特微量を用いた認識性能については、単語音声を用いた予備実験で雑音耐性に対する有効性を確認しており、平成16年の国際会議で発表した（論文[6]）。

従来の研究経過の項でも説明したように、本研究で提案する特微量が、雑音重畠した音声の認識に有効であることを予備実験で確認しているが、今までの実験では50語彙の単語に限定した実験であった。これらの実験のための音声データは、当研究室で6年間学生の協力を得て集積した30人程度のデータである。今回、本研究計画では、より信頼性をもった認識性能をもたせるため、多人数での話者で確率モデルの学習を行うことにより不特定話者の音声に対する信頼性を上げることができるが、本研究の応用例からすると不特定話者よりは特定話者を対象とした認識でも実用性があると考えられる。

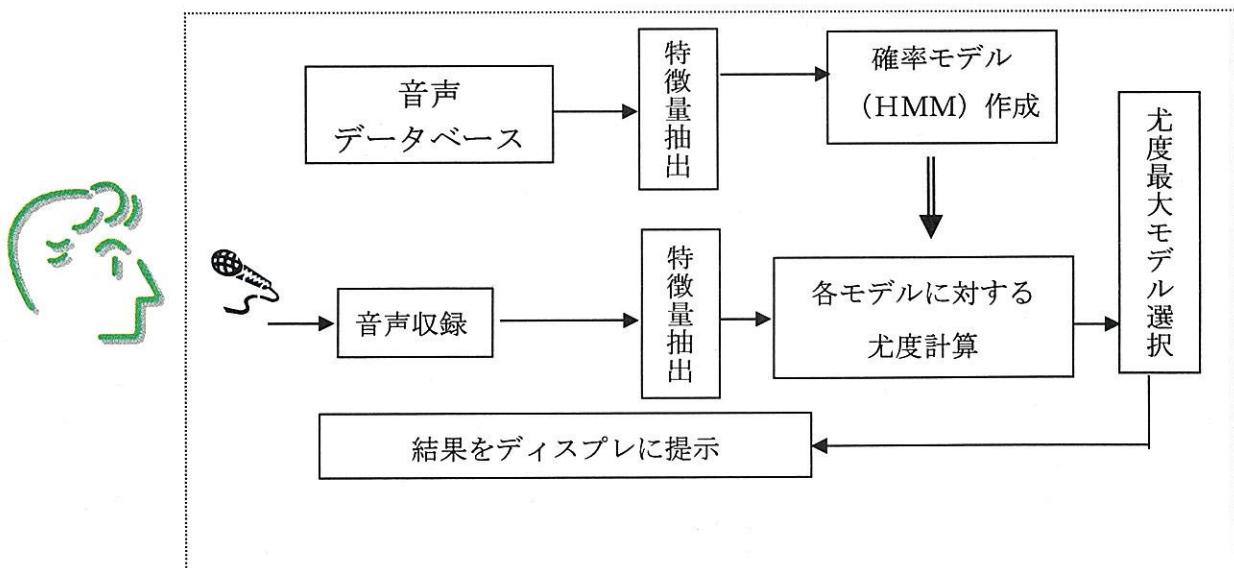
6. 必要な研究設備

研究を行うために必要な設備は、主としてプログラム開発と音声データ収録、確率モデル学習のためのデスクトップパソコンコンピュータと、実際的な応用場面を想定し現場でテストするためのモバイルパソコンを購入して実験を行う。

7. 研究期間内の計画と役割分担

- 平成18年度は「特微量抽出」のブロックにおいて、今まででは周波数軸方向だけであったが、新たに時間方向のスペクトル成分の増減変化を表現する特微量を直接利用する改良を加え、雑音や収録環境の変動に耐性をもったシステムに改変した。これらの研究はC言語を使い汎用のデスクトップパソコンコンピュータ上で行い、プロトタイプとなる模擬システムを作成した。
- 平成19年度は模擬システムに対し実環境での性能を調査する。性能を上げるためにパラメータのチューニングをした上で、データとソフトウェアをモバイルパソコンに移し携帯化を図った。
- 研究代表者船田は「研究全体の統括」と「特微量抽出」、「確率モデルの学習」、「モバイルパソコンへの移植」を担当する。分担研究者野村は「実環境での性能調査」を担当した。

8. システムの概要

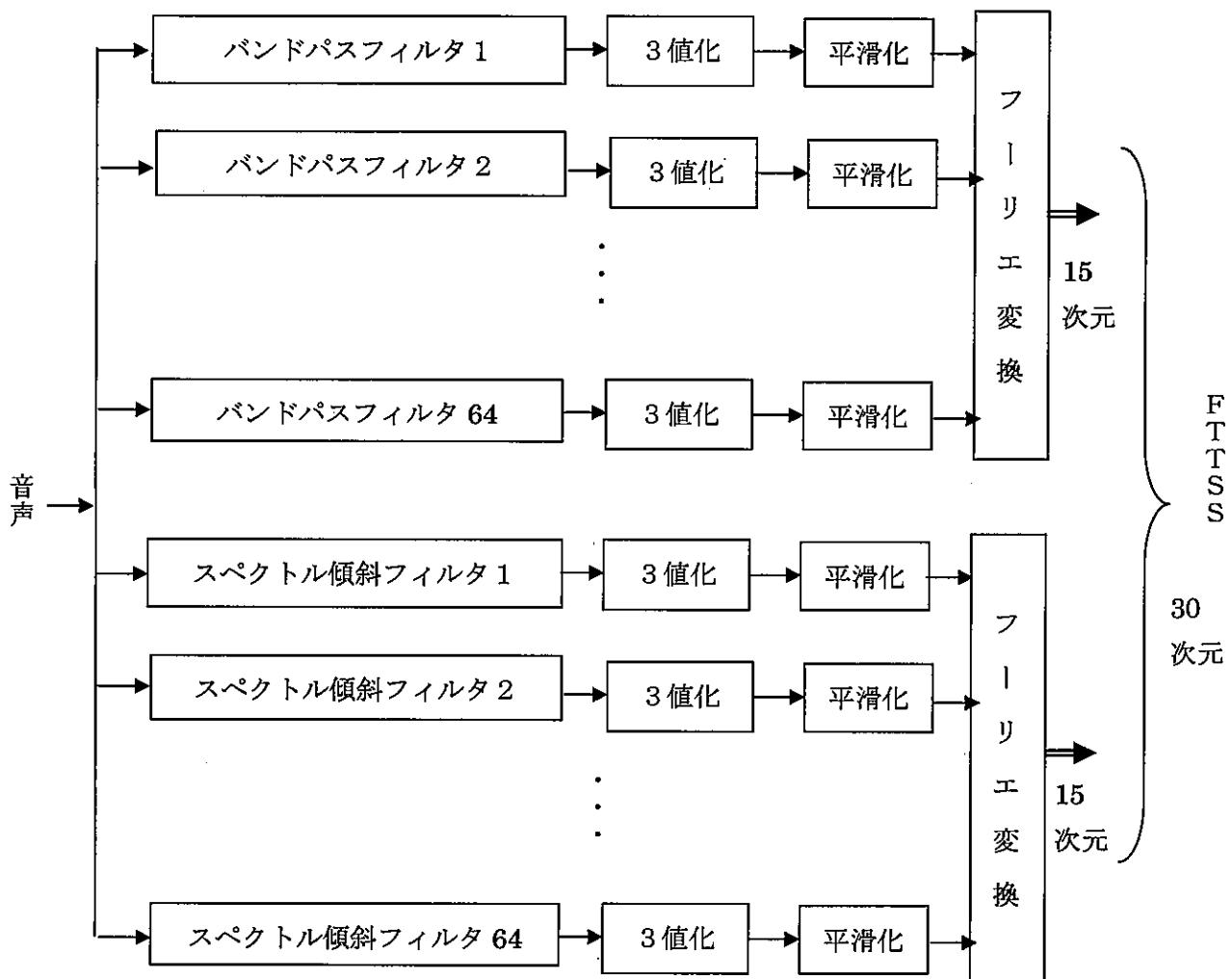


9. 方法に対する説明

- ・通常、雑音重畠した音声を認識するための特徴量には、雑音のスペクトルと音声のスペクトルが重畠したパターンから求められる特徴量が利用されている。このために認識性能の低下が起きる。
- ・本研究で提案している特徴量 (F T T S S … Transform of Ternarized Spectral Slope) は、スペクトル分析の際の分析条件による影響と雑音に対する影響を軽減するため、以下のステップで計算される。
 - (1) メル周波数尺度（人間の聴覚に基づく周波数尺度）で等間隔に設定した 64 チャネルの周波数点で、パワースペクトル成分の時間変化を増大(+1)・不变(0)・減少(-1)の 3 値(Ternary)で量子化し、時間軸での低域フィルタで平滑化する。
 - (2) 同様に 64 チャネルの周波数点でパワースペクトルの周波数軸方向の微分(傾斜)を P S D フィルタ(Power Spectral Derivative)によって計算する。この傾斜値に対しても、周波数方向(チャネル方向)の変化を増大(+1)・不变(0)・減少(-1)の 3 値(Ternary)で量子化し、時間軸での低域フィルタで平滑化する。この P S D フィルタは研究代表者船田が提案したもので、スペクトル傾斜を時間方向の逐次処理で直接的に計算できる非線形フィルタである (T.Funada: IEICE, Vol. E62, No.6, pp.382-388(1979))。
 - (3) (1),(2)のそれぞれの結果に対して、64 チャネル方向でフーリエ変換し、その 1 ~ 15 次までの低次成分を 30 次元の特徴量(特徴ベクトル… 本研究ではこの特徴量を F T T S S とよぶ)として認識に利用する。

この特徴量 F T T S S を計算する過程は次のブロック図で示される。

- ・これらの特徴量を一定時間幅(フレーム)で、一定時間(フレーム周期)ごとに求め、語彙ごとに隠れマルコフモデル(HMM)とよばれる確率モデルを学習する。信頼性ある HMM を学習するには、初期モデルの構成法および多人数の話者による音声データを用いてモデルの学習を進めることが必要である。
- ・上記の項目において、(2)を用いた結果の有用性を実験的に確認・発表しているが、本研究計画では(2)に加え新たに(1)を併用し、より信頼性ある性能を実現する。



9. 研究経過

プロトタイプシステム作成にあたり、単語音声認識タスクの下で以下の点に着目して、提案する特徴量の性能を調査・検討した。

- (1) 装置に内蔵されたマイクで音声入力を行う際に、装置の持ち方で話者の口元とマイク位置間が相対的に変動するため、そのような変動による収録環境変化の認識に対する影響を軽減する。これらの研究に対する問題点を吟味するため、電気通信大学電気通信学部鎌倉友男研究室の指導を受けた。
- (2) 確率モデルを学習する前段でその初期モデルを構成しなければならない。初期モデルを直接認識に用いると学習前のモデルであるので、当然学習後のモデル

より認識性能は低くなる。しかし、初期モデルによる認識性能が、学習後の最終的な認識性能に影響することを実験的に確認している（井上、船田、野村：日本音響学会秋季研究発表会,1-P-5(2004)）。そこで、特微量MFCCとFTTS-Sで同様の条件で、かつ各種の構成法で初期モデルを作成し、それらの調査・比較を行なった結果、初期モデルに対しては本研究で提案する特微量FTTS-SはMFCCより認識率が高くなるのに対し、学習回数を進めるとMFCCの方が徐々に認識率を上げ、十分学習を行うとMFCCの認識率が良くなつた。学習をオンラインでもできるようにする場合は、学習回数が少ない方が良いので、特微量としてFTTS-Sを採用する利点がある。

- (3) 雜音の種類ごとにモデルを切り替えることを想定し、種類による音響的性質の違いと認識性能を調査する。

10. 予備実験

本システムを開発するにあたって行った予備実験の内容とその結果について示す。本システムの応用に当たっては、難聴者に加え構音障害者についての適用も視野にあるため、本実験では通常話者に加え男性の構音障害者1名についても認識実験を行つた。

10.1 50単語による認識実験

いづれの実験も音声データはサンプリング周波数16kHz、量子化16ビットで収録したもの用いる。

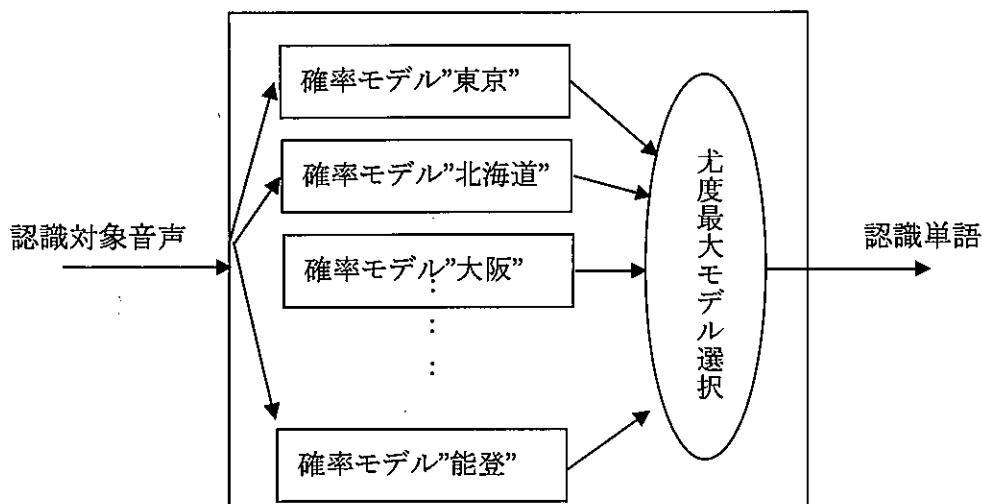
〔実験1〕 通常話者と構音障害者との比較

認識対象単語：都道府県名 47+「金沢」、「加賀」、「能登」の 50 単語

音声データ：研究室男性話者 40 名が各 5 回発声（同時期に連続発声）

構音障害者による各 5 回発声（同時期に連続発声）

認識法：各単語の確率モデルを作成（学習）し、認識対象音声が各モデルに適合する「尤もらしさ（尤度）」を計算し、最も尤度が大きくなるモデルに対応する単語であると判定する。



[実験結果]

【実験 1】不特定話者モデル

- ・20名の話者が各5回発声した計100発声を用い1単語モデルを学習
- ・学習に使用しなかった話者（学習外話者）20名の各5回発声を認識
- ・計5,000発声に対する認識正解率は97.8～98.1%

【実験 2】不特定話者モデル（実験1と同じ）

- ・20名の話者が各5回発声した計100発声を用い1単語モデルを学習
- ・学習に使用していない構音障害者の各5回発声を認識
- ・計250発声に対する認識正解率は50.4～71.6%

【実験 3】特定話者モデル

- ・構音障害者の1～2回目の計2発声を用い1単語モデルを学習
- ・構音障害者の3～5回目の発声を認識
- ・計150発声に対する認識正解率は99.3%

[構音障害者の音声に対する実験結果の考察]

- (1) 実験は同時期に、同一単語を連続して各5回発声しているので安定しており、認識条件は良い。時期において発声した場合についての評価が必要である。

- (2) 不特定話者モデルは構音障害者に適用は困難である。
- (3) モデル作成（学習）には構音障害者自身の発声を利用した特定話者対象の認識システムが必要
- (4) 特定話者の場合の学習用音声データの収録は、限定された小数語彙の認識システムでない限りできないであろう。
- (5) 通常の連続音声認識は困難であろう。
- (6) 音節モデルで対処できないか。この場合カタカナ1文字単位に対応した発声しかできず、実用性に問題が残る。

[実験 2] 特徴量MFCCとFTTSSの比較

- (1) 話者20名のオンライン単語認識率 (%)

	MFCC	FTTSS
認識率	97.8%	97.8%

- (2) マイクロホンによる違い（話者1名の単語認識率）

	MFCC	FTTSS
VAIO内蔵マイク（正面）	77%	77%
VAIO内蔵マイク（横向）	43%	60%
ハンドマイク（ダイナミック）	88%	92%
ハンドマイク（コンデンサ 正面）	88%	90%
ハンドマイク（コンデンサ 横向）	90%	84%

- (3) 構音障害者音声モデルの学習データ量による違い

	MFCC	FTTSS
50単語各1発声で学習	69.0%	88.0%
50単語各2発声で学習	99.3%	99.3%

1.1. システムの操作例

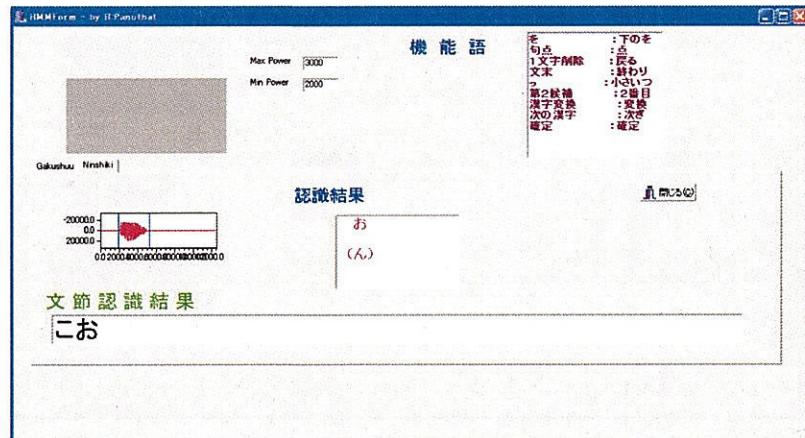
本研究期間内で最終的にシステムをインプリメントしたモバイルパソコンと、動作例を図で示す。

モバイルパソコン（ソニー VAIO）

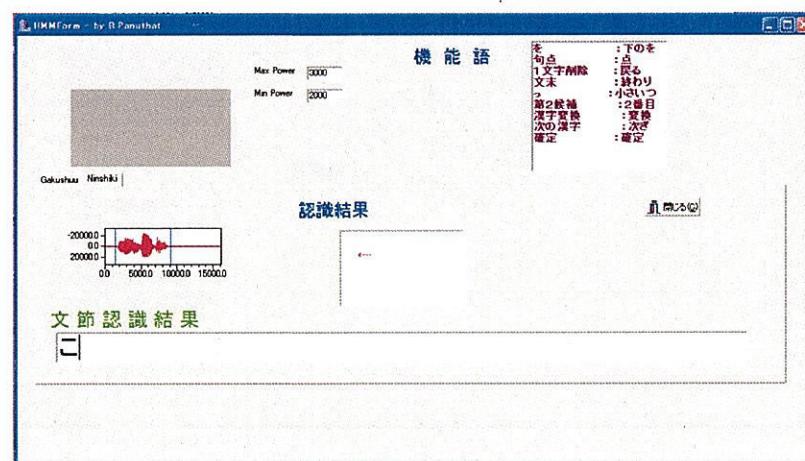


操作例として「ここはかなざわです」という単音節系列を発声し、「ここは金沢です」という文章を提示する過程を示す。

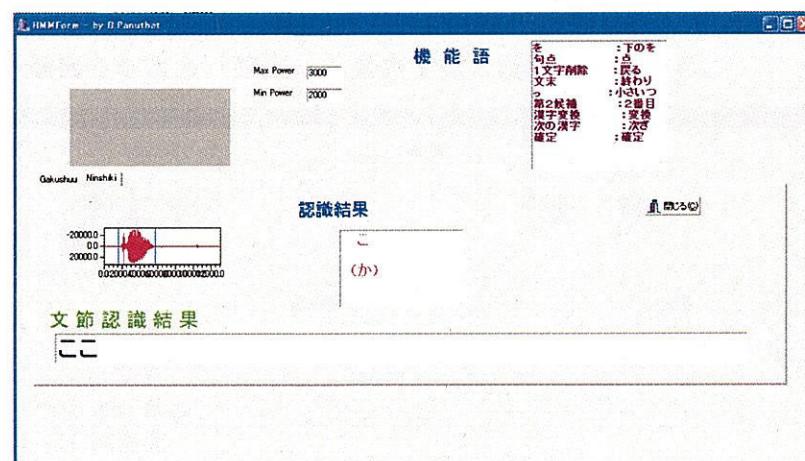
①最初の単音節「こ」と2番目の単音節の「こ」を発声したが、2番目を「お」と誤認識して表示している。



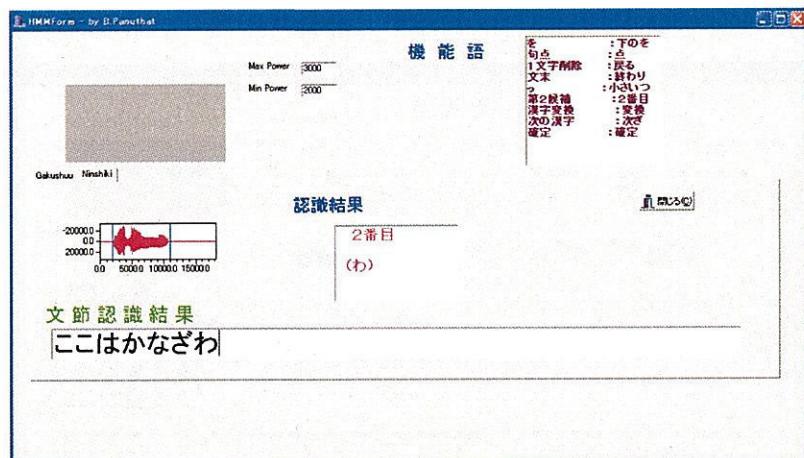
②「戻る」と発声し、「お」を消去する。



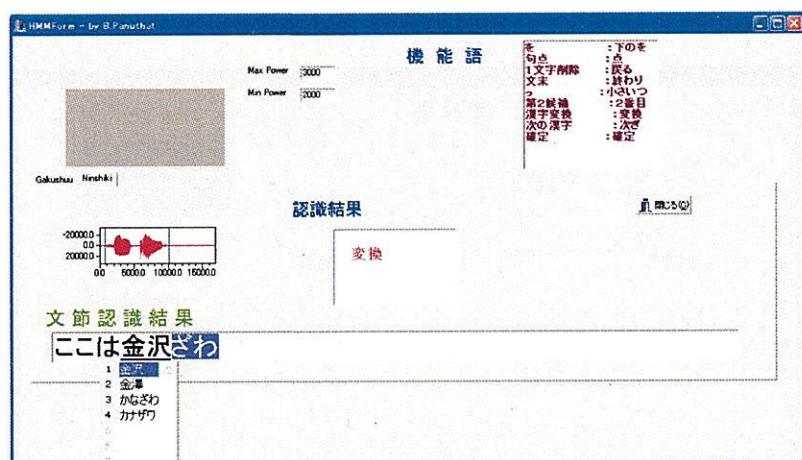
③2音節目「こ」を入れなおす。



④ 3から7音節目の「かなざわ」までを認識・表示

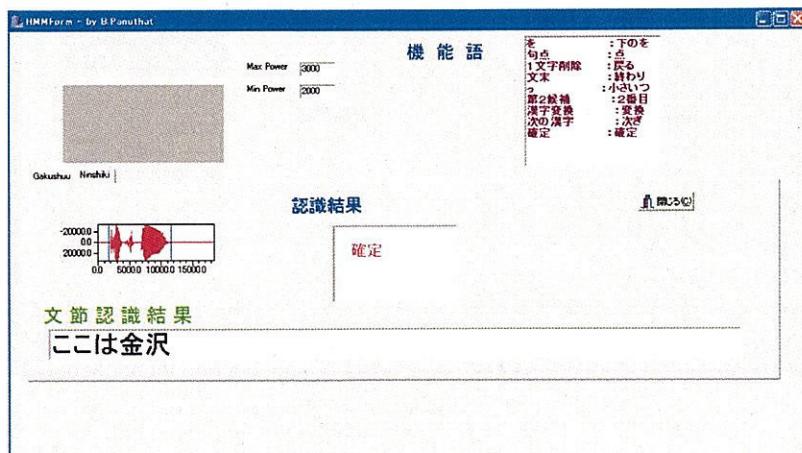


⑤ 「変換」と発声し「かなざわ」を漢字変換する。

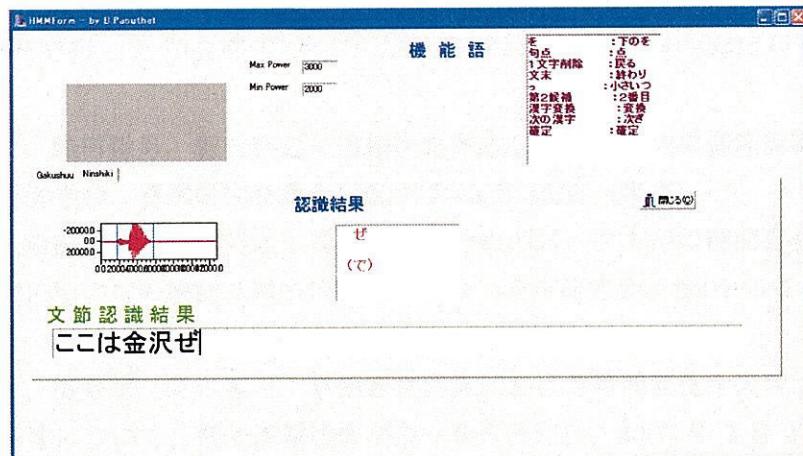


変換したい漢字候補がリストの下の方に位置している場合は「次ぎ」と発声すればハイライト表示が下の候補に移動する。

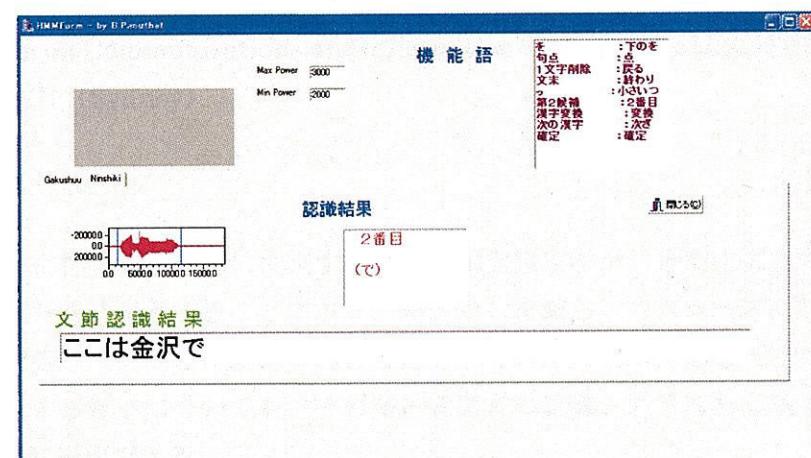
⑥ 希望の候補漢字が選択されたら「確定」と発声すると漢字が確定する。



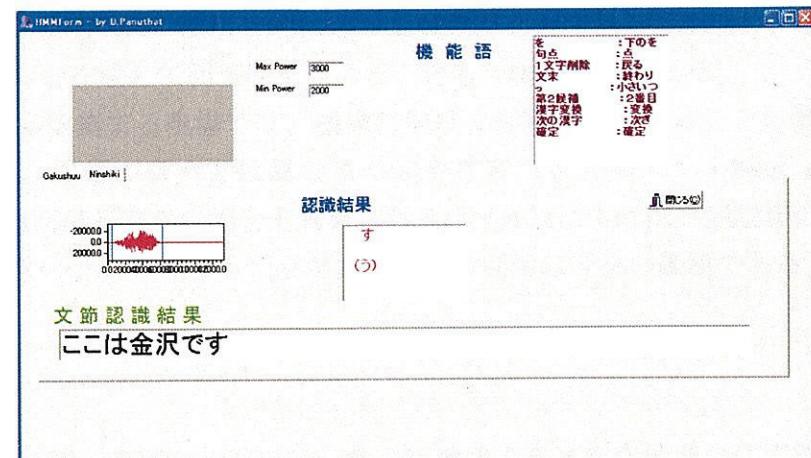
⑦続いて8番目の単音節「で」を発声したが、「ぜ」と誤認識して表示。認識結果の第2候補が（ ）内で正しく「で」と表示されている。



⑧ここで「第2候補」と発声すると、「で」が表示される。



⑨最後の単音節「す」を発声すると、「ここは金沢です」の文が提示される。



1 2. 研究成果

これらの研究成果をまとめ国内の研究会および国際ワークショップでの発表を行った。期間内で行った学会発表は以下のようである。（発表内容は付録参照）

- (i) 黒田弥文、船田哲男、野村英之：信頼性を考慮した孤立発声単音節認識システム、日本音響学会 春季研究発表会、2007年3月13日（東京）
- (ii) 梅野恵、船田哲男、野村英之：音声認識のためのスペクトルの時間変化を表す特微量抽出についての検討、電子情報通信学会 音声研究会、2007年5月31日（京都）
- (iii) 船田哲男、梅野恵、野村英之：単語音声認識における時間変化を表現する特微量の耐雑音性について、電子情報通信学会 音声研究会、2007年7月27日（富山）
- (iv) Megumi Umeno, Tetsuo Funada, Hideyuki Nomura : Noisy Word Recognition Using a Feature Based on Ternarized Spectral Slope , International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT07), 2007年10月17日 (Sydney)

1 3. あとがき

本研究は、加齢に伴う難聴などに由来する軽度の聴覚障害者が、音声による対話をを行う際に、文字情報を同時表示することにより、聞き返しを減らしてスムーズに対話を進めることを支援するシステムの作成を目的としたが、このシステムは難聴だけでなく、構音障害者が発声する音声についても、その発声者固有の認識システムを構築することにより、対話支援に適用できる。

認識の精度と速度を上げることが、本システムの利便性を高めるが、両者はトレードオフの関係があるので、使用目的に応じた調整が必要であるとともに、より効率の高いプログラムを作成して利便性を高めることも今後の課題である。

さらに、人が多数集まる現場では、機械に向けて音声を発声することに抵抗を感じることもあり、通常の音声とは異なるつぶやき音（NAM・・・Non Audible Murmur）による認識が有効な場合も考えられる。NAMによれば周囲騒音の影響もほとんど影響がないという点でも利点があり、その利用は今後の課題である。

【謝 辞】

本研究の遂行に関し支援いただいた、独立行政法人日本学術振興会に深謝いたし

ます。

【参考文献】

- [1] H.Nomura, T.Funada : Numerical Glottal Sound Source Model as Coupled Problem between Vocal Cord Vibration and Glottal Flow, Proc. Interspeech/Lisboa, pp.2153-2156(2005).
- [2] H.Nomura, T.Funada : A Numerical Analysis of Glottal Sound Source based on Distributed Parameter Model of Vocal Fold, Proc. Forum Acusticum/Budapest, pp.2699-2704(2005).
- [3] Y.Morita, T.Funada, H.Nomura : Dependency of Distortion on Output Binary Pattern of the Hidden Layer for a Noisy LSP Quantization Neural Network, IEICE Trans. Inf. & Syst. Vol.E87-D, No.10, pp.2348-2355(2004).
- [4] P.Boonpramuk, T.Funada, H.Nomura : Speech Enhancement by ARUI mode 1 and a New Type of Adaptive Filter with Sequential Processing, Acoust. Sci. & Tech., Vol.25, No.4, pp.267-275(2004).
- [5] 漢野教泰, 船田哲男 : 雑音下音声認識のための重み付分散拡大に基づく単語HMMの耐雑音性の改善, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-DII, No.5, pp.1052-1061(2004).
- [6] T.Funada, T.Ookubo, H.Nomura : An Application of a Feature from Ternarized Spectral Derivatives to Word speech Recognition, Proc. ICA2004, Tu.P2.13, pp.II-1709-1712(2004).
- [7] H.Nomura, T.Funada:A Numerical Experiment of Unsteady Glottal Flow Based on Two-dimensional Rigid Model, Proc. ICA2004, Tu4.H.4, pp.II-1337-1340(2004).
- [8] 大久保智昭、船田哲男 : スペクトル傾斜に基づく特徴量の音素モデルによる単語音声認識への応用、信学会音声研究会, SP2003-61, pp.13-18 (2003).
- [9] S.Kanno, T.Funada: Improved Robustness of Noisy Speech HMMs Based on Weighted Variance Expansion, Proc. Int Conf Signal Processing/ Beijin, pp.556-559(2002).
- [10] 漢野教泰、船田哲男 : 有声音検出に基づくロンバード音声認識と工場における検反システムへの適用、電子情報通信学会論文誌, Vol.J85-D-II, No.5, pp.851-862(2002).
- [11] 宮林穎夫、船田哲男 : ピッチ乱れ、波形変動及び雑音付加に対するBPFP ピッチ抽出法の性能評価、電子情報通信学会論文誌, Vol.J85-A, No.3, pp.271-281(2002).
- [12] 金寺登、荒井孝行、船田哲男 : 変調スペクトルの重要な成分のみを選択的に用いた雑音に強い音声認識、電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-II, No.7, pp.1261-1269(2001).
- [13] 春日正男、船田哲男、林伸二、武田一哉 : 音声情報処理, pp.5-61, 230-235、コロナ社(2001).

- [14] 船田哲男、岸尾一史:HMM 出力確率の共分散行列に対する制約条件の実験的考察、電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-II, No.2, pp.429-431 (2001).
- [15] H.Nomura,T.Kamakura,K.Matsuda:Theoretical and Experimental Examination of Near-field Acoustic Levitation,J. Acoust. Soc. Am.,Vol.111,pp.1578-1583(2002).