

移動体測量を使ったインフラのメンテナンス作業に関する基礎的研究

Basic Research on Infrastructure Maintenance Work Using Mobile Surveying

長江 健三¹⁾, 西山 哲²⁾

1) Kenzo NAGAE, 工務本部, (株)荒木組, nagae375@arakigumi.com

2) Satoshi NISHIYAMA, 教授, 岡山大学学術研究院, nishiyama.satoshi@okayama-u.ac.jp

本研究において、目視点検に替わる効率的なインフラのメンテナンス作業として、移動体による3次元測量手法の特性を検証し、さらに発生した変状箇所を検知して定量化するデータ処理法を考察した。具体的には、MMSおよびLidarSLAMを用いた3次元レーザ測量を用いて、法面のはらみ出しを検知して定量化することを想定した研究を実施した。本論文は、移動体による測量の点群密度の特性を明らかにし、また点群を重ね合わせ、さらに変状を可視化するアルゴリズムの開発により、高密度点群を使った法面の点検作業の実用化について考察した結果を記述する。

キーワード: 移動体測量, SLAM, レーザ点群, 3次元, 維持管理

(IGC:C-04, C-07)

1. はじめに

高度経済成長期以降に集中的に整備されたインフラの老朽化が深刻化しており、建設から50年以上経過する施設の割合が加速度的に進行している。その一方で、我が国のインフラの多くを管理している市区町村では、土木部門の職員数が減少しており、全国の4分の1の市区町村は技術系職員が配置されていないなど、メンテナンスに携わる人的資源の不足も問題になっている。この労働力不足は建設分野全体の課題でもあり、将来さらに深刻化する担い手不足に備え、調査・測量から設計、施工および維持管理までのあらゆる建設生産プロセスでICT技術を導入し、さらに3次元データを受け渡して活用することによる省力化や効率化を進めることで、生産性を向上させようとするi-Constructionの取り組みが推進されている。施工管理分野においては、3次元データを基盤とするBIM/CIM技術や出来形管理が普及しており、これら施工工程の3次元データを維持管理工程に受け渡すことで、インフラのメンテナンスを効率よく実施することができる。例えば竣工時の状態を1時期目のデータとして保管し、その後実施される定期点検時のデータと比較することにより、インフラの状態の経時変化を把握することが可能となる。その一方で、多くのインフラの点検作業は近接目視が基本となっており、健全性の判断も技術者の経験に頼っているのが実情である。同等の健全性の診断ができるならば、近接目視以外の方法も点検作業で用いることができるように点検要領が改訂され¹⁾、さらに点検を支援する新技術の性能も公開されている²⁾。ところが、未だ多くのインフラのメンテナンス作業が、労力を要する近接目視と熟練技術者の経験に頼った健全性診断に依存しているという課題は解決されていない。



図-1 MMSの概観と機器の仕様



図-2 LidarSLAMの概観と機器の仕様

本研究はこのような背景を鑑み、インフラのメンテナンス作業において、近接目視に替わる簡便で効率的なデータ取得法およびインフラの変状を定量化するデータ処理技術の開発に取り組んだ。前者のデータ取得法は、図-1に示す車載写真レーザ測量（以下MMS: Mobile Mapping System）および図-2に示すLidarSLAM（Simultaneous Localization and Mapping）を利用した3次元点群データの取得法を検討する。いずれも移動しながら効率的に測量を実施して、対象物を3次元で再現する手法である。「BIM/CIM活用ガイドライン（案）第5編 道路編（令

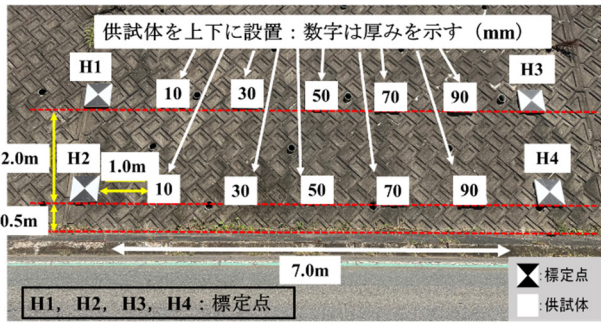


図-3 計測対象法面の状況

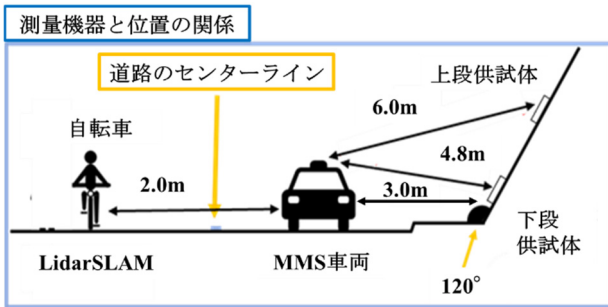


図-4 計測対象法面での測量機器と位置関係

和3年国土交通省)」(以下、BIM/CIMガイドライン)では、「車載写真レーザ測量、レーザスキャナ(LS)等を用いて法面等を計測し、3次元データ(初期値等)と比較することで、はらみ出し等の変状を面的に把握することができる。」と記述されており、施工段階の3次元モデル活用による維持管理作業の効率化が期待されている³⁾。しかしながら、インフラの維持管理に要求される点群密度と測量精度は明示されておらず、また具体的なデータの処理法が示されたメンテナンスの実績も報告されていない。本論文では、車両および徒歩や自転車で移動しながらLS測量を実施するMMSおよびLidarSLAMを用いることにより、i-Constructionが目指す維持管理の省力化および効率化を具体化する。対象とするインフラは、3次元データを使った維持管理の応用例としてBIM/CIMガイドラインに記述されている法面を想定する。そこで法面のはらみ出しを定量化するために必要な点群密度等を検討し、さらにはらみ出し量を把握する点群データ処理法を開発する。これらの3次元データの活用に向けた基本技術は、技術者不足の課題を解決に向けて、近接目視に替わるインフラ点検技術の実現に貢献するものと考えられる。

2. 3次元データ取得法についての考察

ここでは図-3に示すような法面を対象にして、MMSおよびLidarSLAMを使った測量手法の特徴を述べ、さらに両手法の基本特性を評価した結果を示す。なお法面上には、測量精度の評価のために1辺0.7mの四角形のタ

ーゲットを標定点として4点、1辺0.5mから成る変状を模擬した10、30、50、70および90mmの厚みの供試体を上下に分け、さらに供試体については1mの間隔をあけて10個設置した。なお図に記載の距離は鉛直距離である。またレーザ照射距離等の測量機器と法面の位置関係は図-4に示すとおりである。

2.1 MMSの概要と基本特性

MMSは「移動計測車両による測量システムを用いる数値地形図データ作成マニュアル(案)(平成24年国土交通省国土地理院)」(以下MMSマニュアル)のように公共測量で用いられる手法である⁴⁾。レーザスキャナとデジタルカメラの他、GNSS測量機、レーザ照射時の姿勢等を計測するIMU(Inertial Measurement Unit:慣性計測装置)および走行距離計(DMI:Distance Measuring Instrument:オドメータ)を組み合わせる車両等に搭載し、道路工事の竣工時にはBIM/CIM用3次元モデルの作成に活用される。本研究ではMMSマニュアルに基づき汎用化されている地図情報レベル500の仕様、すなわち水平位置および標高点の標準偏差が0.25m以内を満たす仕様の機器を使用した。レーザスキャナのレーザ照射距離や密度の性能を高度化することも可能であるが、スキャナのコストが高くなる課題が生じる。そこで本研究では、コストを考慮して上記に記載の仕様のものを用いた。

MMSのような移動局の自己測位は、一般にリアルタイムで結果が得られるRTK-GPS(Real-Time Kinetic GPS)方式の測位を用いるが、建物などに上空が遮蔽されて4個以上のGNSS衛星から信号を受信できなかった場合はFix解が求まらず、自己測位の精度は安定しない。それを改善するために、座標値をトータルステーション等で測量した標点を設置し、その値を用いてMMS車両の位置や姿勢を再計算して計測精度を確保する手法も用いられているが、計測作業の効率化を妨げるものとなる。またIMU計測値は車両の加速度や角加速度を積分して姿勢を算出するので、時間とともに蓄積する誤差が含まれる欠点がある。そこで、本研究においては、MMSマニュアルで示されているように、GNSS、IMUに加えてオドメータによる位置や速度情報をリファレンスとして利用し、カルマンフィルタの出力値を慣性装置等の値にフィードバックするルーズカップリング(loose Coupling)と称される演算を導入することで、GNSSおよびIMU信号の不安定さを解消する。さらにインフラの維持管理ではリアルタイムでの処理は不要なことから、GNSS測位には近傍の電子基準点のデータを利用するPPK測位方式(後処理キネマティック方式;Post Processing Kinematic)を導入して自己測位の精度を向上させた⁵⁾。

法面上のレーザ点群密度を計測した結果が、MMSの走行速度でどのように相違するのかわかを示したものが図-5である。MMSマニュアルにおいては、地図情報レベル500の仕様でレーザ点群のみによる図化を実施する場合は、400点/m²以上の点群密度が要求される。走行速度

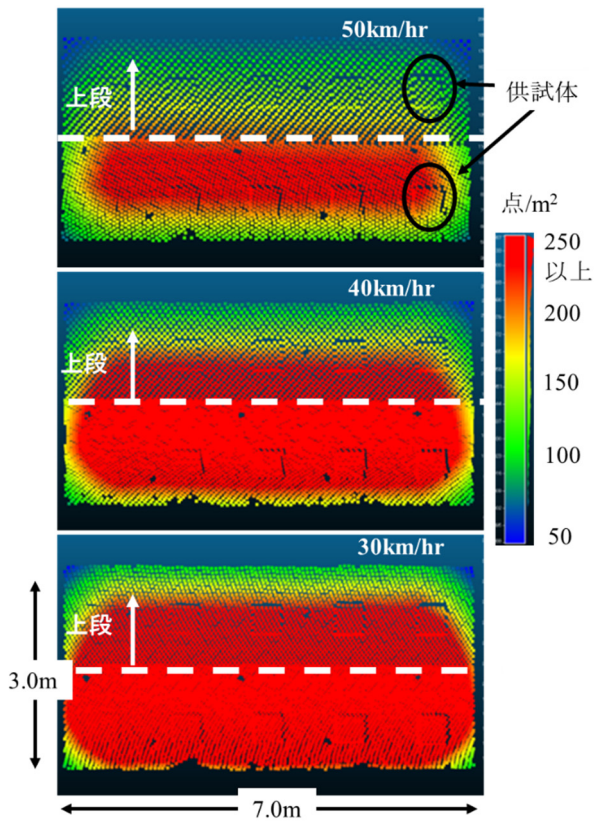


図-5 MMS の走行速度と法面上の点群密度分布の関係

表-1 MMS の走行速度と測量精度の関係

| 走行速度 | 平均較差(mm) | | RMSE(mm) | |
|---------|----------|----|----------|----|
| | XY | Z | XY | Z |
| 50km/hr | 162 | 47 | 163 | 53 |
| 40km/hr | 165 | 36 | 165 | 40 |
| 30km/hr | 159 | 25 | 160 | 29 |

が大きくなると、400 点/m²以上の密度が均一には得られておらず、その分布も走行速度によって大きく変わることが分かる。さらに同じ走行速度でも、法面上段と下段ではレーザ照射距離は大きく相違しないが、点群密度は大きく異なることが分かった。

次に法面上の標定点の測量精度を検証した結果が表-1である。なお測量精度はトータルステーション（以下、TS）により各標定点の中心の座標を 0.1m の精度で測量した値を用いて次の式にて算出した。

$$DIS = OBS - TV \quad (1)$$

$$\text{平均較差} = \frac{\sum DIS}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum DIS^2}{n}} \quad (3)$$

ここでDIS：較差、OBS：MMSによる観測値、TV：TSによる測量値、 \overline{DIS} ：較差の平均値、n：検証点数=4、RMSE：平均二乗誤差（Root Mean Square Error）である。表におけるXYは法面上の水平方向、Zは法面に鉛直な方向を示す。表は各走行速度で得られた4個の標定点での平

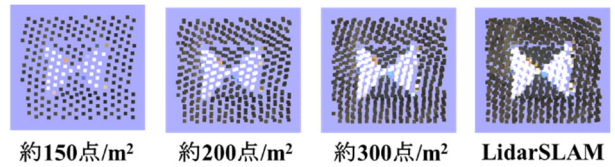


図-6 点群密度による供試体の再現性の相違

表-2 MMSとLidarSLAMの点群密度の相違

| 標定点 | 点群密度 (点/m ²) | | | |
|-----------|--------------------------|------|------|------|
| | H1 | H2 | H3 | H4 |
| LidarSLAM | 3152 | 4932 | 3596 | 4448 |
| MMS | 128 | 224 | 128 | 232 |

均の値を示すものである。走行速度すなわち点群密度が異なるとZ方向の測量精度も相違する傾向が表れているが、測量精度は走行速度によらず、地図情報レベル500の要求精度である水平位置および標高点の標準偏差が0.25m以内を満たす結果が得られた。

図-6はMMSによって取得された点群密度の違いによる供試体の再現性の良否を示すものである。参考のためにLidarSLAMによって計測された点群も示す。図の通り、点群密度によって供試体の認識の難易度が変わる。対象物の変状を捉えるには、対象物を正確に再現する必要があるが、供用中の道路を走行しながら測量するには、走行速度は40～50km/hrが好ましい。その場合のMMS測量ではレーザの照射距離に対する密度の依存性が大きく現われる。そのためMMSマニュアルが示す維持管理に用いるには、物体を認識するために必要な点群密度あるいは密度分布の均一性の向上を図る必要があることが分かった。

2.2 LidarSLAMを使った測量手法の概要と基本特性

SLAMは、移動しながら周辺の地物の特徴点を見つけ出し、それらの見え方や測定距離の変化を把握しながら移動軌跡を推定して自己測位を行う手法である。自動運転などで自己位置推定と周囲の環境地図作成を同時に行う技術として汎用化されているが、レーザ光の情報をもとに対象物との距離を計測するLidar (Light Detection And Ranging) 技術と組み合わせたものは、「LidarSLAM技術を用いた公共測量マニュアル（令和5年国土交通省国土地理院）」（以下、SLAMマニュアル）として公共測量で用いられており、簡便な手法なので今後BIM/CIMの3次元モデル作成用として普及すると考える⁹⁾。

本研究では水平位置0.15m、標高点0.2mの標準偏差の精度である地図情報レベル500の機器を用いて、自転車を移動手段として使った。図-3に示すH1、H2、H3およびH4の標定点上の点群密度を、50km/hr走行によるMMS測量による点群密度と比較したものが表-2である。点群密度が約100～200点/m²にて再現された供試体が、LidarSLAMにより約3,000点/m²以上の密度にて表現さ

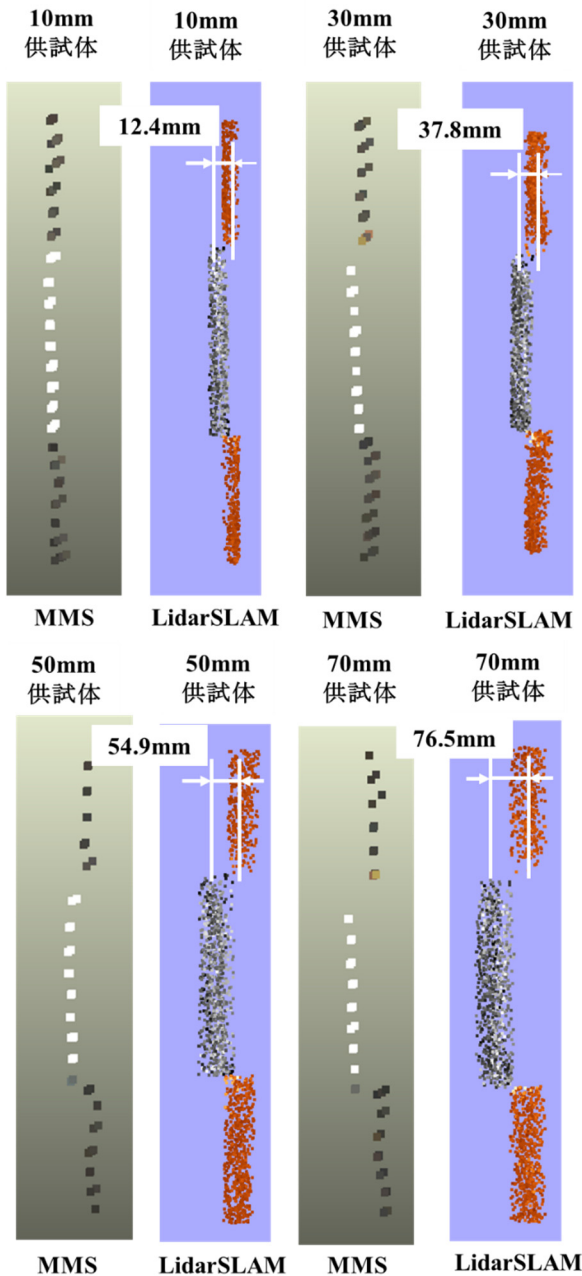


図-7 点群で再現された供試体の断面図

れる。SLAM マニュアルにおいては、地図情報レベル 500 の機器を用いる場合、出来形測量には 100 点/m² 以上の点群密度が要求される。移動しながらのレーザ照射は、対象物が数 m 異なるだけで点群密度が大きく減少する。65m の照射距離の仕様を用いる MMS では、数 m の範囲しか出来形測量に要求される点群密度を満たさないが、照射距離 220m 仕様の LidarSLAM では、SLAM マニュアルの要求を大きく上回る点群密度を取得できる。なお、これは移動速度の大きさが影響していると考えられる。

次に LidarSLAM を使って法面を再現し、供試体の中心の位置の断面を可視化した横断面図の例が図-7 である。図には MMS による点群の横断面図も比較のために示す。なお供試体は法面に沿って設置したが、図では供試体を鉛直に描いた。図のように、MMS の点群では供試体の

表-3 LidarSLAM の測量精度

| 平均較差(mm) | | RMSE(mm) | |
|----------|----|----------|---|
| XY | Z | XY | Z |
| 24 | -6 | 27 | 9 |

認識が容易でない、一方で LidarSLAM では 10mm 厚の供試体の認識は可能である。また法面を表す点群の座標の平均値と供試体を表す点群の座標の平均値の差によって算出した供試体の厚みを図に示すが、点群のバラツキも大きく、また計測精度を考慮すると擁壁表面の凹凸の影響も正確に把握できないので、供試体の厚みを示す数値の信頼性は乏しく、正確に把握するのは困難であるが、厚みの相対的な相違は捉えることができる。地図情報レベル 500 仕様の LidarSLAM により、供試体の位置が検知でき、さらに厚みの相対的な大小を表現できるデータを取得することができる。移動体を利用する測量技術では、移動速度が小さいと点群密度が大きくなり、対象物の再現性も良好になる。ただし点群のバラツキも大きく、点群の中心を特定して定量化する工夫が必要となる。

このように地図情報レベル 500 仕様の測量機器でも、MMS と LidarSLAM では点群密度は大きく異なり、結果として対象物の認識の容易さが異なることが示された。さらに LidarSLAM を使って法面の標定点を計測した際の測量精度を、式 (1) から (3) に基づいて算出した結果を表-3 に示す。点群のバラツキは大きいですが、供試体の認識が容易で中心座標の読み取りが正確なため、高精度の測量が可能であった。なお本研究で用いた LidarSLAM 機器は GNSS および IMU を搭載している。これは測量結果を世界座標系で表現するために用いるもので、測量精度の検証時には GNSS を使用していない。結果は、地図情報レベル 500 の要求精度を満たすことが分かり、同じ移動体測量である MMS より高精度の測量が可能であることが分かった。

3. 3 次元点群データ解析法の検討

前章で示されたように、対象物のインフラの状態を認識するためには高密度の点群が必要になり、取得されたデータはビッグデータとなる。したがって、そのデータの中からインフラの変状箇所を検出するためのデータ処理も労力を要する作業となる。本章では、データ処理の労力の低減を目的に、2 時期の点群を重ね合わせて変状箇所を抽出する作業を自動化するアルゴリズムを検討する。これまででは 2 時期の対応する点を探索して重ね合わせる手法が主に用いられてきた⁷⁾。しかしながら点群間の距離が大きくなる箇所が多くなると、対応点の探索が困難になることから収束しなくなる課題がある。そこで本研究では、2 時期の点群の重心を一致させる平行移動を行なうことで対応点の認識を容易にし、さらに対応す

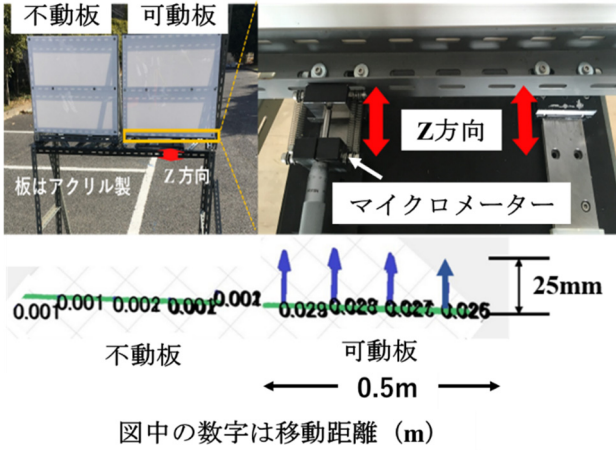


図-8 開発アルゴリズムの有用性を検証する実験の概要

る2つの点群から成る図形に対して、一様なスケーリングと並進および回転変換のもとで、点群間の二乗誤差が最小になるように重ね合わせるプロクルステス分析に基づいたアルゴリズムを考える⁸⁾。

1 時期目の点群を x_i 、2 時期目の点群を y_i とすると、各点群から成る図形を重ね合わせる操作は式 (4) のように表すことができる。

$$x_i = s * M * (y_i - t) + v_i \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

s : 図形のスケーリング比, M : 回転行列, t : 並進ベクトル, v_i : 残差である。

1 時期目の点群 x_i 、2 時期目の点群 y_i から成る図形の重心を式 (5) のように求める。

$$x_g = (\sum x_i) / n \quad y_g = (\sum y_i) / n \quad (5)$$

重心を原点とした座標値を用いて x_i 、 y_i を式 (6) のように書き換える。

$$x_i = x_i - x_g \quad y_i = y_i - y_g \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

それぞれの点群から成る3次元図形において、各点の重心からの距離の2乗和の平方根を計算し、式 (7) によりスケーリング比を算出する。

$$s = \left\{ \frac{\sum \|x_i\|^2}{\sum \|y_i\|^2} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

このスケーリング比を2時期目の点群 y_i から成る図形に掛け合わせる。

$$y_i = s * y_i \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

式 (4) の v_i の2乗和が最小になるように、点群 y_i を式 (4) の回転行列を用いた回転により点群 x_i に重ね合わせる。これは、式 (9) の2乗和 E が最小になる回転行列 M を求めることになる。

$$E = \sum v_i^T * v_i = \sum (x_i - M * y_i)^T (x_i - M * y_i) = \sum x_i^T x_i - 2 \sum x_i^T * M * y_i + \sum y_i^T y_i \quad (9)$$

式 (9) の第1項と第3項は一定であるので、第2項を最大にする回転行列 M を求める。

$$\begin{aligned} \sum x_i^T * M * y_i &= \text{trace}\{x_i (M y_i)^T\} \\ &= \text{trace}\{(\sum x_i y_i^T) M^T\} = \text{trace}\{N M^T\} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで $N = \sum x_i y_i^T$ とした。ここで式 (11) のように特異値分解を考える。

$$E = \text{trace}\{U * S * V^T * M^T\} = \text{trace}\{V^T * M^T * U * S\} \quad (11)$$

U, V は直交行列であり、 S は特異値を対角項に持つ対角行列である。式 (11) は特異値 λ を用いて式 (12) に書き換えられる。

$$\text{trace}\{V^T * M^T * U * S\} = \lambda_1 a_{11} + \lambda_2 a_{22} + \lambda_3 a_{33} \quad (12)$$

a_{11}, a_{22}, a_{33} は $V^T * M^T * U$ 行列の要素である。 $V^T * M^T * U$ は直行行列であり、各列ベクトルの長さは1であるため、要素の大きさは1を超えない。したがって $a_{11} = a_{22} = a_{33} = 1$ のとき最大になるが、そのとき他の要素は0になる。これより $V^T * M^T * U$ が最大になるときは、単位行列を I として、式(13)のように $V^T * M^T * U = I$ となるときである。

$$M^T = V * U^T \quad M = U * V^T \quad (13)$$

この回転行列 M により、式(4)を計算することができ、それぞれの点群から成る3次元図形を重ね合わせることができる。また本アルゴリズムは繰り返し計算が不要なので計算速度も早い利点がある。

本手法の有用性を検証するために、図-8に示すように固定された不動板とマイクロメーターで移動する可動板を、30km/hr で走行する MMS にて測定し、板を稼働させる前後の点群を本アルゴリズムで重ね合わせ、解析値の精度を検証した。MMS が各板の正面に来た時のレーザ照射距離は約 5m であり、板上の点群密度は約 200 点/m² であった。図の Z 方向にマイクロメーターを 25mm 可動させた際の板の変位を、本アルゴリズムを用いて解析した結果を図中にベクトルで示す。図の緑色の実線は初期の板の位置を示しており、板上の任意の位置での2時期の点群の動きを、図のように解析によってベクトルで表すことができる。固定した板の変位量は0と算出され、図のように可動させた板の点群のいくつかを平均して表示させると、約 25mm の大きさと移動した結果を得ることができた。このように、本アルゴリズムによるデータ処理によって、重ね合わせることでできない点群が現われた場合、それは変位が発生したことによるものと解釈できる。さらに板の可動量を変えて、40km/hr 走行によって取得した点群データも用いて、本アルゴリズムを用いて板の可動量を解析した結果をプロットしたものが図-9 である。40km/hr 走行の場合の点群密度は 100 点/m² 以下であった。5mm 以下の可動量が正確に解析できなかったのは、点群密度が約 100 点/m² 以下であるために、正確な板の形状の認識が困難になったことに因る。すなわち、図-6に示すように点群密度の違いにより供試体の再現性が異なるために、十分な点群密度が確保されるといふ条件の下ではあるが、本アルゴリズムによって

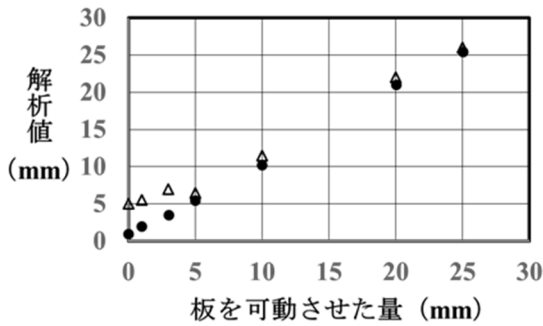


図-9 開発アルゴリズムの精度検証実験の結果

表-4 MMS の走行回数と点群密度の関係

| 走行回数 | 点群密度 (点/m ²) | | | |
|------|--------------------------|------|-----|------|
| | H1 | H2 | H3 | H4 |
| 1回 | 128 | 224 | 128 | 232 |
| 2回 | 260 | 460 | 160 | 456 |
| 3回 | 408 | 708 | 420 | 720 |
| 4回 | 540 | 964 | 560 | 964 |
| 5回 | 684 | 1196 | 696 | 1204 |

現位置に標定点を設けなくても、対象物の変位量と方向を精度良く求められることが示された。

4. 3次元データを用いた法面維持管理の検討

前章で開発した点群処理のアルゴリズムを使って、ビッグデータの中からインフラの変状を検知する手法を本章で検討する。まずは点群密度を向上させる工夫の効果を検証し、異なる2時期に取得された点群から変状としてのはらみ出しを定量化する手法を考察する。

4.1 点群密度向上効果の検証

地図情報レベル 500 仕様の MMS では、レーザ照射距離が 10m 以下でも 10mm 供試体を明確に再現できる点群密度が得られないことが示された。そこで、点群による対象物の再現性を向上させるために、MMS の走行回数を増やし、各走行で取得した点群を重ね合わせることで点群密度を向上させることを試みた。複数の走行回数により点群を重ね合わせた回数と図-3 に示す H1, H2, H3 および H4 の標定点上の点群密度の関係を表-4 に示す。また図-10 は 50km/hr 走行にて取得した点群と 3 回および 5 回走行により取得した点群を重ね合わせて法面を再現させた図、また図-11 は 1 回, 3 回および 5 回の走行により取得した点群を重ね合わせて再現した 10mm および 3mm 厚の供試体の横断面図である。なお図は供試体の中心の位置の断面を可視化したものである。図のように複数の走行による点群を重ね合わせて密度を増加させると共に供試体の認識は容易になり、10mm 厚のものでも複数の走行によるデータによって明瞭に可視化されていくことが分かる。点群密度を向上させるには、レーザスキ

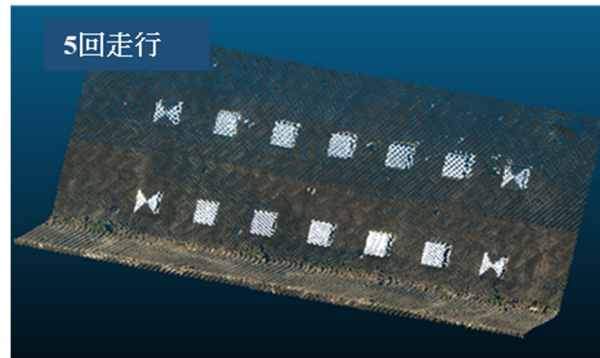
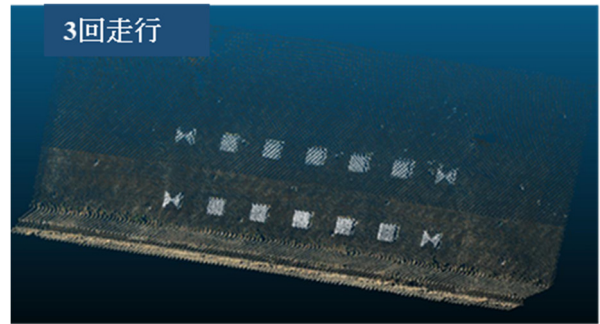
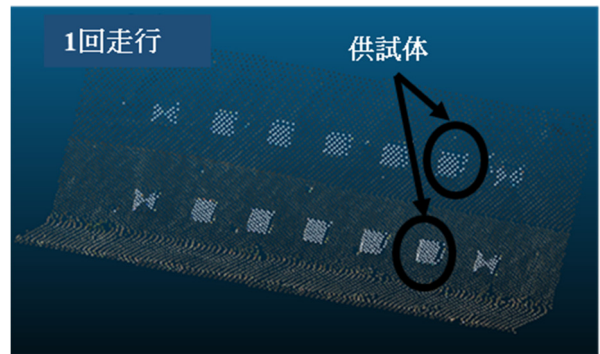


図-10 走行回数による法面の再現性の相違

ャナ機器の照射レートを向上させることでも可能であるが、照射距離が遠くなると結局は本現場と同様に点群密度の減少が大きく現われ、その都度レーザスキャナの仕様の変更を検討する必要が生じる。本研究のように、複数の走行による点群を重ね合わせる手法により、対象物との距離に応じたレーザスキャナ機器を用いて点群密度を向上させることの方が効率的かつ低コストであると考ええる。

4.2 2 時期の点群から変状箇所を検出する手法の検証

前節と同じく、3 章において検討した点群を重ね合わせる手法を用いて、法面上の変状を模した供試体の検出を試みる⁹⁾。まず供試体を設置していない法面を測量し、その後、図-3 に示した供試体を設置した法面を測量して取得した点群を、3 章で開発した手法により重ね合わせ、どの程度供試体の位置を検知できるのかを検討する。

50km/hr の走行の MMS によって取得した点群を重ね合わせた結果を図-12 に示す。多くの国道において、地図情報レベル 500 仕様の MMS により取得されたデータが蓄積されている。それを考慮して 1 時期目のデー

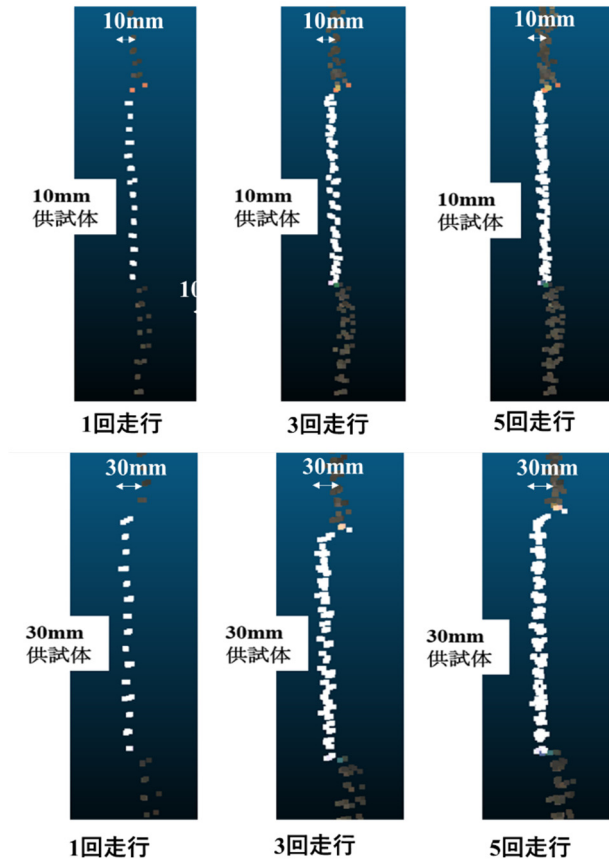


図-11 走行回数による供試体の再現性の相違

データを MMS の 1 回走行によるデータを用い、2 時期目の点群として MMS の 1 回の走行および前節で検討した 3 回および 5 回の走行という複数の測量による点群を重ね合わせた結果を示す。図のように、走行回数を増やして 2 時期目の点群密度を向上させるにつれて、10mm と 30mm の供試体を明瞭に可視化できることが分かる。既往の研究では、50km/hr 以下のような走行速度を変化させることにより測量精度を向上させる試みが報告されているが、交通の支障になるような条件下での MMS の活用は好ましくない¹⁰⁾。本研究のように、50km/hr 走行の MMS であっても、点群密度を向上させた後、世界座標系の中での自己測位によって得られた測量データを本アルゴリズムで解析することにより、法面上の変状を模した供試体の位置を検知することができる。

同じく LidarSLAM を用いた場合での供試体位置の検知について考察する。50km/hr の走行速度の MMS によって取得された 1 時期目の点群と LidarSLAM によって取得した 2 時期目の点群を重ね合わせた結果を図-13 に示す。1 時期目は MMS の 1 回による走行と、比較のために 5 回の走行によって取得された点群を用いる。MMS によって取得された点群を重ね合わせた結果と同様に、2 時期目に高密度点群を取得すると、10mm と 30mm の供試体を明瞭に可視化できることが分かる。

また図-14 には、1 時期目および 2 時期目に共に LidarSLAM で測量したデータを重ね合わせた結果を示

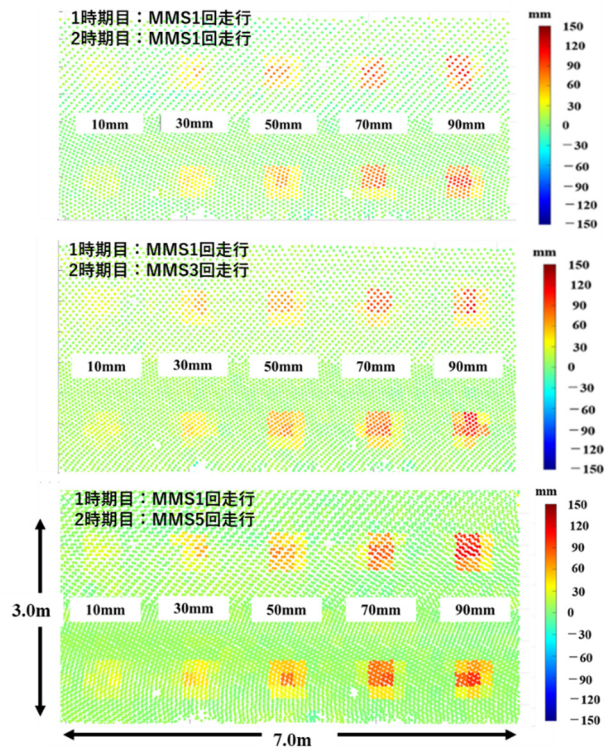


図-12 MMS データの重ね合わせによる法面の再現

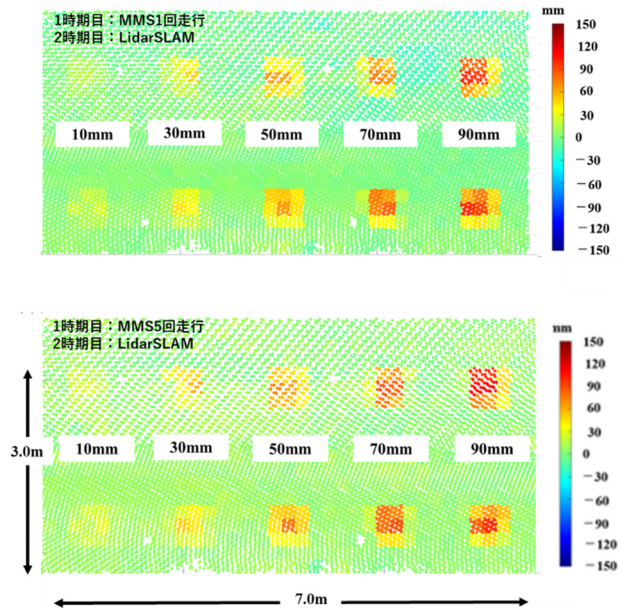


図-13 MMS と LidarSLAM のデータによる法面の再現

す。1 時期目と 2 時期目共に高密度の点群が得られているので、10mm の供試体の位置も明瞭に可視化できている。ただし、図-13 も図-14 においても、供試体の位置は特定できるが、形状までは正確に復元できていない。供試体の位置を検知するスクリーニング作業が可能なのは示せたが、その後、別途法面のはらみ出し量を計測する方法を考察する必要があることが分かる。

4.3 変状の定量化手法の検証

前節で法面上に発生した変状を模擬した供試体の位置を検知するスクリーニング作業の実用性を考察した。ここでは、供試体の位置が特定された後、横断面図を見ることにより、はらみ出しを定量化する作業を検討する。

3回および5回の走行によって取得された点群を重ね合わせて再現した法面に対して、0.3m、0.1m および 0.01m の幅で 10mm および 30mm 厚の供試体の位置を切り出しして断面図を再現した結果を図-15 に示す。図のように、切り出し幅により供試体の厚みの再現性が異なり、切り出し幅が大きくなるにつれ、供試体の厚みを正確に定量化することができる。すなわち、切り出し幅が大きくなるにつれ、抽出される点群数が多くなるので供試体の厚みの認識が容易になり、結果として厚みも正確に読み取れる。したがって、法面を切り出す幅を順次大きくして、はらみ出しを定量化することが好ましいと考える。

また図-12 および図-13 では、供試体の位置は検知できても形状までは正確に再現できていないが、図-15 に示した結果のように、スクリーニング作業の後に、供試体の位置で法面を切り出し、その断面を見ることにより、変状すなわちはらみ出し量を把握することができる。

MMS は車両走行による測量であるため、広範囲の測量の実施が容易となる利点がある。しかしながら2時期の点群データから対象物の変状を定量化するためには、本研究のように点群密度の向上を図る工夫が必要であった。一方、LidarSLAM は高密度の点群を容易に取得できるが、SLAM は移動量が大きくなると測量誤差が累積されることから、広範囲の測量を実施するには課題がある。ウェアラブルレーザスキャナなどの新しい手法も開発されており¹¹⁾、それぞれの移動体測量の利点を組み合わせることで、BIM/CIM のようなプロダクトモデルを使った効率的な維持管理工程を構築できると考える¹²⁾。

4. 結言

本研究において、法面を対象にした目視点検に替わるメンテナンス作業に活用するために、移動体による3次元測量手法の特性を検証し、さらには変状箇所を検知して定量化するデータ処理法を考察した。研究の結果、次の成果を得ることができた。

- (1) 移動体による3次元測量は、移動速度の影響が点群密度に現れる。汎用的な仕様のMMSでは点群密度を取得できない場合があるが、移動体の利点を活かして、複数回の測量結果を重ね合わせることにより、高精度で変状を検知できることを実証した。
- (2) 高密度の3次元データから変状発生箇所を抽出するプロクルステス分析を基にしたアルゴリズムを考察した。実験により、本アルゴリズムにより点群の重ね合わせおよび変状箇所の検知が可能になることを実証し、またスクリーニング

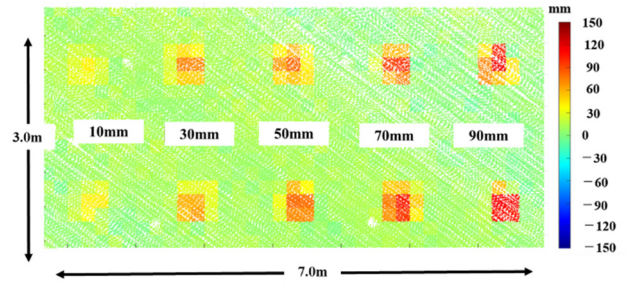


図-14 LidarSLAM データの重ね合わせによる法面の再現

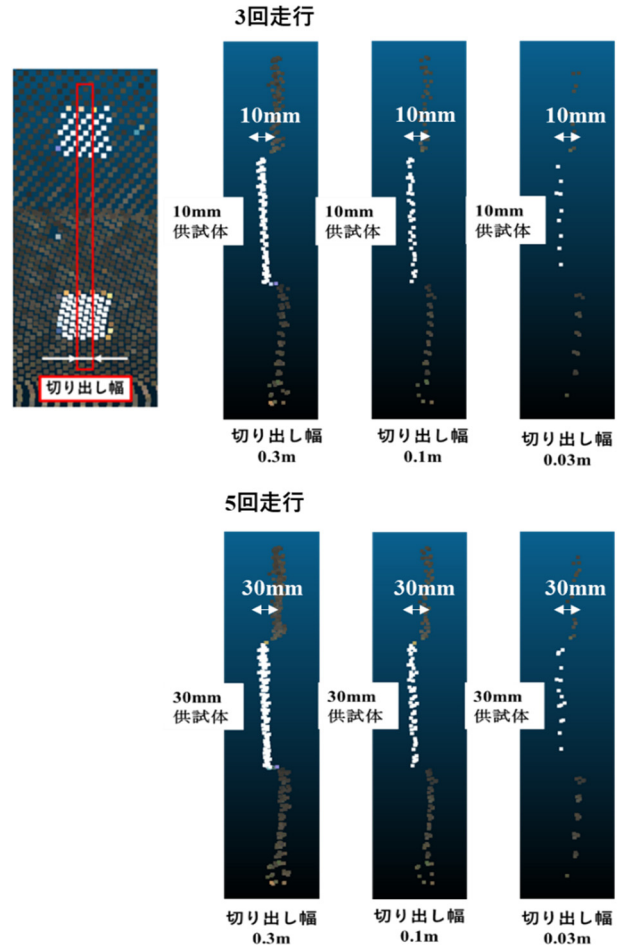


図-15 法面を切り出す幅を変えて作成した断面図

として使用した後、変状発生箇所を切り出して断面を図化する一連の作業により、はらみ出しとしての変状を精度良く定量化できることが示された。

本研究では点群密度に着目して、変状を模擬した供試体の位置および厚みを定量化する手法を検討した。施工工程あるいは維持管理工程においては、測量範囲に応じて、高密度点群を取得しやすい測量手法、すなわち MMS あるいは LidarSLAM を選択すれば良い。ただし、本研究は、近距離の法面を対象にした事例であり、特定道路土工構造物のような長大法面を対象にした場合は、遠距離まで照射できるレーザスキャナ機器を使用することになるが、その場合でも高密度点群の取得法やデータ処理と

して、本研究の成果を適用して変状の検知と定量化は可能であると考え。今後は、さまざまな道路土工構造物への本成果の適用性を実証していく予定である¹³⁾。

参考文献

- 1) 国土交通省 道路局 国道・技術課：道路土工構造物点検要領 令和5年3月, 91p., 2023.
- 2) 国土交通省：点検支援技術性能カタログ, <https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/>, (参照 2024.06.11).
- 3) 国土交通省：BIM/CIM 活用ガイドライン(案)第5編道路編 令和3年3月, p.140, 2021.
- 4) 国土交通省国土地理院：移動計測車両による測量システムを用いる数値地形図データ作成マニュアル平成24年5月, 75p., 2012.
- 5) 間野耕司：モービルマッピングシステム(MMS)の計測技術と活用事例, 計測と制御, Vol.60, No.10, pp.706-710, 2021.
- 6) 国土交通省国土地理院：LidarSLAM 技術を用いた公共測量マニュアル(令和5年 国土交通省国土地理院), 45p., 2023.
- 7) 間野耕司, 石井一徳, 平尾公孝, 橘菊生, 吉村充則, Akca, D., and Gruen, A.：移動計測車両測量システム(MMS)により取得される点群の精度評価, 写真測量とリモートセンシング, Vol.51, No.4, pp.186-200, 2012.
- 8) Crosilla, F., Beinat, A., Fusiello, A., Maset, E., and Visintini, D.: Advanced Procrustes Analysis Models in Photogrammetric Computer Vision, Springer Nature, pp.7-28, 2019.
- 9) Samori, N., Nishiyama, S., and Sakita, K.: Quantifying the slope deformation of a laser point cloud acquired using mobile mapping system, International journal of GEOMATE, Vol.21, No.88, pp12-21, 2021.
- 10) 藤村大輔, 山口裕哉, 白石宗一郎, 岩上弘明, 佐田達典, 江守央：MMS の走行速度と計測精度との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集 F3, Vol.75, No.2, pp. II_79-II_86, 2019.
- 11) 金井理, 伊達宏昭, 田中文基：計測に基づくインフラ構造物の3次元モデル生成とその維持管理への応用, 計測と制御, Vol.60, No11, pp. 780-784, 2021.
- 12) 大月庄治, 今井龍一, 中村健二, 塚田義典, 梅原喜政, 田中成典, 平野順俊：社会インフラの維持管理におけるプロダクトモデル化した点群データの利活用に関する研究, 土木学会 AI・データサイエンス論文集, Vol.3, No.J2, pp.945-953, 2022.
- 13) 山下淳子, 木村沙智, 川村日成：3次元点群データを活用したインフラ構造物の維持管理, 精密工学会誌, Vol.85, No.3, pp. 228-231, 2019.

(2024年6月30日 受付)