

# 高精細音空間コンテンツのための主観的最適化音空間ディスプレイの研究開発 (131202005)

Development of acoustic spatial display for high-resolution acoustic content optimized with subjective experience

## 研究代表者

岩谷 幸雄 東北学院大学  
Yukio Iwaya Tohoku Gakuin University

## 研究分担者

土屋隆生<sup>†</sup> 大谷真<sup>††</sup> 井口寧<sup>†††</sup>

Takao TSUCHIYA<sup>†</sup> Makoto OTANI<sup>††</sup> Yasushi INOUCHI<sup>†††</sup>

<sup>†</sup>同志社大学 <sup>††</sup>京都大学 <sup>†††</sup>北陸先端科学技術大学院大学

<sup>†</sup>Doshisha University <sup>††</sup>Kyoto University <sup>†††</sup>Japan Advanced Institute of Science and Technology

研究期間 平成 25 年度～平成 27 年度

## 概要

聴覚に高い臨場感を与える高精細音空間提示の為には、稠密に並べたスピーカアレイが必要であるが、可聴帯域上限まで物理的に厳密な音場を構成するためには数ミリ～センチ単位に配置する必要があり、現状の音響技術では実現化はほぼ不可能である。本研究は、高精細音コンテンツ提示の実現化へ向け、主観的に厳密な音場と同等な臨場感を得るための合理的な条件を指針としてまとめ、実際の高精細音空間ディスプレイシステムを構築・試作した。

## 1. まえがき

両耳に元音場の信号を再現できれば、聴覚的に元音場と同等な体験が可能となる。信号の再現方法として、ヘッドホン等により両耳の信号を制御する方法（バイノーラル法）と、稠密に並べたスピーカアレイを用いて空間に波面を再現する方法（波面再現法）がある。近年、100チャンネルを超える DA/DA コンバータが安価に手に入ることもあり、世界各国で音場再現の実験が盛んに行われている。しかし、一般に、空間的にサンプリングされた聴覚に高い臨場感を与える高精細音空間提示の為には、空間的サンプリング定理の束縛が有り、再現しようとする周波数の半波長未満にスピーカを配置する必要があり、条件が満たされない場合には、再現信号に空間的折り返し歪みが生じる。したがって、20 kHz までの可聴帯域上限まで物理的に厳密な音場を構成するためには数ミリ(8.5mm@20kHz)未満で配置する必要があり、このような配置は現状の音響技術では実現化は不可能である。しかし、元音場と同等な体験ができるコンテンツの提示法が確立されれば、その条件の下でシステムを構築することが可能となる。

本研究は、元音場と同等な体験ができる高精細音コンテンツ提示の実現化へ向け、主観的に厳密な音場と同等な臨場感を得るための合理的な条件を指針してまとめ、さらに、実際の高精細音空間ディスプレイシステムを構築することを目的とした。

研究開発は、以下のようなサブテーマに分かれて行った。  
テーマ A) システム条件指針の作成：高精細音空間レンダリングシステムを構築し、さまざまな音場コンテンツを作成し、主観評価実験を通して、音空間属性・臨場感进行评估する。また、主観的に同等な印象を与えるために精密に波面を合成する必要がある周波数条件を示し、理的な構成要件に資する。

テーマ B) 高精細音空間レンダリングシステムの高精度化：高精細音空間レンダリングシステムを誤差低減、精緻化することで高度化し、後述する高精細音空間ディスプレイシステムに組み込む。

テーマ C) Sub-DHM 内蔵型音響シミュレーションブロッ

クの開発：シミュレーションブロックを組み合わせて形状を構成することにより、任意の形状の音場を構成し、リアルタイムでレンダリングできることを提案。このシミュレーションブロックを具体的に設計し、複数個の試作を行い、評価を行う。

テーマ D) 高精細音空間ディスプレイシステムの構築：テーマ A) で得られた知見・指針とテーマ B) で実現する高精細音空間レンダリングシステムを組み込み、高精細音空間ディスプレイシステムを構築する。システムは、指針に基づいて臨場感・音空間属性などの伝達を切り替え制御可能であり、その差異が体感できるものとする。

## 2. 研究開発内容及び成果

テーマ A) システム条件指針の策定：さまざまな音空間コンテンツを作成し、客観的評価および主観的評価を行うことにより、探索的にシステム構築の条件を調査した。主な成果は、以下の通りである。

- 客観的評価：シミュレーションにより、折り返し歪みの条件を系統的に変化させた場合の、耳元における信号の再現精度について調査し、4 kHz 程度の周波数が再現できるスピーカアレイがあれば、耳元のバイノーラル再現信号は、5 dB 以下の誤差で再現可能であることを示した。このときの、第 1 次到来波面は、元音場の波面と同等であることが分かった (図 1)。

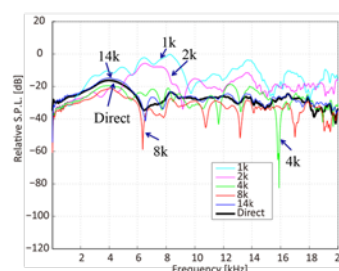


図 1：種々の折り返し歪み条件における耳元の信号（頭部伝達関数）の再現精度比較結果

- 客観的評価：バーチャル空間において、折り返し歪

みが生じない上限周波数を系統的に操作した音空間コンテンツを作成し、音場の総合的な印象が異なる条件を聴取条件により確認した。その結果、4 kHz までを厳密に再現できる条件とリファレンス音場は、弁別できない可能性があることを示した(図2)。

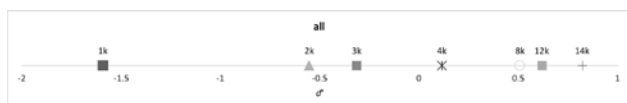


図2：音場の弁別実験の結果

以上の結果から、空間的折り返し歪みが存在するとしても、4 kHz までの波面が厳密に合成できるときには、元音場と同等な体験ができることを示していると考えられる。4 kHz の半波長は、4~5 cm 程度であり、実際のシステムを組むことは可能であるため、今後のシステム構築に対して重要な指針を与えたものである。

**テーマ B) 高精細音空間レンダリングシステムの高精度化：**本テーマでは、GPU クラスタの増強、FDTD アルゴリズムの改良、境界条件の高精度化、3次元室形状モデルと頭部形状の同時解析の実現などを行った。特に、3次元室形状と頭部モデルを同時解析できるシステムが構築できたことは、今後、頭部伝達関数とホール等の響きを一度に解析できるため、さまざまな音空間コンテンツを個人化することにつながると考えられる。

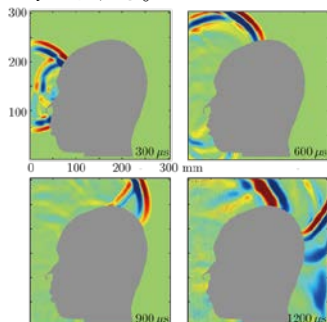


図3：室形状と頭部モデルの音波伝搬の同時解析

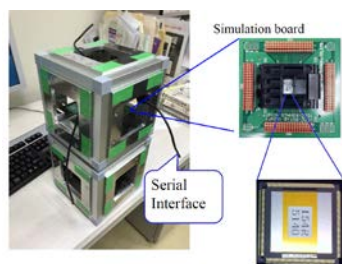


図4：試作したレンダリングブロックの概観

**テーマ C) Sub-DHM 内蔵型音響シミュレーションブロックの開発：**ハードウェアによるリアルタイム音響レンダリングシステムを実現する一方法として、小さなデジタルホイヘンスシミュレータを実現するチップを開発し、それをブロックに組み込んでモジュール化し、ブロックを複数個使って物理的な形状を造作することで実現する方法を考案した。具体的な ASIC チップを設計し、VDEC 提供の ROHM 0.18μm プロセスにてチップを作成した。試作した ASIC チップを組み込んだレンダリングブロックの概観を図4に示す。

**テーマ D) 高精細音空間ディスプレイシステムの構築：**テーマ A) で得られた知見とテーマ B) で構築したレンダリングシステムコンテンツを体験するためのシステムを構築した。ホール等のような 1 秒オーダーの長いインパルス応

答を畳み込むための聴覚ディスプレイシステムとして、クライアントサーバ型のネットワーク型聴覚ディスプレイを作成しスケルトンシステムとした。このシステムを基本システムとして、構築したシステムは以下のような特徴がある。音源の位置、頭部運動等に音場が感応すること、没入感を与えるためにパーチャル視覚空間をヘッドマウントディスプレイで提示、さまざまな折り返し歪みの異なる音空間コンテンツを提示。構築したシステムは、100 ms 程度の遅延で音空間を提示できることを確認できた。

### 3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

作成された技術指針は、今後の音空間の提示システムの構築にあたり、大きな標となることを期待される。さらに、提示システムのみならず、コンピュータシミュレーションの高度化の成果は、聴取者の頭部伝達関数へ個人化されたレンダリング音空間の提示もできるようになり、さらに臨場感の音空間の提示が可能となる。また、試作したディスプレイのベースシステムの概念は、今後の ICT 技術の中で、音空間を遠隔へ届ける際の重要な技術として期待できる。さらに試作したレンダリングブロックに基づいた、これまでにない全く新しいリアルタイム音空間レンダリングの概念は、子供から大人まで、手軽に音空間を構築して体験できる技術の基礎となることが期待される。

今後の展開としては、本研究開発で検討してきたチャレンジングな音空間提示システムを、さらに高精細化し、リアルタイム性を追求する必要がある。これらの成果を、シミュレーションと物理的な音空間がシームレスにつながる遠隔臨場感通信システムの中核的サブシステムへ昇華させていくことへ繋げていきたい。

### 4. むすび

本研究開発を通して、音空間コンテンツの作成と提示に関連した、種々の提案・知見が得られた。様々な支援をいただいた総務省の皆様と、研究に携わった関連研究室の学生諸氏に感謝申し上げます。

#### 【誌上发表リスト】

- [1] Makoto Otani, Hikaru Watabe, Takao Tsuchiya, Yukio Iwaya, “Numerical examination of effects of discretization spacing on accuracy of sound field reproduction”, *Acoustical Science and Technology* 36(4) pp.62-365 (2015/7/1)
- [2] [Invited paper] Yukio Iwaya, Makoto, Otani, Takao Tsuchiya and Junfeng Li, “Virtual Auditory Display by Remote Rendering Via Computer Network”, *Proc. of IHH-MSP 2014* (2014/8/28)
- [3] [Invited paper] Yukio Iwaya, Makoto Otani, Takao Tsuchiya, Junfeng Li, “auditory display on a smartphone for high-resolution acoustic space by remote rendering”, *Proc. of IHH-MSP 2015* (2015/9/23)

#### 【受賞リスト】

- [1] 鎗水翔也 (東北学院大学)、東北地区若手研究者発表会 優秀発表賞、“空間的折り返し歪みの異なるパーチャル音場の弁別”、2016年3月1日
- [2] 伊藤修平 (東北学院大学)、東北地区若手研究者発表会 優秀発表賞、“ネットワーク聴覚ディスプレイに基づくパーチャルコンサートシステム”、2016年3月1日
- [3] 東海林凌 (東北学院大学)、日本音響学会東北支部優秀論文賞、“折り返し歪の生じる境界周波数の異なる音場の主観評価”、2015年2月28日

#### 【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.iwaya-lab.org>