

## (21) レーザスキャンデータを用いたマーカレスAR による地下空間浸水予測の可視化

廣瀬 詢<sup>1</sup>・安室 喜弘<sup>2</sup>・檀 寛成<sup>3</sup>・窪田 諭<sup>2</sup>・尾崎 平<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 非会員 関西大学大学院 理工学研究科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)

<sup>2</sup> 正会員 <sup>3</sup> 非会員 関西大学教授 環境都市工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)

E-mail: {k466162,yasumuro}@kansai-u.ac.jp

近年、短時間集中豪雨の多発による都市部での浸水被害に伴い、都市部の地下街へ水が流入する内水氾濫の被害も増加してきている。降雨状況から予測される地下浸水被害の解析は進んでいるものの、予測浸水情報を一般市民に分り易く還元する方法は未解決である。また、ユーザ地点における浸水予測をAR (Augmented Reality) で可視化する既存のシステムでは、GPSでユーザ位置を特定しているため、地下空間での利用は難しい。本研究ではレーザスキャナによる点群データを利用したマーカレスAR手法を提案する。点群データから生成した多視点画像の自然特徴を利用することで、ユーザ視点を推定し予測浸水状況をAR表示する。

**Key Words:** flood-control measure, augmented reality, indoor localization, laser scanner

### 1. はじめに

近年、短時間の集中豪雨による都市部での浸水被害が増加している。平成25年8月25日には、大阪市周辺において局地的な短時間豪雨により、内水氾濫が発生し、床上浸水、床下浸水、道路の冠水などの被害をもたらした。内水氾濫の原因は、下水道による雨水排除能力の脆弱性である。短時間の集中豪雨により、時間雨量が下水の雨水排除能力を上回っている。また、都市部には地下駐車場や、地下鉄、地下街のような地下空間利用がなされているため、内水氾濫のリスクが高くなっている。現状の水害対策として、国土交通省は洪水時の浸水予測地域を公表しており、各市町村では、洪水ハザードマップの普及促進が図られている。しかし、このハザードマップには地下空間での内水氾濫が明確には含まれていない。しかも、地上におけるハザードマップにおいても実際に現場各地で起こり得る浸水深の程度は理解しづらいことが多く、記載情報も複雑なものとなる傾向がある。したがって、地上からの流入に対する地下での洪水対策も十分とは言えない。本研究では、地下水害の予測情報を対話的に可視化し、ハザードマップとして機能するシステムを提案する。既往の水害シミュレーションと連携し、スマートフォン等のモバイル端末において、ユーザの立ち位置や視点に合わせた可視化システムを創出することで、災害時の浸水対策・避難準備に役立つよう実現する

ことを目的とする。

### 2. 関連研究・技術

#### (1) 地下空間の内水氾濫予測

尾崎らは短時間集中豪雨に伴う内水氾濫による地下街浸水について、3種類の豪雨モデルを用いて地上の内水氾濫解析と地下街への浸水解析を行い、地下街の構造を考慮した浸水状況の時系列を2次元の地図に表示している。地盤高や地下構造、地下街各所での空間の利用形態を踏査して考慮した粗度係数を使い精度の高い浸水解析を行っている。ただし、解析結果は、浸水深を時間別に地図上に色分けして表示されるため、直感的には浸水被災状況が理解し難い。そのため、これらの情報伝達のためには、地下空間利用者にとって容易に理解できるような浸水表現が必要である。

#### (2) AR浸水可視化アプリ

株式会社キャドセンサーは、ハザードマップの内容を実写の映像に合成することができるアプリケーションを開発している。GPSを利用することで、ユーザの位置に合わせたハザード情報も表示することができる。実写に重ねて合成される浸水情報は、やはり奥行き感の無い抽象的な表現となり直感的に理解しづらく、また、GPSが利

用できない地下空間には未対応である。

### (3) 従来のマーカレス AR 手法とその問題点

マーカレス AR は特別なマーカ無しに端末の位置や姿勢を推定し、それに合わせた情報を可視化する技術である。従来のマーカレス AR 手法では 3 次元構成された点と 2 次元上の点を事前に対応付け、新たに入力された画像に対して PnP (Perspective-n-point) 問題を解くことで端末の位置や姿勢を推定する方法が一般的である。対応付けの手法としては、レーザスキャナで 2 次元点と 3 次元点を同時に測位する方法や、SfM によって 2 次元点から 3 次元再構成を行い対応付ける方法等がある。レーザスキャナによる方法では簡単かつ正確な対応付けが行えるが、スキャナ機種によっては画像情報が陽に公開されず、2 次元と 3 次元の対応が取り出せないことがある。SfM による方法では、2 次元情報から 3 次元情報を再構成するため、確実に対応付けはできるが、SfM の精度によって 3 次元情報の正確性が担保されない。そのため、どのレーザスキャナにも適用でき、かつ正確性が担保される汎用的な手法が必要である。

## 3. 提案手法

### (1) 概要

本研究では浸水情報を視覚的に分かりやすく提供するために、水面と物体との隠蔽関係を考慮した AR 表現を目指す。また、カメラ付き携帯端末で撮った画像から抽出される自然特徴点を用いた位置推定により、地下空間のような GPS が使えない環境でも、ユーザ端末の視点に合わせて浸水深を AR 表示するシステムを提案する。

### (2) AR システム

予測される浸水深を反映させて CG で仮想的な水面を作成し、実写に重ね合わせることで対象空間における浸水状況の AR 表示を実現する。事前準備として、レーザスキャナを用いて対象空間内の 3 次元点群データを収集し、それを基にして対象空間の 3D モデルを作成する。この 3D モデルは、現地の対象空間において、地物を水面が回り込んだ様子を表現する役割を果たす。すなわち、水面と現地の物体との隠蔽関係を示すことで、浸水の深さが直感的に表現されることが期待できる。3 次元点群から 3D モデルを生成する方法としては、手作業でポリゴンを編集する方法のほか、自動生成する方法の実装がフリーソフトでも利用できる<sup>3)</sup>。ユーザ端末が写真を撮影した位置を推定するために図-1 に示すようなシステムを構築する。まず、事前にレーザスキャナで得られた 3 次元点群に対して、様々な視点を設定して CG と

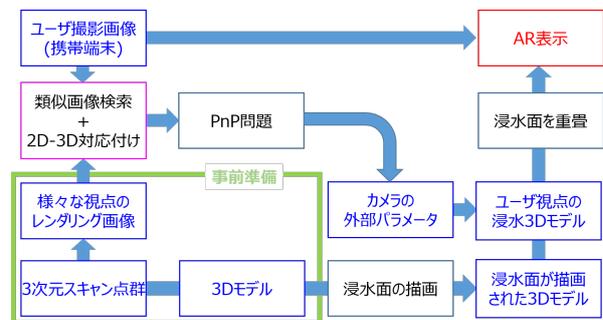


図-1 提案手法による処理手順

してレンダリングした画像を生成することで、現地で撮影したかのような画像を人工的に複数用意する。各画像は 3 次元点群を投影して合成されているため、画像上の各画素には点群の 3 次元座標とが対応している。

一方、ユーザ撮影画像に対しても同様の自然特徴点を抽出し、その中からユーザ画像との特徴点一致が多いものを類似レンダリング画像として採用する。レンダリング画像を介して得られる 3 次元点群とユーザ画像の 2 次元座標との組み合わせを用いて、PnP 問題を解くことにより、対象空間の 3D モデル座標系上での端末カメラの外部パラメータを推定できる。対象空間内の 3D モデルを描画し、さらに水面を描画した後、推定されたカメラパラメータに合わせて視点を動かすことユーザ視点での対象空間の予測浸水深を CG で描画できる。最終的に 3D モデル上の水面のみを撮影画像に重畳することで浸水状況の AR 表示が実現できる。

### (3) 2 次元点と 3 次元点の対応付け

2 次元点と 3 次元の対応付け手法として図-2 のようなプロセスを行った。レーザスキャナで取得した 3 次元点の座標と色情報をファイルで読み取り、CG としてレンダリングして表示したフレームを画像化する。図-3 に模式的に示すように、レーザスキャナは極座標で表される水平・垂直方向の角度で制御された各方向に対する距

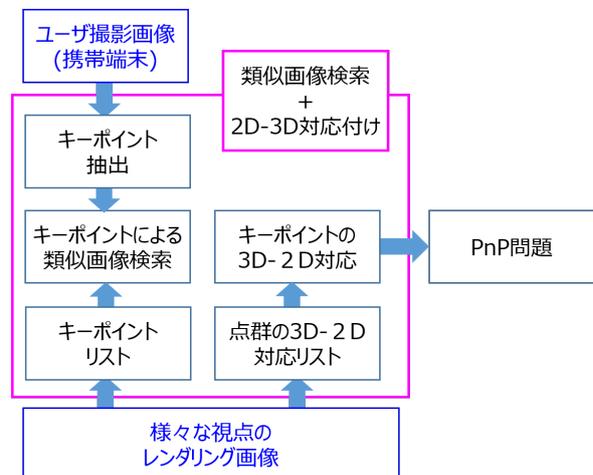


図-2 ユーザ画像における 2 次元と 3 次元の対応付け

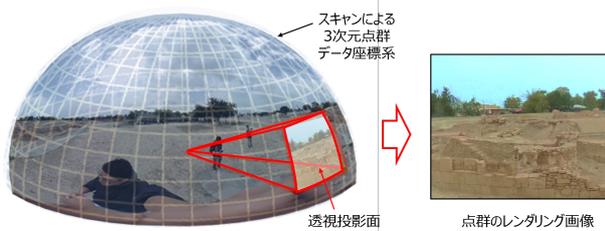


図-3 3次元点群からのレンダリング画像の生成

離情報として点群を獲得する。レーザスキャナは校正済みのデジタルカメラと連動して、各点には色情報も割付けられている。したがって、コンピュータ上で視点位置、視線方向、画角などの設定を行って、2次元画面上に投影することで、任意のカメラアングルでスキャンされたシーンの仮想的な写真画像を生成できる。その際の仮想カメラの位置姿勢、画角や画面サイズに関連する各種座標変換（モデリング変換、透視投影変換、ビューポート変換）を介して、3次元点が2次元画面上のどの位置に投影されてレンダリングされたかを把握することができる。これによりレンダリング画像に投影された点それぞれの2次元座標に対して、対応付けられた3次元座標が取得できる。特徴点による対応付けの方法としては、事前に作成したレンダリング画像群に対して自然特徴点としてキーポイントを抽出しリストとして保存しておく。入力画像に対しても同様のキーポイントを用いて自然特徴点を抽出する。入力画像で抽出した自然特徴点を事前に取得したレンダリング画像の自然特徴点と比較し、類似度が高い画像を類似画像として選択する。類似画像と入力画像間で特徴量マッチングを行い、一致した点の3次元座標を取得することで自然特徴点の2D-3D対応が取得できる。取得された対応関係と、2D座標、3D座標、カメラの内部パラメータを用いてPnP問題を解くことにより、3Dモデルの座標系上での端末カメラの外部パラメータを推定できる。

#### 4. 実装実験

本研究では、地下構造となっている阪急電鉄関大前駅の南改札口を対象空間とし、レーザスキャナ (Focus3D, FARO 社製) を用いた現地での実測により3次元点群を取得した。ユーザ端末として iPhone4 を用いた。開発環境には Visual Studio 2010 (Microsoft 社) を用い、レンダリング画像作成や、浸水深の AR 表示には OpenGL を利用してプログラムを作成した。図-4 は3次元点群からレンダリングして得た画像の例である。自然特徴点には、回転や移動に不変で、比較的处理が速い SURF<sup>3)</sup> を使用し、ユーザ端末の内部パラメータ取得や外部パラメータ



図-4 点群からレンダリング画像の例

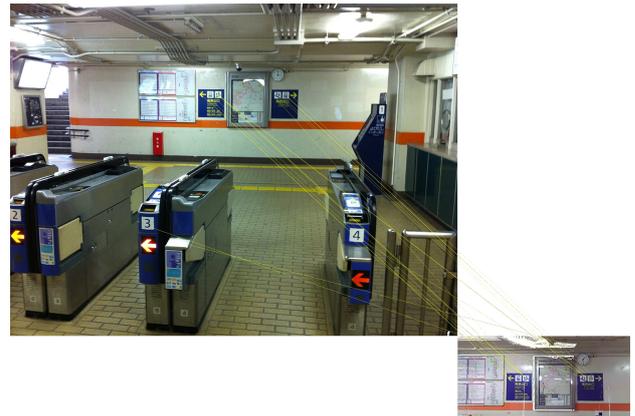


図-5 特徴点对応づけの結果例：ユーザ撮影画像(左)と点群レンダリング画像(右)とで類似する特徴点を線で結んでいる

タ推定などの画像処理ライブラリとして OpenCV を用いた。図-5 は、ユーザ端末画像とレンダリング画像の1枚とでキーポイントが対応付けられている様子を示している。フリーの点群編集ソフト MeshLab<sup>4)</sup> に実装されたポアソンメッシュ<sup>5)</sup>により、対象空間の3次元点群からポリゴンの3Dモデルを作成した。図-6に3次元点群データと、作成した3Dモデルを示す。図-7(上)は推定されたユーザ端末位置から見た3Dモデルにより浸水状況を表現したものである。浸水深に相当する高さに水平な平面ポリゴンを設定し、その表面には適当な水面模様のテクスチャをマッピングし、透過率を与えて浸水を表現している。図-7(下)は、ステンシルバッファを利用して、ユーザ視点から見える水面だけを抽出し、ユーザ端末画像に重畳した AR 表示結果である。

#### 5. 考察

本研究では任意の撮影視点・方向から浸水深の AR 表示が可能となり、壁面や改札機などを水が回りこんだ浸水状況が表現できている。また、浸水深も定量的に変更可能であり、雨量と場所によって変化する予測浸水深に合わせて表現することができる。事前にレーザスキャナで計測を実施し、点群データをレンダリングして画像化

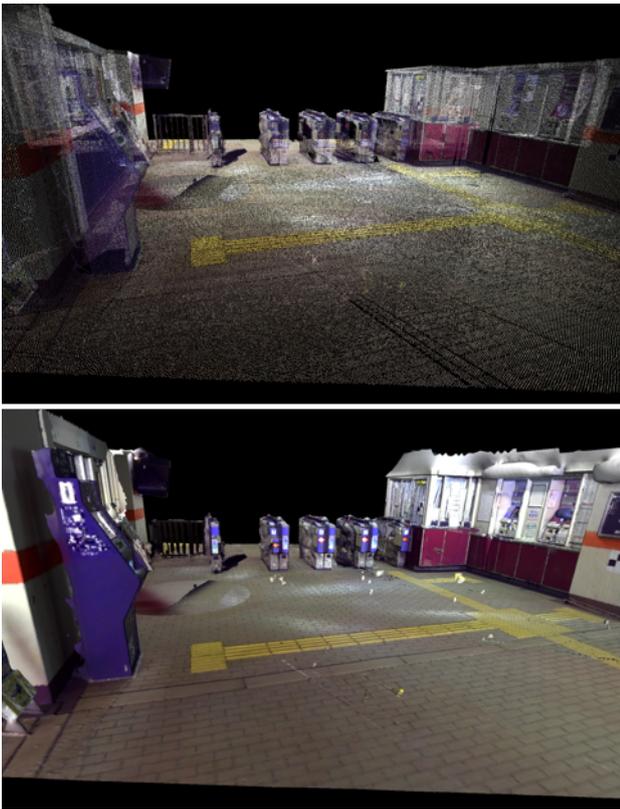


図-6 取得した3次元点群

する必要はあるものの、ユーザの入力画像と一貫した特徴点により対応づけができ、PnP に用いる対応座標を取り出すことができ、レーザスキャナで取得した点群の汎用な参照方法が実現できた。しかし、目視で確認できる通りモデルと実際の地物の間には誤差が存在する。今後は、自己位置推定の精度を上げるため、PnP 問題の解の精度が上がるような点対応の組み合わせを選択的に抽出する必要があると考える。

## 6. おわりに

本研究では、現場をレーザスキャナで計測したデータと、モバイル端末で撮影した画像の特徴点とを利用して端末のカメラパラメータを推定し、得られたカメラパラメータを用いて、撮影写真と浸水深情報の重畳を行うことで、ユーザの任意の撮影視点・方向からの対象空間の浸水深を3次元可視化できる手法を提案した。これにより一般ユーザは予測される浸水深を端末のみで見ることができ、ハザード情報の公開に寄与できると考えられる。

今後は、端末内蔵のジャイロセンサ等で得られるカメラの姿勢情報を、制約条件として PnP 問題に加え、端末位置推定の高速化と精度向上を図り、端末の動きに柔軟に対応させることが課題である。また、浸水解析で得ら

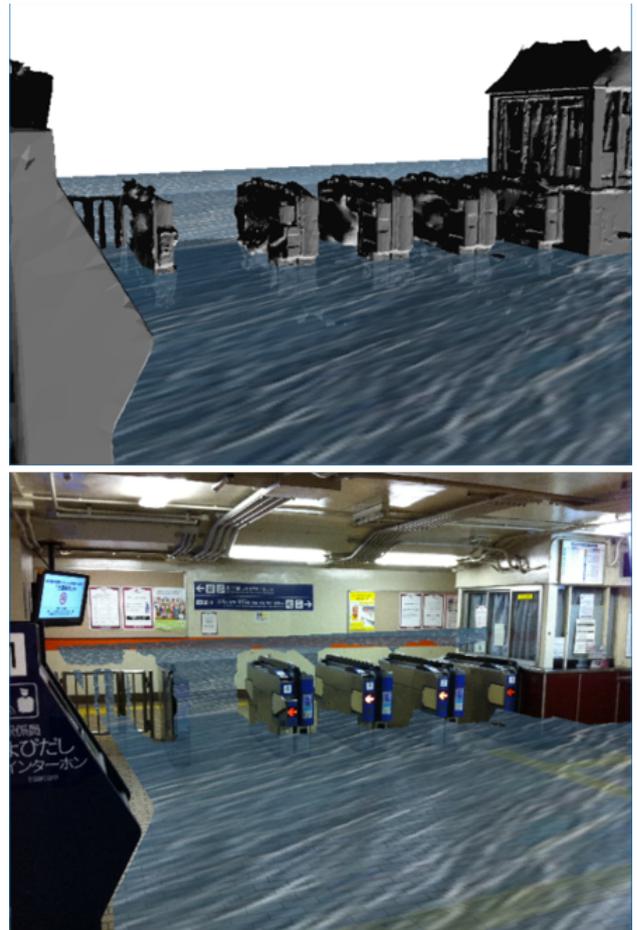


図-7 ユーザ視点での3Dモデル（上）とAR表示（下）

れる流量の情報から、静的な浸水深情報のみでなく、水が流れる様子や浸水深が徐々に上がっていくような動的な被災状況を反映した表現方法を検討する予定である。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金(15H02983)、関西大学先端科学技術推進機構研究グループの助成による。

## 参考文献

- 1) 尾崎平 ほか: “短期間集中豪雨の伴う内水氾濫による地下街浸水特製の考察”, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, No.4, pp.11417-11422, 2014.
- 2) Richard Hartley and Andrew Zisserman : *Multiple View Geometry in Computer Vision (2 ed.)*, Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2003.
- 3) MeshLab: <http://www.meshlab.net/> (2017.06.30 参照)
- 4) H. Bay, T. Tuytelaars and L. Van Gool : SURF: Speeded Up Robust Features, *Proceedings of the 12th European Conference on Computer Vision*, pp. 404-417, 2006.
- 5) Michael Kazhdan and Hugues Hoppe : Screened poisson surface reconstruction., *ACM Trans. Graph.* 32(3), Article 29, pp. 1-13, 2013.