

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06150

研究課題名(和文) 立体音響システムのための頭部伝達関数の多変数モデリングと制御

研究課題名(英文) Multivariable modeling of head-related transfer function and control systems design for three-dimensional sound system

研究代表者

足立 修一 (Adachi, Shuichi)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：40222624

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)：聴取者の前方や後方、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システム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。本研究では、多変数システム同定理論を用いて、頭部伝達関数を高精度に推定する方法について理論検討し、実データを用いてその有効性を確認した。つぎに、前方に設置された多数のスピーカを用いて、立体音響を実現するトランスオーラルシステムの構築について検討した。

研究成果の概要(英文)：This study addresses transaural sound reproduction over loudspeakers, which is a virtual realization of a three-dimensional audio. In order to construct the three-dimensional audio, it is necessary to estimate head-related transfer functions (HRTFs) of the listener. First, an estimation method of HRTFs using multivariable system identification theory is proposed, and its effectiveness is examined using experimental data. Second, using the estimated HRTFs, a construction method of the transaural system for the three-dimensional audio is studied. In particular, a design method of a stable feedforward controller based on model matching is proposed. Finally, the effectiveness of the proposed method is examined through numerical simulations.

研究分野：工学

キーワード：制御理論 システム同定 音響工学

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 人間の両耳で聞こえる音には、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、それらによって音源の方向や距離を人間が知覚することができる。このような音の空間情報を高精度に再現できれば、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を実現することが可能になる。そのためには、自由空間において、頭がない状態での頭部中心に相当する位置から頭外音源位置を経て両耳鼓膜位置もしくは外耳道入口までの伝達関数である頭部伝達関数 (Head Related Transfer Function: HRTF) を高精度に推定する必要があった。

(2) 頭部伝達関数の周波数特性は、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その周波数特性は依存するので、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大きく変化する。したがって、多方向から2つの外耳道入口までの多入力2出力システムを記述する頭部伝達関数を高精度で、かつ短時間で推定することが望まれていた。

(3) 頭部伝達関数には、両耳間時間差やレベル差、周波数特性上のスペクトルキュー（音像の定位知覚に寄与すると考えられているゲイン特性のピークやノッチ）など、音像の定位知覚に関する特徴量が含まれている。そのため、音源信号を頭部伝達関数でフィルタリングすることにより、任意の方向に音像を定位知覚させることができる。このように生成される立体音響信号をバイノーラル信号という。バイノーラル信号をヘッドホンにより提示する再生法をバイノーラル再生という。バイノーラル信号をスピーカで再生する方式をトランスオーラル再生という。トランスオーラル再生方式を実現するためには、モデル化誤差への対処などの解決すべき問題があった。

## 2. 研究の目的

(1) われわれは予測誤差法と呼ばれるシステム同定法を利用した頭部伝達関数の三次元空間多方向同時推定法を提案した。この方法は短時間での多方向同時測定に基づくので、従来法と同程度の精度を維持しつつ、被験者への負担が大幅に軽減された。しかし、同定精度向上のため

めに MIMO システムの同定における入力信号の最適選定法についての検討には着手できていなかった。これは MIMO システム同定問題における最適入力設計問題という理論的に意義の大きな問題であり、これを研究目的の一つとした。

(2) リビングで立体音響を楽しむ場合には、バイノーラル再生ではなく、トランスオーラル再生システムが望まれる。図1に示すようにトランスオーラルシステムでは、ヘッドホンと違って異なるスピーカからの音が影響するクロストークという問題が生じる。これまで、音響の分野では適応信号処理の技術を使って、主にフィードフォワードの考え方でこのクロストークに対処してきた。本研究では、頭部伝達関数のモデル化誤差に対処するため、フィードバック制御理論の分野で構築されたロバスト制御理論をこの問題に適用し、高臨場感をもつ立体音響の構築をめざした。

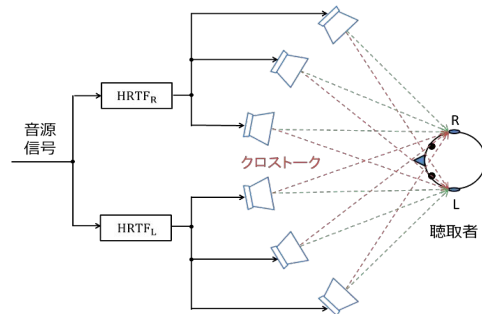


図1 トランスオーラルシステムの構成とクロストークの問題

## 3. 研究の方法

(1) 頭部伝達関数の MIMO システム同定のための最適入力設計: 申請者らは既に MIMO システム同定のための最適入力設計に関する研究を行っている。これらの研究では一つの M 系列信号から複数個の無相関な信号を生成する方法を提案した。本研究では、これらの結果を進めて、頭部伝達関数を推定するために最適な同定入力信号の設計法について検討する。特に、スペクトルキューと呼ばれる周波数領域の特徴点を精度良くとらえることができるようなスペクトル成分をもつ入力信号の設計について検討する。

(2) MIMO システム同定実験の実施: (1) で設計した同定入力を用いて、水平・垂直方向の合計 61 方向の頭部伝達関数のシステム同定実験を NHK 放送技術研究所で実施する(図2)。



図 2 頭部伝達関数の同定実験環境 (NHK 放送技術研究所)

- (3) MIMO システム同定によって得られたモデルの低次元化: MIMO システム同定によって得られる頭部伝達関数のモデルは高次であるため、フィードバック制御系を設計するためにはモデル低次元化を行う必要がある。頭部伝達関数にはスペクトルキューと呼ばれる周波数領域における特徴量があり、その情報を保存するモデル低次元化法の開発を目指す。さらに、最終的に得られた頭部伝達関数の性能を複数の被験者による聴覚実験を通して確認する。
- (4) トランスオーラルシステム構成のためのロバストフィードバック制御系の設計: スピーカシステムを用いて立体音響を実現する方法として、5.1 チャンネル、あるいは 22.2 チャンネルといった多数のスピーカを部屋に配置する方法が主流である。われわれは、図 3 に示すようにテレビ画面の外側に多数のスピーカを配置してトランスオーラルシステムを構成する方法を検討している。このとき鍵となるのは、個人性などの不確かさを考慮した MIMO ロバストフィードバック制御系の設計であり、この課題について重点的に取り組む。



図 3 トランスオーラルシステムのためのスピーカ構成

#### 4. 研究成果

- (1) 2020 年開催の東京オリンピックに向けて 8K と呼ばれる映像技術の開発が進んでいる。それに呼応して音響の分野でも

22.2 チャンネルシステムなどによって、前方や後方、上下などさまざまな方向からの音を再現する立体音響のニーズが高まっている。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り、これは制御工学における多入力多出力 (MIMO) システム同定問題である。また、立体音響を実現するために適した MIMO フィードバック制御系の設計が必要になる。本研究では、音響システムを対象に実用的な MIMO システムのモデリングと制御系設計法を開発した。

- (2) 頭部伝達関数の多入力システム同定のための最適入力設計問題について検討した。一般的な MIMO システムの同定入力を、 $M$  系列に代表される二値系列から複数個の無相関な信号を作成する方法 (このように生成された信号は巡回シフト  $M$  系列と呼ばれる) について検討した。その結果、MIMO システムの共通極をもつモデルが巡回シフト  $M$  系列により同定可能となる条件を導き、そのパラメータ決定法も併せて導出した。
- (3) 実際に、頭部伝達関数のシステム同定実験を NHK 放送技術研究所で実施し、入出力データを収集し、そのデータに対してシステム同定法を適用して頭部伝達関数を求めた。
- (4) 得られた複数個の頭部伝達関数を用いて、立体音響を実現する MIMO フィードバック制御系を設計する方法を提案した。立体音響を実現する方法として、テレビ画面の外側にスピーカを複数個配置して、トランスオーラルシステムを構成する方法について検討した。このとき、鍵となるものは、多変数制御系を非干渉化するフィードバック制御の構成と、さまざまな不確かさに対処できるロバスト制御系の構成である。特に、線形行列不等式 (LMI) を用いたロバストフィードバック制御について詳しく検討し、新しい制御系の設計法を提案し、数値実験などを通してその有効性を確認した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5 件)

Shohei Mori, Masaki Inoue, Kentaro Matsui, and Shuichi Adachi: Model Matching Control for Binaural Reproduction Over Loudspeakers, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 査読有, Vol.11, No.3 (May 2018, to be published)

松井健太郎, 菅谷真帆, 足立修一: 出力追従制御を応用したトランスオーラル再生制御器の設計, 日本音響学会誌, 査読有, Vol.73, No.5, pp.281-290 (2017.5)

Sekitoshi Kanai, Maho Sugaya, Shuichi Adachi, and Kentaro Matsui: Low-Complexity Simultaneous Estimation of Head-Related Transfer Functions by Prediction Error Method, Journal of the Audio Engineering Society, 査読有, Vol.64, No.11, pp.895-904 (Nov. 2016)

松井健太郎, 大石 諭, 杉本岳大, 森田雄一, 足立修一: 22.2 マルチチャンネル音響の枠組スピーカによるバイノーラル再生法の開発, 映像情報メディア学会誌, 査読有, Vol.70, No.1, pp.J37-J46 (2016.1)

金井関利, 松井健太郎, 中山靖茂, 足立修一: 入力設計の改良による頭部伝達関数の多方向同時推定の高精度化, 日本音響学会誌, 査読有, Vol.71, No.7, pp.316-318 (2015.7)

[学会発表](計 8 件)

松井健太郎, 伊藤敦郎, 森 翔平, 井上正樹, 足立修一: 出力追従制御を応用したトランスオーラル再生制御器の緩和処理に関する一検討, 電気音響研究会 / 応用音響研究会, 日本音響学会, 石垣島南の美ら花ホテルミヤヒラ (2018.3.19)

松井健太郎, 伊藤敦郎, 森 翔平, 井上正樹, 足立修一: 出力追従制御を応用したトランスオーラル再生制御器の緩和処理法, 日本音響学会 2017 年秋季研究発表会, 愛媛大学 (2017.9.25)

Shohei Mori, Masaki Inoue, Kentaro Matsui, and Shuichi Adachi: Stable inversion design for binaural reproduction over loudspeakers, 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA2017), Hawaii, USA (2017.8.26)

森 翔平, 井上正樹, 松井健太郎, 足立修一: トランスオーラル音場再生のための安定逆システムの設計, SICE 第 4 回制御部門マルチシンポジウム (MSCS2017), 岡山大学 (2017.3.7)

Kentaro Matsui, Maho Sugaya, and Shuichi Adachi: A design method of transaural reproduction controller based on H-infinity norm constraint, SICE2016, Tsukuba, Japan (2016.9.23)

森 翔平, 松井健太郎, 井上正樹, 足立修一: 線形行列不等式を用いた再生音場の逆システムの設計, 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '16), 京都 (2016.5.27)

Maho Sugaya, Kentaro Matsui, Yasushige Nakayama and Shuichi Adachi: Method of Designing Inverse System for Binaural Reproduction over Loudspeakers by Using Diagonalization Method, IEEE Multi-Conference on Systems and Control (MSC2015), Sydney, Australia (September 21-23, 2015)

松井健太郎, 金井関利, 菅谷真帆, 足立修一: 頭部伝達関数の共通極・零モデリング法の一検討, 応用音響研究会, 東北大学電気通信研究所 (2015.8.3)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

井上 正樹 (INOUE MASAKI)  
慶應義塾大学・理工学部・助教  
研究者番号: 80725680

### (3) 連携研究者

該当なし