

(8) MMS による法面モニタリング手法のための 差分解析手法の精度検証

佐守 直人¹・西山 哲²・崎田 晃基³・藤木 三智成⁴・小野 尚哉⁵

¹学生会員 岡山大学 環境理工学部環境デザイン工学科(〒700-0082 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)
E-mail: p9qz9emp@s.okayama-u.ac.jp

²正会員 岡山大学院 環境生命科学研究科(〒700-0082 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)
E-mail: nishiyama.satoshi@okayama-u.ac.jp

³学生会員 岡山大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻(〒700-0082 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)
E-mail: pq1i4u6h@s.okayama-u.ac.jp

⁴正会員 国際航業株式会社 技術サービス本部(〒102-0085 東京都千代田区六番町 2)
E-mail: michinari_fujiki@kk-grp.jp

⁵国際航業株式会社 公共コンサルタント事業部(〒102-0085 東京都千代田区六番町 2)
E-mail: naoya_ono@kk-grp.jp

近年、老朽化による道路法面の変状が問題で法面の変状モニタリングが必要になっている。しかし、自治体の技術者、財源の不足が問題で、いかに効率的に維持管理するかが課題である。本研究ではカメラやレーザスキャナで道路とその周辺部のレーザ点群、カメラ画像データを取得できる MMS(Mobile Mapping System)とそのデータの変位を定量化できる ICP(Iterative Closest Points)を応用する差分解析手法を用いた。

本研究は MMS による法面モニタリング手法のための差分解析手法の実用性の確認を目的に 2 つの検証を行った。1 つ目は解析手法の精度の検証を行った。法面に変位を与え、差分解析手法でどの程度変位が確認できるか検証した。2 つ目は法面全体の 2 時期の変状が確認できるか検証した。結果は 40 mm 程度変状が確認でき、法面モニタリングにおける差分解析手法は十分実用可能であると分かった。

Key Words: road slope, MMS, ICP, difference analysis

1. 背景と目的

日本は約 50 年前に高度経済成長期を迎えた。この経済成長によって多くの道路土工構造物が建てられたが、現在ではこの非常に多くの道路構造物の老朽化が問題となっている。そのため、この研究は道路土工構造物であり、老朽化による変状が問題視されている道路法面を対象とする。現在の道路法面の点検方法は、多数の点検箇所があるにも関わらず、すべての箇所で見視点検を行わなければならないというものである。さらに自治体の技術者不足、財源の不足によって、いかに効率的に点検し、維持管理するかが課題となっている。これに対して、現在レーザ計測機器を用いた技術が普及しつつあり、点群の解析により構造物の変位・変状を定量化する手法は維持管理の面で期待される。本研究では道路法面の点検を効率化・定量化するため、移動計測車両(MMS)(図-1)、

差分解析手法を用いて、2 つの検証を行った。この 2 つの検証は、MMS による法面モニタリング手法のための差分解析手法の実用性の確認を目的とした。1 つ目は本研究の解析手法の精度の検証を行い、2 つ目は法面の 2 時期の変状が確認できるかを検証した。



図-1 MMS 車両の様子

2. 研究手法

本研究で用いる移動計測車両(MMS)と差分解析手法、また今回の検証の使用機器について述べる。

(1) 移動計測車両(MMS)

MMS(Mobile Mapping System)とは、GNSS(Global Navigation Satellite System)、IMU(Inertial Measurement Unit)、デジタルカメラ及びレーザスキャナ、走行距離計などを搭載した移動計測車両のことである(図-1)。この車両を用いることで車両の位置・姿勢を求め、点群データ、全周囲画像、スポット画像を取得することができる。この点群データとは $X,Y,Z(H)$ の座標を有する道路周辺の地形や形状の3次元データのことであり、このデータの1時期目と2時期目を比較することでその間の変状・変動を定量的に求めることができる。MMSは多くの点検者を必要とせず、運転者のみで点群データを取得・測量することができ、法面前の道路の交通量が多くても移動するだけで測量することができる。従来の人による維持管理に代わる技術として、活躍が期待される計測技術である。

(2) 差分解析手法

差分解析手法とは、ICP(Iterative Closest Point)と呼ばれる点群マッチングアルゴリズムを応用した解析手法である。

ICPは、レーザスキャナやデジタルカメラなどで取得した2時期の点群データを使用する。それらにある一定の大きさのメッシュに区切り、そのメッシュ内で1時期目の点と2時期目の点の距離が最小となる点どうしを対応付ける。その後、回転移動と平行移動を繰り返すことで、それら2時期の対応する点群が一番マッチする位置を計算する。この対応付けから、その2点が一番マッチする位置を計算することを繰り返す。そして、マッチングの参照元となるデータ(基準データ)に対して、2時期目のデータ(参照データ)が最もフィットする移動ベクトルを算出し、変位を求めることができる。

このICPを応用した手法はMMSで得られた3D点群データの変位・変状を定量化することができるため、本研究ではこの差分解析手法を用いた。

(3) 使用機器

本研究における2つの検証では、レーザスキャナ、GNSS受信機、走行距離計、IMUのほか、スポットカメラ8台を搭載したMMSを使用した(図-1)。計測用ポット内にレーザスキャナ、GNSSアンテナ、スポットカメラを搭載した。レーザスキャナは透過性がなく、位相差式で1秒間に100万点のスキャンするものを用いた。また検証2では、真値として点群データを取得するためのTS(トータルステーション、据え置き型レーザスキャナ)も用

いた。このTSの性能は位相差式で取得点数は約3,000万点である。

3. 検証方法

(1) 検証1 解析手法の精度検証

はらみ出しの可能性を持った法面に対し強制的に変位を与えた場合どれだけの精度で変状がみられるか本手法の精度を確認する。1時期目の計測時期は2018年1月12日、2時期目は2018年5月28日である。1時期目の法面には変位を何も与えず、2時期目の法面の1には変位を何も与えず、2にははつり落としを行い、最大40mm程度のくぼみを作る変状を与えた。3と4にはそれぞれ10mm、20mm厚の一边50cmの正方形のシートを設置した(図-2)。またMMSで測量する際には、3D点群データの欠測を少なく高密度なデータを得るため、50km/hで走行した。また解析結果の作図方法は図-3と以下に示す。ICPによる2時期比較で得られるメッシュごとの変位ベクトルから、概ね法面横断方向となるY軸成分を抽出した。法面のはらみ出し、剥離、浮きなどの変位の有無を可視化する方法を採用した。

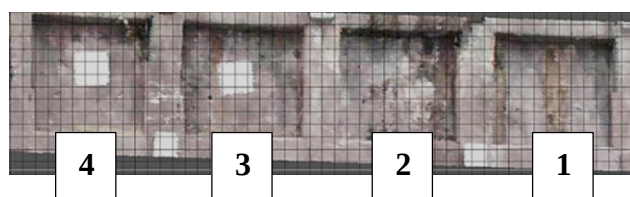


図-2 法面に与えた強制変位

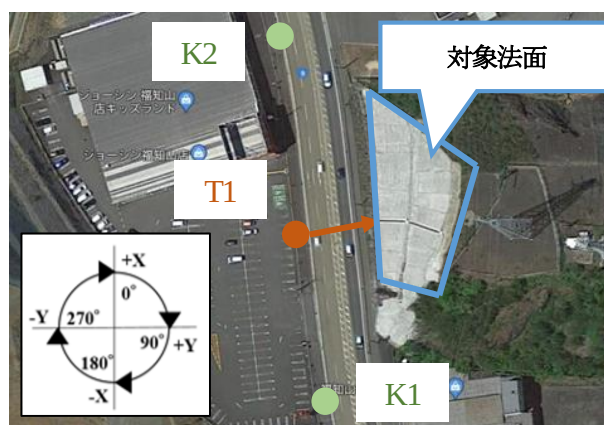


図-3 現地見取り図と測量座標系

(2) 検証2 本手法を用いた法面のモニタリング

この検証も検証1と同じはらみ出しの可能性を持った法面、同じ条件で本手法を用いて法面のモニタリングができるかを検証した。本手法で法面のモニタリングができるかという検証は以下の比較を4回行うことで進める。

a) 比較1 法面の変状を調べるための比較

TSで1時期目と2時期目のそれぞれでターゲットの点群データを得る。ここで得られたTSのデータは誤差の要因がMMSのデータと比べ、少ないため真値であると仮定して、以下の比較を行う。そのため、このTSで得たデータで12時期の間に変動があった場合、対象となる法面は実際に変動していることがわかる。

この比較は基準点をT1とし、ターゲットを測定した。このT1の設置方法はGNSS測量機で法面の両端付近(K1, 2)で2時間のスタティック測量を行い、基準点を設置した。そして、後方交会法によってT1の設置位置を観測した。ターゲットはT1から放射法で求め、かつ対回観測を行うことで誤差の低減に努めた。この比較に用いたターゲットを8点、同時に変位検証点を6点設置した。

b) 比較2 絶対精度検証のための比較

比較1で得たTSのターゲットの点群データを真値と仮定し、MMSの調整計算前の点群データと比較する。1時期目のTSで得た真値のデータと1時期目のMMSで得た調整前データを比較することで、MMSの点群データが真値とどれだけの差があるかを調べ、この差をもとにMMSの点群データに調整計算を加え、比較3を行う。

c) 比較3 絶対精度向上のための比較

TSで得た点群データとMMSで得たデータを比較2によって調整計算を行った調整データとを同時期で比較することで調整計算の精度を向上させる。

絶対精度向上の手法として、2つの方法を用いて精度を検証した。1つ目の方法は地表の特徴部(白線、縁石など)を標定に利用して調整計算を行う従来の方法である。2つ目の方法は法面に設置したターゲットを標定に用いて調整計算に用いた方法である。この2つの方法によって、絶対精度向上のための比較を行った。

d) 比較4 差分解析手法による2時期比較

MMSで得たデータに調整計算を行った点群データの1時期目と2時期目を差分解析手法にかけ、その変動の様子が真値である比較1と同じになるかを検証した。

4. 検証結果

(1) 検証1 解析手法の精度検証

2時期間の点群データに差分解析をして、比較を行った(図-4)。1の箇所の変位を見ると、2時期目に強制変位を与えていないため、変位は見られない。2の箇所の変位

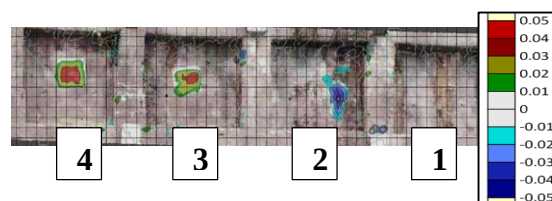


図-4 法面に与えた強制変位
比較結果(単位: m)

表-1 2時期間のTSデータの比

測量値	2時期目データ-1時期目データ			
TG番号	dx(m)	dy(m)	dxy(m)	dh(m)
TG01	-0.001	-0.001	0.001	-0.002
TG02	-0.002	-0.001	0.002	-0.002
TG03	0.001	0.000	0.001	-0.002
TG04	0.001	0.003	0.003	-0.002
TG05	0.003	0.000	0.003	-0.001
TG06	-0.001	0.003	0.003	-0.002
TG07	0.001	0.000	0.001	0.000
TG08	0.003	0.003	0.004	0.001
ave	0.001	0.001	0.002	-0.001
σ	0.002	0.002	0.001	0.001

は青く表れている。これは2時期目の法面にはつり落としを行い、マイナスの変位を与えたためだと考えられる。このはつり落としは最大40mm程度変位を与え、マイナスの変位が大ききところで40mm程度で表れているので、正確に変位が抽出されていることがわかる。

3,4のそれぞれ10mm, 20mmのシートを設置した箇所も2同様にシートを設置した箇所に変位が表れている。

比較結果は強制変位箇所の変化を明瞭に確認でき、それ以外の微小な変位はノイズとして無視する。よって差分解析手法は負の変位が40mm, 正の変位が20mm程度確認できることが分かった。

(2) 検証2 本手法を用いた法面のモニタリング

a) 比較1 法面の変状を調べるための比較

TSで得た点群データの1時期目と2時期目の比較結果は以下のようになった(表-1)。ターゲットの座標値の各軸方向の絶対値は平均1mm, 検証点の座標値の較差はX方向で平均-2mm, Y方向で平均0mm, Z方向で平均-1mmとなった。ここで観測距離が30~100mの場合、TS機械精度は測距で $2\text{mm}+2\text{ppm}\cdot D(<\pm 2.2\text{mm})$, 測角3秒($\pm 1\text{mm}$)であり、今回の観測距離は12m程度であった。よって、2時期の較差はTS機械精度程度であり、変状に対応する有意な変化は生じていない。対象の法面は2018年1月12日から同年の5月28日までの間で変動を起こしていないということが分かった。

表-2 2時期間の TS データの比較

総括		
	dx(y)(m)	dh(m)
最大値	0.077	0.091
最小値	0.001	0

表-3 2時期間の TS データの比較

測量値	TG 使用し調整		地物使用し調整	
TG 番号	dx(m)	dy(m)	dx(y)(m)	dh(m)
TG01	0.000	0.000	0.109	-0.002
TG03	0.000	0.000	0.098	0.000
TG04	0.000	0.000	0.102	0.013
TG05	0.000	0.000	0.089	0.001
TG06	0.000	-0.001	0.089	-0.009
TG07	0.000	0.000	0.085	0.003
TG08	0.000	0.001	0.085	0.002
ave	0.000	0.000	0.094	0.001
σ	0.000	0.001	0.009	0.006

b) 比較 2 絶対精度検証のための比較

TS 測量の点群データと MMS で得た点群データを比較結果は以下のとおりである(表-2)。MMS 計測データは TS 実測値に対して水平方向(dx(y))で最大値 0.077m, 最小値 0.001m, 垂直方向(dh)で最大値 0.091m, 最小値 0.000m となり, 0.1m 未満の差であった。この差は地図情報レベル 500 の精度 0.15m に達しており, MMS 計測精度としては全体的に良好であるといえる。

c) 比較 3 絶対精度向上のための比較

結果は以下のとおりである(表-3)。調整計算後の位置精度はターゲットを使用していた場合の座標値の較差は 1 時期目の X, Y 方向(地面と水平方向)で平均 0.001m, Z 方向(高さ方向)で平均 0.001m, 2 時期目の X, Y 方向で平均 0.001m, Z 方向で 0.001m となった。一方の従来の地物を使っていた場合の座標値の較差は 1 時期目の X, Y 方向で平均 0.035m, Z 方向で 0.004m, 2 時期目の X, Y 方向で平均 0.011m, Z 方向で 0.008m となった。調整計算後の位置精度は従来の地物を用いた方法よりもターゲットを用いた方法のほうが向上することが分かった。そのためターゲットを用いた方法で調整計算を行った。

d) 比較 4 差分解析手法による 2 時期比較

色のついていない部分は法面に変状が生じた部分である(図-6)。しかし, 法面には植生やコーンなどが存在している。今回の法面の様子は局所で変状が表れているため,

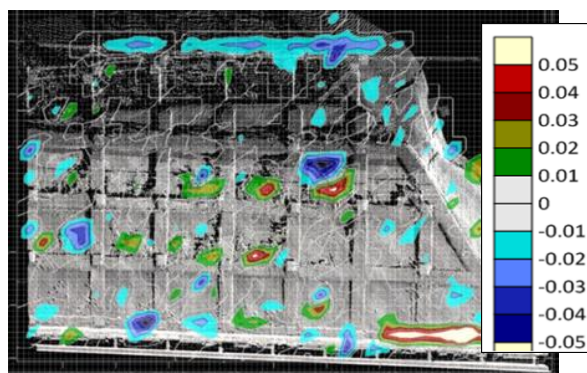


図-5 MMS データの 2 時期間の比較(単位 : m)

局所的なノイズとみなし無視する。法面の広範囲に及ぶ変状がないことに併せ, 局所的な変状を無視することで, 今回の法面は調整計算を終えた後の MMS の点群データと差分解析手法によって, 変動がないことがわかった。

5. 結論

(1) 検証 1 解析手法の精度検証

この検証では本研究における解析手法の精度の検証を行った。検証の結果, 正の変位, 負の変位, 変位を与えていないところは変位が確認できなかったため, 本手法で法面に対し変状を抽出できた。また負の変位であると 40mm 程度, 正の変位であると 20mm 程度, 変状が確認できた。

(2) 検証 2 本手法を用いた法面のモニタリング

この検証では法面の 2 時期の変状が確認できるかという法面モニタリングの検証を行った。比較 1 の TS の点群データから対象の法面は変動していないことがわかり, 比較 4 の調整計算済みの MMS の点群データからも法面が変動していないことがわかった。比較 1 と 4 の法面の様子が一致していることから, 本手法で定量的な判断が可能な法面のモニタリングができることがわかった。検証 1, 2 より MMS による法面モニタリング手法のための差分解析手法は十分実用可能であることが確認できた。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 16K01329 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 内田修, 小泉俊雄, 村上真幸, 守田秀則：測量学【第 2 版】, pp.309~311, 電気大出版局, 2014。