

# 点群データを活用した公共事業の高度化

今井 龍一

昨今、いかにして用途を満足する精度を確保した点群データを効率よく取得・処理するか?の技術開発が盛んである。本稿は、その具体例として、筆者がこれまで取り組んできた活動成果の一端を紹介する。まず、i-Constructionにおける実用的な事例として、建設機械搭載型レーザスキャナによる遠隔臨場リアルタイム出来形管理システムを紹介する。次に、建設機械の走行履歴を用いた道路舗装の出来形管理の適用可能性、スマートフォンで撮影した画像から生成した点群データを用いた地下埋設物の図面の修正技術を紹介する。そして、近い将来の展開が期待される8Kカメラで撮影した画像から生成した点群データの実用性を紹介し、今後の展望を総括する。

キーワード：公共事業, i-Construction, ICT 施工, 点群データ, レーザ計測, SfM

## 1. はじめに

公共事業において“測る”技術が高度化すると、安全性や生産性等の様々な効果を楽しむことが期待できる。昨今は、レーザ機器を用いて対象物を丸ごと測る技術が高度化している。その中でもi-Constructionの動向に着目すると、レーザ機器を用いて工事目的物の点群データを取得、またはカメラで撮影した工事目的物の画像にSfMを適用して点群データを取得のいずれかが多用されている。この動向を要約すると、いかにして用途を満足する精度を確保した工事目的物の点群データを効率よく取得・処理するか?の技術開発が最盛期といっても過言ではない状況である。

本稿は、i-Constructionに係わる動向の具体例として、筆者がこれまで取り組んできた活動成果の一端を紹介する。まず、第2章にてi-Constructionにおける実用的な高度化事例として、建設機械搭載型レーザスキャナによる遠隔臨場リアルタイム出来形管理システムを紹介する。第3章にて建設機械の走行履歴を用いた道路舗装の出来形管理の適用可能性を紹介する。第4章にてスマートフォンで撮影した画像から生成した点群データを用いた地下埋設物の図面の修正技術を紹介する。そして、第5章にて8Kカメラで撮影した画像から生成した点群データの実用性を紹介し、第6章にて今後の展望を総括する。

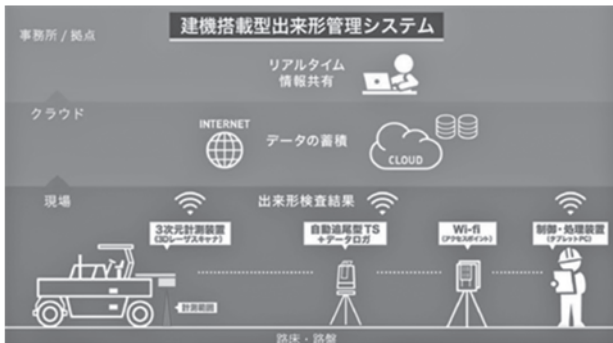
## 2. 道路舗装のリアルタイム出来形管理の遠隔臨場

ICT舗装工では、起工測量や表層の面管理に地上型レーザスキャナ（以下、「LS」という。）や地上移動体搭載型LSが用いられている。しかし、中間工程の舗装各層の管理では、費用対効果の観点からLSは用いられていない。本章は、舗装工事の過程で点群データを簡易に取得できる建設機械搭載型LS（以下、「建機搭載型LS」という。）を用いた舗装各層の面管理の実用例を紹介する<sup>1)</sup>。なお、本技術の検証は、国土交通省の「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」の助成を受けて実施した。

### (1) 技術概要

本技術（図—1）は、建機搭載型LS、制御・データ処理装置（以下、「PC」という。）、自動追尾型トータルステーション（以下、TS）、Wi-Fiシステムおよびクラウドシステムで構成される。舗装工の中間工程では施工完了後速やかに次工程へ移行したいため、面管理であっても従来の出来形管理と同程度の所要時間で行えることが望ましい。このため、本技術の目標としては、出来形判定および遠隔での結果共有を計測後60分以内とした。

建機搭載型LSは1度の走行で4mの幅員を計測可能とし、時速2.5km程度で走行すると管理要領<sup>2)</sup>の



図一 当該技術のシステム構成

路盤工までの要求精度を満足する3次元点群データを取得できる。本技術による計測プロセスを以下に示す。

1) 点群データの取得：タイヤローラに建機搭載型LSを搭載し、路床や路盤工の仕上げ作業後にTSで建機搭載型LSを測位しながら建機を走行させて点群データを計測する。

2) 点群データの処理：点群データを現場のPCに送信し、専用ソフトにより座標変換やノイズ処理、密度調整等を行う。

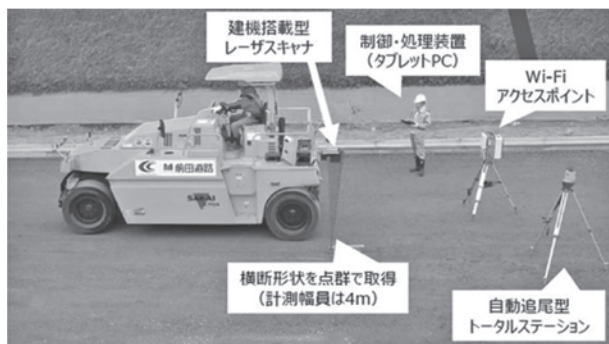
3) 出来形判定：点群データと3次元設計データとの較差(単位面積における高低差)を示したヒートマップ(出来形分布図)を表示する。

4) 遠隔臨場による確認：処理結果をクラウドシステムにアップロードし、WEBブラウザにより判定結果を60分以内に遠隔地と共有する。

(2) 計測結果

本節は、当該技術を適用した現場試行の結果を紹介する。本試行では、路床工および路盤工の仕上げ後に、選定区間内を走行しながら各種データを計測した。本技術の計測状況を図一2、路床面の計測結果を図一3に示す。

1) 点群データの取得結果として、有効なデータ取得範囲はL=71m、W=4mであり、計測時間は事前準備を除いて5分程度であった。取得した点群データ数は0.01m<sup>2</sup>あたり平均165点であり、管理要領で規



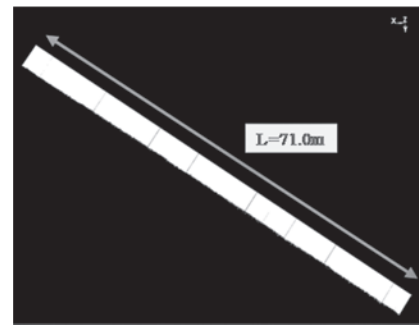
図一 本技術による計測状況

定されている0.01m<sup>2</sup>あたり1点以上のデータが得られたことを確認した。

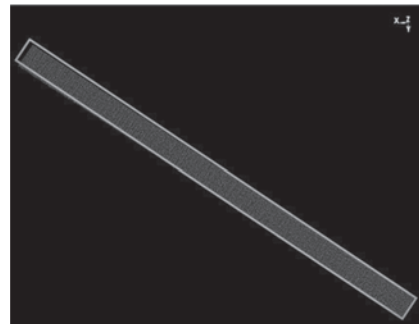
2) 点群データの処理として、取得データを現場のPC (CPU: Core i7, メモリ: 8GB) で0.01m<sup>2</sup>あたり1点となるように点群処理した出来形評価用データを図一4に示す。所要時間は15分程度であった。

3) 出来形判定結果として、点群処理後の出来形評価用データと3次元設計データとの標高較差のヒートマップを図一5に示す。点群処理後からヒートマップの表示までの所要時間は5分程度であった。

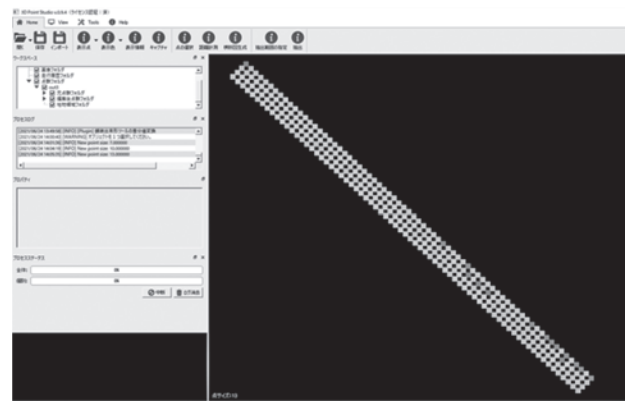
4) 遠隔臨場による確認結果として、出来形評価用データをクラウドシステムにアップロードし、WEBブラウザ上で可視化した結果を図一6に示す。データのアップロードから可視化までの所要時間は10分



図一3 点群データ



図一4 点群処理後のデータ



図一5 PC版ヒートマップの表示例

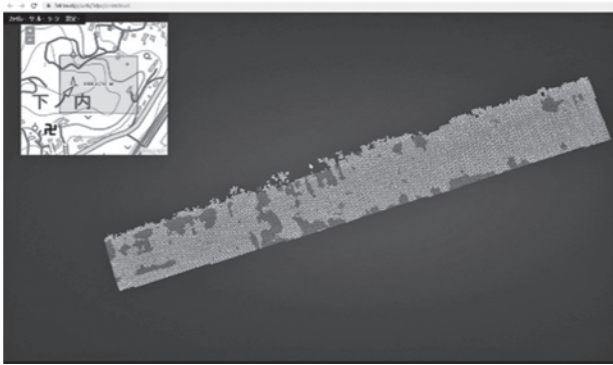


図-6 WEB版ヒートマップの表示例

程度であった。また、現場から離れた事務所でも出来形評価結果を閲覧できることを確認した。

以上のことから、計測後からWEBブラウザで結果を確認できるまでの所要時間は30分であり、目標とする60分以内を達成した。現場試行の結果から、本技術は、遠隔臨場のできるリアルタイムな出来形管理システムとして有用である。

**(3) 本技術の導入効果**

現場試行で得られた導入効果の一例として、作業時間の短縮効果を述べる。路床工 4,320 m<sup>2</sup> (L=540 m, W=8 m) を対象に面管理による出来形管理を行った場合、従来技術 (LS, 地上移動体搭載型 LS) と本技術との所要時間の比較を図-7 に示す。

現地作業からデータ解析に要する時間がLSでは約2日、地上移動体搭載型LSでは約1日であるのに対し、本技術は約5時間であった。このことから本技術を中間工程に適用すれば、当日中に次工程への移行可能なことが分かった。

**3. 建設機械の走行履歴を用いた道路舗装の出来形管理の適用可能性**

建設現場におけるマシンコントロールやマシンガイダンスシステムにて使用されているICT建設機械で

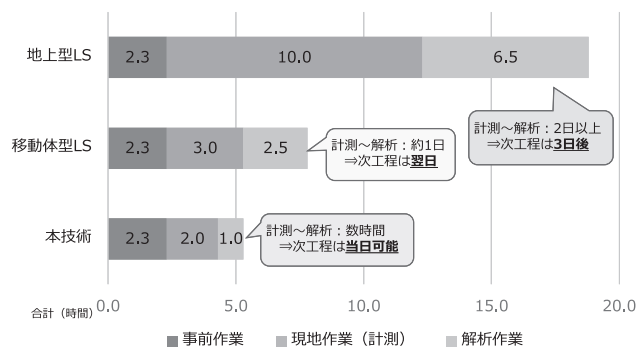


図-7 各LSによる面管理の所要時間の比較

は、挙動履歴や走行履歴の施工データが取得されている。国土交通省の推進する i-Construction では、施工履歴データを出来高部分払の算出に適用されていることから、今後、同データの流通の進展が期待できる。

本章は、前章とは異なる方法で取得されている点群データの一つである施工履歴データ (以下、「ログデータ」という。) の活用事例として、ログデータを用いた3次元モデルの生成手法と、ケーススタディを通じた出来形管理への適用可能性を紹介する<sup>3)</sup>。

**(1) ログデータを用いた舗装工の出来形管理手法**

ログデータを用いた舗装工の出来形管理手法は以下の手順とし、表層工以下の基層工や路盤工の出来形も対象とする。

1) ログデータのフィルタリング処理: ログデータから抽出した座標値には、ICT建機の通信状況や地表面の段差によってノイズとなる異常値が含まれている。そのため、フィルタリング処理を用いてノイズを削除する。

2) 境界線および中心線に基づく3次元モデルの生成: 前節の処理後のログデータを用いて完成形状の3次元モデルを生成する。舗装工では、厚さおよび幅員の出来形を管理する。これらを算出するには舗装面の境界や中心線が必要になる。境界線は、動的輪郭法を用いて生成する (図-8 参照)。図-9a) は、フィルタリング処理したデータを3D-CADを用いて読み込んだ結果を表しており、動的輪郭法により不足している境界点を生成し、補完して境界線を生成する (図-9b), c)。次に、図-10のように地表面の勾配の傾き変化点に中心点を生成し、その中心点を結んで中心線を生成する。その後、TINを生成させて3次元出来形データとする。

3) 出来形計測点の選定: 3次元モデルを用いて、

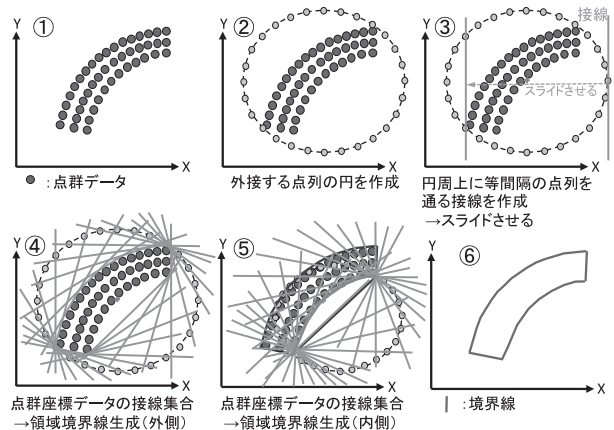


図-8 動的輪郭法による舗装の境界線の生成手順



縦断方向の任意の箇所を指定して横断測線を生成し、横断測線と境界点との交点を出来形計測点として選定する(図-9c)。

4) 出来形検査:前節の成果である出来形計測点と、設計データとを照合し、基準高、厚さおよび幅員が許容誤差内に収まっているかを検査する。

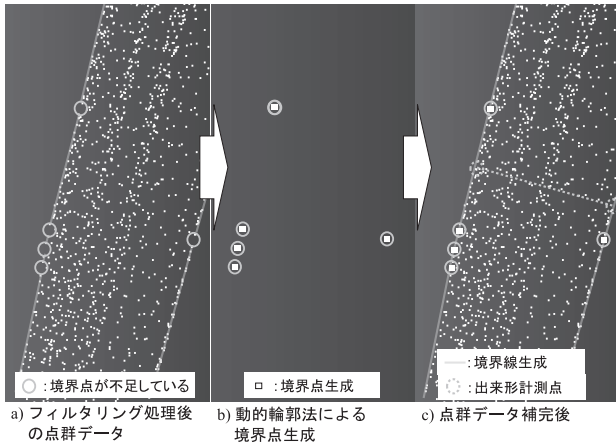


図-9 ログデータの処理手順

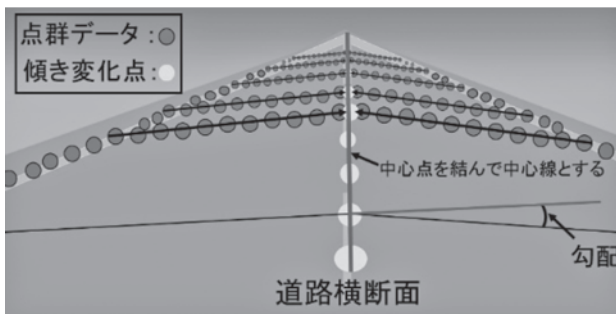


図-10 舗装の中心線の生成イメージ

## (2) ログデータから生成した3次元モデルの活用可能性

図-11は、基層工と表層工の2層分の3次元モデルを示している。舗装工事への出来形管理には補正手法<sup>4)</sup>を適用することで適用できる可能性があることが明らかにされている。また、道路舗装の層厚をデジタル道路地図の属性に収録ができることが明らかにされている<sup>5)</sup>。

この3次元モデルは維持管理に引き継ぐと、劣化の原因究明や補修対策への活用が期待できる。具体例として、道路舗装の劣化の進行が把握できる常時観測が挙げられる。道路管理には、さまざまな車両や機械が使用されている。清掃車や安全パトロール車は毎回ほぼ同じ車線を走行しており、特に安全パトロール車は毎日のように走行している。日常的に走行している安全パトロール車を想定した車両にRTK-GNSSセンサーおよびスマートフォンアプリケーションを取り付けて

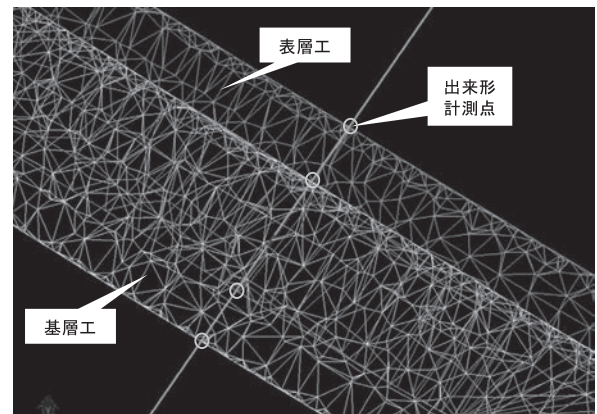


図-11 ログデータから生成した3次元モデル

ログデータを取得し、RTK-GNSSセンサーに基づくログデータ(点群データ)を用いて供用開始時点からの道路形状の変化を把握し、スマートフォンアプリに基づく走行・挙動履歴プローブデータから道路舗装の健全性を評価する。本稿で紹介したのは一案であるが、今後、このような活用事例が増えてくることが期待される。

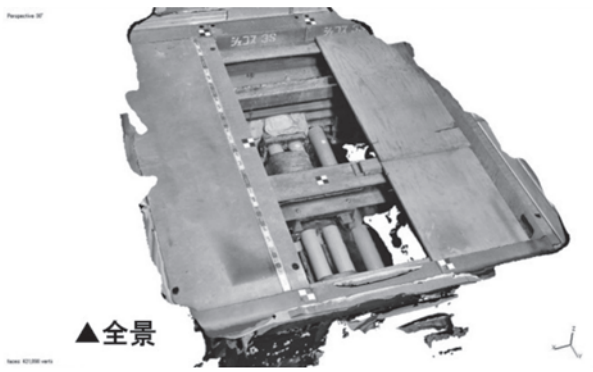
## 4. スマホカメラの画像を用いた地下埋設物の図面の修正

都市土木の工事では、埋設管を確認するために試掘し、測量して2次元図面を修正する機会が多々あり、大変な労力を要している。この解決策として、スマホのカメラで撮影した画像から生成した3次元モデルを用いて2次元図面を補正する手法が実装されている<sup>6)</sup>。具体的には、撮影対象物に標定点を置く等の工夫も必要になるが、スマホで撮影した写真にSfMという技術を適用して3次元モデル(点群データ)を生成する(図-12)。そして3次元モデルと、2次元図面とを重ね合わせて、2次元図面の形状を補正する(図-13)。また、両者を使って自動補正ができるソフトウェアもある。

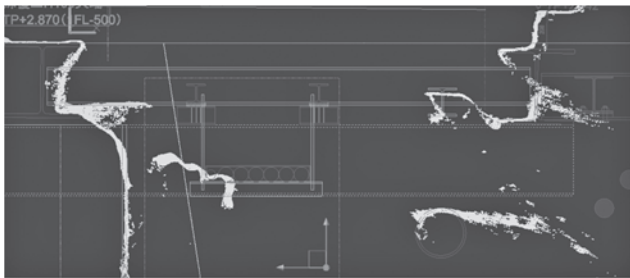
このように工事現場でもスマホは大活躍しており、今回紹介した図面修正以外にも安全管理や稼働管理にも活用されている。

## 5. 8K画像から生成した道路舗装の点群データの精度検証

公共測量の現場では、Agisoft社のMetashapeやPix4D社のPix4D Mapperに代表されるSfM(Structure from Motion)ソフトウェアの導入事例が増えている。SfMとは、多視点画像から撮影位置・姿勢の推定と



図一 12 スマホ写真から生成した3次元モデル



図一 13 3次元モデルを用いた図面の修正

被写体の3次元形状を復元する技術である。これにより、2次元の画像から3次元の点群データを生成できる。しかし、高密度かつ高精度な点群データの生成には、一般に高解像度な画像が必要とされる。

そこで本章は、市場に流通する8Kカメラで撮影した高解像度画像から生成した道路舗装面の点群データの精度を検証した結果を紹介する<sup>7),8)</sup>。

(1) スマホ8Kカメラ画像を用いた道路舗装面の点群データの精度検証

本検証では、iPhone8および高解像度画像を撮影できるGalaxy S20+を使用した(表一1参照)。そして、車内および車外から異なる解像度で撮影された全6種類の動画像を用いて、アスファルト舗装面の点群データを生成する。車内撮影では、自動車のダッシュボードに固定設置された車載ホルダーにスマートフォンを

表一 1 使用機器の仕様

仕様	レンズ	iPhone8	Galaxy S20+
有効画素数	超広角	-	約1,200万画素
	広角	約1,200万画素	約1,200万画素
	望遠	-	約6,400万画素
	その他	-	深度測位 (ToF機能)
F値	超広角	-	2.2
	広角	1.8	1.8
動画設定	解像度	Full HD (1,920*1,200)	Full HD (1,920*1,200)
		4K (3,840*2,160)	4K (3,840*2,160) 8K (7,680*4,320)

取り付け、前方の走行路面が映り込む角度に固定した。車外撮影では、自転車にスマートフォンを取り付け、路面が映り込む角度に固定した。

表一2は、実験結果を示しており、車内に取り付けたカメラの内、Full HDカメラでは、点群データの生成が困難であった。一方、4Kカメラでは約4,000点/m<sup>2</sup>、8Kカメラでは約30,000点/m<sup>2</sup>の点群データを生成できた。しかし、いずれの点群データも全体的に湾曲していた。これは、一方向から撮影した画像のみを使用していたことと、フロントガラスを介して取得した画像を使用していることが原因と考えられる。今後の課題としては、計測環境下に基準点を設け、点群データの生成処理時に補正值として与えることによる改善効果の確認があげられる。

次に車外に取り付けたカメラでは、Full HD、4K、8Kともに点群データを生成できた。Full HDカメラでは、点群データに一部欠損が生じたものの、約1,500点/m<sup>2</sup>の点群データを生成できた。4Kカメラでは約5,000点/m<sup>2</sup>、8Kカメラでは約40,000点/m<sup>2</sup>の点群データを生成できた。

表一 2 点群データの生成結果

解像度	点群データの生成結果	
	車内カメラ	車外カメラ
Full HD (1,920*1,200)	生成不可	生成可(一部欠損有) 約1,500点/m <sup>2</sup>
4K (3,840*2,160)	生成可(全体的に湾曲) 約4,000点/m <sup>2</sup>	生成可 約5,000点/m <sup>2</sup>
8K (7,680*4,320)	生成可(全体的に湾曲) 約30,000点/m <sup>2</sup>	生成可 約40,000点/m <sup>2</sup>

4Kカメラと8Kカメラを用いて生成したアスファルト舗装面の点群データと凹凸部の抽出結果を図一14に示す。なお、図一14中a)のA-A'断面は4Kカメラから生成した点群データの抽出範囲、図一14中b)のB-B'断面は8Kカメラから生成した点群データ



の抽出範囲であり、それぞれ同一箇所を示す。図-14より、4Kカメラと8Kカメラを用いて生成した点群データからアスファルト舗装面の凹凸を確認できることがわかった。A-A'断面を切出した点群データ数は約18万点、B-B'断面を切出した際の点群データ数は約60万点であった。

以上より、画像からアスファルト舗装面の3次元的な変化を識別するためには、カメラは車外設置とし、画像は4K以上の高解像度であることが望ましいといえる。

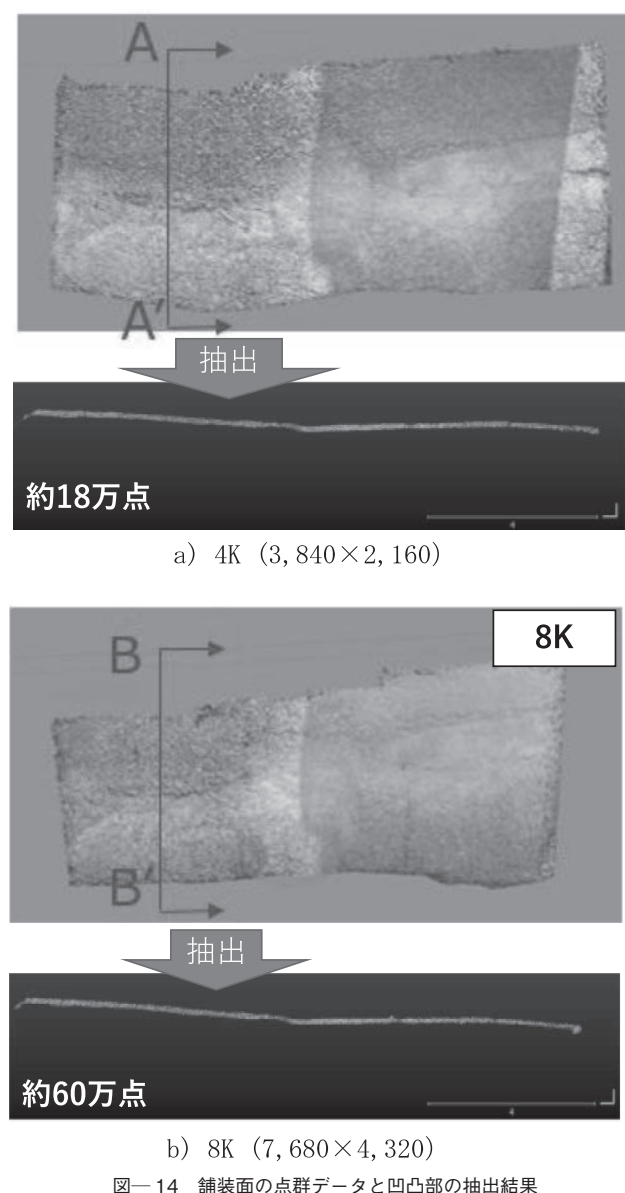


図-14 舗装面の点群データと凹凸部の抽出結果

## (2) アスファルト舗装板を用いたわだち掘れ量の算出実験

本実験では、わだち掘れを模した凹凸が存在する4種類のアスファルト舗装板(図-15)を用いて、SfMにより生成した点群データからわだち掘れ量の算出精

度を確認する。計測機器として、FARO社のLSのFocus3DとCanon社のカメラEOS R5を使用した。LSは、1地点で計測した。カメラの画像は、アスファルト舗装板から約3.5m離れた位置からおおよそ一定の速度で接近しながら29枚撮影した。この画像をSfMの入力データとして点群データを生成した。また、車両で走行しながら撮影した状況に極力合わせることも想定し、速度40km/hと仮定した場合に撮影可能な9枚の画像でも同様に点群データを生成した。

SfMを行う際には、ソフトウェア上でアスファルト舗装板の側面にマスク処理を施すことで、上面のみ計測可能な状況を再現した。また、測定環境下に設置した4つの標定点に対して、同地点のLSの計測座標を与えることにより、実空間のスケールに即した点群データを生成した。わだち掘れの算出精度は、アスファルト舗装板の凹凸部の実寸値、地上レーザの点群データに基づく凹凸部の計測値(2点間距離)、カメラ画像からSfMで生成した点群データに基づく凹凸部の計測値(2点間距離)により評価した。

カメラ画像を用いたアスファルト舗装板の点群データの生成結果を図-16に示す。いずれの場合でもアスファルト舗装板およびその周辺の点群データを生成

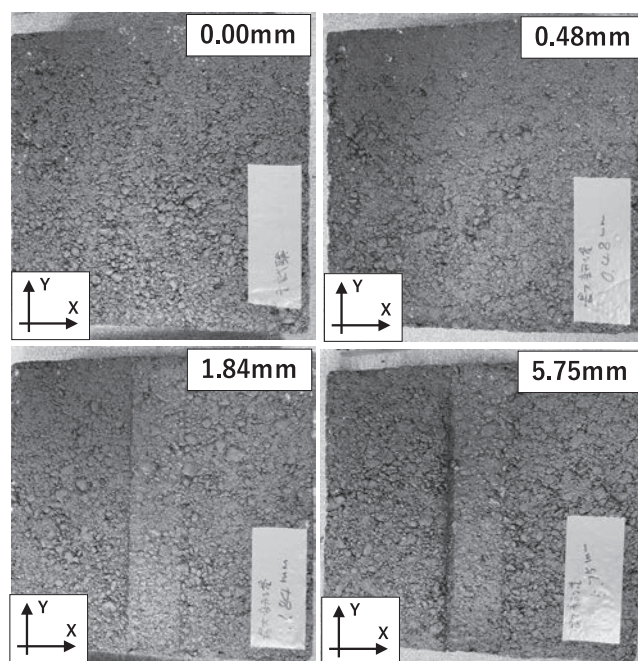
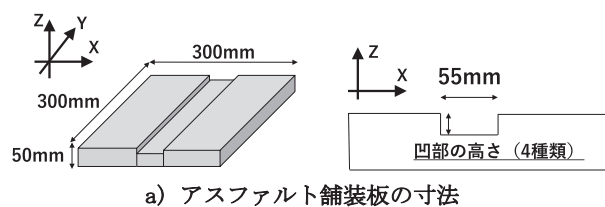


図-15 アスファルト舗装板

できることがわかった。29枚の画像から生成した点群データでは、標定点誤差の平均は3.0mm、9枚の画像では9.0mmであり、枚数が多いほど標定点の精度が高いことが確認できた。図-15に示すアスファルト舗装板の内、凹部の高さが5.75mmのものの点群データの断面図を図-17に示す。白黒だと判読が困難であるが、図中の赤点は、カメラ画像を用いて生成した点群データ、青点はLSの点群データを示している。双方の位置にはズレが生じているものの、いずれの点群データもわだち掘れを模した凹凸部が再現できていることがわかる。

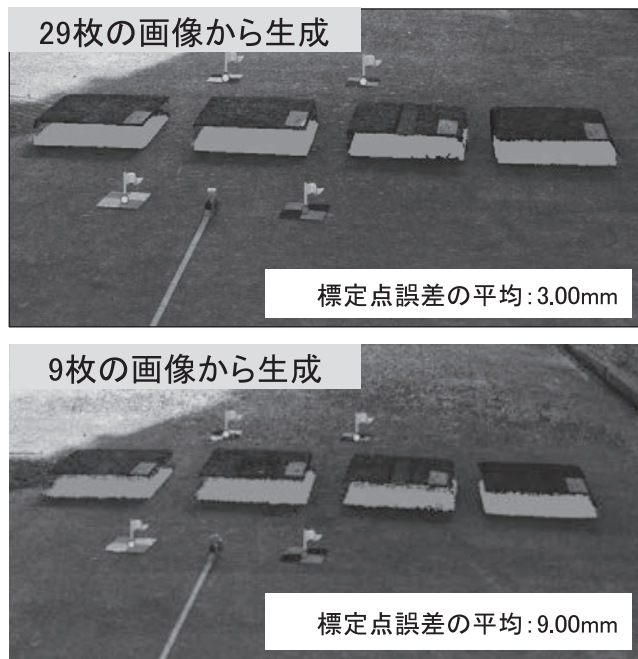


図-16 画像から生成した点群データ

ここで、計測点の標高方向の誤差範囲を分析するため、アスファルト舗装板上面の非凹凸部と凹凸部の点群データ(図-17参照)を抽出し、Z座標の最大値と最小値の差を確認した。そして、非凹凸部と凹凸部の点群データからそれぞれ近似平面を生成し、その重心点のZ座標の差をわだち掘れの算出結果とした。計測点の標高方向の誤差範囲を表-3、わだち掘れの深さの算出結果を表-4に示す。

表-3より、誤差範囲は、大きい順に、LS、カメラ画像(9枚)、カメラ画像(29枚)であった。これより、アスファルト舗装面では、レーザ計測よりもSfMの方が標高方向のばらつきの小さい点群データを取得できることがわかった。

表-4より、わだち掘れの深さの算出精度は、高い順にカメラ画像(29枚)、LS、カメラ画像(9枚)であった。29枚の画像から生成した点群データでは、実寸

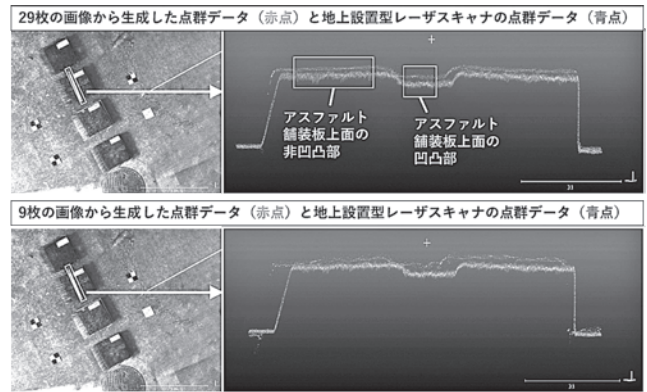


図-17 点群データの重畳結果

表-3 舗装板上面の点群データの誤差範囲

点群データの生成方法	Z座標値の誤差範囲 (mm)
カメラ画像(9枚)	7.20
カメラ画像(29枚)	2.20
地上設置型レーザスキャナ	10.30

表-4 わだち掘れの深さの算出結果

点群データの生成方法	わだち掘れの深さ(mm)		
	計測値	実寸値	誤差
カメラ画像(9枚)	3.4	5.75	-2.35
カメラ画像(29枚)	5.27	5.75	-0.48
地上設置型レーザスキャナ	4.94	5.75	-0.81

値と比較して誤差-0.48mmと高い精度でわだち掘れを算出できることが示唆された。しかし、走行車両から29枚程度の画像枚数を確保する場合は、60fps以上かつ4K以上の高解像度画像の撮影が要求される。

現時点では、カメラ画像(9枚)の結果が示すとおり、高解像度カメラを車外設置して、時速40km程度で走行した場合、5.75mmのわだち掘れを誤差約2.35mmで算出可能であると結論付けることが適切といえる。

## 6. おわりに

点群データは、高精度かつリアルタイムに取得する技術から、専門知識を必要とせず手軽に取得できる技術まで開発されてきており、今後は蓄積した点群データの活用技術の開発もますます発展していくことが期待できる。筆者も引き続き、公共事業の各用途に応じた精度の点群データをいかに効率よく取得して処理するのか、賢く取得して徹底的に使いこなす技術開発に貢献していきたい。

## 《参考文献》

- 1) 加藤康弘, 今井龍一, 平謙二, 中村健二, 塚田義典: 建設機械搭載型レーザスキャナによる遠隔臨場リアルタイム出来形管理システム, 第34回日本道路会議論文集, 2021年11月
- 2) 国土交通省: 地上移動体搭載型レーザスキャナーを用いた出来形管理要領(舗装工事編)(案), 2020年3月
- 3) 今井龍一, 谷口寿俊, 松浦弦三郎: 舗装工事における建設機械の施工履歴の出来形管理への適用可能性の評価, 土木学会論文集F3(土木情報学), Vol.73 No.2, pp.I\_416-I\_423, 2018年
- 4) 松浦弦三郎, 今井龍一, 谷口寿俊: 道路の切削・舗装工事の建設機械の施工履歴を用いた出来形管理手法に関する研究, 土木学会論文集F3(土木情報学), Vol.75 No.2, II\_17-II\_24, 2019年
- 5) 鹿間美咲, 今井龍一, 中村健二, 塚田義典, 土田直之, 松浦弦三郎: 道路舗装の3次元モデルを用いた道路地図の調製に関する基礎的研究, 土木情報学シンポジウム講演集, Vol.46, 2021年11月
- 6) 岡本健, 今井龍一, 新名恭仁: 簡易計測による地下埋設物の3次元モデルを用いた二次元図面の補正システムの開発, 土木学会論文集F3(土木情報学), Vol.75 No.2, pp.II\_43-II\_52, 2019年
- 7) 山本忍, 今井龍一, 中村健二, 塚田義典, 山本莉子: 高解像度画像を用いたアスファルト舗装面の3次元点群データの生成実験, 第76回土木学会年次学術講演会概要集, 2021年9月
- 8) 今井龍一, 中村健二, 塚田義典: 人工知能を用いた舗装点検手法に関する研究, 第21回研究開発助成成果報告会概要書, 国土技術研究センター, 2021年5月

## 【筆者紹介】

今井 龍一 (いまい りゅういち)  
法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科  
教授

