

壁面反射型オーディオスポットを用いた 高臨場感 3D 音場提示手法の検討

A study of 3-dimensional sound field reproduction technique based on the reflective audio spot

杉林裕太郎¹⁾, 栗元総太¹⁾, 森勢将雅¹⁾, 西浦敬信¹⁾, 柴田史久¹⁾, 田村 秀行¹⁾

Yutaro Sugibayashi, Sota Kurimoto, Masanori Morise,

Takanobu Nishiura, Fumihisa Shibata, and Hideyuki Tamura

1) 立命館大学大学院 理工学研究科
(〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Abstract : We have constructed a audio-visual mixed reality (MR) system with headphones. In this paper, we try to construct a new 3-dimensional sound field reproduction technique, named "acoustic planetarium" with several parametric loudspeakers. Parametric loudspeaker can emit the acoustic sound wave to a particular area. Furthermore, acoustic sound image is perceived on the wall, provided that the emitted sound wave arrives at listeners through the wall. Utilizing proposed technique, the users can experience 3-dimensional sound fields without headphones. We carried out evaluation experiments for the proposed technique. And we confirmed the effectiveness of the proposed technique.

Key Words: *Mixed Reality, 3-Dimensional Sound Field Reproduction, Parametric Loudspeaker*

1. はじめに

近年, 現実空間と仮想空間を融合する複合現実感 (Mixed Reality; MR) は, 活発に研究が行われており, 体験者に没入感を与える情報提示技術として注目を浴びている. さらに, 聴覚情報を加えた視覚的 MR は従来の視覚的 MR より高い没入感を与えることが可能であるため, 聴覚情報も含めた研究も行われている [1]. これまでに我々は, 現実空間の音は直接聴取し仮想空間の音は開放型ヘッドホンを用いて提示する聴覚的 MR の提示方式「開放型音独立提示方式」を用いて, 幾何学的整合性を達成した視聴覚併用型 MR システムを実現について検討してきた [2][3].

従前のシステムにおける「開放型音独立提示方式」では開放型ヘッドホンを用い, 頭部伝達関数 (Head-Related Transfer Function; HRTF)[4] を利用し特定の体験者に仮想空間の 3D 音場を提示していた. HRTF は個々の頭部や耳の形状による個人差が大きく, 正確な 3D 音場の提示には個々の HRTF を計測する必要があり, 多大な時間を要する. そのため従前のシステムでは簡易的に既に計測された他者の HRTF を利用していた. しかし, 提示する 3D 音場の定位感は個人差が大きく, 正確な 3D 音場の実現には限界があった. 中でも, 体験者は前方向の音像を後方向に誤定位し, 後方向の音像は前方向に誤定位するという定位の前後誤りの発生が顕著であった. ヘッドホンと HRTF を用いることなく特定の体

験者に対し定位感の良好な仮想空間の 3D 音場提示が可能となれば, 表現力の高い聴覚的 MR の達成が期待できる.

そこで本稿では, 超音波スピーカ [5] による壁面反射型オーディオスポットを利用し, ヘッドホンと HRTF を用いずに「音像プラネタリウム方式」による仮想空間の 3D 音場提示を試みる. 本音像提示方式の検討として, 受聴位置により異なる 3D 音場の生成を目的とする.

2. 壁面反射型オーディオスポット

2.1 超音波スピーカ

通常のスピーカから放射される音波は拡散するのに対し, 超音波スピーカは, 光のスポットライトのように特定の領域のみに可聴音波を提示しオーディオスポットを構築することが可能である. また, 反射音を利用した壁面反射型オーディオスポットを利用することで, 反射壁面上に音像を構築可能である.

2.2 超音波スピーカの原理

超音波は可聴音波と比べて非常に鋭い指向性 (超指向性) を有し, 超音波スピーカは, 超音波の超指向性を利用したスピーカである. 超音波スピーカの原理を図 1 に示す. 超音波をキャリア波として可聴音波を振幅変調し, 振幅変調波を生成する. この振幅変調波は, キャリア周波数とその側波帯で構成される. この振幅変調波を空間に放射すると超

指向性をもつオーディオスポットを作り出し、空気の非線形性によってオーディオスポット内に差音が発生する。キャリア波と側波帯の差音は可聴音波の波形と一致し、可聴音波として再生される。

2.3 壁面反射型オーディオスポット

図2に壁面反射型オーディオスポットのイメージを示す。超音波スピーカから放射される音を壁面、天井や床に反射させると、反射面が平面である場合、超指向性を保ちつつ反射する。このとき反射音を利用して受聴者にオーディオスポットを提示すると、直接音は受聴者に伝わらず反射音のみが伝わるため、反射壁面上に音像が構築され、あたかも音が反射壁面から放射されているように受聴者に知覚させることが可能である。また、定置した超音波スピーカの放射方向の変化のみで任意の壁面位置に音像を構築することが可能である。

3. 音像プラネタリウム方式

3.1 概要

ここでは、壁面反射型オーディオスポットを利用した3D音場提示方式「音像プラネタリウム方式」による3D音場生成について示す。本方式では光のプラネタリウムの原理のように、複数の超音波スピーカを集約したユニットから放射される音を壁面、床、天井等に反射させ、任意の方向に音像を構築する。本方式の利用により、体験者は従来システムで用いられたヘッドホンを装着せずに自由な位置で高臨場感3D音場を体験することが可能であると考えられる。また、音を反射させ実空間に音像を構築するため、HRTFの問題点である定位の前後誤りを回避可能だと考えられる。本稿では、本音像提示方式の検討として、図3のように受

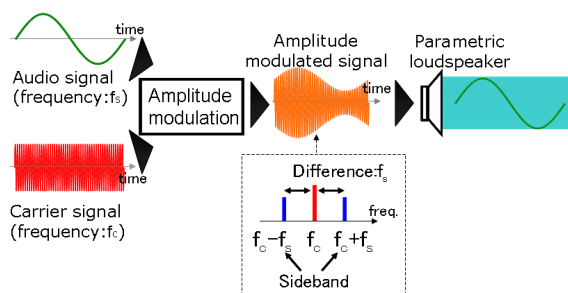


図1: 超音波スピーカの原理

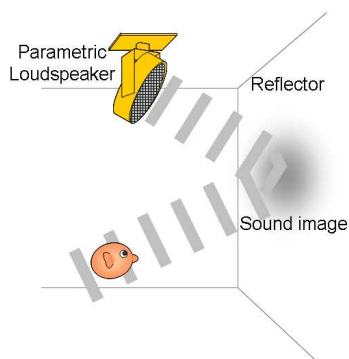


図2: 壁面反射型オーディオスポットのイメージ

聴位置により異なる3D音場の生成を目的とする。オーディオスポットを用いることで、ヘッドホンを着けずに複数の体験者に対し、同時に異なった3D音場の提示が可能であると考えられる。

3.2 構成

超音波スピーカを集約したユニットを図4(a)に示す。ユニットには超音波スピーカを10台設置する。ユニットに設置した超音波スピーカは放射角度を調整することが可能である。反射物体を用いた壁面反射型オーディオスポットを利用し、反射物体上に音像を構築する。反射物体には、図4(b)に示すアクリル板(500mm × 500mm × 5mm)を用いる。この反射物体の角度を反射音が体験者位置に到来するように調整する。これによって複数の体験者に対し同時に異なった3D音場提示を実現するが、そのためにはユニットと反射板の配置について検討する必要がある。

4. 評価実験

提案手法の有効性を評価するため、評価実験を行う。実験条件を表1、実験配置を図5に示す。本稿では、5台の超音波スピーカを用い図5のように5つのオーディオスポットのパスで5方向に音像を定位させる。受聴位置により異なる3D音場生成を想定し、2つの受聴位置A、Bで評価を行う。まず、提案手法の音像定位感を評価するために受聴位置Aでは音像定位実験を行う。次に、受聴位置により異なる3D音場を提示するため、受聴位置Aに到来する各パスの音の受聴位置間の音圧レベル差を評価するために音圧レ

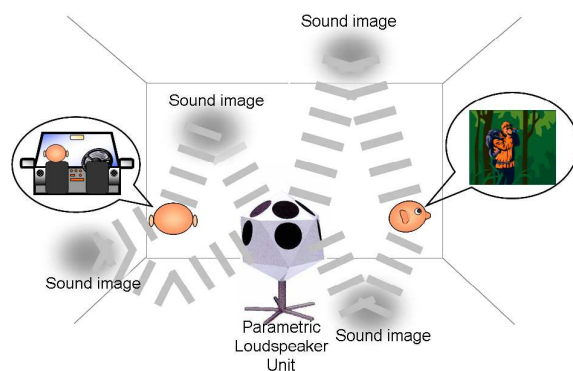


図3: 音像プラネタリウム方式のイメージ

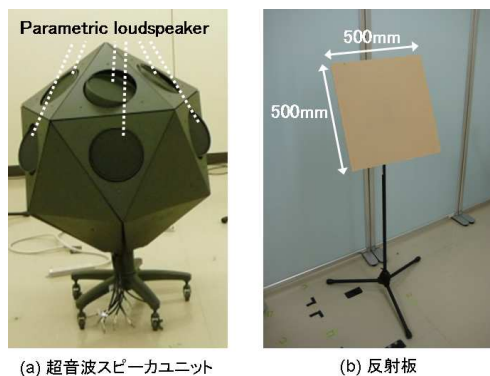


図4: 音像プラネタリウムの構成

ベルの計測実験と、受聴位置 B において音圧レベルの主観評価実験を行う。

4.1 受聴位置 A での音像定位実験

受聴位置 A において、被験者には 5 方向からそれぞれ 2 回ずつランダムな順序で刺激音を提示する。刺激音は 5 秒間のホワイトノイズである。音像の定位方向 (5 方向) を回答させる。被験者は正常な聴力を持つ学生 8 名である。

4.2 受聴位置 A に到来する各パスの音の受聴位置間の音圧レベル差の評価実験

4.2.1 計測実験

まず、音圧レベル計測実験では、各受聴位置において受聴位置 A に到来する 5 つのパスの音のインパルス応答を計測する。そのインパルス応答からそれらの音圧レベルを計測し、受聴位置間の音圧レベル差を算出する。なお、受聴位置 A で 5 つのパスの音の音圧レベルが概ね同じになるようにパスの距離と音源の振幅を調整する。

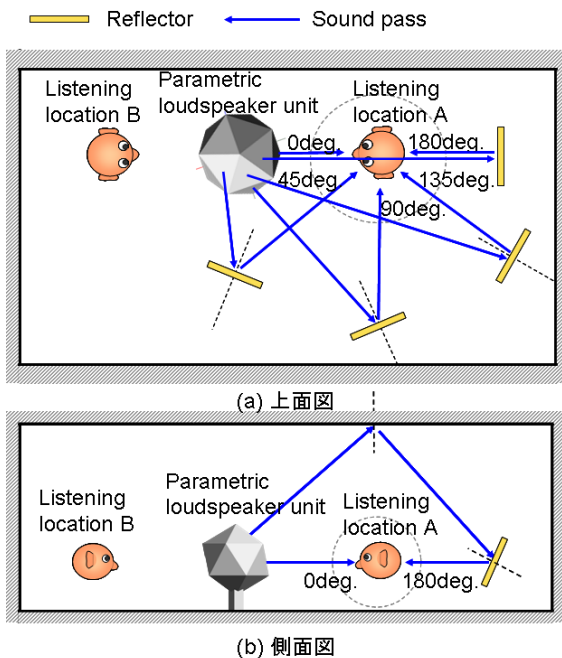


図 5: 実験配置

表 1: 実験条件

Parametric loudspeaker	MITSUBISHI, MSP-50E
Microphone	NEUMANN, KU 100
Loudspeaker amp.	YAMAHA, P2500S
Microphone amp.	audio-technica, AT-MA2
D/A converter	Roland, UA-101
A/D converter	SONY, PCM-D1
Recording condition	96.0kHz, 16bit
Ambient noise level	29.2dBA

4.2.2 主観評価実験

次に、受聴位置 B において、下記の 5 段階の評価尺度から受聴位置 A へ到来する各パスの音の音圧レベルを評価させる。被験者は正常な聴力を持つ学生 8 名である。実験前には受聴位置 A において各パスの刺激音を 5 秒間提示し、その音圧レベルを 5 とする。被験者には受聴位置 B で 5 の刺激音と比較して音圧レベルを評価させる。各パスの音をそれぞれ 2 回ずつランダムな順序で刺激音を提示する。刺激音は 5 秒間のホワイトノイズである。実験環境が暗騒音のみの状態を 1 とする。この評価の合計を被験者数で平均することで MOS 値 (Mean Opinion Score) を求める。

1. 全く聞こえない
2. あまり聞こえない, または, 聞こえる気がする
3. 少し聞こえる, または, 聞こえるが小さい
4. 聞こえる
5. よく聞こえる

4.3 受聴位置 A での音像定位実験の結果と考察

音像定位実験の結果を図 6 に示す。横軸は提示方向、縦軸は回答方向、円の大きさは回答人数を表す。結果より、提示方向と回答方向が概ね一致し正答率が 97.5%であることが確認できる。また、HRTF で問題となっていた定位の前後誤りの発生がないことも確認できる。壁面反射型オーディオスポットを利用し実空間に音像を構築することで、誤定位が低減でき定位感が良好な 3D 音場を生成できたと考えられる。したがって、壁面反射型オーディオスポットを利用した 3D 音場提示手法の有効性を示せた。なお、今回は超音波スピーカ 5 台を使って 5 方向のみに音像を構築したが、ユニットに設置した 10 台全てを使えば 10 方向からの音像を構築可能であり、天井や床に反射させることで仰角方向にも音像を構築可能である。また、超音波スピーカの放射方向を動的に制御することであらゆる任意の方向に音像を構築可能であり、移動音像も構築可能であると考えられ、これらについては今後取り組む方針である。

4.4 受聴位置 A に到来する各パスの音の受聴位置間の音圧レベル差評価実験結果と考察

受聴位置 A に到来する各パスの音の受聴位置 A, B での音圧レベルの計測実験結果を図 7, 8 に示す。また、それらの主観評価実験結果を図 9 に示す。それぞれの横軸は受聴位

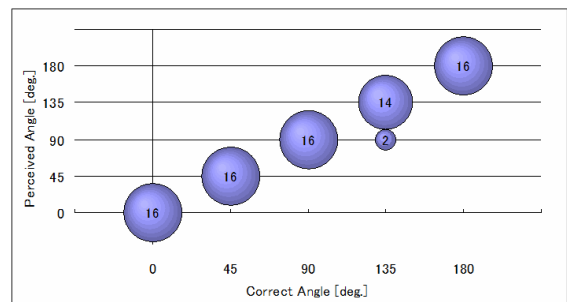


図 6: 受聴位置 A での音像定位実験の結果

置 A に到来する 5 つのパスの音の到来角度である。図 7, 8 の縦軸は受聴位置 A, B でのそれらの音圧レベルである。図 9 の縦軸は受聴位置 B での MOS 値であり、図中の縦線はプラスマイナスの標準偏差を表す。図 7, 8 より、平均 20.0dB, 最大 34.2dB の音圧レベル差が確認できる。図 7, 8, 9 より、受聴位置 B では音圧レベルが小さいほど音があまり聞こえないと被験者は知覚したことが確認でき、MOS 値は平均 3.1, 最小 2.3 であった。超音波スピーカを用いたことで受聴位置 A と B で大きな音圧レベル差の環境を構築し、被験者もその差を十分に知覚したと言える。したがってオーディオスポットを利用した提案手法の有効性を確認した。しかし、180deg. のパスの音は音圧レベル差が 4.6dB, MOS 値が 4.1 であった。これは受聴位置 A に到来する 180deg. のパスの延長線上に受聴位置 B があることから、受聴位置 A を通過し受聴位置 B にまで音が到来したことが原因と考

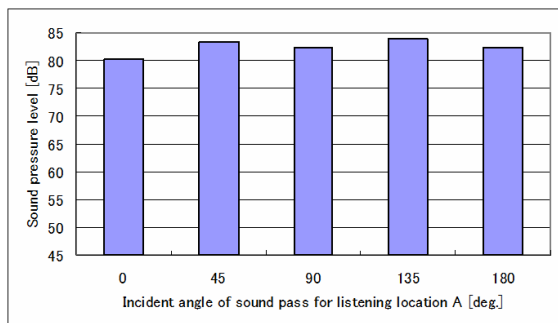


図 7: 受聴位置 A に到来する各パスの音の受聴位置 A での音圧レベル計測結果

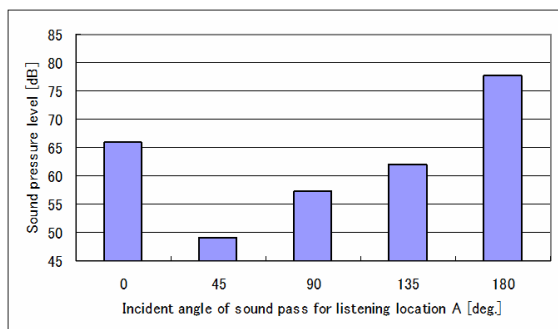


図 8: 受聴位置 A に到来する各パスの音の受聴位置 B での音圧レベル計測結果

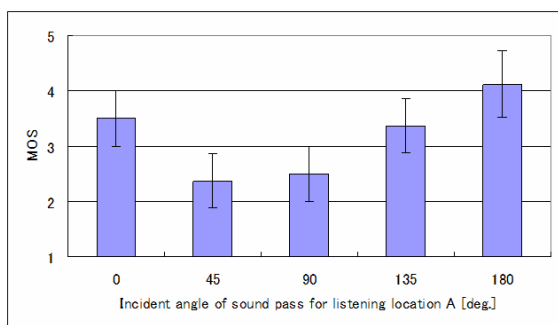


図 9: 受聴位置 A に到来する各パスの音の受聴位置 B での音圧レベルの主観評価実験結果

えられる。よって、音像プラネタリウム方式では、ある受聴位置を通過し別の受聴位置にまで到来するパスの音は避けて 2 次以降の反射音を利用して音像を構築すること、他の超音波スピーカを用いて抑圧すること、又はそれを有効活用すること等が解決策として挙げられる。

5. むすび

本稿ではヘッドホンと HRTF を利用しない 3D 音場提示手法手法として、壁面反射型オーディオスポットを利用した、「音像プラネタリウム方式」による 3D 音場生成を試み、本音像提示方式の検討として、受聴位置により異なる 3D 音場の生成を目指した。その結果、ヘッドホンを用いずに、正答率 97.5% の良好な定位感を確認した。また、受聴位置 A と B で大きな音圧レベル差の環境を構築し、被験者もその差を十分に知覚した。したがって本音像提示方式の有効性を示せた。しかし、ある受聴位置に到来するパスの音が別の受聴位置にまで到来する問題が存在し、受聴位置により異なる 3D 音場生成のためには、その問題は回避して 3D 音場を構築すべきであることも確認した。今後は、本音像提示方式をさらに発展させ、我々が実現した従前の視聴覚の座標系を一致させる手法を踏襲し、視覚的 MR と、本音像提示方式による聴覚的 MR を矛盾なく達成し、より臨場感の高い MR 空間の構築を目指す。

謝辞 本研究の一部は、科研費・基盤研究 A 「視聴覚併用複合現実空間の表現力向上に関する研究」による。

参考文献

- [1] J.Sodnik, et al.: “Spatial sound localization in an augmented reality environment”, Proc. OZCHI 2006, pp. 111 - 117, 2006.
- [2] 比嘉恭太, 他: “視覚・聴覚の現実と仮想を融合する 2 × 2 方式複合現実感システムの実現”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 227 - 237, 2008.
- [3] 吉野将治, 他: “視覚・聴覚を併用した複合現実感システムの開発 (4) - 複合現実空間での音の反射・遮断の実現 -”, 同学会第 13 回大会論文集, pp. 556 - 559, 2008.
- [4] J. Kawaura, et al.: “Sound localization in headphone reproduction by simulating transfer functions from the sound source to the external ear”, J. Acoust. Soc. Jpn (E), 12, pp. 203 - 216, 1991.
- [5] 鎌倉友男, 他: “パラメトリックスピーカの原理と応用”, 電子情報通信学会技術研究報告, EA2005-100, pp. 25-30, 2006.