

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00242

研究課題名(和文) 個人の頭部伝達関数取得のためのプラットフォームの構築とその評価

研究課題名(英文) Development of platform for acquisition of individual Head-Related Transfer Functions and its evaluation

研究代表者

高根 昭一 (Takane, Shouichi)

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号：90236240

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、個人の頭部の3次元形状をデータとして得ることにより、個人の頭部伝達関数(Head-Related Transfer Function, HRTF)を得るためのプラットフォームを構築することを目的とした。反射のある音場におけるHRTFの計測手法について新しい方法を提案するとともに、3Dスキャナ、デジタルカメラと3Dプリンタを用いて個人の頭部形状を耳介部分も含めて精密に得られる手法を確立できた。それを用いて作成された複数被験者の頭部形状を測定対象として用いてHRTFを得た。頭部モデルによって実物に近いHRTFが得られたものの、被験者による精度の差があり課題が残された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

個人の耳介を含む正確な頭部形状を得るための手法を、3Dスキャナや3Dプリンタなどの機器を利用することで確立できたことには大きな学術的意味があると考えられる。ただし、本研究の現状での結論としては、そのことだけでは個人の頭部伝達関数を高い精度で得ることには必ずしもつながらないことも残念ながら明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：This research had its aims at construction of a platform for acquisition of individual Head-Related Transfer Functions (HRTFs) with possibly less physical load to the subject. Together with a new method for the measurement of HRTFs in sound field with reflection, a new platform for acquisition of human 3D head and pinna shapes was successfully constructed with a 3D scanner, a digital camera and a 3D printer. The HRTFs of multiple subjects were acquired by using their 3D models as outputs of the system. As a result, the acquired HRTFs from the 3D models were close to those from the real ones for some cases, but there remained some issues on the difference in accuracy of the HRTFs depending on the subjects.

研究分野：音響情報処理

キーワード：頭部伝達関数 HRTF 頭部インパルス応答 HRIR 主成分分析 3Dスキャナ 3Dプリンタ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 聴覚ディスプレイは、音環境を仮想的に生成するための技術あるいはそれを実装した装置の総称である。研究代表者は、その構成法の理論[1]や実装[2,3]について研究を行ってきた。聴覚ディスプレイの多くでは、その聴取者の頭部伝達関数(Head-Related Transfer Function, 以下HRTF)が必要となる。HRTFの学術的な定義を説明するための図が図1である。図1(a)において、被測定者の頭部がないときの、頭部中心相当位置の音圧を測定し、図1(b)のように測定された被験者の外耳位置での音圧との比( $H_E(z)=H_A(z)$ )をとる[4]。この定義から、HRTFは音源位置の関数となる。また、頭部や胴体などの形状の差に起因する個人性をもち、個人によるHRTFの特性の差異が主観的にも大きな影響を与えることが知られている[5]。このようなHRTFの合成に基づいた聴覚ディスプレイの原理は古くから知られている。しかし、3次元物体の表示を可能とする視覚ディスプレイなどと比べて普及度は低いと言わざるを得ない。その原因は、HRTFの個人性に起因する音の空間知覚の個人による変化の全容を把握し、それに対応したシステムの存在しないことにあるといえる。

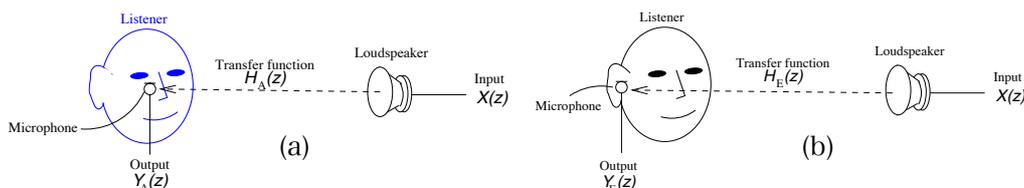


図1 頭部伝達関数の定義

(2) 以上の問題の最も直接的な解決法は、個人のHRTFを、その音源位置による変化を含めて正確に取得できる技術を確認することである。個人のHRTFを得る方法は、大きく3つに分類される。第一の方法は、測定に基づくものである。すなわち、上記の定義に基づき、HRTFを音源から両耳までの伝達特性として測定する。この方法では、個人のHRTFが直接得られるのが利点であるが、その一方で、自由音場(反射のない音場)や様々な位置に音源を配置する装置が必要となる。また、測定を通じて被測定者にかかる身体的負担が極めて大きい。このような測定に基づく取得法の問題点への対処を背景として、第二、第三の方法の研究が進められている。これらは、頭部などの3次元計測結果をデータとした数値解析に基づく方法[5,6]と、多数の被験者で測定されたHRTFのデータベースを利用したフィッティングに基づく方法[7,8]である。第二の方法については、境界要素法に基づいてHRTFを得るためのソフトウェアが開発される[9]など、手法の応用としての進展が見られる。また、個人のHRTFを推定した結果を測定結果と比較すると、推定精度が比較的高いことが知られている[10]。その一方で、第二、第三の方法では、得られたHRTFの主観評価の面で個人に適合しているかは十分に明らかとされていない。

(3) 以上の背景と問題意識から、研究代表者は測定に基づく個人のHRTFの取得手法の研究を行ってきたが、測定にかかる時間と測定を行う場所の制約を完全に払拭するのは困難である。時間に関しては、測定時に必ず音源から音を放射し、その応答を両耳相当位置で観測しなければならない。自分のHRTFを得たいと思う者がそのような音を意図的に出すときに、自ずとその場所は限られてしまう。この問題の解決のために、本研究では、上記の第二に基づく方法に着目する。この方法については研究代表者も研究を行ってきた。境界要素法などによる計算をパソコンで行うと長時間を要し、その点では時間的な制約を完全には取り除けない。本研究では、近年の3Dスキャナ、3Dプリンタの発展を踏まえ、個人の頭部・胴体の3次元形状を3Dプリンタで出力したいわゆる「そっくりさん」を用いて、HRTFを測定することを考える。

### 2. 研究の目的

(1) 以上の背景を踏まえて、本研究では、個人の頭部の3次元形状をデータとして得ることにより、個人のHRTFを得るためのプラットフォームを構築することを目的とする。様々な研究により、現状ではそのための要素技術は整いつつある。しかし、それらを統合して、個人のHRTFがどの程度の精度で得られるのかを検討した研究は少ない。そのことから、単にプラットフォームを構築するだけでなく、その評価も行う。

### 3. 研究の方法

(1) 複数の被験者のHRTFを取得した。その際、HRTFの測定方法について基礎的な検討を加えた。

(2) 上記で測定した被験者の一部について、その頭部の形状を3Dスキャナで測定した。HRTFの特性に大きな影響を与える耳介部分の形状については、平成29年度は3Dスキャナで取得することが困難であったため、アルジネート印象材と石膏を用いて耳型を採取した。平成30年度は、高解像度のデジタルカメラと専用のソフトウェアを用いて、耳介を多方向から撮影した映像から3次元形状を構成することを試み、耳介形状の特徴をもれなくとらえつつ形状の精度を最大で数mm程度とした計測を行うことができた。得られた耳介の形状を3Dスキャナによって得られた頭部形状と結合して、複数被験者の頭部形状を全て3Dデータとして得た。

(3) 上で得た形状データを3Dプリンタで出力した。これを以下では「頭部モデル」と呼ぶこととする。頭部モデルをHATS(Head and Torso Simulator)および複数被験者について得て、HATSや被験者で測定したHRTFとそれらの頭部モデルを用いて測定したHRTFを比較して、頭部形状を基に個人のHRTFを得ることの有効性を検証した。

(4) 3Dプリンタで頭部モデルを出力せず、データをもとに境界要素法によってHRTFを数値的に推定する方法について検討した。

#### 4. 研究成果

(1) 本研究で用いる被験者のHRTFを精密に測定するためには、無響室のような反射のない音場が必要とされる。しかし、無響室においてさえも音源を設置するための機材などの影響で反射の影響は避けられない。そこで、反射の影響を低減して個人のHRTFを得るための方法について検討を行った。その結果、研究代表者が着目してきた主成分分析を有効に適用できることがわかった。図2は、測定したHRIR(頭部インパルス応答)に反射が含まれている例である。このような応答に対して主成分分析に基づく直接音成分の推定手法を適用することで、図3のSDR(Signal-to-Distortion Ratio)に示されるように、音源と同じ側にある耳(図3では右耳)に対応するHRIRについては高い精度で得られることが明らかとなった。

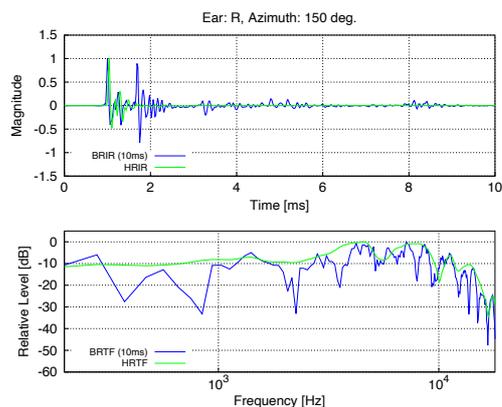


図2 HRIR(頭部インパルス応答)に反射の含まれるものの例

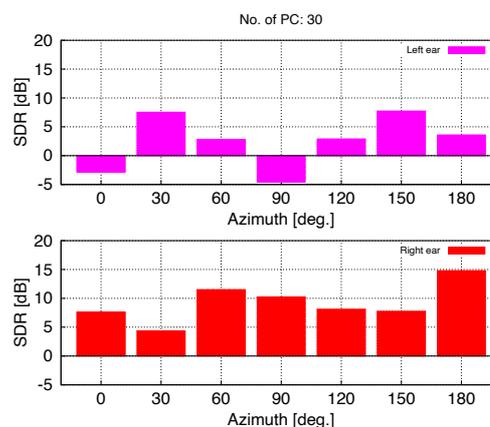


図3 主成分分析に基づく直接音成分推定手法で得られたHRIRのSDR(Signal-to-Distortion Ratio)の方位角による変化

(2) 複数被験者のHRTFを水平面について測定するとともに、それらの頭部形状を3Dスキャナを用いて得た。平成29年度の時点では、3Dスキャナで精密な耳介形状を得ることは困難であることがわかったため、耳介形状はアルジネート印象材および石膏を用いて得ることとした。それを3Dプリンタで出力した頭部形状に接着することで被験者の頭部形状を再現したモデルを得た。これを「頭部モデル」と呼ぶことにする。例として、HATSについて得られた頭部モデルを実物との比較で図4に示す。この他に3名の被験者の頭部モデルを作成した。個人情報保護の見地から、ここでは被験者のモデルは掲載しないこととした。平成30年度は、被験者の耳型を得ることは被験者にかかる身体的負担が大きいため、高解像度のデジタルカメラを用いて多方向(約120方向)から耳介を撮影した映像を用いて専用のソフトウェア(PhotoScan)により耳介の3次元形状を合成した。その結果得られた頭部モデルを図5に示す。頭部および耳介の概形の寸法の誤差は最大で5mm程度であった。



図4 HATSの実物(左)および耳型を装着した頭部モデル(右)



図5 耳介の3次元形状も3Dプリンタで出力した頭部モデル(HATS)

(3)各被験者およびそれらに対応する頭部モデルのHRTFを測定し、それらの比較を通じて、個人の頭部形状から身体的負担を軽減してHRTFを取得する方法の有効性を検証した。

①音源方向は水平面内に設定し、正面を0°とし、頭部を上からみて右が90°、後ろが180°、左が270°とした。頭部モデルはHATSに取り付けて測定した。すなわち、胴体部はHATSのものを利用した。図4、5に載せたHATSのHRTFの例(30°, 左耳)を図6に示す。これらを見ると、実物および頭部モデルのHRTFともにピークや高さやディップの深さに若干の違いはあるものの、概形としてはよい一致が見られるといえる。他の音源方向についても同様に概形はよい対応が見られ、頭部モデルの作成を通じて得られたHRTFが有効であるといえる。

②同様に、被験者についても同様にHRTFの比較を行ったものが図7である。これを見ると、概形としてよい一致のみられる音源方向がある一方で、全体的にはHATSのものよりも差が大きかった。この原因として考えられるのは、HATSの素材が3Dプリンタで用いられたPLA樹脂に近かったこと、被験者にはあった頭髪がHATSにはなかったこと、頭部モデルの胴体部を用いたことなどが考えられる。HRTFにおける胴体の影響は比較的低周波数領域に表れることが知られており、被験者とその頭部モデルのHRTFの違いが比較的高い周波数成分に表れていることから、胴体の影響とは異なると考えられる。被験者とその頭部モデルの胴体部以外の違いの影響を今後詳しく検討する必要があると考えている。

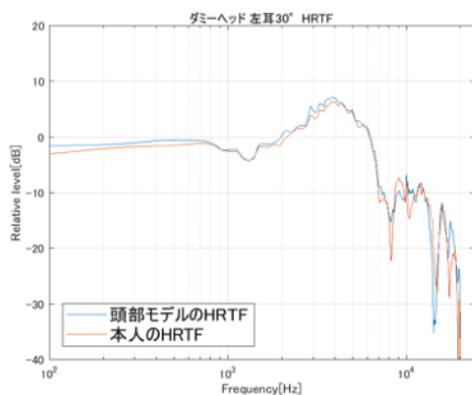


図6 頭部モデルと実物のHRTFの比較(音源方向：30°, 左耳, HATS)

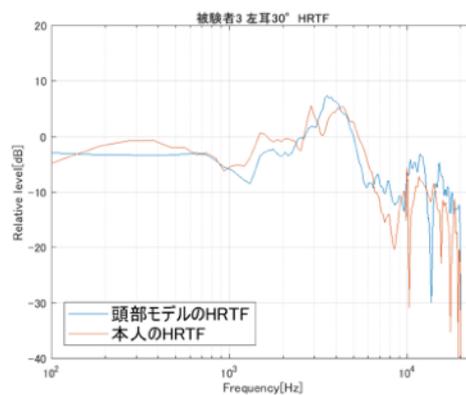


図7 頭部モデルと実物のHRTFの比較(音源方向：30°, 左耳, 被験者3)

この部分については、今後学術論文として公表する予定である。

(4) 3Dプリンタを用いて頭部モデルを出力せず、得られた3次元形状をそのままデータとし境界要素法を用いたHRTFの推定を試みた。ただし、境界要素法による計算を行う過程で、利用するコンピュータの計算能力の限界から、データ中のメッシュの数を大幅に減少させて、粗い形状のデータを用いざるを得なかった(約45万→約1.2万)。そのため、HATSのHRTFの推定結果は、図8のように実際とは大きく異なるものとなった。現状のコンピュータの計算能力を十分に発揮できるように、境界要素法による計算プログラムを改良することが課題として残された。

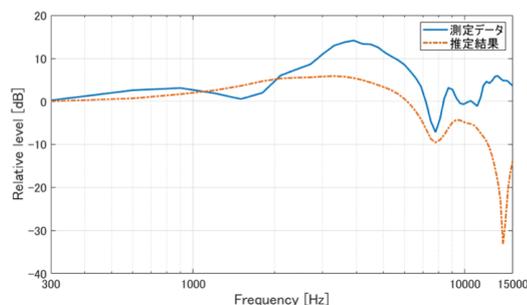


図8 境界要素法によるHRTFの推定結果と実物のHRTFの比較(音源方向：0°, 左耳, HATS)

#### <引用文献>

1. S. Takane et al., “new theory for high definition virtual acoustic display named ADVISE,” Acoust. Sci. & Tech., 24(5), 276-283(2003).
2. S. Takane et al., “Elementary real-time implementation of a virtual acoustic display based on ADVISE,” Acoust. Sci. & Tech., 24(5), 304-310(2003).
3. 渡邊貫治, 及川祐亮, 佐藤宗純, 高根昭一, 安倍幸治, “GPU を用いた複数の仮想音源を動的に提示可能な聴覚ディスプレイシステムの開発及び性能評価,” 日本音響学会誌, 71(11), 571-580(2015).
4. たとえば, J. Blauert, Spatial Hearing (MIT Press, Boston, 1999).
5. たとえば, S. Takane et al., “Numerical estimation of individual HRTFs by using BEM,” Proc. ICA(2004).
6. S. Takane et al., “Objective and subjective evaluation of numerically estimated HRTFs,” J. Acoust.

- Soc. Am., 120(5), Pt. 2, 3214-3215(2006).
7. S. Takane et al. 1 “A database of Head-Related Transfer Functions in whole directions on upper hemisphere,” *Acoust. Sci. & Tech.*, 23(3), 160-162(2002), <http://www.ais.riec.tohoku.ac.jp/lab/db-hrtf/>
  8. Y. Iwaya et al., “Individualization of Head-Related Transfer Functions by using a tournament-style listening test of virtual sound images,” *Proc. 9th WESPAC*(2006).
  9. H. Ziegelwanger et al., “MESH2HRTF: An open-source software package for the numerical calculation of Head-Related Transfer Functions,” *Proc. 22nd ICSV*, 1-8(2015).
  10. P. Mohktari et al., “Comparison of Simulated and Measured HRTFs: FDTD Simulation Using MRI Head Data,” *Proc. 123th AES Convention*, Paper No. 7240, 1-8(2007).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 高根昭一, 高橋幸太, 安倍幸治, 渡邊貴治, 西口正之	4. 巻 11B-3
2. 論文標題 3Dスキャナ・3Dプリンタを利用した個人の頭部伝達関数の取得	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第23回バーチャルリアリティ学会大会論文集	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 高根昭一	4. 巻 3-6-20
2. 論文標題 頭部伝達関数の音源位置による変化の複素対数領域における主成分分析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本音響学会春季研究発表会講演論文集	6. 最初と最後の頁 305-308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shouichi Takane	4. 巻 8
2. 論文標題 Estimation of individual Head-Related Impulse Responses from impulse responses acquired in ordinary rooms based on the spatial Principal Components Analysis	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing	6. 最初と最後の頁 1405-1419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Shouichi Takane
2. 発表標題 Spatial Principal Component Analysis of Head-Related Transfer Functions using their complex logarithms with unwrapping of phase
3. 学会等名 International Congress on Acoustics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shouichi Takane, Keisuke Sakamoto, Koji Abe, Kanji Watanabe, Masayuki Nishiguchi
2. 発表標題 Subjective evaluation of Head-Related Transfer Functions reconstructed with Spatial Principal Component Analysis and their domain dependency
3. 学会等名 International Congress on Acoustics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	安倍 幸治  (Abe Koji)	秋田県立大学・システム科学技術学部・助教  (21401)	
研究協力者	渡邊 貫治  (Watanabe Kanji)	秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授  (21401)	
研究協力者	西口 正之  (Nishiguchi Masayuki)	秋田県立大学・システム科学技術学部・教授  (21401)	