

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (特設分野研究)

研究期間：2017～2020

課題番号：17KT0040

研究課題名(和文) 高密度・高精度点群処理による工業設備の保全支援システムの研究

研究課題名(英文) Research on Maintenance Support System for Industrial Facilities Using High-Density and High-Accuracy Point Clouds

研究代表者

増田 宏 (Masuda, Hiroshi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授

研究者番号：40302757

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：測量分野のレーザスキャナで取得された高密度・大容量・高精度点群を用いて、工業設備やインフラ設備の保全支援を行うための点群処理手法の研究を行った。大型構造物の劣化検出では、健全面の推定手法、多重解像度による差分検出手法、反射強度を用いた亀裂検出手法、鋼材平面検出手法などの点群処理手法を開発した。また、部材交換作業を支援するために、高密度の点群から鋼材を高精度に検出する手法についても開発した。さらに、立体視デバイスを用いた目視による劣化可視化システムについても開発した。また、多頻度計測を実現するために、レーザスキャナによる点群計測を行うための自動計測ロボットの開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国では工業設備の老朽化が急速に進んでおり、その保全作業を効率化する計算機支援システムの実現は重要な課題である。本研究では、レーザスキャナによる3次元計測で得られた、高密度・大容量・高精度な点群から、大型構造物の劣化検出や部材形状算出を行うための点群処理手法の研究を行った。また、開発手法を大型構造物やインフラ整備に適用し、IT支援による保全作業が可能になることを示した。また、予期せぬ劣化を見つけるには、目視作業も必要のため、大規模点群の立体視システムの開発も行った。さらに、3次元計測の労力を低減するため、移動ロボットによって自動計測システムを開発をした。

研究成果の概要(英文)：We studied point-processing methods to support the maintenance work of industrial facilities and infrastructures using high-density, large-scale, high-accuracy point clouds acquired by a terrestrial laser scanner. For the detection of deterioration, we developed point cloud processing methods such as healthy surface estimation, multi-resolution differential detection, crack detection using reflection intensity, and precise plain detection. We also developed methods to precisely reconstruct 3D shapes of steel materials from point clouds in order to support material replacement work. In addition, for detecting unexpected deterioration by visual inspection, we developed a VR environment for large scale point clouds. Furthermore, we developed an automatic measurement robot equipped with a laser scanner to support frequent 3D measurements in large facilities.

研究分野：設計工学

キーワード：点群処理 設備の保全 形状処理 3次元計測 レーザスキャナ

1. 研究開始当初の背景

工業先進国では、長い年月をかけて人工物システムが整備されてきた。しかし、近年では、多くの工業設備で老朽化が急速に進んでいるため、工業設備の保全の効率化のための計算機支援システムの実現が重要な課題になっている。そのための有力な手段として、レーザ計測によって、工業設備の高密度点群を取得し、計算機を用いた保全作業の効率化が期待されている。

高精度・高密度な3次元計測により、劣化を精密に検出するには、処理可能なデータ量や計算精度を格段に高めることが不可欠である。研究開始当初は、高精度・高密度な計測ができるレーザスキャナが各社から出始めた時期であり、取得できる点群の密度や容量の飛躍的な増大が見込まれていた。しかし、そうした高精度・高密度・大容量の点群を用いた保全支援のための基盤技術は未熟であり、多くの点群処理手法では、精度をあまり重視してこなかった。

また、現実の保全作業を支援するためには、想定外の事態を発見するための目視検査も不可欠であり、そのためには、高精細な大規模データの可視化が必要となる。さらに、生産設備での多頻度での計測を行うためには、夜間などに無人で、高精度・高密度な点群を多頻度で取得するための自動計測システムが望まれている。こうした環境の実現されていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、測量分野のレーザスキャナを用いて取得された高密度・高精度点群を用いて、精度を重視した点群処理手法を開発し、点群による保全支援システムを実現することである。そのために、以下の研究を行う。

- (1) 高密度・大容量点群を用いた、人工環境の劣化検出手法の研究。
- (2) 人工環境の保全のための部材検出とモデル化手法の研究。
- (3) 大規模点群を用いた仮想現実による目視検査支援の研究。
- (4) 高頻度の点群取得のための自動計測システムの研究。

3. 研究の方法

- (1) 高密度・大容量点群を用いた、人工環境の劣化検出手法の研究

本研究では、人工物システムの劣化を検出するために、以下の人工物を対象とした研究を行った。

① 大型建造物の摩耗、付着物、亀裂の検出

燃焼炉や貯蔵タンクなどの大型建造物の壁面の劣化を検出する問題について考える。こうした建造物では、長年の使用により、剥落や腐食などによる損耗、付着物などによる劣化が発生する。劣化は、劣化が発生する前の健全面との差異として検出可能であるが、我々の検証では、大型建造物は、必ずしも図面や3D CADに忠実に建造されておらず、建造当初から、図面とのずれが生じている。そのため、現況から、健全面を推定することが必要である。本研究では、多重解像度の自由曲面で現況を表現することで健全面を推定し、様々なスケールの劣化を検出することを考える。

② 送電システムにおける大型鉄塔の変形検出

例題となる人工環境として、送電システムを考える。広域の電力をカバーするためには、大型の鉄塔を建造し、それらを介して送電線を設置する。しかし、地盤沈下や送電線の張力のため、送電鉄塔に傾きや撓みが生じることがある。送電鉄塔は、高さが30~50mであり、地上からの計測では、高密度での点群計測が必要である。本研究では、高密度大容量の点群から鋼材を構成する平面を高精度に検出するための手法を開発する。

③ 道路を跨ぐ電線の劣化検出：

電線は、電柱を介して国内に張り巡らされているが、道路を跨ぐ電線については、車両との干渉が発生する。近年、大型台風などの災害による劣化が増えており、問題箇所の早期の検出が必要となっている。しかし、電線のような細い物体を広範囲に渡って安定して計測することは難しい。本研究では、走行車両から計測された点群と画像を組み合わせることで、欠落のある電線の点群から経路を算出し、危険な電線を検出する手法について考える。

- (2) 大型構造物の保全のための部材検出とモデル化手法の研究。
劣化した部材を交換する際には、必ずしも、正確な CAD データが存在しないため、現況の計測が必要になる。本研究では、点群データから現況の 3D モデルを作成するための手法について考える。

① 複雑な配管形状の形状再構成

複雑な経路を通る配管は手作業で製造される。そのため、そうした配管の交換の際には、現況の計測が必要となる。しかし、プラントの点群計測では、全方位から計測することは困難であり、部分的な点群しか得られない。本研究では、不完全な点群から配管形状の 3D モデルを生成する手法について考える。

② 送電鉄塔の交換部材のモデリング

古い送電鉄塔においては、部材の詳細な記録が存在しないため、交換部材を製造するためのデータを得るために、作業員が数名で鉄塔に登ってボルト位置を計測していた。この作業は、危険で高コストである。本研究では、高密度点群からの高精度な平面検出によって、鋼材とボルトを自動検出し、交換部材の製造に必要な情報を算出することを考える。

- (3) 大規模点群を用いた仮想現実による目視検査支援の研究

予期しない劣化を検出するためには、目視検査も必要となる。3次元の点群データの可視化には、VR システムが有効であるが、描画性能の制約から、大規模点群の可視化は難しい。本研究では、人工環境の劣化の検証を目的として、必要な箇所を効率的に詳細化できる VR システムについて考える。

- (4) 高頻度の点群取得のための自動計測システムの研究。

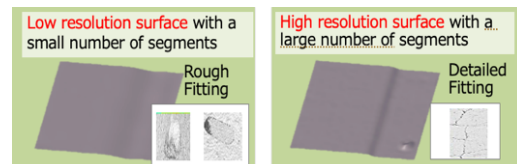
工場などの屋内の人工環境を多頻度で計測するためには、多大な労力を要する。そこで、ロボットが自律的に移動し、点群計測を行う自動計測ロボットについて考える。本研究では、ロボットに搭載したレーザスキャナで得られた点群から、経路探索と最適計測位置の検出を行う手法について考える。

4. 研究成果

- (1) 高密度・大容量点群を用いた、人工環境の劣化検出手法の研究

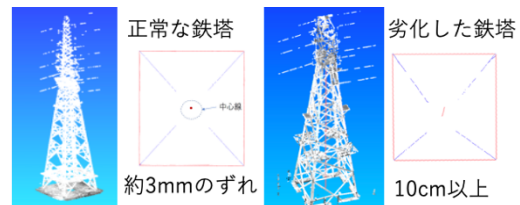
① 大型構造物の摩耗，付着物，亀裂の検出

壁面の劣化検出については、曲面で構成された壁面に適用できる手法は提案されていなかった。本研究では、曲面で構成された壁面の点群を平面展開図に写像し、複数の解像度の自由曲面をフィッティングすることにより、図に示すスケールの異なる劣化を手法できることを確認した。



② 送電システムにおける大型鉄塔の変形検出：

高密度に計測された点群から、平面部を持つ鋼材を高精度に検出する手法を開発した。この手法を送電鉄塔の点群に適用し、構造を支える主要な鋼材を検出して鉄塔の中心軸を算出できることを示した。図は、中心軸を水平面に投影したものである。正常な鉄塔であれば、投影した線分は小さい領域に収まっているが、劣化した鉄塔では、垂直からのずれが大きくなる。この検証によって、経年劣化により傾きや撓みの生じた送電鉄塔の定量評価が行えることを確認した。



③ 道路を跨ぐ電線の劣化検出：

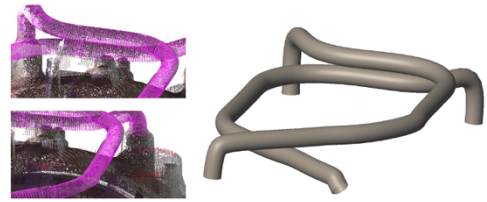
本研究では、不完全に計測された点群を補完するために、画像と点群を連携させる手法を開発した。道路を跨ぐ電線は、レーザ計測で計測漏れとなることがしばしばあり、安定した検出が難しいという問題があった。本研究では、車載の移動計測装置で取得された点群と画像を用いて、図に示すように、断片的に得られた電線の点群から、画像の電線と照合することにより、電線の経路を算出する手法を開発した。



(2) 大型構造物の保全のための部材検出とモデル化手法の研究：

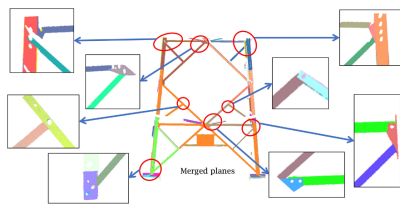
① 複雑な配管形状の形状再構成

劣化した部材を交換するためには、現況を計測して、交換部材を製造する必要がある。複雑な経路を通る配管は、全方位から計測することは困難であり、部分的な点群しか得られない。本研究では、図に示したような配管の点群から断面を算出し、配管を自動的に抽出して3Dモデルを作成する手法を実現した。

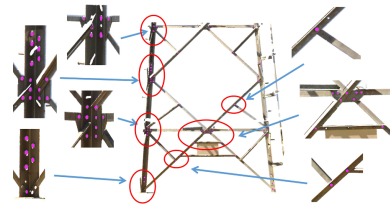


② 送電鉄塔の交換部材の形状再構成：

送電鉄塔の交換部材を製造するためには、穴の位置を正しく計測することが必要がある。本研究では、高密度の点群計測から、規格化された小さい部品の平面を高精度に検出する方法を開発した。送電鉄塔への応用では、六角形ボルトを検出し、鋼材の穴の位置を算出できることを示した。また、適応的な閾値を用いて、平面境界を高精度に検出する方法についても開発した。ここでは、鋼材間の小さい段差を検出するために、この手法を用いている。図は、本手法を用いて検出された鋼材境界とボルト位置を示している。ボルト位置については、手計測で得られた値と比較し、十分な精度で検出できたことを確認した。



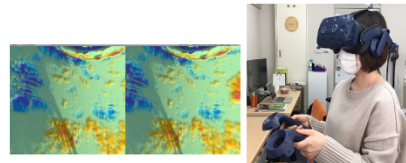
(a) 鋼材境界の検出



(b) ボルト位置の検出

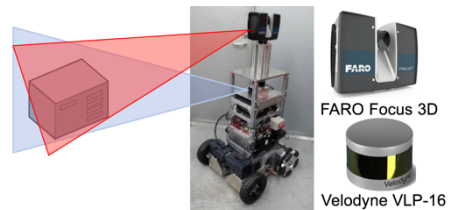
(3) 大規模点群の立体視による目視検査支援の研究：

VRシステムでは、高いフレームレートが要求されるため、高密度・大規模な点群の描画は難しい。そこで、メッシュ描画と局所的に高精細な点群描画を組み合わせることで、高いフレームレートを実現する劣化描画システムを構築した。



(4) 高頻度の点群取得のための自動計測システムの研究：

自律移動して点群計測を行う計測ロボットの開発を行った。ロボットは、高密度点群の取得ができるレーザスキャナを搭載し、自動計測を行う。レーザスキャナの制御用とロボットの制御用に、2台のPCを搭載している。また、レーザスキャナで得られた点群から、移動可能な経路探索と最適計測位置の算出を行う手法を開発した。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Iku Yoshiuchi, Yuki Shinozaki and Hiroshi Masuda	4. 巻 17(3)
2. 論文標題 Detection of Steel Materials and Bolts from Point-Clouds of Power Transmission Pylon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computer-Aided Design and Applications	6. 最初と最後の頁 575-584
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14733/cadaps.2020.575-584	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 Yoshitaka Midorikawa, Hiroshi Masuda	4. 巻 Vol.12, No.6
2. 論文標題 Extraction of Rotational Surfaces and Generalized Cylinders from Point-Clouds Using Section Curves	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 901-910
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2018.p0901	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 Yuma Mori, Keisuke Kohira and Hiroshi Masuda	4. 巻 Vol.16, No.3
2. 論文標題 Adaptive Segmentation of Large-Scale Anisotropic Point-Clouds Captured by Mobile Mapping Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Computer-Aided Design and Applications	6. 最初と最後の頁 466-477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14733/cadaps.2019.466-477	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 Yuki Shinozaki, Keisuke Kohira, Hiroshi Masuda	4. 巻 Vol. 15, No. 4
2. 論文標題 Detection of Deterioration of Furnace Walls Using Large-Scale Point-Clouds	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Computer-Aided Design and Applications	6. 最初と最後の頁 575-584
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/16864360.2017.1419645	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 Kota Tajima, Hiroshi Masuda	4. 巻 V-2-2020
2. 論文標題 Extraction of Road-Crossing Power and Communication Lines from Mobile Mapping Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences	6. 最初と最後の頁 297-304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/isprs-annals-V-2-2020-297-2020	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 -

〔学会発表〕 計31件(うち招待講演 1件/うち国際学会 11件)

1. 発表者名 山本恵里佳, 葭内 郁, 増田 宏
2. 発表標題 3次元計測点群を用いた燃焼炉の劣化検出 点群画像による劣化検出手法の検討
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 重田航平, 江藤信輔, 和田太一, 増田 宏
2. 発表標題 工業設備の大規模点群からの部材形状の抽出と認識
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 葭内 郁, 増田 宏
2. 発表標題 点群データを用いた大型構造物の鋼材抽出とたわみ判定
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 峯村晃平, 田島晃太, 松本裕稀, 増田 宏
2. 発表標題 移動計測による点群と画像を用いた物体の抽出と分類
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Iku Yoshiuchi, Yuki Shinozaki, Hiroshi Masuda
2. 発表標題 Detection of Steel Materials and Bolts from Point-Clouds of Power Transmission Pylon
3. 学会等名 The 16th Annual International CAD Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田太一, 鈴木晶也, 石川貴一郎, 増田 宏
2. 発表標題 自律移動ロボットによる屋内生産設備の点群データ取得システム
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 葭内 郁, 篠崎有希, 増田 宏
2. 発表標題 点群データからの大型構造物の鋼材検出手法 第2報
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Shinozaki, Hiroshi Masuda
2. 発表標題 Point-Based Virtual Environment for Supporting Deterioration Diagnosis of Production Facilities
3. 学会等名 ASME 2018 Computers and Information in Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshitaka Midorikawa, Hiroshi Masuda
2. 発表標題 Extraction of Surfaces Using Section Curves for Engineering Plants
3. 学会等名 ASME 2018 Computers and Information in Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Shinozaki, Nanami Mizuguchi, Yoshitaka Midorikawa, Hiroshi Masuda
2. 発表標題 Diagnosis of Deflection of Large-Scale Structures Using Dense Point-Clouds
3. 学会等名 The 17th International Conference on Precision Engineering (ICPE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroki Matsumoto, Yoshitaka Midorikawa, Hiroshi Masuda
2. 発表標題 Efficient Non-Rigid Registration for Point-Clouds of Pole-Like Objects
3. 学会等名 The 17th International Conference on Precision Engineering (ICPE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ichiro Tanaka, Hiroshi Masuda
2. 発表標題 A Static Method for Estimating the Effective Spot Shape of Terrestrial Laser Scanners
3. 学会等名 The 17th International Conference on Precision Engineering (ICPE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuma Mori, Hiroshi Masuda
2. 発表標題 Shape Reconstruction of Guardrails on Roads Using Point Clouds and Images from Mobile Mapping Systems
3. 学会等名 The Asian Conference on Design and Digital Engineering (ACDDE 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuma Mori, Keisuke Kohira, Hiroshi Masuda
2. 発表標題 Classification of Pole-Like Objects Using Point Clouds and Images Captured by Mobile Mapping Systems
3. 学会等名 Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-2 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田太一, 鈴木晶也, 石川貴一朗, 増田 宏
2. 発表標題 自律移動ロボットによる屋内生産設備の点群データ取得システム
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 葎内 郁, 篠崎有希, 増田 宏
2. 発表標題 点群データからの大型構造物の鋼材検出手法 第 2 報
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本裕稀, 森 悠真, 増田 宏
2. 発表標題 機械学習を用いたガードレールの抽出と形状再構成
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田島晃太, 森 悠真, 増田 宏
2. 発表標題 移動計測による点群と画像を用いた線状物体検出 (第 2 報)
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増田 宏
2. 発表標題 大規模環境の 3 次元計測とモデリング: レーザスキャナの性能向上と応用領域の拡大 (キーノート)
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会講演論文集 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 篠崎 有希, 増田 宏
2. 発表標題 三次元計測点群を用いた大型構造物の劣化診断 ~ 検出精度と信頼性の評価 ~
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本 裕稀, 緑川 佳孝, 増田 宏
2. 発表標題 柱状物体の点群処理に適した非剛体レジストレーション(第2報)
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田島 晃太, 森 悠真, 増田 宏
2. 発表標題 移動計測による点群と画像を用いた線状物体検出(第1報)
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 葭内 郁, 篠崎 有希, 緑川 佳孝, 増田 宏
2. 発表標題 点群データからの大型構造物の鋼材検出手法
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenta Fukano, Ataru Kobayashi, Kazuki Ikeda, Hiroshi Masuda
2. 発表標題 Point-Based Shape Monitoring of Plate Bending for Large-Scale Storage Tanks
3. 学会等名 Proceedings of ASME 2017 Computers and Information in Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuki Shinozaki, Keisuke Kohira, Hiroshi Masuda
2. 発表標題 Detection of Deterioration of Furnace Walls Using Large-Scale Point-Clouds
3. 学会等名 Proceedings of CAD'17 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 篠崎有希, 鈴木晶也, 増田 宏, 増田 宏
2. 発表標題 3次元計測点群を用いた大型構造物の劣化診断
3. 学会等名 精密工学会春季大会講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石橋寛史, 齋藤和人, 増田 宏
2. 発表標題 立体視デバイスを用いた大規模点群の高速描画
3. 学会等名 精密工学会春季大会講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 水口七海, 緑川佳孝, 小平圭祐, 増田 宏
2. 発表標題 点群データを用いた構造物のた わみ判定
3. 学会等名 精密工学会秋季大会講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 篠崎有希, 増田 宏
2. 発表標題 高密度点群を用いた大型構造物の劣化診断 鉄塔の劣化判定
3. 学会等名 精密工学会春季大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 篠崎有希, 増田 宏
2. 発表標題 三次元計測に基づく 燃焼炉の保守支援
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第24期講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Iku Yoshiuchi, Hiroshi Masuda
2. 発表標題 Shape Reconstruction from Point Clouds for Supporting Maintenance of Power Transmission Pylons
3. 学会等名 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (国際学会)
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
---------	---------