

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25871208

研究課題名(和文)加算型サウンドスポットシステムの高精度化

研究課題名(英文)Improvement for simple summation based sound spot system

## 研究代表者

岡本 拓磨 (Okamoto, Takuma)

独立行政法人情報通信研究機構・ユニバーサルコミュニケーション研究所音声コミュニケーション研究室・研究員

研究者番号：10551567

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、音の聞こえるエリアと聞こえないエリアを多数のスピーカを用いて精度よく形成することを目的とする。(1)直線アレイや円形アレイを用いて、空間フーリエ変換に基づく、音の聞こえるエリアと聞こえないエリアを精度よく形成する方式を提案した。(2)直線アレイや円形アレイを用いて、スピーカの近くでのみ音が聞こえる水平面の近傍エリア再生方式を提案した。(3)直線アレイと円形アレイを併用し、上下にも音が広がらない3次元的な近傍エリア再生方式を提案した。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、および多言語同時再生技術などで非常に有用となると期待できる。

研究成果の概要(英文)：This research proposed novel methods for generating acoustically bright and dark zones using multiple loudspeakers effectively. (1) Spatial Fourier transform based methods for generating acoustically bright and dark zones using a linear and a circular loudspeaker arrays have been proposed. (2) Methods for realizing close sound propagation, which can generate audible acoustic signals close to loudspeakers, in the horizontal plane, but very low amplitudes at and beyond the reference distance, using a linear and a circular loudspeaker arrays have been proposed. (3) A new method for realizing three-dimensional near-field sound propagation based on a circular and linear array combination has been proposed. These results can expect to be useful for speech privacy, personal audio and multilingual guide services and other virtual reality applications.

研究分野：音響信号処理

 キーワード：サウンドスポット エリア再生 局所再生 スピーカアレイ 音場再現 音場制御 空間フーリエ変換  
 パーソナルオーディオ

### 1. 研究開始当初の背景

目的音が聞こえるエリアと聞こえないエリアを形成するサウンドスポットシステムはスピーチプライバシー、美術館などでの多言語同時ガイドシステム、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重要である。

従来は多数のスピーカを用いて多点制御を行う方式であったが、目的エリア以外でも音が聞こえてしまうという問題があった。それに対して研究代表者は、多数のスピーカを用いて目的音は目的位置で同位相になるよう再生し、雑音をマスク信号として目的位置で打ち消すように生成することで、目的位置以外では目的音は絶対に聞こえない加算型サウンドスポットシステムを提案した。本研究は、この高精度化を目的とする。

### 2. 研究の目的

加算型サウンドスポットシステムは目的音に対してはるかに大きい音量の雑音をマスク信号として用いるため、実運用としては現実的でない。また、音の高さによってスポットの大きさが異なるという問題、100チャンネル以上のスピーカが必要であること、反射音により精度が劣化するという問題があった。そこで、本研究では、加算型サウンドスポットシステムの高精度化のために、以下の3点を具体的な目的とした。

- (a): スポット拡大のための、目的信号に最適なマスク信号を計算する方法の開発
- (b): 最適なマスク信号に合わせたスピーカ配置(数の削減)の検討
- (c): システムの実装および実環境における反射音などの影響の検討

### 3. 研究の方法

1年目は、(a)に対する取り組みとして、雑音ではなく、音声など意味のある信号をマスク信号として扱うための方式の検討を行った。また、その発展として、音の聞こえるエリアと聞こえないエリアを制御するための解析解を用いた方式の検討を行った。上記の結果を受けて、直線スピーカアレイを用いることが有効であることが示されたため(b)、128チャンネル分の直線スピーカアレイシステムの実装を行った(c)。さらに、(c)に関する取り組みとして、反射音のある環境でも使える方式を検討するために、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方式の検討を行った。

2年目は、(b)に関する取り組みのうち、スピーカ数削減の検討について行った。具体的には、直線スピーカアレイではなく、円形スピーカアレイを用いることにより、音の聞こえるエリアと聞こえないエリアを形成する方式や、スピーカの近くでのみ音が聞こえる方式の検討を行った。さらに、(c)の取り組みとして、直線スピーカアレイと円形スピーカアレイを組み合わせることにより、3次元

的な近距離エリア再生の検討を行った。また、実装した直線アレイを用いて、アレイの右、中央、左の3箇所において3言語別々の音声が聞こえるマルチスポット再生システムを実装した。

### 4. 研究成果

#### (1) 任意の信号をマスク信号とする方式の提案

従来の加算型サウンドスポットシステムのマスク信号は無関連な雑音を用いていたが、音声などの任意のマスク信号を導入する検討を行った。図1に示すように直線スピーカアレイを向かい合わせで設置し、目的音のみは従来法と同様にアレイの中心で同位相となるように駆動する。それに対して、マスク音は各直線アレイから平面波としてそれぞれを逆位相で出力する。すると、アレイの近くではマスク信号の振幅が大きいため目的音は聞こえないが、アレイ中心ではマスク音が相殺され、逆に目的音は強調されるため、任意のマスク信号を用いた加算型サウンドスポット再生方式を実現した。1 kHzのシミュレーションによる信号対雑音比の結果を図2に示す。[発表文献：(8)]

#### (2) 解析解に基づく音の聞こえるエリアと聞こえないエリアを形成する方式の提案

(1)の検討により、任意のマスク信号を扱えるようになったが、図2の結果を見ると、信号対雑音比はそれほど高くないことがわかる。この問題を解決するために、音の聞こえるエリアと聞こえないエリアを効率よく

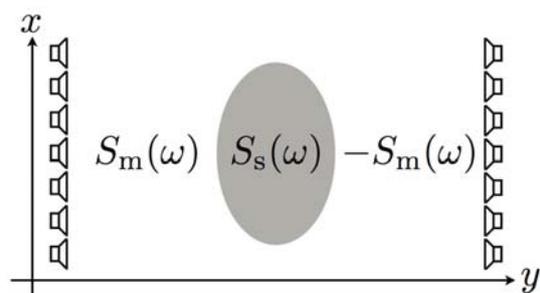


図1: 平行直線アレイ(中心: 目的音が聞こえるエリア, 両端: マスクが聞こえるエリア)

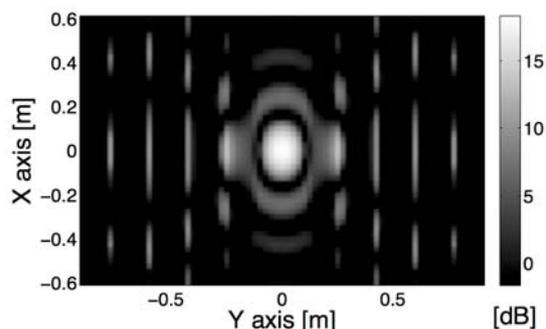


図2: 目的音とマスク音の信号対雑音比

制御する方式の検討を行った。

従来法である多点制御は、スピーカの信号が不安定になる、パラメータ調整のための反復計算が必要、といった問題を有する。本提案では、空間フーリエ変換を用いた解析解に基づく音場再現に着目した[発表文献：(3)]。この方式は原音場の音圧から安定したスピーカの駆動信号を解析的に一意に与えるという特長を持つ。そこで、本提案では、原音場を音の聞こえるエリアを音圧 1、聞こえないエリアを音圧 0、と矩形窓でモデル化し、駆動信号を算出する方式を提案した。図 3 に直線アレイを用いた場合の例を示す。矩形窓の空間フーリエ変換である sinc 関数を用いた解析解に基づく安定した駆動信号の導出を行った。図 4 は 64 チャンルの直線スピーカアレイを用いた場合の従来の多点制御法であるエネルギー最大化法の再生領域の音圧レベル(3 kHz)の結果、図 5 は提案法の結果を示す。また、図 6 は音の聞こえるエリアと聞こえないエリアの音圧レベルの比を表す。これらの結果より、提案法の方が効率的なエリア再生を実現できることが確認できる。[発表文献：(5), (7)]

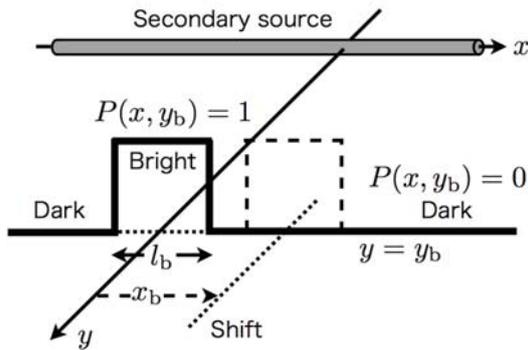


図 3：音の聞こえるエリアの音圧と聞こえないエリアの音圧を矩形窓でモデル化

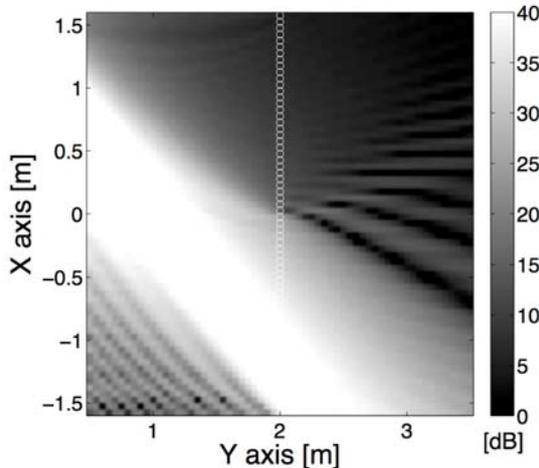


図 4：エネルギー最大化法(従来法)の再生音圧レベル(3 kHz)

また、直線スピーカアレイは 64 チャンルものたくさんのスピーカを必要とするが、スピーカ数を減らす試みとして、円形スピーカアレイを用いた方式も提案した。直線アレイの時と同様、音圧を矩形窓でモデル化し、円形アレイを用いた音場再現の原理を用いて各スピーカの駆動信号を解析的に導出した。これにより、直線アレイを用いた方法の 64 チャンルに対して、半分の 32 チャンルを用いたエリア再生方式を提案した。[発表文献：(4)]

(3) スピーカの近傍でのみ音が聞こえ、遠ざかると聞こえなくなるエリア再生法の提案

従来方式である多点制御、また(1)の方式や(2)の方式は反射音のない自由空間を仮定している。そのため、壁面、天井、床のある実環境では、反射音の到来により音が聞こえないエリアにも音が届いてしまうため、制御性能が劣化する。

この問題に対して、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エリア再生方式の検討を行った。この方式が実現できれば、壁には音が届かなくなるため、反射音のある実環境においても有効なエリア再生法となると期待できる。以下、提案した 2 つの方式について述べる。

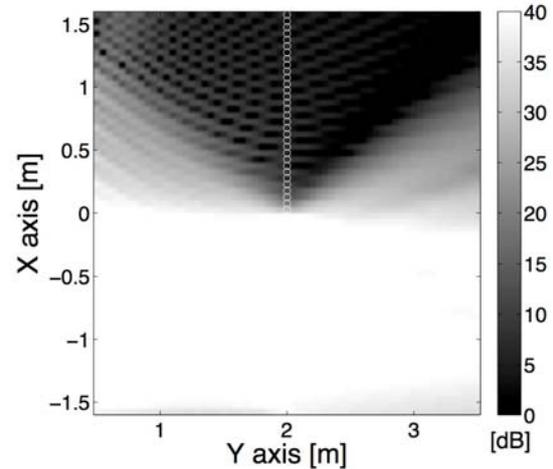


図 5：提案法の再生音圧レベル(3 kHz)

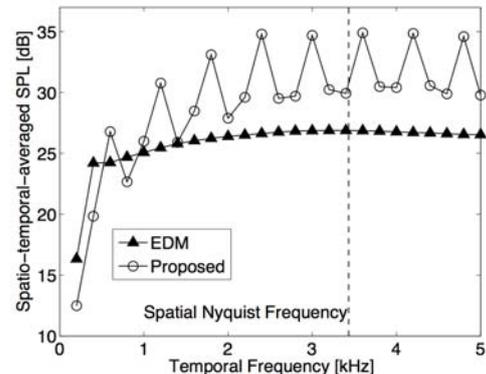


図 6：音の聞こえるエリアと聞こえないエリアの音圧レベル比の比較

1つ目は、直線アレイや円形アレイなど、2次元配置のアレイの特性を利用した方式である。点音源は3次的に音が広がるため、距離が2倍になると約6 dB音圧レベルが減衰するという特長を持つ。それに対して、直線アレイや円形アレイで点音源の音場を再現すると、アレイの近傍では距離が2倍になっても3 dBしか減衰しないという特長を持つ。これを2.5次元音場再現と呼ぶ。この実音源とアレイの次元ミスマッチを利用したエリア再生方式を提案した。直線アレイや円形アレイを用いて、仮想的な点音源を、空間フーリエ変換を用いた解析解に基づく音場再現にて再生する。次に、その仮想音源の位置にもう1つ実際のスピーカを配置し、逆移送で信号を再生する。すると、上記の伝播特性の違いにより、スピーカの近くでは音が聞こえるが、離れると伝播特性が同じとなるため音が相殺され、聞こえなくなる。以上により、音源の次元ミスマッチに基づく近傍エリア再生を実現した。[発表文献：(6), (7)]

しかし、上記の方法は、平面の音圧しか考慮していないため、アレイと同じ平面での音圧は保障されるが、それ以外の面では音波が伝播してしまうという問題がある。それに対して、3次元空間全体を考慮した近傍エリア再生方式を提案した。

上記の方式では、円形アレイの平面伝播しか考慮していなかったが、円形アレイは鉛直方向にも音が伝播する。そこで、円形アレイをすべて同位相で駆動した時の特性を、2次元空間フーリエ変換を用いて解析的に記述した。これにより、円形アレイは、半径の内側と外側で異なる伝播特性であることがわかった。そこで、図7のように円形アレイの中心軸に直線アレイを配置し、円の半径の外側の音圧を再現する駆動信号を解析的に算出し、その逆位相で再生する。すると、円の半径の外側の音場は完全に相殺されるのに対して、円の内側の音場は伝播特性が異なるため、相殺されずに音圧が残る。これにより、3次的な近傍エリア再生を実現した。提案法による再生音場(1 Hz)を図8に示す。[発表文献：(1), (2)]

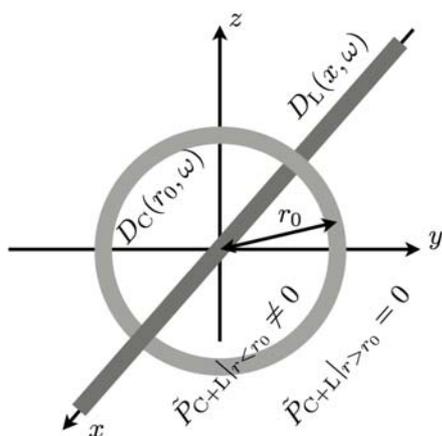


図7：円形アレイと直線アレイの同時再生

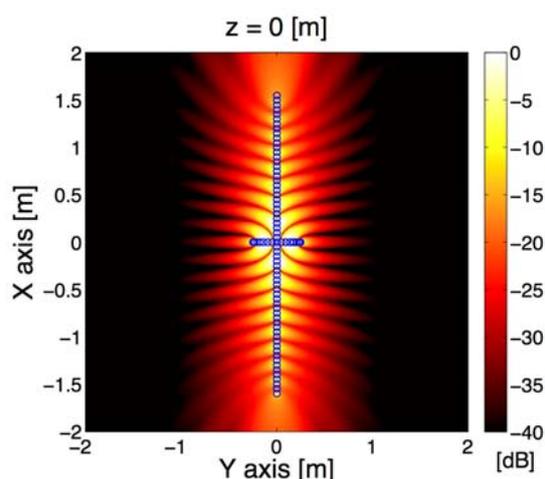


図8：円形アレイと直線アレイの併用に基づく近傍エリア再生音圧レベル(1 kHz)

#### (4) システムの実装および多言語同時再生デモシステムの構築

(B)の検討により、直線アレイを用いた制御方式が有効であることが確認できたため、実際のシステム実装を行った。スピーカアレイの空間解像度により、制御できる音の周波数が決まるため、各スピーカ間の距離を5 cmとし、1インチのスピーカユニットを用いた。各直線アレイを8チャンネルずつとし、横につなげることもでき、かつ、上に積み上げて平面アレイとしても使える仕様とした。合計128チャンネル分の8チャンネルスピーカアレイ16本を作成した。このアレイを既存のスピーカアンプおよび多チャンネルD/Aと接続し、64チャンネルの直線スピーカアレイシステムを構築した。その上で、音の聞こえるエリアを右、左、真ん中と3種類のフィルタを設計し、それぞれに別の言語の音声を入力し、重ね合わせて出力することにより、アレイの真ん中は英語が聞こえ、右は日本語、のような多言語マルチスポット再生デモシステムを構築した。このデモはICASSP 2014のオーラル発表時に上映し、また、情報通信研究機構内の研究発表会においても日英中3言語のマルチスポット再生をデモ展示し、研究奨励賞を受賞した。

以上により、研究目的に掲げた、マスク信号の改良、チャンネル数の削減、反射音のある環境での方式、および、システムの実装、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多言語音声マルチスポット再生システムは、2015年度～2017年度の科研費若手研究B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

[学会発表] (計 9 件)

- (1) Takuma Okamoto, Near-field sound propagation based on a circular and linear array combination, Proc. 40th IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) 2015, 査読あり(採択率 52%), pp. 624–628, 2015 年 4 月 24 日, Brisbane Convention & Exhibition Centre, Brisbane, Australia.
- (2) 岡本拓磨, 円形アレイと直線アレイの併用に基づくエリア再生, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp. 643–666, 2015 年 3 月 16 日, 中央大学, 東京
- (3) 岡本拓磨, 音場収録・再現システムの比較, 課題と展望, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, 招待講演, pp. 895–898, 2014 年 9 月 5 日, 北海学園大学, 北海道
- (4) 岡本拓磨, 円形アレイを用いたマルチスポット再生, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, 招待講演, pp. 833–836, 2014 年 9 月 4 日, 北海学園大学, 北海道
- (5) Takuma Okamoto, Generation of multiple sound zones by spatial filtering in wavenumber domain using a linear array of loudspeakers, Proc. 39th IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) 2014, 査読あり(採択率 48%), pp. 4733–4737, 2014 年 5 月 8 日, Fortezza dal Basso, Florence, Italy.  
DOI:10.1109/ICASSP.2014.6854500
- (6) 岡本拓磨, 円形アレイと実音源の差分に基づくエリア再生, 信学技報, vol. 114, no. 3, EA2014-4, pp. 25–30, 2014 年 4 月 17 日, (独)情報通信研究機構ユニバーサルコミュニケーション研究所, 京都
- (7) 岡本拓磨, 直線アレイ型音場再現の誤差に基づくエリア再生, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp. 925–928, 2014 年 3 月 11 日, 日本大学, 東京
- (8) 岡本拓磨, 波数領域空間フィルタリングによる直線スピーカアレイを用いたマルチスポット再生, 信学技報, vol. 113, no. 349, EA2013-94, pp. 37–42, 2013 年 12 月 13 日, 金沢大学, 石川

- (9) 岡本拓磨, 平行直線アレイを用いたスポット再生, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 727–730, 2013 年 9 月 25 日, 豊橋技術科学大学, 愛知

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 局所音響再生装置およびプログラム  
発明者: 岡本拓磨  
権利者: 情報通信研究機構  
種類: 特許  
番号: 特許願 2014-115582 号  
出願年月日: 2014 年 6 月 4 日  
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www2.nict.go.jp/univ-com/slc/members/takuma-okamoto/>  
<http://www2.nict.go.jp/univ-com/slc/en/members/takuma-okamoto/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 拓磨 (OKAMOTO, Takuma)  
独立行政法人情報通信研究機構・ユニバーサルコミュニケーション研究所音声コミュニケーション研究室・研究員  
研究者番号: 1 0 5 5 1 5 6 7