

VR ゲームによる個人用三次元音場再生システムの性能評価

繁泉 宥斗[†] 木村 敏幸[‡]

[†] 東北学院大学大学院工学研究科電気工学専攻

〒985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1

[‡] 東北学院大学工学部情報基盤工学科

〒985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1

E-mail: [†] s1894202@g.tohoku-gakuin.ac.jp, [‡] t-kimura@m.ieice.org

あらまし 超臨場感コミュニケーション技術が遠隔操作システムに適用されれば、より効率的に遠隔作業を遂行できるようになると期待されている。我々はこれまで波面合成と 8 個の指向性マイクロホンを用いた遠隔操作のための個人用三次元音場再生システムを提案してきた。個人用三次元音場再生システムでは、8 個の指向性マイクロホンで収録した音を 8 個のスピーカで再生することで、制御領域内の三次元音場が聴取領域内に再現される。本研究では、これまで聴覚情報のみを提示した場合の性能しか評価していなかった提案システムの視聴覚性能を評価するために、キューブ型スピーカアレイとヘッドマウントディスプレイを組み合わせた視聴覚提示システムを構築し、VR ゲームによる視聴覚提示システムの評価実験を行った。その結果、前方から音を提示した場合には VR ゲームのスコアは上昇しなかったが、後方から音を提示した場合には VR ゲームのスコアが上昇したため、後方から聴覚情報を提示することが有効であることが示された。

キーワード 波面合成, 個人用三次元音場再生, キューブ型スピーカアレイ, ヘッドマウントディスプレイ, VR ゲーム

Performance Evaluation of Personal 3D Sound Field Reproduction System by VR Games

Yuto SHIGEIZUMI[†] and Toshiyuki KIMURA[‡]

[†] Master's Program in Electrical Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku Gakuin University

1-13-1 Chuo, Tagajo, Miyagi, 985-8537 Japan

[‡] Department of Information Technology, Faculty of Engineering, Tohoku Gakuin University

1-13-1 Chuo, Tagajo, Miyagi, 985-8537 Japan

E-mail: [†] s1894202@g.tohoku-gakuin.ac.jp, [‡] t-kimura@m.ieice.org

Abstract It is expected that efficient remote works are realized if ultra-realistic communication techniques are applied to remote control systems. We have proposed the personal 3D sound field reproduction system using wave field synthesis and eight directional microphones for remote control. In the proposed system, the 3D sound field is reproduced in the listening area by replaying the sound captured by eight directional microphones from eight loudspeakers. In this paper, in order to evaluate the audio-visual performance of the proposed system of which the auditory performance is evaluated in the past study, the audio-visual system was developed by using cubic loudspeaker array and head mounted display and the audio-visual performance of the developed system was evaluated by VR games. As a result, although the score of VR games did not increase when sounds were presented from forward directions, the score of VR games increased when sounds was presented from backward directions. Thus, it was indicated that the presentation of sounds from backward directions was effective.

Keywords wave field synthesis, personal 3D sound field reproduction, cubic loudspeaker array, head mounted display, VR game

1. はじめに

近年、立体映像や立体音響を用いた超臨場感コミュニケーション技術が盛んに研究開発されている。この技術はあたかも目の前に対象物があるかのような感覚(本論文ではこの感覚のことを「臨場感」と呼ぶ)を体験

させることができるので、これらの技術を遠隔操作システムに適用すれば、遠隔作業をより効率的に遂行できるようになることが期待される。

筆者らはこれまでに波面合成と 8 個の指向性マイクロホンを用いた遠隔操作のための個人用三次元音場再生システムを提案し、超指向性マイクロホンを用いれ

ばシステムを構築するには十分な定位性能が得られることを示してきた[1]. しかしながら、これまで提案システムは聴覚情報のみを提示した場合の性能しか評価していなかった.

そこで、本論文では、提案システムの視聴覚性能を評価するために、キューブ型スピーカアレイとヘッドマウントディスプレイ（以下 HMD）を組み合わせた視聴覚提示システムを構築し、VR ゲームを用いた評価実験を行う.

2. 個人用三次元音場再生システム[1]

提案するシステムの構成を Fig. 1 に示す. まず, Fig. 1 の左側に示すように、原音場において聴取者の頭部周辺に設定した立方体型の制御領域の頂点位置に 8 個の超指向性マイクロホンを配置し、音を収録する. その際、マイクロホンの指向特性(図中の灰色線の円)は制御領域の外側に向ける. 次に、Fig. 1 の右側に示すように、再生音場において制御領域と同じ形に設定した聴取領域の頂点位置に配置した 8 個のスピーカから収録した音を直接再生する. その際、スピーカの位置はそれぞれの指向性マイクロホンの位置と同じになるように対応させる. その結果、制御領域内の三次元音場が聴取領域内に再現されるので、例えば制御領域の上側で音が動くと、聴取領域内にいる聴取者は Fig. 1 の右側に示すように頭の上で音が動いているように感じるようになることが期待される. 8 個のスピーカは聴取者頭部の水平面上には配置されていないので、聴取者の水平面方向の視界はスピーカに妨げられていない. 遠隔操作システムにおける作業者の視線は水平面方向を向いていることが多いと考えられるので、立体映像技術と組み合わせた遠隔操作システムも容易に構築することができるようにと考えられる.

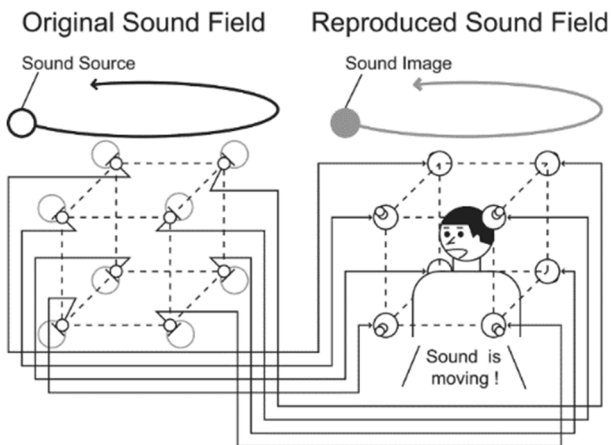


図 1 個人用三次元音場再生システムの基本構成 [1]

Fig. 1 Basic configuration of the personal 3D sound field reproduction system [1].

3. 制作システム

3.1. 視聴覚提示システム

Fig. 2 に制作システムを体験している様子を示す. 制作したシステムでは、PC で三次元仮想空間を描写し、HMD へ出力することで視聴者に対し視覚情報を提示し、同時に 8 個のスピーカ（オーム電機 ASP-204N-K）で構成されたキューブ型スピーカアレイより音声を出力することで聴覚情報を提示する. 三次元空間の描写と出力には Unreal Engine 4 [2] (以下 UE4) を利用し、HMD には Oculus Rift [3]を用いる. 使用した HMD にはヘッドトラッキングセットが付属しているため、被験者の頭部の位置や向きを随時観測することが出来る. また、UE4 は使用した HMD に対応しているため、視聴者の頭部の運動情報を取得してそれに合わせた三次元仮想空間の映像を HMD に出力することが可能である.

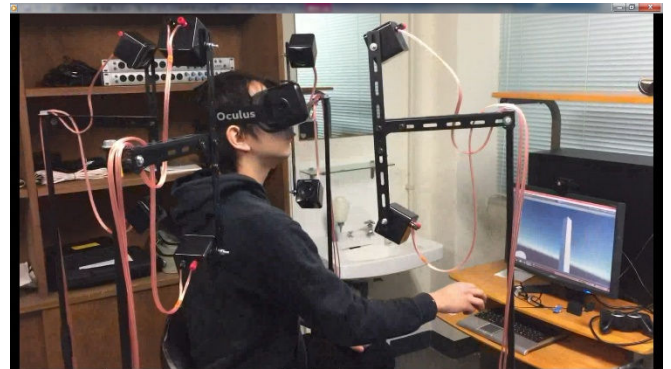


図 2.制作システムのイメージ

Fig. 2 Image of the developed system.

キューブ型スピーカアレイへの音声出力にはビジュアルプログラミング言語のひとつである Max [4]を用い、視覚情報と聴覚情報を連動させるための両ソフトウェア間の通信には OSC (Open Sound Control) [5]を用いる. その際、UE4 には OSC を使用可能にするためのプラグイン[6]を導入する.

3.2. ソフトウェア制御

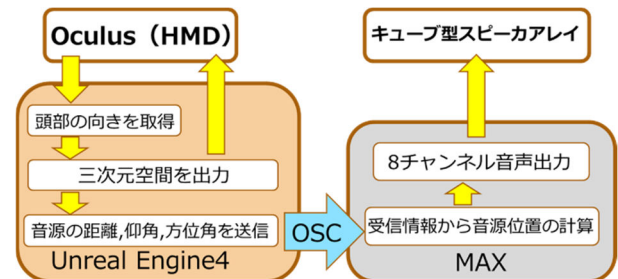


図 3 制作システムの構成

Fig. 3 Configuration of the developed system.

Fig. 3 に制作システムの構成を示す. UE4 において、

三次元空間内のプレイヤーの位置からターゲットの位置までのベクトルを随時取得し、そのベクトルを元に Max 側へ送信するための音源の距離、方位角、仰角を計算する。次に、Max 側では受信用のオブジェクト (udpreceive) を用意し、UE4 から送信される OSC のデータを受け取る。受信した距離、方位角及び仰角の値をもとに 8 チャンネル分の音声を計算し、スピーカアレイから再生する。その際、音声の計算は先行研究 [1] を元に行う。

Max が OSC メッセージを受信するためには、UE4 で扱うポート番号(本システムでは 8000)と同じポート番号を持つ受信用オブジェクトを Max で用意する必要がある。また、OSC メッセージは数字データだけではなく、文字データも扱うことが出来るため、複数の音源の文字データに個別の ID ラベルを割り振れば、複数の音源を同時に再生することも可能になる。

4. 評価実験一前方の音源の場合一

4.1. 実験環境

実験は暗騒音レベルが 40.2 dBA である実験室内の一角にて行った。実験の参加者はキューブ型スピーカアレイの中心に頭部を入れ、HMD を装着した。参加者の頭部中心は地面から 1.3 m の高さに設定した。また、参加者の手元にはゲームコントローラーを持たせた。制作システムの制御 PC の OS は Microsoft Windows 8.1 Pro で、実験に使用した HMD は Oculus Rift DK2 である。

4.2. VR ゲーム

4.2.1 ゲーム制御

制作した VR ゲームは一人称視点のシューティングゲームである。VR ゲームは UE4 を用いて制御されており、主に以下の要素を制御している。

(1) ユーザーの入力

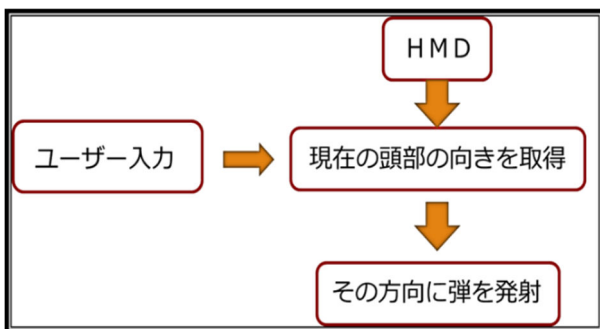


図 4 ユーザー入力に対する動作
Fig. 4 Processing due to user's input.

ゲーム内では HMD から現在のユーザーの頭部の向きを随時取得し、その情報に合わせて三次元仮想空間を HMD および PC 画面に出力している。ゲームコントローラーによってユーザーから入力があったとき、随

時取得している頭部の向きの方向に弾を発射する。Fig. 4 に動作を示す。

(2) ターゲットの出現

ゲームが開始されるとターゲットが事前に指定された位置(後述)からランダムに出現する。ターゲットが出現している間、ユーザー位置におけるターゲットへの距離、方位角、仰角を常に取得し、OSC メッセージを Max へ送信する。OSC メッセージにターゲット自身が持つ ID と関連付けると、Max においてどのターゲットからの情報なのかを判断することができる。そのため、同じ ID を持つターゲットが同時に出現している場合、音源の位置を Max で正しく計算することが出来なくなり、音源の提示に不具合が生じる。それを回避するため、ターゲットを出現させるアクタには Boolean 型変数を用いて各 ID の生存・非生存を判定し、非生存 ID のみを出現させることで同じ ID を持つターゲットが同時に出現しないように制限をかけている。

(3) ターゲットの AI

AI の制御には AIController とビヘイビアツリーを用いる。ビヘイビアツリーとは、別名『振る舞い木』と呼ばれるもので、その名の通り、振る舞いをツリー上に並べることで視覚的に AI の動きを作っていく仕組みである。また、ビヘイビアツリーはブラックボードと呼ばれる AI 用の記憶領域を持ち、ブラックボード内の変数を参照にして AI を制御する。AIController は、AI によって制御されるキャラクターとビヘイビアツリーの紐づけをする Blue Print である。今回は 1 つの AI しか使用していないが、AIController を用いることで条件ごとに異なる AI に従わせることも可能となる。今回作成した AI は、『ユーザーの位置を見つけ、そこに直進する』という非常に単純なものである。Fig.5 にビヘイビアツリーの構成を示す。

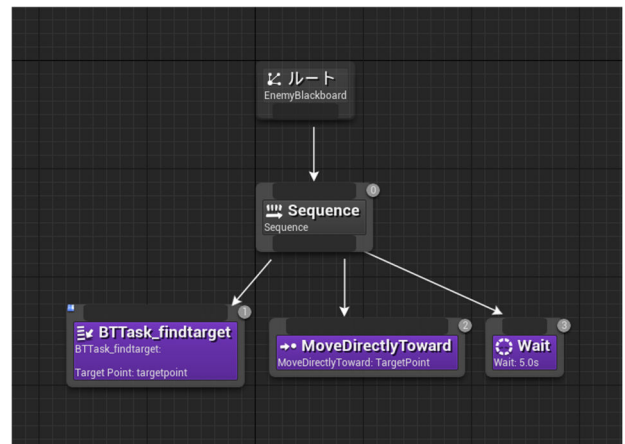


図 5 ビヘイビアツリーの構成
Fig. 5 Configuration of behavior tree.

(4) Max へ送信するデータの取得, 送信

前述の通り, Max へ送信する OSC メッセージには距離, 方位角, 仰角に加えてターゲット自体の ID も含まれる. ターゲットが生存しているかどうかを Boolean 型の変数で判定し, 生存しているならユーザーから自身の位置へのベクトルから各値を算出し, ID と共に OSC メッセージとして送信する.

また, ターゲットが生存していない場合は音源位置が極遠距離となるように OSC メッセージを送信する. 生存していない場合の処理は Max 側のプログラムの構成上必要なもので(データを受け取った場合, そのデータが上書きされるまで最後に受け取ったデータを保持し, その位置からの音声を提示し続ける), この処理を行わない場合, 三次元空間にターゲットが存在しないにも関わらず音声だけが提示され続けてしまう.

4.2.2 ゲーム概要

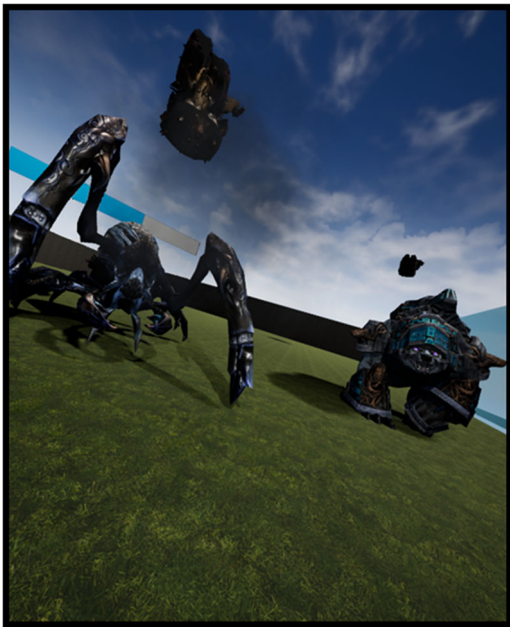


図 6 VR ゲームのプレイ画面
Fig. 6 Playing image of VR games.

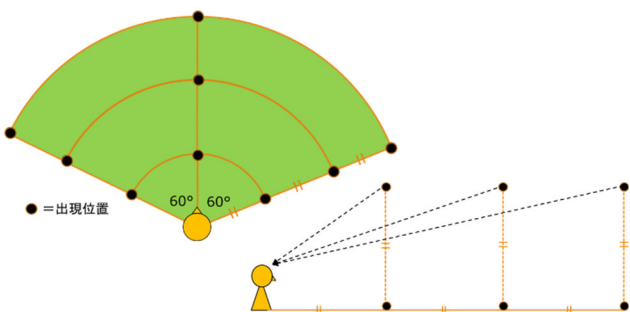


図 7 VR ゲームのターゲットの出現位置
Fig. 7 Appearance positions of targets in VR games.

実際のプレイ画面を Fig. 6 に, ターゲットの出現位

置を Fig. 7 に示す. ターゲットの出現位置はプレイヤーの正面と左右 60 度にそれぞれ 3 か所ずつ存在する. また, 出現位置の高さが異なるのに対応して 2 種類のターゲット(歩行型, 飛行型)を用意し, 歩行型は地面上に, 飛行型は歩行型よりも高い位置に出現させた.

前述の通り, ターゲットは Fig. 7 に示すように設定された出現地点からランダムに出現する. 出現したターゲットは出現位置からプレイヤーに向かって一定の速度で直進する. プレイヤーが手元のゲームコントローラーのボタンを押すと, プレイヤーの頭部の向いている方向に弾が発射される. 発射された弾がターゲットに当たると, ターゲットが破壊され, スコアが加算される. ターゲットの持つ球状の当たり判定と, 弾の持つ球状の当たり判定が一部でも重なった場合, 弾がターゲットに当たったと判定される. ターゲットが破壊されずにプレイヤーに 10 回触れるとゲームオーバーとなり, 最終スコアが表示される.

ターゲットが出現している間常に白色雑音を発した場合, プレイヤーはキューブ型スピーカアレイによって視界外のターゲットの位置を大まかに知ることが出来るようになる. 従って, キューブ型スピーカアレイによって音を提示した場合, 音を提示しない場合に比べてスコアが上昇することが期待される.

4.3. 実験手順

4.2 節で制作した VR ゲームを用いて評価実験を行った. 実験の参加者は 6 名で, 実験に入る前にゲームの操作説明と, 数回の操作練習を行った. 参加者は音提示のあり・なしの 2 条件でゲームをプレイし, そのスコアを記録した. 2 条件の提示順序は参加者ごとにランダム化した. 参加者はそれぞれの条件において 3 回ずつゲームを繰り返した.

4.4. 実験結果

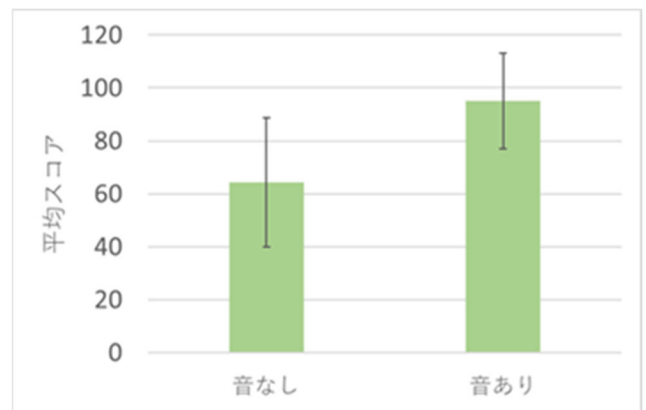


図 8 VR ゲームの結果
Fig. 8 Results of VR games.

Fig. 8 に条件ごとの平均スコアの結果を示す. エラーバーは 95% 信頼区間を示す. Fig. 8 に示した結果に

対して両側 t 検定を実施したところ、有意差は認められなかった ($p=0.16 > 0.05$)。片側検定の場合は $p=0.08$ となり、有意傾向は認められるが、やはり有意差は認められない結果となった。これは、ゲーム内のターゲットの出現位置がプレイヤーの前方に限定していたことから、視覚による反応のみで対応できてしまったことが原因と考えられる。よって、ターゲットの出現位置を後方にも拡張すれば、音による効果が示されると考えられる。

5. 評価実験—後方の音源の場合—

5.1. 実験環境

第4章における評価実験と同じく、実験は暗騒音レベルが 40.2 dBA である実験室内の一角にて行った。実験の参加者はキューブ型スピーカアレイの中心に頭部を入れ、HMD を装着した。参加者の頭部中心は地面から 1.3 m の高さに設定した。また、参加者の手元にはゲームコントローラーを持たせた。実験装置の更新に伴い、制作システムの制御 PC の OS は Microsoft Windows 10 Pro に、実験に使用した HMD は Oculus Rift CV1 に変更されている。

5.2. VR ゲーム

先の評価実験の結果と、実験後の参加者からの感想、実験中に判明したいくつかの問題点の改善のため、VR ゲームにいくつか修正を加えた。修正点は以下の通りである。

(1) ターゲットの出現位置の後方への拡張

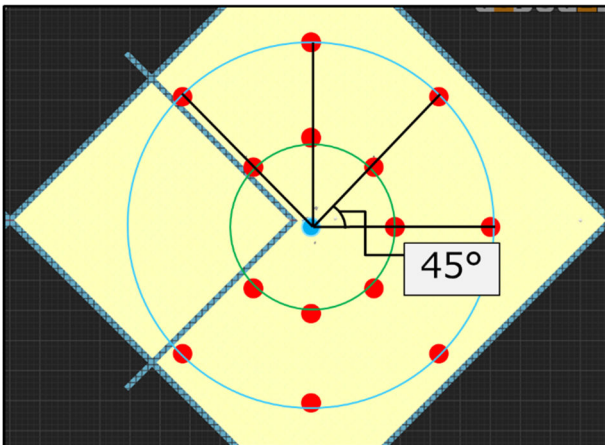


図 9. 拡張したターゲットの出現位置

Fig. 9 Expanded appearance positions of targets.

先の評価実験の結果から、ターゲットの出現位置を後方にまで拡張した。拡張した出現位置を Fig. 9 に示す。ターゲットの出現位置は先の評価実験では正面と左右 60 度だったのに対し、正面、左右 45, 90, 135 度の 7 方向に拡張した。プレイヤーのほぼ真後ろに当たる 120~180 度の位置は、HMD の特性上プレイヤーは周りが見えなく、その状態で真後ろを向くとキューブ

型スピーカアレイと接触する恐れがあるため、出現位置から除外した。

ターゲットの出現距離及び高さを Fig. 10 に示す。2 種類のターゲット(歩行型、飛行型)は各方向においてプレイヤーから 1500cm, 3000cm 離れた位置に出現する。さらに、飛行型ターゲットは歩行型ターゲットの直上 1000cm の位置に出現する。出現したターゲットは 500cm/s でプレイヤーに向かって直進する。

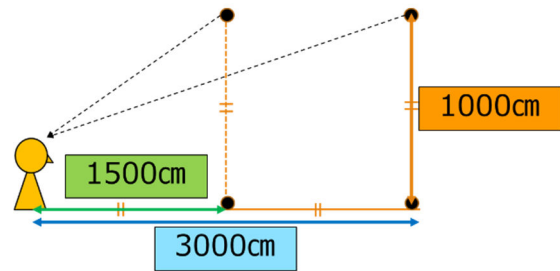


図 10 ターゲットの出現距離及び高さ

Fig. 10 Appearance distances and heights of targets.

(2) ゲームプレイ中に照準を追加

先の評価実験では、ターゲットを撃破するための弾を発射する際、弾が発射される位置が不明確なため、ターゲットの目標設定が難しくなっていた。そのため、プレイ中に弾が発射される位置に照準を追加し、弾が発射される位置を明確にした。

(3) ターゲットの同時出現数を 5 体に制限

先の評価実験の結果からターゲットの出現位置を後方にまで拡張したが、その結果ターゲットの出現位置が増加し、ゲーム自体が大幅に難しくなってしまった。ゲームの難易度が高すぎるとは実験に適さないと考え、ゲームの難易度を調整するために、同時に出現するターゲットの数を 5 体に制限した。

(4) プレイヤーの体力の変更

先の評価実験において、プレイヤーの体力は 10 であったが、照準の追加等の変更によってプレイヤーの生存時間が増加し、プレイ 1 回当たりの時間が長くなった。HMD を付けた状態で首を動かしてゲームをプレイする都合上、1 回当たりの時間が長くなりすぎると参加者の負担が大きくなってしまおうと考え、プレイ時間短縮のためにプレイヤーの体力を 5 に変更した。

(5) ターゲットの見た目の統一

弾の当たり判定は球状であるが、先の評価実験におけるターゲットの外見は Fig. 11 に示す通り球状ではないため、プレイヤーが弾を撃った際に「当たったように見えるが当たっていない」ことや、「当たっていないように見えるが当たった」ことが起こる可能性が存在した。このままでは実験に適さないと考え、Fig. 12 に示すような当たり判定と大きさ、形がほぼ同じ見た

目の外見を用意し、すべての敵に対して修正した外見を適用した。

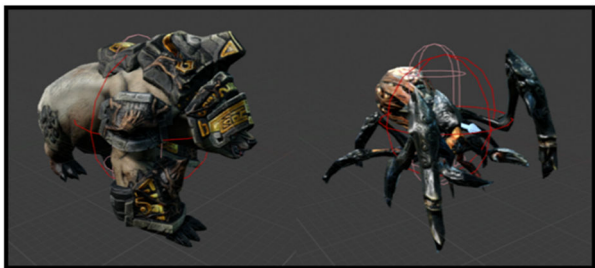


図 11 VR ゲームにおけるターゲットの外見
Fig. 11 Form of targets in VR games.

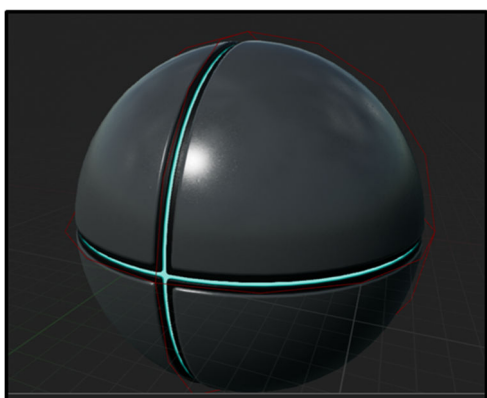


図 12 修正したターゲットの外見
Fig. 12 Modified form of targets.

5.3. 実験手順

修正した VR ゲームを用いて、再度評価実験を行った。実験の参加者は評価実験に参加していない 6 名である。参加者は実験に入る前にゲームの操作説明と、数回の操作練習を行った。参加者は音提示のあり・なしの 2 条件でゲームをプレイし、そのスコアを記録した。2 条件の提示順序は参加者ごとにランダム化した。参加者はそれぞれの条件において 3 回ずつゲームを繰り返した。

5.4. 実験結果

Fig. 13 に条件ごとの平均スコアの結果を示す。エラーバーは 95% 信頼区間を示す。上記の結果に対して t 検定を実施したところ、片側、両側検定共に 1% 水準で有意差が認められた (片側: $p=0.004 < 0.01$, 両側: $p=0.008 < 0.01$)。従って、音を提示することによってゲームのスコアが上昇することが示された。これは、ターゲットの出現範囲が後方まで拡張されたことにより、後方のターゲットは視覚だけで反応することが困難になり、音の提示による効果が大きく反映されたためであると考えられる。

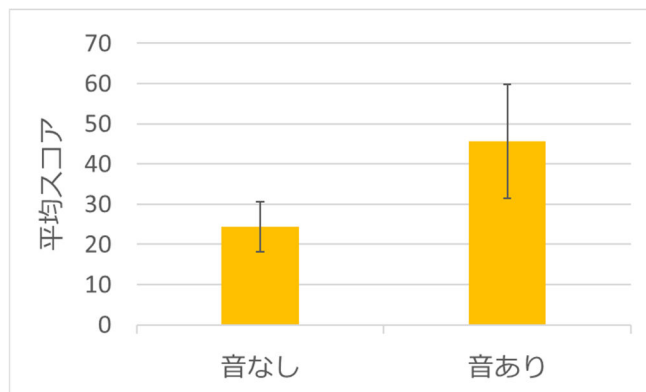


図 13. 修正した VR ゲームの結果
Fig. 13 Results of modified VR games.

6. まとめと今後の課題

本研究では個人用三次元音場再生システムの視聴覚性能を評価するために、キューブ型スピーカアレイと HMD を組み合わせた視聴覚提示システムを構築し、VR ゲームを用いた評価実験を行った。ターゲットの出現方向が前方に限定した評価実験では有意差は認められなかったが、ターゲットの出現位置を後方にも拡張した評価実験では音の提示による効果が大きく反映され、有意差が認められる結果となった。2 つの評価実験の結果を比較してさらに検証を進めたかったが、実験条件の大きな違いから现阶段では比較は難しいと判断した。

今後は修正した VR ゲームでターゲットの出現位置を前方に限定した実験を再度行い、個人用三次元音場再生システムの効果についてさらに検証を行いたい。また、今回は行えなかったが、キューブ型スピーカアレイを用いて音を提示した場合と、ヘッドホンを用いて音を提示した場合の効果の差を検証したいと考えている。

文 献

- [1] 木村敏幸, “8 個の指向性マイクロホンを用いた波面合成技術のコンセプトに基づいた個人用コンパクト三次元音場再生システム,” 信学論 (A), Vol. J97-A, No. 4, pp. 284-294 (2014).
- [2] Unreal Engine 4, <https://www.unrealengine.com/ja/blog>
- [3] Oculus Rift, <http://www.oculus.com/rift/>
- [4] Max, <http://cycling74.com/products/max/>
- [5] <http://opensoundcontrol.org/>
- [6] UE4-OSC, <https://github.com/monsieurgustav/UE4-OSC/>