

同一現実空間における MR 共創環境の実装と評価

柴田 青賢¹ 長尾 確² 梶 克彦¹

概要：仮想空間を使ってコラボレーションを支援する技術はこれまでも盛んに提案されてきた。その仮想的なコラボレーションを、現実環境を共有する複数のユーザ同士が現実空間に物理的に存在するオブジェクトと仮想的なコンテンツの位置関係の整合性を重視し、インタラクティブにコンテンツの創作が可能な仕組みを提案する。この仕組みによって現実空間のオブジェクトを扱いながら、仮想的な共創を実現できる。そのための基盤として MR 共創環境においてスケッチによる共創が可能となるシステムを作成した。座標交換や RPC の仕組みによって 2 人で仮想的なコンテンツを MR 空間上に共有して編集する仕組みを導入した。この仕組みは同一空間内でのコンテンツの共創に有効であると確認した。

1. はじめに

現実空間とコンピュータの仮想空間が連携するシステムの研究が進んでいる。また作業員同士が連携して創作を行う共創を支援する仕組みの研究も行われている。MR（複合現実）とは現実空間とコンピュータ内部の仮想的な空間を融合させてインタラクションを行うための技術である。MR では現実空間の情報をセンサを用いて収集し、現実空間の持つ文脈や物体の形状を踏まえた上で情報を仮想的なオブジェクトとして提供する。仮想的なオブジェクトはインタラクションが可能でコンピュータを操作するインターフェイスとなる。また共創とは複数人で共に行う創作活動である。複数人で創作活動に取り組むと一人でそれぞれが考えるよりも多様なアイデアが生まれ、深い考察が可能となる。

現実空間で利用される建築物の設計や物理的な製品の開発をするにはその形状の設計を必要とする。それらの開発にはコンピュータを用いて行われる場合がある。ただ現状のコンピュータのインターフェイスは基本的に二次元の情報しか扱えず、縮尺や色味、現実の構造との兼ね合いなどの情報が扱いにくいという課題がある。そこで VR（仮想現実）・AR（拡張現実）をインターフェイスとして三次元的な縮尺を再現して、仮想的な空間で形状や色味を確認する方法がある。また MR 技術を利用すると現実の構造との兼ね合いも踏まえた設計をコンピュータの中で行う仕組みがある。

ディスプレイをインターフェイスとして共同作業・教育活動を支援する仕組みがある。しかしディスプレイを利用

すると相手の表情を見ながらのコミュニケーションを取りづらく、空間的な制約から一度に与えられる情報が制限される。これらの問題を解決するために VR・AR・MR をインターフェイスとして仮想空間上に情報を配置して共同作業・教育活動を支援する方法が提案されている。

同一の複合現実空間で複数人のユーザが共同して創作が行える環境を提案する。またその複合現実環境を体験できるプロトタイプを作成した。MR を利用して物理的な製品を設計する際には現実空間の文脈や構造を踏まえた上での設計・確認をコンピュータ内部で完結させられる。また仮想的なインターフェイスを用いて共同作業・教育活動を支援すると情報を三次元空間上で整理し、提示できる利点がある。共同作業・教育活動よりも創造性を必要とする共創活動を MR で支援すると、現実の情報を豊かに扱えるようになり、創造的な活動の支援が可能になる。

2. 関連研究

2.1 CSCW と創造性支援ツールの分類

CSCW (Computer-Supported Cooperative Work) の分野では、コラボレーションを支援するための仕組みの理解と設計に関心が寄せられている。その結果コラボレーション技術の設計に影響を与えてきた理論が生まれている [1]。この研究から時間と空間的な場所に基づいた CSCW システムの分類が提案されている [2]。時間-空間マトリックスによれば、CSCW システムは以下の要素に分解される。共同作業員が同期して、あるいは非同期で作業するのか、作業場所の物理的な配置は同じ場所、あるいは異なる場所にあるのかによって分類される。時間-空間マトリックスの構成は、共同作業のためのソフトウェアツールの分類の基

¹ 愛知工業大学 情報科学部

² 名古屋大学 大学院情報学研究科 / 株式会社 CYPE Technology

表 1 時間同期かつ共同で行う作業に対する CSCW を仮想的な空間で利用するシステム

	仮想的なコンテンツの呼出	仮想的なコンテンツのインタラクティブな創作
仮想的なコンテンツの現実空間との位置関係の整合性なし	studierstube[4] MagicMeeting[5] Transvision[6]	CollaboVR[7] VRresin[8] Mr. sketch.[9]
仮想的なコンテンツの現実空間との位置関係の整合性あり	Collaborative mixed reality[10]	MR 共創環境 (本提案)

礎となっている [3]. 本研究は, 特にリアルタイムで密接なコラボレーションが求められる創造性支援に焦点を当てるため, 時間・空間を共有する同期・同位置の CSCW システムに限定して考察する.

2.2 XR と CSCW

空間・時間を共有する CSCW システムの中で XR 技術がどのような立ち位置にあるのかを分類したマトリックスを表 1 に示す. 仮想的なコンテンツを扱うツールでは他のユーザとの位置関係を共有して体験を提供している. その中で仮想的な空間と現実空間の位置関係の整合性を重視しているものもある. 現実空間と連携するコンテンツは自然な会話やジェスチャーによる豊かなコミュニケーションを維持しつつ, 直感的なインタラクションを可能とするメリットがあると示されている [10]. また仮想的なコンテンツの利用方法は, 既存のコンテンツを呼び出して仮想空間内に配置するものとインタラクティブにコンテンツを形作るものに分けられる. 仮想的な空間でのインタラクティブなコンテンツ制作には, 3 次元的な構造を 3 次元的に認識し入力できるようになるメリットがあると示されている [5].

3. 同一の現実空間で仮想オブジェクトを共有して共創を行うシステム

3.1 システム概要

本提案システムを用いると複数人で現実空間にオーバーレイした 3 次元の複合現実空間 (MR 空間) をキャンバスとしてスケッチができる. システムの利用シーンの例を図 1 に示す. 図 1 の例では, 現実空間に存在する椅子と共に使う机を創作している. ビデオシースルーによって椅子の大きさや形状を認識し, そこに合わせて 2 人で空間上にスケッチしている. アプリは Apple Vision Pro[11] 上で動作し, 複数のユーザが同一の MR 空間を共有する. ユーザは仮想的なオブジェクトとしてストロークを空間上に描ける. ストロークは現実空間との位置関係を維持したまま, ストロークを描いていないユーザも閲覧ができる. また対面でのコミュニケーションを取りつつ, ストロークをインタラクティブに操作して共創活動に取り組める. MR 空間の描画およびインタラクティブな操作はカメラや深度センサから得たデータに基づき, デバイス標準の API によるシースルーやハンドトラッキングの機能を用いて実現さ



図 1 システム利用シーン

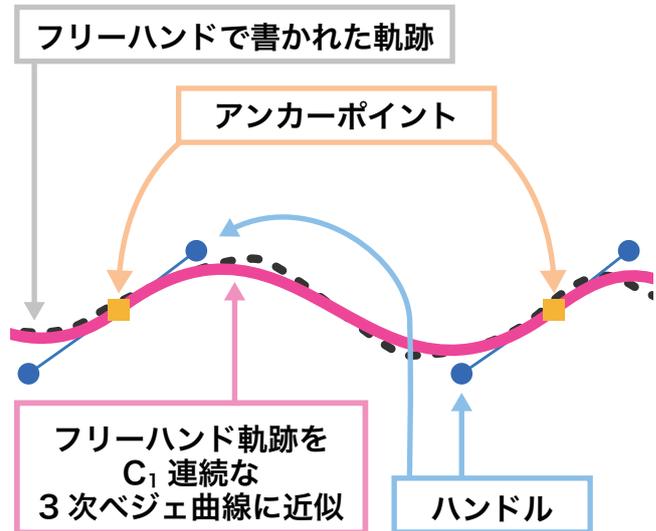


図 2 ハンドトラッキングで描画されたストローク

れる. 空間に記述された内容は任意のタイミングで保存でき, 次の作業時に再度利用できる.

3.2 インタラクティブなストロークの操作

インタラクティブなストロークの編集を実現するために,

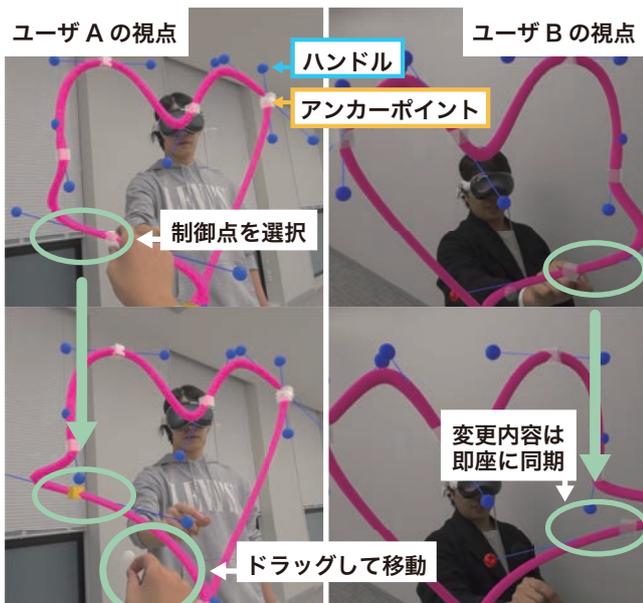


図 3 MR 空間でのベジェ制御点の操作によるストロークの編集

フリーハンドで再利用性の高いストロークを作成できる仕組みを導入した。フリーハンドの操作によって、自由度の高いスケッチが可能となる。スケッチのストロークは図 2 の通りフリーハンドで描いた 3 次元の軌跡を 3 次ベジェ曲線の連続した曲線に近似させて作成する。ハンドトラッキングの軌跡を 3 次ベジェ曲線の連続した曲線に近似させるアルゴリズムには FitCurve[12] を利用している。ストロークをベジェ曲線で表現するとストロークの形状の編集が可能となり、ストロークの再利用性が向上する。また必要に応じてストロークのモデルを再生成できるため、ストロークの描画品質が劣化しづらい利点もある。

ベジェの制御点の移動によるストロークの編集は図 3 のように行われる。この編集は MR 共創環境で全てのユーザに対して即座に同期される。ベジェのアンカーポイントをドラッグするとストロークが通る点を変更でき、ハンドルをドラッグすると曲線の形を変更できる。なおこのシステムでは 1 つ前のベジェ曲線の終点のハンドルと次のベジェ曲線の始点のハンドルが逆ベクトルになるように計算している。これにより C_1 連続なベジェ曲線となり、滑らかな形状のストロークを扱える。

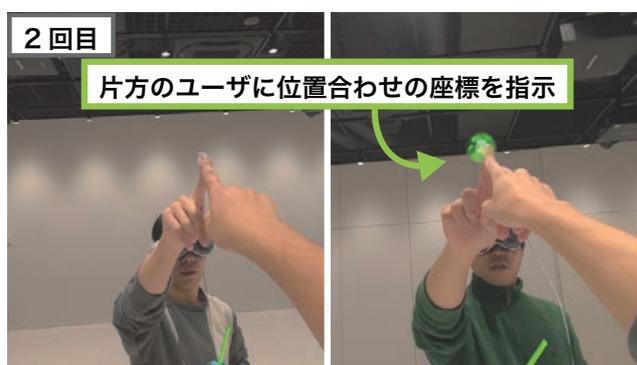
3.3 共創環境のための座標変換

Apple Vision Pro の端末同士で創作体験を共有するために、各端末座標系同士を交換する仕組みを導入した。一般的に MR 空間での位置合わせには AR マーカ (2 次元コード) や空間アンカーを用いる。しかし Apple Vision Pro では一般向けにカメラ機能の利用が禁止されており、カメラ情報を必要とする AR マーカは利用できない。その中で座標空間を共有するために、現実空間の同じ座標とそれぞれの端末座標系の座標を共有して変換行列を算出した。座標

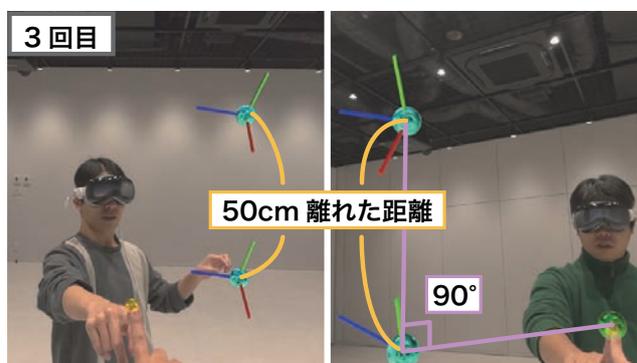
現実空間の同じ座標を指先で取得・共有
この操作を 4 回行う



座標変換の精度を向上させるために片方のユーザに対して 2~4 回目の座標を半透明の球で指示する



2~4 回目の座標は XYZ 座標系の各軸上の 1 回目の点から 50cm 離れた距離を指定



4 回の座標交換を完了したのちに計算を行い、端末座標系同士を変換する座標変換行列を作成

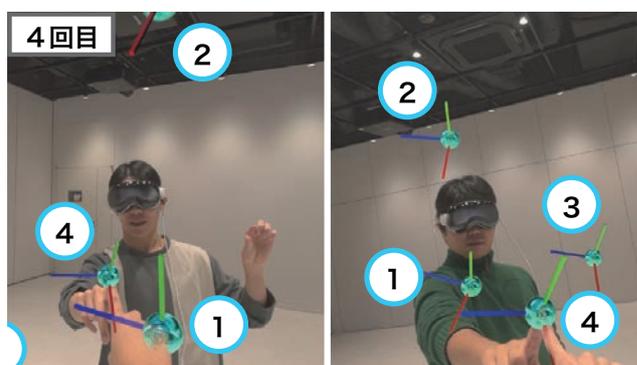


図 4 指合わせによる座標変換行列作成のための基準点取得

は図4の通りに Apple Vision Pro を装着したユーザが互いの指を合わせる操作を4回繰り返して、4点分の座標を端末座標系のアフィン行列として取得した。3次元空間での回転を表現し、位置合わせを行うために最低4点の座標を交換する必要があった。またそれぞれの基準点を互いに直交する位置に設定すると精度の向上が見られるため、それを補助するための位置の指示を半透明の球を表示して行う。4点よりも多く位置合わせを行うと座標変換行列の算出に対して測定誤差の影響を受けづらくなるが、アプリ体験を得るための前準備にかかる時間が長くなりユーザの負担が大きくなるため、なるべく少ない回数で完結するようにした。

ある端末の変換前の端末座標系の座標の定義を式1、相手の端末座標系への変換後の座標の定義を式2、座標変換に用いるアフィン行列の定義を式3とする。

$$\begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} x'_n \\ y'_n \\ z'_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

変換前の座標を同次座標の形式に拡張した行列を4とすると、アフィン行列の算出式は5となる。

$$P = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_n & y'_n & z'_n \end{pmatrix}^T \left((P^T P)^{-1} P^T \right) \quad (5)$$

算出されたアフィン行列はせん断や拡大縮小の要素を含んでいる。しかしそれぞれのユーザは同じ座標系の現実空間に存在しているため、せん断や拡大縮小を行う必要はない。そのため追加で特異値分解を行い、それらのパラメータをアフィン行列から取り除く操作を行なったものを座標変換行列としている。またそれぞれの端末で座標変換行列を計算するのは計算コストが高いため、計算を行うのは片方の端末のみとし、もう片方の端末では算出された座標変換行列の逆行列を座標変換行列として利用している。

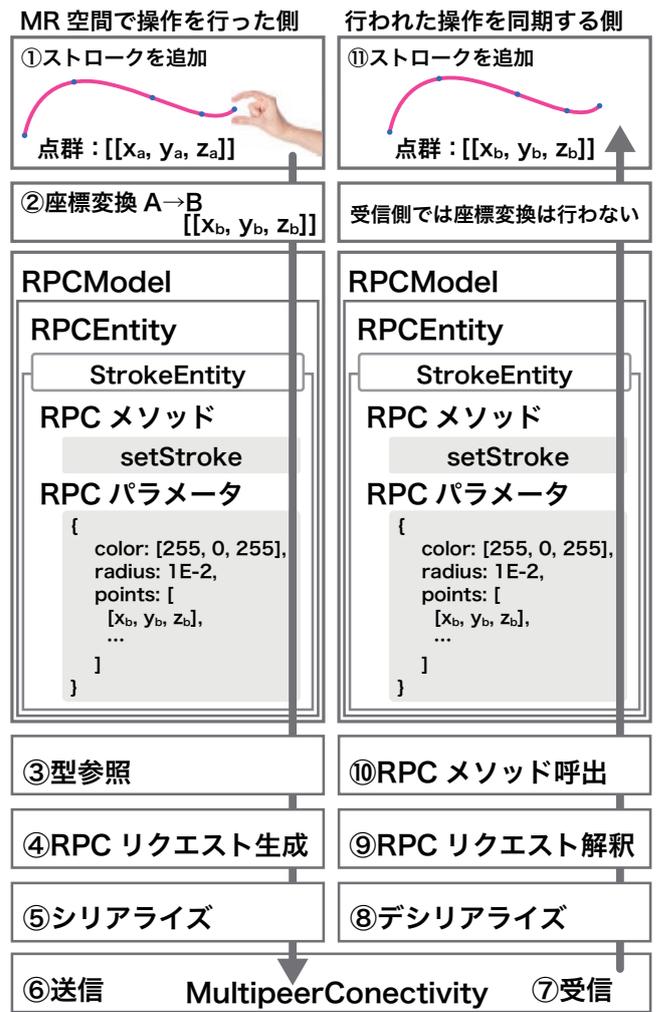


図5 RPC の呼び出し例

```
// ストロークを追加する RPC パラメータ
struct AddStrokeParam: Codable {
    color: [Float] // RGB 色空間
    radius: Float // 半径 ( m )
    points: [SIMD3<Float>] // 線を表す点群
}
// ストロークを追加する RPC メソッド
func addStroke(stroke: AddStrokeParam) {
    // ストロークを追加する処理
    ...
}
```

図6 作成したストロークを共有する RPC メソッドの例

3.4 MR 共創環境を同期させるための仕組み

MR 共創環境をそれぞれのユーザ間で差分の少ないものとするために、ユーザの操作を他の端末でも再現する仕組みとして RPC フレームワークを導入した。このフレームワークは接続したクライアント同士で、1つのクライアントが行った操作を他の全てのクライアントで再現する機能を提供する。

RPC フレームワークは Apple 標準の双方向通信フレー

```

# 一意なリクエストのID
id: 4845768485323367114
# 通信元のピアのID
peerId: -5323367114484576848
# RPC のメソッド
method: setStroke
# RPC のパラメータ
param:
  color: [255, 0, 255]
  radius: 0.01
  points:
    - [0.12345, 1.23313, 0.13455]
    - [0.13819, 1.31115, 0.14536]
    - [0.15321, 1.41234, 0.15678]
    - [0.16824, 1.51345, 0.16789]
    - [0.18327, 1.61456, 0.17890]

```

図 7 作成したストロークを共有する RPC スキーマ

ムワークの Multipeer Connectivity[13] を基盤として動作する。システムは RPC を管理する RPCModel を持ち、その中で操作対象となるオブジェクトを保持する RPCEntity を持つ。RPCEntity はキャンバスの操作や座標変換行列の算出など用途ごとに分けられ、それら特定の機能を実現する。RPCEntity に対する操作は、あらかじめ RPC メソッドとして定義される。操作を共有する RPC の例を 6 に示す。この例では MR 環境にストロークを追加する機能の提供を目的とした RPC メソッドを持つ。またその引数としてストロークを構成する色や半径、点を示す点群を持つ構造体を RPC パラメータとして持つ。この RPC メソッドの呼び出し例を図 5 に示す。この例は単純化のために 1 対 1 での通信を取り上げているが、1 対多（最大 8 台まで）の通信も想定している。他の端末に対して RPC を呼び出すためのスキーマは図 7 として定義される。スキーマに従ってリクエストを行うと、相手端末で RPC メソッドが呼び出され RPCEntity が変更される。MR 共創環境上のストロークやベジェの制御点などのオブジェクトは全て RPCEntity で管理されるため、複数のユーザ間での MR 共創環境の同期が可能となる。

ただクライアントで行われた処理をそのまま他の端末について一律に命令を行うだけではそれぞれの端末座標系は独立しているため、オブジェクトの描画状態を同期できない。これらの問題を解決するために座標系に依存した仮想オブジェクトの操作を伴う RPC メソッドを呼び出す前にあらかじめ座標変換処理を行う。命令元のクライアントで座標変換処理を行うのは、RPC を受け取る端末側に負担を与えないためである。この RPC フレームワークはあるクライアントで行われた処理の他のクライアントへの同期を目的としている。RPC を他クライアントに要求した時点で、各クライアントにはネットワークのトランザクシ

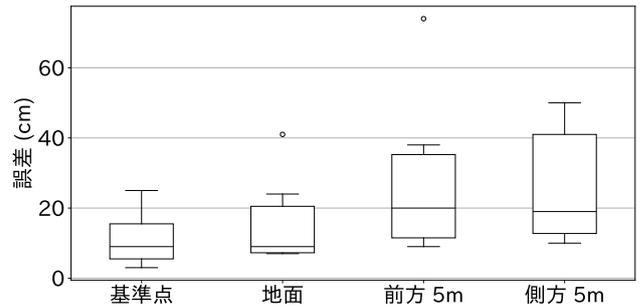


図 8 基準点からの距離と座標変換の誤差分布 (n=6)

ンや RPC スキーマ を解釈する負担が発生する。解釈の処理に加えて座標変換の処理による同期ずれを防ぐため、リクエストを受け取る側での処理を削減した。

4. 動作検証

同一の現実空間で同期・同位置の仮想オブジェクトを共有する人間同士が共同で創作活動を行うために、本システムが利用可能かを検証する。今回は 2 人が 2 台の Apple Vision Pro をそれぞれ装着して検証した。

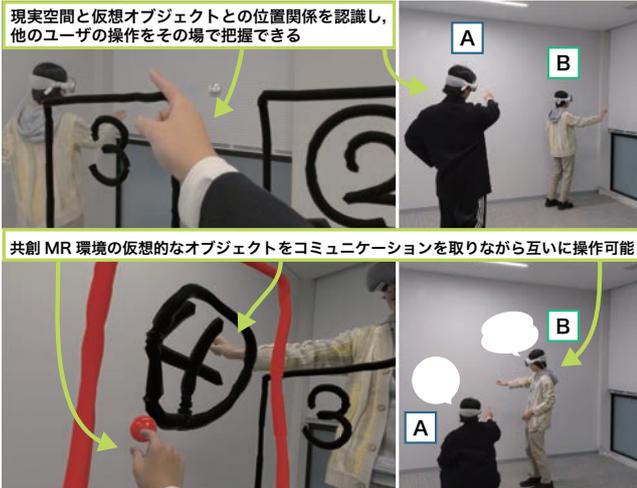
4.1 描画の対称性

それぞれのユーザが認識する複合現実空間にどの程度の位置ずれが存在するのかを検証する。このずれは現実空間上のオブジェクトに重ね合わせられた、仮想的なコンテンツに対してそれぞれのユーザから見える位置関係がどの程度ずれているのかを計測する。そのため複合現実空間内に存在する仮想的なコンテンツ同士の相対的な座標の誤差を測定しているわけではない。このアプリではそれぞれの仮想的なコンテンツに対して拡大縮小やせん断の操作は行われないため、同じ座標系の仕組みを採用する端末同士で同一の座標を交換したときにコンテンツに発生するずれによる影響は小さいと考えられる。計測は位置合わせを行った基準点、その真下の地面、基準点から水平に前方 5m の地点、基準点から水平に側方 5m の地点について行う。それぞれの地点で片方のユーザが閲覧するオブジェクトがもう片方のユーザーからどの程度離れた位置に存在しているかを測定する。計測した結果を図 8 に示す。結果から位置合わせを行った付近では高低差に関係なく 10cm から 25cm ほどの誤差が存在していると分かった。この誤差から基準点付近では、テーブル上のペンやリモコンなどの小さな小物に対する MR 共創環境での操作の同期は難しいが、テーブルや椅子などの比較的大きな家具へのインタラクションは共有できると考えられる。また 5m 離れた地点では 10cm から 40cm ほどの誤差が存在すると分かった。それぞれのユーザが滞在する同じ地点でおおよそ 20cm から 30cm を超える誤差が生じると同じ複合現実空間を共有している感覚は失われるため、複合現実空間を共有するのは難しいと考

ユーザ A の視点

現実空間と仮想オブジェクトとの位置関係を認識し、他のユーザの操作をその場で把握できる

俯瞰視点



共創 MR 環境の仮想的なオブジェクトをコミュニケーションを取りながら互いに操作可能

図 9 MR 共創環境での展示会場レイアウト検討の様子

えられる。

4.2 MR 共創環境の評価

教室での展示会の配置の検討を例として、MR 空間での共創活動が支援可能であるか検証する。検証の様子を図 9 に示す。システムをインストールした Apple Vision Pro を 2 台用意し、2 人がそれぞれ着用する。システムを起動して座標交換を行い、2 人で空間にスケッチを行って展示会の形式や配置場所を検討する。それぞれのユーザがレイアウトを考え、スケッチとして空間に残し、それを見た他のユーザがレイアウトを閲覧する。この活動からアイデアを発展させられる基盤があるかを確かめる。

MR 共創環境で他のユーザがスケッチした内容を現実空間との位置関係を踏まえて認識できると分かった。さらにそれぞれのユーザが互いにスケッチした内容を閲覧してコミュニケーションを取り、スケッチの内容を更新できると分かった。これによりシステムを複数の MR 共創環境を共有するユーザ同士が、アイデアを形にして共有しブラッシュアップするために利用できるのが確認できた。

5. まとめ・今後の展望

同一の複合現実空間で複数人のユーザが共同して創作を行える環境提案のためのプロトタイプシステムを実装した。座標交換や RPC が組み込まれたシステムによって 2 人で仮想的なコンテンツを MR 空間上に共有して編集する仕組みが実現できた。ビデオシースルーによって現実空間の環境情報を立体的な映像として視覚的に取り込み、仮想的なコンテンツを重ね合わせると共創の生産性向上に貢献できると思われる。

今後の展望としては 3 人以上での MR 共創環境の検証がある。今回は 2 人のユーザでの利用を検証した。今後は、多くの人数でも MR 共創環境が利用可能かの検証してい

く。また共創を支援する仕組みとして生成 AI による草案作成を利用する。創作活動ではまず構想を行う。しかし何もないところからいきなり構想を練るのは難しい。先行する具体的な案があれば、案に対しての変更・拡張という認知的負荷の低いプロセスで創作を進められる。また生成 AI が提供する多様な試案は、初心者のイメージ具現化を助けるだけでなく、熟練者同士でもチーム内での共通認識の構築を促す。この草案を起点に複数人が推敲を行う中で、AI が提示するアイデア以上の独自性のある共創が可能になると期待できる。

参考文献

- [1] Ghaoui, C. (2005). *Encyclopedia of human computer interaction*. IGI global.
- [2] Johansen, R. (1988). *Groupware: Computer support for business teams*. The Free Press.
- [3] Ens, B., Lanir, J., Tang, A., Bateman, S., Lee, G., Piumsomboon, T., & Billingham, M. (2019). Revisiting collaboration through mixed reality: The evolution of groupware. *International Journal of Human-Computer Studies*, 131, (pp. 81-98).
- [4] Schmalstieg, D., Fuhrmann, A., Hesina, G., Szalavári, Z., Encarnação, L. M., Gervautz, M., & Purgathofer, W. (2002). The studierstube augmented reality project. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 11(1), (pp. 33-54).
- [5] Regenbrecht, Holger T and Wagner, Michael and Baratoff, Gregory, Magicmeeting: A collaborative tangible augmented reality system (2002). In *Virtual Reality*. 6(3), (pp. 151-166). Springer
- [6] Rekimoto, J. (1996). Transvision: A hand-held augmented reality system for collaborative design. In *Proceedings of Virtual Systems and Multimedia* (pp. 18-20).
- [7] He, Z., Du, R., & Perlin, K. (2020). Collabovr: A reconfigurable framework for creative collaboration in virtual reality. In *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (pp. 542-554).
- [8] Xiao, T., Kim, K. G., Krukar, J., Subramaniyan, R., Kiefer, P., Schwering, A., & Raubal, M. (2024). VRResin: Externalizing spatial memory into 3D sketch maps. *International Journal of Human-Computer Studies*, 190, 103322.
- [9] Kovacs, B. I., Erb, I., Kaufmann, H., & Ferschin, P. (2023). Mr. sketch. immediate 3d sketching via mixed reality drawing canvases. In *2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (pp. 10-19).
- [10] Billingham, M., & Kato, H. (1999). Collaborative mixed reality. In *Proceedings of the First International Symposium on Mixed Reality*. 1.
- [11] Apple Inc. Apple Vision Pro (オンライン) <https://apple.com/apple-vision-pro/> (参照 2025-12-9)
- [12] Schneider, Philip J. (1990). An algorithm for automatically fitting digitized curves. In *Graphics Gems*, (pp. 612-626). Academic Press Professional, Inc.
- [13] Apple Inc. Multipeer Connectivity — Apple Developer Documentation (オンライン) <https://developer.apple.com/documentation/multipeerconnectivity> (参照 2025-12-9)