

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 16 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330187

研究課題名(和文)狭指向性と全方位性を両立する指向性スピーカアレーの研究

研究課題名(英文)The loudspeaker array with a high directivity and an arbitrary beam rotation

研究代表者

羽田 陽一 (Haneda, Yoichi)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：80647496

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、前後左右上下あらゆる方向に対して指向性を自由に再現可能でかつ、狭指向性を持つスピーカアレーの検討を行った。具体的には、正多面体で模擬可能な球面スピーカアレーに着目し、球面調和関数展開領域において最小分散ビームフォーマの原理に基づいてフィルタ設計(球面上で音の大きさと位相を制御)することで、狭指向性と指向性の向きが容易な回転の両立を実現した。さらに、ユーザがジャイロセンサを回転させ、その回転角度に合わせて指向性が回転するシステムを構築し、水平方向内ではあるが、壁からの反射等を利用して音の前後感を含めた音像定位が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We investigated the loudspeaker array which has a high directivity and an arbitrary beam rotation. The filter of a spherical loudspeaker array is designed based on the minimum variance method in the spherical harmonics domain. The beam pattern generated by the filter achieves a high directivity in a certain direction. Further, the beam direction can be rotated while maintaining the shape of the beam pattern. We implemented a prototype system that allows the listener to steer the beam direction using a gyro sensor in real time. The listening test result suggested that the location of the sound image varies based on the sound reflected from the wall. We evaluated the sound localization mechanism while rotating the beam direction based on the observed signal measured with a dummy head. The result showed that the sound of the beam reflected from a wall influences horizontal plane localization and sound image distance.

研究分野：音響信号処理

キーワード：スピーカアレー 球面調和関数 ビームフォーマ 最小分散法 指向性 正多面体

1. 研究開始当初の背景

これまで音を再生する、あるいは音声を遠隔地に伝送するための研究としては、より自然でかつ高臨場感な音の再現に関する研究が主に行われてきた。一方で、震災での防災無線の聞き取りづらさの改善や、オープンスペースでの過剰なアナウンスなどの改善に対しては、特定の場所やエリアにだけ音を届ける指向性スピーカが注目されている。また、著名な演奏家の演奏を遠隔地の会場にて、その楽器の持つ指向特性そのものまで忠実に再現するための指向性スピーカなども検討されている。

これまでの研究において、特定の方向にだけ音ビームを向ける狭指向性の実現には直線状アレーが用いられ、上下前後左右のあらゆる方向の任意全方位指向特性を再現するスピーカアレーには球面調和関数に基づき剛体球面上にスピーカを配置した球面アレーが用いられてきた。本研究では、これら両者のメリットを活かした、狭指向性と任意全方位指向性再現の両面を併せ持つ新しい指向性スピーカ再生方式の実現を目指す。

2. 研究の目的

自然界における音は概ね360度あらゆる方向に拡散してしまうが、その音を聞きたい人、あるいは聞かせたい人にだけ届け、かつ、その目的方向が変化しても追従可能な、狭指向性と全方位にわたる自由な指向性再現の両面を併せ持つ新しい指向性スピーカ再生方式を実現することが本研究の目的である。あらゆる方向に指向性が形成できる剛体球面上に配置されたスピーカ群を用いる球面アレーと、狭指向性を少ないスピーカで実現できる直線状アレーであるエンドファイアアレーはこれまで独立に検討されてきたが、球面アレーの基礎となる球面調和関数をデカルト座標系で直線的に表現することでこの両者を統一的に扱い、狭指向性と全方位にわたる指向性再現の両立を、実際のスピーカアレーを構成しながら検討し、実現手法を確立する。指向性再生がより身近な技術になれば、例えば、隣り合わせに座った人に異なる言語でガイダンスを提示したり、指向性の変化を用いて歩行誘導したり、さらには、より臨場感の高い楽器伝送を行うなど多くの応用が期待できる。

3. 研究の方法

3. 研究の方法

(1) 球面調和関数展開領域におけるフィルタ設計

前後上下左右などあらゆる任意の方向に対して指向性を形成するために、本研究課題では、球面調和関数領域でのフィルタ設計方法について検討を行った。球面調和関数展開を行うと、指向性は基本的な複数の指向性の和で表現することが可能となり、かつその展開係数は指向性の向きには依存しない。このため、一旦ある指向特性を再現する展開係数を求めれば、その展開係数に基づいて容易に指向性の向きを変化させることができる。本研究課題では、伝達関数を球面調和関数領域に変換したのちにフィルタ設計を行う手法を検討し、鋭い指向性と指向性の向きを任意の方向に変更可能とする両立性を目指して研究を行った。

(2) 球面スピーカアレーの作成と指向性評価

当初、球面調和関数展開によって設計したフィルタ係数をさらに多重極に変換し、直線アレーの組み合わせで指向特性を再現しようとしたが、球面スピーカアレーを正12面体や正20面体の各面の中心にスピーカを配置した正多角形アレーとして模擬可能であることが実験的にも明らかになったため、市販されていた正12面体スピーカを改造したもの、および3Dプリンタにより作成した正20面体スピーカアレーを用いて、指向性再現の実験を行った。指向性は、無響室内にて、円周上に11.25度おきに配置した32

個のマイクロホン台を回転させることで、全周囲のインパルス応答を測定し、これに基づいて指向特性の評価を行った。

(3) 正12面体スピーカアレーの指向性を用いた新しい再生法の検討

先に述べたように球面調和関数領域で設計したフィルタ係数を用いると、指向性の向きを容易に変更することが可能となる。そこで、本研究課題では、新しい音の呈示方法の検討の一環として、ジャイロセンサを用いてユーザが指向性の向きを自由に回転させられるシステムを正12面体スピーカアレーを用いて作成し、聴感上どのような効果が得られるかを検討した。

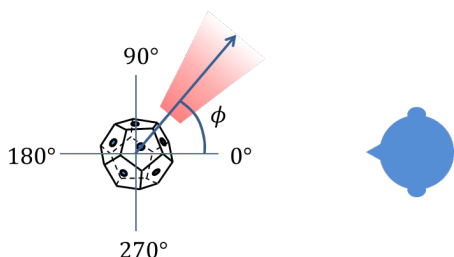


図1 指向性回転のイメージ図

4. 研究成果

(1) 球面スピーカアレーを用いた狭指向性の実現

アレー信号処理において狭指向性を実現するためのアルゴリズムとして、最尤推定法や最小分散ビームフォーマなどが知られている。これらのアルゴリズムは、スピーカ素子ごとのフィルタ係数を求める方法ではあるが、本研究課題では、球面調和関数展開領域において最小分散ビームフォーマの原理を当てはめ、フィルタ係数を設計した。これにより、鋭い指向特性を実現することが可能となった。一方で、指向特性の向きを変えても指向性の形状が変化しないことも確認することができた。指向特性は、無響室にて測

定したインパルス応答を用いて評価した。フィルタ設計は剛球バッフル上の点音源からの放射音圧の理論値を用いて行った。図2に最初に設計したフィルタを用いて再現した指向特性図を示す。図3には、図2のフィルタ係数に基づいて異なる方向に指向性を向けた際の指向特性図を示す。両者において、指向特性の形状を保ったまま、指向性を回転できていることが分かる。

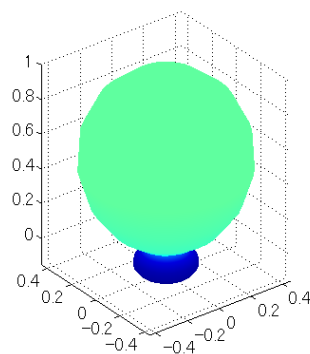


図2 回転前の指向特性

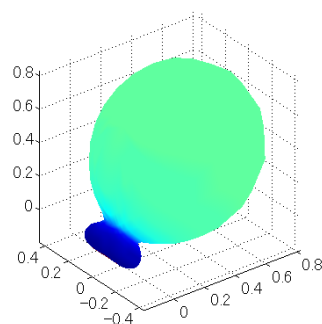


図3 回転後の指向特性

(2) 球面スピーカアレーの指向性回転とその呈示

あらゆる方向に指向性が形成可能であり、かつ、容易にその指向性を回転可能であることが明らかになったため、ユーザがジャイロセンサを回転させ、その回転角度に合わせて指向性が回転するシステムを構築し、聴感上どのように感じかを内観調査した。その結果、指向性が自分の方に向いている場合に音像を近くに感じ、反対方向（ $= 180$ 度）では遠くに感じる事が分かった。これは、図

4に示すように、直接音とそのあと部屋の壁などからの反射によって生じる残響音とのエネルギー比が両者で異なり、これをキーとして前後感を判断しているものと考察できる。

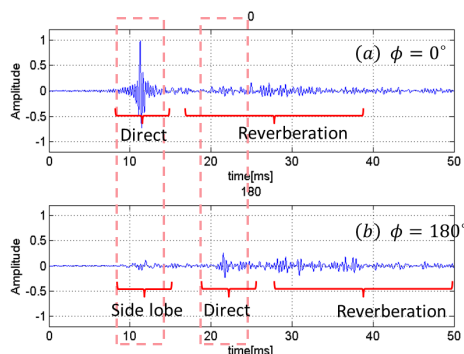


図4 指向特性の向きによる耳位置で観測される時間信号の違い。(a)指向特性が正面方向、(b)指向特性が反対方向

(3) 球面調和関数に基づいた接話型マイクロホンアレーの提案

球面調和関数領域でのフィルタ設計を検討している際に、対象とする周波数から導かれる球面調和関数展開の最大展開次数を超えた領域のみを用いると、アレーのごく近傍のみ収音感度が上昇することが分かり、これを基礎とする接話型マイクロホンアレーを提案した。また、球面調和関数展開領域では、異なる半径における音波を内挿あるいは外挿することが可能であること、および有限の素子数ではその関係に誤差が生じるが、音源が近いほど誤差が生じやすいことが分かり、この性質を用いても接話マイクロホンを構成可能であることを明らかにした。

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 1 件)

羽田陽一、古家賢一、小山翔一、丹羽健太、"球面調和関数展開に基づく2種類の超接話マイクロホンアレー、" 電子情報通信学会論文誌 A、2014、J97-A. no. 4、pp. 264-273

〔学会発表〕(計 6 件)

大小原 亮、羽田陽一、適応的な重み変更を用いた最小二乗法による正20面体スピーカアレーの指向性制御、応用音響研究会、2016年3月29日、別府国際コンベンションセンター(大分県別府市)

K. Bando, Y. Haneda, "Interactive directivity control using dodecahedron loudspeaker array," Proc. of NCSP'16, 2016年3月7日、ハワイ(アメリカ)

大小原 亮、羽田陽一、正20面体スピーカアレーの指向性制御を用いたトランスオーラルシステムの検討、応用音響研究会、2015年7月3日、電通大(東京都調布市)

坂東和奈、羽田陽一、球面調和関数領域のMVビームフォーマによる正12面体スピーカアレーの指向性制御、応用音響研究会、2015年3月3日、ホテルミヤヒラ(沖縄県石垣市)

Y. Haneda, K. Furuya, S. Koyama, "Close-talking spherical microphone array using sound pressure interpolation based on spherical harmonic expansion," IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2014年5月6日、フィレンツェ(イタリア)

坂東 和奈、羽田陽一、正12面体スピーカアレーによる球面調和関数の再現について、日本音響学会2014年春季研究発表会、2014年3月10日、日本大学(東京都千代田区)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: フィルタ係数決定装置、フィルタ係数決定方法、プログラム、および再生システム
発明者: 羽田陽一、関 貴志、大小原亮、佐藤航也

権利者: 電気通信大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-032282

出願年月日: 平成 28 年 2 月 23 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.haneda-lab.inf.uec.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

羽田 陽一 (HANEDA Yoichi)

電氣通信大学・大学院情報理工学研究科・
教授
研究者番号：80647496