

客席まで飛び出す音響を実現する波面合成音響技術

近年、映画館などで上下左右に飛び回る音を再生する音像定位技術が用いられています。NTTサービスエボリューション研究所では、Kirari!のさらなる臨場感向上に向け、サラウンドでは実現が難しい奥行き方向の音像定位技術を検討してきました。本稿では、直線状に並べたスピーカを用いて客席まで飛び出す音響効果を実現した「波面合成技術」について、理論・実装の両面から紹介します。

つつみ きみ たか た か だ ひであき
堤 公孝 / 高田 英明

NTTサービスエボリューション研究所

背景

NTTサービスエボリューション研究所では、競技空間をまるごとリアルタイムに日本国内はもとより世界へ配信するイマーシブテレプレゼンス技術「Kirari!」の研究開発を進めています。Kirari!は、時間的に同期伝送された競技映像・音声をホログラフィックディスプレイに投影・再生することで、あたかも選手が上映会場で競技を行っているかのような高い臨場感のパブリックビューイングを実現する技術です。音響再生についていえば、サッカーボールを蹴る音や柔道選手が受け身を取るときの音といった競技音を再生する際、スクリーンに投影された選手の映像と時間的・空間的に一致する点から音を鳴らすことで、単なるステレオ再生などよりもはるかに高い臨場感を実現できます。このように会場内の任意の位置に音源が存在するかのように音を再生する音像定位技術は、高い臨場感や迫力が要求される映画やゲームなどで広く用いられており、音響で高い臨場感を引き出すためになくしてはならない技術です。

NTT R&Dフォーラム2016では、超音波をスクリーン上の被写体に向け

て方向制御しながら放射するバーチャルスピーカを音像定位に用いていました。スクリーン上で反射した音を聞くため、観客はあたかもスクリーン上の被写体から音が発しているかのように感じるといわれていますが、音像の位置制御が左右方向に限定されるため、ステレオ再生との差異が少ないという課題がありました。また、超音波の反射を利用するため高い音圧を出せないことも課題でした。

そこで、奥行き方向の音像制御も実現可能な波面合成音響技術を検討し、音が客席近くまで飛び出る臨場感の高い音響再生を実現しました。また、波面合成は通常のスピーカを用いて実装するため、超音波を用いるよりも大きな音量を出すことが可能となり、かなり大きな会場でも効果を発揮できるようになりました。波面合成音響技術はKirari!に組み込まれ、NTT西日本グループコレクション2016、NTT R&Dフォーラム2017、歌舞伎シアターバーチャル座、ニコニコ超歌舞伎2017といった実フィールドでも多くの実績を積むことができました。

本稿では、波面合成音響技術の概要を説明し、フィールドトライアルの中でもニコニコ超歌舞伎2017に出展し

た際に用いたシステムについて紹介します。

波面合成音響技術

■波面合成の理論

波面合成音響技術は、音の空間的・物理的な波面を物理モデルに基づき再現する音響再生技術です。この技術はKirchhoff-Helmholtz（キルヒホッフーヘルムホルツ）積分方程式に基づく理論により実現します⁽¹⁾。Kirchhoff-Helmholtz積分方程式は、「音源を含まないある空間の音は、その空間を囲む境界面での音圧と音圧勾配を制御することで自由に制御できる」ことを意味する方程式です。要は、壁・天井・床を隙間なくスピーカで埋め尽くして制御できれば、どんな音でも再現できるということを意味します。ただ、Kirchhoff-Helmholtz積分方程式をそのまま実現しようとする、市販のスピーカでは実現が難しい特殊な特性のスピーカが大量に必要となってしまいますし、必要なスピーカ数も膨大になってしまいます。そこで、レイリーの第一積分による近似を用い、さらに実現対象の音場を平面に限定して実装を行います。実際には、直線状に密に並べた多数のスピーカでスピーカアレ

イを形成し、目標となる音場を設定してスピーカアレイと同一平面上に合成します(図1)。

■Kirari!と波面合成技術

これまでNTT研究所で検討してきた波面合成技術は、マイクアレイで収録した音場をスピーカアレイで高精度に再現する波面再構成技術とでもいべきものでした⁽²⁾。音源の数や位置を

検出することなく、収録した音を処理して再生することで収録会場の音場をそのまま上映会場で再現できますが、マイクアレイを収録会場の音源近くに配置して收音する必要があるため、同時に収録している映像への写り込みを考慮すると実際の中継に用いることは困難です。また、個々の音源を分離するのが難しく、特定の音に限定して編

集を加えるといった柔軟性に欠ける課題がありました。そこで私たちは、コンテンツに演出や編集が加わる可能性を考慮し、モノラルの音源から仮想的な音源をつくり出す波面合成技術を新たに検討し、採用しました。通常の収録でも、ガンマイクなどを用いて個別の音源を高品質に收音したうえで、編集を加えてコンテンツを制作しており、モノラル音源に対して音像定位効果を付与する手法は現実のワークフローに合わせた手法となっています。

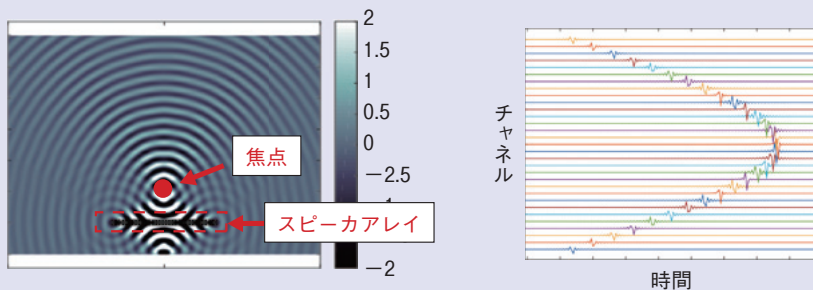
■焦点音源法

スピーカから放射した音がスピーカの前に焦点をつくるよう目標となる音場を設定することで、設置したスピーカよりも客席に近い焦点位置まで飛び出す仮想音源を実現できます。このような音響再生の手法を焦点音源法といいます⁽³⁾。

焦点音源法を用いれば、焦点の位置とスピーカの位置から解析的に算出したデジタルフィルタを入力音源に適用することにより、焦点の位置に音のパワーを集中させることができます。デジタルフィルタはスピーカごとに異なるため、多数のスピーカを用いるとしても入力の数はいくつかで十分です。このデジタルフィルタは、音が到達するタイミングが焦点の位置でぴったりと合うよう、スピーカごとに再生タイミングとパワーを調整する役割を果たします。スピーカと焦点の位置関係を図2(a)に、パルスを入力したときのスピーカごとの出力音声を図2(b)に示します。この例では、0.1 m間



図1 スピーカアレイ



(a) スピーカと焦点の位置関係

(b) パルスを入力したときのスピーカごとの出力音声

図2 焦点音源がつくる音場と各スピーカへの入力音声

隔でスピーカを32個並べ、スピーカの中心から2 m先に焦点をつくった場合について示しています。スピーカアレイの端から焦点までの距離はスピーカアレイ中央から焦点までの距離よりも長くなるため、これらのスピーカを同時に鳴らすと、スピーカアレイの端から出た音が焦点に到達するよりも前に、スピーカアレイの中央から出た音が焦点を通過してしまいます。した

がって、焦点にパワーを集めるためには、焦点から遠い位置のスピーカほど早く音の再生を始める必要があると考えられます。ここで、図2 (b)に示した各スピーカの出力を見ると、焦点から遠いアレイ端のスピーカほど早くパルス音の再生が始まるのが分かります。次に、各スピーカから出た音が集まってどのような音場を形成するかを示します。焦点の位置に音源を置いて

パルス音を再生すると、同心円状に音が広がります (図3)。これと同じ位置に焦点を生成するため、求めた出力をスピーカアレイから再生した様子を図4に示します。複数のスピーカから出た音が重なる部分に図3で示したものと似た波面が形成されているのが分かります。このように、焦点音源法で決定したデジタルフィルタを用いることで、スピーカより客席側の領域を

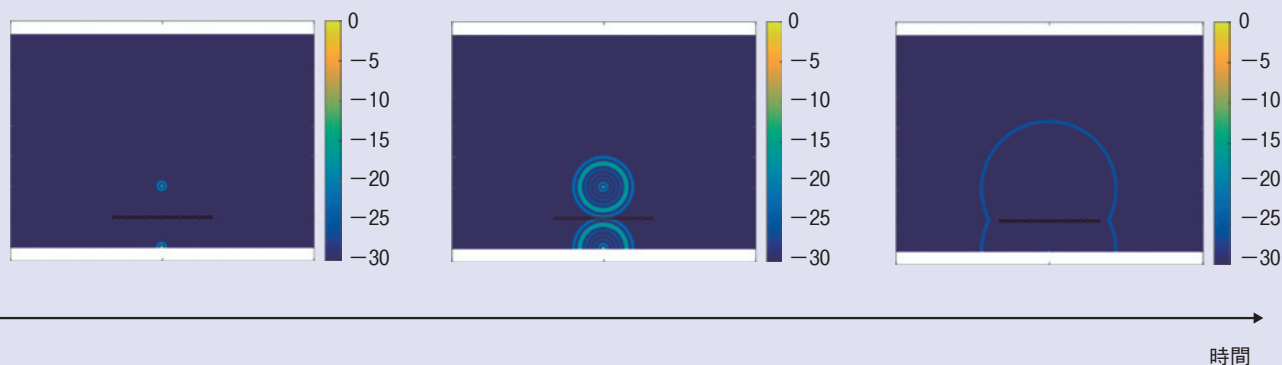


図3 音の広がり方

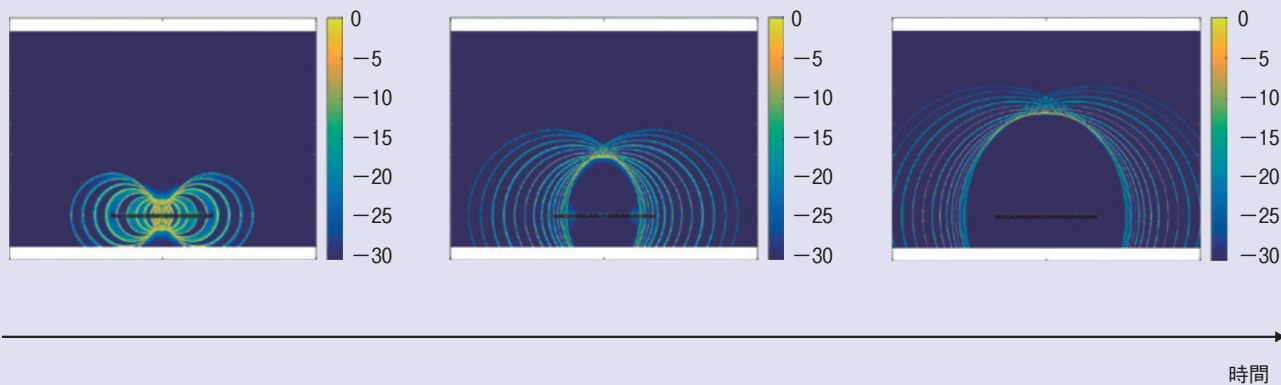


図4 スピーカアレイから再生した様子

含む任意の位置に仮想音源を生成することができます。

■実装上の課題

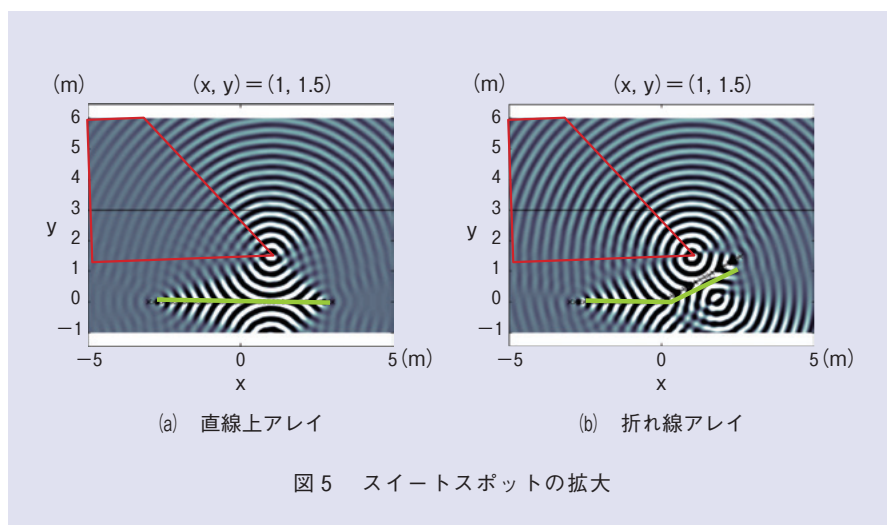
波面合成を用いれば、会場中のどんな客席に座っても飛び出す音響効果を体験できるかという点、残念ながらそうではありません。波面合成では、理論上無限に長いスピーカアレイを用いることを前提としますが、実際には市販のスピーカを並べてスピーカアレイとするため、無限の長さを実現することができません。さらに実際のイベントでは、消防法などの制約条件の下でスピーカの設置場所を決定することから、直線の途中で通路分の隙間を開ける必要があることも少なくありません。その結果、観客が音像を知覚する位置と事前に設定した焦点音源の位置が一致するスイートスポットが狭くなり、飛び出す音響の効果を同時に体験できる客席数が少なくなってしまいます。このスイートスポットの課題に対し、直線状アレイの一部を曲げて折れ線アレイとし、線分ごとに独立なアレイとして焦点音源を生成する手法を導入することで、スイートスポットを拡大することができました⁽⁴⁾ (図5)。スイートスポットに関する課題については現在も世界的に研究が進められており、私たちも理論面での発展によるさらなるスイートスポットの拡大をめざしています。

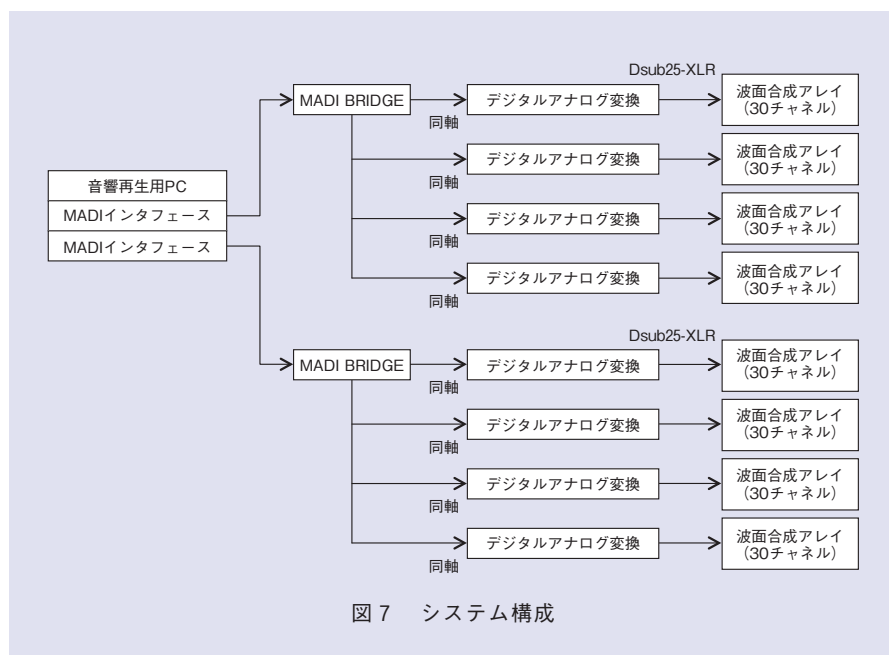
実証実験：ニコニコ超歌舞伎2017

ニコニコ超歌舞伎2017では、240チャンネル、全長36 mのスピーカアレイ

を用いて、1階席350名分の客席を対象に波面合成を用いた特殊効果を披露しました(図6)。事前に波面合成の音響効果を付与した効果音を音響再生用PCに準備しておき、役者の演技に合わせてオペレータが操作することで効果音を再生する方式としました。システム全体の構成を図7に示しま

す。ワークステーションに2台並列接続したオーディオインタフェースから音声データを送り、アンプ内蔵のスピーカから音声を再生することにより、波面合成の効果が付与された効果音が会場に鳴り響きます。石灯籠が爆発して龍が飛び出すシーンでは爆発で飛び散った石灯籠のかけらが客席に降





り注ぐ様子を、大詰の火事のシーンでは焼け落ちた家屋が客席近くに落下する様子を再現するなど、さまざまな演出に波面合成音響を利用することができました。落下する瓦礫や石をお客さまの耳元で鳴らすことにより、本当に瓦礫が会場に降り注ぐかのような高い臨場感を実現することができました。

会場の幕張メッセイベントホールには、1回の公演当り5000人を超えるお客さまが来場されたにもかかわらず、装置の都合上1階席の一部のお客さまにしか効果を確認いただけませんでしたが、このような巨大な会場で開催されるライブイベントで波面合成を用いた特殊効果を導入できたことや、演出を組み合わせることでスイートスポットの課題をカバーしつつ効果的な表現に手ごたえを得られたことなど、私たちのチームにとって極めて貴重な経験を

得ることができました。

今後の展開

波面合成のように多数のスピーカを用いれば、飛び出す音響のようにサラウンドでは実現不可能な特殊な音響効果を実現できます。しかし、焦点音源法におけるスイートスポット問題のように、多数のスピーカを用いてもいまだ解決困難な課題も多く存在するため、波面合成そのもののさらなる進化に向けた研究は重要です。一方、音像定位効果を持つコンテンツを家庭などで楽しむためには、巨大なスピーカアレイがない環境で、ヘッドフォンや小型のスピーカアレイを用いてどこまで波面合成に近い効果を実現できるかといった課題にも取り組む必要があります。波面合成の研究成果をベンチマークとして活用できることは、これらの

課題の検討にも大変有用です。これらの課題に並行して取り組むことで、シアター向け、家庭向けの両方で高い臨場感を実現可能な音響再生技術の研究開発に挑戦していきたいと思います。

参考文献

- (1) 古家・小山：“波面合成技術の原理と応用,” 映像情報メディア学会誌, Vol.68, No.8, pp.621-624, 2014.
- (2) S. Koyama, K. Furuya, H. Uematsu, Y. Hiwasaki, and Y. Haneda: “Real-time sound field transmission system by using wave field reconstruction filter and its evaluation,” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E97-A, No.9, pp.1840-1848, 2014.
- (3) S. Spors, H. Wierstorf, M. Gainer, and J. Ahrens: “Physical and Perceptual Properties of Focused Sources in Wave Field Synthesis,” Proc. of 127th AES Convention, paper 7914, New York, U.S.A., Oct. 2009.
- (4) 堤・高田：“補助アレイを用いた波面合成法による焦点音源の受聴エリア拡大,” 日本音響学会2017年春季研究発表会講演論文集, pp.433-436, 2017.



(左から) 堤 公孝/ 高田 英明

高い臨場感の実現に音響は不可欠です。スピーカやヘッドフォンを用いた音響再生技術に関する課題に対し、私たちはさまざまなソリューションで解決に貢献します。

◆問い合わせ先

NTTサービスエボリューション研究所
ナチュラルコミュニケーションプロジェクト
TEL 046-859-3211
E-mail evac@lab.ntt.co.jp