

## (12) SLAM 技術を導入した携帯型レーザシステムによる河川堤防モニタリング手法の検討

秋山 菜乃香<sup>1</sup>・西山 哲<sup>2</sup>・崎田 晃基<sup>3</sup>・山崎 文明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 岡山大学 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)

E-mail: p02j21gl@s.okayama-u.ac.jp.

<sup>2</sup>正会員 岡山大学大学院 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山北区津島中 3-1-1)

E-mail: nishiyama.satoshi@s.okayama-u.ac.jp

<sup>3</sup>学生会員 岡山大学学生 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)

E-mail: pq1i4u6h@s.okayama-u.ac.jp

<sup>4</sup>可視化ビジョン (〒047-0014 北海道小樽市住ノ江 2-4-1)

E-mail: yamazaki@kasika-vision.com

近年、地球温暖化により記録的な降雨が多発しており、堤防の健全性を把握することの重要性が高まっているが、現状は目視点検による定性的な評価されていないため、破堤の危険性のある箇所を効果的に検出することが困難である。本論文は、この課題を解決するため、堤防の変状を定量的に評価するモニタリング手法として期待される携帯型レーザ計測およびドローン測量技術の適用性を検討した結果をまとめるものである。具体的には、SLAM 技術と組み合わせた携帯型レーザ計測および河川の定期横断測量も可能なグリーンレーザスキャナを搭載したドローン測量の有用性と課題を整理し、3次元データによる河川堤防モニタリングの実用性を考察する。

**Key Words:** river inspections, three dimensional laser point group, SLAM, drone

### 1. はじめに

近年、地球温暖化により記録的な降雨が多発しており、現地状況を把握する河川点検は、堤防決壊等の大規模災害を防止するうえでも重要度を増している状況にある。2017年あるいは2018年の九州北部および西日本豪雨時では、国管理だけでなく県が管理している河川が破堤し甚大な被害が引き起こされた。これらの災害では、線状構造物である河川堤防は、1箇所でも破堤すると甚大な被害が発生することがあらためて実証された。現状の豪雨が増加する傾向を考慮すれば、膨大な延長距離にわたる堤防の健全性を綿密に点検することが、より一層重要になる。しかしながら国だけでなく自治体における技術者と予算の不足は深刻化しており、点検作業の詳細化や回数の増加を図ることは不可能である。また主に実施されている目視による点検では、経験に基づいた健全性の判断に頼っており、定量的なデータが無いために、必要な箇所を優先的に対策するための客観的な根拠に乏しいのが実情である。

そこで近年ドローンを使う測量により、堤防の3次元データを効率よく取得する手法が注目されている<sup>1)</sup>。これにより、これまで定性的に把握していた変状を、定量的に把握することができる。ドローン測量による3次元データの取得法には、デジタル画像を使うものとレーザスキャナを使うものがある。特に後者のレーザスキャナを使用するものは、前者のデジタル画像を使うものに比べて、測量する対象領域に標定点を設置する労力が少なくなるため、河川堤防の測量手法として期待されている。しかしながら、ドローン測量時の自己位置精度はGNSSの受信環境に左右され、測量の時間と場所によっては高精度の測量が期待できない。あるいはレーザーなど重量のある計測機器をドローンに搭載した場合は、電池の寿命の関係で飛行時間が数10分に制限されてしまい、広範囲を効率よくモニタリングすることが困難になるなどの課題がある。

一方、近年車両の自動運転技術で実用化されている



図-1 SALMを導入した携帯型レーザ計測システムの概要



左上図：全体概要 右上図：レーザスキャナの概観  
下図：河川堤防計測時の助教

Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) 技術を導入したレーザ測量手法が注目されている<sup>2)</sup>。SLAMとは、自己位置推定と全体の地図の作成を同時に行う技術の総称である。自動運転車両が、初めての場所を認識するためには、移動しながら得た情報に基づいて地図を作成するとともに、当地図の中で自分がどこに居るのかを推定する必要があり、これにSLAMが使用される。システムの機器構成が簡単で済むことから、携帯型レーザスキャナと組み合わせることで、歩行しながらの3次元レーザ測量が実現できる。この技術を現状の巡視および点検作業時に併用することで、簡便に堤防の3次元の座標データを取得でき、河川堤防の変状箇所をリアルタイムに把握する技術の実現が期待されるが、このSLAMとレーザ測量の組み合わせによる河川堤防の変状把握技術はまだ汎用化化されていない。

本研究は、このような背景を鑑み、ドローン測量とSLAMを導入した携帯型レーザ計測システムによる3次元レーザ点群取得技術の利点と課題を整理し、今後の河川堤防3次元モニタリングの可能性を検討する。特にドローン測量には、波長532nmのグリーンレーザを搭載したシステムを用いる。グリーンレーザは、水中を透過する能力があることから、河川の定期横断面計測への応用が期待されている。また、地上部分も従来の近赤外線レーザを用いた測量と比較して、同程度の精度での測量も可能になることから、地上から水面下までの連続した

表-1 携帯型レーザ計測システムの仕様

レーザ測定範囲	100m 以内
レーザスキャンレート	70 万点/秒
バッテリー稼働時間	2 時間
寸法, 重量	750×312 mm, 6.0 kg



図-2 グリーンレーザスキャナを搭載したドローンの概観

3次元データを取得できる手法として期待されている。本研究は、今後の実用化が期待される両技術を具体的な現場に適用し、その実例に基づいて測量精度や利便性に関する課題をまとめる。これらの成果は、今後の河川堤防の3次元データによるモニタリング手法を実現する際の有用な資料の提供に寄与するものと考えられる。

## 2. 河川堤防3次元レーザ点群取得システムの概要

図-1は、本研究で試行する3次元データ取得システムの概観であり、表-1にレーザスキャナの仕様を含めたシステムの特徴を示す。レーザスキャナとデータロガーは一体化されており、軽量であることから図のように携帯型のシステムとなる。一方、図-2はグリーンレーザ用スキャナと当スキャナを搭載するドローンの概観である。スキャナは測定範囲300mでスキャンレートが6万点/秒の性能を有するものである。ドローンには測位精度が水平に対して±10mm、標高に対して±20mmのGNSSシステムが搭載されている。

レーザドローン測量システムおよび可搬型のレーザスキャナを用いた計測システムの両者は、既にいくつかの事例が報告されている。システムを構成するスキャナ自体の性能はもちろん、装着される測装置 (inertial measurement unit : IMU) の特性によって計測精度は異なるので、計測結果から計測手法に関する一般的な議論をするのは妥当ではない。しかしながら、使用するシステムによって得られる3次元点群は堤防形状を忠実に再現するには十分な高密度を有するものであり、GNSSおよびSLAMによる自己測位に基づいた測量結果を堤防モニタリングの観点から考察し、両手法の課題と利点を論じることは可能である。以下の章にて、実河川堤防での計測結果か

らSLAM導入可搬型レーザおよびドローン測量による堤防モニタリングの適用性を考察する。

### 3. 河川堤防計測結果

#### (1) 計測現場と計測作業の概要

図-3に3次元レーザ点群を取得した現場をドローンによって撮影した写真である。岡山県旭川 14.6k～15.8kの1.2kmの区間である。

携帯型レーザ計測システムでは、レーザの照射距離の関係から、図に示すように計測範囲を赤い実線で示す400m区間に区切って計測した。またドローンは対地高度50mで、サイドラップを75%、そして飛行速度2.5m/sで計測した。

図に示した範囲に対して、携帯型ドローン計測システムを使い、天端の徒歩により約90分で計測を完了した。一方、ドローンは5コースを飛行し、約120分を要した。計測に費やす時間は大きくは変わらないが、前者は現位置でのシステムの組み立ても容易で、徒歩により計測でき

るという利便性があり、後者のように専門的な飛行技術の訓練を要しない。

#### (2) 計測結果

図-4は携帯型レーザ計測システムとドローンによって得られたレーザ点群による河川堤防の再現結果である。図の堤防は、ドローンでは2530万点のレーザ点群で、携帯型レーザ計測システムでは5650万点の点群で構成される。いずれも高密度で堤防の再現が可能である。ただし、SLAMには、位置推定の誤差が徒歩と共に蓄積する課題があることが知られている。本結果では、線状構造物の堤防をいくつかの区間に分けて計測した結果をランドマークなどを設置することなく重ね合わせたが、さらに長距離の範囲を計測する際には課題になる可能性がある。図-5は、同じく徒歩により携帯型レーザ計測システムを使って再現した法面である。堤内の徒歩による計測も容易であるため、ドローンによる対地高度50mからの計測とは異なり、樋門形状も詳細に把握することが可能である。



図-3 計測現場の概要

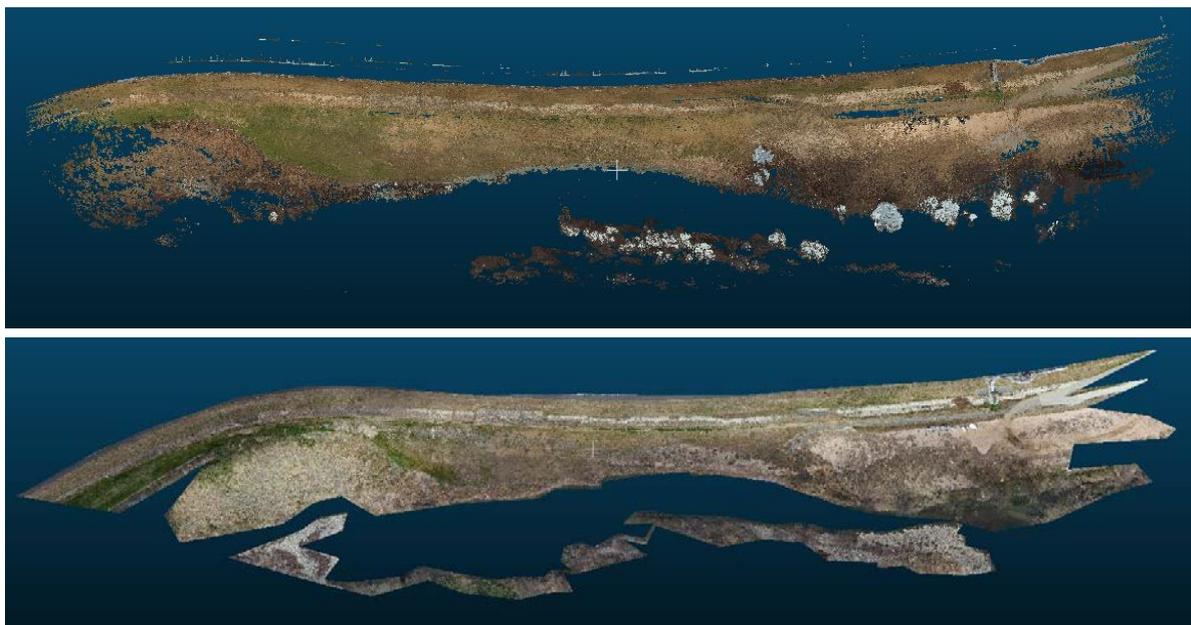


図-4 レーザ点群による堤防の再現結果：携帯型レーザ計測システムの結果（上図），ドローン測量の結果（下図）

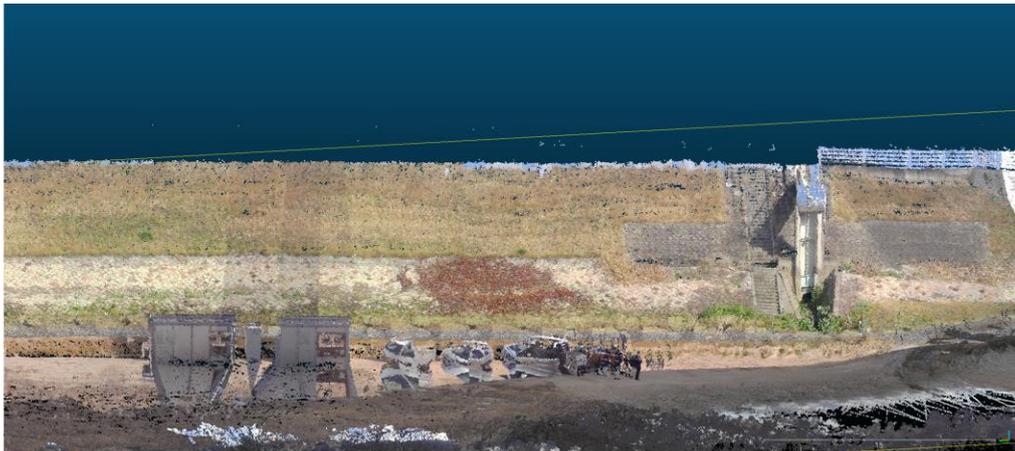


図-5 携帯型レーザ計測システムを用いた堤内の徒歩による計測で得られたレーザ点群

表-2 ドローン測量の精度検証結果

(単位: mm)	X	Y	Z
平均較差	0.0	13.0	-8.0
RMSE	40.0	15.0	27.0

表-2 は、図-3 に示した計測範囲内に設置した検証点を使って、トータルステーション (TS) を用いた測量結果とドローン測量の結果を比較したものである。検証点は5箇所あり、RMSEは二乗平均平方根誤差である。表における X と Y で示した平面および Z で示した標高ともに、TSの結果に対して平均あるいはRMSEで $\pm 50\text{mm}$ 以内の精度に収まっている。本論文での携帯型レーザ計測による点群もドローンによる点群と一致することから同様の計測精度を有していると推測され、高精度で堤防の形状を再現できると考える。

#### 4. まとめ

本研究では、河川堤防の形状を3次的に再現する手法として、携帯型レーザ計測とドローン測量の利点と課題を整理した。前者は SLAM 技術を導入することにより、GNSS 測位の精度に依存しない手法を用い、後者はグリーンレーザという定期横断測量にも応用できる手法を用いた。両者とも、今後の河川点検時に活用するモニタリング手法として期待されている手法である。高密度で堤防形状を再現できる利点があり、その精度も $\pm 50\text{mm}$ 以内であることから、河川標あるいは天端近

傍に設置した検証点の形状を高精度で再現でき、それを利用して2時期のデータ点群の座標値を取得することができるので、沈下などの変状発生箇所を定量的に把握できる考えられる。

本研究では、比較的狭い計測範囲であったため、誤差が累積するという SLAM 技術の課題は見られなかったが、長距離の計測時の誤差は今後検討が必要であると考えられる。またドローンを用いた計測では、計測後に GNSS データと IMU データを用いて最適軌跡解析を行い飛行軌跡を算出するなどの工程を必要とし、リアルタイム計測の観点からは課題を残した。今後、高密度点群の重ね合わせ技術の開発を含めて、携帯型レーザ計測およびレーザードローン測量の実用化のための課題解決をさらに検討していく。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 19K04949 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- 1) 塚浩一, 間野耕司, 橘菊生, 西山哲：グリーンレーザドローンの計測精度と計測特性の把握に関する研究, 応用測量論文集, Vol.31, pp.99-110, 2020.
- 2) 塚田義典, 窪田諭, 田中成典, 梅原喜政：道モバイルセンシングユニットを用いた 3 次元計測結果と SLAM による高精度化に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol 74, No. 2, p. II\_110-II\_117, 2018.
- 3) 国土交通省 水管理・国土保全局：安全を持続的に確保するための今後の河川管理のあり方検討小委員会資料, <[https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/s204\\_jizokutei01\\_pa\\_st.html](https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/s204_jizokutei01_pa_st.html)>, (入手 2020.5.25)