

高所作業における行動特性の評価および バーチャルな高所作業の訓練環境構築に関する研究†

菅 間 敦*¹ 中 嶋 良 介*² 高 橋 明 子*¹ 平 内 和 樹*³ 島 田 行 恭*⁴

本研究は高所作業における安全性向上を目的とし、作業者の行動特性把握と Mixed Reality (MR) 技術を用いた訓練環境構築について検討を行った。作業指示の違いによる行動特性評価実験では、効率優先の指示下で作業時間短縮と安全確認の減少が確認された。MR 訓練システムでは、ビデオシースルー型 HMD と点群データを用いてバーチャルな高所作業環境を再現し、触覚フィードバックを追加して没入感を高めた。システムの妥当性検証では、生理指標、運動計測、外力測定、心理指標を統合的に測定している。これらの成果は、MR 技術を活用した効果的な高所作業訓練システムの開発と作業者の安全意識向上に寄与する重要な知見を提供すると考えられる。

キーワード: 高所作業, MR, 身体動揺, 生体計測。

1. 教示法の違いによる高所作業の行動特性の評価

1) 研究背景

製造業、建設業、陸上貨物運送業、小売業などの様々な業種において、多くの労働災害が発生している。厚生労働省の令和 5 年の労働災害発生状況³⁾によると、755 人の死亡者を含む 135,371 人が休業 4 日以上之死傷者数として報告されている。特に、墜落・転落事故による死亡者は 256 人と最も多く、脚立や可搬式作業台、はしごなどの高所作業の用具を正しく使用するための安全対策が急務となっている。このような問題に対して、先行研究では脚立に乗った場面に着目して作業姿勢⁴⁾や安定性⁵⁾に関する研究がなされている。

一方、地面と脚立や可搬式作業台などを行き来する場面にも墜落・転落リスク（以下、転落リスク）があり、作業者は自身の状況のみならず、周囲の状況も的確に把握しながら作業を遂行する注視行動も必要となるが、このような一連の流れを対象とした研究はあまりないのが現状である。

そこで本研究では、高所作業における作業者の特性を正しく理解した上で、適切な作業方法や教育方法を確立することを目指し、そのための基礎的な知見を得ることを目的として、作業者への作業方法の教示が注視行動に及ぼす影響を実験的に検討する。

2) 実験方法

可搬式作業台を用いた実務を経験したことのない 20 歳から 22 歳の男子大学生 12 名を研究対象者として、実験を実施した。課題作業として、研究対象者には図 1 の

ように可搬式作業台（ナカオ社製：ESK-14）を用いて、あらかじめ設置されたホワイトボードに 5 つのマグネットを貼る作業を課した。その際、研究対象者に視線計測装置（ナックイメージテクノロジー社製：EMR-9）を装着し、研究対象者には以下の流れで作業を実施するように説明した（以下、各々を作業区分①～⑦とする）。

- ① 開始地点から可搬式作業台まで移動（移動）
- ② 可搬式作業台のステップを上る（昇降）
- ③ 可搬式作業台の上で作業点まで移動（歩行）
- ④ ホワイトボードにマグネットを貼る（作業）
- ⑤ 可搬式作業台の上でステップまで移動（歩行）
- ⑥ 可搬式作業台のステップを下りる（昇降）
- ⑦ 可搬式作業台から終了地点まで移動（移動）

なお区分③と⑤における可搬式作業台の端点から作業点までの距離はともに 772.5 mm、作業点の高さは研究対象者の目線高に設定した。

本実験では、研究対象者に対して作業の教示方法を実験因子とし、教示内容は「可能な限り効率（作業スピード）を意識して作業して下さい」と指示する条件（Time Pressure : TP）、「可能な限り安全を意識して作業して下さい」と指示する条件（Safety Awareness : SA）、および通常の意識（Standard : STD）の 3 種類とした。実際の製造業や建設業などの現場においては、作業安全（安全性）に対する要求はもちろん高いが、その一方で作業時間（効率性）に対する制約も高く、「なるべく早く作業しなさい」といった教示がなされる場面も多く見受けられるためである。

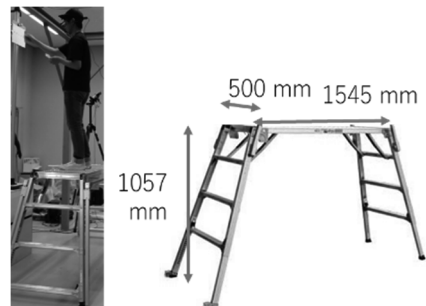


図 1 可搬式作業台を用いた課題作業

† 本報の一部は、2020 年度日本設備管理学会春季研究発表大会論文集¹⁾、2022 年度一般社団法人日本人間工学会関東支部第 52 回大会講演集²⁾の一部を加筆修正し、まとめ直したものである。

*1 労働安全衛生総合研究所リスク管理研究グループ(菅間は研究当時)

*2 慶應義塾大学理工学部管理工学科

*3 労働安全衛生総合研究所新技術安全研究グループ

*4 労働安全衛生総合研究所研究推進・国際センター

実験の前に研究対象者に対して、実験の概要と方法について説明し、事前に練習を課した。また、実験では、2種類の作業方法の教示でそれぞれ3回の試行を課した。なお、研究対象者には実験の目的や内容について文書で説明し、同意書に署名することにより、インフォームド・コンセントを得た。また、ビデオ撮影したデータをもとに、作業区分ごとに作業時間を分析した。さらに、視線計測装置により 60 Hz で測定した眼球運動データから、注視点が視角 2° 以内の範囲に 0.1 秒以上留まった点を停留点と定義し、停留時間と停留回数の観点からも分析した。本実験は労働安全衛生総合研究所の研究倫理審査の実施許可を得た上で実施した（通知番号 R1-安-01）。

3) 実験結果

実験の結果を図 2 に示す。全体の平均作業時間は STD 条件と SA 条件では約 18.3 秒であったのに対し、TP 条件では 13.2 秒と有意に減少していた。作業区分別に分析すると、ステップの上りと下りにおいてのみ TP 条件で作業時間が減少しており、作業中は差が認められなかった。また特定の地点への停留回数を注視回数としてカウントすると、平均注視回数は STD および SA 条件では 32～33 回であったが、TP 条件では 21 回に減少していた。作業区分別に分析すると、TP 条件では天板上での作業中のほかに、ステップの上りと下りにおいて注視回数が有意に減少していた。これらの結果から、タイムプレッシャー下では、ステップ昇降速度の上昇によって作業時間短縮が実現されるが、ステップ昇降中は注視回数が減少し、安全性の確認がおろそかになることが示唆された。そのため本研究では観察していないが、ステップの踏み外しや姿勢バランスの不安定化が生じる可能性があり、転落リスクが高まると考えられる。一方、作業未経験者に対して安全を意識させたとしても、作業時間および注視回数には変化は見られなかった。これは何に注意をするべきかが把握できていないことが一因と考えられ、作業未経験者に対しては具体的な注意点・方法を教示することが安全性向上に向け必要であることが示唆された。

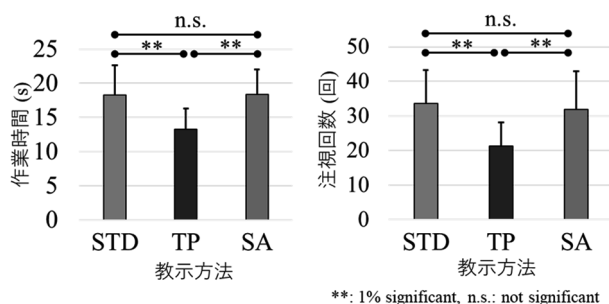


図 2 作業時間および注視回数の結果

2. Mixed Reality を用いた高所作業訓練システムの構築と効果検証に関する基礎的検討

1) MR 高所作業環境の構築

XR による訓練の効果を検証したメタ解析⁶⁾により、XR システムは通常の訓練手法と同等の効果を持つことが示されている。ただし課題の種類によって訓練前後のパフォーマンスへの影響に差が生じることも報告され、認知的課題および身体との複合課題では有意にならなかったが、身体的課題の訓練ではパフォーマンスが有意に向上した。このことから、XR 環境は高所作業現場での移動や軽作業等の身体的作業の訓練にも適している可能性があると考えられる。また、高所作業映像を体験者の周囲を囲うように配置したディスプレイに投影するサラウンドスクリーン VR を用いた研究⁷⁾では、足場映像に実物の足場板を追加して歩行課題を行った際の効果を検証したところ、歩行パターン、姿勢の不安定性スコア、心拍間隔の反応に違いが見られた。このことから、VR の高所足場モデルに実物の足場板を加えたのと同様に、感覚刺激をサポートする工夫を加えれば XR の高所環境下での効果向上が期待できる。このような背景から、著者らは高所作業環境の訓練システムの開発と安全管理・教育に寄与する知見を明らかにすることを目的とし、足場板など実物のオブジェクトとの相互作用環境をつくりやすい MR システムを用いて訓練システムを構築することとした。

MR システムの概要を図 3 に示す。MR 空間の表示にはビデオシースルー型ヘッドマウントディスプレイ (MREAL Display MD-20, Canon. 以下、HMD) を用いた。構造物を再現する手法としては 3DCG の表示のほかに、複雑な表面形状を再現可能な点群データへの没入を採用した。点群データの計測は、3D レーザースキャナー (Focus S, FARO) を用いて複数箇所から撮影し、大規模点群活用ソフトウェア (InfiPoints, Elysium) にてデータの統合と編集を行った。点群データ表示アプリケーション (MREAL for InfiPoints) で表示し、研究参加者に提示した。また、手すりなど体験者が手で触れることで没入感を高めると考えられることから、3D CAD データまたは CG データを表示し、実空間には現物のオ

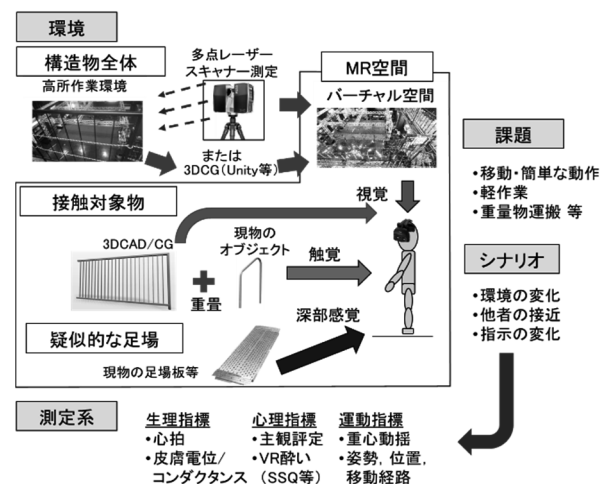


図 3 提案システムの構成

プロジェクトを位置合わせして設置することとした。また先行研究⁷⁾に基づいて、足場の軋み等を再現するために足場板を位置合わせして配置した。

MR 環境下での行動計測は、生理指標として心拍および皮膚電気活動 (electrodermal activity, EDA)、運動計測としてモーションキャプチャ、加速度計による位置・加速度と、ロードセル・フォースプレートによる外力、心理指標として没入感に関する主観評価および SSQ (Simulator Sickness Questionnaire) を測定する環境とした。本実験は労働安全衛生総合研究所の研究倫理審査の実施許可を得た上で実施した (通知番号 R4-安 8-01)。

2) システムの検証

図 4 のように、高さ約 10 m (3 階屋根上相当) の建設作業用足場を高所作業環境とし、足場上部に立った状態を再現した。課題動作は、HMD を装着した状態で足場板上に立ち、周辺環境の目視、足場板上での移動により周辺確認を行わせた。その後、足場の端部から下方をのぞき込んで高さを確認した後、1 歩分前方へ自発的にジャンプ (映像中では足場のない空中への転落) させた。

高所作業環境下での精神的ストレスによる生理反応測定のため、EDA による検証を行った。EDA には電極の電位差を外部から電流を流すことなく直接計測する endosomatic 法と、電極間に微弱な電流を流し見かけの

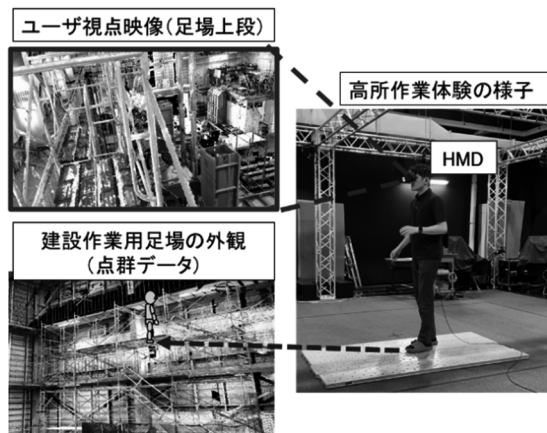


図 4 建設作業用高所足場の MR 体験時の様子

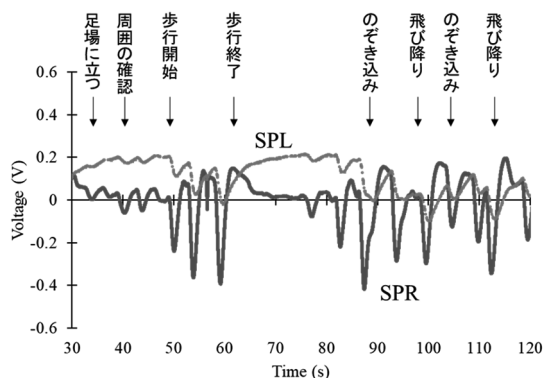


図 5 高所足場の MR 体験時の EDA 測定の例

抵抗を計測する exosomatic 法があり、従来は exosomatic 法による皮膚コンダクタンス反応 (SCR) や皮膚抵抗反応 (SRR) 計測が主流であったが、近年は波形の解釈がやや複雑になるものの時間応答に優れた endosomatic 法による測定も多くみられる⁸⁾。そこで本研究では皮膚電位計 (SPN-01, SKINOS) を用いて皮膚電位反応 (SPR) と皮膚電位レベル (SPL) を測定した。当該機器の時間分解能は SPL が最大 1 Hz、SPR が 10 Hz である。時系列データの例を図 5 に示す。

はじめに SPR 波形に着目すると、周囲の確認や歩行の開始のような体動発生時と、精神的ストレスを受ける下方のぞき込みや疑似的な飛び降り動作時にそれぞれ負方向へ急峻なピークが出現していることがわかる。ピークの持続時間は 2~3 秒程度であり、歩行程度の速度であれば対応が可能であることが示唆される。一方 SPL 波形は、足場に立った開始時と比較して、歩行時と、下方のぞき込み・飛び降り時において、電位が負方向へと持続的に変動していた。また、ピークの発生タイミングは SPR と同期するが、量的な変化は SPR より大きく、図 5 中では飛び降り時に電位変化が大きくなる傾向がみられた。これらの結果は、MR による高所作業環境が身体動作や精神的ストレスによる皮膚電位反応を引き起こす可能性があることを示唆している。具体的には、本システムにより作業訓練を行った場合にも、システムが利用者の身体動作に対する即時の皮膚電位反応を測定し、また精神的ストレスに対する持続的な皮膚電位変動を評価することができる可能性があると考えられる。ただし、これらの反応が現実の高所作業環境と同様のものであるかどうかは不確かであり、さらなる検証が必要となる。

3. まとめ

本研究は、高所作業における安全性向上を目的とし、高所作業環境における作業者の基本的な行動特性の把握と、Mixed Reality (MR) 技術を用いた作業訓練環境の構築を行った。はじめに、作業指示の違いによる行動特性の評価実験では、効率優先の指示下では作業時間が短縮される一方で、ステップ昇降中の注視回数が減少し、安全確認がおろそかになる傾向が示された。これは高所環境における作業者の行動が作業指示や心理的状态から影響を受けるとともに、作業効率を優先させるために転落リスクの増加につながる行動を選択する可能性を示唆している。

次に、MR 技術を用いた高所作業訓練システムの構築では、ビデオスルー型 HMD と 3D レーザースキャナーで取得した点群データを組み合わせ、バーチャルな高所作業環境を再現した。手すりなどの触覚フィードバックや足場の軋み音を追加し、没入感を高めている。本システムにおける検証として、生理指標 (心拍、皮膚電気活動)、運動計測 (モーションキャプチャ、加速度計)、外力測定 (ロードセル、フォースプレート)、心理指標 (主観評価、SSQ) を統合的に測定する予定であり、特に心

拍信号および身体動揺の評価を実施中である。これらの成果は、MR 技術を活用した効果的な高所作業訓練システムの開発と、作業者の安全意識向上に貢献する重要な知見を提供するものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 中嶋良介, 菅間敦, 高橋明子, 久我峻介. 可搬式作業台を用いた高所作業中の注視行動に作業方法の教示が及ぼす影響. 2020 年度日本設備管理学会春季研究発表大会論文集. 2020 ; 77-78.
- 2) 菅間敦, 平内和樹. Mixed Reality を用いた高所作業訓練システムの構築と効果検証に関する基礎的検討. 2022 年度一般社団法人日本人間工学会関東支部第 52 回大会講演集. 2022 ; 56-57.
- 3) 厚生労働省. “ 令和 5 年の労働災害発生状況を公表 ” . https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_40395.html (最終アクセス日 2024 年 6 月 28 日)
- 4) 菅間敦, 大西明宏. 最大リーチおよび作業姿勢の評価による脚立への安定した立ち方の検討. 人間工学. 2016 ; 52 1 : 40-48.
- 5) 菅間敦, 瀬尾明彦. 脚立作業を想定した狭い足場上での静的立位姿勢の安定性評価. 人間工学. 2017 ; 53 4 : 125-132.
- 6) A. D. Kaplan, J. Cruit, M. Endsley, S. M. Beers, B. D. Sawyer, P. A. Hancock. The Effects of Virtual Reality, Augmented Reality, and Mixed Reality as Training Enhancement Methods: A Meta-Analysis . Human Factors. 2021 ; 63 4 : 706-726.
- 7) H. Hsiao, P. Simeonov, B. Dotson, D. Ammons, T.-Y. Kau, S. Chiou . Human responses to augmented virtual scaffolding models. Ergonomics. 2005 Aug. ; 48 10 : 1223-1242.
- 8) L. Lu, Z. Xie, H. Wang, L. Li, X. Xu. Mental stress and safety awareness during human-robot collaboration - Review. Applied Ergonomics. 2022 Nov. ; 105 : 103832.