

TANDEM-STRAIGHT および時変モーフィングのための 研究用インタフェースの開発について

河原 英紀[†] 森勢 将雅^{††} 高橋 徹^{†††} 坂野 秀樹^{††††} 西村 竜一[†]
入野 俊夫[†]

[†] 和歌山大学システム工学部 〒640-8510 和歌山市栄谷 930

^{††} 関西学院大学理工学部 〒669-1337 三田市学園 2-1

^{†††} 京都大学大学院情報学研究科 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

^{††††} 名城大学理工学部 〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501

E-mail: [†]{kawahara,nisimura,irino}@sys.wakayama-u.ac.jp, ^{††}morise@kwansei.ac.jp,

^{†††}tall@kuis.kyoto-u.ac.jp, ^{††††}banno@ccmfs.meijo-u.ac.jp

あらまし TANDEM-STRAIGHT は、STRAIGHT の全アルゴリズムを基礎から置き換え、プログラムを見通しと実行効率の良いものとした。また、時変モーフィング、母音情報に基づく音声変換など、音声加工の新しい枠組みも生み出された。本資料では、様々な分野の研究者がこれらの方法を容易に利用できるように開発している幾つかのインタフェースとそれらの利用法について紹介する。これらのインタフェースの開発は、応用研究を促進するだけでなく、様々な利用形態からのフィードバックと試行錯誤のサイクルの短縮により、アルゴリズム開発そのものを促進することを狙っている。

キーワード STRAIGHT, 音声分析, 音声合成, 音声モーフィング, GUI

Interface design for TANDEM-STRAIGHT and temporally variable speech morphing study

Hideki KAWAHARA[†], Masanori MORISE^{††}, Toru TAKAHASHI^{†††}, Hideki BANNO^{††††}, Ryuichi
NISIMURA[†], and Toshio IRINO[†]

[†] Faculty of Systems Engineering, Wakayama University 930 Sakaedani Wakayama, 640-8510 Japan

^{††} Department of Informatics, Kwansei Gakuin University 2-1 Gakuen, Sanda, 669-1337 Japan

^{†††} Graduate School of Informatics, Kyoto University Yoshida Sakyou-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

^{††††} Department of Information Engineering, Meijo University Tenpaku-ku, Nagoya, 468-8502 Japan

E-mail: [†]{kawahara,nisimura,irino}@sys.wakayama-u.ac.jp, ^{††}morise@kwansei.ac.jp,

^{†††}tall@kuis.kyoto-u.ac.jp, ^{††††}banno@ccmfs.meijo-u.ac.jp

Abstract This article introduces background and design principles of a set of graphical user interfaces to promote research on various aspects of speech processing frameworks, which were made possible by our new algorithms based on TANDEM-STRAIGHT. It is also intended to make new algorithms accessible to researchers with wider range of backgrounds and to acquire their feedback and to accelerate algorithm development itself. Speech morphing that is capable of handling temporally variable multi-aspect morphing rates, and vowel-based speech conversion are representative examples of such new processing frameworks. These algorithms are taking advantages of theoretical transparency and computational efficiency of TANDEM-STRAIGHT, which completely replaced internal algorithms of legacy-STRAIGHT.

Key words STRAIGHT, speech analysis, speech synthesis, speech morphing, GUI

1. はじめに

インタラクティブな環境は、対象の理解を大きく促進する。著者の一人は、22 年前にもパソコン用に音声知覚研究の支援を目的としたインタラクティブな環境を提供するツールを開発した [1]。当時の計算機とプログラム開発環境の能力不足のため、ツールの機能は、波形の編集や短時間 Fourier 変換、LPC、Cepstrum による分析、スペクトログラム上の矩形領域を削除した音声の作成等に限られていた。このような制限にも関わらず、直感的なインタラクティブな操作と結果の即時のフィードバックは、少なくとも作者の音声現象の理解の大きな助けとなった。

STRAIGHT [2] とモーフィング [3] の発明は、音声の加工の範囲を大きく拡大した。初期の実装と併せて用意した GUI は、その機能の一部だけを限られた形で利用可能にするものであったにもかかわらず、STRAIGHT の理解に大きく役立った。ただし、開発者側としては、その実行速度の遅さと、アルゴリズムの頻繁な更新、前回の開発での負担の大きさ（ほぼ 2 年間、約 25,000 行の Turbo Pascal のコードの保守）から、本格的な GUI の開発には消極的な立場を取り、スクリプト作成とプログラム開発による利用を勧めてきた。

2007 年の TANDEM-STRAIGHT の発明 [4] による実行速度の問題の解消、2008 年の時変モーフィングの発明 [5] による操作の複雑化は、この、スクリプト作成とプログラム開発を中心とする利用形態と GUI の得失のバランスを大きく変えることとなった。実際、スクリプトやプログラムの柔軟性は、それらの肥大化と複雑化により、逆に様々な試行錯誤を試みることの障害になるという本末転倒の事態を招くに至っていた。本資料では、これらの問題を解消し、TANDEM-STRAIGHT と時変モーフィングの様々な機能のインタラクティブな操作とフィードバックを提供するために開発しているインタフェースについて紹介する。

2. TANDEM-STRAIGHT と時変モーフィング

TANDEM-STRAIGHT と時変モーフィング技術の詳細は、それぞれの資料に譲り、ここでは、インタフェースの説明に必要な範囲の概要を紹介する。

2.1 TANDEM-STRAIGHT

STRAIGHT は、音源の周期性の影響を取り除いたスペクトログラムを求めるために開発された。TANDEM は、分析窓と波形の相対位相に依存しない周期信号のパワースペクトルを非常に簡単な計算で求めることを可能にした [6]。TANDEM-STRAIGHT は、従来の STRAIGHT の基礎アルゴリズムを TANDEM を応用して根本的に置き換え、さらに標準化定理の新しい解釈 [7] に基づくスペクトル包絡の平滑化法を導入することにより実現された。TANDEM-STRAIGHT により求められるパラメタは、基本周波数、平滑化されたスペクトログラム (STRAIGHT スペクトログラム)、非周期性指標の三種類である。これらのパラメタは、時間-周波数の関数である。これらをまとめたものを STRAIGHT パラメタと呼ぶことにする。

2.2 時変モーフィング

音声モーフィングでは、二つの事例からそれら両者の特徴を有する音声を生成する。これまでの方法では、それぞれの音声の STRAIGHT パラメタを記述するための時間-周波数座標を、

知覚的に重要な特徴のある点 (参照点) が重なるように変形し、それぞれのパラメタを補間/補外することで、モーフィング音声のパラメタが求められる。また、モーフィング率に応じて、モーフィング音声の時間-周波数座標も、それぞれの事例の時間-周波数座標を補間/補外することで求められる。モーフィング率は、操作可能な三種類の STRAIGHT パラメタと、時間軸、周波数軸の操作量からなる 5 次元のベクトルとして表される。

時変モーフィングは、この 5 次元のベクトルのそれぞれの要素を時間の関数 (時系列) に拡張したものである。さらに、モーフィングを、パラメタの導関数の対数についての補間/補外として定式化し直すことにより、これまでの方法での補外の場合に生じていた変換の単調性が失われることに起因する問題を解消している。

3. 開発方針

これまでの「スクリプト作成とプログラム開発を中心とする利用形態」では、以下のような問題が生じていた。

- 作成した合成音声がどのような素材と加工法によるものかを対応づけることがユーザにまかされていた。往々にして、ユーザは一貫性が無く、対応についての記録と記録対象の対応についての情報も、記録されない場合や内容に矛盾が生ずる場合が多発する。
 - 作成したスクリプトやプログラムを誤って変更してしまったり、変更内容を忘れることが多発する。
 - 思いついたアイデアを確認するためのスクリプト/プログラム作成にかなりの時間を要するため、アイデアが膨らまず、悪い場合には忘れられてしまう。
 - アイデアを確認するためのスクリプト/プログラムにどのようなアルゴリズムを用いれば良いか、思いつくことができず、思いついても具体的に実装することができない。
- 本来の目的が音声知覚や応用の研究である場合には、これらは、本来の目的とは無関係な障害でしかない。今回の GUI の開発は、これらの障害を取り除くことを念頭に置いて進められた。

4. 開発したインタフェースの動作例

以下では、具体的な操作例を示しながら、開発したインタフェースの動作、構造について紹介する。インタフェースは Matlab 上に実装されており、Mac OSX, LINUX, Windows いずれの環境でも動作する。^(注1) なお、実際の動作の様子を記録したムービーを用意している。^(注2) 以下の説明と併せて参考にしたい。

4.1 TANDEM-STRAIGHT 操作用メニュー

TANDEM-STRAIGHT による加工、時変モーフィングによる加工は、音声を TANDEM-STRAIGHT により分析した結果に基づいて行われる。結果は、Matlab の構造体 (以下 STRAIGHT object) として表現されている。最初に行うことは、STRAIGHT object の作成である。具体的には、コマンド (TandemSTRAIGHTHandler) により、メニューを起動する。この操作によりファイル選択のダイアログが出現する。

分析対象とするファイルを指定し選択すると、図 1 の左側に示すメニューが出現する。この時点で可能な操作 (基本周波数の抽出、音声の再生、既存の STRAIGHT object の読込) に

(注1): ただし、OSX 上で開発を進めているため、それ以外の環境では、GUI の見栄えが悪い。

(注2): <http://www.wakayama-u.ac.jp/~7ekawahara/STRAIGHTadv/>

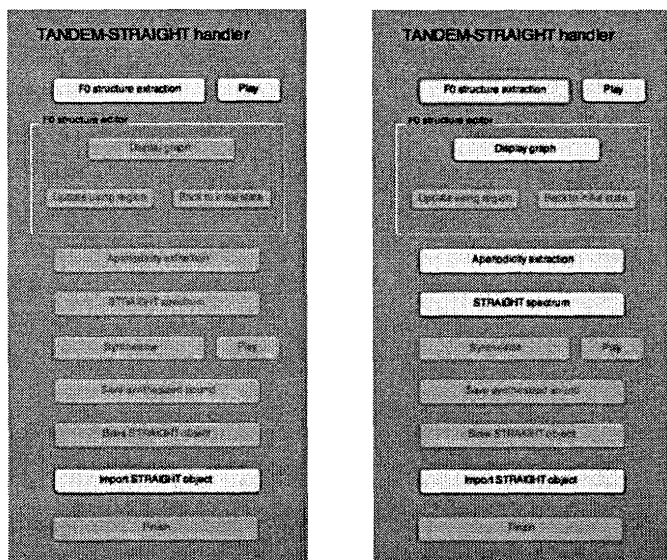


図 1 Left: Initial state of the STRAIGHT handling menu. Right: State after F0 extraction. Note that only buttons that invoke relevant functions are highlighted.

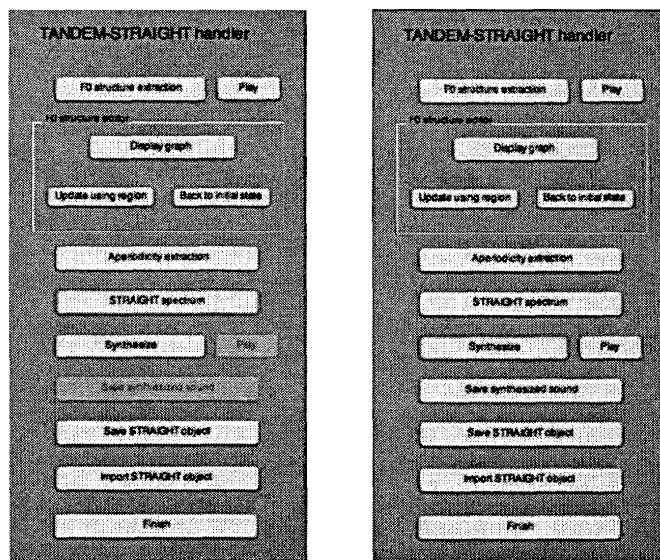


図 3 Left: After STRAIGHT spectrogram analysis and aperiodicity analysis. Right: After synthesis.

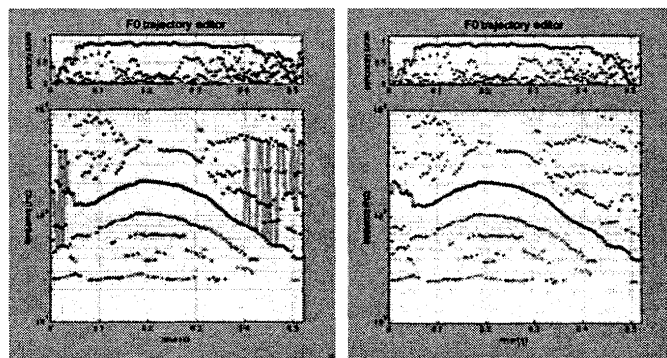


図 2 Left: Initial state of F0 extraction results. Right: After interactive correction of F0 estimates. Selected F0 estimates are connected by a cyan line. F0 candidates at each frame are ordered based on periodicity value shown in the upper plot. They are color-coded using Matlab's default setting.

対応するボタンのみが、強調表示されている。ここで基本周波数の抽出を行うと、表示は図 1 の右側のように変わる。新たに可能になった操作（基本周波数の抽出結果の表示、非周期性指標の分析、STRAIGHT スペクトログラムの分析）が、強調表示されたボタンに加わる。

図 2 の左側に、表示例を示す。この例では、男声話者が早口で話した連続母音「あいうえお」が、分析対象である。図の上には、複数の基本周波数の候補のそれぞれの確からしさが表示されている。各時刻での候補は、この「確からしさ」に基づいてソートされており、Matlab の既定値に基づいて、表示色が割り当てられている。図の下では、基本周波数の候補を片対数グラフ上に表示している。色の割り当ては、図の上と同じである。図では、第一位の候補を結んで水色の太線が表示されている。基本周波数の初期推定値には、この水色で表示されたものが用いられる。ここで、候補選択を行う範囲をラバーバンドボックスを用いて対話的に指定することにより、基本周波数の推定値を右のように修正することができる。具体的には、ラバーバンドボックスを用いて必要な領域をズームした後に、強調表示されている「領域選択のボタン」を押す。

```
creationDate: '20090212T160308'
dataDirectory: [1x58 char]
dataFileName: 'aiueoF2.wav'
samplingFrequency: 44100
waveform: [23040x1 double]
currentHandles: [1x1 struct]
F0extractionDate: '20090212T160347'
F0Structure: [1x1 struct]
refinedF0Structure: [1x1 struct]
```

図 4 Contents of a STRAIGHT object for this example.

ここで残っている処理（非周期性指標の分析、STRAIGHT スペクトログラムの分析）を行う。これらの処理には依存関係が無いので、どちらを先に行っても良い。これらの処理が済むと、メニューは図 2 の左側に示すように変わる。この時点で新たに可能になった操作（STRAIGHT object の格納、音声の合成）を行う。図 2 の右側に、音声合成後の状態を示す。ここで、最後まで残っていた操作（合成音声の再生、合成音声の記録）のボタンが強調表示される。

作成された STRAIGHT object の内容の抜粋を図 4 に示す。フィールド名そのものが内容を表すコメントとなるように決められている。こうして作成された STRAIGHT object は、「STRAIGHT object の格納」ボタンにより、自動生成されたファイル名が付与されて格納される。なお、格納時にはダイアログが表示されるため、自動生成されたファイル名を変更／補足することも可能である。合成された音声を格納する際も、ファイル名が自動生成される。なお、合成音声の格納時には、合成時に用いたパラメタの概要等、STRAIGHT object の内容を要約したものが、同じ名前の Matlab ファイル（拡張子が .mat となる）として作成され格納される。

STRAIGHT object は、Matlab の変数であり、ユーザは、その内容を自由に書き換えることができる。このようにして書き換えたものをファイルとして書き出しておけば、このメニューの合成機能を用いて、メタデータが付属した形で、変更した内容に対応する合成音声ファイルを作成することができる。なお、

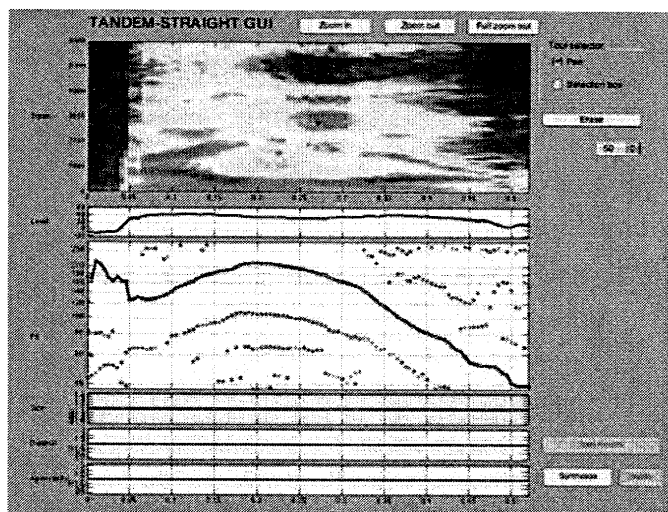


図 5 Initial state of STRAIGHT parameter manipulator. The panels are; (from top to bottom) STRAIGHT spectrogram, power time series, F0 candidates, scale (frequency axis) manipulation time series, speaking rate (time axis) manipulation time series, and aperiodicity manipulation time series.

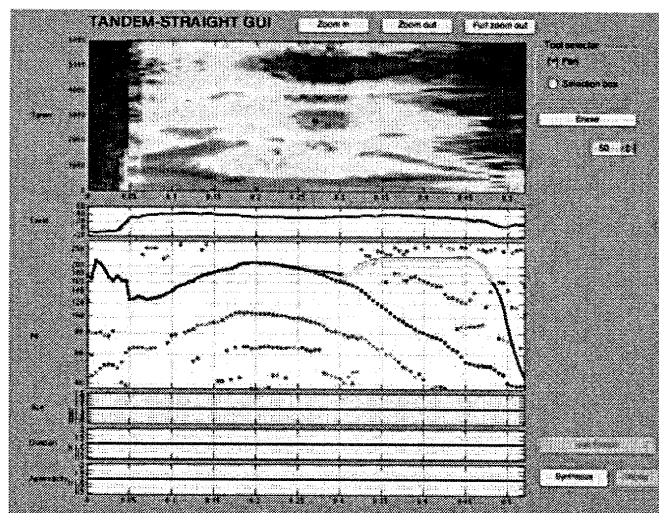


図 6 Free-hand editing of F0 trajectory. Green line represents user-drawn trajectory. This partial time series can be dragged with shape unchanged. Transitional time series between this partial time series and rest of the time series were generated using $1/4$ of cos function.

基本周波数情報については、`refinedF0Structure` に格納されているものが合成時に用いられる。

しかし、前述のように、プログラムやスクリプトを用いて STRAIGHT object の内容を操作することは、柔軟である反面、かなり面倒なアルゴリズムの開発や、定型的処理の記述などの退屈な作業を必要とする。これらは、様々なアイデアを試行錯誤する際の心理的障壁となる。また、Matlab の習熟は、かなりの見返りはあるものの、音声信号処理の専門家以外にとっては、余分な負荷を課す要求である可能性が高い。次に紹介する STRAIGHT パラメタ操作作用の GUI は、この問題を解消するためのものである。

4.2 STRAIGHT パラメタ操作作用 GUI

STRAIGHTmanipulatorGUI は、STRAIGHT パラメタ操作作用 GUI を起動するコマンドである。先ほどのメニューの場合と同様に、ファイル読み込みのためのダイアログが出現する。今回は、先ほど作成した STRAIGHT object を指定して読込むこととする。

STRAIGHT object が読込まれると、図 5 に示すような GUI が表れる。表示内容は、上から順に、STRAIGHT スペクトログラム、パワー、基本周波数候補、寸法（周波数軸）操作作用パラメタ時系列、発話速度（時間軸）操作作用パラメタ時系列、非周期性操作作用パラメタ時系列である。なお、非周期性の操作に関しては、操作の意味の概念化が十分ではないため、操作を行うためのモジュールを用意していない。

操作作用のパラメタが多数にわたるため、図 5 では、STRAIGHT スペクトログラムと基本周波数のみが操作可能な大きさで表示されている。STRAIGHT スペクトログラムの表示領域のサイズは不変であるが、それ以外の操作作用のプロットは、領域内をクリックすることで、この例での基本周波数の表示と同じ大きさに拡大される。その場合、同時に、基本周波数の表示は、それまでの他の表示と同様に縮小される。

この GUI 上では、操作作用の軌跡をフリーハンドで描く操作と、既存の軌跡の全体あるいは選択された一部を平行移動させる操作が提供されている。選択された一部を平行移動させる場合には、その他の領域の操作パラメタの時系列と滑らかに繋

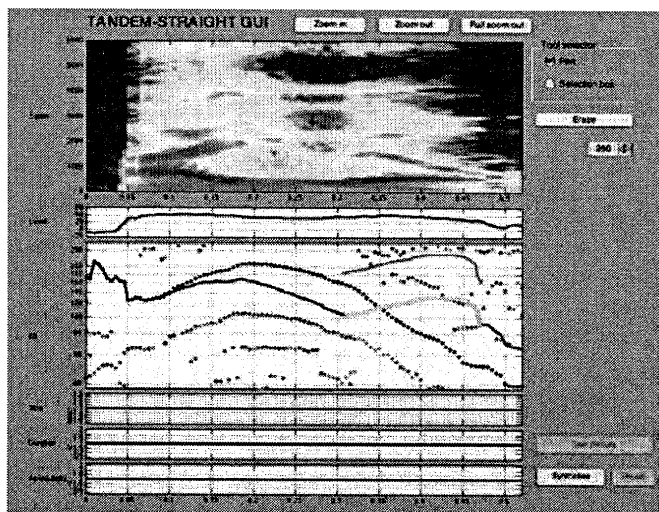


図 7 Dragged free-hand edited F0 trajectory. Transitional area is 250 ms in this case.

がるように、遷移領域の幅を指定して \cos の $1/4$ 周期分の系列を加えるようにしている。なお、選択領域の幅の既定値には 50 ms が設定されている。

まず、図 6 に、フリーハンドで基本周波数の軌跡を与えた例を示す。緑色で表示されている部分が、フリーハンドで与えた部分である。この緑色の部分は、選択された領域としても扱われるため、マウス等で形を保ったままドラッグすることができる。図 6 に、そのような操作の例を示す。図中の紫色の軌跡が最初に書いたもの、緑色は、それを選択してドラッグにより移動させたものである。なお、この場合の遷移領域の長さは 250 ms を選んでいる。

なお、ユーザにフリーハンドによる描画を許していたため、描かれた軌跡が時間に関して一価である保証は無い。ここでは、軌跡の時間座標をソートすることにより、一価性が保証された時系列に変更している。図 8 に、そのような例を示す。図中の紫色の線がフリーハンドで描かれた多価性を有する軌跡を示し、緑色の線が、ソートすることにより一価性が保証された時

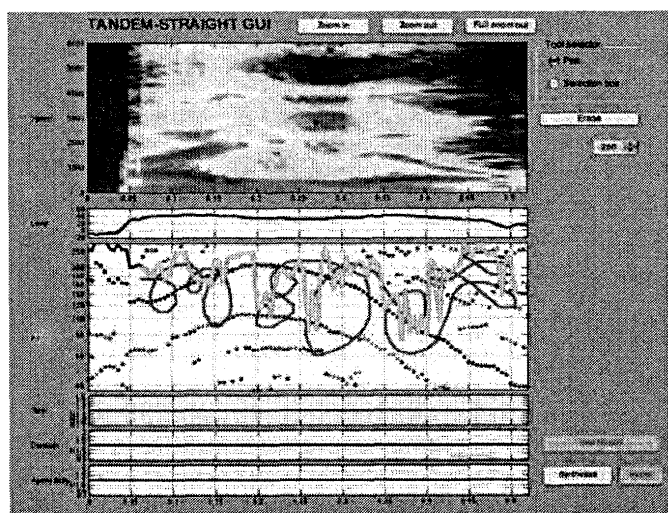


図 8 Original free-hand trajectory (purple line) and converted trajectory (green line) that is unique-valued in terms of time.

```
originalSTRAIGHTObject: 'aiueoF2.wav'
originalPath: [1x58 char]
objectFile: ...
'StrObj20090212T163200.mat'
objectDirectory: [1x58 char]
temporalPositions: [1x105 double]
modifiedTemporalPositions: [1x105 double]
durationModifier: [1x105 double]
modifiedF0: [1x105 double]
sizeModifier: [1x105 double]
powerModifier: [1x105 double]
SynthesisStructure: [1x1 struct]
```

図 9 Metadata generated by manipulations using STRAIGHT parameter GUI.

系列を示す。なお、同様の操作は、他のパラメタについても同様に可能である。

操作の結果は、合成用のボタンを押すことにより、合成音声としてすぐに確認することができる。この GUI を用いたインタラクティブな操作と試聴の繰り返しにより、これまで気付かなかった様々な現象が見つかった。それらについては、別の機会に報告したい。

この GUI による合成音声の格納に際しても、同様に自動生成されたファイル名を用いて合成音声とメタデータが記録される。図 9 に記録されるメタデータの例を示す。元の STRAIGHT object はファイル名を示すのみとし、データの複製を避けている。それぞれのパラメタの操作量は、対応するフィールドに記録されており、刺激連続体をプログラムにより作成する場合に利用することができる。

4.3 時変モーフィング操作メニュー

図 10 に時変モーフィング操作メニューを示す。このメニューは MorphingMenu により表示される。可能な操作は、波形の読み込みとモーフィング用の情報（以下、morphing substrate）の読み込みである。波形を読み込むと分析が可能となる。そこで分析用のボタンを押すと、TANDEM-STRAIGHT 用の

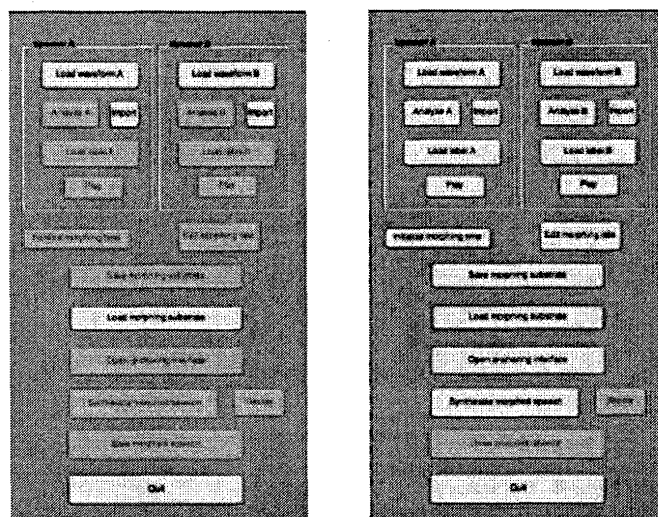


図 10 Left: Initial state of morphing menu. Right: After importing a morphing substrate.

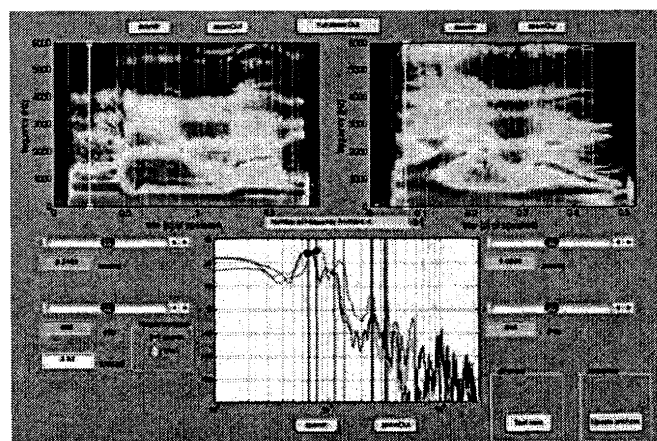


図 11 GUI for anchoring point assignment.

メニューが表示される。このメニューには、モーフィング用のメニューから音声ファイルの情報が渡されているため、改めて音声ファイルを指定する必要は無い。前の節と同様な方法で分析した後、TANDEM-STRAIGHT 用のメニューの最下部にある finish ボタンを押すことで、分析結果がモーフィング用のメニューに渡される。同様な操作を、モーフィングの対象となる話者 A、話者 B について行うことによりモーフィングの準備が整う。なお、モーフィングのための時間方向の参照点を、別の手段で用意したテキストファイルから読み込むこともできる。ここでは、それらの処理を全て済ませて作成した morphing substrate を読み込むこととする。

図 10 の右側に、読み込み直後のモーフィングメニューの状態を示す。この状態では、合成された音声の格納と再生以外の全ての操作ボタンが強調表示され、実行可能になっている。

4.4 参照点設定用 GUI

この状態で、参照点設定用のボタンを押すことにより、図 9 に示す GUI が表示される。この GUI については、時変モーフィングについての資料 [8] で概要を説明しているため、詳細を省く。それぞれの表示の拡大と補助情報を組み合わせて参照点を設定した後、右下のボタンを押すことにより、それらの情報がモーフィングメニューに渡される。

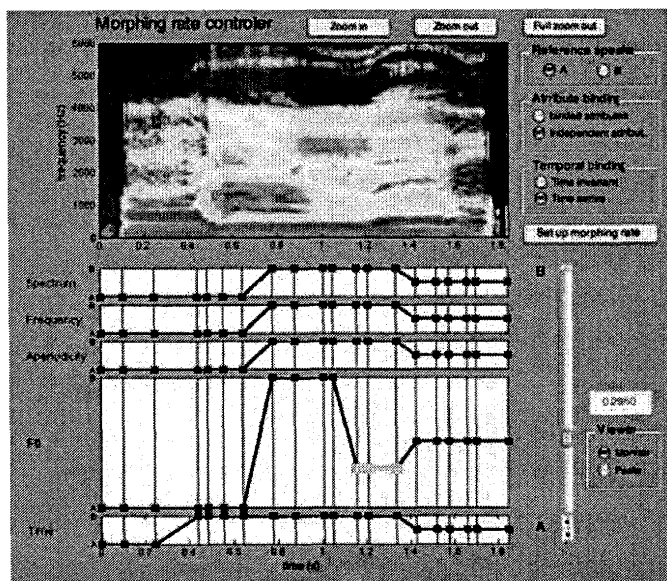


図 12 GUI for multi-aspect time variable morphing rate manipulation. Controllable parameters are; (from top to bottom) spectrum level morphing rate, frequency axis morphing rate, aperiodicity morphing rate, F0 trajectory morphing rate, and time axis morphing rate.

4.5 時変モーフィングパラメタ操作 GUI

以上で、時系列としてのモーフィング率を設定する準備が整った。ここで、モーフィング率編集用のボタンを押すことにより、図 9 に示す GUI が表示される。STRAIGHT パラメタの操作 GUI と同様に、最上部には STRAIGHT スペクトログラムが表示される。表示されるのは、話者 A あるいは話者 B のいずれかであり、右側のラジオボタンで切り替えることができる。モーフィング率の操作点は、参照点の置かれた時刻毎に用意され、下の設定用パネルの縦棒により表されている。

下の設定用パネルは、上から順にスペクトルのレベル、周波数軸、非周期性指標、基本周波数、時間軸のモーフィング率用となっている。現在設定されているモーフィング率の時系列は、横方向の折れ線として示されている。これらも、STRAIGHT パラメタの操作 GUI と同様に、必要なパネルをクリックすることにより、操作が可能な大きさに拡大される。設定のためのポイントの選択は、ラバーバンドボックスで必要な折れ線部分を囲うことにより行われる。

時系列モーフィングの定式化により、時系列と属性の独立な設定が可能となることで大きく増加した操作点の数は、それらの設定作業を非常に困難なものとした。ここでは、必要に応じて、それぞれのモーフィング率に時間方向で一定の値を与える（時不変モーフィング）と、全ての属性を同時に操作する属性バインディングという手段を与えることで、作業の効率化を狙った。これらは、同様に右側のラジオボタンにより設定される。なお、初期状態では、時不変かつ属性バインディングが設定されている。

作業終了後に、この GUI の右側にあるモーフィング率設定ボタンを押すことにより、モーフィング結果がモーフィングメニューに渡される。ここで、モーフィングメニューの合成ボタンを押すことにより、モーフィング音声合成される。こうして設定されたモーフィング率の情報は、モーフィングメニューの格納ボタンにより、構造体として、自動生成された名前を有するファイルに書き出される。この構造体のフィールド数が多

すぎるため、本資料での記載を省く。

5. ま と め

window や menu, slider など window システムと GUI パーツを全て最初から作る必要があった 22 年前と比較すると、Matlab の開発環境を用いた開発は、非常に容易であった。今回の開発に要した時間は、実質 2 週間程であり、2 年程を要した前回と比較すると、50 倍以上の効率である。Matlab よりも優れたインタフェース開発環境は、現在では多数存在している。今回の Matlab の利用は、開発に当たった筆頭著者が Matlab に習熟しており、アルゴリズムそのものも並行して開発していたという特殊な事情による。TANDEM-STRAIGHT の基本アルゴリズムは既に C により実装されている。他のより優れたインタフェース開発環境を使う上での障害は無い。ぜひ、それらを用いて様々なユニークなインタフェースと応用を開発して欲しい。本資料で紹介したインタフェースが、それらの開発の参考となれば幸いである。

このインタフェース自体は、TANDEM-STRAIGHT の一部として利用者に配布する予定である。また、TANDEM-STRAIGHT の開発者自身の研究に利用することで、さらに機能拡張と問題点の解消を図る予定である。

謝 辞

本研究は、科学研究費 基盤 (A)19200017 と科学技術振興機構による戦略的創造研究推進事業のデジタルメディア領域 CrestMuse プロジェクトの支援を受けて行われた。

文 献

- [1] 河原：「音声知覚過程研究支援環境のユーザインタフェース」，聴覚研究会資料，H-87-21 (1987)。
- [2] H. Kawahara, I. Masuda-Katsuse and A. de Cheveigné: "Restructuring speech representations using a pitch-adaptive time-frequency smoothing and an instantaneous-frequency-based F0 extraction", *Speech Communication*, **27**, 3-4, pp. 187-207 (1999)。
- [3] H. Kawahara and H. Matsui: "Auditory morphing based on an elastic perceptual distance metric in an interference-free time-frequency representation", *Proc. 2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2003)*, Vol. I, Hong Kong, pp. 256-259 (2003)。
- [4] H. Kawahara, M. Morise, T. Takahashi, R. Nisimura, T. Irino and H. Banno: "TANDEM-STRAIGHT: A temporally stable power spectral representation for periodic signals and applications to interference-free spectrum, f0, and aperiodicity estimation", *Proc. ICASSP 2008*, pp. 3933-3936 (2008)。
- [5] H. Kawahara, R. Nisimura, T. Irino, M. Morise, T. Takahashi and H. Banno: "Temporally variable multi-aspect auditory morphing enabling extrapolation without objective and perceptual breakdown", *Proc. ICASSP 2009* (2009). [accepted for publication].
- [6] 森勢, 高橋, 河原, 入野: 「窓関数による分析時刻の影響を受けにくい周期信号のパワースペクトル推定法」, *信学論, J90-D*, 12, pp. 3265-3267 (2007)。
- [7] M. Unser: "Sampling - 50 years after Shannon", *Proceedings of the IEEE*, **88**, 4, pp. 569-587 (2000)。
- [8] 河原, 森勢, 高橋, 西村, 坂野, 入野: 「実時間操作インタフェースへの応用を目的とした歌唱モーフィング操作パラメタの時系列への拡張について」, *研究報告 音楽情報科学 (MUS)*, **2008**, 127, pp. 91-96 (2008)。