

学位論文題名

声道音響解析における 3次元有限要素解析の
高速化に関する研究

学位論文内容の要旨

音声合成の研究には2つの流れがある。1つは工学的立場からの音声信号処理に基づくものであり、もう1つは医学・生理学的立場からの音声科学に基づくものである。音声信号処理による音声合成の代表的なものとして、PARCOR分析やLSP分析が挙げられる。これらは既に実用化され、現在の携帯電話等に広く利用されている。

しかし、実際の音声は個人性や情緒等の発声者の情報を含めて伝達されるものであるが、音声信号処理による音声合成では、これらの個人性や感情をパラメータとして合成音に含めることができない。音声の個人性は個人の声帯振動に由来するといわれており、また感情は心理学的な要因に由来するものである。したがって、実際の人間の音声生成過程を医学・生理学的立場からモデル化しなければ合成音の個人性や感情を実現することはできないと考えられる。

音声科学の分野において音声合成のために提案されたモデルの1つに声道音響管モデルがある。これは声道を断面積の異なる複数の音響管で接続したものとみなすモデルである。このモデルを基に当初は1次元で解析が行われてきた。しかし、MRIにより実際の声道の3次元形状の計測が可能になり、また計算機の高性能化が進むにつれ3次元での解析が行われるようになった。その結果、声道伝達関数は声道の3次元形状に大きく影響されることが明らかになり、1次元モデルでの解析には限界があることが指摘されるようになった。

この3次元形状を考慮した解析手段の1つが有限要素法(Finite Element Method; FEM)である。FEMにより3次元での数値解析が行われ、重要な知見がもたらされた。FEMは非常に有効な解析手法であるが、次のような2つの問題点がある。1つは、計算量が多いため、計算時間が膨大になるという点である。FEMは偏微分方程式を連立1次方程式に置き換えて近似的に解を求める。この時、連立1次方程式の次元は一般に数万以上になる。声道音響解析でも1~2次元である。このような大規模な連立1次方程式を解かなければならないため、計算時間が膨大になる傾向がある。もう1つはFEMを行うためには、解析対象となる領域を要素と呼ばれる小領域で分割し、それらの要素全体で解析対象領域を近似するような有限要素モデルを作成しなければならない。この有限要素モデルが適切なものでなければ、実際に計算を行っても重要な物理量を抽出できなくなるため、有限要素モデルの作成はFEMの重要な前処理である。しかし、この有限要素モデルの作成はほとんどの場

合、手作業で行われる。モデルによっては1ヶ月かかることもある。そして、モデルが不適切であった場合には最初から作りなおさねばならない。このように、FEMそのものは有効な解析手法でありながら、モデルの作成は手間のかかる作業となっている。

本論文はFEMに由来するこの2つの問題点を改善し、声道音響解析を高速化するためのアルゴリズムを提案する。高速化とは、1つめの問題点である、計算時間の短縮(特に声道伝達関数を短時間で求めること)だけでなく、2つめの問題点である有限要素モデルの作成も自動で行うことを意味している。

計算の高速化について簡単に述べる。従来は声道伝達関数を求めるために2つの連立1次方程式を解かねばならなかった。そして、この解法にはLU分解等の直接解法が用いられてきた。しかし、大規模な連立1次方程式を解く場合には反復解法が向いているとされる。反復解法は初期値を適切に選ぶことで非常に速く収束する。そこで初期値の選び方を工夫した反復解法を利用した計算アルゴリズムを提案する。さらに、2つの連立1次方程式を解かずに1つだけ解いて、声道伝達関数を求めるアルゴリズムを提案する。

また、有限要素モデルの自動生成法はすでに多数のアルゴリズムが提案されているが、そのほとんどは偏微分方程式を解くことに帰着される。これは、FEMという数値計算を行うための前処理の段階で、さらに数値計算が必要になってしまうことを意味する。本論分で提案する自動生成法は単純な代数計算に基づいている。

本論文は、全6章より構成される。以下では各章の概要を述べる。

第1章では本研究分野の背景と本研究の目的、本論文の構成を述べる。

第2章では、音声生成過程について、声帯音源部、声道共振部さらに口唇放射部に分けて説明する。各部において、その物理的機構を述べ、そこから電氣的等価回路を導く。さらにデジタルフィルタモデルを導く。ここで述べるデジタルフィルタモデルには音声信号処理に基づくものと音声科学に基づくものがあるが、いずれも1次元モデルである。また、本論文中で3次元FEMとの比較に用いるのは音声科学に基づくデジタルフィルタモデルである。

第3章では、声道音響解析のためのFEMの定式化を行う。解析対象となる領域は、声帯から口唇までの声道部、さらに口唇からの放射空間を接続したものである。この領域で定常状態の波動方程式に3次元の有限要素法を適用し、定式化する。

第4章では、声道伝達関数を高速に求めるためのアルゴリズムを3つ提案する。1つは反復解法を逐次的に利用するアルゴリズム、2つめは放射境界条件の与え方、3つめは差分法を利用して連立1次方程式を解かずにすませる方法である。これら3つの提案手法に対して、計算精度を劣化させることなく、短時間で声道伝達関数を求める手法の組み合わせについて考察する。

第5章では、声道音響解析のための有限要素モデルの自動生成法を提案する。本提案の自動生成法により作成された有限要素モデルによる声道伝達関数と手作業で作成された有限要素モデルによる声道伝達関数とに相違はなく、自動生成法が適切なモデルを作成できること、また作成のやり直しも容易におこなえる自動生成法であることを示す。

第6章では、本論文の結論と今後の課題を述べる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 宮 永 喜 一

副 査 教 授 野 島 俊 雄

副 査 教 授 小 柴 正 則

副 査 教 授 小 川 恭 孝

副 査 教 授 三 木 信 弘 (公立はこだて未来大学)

学位論文題名

声道音響解析における 3次元有限要素解析の 高速化に関する研究

音声合成の研究には2つの流れがある。1つは工学的立場からの音声信号処理に基づくものであり、もう1つは医学・生理学的立場からの音声科学に基づくものである。音声信号処理による音声合成の代表的なものとして、PARCOR分析やLSP分析が挙げられる。これらは既に実用化され、現在の携帯電話等に広く利用されている。

音声科学の分野において音声合成のために提案されたモデルの1つに声道音響管モデルがある。これは声道を断面積の異なる複数の音響管で接続したものとみなすモデルである。このモデルを基に当初は1次元で解析が行われてきた。しかし、MRIにより実際の声道の3次元形状の計測が可能になり、また計算機の高性能化が進むにつれ3次元での解析が行われるようになった。その結果、声道伝達関数は声道の3次元形状に大きく影響されることが明らかになり、1次元モデルでの解析には限界があることが指摘されるようになった。

この3次元形状を考慮した解析手段の1つが有限要素法(Finite Element Method; FEM)である。FEMにより3次元での数値解析が行われ、重要な知見がもたらされた。FEMは非常に有効な解析手法であるが、次のような2つの問題点がある。1つは、計算量が多いため、計算時間が膨大になるという点である。もう1つはFEMを行うためには、解析対象となる領域を要素と呼ばれる小領域で分割し、それらの要素全体で解析対象領域を近似するような適切な有限要素モデルを作成しなければならない。

本論文はFEMに由来するこの2つの問題点を改善し、声道音響解析を高速化するためのアルゴリズムを提案している。高速化とは、1つめの問題点である、計算時間の短縮(特に声道伝達関数を短時間で求めること)だけでなく、2つめの問題点である有限要素モデルの作成も自動で行うことを意味している。

計算の高速化については、従来声道伝達関数を求めるために2つの連立1次方程式を解

かねばならなかった。そして、この解法には LU 分解等の直接解法が用いられてきた。しかし、大規模な連立 1 次方程式を解く場合には反復解法が向いているとされる。反復解法は初期値を適切に選ぶことで非常に速く収束する。そこで初期値の選び方を工夫した反復解法を利用した計算アルゴリズムを提案している。さらに、2 つの連立 1 次方程式を解かずに 1 つだけ解いて、声道伝達関数を求めるアルゴリズムを提案している。

また、有限要素モデルの自動生成法はすでに多数のアルゴリズムが提案されているが、そのほとんどは偏微分方程式を解くことに帰着される。これは、FEM という数値計算を行うための前処理の段階で、さらに数値計算が必要になってしまうことを意味する。本論分で提案する自動生成法は単純な代数計算に基づいている。

本論文は、全 6 章より構成されている。以下では各章の概要を述べる。

第 1 章では本研究分野の背景と本研究の目的、本論文の構成を述べている。

第 2 章では、音声生成過程について、声帯音源部、声道共振部さらに口唇放射部に分けて説明している。各部において、その物理的機構を述べ、そこから電氣的等価回路を導く。さらにデジタルフィルタモデルを導く。ここで述べるデジタルフィルタモデルには音声信号処理に基づくものと音声科学に基づくものがあるが、いずれも 1 次元モデルである。また、本論文中で 3 次元 FEM との比較に用いるのは音声科学に基づくデジタルフィルタモデルである。

第 3 章では、声道音響解析のための FEM の定式化を行っている。解析対象となる領域は、声帯から口唇までの声道部、さらに口唇からの放射空間を接続したものである。この領域で定常状態の波動方程式に 3 次元の有限要素法を適用し、定式化した。

第 4 章では、声道伝達関数を高速に求めるためのアルゴリズムを 3 つ提案している。1 つは反復解法を逐次的に利用するアルゴリズム、2 つめは放射境界条件の与え方、3 つめは差分法を利用して連立 1 次方程式を解かずにすませる方法である。これら 3 つの提案手法に対して、計算精度を劣化させることなく、短時間で声道伝達関数を求める手法の組み合わせについて考察している。

第 5 章では、声道音響解析のための有限要素モデルの自動生成法を提案する。本提案の自動生成法により作成された有限要素モデルによる声道伝達関数と手作業で作成された有限要素モデルによる声道伝達関数とに相違はなく、自動生成法が適切なモデルを作成できること、また作成のやり直しも容易におこなえる自動生成法であることを示す。

第 6 章では、本論文の結論と今後の課題を述べる。

これを要するに、筆者は、声道音響解析のための有限要素モデルを新たに提案し、高速にかつ正確に音声の生成モデルを表現できる手法を開発した。さらにこれを利用した音声信号の生成回路を求め、自然性を伴う音声合成システムについて詳細に検討している。これにより、音声生成・合成に関する多くの有益な知見を得ており、音声情報処理の分野に貢献するところ大なるものがある。

よって筆者は、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。