

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K16030

研究課題名(和文) キャリア波と側帯波の独立位相制御に基づく音空間分離システムの開発

研究課題名(英文) Development of acoustic space separation system based on individual phase control of carrier and sideband waves

研究代表者

中山 雅人(Nakayama, Masato)

立命館大学・立命館グローバル・イノベーション研究機構・准教授

研究者番号：90511056

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：キャリア波と側帯波の独立位相制御に基づく音空間分離システムの総合開発を行った。その結果、キャリア波と側帯波の独立位相制御に基づく音空間分離システムは完成し、その性能を評価した。その研究成果は、学術論文として採録された。さらに、この音空間分離技術を発展させた研究として、三次元空間に仮想的な音源を作成する音響ホログラムの技術を開発し、その性能を評価した。その研究成果は、学術論文として採録された。また、他にもこれまでの研究成果を応用した様々な研究も推進した。その結果、研究成果として、特許出願1件、学術論文7件、国際会議21件に加えて多数の研究成果を国内学会にて発表した。

研究成果の概要(英文)：We developed acoustic space separation system based on individual phase control of carrier and sideband waves. As a result, the development of the proposed system was completed and its performance was evaluated. The research result was published as a journal paper. Furthermore, as a research that applied this technology, we developed the technology of acoustic hologram which creates virtual sound source in three dimensional space and evaluated its performance. The research result was also published as a journal paper. In addition, we also promoted various researches applying the research results. As a result, the research results include one patent, seven journal papers and 21 international conferences.

研究分野：音響工学

キーワード：音空間分離 パラメトリックスピーカ 独立位相制御 アレー信号処理

1. 研究開始当初の背景

近年、コミュニケーションの活性化、ビジネスの創発などを期待して、空間シェアリングの積極的な活用が広がりつつある。しかしながら、同じ空間を共有する場合、音楽やアナウンスなどの音空間は分離することが難しく、騒音が社会的な問題となっている。そのため、同じ空間でコミュニケーションが可能で、かつ異なる複数の音空間を提供する音空間分離システムの開発が急務となっている。音空間の分離には、ヘッドホンなどのウェアラブルデバイスを利用する手法なども考えられるが、ヘッドホンの着用はコミュニケーションを阻害する問題がある。また、コンサートホールなどには複数のスピーカを利用したスピーカアレイシステムなども導入されているが、システムの規模が非常に大きくなる問題がある。この問題に対して研究代表者は H24-26 科研費若手研究(B)「パラメトリックスピーカと音響トラッキングによる立体音響システムに関する研究」において一般的な動電型スピーカと比べて極めて鋭い指向性をもつパラメトリックスピーカを改良するアプローチを行ってきた。パラメトリックスピーカと音響トラッキングによる立体音響システムにおいて中核的な技術であったパラメトリックスピーカの指向性制御技術と音響トラッキング技術は、音空間分離システムにおいても重要な要素技術となるが、これまでの研究では個人のみを対象としていたことに比べて本研究課題は多数人を対象とするため、パラメトリックスピーカによる音空間構築において様々な物体(天井, 床, 壁, 人など)からの反射波(残響)を低減する技術革新が必要不可欠な状況である。

パラメトリックスピーカは複数の小型超音波素子を密に並べた構造のスピーカであり、超音波を可聴音波で変調した振幅変調波を大振幅で放射することにより、大振幅の振幅変調波が空気の非線形性により目的とする可聴音波に自己復調する原理で駆動している。そのため、複数の小型超音波トランスデューサを平面に並べた構造であるパラメトリックスピーカは、平面波を放射することが可能であり、回折角が小さい高周波である超音波をキャリア波として利用するため、可聴領域は直線状に存在する特長がある。しかしながら、パラメトリックスピーカは様々な物体からの反射波が大きな問題となる。この反射波も非常に鋭い放射特性を有しているため、対象となる受聴者以外の受聴者が反射経路上にいる場合、その受聴者にもオーディオスポットが形成されてしまう問題点がある。

2. 研究の目的

これまでの研究成果より、音空間の分離を実現するために、研究代表者はキャリア波と側帯波を独立して恣意的に分離、それぞれに

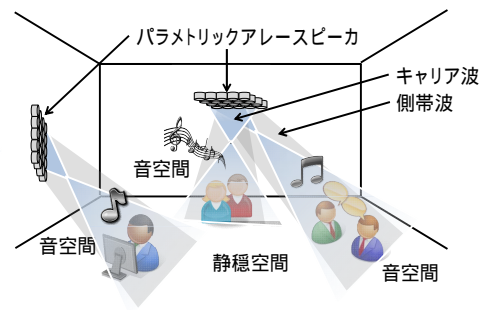


図1: 音空間分離システムのイメージ

異なる指向性を形成して放射し、振幅変調波が復調する領域を制御すれば、周囲は静穏で任意の領域のみに音空間を構築できるのではという着想(図1)に基づき、音空間分離システムの開発研究を推進する。本研究を推進する上で重要となる学術的な研究要素は、以下の2つとなる。

- (1)【技術研究(ハードウェア)】 指向性を自由に制御可能な新しいパラメトリックアレイスピーカの開発
- (2)【技術研究(ソフトウェア)】 キャリア波と側帯波の独立位相制御による音空間分離システムの開発

3. 研究の方法

同一の空間内において異なる音空間を複数構築、それ以外を静穏化するという課題に対して、パラメトリックアレイスピーカを用いてキャリア波と側帯波に対して独立して指向性を制御・放射することで、様々な物体からの反射波による外乱を抑圧して複数の音空間を構築する。本研究では、ソフトウェアによる技術研究だけでなく、ハードウェアによる技術研究も実施することで次世代立体音響再生方式の総合開発を展開する。具体的には以下の項目に対して研究を実施する。

- (1)【技術研究(ハードウェア)】 大音圧の指向性を自由にソフトウェア制御可能な大型パラメトリックアレイスピーカの開発
- (2)【技術研究(ソフトウェア)】 キャリア波と側帯波の独立位相制御による反射音抑圧型パラメトリックスピーカシステムの開発
- (3)【総合研究】 上記(1)-(2)を統合した音空間分離システムの総合開発

パラメトリックスピーカより自己復調する可聴音波は、周波数領域において大振幅で放射する超音波のキャリア波と側帯波の差音として考えることができる。このことは、キャリア波と側帯波を分離して放射することにより、可聴音に復調する領域を制御できることを示唆している。研究代表者が世界に先駆けて提案した「キャリア波と側帯波の分離放射によるオーディオスポット形成手法」は、恣意的に分離したキャリア波と側帯波を異なるパラメトリックスピーカから放射し、交差領域にオーディオスポットを形成していた。しかし、形成されるオーディオスポットは極小領域となるため、多数人に音空間を

提示することが困難であった。一方、前述の通り、パラメトリックスピーカは複数の小型超音波トランスデューサを密に並べた構造のスピーカであるため、多チャンネル出力を利用することによりアレー信号処理による指向性制御を適用することが可能である。そこで本研究では、図1のように振幅変調波をキャリア波と側帯波に分離して、それぞれ異なる位相制御を行った信号を生成、アレー信号処理が可能な多チャンネル出力のパラメトリックスピーカより混合・放射することで、2つの超音波が重なる直接波の領域のみで可聴音波を復調させる手法を検討する。図1のように超音波であるキャリア波、あるいは側帯波のみの領域では自己復調が起こらないため可聴音が復調しない。すなわち、キャリア波と側帯波が重なるパラメトリックスピーカ正面方位においては可聴音が復調するが、反射波は反射角度の違い、放射角の違いにより自己復調が発生しないため、反射波の音圧レベルを大幅に抑圧できる。また、パラメトリックスピーカは原理的に振幅変調波が大振幅であるほど高効率で可聴音に復調するため、正面方位にビームの焦点を絞るように位相制御を行うことで音圧レベルの改善も期待できる。これら要素技術に基づく音空間分離システムにより Multi-in-One 型音空間構築を実現する。最終的にシミュレーションと実環境における総合評価実験を行い、音空間分離システムの有効性を確認する。

4. 研究成果

本研究課題の実現に向けて、様々な検討を行った。本研究課題を実現するために、必要となる要素技術として、技術研究のハードウェアとソフトウェア、それらを統合する総合研究に関する以下の項目に対して研究を推進した。

(1) 【技術研究(ハードウェア)】大音圧の指向性を自由にソフトウェア制御可能な大型パラメトリックアレースピーカの開発(初年度)

パラメトリックアレースピーカの開発と音圧レベル改善の検討を推進した。これまで困難とされていたパラメトリックスピーカの音圧レベルの改善はハードウェアの開発(パラメトリックアレースピーカの大型化)を重視して、変調方式の高効率化とアレー信号処理によるソフトウェア制御を組み合わせることで実現を目指した。

上記の通り、初年度では本研究の基盤となるハードウェアに関する技術研究に取り組み組んだ。その研究の成果として、特許1件、学術論文2件、国際会議7件に加えて多数の研究成果を国内学会にて発表した。

(2) 【技術研究(ソフトウェア)】キャリア波と側帯波の独立位相制御による反射音抑圧型パラメトリックスピーカシステムの開

発(次年度)

テーマ2において、キャリア波と側帯波の独立位相制御方式を開発した。本方式では、キャリア波と側帯波の干渉する領域を限定することで、任意の可聴領域を形成し、反射波の抑圧を実現する。本研究課題の要点は、複数の音空間の分離であり、それぞれの音空間以外では静穏空間となる必要がある。この反射波の抑圧が目的とする音空間以外での静穏化を実現する鍵である。実際にシステムを体験可能なシステムを構築し、研究成果を国際会議等で研究発信した。さらに、企業との共同研究において、本研究成果の一部を活用し、実用化についての検討も行った。

(3) 【総合研究】上記(1)-(2)を統合した音空間分離システムの総合開発(最終年度)

最終年度は、特に(3)【総合研究】を重点的に行い、これまでの研究成果を統合した音空間分離システムの総合開発を行った。その結果、キャリア波と側帯波の独立位相制御に基づく音空間分離システムは完成し、その性能を評価した。その研究成果は、去年度に学術論文(パラメトリックアレースピーカを用いたキャリア波と複数側帯波の独立遅延制御による近距離音響再生)として採録された。さらに、今年度はこの音空間分離技術を発展させた研究として、三次元空間に仮想的な音源を作成する音響ホログラムの技術を開発し、その性能を評価した。その研究成果は、今年度、学術論文(マルチパラメトリックアレースピーカを用いた音像ホログラムの構築)として採録された。また、他にもこれまでの研究成果を応用した様々な研究も推進した。その結果、最終年度の研究成果として、学術論文4件、国際会議9件に加えて多数の研究成果を国内学会にて発表した。

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7件)

小森 慎也, 大上 佳範, 中山 雅人, 西浦 敬信, “マルチパラメトリックアレースピーカを用いた音像ホログラムの構築”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J101-D, No. 3, pp. 578-587, 2018. (査読有)

Masato Nakayama, Kota Nakahashi, Yukoh Wakabayashi and Takanobu Nishiura, “Surround Sensation Index Based on Differential S-IACF for Listener Envelopment with Multiple Sound Sources”, Journal of Communication and Computer, Vol. 14, pp. 122-128, 2017. (査読有)

doi:10.17265/1548-7709/2017.03.003
本多 進哉, 篠原 寿広, 上保 徹志, 中山 雅人, 中迫 昇, “音声を音源とした

雑音環境下の音源距離推定(実および疑似観測信号間のクロススペクトルと同期加算の導入)”, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J100-A, No.7, pp.295-298, 2017. (査読有)

伊藤 瑠美, 若林 佑幸, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, “能動騒音制御と聴覚マスキングに基づく工場騒音の不快感低減”, 日本音響学会誌, Vol.73, No.4, pp.226-229, 2017. (査読有)

小森 慎也, 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, “曲面型パラメトリックスピーカを用いた壁面移動音像の構築”, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J99-A, No.11, pp.426-429, 2016. (査読有)

小辺 亮介, 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, “パラメトリックアレースピーカを用いたキャリア波と複数側帯波の独立遅延制御による近距離音響再生”, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J99-A, No.6, pp.201-210, 2016. (査読有)

小森 慎也, 益永 翔平, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “フレキシブルパラメトリックスピーカを用いたオーディオスポットの制御”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.20, No.3, pp.189-198, 2015. (査読有)

[学会発表](計 61 件)

Misaki Otsuka, Yukoh Wakabayashi, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Sound Distance Perception Based on Weighted Room Impulse Responses with Head-enclosed Back-surround Loudspeaker-array”, NCSP 2018, 2018. Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Synchronized

Amplitude-and-Frequency Modulation for a Parametric Loudspeaker”, 2017 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), 2017.

Yukoh Wakabayashi, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama, Takanobu Nishiura and Yoichi Yamashita, “Application of Phase Reconstruction to Speech Enhancement and Source Localization for Hearable Devices”, 2017 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia, 2017.

Sakiko Mishima, Yukoh Wakabayashi, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Investigations on Raw Features in Deep Neural Network for Indoor-environmental Sound Classification”, INTER-NOISE 2017,

2017.

Yoshinori Ogami, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Enhanced Audio Spot based on Multiple Carrier Waves with Extra Parametric Loudspeaker”, INTER-NOISE 2017, 2017.

Kirara Ariyoshi, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Evaluations on Reproducing Sound Field Control with Film Acoustic-Lens for Parametric Loudspeaker”, INTER-NOISE 2017, 2017.

Sayaka Okayasu, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Discomfort Reduction of Railway Brake Sound with Lower-energy Auditory Masker”, INTER-NOISE 2017, 2017.

Yukoh Wakabayashi, Rikuto Ota, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Dereverberation using Denoising Deep Auto Encoder with Harmonic Structure”, INTER-NOISE 2017, 2017. Nobuhiro Yamazaki, Toki Uda, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Acoustic properties of aerodynamic bogie noise generated from Shinkansen train”, INTER-NOISE 2017, 2017.

Masato Nakayama, Ryosuke Konabe, Takahiro Fukumori and Takanobu Nishiura, “Near-sound-field Propagation Based on Individual Beam-steering for Carrier and Sideband Waves with Parametric Array Loudspeaker”, IEEE APSIPA ASC 2016, 2016.

Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Three-dimensional Sound Field Reproduction Based on Spatial Fusion of Carrier and Sideband Waves with Parametric Array Loudspeaker”, The 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and the Acoustical Society of Japan, 2016. (Invited lecture)

Shinya Komori, Nana Hasegawa, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Stereophonic Reproduction Based on Multi-beam-forming with Curved-type Parametric Array Loudspeaker”, The 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and the Acoustical Society of Japan, 2016.

Kirara Ariyoshi, Takuya Kimura, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Sound Quality Improvement Based on Weighted

AM/FM Modulations for Parametric Loudspeaker”, the 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and the Acoustical Society of Japan, 2016.

Ryosuke Uemura, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “A Study on Near-field Sound Propagation Based on Delay-filtering for Carrier and Sideband Waves Using Curved-type Parametric Loudspeaker”, ICA 2016, 2016.

Ryosuke Uemura, Tomoyuki Wada, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Reverberation Design Based on Acoustic Parameters for Reflective Audio-spot System with Parametric and Dynamic Loudspeakers”, ICA 2016, 2016.

Shinya Komori, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Three-Dimensional Spatial Sound-image Design Based on Separating Emission with Curved-type Parametric Loudspeaker”, ICA 2016, 2016.

Shinya Komori, Ryosuke Uemura, Daisuke Ikefuji, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama, Takanobu Nishiura, “AUDIO-SPOT with Flexible Parametric Loudspeaker”, ICASSP 2016, ST-3.8, 2016.

Shinya Komori, Daisuke Ikefuji, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama, and Takanobu Nishiura, “Localization on Spatial Sound Image with Multiple Parametric Loudspeakers”, NCSP 2016, 2016.

Daisuke Ikefuji, Masato Nakayama, Takanobu Nishiura and Yoichi Yamashita, “Robust sound image localization for moving listener with curved-type parametric loudspeaker”, APSIPA ASC 2015, 2015.

Shinya Komori, Daisuke Ikefuji, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Reshaped Audible Area with Flexible Parametric Loudspeaker”, WESPAC2015, 2015.

- 21 Yukoh Wakabayashi, Toru Iwasaki, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Fundamental Study on High-Power Type Parametric Loudspeaker Based on Hybrid Modulation of Amplitude-and-Frequency Modulations”, WESPAC2015, 2015.

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

名称：パラメトリックスピーカ、信号処理装置、及び信号処理プログラム

発明者：西浦 敬信，中山 雅人，小辺 亮介

権利者：学校法人 立命館

種類：特許

番号：特願 2015-215898

出願年月日：2015年11月02日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.aspl.is.ritsumeai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中山 雅人 (NAKAYAMA MASATO)

立命館大学・グローバル・イノベーション

研究機構・准教授

研究者番号： 90511056