

4D を活用した橋梁の維持管理システムの構築 —AI と VR 技術を用いて—

齊藤 駿¹・藤生 慎²・福岡 知隆³

¹ 学生会員 金沢大学 理工学域 地球社会基盤学類 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: s_sdt6338@stu.kanazawa-u.ac.jp

² 正会員 金沢大学准教授 融合研究域融合科学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: fujiu@se.kanazawa-u.ac.jp (Corresponding Author)

³ 正会員 金沢大学博士研究員 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: tfukuoka@se.kanazawa-u.ac.jp

社会インフラの維持管理において、技術者の不足に加え老朽化が進行した構造物が増加しているため、維持管理コストの削減が求められる。維持管理における省力化を目的として橋梁 3D モデルを導入する研究が行われており、VR (Virtual Reality) を用いた手法では、現場での点検を疑似体験することができる。本研究では、橋梁 3D モデル上に AI による損傷の強調表示を反映させ、損傷箇所の確認を容易にした橋梁 3D モデルを VR 空間上で観察するシステムを開発した。また、本手法で定期的に橋梁 3D モデルを作成し比較することで、時系列的な損傷の変化を確認することが可能になると考えられる。

Key Words: Virtual Reality, bridge maintenance, AI, UAV, structure from motion

1. はじめに

わが国では老朽化した社会インフラが増加している。特に高度経済成長期以降に整備された道路橋について、一般的に寿命とされている 50 年以上経過している割合は、図-1 に示すように 2023 年時点では約 39%、2033 年時点では約 63%にまで増加すると予測される¹⁾。そこで、適切な維持管理を行い効果的な老朽化対策の推進を図ることを目的として、2014 年に橋梁定期点検要領²⁾が策定され、橋梁について、5 年に 1 回の近接目視点検にが義務付けられた。しかし、全ての橋梁に対し近接目視点検を実施するには多くの時間と費用が必要となる。したがって、今後の老朽化した橋梁の増加に対応するため、維持管理コストの削減が喫緊の課題であるといえる。

前述した課題を解決するために、橋梁の点検作業を効率化・省力化する研究や、技術者の育成を補助するシステムの研究が行われている。近年、近接目視点検の代替手法として注目されている ICT 分野では、AI (Artificial Intelligence) 技術を用いた画像認識・空間認識による橋梁の損傷判定手法が提案されている。例えば、福岡らは、深層学習を用いて橋梁の損傷を検出する手法を提案し、その有効性を示している³⁾。南らは、超高解像度カメラ

と AI を用いて橋梁の損傷の程度を明らかにする手法を構築している^{4),5),6),7)}。以上のように、橋梁の点検作業の分野においても AI 技術を利用して、現地に赴くことなくかつ構造物に非接触でデータを取得し損傷の程度を明らかにする研究が行われている。一方で、画像による点検では、対象とする橋梁を平面で描画しているため、現実のような立体的な評価ができない。そこで、馬場らは、橋梁の 3D モデルを VR 空間において点検作業を疑似体験できる橋梁点検システムを開発している⁸⁾。また、宮本らは、VR 技術を用いた仮想橋梁を表現するシステムによる橋梁の維持管理技術教育の有効性を示している⁹⁾。

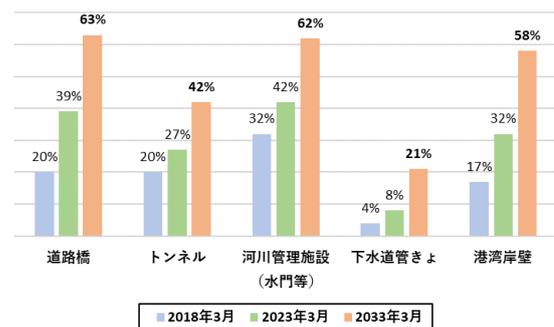


図-1 建設から 50 年以上経過する社会インフラの割合

VR 技術を活用することで、現実の橋梁と同様の大きさの橋梁 3D モデルを観察できるので、損傷の大きさや位置関係を正しく把握することができる。しかし、ひび割れなどの詳細な損傷は確認しづらいといった問題がある。そこで、本研究では、コンクリート構造物の代表的な損傷であるひび割れを AI による画像認識を用いて自動的に検出し、3D モデル上で強調表示する。これにより、VR 空間内で橋梁全体を俯瞰しながらひび割れの具体的な位置を把握することが容易になると考える。本研究では、実際の橋梁に前述した手法を適応し、AI と VR 技術を組み合わせた橋梁点検システムを構築することで、点検員による点検支援の可能性を検証した。

2. VR 技術の活用方法

本章では、橋梁の点検における VR 技術の活用方法について述べる。VR とは、バーチャルリアリティの略で日本語では仮想現実と言われる。VR/AR/MR などの先端技術の総称を XR¹⁰⁾ と言い、VR よりも現実感の強い場合には AR (Augmented Reality)、日本語で拡張現実と言う。さらに、現実の物体を踏まえて仮想世界を現実と融合させた場合は MR (Mixed Reality)、日本語で複合現実と言う。本研究では、没入感が高く現実での点検を疑似体験するのに適している VR を使用し、VR 空間に現実の実橋梁の 3D モデルを読み込むことで、仮想空間内での橋梁の点検作業を可能とする。点検作業は VR 空間を構築した室内で行うことができるため、時間や天候の制約を受けることなく現場とほぼ同様の環境を体験することが可能である。また、3D モデルの作成に用いる画像データは UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いて遠隔で撮影する。したがって、幅員が狭く橋梁点検車を使用できない橋梁での点検を省力化し、交通規制を行う必要もないため費用の削減や交通への影響の減少に繋がる。

次に、橋梁の点検における VR 技術と AI による画像認識の活用について述べる。本研究では、橋梁の損傷のうち、代表的なひび割れを AI によって検出し強調表示した 3D モデルを VR 空間内に描画する。しかし、AI による画像認識情報の表示されたモデルでは、構造物の表面にひび割れ領域が重なり元の構造物の状態を視認できなくなってしまう。したがって、仮想空間では、現実の構造物と遜色のない 3D モデルとひび割れ領域を表示した 3D モデルを同時に見るようにする。これにより、視覚的にわかりやすく橋梁全体を比較でき、全体を俯瞰しながらひび割れの位置を確認することを可能とする。

最後に、橋梁 3D モデルの 4D (3D+時間) 活用について述べる。実際の橋梁点検では損傷を撮影し点検調査に記録するが、全ての損傷を記載することは難しい。した

がって、新たに損傷が発見され、過去の点検調査に記載がなかった場合、過去の点検で損傷を見落としていたか新しく発生した損傷であるかの判別が困難である。その点、本研究で作成するモデルはすべて電子データであるため、管理・保存が容易であり点検当時の損傷が進行することがない。したがって、いつでも点検当時の橋梁の状態を確認することができ、モデル作成の回数を重ねることで時系列データベースの管理が可能である。これにより、図-2 に示すように時間経過による橋梁全体の変化を包括的に確認することができる。

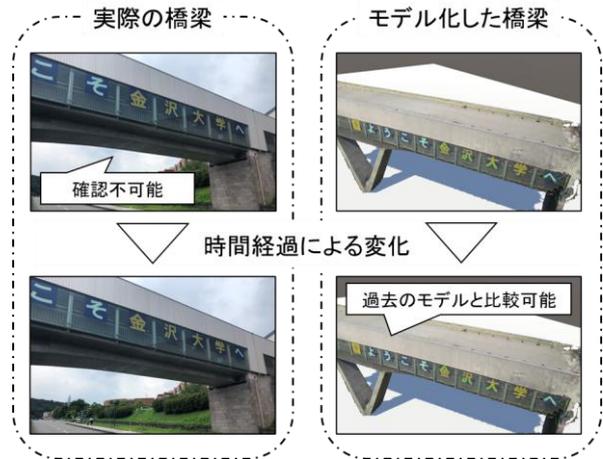


図-2 橋梁 3D モデルの 4D 活用

3. 本システムの概要

本章では、著者らが開発した AI を用いた VR 点検システム (Bridge Inspection System with VR and AI : 以下、BISVRAI と略す) の概要と実装方法について述べる。図-3 は BISVRAI の概要である。

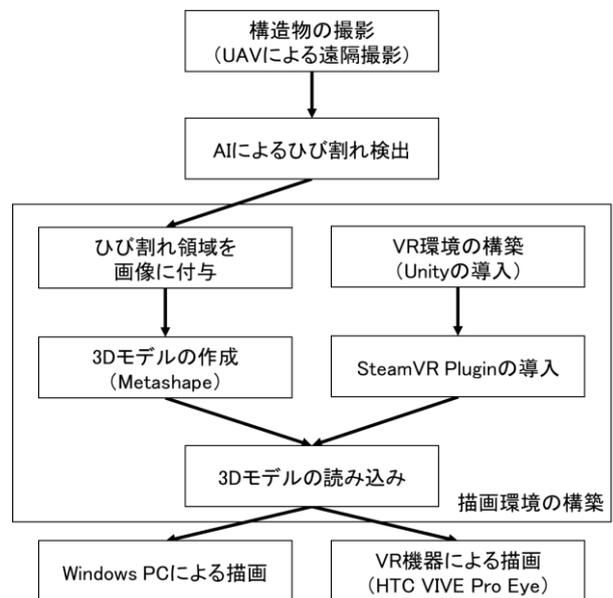


図-3 「BISVRAI」の概要



図-4 VR再生環境



図-5 室内のVR空間



図-6 本研究で使用したUAVとカメラ



図-7 対象橋梁の一部(1径間)

本研究の目的の一つは現実の橋梁の 3D モデルを VR 空間上に再現することである。VR では、コンピュータによってつくられた仮想的な世界をヘッドマウントディスプレイ（以下、HMD）を通じて視認する。HMD は左右の目の視差を用いた立体映像による VR の表示装置の総称であり、あたかもその場にいるような没入感の高い世界を体験できる。VR 再生を行う機器は、パソコンに HMD を接続して動作する「PC 接続型」と HMD 単体で動作する「スタンドアロン型」に分けられる。PC 接続型は HMD と高性能なパソコンが必要なのでコストがかかる分、解像度や描画速度など VR 再生の質は高くなる。また、PC 接続型には、赤外線を出す外部センサーを置き HMD で赤外線を検知して位置を計算する「外部センサー方式（図-4）」と、HMD のカメラで位置を計算する「インサイドアウト方式」がある。外部センサー方式は位置検知の精度が高く、インサイドアウト方式はセットアップが簡単という特徴を持つ。本研究では、橋梁の損傷を高い解像度で確認するために PC 接続型の外部センサー方式の VR 機器（HTC VIVE Pro Eye）を採用し、図-5 に示す VR 空間を室内に設定した。次に、BISVRAI の実装方法について図-3 の構築フローに従い説明する。

(1) SfM に用いる画像の撮影

本研究で橋梁の撮影に用いた UAV は、図-6 に示す DJI JAPAN 株式会社の M200 SERIES V2 である。カメラは、同じく図-6 に示す DJI JAPAN 株式会社が開発した ZENMUSE XT2 である。撮影した画像の大きさは高さ 2160、幅 3840 ピクセルである。撮影枚数は橋梁の規模や現場環境によって異なり、本研究で対象とした金沢大学アカンサスインターフェースの 1 径間（図-7）では手動で UAV を操作し 129 枚撮影した。撮影した画像は SfM（Structure from Motion）による 3D モデルの作成に用いる。SfM は空撮画像から 3D モデルを作成する手法で、画像間における共通した特徴点を連結させるため、撮影する際はオーバーラップ率を 60 から 80% 確保する必要がある。しかし、水中にある橋脚や、排管などの障害物によって死角となっている部分は 3D モデルを構築できない場合がある。また、画像の連結の過程では GPS による位置情報を参照する。そのため、UAV と衛星との間に遮蔽物がある場合は位置情報の正確性が低下する可能性があり、画像の連結が失敗する原因になるので、橋桁の裏や橋脚を撮影する際は UAV が橋梁の下に入り込まないようにして撮影するなどの工夫が必要となる。

(2) 深層学習を用いたひび割れの検出

点検箇所を撮影した画像を入力として、橋梁の代表的な損傷であるひび割れを AI により自動で検出する。深層学習を用いた画像処理技術の一つであるセマンティックセグメンテーション技術を用いて画像のひび割れ領域を自動抽出する。セマンティックセグメンテーションは画像を任意の領域（道路、空、人など）に分割した情報を保持した教師データから、各領域の特徴を学習したモデルを用いて、未知の入力画像に対して画像の領域を自動で推定する技術である。具体的には以下の手順で検出を行う。

1. 実橋梁を高解像度カメラで撮影した画像を 256x256 ピクセルに分割し、分割画像に対してひび割れアノテーションデータを作成する。
2. Pix2Pix³⁾により、疑似画像生成モデルを 64 個作成する。
3. 137 の疑似画像生成モデルへの入力ひび割れパターンを水平反転、垂直反転、水平移動、回転、拡大・縮小の処理をランダムに実施して水増しし、120000 枚の疑似ひび割れ画像を生成する。
4. ひび割れ検出モデルを学習させる。

適応条件は、以下の 5 項目である。

- ① 撮影時の明るさは照度約 1000 ルクス以上で撮影された画像であること。
- ② 点検箇所に対して仰俯角約 30 度以内で撮影された画像であること。
- ③ 検出したいひび割れ幅の約 4 倍以下の画像分解能で撮影した画像であること（例：0.1mm のひび割れを検出する場合、0.4mm/pixel 以下の画像分解能が必要）。本研究で用いたカメラの場合、撮影距離を 1.4m 以下にする必要がある。
- ④ 画像フォーマットは JPEG か PNG であること。
- ⑤ デジタルズーム機能は使用していない画像であること。

上記の適応条件を満たしていない場合、ひび割れの検出精度が低下する可能性がある。図-8 は AI によるひび割れの検出を行った金沢大学アカンサスインターフェースの橋脚の一部である。左の写真が UAV で撮影した画像であり、右の写真で黒く表示されている領域が AI によってひび割れと検出された部分である。



図-8 検出結果の一部

(3) 3D モデルの作成

本節では、Agisoft Metashape を用いた 3D モデルの作成手順について述べる。Agisoft Metashape (旧名、Photo Scan) は、株式会社オークが開発・提供しているソフトウェアで、デジタル画像の写真測量処理や 3D 空間データの生成を行うことができる。以下に 3D モデル作成の手順を示す。

- ① 「ワークフロー」の「フォルダを追加」から、2 節で処理したひび割れ領域の検出された写真を取り込む。
- ② 「ワークフロー」の「写真のアラインメント」を実行する。解析が完了すると低密度点群が生成される。この際、取り込んだ写真の右上にチェックが表示され、アラインメントに成功していることを確認する。特定の範囲で連続してアラインメントに失敗していると、最終的に完成するモデルに欠損が生じる場合がある。また、目安になりやすい箇所（構造物の角や頂点）にマーカーを設置し、各写真においてマーカーの位置を正確に調整することで以降の処理で精度が向上する場合がある。
- ③ 「ワークフロー」の「高密度クラウド構築」を実行する。解析が完了すると高密度点群が生成される。対象とする橋梁以外の不必要な点群（道路、空、木など）を削除する。
- ④ 「ワークフロー」の「メッシュ構築」を実行する。③で作成した高密度点群からメッシュが作成され、シェード・ソリッド・ワイヤーフレームの 3 種類が出力される。
- ⑤ 「ワークフロー」の「テクスチャー構築」を実行する。この工程が完了するとテクスチャーが生成される。
- ⑥ 「ファイル」の「エクスポート」から「モデルをエクスポート」を選択し、ファイル形式（本研究では FBX 形式）を指定して 3D モデル及びテクスチャーを出力する。

(4) VR 描画環境の構築

作成した 3D モデルを VR 機器で確認できるウォークスループログラムを構築するために Unity を用いる¹¹⁾。Unity は米 Unity Technologies 社が開発したゲームエンジン（ゲームを作成するためのソフト）である。Unity で作成したゲームはパソコンだけでなくスマートフォンやゲーム機、VR などの様々なプラットフォームで実行できる。Unity を用いて VR コンテンツを開発するためには、SteamVR に対応させる必要がある。SteamVR は、バーチャルリアリティ体験の基礎となるランタイムで、基本的に VR 対応の HMD を PC に接続した際に自動的にインストールされる。SteamVR に対応させるために、Unity に

SteamVR Plugin を導入する。最後に、3 節で作成した 3D モデルを Unity で読み込むことで VR 機器を用いて 3D モデルを VR 空間上で確認できるようになる。

4. BISVRAI を用いた点検の可能性

(1) 技術者による評価

3 章で作成した橋梁の 3D モデルは Unity を用いたウォークスループログラムで点検することができる。VR 再生のできる HMD では橋梁が目の前に存在しているような没入感のある体験ができ、同時に HMD で見ている映像を Windows PC のディスプレイでも確認することができる(図-9)。点検では、VR 空間内で実際に歩き、あたりを見回すことで橋梁を確認する方法と、椅子に座った状態で PC のキーボードを操作することで移動し橋梁を確認する方法がある。

実際に、金沢大学の施設を管理している技術者に、VR 空間で橋梁を観察してもらい、BISVRAI に関して得られた知見を以下にまとめる。

- ① UAV を飛ばすことができれば簡単に点検が行える。
- ② 点検時間の短縮につながる。
- ③ 3D モデルをデータとして保存できるので、構造物の変化を観察できる。
- ④ 詳細なひび割れが確認できれば生産性のある点検が可能である。

次に、時間の経過を反映した 4D 活用について述べる。一度作成した 3D モデルは実際の橋梁とは異なり、時間経過によって状態が変化しないデータとして永久に保存することができる。したがって、定期的に対象橋梁の 3D モデルを作成することで老朽化の様子を確認することが可能である。また、損傷の進行具合を観察することで、今後の老朽化を予測し維持管理計画を立てられると考えられる。

(2) ひび割れの精度

図-10 は VR 空間で描画された橋梁の 3D モデルであり、緑色で示される領域が AI でひび割れと検出された部分である。3D モデルを作成する過程で複数の写真を結合するため協調表示が重なる。したがって、この緑色の強調表示は、本来のひび割れ幅よりも大きく表示される傾向がある。再現率(入力画像内で、ひび割れである領域を AI がどの程度検出できているかを示す指標)については、撮影した画像にピクセル単位でひび割れ領域を付加することで評価用データを作成し、AI の出力と比較することで算出した。閾値を 50%とした場合の再現率は 31.6%となっており、これは実際の橋梁のひび割れの約 7 割が検出できていないことを意味している。再現率が低くなった要因として、撮影時の実橋梁と UAV との距離

が長く、ひび割れが鮮明に撮影できなかったことが考えられる。また、橋梁のコンクリート部分の型枠などの誤検出も確認された。しかし、これらの問題は撮影する画像の解像度を上げることや多様な学習モデルを用いて AI の検出精度を向上させることで軽減させることが可能であると考えられる。



図-9 技術者による VR 体験の様子



図-10 VR 空間での描画

5. まとめ

本研究は、橋梁の近接目視点検を代替する新たな手法として AI と VR 技術を組み合わせた橋梁点検システムの構築を行った。また、実際に BISVRAI を用いて技術者による橋梁点検の支援の可能性を検証した。以下に得られた知見をまとめる。

- ① UAV で撮影した画像に対し AI によるひび割れの検出を行った。
- ② ひび割れ領域が付与された橋梁の 3D モデルを作成した。
- ③ 作成した 3D モデルを VR 空間で確認できるウォークスループログラムを構築した。
- ④ VR 機器を用いて技術者による橋梁点検を実施した結果、損傷の検出精度を上げることで生産性のある点検が可能という評価を得ることができ、BISVRAI の有効性が検証された。

今後の展望としては、ひび割れの誤検出の減少と再現率の向上のために、AI のひび割れ検出精度を上げる必要がある。その手法の一つとして UAV での撮影環境の変更が挙げられる。本研究では UAV を手動で操縦し橋

梁の撮影を行ったが、自動飛行による撮影を導入することで写真の質を向上させ、ひび割れ検出精度を上げられると考えられる。

また、鉄筋露出や錆などのひび割れ以外の橋梁の損傷も AI で検出し 3D モデルに付加することで、橋梁の健全度を VR 空間内で評価できるシステムを構築したい。そして、精度の向上により詳細な損傷の表示を可能とすることで、BISVRAI を近接目視点検の代替手法として用い点検の効率化・支援を行えると考える。

参考文献

- 1) 令和 2 年版 国土交通白書, <<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r01/hakusho/r02/pdfindex.html>>, (2021 年 6 月 21 日閲覧)
- 2) 道路橋定期点検要領-国土交通省, <<https://www.mlit.go.jp/common/001044574.pdf>>, (2021 年 6 月 23 日閲覧)
- 3) 福岡知隆, 南貴大, 浦田, 藤生慎, 高山純一, 深層学習による橋梁点検のための Pix2Pix による疑似訓練データ作成, 土木学会論文集 F4(建設マネジメント), 2019, Vol75, No2, p. I_27-I_35.
- 4) 南貴大, 藤生慎, 高山純一, 橋梁の定期点検データを活用した部材間の損傷程度の関連性に関する基礎的分析～桁下部材の損傷発生の早期発見にむけて～, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 2018, Vol.74, No.5, pp339-348.
- 5) 南貴大, 藤生慎, 高山純一, 須田信也, 奥村周也, 渡辺一生, 超高解像度カメラで撮影された画像を用いた橋梁点検の実施可能性に関する基礎的検討, 社会技術研究論文集, 2018, Vol.15, pp54-64.
- 6) 南貴大, 浦田渡, 藤生慎, 福岡知隆, 高山純一, 画像の属性や点検経験年数が画像を用いたコンクリートひびわれの検出に与える影響分析, 2019, 土木学会論文集 F4(建設マネジメント), 2019, Vol75, No2, p. I_50-I_57.
- 7) 南貴大, 藤生慎, 福岡知隆, 高山純一, コンクリート構造物のひびわれ画像を用いた健全性の診断支援に関する基礎的研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 2021, Vol 76, No5, I_297-I_304
- 8) 馬場那仰, 谷川さくら, 江本久雄, 中村秀明, 河村圭, MR-ヘッドマウントディスプレイを用いた橋梁点検体験システムに関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 2019, Vol75, No 2, II_34-II_42.
- 9) 宮本文穂, 永田信人, 今野将顕, 中村秀明, バーチャルリアリティを用いた橋梁維持管理技術者教育システムの提案, 土木情報利用技術論文集, 2005, Vol14, 109-118.
- 10) XR とは | docomo XR | NTT ドコモ, <https://xr.docomo.ne.jp/about_xr/>, (2021 年 6 月 22 日閲覧)
- 11) 阿部秀之, Unity でつくる建築 VR 入門, 株式会社エクスタレッジ, 2020.

CONSTRUCTION OF BRIDGE MAINTENANCE SYSTEM IN A 4D ENVIRONMENT USING AI AND VR TECHNOLOGY

Shun SAITO, Makoto FUJII and Tomotaka HUKUOKA

In the maintenance of social infrastructure, the number of aging structures is increasing in addition to the shortage of engineers, so it is necessary to reduce the maintenance cost. Research is being conducted to introduce a bridge 3D model for the purpose of labor saving in maintenance, and the method using VR (Virtual Reality) allows a simulated experience of on-site inspection. We have developed a system for observing a bridge 3D model in VR space by reflecting the damage highlighting by AI on the bridge 3D model and facilitating the confirmation of the damaged part. In addition, by regularly creating and comparing 3D bridge models using this method, it will be possible to confirm changes in damage over time.