

学 位 論 文 題 名

母音の声道 3 次元形状を用いた音響数値解析に関する研究

学位論文内容の要旨

人はそれぞれ違った声質を有している。話すときの感情や、年月が経つと声質は変化するが、話している言語や、話し方、発声法等が違ってもこの声質自体は変わらない。これは、音声の個人性や情緒性などの特徴量が、各個人が先天的に持っている声道の物理形状によって決定されているからである。音声解析のための声道のモデル化の一つとしてよく知られているものに声道アナログ・モデルがある。これは声道断面積と周長をパラメータとする円筒管の縦続接続で近似し、平面波伝搬を仮定した 1 次元モデルである。したがって、この 1 次元モデルでは、声道の曲がりや非対称形状、声道壁の不均一な硬さの分布を直接的に反映することが不可能であるので、3 次元形状によって存在していると思われる情緒性や個人性などを特徴付ける重要な音響的特徴量を見出すことは不可能である。そこで、形状に依存する量を解析できる 3 次元モデルによる音声解析が望まれるが、形状のどのようなパラメータ化が必要なのか、どの程度まで声道を精密に表現する必要があるのかということは十分に知られていない。これは子音モデルは言うに及ばず、母音モデルについても同様である。

本論文は、母音発声時の声道内の 3 次元の音響特性を調べるために、3 次元有限要素法により音響数値シミュレーションを行なった結果について述べたものである。本研究で得られた結果は声道の 3 次元モデル化のための基礎データとして重要な意味を有するものである。

本論文は 9 章からなり、第 1 章では音声研究の歴史的背景を紹介し、本研究の意義について述べている。

第 2 章では、母音および子音の生成機構および調音について詳述している。また、音声生成機構のモデル化に関して、これまでに構築されてきた 1 次元近似の声道アナログ・モデルについて触れた後、本研究に関係の深い声道部の物理的モデルおよび電気的モデルと口唇部の物理的モデルについて概説している。また、1 次元モデルの限界について述べている。

第 3 章では、定常状態の 3 次元波動方程式を有限要素法に適応させるための定式化の過程を示した。有限要素法は任意の領域を有限要素と呼ばれる小領域での分割を行なうが、この要素形状には数種類のものがあり、ここでは 2 種類の要素について定式化を行なった。

第 4 章では、有限要素選択および本手法の有効性を確かめるための予備実験を行ない、その後、口腔内部の不均一な壁インピーダンス分布および声道の曲がりの 3 次元形状が音響特性に与える影響を調べた。その結果より、適切な有限要素の選択が必要であることを示した。また、不均一な壁インピーダンス分布や声道の曲がりが 1 次元モデルには表れ得ない影響を音響特性に及ぼすことを明らかにした。

第 5 章では、口唇部から放射される音波を 3 次元的に表現するための 3 次元の放射モデ

ルを提案し、提案手法の有効性を示した。音響管の断面がだ円の場合、本手法より計算された声道伝達特性のホルマント帯域幅が、平面波モデルのものよりも狭くなり、ホルマント周波数は高周波数側へ遷移することが示された。また、放射インピーダンスは平面波近似を仮定した解析解のものより低かった。さらに、高次伝搬モードが生じ、放射波が垂直偏波的になることが示された。

第6章では、第5章で提案した放射モデルを用いて、断面が円またはだ円である数種類の均一音響管を使用してシミュレーションを行ない、断面と放射インピーダンスの関係を調べた。結果より、放射インピーダンスは放射断面形状によって異なり、実数部と虚数部ではその変化の仕方が異なることが示された。次に、MRI(Magnetic Resonance Imaging)データを元に作成された声道断面形状を断面にもつ音響管と、その声道断面と面積および周長が等価なだ円断面の音響管内の音響特性を比較して、だ円近似の妥当性について検討した。その結果より、両者の声道伝達関数に有意な差は認められず、ここで用いた程度の声道断面ならば、だ円近似で十分であることが示された。

第7章では、上下交互に存在する狭めの影響を調べるため、仕切り状の狭めを均一音響管の放射部付近に上下交互に構成し、その音波伝搬に与える影響を調べた。結果より、本手法より計算した声道伝達特性が1次元の等価回路モデルによって得られるものと比較して、ホルマントが低い周波数側に移動することなどを明らかにした。

第8章では、日本語母音/a/, /i/, /u/発声時の頭部MRIから得られた声道に関する数値データ(断面積と周長)をもとに、3次元の放射モデルを含めた声道の音響管近似モデルを構築し、有限要素法により数値シミュレーションを行なった。また、上下非対称性に着目した声道の日本語母音/a/のモデルを同様に作成し、単純に楕円で近似したモデルとの比較、検討を行なった。結果より、/a/, /i/, /u/いずれのモデルも声道伝達特性の3kHzぐらいまでは、1次元の等価回路モデルの結果とよく一致することが明らかになった。第3ホルマント周波数以上になると、本手法の結果は音波が高次伝搬モードで伝搬するなど、1次元モデルの結果とは違いが生じ、さらに各母音モデルごとに、その差異の様子が異なることが示された。上下非対称性を取り入れた母音モデルは対称なモデル程には高次伝搬モードが生じず、また、上下非対称のためか、ホルマント周波数が全体的に低周波数側にずれて、モデルの音響的長さが長く見えるなど、対称なモデルとは異なる結果が得られることを示した。

最後に、第9章では本研究を総括している。

学位論文審査の要旨

主査	教授	小川吉彦
副査	教授	栃内香次
副査	教授	永井信夫
副査	助教授	三木信弘

学位論文題名

母音の声道3次元形状を用いた音響数値解析に関する研究

マルチメディア隆盛の時代を迎え、それに対応すべく音声情報処理の進歩にも著しいものがある。しかしながら、現今の合成音声の品質は情緒を伴った感情表現や個人性を表現するレベルまでには至っていない。この大きな原因の一つは、従来の音声合成方式が基本的に1次元モデルであり、声道の3次元形状効果を無視してきたことにあると考えられる。このため、3次元形状から派生する情緒性や個人性を特徴付ける重要な音響的特徴量を見出してパラメータ化することで、合成音声の品質を向上させ得ることが大いに期待できる。本研究は、この達成を目標として行われたものである。

本論文では、母音発生時の音響特性に声道の3次元形状がどのように依存するかを、3次元有限要素法により音響数値シミュレーション解析している。その上で、声道の1次元モデルによる特性と比較し、合成音声の品質を向上するための声道の3次元モデル化には、どのような基礎データを必要とするかを検討している。

本論文は9章から構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、音声研究の歴史的背景と本研究の意義を述べている。

第2章では、従来の声道1次元モデルの概要と、本研究に重要な声道部の物理的および電氣的等価モデルと口唇部の物理的モデルについて述べている。さらに、1次元モデルの限界について言及している。

第3章では、定常状態の3次元波動方程式を有限要素法で解析するための4面体要素と6面体要素による2種類の定式化を行っている。

第4章では、口腔内の不均一な壁インピーダンス分布や声道曲がりなどが音響特性に与える影響を解析し、6面体要素の有効性を確認している。さらに、このような3次元形状効果が1次元モデルでは解析できないことのあることを確認している。

第5章では、口唇部から放射される音波に関する3次元放射モデルを提案し、その有効性を示している。例えば楕円断面音響管の場合、本手法により求めた声道伝達特性のホルマント帯域幅が従来の単純な平面波モデルのときより狭くなり、かつホルマント周波数が高周波

側へ遷移することを明らかにした。

第6章では、前章で提案した放射モデルを用いて各種楕円断面形状均一音響管のシミュレーションを行い、放射インピーダンスが放射断面形状で異なることを確認した。また、MRIデータを基にして作成した実際の声道断面形状を一定断面にもつ音響管と、それと断面積および周長が等しい楕円断面との音響特性を比較し、楕円近似の妥当性を確認した。

第7章では、門歯が声道を上下交互に狭めている影響を適当にモデル化して調べた。その結果、1次元等価回路モデルに比べホルマントが低周波側に移動することを明らかにした。

第8章では、MRIモデルから得られた声道断面を基に可変楕円断面声道モデルを構築して、日本語母音/a/, /i/, /u/発生時のシミュレーションを行っている。さらに、単一楕円断面と上下非対称楕円断面モデルとの比較も行っている。この結果、1次元モデルと比べて3kHz程度までの声道伝達特性は良く一致しているが、第3ホルマント周波数以上では高次伝播モードのため差異が生じることを確認した。また、非対称断面モデルの影響も確認した。

第9章は結論である。

以上のように、本論文は初めて3次元声道モデルによる有限要素解析を詳細に行い、母音に関する声道モデルを構成するに際し、どの程度までシステムを簡略してモデル化できるかについての有益な知見を得ており、音声情報処理分野に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。