

氏名（本籍）	わたなべ かんじ 渡邊 貫治（北海道）
学位の種類	博士（情報科学）
学位記番号	情博第309号
学位授与年月日	平成17年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科、専攻	東北大学大学院情報科学研究科（博士課程）システム情報科学専攻
学位論文題目	頭部伝達関数の補間と合成に関する研究
論文審査委員	（主査）東北大学教授 鈴木 陽一 東北大学教授 木下 哲男 東北大学教授 牧野 正三 （工学研究科）

論文内容要旨

第1章 序論

あらゆる聴取者に、ある音場を忠実に模擬し提示する高精度な聴覚ディスプレイシステムは、空間音響の分野への科学的な貢献も大きいだけでなく、テレグジステンズやバーチャルリアリティなどの遠隔地にいる利用者同士のコミュニケーションシステムの実現など、工学的な応用への貢献も大いに期待できる。そこで、音像定位システムを実現するアプローチとして、聴覚へ入力される音信号を制御し、精密に合成することを考える。本論文では、音空間情報の一つとして重要な頭部伝達関数に着目し、その精密な模擬を目指す。頭部伝達関数には方向依存性や個人性があるため、これらの問題を解決することが、高精度なシステムを実現するために非常に重要である。そのために、測定された多数の頭部伝達関数を基盤とした検討が必要不可欠であり、本論文では、まず新しく頭部伝達関数コーパスを構築する。方向依存性に関しては、測定された頭部伝達関数から測定されていない方向の頭部伝達関数を補間によって得る検討を行う。その際、頭部伝達関数をモデル化し、そのパラメータを補間に用いることで、全方向の頭部伝達関数を効率的に表現する。また、個人性に関しては、聴取者の身体形状が頭部伝達関数の特性と非常に関連が深いことをふまえ、身体形状から頭部伝達関数を推定することを目標とする。水平面定位の手がかりとして非常に重要である両耳間時間差に着目し、身体特徴量から両耳間時間差を予測する方法を提案する。

第2章 頭部伝達関数コーパスの構築

第2章では、頭部伝達関数の方向依存性や個人性を検討するためには、測定された多数の頭部伝達関数が重要な基盤となるという考えのもと、頭部伝達関数の大規模なコーパスの構築を行った。本論文における頭部伝達関数は、「頭を中心に相当する自由空間中の1点と、耳道内の1点との間の伝達関数」という定義に基づくものとし、音源から被測定者の耳元までの伝達関数と、被測定者がいない状態での音源から被測定者の頭部中心に相当する位置までの伝達関数の比として算出した。そのために、無響室において、多数の音源方向、多数の被測定者に対して各伝達関数のインパルス応答を測定した。

本章では、頭部伝達関数の測定法について原理の詳細を述べ、測定に使用する OATSP 信号や、頭部伝達関数の定義に基づく測定の実現方法について述べた。また、本論文の頭部伝達関数における特徴として、外耳道を閉

そくした状態で測定することについても述べた。その利点として、外耳道の個人性が取り除かれた頭部伝達関数が得られ、開放法と比較して個人性が弱いことが挙げられる。また、頭部伝達関数の個人性については、聴取者の外見の形状のみを考慮すれば良いということも、本論文における閉そく法の利点である。

本章で構築した頭部伝達関数コーパスには、頭部伝達関数の方向依存性や個人性に深く関係すると思われる身体特徴量も含まれている。本章ではその測定方法、測定部位について述べた。身体形状は、3次元デジタル化を用いて測定され、被測定者の肩より上の3次元形状、および両耳の3次元形状を得た後、必要な身体特徴量を測定した。本論文で使用する身体特徴量は、主に頭部、胴体、耳介の大きさや形状に関するものであり、具体的には、 x_1 :頭幅、 x_2 :頭長、 x_3 :頭高、 x_4 :頭耳長、 x_5 :頭耳高、 x_6 :肩幅、 x_7 :鼻長、 x_8 :鼻深、 x_9 :鼻高、 d_1 :耳長、 d_2 :耳幅、 d_3 :耳甲介長、 d_4 :耳甲幅(長)、 d_5 :耳甲幅(短)、 d_6 :耳甲介艇、 d_7 :舟状窩の16種類である。

本章では、コーパスの評価として、まず測定された頭部伝達関数および身体特徴量の平均や標準偏差を示し、以降の検討に十分な測定データが得られたことを述べた。また、既存のコーパスとの比較を行い、本論文のコーパスの特徴として、下方も含めた全方向の頭部伝達関数を測定していること、既存のコーパスでは測定されていない鼻の大きさの身体特徴量を登録していることを述べた。

第3章 非整数遅延を考慮した頭部伝達関数の補間

本章では、共通極・零モデルのパラメータを用いた、新しい頭部伝達関数の補間法について検討を行った。

まず、従来のインパルス応答の線形補間に関する問題点について述べた。インパルス応答に含まれる初期遅延が音源方向によって異なることから、単純な線形補間では補間精度が低下することを述べた。また、実際に測定された頭部伝達関数を用い、対応のずれと補間精度について検討を行った。その結果、1サンプル以下の非整数のずれでも補間精度に影響することが明らかになり、線形補間を行う上で非整数遅延(fractional delayとも呼ばれる)を考慮することが極めて重要であることを述べた。

本論文では、頭部伝達関数のモデルを用いた補間法を提案した。頭部伝達関数のモデルとして有望な共通極・零モデルに着目しそのパラメータを補間に用いることにした。このモデルは、頭部伝達関数において、耳介などでの共振に対応すると考えられる極が方向によらず共通であるという性質を反映した、零点のみ方向依存性を持つモデルである。この性質によって、全方向の頭部伝達関数の方向依存性は零点のみで表現でき、必要なパラメータが少数に抑えられるという利点がある。また、補間の際にも零点のみに対して行えばよいことになる。本論文では、零点に対応するMA係数を用いた補間法を提案し、検討を行った。共通極・零モデルのMA係数については、式の展開からインパルス応答の線形補間と同等の結果が得られることが予想され、インパルス応答の線形補間において非整数遅延を考慮する必要があったのと同様に、MA係数の補間においても、対応のずれを考慮する必要があることを述べた。

提案法では、測定された頭部伝達関数を共通極・零モデル化し、得られたMA係数を線形補間することで頭部伝達関数の補間を実現する。その際、非整数のずれを考慮するため、次数ごとに並べたMA係数に対してアップサンプリングを適用し、隣接する方向のMA係数同士の相互相関が最大になるように位置を合わせ線形補間を適用することで、高精度な補間を目指した。また、共通極モデルのパラメータを用いるため、少数のパラメータでの補間が可能となった。本章では提案法の評価実験を行い、スペクトル歪みによる客観評価によって補間精度を評価した。また、従来法としてインパルス応答の線形補間および周波数振幅特性の線形補間との比較も行った。その結果、全体的には従来法と同程度の補間精度が得られ、いくつかの方向については、インパルス応答の補間より精度が向上した。

考察により、補間精度の向上は非整数遅延を考慮した補間によるものであることを明らかにした。また、全体的に従来法と同程度の精度が得られたことから、パラメータの削減が可能であることが示された。本章の条件では、インパルス応答の補間に比べて、約30%のパラメータ数で頭部伝達関数を表現可能であることがわかった。

提案法により、全方向の頭部伝達関数を精度を損なうことなく従来より少数のパラメータで表現することが可能となったといえる。このことから、測定されていない空間的な情報を効率的に算出できる可能性が示され、音像定位システムの処理速度向上や負荷の軽減に大きく寄与できると思われる。本章では、本論文の目的を達成す

るための課題の一つである、測定された頭部伝達関数から、全方向の頭部伝達関数を得る方法の検討を行い、頭部伝達関数の音空間における音源位置による変化を表現することができた。

第4章 聴取者の身体形状に基づく両耳間時間差の個人化

本論文では、頭部伝達関数における個人性の問題に対して、頭部伝達関数の測定を行わずに聴取者に適した頭部伝達関数を得ることを大きな目標とし検討を行った。本章では、そのための基礎的検討として、方向定位の手がかりとして重要である両耳間時間差に着目した。両耳間時間差は、音源から両耳までの経路差によって主に決まる特徴量であることから、身体特徴量との関連が大きいと考えられるため、本章では、聴取者の身体特徴量から両耳間時間差を予測することを考え、そのために第2章で構築した頭部伝達関数コーパスを用い、両耳間時間差と身体特徴量との関係を分析することにした。両耳間時間差および身体特徴量はそれぞれ多変量のパラメータで表現されるものであることから、多変量解析の一手法である正準相関分析によって、両耳間時間差と身体特徴量の相関の分析を行った。その結果、頭部の大きさに関する特徴量のみを用いた場合は正準相関が約0.7であったのに対し、肩幅や耳、鼻の大きさなどの他の身体特徴量も含めた方が、約0.9という高い相関が得られることが示された。また、正準相関分析によって得られた構造係数から、特に頭幅、頭長のほかに、肩幅、耳の位置が両耳間時間差と強く関係する特徴量であることが明らかとなった。

以上の分析結果を受け、実際に身体特徴量から両耳間時間差を予測する方法について検討を行った。まず、両耳間時間差の角度依存性を三角関数群でモデル化した。また、正面の両耳間時間差が0となるという仮定の下、より簡便なモデルとして周期360度のsin関数およびその整数倍の周波数をもつsin関数でモデル化した。次に、各sin関数の振幅と身体特徴量との間の関係式を、重回帰分析によって導出した。得られた予測式から、実際に両耳間時間差を合成し、定位実験によってその評価を行った。頭部伝達関数コーパスから、両耳間時間差が聴取者本人のものより大きな差をもつ頭部伝達関数を用い、その両耳間時間差を個人化した両耳間時間差に置き換えたものとの比較を行ったところ、両耳間時間差を個人に合わせ込むことで、定位結果の平均が本人の頭部伝達関数を用いた場合に近づくことが示された。したがって、両耳間時間差を合成することで、本人の頭部伝達関数に近い定位感が得られることが示唆され、提案法である両耳間時間差の個人化に関する有効性が示されたといえる。

第5章 結論

本論文の検討によって、全方向の頭部伝達関数を少数のパラメータで効率よく表現できることが示された。また、両耳間時間差のみではあるが、測定をせずに、頭部伝達関数の個人化の可能性を示すことができた。以上の成果は、空間音響の研究分野のみならず、遠隔地にいる人間同士が、円滑に意思疎通できる、高度なコミュニケーションシステムや遠隔会議システムなどのテレプレゼンテーションの実現などに大きく貢献できるものであると思われる。

論文審査の結果の要旨

人間の聴覚は、音の到来方向や距離等、高度な音空間知覚を行うことができる。音空間知覚に際しては、音源から外耳までの伝達関数、即ち頭部伝達関数を利用していることが知られており、その高精度な合成は、高い臨場感を有する音空間制御システムの実現に重要である。しかし、頭部伝達関数は方向依存性や個人性をもつため、あらゆる聴取者に適した全方向の頭部伝達関数を高精度に得ることは困難であった。そこで著者は、離散的に測定された頭部伝達関数に基づいて、個々人に適した全方向の頭部伝達関数を高精度に合成するための研究を行ってきた。本論文は、その研究成果をまとめたもので、全編5章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、約100名を対象として、頭部伝達関数と、個人性の要因と考えられる聴取者の身体特徴量との測定に基づいて構築したコーパスについて述べている。これは、本研究の基礎になるとともに、今後、関連研究分野で広く利用が可能な基盤を築いたものと評価される。

第3章では、測定点以外の全方向の頭部伝達関数を効率よく高精度に推定するための空間的補間法を検討している。頭部伝達関数を共通極・零モデル化し、そのパラメータを補間することで、従来よりも少数のパラメータで精度の良い補間法を実現した。これは、音空間制御システムの実用化に寄与する技術の提案である。

第4章では、聴取者の身体特徴量を基に他人の頭部伝達関数をその者に適合させる個人化法の検討を行っている。方向定位の基本的手がかりである両耳間時間差に着目し、正準相関分析を行った結果、頭部の大きさや肩幅、耳の位置が重要な身体特徴量であることを明らかにした。次に、重回帰分析を用いて、身体特徴量から両耳間時間差を予測する個人化法を提案している。聴取実験による検証の結果、提案した個人化法により、音空間知覚の精度が有意に改善されることが示された。これは、頭部伝達関数の個人化に基づく高精度な音空間制御実現に寄与する成果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、高精度音空間制御の実現のため、それぞれの聴取者に適合した全方向の頭部伝達関数を与える新しい方法の提案を行い、その有効性を示したもので、音情報工学ならびにシステム情報科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(情報科学)の学位論文として合格と認める。