

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00245

研究課題名（和文）高臨場感立体音響のための疎なスピーカ配置における超解像音場再現技術の研究

研究課題名（英文）Super-resolution sound field reproduction in sparse speaker arrangement for highly realistic three-dimensional sound

研究代表者

古家 賢一（Furuya, Ken'ichi）

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：10643611

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：高臨場感立体音響の実現のために、少ないスピーカでも高精度で音場再現が可能な手法の検討を行った。精度向上のために、空間的に音源の間隔が離れている場合でも周囲の音源のインパルス応答からその間を補間する手法、指向性スピーカを用いる手法、複数の音源委よる音場を各音源に分離する方法を検討した。実験の結果、補間精度はおよそ4～9dB改善し、指向性スピーカによって少ないスピーカの場合でも音場の再現精度も向上した。複数の音源による音場の分離に関しては、理論的な最高値とほぼ同等の分離が確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果として疎なスピーカ配置（少ないスピーカ）でも高臨場は立体音響が実現できれば、家庭におけるスポーツ中継、離れて暮らす家族のコミュニケーション、音を含んだ観光地へのバーチャル旅行など、芸術文化など豊かな生活を実現するために高い臨場感が必要な幅広いサービスへの応用が考えられ、社会への普及が進む。また、今後の五感を含めた高臨場感通信・放送の実用化に向けた研究開発が盛んになると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In order to realize highly realistic stereophonic sound, we investigated a method that can reproduce the sound field with high accuracy even with a small number of speakers. To improve accuracy, even if the sound sources are spatially separated, a method that interpolates between the impulse responses of surrounding sound sources, a method that uses directional speakers, and a sound field assigned by multiple sound sources is separated into each sound source. As a result of the experiment, the interpolation accuracy was improved by 4 to 9 dB, and the directional speaker also improved the sound field reproduction accuracy even with a small number of speakers. With regard to the separation of the sound field by multiple sound sources, it was confirmed that the separation was almost equal to the theoretical maximum value.

研究分野：音響工学

キーワード：高臨場感音響 インパルス応答 指向性スピーカ 音源分離 音場再現

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

通信・放送の分野で、遠隔地の空間をあたかも眼前に存在するような臨場感をリアルタイムに伝える高臨場感立体映像音響通信・テレビの研究開発が行われている。それら技術が実現できれば、例えば、経済的・時間的・身体的な原因で遠方に一人暮らしの高齢な親と子供・孫が直接に会えない場合でも、電話だけでは伝わらない雰囲気を実際に会っているのと同じように感じることができ、高齢化社会において生活に豊かさを与えることができる。また、有名音楽家の演奏やオリンピックやワールドカップなどのスポーツ中継などを距離と時間を超えて、家庭でその場で観て聴いているかのような体験が可能になる。

高臨場感立体映像音響通信・テレビの要素技術のひとつとして、本研究で扱う高臨場感立体音響再生技術は、従来から、キルヒホッフ境界積分方程式に基づく方法、波面合成に基づく方法など多くの研究が行われてきている。しかし、どの方法も理論的には空間エイリアシングが生じないよう物理的厳密な音場を再生するためには、空間サンプリング定理を満たすように十分に音源（スピーカ）を密に配置する必要があるが、実際にはスピーカの大きさにより高周波帯域においては空間サンプリング定理を満足するよう密に配置するのは困難であった。例えば、音楽帯域 20 Hz ~ 20 kHz を再現しようとした場合、20 kHz の波長 1.4 cm の 0.7 cm 間隔でスピーカを密に配置する必要があるが、スピーカはマイクロホンと異なり空間にエネルギーを放射しなければならないためどうしても物理的に大きさが必要となり密な配置が困難である。

### 2. 研究の目的

本研究では、図1のように、この現存の大きさのスピーカを用い、スピーカ間隔が 1/2 波長よりも離れた疎な配置の場合でも、高周波数において精度の高い音場再現（スピーカ間隔が 1/2 波長以上の周波数における再現）を目的とする。

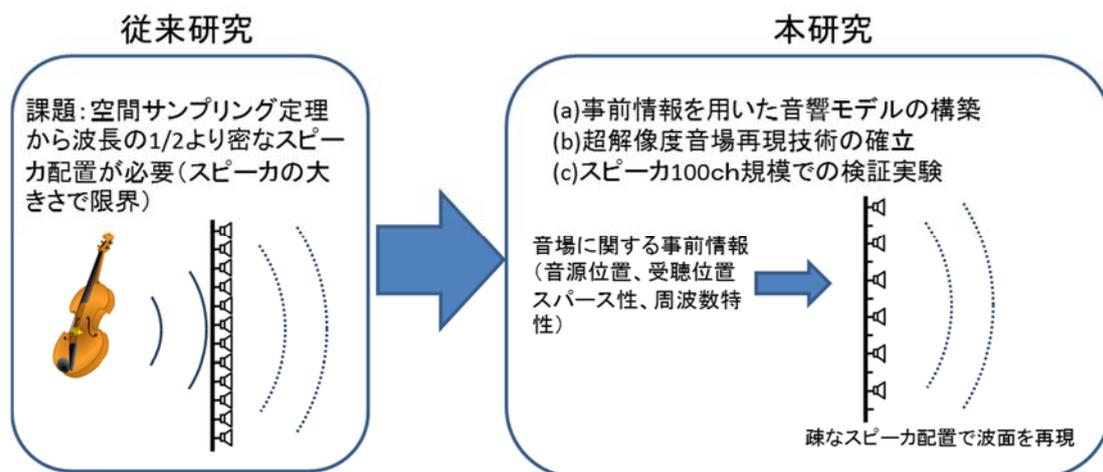


図1. 研究概要図

### 3. 研究の方法

本研究では、疎なスピーカ配列においても精度の高い音場再現をおこなうために、次の3つの手法について検討を行った。

#### (1) 音場の事前情報を利用した音源がない位置での音響特性の補間方法

空間エイリアシングを制御するための音場の事前情報をパラメータに持つ音場モデルを構築する。音場の情報として音源位置、受聴位置をパラメータとして、疎なためにスピーカがない位置からのインパルス応答を周囲のインパルス応答から補間する技術を提案した。音響モデルとして、初期反射音部分には球面波モデルを適用し、反射音成分には平面波モデルを適用した。

#### (2) 音源の指向特性を利用した音場再現のための逆フィルタ計算法

疎なスピーカ配置においても指向性スピーカの指向特性を利用することにより音場再現の精度を高められる可能性がある。本研究では、指向性スピーカの駆動信号を生成するための逆フィルタ計算法を新たに提案した。

#### (3) 複合音源の各個別音源への分解法

音源モデルを複数の音源による音場の重ね合わせで表現し、複雑な音場を音源ごとの音場に分解することにより精度を向上させる。

### 4. 研究成果

#### (1) マルチチャンネル音響実験システム

実環境において提案手法の効果を検証するため、図2のマルチチャンネル音響実験システムを構築した。チャンネル数は32ch、サンプリング周波数48kHzで動作可能である。スピーカ、マイクロホンの配置は可変である。本システムを使用することで、マルチチャンネルの音場再現を実環境下で測定することが可能となる。

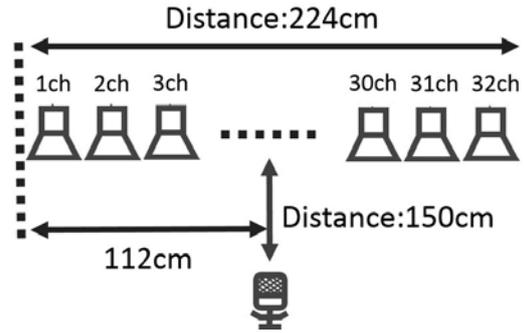
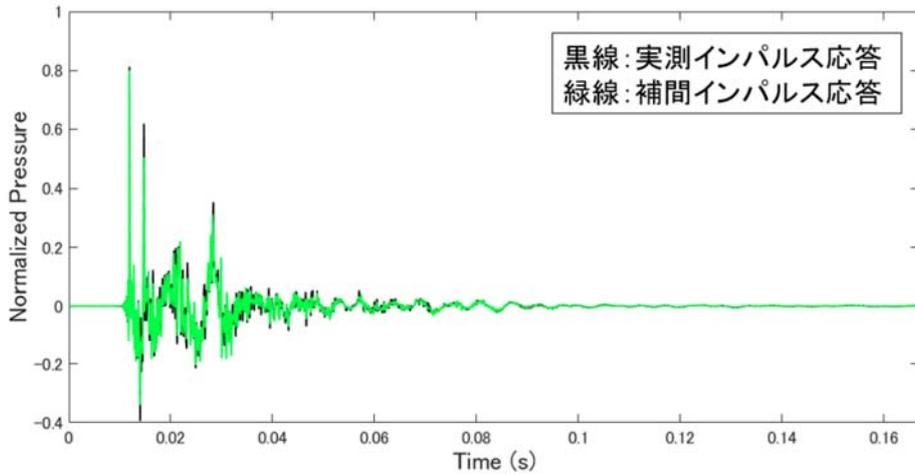


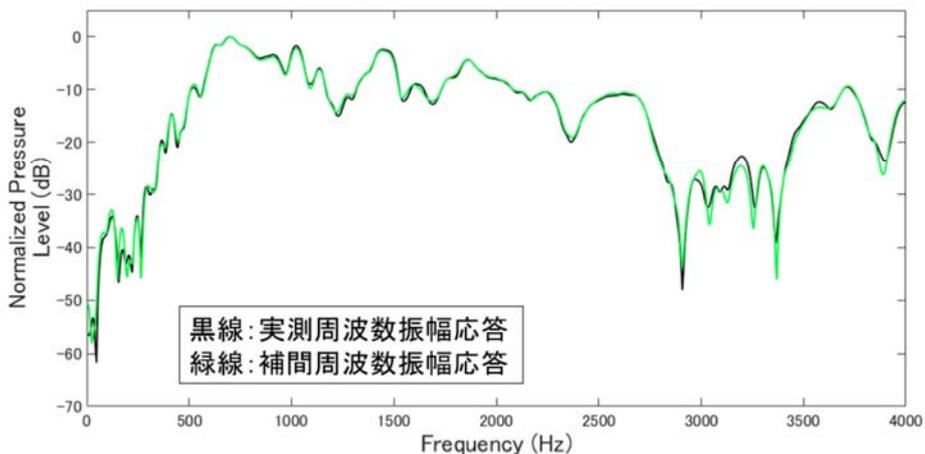
図2. マルチチャンネル音響実験システム。  
左図は無響室で実験の様子，右図はそのサイズを示す。

## (2) 音響特性の補間方法

スピーカの間隔が離れることによりその間の音響特性の再現が困難になってくる。そこで、音響特性の補間法を用いて、周囲のスピーカの音響特性から実際には存在しないスピーカ位置の音響特性を補間した。図3は実測の音響特性（インパルス応答）と5 cm離れた周囲のスピーカ特性から補間で得られたインパルス応答を比較したものである。図3上図は、時間領域におけるインパルス応答の比較であり、緑線の補間インパルス応答が黒線の実測インパルス応答を良く一致しているのが分かる。特に直接波の到達する時間はほぼ正確に補間できている。図3下図は、周波数領域での比較であり、緑線と黒線がほぼ重なっており周波数特性も補間できていることが確認できた。表1に二乗誤差により補間精度の比較を示す。従来手法に比べて直接波部分は、従来法に比べ、4～9 dBの精度が向上していることが分かる。



(a) インパルス応答



(b) 周波数振幅応答

図3. インパルス応答の補間結果

表 1. 二乗誤差による補間精度の比較 (d B)

従来手法	直接波	-10.57
	反射波	-7.97
提案手法 1	直接波	-14.31
	反射波	-8.13
提案手法 2	直接波	-19.86
	反射波	-8.23

### (3) 指向性スピーカ駆動信号の逆フィルタ計算方法

波面合成法などの多数のスピーカが必要な音場再現法は、スピーカとして無指向性スピーカを想定している。しかし、ひとつひとつのスピーカに指向性を持たせることにより、より高精度な音場再現が可能なる可能性がある。そこで、本研究では図 4 のように少ない数の指向性スピーカ (directional loudspeaker) で、多数の無指向性スピーカを用いた時以上の音場再現精度を実現する。図 4 の四隅に指向性スピーカを配置して部屋の中央付近の音場を再現するシミュレーション実験をおこなった。図 5 は音場再現精度を示しており、縦軸が音場再現の二乗誤差、横軸が従来法 (最左) と提案法 (パラメータ 9 種類) の比較結果である。パラメータとしては、逆フィルタを安定に計算するために、どの程度の周波数帯域幅で平均をすればよいか 9 種類の帯域幅で確認した。その結果、パラメータに値によらず、提案法は、従来法に比べて高い音場再現精度を実現できることが分かった。

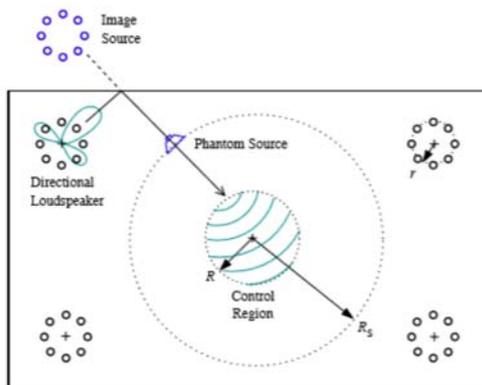


図 4. 指向性スピーカを用いた音場再現

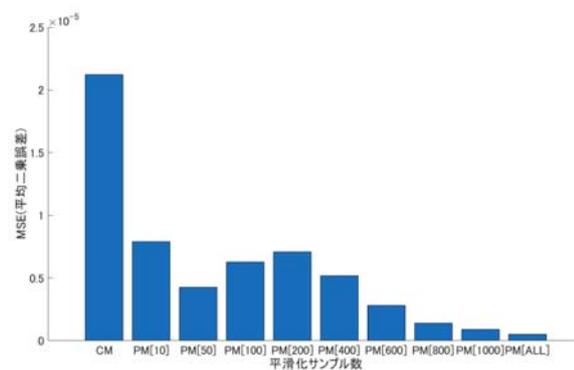


図 5. 音場再現精度の比較

### (4) 複数の音源による音場の分離法

複数の音源による音場を単一の点音源の重ね合わせでモデル化するために、マルチチャンネル非負値行列因子分解を用いた音源分離をおこなった。しかし、従来の音源分離手法では分性能が十分ではないために、複数の初期値をアンサンブル平均することにより、分離性能向上を図った。図 6 は、複数による音場を複数のマイクロホンにより収録する実験配置図である。音源は 3 つ、マイクロホンは 2 c h から 6 c h に変化させて収録した。図 7 は、提案法と従来法での音源分離の精度を表す。縦軸の SDR は分離した音源諺号とそれ以外の音源信号の比を dB 表示している。横軸は、音場を収録するマイクロホンのチャンネル数を示す。図中の青棒が従来法、橙棒が理論的な最高値、黄棒が提案法である。図から提案法は従来法よりも精度よく分離が出来ており、ほぼ、理論値の最高値に近いことが分かる。

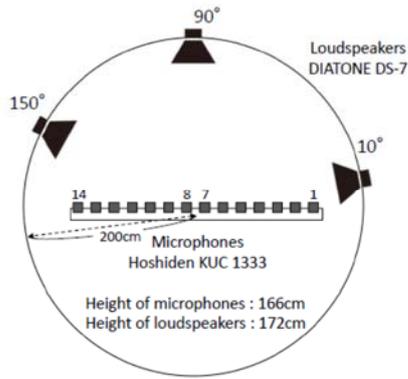


図 6 実験配置図

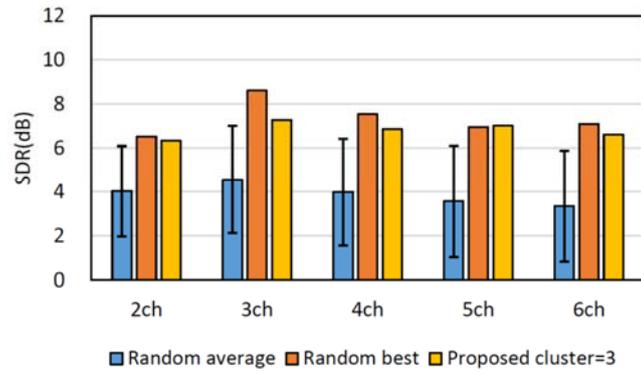


図 7. 音源分離性能の比較

<引用文献>

- ① Effects of Equivalent Sources Arrangement on Spatial Interpolation of Impulse Responses, M. Yoshino, K. Furuya, Proc. the 13th international Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems, pp.733-742, 2019 年
- ② 球面波と平面波の融合モデルを用いたインパルス応答の空間的補間, 吉野 誠史, 古家 賢一, 日本音響学会 2020 年春季研究発表会講演論文集, 2-P46, 2020 年 3 月
- ③ 音場再現逆フィルタ設計における正則化パラメータ計算法, 衛藤亮太, 古家賢一, 日本音響学会 2019 年秋季研究発表会講演論文集 pp. 655-658, 2019 年
- ④ マルチチャンネル非負値行列因子分解における階層的クラスタ分析を用いた音源分離性能の向上, 浦本昂伸, 上ノ原進吾, 古家賢一, 電子情報通信学会論文誌 D, vol. J102-D, no. 3, pp. 118-129, 2019 年

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 浦本 昂伸、上ノ原 進吾、古家 賢一	4. 巻 J102-D
2. 論文標題 マルチチャネル非負値行列因子分解における階層的クラスタ分析を用いた音源分離性能の向上	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌D 情報・システム	6. 最初と最後の頁 118 ~ 129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14923/transinfj.2018PDP0007	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 Shoma Kuroda, Shingo Uenohara, Keisuke Nishijima, and Ken'ichi Furuya	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of Parallel Measurement Methods for Multichannel Impulse Responses	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 2016 IEEE 5th Global Conference on Consumer Electronics	6. 最初と最後の頁 417-418
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/GCCE.2016.7800463	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shinya Kudo, Keisuke Nishijima, Shingo Uenohara, and Ken'ichi Furuya	4. 巻 -
2. 論文標題 Parameter of Noise Suppression Based on Wavelet Transform for Phonocardiographic Signals	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 International Conference on Complex, Intelligent, and Software intensive Systems (CISIS)	6. 最初と最後の頁 578-581
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/CISIS.2016.50	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 Keisuke Nishijima, Shingo Uenohara, Ken'ichi Furuya	4. 巻 -
2. 論文標題 A Study on the Optimum Number of Training Data in Snore Activity Detection Using SVM	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 International Conference on Complex, Intelligent, and Software intensive Systems (CISIS)	6. 最初と最後の頁 582 - 584
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/CISIS.2016.49	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24件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Higashi, D., Tanaka, K., Shin, S., Nishijima, K., Furuya, K.
2. 発表標題 Classification of arteriovenous fistula stenosis using shunt murmurs analysis and support vector machine
3. 学会等名 Advances in Intelligent Systems and Computing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nishijima, K., Uenohara, S., Furuya, K.
2. 発表標題 Evaluating classification methods in snore activity detection
3. 学会等名 Advances in Intelligent Systems and Computing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Higashi, D., Nishijima, K., Furuya, K., Tanaka, K., Shin, S.
2. 発表標題 Classification of Shunt Murmurs for Diagnosis of Arteriovenous Fistula Stenosis
3. 学会等名 Processing Association Annual Summit and Conference, APSIPA ASC 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 牛島 隆裕, 浦本 昂伸, 上ノ原 進吾, 古家 賢一
2. 発表標題 マルチチャネルNMFに対する非負独立成分分析を用いた初期値設定法
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西島 恵介, 古家 賢一
2. 発表標題 実環境下における雑音抑圧と多クラス分類を用いたいびき音識別
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉野誠史, 古家賢一
2. 発表標題 インパルス応答の空間的補間における仮想音源配置の影響
3. 学会等名 日本音響学会研究発表会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 泉太貴, 浦本昂伸, 上ノ原進吾, 古家賢一
2. 発表標題 階層的クラスタ分析を用いたマルチチャネルNMFにおける実環境下音声認識性能の向上
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 牛島隆裕, 浦本昂伸, 上ノ原進吾, 古家賢一
2. 発表標題 マルチチャネル非負値行列因子分解における非負独立成分分析を用いた初期値決定法
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 衛藤亮太, 古家賢一
2. 発表標題 指向性スピーカアレイを用いた音場再現におけるLカーブ法での逆フィルタ設計
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浦本昂伸, 上ノ原進吾, 古家賢一
2. 発表標題 階層的クラスタ分析を用いたマルチチャネルNMFにおける実環境下音声認識性能の向上
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉野誠史, 古家賢一
2. 発表標題 マルチチャネルインパルス応答の空間的補間におけるマイクロホン配置の影響
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上ノ原進吾, 泉太貴, 浦本昂伸, 古家賢一
2. 発表標題 同期同時対角化音源分離における信号特性による影響
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上ノ原 進吾, 西島 恵介, 古家 賢一
2. 発表標題 画像情報を用いたマイクロホンアレイによるリアルタイム音声強調処理
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山中 雄太, 西島恵介, 上ノ原進吾, 古家賢一
2. 発表標題 高臨場感音響のためのラグランジュ多項式を用いた頭部伝達関数補間
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keisuke Nishijima, Shingo Uenohara, and Ken'ichi Furuya
2. 発表標題 Estimation of Noise Suppression Parameters for Maximizing Snoring Activity Detection Performance
3. 学会等名 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 西島 恵介, 上ノ原 進吾, 古家 賢一
2. 発表標題 非定常環境雑音下におけるマルチカーネル学習を用いたいびき区間検出
3. 学会等名 日本音響学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 西島 恵介, 上ノ原 進吾, 古家 賢一
2. 発表標題 深層学習を用いたいびき音と環境音の識別
3. 学会等名 日本音響学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shoma Kuroda, Shingo Uenohara, Keisuke Nishijima, and Ken'ichi Furuya
2. 発表標題 Comparison of the multiple maximum length sequences and multiple exponential sweeps method for parallel measurements of impulse responses
3. 学会等名 Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Keisuke Nishijima, Shingo Uenohara, and Ken'ichi Furuya
2. 発表標題 Performance improvement of snore activity detection in a noisy environment
3. 学会等名 Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Shinya Kudo, Keisuke Nishijima, Shingo Uenohara, and Ken'ichi Furuya
2. 発表標題 Identification of phonocardiographic signals using noise suppression based on wavelet transform
3. 学会等名 Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 西島 恵介, 上ノ原 進吾, 古家 賢一
2. 発表標題 SVM を用いたいびき区間検出における環境雑音への適応化
3. 学会等名 音響学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 尾崎雄大・宮前 寛・西島恵介・上ノ原進吾・古家賢一
2. 発表標題 消音ギターの演奏音に対する臨場感付与
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 工藤晋也・西島恵介・上ノ原進吾・古家賢一
2. 発表標題 ウェーブレット変換による雑音抑圧を用いた心音分析
3. 学会等名 応用音響研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 西島 恵介, 上ノ原 進吾, 古家 賢一
2. 発表標題 雑音抑圧と睡眠環境適応によるいびき区間検出の性能改善
3. 学会等名 音響学会
4. 発表年 2017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
--	---------------------------	-----------------------	----