

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00222

研究課題名(和文) スポット伝達用2ビームステアリング式パラメトリックスピーカの開発

研究課題名(英文) Development of the pinpointed audio transmission system with two parametric speakers incorporating beam steering

研究代表者

永田 仁史 (Nagata, Yoshifumi)

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：40301030

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：超音波振動子を密に配置できない場合でもサイドローブを抑えた不規則振動子配置のパラメトリックスピーカ2台、および、これらを駆動する2台のステアリング機能付きスピーカ駆動装置を開発し、さらに、ステレオカメラを用いたビーム照射点制御インターフェースによって2つのスピーカの照射位置を操作するピンポイント音響伝達用パラメトリックスピーカの全体制御システムを開発した。開発システムを用いて再生可聴音の音場に関して測定した結果、ビーム交差角が小さいほど交点における音圧は高いが、可聴音場が2つのビームに沿って交点の前後に広がる傾向があることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2つのステアリングシステムを協調動作させて任意の位置に可聴音を生成するシステム、および、サイドローブの小さいスピーカを比較的少数の振動子で実現した例はこれまでになく、ピンポイントに音響伝達可能な技術が実現できたことになる。この結果、駅のホームや会議場などで対象の人だけに警告等の伝達が可能になり、煩わしい音を減らし、落ち着いた空間を増やすのに役立つ。また、スピーカ駆動装置の信号処理については、処理を一貫して周波数領域で行う低演算量の方式を提案しており、特に、SSB変調をDFTによる帯域変換処理に置き換える際の信号フレーム接続における劣化現象回避の提案はデジタル信号処理の発展に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：Two parametric loud speakers with irregular arrangement of ultrasonic transducers are developed to reduce grating lobes that is often resulted from the non dense placement of the transducers. These speakers are driven by the two speaker driving system with beam steering also developed for the speakers. Moreover, the control system with the graphical interface to point the beams at a desired point is developed. The control system exploits a 3D position estimation by using stereo camera. The measurement of the reproduced audible sound in the region at and near the crossing point of the two beams using the developed system. As the results of the measurements, we verified that the sound pressure at the beam crossing point gets higher but the audible region grows long along the beams as the beam crossing angle gets narrower.

研究分野：音響信号処理

キーワード：パラメトリックスピーカ ビームステアリング サイドローブ 照射点制御 ステレオカメラ ピンポイント伝達 スポット伝達 周波数領域処理

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

強力超音波の自己復調作用を利用して局所的な可聴空間を実現するパラメトリックスピーカは、特定の場所だけに音を流すような音響システムに利用されており、音質改善や可聴領域の制御等に関して種々の研究が行われている。また、スピーカを構成する多数の振動子の駆動信号に遅延を与えてビーム方向を回転(ステアリング)でき、これを利用したユーザ位置検出や室内音響システムが提案、研究されている。超音波による近距離のセンシングは、車やロボット等で用いられており、画像センサにはない利点があるが、空間的な分解能は限定的である。これに対し、筆者らは、ビームステアリングによる空間走査を行う空間センシングシステム(科研費 H26-28)を研究してきており、一般的な多チャンネル PC オーディオシステムを使って 64ch のシステムを開発している。しかし、現状のシステムは、強いビームを生成できる比較的大きい振動子(直径 17mm)を用いているため、振動子間隔の制約によって強いサイドローブがメインローブに比較的近い角度(約 30 度)に生じ、この方向に可聴音が漏れる。また、不用意にメインビームを遮った場合もそこで音が聞こえる。サイドローブの抑圧に関しては、普及している小径の振動子(直径 9mm)の方が有利であるが、小さい振動子で十分なパワーを得るにはより多くの素子が必要となり、システムのコストに直結する処理チャンネル数を少なくする上でも大きな素子を用いる方が有利である。したがって、大きな径の比較的少数の振動子を用いて良好な指向特性のスピーカを実現する必要があった。

### 2. 研究の目的

サイドローブを抑圧した 2 台のパラメトリックスピーカを開発し、それらの超音波ビーム交点における二次音波発生を利用した情報伝達システムを開発する。搬送波と側帯波を 1 ビームに乗せて送る方式では、サイドローブ方向や反射波の通過する位置でも二次音が再生されるため、伝達可聴音の漏れが広範囲に生じ、目的の聴取者以外にとっては煩わしい雑音となる可能性があった。そこで、搬送波と側帯波を別個のスピーカから放射し、目的位置で交差させるようなステアリングシステムを開発する。任意位置へのピンポイントの音声伝達が可能となることにより、静けさの要求される環境における性能改善や、会議会場や駅のホームなど、多くの人が居る場所での注意や警告を対象となる人だけに伝えることなどが可能になる。

### 3. 研究の方法

次に述べるように、①不規則素子配置パラメトリックスピーカの開発、②照射点制御インターフェースと全体処理システムの開発、③2 ビーム方式の有効性の評価の順番で研究を行う。

①**不規則素子配置パラメトリックスピーカの開発** 素子径が大きめで、且つ、比較的少ない素子数(64 個)の場合でもサイドローブを抑圧した指向性を実現するため、不規則に素子を配置したスピーカとその駆動システムを 2 台ずつ開発する。素子数 64 は現状の PC オーディオ環境で実現可能なほぼ最大の値であり、他の研究グループの専用ハードウェアで実現されている素子数数百のデバイスと比較すると少ないが、処理コストとハードウェアのコストの面で、また、PC 上でソフトウェアのみで処理を変更できる点でも利点である。素子配置の設計にあたっては、ビームステアリングによる指向性の変形も考慮する必要がある。

#### ②照射点制御インターフェースと全体システム

スピーカが鋭い指向性をもつため、目的位置に正確にビームを照射する必要がある。このため、照射位置を明示的に指定するための照射点制御インターフェースを開発する。照射位置の指定は、ステレオカメラによる 3 次元位置推定処理を用い、画面上で目的位置を指定することとする。2 台のパラメトリックスピーカとその駆動システム、および、照射点インターフェースからなる全体システムを動作させ、任意の位置でビームを交差させることが可能な局所可聴システムを構築する。

③**2 ビーム方式の有効性の検討** 開発したシステムが、ビーム交点を指定した目的位置に自由に設定でき、その位置近傍だけで音響情報を受聴可能であることを確認する。ビームの交差角度による可聴音場の形状や音圧の違い、安定的な聴取に有効なビーム形状等について検討する。

### 4. 研究成果

#### ①開発した不規則配置パラメトリックスピーカ

ステアリングによる指向性形状の変化を考慮してスピーカ素子の配置を決定するため、シミュレーションによって多数の不規則配置を探索し、正面  $0^{\circ} \pm 45^{\circ}$  の範囲のステアリング角度に亘ってサイドローブレベル最大値を平均的に低く保つ配置を求めた。多数パラメータの最適化のため、実数値 GA プログラムを作成して計算した。スピーカは、素子配置半径 9cm と 8cm の 2 つを、また、各々を駆動するための 64ch 広帯域アンプと PC オーディオインターフェースも開発した。開発したスピーカの正面を図 1 に示す。また、これらの指向特性を図 2 に示す。図 2 からわかるように、両スピーカともにステアリング角度が  $-10^{\circ}$  から  $10^{\circ}$  と小さい場合はサイドローブが抑えられているが、ステアリング角度の絶対値が  $-20^{\circ}$  と  $20^{\circ}$  の場合は、配置半径 9cm 版のサイドローブが大きくなるのに対し、8cm 版ではそれが大幅に改善されていることがわかる。



図1 左：素子配置半径 9cm、右：素子配置半径 8cm

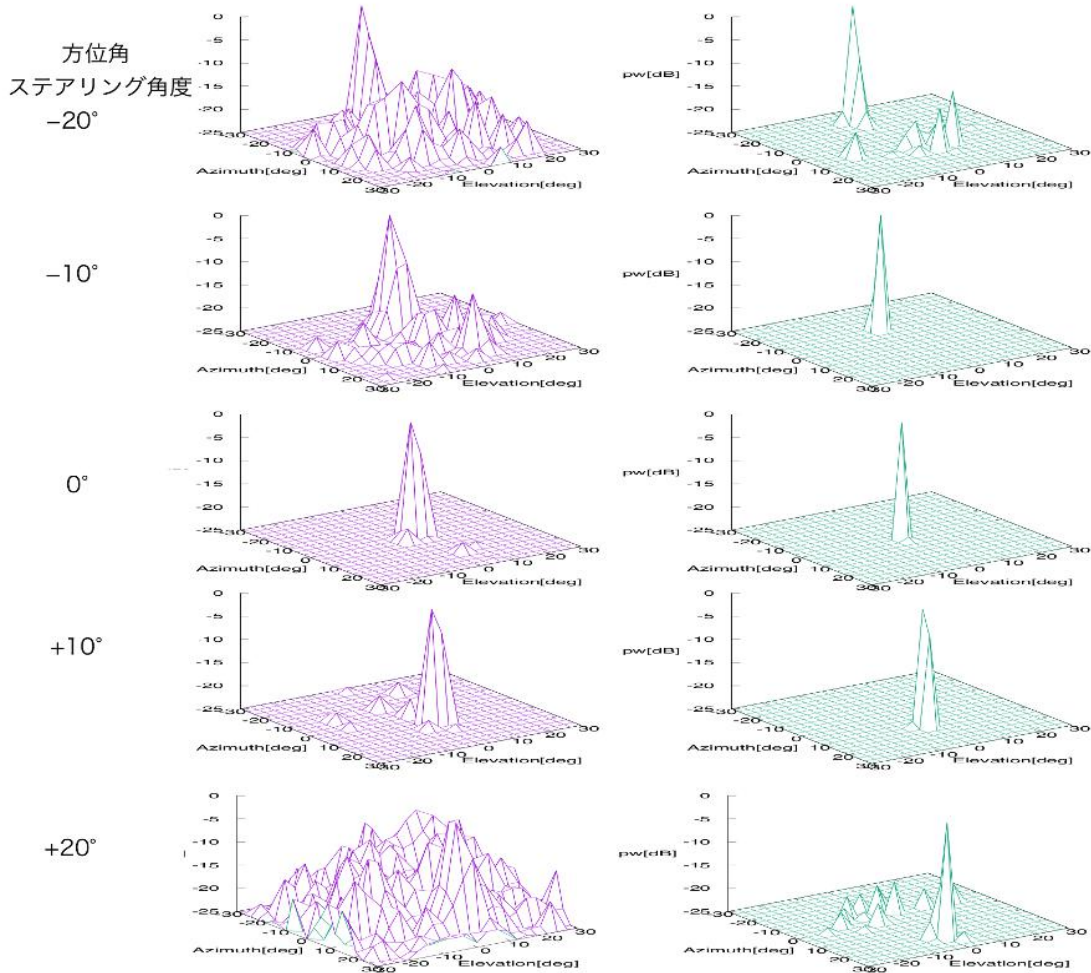


図2 開発したスピーカの復調波（1kHz の正弦波）の指向性  
（左：素子配置半径 9cm、右：素子配置半径 8cm）

## ②照射点制御インターフェースと全体システム

ステレオカメラを用いた照射点制御インターフェースと2台のスピーカのシステム全景を図3に示す。右側のスピーカ上部に取り付けた2台のカメラがステレオカメラである。

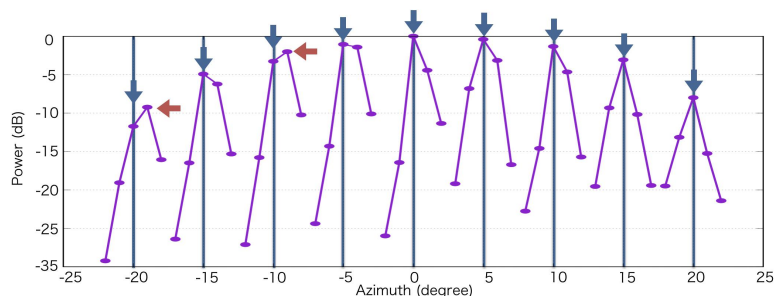
また、照射点制御インターフェースによって指示した照射点近傍の音圧を図4に示す。指示照射位置の方位角を $-20^{\circ}$  ~  $+20^{\circ}$  の範囲で $5^{\circ}$  ずつ変えながら測定した結果であり、図中の矢印が指示方向、折線グラフが音圧である。図4からわかるように、指示位置を変えた場合でも



図3 ステレオカメラを含むスピーカシステム全景

だいたいの指示位置においておよそ最大の音圧となっており、画像による照射点制御が有効に働いていることがわかる。

図 4. 照射点指示位置近傍の音圧



### ③2 ビーム方式の有効性の検討

2 ビーム方式による再生可聴音の音場に関して音圧測定を行った。ビーム交差角度を  $15^\circ$  から  $135^\circ$  の間で  $15^\circ$  ずつ変えたときの交点近傍の最大音圧レベルを図 5 に、また、ビーム交差角度が  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  の各々についてのビーム交点近傍  $1\text{m} \times 1\text{m}$  の水平面内の音圧分布を図 6 に示す。

これらの結果からわかるように、交点近傍でビームに沿って音圧の高い領域が発生し、交点付近で最大となっている。交差角度が小さい場合はビーム交差領域の形状に応じて可聴領域も長く広くなり、同時に交点近傍の最大音圧も大きい。交差角度が大きい場合は、音圧の高い可聴領域が小さくなり、最大音圧も小さくなっていることがわかる。これは、搬送波と変調波が交わって進行する長さが長いほど自己復調の効率が高くなることに対応している。パワーの効率と可聴領域のピンポイント性を考慮すると、交差角度  $30^\circ \sim 45^\circ$  あたりが実用的ではないかと思われる。

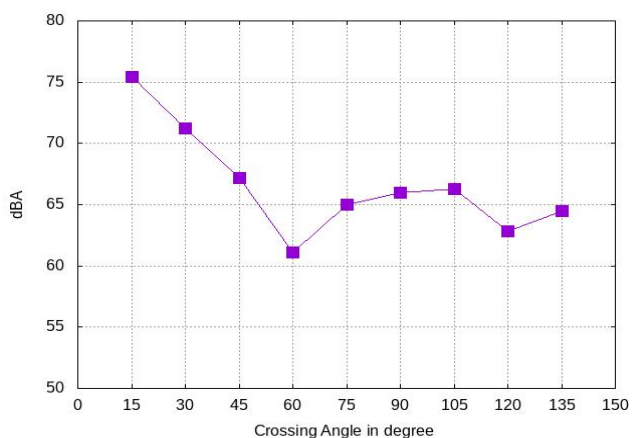


図 5. ビーム交差角度と交点位置の音圧レベル

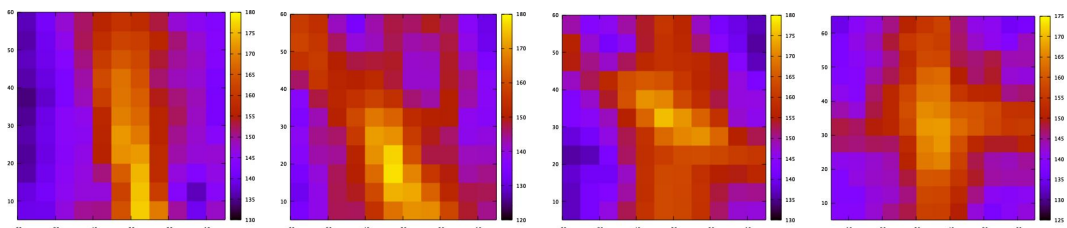


図 6. ビーム交点近傍の可聴音の音圧分布（左から交差角  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ ）

以上に述べたように、2 ビームを目的位置で交差させることのできるピンポイント可聴システムを開発し、ビーム交点での交差角度に応じた音圧分布などの知見を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 金城翔太、永田仁史、藤岡豊太、安倍正人	4. 巻 Vol. J101-A, No. 6
2. 論文標題 周波数領域処理を用いたパラメトリックスピーカ駆動システム	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Shota Kinjo, Yoshifumi Nagata, Toyota Fujioka, and Masato Abe
2. 発表標題 A Study on Element Characteristics Compensation of Parametric Loudspeaker
3. 学会等名 The 38th Symposium on UltraSonic Electronics (USE2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金城翔太、永田仁史、藤岡豊太、安倍正人
2. 発表標題 ランダム素子配置パラメトリックスピーカに関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 超音波研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 成田恭平、金城翔太、永田仁史、藤岡豊太、安倍正人
2. 発表標題 パラメトリックスピーカによる空間センシングシステム --合成開口方式とステアリングビーム方式--
3. 学会等名 日本音響学会 2018年春季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮澤佑樹、金城翔太、藤岡豊太、永田仁史
2. 発表標題 改良型ランダム素子配置パラメトリックスピーカの開発
3. 学会等名 日本音響学会 2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤原真也、金城翔太、藤岡豊太、永田仁史
2. 発表標題 ステレオカメラを用いたパラメトリックスピーカ制御インターフェースに関する検討
3. 学会等名 日本音響学会 2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金城翔太、藤岡豊太、永田仁史
2. 発表標題 音響信号を用いた空間センシングに関する予備的検討
3. 学会等名 日本音響学会 2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019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
研究協力者	金城 翔太  (Kinjyo Shota)	岩手大学・理工学部・特任研究員  (11201)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	恭平 恭平  (Narita kyouhei)		
研究協力者	宮澤 佑樹  (Miyazawa Yuki)		
研究協力者	藤原 真也  (Fujiwara Shinnya)		