

MR画像による声道形状の3次元表示

横山 徹[†] 三木 信弘[†] 白川 智昭[†] 小川 吉彦[†]

[†]北海道大学 工学部 電子工学科
060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目
TEL (011)706-6531

あらまし 近年、声道の物理的形状に即して音声生成過程を解析することの重要性が認識されてきている。本研究は実体的な音声生成モデルを構築するために、MRI(磁気共鳴映像法)を用いて声道の3次元形状を構成し、声道の物理的形状と音響特性との関連性を解析することを目的としている。本稿では、矢状断面MR画像フィルムをディジタルで計算機に取り込んだデータを用いて3次元声道形状を構成する方法を示し、得られた声道形状を3次元表示する。そしてこの3次元声道形状をもとに、声道断面積関数、声道周長関数を推定する。

和文キーワード

MR画像, 3次元声道形状, 声道断面積関数, 声道周長関数

Three Dimensional Expression of Vocal Tract Shapes Using Magnetic Resonance Images

Tohru YOKOYAMA[†], Nobuhiro MIKI[†], Tomoaki SHIRAKAWA[†], and Yoshihiko OGAWA[†]

[†]Faculty of Engineering, Hokkaido University
N-13 W-8, Kita-ku, Sapporo-shi, 060 Japan
TEL (011)706-6531

Abstract They have recognized importance of the physical figure in articulation in order to analyze speech production process. The purpose of this paper is to reconstruct the 3-D vocal tract shape using magnetic resonance imaging(MRI), and to analyze the acoustical feature associated with the vocal tract shape, which is required for constructing a substantial model of speech production. We propose an algorithm for reconstruction of the 3-D vocal tract shape using the digitized data of the sagittal MR images, and evaluate the displayed 3-D shape. Moreover, we estimate the cross-sectional area function and the circumference function of the vocal tract.

英文 key words MR image, 3-D vocal tract shape, Cross-sectional area function, and Circumference function.

1 まえがき

声道は、調音器官の動的変化によって形状が様々なに変化し、声帯振動音に個々の音韻固有の音響的特性を付加する働きを持つ。従来より、声道部の物理的音響モデルとして断面積の異なる均一音響管の縦続接続で近似したモデルが広く用いられて来た。しかし、このような近似モデルによって単純化される、あるいは考慮されない現象の中にも、調音上の重要な特徴量が含まれている可能性がある。中でも、声道の物理的形狀が音響的性質に与える影響は非常に重要である。例えば元木ら⁽¹⁾の、口腔部のレプリカの内部の音圧分布および位相分布の実測によれば、3[kHz]程度の周波数領域であっても非平面波的な音圧が観測される場合があり、声道形状の複雑さによるものと考えられる。また神山ら⁽²⁾は、声道壁の振動による損失を声道壁の粘弾性体モデルで表現することによって、壁厚や、声道形状が伝達特性に与える影響が大きいことを示した。声道形状に依存した調音特性を表現するためのアプローチとしては、工学的手法と生理学的手法とがある。前者は、例えば発声音の音響的特性からその断面積関数を推定するというような、統計的な手法を用いた音声分析を主体とする方法である。後者は、人間の音声生成過程を、その生理学的なレベルまで立ち返り、音声生成時の生理的計測データに基づいて解明し、模擬していこうという手法である。特に後者は昨今の計測技術の進歩に伴って、特にその必要性が認識され、盛んに研究が行われてきている。

磁気共鳴映像法 (Magnetic Resonance Imaging: MRI) は、無侵襲で安全性が高く、任意斜断面の撮像が容易である。近年、MRI は定常的な音声発声時の 3 次元声道形状の計測に応用されるようになった。^{(2)~(7)} 松村ら⁽⁶⁾は、水平断面と冠状断面、および正中断面を MRI で撮像し、歯冠部にプレートを着装することによって歯冠部の輪郭を補正し、鼻腔の 3 次元形状を抽出した。楊ら⁽⁷⁾は、水平断面と冠状断面、および矢状断面を MRI で撮像し、歯の形状は別に処理してから声道輪郭線を補正し、補正しない場合との声道伝達特性を比較し、また計測精度についても定量的考察を行った。

本研究では、より実体的形状に即した音声生成モデルを構築するために、声道の 3 次元形状が声道伝達特性にどのような関わりをもっているかを調べ、それを記述するのに有効な音響特徴量を抽出することを目的とする。そのためには、声道の 3 次元形状を計測し、それをもとに断面積関数等の形状パラ

メータを抽出し、その形状から声道伝達特性を求めようシステムを構築することが要求される。声道の 3 次元形状の複雑さのため、形状抽出の処理を完全に自動化するのは困難である。従って、状況に応じて適切に自動化する処理とマニュアルで行うべき処理とを分別する、ということが現実的かつ有効であると考えられる。

そこで本報告では MRI によって得られた矢状断面データから 3 次元声道形状を構成するアルゴリズムを示す。また、この構成された 3 次元形状データから、断面積関数、周長関数を推定する。また、本稿で示した方法の問題点、および今後の課題についても検討する。

2 MRI による声道形状の抽出⁽²⁾

以下に、神山ら⁽²⁾が行った MRI による声道形状の抽出法について説明する。

計測には、東芝メディカル超電導 MRI システム SMT-100(静止磁場強度 0.5T) を用いた。被験者は成人男性 1 名で、日本語 5 母音をそれぞれ発声した後、その声道形状を維持して測定された。画像はスライス厚が 5mm で、スライス間隔は、矢状断面が 5mm、水平断面および冠状断面が 10mm 間隔で、各断面 10 枚ずつ、1 母音につき計 30 枚を撮影した。

この 30 枚のデータを 3 次元空間に配置することで唯一の声道形状が得られるのが理想である。しかし実際の画像の撮影には時間的インターバルがある上、ある断面について 5 母音の撮影を終了した後に、次の断面についてまた 5 母音を撮影するという過程を経ている。このため、ある母音についての形状が断面によって変化してしまうことは避けられない。したがって声道形状の抽出には、基本的には矢状断面画像を用いるものとし、視察を必要とする段階においては他の画像データを利用することにする。

撮影した MR 画像は専用プリンタへフィルム感光形式で出力した。このフィルム画像では直接デジタルでの取り込みが出来ないので、視察により声道形状をバックライティングを行いながら、トレーシングペーパーに透写する。MR 画像は歯部が写らないので、必要に応じて、冠状断面、水平断面、および人体解剖図などを参照して歯部の補正を行った。トレースされた形状はデジタルイザによって計算機に取り込まれる。この段階でデータは実尺値に変換される。

矢状断面の画像は各母音それぞれ 10 枚であるが、

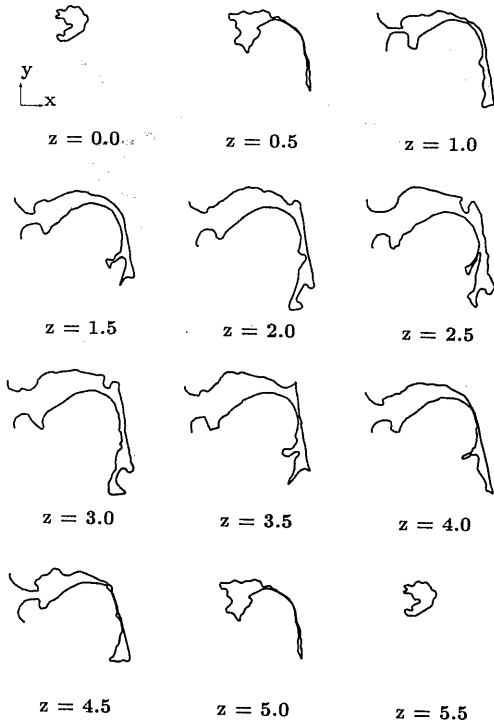


図1 母音/a/発声時の矢状断面データ

正確に正中軸対称に5枚ずつ測定されたとは必ずしも言えない。そこで10枚の矢状断面データをもとに正中面を推定し、この面に対して左右対称になるようにデータを補充配置する。結果としては6番目と7番目の矢状断面の間に正中面があるものとし、1番目と2番目の矢状断面データをそれぞれ12番目、11番目として補充配置した。

頭部の前後方向の後ろ向きを+x、上下方向の上向きを+y、左右方向の左向きを+zとした三次元空間を考えると、矢状面は、x-y平面に平行な平面である。各矢状断面は0.5cm間隔で抽出されているので、この1~12番目の矢状断面データに、1番目は $z=0.0$ 、2番目は $z=0.5$ というようにz座標を0.5間隔ずつ付加することにより、各矢状断面データを三次元空間上に配置した。このようにして得られた/a/発声時の声道の矢状断面データを図1に示す。

3 3次元声道形状の構成

本章では、前章で得られた矢状断面声道輪郭データを用いて声道の3次元形状を構成する方法を示す。

3.1 任意切断面形状の推定

多数の断面形状を3次元空間上に配置することによって3次元の声道形状を構成することができる。この断面は、数が多いほど、また断面の間隔が狭いほど、得られた形状の精度は高いと言える。この多数の断面形状が全てMRIによって計測されれば理想的である。しかし実際はスライス幅に限界があるので、可限小なスライス幅で撮像した断面形状から全体の形状を推定する方法が一般的である。

そこで本稿では、12枚の矢状断面形状から全体の声道形状の概形を得るために、矢状面(x-y平面)に垂直な任意の断面を推定し、これを多数配置する、という方法をとった。具体的には、ディスプレイ上で図2に示すような矢状面に垂直な64個の切断平面を対話的に作成し、この平面と各矢状断面との交点を計算する。しかしながら矢状断面形状の曲率の変化の大きい箇所(例えば喉頭部など)では、交点が多数抽出されてしまうことがしばしば生じる。よってここで視察によって交点の取捨と並べ換えを行った。そして各切断平面において、得られた交点を3次スプライン補間することによって閉曲線とむすび、これを断面形状とする。

このようにして得られた断面形状の部分例を図3に示す。ただし図3中の断面の番号は、図2において切断平面を声門側から1番目、2番目と数えたときの番号に対応しているものとする。

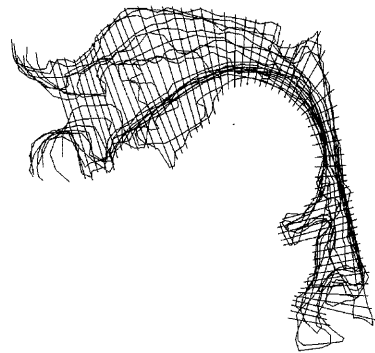


図2 切断平面(母音/a/の例)

3.2 隣接する断面形状間の対応づけのアルゴリズム

3次元空間上に配置された断面形状を見ることによって全体の声道形状の概観は推測できるが、これ

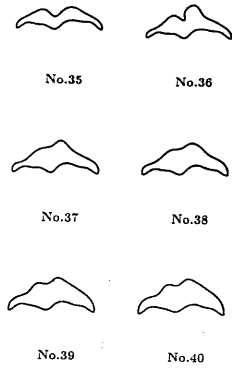


図3 断面形状の例 (母音/a/の例)

を形状データとして利用するためには、それぞれの断面形状の間の対応関係を決定し、全体の3次元声道形状を構成する必要がある。後に声道形状を3次元グラフィックスで表示することを試みるため、隣接する断面形状間の点は1対1の対応関係がとれていることが望ましい。しかし声道の形状は複雑であるため、隣接する断面形状は必ずしも類似した形状であるとは言えず、あらゆる隣接パターンが考えられる。このため、この1対1対応づけの処理を完全に自動化することは困難である。

そこで本稿ではまず、視察により隣接した断面曲線の間で対応している部分曲線を、それぞれが一つの凹、または凸部分を含むように抽出し(図4)、輪郭線を部分曲線に分割する。次に各部分曲線上の点を計算により自動的に求めるために部分曲線について、次のような仮定を設ける。「抽出された部分曲線は、一つの凹、または凸部分を形成しており、それぞれの凹部分の頂点、または凸部分の頂点どうしが対応している」。このような仮定の下に、以下のようにして部分曲線上の対応する点を計算する。まず各切断平面上で、部分曲線の端点を結ぶ直線を横軸、これに直交する方向を縦軸とするような座標系を考える(図5上段参照)。次にそれぞれの部分曲

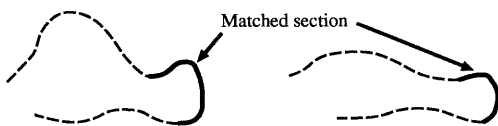


図4 対応する部分曲線の抽出

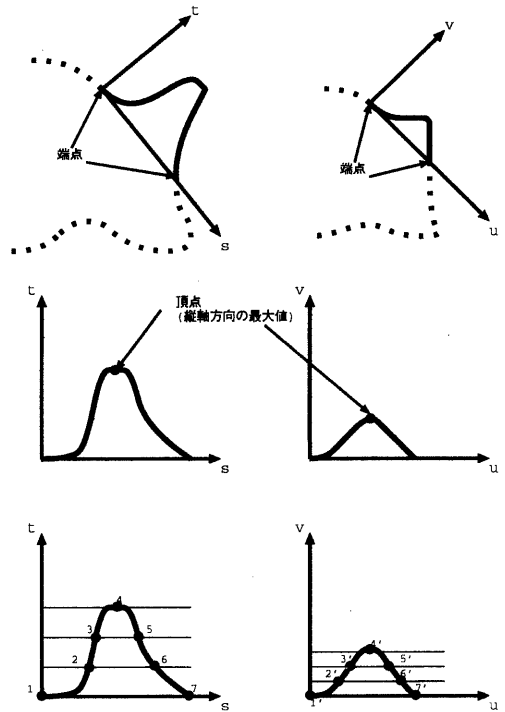


図5 対応する点の抽出

線の頂点を求める(図5中段参照)。そして横軸に平行な直線で、縦軸方向に等間隔に等間隔数で部分曲線を分割したときの交点を互に対応する点とする(図5下段参照)。このとき分割する間隔数は、その部分曲線の長さが輪郭線全体の長さにどれだけ寄与しているかによってあらかじめ決定しておく。

このようにして得られた対応関係の抽出の一例を図6に示す。このような隣接断面間の点の対応づけを全部の断面間について行うことによって声道の全体の3次元形状を構成する。得られた3次元形状を図7に示す。この際、図6のように隣接する断面の形状がよく似ており、対応関係がとり易い場合は上記した方法でうまく処理できる。しかし、中には全く形状が異なり、対応する部分曲線を抽出する段階

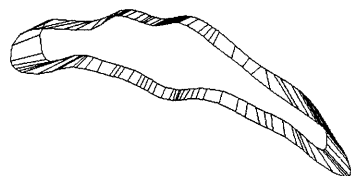


図6 隣接する断面間 (No.38-No.39) の対応

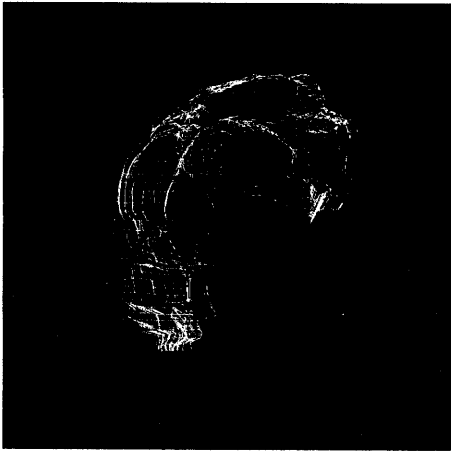


図7 /a/発声時の3次元声道形状の構成

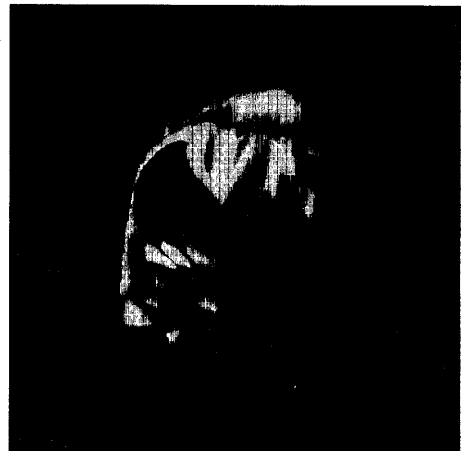


図8 /a/発声時の声道形状のシェーディング表示

での判断が難しい場合がある。このような時は、望ましい対応関係がすぐに得られず、何回も部分曲線を取り直す必要が生じる。そのため、対応関係を得る方法として上記の方法は今後何らかの改善をしていく必要がある。

図7に示した3次元声道形状データを基に、声道形状をシェーディング表示した結果を図8に示す。図7、図8は正中面に対して45°の角度から見た形状である。

4 声道断面積関数、周長関数の推定

図7に示した3次元声道形状データを用いて、声道断面積関数および周長関数を推定する。そのためには、声道内を音波が伝搬していく波面を求めなければならない。本稿ではこの波面が正中面に直交すると仮定する。正中断面声道形状から声道の中心線を推定し、これと垂直な直線を音波の伝搬波面とする。

正中面を決定するには、64個の各断面形状について z の最大値と最小値との中間値を求め、それらの平均値を正中面の z 座標値とした。母音/a/の場合、計算結果は $z=2.773121$ となった。2章で述べたように、正中面は $z=2.5$ (6番目の矢状断面)と $z=3.0$ (7番目の矢状断面)との間に位置すると予想されるので、この結果は妥当な値と言える。正中面が決定したので、図7の3次元声道形状を正中面で切断したときの交点を求め、それらをスプライン補間することによって正中断面声道形状が得られる。

次に正中断面形状から、声道の中心線を推定する。推定方法は松村ら⁽⁵⁾のアルゴリズムを参考にした。まず正中断面形状を舌面側と口蓋側とに分け、舌面上のある任意の点を固定して、口蓋側との点の距離が最小となる点を探索して求める。次にこの二つの点の中点を中心線上の一点とする。この操作を声門部から口唇部まである程度の細かい間隔で行い、各中点を滑らかに結ぶことによって声道中心線を推定した。ただし軟口蓋や、喉頭部付近では声道形状が複雑なため、得られた中心線が急激に曲がる箇所があった。このような箇所は視察によりマウスで滑らかに修正した。

次に声道中心線を等間隔に分割し、各分割点において中心線に垂直な面で切断したときの断面形状を求めて、その面積と周長を推定する。これによって断面積関数と周長関数が得られる。ただし、この切断平面は図2で示した切断平面と同様に矢状断面に垂直な平面とする。図9に正中断面声道形状と声道中心線、および中心線を25個のセクションに分割したときの切断平面を示す。図10に推定された母音/a/の声道断面積関数と声道周長関数を示す。

5 むすび

本稿では、MRIによって得られた矢状断面形状を用いて3次元声道形状を構成するアルゴリズムを示した。検討すべき問題としてはまず、3.2節で述べたように、隣接する断面間の点の対応関係を定める際、アルゴリズムとして輪郭曲線の凸部分と凸部分

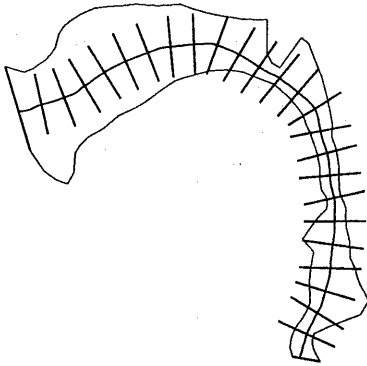


図9 正中断面声道形状、声道中心線、および切断平面 (母音/a/の例)

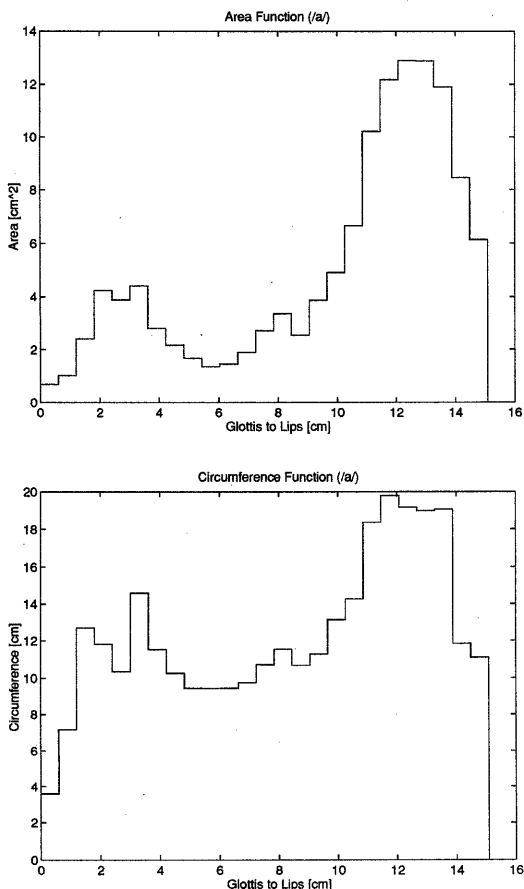


図10 母音/a/の声道断面積関数(上図)および声道周長関数(下図)

とを抽出して対応させることを行った。しかし、この方法のみでは、隣接断面間で凸部分の数が異なる場合に不都合が生じた。また喉頭蓋谷や軟口蓋などの突出した部分に対しての処理は、図2の切断平面を、突出部をちょうど切断するように決定することによって三次元形状に突起部分を含むようにした。しかし、後に声道の電気的等価回路を構成するためには、これらの突出部は分岐として扱う必要がある。これらの点について今後改善策を検討していきたい。

今回用いた矢状断面形状はフィルムをマニュアルでトレースし、ディジタイザによって取り込む、という方法で得られたものである。よって大量のデータを処理するには大量の時間を要し、また計測精度の面でも問題がある。そのためMR画像を計測系から直接計算機に取り込み、輪郭抽出を自動化するシステムの構築が必要である。本稿で示したアルゴリズムは、このような自動輪郭抽出を行う場合においても有効であると考えられる。

今後は今回得られた声道断面積関数、および周長関数を用いて声道伝達特性を計算し、また同時に上記した問題点について改善していく予定である。また歯の形状の補正をどのように行うか、についても輪郭抽出法と合わせて検討する必要がある。

参考文献

- (1) Motoki K. and Miki N: "Measurement of intraoral sound pressure distributions of Japanese vowels", ICSLP, pp.851-854(1992).
- (2) 神山直久, 三木信弘, 永井信夫: "粘弾性体モデルを用いた声道壁インピーダンスについての考察", 信学論 (A), **J75-A**, 11, pp.1649-1656(1992).
- (3) 六角光宏, 橋本清, 今泉敏, 新美誠司, 桐谷滋: "MRIによる声道の三次元計測の試み", 音響論, pp.219-220(1986).
- (4) Bear T., Gore J.C., Gracco L.C. and Nye P.W.: "Analysis of vocal tract shape and dimensions using magnetic resonance imaging: Vowels", JASA, **90**, 2, pp.799-828(1991).
- (5) 松浦雅史, 杉浦淳: "磁気共鳴映像法(MRI)による声道形状の計測", 信学論 (A), **J75-A**, 7, pp.1115-1123(1992).
- (6) 松浦雅史, 新川拓也, 松重康弘, 清水公治, 橋本泰嗣, 森田龍彌: "MRIによる歯冠部を含む声道と鼻腔の三次元形状の計測", 信学技報, **MBE93**-131(1994).
- (7) 楊長盛, 粕谷英樹, 加納滋, 佐藤俊彦: "MRIによる声道形状の精密計測法の検討", 信学論 (A), **J77-A**, 10, pp.1327-1335(1994).