

蛇行式航空レーザー計測方法の解析手法の開発

前橋 尚弥・西村 大助・阿部 亮吾・王 婭・城 朋恵 (国際航業株式会社)
 清水 信夫 (国土交通省中国地方整備局 福山河川国道事務所)
 児子 真也 (国土交通省中国地方整備局 災害対策マネジメント室)

1. はじめに

近年、H30年7月豪雨や北海道胆振東部地震など大規模災害における被害が深刻な問題となっている。国土交通省では国土強靱化を唱え、大規模災害への備えとして事前防災や迅速な復興に向け数々の施策に取り組んでいる。航空レーザーは事前防災としても、災害後の状況把握としても有効な手段であり、河川管理¹⁾や斜面崩壊の調査²⁾にも利用されている。

航空レーザー計測は、対象範囲を直線状に計測したラインに従い飛行を行う方法が一般的である。直線で飛行する手法は対象範囲が面的である場合には対象範囲と計測範囲がほぼ一致するため有効である。しかし、直線で線状物(河川・道路等)を計測する場合は、同じ面積の面的な計測に比べて、対象範囲外を多く計測することになり計測コースやフライト時間が増加するため非効率である。

そこで、線状物に沿って飛行する蛇行式航空レーザー方法(以下、蛇行飛行)を実施することが有効と考えた。しかし、レーザーデータの計測精度やパイロットの技術などの課題があるため、航空レーザー計測を目的とした蛇行飛行及び解析についての事例は少ない。そこで、レーザーデータの計測精度を維持しながら蛇行飛行を実施するための、飛行計画～調整用基準点の配点～調整計算までを体系化した新たな「航空レーザー蛇行飛行解析手法」を開発した。本稿では、検証作業及びそれにより開発した手法を紹介するとともに、その手法を実際の業務に適用した事例を報告する。

2. 使用機材

機材はChiroptera II (Leica Geosystems製)を使用した。Chiroptera IIのスペックを表1に示す。レーザーセンサーを搭載するプラットフォームは、固定翼機では細かな蛇行飛行をすることが困難であるため、回転翼機(AS350B2:アエロスパシアル製)とした。

表1 Chiroptera IIのスペック

	Chiroptera II	
	Topographic	Bathymetric
レーザー波長	近赤外 (1064nm)	グリーン (532nm)
レーザーレンジ	～ 1600m	400 ～ 600m
パルスレート	最大500,000Hz	35,000Hz
ビーム径	0.5mrad	4.5mrad
スキャン角度	前後±14°、左右±20°	
スキャンレート	最大70Hz	最大35Hz
レーザー規格	Class IV	

3. 検証フライト

3.1 検証フライトの概要

検証フライトは東京都青梅市多摩川上流にて2018年6月25日に実施した。同一のエリアに対して直線飛行と蛇行飛行の2パターンの計測を実施した(図1)。計測諸元を表2に示す。

表2 検証フライトの計測諸元

対地高度	500m
飛行速度	60kt
パルスレート	470,000Hz
スキャナースピード	4,200rpm
計測点密度	31.5点/㎡

3.2 精度検証

作業規程の準則に従い、以下3種の検証を近赤外のデータに対して実施した。

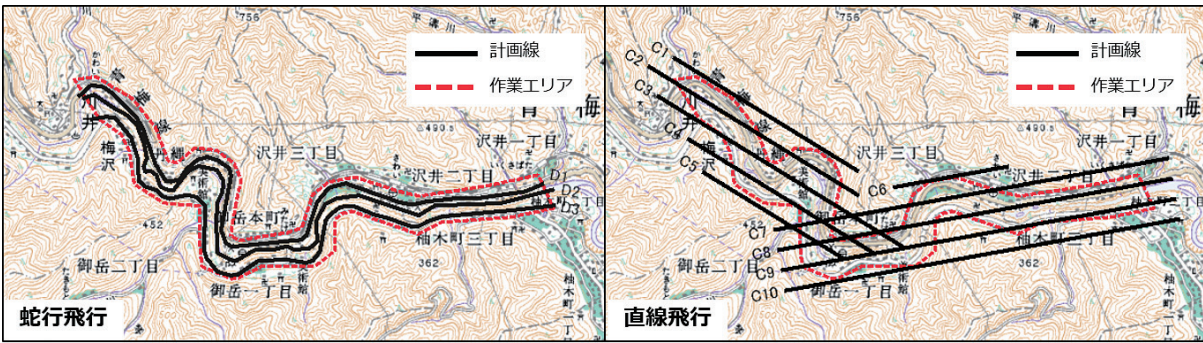


図1 検証フライトの計測計画図

1) 欠測率

要求仕様の点密度を満たしているかを確認するため欠測率を確認した。国土基本図郭(地図情報レベル2500単位)のデータに対して、あるメッシュサイズ内に規定の点数が存在しない割合を算出し、評価した。頻繁に使用される点密度である4点/m²、0.5m四方に1点のほかに10点/m²の検証も実施した。結果を表3に示す。作業規程の準則では、メッシュサイズが1m以下の場合は欠測率15%以下と規定されており、3パターンすべてにおいて規定値内だった。

表3 欠測率結果

メッシュサイズ	点数	全域平均	最小	最大
0.5m	1点	0.01%	0.00%	0.03%
1m	4点	0.01%	0.00%	0.02%
1m	10点	0.01%	0.00%	0.03%

※作業規程の準則の規定値 15%以下

2) 検証点による精度検証

エリアの四隅と中央部に設置した調整用基準点6点による調整計算後のデータについて、ネットワーク型RTKにより検証点を14点設置して精度検証を実施した(図2)。検証方法は、検証

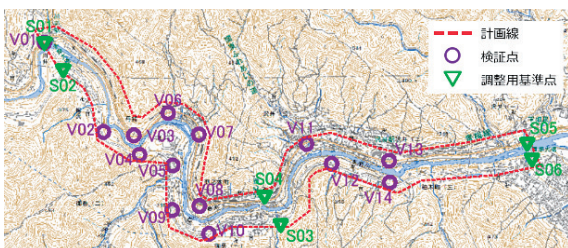


図2 調整用基準点、検証点設置箇所

表4 標高検証結果

	最小値 (m)	最大値 (m)	平均値 (m)	標準偏差 (m)
蛇行飛行	-0.080	0.078	0.004	0.040
直線飛行	-0.097	0.106	0.004	0.057

※作業規程の準則の規定値 平均値±0.25m以下あるいは標準偏差0.25m以下

点の半径0.5m以内にある全コースのレーザ点群と検証点との較差の平均を算出した。結果を表4に示す。作業規程の準則では、平均値±0.25m以下あるいは標準偏差0.25m以下と規定されており、規定値を満たす結果だった。直線飛行と比較してもほぼ同程度の精度だった。

3) コース間標高値の検証

コース間で重複した平坦地を各コース間で10点選点した。選点箇所の半径0.5m以内にあるレーザ点群の平均値を求め較差を算出した。作業規程の準則では、平均値±0.30m未満と規定されており、各コース間で規定値を満たす結果だった(表5)。

表5 蛇行コース間の標高検証結果

	ΔH	
	D1-D2	D2-D3
平均値 (m)	0.027	0.028
最大値 (m)	0.055	0.059
最小値 (m)	0.004	0.001
標準偏差 (m)	0.018	0.015

※作業規程の準則の規定値 平均値±0.30m未満

3.3 作業コスト

コース数を比較すると直線飛行が10コース、

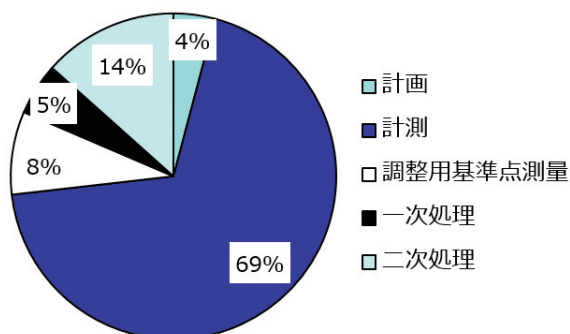


図3 航空レーザ測定の作業工程毎の費用割合

総飛行延長90kmに対して、蛇行飛行では3コース、総飛行延長50kmだった。延長が短くなることで計測時間も直線飛行が52分、蛇行飛行が34分と2/3に減少した。これはコース数の減少に伴い、次コースへの進入時の旋回回数が減少したことによる影響と考える。実際の平均飛

行速度は直線飛行が45kt、蛇行飛行が30ktと遅くなるが、それでも計測時間の短縮が可能であり、少ない計測機会を逃さずに計測することが可能になる。

航空レーザ測量における作業工程毎の費用割合を図3にまとめた。計測にかかるコストが全体の約7割を占めている。大きな割合を占める計測コストの削減が示唆されたため、作業全体のコスト低減も期待される。

4. 蛇行飛行時の注意点と対処法

検証フライトの結果、蛇行飛行実施の際の注意点が明らかになった。以下の点に留意して計画、解析することで蛇行飛行の精度確保が期待できる。

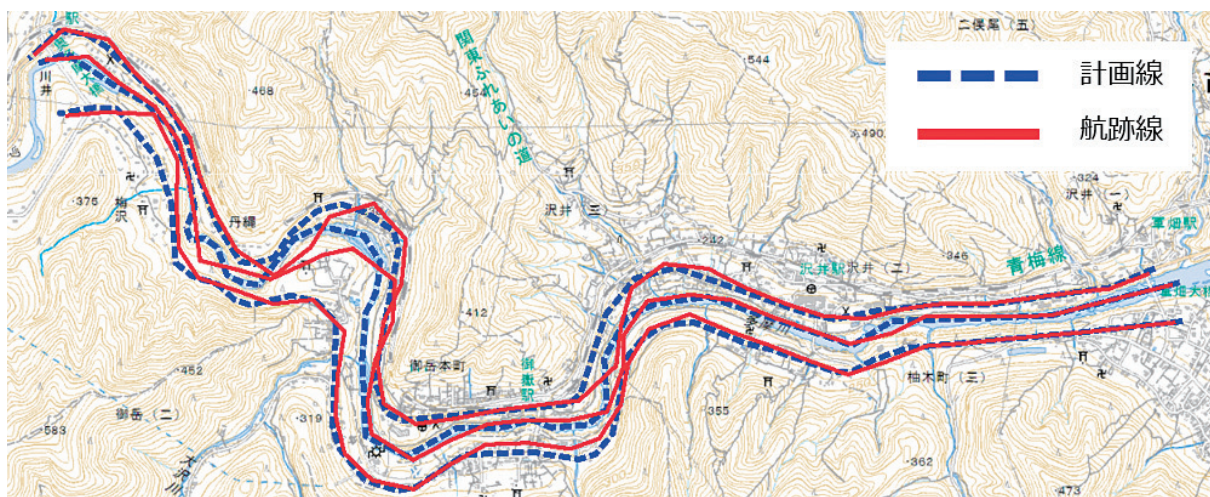


図4 検証フライトにおける計画コースとの乖離

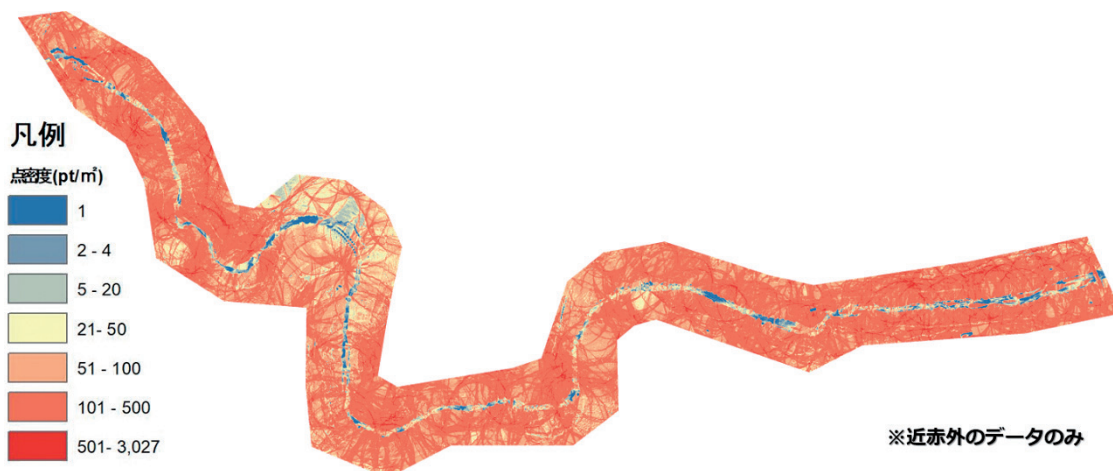


図5 検証フライトにおける点密度の分布図

4.1 飛行計画

カーブが急な場所では計画コースとの乖離(図4)や点密度が不均一になることがわかった(図5)。直線飛行では隣接コースと50%重複するように計画するため点密度は均一になるが、蛇行飛行ではUターンに近い急なカーブへの進入前後において風向きが逆転するため、機体の姿勢制御が難しくなりデータへ影響が出たと考える。また、蛇行箇所では姿勢制御の困難さに加え、飛行速度が低下したことで位置精度の低下率を表すPDOP (Position Dilution Of Precision) の値が直線飛行時よりも悪化した(最大値 蛇行:2.9、直線 2.0)。

そこで90度より急なカーブがある場合はカーブ地点で一度離脱し、コースを区切ることで密度の不均一化を抑え、またGNSSとIMUの精度を保つことが有効である。

4.2 調整計算

直線飛行の場合、コース間の相対的な較差を除去するためにコース単位で姿勢情報の補正をする調整計算を実施する。蛇行飛行の場合は前述したように1コース内で場所により機体の姿勢変化が顕著であるため、直線飛行と同一の方法では較差が除去できずに波紋状のスキャンラインが目立つ結果となった(図6左)。

そこでコース単位ではなく、コースを一定の単位で分割し、補正することで詳細な調整が可能となる。分割単位としては、点群出力ソフトの都合上、点群データが一定容量で区切られて出力されるため、出力ファイル単位で分割した。検証フライトでは1コースあたり約100ファイ

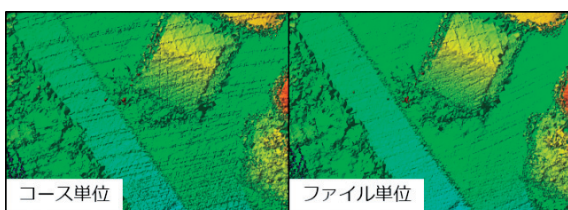


図6 調整方法の違いによる比較

ルに分割された。分割して調整することで細かな較差が除去でき、スキャンラインも目立たなくなった(図6右)。コースを分割することで詳細な調整計算が可能になるが、コース単位で調整していたものを細かく分割するため、作業量は約2~3倍に増加することを考慮する必要がある。

4.3 調整用基準点の配点

直線飛行の場合、ブロックの四隅やブロック間のラップ箇所に調整用基準点を設置する。4.1と4.2を踏まえると蛇行飛行の場合は急カーブ箇所でもコース間の較差が大きくなりやすいことが分かった。

そこで通常の設置箇所のほか、蛇行コースの両端や急カーブ箇所にも検証点を設置することが有効である。精度悪化の可能性がある箇所を把握でき、悪化が確認できた場合は検証点を用いて調整計算することで精度の悪化を抑えることができる。調整用基準点は精度確保のため有効であるが、蛇行箇所の多い計測エリアでは、設置する点数が増加することに留意する必要がある。

5. 実業務における事例

一級河川芦田川における業務の一環として直線飛行と蛇行飛行による航空レーザ測量を実施した(図7)。計測諸元を表6に示す。前述の対処法を踏まえ、急なカーブになる箇所ではコースを区切り3コースの計測を実施した。調整用基準点は区切ったコースの両端に合計4点設置し、検証フライトと同様の方法で検証を実施した。精度検証の結果、同日に実施した直線飛

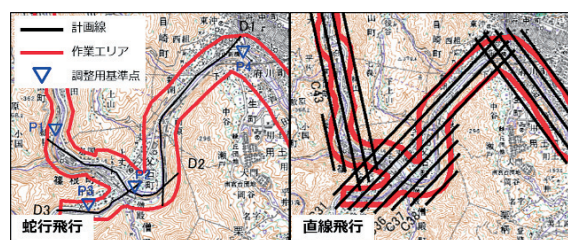


図7 芦田川の計測計画図

表6 芦田川の計測諸元

対地高度	500m
飛行速度	60kt
パルスレート	150,000Hz
スキャナースピード	2,947rpm
計測点密度	10.5点/m ²

表7 芦田川の標高検証結果

	最小値 (m)	最大値 (m)	平均値 (m)	標準偏差 (m)
蛇行飛行	-0.006	0.021	0.006	0.011
直線飛行	-0.014	0.012	-0.005	0.011

※作業規程の準則の規定値
平均値±0.25m以下あるいは標準偏差0.25m以下

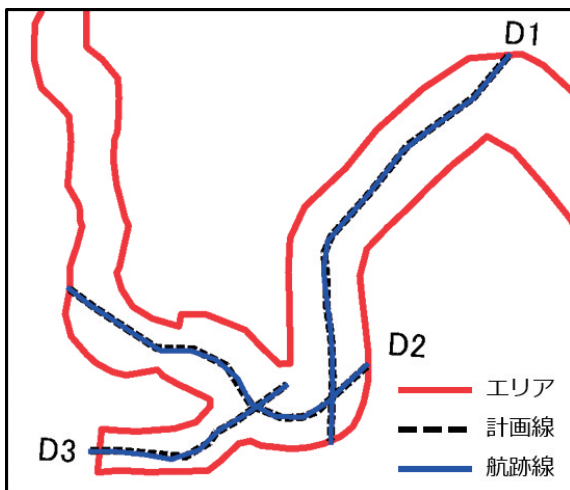


図8 芦田川における計画コースとの乖離

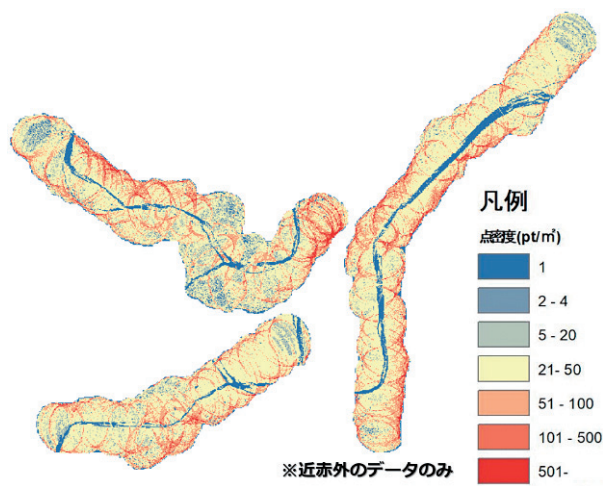


図9 芦田川における点密度の分布図

行の精度と同程度の結果であった(表7)。計測時間を比較すると直線飛行が8コース、計測時間38分に対して、蛇行飛行が3コース、計測時間14分と半分以下に短縮された。また、検証フライトで見られた急カーブ箇所における計画との乖離や点密度の不均一さは、コースを区切ったことにより改善することができた(図8、図9)。

表8 直線飛行と比較した蛇行飛行のコストと品質

作業項目	コスト	品質
計画	削減	—
計測	削減	—
調整用基準点測量	増加	—
精度検証	同程度	同程度
コース間調整	増加	同程度
フィルタリング	同程度	同程度

6. まとめ

本稿では、蛇行飛行の有用性と飛行計画～調整用基準点の配点～調整計算までを体系化した解析手法を紹介した。4章で述べた3点の対処法を踏まえて計画、解析することで作業規程の準則に規定される精度を確保することが示唆された。

蛇行飛行と直線飛行を実施した際のコストと品質を表8にまとめた。蛇行飛行では調整用基準点の設置点数が増加し、調整計算の作業量が増加するが、工程全体の大きな割合を占める計測コストが大きく削減可能なため、全体で

考えるとコスト削減につながる。

品質についてはコース間の調整時に一定単位ごとの調整計算でも除去しきれない相対較差が残る可能性があるが、精度検証では直線飛行と同程度の精度が確認でき、作業規程の準則を満たすことが示唆された。状況に応じて蛇行飛行による計測を実施し、本手法による解析を実施することでより効率的な作業進捗が期待できる。

7. 謝辞

本稿で紹介した「芦田川航空レーザー測量外

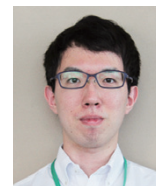
業務」は国土交通省中国地方整備局福山河川国道事務所の業務として実施し、事務所の許可を頂きました。ここに感謝の意を表します。

■参考文献

- 1) 吉田圭介・前野詩朗・間野耕司・山口華穂・赤穂良輔、ALBを用いた河道地形計測の精度検証と流況解析の改善効果の検討、pp.565-570. 土木学会論文集B1 (水工学) vol.73, 2017
- 2) 平松晋也・石田孝司・金沢瑛・権田豊・澤陽之・堤大三・長山孝彦・福山泰治郎・萬徳昌昭・三池力・森下淳・矢島光一・山田泰弘、平成29年5月長野県飯山市井出川流域で発生した大規模崩壊と土石流、pp.41-50. 砂防学会誌vol.70, No.3, 2017

■執筆者

前橋 尚弥 (まえばし なおや)
国際航業株式会社
naoya_maebashi@kk-grp.jp



(共著者)

西村 大助 (にしむら だいすけ)

国際航業株式会社

阿部 亮吾 (あべ りょうご)

国際航業株式会社

王 姫 (おう あ)

国際航業株式会社

城 朋恵 (たち ともえ)

国際航業株式会社

清水 信夫 (しみず のぶお)

国土交通省 中国地方整備局 福山河川国道事務所

児子 真也 (にこ しんや)

国土交通省 中国地方整備局 災害対策マネジメント室