

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：10106  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2018～2020  
課題番号：18K04317  
研究課題名(和文) 高密度画像計測データの構造解析モデルへの直接的変換—鋼構造への粒子法の適用

研究課題名(英文) Direct transform from dense point cloud data to finite element model for structural analysis

研究代表者  
宮森 保紀 (Miyamori, Yasunori)  
北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00363383  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、デジタルカメラで撮影した画像から、鋼構造部材の板厚変化も検出できる程度の高密度点群モデルを構築し、さらに構造解析可能なFEMモデルに変換することで、既存構造物の保有性能を定量的に把握する手法を開発することを目的としている。構造物を撮影した多数の写真から、SfMにより点群モデルを作成し、点群データからFEM解析可能なソリッドモデルを作成して応力解析を行う。具体的には、点群モデルの部材の軸方向について任意の間隔で断面を設定し、断面ごとに二次元デローニー分割を行い、断面間で近傍の節点を接続することで3次元要素を生成する。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
老朽化が深刻化する橋梁などの社会インフラの長寿命化を効率的に実現するためには、経年変化した構造物の実際の性能を精度よく定量的に評価することが必要である。現在は技術者の目視点検結果に基づき、外観から4段階で評価することが基本となっているが、これを実際に内部で発生している応力値で簡単に評価することができれば、補修や架け替えが真に執拗な構造物を効率よく発見できる。本研究では、デジタルカメラで撮影した多数の画像から、構造物の変形やひび割れ、腐食による板厚減少が分かる3次元モデルを構築し、さらに応力解析が可能なFEMモデルに変換する手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：We developed a method for quantitatively evaluating the structural performance of existing civil infrastructures. We firstly constructed a dense point cloud model from images taken with a digital camera, which is so dense that even thickness changes of steel structural members can be detected. And then the dense point cloud model was converted into a FEM model that can be used for structural analysis. From a large number of digital images, a point cloud model is created using SfM, and solid elements for FEM analysis were created and stress analysis is performed.  
In the feasible study, laboratory-scale specimens and large actual scale structures were chosen. Steel members of experimental structures could be modeled in 2% error. In FE structural analysis, the distribution of stress was reproduced following the compatible FE model established by the common method.

研究分野：橋梁工学、構造工学

キーワード：点群モデル FEMモデル変換 線形静的解析 SfM

### 1. 研究開始当初の背景

近年の構造解析プログラムの高機能化やコンピュータの処理速度向上により「実橋梁を完全に数値モデル化できれば、保有耐力や健全度評価が正確に可能となり、余寿命も評価できるようになる。」というストーリーが一定の現実味を帯びて語られるようになってきた。しかしながら「モデル化は着目すべき現象を不足なく表現できる範囲で、できるだけ単純に表現すべきだ」というこれまでの原則も揺るぎないように思われる。実構造物を完全にモデル化できるのか、モデル化すると何が分かるのかが、本研究課題の学術的な「問い」であった。

一方、実務的には既存橋梁の自然災害による被災や、経年劣化による変状が生じた場合に、通行止め可否、対応の緊急性などの判断が求められる。現状では、設計時に用いるような FEM (有限要素法) モデルを構築する間もなく、構造力学の梁として計算し判断を行っていることが多い。今後の老朽化の進展や維持管理費の不足を考慮すれば、より精度の高い判断により最小限の対応を可能にする枠組みが求められる。

現在の技術開発の動向は、内閣府の「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)ーインフラ維持管理・更新・マネジメント技術」など、産官学でロボット技術や画像処理技術などをインフラのマネジメントに実装しようとするものである。これらの取り組みでは、既存の目視点検に新技術を導入することで、データの客観化や業務の効率化に資することが期待できるが、供用下での部材内部の応力状態や劣化の進行を定量的に把握するには至っておらず、現状の構造解析技術や技術者の判断を本質的に変革するものではない。

しかしながら、ドローンなどのロボット技術と画像処理技術を組み合わせることで、構造物の形状の情報を、高密度かつ比較的安価に取得できるようになりつつあることは事実である。単なる点検記録や損傷図の電子化、3次元情報化にとどまらず、構造物の完全なモデル化に向けた一歩として、完全な構造物の形状情報を取得できる環境は整いつつある。

### 2. 研究の目的

本研究では、ドローンによる橋梁の高密度画像計測を前提に、点群データから構造解析モデルを構築し、既存構造物の保有性能評価を定量的に可能にする方法を開発する。

近年の技術開発の焦点は図-1の実線矢印のループのうち、点群データの構築までであり、構造解析による定量的な性能評価には至っていない。本研究では、点群データや3次元形状データから構造解析モデルを構築する方法を開発する。現状でも CAD ソフトで書き出した形状データを FEM ソフトで読み込み、シェル要素などに変換することはソフトの機能としては可能だが、メッシュの凹凸や不十分な寸法精度により、構造解析に耐え得るモデルとはならない。本研究では精度の高い画像計測手法を確立した上で、点群や3次元形状データの間引き方を検討し、従来と同様のシェルもしくはソリッドによるモデル構築手法を開発する。一方、この方法では、点群データから3次元形状データへの変換が冗長となる。そこで、点群データから直接構造解析モデルを構築するため粒子法を適用することについても検討する。

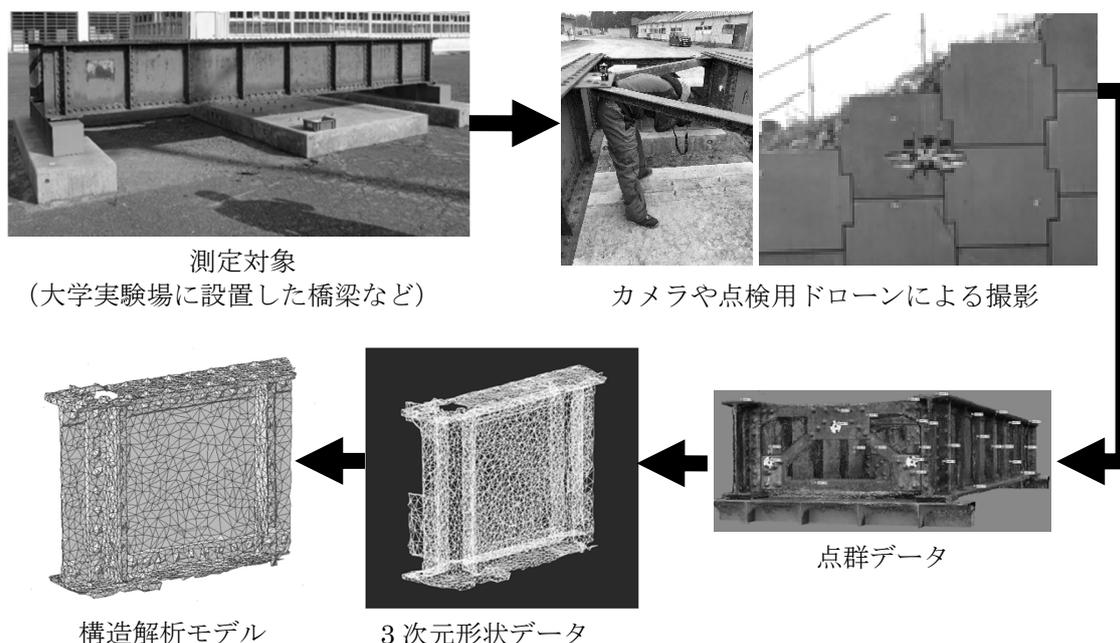


図-1 本研究の流れ

### 3. 研究の方法

#### (1) 平成 30 年度

本研究に先行して行った研究で、画像から構造物の形状モデルを構築する際には、画像の重なり（オーバーラップ）とともに、鉛直方向以外の複数角度で撮影した画像を組み合わせれば、精度が向上する可能性が示された。平成 30 年度はこの知見を踏まえて検討を行った。

まず、構造解析モデルとして十分な精度を有する点群モデル構築のための撮影実験を行った。撮影実験では計測精度の目標を 1.0mm 以下とし鉄筋や鋼桁の桁端部を対象とした実験を行った。具体的には、直径 D16、全長約 700mm の異形鉄筋 SD345 を 3 本用意し、150mm 間隔で標点を設け、それぞれに万能試験機で 3mm、6mm、9mm の塑性変形を与えた。引張試験の前後でデジタルカメラにより撮影し、点群処理ソフトウェア PhotoScan で点群モデルを作成し、点群上で塑性変形を計測しその精度を検討した。

さらに、点群モデルから FEM モデルを構築するための実験供試体として、小橋梁の桁端部を模した図-2 のような実験供試体を製作した。これは SS400 材相当の鋼材からなる I 形鋼を用いた鋼鉄道橋の主桁を 750mm に切断し、SM400A 材の垂直補剛材とソールプレートとを溶接して製作したものである。このモデルについてもデジタル写真から高密度点群モデルを作成した。カメラと供試体の距離を 600~630mm に保ちながら、60%以上のオーバーラップ率で供試体の全周から撮影した。画像は約 391 枚撮影して、このうち 389 枚を用いて点群モデルを作成した。FEM モデルへの変換に際しては、点群モデルの点群数や分布は通常の FEM モデルの節点数と比較して膨大で、またその分布は表面のみである。このため、点群モデルから FEM モデルへの変換は、点群をどのように FEM モデルの節点として取捨選択して移行するかが問題となる。しかし、このような方法は確立されていないため、PhotoScan で作成した点群データを複数のソフトウェアを介して、FEM モデルに変換することとした。具体的には供試体の代表的な断面について、断面の輪郭を点群モデルから抽出し、これを供試体の軸方向に「押し出し」、FEM のソリッドモデルを構築した。構築されたモデルの一例は図-3 のようである。

なお、点群データから構造解析モデルの変換について、粒子法による構造解析モデルの構築の検討と、3次元デローニー分割を用いて点群モデルを FEM モデルへ一括して変換する手法についても検討を行った。

#### (2) 令和元年度（平成 31 年度）

デジタル画像からの点群モデルの構築については、実構造物での検証を行うため、大学実験場に設置した図-1 左上の鉄道橋を対象として撮影と点群モデルの構築を行った。また、後述する構造解析モデル構築のため、実験室に設置した長さ 2m の T 形の鋼製梁（図-4）についても撮影実験を行った。

構造解析モデルについては、前年度は構造部材の代表断面を抽出して部材軸方向に押し出す

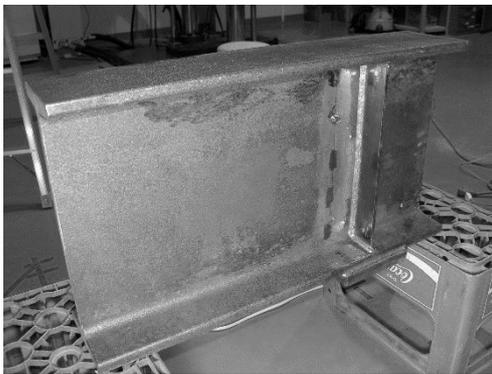


図-2 桁端供試体

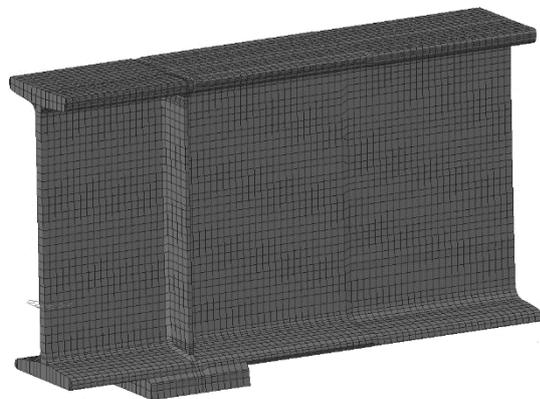


図-3 桁端点群 FEM モデル（押し出し）

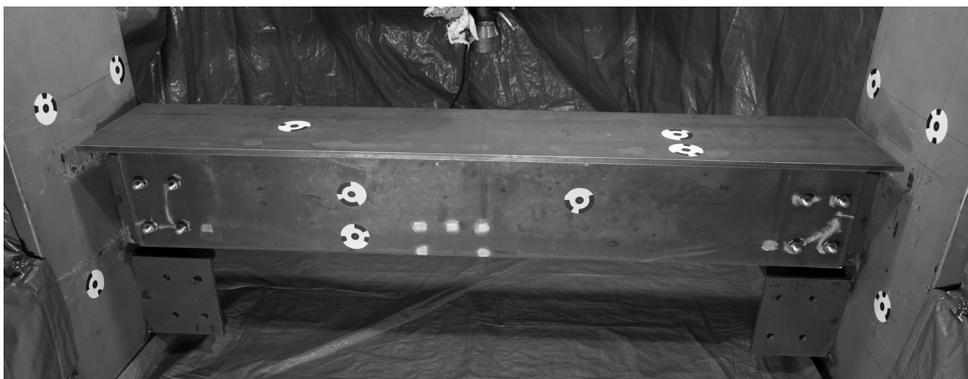


図-4 対象供試体

方法でモデルを構築していたが、軸方向の形状変化を反映することができず、また変換作業に膨大な手作業を要することが課題であった。また、点群データをFEMモデルへ一括して自動変換する手法として、3次元デローニー分割を用いる方法では、対象物の凹部にも要素が作成されてしまう課題があった。このため、点群モデルから自動的にFEMデータに変換する方法について検討した。具体的には上述のT形梁について、鋼構造部材の部分的な腐食を想定し、部材の一部を2段階で減肉させて写真撮影を行った。次に写真から構築した点群モデルの座標データを3次元格子の中で平均化しFEMの節点へ変換した。さらに断面ごとに行った2次元デローニー分割と隣接断面との間での近傍点探索を組み合わせてFEMのソリッド要素を作成した。このように構築したFEMモデルに対して、従来手法で作成したFEMモデルと、静的載荷実験の結果から本手法の適用性や課題について検討した。

### (3) 令和2年度

デジタル画像からの点群モデルの構築技術については、より大型の土木構造物への適用を想定し、大学実験場に建設されたコンクリート擁壁(図-5)を対象に構造物点検用ドローンを用いた撮影実験を行った。撮影画像から構築された点群モデルに対して、壁の変状やひび割れの検出が可能か検討した。

構造解析モデルについては、前年度は軸方向に一樣な断面形状のT型梁モデルで自動処理を行ったが、実際の橋梁では上下フランジや補剛材など、より複雑な形状を自動処理する必要がある。そこで、平成30年度に対象とした橋梁主桁の桁端部を模した供試体を対象として、自動変換手法を改良した。具体的には、3次元点群モデルからFEMモデルへの変換において、ソリッド要素のメッシュサイズを断面により可変にして、断面形状が変化する箇所でもより詳細なモデルを作成できるようにした。この方法について、従来のように部材寸法から作成したFEMモデルと同じ解析条件で線形静的解析を行った。

## 4. 研究成果

引張試験前後の鉄筋を撮影して点群モデルを構築して塑性変形の計測を行った。結果は図-6の通りであり、ノギス測定との誤差は最大1.5mmで標点間距離の1%程度となった。これより、点群モデル上での計測でも一定の精度は確保でき、目視による構造物の点検を補完・代替できる可能性があることが分かった。

点群モデルからFEMモデルに変換した桁端部モデルの構造解析結果については、部材寸法からFEMモデルを構築する従来の方法と比べ、応力の分布はおおむね一致しており、画像計測により実構造物の応力状態を把握できる可能性は確認できた。一方、工程が煩雑でありながら、代表断面を押し出してモデル全体を構築しているため、代表断面の中間にある形状の変化を反映することができず、局所的な損傷をモデルに反映できないことが課題となった。なお、当初計画した粒子法による構造解析モデルの構築を検討したが、橋梁のような比較的複雑な形状の弾性体を解析することは困難であった。また、画像解析から得られる点群データは表面や端部に点が集中するため、部材内部にも一定の密度で粒子を分布させることが必要であるが、これについてはFEMでも同様の工夫が必要となるため、本研究では、大規模な解析が可能な商用ソフトウェアへの適用を想定してFEMを対象として検討を進めることとした。また、3次元点群モデルを一括して構造解析モデルに変換するため、3次元デローニー分割を用いる方法を矩形上の鋼板について予備的な検討したが、表面に偽の要素が生成されるなどの課題が明らかになった。

### (2) 令和元年度(平成31年度)

大学実験場に設置した鉄道橋を対象として構築した点群モデルは図-1右下のように、写真と同様の精巧なモデルが構築できた。モデルの寸法精度は表-1のようにおおむね2%未満となったが、補剛材の突出部では精度が低下した。これは、従来の方の平面のオーバーラップ率に基づく撮影方法では、3次元形状を高精度に再現できない場合があることを示しており、斜め方向からの撮影手法の確立と指標の定量化など、さらに検討が必要である。

点群モデルからFEMモデルへの変換については、自動化に向けて改良した手法を用いて図-4のT形梁を対象にFEMモデルを構築して、載荷実験や線形静的解析を実施した。図-7は、線形



図-5 コンクリート擁壁

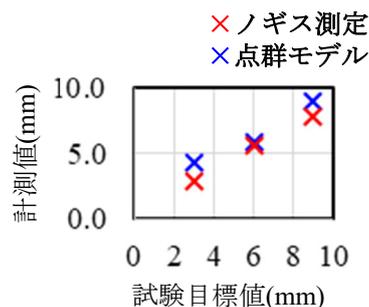


図-6 鉄筋引張試験結果

静的解析結果の一例であり、構築した点群 FEM モデル（下図）と実測寸法から作成した FEM モデル（上図）の比較で、有効応力は中央部の切削箇所近傍で応力が大きくなっていることが再現できている。これにより、大量の点群データを FEM モデルのソリッド要素の節点へ変換し、鋼材の板厚が減少する形状を再現できるとともに、全体的な応力分布や板厚減少位置や切削部における応力増加も把握できたため、損傷を受けた鋼構造物の部材の応力評価に応用できることが明らかになった。

### (3) 令和 2 年度

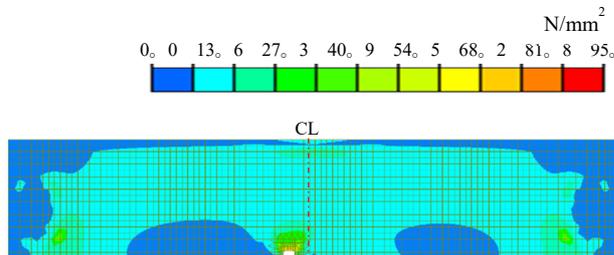
コンクリート擁壁（図-5）を対象に行った撮影実験と点群モデルの構築では、構造物点検用ドローンで 12464 枚（75.13GB）の写真撮影し、全長 34m、最大高さ 6m の擁壁全体の点群モデルの構築に成功した。図-8 のように点群モデル上で構造物の変状も確認できるが、3 次元的な撮影により精度の良いモデルを構築する必要性や、基準となるマーカーの座標の正確性が大きく関係することを明らかにした。

構造解析モデルについては、図-9 のように橋梁の桁端部を模した供試体について、改良した自動変換手法で FEM モデルを構築した。図-3 と比較して部材の隅角部に三角形の偽の要素が生成されるが、補剛材を含む構造全体のモデルが自動的に行えた。図-10 の線形静的解析の結果でも、要素生成の不十分さにより局所的に応力が課題となっている箇所はあるが、応力分布は適切に表現されている。

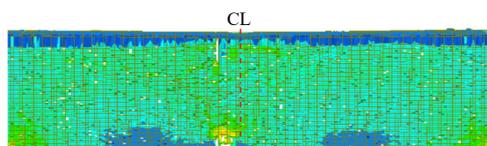
以上のことから、本研究では撮影したデジタル画像から 3 次元点群モデルを構築し、さらにこれを FEM モデルに変換することで、応力解析を行い、構造物の保有性能を明らかにすることができることを示した。

表-1 鉄道橋モデルの測定精度(mm)

	実測	点群モデル	誤差(%)
桁長	6451	6500	0.75
幅員	1943	1936	0.33
桁高	787	795	1.11
上フランジ幅	266	261	1.83
上フランジ厚	22.12	22.57	1.94
垂直補剛材幅	88.90	35.40	60.18
垂直補剛材厚	9.52	10.24	7.53



(a) 全切削比較 FEM モデル



(b) 全切削点群 FEM モデル

図-7 T 桁梁モデルの有効応力分布



図-8 コンクリートスキンのはらみ出し

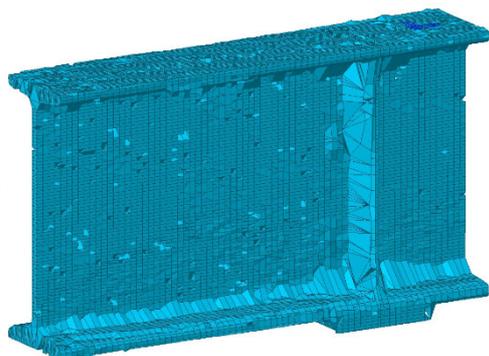


図-9 桁端点群 FEM モデル（自動化）

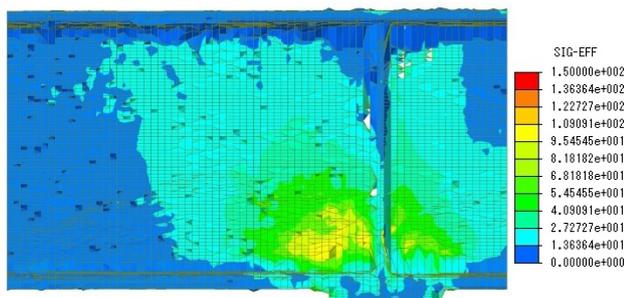


図-10 桁端モデルの有効応力分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 鈴木 紗苗, 宮森 保紀, 齊藤 剛彦, 山崎 智之, ムンフジャルガル ダンビーバルジル, 三上 修一	4. 巻 75巻2号
2. 論文標題 鋼構造部材の3次元点群モデル構築とFEMデータへの自動変換に関する検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集F3 (土木情報学)	6. 最初と最後の頁 I_141 ~ I_149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejcei.75.2_I_141	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 -

1. 著者名 岩淵 直, 宮森 保紀, 大島 俊之, 三上 修一, 齊藤 剛彦	4. 巻 66A
2. 論文標題 端横桁および床版に損傷を生じた小規模鋼橋の支点部の耐荷性能に関する解析的検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 48 ~ 58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.66A.48	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12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 ムンフジャルガル ダンビーバルジル
2. 発表標題 撮影画像を用いた鋼構造物の3次元点群モデル構築手法に関する一検討
3. 学会等名 土木学会北海道支部 令和元年度 年次技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮森 保紀
2. 発表標題 鋼構造部材の点群モデルから変換したFEMモデルの精度に関する一検討
3. 学会等名 土木学会北海道支部 令和元年度 年次技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩淵 直
2. 発表標題 端横桁等の損傷が支点部の耐荷性能に与える影響に関する解析的検討
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩淵 直
2. 発表標題 主桁の損傷寸法が隣接主桁間の荷重伝達に与える影響に関する解析的検討
3. 学会等名 土木学会北海道支部 令和元年度 年次技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木 紗苗
2. 発表標題 3次元点群モデルのFEM データへの変換手法に関する一検討
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木紗苗
2. 発表標題 鋼構造部材の3次元点群モデル構築とFEMデータへの自動変換に関する検討
3. 学会等名 第44回土木情報学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sunao Iwabuchi
2. 発表標題 ANALYTICAL INVESTIGATION ON BEARING CAPACITY OF STEEL GIRDER BRIDGE AFFECTED BY CORROSION DAMAGE AT THE END CROSS BEAM
3. 学会等名 12th Pacific Structural Steel Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木 紗苗
2. 発表標題 点群データから構造解析モデルへの変換の自動化に関する検討
3. 学会等名 土木学会北海道支部平成30年度年次技術発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木 紗苗
2. 発表標題 高密度点群データの構造解析モデルへの変換に関する基礎的検討
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木 紗苗
2. 発表標題 高密度点群データの構造解析モデルへの変換に関する基礎的研究
3. 学会等名 第43回土木情報学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 工藤 将暉
2. 発表標題 ドローンで撮影した画像を用いたコンクリート製補強土壁の3次元点群モデル構築実験
3. 学会等名 土木学会北海道支部令和2年度年次技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 瑛典
2. 発表標題 鋼桁供試体の3次元高密度点群モデルからFEMモデルへの自動変換
3. 学会等名 土木学会北海道支部令和2年度年次技術研究発表会
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

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