

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04565

研究課題名（和文）効率的かつ効果的な橋梁維持管理データの蓄積と点検・診断教育シミュレータの開発

研究課題名（英文）Efficient and effective bridge maintenance management data collection and development of bridge inspection/diagnostic training simulators

研究代表者

田井 政行（Tai, Masayuki）

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：70646596

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：3Dイメージングレーザースキャナを用いて作成した橋梁点群モデルとStructure from motionを用いて作成した橋梁点群モデルとを、ICP法を用いることで合成したモデルを点検シミュレータに取り込み、ヘッドマウントディスプレイ上に表示させ、橋梁上やその周辺を移動可能な点検シミュレータを構築した。

また、タブレット端末内の3次元橋梁モデル上に点検・診断記録の保存や過去の点検・診断結果、類似橋梁の損傷事例などの閲覧が現場で確認可能なデジタル点検野帳を開発し、その有効性の検証を実装試験により行った。その結果、き裂・塗膜割れの点検漏れ防止に有効であることや内業の効率化に効果的であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

道路構造物の維持管理において、5年に1度の近接目視による点検が義務付けられ、日本国内全ての橋梁に対して適切な点検・診断を行い、安全・安心を確保するためにも、優秀な点検・診断技術者の確保と効率的な点検・診断の実施が必要である。

本研究成果は、橋梁諸元の効率的な収集だけでなく、現場に近い環境での点検学習が可能となり、維持管理が必要な橋梁ストックの増大と人口減少社会において、優秀な点検診断員の確保につながる。また、開発したデジタル野帳は点検のデジタル化と信頼性向上につながり、橋梁の長寿命化の一助になると考えている。

研究成果の概要（英文）：A bridge inspection simulator was constructed by integrating models created using a 3D imaging laser scanner with models created using Structure from Motion, utilizing the ICP method, and displaying them on a head-mounted display. This simulator enables movement on and around the bridge. Furthermore, a digital field notebook was developed for use on tablets, which facilitates on-site storage and review of inspection and diagnosis records, historical results, and cases of similar bridge damage. The effectiveness of this notebook was evaluated through implementation tests, demonstrating its efficacy in preventing the oversight of cracks and coating fractures and in improving the efficiency of office tasks.

研究分野：維持管理

キーワード：3次元モデル 点検診断 技術者育成 維持管理 野帳

### 1. 研究開始当初の背景

建設年度が不明な約 23 万橋梁をはじめとして、橋梁諸元データが不十分な橋梁が存在している。橋梁の維持管理において、建設当時の図面は、点検計画の立案や余耐力評価、補修補強設計時に活用されるため、適切な維持管理を実施するためには、不可欠なデータである。しかしながら、これらの図面の復元には、測量やそれに基づく図面作成といった多くの手間が必要であるため、橋梁諸元データを効率的に収集する手法の確立が必要である。

また、橋梁に生じる損傷は、構造ディテール、架設環境に大きく依存するため、橋梁の長寿命化を図るためにも、各損傷の特性を十分に理解し、適切な処置を行うことが不可欠である。鋼橋に生じる損傷の学習には、各機関から発刊されている文献等を参考に、損傷形態や要因を机上で学ぶ場合が多く、現場や実物大の橋梁模型を用いた橋梁点検講習会を受講する機会は十分でない。適切な点検・診断を行うためには、「継続的な机上での学習」だけでなく「現場での実務経験」が必要であり、優秀な点検技術者の育成には、この両者を同時に行える効率的な学習システムが求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、実橋を効率的に再現可能なモデル化手法を構築し、研究代表者らが開発した点検シミュレータへ適用することを目的とする。実橋のモデル化には、高密度な点群データにより対象構造物の形状を面的に捉えることが可能な 3D レーザースキャナと、2 次元画像から 3 次元形状を推定する Structure from Motion (以下, SfM) に着目し、両者を組み合わせた 3 次元モデル化手法の検討を行う。そして、著者らが開発した点検教育シミュレータへの適用を行う。また、点検作業時に点検漏れを防ぎ、信頼性の高い点検を支援するためのデジタル点検野帳の開発を行い、その有効性の検証を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 3D レーザースキャナによる橋梁諸元の収集

対象橋梁は図 1 に示す、橋長 10,900mm、幅員 4,600mm の単純非合成 2 主鉄桁橋である。この橋梁を対象に、図 2 に示す 3D レーザースキャナ Leica BLK360 を用いて計測を行った。スキャン状況を図 3 に示す。なお、橋梁全体のモデルを作成するため、橋梁周囲だけでなく、床版上面や橋梁の下面でもスキャンを実施した。スキャンデータと実寸法との比較を行い、スキャンデータの計測精度の検証を行った。



図 1 対象橋梁



図 2 3D レーザースキャナ



図 3 3D レーザースキャナでの計測状況

#### (2) SfM を併用した橋梁 3 次元モデルの作成

3D レーザースキャナでは、狭隘部のモデル化が困難である。そこで、計測対象物を様々な位置や角度から撮影した 2 次元画像を用意し、写真同士の位置関係を解析することで、計測対象物の 3 次元形状を推定する SfM に着目した。ただし、誤差の少ない 3 次元モデルを作成するためには、できるだけ計測対象物が重複するように撮影した画像を使用する必要がある。それゆえ、この手法を用いて橋梁全体をモデル化する場合、膨大な写真撮影が必要となり、データ量も膨大となることから、解析コストやデータの扱いやすさの点などでデメリットがあるため、橋梁全体については 3D レーザースキャンデータから、撮影が困難な狭隘部等については SfM からそれぞれモデルを作成し、それらを組み合わせることで、それぞれの利点を生かした橋梁 3 次元モデルを作成することとした。SfM を適用するための画像の取得は、小型で狭隘部の撮影に適したスマートフォンのカメラ機能を用いて行った。下フランジ近傍のボルト継手部を対象に行った撮影状況を図 4 に、使用した画像の一例を図 5 にそれぞれ示す。

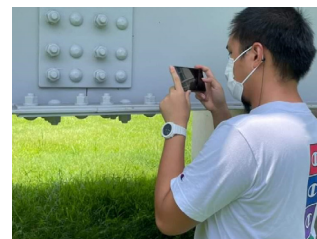


図 4 撮影状況



図 5 撮影画像の一例

#### (3) 点検シミュレータの高度化

(2) で作成した橋梁 3 次元モデルを点検シミュレータの取り込み、改良を行った。シミュレータの開発には、汎用 3D ゲーム開発ソフトウェアの Unity を用いた。なお、実際の視野や環境を体感可能なように、ヘッドマウントディスプレイで操作可能なようにシミュレータの高度化も同時に行った。



#### (4) デジタル点検野帳の開発

損傷・変状の点検漏れを防ぎ、信頼性の高い点検実施のために、タブレット端末内に橋梁 3D モデルを構築し、そのモデル上に過去の点検結果や新たな点検箇所、点検結果を記録可能な機能や点検の手引き等を現場で確認可能なデジタル点検野帳の開発を行った。開発にはシミュレータと同様に Unity を用いた。開発したデジタル点検野帳の有効性を評価するために、実橋での実装検証を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 3D レーザースキャナによる橋梁諸元の収集

3D レーザースキャナを用いて作成した対象橋梁の 3 次元点群モデルを図 6 に示す。スキャンデータの計測精度を検証するために、3 次元点群データと設計条件の比較を行った。実際の桁長は 10,800mm、幅員は 4,600mm、ウェブ高さは 1,200mm に対して、点群モデルではそれぞれ 10,795mm、4,603mm、1,202mm と誤差は概ね 2~5mm であった。また、板厚については、設計条件での端補剛材の板厚は 9mm、フランジ厚は 12mm に対して、点群データでは 8mm と 11mm となっており、比較的高精度で各部材の寸法等の橋梁諸元の計測ができていることが分かった。これらの計測データを活用することで、竣工図がない橋梁に対する図面の作成にも役立つと考えられる。

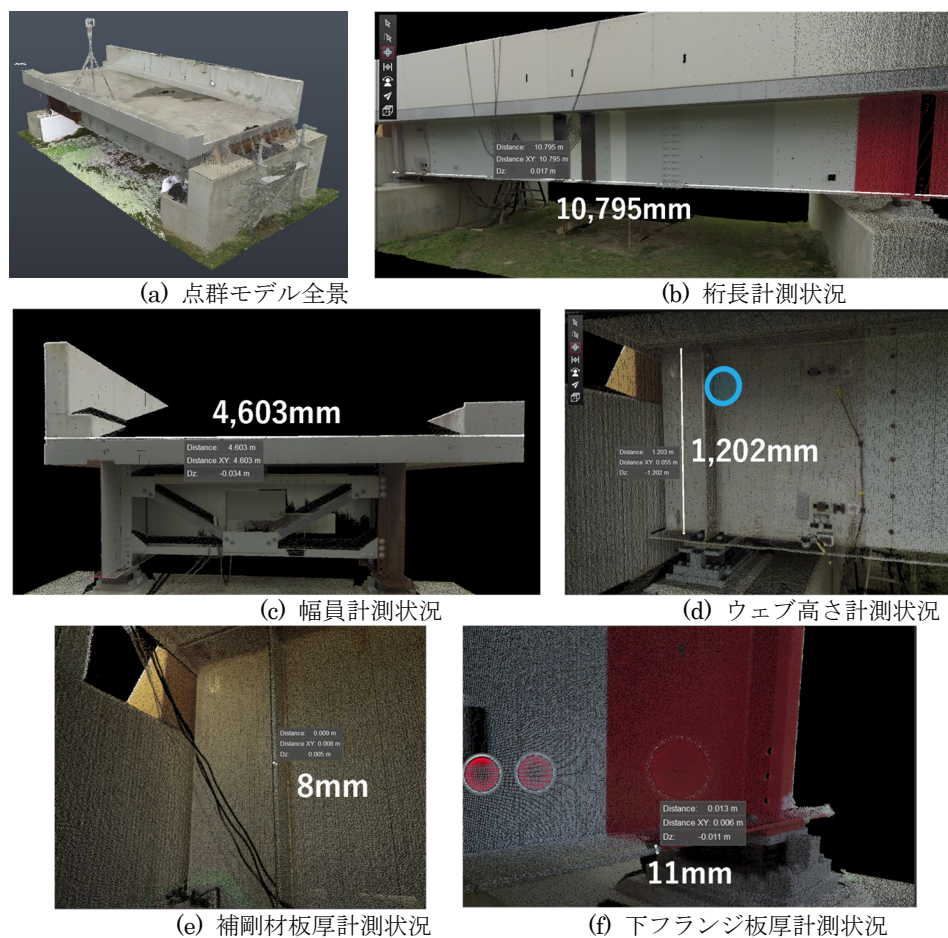


図 6 スキャンデータに基づき作成した 3 次元点群モデルと計測精度検証

#### (2) SfM を併用した橋梁 3 次元モデルの作成

作成したボルト継手部の 3 次元モデルを図 7 に示す。3D レーザースキャナではモデル化が困難なウェブ側のボルト側面などが正確にモデル化できており、SfM を適用することで狭隘部のモデル化が可能であるといえる。次に SfM により作成したモデルと 3D レーザースキャナのスキャンデータより作成したモデルを合成し、橋梁全体の 3 次元モデルの構築を行った。合成にあたっては、Iterative Closest Point 法を用いた。Iterative Closest Point 法は、点群データ同士の特徴位置の誤差が最小となるように繰り返し計算により位置合わせをする手法である。3D レーザースキャナより得られた点群モデルと SfM より作成した点群モデルの 2 つのモデルに対して Iterative Closest Point 法を適用して両者のモデル位置を決めたのちに、組み合わせた点群モデルに対してサーフェースを作成し、図 8 に示す 3 次元メッシュモデルを作成した。これより、2 つのモデルを組み合わせることで、橋梁部材や狭隘部を詳細に再現した橋梁全体の 3 次元モデルを構築できると考えられる。

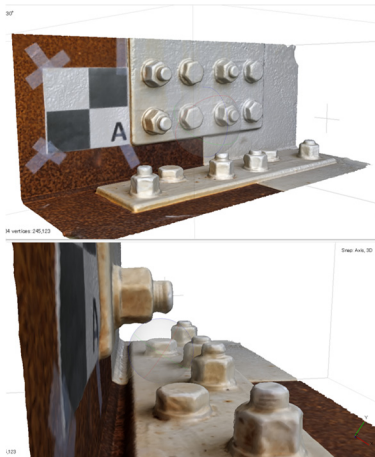


図7 作成したボルト継手部のメッシュモデル

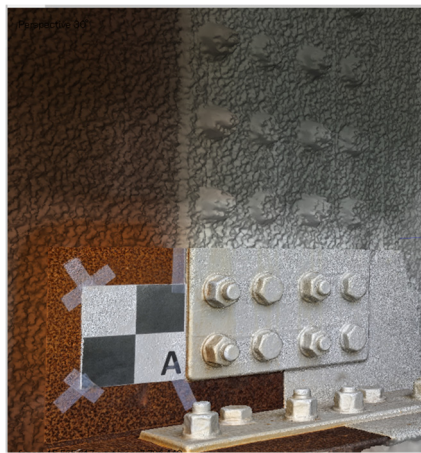


図8 組み合わせて作成したメッシュモデル

### (3) 点検シミュレータの高度化

シミュレータの開発状況を図9に示す。シミュレータ内では、点検者の移動はヘッドマウントディスプレイをつけた状態で移動するほか、手持ちのコントローラでも移動が可能である。点検者の視点を再現しており、シミュレータ上で橋梁の全景や複雑な支承部の形状、高力ボルト継手部の状況などを視認することが可能である。これより、3Dレーザースキャナ及びSfMにより作成した実橋梁モデルをシミュレータに適用することが可能であるといえる。この実橋の状況を再現した3次元橋梁モデルを用いることで、より点検者に近い視点や環境で学習ができ、現実に近い形で体感できると考えられる。



図9 点検シミュレータへの3次元橋梁モデルの適用状況

### (4) デジタル点検野帳の開発

デジタル点検野帳の主な機能を以下に示す。

#### ① 橋梁3Dモデル上への点検結果の記録機能

図10に示すように、橋梁の3Dモデル上の点検箇所をタップすることで、橋梁3Dモデルを活用してスケッチを行うことができる。スケッチが終了した後は、損傷の種類や程度等をプルダウンから選択する。また、手書きメモや音声入力によるコメント機能、カメラアプリによる写真撮影機能も有している。点検結果を保存すると、橋梁3Dモデル上に球体マーカーが表示され、マーカーをタップすることで記録内容を確認することができる。このマーカーの作成位置は視覚的に確認できるため、点検実施済み箇所を容易に判断できることによる点検漏れの防止や、3次元モデル上で損傷位置を視認できることによる損傷位置の誤報告の防止に役立つと考えられる。

#### ② 点検調書の自動作成機能

①の点検記録に基づき、点検調書の「その11~13」を自動作成が可能である。自動出力により転記ミスによる誤記入の防止や内業効率化に役立つと考えられる。

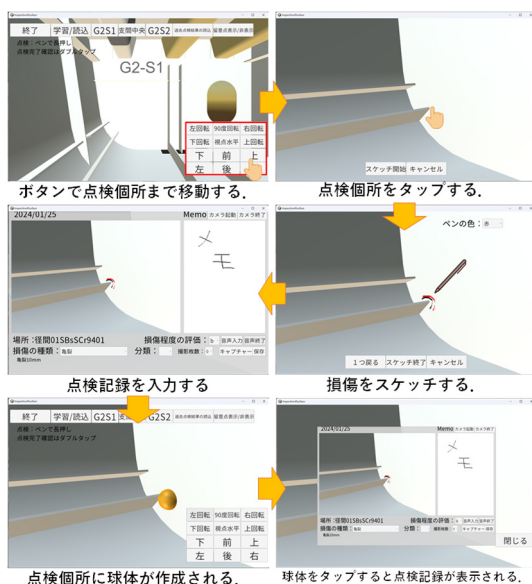
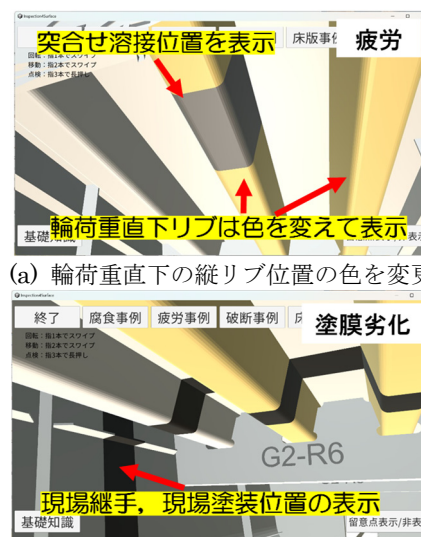


図10 点検結果の記録方法



(a) 輪荷重直下の縦リブ位置の色を変更  
図11 損傷懸念箇所の明示機能



### ③ 損傷懸念個所の明示機能

類似橋梁の損傷事例などから、損傷が懸念される個所について、橋梁 3D モデル上の色を変えて明示し、対象橋梁の損傷・変状の点検漏れを防ぐ機能を設けている。例えば、図 11 に示すように疲労き裂の発生が懸念される鋼床版の輪荷重直下にある縦リブや、現場塗装となるため、他の部位と比べて塗膜の劣化や腐食の発生する可能性が高い現場継手位置の色を変えることで、事前学習や点検時において点検重要個所を視覚的に把握できるようにしている。

そのほか、過去の点検結果の表示・確認機能や点検重要個所の事前学習機能など、点検漏れ等を防ぎ、信頼性の高い点検実施に役立つ機能を設けている。

デジタル野帳の有効性を検証するために、図 12 に示す 3 径間連続鋼床版箱桁橋の第 2 径間で実証試験を実施した。事前に熟練点検員 2 名（点検歴 20 年超）が詳細点検として十分に時間をかけて発見した損傷数を正値として、中堅（点検歴 8 年）、若手①（点検歴 5 年）、若手②（点検歴 3 年）の 3 グループが従来手法の場合とデジタル点検野帳を使用した場合に発見した損傷数とその点検作業時間を比較した。点検状況を図 13 に示す。点検は各グループ 2 名一組とし、1 人が点検員、もう一方が点検補助員として記録を行った。また、内業効率化を評価するために、点検後の調書作成時間も計測した。なお、従来手法は、通常の点検と同様となるよう定期点検員にヒアリングを実施し、以下のように行った。

- ・外業：点検結果（損傷位置、損傷 A 種類、損傷程度）を紙の野帳に手書きで記録。
- ・内業：事務所にて点検結果をセルに転記して調書（その 11～13）の作成。

各グループの損傷発見数、点検作業時間、調書作成時間の比較を表 1 から 3 に示す。なお、損傷発見数については紙面の都合上、き裂・塗膜割れのみの結果を示している。表 1 より、点検歴によらず、デジタル野帳を用いることで、き裂・塗膜割れの発見数が従来手法と比べて 35% 程度増加しており、点検漏れに対して有効である傾向が得られた。また、表 2 に示す点検作業時間の比較では、1 損傷個所あたりの記録に要する時間は従来手法と同程度あった。さらに内業作業時間を比較した表 3 では、点検調書の自動出力により作業時間が 1/4 程度に短縮されており、内業効率化に効果的であることが示唆された。

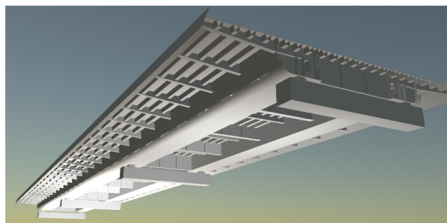


図 12 対象橋梁と 3 次元橋梁モデル



図 13 デジタル点検野帳での点検状況

表 1 損傷発見数の比較（き裂・塗膜割れ）

点検員	損傷発見数(き裂・塗膜割れ)		発見割合の向上
	従来手法	デジタル点検野帳	
熟練点検員 詳細点検 (点検歴 20 年以上)	22 箇所		
中堅点検員 (点検歴 8 年)	10 箇所 45%(10/22)	18 箇所 82%(18/22)	37%向上
若手点検員① (点検歴 5 年)	5 箇所 23%(5/22)	13 箇所 59%(13/22)	36%向上
若手点検員② (点検歴 3 年)	0 箇所 0%(0/22)	8 箇所 36%(8/22)	36%向上

表 2 点検作業時間の比較

点検員	従来手法			デジタル点検野帳		
	時間(分)	損傷数	1 箇所当たり	時間(分)	損傷数	1 箇所当たり
熟練点検員 詳細点検 (点検歴 20 年以上)	209 分	61	3.4 分			
中堅点検員 (点検歴 8 年)	68 分	41	1.7 分	65 分	49	1.3 分
若手点検員① (点検歴 5 年)	70 分	28	2.5 分	75 分	56	1.3 分
若手点検員② (点検歴 3 年)	58 分	59	1.0 分	82 分	75	1.1 分

表 3 点検調書(その 11～13)作成時間の比較

点検員	従来手法(エクセル手入力)		自動出力機能
	損傷数	時間(分)	時間(分)
中堅点検員 (点検歴 8 年)	49	15 分	5 分
若手点検員① (点検歴 5 年)	60	20 分	5 分
若手点検員② (点検歴 3 年)	44	24 分	5 分
平均	51	20 分	5 分

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 田井 政行、白旗 弘実、河合 孝純	4. 巻 2
2. 論文標題 橋梁定期点検用デジタルツイン点検野帳の開発	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 インフラメンテナンス実践研究論文集	6. 最初と最後の頁 136 ~ 142
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11532/jsceim.2.1_136	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 田井政行、白旗弘実、河合孝純
2. 発表標題 橋梁定期点検用デジタルツイン点検野帳の開発
3. 学会等名 インフラメンテナンスシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田井政行、白旗弘実、河合孝純、青木工、原廣敬、高木千太郎
2. 発表標題 橋梁デジタル点検野帳の実装
3. 学会等名 第48回土木情報学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M.Tai, H.Shirahata, T.Kawai, T.Aoki, H.Hara and S.Takagi
2. 発表標題 Development and implementation of digital inspection notebook for bridges
3. 学会等名 International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田井政行, 白旗弘実, 青木工, 原廣敬, 高木千太郎
2. 発表標題 社会インフラのデジタル点検野帳の開発と実装検証
3. 学会等名 土木学会第79回年次学術講演会
4. 発表年 2024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	下里 哲弘  (Shimozato Testuhiro)  (90452961)	琉球大学・工学部・教授    (18001)	

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
---------	---------