

氏名（本籍）	石井 要次（千葉県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 209 号
学位授与の日付	平成 30 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	受聴者の頭部形状に基づいた頭部伝達関数の個人化に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 飯田 一博 (副査) 教授 陶 良 教授 今野 将 教授 菖木 禎史 教授 宮田 高道

## 学位論文の要旨

### 受聴者の頭部形状に基づいた頭部伝達関数の個人化に関する研究

本論文は、3次元音像制御精度の向上を図るため、受聴者の頭部形状に基づいて頭部伝達関数を個人化する方法を提案し、その有効性を示したものである。

頭部伝達関数に含まれるヒトの方向知覚の手掛かりは、前後・左右方向で異なる。左右方向知覚の手掛かりは両耳間差キューであり、両耳間差キューには両耳間時間差と両耳間レベル差があることが知られている。前後・上下方向知覚の手掛かりは、頭部伝達関数の第 1、第 2 ノッチがスペクトラルキューとして重要な役割を果たしていることが知られている。頭部伝達関数の第 1 ピークと第 1 ノッチは耳介によって生成されることが示されている。また、第 1、第 2 ノッチと第 1 ピークで再構成されたパラメトリック頭部伝達関数は、実測した頭部伝達関数と同等の定位精度が得られることが報告されている。ただし、上方では、一部の被験者においてパラメトリック頭部伝達関数の定位精度が低下することが報告されている。

頭部伝達関数には方向知覚の手掛かりが含まれているため、受聴者本人の頭部伝達関数を鼓膜上で再現することで任意の 3次元方向に音像を制御することができる。しかし、頭部伝達関数には個人差があるため、他人の頭部伝達関数を用いると誤った方向に定位する現象がしばしば発生する。頭部伝達関数の個人差は、頭部や耳介形状の個人差に起因していることが報告されている。

3次元音像制御を一般に普及させるためには、各受聴者に適合する頭部伝達関数を容易に提供する方法が必要となる。試聴により適合する頭部伝達関数を選出する方法、および受聴者の頭部形状から適合する頭部伝達関数を求める方法が提案されているが、いずれの従来法においても、

高い音像定位精度は得られていない。

本研究では、方向知覚の手掛かりに着目し、受聴者の頭部形状から方向知覚の手掛かりである両耳間差キューおよびスペクトラルキューを推定することで各受聴者に適合する頭部伝達関数を提供する方法を提案し、その有効性について検証した。また、上方の音像定位精度の向上を目的とし、頭部伝達関数の第2ピークが上方の音像定位精度に及ぼす影響を検証した。

本論文は以下の5つの章から構成されている。

第1章では、ヒトの方向知覚の手掛かり、頭部伝達関数について解説した上で、3次元音像制御における問題点として頭部伝達関数の個人差を採り上げた。また、本研究の目的として、受聴者の頭部形状から方向知覚の手掛かりである両耳間差キューおよびスペクトラルキューを推定することで各受聴者に適合する頭部伝達関数を提供する方法を提案し、その有効性について物理的側面および知覚的側面から検証することを述べた。

第2章では、各受聴者の頭部形状から左右方向知覚の手掛かりである両耳間時間差および両耳間レベル差を個人化する方法を提案し、従来法および方向知覚の弁別閾と比較することで提案法の有効性について検証した。

提案法では、受聴者の頭部形状の前後・左右非対称性を反映できる頭部モデルを導入した。33名の被験者の10箇所頭部形状、水平面内12方向の両耳間時間差および両耳間レベル差を計測した。さらに、方位角ごとに、水平面内12方向の両耳間時間差、および1/3 octave bandの両耳間レベル差を目的変数、頭部形状を説明変数とした重回帰式を構築した。次に、4名のナイーブな被験者を用いて提案法の有効性を検証した。その結果、4名の被験者の平均推定誤差は、両耳間時間差ではいずれの方向においても弁別閾と同等であり、両耳間レベル差では800 Hz以下の帯域では弁別閾内であった。しかし、1000 Hz以上の両耳間レベル差の推定誤差は、弁別閾を超えた。

第3章では、受聴者の耳介形状から前後・上下方向知覚の手掛かりであるスペクトラルキューの個人化方法を提案し、提案法の有効性について検証した。本研究では、受聴者の耳介形状から前後・上下方向知覚の手掛かりとして重要な役割を果たす第1、第2ノッチの周波数を推定し、その周波数に近い第1、第2ノッチの周波数を持つ頭部伝達関数をデータベースから選出することで頭部伝達関数の個人化を行う方法を提案した。次に、提案法の有効性を検証するため、4名のナイーブな被験者の個人化した頭部伝達関数を用いて正中面内を目標方向とした音像定位実験を行った。その結果、上昇角0、180°においては実測した頭部伝達関数と同等の精度で音像制御を提供できることを示した。しかし、一部の被験者において上方で音像定位精度が低下する場合があった。

第4章では、頭部伝達関数の第2ピークを加えることで上方の音像定位精度が向上するか否か、および第2ピークが上方の音像定位精度に及ぼす影響について検証することを目的とし、第1、第2ノッチおよび第1ピークで再構成したパラメトリック頭部伝達関数と、それに第2ピークを加えたパラメトリック頭部伝達関数を用いて上半球正中面内を目標方向とした音像定位実験を行った。その結果、第1、第2ノッチおよび第1ピークで再構成したパラメトリック頭部伝達関数

に第 2 ピークを付加することで上方の音像定位精度が向上し、実測した頭部伝達関数と有意な差がない音像定位精度となることを示した。また、第 2 ピーク自身はスペクトラルキューではないが、第 2 ピークは第 1 ノッチを強調することにより、正中面上方の音像定位に重要な役割を果たしている可能性を示した。上半球正中面内全体において、実測した頭部伝達関数と同等の定位精度を提供できる最小構成は、第 1, 第 2 ノッチ, 第 1, 第 2 ピークであることが示唆された。

第 5 章では、今後の展望等を踏まえて本論文を総括した。

## 審査結果の要旨

本論文は、3次元音像制御精度の向上を図るため、受聴者の頭部形状に基づいて頭部伝達関数を個人化する方法を提案し、その有効性を示したものである。

受聴者本人の頭部伝達関数を鼓膜上で再現することで任意の3次元方向に音像を制御することができるが、他人の頭部伝達関数を用いると誤った方向に定位する現象がしばしば発生する。しかし、受聴者本人の頭部伝達関数を測定するには無響室などの特別な設備が必要なうえ、多大な時間を要する。したがって、3次元音像制御や音のバーチャルリアリティを一般に普及させるには、各受聴者に適合する頭部伝達関数を簡便に提供する方法が必要となる。頭部伝達関数の個人差は頭部や耳介形状の個人差に起因するため、これまで受聴者の頭部形状から適合する頭部伝達関数を求める方法がいくつか提案されているが、いずれの方法も実用に耐える高い音像定位精度は提供できていない。

ここで、頭部伝達関数に含まれる方向知覚の手掛かりに着目すると、ヒトの方向知覚の手掛かりは、前後・左右方向で異なることが知られている。左右方向知覚の手掛かりは、両耳間時間差と両耳間レベル差がある。これらは併せて両耳間差キューと呼ばれている。一方、前後・上下方向知覚の手掛かりはスペクトラルキューであり、特に頭部伝達関数の第 1, 第 2 ノッチが重要な役割を果たしていることが知られている。頭部伝達関数の振幅スペクトルにおける第 1, 第 2 ノッチと第 1 ピークだけで再構成されたパラメトリック頭部伝達関数は、元の頭部伝達関数と同等の定位精度が得られることかも報告されている。ただし、上方への音像制御では、パラメトリック頭部伝達関数の定位精度は低下する場合がある。

本研究では、このような方向知覚の手掛かりに着目し、受聴者の頭部形状から方向知覚の手掛かりである両耳間差キューおよびスペクトラルキューを推定することで各受聴者に適合する頭部伝達関数を提供する方法を提案し、その有効性について検証した。また、上方の音像定位精度の向上を目的とし、頭部伝達関数の第 2 ピークが音像定位精度に及ぼす影響を検証した。

本論文は以下の 5 つの章から構成されている。

第 1 章では、ヒトの方向知覚の手掛かり、頭部伝達関数について解説した上で、3次元音像制御における主要な問題の 1 つは頭部伝達関数の個人差であることを示した。また、本研究の目的は、”受聴者の頭部形状から両耳間差キューおよびスペクトラルキューを推定することで各受聴

者に適合する頭部伝達関数を提供する方法を提案し、その有効性について、物理的側面および知覚的側面から検証すること”であることを示した。

第2章では、各受聴者の頭部形状から左右方向知覚の手掛かりである両耳間時間差および両耳間レベル差を推定する方法を提案し、従来法および方向知覚の弁別閾と比較することで、提案法の有効性を検証した。提案法では、受聴者の頭部形状の前後・左右非対称性を反映できる頭部モデルを導入した。33名の被験者の10箇所、水平面内12方向の両耳間時間差および両耳間レベル差を計測し、水平面内12方向の両耳間時間差、および1/3 octave bandの両耳間レベル差を目的変数、頭部形状を説明変数とした重回帰式を構築した。さらに、4名のナイーブな被験者を用いて提案法の有効性を検証した。その結果、4名の被験者の平均推定誤差は、両耳間時間差ではいずれの方向においても弁別閾と同等であり、両耳間レベル差では800 Hz以下の帯域では弁別閾内であった。しかし、1000Hz以上の両耳間レベル差の推定誤差は弁別閾を超えた。

第3章では、受聴者の耳介形状から前後・上下方向知覚の手掛かりであるスペクトラルキューの推定方法を提案し、提案法の有効性を検証した。受聴者の耳介形状から前後・上下方向知覚の手掛かりとして重要な役割を果たす第1、第2ノッチの周波数を推定し、その周波数に近い第1、第2ノッチの周波数を持つ頭部伝達関数をデータベースから選出することで頭部伝達関数の個人化を行う方法を提案した。さらに、提案法の有効性を検証するため、4名のナイーブな被験者の個人化した頭部伝達関数を用いて、正中面内を目標方向とした音像定位実験を行った。その結果、上昇角0°、180°においては本人の頭部伝達関数と同等の精度で音像制御できることを示した。しかし、一部の被験者において、上方で音像定位精度が低下する場合があった。

第4章では、頭部伝達関数の第2ピークを加えることで上方の音像定位精度が向上するか否かについて検証した。その結果、第1、第2ノッチおよび第1ピークで再構成したパラメトリック頭部伝達関数に第2ピークを付加することで上方の音像定位精度が向上し、元の頭部伝達関数と統計的に有意な差がない音像定位精度となることを示した。また、第2ピーク自身はスペクトラルキューではないが、第2ピークは第1ノッチを強調することにより、正中面上方の音像定位に重要な役割を果たしている可能性を示した。以上より、上半球正中面内全体において、元の頭部伝達関数と同等の定位精度を提供できる最小構成は、N1, N2, P1, P2であることが示唆された。

第5章では、今後の展望等を交えて本論文を総括した。

このように、本論文は頭部伝達関数の個人化方法について研究したものであり、音のバーチャルリアリティシステムなどへの応用が可能な重要な知見を得たものとして、価値ある集積であると認める。したがって、学位申請者の石井要次は博士（工学）の学位を得る資格があると認める。