

視覚・聴覚を併用した複合現実感システムの開発(5) —ヘッドホンとスピーカの併用による音提示法の拡張—

吉野 将治 村井 嘉彦 森勢 将雅 西浦 敬信
木村 朝子 柴田 史久 田村 秀行

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
E-mail: yoshino@rm.is.ritsumeai.ac.jp

あらまし 複合現実感 (MR) の研究は視覚情報に対するものが主流である中, 我々はこれまでに聴覚に関しても MR を実現し, 視覚的 MR と共存させた「2×2 方式視聴覚併用 MR システム」を実現した. これはヘッドホンを用いた立体音響技術による仮想の音像の提示と, 現実の音の同時聴取により聴覚的 MR を構築している. しかし, 音響分野ではスピーカを用いて立体音響を実現する手法も研究されており, 様々な特徴を有している. それに加え, スピーカでの音提示は, 実際の空気振動を体でも感じられることから臨場感が高まる効果があると考えられる. MR では, 視覚的にはもちろん聴覚的にも様々な表現が可能で, その演出の目的に応じた情報提示や体験環境を考慮した表現が可能であれば, その用途の幅は広がる. そこで本研究では, MR システムに適した音提示方法の拡張を, ヘッドホンとスピーカのそれぞれの特徴を活かして実現し, 視聴覚併用 MR システムの表現力向上を実現した.

キーワード 複合現実感, 視聴覚併用, ヘッドホン, スピーカ

Mixed Reality System Using Audio and Visual Senses (5) ---Extension of Auditory Information Presentation Method in Use of Both Headphones and Speakers---

Masaharu Yoshino Yoshihiko Murai Masanori Morise Takanobu Nishiura
Asako Kimura Fumihisa Shibata and Hideyuki Tamura

Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University
1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan
E-mail: yoshino@rm.is.ritsumeai.ac.jp

Abstract In mixed reality (MR), many studies focused on visual senses. We developed Two-by-Two Mixed Reality System that merges the real and virtual worlds in both the audio and visual senses. Our system realized an auditory MR which has high localization using headphones. In the field of acoustics, there are some studies on stereophonic technique using speakers. Additionally, it is possible that users can feel high realistic sensations by perceiving aerial vibrations. In this study, we extend auditory information presentation using both features of headphones and speakers and improved an expressive power of Audio-Visual MR system.

Keyword Mixed Reality, Audio and Visual Senses, Headphone, Speakers.

1. はじめに

仮想空間と現実空間を融合させた複合現実感 (Mixed Reality; MR) の研究は, 人工現実感 (Virtual Reality; VR) の限界を克服する新技術として注目を集めている. 当初は視覚の融合に主眼が置かれていたが, 近年は聴覚, 触覚など視覚以外の様々なモードに基づく研究も行われ, 活発な研究領域となっている.

その中で我々はこれまでに, 聴覚的な融合にも目を向け, 視覚的 MR と聴覚的 MR を融合させた視聴覚併

用 MR システムを実現した[1]. 更に MR 空間で起こる仮想物体, 実物体, 人工音, 実音の相互作用のうち, MR 特有の反射・遮断現象を実現しシステムの拡張も行ってきた[2]. 実現したシステムの技術的効果の確認, 並びにシステムの新たな課題の洗い出しのために MR アトラクションの制作・運用にも着手してきた[3][4].

そうした中で, MR が新しい情報提示技術としてその応用の幅を広げていくには, 様々な表現が可能で, 演出目的に応じた情報提示ができることが望ましい,

との考えから、我々はMR型情報提示における表現力向上を重要課題であるとした。

そこで、聴覚的MRの更なる拡張に着手する。既開発のシステムは音提示方式として頭部伝達関数を用いたヘッドホンによるバイノーラル方式を採用してきた。一方、音響分野ではスピーカを用いた立体音響技術の研究[5]も盛んに行われており、ヘッドホンでの音提示にはない特徴を有している。更に、スピーカによる音提示は音を耳だけでなく体でも感じられる点で臨場感を高める効果があると我々は考えている。その反面、ヘッドホンはスピーカと比べて音場制御が容易であるなどの特徴も有している。

よって本研究ではMRに適した音提示を図1のようにヘッドホンとスピーカを併用し、それぞれの特徴を活かした形で実現する。これにより視聴覚併用MRシステムの表現力向上を目指す。

以下本稿では、2章でMRと音響デバイスの特徴を踏まえたヘッドホンとスピーカを併用した音提示法について、3章で提案手法による視聴覚併用MRシステムの実現を行う。4章では拡張したシステムの表現力が向上したかを確認するため行った、運用を想定した実験について述べる。

2. ヘッドホンとスピーカの併用による音提示

2.1. 複合現実感に適した音提示

我々は視聴覚併用MRシステムを開発し、MRアトラクションという形でデモ展示を行うことで、システムに対する意見を求めてきた。このMRアトラクション制作及び運用実績から、得られた制作者、体験者のコメントからMRにおける音提示の重要要素として以下の3項目を抽出した。

- (1) 音の加工における実時間処理
- (2) 視野外における高い定位感
- (3) 演出効果としての誇張表現

MRでは実時間性が必須であるためMR空間を自由に演出するには可能な限り(1)を実現する必要がある。実際に、文献[3]のMRアトラクションでも複数の音源を空間中に配置し、実時間で音を提示するなど、表現力豊かなシーンを構築してきた。表現できるシーンの幅を狭めないためにも(1)は重要な要素となる。

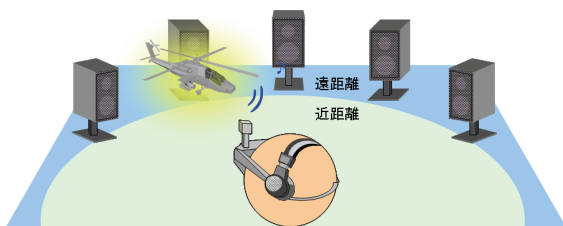


図1 ヘッドホンとスピーカ併用イメージ

次に、人は全ての感覚器官から受ける情報のうち、一番多くの情報を視覚から得ており、聴覚は視覚に次いで重要な五感情報である[6]。そのため視野外においては聴覚情報が最も重要で、(2)はその領域における音の存在を把握するための重要な要素である。また、HMDによる視覚情報提示では視野が狭まることもあり、運用時にも体験者から(2)の重要性に関するコメントが得られている。

また、MRでの表現力を更に増強するためには現実世界の現象を再現するだけでなく、(3)のように、物理モデルを超えて意図的に誇張することも有効な演出効果と考えられる。実際、我々が先に制作したMRアトラクション[4]においても、反射音を意図的に誇張することが体験空間の表現において有効な演出効果であった。映画のようなエンターテインメントにおいても、ある音に対して意図的にエフェクトをかけて注目させるような表現がしばしば用いられている。これは制作者の思い描いたシーンを演出するための表現であり、MRシステムにおいても(3)を兼ね備えておくことは表現力向上のために有用である。

2.2. 音響デバイスによる音提示の特徴

【ヘッドホン】

ヘッドホンとスピーカの音提示について図2を基に述べる。ヘッドホンは受聴者の頭部に装着し耳元のみ音を制御するため室内で起こる反射などの室内伝達関数の影響を受けずに音提示を行える。それにより音場制御を行う場合に所望の信号を受聴者に提示でき、音場制御の自由度が高いと言える。しかし、室内伝達関数を含まないなどの理由から、近距離に音が定位しているように感じ易いという特徴がある。

一般的に、ヘッドホンを用いて立体音響を提示する場合、バイノーラル方式による3次元音場提示が利用される。また、頭部を磁気センサ等によりセンシングすることで受聴者の動きに応じた音提示が可能である。しかし、その動きに追従する室内伝達関数のシミュレートには多くの演算コストを必要とする。

【スピーカ】

一方、スピーカを用いた立体音響方式には、ホームシアターなどで普及している5.1chサラウンドなどのマルチチャンネルステレオ再生方式や、ヘッドホンにおけるバイノーラル方式をスピーカによって実現するトランスオーラル方式、多数のスピーカによって聴取空間全体を制御する波面合成法など様々な手法がある。

スピーカは空間に音を放射し、受聴者へ音の提示を行う。音を放射するため、受聴者の耳に届くまでに室内伝達関数を含んで提示される。また、他のスピーカからの音の干渉(クロストーク)も受けるため、音場制御にはそれらを考慮した高度な処理が必要となる。

その反面、反射音などの室内伝達関数を経て受聴者に届くため、日常生活で知覚する音に近く、ヘッドホンに比べて自然な音提示と言える。更に、スピーカが配置されているような遠距離に音が定位し易いという特徴がある。また、体でも音を空気振動として感じる事が可能であることから(特に低音)、耳のみを制御するヘッドホン音提示と比べ臨場感が増すと考えられる。

なお、ここでの近距離・遠距離とは図1で色分けしたように体験者付近の領域を近距離、配置したスピーカ付近より遠い領域を遠距離とする。

以上、ヘッドホンとスピーカの特徴を表1に示す。

2.3. 併用による音提示法の拡張

MRに適した音提示であることを念頭に置き、なおかつヘッドホンとスピーカをハイブリットに利用することで表1にある両方の特徴を活かした音提示法の拡張を行う。これにより視聴覚併用MRシステムに特化した効果的な音提示を実現する。

【各音響デバイスにおける音提示方式】

本研究では、ヘッドホン、スピーカにおいて、それぞれ以下の方式を採用する。

- ・ヘッドホン：バイノーラル方式
- ・スピーカ：マルチチャンネルステレオ再生方式

既開発のシステムはヘッドホンによるバイノーラル再生方式を用いて高い定位感を実現しており、これまでも複数音を提示するアトラクションで動作していることから、定位感が高く、実時間処理可能な演算量であるため、引き続きこの方式を採用する。

スピーカを用いた波面合成法などに代表される既存の空間制御型立体音響方式は、高音質で没入感の高い音場を実現する上で有効な手法である。しかし、無響室が必要という大きな制約が発生することから、一般的な有響空間で行われるMR体験の利用には不向きである。よって、有響空間において容易に実現可能であり、得られる演算量と定位感を考慮してマルチチャンネルステレオ再生方式を採用する。

このとき、ヘッドホンでの音提示は提示音と周囲の音が両方聴取可能な開放型ヘッドホンによる開放型音独立提示方式[1]を用いる。そうすることで、スピーカからも出力される人工音との合成を行い、更に実音も合成された音提示を行う。

【音響デバイスと提示音の組み合わせ】

表1に記したヘッドホンとスピーカの特徴を活かし、提示音の目的と音像の距離に応じて、以下のよう

- (A) ヘッドホンを用いて提示
- (B) スピーカを用いて提示
- (C) ヘッドホンとスピーカ両方を用いて提示

(A) ヘッドホンを用いて提示する場合

音場制御の自由度が高いヘッドホンを利用することで、反射音を誇張するなど演出が容易になる。そのため音源に意図的な表現を加えた演出を行いたい場合にはヘッドホンを使って提示する。

また、近距離に音が定位し易い特徴から、音源が近距離の場合もヘッドホンを用いて提示する。

(B) スピーカを用いて提示する場合

空気振動を体でも感じられるため、迫力あるスケールの大きい音を演出したい場合にはスピーカを用いて提示することによって臨場感を高める。

また、スピーカは遠距離に定位し易いため、遠距離の音の場合についても提示する。このようにヘッドホンとスピーカでそれぞれ定位し易い距離によって使い分けて提示することで、少ない演算コストで距離感の違う音の表現を行う。

それに加え、ヘッドホンに比べ自然な音提示が可能である特徴も活かして、特定の位置に配置するような音源ではなく、演出したいシーンの雰囲気演出するBGMのような音を提示したい場合にもスピーカで提示する。

(C) ヘッドホンとスピーカ両方を用いて提示する場合

先に述べたように、ヘッドホンは近距離、スピーカは遠距離に音が定位し易い。そのため、距離減衰に加

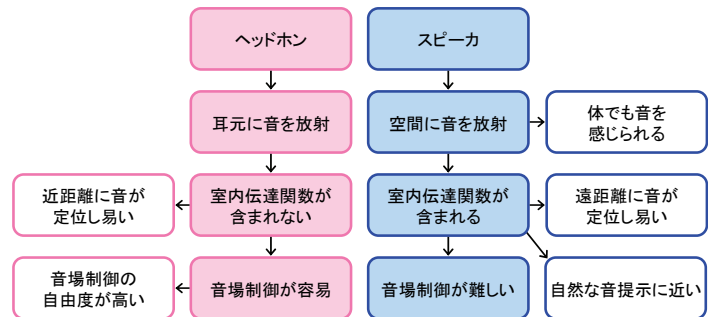


図2 ヘッドホンとスピーカの音提示

表1 ヘッドホンとスピーカの音提示の特徴

ヘッドホン	スピーカ
音場制御の自由度が高い	空気振動を体でも感じられる
近距離に音が定位し易い	遠距離に音が定位し易い
	自然な音提示

表2 音響デバイスと提示音の組み合わせ

ヘッドホン	スピーカ	両方を使用
意図的な音	迫力ある音	移動感のある音
近距離の音	遠距離の音	
	BGM	

え、これらの音量のバランスの調整を行うことで、遠近の移動感を少ない演算コストで演出できると考えられる。よって遠近の移動感を表現したい場合に、ヘッドホンとスピーカ両方を用いて提示する。

3. 音提示法を拡張した視聴覚併用MRシステムの実現

3.1. システム構成

図3のような構成で、視覚情報生成処理と聴覚情報処理に大別してシステムを構築している。

視覚情報生成処理は、視覚情報生成兼MR空間管理用PCを用いてMR空間の管理及び生成を行う。ビデオシーズルー型HMD(Canon VH-2002)を用いて、カメラでキャプチャした現実世界の映像にコンピュータで生成した仮想物体を重畳描画し、眼前のディスプレイに表示することで体験者に視覚的なMR空間を提示する。また、体験者の頭部位置姿勢の検出には磁気センサ(Polhemus 3SPACE FASTRAK)をHMDに取り付けることを行う。

聴覚情報生成処理は、音場制御PCを用いて体験者の頭部位置姿勢、仮想物体の3次元位置を基に体験者に提示する聴覚情報を生成する。音場制御PCからの情報を、DA変換器(Thinknet DF-2032D)を通じ、音を提示する開放型ヘッドホンとスピーカに出力する(図4)。ヘッドホンにはエフェクタ(ZOOM RFX-2200)を経由した信号が、スピーカにはパワーアンプ(BOSE 1200V I)を経由した信号が入力される。こうして実音、ヘッドホンから出力された人工音、スピーカから出力された人工音を体験者の耳元で合成し、聴覚的なMR空間を提示する。

以上のように、視聴覚情報を同期させて提示することで視聴覚併用MRシステムを構築している。

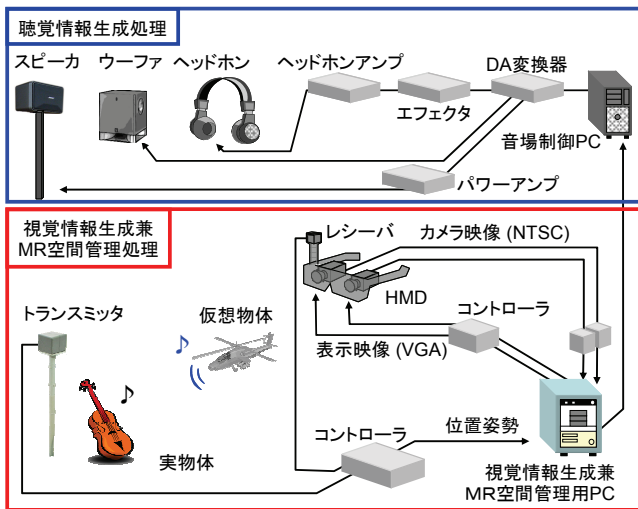


図3 システム構成

3.2. ヘッドホンとスピーカの制御

【ヘッドホン】

図4(a)のような開放型ヘッドホンを用い、頭部伝達関数を用いたバイノーラル方式により、定位感の高い音提示を行う。頭部伝達関数は水平方向5度間隔のものを体験者頭部に取り付けた磁気センサによる頭部位置姿勢に合わせて切替えて用いる。

また、エフェクタを用いた文献[2]の方法で反射音を付加、誇張できる。このようにして意図的な表現を加えた音、近距離の音を生成する。

【スピーカ】

図4(b)のようなスピーカ8本とウーファ(YAMAHA YST-SW225)を用いた8.1chのマルチチャンネルステレオ再生方式によって音提示を行う。スピーカは図5のように、主に体験の中心となる磁気センサ付近を中心に半径2.0mで等間隔に配置する。このときすべてのスピーカは中心に向ける。各スピーカの制御には距離減衰と、文献[7]の手法を参考にしてエネルギー和を一定に保って振り分ける処理を行う。これにより任意の位置に音像定位させる。

以上の手法によって、迫力のあるスケールの大きな音、遠距離の音を生成する。なお、BGMのような音の提示では、8本すべてのスピーカから均一のエネルギーで音を出力して提示する。

【両方を使用】

ヘッドホンとスピーカの両方をエネルギー、音質の両面でシームレスに使用するため、図5の中心から半径1.0~2.0mの領域内で距離に応じて出力エネルギーをそれぞれに振り分ける。その際、ヘッドホンとスピーカ間の出力特性の違いによる音質の違いは、ヘッド



図4 使用したヘッドホンとスピーカ

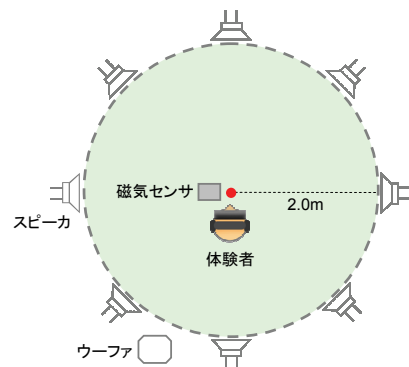


図5 スピーカ配置

ホンの逆フィルタを生成し、スピーカ側の出力特性に合わせることで補正を行う。このようにして遠近の移動感のある音を提示する。

4. 視聴覚併用 MR システムでの音提示実験

4.1. 実験目的

提案手法が視聴覚併用 MR システムにおいて効果的であるかを、実用を想定したシーンを用いて実験する。また、MR アトラクションでの運用も行い、ヘッドホンとスピーカを併用した音提示法の評価を行う。

4.2. 実用を想定した実験

実験 1：遠距離と近距離の同時聴取実験

【実験内容】近距離と遠距離をそれぞれ巡回する 2 羽の鳥の CG オブジェクトを提示する(図 6 実線矢印)。それぞれの CG オブジェクトの位置から異なる種類の鳥の鳴き声を人工音として提示し、以下の 3 種類の音提示法で聞き比べさせる。

- (a) ヘッドホンのみ
- (b) スピーカのみ
- (c) ヘッドホンとスピーカを併用(提案手法)

なお、このとき CG オブジェクトの見た目から鳴き声は判断できないようにした。被験者は正常な聴力を持つ学生 3 名(以下、実験 2~4 も同様)とした。

【結果と考察】(a)(b)についてもある程度は遠近の違いを感じられたが、(c)は階層が出来たかのように明確に遠近の違いを感じられた。よって、(c)を用いることで演算コストのかかる処理なしで距離感を表現できた。

実験 2：スケールの大きな音の聴取実験

【実験内容】体験者の 2.0m 前方(図 6 丸印)から、文献[8]のミニチュア花火を提示する。具体的にはミニチュアの CG オブジェクトによる花火と花火の爆発音を上記(a)(b)の 2 種類の方式で提示し比較させる。

【結果と考察】(b)が最も迫力を感じた。これは、予測通り音を耳だけでなく体で感じることによる効果があったと考えられる。このような音源の場合であれば高い臨場感を実現するにはスピーカを用いるのが適切であると考えられる。

実験 3：移動感のある音の聴取実験

【実験内容】移動音源としてヘリコプタのプロペラ音を提示する(図 6 破線矢印)。CG オブジェクトのヘリコプタは体験者に近づいたり、遠ざかったりする動きを繰り返す。この音を実験 1 と同様に(a)~(c)の 3 種類の音提示法で聞き比べさせる。

このときヘッドホンとスピーカの出力特性を補正した場合としない場合の比較も行った。

【結果と考察】(a)(b)の場合でも距離減衰により移動

感は得られたが、併用した音提示の方が大きく移動しているように感じられた。しかし出力特性を補正しない場合に音質の違いが顕著で違和感を覚える被験者もいた。逆フィルタによる補正を行った場合はそのような不自然さは無く、スムーズに距離感の制御が行えており、移動感のある音を演出できた。これは、室内伝達関数の有無による距離感の違いによる効果であると考えられる。

実験 4：意図的な音と BGM の同時聴取実験

【実験内容】幽霊の CG オブジェクトに「うらめしや」と囁くような音声を配置し、不安をあおる様な BGM を同時に提示する。実験は図 7 のように映画の撮影に使われるようなセットを用いて、よりアトラクションに近い形で行う。音声データは囁く声が収録されており、反射音を全く付加しないことで、耳元で囁くような意図的な演出を行う。この音を実験 1 と同様に(a)~(c)の 3 種類の音提示法で聞き比べさせ、幽霊の存在を強調し、かつ BGM で自然に不安をあおる演出が行っているか比較する。

【結果と考察】(c)では、意図的な音は演出通りの提示が行え、かつ BGM は雰囲気作りに効果が現れた。(a)については、意図的な音は演出通り提示できているが、BGM も引き立って聞こえた。一方、(b)は囁き声が耳元で聞こえるという演出が行えていなかった。これは実験 1 と同様に室内伝達関数の有無による効果であると考えられる。MR アトラクションでは、実験 4 のような演出を頻繁に行うため、有用な演出効果である。

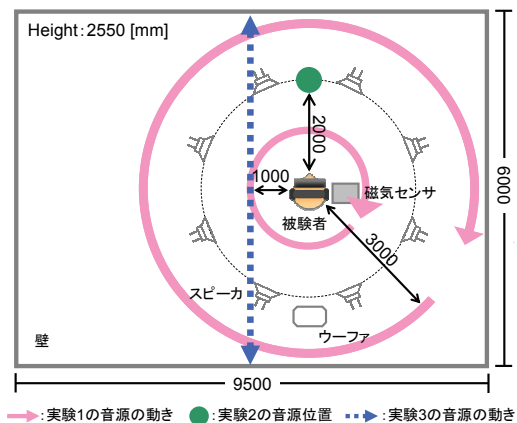


図 6 実験環境(実験 1~3)



図 7 実験 4 の様子

4.3. MR アトラクションでの運用

実際に 2.3 に基づいた音提示の運用を MR アトラクション「Rhythm of the Rain in 3D」で行った。この MR アトラクションは題材として、雷鳴、降雨現象を選択し、様々な種類の音を視覚的 MR 表現と調和させた視聴覚 MR 体験ができる。コンテンツとしてのデザインコンセプト、体験の流れなどの詳細は[4]に譲り割愛するが、様々な音響効果を表現するため、下記のように表 2 に基づいて設計した音提示が行われている。

- ・ 雨音 (BGM)
- ・ 体験者が持つ傘と雨の衝突音 (近距離の音)
- ・ 雷鳴 (迫力ある音)
- ・ 体験者が手に持ったオルゴール (意図的な音)
- ・ ジェット機の旋回 (遠距離の音)

オルゴールの音に関しては、体験空間にある小屋の中と外で反射の様子が変わる表現を行うために小屋の中では反射を誇張して表現し、外では通常通り反射を付加するという演出を行った。

このアトラクションは約 100 名が体験し、その音響効果による迫力から多くの体験者から驚きの声が聞こえた。小屋を何度も出入りして音の変化を楽しむ体験者や、降雨体験を楽しむ体験者もしばしば見受けられるなど、大変好評を博した。一方で、周囲に配置したスピーカをはじめとする機器によって視覚的な表現を阻害することが問題点として挙げられた。

4.4. 実験・運用結果の考察

目的に応じた音提示が表 2 通りに行えているかを、近距離の音と遠距離の音は実験 1 により確認でき、同様に迫力ある音は実験 2、移動感のある音は実験 3、意図的な音と BGM は実験 4 より確かめられた。

また、それらを組み合わせて自由度の高い MR アトラクション制作が行えた。機器が視覚的表現を妨げる問題はあるものの、トータルでは魅力的な視聴覚 MR 体験が行え、様々な演出効果が表現可能であったことから、提案手法は視聴覚併用 MR システムにおいて効果的な音提示であると言える。

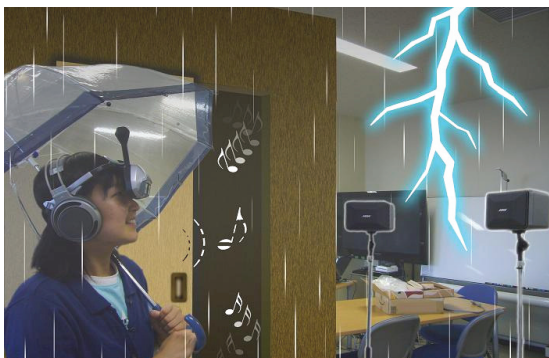


図 8 Rhythm of the Rain in 3D

5. むすび

視聴覚併用 MR システムの表現力向上のためにヘッドホンとスピーカを併用して MR に適した音提示を提案、実装、評価を行った。まず、これまでの豊富な MR アトラクションの運用実績から、MR に適する音提示方法の洗い出しを行い、次に、ヘッドホンとスピーカそれぞれの特徴について分析を行った。そうして、音提示法の拡張としてヘッドホンにおけるバイノーラル方式での立体音響再生と、スピーカにおけるマルチチャンネルステレオ再生方式をハイブリットに用いることを提案した。本手法では各音源の目的と距離に応じて、ヘッドホンを用いて提示、スピーカを用いて提示、ヘッドホンとスピーカ両方を用いて提示に分類して提示する。また、開放型ヘッドホン、8 本のスピーカ、ウーファを用いて視聴覚併用 MR システムとしての実装を行い、音提示方法が効果的なものであるかを、実用を想定して実験を行った。これにより併用する音提示が効果的であることを確認し、MR アトラクションでの運用により制作者の思い描いたシーンを演出する音提示が行えることを確認した。

今後は体験空間に存在するスピーカが視覚面での表現を阻害するという問題を解決するため、視覚的に隠消させることについて取り組む予定である。

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。

文 献

- [1] 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 VR 学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 227 - 237, 2008.
- [2] 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)ー複合現実空間での音の反射・遮断の実現ー”, 同学会第 13 回大会論文集, pp. 556 - 559, 2008.
- [3] 石黒祥生, 他: “Watch the Birdie!ー三感融合型複合現実感アトラクション”, 同学会論文誌, Vol. 12, No. 3, pp. 259 - 268, 2007.
- [4] 村井嘉彦, 他: “Rhythm of the Rain in 3D ー視聴覚 3D-MR 空間の表現力を体験できる複合現実型アトラクションー”, 同学会第 13 回大会論文集, pp. 560 - 563, 2008.
- [5] 榎並和雅, 他: “超臨場感(Ultra - Reality)の現状と将来像”, 日本音響学会誌, Vol. 64, No. 5, pp. 322 - 327, 2008.
- [6] K. Boff, et al.: Handbook of perception and human performance: Cognitive processes and performance, Wiley-Interscience, 1986.
- [7] 大久保洋幸, 他: “CG 画像と同期したインタラクティブ音場再生システムについて”, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 5, No. 3, pp. 965 - 974, 2000.
- [8] 石黒祥生, 他: “視聴覚併用複合現実空間のスケール間に関する考察”, 同学会誌, Vol. 13, No. 2, pp. 125 - 128, 2008.