



現実空間の物体分布と人の行動特性を反映した VR 空間のリアルタイム構築

Real-time generation of VR space
reflecting object distribution in real space and human behavioral characteristics

松尾直紀¹⁾, 井村誠孝²⁾

Naoki MATSUO and Masataka IMURA

1) 関西学院大学大学院 理工学研究科 (〒 669-1337 兵庫県三田市学園 2-1, dic16538@kwansei.ac.jp)

2) 関西学院大学 理工学部 (〒 669-1337 兵庫県三田市学園 2-1, m.imura@kwansei.ac.jp)

概要: HMD を装着したユーザは、自身の周辺状況を知ることができないため、HMD を利用した VR 体験は障害物のない空間を必要とするのが現状である。本研究では、あらゆる現実環境で VR 体験を可能とすることを目標として、距離カメラから現実空間の障害物位置を計測し、同じ位置に VR 空間でもバーチャル物体を設置することで、現実空間の物体分布を反映した VR 空間をリアルタイムに構築する。人が実物体同様にバーチャル物体を回避するか定かではないため、バーチャル物体に対する人の回避行動の特性について実物体に対する行動と対比して調査し、得られた知見に基づいて、障害物のある空間でも世界観を損なわない現実空間の物体分布を反映した VR 空間のリアルタイム構築システムを実装する。

キーワード: 歩行, 移動, 空間構築

1. はじめに

近年、Head Mounted Display(以下 HMD) が一般的に利用できるようになり簡単に誰でも簡単に Virtual Reality(以下 VR) を体験できるようになった。ユーザは HMD 装着時に現実世界での自分の周辺状況を知ることができないため、HMD を使用するには障害物のない空間が必要であり、ユーザの行動可能範囲は周辺環境による制限を受ける。実空間の障害物配置に合わせてバーチャル空間を構築することで、障害物のある空間でも没入感を損なうことなく VR を体験可能とする方法が検討されている [1][2]。しかし、バーチャル物体は、一般的に実体は無いものという印象を抱かれています。そのため、実物体と同じようにユーザが障害物を回避するかは定かではない。本研究では、バーチャル物体に対する人の回避行動の特性について、実物体と比較して調査し、得られた知見に基づいて、障害物のある空間でも世界観を損なわない現実ベースの VR 空間をリアルタイムに構築する手法を確立する。

2. 関連研究

VR 空間への没入感を損なわない形で空間の形状や障害物をユーザに提示する方法が Sra によって提案されている [1]。Sra らの研究では、事前に空間の状況をスキャンし、点群解析によって床、壁を推定し行動可能範囲を検出する。そのデータから自動的にオブジェクトを割り当てて VR 空間を構築している。しかし、この研究では事前に 3D スキャンを行って得た空間のデータから VR 空間を構築している

ため、空間が広いものになればなるほど事前スキャンが大変なものになり、スキャンを行っていない空間を歩行することはできない。また Cheng らによって事前スキャンを必要としない VR 空間の構築方法が提案されている [2]。Cheng らの研究では、RGB-D カメラを利用し、リアルタイムに現実空間スキャンを行い、一定面積以上の障害物のない床平面を検出すると、VR 空間上で床平面をバーチャル物体で囲み、検出された空間以外をユーザに見せないようにして VR 空間を構築している。しかし、この手法では行動可能と判断されるのに一定面積以上の床平面が必要となるため、現実空間の広さを最大限に活用することができない。

3. 提案手法

3.1 提案手法の概要

本研究では、現実空間の障害物と同じ位置に VR 空間でもバーチャル物体を配置することで、現実ベースの VR 空間をリアルタイムに構築する。図 1 に提案手法の処理の流れを示す。VR 空間をボクセルに分割し、HMD に搭載した RGB-D カメラより実空間の物体表面を点群データとして取得し、点群データを VR 空間座標に変換する。各点群がどのボクセルに属しているか判定を行い、点が属するボクセルがバーチャル物体を重畳してもよいボクセルであればバーチャル物体を重畳する。

3.2 バーチャル物体の重畳方法

画像ピクセルごとに距離情報を取得できる RGB-D カメラを用いて、ユーザ周辺の物体表面の位置を点群データと

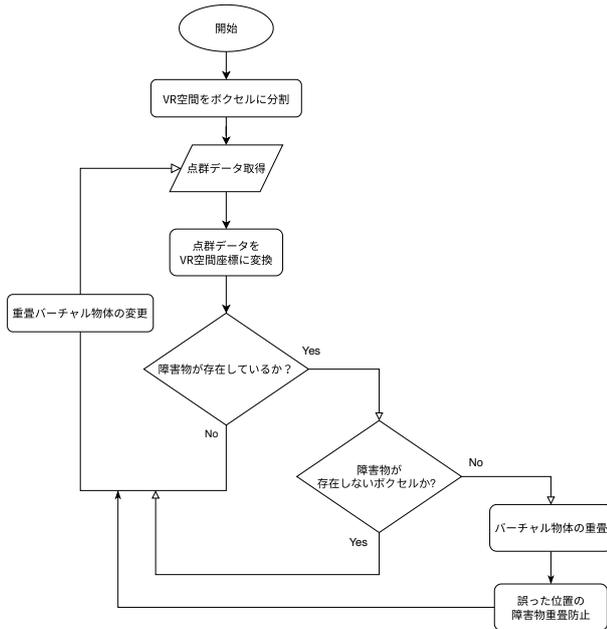


図 1: 提案手法の処理の流れ

してリアルタイムに取得する。X 軸, Y 軸, Z 軸を等しい長さで区切り VR 空間をボクセルに分割する。RGB-D カメラから得られる距離画像の各ピクセルがどのボクセルに属しているかを VR 空間座標に変換して判別し, 該当したボクセルには物体表面点群が存在するとして該当した回数をカウントしていく。カウント数が設定されたしきい値以上になるとそのボクセル位置に現実空間で障害物が存在すると判断し, バーチャル物体を重畳する。

3.3 誤った位置でのバーチャル物体重畳防止

鏡面反射などの影響により物体表面が存在しない場所に点群が計測されることがあるため, まず各ボクセルが下記の三つの状態のいずれかであるとする。

- 障害物が存在する
- 障害物が存在してはいけない
- 未確定

以下の手順で間違った場所にバーチャル物体が重畳されることを防止する。障害物があると判断されたボクセルの状態が「障害物が存在してはいけない」でなければ, 状態を「障害物が存在する」に変更してバーチャル物体を重畳する。同時に, そのボクセルとカメラの間にあるボクセルには障害物が存在しないため, 間にあるボクセルを「障害物が存在してはいけない」状態とする (図 2)。ボクセルに点群が存在する場合でも, そのボクセルの状態が「障害物が存在してはいけない」であればバーチャル物体を重畳させないことで, 間違った点群データによりバーチャル物体が重畳されることを防ぐ。

3.4 重畳バーチャル物体の変更

現実空間の構造情報をより把握しやすくするため, 障害物があると判定されたボクセル集合体の大きさにより重畳するバーチャル物体を変更する。複数ボクセルの集合を一

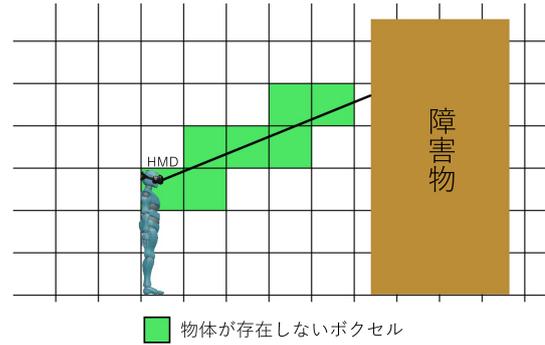


図 2: 物体表面が存在しないボクセルの判定

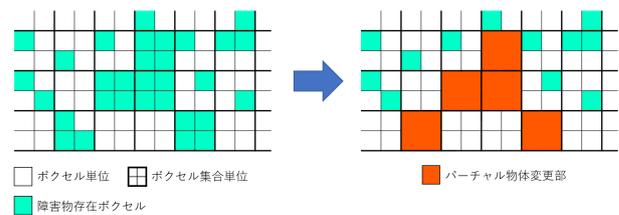


図 3: 重畳バーチャル物体の変更

単位として VR 空間を分割し, 分割されたボクセル集合について, 障害物が存在するボクセルの割合が定められたしきい値を超えた場合, そのボクセル集合体に別のバーチャル物体を重畳する。変更の様子を図 3 に示す。

3.5 機械学習による計測結果の補完とセグメンテーション

RGB-D カメラで計測する際, 他の物体で隠れている物体表面を計測できないため, まとまりがある物体でも一部穴が空いてしまう。また, 壁やドアなどの空間の境界になる物体と椅子や机などの障害物の違いは, 点群のみから判断することが困難であるため構築される VR 空間の品質が低く感じられてしまう。この問題を解消するために, VR 空間の物体配置情報を機械学習させたネットワークに送り, 計測できない未確定部分の穴埋めを行う。同時に, 空間の境界になる物体と障害物の二種類にセグメンテーションを行うことで, それぞれに対応したバーチャル物体の重畳を可能にする。

4. バーチャル物体に対する人の回避特性の調査

バーチャル物体は, 一般的に実体は無いものという印象を抱かれているため, 実物体と同じようにユーザが障害物を回避するかは定かではない。本研究では現実世界の物体にバーチャル物体を重畳してユーザに提示するため, 現実物体とバーチャル物体に対する回避特性に相違が見られた場合, 現実物体をバーチャル物体に置き換える際に差を考慮する必要がある。「バーチャル物体の存在を人が避けるべきだと感じるか」と「現実物体とバーチャル物体では物体との距離の取り方に相違があるか」の二点について人の行動特性を調査する実験を行い, 現実物体とバーチャル物体に対する回避特性に相違があるか調査した。

4.1 実験 1

バーチャル物体のみが存在する環境と実空間にも同じ大きさの机がある環境の二種類の環境を用意し、VR 初心者の 32 人にどちらの環境か知った上で「モグラたたきゲーム」をプレイしてもらい、プレイ中にバーチャル物体を避けるか記録した。

実験の結果、バーチャル物体の中に実空間では障害物がないと知った上で 32 人中 27 人がバーチャル物体を避け、5 人が避けなかった。また、実空間に机が存在する場合は全員がバーチャル物体を避けた。よって多くの人がバーチャル物体を避けるべき障害物として認識していると考えられ、現実空間の障害物にバーチャル物体を重畳しても問題ないことがわかった。

4.2 実験 2

大中小の三種類の大きさの机を用意し、下記の三種類の環境で 10 人の実験協力者に現在の環境を伝えた上で机の周囲を回ってもらい、机からどれだけ離れた位置を歩行するか計測した。実験は一人あたり三種類の環境 × 大中小三種類の机の 9 回をランダムな順番で行った。

環境 R 実際の机がある現実環境

環境 R+V 実空間の机と同じ位置にバーチャル物体が重畳された VR 環境

環境 V 実空間に机がなく、バーチャル物体のみの VR 環境

実験協力者ごとの頭部位置と机の端との距離を図 4 に示す。結果、全員が現実物体、バーチャル物体ともに距離を取り、物体に接触しなかった。必ず現実空間の方が近く歩行する人が A~E の 5 人、必ず VR 空間の方が近く歩行する人が F,G の 2 人、どの環境でも距離の取り方が変わらない人が H~J の 3 人であった。よってバーチャル物体に無意識に侵入することなく、現実物体にバーチャル物体を重畳してもユーザはバーチャル物体から適切に距離を取って歩行を行うと考えられる。「現実空間の方が必ず近くを歩行する人」と「どちらでもあまり変わらない人」は、バーチャル物体に対して現実物体以上に距離を取るため、現実物体と同じ大きさにバーチャル物体を重畳しても問題ない。しかし、「VR 空間のほうが必ず近くを歩行する人」は、バーチャル物体に対して現実物体よりも近づくため、安全性を考慮すると現実物体より大きくバーチャル物体を重畳する必要性がある。現実物体より大きくバーチャル物体を重畳する必要性のある「VR 空間のほうが必ず近くを歩行する人」2 名の計測データより、現実空間と VR 空間の距離の取り方に最大 10 cm の差が見られたため、本研究では安全性のためにバーチャル物体を現実物体より 10cm 以上大きく重畳することにする。

5. VR 空間リアルタイム構築の実装

5.1 デバイス構成

実装デバイスの構成を図 5 に示す。HMD には外部トラッキングカメラを必要としない Oculus Rift S(単眼解像度:

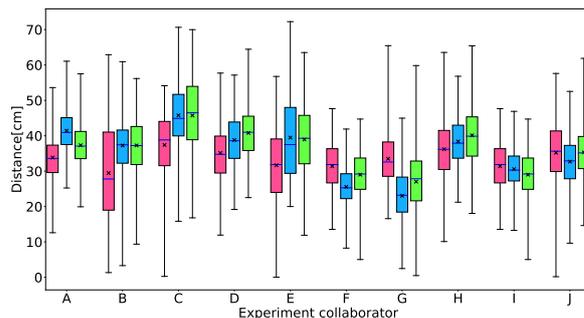


図 4: 実験結果 (赤:環境 R, 青:環境 R+V, 緑:環境 V)



図 5: 実装デバイスの構成

1280 × 1440, リフレッシュレート: 80 Hz, 瞳孔間距離: 63.5 mm), 距離計測のための RGB-D カメラは intel RealSense Depth Camera D435i(解像度: 最大 1280 × 720, FOV: 85.2° × 58° × 94°(± 3°), フレームレート: 最大 90 fps, 取得可能深度: 0.1 m - 10 m), VR 環境の構築には Unity 2019.1.31f を用いた。RealSense は前方向のみだと足元にある障害物を計測できないため、前方向と斜め下方向の二台を搭載した。

5.2 実装

実装の結果図 6 の現実空間に対して図 7 の VR 空間が構築された。RealSense は解像度を 640 × 480 に設定し、0.3 m - 7 m の範囲で距離計測を行った。VR 空間を 30 cm × 30 cm × 30 cm のボクセルに分割し、物体表面点群を RGB-D カメラの座標系から VR 空間座標系に変換を行い、物体表面が存在すると判断されたボクセルにバーチャルブロックを重畳した。重畳するバーチャルブロックは屋外の VR 空間を想定し、レンガブロックと木箱を用いた。4 節の結果に基づいて、バーチャル物体を現実空間の障害物より 10 cm 大きく重畳するため、RGB-D カメラで得られる距離から -10 cm することで、実際の障害物位置よりも 10 cm ユーザに近く重畳されるよう実装した。また、現実空間の構造情報をより把握しやすくするため、障害物があると判定されたボクセル集合体を同一障害物として扱い、レンガブロックや木箱が縦に 4 つ重畳された時、その部分を柱ブロックに変換し重畳するようにした。

5.3 機械学習による計測結果の補完と分類の予備実験

VR 空間の物体配置情報を機械学習させたネットワークに送り、他の障害物で隠れて計測できない未確定部分の穴



図 6: ベースとした現実空間



図 7: 構築された VR 空間

埋めと壁やドアなどの空間の境界になる物体と椅子や机などの障害物の二種類に分類することを目標に予備実験を行った。VR空間の物体配置情報を持った $16 \times 128 \times 128$ のボクセル空間を入力とし、U-Net 構造を持った [3] ネットワーク (図 8) で学習を行った。学習データセットはランダムに生成した壁と立方体で構成される $16 \times 128 \times 128$ のボクセル空間にノイズが入ったものとその正解ラベルを 1 セットとし、訓練データ 800 セット、テストデータ 200 セットを用いた。ネットワークの実装は Python3.6.10 と機械学習ライブラリの Pytorch を使用した。図 9 の入力に対する結果を図 10 に示す。水色のボクセルは壁面と判定されたことを示しており、未確定部分の穴埋めとセグメンテーションがされていることを確認できた。

6. おわりに

本研究では、障害物のある空間でも HMD を装着した VR 体験を可能にするために、バーチャル物体に対する人の回避行動の特性について実物体と比較して調査し、その知見に基

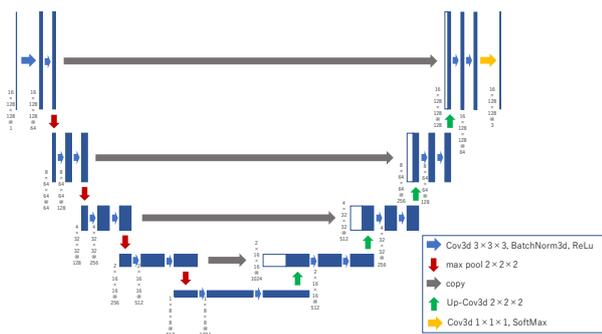


図 8: ネットワーク構造

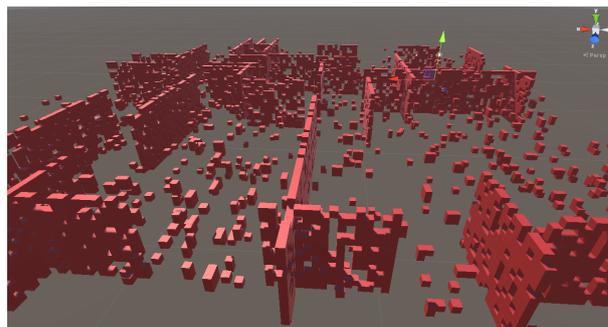


図 9: 入力空間

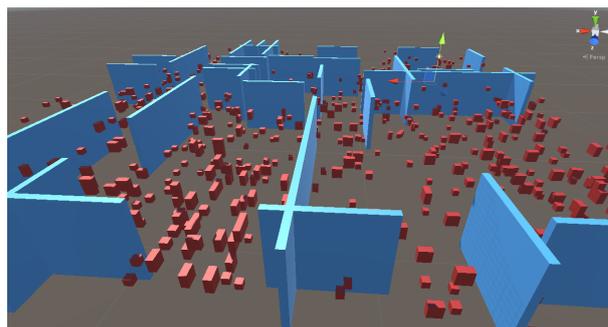


図 10: 出力空間

づいて障害物のある空間でも世界観を損なわない現実ベースの VR 空間をリアルタイムに構築する手法を提案した。

バーチャル物体に対する人の回避特性を調査した結果、多くの人がバーチャル物体を避けるべき障害物として認識していると考えられ、バーチャル物体に無意識に侵入することはなく、ほとんどの人がバーチャル物体から適切に距離を取って歩行することがわかった。

RGB-D カメラにより取得した点群データをもとに現実空間の障害物と同じ位置に VR 空間上でもバーチャル物体を設置するシステムを提案し実装を行った。実装の結果、障害物のある空間でも世界観を損なわない現実空間ベースの VR 空間をリアルタイムに構築することができた。

参考文献

- [1] M. Sra et al.: Procedurally Generated Virtual Reality from 3D Reconstructed Physical Space, Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology, pp. 191–200, 2016.
- [2] L.-P. Cheng et al.: VRoamer: Generating On-The-Fly VR Experiences While Walking Inside Large, Unknown Real-World Building Environments, IEEE Virtual Reality, pp. 359–366, 2019.
- [3] O. Ronneberger et al.: U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation, In Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, pp. 234–241, 2015.