那珂川地形測量の事例紹介（Lidar SLAMの応用事例）

鎗田 俊輔・大森 晃・佐藤 智美・折原 雄也・柳瀬 洋輝（株式会社パスコ）

1. はじめに

近年、SLAM（Simultaneous Localization and Mapping：自己位置推定同時地図作成）技術を利用したリアルタイム空間把握手法が登場し、また「LidarSLAM技術を用いた公共測量マニュアル（令和4年6月）」（以降、マニュアル）も制定され、測量業務への活用も期待されている。

本稿では、国土交通省関東地方整備局常陸河川国道事務所の発注業務から「R3那珂川測量業務」を事例として紹介する。

那珂川では、令和元年東日本台風による堤防決壊等甚大な被害発生を踏まえ、国・県・市町等が連携し、久慈川・那珂川緊急治水対策プロジェクトをとりまとめ、多重防御治水の推進、減災に向けた更なる取組の推進に取組んでいる。このプロジェクトには河川整備の他に土地利用・住まい方の工夫や河口部対策の検討等が位置付けられ、土地利用の制限や家屋移転など住民生活に大きく関わる事業となるため、住民対応について特に配慮が必要となる。今後具体化される河川事業の基礎資料とするには、住民の合意形成等事業の活用場面を想定し敷地を正確に計測するなど品質を高めることが求められていた。水平位置精度に優れた空中写真測量技術と、標高精度に優れた航空レーザ測量技術の利点を生かし、各測量成果を融合し精度を高める対策が重要となる。そのため地形細部まで表現した高精度な三次元数値地形図（地図情報レベル500）を作成した。本事例のLidarSLAM技術による補備測量の工夫、測量成果の品質向上および作業効率について検証した結果について述べる。

2. 地域概要と課題

対象地域を図2.1に示す。栃木県烏山地区と茨城県那珂湊地区の2か所あり、それぞれに地域特性がある。烏山地区は那珂川上流に位置し、河川堤防や樹木が多くある地域である。一方、那珂湊地区は河口部付近であり、家屋が密集している地域である。加えて、2地区分の補備測量範囲は、総延長45kmの広範囲であり、かつ住民対応にも配慮のある地区のため、短期間で高精度な三次元データを取得する課題があった。

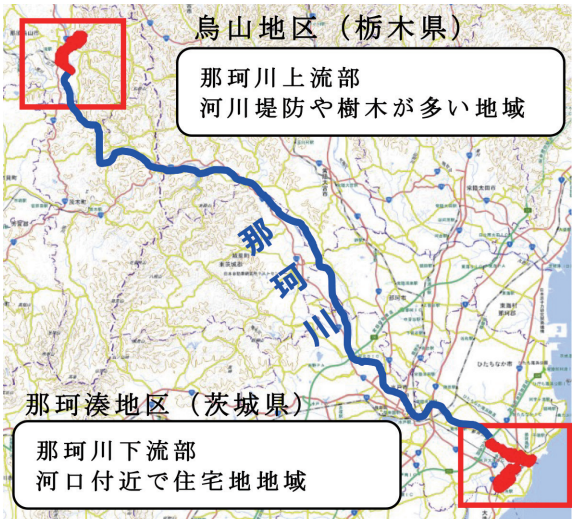

図2.1　位置図

3. 目的と業務フロー

3.1　目的

今後の測量・地質調査、堤防などの設計業務等に利用される河川資料として活用するため、高精度な三次元数値地形図の作成が必要となる。また、住民との合意形成として活用するため「測量成果の見える化」が重要となる。そこで本事例では、空中写真測量及び航空レー

ザ測量が苦手とする上空遮蔽部や密集した住宅街の地形データを補備測量により取得し、再現性のある測量成果とすることを目的とした。そのため本事例では、精度を担保しつつ機動性に優れたLiderSLAM技術を補備測量に活用した。

3.2　業務フロー

高精度な三次元数値地形図の作成方法と測量成果の可視化について、図3.1に示す。

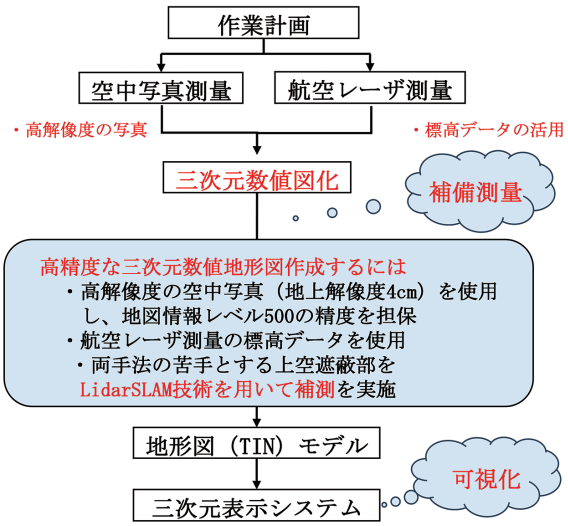

図3.1　業務フロー

まず空中写真測量は、高解像度数値写真（地上解像度4cm～6cm）を使用することで、地形・地物を細かく判読し数値図化をすることが可能となり、高い水平位置精度を担保できる。航空レーザ測量は、上空からレーザ光を照射し、その反射光の時間差から距離を測定する手法である。航空レーザ測量は、回転翼航空機を利用することから、広範囲の点群データを短時間で計測することが可能であり、微小な地形の起伏を表現でき、等高線や標高単点の高さ精度を担保できる。

そのため、水平位置精度は空中写真測量成果、標高データは航空レーザ測量成果を利用したハイブリッド型とすることで高精度かつ高品質な三次元数値地形図の作成が可能となる。一方で両手法とも、遮蔽部（橋梁下・樹木下など）を表現することが困難である。そのため、LiderSLAM技術による補備測量にて、遮蔽部の詳細な地形形状を表現することで、より高精度かつ再現性の高い三次元数値地形図の作成が可能となる。

次に、作成した三次元数値地形図から地形モデル（TIN）を作成する。また航空レーザ測量のオリジナルデータを重畳し、三次元表示システムにて測量成果の可視化（見える化）をおこない、発注者が住民との合意形成のツールとして利用可能になる。

3.2　対応方針と検証内容

対応方針及びその検証内容について、表3.1の通り整理した。【課題①】に対しては、①上空遮蔽部の地形を表現すること、②地形変化点を正確に捉えること、③その上で現況の再現性を向上することが求められており、その有効性を確認するため位置と標高の精度の確保について検証した。一方、【課題②】に対しては、①住民への配慮はもちろんのこと、②効率的な観測作業が求められ、その有効性を確認するため作業時間効率について検証をした。

表3.1　課題と目的等の整備

課題	目的	対応方針	検証内容
【課題①】 ・地域特性を考慮した 精度のある補備測量が必要	① 河川基礎資料としての活用するための 高精度な三次元数値地形図の作成 ② 住民の合意形成としての活用するための 測量成果の見える化	① 上空遮蔽部の詳細地形を表現する ② 地形変化点（骨格となる地形）を捉える ③ 現況の再現性を向上	・位置・標高精度
【課題②】 ・住民対応に特に配慮が必要 ・総延長45kmと広範囲	① 短時間での効率的な補備測量 ② 観測時の住民トラブルなし	① 住民へ配慮 ② 効率的な観測作業	・作業時間効率

4. 計測時の工夫点

まず、今回の補備測量にはライカ社製のBLK2GOを使用した。他社製と比較して重量が軽く、長時間の作業にも適しているため選定した。製品仕様を表4.1に示す。

表4.1　製品仕様

ハンディレーザスキャナの製品仕様	
メーカ	Leica Geosystems社
名称	BLK2GO
スキャン範囲	360°（水平）/　270°（鉛直）
測定範囲	最小0.5m～最大25m
計測密度	420,000点/秒
寸法/ 高さ	279mm/直径：80mm
重量	650g(バッテリー含め775g)

表4.2　計測時の工夫点

計測時の工夫	目的
①１計測を短く5分程度に設定（200mほど）	SLAM自体の歪みを低減
②計測毎による標定点4点、検証点２点を設置	標定精度向上
③同一の標定点を使用できるよう オーバーラップして計測を実施	標定精度向上
④ゆっくり歩行・方向転換をしながら計測を実施	点密度向上
⑤道路の片側ずつ計測し、起終点が閉合 するよう計測を実施	点密度向上
⑥下草の地盤を取得のため,下草刈や踏込みを実施	点密度向上

続いて、補備測量時の工夫点として、表4.2の通り6点を実施した。【工夫①】Lidar SLAMは計測時間・距離が長くなるについて取得したデータに歪みが生じる傾向にあるため、歪み低減のため、1計測を5分程度（200m）と短く設定した。【工夫②、③】標定精度向上のため、計測毎に標定点4点と検証点2点を設置し、それらが別ブロックでオーバーラップするよう計測を実施した。【工夫④】また点密度向上のため、ゆっくり歩行や方向転換をしながら計測をした。【工夫⑤】道路の片側ずつ計測し、起終点が閉合するよう計測を実施した。【工夫⑥】さらに下草の地盤データ取得のため、下草狩りや踏込みを実施した。さらに点群の取得範囲向上のため、機器を少し高くし観測を実施した。（図4.1参照）

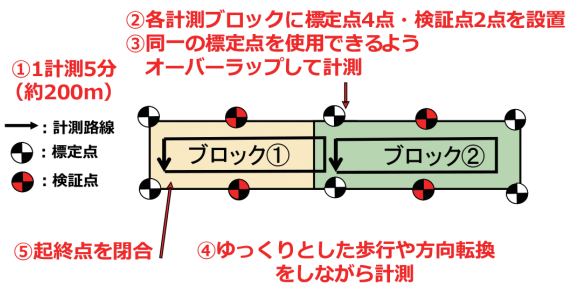

図4.1　計測方法

図4.2　観測風景

5. 検証結果

① 上空遮蔽部の詳細地形を表現

航空レーザ測量や空中写真測量が苦手とする上空遮蔽部の詳細地形にて検証した。本事例で取得した航空レーザ測量とLidarSLAMの三次元点群データの横断側線にて比較した結果を図5.1に示す。上空写真の画像のA-A’ の

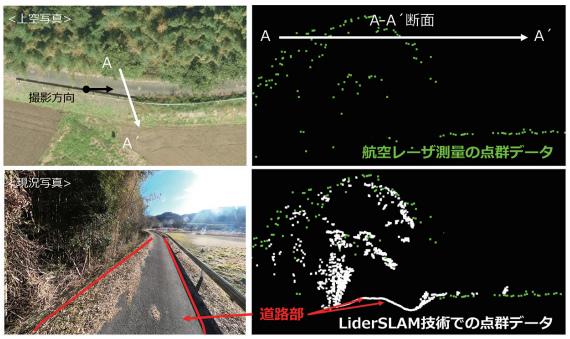

図5.1　横断線による比較

断面に上空写真の画像のA-A’の断面にて、緑点が航空レーザ測量、白点がLidarSLAMで取得した三次元点群データを示す。航空レーザ測量の三次元点群データが疎となっている箇所を、LidarSLAMの三次元点群データにて詳細に補測できているのがわかる。現地写真と横断側線データを比較してわかるように、道路部の盛り上がりや斜面を詳細にとらえ、現地の地形を詳細に表現できている。

② 地形変化点（骨格となる地形）を捉える

高精度な三次元数値地形図作成のため、骨格となる地形変化点を捉えることができたかを検証した。取得した三次元点群データの状況を**図5.2**に示す。左の画像は、住宅地が密集する地区であり、道路縁やU字側が取得できている。一方、右の画像は、上空遮蔽部の地区であり、樹木下の地形形状が取得できている。両地区とも建物や地形地物を三次元点群データにて精密に取得できている。これらの三次元データを三次元数値地形図の補備として図化に使用し、より高精度な三次元数値地形図の作成に利用した。また既に図化したデータの確認に利用し、より精度のある三次元数値地形図を作成した（**図5.3**下段）。

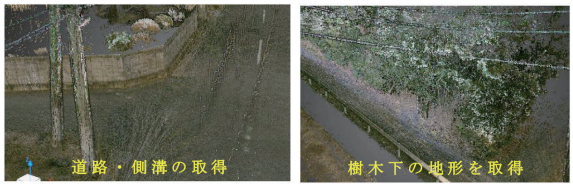

図5.2　取得した三次元点群データ

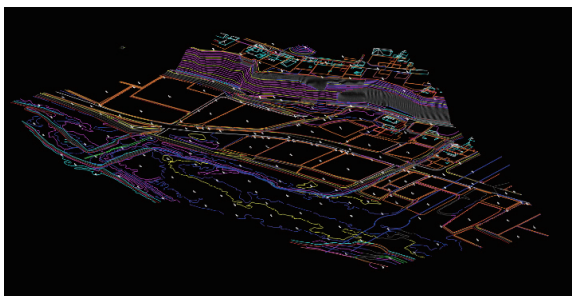

図5.3　作成した三次元数値地形図

③ 現況の再現性を向上

作成した三次元数値地形図や三次元点群データを同業務で整備していた三次元表示システムに搭載した状況を**図5.4**に示す。LidarSLAMで取得した三次元点群データより堤防の法肩・法尻、ブレークラインや側溝を表現した三次元数値地形図から地形図（TIN）モデルを作成した。それらにオルソフォトを貼り付け、LidarSLAMで取得した三次元点群データを表示し、現況を再現した。作成した測量データを「見える化」することにより、職員の方が住民との合意形成に使えるよう、作成した成果が正しく伝わるように表現方法の工夫をした。

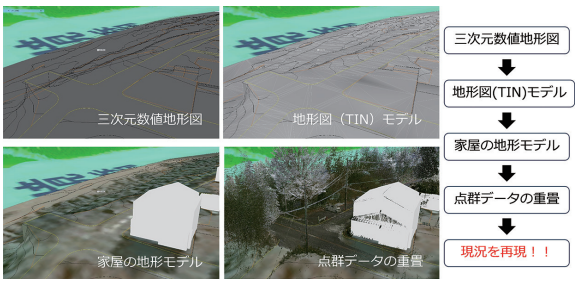

図5.4　三次元表示システム

④ 住民への配慮

一般的な測量では、三脚を据え、そこに観測者、測量補助者や交通誘導員といった測量形態で作業を行うが、LidarSLAM技術を用いた補備測量では、ハンディタイプの小さな機械を保有してひとりで歩いての作業となる。そのため、現地作業は現地滞在時間を短くでき、かつ住民の方への目に付きにくい配慮した計測を実施できた。

⑤ 効率的な観測作業

総延長45kmと広範囲な観測作業のため、観測漏れやミスがないよう綿密な観測計画を立てた（**図5.5**）。事前におおよその標定点・検証点の位置や計測路線の設定をおこなった。観測は2人1組で実施し、標定点をネットワーク型RTKで観測する作業員とLidarSLAMで三次元

点群データを取得する作業員に別れ、トランシーバで連絡を取り合い、作業をおこなった。その結果、地上レーザ計測では1か月ほど想定していた現地作業がLidarSLAM技術では10日ほどで終了することができた。

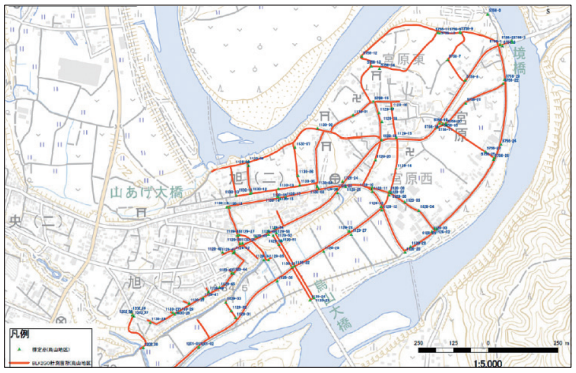

図5.5　観測計画（烏山地区）

6. 定量的評価結果

LidarSLAM技術を用いた補備測量によって高精度・高品質な三次元数値地形図成果を得られることができたが、短期間で高精度な三次元データを取得することの課題に対して、位置・標高精度と作業時間効率について定量的に評価した。

6.1 位置・標高精度

標定点・検証点の平面直角座標系への変換時の残差を指標として評価した。ネットワーク型RTK測量によって設置した標定点・検証点は総数439点であった（**図6.1**）。

平面直角座標系への変換時の平均残差及び最大残差を**表6.1**に示す。平均残差は水平で5cm、標高で3cmという良好な結果であった。また98%以上の標定点は水平・標高ともに15cm以内であり、これはマニュアル記載のICT土工で用いる三次元点群データ作成の許容範囲内にも収まっており、計測時の工夫が活かされた結果であると考えられる。一方、構造物等の特徴点が少ない堤防付近や田畑では取得したデータに歪みが生じ、標定精度が低下する結果であり、残差が15cm以上（全体の2%）となることもあった。その際は取得データを不採用。もしくは再測をして精度向上をはかった。

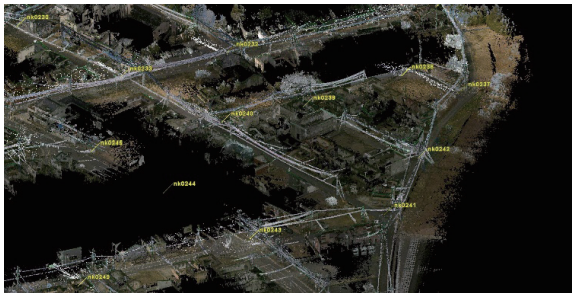

図6.1　標定点（黄色）と三次元点群データ

表6.1　平面直角座標系への変換時の残差

	水平(m)	標高(m)
平均残差	0.048	0.028
最大残差	0.329	0.194

◆ICT 土工で用いる三次元点群データを作成（マニュアル）
地図情報レベル500（水平0.15m以内、高さ0.2m以内）
◆数値地形図作成（作業規程の準則）
地図情報レベル500（水平・高さ0.25m以内）

6.2　作業時間効率

今回実施したLidarSLAM技術での計測と別業務にて使用した地上レーザ計測、参考としてTS（トータルステーション）を使用した計測について、計測区間1kmあたりを算出し、作業所要時間を比較、評価した。諸条件は以下の通りとした。

1. 作業は2人1組
2. 標定点4点と検証点2点設置、計測も含む
3. 地上レーザ計測の場合は、15m間隔で計測した場合（中距離タイプ）
4. TSによる計測：『一般財団法人経済調査会 設計業務等標準積算基準書 2020、1-2-71』より算出した値を採用

LidarSLAMで45kmの補備測量にかかった日数は実質10日間であった。そこから1km当たりの計測時間を算出すると、およそ100分となる。同様に地上レーザ測量とTSによる計測の作業

表6.2　各手法の作業時間

作業項目	LidarSLAM技術での計測	地上レーザー計測	（参考）TSによる計測
現地計測（1km当）	約100分	約300分	1.4（日）
合計時間（45km）	2,700分（45時間） 10日	13,500分(225時間) 30日	63日

時間を算出し、表6.2に整理した。

その結果、今回の範囲45kmを実施した場合、LidarSLAM技術では10日、地上レーザ計測は30日、TSによる計測では63日となった。地上レーザ計測と比較して、3分の1、TSによる計測と比較して6分の1の期間で実施でき、非常に有効であった。

5. おわりに

本稿では、地形細部まで表現した三次元数値地形図作成時のLidarSLAM技術による補備測量の工夫および成果の視認性向上について事例及び検証結果を紹介した。LidarSLAM技術の利点を活かし、短期間で高精度な測量を実施でき、地形図の補備測量に非常に有効的であった。一方、特徴点の少ない堤防や田畑地域の開けた場所では、LidarSLAMの特性の自己位置推定がうまく機能できず精度が劣化しやすくなる傾向であった。標定点を細かく設置し、計測区間を細分化することで一定の精度を保つことができるが、計測に時間がかかるため不効率になり、LidarSLAM技術の利点を相殺してしまう。効率化と精度を両立できるよう現場ごとに最適な観測計画をすることが課題である。

6. 今後の展望

今回の検証で、LidarSLAM技術による補備測量が地図情報レベル500相当であれば十分な精度を担保できることが検証できた。また標定点4点でも十分に精度を確保できることも確認できた。今後の利活用促進をするためには、さらなる作業効率向上のため、検証点2点の省略もマニュアルでは検討されたい。

7. 謝辞

本論文の作成にあたっては、国土交通省関東地方整備局常陸河川国道事務所の「R3那珂川測量業務」を事例として戴いた。ここに感謝の意を表する。

付記：本稿は、第46回測量調査技術発表会（2024年8月）の発表内容に、改良と検討を加えたものである。

■参考文献

1）国土交通省 関東地方整備局 常陸河川国道事務所：事業内容・諸元 https://www.ktr.mlit.go.jp/hitachi/hitachi00814.html（2024/12/20参照時点）
2）折原 雄也. 大坪 和幸. 佐藤 智美. 中山 悟: 空中写真測量を用いた三次元数値地形データ作成（地図情報レベル1000）. 先端測量技術（Vol.118pp.17-22）
3）一般財団法人経済調査会設計業務等標準積算基準書 2020, 1-2-71

■執筆者

鎗田 俊輔（やりた しゅんすけ）
株式会社パスコ
東日本事業部 技術センター 国土情報部
地理情報四課

（共著者）所属は筆頭著者に同じ
大森 晃（おおもり あきら）
佐藤 智美（さとう ともみ）
折原 雄也（おりはら ゆうや）
柳瀬 洋輝（やなせ ひろき）