

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：53101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02225

研究課題名（和文）視線情報に基づく構造物点検技能の形式知化・標準化：VR技術による知の加速度的継承

研究課題名（英文）Formalization and standardization of structural inspection skills based on line-of-sight information using VR technology

研究代表者

村上 祐貴（Murakami, Yuki）

長岡工業高等専門学校・環境都市工学科・教授

研究者番号：70509166

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：道路法では、道路構造物を対象に5年に1度の定期点検が定められているが、点検者によって近接目視点検結果に差異が生じる場合がある。本研究では、近接目視点検精度の向上および標準化を図ることを目的とし、コンクリート構造物を対象に、VRを用いた近接目視点検トレーニングシステムの開発を行った。その結果、トレーニング中の視線情報から、判定結果の変動の要因を明らかにするとともに、本トレーニングによる近接目視点検における損傷探索精度、記録の正確性および損傷判定精度の向上が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、構造物の定期点検で行われる近接目視点検において、全国的に喫緊の課題である熟練点検者不足の問題解決に寄与するものである。目視点検は各種車両点検など他分野でも行われており、目視点検技能継承プロセスの体系化は他分野にも水平展開が期待される。視線情報に着目した技能継承は他産業にも応用可能であり、スポーツ工学や情報工学を専門とする他分野の研究者の参画も期待され、その学術的波及効果は大きいものである。今後、多くの外国人労働者を受け入れていくことが予想される建設業や製造業にとって、教育に要する時間を大幅に短縮する可能性があり、社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：The Road Act requires periodic inspections of road structures once every five years, but the results of close-up visual inspections can vary depending on the inspector. In this study, we developed a training system for close-up visual inspection using VR for concrete structures in order to improve the accuracy and standardization of close-up visual inspections. As a result, we clarified the factors that cause variation in the judgment results based on the eye information during the training, and confirmed that the training improved the accuracy of damage search, accuracy of recording, and accuracy of damage judgment in the close proximity visual inspection.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：構造物点検 技能の形式知化 視線情報 VR

1. 研究開始当初の背景

2012年12月の笹子トンネル事故を契機として翌年9月に道路法が改正された。この改正により、トンネル、道路橋は5年に1回の頻度を基本とした近接目視による定期点検が法的に義務付けられた。定期点検では、①近接して損傷状態を把握し、②構造物の部材、部位毎に対策区分の判定を行う。これらの情報をもとに③部材毎の健全性の診断、④橋単位の健全性の診断を行う一連のプロセス連鎖をなす。その上流プロセスに位置する①、②の精度は定期点検の成否を大きく左右する。国土交通省は、2019年から始まる2巡目の橋梁定期点検に際し、1巡目の点検結果で抽出された課題に対応した、道路橋定期点検要領（改訂版）を同年2月末に発表した。改訂版の点検要領においても上述の流れ①～④に変わりはないが、自治体からの点検の負担軽減の要望を受けて、点検の着目箇所や新技術の活用による効率的な点検ができるように改訂された。点検要領の中でこれらの判断は「点検の知識と技能を有する者」が行うとされているが、この「点検の知識と技能を有する者」について定義と要件は明確にされていない。このように点検技能が何たるかの定義等が明確ではない。また、その継承が主にOJTで行われている現状にも課題がある。2006年に土木学会が行った建設業におけるOJTに関する取り組みに対するアンケート調査では、70%以上の企業がOJTは指導者によって成長度に差が出るという回答であった。点検業務においても、点検者の技能レベルの差異に起因する損傷の見落としや診断のバラツキが国内に限らず海外でも課題となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、熟達者の点検技能を形式知化・標準化し、非熟達者へ継承するプロセスを体系化することである。具体的には定期点検の熟達者の構造物の損傷状態の把握、状態把握に基づく対策区分判定における熟達者の暗黙知を、視線情報に基づいて形式知化を図る。そして、標準化された知を、仮想現実（VR）を用いて継承する方法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 視線情報に基づくVRを利用した熟達点検者の暗黙知の形式知化

本研究では環境ノイズの低減、繰り返し計測を実現するため、VR上に投影された実構造物を用いて、点検技能の抽出やトレーニングを行った。VR上の3Dモデルは、実際の構造物の写真から自動生成を行うSfM/MVS（Structure From Motion/Multi-View Stereo）技術を用いて作成した。撮影はデジタル一眼レフカメラ（Canon社、EOS Kiss X90、解像度：約2400万画素）と360°カメラ（RICOH社、THETA X、解像度：約6000万画素）を用いて、520枚（うち98枚を360°カメラで撮影）の写真撮影を行った。また、SfM/MVSによる解析・モデル生成はAgisoft Metashape Professional（ver.1.8.4.14671）を用いた。作成した3Dモデルを図-1に示す。また、作成したモデルは、ひび割れ幅0.3mmのひび割れを十分に視認できる品質であることを確認した（図-2参照）。

作成したVR空間における操作者視点の映像を図-3に示す。3Dモデルを投影し、点検を行うVR空間は、Unity（ver.2020.3.0f1）を用いて作成を行った。本研究では、3Dモデルの閲覧用のヘッドマウントディスプレイとして、HTC社、VIVE Pro Eyeを用いることとした。Unity上での環境構築として、SteamVR Unity Plugin（ver.2.7.3）、Vive SRanipal Unity Plugin（ver.1.3.3.0）を利用し、ヘッドマウントディスプレイへの描画およびVR空間上での操作者の頭部位置座標の取得を行った。VIVE Pro Eyeは専用ソフトウェアのVIVE SRanipal Runtime（ver.1.3.1.1）を用いてユーザーの視線計測が可能であり、VR点検時の被験者の頭部座標と注視点を結ぶ注視点ベクトルの視線情報の取得を行った。VR点検システムでは、コントローラを用いた被験者の移動、発見した変状に対してマーキングによる記録および選択式の変状種類と判定区分の入力が可能である。

被験者は、橋梁点検業務に従事している勤続年数10年以上の熟達点検者Aと点検者Aに比べて点検業務年数が少ないB（経験年数0.5年）、C（1年）、D（2年）、E（4年）の計5名とした。被験者はVR空間上を自由に移動し、3Dモデルを点検し、劣化・変状箇所を探索し、該当場所にマーキングを行う。試験中はエリアセンサでヘッドマウントディスプレイの座標およ



図-1 作成した3Dモデル



図-2 3Dモデルの表面

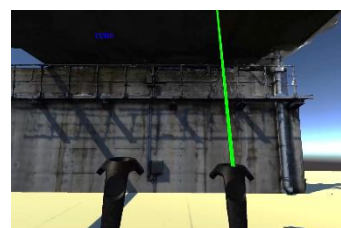
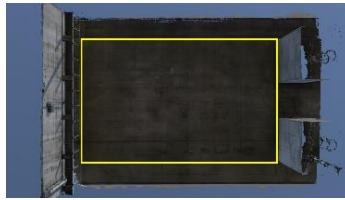


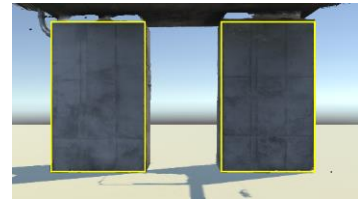
図-3 操作者視点の映像



(a) A1 橋台



(b) 床版



(c) P1 橋脚

図-4 点検対象領域

び角度を計測する。また、ヘッドマウントディスプレイの内部カメラで VR 点検中の視線情報の計測を行う。

構造物は新潟県内の 1982 年に供用開始された 4 径間、橋長 60m、幅員 10.0m の RC 中空構造の高架橋（以下、本橋梁）を対象とした。本試験では、作成した 3D モデルのうち図-4

の黄線で示した、A1 橋台、床版、P1 橋脚を点検対象として試験を実施した。制限時間は設けず、被験者が点検を終了したと宣言するまでを試験時間とした。

試験中の測定項目として、ヘッドマウントディスプレイを用いた被験者の頭部位置座標および、視線の注視点ベクトルと頭部角度から算出した、VR 空間上の視線座標を 1/90sec 間隔で取得する。また、被験者が変状と判断したマーキング領域の位置座標、変状の判定結果も併せて取得した。本研究では NEXCO 総研が規定している「保全点検要領 構造物編 令和 4 年 4 月」をもとに判定を実施した。本要領で規定されている各判定区分と定義を表-1 に示す。

(2)VR を利用した点検技能の継承

VR 空間上に投影する構造物の 3D モデルを 5 ケース作成し、目視点検技能のトレーニングを行った。作成したモデルの一例を図-5 に示す。本トレーニングでは、実務での点検を模擬し、図-6 に示すような点検作業台に乗った状態で目視点検を実施した。点検作業台はコントローラによって上下前後左右に自由に動かすことができ、様々な角度から構造物を確認できる。また、発見した損傷に対しては、マーキングで位置を記録し、損傷種類と判定区分の入力を行うことができる。点検範囲は、実際の点検時に一人が担当する範囲を模して、図-6 の白い枠で示された領域とした。

目視点検 VR トレーニングについては点検者の点検精度向上を図るために次のトレーニング機能を検討し実装した。点検時に点検者が目視した領域を、図-7 に示すようにヒートマップ化して表示する機能を実装した。このヒートマップは、視機能が優れている 5 度以内の視野の色付けを行い、合計 5 秒間の目視データに基づき、青色から赤色まで変化する（以降、目視ヒートマップ）。点検終了時にこの目視ヒートマップを被験者にフィードバックすることで、点検者が

表-1 判定区分

| 判定区分 | 定義 | |
|----------|-----|----------------------------|
| 変状に対する判定 | AAA | 変状が極めて著しく、緊急措置が必要な状態。 |
| | AA | 変状が著しく、速やかな措置が必要な状態。 |
| | A1 | 変状があり、早期に措置が必要な状態。 |
| | A2 | 変状があり、適切な時期に措置を行う事が望ましい状態。 |
| | B | 軽微な変状があるが、措置を必要としない状態。 |
| | OK | 変状がない又は極めて軽微で、措置を必要としない場合。 |

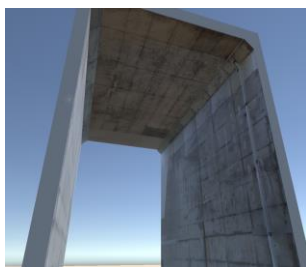


図-5 作成した 3D モデル

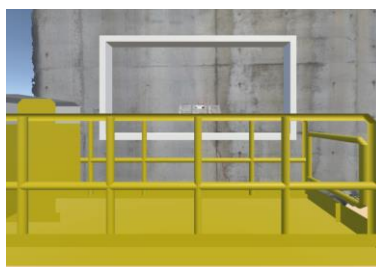


図-6 点検作業台と点検領域

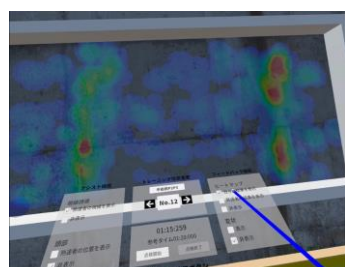


図-7 目視ヒートマップ



図-8 損傷図を表示した 3D モデル

表-2 点検領域パラメータ

| 領域番号 | 構造 | 領域の大きさ |
|------|----|-----------|
| 1 | 橋台 | 1.5m×3.0m |
| 2 | 橋台 | 1.5m×3.0m |
| 3 | 橋台 | 1.5m×3.0m |
| 4 | 橋脚 | 1.5m×3.0m |
| 5 | 橋脚 | 0.9m×3.0m |
| 6 | 床版 | 3.0m×1.7m |
| 7 | 床版 | 3.0m×1.7m |
| 8 | 床版 | 3.0m×1.7m |

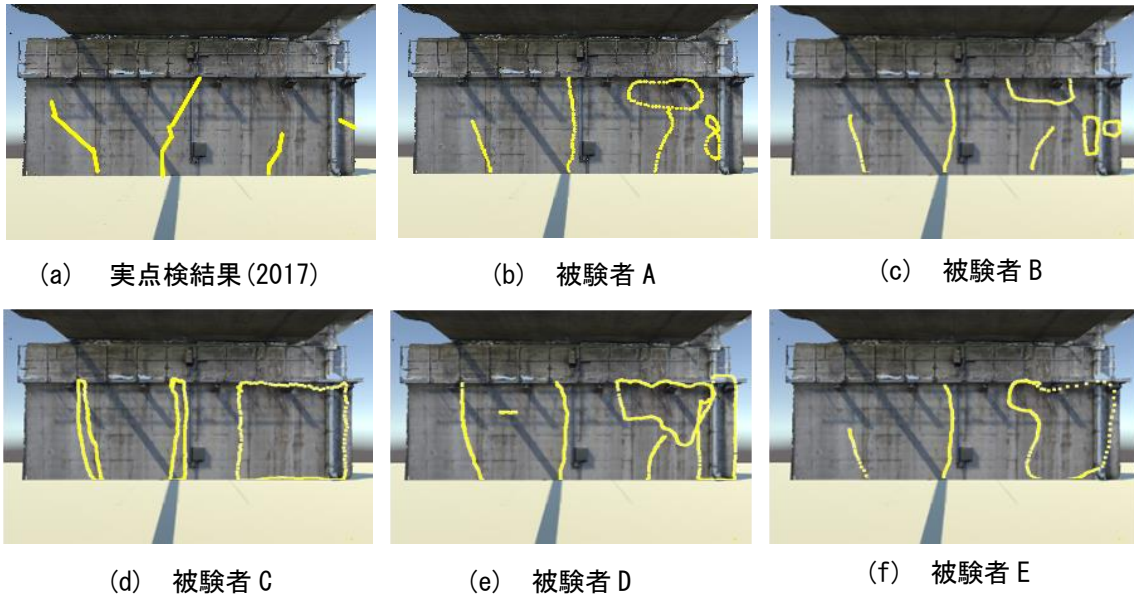


図-9 A1橋台のマーキング

視認していない部分を自ら認識できるようになる。点検業務における勤続年数が10年以上の熟達者の情報として、点検中の視線の位置および頭部の位置をVR空間上に表示する機能を実装した。また、熟達者の目視ヒートマップの結果や点検に要した時間を表示させることができるため、熟達者と点検者自身の点検スキルを比較することが可能である。定期点検により作成された損傷図を3Dモデル上に図-8に示すように表示する機能を実装した。点検結果と損傷図を比較することにより、点検時の判断を照合し、相違を確認することができる。

被験者は橋梁点検業務に従事している勤続年数が14年、9年、1年、2年の点検者4名（以降被験者A、B、C、Dと称する）とした。なお前述の被験者AからDとは異なる。点検はトレーニング中に使用するものとは異なる3Dモデルの橋台、橋脚および床版から合計8領域を選定した。各領域の大きさを表-2に示す。試験環境として、2m×2m程度のスペースを用意し、初めに試験内容とトレーニングの説明を行った。その後、被験者はヘッドマウントディスプレイを装着し、視線のキャリブレーションを行った。VR空間内で操作に十分に慣れた後、試験を開始した。試験終了後にはトレーニングを1時間行い、再度トレーニング前と同様の試験を実施した。トレーニング中にはトレーニング機能を被験者が自由に使用しながら、複数の領域での点検を反復した。試験中の制限時間は設けず、全ての領域の点検を終えた時点で試験を終了とした。試験中の測定項目は、被験者の視線座標と頭部座標（1/50秒間隔）、マーキング座標とその判定内容、視線情報動画である。なお、被験者が判定する損傷種類は、ひび割れや浮き・はく離・はく落、鉄筋露出などから選択して入力した。また、NEXCO総研が出版する保全点検要領構造物編に定める6段階の判定区分に従って損傷の程度を判定した。

4. 研究成果

(1) 視線情報に基づくVRを利用した熟達点検者の暗黙知の形式知化

各被験者のVR点検後のマーキング結果の例として、対象としたA1橋台のマーキング結果および、比較のために2017年実施の点検で作成された、変状状況の記録（以降、実点検結果）を図-9に示す。すべての被験者において、2017年実施の点検時の実点検結果に記録された変状（図-9(a)）を含むマーキングを行っていることから、実橋梁での点検と同様にVR上でも点検を行うことが可能であると考えられる。すべての被験者において、実点検結果に記録されていない、橋台右上側での広範囲な変状の記録が行われていた。これは、前回点検時よりも劣化が進行した可能性が考えられる。次に、被験者間でマーキング結果を比較すると、被験者A、B、Dのマーキングは変状ごとに細分化されているのに対して、被験者C、Eのマーキングは変状箇所を一括りに大きく囲う傾向が見られた。面的な変状に関しては変状の境界の判断が難しく、変状発生範囲の認識に差異が生じやすいと考えられた。このように変状のマーキング結果から点検結果に差異が確認されたとともに、紙面の都合上、結果の掲載は割愛するが変状の注視時間から点検過程にも差異が確認された。点検過程を大別すると①変状の探索過程、②発見した変状の記録過程、③変状の程度の評価過程に分けられる。目視点検技能の向上、初学者への目視点検指導に際しては、変状を発見できているか、適切なマーキングが行えているか、変状種類を正しく選択できているか、といった過程ごとに区別した技能に対し、訓練が必要であると考えられる。

(2) VRを利用した点検技能の継承

各被験者の目視ヒートマップの結果の一例として、橋台の領域3を図-10に示す。図10(b)よりトレーニング前については、領域右側の目視を行っておらず、損傷図に記載されている損

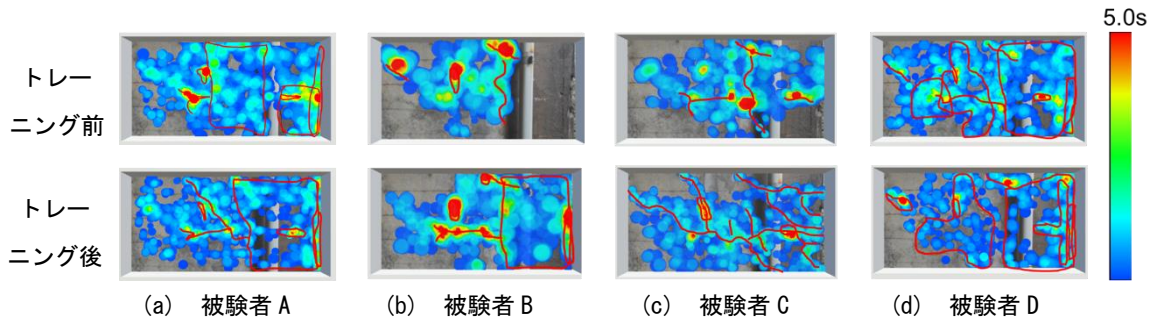


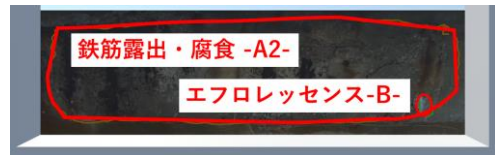
図-10 領域3の目視ヒートマップとマーキング

表-3 損傷図との損傷判定の比較結果

| 領域番号 | 損傷番号 | 被験者A | | 被験者B | | 被験者C | | 被験者D | |
|----------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | トレーニング前 | トレーニング後 | トレーニング前 | トレーニング後 | トレーニング前 | トレーニング後 | トレーニング前 | トレーニング後 |
| 1 | 1 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 2 | 2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 3 | 3 | ○ | ○ | | ○ | | | ○ | ○ |
| 4 | 4 | | | | | | | | |
| | 5 | ○ | ○ | ○ | | | ○ | | |
| 5 | 6 | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | |
| 6 | 7 | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 8 | | | | | | | | |
| 8 | 9 | | | | | | | | |
| | 10 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 11 | ○ | ○ | | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 正しい判定の個数 | | 7 | 8 | 6 | 6 | 5 | 7 | 6 | 6 |

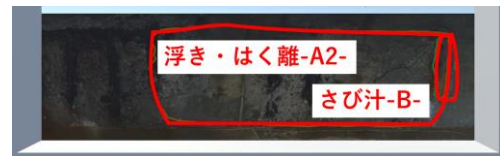


(a) トレーニング前



(b) トレーニング後

図-11 被験者Bのマーキングと判定結果



(a) トレーニング前



(b) トレーニング後

図-12 被験者Cのマーキングと判定結果

傷をマーキングしていないが、トレーニング後には領域内を隅まで目視するようになったことで、損傷を発見していることが分かった。このことから、開発したVR点検トレーニングにより損傷探索の技能が向上していると考えられる。なお、損傷の記録を行わなかった原因は、目視ヒートマップの結果から見落としであると推察され、損傷の記録を行わない原因を判別する上で目視ヒートマップは有効であることが確認できた。

損傷図に記載された損傷をナンバリングし、損傷図と比較した結果を表-3に示す。表-3からトレーニングが損傷種類の判定に寄与したことが確認できる。経験年数が最も長い被験者Aは一致した損傷の個数が最も多かった。一方、最も勤続年数の短い被験者Cはトレーニング前には一致した損傷の個数が最も少なかったが、トレーニング後には改善が見られた。一例として、領域5(全面鉄筋露出・腐食-A1-判定)の各被験者のマーキングと判定内容を図-11から図-12に示す。領域5については、被験者Bと被験者Cがトレーニングによりマーキングの範囲が拡大し、被験者Cはトレーニング後に損傷図と同様の鉄筋露出・腐食と判定するようになっており、トレーニングによる判定能力向上を示している。なお、被験者Aは、浮き・はく離と鉄筋露出・腐食を全体的にマーキングした。これは、本システムでは打音点検を行うことが出来ないため、類似の損傷の区別が困難であるためと考えられる。一方、被験者Dはトレーニングを通じて異なる損傷を記録し、多くの損傷を記録した。これは経験が浅い点検者が適切に損傷の選別を行えていない可能性を示しており、軽微な損傷も網羅的に記録している可能性がある。本トレーニングシステムでは損傷図を3Dモデル上へ表示する機能を実装しているが、この機能に加えて判定の理由を表示させ、損傷の選別や程度についてのトレーニングを強化する必要があると考えられる。

このように、VR目視点検トレーニングを実施した結果、被験者間で点検技能が異なることが示唆されるとともに、トレーニングによって技能が変化することが確認された。今後、本システムを用いた点検トレーニングのさらなる効果検証を進める。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 中村柊太、陽田修、村上祐貴、池田富士雄 | 4. 巻 43 |
| 2. 論文標題 橋梁点検技術者のプロファイルの違いが目視点検時の損傷把握に及ぼす影響 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 日本コンクリート工学会コンクリート工学年次論文集 | 6. 最初と最後の頁 1247 - 1252 |
| 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 - |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 稲田晃大、小海元暉、陽田修、村上祐貴 | 4. 巻 44 |
| 2. 論文標題 熟達者の暗黙知に基づく打音点検技能獲得トレーニングが欠陥検知精度および打撃特性に及ぼす影響 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 日本コンクリート工学会コンクリート工学年次論文集 | 6. 最初と最後の頁 1390 - 1395 |
| 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 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 関川周吾、高橋一平、込山晃市、上村健二、村上祐貴 | 4. 巻 23 |
| 2. 論文標題 VR を用いた点検者の視線情報に基づく RC 構造物の目視点検技能の可視化 | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 日本材料学会コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集 | 6. 最初と最後の頁 319 - 324 |
| 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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 櫻井優、陽田修、井林康、上村健二、関川周吾、村上 祐貴 |
| 2. 発表標題 目視によるコンクリートの品質評価プロセスの可視化 |
| 3. 学会等名 土木学会全国大会第77回年次学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 関川周吾、稲垣琉右孔、村上祐貴、井林康、陽田修、上村健二、池田 富士雄 |
| 2. 発表標題 橋梁定期点検の対策区分判定時の意思決定の可視化 |
| 3. 学会等名 土木学会全国大会第77回年次学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高橋一平、関川周吾、込山晃市、陽田修、井林康、村上祐貴、上村健二、清水遼介 |
| 2. 発表標題 VRを利用した点検者の視線情報に基づくRC構造物の目視点検技能の可視化 |
| 3. 学会等名 土木学会全国大会第78回年次学術講演会 |
| 4. 発表年 2023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 | 井林 康 (IBAYASHI KOU) (10321415) | 長岡工業高等専門学校・環境都市工学科・教授 (53101) | |
| 研究分担者 | 池田 富士雄 (IKEDA FUJIO) (30353337) | 長岡工業高等専門学校・機械工学科・教授 (53101) | |
| 研究分担者 | 土田 泰子 (TSUCHIDA YASUKO) (30455125) | 長岡工業高等専門学校・一般教育科・教授 (53101) | |

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 | 外山 茂浩 (TOYAMA SHIGEHIRO) (60342507) | 長岡工業高等専門学校・電子制御工学科・教授 (53101) | |
| 研究分担者 | 上村 健二 (KAMIMURA KENJI) (80708090) | 長岡工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授 (53101) | |

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 |
|---------|---------|
| | |