

高密度航空レーザ測量を用いた数値図化 (地図情報レベル500)の検証

元木 健太・逢坂 直樹・上原 恵美・西村 大助・松岡 正格・西村 亜紀 (国際航業株式会社)

1. はじめに

国土交通省では、建設現場の生産性向上を図るi-Construction¹⁾の取組において、3次元モデルを活用し社会資本の整備や管理を行うCIM (Construction Information Modeling, Management)を導入することによって受発注者双方の業務効率化・高度化を推進してきた²⁾。さらに、近年の土木分野における国際標準化の流れとしてBIM (Building Information Modeling)が顕著な進展を見せており、国土交通省ではSociety5.0における新たな社会資本整備を見据えた3次元データを基軸とする建設生産・管理システムを実現するBIM/CIM (Building/Construction Information Modeling, Management)という概念を再構築している³⁾。BIM/CIMについては、令和5年度までの小規模を除く全ての公共工事におけるBIM/CIM原則適用に向け、令和3年度より大規模構造物の詳細設計にて原則適用となっている³⁾。

このような社会情勢を背景に、測量分野においても国土地理院が令和4年に「i-Construction推進のための3次元数値地形図データ作成マニュアル」を公表した。このなかで従来法の空中写真測量だけでなく、最新技術であるUAVレーザ測量などを用いた3次元数値地形図や3次元地形モデルの作成手法が記載されている。今後の測量分野では、BIM/CIMの各ユースケースに応じた3次元数値地形図や3次元地形モデルを作成する機会が大いに増えると予測される⁴⁾。

3次元数値地形図や3次元地形モデルを作成する際にUAVレーザ測量の特徴として、従来の

空中写真測量に比べて山間地において樹林下の地形・地物の判読が可能である⁵⁾。そのため、小規模な測量地域や山間部におけるBIM/CIMを目的とする業務の中で「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、マニュアルという。)を用いた地図情報レベル500(照射点密度:400点以上/m²)の3次元数値図化を行なう機会が増加している。しかし、UAVレーザ測量を実施するためには、航空局への申請はもとより、住民への説明、必要に応じて地権者や道路管理者、鉄道管理者との協議など、計測を開始するまでの諸手続きに非常に時間を有する場合がある⁶⁾。そのため、設計の元データとなる3次元数値地形図データの完成に時間がかかり、プロジェクト全体の工程に影響を及ぼす場合がある。一方で、空中写真測量では、樹木下の道路等の地物や地形が写真から判読が困難なため、後続作業の現地調査に時間がかかるとともに、現地調査時に調査漏れが発生した場合は、その後の作業工程の検査において発見することが難しい。航空レーザ測量は、数値標高モデルや等高線の作成を目的としているため、地図情報レベル500の場合は点密度が0.5m四方に1点となり、数値図化を行うことはできない⁷⁾。

そこで本論では、空中写真測量の樹木下の判読性の低さとUAVレーザ測量の現地作業の煩わしさの両方をクリアできると考えて、航空機を用いた航空レーザ測量にて高密度点群(400点/m²)を取得し用いて地図情報レベル500の数値図化を実施した(以下、高密度航空レーザ測量)。その結果に対して、空中写真測

量を比較して位置精度と判読性について考察した。さらに、今回の検証結果をもとに空中写真測量やUAVレーザ測量に対する本手法の特徴を作業工種ごとにまとめた。

2. 地域概要

対象地は、奈良県高市郡明日香村の南西部に位置する国営飛鳥歴史公園のキトラ古墳周辺地区とした(図1)。当該地区は、阿部山(丘陵地)に築かれた特別史跡キトラ古墳を、周辺の自然環境や田園環境と一体的に整備したエリアである。本論では、高密度航空レーザ測量を用いた数値図化の検証範囲を地物が明瞭に判読できる箇所として、「公共測量標準図式(以下、図式という。)」の大分類で規定されている道路施設、建物等、小物体、水部等、土地利用等、地形等の地物が存在するキトラ古墳周辺地区の一部の0.01km²を対象とした(図2)。

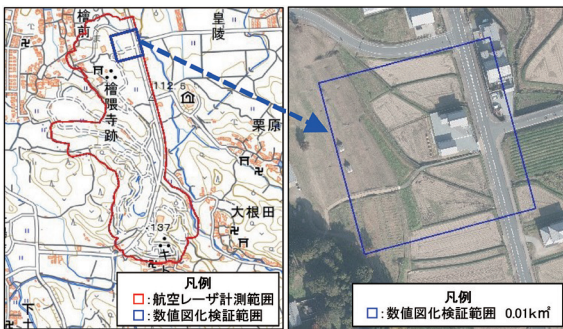


図1 航空レーザ計測範囲

図2 数値図化検証範囲

3. 高密度航空レーザ測量の飛行計測諸元

本検証に用いた航空レーザ機器はLeica Geosystems社製TerreinMapper2で、航空機の機体はCessna社製Cessna 208 Caravanである。マニュアルにおいて、UAVレーザ測量で地図情報レベル500の数値地形図データを作成する場合は、レーザの照射密度が400点/m²と定義されている。本検証ではマニュアルの照射密度をもとに航空レーザ計測の照射密度を400点/m²に設定した(図3)。飛行計画は高密度計測を行

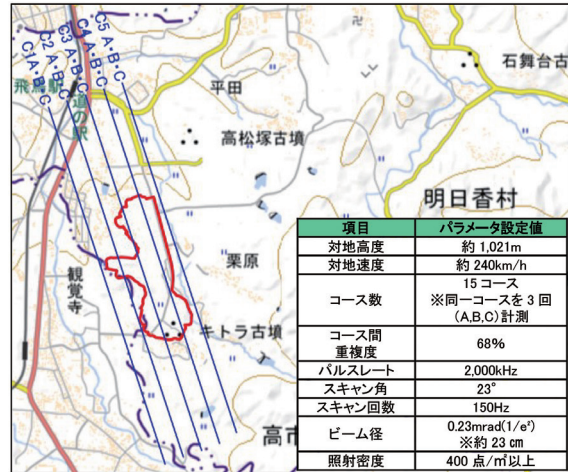


図3 飛行計測諸元と計測コース

うため、対地高度を約1000m、スキャン角を23°とし、パルスレートとスキャン回転数は航空レーザ機器の最大値とした。対地高度が約1000mのためフットプリントは約23cmとなり、一般的なUAVレーザスキャナ機器であるRiegl社製VUX-1にて対地100mでフライトした場合の約5cmと比較して4.6倍となった。計測コースは、1コースの照射密度を約45点/m²に設定し、コース間重複度を68%(同一箇所を3回計測)とし、同じコースA・B・Cを3回計測することで、照射密度が400点/m²以上を満たす計測計画で実施した。すなわち、点密度の計算は、45点/m²×3回(コース間重複度)×3回計測=405点/m²となる。なお、コース間重複度を68%に設定することで同一地点を多方向から照射することになり、草本や塀などの遮蔽物の影響を減少させることが期待できる。

4. 高密度航空レーザ測量を用いた数値図化の検証

4.1 数値図化方法

本手法における数値図化方法は、CAD上にレーザ点群データを反射強度表示して地物の入力を行なった。通常は上面表示にてレーザ点群データのXYZ座標を取得し、上面から判読できない立体的な地物は鳥瞰表示にてXYZ座標

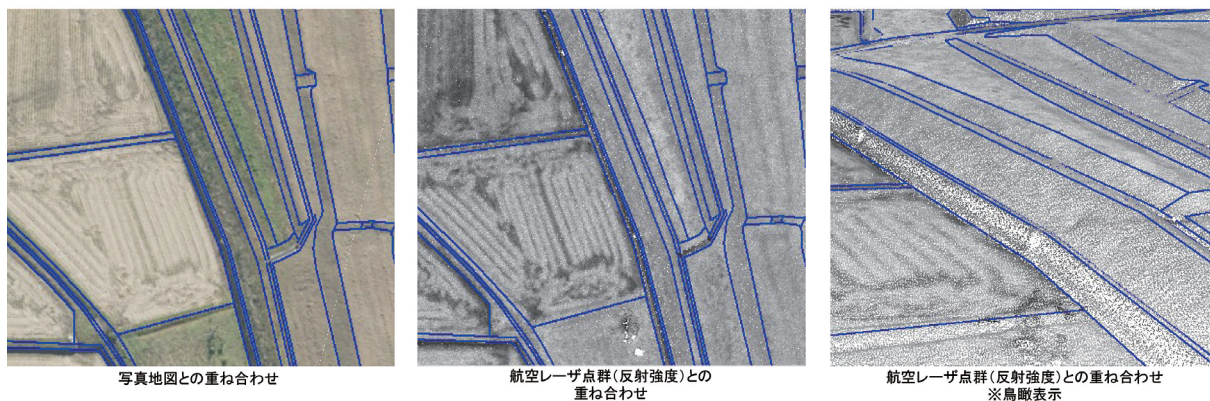


図4 高密度航空レーザ測量を用いた数値図化のイメージ図

を取得した。数値図化後には、航空レーザ用写真地図データと重ね合わせて、取得漏れや分類コードの誤入力の確認を行なった(図4)。

4.2 検証方法

本対象地域では、同時期に航空機による空中写真測量にて地図情報レベル500の数値図化を実施している。そのため、この空中写真測量による数値図化と本手法による数値図化について、位置精度、判読性、作業時間について比較を行なった。位置精度は空中写真測量を真値として水平位置及び標高の較差を算出した。判読性は特徴的な地物について空中写真測量

と比較した。作業時間は数値図化工程のみを対象として比較を行なった。

4.3 検証結果

①位置精度

図式の大分類で水平位置について26分類(438箇所)、標高について12分類(223箇所)の項目についてそれぞれ検証を実施(表1)し、水平位置及び標高の検証結果をとりまとめた(表2)。検証の結果、空中写真測量で得た結果を真値と仮定した場合において、水平位置の標準偏差が0.084m、標高の標準偏差が0.161mの結果となり、「作業規程の準則(以下、規程

表1 検証項目

水平位置			
大分類	分類	分類数 (26分類)	検証箇所数 (合計：438箇所)
交通施設	道路縁(街区線)、道路橋(高架部)、歩道、石段、側溝U字溝無蓋、側溝U字溝有蓋、側溝L字溝、雨水樹、カーブミラー	9	173
建物等	普通建物、普通無壁舎	2	81
小物体	マンホール(電気)、電力柱、マンホール(下水)、照明灯	4	12
水部等	用水路、水路地下部	2	61
土地利用等	人工斜面、コンクリート被覆、ブロック被覆、石積被覆、防護さく、鉄さく、堅ろうへい、植生界	8	108
地形等	ブレイクライン	1	3
標高			
大分類	分類	分類数 (12分類)	検証箇所数 (合計：223箇所)
交通施設	道路縁(街区線)、道路橋(高架部)、石段、雨水樹	4	58
水部等	用水路	1	59
土地利用等	人工斜面、コンクリート被覆、ブロック被覆、石積被覆、堅ろうへい、植生界	6	103
地形等	ブレイクライン	1	3

表2 検証結果

項目	水平位置	標高
	検証結果 (26分類: 438箇所)	検証結果 (12分類: 223箇所)
最大値	0.484m	0.626m
最小値	0.011m	-0.449m
平均値	0.137m	-0.002m
標準偏差	0.084m	0.161m

という。)」で規定されている地図情報レベル500の制限値である0.25mを水平位置及び標高ともに精度を満たしていた。

②判読性

判読性は、水平位置及び標高の標準偏差の値が小さかった道路縁と大きかった用水路について、現地状況を確認した(表3)。道路縁は、植生の影響が少なく比較的判読しやすいため、両手法の水平位置と標高の標準偏差が小

表3 検証結果(個別)

分類	検証項目	標準偏差	検証箇所数
道路縁(街区線)	水平位置	0.047m	21
	標高	0.067m	
用水路	水平位置	0.063m	59
	標高	0.193m	

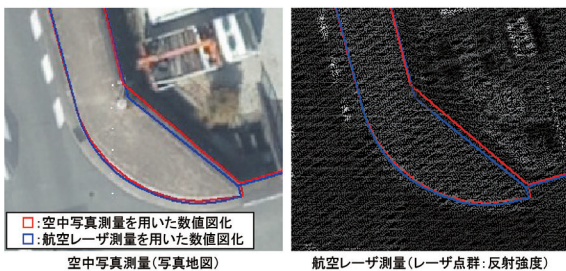


図5 道路縁(街区線)

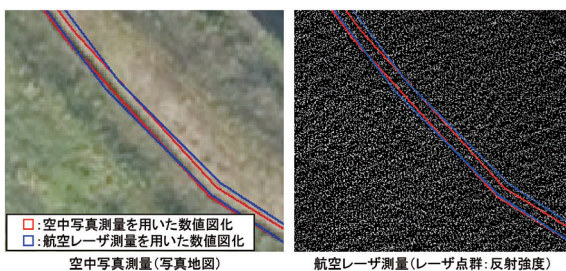


図6 用水路

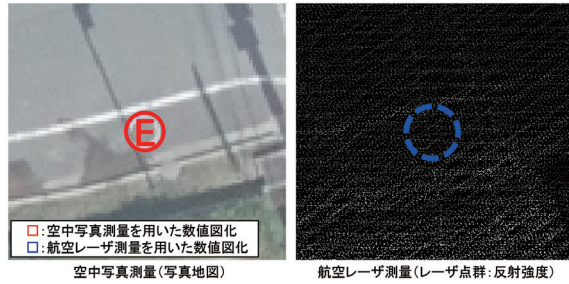


図7 判読が困難な地物(例:マンホール)

さかっただと考えられる(図5)。用水路は、草本が上から被さった状態のため空中写真測量では判読が難しい箇所があった(図6)。一方で、高密度航空レーザー測量では、グラウンドデータを用いて植生下の地表面の判読が可能のため、標準偏差が大きくなったと考えられる。また、高密度航空レーザー測量において、対象地物が起伏のない地物(例:マンホールや雨水桝)でさらに周りの地物の反射強度が近い場合は、反射強度だけで判読が困難な箇所が存在した(図7)。最大値と最小値についても地物の判読性によって、位置精度に傾向が出る結果になった。

③作業時間

検証範囲において数値図化に有した時間は、空中写真測量で約3時間、高密度航空レーザー測量で約4時間であった。これは、空中写真測量が上面からの判読のみで地物を取得するのに対して、高密度航空レーザー測量では上面以外にも建物等の高さがある地物について多方向鳥瞰表示にて取得するために作業に時間を有したと考えられる。

5. 高密度航空レーザー測量を用いた数値図化の特徴

検証の結果を踏まえ、従来法である空中写真測量、最新技術であるUAVレーザー測量、本手法である高密度航空レーザー測量について、数値図化を実施した場合の特徴を工種ごとに整

表4 各手法での数値図化に関わる比較一覧表

工種	比較項目	①空中写真測量	② UAV レーザ測量	③航空レーザ測量
撮影・計測	機動性	○	×	○
	安全性	○	△	○
	計測機会	△	○	△
	計測に対する制約	○	×	○
	計測可能面積 (1フライト)	○	×	○
標定点・調整点・調整用基準点の設置	現地での作業量	○	△	○
数値図化	判読性 (平地部)	○	△	△
	判読性 (山間部)	×	○	○

理した(表4)。なお、地域条件として、UAVレーザ測量が実施されることが多い山林、田畑、宅地などが混在する場所を想定している。

①撮影・計測

撮影・計測の工種では、計測プラットフォーム(UAVと航空機)によって特徴が異なった。機動性について、航空機は飛行場から数時間でフライトが可能であるが、UAVは計測対象までの移動とフライトするための基地が必要となる⁸⁾。フライト基地は現地踏査にて事前に選定するとともに、民地の場合は地権者への承諾も必要となる⁸⁾。安全性について、航空機は大型の機体で高速で飛行するため安全性が高く、UAVは小規模な機体のため風などの影響を受けやすく落下などのリスクがある。計測機会について、航空機は高高度でフライトするため雲などの影響を受けやすく、UAVは低高度でフライトするため雲など影響を受けにくい。計測に対する制約について、航空機は概ね航空局への申請にてフライトが可能となるが、UAVは航空局への申請に加えて、住民説明、必要に応じて地権者、道路管理者、鉄道管理者との協議などかなり手続きのプロセスに時間と労力が必要となる。計測可能面積について、航空機は高密度航空レーザ測量であっても1フライトで1km以上計測可能であり、UAVは1フライトで約0.2km以下の計測となる。

②標定点・調整点・調整用基準点の設置

標定点・調整点・調整用基準点の設置において、計測プラットフォーム(UAVと航空機)により設置方法、現地の労力、計測期間に対する制約が異なった。UAVは、計測可能面積が小さいため計測範囲内に明瞭な地物がない場合が多く、調整点のために対空標識を新たに設置することが多い⁸⁾。UAV計測時は対空標識が設置されている必要があり、さらに計測中に変化しないように見張り員の配置が必要である。フライト基地と同様に現地踏査にて設置場所を事前に選定するとともに、民地の場合は地権者への承諾も必要となる。さらに、データ解析後の対空標識の撤去や再計測時の対空標識の再設置など、現地作業の労力とUAV計測との期間的な制約がかかる。設置数量について、作業対象が一定の面積以上の場合や鉄道や河川などで分割されるなどUAVが複数回フライトする場合は、高密度航空レーザ測量と比較して多くなる。航空機は、公道上の地物に直接座標を取り付けることが多いため、対空標識の設置や地権者承諾などが不要となる。そのため、現地作業が少なくなるとともに計測との期間的な制約も少ない。

③数値図化

数値図化は、空中写真測量を用いた数値図化と高密度航空レーザ測量を用いた数値図化を

比較した際に以下の特徴があった。

植生の影響を受けない場所では、視認性が高い空中写真測量を用いた手法の判読性が高く、高密度レーザー測量は起伏がなく周辺と反射強度の差が少ない地物など反射強度だけで判読が困難な箇所がある。なお、UAVレーザー測量や高密度航空レーザー測量で同時取得する数値写真データにてこのような地物の判読は可能であるが、地図情報レベル500の数値図化を行なう位置精度を有していないため、地物の座標取得を実施することができない。

植生の影響を受ける場所では、植生下の地形が判読できる高密度レーザー測量を用いた手法の判読性が高かった。一般的に、航空レーザー測量は樹林下の道路や建物などの地物だけでなく、標高数値モデルや等高線についても地形形状の再現性が高い⁹⁾。さらに、山間部が多い範囲であれば大部分が等高線となるため、高密度航空レーザー測量をフィルタリングして等高線を自動発生することで作業にかかる時間を短縮することが可能である。

6. 最後に

本論では、高密度航空レーザー測量と空中写真測量の比較により、空中写真測量で得た結果を真値と仮定した場合において、高密度航空レーザー測量による数値図化が規程の地図情報レベル500の精度内であることを確認した。高密度航空レーザー測量は、従来法の空中写真測量と比較して植生の影響を受ける場合における判読性と地形再現性の高い点で有利であり、最新技術のUAVレーザー測量は今後、法制度の緩和により様々な制約が改善されることが見込まれるが、現時点では高密度航空レーザー測量が現地の労力や計測に対する制約が有利であった。特に山間部においての高密度航空レーザー測量は、樹木下の地形形状を取得できるため、陰影段彩図を作成して現地調査を行うこと

により、林道や歩道を的確に抽出、漏れなく調査できるため、作業期間とコストを抑えることができる。これらの結果より、高密度レーザー測量の有効性を示した。

BIM/CIMの浸透によりレーザー点群データから作成する3次元数値地形図データや3次元地形モデルが求められている。今後もこのような作業が増えてくると予想される中で、UAVレーザー測量のような現地の作業期間を多く必要とする測量に変えて、高密度航空レーザー測量が有効であると考えられる。ただし、平野部が含まれる場合は空中写真測量が有効であるため、空中写真測量と高密度航空レーザー測量の併用法が有効と考える。今後の検討として、航空レーザー計測と同時に撮影する航空レーザー用数値写真データを用いて空中写真測量を実施することで、1つの機体で同時に写真とレーザー点群を取得することが可能となる。

謝辞

本論では、高密度航空レーザー測量を用いた数値図化について、国土交通省近畿地方整備局国営飛鳥歴史公園事務所の業務成果を用いて、検証させていただきました。この場をお借りして感謝申し上げます。

■参考文献

- 1) i-Construction委員会. i-Construction ～建設現場の生産性革命～. 2016, 4.
- 2) 国土交通省. 発注者におけるBIM/CIM実施要領(案). 2022, 3.
- 3) 国土交通省BIM/CIM推進委員会. 資料3-1 令和5年度のBIM/CIM原則適用に向けた進め方”. 2021, 3.
- 4) 田中成典, 窪田諭, 今井龍一, 中村健二, 山本雄平, 寺口敏生, 櫻井淳: レーザスキャナ搭載UAV開発のための点群データ計測の利用場面と解析・処理技術に関する調

- 査研究. 土木学会論文集 (Vol.72, No.2, pp.II_82-II_89). 2016.
- 5) 元木健太, 島田徹: UAV写真測量及びUAVレーザ計測を用いた土石流数値シミュレーションのための数値地形モデル作成の有効性検証. 先端測量技術 (Vol.111, pp.96-102). 2018
- 6) 加茂正人. UAV (ドローン) の安全運航管理と運用業務. 技術室報告 (Vol.18). 2017.
- 7) 佐藤俊明, 四俣徹, 間野耕司: さまざまなプラットフォームのレーザ計測による3次元点群にかかる新しい技術. 精密工学会誌 (Vol.85, 3, pp.223-227). 2019.
- 8) 藤田翔平, 松下幸男: 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. 近畿地方整備局研究発表会論文集 (No.15, pp1-5). 2019.
- 9) 菊地輝行, 崎田晃基, 秦野輝儀, 西山哲: 航空レーザ計測データを用いた地すべり・崩壊斜面における地形判読と地形変状規模の定量化. 情報地質 (Vol.31, 2, pp.37-45). 2020.

■執筆者

元木 健太 (もとき けんた)

国際航業株式会社

西日本地理空間情報部



(共著者)

逢坂 直樹 (おおさか なおき)

国際航業株式会社 インフラマネジメント部

上原 恵美 (うえはら えみ)

国際航業株式会社 西日本地理空間情報部

西村 大助 (にしむら だいすけ)

国際航業株式会社 西日本地理空間情報部

松岡 正格 (まつおか まさのり)

国際航業株式会社 西日本地理空間情報部

西村 亜紀 (にしむら あき)

国際航業株式会社 西日本地理空間情報部