

ICT 舗装工における MMS を活用した 3 次元出来形計測の生産性向上に関する研究

(株)NIPPO 総合技術部 生産開発センター 其田 直樹

(株)NIPPO 総合技術部 生産開発センター 相田 尚

(株)パスコ 安井 嘉文

(株)パスコ 其阿彌 大祐

1. はじめに

わが国では、i-Construction の取組みにより、2025 年までに建設現場の生産性を 2 割向上させることで、魅力ある建設現場の実現を目指すことが推進されている。

国土交通省のトップランナー施策の一つである「ICT の全面的な活用」とは、調査・測量から設計、施工、検査、維持管理・更新までのあらゆる建設生産プロセスにおいて、3 次元データを一貫して使用する ICT を全体的に導入することであり、建設現場の抜本的な生産性の向上を図ることをその目的としている。

これらを実現するためには、調査から更新に至る各プロセスを横断したデータ活用を可能とする必要があることから、そのデータの内容と取得方法は重要な課題といえる。そこで筆者らは、あらゆる建設生産プロセスにおける新たな 3 次元点群データ取得方法として、移動計測車両による計測システム（モバイルマッピングシステム、以下、MMS）の活用を研究している¹⁾。本論文では、本研究から得られた ICT 舗装工における MMS を活用した 3 次元出来形計測の生産性向上に関する新たな知見について述べるものである。

2. 研究の背景と目的

2017 年から導入された ICT 舗装工では、事業フェーズや目的に応じて段階的に取組みが進められている²⁾。路盤工における MC グレーダと地上型レーザースキャナー（以下、TLS）による出来形面管理が ICT 舗装工の第一段階として導入された。また、3 次元測量においては、ICT 舗装工対象工事における起工測量および表層工の出

来形管理において必須となっており、そのデータ取得方法は TLS や地上移動体搭載型レーザースキャナー（以下、移動体 LS）等が活用されている。

TLS と移動体 LS により取得された 3 次元点群データを用いることにより面的管理が可能であることが大きな特長であるが、実際のデータ取得に一定の時間を要する方法といえる。したがって、これらによるデータ取得時間は、ICT 舗装工の第一段階である道路新設時の起工測量および表層工の出来形管理においては大きな制約とはならないレベルといえるが、交通規制時間の制約がある舗装維持管理における調査、点検および舗装維持修繕工事などのプロセスにおいては、これらのデータ取得に費やす時間が、各プロセスそのものの生産性を低下させる要因となる可能性がある。

MMS は、車両に搭載された 3 次元レーザ計測機とデジタルカメラなどによって、道路および周辺の 3 次元点群データと、測定区間の連続映像を短時間で取得することが可能な計測装置である。

本研究は、MMS の 3 次元出来形計測性能の確認とその性能向上による 3 次元出来形計測の生産性向上を目的とし、以下の 2 点について検討を行った。

(1) MMS の 3 次元出来形計測性能の確認

実際の 신설舗装区間において、MMS と TLS による 3 次元点群データを取得し、これらの①現地計測時間、②計測点密度、③高さ精度を比較する。

(2) MMS の高精度 3 次元点群データ計測手法の確認

構内道路において、密粒度アスファルト舗装（以下、

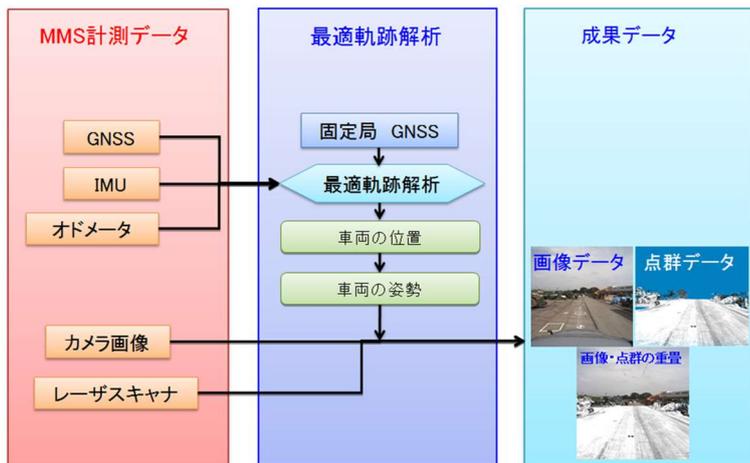


図-1 MMSによる3次元点群データ取得および処理方法



写真-1 計測状況（上段：MMS、下段 TLS）

密粒) と排水性舗装 (以下、排水性) の舗装切削オーバーレイ工事を想定した試験舗装路面を用いた計測性能の検証を行った。検証では MMS、TLS および移動体 LS による 3 次元点群データを取得し、これらの高さ精度をレベル測量と比較することにした。

3. MMS による 3 次元点群データ取得および処理方法

図-1に、筆者らが検討している MMS による 3 次元点群データ取得および処理方法を示す。図-1より、MMS は車両に搭載された①GNSS 受信機、②IMU (車両慣性計測装置)、③オドメトリ (距離計)、④レーザーキャナー、および⑤連続映像撮影用カメラからなる計測システムである。これらにより、自己位置をリアルタイムに把握しながら、測定区間の 3 次元点群データと連続映像を取得する。次に、データセンターよりインターネットを介して収集される地上参照局 GNSS データ (電子基準点および面補正パラメータ) を用いて、測定区間で取得した 3 次元点群データと連続映像を後処理解析 (位置、姿勢解析、レーザー点群解析、画像統合処理) をすることで、精度の高い 3 次元点群データと画像データとなる。

4. MMS と TLS による計測性能の比較

4.1 計測概要

新設道路の直線区間において、MMS と TLS による 3 次元点群データを取得し、これらの現地計測時間、計測点密度、高さ精度を比較した。写真-1に、新設道路における MMS と TLS の計測状況を示す。測定区間は、延長約 200m、縦断勾配 2.0%の片側 2 車線道路であり、表層は排水性舗装(13)である。

4.2 現地計測時間

表-1に、MMS と TLS による 3 次元点群データの現地計測時間の比較結果を示す。表-1に示す MMS による現地計測時間は、車両速度が 14.4km/h によるものである。MMS による現地における計測は、測定区間 200m における所要時間は約 1 分間であった。なお、MMS は、計測開始前に装置初期化作業が必要となるため、表-1中に初期化時間 (10 分間) を含めた。次に TLS の現地計測時間は、1 回当たりの計測距離を 50m とし、測定区間 200m における測定時間は 40 分間 (10 分間×4 回) であった。また、4 回の計測器の据替作業時間として、表-1中に据替作業時間 (20 分間=5 分間×4 回) を含めた。表-1より、MMS と TLS による 3 次元点群データの現地計測時間を比較すると、MMS が 11 分間に対して、TLS は 60 分間であり、MMS は TLS の約 5 分の 1 の時間で測定が可能であることがわかった。

表-1 MMS と TLS の現地計測時間の比較
(単位：分)

項目	MMS	TLS
初期化時間	10	—
計測時間	1	40 (10×4 回)
据替作業時間	—	20 (5×4 回)
合計	11	60

*測定区間：延長約 200m、縦断勾配 2%、排水性舗装(13)

ここで、表-1をもとに、測定区間長が 500m のケースを試算すると、MMS が 12 分間に対して、TLS は 150 分間であり、MMS は TLS の約 12 分の 1 の時間で測定が可能となる。このことは、交通規制時間の制約がある舗装維持管理における調査、点検および舗装維持修繕工

事などのプロセスにおける3次元点群データの取得において、MMSを活用することで、3次元出来形計測の生産性向上と、各プロセスそのものの生産性の確保に期待ができることがわかった。

4.3 計測点密度

図-2に、MMSの計測点密度の測定結果を示す。本検討では、MMSの計測点密度が計測車両の走行速度により、どの程度変化するかを確認するため、図-2に示す4速度のケースを設定し、各速度における0.01m²あたりの点密度測定を実施した。図-2より、車両走行速度により点密度が異なり、走行速度が速くなるほど、計測点密度が低下することがわかる。図-2の実測値を見ると、速度が7.2km/hの場合、計測点密度は159.6点/0.01m²に対して、速度が4倍の28.8km/hの場合、39.1点/0.01m²であり、計測点密度は約4分の1となっている。図-2に計測器メーカーが示す計測点密度の理論値をあわせて示す。図-2より、MMSの計測点密度の実測値は、本検討の4速度の範囲ではあるが、理論値よりも大きい値が得られていることがわかった。ここで、国土交通省の「地上型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領（舗装工事編）（案）」³⁾によれば、計測点密度の計測精度管理基準値は、1点/0.01m²となっている。このことは、MMSの計測点密度は、計測点密度の計測精度管理基準値を十分に満足しているといえる。

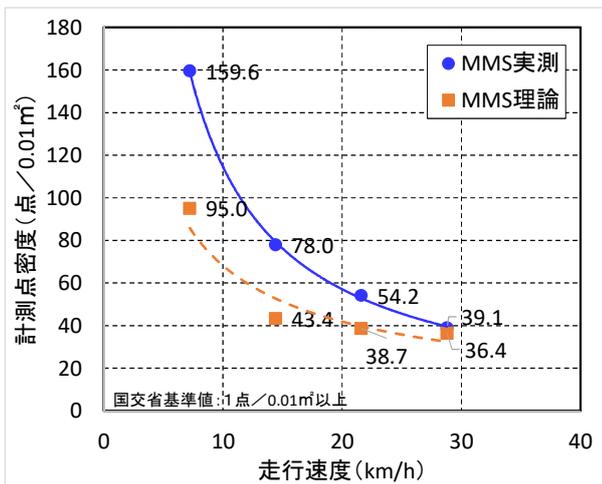


図-2 MMSの計測点密度と走行速度の関係
(単位：点/0.01m²)

*測定区間：延長約200m、縦断勾配2%、排水性舗装(13)

図-3に、TLSによる計測距離別点密度の測定結果を示す。本検討では、TLSの計測点密度が計測距離と道路縦断勾配により、どの程度変化するかを確認するため、図-3に示す4計測距離のケースを設定し、各計測距離

における0.01m²あたりの点密度測定を実施した。なお、図-3は、道路縦断勾配が+2.0%と-2.0%のケースによる点密度測定結果を示した。図-3より、計測距離により点密度が異なり、計測距離が長くなるほど、計測点密度が低下することがわかる。また、縦断勾配が変化すると計測点密度が変化している。このことは、縦断勾配の違いにより、入射角が変化することに起因していると考えられる。前述の計測点密度の計測精度管理基準値(1点/0.01m²)と実測値を比較すると、本検討の範囲では実測値は基準値を満足している。しかしながら、縦断勾配が-2.0%で、計測距離が50mの場合、計測点密度は1.5点/0.01m²となっている。このことは、管理基準値を満足するためには測定箇所の縦断勾配の大小を勘案し、適切な計測距離の選定を行う必要があるものと考えられる。

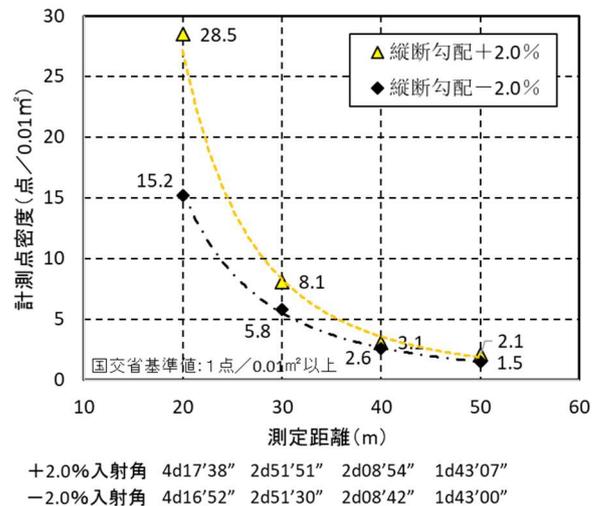


図-3 TLSの計測点密度と計測距離の関係
(単位：点/0.01m²)

*測定区間：延長約200m、縦断勾配2%、排水性舗装(13)

図-2と図-3より、MMSとTLSによる3次元点群データの計測点密度を比較すると、MMSの計測点密度の方が大きいことがわかる。このことは、MMSとTLSの計測方法の考え方が異なることにも起因している。図-4にMMSとTLSの計測方法の計測概念を示す。図-4により、TLSは計測機を三脚に据え付けて、固定点から計測を行うため、計測箇所が計測機より離れるほど、入射角が小さくなり、計測点密度が低下する。これに対して、MMSは移動計測車両による計測システムであることから、計測距離が短く、入射角の変化が極めて小さいことから、均一な計測点密度を確保しやすいといえる。したがって、MMSにより取得したデータはTLSよりも

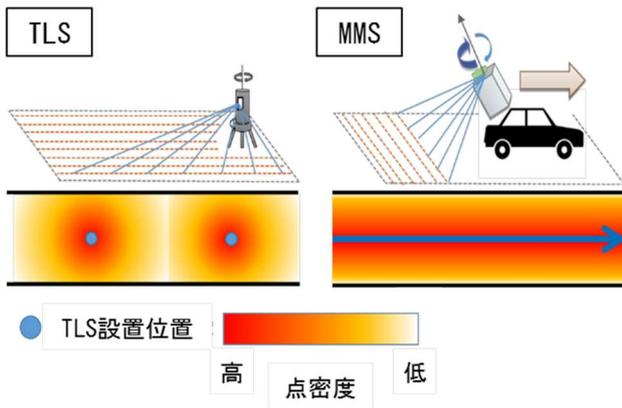


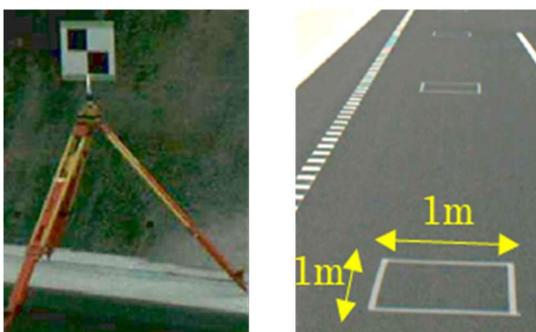
図-4 MMS と TLS の計測方法のコンセプト

緻密であり、出来形計測への活用のみならず、舗装維持管理における舗装路面の点検・調査において、例えば局所的な路面の変形などの詳細調査への活用も期待できるものと考えられる。

4.4 高さ精度

本研究では、MMSにより取得した3次元点群データの高さ精度を確保することを目的に、標定点を用いた3次元点群データの補正処理方法を検証した。写真-2に、本検討で用いた標定点および路面に設置した高さ精度の確認のための検査面を示す。標定点は舗装面の出来形取得のためにTLSで使用しているものであり、現場既知点座標である基準点上に設置している。延長方向40m間隔の道路両端の12箇所に標定点を準備した。

図-5に、MMSにおける標定点を用いた点群データの補正処理方法の考え方を示す。3次元点群データの補正は、取得した3次元点群データより標定点を読み取り、標定点の成果座標との差を使用して、位置補正ベクトルを算出する。位置補正ベクトルにより補正処理後の車両位置を算出し、点群データを再生成する方法である。検査面は延長方向50m間隔に、写真-2に示す1m四方の



a) 標定点 b) 検査面
写真-2 標定点および検査面

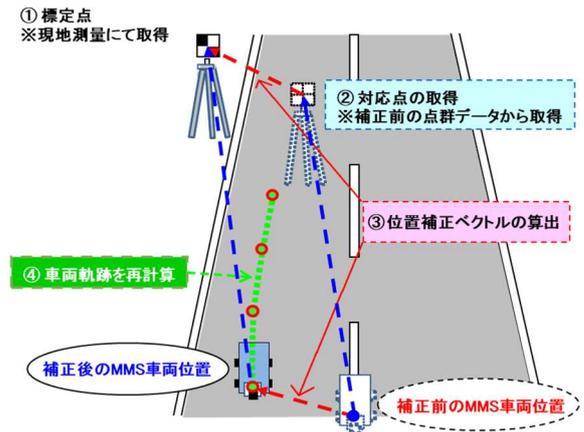


図-5 MMSにおける標定点を用いた点群データの補正処理方法

検査面を路面上に設置した。高さ精度の確認方法は、検査面内の3次元点群データの高さの平均値と、検査面の4隅の高さをレベル計測した平均値を比較することで行った。

表-2に標定点を用いた3次元点群データ補正処理を行ったMMSの高さ精度の確認結果を示す。表-2より、標定点を用いた3次元点群データ補正処理を行ったMMS計測値とレベル計測値との差は-17から0mmの範囲であった。なお、標定点を用いた補正処理を行わない3次元点群データの場合は、-92mmから-50mmの範囲であり、TLSによる3次元点群データの場合は、+1mmから+4mmの範囲であった。

このことは、標定点を用いた3次元点群データの補正処理を行うことで、高さ精度の大幅な改善につながることを示しているが、国土交通省の「地上型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領(舗装工事編)(案)」が示す高さの計測精度管理基準値は、表層表面において±4mmである。したがって、MMSを3次元出来形計測に使用するためには、高さ精度の更なる向上が必要となることがわかった。

表-2 標定点を用いた3次元点群データ補正処理を行ったMMSの高さ精度 (単位: mm)

計測箇所	走行速度 (km/h)			
	7.2	14.4	21.6	28.8
A 地点	-4	-5	-4	0
B 地点	-7	-7	-12	-2
C 地点	-12	-6	-16	-15
D 地点	-17	-11	-1	-9

*測定区間: 延長約200m、縦断勾配2%、排水性舗装(13)

5. MMSにおける高精度3次元点群データ計測手法

5.1 高精度3次元点群データ計測手法

本研究では、MMSにおける更なる3次元出来形計測性能の向上を図ることを目的に、新たな手法を検討した。検討にあたっては、交通規制時間の制約がある舗装維持管理における調査、点検および舗装維持修繕工事などのプロセスにおいても実際に適用可能な計測手法を検討コンセプトとした。そこで、前述の標定点を用いた3次元点群データ補正処理方法を活用することを前提とし、使用する標定点の設置位置に着目した。写真-3に筆者らが新たに検討した標定点を示す。標定点は1辺が28cmの正方形のターゲットである。この標定点を路面または路肩に直接貼り付けることで計測路面に近接した路面上の基準点を補正に使用し、これにより高さ精度の向上を図ることが、筆者らのシンプルな着想である。

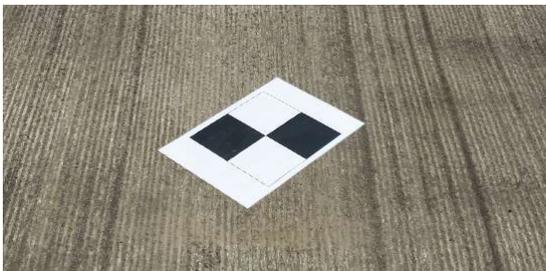


写真-3 新たに検討した標定点

5.2 計測概要

密粒と排水性の舗装切削オーバーレイ工事を想定した構内道路の試験舗装路面において、筆者らが新たに検討したMMSにおける高精度3次元点群データ計測手法の計測性能の検証を行った。写真-4に試験舗装路面を示す。試験舗装路面の延長は約30mである。本検討では、標定点と検査面を切削面および表層面に設置した。標定点は延長方向10m間隔に設置した。また検査面の仕様は前述と同様とし、10mまたは14mの間隔で設置した。

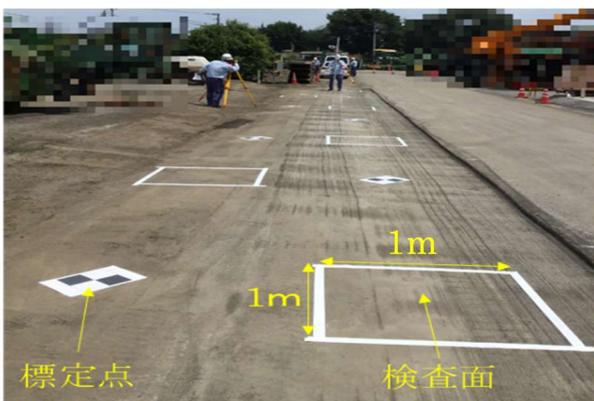


写真-4 試験舗装路面

検討に用いた計測器は、レーザースキャン速度(以下、LSV)の異なるMMSの2機種と、比較としてTLSおよび移動体LSを用いた。写真-5に検討に用いた計測機を示す。なお、本検討ではMMSの走行速度を14.4km/hにて計測を実施した。



A) TLS (LSV 100 万点/sec)



B) MMS (LSV 55 万点/sec)



C) MMS (LSV 102 万点/sec)



D) 移動体LS (LSV 100 万点/sec)

写真-5 検討に用いた計測機

5.3 高さ精度

表-3に切削面、表-4に表層面におけるMMSとTLSおよび移動体LSの高さ精度の検証結果を示す。MMSにより取得した点群データは、路面上に設置した標定点を用いた3次元点群データ補正処理を行った。表-3と表-4中に示す標高差は、前述と同様に、1m四方の検査面内の点群データの高さの平均値と、検査面の4隅の高さをレベル計測した平均値の差である。また標準偏差は、検査面の4隅の座標値より検査面を想定し、この想定面に対する3次元点群データのばらつきを示している。

表-3より、切削面における路面上の標定点を用いて3次元点群データ補正処理を行ったMMS計測値とレベル計測値との差は、B機において+1から+3mm、C機において0から+2mmの範囲であった。これらのMMSの高さ精度は、TLSと移動体LSの高さ精度よりも優れており、表層表面における高さの計測精度管理基準値の±4mmを十分に満足する結果を示している。次に、表-4より、表層面における路面上の標定点を用いて3次元点群データ補正処理を行ったMMS計測値とレベル計測値との差は、B機において0から+1mm、C機において0から+4mmの範囲であった。これらのMMSの高さ精度は移動体LSとほぼ同等であるが、TLSの高さ精度よ

表－3 切削面における MMS・TLS および移動体 LS の高さ精度 (単位：mm)

検査面		A 機 (TLS)		B 機 (MMS)		C 機 (MMS)		D 機 (移動体 LS)	
番号	舗装種別	標高差	標準偏差	標高差	標準偏差	標高差	標準偏差	標高差	標準偏差
①	切削面	3	2.7	3	3.2	2	3.1	1	2.7
②	切削面	1	3.4	3	3.9	0	3.5	1	3.6
③	切削面	4	1.6	3	2.1	0	0.9	3	1.3
④	切削面	3	2.3	3	2.8	0	1.7	2	2.0
⑤	切削面	2	2.0	3	3.2	1	1.7	4	2.9
⑥	切削面	0	1.2	1	2.2	2	1.8	6	2.6

表－4 表層面における MMS・TLS および移動体 LS の高さ精度 (単位：mm)

検査面		A 機 (TLS)		B 機 (MMS)		C 機 (MMS)		D 機 (移動体 LS)	
番号	舗装種別	標高差	標準偏差	標高差	標準偏差	標高差	標準偏差	標高差	標準偏差
①	密粒	4	1.7	1	1.8	2	1.5	2	1.4
②	密粒	3	3.6	1	3.7	0	3.4	1	3.3
③	密粒	3	2.3	0	2.2	1	1.9	2	2.1
④	密粒	4	2.0	0	2.0	2	1.8	0	1.6
⑤	排水性	3	0.8	0	1.6	4	1.6	1	1.2
⑥	排水性	3	2.9	0	2.5	0	2.3	1	2.4

りも優れており、表層表面における高さの計測精度管理基準値の±4mm を切削面と同様に十分に満足する結果を示している。これらのことより、限定された条件ではあるが、筆者らが新たに検討した標定点を用いた 3 次元点群データ計測手法は、従来の MMS における 3 次元点群データ計測手法と比較して、その高さ精度が向上することがわかった。

6. おわりに

本論文では、ICT 舗装工における MMS を活用した 3 次元出来形計測の生産性向上を目的に、MMS の 3 次元出来形計測性能の確認と、MMS における更なる 3 次元出来形計測性能の向上を目的とした新たな手法を検討した。本論文で得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

(1)MMS と TLS による 3 次元点群データの現地計測時間を比較すると、測定区間長が 500m のケースの試算では、MMS の現地計測時間は TLS の約 12 分の 1 の時間による測定が可能である。MMS の適用により 3 次元出来形計測の生産性向上に期待ができる。

(2)MMS の計測点密度は、車両走行速度により点密度が異なるが、TLS よりも高い点密度が得られる。

(3)MMS における 3 次元出来形計測性能の向上を図ることを目的に、標定点に着目した高精度 3 次元点群データ計測手法を提案した。本手法は、限定された条件ではあるが、「地上型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領 (舗装工事編) (案)」が示す高さの計測精度管理基準値を満足していることを確認した。

今後の課題として、標定点の設置間隔などがあげられる。今後更なるデータの収集を図り、検討を進めていきたい。

<参考文献>

- 1) 其田ほか：第 14 回北陸道路舗装会議, ICT 舗装工における出来形計測の検証と考察, 2018.
- 2) 国土交通省：ICT 舗装工について, 2017 年 3 月 7 日.
- 3) 国土交通省：地上型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領 (舗装工事編) (案), 2018 年 3 月.