高臨場音場再現：パラメトリックスピーカを用いた最新の研究動向

High-realistic Acoustic Sound Field Reproduction: Research Trend with Parametric Array Loudspeaker

西浦敬信 Takanobu NISHIURA

アブストラクト パラメトリックスピーカを用いた高臨場音場再現手法について簡潔に解説する。特にパラメトリックスピーカの原理や従来の変調方式を説明した上で、高音質と高音圧を同時に実現可能なハイブリッド型振幅変調方式や音圧が最大となる距離を推定可能な復調評価指標を紹介する。加えて空間の1点でのみ音場を再現可能な極小領域オーディオスポット方式やスピーカの近傍でのみ音場を再現可能な近距離音響再生方式、及び音場再現エリアを制御可能な新しい音響再生デバイスの紹介など最新の研究動向を分かりやすく解説する。

キーワード 高臨場音場再現、パラメトリックスピーカ、オーディオスポット、近距離音響再生

Abstract This paper describes high-realistic acoustic sound field reproduction using a parametric array loudspeaker. We focus on hybrid amplitude modulation with SSB and DSB to obtain higher power and sound quality: distance as a demodulation criterion for estimating the maximum sound pressure; an audible sound spot in the minimum zone for reproducing an acoustic sound field in the minimum zone: near-field sound propagation based on individual delay filtering for carriers and multiple sideband waves: and flexible parametric array loudspeakers for controlling audio spots.

Key words High-realistic acoustic sound field reproduction, Parametric array loudspeaker, Audio spot, Near-field sound propagation

1. はじめに

これまで音場再現手法としてステレオやサラウンド等の多チャンネル音響再生方式が広く普及してきた。更に、パラメトリックスピーカ(超音波スピーカ)^{(1), (2)}の開発に伴い、高臨場音場再現の新たな可能性を追求できるフェーズへと突入した。

パラメトリックスピーカは超音波をキャリア波として利用することで可聴音を特定の領域のみに伝達可能な音響再生デバイスである。一般的なスピーカを用いて可聴音を空中に放射すると、波の回折効果等の影響により音波が拡散して伝搬する。これに対してパラメトリックスピーカは超音波をキャリア波として放射することで、可聴音であっても鋭い放射特性を保持したまま伝搬可能であるが、低周波数帯域の再生が困難という問題を抱えていた。パラメトリックスピーカは超音波をキャリア波とする振幅変調波を放射することで超指向性を実現し、大音圧で放射された振幅変調波は空気の高圧性により可聴音に自己復調する原理である。復調された可聴音の音質と音圧はこの復調レベルに依存するため、パラメトリックスピーカで目的音を再生するには振幅変調波が空気中

で十分復調される必要があり、距離ごとに音質や音圧は変動する。本稿では高音質と高音圧を同時に実現可能な新しい変調方式⁽³⁾、及び復調評価指標⁽⁴⁾について解説する。

また、パラメトリックスピーカの放射音が壁面などに反射すると、反射音は放射音と同様に鋭い指向特性を有し、その音像は反射位置に定位するという特徴を持つ。この現象に着目し、複数のパラメトリックスピーカの放射音を室内の壁面、天井面及び床面に反射させることで、室内1箇所に設置したユニットだけであらゆる方向や位置に音像を構築可能とする技術が、三次元音響再生方式「音像プラネタリウム」⁽⁵⁾である。この方式は、5.1chのようにスピーカを体験者の周囲に配置する必要もなく、次世代の新しい立体音響再生デバイスとして研究を実施しているが、室内における二、三次反射の扱いが問題となる。そこで、反射音の扱いも含めて、室内に高精度に音像を構築する手法⁽⁶⁾についても合わせて解説する。

最後に、空間の1点でのみ音場を再現する技術「極小領域オーディオスポット」⁽⁷⁾について解説する。パラメトリックスピーカは振幅変調した超音波を利用する超指向性スピーカであり、鋭い音響ビーム(可聴領域)によりオーディオスポットを実現している。しかし、特定の受聴者のみに音を届けたい場合、可聴領域は直線状となるため、壁や床などの反射、非対象者の割込みにより対象者以外にもオーディオスポットが形成される問題点があった。そこで複数のパラメトリックスピーカよりキャリア波と側帯波を分離放射し、キャリア波

西浦敬信 正員 立命館大学情報理工学部
E-mail nishiura@is.ritsumei.ac.jp
Takanobu NISHIURA, Member (College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kusatsu-shi, 525-8577 Japan).
電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ
Fundamentals Review Vol.10 No.1 pp.57-64 2016年7月
©電子情報通信学会 2016

と側帯波が重なる領域のみでオーディオスポットを形成することで極小領域における高臨場音場再現を実現した。また、極小領域オーディオスポットの制御領域を拡大・縮小可能な音響再生デバイス⁽⁸⁾の紹介に加え、単体のパラメトリックスピーカを用いてスピーカ近傍のみ原音場を再現する技術⁽⁹⁾も併せて解説する。

2. 様々な音響再生方式

これまでに提案された代表的な音響再生方式について簡潔に解説する。

(1) ステレオ方式

左右2台のスピーカを用いて、受聴者の鼓膜までの到来時間差と到来音圧差を制御することで前方方向に音像を構築する手法である。非常に簡素な方式であり一般的なテレビジョン放送などにも利用されているが、音像定位性能は体験者の受聴位置に大きく依存するだけでなく、理論的に側方や後方の音像を構築することは不可能である。

(2) バイノーラル方式

ヘッドホンをを用いた音響再生方式であり頭部伝達関数を用いて音像を構築する方式⁽¹⁰⁾である。良好な音像定位を実現するためには、受聴者自身の頭部伝達関数を計測する必要がある膨大な計測コストがかかる。他者の頭部伝達関数を用いた方法も検討されているが、個人差が大きく特に前後方向における音像定位が困難であるという問題がある。

(3) トランスオーラル方式

複数のスピーカを用いた音響再生方式であり、体験者とスピーカ間の伝達特性を考慮した上で、各音像に対する頭部伝達関数を複数のスピーカによって表現することで音像を構築する方式^{(11), (12)}である。良好な音像定位を実現するためには、高精度なデジタルフィルタを設計することが必要不可欠となり、受聴者の移動や複数人の受聴に対してぜい弱であるという問題を有する。

(4) サラウンド方式

5.1chサラウンドに代表されるサラウンド方式は、体験者を囲むように複数のスピーカを配置することで、前後左右の音像を構築する方式である。受聴者の移動などに頑健であるが、音像はスピーカの配置位置に定位するという問題がある。現方式では特に上下方向に対する音像の構築は困難である。

(5) 波面合成方式

再生音場の境界面上の音圧等を制御することで、原音場内の点音源の波面を再生音場内にて再現する方式である。この方式は無響室などの音響的設備を必要とするが、前述のバイノーラル方式やトランスオーラル方式とは異なり、受聴者の位置や身体に関する制約が少ないため、再生音場内の広いエ

リアを再現できる。

(6) 境界音場制御方式

原音場と再生音場で境界面上の音響物理量が等しくなるように逆フィルタを設計することで音場を高臨場に再生する手法⁽¹³⁾であり、近年ではBoSC (Boundary Surface Control) システム⁽¹⁴⁾をはじめ実用化も視野に研究が進んでいる。波面合成方式と異なり点音源による音場再生を前提とはしていないが、逆システムの設計が精度のポイントとなる。

(7) パラメトリックスピーカ方式

超指向性を持つパラメトリックスピーカを利用した音響再生手法⁽¹⁵⁾である。反射音を制御することで実現する「音像ブラネタリウム」方式は、音像を構築したい方向・位置に反射音を用いて実音像を構築するため、ヘッドホンも頭部伝達関数の計測も不要であり、更に体験者周囲のスピーカ配置も不要という画期的な手法である。加えて空間の1点でのみ音場を再現する「極小領域オーディオスポット」は、空間のある1点でのみ可聴音を生成する技術であり、他の音響再生方式とは基本原理が異なる新しい音場再現手法として注目されている。

本稿では、特にパラメトリックスピーカを用いた音場再現手法に注目し、最新の研究動向について解説する。

3. パラメトリックスピーカの音質改善

(1) パラメトリックスピーカの原理と特徴

図1のように、目的とする可聴音により超音波を振幅変調し、振幅変調した超音波を空気中に大音圧で放射することにより、可聴音を特定エリアにおいて再生する。放射された振幅変調波は、空気非線形性によりひずみが生じ高調波が発生する。このひずみにより生じた二次高調波が、目的とする可聴音となる⁽¹⁶⁾。パラメトリックスピーカから放射される振幅変調波は、超音波帯域にのみエネルギーを持つ信号である。一般的に、高い周波数の音ほど直進するという特性があるため、パラメトリックスピーカから放射される振幅変調波は、図2に示されるように鋭い放射特性を持つ。空気非線形ひずみが生じる領域は、パラメトリックスピーカから放射された領域のみとなるため、目的とする可聴音も振幅変調波と同様に超指向性を持つ。

(2) パラメトリックスピーカの音質と音圧

パラメトリックスピーカから放射された振幅変調波は、空気非線形性によりひずみ、変調前の音響信号に自己復調する。Merklinger⁽¹⁷⁾は、自己復調した音響信号の音圧レベルはその周波数の二乗に比例し、低域ほど音響再生が困難であることを理論的に示した。また自己復調した音響信号には、目的音のほかにその音響信号の倍音成分が含まれる。これは、目的音となる音響信号はキャリア波と両側波帯との差音⁽²⁾で

図1 パラメトリックスピーカを用いた可聴音の再生原理⁽⁴⁾ 可聴音により超音波を振幅変調した後に、大音圧で空气中に放射することで、空気非線形性により可聴音が復調される。

図2 パラメトリックスピーカの放射特性の一例⁽⁵⁾ パラメトリックスピーカと一般的な動電型スピーカの放射特性の差を示す。

あるが、両側波帯間でも差音が発生する。倍音成分は、目的音の整数倍の周波数を有し、再生音に混入することで目的音がひずむ。したがって、パラメトリックスピーカの音質改善には、低域の強調と倍音成分の低減が必要となる。

4. パラメトリックスピーカの変調方式

パラメトリックスピーカの音質及び音圧は変調方式に依存する。ここでは従来の両側波帯振幅変調方式 (DSB) や単側波帯振幅変調方式 (SSB) に加えて、音質及び音圧を同時に改善可能な DSB-SSB ハイブリッド型変調方式について解説する。またパラメトリックスピーカの距離ごとの復調レベルを評価する指標についても紹介する。

(1) 両側波帯振幅変調方式

両側波帯とキャリア波との差音を利用する方式が両側波帯 (DSB: Double SideBand) 振幅変調方式^{(2), (18)}である。図3(a)に示すように両側波帯とキャリア波の差音の和が再生音となるため、単側波帯を用いた変調方式に比べ可聴音の再生音圧レベルが大きい。一方、両側波帯を利用するため音質劣化の原因となる倍音成分の発生量も多い⁽¹⁹⁾。また、低域再生には両側波帯を、高域再生には単側波帯を用いる非対称振幅変調方式⁽²⁰⁾もあり、低域強調及び変調の際に混入する雑音を低減できることが示されている。しかしながら、全周波数帯域で同様の単側波帯を利用するため、電気音響変換効率の悪い単側波帯を利用する帯域があり、高域の音圧レベルが大きく減少する可能性がある。

(a) DSB 方式

(b) SSB 方式

図3 両側波帯 (DSB) 振幅変調方式と単側波帯 (SSB) 振幅変調方式⁽³⁾ キャリヤ波と各側波帯の差音により可聴音が復調される。SSBに比べてDSBは再生音圧レベルが大きい。

(2) 単側波帯振幅変調方式

キャリア波と単側波帯 (片側の側波帯) との差音を利用するのが単側波帯 (SSB: Single SideBand) 振幅変調方式⁽²¹⁾である。特に側波帯の低周波数帯域 (LSB: Lower SideBand) を利用する変調方式を LSB 変調方式、側波帯の高周波数帯域 (USB: Upper SideBand) を利用する変調方式を USB 変調方式という。通常は振幅変調波にキャリア波の周波数付近をカットオフ周波数とした低域フィルタや高域フィルタなどを用いることで、単側波帯を実現する。SSB 変調方式は、図3(b)に示すように単側波帯とキャリア波との差音を利用するため、再生音圧レベルが DSB 変調方式と比較して小さい。しかし、倍音の発生量は DSB 変調方式と比較して少なく、実際に三次波において 15 dB、四次波において 20 dB の低減が報告されている⁽²²⁾。

(3) DSB-SSB ハイブリッド型振幅変調方式

両側波帯を利用する DSB 変調方式は再生音圧レベルが大きく、単側波帯を利用する SSB 変調方式は倍音成分を低減する。したがって、音響再生そのものが困難である低域には両側波帯を、再生音圧レベルが大きい高域には倍音成分を低減する

図4 DSB-SSBハイブリッド型振幅変調方式⁽³⁾ 再生音圧レベルの小さい低域には両側波帯を、再生音圧レベルの大きい高域には倍音成分を低減するため単側波帯のLSB/USBをエネルギー最大基準により帯域ごとに選択して変調する。

ため単側波帯のLSB/USBをエネルギー最大基準により帯域ごとに選択するのが、DSB-SSBハイブリッド型振幅変調方式⁽³⁾である。この方式は、前述の非対称振幅変調方式と異なり、単側波帯を用いる高域において帯域ごとに電気音響変換効率の良い方の側波帯を用いる。つまり、高域の再生においては、LSB若しくはUSBの再生音圧レベルの大きい単側波帯を用いるように帯域制限を行う。更に、従来の変調方式では、低域だけでなく全可聴域においても周波数帯域ごとの音圧差が大きく、帯域ごとに利用する側波帯を制限するだけでは十分な低域強調が期待できない。これは、従来の振幅変調方式では、利用する側波帯における周波数ごとの振幅の重みが一樣であることが原因であると考えられる。したがって、低域強調の実現のためには、パラメトリックスピーカの周波数特性を均一に制御する必要がある。そこで、利用する側波帯における周波数ごとの振幅の重みを制御することで、パラメトリックスピーカの周波数特性の制御を実現する。図4にDSB-SSBハイブリッド型振幅変調方式の概略を示す。図4に示すように、両側波帯を制限し利用する側波帯の周波数ごとの振幅の重みを制御する。

(4) パラメトリックスピーカの復調評価指標

パラメトリックスピーカによる再生音の音質や音圧は空気中での復調レベルに依存するため、パラメトリックスピーカで目的音を高精度に再生するには、振幅変調波が十分復調される必要がある。これまでは再生音圧レベルが復調に依存することから、十分復調するために必要な距離を可聴音の音圧

レベルから算出⁽²³⁾していた。

実測した例として、パラメトリックスピーカから再生される超音波（振幅変調波）と再生音（復調波）の音圧レベル及び十分復調される距離の関係を図5に示す。図5から、可聴音はパラメトリックスピーカ近傍において最大音圧レベルとなるわけではなく、ある程度距離を経て十分に復調が生じ、その後減衰する特徴を有する。そこで、距離ごとのスペクトル包絡に基づきパラメトリックスピーカの復調レベルを算出する復調評価指標⁽⁴⁾を用いることでパラメトリックスピーカによる再生音の復調距離の推定が可能となった。

5. 音像ブラネタリウム：パラメトリックスピーカを用いた三次元音響再生

パラメトリックスピーカにより放射された音波は鋭い放射特性を持ち、鋭い放射特性を損なうことなく壁面に反射する⁽²⁴⁾。本稿では、パラメトリックスピーカから放射された領域で壁面等による反射領域を、壁面反射形オーディオスポットと定義する。壁面反射形オーディオスポットに存在する受聴者がパラメトリックスピーカの放射音を受聴した場合、図6に示されるように、パラメトリックスピーカではなく反射する壁面から音波が放射されるように知覚する⁽²⁴⁾。反射する壁面は、反射係数が高く透過性が低い材質であればよい。また、複数回数の反射を伴う壁面反射形オーディオスポットの場合、最後に反射した壁面の位置が音像の位置となる。この現象を活用し、光のブラネタリウムの原理のように、複数のパラメ

図5 パラメトリックスピーカの放射音圧と復調距離の関係⁽⁴⁾ パラメトリックスピーカは空気の実非線形性により可聴音を生成するため、復調には若干の距離が必要となる。上記の例だとスピーカから90 cmほど離れた場所で可聴音圧レベルが最大となる。

図6 壁面反射形オーディオスポット⁽⁵⁾ パラメトリックスピーカの放射特性は鋭く、かつ壁面反射しても鋭い放射特性は保たれるため、体験者はスピーカではなく、反射位置に音像を知覚する。

図7 音像プラネタリウム方式の概略図 複数台のパラメトリックスピーカを搭載したベースユニットを中心に、壁や天井等に放射音を壁面反射させることで、体験者は複数の音像を各反射方向に知覚し、高臨場音場を体験できる。

(a) 1号機 (10台搭載)

(b) 2号機 (11台+サブウーファ1台搭載)

図8 音像プラネタリウムベースユニット 1号機はパラメトリックスピーカを10台搭載し、壁面・天井面に高臨場音像を表現する。2号機はパラメトリックスピーカ11台に加えて、サブウーファを搭載し、低域も含めて高臨場音場再現を実現できる。

リックスピーカを集約したベースユニットから放射される音波を壁面・天井面及び床面等に反射させ、目的の方向から体験者に向けて壁面反射形オーディオスポットを構築することにより、高臨場に音場を再現する技術が「音像プラネタリウム」⁽⁵⁾方式である。図7に音像プラネタリウム方式の概略図を示す。パラメトリックスピーカを集約した音像プラネタリウムベースユニットを図8(a)に示す。このベースユニットはパラメトリックスピーカ10台で構成される。ベースユニットに設置されたパラメトリックスピーカは、放射角度を任意の方向に調整することが可能である。ベースユニットから放射された音は、壁面・天井面及び床面を用いた壁面反射形オーディオスポットを利用し、目的音像を構築する。体験者は、ヘッドホンを装着せずに三次元音場を体験することができるため、身体にかかる負荷はヘッドホンを用いた方法よりも低減できる。また、音を反射させ実空間に音像を構築するため、頭部伝達関数の問題点である音像定位の前後誤りを回避可能である。更に、音像プラネタリウム方式の利点として、パラメトリックスピーカの鋭い放射特性を利用することで、同一室内でありながら受聴位置により二つ以上音場を構築できる

ことなどが挙げられる。また、ベースユニットを改良し、図8(b)のように低域用のサブウーファを搭載することで低域の音質を改善し、再生音場の更なる高臨場化⁽²⁵⁾も検討が進められている。加えて、ベースユニットから放射された音波の高次反射の扱いを改善するために、ドーム内での音像プラネタリウム方式も開発⁽⁶⁾されている。ドーム内にてベースユニットから壁面に向けて放射した音波は、ドームの構造上、必ず床面へと集約される。そこで、二次反射以降の反射音の除去を目的として床面を吸音構造にすることで音場の高臨場化を画策している。この音像プラネタリウム方式は視覚情報との親和性も高く、ヘッドマウントディスプレイを用いた視聴覚融合研究⁽²⁶⁾も展開されている。

6. 極小領域オーディオスポット：空間の1点でのみ可聴音を再現する技術

(1) キャリヤ波と側帯波の分離放射によるオーディオスポット形成

パラメトリックスピーカでは、キャリヤ波と側帯波の差音が可聴音として復調される原理であるため、どちらか一方の音波が存在しない場合、再生音場にて可聴音は生じない。そこで、振幅変調波をキャリヤ波と側帯波に分離して、複数のパラメトリックスピーカから各々分離して放射することで、キャリヤ波と側帯波が重なる領域のみにオーディオスポットを形成する方式が「極小領域オーディオスポット」⁽⁷⁾である。図9(a)はキャリヤ波と単一侧帯波の分離放射によるオーディオスポット形成の概略図である。キャリヤ波と側帯波が重なる領域でのみ可聴音への復調が生じるため、任意の領域での

図9 極小領域オーディオスポット方式の概略図⁽⁷⁾ キャリヤ波と側帯波を分離して放射することで、各波が重なる空間の1点でのみ可聴音を再生できる。更に側帯波を分割することで、高調波ひずみを抑圧することが可能となり、より高臨場にオーディオスポットを実現できる。

図10 極小領域オーディオスポット技術を用いた可聴音の音圧マップ キャリヤ波と側帯波を分離して放射することで、体験者の頭部周辺でのみ可聴音を再生する。この実験では片耳当り3台のパラメトリックスピーカを使用しており、1台はキャリヤ波、2台は分割側帯波を各々割り当てている。

みオーディオスポットを形成できる。ただし、側帯波のみの領域では、側帯波同士の差音による混変調ひずみが発生する。そこで混変調ひずみを抑圧するために、図9(b)のようにキャリヤ波と複数側帯波の分離放射を用いることで更に高臨場音場を再現することができる。図10に極小領域オーディオスポット技術を用いた可聴音の音圧マップを示す。空間のある1点でのみ可聴音を再現できている様子が伺える。低域の再生はやや難しいが、音声でも音楽でも十分に内容が聞き取れる音質で再現可能である。

(2) フレキシブルパラメトリックスピーカの開発

極小領域オーディオスポットにより空間の1点において音場を再現できる技術が開発されたが、その領域内の大きさを制御することは困難であった。そこで、パラメトリックスピー

(a) 試作した凹面型パラメトリックスピーカ

(b) 放射特性の概略図

図11 凹面型パラメトリックスピーカ⁽⁸⁾ 超音波素子を凹面の内側に配置して放射することで、焦点に振幅変調波が集まった後、放射面の曲率に合わせて振幅変調波が拡散し、空気の非線形性により広範囲で可聴音が生じる。

カの放射面を曲面に制御することで、放射範囲を超指向性から拡散性へと自由に制御可能な音響再生デバイスが開発された。これがフレキシブルパラメトリックスピーカ⁽⁸⁾である。パラメトリック効果を最大限発揮するためには、図11(a)のように凹面型配置の方が高効率であり、図11(b)の曲率 r_1' を制御することで図12のように放射範囲を制御することが可能となる。図13に曲率を外部から制御することで、放射面を自在に変形可能なフレキシブルパラメトリックスピーカを示す。従来のスピーカは音量や音質を制御できる程度であったのに対し、フレキシブルパラメトリックスピーカは放射特性を自由に制御できる画期的な音響デバイスとして高く注目されている。

(a) $r_1' = 10\text{cm}$

(b) $r_1' = 30\text{cm}$

図12 凹面型パラメトリックスピーカの音圧マップ⁽⁸⁾ 曲率ごとの凹面型パラメトリックスピーカの放射特性を示す。曲率が小さいほど、広範囲に復調が生じる。なお、パラメトリックスピーカは(0,0)に配置されている。

図13 試作した外部制御可能なフレキシブルパラメトリックスピーカ⁽⁸⁾ 外部入力によりスピーカの放射面を動的に制御することで、任意の放射特性を実現可能な音響再生デバイスである。

図14 近距離音響再生の概略図⁽⁹⁾ 遅延を付加してキャリア波と側帯波の放射方向を変えることで、音波の重なり合うスピーカ近傍でのみ高臨場音場を再現する。

(a) 試作したライン制御型パラメトリックスピーカ

(b) 超音波素子の配置及び間隔

図15 ライン制御型パラメトリックスピーカ⁽⁹⁾ パラメトリックスピーカにアレー信号処理が施せるよう、1列ごとに出力信号を制御可能な音響再生デバイスである。

(3) キャリヤ波と側波帯の独立制御に基づく近距離音響再生

極小領域オーディオスポットは複数台のパラメトリックスピーカを用いて空間の1点に音場を再現したのに対して、1台のパラメトリックスピーカを用いてキャリア波と側波帯を独立に遅延制御することで、スピーカ近傍のみ音場を再現する技術が「キャリア波と側波帯の独立制御に基づく近距離音響再生」⁽⁹⁾である。図14に側帯波を二つに分割した近距離音響再生の概略を示す。図14において、 t は時刻、 $x_{AM}(t)$ は振幅変調波、 $x_C(t)$ はキャリア波、 $x_B(t)$ 、 $x_{B'}(t)$ は分割した各側帯波、 θ_k ($k=B, B'$)は分割した各側帯波に対する目的方向、 d は超音波素子間隔、 c は音速、 τ_k ($k=B, B'$)は隣り合うライン制御型パラメトリックスピーカから放射する分割側帯波の遅延時間の差、 M はライン制御型パラメトリックスピーカ数、 D_{k_i} ($k=C, B, B', i=1, 2, \dots, M$)はキャリア波、及び分割側帯波に対する i 番目のライン制御型パラメトリックスピーカから放射する音波の遅延時間を示す。この方式では、図15(a)(b)のように列ごとに独立して信号を出力可能なライン制御型パラメトリックスピーカが必要となる。分離したキャリア波 $x_C(t)$ と複数の側帯波 $x_B(t)$ 、 $x_{B'}(t)$ をライン制御型パラメトリックスピーカ数 M 個に分解し、それぞれ独立に遅延 D_{k_i} ($k=C, B, B', i=1, 2, \dots, M$) を付与し、遅延和アレーによるビームステアリング^{(27), (28)}を行うことで、重なり合う領域でのみ音場が再現される。遅延和アレーによるビームステアリングは、複数の超音波素子から放射される音波に

対して個別に遅延を付与し、目的方向に対して波面を形成することで、分割した各側帯波、キャリア波を異なった方向に再生する。重なり合う可聴エリアの奥行きは、パラメトリックアレースピーカの半径と放射角が一番大きい側帯波の放射方向に依存するため、各側帯波の放射方向(遅延量)を調節することで可聴エリアの大きさを制御可能である。

7. おわりに

本稿ではパラメトリックスピーカの基本原理や特徴を説明した上で、音像プラネタリウム、極小領域オーディオスポットや近距離音響再生などパラメトリックスピーカを活用した最新の高臨場音場再現技術に関する研究事例を解説した。これまで音場再現技術は多チャネル信号処理(ソフトウェア)技術を中心に研究を展開してきたが、実用化を目指す上で、ハードウェアの進化は必要不可欠である。今後はソフトウェアとハードウェアが両輪となって更なる進化を遂げ、画期的な音場再現技術が日々の暮らしを支える時代を切に願う。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科研費(21240018, 24220004, 26280065)及びJST COIによる研究助成を受けた。また、立命館大学情報理工学部 中山雅人博士、同情報理工学研究科 生藤大典博士(現NEC)、松井唯氏(現富士通)、益永翔平氏、

(現富士ゼロックス), 小辺亮介氏(現三菱電機), 小森慎也氏, 同理工学研究科 杉林裕太郎氏(現富士ゼロックス), 廣川孝太郎氏(現ソニー)の協力に感謝する。

参考文献

- (1) P. J. Westervelt, "Parametric acoustic array," J. Acoust. Soc. Am., vol. 35, no. 4, pp. 535-537, 1963.
- (2) M. Yoneyama, J. Fujimoto, Y. Kawamo, and S. Sasabe, "The audio spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design," J. Acoust. Soc. Am., vol. 73, no. 5, pp. 1532-1536, 1983.
- (3) D. Ikefuji, M. Nakayama, T. Nishiura, and Y. Yamashita, "Weighted double sideband modulation toward high quality audible sound on parametric loudspeaker," Proc. IEEE ICASSP 2013, pp. 843-847, 2013.
- (4) 生藤大典, 中山雅人, 西浦敬信, "パラメトリックスピーカのためのスペクトル包絡に基づく復調評価指標の策定," 信学論(D), vol. J96-D, no. 3, pp. 655-663, March 2013.
- (5) 西浦敬信, 森勢将雅, "音像プラネタリウム パラメトリックスピーカを用いた三次元音響再生方式," 超音波 techno, vol. 24, no. 4, pp. 47-51, 2011.
- (6) 生藤大典, 辻井秀弥, 益永翔平, 中山雅人, 西浦敬信, 山下洋一, "間接動電型スピーカを用いた残響時間制御による全天候ドームにおける音像プラネタリウムの高臨場化," 第26回 回路とシステムWS, pp. 436-441, 2013.
- (7) 松井 唯, 生藤大典, 中山雅人, 西浦敬信, "キャリア波と側帯波の分離放射によるオーディオスポット形成," 信学論(A), vol. J97-A, no. 4, pp. 304-312, April 2014.
- (8) 小森慎也, 益永翔平, 生藤大典, 中山雅人, 西浦敬信, "フレキシブルパラメトリックスピーカを用いたオーディオスポットの制御," 日本VR学論, vol. 20, no. 3, pp. 189-198, 2015.
- (9) 小辺亮介, 生藤大典, 福森隆寛, 中山雅人, 西浦敬信, "パラメトリックアレイスピーカを用いたキャリア波と複数側帯波の独立遅延制御による近距離音響再生," 信学論(A), vol. J99-A, no. 6, pp. 201-210, June 2016.
- (10) 浜田晴夫, "バイノーラル音場再生系について," 音響誌, vol. 48, no. 4, pp. 250-257, 1992.
- (11) B. B. Bauer, "Stereophonic earphone and binaural loudspeakers," J. Audio. Eng. Soc., vol. 9, pp. 148-151, 1961.
- (12) J. Bauck and D. H. Cooper, "Generalized transaural stereo and applications," J. Audio. Eng. Soc., vol. 44, no. 9, pp. 683-705, 1996.
- (13) 伊勢史郎, "キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理," 音響誌, vol. 53, pp. 706-713, 1997.
- (14) A. Omoto, S. Ise, Y. Ikeda, K. Ueno, S. Enomoto, M. Kobayashi, "Sound field reproduction and sharing system based on the boundary surface control principle," Acoust. Sci. and Tech., vol. 36, no. 1, pp. 1-11, 2015.
- (15) J. Yang, K. Sha, W. S. Gan, and J. Tian, "Nonlinear wave propagation for a parametric loudspeaker," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E87-A, no. 9, pp. 2395-2400, Sept. 2004.
- (16) 矢田淳也, 北川和則, 米沢義道, 伊東一典, 橋本昌巳, "パラメトリックアレイビームによる空中音源," 信学技報, EA94-37, pp. 25-30, Aug. 1994.
- (17) H. M. Merklinger, "Improved efficiency in the parametric transmitting array," J. Acoust. Soc. Am., vol. 58, no. 4, pp. 784-787, 1975.
- (18) T. Kamakura, K. Aoki, and Y. Kumamoto, "Suitable modulation of the carrier ultrasound for parametric loudspeaker," Acustica, vol. 73, pp. 215-217, 1991.
- (19) M. Chen, L. Xu, Y. Cao, L. Xu, X. Wang, X. Li, and J. Ma, "Research on an improved amplitude modulation method of audio directional loudspeaker," Proc. IEEE ICALIP, pp. 5-9, 2008.
- (20) 原 祥之, 森 幸男, 鎌倉友男, "パラメトリックスピーカにおける音質改善について," 2008 信学総大, no. A-10-5, p. 207, March 2008.
- (21) M. Chen, X. Qin, L. Xu, Y. Du, and L. Xu, "The distortion analysis of the single side band method for parametric loudspeaker based on orthogonal envelope detection," Proc. IEEE ISSCAA, pp. 1-6, 2008.
- (22) 愛甲英寿, 野村建太, 青木健一, 鎌倉友男, 酒井新一, "ダイナミックSSB変調機を用いたパラメトリック音響システムの検討," 信学技報, US2007-102, EA2007-107, pp. 33-38, Jan. 2008.
- (23) 鎌倉友男, 酒井新一, "パラメトリックスピーカの実用化," 音響誌, vol. 62, no. 11, pp. 791-797, 2006.
- (24) K. Hirokawa, M. Morise, and T. Nishiura, "The fundamental design of reflective audio spot utilizing ultrasound loudspeaker," Proc. 10th WESPAC, PaperID: 126, 2009.
- (25) Y. Sugibayashi, S. Kurimoto, D. Ikefuji, M. Morise, and T. Nishiura, "Three-dimensional acoustic sound field reproduction based on hybrid combination of multiple parametric loudspeakers and electrodynamic subwoofer," Applied Acoustics, vol. 73, no. 12, pp. 1282-1288, 2012.
- (26) 中野亜美, 中山雅人, 西浦敬信, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行, "音像プラネタリウム方式を用いた視聴覚併用MRシステムにおける移動音の実現," 日本VR学大, pp. 588-591, 2013.
- (27) W. S. Gan, J. Yang, K. S. Tan, and M. H. Er, "A digital beamsteerer for difference frequency in a parametric array," IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process., vol. 14, no. 3, pp. 1018-1025, 2006.
- (28) D. Olszewski, F. Prasetyo, and K. Linhard, "Steerable highly directional audio beam loudspeaker," Interspeech, pp. 137-146, 2005.

(SIP研究会提案, 平成28年5月8日受付)

西浦敬信 (正員)

平13 奈良先端大情報科学研究科博士後期課程了。同年和歌山大・シス工・助手。平16 立命館大・情報理工・助教授。平19 同准教授。平26 同教授。現在に至る。博士(工学)。音響信号処理。主として音環境の解析・理解・再現・生成に関する研究に従事。平13 電気通信普及財団賞, 平13 ATR 発明・論文表彰。平21 日本バーチャルリアリティ学会論文賞各受賞。著書「応用センサ工学」など。