

原著論文

フォトグラメトリ技術を用いた建築物の3DCGモデルの試作 －3Dバリアフリーマップの実現に向けて－

柳田恵梨奈、漆山純一

東北福祉大学

要旨

日本の多くの自治体では、高齢者や障がい者を含めたすべての人が生活しやすい街づくりを進めている。その中でも、移動の円滑化という観点からバリアフリー化が推進されており、その情報提供の一環として、Webや紙媒体によるバリアフリーマップが作成されている。しかし、二次元情報だけでは、高齢者や障がい者が必要な情報を補いきれない。そこで、3Dバリアフリーマップで必要な情報が提示できるのではないかと考えた。本研究では、建築物内を含めた3Dバリアフリーマップの実現に向けて、建築物の外観と内部の3DCGモデルの試作を行った。外観は、UAVで撮影した静止画をもとに、フォトグラメトリ技術を用いて作成し、実物に近いスケールで再現した。また、建物内部は縮尺を同じにすることや、適切な配置物の作成、色、明るさなどを考慮して再現した。さらに、段差やエレベーターなどの情報を提示するとともに、建物内を任意に歩き回って見渡すイメージの再現（ウォークスルー）ができた。なお、一部の配置物についてはフォトグラメトリ技術を用いて3DCGモデルを作成した。フォトグラメトリ技術による3DCGモデル作成は、モデリングソフトで一から作成するよりも短時間かつ正確であり、本技術を用いることで、実用性の高い3Dバリアフリーマップ作成に活かすことができると考えられる。

キーワード：バリアフリーマップ、3DCGモデル、フォトグラメトリ、UAV、SfM/MVS処理

1. はじめに

各自治体では、高齢者や障がい者を含めた全ての人が生活しやすい街づくりを進めている。そのため、福祉のまちづくり条例等では、公共建築物の構造および設備や道路などの整備基準を定めている。また、移動や施設を利用する際の利便性や安全性を向上させるために、バリアフリー化を推進している。これらの情報提供の一つとして、バリアフリーマップの作成がある。しかし、車椅子ユーザへの調査では、自治体から提供されているバリアフリーマップの利用率は低いとされている。理由として、印刷物やWeb等による二次元情報では、具体的なバリア情報を把握することは容易ではなく、出先で困ったという経験が挙げられている¹⁾。そのため、バリアフリーマップをはじめとした地図・案内図として、物体を立体的に表示できる三次元情報の活用が考えられる。例えば、一度も行ったことのない場所であっても、三次元情報であれば、どこにエレベーターがあるのか、段差や勾配、スロープの場所など二次元情報では認知しにくい情報を得ることができる。Yanagida et al. 2019の研究では、バリア情報を360度映像として提示することによって、実際の悪路や勾配などの状況が理解しやすいことを報告している²⁾。しかしながら、映像を使用しているため、地図上のどこへでも自由に移動できるわけではない。また撮影方法により映像の揺れが大きく、実際の感覚以上に路面が荒く感じる等、課題が残されている。また、一部に変更があった場合、映像の撮り直しや修正が困難であるという問題があった。

この問題を解決するための方法の一つとして、映像を3DCGモデル化することが考えられる。しかし、公共施設周辺のバリアフリー情報を3DCGモデルで提示しようとした場合、その実現には専門的な知識と、大きなコストがかかる。誰でも簡単に、かつ正確に建物などの3DCGモデルを作成することができれば、これらの問題を解決でき、福祉社会に貢献できると考えられる。

ここで注目されるのが、フォトグラメトリ技術（Photogrammetry技術（後述））である。近年、Structure from Motion（他視点画像からの三次元形状復元；以下、SfMと略す）やMulti-View Stereo（多眼ステレオ；以下MVSと略す）、Scale-invariant feature transform（スケール不変特徴変換；以下SIFTと略す）などの画像処理技術を活用した三次元形状復元技術や撮影位置推定技術が発展し、撮影した画像等からの三次元モデルの生成が簡便に行う事ができるようになっている³⁾。さらに、Unmanned Aerial Vehicle（無人航空機、通称「ドローン」；以下UAVと略す）が一般にも普及し、それにより撮影された映像・画像が、新しい表現手法として、テレビや映画、さらにはSNSにも用いられている。これらを活用すれば、従来の手法より簡単に3DCGモデルを作成できる。

現在、道路や公園など屋外の地図情報をPCやスマートフォンで閲覧できるサービスが提供されている。Webや紙媒体の情報に加え、このような地図を用いて移動のシミュレーションを行うことができる。しかし、これらのサービスではほとんど屋外の情報しか得られない。そのため、施設に到着することができても施設内を移動する際にバリアに直面してしまう。ドアの広さや多目的トイレ、エレベーターまでの経路など、移動の円滑化や生活しやすい環境を整えていても、情報が足りないことで不自由さを感じてしまう。

そこで、本研究では3Dバリアフリーマップ作成の実現に向けて、UAVで撮影した写真から建築物の外観の3DCGモデルを作成することと共に、内部を作りこみ、建築物の内部を自由にウォークスルーできる3DCGモデルの試作を目的とする。今回はその過程と再現性について報告する。

2. フォトグラメトリ技術について

2.1 フォトグラメトリ技術

フォトグラメトリ技術とは、複数枚撮影されたデジタル写真を元に3DCGモデルを作成する一連のプロセスのことである。フォトグラメトリ技術の中で重要となってくるのがSfM/MVSである。撮影された写真から特徴点の抽出を行い、画像間の共通特徴点の認識、カメラモデルの最適化を行い⁴⁾、簡易的な三次元点群データの作成を行う。そこで作成された三次元点群データをもとにMVS処理を施し、さらに点群が高密度化される⁵⁾⁶⁾。それを元に3DCGモデルの作成を行う。処理の一連の流れとしては以下の通りである（Fig. 1）。

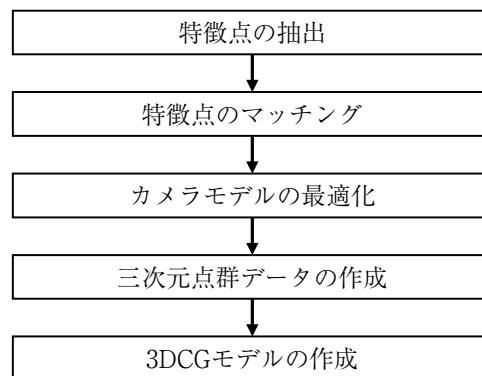


Fig. 1 フォトグラメトリ技術

2.2 SfM/MVS 処理

形や色などの際立った部分の点群データを特徴点と呼ぶ。まず、SfM 処理で同じ物体を別角度から撮影された写真から特徴点の抽出を行う。特徴点の抽出には SIFT のアルゴリズムを用いられている。このアルゴリズムは、特徴点検出（ディテクタ）と特徴量記述（ディスクリプタ）で構成される。ディテクタは画像からの特徴点の候補（輝度変化が最大となる画像上の位置）とスケール（特徴点における画像の拡大率に対応する値）を検出し、有効な特徴点の候補を絞り込むことによって、画像の特徴点を検出する。ディスクリプタでは、ディテクタによって検出された特徴点のそれぞれについて「向き」を定義する。そして、画像の回転変化に不変な特徴量（特徴ベクトル）を取得する⁷⁾。

決定された特徴点をもとに、複数の画像を比べて特徴点類似している部分を同一とみなしマッチングする。異なる画像を比べマッチングされた特徴点がどれだけ移動しているかで視差を求める。この視差をもとに撮影したカメラの位置・角度の推定を行う。そのため SfM 処理に用いる画像はオーバーラップ率（被写体の同一部分が画像中に含まれている割合）が高いほど共通の特徴点が増え、3 DCG モデルの精度が向上する⁸⁾。さらに画像に含まれる Exchangeable image file format（以下 Exif と略す）を用いる。これは GPS 機能を搭載する媒体で撮影された画像に含まれる情報であり、撮影日、本体情報、位置情報、焦点距離や絞り値等のデータが含まれている。SfM/MVS 処理には Exif の位置情報等を付加することでより正確な 3 DCG モデルの生成が可能となる。

SfM 処理だけでは簡素な 3 DCG モデルになってしまう。そのため、SfM 処理により得られたカメラパラメータおよび画像情報を利用し MVS 処理に移る。MVS 処理では高密度な三次元点群を算出することで、テクスチャ付きポリゴンモデルとして復元を行う。また、MVS の一手法である patch-based-Multi-view Stereo (PMVS) では、画素群から法線付きの三次元点群を復元し、それをメッシュモデルに変換することで、より再現度の高い 3 DCG モデルの作成ができる。

3. 開発工程

本研究では、3D バリアフリーマップ等への応用を考え、建築物を 3 DCG モデルで再現し、VR 空間内でその建築物内をウォークスルーできるソフトウェアの開発を行った。開発環境は Table 1 に示す。再現した建築物は、東北福祉大学国見ヶ丘第一キャンパス ウェルコム21である。6階建てであり、屋上（PH 階）を有する建物である。正面が半円形状のガラス張りの特徴的な建物である。

Table 1 開発環境

開発機器	Dell G 3 15
開発 OS	Windows10 Pro
統合開発環境	Unity Technologies : Unity5.6.3p 2 (開発言語 C#) 使用目的 ソフトウェアの開発 建物外観の修正、テクスチャの設定
使用ソフトウェア	Agisoft : PhotoScan Autodesk : ReCap Photo 使用目的 フォトグラメトリ作成 Blender Foundation : Blender2.7.9 使用目的 3 DCG モデルの修正、建物内部の作成

3.1 建築物外観の作成

フォトグラメトリ技術を用いて、建築物を3DCGモデルで再現するためには、建築物を様々な角度から撮影する必要がある。また、フォトグラメトリ技術を用いるためにカメラを搭載したUAVを用いて撮影を行った。使用したUAVは、DJI社PHANTOM 4 Pro+V2.0である (Table 2、Fig. 2)。

Table 2 PHANTOM 4 Pro+V2.0

機 体	
機体形式	マルチモーター方式 (4 軸)
動力	モーター式 (バッテリー駆動)
重量	1375g
対角寸法	350mm
最大速度	72km/h (Sモード)、58km/h (Aモード)、50km/h (Pモード)
運用限界高度 (海拔)	6000m
最大風圧抵抗	10m/s
最大飛行時間	約30分

カメラ	
センサ	1" CMOS、有効画素数 : 2,000万画素
レンズ	視野角 : 84°、8.8mm/24mm (35mm 判換算)、 f/2.8~f/11 オートフォーカス (1m~∞)



Fig. 2 PHANTOM 4 Pro+V2.0と操作用コントローラ

UAVに搭載されたカメラを用いて、視野角84度、オートフォーカスで、5472 × 3078ピクセルの画像を様々な位置から240枚撮影した。なお、撮影時の天候は曇りであった。

撮影した画像をもとに3DCGモデルを作成した。3DCGモデル作成に用いたソフトウェアは、Agisoft社PhotoScanである。フォトグラメトリ技術を使用することで3DCGを作成する事ができ、地形や測量の分野など大きなものに対しても使用可能である。

本研究では撮影した写真より192枚を使用した。撮影した写真をPhotoScanにインポートしアライメントを行うことで、撮影位置の推定や位置合わせを行い、粗い点群データを取得することができる (Fig. 3)。さらに高密度構築クラウドを実行する事で、アライメントした点群データより高密度な点群データが取得できる (Fig. 4)。この高密度点群データの生成の過程でメッシュデータが得られる。これらの処理により外観のモデルが生成された。作成された3DCGモデルはFBX形式でエクスポートした。

作成した3DCGモデルをウォークスルーできるようにするため、Unityへインポートしようと試みた。

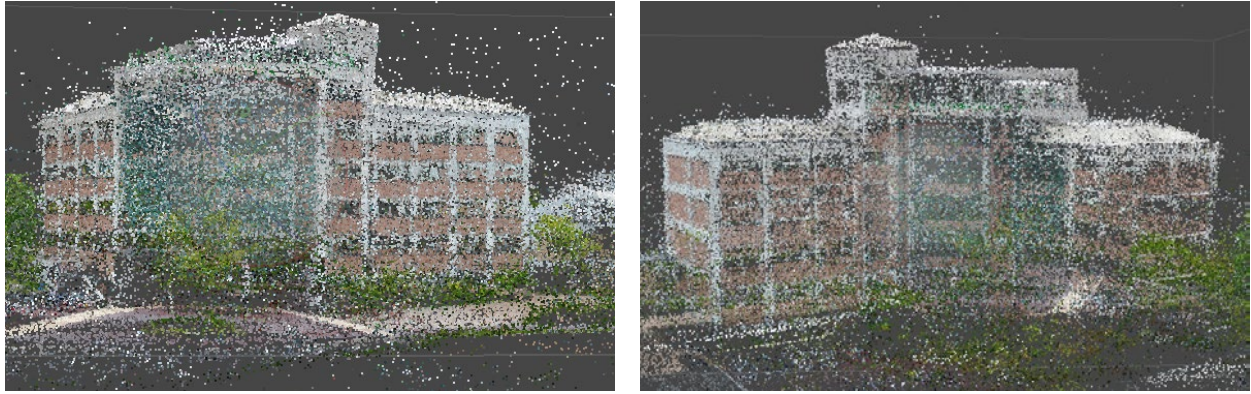


Fig. 3 写真から抽出した点群データ (左：正面、右：背面)

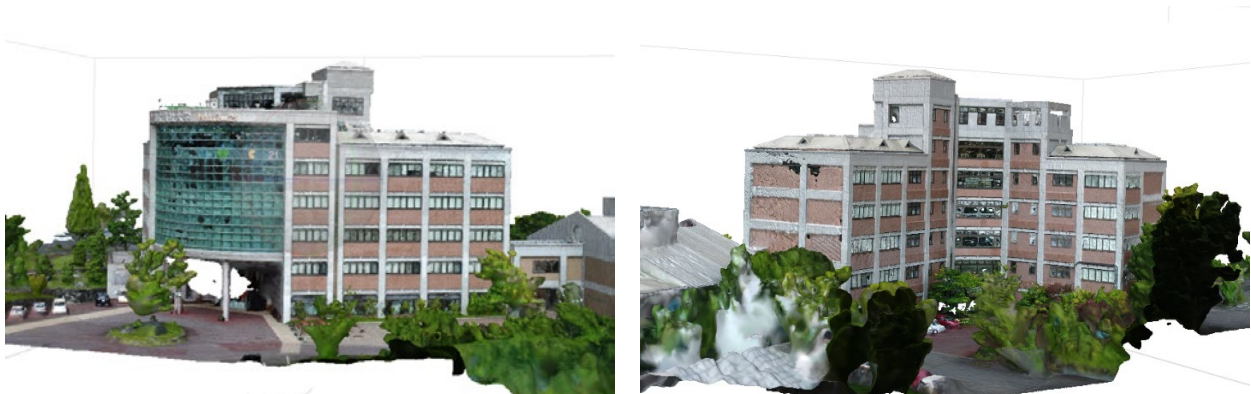


Fig. 4 高密度色付点群データ (左：正面、右：背面)

しかし、ファイルの容量が大きくインポートができなかった。この現象はポリゴン数が多いことが原因の一つであった。そのため、Blenderで修正を行った。まずは、頂点を削減する作業を行った。モディファイアから「ポリゴン数の削減」を選択し、3DCGモデルの形状を損なわないところまで頂点数の削減を行った。頂点数を減らした後は、平坦な部分で頂点数が少なくてもよいと判断した部分をBlenderのツール内の「重複頂点の削除」により頂点の削減を行った。この作業により、約120万あった頂点数を約14万まで減らすことができた。また、窓の鏡面や陰になってしまい、構築が不鮮明である箇所や欠損部分については面を一旦削除し、新しくメッシュの張り直しを行った (Fig. 5)。これらの作業により、Photo Scanで生成されたテクスチャデータが壊れた。そのため新しくテクスチャデータを作成し、UV展開図

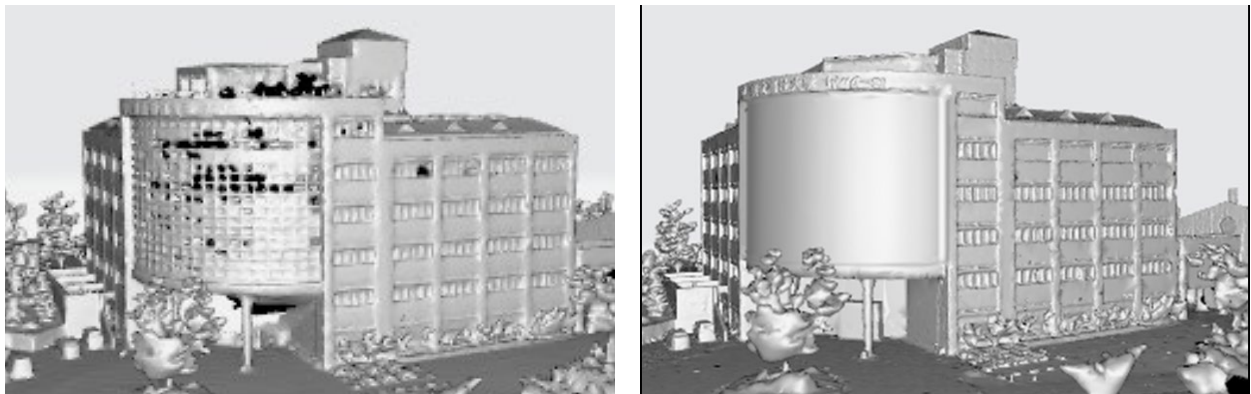


Fig. 5 Blenderにインポートしたもの (左：修正前、右：修正後)

として3DCGモデルに対応させた。

これらの作業を行うことで3DCGモデルをUnityへインポートすることができた。テクスチャデータに加え、Material機能により、鏡面や建物全体の色の設定を行うことで忠実に再現することができた(Fig. 6)。完成した3DCGモデルはFig. 7である。

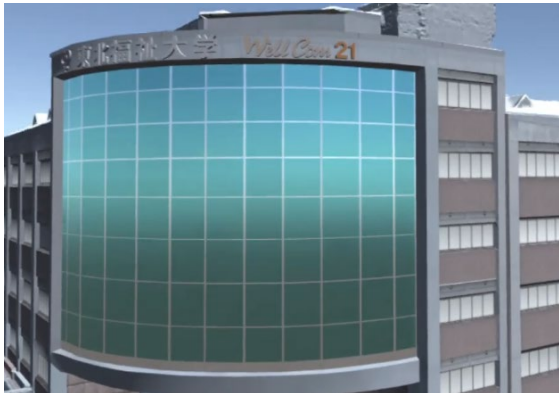


Fig. 6 鏡面箇所



Fig. 7 建物外観の完成図

3.2 教具や机の作成

建物内をウォークスルーするため、内部の作成も行った。まずは、建物内にある教具や机の作成を行った。ウェルコム21内にある机や黒板については、Blenderを用いて手作業で3DCGモデルの作成を行った。複雑な形状をしているものはBlenderで再現することは難しい。そこで、水治療法室にある浴槽はAutodesk社ReCap Photoを用いてモデリングした(Fig. 8)。事前検証の結果、ReCap Photoでも再現度が高い3DCGモデルを作成できることが分かった(資料1)。今回は水治療法室にある浴槽を100枚撮影し3DCGモデルを作成した。この3DCGモデルもFBX形式でエクスポートし、Blenderによる修正を行った。



Fig. 8 ReCap Photoで作成した浴槽(左:実物、中:上部、右:側面)

資料1 ReCap Photo による3 DCG モデル作成

検証では評価版の ReCap Photo を使用した。評価版ではモデルの作成に写真の必要枚数は最低20枚、最大100枚である。そのため、20枚から10枚ずつ写真の枚数を増やしながら、画像の枚数による3 DCG モデル再現度の差について検証を行った。検証方法の手順は以下の通りである。

- 1) 被写体は縦約40cm、横約45cm、高さ約85cmの椅子を使用する。被写体を中心として、放射状に撮影する。被写体からの距離は1 m に統一する。
- 2) 初めに、90度おきに4地点で撮影する。なお、各地点では、地面から高さを20cmずつ上げ、5か所で1枚ずつ撮影する。
- 3) 次に、被写体正面から18度ずつ水平方向に移動して撮影する。この際、対角線にあたる地点でも同様に撮影する。
- 4) 最終的には20地点×5か所の計100枚までの検証を行う。

作成された3 DCG モデルの抜粋を以下に示す (Fig. 9)。



Fig. 9 枚数による比較

検証の結果、枚数や角度が増える事でオーバーラップ率が上がり、高精度で生成されている。枚数が少ないものは、余計な部分を点群データとしてしまうため、不完全な3 DCG モデルになってしまう事が明らかとなった。

3.3 フロア・建具の作成

建物内部のフロア再現のため、写真撮影、計測を行った。建物の一部分を実際に計測し、それに対応した校地・校舎配置図 (Fig. 10) を活用し、縮尺を計算した。その縮尺をもとにすべての階の床・天井・壁をBlenderでモデリングした (Fig. 11)。ドアや窓の切り抜きを行い、テクスチャを設定した。UnityへインポートしMaterialを使用することで壁などの質感の設定を行い、内部を再現した (Fig. 12)。また、建物内のガラスや配置物、床の一部は実際の写真を使用した (Fig. 13)。実際の写真を使用する場合、「UV/画像エディタ」からUV展開を行い、頂点を合わせていくことでテクスチャを設定する。作成したテクスチャよりも実際の写真を用いることで、より再現性の高いフロアとなった。作成したフロアに配置物や机を実際の建物同様に配置し、内部の再現を行った。

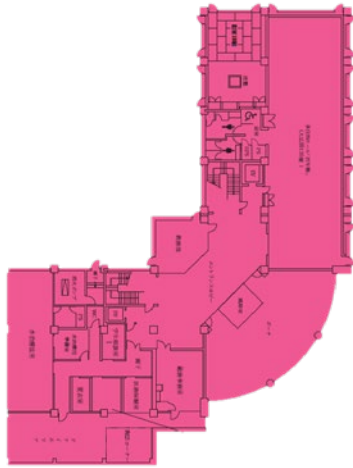


Fig. 10 フloor図



Fig. 11 作成した建物内フロア

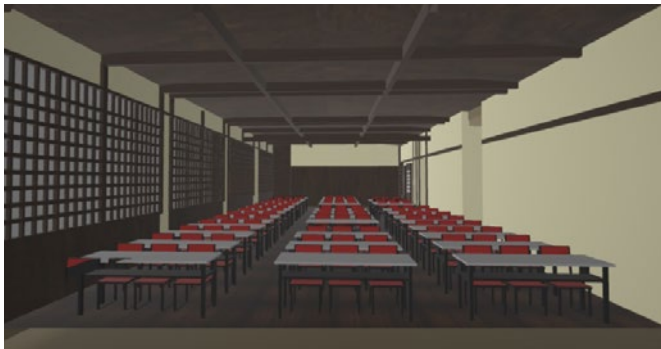


Fig. 12 テクスチャを貼り付けた教室

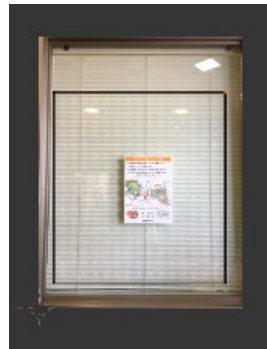


Fig. 13 写真を使用したテクスチャ

3.4 ライトの設定

Unityへインポートしたあとにライトの設定を行った。建物内の各部屋のライトを調節することで、ウォークスルーした際の違和感の軽減を行った。Unityではライトの向きや明るさを細かく調節することができる。各部屋に透明なオブジェクトを配置し、部屋の大きさに応じてライトの個数や向き、明るさを調節した (Fig. 14)。

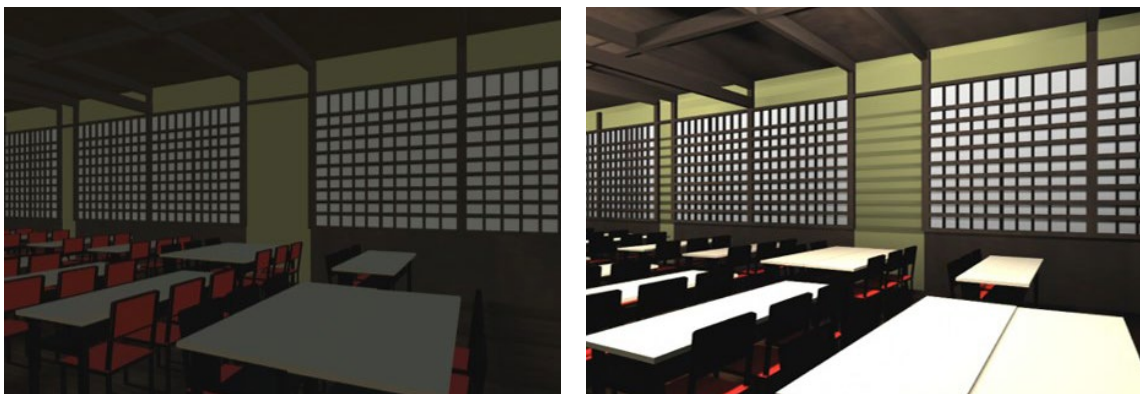


Fig. 14 ライトの設定 (左：設定前、右：設定後)

3.5 操作方法

作成した3DCGモデルをUnity上でウォークスルーできるようにするため、コードの作成を行った(Fig. 15)。提示方法として、HMDを装着しながら操作することも想定し、コンピュータから離れていても操作可能なXboxコントローラを採用している(Fig. 16)。各ボタンの操作の割り当てについてはTable 3に記載する。

```

36 float x = Input.GetAxis ("Horizontal") * m_sencitive; //X 方向の現在座標
37 float y = Input.GetAxis ("Vertical") * m_sencitive; //y 方向の現在座標
38 m_TiltAngle -= y * m_TurnSpeed; // 上下角制限
39 m_TiltAngle = Mathf.Clamp (m_TiltAngle, -m_TiltMin, m_TiltMax) ;
40 m_LookAngle += x * m_TurnSpeed; // 横方向の回転角
41 m_TransformTargetRot = Quaternion.Euler (0 f, m_LookAngle, 0 f) ;
42 m_PivotTargetRot = Quaternion.Euler (m_TiltAngle, m_PivotEulers.y, m_PivotEulers.z) ;
   //m_Pivot を X 軸回転させる
43 m_Pivot.localRotation = Quaternion.Slerp
   (m_Pivot.localRotation, m_PivotTargetRot, m_TurnSmoothing * Time.deltaTime) ;
   //m_TurnSmoothing 値に応じた速度で向ける
44 m_TFM.localRotation = Quaternion.Slerp
   (m_TFM.localRotation, m_TransformTargetRot, m_TurnSmoothing * Time.deltaTime)
   //m_TFM を Y 軸回転させる

```

Fig. 15 建物外をカメラ移動させるコード (一部抜粋)



Fig. 16 Xbox コントローラ

Table 3 コントローラのボタン配置

ボタン	ウェルコム屋外	ウェルコム屋内
①	建物の外部を回転移動する	移動
②	屋外・室内の画面切り替え選択	屋外・室内の画面切り替え
③	押されているときのみ移動可能	-
④	画面切り替え選択の決定	画面切り替え選択の決定
⑤	ズームアウト	-
⑥	ズームイン	-

建物外観と内部のフロアごとにシーンを作成し、コントローラを用いてシーン遷移ができるように設定を行った。Unity では、作成したシーンを呼び出すことで場面の切り替えを行っている。そのため、当たり判定を用いることでシーンの呼び出しを行った。当たり判定とは、オブジェクト同士が衝突した際に行う処理の事である。今回は、視点カメラとシーン遷移を行う箇所（ドアや階段）に当たり判定を設定している。当たり判定を設定するためには、シーン遷移を行う箇所に Cube オブジェクトを作成し、物理特性エンジンを可能とするための Rigidbody を追加する。Rigidbody を追加することで、Collider が入っているオブジェクトと衝突した際、当たり判定を得ることができる。これにより、当たり判定によるシーン遷移が可能となる。また、壁のすり抜けを防止することもできる (Fig. 17)。



Fig. 17 当たり判定 (左：設定前、右：設定後)

当たり判定を行う Cube オブジェクトには透明な Material を作成した。Material の Rendering mode を Fade に設定し、色を設定する RGBA の Alpha (透明度) を 0 に設定することで透明な Material の作成が可能である。シーンを切り替えるためのコードは Fig. 18 に示す。また、シーンの遷移は Fig. 19 の通りである。

```
4 using UnityEngine.SceneManagement; //シーンを切り替えるために必要なエンジン
5
6 public class naka : MonoBehaviour {
7     void OnCollisionEnter (Collision collision) {
8         if (collision.gameObject.tag == "Player") { //Player のタグに触れた時
9             SceneManager.LoadScene ("Rooms") ; //1階へ移動
13        }
14    }
15 }
```

Fig. 18 シーンを切り替えるためのコード (一部抜粋)



Fig. 19 シーン遷移

4. 考察

本報告では、ウェルコム21の外観と建物内部を3DCGモデルで再現した。建物外観の再現には、UAVで撮影した静止画（192枚）をもとに、フォトグラメトリ技術を用いて作成した。作成された3DCGモデルの大きさは28.7mであり、実際と比べると誤差約0.35%であった（Fig. 20、Fig. 21）。本研究で作成した3DCGモデルは、誤差も少なく実物に近いスケールでの再現ができた。建物内部は、ウォークスルーできるようになった。廊下や各部屋の明るさを調節し、実際の部屋と同じ箇所に配置物を設置している。そのため、階段やエレベーターの場所、距離、幅などを把握しやすいものとなった。また、屋内のガラス面や配置物の一部は、テクスチャの設定で写真を対応させたこともあり、リアルに再現することができた。しかし、手作業で作成したため、時間がかかってしまった。そのため、教具の一部である水治療法室の浴槽は、フォトグラメトリ技術を用いて3DCGモデルを作成した。

フォトグラメトリ技術は、事前検証の結果にもある通り、撮影の環境を整えることとExif情報を含めた画像があれば3DCGモデル化までは専門的な技術を必要としない。3DCGモデル作成の大きなハードルの一つがモデリングである。フォトグラメトリ技術を用いると、モデリングソフトを用いて一から3DCGモデルを作成する場合と比べ、短時間かつ正確に作成できる。しかし、大きな建物の作成ではポリゴン数が多くなることや、材質や明るさの影響から特徴点の抽出が難しく、手直しが必要である。

今後、撮影方法や適切な写真の枚数、解像度の高いカメラで撮影するなど、点群データの欠損などを少なくする方法を検討することで、フォトグラメトリ技術で様々なものを作成できるようになると考える。

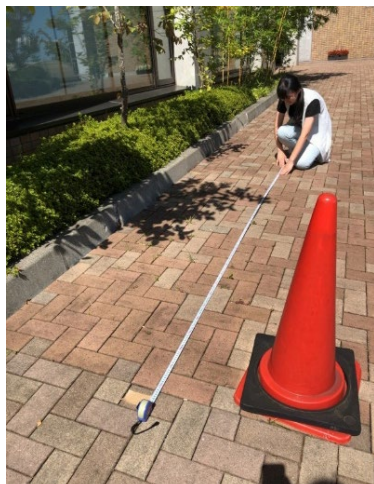


Fig. 20 実際に計測している様子



Fig. 21 3DCGモデル上の計測値

5. まとめ

本研究では、3D バリアフリーマップの実現に向けて、建築物の3DCGモデルの作成を行った。建物外観は、UAVで撮影した写真からフォトグラメトリ技術を用いて、再現度の高い3DCGモデルが作成された。また、建物内部は、Blenderでのモデリングとフォトグラメトリ技術によって再現を行った。縮尺を同じにすることや、適切な配置物の作成、色、明るさなどを考慮することでリアルに再現することができた。段差やエレベーターなどの情報を提示するとともに、ウォークスルーを行うことができるようになった。今後、勾配やスロープなど高齢者や障がい者に必要な情報をフォトグラメトリ技術で再現することで、建物内外のウォークスルーが可能になると考えられる。そのため、本研究で用いた技術を使用することで、3D バリアフリーマップの実現が可能となり、情報の提供に貢献できると考えられる。

謝辞

本研究は、東北福祉大学感性福祉研究所において、文部科学省の研究施設運営支援の助成を得て行われました。また、研究に協力して頂いた近藤夏希さん、滝澤奈々子さんに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 荒井雅代「車椅子ユーザーの交通に関する真に役立つバリアフリー情報」, 『社会デザイン学会 学会誌』 Vol. 10, 2018
- 2) Erina Yanagida, Yoko Usui, Katsumi Sato “Comparison of Video Images and VR Images for Effective Barrier-Free Map Creation”, *World Conference on Educational Media and Technology*, 2019
- 3) 渡邊圭, 庭野道夫, 山口政人, 鹿納晴尚, 高嶋礼詩「ドローンを用いた被災地域の三次元地形モデル作成の試み－崩落地域の地形を例に－」, 『感性福祉研究所年報』 第20号141-151, 2019.
- 4) 河野洋行, 松岡昌志, 牧紀男, 堀江啓「SfM-MVS技術を用いた空撮写真による3次元モデルからの地震建物被害の抽出」, 『日本建築学会構造系論文集』 第82巻 第735号, 2017
- 5) 山本恵久 (2020年12月18日). 写真から3D空間を起こしてアーカイブや防災に展開, 旧都城市民会館の「保存」も. 日経クロステック, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01457/102700005/>.
- 6) 中野一也 (朝日航洋株式会社 商品企画部 G空間研究室). 『第三回 SfMによる三次元形状復元ソフトウェアについて』, 「写真測量とリモートセンシング」VOL 55, NO. 5. 2016
- 7) 藤吉弘亘「Gradientベースの特徴抽出－SIFTとFOG－」, 『情報処理学会研究報告』, CVIM-160, pp. 211-224, 2007
- 8) 加治佐剛, 鎌田侑成, 寺岡行雄 UAVを用いたSfMによる単木3Dモデリング－画像オーバーラップ率が3Dモデルの精度に与える影響－. 九州森林研究 NO. 70, 2017