

## (51) SfMに基づく高精度 DEM からの 路面のバリア検出とパノラマ可視化

谷口 阜貴<sup>1</sup>・窪田 諭<sup>2</sup>・安室 喜弘<sup>3</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 3-3-35)  
E-mail: k225879@kansai-u.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)  
E-mail: skubota@kansai-u.ac.jp

<sup>3</sup> 正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)  
E-mail: yasumuro@kansai-u.ac.jp

昨今の日本は急激な超高齢社会化に直面し、高齢者、車椅子利用者等の歩行弱者の移動円滑化のため、駅や大型施設及びその周辺ではバリアフリー環境の整備がなされている。しかし、施設を結ぶ動線や生活圏内には、依然として物理的バリアが偏在している。日常生活の節々で歩行弱者自身が単独あるいは介助者を伴って外出する機会が少なくないため、歩行弱者の安全かつ快適な移動を支援する仕組みが必要不可欠である。本研究では、歩行空間を撮影した画像群から、SfM (Structure from Motion) によって再現した 3D 形状を介して、路面の物理的バリア検出を実施した。以上で得られた結果は GIS として位置情報の整合を取るとともに、バリア領域を示した 3D モデルを 360 度パノラマに投影し、歩行弱者の移動に適した経路の可視化を実現した。

**Key Words:** barrier-free, pedestrian space, SfM (Structure from Motion), DEM (Digital Elevation Model), GIS (Geographic Information System), panoramic image

### 1. はじめに

昨今、日本は超高齢社会化に直面しており、65 歳以上人口の割合は 2018 年 10 月時点で 28.1% に達し、増加し続けている<sup>1)</sup>。これに伴って、身体障害者の割合も増加傾向にあり、全年齢の在宅の身体障害者のうち 65 歳以上の割合が 2016 年時点で 72.6% を占めており、今後も高齢者を含めた、車椅子利用者等の歩行弱者の増加が予想される<sup>2)</sup>。

社会の高齢化に際して、歩行弱者の自立移動の円滑化を図るため、バリアフリー法に基づいて駅や大型施設内及び周辺では歩行空間の環境整備が進行しつつある。平成 30 年 3 月時点で、全国の平均利用客数が 3,000 人/日以上である駅周辺地区では、段差の解消や歩道の拡幅、勾配緩和等のユニバーサルデザイン整備が推進されているが、整備率は約 5 割に留まっている<sup>3)</sup>。また、ユニバーサルデザイン整備がなされていない施設間の経路や生活圏においては、大きなバリアに加えて、健常者には気にならなくても、歩行弱者の安全かつ快適な移動を阻害するような起伏や傾斜が、路面上に偏在している。

歩行弱者が安全かつ快適な移動を自立的に行うためには、ハード面だけでなく、ソフトの面でのユニバーサルデザイン整備として、通行し易い経路を事前に把握し、移動の計画を立てられるような支援も必要である。各地方公共団体では、歩行空間に存在する階段や段差、勾配等のバリア情報を含む歩行空間ネットワークデータを反映し、車椅子で通行可能な経路を掲示した 2D マップが作成されており、都道府県等のホームページから Web 上でのマップの閲覧が可能となっているものが多い。近年では、歩行空間ネットワークデータを活用したマップ上で、段差のない経路や勾配の少ない経路等を選択して案内するアプリケーションも普及してきている<sup>4)</sup>。しかし、2D マップではバリア情報を色分けやマーカーで表示しているため、現場でのバリアの実情を評価することが難しい。

そこで本研究では、歩行空間を精密に再現した 3D 形状から物理的バリアを抽出し、形状別に正確な位置情報の基づくバリア分布を示した 3D 空間を 360 度パノラマに投影して可視化することで、歩行弱者にとって通行時の障壁が少ない経路の探索に役立てるシステムを目指す。

## 2. 関連研究・技術

近年の自動車の自動運転技術の発展に伴い、航空レーザ測量やMMS (Mobile Mapping System)、TLS (Terrestrial Laser Scanning) が道路面や地物の3次元計測に多数用いられてきた<sup>5,6)</sup>。しかし、航空レーザスキャナでは植生や雨除けなどの構造物が隠蔽する路面領域の計測が困難であり、MMSでは、車道から見渡せる領域に計測対象が限定されるため、歩行空間の計測には不向きである。

路面特性や傾斜の計測には、加速度センサやスマートフォンを用いたものがあり、台車や自転車に搭載することで歩道部を計測する取り組みが多数存在する<sup>7)</sup>。しかし、これらのセンサを搭載した車輪が実際に走行した動線上に限られた局所的なデータ収集となる点で、センサによる歩行空間一帯における網羅性が低い。

路面計測とストリートビュー形式を連携させて表示する取り組みがある<sup>8)</sup>。車椅子に搭載した3軸加速度センサ、GPS、地磁気センサを内蔵したスマートフォンにより路面の起伏、傾斜を計測するとともに、同じ車椅子に装着した全天球カメラでパノラマ画像を撮影する。各種センサの計測値をもとに地図上で色分けし、対応する地点のパノラマ画像を表示する。しかし、単純な色分けでは路面性状やバリアの把握が難しく、パノラマ表示された実写内容とバリアとの対応関係も不明確である。

## 3. 提案手法

本研究で提案するシステムの処理手順を図-1に示す。ここでは、歩行しながら路面を撮影することで、写真測量の要領で面的に路面及びその周辺について計測する。その際、地上基準点を写し込んで撮影する。これにより、測地座標に則した実スケールでの再現が可能となる。取得した画像群からは、SfM (Structure from Motion) に基づく3次元再構成処理を実施し、歩行空間一帯の3D形状を再現する。測地座標に整合した3Dデータからは、地形形状を表現したDEM (Digital Elevation Model) と空間の正射投影により得られるオルソ画像を作成する。

DEMは、地表からの標高を輝度として表現しており、局所的に分布する急峻な輝度勾配は、物理的に縁石や階段等が成す勾配に相当する。これらを画像処理により包括的に検出することで、周囲との位置の対応が取れた正確な分布とともに物理的バリアを抽出できる。検出したデータは、測地座標を基にGISに投影することで、2Dマップ上でバリアの領域を示すレイヤとして可視化できる。さらに、空間を再現した3Dモデルにマッピングすることで、物理的バリアの領域を強調表示した現実のデジタルコピーとして表現できる。

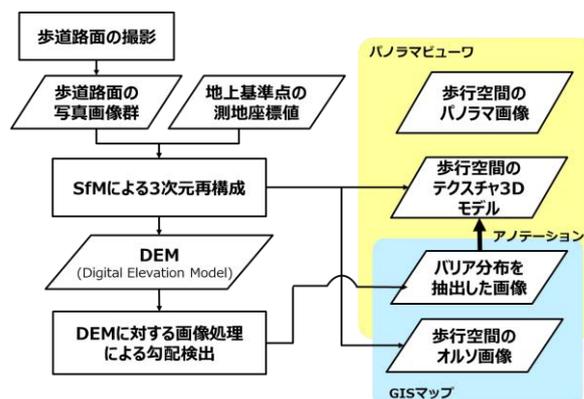


図-1 提案システムの処理手順

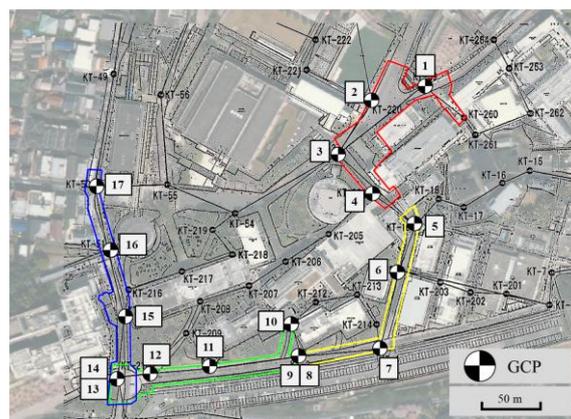


図-2 実験対象範囲の基準点網図

バリア領域を示した3Dモデルは、歩行空間を写した360度パノラマ画像と統合してレンダリングし、周囲のバリア分布と程度を視認できるストリートビューとして可視化する。

## 4. 実験

### (1) 使用機材

路面の撮影では、カメラとしてGoPro社製のHERO5 Blackを最長3mまで延ばせる一脚に取り付けて使用した。処理に用いたアプリケーションの詳細は以下の通りである。SfMによる3次元再構成処理と、3Dモデル、DEM、オルソ画像の作成にはAgisoft社製のMetashapeを使用した。DEMに対する画像処理にはMicrosoft Visual Studio 2019を使用した。地図の構築には、フリーのGISソフトウェアであるQGISを使用した。パノラマ画像は、RICOH社製のTHETA Z1を使用した。3Dモデルを投影したパノラマ画像のレンダリングには、オープンソースの3DCGソフトウェアであるBlenderを使用した。

### (2) 実験概要

対象箇所は、関西大学千里山キャンパス内の図-2に



図-3 対象箇所の風景



図-4 撮影機材と撮影の様子

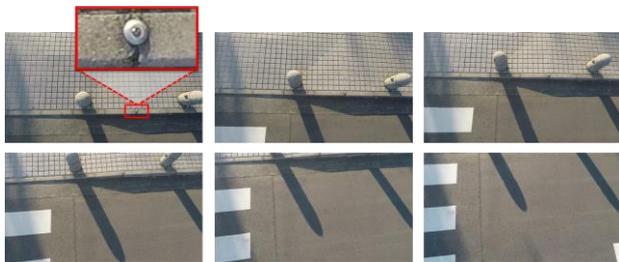


図-5 SfMにより生成したテクスチャ 3Dモデル

表-1 3次元再構成に用いた画像枚数と再構成の精度

	画像枚数	再投影誤差 RMS	GCP 座標誤差
赤枠エリア	3410	1.56 pix	0.006 m
黄枠エリア	569	0.77 pix	0.010 m
緑枠エリア	2644	1.24 pix	0.004 m
青枠エリア	2794	1.09 pix	0.007 m

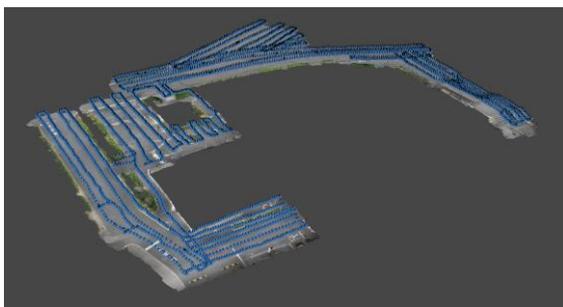


図-6 SfMにより生成したテクスチャ 3Dモデル

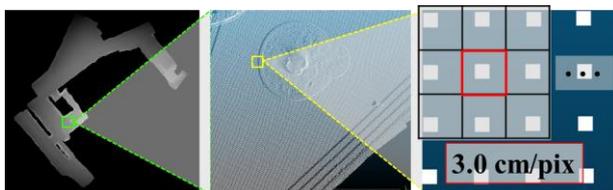


図-7 画像処理の過程

示す領域である。また、対象箇所の風景を図-3 に示す。対象箇所には、構内でも車通りの多い幅員の大きな道路があり、傍らには歩道が整備されているが、歩道境界には段差の大きな縁石が敷設されている上、歩道と車道の接続部において段差が低くなっている箇所や段差プレートが設置されている箇所が少なく、あらかじめ場所を把握しておかなければ歩道への乗り上げは難しい。また、図-3 の左・中の図の通り、建物の正面玄関には階段が敷設されているため、車椅子利用者は迂回してスロープを有する別の入口を利用する必要がある。他にも、一定間隔でポールが敷設されている歩道部では、実際の幅員よりも狭くなってしまっており、車椅子や歩行器の利用者は簡単には通行できない。

路面の撮影は、図-4 に示すように、カメラを長さ約 2m に伸ばした一脚の先端に取り付け、カメラのレンズが路面に対しておよそ垂直になるように手で持つて行く。また、3次元復元ソフトウェア上で画像に写り込んだ地上基準点を GCP (Ground Control Point) として設定してマーカーを配置し、マーカーに測地座標値を反映する。また、3次元復元処理で生成した 3D データを基に、高度を 32 bit 浮動小数点数のグレースケールで表現した 1 pixel あたり 3.0cm 四方の DEM を生成する。

DEM は、平滑化フィルタによる処理を施してノイズを除去した後、Sobel フィルタを用いて局所的なエッジを検出する。その際、実スケールとグレースケールとの対応を考慮して閾値処理を施すことで、縁石や階段等の勾配レベル別に物理的バリアを抽出する。

パノラマビューは、対象箇所でパノラマ撮影した実写を背景とし、バリア情報をテクスチャマッピングした 3D モデルを Blender で 3D 空間に配置して、正距円筒図表によりパノラマ画像としてレンダリングして生成する。

## 5. 結果と考察

3次元復元処理の入力画像は、図-5 のように動画からオーバーラップが約 80% になるように切り出して取得し、地上基準点にマーカーを設置して測地座標に則した 3次元再構成を実施した。表-1 では、各箇所における 3次元再構成に用いた画像の枚数と、同じ箇所を写した画像群から推定された特徴点を元画像に再投影した際の RMSE (Root Mean Square Error), 及び GCP の座標誤差を示している。図-6 は 3次元再構成によって得られたテクスチャ付き 3D モデルであり、再投影誤差の RMS が 2.0 pix 未満、GCP の座標誤差も 1.0cm 以内の精度で再構成できていることから、およそ正確な 3D 形状を成していると考えられる。

DEM は、図-7 のように各種フィルタを適用して処理

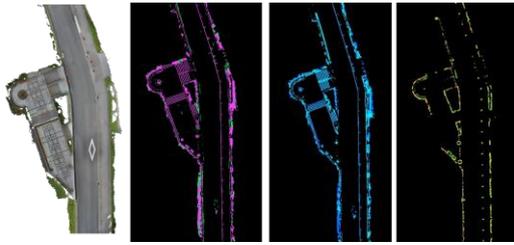


図-8 バリア検出結果

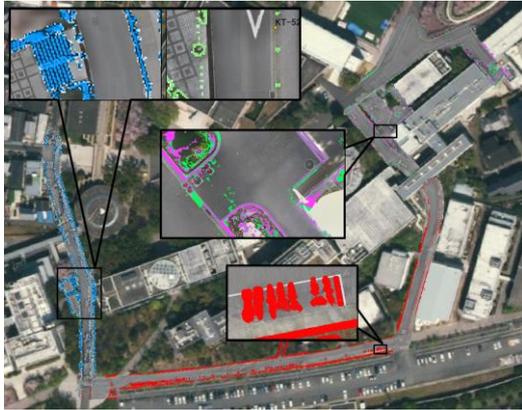


図-9 バリア画像とオルソ画像を投影した地図

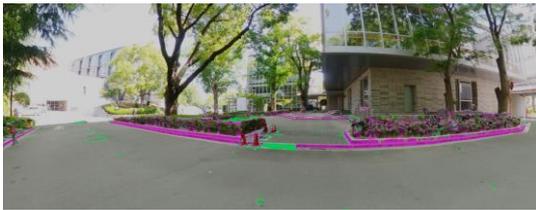


図-10 バリア情報を付与した 3D モデルと周囲を写したパノラマビュー

を施し、勾配レベル別にバリアを検出した画像を作成した。処理で得た画像は図-8 に示す通りである。図-8 左から2つ目の図は、1/25 から 1/15 程度の緩やかな勾配を緑色、1/15以上の急勾配を桃色として検出した画像で、車椅子の通行の可否の指標として検出することができた。さらに、図-8 右2つ目の図は、約 3.0cm の縁石が成す段差以上の高度差を水色で検出した画像と、ポールや植え込み等の地物が成す約 10.0 cm 以上の高度差を黄緑色で検出した画像である。以上のように、閾値処理によって抽出したい地物ごとにレイヤ化することができる。これらは、図-9 の通り QGIS にオルソ画像と重畳して、バリアの程度と分布を示す地図として一覧化できる。

図-10は、バリア領域を強調した3Dモデルを、周囲を写したパノラマ画像に投影したパノラマビューである。現実のデジタルコピーとしての3Dモデルにバリア情報を投影し、周囲の景観と併せて辺り一帯を見渡せるビューを構築することで、色分けやアイコンによる注釈に留まらない拡張現実として付加情報の提示を示した。

## 6. おわりに

本研究では、歩行空間の写真測量により面的に収集した多視点画像から3次元形状を復元し、画像処理による画一的な物理的バリア検出を実施して、多様な路面性状の抽出及び可視化する方法を提案した。これにより、高齢者を含む、車椅子利用者等の歩行弱者が、施設までの動線に存在するバリアのレベルと分布を把握できるシステムとして、安全かつ快適な自立移動に寄与できる可能性を示した。

一方で、マンホール周囲の陥没やグレーチングの格子も歩行弱者の通行の快適性に関わる要素であり、さらにそれらの分布は不規則であるため、今後は写真測量で収集する画像に対して機械学習を適用することで、マンホールやグレーチングの自動検出とセグメンテーションに取り組んでいく。

謝辞：本研究の一部は、交通エコロジー・モビリティ（ECOMO）財団 2021 年度交通バリアフリー研究助成事業と関西大学先端機構の支援による。

## 参考文献

- 1) 内閣府：令和元年版高齢社会白書（全体版），pp.2-6，<[https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2019/zenbun/pdf/1s1s\\_01.pdf](https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2019/zenbun/pdf/1s1s_01.pdf)>，（入手 2021.6.9）。
- 2) 内閣府：令和元年版 障害者白書（全体版），pp.231-237，<<https://www8.cao.go.jp/shougai/whitepaper/r01hakusho/zenbun/pdf/ref2.pdf>>，（入手 2021.6.9）。
- 3) 国土交通省：バリアフリー実態調査結果，<[https://www.mlit.go.jp/road/road/traffic/bf/design\\_activities/index.html](https://www.mlit.go.jp/road/road/traffic/bf/design_activities/index.html)>。（入手 2021.6.9）
- 4) 内閣府：まち（都道府県・指定都市バリアフリーマップ等ホームページ一覧），<<https://www8.cao.go.jp/souki/barrier-free/link/bfmap-ken.html>>，（入手 2021.6.9）
- 5) Vosselman, G., Zhou, L.: Detection of curbstones in airborne laser scanning data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.38, Part 3/W8, pp.111-116, 2009.
- 6) Rodriguez-Cuenca, B., Garcia-Cortes, S., Ordóñez, C., Alonso, M. C.: An approach to detect and delineate street curbs from MLS 3D point cloud data. *Automation in Construction*, Vol.51, pp.103-112, 2015.
- 7) Zang, K., Shen, J., Huang, H., Wan, M., Shi, J.: Assessing and mapping of road surface roughness based on GPS and accelerometer sensors on bicycle-mounted smartphones. *Sensors*, Vol.18, Issue.3, 914, 2018.
- 8) 荒井研一，中島良太，小林透：ソーシャルバリアフリーストリートビューシステム，情報処理学会論文誌 Vol.60 No.3, pp.821-829, 2019.