

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700142

研究課題名(和文) 数値解析と模型測定による頭部伝達関数の生成メカニズムの解明

研究課題名(英文) Investigation of production mechanism of head-related transfer functions using numerical simulation and measurement

研究代表者

大谷 真 (OTANI, Makoto)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：40433198

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：両耳での音圧情報を再現することによって立体的な音響再生を行う聴覚ディスプレイを実現することが可能である。両耳での音圧情報には耳介形状に起因する個人差が含まれており、聴覚ディスプレイの高精度化には両耳での音圧情報の個人差を補償する必要がある。しかし、この個人差を生じさせる要因は明らかにされていない。そこで、本研究では、耳介のどの部位が知覚上重要な個人差を生じさせているのかを明らかにするために、耳介周辺の音場を数値シミュレーションと耳介模型による測定によって詳細な検討を行った。検討の結果、耳介上部の形状が個人差を生じさせる主要な要因の1つであることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Virtual auditory display that presents spatial auditory information to a listener can be realized by reproducing sound pressures at a listener's both ears. Sound pressures observed at both ears have inter-individual variations caused by pinna shapes. Therefore, to enhance the accuracy of virtual auditory display, inter-individual differences of sound pressures at both ears should be compensated to each listener. However, it is yet to be revealed which part of pinna yield the inter-individual variations. This work investigated a sound field around the pinna using numerical simulation and measurement using physical model of pinna in order to clarify which part of pinna contribute to a generation of perceptually important inter-individual variation. The results revealed that the shape of an upper part of pinna is one of the major factor that yield the inter-individual variation of the sound pressures at the ears.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：聴覚ディスプレイ 頭部伝達関数 音場定位 数値解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、高臨場感バーチャルリアリティシステムの実現が大きく期待されているが、これを実現する上で聴覚情報は極めて重要なファクターである。高臨場感音再生技術を実現するための有望なアプローチとして、音源から両耳までの音響伝達関数を表す頭部伝達関数 (HRTF: Head-Related Transfer Functions) を用いた聴覚ディスプレイ (VAD: Virtual Auditory Display) がある(Blauert, '83) が、聴覚ディスプレイの高精度化にはヒトの頭部・耳介形状に起因する HRTF の個人差を補償する必要がある(Møller, '96)。

(2) VAD で使用される HRTF と受聴者自身の HRTF が異なる場合に音像定位精度が大きく低下することが先行研究によって指摘されてきた(Wenzel, '93)が、受聴者の頭部運動に追従可能な動的 VAD では音像定位精度が大きく改善されることを申請者らは示してきた。しかし、「高臨場感」という大きな観点から見れば動的 VAD の使用だけでは不十分であり、やはり使用される HRTF と受聴者自身の HRTF のマッチングの問題が解決されなければ VAD の真の高精度化・高臨場感化は実現できないと考えられる。一方で、申請者は数値解析による HRTF シミュレーションという、HRTF の生成メカニズムを探求可能なツールを開発してきており、これまでに、耳介表面の音圧分布を算出するなどの予備的検討を行ってきたが、さらに数値解析及び拡大模型による測定の内面からより詳細な検討を行うことで、HRTF の生成メカニズムを明らかにし VAD で使用される HRTF を各受聴者個人に対して最適化するための知見を得ることができると考えられる。

(3) また、日本国としても総務省による「ICT 成長力懇談会」の最終報告書である「xICT」ビジョン('08 年)において、実現が期待される技術の一つとして高臨場感コミュニケーションが掲げられている。これに関連して総務省では超臨場感フォーラムを立ち上げ、平成 20 年度からは研究予算を計上しており、国を挙げて高臨場感技術の研究開発に取り組む体制が構築されている。

2. 研究の目的

本研究期間内に行う事項は以下の 4 点であった。

(1) 耳介近傍音場と HRTF の予備的解析

耳介の複雑な形状はその表面や近傍に複雑な音場を形成し、その結果として HRTF の複雑な時間構造/周波数特性が生み出される。本研究の目的は HRTF の特徴を生み出すメカニズムを明らかにすることであるが、まず数値解析による計算値の妥当性の検証(下記(2)及び(3))を行うために、被験者 1 名の耳介コ

ンピュータモデルの作成と境界要素法 (Boundary Element Method: BEM)を用いて予備的な条件における耳介近傍音場と HRTF の算出を行う。

(2) HRTF の計算値の妥当性の検証

本研究では、数値解析を利用することで、測定では詳細な検討が不可能であった HRTF の生成メカニズムの詳細の解明を目指す。そのためには、数値解析により算出される耳介表面音圧の妥当性の検証を行う必要がある。特に、本研究における数値解析では、人間の皮膚表面を音響的に剛とする予定であるが、高周波数域において皮膚を剛とみなせるかどうかは不明であり、その妥当性を確認する必要がある。このために、
実耳に対する HRTF の測定
実寸大実耳モデルに対する HRTF の測定
を行い、数値解析による計算値と比較することで、計算値の妥当性を示す。

(3) 耳介近傍音場の計算値の妥当性の検証

ここでは、耳介表面を含む近傍音場の計算値の妥当性を示す。HRTF は小型のマイクロホンを外耳道入口に設置することで測定可能であるが、現状で入手できるマイクロホンが耳介の寸法に比して充分な小ささを持たないため、耳介表面や近傍の音場を正確に測定することが困難である。そこで、正確な測定データを得るために、
拡大耳介モデルの作成及びそれに対する耳介近傍音場の測定
を行い、数値解析による計算値と比較することで、計算値の妥当性を示す。

(4) HRTF の生成メカニズムの解明

HRTF の特徴を生成するメカニズムを明らかにするために、耳介キャビティ内で生じる音響物理現象と HRTF の特徴の関連を詳細に検討する。ここでは、数名の被験者の耳介コンピュータモデルを作成し、各モデルに対して、

耳介表面の音圧の算出

HRTF (外耳道入口で観測される音圧波形) の算出

を行うとともに、耳介の細部の影響をより明確に明らかにするために、数値解析により耳介各部位を吸音性とした場合の HRTF 及び耳介表面音圧の算出
を行い、これらの結果を詳細に観察・比較することで

・ HRTF の特徴 (周波数特性上に現れるピーク・ノッチ) の生成メカニズム

・ HRTF の個人差を生む要因

を解明する。

3. 研究の方法

(1) HRTF と耳介表面及び近傍音場の数値解析: 耳介コンピュータモデルの作成と HRTF

と耳介表面と周辺音場の予備的解析を行い、次項で行う HRTF の実測値との比較に必要なデータ作成を行う。

(2) 実耳及び実寸大実耳モデルによる HRTF の測定：数値解析による HRTF の計算値の妥当性の検証を行うために、実耳に対する HRTF の測定及び実寸大実耳モデルに対する HRTF の測定を行い、数値解析による計算値と比較することで、計算値の妥当性を示す。

(3) 拡大耳介モデルの作成：耳介表面及び近傍音場の測定のための拡大実耳モデルの作成を行う。具体的には、MRI 撮像や光学 3 次元スキャナで得られる耳介形状データを数倍に拡大することで、実寸の数～10 倍の大きさを持つ耳介コンピュータモデルを作成し、それを光造形装置に入力することにより拡大耳介モデルを作成する。

作成した拡大耳介モデルを用いて、耳介表面及び近傍音場の測定を行い、初年度に数値解析により算出した耳介表面及び近傍音場の計算値と比較を行うことで、その妥当性を検証する。

(4) 複数名の耳介コンピュータモデルの作成：HRTF の個人差の要因を明らかにするために、複数名の耳介コンピュータモデルを作成する。先行研究(渡邊ら, 2010)により示唆されているように HRTF に個人差を生じさせやすい耳長などのマクロな寸法においてばらつきの多い被験者数名を選定する。

前項で作成した複数名の被験者の耳介コンピュータモデルを解析対象として HRTF 及び耳介表面及び近傍の音場の数値解析を行い、耳介キャピティ内で生じる音響物理現象と HRTF の特徴の関連を詳細に観察・比較することで、HRTF の特徴の生成メカニズム及び HRTF の個人差を生む要因を解明する。

4. 研究成果

(1) 耳介近傍音場と HRTF の予備的解析
磁気共鳴画像装置 (MRI) を用いて被験者 1 名の耳介モデルの作成を行った。この際、外耳道入口は閉塞した状態とし、1 波長当たり 6 要素以上となる離散化精度となるようにモデルを作成した。また、耳介表面は音響的に剛とした。

(2) HRTF の計算値の妥当性の検証
BEM によって算出した HRTF と実寸大モデルを用いた実測による HRTF の比較を行った。その結果、約 16 kHz 以下の帯域で、両者が良好に一致することが示唆された。16 kHz 以上の帯域では周波数特性上に現れるピークやノッチ(谷)が両者の間で異なる場合が見られたが、音像定位には 8-16 kHz のオクターブバンドにおける特性が寄与しているとの報告があるため、聴感上の影響はないと考え

られる。

(3) 耳介近傍音場の計算値の妥当性の検証
耳介表面音圧の測定を行うために、5 倍拡大耳介モデルを作成した。しかし、これを用いた HRTF の測定結果は、測定後の波長の調整を行ったとしても実寸大モデルの結果と整合せず、正確な測定を行うことができなかった。この原因は拡大モデルを用いた場合の音速の不整合に原因があると考えられる。しかし、前項で述べたように、実寸大モデルにより実測した HRTF と数値シミュレーションにより算出した HRTF は良好に一致しているため、計算値が一定の妥当性を有すると考えられる。

(4) HRTF の生成メカニズムの解明
BEM と上述の耳介モデルを用いて耳介近傍音場(耳介表面音圧分布)と外耳道入口における HRTF を算出した。算出結果より、特に高域においては、HRTF の値が、外耳道入口近傍に設置する受音点の微妙な違いによって大きく異なることが示唆された。

耳介の一部を吸音性とした数値シミュレーションを行った結果、これらの部位を吸音性とする事で、HRTF の特性及び耳介表面音圧分布に変化が見られ、特に耳介上部の構造が HRTF の特性に影響を及ぼすことが示唆された。これらの部位は個人による形状の差が大きく、これらの部位の形状が HRTF の個人差を生じさせていることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

Makoto Otani, Fuminari Hirata, Kazunori Itoh, Masami Hashimoto, Mizue Kayama, Effect of distant-variant/invariant head-related transfer functions on perception of a proximal sound source in virtual auditory display, Proc. International Congress on Acoustics, 査読有, Vol. 19, 2013, 050169.

Hiroaki Kurabayashi, Makoto Otani, Kazunori Itoh, Masami Hashimoto, Mizue Kayama, Development of dynamic transaural reproduction system using non-contact head tracking, Proc. 2nd IEEE Global Conference on Consumer Electronics, 査読有, 2013, 12-16

Makoto Otani, Fuminari Hirata, Kazunori Itoh, Masami Hashimoto, Mizue Kayama, Perception of proximal sound sources in virtual auditory space by distance-variable head-related transfer functions, Acoustical Science and Technology, 査読有, Vol. 33, No. 5,

〔学会発表〕(計 11件)

糸川雄紀、大谷 真、橋本昌巳、香山瑞恵、伊東一典、2次元画像に基づいた頭部・耳介モデルのモーフィングと数値解析による個人頭部伝達関数の算出、日本音響学会講演論文集(春) 2014.3.10、879-882、東京

糸川雄紀、大谷 真、橋本昌巳、香山瑞恵、伊東一典、頭部伝達関数算出のための2次元画像に基づいた3次元頭部モデルモーフィングの検討、電子情報通信学会技術研究報告、EA2013-97、2013.12.14、55-60、金沢

大谷 真、倉林宏明、動的バイノーラル合成による音場の可聴化、日本音響学会アコースティックイメージング研究会資料、2013.10.18、AI-2013-20、東京

倉林宏明、大谷 真、伊東一典、橋本昌巳、香山瑞恵、非接触センサを用いた動的トランスオーラルシステムによる音像定位、日本音響学会講演論文集(秋) 831-834、2013.9.25、豊橋

大谷 真、倉林宏明、伊東一典、橋本昌巳、香山 瑞恵、動的トランスオーラル再生による音像定位、電子情報通信学会技術研究報告、EA2013-58、2013.8.9、29-34、仙台

倉林宏明、大谷 真、伊東一典、橋本昌巳、香山瑞恵、頭部運動追従型トランスオーラルシステムにおけるクロストークキャンセラの数値的検討、日本音響学会講演論文集(春) 2013.3.13、837-838、八王子

大谷 真、伊東一典、Kinectと角度センサを用いた6自由度仮想聴覚ディスプレイ、日本音響学会講演論文集(秋) 2012.9.19、853-854、長野

大谷 真、平原達也、両耳間時間差の周波数依存性の要因 -円板モデルによる検討-、日本音響学会講演論文集(秋) 2012.9.19、575-576、長野

平田史成、大谷 真、伊東一典、橋本昌巳、香山瑞恵、高精度に近接音像を呈示可能な動的聴覚ディスプレイの開発、日本音響学会講演論文集(春) 2012.3.13、923-924、横浜

大谷 真、平原達也、両耳間時間差の周波数依存性の成因 -数値解析編-、日本音響学会講演論文集(春) 2012.3.13、735-736、横浜

岩田詠史、大谷 真、伊東一典、橋本昌巳、香山瑞恵、耳介画像による頭部伝達関数推定に関する基礎的検討、日本音響学会講演論文集(春) 2012.3.13、929-930、横浜

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cs.shinshu-u.ac.jp/~otani/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大谷 真 (OTANI, Makoto)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号： 40433198