

# 腕輪型ハンズフリーフォン向け指向性スピーカアレーの研究

Investigation of circular loudspeaker array for wrist-mounted communication devices



羽田 陽一 (博士(情報科学)、Ph. D.)  
電気通信大学 大学院情報学専攻 教授  
(Professor, The University of Electro-Communications)

日本音響学会 IEEE、AES 他

受賞: 電気通信普及財団賞 (2015年)、日本音響学会技術開発賞 (2007年)、  
電子情報通信学会論文賞 (2002年)、日本音響学会佐藤論文賞 (2002年)、  
電子情報通信学会業績賞 (1998年) 他

著書: 音響学入門ベディア コロナ社 (2017年)

研究専門分野: 音響信号処理

## あらまし

本研究は、複数のスピーカを円周上に等間隔に並べた円形スピーカアレーを用いて、ある方向には音を強く放射し、ある方向では音の放射を弱める、いわゆる指向性スピーカに関する研究を行ったものである。特に腕に装着することを想定し、半径 5 cm の円形アレーと、その円形アレーを 3 段積層したタイプの 2 つについて指向性形成を検討した。従来技術では、指向性を形成しようとする、音が歪む、3 次元的な指向性が形成しづらい、といった課題があったが、本研究では、円形アレーの基本的な鳴動パターンによって外部に形成される指向性とそのときに必要な放射効率に着目し、指向性と音の歪みのトレードオフを制御しやすくする方法を考案した。基本鳴動パターンは、正負の単純な並びであり、これを円の周方向のみならず、縦方向にも応用した。提案手法の有効性は、3D プリンタで作成した試作機により確認し、音の歪みが少ない 3 次元指向特性が形成できることがわかった。

## 1. 研究の目的

近年、Apple Watch に代表されるような腕時計型の携帯端末が発展してきている。これらの端末は、

腕に常時装着するという観点から、脈拍等の生体信号を読み取り健康管理に利用されるなど活用方法は多様であり、今後の発展も期待されている。一方で、以前より腕時計型のハンズフリーフォンの商品化や検討が進んでいるが、一般に普及しているとは言えない。ハンズフリー通話は便利ではあるが、周囲に人がいるような環境では、通話音声は外部に漏れるという課題がある。これを防ぐためには音を耳元の方角にのみ強く放射する指向性スピーカの利用が考えられる。一般に指向性スピーカとしては、超音波を用いたパラメトリックスピーカ<sup>\*1</sup>方式が知られているが[1]、指向性を形成するためには平面上に超音波素子を並べるための面積が必要であり、小型化はできない。

そこで、本研究においては、腕に装着することを念頭におきながら、10mm 角程度の小型の可聴域スピーカを複数用いて円形スピーカアレー<sup>\*2</sup>を構成し、これを用いて指向性スピーカを実現することを検討する。

## 2. 研究の背景

指向性スピーカに関する研究は、超音波を用いたパラメトリックスピーカ方式と、通常のスピーカを複数個利用するスピーカアレー方式の 2 つに大きく分類できる。パラメトリックスピーカに関する研究は、現在も国内外で盛んに研究がなされており、指向性再生のみならず、2 つのパラメトリックスピーカを用いたステレオ再生の研究など臨場感再生に関連する研究も数多く行われている[2][3]。

一方、通常のスピーカを複数用いるスピーカアレーの研究は、本研究と同様に特定の方向に音を強く放射するための指向性再生の研究と、あたかもその場に話者がいるような感覚を与える高臨場感再生に向けた波面合成法<sup>\*3</sup>の研究が主流となっている[4]。波面合成法は、近年、空間フーリエ変換<sup>\*4</sup>[5][6]に基づく解析的な手法の研究が進み、高精度な音場再現が可能となってきている[7]。また、指向性再生でも同様に、スピーカ素子を直線や球面上に等間隔で並べ、空間フーリエ変換を施すことで、空間波数領域で処理する方法が研究されている。特に、球面アレーや円形アレーに対して

# 腕輪型ハンズフリーフォン向け指向性スピーカアレーの研究

## Investigation of circular loudspeaker array for wrist-mounted communication devices

は、球面調和関数展開やヘリカル波展開<sup>\*5</sup>などを用いた理論的かつ解析的な研究が進んでいる。一方、国内では、指向性スピーカアレーに関する研究は少ない。また、これまでの研究においては、用いるスピーカ数は、16個以上と規模が大きい場合が多い。本研究では、最終的に腕に装着することを念頭に、4個から8個程度の比較的少ないスピーカ数で効果的な指向性形成を目指す。

### 3. 2次元円形アレーによる3次元指向性制御

本研究においては、腕に装着可能なサイズ（半径5cm）の円周上に8個のスピーカ素子を等間隔（等角度間隔）に並べた円形スピーカアレーを想定し、計算機シミュレーション、および3Dプリンタを用いて作成した試作機を用い、指向性形成の検討を行った。

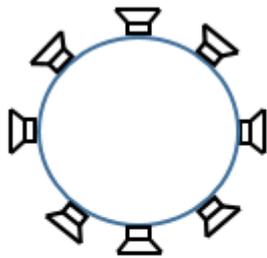


図1. 8ch 円形スピーカアレー

図1に円形アレーの配置図を示す。まず、通常の代表的なアルゴリズムである最小2乗法およびマイクロホンアレーなどでよく用いられる最小分散法（MV法）を用いて指向性を形成してみたところ、計算機シミュレーション上では良好な指向特性が形成されたが、3Dプリンタを用いて作成した試作機を用いて指向性再生を行うと、ビリビリといった音割れが生じ、指向性が崩れることが確認された。この音割れ（歪み）の原因は、指向性を無理に形成しようとしたため、特に低域でフィルタの大きさが上昇し、スピーカに負荷がかかったためであると考えられる。フィルタが大きくなる原因は、スピーカアレー全体の放射効率が悪い、つま

り大きな音をスピーカに与えないと遠くまで音が届かないようなフィルタ設計を行っているからである。また、通常、円形アレーは2次元平面内に配置されるため、指向性も同じ2次元平面内で評価されることが多い。しかしながら、音は3次的に広がってしまうため、たとえ2次元アレーであったとしても評価および制御は3次元で行う必要がある。

そこで本研究では、音割れが生じずに安定したフィルタ係数を求める手法として、円形アレーである性質を活かし、円調和展開領域でフィルタを設計する手法を検討した。ここで、円調和展開領域とは、円形アレーの8個のスピーカを、例えば（1）8個とも同じ音を出す、（2）最初の4つのスピーカは同じ音を出して、後の4つはそれとは逆符号（逆位相）の音にして出す、（3）2個ずつ交互に逆位相の音を出す、（4）1個ずつ交互に逆位相の音を出す、といった基本的なパターンを組み合わせることで音を出すことに相当する。8個のスピーカの位相を+と-で表すとすると、（1）は+++++、（2）++++- - - -、（3）+-+-+-、（4）+-+-+-、のパターンに相当する。本手法では、まず周波数ごとにこれらの基本的な鳴動パターンが、3次元空間にどのように音を放射し、かつ、どれくらいの音の大きさで周囲に音が到達するのかを実験的に調べる。次に、この結果に基づき、あらかじめ設定した利得の中で目的とする指向特性に近い特性を生成する、というものである。

この手法の有効性について、試作したスピーカアレーの指向特性の測定を行った。測定は、無響室において行い、アレーから半径50cm離れた点にマイクロホンを設置し、水平方向と垂直方向の指向特性を計測した。その結果を図2に示す。

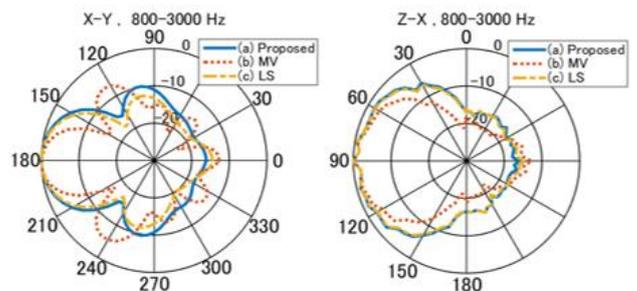


図2. 指向特性（左：x-y, 右：z-x平面）

# 腕輪型ハンズフリーフォン向け指向性スピーカアレーの研究

## Investigation of circular loudspeaker array for wrist-mounted communication devices

図2において、左は水平面内の指向特性であり、円形アレーと同じ面上の特性である。右は垂直方向の指向性である。比較は、提案手法および2次元制御である最小2乗法とMV法を用いた。どの手法においても指向性の向きは、水平方向180度方向、垂直方向90度方向に音を強く放射し、その他の方向の音は小さくなるように制御している。図の半径方向の大きさは、音の強さを表しており、円の中心から最大の円までの差が30dBになるように表示している。この結果から分かるように、提案手法は、水平方向および垂直方向、すなわち3次元空間において良好な指向性を形成できていることが分かる。一方で、図3に再生音の歪みについて示す。

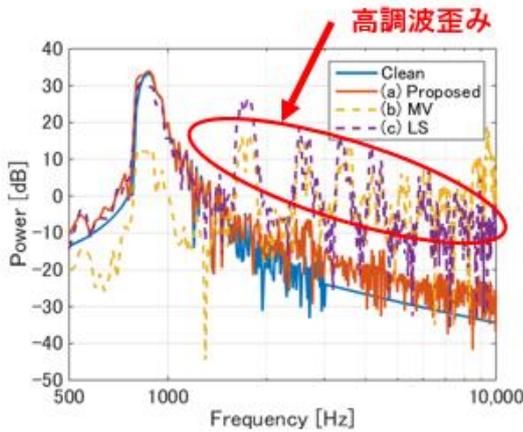


図3. 指向再生時における音声信号の歪み

図3では、音声信号をスピーカから流した際に、指向性が向いた180度方向で音を聴取した際の周波数振幅特性を示している。図から、提案手法以外では、高調波歪みが発生していることが明らかとなった。以上述べたように、提案手法は、再生音の歪みをなくし、かつ良好な指向性を形成できることが分かった。

### 4. 円筒形アレーへの拡張

3節で述べた2次元円形アレーにおける指向性制御は、3次元空間において円形アレーが放射する基本的なパターンをあらかじめ収集し、これを用いて安定したフィルタを求めるものである。これにより2次元アレーでも3次元指向特性を形成できるが、

本制御方式では垂直方向において上下対称であるパターンしか制御が行えず、上下を区別して制御することはできない。そこで、本節では、円形アレーを3段に積層することで上下を区別しながら3次元の指向特性を形成する手法の検討を行った。本手法は、1段ごとの円形アレーは前節で示した方法をそのまま適用することとし、縦に積層したアレーに関する制御方式としては、3つの円形アレーをそれぞれ一つの放射体とみなし、(1)中央のスピーカのみ+で鳴らす、(2)上下の2つをそれぞれ+と-の符号をつけて鳴らす、(3)上から、+1、-2、+1を信号に掛け算して鳴らす、の3つを基本パターンとして、これらを組み合わせてスピーカアレーを鳴動させることを提案する。

提案手法を評価するため、3Dプリンタを用いて8個のスピーカ素子を有する8ch円形スピーカアレーを3段積層した合計24個のスピーカを用いた試作機を作成し、指向特性の評価を行った。図4に3段積層したアレーのイメージを示す。

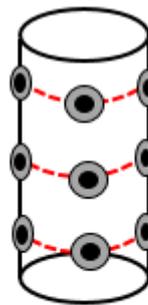


図4. 8ch × 3段円筒形スピーカアレー

# 腕輪型ハンズフリーフォン向け指向性スピーカアレーの研究

Investigation of circular loudspeaker array for wrist-mounted communication devices

図5には、測定した指向特性を示す。

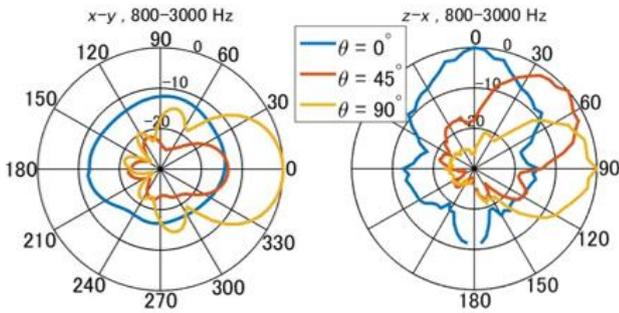


図5. 指向特性 (左: x-y, 右: z-x平面)

図5において、左側は水平方向の指向特性であり、右側は垂直方向の図である。図において、水平方向の目的放射方向は0度であり、垂直方向の目的放射方向は、0度、45度、90度の3方向に変化させて評価を行った。図から、これまで上下方向に独立に形成できていなかった指向性ビームを自由に変更できることが分かった。また、前節と同様に音が歪まないような安定したフィルタを求められており、比較的容易にフィルタを設計できることが分かった。

## おわりに

本研究は、円形スピーカアレーを基礎として3次元空間において音のある方向には強く放射し、ある方向では音を弱める、いわゆる指向性スピーカに関する研究を行ったものである。特に腕に装着することを想定し、半径5cmの円形アレーと、その円形アレーを3段積層したタイプの2つについての指向性形成を検討した。従来技術では、指向性を形成しようとすると、音が歪む、3次元的な指向性が形成しづらい、といった課題があったが、本研究では、円形アレーの基本的な鳴動パターンによって外部に形成される指向性とそのときに必要な放射効率に着目し、指向性形成と音の歪みのトレードオフを制御しやすくする方法を考案した。鳴動パターンは、円の周方向のみならず、縦への積層方向にも応用したものとなっている。本研究では、基本的な鳴動パターンが作る基本的な指向性とその放射

効率を事前に実験的に求めている。これは、実際の応用においてはネックになることが考えられるが、一度測定すればあとは使いまわすことができるため、大きな欠点ではない。ただし、形状の変更等に容易に対応するためには解析的に求める方法についても今後検討が必要であると考え。また、本研究では、指向性と音の歪みという観点での最適化を行ったが、スピーカ再生においては聴取点における音質(周波数振幅特性)も重要な要素となるため、今後は、指向性、音の歪み、周波数特性の3つを最適化するような方法を確立したい。

## 用語解説

- \*1 パラメトリックスピーカ：人には聞こえない超音波を空气中で歪ませて人に聞こえる音を作り出すスピーカ。超音波の直進性を利用してある特定の方向にだけ音を届ける。
- \*2 スピーカアレー：ふつうのスピーカを2個以上並べて、各スピーカから出る音の大きさとタイミングを周波数ごとに細かく制御することで、指向性や波面を作り出すスピーカ。
- \*3 波面合成法：複数のスピーカを用いて、音波をある表面で再現することで、音場全体を再現する方法。
- \*4 空間フーリエ変換：空間を流れる音波を周期の異なるサインやコサインと呼ばれる三角関数で表そうとすること。
- \*5 球面調和関数展開とヘリカル波展開：球面調和関数は難しいのでここでの説明は省く。ヘリカル波は、床屋の前のサインポールの動きの波であり、大きさや赤青の斜め具合の異なるサインポールで空間に漂う音波を表そうとすること。\*4のサインとこのサインは意味が異なる。

## 参考文献

- [1] 鎌倉 友男、非線形音響、コロナ社、2014
- [2] 桐山明奈、奈良一輝、網江睦巳、安藤輝、青木茂明、“2台のパラメトリックスピーカの配置による音像定位の検討、”日本音響学会秋季研究発表会講演論文集(2017)

# 腕輪型ハンズフリーフォン向け指向性スピーカアレーの研究

Investigation of circular loudspeaker array for wrist-mounted communication devices

- [3] 小森 慎也、大上 佳範、中山 雅人、西浦 敬信、  
“マルチパラメトリックアレースピーカを用いた  
音像ホログラムの構築、” 電子情報通信学会論文  
誌 J101-D(3) pp. 578-587. (2018)
- [4] A. J. Berkhout, V. Diemer, and V. Peter,  
"Acoustic control by wave field synthesis, " *The  
Journal of the Acoustical Society of America*,  
vol. 93, no. 5, pp. 2764-2778. (1993)
- [5] Earl G. Williams, "Fourier Acoustics: Sound  
Radiation and Nearfield Acoustical  
Holography, " Elsevier. (1999)
- [6] 羽田陽一, “音の波数領域信号処理” 電子情報通  
信学会 基礎・境界ソサイエティ *Fundamentals  
Review*, 11(4), pp. 243-255. (2018)
- [7] Jens Ahrens, “Analytic Methods of Sound  
Field Synthesis, ” Springer Science & Business  
Media. (2012)
- Reproduction System Using Two End-Fire  
Arrays, " *Audio Engineering Society 142nd  
Convention 142*, 9768- (2017/05/11)
- [6] 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)
- [7] K. Imaizumi, Y. Haneda, "Personal audio  
reproduction using two wearable end-fire  
loudspeaker arrays, " *Joint Meeting of the  
Acoustical Society of America and Acoustical  
Society of Japan*, vol. 140, no. 4, p. 3057  
(2016/11/28)

## 関連文献

- [1] K Sato, Y Haneda, "Directivity control of a finite  
cylindrical loudspeaker array based on circular  
harmonics and longitudinal multipole expression,  
" *Acoust. Sci. & Tech.*, vol. 40, no. 2, pp. 93-104  
(2019)
- [2] K. Sato, Y. Haneda, "Sidelobe suppression  
by desired directivity pattern optimization for a  
small circular loudspeaker array, " *Acoust. Sci.  
& Tech.*, vol. 39, no. 3, 243-251 (2018)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] K. Imaizumi, Y. Haneda, "Wearable Sound

この研究は、平成27年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成28～29年度に実施されたものです。