

複合現実と PC 用 AR/VR を併用可能な CSCW プロトタイピングシステムの開発と拡張

井原章之^{†1} 元村慎太郎^{†1}

概要: コンピュータを活用して協調作業を支援する研究領域として、Computer-Supported Cooperative Work (CSCW) が重要性を増している。我々は近年、現実空間に仮想オブジェクトを重ね合わせ、両者が相互作用する環境を構築する「複合現実(Mixed Reality, MR)」テクノロジーと PC 用の AR および VR を併用可能なプロトタイピングシステムを開発し、CSCW の用途での活用を試してきた。今回、本システムを活用したワークショップを開催し、新たなコンテンツを試作する上での利点や課題点を調べた。また、システムに改修を加え、広い視野角をもつ MR デバイス (Magic Leap2) にも適用できる仕様に拡張したので、その特徴と可能性について検討する。

1. はじめに

近年、グローバル化やリモートワークの進展に伴い、地理的に離れた複数のユーザーが協調しながら作業を行うニーズが急速に高まっている。そのような中で、Computer-Supported Cooperative Work (CSCW) は、コンピュータを活用して協調作業を支援する研究領域として重要性を増している。しかし、従来の CSCW システムは、2次元の画面共有やテキストベースのコミュニケーションに依存しており、空間的な認知共有や複雑な作業の再現には限界がある。この課題を解決する有力なアプローチとして、複合現実 (Mixed Reality, MR) を用いた CSCW が注目されている。MR は、現実空間に仮想オブジェクトを重ね合わせ、両者が相互作用する環境を構築することで、従来の CSCW では困難であった「空間的な共有認識」や「直感的な操作」を可能にする。これにより、設計や製造、教育、医療など、物理的な対象を扱う協調作業において、コミュニケーションの質を高め、意思決定や作業効率を向上させることができると期待される。

MR テクノロジーを活用する CSCW は多くの可能性を秘めているが、現状は MR ヘッドセットの価格が高く、重量が大きいため長時間使用に不向きであり、視野角や解像度も制限がある。また、地理的に離れた複数のユーザー全員が MR ヘッドセットを装着した場合、個々のユーザーで現実世界が異なるため、CSCW の形態に制約が課されてしまう。この問題への対策としては、MR ヘッドセットに加えて仮想現実 (Virtual Reality, VR) ヘッドセットを併用することや、PC やタブレット、スマートフォンなどのデバイスを併用することなどが挙げられる。我々も近年、複数のヘッドセット装着者が同時に MR の世界にアクセスする状況において、同じ MR の世界に PC 用の拡張現実 (Augmented Reality, AR) テクノロジーでアクセスしたり、PC 用のアバ

ターの視点に切り替えて VR の世界を動き回ったりできる独自のシステムを開発した。開発に着手したのは 2022 年頃であるが、当時は「研究者の活動を効率化するためのツール」としてのシステムを想定して開発を進めており、「リサーチトランスフォーメーション (RX) を推進するためのソフトウェア」という意味を含めて、「Studio-RX」という名称をつけた[1-3]。我々が開発した Studio-RX のシステムは、独自のプログラミング言語 (インタープリター) で動作するツールボックスを同梱しており、複数のデバイスをネットワークで接続した状況において、新しいコンテンツや新しい機能を試作する際の「プロトタイピングシステム」として利用しやすい特徴を持っている。

本稿では、我々がこれまでに開発した「MR テクノロジーと PC 用 AR および PC 用 VR を併用可能な CSCW プロトタイピングシステム」の特徴を解説し、そのシステムを活用して開催したワークショップの例を紹介する。また、これまで Studio-RX の開発を進める際に使用してきた MR ヘッドセット (Microsoft 社の HoloLens2) に加えて、広い視野角をもつデバイス (Magic Leap 社の Magic Leap2) も使用できるようにシステムを拡張している点についても説明し、拡張によって得られる価値や有用性について検討する。

2. 先行事例・関連研究

2023 年から 2024 年にかけて、MR ヘッドセットに加えて VR ヘッドセットを併用する事例や、タブレット・スマートフォンなどのデバイスを併用する事例が多く報告された。Zaman, Rhee らは 2023 年、MR の機能をもつ AR ヘッドセットの装着者と、VR ヘッドセットを装着した遠隔地のユーザーがコラボレーションを行うシステム (MRMAC) を報告した[4]。Numan, Steed らも同様のシステムを開発し、屋外で使用する場合の課題点について議論した[5]。伏田、

^{†1} 国立研究開発法人 情報通信研究機構 未来 ICT 研究所

平林らは2023年、MRヘッドセット・VRヘッドセットに加えてタブレット用ARを組み合わせたシステムを開発し、観客参加型ライブパフォーマンスの可能性について議論した[6]。岩崎、柴田らは2024年に、リアルワールドメタバースの構想のもとで、MRとVRを組み合わせる非対称型複合現実環境を開発し、協力脱出ゲームを開発し特徴を議論した[7]。

これらの先行研究は全てMRを用いたCSCWを想定したものであるが、我々が開発したStudio-RXシステムは、使用するデバイスが先行事例とは異なっている。すなわち、MRヘッドセットに加えて、VRヘッドセットまたはタブレットを併用する従来の構成ではなく、独自のPC用ARテクノロジーを使用する構成とした点が、本研究の特徴のひとつである。我々はこのPC用ARテクノロジーを簡易的なプロセスで実現しており、2022年には特許の出願も済ませた[8]。開発した技術の価値や可能性については、我々が近年出版した論文の中でも議論しているので、興味のある方はそちらを参照して頂きたい[9-12]。

3. システム構成

3.1 MRヘッドセット

我々はこれまでStudio-RXの開発を進める際に、MRヘッドセットとしてMicrosoft社のHoloLens2を使用してきた。HoloLens2は、現実世界を直接見ながら、その上に仮想情報を重ねて表示する光学シースルー型のデバイスである。ユーザーの頭の位置と向きを3次元空間でトラッキングできる6DoFの機能を持っているため、表示される仮想物体が空間に固定されているように見える。ハンドトラッキングの機能を持っており、コントローラー不要で、手やジェスチャーを認識して操作可能である。HoloLens2は2019年頃に販売が開始されてから多くの分野での活用が試され、特に産業分野で導入の期待が高まった。しかし、実際には大規模な採用に至らず、市場拡大が思うように進まなかったため、2024年にMicrosoft社は販売を終了することを決定し、サポートも2027年で終了することになっている。このような状況において今回我々はHoloLens2に加えて、同じく光学シースルー型のデバイスとして知られている、Magic Leap社が販売中のMagic Leap2デバイスを導入することを検討し、ソフトウェアを拡張するための作業に着手した。Magic Leap2は広い視野角をもつのが特徴であり、CSCWプロトタイピングシステムの構成要素として使用すれば、高い有用性を発揮できると期待される。

3.2 PC用ARシステム

本研究において我々は、MRを用いたCSCWの構成要素として、文献[9-12]で紹介した独自のPC用ARテクノロジーを使用した。一般的に、ARはスマートフォンやタブレットで使用されることの多いテクノロジーであるが、PCで使用できるようにすることによって、遠隔参加しやすくなる

メリットがある。なお、文献[10-12]において我々は、PC用ARテクノロジーという単語を使用せずにリアルタイム拡張仮想テクノロジーという単語を使用し、その機材構成について解説した。本稿では、VRも併用する構成を想定しているため、「PC用ARおよびPC用VR」というように呼称を揃えることにした。図1に示すように、360度全方向の映像や画像を一度に撮影できる全天球カメラ(A)の映像をノートPC(B)上のアプリで受信させた。受信した映像を背景として描画し、さらにその背景に重ねる形で、仮想物体を描画させた。図2に示したのが、ノートPC画面に表示される、背景映像と仮想物体を合成したAR映像である。中央の赤い円盤の上に乗った人形が仮想物体であり、そのオブジェクトを右側のヘッドセット装着者が手で掴んでいる状況である。ヘッドセットの下に描かれた箱形状の黄色の仮想物体は、ヘッドセット装着者の場所を示すマーカーである。

人形と箱、その他の仮想物体は全て位置情報をデバイス間で同期しており、ひとつのデバイスで動かすと、別のデバイスでも動くようにプログラムした。その結果、ヘッドセット装着者が何かを動かすと、その様子をAR映像で表現できるようになった。また、ARシステムのユーザーを「視聴者」としてではなく「能動的にMRの世界にアクセスできる参加者」として扱いたいと考え、PC上で仮想物体をクリックして選択した後、選択した仮想物体をキーボードの矢印キーで動かせる機能を加えた。PC用アプリであるARシステム上で画面をドラッグすると、仮想カメラが回転し、視線を変更できる機能も加えた。

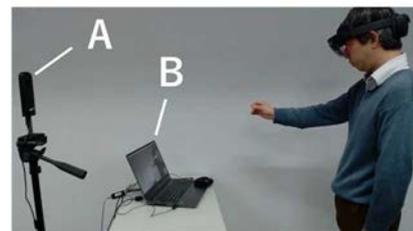


図1 機材構成の例（通常のウェブカメラ映像）



図2 ノートPCに描画されたPC用ARシステムの映像

3.3 PC用VRシステム

本研究において我々は、MRヘッドセットとPC用ARシステムに加えて、PC用VRシステムを併用できるようにし

た。AR を使用する場合の仮想カメラの位置は現実空間の全天球カメラの位置に固定されるため、自由度は「回転移動のみ」であり、位置座標が変化するような移動は許されない。しかし、VR の場合はカメラ映像を描画せず、仮想物体のみで世界を構成するため、アバターに仮想カメラを追随させ、PC からアバターを動かした時にカメラも一緒に動く仕様にできる。図 3 に、PC 用 VR を用いて作成される映像の一例を示した。中央の人形がユーザーの操作するアバターであり、ちょうど 3D ゲームのプレイヤーのように、操作すると VR の世界を動き回れるようにした。また、ヘッドセット装着者の位置を示すマーカーとして、頭部を表す箱と、手を表す板を表示したほか、ヘッドセット装着者の視線を表す白線も表示した。



図 3 PC 用 VR システムの映像

3.4 MR ヘッドセット装着者視点の映像

本研究では、図 1 に示した機材を基本構成として、MR ヘッドセット装着者、PC 用 AR システムのユーザー、PC 用 VR システムのユーザーが複数集まって CSCW に参加する場面を想定している。MR ヘッドセット装着者には、PC ユーザーがどこにいるのかを示すマーカーとカメラを表示しており、AR で参加している場合には、そのカメラは全天球カメラの位置に表示される。VR で参加している場合には、操作しているアバターの背後にカメラが表示される。図 2 に示したような配置において、MR ヘッドセット装着者視点で見える映像を図 4 に示した。ハンドトラッキングによって認識された自身の手が、仮想物体として白く表示される仕様になっている。我々は光学シースルー型のヘッドセットを用いているため、アバターの後ろに置いてあるノート PC の画面がそのまま見えている。必要に応じて、MR ヘッドセット装着者が AR 映像を確認したり、PC を操作したりすることが可能となっている。



図 4 MR ヘッドセット装着者視点の映像

4. CSCW プロトタイピング

4.1 コンテンツを試作するワークショップ企画の開催

本研究において我々が開発したシステムは独自のインタープリターで動作するツールボックスを同梱しているため、新しいコンテンツを生み出すためのプロトタイピング作業を効率的に進めることができる。そこで我々は 2025 年 3 月、兵庫県豊岡市にある芸術観光専門職大学のスタッフの方々に協力して頂いて、コンテンツを試作するための 3 日間のワークショップを開催してみることにした。参加したメンバーは我々のほか、芸術観光専門職大学の教員 3 名と、学生 5 名であった。学生からヒアリングをした結果、下記のコンテンツを開発することになった。

- ・ 「当たりの箱」と「ハズレの箱」を複数生成し、現実空間にランダムに配置する。ヘッドセット装着者には当たりとハズレの箱が同じ形状に見えるように設定する。PC でアバターを操作するユーザーには、当たりとハズレの違いが分かるようにしておく。
- ・ PC 画面を見るユーザーやアバターの操作者がヘッドセット装着者に対してヒントを与えて、当たりの箱を見つけられるようにする。見つけた箱はテーブルに集めるルールにして、赤チームと青チームで集めるスピードを競う。

4.2 試作したツールボックス

上述したコンテンツを実現するために試作したツールボックスを図 5 に示した。ツールボックスにはオブジェクトを生成するためのプログラムが含まれており、各項目を実行した時に、そのオブジェクトが「全デバイスにおいてネットワーク同期する仕様」で生成されるようになっている。このようなツールボックスを使用することによって、ワークショップ当日にゲームエンジンを使用した開発を行う必要がなくなり、プロトタイピングを極めて高い効率で進めることができた。

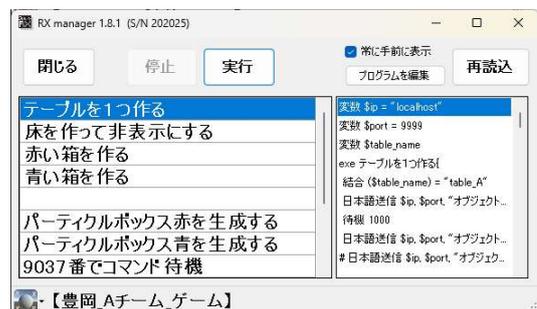


図 5 ワークショップで試作したツールボックス

4.3 試作したコンテンツの体験会

3 日間のワークショップでは、MR についての説明・ヒアリング・プログラムの試作を前半 2 日間で完了させ、3 日目に体験会を開催し、課題点を確認した。3 日目に行った体験会の様子のスクリーンショットを図 6 に示した。この画像は我々が開発した PC 用 AR システムを使用して作

成しており、現実世界の映像を背景として、箱やアバターなどの仮想物体が重畳されている。ヘッドセット装着者がアバターからヒントをもらいながら、オレンジ色の枠のついた「ハズレの箱」を避けて、それ以外の当たりの箱を集める作業を、ヘッドセット装着者・アバター操作者・視聴者といった様々な形態の参加者が楽しむことができた。

なお、この体験会では、開発したシステムを CSCW の用途で活用することを視野に入れて、遠隔地からの参加者を加えてイベントを進行した。システム構成は参考文献[9]に記載したものと同様に、遠隔参加者はウェブ会議システムを使用し、画面共有された映像を見ながら、現地のスタッフと音声でやり取りを行った。共有した画面は PC 用 AR システムの映像であり、リアルとバーチャルが融合した世界を遠隔参加者がリアルタイムに視聴できるようにした。体験会を開催した会場がかなり広いスペースであったため、音声でのやり取りがしづらく、AR 映像で把握できる空間範囲にも制約があった。また、ネットワークの帯域が十分に確保できていなかったため、映像の表示に遅延が発生したり、フレームレートが低下したりしてしまう問題も発生した。結果として、現地に来ていると感じるほどの臨場感を遠隔参加者が得ることはできず、この点を改善するためには、さらなる工夫が必要であることが分かった。



図 6 コンテンツ体験会の様子 (PC 用 AR 映像)

5. Magic Leap2 への拡張

5.1 MRTK2 から MRTK3 への変更について

我々は本研究において、HoloLens2 バージョンの Studio-RX システム開発時、MR テクノロジーを効率よく扱うためのツールキットとして、Microsoft 社が公開していた Mixed Reality ToolKit 2 (MRTK2) を使用した[13]。しかし、Magic Leap2 デバイスと HoloLens2 を併用する場合に、最新版の MRTK3 を使用する必要が生じたため、ソフトウェアの仕様を変更する必要が生じた。特に、マルチユーザー参加型の設計でシステムを開発する際、従来使用していたパッケージが MRTK3 に対応していなかったため、この部分を大幅に修正することになった。現状、Magic Leap2 用のコンテンツに対して、PC 用 AR システムのユーザーや、HoloLens2 ユーザーが同じコンテンツにアクセスすることが可能になり、上記の問題を解決することができた。

5.2 試作中のコンテンツ

我々はこれまで MR ヘッドセットとして HoloLens2 を使用する場合、視野角が狭いことや、映像描画能力がそれほど高くないことを考慮して、比較的単純な形状の仮想物体や、ローポリゴンのコンテンツを使用することが多かった。これに対して Magic Leap2 は視野角が広く、映像処理能力も高いため、没入感のあるフォトリアルな映像コンテンツを使用するようになった。今回我々は、図 7 に示すような、風に揺れる紅葉の下で、コウノトリが動き回る様子を眺めるコンテンツを試作し、それらを Magic Leap2 と PC 用 AR テクノロジーを併用して楽しめるようにできた。本コンテンツの体験は大変好評であり、様々なユースケースに展開可能であることが示唆された。



図 7 Magic Leap2 用コンテンツ (PC 用 AR 映像)

6. おわりに

本稿では、我々がこれまでに開発した、MR テクノロジーと PC 用 AR/VR を併用可能な CSCW プロトタイピングシステムの特徴を解説した。そのシステムを活用して開催したワークショップでは、MR についての説明会・ヒアリング・プログラムの試作・体験会の開催・課題点の確認、という全ての項目を 3 日間で実施できた。CSCW プロトタイピングシステムを活用して外部のチームと連携した経験はこれまでに無かったが、3 日間で体験会まで開催できたことで、独自開発したツールボックスが、ユーザーと共に協創するプロトタイピングに対して極めて高い有用性を発揮し得ることを確信する機会となった。一方で、遠隔参加者の臨場感を向上させるためには、さらなる工夫が必要であることも分かった。また、Magic Leap2 への拡張に向けた現状についても説明し、その特徴と可能性について検討した。今後は CSCW プロトタイピングシステムの構成要素として Magic Leap2 を導入するための開発作業を進める予定である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 23H01006 および JSPS 科研費 25K15223 の助成を受けたものである。CSCW プロトタイピングシステムを使用した 3 日間のワークショップ開催にご協力頂いた、芸術文化観光専門職大学の井原麗奈氏、田上豊氏、野津直樹氏に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 井原章之. 研究現場における XR (クロスリアリティ) 活用事例の紹介. 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン B-plus. 2023, no. 65, pp. 18-23.
- [2] 井原章之. XR が拓く RX (リサーチトランスフォーメーション). 情報処理学会誌「情報処理」デジタルプラクティスコーナー. 2023, vol. 64, no. 8.
- [3] Y. Hayamizu, T. Ihara, and H. Asaeda. Metaverse meets ICN: Low-Latency, Synchronous Communications for XR/AR Applications. IEEE MetaCom 2025. 2025, poster presentation.
- [4] Zaman, F., Anslow, C., Chalmers, A., and Rhee, T.. MRMAC: Mixed Reality Multi-user Asymmetric Collaboration. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). 2023, 591.
- [5] Numan, N., Lu, Z., Congdon, B., Giunchi, D., Rotsidis, A., Lernis, A., Larmos, K., Kourra, T., Charalambous, P., Chrysanthou, Y., Julier, S., and Steed, A.. Towards Outdoor Collaborative Mixed Reality: Lessons Learnt from a Prototype System. IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW). 2023, 113.
- [6] 伏田 昌弘, 平林真実, XR を用いた観客参加型ライブパフォーマンスの可能性. 情報処理学会 インタラクシオン. 2023, 356.
- [7] 岩崎勇斗, 服部圭吾, 井上蓮太, 中村文彦, 木村朝子, 柴田史久. リアルワールドメタバース実現に向けたデジタルツイン構築に関する検討～非対称型複合現実環境における協力脱出ゲームを事例に～. 日本バーチャルリアリティ学会. 2024, 2B1-11.
- [8] 井原章之. 仮想物体操作装置およびそのプログラム, ならびに, 仮想物体表示システム. 特開 2024-92551, 特願 2022-208575. 出願日: 2022/12/26.
- [9] 田代穂香, 山中雄生, 井原章之, 元村慎太郎, 瀬戸崎典夫. Web 会議システムと連動する AR コンテンツを用いた遠隔コミュニケーションの利点と課題. 日本教育工学会論文誌. 2024, vol. 48 (Suppl.), pp.173-176.
- [10] 井原章之. マルチデバイス型 Mixed Reality システム: 活用事例と将来展望. パテント 特集《2025 大阪・関西万博 (第2弾)》. 2025, vol. 78, no. 2, pp. 51-61.
- [11] 井原章之. 複合現実・リアルタイム拡張仮想システムの万博出展. 情報通信研究機構研究報告. 2025, vol.71, no.1
- [12] 元村慎太郎, 井原章之. WebRTC 活用型リアルタイム拡張仮想と複合現実の融合システム開発. 日本バーチャルリアリティ学会大会. 2025, 3E1-02.
- [13] Mixed Reality Toolkit 2 とは. <https://learn.microsoft.com/ja-jp/windows/mixed-reality/mrtk-unity/mrtk2/?view=mrtkunity-2022-05> アクセス日: 2025/12/14.