



AR 技術を活用した工場設備教育システムの試作と有効性検証

Development and Evaluation of an AR-based Training System for Factory Equipment Operation

立川智章¹⁾, 大塚諒奈¹⁾, 青木健¹⁾, 松尾裕一¹⁾

Tomoaki TATSUKAWA, Asana OTSUKA, Takeru AOKI, and Yuichi MATSUO

1) 東京理科大学 工学部 情報工学科 (〒 125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1, {tatsukawa, aoki, matsuo}@rs.tus.ac.jp)

概要: 製造業における人材教育を支援することを目的とし AR 技術を用いた工場設備教育システムを試作し、手順書、動画、AR の 3 手法を比較評価した。評価は被験者に対する事前アンケートと事後アンケートにより行い、理解度、危険意識、操作精度、学習時間、使用感などの観点で分析を行った。その結果、AR は理解度や危険意識や操作精度に優れ、教育効果の高さが示された。一方、学習時間や疲労感といった課題も明らかとなった。

キーワード: HMD, 拡張・複合現実, 教育・訓練

1. はじめに

近年、日本の製造業は少子高齢化による人手不足や人件費の高騰、技術継承の属人化、さらにはデジタル化の遅れといった様々な課題に直面している。人手不足に関して、総務省統計局「労働力調査」[1]によれば、日本の製造業における就業者数は 2002 年から 2024 年までに 156 万人減少し、全産業に占める製造業の割合は 2002 年度の 19.0%から 2024 年度には 15.4%にまで低下している。また、文部科学省「ものづくり白書」[2]によると、能力開発や人材育成に課題を抱えていると回答した事業所の割合は 2024 年度において全産業の中で最も高く、特に「指導する人材が不足している」という回答が最多であった。このことは、技術ノウハウが熟練の技術者に属人化しており、体系的な技術継承が難しいことを示していると考えられる。これらの課題への対処法の一つとして本研究は拡張現実 (Augmented Reality, AR) 技術に注目する。

AR 技術の大きな特徴として、コンピュータグラフィクスで表現された様々な情報を現実の視野の中に立体的に重ねて表示できることが挙げられる。従来は紙やディスプレイに情報が表示され、利用者は対象物から視線を外して確認する必要があった。これに対し AR では情報が対象の近くやその上に直接重ねて表示されるため、視線の移動を最小限に抑えつつ重要な変化や異常を即座に把握することができる。近年はこの AR 技術が著しく向上しており、より安価かつ高性能なデバイスが普及しつつある [3]。このような状況を背景に、AR 技術は様々な産業分野での訓練・学習手法として注目を集めている。

例えば、医療分野では手術の術前計画とシミュレーションや医療技術習得訓練への活用が試みられている [4]。製造分野においては、組立作業やプロセス監視の高度化に AR が高い効果があることが示されている [5]。

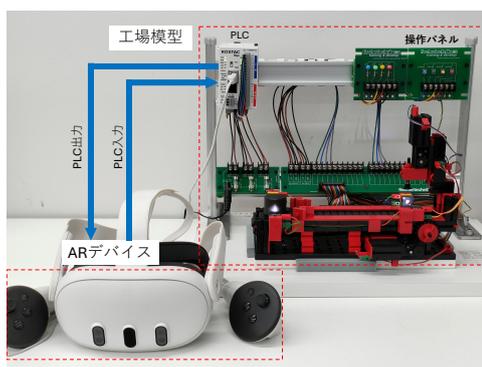


図 1: システム概要

本研究では製造業における人材教育の手法として AR 技術を用いる効果と課題を検証することを目的とする。具体的には工場機械を扱う新人教育を対象に、操作の分かりやすさや安全性の向上といった観点から AR 技術の有効性を評価する。

2. AR を用いた工場設備教育システムの概要

図 1 に開発した AR を用いた工場設備教育システムの概要を示す。工場模型と AR デバイスからなり、工場模型の PLC (プログラマブル・ロジック・コントローラ) と AR デバイスは Modbus により双方向通信を行う。本研究では図のような工場模型を使用するが、PLC 制御されるものであれば拡張可能である。

2.1 工場模型

本研究では、教育用の題材として Fischertechnik Education 社製の工場模型 (パンチングマシン付きベルトコンベア) を使用する。PLC としては、ジェイテクトエレクトロニクス社製の SJ-11DREP-D を用いる。模型の右上には、4 つの押しボタンと 4 つの LED で構成された操作パネルが

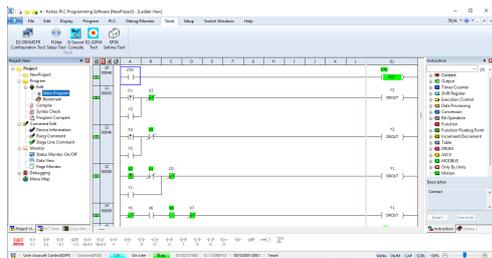


図 2: ラダー言語による訓練シナリオの編集画面

取り付けられている。ボタン入力をトリガーとして訓練シナリオが実行され、LED の点灯やベルトコンベアおよびパンチングマシンの動作する。訓練シナリオはラダー言語により記述されており、あらかじめ PLC にアップロードされている (図 2)。

2.2 AR 教育システム

AR 教育システムの開発には Unity を用い、AR を表示するデバイスとして HMD (ヘッドマウントディスプレイ) 型の Meta Quest 3 を使用した。レッスンは、機器の操作方法や安全確認手順、トラブル対応訓練などの単位で作られており、学習者が順を追って理解を深められるよう設計されている。

開発した AR 教育システムのレッスン例を図 3 に示す。学習者は、現実の工場模型上に重ねて表示される操作手順に従って操作を進める。図 3 では、左上部にレッスン項目、中央正面に操作番号と操作指示、下部には赤背景で安全面に関する注意事項が表示されている。工場模型の左右には、3D モデルで模型の前面および背面が表示されており、正面からは見えない部分や模型の動作を確認できるようになっている。レッスンによっては背面を見ることが難しいケースが想定されるが、そういった場合でも周りを歩き回ることなく正面から学習を効率的に進めることができる。

工場模型の状態は PLC との Modbus 通信によりデータの送受信が可能となっており、トラブル対応訓練などの分岐を伴う複雑なシナリオも実施することができる。レッスンや各レッスンのステップの切り替えは、Meta Quest のコントローラのボタンによって行う。

Meta Quest 3 には Spatial Tracking 機能が備わっており、具体的な実装アルゴリズムは非公開となっているものの現実空間内の特定の位置と AR コンテンツを安定的に対応付けることが可能となっている [6]。本システムでは、この機能を活用して AR 表示を工場模型の物理的位置に正確に固定し、ユーザが視点を移動しても表示がずれないようにしている。これにより、操作手順や 3D モデルの重ね合わせ表示が常に正しい位置に保たれ、学習支援の効率的な実施や学習効果の向上が期待できる。

3. 実験概要

3.1 実験方法

実験では、AR 教育システムの操作方法に慣れるためのチュートリアルレッスンと、工場模型の操作方法を学習す

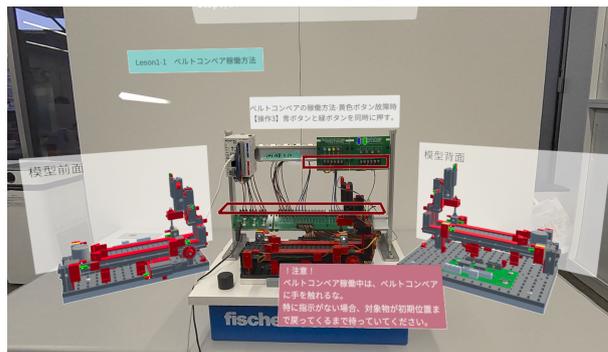


図 3: AR 教育システムによるレッスン例

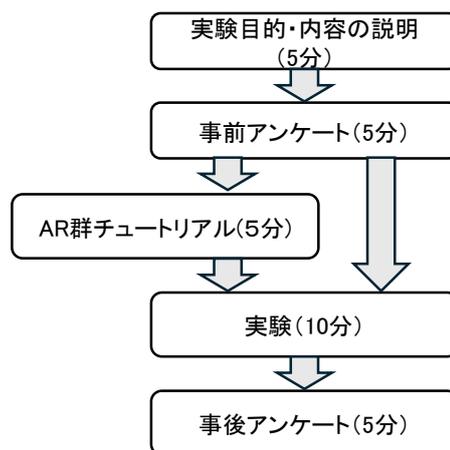


図 4: 実験の流れ

るための 2 つのレッスンを用意した。チュートリアルレッスンでは、機械部位の説明や簡易デモを通じて、AR の利用が初めての学習者でもスムーズに操作できるよう配慮した。工場模型操作レッスンでは、(1) ベルトコンベアの基本操作方法、(2) パンチングマシンのメンテナンス方法を学習する。

本研究では、被験者を 3 群に分け、各群ごとに異なる学習手法を用いて 2 つのレッスンを実施した。各群は、AR 群、動画群、紙の手順書群である。各群には 5 名の被験者が参加した。被験者は 1 名ずつ実験を行い、実験指導者が時間計測および操作の正確さを記録した。AR 群は、AR で表示される指示に従って操作を行う。被験者は、ハンズフリーで操作を行い、実験指導者が Meta Quest 3 のコントローラでレッスンステップの切り替えを行う。動画群は、iPad で操作手順を示す動画を視聴しながら実験を行う。被験者は、動画を途中で停止したり、巻き戻したりしながらレッスンを進める。手順書群は、被験者が手順書に基づいて実験を進める。実験の流れを図 4 に示す。

実験の前には、事前アンケートと事後アンケートを実施する。事前アンケートは教育方法を操作補助として使用した経験の有無を問うものであり、実験対象者の背景を確認するためのものである。事後アンケートは、使用した教育方法による疲労感、理解度、およびわかりやすさなどの

表 1: 事後アンケート

質問内容	評価段階
Q1. 指示を直感的に理解できたか.	5 段階 (1~5)
Q2. 学習に使用した方法は、一般的な工場機械の操作を学ぶ初学者に向いているか.	5 段階 (1~5)
Q3. 工場機械の操作を学ぶ教育方法として、使用した方法を継続的に学びたいか.	5 段階 (1~5)
Q4. 操作中に危険な行為や触れてはいけない箇所を常に意識できたか.	5 段階 (1~5)
Q5. 疲れほどの程度感じたか.	4 段階 (1~4)
Q6. 学習の感想 (自由記述)	自由記述
Q7. AR 追加機能要望	有無・自由記述
Q8. 体調面での問題	有無・自由記述

主観的な使用感を分析するためのアンケートである。

3.2 評価方法

実験では、各群の学習方法を比較するために、(1) 事後アンケート、(2) 実験時間、(3) 正確さ、の3つの観点から評価を行う。

3.2.1 事後アンケート

事後アンケートを表1に示す。Q1からQ4の5段階評価では、スコア1を「当てはまらない」、スコア2を「やや当てはまらない」、スコア3を「どちらともいえない」、スコア4を「やや当てはまる」、スコア5を「当てはまる」と定義し、スコアが高いほど質問に対して肯定的であることを示す。一方、Q5の疲労感については4段階評価を用い、スコア1を「非常に疲れた」、スコア2を「疲れた」、スコア3を「少し疲れた」、スコア4を「特に何も感じなかった」と定義し、被験者が感じた疲労感を明確に把握できるようにする。これらの評価基準を用いることで、教育方法ごとの特性や被験者の使用感を比較する際の一貫性の確保を試みる。さらに、ARの今後の課題を図るためにAR群に対して追加質問(Q7およびQ8)を実施する。

3.2.2 実験時間

2つのレッスンが完了するまでに要した時間をそれぞれ測定する。各群における平均点を算出して比較することで、学習効率を評価する。

3.2.3 正確さ

操作の正確性および危険領域への接触の有無を評価し、2つのレッスンを通して合計17点満点で採点する。採点は、減点方式で間違えた回数、そして危険領域に触れた回数を17点から減点する。各群における平均点を算出して比較する。

4. 結果と考察

まず事前アンケートの結果、AR群では使用経験有りの被験者は5人中1人で、その他の群では全員が使用経験有りであった。

事後アンケートの結果を図5に示す。Q1(指示の直感的理解度)では、AR群が4.8と最も高い評価となった。これは現実空間に重ねて表示される視覚的なガイドが理解を促

進したと考えられる。Q2(初学者適応性)もAR群が5.0で最高評価となった。これはリアルタイムの指示や補助が初心者にも有効であることを示唆している。Q3(継続使用意向)では、AR群が4.2と比較的高評価となった。動画群は3.8となっており、AR群との差は小さい。現状、HMDを装着することの身体的負担や情報の提示方法が影響していると考えられるが、今後さらなる軽量化、高解像度化、UIの洗練が進めばAR群の評価向上が期待できる。Q4(危険への注意意識)では、AR群が4.2と最も高い評価となった。視覚補助による危険意識の向上が効果的であったと考えられる。Q5(疲労感)は、AR群が3.0と最も疲労感を感じたことが示された。これはHMDの重量や長時間装着による身体的負担が直接の原因と考えられる。

AR群のみ対象のQ7では、5人中3人の被験者が機能追加を希望した。例えば、「警告表示機能の強化」や「操作時のフィードバック改善」が挙げられた。これらの要望を満たすことで継続使用につながると考えられる。一方、Q8では、5人中1人の被験者が体調面で「軽い酔い」を感じたと回答している。個人差があるものの短時間であれば、Meta Quest 3でも身体的不調なしに訓練を行うことができると考えられる。

次に、各群の学習時間を図6に示す。学習時間はAR群が最も長くなった。AR群の学習時間が長い理由として2つ考えられる。第一に、ARでは次に行うべき操作や動作が視覚的に順を追って表示されるため、被験者はその指示に従って操作を進める必要がある。そのため、自分のペースで自由に進めることが難しくなった可能性が考えられる。これは情報の提示方法やユーザーインターフェースの改善により学習時間の短縮につながると考えられる。第二に、多くの被験者がARに慣れているわけではないため、慣れるまでに時間を要したことが挙げられる。これはARに触れる機会が増えていけば自然に解決するものと考えられる。

学習時間が最も短くなったのは手順書群であった。これは、被験者が紙の手順書に慣れていることと、自分のペースで手順を確認しながら操作を進められることから、操作速度が速くなる傾向があったためと考えられる。

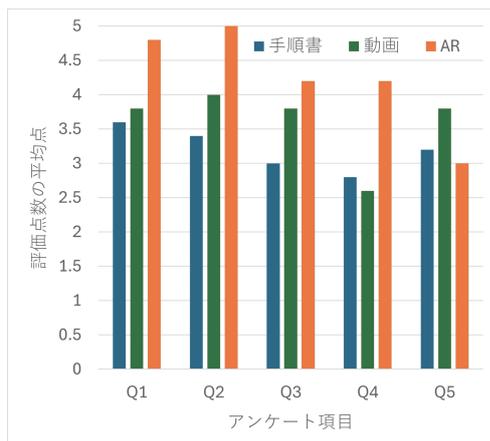


図 5: 事後アンケート結果

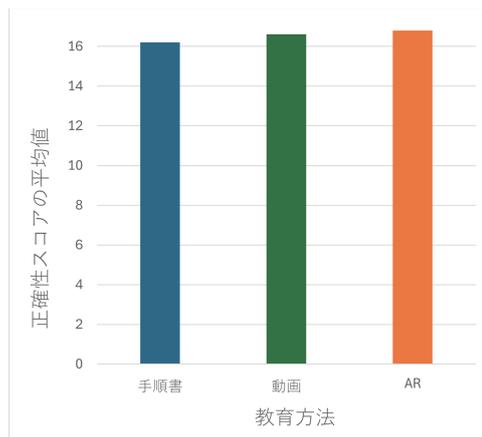


図 7: 正確さの評価結果

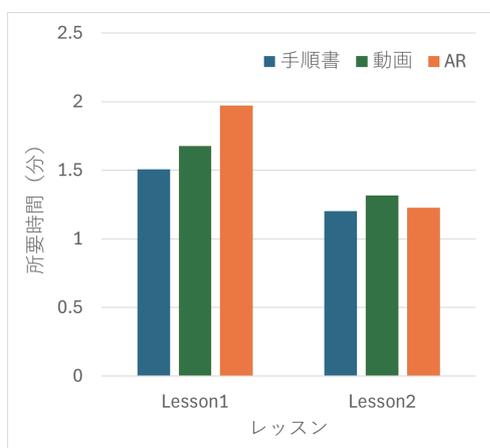


図 6: 各レッスンの平均学習時間

最後に、正確さの結果と図 7 に示す。正確さは、AR 群が最も高い平均点となったが、各群に大きな差は生じなかった。わずかではあるが AR 群が高い点数となった理由としては、リアルタイムに実際の模型に重ねて視覚的な補助や警告が表示されるため、誤解が生じにくく、操作の正確性を向上させたことが考えられる。しかし、本実験のシナリオ内容が比較的簡単な内容であったため、どの群でも操作での間違いは少なかった。動画は、学習時間と正確さのバランスが取れているものの、レッスンの操作と動画の進行が一致せずに、操作ミスや時間のロスにつながっていると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究では製造業における人材教育の手法として AR 技術を用いる効果と課題を検証することを目的とし、AR を用いた工場設備教育システムを開発した。開発した AR 教育システムの有効性を検証するために、(1) ベルトコンベアの基本操作方法、(2) パンチングマシンのメンテナンス方法を学習する 2 つの工場模型操作レッスンを用意し、手順書、動画、AR の 3 つの教育方法でそれぞれ学習効果、学習時間、正確さの観点で評価した。

その結果、AR は直感的な理解度や初学者への適応性に

において最も高い評価となった。特に直感的理解度や危険意識の向上が高かったものの、学習時間や疲労感に関しては改善の余地がある。動画は学習時間や疲労感に関してバランスの取れた結果を示した。動画内で指示が視覚的に確認できることから、理解度が高くなったと考えられる。手順書は最も短い学習時間となったが、直感的理解や危険意識の評価では他の手法に劣る結果となった。

以上のことから、AR を活用した教育手法によって、従来の教育方法では不十分であった初学者に対する高い適応性や危険意識の向上、および操作精度の向上という点で有効であることが示唆される。

今後の課題としては、学習時間の長さや疲労感を抑えられるように、効果的な情報の提示方法やユーザーインターフェースの改善が考えられる。また、AR の大きな利点としてトラブル対応訓練などの分岐を伴う複雑なシナリオが可能なが挙げられる。このようなシナリオを作成し、AR 教育システムの有効性を検証していく。

参考文献

- [1] 総務省統計局「労働力調査」長期時系列データ, 2024.
- [2] 「ものづくり基盤技術の振興施策」(ものづくり白書), 2024.
- [3] Wei Fang, et al. Head-mounted display augmented reality in manufacturing: A systematic review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 83, p. 102567, October 2023.
- [4] Mythreye Venkatesan, et al. Virtual and augmented reality for biomedical applications. *CR Med*, Vol. 2, No. 7, July 2021.
- [5] Vasilis Siatras, et al. Applying the Teaching Factory Paradigm and Augmented Reality Technology for Operator Training in Assembly Operations, June 2021.
- [6] Tianyi Hu, et al. Apple vs. Meta: A Comparative Study on Spatial Tracking in SOTA XR Headsets. Washington D.C., November 2024.