

## (4) 位相差方式レーザスキャナを搭載した MMS にて計測したトンネルの損傷を自動検知する手法の検討

山下 翔雅<sup>1</sup>・山口 裕哉<sup>2</sup>・白石 宗一郎<sup>3</sup>・岡本 直樹<sup>4</sup>・岩上 弘明<sup>5</sup>  
佐田 達典<sup>6</sup>・江守 央<sup>7</sup>

<sup>1</sup>学生会員 日本大学大学院 理工学研究科交通システム工学専攻  
(〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)  
E-mail: cssh21011@g.nihon-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 朝日航洋株式会社 (〒350-1165 埼玉県川越市南台 3-14-4)  
E-mail: yuya-yamaguchi@aeroasahi.co.jp

<sup>3</sup>非会員 朝日航洋株式会社 (〒350-1165 埼玉県川越市南台 3-14-4)  
E-mail: souichirou-shiraishi@aeroasahi.co.jp

<sup>4</sup>正会員 朝日航洋株式会社 (〒350-1165 埼玉県川越市南台 3-14-4)  
E-mail: naoki-okamoto@aeroasahi.co.jp

<sup>5</sup>正会員 株式会社ニコン・トリンブル (〒144-0035 東京都大田区南蒲田 2-16-2)  
E-mail: Iwakami.hiroaki@nikon-trimble.net

<sup>6</sup>正会員 日本大学教授 理工学部交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)  
E-mail: sada.tatsunori@nihon-u.ac.jp

<sup>7</sup>正会員 日本大学准教授 理工学部交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)  
E-mail: emori.hisashi@nihon-u.ac.jp

道路インフラの点検においてモバイルマッピングシステム (MMS) の活用が進められている。その中で、計測して得られたデータをどのように分析するかが課題となっている。そこで、本研究では位相差方式レーザスキャナを搭載した MMS を用いてトンネルを計測し、画像処理の輪郭抽出手法を用いてトンネルの損傷を自動検知した。結果としてはく離の損傷を模した部分を自動的に検知することができた。同時にノイズ等の影響により損傷がない部分も誤検知されてしまうことが明らかとなった。

**Key Words:** MMS, road tunnel, tunnel maintenance, ps method, automatic detection

### 1. はじめに

モバイルマッピングシステム (以下: MMS) は GNSS アンテナやレーザスキャナ, カメラを搭載した計測車両であり, 走行しながら周囲の 3次元点群データを取得することができる。近年ではトンネル等の道路インフラの維持管理の省力化に向けて点検での MMS の活用が注目されている。

既往研究として水口ら<sup>1)</sup>はトンネル走行型計測車両を

使用してトンネル壁面の推定出来高断面を設定し, 推定出来高断面とレーザスキャナによる計測結果の点群との差分によるコンター図を作成している。作成したコンター図より 5mm の段差が十分に把握できることが示されている。一方で, コンター図より段差を把握するのは人の目視に依存していて, 自動化されていない。

また, 藤村ら<sup>2)</sup>は飛行時間差 (以下: TOF) 方式レーザスキャナと位相差 (以下: PS) 方式レーザスキャナをそれぞれ搭載した MMS にてコンクリートの損傷を模

したターゲット板を計測し層厚計測精度を比較している。同時に、トンネルなどの測位衛星電波遮蔽環境を想定した IMU のみによる自己位置推定時と測位衛星による補正を行った際の層厚算出精度を比較している。その結果、TOF 方式レーザスキャナに比べて PS 方式レーザスキャナの方が計測精度が高いことが示されている。また、測位衛星電波遮蔽環境においても 1mm の層厚まで計測可能であることが示されている。一方で、この研究では層厚算出対象であるターゲット板を手動で抽出し層厚の算出を行っているため、自動でターゲット板を抽出することができるかは明らかにされていない。

このようにコンター図を用いることでトンネル壁面の段差を把握することが可能である。また、PS 方式レーザスキャナは高精度な層厚計測精度を有しており、トンネル等の点検には適していると考えられる。そこで、本研究では PS 方式レーザスキャナを搭載した MMS にてトンネルを計測し得られた点群データから損傷部を自動検知、検知結果を可視化する。また、トンネル計測時のスキャナ設置角度を 45° と 90° に設定し検知結果の比較を行う。

## 2. 実験概要

### (1) 実験方法

実験は福島ロボットテストフィールド内の試験用トンネルにて実施した。トンネルの全景を図-1に示す。このトンネル<sup>3)</sup>は長さ 50m、道路幅員 6m の丸形トンネルである。本研究では PS 方式レーザスキャナを搭載した MMS にて計測を実施した。MMS の性能を表-1に示す。

計測条件として計測時の走行速度は 10km/h、道路での計測を想定して中央より左側を走行した。また、スキャナの設置角度を地面に対して 45° と 90° の 2パターンで実施した。計測時の様子を図-2に示す。また、本実験ではトンネルの 1 部断面 (15m 程度) を抽出し分析の対象とする。対象区間には模擬崩落が設けられている。模擬崩落は最小部で 4cm 程度、最大部で 12cm 程度の層厚となっている。



図-1 トンネル全景

表-1 MMS の性能諸元<sup>3)4)</sup>

GPS/IMU	
位置精度	水平0.01m 高度0.20m(GNSS受信時)
レーザスキャナ	
計測レート	1,016,000点/秒
計測精度	0.5mm(計測距離10mの場合)

計測車両



※精度仕様はRMS値



図-2 計測の様子

### (2) 解析方法

MMS にて取得した 3 次元点群データよりトンネルの対象区間を手動で抽出した。またノイズ及び路面、照明等の付属物も手動で取り除いた。ノイズ及び付属物の状況を図-3に示す。その後、自作した分析プログラムを用いて分析を行う。プログラムについての詳細は次章で説明する。

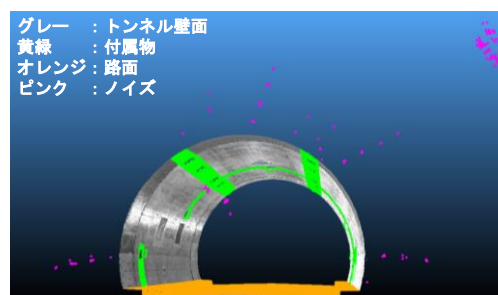


図-3 除去したノイズ等

## 3. 分析プログラム

プログラムでは点群を平面に展開し、グリッド化を経て画像へ変換する。その後、画像処理で使用される輪郭抽出を用いて損傷部を検知する。これらの処理をすべて同一のプログラムを用いて行う。

### (1) 平面上での回転・勾配補正

以降の処理をしやすくするために計測車両の走行方向とX軸が同じになるように変換する。また、一定区間ごとのトンネルの推定円中心算出し推定円中心より斜度を算出しヘルムート変換を行うことで勾配を補正する。円中心の算定方法については次節で説明する。

### (2) トンネルの分割と円中心の推定

X軸方向で10mmごとに区間を区切り点群データを輪切り状にする。その後、区間ごとに円の方程式と最小二乗法を用いてトンネルの円中心を推定する。このとき1区間の点数が1500点以下の場合には精度が低下するため計算を行わない。1500点を基準としたのは図-4に示すように点数と推定半径の関係を見ると1500点以下の場合には算定結果にばらつきが見られるためである。推定した円の中心座標の平均値をトンネルの円中心として仮定して分析に利用する。

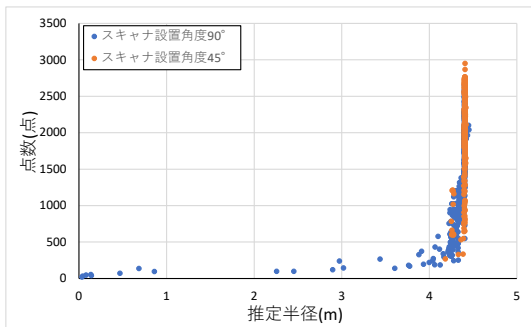


図-4 点群数と推定半径の関係

### (3) 平面への展開

推定した円の半径と点群データと円中心との距離の差を算出し、算出結果をZ座標とした展開図を作成する。図-5に示すように推定半径との差がない場合を0として、それよりも点群と推定中心座標が近い場合（うきなどで表面がうき出ている場合）は正の値で表現し、点群と推定中心座標が遠い場合（崩落などでへこんでいる場合）は負の値で表現する。

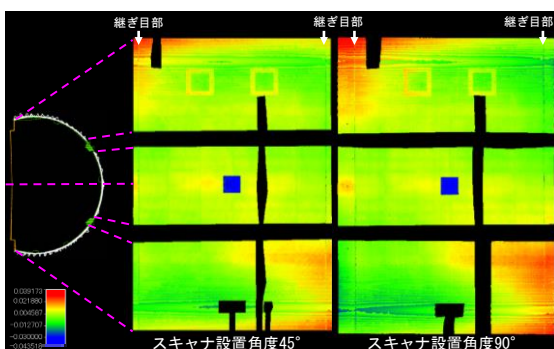


図-5 平面展開した際の点群（高さで着色）

### (4) グリッド化

平面に展開した点群のグリッド化を行う。グリッド化を行うことで画像化が可能となる。グリッド化は点群を格子状のデータに変換するものでXY平面に格子点を作成し、格子点を中心とした範囲を設定しその内部にある点のZ座標の平均値を格子点のZ座標とする。本研究では格子点の間隔を25mmとして設定し分析を行う。グリッド化を行うことで点群を画像に変換することが可能となる。

### (5) 画像化

グリッド化した点群を画像に変換する。画像ではZ座標を画素値（明るさ）として表現するためトンネル壁面の可視化が可能となる。本研究では8bit画像に変換しているため、最大値と最小値の間で256段に変換して分析を行う。2種類の画像を作成し1つを(6)の分析にて使用し、もう1つを(8)の可視化に使用する。分析に使用する画像は赤、緑、青の3層の画像であり、Z座標が正（推定円半径より小さい）の場合は赤、Z座標が負（推定円半径より大きい）の場合は青になるように、推定円半径と同じ場合は緑として変換している。可視化に使用する画像はZ座標の値が小さいほど黒く、値が大きいほど白いグレースケール画像として変換している。

### (6) 輪郭抽出

画像化した点群から輪郭抽出手法を用いて損傷部を抽出する。ここでは色として表現された凹凸を自動検知することで損傷部を自動的に検知している。輪郭抽出では閾値を設定して2値化を行う。本研究では画像化した際の画素値1段あたりの高さから逆算して2cm程度になる値を閾値として設定した。今回対象とする部分には4cm程度の模擬崩落が設置されているためこの値を閾値として設定した。

### (7) 層厚の算出

抽出された損傷部の層厚を計算する。画像の状態では256段階であり正確な高さを算出できないので抽出された領域をグリッド化した点群と紐づけて損傷部の層厚の平均値と推定半径として算出し、損傷部の層厚とする。

### (8) 可視化

輪郭抽出にて検知された損傷部の位置と層厚を画像形式で可視化する。検知した損傷部を枠で囲い表示する。また、算出された損傷部の層厚も重ねて表示する。この際にうき等の推定半径よりも中心側にあるものを赤色で、はく離等の推定半径より外側にあるものを青色で表示している。

## 4. 分析結果

3章のプログラムにて分析を行った結果を図-6、図-7に示す。スキャナの設置角度が $45^\circ$ 、 $90^\circ$  どちらの場合でも模擬崩落を損傷として検知することができている。一方で対象区間にははく離以外の損傷はないが、継ぎ目部周辺で検知されている部分がある。これらはすべて誤検知である。スキャナ設置角度が $45^\circ$ と $90^\circ$ の場合で比較すると $45^\circ$ の場合では模擬崩落部を複数検知してしまっている。これはオクルージョンにより計測できない領域があり、グリッド化の際に欠損が生じたことが原因だと考えられる。また、 $90^\circ$ の場合では継ぎ目部に誤検知が多く発生している。これは図-8で示すような手動での除去が困難なノイズが発生していることが影響だと考えられる。

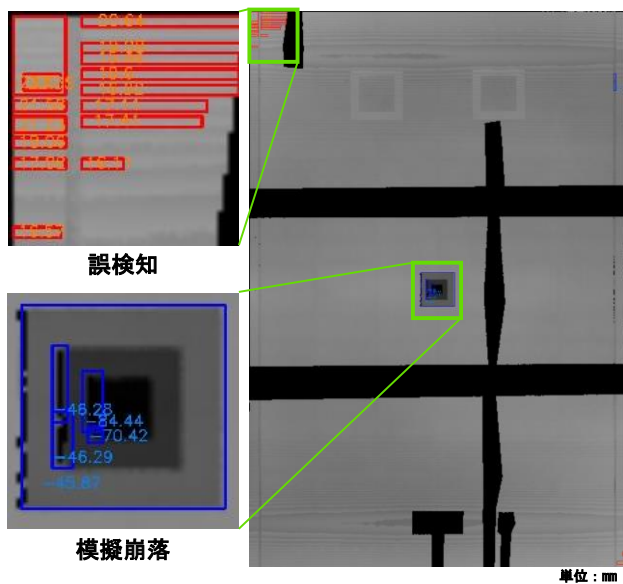


図-6 分析結果（スキャナ設置角度 $45^\circ$ ）

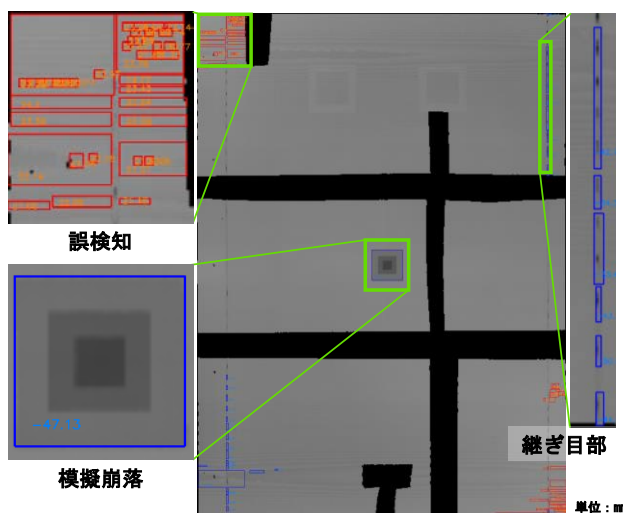


図-7 分析結果（スキャナ設置角度 $90^\circ$ ）

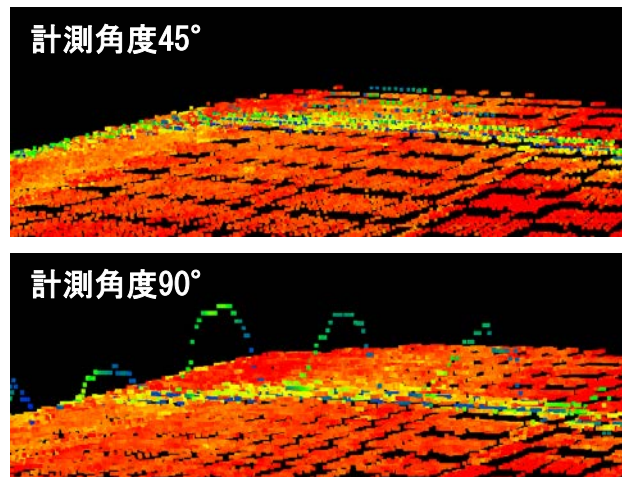


図-8 継ぎ目部のノイズの発生状況

## 5. 結論

本研究の結果から PS 方式レーザスキャナを搭載した MMS にてトンネルを計測し得られた点群データから輪郭抽出を用いて損傷部を自動的に検知した場合、4cm 程度の損傷を検知できることが明らかとなった。スキャナ設置角度 $45^\circ$ の場合はオクルージョンにより1つの損傷部を複数検知してしまった。また、スキャナ設置角度 $90^\circ$ の場合では継ぎ目部に発生する除去が困難なノイズにより誤検知が多数発生した。

今後は、本研究で分析に含めなかった区間を含め更なる解析を進めていく予定である。また、自動的なノイズの除去、構造物の種類判別手法も含めて検討する。

## 参考文献

- 1) 水口尚司, 大西有三, 西山哲, 西川啓一, 下澤正道, 石村勝伸: 道路トンネルにおける画像およびレーザデータを用いたマネジメント手法の研究, 土木学会論文集 F2 (地下空間研究), Vol.71, No.1, pp.20-30, 2015.
- 2) 藤村大輔, 笹野拓海, 山口裕哉, 白石宗一郎, 岡本直樹, 岩上弘明, 佐田達典, 江守央: 位相差方式レーザスキャナ搭載型 MMS による円盤計測精度に走行速度と測位衛星補正が及ぼす影響の検証, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.77, No.2, pp.II\_23-II\_33, 2021.
- 3) Geo3D : Z\_F\_Profiler\_9012 データシート, <[http://www.geo3d.hr/sites/default/files/2018-06/Z\\_F\\_PROFILER\\_9012\\_Datasheet\\_E\\_fina\\_l\\_compr.pdf](http://www.geo3d.hr/sites/default/files/2018-06/Z_F_PROFILER_9012_Datasheet_E_fina_l_compr.pdf)>, (入手: 2022.06.06).
- 4) LIDAR USA : Highway Mapper Z+F, <<https://www.lidarus.com/hwy-mapper-z-snoopy-custom.html>>, (入手: 2022.06.06).
- 5) 福島ロボットテストフィールド, 試験用トンネル図面, <[https://www.fipo.or.jp/robot/wp-content/uploads/2021/04/%E8%A9%A6%E9%A8%93%E7%94%A8%E3%83%88%E3%83%B3%E3%83%8D%E3%83%AB%E5%9B%B3%E9%9D%A2\\_1.pdf](https://www.fipo.or.jp/robot/wp-content/uploads/2021/04/%E8%A9%A6%E9%A8%93%E7%94%A8%E3%83%88%E3%83%B3%E3%83%8D%E3%83%AB%E5%9B%B3%E9%9D%A2_1.pdf)>, (入手: 2022.06.06).