

# 視聴覚併用複合現実空間のスケール感に関する考察

石黒 祥生<sup>\*1</sup>, 比嘉 恭太<sup>\*1</sup>, 木村 朝子<sup>\*2\*3</sup>, 柴田 史久<sup>\*1</sup>, 田村 秀行<sup>\*1</sup>

## Considerations on Scale Sensitivity in Audio-Visual Mixed Reality Space

Yoshio Ishiguro<sup>\*1</sup>, Kyota Higa<sup>\*1</sup>, Asako Kimura<sup>\*2\*3</sup>, Fumihisa Shibata<sup>\*1</sup>, and Hideyuki Tamura<sup>\*1</sup>

**Abstract** — The perceptual effects for mixed reality space by the newly introduced audio information in audio-visual mixed reality space were studied in this research. First of all, the experiment whether the audio information could help depth perception at MR space was carried out before and after introduction of audio information. As a result, audio information could help the depth perception. We also discovered when the audio information such as volume was changed, observers felt strongly discomfort to change of delay time and that affected to sound volume impression. In conclusion, real scale audio information could create the high realistic and immersive sensation at the miniature world in MR space.

**Keywords:** *Mixed Reality, Audio-Visual MR, Scale Sensitivity*

### 1. はじめに

現実と仮想を融合する複合現実感 (Mixed Reality; MR) は急速な発展を遂げ、活発に研究されている [1]。しかしながら、従来の MR システムの実現例の大半は視覚的な融合に留まっており、聴覚に関しては効果音が付加される程度であった [2]。そこで我々は視覚的 MR と聴覚的 MR が共存する環境を構築することが可能なシステムを開発した [3]。また、その効果を確認できる MR アトラクションも開発した [4]。

このシステムにより、MR 空間においても、その空間内で視聴覚のどのような相互作用が起こるか、それぞれ正しい距離感が得られるかという興味が湧いてくる。VR での視聴覚併用の事例は数多く、視聴覚の関係を考察した研究もあるが [5]、筆者らのこの興味の発端は、かつて「MR テーブル花火」 [6] を開発したことによる。体験者自らがデザインした CG 製の打ち上げ花火をテーブル上で鑑賞するこの MR アトラクションでは、花火が破裂と同時に爆発音を提示し、臨場感を演出した。ここで問題となったのは、MR 空間において効果音の提示に通常の花火のように時間遅延を与えるべきか、与えたとすれば、ミニチュアの花火にどの程度の遅延を与えるべきかである。

ミニチュアの花火での効果を検討する前に、実寸大の仮想空間での打ち上げ花火の鑑賞体験を実現することにし、花火玉とその高度や爆発音の大きさの関係を把握・実装した。しかるのちに、実物体を配置したミニチュア花火大会を実現した結果、視聴覚のスケール感、時間遅延に関する回答から興味深い結果が得られたので、本稿にてそれを報告する。

### 2. 関連研究と実験の準備

#### 2.1 関連研究

人間の視知覚において、両眼立体視を用いた場合の 3D 特有の歪み現象として「箱庭効果」や「書き割り効果」が知られているが、本研究は、立体視と 3D 音場を併用した場合、正しいスケール感が得られるかを検討するものである。

Fujisaki ら [7] は、人間は視覚情報と聴覚情報を統合し、現実世界の事象を認識していることを報告している。Zhou ら [8] は、AR/MR 環境で、意図的に視覚・聴覚のスケールを変えた実験の結果、目の前の比較的近い距離において、スケールが同じ場合に、奥行きや方向が知覚しやすいことを確認した。しかし、本研究では「花火」や「雷鳴」のように、もっと遠距離で視聴覚刺激が同時に発生し、音の時間遅延が確実にある場合を対象とする。

本研究では、まずすべてが実スケールの環境下で実際の花火大会を仮想体験し、体験者が音源からの正しい距離を把握できるかどうかを実験する。次に、ミニチュアスケールでの花火を観察する (即ち、体

\*1 立命館大学大学院理工学研究科

\*1 Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

\*2 科学技術振興機構 さきがけ

\*2 PRESTO, Japan Science and Technology Agency

\*3 立命館大学 総合理工学研究機構

\*3 Research Organization of Science and Engineering, Ritsumeikan University

験者がガリバーやウルトラマンのように巨大化して実寸大の花火を鑑賞する) 場合に, どのような感じ方をするかを分析・検討することにした。

### 2.2 実験システムの構成と花火の計算モデル

CGで描いた花火のMR体験には, HMDを装着する「MR テーブル花火」をベースとし, ヘッドホンによる3次元音像の提示により, 視覚と聴覚で幾何学的整合性がとれた実験システムを構築した(図1, 表1)。また, 花火特有の低域(200Hz以下)の音を表現するためにウーファを付加した。

打ち上げる花火玉の号数・火薬量・開く大きさ・高さは, 10号玉を基準として, 他の7号, 5号等での爆発のモデル化を行った。本実験では最もシンプルな掛け星型の花火に限定して実験を行う。

遠方の視聴覚現象における聴覚情報の到達時間は, 常温(15°C)時の伝播時間を用いる。音の大気伝播中の減衰も考慮し, JISで規定されている「空気吸収」の計算式[9]を適用するものとした。

### 3. 実寸大花火大会の仮想体験

以下の実験は, 下記の環境で実施した。

- 【被験者】正常な聴力を持つ20~24歳の男女14名
- 【音響処理】サンプリング周波数: 16kHz, 処理フレーム長: 64ms, 実験中の暗騒音は50dBA程度
- 【視聴環境】ビデオシースルーHMD(640×480画素, 視野角水平51度, 垂直37度)と開放型ヘッド

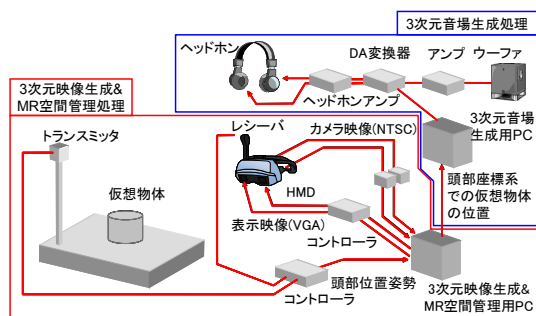


図1 システム構成

Fig. 1 Configuration of the audio-visual MR system

表1 構成機器

Table 1 Hardware configuration

機器名	モデル名
3次元映像生成&MR空間管理用PC	Canon MR Platform System
3次元音場生成用PC	Dell Precision 670
位置姿勢センサ	Polhemus 3SPACE FASTRAK
HMD	Canon VH-2002
DA変換器	Thinknet DF-2032D
ウーファ	YST-SW225
ヘッドホン	SONY MDR-F1

ホンを装着したMR体験。目の前に暗幕を置き, その前にCGで描画した花火を重畳描画するので, 自分の手足は視認できるが, 視覚的にはVRに近い。一方, 聴覚的には, 生成した爆発音以外に周囲の話し声(現実世界の音)等が聞こえるので, 現実の花火大会に近い環境である。被験者は椅子に座った状態で実験を行い, 頭部位置は固定せず, 座ったままであれば頭を動かすことは可能とした。

### 3.1 実験1: 視覚のみの提示による距離感把握

【目的】見かけの大きさが同じである数種類の花火を提示し, 両眼立体視だけで距離判別できるか試す。

【花火と距離】図2に示す5地点で, 3種類の大きさ(S, M, L)の花火を打ち上げる。花火は見かけ上, 同じ高さ, 同じ大きさ(例えば300mでのMサイズと500mでのMサイズが同じ大きさ)に表示される。

【提示手順】各被験者には, 始めに距離とサイズを告知した上で, 全数(15発)を近い順, 小さい順に提示する。しかる後に, 全15種類をランダムに3回提示し, 計45発を打上げて, 発射地点までの距離を回答させる。

【結果】正答率: 平均17.8%(最高24.4%, 最低8.9%) 花火のサイズによる正答率の差はなかった。

【考察】両眼視でもほぼ全く距離判別できていない。遠距離で両眼視差がほとんどない(HMD表示部の水平角度分解能が0.14度に対して輻射角は300m打ち上げ時で約0.012度)上に, 背景に比較するものがないためと考えられる。また, 何人かの被験者は距離を把握しようと頭を左右に動かしていたが, その運動視差をで距離を把握することができていない(頭を水平方向に100mm動かしても約0.03度しか変化しない)。

### 3.2 実験2: 聴覚提示の付加による距離感把握

【目的】実験1に爆発音の提示を加えた場合, 視覚情報と聴覚情報の時間差により, 人間は仮想環境でも距離識別ができることを確認する。

【実験内容】実験1と同じ手順で提示し, 回答を求める。爆発音量は花火の号数(火薬量)に依存し,

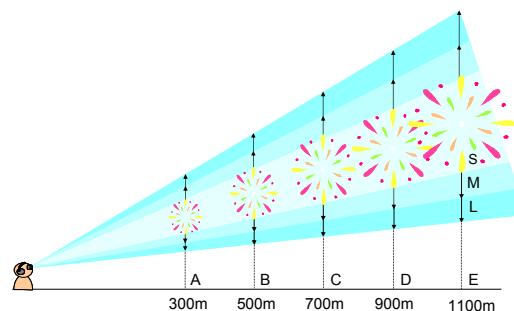


図2 打ち上げる花火の大きさと打上げ地点までの距離

Fig. 2 Sizes and distance to the launch point

空気吸収によって遠いほど減衰させる。到達時間は、距離に比例して遅延させた生成音を提示する。

【結果】正答率：平均 66.6% (最高 84.4%, 最低 40.0%)。花火のサイズによる正答率の差はなかった。

【考察】予想通り、聴覚情報の付加による大幅な改善が見られた。それでも、正答率はそう高くなく、遠近は区別できるが、正確な距離までは当てられない場合が少なくない。また、空気吸収の影響による音質の違い（遠方の音源は高域成分が減少する）からも距離感を把握できたという意見もあった。

### 3.3 実験 3: 聴覚情報の意図的な変化への適応

【目的】基準となる爆発音から音量や到達時間を意図的に変化させた場合の人間の適応能力を確認する。

【実験内容】基準：7号玉，500m 地点での打上げ  
 ・到達時間の変化量：+0.7, +0.3, 0, -0.3, -0.7 (sec)  
 ・音量の変化量：+3, +1, 0, -1, -3 (dB)  
 ・被験者の回答：基準音に対して、音量・遅延が「正しい」「変だ」「どちらともいえない」の3通り。  
 ・提示方法：基準爆発音3回、音量のみ変化した音を4回、到達時間のみを変化した音を4回、両方変化した音を4回で構成される計15回の打上げをランダムに提示。

【結果】実験結果を図3に、バブルグラフで示す。  
 【考察】大半は、±3dBの音量差があっても「正しい」と回答し、音量の変化を許容する（区別がつかない）傾向がある。一方、到達時間は高々0.3secの変化にも敏感に反応し、違和感を覚えている。この実験から、聴覚提示による距離感把握には、遅延時間の方が重要と言える。

### 4. ミニチュア花火大会の複合現実体験

数百 m 離れた打上げ地点での花火の映像と音像を提示する実寸大実験により、一定の知見を得たので、当初から意図した「MR テーブル花火」の世界

に移る。本研究では、人々がミニチュア・サイズであると意識している対象を、どのような視聴覚スケール感で描けばよいかを考察する。

#### 4.1 予備実験 4a: 縮小サイズでの視聴覚提示

【目的】「ミニチュア花火大会」を実施する  
 【実験内容】前述 500m 地点での基準爆発を、1/250に縮小して 2m 地点でミニチュア花火を打ち上げる。  
 【結果】両眼立体視（輻輳角 1.86 度）や、100mm 視点を変化させると 5 度以上見た目が変わるなど、運動視差等によりガリバーになった感覚が得られる。ただし、火薬量が激減することによって、絶対的な爆発音量が小さくなり、花火大会の感じがしないという意見で一致した。

#### 4.2 予備実験 4b: 爆発音のみ原音量に復帰

【目的】前項に対し、音のみ大きくして効果をみる。  
 【実験内容】視覚的に前項と同じ。音は 500m 地点の 7号玉の爆発音量を聞かせる。ただし、到達時間には 2m の位置からの遅延しか与えない。  
 【結果】被験者全員が、ミニチュア花火と意識した上で、この音量は好ましいとしながらも、眼前 2m からの到達時間では遅延がなく不自然と答えた（即ち、もっと大きな時間遅延が望まれた）。

#### 4.3 実験 4: ミニチュア環境に適した遅延時間

人間は視認対象が現実に存在し得る物体のミニチュアであると認識すると、縮尺に関わらず、実物大の事物を見ているかのようなメンタルモデルを構築するとされている。被験者全員に花火大会の体験があり、かつ実験3までを経験していたので、光景と音には時間差があることを当然と感じる結果が出たのだと考えられる。

【目的】ミニチュアが対象の場合、どの程度の遅延が望ましいのかを、縮小スケールを変えて調べる  
 【ミニチュアのスケール】眼前 2m に 1/150, 1/250, 1/350（即ち、300m, 500m, 700m を 2m に縮小）の3種類のスケールのミニチュア環境を提示する。

【CG&実物体の追加】ミニチュア花火大会のスケール感を持たせるために、MR 環境であることを活用し、実体模型のビルと CG で描いたタワーを上げた花火の前景に見えるようにした（図4）。模型も CG もスケールに合わせ3種類の大きさを用意した。  
 【遅延を含む MR 提示】到達時間を 0 秒から 0.1 秒単位で遅らせ、被験者は、各到達時間を遅延が「短い」「適切」「長い」の3種類のいずれであるか評価する。連続して3回「長い」という回答があった場合、その最後の到達時間から 0.1 秒ずつ短くしていき、「適切」と回答した時間帯を求める。

【結果】被験者 14 人の回答分布を図5に示す。かな

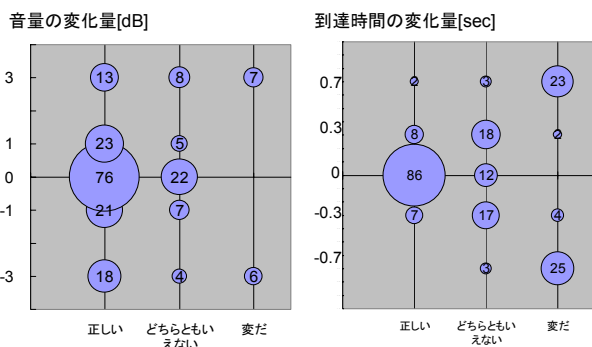


図 3 音量変化と遅延時間変化に対する回答数 (左: 音量変化, 右: 遅延変化)

Fig. 3 Perception of volume and delay of sound

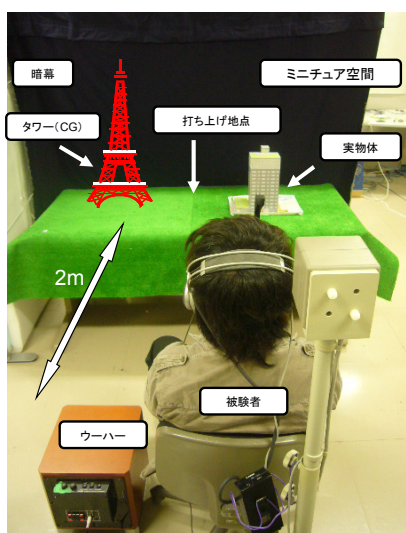


図 4 ミニチュア花火の実験環境

Fig. 4 Experimentation environment of miniature fireworks

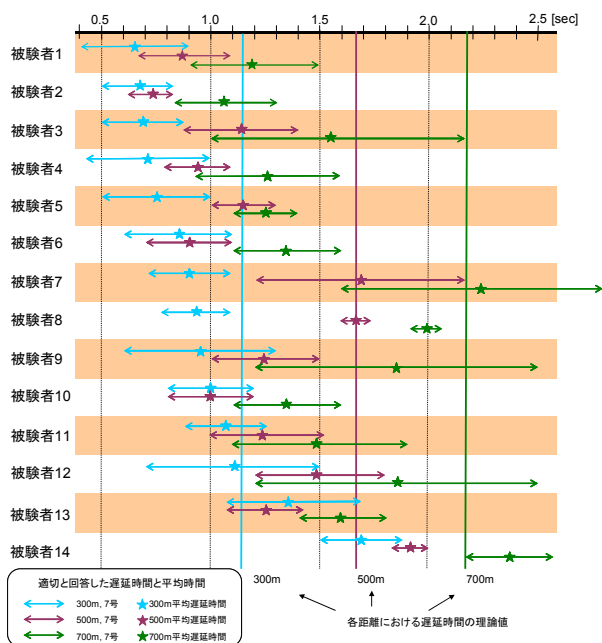


図 5 各スケールにおいて適切と回答した到達時間

Fig. 5 Effective delay time of sound in miniature firework

り個人差があるが、全員が0.4秒以上の遅延を望み、その音量で発する実距離からの到達時間よりも早い時間での(遅延の少ない)音提示を好む傾向がある。

【考察】予備実験の結果は、我々の予想通りであった。「花火には音の時間遅れが付きものと思うものの、どの程度の遅延が必要か答えるには、他に比較すべき事物があった方が把握しやすい」との被験者の意見があったので、実体のある縮小模型を配置して本実験を行うことにした。

実験4で、スケールを1/150から1/250, 1/350と変化させた場合、好まれる到達時間が長くなっていく傾向がある。これは、ミニチュアであることを意

識した上で、スケール(縮小率)に応じて遅延時間も変化させる必要があることを示している。遅延時間は、理論値(想定する打上げ位置から計算した値)よりも短い時間が好まれるという結果が得られた。

## 5. むすび

本稿では、視聴覚併用型MRシステムを用いて、数百分の1程度のミニチュア花火大会を実現した場合、花火の音量や時間遅延はどのように表現すべきかという問題に取り組んだ。そのために、視聴覚で矛盾のないMRシステムを構成し、まず被験者に実物大の花火を仮想体験させることから始めて、数百m級の空間での音刺激の「音量減衰」や「時間遅延」の知覚能力を系統的に実験検証した。

しかる後に「ミニチュア花火のMR体験」へと発展させた。結果は当初の予想通り、人は縮小しない花火に近い音量で爆発音の時間遅れを好むことが実証されたが、理論値よりも短い遅延時間が好まれることが判明した。

## 謝辞

本研究の予備実験の環境整備は、研究室の学部生(現在、オムロン(株))松實洋介氏の協力による。また、本実験の音響学的な観点からの検討は、本学西浦敬信准教授の助言を得た。本研究の一部は、科研費・基盤研究A「三感融合型複合現実空間の構成法に関する研究」による。

## 参考文献

- [1] “複合現実感特集1~3”, 日本VR学会論文誌, 1999, 2002, 2005.
- [2] 大島登志一, 他: “AR2 ホッケー: 協調型複合現実感システムの実現”, 同上, Vol. 3, No. 2, pp. 55 - 60, 1998.
- [3] 比嘉恭太, 他: “視覚・聴覚を併用した複合現実感システムの開発(1)”, 日本VR学会第11回大会論文集, pp. 285 - 288, 2006.
- [4] 石黒祥生, 他: “Watch the Birdie!—三感融合型複合現実感アトラクション”, 日本VR学会論文誌, Vol. 12, No. 3, 2007.
- [5] 小曳尚, 繁樹博昭, 北崎充晃: “バーチャルリアリティ空間における視聴覚の同時知覚—両眼視差と運動視差の効果—”, 信学技報, MVE43-62, pp. 73 - 77, 2006.
- [6] 木村朝子, 他: “MR テーブル花火”, 日本VR学会第10回大会論文集, pp. 516 - 517, 2005.
- [7] W. Fujisaki, S. Shimojo, M. Kashino, and S. Nishida: “Recalibration of audiovisual simultaneity,” Nature Neuroscience, Vol.7, No. 7, pp. 773 - 778, 2004.
- [8] Z. Zhou, A. D. Cheok, Y. Qiu, and X. Yang: “The role of 3-D sound in human reaction and performance in augmented reality environments,” IEEE Trans. on Syst., Man & Cybern., Part A, Vol.37, No.2, pp.262-272, 2007.
- [9] JIS Z8738 “屋外の音の伝搬における空気吸収の計算”, 1999.

(2007年12月4日受付)