

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：17601  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2020～2022  
課題番号：20K04666  
研究課題名（和文）地方橋梁の三次元モデルの構築と効率的・効果的な復元設計による維持管理環境の創出  
  
研究課題名（英文）Creation of maintenance management environment for regional bridges by constructing three-dimensional models and efficient and effective restoration design  
  
研究代表者  
森田 千尋（MORITA, Chihiro）  
  
宮崎大学・工学部・教授  
  
研究者番号：60230124  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究においては、まず、既設橋梁の復元設計のための基準類の変遷等の整理を行い、建設年度推定の基礎資料を作成した。学内にある解体橋梁を計測し、基礎資料をもとに建設年度を推定した。また、建設年度が異なる2橋梁に対し、同様の手順で建設年度推定を行い、数年の幅の範囲で建設年度を推定できた。三次元計測においては、デジタルカメラにより複数の方向から撮影した画像を用いたSfM技術を用いた。効率化のため、動画撮影を用いた構造物のモデル再現性の精度検証を行った。撮影距離、撮影速度などの条件を明確にし、UAVを用いた撮影による精度検証を行い、計測方法などの問題点を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
既存橋梁の安全性評価等を行う際、設計図面や設計計算書などが残されていないことが多く、その後の設計基準の変化や各種劣化の進行に伴う橋梁の安全性を評価する際に多くの困難が発生する。本研究では、特に、地方公共団体が管理する橋梁では、その影響が顕著に現れると想定されるため、復元設計のための基準類の変遷等の整理を行うとともに、橋梁全体の三次元座標を取得し、三次元解析モデルを構築することで、市町村が管理する橋梁の維持管理が効率的・効果的に行われる環境を創出した。

研究成果の概要（英文）：In this study, the basic materials for estimating the year of construction were created by sorting out changes in standards for restoration design of existing bridges. In addition, the dismantled bridges on campus were measured and the year of construction was estimated based on basic data. For the two bridges with different construction years, the same procedure was used to estimate the construction year, and the construction year was estimated within a range of several years. In the three-dimensional measurement, SfM technology using images taken from multiple directions with a digital camera was used. For efficiency, accuracy verification of the model reproducibility of the structure was verified using video recording. The conditions such as shooting distance and shooting speed were clarified, and accuracy verification by shooting using UAV was performed, and problems such as measurement methods were clarified.

研究分野：構造工学、維持管理工学

キーワード：地方公共団体 橋梁 維持管理 復元設計 健全度 SfM技術

### 1. 研究開始当初の背景

我が国には、2m以上の道路橋は全国に約72万橋存在する。その7割となる約47万橋が市町村道にあり(図1)、大部分は地方公共団体が管理するものである。そのうち、高度経済成長期以降に集中的に整備した橋梁が、今後急速に高齢化し、10年後には建設後50年経過する橋梁が半数以上になると見込まれている。しかしながら、これは建設年度が明らかな橋梁の数値であり、記録が確認できない建設年度不明橋梁が約23万橋ある。

道路構造物の老朽化は進行を続け、日本の橋梁の70%を占める市町村が管理する橋梁では、通行止めや車両重量等の通行規制が約2,560箇所及び、その箇所数はこの8年間で2.6倍と増加し続けている(図2)。さらに、橋梁の管理に携わる土木技術者の人数に関しても、町の約3割、村の約6割において橋梁の維持管理業務に携わる土木技術者が存在しないという実情である。

そこで、国土交通省は、「道路橋」、「道路トンネル」など5種類の定期点検要領を公開し、2m以上の道路橋などを5年に1回の頻度で点検することを平成26年に義務付けている。しかしながら、近接目視による点検の義務化と、その頻度などを定めた省令・告示を施行したが、予算や人材の面で苦境に立つ自治体には戸惑う声も少なくない。

これらを解決するため、地方公共団体の三つの課題(予算不足・人不足・技術力不足)に対して、橋梁の維持管理が効率的・効果的に行われる環境を創出する必要がある。しかしながら、建設年度推定のための資料が少なく、市町村でも利用できる細目構造や設計計算事例等について整理されたものはあまり見かけない。また、人材不足を補うための点検・診断・修繕まで含めた橋梁の三次元データ管理については、まだまだ不十分な状況である。そのため、橋梁を三次元データ管理し、効率的かつ効果的に復元設計できるシステムの構築は、地方においては特に意義が大きい。

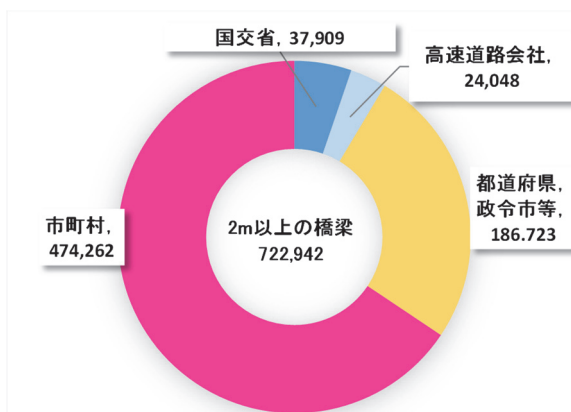


図1 全国の管理者別橋梁数

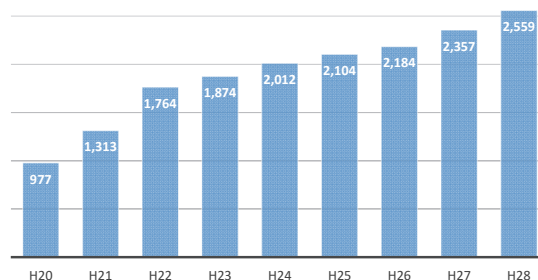


図2 通行規制等の推移(2m以上)

### 2. 研究の目的

本研究においては、まず、建設年度不明橋梁の建設年度の推定を行う。また、復元設計のための基準類の変遷等の整理を行い、建設年度推定の基礎資料を作成する。さらに、光学的計測手法を用いて、橋梁全体の三次元座標を取得し、三次元解析モデルを構築する。市町村が管理する橋梁の多くは、設計図面が保存、管理されておらず、橋梁台帳の作成も不十分であるとも指摘されており、維持管理データの蓄積に繋がる。

以上により、市町村が管理する橋梁の維持管理が効率的・効果的に行われる環境を創出するのが本研究の目的である。

既存橋梁の安全性評価等を行う際、設計図面や設計計算書などが残されていないことが多く、その後の設計基準の変化や各種劣化の進行に伴う橋梁の安全性を評価する際に多くの困難が発生する。本研究の意義は、それをなくすことであり、特に、地方公共団体が管理する橋梁では、その影響が顕著に現れると想定され、また、既存橋梁を適切に維持管理するためには、過去の技術を次世代に伝承することも極めて重要である。

今回は宮崎県および市町村管理の橋梁を対象としているが、技術力不足、財政的な問題、人材不足の問題が深刻な市町村などへの展開が期待できる。さらに開発を進めることで将来的には舗装やトンネル、斜面など拡大し道路インフラ全体の効率的・効果的な維持管理システムの他地域への展開が期待できる。

### 3. 研究の方法

3Dデータの取得方法は、画像を用いる方法とレーザーを用いる方法に大別できる。今回使用するSfM (Structure from Motion) は、このうち画像を用いた3D形状の復元技術である。これは異なる位置から撮られた複数枚の画像のオーバーラップ部を解析することにより、3Dモデルを

復元する。従来の写真計測は、異なる位置から撮られた複数枚の画像から手動で基準点を抽出し、既知座標を与えることでカメラの姿勢と位置を求めていた。また、異なるカメラや焦点距離で撮影された画像の解析は困難であった。SfMも基本原理は同様であるが、既知座標値を入力する以外、条件の異なる複数のカメラを用いた解析も可能であり、1つの画像から数百から数千点の特徴点が抽出され、画像間でマッチングされた後にその点の3D座標を特定する。ここで、特徴点とは、画像上の特徴的な点のことであり、コーナ点やテクスチャ情報を多く含む領域の中心が選ばれる。ここでは、特徴点を周囲と比較して輝度、すなわち明るさが異なる点とする。図3に示すように2枚の画像上にある特徴点PとQについて、それぞれの特徴量を特徴点を中心とする3×3の領域内の輝度 $T_P(i,j)$ ,  $T_Q(i,j)$ ,  $-1 \leq i,j \leq 1$ とすると、特徴点周辺部の明るさの特徴点間の違いの程度 $J(P,Q)$ が式(1)より算出され、その値がある判定値に収まる場合に同一点と判断する<sup>2),3)</sup>。

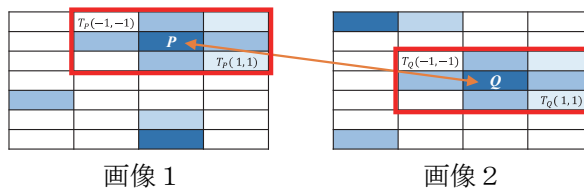


図3 特徴点の判別

$$J(P,Q) = \sum_{-1 \leq i,j \leq 1} |T_P(i,j) - T_Q(i,j)|^2 \quad (1)$$

3Dモデル構築の流れを図4に示す。特徴点と各カメラの位置・姿勢の推定値から生成された粗い点群 (Sparse point cloud) から各ピクセルの3D座標を計算し、より高密度な点群 (Dense point cloud) を得る。この点群からメッシュデータを作成し、そのメッシュデータに元画像を張り付けることによって3Dモデルが構築される。レーザースキャナーの場合、測定可能な距離の範囲は基本的に固定されているがSfMの場合、近年普及が始まったUAVを用いれば、数キロ四方程度の復元も可能である。なお、今回のSfM解析には、Agisoft社製のMetashapeを用いた。



図4 3Dモデル作成手順

#### 4. 研究成果

##### (1) 基準類の変遷等の整理と建設年度推定の基礎資料の作成

道路橋の維持管理において十分な設計図書がない場合などでは、復元設計が必要となることがある。復元設計の主な目的の一つは、容易に確認できない箇所の推定であるが、以下のような問題が生じることがある。

- ・設計年が不明で適用された基準が特定できない。
- ・基準のみでは構造細目が再現できない。
- ・許容値を満足しないなど、妥当性の低い結果が得られる。

上記のようなケースでは不確実性が排除しきれない復元設計とならざるを得ない。

そこで、鋼橋、コンクリート橋、下部構造・耐震、付属物に分け、表1のように詳細な設計条件や構造細目のディテールの変遷をまとめた。

表1 コンクリート供試体の相対誤差

種別	変遷
鋼橋	設計思想, 鋼種, 連結方式, 連結版, 垂直補剛材の取り付け方, 水平補剛材端部形状, スカーラップ, 足場用吊金具, 床版, 防食方法
コンクリート橋	材料の許容応力度, 塩害対策, プレテンションI桁, H桁, T桁, ポストテンションT桁, PC鋼材, 解析手法
下部構造・耐震	橋台構造, 橋脚構造, 支承縁端距離, 地盤反力係数, 設計震度, 落橋防止システム
付属物	高欄・防護柵, 地覆, 伸縮装置, 支承

##### (2) 写真撮影による3Dモデルの形状計測の精度検証

①まず、写真1に示すコンクリート供試体 (長方形断面, 縦400mm×横300mm) を用いて、3Dモデル化におけるラップ率や照度差の影響を確認した。撮影機器は、一眼レフデジタルカメラ (Nikon D5500, 2,400万画素) と UAV (Parrot ANAFI, 2,100万画素)



写真1 コンクリート供試体

を用いた。

まず、ラップ率を変化させて作成した3Dモデルの相対誤差を表2に示す。同表より、ラップ率が低いと特徴点を認識することができず、モデル化できない場合がある。どちらの機器においても、ラップ率が約85%以上であればモデル化することができ、相対誤差はいずれも1%以内でモデル化できることが分かった。

さらに、照度差の影響について、照度差約1,000lx、約2,000lx、約3,000lxの場合について3Dモデルを作成し、相対誤差を比較した。その結果、照度差が大きくなるほど相対誤差は大きくなる傾向があるが、いずれの場合も相対誤差1%以内でモデル化することができた。

②次に、図5に示す大学構内にある解体橋梁桁を用いて、実環境における撮影による3Dモデル化の精度を確認した。撮影機器は、UAV (Parrot ANAFI, 2,100万画素)を用いた。

作成した3Dモデルの相対誤差を図6に示す。なお、ケース1は日光が当たる時間帯(照度約3,000~38,000lx)、ケース2は日光が当たらない時間帯(照度約150~1,500lx)での撮影である。照度においては大きな差異は見られなかった。相対誤差においては、ウェブ厚で若干誤差が大きいが、それでも2%以内で計測できており、実環境下においても十分な精度で3Dモデル化できることが分かった。

### (3) 動画撮影による3Dモデルの形状計測の精度検証

3Dモデル化の効率化のため、動画撮影による3Dモデルの形状計測の精度検証を行った。撮影機器は、SONY α 6100 (画素数3,840×2,160)を用いた。まず、コンクリート供試体を用いて撮影速度の検討を行った。167mm/s~1,000mm/sの6種類の撮影速度で撮影した結果、撮影速度が遅ければ遅いほど3Dモデルの精度が良くなり、333mm/s以下であれば高い精度で計測できることが明らかとなり、撮影時間は写真撮影と比べて約1/8に短縮できた。また、撮影距離については、約500mm、1,000mm、1,500mmで行った結果、撮影距離約1,000mmでの撮影が最も良い精度であった。

これらの結果を元に、解体橋梁桁を用いて、画素数の違いによる3Dモデルの形状計測の精度検証を行った。撮影機器は、GoPro (画素数5,312×2,988)、SONY α 6100 (画素数3,840×2,160)、Panasonic HC-W870M (画素数1,920×1,080)を用いた。表3に形状の相対誤差を示す。全体的に高い精度を持って測定することができ、画素数が高くなるほど誤差は小さくなりモデルの精度は向上した。写真撮影の場合と比べると、誤差は大きくなるのがわかるが、数%程度の誤差であり、動画撮影であっても十分な精度で計測できることが分かった。

### (4) 実橋梁の建設年度推定

最後に、写真2に示す実橋梁A、Bを対象に、建設年度推定を行った。対象橋梁は、宮崎市が管理している橋長75mの橋梁B(ポステンT桁)と橋長93.4mの橋梁C(ポステンT桁)であ

表2 コンクリート供試体の相対誤差

機器	ラップ率	側面①	側面②	上面	下面	平均
デジタルカメラ	87.5%	0.27%	0.29%	0.23%	0.39%	0.29%
	80.3%	0.43%	0.58%	0.88%	0.75%	0.66%
	77.6%	×	×	×	×	×
UAV	87.5%	0.36%	0.07%	0.57%	0.03%	0.26%
	80.3%	×	×	×	×	×
	77.6%	×	×	×	×	×

×：モデル化不可

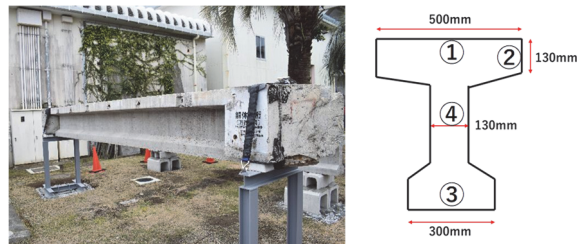


図5 解体橋梁桁の外観および断面

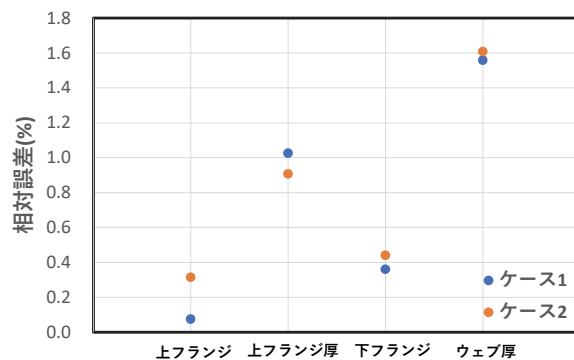


図6 解体橋梁桁の相対誤差

表3 動画を用いた解体橋梁桁の相対誤差

	GoPro	α 6100	HC-W870M
①上フランジ	0.47%	1.47%	1.00%
②上フランジ厚	2.08%	3.65%	4.69%
③下フランジ	0.99%	1.65%	2.31%
④ウェブ厚	1.01%	1.52%	2.27%
平均	1.14%	2.07%	2.57%

る。撮影条件として、橋梁と UAV 間を約 0.5m とし、照度は 500 lx~48,000 lx であった。また、撮影枚数は橋梁 B が 857 枚、橋梁 C が 697 枚であった。撮影範囲は、橋梁の一部分の横桁間とし、車の交通安全面を考慮し、撮影は橋梁の下面側と横側からの撮影のみとした。3D モデルを作成し、既設道路橋の技術基準・設計方法の変遷に関してまとめた資料と比較し、建設年度を推定した。

まず、橋梁 A は、断面形状がストレート断面ではないため、1994 年標準設計より以前ということ、中間横桁が 5 箇所あることから、1966 年 PC 道路橋設計資料を基準としていることが分かった。しかし、断面形状の寸法を 1966 年の規格と比較すると、図 7 の通り一致しないことより、1966 年より以前の規格なしの時代に建設されていると判明し、1956 年からポストテンション T 桁の導入期になっているため、橋梁の大きさと基本的な工期も含めて検討すると、1958 年から 1967 年の間であると推定した。実際に、この橋梁の建設年度は 1965 年であり、推定した期間内にあるため、おおよその年度ではあるが推定することができた。

橋梁 B は、橋梁 A と同様、断面形状がストレート断面ではないため、1994 年標準設計より以前ということ、中間横桁が 5 箇所あることから、1966 年 PC 道路橋設計資料を基準としていることが分かった。断面形状の寸法を 1966 年の規格と比較すると、図 7 の通りすべての寸法が一致することから、1966 年の規格を採用している時期に建設されていることが判明した。橋梁の大きさと基本的な工期も含めて検討すると、1968 年から 1971 年の間であると推定した。実際に、この橋梁の建設年度は 1971 年であり、推定した期間内にあるため、おおよその年度ではあるが推定することができた。



橋梁 A



橋梁 B

写真 2 対象橋梁

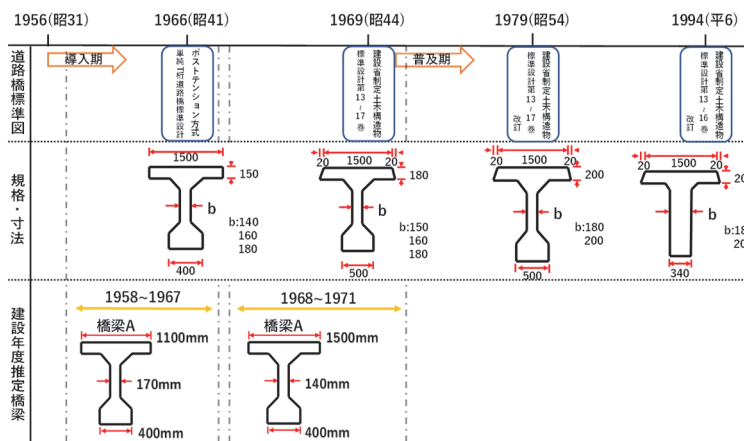


図 7 実橋梁の建設年度推定

<引用文献>

- ① 道路メンテナンス年報，国土交通省，2019.
- ② 小沼恵太郎，西村正三：多視点画像 3D モデル構築技術の橋梁調査への適用性について，土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集，VI-511，Vol.69，2014.
- ③ 本多雅匠，森田千尋，安井賢太郎，出水亨，中野敦：UAV と SfM 技術を利用したコンクリート構造物のひび割れ幅計測の道路橋への適用，実験力学，21 巻，第 3 号，232-239，2021.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 本多雅匠、塩竈柚貴、森田千尋、安井賢太郎、中丸ゆかり	4. 巻 51
2. 論文標題 中小規模橋梁の復元設計におけるSfM活用の基礎的検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 宮崎大学工学部紀要	6. 最初と最後の頁 7~14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 渡邊学歩、佐々木貴信、森田千尋、小林博之、勝呂翔平、松田伊佐雄、木下幸治	4. 巻 69A
2. 論文標題 防災・減災のための緊急仮設橋の設計および設計基準の課題	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 1258~1268
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11532/structcivil.69a.1258	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 本多雅匠、森田千尋、安井賢太郎、出水享、中野敦	4. 巻 21
2. 論文標題 UAVとSfM技術を利用したコンクリート構造物のひび割れ幅計測の道路橋への適用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 実験力学	6. 最初と最後の頁 232~239
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11395/jjsem.21.232	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 出水享、松田浩、伊藤幸広、森田千尋	4. 巻 60(2)
2. 論文標題 デジタル画像相関法を用いた橋梁の亀裂・変位・ひずみ計測に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 光技術コンタクト	6. 最初と最後の頁 32~39
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Thavone Khounsida, Takafumi Nishikawa, Shozo Nakamura, Toshihiro Okumatsu, Douangmixay Dounsuvan	4. 巻 28
2. 論文標題 Experimental and analytical study on the dynamic behavior of the deteriorated Bailey bridge	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 771 ~ 777
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計25件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 迫田鐘生、森田千尋、本多雅匠、安井賢太郎、出水享
2. 発表標題 既設道路橋の復元設計におけるSfMの利活用について
3. 学会等名 日本実験力学会2022年度年次講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小長光悠生、出水享、古賀掲維、松田浩、伊藤幸広
2. 発表標題 中小橋梁のVR点検・診断のためのSfM/MVS技術を用いた3D劣化情報取得に関する研究
3. 学会等名 日本実験力学会2022年度年次講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本多雅匠、森田千尋、安井賢太郎、出水享
2. 発表標題 UAVとSfMを活用したひび割れ幅測定に及ぼす写真ラップ率の影響
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥松俊博、熊天、田中良治、中村聖三、西川貴文
2. 発表標題 支承部に劣化がみられる既設PC橋梁の設計図書に基づく構造解析および実橋振動計測
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 迫田鐘生、本多雅匠、森田千尋、安井賢太郎、出水享
2. 発表標題 UAVとSfMを活用したひび割れ幅測定に及ぼす撮影時の外的要素の影響
3. 学会等名 令和4年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤悠祐、奥松俊博、中村聖三、西川貴文
2. 発表標題 GNSSおよびUAVを用いた橋梁維持管理のための飛行経路決定に関する検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本多雅匠、森田千尋、安井賢太郎、出水享
2. 発表標題 UAVとSfMを活用した橋梁点検におけるひび割れ幅計測手法の検討
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 中西涼太、中丸ゆかり、安井賢太郎、森田千尋、出水亨
2. 発表標題 小型ドローンとSfMを利用した構造物ひび割れ点検における写真ラップ率の影響
3. 学会等名 令和3年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川裕棋、森田千尋、松川尚史、塩竈柚貴、白井敬大
2. 発表標題 SfMを用いた構造物の3次元モデル化について
3. 学会等名 「歴史的構造物の非破壊検査」ミニシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木航作、大山智也、伊勢田幹太、山口浩平、松田浩、出水亨
2. 発表標題 復元設計に着目した3D計測の利活用について
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本多雅匠、森田千尋、安井賢太郎、出水亨
2. 発表標題 UAVを利用した橋梁点検におけるSfMによるひび割れ幅計測手法の検討
3. 学会等名 令和2年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松田 浩 (MATSUDA Hiroshi) (20157324)	長崎大学・工学研究科・教授  (17301)	
研究分担者	奥松 俊博 (OKUMATSU Toshihiro) (30346928)	長崎大学・工学研究科・准教授  (17301)	
研究分担者	安井 賢太郎 (YASUI Kentaro) (70897701)	鹿児島工業高等専門学校・都市環境デザイン工学科・准教授  (57701)	
研究分担者	出水 享 (DEMIZU Akira) (00533308)	長崎大学・工学研究科・技術職員  (17301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------