

Mixed Realityを用いた試薬の搬送と実験自動化への展望

学校法人角川ドワンゴ学園 S高等学校 3年 須藤隼人

概要

近年、生命科学分野においてロボットを活用した実験自動化に関して数多くの報告が行われている。しかし、現状のロボットの運用は搬送系に課題を抱えているため、実験機器との連携に多くのコストが必要であり、拡張性の低下の一因となっている。本研究では、Mixed Reality (MR) 技術を用い、人間とロボットが共存する環境を構築し、実験自動化における搬送系の課題を解決をすることを目指す。具体的なアプローチとして、MRインタフェースの設計と開発を行い、実験サンプル輸送をモデルとした簡易的な実験系の構築を行った。実験内容について事前情報を与えられていない10名の被験者を対象とし、被験者が、安定して想定した操作を行えるのか、正確性と所要時間の測定を行った。結果、MRインタフェースによる指示は、被験者毎の所要時間のばらつきはあるものの、許容可能な範囲に収まっており、本アプローチの有用性を示すことに成功した。

1. 背景

近年のAI技術の発展を受け、AIとロボットを用いて実験科学を構成する各種プロセスを一つのサイクルとして統合し、科学の加速を目指す「AIロボット駆動科学」という新しい分野が提案されている。この分野では科学のプロセスである「仮説>検証>解析>発見」をAIとロボット技術を用いて自動化することで、人の認知能力やバイアスの限界を超えた発見を目的としている。

科学研究自動化の歴史として、1875年には実験自動化のための装置の開発が報告されている[1]。また、生物学・生化学の分野における画期的な例として、2009年にRoss D. Kingの研究が挙げられる[2]。King博士のチームによって開発されたAdamは、パン酵母に関する機能ゲノミクスの仮説を自動で生成し、ロボットによる自動実験を行い、仮説の検証を行うことに成功した(図1a)。また、日本においては夏目徹氏と谷内江望氏が2017年に汎用産業ロボットのまほろを用いた自動化プラットフォームの提案を行っている[3]。

2023年現在、様々なロボットが実験自動化のために販売されている。現在幅広く実験室に導入されているロボットとしては、OpenTrons社のOT-2やTecan社のFluentなどに代表される高速自動分注器が挙げられる。これら実験ロボットは、総じて安全性などの観点から「箱」の中に収められており、基本的に決められた領域の中で実験を実施することに重きを置かれた装置である。複数の実験装置・実験機器を連携させるには、それらを繋ぐための搬送システムが必要となる。このとき、各実験装置の持つ物理的なインターフェースに制約が存在する場合がある。加えて、一度作成・構成を完了したハードウェアは、別の実験を行う際に構成を変更する際に高い人的・機材のコストが生じる。この特性のため、ルーチン化された特定のプロトコルに沿った実験を何度も繰り返すような場合には有用であるが、実験計画をその都度変更する必要がある場合、課題が多く存在する。これは複数のプロトコルを必要に応じて切り替える必要のあるAIロボット駆動科学において重要な課題の一つである。

この課題に関連するアプローチとして、Andrew I. Cooperの取り組みが挙げられる[4]。この研究では、KUKA社のロボットアームMobile Robotを移動型プラットフォームであるMobile Platformに搭載し、各種専門機器を扱えるよう改良を行った。結果、開発されたロボットが専門機器の操作、並びに装置間のサンプル輸送を行うことに成功した(図1b)。

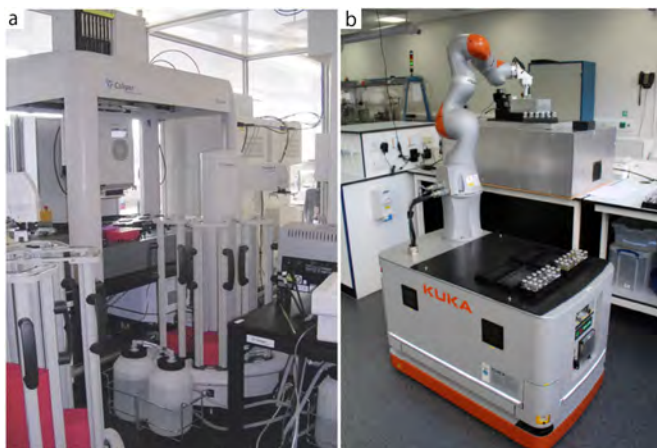


図1. 生化学の分野における研究自動化の例

(a) Ross D. Kingのチームが開発したAdam (画像引用元：https://www.researchgate.net/figure/Adam-the-robotic-scientist-Bottom-left-Professor-Ross-King-together-with-the-original_fig1_6171324).

(b) Andrew I. Cooperのチームが使用したKUKA Mobile RobotとMobile Platform (画像引用元：論文[4]のFigure 1).

一方、これらの方法では搬送系のために研究室に高価なロボットを導入する必要がある他、ロボットのティーチング・チューニング・システムの構築に時間がかかるといったデメリットが存在する。

ロボットによる完全に自動化された汎用的なプラットフォームの構築は非常に難易度が高く、必要なコストも莫大である。ここで私は、人間が実験操作に関する指示をロボットと連携したシステムから動的に受け取って遂行できるデバイスが存在すれば、人間がロボットの得意としない、もしくは自動化にコストのかかる作業を担当することで、経済的・時間的コストを下げる事が可能となると考えた。これにより、AIロボット科学発展の移行期間として、人間とロボットが協調して実験を遂行可能なプラットフォームの構築が可能となる。

人間が実験に関する指示を動的に受け取るデバイスとして、Mixed Reality (MR：複合現実) 技術に着目した。MRとは、現実世界に対して、仮想世界となるCGを重ね合わせて表示し、現実世界と仮想世界の両方の視覚情報を融合する技術である。比較対象として良く挙げられることの多いAR (Augmented Reality：拡張現実) は、仮想の視覚情報を上乗せする技術であるが、MRはARに加えて現実世界の情報がミックスされて表示されている点が大きく異なる(図2)。

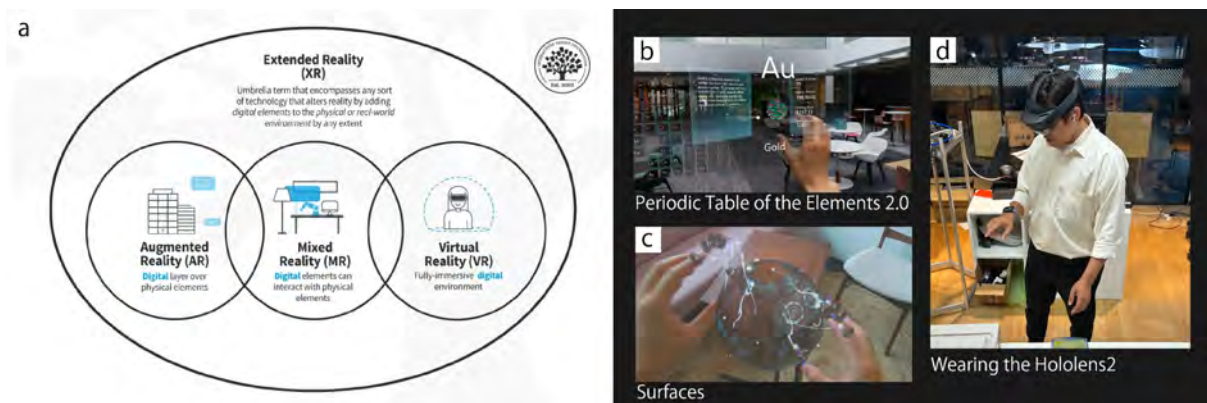


図2. XR分野におけるAR/MR/VRの位置づけと、MRの具体例。 (a) AR/MR/VRといった技術を総称してXRと呼ばれ、この中で現実とバーチャルの相互作用がある領域がMRと定義される (画像引用元：

<https://www.interaction-design.org/literature/topics/extended-reality-xr>)。 (b)(c) Hololens2を用いたMR表示の例 (画像引用元：<https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/develop/features-and-samples?tabs=unity>)

(d) MRデバイスであるHololens2を装着した様子。

MR技術は現在、様々な領域での活用が行われている。米国のスタートアップであるMedivisはMRの視覚サポートに基づいて医師の手術を補助する医療ツールを開発しFDAの取得を行っている。これまでMRを活用することで、200回以上の手術を成功させている[5]。日本においては、トヨタ自動車が車両検査・整備にMRを活用することで、ヒューマンエラーを低減する試みが行われている[6]。大和ハウス工業では、当日の検証内容や確認区域について3Dモデルを通じた事前確認、排煙有効高さの空間をモデル化することで、有効開口面積を算出し建築基準法における排煙検討を行う等、施工現場での利用を検証している[7]。また北海道電力では経営効率化の取り組みの一環として、発電設備の異常の早期発見を行う巡視点検用作業において、点検箇所や注意事項をMR表示し、点検業務の効率化と設備異常の異常検知を目指したアプリケーションの開発がなされている[8]。

本研究ではMRを用いた視覚的な補助を活用することによって、ロボットと人間の協働を可能とするMRインタフェースを設計・開発した。本報告書では、設計・開発したアプリケーションの解説と、その効果について検証した結果について報告を行う。開発された技術はAIロボット駆動科学の発展に寄与することが期待される。

2. 手法

本研究で利用するMRデバイスの選定を行った。表1に各種MRデバイスの性能比較を示す。クリーンルームでの使用をメーカーが推奨しており生物学実験と相性が良い点、現実世界の視覚情報がディスプレイを介したビデオパススルー方式ではなく、直接目視が可能である点が利用者にとって安全性が高い点を考慮し、本研究ではHololens2を採用した。

表1. MRデバイスの比較

	価格	視野角	解像度	XR区分	スタンドアロン	クリーンルームでの動作保証	表示方式
Microsoft Hololens 2	¥422,180	52°	2048*1080 (px per eye)	AR/MR	Yes	○	See-through
Oculus Quest pro	¥226,800	96°	1920*1800 (px per eye)	VR/AR /MR	Yes	×	Passthrough(RGB)
HTC Vive pro 2	¥103,400	120°	2448*2448 (px per eye)	VR/AR /MR	No (Window OS)	×	Passthrough(RGB)
Vive XR Elite	¥179,000	110°	1920*1920 (px per eye)	VR/AR /MR	No (Window OS)	×	Passthrough(RGB)
Google Glass Enterprise Edition 2	¥180,000	83°	640*360 (px per eye)	AR/MR	Yes	×	See-through

Hololens2を用いて、実験ロボットや冷蔵庫などのリアルワールドの情報（そのオブジェクトが何なのか、オブジェクトの座標情報など）を取得し、ロボットと人間の協調作業を実現するアプリケーションの作成を行った。このアプリケーションは、ロボットや冷蔵庫などのリアルワールドの情報（そのオブジェクトが何なのか、オブジェクトの座標情報など）をQRコードによって認識する。事前に設定した手順書を参照し、工程毎にバーチャルなユーザーインターフェイス（UI）として指示を表示し、3Dモデル・アニメーション等を表示してユーザーを誘導する。アプリケーションはHololens2上で単体動作するよう設計されており、開発にはUnity[9]とMixed Reality Toolkit (MRTK)[10]を使用した。図3に開発したアプリケーションのシステム構成を示す。

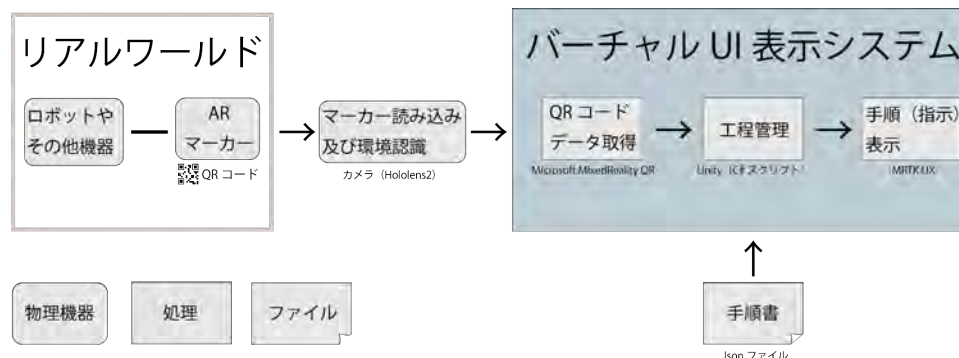


図3. システム構成。本プロジェクトで開発を行ったプログラムの大まかな処理の流れを記載したもの。リアルワールドの情報をHololens2が認識し、実験手順と照らし合わせて必要な情報をバーチャルなUIとして表示する。

3. 結果

3.1 MRインターフェイスの開発

実験装置・試薬のリアルワールドの情報（そのオブジェクトの説明や詳細、オブジェクトの座標情報など）をQRコードによって認識し、実験手順書に基づいてユーザーを誘導するインタフェースの開発を行った。工程毎にバーチャルなUI上に必要な操作の指示が行われる。図4に今回開発したバーチャルなUIの具体的な例を示す。実験内容に関する情報が、バーチャルなUIとして説明文や3Dモデル・アニメーションといった形で表示される。

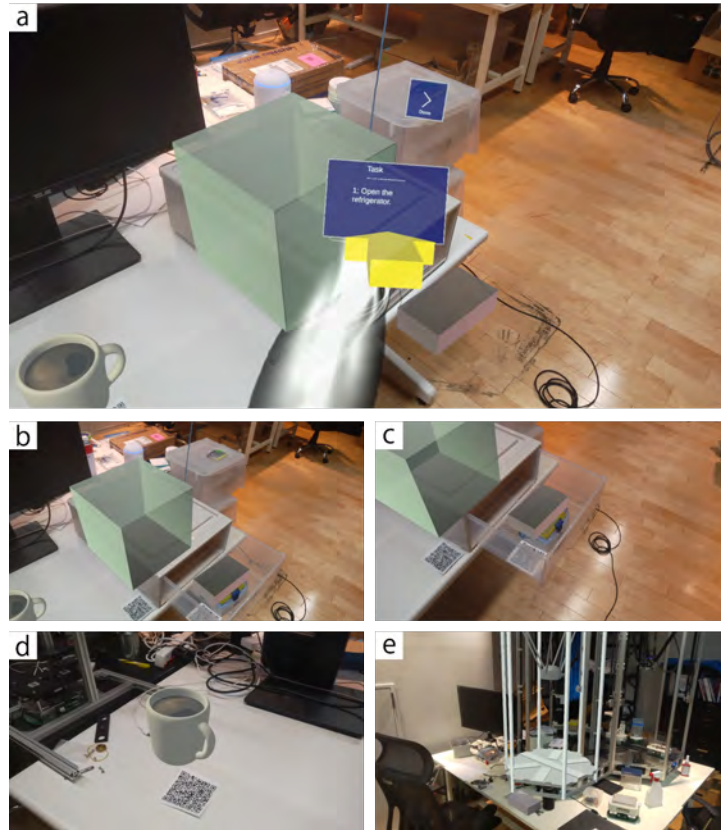


図4. 本研究で開発したMRインターフェイス. (a) 動作の内容を指示するテキスト表示と、実験操作を行う場所を示す矢印. (b) 操作対象の装置が3Dモデルにより強調表示される（図では簡易的な冷蔵庫のモデル）. (c) 強調表示が行われている試薬. (d) リアルワールドに対応するものが存在しない完全にバーチャルなオブジェクトも表示可能（図ではバーチャルなコーヒーのオブジェクト）. (e) 3Dモデルにより強調表示されたロボットに対する試薬のセット位置.

3.2 検証実験

開発を行ったMRインターフェイスの検証を行うため、生物学実験における基本的な操作を指示するプログラムの作成を行った. 実験自動化ロボットが抱える搬送系に関わる課題解決の概念実証として、「冷蔵庫から試薬を取り出しロボットへ受け渡す」という実験動作のモデル化を行った. 一連作業は合計6つの工程によって構成され、それぞれに対応するUIが指示として表示される設計とした. 表2に6つの工程の詳細を示す.

表2. 実験工程

ステップ1	冷蔵庫を開ける
ステップ2	冷蔵庫から試薬を取り出す
ステップ3	試薬をロボットにセットする
ステップ4	ロボットの実験完了まで待機
ステップ5	ロボットから試薬を取り出す
ステップ6	試薬を冷蔵庫の元の位置に戻す

10名の被験者を対象とし、実験操作の正確性と所要時間についてデータ収集を行った. 10名の被験者は株式会社MOLCUREの従業員の有志のメンバーであり、内1名が現職の生物学研究者であった. 被験者に対して実験内容に関する一切の事前情報共有は行わなかった. 実験は東京工業大学 地球生命研究所の同社オフィスにて2023年7月19日に行われた. 実験に用いたデバイスや装置について図5に示す.

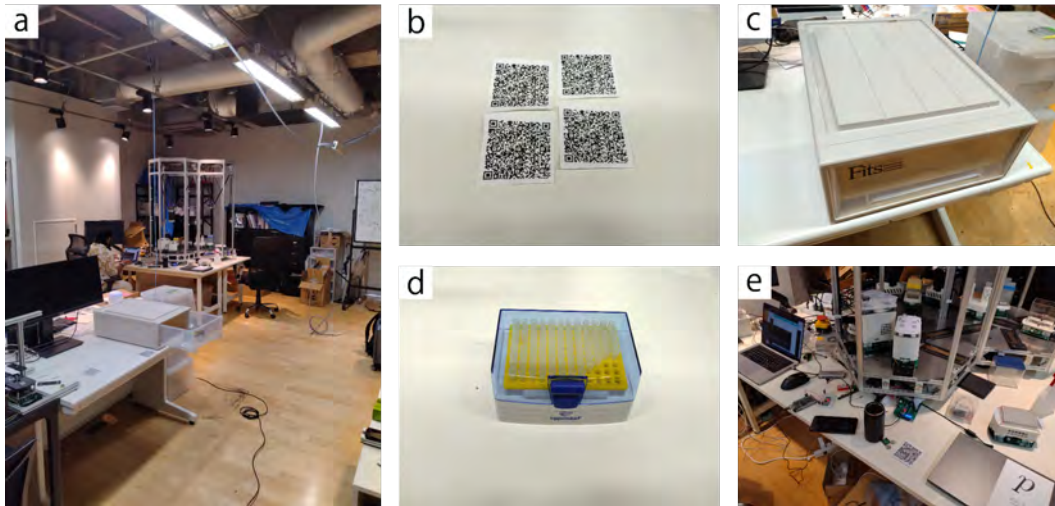


図5. 動作・実験環境. (a) 本研究で実験を行った環境の全体図（株式会社MOLCURE東工大内オフィス）. (b) リアルワールドの各情報の格納を担うQRコード. (c) 本研究で冷蔵庫に見立てた箱（以後便宜上冷蔵庫として表記）. (d) 試薬に見立てた空のエッペンチューブボックス（以後便宜上試薬として表記）. (e) 本研究でのサンプルをセットする自動実験ロボット（株式会社MOLCURE開発のHAIVE）.

被験者は一人ずつ実験場に入室し、個別に実験を行った。被験者に対して与えられた事前情報は「Hololens2を被り、ディスプレイ上に表示される指示に従う」という内容と、プログラムの起動方法やボタンの操作など、ソフトウェア操作に必要な解説のみに制限した。

被験者が実験を遂行する様子を観察し、各工程に対する行動の正確さを筆者がその場で確認し、評価を行った。また、各工程の完了までの所要時間の計測を行った。正答率の詳細を図6に、図7に所要時間の詳細を示す。

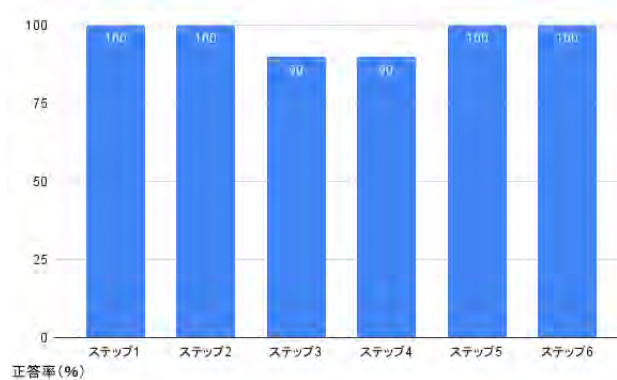


図6. 実験ステップ毎の被験者の正答率. 10名の被験者が各ステップにおいて想定した操作を正確に行えた割合を示す. 指示に対して正解か不正解か筆者が判定.

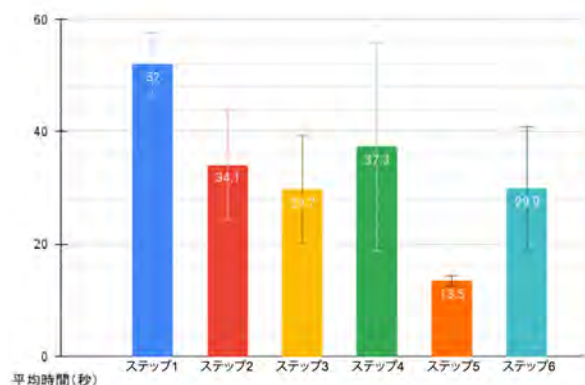


図7. 実験ステップ毎の被験者の所要時間. 10名の被験者が各ステップにおいて必要とした所要時間の平均値（秒）. エラーバーは標準偏差を示す. 各ステップの開始から、完了ボタンが押されて次のステップに移行するまでの秒数を、Unity内に組み込まれたプログラムによって計測した. 結果から小数点以下を四捨五入したものを平均値の計算に用いた.

実験の結果、1-6の各工程の正答率はステップ3と4を除いて100%、ステップ3と4は90%であった。所要時間の平均はそれぞれステップ1が52秒、ステップ2が34.1秒、ステップ3が29.7秒、ステップ4が37.3秒、ステップ5が13.5秒、ステップ6が29.9秒を記録し、ステップ1が最も時間がかかった工程であった。また、標準偏差はそれぞれステップ1が10.7秒、ステップ2が28.2秒、ステップ3が32.0秒、ステップ4が6.8秒、ステップ5が49.5秒、ステップ6が36.5秒であり、ステップ4が最もばらつきのある結果となった。

4. 議論

概念実証実験において、ステップ1「冷蔵庫を開ける」が顕著に時間のかかる状態であった。これは被験者が事前知識のない状態で簡単な操作説明のみを受け実験を行ったため、基本的な動作を理解するために時間を必要としたことが原因であると考えられる。後半につれて所要時間が短くなっている理由も、デバイスの操作を繰り返すことで操作に慣れが生じたためであると考えられる。被験者から得られた実験後のフィードバックでも、「初めは少しわかりづらかったためUIの位置に改善が必要」といった内容が存在した。所要時間については、ステップ5「ロボットから試薬を取り出す」を除き、被験者毎のばらつきが大きい結果が得られた。ばらつきの大きさは特にステップ4「ロボットの実験完了まで待機」において顕著であった。これは操作の難易度が原因ではなく、現実の視点の角度によってはバーチャル空間上でボタンUIが押せないといったアプリケーション側の不具合が原因であると考えられる（実験中の観察と実験後のフィードバックから判断）。いずれの問題も、アプリケーションのUI設計を変更することで改善が期待できる。

本研究では、MR技術が生物学の実験自動化における試薬搬送の課題を解決する手段として有用であるか否かの概念実証実験を行った。結果として、実験内容に関して事前知識のない人物であってもMRを用いてロボットへの搬送などの簡便なタスクを問題なく実行可能であることが示された。これはすなわち、高度な技能や知識を持った研究者ではなくとも、本技術の発達により現在のロボットが自動化を得意としない実験を遂行できるという可能性を示すものである。今回開発を行った技術は、Hololens2にこのアプリケーションをインストールするだけで既存のロボットとの協働を実装できるため、ロボットを新たに物理的に作成するよりも低コストかつ簡単に拡張可能であり、また普及も比較的容易であるという優位性を持っている。将来的に内容の精度があがることで、ロボットによる完全な自動化の難しい特定領域の実験などにおいても、低コストで実験を遂行するといった活用が期待できる。

今後の展望として、「サンプルに関する情報をポップアップとして表示する機能」の追加があげられる。分子生物学実験はサンプルの状態を目視で確認することが困難な状況が多く、サンプルの状態を想像しながら実験する能力が求められる。MRを活用することでこの課題解決にアプローチしていきたい。ここで開発される機能は教育目的として、「学生が何をしているのか」、「何のために現在の実験操作を行っているのか」を視覚的に理解し学習を支援するような活用も想定している。さらに先のビジョンとしては、サンプルの情報が簡単に確認できるだけでなく、実験装置が行った操作をフィードバックして、動的にサンプルの状態を予測・可視化することで、MRならではの機能で生物研究者を助ける機能の開発も行っていきたいと考えている。私は、AIとロボットが高度に連携していくAIロボット駆動科学という分野を広げる第一段階として、人とロボットが協調して作業が行う段階が存在すると考えている。本研究結果がその一助となることを期待する。

謝辞

アプリケーションの開発環境の提供・実験実施など、本研究は株式会社MOLCUREの協力によって成立したものである。実験に参加してくださった株式会社MOLCUREの有志メンバー、並びに、開発面のメンターであるUlrich Camille氏、学術面のメンターである玉木聡志氏の協力に深謝する。

参考文献

- [1] Olsen, K. The first 110 years of laboratory automation: technologies, applications, and the creative scientist. J Lab Autom 17, 469-80 (2012).
- [2] King, R.D. et al. The Automation of Science. Science 324, 85-89 (2009).
- [3] Yachie, N., & Natsume, T. Robotic crowd biology with Maholo LabDroids. Nature biotechnology, 35, 310-312 (2017).
- [4] Cooper, A.I. et al. A mobile robotic chemist. Nature 583, 237-241 (2020).
- [5] Mixed Reality Momentum: HoloLens 2 expands globally and new Azure service launches: <https://azure.microsoft.com/en-us/blog/mixed-reality-momentum-hololens-2-expands-globally-and-new-azure-service-launches/>
- [6] Toyota makes mixed reality magic with Unity and Microsoft HoloLens 2: <https://blog.unity.com/manufacturing/toyota-makes-mixed-reality-magic-with-unity-and-microsoft-hololens-2>
- [7] Mixpace 導入事例: <https://mixpace.jp/blog/20220118/>
- [8] 電力・ガス取引監視等委員会 北海道電力経営効率化の取り組みについて: https://www.emsc.meti.go.jp/activity/emsc_electricity/pdf/0035_16_00.pdf
- [9] Unity: <https://unity.com/>
- [10] MRTK: <https://learn.microsoft.com/windows/mixed-reality/mrtk-unity/mrtk2/>