

バーチャル聴覚ディスプレイ技術を応用した 視覚障害者向け音空間ゲームの開発

大内 誠^{1,a)} 鈴木 陽一^{2,b)} 岩谷 幸雄^{3,c)}

概要: 著者らは、視覚障害者と晴眼者の両方が楽しむことができる音空間アクションゲーム「ラビットヒット2」を開発した。本ゲームは、ヘッドフォンを用いて3次元的な音空間を創生するためのVirtual Auditory Display (VAD) 装置を応用して開発された。また、予備検討として、前バージョンのゲームを用い、晴眼者18名ならびに視覚障害者8名、計26名によるエンタテインメント性評価の結果、「非常に高い」または「高い」と答えた人は合計21名にのぼった。これは、本研究の主目的である、晴眼者も視覚障害者も楽しめるゲームの開発が十分可能であることを示すものである。

Development of spatial sound games for the visually impaired applying Virtual Auditory Display technology

MAKOTO OHUCHI^{1,a)} YÔITI SUZUKI^{2,b)} YUKIO IWAYA^{3,c)}

Abstract: The authors developed a sound space action game "Rabbit Hit 2" that both visually impaired and sighted people can enjoy. This game was developed using a Virtual Auditory Display device (VAD) for creating a three dimensional sound space using headphones. Moreover, as a preliminary evaluation, eighteen sighted and eight visually impaired people played the previous version of the game to evaluate its entertaining aspect. As a result, 21 among the 26 players evaluated this game as very highly or highly entertaining. This result shows it possible to develop a game which both visually impaired and sighted people can enjoy as aimed in this study.

1. はじめに

2016年1月、全盲のゲーマー Garrett が4年もの歳月をかけて、Nintendo64の3Dアクションゲーム「ゼルダの伝説 時のオカリナ」を完全クリアした映像がYouTubeにアップロードされ、話題になった[1]。ゼルダの伝説は、晴眼者向けに開発されたビデオゲームであり、迷路やトラップによってステージが構成されるため、視覚に頼らずにゲームをプレイすることは至難の業である。しかし、

Garrett は、ステレオスピーカを眼前に配置し、音そのもののや音の定位を手がかりにしてゲームを攻略していったと語っている。

Garrett のようなケースはまれだとしても、視覚障害者や視覚障害児が、晴眼者と同じようにビデオゲームをプレイしてみたいというニーズがあることは、著者らのこれまでの研究[2]でも明かとなっているが、視覚障害者に最適化されたゲームはまだ少ないのが現状である。

一方、著者らは、これまで低遅延で頭部運動に感応するバーチャル聴覚ディスプレイ装置 (Virtual Auditory Display: VAD) を開発してきた[3]。この装置は、ヘッドフォンを用いて3次元的 (立体的) な音空間を創成するもので、聴取者から見て任意の位置に音像を定位させることが可能である。すなわち、実際には音を発する物体が存在しなくても、あたかもそこに音源があるかのように知覚させるこ

¹ 東北福祉大学
Tohoku Fukushi University

² 東北大学
Tohoku University

³ 東北学院大学
Tohoku Gakuin University

a) makoto@tfu-mail.tfu.ac.jp

b) yoh@riec.tohoku.ac.jp

c) yukio@iwaya-lab.org

とが可能な音響バーチャルリアリティ（以下 VR）装置である。

そこで、著者らは、この装置を応用して、視覚障害者でも晴眼者でもプレイできる音空間アクションゲーム「ラビットヒット2」を開発することにした。

2. バーチャル聴覚ディスプレイの開発

2.1 VAD の原理

音空間を厳密に再現するためには、再現したい環境（壁、天井、障害物など）の伝達関数と聴取者本人の頭部伝達関数（後述）を含んだ音波を聴取者の鼓膜に伝達すればよい。これを実現するための最も単純な方法は、聴取者の両耳の鼓膜位置にマイクロフォンを設置し、目的の音を収録して再生するバイノーラル録音再生技術である。しかし、実際には鼓膜位置にマイクロフォンを設置することは困難を要するので、頭部を模擬したダミーヘッドまたは HATS (Head And Torso Simulator) を用いて録音するのが一般的である。しかしこの場合、いちいち録音しなければ音が聞けず、インタラクティブ性に欠ける。

そこで、前もって聴取者の外耳道入口やダミーヘッドの鼓膜上に設置されたマイクロフォンで「伝達関数」のみを測定しておき、のちにその伝達関数を音声に合成して（たみこんで）聴取者に提示することにより、バイノーラル録音再生法とほぼ同様の音空間を再現する手法がある。これを「伝達関数合成法」という [4]。この時、コンサートホールなどの部屋そのものの伝達関数を「室伝達関数」と呼ぶのに対して、自由空間上にある頭部や耳介、肩などの聴取者の体型に起因した、音の到来方向や距離を知覚させるための伝達関数を「頭部伝達関数（HRTF: Head Related Transfer Function）」と呼ぶ。言い換えれば、人間が普段聴いている音には必ず HRTF が含まれており、それを経験的に使いこなすことで、目をつぶっても音源の方向や位置を知覚することができるのである。

著者らが開発した VAD は、この HRTF と音声データをコンピュータ内でリアルタイムに合成することによって、任意の位置に任意の音像を定位させることを可能にしている。

2.2 HRTF の測定方法

人間は、人それぞれ頭部の大きさや形状、耳介の形状などが異なるため、HRTF にも個人差がある。したがって、定位精度のよい VAD を実現するためには、聴取者自身の HRTF を使用するのが望ましい。

HRTF の測定は、おおむね次のような手順で行う。

- (1) 聴取者の両耳の外耳道入り口に小型のマイクロフォンをセットする。
- (2) 測定したい位置にスピーカを設置し、そこから可聴帯域全域を含む信号を流し、受信した信号の FFT から

元の信号の成分を除いた周波数スペクトルを求める。

- (3) 求めた周波数スペクトルを、さらにスピーカと頭部中心位置のマイクロホン間の音伝搬路の周波数スペクトルを除いて正規化する。これが頭部伝達関数（HRTF）である。

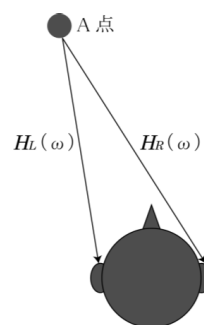


図 1 A 点から両耳までの HRTF（頭部中心位置の伝達関数で正規化）

図 1 のように、VAD を用いて A 点から音が聞こえるようにするためには、前もって A 点から左右の耳までの HRTF ($H_L(\omega)$ と $H_R(\omega)$) を測定しておく必要がある。もし別の地点に音源を定位させたい場合は、その位置からの HRTF が必要になるため、理論上は無数の地点からの HRTF を測定しておかなければならない。しかし、これは現実的ではない。



図 2 HRTF を測定するための球状スピーカアレイ

そこで、著者らは、図 2 のような球状スピーカアレイの中心に聴取者の頭部の中心が位置づけられるように聴取者を着座させ、球の中心から見て水平方向 5 度おき、垂直方向は 10 度おきに HRTF を測定した。したがって、測定した HRTF は全部で 1,225 方向である。測定方向以外については補間により頭部伝達関数を推定する。なお、球の中心から各スピーカまでの距離は、1.5m である。

2.3 VAD 開発専用ミドルウェアの開発

VAD を開発するに当たって、まず専用のミドルウェアを開発した [5]。開発環境は Microsoft Visual C++, ASIO

対応のサウンドボード、サンプリング周波数は48kHz、量子化ビット数は16bitで、Windows PC上に実装した。本ミドルウェアはVADの心臓部に当たり、FIRフィルタを中心とするデジタル信号処理を行っている。また、本ミドルウェアは、ゲームアプリケーションとサウンドドライバ部(ASIO)の間に位置するAPIであり、実行時にゲームアプリケーションから動的に呼び出すことができるDLL(Dynamic Link Library)形式として作成した。

本ミドルウェアの主な機能を以下に挙げる。

- (1) HRTFと音源データのたたみこみ処理
- (2) HRTFの補間計算
- (3) ドップラー効果
- (4) 材質を考慮した床、壁、天井からの一次反射音
- (5) 後部残響音
- (6) 距離減衰と空気減衰

2.4 Wiiリモコンによる頭部運動感応型VADの開発

聴取者に3次元音声提示する場合、2台以上のスピーカよる方法とヘッドフォンによる方法が考えられるが、スピーカの場合、クロストークが発生するため音場の制御が複雑になる。これに対し、ヘッドフォンでは原理的にクロストークが発生しないため、音場の制御が比較的容易である。ところが、ヘッドフォン再生の場合、頭を回転させると音像も回転方向に動いてしまうという欠点がある(Head Mount Displayを用いたVRにおいても頭部運動に映像が追従しなければ単なる映像提示装置になってしまうのと同じである)。これに対応するために、図3のようにヘッドフォンのヘッドバンド部にWiiリモコンを取り付け、内蔵されたジャイロセンサにより頭部の回転を検出できるようにした。もし頭部が動いた場合、HRTFを切り替え、頭部回転とは相対的に反対側に音像を瞬時に移動させることにより、頭部を動かしても絶対的な音像位置が変化しない頭部運動感応型VADを実現した[6]。なお、測定したHRTFは1,225方向であるため、測定していない角度のHRTFは補間計算により導出した。また、聴取者から音源までの距離はヘッドフォンの音圧を変化させることにより表現した。



図3 Wiiリモコンを装着したヘッドフォン

3. ラビットヒット2の設計と開発

3.1 ラビットヒット2のゲームシステム

ラビットヒット2のベースになった音空間アクションゲーム「ラビットヒット」は、尾崎らによって開発された[7]。ラビットヒットは、視覚障害者の移動障害物回避能力を向上させるために開発したシリアスゲームである。音空間内を移動する自動車に当たらないように回避行動を取ったり、空間内を浮遊するアイテムをWiiリモコンを振ってゲットしたりするゲームシステムとなっている。

ラビットヒット2も基本的にはラビットヒットと同等のゲームシステムとなっているが、訓練等を目的としたものではなく、エンターテインメント性を重視し、視覚障害者でも晴眼者でも楽しめるよう、様々な工夫を施した。

3.2 ラビットヒット2の開発

開発言語はMicrosoft Visual C++, サウンド周りの開発は前述したVAD開発用ミドルウェア、画面周りの開発はMicrosoft Direct3D 9.0c、センサとして2台のWiiリモコンを用いた。

1台目のWiiリモコンは前述したとおりヘッドフォンのヘッドバンド部に装着し、頭部の回転運動ならびに左右への「かしげ」の検出に利用した。2台目のWiiリモコンは手に持ち、音空間を漂うアイテムのゲットの際に振って用いた(図4)。



図4 2台のWiiリモコン

音空間には、「自動車」「バイク」「トラック」「石の玉」など、プレーヤに近づいてきたら頭を左または右にかしげでよけなければならないアイテムと、「ハチ」「鈴」「蚊」「コウモリ」など、プレーヤに近づいてきたら手に持ったWiiリモコンで叩き落とさなければならないアイテムがある。よけなければならないアイテムが近づいてきたとき、プレーヤがうまくよけられたら得点になり、よけられなければ減点になる。同様に、ハチなどは叩き落とすことができれば得点になり、落とせなければ減点となる(図5)。

ゲームが進行するにしたがってアイテムの出現回数が増加し、移動速度も高速になる。一定数のアイテムをゲット

するとボスキャラが出現する。ボスキャラは何度も Wii リモコンで叩くことにより倒すことができるが、ボスキャラも攻撃してくるので首をかしげてよけなければならない。

それぞれのアイテムやボスキャラは、特徴的な音を鳴らしながら音空間に出現し、移動する。同時にディスプレイ上にも表示される。これにより、視覚障害者も晴眼者もほぼ同様にプレイすることが可能となった。



図 5 ゲーム画面（赤い自動車がプレーヤに向かってくる様子。プレーヤは首をかしげてよけなければならない。）

4. ゲームのエンタテインメント性の評価と考察

視覚障害者 8 名（内全盲が 3 名，弱視が 5 名）と晴眼者 18 名にラビットヒット（初代）をプレイしてもらった後、アンケートを採った。なお、用いた HRTF はプレーヤ本人のものではなく別人のものである。

その結果、ゲームのエンタテインメント性については、高いが 15 名（内視覚障害者は 6 名），非常に高いが 6 名（内視覚障害者が 1 名），低い 1 名（内視覚障害者は 0 名），非常に低い 0 名であった（未回答者あり）。今後も継続して本ゲームをプレイしたいかという質問に対しては、そう思うが 15 名（内視覚障害者が 6 名），非常にそう思うが 5 名（内視覚障害者が 0 名），そうは思わないが 2 名（内視覚障害者は 0 名），全くそう思わないが 0 名であった。

自由記述のところでは、「もっと沢山のステージがあるとよい」「アイテムの移動速度が速すぎる」「音を叩くタイミングがつかめなかった」「Wii リモコンに乗せたヘッドフォンが重い」などの意見があった。

以上のようにラビットヒットのエンタテインメント性については、晴眼者からも視覚障害者からもまずまずの評価を得ることができた。このことから本ゲーム開発の主目的である、晴眼者も視覚障害者も楽しめるゲームの開発は十分可能であるという知見を得たと言える。

一方、アイテムの移動速度が速すぎたり音を叩くタイミングがつかみにくいという意見もあったので、ゲーム開始時はゆっくり移動し、慣れてきたら徐々に速くするようプレーヤビリティへの配慮が望まれる。また、プレーヤ本人の HRTF に特性の最も近い HRTF を選択できるような機

能も必要であろう。これらの改善点をラビットヒット 2 に盛り込んだ上で、同様の評価実験を実施したい。

5. おわりに

本稿では、ヘッドフォンを用いて 3 次元的（立体的）な音空間を創生するための VAD とそれを応用した音空間アクションゲーム「ラビットヒット 2」の開発について述べた。VAD を開発するに当たっては、球状スピーカアレイを用いて人間の HRTF を 1,225 ヶ所で測定した。また、ゲームアプリケーションの開発を容易にするために VAD 開発専用のミドルウェアを先行開発した後、ラビットヒット 2 の開発を行った。ラビットヒット 2 は、バーチャルな音空間に出現する移動障害物から逃げたり、アイテムをゲットしたりするアクションゲームとなっている。頭部の回転運動と手の動きを検出するために Wii リモコンを 2 台用いている。今回は、ラビットヒット 2 の元となったラビットヒットを用いて晴眼者と視覚障害者合わせて 26 名にプレイ、エンタテインメント性について評価した。その結果、「非常に高い」または「高い」と答えた人が合計 21 名いた。このことから本ゲーム開発の主目的である、晴眼者も視覚障害者も楽しめるゲームの開発は十分可能であるという知見を得た。今後は、ラビットヒット 2 の評価実験を行い、さらなる改良を加えていきたい。

謝辞 ラビットヒット 2 の開発に当たり、プログラミングの一部を担当した東北福祉大学情報福祉マネジメント学科の寺嶋君、渡邊君、茂手木君に感謝する。

参考文献

- [1] *True Blind* Let's Play [Zelda OoT 46/46] Ganon's Tower(Final Battle), 入手先 (<https://www.youtube.com/watch?v=FbU1w5S0QgU>)(2016.01.02).
- [2] M. Ohuchi, Y. Iwaya, Y. Suzuki and T. Munekata, "Cognitive-map formation of blind persons in a virtual sound environment," International Conference on Auditory Display 2006 (ICAD2006), CD-ROM (2006).
- [3] Kawaura, J., Suzuki, Y., Asano, F. and Sone, T. :Sound localization in headphone reproduction by simulating transfer functions from the sound to the external ear, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 12, 203-216 (1991).
- [4] Blauert, J., Morimoto, M., and Goto, T.: Spatial Hearing, 鹿島出版会 (1986).
- [5] 豊田将志, 岩谷幸雄, 鈴木陽一 "3 次元音空間内におけるドブラー効果のリアルタイムレンダリングに関する考察," 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 457-460 (2004).
- [6] Y. Iwaya, Y. Suzuki and S. Takane, "Effects of listener's head movement on the accuracy of sound localization in virtual environment," In: Proc. of the 18th International Congress on Acoustics (ICA2004), 997-1000 (2004).
- [7] 尾崎千尋, 菊地拓也 "3 次元音響バーチャルリアリティを応用した視覚障害者のための移動物体回避訓練ゲーム「ラビットヒット」の開発," 平成 23 年度東北福祉大学総合マネジメント学部情報福祉マネジメント学科大内誠ゼミ卒業論文集, 69-139 (2012).