

## 学位論文要旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	砂防施設点検に対する3次元モデルとGISの活用に関する研究 (Study on Utilization of 3D Model and GIS for Sabo Dam Inspection)
氏名(Name)	山野 亨

高度経済成長期に集中的に整備された社会資本は一斉に老朽化が進むため、今後は施設の維持管理が課題であるが、現在の施設点検記録は紙ベースの帳票を基本としており、コンピュータで自動処理することを前提としていない。著者らはスマート調査を開発し、施設点検のデータベース化とGIS化を実現した。スマート調査は、2次元の地図上に点検写真の撮影位置を記録できたが、点検写真撮影時には変状部位に接近する必要があるため、施設全体に対する位置・方向・大きさを把握出来ないという課題があった。そこで、砂防堰堤を対象としてスマート調査に3次元GISを適用し、現地で撮影した写真から3次元モデルを作成し、点検結果を3次元モデル上で管理するための研究を行った。

本研究は、砂防施設点検写真管理の効率化のために、点検写真の3次元GIS上での管理に取り組んだ研究成果をとりまとめたものである。本論文は全6章から成り、各章の主な内容は以下のとおりである。

「第1章 序論」では、我が国における社会インフラの維持管理の現状と課題をまとめるとともに、土木施設維持管理のための3次元モデルの活用・3次元モデルの位置合わせに用いる高精度測位・コンクリート構造物における点検効率化・iPhone LiDAR アプリに関する既往の研究動向の整理を行った。その上で本研究の目的と着眼点を整理し、本論文の構成と概要について述べた。

「第2章 3次元モデルの比較と砂防施設維持管理システムへの適用検討」では、砂防施設維持管理システムに適用するための3次元モデルとして、BIM/CIMモデル・3次元点群モデル・3次元サーフェスモデルの3種類のモデルを比較し検討を行った。本章での問題設定は、本システムで利用する3次元モデルの選定である。制約条件は、既設を含めた砂防堰堤を3次元モデル化可能であることである。

現状では、砂防堰堤のBIM/CIMモデルは少ないため、既往の砂防堰堤に適用する場合にはUAVで撮影した写真からSfM/MVS技術により作成可能な3次元サーフェスモデルが有用であると考え、本研究における3次元モデルは3次元サーフェスモデルとした。

本章では、砂防施設維持管理システムに適用可能な3次元モデルについての知見と、3次元モデルを3次元GISで活用するための知見が得られた。

「第3章 砂防施設調査支援システムに用いるRTK受信機の性能評価」では、砂防堰堤や点検写真の3次元モデルを、3次元GIS上に配置する際の位置合わせのために必要な高精度測位技術を調査し、砂防堰堤とその周辺の森林において測位性能評価を実施した。本章の問題設定は、砂防施設調査時の位置情報取得可否および精度検証である。制約条件は、衛星測位にとって劣悪な環境(砂防堰堤、森林中)において、安価かつ小型な装置を用いてリアルタイムに高精度測位が必要であることである。

性能評価を行ったマルチバンド受信機では、砂防堰堤直下の上空が7割程度覆われている劣悪な環境においても、水平方向のばらつきが22mm(2DRMS)であることを確認し、砂防堰堤や点検写真の3次元モデルの位置合わせに適用可能であることを確認した。

「第4章 砂防堰堤点検画像作成のための画像合成の検討」では、3次元モデル作成の基礎的な検討として、画像合成手法について整理した。本章の問題設定は、点検写真(2次元)の合成にあたり必要となる正対化と画像結合である。制約条件は、点検写真撮影機材が現地調査用スマートフォンであることである。

画像合成のための特徴点検出手法では、SIFT特徴量・AKAZE特徴量・ORB特徴量の3種類の特徴量を比較し、実験により精度を確認した。また、外れ値除去手法としてRANSACを用いた。これらを組み合わせた手法により、砂防堰堤のコンクリート面の複数枚の写真を用いた画像合成を実施した。

本章では、実際の砂防堰堤のコンクリート面において特徴点検出により点検写真が合成可能であることを確認した。特徴点抽出は、近年土木施設維持管理の現場で活用されているSfM/MVS技術による画像合成(3次元モデル作成)においても活用されていることから、点検写真の合成にSfM/MVS技術を適用することにつながった。

「第5章 SfM/MVSによる3次元モデル作成と3次元GISへの適用」における問題設定は、3次元砂防堰堤モデルと点検写真の重畳表示である。制約条件は、点検写真3次元モデル作成に利用できる機器は現地作業員が持参できる機器(小型、軽量)に限定されることである。

まず本研究において2次元から3次元へ適用範囲を拡張する「スマート調査」のシステム概要を示した。その後、3次元サーフェスモデルを作成するために、SfM/MVS処理について調査した。SfM/MVS処理により砂防堰堤3次元モデルと点検写真3次元モデルを作成し、それらを3次元GISに取り込むことで、3次元地図上に砂防堰堤(粗い画像)と点検写真(詳細な画像)を重ね合わせて表示することに成功した。その結果、現場の点検者以外の人々が現場の状況を把握することを可能とした。

さらにiPhone12Proから搭載されたLiDAR機能を用いて3次元計測を行うことが可能なiPhone LiDARアプリを用いて3次元サーフェスモデルを作成する手法を検討した。iPhone LiDARアプリで作成した3次元モデルとSfM/MVS処理を実装したソフトウェアであるMetaShapeを用いて作成した3次元モデルを比較し、点検写真として活用するための画像解像度や位置精度等を確認した。作成した3次元モデルを3次元GISソフトに取り込むための、方位および位置を合わせるための手法を検討し、実際に3次元GIS上で砂防堰堤3次元モデルと点検写真3次元モデルを重ね合わせることができていることを確認した。

「第6章 総括」では、第2章から第5章までで得られた検討結果の総括と今後の課題について述べた。

本研究の成果は、UAV・スマートフォンで撮影した写真から作成したSfMモデル、ハンドヘルドRTKローバーで撮影した写真から作成したSfMモデル、iPhone LiDARアプリで作成した3次元モデル等、様々な方法で取得した3次元サーフェスモデルを、3次元GIS内に取り込むことで、現場の点検者以外の人々に対して現場の状況を分かりやすく説明するために砂防堰堤および点検写真を3次元モデル上に可視

様式7号(第12条, 第31条関係)

(様式7号)(Format No.7) 英語版

化する手法を開発したことである。本手法を用いることで、砂防堰堤の変状位置・方向を3次元空間上で把握でき、年度毎の点検写真を重畳表示することで、時系列変化を把握可能とした。

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)  
(about 800 words)

## 学位論文要旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	砂防施設点検に対する3次元モデルとGISの活用に関する研究 (Study on Utilization of 3D Model and GIS for Sabo Dam Inspection)
氏名(Name)	YAMANO Toru

Since social infrastructure, which was intensively developed during the high economic growth period, will deteriorate all at once in the future, maintenance and management of facilities will be an issue in the future. Currently, facility inspection records are based on paperbased forms, and are not premised on automatic processing by computer. The authors have developed the "Smart Chosa" and realized a database of facility inspections and a GIS System. The Smart Chosa was able to record the location of the inspection photo on a two dimensional map, but because it was necessary to approach the deformed part when taking the inspection photo, it was not possible to grasp the position, direction, and size of the entire facility. Therefore, we applied 3D GIS to Smart Chosa for sabo dams, created a 3D model from photographs taken on site, and conducted research to manage inspection results on the 3D model.

This study summarizes the results of research on management of inspection photographs on a 3D GIS in order to improve the efficiency of management of inspection photographs of sabo facilities. This thesis consists of 6 chapters, and the main content of each chapter is as follow.

### **[Chapter 1: Introduction]**

In this chapter, the current status and issues of the maintenance and management of social infrastructure in Japan were summarized. Utilization of 3D models for maintenance and management of civil engineering facilities, high-precision positioning used for alignment of 3D models, efficient inspection of concrete structures, and existing research trends on iPhone LiDAR applications were organized. On that basis, the purpose and points of focus of this research were organized, and the structure and outline of this paper were described.

### **[Chapter 2: Comparison of 3D models and examination of application to sabo facilities maintenance management system]**

In this chapter, three types of models, a BIM/CIM model, a 3D point cloud model, and a 3D surface model, are compared and examined as 3D models to be applied to the maintenance management system. The problem setting in this chapter is the selection of a 3D model to be used in this system. The constraint is that the Sabo dams including the existing dam can be modeled in 3D. At present, there are few BIM/CIM models for sabo dams, so when applying to existing sabo dams, we believe that a 3D surface model that can be created by SfM/MVS technology from photographs

taken by UAVs will be useful. The 3D model in the research was a 3D surface model.

Knowledge about the 3D model that can be applied to the sabo facility maintenance management system and knowledge for utilizing the 3D model in the 3D GIS were obtained.

### **[Chapter 3: Performance evaluation of RTK receiver used for Sabo facility investigation support system]**

In this chapter, a survey of high-precision positioning technology necessary for positioning 3D models of sabo dams and inspection photos on a 3D GIS, and evaluation of positioning performance in sabo dams and surrounding forests are conducted. The problem setting in this chapter is whether or not location information can be acquired during surveys of Sabo facilities, and accuracy verification. The constraint is that real-time high-precision positioning is required using inexpensive and small devices in environments that are unfavorable for satellite positioning (such as sabo dams and forests).

It was confirmed that the multi-band receiver whose performance was evaluated has a horizontal variation of 22 mm (2DRMS) even in a poor environment where about 70% of the sky directly below the sabo dam is covered. It was confirmed that the method can be applied to aligning 3D models of photographs.

### **[Chapter 4: Investigation of image synthesis for creation of sabo dams inspection image]**

In this chapter, as a basic examination of 3D model creation, the image synthesis method is organized. The problem setting in this chapter is normalization and image combination necessary for synthesizing inspection photographs (2D). The constraint is that the inspection photography equipment is a smartphone for field survey. In the feature point detection method for image synthesis, we compared three types of feature amounts, SIFT feature amount, AKAZE feature amount, and ORB feature amount, and confirmed the accuracy by experiments. In addition, RANSAC was used as an outlier removal method. By combining these methods, we performed image synthesis using multiple photographs of the concrete surface of the sabo dam.

### **[Chapter 5: 3D model creation by SfM/MVS and application to 3D GIS]**

The problem setting in this chapter is a superimposed display of a 3D Sabo dam model and inspection photographs. The constraint is that the equipment that can be used to create a 3D model of inspection photographs is limited to equipment (compact and lightweight) that can be brought by local workers. In this chapter, we first present an overview of the "smart chosa" system that expands the scope of application from 2D to 3D in this research. After that, we investigated SfM/MVS processing to create a 3D surface model. By creating a 3D model of the sabo dam and a 3D model of inspection photos by SfM/MVS processing, and importing them into a 3D GIS, we succeeded in superimposing the sabo dam and inspection photos on a 3D map.

In addition, we examined a method of creating a 3D surface model using the iPhone LiDAR

application that can perform 3D measurement using the LiDAR function installed from iPhone12Pro. We compared the 3D model created with the iPhone LiDAR app and the 3D model created using MetaShape, a software that implements SfM/MVS processing, and confirmed the image resolution and positional accuracy for use as inspection photographs. In order to incorporate the created 3D model into 3D GIS software, we examined a method for matching the orientation and position, and actually superimposed the 3D model of the sabo dam and the 3D model of the inspection photograph on the 3D GIS. I have confirmed that it is possible.

#### [Chapter 6: Summary]

In this chapter, a summary of the results obtained in Chapters 2 to 5 and future issues were discussed.

The result of this research is a visualization method that makes it easy for people other than field investigators to understand the situation of the site by importing 3D surface models acquired by various methods into 3D GIS. 3D surface models include SfM models created from photos taken with a UAV/smartphone, SfM models created from photos taken with a handheld RTK rover, and 3D models created with the iPhone LiDAR app.

By using this method, it is possible to grasp the deformation position and deformation direction of the sabo dam in 3D space, and by superimposing the photographs of each inspection, it is possible to grasp the change over time.

(様式 9 号)

## 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	山野 亨
審査委員	主 査： 河村 圭
	副 査： 多田村 克己
	副 査： 田村 慶信
	副 査： 中村 秀明
	副 査： 藤田 悠介
論文題目	砂防施設点検に対する 3 次元モデルと GIS の活用に関する研究 (Study on Utilization of 3D Model and GIS for Sabo Dam Inspection)

## 【論文審査の結果及び最終試験の結果】

日本国内では、近年、高度経済成長期に集中的に整備された社会基盤施設の老朽化、また、これら施設の維持管理に関わる技術者不足や高齢化が課題となっている。これら施設の適切な維持管理には、点検が重要となるが、現在は目視点検が主であり、施設点検結果の記録は電子化が進んでいるものの記録様式は紙ベースの帳票を基本としている。例えば、ひび割れのように幅に対して長さが長い変状の場合、幅と長さを同時に把握するためには、近接写真と遠景写真を別々に撮影し、ひび割れ幅とひび割れ長さをそれぞれの写真で台帳に貼付け記録する必要がある。このような撮影方法では、1 枚の写真で幅と長さを同時に把握することはできない。このため、施設の変状を撮影した点検写真は、施設全体に対する位置・方向・大きさの把握が困難であるという課題が残されたままである。点検対象施設と点検写真を 3 次元空間上で対応づけ可能となれば、点検結果の位置関係を視覚的に確認でき、点検部位を詳細に確認できる。また、過去の点検写真を時系列で比較することで、変状の経年変化把握も容易となり、より高度な施設の健全度診断が可能となる。

このような背景から、本研究は、砂防施設の点検写真管理の効率化また高度化を目的とし、点検写真の 3 次元 GIS (地理情報システム) 上での管理手法に関する研究を行ったものである。具体的には、現地で撮影された写真から砂防施設の 3 次元モデルを作成する手法を検討するとともに、3 次元モデルを GIS (地理情報システム) に取り込む手法、さらに点検写真を 3 次元モデル上で管理するための手法を提案し、その有効性を明らかにしている。

本学位論文は、全 6 章から構成されている。第 1 章では、日本国内における社会基盤施設の維持管理の現状と課題をまとめるとともに、社会基盤施設維持管理への 3 次元モデルの活用に関する既往研究を整理し、本学位論文の目的と構成について述べている。第 2 章では、3 次元モデルとして、BIM/CIM (Building/ Construction Information Modeling) モデル、3 次元点群モデル、3 次元サーフェスモデルを比較し、砂防施設の点検写真管理への

(様式 9 号)

適用可能性について議論している。既往の砂防堰堤に適用する場合には、UAV で撮影した写真から SfM/MVS (Structure from Motion/Multi View Stereo) 技術により作成可能である 3 次元サーフェスモデルが有用であるとし、本研究における 3 次元モデルは 3 次元サーフェスモデルを採用している。第 3 章では、砂防堰堤や点検写真の 3 次元モデルを、3 次元 GIS 上に配置する際の位置合わせに必要とされる高精度測位手法について論じている。砂防堰堤は山間部に建設されていることが多く、衛星測位にとっては劣悪な環境であるが、本研究では、RTK (Real Time Kinematic) 受信機を用いた測位手法を提案し、実環境において性能評価を行い、砂防堰堤や点検写真の 3 次元モデルの位置合わせに適用可能であることを示している。第 4 章では、3 次元モデル作成の基礎的な検討として、画像合成手法について検討し、結合精度の比較を行っている。ここでは、実際の砂防堰堤コンクリート面の点検写真が、SIFT 特徴量を用いた特徴点抽出手法により合成可能であることが確認されている。なお、SIFT 特徴量による特徴点抽出は SfM/MVS 技術に活用されていることから、この結果は、本研究で提案する砂防堰堤や点検写真の 3 次元モデル作成手法に SfM/MVS 技術を採用した根拠とされている。第 5 章では、SfM/MVS 処理により砂防堰堤 3 次元モデルと点検写真 3 次元モデルを作成し、それらを 3 次元 GIS 上で重畳表示する手法を提案するとともに、位置精度を検証している。第 6 章では、本研究の総括と今後の課題について述べている。

公聴会はオンラインのみで実施され、学内外から 37 名の聴講者があった。公聴会における主な質問内容は、砂防施設を写真撮影する場合に要求される撮影条件に関するもの、3 次元モデルを GIS に取り込む際に必要とされる前処理に関するもの、解像度の異なる画像間の位置合わせ方法に関するもの、測位精度をさらに高める手法に関するものなどについてであった。いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士 (工学) の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計 3 編)

- 1) 山野 亨, 桐山 魁, 岡本 修, 猿渡 雄二, 荒木 義則, 森安 貞夫, 高田 知典, 河村 圭 : 災害調査支援システムに用いる RTK 受信機の性能評価, 土木学会論文集, Vol. 79, No. 3, F3-0127, 2023. (doi: 10.2208/jscej.F3-0127)
- 2) 山野 亨, 荒木 義則, 桐山 魁, 白 宇, 河村 圭 : 砂防堰堤点検写真管理への 3 次元モデルおよび GIS 活用に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 79, No. 22, 22-22009, 2023. (doi: 10.2208/jscej.22-22009)
- 3) Toru Yamano, Kai Kiriyama, Osamu Okamoto, and Kei Kawamura : Positioning Accuracy Comparison of RTK Receivers Used for Disaster Investigation , *Proceedings of The 17th East Asian-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 2022*, pp. 437-447, 2023.