



水害シミュレーションを用いた VR 避難訓練システムの開発と防災意識の向上に関する評価

前田陽光¹⁾, 石原真紀夫²⁾

1) 福岡工業大学 大学院工学研究科 情報工学専攻 (〒 811-0295 福岡県福岡市東区和白東 3-30-1, mfm25112@bene.fit.ac.jp)

2) 福岡工業大学 情報工学部 情報工学科 (〒 811-0295 福岡県福岡市東区和白東 3-30-1, m-ishihara@fit.ac.jp)

概要: 近年、津波や地震などの自然災害が頻発する中、住民一人ひとりの防災意識の向上が重要となっている。本稿では、津波の浸水状況を再現する流体シミュレーションを用いた VR 避難訓練システムを開発した。また、都市環境は自動生成された仮想空間上に構築し、ユーザが災害発生時の避難行動を体験できるよう設計している。避難体験後に実施したアンケートの結果から、本提案システムは防災意識の向上に効果があることが示された。

キーワード: 避難訓練, VR, 防災意識

1. はじめに

地震や津波、豪雨などの自然災害が国内外問わず増加し、多くの地域で人的被害が深刻化している。2024 年の能登半島地震では最大震度 7 を観測し、津波が日本海沿岸の広範囲を襲い、甚大な被害をもたらした [1]。このような状況を踏まえ、住民一人ひとりの防災意識の向上と適切な避難を行うことが求められている。近年、人的被害を軽減するため Virtual Reality (以下、VR) を利用した災害体験シミュレーションが開発・研究されている。松下ら [2] は避難体験に基づく防災意識の向上のための VR アプリケーションの開発を行い、体験者の避難行動の評価を行った。しかし、防災意識の向上を目的とした研究事例は特定の地形を利用していることが多く、訓練がマンネリ化している可能性がある。

そこで本研究では、自動生成された都市の仮想空間と VR を利用し、波の到達時間や範囲を考慮した津波を想定して訓練を行う。さらに、訓練後のアンケート結果から本提案システムによって防災意識が実際に向上しているかどうかを評価する。また、システム体験者の行動軌跡を分析し、傾向や特徴について考察を行う。

2. 関連研究

2.1 防災知識の向上に関する研究

津波の被害を軽減する方法として、防波堤を設置するなどの対策がある。しかし、防波堤などのハードウェア対策による被害軽減には限界があり、防災意識の向上が求められている。また、現実での避難訓練は災害発生時の緊迫感を再現することができない。そこで、松下ら [2] は災害時の避難行動を仮想空間上で体験可能とする Disaster Experience VR App(DeVA) を開発した。このシステムは、地震、津波、火災など複数の災害シナリオをランダムに発生させることで、より現実的かつ印象に残る防災教育を目指している。システム体験者は仮想空間内を自由に移動できるほか、NPC(Non-Player Character) の行動を通じて、同調性バイ

アスの影響を受ける構成となっている。ここで、同調性バイアスとは自身の知識や意見よりも、集団の意見や行動を優先する傾向のことである [3]。周囲の地形について知らない条件下で、防災意識の向上が確認された。また、同調性バイアスによって NPC は体験者の行動に影響を及ぼす可能性があることが分かった。

2.2 NPC の人数や行動が VR 訓練の体験者に与える影響

近年、VR を用いたシミュレーションや疑似災害体験が注目を集めているが、他者の行動への同調に関する研究例は少ない。そこで、松村ら [4] は、VR 空間における防災訓練において、避難行動を共にする NPC の人数や行動がユーザの心理や意思決定に与える影響を検証している。特に、適切な避難行動をとる NPC が多い場合、体験者の避難成功率が高まることが示されており、VR 訓練環境における集団的影響の重要性が示唆されている。

3. 避難訓練システム

3.1 システム概要

本システムは、体験者が都市部で津波に遭遇する場面を想定している (災害シナリオ)。表 1 に利用した機材と開発環境を示す。なお、使用したヘッドマウントディスプレイ (HMD) は Meta Quest 3 である。また、特定の地形を利用することによる訓練のマンネリ化を防ぐため、Unity の Assets である Fantastic City Generator を用いて都市を自動生成した。仮想空間内の体験者の視点の高さは 1.5m に固定し、歩いた時の移動速度は約 4km/h、走った時の移動速度は約 8km/h とする。図 1 に都市の全体、図 2 に体験者視点の都市の様子を示す。都市の大きさは横 800m × 縦 500m である。図 1 の右端に図 3 の様な水源を設置し、指定時間が経過すると水が流れる。体験者の初期位置は図 1 の右端の道路からランダムに決定し、複数ある避難地点の建物の一つに辿り着くと避難完了となる。非常口マークの描画された立方体下の建物を避難地点に設定した。

表 1: 利用した機材の仕様

PC	CPU	Intel Core i7-14700 2.10GHz
	メモリ	32.0GB
	GPU	NVIDIA GeForce RTX 4060 Ti
	GPU メモリ	8.0GB
	OS	MS Windows 11 Home 24H2
HMD	ディスプレイ 解像度	片目当たり: 2064 × 2208 Pixel
	視野角	110 度
	リフレッシュ レート	72Hz, 80Hz, 90Hz, 120Hz
	搭載センサ	ワイヤレスインサイド SLAM トラッキング
	本体重量	515g
開発環境	Unity 2022.3.30f1	



図 1: 都市の全体図



図 2: 体験者視点の街の様子

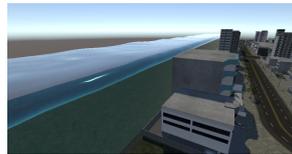


図 3: 津波の発生地点

3.2 水害シミュレーション

水害シミュレーションとは、水の流れを流体力学に基づいて、離散化手法の一つである粒子法を用いてシミュレーションすることである。粒子法はさらに SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics) と MPS 法 (Moving Particle Semi-implicit) に分類できる。

SPH 法は、流体を粒子の集合として扱い、各粒子に密度や圧力などの物理量を割り当て、それらを滑らかに補間してシミュレーションする。精度は落ちるが計算コストが低く、GPU での並列化処理に適しており、アプリケーションの用途に用いられる。MPS 法は、物理量を直接補間せず、離散化した微分方程式に基づいてシミュレーションする。精度が高く計算コストが高いため、高精度が求められる解析の用途に用いられる。本システムでは、津波を再現するため Zibra Effects を利用した。Zibra Effects は AI を利用してリアルタイムで流体をシミュレーションし、リアルな流体の挙動や障害物と水との衝突を再現することが可能な Unity の Assets である。本研究はアプリケーションとして開発を行うため、使う手法は SPH 法である。

3.3 避難地点と避難完了条件

本システムでは、図 1 の非常口マークが描画された立方体下の建物を避難地点に設定している。避難地点の一つは



図 4: Meta Quest Touch Plus コントローラ

オフィスビル、もう一つは公民館を想定している。体験者は現在の状況を把握した上で、初期地点から近く高所にあるオフィスビルと、水辺から離れているが低地に位置する公民館のいずれがより安全かを選択することになる。通常は高所にあるオフィスビルが選ばれるが、水から遠く、浸水までの時間に余裕がある状況に多数の避難者を受け入れ可能な広さを持つ公民館が選択される可能性もある。

本システムの避難完了条件は、避難地点どちらかの建物内にある看板の前まで移動することであり、避難失敗 (被災した場合) の条件は、流れてくる水に体験者が触れることである。

3.4 操作方法

体験者は、図 4 に示す Meta Quest のコントローラで以下の操作が可能となる。また、実際に避難している時の様な恐怖感を演出するため、津波警報が HMD から流れる。

左コントローラ

- アナログスティックで移動
- トリガーボタン長押しで走る

右コントローラ

- アナログスティックで視点の移動 (左右のみ)
- A ボタンを押す度に音量が小さくなる
- 避難地点のドア前で B ボタンを押すと建物の中へ入る

4. 実験

4.1 目的

津波からの避難を想定した本訓練システムの有用性と防災意識への効果を状況把握、緊迫感、現実感、操作感、没入感、酔い、防災意識、安心感、自信の 9 つの観点から明らかにすることである。

4.2 方法

体験者は、21~26 歳の学生 20 名 (男性 20 名) を対象とし、体験者には避難訓練の前に「地震が発生し、津波が来るので避難行動をとってください」と伝え、2 回体験してもらった。避難中の危機感を演出するため、波の到達時間と波の速度を 1 回目は早く、2 回目は遅い条件とした (表 2)。なお、表 2 に示す条件は体験者に伝えていない。

表 2: 実験条件

	波の到達時間 [s]	波の速度 [m/s]
1 回目	30	80
2 回目	120	30

表 3: アンケートの質問内容

状況把握	Q1	避難地点や障害物などの状況を的確に把握できましたか.
	Q2	どの避難経路を選択すべきかを明確に判断できましたか.
	Q3	避難場所の表示は十分に足りていましたか.
緊迫感	Q4	訓練中, 実際の避難をしているような張り詰めた空気を感じましたか.
	Q5	システムが危機的状況をリアルに再現できていると感じましたか.
現実感	Q6	訓練中, 実際に歩いているように感じましたか.
操作感	Q7	方向転換や進行方向の調整はスムーズに行えましたか.
	Q8	VR 空間内での操作は直感的で使いやすかったですか.
	Q9	操作に困難を感じることはありませんでしたか.
没入感	Q10	VR 空間のグラフィックや音声に引き込まれるように感じましたか.
酔い	Q11	実験の途中で気分が悪くなったりしましたか.
防災意識	Q12	訓練を継続したいと思いましたか.
	Q13	自宅近所の海拔高度や避難所について把握しておきたいと感じましたか.
	Q14	訓練を受けたことで, 防災意識が高まったと感じましたか.
	Q15	実際の避難方法や防災知識をもっと学びたいと思いましたか.
安心感	Q16	避難を無事に完了できたという安心感を得られましたか.
自信	Q17	訓練後, 実際の災害時にも適切に避難できると感じましたか.

実験の手順を以下に示す。また、アンケートの評価項目は全 17 項目で、最後にシステムに関する意見（自由記述）の欄を設けている。質問項目は状況把握、緊迫感、現実感、操作感、没入感、酔い、防災意識、安心感、自信に関する質問で、リッカート尺度による 5 段階評価（1：全く当てはまらない～5：とても当てはまる）とする（表 3）。

1. 操作方法の資料を渡し、操作方法を理解してもらう。
2. HMD を装着し、1 回目の避難訓練を行う。
3. HMD を外し、5 分間休憩する。
4. HMD を装着し、2 回目の避難訓練を行う。
5. HMD を外し、システムの評価に関するアンケートに回答してもらう。

5. 結果と検定

5.1 アンケート結果

本システムの体験者 20 人のアンケート結果を図 5 に示す。図 5 のグラフは項目毎の平均値である。また、質問とアンケート結果の項目の対応について、Q1～Q3 が状況把握、Q4, Q5 が緊迫感、Q6 が現実感、Q7～Q9 が操作感、Q10 が没入感、Q11 が酔い、Q12～Q15 が防災意識、Q16 が安心感、Q17 が自信である。

状況把握の項目では平均値が中央値の 3 に寄った結果となっており、3 の「どちらともいえない」評価が多かったことを示している。緊迫感や現実感の項目では 5 の「とても当てはまる」に寄った結果となっており、多くの体験者から高い評価を受けていることがわかる。操作感の項目では同じく 5 に寄った結果となった。また、Q9 から操作に困難を感じる人は少なかった。没入感の項目でも同じく 5 に寄った結果となった。酔いの項目では、結果から VR 酔いを起

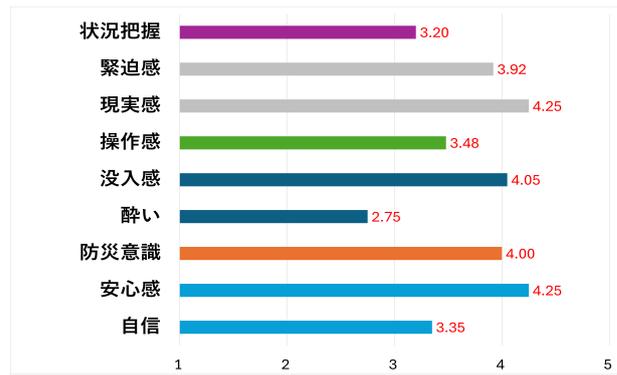


図 5: アンケート結果

している人がいたことがわかる。防災意識の項目でも 5 に寄った結果となった。安心感の項目では 5 に寄っており高い評価を得られた。しかし、自信の項目では 3 に寄っており、実際の災害時に活用できると感じた人は少なかった。

アンケートの各項目毎に、Wilcoxon の符号付順位検定を用いた中央値の検定を行った。検定結果を表 4 に示す。多くの項目で有意水準 1 % で有意差が認められた。これは、中央値の 3 より有意に高い肯定的な傾向を示しており、システムと訓練内容が効果的に機能していることが示唆される。

5.2 体験者の行動軌跡

システム体験中、都市を移動中の体験者 20 人に対して、0.5 秒毎に位置の記録を行った。1 回目の避難訓練の行動軌跡を図 6 に、2 回目の避難訓練の行動軌跡を図 7 に示す。なお、図中の x 軸（範囲:-400～400）が都市の横の大きさ 800m、z 軸（範囲:-250～250）が都市の縦の大きさ 500m と対応している。図 6 と図 7 で同一の色は同一の体験者を表し、緑の立方体がある位置が避難地点である。

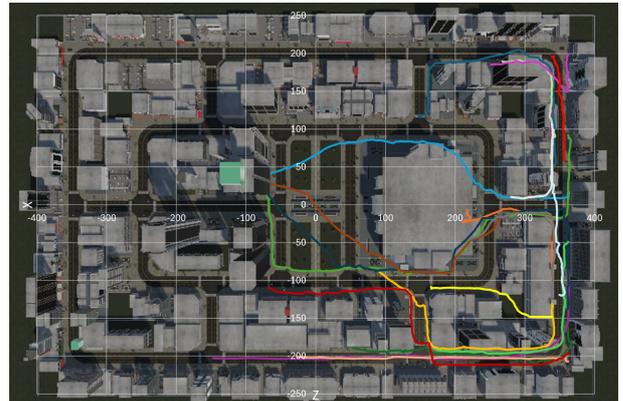


図 6: 1 回目の避難訓練の行動軌跡



図 7: 2 回目の避難訓練の行動軌跡

表 4: 検定結果

質問	平均値	有意水準
状況把握	3.20	有意差なし
緊迫感	3.92	$T(n = 20) = 5.5, p < .01$
現実感	4.25	$T(n = 20) = 0.0, p < .01$
操作感	3.48	$T(n = 20) = 22.0, p < .01$
没入感	4.05	$T(n = 20) = 0.0, p < .01$
酔い	2.75	有意差なし
防災意識	4.00	$T(n = 20) = 26.0, p < .05$
安心感	4.25	$T(n = 20) = 0.0, p < .01$
自信	3.35	有意差なし

6. 考察

6.1 状況把握

状況把握では、有意差が認められなかった。システムに関する意見（自由記述）によると、体験者からは「避難場所がわかりづらい」との意見が多く、避難地点の表示が適切ではなかったと考えられる。避難地点の表示方法の改善が必要と推測される。

6.2 緊迫・現実感

緊迫感と現実感に有意差が認められた。緊迫感の項目に有意差が認められたことは、本システムが差し迫った感覚や現実世界にいるような感覚を体験者に与えることができたことを示唆している。中央値の3を選択した人が少ない結果となったことから、本システムは体験者に対してあたかも現実にいるかのような感覚を与えることができたと考えられる。「想像以上にリアルだった」との意見もあり、緊迫感や現実感を仮想空間内で演出できたといえる。

6.3 操作感

操作感では、有意差が認められた。本システムの操作設計には問題がなく使いやすいシステムであったといえる。システム設計当初、HMD着用中はコントローラが見えないので操作感に影響が出ると考えていたが、Q9の結果から操作に困難を感じている人は少なく、仮想空間内のコントローラの視認は操作感に影響が小さかった。これは、コントローラの視認がなくても操作が可能な単純なタスクであったこと、また利用者が操作に慣れていたため、視覚的な確認を必要としなかったことが要因であると考えられる。

6.4 没入感・酔い

没入感の項目では有意差が認められた。これは、「水が近づいてくる感じがリアルに感じた」との意見から、仮想空間内の高いグラフィックや音声が体験者に没入感を与えたと考えられる。酔いの項目では有意差が認められなかった。これは、「実験中、少し気分が悪くなった」との意見から、全体としては大きな不快感は生じなかったものの、個人差により軽度のVR酔いを起こした体験者がいたと考えられる。

6.5 防災意識

防災意識では有意差が認められた。平均値は限りなく5に近いとはいえないので、本システムはある程度の防災意識の向上が図れたといえる範囲に限る。このような結果となった原因として、VR酔いを起こした人が不快感を覚え、

1（全く当てはまらない）や2（あまり当てはまらない）を選択したのではないかと推測できる。

6.6 安心感・自信

安心感に関しては有意差が認められた。避難訓練の1回目と2回目で津波の到達時間と波の速度のパラメータを変更した効果が結果に表れているといえる。自信に関しては、有意差が認められなかった。訓練を受けることで実際の災害時に活用・応用できると感じた人は少なかった。状況把握に関する項目で有意差が認められなかったことから、適切に避難できると感じた人が少なかったと推察される。

6.7 体験者の行動軌跡

本実験では、参加者は事前知識のない都市空間において災害状況を体験したため、避難経路や周囲の状況に関する情報が乏しく、移動に際して不確実性を抱えながら判断を下す必要があった。実際に観察された行動軌跡からは、進行方向を途中で変更したり、経路を引き返したりする様子が確認され、これは避難先までの道筋が明確でない中で、「この道で正しいのか」という判断の揺らぎや迷いが行動として表出したものであると解釈できる。このようなふるまいは、初めての環境において周囲の状況把握に時間を要すること、および避難判断に対する確信が持てないことを反映していると考えられる。一方で、2回目の訓練では、同様の地形に対する経験を得た状態で再度避難を行っており、初回に比べて到達者数が増加し、折り返しや迷いの行動も減少する傾向が見られた。よって、経験の蓄積が避難行動の判断に影響を与えると考えられる。加えて、事前知識のない都市空間で、どのような防災訓練が、初見での被災行動に効果的な影響を及ぼすのかは引き続き検討が必要である。

7. まとめ

本研究では、水害シミュレーションを用いたVR避難訓練システムの開発と防災意識に関する評価を行った。防災意識を向上させることはできたが、避難場所の表示が不十分であったため、今後は避難場所の表示方法を改善する必要がある。

参考文献

- [1] 国土交通省, 令和6年能登半島地震における被害と対応 (令和7年1月), <https://www.mlit.go.jp/common/001864443.pdf>, Jan, 2025.
- [2] 松下智晴, 菊池晶陽, 大井翔, 後藤壮史, 佐野睦夫: DeVA: VRを用いた防災知識向上のための避難訓練アプリケーションの開発, インタラクシオン2021論文集, pp. 307-312, 2021.
- [3] 山下駿野, 入舟広大, 畑中健志, 和佐泰明, 平田研二, 内田健康: 同調バイアスを有する集団避難行動のモデル化と受動性に基づくナッジ設計, 計測自動制御学会論文集, Vol. 58, No. 3, pp. 120-128, 2022.
- [4] 松村直季, 杉原健輔, 米澤朋子: VR防災訓練におけるエージェントの人数や行動の影響, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, pp. 41-46, 2023.