

一般財団法人新潟県建設技術センター
研究助成事業

報 告 書

令和6年3月

新潟大学自然科学系（農学部）

鈴木哲也

1 概要

本報告書は、一般財団法人新潟県建設技術センター令和 5 年度の研究助成事業に係わる研究成果を取りまとめたものである。

1-1. 申請課題名

レーザースキャニングデータの深層学習によるコンクリート損傷の非破壊 3 次元検出法の開発

1-2. 申請者

新潟大学自然科学系（農学部） 教授 鈴木哲也

1-3. 研究期間

調査研究の期間は令和 5 年 4 月 1 日～令和 6 年 3 月 31 日の 1 年間である。

1-4. 研究目的

本課題では、3D レーザースキャニングと計測データの深層学習による非破壊 3 次元損傷検出法を開発し、精度および作業効率の改善を試みる。

1-5. 研究成果

(1) 論文

- 1) Kazuma Shibano, Nadezhda Morozova, Yuji Ito, Yuma Shimamoto, Yuki Tachibana, Kakutaro Suematsu, Atsushi Chiyoda, Hisaya Ito and **Tetsuya Suzuki**: Evaluation of Surface Damage for in-service Deteriorated Agricultural Concrete Headworks using 3D point clouds by Laser Scanning Method, *Journal of Paddy and Water Environment* (2024). <https://doi.org/10.1007/s10333-023-00965-3>
- 2) Kazuma Shibano, Nadezhda Morozova, Yuma Shimamoto, Ninel Alver and **Tetsuya Suzuki**: Improvement of Crack Detectivity for Noisy Concrete Surface by Machine Learning Methods and Infrared Images, *Case Studies in Construction Materials* (2024), <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02984>
- 3) 島本由麻, **鈴木哲也**: ヒストグラム平坦化を活用した道路橋床版での遊離石灰の自動検出に関する解析的検討, *農業農村工学会論文集*, 316, pp. I_69- I_76 (2023) .
- 4) 柴野一真, Morozova, N, 島本由麻, **鈴木哲也**: AE ダブルロジスティック解析によるコンクリートコアの損傷度評価に関する実験的研究, *農業農村工学会論文集*, 316, pp. I_57- I_68 (2023) .
- 5) 柴野一真, Nadezhda Morozova, 島本由麻, **鈴木哲也**, 伊藤久也, 千代田淳, 末松格太郎, 橘勇貴: レーザー計測による農業水利施設の三次元損傷データの構築, *農業農村工学会誌*, 91 巻, 第 6 号, pp. 3-6 (2023) . (報告書巻末に添付)
- 6) 島本由麻, 柴野一真, **鈴木哲也**: 材料施工研究への機械学習適用と解析精度へ及ぼす要因分析, *農業農村工学会誌*, 91 巻, 第 6 号, pp. 7-10 (2023) .
- 7) 小日向研吾, 高橋智香, **鈴木哲也**: レーザースキャニングによる既設頭首工堰柱の表面損傷検出, *農業農村工学会誌*, 91 巻, 第 8 号, pp. 44-45 (2023) .

(2) 口頭発表

- 1) Kazuma Shibano, Masaomi Kimura, Kentaro Ohno and **Tetsuya Suzuki**: Use of Infrared Data for Detection of Concrete Defect In-Service Thrust Block Based on Heat Balance Analysis, *FraMCoS - 11*, 10-14 September, 2023.

他口頭発表 15 件

2 研究成果概要

2-1. はじめに

近年、社会基盤施設の BIM/CIM (Building/Construction Information Modeling, Management) モデルをはじめとする新たなデータ様式による施設データの一元管理・利用に関する将来像が各地で模索されている¹⁾。重要な論点は、既存施設の維持管理データに損傷実態を詳細に反映できるかにある。既存技術では、UAV などにより取得した可視画像での管理が広く普及しているが、調査データのデジタル化において評価精度や作業効率に改善が必要である。

そこで本報では、表面損傷が顕在化した鉄筋コンクリート造の既設頭首工を対象にレーザー計測による非破壊 3 次元損傷検出を試みた結果を報告する。

2-2. 計測対象と方法 (研究課題 1, 2)

(1) 計測対象

計測対象は竣工後 46 年が経過した鉄筋コンクリート造の頭首工である。新潟県上越市内に立地し、ひび割れが顕在化した施設である (写真-1)。

(2) 計測方法

レーザー計測には、FARO 社製の Focus Laser Scanner S150 を用いた (写真-1 右下)。測距手法は位相差検出方式である。計測条件はレーザーの波長 1,550 nm, 視野 300° (鉛直) / 360° (水平) である。取得された 3 次元点群は、座標データおよび反射強度の指標を有している。本解析では、主に点群の幾何学特性の指標によりひび割れと遊離石灰の検出を試みた。点群処理に用いたソフトウェアは Open-source Cloud Compare software²⁾ である。幾何学特性による損傷検出では、パラメータ推定法の一つである RANSAC (RANDOM Sample Consensus) による平



写真-1 計測施設外観

面検出を行い、幾何学指標として検出された平面と点群の距離を用いた。本解析範囲には、付帯設備であるパイプと銘板が含まれており、単純な最小二乗法による平面検出ではノイズの影響を受ける。以上より、ノイズ存在下に最適な推定を行う手法である RANSAC を用いた。検出された平面と点群の距離はコンクリート表面の粗さを示す。これらの手法は、点群から推定される平面を健全部と仮定し、検出された平面とひび割れや遊離石灰部の点群の距離を算出することで定量的評価を試みた。

2-3 結果および考察

(1) 計測施設の損傷状況

計測対象の損傷状況は、部位により異なっていた。特に左岸側堰柱部ではひび割れが顕在化していた。本検討では、左岸側堰柱部を対象に実証的検討を試みた (写真-1 解析対象)。

(2) 幾何学指標による損傷検出

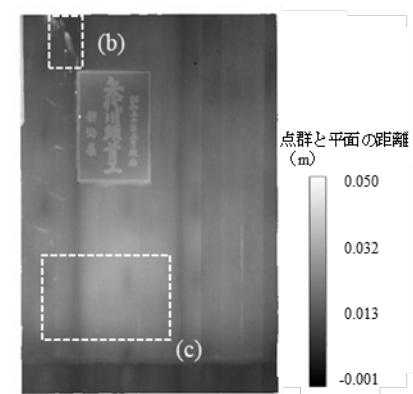
点群の座標データを用いて、RANSAC により得られた平面と点群の距離を図-1 (a) に示す。平面と点群の距離は、健全部と推定された平面と点群の各点との距離を表す幾何学指標であり、大きな値ほど表面が粗いことを示す。コンクリートの打継目および銘板部で大きな値を示し、RANSAC により堰柱表面の点群から部材平面の高精度な検出が示されたものと推察される。解析面左上(b)は遊離石灰が析出しているこ

とが目視により確認されている。遊離石灰部における平面と点群の距離を図-1 (b) に示す。RGB 点群で白く示される遊離石灰部 (点群) がコンクリート表面 (平面) との距離で大きな値をとることが確認された。最大距離は 0.031 m であった。解析面左下のひび割れ部における局所的に整合させた平面と点群の距離を図-1 (c) に示す。RGB では垂直方向のひび割れが確認された (図-1 (c) のI)。黒い点線の範囲内の点群に関して、平面と点群の距離を図-1 (c) のIIに示す。X 軸座標が 10.75, 10.95, 11.10 および 11.30 m 付近で約 0.001 m の平面と点群の距離を示し、ひび割れ位置との合致が確認された。これより、点群の幾何学指標を用いて、ひび割れを定量的に評価可能であることが示唆された。

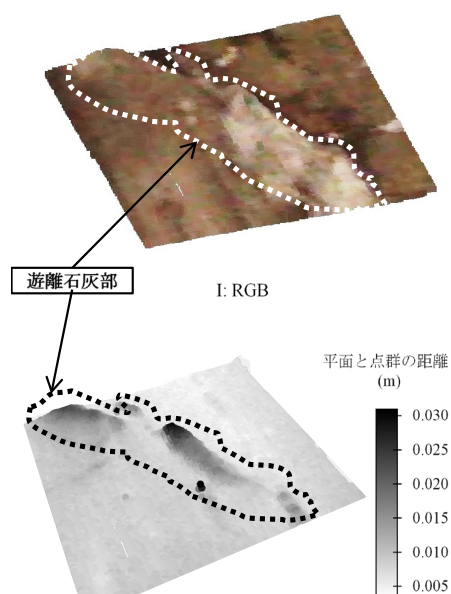
これらの結果から、コンクリート構造物の表面をレーザー照射し、対象表面の幾何学特性を可視化することにより遊離石灰やひび割れを検出可能であると推察される。計測結果は 3D 点群として処理可能であることから、図面と 3D 点群の位置情報を同期することで、設計計画や維持管理、補修・補強、更新計画などに用いる 3D-CAD データへの有効活用が可能となる。このことから、幾何学指標と反射強度を組み合わせた損傷度評価が今後可能になるものと推察される。

2-4. おわりに

本報告書では、研究課題「レーザースキャニングデータの深層学習によるコンクリート損傷の非破壊 3 次元検出法の開発」として試験結果を報告した。地上型レーザースキャナにより得られた 3 次元点群から既設頭首工に発達した表面損傷検出を試みた結果、幾何学指標を用いて遊離石灰とひび割れが定量的に検出可能であることが明らかになった。報告者である鈴木らの既往研究^{3),4)}では、レーザーの反射強度を指標にすることにより損傷状況を定量化できる可能性が確認されている。反射強度と幾何学指標を組み合わせることで表面状態の特徴づけが可能になるものと推察される。

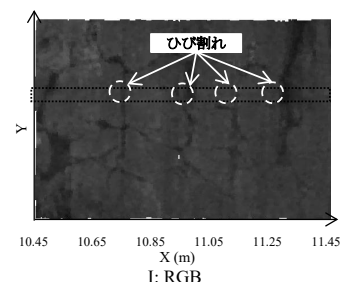


(a) 平面と点群との距離評価

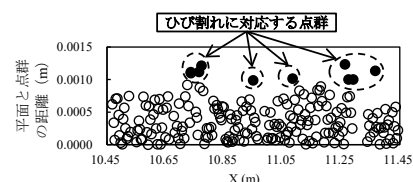


II: 平面と点群の距離

(b) 地点 (b) 詳細



I: RGB



II: 平面と点群の距離

(c) 地点 (c) 詳細

図-1 平面と点群の距離による損傷検出

参考文献

- 1) 農林水産省農村振興局：農業農村整備に関する技術開発計画～今後 5 年間で目指すべき技術開発の方向性～（2021），
https://www.maff.go.jp/j/nousin/pdf/R311_gijutukeikaku_zentai.pdf（参照 2023 年 1 月 12 日）
- 2) Cloudcompare.org (2023) : CloudCompare Home, <https://www.danielgm.net/cc/>（参照 2023 年 6 月 16 日）
- 3) Tetsuya Suzuki, Kazuma Shibano, Nadezhda Morozova and Yuma Shimamoto: On-Site Damage Detection of in-Service Irrigation Head Works by Laser Scanning Method, The XX CIGR World Congress 2022, p. 208 (2022)
- 4) 柴野一真, モロゾバ ナデージダ, 島本由麻, 鈴木哲也, 伊藤久也, 千代田淳, 末松格太郎, 橘勇貴: レーザー計測による農業水利施設の三次元損傷データの構築, 水土の知 91(6), pp. 3-6, (2023)

レーザ計測による農業水利施設の三次元損傷データの構築

Creation of 3D Damage Data for Irrigation Infrastructure by Laser Scanning Method

柴野 一真* モロゾバ ナデーダ* 島本 由麻** 鈴木 哲也***
 (SHIBANO Kazuma) (MOROZOVA Nadezhda) (SHIMAMOTO Yuma) (SUZUKI Tetsuya)
 伊藤 久也**** 千代田 淳**** 末松 格太郎**** 橋 勇貴****
 (ITO Hisaya) (CHIYODA Atsushi) (SUEMATSU Kakutarō) (TACHIBANA Yuki)

I. はじめに

基幹的農業水利施設の維持管理において三次元データの活用が期待されている。施設の経年的な劣化および供用環境がもたらす損傷蓄積による施設機能の損失は農業水利施設の突発事故件数の増加傾向に反映されており¹⁾、機能診断は喫緊の課題である。一方で、ダム、取水堰等の整備された農業水利施設は2020年3月時点で7,656カ所ある¹⁾。維持管理に対する予算や人手不足の現状の中で、既存の手法による農業水利施設全体の損傷状況の把握は不可能である。2021年3月に閣議決定された第6期科学技術・イノベーション基本計画では、農業水利施設の機能が安定的に発揮されるよう、施設の点検や機能診断等の省力化・高度化を目的としたデジタル技術の活用が推進されている²⁾。具体的な取組みとしては、AIによるひび割れの自動検出、BIM/CIM (Building Information Modeling/Construction Information Modeling) の取組みとして三次元データの取得による施設の現状把握、そして時間と空間の両軸での一元管理が挙げられる。

農業水利施設の維持管理は、長寿命化を目的とした予防保全の原則に基づき行われている³⁾。コンクリート農業水利施設においては、構造性能の低下が直ちに通水性能の低下として顕在化しないため、構造性能の低下を改善することは予防保全とされている。構造性能の調査はひび割れの定量化、コンクリートコアを対象とした圧縮強度試験により行われるのが一般的である。近年では、効率的なひび割れの定量化手法としてUAV画像を用いたAI・機械学習による検出が行われている^{4),5)}。島本らの別報では、材料施工分野における機械学習のデータ特性について考察している⁶⁾。

三次元データを活用したコンクリート農業水利施設の維持管理の実現には、三次元データによる表面損傷

検出とこれまでの画像による検出を組み合わせで発展させる必要がある。具体的には、コンクリートコアを用いた物性評価とレーザスキャニング計測や画像診断を関連付けることで、非接触で構造物の損傷状態を評価可能になると考えられる。

そこで本報では、損傷が進行したコンクリート取水堰でレーザスキャニング計測を行い、三次元データにより表面損傷検出を行った結果を報告するとともに、既存の画像処理によるひび割れ検出技術との相違を考察し、点群を用いたBIM構築の特徴を概説する。最後にBIMを活用した農業水利施設の維持管理について考察する。

II. 損傷が顕在化したコンクリート取水堰のレーザスキャニングによる表面損傷の検出


1. 対象構造物とレーザスキャニング計測

調査対象とした構造物は1976年に竣工されたコンクリート取水堰であり、レーザスキャニング計測と目視によるひび割れの確認を行った。レーザスキャナはFARO® Focus S 150を用いた。測定では完全な点群データの取得のために20回のスキャンを行うとともに、スキャンの統合のためにターゲットを設置した。点群の座標データは位相差による測距、ミラーの回転および角度エンコーダによって得られた。反射強度は以下の式で示される⁷⁾。

$$P_R = \frac{\pi P_T \rho}{4R^2} \eta_{Atm} \eta_{Sys} \cos a \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 P_R は受信信号電圧、 P_T は送信信号電圧、 a は入射角、 ρ は材料の反射率、 η_{Atm} は大気透過係数、 η_{Sys} はスキャナの送信係数および R は範囲である。得られた点群を図-1に示す。本報では、右岸側および左岸側の門柱を解析対象として用いた。目視では、左岸側の門柱はひび割れおよび遊離石灰が確認され、右

*新潟大学大学院自然科学研究科, **東京農工大学大学院農学研究科, ***新潟大学自然科学系(農学部), ****(株)日本水工コンサルタント

 農業水利施設、損傷度評価、非破壊・非接触計測、レーザスキャニング、三次元データ、BIM

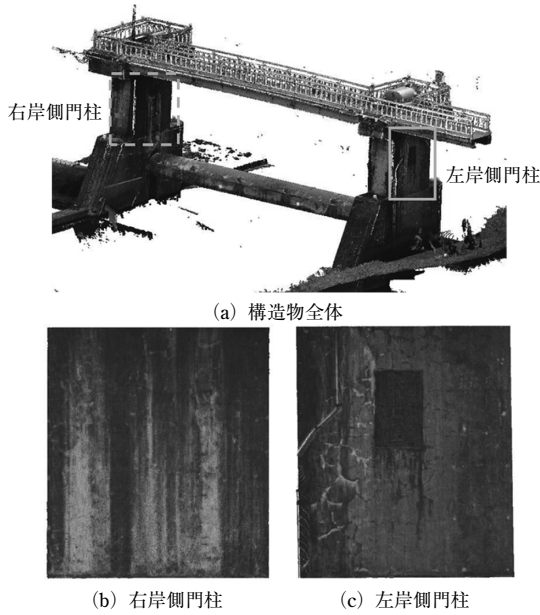


図-1 対象構造物の点群

岸側は小さなひび割れが多数確認された。

2. 高精度な点群のレジストレーション

点群による損傷評価の前処理として、任意範囲以内の点群を用いたレジストレーションを行った。レジストレーションとは、複数の点群の位置合わせを行い、共通の座標系に統合する処理である。本報で実施するターゲットを用いた自動レジストレーションでは統合の誤差が生じることが確認されている⁸⁾。式(1)より、反射強度は範囲と入射角に影響を受ける。範囲を30, 50, 100 mの3ケース設定してレジストレーションを実施し、範囲が統合された点群に及ぼす影響を確認するため、表面の変化を算出した。表面の変化は定義された半径内の点群の幾何学特性を示す。対象の点群の共分散行列の固有値を大きい順に λ_1 , λ_2 および λ_3 とすると、表面の変化 C_λ は以下の式で示される⁹⁾。

$$C_\lambda = \frac{\lambda_3}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)} \dots\dots\dots (2)$$

表面の変化は最小の固有値 λ_3 が全体に占める割合である。レジストレーションによる誤差が大きい場合、点群は平面から離れるため、表面の変化は大きくなると思われる。図-2に範囲の異なる点群の表面の変化の分布を示す。スキャナから100 m内の点群を用いた場合、平面からのばらつきが大きくなり、30および50 mと比較して、表面の変化の大きな値は増加した。図-3に範囲が30 mおよび100 mの点群における右岸側門柱の表面の変化を示す。円形で白く示されている部分は目地である。目地を除く平面部において、100 m点群は30 m点群より大きな値をとることが確認された。このことは、使用する点群の範囲が広

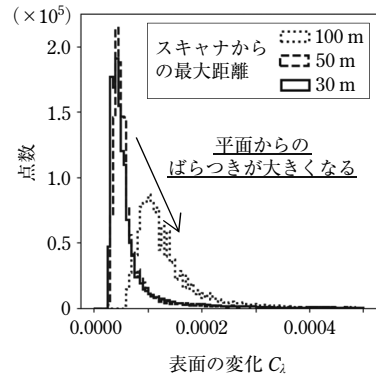
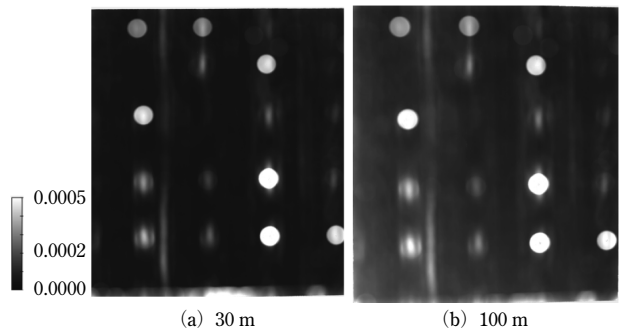


図-2 範囲の異なるデータを用いた表面の変化の分布



*円形で値が高い箇所は目地である。

図-3 表面の変化 (右岸側門柱)

いほどレジストレーションの誤差は大きくなることが示されている。以上より、以降の検討では30 m範囲内の点群を統合した結果を用いた。

3. 幾何学情報および反射強度による表面損傷検出

レーザスキャニング計測による点群の幾何学情報および反射強度から、表面損傷の評価を行った。

幾何学情報による表面損傷の評価には粗さ¹⁰⁾を用いた。粗さは、任意の半径内の点群を対象に平面フィッティングを行い、フィッティングされた平面と点群との距離を表す指標である。ひび割れや遊離石灰析出部はコンクリート表面に凹凸を形成するため、粗さを用いることで定量的に評価できる。本報では、半径を10 cmとして粗さを算出した。

図-4に粗さを投影した点群を示す。軽微な損傷状況の右岸側門柱では、目地が大きな値をとっていることが確認された。小さなひび割れの箇所では、大きな値が見られなかった。これらの結果は、小さなひび割れに対しては幾何学情報のみで評価することは困難であることを示唆している。極度に損傷が顕在化していた左岸側門柱では、遊離石灰、目地、排水パイプおよび銘板において相対的に粗さ指標が大きな値をとることが確認された。

図-5に反射強度の結果を示す。反射強度は、式(1)で示されるが、材料の反射率の影響を大きく受けるほ

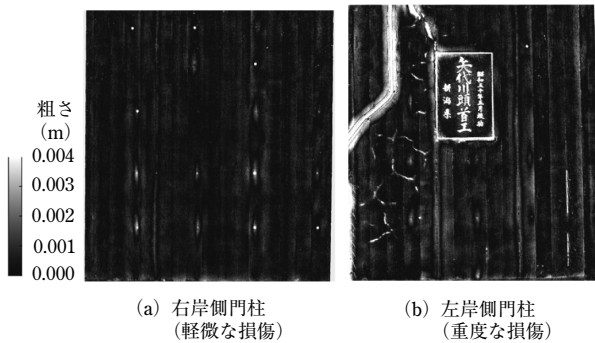


図-4 粗さ

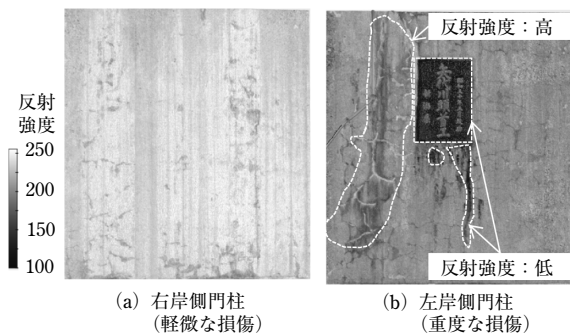


図-5 反射強度

か、主に材料表面の粗さ、色および水分状態に影響を受ける¹¹⁾。右岸側門柱では、幾何学情報では確認できなかった小さなひび割れが輪郭としてとらえられており、損傷の分類に用いる特徴量として有用であると考えられる。左岸側門柱では、黒い銘板および変色部が小さな値を示し、遊離石灰部では高い値を示したことから、色の影響が大きいと考えられる¹²⁾。ひび割れは幾何学情報同様に輪郭が確認され、健全部より小さな値を示した。このことは、レーザの反射強度が欠陥のエッジ付近で低下するため¹³⁾と考えられる。

以上より、幾何学情報と反射強度を相補的に用いることで、損傷の分類と定量評価が可能になることが示唆された。現状では、三次元データはデータサイズが大きいため処理に多くの時間を要する。一方、多くの既往研究では、画像による高精度なひび割れ検出法が提案されている。そのため、二次元画像データを三次元データにマッピングすることで高度な情報を反映した三次元データの生成が可能であることも報告されている¹⁴⁾。このことから、具体的な三次元損傷分布の生成はこれまで開発されてきた高精度な検出と三次元データの融合からも可能であると考えられる。

III. 三次元データによる BIM の構築と活用

BIM は既存の建物や設計済みの建物を示す 3D のデジタル表現である¹⁵⁾。BIM の有用性は格納された情報の時系列変化を組み込むことが可能な点である。

本報で紹介した点群データを BIM として使用するには、BIM への変換処理が必要である。本章では、点群データから BIM の生成技術と BIM の活用について既往研究を参考に概観する。

1. 点群から BIM の生成技術

一時点での建物の情報はレーザスキャナ、CAD 図面およびトータルステーションにより得られる。はじめに、得られたデータをグローバル座標系に登録する必要がある¹⁵⁾。点群の場合、既知座標のターゲットをスキャンし、グローバル座標系に登録する。次に複数のスキャンを統合し、統合された点群から建物の要素として面や立方体がモデル化される。現在、単純な要素や要素間の接続は半自動化されているが¹⁶⁾、複雑な実環境や多様な目的に対応するため、自動化に向けた方法論が議論されている¹⁷⁾。一例として、あらかじめ使用されている CAD や元の設計図などの特定のモデルを利用する予備知識を活用する技術が挙げられる¹⁸⁾。

2. 維持管理分野における BIM の活用

前節で紹介したようにレーザスキャニング計測は、物理ドメインである実構造物から仮想ドメインである BIM モデルの生成に重要な機能を担う¹⁹⁾。筆者らは、コンクリートコアを採取し、X線 CT 法²⁰⁾、弾性波法²¹⁾による損傷度評価法を開発している。施設の点検や機能診断を大幅に省力化するためには、本報で行ったレーザスキャニング計測による表面損傷結果と内部損傷を関連付けた非破壊検査手法の開発が必要である。それらの損傷状態を BIM に蓄積することで、時系列変化を考慮した損傷モデルの作成が可能になり²²⁾、将来的には精緻な寿命予測が行える可能性がある²³⁾。

以上より、農業農村工学分野における BIM の活用は、農林水産省の示すストックマネジメントに向けた取組みや農業水利施設の安定的な機能の発揮に寄与するものと期待される。

IV. おわりに

本報では、既設コンクリート取水堰においてレーザスキャニング計測を行い、得られた点群によって表面損傷度評価を行った。その結果、複数スキャンの統合には、用いる点群の範囲を考慮する必要があると示唆された。幾何学情報から算出した粗さは目地、遊離石灰部で大きかった。反射強度は色に影響を受けていると考えられ、ひび割れは健全部と比較して小さな値であった。これらの結果から、幾何学情報および反射強度の指標を相補的に用いることで、表面損傷の分類と検出が可能であることが示唆された。レーザスキャニング計測は BIM の作成に有用であり、BIM は農業水利施設の維持管理に寄与すると考えられた。

謝辞 コンクリート取水堰の計測では、新潟県農地部の協力を得た。ここに記して感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 農林水産省：令和3年度食料・農業・農村白書, https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/r3/ (参照2023年2月17日)
- 2) 内閣府：第6期科学技術・イノベーション基本計画, <https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/6honbun.pdf> (参照2023年2月17日)
- 3) 農林水産省：農業水利施設におけるストックマネジメントの取組について、農業水利施設の保全管理, <https://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/sutomane/> (参照2023年2月17日)
- 4) 島本由麻, 萩原大生, 鈴木哲也：決定木を用いた道路橋RC床版における遊離石灰抽出に関する研究, 農業農村工学会論文集310, I_59~I_65 (2020)
- 5) Shibano, K., Morozova, N., Hagiwara, T., Shimamoto, Y., Suzuki, T., Chiyoda, A., Suematsu, K., Tachibana, Y. and Ito, H.: Use of Infrared Thermography for Damage Detection of Concrete Structure by Machine Learning, IWAEM, 122 (2022)
- 6) 島本由麻, 柴野一真, 鈴木哲也：材料施工研究への機械学習の適用とその解析精度へ及ぼす要因分析, 水土の知91(6), pp.7~10 (2023)
- 7) Stałowska, P., Suchocki, C. and Rutkowska, M.: Crack detection in building walls based on geometric and radiometric point cloud information, Automation in Construction 134, 104065 (2022)
- 8) Soudarissanane, S. and Lindenbergh, R.: Optimizing terrestrial laser scanning measurement set-up, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-5/W12, pp.127~132 (2011)
- 9) Hackel, T., Wegner, J.D. and Schindler, K.: Joint classification and contour extraction of large 3D point clouds, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 130, pp.231~245 (2017)
- 10) CloudCompare wiki: Roughness, <https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Roughness> (2022) (参照2023年2月17日)
- 11) Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M. and Teunissen, P.: Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 66(4), pp.389~399 (2011)
- 12) Costantino, D. and Angelini, M.G.: Qualitative and quantitative evaluation of the luminance of laser scanner radiation for the classification of materials, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W2, pp.207~212 (2013)
- 13) Nicodemus, F.E.: Directional reflectance and emissivity of an opaque surface, Applied Optics 4(7), pp.767~775 (1965)
- 14) Wang, C., Cho, Y.K. and Gai, M.: As-is 3D thermal modeling for existing building envelopes using a hybrid LIDAR system, Journal of Computing in Civil Engineering 27(6), pp.645~656 (2013)
- 15) Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R. and Lytle, A.: Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques, Automation in Construction 19(7), pp.829~843 (2010)
- 16) Schnabel, R., Wahl, R. and Klein, R.: Efficient RANSAC for point-cloud shape detection, Computer Graphics Forum 26(2), pp.214~226 (2007)
- 17) Romero-Jarén, R. and Arranz, J.J.: Automatic segmentation and classification of BIM elements from point clouds, Automation in Construction 124, 103576 (2021)
- 18) Bosche, F. and Haas, C.T.: Automated retrieval of 3D CAD model objects in construction range images, Automation in Construction 17(4), pp.499~512 (2008)
- 19) Begić, H. and Galić, M.: A Systematic Review of Construction 4.0 in the Context of the BIM 4.0 Premise, Buildings 11(8), 337 (2021)
- 20) Morozova, N., Shibano, K., Shimamoto, Y., Tayfur, S., Alver, N. and Suzuki, T.: Visualization and evaluation of concrete damage in-service headworks by X-ray CT and non-destructive inspection methods, Frontiers in Built Environment 8 (2022)
- 21) Suzuki, T., Nishimura, S., Shimamoto, Y., Shiotani, T. and Ohtsu, M.: Damage estimation of concrete canal due to freeze and thawed effects by acoustic emission and X-ray CT methods, Construction and Building Materials 245(10), 118343 (2020)
- 22) Raposo, C., Rodrigues, F. and Rodrigues, H.: BIM-based LCA assessment of seismic strengthening solutions for reinforced concrete precast industrial buildings, Innovative Infrastructure Solutions 4, (2019)
- 23) Zeibak-Shini, R., Sacks, R., Ma, L. and Filin, S.: Towards generation of as-damaged BIM models using laser-scanning and as-built BIM: First estimate of as-damaged locations of reinforced concrete frame members in masonry infill structures, Advanced Engineering Informatics 30 (3), pp.312~326 (2016)

[2023.4.10.受理]

正会員：島本由麻, 鈴木哲也, 伊藤久也, 千代田 淳

CPD個人登録者：伊藤久也, 千代田 淳

学生会員：柴野一真, モロゾバ ナデージダ