



環境の手がかりの即時的な 3D 再構成を用いた 非対称 MR コミュニケーションシステムの提案

末次 凜乃介¹⁾, 朝日 紅愛¹⁾, 小野 源太¹⁾, 大原 嶺¹⁾, 太田 貴士¹⁾, 鳴海 拓志¹⁾, 葛岡 英明¹⁾

1) 東京大学 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {suetsugu, asahi, genta.ono, rohara, ota, narumi, kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: 3D 再構成技術によって構築されたバーチャル環境内での遠隔通信は、現実世界に近いインタラクションをユーザに提供できるという点で、VR 分野において重要なテーマである。本研究では、即時的に写真から 3D 空間を再構築可能な技術を用いた、非対称な MR コミュニケーションシステムの利用可能性を検討した。参加者に対して提案システムに関する半構造化インタビューを行い、得られたユースケースの分析や既存システムとの比較を行った。分析の結果、システムが有用である具体的な場面や文脈、アバタを介することによる感情共有の課題と非言語的表現により生じる利点、システムに要求される環境の表現とユーザの安全性に関する課題が明らかとなった。

キーワード: HMD、拡張・複合現実、テレプレゼンス、三次元再構成

1. 序論

Mixed Reality (MR) 技術は、実環境とバーチャルな情報を統合することにより、ユーザの空間認識や作業理解を支援する手段として活用されている。これまでに VR では、複数人でバーチャル空間を共有することによって、身体的な存在感や没入感を伴う遠隔コミュニケーション技術が盛んに研究されてきた。近年ではこうした遠隔協調の枠組みを MR 技術に応用する試みも進んでおり、現地の実環境で作業を行うユーザと、その環境を遠隔から支援するユーザとの協調作業を支援する手法が提案されている [1]。

MR を用いた遠隔協調では、現地のユーザは実環境内で行動し、遠隔ユーザは現地をバーチャルに再構成した VR 環境で状況を把握する構成である、非対称 MR (Asymmetric MR) が設計上の重要な観点として提案されている [1]。しかし非対称 MR の実現のためには、撮影機材や計算量の制約により、360 度カメラや深度センサを用いた撮影、NeRF (Neural Radiance Fields) [2] や 3D メッシュ生成などを含む一連の準備に数時間を要する場合が多い。そのため、再構成の即時性や要求される専門的な撮影技術の高さが課題となっている。また非対称 MR において、ユーザ体験の非対称性を踏まえたユーザビリティの簡易的な評価 [4] は行われているものの、具体的なユースケースや設計上の考慮事項については十分に調べられていない。

本研究では、3D Gaussian Splatting (3DGS) [3] を用いることで、環境の手がかりを短時間で再構成して遠隔コミュニケーションに活用できる非対称 MR システムを提案する (図 1)。近年のグラフィックスハードウェアの性能向上や機械学習アルゴリズムの進展により、こうした 3D 再構成が現実時間に近い形で可能となった。とりわけ 3DGS は再構成精度と速度のバランスに優れている。本システムでは、



図 1: 本研究で実装したプロトタイプ

HMD に搭載されたパススルーカメラやスマートフォン付属のカメラを用いて現地ユーザが撮影した画像をもとに、クラウド上で 30 分程度の時間で 3D 環境を構築し、遠隔ユーザに対してバーチャルに提示することを可能とした。本項では試作したシステムをもとにユーザスタディを実施し、今後展開が予想される非対称 MR のユースケースや、設計上の考慮事項についてインタビューに基づいて整理した。

2. 関連研究

2.1 遠隔 MR コミュニケーションシステム

MR を用いた遠隔コミュニケーションシステムは、物理環境にバーチャルな情報を重畳表示することができる。遠隔コミュニケーションにおいては、遠隔地のユーザをアバターとして表示することで、ユーザに強い共同存在感 (co-presence) を提供することができる。実際に、ユーザが空間内における相互の身体動作や視線、ジェスチャなどを共有できるため、従来のビデオ会議システムと比較して、作業への集中や相互理解が促進され、高いタスクパフォーマンスを実現できることが報告されている [5]。

Fidalgo ら [1] は、ユーザが知覚する空間の実-バーチャルの組合せに基づき遠隔 MR システムを整理した。中でも実環境 MR-遠隔 VR 型の非対称 MR は、双方の作業文脈に応じた UI 設計が可能である点から有効性が指摘されている。Teo らは、360 度パノラマと 3D 再構成を組み合わせることで没入感の高い非対称 MR システムを提案したが、現地でのパノラマ撮影や処理の重い 3D メッシュ生成が課題となった [4]。こうした課題を解決することで非対称 MR の導入障壁が下がり、より広い応用がされるものと予想される。

2.2 3D 再構成技術

3D 再構成技術は著しい進展を見せており、特にニューラルレンダリング手法の発展によって、高品質かつ没入感の高い環境生成が可能となっている。中でも NeRF を用いた遠隔 MR コミュニケーションシステム [6] は、簡単なセットアップで高精細なバーチャル環境でのコミュニケーションを実現できるとされているが、推論時間や視点制限の課題が指摘されている。

一方、3DGS [3, 7] は、3D 空間上に分布するガウス関数の集合としてシーンを表現することで、高速な再構成とレンダリングを同時に達成している。物体表面の反射や透明な物体についても表現できるといった高品質な再構成が数秒から数分程度で完了し、レンダリングがリアルタイムで可能な点が特徴である。さらに、3DGS は 360 度カメラや深度センサといった専用機材を必要とせず、通常の RGB 画像群からの再構成が可能のため、モバイル環境や即時的な利用においても有用性が高い。

本研究では、3DGS を採用することで、3D 再構成の待ち時間が比較的短い非対称 MR コミュニケーションシステムを実装した。

3. 提案手法

3.1 現地ユーザによる環境の撮影と 3D 再構成

本システムでは、現地ユーザが Meta Quest 3 の外部カメラを用いて周囲環境を様々な方向や角度から網羅的に撮影することで、3DGS による 3D 空間の構成に必要な画像データセットを取得する。撮影用のアプリケーションでは、ユーザが既に写真を撮影した位置と向きを示すアンカーを空間上に表示させることができるため、ユーザは撮影の不足している実環境の領域を視覚的に把握することができる。この機能により、初心者でも網羅的かつ効率的に写真を撮影することができ、再構成されるバーチャル環境の品質の安定化が見込まれる。撮影した画像は HTTPS 経由でクラウドに送信され、3DGS による 3D 再構成が平均 30 分程度で行われる。本システムにより再構成されたバーチャル環境の例を図 2 に示す。

3.2 現地ユーザと遠隔ユーザの体験フロー

現地ユーザは 3D 再構成が完了した後、撮影時に決めた基準位置に移動してアプリケーションを起動する。一方遠隔ユーザは、クラウド上から 3DGS により再構成された空間データをダウンロードし、Unity 環境上にロードする。通

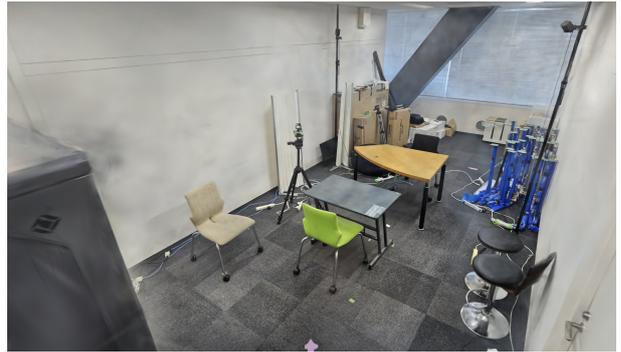


図 2: 提案手法により再構成されたバーチャル環境の例

信開始前に、遠隔ユーザはバーチャル空間の大きさや傾きを微調整することができ、現地環境との整合性を担保することが可能である。その後、システム利用中に移動すると考えられる範囲に障害物がないことを確認し、アプリケーションを起動する。

双方のユーザがアプリケーションを起動すると、現地ユーザはビデオパススルーによって実空間を視認しつつ、遠隔ユーザのアバターと対面する。一方遠隔ユーザは、バーチャル空間として再構成された 3D シーンの中に現地ユーザのアバターを確認することができる。両者のアバターの姿勢は、それぞれの HMD およびコントローラのポーズ情報を UDP 通信で送信・同期することで実現されており、自然なノンバーバル情報の共有が可能となっている。

4. ユーザスタディ

4.1 データ収集

試作したシステムを踏まえ非対称 MR コミュニケーションシステムの潜在的なユースケースと設計要件を整理するため、15 名の参加者 (男性 11 名、女性 4 名、平均 24.9 歳) に半構造化インタビューを実施した。参加者は、試作したシステムを 15 分程度使用したユーザ、またはデモ動画と補足説明によりシステムの特徴を十分に理解したユーザに限定した。参加者は機縁法によって集められた。参加者の募集は、インタビューの結果からそれ以上の新たなテーマが得られなくなるまで続けられた。インタビューは対面で行われ、1 回あたりの所要時間は約 15 分だった。

本研究では、「即時的に空間を構成できる非対称 MR システムのユースケース」「試作した非対称 MR システムを踏まえアバタに求められる事項」「即時的に空間を構成できる非対称 MR システムの設計上の考慮事項」の 3 つの項目に沿ってインタビューガイドを作成した。研究者はインタビューガイドに従って参加者にインタビューを行い、参加者の語りの内容に応じて追加の質問を行った。とりわけ、非対称であることに起因する事項や、即時的に空間を再構成できること特有の事項について詳しく説明を求めた。

4.2 データ分析

インタビュー内容から生成された逐語録に対して、再帰的テーマティック分析 [8] が行われた。本研究では、設定し

た3つの項目に沿った分析を行う演繹的アプローチが採用された。収集されたデータは複数回通読された後に、著者らによって初期コードが生成された。続いて、著者らによってコードの妥当性やコード間の関係性について議論が行われた。その後、すべての共著者による意見を踏まえ、コードの改訂とテーマの特定が再帰的に行われた。分析には、質的研究支援ソフトである ATLAS.ti¹が使用された。

5. 結果と考察

5.1 非対称 MR システムのユースケース

即時的に空間を再構成できる非対称 MR システム特有のユースケースとして、4つのテーマが特定された。

5.1.1 強い紐帯の関係間における生活空間の共有

家族や友人といった親密な関係性にある間柄において、生活空間を共有するユースケースが報告された。参加者 P11 は「離れて暮らす家族と話すとき、同じ空間にいる感じが出ていいと思う」とし、環境の手がかりの共有と共在感覚の喚起は親しい相手とのコミュニケーションにおいて有用であることを示唆した。P06 は「自分の部屋を見せるのはちょっと…でも親しい人だったら、別に見せてもいいかも」と述べ、空間の開示と心理的距離の影響を指摘した。また P04 が「部屋の中が相手に全部見えるのはちょっと抵抗がある」と述べたように、選択的な生活空間の共有等の機能の必要性も強調された。

5.1.2 価値を持つ空間の共有とコミュニケーション誘発

空間そのものが価値を持つ文脈において、現地ユーザが案内役として空間を紹介し、遠隔ユーザがそれを自由視点で体験する形式のユースケースが明らかとなった。とりわけ、観光、展示、または内見といった、視覚的な情報が重要な状況において平面映像では得られにくい体験を得られる点が高く評価された。P01 は「旅行先を友達に見せたい。こっちは歩き回って案内する感じで、向こうは好きに見て回れると良さそう」と述べ、非対称性が空間案内に適していると評価した。P08 も「物件の内見とか、一緒に見に行けないとき便利そう。その場にいる人がカメラマンになれる」と語った。このような、空間を「案内する／される」役割分担が明確化される点が非対称構成の利点であり、状況依存の空間価値の伝達に適していることが確認された。

5.1.3 現地のユーザとの大規模イベントの共有

ライブや脱出ゲームといったイベントでは、非対称構成が現地の臨場感と遠隔からの俯瞰視点を同時に実現することが指摘された。具体的には、現地ユーザが場の雰囲気や仲間を介する一方で、遠隔ユーザが VR 空間内で自由に視点を操作しながら体験を楽しむことができる点が利点として強調された。P05 は「ライブの熱気は、現地にいないとわからない。でも相手がそこにくれてると、こっちは盛り上がる」と述べた。P09 は「リアルだと前の人の頭が見えないけど、VR だと見やすい」とし、視点操作可能な非対称性の利便性を挙げた。このように、現地ユーザが場の雰囲気

を補完しつつ、遠隔ユーザが自由度の高い体験を得るという役割分担によって、それぞれのニーズに合わせた楽しみ方を選べる柔軟な体験を可能とすることが示唆された。

5.1.4 実環境に依存した遠隔協調作業支援での活用

実作業を伴う協調作業支援では、現地ユーザが身体的操作を担い、遠隔ユーザが上位から指示を出すという非対称な役割分担が、情報伝達の効率性を高め得ることが示唆された。P03 は「うちの親にスマホ教えるとき、横にいて教えるの難しい。こういうのがあれば便利そう」と述べ、IT 支援での活用可能性を挙げた。P14 は「教育で使えそう。現場にいる人が手本見せて、遠隔の学生がマネするとか」と、教育への応用可能性を語った。

5.2 非対称 MR システムにおけるアバタの役割

試作した非対称 MR システムを踏まえアバタに求められる事項として、2つのテーマが特定された。

5.2.1 ボディランゲージによる言語コミュニケーションの補完

全身アバタによる指差しや身体の向きといったボディランゲージは、言語情報を補完する情報として有効に機能していた。P06 は相手の動きが共有されることで「相手の考えていることを読み取れる」と述べ、ジェスチャーによるコミュニケーションの補助的機能について言及した。P10 は「指さして説明されると、どこを見ればいいのかわかりやすい」と述べ、遠隔ユーザが実環境に対する指示が可能である点を評価した。このようにジェスチャーを俯瞰できることで、コミュニケーションの補助や環境への指示といった、2D 映像にはない強みが確認された。

5.2.2 表情の表現力不足による感情共有の課題

アバタはプライバシーを保ちつつ存在感を表現できるが、非対称環境では視線や表情といった繊細な感情表現が失われやすい。全身を用いた非言語的表現が評価された一方で、感情表現の不足はユーザによる懸念事項として顕在化した。P02 は「相手の気持ちが読み取りにくい。表情がないと、怒ってるのかどうかもわからない」とし、アバタの表現力の制限について述べた。一方で、P07 は「顔出ししたくないときに、こういうのあると気が楽」とアバタの持つ利点を挙げており、匿名性や参加の気軽さとのトレードオフも強調された。今後は、フェイストラッキングを通じた表情や視線のアバタへの反映や、利用文脈に応じた表現能力の切り替え機能を設計に組み込むことが有用であると考えられる。

5.3 即時的に空間を構成できる非対称 MR システムの設計上の考慮事項

今後類似したシステムを設計するうえでの考慮事項として、5つのテーマが特定された。

5.3.1 環境に対するインタラクションの必要性

遠隔ユーザは実空間と断絶された環境にいるため、触覚やオクルージョンといった物理的なインタラクションを欠いている。これにより、バーチャル空間への没入感が妨げられる場面があった。P13 は「相手が持っているものに手を出したら、すり抜けちゃうのが変だった」と述べており、インタ

¹ATLAS.ti <https://atlasti.com/>

ラティブな行動の実現が求められている。また、P11は「VR側でオクルージョンが正しく機能していないとコミュニケーションが阻害されそう」と述べ、環境とのインタラクションの不自然さがコミュニケーションの障壁となり得ることへの懸念を示した。

5.3.2 リアルタイム性の担保による動的環境への対応

再構成が静的である場合、環境の動的変化（光・物体の移動など）が反映されず、遠隔ユーザが状況を見誤るリスクがある。P12は「画面の中では昼なのに、現地は暗くなった。状況がわからない」と指摘しており、遅延なく変化を反映する技術的改善が求められる。また、P14は「現実のレイアウトを変えても、リアルタイムに反映されないのは問題かもしれない。例えば、紙にペンで何か書いても共有できない」と述べ、リアルタイム性の不足がコミュニケーションの制限につながることを指摘した。今回提案したシステムは、ユーザが気軽にその場の環境を3D再構成することができるという特徴を有しているものの、よりリアルタイム性を高めることにより、システムの適用可能性が広がることが示唆された。

5.3.3 3D再構成にかかる労力の軽減

現地空間の3D再構成は、現地ユーザの撮影負荷や再構成の待ち時間が懸念されており、現実的な利用の障壁となり得る。P01は「撮るのが面倒。あとどこ撮ればいいのかわからない」と述べ、より明示的なガイド機能やインクリメンタルな再構成が必要なことを示唆した。また、再構成に関する待ち時間についてはインタビューで多く指摘がされており、P04は「10分くらいなら待てる」と述べた。本システムで利用している3DGSは他の3D再構成技術と比較して再構成にかかる時間的・計算量的なコストは低いものの、依然としてユーザの物理的・心理的負荷が大きいため、ユーザが受ける負荷のさらなる軽減が必要であると言える。

5.3.4 空間共有におけるプライバシー上の懸念

空間の可視性が一方であるため、現地ユーザは自環境の開示に対し不安を抱くことがある。P04は「片づけてない部屋とか、見せたくない部分もある」と述べ、P11は自宅を共有する際の利用について「自宅は掃除しないといけない」と述べた。このように、自宅のようなプライベートな空間で利用する際の心理的抵抗や共有のために事前の作業が必要であるという点が利用のための障壁となっている。生活空間の開示に対する心理的抵抗を軽減するためには、特定のオブジェクトの隠消処理[9]、共有範囲の選択的制御といったプライバシー保護機能の導入が今後の設計において重要であることが示唆された。

5.3.5 非対称MRによるユーザの安全性の確保

遠隔ユーザは、共有されたバーチャル空間と実空間の物理的な整合性の無さにより、現実環境の物体との衝突リスクを常に抱えている。現地ユーザとの空間一致を前提としない非対称構成では、特に慎重な配慮が必要である。P09は「いきなり壁にぶつかりそうになった。見えてる空間と違って怖い」と述べ、明示的な空間境界の提示や、システム側

からの移動範囲の事前アラートといった、安全設計を支援するフィードバック機構の実装が必要不可欠である。

6. 結論

本研究では、3D Gaussian Splattingを用いて即時的に現地環境を再構成することの可能な非対称MRコミュニケーションシステムを試作した。インタビュー調査を通じて、強い紐帯関係にある相手との生活空間の共有等、多様なユースケースにおける本システムの活用可能性が確認された。また、アバタを介した非対称構成における表現力の限界、環境とのインタラクション設計や安全性の確保など、非対称MR特有の課題も明らかとなった。今後は、今回特定されたユースケースを踏まえ、具体的なシナリオを想定した大規模なユーザ実験を実施し、本システムの有効性を定量的・定性的に評価する予定である。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 (23H00488, 25K03172)、および立石科学技術振興財団研究助成の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] Fidalgo et al., A survey on remote assistance and training in mixed reality environments, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, pp.2291-2303, 2023.
- [2] Mildenhall et al., NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis, *ACM Transactions on Graphics*, 2020.
- [3] Kerbl et al., 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering, *ACM Transactions on Graphics*, 2023.
- [4] Teo et al., A Technique for Mixed Reality Remote Collaboration using 360 Panoramas in 3D Reconstructed Scenes, *Proceedings of the 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp.1-11, 2019.
- [5] Yin, Jianing, et al., A Comparison Study Understanding the Impact of Mixed Reality Collaboration on Sense of Co-Presence, *IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2025.
- [6] 太田ら, Instant-NGPによる実環境のモデリングおよびアバタによる身体化を用いた没入型遠隔コミュニケーションシステムの試作, 第73回複合現実感研究会, 2024.
- [7] Kleinbeck et al., Multi-Layer Gaussian Splatting for Immersive Anatomy Visualization, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, pp.2253-2363, 2025.
- [8] Braun et al., Reflecting on reflexive thematic analysis, *Qualitative Research in Sport, Exercise and Health*, 11(4):589-597, 2019.
- [9] 太田貴士, 時間的に連続な複数画像から構築されたNeRF表現において人物オブジェクトを削除するパイプラインについての検討, 電子情報通信学会 IE 研究会, 2025.