

(54) プラント定期検査作業への VR 教育システム適用の研究

屋代 裕一¹・王 ゴウ²・羽鳥 文雄³・矢吹 信喜⁴

¹学生会員 株式会社日立プラントコンストラクション 研究開発部

(〒170-8630 東京都豊島区東池袋三丁目 1 番 3 号 ワールドインポートマートビル 6 階)

E-mail: yuichi.yashiro.kp@hitachi.com

²非会員 株式会社日立プラントコンストラクション 研究開発部

(〒170-8630 東京都豊島区東池袋三丁目 1 番 3 号 ワールドインポートマートビル 6 階)

³正会員 株式会社日立プラントコンストラクション ICTM 開発部

(〒170-8630 東京都豊島区東池袋三丁目 1 番 3 号 ワールドインポートマートビル 6 階)

⁴フェロー会員 大阪大学教授 大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻

(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

E-mail: yabuki@see.eng.osaka-u.ac.jp

建設業では少子高齢化や熟練者の減少が問題となっており、熟練者が退職する前に属人化ノウハウを効果的に伝承する仕組み構築が急務である。本研究では、ノウハウ伝承手段の一つとして VR (Virtual Reality) 技術を適用し、ハンドトラッキングやアイトラッキングにより体験者の手指や注視点の動きを仮想空間内に再現し、インタラクティブに作業訓練出来る体験型 VR システムを開発した。また、複雑な作業手順をコンテンツ化するため、現場で必要となる動作をコマンド化し CG オブジェクトと組み合わせることで、VR シナリオを自由に作成できる機能を開発した。従来の紙や動画教材との理解度への影響を比較した結果、空間情報の把握や身体を動かして体験できる VR 教材を組み合わせることで、より効果的に理解度を向上できる見込みを得た。

Key Words: virtual reality, eye tracking, hand tracking, expert know-how, plant construction

1. はじめに

現在、将来的な人口減少による労働力低下や、団塊世代の退職で問題となった 2007 年問題に続く大量採用世代 (1987 年～1991 年入社世代) の退職 (2026～2029 年) が懸念されている。更に、建設業では、技能労働者の減少、高齢者層の増加と若年層の減少等の課題を抱えており、他の業界と比較しても人材供給の面で不足している状況である。また、大規模プラントの一つである原子力発電プラントの状況を見ると、2011 年の東日本大震災が引き起こした福島第一原子力発電所の事故を受けて、国内の新規建設案件は停止状態となり、既存プラントも定期検査 (定検) が未実施の状態が続いている。従って、長期間にわたり原子力発電プラントの建設・定検に関わる熟練者ノウハウを伝承する機会を逸失している状況である。このような環境を考慮すると、数年以内に退職を

迫られる大量の熟練者が社内に在職している間に、これまで培ってきたノウハウを若年層へ伝承するための枠組みが早急に必要となる。

原子力発電プラントの現場でのノウハウ伝承の課題として、過去の大規模プラント建設ラッシュ (1960～2000 年) を経験した熟練者の殆どが 2025 年頃に退職してしまうこと、ノウハウの伝承は現場での OJT (On-the-Job Training) による部分が多く個別で行われていること、また、熟練者や作業員は作業のある現場を渡り歩くことが多く、一つのサイト内に留まることが少ないためノウハウ伝承が効率良くなされないといったことが挙げられる。従って、熟練者のノウハウを効果的に「抽出」・「蓄積」し、他者が使える形で「形式知化」させ、最終的に組織間 (各現場間) でノウハウを「理解」・「体得」できるように情報を「体系化」する一連のプロセスと仕組みの構築が必要である。本研究では、これらのプロセ

スの中で、ノウハウの「理解」・「体得」にフォーカスし、その手段の一つとして VR (Virtual Reality) の適用を検討した。ノウハウ伝承手段としては、前述した OJT 以外では、従来の紙マニュアルや動画マニュアルによる座学での学習に加え、訓練センターにおけるモックアップ設備での実技学習が考えられる。しかしながら、原子力発電プラントのような特殊構造物の作業となると多くの場所に汎用的な訓練センターがあるわけではなく、特定の場所にある特殊設備を利用する必要があるため、実技学習の機会自体が少ないといった問題がある。また、大規模な特殊構造物の場合はモックアップ設備自体が準備できないため、現場での OJT で教育せざるを得ないといった課題もある。さらに、作業場所によってセキュリティや放射線の被ばく時間による入域制限があるため、気軽に現場へ行くこと自体が難しい環境であることもノウハウ伝承を難しくしている要因の一つである。これら課題に対して、VR は時間や場所を選ばずに現場を模擬した仮想空間に没入して作業を体験学習できることから、原子力発電プラントの特殊作業への適用には非常に有効であると考え、ノウハウ伝承手段として検討することとした。

2. 既往の研究

近年の建築関連における VR の研究動向として、Li ら⁷⁾は、2000 年から 2017 年まで 90 の論文や記事を調査してレビューしている。そのなかで、危険識別、安全トレーニング、安全指導を主として、マルチユーザ環境で直感的に作業手順を学び、現実作業に近い仮想体験が出来るアプリケーションが多く発表されていると述べている。安全認識の研究として、Eiris ら⁸⁾は、VR と 360 度パノラマカメラの危険識別訓練コンテンツを用いて危険識別スコアを比較した結果、VR の方が高いスコアを示したとの結論を得た。Lin ら⁹⁾は、VR 内で仮想の地下鉄駅モデルを用いて、空間的知識が火災発生時の避難行動に与える影響を分析する実験を行った結果、空間知識の充実度によって、避難行動、避難時間、避難距離、避難速度に相互作用があるとの結論を得た。Shi ら¹⁰⁾は、2 つの仮想高層ビルの上に設置された板の上を歩く VR シミュレーションで、被験者の動作を計測した結果、指示の方法（ポジティブ、ネガティブ）によって行動が変化し危険行動を誘発する可能性がある事例を報告している。

また、既存手法と比較した VR 自体の有効性を研究している例も多く報告されている。Kang ら¹¹⁾は、VR を用いて事象事例を提示する学習システムを紙の資料で学習する方法と比較した結果、VR での視覚的表現が暗黙知の習得と定着を向上させる可能性があるとの結論を得た。Shi ら¹²⁾は、配管のメンテナンス作業教育へ 2D、3D、VR

を適用した際のパフォーマンスを調査した結果、3D 群と VR 群は、2D と比較して作業時間と作業品質で優れているとの結論を得た。Sampaio ら¹³⁾は、大学の講義での VR の使用が橋梁建設の理解能力に与える影響を測定した結果、通常の授業を支援することができるとの結論を得た。Paes ら¹⁴⁾は、仮想モデルの空間知覚力の比較をした結果、没入型 VR は非没入型 VR よりも全体的に優れた空間知覚力を提供し、また、被験者の経験と年齢は空間知覚力に影響を与える可能性があるとの結論を得た。このように、従来の紙、2D 等の手法と比較して VR (没入型) が有用であるということが報告されている。

作業訓練に関する報告としては、Wang ら¹⁵⁾は、VR にて足場の組立トレーニング実験を実施した結果、従来の方法と比較して生産性向上率は 12% で、より効果的なアプローチとなり得るとの結論を得た。

以上から、VR 自体の有効性の基礎検証や、安全認識等への研究がなされている一方で、建設現場での作業訓練への適用事例は多く報告されていない。特に、大規模建設物における複雑な作業への適用事例はなされていない。そこで、本研究では、大規模建設物として原子力発電プラントの定検作業を対象とし、その作業を自身の身体を動かしながら学習できる VR システムを検討した。

3. 実験方法

(1) 定検作業の概要と VR に選定した機器

原子力発電プラントの定検作業とは、法律で定められた期間で定期的に運転を停止し、機器に応じて必要な点検を行うものである。点検箇所によって機器を分解し、部品交換等を行い、再度組み立てる作業が必要となる。本研究では、緊急時に制御棒を駆動させるための水圧制御ユニット (HCU: Hydraulic Control Unit) の点検作業を対象とした。HCU は原子炉内の制御棒の数に応じて存在し、繰り返し点検する必要がある非常に重要な機器である。また、狭隘空間で作業する必要があるため、VR で再現して学習するために適していると考え本機器を選定した。

(2) 作業教育向け VR システムの開発

作業を効果的に学習するためには、VR 内で閲覧するだけではなく、インタラクティブに自身の身体を動かしながら「体験」できる仕組みが必要であると考えた。そこで、作業中に最も動作が必要となる手指の動きを再現するために、ハンドトラッキング技術を適用した。また、作業中は指差確認や目視確認作業も多いため、自身の視線の動きを再現するためのアイトラッキング技術も適用した。開発した体験型 VR システムを図-1 に示す。アイトラッキング機能付きヘッドマウントディスプレイ

(HMD) は HTC Nippon 株式会社の VIVE Pro Eye を使用した。装着者の注視点の動きを検出し、仮想空間内で赤い球体の動きで可視化した。これにより、目視確認作業を再現することや、被験者が何を注視して作業を遂行していたのかを分析することが可能である。ハンドトラッキング技術は、オランダの Manus VR 社の Manus Prime Haptics を使用した。グローブ型の装置であり、装着者の手指の動きを仮想空間内で再現し、工具を持つ動作や機器や部品を運ぶ動作などを再現することが出来る。

また、前述したように、大規模プラントを対象とした作業訓練を VR で再現する場合、膨大な物量のある機器や部品の作業手順を再現する必要がある、コンテンツ作成に非常に手間が必要といった課題があった。そこで、簡便に効率よく VR コンテンツを作成できるツールを開発した。開発したコンテンツ作成支援ツールの画面を図-2 に示す。汎用的な VR 作成用ゲームエンジンである Unity のプラグインとし、コマンドの選択、対象のオブジェクト群の選択、コマンドの属性情報入力を順番に実行することでシナリオを自由に作成できる。ここで選択するコマンドに関しては、建設現場で特徴的な作業動作を再現するための専用コマンドを開発した。具体的には、工具の使用（持つ、回す）、部品の据付や取外し、クレーンやチェーンブロックによる重量物の吊搬、目視確認といった体験者の動作を再現できるコマンドや、作業手順の表示、ノウハウの提示（画像、動画、音声、テキスト）等の学習を支援するコマンドである。これらのコマンドをツール上で自由に組み合わせて記述することで、大規模な機器の作業訓練用のコンテンツを効率よく作成することができる。

(3) 開発システムの評価方法

開発した「体験型 VR」の効果を評価するために、従来の紙での学習、動画での学習と比較して理解度へ及ぼす影響の検証実験を行った。被験者 15 名を対象とし、紙、動画、VR の 3 グループに分けて、それぞれの教材で 1 時間以内の学習を実施後、共通のテスト問題を受験させて作業理解度を定量的に評価した。なお、本評価では、HCU の「計装ユニット」と呼ばれる一部の機器の

分解作業を対象とした。紙教材は作業要領やノウハウを現場の写真とともに記載した資料（A4 用紙 9 ページ）、動画教材は紙教材の情報に加えて 3D-CAD による動きやナレーション音声を追加したコンテンツ（視聴時間：20 分/回）、VR 教材は、紙教材、動画教材の情報に加えて、一連の作業の流れを身体を動かしながら体験できるコンテンツ（体験時間：40 分/回）とした。紙と動画に関しては、1 時間以内で自由に何回でも繰り返し学習可能とし、VR に関しては、体験時間の関係上 1 回のみの学習とした。テスト問題は 60 問とし、基礎的な知識を習得するための座学関係の問題を 15 問、VR で再現した問題を 42 問、それ以外の作業手順に関する問題を 3 問として出題した。また、各学習方法に対して ARCS モデルに基づいた 20 問のアンケート評価（5 段階評価）を行った。ARCS モデルとはジョン・ケラーが 1983 年に提唱した学習意欲向上モデルであり、学習意欲を高める方法を注意（Attention）、関連性（Relevance）、自信（Confidence）、満足感（Satisfaction）で整理したものである。

4. 実験結果と考察

理解度テストの結果を図-3 に示す。各グループで正解率の平均を算出した結果、全問題を対象とした場合、VR グループと動画グループが紙グループと比較して高い結果となった。しかし、座学関連問題では、紙グループの正解率が最も高く、VR グループで最も低い結果であった。この結果から、実作業を模擬した学習には動画と VR が有効であるが、座学関係の学習に関しては紙での学習が有効であることが分かった。VR や動画では視覚や聴覚情報を優先的に取り込むことにより、文字を読んで学習する方法は不向きであったと考えられる。一方で、VR で再現した問題に関しては VR グループと動画グループがほぼ同じで、紙グループでは最も低い結果となった。VR や動画では空間情報を考慮した教材であったが、紙教材の場合、作業中の位置関係、形状、サイズ感などを把握できなかったことが要因として考えられる。



図-1 開発した体験型 VR システムの概要



図-2 コンテンツ作成支援ツールの画面

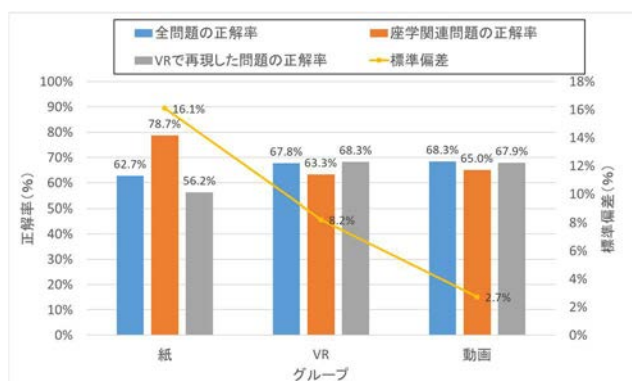


図3 理解度テストの結果

また、標準偏差は、動画グループが最も小さく、紙グループで最も大きかった。動画と紙は繰り返し学習をすることが可能であり（学習回数は、紙が平均 2.4 回、動画が平均 1.6 回、VR が 1 回）、正解率が高い動画グループでばらつきが小さくなったものと思われる。紙は学習回数が最も多いにもかかわらず正解率が低くばらつきも大きいという結果であり、座学以外での学習効率は低いと考えられた。一方で、VR はコンテンツの特性上、繰り返し学習や戻って学習することが難しく、理解できない状態でコンテンツが進んでしまうデメリットがあり、ばらつきが大きくなった要因の一つとして考えられる。しかしながら、1 回の学習でも繰り返し学習可能な動画と同等の正解率を得られたことから、VR 学習自体は効果的であったと考える。

ARCS によるアンケート結果では、VR グループでは「好奇心を刺激された」「積極的に学習できた」「楽しく学習できた」「作業前での学習に重要だ」といった項目で高得点であった。全ての質問を平均すると、紙グループで 2.8 点、動画グループで 3.3 点、VR グループで 4.3 点という結果となり、VR グループで良好な結果を得た。自由記述では「実際の作業姿勢を体験できて良かった」「現場に入る前の心構えになった」「体を動かすため VR 酔いがなかった」といった意見があり、VR はテストの点数だけでなく、学習意欲を高めて教育の機会・頻度を向上できる有効な学習方法であることが分かった。

以上から、紙、動画、VR ではそれぞれ異なるメリットを持ち、作業訓練では全ての学習方法を組み合わせることで効果的に理解度を向上できると考えられる。具体的には、まず最初に紙教材で「能動的」に繰り返し学習して基礎知識を習得し、動画コンテンツを「受動的」に学習することで作業の流れを理解し、最終的に VR で実際の現場を模擬した空間で「相互作用（能動的、受動的）」により自身の身体を動かして体験することで網羅的に理解度を深めることが可能と考えられる。今後、これらの組み合わせ方式での効果を検証し、再現性のある定量評価を実施していく予定である。

5. 結論

原子力発電プラントの定検作業を対象とし、熟練者ノウハウを伝承する手段の一つとして「体験型 VR 教育システム」を開発し、従来の紙や動画での学習と比較した結果、VR は学習意欲が高い方式であり理解度テストも高得点という結果を得た。一方、VR の不得意とする範囲もあり、各学習方式でメリット・デメリットがあることが分かった。今後、さらにサンプルを増やして定量的に評価したうえで、最適な学習方式を確立していく予定である。最終的には、原子力発電プラントの技量認定制度への組み込みを目指して、現場の作業者が簡便に使えるような形でシステム化していきたい。

参考文献

- 1) Li, X., Yi, W., Chi, H., Wang, X. and Chan, A. P. C.: A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety, *Automation in Construction*, Vol.86, pp.150-162, 2018.
- 2) Eiris, R., Gheisari, M. and Esmaeili, B.: Desktop-based safety training using 360-degree panorama and static virtual reality techniques: A comparative experimental study, *Automation in Construction*, Vol.109, 102969, 2020.
- 3) Lin, J., Cao, L. and Li, N.: How the completeness of spatial knowledge influences the evacuation behavior of passengers in metro stations: A VR-based experimental study, *Automation in Construction*, Vol.113, 103136, 2020.
- 4) Shi, Y., Du, J., Ahn, C. R. and Ragan, E.: Impact assessment of reinforced learning methods on construction workers' fall risk behavior using virtual reality, *Automation in Construction*, Vol.104, pp.197-214, 2019.
- 5) Kang, J. and Jain, N.: Merit of Computer Game in Tacit Knowledge Acquisition and Retention, *28th International Association for Automation and Robotics in Construction*, pp.1091-1096, 2011.
- 6) Shi, Y., Du, J. and Worthy, D. A.: The impact of engineering information formats on learning and execution of construction operations: A virtual reality pipe maintenance experiment, *Automation in Construction*, Vol.119, 103367, 2020.
- 7) Sampaio, A. Z. and Martins, O. P.: The application of virtual reality technology in the construction of bridge: The cantilever and incremental launching methods, *Automation in Construction*, Vol.37, pp.58-67, 2014.
- 8) Paes, D., Arantes, E. and Irizarry, J.: Immersive environment for improving the understanding of architectural 3D models: Comparing user spatial perception between immersive and traditional virtual reality systems, *Automation in Construction*, Vol.84, pp.292-303, 2017.
- 9) Wang, P., Wu, P., Chi, H. L. and Li, X.: Adopting lean thinking in virtual reality-based personalized operation training using value stream mapping, *Automation in Construction*, Vol.119, 103355, 2020.