

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12049

研究課題名（和文）走査型マイクロホンアレイを用いた三次元音場計測における位相同期

研究課題名（英文）Three-dimensional sound field measurement with moving microphone array

研究代表者

池田 雄介（Ikeda, Yusuke）

東京電機大学・未来科学部・准教授

研究者番号：80466333

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）：音場の可視化を目的とした少量のマイクロホン計測情報を用いた三次元音場情報の復元・補間手法の提案を行う。本研究では、複合現実技術を用いた手持ちマイクロホンアレイによる動的音場計測・可視化システムを構築し、特に直接音と初期反射音に対し、少数マイクロホンを用いた局所領域インパルス応答分布の可視化手法や等価音源法を用いた反射音分離可視化手法を確立した。さらに、計測情報に基づいた空間インパルス応答モデルの空間的に連続であるという特徴を利用した応用技術として、Pressure Matching法に基づいた多チャンネル音場制御手法の検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

音伝搬の物理的特性に着目し、少数計測データから位相情報を含む局所音場情報を復元する手法を確立し、複合現実技術を用いた音場の可視化システムを構築した。少数計測で三次元音場情報を取得可能なため、空間的な音情報が重要となる音響設計、音場制御、騒音対策、音響教育など音響工学分野に広く有効である。また、仮想現実技術を利用することで、音波面の情報を実空間に重畳するという音の新しい表現が実現され、音伝搬のより直感的な画期的なシステムへの応用が可能である。

研究成果の概要（英文）：We propose methods for restoring and interpolating three-dimensional sound field information using a small amount of microphone measurement information for the purpose of visualizing the sound field. In this study, a dynamic sound field measurement and visualization system using a hand-held microphone array based on mixed reality technology was developed, and a visualization method for impulse response distribution in local area using a small number of microphones and a visualization method of separated reflective-sound using the equivalent source method were established, especially for direct sound and early reflected sound. Furthermore, a multi-channel sound field control method based on the pressure matching method was studied as an application technique using the spatially continuous feature of the model of spatial impulse responses based on measurement information.

研究分野：音響信号処理

キーワード：室内インパルス応答 マイクロホンアレイ 音場可視化 音場計測 等価音源 複合現実技術

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

実音場において音の伝搬を知ることは、音響設計や音場制御などの観点から重要であり、特に音場の可視化は、音の空間情報を実空間の視覚情報に対応付けることで、音の伝搬の直感的な把握に役立つ。近年、複合現実技術の発展により、現実空間に情報を付加することが容易となり、音場の三次元的な情報の提示はより容易かつ重要となっていると言える。しかし、実測による音場の可視化を行うには、大規模なマイクロホンアレイが必要になるなど、多量のデータを計測する必要があり容易ではないという課題があった。また、少数のマイクロホンを用いて空間を走査するように動かしながら計測する手法も考案するが、音響インテンシティなどの定常的な音場やマイクロホンを高精度に動かすロボットが必要になるなど、動的な音場計測技術の研究には課題が多い。また、少数のマイクロホンアレイを用いた広範囲音場計測も、内挿法に関する研究が多く、外挿法に着目した研究が少ない。

2. 研究の目的

本研究では、効率的で直感的な三次元実音場の可視化を目的とした、少数マイクロホンを用いた位相情報を含む三次元音場情報の推定手法の提案と、それら推定手法を導入した複合現実を用いた三次元音場可視化システムの構築を行う。具体的には以下の3つを目的とする。(1) 拡張現実技術を用いた動的インパルス応答計測システムを構築し、その性能を明らかにする。(2) 音の物理モデルと幾何的情報を用いた室内インパルス応答の空間外挿手法の提案とその性能の検証、さらに可視化以外への三次元音場の計測手法の応用として、(3) 多チャンネルスピーカシステムを用いた音場制御への適用を検証する。

3. 研究の方法

少量の計測データから可視化に必要な音場情報の推定が可能かを明らかにするため、音場推定手法とその応用技術に大きく分けて、(1) 複合現実技術を用いた動的インパルス応答計測と可視化、(2) 室内インパルス応答の空間外挿、(3) 多チャンネルスピーカシステムを用いた音場制御への適用について取り組む。

(1) 複合現実技術を用いた動的インパルス応答計測と可視化

マイクロホンを動かしながら音場計測するには、マイクロホンの経路情報とマイクロホン信号を同期して記録する必要がある。そこで、複合現実技術と画像処理技術を用いたマイクロホンアレイ経路推定システムを構築する。構築したシステムとシミュレーションにより、音場の物理特性を用いた音場推定手法の確立を行う。また、計測した位相情報も含む音場情報を複合現実技術を用いて現実空間に重畳する音場可視化システムを構築し、有効性を確認する。

(2) 室内インパルス応答の空間外挿

複合現実技術の発展により、部屋の形状やマイクロホンやスピーカの位置情報の把握は容易となってきた。そこで、少数マイクロホンと幾何的情報（部屋の形状や計測器の配置）を用いた音場手法を確立する。シミュレーションによる手法の検討を実施し、その後、実測による手法の有効性の検証を実施する。

(3) 多チャンネルスピーカシステムを用いた音場制御への適用

音場を制御する手法として空間を離散化し、その空間点（制御点）において所望の音圧となるように制御を行う **Pressure Matching** 法が知られているが、実際にはスピーカから制御点までの伝達特性の計測が必要となるという問題があった。そこで、計測・推定された音場情報の可視化以外の応用として、多チャンネル音場制御システムへの適用を試みる。シミュレーションによる手法の確率を行い、無響室における実測実験によってスピーカ自体の反射の補正を試みる。

4. 研究成果

(1) 複合現実技術を用いた動的インパルス応答計測と可視化

音空間を少数のマイクロホンを用いて測定する方法の一つは、マイクロホンを動かしながら空間を走査して計測することである。しかし、このような方法は、音場が定常的な状態であることが前提となるため、これまで音響インテンシティのように時間平均を行う物理量を可視化する手法が提案され、時間変化を伴う音場を計測することは困難であった。

本研究では、繰り返し計測信号を再生し、マイクロホンを動かしながら録音された信号から、可視化に必要な空間上のグリッド点の室内インパルス応答を推定する動的音場計測手法に着目した。グリッド上の室内インパルス応答を復元するには、マイクロホン録音信号に同期したマイクロホンの経路情報が必要となる。しかし、マイクロホンを自由に走査しつつ、その経路情報を取得するには、ロボットなど大掛かりなマイクロホントラバースシステムが必要となり、一般的な空間を計測することは容易ではない。

そこで、まず、申請者らの開発した手持ちマイクロホンを用いた三次元音響インテンシティ可視化システムを拡張し、測定信号の再生とそれに同期したマイクロホン信号とマイクロホン移動経路の推定を行うシステムの開発を行った。マイクロホン位置推定には、Microsoft HoloLens を用いて Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) 技術と AR マーカを併用することで推定する。HoloLens は測定者が頭部に装着することが可能なため、小規模なシステム構成で、測定者が空間内を自由に動きながら計測する事が可能となった。

動的に録音された信号から、グリッド上の室内インパルス応答を復元するには、復元するにはグリッドの室内インパルス応答から経路上の室内インパルス応答を補間するという順問題を考え、その逆問題を解く必要がある。しかし、この問題は劣決定系のため、解が一意に定まらない。そこで、いくつかの手法で検討を実施した。

1つ目の手法は、室内インパルス応答の時間領域でのスパース性を利用した手法である。一般に初期インパルス応答は、時間領域上でスパースな信号となる。そこで、防音室など、比較的残響の少ない空間において、グリッド上の室内インパルス応答の復元を試みた。実験の結果から直接音の波面が観測されたものの、波面に誤差が大きく精度が不十分であることが分かった。

2つ目の手法は、波数領域上でのスパース性を利用した手法である。波動方程式に基づく、音波は波数領域（空間周波数領域）において、特定の領域にエネルギーが集中することが知られている。そこで、波数領域上でのスパース性を仮定し、問題を解く。シミュレーション実験の結果、マイクロホンを移動させた経路から推定することが可能であることが分かった（図1）。一方で、マイクロホン経路情報には誤差が含まれるが、誤差に弱いという課題があることや、波数領域上でのフィルタが最終的な波面の見えに大きく影響するという課題があった。

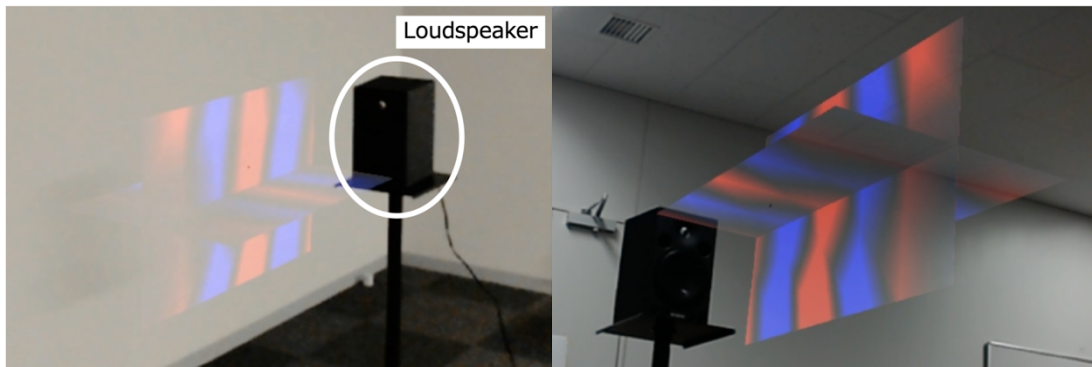


図1：複合現実技術を用いた動的インパルス応答計測による音場の可視化例

(2) 室内インパルス応答の空間外挿

位相情報を含む音場の可視化に必要なグリッド上の室内インパルス応答を計測する最も単純な方法は、すべての計測点にマイクロホンを設置することである。しかし、これは大規模なマイクロホンアレイを必要とするため、非常に計測コストが高く、また、そのようなマイクロホンアレイは、マイクロホンアレイ自体の反射を無視することができなくなるという課題もある。少数のマイクロホンアレイの情報から、マイクロホンの周囲領域のグリッド上のインパルス応答を推定可能であれば、マイクロホンアレイを順次動かしながら複数回計測することで、大規模な音場の可視化が可能となる。

そこで、本研究では、少数の近接したマイクロホンを用いた室内インパルス応答の空間外挿手法を確立する。特に SLAM 技術の発展により、室形状の推定が用意となってきたため、室形状情報やスピーカ位置、マイクロホン位置、マイクロホンアレイの形状といった事前に計測が容易な幾何的な情報を積極的に利用する。また、近年の Compressive Sensing の考え方にに基づき、音の物理モデルである点音源や平面波を基底として、マイクロホン信号をそれら物理モデルの線形和として表現し、点音源や平面波の空間上のスパース性を仮定することで、少ない計測情報からより広い範囲の音場を推定する。

実験では、無響室において直接音と床面からの反射音という音場に対して、三本のマイクロホンの情報から音場の可視化を行った。計測点よりも中心点から2倍離れた距離において、SNR 約 10dB、4倍離れた位置において SNR 8dB で推定可能であることが分かった。また、直接音と反射音を分離して可視化ができるという特徴があり、複雑な音場の可視化に非常に有効であることが示唆された。一方で、プリエコーと呼ばれる直接音より早いエイリアシングが確認でき、より高い推定精度が必要であることが分かった（図2）。

また、推定精度を悪化させる原因として、局所的に配置されたマイクロホンでは、スピーカの指向性を十分に推定できないという課題があることが明らかとなった。そこで、スピーカの指向性を事前にモデル化し、モデル化された直接音を用いた音場の推定手法を提案する。スピーカを取り囲む用に配置されたマイクロホンによって指向性を含むスピーカの放射特性を点音源の線形和で表現する。その後、実際の音場計測時にそれら点音源モデルをスピーカの位置付近に候補として複数方向、複数位置に配置し、実際にはスピーカの向きと位置は一箇所であるため、スパースな解を求める。シミュレーション実験の結果、従来手法と比較して約 10dB の改善が可能で

あること明らかとなり、より広い範囲の音場を正確に可視化することが可能となること明らかとなった。

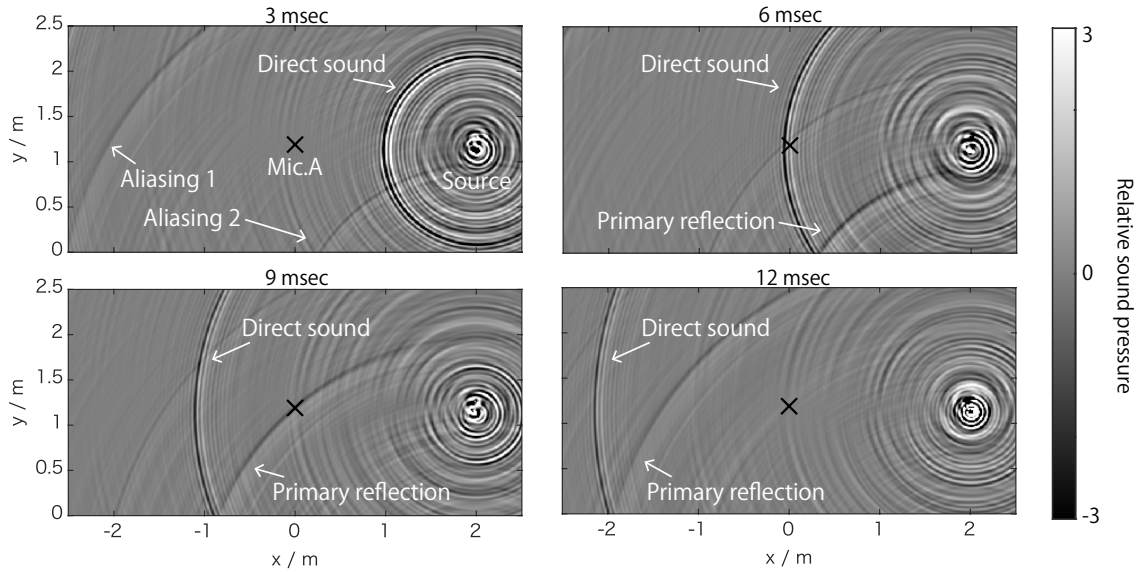


図2：三点の計測情報を用いた音場の可視化例

(3) 多チャンネルスピーカシステムを用いた音場制御への適用

本研究では、計測された音場情報の音場の可視化以外への応用として、音場制御への応用を考える。高い臨場感・リアリティの音空間の再現を行う方法には、波動方程式から解析的にスピーカの駆動信号を求める方法などが知られているが、実際には、音場を制御する場所の部屋の響きやスピーカレイ自体の反射やスピーカの放射特性などを補正する必要あり、それには多数の点のインパルス応答を測定する必要がある。一方で、**Pressure Matching**法を始めとした数値的手法では、空間を離散化して制御し、予め音場制御を行う場所の音響特性の補正が含まれている場合が多い。例えば、**Pressure Matching**は離散化された点群への室内インパルス応答から、それら点上での音圧が所望の音圧と一致するようにスピーカの出力を求める方法である。しかし、離散化された多数の点への室内インパルス応答を測定する必要がある、実装が困難であった。そこで、本研究では、特に研究方法(2)で検討した少数マイクロホンで計測した音場推定手法を用いて、少数のデータから広範囲の音場情報を推定し、その情報を**Pressure Matching**法へと適用する。

シミュレーション実験の結果から、スピーカからの反射音も考慮して音場を推定することによって、音場制御の精度が1-8kHzの周波数帯において約15dBの改善されることが明らかとなった(図3)。今後はこれらの手法を実際のシステムへと適用することで、その有効性を確認する。

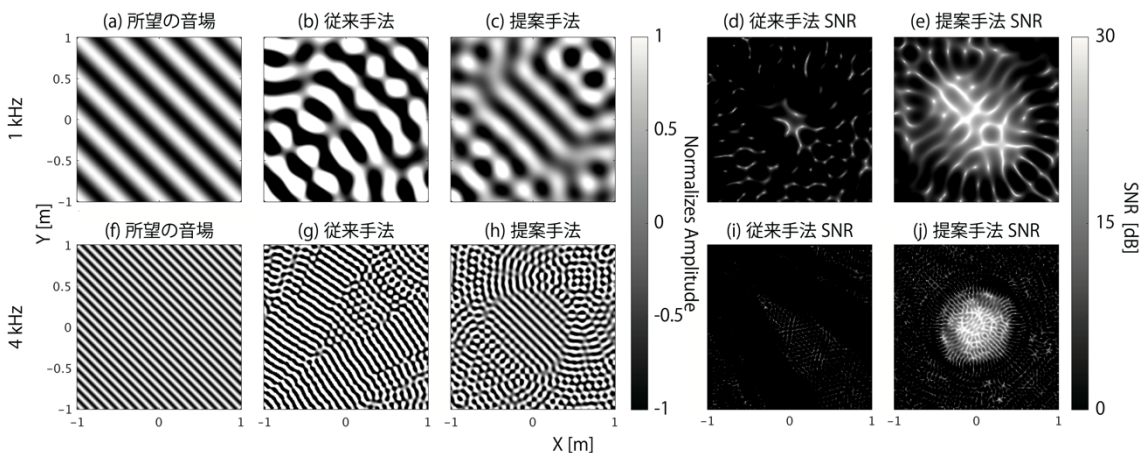


図3 少数マイクロホンから推定された音場情報の音場制御への適用結果。
推定された波面(左図)と推定精度(右図)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計31件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 Haruka Matsuhashi, Izumi Tsunokuni and Yusuke Ikeda
2. 発表標題 Spatial Interpolation of Early Room Impulse Responses Using Equivalent Source Method Based on Grouped Image Sources
3. 学会等名 InterNoise 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ayame Uchida, Yukiko Okawa, Yusuke Ikeda, Yasuhiro Oikawa
2. 発表標題 Mixed reality visualization system for 3D sound intensity using PAGE method and spatial interpolation
3. 学会等名 InterNoise 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yukiko Okawa, Ayame Uchida, Yusuke Ikeda, Yasuhiro Oikawa
2. 発表標題 Machine-learning-based estimation of absorption coefficients from transfer functions modeled by virtual sources
3. 学会等名 InterNoise 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Izumi Tsunokuni, Haruka Matsuhashi, and Yusuke Ikeda
2. 発表標題 Spatial extrapolation of early room impulse responses with source radiation model based on equivalent source method
3. 学会等名 Audio Engineering Society 125nd Convention (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木薫佳, 松橋遼, 津國和泉, 池田雄介
2. 発表標題 反射音を考慮した等価音源法に基づくPressure Matching法による2.5次元音場合成
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuaki Watanabe, Yusuke Ikeda, and Yasuhiro Oikawa
2. 発表標題 Mixed Reality Visualization of Room Impulse Responses on Two Planes by Moving Microphone
3. 学会等名 2022 INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCED IMAGE TECHNOLOGY (IWAIT) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大川祐貴子, 松橋遼, 津國和泉, 池田雄介, 及川靖広
2. 発表標題 機械学習を用いた等価音源分布からの壁面の音響インピーダンス推定の検討
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松橋遼, 鈴木薫佳, 津國和泉, 池田雄介
2. 発表標題 反射音到来時間を用いた等価音源法による室内インパルス応答の空間補間
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内田彩芽, 大川祐貴子, 渡辺靖明, 池田雄介, 及川靖広
2. 発表標題 不規則間隔音響インテンシティの空間補間を用いた複合現実による音場可視化システム
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木薫佳, 松橋遼, 津國和泉, 池田雄介
2. 発表標題 等価音源を用いたPressure Matching法による2.5次元音場合成の実験的検討
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内田彩芽, 大川祐貴子, 渡辺靖明, 池田雄介, 及川靖広
2. 発表標題 複合現実技術を用いた三次元音響インテンシティ可視化システムへのPAGE法の適用
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松橋遼, 津國和泉, 池田雄介
2. 発表標題 虚像法とスパース等価音源法を用いた局所領域の室内インパルス応答推定
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大川祐貴子, 渡辺靖明, 池田雄介, 及川靖広
2. 発表標題 音響インテンシティとFDTD法を用いた音響インピーダンスの推定
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺靖明, 池田雄介, 及川靖広
2. 発表標題 複合現実技術と手持ちマイクロホンを用いた室内インパルス応答計測による音場の複数平面可視化
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yukiko Okawa, Yasuaki Watanabe, Yusuke Ikeda, Yasuhiro Oikawa
2. 発表標題 ESTIMATION OF ACOUSTIC IMPEDANCES IN A ROOM USING MULTIPLE SOUND INTENSITIES AND FDTD METHOD
3. 学会等名 27th International Congress on Sound and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Haruka Matsuhashi, Izumi Tsunokuni, Yusuke Ikeda
2. 発表標題 MODELING LATE REVERBERATION IN THE EXTRAPOLATION OF ROOM IMPULSE RESPONSES USING THE SPARSE EQUIVALENT SOURCES AND THE IMAGE SOURCE METHODS
3. 学会等名 27th International Congress on Sound and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Haruka Matsuhashi, Izumi Tsunokuni, Yusuke Ikeda
2. 発表標題 Comparison of estimation of Room Impulse Responses in local region using small number of microphones
3. 学会等名 InterNoise 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 津國和泉, 松橋遼, 池田雄介
2. 発表標題 音源の指向性を考慮した等価音源法に基づく少数マイクロホンによる音場の可視化
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松橋遼, 津國和泉, 池田雄介
2. 発表標題 虚像法とスパース等価音源法を用いた局所領域の室内インパルス応答推定
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内田彩芽, 大川祐貴子, 渡辺靖明, 池田雄介, 及川靖広
2. 発表標題 不規則間隔音響インテンシティの空間補間を用いた複合現実による音場可視化システム
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木薫佳, 池田雄介, 津國和泉, 松橋遼
2. 発表標題 反射音を考慮した等価音源法に基づくPressure Matching法による2.5次元音場合成
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺靖明, 池田雄介, 片岡優太, 及川靖広, 小坂直敏
2. 発表標題 複合現実技術と手持ちマイクロホン計測を用いたインパルス応答の可視
3. 学会等名 情報処理学会全国大会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsunokuni, Izumi, Ikeda, Yusuke, Osaka, Naotoshi
2. 発表標題 Sound field visualization for primary reflection using equivalent sources and image source methods
3. 学会等名 Proceedings of SPIE (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yukiko Okawa, Yasuaki Watanabe, Yusuke Ikeda, Yuta Kataoka, Yasuhiro Oikawa, Naotoshi Osaka
2. 発表標題 Visualization System of Measured and Simulated Sound Intensities with Mixed Reality
3. 学会等名 2020 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺靖明, 池田雄介, 片岡優太, 及川靖広, 小坂直敏
2. 発表標題 複合現実技術と移動マイクロホン計測による音波面の可視化
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大川祐貴子, 渡辺靖明, 池田雄介, 片岡優太, 及川靖広, 小坂直敏
2. 発表標題 複合現実技術と FDTD シミュレーションを用いた音響インテンシティの可視化
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuta Kataoka, Yasuhiro Oikawa, Yasuaki Watanabe, Yusuke Ikeda
2. 発表標題 Mixed Reality Visualization of Instantaneous Sound Intensity with Moving 4-ch Microphone Array
3. 学会等名 ACM SIGGRAPH 2020 Posters (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasuaki Watanabe, Yuta Kataoka, Yasuhiro Oikawa, Yusuke Ikeda, Naotoshi Osaka
2. 発表標題 Visualization of Spatial Impulse Responses using Mixed Reality and Moving Microphone
3. 学会等名 ACM SIGGRAPH 2020 Posters (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺靖明, 池田雄介, 片岡優太, 及川靖広, 小坂直敏
2. 発表標題 手持ちマイクロホン用いた 動的インパルス応答における計測位置誤差の影響
3. 学会等名 日本音響学会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津國和泉, 田中琴美, 池田雄介, 小坂直敏
2. 発表標題 等価音源法を用いた少数マイクロホンによる一次反射音場の可視化
3. 学会等名 日本音響学会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺靖明, 池田雄介, 片岡優太, 及川靖広, 小坂直敏
2. 発表標題 複合現実技術と移動マイクロホン計測による空間インパルス応答の可視化
3. 学会等名 日本音響学会アコースティックイメージング研究会
4. 発表年 2020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 分担者	及川 靖広 (Oikawa Yasuhiro) (70333135)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	

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
---------	---------