



災害時救助者支援を目的とした一人称視点での リアルタイム点群データ取得システム

A real-time point cloud data acquisition system from a first-person perspective for supporting rescuers during disasters

松本敬¹⁾, 平尾悠太郎¹⁾, Perusquia-Hernandez Monica¹⁾, 内山英昭¹⁾, 清川清¹⁾

Takashi Matsumoto, Yutaro Hirao, Monica Perusquia-Hernandez, Hideaki Uchiyama, and Kiyoshi Kiyokawa

1) 奈良先端科学技術大学院大学 先端科学研究科 (〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5,
Matsumoto.takashi.mr9@naist.ac.jp)

概要: 近年多発する大規模災害時の人命救助において, 救助隊の活動により大勢の被災者の命が救われている。しかし, 一刻を争う救助活動において, 倒壊した建物内部の探索や不安定な足場の移動などにより救助隊の安全も脅かされることが問題となっている。MR の技術を用いた関連研究ではシミュレーションによる防災が注目されている。本研究では直接救助者を支援するための, HMD と深度センサを用いて実際の救助活動を視覚的に支援するシステムを構築する。

キーワード: 拡張・複合現実, 点群, 作業支援・評価, HMD

1. 背景

近年多発する大規模災害時の人命救助において, 救助隊の活動により大勢の被災者の命が救われている。しかし, 一刻を争う救助活動において, 倒壊した建物内部の探索や不安定な足場の移動により救助隊の安全も脅かされることが問題となっている。そのため, 被災者を迅速に救助することに加え, 派遣される救助隊の安全を確保することも同様に重要な点である。ここで, 当該分野の関連研究ではヘッドマウントディスプレイ(以下 HMD)とセンシング技術を防災用途に用いる試みが実践されている。Yoon らは, 複数のファーストレスポnder役の消防隊員がスマートグラスを用いて被災者や危険要素のアノテーションを共有マップに追加して, 中央管理システムと連携して情報をやり取りする仕組みについて紹介し, このシステムを安全な救助活動を支援する目的において役立つものであると評価した[1]。この研究で考察されているプロジェクトでは, スマートグラスと地理情報を用いて被災地の情報を集めるソーシャルセンシングを実施しており, スマートグラス利用者によって効率的に被災情報を集めることができるが, 多くのファーストレスポnderがスマートグラスを使用しているという前提に基づいたシステムであるため, 装着者の母数が少ないと有効性が低下してしまう問題があり, 地理情報の取得に QR コードを用いており, 読み取りに手間がかかってしまう問題が言及されている。加太らは, VR を用いて水害をシミュレーションし, 防災意識を向上

させるシステムと, 音と色のアノテーションで使用者の進行方向の危険性を知らせるシステムを提案した[2]。この研究で提案されたシステムでは, 音と HMD 画面上の表示で使用者に危険性を知らせることで被災の危険を減少させる効果を示しているが, 危険性の評価はシミュレーション依存であるため, 実際に災害が起こっている現場で利用できない問題が考えられる。このような拡張現実・複合現実技術を用いる際, HMD の使用により使用者の空間認識能力が低下する可能性がある点も注意すべきである。Gauthier らの研究では, 暗闇を視認できるようになる効果を持つ暗視ゴーグルの装着によって空間認識能力が低下するという結果が出ている[6]。Wang らは, ロボットの緊急搜索救助(SAR)のために 2 次元マップを元に 3 次元の物体配置を高速に推定する自己位置推定とマッピング(以下 SLAM)手法を提案した[3]。これは RGB-D データによって自己位置推定するシステムであり, 実際に被災地でリアルタイムに周囲環境を取得することができるが, ロボットの運用を軸にした平面的な地図となっており, 救助者のような人間が行動するための立体的な空間認識は困難であると考えられる。また, RGB-D データを用いた 3 次元再構成は SLAM において, RGB 画像やステレオカメラにより推定する手法よりも高速でリアルタイム処理に向いていることが示されている[4]。これらの研究は, HMD を用いてアノテーションを提示することで救助活動を支援するほか, SLAM 技術を用いて空間地図を生成する手法を提案

した。これらをふまえて、SLAM 技術を用いて空間情報を取得し、HMD により救助者に視覚支援を提供するシステムを構築することで、救助活動をより効果的に支援することができると考えられる。

2. 目的

本研究は、RGB カメラと深度センサを用いた RGB-D データによる SLAM と HMD を用いた視覚支援により、救助者の安全確保と迅速な人命救助に貢献できるソフトウェアの構築を目的とする。

3. 提案

主に 2 種類の機構からなるセンシング、拡張現実技術を用いて救助者を支援するシステムを提案する。1 つ目の機構は、暗所における段差や障害物のような肉眼では把握しづらい場所を認識しやすくする機構である。2 つ目の機構は使用者が視認した範囲を自動的に記録し、救助者を遠隔で支援するオペレータへの状況共有と、複雑な構造物内の救助活動における被災者救出後の退路確保を支援する機構である。それぞれ、深度センサを用いた SLAM 技術によって生成された動的な 3 次元空間マップを活用して実現する。

4. 実装

4.1 概要

本研究で構築したシステムは、深度センサによるデータの情報処理と HMD による視覚支援を活用した災害時の救助活動を支援するシステムである。これは、Unity 2022.3.43f1 で開発し、Meta Quest 3 のスタンドアロンソフトウェアとして動作する。深度センサは HMD に搭載されている ToF センサを利用し、パルスルーカメラを用いてビデオスルー方式の拡張現実を扱う。ライブラリには Meta XR SDK, Meta Depth API, Meta Building Blocks, Mixed-Reality SDK, Google.Apis.Drive.v3, Better Streaming Assets を用いた。本システムは、提案にて述べた使用者前方の状況を認識支援する機構とデータ管理から描画機能まで持った点群スキャナシステムの 2 つで構成され、それぞれ Grid Scanner と Point Cloud Scanner と呼び、2 つ合わせてこのシステム全体を Depth Scanner と呼ぶ。

4.2 Grid Scanner

Grid Scanner は、深度センサからのデータを元に深度が同じ部分をハイライトし、光る線を手前から奥に走査することにより、周囲環境を素早く認識し、肉眼では視認できない空間も把握できるようにする機構である。スキャン動作は Depth API を用いて得た Depth Texture を利用し、同じ深度の部分を変化で手前から奥へ描画するという仕組みを取っており、空間の奥行きを効果的に認識できるメリットがある。また、走査線にはグリッド状の表示を採用しており、図 1 のように単色描画よりもグリッドの方が物体形状を認識しやすいためである。このグリッドの描画に

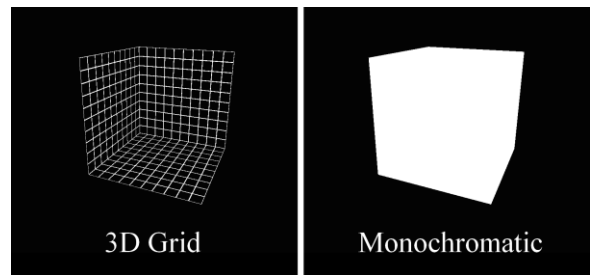


図 1: 単色とグリッド

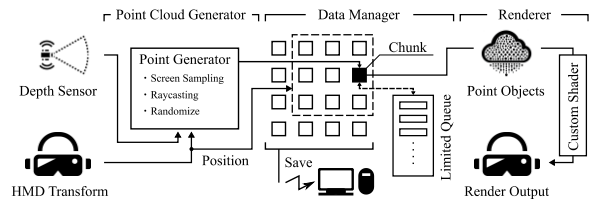


図 2: システム全体図

は Triplaner という技術を用いており、三次元空間の 3 軸に垂直な平面を用意し、Depth Texture の勾配情報から求めた法線と内積を取り、線形結合で Blend することでスキャンした面にグリッドを投影することができる。

4.3 Point Cloud Scanner

Point Cloud Scanner は、深度センサからのデータと HMD の自己位置推定情報を活用し、前方の障害物の形状をスキャンして点群データとして処理、提示する機構である。図 2 に Point Cloud Scanner のシステム全体図を示す。このシステムは大きく分けて、Point Cloud Generator, Data Manager, Renderer の 3 つの機構に分けることができる。

Point Cloud Generator では、HMD の深度センサから得た深度情報を元に点群位置を推定する。スキャン操作は非同期処理で動作し、任意の間隔で走査できる。これにより、間隔を短くすることで応答性を向上させることができる。Meta Quest 3 の場合、Depth API 経由で取得できる Depth Texture は解像度が 2000×2000 となっており、一度のスキャンで最大 400 万個のデータをサンプリングできるが、それ以上細かくできないという問題は存在する。このデータからサンプル数を制御するために、Screen Space において任意サンプル数の UV 計算用 2 次元座標を生成し、サンプリングする。これにより UV に対応した画面上の深度情報を取り出すことができ、Reverse Projection Matrix によってサンプリング点に対応した座標を取得することができる。

Data Manager は、スキャンで得た点群データを一時保存し、データ全体の管理面や入出力の観点から適切にデータ処理する機構である。管理されるデータは Chunk 構造を取っており、Chunk Manager と Chunk Loader によって制御される。

Chunk Manager は各 Chunk のデータ構造を示す。Point Cloud Generator によってスキャンされた点群は、グリッド状に配置された該当する Chunk に格納され、点群データをクエリした際には Chunk ごとに呼び出されるようなシス

テムとなっている。Chunk は Dictionary 構造により表現しており、Key を 3 次元座標、Value は点群の位置情報として管理している。各 Chunk 内における点群座標の管理には List を用いているが、動的にスキャンし点群を取得し続ける特性上、ある地点にデータが集中してしまう点が問題である。これを解決するために Limited Queue を用いて各 Chunk 内のデータ数の上限を設けることで、データ全体での点群分布の偏り抑制と、過密化することを抑制している。また Chunk 構造には、ブロック単位で点群を管理することによって描画範囲計算が Chunk 単位でできるため高速であるという点と、形状の変化に伴って点群の上書きが可能である点で、リアルタイム描画とデータ転送におけるメリットがあるため、動的なオブジェクトに対する点群スキャンに有効であるといえる。そして、一時保存されているデータは、任意のタイミングで全 Chunk の情報を位置情報の整合性を持たせた状態で結合して、STL 形式の点群データとして出力し、外部に転送することができる。

Chunk Loader は、各 Chunk に格納されたデータを適切に取り出すための入出力機構である。Chunk Manager で整理されたすべてのデータを表示し続けると高負荷になるため、Renderer に送られるデータは Chunk 表示数上限と Chunk 表示距離制限を設けることで一定範囲の Chunk 内点群のみ表示できるように制限することで負荷を減らしている。このアルゴリズムは、Chunk の中心座標を計算し、HMD の位置から Chunk の中心までの距離を測定、距離が一定以上の Chunk と表示数上限以上の Chunk を除外する仕組みである。

Renderer は、点群データを視覚情報として描画する機構である。点群の描画には独自開発の Shader を利用しており、見やすさや負荷を考慮している。ここでは、点群内の各点の座標をオブジェクトとして配置し、各オブジェクトの見た目を Shader で制御することで点群を描画している。しかし、描画する点の数が多いとオブジェクト数も増えるためドローコールが増加し、CPU 側のパフォーマンスオーバーヘッドが発生する問題がある。これに対して Shader を GPU Instancing に対応することで全く同じ表示のオブジェクトを 1 つのバッチでまとめて描画することで対策し、高速な描画処理を実現している。また、大量のオブジェクトの生成と削除を繰り返すことでも CPU 側のパフォーマンスオーバーヘッドが発生するため、非表示のオブジェクトを用意し、インターバルごとに必要数だけ表示し、点群の位置に移動するオブジェクトプールを採用している。また、HMD における描画処理である点から Single Pass Stereo にも対応しており、両目を別の Pass で描画する Multi Pass Stereo と比較してドローコールが半分に抑えられるためシステムの描画処理高速化に貢献している。また、見た目に關しては画面方向に垂直表示される 2 次元のガウシアンを採用している。これは、シンプルかつ低負荷であるため、不透明の描画と比較して使用者が点群密度を認識しやすく、高いポリゴン数のオブジェクトを描画するよりも高速



図 3: 野外で使った様子

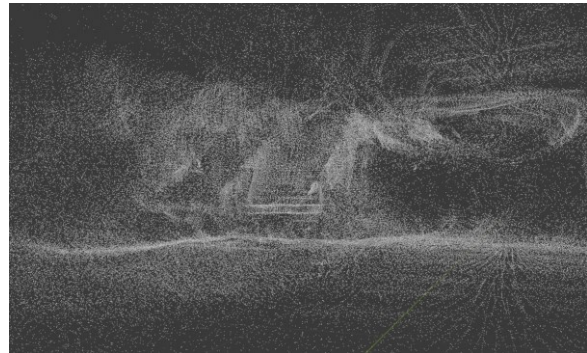


図 4: 出力された点群データ

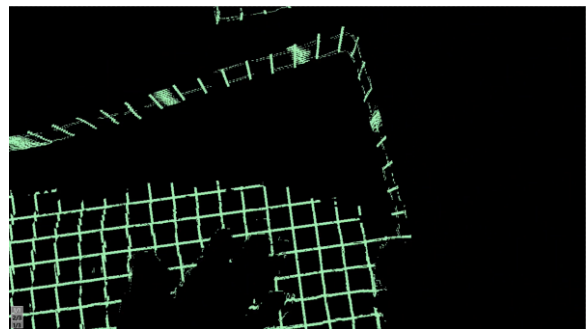


図 5: Grid Scanner の効果

に描画できるメリットがある。本システムでは点群の色は取得していないため、視認性が高い蛍光色の黄色を採用している。スクリーン方向を向く板の描画には Screen-Aligned Billboard を用いており、立体図形を描画するよりも計算コストを抑えられる特徴がある。

5. 結果

実際に本システムを野外で使った様子を図 3 に、そのときにスキャンした点群データを図 4 に示す。図 3 より、Chunk Loader によって近距離のスキャンデータのみ Renderer で描画され、視界を遮らずに空間情報を提供していることが分かる。このとき、黄色のガウシアンで描画した点群は HMD の両眼視差によって図で示す画像よりも深度の認識が容易になっている。また、Point Cloud Scanner で描画していない遠方の視覚情報は、Grid Scanner による視

覚支援によって提供され、グリッドの方向と線の位置によって天井の形状を表現できていることが確認できる。しかし、天井の凹凸付近のグリッドにノイズが走り潰れていることが見て取れる。図4より、図3に写っている階段がスキャンしたデータでも確認できる程度に取得できていることが分かる。そして、パススルー画面を消して周囲が暗い環境であるという想定をした状態でGrid Scannerを使用した様子を図5に示す。図5からは、正面に手がある点と壁と四隅の位置を視覚エフェクトにより把握することができ、暗闇でもセンサが機能していれば空間をある程度正確に認識できることが分かる。

6. 課題と考察

本研究で提案したシステムの現時点での課題はいくつか考えられる。まず、実用面における課題として、HMDの対候性と深度センサの能力限界が挙げられる。Meta Quest 3は室内で使うことが前提となっているデバイスで、砂埃が存在する空間や、水に濡れる環境、衝撃を受ける可能性がある場面では使用者に危険が及ぶ可能性があるほか、本体が破損する恐れがある。よって、実用を考える場合は過酷な環境下でも破損しない対候性が高いHMDが必要であると考えられる。また、付属しているToFセンサは暗所に弱いので、同様に過酷な環境下で運用する場合はLiDARのような高性能なセンサを用いる必要があると考えられる。次に、使用上の課題として、HMDを装着することによってタスク遂行能力が低下する可能性が懸念される。Gauthierらの研究より、暗所でHMDを用いた際に空間認知能力が低下することから、HMDのビデオスルー方式の運用でも空間認知能力が低下する可能性が考えられ、本システムによってその問題を補えるかどうかを検証する必要がある[6]。そして、システム性能の課題として、データ転送時の硬直、データ構造にグリッド状のパターンが現れる問題、スキャン時のノイズが挙げられる。データ転送は現在同期処理で動作しているため、データ転送中は処理が硬直し、使用者への情報提供が停止する問題があるため、非同期処理に変更する必要があると考えられる。データのパターンはサンプリングパターンを一定間隔のグリッド状に指定しているため、これをランダムなサンプリングとすることで、使用中に視認する点群データや最終的なデータでもグリッド状のパターンを除去できると考えられる。

また、スキャン時のノイズに関して、手や身体など不要な情報がスキャンされてしまった際にChunkごとの動的データ更新処理によってすぐに上書きされるが、Chunkのサイズが小さすぎる場合は空間中に点群が配置されてしまい、ノイズ除去ができない問題がある。これは、Chunkサイズを大きく設定し、1つのChunk内に必ず1つの構造物が含まれるようにすることで解決すると考えられる。以上を踏まえて、実験による検証必要性を考えると、HMDの対候性の評価のため、災害時に倒壊した建造物内における

状況の再現実験と、Point Cloud ScannerにおけるRendererの有無によるタスク遂行能力変化の評価実験と、システム内部における各手法適用時のパフォーマンス計測実験が必要であると考えられる。

7. 結論

RGBカメラと深度センサを用いて取得できるRGB-Dデータを用いてリアルタイムにHMD装着者に空間情報を提示する大規模災害時の救助者支援システムを提案した。これにより、被災地の不規則に変化する周囲環境や足場の情報を提示し、取得した空間情報は無線通信により外部で救助者を支援するオペレータへ迅速に現場の状況を共有できるため、複雑な構造の構造物内において、救助時の安全確保のほか、救助後の退路の確保を支援できると考えられる。

そして、上記で述べた課題の克服のほか、点群をカラー化することによって倒壊した建物のアーカイブ化を実現する機能を将来的に実装する予定である。また、Zagataらの研究より、ミニマップを用いることで空間認識能力が向上することが示されているため、スキャンした空間に加えて自身の位置情報、救助者の位置情報、脱出地点の位置情報を立体的に俯瞰視点で表示するミニマップを実装する予定である[5]。そして、実用的なタスクを踏まえた本システムの性能評価実験も実施予定である。

参考文献

- [1] Heejin Yoon, Guillaume Inglese, Yuri A. Tijerino: A Case Study on the Use of Smart Glasses in Disaster Prevention, 情報処理学会, pp.1-5, 2021.
- [2] 加太春貴, 神戸英利,: VR/ARを用いた避難行動支援システムの研究, 電気学会論文誌C 143 巻 (2023) 12 号, pp.1211-1218, 2023
- [3] Hongling Wang, Chengjin Zhang, Yong Song, Bao Pang, Guangyuan Zhang: Three-Dimensional Reconstruction Based on Visual SLAM of Mobile Robot in Search and Rescue Disaster Scenarios, Robotica 38(2), pp.1-24, 2019
- [4] Shishun Zhang, Longyu Zheng, Wenbing Tao: Survey and Evaluation of RGB-D SLAM, IEEE Access (Volume: 9), pp.2169-3536, 2021.
- [5] Krzysztof Zagata, Beata Medyriska-Gulij: Mini-Map Design Features as a Navigation Aid in the Virtual Geographical Space Based on Video Games, ISPRS Int. J. Geo-Inf. 12(2), pp.1-16, 2023
- [6] Michelle Sylvia Gauthier, Avi Parush, Todd Macuda, Denis Tang, Gregory Craig, Sion Jennings: The impact of night vision goggles on way-finding performance and the acquisition of spatial knowledge, Human Factors The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society 50(2), pp.311-21, 2008.