

地下街等地下空間におけるVR技術手法避難訓練の実施と考察

株式会社日建設計 都市・社会基盤部門 シビルグループ 大森 高樹

新潟大学 工学部工学科 棚橋 重仁

北陸大学 経済経営学部経済学科 田部田 晋

新宿サブナード株式会社 井上 良、廣田 直人、稻田 善彦

1. はじめに

地下街を含む地下空間は、安全・安心で持続可能なまちづくりを実現するための重要な拠点であることは誰もが知るところである。そして、最近の想像を超える自然災害に対する強靭化を図っていかなければならぬ重要な社会インフラ施設の一つでもある。築40年以上も経過して老朽化対策が必要となっている地下街等の地下空間が多いという背景を認識したうえで、もしもの災害時には異なる属性を有する不特定多数の人が避難または滞留することを想定したソフトとハードの事前対策を講じていかなければならぬ。

本論文は、全国にある地下街等の中で比較的規模の大きい新宿サブナード地下街(以下、サブナードという)が毎年行っている自衛消防訓練に着目したものである。この自衛消防訓練は従来の机上訓練や要素訓練ではなく、フォトグラメトリ技術を用いて作成された地下通路・階段・広場の3次元空間を人工現実(Virtual Reality:VR)技術を活用した避難訓練(以下、VR避難訓練とする)へと内容の充実と高度化を図った。そして、地下街に勤務する多くの従業員を対象にVR避難訓練に対する率直な意見を収集するためのアンケートを行った。そのアンケート結果と考察を整理して訓練実施から得られた成果をまとめ、考察したものである。¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾ なお、この避難訓練を行う前に地下街防災推進事業の一環として、地下街施設の状況把握や避難計算に必要な情報整理を改めて行い、「新・建築防災計画指針(財)日本建築センター1995年(以下、指針という)」に準拠した避難シミュレーションに基づく居室及び階避難計算を実施して、地下街としての安全対策検討は行っている。火災発生時の計算結果から得られた避難者の経路状況や避難階段付近の抱えている課題や弱点を把握したうえで、その回避方法をVR技術による避難訓練で確認していくことを始めたところである。地下街施設管理者としては、避難訓練で得られた成果を今後の防災計画や避難計画の更新、体験した店舗勤務者の意見を踏まえた訓練内容の向上、安全な避難を実現するための施設の整備・改修などに活用していく予定である。そして、火災だけでなく、最近非常に多くなっている地上出入口からの浸水に対するVR技術による避難訓練実施についても本論文で紹介する。

2. 3D都市モデルの高精度化とVR技術の利活用

2-1 3D都市モデルとVR技術の活用

最近の3D都市モデルは、地上だけでなく地下の空間(地下街、地下通路、地下広場、地下鉄駅など)についても主要な個所が整備されてきているため、その利用価値が高まっている。⁶⁾この状況を踏まえて、3D都市モデルにVR技術を活用する利点は、広大な地上・地下空間をVR空間上で3次元的に再現できるだけでなく、時々刻々変化する人の移動や滞留などの外的要因を変数として自由に設定できることである。この技術を用いれば、平常時や非常時の地上・地下空間利用に関する計画、防災・減災、環境改善、空間デザインなど多岐にわたる視点から諸課題を解決すること、そして、その課題解決をするための人の行動特性や認知特性を定量的に明らかにできる研究に役立つと考える。

2-2 3D都市モデルへのフォトグラメトリ技術の活用

誰もが利用できるオープンソースの3D都市モデルとしてPLATEAUが挙げられる。PLATEAUは、国

土交通省が中心となり産学官の様々なプレイヤーと連携して推進する日本全国の都市デジタルツイン実現プロジェクトであり、3D 都市モデルは都市活動のプラットフォームデータとして都市そのものを3次元でモデル化したものである。この3D 都市モデルを様々な領域でユースケースとして利用できるように開発している最中であり、誰もが自由に都市のデータを引き出せるようにしていくという「3D 都市モデルのオープンデータ化」を進めている。そして、PLATEAU を構築する3D 都市モデルの整備・活用・オープンデータ化により、まちづくりの DX を実現によるオープン・イノベーション創出を目指している。

しかしながら、PLATEAU は建物や交通網等の「幾何の細かさ」と「部位や属性の細かさ」を示す Level of Detail (LoD) が都市によってばらつきが多く、詳細シミュレーション向けの LoD3 であっても、VR 空間内でアバタを通して建物や交通網等を見ると、実空間と比較して、その再現度が低いことが分かる。この PLATEAU の抱える課題を解決するために、フォトグラメトリ技術を用いることとした。フォトグラメトリ技術とは、撮影した写真を元にして3D データを作成する技術である。工業製品や芸術作品等の形を把握する分野ではすでに確立した技術であり、多くのビジネスや教育の現場にも取り入れられて重要な役割を担っている。この技術を用いることで新宿サブナード地下街の通路・広場や階段を高精度・高精細で再現することを試みた。これらの取り組みは新潟大学の棚橋研究准教授と北陸大学の田部田講師の協力を得ながら当社との共同研究の一環で行っている。そして、地下街という多くの不特定多数の人が利用している施設を店舗勤務者に配慮しながら安全に撮影する許可や諸々の対応は、サブナード施設管理者の協力があってトラブルもなく進めていた。研究成果の一つであるフォトグラメトリによる地下空間の3D モデル化を図1に示す。高精度・高精細で再現されたフォトグラメトリによる地下空間の3D モデルを用いれば、VR 空間への没入感を増すことで、想定内容(現象)を工夫して VR 技術利用を促し地下空間の抱える課題解決につなげられるものと考えている。³⁾



実際の地下街通路



フォトグラメトリで三次元復元された同地下街通路

図1 フォトグラメトリ技術を用いた3Dモデル

3. VR 技術で再現した地下空間における2つの避難訓練の紹介

3-1 防災訓練へのVR技術の活用

地下街という特殊な空間での避難訓練に VR 技術を応用していく取り組みも、棚橋研究准教授と田部田講師の協力を得ながら当社との共同研究の一環で行ってきた。従来のVR技術を活用した防災訓練は、VR空間内のアバタを操作することでおこなわれていたが、棚橋研究准教授と田部田講師が開発した人の速度知覚特性を反映させたアバタ操作を足踏み動作でおこなうVRプラットフォームを用いれば、アバタの操作をより直感的におこなうことができる。さらに、この技術を用いることは、サブナードが長年継続して実施してきた避難訓練の内容を高度化・充実化させることができるものと考えている。避難訓練を継続的に実施していくことは、利用者の行動や体験から従来手法と同程度のことしか記憶できないと想定できる。しかしながら、臨場感の高さから VR 空間への没入感を増すことで、想定内容(現象)を工夫して VR システム利用を促し地下空間の抱える課題解決につなげられるものと考えている。

3-2 2024年10月実施の避難訓練内容とやり方

サブナード自衛消防訓練の一環で実施した避難訓練は、2024年10月15日(火)から17日(木)の各曜日の店舗開店前(9時30分～10時20分)の間で、地下1階3丁目周辺の地下通路を利用して店舗勤務者を中心に各日とも30人程度で実施した。訓練内容は、避難シミュレーションの実施経緯及び結果の説明、MassMotion というソフトで作成した避難者が移動する動画の全体像および検討結果の説明、3丁目区画の防火シャッターを閉鎖して非常灯を消灯し暗視下で誘導灯の位置を確認、VR動画による避難体験などを行った。(写真1) それらの説明と合わせて人工現実が体験できるVRヘッドセットとセンサ付きの靴を希望する参加者が身に着けて、予め決めた定点で足踏み動作をすることで災害状況を想定した避難行動(地上出入口を目指して早歩きで逃げるという行動)を経験してもらった。(写真2)



写真1 店舗勤務者と実施した避難訓練



写真2 VR技術手法を用いた避難訓練の状況

3-3 避難訓練時の理解度確認や要望把握

今まで実際の地下通路を使った避難訓練を行ってきた店舗勤務者に対して、センサがついた専用の靴をはいて足踏み動作をすることで、VR空間内のアバタを操作して災害状況を想定した現実に近い避難行動を経験してもらい、その時に感じた素直な意見を複数の質問形式のアンケートから確認できた。アンケートで得られた回答の抜粋を下記に示す。

- ① 参加者の約半数の人が初めて3次元モデルを体験。約4割の人がまた体験してみたいと回答
 - ② 参加者の約8割の人がVR避難訓練を実施してほしいと回答
 - ③ 避難に時間を要する動きもあって、かなりリアルで臨場感があつてよかったですと回答
 - ④ 避難時の人の流れがイメージできたことで、実際に防災対策が必要な時の備えになったと回答
- 一方、自由回答欄には下記のような要望もあった。
- ① 声が届きづらく聞こえない部分があった。混みやすい階段や混まない階段が書かれたスライドが欲しかった
 - ② リアルに災害や怖さを体験できてためになったが、体験中と体験した後で身体がふらつき、多少酔った
 - ③ 本当に歩いている感覚で実際に避難するシミュレーションでは、足踏みが怖かったので手すりや支柱が近くに欲しかった

このアンケートで得られた内容を活かして、今後も引き続き新しい防災訓練方法を地下街施設管理者と意見交換しながら取り入れていくこと、このような避難訓練を元に地震や火災等が同時に発生した複合災害を想定した避難計画の見直しや対策を地下街施設管理者とともに検討していくことはとても重要であると考えている。さらに、この避難訓練状況を確認・体験していただいた東京都都市整備局や新宿区消防の担当者とも意見交換しながら、実際の地下街等の地下空間で発生する災害や想定外のこと

に対して、全員が積極的に備えていく・準備していくという「事前防災」の意識を継続して持ち続けていくことがますます求められていると実感した。

3-4 2025年7月実施の避難訓練内容とやり方

最近、ゲリラ豪雨や線状降水帯発生による地下空間の浸水被害が多くなっている。サブナードにおいても地上出入口から地下通路や広場への浸水を想定した対策を考えておく必要度合いが高まっている。そこで、この浸水災害を想定した VR 避難訓練を、2025年7月29日(火)から31日(木)の各曜日の店舗開店前(9時30分～10時15分)の間で、地下2階の地下室を利用して店舗関係者を中心に実施した。

(写真3) 浸水状況は、2024年10月に実施した際に、体験者から“階段箇所からの浸水”や“浸水し始めている階段からの避難”も経験しておきたいとの要望があったため、避難状況を新たに構築(設定)して実施した。訓練に適用したVRヘッドセットの映像は、地下街の出入口から雨水が浸入している状況となっている。(図2)

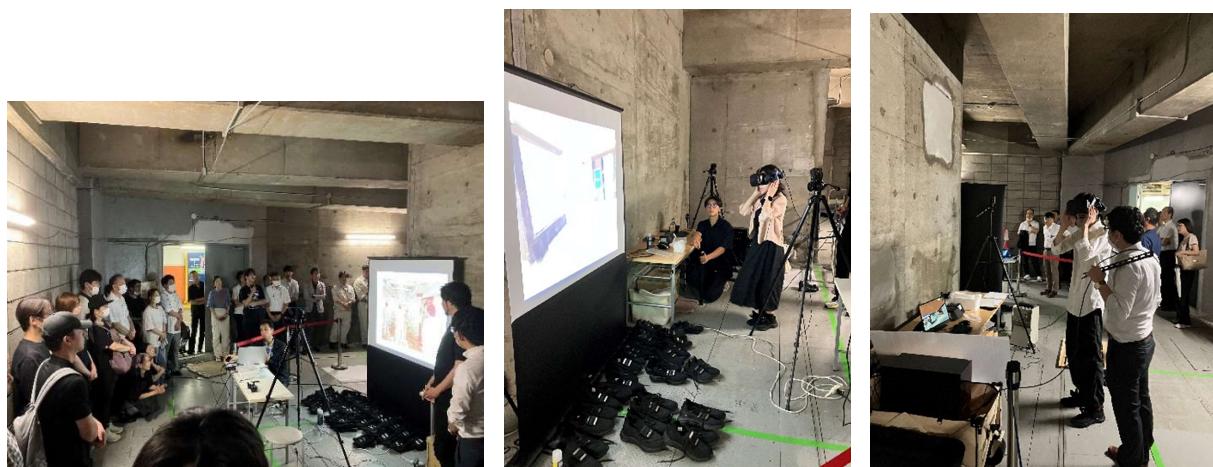


写真3 VR技術手法を用いた避難訓練の状況(VR映像は浸水状況を示している)

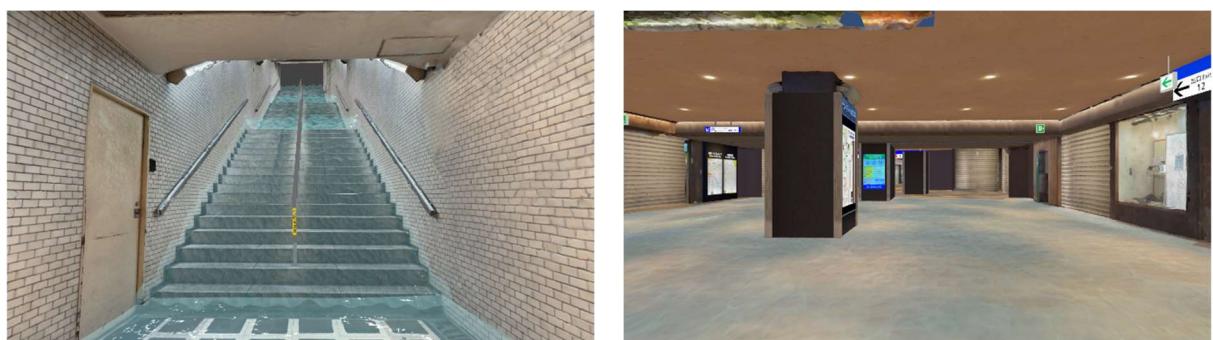


図2 VR避難訓練用に作成した3Dモデル(左:階段部、右:通路・広場)

7月に実施した浸水被害を想定した VR 避難訓練は、店舗勤務者数 90名(3日間)で実施し、約8割にあたる75名からアンケート結果を質問と回答を抜粋して示す。(表1)

表1 浸水被害を想定したVR避難訓練時のアンケート回答

質問	回答(大まかな整理)
浸水が起きたときに危険だと思う「もの」・「こと」	●75件の回答のうち、80%の人が「危険だと思う」と回答した 「避難する側」と「避難させる側」の2つで回答内容を分類した
避難する側	・逃げる方向がわからない場合、パニックになる ・人混み(混雑)、出口階段に殺到する人、混雑による階段の封鎖感 ・電源タップや照明機器への浸水による感電(漏電)や火災の危険

	<ul style="list-style-type: none"> ・転倒する可能性が上がる、足元の不自由さ ・階段で入ってくる人と出たい人が滯る ・慌てた人達が同じ方向に一気に押し寄せる ・身動きが取りにくく、混乱を招く ・パニックによる混雑や避難路の混雑により歩きにくくなる ・多数の人が出口に殺到して、通路の視認性が悪くなり動けなくなる ・普段の速さで行動できないで歩行が遅くなる ・まだ大丈夫と思い、いざ移動(避難)する時に手遅れになっている
避難させる側	<ul style="list-style-type: none"> ・システムダウンや電気トラブルの発生 ・人が集まりすぎて適切な避難指示ができなくなる ・避難者が避難誘導に従わない ・避難経路の確認、避難口がわかりづらい ・店舗内に閉じ込められる、エレベーター・エスカレーターの停止 ・救護ジャケットなど身につけるものがない
<u>浸水が起きたときにどのような行動を取るか</u>	<p>●75件の回答のうち、52%の人が「とてもそう思う」と回答した 「避難誘導」、「自己の避難」、「避難誘導しつつ自己の避難」の3つで回答内容を分類した</p>
避難誘導	<ul style="list-style-type: none"> ・浸水が起きたときは、スタッフグループでお客様を避難指示のもとに、安全を確保して新宿駅側に誘導することを最優先に行う ・いち早く声をかけパニックを起こさない、落ち着いて避難誘導する ・焦らずに、避難・誘導、水をくい止める ・防災センターやアナウンスでの指示をよく聞き、スタッフ同士協力して避難誘導をおこなう、避難誘導等と何を最優先にするか決める ・適切な避難経路を確認してお客様を混乱のないように誘導する ・できれば、地上の状況を把握して地上へ避難させる、なるべく高いところにお客様を誘導する ・自分がどの役割をすればいいのかを考えて安全に誘導する
自己の避難	<ul style="list-style-type: none"> ・避難誘導に従って地上(高い場所)へ早めの避難をする ・可能であれば水を止める、不可能なら避難する ・落ち着いて焦らず、周りの情報を良く聞き、周りの人達と協力をして正しい方向(新宿駅方面)に避難する ・水の少ない所に同じ避難でも落ち着いて行動する(脱出経路を探す)、焦らず一歩一歩前に冷静に慌てずに行動する ・まず土嚢や市販の浸水を止めるもので防ぎ、自身も避難する。避難する際に重い荷物だと足元の身動きが取りにくくなるので、なるべく軽装で、地下にいる場合は階段から地上を目指す ・水が流れていない階段から地下から脱出する、接続されているビルに足元に気をつけて垂直避難する ・人の流れに逆らわず、出口を目指す
避難誘導しつつ自己の避難	<ul style="list-style-type: none"> ・館内放送をよく聞き、自身の身の安全確保を確保し、お客様を安全に誘導する ・お客様の誘導が落ちついたところで、シャッターを下ろすなど、店

	<p>舗閉鎖の必要なことを行う</p> <ul style="list-style-type: none"> まずは自分の身は自分で守るためにすぐに移動し、サブナード従業員として館内に水が入らないように土嚢の設置等を連携をとりながら行う <p>館内アナウンスや他店舗・防災センターやスタッフ同士で連携を取り情報を共有、避難を開始・誘導する</p>
--	--

4. まとめとVRシステム作成における課題や解決していくべき内容

いくつかの災害発生を想定した避難訓練を、いかに人工現実技術手法をうまく取り入れて継続的に行い、効果を出していかを地下街等地下空間の施設管理者と一緒に考えていくことはとても大切である。そのためにも訓練を行う空間をいかに現実に近づけて、簡易に3次元モデルとして作成しコストをかけないようにするかが課題である。そして、避難行動における群集避難⁷⁾や逃げる行為を支援する誘導サイン・館内案内サインなどの見え方、そして避難者の意識的な行動把握⁸⁾⁹⁾に影響を及ぼす要因を、VR避難訓練内容のうち特に画質担保する細かい配慮は当然改善・改良を加えていかなければならぬ。ただし、それらにこだわりすぎると手間や時間がかかり費用も増すことは明らかであるため今後の課題と認識している。そして、これからVR避難訓練に盛り込んでいくべき内容は、避難時の音や匂い、多くの避難者の存在と動き、シャッター閉鎖などが考えられるため、研究を進めていく段階で一つひとつ進めていきたいと考えている。避難訓練内容の向上と高度化を図るためにも施設管理者や店舗勤務者・警備員等の要望に応えていくとともに、VR技術を適用していく、なにがこの技術の良いところか、あるいは弱点なのか、を冷静に判断しながら、地下街等の地下空間の安全・安心の度合いを高めていくことに尽力していく所存である。

【参考文献】

- 1) 大森高樹,井上良,新藤博,廣田直人:新宿サブナード地下街におけるVR技術手法を用いた避難訓練実施と考察,土木学会令和7年度全国大会第80回年次学術研究会,2025.9
- 2) 大森高樹,井上良,新藤博,廣田直人:新宿サブナード地下街における避難検討の実施,地下空間シンポジウム論文・報告集,第30巻,土木学会【一般投稿論文】,2025.1
- 3) 棚橋重仁,田部田晋,渡邊歩,松原寧寿,小野英子,大森高樹:VR空間上でフォトグラメトリを用いて再現された地下空間を探索する人が得る認知地図の正確性の量的評価,地下空間シンポジウム論文・報告集,第29巻,土木学会【査読付き論文】,pp.9-20,2024.1
- 4) 棚橋重仁,田部田晋,小野英子,大森高樹:地下空間で生じた火災に遭遇した人間の行動特性の解明:身体動作をともなうVRシステムから明らかにする単独で地下街を避難する場合の人間の行動特性,土木学会論文F2(地下空間研究),Vol.78, No.1, pp.51-61, 2022
- 5) 田部田晋,小野英子,大森高樹,棚橋重仁:身体動作を伴うVRシステムによって都市空間を探索することで形成される認知地図:認知地図の歪みの幾何学的性質と統計学的性質に基づいた解析,土木学会論文F2(地下空間研究),Vol.77, No.1, pp.75-87, 2021
- 6) uc23-05 地下街データを活用したナビゲーションシステム技術検証レポート 地下街データを活用したナビゲーションシステムの技術資料(2023年度) <https://www.mlit.go.jp/plateau/use-case/uc23-05/> JR東日本コンサルタンツ株式会社
- 7) 群集マネジメント総論 理論と実践 西成活裕、東京大学出版会
- 8) 避難学「逃げる」ための人間科学 矢守克也、東京大学出版会
- 9) 人はなぜ逃げおくれるのか -災害の心理学 広瀬弘忠、集英社新書