

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H00811

研究課題名(和文) 超臨場感実現のための音響環境総合シミュレーションシステム開発

研究課題名(英文) Development of Comprehensive Acoustic Environment Simulation System for Realization of Ultra-realistic Presence

研究代表者

尾本章(Omoto, Akira)

九州大学・芸術工学研究院・教授

研究者番号：00233619

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,700,000円

研究成果の概要(和文)：音場再生システムの総合的な性能向上を目指し、24本の鋭指向性マイクアレイと同数のスピーカで構成されるシステムを題材にして検討を行った。ここでは、A) 再生に物理的な根拠があること、B) 受聴者の存在など不可避な外乱に対して頑健であること、C) 付加的な演出を受け入れる余地があること、D) 映像情報との親和性が高いことの4条件を抛り所とし、物理的な測定と人の主観評価を併用して性能評価を実施した。結果として、収録時に信号の性質を限定するビームフォーミングの有効性が大きいことが明らかになった。またコンテンツとの相性はあるものの、映像情報により没入感が大きく向上することなどが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案したシステムは、鋭指向性のマイクとほぼ同方向に配置したスピーカの組み合わせで実現されるものであり、直感的にもわかりやすい構成である。更に球面調和領域での指向性制御という比較的新しい信号処理技術を導入することで、高い基本的性能を持つシステムを構築することができた。また録音等で用いられる機材を導入することで、高品質の収録再生が可能となっている。聴感上の印象もよく、結果として工学的デザインおよび芸術的なデザインの両立に成功していると考えている。これは複数の企業の研究所等において同様のシステムが構築され、社会実装されていることから明らかである。

研究成果の概要(英文)：In order to improve the overall performance of a sound field reproduction system, a system consisting of 24 narrow directional microphone arrays and the same number of loudspeakers was investigated. The performance of the system was evaluated using both physical measurements and human subjective evaluations, based on the assumption that the performance depends on the following four conditions: A) physical basis for the reproduction, B) robustness against inevitable disturbances such as the presence of listeners, C) room for additional effects, and D) high compatibility with video information. The results show that beamforming, which limits the nature of the signal during recording, is very effective. In addition, it was found that video information significantly improved the sense of immersion. However, there was some compatibility with the content.

研究分野：建築音響学

キーワード：音場再生 鋭指向性マイク ビームフォーミング

## 1. 研究開始当初の背景

音響学の分野において、コンサートホールなどの音場の特徴を別の場所で精密に再生する技術は「音場再生」あるいは「音場再現」と呼ばれている。特に物理的な原理に基づいた正しい手法が幾つか提案されており、再生精度の検証も詳細に行われている。これらの手法では臨場感の高い聴取環境の再現が出来るが、研究申請時および研究開始当初において、主たる成果はヘッドホン、イヤホンでの聴取に特化された場合がほとんどであった。またスピーカによる音提示の試みも散見されるものの、未だデモンストレーションなどで体験されることに留まる場合が多かった。更に聴取者が積極的に音場の特徴を変更して仮想音場を体験するなど、高い自由度で臨場感を超える感覚を提供する、総合的な再生システムの構築には至っていない状況であった。

申請者も幾つかの音場再生手法に取り組み、成果を公表してきた<sup>2)</sup>。その過程で多くの問い合わせをもらい、活用方法の議論までは進むが、具体化した例は無く、他の研究機関、メーカー等においても同様な状況であった。精密な再生には多くのマイクロホンやスピーカとある程度の計算を必要とするという不可避な制限も大きな要因であるが、音場再生技術が、正確さを追求するがゆえに、学術的・実験的な領域の微細な事項の検討に留まり、映像分野の VR, AR と融合した超臨場感<sup>3)</sup> 向上のための有効な道具にまで成熟していないことの証左であると考察していた。特に本来、スピーカを用いた音場再生は音の方向情報を含む「音場」を再現できるため、拡張現実等との融合に関してはヘッドホンを用いた局所的な再生方式より有利である。しかしその具現化に対して、いま一步踏み込んだ検討が行われていないと感じていた。このような背景をもとに、本研究を立案した。

## 2. 研究の目的

### (1) 当初設定した目的・目標

本研究では、映像の分野が先行している VR, AR などを通じた超臨場感の実現に音が貢献できる幅の広さを明らかにしながら、従来の音場再生システムを拡張した、高精度かつ自由度の高い総合的な音響環境シミュレーションシステムを構築することを目的に設定した。システムとしては、スピーカを用いる形態を前提とした。この目的達成のために、工学的なデザイン、使い勝手のデザインという二つの項目に関して、以下のような達成すべき具体的目標を設定した。

- ・**工学的なデザイン**: マイク、スピーカの組み合わせ方法を始めとして、これまでに実績のある境界音場制御<sup>2)</sup>などをベースに、十分な性能を発揮できる信号処理方法を選定し、実装すること。
- ・**使い勝手のデザイン**: 専門家が特殊な環境で計算処理を行うことなく利用できるように、コンテンツ収録から再生、さらに自由度の高い演出の導入までを、一連のワークフローとして整理すること。

### (2) 性能向上に不可欠な 4 項目の設定

これらの目標は、研究を推進するに伴って、システムの総合的な性能を決定する以下の 4 つの項目での性能向上という、より具体的かつ有効な目標へと変化し、集約されることとなった。

- A) 音場の再生のための信号処理の手法は、何らかの物理的な原理に基づくこと。
- B) 聴取者の存在など、様々な外乱に頑健な再生を実現できること。
- C) 再生の過程で、何らかの演出を導入できる自由度を有すること。
- D) 映像情報との親和性が高い再生手法であること。

主として大学院生との共同作業によって研究を推進したが、いずれの成果も上記 A)~D) に位置づけるような整理を行うこととした。A), B) は工学的な性能に対応し、C), D) は芸術的な表現力と言うことができる。これらを両立できるシステムの構築を試みることになる。

## 3. 研究の方法

### (1) 収録・再生のプラットフォームと基本的な再生手法

図 1 に示すように、水平角 45 度ごと、さらに仰角も 45 度ごとに配置した 24 チャンネルの鋭指向性マイクアレイと、同数のスピーカをやはり水平角 45 度ごと、高さ方向に 3 層配置したスピーカアレイの組み合わせを検討のためのプラットフォームとした。従前の科研費研究(基盤(B) 25282003 及び挑戦的萌芽 26560012)において製作したシステムを発展させたものである。このシステムでは収録するマイクと再生するスピーカが同数で特に水平角で同一のため、収録した音を対応する配置のスピーカからそのまま再放射する方法を基本的な考え方とした。この手法を「録って出し」と称している。マイクは鋭指向性であるが、特に低周波数においてその性能は十分とはいえず、当然近接したマイクに同じ音が収録され、再生の際に低域が過剰となり、定位に悪い影響が生じることが予備的な検討で明らかになっていた。そのために、特に低域の整理(指向性のスリム化とも解釈できる)を行うことが、信号処理を導入する主たる意義である。



図1: 収録・再生のプラットフォーム (実際のシステム構築の際に用いた CAD の出力)

## (2) 検討項目

上記の項目 A), B) に関しては、音を収録・再生する際に、これまでに実績のある複数種類の信号処理を施し、その効果について物理的測定を通して検証することで検討を行った。評価に関しては、特に研究室で開発したマイクアレイを用いた波面の観測や、ダミーヘッドマイクによる両耳での収録信号比較、さらにホール音場などで用いられる物理指標の再現性能による定量的な評価を基本とした。あわせて、音を聴取してその定性的・質的な評価を行う主観評価の手法も大いに活用することとした。

音の収録・再生には、24本のマイクで直接的に音を録音する方法と、原音場で24のインパルス応答を測定しておき、適当なドライソースと畳み込むことで再生音を生成する方法がある。

後者は特にオーディオ装置を伴う場合など、音源の位置や機能が限定されている場合には有効である。これらのいずれにも有効な処理手法を模索することとした。

また特に A) に関連した内容として、音響測定に適した環境の再現も試みた。具体的には吸音材料などの性能測定に対して有効な乱入射条件の再現や、特定の斜め方向からの入射の再現などである。再現の対象を人が音を聴く環境に限定しおらず、本研究の特色の一つである。

項目 C) に関しても、信号処理との相性は重要であるが、演出の必要性や種類は個別の事例に大きく依存するため、実践的な応用を視野に入れて、実務者からの助言などを可能な限り取り入れて検討を行うこととした。このために学会発表やデモンストレーションなどを通して広くプロモーションを心がけた。

D) に関しては、特に 360 度円周映像との親和性を題材とした検討を行うこととした。当初、学内の他研究室の協力の下、音と映像の基礎的な親和性の検討などを行い、研究期間の後半には自ら映像提示システムを構築し、撮影、音の収録から再生までのワークフローの開発を試みた。

## 4. 研究成果

### (1) 工学的デザインに関して

鋭指向性マイクアレイで収録した信号に対して、境界音場制御、高次（混合次数）アンビソニックスや球面調和関数展開を応用したビームフォーミングなど、数種類の信号処理手法を適用し、再生性能の物理的検証とともに、主観評価などを通して、コンテンツの内容との相性も含めて詳細に検討を行った。物理的な性能評価においては、いずれの手法も大差は観測されず、主観評価においては、むしろ再生コンテンツの潜在的な周波数特性、音源の移動の度合いなどとの相関が高い傾向であった。

これらの検討の結果、球面調和関数展開を応用したビームフォーミングによって低域の指向性をスリム化し、高域に関しては「録って出し」のまま用いるハイブリッドな再生手法が、性能、音質、自由度の高さにおいて優位であると結論づけている。検討項目の A), B), 及び C) も関連しているが、一定の物理的性能が担保できること、「収録時の音」に対して処理を施す方法であり、再生時の多チャンネル信号の位相関係などを厳密に制限しないため、いわゆるスウィートスポットを明確に定義せず、必要な音の方向情報を最低限再生する方式であると解釈できる。図2はマイクアレイで収録した波面の様子であり、様々な再生方式の再生度合いを比較している。図中の Direct は録って出し、BoSC(576, 104) は境界音場制御で数字は用いた逆フィルタの数、3H2V-HOA は混合次数アンビソニックス、一番右側の Beamforming がビームフォーミングによる方式であり、広い周波数帯域において高い再生精度を確保していることが確認できる。

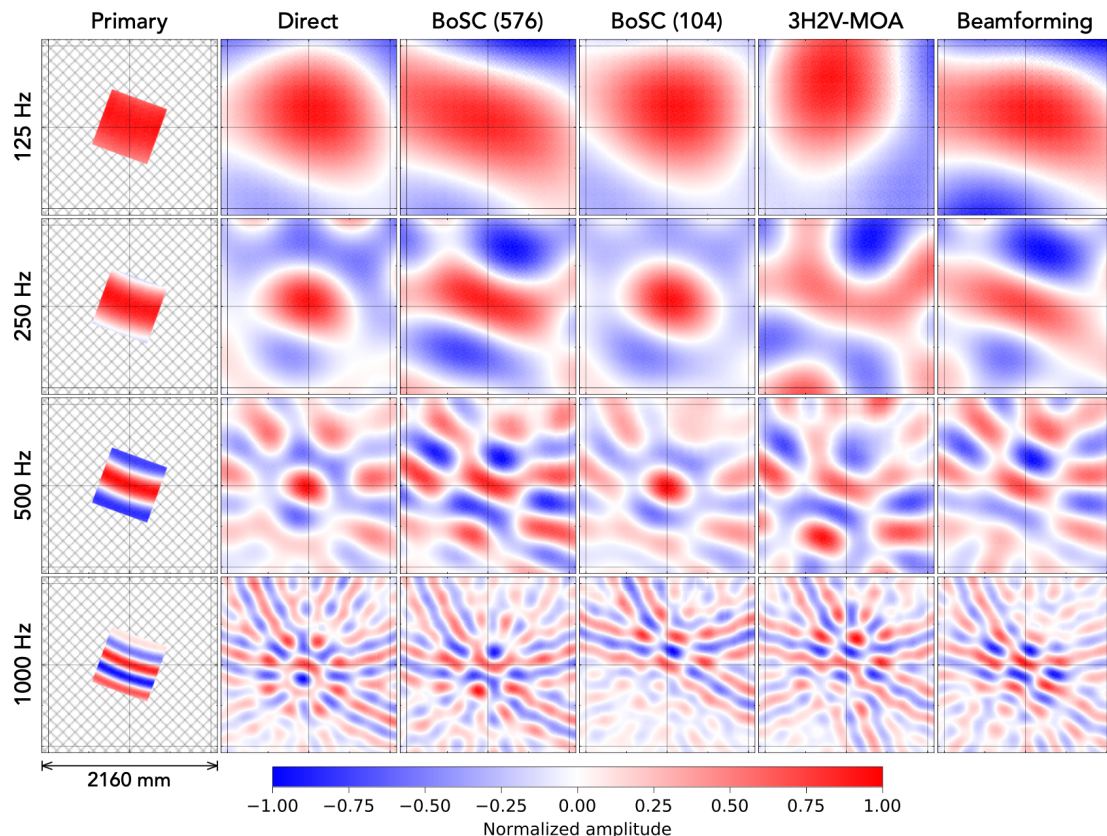


図 2: 様々な再生方式による波面の再現の様子

特に騒音環境の再現などの際には、特定の方向の音のレベルや周波数特性を変化させた場合のシミュレーションも全体の音場を破綻させることなく行うことが可能であり、自由度の向上が見込まれることも採用する原因である。またビームフォーミング処理は、インパルス応答に対しても同様に行うことができ、適用範囲も広い。

具体的検討項目 D)の映像情報に関しては、360 度全周パノラマ画像を円筒状のスクリーンに隙間なく投影する方法を採用した。これにより、いわゆる臨場感や没入感と呼ばれる感覚が増大することも明らかになった。同時に、コンテンツの表現内容に応じた使い分けなどの課題も明らかになり、いくつかの項目は継続的な検討課題としている。

#### (2) 使い勝手のデザインについて

上記(1)のビームフォーミングを実施するためには、あらかじめマイクを特定の角度に向けた際の特性を精密に測定しておく必要がある。しかし、一度測定を行ってフィルタを生成しておけば、処理自体は既存のプログラミング環境などで比較的容易に適用でき、使い勝手としては非常に良い。また収録・再生までの一連の流れは、市販の DAW (Digital Audio Workstation)を用いて実現した。これは広く一般的に短時間で習得可能な収録・再生環境であり、提案する手法を社会実装するためには重要な項目である。

360 度パノラマカメラの映像情報を円筒に投影するにあたっては、研究室において開発した手法で、半自動化したワークフロー<sup>4)</sup>を確立することができた。4 台のプロジェクタを用いたステイッチングを自動で行う画期的な手法であり、今後のさらなる発展が期待できる成果である。

#### (3) 成果の社会実装について

本研究期間中、共同研究やそれに類する協力関係を通して、我々の提案するシステムと手法を体験していただく機会を持つことができた。結果的に我々と同様の 24 チャンネルの収録再生システムが、複数の企業の研究機関等で構築されている。学術雑誌に掲載されるのとは異なり、広く公知となるものではないが、実質的な社会実装が行われていることになる。再生音の質とともに、システム構成の簡易さ、取り扱いの容易さが評価された結果であると認識している。

#### 《参考文献》

- 1) 尾本 章, “音場再生技術について,” 日本音響学会誌, **67**, 520-525, 2011.
- 2) A. Omoto, et. al., “Sound field reproduction and sharing system based on the boundary surface control principle,” *Acoust. Sci. & Tech.*, **36**, 1-11, 2015.
- 3) 超臨場感産学官コミュニケーションフォーラム <http://www.urcf.jp>
- 4) 柏崎紘, “鋭指向性マイクロホンアレイを用いた音場再生システムに関する研究,” 九州大学博士論文, 2021,3.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Akira Omoto, Hiroshi Kashiwazaki	4. 巻 41
2. 論文標題 Hypotheses for constructing a precise, straightforward, robust and versatile sound field reproduction system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 151-159
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1250/ast.41.151	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 -

1. 著者名 Hiroshi Kashiwazaki, Akira Omoto	4. 巻 39
2. 論文標題 Sound field reproduction system using narrow directivity microphones and boundary surface control principle	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 295-304
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1250/ast.39.295	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31件（うち招待講演 7件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 原量子, 岩見貴弘, 柏崎紘, 尾本章
2. 発表標題 一般的なスピーカを用いた楽器の指向性模擬の試み -球面調和関数領域におけるフィッティング手法の提案-
3. 学会等名 日本音響学会建築音響研究会資料（資料番号AA 2021-05）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩見貴弘, 尾本章
2. 発表標題 再生核を用いた瞬時到来パワー予測手法の検討
3. 学会等名 日本音響学会2021年春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柏崎紘, 尾本章
2. 発表標題 360 度パノラマ映像と融合した音響コンテンツ制作
3. 学会等名 日本音響学会2021年春季研究発表会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原量子, 岩見貴弘, 柏崎紘, 尾本章
2. 発表標題 一般的なスピーカを用いた楽器の指向性模擬の試み -スピーカ配置の検討-
3. 学会等名 日本音響学会2021年春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩見貴弘, 柏崎紘, 尾本章
2. 発表標題 多重極再展開法を用いた簡易音場再生手法のシミュレーション
3. 学会等名 日本音響学会2020年秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原量子, 岩見貴弘, 柏崎紘, 尾本章
2. 発表標題 球面調和展開係数のフィッティングによる 楽器の指向性を模擬した音源構築の試み
3. 学会等名 日本音響学会2020年秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡壁航平, 見上純一, 尾本章, 柏崎紘
2. 発表標題 24ch 3次元音場再生システムの正中面音像定位に関する検討 -簡易音場再生と境界音場制御の比較および音と映像のズレへの許容度-
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩見貴弘, 柏崎紘, 尾本章
2. 発表標題 高次球面調和スペクトル推定による境界音場制御と高次アンビソニックスの音場再現性能比較
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡壁航平, 神戸貴博, 尾本章
2. 発表標題 24ch 3次元音場再生システムの水平面音像定位性能に関する検討 -再生方式による検討・比較-
3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辺鐘言, 柏崎紘, 尾本章
2. 発表標題 方向別インパルス応答を用いた音場再生システムの性能評価
3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩橋佑弥, 尾本章
2. 発表標題 音源の指向性と方向別インパルス応答を用いたステージ音場の評価と再生の試み
3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柏崎紘, 岩見貴弘, 尾本章
2. 発表標題 鋭指向性マイクアレイによる高次アンビソニックス収録法の検討
3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野達也, 尾本章
2. 発表標題 多チャンネル音場再生システムを用いた吸音率測定に関する研究 -チャンネル数による性能の比較-
3. 学会等名 日本音響学会騒音振動研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Kashiwazaki, Akira Omoto
2. 発表標題 Attempt to improve the total performance of sound field reproduction system: Integration of wave-based methods and simple reproduction method
3. 学会等名 International Congress on Acoustics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Akira Omoto, Tomohiro Shimizu, Hiroshi Kashiwazaki
2. 発表標題 Sound field Reproduction using Convolving Directional Dry Signals and Directional Impulse Responses
3. 学会等名 International Symposium on Room Acoustics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Omoto, Hiroshi Kashiwazaki
2. 発表標題 Performance comparison of various strategies in 24-channel versatile sound field reproduction system
3. 学会等名 178th meeting of the Acoustical Society of America (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 見上 純一, 渡壁 航平, 尾本 章
2. 発表標題 3次元音場再生システムへの円筒型スクリーンを用いた360度映像付加システム構築と音像定位の主観評価ー
3. 学会等名 日本音響学会2018年度秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柏崎 紘, 尾本 章
2. 発表標題 鋭指向性マイクアレイを用いた音場再生システムの周波数特性補正
3. 学会等名 日本音響学会2018年度秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩見 貴弘, 尾本 章
2. 発表標題 境界音場制御における11ノルム正則化を用いた局所的逆問題解析
3. 学会等名 日本音響学会2018年度秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水 智寛, 尾本 章
2. 発表標題 方向別インパルス応答を用いた音場再生システムの提案と応用に関する研究
3. 学会等名 日本音響学会2019年度春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柏崎 紘, 尾本 章
2. 発表標題 鋭指向性マイクアレイを用いた音場再生システムの性能向上に関する研究 - 低域での高次アンビソニクス制御の試み -
3. 学会等名 日本音響学会2019年度春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 見上 純一, 渡壁 航平, 尾本 章
2. 発表標題 24チャンネル3次元音場再生システムの音像距離定位に関する検討 - 簡易音場再生と境界音場制御の比較および音と視覚刺激のズレの許容度 -
3. 学会等名 日本音響学会2019年度春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴田 翔馬, 尾本 章
2. 発表標題 多チャンネル音場再生システムにおける臨場感に寄与する要素についての検討
3. 学会等名 日本音響学会2019年度春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩見貴弘, 高橋亨太, 尾本章
2. 発表標題 境界音場制御における逆フィルタ設計手法に関する考察
3. 学会等名 日本音響学会 建築音響研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 尾本 章, 柏崎 紘
2. 発表標題 3次元音場再生システムの性能向上に関する試み
3. 学会等名 日本音響学会 建築音響研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Omoto, Hiroshi Kashiwazaki
2. 発表標題 Improvement of total performance of sound field reproduction systems
3. 学会等名 International Symposium on Universal Acoustical Communication 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Omoto, Hiroshi Kashiwazaki
2. 発表標題 Sound field acquiring and reproducing system for auditorium acoustics
3. 学会等名 InterNoise 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Kashiwazaki, Akira Omoto
2. 発表標題 Reduction of Number of Inverse Filters for Boundary Surface Control
3. 学会等名 AES International Conference on Spatial Reproduction - Aesthetics and Science -
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柏崎紘, 星加慧, 岩見貴弘, 尾本章
2. 発表標題 境界音場制御における逆フィルタ数の削減の試み
3. 学会等名 日本音響学会2017年秋季研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 尾本章
2. 発表標題 高臨場感オーディオと建築音響
3. 学会等名 日本音響学会2018年春季研究発表会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋亨太, 岩見貴弘, 尾本章
2. 発表標題 音場の逆フィルタ行列生成における正則化パラメータ決定法の提案-モロゾフの不一致原理の導入-
3. 学会等名 日本音響学会2018年春季研究発表会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

九州大学 研究者情報 <a href="https://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K002321/">https://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K002321/</a>
---

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
連携研究者	亀川 徹  (Kamekawa Tohru)  (70359686)	東京藝術大学・音楽学部・教授   (12606)	
連携研究者	中村 美亜  (Nakamura Mia)  (20436695)	九州大学・芸術工学研究院・准教授   (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------