

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330202

研究課題名(和文) TPOを選ばない個人の頭部伝達関数の取得方法の研究

研究課題名(英文) Research on acquisition of individual Head-Related Transfer Functions without any limitations due to TPO

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、個人の頭部伝達関数を時(T)、場所(P)、状況(O)の制限なく取得する手法の確立を目的とした。本研究で蓄積された複数人の頭部伝達関数(HRTF)の測定データと、公開されている個人のHRTFのデータセットを用いて、個人のHRTFを主成分分析に基づいて推定する方法を提案した。その際、主成分分析を行うHRTFの領域は、周波数振幅あるいは複素周波数スペクトルを対象にすることで、主成分分析によるデータ量削減の効果が大きいことを示した。これらは、HRTFの取得におけるTとOの制限を緩和するものといえる。PとOに関しては、HRTF測定ソフトウェアを開発したが、その成果の公表は現在進行中である。

研究成果の概要(英文)：This research has its aims at acquisition of individual Head-Related Transfer Functions (HRTFs) without any limitation due to Time(T), Place(P), and Occasion(O). By using data of the HRTFs acquired in the affiliation of principal investigator and an open dataset of the HRTFs, the principal investigator proposed a new method for estimation of individual HRTFs based on the Principal Components Analysis (PCA). He also indicated that the PCA whose domain is set to frequency amplitude or complex frequency spectrum brings about the most compact representation of the spatial variation of HRTFs. These findings have their effects for mitigating the limitations from the T and the O. As for the limitation from the P and the O, he developed a software for measurement of individual HRTFs. Publication of this achievement is now in progress.

研究分野：音響情報処理

キーワード：頭部伝達関数 TPO HRTF 主成分分析 周波数スペクトル ソフトウェア

1. 研究開始当初の背景

(1) 音環境を仮想的に生成するための技術あるいはその技術を実装した装置は聴覚ディスプレイと呼ばれ、研究代表者の高根は、その構成法の理論や初歩的な実装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、聴取者個人の頭部伝達関数(Head-Related Transfer Function, 以下HRTFと書く)が必要となる。HRTFは音源位置によって変化し、頭部や胴体などの形状の差に起因する個人性をもつ。一方、HRTFあるいはそのフーリエ逆変換に相当する頭部インパルス応答(Head-Related Impulse Response, HRIR)を利用して、ホームシアターのような限定的な聴取状況ではあるものの、聴覚ディスプレイとして動作するソニーのVPT(Virtual Phones Technology)などが製品化されている。ただし、VPTを搭載した製品は、不特定多数の利用を考えていながら、使用されているHRTFもしくはHRIR(両者はそれぞれ周波数特性、時間応答に相当するので、以後HRTFと書いたときはHRIRも指すものとする)は特定のもので、聴取者ごとに特性を調整する機能はない。そのため、この製品で自然な音の聞こえが実感できる聴取者がいる反面、音の聞こえる位置が不自然に移動するなど、支障の生じる聴取者も現れるといえる。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ものの、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が低いのは、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が大きな要因といえる。

(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。この方法では、本人の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。測定に基づく取得法の問題点への対処を背景として、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、多数の被験者で測定されたHRTFのデータベース(DB)を利用したフィッティングに基づく方法が第2、第3の方法として研究されている。しかし、いずれの方法も、得られたHRTFの主観評価の面で正確さが保証されているとは言えず、個人のHRTFの取得法として、現状で最も信頼できるのは、測定に基づく方法であると言える。

(3) 測定に基づく方法で個人のHRTFを得ることの問題点は、T(Time)・P(Place)・O(Occasion)の制約としてとらえることができる。すなわち、上述の被測定者にかかる

負担は時間の制約としてみることができ、自由音場を必要とするといったことは、空間の制約である。さらに、個人を限定せず誰でも自分自身のHRTFが得られるようにするためには、システムの利用に対する制約も存在し、これは、TPOのいずれにも関連する。このうち、空間の制約については、反射や雑音の存在する空間での測定に基づく個人のHRTFの推定について継続的に研究しており、物理的精度の面ではその有効性や限界が明らかになりつつあるが、主観評価についてはまだ十分に明らかとはなっていない。システムの利用に関する制約については、研究代表者のものも含め、これまでの多くの研究のほとんどが、個人のHRTFを高い精度で得ることに主眼を置いているものであり、未着手の分野であるといえる。

2. 研究の目的

(1) 以上の背景で述べた様々な制約と精度との関係を踏まえて、個人のHRTFを、測定に基づいてできる限り簡単に取得する方法の確立を本研究の目的とする。さらに、ある聴取者が自分自身のHRTFを得られることを重視する。すなわち、TPOを選ばず聴取者が自らHRTFを得られる方法とシステムを提供することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 本研究で研究する測定に基づくHRTFの取得手法の有効性を検討するための基礎データとして、できる限り多くの被験者のHRTFのデータを全周方向について測定することを目指した。この際、測定に用いる音源について基礎的な検討を行った。

(2) 上記で得られたHRTFのデータに基づき、個人のHRTFの音源位置による変化をできる限り少ないパラメータでモデル化することを検討する。本研究では、様々な先行研究のアプローチの中から、主成分分析(PCA)に基づく方法に着目した。モデル化を行うことで、HRTF取得におけるTとOの制限を緩和するための手掛りが得られると推測した。

(3) HRTF取得におけるPとOの制限を小さくするために、反射の存在する空間において測定されたインパルス応答から、個人のHRTFを推定する方法を検討した。従来から検討していた自己回帰(AR)モデルに基づく方法と、PCAに基づく方法を検討した。

(4) 上記の成果を含め、一般の室内において測定されたインパルス応答から個人のHRTFを得るためのソフトウェアを開発した。使用端末としてタブレット型のパソコンを想定した。

4. 研究成果

(1) 個人のHRTFを測定する上で、どのような音源を用いるべきかが問題であることがわかった。これは、本研究を進める上ではじめて発見された検討事項である。市販で入手できる

様々な型、構造のスピーカを用意し、それらを用いて得られたダミーヘッドのHRTFを比較した。距離が1m以上離れていれば、ブックシェルフ型の2ウェイのスピーカでも得られるHRTFの精度上の問題は小さいが、大型のマルチウェイスピーカはHRTFの測定に用いることができないことがわかった。

(2) 個人のHRTF取得におけるTとOの制限を克服するために、主成分分析(PCA)に基づいてHRTFの音源方向による変化をなるべく少ないパラメータで表す方法について検討した。

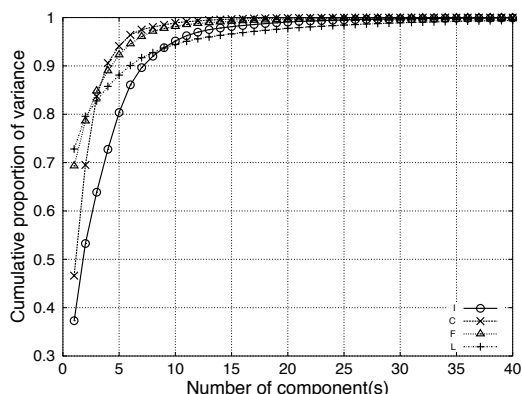


図1 HRTFのPCAにおける累積寄与率の領域による比較

① KEMARのHATSのHRTFを710の音源方向について測定したMITのHRTFデータベースを対象に、音源方向による変化をHRTFのどの領域でPCAを行うかの検討を行った。先行研究では、HRTFを対象にしたPCAは、HRIR(Case I)、周波数振幅スペクトル(Case F)、位相を含む複素周波数スペクトル(Case C)、対数周波数振幅スペクトルの対数(Case L)の4つを対象にした研究があり、それぞれの結果を比較した研究はなかった。そのため、この研究では、この4領域でPCAを行ったときのデータの削減性能について比較を行った。

②PCAにおいてデータのもつ散らばりをどの程度カバーできるかの基準として用いられる累積寄与率を上記の4つの領域で行ったPCAの結果について比較したのが図1である。これを見ると、横軸の主成分数に対して累積寄与率が最も大きいのは複素スペクトルのCase Cであることがわかる。表1に累積寄与率の値を超える最少の主成分数を示す。これを見ても、Case Cが他の場合に

表1 累積寄与率を超える最少の主成分数の領域による比較

Case	累積寄与率			
	0.9	0.95	0.99	0.999
I	8	10	20	39
C	4	6	11	20
F	5	7	14	31
L	6	11	32	78

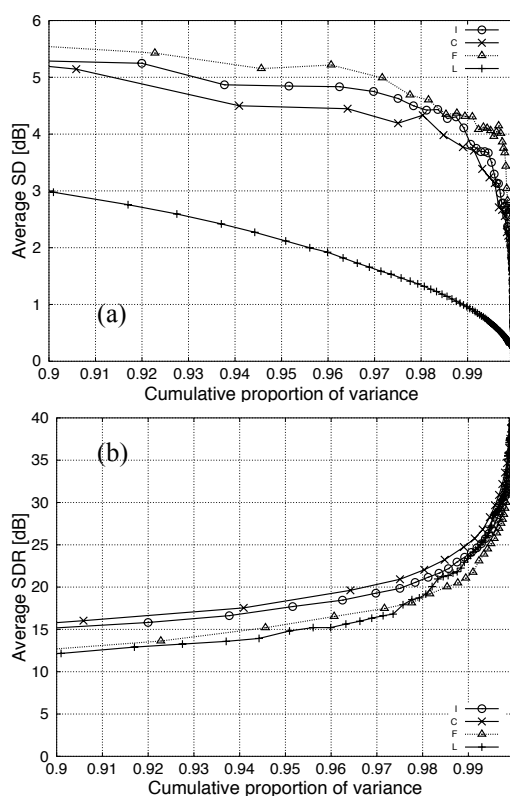


図2 累積寄与率と(a)平均SDおよび(b)平均SDRの変化の領域による比較

比べて最も小さいことがわかる。

③しかし、累積寄与率は、PCAによるHRTFの合成精度の絶対的な指標とはならない。それを示したのが図2である。周波数領域の精度の指標であるSD(Spectral Distortion)と時間領域の精度であるSDR(Signal-to-Distortion Ratio)の空間平均値をPCAを行う領域間で比較したもので、SDは0dBに近い方が、SDRは大きい方が精度のよいことを表す。図2(a)から、周波数領域の精度の最も高いのはLでFが最も低いことがわかり、図2(b)からは、時間方向の精度はIが最も良く、Lが最も低いといえる。

④このことから、SDとSDRを4つの領域でPCAを行った全ての音源方向について計算して精度を評価することにした。その結果、累積寄与率が0.999を超える最少の主成分数は、全ての領域でSDRが20dB以上となり、精度の高さと対応のとれることがわかった。そのときの条件から、最も少ない主成分でHRTFの空間的变化を表せるのは、HRTFの最小位相近似が許容できるのであればF、最小位相近似をしないのであればCであることがわかった。

⑤この成果については、海外の学術論文誌に掲載された。このような比較研究はこれまでなかったため、少なくない海外の研究者から参照されている。この研究を進める中で、新しいPCAの方法を考案するに至ったので、学術論文誌において公表する予定である。

⑥この研究では、累積寄与率が比較的高く、HRTFの合成精度もかなり高いところでの議

論が主であった。しかし、Case Lでは、主成分数が比較的小さいところで、周波数領域の精度が他の領域に比べかなり小さいことが図2(a)からわかる。このような部分を含め、PCAで合成されるHRTFが主観的にどの程度なのかを検討することが今後の展望として挙げられる。

(3)一般の室内で測定されたインパルス応答を用いた主成分分析に基づく個人のHRTFの推定を検討した。この検討は、個人のHRTFの取得におけるPとOの制限を緩和するためのものである。

①この方法の原理は次のとおりである。まず、多くの被験者がHRTFを全周方向について測定された既存のHRTFデータセットを用いてPCAを行い、主成分を得る。次に、ある被験者について測定された反射を含むインパルス応答から、直接音成分とみなせるものを残し、あとは切り取る。その残された部分に最もフィットする各主成分への重みを算出し、それをもとに切り取られた部分の応答を得る。

②この方法で得られたHRTFとHRIRの例を図3に示す。図中のNcは、直接音成分として用いたサンプル数を表しており、30ポイントでは元の応答とほぼ一致しているといえる。

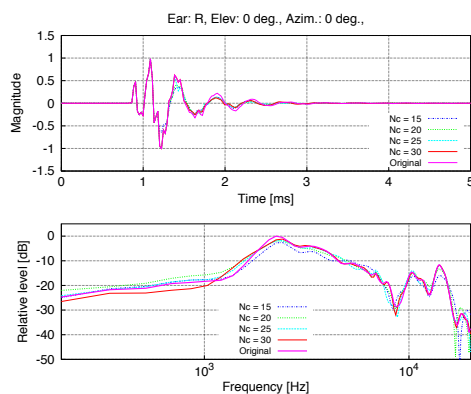


図3 提案手法で推定されたHRTFとHRIRの一例(音源方向：方位角0°，仰角0°)

③SDとSDRを全音源方向についてみたものが図4である。これを見ると、横軸の方位角が270°の付近では精度が低下していることがわかる。この方向は、音源に対して耳が逆側となるところで、HRTFのもつエネルギーが相対的に小さいために精度が低下すると考えられる。しかし、その他の方向では、比較的高い精度が実現できており、推定手法が有効であると結論づけた。

④反射のある一般の室内で得られたインパルス応答から個人のHRTFを推定する方法を検討した研究例は他になく、着眼は独創的であるといえる。研究室におけるHRTFの計測では、被験者の頭部を壁面から十分に離すなどの方策で反射の影響を抑え、HRTFをその測定結果で代用するといったことはよく行われているが、本研究は、そのような壁面による影響を考慮することなく一般の室内で測定され

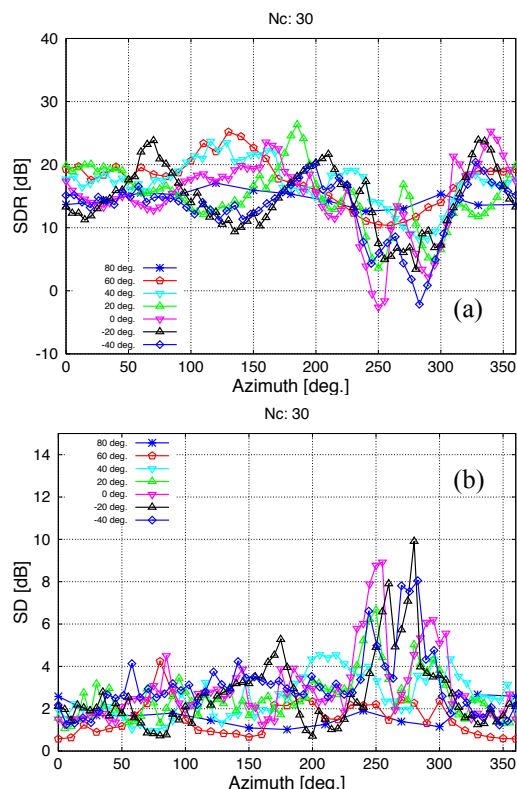


図4 提案手法で推定されたHRTFとHRIRの(a) SDRと(b) SD(Nc: 30)

たインパルス応答からHRTFを得られる方法であることに意義がある。

⑤推定されたHRTFが元のHRTFと主観的な差があるかどうかを確認する必要がある。また、様々な一般の室内における実証実験を進めていく必要があると考えている。

(4)上記の手法において、あらかじめ準備すべき主成分をどの程度のデータ量のHRTFから求めればいいのかについても検討を行った。①その結果の一例を図5に示す。横軸は、主成分ベクトルの作成に用いたデータ量を被験者の数で表したもので、縦軸はそれぞれSDRとSDを表す。これを見ると、データ量を増やすことによる精度の改善は小さいこと、1名分のデータでもある程度の精度が実現できること、10名分程度のデータがあれば精度は安定することがわかった。

②数名分のHRTFから主成分を求め、それをもとに個人のHRTFを推定することで、ある程度の推定精度が得られることが示唆された。(5)上記の研究成果を含め、個人のHRTFを場所と状況の影響を受けずに取得できるソフトウェアを開発した。タブレット端末を用いたもので、タブレット端末に装着されているジャイロセンサを用いた簡易な位置決めを行う。この成果については、現在公表の準備中である。

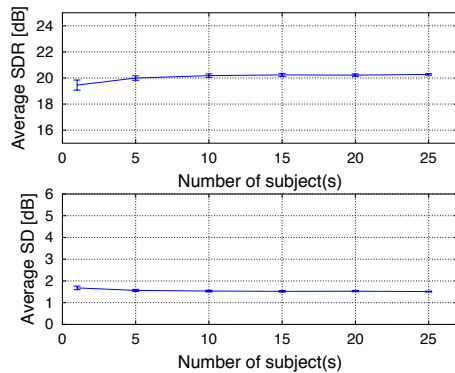


図5 主成分を求めるためのデータ量と精度 (SDR, SD)の関係(Nc: 30)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 2 件)

- ① Shouichi Takane, Effect of domain selection for compact representation of spatial variation of Head-Related Transfer Function in all directions base on Spatial Principal Components Analysis, 査読あり, Applied Acoustics, 101, 2016年, 64-77, DOI:10.1016/j.apacoust.2015.07.018
- ② Shouichi Takane, Koji Abe, Kanji Watanabe, Sojun Sato, Influence of loudspeaker systems on acquisition of Head-Related Transfer Functions, 査読なし, Proc. 135th AES Convention, EB115, 2013年, 1-4

〔学会発表〕 (計 5 件)

- ① Shouichi Takane, Estimation of individual HRIRs based on SPCA from impulse responses acquired in ordinary sound field, 139th Convention of Audio Engineering Society, 2015年10月30日, Jacob Davits Convention Center (ニューヨーク(アメリカ))
- ② 高根昭一, 反射を含むインパルス応答と主成分分析を用いた個人の頭部伝達関数の推定 -必要な頭部伝達関数のデータ量に関する検討-, 日本音響学会, 2015年9月17日, 会津大学(福島県会津若松市)
- ③ 高根昭一, 反射を含むインパルス応答と主成分分析を用いた頭部伝達関数の推定 -個人性の影響に関する検討-, 日本音響学会, 2015年3月17日, 中央大学後楽園キャンパス(東京都千代田区)
- ④ 高根昭一, 反射を含むインパルス応答と主成分分析を用いた頭部伝達関数の推定の試み, 日本音響学会, 2014年9月4日, 北海学園大学(北海道札幌市)
- ⑤ 高根昭一, 安倍幸治, 渡邊貫治, 佐藤宗純, 頭部伝達関数の測定におけるスピーカの構造の影響に関する検討, 日本音響

学会, 2013年9月25日, 豊橋技術科学大学 (愛知県豊橋市)

6. 研究組織

(1)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