

三次元放射音場再生のためのMRゴーグルを用いた放射型映像提示システムの評価*

☆荒木峻我, 木村敏幸 (東北学院大)

1 はじめに

これまでに、遠隔で人々が取り囲みながら何も身に着けずに音楽ライブや舞台等のステージを鑑賞できる未来の3Dテレビの開発を目指し、三次元放射音場再生技術が提案されている[1]。本研究では、未来の3Dテレビの仮想的な再現手段として、ヘッドマウントディスプレイの複合現実(MR)機能を用いた映像とバイノーラル音響を組み合わせた放射型映像提示システムを開発し、その性能を実験によって評価した。

2 制作システム[2]

2.1 システム構成

制作にはゲームエンジンのUnreal Engine 5 (UE5) [3]とヘッドマウントディスプレイのMeta Quest 3 [4]を用いる。Meta社が提供するプラグイン(MetaXR)を有効化することで、Meta Quest 3が提示する三次元仮想空間に実空間の映像が重畳される。

UE5で構築されるMR空間は、Meta Quest 3のトラッキング情報と同期して更新されるため、ユーザの頭部位置と向きに応じた動的な音場制御が可能となる。また、音源の位置・放射方向をUE5上でリアルタイムに設定できるため、音源の位置や指向性をMR上にそのまま再現できる。

2.2 疑似体験システム

本システムの展示のために、映像とバイノーラル音響を同期して提示する演奏視聴システムを構築した。実行画面をFig. 1に示す。MR空間内には、楽曲を構成する各パートに対応した音源オブジェクトを配置し、ユーザは統合された楽曲を聴取するとともに、各パートを空間的に区別して聞き取ることが可能となる。

さらに、コントローラ操作により、音源オブジェクトの位置および放射方向をリアルタ

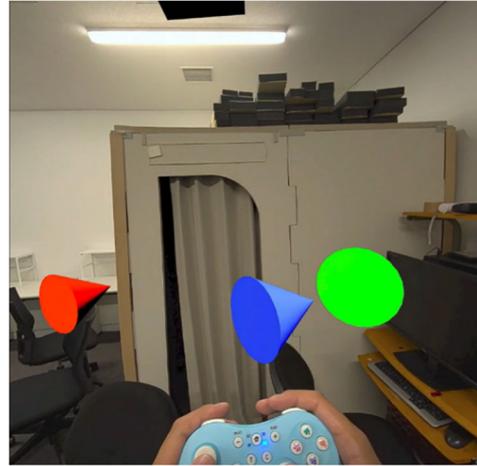


Fig. 1 疑似体験システムの実行画面[2]

イムに変更可能とした。これにより、ユーザは音源配置や放射指向性を動的に再構成し、音場の変化を直感的に体験できる。

3 音響再生手法の有効性の検証

3.1 評価実験手順

開発したシステムにおけるバイノーラル音響の有効性を検証するために、被験者7名に対し位置特定実験及び放射方向特定実験を行った。

位置特定実験では、Fig. 2に示す直方体(37.5 cm×37.5 cm×25 cm)の8頂点に対応する音源位置をあらかじめ設定し、試行ごとにその中から一点を選出して音源位置として提示した。音響再生条件として、バイノーラル音および空間化処理を行わない音(以降「非バイノーラル音」)の2条件を設定した。被験

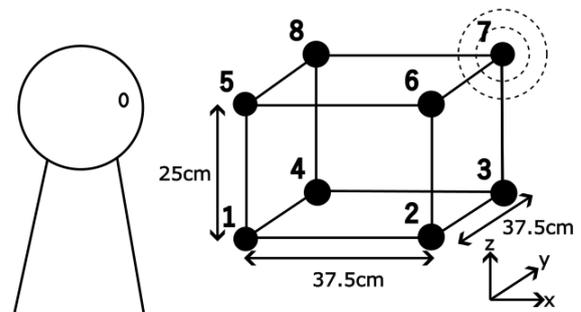


Fig. 2 位置特定実験の実験環境(音源位置7に提示した場合)

* Evaluation of immersive video display system using MR goggle for 3D radiated sound field reproduction, by ARAKI, Ryouga and KIMURA, Toshiyuki (Tohoku Gakuin University).

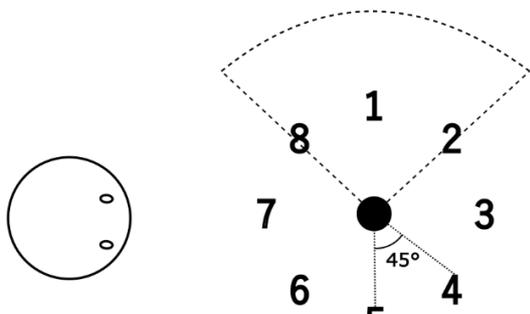


Fig. 3 放射方向特定実験の実験環境
(放射方向 1 に提示した場合)

者は、直方体の周りを自由に動き回ったうえで、提示された音源位置に対応する番号を回答した。実験は一人当たり計 48 試行 (=8 位置×2 条件×3 繰り返し) で、音源位置及び音響再生条件の提示順序はランダム化した。

放射方向特定実験では、Fig. 3 に示す水平面上の円周に 45° 間隔で配置された 8 方向を対象とし、試行ごとに一方向を選出して音を放射した。位置特定実験と同様に、音響再生条件としてバイノーラル音および非バイノーラル音の 2 条件を設定した。被験者は、音源の周りを自由に動き回ったうえで、提示された放射方向音源位置に対応する番号を回答した。実験は一人当たり計 48 試行 (=8 方向×2 条件×3 繰り返し) で、放射方向及び音響再生条件の提示順序はランダム化した。

3.2 評価実験結果

位置特定実験における音響再生条件ごとの実験結果を、水平方向および鉛直方向に分けて Figs. 4-7 に示す。灰色の丸は提示位置、黒色の丸は平均回答位置、エラーバーは 95% 信頼区間を表す。

Figs. 4-5 より、非バイノーラル音提示では水平方向において 7 箇所、鉛直方向ではすべての提示位置において有意差が確認された。これは、鉛直方向の提示位置間の距離が近く、位置の識別が特に困難になるためであると考えられる。

一方で、Figs. 6-7 より、バイノーラル音提示では水平方向のすべての提示位置において正答位置との有意差は認められなかった。さらに、鉛直方向では 4 箇所にとどまった。従って、本システムにおけるバイノーラル音響は音源位置特定に有効であり、特に水平方向では高い精度が得られることが示された。

放射方向特定実験において、算出した被験

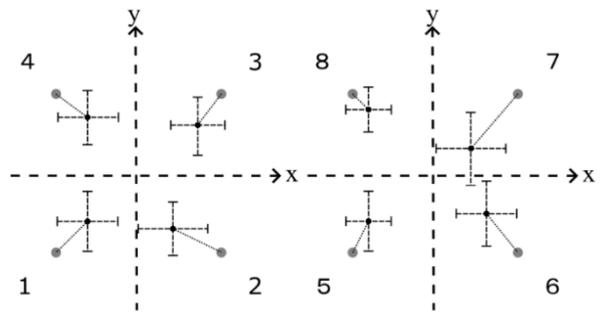


Fig. 4 位置特定実験の実験結果
(非バイノーラル音、水平方向)

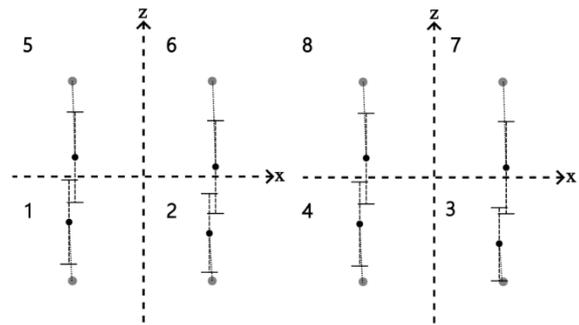


Fig. 5 位置特定実験の実験結果
(非バイノーラル音、鉛直方向)

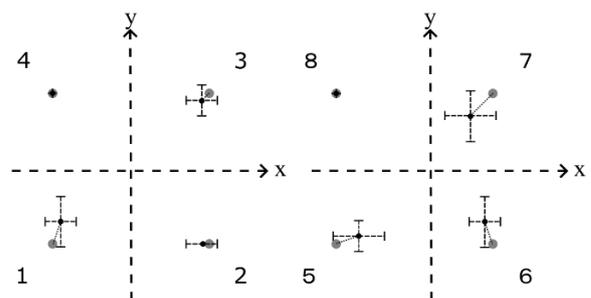


Fig. 6 位置特定実験の実験結果
(バイノーラル音、水平方向)

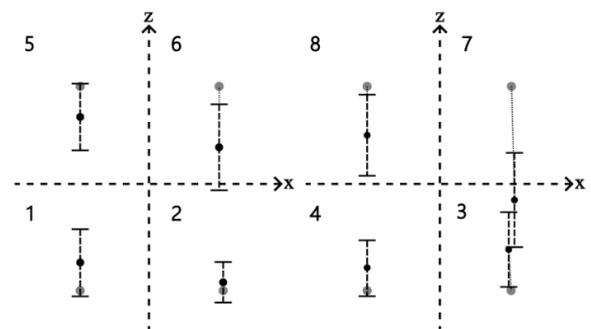


Fig. 7 位置特定実験の実験結果
(バイノーラル音、鉛直方向)

者の回答方向と提示方向との角度差の分布を表したヒストグラムを Fig. 8 に示す。2 条件間において回答のばらつきに大きな差は認められず、Welch の t 検定においても有意差は確認されなかった。これは、非バイノーラル音であっても、提示方向に隣接する音源間の

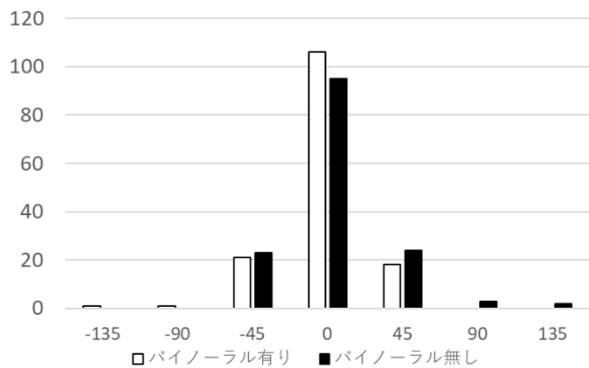


Fig. 8 放射方向特定実験における角度差の分布

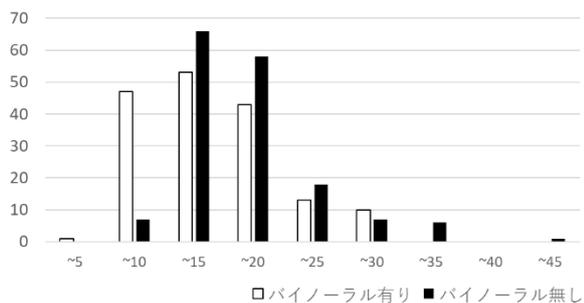


Fig. 9 放射方向特定実験における回答時間の分布

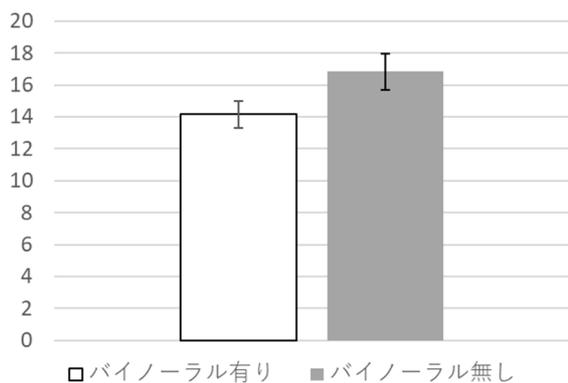


Fig. 10 放射方向特定実験における平均回答時間

音量が等しくなることにより、放射方向の推定が可能であったためと考えられる。

一方で、回答時間の分布を Fig. 9 に、平均解答時間の結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 より、バイノーラル音と非バイノーラル音との間に有意差が認められた。

以上の結果から、放射方向特定の正答率に音響再生条件による差は生じないものの、バイノーラル音の方がより直感的に放射方向を特定できることが示された。

4 腹話術効果の検証

4.1 評価実験手順

本システムにおける腹話術効果による映像

提示の有効性を検証するために、被験者 7 名に対し評価実験を行った。

実験では、位置特定実験と同様に Fig. 2 に示す直方体の 8 頂点に対応する音源位置を設定し、各試行において一点を選出して音を提示した。映像提示条件として、音源位置と同一座標に映像を提示する条件と、映像を提示しない条件の 2 条件を設定した。被験者は直方体の周りを自由に動き回ったうえで、音源位置を特定した。また、被験者には回答への集中を維持させる目的で、映像と音源の位置が異なるダミー提示を 8 試行追加した。実験は 1 人に対し合計 56 試行 (=8 位置×2 条件×3 繰り返し+8 ダミー) で、音源位置及び映像提示条件の提示順序はランダム化した。ダミー試行は実験結果の解析対象とはしなかった。

4.2 評価実験結果

映像提示条件ごとの実験結果を、水平方向および鉛直方向に分けて Figs. 11-14 に示す。灰色の丸は提示位置、黒色の丸は平均回答位置、エラーバーは 95%信頼区間を表す。

映像を提示しない場合は、水平方向については正確な位置特定に成功しているが、比較的難易度が高く設定されている鉛直方向では全ての提示位置で正答位置との有意差が認められた。

なお、映像を提示しない場合の提示条件は、位置特定実験におけるバイノーラル音提示条件と同じ条件であるが、同実験よりも正答率が低下している。これは、視覚的な指標を与える映像有りの条件に対し、相対的に難易度が高く感じられることに起因すると考えられる。

一方で、Figs. 13-14 より、映像を提示する場合、全ての方向に対し正答位置との有意差が認められず、正しく提示位置をとらえることが可能であるといえる。

以上より、映像を伴う条件では音のみを提示した場合と比較して、位置の識別精度が向上する傾向が確認され、腹話術効果が認められた。

5 おわりに

本研究では、MR ゴーグルを用いた放射型映像提示システムを制作し、バイノーラル音響による音像定位及び腹話術効果の検証を行

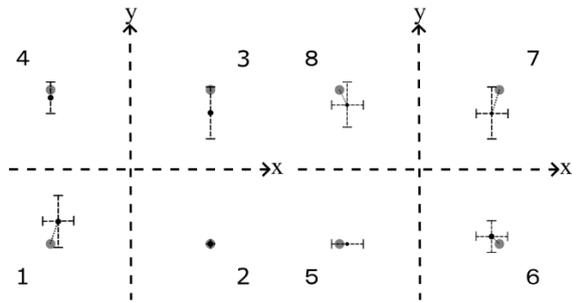


Fig. 11 腹話術効果実験の実験結果
(映像無し, 水平方向)

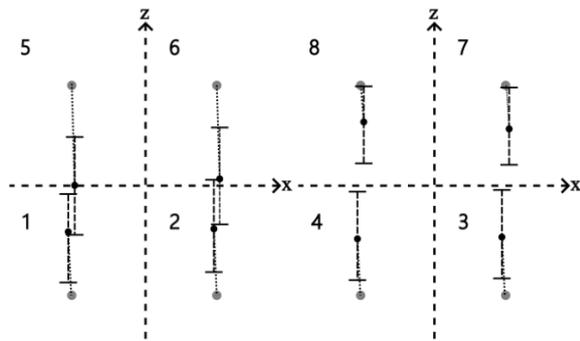


Fig. 12 腹話術効果実験の実験結果
(映像無し, 鉛直方向)

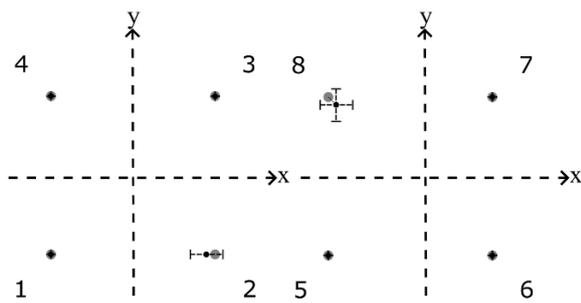


Fig. 13 腹話術効果実験の実験結果
(映像有り, 水平方向)

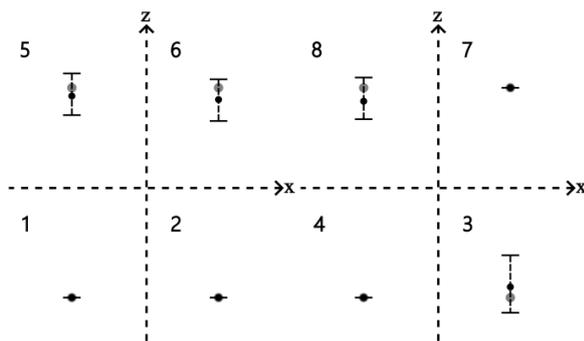


Fig. 14 腹話術効果実験の実験結果
(映像有り, 鉛直方向)

った。その結果、映像提示を併用することで音像定位の安定性が確認され、視覚情報が聴覚知覚に与える影響が定量的に示された。

今後は、今回開発したシステムによる映像提示と本研究室で製作している放射型スピーカアレイ (Fig. 15) を併用することで、同シ



Fig. 15 製作中の放射型スピーカアレイ

ステムによる音場再現と視覚的音源位置の一致が可能となり、超臨場感体験を提供するシステムへの応用が期待される。

謝辞

本研究における評価実験は、東北学院大学人間対象研究審査委員会による研究計画の承認を得たうえで実施した。

参考文献

- [1] T. Kimura, Y. Yamakata, M. Katsumoto, T. Okamoto, S. Yairi, Y. Iwaya and Y. Suzuki, "Three-dimensional Radiated Sound Field Display System Using Directional Loudspeakers and Wave Field Synthesis," *Acoust. Sci. & Tech.*, Vol. 33, No. 1, pp. 11-20 (2012).
- [2] 荒木峻我, 木村敏幸, "三次元放射音場再生のためのMRゴーグルを用いた放射型映像提示システムの開発," 令和7年東北地区若手研究者研究発表会講演資料, No. YS-23-P02, pp. 131-132 (2025).
- [3] Unreal Engine 5, <https://www.unrealengine.com/ja/unreal-engine5/>.
- [4] Meta Quest 3, <https://www.meta.com/jp/quest/quest-3/>.