

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04556

研究課題名（和文）3次元データを用いたインフラ構造物の革新的点検・診断システムの開発

研究課題名（英文）Development of innovative maintenance system of infrastructure using 3D technology

研究代表者

出水 享（Demizu, Akira）

長崎大学・工学研究科・技術職員

研究者番号：00533308

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）：本研究ではデジタル画像からSfM（Structure from Motion）により構築した3Dモデルを活用したインフラ構造物の新しい維持管理技術の開発を行った。具体的には、小型デジタルカメラ、LEDライト、伸縮棒などを組み合わせたインフラ構造物の寸法や損傷を合理的かつ高精度に記録する装置の開発を行った。実橋梁や試験体を用いた検証実験では、(1)ひび割れの進展を評価できた、(2)寸法精度が手計測とほぼ同等レベルだと確認できた、(3)幅0.1mmのひび割れが評価できた、(4)断面欠損が評価できた、(5)水中にある消波ブロックの3Dモデル化に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発装置はインフラ構造物を3D記録できることから形だけでなく変状を正確に記録することができる。そのため時期が異なるデータを比較することで劣化の進行を正確に評価することができる。結果としてインフラ構造物の余寿命推定の予測精度を向上できる。このことから、インフラ構造物の維持管理研究の先導的となるため学術的意義の高い研究として位置づけられる。開発技術は、橋、ダム、トンネルなど多くのインフラ構造物への適用だけでなく、歴史的構造物においても適用可能となる他、日本と同様な課題に向き合うヨーロッパ、アメリカなどの諸外国への技術展開できることから社会的意義の高い研究として位置づけられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed a new maintenance technology for infrastructure structures using 3D models constructed from digital images by SfM (Structure from Motion). Specifically, we have developed a device that records the dimensions and damage of infrastructure structures that combine small digital cameras, LED lights, telescopic rods, etc. with reasonable and high accuracy. In the verification experiment using the actual bridge and the test piece, (1) the progress of cracks could be evaluated, (2) the dimensional accuracy was confirmed to be almost the same level as the manual measurement, (3) the cracks with a width of 0.1 mm could be evaluated, and (4) the cross section. We were able to evaluate the defect. (5) We succeeded in 3D modeling of the wave-dissipating block in the water.

研究分野：維持管理工学

キーワード：維持管理 点検 検査 橋梁 デジタル画像 デジタルカメラ 画像 老朽化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我国では、高度経済成長期に建設されたインフラ構造物の高齢化・老朽化が進む中で、2012年の笹子トンネルの天井板の崩落事故のような重大事故が起きた。このような重大事故を起こさないために、全国各地で急ピッチに点検が進められている。しかし、今だに点検方法がアナログ方式で効率的・効果的な維持管理が実施されていない。点検は点検員が構造物に近接して高さ、幅、長さなどの寸法の計測やひび割れや鉄筋露出などの変状を記録する方法が行われている。記録方法は、点検しながら記録用紙に寸法や変状を鉛筆などでスケッチする方法が一般的である。そのため、点検員の技量により、点検結果にバラツキがあることや点検漏れ、スケッチ漏れ、正確にスケッチできないなどが問題となっている。さらに曲がったひび割れの長さをメジャーで正確に計測することができないことから、定期点検でその変化を評価することができていない。点検後は、事務所で記録用紙を見ながら2次元CADで書き換えられ点検データが完成する。2次元で記録するため曲率がある構造物、複雑な形をした構造物、部材が多い構造物、大規模構造物に関しては評価が難しい。また、道路管理者は人手不足で現場を見る機会が少なくなっていることも評価を難しくする原因の一つである。このようなことから、道路管理者は正確性に欠けた点検データを元に維持管理計画を立てていることになる。

2. 研究の目的

研究ではデジタル画像から SfM により作成した3Dモデルを活用したインフラ構造物の新しい維持管理技術の開発を目的としている。研究で開発する技術はデジタル画像を用いるため構造物に近接することなく変状を記録することができる。そのため、高所など危険で簡単に近づくことができない構造物の調査を安全に実施できる。また、構造物を3Dで記録するため形状だけでなくひび割れなどの変状の位置や大きさ(長さ、量)を正確に記録できる。そのため、従来の2次元CADでの記録と比較して合理的かつ効果的に現状を記録できる。また、時期の異なる3Dモデルを比較・解析することで劣化の進行具合を三次元で把握することができる。

3. 研究の方法

研究で用いた SfM とは Structure from Motion の略称で、デジタルカメラで撮影した複数枚のデジタル画像から対象の3Dモデルを作成する技術で形状や色など対象物を詳細に再現することができる。3Dモデルの精度は撮影に使用したデジタルカメラの性能(画素数、ISO感度など)や撮影条件(照度、撮影速度、撮影距離、画像ラップ率など)に影響する。本研究で用いたデジタルカメラは GOPROHERO9 である。

(1) 視認性・寸法精度の検討

基礎的研究として、撮影時の照度、撮影速度、撮影距離、画像ラップ率が視認性に与える影響について検討を行い、最適な撮影条件を選定した。検討には、ひび割れが発生している小規模のコンクリート構造物を用いた。構造物をデジタルカメラで撮影したデジタル画像やデジタル画像から SfM で作成した3Dモデルを用いた。そして、選定した撮影条件で作成した3Dモデルの形状寸法やひび割れ長さを実測と比較して精度を検討した。形状計測はコンベックス、ひび割れ長さの計測はペンタイプマップメータを用いた。なお、ペンタイプマップメータは、ひび割れ上をなぞることで長さが計測できる装置である。

(2) ひび割れ進展の評価

3Dモデルでひび割れ進展が評価できるかを検討した。検討には、コンクリート製の円柱試験体(直径100mm、高さ200mm)を用い、デジタルカメラで撮影したデジタル画像から SfM で3Dモデルを作成した。検討は、試験体のひび割れを段階的に変化させて、段階ごとに実測、3D計測を行った。そして、実測値と3Dモデルから読み取った計測値を比較した。ひび割れ長さの計測はペンタイプマップメータを用いた。

(3) 鋼部材への適用

鋼部材への適用性について検討を行った。検討にはH形鋼と鋼橋(実橋梁)を用い、デジタルカメラで撮影したデジタル画像から SfM で3Dモデルを作成した。H形鋼では、3Dモデルの形状寸法精度の検討を行った。鋼橋では、3Dモデルの形状寸法精度、変状の視認性の検討を行った。形状計測はコンベックスとノギスを用いた。

(4) 撮影装置の開発とコンクリート部材への適用

コンクリート橋を効率的に計測可能なデジタルカメラを用いた撮影装置の開発を行うとともに開発装置のコンクリート橋への適用性について検討を行った。開発装置で撮影したデジタル画像から SfM で3Dモデルを作成し、形状寸法精度、ひび割れの視認性、ひび割れ長さの精度の検討を行った。形状計測はコンベックス、ひび割れ長さ計測はペンタイプマップメータを用いた。また、作成したコンクリート橋の3Dモデルから FEM モデルを作成して固有振動解析

を行った。そして、固有振動解析で算出した振動数を評価するため遠隔・非接触な振動計測が可能なレーザードップラー速度計を用いて振動数を計測し解析値と比較した。

(5) 線状部材への適用

吊橋のハンガーケーブルや斜張橋のケーブルなどに代表されるストランドやパイプ、ロッドなどの線状部材の外観点検するための装置の開発を行った。開発装置の適用性を検討するため模擬試験体を用いて撮影したデジタル画像から SfM で 3D モデルを作成した。そして、視認性の確認や変状の評価を行った。

(6) 水中構造物への適用

水中構造物の維持管理の適用可能性を検討した。検討には、デジタルカメラが搭載した水中ドローンを用いて漁港内の消波ブロック、防波堤、船の係留用の常設アンカーの撮影を行った。そして、撮影したデジタル画像から SfM による 3D モデル化の可否について検討した。

4. 研究成果

(1) 視認性・寸法精度の検討

照度の検討は、パターン 1 (10lx)、パターン 2 (700lx)、パターン 3 (29000lx) で行った。なお、撮影速度は 20cm/sec、撮影距離は 50cm で統一し、撮影写真で視認性を検討した。撮影速度の検討は、パターン 1 (60cm/sec)、パターン 2 (40cm/sec)、パターン 3 (20cm/sec) で行った。なお、照度は 700lx、撮影距離は 50cm で統一し、撮影写真で視認性を検討した。撮影距離の検討はパターン 1 (100cm、写真 1)、パターン 2 (50cm、写真 2) で行った。なお、照度は 18000lx、

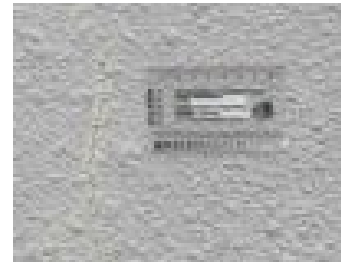


写真 1 撮影距離 100 cm

撮影速度は 20cm/sec で統一し、撮影写真で視認性を検討した。画像ラップ率の検討はパターン 1 (30%)、パターン 2 (60%)、パターン 3 (90%) で行った。なお、照度は 18000lx、撮影速度は 20cm/sec、撮影距離は 50cm で統一し、3D モデルで視認性を検討した。結果から、照度 700lx 以上、撮影速度 20cm/sec 以下、撮影距離 50cm 以内、画像ラップ率 60% 以上の撮影条件が最適であることが確認された。



写真 2 撮影距離 50 cm

最適条件下で対象物の 3D 計測を行い、形状やひび割れ長さの寸法精度の検討を行った。形状寸法の検討箇所は、高さ (1580mm)、屋根の厚さ (152mm)、屋根の出幅 (87mm)、ひび割れ長さ (268mm) とした。結果として、寸法の誤差は、高さ 7mm、屋根の厚さ 3mm、屋根の出幅 3mm、ひび割れ 4mm だった。

(2) ひび割れ進展の評価

ひび割れ進展の評価は、段階的にひび割れを計測することで行った。対象としたひび割れは、図 1 に示す ~ の 3 箇所とした。計測は、段階 1 として約 30mm、段階 2 として約 10mm 延長した約 40mm、段階 3 としてさらに約 10mm 延長した約 50mm で行った。なお、ひび割れは、幅 0.2mm の鉛筆で試験体表面に描いた。そして、各段階で実測と 3D 計測を行い、寸法精度の検討を行った。結果として、ひび割れ長さの誤差は、ひび割れは、段階 1 で 0.27mm、段階 2 で 2.02mm、段階 3 で 2.50mm、ひび割れは、段階 1 で 0.02mm、段階 2 で 1.27mm、段階 3 で 2.16mm、ひび割れは、段階 1 で 0.39mm、段階 2 で 0.16mm、段階 3 で 0.97mm だった。よって、3D 計測でひび割れの進展を高精度に計測できることが確認できた。

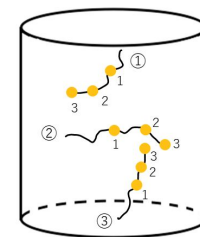


図 1 円柱試験体

(3) 鋼部材への適用

使用した H 形鋼を図 2 に示す。検討は上フランジ (8mm)、ウェブ (6mm)、下フランジ (8mm) で行った。結果として、計測値の誤差は上フランジ 0.17mm、ウェブ 0.04mm、下フランジ 0.06mm と高精度な計測ができた。

実橋で使用した鋼橋は、1975 年に架設され、橋長 3.6m、幅員 1.7m である。今回は、コンクリート床版と鋼主桁に着目して 3D 計測を行った。橋梁が小規模であるため 1 台のデジタルカメラを用いて撮影を行った。撮影は動画で行った。撮影速

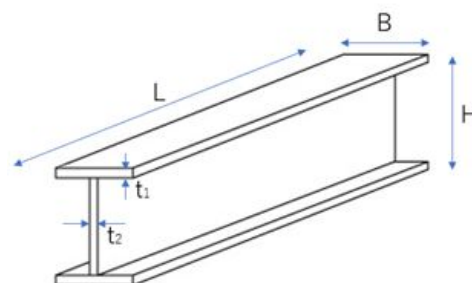


図 2 H 形鋼

度は 20～30cm/sec、撮影距離は 50cm、照度は約 800lx とし、対象物と正対撮影を行った。撮影時間は約 5 分だった。撮影した動画からラップ率が約 60～70%になるように切り出した約 300 枚の画像から SfM で 3Dモデル(図3)を作成した。そして、3Dモデルと実測した寸法と近接目視点検の結果を比較した。点検結果は、変状の種類や位置を比較した。3Dモデルではコンクリート床版のひび割れ、剥離、鉄筋露出(図4)、主桁の腐食(図5)が確認できた。これらの変状は近接点検においても同様に確認することができた。しかし、近接点検で確認できた浮きに関しては3Dモデルで確認することができなかった。寸法精度の検討は主桁下フランジ厚(8.6mm)・長さ(134.8mm)、ウェブ長さ(78.8mm)で行った。結果として誤差は、主桁下フランジ厚 0.5mm・長さ 3.7mm、ウェブ長さ 4.3mm となった。以上から実橋において3Dモデルで変状の確認や寸法計測が可能なが確認できた。



図3 鋼橋の3Dモデル



図4 鉄筋露出

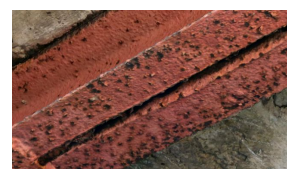


図5 腐食

(4) 装置開発とコンクリート部材への適用

開発した撮影装置を図6に示す。装置は3台の小型のデジタルカメラと伸縮ポール、LEDライトから構成されており、それぞれのカメラを正面方向0°、斜め方向45°、鉛直方向90°でポールの先端に取り付けた。なお、カメラ同士の画像のラップ率を約50%となるように配置している。伸縮ポールを用いることで構造物に近接・正対して撮影することができるので視認性が高くなる。なお、ポールは約1.6m～8mと長さを自由に調整可能である。つまり、桁下8mの橋梁までこの装置が適用となる。ポールの材質はカーボン素材を用いたため重さも約1kgと軽量で持ち運びが簡単である。桁下は照度が低いため、ライトを取り付けることで、明るく鮮明に撮影をすることができる。なお、用いたライトはLEDのリングライトであるため軽量で明るさにムラがない。開発装置はコ



図6 撮影装置

ンクリート橋の主桁の側面から床版下面を一度に撮影することが可能である。またそれぞれのカメラのラップ率が一定なため高精度な3Dモデルが製作できる。

開発した装置を用いてコンクリート橋を適用した。対象となるコンクリート橋は、鉄筋コンクリート橋で1960年に架設され、橋長8.9m、幅員7.5mである。撮影方法としてはラップ率を約60～70%になるように写真を撮影した。撮影速度は20～30cm/sec、撮影距離は50cm、照度は約800lxとし、対象物と正対撮影を行った。撮影はタイムラプス撮影により1秒間隔で撮影を行った。なお、撮影時間は15分だった。3台のカメラで撮影した合計約5000枚の画像を用いて3Dモデルを作成した。そして3Dモデルと実測した寸法と近接目視点検の結果を比較した。点検結果は、変状の種類や位置、ひび割れの長さを比較した。

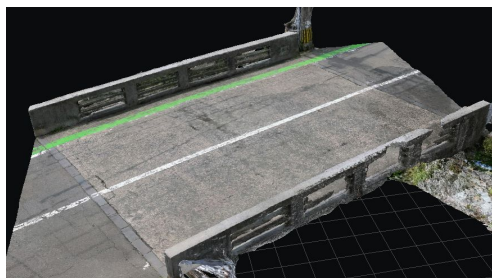


図7 コンクリート橋の3Dモデル(上部)



図8 コンクリート橋の3Dモデル(下部)

作成した3Dモデルを図7、8にそれぞれ示す。3Dモデルではひび割れ(図9)、鉄筋露出(図10)、剥離(図11)、漏水(図12)が確認できた。これらの変状は近接点検においても同様に確認することができた。ただ、近接点検で確認できた浮きに関しては3Dモデルで確認することはできなかった。寸法精度の検討箇所は、幅員(7,000mm)、主桁の高さ(500mm)・厚さ(295mm)、横桁の高さ(450mm)・長さ(1,440mm)とした。また、ひび割れ(213mm)、ひび割れ(320mm)、ひび割れ(185mm)の3箇所の長さも計測した。結果として、寸法精度の誤差は、幅員4mm、主桁の高さ1mm・厚さ1mm、横桁の高さ4mm、

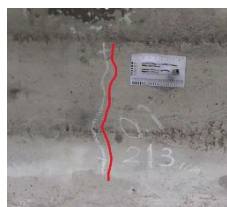


図9 ひび割れ



図10 鉄筋露出

長さ 2mm、となった。また、ひび割れ長さの誤差は、ひび割れ 1mm、ひび割れ 3mm、ひび割れ 3mm となった。

FEM モデルは、3Dモデルから断面図を作成し、その断面を橋軸方向に押し出すことによってソリッドモデルを作成した。ソリッドモデルを汎用 FEM 解析ソフトに読み込ませて、メッシュ分割や材料特性や境界条件を設定し、固有振動解析を行った。解析モデルは、単一材料であると仮定し材料特性は単位体積重量:2,400kg/m³、静弾性係数:31,000N/mm²、ポアソン比:0.2 と設定した。また境界条件は、一端をピン支点、他端をローラー支点と設定した。レーザードップラー速度計で一次の振動数が明確に得られなかったため、2次の固有振動数の比較を行った。解析値が 23.4Hz で計測値が 18.6Hz となった。

計測値と解析値を比較すると、約 20%の差があった。その原因としては、材料定数を一般的な値を使用したことや対象橋梁が架設後約 60 年を経過しており、変状による剛性の評価が行えていないことが考えられる。



図 11 剥離



図 12 漏水

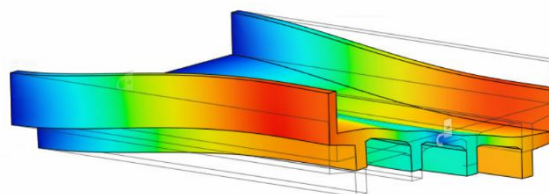


図 13 解析結果 (2次モード)

(5) 線状部材への適用

開発した線状部材の外観を撮影する装置は、写真 3 示す、装置の上下に配置したガイドローラーによって装置本体を線状部材に沿って可動させるものである。装置内部には、画角 120°のデジタルカメラを 4 台、LED 照明を 8 個設置した。撮影装置を用いて、直径 43mm、長さ 440mm の鋼製のパイプを撮影し、3Dモデルを作成した結果を写真 3 に示す。パイプは全面が激しく腐食しており、一部孔食も見られる。3Dモデルは、形状・色の再現性も高く、直径 2mm 程度の孔食も確認することができた。単管パイプにドリルで直径 15mm の孔を削孔し、孔の内側にアルミテープを貼り、本装置を用いて撮影を行った。作成した 3Dモデルは、孔を高精度に評価ができた。

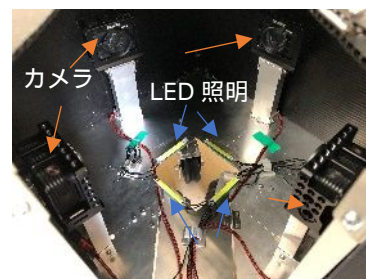


写真 3 開発装置

(6) 水中構造物への適用

水中ドローンを用いて水深 1m ~ 4m で撮影したデジタル画像で作成した消波ブロックの 3Dモデルを図 14 に示す。図から消波ブロックのモデルが鮮明に作成できることが確認できる。また、防波堤においても同様にモデル化に成功した。水深 6m にある常設アンカーの 3Dモデル化は失敗となった。失敗の原因としては、撮影時に撮影対象と水中ドローンの距離が離れており、ライトが適切に当たっていなかったこと、海底付近の水が濁っていたことから鮮明に撮影できなかったことも原因だと考えられる。

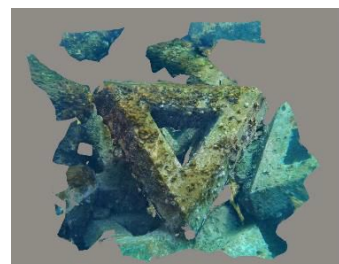


図 14 波消ブロックの 3D

本研究で開発した技術は、鋼部材やコンクリート部材の形や変状を高精度で 3D記録できることからインフラ構造物の維持管理分野の先導的な研究として位置付けられる。開発技術は、橋だけでなくダム、トンネルなど多くのインフラ構造物への適用だけでなく、歴史的構造物においても適用可能となる他、国外においても技術展開が可能となる。そのため世界中のインフラ構造物の持続可能な社会の実現に向けて貢献できる。今後は、多種多様な構造物に適用を拡大するとともに計測時間の短縮、や更なる計測精度の向上に向けて装置の改良を進める。そして、実用化に向けて実務者による試計測を行うとともに試計測で得られた問題点を改善していく。さらに、AI を組み合わせた革新的な維持管理技術の開発に発展させていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

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 出水享、松田 浩、伊藤幸広	4. 巻 4
2. 論文標題 デジタルカメラを用いた鋼材の革新的亀裂検査法の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 建設機械	6. 最初と最後の頁 37-42
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 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) なし	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 市川 辰旺、宮濱 晃一、佐々木 謙二、出水 享、古賀 掲維、島崎 航平、石井抱	4. 巻 21
2. 論文標題 たわみ影響線及びたわみ曲線の変化率を利用した橋梁劣化箇所同定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 実験力学	6. 最初と最後の頁 97-103
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 木本啓介, 西村正三, 松田浩, 出水亨	4. 巻 59
2. 論文標題 軍艦島3Dプロジェクト~3D 計測技術を活用した文化財の記録	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 1, 5
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 該当する

1. 著者名 出水亨, 松田浩, 伊藤幸広	4. 巻 57
2. 論文標題 デジタルカメラを用いた鋼材の革新的亀裂検査法の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 建設機械	6. 最初と最後の頁 37, 42
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 伊勢田幹太, 出水亨, 松田浩, 古賀揚維, 山口浩平, 市川辰旺	4. 巻 50
2. 論文標題 仮設足場を用いない光学的計測法による橋梁点検に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 長崎大学大学院工学研究科研究報告	6. 最初と最後の頁 77, 80
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 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

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、出水享
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 伊勢田幹太，出水享，松田浩，古賀掲維，山口浩平
2. 発表標題 3D 計測を用いた橋梁点検に関する研究
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020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	森田 千尋 (Morita Chihiro) (60230124)	宮崎大学・工学部・教授 (17601)	
研究分担者	伊藤 幸広 (Ito Yukihiro) (90223198)	佐賀大学・理工学部・教授 (17201)	
研究分担者	松田 浩 (Matsuda Hiroshi) (20157324)	長崎大学・工学研究科・教授 (17301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	山口 浩平 (Yamaguchi Kohei) (60336013)	長崎大学・工学研究科・准教授 (17301)	
研究分担者	才本 明秀 (Saimoto Akihide) (00253633)	長崎大学・工学研究科・教授 (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