

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：33803

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700151

研究課題名(和文) 1ビット個別駆動パラメトリックスピーカを用いたアコースティックプロジェクタ

研究課題名(英文) Acoustic Projector Using Individually Controlled Parametric Loudspeaker with High Speed 1-bit Signal Processing

研究代表者

武岡 成人 (TAKEOKA, Shigeto)

静岡理科大学・理工学部・講師

研究者番号：30514468

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円、(間接経費) 570,000円

研究成果の概要(和文)：これまで研究を進めて来た指向性制御型パラメトリックスピーカは極めて直線性が高く、また任意の方向に複数の個別の音ビーム出力が可能である。そこで本研究ではより分離性の高い多方向出力に向けて素子配置や駆動信号の検討を加え、実際に円弧状の壁面を用いて反射波を観察する実験を行った。これによりスピーカの設置は一箇所でありながら様々な方向から音ビームを再生することができるアコースティックプロジェクタとでもいうべきシステムを構築することができた。

研究成果の概要(英文)：The Steerable Parametric Loudspeaker that we have proposed is able to generating multiple independent and super-directive audio beams, and controlling the angles of the beams. In this report, we describe about array processing of transducers for isolation of the beams, and an experiment about reflected beams from semicircular wall. This system allows to reproducing sound beams from any directions to the listening area, though the speaker is set up in one place.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学

キーワード：パラメトリックスピーカ パーチャルリアリティ 超多チャンネル信号処理

1. 研究開始当初の背景

(1) 聴覚は人間にとって極めて重要な感覚器官であり、音場をあるがまま記録・伝送する技術はコミュニケーションツールや演奏等音文化財の記録など人類の文化に大きく寄与する。約 120 年前のエジソンらの機械式レコーダにより初めて実用化された録音・再生技術は様々な発展を遂げ、現在では電気信号上は知覚限界に近い S/N のレコーダも市販されている。しかしながら空間中のある一点の音圧の再現では無く、空間情報を含めた立体的な音場を再現する試みは優れた研究が数多くあるものの決定的なシステムが確立されているとは言い難いのが現状で、未だ途上の技術といえる。一般に広く利用されているいわゆるステレオや 5.1ch 再生、ヘッドホン受聴は両耳周辺に特定の音場を再現する手法であり、立体再生を行うには原理的に受聴者の位置と姿勢が限定されることが問題となる。一方、受聴者の姿勢によらない 3 次元音場再生手法としてホイヘンスの原理に基づく波面合成による手法が知られている。制御波面上各点の音圧と法線方向の粒子速度を原音場と一致させることにより制御閉曲面内で所望の音場を生成することが可能となるが、厳密な再生には対象となる周波数帯の半波長毎（可聴域全般であれば 1cm 毎）にスピーカを設置する必要がある。近年海外では 1988 年に Berkhout により提案された Wave Field Synthesis(WFS)と呼ばれる波面合成法に関する研究が盛んに行われている。これら研究の多くは前述の膨大な制御点に変わり 10~100ch 程度のスピーカアレイで音場を囲み適応制御や圧縮符号化により聴感上違和感の無い音場生成を行うというものであるが、原理的に音場の厳密性を欠くこと、間引いているとはいえ再生装置の大規模化が課題となる。よって、再生音源の空間分解能を高め、なおかつシステムを小規模化することは立体音響再生においてブレイクスルーとなりえる。

(2) 極めて特徴的なスピーカとしてパラメトリックスピーカ、あるいは超音波スピーカと呼ばれる再生方式がある。これは超音波を搬送波とした変調信号を出力し、空気伝播中の非線形性により可聴域に復調する方式で、可聴音でありながら超音波の非常に鋭い指向性を持つスピーカ出力が可能である。またその特徴から壁面への照射時に出力音ビームはほぼ鏡面反射し、結果あたかも反射点から音が到来しているように感じることや、反射波をある点に集中させることによる仮想的な空中再生などが報告されている。それら背景のもと、我々はアレイ状の超音波素子を高速 1bit 信号で直接制御することにより 576ch の個別駆動を行う指向性可変なパラメトリックスピーカシステムを実現してきた。本手法ではアレイ制御によりパラメトリックスピーカの超指向性出力を保ったまま出力方向を任意に制御することが可能で、かつ複数の

個別な出力が可能となる。図 - 1 に指向性制御型パラメトリックスピーカ外観を、図 - 2 に本装置で 30° 方向に出力した際の指向特性と、通常のダイナミック型スピーカの指向特性を示す。所望の方向に極めて鋭い出力が得られている様子がわかる。

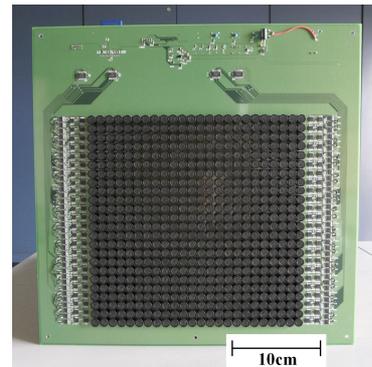


図 - 1 試作機外観

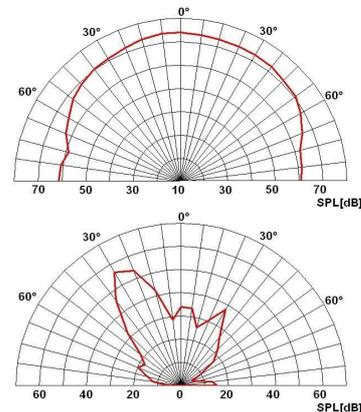


図 - 2 指向性比較 (上図：通常のスピーカ 下図：試作機出力 (30° 方向に制御時))

2. 研究の目的

本研究ではこれら手法の応用としてアコースティックプロジェクタとでもいうべき反射型の立体音響再生手法の確立を目指す。図 - 3 に示すように、これまで検討してきた指向性制御型パラメトリックスピーカと曲面状の反射壁を用い、各方向への出力ビームを反射させ受聴エリアに対して各方向からの音波面を再現しようというものである。

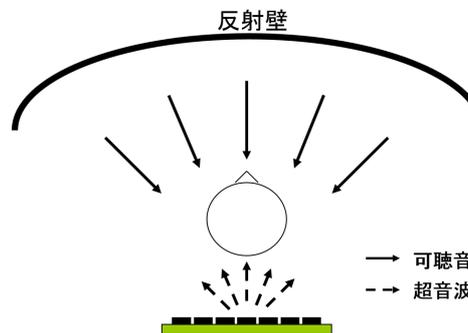


図 - 3 提案するアコースティックプロジェクタ

本手法は受聴者に対して任意の方向からの到来音を実際に放射できるという利点があり、トランスオーラルシステムに代表される複数のスピーカおよび伝達関数を用いて聴覚上音像を再現する手法と比較して受聴者の姿勢によらず音像定位する、多数のスピーカを要する波面合成法などと比較してスピーカ自体の設置は一箇所でありながら壁面上の任意の箇所から音波面を生成できる、といった利点がある。

3. 研究の方法

(1) 多方向出力を考慮した指向性制御型パラメトリックスピーカの設計を行った。アレイ制御において、素子間隔と駆動周波数、励振分布の条件によってグレーティングローブやサイドローブと呼ばれる意図した方向以外への出力が発生してしまう。そこでグレーティングローブを実効的に抑える素子配置を提案し、試作・実験を行った。また、原理上サイドローブの発生しない2項係数分布駆動を指向性制御型パラメトリックスピーカに導入し計算・測定を行った。

(2) (1)の結果を受け、提案する図-3の手法に関して、円弧状の壁面を作成し実測実験を行った。曲面の中心点に設置した試作スピーカの出力に対する反射波の音圧分布を測定し、マルチビーム出力による波面合成手法の基礎検討を行った。

(3) 提案手法は反射波を一点に集めるという原理上、ある程度受聴範囲が限定されるという課題がある。そこでパラメトリックスピーカにカメラを設置し、画像処理と併用することによりスピーカと対象点の相対角度を確定させるシステムを構築し実測実験を行った。

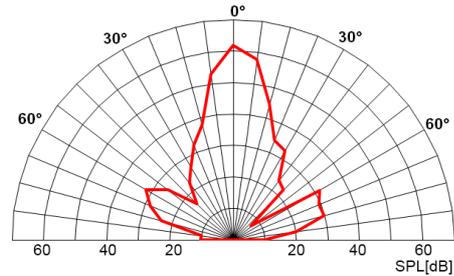
4. 研究成果

(1) 等間隔な直線アレイにおいて素子間が $\lambda/2$ 以上になるとグレーティングローブと呼ばれるメインローブ以外の出力が発生する。グレーティングローブの発生角は以下の式で与えられる。

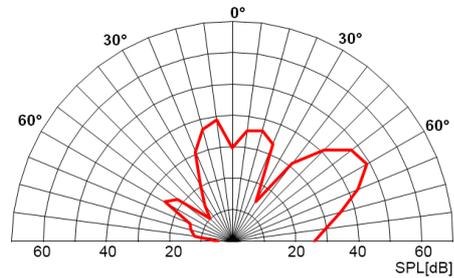
$$\theta_N = \arcsin\left(\frac{cD + N\lambda}{d}\right) \quad (N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

図-1の試作機を用いて制御角 0° 、 30° で出力した際の復調波(4kHz)の2m地点での指向性を図-4に示す。パラメトリックスピーカに広く用いられている圧電素子は概ね直径1cmであり、図-5(a)に示すようなスピーカ配置においては概ね 60° 方向にグレーティングローブが発生することになる。市販のパラメトリックスピーカは正面方向のみの出力であり、また後述する素子自体の指向性から図-4(a)にわかる様に 60° 方向へのグレーティングローブは大きな問題とならない。しかしながら提案する指向性制御型パ

ラメトリックスピーカにおいてはグレーティングローブが有効な出力角に発生してしまうことから図-4(b)の 0° 方向に示される様に無視できないものになってしまう。そこで、水平方向のみの制御を目的に図-5(b)の配置の指向性制御型パラメトリックスピーカを試作し、提案手法の実験装置とした。外観を図-6に、各方向への制御時の指向性測定結果を図-7に示す。提案の素子配置により水平方向へは実効的に充分短い素子間隔となり、グレーティングローブが大きく抑圧されている様子がわかる。

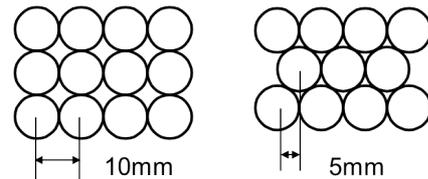


(a) 0° 方向出力時



(b) 60° 方向出力時

図-4 従来型配置における指向性



(a) 従来型 (b) 試作機配置

図-5 試作機の素子配列



図-6 グレーティングローブを考慮した試作機の外観

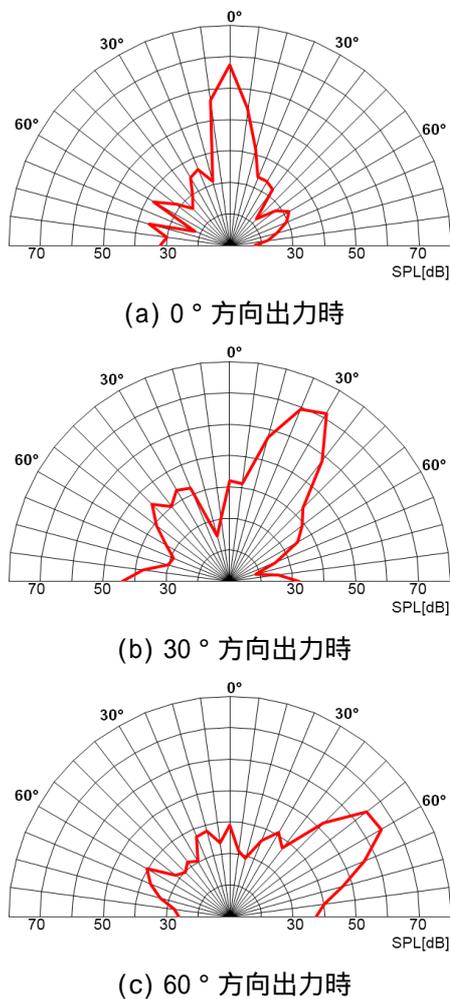


図 - 7 提案する配置における指向性

アレイアンテナの指向性は素子自体の指向性とアレイの配列に起因するアレイファクタの積によって決まる指向性相乗の理が知られている。図 - 6 の試作機での各方向出力時におけるメインローブのピーク値と素子単体の指向性を比較した。結果を図 - 8 に示す。素子はばらつきを考慮し、ランダムに抽出した3個の測定結果の平均値を用いている。両者の関係は概ね一致しており、出力された超音波の非線形形で復調されるパラメトリックスピーカ出力においてもメインローブの指向性は素子自体の指向性に追従することが実験により明らかにされた。

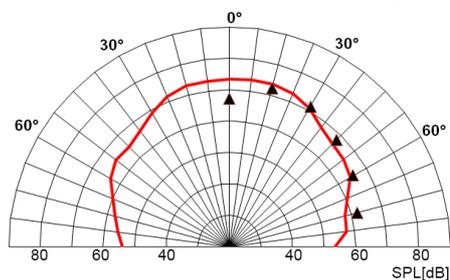


図 - 8 素子指向性と各方向出力時のメインローブレベル (: メインローブ, 実線 : 素子単体の指向性)

パラメトリックスピーカのアレイ出力に2項分布を導入することによりサイドローブを抑圧する手法を提案・検討した。アレイの駆動分布を2項分布とすることによりサイドローブが理論上無くなることが知られているが、1音源の出力時に適用してしまうとアレイ端部の出力が大きく抑圧され結果としてメインローブのレベルが低減し利点は少ない。一方本研究では多方向に音響ビームを出力することを目的としている。そこで図 - 9 に示す様にアレイ内での各ビームの出力分布位置をずらし重ね合わせる配置とすることにより総出力レベルの低下を抑えつつ各ビームのサイドローブを低減させる手法を検討した。その結果3ビーム出力時にシミュレーションで10dB, 実測で3~4dB程度のサイドローブ抑圧効果が認められた。測定結果を図 - 10 に示す。

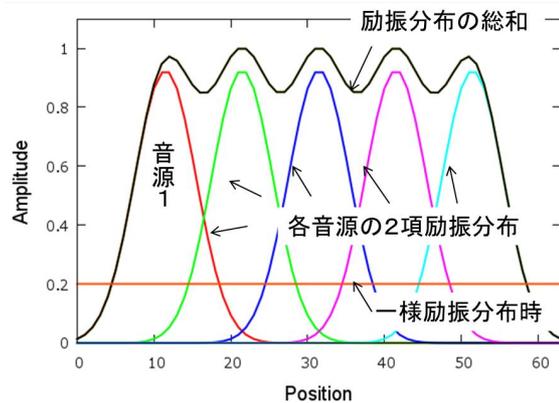


図 - 9 多チャンネル二項分布出力 (5ビーム出力時)

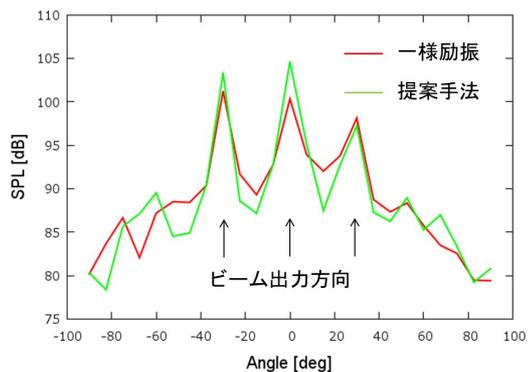


図 - 10 素子配置および出力実験結果

(2) 半円状の反射壁を木材で作成し、反射波の測定を行った。作成した反射壁とスピーカ位置の概要を図 - 11, 図 - 12 に示す。半径170cmの半円状の反射壁を高さ92cmで作成し、上方から見て中心点にあたる位置にスピーカを設置した。円の中心から出力することによりいずれの方向に出力した音ビームも壁面から中心点に向かって反射することとなり、中心点付近で受聴することにより、様々な方向に音像を再現できるはずである。今回作成した反射壁は上下方向は直線状となっていることからスピーカを斜め上方に

傾け、受聴位置をスピーカ上方とすることにより、スピーカと測定範囲が壁面に対して正反射となるよう設定し反射波のみの測定を試みた。測定は円の中心点を中心として100cm四方の範囲における音圧分布を10cm四方毎に測定した。各方向へ出力時の音圧分布を図-13に示す。いずれもパラメトリックスピーカの特徴である鋭い指向性を保ったまま所望の方向からの反射波として得られている様子がわかる。中心点に立つと聴感上も明らかに所望の方向に音像を感じることができた。閾値を暗騒音+15dBとすると、全ての実験結果において反射されたビームが到来していた範囲、すなわち本システムのスイートスポットは約40cm四方であった。

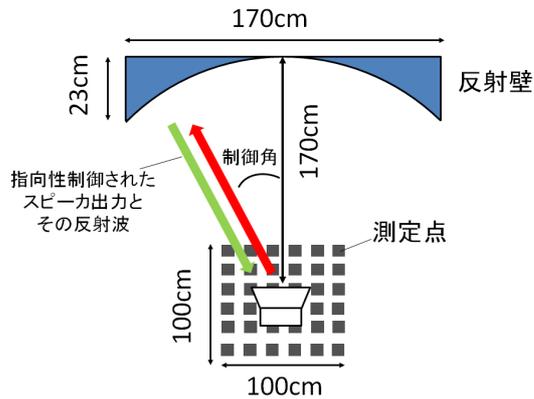


図 - 1 1 作成した反射壁とスピーカ配置

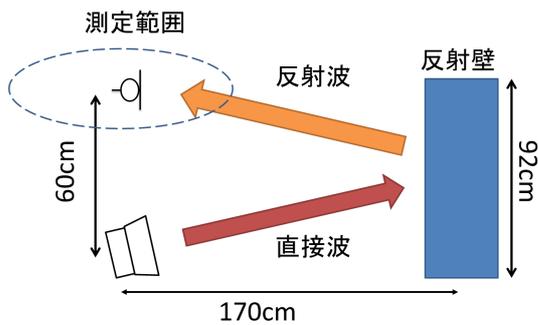
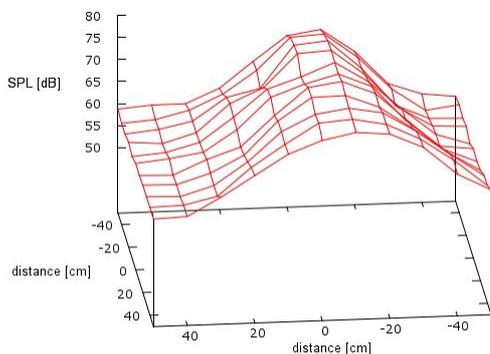
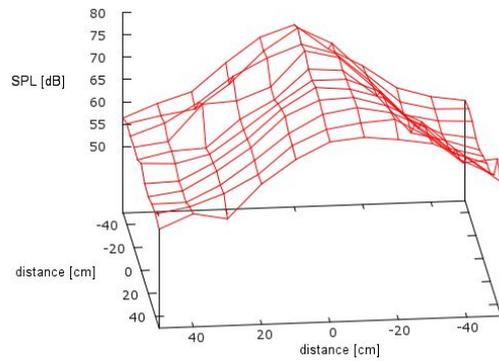


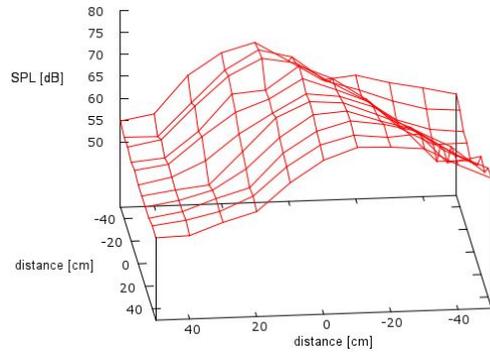
図 - 1 2 反射壁とスピーカ配置 (側面)



(a) 0° 方向出力時



(b) 10° 方向出力時



(c) 20° 方向出力時

図 - 1 3 反射音圧分布測定結果

(3) 図-1に示した試作機にwebカメラを設置し、画像情報上の所望の方向へ出力ビームを放射するシステムを試作し実験を行った。画像処理と方向制御信号出力はノートPCで行っている。試作したシステム図を図-13に、出力方向制御の様子と測定された音圧分布を図-14、図-15に示す。概ね目標点に向けて超指向性出力がなされている様子がわかる。本システムを提案手法に導入することにより受聴者の位置に応じてスイートスポットを移動させるなどの応用が期待できる。

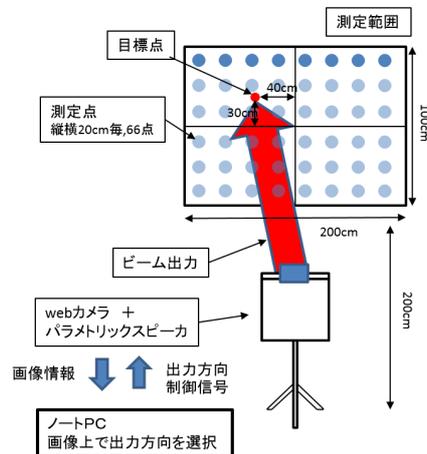


図 - 1 3 2次元音圧分布測定



図 - 1 4 PC (方向制御) 上の画像

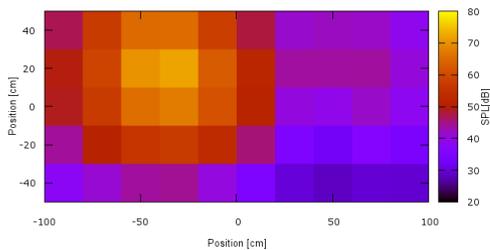


図 - 1 5 2m 地点での音圧分布

(4)総括

指向性制御型パラメトリックスピーカと反射壁を用いて任意の方向からの音像を再現するシステムを提案し、実験で有用性を確認した。具体的には提案システムにおいて虚像の原因となるサイドローブを抑圧する素子配置、駆動分布について提案・試作を行い、試作したシステムを用いて円弧上の壁面に対する反射実験を行った。結果として設置する音源が一箇所でありながら受聴点において任意の方向から、かつ同時に複数の個別の音を到来させることができる音場再生システムを構築することができた。本手法は受聴者の姿勢によらずに音像を再現することが可能であり、また超指向性出力を利用していることから部屋の響きなど周囲の環境や空間の広さの変化に対しても頑強であるという特徴を有している。また画像処理との併用はバリアフリーシステムなどへの応用も大いに期待できる。

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 1 件)

武岡 成人 ,アレイ制御を用いた指向性可変なパラメトリックスピーカ, 信学技報, 査読無, 112(76),2012, pp.31-36, <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009588408>

〔学会発表〕(計 4 件)

Shigeto Takeoka, Directivity Controllable Parametric Loudspeaker using Ar

ray Control System with High Speed 1-bit Signal Processing, AES JAPAN CONFERENCE, 査読有, 2012.10.10-11, せんだいメディアテーク,
武岡 成人 , 個別駆動型パラメトリックスピーカへの素子間出力補正の導入, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 2012/3/13, pp.679-860, 神奈川大学
武岡 成人 , 個別駆動型パラメトリックスピーカによる多方向出力, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, 2012/9/19, pp. 739 - 740, 信州大学
武岡 成人 , 指向性制御型パラメトリックスピーカによる反射を利用した音源方向制御, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, 2013/9/26, pp.667-668, 日本大学

6 . 研究組織

(1)研究代表者

武岡 成人 (TAKEOKA Shigeto)
 静岡理工科大学・理工学部・講師
 研究者番号: 30514468

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし