



# 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～

岩崎勇斗<sup>1)</sup>, 服部圭吾<sup>1)</sup>, 井上蓮太<sup>1)</sup>, 中村文彦<sup>1)</sup>, 木村朝子<sup>1)</sup>, 柴田史久<sup>1)</sup>

1) 立命館大学 情報理工学部 (〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150)

**概要:** 我々は現実世界とメタバースを融合したリアルワールドメタバースを実現する MR キャンパスを構想している。MR キャンパスでは、実空間のキャンパスを VR 空間上で再構成したデジタルツインを構築し、両空間に存在するユーザ間での共同作業の実現を目指している。本研究では、非対称型複合現実環境を利用した協力脱出ゲームの制作を通じて、デジタルツイン構築に向けた基礎検討を行った。制作した作品では、実空間の部屋がデジタルツインとして VR 空間上に再現されている。実空間に存在する複合現実感の体験者と、VR 空間に没入したボディサイズの異なる VR の体験者は、お互いを視認でき、インタラクションを通じて目的の達成を目指す。

**キーワード:** 非対称型複合現実, MR, メタバース, デジタルツイン

## 1. はじめに

複合現実 (Mixed Reality: MR) 環境における様々なデジタルツインの活用手法が提案されている。その中でも Niantic 社が提唱したリアルワールドメタバースは、メタバースと MR が融合する新たな形態であり、現実世界を起点とした空間を VR 空間上で再現し、現実世界からのアクセスだけでなくリモート環境からもアクセスすることを目指している。実空間の情報と MR 空間のデジタル情報を結びつけることにより、リモートユーザが実際に実空間に存在しているかのような臨場感を生み出すことが可能である。これにより、エンターテインメントのみならずビジネスなど、幅広い分野での応用が期待されている。

リアルワールドメタバースの研究事例として、例えば、Zaman らはリモートユーザが現実世界のコラボレーション空間にアクセスすることで、ローカルユーザとやり取りを行うことを可能とするシステムを開発し、臨場感やタスク遂行能力の向上を実証している[1]。

また、Lee らの研究では、360 度映像を用いてホスト空間を他者と共有し、視界の独立性を提供することで共同作業において、ユーザの存在感の向上に繋がることが示されている[2]。

リアルワールドメタバースの具現化の一環として、我々は、現実世界に存在する本学のキャンパスを VR 空間においてデジタルツインとして再現する MR キャンパスを構想している。MR キャンパスでは、現地の実空間か

らは MR 技術によって VR 空間に存在するアバタ、すなわち遠隔地からアクセスするユーザと対話できる。一方、遠隔地に存在するユーザは、デジタルツインとして構築した VR 空間内をアバタとして動き回ると同時に、現地の実空間中に存在するユーザの位置・姿勢を VR 空間へと写像することで、現地のユーザとも対話できる。したがって、MR キャンパスでは、デジタルツインによる両空間の相互作用により、現地に存在するユーザと遠隔地のユーザが同じ空間にいるかのように共同作業を行える。

このような、MR キャンパス構想を実現するにあたり、建物内の一部を対象として基礎的な検討を行った。具体的には、現実世界の大道具セットとそれをデジタルツインとして再現した 3D モデルを作成し、これらを利用したクロスリアリティ (XR) コンテンツを制作・展示を行い (図 1)、現実空間に存在するユーザと VR 空間内のユーザとのインタラクションにおける課題について検討した。

## 2. MR キャンパス構想実現に向けた課題

MR キャンパス実現の課題の 1 つとして、ユーザの位置・姿勢の共有が挙げられる。具体的には、現実空間に存在するユーザの位置・姿勢をどのようにして VR 空間に存在するユーザへ提示するのか、VR 空間に存在するユーザを現実空間に存在するユーザにどのようにして提示するか、というものである。特に前者は、頭部の位置・姿勢だけでなく全身をどのようにトラッキングし、表現す



図1: 大道具セットとそのデジタルツイン  
(左: 実物の大道具セット, 中央: デジタルツイン, 右: 制作した作品の様子)

るかなど, 検討すべき事項が多い. その他, 両空間の位置合わせや物体の位置・姿勢の同期も大きな課題である.

本作品は, 現実空間のユーザは実スケールのアバタで表現される一方, VR空間のユーザはスケールの縮小されたアバタで表現される非対称型の複合現実空間として構築した. その上で, 両者の間での位置・姿勢の共有方法やインタラクション方法, 両空間の位置合わせ方法などについて検討した. 検討にはゲーム的な要素を導入し, VR/MR技術に馴染みのない一般の方に体験してもらい, 課題について考察した.

### 3. 作品概要

本作品は非対称型複合現実環境を利用した協力脱出ゲームであり, 複合現実 (Mixed Reality: MR) 空間に存在する, 怪盗になりきったプレイヤー (以下, 人間側とする) と人工現実 (Virtual Reality: VR) 空間に存在する, ネズミになりきったプレイヤー (以下, ネズミ側とする) が相互にやり取りを行うことでタスクを行い, 部屋からの脱出を目指す. 人間側, ネズミ側は相互に相手を視認することが可能であり, 両者の移動は他方の空間にも反映される. 人間側は現実空間を動き回ること, ネズミ側はコントローラを交互に振ることで移動することができる. また, 人間側は (図2) に示すようにハンドトラッキングによる操作でアイテムやネズミ側のプレイヤーを掴んで移動させることができる. ネズミと人間はボディサイズが異なるため, 狭い空間内でのタスクはネズミ側が行い, ネズミの移動の手助けやレバーなどのギミック操作は人間側が行うことで互いに協力する.

#### 3.1 体験の流れ

まず, 両プレイヤーは暗闇に包まれた空間からスタートする. 人間側が仮想物体であるスイッチに手を触れることで空間に明かりが灯り, 様々なタスクを行えるようになる. 次に両プレイヤーは部屋からの脱出に必要な3つのアイテムを探し出すことになる. この空間には3つの大きなギミックが存在し, 各ギミックをクリアすることでそれに対応した, 脱出に必要なアイテムを制限時間である5分以内に入手する.

1つ目のギミックは迷路 (図1右図の手前にある半透明ケース内) である. 人間側はネズミを発見した後, ネズミ

を掴み迷路の入口まで運ぶ. 迷路は小さいため人間側は入ることができず, ネズミ側のプレイヤーが人間側に指示を受けながら攻略する形となる. 迷路の中にあるアイテムをネズミが押し出すことで人間側も掴むことができるようになり, アイテムを獲得することができる.

2つ目は, パイプとハンドルを使ったギミックである. 両プレイヤーはパイプとハンドルを使ったギミックに取り組むことになる. ギミックの様子を (図3) に示す. 迷路と同様, パイプの中にはネズミ側のみ入ることができる. 実物体として存在する2色のハンドルと一部の色のついたパイプは連動しており, 人間側はこのハンドルを操作することによってパイプを回転させ, アイテムまでの通路を作る.

3つ目は, リフトとレバーを用いたギミックである (図4). 脱出に必要なアイテムが空間の天井付近に設置されており, 人間側のプレイヤーの手が届かなくなっている. 人間側がレバーを上下に操作することで, リフトも上下に移動するようになっていく. ネズミ側をリフトの上に乗せ, リフトを上昇させることでアイテムを獲

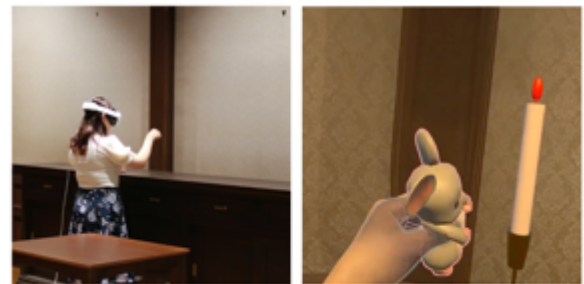


図2: ネズミを掴む様子



図3: パイプギミック

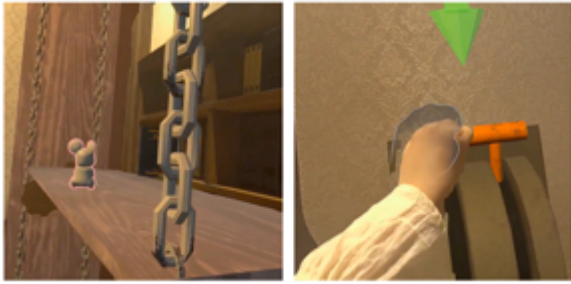


図 4: リフトとレバーの様子

得する。棚に設置されている本には衝突判定が存在しており、リフトの上下の障害となるためプレイヤーはこれらの本を取り除きながらリフトを上昇させる必要がある。

3つのアイテムを探した後、これらをアタッシュケースを模した仮想物体の中に入れ、取っ手部分を掴んで運ぶ。両プレイヤーがドアの前まで移動することでゲームクリアとなる。

なお、制限時間である5分が経過するとドアにロックが掛かる演出が発生し、脱出失敗となる。

#### 4. システム構成

システム構成を(図5)に示す。本システムでは、人間側、ネズミ側の体験者どちらもHMDとしてMeta Quest 3 [3] を装着する。人間側はパススルー機能を使用し、現実世界のセットの様子に加え、仮想物体も表示する。ネズミ側はパススルー機能は使用せず、仮想空間のみの表示となる。コンテンツの制作にはUnityを用いており、動作させるために人間側、ネズミ側それぞれにデスクトップPCを1台ずつ用意した。Meta Quest 3とデスクトップPCの接続にはMeta Quest 3の機能であるQuest Linkを使用する。

##### 4.1 2プレイヤー間の同期

2プレイヤー間の動作、位置情報などの同期にはPhoton Unity Networking 2 (PUN2) [4]を用いている。Photonのクラウドサーバを中継してhttp通信で座標や回転情報などの数値データのやり取りを行っている。ネームサーバやリジョン、ルームIDなどを用いて同期する

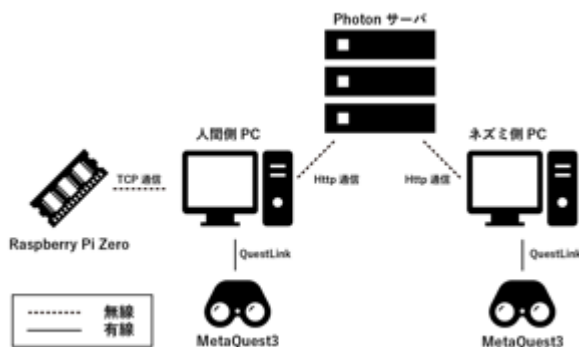


図 5: システム構成図

情報の識別、接続を行う。

カメラやHMDからの入力を受け付けるオブジェクトは同期を行わず、プレイヤーのアバタ情報のみPUN2で同期を行うことで通信量を低減させている。アバタの座標情報はHMDから取得する頭の座標を利用している。アバタの動きは左右の手と頭の座標情報の3点に床の座標を加えた4点で逆運動学(Inverse Kinematics: IK)による補完で実現させている。左右の手の座標情報は、人間側はハンドトラッキングによる手の認識位置、ネズミ側は両手に持たせたコントローラの位置から取得を行っている。同期後の位置合わせについては次項で述べる。

また、アイテムの獲得状況やスイッチの動作状況についてもPUN2を利用しており、人間側に存在する変数情報をベースに同期を行い、共有変数のように使用できるシステムを作成した。

##### 4.2 位置合わせ

本作品の人間側では、実空間の部屋に迷路やパイプといった仮想物体が表示される。それらは、Meta Quest 3のSpatial Anchorという機能を使って位置合わせを行っており、すべての仮想物体が1つのSpatial Anchorを基準にして配置される。両空間の部屋全体は、先述のPUN2により位置と向きとの同期が行われている。ゲーム開始時にネズミ側の部屋全体が、人間側の部屋の位置と向きに合わせられるようになっている。また、ネズミのスタート地点は部屋オブジェクト内の特定の位置に決められているため、ネズミも部屋オブジェクトと同様に位置合わせが行われる。以上の処理により実空間とVR空間の間で位置合わせが行われており、仮想物体の位置の他、両プレイヤーの進行方向や姿勢も正しく反映される。

##### 4.3 ハンドルによる操作

3.1節で述べたパイプとハンドルを使ったギミックについて詳述する。ネズミが通る仮想物体のパイプには赤色と青色の部分があり、それらは対応する色をした実物体のハンドルを回すことで回転させることができるようになっている。このハンドルを人間側が回すことで、ネズミが通行可能なルートを作ることができる。ハンドル部分にはステアリングコントローラ型のアタッチメントを使用した。ハンドルの軸の部分には加速度センサMPU-6050を取り付けており、ハンドルと共に回転する。加速度センサによって取得された情報はRaspberry Pi Zeroに送られ、角度の計算に利用される。得られた角度情報は、TCP通信により人間側の処理を行っているPCのUnityに送信され、仮想物体のパイプの角度にリアルタイムで反映される。

##### 4.4 ハンドトラッキングによる操作

人間側では、ハンドトラッキングによる操作で仮想物体とのインタラクションができるようになっている。この作品ではプレイヤーは2種類の操作を行う。

1つ目は、突きによる操作である。実装にはMeta XR Interaction SDK(以下、Interaction SDKとする)のPoke

**Interaction** を用いた。この操作は空間内のスイッチのオブジェクトに適用されており、プレイヤーの手の指先でスイッチを押すことでオン・オフを切り替えることができるようになっている。

2 つ目は、掴みによる操作である。実装には **Interaction SDK** の **Grab Interaction** を用いた。この操作は、人間側がネズミ側を掴んで動かす際や、空間内の様々な仮想物体を動かす際に用いられる。実際に何かを掴むように手を握ることで、仮想物体が手に追従するようになっている。

掴みによる操作では、人間側の手が届くあらゆる場所に仮想物体を移動させることができるため、物体間の衝突判定を無視できる場合がある。ネズミ側を動かす際に仮想物体を貫通してしまうと、ギミックを意図しない形でクリアされる懸念があった。そこで、ネズミのオブジェクトが特定のオブジェクトとの間で衝突した場合に、掴み状態を強制的に解除することで仮想物体の貫通を防いでいる。

#### 4.5 ネズミ側の操作

ネズミ側は、**MR** 側で使用する大道具セットの横で体験を行う。ネズミ側は、コントローラを振ることで前進する。前進の速度はコントローラの速度の絶対値により決定され、すばやく動かすほど大きく前進する。コントローラの微細な動きによる意図しない前進が生じないようにするため、コントローラの速度が一定以上になった場合にのみ前進する。

**VR・MR** 用コンテンツの開発では、コントローラの動きを取得したい場合、コントローラが持つセンサの値を直接参照するのではなく、**Unity** 上でのコントローラの座標や回転の変化を検出することが一般的である。そこで、ここではプレイヤーの頭部に対するコントローラの相対座標を用いて速度を計算している。

進行方向はプレイヤーの頭の向きが反映され、プレイヤーの見ている方向に前進する。ネズミ側には、地面に対し垂直に伸びるパイプの中を登らなければいけない区間がある。この区間に入っている間は前進が無効になり、上昇に切り替わる。これによってネズミ側はパイプを登ることができるようになる。また、人間側に掴まれている状態ではコントローラによる操作は無効化される。

なお、本体験ではセットの横でネズミ側を操作するが、システム構成上は遠隔地からの操作も可能である。

#### 5. 作品の展示と課題

本作品は 2024 年 5 月 19 日に行われた、いばらき×立命館 DAY 2024 (図 6) にて展示された。12 歳以上を対象とした 87 組、174 人が体験した (一部重複あり)。

ほとんどの体験者が制限時間である 5 分以内にクリアでき、3 つのタスクに問題なく取り組んでいたことから、位置の同期や動作の反映については十分有用なものであると考えている。

一方で利便性や操作性の面において、いくつかの課題も見つかった。見つかった課題を 2 つ挙げる。1 つ目は **Meta Quest 3** とデスクトップ PC の接続が不安定であるという点である。ゲーム開始の際にパススルー機能が作動しない問題や位置のズレが発生する問題など、様々な不具合が発生した。これは **Quest Link** 上でのパススルー機能がプレビュー版であったためであると考えられる。今後の **Meta Quest 3** のアップデートにより解消されるだろう。

2 つ目は、**HMD** の視界内でのみハンドトラッキングが機能することである。レバーの操作やネズミを掴む際に別の方向を向くと、ユーザの手が認識されず、行いたい操作が快適に行えないことがあった。**Meta Quest 3** 単体での根本的な解決は不可能であり、360 度カメラなど他のデバイスが必要になると考えられる。

#### 6. まとめ

**MR** 空間と **VR** 空間に存在する 2 人のプレイヤーが協力をし、脱出を目指すコンテンツの制作・展示を行った。それぞれの空間は現実世界のセットと、それを再現した 3D モデルによって構成され、相互の作用が可能になるよう設計された。展示を通じて複数の課題が見つかったため、**MR** キャンパス構想の実現に向けてこれらの課題について検討していく必要がある。

#### 参考文献

- [1] Faisal Zaman, Craig Anslow, Andrew Chalmers, Taehyun Rhee : MRMAC: Mixed Reality Multi-user Asymmetric Collaboration, International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 591-600, 2023.
- [2] Gun A. Lee, Theophilus Teo, Seungwon Kim, Mark Billinghurst : A User Study on MR Remote Collaboration Using Live 360 Video, International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 153-164, 2018.
- [3] Meta Quest 3 : <https://www.meta.com/jp/quest/quest-3/>
- [4] Photon Unity Networking 2 : <https://doc-api.photonengine.com/ja-jp/pun/v2/index.html>



図 6: いばらき×立命館 DAY2024 の様子