



3D スキャンした屋内実空間に基づく VR 環境の生成

Generation of Virtual Reality Environment Based on 3D Scanned Indoor Physical Space

毛呂聡史¹⁾, 小室孝¹⁾

Satoshi Moro, Takashi Komuro

1) 埼玉大学

概要: 本研究では, ユーザが屋内で周囲の障害物を違和感無く認識し, 没入感を損なうことなく体験可能な VR 環境の生成手法を提案する. 屋内をスキャンして 3 次元点群を取得し, 平面検出やクラスタリングなどの点群処理を行うことで, 屋内実空間に基づく VR 環境を生成する. また, 法線推定によって検出した, ユーザが触れることの出来るエリアを提示し, VR に触覚体験を付与する. 本稿では, 提案システムの動作検証を行った結果を示す.

キーワード: HMD, VR 生成, 点群処理

1. はじめに

近年, PlaystationVR や HTC Vive などの比較的安価で高機能な HMD が登場し始め, 屋内で VR を楽しむ人々が増えてきている. しかし, 屋内には周囲に家具などの障害物が多く, 利用可能なスペースが少ないため, ユーザが手や体を動かす際の安全性や没入感が損なわれてしまう. このことから, ユーザが周囲の障害物を違和感無く認識し, 回避可能な VR システムが求められる.

この問題に関連する研究として, 屋内の歩行可能領域に基づいて VR 環境を生成する研究がある [1]. 自由に歩くことのできる VR 環境を生成するが, 周囲の障害物を VR 内に提示しておらず, ユーザが安全な距離感を認識しづらい. 他にも, 屋内の物体全てを仮想物体に置換する研究がある [2][3][4][5][6]. これらはより安全な VR の体験を可能とするが, VR の生成に大量のカメラやマーカが必要となる.

そこで本研究では, カメラやマーカの設置が不要であり, 屋内においてユーザが周囲の障害物を違和感無く認識し, 没入感を損なうことなく体験可能な VR 環境の生成システムを提案する. 事前の 3D スキャンによって屋内の 3 次元点群を取得し, 平面検出やクラスタリングなどの点群処理を行う. 点群処理で得た結果を利用して, 障害物の位置に対応する直方体の仮想物体を配置し, 屋内実空間に基づいた VR 環境を生成する. また, ユーザが触れることの出来るエリアを VR 内で提示することで, VR を通して屋内環境の実物体とインタラクションが可能な触覚体験を付与する.

2. スキャンした屋内実空間からの VR 環境の生成

本手法は大きく分けて屋内の 3D スキャン, 天井と床の除去, 障害物のクラスタリング, 主成分分析, 法線制約を満たす平面検出の 5 つの処理からなる. 本手法の概要を図 1 に示す.

始めに, デプスカメラや IMU を搭載し, 自己位置推定の

機能を有した機器を利用して 3D スキャンを行うことにより, 屋内環境の 3 次元点群を取得する. 点群の座標系は搭載された IMU によって重力加速度を検知し, 重力方向が z 軸の負方向となるように定義される. 取得した点群に対して平面検出を繰り返し行い, 天井, 床部分の検出やノイズ除去を行う. その後, 除去後に残った点群全てを障害物と見做してクラスタリングを行い, 障害物の大まかなグループ分けを行う. 検出したそれぞれのクラスタに対して, 主成分分析を行って点群の分布する範囲となる直方体を決定し, その範囲を各主成分軸に沿って一定の範囲で分割することで, 分割範囲内での点群の分布する直方体を再度算出し, 最終的に配置する仮想物体のサイズを決定する. 最後に, 置換範囲内において平面検出と平面法線の計算を行うことで, VR 内で実際に触れることのできるエリアを提示し, VR を通して屋内環境の実物体とインタラクションが可能な触覚体験を付与する.

2.1 天井と床の除去

本手法では, 天井, 床部分を除いた全ての点群を障害物と見做し, 仮想物体に置き換える. そのため, 始めに平面検出により天井, 床の除去を行う.

取得した屋内の 3 次元点群に対して, RANSAC [7] を用いて平面検出を行う. RANSAC とは, 外れ値に対してロバストな, モデルのパラメータを推定する手法である. RANSAC を行う際のサンプリング回数を 10000 回として, 属する点の数が最も多いモデルを平面として検出する. 3 次元点群を P , フィッティングする平面を Q , ε を RANSAC における許容誤差とすると, ある平面に属する点群 P_{plane} は以下のように表現できる.

$$P = \{p_i \in R^3\} \quad (1)$$

$$P_{\text{plane}} = \{p_i \in P \mid d(Q, p_i) < \varepsilon\} \quad (2)$$

RANSAC によって検出した平面を除去し, 再度 RANSAC

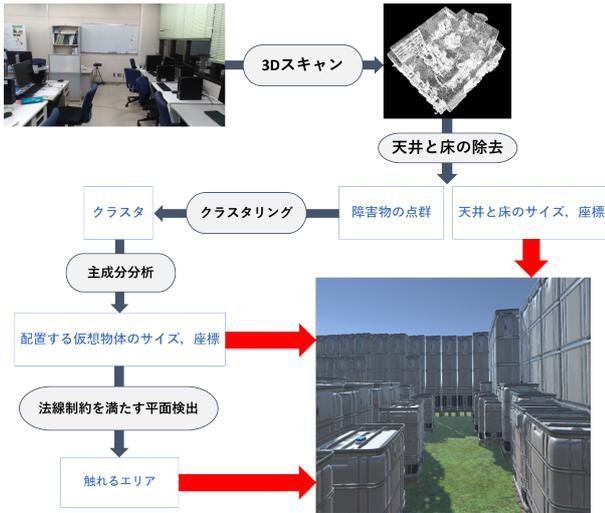


図 1: 提案する VR 環境生成手法の概要

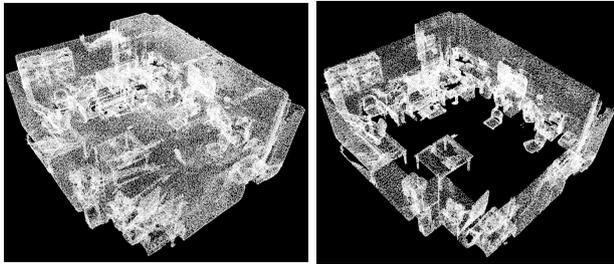


図 2: 天井・床・ノイズ除去の例

の適用を繰り返し行うことで、屋内に存在する複数の平面を検出する。ここで、点 p_i の座標を (x_i, y_i, z_i) とすると、 P_{plane}^j の最小、最大 z 座標は以下ようになる。

$$z_{\min}^j = \min_i z_i \quad (3)$$

$$z_{\max}^j = \max_i z_i \quad (4)$$

上記で求めた最小、最大座標を利用して、天井、床部分を以下のように定義し、除去する。

$$P_{\text{ceiling}} = \{p_i \in P_{\text{plane}} \mid z_{\min} = \max_j z_{\min}^j\} \quad (5)$$

$$P_{\text{floor}} = \{p_i \in P_{\text{plane}} \mid z_{\max} = \min_j z_{\max}^j\} \quad (6)$$

また、天井や床として適切に検出されなかった点群は今後の処理においてノイズとなり、結果に影響が出てしまう可能性がある。したがって、天井よりも高い位置、床よりも低い位置に存在する点群をノイズとして除去する。天井、床、ノイズ除去の例を図 2 に示す。

2.2 障害物のクラスタリング

残った全ての点群にクラスタリングを適用し、障害物の大きなグループ分けを行う。クラスタリングには、Euclidean Cluster Extraction 法 [8] を利用し、点間のユークリッド距離に基づいてクラスタリングを行う。尚、クラスタとして統合する最大距離を 0.2 m、クラスタに含む点群数の下限

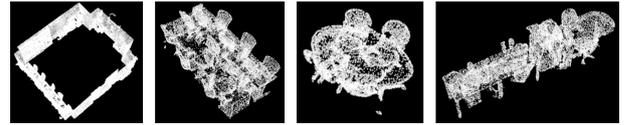


図 3: 得られるクラスタの例

を 500 点とすることで、小さな障害物を無視する。得られるクラスタの例を図 3 に示す。

2.3 仮想物体のサイズの決定

得られた各クラスタを利用して、仮想物体へと置換するサイズの決定を行う。クラスタに属する点群全てを囲むような直方体を計算し、その範囲内において、配置する仮想物体の中心座標、サイズを決定する。

始めに、各クラスタに対して主成分分析を行い、点群の分布の範囲を決定づける主成分軸を求める。その後、求めた主成分軸に沿って、より細かな範囲で分割することによって、最終的な置換結果となる仮想物体のサイズを決定する。

各クラスタに主成分分析を行う前に、クラスタに属する点群に対して前処理を行う。点群の z 座標の分布によっては、主成分分析によって導出される z 方向の主成分軸が重力方向に平行ではない場合がある。そのような場合、配置する仮想物体も同様に傾いてしまい、VR 環境として不自然になってしまうため、入力したクラスタの点群 P_{origin} を $x-y$ 平面に投影し、 $P_{\text{projection}}$ を得る。

$$P_{\text{projection}} = \{p_i \in P_{\text{origin}} \mid p_i = (x_i, y_i)\} \quad (7)$$

前処理の後、各クラスタに主成分分析を行う。求めたい主成分軸は、点群の重心 $G_{\text{projection}}$ と各点との分散共分散行列 C を正規化し、固有値問題を解くことによって得られる固有ベクトル $V = (v_1, v_2, v_3)$ である。クラスタに属する点の数を n とすると、以下のように表現できる。

$$G_{\text{projection}} = \frac{1}{n} \sum_i (x_i, y_i)^T \quad (8)$$

$$C = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

クラスタに属する各点の座標を、主成分軸 $V = (v_1, v_2, v_3)$ を新たな座標系とした座標に変換し、その座標系での最大座標・最小座標を求めることによって、クラスタを囲む直方体のサイズを決定する。主成分軸 v_i は、

$$v_i = \begin{pmatrix} v_{i1} \\ v_{i2} \\ v_{i3} \end{pmatrix} \quad (10)$$

であり、新たな座標系へと変換する変換行列を T とすると、以下のように表現できる。

$$T = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & -d_1 \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & -d_2 \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

また、上記における \mathbf{d} は、以下のように定義される。

$$\mathbf{d} = -\mathbf{V}^T \mathbf{G}_{\text{origin}} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{G}_{\text{origin}} = \frac{1}{n} \sum_i (x_i, y_i, z_i)^T \quad (13)$$

得られた変換行列 \mathbf{T} を適用することで、変換後の点群 $P_{\text{transform}}$ を得る。

$$P_{\text{transform}} = \mathbf{T} P_{\text{origin}} \quad (14)$$

変換後の座標系 x', y', z' の方向それぞれにおける、最大座標 $x'_{\max}, y'_{\max}, z'_{\max}$ 、最小座標 $x'_{\min}, y'_{\min}, z'_{\min}$ を求めることにより、クラスタの点群を囲む直方体領域が決定される。

求めた直方体領域内において、 x', y', z' 方向を一定の閾値間隔 $\Delta x', \Delta y', \Delta z'$ で分割することで、仮想物体へと置換するサイズの決定を行う (図4)。主成分分析で算出した直方体で仮想物体へと置換すると、実際の点群との形状のずれが大きく、実際の障害物よりも大きいサイズで仮想物体が配置されてしまうため、ユーザの利用できる歩行領域が狭まってしまふ。そのため、求めた直方体を主成分軸に沿って一定間隔で分割し、分割領域内での点群の分布範囲を仮想物体のサイズとすることによって、障害物とのサイズのずれを少なくする。

特に、この領域分割の x' 方向における分割線の座標 x'_n は、以下のように表現できる。

$$x'_0 = x'_{\min} \quad (15)$$

$$x'_n = x'_{n-1} + \Delta x' (n \geq 1, x'_n \leq x'_{\max}) \quad (16)$$

ここで、分割した範囲より、小さく囲めるような範囲が存在する場合を考慮する。範囲内に存在する点群の最小座標を x''_{\min} 、最大座標を x''_{\max} とすると、配置する仮想物体単体の存在範囲は以下のように表現できる。

$$\max(x_{n-1}, x''_{\min}) \leq x' \leq \min(x_n, x''_{\max}) \quad (17)$$

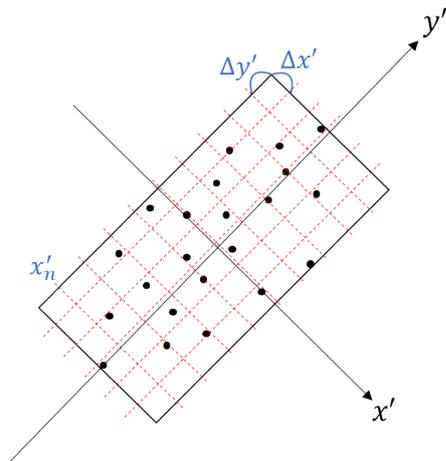


図4: 点群の存在範囲の分割

y', z' 方向についても同様に考えることで、3軸それぞれにおける仮想物体の存在範囲、サイズ、中心座標が決定する。

2.4 ユーザが触れるエリアの提示

VR 内でユーザが触れるエリアの提示を行うために、配置する仮想物体内部の点群に法線制約を追加した平面検出を行う。検出した平面が仮想物体の6平面のいずれかに対して平行であり、距離 x'_d の小さい平面を抽出することで、触れるエリアとして提示する。

平面検出は、天井・床の除去に用いた RANSAC に、法線制約を追加して実行する。特に主成分軸 x' 方向において、法線制約を考える。求める平面の法線ベクトルを \mathbf{n} とすると、法線制約は以下のように表現でき、同時に RANSAC の (2) 式を満たす必要がある。

$$\mathbf{n} = t\mathbf{x}' (t \neq 0) \quad (18)$$

直方体である仮想物体の6平面のいずれかに対して、厳密に平行な条件とすると、条件を満たす平面が少なくなり、ユーザが利用できる触覚体験のエリアが少なくなってしまう。そのため、平面法線と主成分軸との角度の誤差を $\pm 10^\circ$ として実行する。この条件によって、6平面のいずれかに対して、おおよそ平行な平面を検出することが出来る。その後、検出平面と6平面のいずれかにおける距離を ε_d 、検出した平面の主成分軸 x' における座標を x'_p とすると、ユーザが触れることのできるエリアは以下の条件式を満たす検出平面となる。

$$x'_d = x''_{\max} - x'_p, x'_p - x''_{\min} \quad (19)$$

$$0 \leq x'_d \leq \varepsilon_d \quad (20)$$

この条件を主成分軸 y', z' 方向においても同様に考える。この定義に基づいて平面を抽出することにより、VR 内にユーザが触覚体験を行うことのできるエリアを提示することが可能となる。

3. VR 環境の生成例

3.1 実装

本研究で作成したシステムは、3D スキャン端末に Google Tango 搭載の Lenovo Phab2 Pro, HMD に Oculus Quest, PC の3つの装置から成る。また、ソフトウェアとして屋内環境の3D スキャンに Constructor Developer Tool, 平面検出やクラスタリングなどの点群処理に Point Cloud Library, 仮想物体を配置した VR 環境の構築に Unity を利用した。

仮想物体は障害物、床、ユーザが触れることのできるエリア用に3種類を利用した。さらに、ユーザが提示された触覚体験可能なエリアに触れられるようにするため、VR 環境内でユーザの手をアバター表示した。

3.2 実験環境

7 × 8 m の屋内環境において、端末をかざして歩き回ることによって、3D スキャンを行った。



(a) スキャンした屋内実空間 (b) 生成された VR 環境

図 5: 屋内実空間と生成された VR 環境の比較例



(a) 触覚体験中の VR 環境 (b) (a) に対応する実空間

図 6: 触覚体験中の VR と実空間の比較例

3.3 生成された VR 環境

実験に利用した屋内環境と生成された VR 環境を図 5 に示す。図 5 から、屋内に存在する壁やテーブルなどの障害物の構造に基づいて VR 環境が生成されていることが分かった。また、テーブルのような平面領域の多い障害物は、触覚体験可能なエリアの提示数が多くなっている。

図 6 に、ユーザが VR 内で仮想物体に触れている様子と対応する実空間のテーブルに触れている様子を示す。ユーザの触れた仮想物体にあわせて、対応するテーブルに適切に触れられていることが分かった。また、VR 環境の生成における各工程でかかった時間は、3D スキャンに 720[s]、天井、床、ノイズの除去に 90[s]、クラスタリングに 5[s]、サイズの決定、触れるエリアの提示に 30[s] であった。

図 5 から、屋内構造に基づいて仮想物体を配置できているが、提示されている触覚体験可能なエリアが少ないことが分かる。何も物体が乗っていないテーブルは触れるエリアとして認識されているが、他の部分はそのようなエリアが少ない。これは、実際の障害物と配置する仮想物体との形状のずれによるものと考えられる。このずれは、配置する仮想物体の最大サイズを小さくすることで改善されるが、仮想物体の数が多くなるため、描画する HMD のプロセッサに多くの負担がかかる。また、VR 生成の工程の中で、3D スキャンにかかる時間が全体の多くを占めていることが分かった。これは、スキャンに利用する端末とアプリケーションをより処理能力の高いものに変更することで解決できるが、装置が大掛かりになりやすく、スキャンを端末 1 つで行える手軽さが失われてしまう。

4. おわりに

本論文では、屋内においてユーザが周囲の障害物を違和感無く認識し、没入感を損なうことなく体験可能な VR 環境の生成システムを提案した。事前に屋内の 3D スキャンを

行って得た 3 次元点群に対して、平面検出やクラスタリング、主成分分析などの点群処理を行うことにより、屋内実空間に基づく VR 環境を生成した。また、平面法線の計算を行うことで、ユーザが実際に触ることのできるエリアを提示し、VR に触覚体験を付加した。

今後の課題として、実際の障害物と仮想物体との形状の乖離が挙げられる。提案手法では、仮想物体の形状を直方体に限定しているため、障害物の形状が滑らかな曲面である場合に、置換結果は段差のある角ばった形状となってしまう。この課題に対しては、直方体以外の仮想物体への対応や配置する仮想物体のサイズ、回転角に変化を加える工夫で解決できると考えられる。

また、事前に得た屋内の 3 次元点群を利用するため、屋内のレイアウトが変化してしまうと、再度 3D スキャンを行う必要がある。したがって、より容易に VR 体験を行えるようにするために、リアルタイムで屋内実空間を認識し、VR 環境の自動生成する手法を考える必要がある。

最後に、提案した生成手法を実装したシステムの評価実験を行い、その有効性を確認することが挙げられる。VR 環境の生成結果に対する屋内実空間との一致度を評価する定量評価とユーザの利用における安全性と没入感の定性評価を行うための評価実験を行う予定である。

参考文献

- [1] M. Sra et al. Oasis: Procedurally generated social virtual spaces from 3d scanned real spaces. *IEEE TVCG*, Vol. 24, No. 12, pp. 3174–3187, 2017.
- [2] A. Simeone et al. Substitutional reality: Using the physical environment to design virtual reality experiences. In *Proc. CHI 2015*, pp. 3307–3316. ACM, 2015.
- [3] B. Eckstein et al. Smart substitutional reality. *Entertainment Computing*, p. 100306, 2019.
- [4] D. Lindlbauer et al. Remixed reality: manipulating space and time in augmented reality. In *Proc. CHI 2018*, pp. 1–13, 2018.
- [5] L. Shapira et al. Reality skins: creating immersive and tactile virtual environments. In *Proc. ISMAR 2016*, pp. 115–124. IEEE, 2016.
- [6] K. Kanamori et al. Obstacle avoidance method in real space for virtual reality immersion. In *Proc. ISMAR 2018*, pp. 80–89, 2018.
- [7] M. Fischler et al. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381–395, 1981.
- [8] R. Rusu. Semantic 3d object maps for everyday manipulation in human living environments. *KI-Künstliche Intelligenz*, Vol. 24, No. 4, pp. 345–348, 2010.