

視聴覚併用複合現実空間のスケール感に関する考察

Considerations on Scale Sensitivity in Audio-Visual Mixed Reality Space

石黒祥生¹⁾, 比嘉恭太¹⁾, 木村朝子²⁾, 柴田史久¹⁾, 田村秀行¹⁾

Yoshio ISHIGURO, Kyota HIGA, Asako KIMURA, Fumihisa SHIBATA, and Hideyuki TAMURA

1) 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, {ishiguro, higa}@rm.is.ritsume.ac.jp)

2) 科学技術振興機構 さきがけ

(〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8)

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 comfortable with sound volume difference but they 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.

Key Words: Mixed Reality, Audio-Visual MR, Scale Sensitivity

1. はじめに

現実世界と仮想世界を実時間で融合する複合現実感 (Mixed Reality; MR) は人工現実感 (Virtual Reality; VR) の発展形として急速な発展を遂げ、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]. ようやく最近では、視覚的な MR に 3 次元音場 (即ち、聴覚的な VR) を導入した実施例も見られるようになって来た[3][4]. 我々はこれをもう一歩進め、視覚的 MR と聴覚的 MR が共存する環境、即ち、視覚・聴覚の両方で現実世界と仮想世界を違和感なく融合することが可能なシステムを開発した[5]. 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[6].

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[7]. 初めて視聴覚が矛盾なく共存できる MR 空間の存在により、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湧いてくる. 筆者らのこの興味の発端は、かつて「MR テーブル花火」[8]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鑑賞するこの MR アトラクションでは、花火が破裂とほぼ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、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、与えらば、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. このシステムでは、3 次元音場も視聴覚で矛盾のない MR 空間も達成していなかったため、

この問題の考察は先送りとなっていた.

上記の視聴覚併用 MR 環境の実現により、この未解決の問題を本格的に研究することにした. 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ところ、視聴覚のスケール感、時間遅延に関する被験者の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」が知られており、その現象分析も行われている[9]. 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[10]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. 小宮山[11]は視覚と聴覚の相互作用が音像方向知覚に与える影響を論じている. Zhou ら[4]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、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.

上記は、目の前の比較的近い距離で視聴覚の時間遅延があまり問題とならない実験に限られている. Sugita ら[12]は、現実世界で 20m 以内では、1m につき音を 3ms 遅延さ

せた場合に、人間は視覚事象と聴覚事象が同時に発生したと知覚することが報告されている。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、まず実際の花火大会で使用する大型花火を数百 m の距離から視認・受聴する仮想体験を実現し、体験者は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」[8]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)。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、「花火情報館」[12]を参考に、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(図 2)。「MR テーブル花火」は多様な仮想花火を描写可能だが、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。

遠方の視聴覚現象を VR/MR 空間で再現する場合、聴覚情報提示の到達時間は、常温(15°C)時の伝播時間を用いる。音量は単純な距離減衰を適用するだけではなく、現実に近い現象を表現するには音の大気伝播中の減衰も考慮する必要があり、JIS で規定されている「空気吸収」の計算式[14]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 歳から 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 と開放型ヘッドホンを装着した 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。

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なる数種類の花火を提示し、両眼立体視して視覚だけでその距離が判別できるか試す。

【花火と距離】図 3 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(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、距離とサイズを告知して、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推定して回答させる。

【結果】正答率：平均 17.78% (最高 24.4%, 最低 8.9%)

【考察】5 者択一で正答率 20% 以下では、両眼視でもほぼ全く距離判別できていないに等しい。過去の近距離での同様な実験[15]では両眼の輻輳により区別が良かったが、本実験対象は遠距離で両眼視差がほとんどない上に、背景に比較するものがないためと考えられる。

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 と同じ回数、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、空気吸収によって遠いほど減衰させる。到達時刻は、距離に比例して遅延させた生成音をヘッドホンで提示する。

【結果】正答率：平均 66.58% (最高 84.4%, 最低 40.0%)。

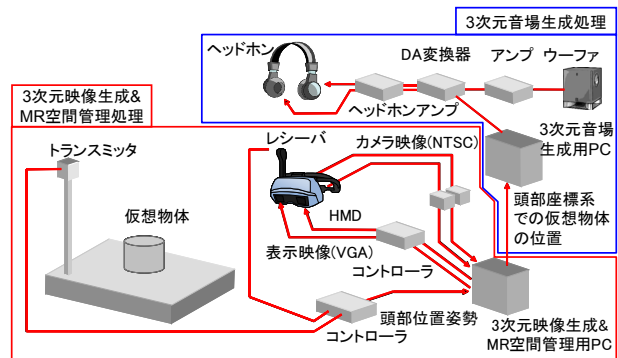


図 1 システム構成

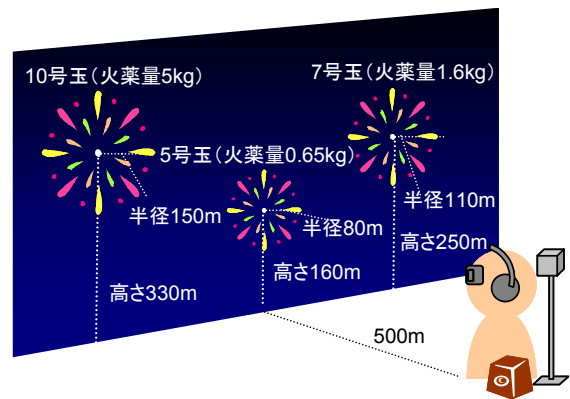


図 2 実験に使用する花火のモデル

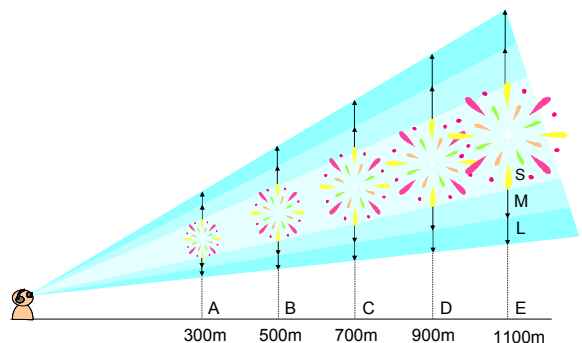


図 3 打ち上げる花火の大きさと打上げ地点までの距離

花火のサイズによる正答率の差は、ほとんどなかった。

【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、視聴覚の時間差により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。音の遅れだけでなく、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があった。

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における人間の適応能力を確認する。

【実験内容】7号玉を500mの地点で打上げの場合が基準・到達時間の変化: +0.7, +0.3, 0, -0.3, -0.7 (sec) の5通り・音量の変化: +3, +1, 0, -1, -3 (dB) の5通り・被験者の回答: 基準爆発音に対して、音量・遅延が「正しい」「変だ」「どちらともいえない」の3通りで回答する。・提示回数: 基準爆発音3回、音量のみ、到達時間のみを変化させた音を各4回、両方変化させた音を4回、計15回提示する。

【結果】実験結果を図4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:縮小サイズのままでの視聴覚提示

【目的】眼前2mの距離で「ミニチュア花火大会」を実施するが、単純縮小では不都合であることを確認する。

【実験内容】前述500m地点での基準爆発を、1/250に縮小して2m地点で起こす。これは、視覚的な画角が同じになる花火玉を仮想的に設計したことになるが、火薬量は激減するので、絶対的な爆発音量が小さくなる。

【結果】発射地点からの仰角と花火が占める画角は同じであるが、被験者の視点位置が高くなるので仰角は同じでなく、ガリバーになった感覚が得られる。ただし、被験者は全員、音が聞こえにくく、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】実験1で画角が同じなら距離の区別つかないことは確認されているので、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で、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であることを一層感じやすくし、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で描いたエッフェル塔を上げた花火の前景（下方）に見えるようにした（図5）。模型もCGも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0.1秒単位で変化させ

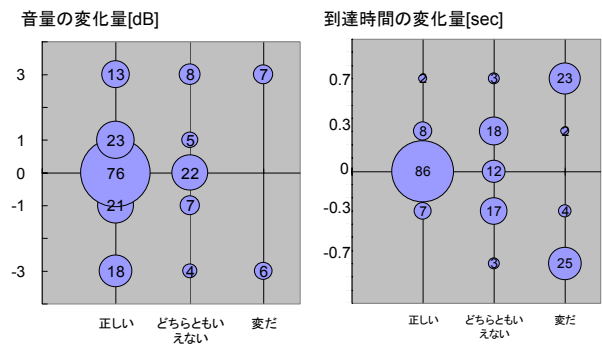


図4 音量変化と遅延時間変化に対する回答数（左：音量変化，右：遅延変化）

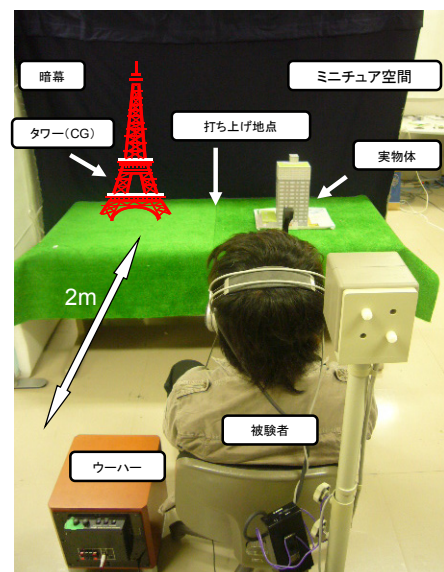


図5 ミニチュア花火の実験環境

た音を提示し、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。

【結果】被験者 14 人の回答分布を図 6 に示す。かなり個人差があるが、全員が 0.4 秒以上の遅延を望むが、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（表 1）。

【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。即ち、自分がガリバーになっている感覚はあるが、どの程度大きくなっているかが実感として得たいという意見である。

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、そのスケール（縮小率）に応じて遅延時間も変化させる必要があることが分かる。この遅延時間は、理論値（想定する打上げ位置から計算した数値）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

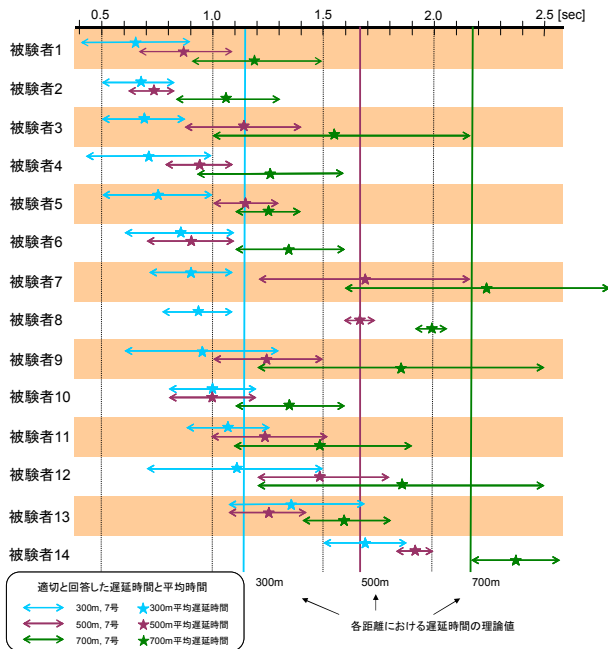


図 6 各スケールにおいて適切と回答した到達時間

表 1 各スケールにおける到達時間の理論値と実験結果

理論値 [s]	実験値(理論値との差) [s]
1.15	0.95 (-0.20)
1.64	1.25 (-0.39)
2.19	1.44 (-0.75)

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。これは、系統的实验を体験した被験者に対する結果であって、いきなり実際の花火を見た場合の距推定精度はもっと悪く、さらに時間遅延が少ない状態が好まれると予想される。

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）松實洋介君の協力による。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] J. Sodnik, S. Tomazic, R. Grasset, A. Duenser, and M. Billinghurst: “Spatial sound localization in an augmented reality environment,” Proc. OZCHI2006, pp.111-117, 2006.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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 (掲載予定).
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 山之上裕一, 奥井誠人, 岡野文男, 湯山一郎: “2 眼式立体画像における箱庭・書き割り効果の幾何学的考察”, 映情メ誌, Vol. 56, No. 4, pp. 575 - 582, 2002.
- [10] W. Fujisaki, S. Shimojo, M. Kashino, and S. Nishida: “Recalibration of audiovisual simultaneity,” *Nature Neuroscience*, Vol.7, No. 7, pp. 773 - 778, 2004.
- [11] 小宮山撰: “視覚と聴覚による音像知覚”, 日本音響学会誌, Vol. 52, No. 1, pp. 46 - 50, 1996.
- [12] Y. Sugita and Y. Suzuki: “Audiovisual perception: Implicit estimation of sound-arrival time,” *Nature*, Vol. 421, No. 6926, p. 911, 2003.
- [13] 花火情報館, <http://www.hanabi.co.jp/>
- [14] JIS Z8738 “屋外の音の伝搬における空気吸収の計算”, 1999.
- [15] 大川卓哉, 他: “複合現実型立体図鑑・カタログにおけるアイテム提示法に関する考察”, 日本 VR 学会第 9 回大会論文集, pp. 297 - 300, 2004.