

青山学院大学理工学部
情報テクノロジー学科
2024年度卒業研究論文

拡張と仮想現実の違いがタスクパフォーマンスに与える影響の比較

2025年1月28日提出

指導教員 ロペズ・ギヨーム教授

提出者学生番号 氏名
15821057 田中 崇登

拡張と仮想現実の違いがタスクパフォーマンスに与える影響の比較

田中崇登（15821057）

ロペズ研究室

1.はじめに

拡張現実（AR）技術と仮想現実（VR）技術の市場規模は急速に拡大しており、その応用範囲は教育、医療、エンターテインメント、製造業など多岐にわたる[1]。特に製造業では、生産性向上やコスト削減を目的にXR技術の導入が進んでおり、MRグラスを活用したシステムを導入し、パネルの組立作業の作業効率を向上させた事例が存在する[2]。一方、これら両技術の特性やユーザー体験における差異についての比較研究は十分に行われていない。

そこで本研究では、ARおよびVRを用いたタスク遂行システムを構築し、両技術の性能とユーザー体験の差異を比較・評価する。

2.関連研究

Verhulstらは、博物館の体験イベントを題材に、VRデバイスとARデバイスのユーザー体験を比較し、VRがARよりも空間的臨場感や没入感で優位性を示すことを報告した[3]。また、Hirotaらは、VRヘッドマウントディスプレイと2Dディスプレイを用いた視覚的疲労の比較を行い、瞬目回数が視覚的疲労を評価する指標として有効である可能性を示した[4]。特に、瞬目回数が少ないほど視覚的負荷が高まり、疲労を引き起こしやすいことが示唆されており、この指標は視覚的ストレスやデバイスの影響を測定する上で有用である。

3. AR・VRを用いたアームロボット操作システム

本研究では阿部ら[5]がHoloLens2[6]向けに制作・開発した「拡張現実とインプットデバイスを用いたアームロボットリモートコントロールシステム」（以下ARアプリと記載）を元に、Meta Quest 3[7]向けのアームロボット操作システムを開発した（以下VRアプリと記載）。

図1-2にアプリケーションの全体図を示す。それぞれのアプリでは仮想的に提示されたボタンを操作し、ロボットアームを動かしてブロックを指定の位置に移動させるタスクを遂行する。図3にタスク実行中の様子を示す。

さらに、ARおよびVR環境でタスクを実行中の瞬目回数をタスクパフォーマンス評価指標の一つとして用いるため、HoloLens 2にはPupil Labs HoloLens Add-on[8]を、Meta Quest 3にはPupil Labs VR/AR Eye Tracking Module[9]をそれぞれ装着し、視線情報を取得した。本研究では、瞬目回数が視覚的疲労を評価する客観的指標として有効であることがHirotaらの研究[4]で示されていることから、これをパフォーマンス評価と関連付けて使用する。特に、ARおよびVRデバイスでの視覚的負荷がタスク遂行能力に与える影響を定量的に把握する目的がある。

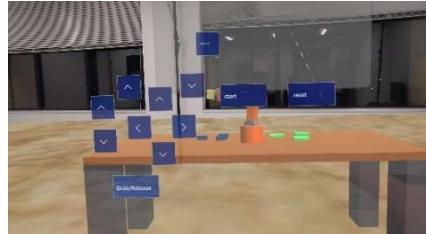


図1 ARアプリの全体図

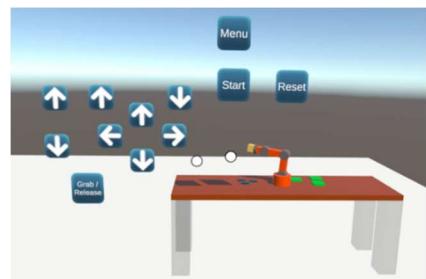


図2 VRアプリの全体図

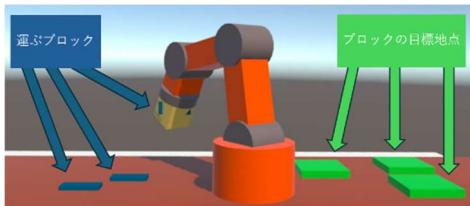


図 3 タスク実行中の様子

4. 各アプリケーションのパフォーマンス比較手順

AR 及び VR アプリにて同様のタスクを課し、違いを比較し評価した。本研究では各アプリでのタスク実行時間と、実行中の瞬目回数を定量評価指標として用いた。

実験手順として、被験者 10 名（男性:8 人、女性:2 人）は操作説明を受けた後に 5 人は AR、5 人は VR アプリを先に使用する。その後 5 分間の休憩をとり、もう一方のアプリを使用する。また操作後に操作性、視認性を評価するため SUS アンケートと独自に作成したアンケートを実施した。

5. 結果

図 4 にタスク実行時間の結果を示す。VR アプリにてタスクを行った際は AR アプリに比べてタスク完了時間が有意に短縮されることが示された ($p<0.01$)。

タスク実行中の瞬目回数に関しては AR アプリにてタスクを行った際に VR アプリよりも瞬目回数が有意に減少することが示された。($p<0.01$)。

また主観評価に関して、SUS アンケートによるユーザビリティ評価では平均値が AR アプリが 54.8 点、VR アプリが 70.8 点であり、VR アプリの方が評価が高い結果となった。また、主観評価に関して、独自のアンケートの結果では、操作性と視認性で VR が AR を上回る一方、UI は両者で同程度の評価となった。これにより、VR は操作性と視認性で優位性を示すことが確認された。

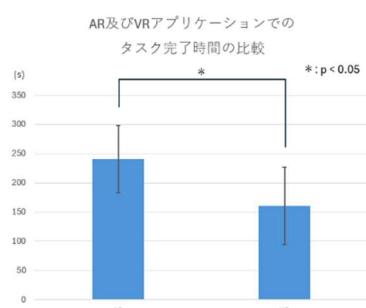


図 4 各アプリケーションでのタスク完了時間の比較

6. まとめ

本研究では、AR と VR を用いたアームロボット操作システムを構築し、性能を比較評価した。結果、VR はタスク実行時間が短く、ユーザビリティに優れる一方、AR は瞬目回数が少ない結果を示した。

本研究では、評価は 1 回のタスク実施に限られ、慣れや習熟度の影響は未検討である。今後は長期的評価や他システムへの適用を通じ、より直感的で効率的な設計を目指す。

参考文献

- [1] Fujitsu: その課題、情くんにおまかせ！第 10 話，<https://jp.fujitsu.com/platform/server/advantages/special/jokun/10-ar/> (2025/1/24 参照)
- [2] 三菱重工技報 Vol.59 No. 3: MR グラス活用による現場作業効率化，<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/593/593090.pdf> (2025/1/24 参照)
- [3] I.Verhulst, A.Woods, L.Whittaker, J.Bennett, P.Dalton: Do VR and AR versions of an immersive cultural experience engender different user experiences?, Computers in Human Behavior 125. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0747563221002740?ref=cra_js_challenge&r=RR-1
- [4] M. Hirota, H. Kanda, T. Endo, T. Miyoshi, S. Miyagawa, Y. Hirohara, T. Yamaguchi, M. Saika, T. Morimoto, T. Fujikado: Comparison of visual fatigue caused by head-mounted display for virtual reality and two-dimensional display using objective and subjective evaluation. <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/00140139.2019.1582805?needAccess=true>
- [5] H.Abe, V. Blanco Bataller, H.Terävä, M. Luimula, G. Lopez, "Combining AR and ball-shape input interface to control remotely a robot-arm," AHFE Open Access, vol 121 (2024). doi:10.54941/ahfe1004628
- [6] HoloLens2, Microsoft 社. <https://www.microsoft.com/ja-jp/d/hololens-2/91pnzznzwcp?activetab=pivot:%E6%A6%82%E8%A6%81tab>
- [7] Meta Quest3. Meta 社, <https://www.meta.com/jp/quest/quest-3/> (2025/1/24 参照)
- [8] Hololens and BT300 eye tracking add-ons. PupilLabs 社, <https://pupil-labs.com/blog/hololens-bt300-addon> (2025/1/24 参照)
- [9] Eye tracking for mixed reality. PupilLabs 社, <https://pupil-labs.com/products/vr-ar> (2025/1/24 参照)

目次

第1章 序章	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 拡張現実・仮想空間技術の現状	1
1.1.2 拡張現実技術と仮想空間技術の差別化	2
1.1.3 製造業における XR 技術の活用	3
1.2 研究目的	4
1.3 本論文の構成	5
第2章 拡張現実・仮想空間に関する研究	6
2.1 AR・VR に関する研究	6
2.1.1 製造業での XR 研究	6
2.1.2 医療分野での XR 研究	8
2.1.3 教育分野での XR 研究	9
2.1.4 エンタメ分野での XR 研究	9
2.2 視覚的負荷に関する研究	10
2.3 AR/VR の比較に関する研究	11
2.4 先行研究のまとめ	11
第3章 拡張現実・仮想空間技術を用いたアームロボット操作システム	12
3.1 システム概要	12
3.2 アプリケーションのタスク内容	14
3.3 使用デバイス	15
3.3.1 AR デバイス	15
3.3.2 VR デバイス	16
3.3.3 AR デバイスに装着する視線情報取得デバイス	16
3.3.4 VR デバイスに装着する視線情報取得デバイス	17
3.4 ソフトウェア開発	20
3.4.1 アプリケーション開発	20
3.4.2 AR アプリケーション開発	20

3.4.3 VR アプリケーション開発	21
第 4 章 ユーザ評価実験	22
4.1 実験目的	22
4.2 実験環境	22
4.3 実験方法	22
4.4 評価方法	24
4.4.1 定量評価指標	24
4.4.2 主観的な評価の指標	24
第 5 章 実験結果及び考察	26
5.1 定量評価の実験結果及び考察	26
5.2 主観的な操作のしやすさの実験結果と考察	28
第 6 章 結論と今後の展望	34
6.1 結論	34
6.2 今後の展望	35
謝辞	36
参考文献	37

第1章 序章

本章では、本研究における研究背景、目的および本論文の構成について述べる。

1.1 研究背景

1.1.1 拡張現実・仮想空間技術の現状

拡張現実（AR）とはユーザが見ている現実のシーンにコンピュータグラフィックスによって描かれた仮想物体を重畳表示することで、ユーザがいる場所に応じた情報を直感的に提示する技術である [1]。

近年、拡張現実技術の市場規模は拡大し続けている。図 1-1 で示すように、2020 年の調査によると、2020 年の AR スマートグラス、MR スマートグラスの世界での市場規模は 441 億円の見込みであるが、2030 年にはその規模は 13 兆 9500 億円であると予測されており、この数字は 2020 年の市場規模の約 320 倍である [2]。なお、AR スマートグラス・MR スマートグラスとは肉眼に見える視界にデジタル情報を重ねて表示する機能を持つデジタルデバイスである。



図 1-1: スマートグラスの世界市場 ([2] より引用)

仮想空間（VR）とは、CGで作られた世界や360度動画等の実写映像を「あたかもその場所に居るかのような没入感」で味わうことができる技術である[3]。拡張現実技術と同様に、仮想空間技術の市場規模は拡大し続けている。図1-2で示すように、2020年の調査では、仮想空間技術を利用する際に使用するデバイスであるヘッドマウントディスプレイの世界での市場規模は、2020年では1914億円の見込みであるが、2030年には1兆3272億円に上ると予測されている[2]。

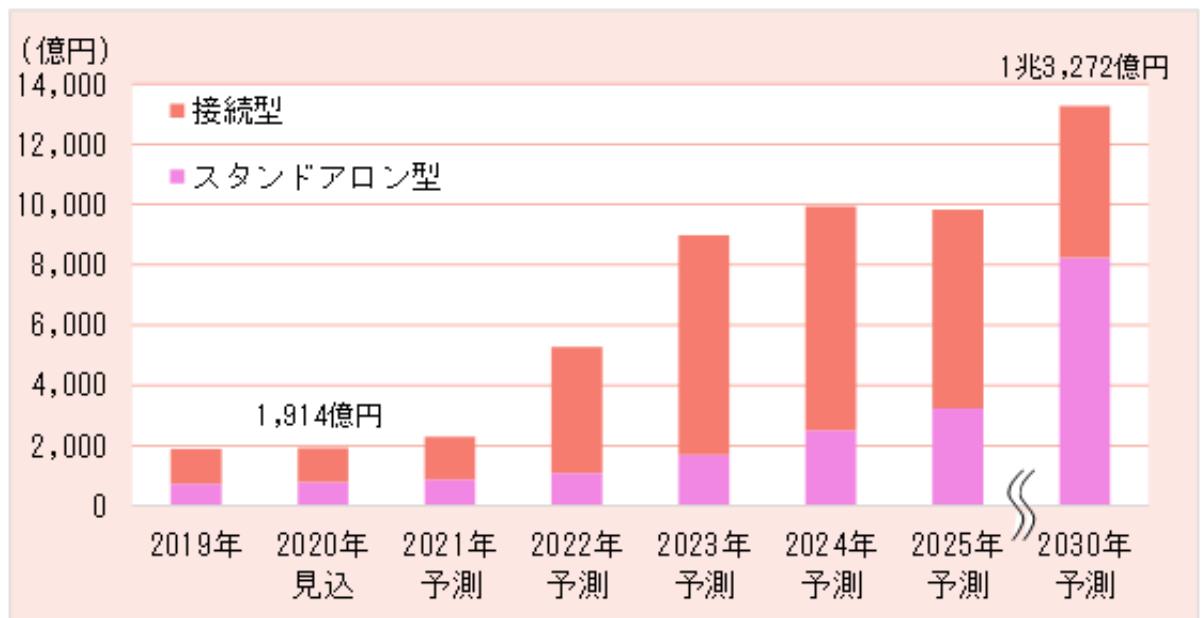


図1-2: スマートグラスの世界市場（[2]より引用）

上記のように拡張現実・仮想空間技術の市場規模が急速に成長しており、これらの技術はこれから私たちの生活や産業においてますます重要な役割を果たすこと正在示している。

1.1.2 拡張現実技術と仮想空間技術の差別化

クロスリアリティ（XR）技術とは拡張現実（AR）、仮想空間（VR）、複合現実（MR）など現実世界と仮想世界の組み合わせで新たな体験を生み出す技術の総称である。仮想空間（VR）と拡張現実（AR）は、現実世界を拡張または仮想化する技術として、教育、エンターテインメント、文化遺産保護、医療、産業など多岐にわたる分野で応用が進展している。これらの技術はユーザー体験に与える影響が異なるとされており、その違いを明確にする研究が注目されている。しかし、これら二つの技術はしばしば混同されがあり、両者の差異に言及した研究は依然として限られている。Verhulstら（2021）は、ロンドンのナショナル・ギャラリーにおける「バーチャル・ヴェロネーゼ」体験を題材に、VR

デバイス（Oculus Quest）と AR デバイス（Magic Leap および Mira Prism）のユーザー体験を比較した [4]. この研究では、臨場感、楽しさ、認知的および感情的関与、行動的関与が評価され、VR は空間的な臨場感や「その場にいる」感覚が AR よりも高いという結果が得られた。これらの知見は、デバイスの特性が提供される体験の質に影響を与えることを示している。しかし、同一のタスクやプロジェクトを実行する際、これらの技術が具体的にどのような差異を生じさせるのかについては、依然として明らかにされていない点が多い。

1.1.3 製造業における XR 技術の活用

XR 技術はエンターテイメント業界での利用が注目されがちであるが、製造業においても金銭コストの削減、生産性の向上を目的とした導入事例が数多くある。富士通は工場の保守点検業務において点検ノウハウを紙からタブレットを用いた AR システムに変更することで作業内容が映像と音声で指示できるようになり作業品質が向上した [5]. 鋼管製造を行うテナリス社は保守作業の効率化と人的ミスの削減のため端末で点検が必要な場所をアイコンで表示する AR システムを導入している [6]. 三菱重工株式会社では、航空機胴体パネルの組立て作業において、作業効率の向上を目的として作業者が装着するヘッドマウント型 MR グラスに、実物に対して取付け後の部品を含む 3D モデル及び、作業箇所にリベットの位置や種類、工作情報などを重ね合わせ表示するシステムを導入した [7]. 図 1-3 に実際にヘッドマウント型ディスプレイを使用している様子を示す。



図 1-3: ヘッドマウント型ディスプレイ使用時の様子（[7] より引用）

以上のように今日製造業の様々な現場で MR 技術が活用され、生産性や効率の向上に寄与するとともにコスト削減にも寄与している。

1.2 研究目的

1.1 節で述べたように、拡張現実（AR）技術とバーチャル・リアリティ（VR）技術の市場規模は急速に拡大しており、その応用範囲は教育、医療、エンターテインメント、製造業など多岐にわたる。一方で、これらの技術が特定のタスク遂行においてどのような影響を与えるかについての体系的な検討は十分に行われておらず、最適な環境設定に関する指針も確立されていない。そこで本研究では、AR/VR 環境における負荷軽減と操作性向上を両立するシステムを開発・提案することを目的とする。この目的を達成するために、以下の 2 つの目標を設定する。

- AR および VR 環境で実施可能なタスクを提案し、AR 及び VR 環境における適切なタスク設計とシステム構築の指針を示す
- AR 及び VR 環境における操作性および視覚的負荷の違いを明確にする

1.3 本論文の構成

第1章では、本論文の研究背景、研究目的、及び本論文の構成について述べた。第2章では、関連研究について説明する。第3章では、システムの概要について説明する。第4章では、実験方法について説明する。第5章では、実験結果と考察について説明する。第6章では、本論文の結論と今後の展望について述べる。

第2章 拡張現実・仮想空間に関する研究

本章では、AR・VRに関する研究について述べる。2.1節ではAR・VRを用いたシステム開発、2.2節では視覚的負荷に関する研究、2.3節ではVRとARの比較に関するに関する研究について述べる。

2.1 AR・VRに関する研究

VR・ARは製造業、教育、医療、エンタメ分野など様々な分野で開発、導入されている。

2.1.1 製造業でのXR研究

Román-Ibáñezら(2018)は、低コストで没入型のVRシステムを開発し、ロボットアーム操作の教育における有効性を検証した。この研究では、シミュレーション環境を活用することで、ロボットアームの高コストや安全性の課題を解決し、学生がロボティクスの実践的な知識を習得するための効果的な学習ツールとしてVRを提示している。また、シミュレーターに組み込まれた衝突検知やトラジェクトリ計画などの高度な機能により、実際の産業環境を模擬することが可能となり、教育現場での実用性が評価された。本研究は、VR技術が持つ教育的可能性を示すとともに、タスク遂行における没入型技術の活用を検討するまでの基盤を提供している[8]。図2-1にRomán-Ibáñezらの提案するシステム使用時の様子を示す。

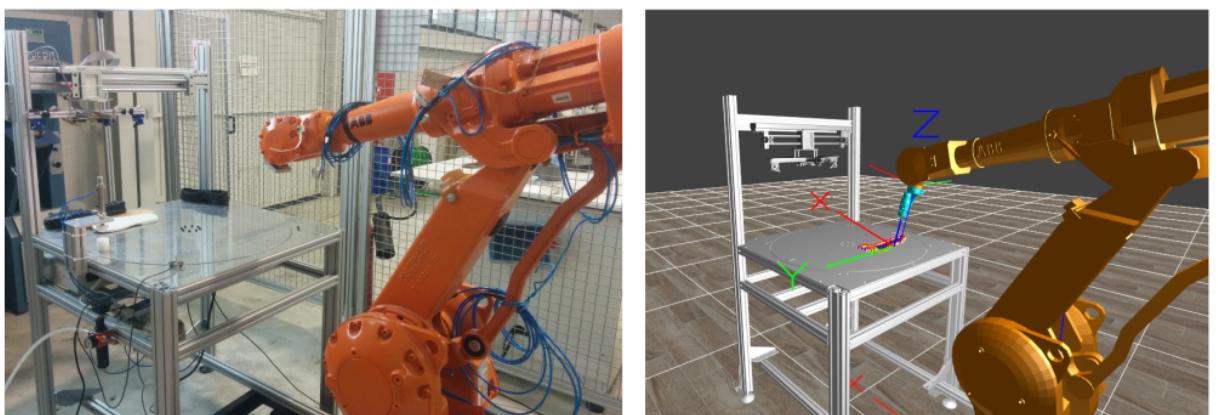


図2-1: 実際のロボットと仮想空間上でのロボット ([8]より引用)

Pérez ら (2019) は、VR 技術を活用した人間とロボットの協調的なインターフェースを提案し、トレーニング、シミュレーション、そしてロボット制御を一体化した新たなアプローチを示した。この研究では、VR による没入型のトレーニング環境が、学習プロセスの効率を高め、安全性を向上させることを実証している。さらに、VR 技術を活用することで、ロボットプログラムの事前検証やエラー検出が可能となり、工場環境でのリスク軽減とコスト削減を実現した [9]。図 2-2, 2-3 に Pérez らの提案するシステムで使用する実際のロボットと仮想空間上のインターフェースの様子を示す。



図 2-2: 実際のロボット（[9] より引用）

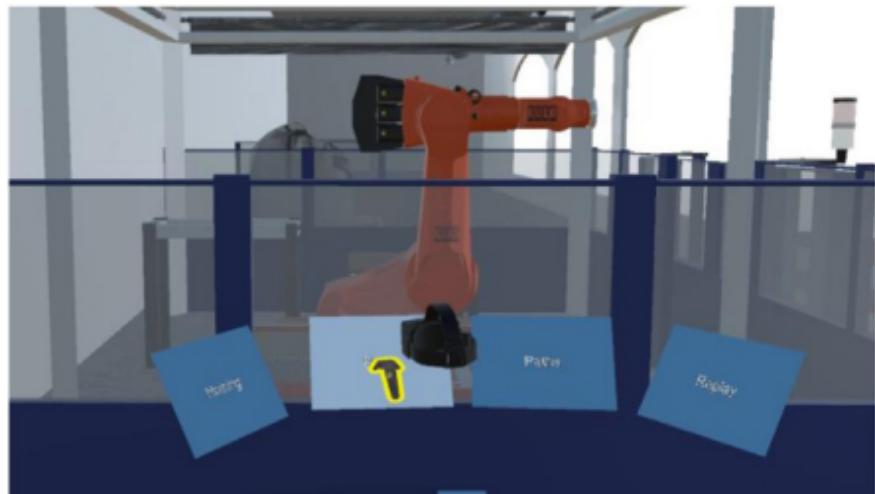


図 2-3: 仮想空間上のインターフェース（[9] より引用）

Hashimoto ら (2011) は、拡張現実 (AR) 技術を活用したロボットのリモート操作システム「TouchMe」を提案し、その有効性を検証した。このシステムでは、カメラを通じた三人称視点の画像に仮想ロボットモデルを重ね合わせ、タッチスクリーン上で直感的な操作を可能にしている。特に、タッチ操作によるロボットの各部の直接的な操作が可能であり、従来のジョイスティック操作のような高度な訓練が不要であることが特徴である。

研究では、操作スケジューリングの異なる3つの手法を比較し、ユーザーの操作性や効率性を評価した。さらに、このシステムが初心者にも使いやすいことを示し、製造業などの産業分野におけるロボット操作の効率向上に寄与する可能性を提案している。本研究は、AR技術を用いた直感的なロボット操作の基盤を提供し、さらなる応用の可能性を広げている[10]。

Makhataevaら(2020)は、2015年から2019年の5年間における拡張現実(AR)技術を用いたロボット工学の研究をレビューし、医療ロボット、動作計画と制御、人間とロボットの相互作用(HRI)、および群ロボットシステムの4つのカテゴリに分類して分析を行った。この研究は、ARがロボット工学において如何に統合され、各分野にどのような改善をもたらしたかを詳細に探究している。また、ARがカメラのローカリゼーションや環境マッピングの課題に直面しつつも、効率性やヒューマン・マシン・インターフェースを大幅に向上させる可能性を示している。このレビューは、産業界を含むさまざまな分野でAR技術がいかに適用される可能性があるかの基盤を提供しており、今後の研究方向性も示唆している[11]。

Bambušekら(2021)は、空間拡張現実(ISAR)とヘッドマウントディスプレイ(HMD)を組み合わせた手法による協働ロボットのエンドユーザープログラミングを提案した。本研究では、HMDとタッチテーブルを活用し、従来のキネステティック・ティーチングと比較して、作業負担の軽減とプログラミング速度の向上を目指した。20名の被験者による評価実験では、タスク遂行の効率性とユーザーエクスペリエンス(UX)がそれぞれ33.84%, 28.46%向上し、ロボット不在時のプログラミングが可能となる利点も示された。本研究は、ISARとHMDの統合が協働ロボットの操作性向上に寄与することを示唆している[12]。

2.1.2 医療分野でのXR研究

Elenduら(2024)は、シミュレーションベースのトレーニング(SBT)の医療教育における重要性をレビューし、その進化と利点を概説した。本研究では、初期の訓練ツールから高精度シミュレーターやバーチャルリアリティ(VR)環境への進展が詳述され、安全な環境下で技術的および非技術的スキルを練習できることや即時フィードバックを通じた学習者の能力向上の効果が示された。一方で、導入コストの高さや教員への専門的トレーニングの必要性、現実の臨床環境との相違といった課題も指摘されている。さらに、人工知能(AI)やVR技術の進展がSBTのさらなる発展に寄与する可能性が論じられ、SBTが医療教育において不可欠なツールであると結論付けられた[13]。

志賀ら(2020)は、複合現実(MR)、拡張現実(AR)、仮想空間(VR)技術をロボット支援腎部分切除術(RAPN)に応用し、その有用性を検討した。本研究では、術前患者画像を3Dホログラム化し、HoloLensを用いて手術中に活用した結果、腫瘍切除時間の短

縮や出血量の低減に寄与したことが示された。さらに、空間認識の向上や術者目線での手術記録を通じた教育効果も確認された。本研究は、MR および VR 技術が手術支援や教育において有用なツールであることを示し、これらの技術が医療分野におけるさらなる発展を促す可能性を強調している [14]。

2.1.3 教育分野での XR 研究

山元（2019）は、AR（拡張現実）と VR（仮想空間）の教育・学習支援への活用事例と課題を検討した。AR は現実環境に仮想情報を重ねることで認知負荷を軽減し、直感的な学習を支援する一方、VR は没入型環境を提供し、身体活動を伴う学習を可能にする利点が示された。しかし、導入にはコストや教員の専門知識不足が課題とされている。本研究は、AR/VR 独自の学習支援の可能性を探る重要性を強調している [15]。

渡邊ら（2022）は、Mozilla Hubs を活用した VR 外国語教育の実践を報告し、学習者が体験的に学ぶことで中国語の定着を促進する効果を示した。VR 空間内での声調練習や対話型タスクにより、学習の動機づけと理解が向上し、オンライン授業の柔軟性も評価された。今後は長期的な学習効果の検証が課題とされている [16]。

2.1.4 エンタメ分野での XR 研究

Kohen ら（2021）は、Microsoft HoloLens 2 を活用した拡張現実（AR）格闘ゲーム「HoloFight」を開発し、マルチプレイヤー型の没入体験を提供するシステムを提案した。本ゲームは、Xbox コントローラーや HoloLens の空間認識機能を組み合わせることで、物理環境との連動や自然なキャラクター操作を可能にしている。また、プレイヤーが同一空間にいる場合の視点の自動調整機能や、異なる空間間で対戦できるリモートモードも搭載し、安全で柔軟なゲーム体験を実現している [17]。本研究は、AR 技術と従来型ゲームの要素を融合し、エンターテインメントの新たな可能性を探るとともに、COVID-19 パンデミック下での安全な娯楽の提供を目指している。今後は、アバターの動作拡張や視線追跡機能の活用を進め、さらなる没入感を提供する予定である。

Hackl と Anthes（2021）は、拡張現実（AR）を活用したピアノ学習アプリケーション「HoloKeys」を開発し、その設計と実装を報告した。HoloKeys は、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）を使用して、物理的なピアノの鍵盤に重ねて演奏すべきキーを表示するシステムであり、MIDI ファイルを利用して音楽データを動的に処理する [18]。

このアプリケーションは、ユーザーの位置をトラッキングし、適切に補強情報を表示する機能を備える。また、リアルタイムの視覚的ガイドと音声出力を提供し、初心者でも効率的に楽曲を学習できるよう設計されている。さらに、ゲーム要素を取り入れることで学

習意欲を高める可能性が指摘されている。本研究は、AR技術が音楽教育に与える可能性を示す一例であり、将来的にはより広範な楽器学習への応用が期待されている。

2.2 視覚的負荷に関する研究

Pavelら（2023）は、コンピュータ視覚症候群（CVS），別名デジタル眼精疲労（DES）について、デジタルデバイスの長時間使用に起因する眼科的、筋骨格系、および行動上の症状を引き起こす現代の病態として検討した。本論文では、CVSの主な環境的、眼科的、筋骨格系の原因をレビューし、デジタルデバイスの使用頻度の増加とDESの高い有病率を考慮し、眼科医が質の高い研究に基づいた助言と管理オプションを提供することの重要性を強調している[19]。

Kaurら（2022）は、デジタル眼精疲労（DES）の症状、原因、管理戦略を包括的にレビューした。長時間のデジタルデバイス使用が乾燥感、かゆみ、頭痛、視力のぼやけなどを引き起こし、特にCOVID-19パンデミック中に発生率が増加したと報告されている。管理には、エルゴノミクスの改善、20-20-20ルールの実践、ブルーライトフィルターやアンチリフレクティブ眼鏡の使用が有効とされる。本研究は、DESの理解を深め、効果的な対策の開発を促進する重要性を示した[20]。

伊藤ら（2020）は、スマートグラス（SG）、液晶ディスプレイ（LCD）、および印刷物（Paper）を用いた作業における眼精疲労の程度を比較検討した。77名の学生および教員を対象に、それぞれの方法で1時間の作業負荷を与え、フリッカーレート、瞬き回数、調節微小振動の高周波成分（HFC）、脈拍数、主観的疲労感を測定した。結果として、SG使用時はLCDや印刷物に比べて瞬き回数の減少が少なく、眼精疲労が軽減される傾向が見られた。また、主観的評価では、LCDや印刷物と比べ、SGの使用による疲労感は少なかった。これにより、SGを用いたハンズフリーマニュアル（HFマニュアル）は、作業中の眼精疲労が問題とならないことが示唆された[21]。

Hirotaら（2019）は、VRヘッドマウントディスプレイ（VR-HMD）と2Dディスプレイの視覚疲労への影響を比較評価した。視覚タスク後、両デバイスで双眼融合維持能力（BFM）の低下と主観的な眼症状スコアの増加が見られたが、有意差は認められなかった。本研究は、低い視覚誘発運動病（VIMS）を伴うVRコンテンツ使用時、VR-HMDの視覚疲労が2Dディスプレイと同程度であることを示唆している[22]。

Souchetら（2022）は、VRヘッドマウントディスプレイ（VR-HMD）を用いた学習における視覚疲労と認知負荷を眼球運動計測で評価する方法をレビューした。視覚疲労は瞬目頻度、認知負荷は瞳孔径の変化で測定されるが、両者の区別は課題であることが示された。一方で、眼球運動計測は学習中のリアルタイム評価に有望であり、より精度の高い

データ解釈モデルの開発が必要である。本研究は、VR学習の効率向上と技術設計における重要な基盤を提供している[23]。

Wangら(2023)は、ARメガネを用いた2Dおよび3D視聴が視覚疲労と眼表面に与える影響を比較した。1時間の視聴後、視覚疲労は両モードで増加したが、2D視聴後に脂質層厚(LLT)や瞬き頻度がより顕著に増加。一方、涙液破壊時間(NIBUT)や涙液メニスカス高(TMH)には有意差はなかった。本研究は、ARメガネ視聴による視覚負荷を評価し、特に3Dコンテンツが視覚的負荷を高める可能性を示唆している[24]。

2.3 AR/VRの比較に関する研究

Souchetら(2021)は、VRおよびARを用いた没入型文化体験がユーザーエクスペリエンスに与える影響を比較した。VRは高い没入感と感情的関与を促進し、ARは現実世界との統合による直感的な操作性が評価された。ユーザーの満足度や学習効果の観点でいずれも有用であるが、利用目的に応じた技術選択の重要性が示された。本研究は、没入型技術の設計や応用における基盤を提供している[4]。

2.4 先行研究のまとめ

従来の研究では、AR/VR技術が製造業、医療、教育、エンターテインメントなど幅広い分野で活用されており、特にロボット操作や協調作業の効率化に寄与することが示されている。また、AR/VRの比較研究では、VRが没入感や感情的関与を強化し、ARが現実環境との統合による直感的な操作を可能にすることが明らかになっている。しかし、多感覚フィードバックを統合した評価や、視覚的負荷を考慮したAR/VRの適用に関する検討は十分ではない。そこで本研究では、ロボットアーム操作を題材にAR/VRの操作性や負荷の違いを明確にし、最適な環境設定指針を示すことを目的とする。

第3章 拡張現実・仮想空間技術を用いたアームロボット操作システム

3.1 システム概要

本研究で用いた拡張現実を用いたアームロボット操作システムは、阿部らが制作・開発した「拡張現実とインプットデバイスを用いたアームロボットリモートコントロールシステム」であった（以下 AR アプリケーションと記載）[25]。AR デバイスを装着した状態で、ハンドトラッキング機能を用い、仮想的に提示されたボタンを押し、同様に仮想的に提示されたアームロボットを操作し、ブロックを指定の位置まで移動させるというタスクを行うシステムとなっている。本研究では、AR アプリケーションを VR デバイスで使用できるよう移植し、両デバイスにて同様のタスクを行うことでタスク遂行時間、タスク中の瞬きの回数、主観評価に差異が生まれるのか比較を行った。そしてタスク中の瞬きの回数を取得するため、AR デバイス、VR デバイスにてタスクを行う際、それぞれ異なる視線情報取得デバイスを装着した。図 3-1 に本システムの概要図を示す。また、図 3-2 に AR アプリケーションの全体図を示す。

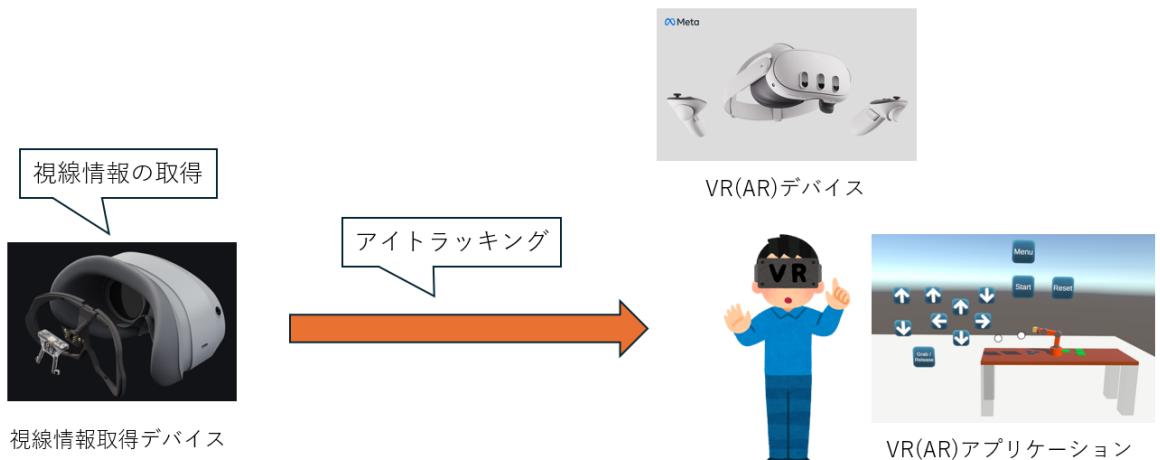


図 3-1: 本システムの概要図

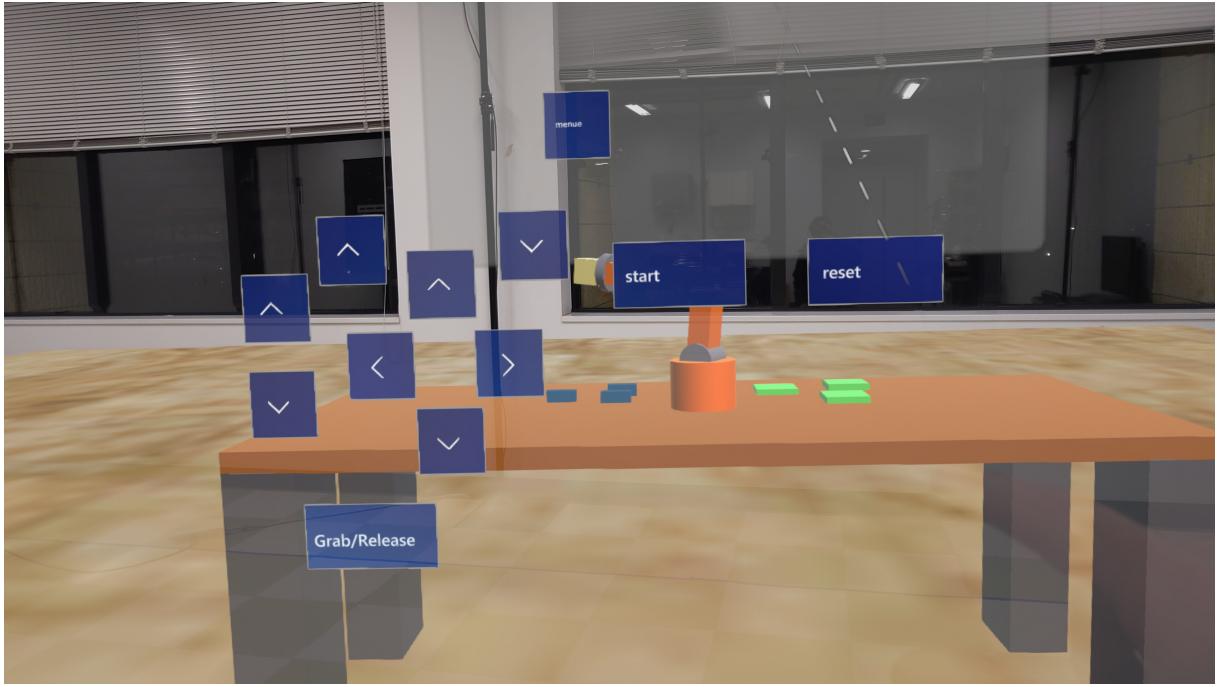


図 3-2: AR アプリケーションの全体図

尚、AR アプリケーションを実装するデバイスとして Microsoft 社の Hololens2 を用いる [26]. hololens2 は透過型のヘッドマウントディスプレイであり、前面に配置された RGB カメラ及び環境認識カメラを用いた高精度なハンドトラッキング機能を有していることに加えて別途のコントローラを必要とせずに操作を行うことが可能である点や幅広い視野角でユーザが快適かつ正確にホログラムを操作可能である点に優れており本システムに適している。そして本研究では評価指標としてアプリケーションを操作している際の瞬きを検出するため、Pupil Labs 社が提供する hololens の add-on を使用した [27]. また、本研究では VR デバイスで同様のタスクが行えるよう、この AR アプリケーションを元に VR デバイスで使用可能なアプリを開発した（以下、VR アプリケーションと記す）。VR アプリケーションの基本的なシステムは AR アプリケーションと同様であるが、ボタンを押す際の動作はハンドトラッキングではなく、コントローラの操作によって行う。図 3-3 に AR アプリケーションの全体図を示す。尚、VR アプリケーションを実装するデバイスとして Meta 社の Meta Quest 3 は、VR アプリケーションを実装および実行するためのデバイスであり、スタンドアロン型のヘッドセットとして広視野角および精密なトラッキングを搭載することで、直感的な操作とスムーズなユーザ体験を可能にしており、本システムに適している [28]. そして瞬きを検出するための機器として、Pupil Lab 社が提供する VR 用の add-on を使用した [29]. 図 3-3 に VR アプリケーションの全体図を示す。

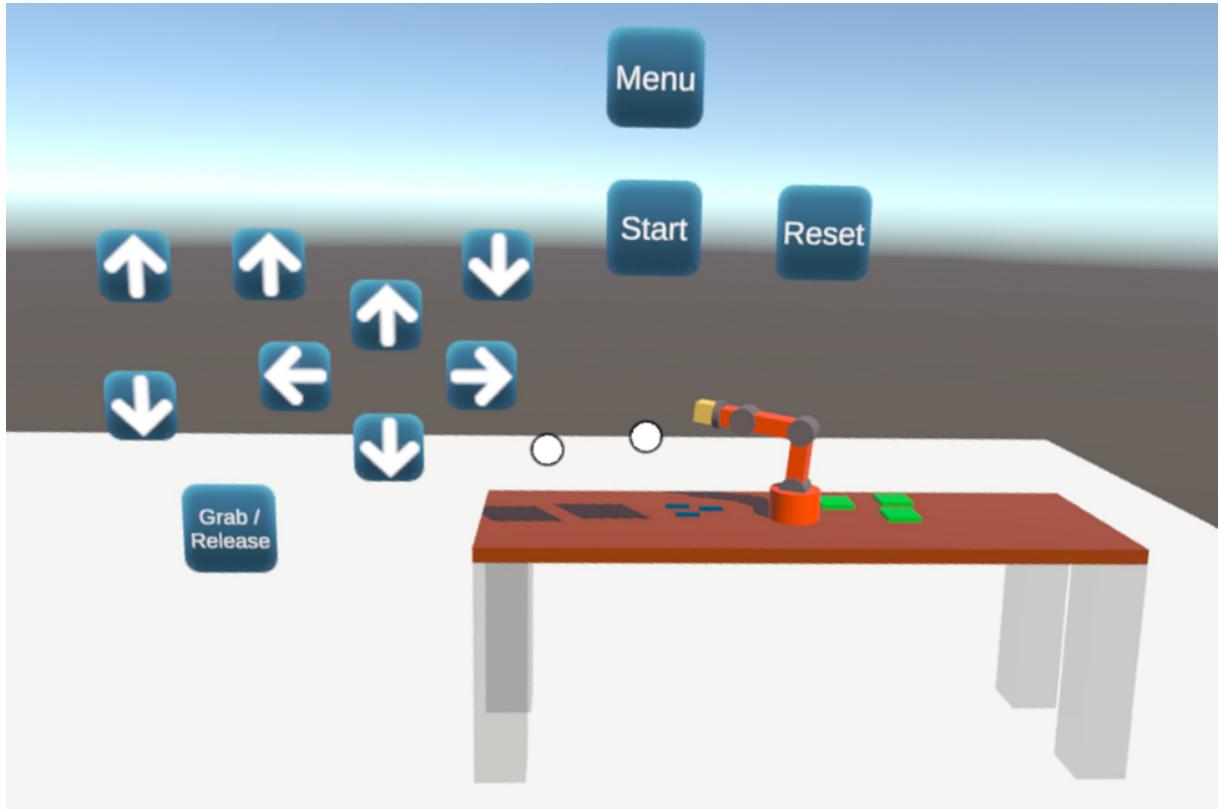


図 3-3: VR アプリケーションの全体図

3.2 アプリケーションのタスク内容

両アプリケーションでは同様のタスクを行う。アプリケーション内の目標は、ロボットアームの左側にある青色のブロックを、ロボットアームを操作しブロックをつかんで移動させ、緑色のブロックの位置まで移動させることである。このブロックを移動させる動作を3回分行うことで、目標達成となる。アプリケーションを起動後、ユーザはアームロボット、メニューボタン、スタートボタン及びリセットボタンが確認可能である（VRアプリケーションの起動時の画面は図3-3に示す）。この状態ではアームロボットの操作はできず、ボタンを押してもアームロボットは動作しない。この状態からスタートボタンを押すことでロボットアームの操作が可能となる。その後、矢印のボタンを押すことで、アームロボットを動かすことができる。また、リセットボタンによりアームロボットを初期状態へ戻すことが可能である。初期状態ではアームロボットをブロックに近づけても掴むことができないが、「グラブ/リリースボタン」を押すことでブロックを掴むことが可能な状態へ移行することができる。そしてもう一度「グラブ/リリースボタン」を押すことでブロックを離すと可能である。タスク実行中の様子を図3-4に示す。

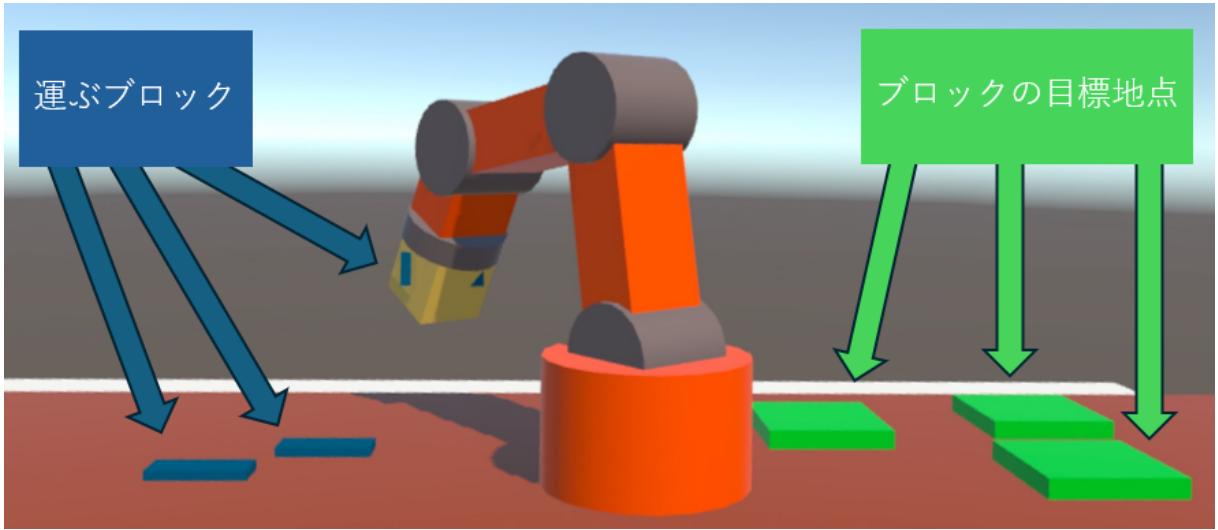


図 3-4: タスク実行中の様子

3.3 使用デバイス

本節では、このシステムを構成するデバイスの説明について述べる。

3.3.1 AR デバイス

本研究で利用する AR デバイスは、Microsoft 社が開発した HoloLens2 である [26]。図 3-5 に使用する HoloLens2 を示す。HoloLens 2 は本研究において、AR 環境でのタスク遂行システムの実行デバイスとして用いられた。ハンドトラッキング機能を活用し、被験者が AR 環境内で自然かつ直感的にタスクを操作することを可能にした。



図 3-5: Microsoft 社が開発した「HoloLens2」（[26] より引用）

3.3.2 VR デバイス

本研究で使用する VR デバイスは、Meta 社が開発した「Meta Quest 3」である [28]。図 3-6 に使用する Meta Quest 3 を示す。Meta Quest 3 は本研究において、VR 環境でのタスク遂行システムの実行デバイスとして使用された。内蔵のセンサーによる高精度な位置追跡と、ハンドトラッキング機能を活用し、ユーザーが VR 空間内で直感的にタスクを操作できるようになっている。本デバイスは、被験者の VR 体験におけるユーザーインターフェースと操作性の評価を行うために重要な役割を果たした。



図 3-6: Meta 社が開発した「Meta Quest 3」（[28] より引用）

3.3.3 AR デバイスに装着する視線情報取得デバイス

本研究では評価指標の一つとして実験中の瞬きの回数を用いるため、AR デバイス、VR デバイスにてそれぞれ視線情報取得デバイスを取り付けて使用した。

AR デバイスとして使用した HoloLens 2 には、Pupil Labs 社が提供する「HoloLens Add-on」を装着した [27]。図 3-7 に使用する「HoloLens Add-on」を示す。HoloLens Add-on は、Pupil Core ヘッドセットに基づく高精度な視線追跡テクノロジーを搭載しており、左右の瞳孔の動きを正確に検出することができる。デバイスは HoloLens に無理なく取り付けられるよう設計されており、ユーザーの視覚体験を妨げることなく動作する。また、視線データは Pupil Capture ソフトウェアを通じてリアルタイムで記録および分析され、瞬きや視線の移動パターンの詳細な解析が可能となる。なおこのデバイスは初代 HoloLens [30] に対応するデバイスとして設計されているが、HoloLens2 には直接取り付けることができないため、マスキングテープを用いて装着・固定化した（図 3-7）



図 3-7: HoloLens 用のアイトラッキングアドオン（[27] より引用）



図 3-8: 視線情報取得デバイスを装着した Hololens2

しかし、この装着方法ではデバイスの安定性が十分ではなく、視線追跡の精度が低下したため、瞬きや視線の移動パターンをリアルタイムで正確に取得することができなかった。

そのため、Pupil Capture ソフトウェアを用いて実験中の目元の映像を録画し、後処理として映像を手動で解析する方法を採用した。具体的には、録画された映像を確認し、被験者の瞬きの回数を目視でカウントした。このプロセスにより、リアルタイムで取得できなかったデータを補完し、瞬き回数に関する定量的な情報を得ることができた。図 3-9 に実験中に収録した目元の映像の一例を示す。

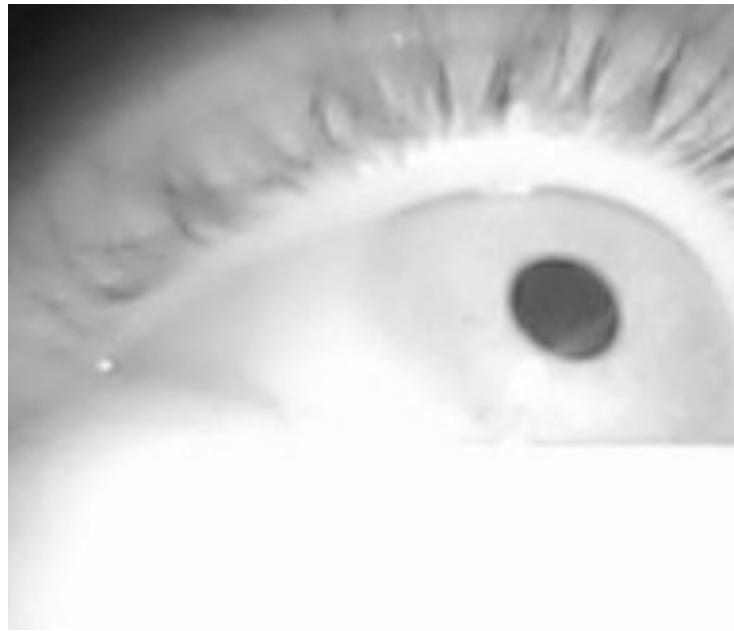


図 3-9: HoloLens Add-on で収録した目元の映像

3.3.4 VR デバイスに装着する視線情報取得デバイス

VR デバイスとして使用した Meta Quest3 には、Pupil Labs 社が開発した「Pupil Labs VR/AR Eye Tracking Module」を使用した [29]。図 3-10 に使用する「Pupil Labs VR/AR Eye Tracking Module」を示す。このデバイスは、VR ヘッドセットに統合可能な高精度の

視線追跡システムであり、被験者の瞬きや視線移動をリアルタイムで記録・分析することが可能である。本研究では、Meta Quest 3 にこのデバイスを装着し、VR 環境内でのタスク遂行中の視線情報を収集し VR 環境下での瞬きの頻度の定量的解析に活用された。



図 3-10: Pupil Labs VR/AR Eye Tracking Module ([29] より引用)

Pupil Labs VR/AR Eye Tracking Module は、視線情報をリアルタイムで確認および保存するための包括的なエコシステムを提供している。このデバイスは、Neon Companion と呼ばれるスマートフォンアプリ（図 3-11）と連携して動作する [31]。有線接続を通じて、視線データをリアルタイムでアプリ上に表示することが可能であり、被験者の視線移動や瞬きの状況をその場で確認することができる。

Neon Companion には録画機能が備わっており、収録された映像データは自動的に Pupil Labs が提供する Pupil Cloud というクラウドプラットフォームにアップロードされる。このクラウドプラットフォーム（図 3-12）では、録画された映像に基づく詳細な視線データの解析が可能である [32]。瞬きの回数や視線移動のパターンといった定量的な情報も提供されるため、これらのデータを後処理で解析することにより、被験者が VR アプリケーションを操作している間の瞬き頻度を正確に評価することができた。



図 3-11: スマホアプリ「Neon Companion」([31]より引用)

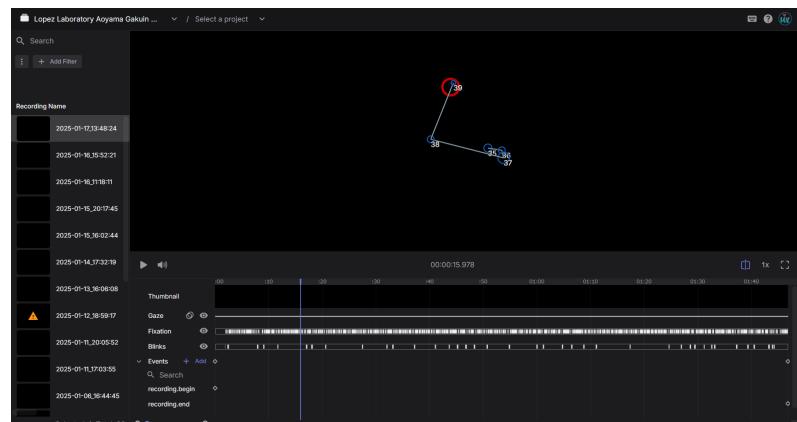


図 3-12: Pupil Cloud の WEB ページ

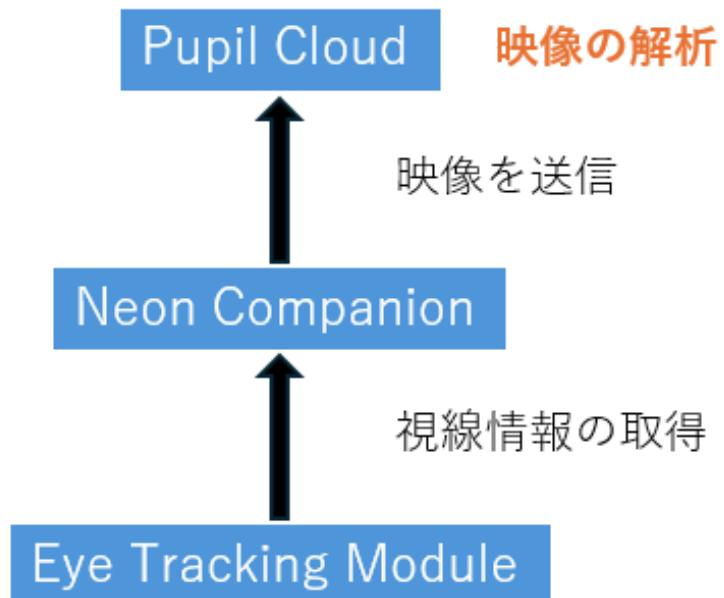


図 3-13: 通信のフローチャート

本研究では、この機能を活用して Meta Quest 3 上でタスク遂行中の被験者の瞬きの回数を測定し、収集したデータを解析した。これにより、VR 環境下での瞬き頻度を定量的に評価するための信頼性の高いデータセットを構築することが可能となった。

3.4 ソフトウェア開発

3.4.1 アプリケーション開発

本節ではアプリケーション開発に用いたソフトウェアについて述べる。本研究ではクロスプラットフォームのゲームエンジンである Unity を使用してアプリケーションを開発した。Unity は、高度なリアルタイムレンダリング機能を備え、多様なデバイスに対応するための柔軟な開発環境を提供する [33]。特に、HoloLens 2 (AR) や Meta Quest 3 (VR) といった異なるプラットフォーム上でアプリケーションを開発・実行できる点は、本研究の目的に非常に適している。また、Unity は基本機能を無料で利用可能であり、高性能なアプリケーションをコストを抑えて開発できるという利点もある。本研究のアプリケーション開発においては、以下の機能を実現するために Unity を活用した。

1. 視覚的ユーザーインターフェースの設計

- 被験者が直感的に操作できるよう、タスク遂行中に必要な指示やフィードバックを表示する UI を設計した

2. 実験シナリオの構築

- AR および VR 環境それぞれにおけるタスクシミュレーションを構築し、実験条件を再現可能な形で設定した

AR アプリケーションは、HoloLens 2 上でロボットアームの操作を行うための機能を中心に設計されており、VR アプリケーションは Meta Quest 3 において同様の操作環境を再現する形で構築された。

3.4.2 AR アプリケーション開発

AR アプリケーションの開発においては、Unity で使用可能な Microsoft 社が提供する Mixed Reality Toolkit (MRTK) を利用した [34]。MRTK は、HoloLens 2 をはじめとする Mixed Reality デバイス向けに最適化された開発ツールキットであり、直感的な UI の設計やインタラクションの実装を効率的に行うことができる。本研究では、ロボットアームを操作するためのボタンを MRTK の標準コンポーネントを用いて実装した。このボタンは、ハンドトラッキングを活用して被験者が自然な操作でタスクを遂行できるよう設計さ

れている。AR アプリケーションではユーザーはボタンを押すことでアームロボットを動かすことができるが、その手法は現在一般的に広く用いられているアームロボットのヘッドの位置姿勢及びグリッパーの開閉をそれぞれ方向ボタン、グリッパー開閉ボタンを用いて決定し各関節角を逆運動を用いて決定することで操作する手法である。

3.4.3 VR アプリケーション開発

VR アプリケーションの開発では MRTK を使用せず、Meta Quest 3 に最適化された独自のアプローチを採用した。具体的には、Oculus Integration パッケージを用いて Meta Quest デバイスにおける操作やインターフェースを実現した。このパッケージは、Meta Quest 向けの開発を効率化するためのツール群を提供しており、ハンドトラッキングやコントローラー操作の実装に利用された。ユーザーインターフェース (UI) の構築に際しては、Canvas システムを使用し、VR 環境内で視覚的に認識しやすい 3D ボタンを作成した。これらの UI 要素は、被験者がコントローラーを通じて直感的に操作できるよう配置され、操作性を考慮したデザインとなっている。また、UI の配置やサイズ調整については、視覚的な快適性を確保するために、Meta Quest 3 の視野角や解像度に基づいて最適化を行った。

第4章 ユーザ評価実験

4.1 実験目的

本章では、本研究で提案するシステムの有効性を検証するために実施したユーザ評価実験について述べる。ユーザ評価実験は、提案システムの操作性およびユーザー体験を定量的かつ定性的に評価することを目的として行われた。本実験では、従来手法と提案システムを比較し、タスク遂行における効率性、正確性、直感的な操作性の向上を検証する。さらに、実験中に得られた視線データを解析することで、認知的負荷やユーザーの主観的評価との関連性についても調査する。

4.2 実験環境

本実験では、使用するデバイスの特性が実験結果に与える影響を最小限に抑えるため、実験環境を慎重に設計した。特に、HoloLens 2 はシースルー型のヘッドマウントディスプレイ (HMD) であり、現実世界の視界とデジタル情報を同時に提示する機能を持つ。この特性により、外部環境の違いが被験者の視覚的注意やタスク遂行に影響を与える可能性がある。そのため、本研究では外部環境の影響を排除するため、実験を行う部屋を固定し、すべての被験者が同一の環境で実験を行うようにした。被験者の向きも統一し、視界に壁のみが入るよう配置を調整することで、外部刺激を最小限に抑えた。また、部屋の照明や配置物も統一し、環境条件が一貫するよう配慮した。VR デバイスを使用した実験についても、同様の環境条件下で実施した。VR デバイスである Meta Quest 3 は、完全に仮想空間内での体験を提供するため、被験者が外部環境を視覚的に認識することはない。しかし、外部環境の変化が被験者の心理的状態や実験中の集中度に影響を与える可能性を排除するため、HoloLens 2 の実験と同じ固定された部屋で行い、実験条件の一貫性を確保した。被験者は 20 代の男女 10 名であり、AR アプリケーションシステムと VR アプリケーションシステムの比較実験を行った。

4.3 実験方法

本研究では、提案する AR アプリケーションシステムおよび VR アプリケーションシステムの操作性やユーザー体験を評価するため、被験者にそれぞれのシステムを一度ずつ

体験してもらう形式で実験を実施した。各被験者は、AR アプリケーションシステムおよび VR アプリケーションシステムを使用してタスクを遂行した。2つのシステム間の体験が連続すると、被験者の疲労や集中力の低下がタスク遂行に影響を与える可能性があるため、各システムの体験の間に5分間の休憩を設けた。また、どちらのシステムを先に使用するかによって、被験者がシステム操作に慣れてしまうことでタスク遂行時間に偏りが生じる可能性を考慮した。この影響を排除するため、被験者10人を2つのグループに分け、5人にはAR アプリケーションを先に体験してもらい、残りの5人にはVR アプリケーションを先に体験してもらうようランダムに割り当てた。これにより、両システムのタスク遂行における公平な比較が可能となり、システム間の特性や操作性に関する偏りのないデータを取得することを目指した。図4-1に実験の手順を示す。

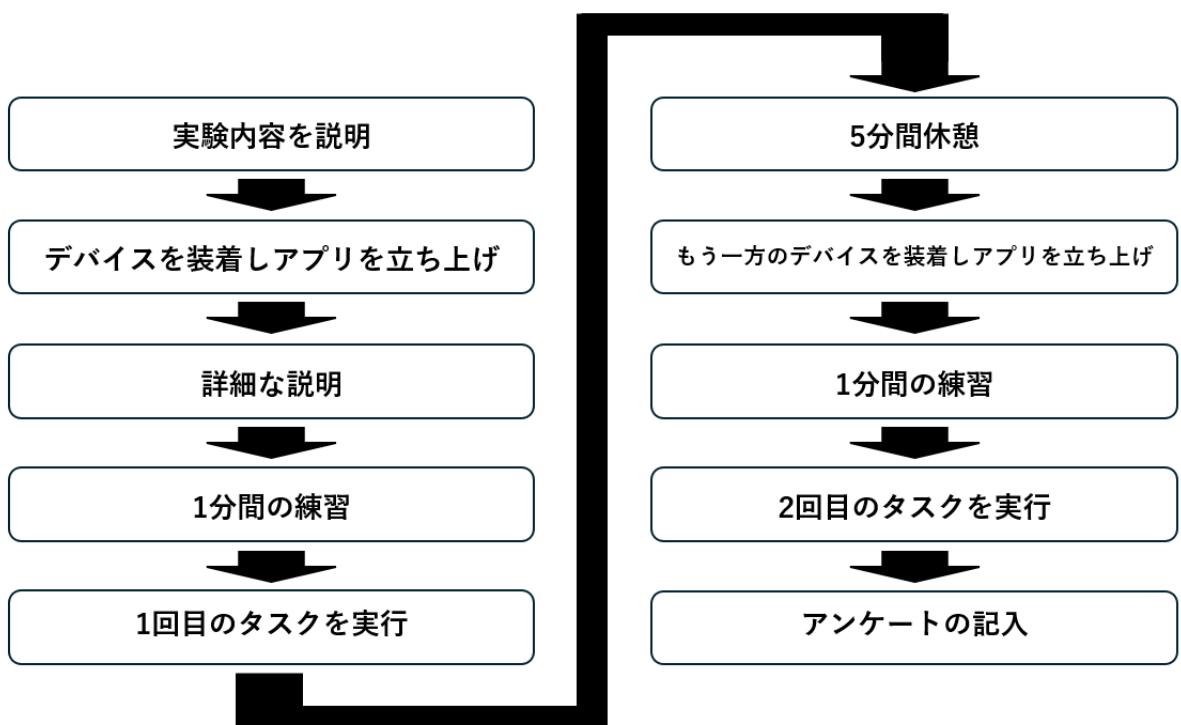


図4-1: 実験の手順を示すフロー図

本実験で被験者に与えられたタスクは、アプリケーション内で3つのブロックをそれぞれ指定された位置まで移動させる作業である。このタスクは、AR および VR アプリケーションを使用して行われ、ロボットアームを操作することでブロックを掴み、指定された位置に正確に配置することを求められる。被験者は、まずアプリケーション内でブロックが配置されている初期位置を確認した後、ロボットアームを操作してブロックを掴む。次に、指示された目標位置までロボットアームを動かし、ブロックを所定の位置に配置する。この手順を3つのブロックそれぞれに対して繰り返し、全てのブロックを正確に配置

することがタスク完了の条件となる。このタスクは、ロボットアーム操作における正確性、効率性、および直感的な操作性を評価する目的で設計されており、AR および VR システムの比較を可能にするよう構築されている。

4.4 評価方法

4.4.1 定量評価指標

本研究では、AR および VR アプリケーションの操作性やユーザー体験を評価するために、定量評価指標としてタスク実行時間とタスク実行中の 1 分当たりの瞬目回数を用いた。タスク実行時間は、被験者がアプリケーション内で 3 つのブロックを全て指定の位置に正確に配置するまでに要した時間として計測された。瞬目回数は、タスク実行中における瞬目の総回数を測定し、1 分間あたりの平均回数として算出された。タスク実行時間は、ボットアームを正確かつ効率的に操作できたかという操作性と、ボタンが押しやすく UI が操作に適しているかというインターフェースの使いやすさの 2 点の観点でアプリケーションの性能を測定するために選定した。タスク実行中の 1 分当たりの瞬目回数は、AR および VR デバイスを使用する際の視覚的負荷を測定するために選定した。

4.4.2 主観的な評価の指標

被験者が AR および VR アプリケーションを使用した際の主観的な操作のしやすさを評価するために、System Usability Scale (SUS) を用いた [35]。SUS は、システム全体の使いやすさを評価するための信頼性が高く広く使用されている 10 項目のアンケート形式の評価指標である。被験者には、それぞれのアプリケーションを体験した後に、SUS アンケートに回答してもらった。アンケート項目は、システムが簡単に使えたか、必要な機能が適切に提供されていたか、また使用中に困難を感じたかといった視点に基づいており、5 段階のリッカート尺度で評価された。各回答はスコアとして集計され、0 から 100 の範囲で使いやすさを定量的に測定する SUS におけるスコアの基準を表 4-1 に示す。

これに加え、主観的にアームロボットの操作が容易かつ意図した通りに行えたか、文字やオブジェクトが見やすかったかという視認性及び UI を評価するため独自に作成したアンケートを用いた。

表 4-1: SUS におけるスコアと評価の対応

SUS score	Grade	Adjective Rating
>80.3	A	Excellent
68 - 80.3	B	Good
68	C	Okay
51 - 68	D	Poor
<51	E	Awful

第5章 実験結果及び考察

5.1 定量評価の実験結果及び考察

図5-1にARアプリケーション及びVRアプリケーションでのタスク完了時間の比較を示す。エラーバーは標準誤差を示す。ARアプリケーションとVRアプリケーションのタスク完了時間を比較した結果、VRアプリケーションにてタスクを行った際はARアプリケーションに比べてタスク完了時間が短縮されることが示され、二つの手法間のタスク完了時間には有意差が見られた。VRアプリケーションでの操作は、コントローラを動かしポインタをボタンの位置に合わせて、コントローラのボタンを押すことでアームロボットを操作することができ、操作が直感的に感じられたところがタスク完了時間の短縮に寄与したと考えられる。ARアプリケーションではハンドトラッキング機能を用いて実際の指の動きでボタンを押すため、デバイスが指の動き正確に認識できず意図した通りの操作が難しい一方でVRアプリケーションではアームロボットを動かしたい方向のボタンに向けてコントローラを動かすのみで操作可能であるため、意図した通りの操作が可能である点もタスク完了時間の短縮に寄与したと考えられる。

AR及びVRアプリケーションでの タスク完了時間の比較

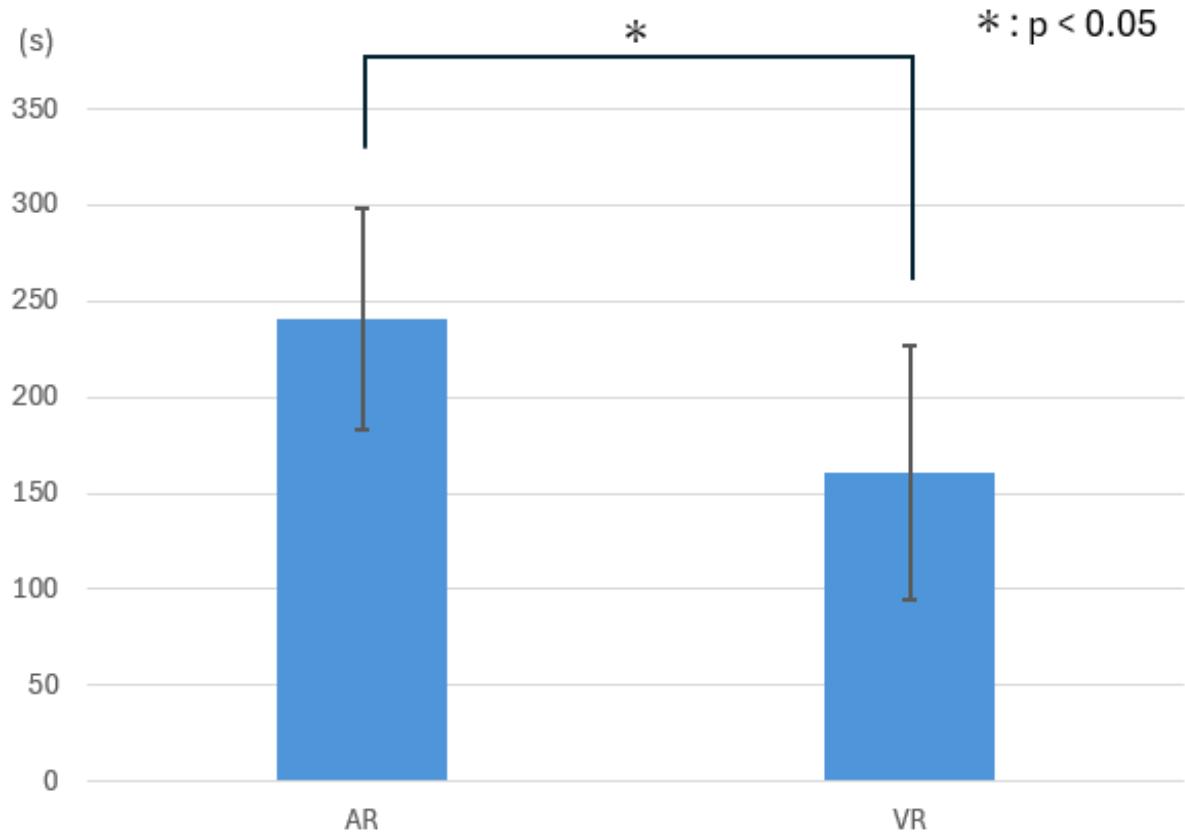


図 5-1: AR 及び VR アプリケーションでのタスク完了時間の比較

図 5-2 に AR アプリケーション及び VR アプリケーション実行中の 1 分当たりの瞬目回数の比較を示す。エラーバーは標準誤差を示す。この項目を比較した結果、AR アプリケーションにてタスクを行った際に瞬目回数が減少することが示され、二つの手法間の実行中の 1 分当たりの瞬目回数には有意差が見られた。2つのアプリケーションにて表示されるオブジェクトは同じであるが、VR アプリケーションでは完全な仮想空間上に表示されるのに対して、AR アプリケーションでは実空間に重ねてオブジェクトが表示されるため、オブジェクトとの距離感がつかみづらく、オブジェクトをより注視しなければならなかつたことが瞬目回数に影響したと考えられる。

AR及びVRアプリケーション実行中の 1分当たりの瞬目回数

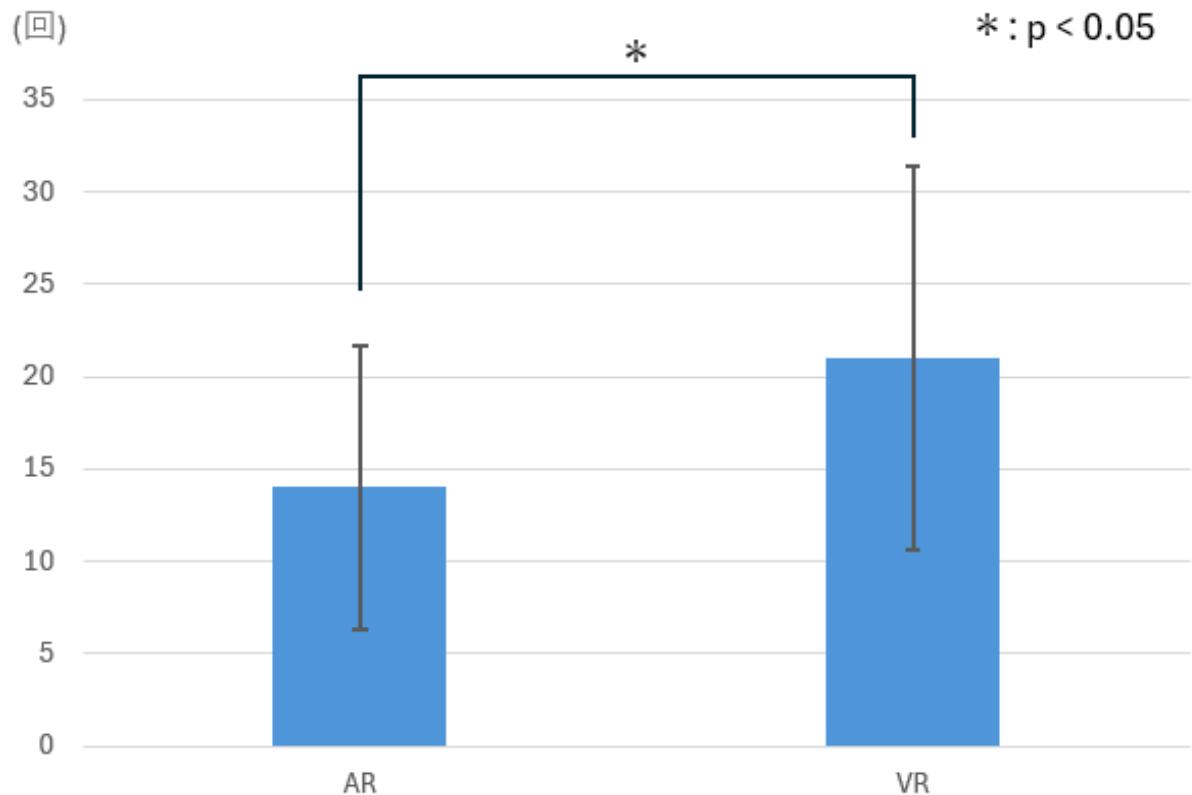


図 5-2: AR 及び VR アプリケーション実行中の 1 分当たりの瞬目回数

5.2 主観的な操作のしやすさの実験結果と考察

表 5-1 に AR 及び VR アプリケーションにおける SUS スコアの平均を示す。結果として、AR アプリケーションでは 54.8 点であり VR アプリケーションでは 70.8 点であり、一般に良いシステムとされる 68 点という基準を VR アプリケーションでは満たしたが、AR アプリケーションでは下回る結果となった。VR アプリケーションと AR アプリケーションでは操作開始時にスタートボタンを押すことや任意のタイミングでメニュー ボタンを押すことで操作が中断可能であること、リセットボタンを押すことでアーム ロボットを初期姿勢に戻すことが可能であることは共通である。今回の研究ではどちらのアプリケーションでもアーム ロボットの頭部の位置や姿勢、グリッパーの制御を全てボタンで行うためボタン数が多い。AR アプリケーションではハンド トラックング機能を用いて指でボタンをそして操作するため、ハンド トラックングの精度によって自分の意図の通りにボタンを操作できない事例がたびたび起きた。このことがシステム全体に対して使用することが

難しいと感じさせ、基準を下回る結果になったと考えられる。これに対し VR アプリケーションではコントローラのポインタを合わせるだけでボタンを押すことができるため、操作中のシステムの仕様が容易であると感じさせることができ、基準を満たす結果になったと考えられる。

表 5-1: AR アプリケーション及び VR アプリケーションにおける平均 SUS スコア

手法	SUS スコア
AR	54.8
VR	70.8

以下にアンケート評価の結果と考察を述べる。アンケートの各項目は「全く思わない」を 1、「非常に思う」を 5 としてスコアリングした。また、スコアリングした値を用いて各モードの各項目の平均スコアを算出した。表 5-2 に被験者に回答してもらったアンケート項目及び表 5-3 にアンケート評価結果を示す。アンケートの各項目について考察を行う。

表 5-2: 評価実験のアンケート項目

question
Q1 アームロボットの操作は直感的に感じましたか？
Q2 アームロボットの操作は難しく感じましたか？
Q3 アームロボットの操作の精度に満足していますか？
Q4 アームロボットの操作の習得は容易であると感じましたか？
Q5 操作のインターフェースは理解しやすかったですか？
Q6 課されたタスクは難しいと感じましたか？
Q7 アームロボットは意図した通りに動きましたか？
Q8 アームロボットの操作中に目の疲労を感じましたか？
Q9 アームロボットの操作中に体の疲労を感じましたか？
Q10 画面上の文字や情報が見やすかったです？
Q11 ロボットアームやブロックの位置が正確に認識できましたか？
Q12 ロボットアームとブロックとの距離感を正確に掴めましたか？
Q13 デバイスを使用している間、視界に違和感や疲れを感じましたか？
Q14 自分の意図の通りにボタンが押せましたか？
Q15 ロボットアームの微調整が簡単に行えると感じましたか？
Q16 長時間の操作でも、快適に作業を続けられると感じましたか？

表 5-3: 評価実験のアンケート結果

質問番号	AR	VR
Q1	3.9	4.5
Q2	4.0	2.1
Q3	3.0	4.1
Q4	3.4	1.8
Q5	4.4	4.4
Q6	3.4	2.4
Q7	2.9	3.8
Q8	3.7	2.1
Q9	1.9	1.9
Q10	3.4	4.6
Q11	3.2	4.2
Q12	3.3	3.8
Q13	3.1	2.1
Q14	3.0	4.7
Q15	3.0	4.3
Q16	2.4	3.7

Q1 アームロボットの操作は直感的に感じましたか？

AR アプリケーションと VR アプリケーションの比較において、 AR アプリケーションで 3.9 点であり、 VR アプリケーションで 4.9 点という結果になった。 2つの手法ではボタンを用いてアームロボットを操作するという操作手法は共通しているが、 AR アプリケーションではハンドトラッキング機能を用いて指でボタンを押すため、 デバイスが指を正確に認識できなければボタンを押すことができない。 その事象によって、 直感的ではないと感じられたと考えられる。 一方で VR アプリケーションではコントローラのポインタを合わせてコントローラのボタンを押すのみで操作が行えるため、 操作がより容易に感じられたと考えられる。

Q2 アームロボットの操作は難しく感じましたか？

AR アプリケーションと VR アプリケーションの比較において、 AR アプリケーションで 4.0 点であり、 VR アプリケーションで 2.1 点という結果になった。 AR アプリケーションではデバイスの構成上一度に画面内に表示できる情報が VR アプリケーションに比べ限られているため、 ボタンを操作する際はアームロボットとブロックがある位置から視線を移動させ、 ボタンがある方向を向かなければならない。 そのため、 VR アプリケーションと比較して操作に必要な手順が 1 つ多くなってしまうことが、 主観的な操作の難しさに影響を与えたと考えられる。

Q3 アームロボットの操作の精度に満足していますか？

AR アプリケーションと VR アプリケーションの比較において、 AR アプリケーションで 3.0 点であり、 VR アプリケーションで 4.1 点という結果になった。 本システムでは、 ボタンを押し続けることでロボットアームを動かし続けることが可能である

が、VR アプリケーションでは、コントローラのボタンによって、ロボットアーム操作のボタンを容易に押すことが可能である。一方で、AR アプリケーションではハンドトラッキングにより正確なボタン入力が難しい場合があり、精度に対する満足度が低下したと考えられる。

Q4 アームロボットの操作の習得は容易であると感じましたか？

AR アプリケーションと VR アプリケーションの比較において、AR アプリケーションで 3.4 点であり、VR アプリケーションで 1.8 点という結果になった。Q1 で述べた通り、AR アプリケーションではハンドトラッキング機能で指を認識してボタンを押さなければならぬため、デバイスが指を正しく認識できないときに意図通りの操作ができないという点が影響したと考えられる。

Q5 操作のインターフェースは理解しやすかったですか？

AR アプリケーションと VR アプリケーションの比較において、AR アプリケーションで 4.4 点であり、VR アプリケーションで 4.4 点という結果になり、評価に差は見られなかった。この結果は、両アプリケーションで同じ UI が使用されていることが影響していると考えられる。

Q6 課されたタスクは難しいと感じましたか？

AR アプリケーションと VR アプリケーションの比較において、AR アプリケーションで 3.4 点であり、VR アプリケーションで 2.4 点という結果になった。両アプリケーションで課されたタスクは同じであったが、この違いは、Q2 や Q3 で述べたように、AR アプリケーションでは操作の容易さや精度において VR に劣る点が影響したと考えられる。

Q7 アームロボットは意図した通りに動きましたか？

AR アプリケーションと VR アプリケーションの比較において、AR アプリケーションで 2.9 点であり、VR アプリケーションで 3.8 点という結果となり、VR アプリケーションの方が高評価であった。この結果は、Q3 で述べたように VR の方が操作の精度が高いことが影響したと考えられる。

Q8 アームロボットの操作中に目の疲労を感じましたか？

AR アプリケーションと VR アプリケーションの比較において、AR アプリケーションで 3.7 点であり、VR アプリケーションで 2.1 点という結果となり、AR アプリケーションの方が疲労感が強く感じられた。この理由として、AR は実世界にオブジェクトを重ねて表示する特性上、オブジェクトとの距離感が正しく測りづらいことで、被験者がより注視しなければならない点が挙げられる。

Q9 アームロボットの操作中に体の疲労を感じましたか？

AR アプリケーションと VR アプリケーションの比較において、 AR アプリケーションで 1.9 点であり、 VR アプリケーションで 1.9 点という結果となり、評価に差は見られなかった。

Q10 画面上の文字や情報が見やすかったですか？

AR アプリケーションと VR アプリケーションの比較において、 AR アプリケーションで 3.4 点であり、 VR アプリケーションで 4.6 点という結果となり、 VR アプリケーションの方が高評価であった。この理由として、 Q8 で述べたような距離感の問題が VR では解消されていることが寄与したと考えられる。

Q11 ロボットアームやブロックの位置が正確に認識できましたか？

AR アプリケーションと VR アプリケーションの比較において、 AR アプリケーションで 3.2 点であり、 VR アプリケーションで 4.2 点という結果となり、 VR アプリケーションの方が高評価であった。この結果も、 Q8 で述べた距離感に起因する問題が関係していると考えられる。

Q12 ロボットアームとブロックとの距離感を正確に掴めましたか？

AR アプリケーションと VR アプリケーションの比較において、 AR アプリケーションで 3.3 点であり、 VR アプリケーションで 3.8 点という結果となり、 VR アプリケーションの方が高評価であった。この結果も、 Q8 で述べた理由と同様に、距離感を掴みやすい点が評価に影響したと考えられる。

Q13 デバイスを使用している間、視界に違和感や疲れを感じましたか？

AR アプリケーションと VR アプリケーションの比較において、 AR アプリケーションで 3.1 点であり、 VR アプリケーションで 2.1 点という結果となり、 AR アプリケーションの方が疲れを感じたと評価された。この理由として、 Q2 で述べたように、 AR デバイスでは一度に表示できる情報が限られており、視界の端にあるオブジェクトが見えづらいことが影響したと考えられる。

Q14 自分の意図の通りにボタンが押せましたか？

AR アプリケーションと VR アプリケーションの比較において、 AR アプリケーションで 3 点であり、 VR アプリケーションで 4.7 点という結果となり、 VR アプリケーションの方が高評価であった。この結果は、 Q1 で述べたように、 VR の方が操作の直感性が高いことが影響していると考えられる。

Q15 ロボットアームの微調整が簡単に行えると感じましたか？

AR アプリケーションと VR アプリケーションの比較において、 AR アプリケショ

ンで3点であり、VR アプリケーションで4.3点という結果となり、VR アプリケーションの方が高評価であった。この結果は、Q3 や Q14 で述べたように、VR ではボタンの押しやすさや操作の精度が高いことが寄与していると考えられる。

Q16 長時間の操作でも、快適に作業を続けられると感じましたか？

AR アプリケーションと VR アプリケーションの比較において、AR アプリケーションで2.4点であり、VR アプリケーションで3.7点という結果となり、VR アプリケーションの方が高評価であった。この結果は、Q3 や Q8 で述べたように、VR では操作の精度が高いことと視覚的負荷が小さいことが寄与していると考えられる。

第6章 結論と今後の展望

6.1 結論

本研究では、AR および VR 技術が市場規模の拡大とともにエンターテインメント、医療、製造業など多岐にわたる業界で活用されている中で、両技術の差別化が明確でない点に着目した。特に、製造業界におけるロボットアームの操作システムを題材に、既存の AR アプリケーションを VR デバイス向けに移植・開発し、両システムを比較する評価実験を行った。

AR および VR アプリケーションはどちらもボタン操作によるロボットアームの制御を目的としたが、AR ではハンドトラッキング機能を用いて指でボタンを押す一方、VR ではコントローラを用いてボタンを操作するという違いがあった。評価実験の結果、以下の点が明らかになった。

タスク完了時間

VR アプリケーションではタスク完了までの時間が有意に短く、操作の効率性に優れていることが確認された。これは、コントローラを用いた VR アプリケーションでは、ボタン操作が容易で意図した通りの動きを行いやすいためと考えられる。

瞬目回数

AR アプリケーションでは、タスク実行中の瞬目回数が有意に少ないという結果が得られた。これは、AR が現実世界に仮想オブジェクトを重ねる特性上、オブジェクトとの距離感がつかみにくく、ユーザーがより注視する必要があったためと推察される。一方、VR は完全な仮想空間であるため、視覚的な負荷が軽減されていると考えられる。

システムの使いやすさ

SUS (System Usability Scale) の結果から、AR アプリケーションは基準を満たさず、操作が難しいと評価された。一方、VR アプリケーションは一定以上の使いやすさを持つシステムであることが示された。また、アンケート結果においても、VR アプリケーションが従来手法に比べ直感的かつ容易で、意図した通りの操作が可能であるという点で高い評価を得た。

以上の結果から、ロボットアームの操作システムに関してはVRアプリケーションは操作性や効率性、使いやすさにおいて優れていることが明らかとなった。また、本研究で対象としたような実世界のオブジェクトを必要としないタスクにおいては、仮想オブジェクトの視認性に優れるVRアプリケーションの方が使用者にとって高い評価を得やすい可能性があると考えられる。

6.2 今後の展望

本研究では、ARおよびVRを用いたアームロボット操作システムの比較評価を行い、両システムの特性や性能に関する知見を得た。しかし、本研究の評価実験では各操作手法で一回のみタスクを行ったため、操作手法への慣れによる操作のしやすさやタスク実行時間の変化、両手法間の差異については十分に明らかにされていない。今後は、異なるタスクを対象とした比較、評価を行い、ARおよびVRがどのような場面で適しているかをより詳細に検討する必要がある。例えば、本研究ではロボットアームの操作を対象としたが、医療現場における手術シミュレーションなど、実世界における複雑な作業環境を想定したタスクに適用することで、ARとVRの特性がどのように異なるかを明確にすることができる。

さらに、本研究ではタスク遂行時間や主観的評価を主な指標としたが、今後の研究では、異なる評価指標を用いた比較、評価も重要となる。例えば、本研究では視覚的負荷に焦点を当てたが、HMDを使用することによる首や肩への身体的負荷、長時間使用による疲労、さらにVR環境特有の酔いやすさ（サイバーモーションシックネス）などの生理的影響も評価する必要がある。特に、HMDの重量や装着時間が首や肩の筋疲労に与える影響を測定することで、ARとVRの長時間使用時の快適性を比較できると考えられる。また、使用者がどの程度VR酔いを感じるかを定量化することで、異なるタスクにおけるVRの適用可能性についてもより詳細な検討が可能となる。こうした評価指標を導入することで、AR/VR環境がユーザーに与える影響をより多角的に分析できると考えられる。

加えて、これらの知見をもとに、負荷軽減と操作性向上のための環境設定やシステム開発を進めることが求められる。具体的には、視覚的負荷の軽減を目的としたインターフェース設計や、適切なタスク環境の構築を通じて、ユーザーがより直感的かつ効率的にタスクを遂行できるシステムの開発が期待される。今後の研究を通じて、ARおよびVRの適用可能性をより広範囲に明らかにし、それぞれの技術の特性を最大限に活かしたシステム設計の指針を提供することが目標である。

謝辞

本研究を進めるうえで、親身に相談に乗って下さった青山学院大学理工学部情報テクノロジー学科ロペズ・ギヨーム教授に深く感謝をいたします。また、自身が制作されたARのロボットアーム操作システムを本研究において使用することを快諾してくださり、さらにVRアプリケーション開発の際に助言をいただいた阿部先輩にも心より感謝申し上げます。研究環境の補助をしてくださった大熊氏、論文の添削を通してアドバイスをくださった高橋先輩をはじめとするロペズ研究室の院生の方々、同期の方々に深く感謝いたします。また、実験に協力していただいた被験者の方々にも感謝いたします。

2025年1月28日

田中 崇登

参考文献

- [1] 神原誠之: 拡張現実感 (Augmented Reality: AR) 概論, 情報処理, Vol. 51, No. 4, pp. 367–372 (2010).
- [2] 富士キメラ総研: 『AR／VR 関連市場の将来展望 2020』まとまる, <https://www.fcr.co.jp/pr/20088.htm> (2020).
- [3] 経済産業省: 令和 2 年度コンテンツ海外展開促進事業(仮想空間の今後の可能性と諸課題に関する調査分析事業), https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/contents/downloadfiles/report/kasou-houkoku.pdf (2021).
- [4] Verhulst, I., Woods, A., Whittaker, L., Bennett, J. and Dalton, P.: Do VR and AR versions of an immersive cultural experience engender different user experiences?, *Computers in Human Behavior*, Vol. 125, p. 106951 (2021).
- [5] Fujitsu: その課題、情くんにおまかせ！ 第 10 話, <https://jp.fujitsu.com/platform/server/advantages/special/jokun/10-ar/> (2013).
- [6] Tenaris: VR and AR technology used to manage Argentine project from Italy, <https://www.tenaris.com/en/news/2021/vr-and-ar-technology-used-to-manage-argentine-project-from-italy> (2021).
- [7] 三菱重工技報: MR グラス活用による現場作業効率化, <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/593/593090.pdf> (2022).
- [8] Román-Ibáñez, V., Pujol-López, F. A., Mora-Mora, H., Pertegal-Felices, M. L. and Jimeno-Morenilla, A.: A low-cost immersive virtual reality system for teaching robotic manipulators programming, *Sustainability*, Vol. 10, No. 4, p. 1102 (2018).
- [9] Pérez, L., Diez, E., Usamentiaga, R. and García, D. F.: Industrial robot control and operator training using virtual reality interfaces, *Computers in Industry*, Vol. 109, pp. 114–120 (2019).

- [10] Hashimoto, S., Ishida, A., Inami, M. and Igarashi, T.: Touchme: An augmented reality based remote robot manipulation, Vol. 2 (2011).
- [11] Makhataeva, Z. and Varol, H. A.: Augmented reality for robotics: A review, *Robotics*, Vol. 9, No. 2, p. 21 (2020).
- [12] Bambušek, D., Materna, Z., Kapinus, M., Beran, V. and Smrž, P.: Combining interactive spatial augmented reality with head-mounted display for end-user collaborative robot programming, pp. 1–8 (2019).
- [13] Elendu, C., Amaechi, D. C., Okatta, A. U., Amaechi, E. C., Elendu, T. C., Ezeh, C. P. and Elendu, I. D.: The impact of simulation-based training in medical education: A review, *Medicine*, Vol. 103, No. 27, p. e38813 (2024).
- [14] 志賀淑之, 杉本真樹, 安部光洋, 錦見礼央, 保科勇斗, 米岡祐輔, 斎川周, 井上泰, 吉松正, 日下部将史ほか: 複合現実 MR, 拡張現実 AR, 仮想現実 VR を応用した泌尿器ナビゲーション手術の検討, *Japanese Journal of Endourology*, Vol. 31, No. 2, pp. 253–259 (2018).
- [15] 山元翔: AR/VR の教育・学習支援システムへの利用と課題, 教育システム情報学会誌, Vol. 36, No. 2, pp. 49–56 (2019).
- [16] 渡邊ゆきこ, 小渡悟, 大前智美: VR 空間内の活動を経験記憶につなげる外国語教育, pp. 199–202 (2022).
- [17] Kohen, S., Elvezio, C. and Feiner, S.: HoloFight: An augmented reality fighting game, pp. 1–2 (2021).
- [18] Hackl, D. and Anthes, C.: HoloKeys-an augmented reality application for learning the piano., pp. 140–144 (2017).
- [19] Pavel, I. A., Bogdanici, C. M., Donica, V. C., Anton, N., Savu, B., Chiriac, C. P., Pavel, C. D. and Salavastru, S. C.: Computer Vision Syndrome: An Ophthalmic Pathology of the Modern Era, *Medicina*, Vol. 59, No. 2, p. 412 (online), <https://doi.org/10.3390/medicina59020412> (2023).
- [20] Kaur, K., Gurnani, B., Nayak, S., Deori, N., Kaur, S., Jethani, J., Singh, D., Agarkar, S., Hussaindeen, J. R., Sukhija, J. and Mishra, D.: Digital Eye Strain- A Comprehensive Review, *Ophthalmology and Therapy*, Vol. 11, No. 3, pp. 1655–1680 (online), <https://doi.org/10.1007/s40123-022-00466-5> (2022).

- [21] 伊藤奈々, 武田朴, 笠井亮佑, 上條史記, 加納敬, 島峰徹也, 萩野稔, 日向奈惠, 篠原一彦, 田仲浩平: VDT 作業における眼精疲労度の比較—スマートグラスと LCD および印刷物の比較—, 医療機器学, Vol. 90, No. 5, pp. 405–413 (2020).
- [22] Hirota, M., Kanda, H., Endo, T., Miyoshi, T., Miyagawa, S., Hirohara, Y., Yamaguchi, T., Saika, M., Morimoto, T. and Fujikado, T.: Comparison of visual fatigue caused by head-mounted display for virtual reality and two-dimensional display using objective and subjective evaluation, *Ergonomics*, Vol. 62, No. 6, pp. 759–766 (2019).
- [23] Souchet, A. D., Philippe, S., Lourdeaux, D. and Leroy, L.: Measuring visual fatigue and cognitive load via eye tracking while learning with virtual reality head-mounted displays: A review, *International Journal of Human–Computer Interaction*, Vol. 38, No. 9, pp. 801–824 (2022).
- [24] Wang, X., Liu, L., Hu, X., Wu, Y., Liu, Y., Ni, B. and Ke, B.: Comparison of changes in visual fatigue and ocular surface after 3D and 2D viewing with augmented reality glasses, *Displays*, Vol. 78, p. 102401 (2023).
- [25] H.Abe, Bataller, V. B., H.Terävä, M. Luimula, G. Lopez: Combining AR and ball-shape input interface to control remotely a robot-arm, *AHFE Open Access*, Vol. 121 (2024).
- [26] 日経クロステック: まるでパズル、コスト度外視 HoloLens 2 のスゴイ中身, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01267/00084/> (2020).
- [27] Labs, P.: Hololens and BT300 eye tracking add-ons, <https://pupil-labs.com/blog/hololens-bt300-addon>. (最終参照日: 2025/1/15).
- [28] meta: Meta Quest 3, <https://www.meta.com/jp/quest/quest-3/>. (最終参照日: 2025/1/15).
- [29] Labs, P.: Eye tracking for mixed reality, <https://pupil-labs.com/products/vr-ar>. (最終参照日: 2025/1/15).
- [30] Microsoft: HoloLens, <https://learn.microsoft.com/ja-jp/hololens/hololens1-hardware>. (最終参照日: 2025/1/15).
- [31] Labs, P.: Neon Companion App Terms of Use, <https://pupil-labs.com/legal/neon-companion-terms-of-use>. (最終参照日: 2025/1/15).

- [32] Docs, P. L.: Pupil Cloud - NEON, <https://docs.pupil-labs.com/neon/pupil-cloud/>. (最終参照日: 2025/1/15).
- [33] Technologies, U.: Unity, <https://unity.com/ja>. (最終参照日: 2025/1/15).
- [34] Microsoft: Mixed Reality Toolkit, <https://hololabinc.github.io/MixedRealityToolkit-Unity/Documentation.ja>WelcomeToMRTK.html>. (最終参照日: 2025/1/15).
- [35] QuestionPro: System Usability Scale: What it is, Calculation + Usage, <https://www.questionpro.com/blog/system-usability-scale/>. (最終参照日: 2025/1/15).

質疑応答

伊藤 雄一 情報テクノロジー学科 教授

Q	どんなタスクでしたか。
A	ロボットアームの左側にあるブロックを、ロボットアームを操作しブロックをつかんで移動させ、所定の位置まで移動させる動作を3回分行うという内容です。
Q	研究の目的と構築したシステムが合っていますか。
A	AR及びVRアプリケーションで同様のタスクを行っているため、研究の目的と合致していると考えております。
Q	パフォーマンスに影響を与えていているのは何ですか。
A	パフォーマンスに影響を与えていている要因は、操作性の違いと視認性が挙げられます。VRではコントローラ、ARではハンドトラッキングによる指の操作を用いるため操作性が異なり、さらにオブジェクトの視認性の差も影響を及ぼしていると考えております。
Q	VRデバイスの場合は実空間に投影するのではなく背景が設定されていますが、コントローラの違いだけがパフォーマンスに影響を与えていますか。
A	今回、VRデバイスでは背景を設定することが一般的であると考え、背景を設定しました。そのため、背景の有無もパフォーマンスに影響を与えている要因の一つと考えております。

上堀 さん 情報テクノロジー学科

Q	コントローラなどへの慣れが影響しませんか。
A	実験後のアンケートで普段AR及びVRデバイスを使用するかという質問項目を設けており、その結果どちらのデバイスでも日常的に使用する人はいなかったので、コントローラ操作への慣れは影響していないと考えております。