

拡張現実とマルチセンサ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の提案

阿部 悠貴 ^{†1} 木村 正子 ^{†2} ロペズ ギヨーム ^{†3}
青山学院大学 青山学院大学 青山学院大学

1. はじめに

近年のアームロボット技術は製造業など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。これらの利点からアーム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り、人口減少が進む我が国においても工場での働き手の減少を補うことが可能なロボット化への期待は大きい [1]。また、世界中の工場で稼働している産業用ロボットの総数は 2017 年から右肩上がりであり、2021 年には 340 万台を記録している [2]。これらのことから今後、産業などの現場でアームロボットのさらなる活用が期待される。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 [3]。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。アームロボット導入の理想形は完全に自動化する事であるが、否定形的な作業など完全に自動化することが難しい作業も存在し、そのような作業にアームロボットを導入するには人が操作を行う必要がある。

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 [4]。アームロボットの操作においても、タッチパネルやジョイスティックコントローラを用いてリモート化されつつあるが、これらの操作手法は対応するボタン操作を覚える必要があるなど直感的な操作が難しい。

また、近年アームロボットの操作を含む Human-Robot Interaction (HRI) の分野では MR が注目され、MR を用いた情報提示や MR 空間内での操作といった使用法が模索されており、その有効性も示されている [5]。

アームロボットの操作手法としてこれまで顔表情を用い

て操作を行う手法 [6] や足首、足指の動作を用いて操作を行う手法 [7] などが提案してきた。しかし、これらの手法はアームロボットの特定の動作に対するコマンドを覚える必要があるため直感的な操作が難しい点や意図しない動作が発生する可能性がある点など課題が残されている。また、現在一般的に用いられているコントローラなどを用いた操作手法においても直感的な操作が難しく認知的負荷も大きい、以上のことから直感的な操作を可能にしながら意図しない動作の発生を防ぐ操作手法が必要である。

そこで、本論文では直感的な操作および意図しない動作の発生を防ぐことを可能にするアームロボットの操作手法を提案する。本論文で提案するシステムは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マルチセンサ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マルチセンサデバイスを用いて操作する。また、従来の一般的な手法を利用した場合と本システム利用した場合にタスク完了までに要する時間や精度、主観的なアームロボットの操作のしやすさに差異が生じるかを検証するため評価実験を行った。

2. 関連研究

アームロボットの操作に関する研究は数多く行われており、手動操作の分野においてはジョイスティックやコントローラを用いて操作を行う手法が一般的に広く研究されている [8][9][10]。これらの手法では一般的にアームロボットの各関節を操作する手法と逆運動学を用いてアームロボットのヘッドの位置姿勢から各関節角を計算し操作する手法が存在するが、これらのインターフェースは操作方法を覚えることが難しくユーザの認知的、物理的負担が大きいという欠点がある [11]。また、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

Proposal for an Arm Robot Remote Control System Using Augmented Reality and Multi-Sensor Devices

^{†1} HARUTAKA ABE, Aoyama Gakuin University

^{†2} SHOKO KIMURA, Aoyama Gakuin University

^{†3} GUILLAUME LOPEZ, Aoyama Gakuin University

いてヘッドの位置姿勢を制御することによりアームロボット操作する手法が多く用いられている [12][13] が、アームロボットの自由度の高さからボタンの数が多くなり直感的な操作が難しく認知的負荷が大きいという欠点がある。このような課題に着目し、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。福岡ら [6] 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を提案している。顔表情を用いた操作では一般的に用いられている手法に比べてボタンの数が少ないため認知的負荷を低減しながらアームロボットを操作可能である点に利点がある。評価実験の結果から、顔表情を用いて操作を行う手法の有効性を示しているが、顔表情をコマンドとして用いているため各操作に対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点で課題が残されている。また、顔表情の誤認識による意図しない動作が発生する可能性がある点においても課題が残されている。sasaki ら [7] は靴下型のインターフェースを用いてユーザの足首、足指の動作をアームロボットの動作に対応づけることで操作を行う手法を提案している。足首、足指の動作を対応づける手法は身体動作などをコマンドとしてアームロボットの特定の動作に割り当てる手法と異なりユーザの意図した直感的な操作が可能になる点や必要なボタンなどの UI が少ない点から認知的負荷を低減可能な点に優れている。しかし、ユーザがアームロボットの操作とは異なる目的で行動を行う際にもその動作に基づいて動作してしまうため、実環境の利用には適していない。Penaloza ら [14] は脳波を用いてアームロボットを操作する手法を提案している。脳波を用いて操作を行う手法は特定のコマンドを覚える必要がなく、最も直感的な手法であるといえるが、実環境で利用する際に脳波を完全にコントロールすることは難しくユーザの意図しない脳波の発生に基づいた動作をする可能性がある点で課題が残されている。木村ら [15] は身体動作に基づいたアームロボットの操作手法を提案している。木村らの提案するシステムは頭部から脚部までの動作をアームロボットの動作に対応づけており、実験結果では制御に用いる特定の体の部位では意図しない動作を防ぐことができ操作しやすいことが示されている。しかし、ヘッドの位置姿勢を操作するのではなく各関節角を操作しているためアームロボットの操作経験がないなど知識がないユーザには操作が難しいという課題が残されている。

以上のことから先行研究で提案されている操作手法及び一般的に用いられている操作手法は主に以下の二点の内どちらかを可能にしているといえる。

1. 認知的負荷を低減しながら直感的な操作を可能にする
2. 意図しない動作の発生を防ぐ

しかし、同時に上記二点を可能にする操作手法の実現は難

しく、著者らの知る限りではないため本論文で提案するシステムは認知的負荷を低減しながら直感的な操作を可能にし、意図しない動作を防ぐことを可能にするシステムの提案を目的とする。

3. 拡張現実とマルチセンサ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

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 1 に提案システムの概要図を示す。マルチセンサ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取得する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。マルチセンサデバイス、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ため、ハンドシェイクなどによるオーバヘッドが少なくリアルタイム性に優れている。また、要求応答型モデルであり、Topic を用いることで双方で 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 [16]。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。Hololens2 は高精度なハンドトラッキング機能を有しており、ベット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プログラムを操作可能である点に優れており [17] 本システムに適している。

3.1. 仮想的に配置されたアームロボットの操作手法

AR アプリケーション内で仮想的に配置されたアームロボットの各関節角は逆運動学を用いて決定する。そのためアームロボットのヘッドの位置姿勢を決定する必要がある。図 2 に仮想的に配置されタームロボット操作中の様子を示す。AR アプリケーション内で自身の手の位置がハンドトラッキングにより追跡され、白色の立方体で示されている。自身の手の位置とアームロボットのヘッドの位置を同期することでヘッドの位置を決定する。これにより、アームロ

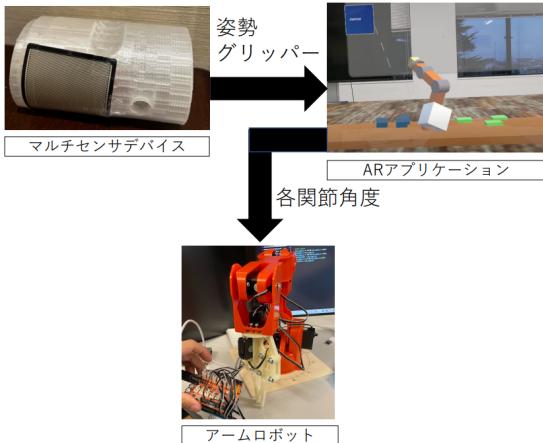


図 1 提案システムの概要図

ポットのヘッドを動かしたい方向へ手を動かすことで操作可能になり、直感的な操作が可能になる。姿勢及びグリッパーの制御についてもハンドトラッキング及び手の握持認識で行うことが最も直感的であるが、手の姿勢の変化によりトラッキングが途切れてしまう事や指が手の陰になる際の握持認識が難しい点からハンドトラッキング及び握持認識のみで行うことは困難である。そのため、直感的な操作を可能にしたまま高い精度での操作を可能にするため、本研究ではマルチセンサデバイスを制作した。マルチセンサデバイスの構成については3.2節で述べ、本節ではその使用方法を述べる。図3.2にマルチセンサデバイス使用時の様子を示す。マルチセンサデバイスでは、その姿勢情報と握持情報を取得可能であり、それぞれアームロボットのヘッドの姿勢決定とグリッパーの制御に用いる。姿勢の決定方法は、アームロボットのヘッドを回転させたい方向にマルチセンサデバイスを持った状態で傾けることで行う。傾けている間、傾けている方向へアームロボットのヘッドが回転し、回転を止める際は元の水平な状態に戻すことでアームロボットのヘッドの姿勢を決定する。また、マルチセンサデバイスを強く握ることでグリッパーの開閉を制御する。これらのようにハンドトラッキングを用いてアームロボットのヘッドの位置、マルチセンサデバイスを用いてアームロボットのヘッドの姿勢及びグリッパーを制御することで直感的な仮想的に配置されたアームロボットの操作を可能にする。

3.2. マルチセンサデバイスの構成

3.1節で述べた通り、本研究ではマルチセンサデバイスを制作し、用いている。図4にマルチセンサデバイスの全体図を示す。マルチセンサデバイスは複数のセンサから構成されており、それを格納するケースを3Dプリンタを



図 2 仮想的に配置されたアームロボット操作時の様子



図 3 マルチセンサデバイス使用時の様子

用いて印刷した。図5にマルチセンサデバイスを構成するM5StickC及び圧力センサを示す。M5StickCはESP32ベースであり、WI-FI及び6軸IMUセンサが利用可能であり、姿勢推定やセンサ値及び計算値などが送信可能である。また、小型でながらバッテリーを搭載しており、マルチセンサデバイスが外部からの電源供給なしに動作することを可能にする。圧力センサにはInterlink Electronics社の圧力センサFSR406を用いる。これは、小型でフレキシブルな圧力センサであり、M5StickCに接続して利用することが可能である。本研究で用いるマルチセンサデバイスは片手で使用可能な程度小型であり、姿勢推定や握持推定、計算値やセンサ値の送信が可能である必要があるため、M5StickC及びフレキシブルでマルチセンサデバイスに固定可能な圧力センサFSR406は本研究で提案するシステムに用いるマルチセンサデバイスに適している。マルチセンサデバイスの構造については3Dプリンタで印刷したケース内にM5StickC及び圧力センサを使用するための配線を格納し、ケースに空いている穴から表面に固定されている圧力センサに接続する構造となっている。

3.3. システム利用方法

これまでに述べた手法でアームロボットの操作を行うことが可能であるが、ARアプリケーション起動中に常時操作が可能な状態であると、操作とは別の意図で手を動かした際にもアームロボットが動作してしまい、意図しない動作が発生してしまう。そのため、本システムは操作時、非操作時に分けることで意図しない動作の発生を防ぐ。図6にAR



図4 マルチセンサデバイスの全体図

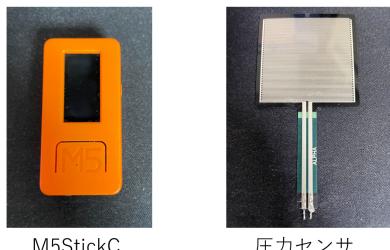


図5 マルチセンサデバイスを構成する M5StickC（左側）及び圧力センサ（右側）

アプリケーション起動時の様子、図7にスタートボタン押下後の様子を示す。これら二つの状態では手を動す、傾ける、マルチセンサデバイスを握るなどによる操作はできない状態である。AR アプリケーション起動後、操作開始のためにスタートボタンを押し、その後画面で初期位置としてのオレンジ色の立方体に手を重ね合わせることで指示テキスト及びオレンジ色の立方体が消え、操作可能となる。操作作中は任意のタイミングで画面左上に常時表示されているメニューボタンを押すことで操作を中断でき、再度スタートまたは初期姿勢に戻すリセットボタンを押す操作を選択可能である。



図6 AR アプリケーション起動時の様子



図7 スタートボタン押下後の様子

4. 評価実験

本研究で提案するシステムの有効性を検証するために評価実験を行った。被験者は20代の男女10名であり、本実験では従来の手法と提案システムの操作性の差異の検証を目的とする。そのため操作及び評価はARアプリケーション内で行った。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した。

4.1. 実験方法

被験者は従来システム及び提案システムの両方でタスクを実行した。タスクは三つのブロックをそれぞれ異なる目標位置まで運ぶタスクとし、可能な限り目標位置の中心に置くことを依頼した。従来システムと提案システムの使用する順番はランダムとした。最初にそれぞれのシステムでのアームロボットの操作方法及び行うタスクの説明を行い、各ボタンの意味や操作方法について理解したかを確認した。実験についての説明後、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。実験担当者の合図によりタスクを開始した。タスク完了後に利用したシステムに関するアンケートに回答してもらい、実験担当者はタスク完了時間、目標位置の中心からの差を記録した。

4.2. 評価指標

アームロボットの操作のしやすさに関する定量評価として、タスクの実行時間及び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検定を用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。主観的な操作のしやすさをSystem Usability Scale (SUS)アンケート[18]

及び独自に作成したアンケートを用いて評価した。

5. 実験結果と考察

5.1. 定量評価の結果と考察

図 8 にタスク完了時間平均の比較結果を示す。エラーバーは標準誤差を示す。従来手法と提案手法のタスク完了時間平均を比較した結果、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くなることが示され、二つの手法間のタスク完了時間平均には有意差が見られた。これは、提案手法の直感的な操作により、操作に迷わずタスクを実行できたためタスク完了までの時間が短くなったと考えられる。また、提案手法の操作性の高さから、目標位置に素早く移動させることができることもタスク完了までの時間の短縮に寄与していると考えられる。

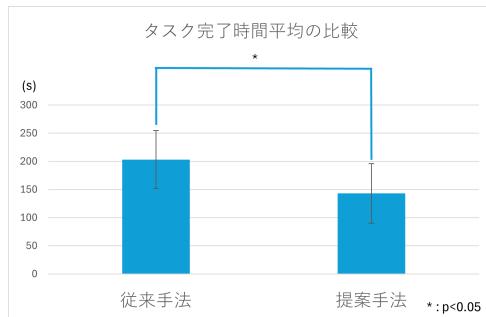


図 8 タスク完了時間平均の比較

図 9 に目標位置の中心からの差の比較結果を示す。エラーバーは標準誤差を示す。従来手法と提案手法でタスクを行った際の中心からの差を比較した結果、わずかに提案手法が小さい結果が得られたが、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、提案手法では操作時に手の全ての動きを用いて操作を行っているため無意識的な手の揺れと意図的な動作を区別することはしていないく、操作精度が低下する可能性がある。これに対応することでより操作の精度が向上すると考えられる。

5.2. 主観的な操作のしやすさの評価の結果と考察

表 1 に従来手法及び提案手法の SUS スコアの平均を示す。一般的に SUS スコア 68 以上は良いシステムとされており、従来手法においては基準を大きく下回り、提案手法においては基準を満たした。従来手法は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の操作を全てボタンで行うため認知的負荷が大きく SUS スコアが低下したと

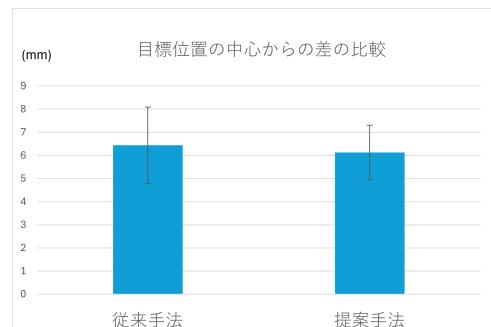


図 9 目標位置の中心からの差の比較

考えられる。これに対し、提案手法で用いるボタンは初めのスタートとリセット、常時表示されているメニューボタンのみであるため、認知的負荷が小さく使いやすいシステムであると評価され、基準を満たしたと考えられる。

表 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

表 2 に評価実験のアンケート結果を示す。各設問は 1 (全くそう思わない) から 5 (非常にそう思う) の 5 段階評価であり、アンケート結果については各項目の平均値をまとめた。設問 1, 2, 4, 6 の結果から提案手法を用いた際、従来手法に比べて UI の理解しやすさや操作手法から操作が直感的であり、簡単であるということが明らかとなった。これは手を動かす傾ける握るといった実際のアームロボットの動作に近い操作手法を採用したことが簡単で直感的な操作に寄与したと考えられる。また、このような操作手法をとったことにより必要なボタン数が少なくなり、認知負荷を低減したため簡単に操作可能に感じたと考えられる。さらに、設問 7 の結果では同じタスクを行ったにもかかわらず、提案手法を用いた方が従来手法に比べてタスクが簡単に感じていることが明らかとなった。これは、提案手法が簡単で直感的に感じたため、タスク自体の主観的な難易度を低下させたと考えられる。設問 3, 8 の結果から提案手法を用いた際に従来手法と比べてユーザは高精度で想定通り操作できていると感じていることが明らかとなった。これは、従来手法に比べて意図しない動作の発生を防ぐことができたためであると考えられる。意図しない動作の発生を防止したことでも主観的な操作の難しさ低下に寄与したと考えられる。設問 5 の結果から従来手法と提案手法が同程度操作中に疲労を感じることが明らかとなった。これは、提案手法を用いた操作中は常に手を視界にとらえている必要があり、身体的な疲労が大きいためであると考えられる。

表 2 評価実験のアンケート結果

質問内容	従来手法	提案手法
Q1. 操作は直感的だと感じましたか	2.8	4.2
Q2. アームロボットの操作は難しいと感じましたか	4.3	2.9
Q3. 操作の精度に満足しましたか	2.5	4.0
Q4. この操作方法を習得するのに時間が必要だと思いますか	3.4	2.4
Q5. 操作中にどの程度疲労を感じましたか	3.8	3.5
Q6. 操作 UI は理解しやすかったですか	3.4	4.7
Q7. タスクは難しいと感じましたか	3.2	2.0
Q8. アームロボットは想定通りに動きましたか	2.5	4.0

6.まとめと今後の展望

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マルチセンサ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。また、アンケート結果から提案手法は従来手法に比べて簡単で直感的であり、意

図しない動作の発生防止を促すことが可能であることが明らかとなった。

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らないため、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と考える。また、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により正確な操作を可能にする必要がある。

参考文献

- [1] 楠原伸介：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).
- [2] of Robotics, I. I. F.: World Robotics 2022, https://ifr.org/downloads/press2018/2022_WR_extended_version.pdf (2022). [accessed 2024.09.24].
- [3] : 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/>.
- [4] 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).
- [5] 山田亮介、秋月秀一、橋本学：ロボット動作に対する反応時間の短縮に有効な複合現実による情報提示手法、日本ロボット学会誌, Vol. 42, No. 5, pp. 493–496 (2024).
- [6] 福岡正彬、中村文彦、滝澤暉、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).
- [7] Sasaki, T., Saraiji, M. Y., Fernando, C. L., Minamizawa, K. and Inami, M.: MetaLimbs: Multiple arms interaction metamorphism, ACM SIGGRAPH 2017 emerging technologies, pp. 1–2 (2017).
- [8] 永田寅臣、渡辺桂吾：研磨ロボットのためのジョイスティック支援による力制御教示システム、日本機械学会論文集 C 編, Vol. 67, No. 655, pp. 767–774 (2001).
- [9] 西村和真、幸村貴臣、桐林星河、永谷圭司：ジョイスティックを用いた遠隔操作型移動マニピュレータの微操作の実現、ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2016, 一般社団法人 日本機械学会, pp. 2A1-17a1 (2016).
- [10] 山下恭平、加藤由希子、倉部紘一、小池元輝、神野晃治、鬼頭一将、辰野恭市：配電作業用ロボットにおける HRI (Human Robot Interface) の改良—ジョイスティック、マスターアームを利用したカメラとアーム、ピークルの同時操作—、ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2016, 一般社団法人 日本機械学会, pp. 2P2-09a2 (2016).
- [11] 松本大賢、岡哲資ほか：Kinect とタブレットを用いたロボットアームによる物体拾得システム、第 77 回全国大会講演論文集, Vol. 2015, No. 1, pp. 285–286 (2015).
- [12] MONOist: <https://monoist.itmedia.co.jp/mn/>

- articles/2005/22/news048.html (2020). [accessed 2024.08.24].
- [13] ユニバーサルロボット：https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/43932/UR5e_User_Manual_jp_Global.pdf (2022). [accessed 2024.08.24].
- [14] Penalosa, C. I. and Nishio, S.: BMI control of a third arm for multitasking, *Science Robotics*, Vol. 3, No. 20, p. eaat1228 (2018).
- [15] 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).
- [16] 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).
- [17] HoloLens2—概要, 機能, 仕様：<https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens/hardware>. [accessed 2024.08.24].
- [18] Lewis, J. R.: The system usability scale: past, present, and future, *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 34, No. 7, pp. 577–590 (2018).