



# 遠隔 MR ロボットアーム制御による スマートな 3D スキャンシステム

A Smart 3D Scanning System via Remote Control of a Robot Arm in Mixed Reality

宇佐美 龍斗, 渡邊 企章, 具志 祐希, 筒井 秀斗

渡辺 圭貴, 加納 一馬, 相川 雄也, 志村 魁哉, 林田 望海

浦野 健太, 米澤 拓郎, 河口 信夫

名古屋大学 (〒 464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

{usami,kisho,gushi,tsutsui,yoshiki,kazuma,aichi,kaiya,linda}@ucl.nuee.nagoya-u.ac.jp

{urano,takuro,kawaguti}@nagoya-u.jp

**概要:** VR ヘッドセットは広く社会に普及しつつあるが、ヘッドセットを通じた実社会へのアクチュエーションはまだ十分に活用されていない。本研究では、一般的な VR ヘッドセットを通じて遠隔地のロボットアームを用いた直感的な作業が実現できる枠組みを構築する。そして、遠隔作業の例として 3D スキャンに着目し、RGB-D カメラを搭載したロボットアームにより、その実現を目指す。このシステムは VR を用いた没入型の遠隔作業を実現すると共に、離れた場所の物体を VR 空間に取り込むことを可能にして現実と仮想現実の連携を強化するものである。

**キーワード:** 遠隔ロボティクス, 複合現実, 3D スキャン

## 1. はじめに

ロボット工学は、進歩する VR(Virtual Reality) 技術を効果的に応用する工学分野の一つとなっている。これまでの研究では、VR を用いた没入型ロボット制御によるユーザーへの遠隔地のリアルな体験の提供と操作の質を向上が示されている [1],[2]。VR ヘッドセットで遠隔地のロボットを制御する VR ロボット技術は、遠隔地からの直感的な作業を可能にする。VR ロボット技術が進歩し、より複雑な作業を処理できるようになれば、遠隔地からの VR ベースの労働という新しい雇用形態を生み出す可能性がある。

VR を介したロボットの遠隔制御で複雑な作業を達成するには、現実空間と VR 空間との必要な情報の整合と遠隔地の没入型視覚体験の提供が不可欠である。さらに、VR ロボット技術が普及するためには多くのユーザーが利用できるコモディティ化されたデバイスの使用が重要である [3]。

そこで本研究では、VR ヘッドセット、ステレオカメラ、ロボットアームを使用して遠隔地で作業を実行できるシステムを提案する。このシステムでは、ステレオカメラによる遠隔地の現実空間の映像に VR 空間の情報を表示させた、遠隔 MR(Mixed Reality) 空間でのロボットアーム制御による作業を行う。ステレオカメラの VR180 映像によりユーザーに没入感のある映像体験を提供し、より直感的な作業が可能になる。また、WebXR と WebRTC によってウェブ上で VR ヘッドセットとの通信システムを構成しているため、既存のほとんどの VR ヘッドセットであればアクセスしやすいシステムであり、低遅延かつ操作者の切り替えも容易で

ある。

提案するシステムを用いたタスクとして、カラー画像と深度画像を同時に取得できる RGB-D カメラを取り付けたロボットアームを操作し、遠隔地の物体の 3D スキャンを行う。タスクに 3D スキャンを選択した理由は、ハプティクスの実装が不要で物品破損の可能性も低い非接触の作業かつロボットアームの先端姿勢を柔軟に変えられる特性を生かせるためである。スキャンした物体の RGB データ、深度データをもとに、その物体の三次元像を VR 空間上に再構成する。このようにスキャンした物体の立体的構造を取得する技術は三次元再構成と呼ばれ、現実空間の環境を VR 空間に再現するデジタルツイン技術の 1 つである。

デジタルツインは現実空間のデータをより多く収集し、サイバー空間でより深く応用して更なる価値をもたらす技術であり、産業において大きな関心を集めている [4]。VR とロボットアームによる遠隔 3D スキャンが実現すれば、遠隔地にある現実の物体や空間を仮想空間で即座に閲覧できるようになり、デジタルツイン分野の発展に貢献する。

RGB-D カメラの点群を使用した三次元再構成では、各フレームの点群を位置合わせしてモデルを構築しなければならない [5]。これを効率的に正確に行うにはフレーム間のカメラの姿勢変換行列を求める必要があるが、人の手でこの作業を行うと、整合が上手くいかず位置をロストしてしまう問題がある [6]。一方ロボットアームを使うと各ジョイントの角度から手先位置角度を直接計算できるため、この点からもロボットアームを用いた三次元再構成は有用であ

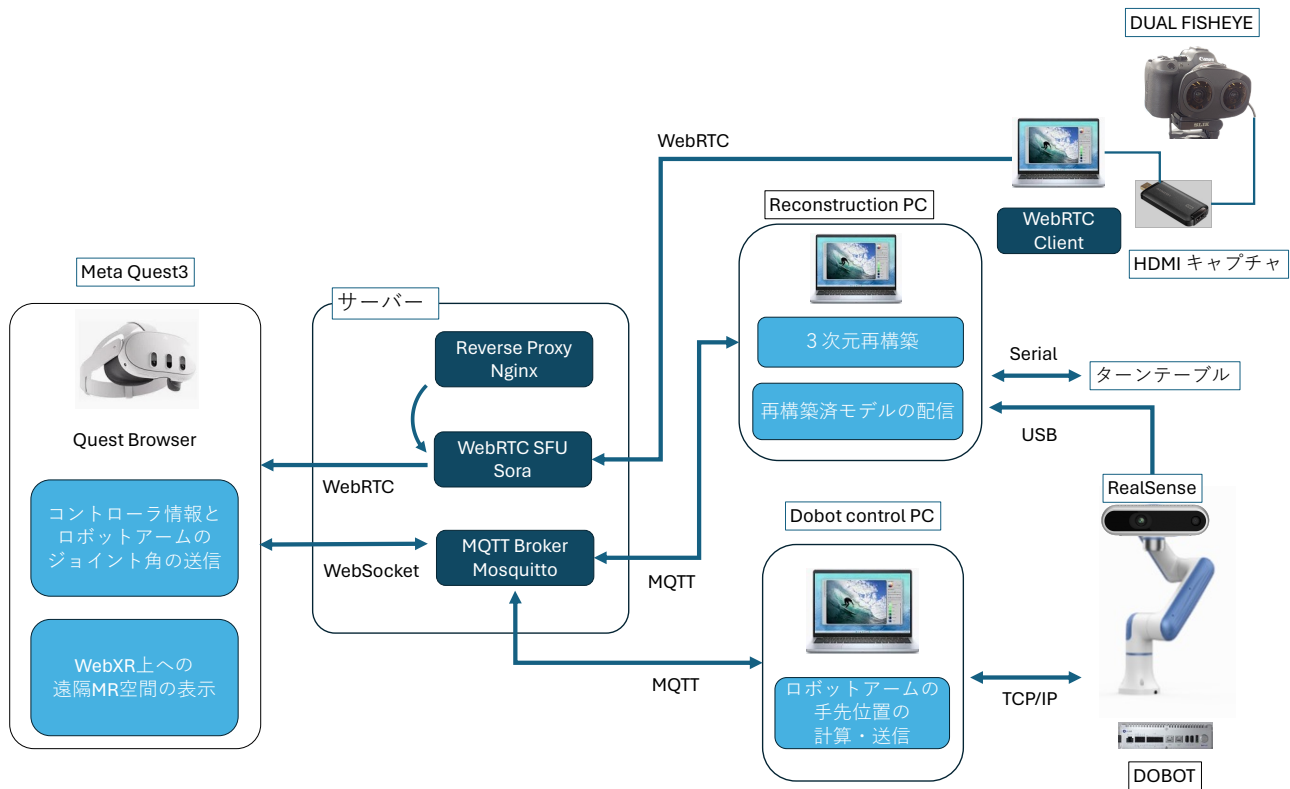


図 1: システム構成図

る。本研究の貢献を以下にまとめる。

- VR ヘッドセットを使った遠隔地での直感的な没入型ロボットアーム操作システムの提案
- RGB-D カメラを使った 3D スキャンにロボットアームを組み合わせ、遠隔で三次元再構成

## 2. システム構成

図 1 にシステムの構成を示す。ユーザは VR ヘッドセット付属のコントローラを用いて、遠隔空間のロボットアームを操作し物体のスキャンを行う。コントローラの位置と向きはロボットアームの先端と同期しており、ボタン操作によってスキャン対象が配置されたターンテーブルを回転できる。スキャン状況はリアルタイムで VR 空間に反映され、一人称カメラからの映像と VR 空間上のロボットアームと再構築されたモデルを重ねた遠隔 MR 空間を確認しながら RGB-D カメラの位置と向き、ターンテーブルの回転を制御する。

### 2.1 遠隔 MR 空間

各空間の概要図を図 2 に示す。遠隔空間にはスキャン対象物を乗せたターンテーブルと RGB-D カメラを取り付けたロボットアーム、VR180 映像を撮影する一人称カメラが置かれている。VR 空間には仮想ロボットアームと再構築されたモデルが表示される。遠隔 MR 空間には一人称カメラ視点で映した遠隔空間の映像に VR 空間上の仮想ロボットアームと再構成された 3D モデルが重ねて表示される。遠隔 MR 空

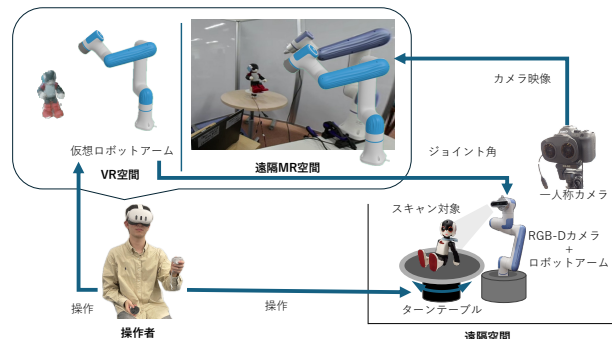


図 2: 空間概要図

間作成のための一人称カメラから得た画像とカメラ画像に対応した VR 空間のイメージ図を図 3 に示す。VR180 映像は一度 WebRTC SFU server を経由してから、WebXR を用いて VR ヘッドセットのブラウザ上に表示する。WebRTC により低遅延かつ複数人でステレオカメラ映像を見ながら VR 体験が行え、VR ヘッドセットでの処理をウェブ上で完結させているため、本システムは既存のほとんどのヘッドセットですぐにアクセスできる。操作者は遠隔 MR 空間の一人称カメラからの映像で遠隔空間を確認しながら VR ヘッドセット付属のコントローラを用いてロボットアームとターンテーブルを操作し 3D スキャンを行う。3D スキャンによる情報からリアルタイムに三次元再構築を行い、VR 空間と遠隔 MR 空間に再構築されたモデルを反映させる。遠隔

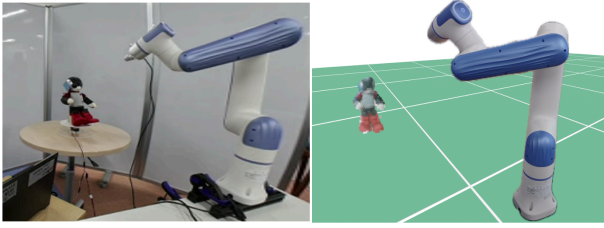


図 3: MR 空間構成要素 (左: 一人称カメラ画像, 右: VR 空間イメージ図)

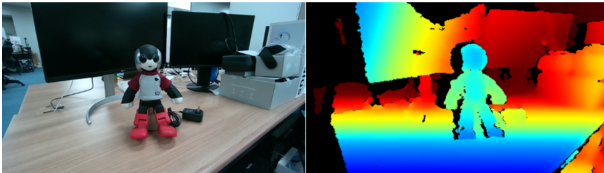


図 4: スキャン画像 (左: RGB 画像, 右: depth 画像)

MR 空間と VR 空間を切り替えてスキャンが不十分・解像度が低い箇所を確認し、スキャンが必要な場所を随時確認して物体をスキャンできる。

## 2.2 遠隔ロボットアーム制御

VR コントローラの位置と姿勢を元に逆運動学を計算し、VR 空間上の仮想ロボットアームを操作する。遠隔空間のロボットアームには仮想ロボットアームと同期するようジョイントの角度のみを送る。これによって、遠隔であってもすぐにコントローラ操作が仮想ロボットアームに反映されるためユーザが即座にフィードバックを得られるほか、先に仮想ロボットアームでコントローラの入力と整合をとることで、現実のロボットアームの誤作動を予防する。仮想ロボットアームのジョイントの角度は WebSocket で MQTTbroker に送られ、MQTT のトピックとして配信され、ロボットアームに接続した PC でサブスクライブする。

## 2.3 三次元再構築

三次元再構築は 3D スキャン、カメラ位置計算、モデル作成の三段階の工程で行う。

### 2.3.1 3D スキャン

3D スキャンのために RGB-D カメラである RealSense Depth Camera D435i を用いる。カメラからは RGB 画像と深度画像を取得する。実際にこのカメラで撮影した RGB 画像と深度画像を図 4 に示す。

RGB-D カメラを取り付けるロボットアームとして Dobot nova2 を使い、Dobot が提供している Python API を用いて操作情報を送る。Dobot nova2 は 6 軸ロボットアームであり、三次元空間上で先端部分を自由に移動させ、姿勢を変えられるため、先端に取り付けた RGB-D カメラで対象物を細かく角度を変えてスキャンできる。さらに、ロボットアームの可動範囲には限界があるため、サーボモータを用いたターンテーブルを作成し、様々な方向からのスキャンを可能にした。操作者は VR ヘッドセットのコントローラのボタン操作でターンテーブルを回転させ、スキャンを行う。

### 2.3.2 カメラ位置計算

ロボットアームとターンテーブルの操作情報を用いて計算を行う。ロボットアームからは各ジョイントの角度を受け取り、順運動学を用いて先端カメラの位置と姿勢を求める。先端カメラの位置とターンテーブルの回転角度を用いて、RGB-D カメラとスキャン対象の位置関係を計算する。RGB-D カメラ単体でスキャンを行い三次元再構築を行う場合、カメラ自体で得た情報から自己位置を推定しなければならない。一般に RGB-D カメラの自己位置推定には、SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) の一種である RGB-D SLAM が用いられる。RGB-D SLAM では取得した RGB 画像、深度情報から空間を再現しつつ、その空間からカメラの自己位置を計算する。そのため特徴の乏しい対象物を撮影すると再現された空間での自己位置の計算が難しく、自己位置を見失ってしまう場合がある。本システムではカメラ位置はロボットアームの各ジョイントの角度から計算するため、カメラを激しく動かした場合や取得した画像に特徴がない場合であってもカメラ位置を見失わない。

### 2.3.3 モデル作成

コントローラでロボットアームやターンテーブルを動かしながら複数のシーンにおける RGB-D 画像を統合することで 3D モデルを作成する。各フレームごとに計算したカメラ位置を参照し、シーンの統合には TSDF(Truncated Signed Distance Function) を用いる。

## 3. 今後の展望

遠隔ロボットアームを用いた直感的で正確な作業を実現するためには、スムーズな制御が必要である。コントローラを動かす際には、人体起因のブレが発生するため、それを吸収できる機構の開発・実装が必要である。また、ロボットアームのジョイントの角度が限界に近づいた際に、仮想ロボットアームの色を変化させたり、コントローラを振動させるなどのフィードバックを実装することで、遠隔 MR 空間での作業改善が期待できる。

さらに、遠隔 MR 空間をより高い自由度で行うための発展として、ロボットアームとステレオカメラを移動型ロボットに搭載すると、自己位置を移動しながらより自由に作業を行えるようになる。例として、本研究で行った 3D スキャンでは、対象をターンテーブルの上に配置して背面側のスキャンを可能としているが、移動型ロボットにシステムを搭載することで、物体を移動させずに任意の角度からスキャンできるようになる。移動型ロボットは正確な位置が取得できるため RGB-D カメラの自己位置を見失うことはない。自己位置の移動をシステムに組み込むことで、現場の人間の負担なく動作し、人が立ち入れない危険な環境で作業するなど、遠隔地でのロボットのタスクに大きな可能性が生まれる。

#### 4. まとめ

本研究ではVR ヘッドセット, ステレオカメラ, ロボットアームを用いて遠隔 MR 空間で作業できるシステムを提案した. さらに, 本システムによるタスクの例としてロボットアームに RGB-D カメラを取り付けることで遠隔で 3D スキャンする手法を提案した. VR 空間上の仮想ロボットアームによるフィードバックとステレオカメラによる没入感のある映像体験により直感的な作業が可能になった. 加えて, 本システムは Web ブラウザを介して既存のほとんどの VR ヘッドセットで遠隔ロボットアームへのアクセスが可能であるため, 幅広い分野での活用が期待される.

**謝辞** 本研究の一部は, 内閣府 SIP3 JPJ012495, NEDO 委託研究 JPNP23003, NICT 委託研究 22609, JST CREST JPMJCR22M4 に支援されています.

#### 参考文献

- [1] Patrick Stotko, Stefan Krumpen, Max Schwarz, Christian Lenz, Sven Behnke, Reinhard Klein, and Michael Weinmann : vr system for immersive teleoperation and live exploration with a mobile robot, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 3630–3637, 2019.
- [2] Chen-Yu Kuo, Chun-Chi Huang, Chih-Hsuan Tsai, Yun-Shuo Shi, and Shana Smith : Development of an immersive slam-based vr system for teleoperation of a mobile manipulator in an unknown environment. Computers in Industry, 132:103502, 2021.
- [3] Eric Rosen and Devesh K. Jha : A virtual reality teleoperation interface for industrial robot manipulators, 2023.
- [4] Mengnan Liu, Shuiliang Fang, Huiyue Dong, and Cunzhi Xu : Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. Journal of Manufacturing Systems, 58:346–361, 2021. Digital Twin towards Smart Manufacturing and Industry 4.0.
- [5] Michael Zollhöfer, Patrick Stotko, Andreas Görlitz, Christian Theobalt, Matthias Nießner, Reinhard Klein, and Andreas Kolb. State of the art on 3d reconstruction with rgb-d cameras. Computer Graphics Forum, 37(2):625–652, 2018.
- [6] Yan-Pei Cao, Leif Kobbelt, and Shi-Min Hu : Real-time high-accuracy three-dimensional reconstruction with consumer rgb-d cameras. ACM Trans. Graph., 37, sep 2018.