

[研究論文]

AR 技術を用いて作業者を支援するツールの定量的な効果分析 — ポンプ分解作業を例として —

Quantitative Effectiveness Analysis of Tools to Assist Remote Workers via AR Technology and Video Calling - Pump Disassembly Work as an Example

對馬 広大^{†*}, 宮地 英生^{*}

Kodai TSUSHIMA, Hideo MIYACHI

[†]株式会社 荏原製作所

[‡]東京都市大学

[†]EBARA Corporation

[‡]Tokyo City University

要旨

AR 技術や VR 技術等を総称した XR 技術を活用した IT ツールは、定性的な評価は行いやすい一方、実際の業務効率化に対する定量的な評価は行いづらく、これまでの既存の研究においても作成したツールの紹介や、定性的な評価を行っているだけに留まっているという課題があった。筆者らも XR 技術の産業応用を進めるに当たって、定性的な評価だけではなく定量的な評価が必要であるという同様の課題を認識している。そこで、今回は AR 技術を活用した遠隔支援ツールが作業時間へ与える効果を分析することを目的に、ポンプの分解作業を題材とした2つの実験を行った。その結果、今回題材とした作業においては指示を受け、その指示を理解して動き出すまでの時間を短縮することによって作業時間を短縮する効果があることが示唆された。

Abstract

While it is easy to conduct qualitative evaluation of IT tools utilizing XR technology, which is the generic term for AR and VR technologies, it is difficult to conduct quantitative evaluation for actual improvement of business efficiency, and existing research to date has only introduced created tools and conducted qualitative evaluation. The authors are aware of the same issue of the need for quantitative as well as qualitative evaluation when promoting industrial application of XR technology. Therefore, two experiments were conducted to analyze the effect of a remote assistance tool using AR technology on working time, using pump disassembly as the subject. The results suggest that the remote assistance tool is effective in reducing work time by shortening the time required to receive instructions, understand those instructions, and start working.

1. はじめに

近年、AR(Augmented Reality,拡張現実感)、VR(Virtual Reality,人工現実感)、およびMR(Mixed Reality,複合現実感)等の技術を総称した XR 技術は、製造業をはじめとした産業分野に応用が広まっている^[1-3]。

筆者らは XR 技術の産業応用の一つとして、製造業における業務への適用を推進してきた^[4-6]。その中で XR 技術の導入の課題として、XR 技術を導入したときの定性的な効果の測定はヒアリングで示すことは容易であり、好意的な効果を示しやすい一方で、定量的な効果を示すことは困難であることが分かってきた。特に工場における生産業務や納入した機器のメンテナンスなど、企業の生産活動に直結する領域での XR 技術導入には、業務の効率化によるコストダウンや生産性向上による費用対効果の算定を行い、生産現場から経営層までが一丸となって業務の効率化に対する納得感を形成することも重要であると感じてきた。

2. XR 技術を用いた作業支援

遠隔作業の支援は、XR 技術の中でも特に AR が有効に機能する場の1つと考えられている^[7,8]。初期の試みとして、Haringer^[9]や、Poupyrev^[10]らが2000年代初頭にコンテンツ作成の AR コンテンツを作成するためのシステムを発表している。このシステムは作業者が必要とする電子マニュアルを作業者の視界に表示することで作業者を支援するシステムであり、様々なハードウェア、およびソフトウェアが多く研究者によって提案されている。これらのシステムはすでに作業が定型作業となっており、マニ

[研究論文]

2022年11月23日受付, 2023年2月17日改訂, 2023年3月11日受理

© 情報システム学会

ュアル整備が進んでいる際に有用であると考えられる。

一方でそうではない作業，例えばある機械が故障し，原因を特定したうえで対処をする必要がある場合のような，作業手順がマニュアル化されていない非定型作業においてはその効果を十二分に発揮することは難しい．そのような場合において，筆者らは遠隔地にいる熟練者と現地にいる作業者をビデオ通話で繋ぎ，熟練者の指示を作業者の視界に表示させることで作業者を支援するツール^[11]が有用なのではないかと考えている．

本論文においては，電子マニュアルを作業者の視界に表示し，その作業を支援する技術を操作支援技術，遠隔地にいる作業者に対し，熟練者の指示を表示する技術を遠隔支援技術と呼称する．

AR を活用した遠隔支援技術は既に産業用の IT ツールとして販売が始まっており^[12-15]，熟練した技術者の経験を遠隔地の作業者へ効率よく伝えるツールとして発展が進んでいる．特に 2019 年末からの新型コロナウイルス感染拡大による国境の封鎖や，国内における移動が制限されている状況において急速に需要が高まり^[16,17]，ソフトウェア開発会社が開発を強く推進している．また，タブレット端末やウェアラブル端末などと併せて現場を支援するツールとして市場規模も拡大していくとの予測がある^[18]．

筆者らも島しょ部や海外拠点等，遠隔地の現場で発生した機器の故障に対し，熟練した作業者の経験を現地にいる作業者へ効率的に伝えたいという製造業の現場における需要の高さを認知している．そこで，タブレット端末を用いた遠隔支援技術を具備したツールを導入した．以降，このツールを遠隔支援ツールと呼称する．この遠隔支援ツールはタブレット端末同士をインターネット回線で接続し，音声とビデオによる通話に加え，ビデオ通話の画面に書き込んだ線を AR で表示する機能を具備している．動作時の画面を図 1 に示す．

本ツールを活用することで，通常ビデオ通話では「黒いボタンが三つ並んでいる隣のトグルスイッチ」や、「光っている赤いランプの隣の緑のランプの下にある青いつまみ」のような指示が必要であったが，空間上に丸を書き「このスイッチ」「このつまみ」という指示に置き換えることができ，指示をより明確かつ簡潔に伝えることが可能となり，効率的な業務支援が可能となった．この遠隔支援ツールは，筆者のヒアリングによる調査の結果，定性的な評価として作業者への指示を口頭だけで伝えるよりも，AR によって作業者への指示が画面内に線で表示されることで視覚的にも指示が伝わりやすく，作業の効率が上がったと評価されている一方，その定性的な評価を裏付ける定量的な効果があるかが算出されていないという課題が存在する．

そこで本研究では，この課題を解決するために AR を用いた遠隔支援ツールで作業者への指示を線で表示することで作業を支援した際の作業時間短縮を試み，その時間短縮度を評価することを目的とする．

3. 先行研究

AR による操作支援技術は，2 章に示した Haringer^[9]や，Poupyrev^[10]の他にも，例えば Andrew らが 2003 年に空間内の特徴点を検出し，空間内に指示を表示させる手法を開発^[19]し，さらに Edward らが 2005 年に矢印などのマーカーによる特徴点の認識する手法を報告している^[20]．また，Garhad^[21]らが 2007 年に移動する作業者に取り付けたカメラの映像から機器の形状を特定し，その機器の表面を特定して指示を表示させる技術を開発している．同様に遠隔支援技術は Bauer^[22]らがアプリケーションの 1999 年に実証研究を行っている．さらに，2012 年と 2014 年には Gauglitz^{[23][24]}らが現在の遠隔支援の形に近いアプリケーションを報告している．

これら AR のアプリケーション開発は近年も盛んに行われており，様々なフレームワークが提案されているが，Blattgerste らはそれらの提案はしばしばフレームワークやプロトタイプを説明するだけで，提案されたツールの評価はしていないと 2019 年に指摘している^[25]．そこで，本研究では市販品の AR による遠隔支援ツール(図 1)の効果測定を行う．これにより，製造業が導入しやすい市販品の AR による遠隔支援ツールにおいて，指示が伝わりやすいという事前ヒアリングによる定性的な評価に対し，実作業時間を測定し，定量的な効果の評価での裏付けを行う．

もちろん，Blattgerste の指摘はあるものの XR 技術を用いたアプリケーションに対して，定量的な効果測定が試されていない訳ではない．定量的な効果測定の先行研究として，VR 技術においては，伊藤ら^[26]，そして丸山ら^[27]が 2020 年に，岡本ら^[28]が 2021 年に VR 教材に対する効果測定を実施しており，いずれも VR により作成した教育コンテンツが，教育にどのような効果を発揮したかを測定した研究が存在する．いずれの研究においても，被験者となった学生の理解度や，定着度が向上したと報告している．また，AR に対する定量的な効果測定は，Gauglitz^[24]らが 2014 年に，瀧塚^[29]ら，および遠山ら^[30]がいずれも 2016 年に，Lim^[31]らが 2018 年に Blattgerste^[25]ら，および Radu^[32]らが 2019 年に，作業支援技術を具備したツールにおいて実施しており，被験者の作業時間の短縮，および正答率，学習意欲が向上

したと報告している。

これらの XR 技術を活用した様々なツールにおいて定量評価の研究はされているものの、これらの定量評価の多くは研究室で開発されたシステムを評価するために実施されており、教育の現場での意欲向上を評価している事例が多く、市販されているツールを活用した作業における時間短縮に焦点をあてた評価は行われていない。

そこで本研究では、AR を用いた線による作業の指示の表示の有無に着目し、AR を用いずに作業を支援した場合と市販品の AR を活用したツールを用いて作業を支援した場合を比べ、作業における時間短縮について調査する。



図1 ARによる遠隔支援ツールの一例

4. 実験方法

本研究では作業の指示を出す際に AR による指示による視覚的な支援がある場合と無い場合で、どちらが効率的な作業を行うことが出来るかを比較検討する。まず実験 A として AR によって作業支援を行うことで作業時間全体が短縮されるかを計測した。給水用ポンプのメンテナンスを想定した作業手順を構築し、被験者をランダム化比較実験(Randomized Controlled Trial, RCT)の手法で AR 有りもしくは AR 無しに二群にランダムに割り付け、タブレット端末を保持した被験者に対し、同じくタブレット端末を保持し作業手順を熟知している指示者が指示を出し、作業完了までの時間をストップウォッチで測定した。

次に、実験 B として AR による作業支援は作業におけるどの工程を短縮するかを計測した。作業者が指示を受けて作業する場合、作業工程は指示を受ける→指示を理解する工程と、必要に応じてタブレット端末を置く→作業する工程の2つに分けられると考えられる。実験 A とは違う被験者を用意し、実験 A と同様の手順で二群に割り付けた被験者に、実験 A と同じ作業を被験者に実施してもらい、その各作業手順の動作の様子を録画し各作業手順における2工程の時間をストップウォッチで計測した。

4.1. 実験 A における実験内容

4.1.1. AR による遠隔支援ツールのシステム構成

本実験で用いたタブレット端末のスペックを表1に示す。

表1 実験で用いたタブレット端末

機種	iPad Air(第4世代)
容量	256GB
チップセット	64bitA14チップ

4.1.2. 実験空間

本実験の実験空間における被験者と指示者の位置関係の様子を図2に、空間の俯瞰図を図3に示す。3m×3mの空間内にポンプと被験者、そして指示者を配置した。本研究で用いた遠隔支援ツールは音声通話の機能を具備しているが、ARによる指示の表示と作業時間との関係性を見ることに主眼を置いて

いるため、音声通信の乱れによる実験への影響を抑える必要がある。よって本研究で行った実験においては同一空間内から指示を出すことでその影響を抑えることとした。



図2 実験空間における被験者と指示者の位置関係

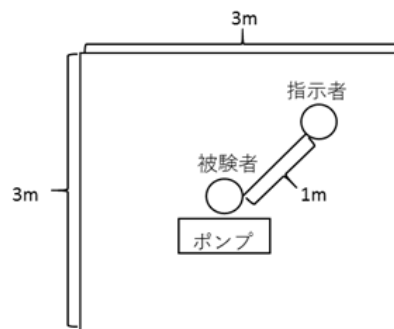


図3 実験空間の俯瞰図

4.1.3. 遠隔支援ツール

本実験では PTC 社が市販している AR による遠隔支援ツール『VuforiaChalk[10]』を用いた。このツールは、2 章で示したように、ビデオ通話機能と、任意の形状の AR マーカーの表示機能を具備したツールである。作業員、および指示者の間でビデオ通話を開始すると、図4のように作業員の端末が特徴点の検出を開始する。



図4 特徴点検出の様子

被験者は端末を対象物に近づけたり、遠ざけたりすることで端末に空間を認識させる。端末が空間認識を完了させると、指示者、もしくは作業員が画面上に書き込んだ線が AR 表示で視認できるようになる。図1に示しているように、記入者は線の色で区別される。また、書き込んだ線は端末が特徴点によ

って認識した3次元空間に固定されるため、端末の向きを変更すると、図5および図6で示すように、書き込んだ形状を他の向きから見る事が可能となる。図5で書き込んだ線を横から見た状態が図6である。

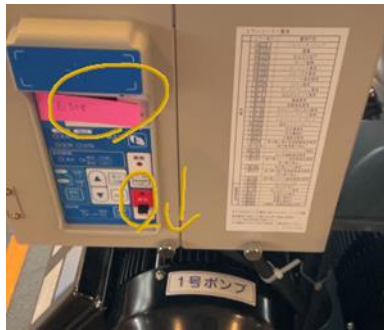


図5 正面からARマーカを書き込んだ様子

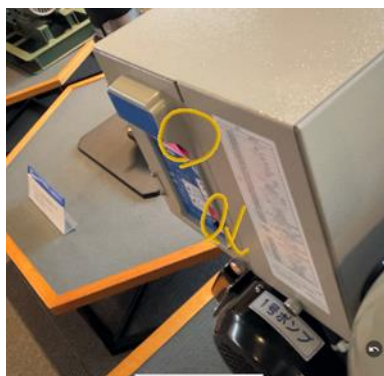


図6 図5の状態を横から見た様子

4.1.4. テストプロトコルについて

本実験では、現実空間に設置している給水用ポンプ(図7)に対し、実際のメンテナンス手順と同一の分解作業を実施する。この給水用ポンプは民間向けに販売されており、一定の台数が市中に存在していること、既に音声通話を用いてメンテナンスの指示が行われていること、特別な器具を用いなくても分解が可能であることから実験対象として選定した。分解手順は以下に示す通りである。



図7 実験に用いた給水用ポンプ

- ① 被験者は制御盤に表示されている内容(本実験ではポンプに電源を供給していないため制御盤表示部に貼り付けられている付箋の文字)を読み取る(図8赤枠部)
- ② 被験者は制御盤からポンプの運転を停止する(図8緑枠部)
- ③ 被験者は制御盤正面に存在するネジを2か所取り外す(図8黄枠部)

- ④ 被験者は制御盤上面に存在するネジを2か所取り外す(図8 青枠部)
- ⑤ 被験者は制御盤外部カバーを取り外す
- ⑥ 被験者は制御盤の電源供給を停止する(図9 赤枠部)
- ⑦ 被験者はポンプに電源を供給するブレーカーを2か所遮断する(図9 緑枠部)
- ⑧ 被験者はポンプへ電源供給する配線を2か所取り外し、
上下を入れ替えた上で再装着する(図10 赤枠部)
- ⑨ 被験者は配管外側に位置する外部配管のバルブを閉鎖する(図11 赤枠部)
- ⑩ 被験者は配管内側に位置する外部配管のバルブを閉鎖する(図11 緑枠部)



図8 給水ポンプ外観部



図9 制御盤内電源部



図10 制御盤内配線部

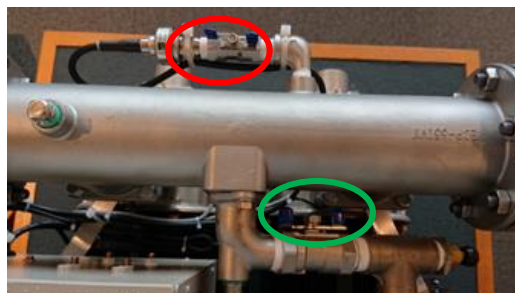


図11 外部配管部

4.1.5. 被験者の群分けについて

本実験では、被験者を AR 表示有り(A 群)または AR 表示無し(B 群)の 2 群にランダムに振り分け実験を行った。A 群の被験者の場合、指示者は口頭での指示に加え、図 12 で示すように、AR によるマーカーによって空間に線を引きながら被験者に対し作業の指示を出した。一方、B 群の被験者の場合、図 13 で示すように AR によるマーカーの指示は行わず、口頭のみで指示を行った。A 群、および B 群の被験者の条件を整理したものを表 2 に示す。



図 12 A 群の被験者に対する手順③の指示の様子



図 13 B 群の被験者に対する手順③の指示の様子

表 2 A 群および B 群の被験者の条件

	口頭による指示	ARによるマーカー指示
A群(ARあり群)	あり	あり
B群(ARなし群)	あり	なし

4.1.6. 被験者の属性について

本実験では給水ポンプの設計、販売、物流に関わる部門員から実験の参加者を募り、実験参加に対し同意を得た 20 代～60 代の男女 19 名(以下、被験者と呼称する)を対象とした。年齢、性別、および振り分けた群を表 3 に示す。被験者はいずれも設計、販売、物流に関わっていることから今回実験対象とした給水ポンプの存在や基本的な構造の知識は有しているが、メンテナンスを専業としていないため今回のテストプロトコルに示した詳細な分解手順は前提知識として有していない。

表 3 実験 A に参加した被験者の属性

年齢	性別	割当群	部門
22	男性	B	販売
22	女性	B	販売
34	男性	B	設計
22	男性	A	設計
50	男性	B	物流
41	女性	A	物流
60	男性	A	物流
42	男性	B	設計
44	男性	A	販売
54	女性	B	設計

年齢	性別	割当群	部門
25	女性	A	設計
24	女性	B	販売
61	男性	A	物流
55	男性	A	物流
52	男性	A	物流
33	女性	B	販売
29	男性	B	設計
49	男性	B	物流
26	男性	A	販売

4.1.7. 指示者について

本実験における指示者は1名に限定した。指示者は本実験手順を熟知しており、口頭、及びタブレット端末の画面上に書いて指示する内容は紙に出力し、実験中にいつでも参照可能な状態で実験を行った。これは指示者が指示を出す時間と、内容のバラつきを排除し、実験結果として得られる作業時間への影響を極力与えないためである。

4.1.8. 倫理的配慮について

本実験を実施するに当たり、実験内容、および実験データの取り扱い方法を書面で東京都市大学「人を対象とする研究」に関する倫理審査委員会に提出し、承認を得た(承認番号 2021-h02)。実験前に被験者には実験への参加は任意であること、実験からの離脱は自由であること、そして実験への不参加や離脱に際し被験者に不利益が及ばないことを説明し同意書を取得した。

4.1.9. データ取得方法について

被験者には実験開始直前に AR 表示有り (A 群) または AR 表示無し (B 群) であることを伝え、特徴点検出を完了させた状態のタブレット端末を渡し、作業手順を開始した。作業手順①の開始と同時にストップウォッチを作動させ、作用手順⑩の終了と同時にストップウォッチを停止し、その時間を記録した。

4.2. 実験 A の実験結果と分析および考察

4.2.1. 実験 A の実験結果

19名の被験者に対する実験結果を表4に示す。

表 4 実験 A の実験結果(単位:秒)

	A群(n=9)	B群(n=10)
平均	211.11	261.40
中央値	225	252
標準誤差	9.21	9.12
標準偏差	27.64	28.83
分散	763.86	830.93
最小	163	231
最大	240	314

4.2.2. 実験 A の実験結果の分析

今回実施した実験結果は表4の通りである。本節では表4の結果を分析し、ARによる遠隔支援ツールの効果の有無を議論する。

A 群および B 群の間で作業時間に差があるかを検討する為にノンパラメトリック検定である Mann-Whitney の U 検定^[33]を用いた。これはサンプルサイズが小さいことに加え、データの分布が正規

分布形であると判断できないためである。データの処理には Python のライブラリである SciPy^[34]の stats モジュールに搭載されている mannwhitney^[35]関数を用い、帰無仮説 H_0 を両群間の分布に差はない、対立仮説 H_1 を両群間の分布に差があると設定し、有意水準 $\alpha=0.05$ として U 検定を実施した。その結果、 $p=0.0019<0.05$ であり、A 群と B 群の間には分布に差があることが示された。表 4 で示したように、作業の平均値、および中央値を比較すると A 群(AR 表示あり)の方が作業時間は短いことから、AR を用いることで、今回の実験手順においては平均時間が約 50 秒、20%程度作業効率が向上することが示された。

4.2.3. 実験 A の実験結果の考察

本実験から、同一の作業手順に対して作業者に対し指示を出す場合、AR を用いた方が作業時間を短縮する効果があることが示唆された。これは指示者がこれまで口頭のみで「制御盤の上面側にある黒いつまみの下のトグルスイッチ」と指示していたところを、指示者が空間上に図 9 の赤丸の様に丸を書き、「このスイッチ」と指示するだけで作業者に対して指示が伝わるようになるためであると考えられる。実験中の様子を観察したところ、AR による指示によって、この指示を受ける→指示を理解するという工程が短縮されたため、作業時間が短縮したものと考えられる。タブレット端末を置く→作業するという工程は作業者の器用さや力の有無が作業時間に大きく影響するため、AR による支援の有無は影響が小さいと考えられる。

4.3. 実験 B における実験内容

4.3.1. 実験 B の内容について

実験 B における実験内容、および指示者は実験 A と同一である。被験者は新たに給水ポンプの設計、販売、物流に関わる部門員から実験の参加者を募り、実験参加に対し同意を得た 20 代～60 代の男女 19 名(以下、被験者と呼称する)を対象とした。これは一度実験に参加した被験者の場合、作業内容を覚えていること、作業への慣れが発生することが実験結果に大きく影響するためである。

年齢、性別、および振り分けた群を表 5 に示す。被験者はいずれも設計、販売、物流に関わっていることから今回実験対象とした給水ポンプの存在や基本的な構造の知識は有しているが、メンテナンスを専業としていないため今回のテストプロトコルに示した詳細な分解手順は前提知識として有していない。また、全ての作業手順は録画を行っている。

表 5 実験 B に参加した被験者の属性

年齢	性別	割当群	部門
35	男性	X	設計
52	男性	X	物流
51	男性	Y	物流
22	女性	X	販売
36	男性	X	物流
28	女性	Y	販売
57	男性	Y	販売
59	男性	Y	物流
50	女性	Y	販売
30	女性	X	物流
60	男性	X	物流
32	女性	X	販売
35	男性	X	販売
41	男性	Y	設計
40	女性	X	販売
48	男性	Y	物流
23	男性	Y	販売
39	男性	Y	物流
24	男性	X	販売

4.3.2. データ取得方法について

被験者には実験開始直前に AR 表示有り(X 群)または AR 表示無し(Y 群)であることを伝え、実験手順①の開始から実験手順⑨の終了までを録画した。実験終了後に録画を再生し、被験者に指示を出して被験者がタブレット端末を見ている時間(指示時間)、および被験者が指示を受けて動いている時間(作業時間)を計測した。ただし、AR 表示による指示を行っておらず、AR の有無が作業結果に影響を及ぼさない「⑤被験者は制御盤外部カバーを取り外す」の工程は時間を計測していない。被験者がタブレット端末を見ながら作業している場合は作業工程時間として計上した。指示工程時間、および作業工程時間の計測の誤差を減らすため、1 手順につき 3 回ずつ計測を行い、その平均値を計測結果とした。

4.4. 実験 B の実験結果と分析および考察

4.4.1. 実験 B の実験結果

実験 B の結果として、X 群と Y 群の指示工程時間を表 6 に、X 群と Y 群の作業工程時間を表 7 にそれぞれ示す。

表 6 指示工程時間(単位:秒)

	手順1		手順2		手順3		手順4			
	X群	Y群	X群	Y群	X群	Y群	X群	Y群	X群	Y群
平均	3.200	5.630	3.519	7.824	2.706	5.551	3.147	5.764		
標準誤差	0.154	0.563	0.172	0.816	0.183	0.274	0.285	0.543		
中央値	3.280	5.080	3.495	7.810	2.735	5.420	2.865	5.630		
標準偏差	0.486	1.690	0.545	2.447	0.578	0.822	0.902	1.630		
最小	2.440	3.720	2.890	4.450	1.960	4.510	1.880	3.360		
最大	3.880	8.470	4.730	11.100	3.940	6.440	4.360	9.260		

	手順6		手順7		手順8		手順9		手順10	
	X群	Y群	X群	Y群	X群	Y群	X群	Y群	X群	Y群
平均	2.873	10.950	3.619	5.463	12.252	12.776	8.157	7.766	7.424	11.990
標準誤差	0.184	2.031	0.207	0.358	2.110	1.058	0.663	0.669	0.550	2.226
中央値	2.940	9.720	3.600	5.140	9.285	13.620	7.295	6.720	7.510	8.360
標準偏差	0.580	6.093	0.656	1.073	6.671	3.175	2.095	2.007	1.740	6.679
最小	1.810	5.400	2.670	3.980	6.580	8.520	5.250	5.870	5.360	6.340
最大	3.640	25.290	4.740	7.600	28.690	17.820	10.860	12.110	10.250	24.740

表 7 作業工程時間(単位:秒)

	手順1		手順2		手順3		手順4			
	X群	Y群	X群	Y群	X群	Y群	X群	Y群	X群	Y群
平均	3.790	3.647	2.399	2.061	17.883	15.114	16.359	13.280		
標準誤差	0.284	0.367	0.208	0.164	1.504	0.955	1.116	1.000		
中央値	3.825	3.480	2.410	2.080	18.200	15.220	16.735	14.250		
標準偏差	0.898	1.101	0.656	0.492	4.756	2.866	3.530	2.999		
最小	2.460	2.010	1.580	1.350	5.510	11.790	11.520	7.430		
最大	5.780	5.000	3.500	2.890	22.360	19.860	21.480	16.610		

	手順6		手順7		手順8		手順9		手順10	
	X群	Y群	X群	Y群	X群	Y群	X群	Y群	X群	Y群
平均	1.684	1.564	4.065	3.933	26.448	24.271	3.188	3.052	2.879	3.290
標準誤差	0.203	0.247	0.434	0.616	2.340	2.627	0.373	0.404	0.319	0.280
中央値	1.535	1.260	3.420	3.250	28.095	27.230	3.220	2.770	2.900	3.250
標準偏差	0.641	0.742	1.372	1.847	7.401	7.880	1.181	1.212	1.007	0.841
最小	0.550	0.970	2.480	1.960	14.750	10.450	1.240	1.320	0.870	1.840
最大	2.910	3.090	6.710	7.040	36.540	35.240	5.010	4.940	4.800	4.580

4.4.2. 実験 B の実験結果の分析

次に、表 6 及び表 7 で示した実験結果に対し、帰無仮説 H_0 を両群間の分布に差はない、対立仮説 H_1 を両群間の分布に差があると設定して有意水準 $\alpha=0.05$ として U 検定を実施した。その上で、U 検定の実施結果を表 8 および表 9 に示す。

表 8 各手順における指示時間の U 検定結果

*:p<0.05 **:p<0.01 ***:p<0.001

	X群平均	Y群平均	p値
手順1***	3.200	5.630	0.00052
手順2***	3.519	7.824	0.00038
手順3***	2.706	5.551	0.00028
手順4***	3.147	5.764	0.00094
手順6***	2.873	10.950	0.00028
手順7***	3.619	5.463	0.00070
手順8	12.252	12.776	0.43794
手順9	8.157	7.766	0.54011
手順10	7.424	11.990	0.09417

表 9 各手順における作業工程時間の U 検定結果

*:p<0.05 **:p<0.01 ***:p<0.001

	X群平均	Y群平均	p値
手順1	3.790	3.647	0.90252
手順2	2.399	2.061	0.30743
手順3*	17.883	15.114	0.04546
手順4	16.359	13.280	0.13091
手順6	1.684	1.564	0.34753
手順7	4.065	3.933	0.54011
手順8	26.448	24.271	0.59545
手順9	3.188	3.052	0.83826
手順10	2.879	3.290	0.34775

表 8 の分析結果より、手順 8~10 を除き、X 群が Y 群よりも有意に指示工程時間が短縮され、作業時間の標準偏差が小さくなることが示された。また、作業時間においては表 9 の分析結果より、手順 3 において、Y 群の方が作業時間を有意に短縮した。よって、先に立てた仮説通り、今回の実験で行った作業において、AR マーカーを用いて作業指示を出すことで指示工程時間が有意に短縮される作業が存在することが示唆された。一方、AR を用いることで作業工程時間が長くなる作業が存在することも示唆された。

4.4.3. 実験 B の実験結果の考察

実験 B の結果から、AR による作業指示は指示者が指示を出し、作業者がそれを理解して作業に移るまでの時間を短縮する工程に作用し、手順 3 の様に AR を用いることで作業時間が長くなる作業がありながらも、結果として作業全体の時間を短縮する効果があると考えられる。

一方で、指示工程の時間が有意に短縮されなかった作業が存在する。本実験における手順⑧~⑩における作業であるが、これらは図 10 および図 11 に示しているように周囲に同様の形状や特徴を示す箇所が少なく、「画面中央の配線が縦に連なっている箇所」や、「画面中央上部の青いゴムが付いたバルブ」などの様に、特徴的な箇所を口頭で示した場合は AR マーカーと同様に指示が伝わりやすいためであると考えられる。

5. まとめ

本研究では、市販品の AR を用いた遠隔支援ツールを用いて作業を支援した際の作業時間短縮を試み、その時間短縮の評価を行った。その結果、本事例で用意したポンプの分解作業の一例ではあるが、20%程度の時間短縮が認められた。

筆者らはまず実験 A として、AR による遠隔支援ツールを用いて、AR による支援の有効性を作業者の作業時間を測定することで定量的に評価した。その結果、AR による支援が作業時間全体を短縮することが示された。

次に、AR による遠隔支援が有効な作業要素を抽出するために実験 B を実施し、作業時間全体を短縮する効果は作業者へ指示を出す時間の短縮によって得られることが示された。但し、特徴的な箇所を口頭で指示できる場合、AR による遠隔支援の有意な効果を示さなかった。口頭で表現が困難な指示において、AR による遠隔支援が特に効果的であることが示唆された。

これらの結果から、AR の遠隔支援ツールの利用によって指示を受けて理解するまでの時間を短縮する作業があるという定量的な裏付けを得た。

今後、さらに製造業の実現場における様々な作業を想定した手順を用意し、AR による遠隔支援が有効な作業特性の模索や、作業経験で被験者を分けることで AR による遠隔支援が有効な属性を持つ作業者を模索すると共に、指示者もランダムに割付けた実験を行うことで、AR による遠隔支援の更なる特性を模索したい。

本研究で用いた XR 技術以外にも様々な技術に対して産業応用には欠かせない定量的な評価を継続して行い、産業応用分野における XR 技術の導入効果を定量評価する手法を確立させたい。

6. 利益相反に関して

本実験に用いたタブレット端末は小売店から購入したものであり、本稿執筆時点でタブレット端末の開発元との利害関係は存在しない。

本実験に用いた AR 遠隔支援ツールは、販売代理店から当社調達手続きに則ってライセンスを購入したものであり、本稿執筆時点でソフトウェアの開発元との利害関係は存在しない。

謝辞

本実験に協力頂いた被験者の皆さまにこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 久保田 瞬, “産業応用から芽吹く VR,” 日本バーチャルリアリティ学会, 24 巻, 2 号, pp.7-8, 2019.
- [2] 一般財団法人機械システム振興協会, “ヘッドマウントディスプレイを中心とした没入型映像システムに関する戦略策定,” p.53, 2017.
- [3] 日本情報システム・ユーザー協会(JUAS), “企業 IT 動向調査報告書,” 2020.
- [4] 對馬広大, 平田和也, “XR 技術を用いたポンプ補器類・配管配置の確認,及び流動状況の把握,” 株式会社荏原製作所, エバラ時報, 260 号, pp.3-8, 2021.
- [5] 對馬広大, “VR 技術を用いた DX~製造業の VR 活用の最前線,” 環境新聞社, 月刊下水道 7 月号, 2020.
- [6] BUILT, “ポンプ機場で有効な流れ場や最適な配管の取り回しなどを確認可能な VR 活用事例,” <https://built.itmedia.co.jp/bt/articles/2003/10/news037.html>, 2021-10-22 参照.
- [7] 原英樹, 他, “AR 技術で実現するスマートデバイスを活用した現場業務革新,” 富士通株式会社, Fujitsu, 66 巻, 1 号, pp.11-17, 2015.
- [8] 山崎賢人, 他, “商品物流における 仕分け作業支援への複合現実感技術の応用(3),” 情報処理学会, 情報処理学会研究報告, Vol.2015-CVIM-195, 34 号, pp.1-6, 2015.
- [9] Matthias Haringer and Holger T. Regenbrecht, “A Pragmatic Approach to Augmented Reality Authoring,” ISMAR 2002: In Proceedings of the 1st International Symposium on Mixed and Augmented Reality, IEEE, pp.237-245, 2002.
- [10] Ivan Poupyrev, et al, “A Mixed Reality Authoring Interface,” Human-Computer Interaction INTERACT'01, Vol.1, pp.334-341, 2001.
- [11] 今井博, “AR 技術を用いた現場支援システムの研究,” 大成建設技術センター報, 41 号, pp.56-1-56-4, 2008.
- [12] VuforiaChalk, <https://www.ptc.com/ja/products/vuforia/vuforia-chalk>, 2021.10.22 参照.
- [13] AR 匠, <https://solutions.ostechnology.co.jp/artakumi.html>, 2021.10.22 参照.
- [14] TeamViewerAssistAR, <https://www.teamviewer.com/ja/augmented-reality/>, 2021.10.22 参照.

- [15] Dynamics365RemoteAssist, <https://dynamics.microsoft.com/ja-jp/mixed-reality/remote-assist/>, 2021.10.22 参照.
- [16] 日経ビジネス, “横河電機奈良社長「リモート制御需要がものすごい」,” <https://business.nikkei.com/atcl/gen/19/00155/060800004/>, 2021.10.22 参照.
- [17] 化学工業日報 (先端材料・部材), “スマートグラス需要拡大 工場保守を遠隔支援(2021/05/01),” 化学工業日報社, <https://www.chemicaldaily.co.jp/category/material/>, 2021.10.22 参照.
- [18] 株式会社矢野経済研究所, “2020 フィールドワーク支援ソリューション市場の実態と展望 ～人手不足対応、働き方改革、ノウハウ継承／教育・トレーニングに向けた ICT 活用～ (概要版),” pp.3-4, 2020.
- [19] Andrew J. Davison, et al., “Real-Time Localisation and Mapping with Wearable Active Vision,” ISMAR 2003: Proceedings of International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.18-27, 2003.
- [20] Edward Rosten, et al., “Real-Time Video Annotations for Augmented Reality,” ISVC '05: Proceedings of the First International Conference on Advances in Visual Computing, pp.294-302, 2005.
- [21] Gerhard Reitmayr, “Semi-automatic Annotations in Unknown Environments,” ISMAR 2007: Proceedings of International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.67-70, 2007.
- [22] M. Bauer, et al, ““Where are you pointing at?” A Study of Remote Collaboration in a Wearable Video Conference System,” ISWC '99: Proceedings of the 3rd International Symposium on Wearable Computers, IEEE, pp.151-158, 1999.
- [23] Gauglitz, et al., “Integrating the Physical Environment into Mobile Remote Collaboration,” MobileHCI '12: Proceedings of the 14th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, pp.241-250, 2012.
- [24] Gauglitz, et al., “World-Stabilized Annotations and Virtual Scene Navigation for Remote Collaboration,” In Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.449-459, 2014.
- [25] Jonas Blattgerste, et al., “Authorable Augmented Reality Instructions for Assistance and Training in Work Environments,” MUM '19: Proceedings of the 18th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, pp.1-11, 2019.
- [26] 伊藤豊, 他, “資源開発教育用 VR 教材の開発および VR 教材を利用した授業の定量評価,” 資源・素材学会, Journal of MMIJ, 136 巻, 5 号, pp.33-39, 2020.
- [27] 丸山智美, 他, “VR を活用した「火」の学びの教材,” 日本調理科学会, 日本調理科学会誌, 53 巻, 4 号, pp.64-69, 2020.
- [28] 岡本健太郎, 他, “VR (Virtual Reality) 技術の医学教育への有効性,” 日本小児放射線学会雑誌, 37 巻, 1 号, pp.68-74, 2021.
- [29] 瀧塚令子, 他, “AR 技術を利用した操作支援装置の有用性についての検証—実用に即したユースケースを使った実験結果の報告—,” ITE Technical Report, 40 巻, 26 号, pp.46, 2016.
- [30] 遠山貴大, 他, “シースルー型ウェアラブルメガネを用いた AR による作業効率向上への効果,” 情報処理学会, 情報処理学会研究報告, Vol.2016-CVIM-200, 46 号, pp.1-4, 2016.
- [31] Chor-Kheng Lim, et al., “Application AR in Field Experience Education: Development of Teaching Aids in Chinese Literature and Taoyuan Local Culture,” ICETC '18: Proceedings of the 10th International Conference on Education Technology and Computers, pp.3-6, 2018.
- [32] Iulian Radu, et al, “What Can We Learn from Augmented Reality (AR)?,” CHI '19: Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1-12, 2019.
- [33] Mann, H.B., Whitney, D.R., “On a Test of Whether One of Two Random Variables Is Stochastically Larger than the Other,” Annals of Mathematical Statistics, Vol.18, pp.50-60, 1947.
- [34] SciPy, <https://scipy.org/>, 2023-02-08 参照.
- [35] [scipy.stats.mannwhitneyu](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.mannwhitneyu.html), <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.mannwhitneyu.html>, 2023-02-08 参照.

著者略歴

對馬 広大 (つしま こうだい)

2017 年東京理科大学経営学部卒業。同年株式会社荏原製作所入社。2019 年技術・研究開発統括部に異動, 2021 年 XR 技術推進課設立に伴い異動。同年東京都市大学大学院環境情報学研究所に入学。現在に至る。

宮地 英生 (みやち ひでお)

1987 年岡山大学大学院工学研究科修了。同年久保田鉄工株式会社入社。2006 年東京大学大学院工学研究科修了。クボタコンピュータ出向後, サイバネットシステム株式会社を経て 2015 年東京都市大学教授。現在に至る。