

VR 避難訓練の振り返りにおける視線可視化とその効果 Gaze Visualization in VR-based Evacuation Training and its Effects

伊井千尋[†]
Chihiro Ii

市野有朔[†]
Yusaku Ichino

光原弘幸[‡]
Hiroyuki Mitsuvara

1. はじめに

災害から命を守る防災教育として、地域や学校などで定期的に実施される避難訓練がもっとも身近といえる。しかし、従来の避難訓練では、安全性を確保するといった理由から、災害状況を忠実に再現できていない。例えば、火災避難訓練において、実際に火災を発生させることはできない。また、避難経路が予め定められており、参加者がその経路を辿ることしかできない訓練も多い。言い換えれば、避難訓練中の緊迫感が低く、参加者が自主的に判断・行動する場面も少ない。従来の避難訓練は災害の自分ごと化につながりにくく、マンネリズムにも陥りやすいといえる。これらの課題を解決するための有望なアプローチとして、VR(Virtual Reality)を活用した避難訓練があげられる。

VR 避難訓練はこれまでに多く開発されている。例えば、洪水からの避難訓練に非没入型 VR を活用することで、参加者の自己効力感と安全知識が向上したとの報告がある^[1]。また、参加者が HMD(Head Mounted Display)を通じて仮想的な火災を見ながら現実の建物内を移動して避難できるモバイル VR 避難訓練もある^[2]。本研究では VR の発展系であるメタバースに着目した避難訓練システムを開発している^[3]。このシステムは、訓練後に参加者が単独で自身の避難を振り返ることができるようにしており、その支援として、訓練中に記録した避難行動を 3 次元空間にリプレイ再生する^[4]。本研究では現在、この振り返り支援の拡充として、リプレイ再生時に訓練中の参加者の視線を可視化する機能を実装している。

本稿では以降、理想的な避難訓練を概説し、視線可視化機能の実装とその実験的評価について述べる。

2. 理想的な避難訓練

実際の避難において、時間や周辺環境に伴って変化する災害状況に対して、避難者(避難場所に向かっている人)は難しい判断・行動を迫られることがあるが、その判断・行動が適切かどうかは一概に評価できない。例えば、津波発生時、高齢者のいる自宅に戻って一緒に避難することは、津波到達までの時間的猶予があれば、適切といえるかもしれない。このような評価の難しさは避難訓練においても同様であり、訓練参加者の判断・行動の適否を定め、その割合などから訓練効果を示すことは難しい。

2.1 避難訓練の効果

本研究では、避難訓練に繰り返し参加することで参加者の“判断を下すまでの速さ”や“判断に対する自信”を高

[†] 徳島大学大学院創成科学研究科 Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Tokushima University

[‡] 徳島大学大学院社会産業理工学研究部 Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University

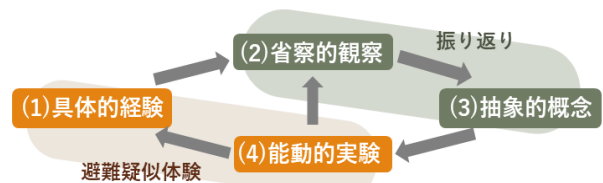


図 1 避難訓練モデル

められると考えている。“判断に対する自信”は自己効力感(Self-efficacy)と言い換えられ、これが高いほど実際に行動に移せるようになるといわれている^[5]。つまり、避難訓練に繰り返し参加した参加者は実際の避難において、自信をもって素早く判断・行動できるようになると期待される。

元吉^[6]は、自己効力感を防災の分野に適用し、「災害発生時にどの程度適切な行動を取ることができるか、また災害を生き抜くことができると思うか」ということに対する自信を“災害自己効力感”と定義した。災害自己効力感が高いと、防災行動に関する主観的規範や防災行動意図が高く、実際に防災行動を実施する傾向にあるとわかっている。また、災害自己効力感、災害時に自分自身の力によって対応できるという効力感の“自己対応能力”と、周囲の人を頼りにして災害を乗り越えることができるという“対人資源活用力”の二因子から構成されている。

本研究では、災害自己効力感のうち自己対応能力の向上に焦点を当てる。

2.2 避難訓練モデル

本研究では、Kolb の経験学習モデル^[7]に基づく避難訓練モデルを採用している(図 1)。このモデルは、(1)具体的経験と(4)能動的実験に該当する“避難疑似体験”と、(2)省察的観察と(3)抽象的概念化に該当する“振り返り”のフェーズから構成される。具体的には、(1)困難な状況を伴う避難を疑似体験し、(2)自身の避難を振り返って、避難の失敗要因といった気づきを得たうえで、(3)避難に関する自己ルールを形成し、(4)自己ルールを同一または類似の避難疑似体験に適用する。例えば、地震避難訓練において、狭い避難経路が家屋倒壊で通行できず時間をロスしたという失敗を踏まえ、「遠回りでも広い経路を通して逃げる」という自己ルールが形成される。このような循環を通じた避難疑似体験と振り返りの繰り返しにより、さまざまな災害状況に対する判断の蓄積から、自己ルールが更新・洗練され確固たるものとなる。これは自己対応能力の向上に該当する。実際の災害において、避難者は確固たる自己ルールに基づいて自信をもって素早く判断・行動できることが期待される。

3. 視線可視化機能

本研究で実装する視線可視化機能は、先行研究の振り返り支援の拡充に位置づけられる。ユーザ(避難者)は避難

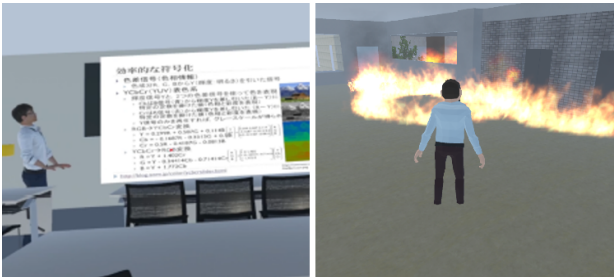


図2 Tokudiverseのスクリーンショット
(左：通常モード、右：振り返りモード(三人称視点))

疑似体験中に動揺している可能性もあり、記憶を頼りに避難行動を振り返ることは難しい。よって、振り返り支援が必要となる。

3.1 先行研究

先行研究であるTokudiverseは、徳島大学工学部キャンパスを3次元仮想空間化した、多人数同時参加可能なメタバース型のVR避難訓練システムである^[3]。“通常”、“緊急”、“振り返り”のモードがあり、通常モードでは一人称で現実世界のように他ユーザと交流したり、授業を受講したりすることができる(図2左)。通常モード中に特定の条件を満たすと、3次元仮想空間内で地震が発生し、緊急モードに遷移する。このように不意打ちで避難訓練が始まるが、避難するかどうかはユーザの判断を委ねられる。緊急モードでは火災や煙といったオブジェクトがシナリオに基づいて配置され、予め設定された避難場所にユーザが到着するか、一定時間が経過すると通常モードに遷移する。

3.1.1 振り返りモード

ユーザは任意のタイミングで振り返りモードに遷移できる。振り返りモードでは、緊急モードにおけるユーザの移動経路と方向をログから再現する形で、避難行動をリプレイ再生する^[4]。再生、一時停止、巻き戻し、一人称/三人称(図2右)の視点切り替えが可能である。過去にプレイした他ユーザの避難行動はNPC(Non Player Character)に反映される。

3.1.2 問題点

避難行動のリプレイ再生は、避難経路を想起させ振り返らせる効果は期待できるが、ユーザの視界が再現される一人称視点であっても、ユーザが視界内の何を見ていたかまでは示せていない。つまり、現在のリプレイ再生は気づきにつながる振り返り支援として十分ではない。この問題点を解決するには、ユーザの視線をログとして取得し、避難行動のリプレイ再生時に視線を可視化する必要がある。例えば、視線可視化により、火災が広がっているフロアでユーザが炎ばかり見ていたことを示せれば、「吸い込むと危険な煙は見ていなかった」「素早く非常口を探すべきだった」などの気づきにつながると期待される。

3.2 視線可視化手法

視線は人間の認知行動において重要な要素であり、鉄道運転訓練^[8]や授業改善^[9]を目的とした振り返りに活用されている。また、防災分野でも活用されており、大学キャンパスVRを対象として、視線から避難経路探索行動^[10]や非常口のデザインと避難者の出口選択の関係について検証した研究^[11]が存在する。

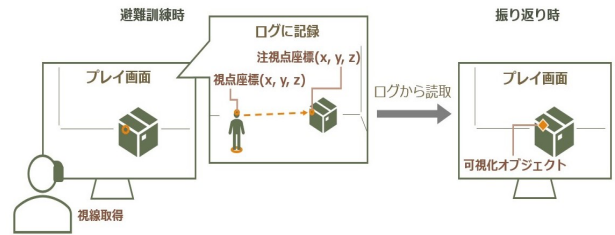


図3 可視化システムの概要

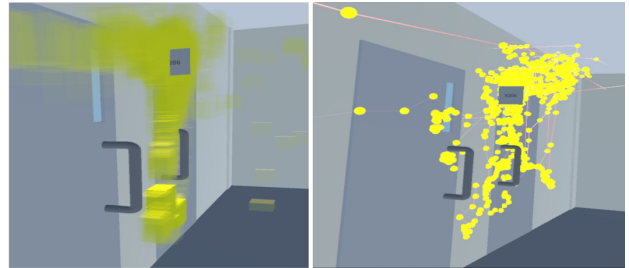


図4 累積に焦点を当てた視線可視化
(左：ヒートマップ、右：点群と線)

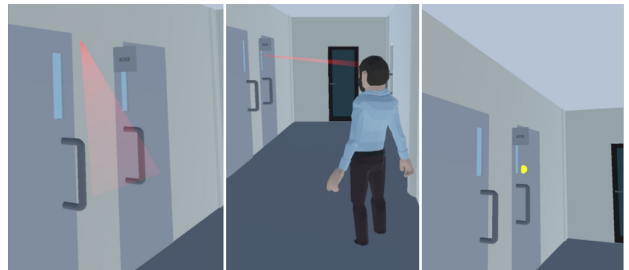


図5 遷移に焦点を当てた視線可視化
(左：ビーム(一人称視点)、
中央：ビーム(三人称視点)、右：ポインタ)

3.2.1 実装の概要

Tokudiverseに視線の記録・リプレイ再生機能を追加実装した。本機能は緊急モードにおける視線取得のために、アイトラッキング機能を搭載したHMDであるVIVE Pro Eyeの使用を前提としている。ユーザは振り返りモードにおいて、一般的なモニタ上で避難行動をリプレイ再生できる。

視線データは緊急モードにおいてフレームごとに記録されるログに、視点座標(ユーザアバタの目の位置に配置されたカメラの3次元位置座標)、視線ベクトルとオブジェクトとの衝突点である注視点座標を追記する形で記録される。振り返りモードでは、このログに基づいて3次元オブジェクトを配置または移動することで視線を可視化する(図3)。現在までに、視線の累積(積み重ね)と視線の遷移(移動)に焦点を当て、可視化を実装した。

3.2.2 視線の累積に焦点を当てた可視化

避難開始から現在(リプレイ再生経過時間)までのすべての視線を可視化する。

- **ヒートマップ(図4左)**：注視点座標に半透明の立方体オブジェクトを配置して可視化する。同じ箇所を注視するほどオブジェクトが重なり、色が濃くなるように見えていく。
- **点群と線(図4右)**：注視点座標に球体オブジェクトを配置し、それらをラインで時系列に数珠繋ぎにして可視化する。

3.2.3 視線の遷移に焦点を当てた可視化

現在 (リプレイ再生時刻) の視線を可視化し、リアルタイムで追従させる。

- **ビーム (図 5 左、中央)** : 現在の視点座標と注視点座標をラインで結んで可視化する。
- **ポインタ (図 5 右)** : 現在の視点座標に球体オブジェクトを移動させて可視化する。

4. 実験的評価

視線可視化の有無および可視化手法の違いが振り返りにどのような影響を及ぼすのかを調査するために比較実験を行った。本実験では、振り返りにおいて被験者が一人称/三人称視点を切り替え可能なことを考慮しながら、注視箇所とその頻度が分かり易いヒートマップと、三人称視点における視線が分かり易いビームを調査対象とした。

4.1 実験設定

被験者である徳島大学生 9 名を、事前アンケートの「VR 経験」「被災経験」の回答に偏りが無いよう、以下の 3 グループに分割した。

- **グループ A (被験者 A1~A3)** : ヒートマップによる視線可視化で避難行動を振り返る
- **グループ B (被験者 B1~B3)** : ビームによる視線可視化で避難行動を振り返る
- **グループ C (被験者 C1~C3)** : 視線可視化なしで避難行動を振り返る (先行研究の振り返り支援)

被験者は VIVE Pro Eye を装着し、Tokudiverse で避難を疑似体験した。避難疑似体験は、地震発生後に講義棟 6 階 (最上階) から 1 階の出口へ避難する内容となっており、被験者が避難中に火災や煙、瓦礫、負傷者に遭遇するよう設計した。避難の仕方や経路は指示せず、被験者が 1 階の出口から屋外に避難した時点で避難完了とした。

被験者は避難疑似体験の直後、操作方法の説明と自由に避難行動を振り返るよう指示を受け、42 インチの液晶モニタ上で自身の避難行動を振り返った。被験者が十分に振り返りできたと判断した時点で振り返り完了とし、事後アンケートに回答してもらった。

4.2 結果と考察

振り返りの効果は、避難に関する自己ルールを形成・洗練し確固たるものにできたかどうかで評価すべきである。しかし、本実験では単発の避難訓練が対象であったことから、一度の避難行動の振り返り (省察的観察) で気づきを得られたかどうかに着目し、主にアンケート結果から評価した。

4.2.1 注視箇所

振り返り時の注視箇所を尋ねた事後アンケート Q1「振り返りを行う際、どのような点に注目していましたか (選択式・複数回答可)」の選択肢ごとの回答者数を表 1 に示す。被験者全員が回答した「自身の行動」は視線可視化の有無に関わらず、振り返りでもっとも重視される要素であることがわかった。「自分の視線」「周囲の状況」「移動経路」についても各グループに回答者がいたことから、振り返りで重視される要素だといえる。これらの回答者数から、被験者は大局的に避難行動を振り返ったと考えられる。その他、グループ A の全員が火災を注視したことは、危険

表 1 事後アンケート Q1 の回答結果

選択肢	グループ A 回答者数	グループ B 回答者数	グループ C 回答者数
自身の行動	3 名	3 名	3 名
自身の視線	2 名	2 名	2 名
周囲の状況	2 名	2 名	3 名
移動経路	1 名	2 名	2 名
出口選択	-	-	-
重篤負傷者	-	-	-
重症負傷者	-	-	1 名
車椅子の人	-	-	-
火災	3 名	1 名	1 名
煙	-	-	1 名
瓦礫	-	1 名	1 名

表 2 事後アンケート Q2~Q4 の回答結果

設問番号	グループ A 回答数	グループ B 回答数	グループ C 回答数
Q2	4 個 (2 個)	2 個 (1 個)	2 個 (0 個)
Q3	4 個 (3 個)	2 個 (1 個)	2 個 (1 個)
Q4	2 個 (0 個)	2 個 (0 個)	1 個 (1 個)
合計	10 個 (5 個)	6 個 (2 個)	5 個 (2 個)

括弧内の数字は注視箇所に言及している回答数

表 3 事後アンケート Q5~Q7 の回答結果

設問番号	グループ A 回答平均値	グループ B 回答平均値	グループ C 回答平均値
Q5	3.00 (2.00)	3.67 (1.53)	3.33 (1.15)
Q6	3.67 (1.53)	3.33 (1.53)	2.70 (1.53)
Q7	4.00 (1.00)	3.33 (0.58)	4.00 (1.00)

括弧内の数字は標準偏差

箇所への注視がヒートマップ (累積) で強調して可視化されたことで、危険性を再認識した結果かもしれない。グループ C はグループ A と B よりもさまざまな要素を注視しているが、これらはすべて被験者 C3 の回答であるため、被験者の個人差が現れた結果といえる。ただし、視線可視化によって、さまざまな箇所を注視するに至らず、振り返りの対象が限定される可能性は否定できない。

4.2.2 気づき

振り返りの成果を尋ねた自由記述式の Q2「振り返りを通じて気付いたことをすべて書き出してください」、Q3「振り返りを通じて発見した自分の行動の傾向や癖をすべて書き出してください」、Q4「振り返りを通じて思いついた、より良い避難するためのアイデアをすべて書き出してください」に対する回答数を表 2 に示す。Q2 では直接的に気づきを尋ね、Q3 と Q4 では自己ルールの形成につながることを意図して間接的に気づきを尋ねた。Q2~Q4 の合計回答数についてグループ A が他グループよりも多く、Q2 と Q3 については他グループの倍の回答数であった。「〇〇を見ていた」など注視箇所に言及された回答についても、グループ A がもっとも多かった。具体的な回答内容を以下に示す。

- Q2 (気づいたこと)

A3. 何か起きている場所をよく見ていた。

A3. 人がいたらそこに目が行っていた。

B1. 人に視線がよって周囲の状況の把握が遅かった

● Q3 (自分の行動の傾向や癖)

A1. 最初の方は状況確認のために、不必要な場所まで見て回っている。

A2. 周りを助けるより自分の避難ルートの確保第一で避難するつもりでいたが、教室や他の人などの状態を見にいこうとしてる節があった。

A3. 角で進行方向以外を覗く癖があった。

B2. 負傷者は目に入ったが助けようとしなかった。

C3. あまり周囲を見渡せていないと感じた。

● Q4 (より良い避難するためのアイデア)

C3. 周囲をもっと見渡して情報を得ること。

グループ A では全員、グループ B では 2 名が注視箇所と言及したが、グループ C では 1 名 (C3) だけが注視箇所「周囲」という観点から言及した。グループ A と B では負傷者についての言及が複数あるが、Q1 で負傷者に注視したとは回答していない。避難疑似体験中の視線ログは、グループ A と B のすべての被験者が負傷者を注視したことを示していた。これらの被験者は振り返りにおいても負傷者を注視してはいるものの、負傷者を「自身の行動」「自身の視線」「周囲の状況」の中に位置づけており、無意識的に具体的な注視箇所から除外した可能性がある。しかし、困難な状況にある負傷者との遭遇は印象的であり、グループ A と B の被験者が振り返り時の視線可視化によって負傷者を再注視することで、負傷者に関する気づきが多く表出したと考えられる。一方、グループ C では 1 名 (C3) が「重症負傷者」を注視したが、負傷者に関する気づきは表出しなかった。4.2.1 で視線可視化が注視箇所を制限する可能性に触れたが、負傷者への注視と気づきにはつながっていることから、視線可視化が再注視および振り返りを促進すると期待できる。

4.2.3 ユーザビリティ

ユーザビリティを尋ねた Q5~Q7 (5 段階リッカート尺度を採用) の回答平均値を表 3 に示す。Q5 「振り返り機能の画面は見やすかった」について、各グループとも 3.0 以上ではあるが、良好な結果とはいえない。「黄色のオブジェクトではなく (中略) 光線で表現した方が分かりやすいと思う」(A1)、「三人称視点が真横からだったので斜め上からだとわかりやすいのではと感じた」(B1) との指摘から、改善の余地はあるものの、ビームによる可視化が見えやすいことが示唆された。Q6 「振り返り機能は操作しやすかった」についてはグループ A の平均値がもっとも高く、グループ C がもっとも低かった。一人称/三人称視点を切り替え可能にしていたため、グループ間の正確な比較はできないが、視線可視化が操作性を低下させるものではないと考えられる。Q7 「振り返り機能は避難訓練の効果向上につながると思う」については、グループ A と C の平均値が高かったことから、視線可視化の有無にかかわらず振り返り自体に効果があると考えられる。

4.2.4 視線可視化手法の違いが振り返りに与える影響

Q2~Q4 の回答を比較すると、グループ A の回答は「何か起きている場所をよく見ていた」など、すべて被験者自身の注視行為に関する内容であった。一方、グループ B の回答は「人に視線がよって周囲の状況の把握が遅かった」など、被験者自身の行動に関する内容であった。

視線の累積に焦点を当てたヒートマップは、避難開始から現在までのすべての注視点を一度に可視化できる。その

ため、被験者は自身の注視対象の偏りに気づきやすかった可能性がある。Q3 において、グループ A の被験者全員が視線に関して回答したことから、ヒートマップは訓練参加者に自身の注視行為の傾向や癖を認識させる効果が高いことが示唆される。一方、視線の遷移に焦点を当てたビームにより、グループ B は可視化された視線を自身の行動のきっかけ、または要因のひとつと捉えて避難行動を振り返ったのではないかと考えられる。事後アンケートの結果を総合し、ヒートマップとビームによる視線可視化はともに振り返り支援として有効であると結論づけたい。

5. おわりに

本稿では、VR 避難訓練の振り返り支援として視線可視化に着目し、先行研究を拡充する形で視線可視化機能を実装した。小規模ではあるが実験を行い、ヒートマップとビームによる視線可視化の有効性が示唆される結果を得た。

今後の展望として、オブジェクトごとの注視時間や頻度、振り返り時間といった客観・定量的データも取り入れて考察していく。さらに、ヒートマップやビームなどの視線可視化手法を複数同時に表示できるよう機能を拡張し、多数の被験者による長期的な実験 (避難訓練への繰り返し参加) を通じて、振り返り支援および VR 避難訓練の有効性をより詳細に明らかにしていきたい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP23K25701 ならびに徳島大学研究クラスター「大規模自然災害からのインクルーシブ避難の実現」の支援を受けた。

参考文献

- [1] D'Amico, A., Bernardini, G., Lovreglio, R., and Quagliarini, E., "A non-immersive virtual reality serious game application for flood safety training", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol.96, No.103940 (2023)
- [2] Dang, P., Zhu, J., Cao, Y., Wu, J., Li, W., Hu, Y., You, J., and, Fu, L., "A method for multi-person mobile virtual reality fire evacuation drills based on pose estimation: Consistency of vision and perception", *Safety Science*, Vol.170, No.106334 (2024)
- [3] 大江 海斗, 奥井 翔麻, 市野 有朔, 光原 弘幸ほか, "メタバース内避難訓練システムの開発", *教育システム情報学会研究報告会*, Vol.38, No.5, pp.36-41 (2024).
- [4] 市野 有朔, 大江 海斗, 光原 弘幸ほか, "避難訓練 VR におけるリプレイ機能を用いた振り返り支援", 第 48 回教育システム情報学会全国大会講演論文集, pp.85-86 (2023).
- [5] Bandura, A. "Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change", *Psychological Review (American Psychological Association)*, Vol. 84, No. 2, pp.191-215 (1977).
- [6] 元吉忠寛, "災害自己効力感尺度の開発", *社会安全学研究*, Vol.9, pp.103-117 (2019).
- [7] Kolb D.A., "The Process of Experiential Learning", *Strategic Learning in a Knowledge Economy*, pp.313-331 (2000).
- [8] 鈴木大輔, 菊地史倫, 小池隆治, 片野博行, "鉄道運転シミュレータにおける視線データを用いた振り返り", *人間工学*, Vol.56, pp.2F1-01 (2020).
- [9] 姫野完治, "教師の視線に焦点を当てた授業リフレクションの試行と評価", *日本教育工学会論文誌*, Vol.40, pp. 13-16 (2016).
- [10] Feng, Y, Duives, D.C., and Hoogendoorn, S.P., "Development and evaluation of a VR research tool to study wayfinding behaviour in a multi-story building", *Safety Science*, Vol.147, No.105573 (2022).
- [11] Fu, M., Liu, R., and Liu, Q., "Why individuals do not use emergency exit doors during evacuations: A virtual reality and eye-tracking experimental study", *Advanced Engineering Informatics*, Vol.60, No.102396 (2024)