

任意の屋内環境での VR 地震シミュレーションにおける 客観・主観的な危険度可視化およびその効果の調査

飯桶 遼輝[†] 鈴木 亮太[‡] 邱 玥[†] 岩田 健司[‡] 佐藤 雄隆[†]

概要：任意空間の地震シミュレーションシステムに基づき、実質的な防災意識の向上を更に高めるための可視化・VR 体験を提案する。地震発生時の任意空間における危険度の分布を三次元ハザードマップとして定量化・可視化し、客観的に危険な部位を俯瞰可能にする。また、危険度の増強を目的とした視覚効果の付与による VR 体験により、ユーザの防災意識の向上を図る。更に、三次元ハザードマップおよび複数のモードの視覚効果の効果を調査するため、ユーザ評価による比較実験を行う。

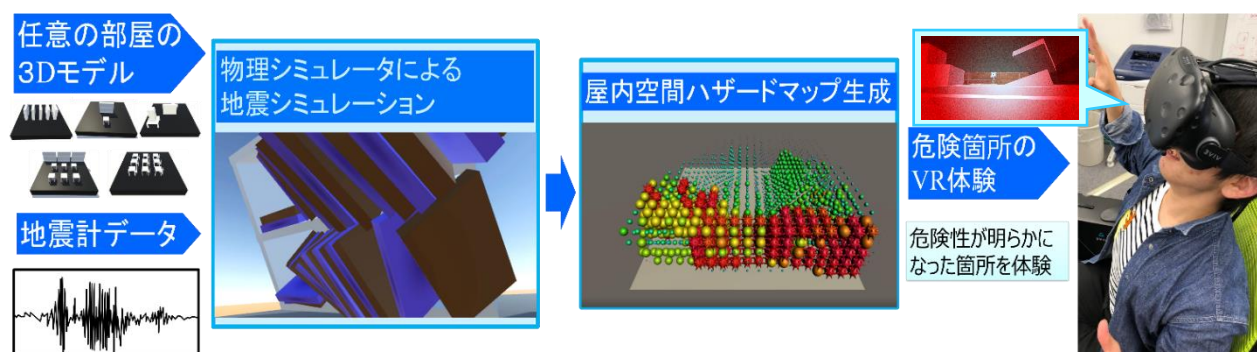


図1 ハザードマップ生成・危険箇所体験システム

1. はじめに

日本は地震が多く、突発的な大震災もしばしば起こることから、地震対策は重要な社会的課題の一つである。2003～2005年に発生した大地震による負傷者の約三割～五割は家具の転倒及び落下が原因であったというデータがある[1]。そのため、地震が起きた時に家具がどのような配置であれば転倒及び落下の危険を減らせるかを、事前に把握し対策できることが望ましい。起震車やVR地震体験[2]といった防災意識向上のためのコンテンツはこれまでに提案されているものの、地震のシミュレーションは一般的に高コストであり、実質的な個人空間における防災意識の向上に資すると思われる個人空間での地震シミュレーションの報告例は少数であった[3]。

これに対し、我々は個人宅のような任意の屋内環境における地震のシミュレーションが容易に実行可能になるVR体験システムを提案した[4]。市販のRGB-Dセンサを組み合わせたセンサシステムにより任意の屋内空間を計測し、SLAMおよび物体認識技術を用いてVR体験を妨げないレベルの内観を提供しつつ物理シミュレーション可能な3Dモデル化を施す。これに対して、地震シミュレーションを

実行、没入型VR体験を行うものである。

本稿では、実質的な防災効果を更に高めることを目的として、任意の屋内環境におけるVR地震シミュレーションの結果を基に、客観・主観的な危険度の可視化・VR体験を提案する(図1)。物理シミュレーションの結果に基づき、地震発生時の個人空間における危険度の分布を三次元ハザードマップとして可視化し、客観的に危険な部位を俯瞰可能にする。また、危険度の体験の拡張を目的とした視覚効果の付与によるVR体験により、ユーザの防災意識の向上を図る。ハザードマップ、視覚効果それぞれにおいて複数のモードを実装し、その効果・性質について比較検討する。

本研究の特徴は、実質的な防災への活用を意識した客観・主観の両面から危険度の可視化を行う点にある。実際の地震対策においては、どの部分に危険性があるのかが定量化され、客観的に俯瞰できることが求められると考えられる。本稿で提案する屋内環境三次元ハザードマップは危険度の把握を容易にすると考える。一方で、客観的に俯瞰しただけでは危険性を体感的に理解することができず、そもそもの防災意識に繋がらない可能性もあるが、本稿で提案する危険度を増強したVR体験により強く防災意識を促せると考える。

[†] 筑波大学

[‡] 産業技術総合研究所

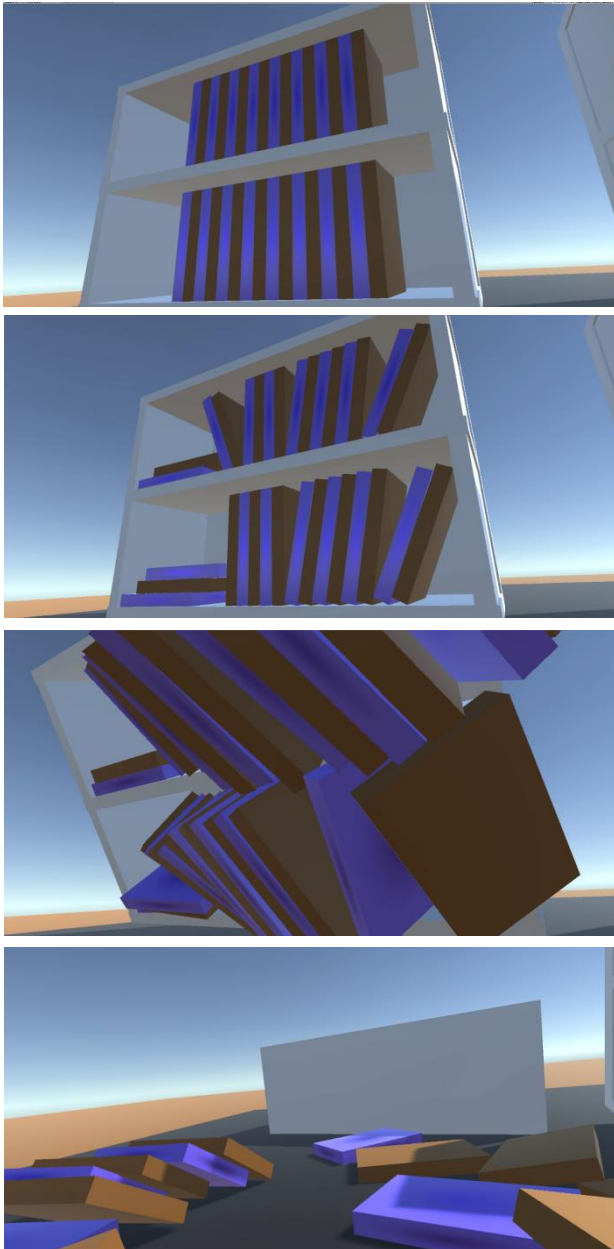


図2 地震シミュレーション例

2. 関連研究

災害シミュレーションにおける 3D 可視化は、洪水・津波について多く報告されている。亀田らは、3D モデルを対応させた AR マーカを配置し、それをカメラから読み取ることによって配置した 3D モデルに対する津波の被害をシミュレーションし可視化している[5]。岩塚らは、津波浸水解析手法に基づき建物および地形形状に適合した非構造格子に写像したうえで、テクスチャマッピング手法や CG 効果を付加することで避難者視点に立った動画へ変換するシステムを提案している[6]。

地震における 3D マップの生成においては、地中における地震動の強さを可視化するという地理学的な研究例が多い。海渡らは、大域的な震源分布の特徴を地域や震度に

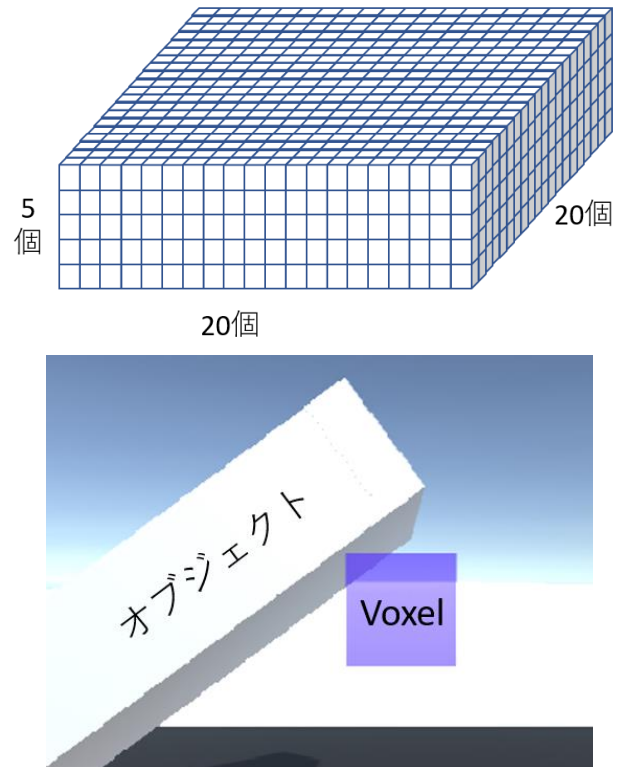


図3 Voxel による空間分割と運動の記録

応じて彩色したものの液晶シャッター式眼鏡による立体視表示における視認性に関する実験を行っている[7]。

本研究では、地震の可視化を彩色により行うだけではなく、可視化により明らかになった危険地点に対して HMD を用いた VR による没入体験を行う。

3. 地震シミュレーション

本研究では、3D 可視化及び物理シミュレーションのプラットフォームとして Unity を用いる。Unity は 3D モデルの取り込み、配置から表示に至るまでの設定が容易であり、また物理シミュレーションを効率的に実行可能な PhysX による物理シミュレーションを導入している。

気象庁は日本各地に設置された加速度計による強震データを公開しており、その加速度データから、加速度計の固有パラメータを考慮した IIR フィルタ[8]により計算可能な変位量を用いる。床であるオブジェクトに対し変位量を逐次設定することで地震による床の振動をシミュレートする。床の上にあるその他オブジェクト（以降、インテリアと呼称）が床の振動を受けて振動、転倒する様子が PhysX によりシミュレートされる。実行例を図 2 に示す。

本研究では、三次元ハザードマップ及び地震の VR 体験における危険感の増強に焦点を置くため、手動で作成した屋内環境を模倣した 3D モデルに対しシミュレーションを行うが、センサ計測による屋内環境 3D モデルの自動生成[4]と組み合わせることが可能である。

4. 三次元ハザードマップ

4.1 危険度分布の算出

部屋のどこが危険であるかを定量化するため、危険度の分布を算出する。まず、計測を行うべき領域を図3上部に示す Voxel で区切る。Voxel のサイズは、人やインテリアの大きさを考慮して適切に定める。本稿では 1 辺 50cm の立方体とする。

物理シミュレーションの実行中、地震により動いたインテリアは逐次 Voxel を通過する。各 Voxel と接触した瞬間（図3下部）に、接触したインテリアの速さ及び質量を Voxel ごとに継続して記録する。シミュレーション終了後、記録された速さ m と質量 v の時系列データから、時刻 T における Voxel i の危険度 $R_T^{(i)}$ を次式に示す運動エネルギーの累加として求める。

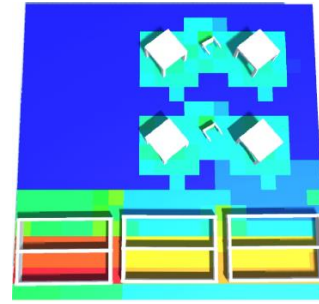
$$R_T^{(i)} = \sum_{t=0}^T \frac{1}{2} m_t^{(i)} v_t^{(i)2}$$

ここで、累加の時間を調整することで、局所的な時間における危険度分布を得ることも可能である。例えば、時刻 T をシミュレーションと同期させることでリアルタイムにその時点までの危険度分布を可視化することができる。また、異なる地震波形における危険度を更に累加することで、地震の種類に依らないインテリアの配置に起因する危険な領域の定量化も行える。

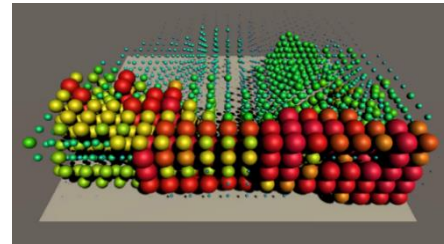
4.2 三次元ハザードマップ可視化

シミュレーションにより得られた Voxel の危険度に基づき、ハザードマップを可視化する。

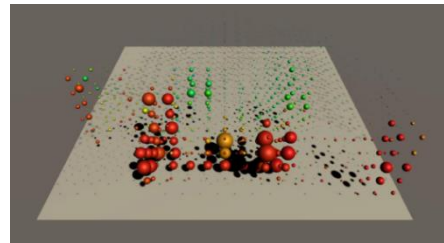
いくつかのモードのハザードマップの作成が可能である。危険度 R に基づき、Voxel 位置に危険度を示すマーカを描画する。本稿では、危険度を表すハザードマップの5つのモードを提案する。図4(a)は、垂直方向に並ぶ Voxel の列を最大値の抽出で縮約し、その値によって対応する位置の床を彩色した 2D ハザードマップである。図4(b)は、危険度に応じて大きさと色を変化させたマーカで表した 3D ハザードマップである。球で表されるマーカの大きさと色相を、複数の地震に対し記録された $R_T^{(i)}$ 全体の中の最大値を基準とし、各 Voxel における $R_T^{(i)}$ を 0 から 1 に正規化した数値に従い描画したものである。1 に近いほど赤く半径を大きく、0 に近いほど青く半径を小さく表示する。図4(c)は、マーカの大きさと色に対しそれぞれに別の意味を持たせるべく、複数の地震に対し記録された $R_T^{(i)}$ の平均をマーカの大きさに、最大値を色に対応付けて可視化したものである。図4(d)は、図4(c)のものとは対照的に、複数の地震に対し記録された $R_T^{(i)}$ の平均をマーカの色に、最大値を大きさに対応付けて描画したものである。図4(e)は、マーカの形状に意味を持たせるべく、 $R_T^{(i)}$ の最大値に近い Voxel のマーカの形状をトゲのある球にしたものである。具体的



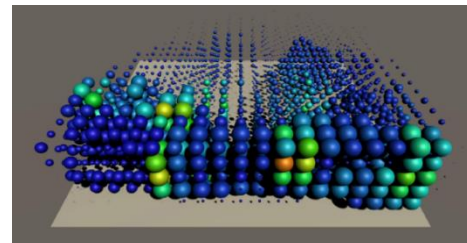
(a) 床に最大値を投影した 2D ハザードマップ



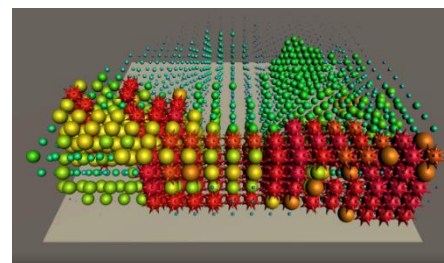
(b) 危険度をマーカの大きさと色相で表したハザードマップ



(c) 地震間データに対し、大きさに平均、色相に最大値を割り当てたハザードマップ



(d) 地震間データに対し、大きさに最大値、色相に平均値を割り当てたハザードマップ



(e) 図(b)に更に危険度が最大級のマーカにトゲを付与したハザードマップ

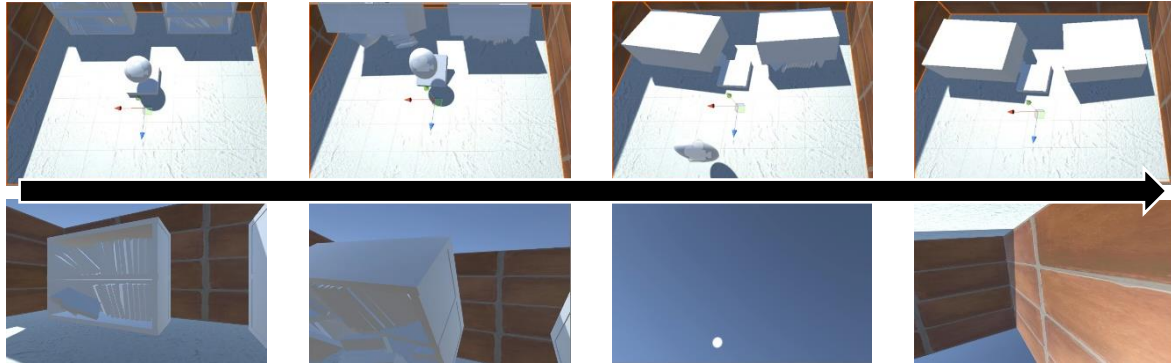
図4 危険度を可視化するハザードマップのモード



(A) 均一な赤色とのブレンディングによる視覚効果



(B) 周辺赤色ブレンディングと Grain ノイズによる視覚効果



(C) 衝撃力の拡大による視点吹き飛びによる視覚効果.

図 5 衝突感・危険感を増大させる視覚効果のプロトタイプ

は, Voxel ごとの $R_T^{(i)}$ が全 Voxel の最大値の 90% 以上である場合にトゲのある球に変更する.

5. 危険感を増強する視覚的 VR 表現

VR 空間に配置されたカメラに対し, 地震の振動を受け移動したインテリアの接触が発生した際, 視覚効果を与えることで危険感を増強し, 実質的な防災意識の向上を図る.

本研究では, どのような視覚効果が危険感を増強させやすいかを調査するため, 3 種類の視覚効果を Unity 上で実装した. 図 5 にそれぞれの視覚効果の動作例を示す.

(A) の効果では, 視界全体が一様に赤く変色する. (B) の効果では, 更に意味のモーダルを付与するという意図で, 一人称視点の 3D ゲームによく用いられる視覚効果を模倣し, 視野の周辺になるにつれて赤く彩色され, またランダムノイズが付与される. (C) の効果では, 視界に効果を掛けるのではなく, 仮想的に設置したカメラオブジェクトに受けた衝撃を拡大させ, 視点が通常以上にのけぞり, また空間を転げ回る. (A), (B), (C) ともにインテリアがカメラを表すオブジェクトに物理的に衝突した瞬間に適用される.

各効果の具体的な処理を次に示す. (A), (B) は Unity の PostProcessing の機能を用いて実装した. (A) は, Vignette 機能を用い, ディスプレイの各画素において純色の赤と画素値を一様にアルファブレンドさせている. (B) は, Vignette 機能を用い, ディスプレイの中心からの距離に応じて透過値を線形減衰させて純色の赤とアルファブレンドする彩色を施し, さらにフィルムカメラのフィルムに発生する Grain

ノイズを模倣する Grain 機能によりノイズを重畳する. (C) は, インテリアが衝突した瞬間に衝突方向の水平方向に 20m/s, 空間の垂直上方向に 1m/s の速度を視線方向を紐づけた球オブジェクトに対して追加で与える.

6. 実験

ハザードマップの有用性や, 視覚的効果がユーザに対して危険感を増大させられたか, 体験を通じて地震に対して危機感を抱かせることができたかを検証するため, ユーザ評価実験を行った. ハザードマップの俯瞰による客観視の効果, および主観的な VR 体験における視覚効果による衝突感および危険感の比較について意見を伺った.

被験者は 23 歳から 29 歳の 7 名の男性であった. また, 体験時に使用したハザードマップのモードは図 4(b) のものを使用した. VR 機器には HTC Vive を用い, あらゆる視線方向の鑑賞ができるようにセットアップした. 計算機は Intel Core i7 CPU, NVIDIA GeForce GTX 1080Ti GPU を使用し, すべての VR 体験はリアルタイムに行える.

6.1 仮説

地震の危機感を感じるのはハザードマップより一人称視点の VR 体験の方が有用であると考える一方で, 地震の対策により有用なのはハザードマップであると考えた.

また, 視覚効果(A), (B), (C) のうち, 衝突の瞬間に外力を加えるため最も(C)が衝突感が高く, (A)と(B)との比較ではより赤く視界が見えづらくなるノイズがある(B)の方が危機感を感じると考えた.

表 1 アンケートの質問文

Q1	ハザードマップは妥当だと思いましたか。
Q2	ハザードマップは、具体的な災害対策に有用だと思いますか。
Q3	一人称での被災体験は、ハザードマップより災害対策に有用だと思いましたか。
Q4	一人称での被災体験は、ハザードマップより危機感を得ることができましたか。
Q5	本体験によって地震が危険だと感じましたか。
Q6	体験 A と B を比較して、どちらがより衝突された感じがしましたか。
Q7	体験 A と B を比較して、どちらがより危険を感じましたか。
Q8	体験 B と C を比較して、どちらがより衝突された感じがしましたか。
Q9	体験 B と C を比較して、どちらがより危険を感じましたか。
Q10	体験 A と C を比較して、どちらがより衝突された感じがしましたか。
Q11	体験 A と C を比較して、どちらがより危険を感じましたか。

表 2 アンケートの回答文。括弧内の記号の順番は質問ごとに対応。

	選択肢 1	選択肢 2	選択肢 3	選択肢 4	選択肢 5	選択肢 6	選択肢 7
Q1~4	全く そう思わない	そう思わない	やや そう思わない	どちらとも いえない	ややそう思う	そう思う	非常に そう思う
Q5~Q11	絶対に(A,B,C)	(A,B,C)	どちらかと いえば(A,B,C)	どちらとも いえない	どちらかと いえば(B,C,A)	(B,C,A)	絶対に(B,C,A)

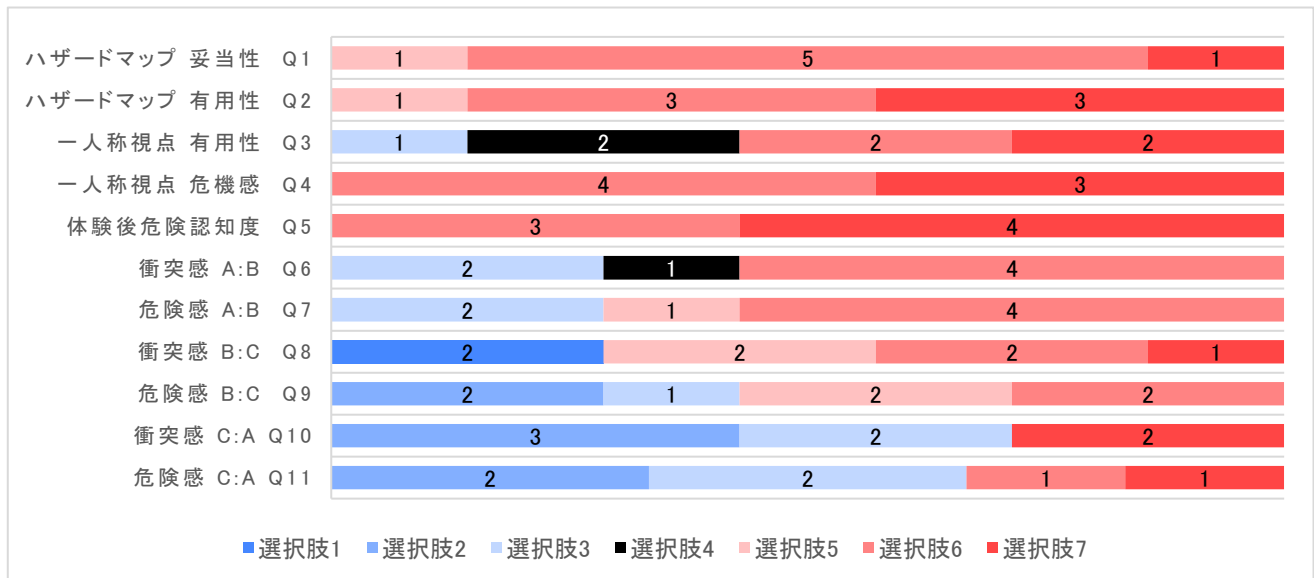


図 6 アンケート結果。バー中の数値は回答数。

6.2 手順

実験中、被験者は以下の手順で体験を行った。

1. 被験者は椅子に座り、HMD を装着する。
2. 被験者は首を下に向け、ハザードマップが重畳された地震シミュレーションの様子を俯瞰する。
3. 被験者は首を正面に向け、4 節に示す視覚効果(A), (B), (C)をそれぞれ体験する。体験の順番は被験者ごとにシャッフルされる。また、視点位置はハザードマップにおける危険度が最大の位置である。
4. 体験後、アンケートに回答する。

アンケートの内容を表 1 に示す。被験者は、それぞれの質問につき表 2 に示す 7 段階評価による回答を行い、さらにその回答の理由を自由筆記により回答する。

6.3 結果

アンケートの各質問における回答の分布を図 6 に示す。ハザードマップの妥当性および有用性に関しては、被験者全員の同意が得られた。また、ハザードマップの俯瞰よりも一人称視点での被害の体験の方が危機感を感じるかについて被験者全員の同意が得られた。

地震の対策により有用なのはハザードマップであるという仮説に対しては否定的な意見が多数であった。回答の理由として、「ハザードマップを見た時より、一人称の体験の方が危険という意識が非常に高まったから。」「実際の視点は一人称なので、より実生活に近く感じるため一人称の方が有用」という意見が得られた。質問2において被験者全員がハザードマップの有用性を認めておりながらこのような意見があったことから、地震を主観的に体感することの効果がより印象的であったと考えられる。また、ハザードマップと一人称視点体験はどちらも有用という話ではなく、合わせて活用することでよりよくなるという意見も頂いた。

視覚効果(A)と(B)の比較では、仮説通り(B)の方がより衝突感・危険感を感じた被験者が多数であった。「画面の色全体が変わるのは、現実味が比較的感じなかった」、「Bの方が、ゲームの表現に近く痛々しく感じたから」という意見があり、より親近感のある見た目がVR体験を阻害せず、また効果の意味に紐づいた感覚の提示に成功していると考えられる。一方で、衝突感が薄れたという回答もあり、「周辺視野にかかるエフェクトは多少インパクトが弱く感じる」「Bは棚の角が自分をぶつかったから、危険な感じがします。Aは棚が自分の体を圧倒しましたが、自分の体が見えないため、現実感がBよりちょっと弱い。」という回答が得られた。この理由として、周辺視野の色を変化させると中心視野のみに注意が集まり、家具と衝突している状況の全体が見えにくくなってしまい、衝突感が薄れたと考えられる。さらに、双方の効果に対し、「衝突した」という気はしなかった。いつの間に視界が変わっていたというイメージ」という否定的な意見も得られた。これに関しては更なる検証が必要であるが、棚の転倒による衝撃ではなく転倒後の地震動による棚の床上でのスライド移動による衝撃の体験がなされた可能性や、インテリアの衝突の瞬間の感覚的衝撃が視界の変化の感覚的衝撃で上書きされてしまった可能性が考えられる。

(A)、(B)に対する(C)の比較では、衝突感、危険感のどの回答においても(C)の方が効果を感じられたという意見が多数であった。「飛ばされた感じがしたため」や「VR内でも十分な加速度を感じたため」といった意見も得られた。一方で、「Cは視界が動きすぎて周りの状況が把握できず何が起きたのか分からず危険の現実味を感じなかった。」という意見があり、衝突の瞬間に視界が大きく動きすぎると状況判断がしづらくなり、衝突したということへの認識が薄れてしまう可能性がある。

本実験の結論として、次の2点が挙げられる。(1)ハザードマップと主観的な体験の併用が防災意識の向上及び防災対策に有効である。(2)視覚効果は、衝突というイベントが発生したという直感的に理解することができるので、衝突感及び危機感を増幅させることができる。同時に、過度な効果は状況把握を妨げ、衝突感及び危機感を減退させる恐れがあるため、状況が理解できるようにする配慮が必要である。

7. おわりに

実質的な防災効果を更に高めることを目的として、任意の屋内環境におけるVR地震シミュレーションの結果をもとに、客観・主観的な危険度の可視化・VR体験を提案した。また、最適な可視化方法の検討のため、複数の可視化のモードを実装し、ユーザ評価実験を行った。その結果、ハザードマップと一人称視点被災体験の両方の提示の有効性、視覚効果による危険感拡張の可能性を確認した。

今後は、どのような視覚的效果がより効果的に衝突感及び危機感を増幅させることができるかを検証していく。

参考文献

- [1] “オフィス家具・電化製品の転倒・落下防止対策に関する調査研究委員会における検討結果”。
<http://www.tfd.metro.tokyo.jp/hp-bousaika/kaguten/okt.html>, (参照 2018-12-21)。
- [2] 中本涼菜, 吉野孝, 今西武. VRを用いた防災教育のための地震体験システムの開発. 情報処理学会関西支部大会. 2016, D-08, 5p.
- [3] 石井裕剛, 半田大樹, 下田宏. 屋内環境の自動モデル化機能を備えたVR地震体験システムの開発と評価. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌. 2016, vol. 21, no. 2, p. 345-357.
- [4] Ryota Suzuki, Ryoki Itoi, Qiu Yue, Kenji Iwata, Yutaka Satoh, “AI-Based VR Earthquake Simulator”. Proc. the 20th International Conference on Human Computer Interaction (HCI International 2018), LNCS, vol. 10910, p. 213-222.
- [5] 亀田知沙, 高橋智幸. “AR技術を活用した津波リスクの可視化手法の開発” 可視化情報学会論文集, 2016, vol. 36, no. 5, p. 32-39.
- [6] 岩塚雄大, 古牧大樹, 西畑剛, 川辺赳史, 檜山和男. “地域防災教育のための3次元津波浸水解析とその可視化に関する研究”. 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 2014, vol. 70, no. 2, p. 152-159.
- [7] 海渡麻美, 渡邊恵美, 中貴俊, 山田邪之, 遠藤守, 宮崎慎也, 長谷川純一. “地震データ解析のための震源分布の3D表示システム”. 芸術科学会論文誌, 2005, vol. 4, no. 2.
- [8] 勝間田明男. “機械式地震計の周波数特性を持つ再帰型デジタルフィルター”. 験震時報, 2008, vol. 71, p. 89-91.