



トレイグジスタンス・アバターロボットによる XR遠隔対話・作業システムに関する研究

An XR remote spatial collaboration system using a telepresence avatar robot

米田 悠人¹⁾, 小島 優希也²⁾, 福地 庸介²⁾, ヤエム ヴィボル³⁾, 池井 寧²⁾, 西内 信之²⁾

Yuto YONEDA, Yukiya OJIMA, Yosuke FUKUCHI, Vibol YEM, Yasushi IKEI and Nobuyuki NISHIUCHI

- 1) 元 東京都立大学システムデザイン研究科情報科学域 (〒 191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6, yutonishiuchilab@gmail.com)
2) 東京都立大学システムデザイン研究科情報科学域 (〒 191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6, yukiya-ojima@ed.tmu.ac.jp, {fukuchi, ikei, nnishiuc}@tmu.ac.jp)
3) 筑波大学大学院 システム情報系 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, yem@iit.tsukuba.ac.jp)

概要: 本研究では、テレイグジスタンスロボットと XR 技術を用いて遠隔から作業に参加する操作者の言語・非言語コミュニケーションと空間操作を強化するための XR 遠隔対話・作業システムを構築した。遠隔参加者の表情を 3D 表示のリアル CG アバターで再現しロボットに投影する自然な対話環境を実現した。評価実験では、2D 表示と比較して 3D 表示は対話者の存在感や非言語情報の伝達を有意に向上させ、移動可能なロボットによる空間作業タスクを通じて提案システムの有効性が示された。

キーワード： テレイグジスタンス，遠隔共同作業，リアル CG アバター，拡張現実 (XR)

1. はじめに

近年の B5G (Beyond 5G) の進展により遠隔地とのライブ映像通信は各段に容易となった。しかしながら実際の現場の 3 次元の物理環境にいて現場作業者と対面して行動するときに得られる自然なアウェアネスには遠く及ばない。テレイグジスタンスは、人間が遠隔の実空間に'実質的に'存在して行動するための技術を構築し、自然なアウェアネスに基づいた作業を可能とするものである。このテレイグジスタンスの概念を実現するには極めて高度な技術が必要であり、そのための開発が継続して行われている [1]。

本研究ではテレイグジスタンスロボットと XR 技術を融合させた新たな遠隔コミュニケーションシステムを開発している。現在、簡易なテレプレゼンスシステムで用いられている平面ディスプレイによるアバター表示 [2, 3, 4] では、相手話者の存在感や環境への注目などの非言語情報が不足しているため、空間的な対象を含む共同作業には課題がある。

これに対して我々は、ロボットアバターを用いて遠隔から参加している対話作業者の存在感を高めると同時に、作業中にその作業者が環境を注目する行動を分かりやすく伝えるリアル CG アバターを構築した。さらに実空間オブジェクトおよび VR 空間オブジェクトを対象とした XR コミュニケーションを提供する中でテレイグジスタンスロボットとそのアームを用いた共同作業を実証することにより、上記の課題への対処を試みた結果を示す。これらにより遠隔コミュニケーションにおける自然な対話と作業を可能とするための特性について考える。

2. XR 遠隔対話・作業システム

本研究で構築した XR 遠隔対話・作業システムの全体構成を図 1 に示す。遠隔対話作業者 A は左側の遠隔空間 A から自分のテレグジスタンスロボットを現場作業空間 B で操作する。遠隔対話作業者 A は、HMD (Head Mounted Display) に付属した右手コントローラでロボットアームを制御する。この際、コントローラの空間位置の移動差分値 (ボタンホールド時) をロボットアームの先端の目標位置の変化量とした。またトリガーボタンの押し込み量でグリップの開閉を制御した。さらに左手コントローラの円形トラックパッドでロボットの直線速度と旋回速度を制御した。全体制御は Unity (2019.4.39f1, Unity Technologies) を用いた。テレグジスタンス・アバターロボットには全天球カメラ 2 台 (THETA Z1, Ricoh) が搭載されており、360 度ラ

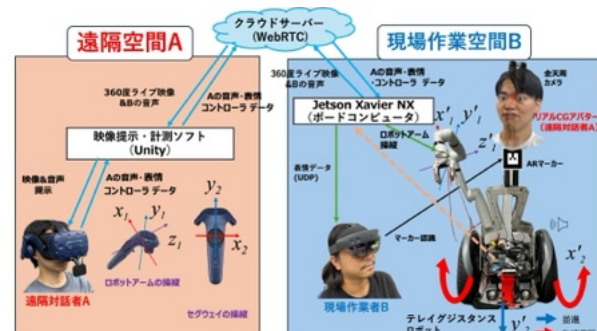


図 1: XR 遠隔対話・作業システムの概要.

イブ立体視映像 (4K, 30fps) がボードコンピュータ (Jetson NX, NVIDIA) でクラウドサーバに送信され遠隔対話作業
者 A の HMD (Vive Pro Eye, HTC) に提示された。

現場作業空間 B では, MR グラス (HoloLens 2, Microsoft) を装着した現場作業員 B が, テレイグジスタンスロボットのカメラの位置に提示された遠隔対話作業員 A のリアル CG アバターと対話する。リアル CG アバターの表情は, 遠隔対話作業員 A が装着している HMD で計測された頭部回転, 眼球と口元領域の位置変化データの着信後に再現された。

2.1 遠隔対話作業員 A のリアル CG アバターの構築

遠隔対話作業員 A のリアル CG アバターの 3D モデルは, iPhone 13(LiDAR 搭載) と Scaniverse 3D scanner app. (Niantic, Inc.) で構築した。開発した手順に基づき, この形状データからブレンドシェイプ用のモデルを作成した [5]。

2.2 遠隔対話作業員 A の表情情報

HMD に内蔵された眼球運動センサとリップトラッカー (VIVE Facial tracker : HTC 社) で眼球 4 自由度, 頭部 6 自由度, 口元 11 自由度の表情データを取得した。

2.3 現場作業空間 B でのリアル CG アバターの表示法

遠隔対話作業員 A のリアル CG アバターの 3D モデルを現場作業員 B が装着する HoloLens 2 に内蔵し, テレイグジスタンスロボットのカメラ部に重畳表示した。カメラ下部に設置した AR マーカの位置をソフトウェア (Vuforia Engine, PTC, inc.) で取得し, リアル CG アバターをカメラの移動に追従させた。

3. 現場知覚・対話性の定性評価実験

3.1 実験目的

遠隔地から現場空間に参加し, その場の作業員と共同作業を行うシステムの有効性を定性的に検証した。現場空間の実空間オブジェクトと共有 VR オブジェクトを現場作業員 B がアバターへの対話で遠隔対話作業員 A に指示して, A がそれらの写真をホワイトボードから検索した。両者は質問紙でシステムを評価した。これは現場 (工場など) でのメンテナンス作業を共同で行う状況を想定している。

3.2 実験参加者と提示条件

実験参加者は健康な大学 (院) 生 12 名 (男性 8 名, 女性 4 名, 21-24 歳, 平均年齢: 22.6) である。これらを遠隔対話者 A と現場作業員 B の役割の 2 グループに分け, A, B の各 1 名を 1 組として全 6 組とした。現場作業員 B が装着する MR グラス (HoloLens 2) に表示する遠隔対話者 A のリアル CG アバターは図 2 に示す 2D 表示 (対比手法) と 3D 表示 (提案手法) の 2 種類とした。

3.3 実験空間のレイアウトと検索対象オブジェクト

実験空間のレイアウトを図 3 に示す。対象は, 実空間オブジェクト (紙コップ, ペン, 消しゴム, 書籍, ノート, ハサミ, ホチキス, カード) 16 点と, 3D 共有 VR オブジェクト (3 種類の紙コップと 4 種類の円筒) である。検索対象は, 実空間オブジェクトと VR オブジェクトのそれぞれを 3 種類のサイズの白黒写真として印刷した紙片であり, ラ

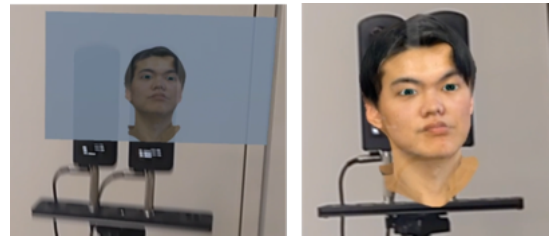


図 2: 遠隔対話者 A の提示アバター左 (2D/右 3D)

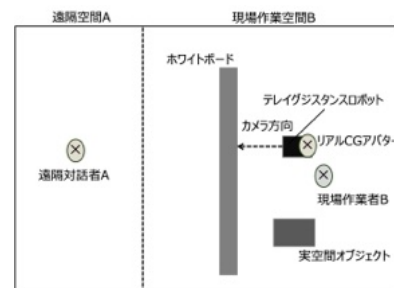


図 3: 現場知覚・対話性評価実験のレイアウト



図 4: 検索対象を貼付したホワイトボード ((a) 実空間オブジェクトの写真, (b) VR オブジェクトの写真)

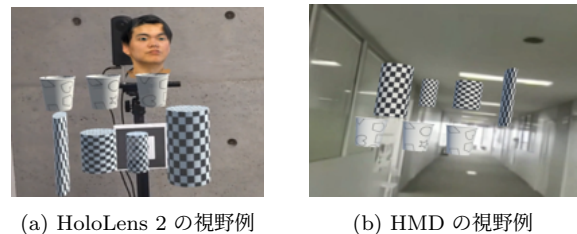


図 5: 対話者間で共有した VR オブジェクト

ンダムな角度で現場作業空間 B のホワイトボードに貼付した (図 4)。実空間オブジェクトは現場作業空間 B に配置し, 共有 VR オブジェクトは遠隔対話作業員 A と現場作業員 B の両者に提示した (図 5)。

3.4 実験タスクおよび実験手順

現場作業員 B が提示したオブジェクトの写真がホワイトボードに何個存在するかを遠隔対話作業員 A が探索し回答した。まず現場作業員 B が任意の実空間オブジェクトを一つ手に取り, アバターに (カメラに) 近づける。遠隔対話作業員 A は HMD による立体視映像でその実空間オブジェクトを良く観察した後, テレイグジスタンスロボットの視点を移動してホワイトボードの全体を見てそのオブジェクトの 3 つのサイズの写真がどこにいくつあるかを検索する。写真の位置を口頭で現場作業員 B に説明して回答する。現場作

業者 B は遠隔対話業者 A のアバターが探している頭部と視線の方向を HoloLens 2 で観察しつつ対話する。複数の実空間オブジェクトについて繰り返す。次に VR オブジェクトを対象とし、現場業者 B が共有表示されている VR オブジェクトの中から一つを指定し、実空間オブジェクトと同様に遠隔対話業者 A がその写真を検索し回答した。

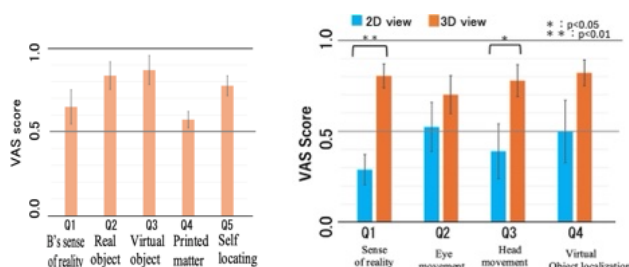
3.5 質問紙の評価項目

遠隔対話業者 A と現場業者 B は、次の項目に Visual Analog Scale (VAS) で回答した。遠隔対話業者 A の質問紙は、現実感 (Q1), 実空間オブジェクト・VR オブジェクト・ホワイトボード上印刷物の明確さ (Q2, Q3, Q4), 自己位置把握 (Q5) の評価を求めた (0: 全く分からない, 1: 完全に分かる)。現場業者 B の質問紙は、存在感 (Q1), リアル CG アバターの視線運動・頭部運動が対象物を示す明確さ (Q2, Q3), VR オブジェクト定位 (Q4) について、アバターの 2D 表示と 3D 表示の両者の評価を求めた (0: 全く不明確, 1: 完全に明確)。

3.6 実験結果及び考察

3.6.1 遠隔対話者 A の質問紙への回答

遠隔対話業者 A (HMD 側) の回答を図 6a に示す。現場にいる B の現実感 (Q1) は中間値より高く評価され、現場空間の把握が十分であることが確認された。指示された実空間オブジェクトと VR オブジェクト (Q2, Q3) の明確さは特に高く評価され、これは実物への接近観察と CG の高品質さによるものと考えられる。実空間オブジェクトとバーチャルオブジェクトがほぼ同等の明確さで視認できたことは、本システムの XR 環境の実用性を示している。自己位置感覚も良好である。他方、ホワイトボード上の印刷物の明確さ (Q4) が相対的に低く評価された。これは映像の解像度の制約、および現場の照明不足が原因と推測される。



(a) 遠隔対話業者 A の評価結果, n=6, SE. (b) 現場業者 B の評価結果, n=6, SE.

図 6: 現場知覚・対話性の評価結果

3.6.2 現場業者 B の質問紙への回答 (2D/3D 表示)

現場業者 B (HoloLens 2 側) の回答を図 6b に示す。リアル CG アバターの 3D 表示が 2D 表示より全ての項目で高評価を得た。2 水準 (2D/3D) 対応ありの t 検定 (MS Excel, Mac ver.16.86) で、アバターの存在感 (Q1), アバターの頭部回転による話題対象の明確さ (Q3) で 3D 表示が 2D 表示よりも統計的に有意に高いことが示された。他方、アバターの視線運動による話題対象の明確さ (Q2) は評価が低く、さらに 2D/3D 間で有意差がなかった。これは現場

業者 B の観察位置や、HMD の視野制限から A の眼球運動が小さいことによると考えられる。また、2D 表示の評価の分散が大きかったのは、2D 表示のときの側面からの視認性が劣ることが挙げられる。

4. 空間共同作業の評価実験

4.1 実験目的

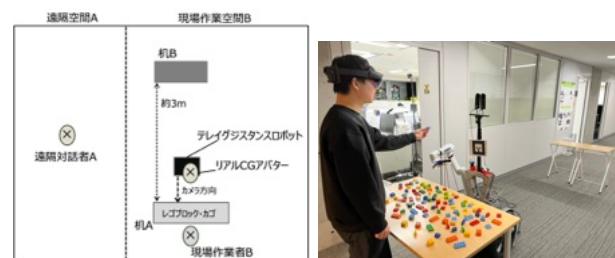
実験者があらかじめ用意した VR オブジェクトによって目的の空間形状を示し、実験参加者が対話による共同作業を行って実空間のパーツを集めてその目的形状を作り、それをロボットアバターで運搬するモデル実験を行った。これにより、リアル CG アバターの非言語的空間特徴を通じた意図伝達、VR オブジェクトに関する情報交換を含む遠隔共同作業について評価した。

4.2 実験参加者

実験参加者を遠隔対話業者 A と現場業者 B の役割の 2 グループに分け、A, B の各 1 名を 1 組として 4 組が実施した。データの不備から 1 名の参加者を除き、分析対象は 7 名 (男性 3 名, 女性 4 名, 21-24 歳, 平均年齢: 23.0) である。

4.3 実験環境

実験中の位置関係を表すレイアウトを図 7a, 現場作業空間 B の様子を図 7b に示す。現場作業空間 B には、2 つの机 A, B を約 3m 離して配置した。遠隔対話業者 A と現場業者 B に、同じ外形の VR オブジェクトを前章の実験と同様の方法で HMD と HoloLens 2 に表示した。



(a) 実験空間のレイアウト (b) 現場作業空間 B の様子

図 7: 空間共同作業実験の概要

4.4 実験タスクおよび実験手順

本提案システムの有効性を検証するために、空間中で XR 共有している VR オブジェクトを完成目標としたレゴブロックパーツの組立作業と、テレグジスタンスロボットによる運搬作業を実施した。実験参加者は役割を交互に交代してタスクを実施し、現場業者 B の役割ではリアル CG アバターの 2D 表示 (対比手法) と 3D 表示 (提案手法) の 2 条件で実験を行った。実験手順は、まず VR オブジェクトの形状や特徴を両参加者が確認し、次にレゴブロックの選定と組み立てを両者で議論しながら行った。その後、現場業者 B が完成品をカゴに収納して遠隔対話業者 A が操縦するロボットアームのグリップ部に渡し、遠隔対話者 A がテレグジスタンスロボットの位置を遠隔操作して、カゴを約 3m 離れた机 B まで運び、配置した。

4.5 質問紙の評価項目

遠隔対話作業者 A の質問紙は、前章実験の質問紙に加えて、トレイグジスタンスロボットの性能評価、および遠隔対話・遠隔作業に対する満足度評価を取り入れ、回答には VAS を用いた。評価項目は臨場感 (Q1), 実空間オブジェクト・VR オブジェクト・机上レゴブロックの明確さ (Q2, Q3, Q4), 自己位置把握 (Q5), テレイグジスタンスロボットとロボットアームの操縦性 (Q6, Q7), 酔いの程度 (Q8, Q9), および満足度 (Q10, Q11) である。アンカーは全く良くない 0 から最大に良いが 1 に相当する。現場作業者 B の質問紙の評価項目は、存在感 (Q1), リアル CG アバターの視線運動・身体回転が対象物を示す明確さ (Q2, Q3), VR オブジェクト定位 (Q4), 満足度 (Q5) である。リアル CG アバターは 2D 表示, 3D 表示の両者について回答を求めた。

4.6 実験結果及び考察

4.6.1 遠隔対話作業者 A の回答

遠隔対話作業者 A (HMD 側) の回答を図 8 に示す。VAS の評価は絶対評価とし、0.5 以下を「低評価」、0.51~0.69 を「中評価」、0.7 以上を「高評価」とした。

臨場感 (Q1), 実空間オブジェクト・バーチャルオブジェクトの明確さ (Q2, Q3), 自己位置把握 (Q5), ロボットの操縦性 (Q6) は高評価で、現場空間に対する高い臨場感やロボット操縦が円滑であったことが示唆された。他方、遠隔対話者 A はロボット操縦時に酔いを感じやすい評価 (Q8, Q9) であり、身体へのフィードバックおよびカメラ振動の抑制が今後の課題である。満足度の評価 (Q10, Q11) は中程度であり、基本的な期待には応えたが、さらなる改良が必要であることを示している。実験参加者のコメントによれば、遠隔地からの映像が時折遅延したことが不満の原因であることが示された。これは学内の無線 LAN の変動によることが考えられるため、高速通信環境の確保は重要である。

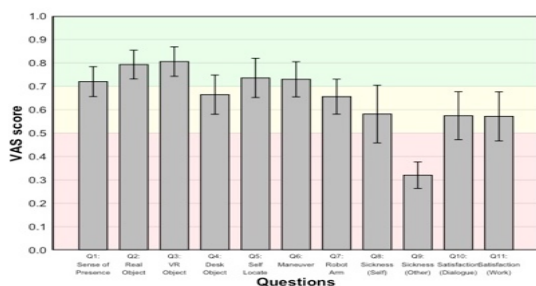


図 8: 空間共同作業の遠隔対話作業者 A の回答, n=7, SE.

4.6.2 現場作業者 B の回答

現場作業者 B (HoloLens 2 側) の回答を図 9 に示す。Q4 を除く全ての質問項目でリアル CG アバターの 3D 表示が 2D 表示よりも高い評価を得た。空間的共同作業のコミュニケーションにおいて 3 次元表示が明確に有効であることが示された。Q4 は VR オブジェクトの定位であるが、VR オブジェクト自体の表示はどちらの条件においても 3D 表示となっているため差は生じず、かつ非常に高い評価値であった。

Q4 以外の評価項目について 2 水準 (2D/3D) 対応ありの t 検定の結果、全ての項目で 3D 表示が 2D 表示よりも統計的に有意に高いことが示されている。3D 表示での高い満足度は、遠隔対話者 A の存在感とリアリティの向上、およびアイコンタクトの可能性が貢献したと考えられる。しかしながら、3D 表示での視線を含む表情の評価はまだ十分とはいえず、より詳細で自然な表情を再現することができれば満足度もより一層高まると考えられる。

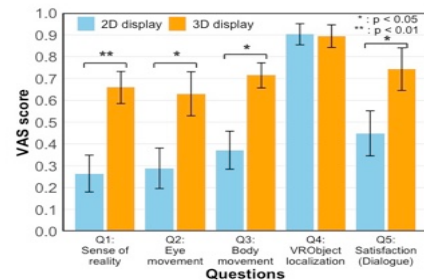


図 9: 空間共同作業の現場作業者 B の回答, n=7, SE.

5. 結論

本研究では、トレイグジスタンスと XR 技術を統合したアバターロボットを開発し、XR 対話を中心とした性能評価を行った。リアル CG アバターの 3D 表示は、遠隔の対話者の存在感と対話の対象となっている 3D オブジェクトへの認識状態の伝達を有意に向上するとともに、HMD による 360 度立体視映像が高い臨場感を伴った対話を可能とすることが確認された。他方、移動可能なロボットアバター操作では映像酔いが誘発され、身体感覚の提示を省略した場合の欠点があったため確認された。我々の研究グループでは歩行の身体感覚提示を常用するため映像酔いが問題となることがほとんどないが、今後は全身の運動感覚を含む XR コミュニケーションシステムとそれに基づく物理的タスクの効率的な実行環境を構築する予定である。

謝辞 本研究は科学研究費補助金 JP19K20325, 21H04883, 18H04118, 21K19785, 東京都立大学ローカル 5G プロジェクトおよび電気通信普及財団の助成を受けたものである。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] Tachi Lab, : テレイグジスタンス (2025), <https://tachilab.org/>, (2025-7-12).
- [2] Double 3 - The telepresence robot for the future (2019), <https://www.doublerobotics.com/>.
- [3] temi Global Ltd., : temi Robots: <https://www.robotemi.com/>, (2025-7-12).
- [4] Lenz, C., et al.: NimbRo wins ANA Avatar XPRIZE Immersive Telepresence Competition: Human-Centric Evaluation and Lessons Learned, *arXiv preprint arXiv:2308.12238* (2023).
- [5] Kato, R., Kikuchi, Y., Yem, V. and Ikei, Y.: Reality Avatar for Customer Conversation in the Metaverse, in Yamamoto, S. and Mori, H. eds., *Advances in Artificial Intelligence and Data Engineering*, Berlin, Heidelberg (2022), Springer-Verlag.