

Mixed Reality (MR) を用いた高所作業における安全教育システムの提案

独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所

新技術安全研究グループ 研究員 平内 和樹

1. はじめに

近年のバーチャル・リアリティ (Virtual Reality : VR) をはじめとするエクステンデッド・リアリティ Extended Reality : XR 技術の発展は著しく、その応用範囲は多岐にわたる。安全教育の分野では、XR 技術が革新的な技術であると期待され、建設業においても非常に多くのアプリケーションが開発されている。

XR 技術を活用する最も大きな利点は、労働災害を「自分ごととして」体験することができるという点にある。2018 年度から 2022 年度までの期間で推進してきた第 13 次労働災害防止計画¹⁾の中では、労働者の危険感受性の低下が、労働災害が減少しない原因の一つであると指摘しており、XR 技術を用いて危険を体感する教育は労働災害防止に向けた有効な手段の一つとして期待されている。

筆者が所属する労働安全衛生総合研究所 新技術安全研究グループ (以下、「当研究グループ」という) は、前述のような産業現場への導入が進められているさまざまな新技術 (XR 技術、協調ロボット、人工知能 (Artificial Intelligence : AI)、IoT など) に係る労働安全の課題に対応するため、2021 年 4 月に設立されたグループである。

これらの新技術の社会実装にあたり当研究グル

ープでは、産業現場において新技術を労働災害防止にどのように応用していくか、その一方で、それを用いることで安全上の問題が生じないか、新技術の開発と使用の両面から課題の抽出と分析に取り組んでいる。XR 等の新技術を用いた安全教育は危険感受性を高める有効な手段とされている一方で、どのような効果が、どのようなユーザーに、なぜ生じるのかなど、依然として解明すべき課題も多い。

筆者らは、このような XR 技術を用いた安全教育の解決すべき課題を明らかにするために、特に建設業を対象とし、高所作業を体験する複合現実感 (Mixed Reality : MR) を用いた安全教育システムを開発した。本稿では、システム開発に至った経緯として国内外における XR 技術の安全教育への応用状況について紹介するとともに、開発したシステムの概要、今後の課題について述べる。

2. 国内外における XR 技術の安全教育への応用状況

従来の安全教育は、教育テキストや動画を利用した知識教育、危険予知活動などが行われ、労働災害の減少に貢献してきたが、一方で、教育テキストやビデオに基づく訓練では実際の現場での危険認識や対応力の向上に対する効果が十分に得られないという課題があった²⁾。

そのため、実際の事故に近い体験を行う体験型安全教育が危険意識を高めるためには有効であるが、従来型的手法では場所や物の準備などに多くの時間を費やしてしまうという課題があった³⁾。XR技術を用いた安全教育は、これらが不要になり、一度コンテンツを作成すれば何度でも利用できるという点で、従来型の体験型安全教育の課題を克服するものとなると考えられる。

2015年に、建設現場の安全教育にVRがどのように活用されているのか、教育への影響や利点などについて既存の研究をまとめたレビュー論文⁴⁾が発表された。それによれば、2015年時点ではVRを安全教育に採用した例は極めて少なかったが、それが持つ没入感は学習意欲を喚起し、危険を体験的に学ぶための有効な手段であると当時から考えられていた。

2015年時点でVRの採用数が低かった原因は、まだVR技術が高額であり、専門的なプログラミングが必要だったためである。しかしその年に、現在広く普及するヘッドマウントディスプレイの初代機が開発者向けに市販されるようになり、「VR元年」と呼ばれる2016年以降、さまざまなVR技術が世間に広がるようになった。

図-1は、学術文献の検索エンジンであるGoogle scholarを用いて、XR技術、建設業、安全に関するキーワードを検索した場合の、2010年から2024年10月5日時点までの文献数の推移である。このグラフからも見て分かるように、

2015年以降に出版される文献の数が多くなっており、さまざまなVR機器の普及とともに建設業界においても安全教育のためのVRへの関心が高まっていることが分かる。

2024年現在、2009年から2023年までに発表された論文についてXR技術の建設業への応用状況を調査したレビュー論文⁵⁾では、安全管理、技能・知識習得などの分野で活用されていることが報告されている。安全管理の分野では、危険認識や安全意識を高めるための訓練に広く使用され、技能・知識習得の分野では、XR技術を用いることで実際の建設現場で必要とされるスキルや知識を効率よく学べることが明らかになっている。

このように、現在ではXR技術が建設業における安全教育に広く利用されるようになってきている。ただし、XR技術の中でも、VRを用いた安全教育システムに関しては広く普及する一方で、MRや拡張現実感（Augmented Reality：AR）は採用例が少なく、特定の作業やトレーニングシナリオでの応用が期待されている⁶⁾のが現状である。

現在、XR技術を用いた多くの安全教育システムが開発されているが、その教育の効果が及ぶ範囲を把握することが重要であると考えられる。XR技術のトレーニングは、危険認識能力の向上に対して効果があり⁷⁾、学習の定着率を高める⁸⁾ことがいくつかの先行研究により明らかになっている。また、複数の研究結果を統合して分析するメタ解析と呼ばれる手法を用いてXR技術による

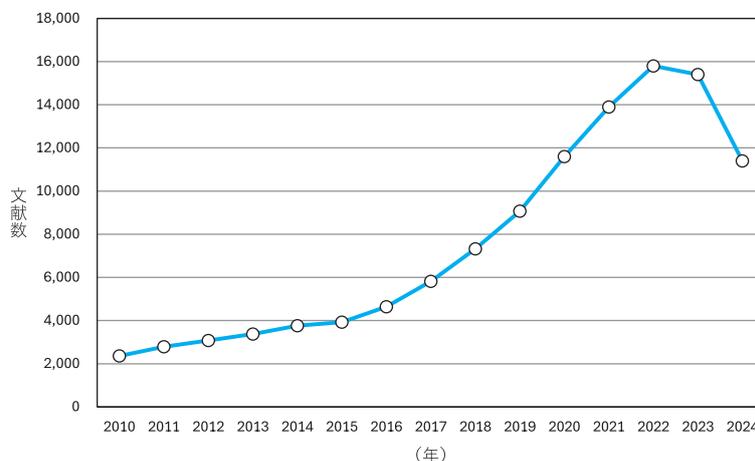


図-1 2010年から2024年10月5日時点までのXR技術・建設業・安全に関する文献数の推移

訓練の効果を検証した研究では、XR 技術を用いた訓練が通常の訓練と同等の効果を持つが、課題の種類によって訓練前後のパフォーマンスに差が生じることが報告されている。特に、身体的課題の訓練ではパフォーマンスが有意に向上するものの、認知的課題や身体との複合課題では有意にならないことが示されている。

このことから、XR 技術を用いた安全教育は、特に高所作業での移動や軽作業等の身体的作業の訓練に適している可能性が示されている。また、安全教育におけるリスクの特定に関して XR 技術が多く使用されているが、リスク評価やリスク対応計画における実践的な応用は限られている⁹⁾。

例えば、高所作業での移動や軽作業などを対象とした訓練システムにおいて、墜落・転落リスクを低減するためにどのような行動を取るべきかを訓練するといった応用はまだ少ないと推察される。実際に作業員自身がリスクを低減させるためにどのような行動を取るべきかといった訓練は、XR 技術による訓練の利点である「自分ごととして」体験する効果をより高めることにつながると考えられる。

また、より「自分ごととして」体験してもらうためには、例えば、高所作業環境を模した XR システムの場合では、いい意味で正しく怖がってもらう必要がある。VR 技術を使用する方が、従来の座学ベースの訓練と比較して学習者の感情的反応を強く引き出しやすいことが報告されてい

る⁷⁾。さらに、高所作業をサラウンドスクリーン型 VR で再現した研究では、足場映像に実物の足場板を重ねて歩行課題を行うと、歩行パターンや心拍間隔に変化が生じることが分かっている。

このことから、XR 技術を用いた高所作業訓練において実物の足場を置くなど、感覚刺激をサポートすることが安全教育の効果の向上に有効である可能性がある。

以上のことをまとめると、国内外で多く活用されるようになっている建設業の安全教育 XR システムは、すでに一定の安全教育への効果が認められている。しかし、さらに「自分ごととして」体験してもらうためには、体験者自身が動作するなどの身体的課題に加えて、現実のオブジェクトとのインタラクションによる感覚刺激のサポートなどが必要になると考えられる。

3. MR を用いた高所作業における安全教育システムの提案

筆者らは前述の XR 技術の応用状況を踏まえて、足場板などの実オブジェクトとのインタラクションを生成しやすい MR を用いた訓練システム（以下、「本システム」という）の構築を試みた。本システムの構成は図-2 のとおりである。

MR 空間の表示にはビデオシースルー型 HMD（MREAL Display MD-20, Canon）を用い、HMD に装着した反射マーカークの位置を光学式モ

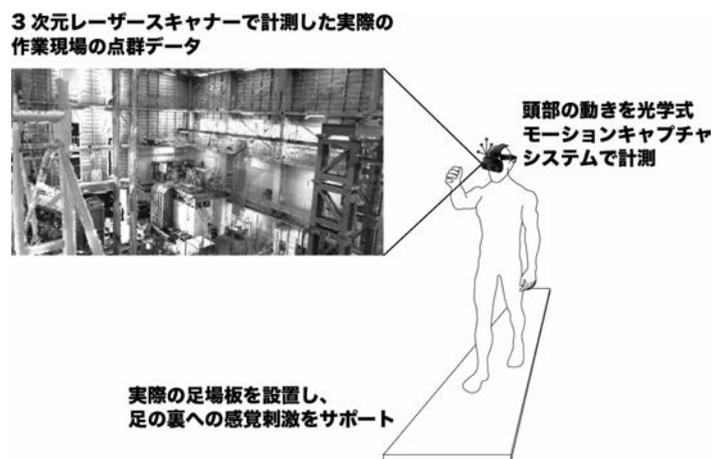
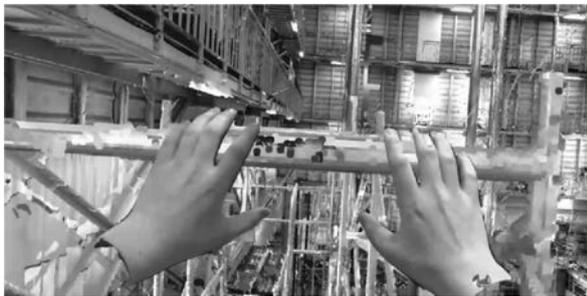


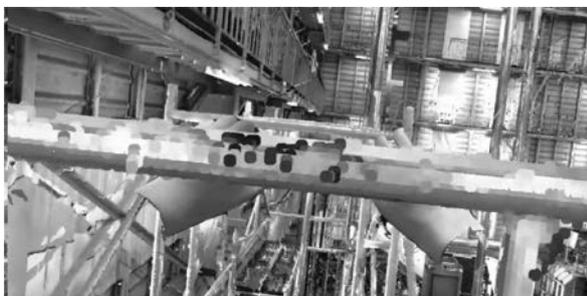
図-2 Mixed Reality を用いた高所作業安全教育システムの構成

ーションキャプチャシステム（Vero, Vicon Motion Systems Ltd.）で測定することで使用者の頭部の動きを正確に追跡する。

本システムで表示される映像は、図-2の画像に示すような実際の環境を点群データで再現したものであり、3次元レーザースキャナー（Focus S, FARO）を用いて計測した。また、前述のように感覚刺激をサポートすることで訓練効果が高まるため、実際の足場を設置し、映像と重ね合わせることにした。加えて、本システムは図-3に示すように、使用者の手をMR空間内に重畳表示することが可能となっている。



(a) 手がオブジェクトより手前にある場合



(b) 手がオブジェクトより奥にある場合

図-3 使用者の手の表示機能のイメージ

これは事前に肌色を認識するようシステム上で設定することで、使用者の手の色を認識し、MR空間内に重畳表示している。VRによる訓練システムには仮想の手が表示されるものも存在するが、本システムは使用者本人の手が表示されることにより、より「自分ごととして」体験できるものとなっている。さらに、この手の表示機能はMR空間内のオブジェクトとの位置関係を認識するため、空間内のオブジェクトの方が手前にある

場合は手の前に描画される。

この機能には、使用者自身が動作し、さらに仮想オブジェクトとの位置関係を把握しやすくすることで訓練効果を高める狙いがある。

本システムはまだ開発途中ではあるが、これまでに多くの方に労働安全衛生総合研究所の一般公開や見学の際に体験してもらっている。体験した方の多くは、自分自身の手が見えることや、仮想オブジェクトとの位置関係の反映といった機能によって、既存のVRとは異なる体験ができると感じている様子であった。また、実際の足場板を床に置いただけではあるが、足場板特有の浮遊感を感じることや、足場が軋んだ音などから、より高所にいる感覚になるという感想をいただいた。

本システムは、より「自分ごととして」高所作業を経験するという目的に対して有効なアプローチになり得ることが示唆された。一方で、あまり恐怖感を感じないという体験者も一定数見られたのは事実である。体験する人によりXR技術への慣れや、高所への恐怖感に差があるのは当然ではあるが、できる限り多くの方に適切な訓練効果があるということを明らかにするためには、人間の特性を考慮したシステムの有効性評価が重要になる。

現在は、予備的な検討段階ではあるが、本システムによる軽作業体験中の人の興奮状態と関連する皮膚の電気活動を測定し、作業中や危険な行動をした時に変化が生じることを確認している。

4. 今後の課題

本システムをより多くの方に利用してもらうためには、依然としていくつかの課題がある。最も大きな課題は、本システムのコストに関する点である。本システムは現実とのインタラクションを生成するためにMRに対応したビデオシープ型HMDを、現実の環境の複雑な形状を再現するために3次元レーザースキャナーを、体験者の頭部の動きを追跡するために光学式モーションキャプチャシステムを採用した。

これらのシステムは非常に高価であるため、導入が非常に困難であり、初期のVRが抱えていた課題に類似している⁴⁾。今後の技術の進歩によりコストが下がることを期待するとともに、現状のシステムをどのような機関が所有でき、どういった運用をしていくべきなのかなどのシステムの利用場面を明確にする必要があると考えられる。

本システムの利用場面を明確にし、導入を進める上で重要になるのは、それがいかに有効かを明確にすることである。現在は予備的な検討となっている人間の特性を考慮した評価についてより多くの参加者を募った実験を実施し、どういうユーザーに、どのような効果が生じているのかという点について引き続き研究を進め、コストに見合った効果を得るための本システムの運用方針の提案を行っていくことが重要であると考えられる。

5. おわりに

本稿では、筆者らが開発したMRを用いた高所作業体験システムの紹介を行った。現在、XR技術を用いた安全教育は建設業だけに限らず幅広い業種において着目されている技術である。

今後の展望として、より多くの実験をとおして本システムの精度検証を行い、異なるユーザー層や作業環境における適用可能性を明確にすることが必要である。これにより、効果的な安全教育が実現できるツールとしてXR技術がより一層普及し、長期的には労働災害の減少に貢献できると考える。

【参考文献】

1) 厚生労働省, 第13次労働災害防止計画
<https://www.mhlw.go.jp/content/11200000/001074135.pdf>

2) Xu, Z., & Zheng, N. (2020). Incorporating virtual reality technology in safety training solution for construction site of urban cities. *Sustainability*, 13 (1), 243.
<https://doi.org/10.3390/su13010243>

3) 広兼道幸, 伴場翔, 大幡勝利, 田邊準一 (2013) AR技術を用いた現場における安全管理情報の共有化システムの構築. 土木学会論文集 F6 (安全問題), 69(2), I_165-I_170.
https://doi.org/10.2208/jscejsp.69.I_165

4) Bhoir, S., & Esmaili, B. (2015). State-of-the-art review of virtual reality environment applications in construction safety. *AEI 2015*. Milwaukee, Wisconsin.
<https://doi.org/10.1061/9780784479070.040>

5) Javad, Z. M., Abbasianjahromi, H., Banihashemi, S., Amir, T. S., & Hajirasouli, A. (2023). Extended reality (XR) technologies in the construction safety: systematic review and analysis. *Construction Innovation*, 24 (4), 1137-1164.
<https://doi.org/10.1108/CI-05-2022-0131>

6) Chellappa, V., Mésároš, P., Spišáková, M., Kaleja, P., & Špak, M. (2024). Digital technologies (DTs) for safety education and training in construction. *Work* (Reading, Mass.), 78 (3), 625-639.
<https://doi.org/10.3233/WOR-220698>

7) Han, Y., Yang, J., Diao, Y., Jin, R., Guo, B., & Adamu, Z. (2022). Process and outcome-based evaluation between virtual reality-driven and traditional construction safety training. *Advanced Engineering Informatics*, 52 (101634).
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101634>

8) Beś, P., & Strzałkowski, P. (2024). Analysis of the effectiveness of safety training methods. *Sustainability*, 16 (7), 2732.
<https://doi.org/10.3390/su16072732>

9) Kassem, M., Benomran, L., & Teizer, J. (2017). Virtual environments for safety learning in construction and engineering: seeking evidence and identifying gaps for future research. *Visualization in Engineering*, 5 (1).
<https://doi.org/10.1186/s40327-017-0054-1>