

青 山 学 院 大 学

理 工 学 研 究 科

理工学専攻 知能情報 コース

修 士 論 文

学 生 番 号 35623214

氏 名 阿部 悠貴

研究指導教員 ロペズ・ギヨーム

Title: Combining AR and input device to control remotely a robot-arm

Student Name: Harutaka Abe

ID Number: 35623214

Degree: Master of Engineering

Course: Intelligence and Information

Thesis Advisor: Professor Guillaume Lopez

## Abstract

The introduction of robotics has attracted attention in factories and other workplaces to improve productivity and safety. Furthermore, remote and unmanned robotics are rapidly advancing due to the impact of COVID-19, and the number of industrial robots being introduced is increasing yearly. The trend towards the introduction of industrial robots is to automate various tasks. However, it is not easy to automate all tasks, and detailed tasks require human work or the operation of industrial robots by humans. Besides, the lack of personnel who can operate industrial robots is an obstacle to the introduction of industrial robots.

This study focuses on arm robots, widely used as industrial robots, and proposes an intuitive and easy-to-operate teleoperation method combining an Augmented Reality (AR) interface and an original intuitive input device (TIARC). The proposed method enables the real environment arm robot to be operated in synchronization with the arm robot by operating the arm robot virtually in an AR application. The manipulator controls the following three pieces of information, and the joint angles of the robot arm are then determined using inverse kinematics.

- The hand position determines the position of the robot arm head.
- TIARC orientation determines the robot's arm posture.
- TIARC gripping force determines the opening and closing of the robot arm gripper.

Evaluation experiments were conducted to verify the effectiveness of the proposed method and to investigate whether the size of the operable area of the gripper affects the operation. Subjects were asked to complete a task using a conventional system with multiple virtual buttons, TIARC, and similar intuitive input devices provided by Ai2AI (Pall0v2 and Pall0v3).

The results showed that TIARC reduced task completion time while ensuring operation accuracy similar to that of the conventional system. Besides, subjective assessment results showed that TIARC is more intuitive and easier to operate. Compared with Pall0v2 and Pall0v3, whose gripper control areas are smaller and more prominent than the TIARC one, the control accuracy was the same, but Pall0v3 task completion time was the shortest. This indicates that the area in which the gripper can be manipulated influences the operability of the arm robot.

In the evaluation experiments in this study, the task was performed only once for each manipulation technique, so changes due to familiarisation with the manipulation are unclear. Future long-term experiments should be conducted to investigate changes in operability and task execution time. In order to improve the accuracy of operations, a method to distinguish between unintended and intended movements is required. In this study, only synchronization between the arm robot in the application and the actual environment was carried out, but the surrounding situation is also an important factor and needs to be synchronized. In addition, developing a more generalized operation method for various arm robots is necessary.

# 理工学専攻修士論文要旨

: 2024年度

: 2025年 1月 31日

専修コース: 知能情報コース

: 35623214

: 阿部 悠貴

研究指導教員: ロペズ ギヨーム 教授

(論文題目)

拡張現実及び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

(内容の要旨)

工場などの現場では生産性や安全性の向上を目的としたロボティクスの導入が注目されている。さらに、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の影響でリモート化や無人化が急速に進展しており、産業用ロボットの導入台数は年々増加している。産業用ロボット導入の動向として様々な作業を自動化する傾向にあるが、すべての作業を自動化することは難しく細かなタスクは人による作業や人による産業用ロボットの操作が必要であり、操作ができる人材の不足が産業用ロボット導入の妨げとなっている。

本研究では産業用ロボットとして広く利用されているアームロボットに注目し、その直感的かつ容易に操作可能な遠隔操作手法の開発を目的としている。具体的に、拡張現実(AR)による遠隔ロボットの状態の可視化と、アームロボットを直感的に操作可能とする物理的な入力インターフェースを組み合わせたシステムを考案・実装し、その有効性を検証することを目標とした。

開発したARアプリケーション内、仮想的に配置された操作対象のアームロボットを操作することで、それに同期した実際のアームロボットも操作可能にしている。また、自作した直感的入力デバイスTIARCを用いて、以下の3つのアームロボットの情報を決定し、各関節角を逆運動学から導く方法を実装している。

- 操作者の手の位置がアームロボットの位置を決定する。
- TIARCの姿勢がアームロボットの姿勢を決定する。
- TIARCを握る度合いがアームロボットのグリッパーの開閉を決定する。

TIARCの有効性の検証及びグリッパーの操作可能な部分の面積の大きさが操作に影響を与えるかを調査した。有効性の検証のための評価実験においては従来手法として、仮想空間内の複数のボタンで操作を行うシステムとTIARCを用いた提案システムで被験者にタスクを課し比較した。グリッパー操作可能エリアの影響を検証するため、TIARCと、Ai2AI社が提供するPall0v2(小さなボタンによる制御)及びPall0v3(デバイス全面積による制御)を比較した。

結果として提案システムで優位にタスク完了時間が短縮され、従来システムと同程度の精度で操作が可能であることが明らかとなった。アンケート評価の結果からは提案手法がより直感的かつ容易な操作が可能であることが示された。特定の位置のボタンによりグリッパーの操作を行うPall0v2とデバイスを強く握ることでグリッパーの操作を行うPall0v3の比較においては精度は同程度であったがPall0v3で優位にタスク完了時間が短縮されたことから提案手法においてグリッパーの操作が可能な面積がアームロボットの操作性に影響を与えることが示された。

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、操作の慣れによる変化は明らかになっていない。今後は長期的な実験を行い、操作性やタスク実行時間の変化を調査する必要がある。操作の正確性向上のため、意図しない手の揺れと意図した動作を区別する手法が求められる。本研究においてはアプリケーション内と実環境のアームロボットの同期のみを行ったが、周囲の状況も重要な要素であり、同期を行うひとつようがある。また、多様なアームロボットへの対応が課題であり、より汎用的な操作手法の開発が必要である。

# 拡張現実及び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

阿部 悠貴

2025/02/24

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景 . . . . .	1
1.1.1 製造業の現場における産業用ロボット . . . . .	1
1.1.2 製造業のリモート化 . . . . .	2
1.1.3 製造業におけるXR技術の活用 . . . . .	3
1.2 研究目的・目標 . . . . .	4
<b>第2章 関連研究・技術</b>	<b>6</b>
2.1 既存のアームロボット操作手法 . . . . .	6
2.2 直接操作型のアームロボット操作手法 . . . . .	7
2.3 ジェスチャ及び身体動作用いたアームロボット操作手法 . . . . .	10
2.4 自然インターフェースを用いたアームロボット操作手法 . . . . .	15
2.5 まとめ . . . . .	17
<b>第3章 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</b>	<b>19</b>
3.1 システム概要 . . . . .	19
3.2 インプットデバイス . . . . .	20
3.2.1 PALL0 . . . . .	21
3.2.2 マルチセンサデバイス . . . . .	22
3.3 仮想的に配置されたアームロボットの操作手法 . . . . .	24
3.4 各デバイス間の通信手法 . . . . .	26
3.4.1 MQTTプロトコルによる通信の概要 . . . . .	26
3.4.2 Pall0を用いた各デバイス間の通信 . . . . .	26
3.4.3 TIARCを用いた各デバイス間の通信 . . . . .	27
3.5 システムの使用方法 . . . . .	28
<b>第4章 ユーザ評価実験</b>	<b>30</b>
4.1 実験目的 . . . . .	30
4.2 実験環境 . . . . .	30
4.3 実験方法 . . . . .	31
4.4 評価方法 . . . . .	32
4.4.1 定量評価指標 . . . . .	32
4.4.2 主観的な操作のしやすさの評価指標 . . . . .	32

<b>第 5 章 実験結果及び考察</b>	<b>34</b>
5.1 定量評価の実験結果及び考察 . . . . .	34
5.2 主観的な操作のしやすさの実験結果と考察 . . . . .	39
<b>第 6 章 結論と今後の展望</b>	<b>44</b>
6.1 結論 . . . . .	44
6.2 今後の展望 . . . . .	45
<b>謝辞</b>	<b>47</b>
<b>参考文献</b>	<b>47</b>

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 製造業の現場における産業用ロボット

今日、日本では超高齢化社会に伴い様々なところで人手不足が指摘されている。[1] 図 1.1 から日本における生産年齢人口（15～64 歳）は 1995 年をピークに減少しており、2050 年には 5,275 万人（2021 年から 29.2 % 減）に減少すると見込まれると同時に労働力の不足などの課題が深刻化すると懸念されている。[2] 生産年齢人口の減少に伴い、生産性を高める手段としてロボティクスへの期待が高まっている。

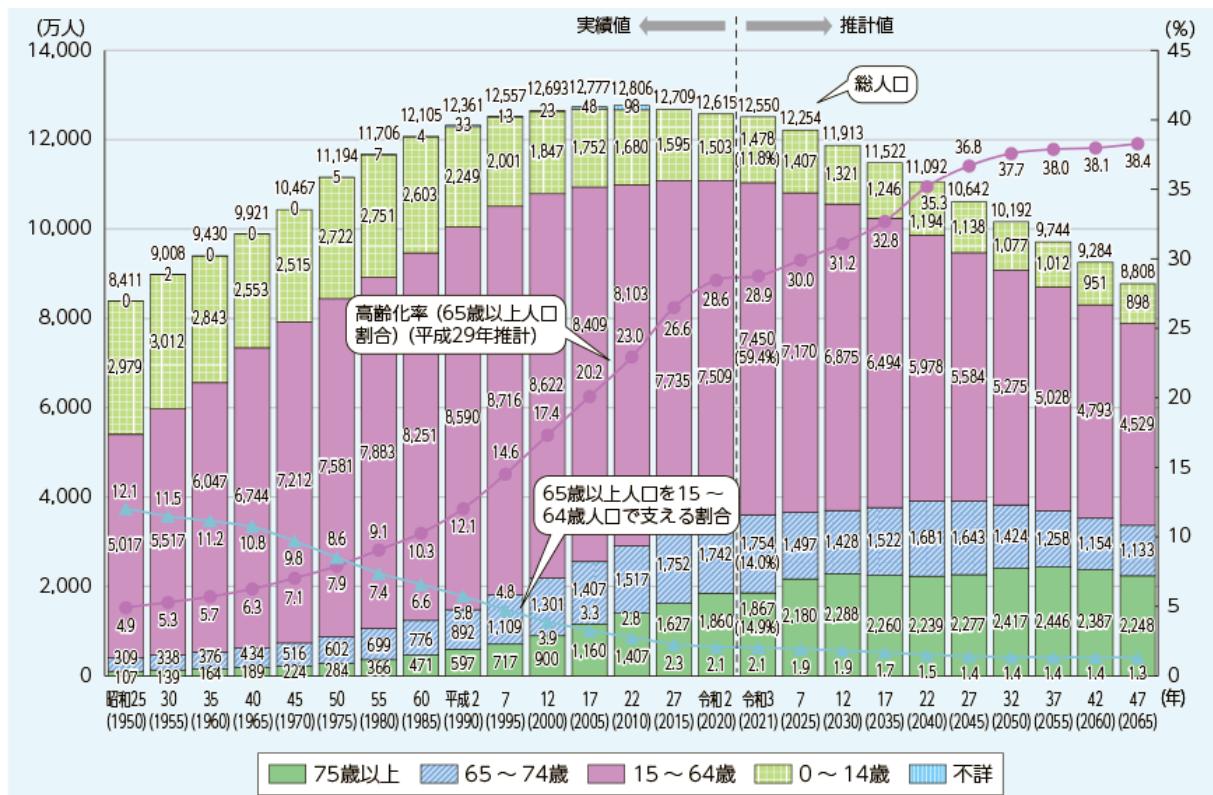


図 1.1 高齢化の推移と将来推計 ([2] より引用)

製造業の現場においてもロボティクスへの期待が高まる傾向にあり、近年の産業用ロボット技術は多くの産業の現場に導入され、作業者の安全性と作業の生産性を向上させるとともに、3K 職場の改善など働き方にも影響を及ぼしている。これらの利点から産業用ロボットの導入は先進工業国にとどまらず、新興国も含め世界的に大きな潮流となりつつある。[3]。図 1.2 に産業用ロボットの稼働台数の推移及び図 1.3 に産業用ロボットの年間導入台数を示す。産業用ロボットの稼働台数は年々増加しており、今後もさらなる拡大が

見込まれる。

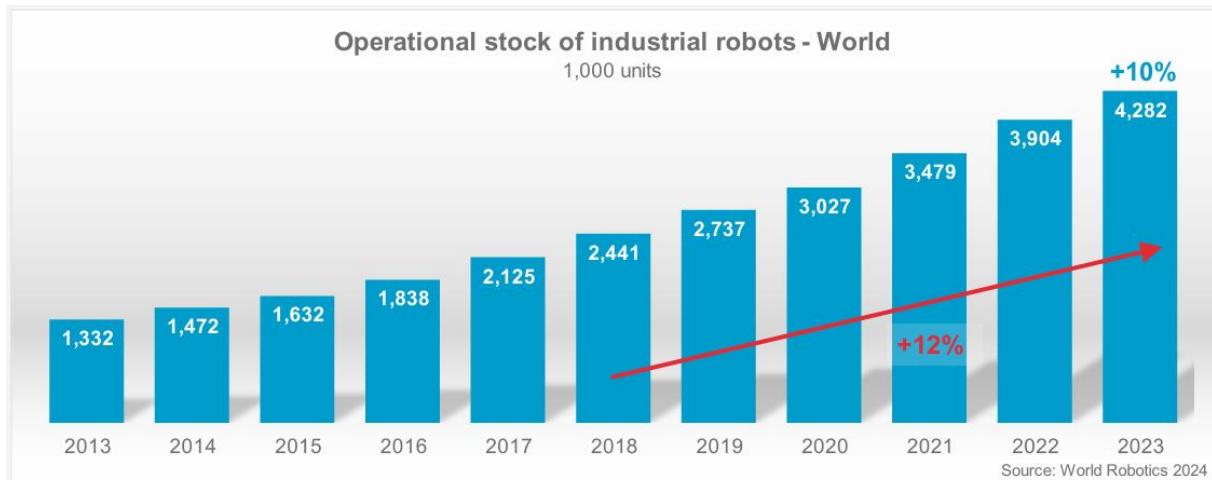


図 1.2 産業用ロボットの稼働台数の推移 ([4] より引用)

実際の導入事例としてはオムロン株式会社のアームロボットが挙げられる [5]. オムロン株式会社が提供するアームロボットは様々な現場に導入され、省人化による人手不足の解消や作業時間の短縮による生産効率の向上などその有用性を示している。また、株式会社 KEYENCE が提供している産業用ロボット [6] は人体への負荷が大きい作業にアームロボットを導入することで品質の安定化や作業の効率化を図るだけでなく作業環境の改善に寄与しその有用性を示している。

### 1.1.2 製造業のリモート化

これらの動きに加えて、2020年世界的に流行した新型コロナウイルスの影響を受け、あらゆる作業がリモート化、無人化に関連したソリューションが登場し、新しい産業形態の変化が訪れている [7]. 工場においてもコロナ禍が始まった2020年から緊急対応としてリモート化を行う企業が多くなったが、2021年以降は恒久的な体制として整備が進みつつあり、今後さらにリモート化が進む見込みである [8]. 図 1.3 に産業用ロボットの年間導入台数を示す。2013年から新型コロナウイルスが流行する以前までの年間導入台数は多い年で年間430万台となっているが、新型コロナウイルスが流行した2020年の翌年から年間530万台程度で推移しており、産業用ロボットの年間導入台数から見ても製造業のリモート化、無人化が進められていることが明らかである。しかし、産業用ロボットの導入に伴い、産業用ロボットの操作の複雑さから効果的に活用するために必要なスキルを持つ人材が不足していることや、導入するための資本の不足等様々な課題が挙げられている [9][10][11]. また、産業用ロボットの利用の動向として様々な工程の自動化が進められているが、完全な自動化は難しく、自動化が難しい工程については人が作業を行うことや人間による産業用ロボットの操作が必要である [12].

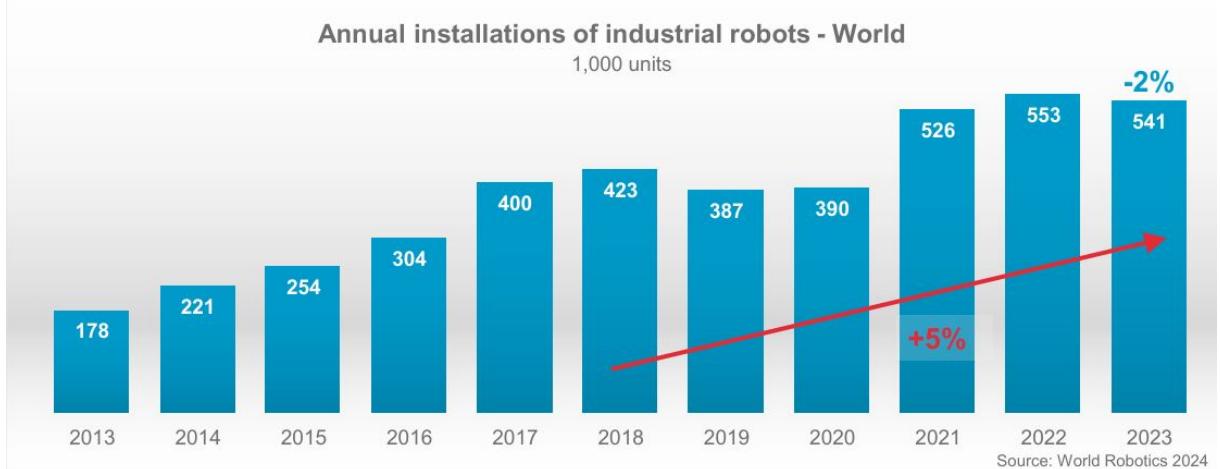


図 1.3 産業用ロボットの年間導入台数 ([4] より引用)

実際に製造業、産業のリモート化を可能にした事例として、トヨタ自動車の 3D CAD VDI があげられる [13]. 3D CAD VDI の導入により、設計職は自宅のノート PC からインターネット経由で仮想環境の 3D CAD アプリにアクセス可能となりリモート化が実現した. また、東京で溶接の町工場を営むクリエイティブワークスは、技能者育成用の溶接キットにインカム、カメラ、通信機能を搭載した独自開発の IoT 溶接機と汎用クラウドの生産管理システムを用いて溶接職人のリモート化を実現している [14]. さらに、人間による操作が必要なタスクをリモート化する試みも進められている. ManageReact は従来人が現場で行っているシンプルな作業を遠隔化する取り組み SocoCacico を提案している [15]. これらの事例のように製造業、産業の現場でリモート化が導入されつつあり今後更なるリモート化の推進が予想される.

### 1.1.3 製造業における XR 技術の活用

拡張現実(AR), 仮想現実(VR), 複合現実(MR)から成る xR と呼ばれる基本的な概念はヘッドマウントディスプレイやサングラス型の XR グラスなどに仮想的なオブジェクトであるホログラムを映すものである.

製造業においては設計、製造、メンテナンスなどのエンジニアリングチェーン全体をデジタルツインでつなぐことや各プロセスに XR を活用する動きが起こっている [16][17]. AIMultiple は拡張現実を利用することで作業指示や情報のオーバ레이を行う事ができ、組み立て工程を効率化するソリューションを提供している. 同社は XR 技術を用いることで遠隔での共同作業を可能にし、効率性や正確性を向上させている. その他にもアルゼンチンの同管理製造メーカーであるテナリス社では AR 技術を導入することで設備メンテナンスや製造工程の運用管理を効率化することに成功した事例 [18] や富士通沼岡工場では保守点検に AR を導入し管理ノウハウを見るかすることで関係者全員が共有可能にするシステムを導入した事例 [19] など今日様々な製造業の現場で XR が活用されている. また、製造の工程だけでなく教育訓練に XR を活用することで教育訓練にかかる時間の短縮、効率化を可能にしている事例が多く存在する. 一例として株式会社ホロラボは教育訓練に MR を用いたサービス assists を提供している [20]. 図 1.4 に assists 使用時の様子を示す.

assists は MR 技術を用いて空間にテキストや画像、3D モデルといったデジタル情報を縦走し、直感的で学習効率の高い体験形式での教育訓練を可能にしている。これにより、反復して自主学習を行えるため指導矢が常駐する必要がなく教育コストの軽減に成功している。

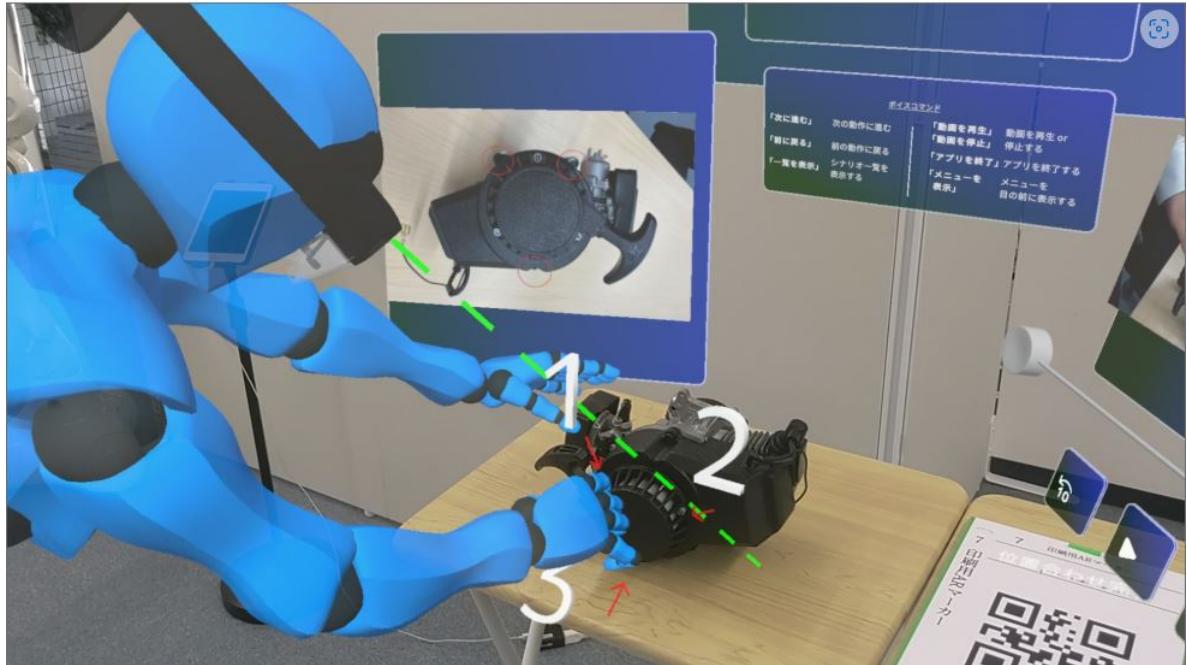


図 1.4 Assists 使用時の様子 ([20] より引用)

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・目標

今日日本では超高齢化社会に伴い様々なところで人手不足が指摘されている中、労働力不足の課題が深刻化すると懸念されており、生産性を高める手段としてロボティクスへの関心が高まっている。製造業の現場においてもロボティクスへの期待が高まる傾向にあり、近年産業用ロボットは多くの現場に導入され作業者の安全性と作業の生産性を向上させている。様々な利点から産業用ロボットの導入は我が国を含む先進工業国にとどまらず新興国も含め世界的に大きな潮流となりつつある。これらの動きに加えて 2020 年世界的に流行した新型コロナウイルスの影響を受けあらゆる作業のリモート化、無人化に関連したソリューションが登場している。工場においても産業用ロボットを導入するなどの方法でリモート化、無人化を進めており、この動きは今後さらに進む見込みである。しかし、産業用ロボットの導入には資金的な課題や産業用ロボットを扱える人材が不足しているなどの課題も存在している。また、産業用ロボットの利用の動向としては工程の自動化が主に進められているが完全な自動化が難しく人による操作が必要な作業も存在している。リモート化、無人化に関連したソリューションとして設計、製造、メンテナンスなど全体に XR を活用する動きが起こっており、様々な事例が存在する。

以上のことから産業用ロボットの操作に特別な知識を必要としない程度簡単で直感的であり、遠隔地からリアルタイムな操作が可能な産業用ロボットの操作手法が必要である。そこで本研究では産業用ロボットの中でも多くの工程に用いられているアームロボットに焦点を当て、特別な知識を必要とせず遠隔地からリアルタイムで操作が可能な操作手法の提案を目標とする。そのため本研究では以下3点を目標とし、評価実験を行い目標が達成されたかを検証する。

- 直感的に操作可能な操作手法
- 認知的負荷の小さい操作手法
- 操作が簡単に感じられる操作手法

本研究で提案する手法はアームロボットの状態などの情報提示手法として拡張現実を用い、拡張現実で仮想的に提示されたアームロボットを操作することでその動きに連動して実際のアームロボットも操作可能なシステムとなっている。拡張現実で仮想的に配置されたアームとボットはハンドトラッキングを用いて取得する手の位置及び操作デバイスを用いて取得する姿勢を用いてアームロボットのヘッドの位置姿勢を決定することで各関節角を決定し操作を行う。グリッパーの開閉は操作デバイスを用いて操作する。

## 第2章 関連研究・技術

### 2.1 既存のアームロボット操作手法

製品化されているアームロボットの手動操作手法はタッチパネル上の複数の方向ボタンを用いてアームロボット操作する手法が多く用いられている [21][22]. 図 2.1 に方向ボタンを用いたアームロボット操作手法の例を示す. 一般的に方向ボタンを用いてアームロボットのヘッドの位置姿勢を決定し制御する逆運動学を用いることで各関節角を制御する方法より簡単に操作が可能な一方で、アームロボットの自由度の高さからボタン数が多くなり直感的な操作が難しい課題が存在している.

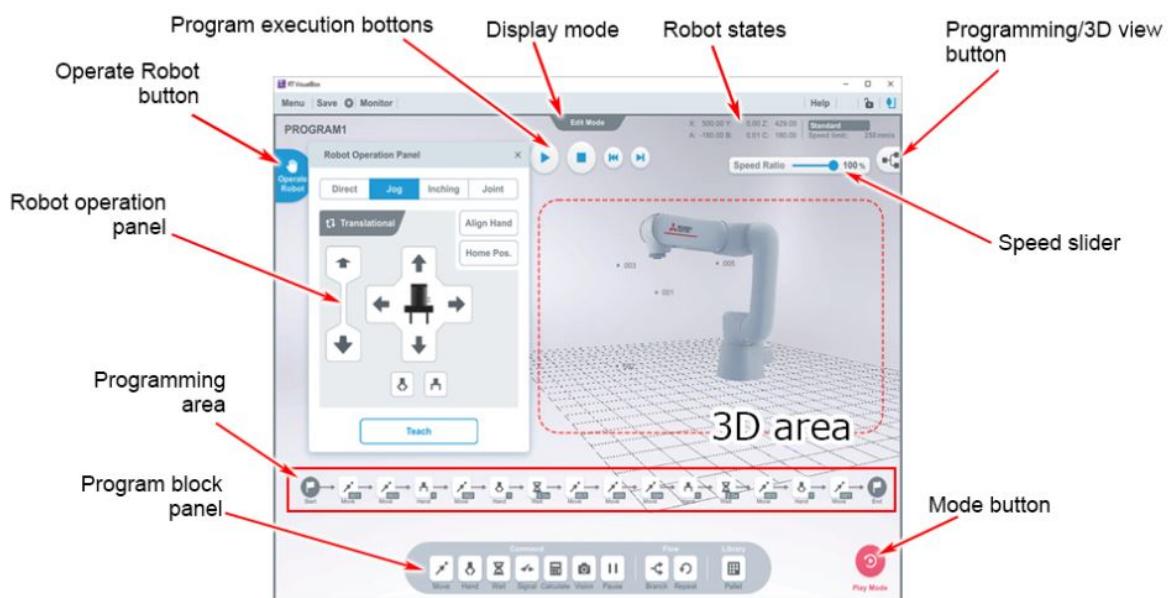


図 2.1 方向ボタンを用いたアームロボット操作手法の例 ([22] より引用)

より直感的な操作を可能にする操作手法としてジョイスティックなどのコントローラを用いて操作を行う手法が存在する [23]. 図 2.2 にアームロボット操作に用いるジョイスティックの例を示す. スティックを倒すことでその方向にアームロボットのヘッドの位置を移動させるなど方向ボタンを用いて操作する手法に比べ簡単な操作が可能であるが、奥行き方向の操作時にはボタンを押す必要があることや回転の操作についても特定のコマンドを入力する必要があるなどアームロボットの動作を意識した操作が必要なことから方向ボタンを用いた操作と同様に直感的な操作や意図したとおりの操作が難しい課題が残されている.



図 2.2 アームロボット操作に用いるジョイスティックの例 ([23] より引用)

## 2.2 直接操作型のアームロボット操作手法

アームロボットの操作手法を提案する研究は数多く行われている。リアルタイムのロボットの手動操作においては、ジョイスティックなどのコントローラやタッチパネルを用いて複数のボタンを用いた操作手法が多く提案されている [24][25][26].

Hashimoto らは CG の重曹表示を用いてロボットを直感的に操作することができるシステム TouchMe を提案している [27]. TouchMe は入力デバイスとしてタッチスクリーンを使用しており、画面上には操作対象のロボット三人称視点からとらえたカメラ画像が表示されている。ユーザは画面上に表示されているロボットの操作したい部位に直接触れ、ドラッグすることによってロボットを任意の位置姿勢にすることができる。図 2.3 に TouchMe を用いたアームロボット操作時の例を示す。TouchMe ではアームロボットのヘッドを動かしたい方向へドラッグすることで操作を可能にしている。TouchMe でアームロボットを操作する際にタッチパネルを用いて操作を行っているため、二次元平面での操作は直感的で容易であるが、三次元空間での操作は難しい課題が残されている。

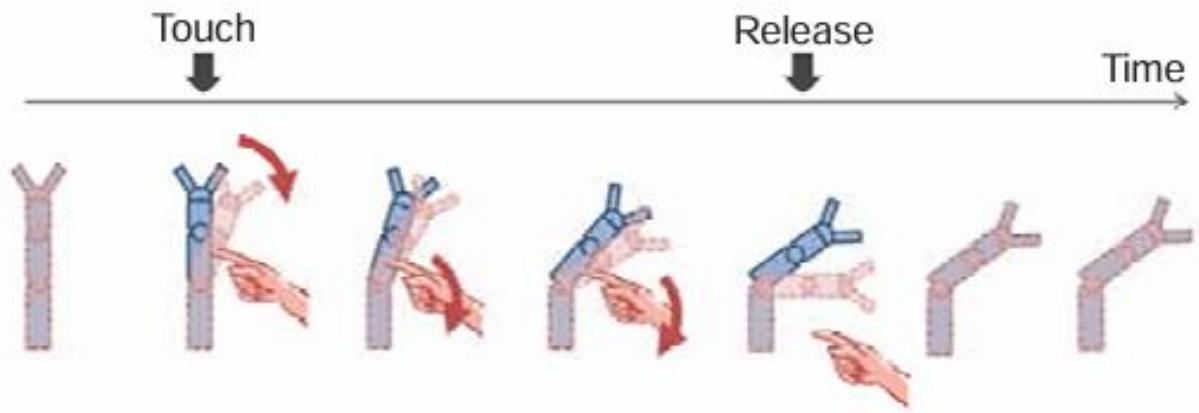


図 2.3 TouchMe を用いたアームロボット操作時の例 ([27] より引用)

竹内らは操作者が周囲の確認を目視と1台のカメラで行い物体把持を簡単に行えるタッチパネルを利用したロボットアーム手先目標指定インターフェースを提案している [28]. 図2.4に竹内らの提案するシステム使用時の様子を示す. 竹内らの提案するシステムではタッチパネル上での操作によりロボットアームを動作させ, 少ない操作回数で物体の把持を可能にしている. 竹内らの提案するシステムでは, 目視とカメラで対象物体の確認を行っていることから, 遠隔地からの操作を想定した際に奥行き方向の認識が難しく操作が難しくなる課題が残されている. 竹内らはさらにUIを追加する改善案も述べており, 認知的負荷がより大きくなる, アームロボットの動作をより意識する必要がある課題も残されている.

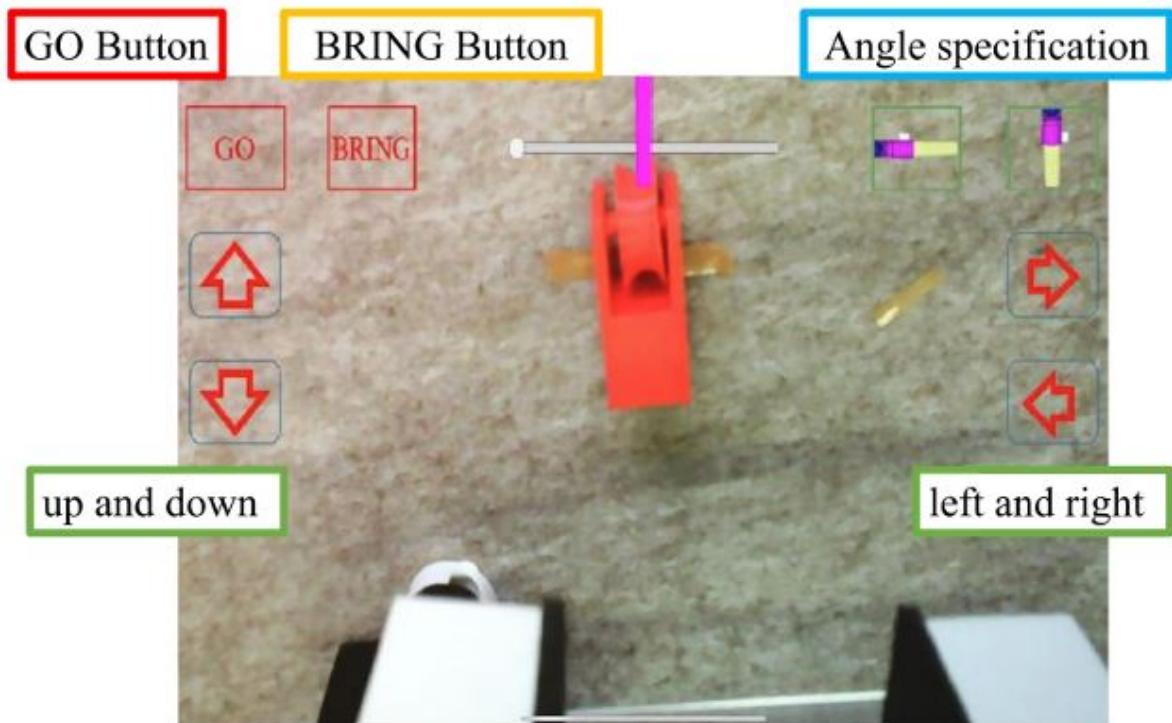


図 2.4 竹内らの提案するシステム使用時の様子 ([28] より引用)

Chenchireddy らは Aruduino コントローラを用いたアームロボットの操作手法を提案している [29]. 図 2.5 に Chenchireddy らの提案する操作手法の全体図を示す. Chenchireddy らが提案する操作手法ではアームロボットの各関節を操作する Aruduino コントローラとセンサを統合して精密活動的な操作を可能にしている. Aruduino コントローラとセンサのみを用いるため他の手法に比べて安価であり, コスト面に優れている. しかし, 各関節を操作する手法は操作の直感性にかけており, 使用する人の知識を必要とする課題が残されている.

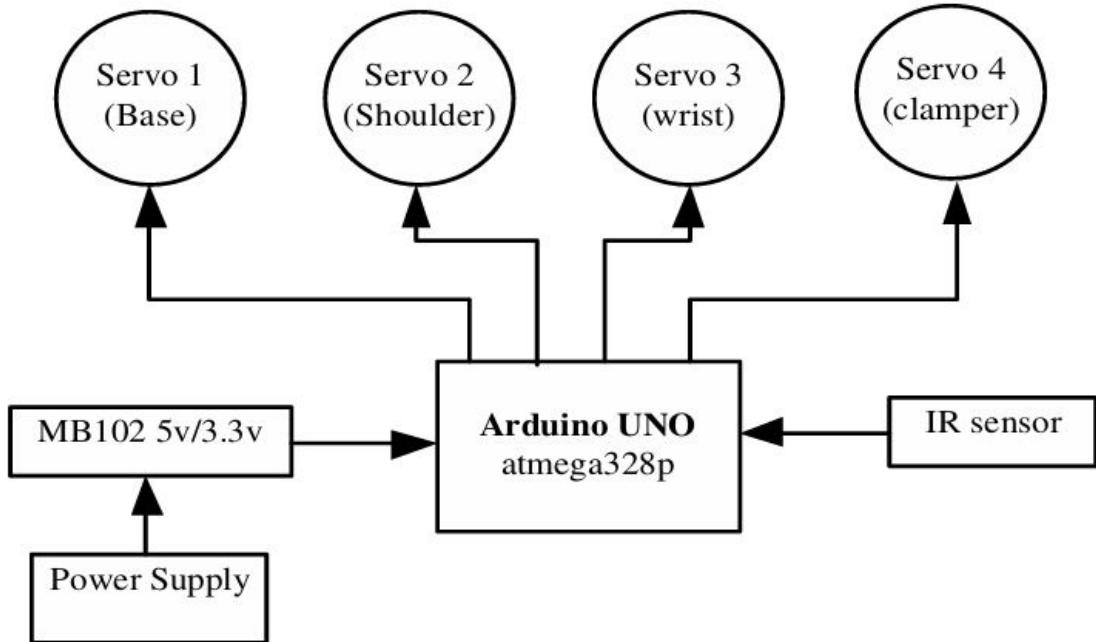


図 2.5 Chenchireddy らの提案する操作手法の全体図 ([29] より引用)

ジョイスティックなどのコントローラを用いた操作手法については様々な形のコントローラが提案されている [30][31][32]. コントローラを用いた手法では精密な操作のため複数のボタンを用いることやタッチパネルなどと組み合わせるなどの手法が存在しているが, 用いるボタンやタッチパネル内の UI が多くなる程アームロボットの操作に対する専門性が必要になり直感的な操作が難しくなる. これに対し, 図 2.6 に示すようなより簡素化したコントローラも多く提案されている. このようなコントローラは複数のボタンを用いる手法に比べ操作が容易である利点があるが, 細かな操作が難しい課題が残されている. また, 操作ミスを防ぐために触覚や聴覚によるフィードバックを行う手法も存在しており



図 2.6 アームロボットコントローラの例 ([30] より引用)

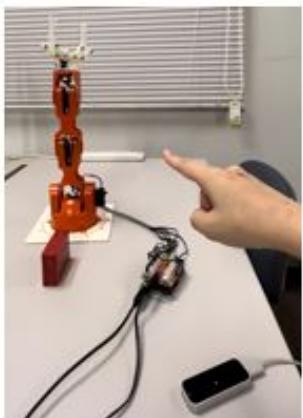
以上のようにジョイスティックなどのコントローラを用いる手法やタッチパネルを用いる手法、タッチパネルとコントローラを組み合わせる手法など様々な直接操作型のアームロボット操作手法が提案されている。タッチパネルを用いた操作手法ではアームロボットの自由度の高さから UI が複雑になり直感的な操作が難しい課題が挙げられ、ジョイスティックなどのコントローラを用いた手法では奥行き方向や精密な操作が難しい課題が残されている。

### 2.3 ジェスチャ及び身体動作用いたアームロボット操作手法

ロボットの操作手法においてタッチパネルやコントローラを用いた操作に比べ専門的な知識を必要とせず、直感的な手法としてジェスチャ操作や身体動作を用いた操作が挙げられる。これらの操作手法を提案する先行研究は数多く存在する。手袋型で指の動きを認識する手法、カメラで身体動作をコマンドとして認識する手法、センサを用いて人の動作を認識しコマンドとして用いる手法など、身体動作の認識方法及びその活用方法などその手法は多岐にわたる [33][34][35]。

川西らは Leap Motion を使用したロボットアームの操作手法を提案している [36]。川西らが提案するシステムでは Leap Motion で取得した手の座標データを用いてアームロボットの操作を行っている。この手法は手の動きがアームロボットの動きに反映されるため非常に直感的であるが、その他のグリッパーの制御やヘッドの回転などの操作手法について言及されてなく、操作手法として不十分である。これに対し日置らは Leap Motion を用

いて手の動きを認識し、特定の動作をアームロボットの特定動作のコマンドとして用いることでアームロボットの操作を行う手法を提案している [37]. 図 2.7 日置らの提案するシステムを用いたアームロボット操作の様子を示す. に日置らの提案する手法では例えば指で円を描く動作をした際にモータ 3 の角度を 20 度上げるなど特定の動作を特定のモータの動きに割り当てることで操作を可能にしている. 川西らの提案する操作手法に比べ、多くの動作に対応可能であることから操作手法として十分であると言えるが、一度のコマンドで一定量アームロボットが動くことから細かな操作が難しい事や、各身体動作が対応するコマンドを覚える必要があり直感的な操作が難しい課題が残されている.



(a)垂直にする



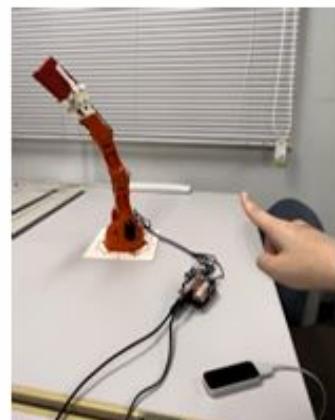
(b)アームロボットの腕を下げる



(c)グリッパを閉じる



(d)アームロボットの腕を上げる



(e)時計回りに回転させる



(f)アームロボットの腕を下げる



(g)グリッパを開く

図 2.7 日置らの提案するシステムを用いたアームロボット操作の様子 ([37] より引用)

Chen は MR を用いて仮想的に表示されたアームロボットをオブジェクトトラッキングを用いて操作を行う手法を提案している [38]. 図 2.8 に chen が提案する手法を用いたアームロボット操作の様子を示す. アームロボットは逆運動学を用いて制御され, 赤いボール

を追跡する。赤いボールは手を用いて移動させることができあり、この位置に応じてアームロボットが適切な姿勢で追跡することで操作を可能にしている。赤いボールの移動については操作者自身の手を用いて触れるなどで移動させることができあり非常に容易である。Chen の提案する手法ではヘッドの回転やグリッパーの制御に関する記述がなく操作方法としては不十分ではあるが、アームロボットの操作に必要な動作が赤いボールを動かすのみであるため専門的な知識を必要とせず直感的な操作が可能であるなどの利点が挙げられる。

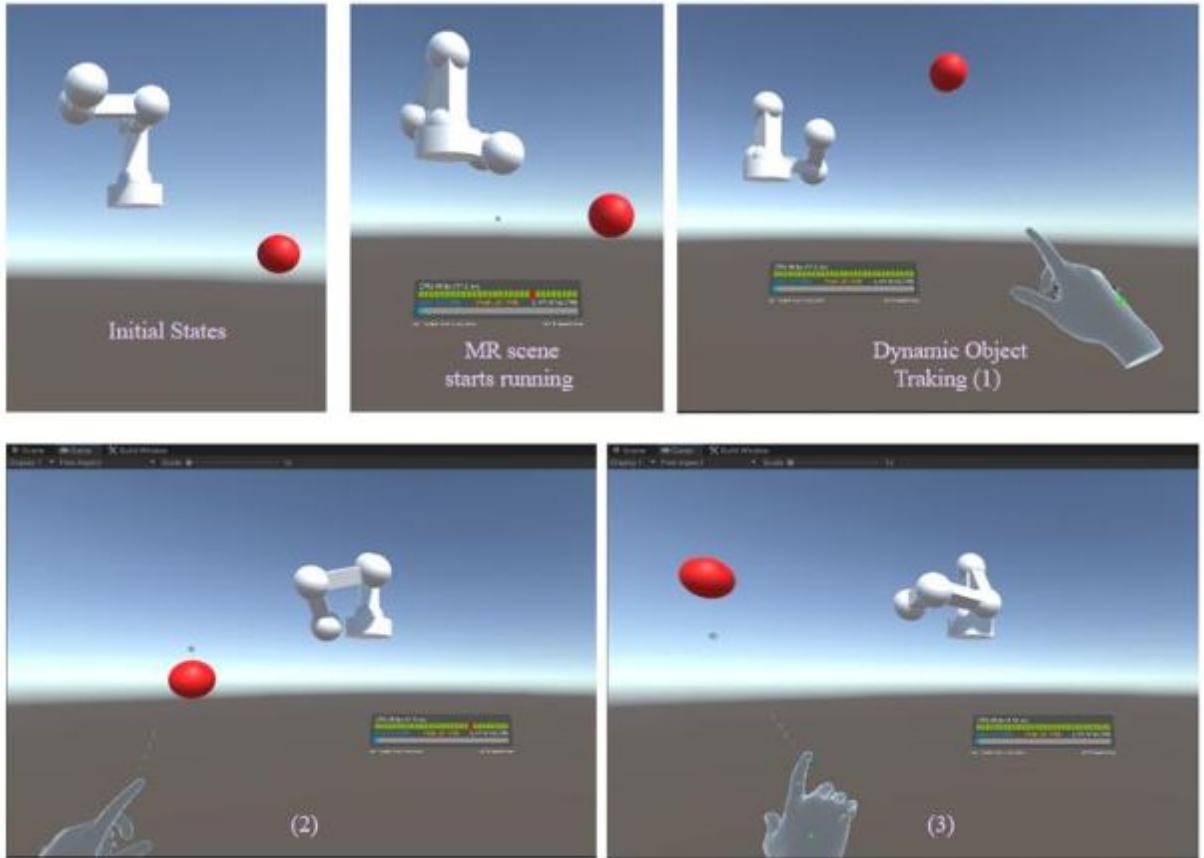


図 2.8 chen が提案する手法を用いたアームロボット操作の様子 ([38] より引用)

福岡らは顔表情をアームロボットの動きにマッピングすることで操作を行う手法 faceDrive を提案している [39]。図 2.9 に faceDrive を用いたアームロボット操作の例を示す。FaceDrive では、機械学習を通じて表情とアーム動作コマンドのマッピングを行う操作手法を用いている。四肢の自由を底縛地に操作が可能である点においては優れた操作手法である一方、コマンドとしての顔表情を記憶する必要がある点や顔表情のご認識により意図しない動作が発生する可能性がある点などの課題が残されている。



図 2.9 faceDrive を用いたアームロボット操作の例 ([39] より引用)

木村らは頭部動作に基づいてアームロボットの操作を行う手法を提案している [40]. 図 2.10 に木村らの提案するアームロボット操作時の様子を示す. 木村らの提案する手法では操作開始時にヘッドマウントディスプレイに搭載されたウェブカメラを用いてアームロボットに貼り付けられているコードを読み取る. アームロボット動作はコードに割り当てられている情報によって切り替えられ, 読み取りが完了するとロボットアームがユーザの頭部動作に基づいて動作するようになる. アームロボットの操作時にはヘッドマウントディスプレイに取り付けられた慣性センサを用いて頭部動作を認識し, アームロボットの旋回運動及び上下運動を制御する. 木村らの提案する手法は任意のタイミングでアームロボットを操作可能であるため意図しないタイミングでの操作を避けられる利点がある一方, アームロボットの動作に対応した頭部の動きを覚える必要があるため直感的な操作が難しい点や頭部を動かしている際にアームロボットを視界に入れ続けることが難しい点に課題が残されている.



図 2.10 木村らの提案するアームロボット操作時の様子 ([40] より引用)

以上のようにジェスチャや身体動作を用いた操作手法は数多く提案されている。仮想的に表示されたオブジェクトを移動させることでそれに追従するアームロボットの操作を行う手法や手の動きを用いて操作を行う手法など非常に直感的であり意図したとおりの操作が可能な手法が提案されているが回転やグリッパーの制御については言及されていないなど操作手法として不十分である。その他の身体動作を用いた手法は複雑なUIを必要とせず、操作手法を簡単に理解可能である利点があるが、アームロボットの動作に対応した身体動作を覚える必要があり、アームロボットの動作に近い動作ではない事などから直感的な操作が難しい課題が残されている。

## 2.4 自然インターフェースを用いたアームロボット操作手法

タッチパネルやジョイスティックなどのコントローラ、身体動作やジェスチャなどを用いた操作手法以外の操作手法も多く提案されている。その例として大規模言語モデルへのプロンプティングをもとに得たタスク実行手順を用いてアームロボットを操作する手法[41]や実際のアームロボットに対して言語を用いて指示を与えて実行する PaLM-SayCan[42]、運動イメージ脳信号とインピーダンス制御を組み合わせることで操作を行う手法[43]など自然言語や脳波を用いた操作手法が挙げられる。

Zhang らは脳波を用いて意図を推定し、アームロボットの操作を可能にする手法を提案している[44]。図2.11にzhangらが提案する手法の概要図を示す。zhangらが提案する手法では操作者に「物をつかむ」や「前に進む」などの具体的な動作をイメージしてもらい、運動関連領域で生成される脳波パターンを学習し意図推定に用いる。実際に操作を行う際には操作者がイメージした運動を事前に学習したモデルを用いて意図推移帝を行い推定結果を制御コマンドに変換することで操作を行う。zhangらが提案する手法では運動をイメージするのみでアームロボットの操作を可能にしている点で直感的であり優れている一方、脳波から正確に意図を推定することが難しい点や汎用性に欠ける点などの課題が残されている。

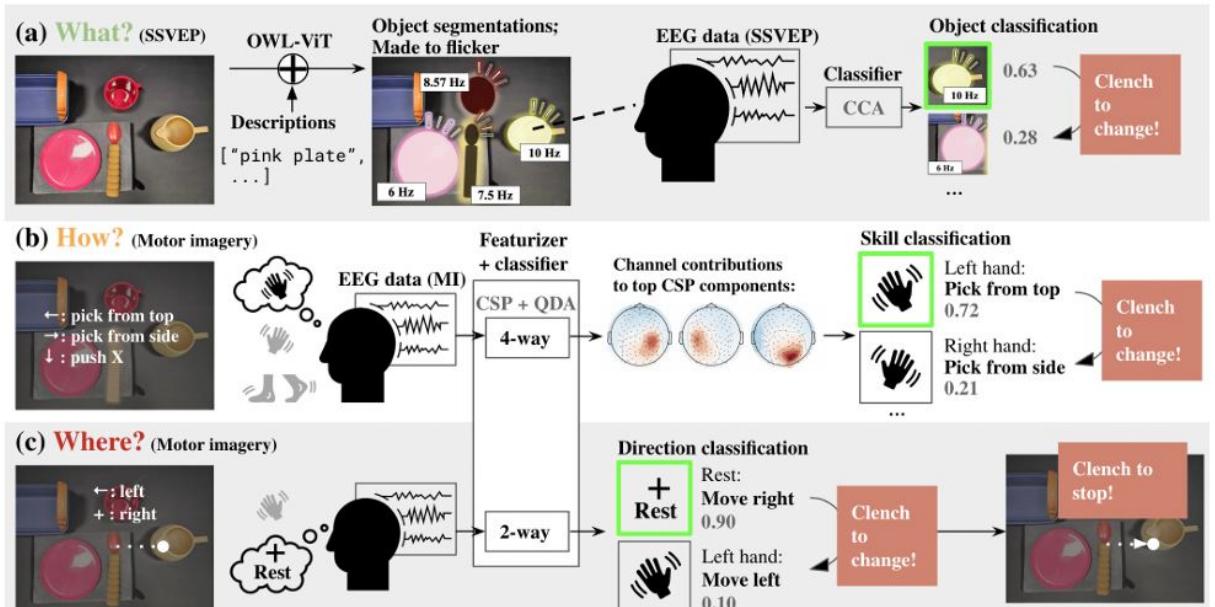


図2.11 zhangらが提案する手法の概要図([44]より引用)

久保山らは大規模自然言語モデルを用いて指示を生成することでアームロボットの操作を可能にする手法を提案している [45]. 図 2.12 に久保山らが提案する手法の概要図を示す. 久保山らが提案する手法では大規模言語モデルを用いて抽象的な自然言語指示をロボットの制御に適した具体的な行動の手続きを示した分のリストに変換し, その文とロボットの行動コマンドを結びつけることで操作を可能にしている.

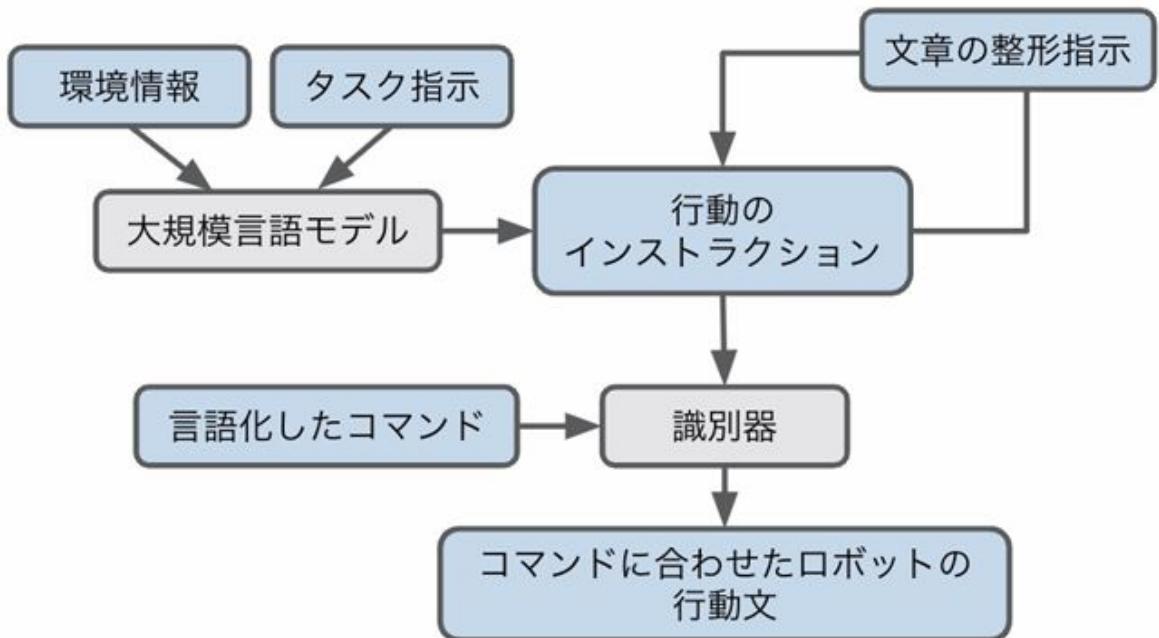


図 2.12 久保山らが提案する手法の概要図 ([45] より引用)

黄瀬らは大規模言語モデルによるコード生成と機械学習によるロボット制御を組み合わせることで言語指示によりアームロボットの操作を行う手法を提案している [46]. 図 2.13 に黄瀬らの提案する手法の概要図を示す. 黄瀬らの提案する手法では大規模言語モデルが生成した LMP は NewtonianVAE によって事前学習された世界モデルの潜在空間を利用して制御を行う. 世界モデルを用いることで, アームロボットの座標や関節角, 物体位置などの情報を利用することなく自然言語文で指示される道のタスクや動作に対して自立制御を可能にしている.

久保山らや黄瀬らなどが提案する自然言語を用いた操作手法は脳波を用いた手法と同程度に直感的であると言えるが, 自然言語の曖昧さから意図しない動作が発生する可能性があるなどの課題が残されている.

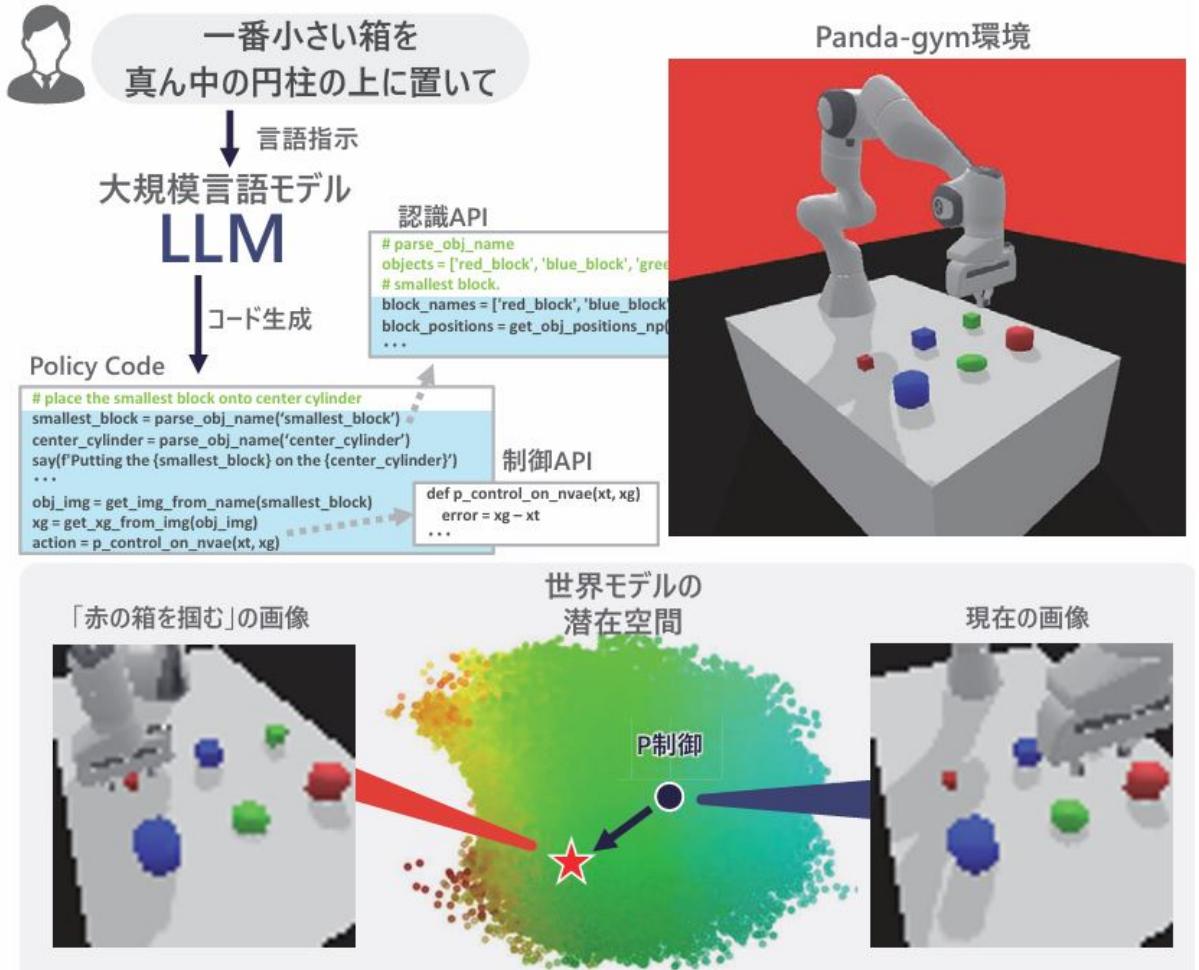


図 2.13 黄瀬らの提案する手法の概要図 ([46] より引用)

## 2.5 まとめ

既存の操作手法としてタッチパネル上で複数のボタンを用いることやジョイスティックなどのコントローラを用いた手法が存在するが、アームロボットの自由度の高さから操作が煩雑になる課題があり、アームロボット導入の妨げとなっている。この課題を解決するために既存の操作手法を改善しより簡潔にする手法を提案する研究は数多く存在するが簡易化する事には限界があり、認知的負荷が大きい課題が残されている。これに対し、身体動作やジェスチャを用いた操作手法が数多く提案されている。これらの手法はタッチパネルなどを用いた手法に比べて必要なボタン数が少なく認知的負荷が小さい点で優れている。しかし、アームロボットの動作に対応するジェスチャや身体動作を意識する必要があるため直感的な操作が難しい点に課題が残されている。仮想的に表示されたオブジェクトを移動させることでそれに追従するアームロボットの操作を行う手法や手の動きを用いて操作を行う手法など非常に直感的であり意図したとおりの操作が可能であるが、回転やグリッパーの制御については言及されていないなど操作手法として不十分である課題が残されている。脳波や自然言語を用いた操作手法は認知的負荷が小さく特別な身体動作などのコマンドを意識する必要がなくより直感的な手法であると言えるが、自然言語の曖昧さなどから意図しない動作が発生する可能性がある点に課題が残されている。

以上のことから本論文ではアームロボットの状態などの情報提示手法として拡張現実を用い、拡張現実で仮想的に提示されたアームロボットを操作することでその動きに連動して実際のアームロボットも操作可能なシステムをつくる。拡張現実で仮想的に配置されたアームとボットはハンドトラッキングを用いて取得する手の位置及び入力デバイスを用いて取得する姿勢を用いてアームロボットのヘッドの位置姿勢を決定することで各関節角を決定し操作を行う。グリッパーの開閉は入力デバイスを用いて操作する。

# 第3章 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

## 3.1 システム概要

本研究で提案するシステムは拡張現実を用いて仮想的に提示されたアームロボットのモデルを操作することでその動きに連動した実際のアームロボットの操作も可能にするシステムとなっている。図3.1に提案システムの概要図を示す。インプットデバイスを用いて姿勢情報及びグリッパーの開閉情報をARアプリケーションへ送信し、ARアプリケーションでは受け取った情報及びアプリケーション内でハンドトラッキングを用いて取得する手の位置情報を用いてアームロボットの各関節角を計算する。その後、ARアプリケーションで計算された各関節角の情報を実際のアームロボットへ送信することで操作を行う。インプットデバイス、ARアプリケーション間及びARアプリケーション、アームロボット間の通信はMQTTプロトコルを用いる。MQTTプロトコルはhttpのようにプレーンテキストでの情報ではなく、ビット単位での情報によりオーバヘッドが少なく軽量であり、コネクション指向のプロトコルである。また、要求-応答型モデルであり、Topicを用いることで双方向で1対多、多対多の通信が可能であるため柔軟に拡張可能である[47]。これらの利点を有するMQTTプロトコルは直感的な操作のため低遅延でリアルタイムに通信を行う必要がある本システムに適している。また、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。図3.2に使用するhololens2を示す。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います[48]。本システムに適している。

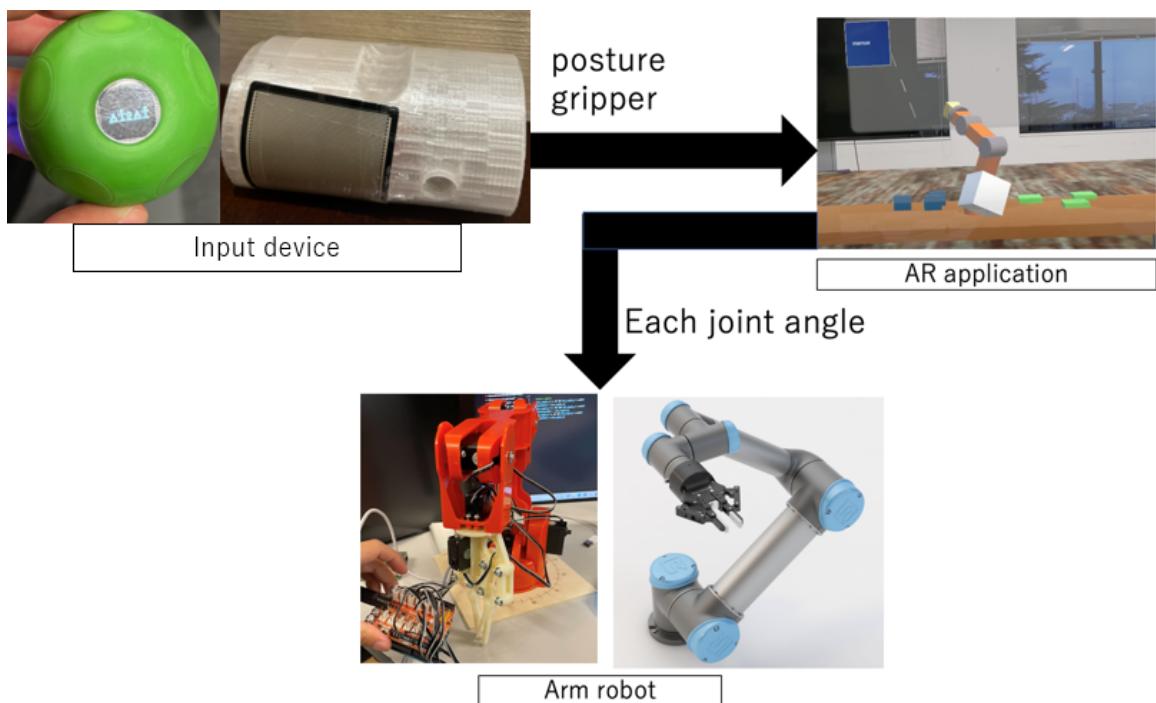


図 3.1 提案システムの概要図



図 3.2 使用する HoloLens2

### 3.2 インプットデバイス

アームロボットのリアルタイム操作を行うにあたり、ハンドトラッキングを用いた手の位置情報及び姿勢情報、開閉情報を用いて操作が可能であれば直感的な操作を可能にしながら専門的な知識を必要とせず容易な操作が可能である。しかし、姿勢を制御するために

手を傾けた際などに手が隠れてしまい hololens2 のカメラでとらえられない際に姿勢や開閉の認識が難しく正確な操作が難しい。そのため本研究では手が隠れた際にも正確に姿勢及び把持の認識を正確に行うためインプットデバイスを用いる。

### 3.2.1 PALL0

姿勢及び把持推定が可能なデバイスとして AI2AI が提供する Pall0 が挙げられる。図 3.3 に Pall0 の構成図を示す。Pall0 は、ボールという物理的な特性と高度なデジタルセンサー、多モーダルフィードバックを融合させたデバイスであり、は主に身体活動の促進やリハビリテーションを目的として設計されているが、現在では産業用制御システムにも応用されている。加速度、角速度、外部環境要因を追跡するセンサーを搭載し、PALL0 は多様な応用分野に対応するユニークで直感的なインターフェースを提供する [49]。



図 3.3 Pall0 の構成図 ([49] より引用)

図 3.4 に使用する Pall0 の外見を示す。Pall0 は上下各 4 か所ずつ計 8 か所に圧力センサを用いたボタンが設置されており、様々なインタラクションが可能である。本研究においては把持認識にボタンを用いる。また、本節で紹介している Pall0 は Pall0v2 であり現在ではデバイスの全面に圧力センサを搭載し把持認識が可能な Pall0v3 が提供されている。Pall0v2 ではあらかじめ配置されているがあり、グリッパーの制御において特定の位置にあるボタンを開閉の操作療法で押す必要がある。これに対し Pall0v3 ではデバイスを握り続ける間はグリッパーを閉じ、緩めた際にグリッパーを開くという制御が可能である。そのため本研究ではこれら二つの制御方法で操作の容易さや直感性に差異が出るかを検証する。

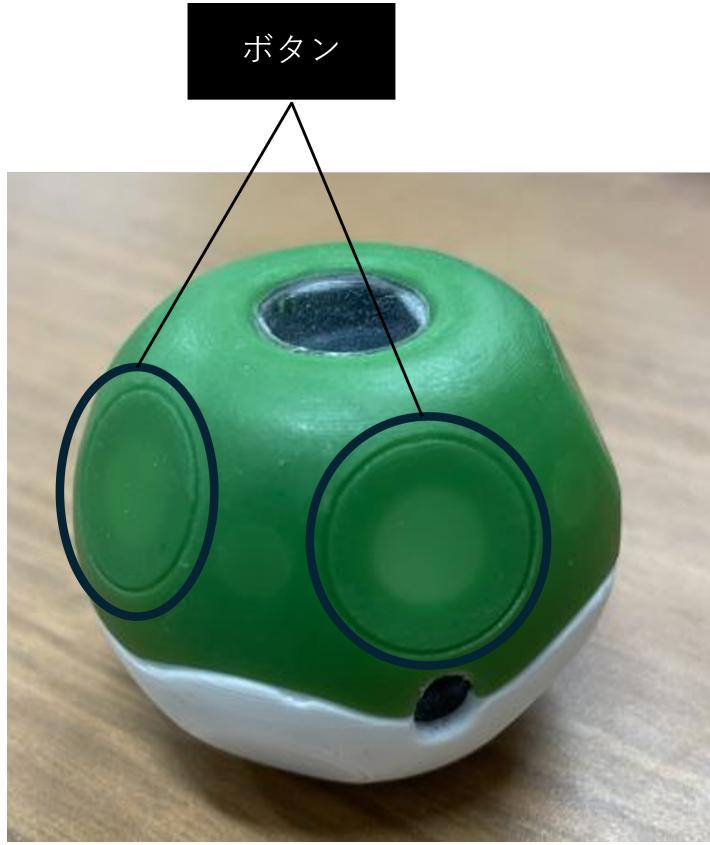


図 3.4 使用する Pall0 の外見

### 3.2.2 マルチセンサデバイス

手で持って操作を行うインプットデバイスを用いる際、形状は重要な要素であり、デバイスの握りやすさや持ちやすさを調査する文献は多岐にわたる。その中でも、特に道具やデバイスの把持部が円柱状である点に着目した研究が数多く存在する。これらの研究では、道具の把持部を円筒形に単純化し、その形状やサイズが握りやすさや使いやすさに与える影響を評価している [50][51][52]。このような背景を踏まえ、本研究では姿勢推定および把持認識が可能な円柱状のデバイスを新たに開発し、これを「Tangible Interface for Arm Robot Control (TIARC)」と命名した。

図 3.5 に制作した TIARC の外見及び図 3.6 に TIARC 使用時の様子を示す。TIARC は片手で容易に使用できる大きさを持ち、表面には把持認識を実現するための圧力センサが取り付けられている。また、TIARC のケースは 3D プリンタを用いて製作されており、内部構造を保護しつつ、充電用および配線用の穴を備えている。この設計により、取り扱いが簡便で、センサの付け替えなどのメンテナンスも容易である。図 3.7 に TIARC を構成する M5StickC 及び圧力センサを示す。M5StickC は ESP32 を搭載したオープンソースの IOT 開発ボードであり、6 軸の IMU センサや WI-FI が利用可能である。6 軸の IMU センサを用いることで TIARC の姿勢を高精度で推定することが可能であり、WI-FI を用いることでセンサ値をリアルタイムで AR アプリケーションへ送信することができる。またバッテリー駆動であり外部電源を必要せずに TIARC を動作させることができるので、持ち運びが容易で様々な環境での使用が可能である。圧力センサには、Interlink Electronics

社が提供する FSR406 圧力センサを採用している。このセンサは、M5StickC に直接接続可能な小型で柔軟性のある設計が特徴であり、非常に軽量で取り扱いが容易である。また、フレキシブルな特性を持つため、円柱状の TIARC の表面に沿うように配置することができあり、デバイス全体の形状や機能性を損なうことなく高い感度で圧力を検知することが可能である。

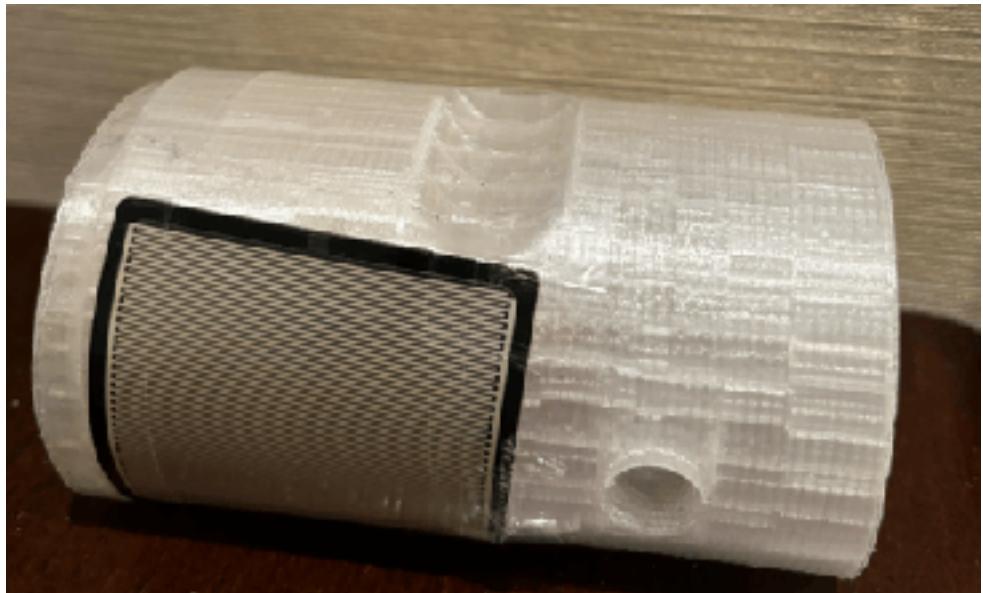
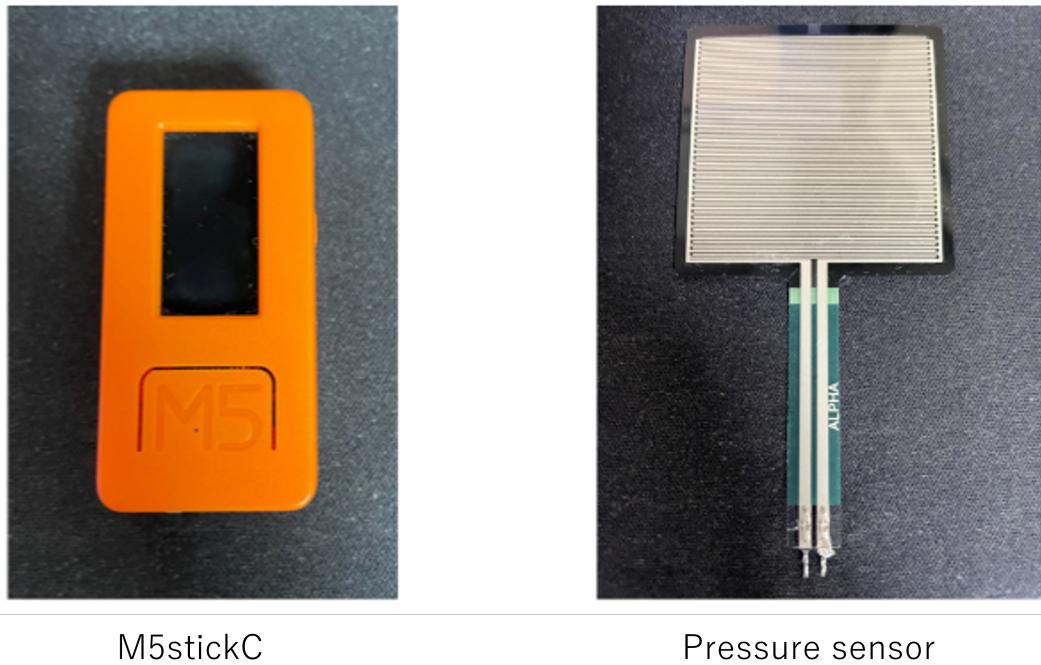


図 3.5 TIARC の外見



図 3.6 TIARC 使用時の様子



M5stickC

Pressure sensor

図 3.7 TIARC を構成する M5StickC (左側) 及び圧力センサ (右側)

### 3.3 仮想的に配置されたアームロボットの操作手法

AR アプリケーションにおいて、仮想的に配置されたアームロボットの各関節角度は、逆運動学の計算を用いて決定される。そのため、アームロボットの頭部の位置および姿勢を適切に決定することが必要である。図 3.8 に仮想的に配置されたアームロボット操作時の様子を示す。このアプリケーションでは、ハンドトラッキング技術を用いて手の位置をリアルタイムで追跡し、その追跡された位置を白い立方体として視覚的に表現している。白い立方体による位置表示は、仮想オブジェクトとユーザーの手が重なった際にも手の位置を視認可能に保ち、誤操作や混乱を防ぐために使用される。手とアームロボットの頭部にはそれぞれ基準点が設けられている。この基準点を基に取得する手の基準点から差の情報と、アームロボットの頭部の基準点からの差情の情報を同期させることで、アームロボットの頭部の位置を決定する。これにより、操作者はアームロボットの頭部を動かしたい方向に手を動かすのみで位置の操作ができる、直感的で容易な操作を可能にしている。図 3.9 に仮想的に配置されたアームロボットの頭部の姿勢操作時の様子を示す。アームロボットの頭部を傾けたい方向にインプットデバイスを持った手を傾けることで操作を行う。手を傾け続けている間はアームロボットの頭部が回転し続け、手を水平な状態に戻すことで回転を止め姿勢を固定する。グリッパーの操作手法は Pall0v2, Pallov3, TIARC で異なる。Pall0v2 ではグリッパーを閉じる際に特定のボタンを押し、開く際に再度同じボタンを押す。TIARC ではグリッパーを閉じる際にデバイスを強く握り、開く際に再度強く握る。Pallov3 ではデバイスを強く握っている間グリッパーが閉じ続ける。Pall0v2 と TIARC はグリッパーの開閉を切り替えることで操作する点で同様であるが、特定の位置のボタンを押す必要があるか単純にデバイスを握るのみで操作可能かという点において異なる。また、TIARC と Pallov3 はデバイスを握るのみで操作可能である点では同様であ

るが、グリッパーの開閉を切り替えることで行うか握っている間はグリッパーが閉じ続けるかという点でことなる。これらの操作手法を比較することで、どの操作手法が最も直感的かつ容易かを検証する。



図 3.8 仮想的に配置されたアームロボット操作時の様子

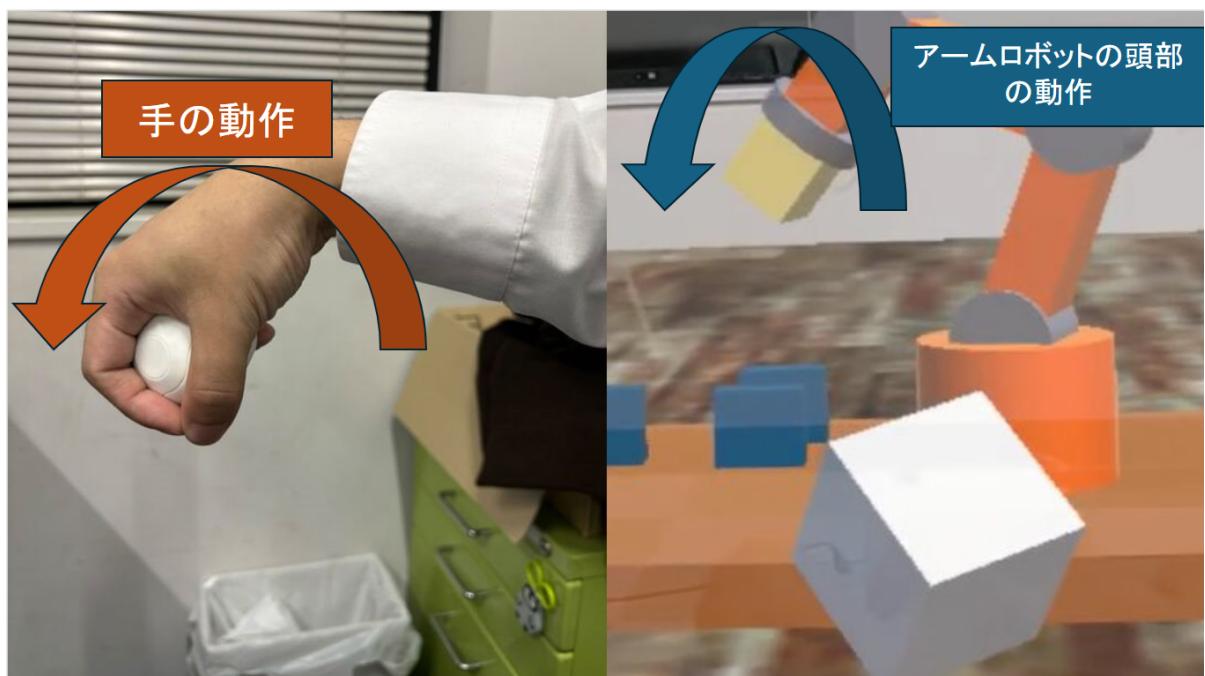


図 3.9 仮想的に配置されたアームロボットの頭部の姿勢操作時の様子

## 3.4 各デバイス間の通信手法

### 3.4.1 MQTT プロトコルによる通信の概要

3.1 節で述べた通り、提案システムでは各デバイス間の通信に MQTT プロトコルを用いる。この MQTT プロトコルはパブリッシュ/サブスクライブという通信パターンを採用しており、様々なデバイス間での効率的なデータ交換を可能にしている。このパターンにおいて、メッセージを送信する役割を担うクライアントは「パブリッシャー」と呼ばれ、メッセージを受信する側のクライアントは「サブスクリーバー」と呼ばれる。また、これらの間で通信を仲介するサーバーは「ブローカー」と呼ばれる。実際に通信を行う際には、各メッセージにトピックと呼ばれる属性が付与され、このトピックによってどのメッセージがどのクライアントに送られるかが決定される。mqtt プロトコルによる通信の概要図を 3.10 に示す。複数のデバイスが /Time というトピックをサブスクライブしているため、パブリッシャーとして機能するデバイスがメッセージの属性値に /Time というトピックをつけてパブリッシュするとブローカーを介して各デバイスにメッセージが送られる。この際、/Time 以外のトピックをサブスクライブしているデバイスはメッセージを受信しない。ブローカーはすべてのメッセージの受信、トピックに関心を持つデバイスの決定、サブスクライブしているすべてのクライアントへのメッセージの送信を行う。オープンソースのブローカーも数多く存在しており、実装が容易である利点を持つ。

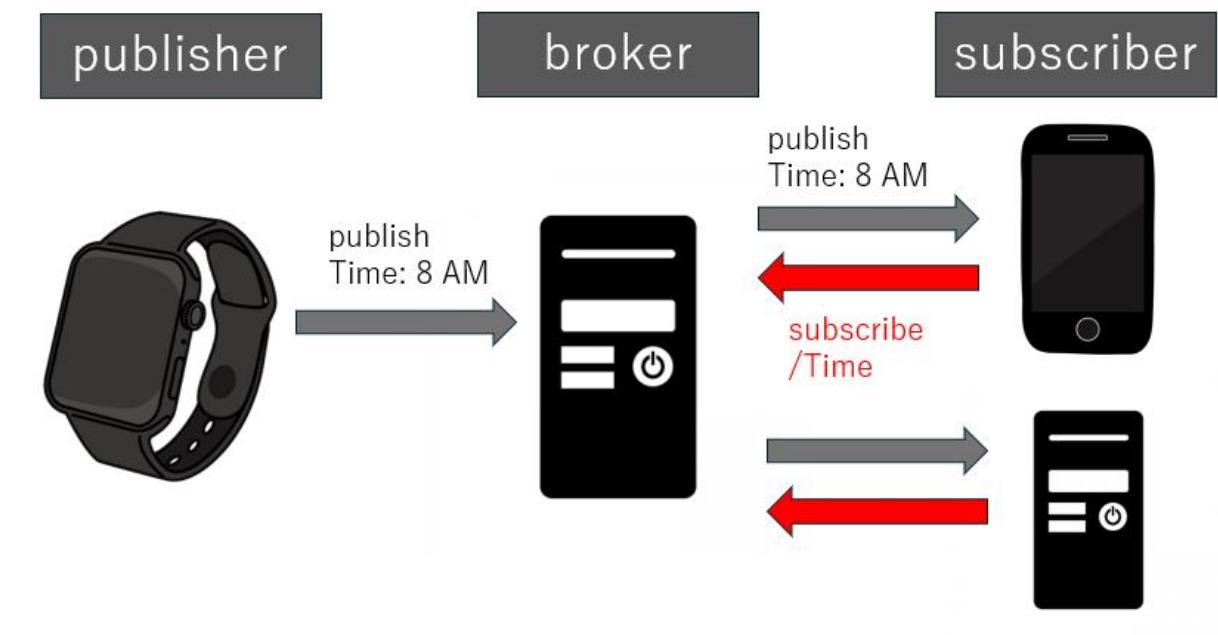


図 3.10 mqtt プロトコルによる通信の概要図

### 3.4.2 Pall0 を用いた各デバイス間の通信

図 3.11 に Pall0 を用いた際の通信の概要図を示す。通信の信頼性およびリアルタイム性を確保するためには、Hololens2 へセンサデータを直接 Bluetooth で送信することが理想的である。しかし、Hololens2 が主にサポートしている Bluetooth デバイスはキーボードやマウ

スに限定されており、センサデータを Bluetooth 経由で AR アプリケーションに送信することが技術的に困難であるという課題が存在する。さらに、Pall0 自体は Wi-Fi が利用できず、単体で MQTT ブローカーにデータをパブリッシュすることができないという制約もある。このため、Pall0 が取得する加速度、角速度、圧力センサの値を Bluetooth 経由で PC に送信し、PC 上で動作するコンソールアプリケーションにこれらのデータを取り込む。このコンソールアプリケーションは、受信した各センサデータに「トピック 1」という属性を付与したメッセージを作成し、MQTT ブローカーへパブリッシュする。AR アプリケーションは、コンソールアプリケーションによってパブリッシュされたセンサデータをサブスクライブすることで、必要なデータをリアルタイムで取得する。AR アプリケーションではコンソールアプリケーションがパブリッシュしたセンサデータをサブスクライブにより取得し、3.3 節で述べた通りに操作を行い、仮想的に配置されたアームロボットの各関節角度を決定する。AR アプリケーションは各関節角度からトピック 2 という属性を付与したメッセージを作成後にパブリッシュし、アームロボットがサブスクライブすることにより AR アプリケーション内の仮想ロボットと同様の動作を遠隔地で再現する。このように各デバイス間の通信を行うことで物理的なアームロボットが仮想環境と同期して動作し、リアルタイムでの遠隔操作が可能となる。

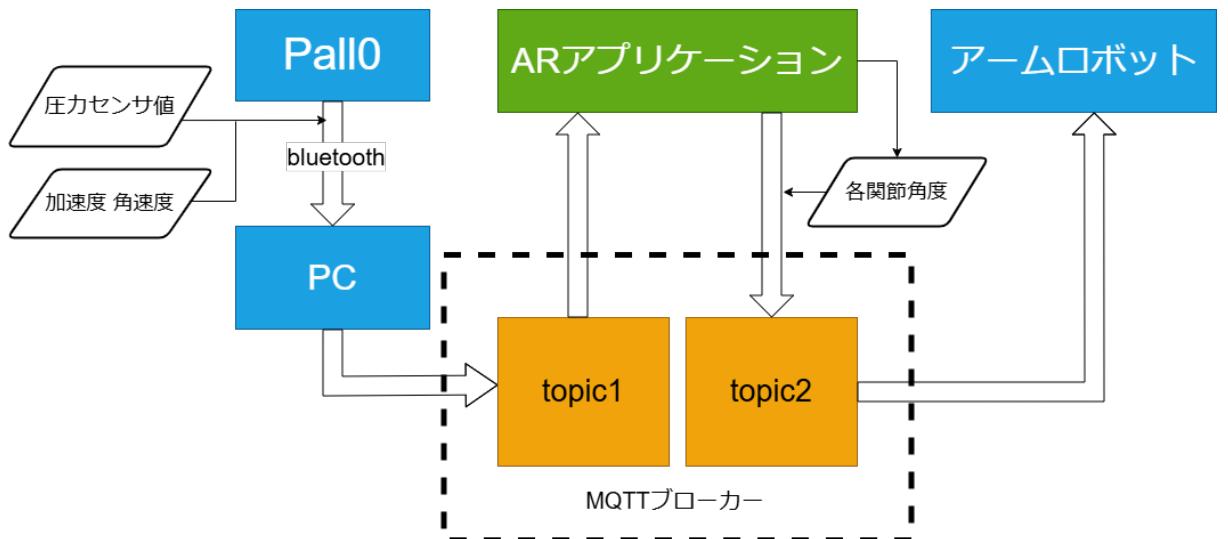


図 3.11 Pall0 を用いた際の通信の概要図

### 3.4.3 TIARC を用いた各デバイス間の通信

TIARC は WI-FI が利用可能であるため外部の PC などを介さずに MQTT ブローカーへのパブリッシュが可能である。さらにデバイス内で姿勢推定が可能であるため、AR アプリケーション内において姿勢推定の必要がなく処理の軽減が可能である。図 3.12 に TIFARC を用いた際の通信の概要図を示す。TIARC では加速度、角速度、圧力センサ値を取得し TIARC の姿勢を推定する。その後、推定結果である姿勢及び圧力センサ値に「トピック 1」という属性を付与してメッセージを作成、パブリッシュする。以降は 3.4.2 節と同様に通信を行いアームロボットのリアルタイムでの遠隔操作を行う。

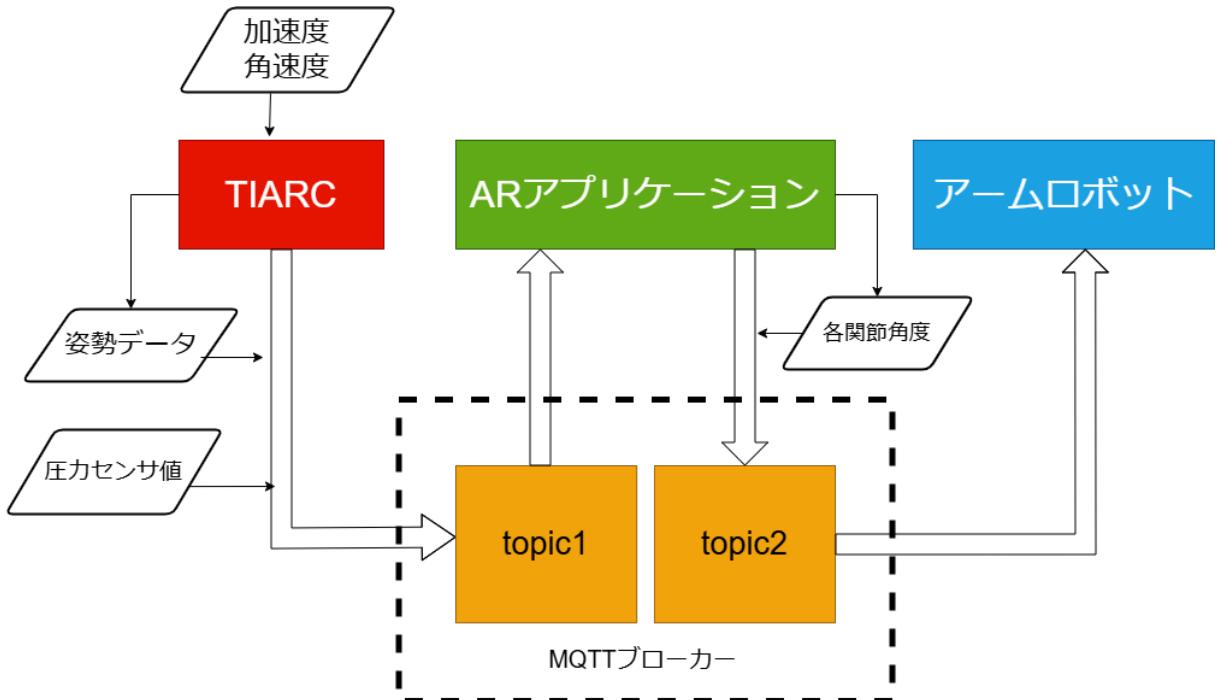


図 3.12 TIFARC を用いた際の通信の概要図

### 3.5 システムの使用方法

図 3.13 にシステム起動時の AR アプリケーションの様子を示す。AR アプリケーション起動後、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。この状態ではアームロボットの操作はできず、手を動かすことやインプットデバイスを操作してもアームロボットは動作しない。アームロボットの操作が不可能な状態を用いることで意図しないタイミングで誤ってアームロボットを動作させてしまうことを防ぐ。この状態からスタートボタンを押すことで図 3.14 に示す状態へ遷移する。テキストによる指示が表示され、指示に従いオレンジ色の立方体に自身の手の位置である立方体を重ね合わせることでアームロボットの操作を開始する。メニューボタンはアームロボットの操作中も常時表示されており、任意のタイミングで押すことで操作を中断可能である。メニューボタン押下後はシステム起動時と同様の状態へ遷移し、操作を開始する際と同様の手順で操作の再開が可能である。操作再開時にはオレンジ色の立方体が操作を中断した点に出現する。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。

本システムにおいて使用される画面内のボタン UI は前述の通りメニューボタン、スタートボタン、リセットボタンの 3 種類のみで構成されている。このように UI のボタン数を既存の手法と比較して大幅に削減していることによりユーザに対する認知的負荷が大幅に低減されている。ボタンが少ないため、ユーザは複雑な操作を覚える必要がなく、簡単にシステムを利用することが可能となる。また、操作が可能な状態と不可能な状態を明確に分けていたため、常時操作が可能なシステムに比べ意図しないタイミングでの誤動作のリスクを大幅に低減することが可能である。

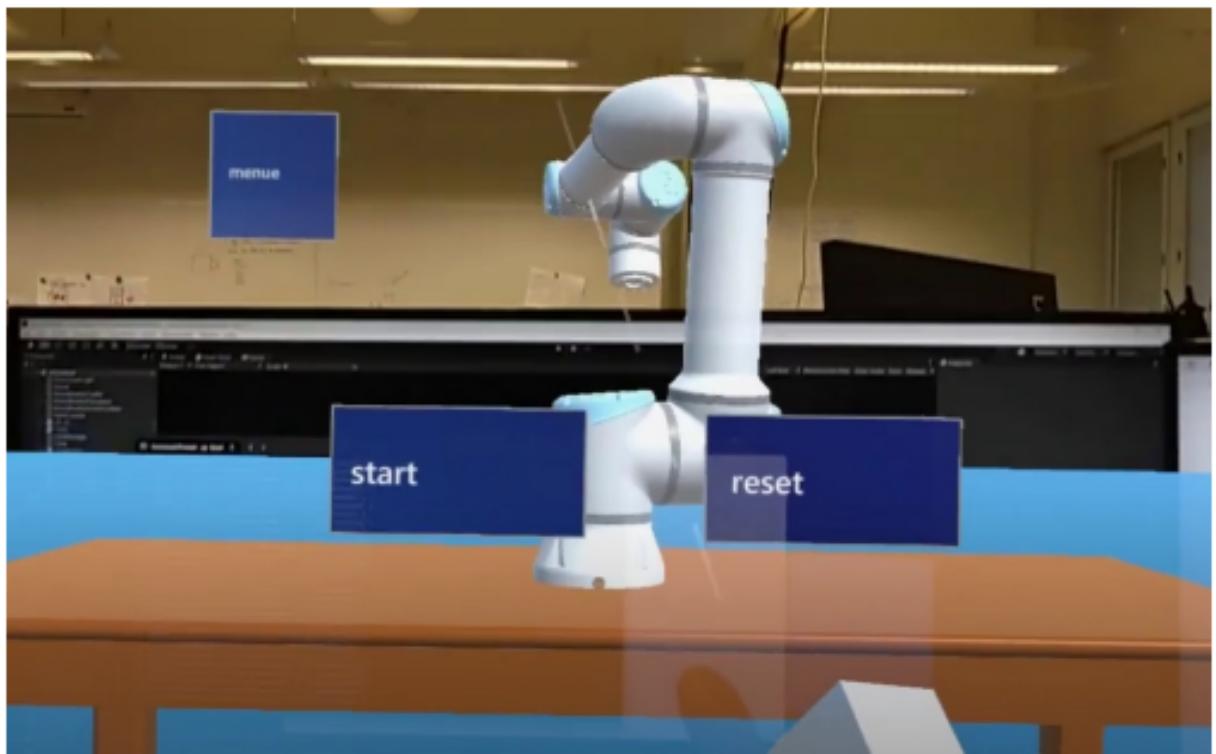


図 3.13 システム起動時の AR アプリケーションの様子



図 3.14 スタートボタン押下後の AR アプリケーションの様子

# 第4章 ユーザ評価実験

## 4.1 実験目的

本研究で提案するシステムが従来手法に比べ直感的かつ容易に操作が可能であったかを検証するためユーザ評価実験を行う。この評価においては従来手法と TIARC を用いた提案システムで比較を行う。図 4.1 に従来手法を用いたアームロボット操作手法を示す。比較対象である従来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とする。また、Pall0v2 と Pall0v3 では把持認識の際に特定のボタンを押すかデバイス自体を握るかという差があるため、この表面積の差が操作の直観性及び容易さに影響を与えるか検証する。

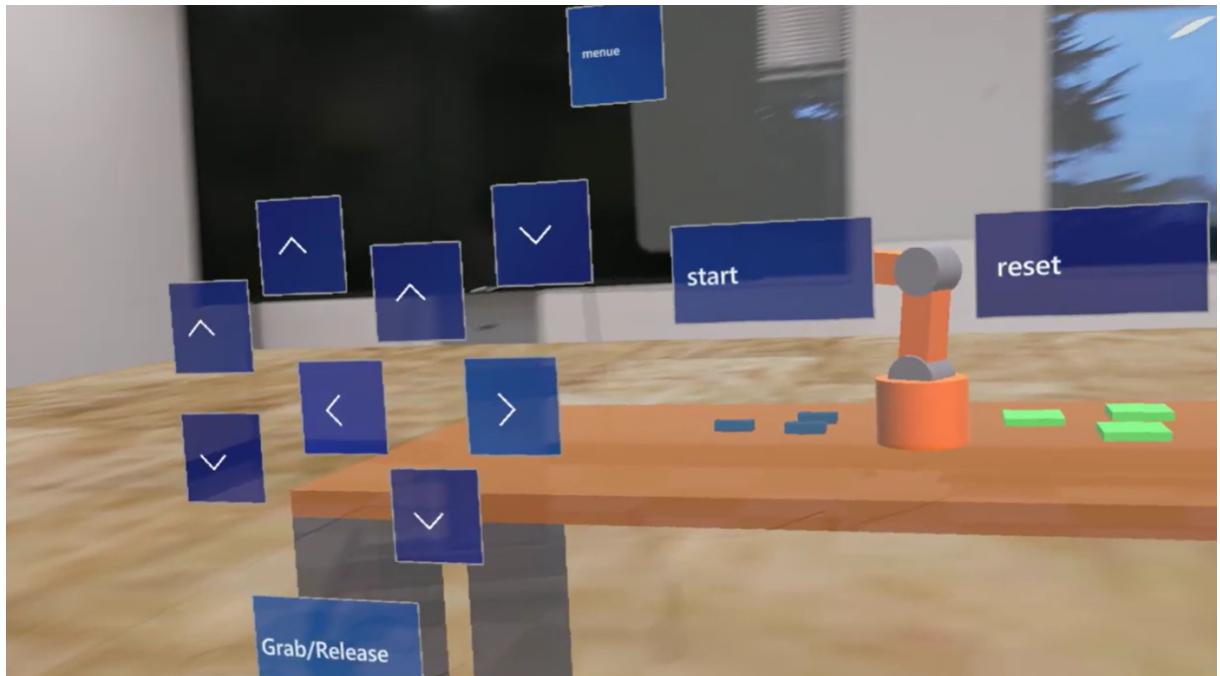


図 4.1 従来手法用いたアームロボット操作手法

## 4.2 実験環境

hololens2 はシースルー型ヘッドマウントディスプレイであり外部の様子が視界に入る。そのため本実験では部屋の違いによる影響を少なくするために図 4.2 に示す部屋を設定し、実験時の被験者の向きを固定した。被験者は実験中、実空間では壁のみが視界に入るよう椅子に座る。被験者は提案システムと従来システムの比較実験で男女 10 名、Pall0v2 と

Pall0v3 の比較実験で男女 15 名であり、本実験ではアームロボットの操作性の比較を目的としているため、操作及び評価 AR アプリケーション内の操作のみで行った。

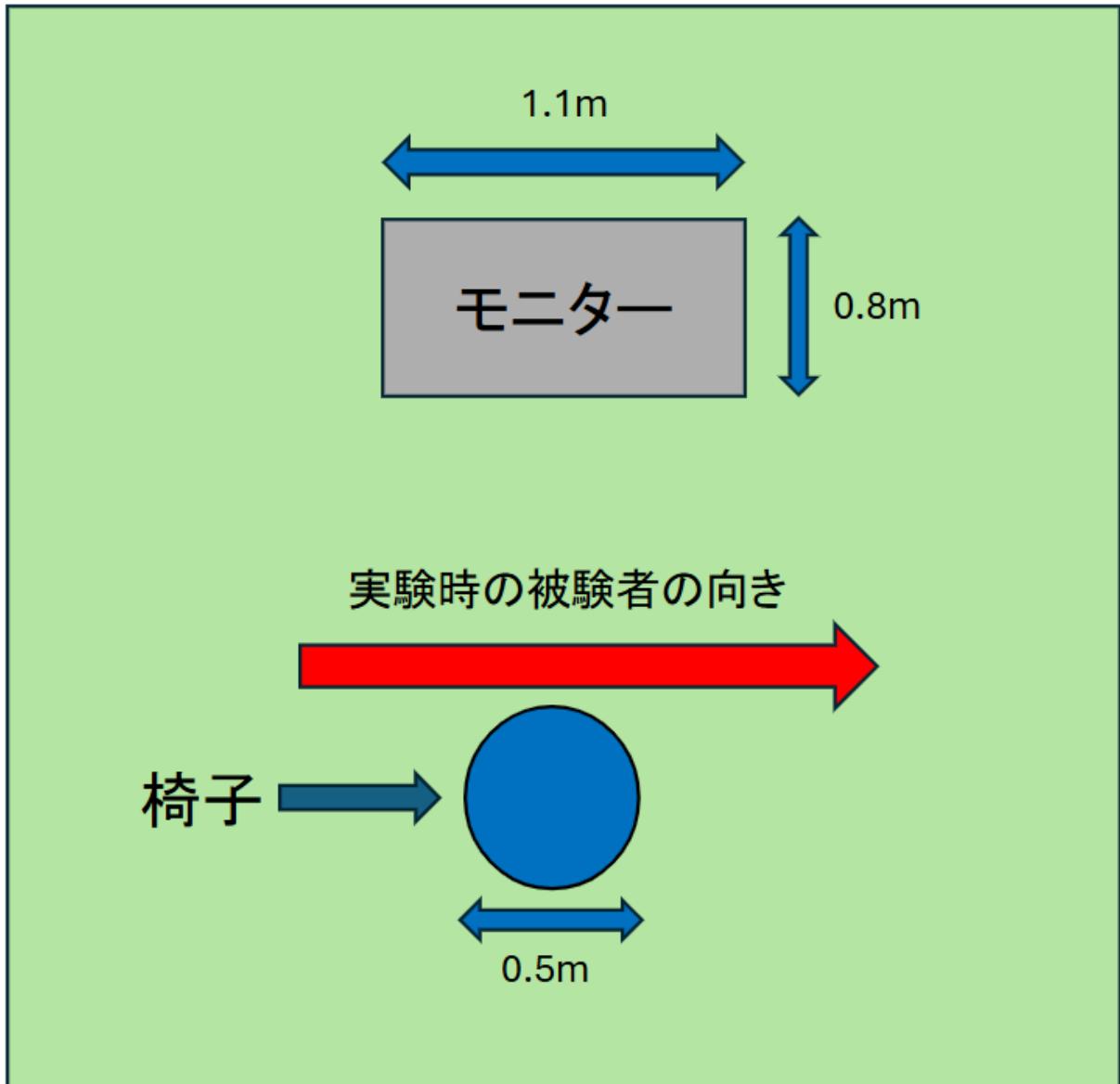


図 4.2 実験環境の全体図

### 4.3 実験方法

各実験参加者は従来手法及び提案手法またはPall0v2 を用いた操作及びPall0v3 を用いた操作を使用して仮想的に配置されたアームロボットを操作した。それぞれ操作を行う順番はランダムとした。最初に操作時の動画を用いて操作方法及びインプットデバイスの使用方法、行うタスクの説明をした。図 4.3 にタスク実行中の様子を示す。被験者にタスクとして 3 個のブロックをそれぞれの異なる目標位置へ運ぶことを指示し、目標位置に置く際には可能な限り目標位置の中心にブロックを置くことを指示した。被験者が理解したことを見認めた。その後、被験者に Hololens2 を装着してもらい、視度や明るさ、頭のバンドの締め具合を調整してもらった。被験者は実験担当者の合図でタスクを開始し、タスクの

終了後にアンケートに回答した。実験担当者はARアプリケーション内に表示されるタスクの成績を記録した。同様の手順でもう一方の操作を用いてタスクを実行した。

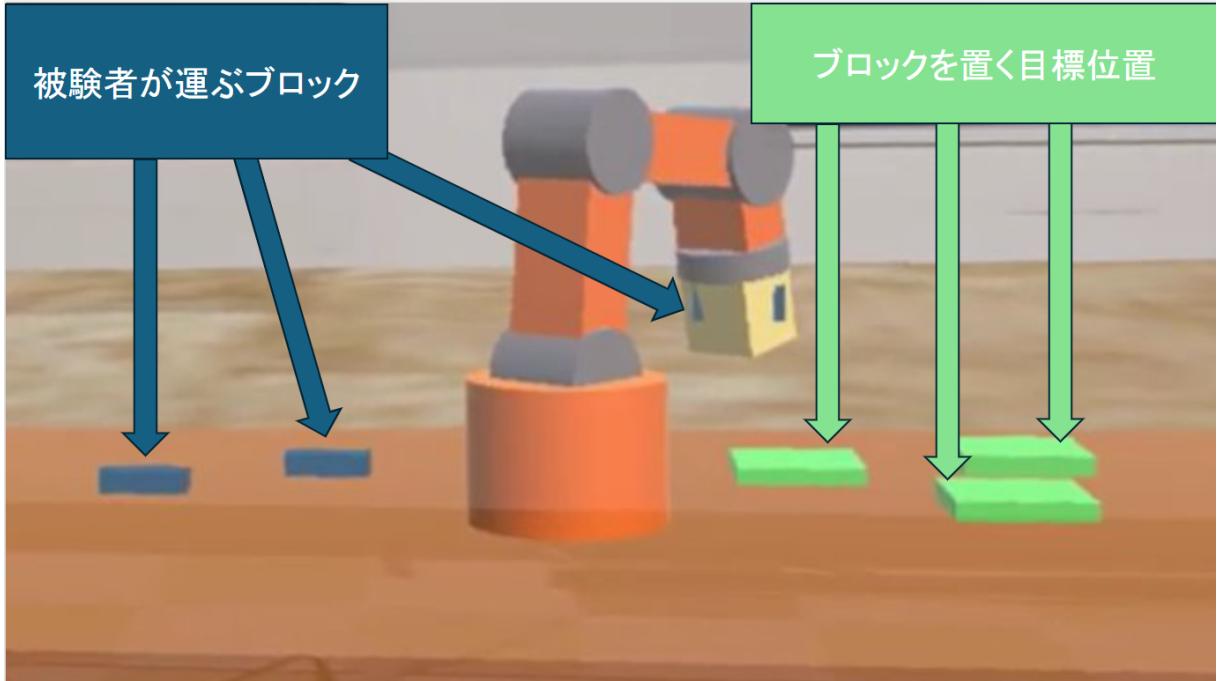


図 4.3 タスク実行中の様子

## 4.4 評価方法

### 4.4.1 定量評価指標

アームロボットが直感的かつ容易に操作可能かという操作性及び意図したとおりの正確な操作が可能であるかを評価するための定量評価指標としてタスク実行時間及びブロックを運んだ際の目標位置の中心からの差を用いた。タスクの実行時間はスタートボタンを押してから三つ目のブロックを目標位置に移動させるまでの時間とした。また、定量評価においては二つの手法に対してタスクの成績を評価するため、 $f$ 検定を行い等分散と仮定されるかを確認し、それに応じた $t$ 検定を行うことで有意差の有無を確認した。この際、優位水準は5%とした。

### 4.4.2 主観的な操作のしやすさの評価指標

アームロボット操作開始までを含めたシステム全体の使いやすさの評価として System Usability Scale (SUS) を用いた。SUS は 10 の質問に対し 5 段階で評価を行う質問票であり、ユーザビリティと学習能力を測定し指標化する [53]。すべての質問の 5 段階評価の結果は 0 から 100 の範囲でスコアリングされる、SUS におけるスコアの基準を表 4.1 に示す。平均点は 68 点となっており、平均点以上が良いシステムと言われる。SUS のアンケート回答者は各項目を 5 段階で評価する。集計方法は奇数の質問の回答スコアから 1 を引き、偶数の質問スコアを 5 から引く。その後、すべてのスコアを合算し 2.5 倍したものが SUS スコアとなるこれに加え、主観的にアームロボットの操作が直感的かつ容易であったか、

意図したとおりに操作が可能であったかを検証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

<b>SUS score</b>	<b>Grade</b>	<b>Adjective Rating</b>
>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に従来手法及びTIARC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。従来手法とTIARCのタスク完了時間を比較した結果、TIARCを用いた提案手法を用いてタスクを行った際に従来手法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。提案手法はアームロボットを動かしたい方向へ手を動かすことやTIARCを持った手を傾ける事でアームロボットの操作が可能であり、グリッパーの制御においてもTIARCを強く握るのみで可能であるため、操作が直感的に感じられどこがタスク完了時間の短縮に寄与したと考えられる。直感的な操作が可能なため、タスク開始から実際の操作に迷わずタスクを行うことが可能であったこともタスク完了時間が短縮されたと考えられる。従来手法はボタン数の多さから操作の間隔をつかむことが難しく意図した通りの操作が難しい一方で提案手法はアームロボットを動かしたい方向に手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。以上のようにタスク完了時間はTIARCを用いた提案手法で大幅に短縮されることが明らかとなったがタスク完了時間のばらつきは提案手法の方が大きい。従来手法はボタン数が多く操作が複雑なため直感的な意図した操作が難しい一方でアームロボットの操作に限らず様々な場面で一般的なユーザインターフェースであるため、個人差が小さくなったと考えられる。これに対し提案手法では手の位置及び手に持ったTIARCの姿勢を用いた操作手法やTIARCを強く握ることでグリッパーを操作する手法はユーザが初めて体験する操作手法であり、それに慣れる時間には個人差があるため、タスク完了時間のばらつきが大きくなつたと考えられる。

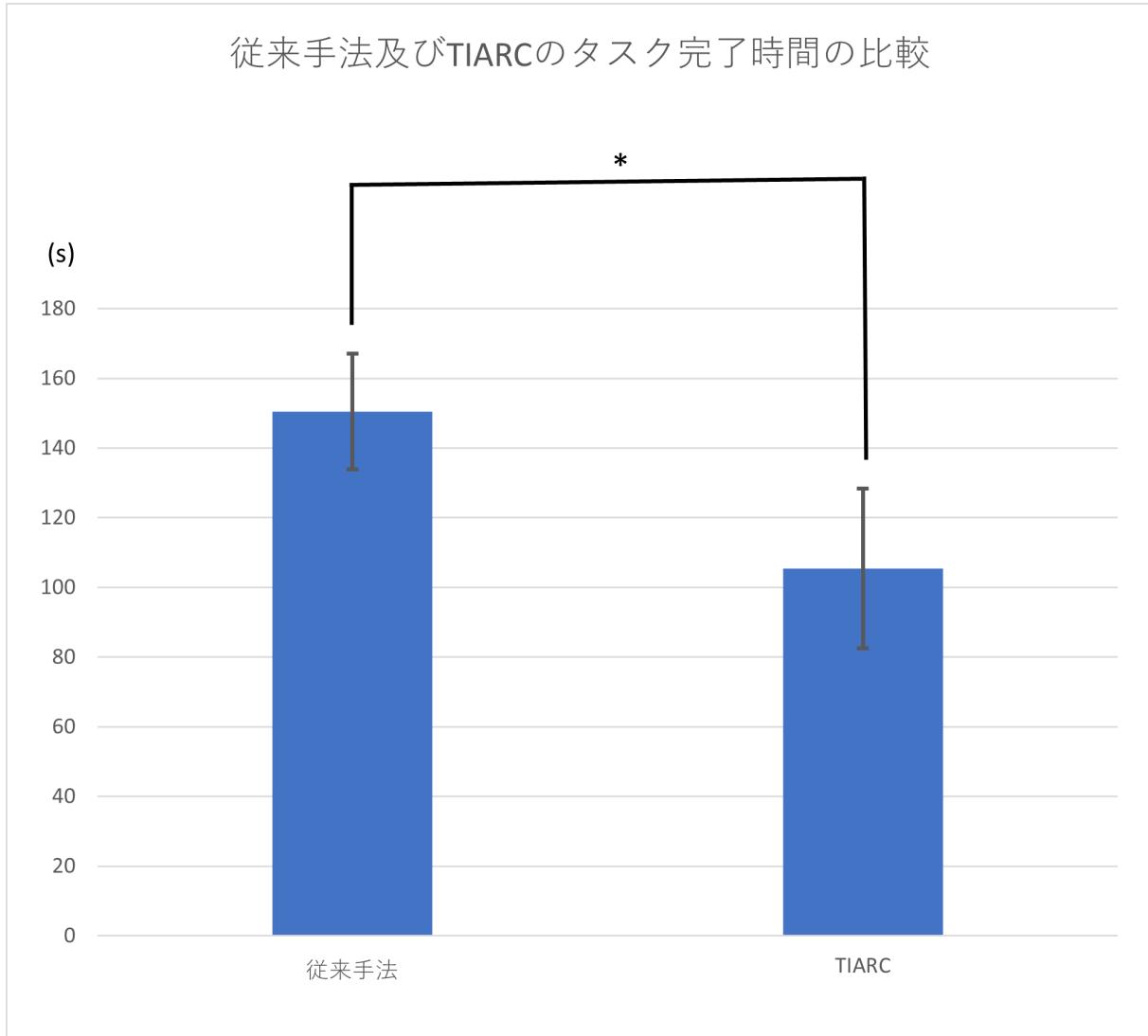


図 5.1 従来手法及び TIARC のタスク完了時間の比較

\*:p<0.05

図 5.2 に Pall0v2 及び Pall0v3 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。Pall0v2 を用いた提案手法と Pall0v3 を用いた提案手法のタスク完了時間を比較した結果、Pall0v3 を用いた際に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。Pall0v2 と Pall0v3 の差はグリッパーの操作のみである。Pall0v2 では特定の位置にあるボタンを押し、開閉を切り替える必要があるが、Pall0v3 ではデバイスを握っている間はグリッパーが閉じ続ける制御を行っている。すなわち、グリッパーの操作が可能な部分の表面積が異なっている点が最も大きな違いである。Pall0v3 を用いた提案手法で優位にタスク間長時間が短縮されたことはグリッパーを操作可能である部分の表面積を大きくすることは直感的で意図した操作を可能にすることに寄与していると考えられる。また、Pall0v3 を握っている間グリッパーを閉じる操作手法はボタンで切り替える手法に比べて実際のアームロボットの動作に近くより直感的な操作が可能であったことがタスク完了時間の短縮に寄与したと考えられる。

タスク間長時間のばらつきは Pall0v3 を用いた提案手法に比べ Pall0v2 を用いた提案手法で大きくなることが示された。Pall0v2 は特定の位置にあるボタンを用いてグリッパー

の制御を行うためボタンの位置を常に把握しているかという点がタスク完了時間に影響していると考えられる。実際に個々の被験者のタスク完了時間を見ると、Pall0v2 を用いた際と Pall0v3 を用いた際で差が数秒程度の被験者が複数存在する。このことからグリッパーの操作を行うボタンの位置に迷わず操作を行えた被験者は Pall0v3 同程度の時間でタスクを完了することが可能であったと考えられる。これに対し、グリッパーの操作を行うボタンの位置を常に把握することが難しかった被験者は通常の操作に加えそのボタンを探すことを行ったため、タスク完了時間に影響したと考えられる。

以上のことからグリッパーの操作が可能な部分の表面積が大きいことは重要な要素であり、その面積がより大きいことがタスク完了時間の短縮に寄与すると考えられる。

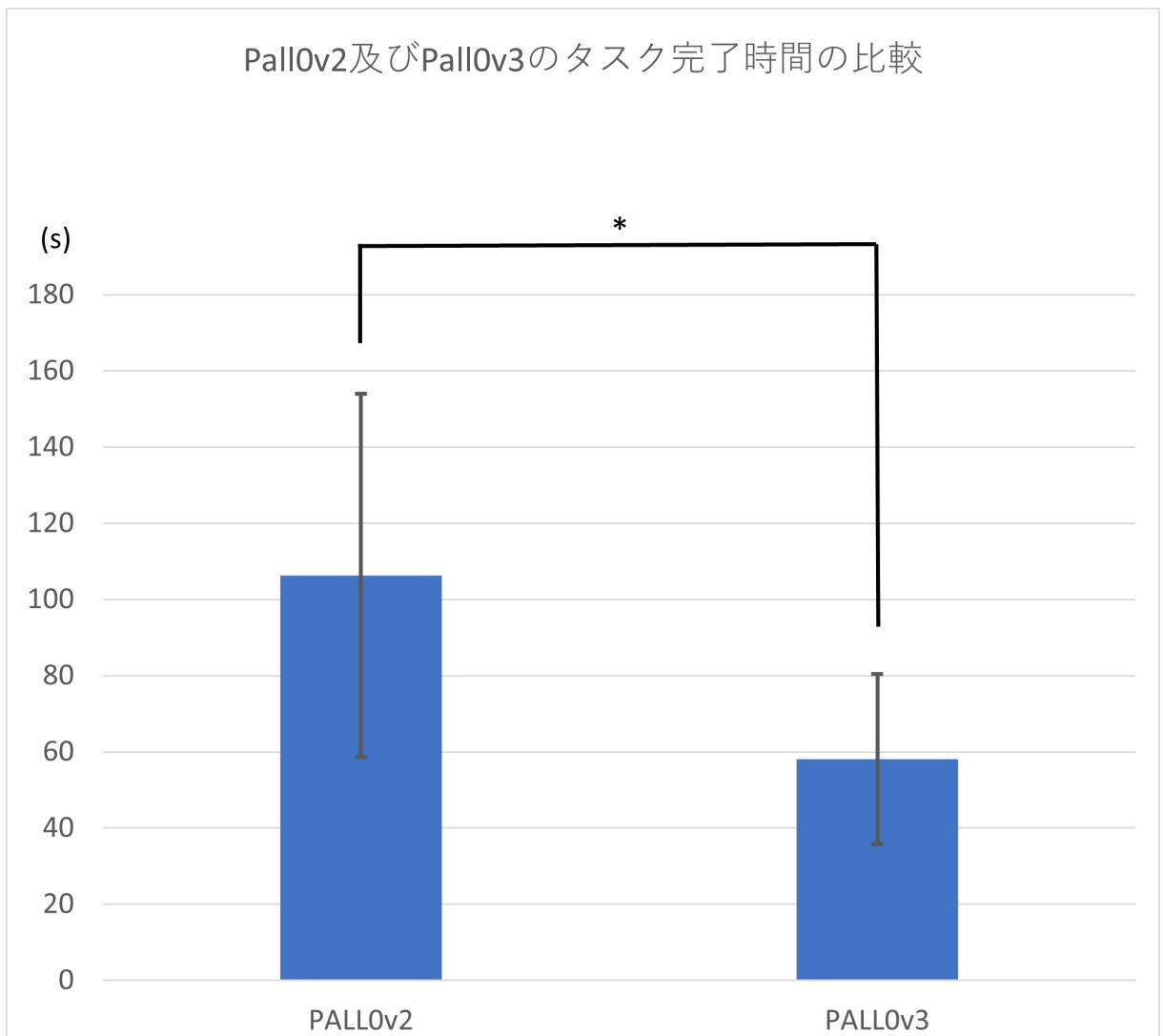


図 5.2 Pall0v2 及び Pall0v3 のタスク完了時間の比較

\*:p<0.05

TIARC と Pall0v2 の比較においては大きな差が見られない結果となった。TIARC と Pall0v2 の最も大きな差は円柱型であるか球型であるかという点である。表面の材質の差などから単純に比較することは難しいが、本実験の結果からアームロボットの操作において使用するインプットデバイスの形状は操作性及びタスク完了時間に影響を与えないことが明らかとなった。TIARC は表面に取り付けた圧力センサの部分を強く握ることでグ

リッパーの操作が可能であり Pall0v2 に比べグリッパーの操作が可能な部分の面積は大きいが、デバイスの任意の部分を握ることでの操作は難しく特定の位置を握る必要がある点で Pall0v2 と同様であることもタスク完了時間に大きな差が出なかった要因であると考えられる。そのため、TIARCにおいてはデバイス表面全体で把持認識を可能にすることでタスク完了時間がより短縮されると考えられる。

図 5.3 に従来手法及び TIARC の目標位置の中心からの差の比較を示す。エラーバーは標準誤差を示す。従来手法と TIARC を用いた提案手法でタスクを行った際の目標位置の中心からの差を比較した結果、わずかに TIARC を用いた提案手法が小さいことが明らかとなったが、有意差は見られなかった。これは、従来手法と提案手法が同等程度の正確な操作が可能であることを示しており、操作性の向上により細かな操作が難しくなるなどの欠点が提案手法に見られないことを示している。しかし、提案手法においては操作時に手の全ての動作を用いて操作を行っており、操作を意図しない微細な動きと操作を意図した動きの区別を行っていないため、操作精度が低下した可能性がある。そのため、これらを区別し、操作を意図しない微細な手の動きをアームロボットの操作から排除することでより操作精度が向上すると考えられる。

### 従来手法及びTIARCの目標位置の中心からの差の比較

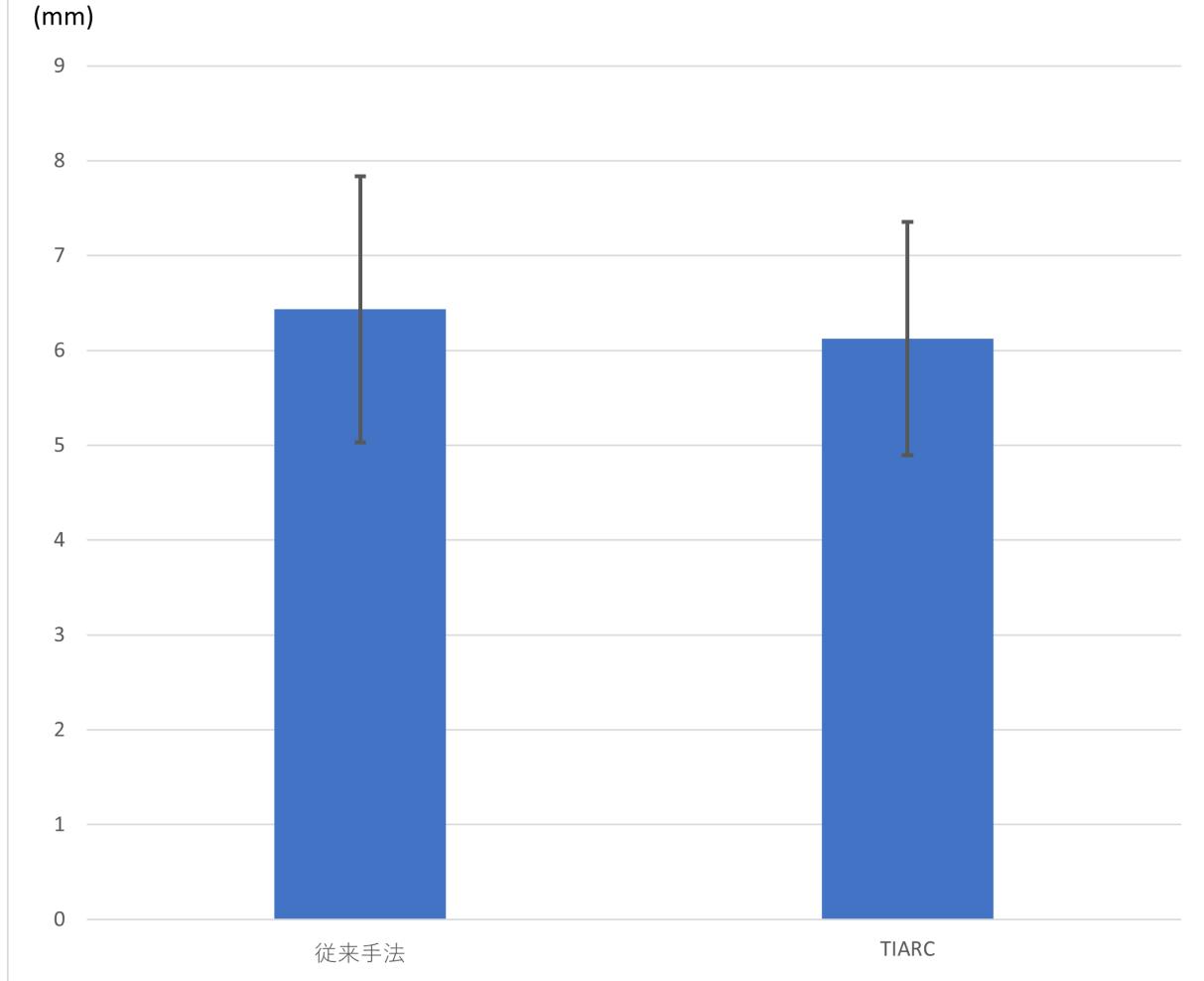


図 5.3 従来手法及び TIARC の目標位置の中心からの差の比較

図 5.4 に Pall0v2 及び Pall0v3 の目標位置の中心からの差の比較を示す。エラーバーは標準誤差を示す。Pall0v2 及び Pall0v3 を用いた提案手法の目標位置の中心からの差を比較した結果わずかに Pall0v2 を用いた手法が小さいことが明らかとなったが、有意差は見られなかった。このことは、アームロボット操作の精度において、グリッパーの操作手法は影響を与えないことが示された。Pall0v2 を用いた際にグリッパーを制御するボタンの位置に迷い、精度が低下する可能性があるが、提案手法のアームロボット操作が容易であり位置の調整が容易であるためグリッパーを制御するボタンを発見後にもアームロボットの頭部の位置の調整が行いやすく、操作精度が維持されたと考えられる。

Pall0v2及びPall0v3の目標位置の中心からの差の比較

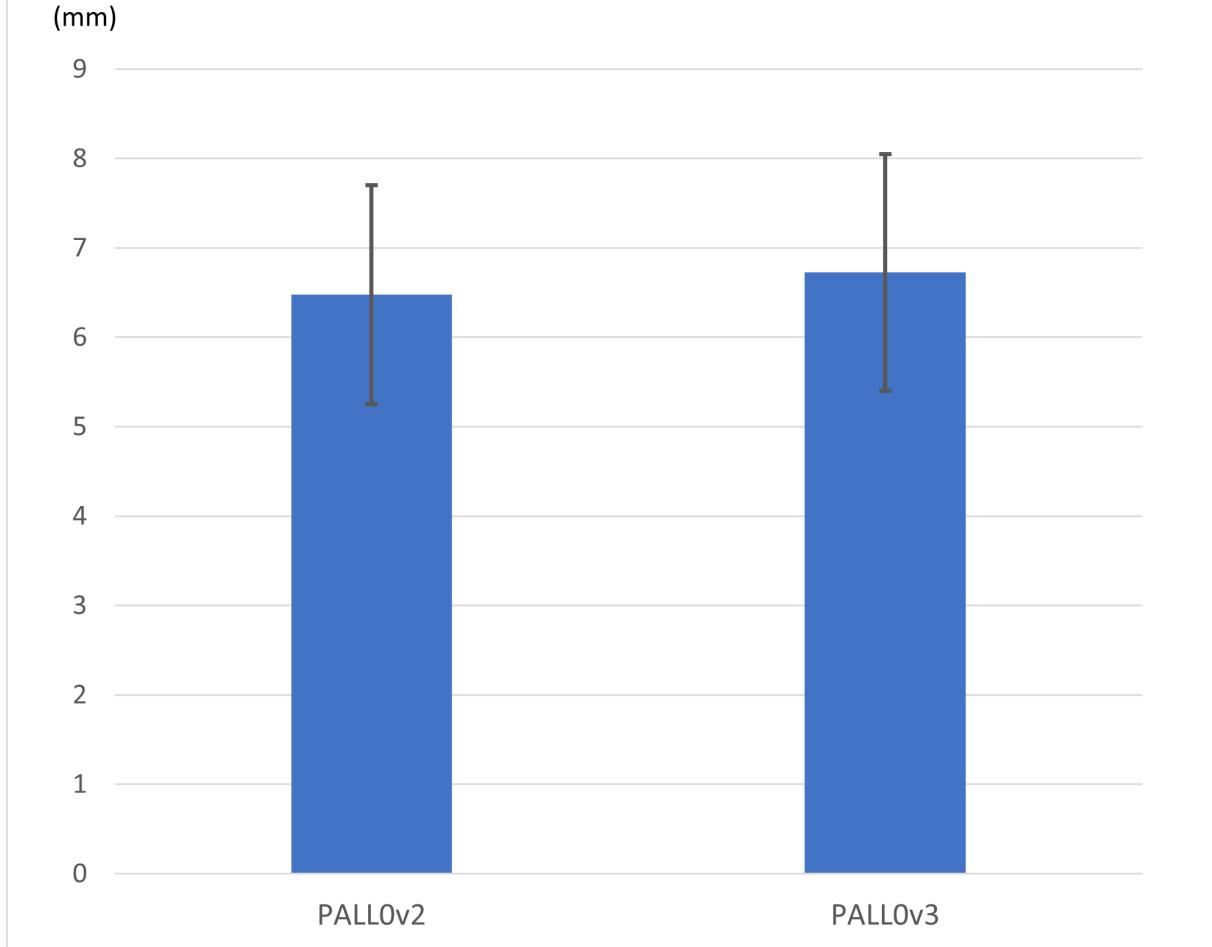


図 5.4 Pall0v2 及び Pall0v3 の目標位置の中心からの差の比較

## 5.2 主観的な操作のしやすさの実験結果と考察

表 5.1 に従来手法及び TIARC を用いた提案手法の SUS スコアの平均を示す。結果として、従来手法で 45.7 点であり提案手法で 72.2 点であり、4.4.2 節で述べた一般に良いシステムとされる 68 点という基準を提案手法では満たしたが、従来手法では大幅に下回る結果となった。従来手法と提案手法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。そのため実際にアーム ロボットの操作を行う際のシステムの使いやすさが評価に影響を与えたと考えられる。実際にアーム ロボットを操作する際には従来手法ではアーム 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くなり、認知的負荷が大きく操作が煩雑である。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、使用には特別な知識が必要だと感じさせ、基準を大きく下回る結果になったと考えられる。

これに対し提案手法ではアームロボットの操作中に表示されているボタンはメニューボタンのみであり、認知的負荷が小さい設計となっている。そのため、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、基準を満たす結果となったと考えられる。

表 5.1 従来手法及び提案手法における平均 SUS スコア

手法	SUS スコア
従来手法	45.7
提案手法	72.2

いか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。

### Q1 アームロボットの操作は直感的に感じましたか？

従来手法と TIARC の比較において、従来手法で 2.8 点であり TIARC で 4.2 点という結果になった。従来手法のアームロボットの頭部の位置や姿勢、グリッパーの操作を全てボタンで行う操作手法は操作中どのボタンがどの方向に動くかを常に把握しておく必要があるため、例えば「右側に動かしたい」と考えてから実際に動かすまでに右側へ動かすボタンを認識し、ボタンを押すという工程が必要なため直感的ではないと感じられたと考えられる。これに対し、提案手法ではアームロボットの頭部の位置を動かしたい方向に手を動かす、傾けるや TIARC を握るのみであるため、実際のアームロボットの動作に近く直感的に操作できると感じられたと考えられる。Pall0v2 と Pall0v3 の結果を比較すると、Pall0v2 で 2.9 点、Pall0v3 で 3.6 点という結果になった。Pall0v2 ではグリッパーの操作の差異に特定の位置のボタンを押す必要があることが実際の動作に近くなく、直感的ではないと感じられたと考えられる。これに対し、Pall0v3 は強く握っている間グリッパーを閉じ続けるという実際のアームロボットの動作に近い操作が可能なため直感的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？

従来手法と TIARC の比較において、従来手法で 4.3 点であり TIARC で 2.9 点という結果になった。Q1 で述べた通り、従来手法はどのボタンがどの方向に動かすかを把握しておく必要があることやボタン数が多いことから操作が煩雑であることが操作が難しいと感じさせたと考えられる。これに対して直感的な操作が可能な提案手法では操作者が実際にボタンを押すなどして操作を行うことが少ないと操作が容易に感じられたと考えられる。Pall0v2 と Pall0v3 を比較すると、Pall0v2 で 3.0 点、Pall0v3 で 3.2 点であり大きな差は見られなかった。このことは、本実験においてはグリッパーを操作する部分の表面積の大きさはアームロボットの操作自体が難しく感じるかという点に影響を与えないことを示している。グリッパーの操作はアームロボットの操作の内的一部分でありその操作を行う時間はアームロボットの頭部の位置や姿勢の操作を行う時間に比べて少ないため、主観的な操作の難しさに影響を与えなかつたと考えられる。

### **Q3 アームロボットの操作の精度に満足していますか？**

従来手法と TIARC の比較において、従来手法で 2.5 点であり TIARC で 4.0 点という結果になった。定量評価の結果においては従来手法と提案手法の操作精度を比較する目標位置の中心からの差の比較においては大きな差が見られなかったにも関わらず、差が見られたことは主観的に意図した通りの操作が可能であったかが影響を与えていると考えられる。意図した通りの操作が可能であったことで、素早く意図した箇所にアームロボットを動かすことが可能になり、精度高く操作をしていると感じさせたと考えられる。Pall0v2 と Pall0v3 の比較においては両手法で 3.1 点と差が見られなかった。これは Q2 と同様にグリッパーを操作する時間とアームロボットの頭部の位置及び姿勢を操作する時間の差からグリッパーを操作の影響が小さく、同程度の操作精度の満足度となったと考えられる。

### **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？**

従来手法と TIARC の比較において、従来手法で 2.4 点であり TIARC で 3.4 点という結果になった。操作の習得という点においては操作が単純であるかや覚えやすいかという点が影響していると考えられる。操作が単純であるかという点においては従来手法は Q2 で述べた通り操作が煩雑であるため難しく感じられた可能性がある一方で提案手法ではアームロボットの操作中に必要なボタンがなく操作自体が単純に感じられたと考えられる。また、従来手法ではボタン数の多さからどのボタンがどのような操作が可能かを覚えることが難しいことが操作の習得が難しいと感じさせたと考えられる一方で定量評価やこれまでのアンケート評価から示されたように直感的かつ容易な操作が可能な提案手法では覚える必要があることが少なく習得が容易であると感じさせたと考えられる。Pall0v2 と Pall0v3 の比較結果を見ると Pall0v2 で 3.6 点であり Pall0v3 で 4.0 点とわずかに Pall0v3 が容易に操作を習得可能と感じられることが明らかとなった。これまで述べた通り Pall0v2 ではグリッパーの操作をボタンで行うためボタンの位置を覚える必要があることが操作手法を容易に習得可能を感じるかに影響を与えたと考えられ、Pall0v3 ではこの操作を行う部分の表面積が大きいことが操作手法を容易に習得可能と感じさせることに寄与したと考えられる。

### **Q5 アームロボットの操作中に疲労を感じましたか？**

従来手法と TIARC の比較において、従来手法で 2.8 点であり TIARC で 2.5 点と両手法でおおよそ同程度日疲労を感じている結果になった。従来手法においては操作に必要なボタン数が多いため操作中の認知的負荷が大きくなり、一定の疲労が感じられたと考えられる。提案手法においては操作が必要なボタン数が少ないと認知的負荷を低減可能である一方でアームロボットの操作中は常に手を動かす必要があるため身体的な疲労が大きく一定の疲労が感じられたと考えられる。Pall0v2 と Pall0v3 の比較においては Pall0v2 で 1.7 点であり Pall0v3 で 3.3 点と Pall0v3 を用いた手法でより疲労を感じられることが明らかとなった。Pall0v3 ではグリッパーの操作において握っている間グリッパーを閉じる操作を行っているため、一定以上握力を必要とする時間が Pall0v2 に比べて長くなり身体的な疲労が大きいためより疲労を感じていると考えられる。

### **Q6 操作のインターフェースは理解しやすかったですか？**

従来手法と TIARC の比較において、従来手法で 3.4 点であり TIARC で 3.7 点と大きな差は見られないという結果になった。従来手法において認知的負荷の大きい操作インターフェースでありながら提案手法と同程度理解しやすいと感じられたことは、従来手法で用いているボタン型のインターフェースはアームロボットの操作に限らず多くの場面で利用されているものであるため、理解しやすいと感じられたと考えられる。提案手法においては操作が必要なボタン型のインターフェースが少ないと加え、アームロボットの操作時にも TIARC を強く握るのみの操作であったため理解しやすいと感じられたと考えられる。Pall0v2 と Pall0v3 の比較においては Pall0v2 で 3.6 点であり Pall0v3 で 3.8 点と同程度インターフェースが理解しやすいと感じられていることが明らかとなった。グリッパーの操作において単純にデバイスを握るのみで操作が可能であることと特定の位置のボタンを押す必要があることの差により理解のしやすさにわずかに差が生じているが、操作が必要なボタン型のインターフェースは両手法で少なくなっているため理解しやすいと感じられたと考えられる。

#### **Q7 課されたタスクは難しいと感じましたか？**

従来手法と TIARC の比較において、従来手法で 3.2 点であり TIARC で 2.0 点と提案手法を用いた際によりタスクを簡単に感じていることが明らかとなった。従来手法においては操作時の認知的負荷が大きいことに加え、操作が煩雑であり直感的かつ容易な操作が難しいため、タスク自体を難しく感じたと考えられる。これに対し提案手法においては Q4 の考察で述べた通り直感的かつ容易な操作が可能であるため、アームロボットの操作に迷うことなくタスクを行うことが可能となりタスク自体が簡単に感じられたと考えられる。Pall0v2 と Pall0v3 の比較においては Pall0v2 で 2.1 点、Pall0v3 で 1.8 点とわずかに Pall0v3 を用いた際にタスクが簡単に感じられる結果となった。両手法においてアームロボットの頭部の位置及び姿勢の決定の操作は直感的かつ容易に行うことが可能であったため一定以上タスクが簡単に感じられたと考えられる。Pall0v3 においてはグリッパーの操作においてより実際のグリッパーの動きに近くボタンの位置を常に把握する必要のない操作が可能であったため Pall0v2 に比べ直感的かつ容易に感じられわずかにタスク自体が簡単に感じられたと考えられる。

#### **Q8 アームロボットは意図した通りに動きましたか？**

従来手法と TIARC の比較において、従来手法で 2.5 点であり TIARC で 4.0 点と提案手法において大幅に意図した通りの操作が可能であると感じられることが明らかとなった。従来手法においては常に各ボタンを押したことによるアームロボットの動作を把握する必要があるため操作ミスが起きやすく意図した通りの操作が難しいと感じられたと考えられる。これに対して提案手法においてはこれまで述べた通り直感的かつ容易な操作が可能であることに加えて手の動きに合わせてアームロボットが動作するため操作ミスが起きずらく、意図した通りの操作が可能であったと考えられる。Pall0v2 と Pall0v3 の比較においては Pall0v2 で 3.0 点であり Pall0v3 で 3.1 点と大きな差は見れない結果となった。これはアームロボットの頭部の位置及び姿勢の決定においては同様の操作手法でありその操作手法が TIARC を用いた場合と同様に直感的な操作が可能であるため意図した通りの操作が可能であったと考えられる。また、グリッパーの制御において意図した通りの操作が可能かという点におい

てはボタンによる操作が必要か単純にデバイスを握るのみで操作可能かは影響を与えないことが明らかとなった。

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 アームロボットの操作中に疲労を感じましたか？
Q6 操作のインターフェースは理解しやすかったですか？
Q7 課されたタスクは難しいと感じましたか？
Q8 アームロボットは意図した通りに動きましたか？

表 5.3 評価実験のアンケート結果

質問番号	従来手法	TIARC	PALL0v2	PALL0v3
Q1	2.8	4.2	2.9	3.6
Q2	4.3	2.9	3.0	3.2
Q3	2.5	4.0	3.1	3.1
Q4	2.4	3.4	3.6	4.0
Q5	2.8	2.5	1.7	2.3
Q6	3.4	3.7	3.6	3.8
Q7	3.2	2.0	2.1	1.8
Q8	2.5	4.0	3.0	3.1

# 第6章 結論と今後の展望

## 6.1 結論

本研究では、産業などの現場に導入され、生産性や安全性などを向上させているアームロボットがその作業を完全に自動化することは難しく人が操作を行う必要がある場合があるが、先行研究や一般に用いられている操作手法には直感的かつ意図しない動作の発生を防止可能な操作手法がない点に着目し、アームロボットのリモート操作手法を提案した。本研究で提案した手法は、AR アプリケーション内に仮想的に配置されたアームロボットを操作することでそれに同期した実際のアームロボットも操作可能な手法となっている。また、仮想的に配置されたアームロボットについては手の位置及びインプットデバイスより取得した姿勢、グリッパーの開閉を用いてロボットアームのヘッドの位置姿勢を決定し、各関節角を逆運動学を用いて決定することで操作を行う手法である。提案システムを用いて従来手法である一般的に広く用いられているボタンを使用して操作を行う手法と比較する評価実験を行った結果、操作精度は従来手法と同程度であるが、タスク完了までの時間が優位に短くなることが明らかとなった。Pall0v2 と Pall0v3 の比較結果については Pall0v3 でタスク完了時間が優位に短縮されることが明らかとなった。これはグリッパーの制御において、ボタンによる操作に比べ単純にデバイスを握るのみの操作が直感的かつ容易であり、制御可能な部分の表面積の大きさがアームロボットの操作に影響を与えることが明らかとなった。従来手法と提案手法のシステム全体としての使いやすさを評価した SUS の結果から提案手法では一定以上使いやすいシステムであるが、従来手法では基準を満たさず使用が難しいことが明らかとなった。このことから提案手法ではボタン数の少なさから認知的負荷を低減可能であり操作に迷うことが少ないシステムであることが確認できた。また、アンケート結果から提案手法は従来手法に比べて直感的かつ容易であり、意図した通りの操作が可能であることが明らかとなった。Pall0v2 と Pall0v3 の比較においては Pall0v3 を用いた手法がより直感的に操作可能であることが判明した。このことからもグリッパーを制御可能な部分の表面積の大きさがアームロボットの操作の直感性に影響を与えることが示された。

提案手法を用いることでアームロボットの操作を直感的かつ容易に行うことを可能にした。アームロボットの操作部分以外においてもシステム全体としてボタン数を大幅に減らすことによって認知的負荷を低減し使いやすいシステムと感じられることが示された。また、グリッパーをの制御可能な部分のひょめんせきの大きいことが直感的かつ容易な操作を可能にすることに寄与することが示された。

## 6.2 今後の展望

今後の展望として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ことから、操作手法の慣れによる操作のしやすさ、タスク実行時間の変化や差異については明らかになっていないため、長期的に複数回タスクを行うことでの変化を調査する実験を行う必要がある。操作面においては意図しない手の揺れによる動きと操作を意図した動きを区別することでより正確な操作を可能にする必要がある。仮想空間と実環境の同期においても課題が残っている。仮想的に配置されたアームロボットの姿勢を常に実空間のアームロボットの姿勢と同期することは難しく、実空間において周囲の安全性を損なう危険性がある。そのため、図6.1に示すような操作手法を開発中である。この操作手法は実空間のアームロボットと仮想アームロボットを分けて表示しており、仮想アームロボットを操作、姿勢を固定後に実空間と同期したアームロボットが追従する形で動作する。追従している際ユーザは仮想アームロボットの操作が不可能となる。この操作手法により直感的かつ容易な操作を維持すると同時に実空間において周囲の安全性の維持が可能になると考える。



図 6.1 安全性確保のための操作手法（開発中）

多くのアームロボットに汎用的に対応していない点も課題である。現状のシステムでは特定のアームロボットにのみ対応しており、同じ自由度であってもその他もアームロボットの操作が不可能である。現在開発中の手法としてはアームロボットのヘッドのみを仮想的に提示、操作を行い、その位置姿勢のみを決定する手法であるが、このような手法で操作が可能であるかは実際のアームロボットに依存するため汎用的であるとは言えない。今日導入されているアームロボットの種類は数多く、その多くに対応可能なシステムとすることにより実用的にしていきたい。また、システム全体として実際のアームロボットの状態や周辺オブジェクトの状態を AR アプリケーションへフィードバックを行っていないため、これを行うことで遠隔地の実環境においてもアプリケーション内と同様な精度で操作を可能にする必要がある。

以上の課題を解決することでより実用的なシステムとし、提案手法を発展させていきたい。

## 謝辞

本研究の機会を与えて下さり、研究面について大変ご丁寧なご指導を賜りました、青山学院大学理工学部情報テクノロジー学科 Guillaume LOPEZ 教授およびトゥルク応用科学大学 Luimula Mika 教授に深く感謝申し上げます。そして、研究会などを通して助言をいただいた LOPEZ 研究室の皆様並びに実験に協力していただいた皆様に深く感謝いたします。

2025年1月31日  
阿部 悠貴

# 参考文献

- [1] 安藤健. コロナ禍におけるサービスロボットの活用とインタラクション技術. 計測と制御, Vol. 61, No. 3, pp. 231–234, 2022.
- [2] 総務省. <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens/hardware>. [accessed 2024.08.24].
- [3] 柿原伸介. 知能ロボットによる工場自動化と iot, ai 活用について. システム/制御/情報, Vol. 61, No. 3, pp. 101–106, 2017.
- [4] IFR International Federation of Robotics. World robotics 2024. [https://ifr.org/img/worldrobotics/Press\\_Conference\\_2024.pdf](https://ifr.org/img/worldrobotics/Press_Conference_2024.pdf), 2024. [accessed 2024.12.24].
- [5] オムロン株式会社. オムロン 制御機器 ソリューション 事例. <https://www.fa.omron.co.jp/solution/case/>.
- [6] 株式会社 KEYENCE. Fa ロボット の 導入 事例. [https://www.keyence.co.jp/landing/req/vision/cv-x\\_1097\\_04.jsp](https://www.keyence.co.jp/landing/req/vision/cv-x_1097_04.jsp).
- [7] 三治信一朗. ロボット事例からみる, アプリケーション, ソリューション開発の方向性. システム/制御/情報, Vol. 64, No. 11, pp. 447–442, 2020.
- [8] MONOist. 2022年展望. <https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/2201/13/news127.html>.
- [9] Nichola Lowe and Thomas Kemeny. Disparities in robot adoption among u.s. manufacturers. *Industry and Innovation*, Vol. 28, No. 9, pp. 1062–1084, 2021.
- [10] Lindsay Sanneman, Christopher Fourie, and Julie A. Shah. The state of industrial robotics: Emerging technologies, challenges, and key research directions. *ArXiv*, 2020.
- [11] J. Gray, S. Davis, and M. G. Mullins. Challenges for industrial robot applications in food manufacturing. In *Proceedings of the ACM International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 328–472, 2018.
- [12] MONOist. 3dexperience world japan 2022. <https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/2211/24/news052.html>.
- [13] 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社. 仮想 gpu による cad vdi で設計開発プロセスを加速「設計開発業務の働き方改革を実現」. <https://www.ctc-g.co.jp/report/case-study/toyota02/>.
- [14] NECソリューションイノベータ. 仮想gpuによるcad vdiで設計開発プロセスを加速「設計開発業務の働き方改革を実現」. <https://www.ctc-g.co.jp/report/case-study/toyota02/>.

- [15] SocoCacico. Sococacico. <https://sococacico.com/>.
- [16] AIMultiple. Xr/ar in manufacturing: 7 use cases with examples. <https://research.aimultiple.com/ar-in-manufacturing/>.
- [17] 小宮昌人. 生産現場におけるデジタルツインの今. 工場管理/日刊工業新聞社 [編], Vol. 68, No. 2, pp. 14–17, 2022.
- [18] 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>.
- [19] FUJITSU. 在庫管理の改善に売り上げアップ, 保守点検の効率化. <https://jp.fujitsu.com/platform/server/advantages/special/jokun/10-ar/>.
- [20] HOLOLAB. Assists. <https://hololab.co.jp/assists>.
- [21] universal robot. [https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/43932/UR5e\\_User\\_Manual\\_jp\\_Global.pdf](https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/43932/UR5e_User_Manual_jp_Global.pdf), 2022. [accessed 2024.08.24].
- [22] 三菱電機. Melsoft rt visualbox. <https://www.mitsubishielectric.com/fa/products/rbt/assista/smerit/vb/index.html>.
- [23] CHITOSE ROBOTICS. crewbo studio. <https://chitose-robotics.com/archives/233756>.
- [24] 楓和憲, 坂井田千摩, 綿貫啓一. タッチパネルおよびジャイロスコープを用いた多関節マニピュレータの無拘束遠隔操作システムの開発. 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 830, pp. 15–00177, 2015.
- [25] Paul Hebert, Jeremy Ma, James Borders, Alper Aydemir, Max Bajracharya, Nicolas Hudson, Krishna Shankar, Sisir Karumanchi, Bertrand Douillard, and Joel Burdick. Supervised remote robot with guided autonomy and teleoperation (surrogate): a framework for whole-body manipulation. In *2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, pp. 5509–5516. IEEE, 2015.
- [26] Reduanur Rahman, Md Sajid Rahman, and Jillor Rahman Bhuiyan. Joystick controlled industrial robotic system with robotic arm. In *2019 IEEE International Conference on Robotics, Automation, Artificial-intelligence and Internet-of-Things (RAAICON)*, pp. 31–34. IEEE, 2019.
- [27] Sunao Hashimoto, Akihiko Ishida, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. Touchme: An augmented reality based remote robot manipulation. In *The 21st International Conference on Artificial Reality and Telexistence, Proceedings of ICAT2011*, Vol. 2, 2011.
- [28] 竹内良緒, タケウチリオ. タッチパネルを用いた容易な把持幅指定によるロボットアームの操作インターフェース.

- [29] Kalagotla Chenchireddy, Radhika Dora, Gouse Basha Mulla, Varghese Jegathesan, and Shabbier Ahmed Sydu. Development of robotic arm control using arduino controller. *IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*, Vol. 264, pp. 1024–1064.
- [30] Hairong Jiang, Juan P Wachs, Martin Pendergast, and Bradley S Duerstock. 3d joystick for robotic arm control by individuals with high level spinal cord injuries. In *2013 IEEE 13th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, pp. 1–5. IEEE, 2013.
- [31] Ivan Rulik, Md Samiul Haque Sunny, Javier Dario Sanjuan De Caro, Md Ishrak Islam Zarif, Brahim Brahmi, Sheikh Iqbal Ahamed, Katie Schultz, Inga Wang, Tony Leheng, Jason Peng Longxiang, et al. Control of a wheelchair-mounted 6dof assistive robot with chin and finger joysticks. *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 9, p. 885610, 2022.
- [32] Nikolaos Mavridis, Georgios Pierris, Paolo Gallina, Zacharoula Papamitsiou, and Umair Saad. On the subjective difficulty of joystick-based robot arm teleoperation with auditory feedback. In *2015 IEEE 8th GCC Conference & Exhibition*, pp. 1–6. IEEE, 2015.
- [33] 並木惇, 菅原悠平, 松嶋昭雄. ジェスチャーによるロボット操作におけるモデリングに関する一考察 (2) 大学生を対象とした実験授業を事例として. 日本科学教育学会年会論文集 42, pp. 383–386. 一般社団法人 日本科学教育学会, 2018.
- [34] Poltak Sihombing, Rifky B. Muhammad, Herriyance Herriyance, and Elviwani Elwiwani. Robotic arm controlling based on fingers and hand gesture. In *2020 3rd International Conference on Mechanical, Electronics, Computer, and Industrial Technology (MECnIT)*, pp. 40–45, 2020.
- [35] Pradeep .J. Design and implementation of gesture controlled robotic arm for industrial applications. *International Journal of Scientific Research*, Vol. 3, pp. 202–209, 10 2016.
- [36] 川西巧人. Leap motion を使用したロボットアームの操作手法の開発. 2021.
- [37] 日置真優. ジェスチャーを用いたアームロボットの制御. 2018.
- [38] Hanxiao Chen. Motion control of interactive robotic arms based on mixed reality development. 2024.
- [39] 福岡正彬, 中村文彦, 滝澤暁, 正井克俊, 北崎充晃, 杉本麻樹. Facedrive: 顔表情による装着型ロボットアーム操作手法の提案. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 25, No. 4, pp. 451–461, 2020.
- [40] 木村拓己, 土田修平, 寺田努, 塚本昌彦ほか. 協働ロボットアームのためのハンズフリー制御手法の提案. 研究報告音楽情報科学 (MUS), Vol. 2021, No. 43, pp. 1–8, 2021.
- [41] 高城頌太, 谷口尚平, 中野聰大, 岩澤有祐, 鈴木雅大, 熊谷亘, 谷中瞳, 松尾豊. 大規模言語モデルを補助に用いた言語指示ロボット学習のタスク汎用性の分析. 人工知能学会全国大会論文集 第 37 回 (2023), pp. 2O1GS805–2O1GS805. 一般社団法人 人工知能学会, 2023.

- [42] Michael Ahn, Anthony Brohan, Noah Brown, Yevgen Chebotar, Omar Cortes, Byron David, Chelsea Finn, Chuyuan Fu, Keerthana Gopalakrishnan, Karol Hausman, et al. Do as i can, not as i say: Grounding language in robotic affordances. *arXiv preprint arXiv:2204.01691*, 2022.
- [43] Maximilian Stölzle, Sonal Santosh Baberwal, Daniela Rus, Shirley Coyle, and Cosimo Della Santina. Guiding soft robots with motor-imagery brain signals and impedance control, 2024.
- [44] Ruohan Zhang, Sharon Lee, Minjune Hwang, Ayano Hiranaka, Chen Wang, Wensi Ai, Jin Jie Ryan Tan, Shreya Gupta, Yilun Hao, Gabrael Levine, Ruohan Gao, Anthony Norcia, Li Fei-Fei, and Jiajun Wu. Noir: Neural signal operated intelligent robots for everyday activities, 2023.
- [45] 久保山瞳, 小林一郎. 制御コマンドの言語化による言語指示操作への取り組み. 人工知能学会全国大会論文集 第 38 回 (2024), pp. 3Xin284–3Xin284. 一般社団法人 人工知能学会, 2024.
- [46] 黄瀨輝, 奥村亮, 谷口忠大. ロボット制御における大規模言語モデルと世界モデルの融合. 人工知能学会全国大会論文集 第 37 回 (2023), pp. 2G5OS21e01–2G5OS21e01. 一般社団法人 人工知能学会, 2023.
- [47] 藤井彬, 田中和明. 低遅延かつ軽量なセンサネットワーク実現のための技術研究. 情報処理学会研究報告, Vol. 2016, , 2016.
- [48] HoloLens2—概要, 機能, 仕様. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r04/html/nd121110.html>. [accessed 2024.12.24].
- [49] With PALL0™ the ongoing digitalization of healthcare means less screen time and more engaging fun! <https://www.ai2ai.fi/>. [accessed 2024.08.24].
- [50] 茅原崇徳, 大山修斗, 濑尾明彦. 個人差への対応を考慮した人間工学的設計問題の定式化. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 79, No. 799, pp. 800–813, 2013.
- [51] 横山清子, 楠千弘, 藤巻吾朗, 安藤敏弘. 1e1-5 グリップ表面の凹凸模様が握り易さに与える影響評価. 人間工学, Vol. 50, No. Supplement, pp. S186–S187, 2014.
- [52] 笹野祐嗣. 握りやすい把持体形状デザインを目的とした 3 次元把持体データの特徴分析に関する研究.
- [53] James R Lewis. The system usability scale: past, present, and future. *International Journal of Human–Computer Interaction*, Vol. 34, No. 7, pp. 577–590, 2018.

伊藤 雄一 情報テクノロジー学科 教授

Q	このような関連研究は多いと思うが、技術的に優位な点はなにか。直接指示と間接指示で比較の方法がアンフェアだと思います。
A	まず、技術的に優位な点としては手と手に持ったインプットデバイス及びヘッドマウントディスプレイのみで直感的かつ容易にアームロボットの遠隔操作が可能である点です。先行研究では直感的に操作可能ですが、意図しない動作が発生する可能性がある手法や意図しない操作が発生する可能性は低いですが直感的な操作が難しい等直感的であることと容易であることの条件を同時に満たす操作手法は見られず、これら二つの条件を同時に満たしている点が技術的に優位な点であると考えています。比較の方法については、広く一般に普及している操作手法と比べる必要があると考え本研究のような比較を行いました。しかし、アンフェアである点はおっしゃる通りだと考えており、今後様々な先行研究で提案されている直接指示の手法と比較する必要があると考えています。