

平成30年6月25日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21674

研究課題名(和文)多言語音声マルチスポット再生システムの開発

研究課題名(英文)Development of multilingual-multizone generation system

研究代表者

岡本 拓磨 (Okamoto, Takuma)

国立研究開発法人情報通信研究機構・先進的音声翻訳研究開発推進センター先進的音声技術研究室・研究員

研究者番号：10551567

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)：本研究は、多言語音声マルチスポット再生を実現するために、空間フーリエ変換に基づく解析的なマルチスポット再生技術の開発を目的とする。(1)直線および円形スピーカアレイを用いた解析的方式を提案し、Hann窓に基づく方式の有効性を実際に構築した64チャンネル直線スピーカアレイの実測結果により示した。(2)反射音に頑健な音場制御実現のために、外部放射のない音場制御方式を提案した。(3)直線と円形/球形間の解析的音場変換を提案し、マルチスポット再生への応用を行った。これらの成果は、スピーチプライバシー、パーソナルオーディオやバーチャルリアリティシステム等にも非常に有用であると期待できる。

研究成果の概要(英文)：This research investigated several sound field control methods based on spatial Fourier transform for realizing multiple sound zones as below. (1) Spatial Fourier transform-based analytical approaches to generating multiple sound zones with a Hann window using linear and circular loudspeaker arrays have been provided and evaluated by using an actually implemented linear array of 64 loudspeakers. (2) Undesired propagation-free sound field control methods have been proposed for sound field synthesis in reverberant environments. (3) Analytical sound field conversion formulations between angular and circular/spherical harmonic spectrums have been derived and applied to generate multiple sound zones. These results can expect to be useful for not only multilingual-multizone generation but also speech privacy, personal audio and other virtualreality applications.

研究分野：音響信号処理

キーワード：音場制御 スピーカアレイ エリア再生 空間フーリエ変換 マイクロホンアレイ 音場変換

1. 研究開始当初の背景

ある位置では音が聞こえるが、違う場所ではその音が聞こえないスポット再生方式や、この方式を組み合わせ、ある場所では日本語が聞こえ、別の場所では英語が聞こえるようなマルチスポット再生技術は、多言語音声コミュニケーションのみならず、パーソナルオーディオ、スピーチプライバシー、その他バーチャルリアリティやエンターテインメントなど幅広い分野でのさらなる応用が期待される。

これまでの従来方式の多くは多点制御に基づく方式のため、スピーカの駆動関数が不安定になる問題があったが、申請者は空間フーリエ変換に基づく解析的方式を提案し、多点制御方式よりも高精度なスポット再生を実現できる理論検討を行ってきた。

この方式を実際に使うためには、以下のような課題が残されている。

- (1) 最適なスピーカ形状およびチャンネル数
- (2) 最適なエリア形状
- (3) 反射音による影響
- (4) 実際のスピーカアレイを用いた評価

2. 研究の目的

本研究では、この手法を実社会で応用すべく、ある位置では日本語のみが聞こえ、別の場所では英語のみが聞こえるような多言語音声マルチスポット再生システムの構築を目的とし、上記4点の課題を考慮し、以下のような目的を設計した。

<本研究の具体的な目的>

最大 64 チャンネルのスピーカ (直線配置および円形配置) でのマルチスポット再生を実現する。

- (1) スポット再生を実現するために最適な空間フーリエ変換の再生窓形状を設計する方法を開発する。
- (2) 壁面からの反射音やの影響に頑健な方法を開発する。

3. 研究の方法

1年目には、64 チャンネルの直線スピーカアレイの実装を行い、各スピーカから目的エリア、音の聞こえないエリアまでのインパルスお応答を無教室にて測定した。また、これまで直線アレイで検討してきた空間フーリエ変換に基づく方式を円形アレイに拡張し、円の外側や内側にマルチスポット再生を実現するための理論検討を行った。内側再生の検討を行っていた際、直線アレイでの空間フーリエ変換係数を円形アレイの係数に解析的に変換できる音場変換方式についても見当した。

2年目には、1年目の実装した実機アレイの計測データを解析し、また、最適な窓形状に関する検討も行い、提案法の有効性を示した。また、円形アレイを用いて、反射音がある環境においても実際にある音場を無音にする方式の検討および、内側には所望音場、外側

には音が放射しない制御方式の検討を行った。また、直線スピーカの近くでのみ音が聞こえ、離れると聞こえなくなるようなスポット再生方式の検討も行った。

3年目には、1年目に検討してきた音場変換の逆変換、つまり、球形アレイの空間フーリエ変換を直線アレイの係数へと変換する方式の検討を行った。また、球形スピーカアレイの近くでのみ音が聞こえ、離れると急激に減衰するスポット再生方式の検討も行った。

以上により、研究目的で掲げた、64 チャンネルでの実装、最適な窓形状の設計、および反射音の影響に頑健な方式の検討の全てを問題なく遂行できたとと言える。

4. 研究成果

(1) 64 チャンネル直線スピーカアレイの実装と最適な窓形状の提案

当初は図1のような単純な矩形窓を用いた空間フーリエ変換による検討を行ってきたが、Hann 窓(コサイン窓)を用いることにより、アレイと平行な波の成分を現象させ、従来のビームフォーミング、多点制御や矩形窓方式と比べて、より精度の高い制御性能を実現できることを計算機シミュレーションおよび無教室にて実装した 64 チャンネルの直線スピーカアレイ(図2)の実測データにより示した。図3の結果は、音の聞こえるエリアと聞こえないエリアの音圧パワー比を示すが、Hann 窓を用いた提案法が一番高い値を示し、精度がよいことが確認できる。

(2) バッフル型円形スピーカアレイを用いたスポット再生の提案

上記の直線アレイでの検討をバッフル型円形スピーカアレイへと適用し、空間フーリエ変換に基づく解析解を導出した(図4)。従来法であるビームフォーミング方式や多点制御よりも高精度な制御性能を計算機シミュレーションにより確認した(図5, 6)。

(3) 角度スペクトルから円調和スペクトルへの解析的音場変換およびスポット再生への応用

円形アレイの内部にマルチスポット再生を実現できる従来の解析的方式は、最大で2つまでのスポットしか形成することができない問題があった。そこで、上記の直線スピー

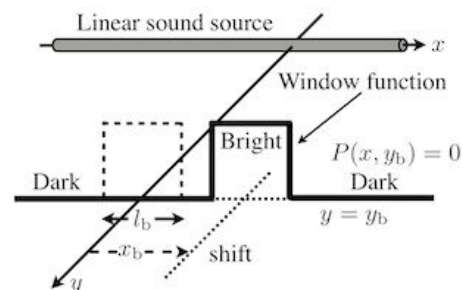


図1: 空間フーリエ変換によるスポット再生



図 2 : 実装した 64 チャンネルスピーカアレイ

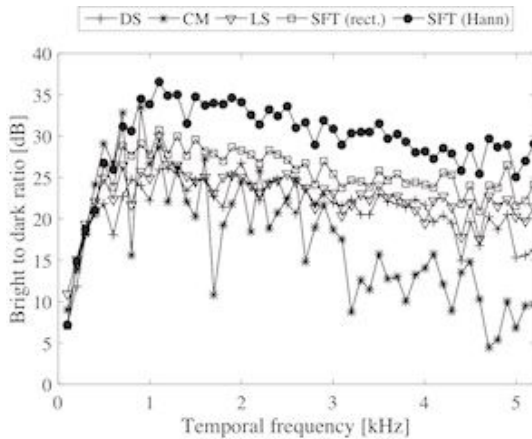


図 3 : スポット再生精度結果(直線アレイ)

ーカアレイでの窓関数法を円形アレイの内部に適用する方式を検討した。その際、直線アレイでの空間フーリエ変換係数を円形アレイでの係数へと変換する解析的音場変換を提案した。これは、スポット再生のみならず、音場収録・再現での成果としても非常に重要であり、提案した解析的音場変換により、直線マイクロホンアレイで収録した音場を円形アレイで再生できることを示した(図 7)。そして、この変換を応用し、円形アレイの内部に3つ以上のスポットを形成できる解析的スポット再生方式を提案した(図 8)。

(4) 円形二重スピーカアレイを用いた反射音に頑健な音場制御

通常の音場制御は、自由空間を過程した定式化が多く、壁からの反射音を考慮していない。しかし、実際には壁、天井、床等からの反射音の影響により、制御性能が劣化する問題がある。この問題に対して、円形アレイの内部は所望の音場、外側には音を放射しないような制御を円形二重スピーカアレイで実現する方式が提案されている。従来法は多点制御であるのに対して、提案法は解析解を導出し(図 9)、従来法よりも空間ナイキスト周波数内であれば高精度であることを計算機シミュレーションにより確認した(図 10)。

(5) 球面調和展開から角度スペクトルへの快適的音場変換

(3)の成果の逆変換である、解析的音場変

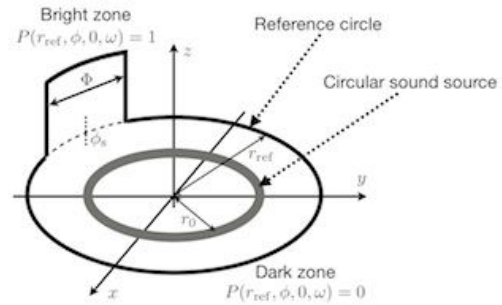


図 4 : 円形アレイを用いたスポット再生

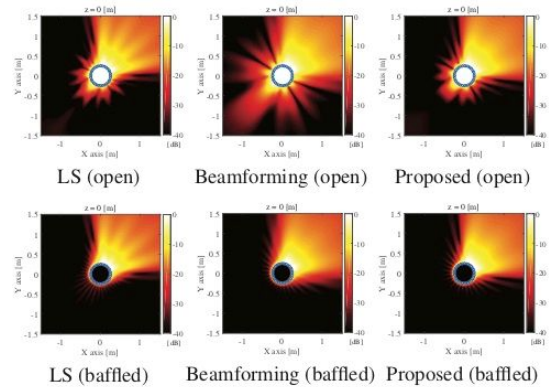


図 5 : 円形アレイによるスポット生成結果

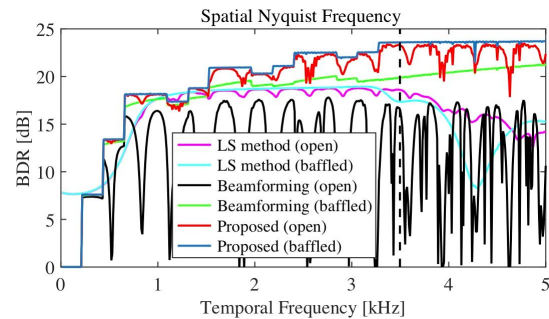


図 6 : スポット再生精度結果(円形アレイ)

換を提案した。具体的な応用例は、図 11 に示すように、球形マイクロホンアレイで収録した指向性音場を直線スピーカアレイで再生できるようになる。また、この再生により任意の球面調和スペクトルで記述された指向性音場をスポット再生することもできるようになる。解析解を導出し、計算機シミュレーションにより有効性を確認した。

(6) スピーカアレイ近傍におけるスポット再生方式

(1) ~ (5)までの方式はスピーカアレイから比較的離れた場所にスポットを形成するのに対して、スピーカの近くでのみ音が聞こえ、離れると急激に減衰して聞こえなくなるスポット再生方式について3手法を提案した。

1 つ目は、点音源の波面を直線アレイでキャンセルする方式であり、同一平面では近傍でのみ誤差による音圧が発生し、アレイ遠方では誤差がなくなるため音が聞こえないスポット再生の定式化を行った。計算機シミュ

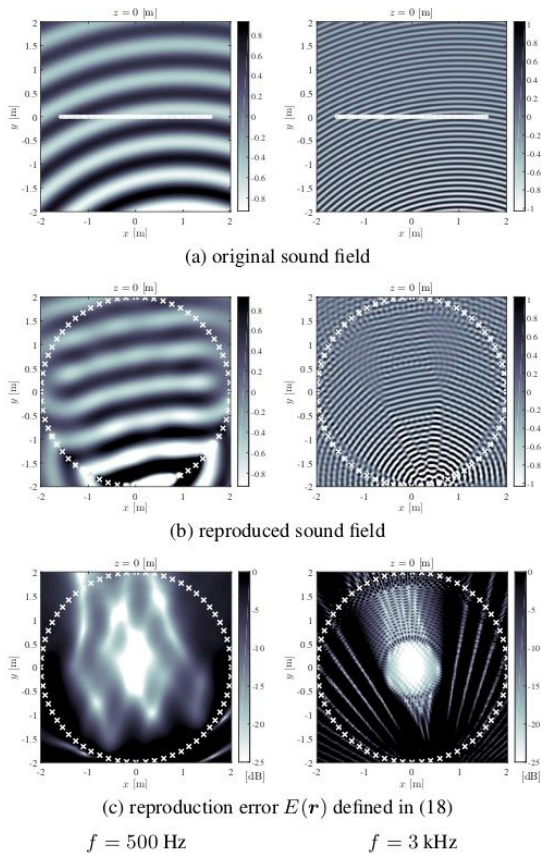


図 7：直線から円形への解析的音場変換

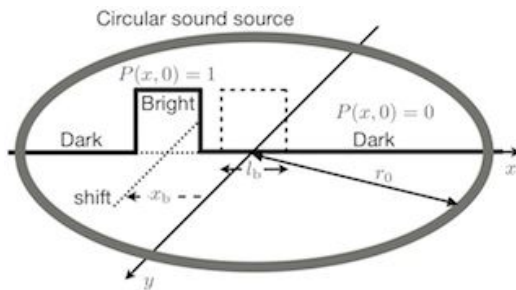


図 8：解析的音場変換に基づくスポット再生

レーションにより有効性を確認した。

2 つ目は，円形アレイの波面を直線アレイでキャンセルする方式である．上記が平面でのみ有効である方式に対して，本方式は 3 次元的有效である．解析解を導出し，計算機シミュレーションにより有効性を確認した．

3 つ目は，点音源の波面を球形アレイでキャンセルする方式であり，この方式も 3 次元的有效である．また，2 つ目の方式と比べてアレイ形状がコンパクトであるため，実用性が高いと考える．解析解を導出し，計算機シミュレーションにより有効性を確認した．

以上により，研究目的に掲げた，最適窓形状の検討，反射音のある環境での方式，および，64 チャンネルでのシステムの実装と評価，すべてに対して実施し，期待以上の成果を得ることができたと言える．この成果は，美術館などでの多言語同時ガイドシステムやパーソナルオーディオシステム等を実現する

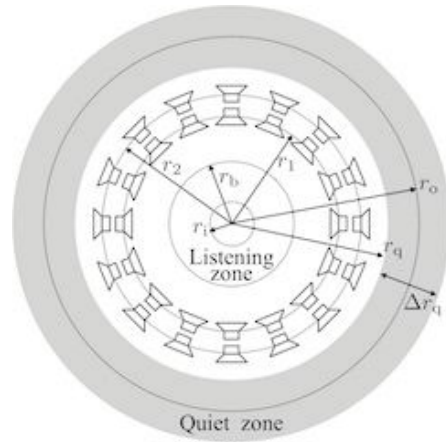


図 9：円形二重アレイを用いた音場制御

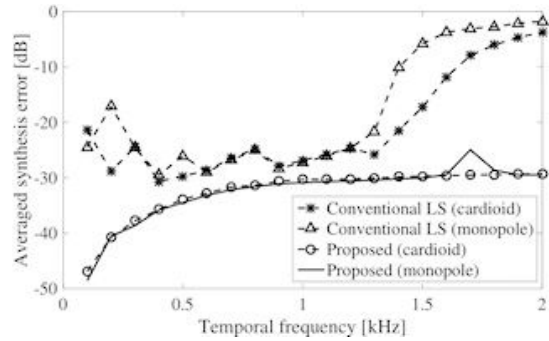
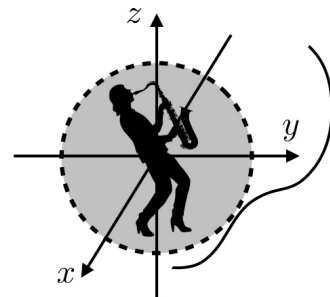
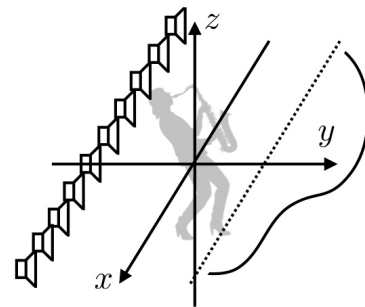
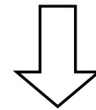


図 10：円形二重アレイの内部音場の制御精度



Recording with a spherical array



Synthesis with a linear array

図 11：球形から直線への解析的音場変換

上で有用な技術になると期待できる。そして、これらの研究成果により開発されたマルチスポット再生システムは、2018年度～2020年度の科研費基盤研究C「アクティブマルチスポット音空間再生システムの開発」として採択され、引き続き研究が進められている。

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 3 件)

- (1) Takuma Okamoto, "Localized sound zone generation based on external radiation canceller," *J. Inf. Hiding Multimed. Signal Process.*, vol. 8, no. 6, pp. 1335-1351, Nov. 2017. (査読あり)
<http://bit.kuas.edu.tw/~jihmsp/2017/vol8/JIH-MSP-2017-06-015.pdf>
- (2) Takuma Okamoto, "Horizontal local sound field propagation based on sound source dimension mismatch," *J. Inf. Hiding Multimed. Signal Process.*, vol. 8, no. 5, pp. 1609-1081, Sept. 2017. (査読あり)
<http://bit.kuas.edu.tw/~jihmsp/2017/vol8/JIH-MSP-2017-05-011.pdf>
- (3) Takuma Okamoto and Atsushi Sakaguchi, "Experimental validation of spatial Fourier transform-based multiple sound zone generation with a linear loudspeaker array," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 141, no. 3, pp. 1769-1780, Mar. 2017. (査読あり)
DOI: 10.1121/1.4977995

[学会発表](計 12 件)

- (1) 岡本拓磨, "剛球バッフルを用いた超接話アレイ処理", 日本音響学会 2018 年春季研究発表会, Mar. 2018.
- (2) T. Okamoto, "Angular spectrum decomposition-based 2.5D higher-order spherical harmonic sound field synthesis with a linear loudspeaker array," WASPAA, Oct. 2017.
- (3) 岡本拓磨, "球面調和展開から角度スペクトルへの解析的音場変換", 日本音響学会 2017 年秋季研究発表会, Sept. 2017.
- (4) 岡本拓磨, "モードマッチングに基づく円形二重アレイを用いた音場制御", 日本音響学会 2017 年春季研究発表会, Mar. 2017.
- (5) T. Okamoto, "Analytical approach to 2.5D sound field control using a

circular double-layer array of fixed-directivity loudspeakers," ICASSP, Mar. 2017.

- (6) 岡本拓磨, "音場テレポーテーション", 日本音響学会 2016 年秋季研究発表会, Sept. 2016.
- (7) T. Okamoto, "2.5D higher-order Ambisonics for a sound field described by angular spectrum coefficients," ICASSP, Mar. 2016.
- (8) 岡本拓磨, "角度スペクトルから円調和展開への解析的音場変換", 日本音響学会 2016 年春季研究発表会, Mar. 2016.
- (9) 岡本拓磨, "解析的音場変換に基づく円形アレイ内部におけるマルチスポット再生", 日本音響学会 2016 年春季研究発表会, Mar. 2016.
- (10) T. Okamoto, "Analytical methods of generating multiple sound zones for open and baffled circular loudspeaker arrays," WASPAA, Oct. 2015.
- (11) 岡本拓磨, "中空・バッフル型円形アレイを用いたマルチスポット再生", 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会, Sept. 2015.
- (12) 岡本拓磨, 坂口敦, "空間フーリエ変換に基づくマルチスポット再生とその実装", 電子情報通信学会応用音響研究会, Aug. 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本拓磨 (OKAMOTO, Takuma)
国立研究開発法人情報通信研究機構・先進的音声翻訳研究開発推進センター先進的音声技術研究室・研究員
研究者番号: 10551567