

Title	立体音響構成のための頭部伝達関数のモデリング
Sub Title	Modeling of head-related transfer functions for three-dimensional sound
Author	足立, 修一(Adachi, Shuichi) 丸田, 一郎(Maruta, Ichiro)
Publisher	
Publication year	2015
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2014. )
JaLC DOI	
Abstract	<p>前方や後方, 上下などのさまざまな方向からの音を再現する立体音響を実現するためには, 人間の頭部伝達関数を推定する必要がある。従来, 音響信号処理の分野では, TSP(Time Stretched Pulse)信号を用いて頭部伝達関数を求めていたが, この方法では多方向の頭部伝達関数を一つひとつ測定しなければならず, 測定に長時間を有していた。本研究では, 制御工学の分野で研究が進められている多変数システム同定理論を用いて頭部伝達関数を推定する新しい方法を提案した。57方向の三次元空間多方向同時推定実験を行い, 得られたデータを用いて頭部伝達関数のモデリングを行い, 提案法の有効性を確認した。</p> <p>We proposed a method of simultaneous estimation for head-related transfer functions (HRTFs) using a multi-input single-output (MISO) system identification method. A set of multi-directional HRTFs can be regarded as an MISO system, and identified as an MISO finite impulse response model by applied the least squares method. The effectiveness of the proposed methods was verified through the simultaneous estimation experiments of 57 direction HRTF sets of the dummy head and sound localization experiments of 16 subjects. Through the experiments it is verified that the HRTFs estimated simultaneously were nearly equivalent to HRTFs measured one direction by one direction.</p>
Notes	研究種目 : 基盤研究(C) 研究期間 : 2012 ~ 2014 課題番号 : 24560552 研究分野 : 工学
Genre	Research Paper
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_24560552seika">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_24560552seika</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560552

研究課題名(和文)立体音響構成のための頭部伝達関数のモデリング

研究課題名(英文) Modeling of head-related transfer functions for three-dimensional sound

## 研究代表者

足立 修一 (ADACHI, SHUICHI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：40222624

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：前方や後方、上下などのさまざまな方向からの音を再現する立体音響を実現するためには、人間の頭部伝達関数を推定する必要がある。従来、音響信号処理の分野では、TSP(Time Stretched Pulse)信号を用いて頭部伝達関数を求めていたが、この方法では多方向の頭部伝達関数を一つひとつ測定しなければならず、測定に長時間を有していた。本研究では、制御工学の分野で研究が進められている多変数システム同定理論を用いて頭部伝達関数を推定する新しい方法を提案した。57方向の三次元空間多方向同時推定実験を行い、得られたデータを用いて頭部伝達関数のモデリングを行い、提案法の有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：We proposed a method of simultaneous estimation for head-related transfer functions (HRTFs) using a multi-input single-output (MISO) system identification method. A set of multi-directional HRTFs can be regarded as an MISO system, and identified as an MISO finite impulse response model by applied the least squares method. The effectiveness of the proposed methods was verified through the simultaneous estimation experiments of 57 direction HRTF sets of the dummy head and sound localization experiments of 16 subjects. Through the experiments it is verified that the HRTFs estimated simultaneously were nearly equivalent to HRTFs measured one direction by one direction.

研究分野：工学

キーワード：制御理論 システム同定

### 1. 研究開始当初の背景

人間の両耳に入射する音には、到来方向、音源から両耳までの距離や、音が伝搬する音場の影響などといった空間的な情報が含まれており、それらは音源の方向や距離を知覚するのに役立っている。このような音の空間情報を高精度に再現することができれば、任意の方向や距離に音像を定位できるような立体音響システムの実現が可能になる。音の空間情報を高精度に再現する方法の一つとして、人間の頭部伝達関数 (Head Related Transfer Function: HRTF) をあらかじめ測定しておき、任意の音源信号にたたみ込んだ後に、ヘッドホンで提示するという方法が知られている。

頭部伝達関数は、自由空間における音源と受聴者の外耳道入口に設置した受音点の間の伝達関数であり、その周波数特性は、音源から両耳に直接到達する音や、耳介や頭部、肩などで反射・回折した音などによって決定される。すなわち、受聴者の体と頭部の三次元形状によってその周波数特性が変化するので、頭部伝達関数は個人性を有する。また、頭部伝達関数は音源の方向によっても変化するので、上下左右などのすべての方向についての頭部伝達関数が必要となる。

従来、頭部伝達関数は TSP (Time Stretched Pulse) 信号を用いて測定されてきた。しかしこの測定法では、多方向の頭部伝達関数を一つずつ測定する必要があり、測定に長い時間を要することが問題であった。また、測定されたそれぞれの方向に対応する多数の頭部伝達関数の数は、8 個から多いものでは 100 個を超えることもあり、それらを立体音響の合成に用いることは一般に困難であった。

従来の TSP 法による頭部伝達関数の測定の問題点を解決するために、TSP 法を改良した研究が提案されているが、多くの方向 (たとえば、水平 72 方向、垂直 13 方向) の頭部伝達関数を同時に測定することは困難であった。

以上のように、これまで国内外で提案されてきた頭部伝達関数の求め方は、インパルス応答や周波数応答の「測定」に基づくものがほとんどであった。そのため、頭部伝達関数を測定しようとする、被験者は長時間 (場合によっては 90 分以上) 同じ姿勢のまま、測定実験を受けなければならなかった。これは被験者にとっても苦痛であるし、長時間の実験中に頭部が動いたりして、正確な測定が難しかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、制御工学の分野で研究されている多変数システム同定法を用いて頭部伝達関数を推定する方法について検討することを目的とした。特に、システム同定を行う際に重要である、システム同定入力的设计法について検討し、多入力システム同定のための新しい同定入力設計法を提案することをめざした。また、スペクトルキューと呼ばれ

る頭部伝達関数の特徴量に着目し、パラメトリック頭部伝達関数を用いた頭部伝達関数の推定法について検討した。

今後、より豊かな高臨場感音響を実現するためには、聴取者の個人性に適応的に対応できる音響システムの開発が重要である。そのためには、短時間で聴取者の頭部伝達関数を推定する技術が必要になる。特に、テレビへの応用を考えたとき、現在は 5.1 チャンネル方式のように、スピーカを前後左右に配置して高臨場感を実現しているが、頭部伝達関数を高精度に推定する技術が確立されれば、個人個人の特性に合わせて、前面だけに設置されたスピーカだけを用いて前後左右から聞こえてくるような音を再現することが可能になる。

### 3. 研究の方法

本研究ではつぎの 4 点に注力した。

- (1) 多方向のモデリング: 水平 24 方向の頭部伝達関数の同定実験を行い、予測誤差法と呼ばれるシステム同定法を適用する有効性を示してきたが、この方向を最終的には 72 方向まで増やして実験を行った。また、水平方向だけでなく、垂直方向についても同時に頭部伝達関数の同定実験を行った。このように、水平・垂直方向の数を増加させてシステム同定実験を行い、頭部伝達関数を高精度に同定することをめざした。この問題を通して、音響システムをモデリングするためのシステム同定実験の計画法についての、より一般的な理論の構築を行った。
- (2) 多入力同定信号の選定: 多入力システム同定実験を行うためには、互いに無相関な入力信号を複数個準備する必要がある。これまで制御工学の分野における多変数同定実験では、多くても 6 程度の入力数が多く、24 入力や 72 入力といった多数の同定入力を作成する理論的な研究はあまり行われてこなかった。本研究では、音響系のモデリングのための無相関な M 系列信号の作成法について多変数システム同定実験に対して有効な多数の入力信号の作成法に関する理論研究を行った。
- (3) スペクトルキューを利用したモデリング: より多くの方向に対する頭部伝達関数を同定することは重要な課題であるが、得られたモデルを利用する立場に立つと、より簡単なモデルで表現できたほうが便利である。そこで、スペクトルキューと呼ばれる音響系の特徴量を用いたモデリング法について検討した。
- (4) 音像定位実験による検証: 提案する方法により得られた頭部伝達関数を用いて立体音響信号を作成し、音像定位実験を行い、得られたモデリング結果の有効性を検証した。

#### 4. 研究成果

- (1) NHK 放送技術研究所において, 24, 57, 72 方向の三次元空間多方向同時同定実験を行い, 得られたデータを解析した。音源から片耳までを多入力 1 出力システムとみなして, 予測誤差法の一つである最小二乗法を用いて頭部伝達関数を推定した。推定の結果, 音源から反対側の耳までの推定精度が少し不足することがわかり, 頭部伝達関数の線形補間を用いた正則化項を最小二乗法に導入した「正則化最小二乗法」の適用を行い, 精度の向上を図った。
- (2) 多入力システム同定実験を行うための入力信号の設計法を検討し, 新しい入力信号設計法を提案した。この新しい入力信号を用いて, 再度, 三次元空間多方向同時同定実験を行って, 得られたデータを解析した。その結果, 従来, われわれが提案していた入力を用いた場合よりも高精度な同定結果が得られることを確認した。この多入力システム同定入力の設計法は音響系のモデリングを目的としたものであるが, 一般的な多入力システム同定のための入力信号に関する新たな知見を得ることができた。
- (3) パラメトリック頭部伝達関数を用いた頭部伝達関数の推定方法について検討した。この方法は, 方向近くの手がかりであるスペクトラルキューと呼ばれる量に着目し, これをスペクトルのピークやノッチをパラメータで表現したパラメトリックモデルで推定するものである。この推定法を実験データへ適用し, その有効性を明らかにした。

#### 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4件)

M. Sugaya, K. Matsui, Y. Nakayama, and S. Adachi: Low-order Modeling of Head-Related Transfer Function for Binaural Reproduction, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.8, No.2, pp.108-113 (2015.3) 査読有

K. Matsui, S. Oishi, T. Sugimoto, S. Oode, Y. Nakayama, H. Okubo, H. Sato, K. Mizuno, Y. Morita, and S. Adachi: Binaural Reproduction of 22.2 Multichannel Sound with Flat Panel Display-Integrated Loudspeaker Frame for Home Use, 映像情報メディア学会誌, Vol.68, No.10, pp.J447-J456 (2014.10) 査読有

石川健太郎, 徳住ゆりか, 丸田一郎, 足立修一, 松井健太郎, 安藤彰男: システム同定理論を用いた頭部伝達関数の三次

元空間多方向同時推定, 日本音響学会誌, Vol.69, No.7, pp.321-330 (2013.7) 査読有

石川健太郎, 丸田一郎, 足立修一: L1 最適化を用いた循環構造を有するシステムのモデリング, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.6, pp.655-657 (2013.6) 査読有

[学会発表](計10件)

S. Kanai, K. Matsui, Y. Nakayama, and S. Adachi: Uncorrelated input signals design and identification with low-complexity for simultaneous estimation of hear-related transfer functions, 137th AES Convention, Los-Angeles, USA (2014.10)

K. Matsui, Y. Nakayama, M. Sugaya, and S. Adachi: Binaural reproduction over loudspeakers using low-order modeled HRTFs, 137th AES Convention, Los-Angeles, USA (2014.10)

S. Kanai, K. Matsui, and S. Adachi: Identification input design for simulatneous estimation of head-related transfer functions, SICE2014, Sapporo, Japan (2014.9.12)

M. Sugaya, K. Matsui, Y. Nakayama, and S. Adachi: Low-order modeling of head-related transfer functions for transaural systems, SICE2014, Sapporo, Japan (2014.9.12)

金井関利, 松井健太郎, 中山靖茂, 足立修一: 頭部伝達関数同時推定のための入力信号設計, 日本音響学会 2014 年秋季研究発表会, 北海学園大学 豊平キャンパス, 札幌, 北海道 (2014.9.4)

松井健太郎, 中山靖茂, 足立修一: 非負値行列因子分解のトランスオーラル再生への応用の一検討, 日本音響学会 2014 年秋季研究発表会, 北海学園大学 豊平キャンパス, 札幌, 北海道 (2014.9.4)

松井健太郎, 中山靖茂, 菅谷真帆, 足立修一: 低次 HRTF モデルを用いたトランスオーラル再生, 電子通信学会 応用音響研究会 (EA) / 日本音響学会電気音響研究会, 東北学院大学 多賀城キャンパス, 多賀城, 宮城 (2014.8.19)

金井関利, 足立修一, 松井健太郎, 安藤彰男: 正則化最小二乗法を用いた頭部伝達関数の多方向同時推定, 日本音響学会聴覚研究会 / 電子情報通信学会 応用音響研究会, 東北大学 電気通信研究所, 仙台, 宮城 (2013.8.9)

石川健太郎, 金井関利, 足立修一, 丸田一郎, 松井健太郎, 安藤彰男: パラメトリックモデルに基づく頭部伝達関数の推定, SCF13, 神戸, 兵庫 (2013.5.17)

石川健太郎, 丸田一郎, 足立修一, 松井健太郎, 安藤彰男: 予測誤差法を用いた

頭部伝達関数の多方向同時推定精度の検証，応用音響研究会，東北学院大学，仙台，宮城（2012.8.2）

〔図書〕（計1件）

足立修一，丸田一郎：カルマンフィルタの基礎，東京電機大学出版局（2012.10.10）

## 6．研究組織

### (1)研究代表者

足立 修一（ADACHI, Shuichi）  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号：40222624

### (2)研究分担者

丸田 一郎（MARUTA, Ichiro）  
京都大学大学院・情報学研究科・助教  
研究者番号：20625511

### (3)連携研究者

該当なし