

令和元年5月27日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00232

研究課題名(和文)ウェアラブルスピーカアレーの実現に向けた聴感的指向特性生成技術

研究課題名(英文)Directivity control for wearable loudspeaker array system

研究代表者

羽田 陽一 (Haneda, Yoichi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：80647496

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、利用者だけに音を届けるウェアラブルスピーカとして、円形および直線スピーカアレーに関する検討を行った。円形アレーではスピーカは2次元平面上に配置されているが3次元空間での指向性の振る舞いや2つ以上の円筒が近づいた際に起こる反射の影響について検討した。その結果、あらかじめ基本モードによる指向性生成能力を把握することで無理のない3次元指向性制御が行えること、2つの円筒を用いて多重反射を行うことでさらなる性能向上が望めることがわかった。さらに、2つの直線アレーをV字型に配置し、それぞれの指向性を両耳方向に向けることで、音漏れの少ないウェアラブルスピーカの構築が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、2次元平面内に置かれたスピーカ群が3次元空間に形成する指向性をあらかじめ測定することは必要にはなるが、物理的に無理のない範囲で指向性設計するための手法を提案したこと、さらに2つ以上の円筒形アレーが多重反射を繰り返す状況において、これらを積極的に利用したほうが、性能向上が望めることを示した学術的な意義は大きい。さらに、ウェアラブルスピーカアレーのデモシステムを構築し、耳を閉塞しないシステムの可能性を示せたことは今後の新しい受聴スタイルを提示できた。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the wearable loudspeaker array which has multiple loudspeaker units. It can control directivity pattern. In this study, we considered the circular, cylindrical, and linear loudspeaker arrays. When the loudspeaker units were placed on the circle with equal space, we can use the spatial Fourier transform. We can calculate filter coefficients for sound field or directivity control analytically. However, the performance of three dimensional directivity pattern made by two dimensional circular array had not been studied so far. Moreover, if the two cylindrical arrays are located closely, the multiple scattering occurs, but the performance of this situation also has not been investigated. Therefore, we investigated three dimensional directivity pattern with those conditions analytically. Furthermore, we studied the wearable loudspeaker with two linear loudspeaker arrays which indicates the independent sounds at both ears, and prevent the sound leakage around the uses.

研究分野：音響信号処理

キーワード：音響信号処理 スピーカ スピーカアレー 空間フーリエ変換

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、身体装着可能なスタイリッシュでかつ先進的なウェアラブル端末が開発され、いつでもどこでも情報コミュニケーションを楽しむことができるようになってきている。しかし、コミュニケーションの基本である音声通話、あるいは屋外で音楽を楽しむことについては、受話器を耳に当てる、ヘッドホン・イヤホンをするという旧来のスタイルから脱していない。一方、屋外でのヘッドホンやイヤホンの装着は実世界からの情報を遮断するため、運動時や自転車等での利用は危険を伴い推奨されない。外部マイクや密閉度の低いイヤホン利用も考えられるが、外界音の正しい定位は得られない。

本課題においては、耳元から離れた位置に身体装着したマイクロスピーカ(10mm 角程度)での音再生を目指し、腕、肩、首等の位置に複数個配置したスピーカを利用して、耳元周辺に音を強く放射し、それ以外の周囲には音漏れが少なくなるようなウェアラブルスピーカアレーの構築を行う。これにより、耳を閉塞しない状態での音呈示が可能となり、例えば、災害現場での周囲音の知覚と情報指示の同時聴取、屋外競技場などにおいて実世界の音と情報音の同時知覚、あるいはウェアラブルスピーカによる新たな音楽表現など、新しい音の提示・受聴スタイル、文化の創出が期待できる。

### 2. 研究の目的

ヘッドホン・イヤホンのように耳を閉塞することなく、利用者の方に音を届けるウェアラブルスピーカの実現を目指し、耳元にのみ音を強く放射し、周囲への音漏れを気にならないレベルに抑える「聴感上の指向特性が良好なスピーカアレー」の提案を行う。可聴域スピーカを利用するスピーカアレーでは、従来の線形フィルタの枠組みでは周囲への音漏れを完全にすることはできない。そこで、本研究では、再生信号や残響などの再生環境に合わせて、聴感上の指向特性の向上を目指す。また、円形を基本としながら身体装着に最適なスピーカ配置を確立するとともに、耳元等に設置したマイクを用いて身体運動や環境変化に適応的に追従するアルゴリズムの実現を目指す。

### 3. 研究の方法

聴感上の指向特性が良好なウェアラブルスピーカアレーの実現を目的とし、スピーカ再生アルゴリズムとスピーカ配置の両面について、計算機シミュレーションと実機実験を相互に繰り返しながら実環境においても頑健に動作するシステムの構築を行う。具体的には以下の項目を本課題期間中に進めた。

- (1) 円形アレーおよび円筒型アレーによる指向性制御方式の検討と実機による性能確認
- (2) 2つの円形アレーを用いた波面合成
- (3) 2つの直線アレーを用いたウェアラブルスピーカの提案

### 4. 研究成果

- (1) 円形アレーおよび円筒型アレーによる指向性制御方式の検討と実機による性能確認

円形アレーとは、円周上に複数のスピーカ素子を配置したもので、本研究課題においては、円周上の空間フーリエ変換である円調和展開による検討を進めるため、スピーカ素子は等角度間隔で配置することとした。具体的には、手首や腕に巻き付け可能なサイズを念頭におき、検討を行った。円筒型アレーとは、この円形アレーを縦方向に複数段積み上げた形状のアレーである。

まず、2次元平面の円周上にスピーカ素子を配置した円形アレーについて検討を行った。2次元円形アレーにおいても実際の音は3次元空間に放射されるため、2次元平面内のみでの制御では、実環境においてどのような放射パターンになるかの予測が難しい。そこで、本研究においては、2次元円形アレーを円調和展開した際の基本的なスピーカアレー駆動信号(具体的には、角度  $\theta$  のスピーカの音に  $\exp(jn\theta)$  をフィルタリングして放射)に対して、どのような放射パターンが3次元空間で観測されるかを実測し、この結果に基づいて、所望の指向特性を合成する方法を提案した。本提案手法を用いれば、基本的な放射パターンに対してどの程度の音量をスピーカに与えればよいかを事前に予測可能であるため、結果として無理のない信号レベルで指向特性が合成できるようになる。ただし、2次元アレーで3次元を制御しているため、合成可能な指向性パターンに限界がある。

そこで、次に円形アレーを3段積みにした円筒型アレーの検討を行った。円筒型アレーは、腕に装着する際には、時計のように手首に巻くというよりは、腕全体を覆うような形になる。このような形状においては、スピーカの配置自体が3次元形状になるため、空間制御が行いやすくなることが期待できる。ただし、3次元空間に放射されるパターンを事前に知るための基本的なスピーカ駆動信号は未知であった。そこで、本研究課題では、3段に積まれたアレーの各円形アレーは、円周方向には同期して円調和展開に基づく基底に沿ってスピーカを駆動(2次元円形アレーと同じ)し、多段に積み上げた方向については、多重極展開に基づいてスピーカを駆動することにした。多重極展開とは、ここでは縦方向に正負の符号の逆転したスピーカを規則的に並べる手法を指しており、3段の場合は、例えば、中央を+符号で鳴動、上下を+と-で鳴動、3段を上から、-1, +2, -1で鳴動のようなパターンで鳴動させることを意味する。次に、これらの規則に則りスピーカを駆動したときに3次元空間でどのような放射パ

ターンになるかをあらかじめ測定することで、最終的に所望の指向特性の合成を行う。図1 (a)(b)に提案する円形アレー、円筒型アレー、従来の円形アレーの指向性パターンを示す。円形アレーは円周上に8個のスピーカ素子を有し、円筒型はこれらを3段積み上げて構成されている。(a)は2次元平面内の結果であり、(b)は円形アレーを含む平面に垂直な方向の結果である。これらの図から、提案する円形アレーは2次元平面内では従来技術より指向性が悪化しているが、3次元空間全体でみると性能が改善していることが分かる。また、円筒型アレーでは、水平方向、垂直方向とも指向性が形成されている。これらの結果については雑誌論文、学会発表として発表を行った。

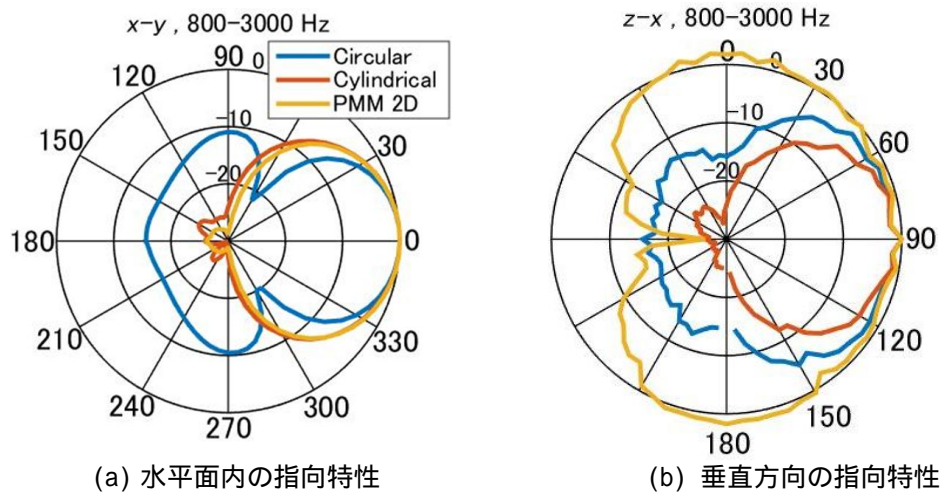


図1 円形および円筒型スピーカアレーの指向特性

## (2) 2つの円形アレーを用いた波面合成

スピーカアレーの利用は指向性生成のみならず、音場の波面そのものを再合成する技術としても用いられる。特に近年では、バーチャルリアリティーに対応するようなスピーカ前面に飛び出すような音像の再現が求められている。本研究課題では、上記で進めてきた円形アレーの発展形として、これらを2台平行に配置し、飛び出す音像が再現できるかを検討した。ただし、円形アレーを2台近接して配置した場合、片方のスピーカから放射された音がもう一方のスピーカアレー表面で反射し、多重反射が起こる。そこで、本研究課題では、これらの多重反射を定式化した音の伝搬特性を導き出し、これに基づいてスピーカから離れた位置に仮想的に音像を再現することを試みた。図2に2つの円形アレーを用いた場合と、1つの円形アレーのみを用いた場合の仮想音像再現の結果を波面で示す。この図においては $(x, y) = (0, 0.5)$ mの位置に球面波を生成する仮想音源を再現しているが、(a)の2円アレーでは球面波がおおむね再現できているが、(b)の1円アレーの場合では、波面の進行方向によって濃淡があり、正しく波面が合成できていないことが分かる。これらの結果から2つの円形アレーを用いることが仮想音源の生成と波面の合成に有利に働いていることが分かる。本成果は、研究発表として発表を行った。

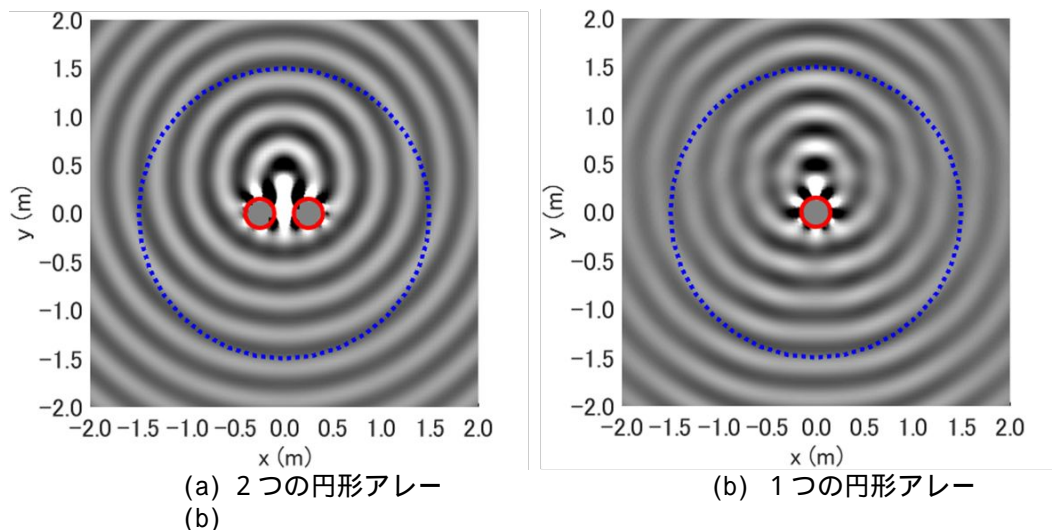


図2 円形アレーを用いた仮想音源生成時の波面の比較

### (3) 2つの直線アレーを用いたウェアラブルスピーカの提案

これまで円形アレーに関する検討について述べてきたが並行して直線アレーを2本V字型に配置し、首から下げるウェアラブルスピーカについて述べる。ウェアラブルスピーカへの要求条件としては、左右の耳に入る音は、ヘッドホンのように左耳には左の音、右耳には右の音のみ呈示したい、耳元では大きな音で再生可能だが、周囲に対しては音漏れが少ない、ことが要求される。そこで、本研究課題では、図3に示すような2つの直線アレーの指向性をそれぞれ左右の耳に向けることで、耳のみに大きな音を届け、周囲に音を抑圧することを考えた。周囲への音漏れは、これまでの指向性再生と同じであるが、左右の耳に独立な音を届けるために、ここではさらに左右の信号のクロストークを低減するフィルタを導入した。図4に左右それぞれの音の周波数特性を示す。(a)は左耳で、(b)は右耳であり、それぞれに混入する逆の耳の音が結果的に少なくなっている様子が分かる。本研究成果は、研究発表として発表を行った。

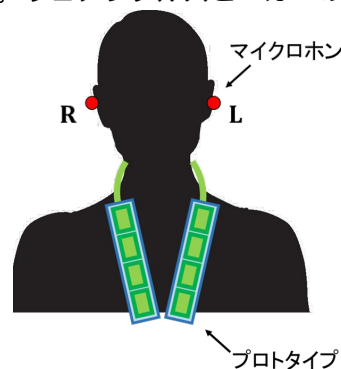
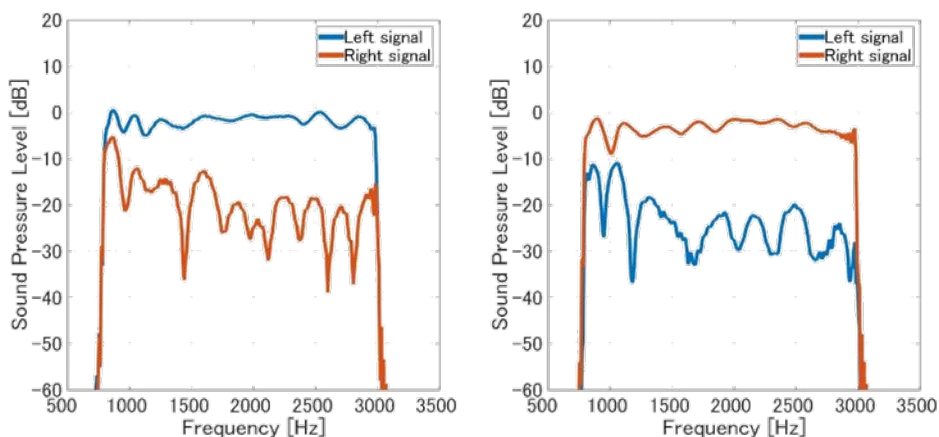


図3 ウェアラブルスピーカ



(a) 左耳の周波数振幅特性

(b) 右耳の周波数振幅特性

図4 クロストークキャンセル後の左右両耳における周波数振幅特性

### (4) まとめ

本研究課題では、ウェアラブルなスピーカを念頭に置きながら、円形、円筒形および直線アレーについて指向性や波面形成の検討を行った。円形アレーでは、縦型に積み上げることで3次元制御にも対応可能なこと、2つの円形アレーを用いることで性能が向上すること、直線アレーを2つ用いることで、指向性再生とクロストークキャンセリングが両立できることを示すことができた。

また、本研究課題を進めるにあたり、スピーカアレーによる指向性制御および波面合成において注意すべきことがあり、一般的なことなのでここに付す。

実際に聞く音の音色を統一して比較すること

スピーカに与える信号の大きさ(フィルタゲイン)が大きくなりすぎないようにすること

所望の指向特性が実現できること、特に死角の形成範囲が狭いと聴感上の効果が薄くなるこれらはトレードオフの関係にあるが、単なる線形フィルタ処理のみならず、非線形処理やスピーカアレーの形状、あるいは反射・回折の積極的な利用などが重要となると考える。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

K. Sato, Y. Haneda, Directivity control of a finite cylindrical loudspeaker array based on circular harmonics and longitudinal multipole expression. *Acoustical Science and Technology*, 査読有, vol. 40, no. 2, 2019, pp. 93-104  
DOI: <https://doi.org/10.1250/ast.40.93>

K. Sato, Y. Haneda, Sidelobe suppression by desired directivity pattern optimization for a small circular loudspeaker array, *Acoustical Science and Technology*, 査読有, 2018, vol. 39, no. 3, 243-251  
DOI: <https://doi.org/10.1250/ast.39.243>

〔学会発表〕(計 10 件)

- Y. Ren, Y. Haneda, Virtual Source Reproduction Using Two Rigid Circular Loudspeaker Arrays, Audio Engineering Society 145th Convention (2018/10/07)
- K. Sato, Y. Haneda, 3D Directivity Control of a Finite Cylindrical Loudspeaker Array with Cylindrical Harmonics, 2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) (2017/10/26)
- K. Sato, Y. Haneda, Filter Design of a Circular Loudspeaker Array Considering the Three-Dimensional Directivity Patterns Reproduced by Circular Harmonic Modes, Audio Engineering Society 142nd Convention 142, 9767- (2017/05/11)
- K. Imaizumi, Y. Haneda, Wearable Sound Reproduction System Using Two End-Fire Arrays, Audio Engineering Society 142nd Convention 142, 9768- (2017/05/11)
- K. Sato, Y. Haneda, Directivity control of a compact circular loudspeaker array based on selected orders of circular harmonic expansion, Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, vol. 140, no. 4, p. 3061 (2016/11/28)

〔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，および音響システム

発明者：羽田 陽一，佐藤 航也

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2017-173419

出願年：2017 年

国内外の別： 国内

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。