

串本太地道路におけるUAVレーザ測量による 三次元地形測量について

藤田 翔平・松下 幸男

近畿地方整備局 紀南河川国道事務所 工務二課（〒646-0003 和歌山県田辺市中万呂142）

平成30年度に事業化された「一般国道42号串本太地道路」において、道路設計等に活用できる3次元地形図（レベル500）及び地形モデル、縦横断図作成をUAVレーザ測量により実施した。本稿では、急峻な山地部においてUAVレーザ測量を「UAV搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案）（以下、「マニュアル」）」に準拠し実施した作業の概要と作業実施するにあつた課題対応および今後の活用についての留意事項等について、報告するものである。

キーワード UAVレーザ測量，三次元地形測量，設計用数値地形図データ，i-construction

1. はじめに

国土交通省が、i-constructionにおける「ICTの全面的な活用」の取り組みを展開している中で、2018年度（平成30年度）に新規事業化された串本太地道路は、ICT活用を前提とし、測量・調査段階から設計、施工、維持管理に至る建設生産プロセスで一貫して3次元データの利活用を図るべく事業を推進している。

紀南河川国道事務所では、串本太地道路の道路（用地）幅を決定するための道路設計に必要なとなる3次元地形データ（地図情報レベル500）について、近年整備された3次元データ取得活用についての「マニュアル」やCIM導入ガイドライン（案）（以下、「ガイドライン」）等を活用しデータ作成を行った。

串本太地道路（鬮野川地先～八尺鏡野地先；18.4km）は山間部に位置し、今回の測量範囲の約9割が急峻な山地（森林）となっており、設計に必要な精度を確保するために地形・植生状況等からUAVレーザ測量を採用することとした。

本稿では、山間部の道路計画全線においてUAVレーザ測量による3次元地形測量を最新のマニュアルに準拠し実施したものであり、その測量作業実施における課題対応および今後の設計・地元説明・工事施工、維持管理等への活用に向けての方策（留意

事項）について報告する。

2. UAVレーザ測量の現状と課題

(1) 現状

現在、UAVレーザ測量は公共測量規程（以下、「規程」）には組み込まれていないが、2018年3月にマニュアルが公開されたこと、ガイドラインにも測量手法として採用されたことにより、この測量方法を公共測量として採用するためのツールが整備された。

しかし、マニュアルは規程に組み込まれるまでの試行段階であり、3次元地形モデルを道路設計に採用するためには、道路計画機関として目的に合わせた精度を確保するために要求仕様を詳細に定義していく必要がある。

(2) 課題

a) 要求仕様の作成

道路設計に必要な精度を確保するため、マニュアルに準拠して要求仕様を定める必要があった。マニュアルには要求値が規定されていない項目があるため、レベル500数値地形図作成と3次元地形モデル作成を行うために必要な要求値などを定める必要があ

った。

b) 作業実施調整及び周辺地域への説明

UAVレーザ測量について、対象地域周辺の法規制（航空法、道路使用等）への対応、飛行基地の土地所有者との調整、および周辺自治体・地域住民への説明周知が必要であった。

c) 地形条件等に対応した計測計画の策定

①計測計画の策定

計測対象地域は、急峻な山地（森林）部であり、常緑針葉樹が多く密生しており、要求仕様を満たす計測密度を確保するため、レーザパルス透過率が高い計測が必要であった。また平地部では圃場（水田）が多いため、計測実施時期等の設定検討も必要であった。

②UAV機器の選定

地形・植生条件を考慮した計測計画を満たし、安全にUAV計測を実施するための条件（高高度からの計測、高密度計測、約1kmの長距離飛行）を設定し、その条件を満たせる機器及び飛行基地の選定が必要であった。

d) 山地（森林）部での精度確保

通常、位置と高さの精度確保のために設置する調整用基準点は、平地部の平坦な場所を選んで設置する。しかし、本計測対象地域は急峻な山地部であるため、調整用基準点の設置を行うには、土地所有者の確認調整、樹木伐採等の設置作業が必要であった。

e) 数値図化（3次元点群作成）に必要な点密度希薄箇所の対応

平地部では、道路や水路、家屋などの構造物による地形の遮蔽が避けられないため、計測したレーザ点群のみでは地形・地物の判読が難しく、補測対応が必要であった。

f) 縦横断面図の品質確保

今回、「三次元点群データを使用した断面図作成マニュアル（案）」（以下、「断面図作成マニュアル」）を参考に、グラウンドデータから道路中心の縦断面図および20mピッチの横断面図を作成した。

① グラウンドデータの欠測箇所の品質確保

山地部では、植生の繁茂や急崖や転石などにより、グラウンドデータに低密度な部分が生じ、この低密度箇所の補測対応が必要であった。

② 標高に係る品質確保

従来の実測による縦横断測量では、仮BM設置測量を実施し道路中心点に水準測量成果を取り付けるが、UAVレーザ測量手法では、道路中心点の設置を行わないため、作成する縦横断図の高さ精度の確保、確認が必要であった。

3. 串本太地道路における取り組み

(1) 測量対象箇所

串本太地道路のトンネル以外の橋梁部および土工部12.56km（23区間）（図-1）について3次元地形測量を実施した。測量範囲の地形条件は山地が約88%で植生は常緑針葉樹が多く、地形の起伏は高低差（標高約5m～140m）が顕著で急峻である。土地利用は平地部に圃場（水田）が多く、古座川沿岸には市街地が存在する（図-2）。

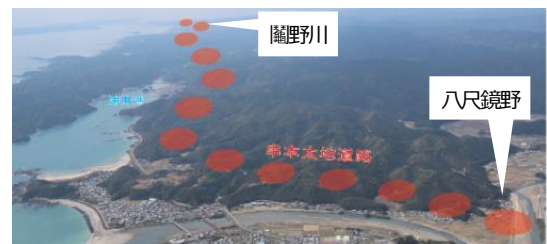


図-1 事業箇所（鳥瞰）写真



図-2 測量箇所

(2) 作業概要

マニュアルに準拠し、図-3に示す作業フローにより、3次元地形図および3次元地形モデルを作成し、縦横断面図を作成した。

計画段階で道路設計に必要な要求仕様の作成を行い、国土地理院への公共測量申請およびその助言を受けたうえで計画の作業を進めた。UAVレーザ計測前には、航空局および周辺自治体・地域住民、関係機関との調整・周知を行った。

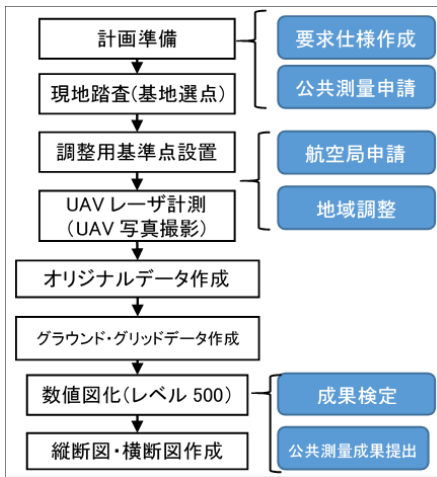


図-3 作業フロー

計測は2月5日から3月14日の期間に実施し、天候障害を除き20日間で82フライトの計測を実施した(図-4, 図-5)。またUAVレーザ用数値写真撮影を、グラウンドデータや3次元図化において地物・地形の判読と補測に必要であるため、レーザ計測と並行して実施した。



図-4 停車場帯での飛行

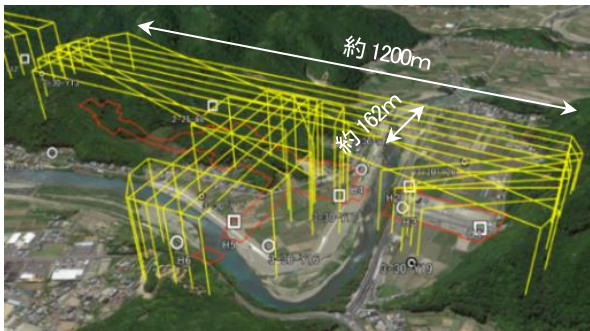


図-5 UAVレーザ計測事例(八尺鏡野付近)

4. 課題への対応

(1) 要求仕様の作成

3次元点群データ(オリジナルデータ)取得の要求仕様の内、マニュアルで要求値が規定されていない項目について、数値図化(レベル500)と3次元地形モデル作成を必要な要求値を定めた(表-1)。

地形取得の取得点密度は、数値図化(レベル500)に必要な計測密度(400点/m²)に対応できる密度とした。植生の影響の少ない場合はフィルタリングによる点群の減少が少ないため、200点/m²とした。グリッドデータの格子間隔は、計測点密度を考慮して10

cm格子と定めた。水平位置精度は起工測量の位置精度を目標精度として調整可能な精度を定めた。

表-1 3次元地形モデルおよびグリッドデータの要求仕様

仕様項目		要求仕様値	マニュアル標準値
数値図化		400点/m ²	400点/m ²
地形取得	植生の影響がある	400点/m ²	20~200点/m ²
	植生の影響が少ない	200点/m ²	10~100点/m ²
グリッドデータ		10cm格子	規定なし
標高精度(標準偏差)		10cm	10cm(地形取得)
水平位置精度(標準偏差)		10cm	規定なし

(2) 作業実施調整及び周辺地域への説明

対象地域の条件を現地踏査により十分確認し、周辺自治体・地域住民等との調整・周知を行った。調整は串本町・那智勝浦町・古座川町と周知範囲内容と方法を確認調整し、選定した飛行基地の土地所有者および自治会区長への説明、周辺住民への作業ビラの回覧、猟友会会員への連絡(計測開始前・現地調査開始前)を行った。

航空法については、飛行が150mを超える高高度の飛行が必要であったため、空港事務所と航空局への申請を行い許可を得た。JRについては、基地から計測対象エリアに移動するために軌道上の通過が避けられない箇所が1箇所(5フライト)あったため、JRに連絡し列車通過時刻等を確認し、列車運行が無い時間帯を選んで飛行を行うことで、安全を確保した。道路停車帯の使用申請は、管轄の新宮警察に行った。これらの対応を表-2にまとめた。

また、作業期間中に行政機関向けの現地説明会を実施した。

表-2 対象地域の条件確認など

確認項目	内容	申請・調整先
航空法	・地表又は水面から150m以上の高さの空域(飛行禁止空域の飛行(第132条関係))が必要な場合 ・人又は物件から30m以上の距離が確保できない飛行(飛行の方法(第132条の2関係))が必要な場合	関西空港事務所 大阪航空局
周辺住民等	・飛行区域およびその周辺の理解と協力を得るため、説明会や回覧を行う。	自治体(町・区・猟友会など) 河川管理者 道路管理者
周辺施設	・障害要素を踏査などにより確認する。送電線・鉄道(JR)・携帯基地局 飛行場・ヘリポート・道路・住宅	電力会社 JR 警察、他
飛行基地	・対象地域の近傍かつ、平坦かつ飛行コースが目視できる場所の選定 ・選定箇所の土地所有者調査	土地所有者 自治体 警察、他

(3) 地形条件等に対応した計測計画の策定

a) 計測計画の策定

計測対象地域に合わせて、高性能(高高度・高出

力)のUAVレーザ計測機材の選定を行うと共に、UAV飛行計画(目視内飛行)で最も重要な飛行基地の選定・確保を、地域の協力を得て実現し、高低差のある山地部でのレーザ計測を実施することができた。

周辺の圃場は水田が多いため、植生が無く水も抜かれている冬季にすべてのUAVレーザ計測を行い、要求仕様を満たす計測結果を得ることができた。

b) UAV機器の選定

計測対象地域は、急峻な山地(森林)部であり、高高度から高密度計測が可能で樹木下へのレーザパルス透過率が高いレーザスキャナを搭載した計測機器を選定している。使用したUAVレーザ計測機器の諸元は表-3のとおりである。

表-3 UAVレーザ計測機器の諸元

計測機器		諸元
機体 SPIDER-LX8	機体総重量	270Kg(レーザシステム・バッテリー含む)
	モータ軸間	1100mm×1300mm
	動力	8個モータ
	バッテリー	ムポリマー電池
	飛行能力	最大飛行時間)約16分 自律飛行、自動帰還
	計測範囲	半径1000m以内(≒目視範囲)
レーザ 機器 VUX-1LR (Riegle社)	最大計測距離	1,350m
	パルスレート	最大820kHz, Class1
	レーザ照射角	330°(FOV)
	レーザ拡散角	0.5 mrad
	精度	15mm
	位置・姿勢	GNSS/IMU AP-20 Applinix社

(4) 山地(森林)部での精度確保

山地部の位置精度の確保のために、既設の基準点(2級基準点, 3級基準点)を調整用基準点に可能な限り利用し、基準点に対空標識を設置し高さ位置の精度を確保した。また対空標識には反射シートを貼り、レーザ照射の反射強度を利用して標識の位置認識ができるものを採用した(図-6)。



図-6 対空標識の設置

(5) 数値図化(3次元点群作成)に必要な点密度希薄箇所への対応

平地部の道路や水路、家屋などの構造物により地表へのレーザ計測が遮蔽された部分は、点群密度が希薄になっている。その部分の数値図化は、点群からの図化が難しいため、ほぼ同時にUAV撮影した写真を用いた補測、または現地補測を実施し、道路幅や水路形状や法面の構造など正確に表現し、遮蔽箇所の図化品質を確保した。

(6) 縦横断面図の品質確保

今回、断面図マニュアルを参考に、グラウンドデータから道路中心の縦断面図および20mピッチの横断面図を作成した。

a) グラウンドデータの欠測箇所の品質確保

山地のグラウンドデータの低密度な部分の対応は、地形解析図(図-7)を作成し地形形状の表現を確認し、確認できない部分は現地にて補測を実施した。現地補測は既設の4級基準点などを利用してTSやTLSなどを用いて行い、品質を確保した。

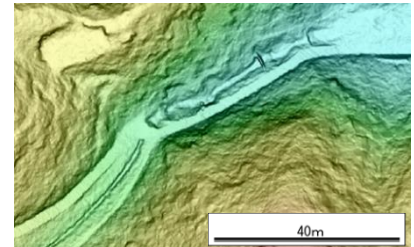


図-7 地形解析図

b) 標高に係る品質確保

本作業では、調整用基準点として既設基準点(2級, 3級基準点)を利用したため、その精度を3級水準測量により確認した。確認の結果、2級基準点・3級基準点の水準成果との較差は標準偏差にて4.5cmであることが確認でき、レベル500に必要な調整用基準点の精度10cm(標準偏差)を十分に満たす結果であった。

今後、同様な道路設計を行う場合は、2級基準点、3級基準点設置の計画時点でUAVの調整用基準点に必要な配置を考慮し、観測時に測標水準を行い、標高精度を向上させておく必要がある。

5. 点検測量(検証)の実施

今回、品質確認(検証)のために点検測量を実施した。点検箇所は、設計条件(山地の盛土・切土・坑口箇所、平地の盛土、市街地・圃場の橋梁部)に応じて8箇所選定し、本作業でレーザ点群から作成した縦断・横断との従来の実測による路線測量により、縦横断形状について比較検証を実施した。点検箇所付近の様子を図-8~10に、縦断、横断の比較図を図-11~15に示した。



図-8 点検箇所(左)No.234+40付近、(右)No.307+80付近



図-9 点検箇所(左) No.372+0 付近, (右) 242+60 付近



図-10 点検箇所(左)No.253+0 付近, (右)No.254+0 付近

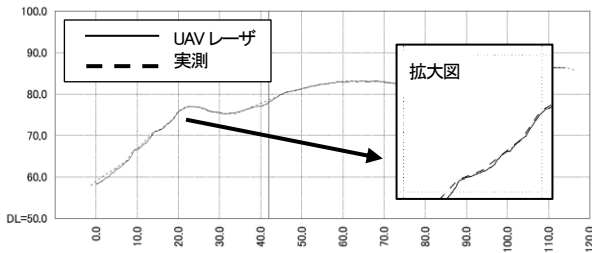


図-11 横断面図の点検 (山地部・切土) (No.234+40)

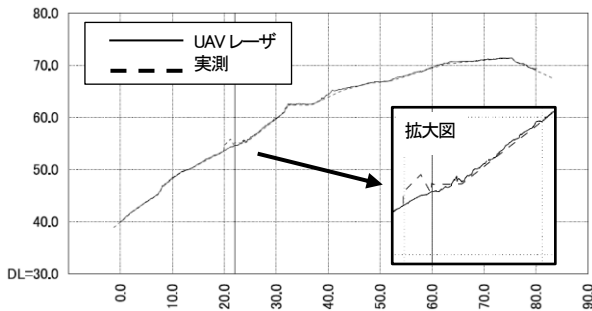


図-12 横断面図の点検 (山地部・切土) (No.307+80)

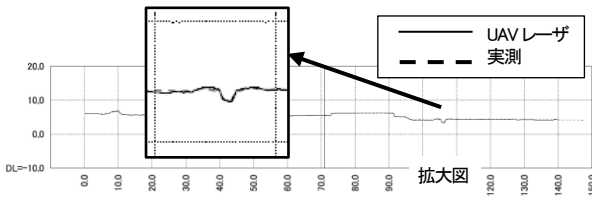


図-13 横断面図の点検 (平地・圃場) (No.372+0)

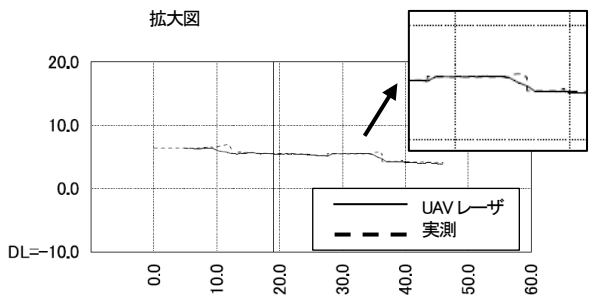


図-14 横断面図の点検 (平地・市街) (No.242+60)

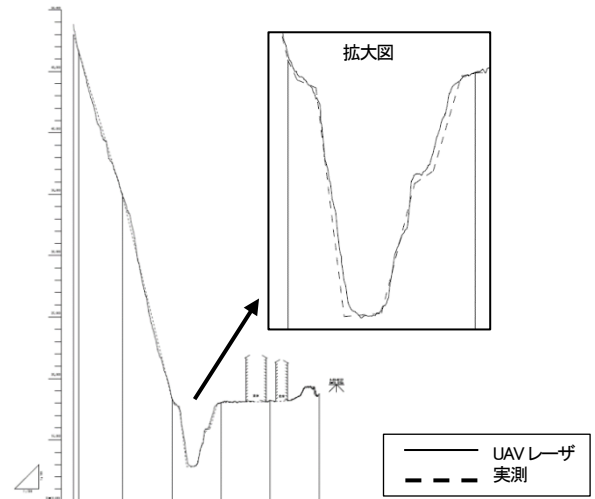


図-15 縦断の点検 (山地部・坑口) (No.253+0~No.254+0)

UAVレーザ断面と実測断面を比較図全体から、評価すると、±10cm程度の較差で推移している傾向が確認でき、実測では表現できない微地形が表現できている。個別に見ると、図-11の横断は雑木林であるが、レーザ横断が急傾斜地の形状変化を詳細に表現できていることが分かる。図-12は高さ2m程度の転石が、レーザ横断では表現できていない可能性があった。図-13は田畑・水路が詳細に表現できていた。図-14は家屋や擁壁などのエッジの表現が難しいことが分かる。図-15の縦断の差異は急斜面および溪流、平地、道路まで、形状が詳細に表現できていることが確認できた。

6. 今後の活用方策 (留意事項)

(1) 実測 (縦横断測量) に替わる手法として実施する場合の留意事項

従来は、仮BM設置および道路中心杭設置作業により、縦横断面に水準点からの標高成果を取り付け、標高精度を向上させていた。しかし、この作業が無いUAVレーザ測量の場合、2級・3級基準点設置の際に、水準点からの標高成果の取付を行っておく必要が有る。なお、基準点測量に使用する電子基準点に測標水準 (水準点から標高成果取付) が行われていることの確認、または設置する基準点には測標水準を実施し、水準測量の標高精度を取り付ける必要がある。

(2) 幅杭設置測量等における留意事項

今回、3次元点群データから作成した縦横断図デ

ータは、レベル500の精度で作成したため、実測縦横断面図同様の扱いで道路設計を行い、幅杭を設置することに問題はない。ただし、幅杭設置及び用地測量を行う際には、基準点測量（4級）等が必要となる。

参考に、UAVレーザ測量と実測との横断測量精度の比較を比較を表-4にまとめた。

山地における各手法の精度比較で、道路中心線から50m幅（L）を想定した横断測量の精度比較である。

表-4 (参考) 横断測量精度の比較

方法 精度	実測横断測量（山地部） の精度 ※規程より	UAVレーザ測量 の精度
特徴	横断距離(単位:m)に依存	距離に関係なく均一
標高精度 (計算式)	15.6cm (L=50m) 50mm+150mm√(L/100)	10cm (標準偏差) ※マニュアル準拠
位置精度 (計算式)	16cm (L=50m) 距離 L/300	10cm (標準偏差)

(3) 今後のICT活用における留意事項

a) 計画説明への利用

今後、本業務で作成した3次元地形データ（図-16）を基に道路構造設計（3次元）への展開や、構造イメージ（CG・シミュレーション）等による、わかりやすい計画説明資料作成等、具体の活用検討が必要である。

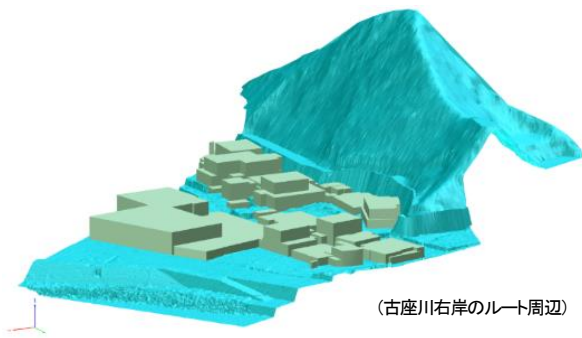


図-16 3次元地形モデルの鳥瞰表示

b) 起工測量への利用

本業務で取得した3次元地形データ（レベル500）は、標高・位置精度ともに10cmの要求精度の測量成果で有るため、起工測量に十分使用できる成果である。

c) 施工完了後、維持管理等での活用

本業務成果には、維持管理等の今後の利活用を想定し、既測のレベル1000地形図と本業務成果のレベル500地形図の合成図も成果としている。この合成図の場合、整備範囲と整備年度の履歴が重要な要素となってくる。そのため、各整備範囲の作成時期、作成方法（手法、精度等）を、実際のデータ（3次元地形モデル）上にレイヤーとして記述する方法などにより引き継いで行くことが重要である。

7. まとめ

(1) 作業の効率化及び作業期間の短縮

本作業では、従来の路線測量が必要であった現地測量（中心点設置、縦横断測量）および山地部での樹木伐採が削減されたため、自然環境への影響の低減と作業の効率化および作業期間の短縮が図れ、従来法では10ヵ月程度必要な作業量を7ヵ月程度で終える見込みである。

(2) 3次元地形（3次元点群）データの活用と展開

今回取得した3次元地形データはレベル500であり、さらに別途、UAV写真撮影により地物データも取得しているため、今後の道路（詳細）設計、構造（道路、橋梁、トンネル）設計にもそのまま活用可能なデータであると考えている。

また、3次元地形データに計画する道路や構造物を重ね合わせたVR（仮想現実；自由に3次元モデル上を移動）やCG（静止画、動画）、3次元モデルを使用した立体模型等により、整備後のイメージを誰でもわかりやすく説明する地元計画説明への活用も想定している。

(3) 今後の取り組みに向けて

本報告は、山間部におけるUAVレーザ測量による3次元地形測量を、マニュアルに準拠し公共測量申請を行い実施した事例であり、作業の課題対応及び今後の活用方策（留意事項）をとりまとめ、その有用性は確認できた。

UAV測量はまだ始まったばかりであり、今後、規程にも規定されるものと考えているが、UAV測量を実施するためには、関係機関・地元調整等が必要であり、精度確保のためには重要な事項であると考えている。

また串本太地道路は、事業化当初より「ICTの全面的な活用」を図る事業であり、今回取得作成した3次元地形データを活用し、今後のICT技術の進歩と合わせて、設計・施工・維持管理の各段階において、効率化・生産性向上を図って参りたい。

謝辞：本論文の取りまとめに際し、ご協力、ご指導賜りました関係各位に感謝申し上げます。