

モバイル端末に搭載された LiDAR (光センサー) の計測精度と利活用

(株) CTI ウイング ○ 杉 山 孝 聡
(株) CTI ウイング 南 健 実

論文要旨

LiDAR (Light Detection and Ranging) と呼ばれる光センサーによる測距機能が搭載されたモバイル端末の市場流通に伴い、三次元測量に関して専門的な知識や技術を有することなく地形・地物の三次元データが取得可能となり、測量・調査・設計といった業務において作業の効率化、高度化等を目的に活用が期待される。本研究では、LiDAR が搭載されたモバイル端末の構成および測距の仕組みについて解説するとともに、ネットワーク型 RTK 測位が可能なビズステーション株式会社製の GNSS 測量機「RWP」を標定点とした計測軌跡補正による LiDAR の計測精度を検証し、得られた成果から利活用可能な分野の検討とモバイル端末による LiDAR 計測の課題および展望について述べるものである。

Key Word : LiDAR, DX, ToF, SLAM, i-Construction

はじめに

我が国の建設業就業者数は、1997年の685万人をピークに、2023年ではピーク時の70.5%となる483万人に減少しており、建設業に従事する技術者が担うインフラ整備を始めとする様々な役割において、品質を下げることなく的確にその役割を果たすためには、技術者一人一人の生産性向上が求められている。

この課題に対し、国土交通省では、測量・調査・設計・施工・維持管理といった建設に関連する業務の生産性向上に向けて、2017年より三次元データ等を活用する「i-Construction」の推進が重要施策の1つとして挙げられており、建設現場に従事する技能労働者の減少に伴う生産性低下、将来的な担い手不足等の課題について対策が施策されている。

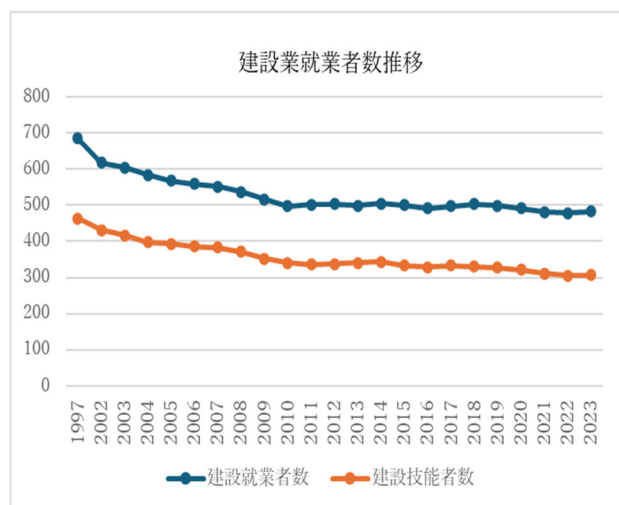


図-1 建設業就業者数の推移

本研究では2020年3月にApple社から発売されたLiDAR (Light Detection and Ranging) と呼ばれる光センサーを利用し

た測距機能が搭載されたモバイル端末 (iPhone Pro, iPad Pro 等) の構成および計測の仕組みと、ネットワーク型 RTK (リアルタイムキネマティック) が実行可能な GNSS 測量機「RWP」を標定点とした、LiDAR 計測で取得する点群データの計測精度を検証するとともに、実証実験により得られた結果から測量・調査・設計といった建設業務における生産性向上の方法について検討するものである。

1. LiDAR スキャナの構成と計測の仕組み

2020年以降、Apple社が発売するモバイル端末の一部 (iPhone Pro, iPad Pro 等) には LiDAR スキャナが搭載されており、この機能により周辺の地形・地物といった物体を三次元的に計測可能となった。本項では、LiDAR が搭載されたモバイル端末のシステム構成および計測の仕組みについて解説する。なお、システム構成については Apple 社より明確に開示されていないため、フランスの技術系コンサルティング会社である System Plus Consulting による分析結果、他文献に基づき述べるものである。

(1) LiDAR スキャナの構成

LiDAR スキャナを構成するモジュールは、レーザパルス照射する発光素子である VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) と、VCSEL より照射したレーザパルスが物体に跳ね返って受光するための素子 (受光素子) である CMOS イメージセンサーで構成される。VCSEL の主な特徴として、照射するレーザパルスの方向は基盤面に対し垂直方向にレーザパルスが照射されており、最大5メートルまでの距離が測定可能である。その他には小型軽量化に適していることや消費電力が小さいことなどが挙げられる。

CMOS イメージセンサーにはソニー製の SPAD (Single Photon Avalanche Diode) と呼ばれるセンサーが採用されており、通常のセンサーより高精度かつ高速に測定できることが特徴として挙げられる。

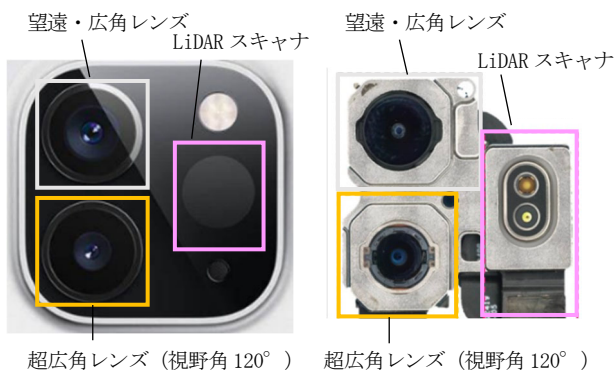


図-2 LiDAR スキャナ・カメラレンズの構成

(2) LiDAR 計測の仕組み

LiDAR スキャナによる測距方式には、VCSEL からレーザパルスを照射し、地形・地物等の物体に反射して CMOS イメージセンサーで物体を感知するまでに要した時間を計測することで距離を算出する技術である ToF (Time of Flight) が採用されている。

ToF による計測手法には dToF (direct Time of Flight) と iToF (indirect Time of Flight) の 2 種類があり、dToF 方式とは、レーザパルスを照射した時刻と跳ね返ってきたパルスを受光した時刻の差分から物体までの距離を計測する方法で、外光に強く屋外での計測に向いている。iToF 方式とは、周期的にレーザパルスを照射し、物体から反射してきたレーザパルスの位相差から物体までの距離を計測する方法である。今回使用する Apple 社の LiDAR スキャナは前者の dToF 方式が用いられている。

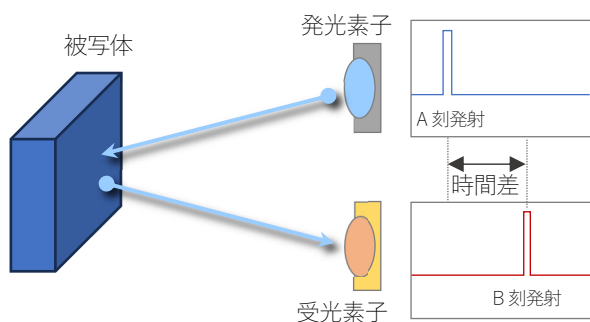


図-3 dToF 方式

次に、物体が持つ分光反射率と LiDAR スキャナで取得する点群密度および形状について、反射率の異なる物体を LiDAR で計測し取得した点群データの比較結果を踏まえて解説する。

我々が目にする物体には、分光反射率と呼ばれるどの波長(nm)の光をどれだけ反射するか物体特有の反射特性が含有する。図-4 に示すのは白色と黒色の分光反射率の特性を示したグラフである。白色の分光反射率では 400nm～700nm の反射率が一律して高く、黒色の分光反射率は白色とは逆に一律して低いことが確認できる。

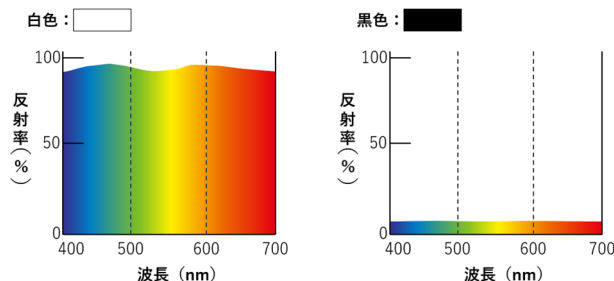


図-4 白色/黒色の分光反射率

LiDAR スキャナは、VCSEL と受光素子による光センサーで物体を計測することから、分光反射率の異なる白色の物体と黒色の物体では、取得する点群の密度および点群の形状に分光反射率が影響する可能性がある。光センサーと分光反射率の関係性を把握するため、白色の物体と黒色の物体を LiDAR で計測し、取得する点群データの密度および形状にどのような影響があるか検証した。検証方法は、それぞれ同一の素材となる白色の A3 用紙と黒色で着色した A3 用紙を壁面に張り付け、LiDAR スキャナで取得した点群から白色部分と黒色部分における点群の密度および形状を確認することとした。検証結果は次のとおりである。

a) 点群密度の検証

点群密度は白色部分で 799 点、黒色部分では 782 点となり、分光反射率の異なる物体における点密度に大きな変化はないことが確認できる(図-5)。同様の検証を 4 回実施したが、白色と黒色部分で点密度に大きな変化は確認されなかった。

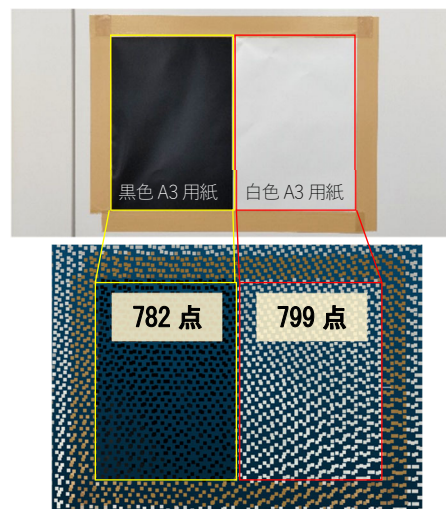


図-5 白色/黒色の点群密度

b) 点群形状の検証

次に点群の形状についてである。図-6に示すのは、奥行きを示すY方向をベクトルで色分けした点群データを投影した画像で、白色部分と黒色部分では±1~2mm程度の誤差が生じている。これは、黒色部分の分光反射率が低く、VCSELから照射した光が受光素子で受光する時間差が、白色部分と比較して遅延したためと推測される。

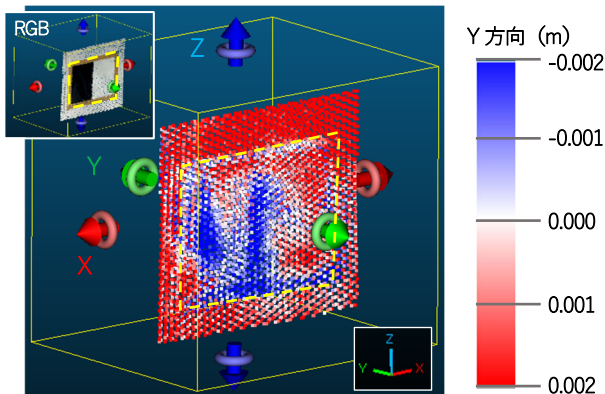


図-6 白色/黒色の点群形状

検証結果から、光センサーで物体を計測するLiDARスキャナでは、物体の分光反射率が点群の形状に影響することが確認できる。今回の検証結果を踏まえ、LiDARスキャナで物体を計測するには分光反射率を考慮することが必要である。

2. 標定点を活用したLiDAR計測

iPad Pro, iPhone Pro等のモバイル端末に搭載されたLiDARスキャナをdToF方式により測距することでデバイス周辺の三次元点群データが取得可能となるが、dToF方式の場合、計測する距離や範囲によって取得する点群データに誤差が累積する。誤差が累積する主な要因として、LiDAR-SLAMによる自己位置推定が正しく算出できていないことが考えられる。

LiDAR-SLAMとは、LiDARにより周辺空間の三次元形状を復元すると同時に、端末の自己位置を推定する技術である。自己位置推定には、LiDARで得られる三次元データ以外にも、端末に内蔵されるIMU(慣性計測装置)による物理移動量の計算値データも利用される。しかしながら、LiDARやIMU等で得られる計算値だけでは、driftと呼ばれる自己位置推定値にエラーが発生し、自己位置推定値のエラーとともに点群データの形状が正しく復元できない。

図-7に示すのは、LiDAR-SLAMにおけるdriftの実証実験結果である。0m地点と20m地点に標識を設置し、この2点間をLiDARで取得した点群データによる点間距離を示している。実証実験の結果、実寸20mに対し、LiDARで取得した点群データの点間距離は19.79mとなり、0.21mの誤差が生じ、drift現象の発生を確認出来る。

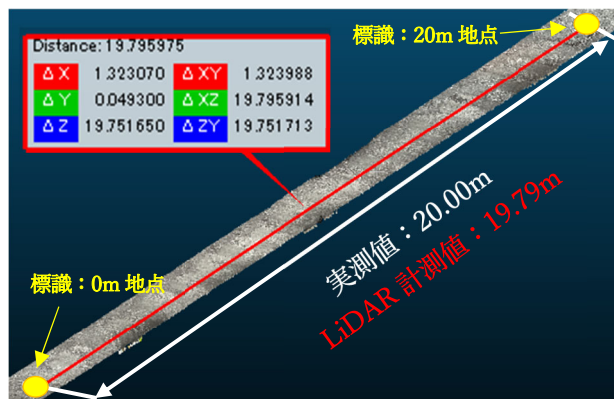


図-7 実測値とLiDAR計測値の比較

以上の測距誤差の軽減の課題を解決する方策として、ビズステーション株式会社製GNSS測量機「RWP」を標定点とする自己位置推定を補正したLiDAR計測方法を検討した。

3. 「RWP」による自己位置補正

「RWP」はネットワーク型RTK測位・スタティック測量が可能な1級GNSS測量機器で、国土地理院が実施する基本測量、公共機関が実施する公共測量でも適用されている。



図-8 GNSS測量機「RWP」

表-1 RWPの性能表

項目	値
品名	RTK W-band bluetooth GNSS receiver アンテナ一体型
受信部型式	DG-PROIRWS
本体寸法(取付部含む)	Φ125mm x (H)54mm
本体重量(アンテナ含む)	270g
カラー	ブラック
消費電流	230mA (WiFi Bluetooth 同時接続)
Bluetooth	4.2
DMP	加速度・ジャイロ・磁気センサー 各3軸 DMP プロセッサ
耐衝撃・防水・防塵	IP65(受信部 IP67) アンテナ部 IP67
動作温度	-30°C to +65°C
原産国	日本
保証期間	1年(日本国内のみ ケーブル類を除く)

項目	値
Receiver type	184-channel u-blox F9P Engine GPS L1C/A L2C, GLO L10F L20F, GAL E1B/C E5b, BDS B1I B2I, QZSS L1C/A L1S L2C
Operational limits	Dynamics ≤ 4g Altitude 50,000m Velocity 500m/s
Velocity accuracy	0.05 m/s
Heading accurac	0.3 degrees

ネットワーク型RTK測位により位置情報を取得したRWPを計測対象となる空間に約5mの一定間隔で設置し、RWPで得られるGNSS衛星の測位データをインターネットを介してNtripサーバー内蔵のGNSSデバイスによって取得する。取得したGNSS位置情報は、LiDARを搭載したインターネット接続可能なiOSデバイスのIP/portを指定したWifiテザリング

によって位置情報データを受信する。測距誤差は、LiDAR 計測を実行するデバイスと GNSS デバイスとの接続を一定間隔に設置および接続し、接続毎に位置補正を実施することで軽減している。



図-9 RWP を用いた自己位置補正の概要図

4. LiDAR 計測の精度検証実験

(1) 精度検証概要

GNSS デバイス「RWP」による LiDAR スキャナの精度検証は、LiDAR スキャナで取得した三次元点群データと、GNSS 測量で取得した観測値との比較により実施した。精度検証の条件は、図-10、図-11 に示すとおり、延長約 20m の平坦な場所に約 5m 間隔で標定点を設置し、別途 1.25m 間隔で設置した検証点において LiDAR スキャナで取得した点群データの観測値と、GNSS 測量による観測値の較差を比較することで、LiDAR スキャナの精度を検証した。

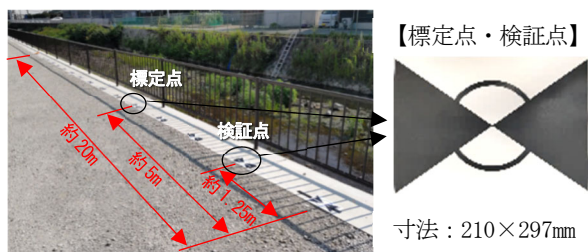


図-10 LiDAR スキャナ計測検証概略図

LiDAR スキャナ計測では、高精度に三次元点群データを取得するために、ネットワーク型 RTK 測位を実行した GNSS デバイスを約 5m 間隔に設置し標定点として利用することで、モバイル端末の位置情報が補正されるとともに LiDAR スキャナで取得する点群データの位置情報が向上

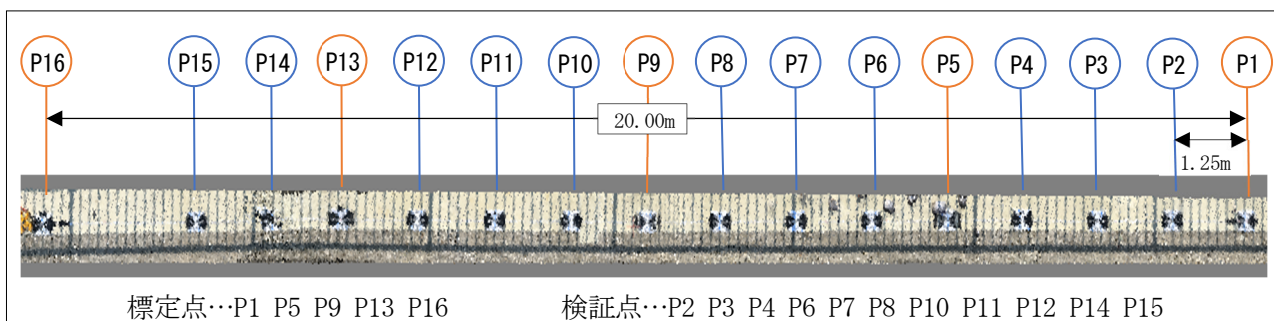


図-11 LiDAR スキャナ計測時の標定点・検証点の配置図

される。なお、LiDAR スキャナ計測時の衛星飛来状況は図-12 に示すとおり、QZSS (準天頂衛星システム) 4 基、GPS12 基、BeiDou31 基、Galileo10 基、HDOP : 0.35、PDOP : 0.47 で、衛星からの電波受信状況は良好であったことが確認出来る。

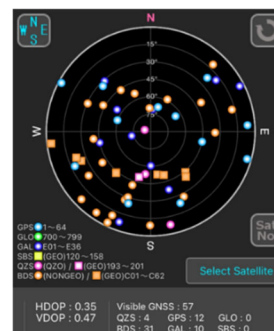


図-12 計測時の衛星飛来状況

(2) 精度検証結果

RWP を標定点として約 20m 区間を LiDAR スキャナで観測し、1.25m 間隔に設置した検証点において別途実施した GNSS 測量値を基準にその較差を比較した結果、 ΔXYZ で標準偏差 0.019m という良好な結果が得られた。また、XY 方向では標準偏差 0.017m、H 方向では 0.024m といういずれも良好な結果であった(表-2)。LiDAR-SLAM 測量や UAV レーザ測量といった三次元レーザ計測における標準的な計測精度について、国土地理院が発行する「LiDARSLAM 技術を用いた公共測量マニュアル」「作業既定の準則」によると、双方ともに水平方向 0.15m、高さ方向 0.20m が許容値とされており、LiDAR 計測の基準を満たす結果となった。

表-2 LiDAR スキャナと実測値の較差

点名	較差				
	X	Y	XY	H	ΔXYZ
P1	0.009	-0.008	0.012	0.066	0.067
P2	-0.003	0.006	0.007	0.066	0.066
P3	-0.004	0.005	0.006	0.074	0.074
P4	0.004	0.005	0.006	0.035	0.036
P5	0.009	0.007	0.012	0.021	0.024
P6	0.003	-0.001	0.004	0.042	0.042
P7	0.009	-0.013	0.016	0.038	0.042
P8	0.012	-0.014	0.019	0.035	0.040
P9	0.019	-0.021	0.028	0.017	0.033
P10	0.003	-0.005	0.006	0.002	0.006
P11	0.012	0.007	0.014	0.000	0.014
P12	0.051	-0.014	0.053	-0.003	0.053
P13	0.051	0.006	0.051	0.007	0.052
P14	-0.015	0.011	0.018	0.051	0.054
P15	-0.024	0.001	0.024	0.055	0.060
P16	0.023	-0.046	0.052	0.049	0.072
標準偏差			0.017	0.024	0.019

5. LiDAR スキャナの利活用と今後の展望

(1) LiDAR スキャナの利活用

LiDAR スキャナが搭載されたモバイル端末と GNSS 測量機「RWP」を利用することで、三次元測量に関する知識を必要とすることなく三次元計測が可能となり、冒頭で述べた測量・調査・設計等に関する業務の作業効率化、生産性向上、業務の高度化といった課題の解決に期待出来る。

a) 測量分野における利活用

従来、河川土工、盛土工における出来形管理では、トータルステーション・GNSS 観測器等を用いた測量方法に変わり、地上レーザスキャナ計測や UAV レーザ計測・UAV 写真点群測量といった三次元計測技術が活用され作業の効率化や高度化が進められている。これら三次元計測手法に加え、約 2cm 程度の精度で計測可能な LiDAR スキャナによる三次元計測が出来形管理において活用が期待できる。

LiDAR スキャナ計測は、地上レーザスキャナや UAV と比較して、一度に計測できる範囲は狭くなってしまうが、その一方で煩雑な操作および解析は不要であることから、求められる測量範囲によっては十分に利活用が期待できる。

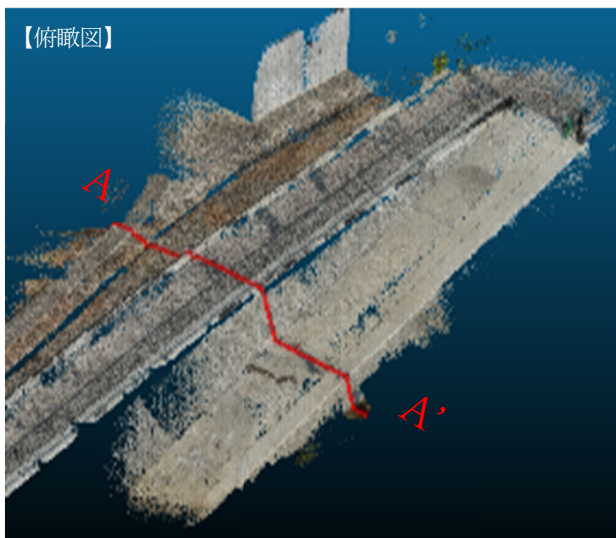


図-13 LiDAR 計測で取得した点群データ

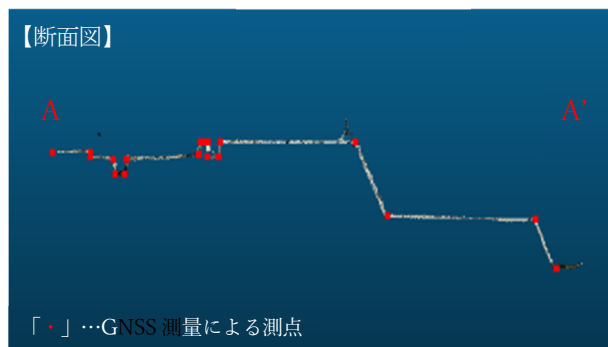


図-14 点群データから作成した断面図

その他には、人が立ち入れる程度の小規模土砂災害が発生した場合、その土砂災害の規模や形状を効率的に三次元で地形計測できることが考えられる。近年では、UAV レーザ計測、地上レーザ計測、ハンディレーザ計測などの三次元計測手法が普及しているが、各測量機器を取り扱うための知識・経験が必要となるため、測量技術者による現地作業が求められる。一方、モバイル端末を用いた LiDAR スキャナによる計測では、測量に関する知識・経験を必要とせず三次元地形計測できるため、機動性・効率性に長けており、迅速な対応が必要となる災害復旧での活用が期待できる。

b) 調査・設計分野における利活用

調査・設計分野における活用例としては、捨石工のような拘束力が低い構造物の変動量や、飛散状況を把握する際に利活用が考えられる。通常、捨石飛散状況を把握するためには、調査する範囲が広大になってしまうため作業に手間と時間が掛かってしまう(図-15)。



図-15 従来の捨石点検

図-16 に示す図面は、目視点検による捨石の飛散箇所を抽出した結果と LiDAR スキャナで計測した点群データから捨石の飛散箇所を抽出した結果を比較した図面で、目視点検と LiDAR スキャナ計測双方の抽出箇所が一致していることを確認した。目視点検による飛散状況調査に要する時間は従来手法および LiDAR スキャナ計測では変わらないが、従来手法では調査に3名(計測、写真、記録)に対して LiDAR スキャナ計測では2名(計測、記録)で実施可能である。また、内業作業は従来手法では外業時間の1.5倍/人に対して、LiDAR スキャナは1.0倍/人で可能であり、外業から内業作業のトータルで約30%の作業省力化となる。また、点群データで現地状況を復元しているため調査洩れもなく、変状判断を行うための熟練技術者等の同行も不要であるため、限られた人員・時間・予算の中で臨機応変な調査・設計が可能となる。

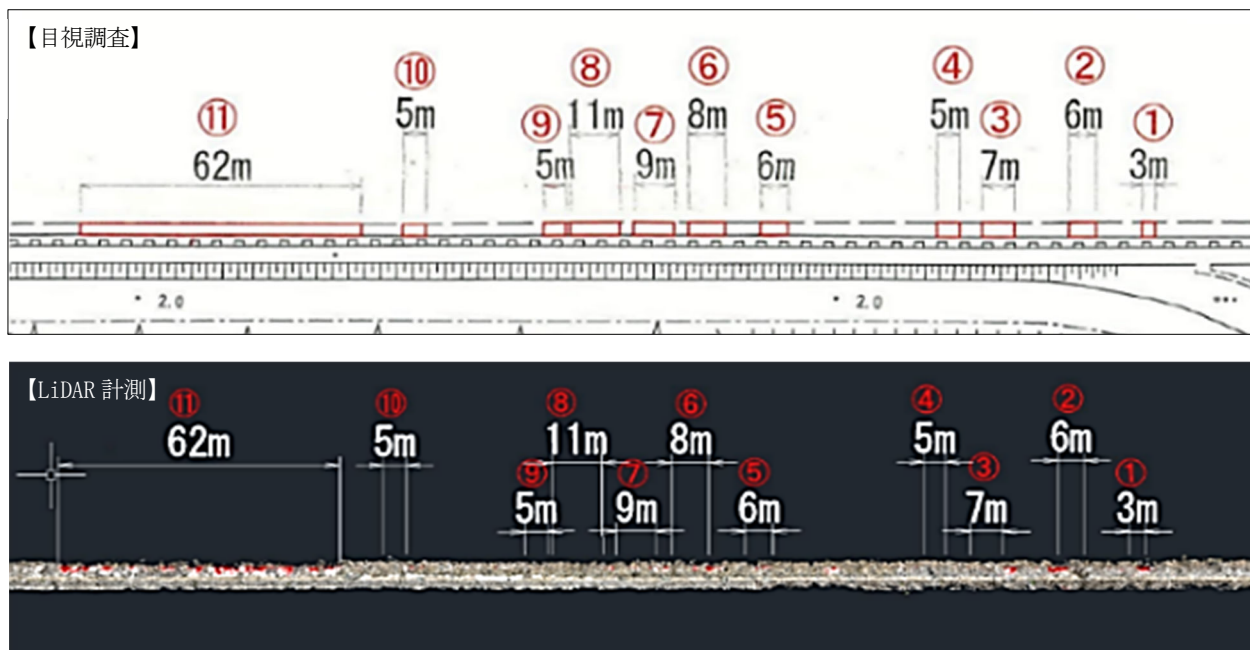


図-16 目視調査とLiDAR計測による飛散状況抽出結果

(2) LiDAR スキャナの課題と今後の展望

a) LiDAR スキャナの課題

実証実験により GNSS 測量機「RWP」を利用した LiDAR 計測では、0.02m 程度の精度で地形・地物が計測可能となることが確認できた。また、今回は LiDAR 計測で取得する点群データの精度を検証するために検証点を 1.25m 間隔で設置したが、業務等で LiDAR スキャナを利用する場合は、作業効率を考慮し、計測対象となる範囲の四隅と中心付近といった箇所に検証点を設置するなど、必要な数と地点で検証することが望ましいと考える。

iPad Pro, iPhone Pro による LiDAR 計測は、最大約 5m の距離しか光センサーが照射されないため、5m を超える物体や広大な範囲では十分に点群データの取得が困難となる。この課題を解消する方法の一つに、株式会社オプティムが開発した「Geo Scan Advance」アプリケーションの利用が検討される。当アプリケーションを利用することで光センサーが約 30m まで照射可能となり、通常の計測では困難であった 5m 以上の構造物や広大な範囲の計測も実施可能となり、測量分野・調査・設計等の業務へのさらなる活用が期待できる。

b) 今後の展望

冒頭でも述べたとおり、建設業就業者数は 1997 年をピークに減少の一途を辿っており、技術者一人一人が担う業務件数は増加するとともに業務品質が低下する恐れが懸念される。これら社会問題と考えられる課題に対し、日々進化するデジタル技術・ICT 技術は大いに活用する必要があると考える。

しかしながら、我が国のデジタル競争力は諸外国と比較し年々順位を落としている。IMD 世界競争力センターが発表する、64 カ国を対象に行った「デジタル技術を採用し、探求する能力と準備状況」に関するデジタル競争力ランキングでは、日本は 32 位と低迷しており、東アジアでも韓国、台湾、中国に次いで 4 位となっている。様々なことが要因し、デジタル競争力ランキングが低迷していると推測されるが、今後、さらに建設就業者数が減少した場合に備え、産学官が一体となりデジタル技術、ICT 技術開発を推し進め、より一層活用し普及させていくことが望まれる。

謝辞：本稿は、実験フィールドに利用した大川を管轄する大阪府岸和田土木事務所崎出張所維持・河川グループの皆様にご協力頂き取りまとめた成果である。関係者皆様には厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Peter Bonanno, Peggy Gallois System Plus Consulting : Camera Module Comparison 2022 - Vol. 1
- 2) 土屋丈太, 東将大, 日建エレクトロにクス: 新型 iPad Pro の LiDAR 部を分析 2020.7.31
- 3) 都外川八恵, COCOLOR : 物体が持つプロフィール～分光反射率曲線&分枝透過率曲線 2020.1.26
- 4) 国際経営開発研究所 (IMD) : IMD World Digital Competitiveness Ranking 2023

表-3 デジタル競争力ランキング 2023

デジタル競争力ランキング 2023	
順位	国・地域
1	米国
2	オランダ
3	シンガポール
4	デンマーク
5	スイス
6	韓国
7	スウェーデン
8	フィンランド
9	台湾
10	香港
...	...
32	日本
33	マレーシア
34	カザフスタン