

(73) 小規模橋梁の安全確認のための 効率的点検技術の調査研究

関 和彦¹・岩佐 宏一²・
窪田 諭³・塚田 義典⁴・安室 喜弘⁵・今井 龍一⁶

¹正会員 アイセイ株式会社 技術開発部 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2丁目40番3号)
E-mail: seki-k@eyesay.co.jp

²正会員 アイセイ株式会社 代表取締役 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2丁目40番3号)
E-mail: iwasa-k@eyesay.co.jp

³正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)
E-mail: skubota@kansai-u.ac.jp

⁴正会員 摂南大学講師 経営学部 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17番8号)
E-mail: yoshinori.tsukada@kjo.setsunan.ac.jp

⁵正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)
E-mail: yasumuro@kansai-u.ac.jp

⁶正会員 法政大学准教授 デザイン工学部 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2丁目33号)
E-mail: ryuichi.imai.73@hosei.ac.jp

2014年に公共インフラ施設(橋梁等)の5年に1度の定期点検が法制度化された。全国で約73万橋ある橋梁のうち、53万橋が橋長2~15mの小規模橋梁である。これらの橋梁には点検技術者が容易に近づくことができないことが多い。そこで、本研究では、小規模橋梁を対象にして、目視点検の代替となる点検手法の検討を目的として、点検ロボットの開発、3次元CADデータ作成の効率的手法の検討、3次元モデルによる点検結果の管理システム、AIによる写真からの損傷箇所の抽出という4つ観点で検討を行った。

研究の成果として、実証実験を複数回実施し、利用シーンに応じた技術の適用範囲を整理し、機能要件定義を明確にした。これは、実運用に向けて開発するための一資料となり、今後の小規模橋梁における点検の効率化、生産性の向上、安全性等の発展に寄与することが多いに期待できる。

Key Words: bridge inspection, Structure from Motion, 3D Damage Figure, AI Damage Detection

1. はじめに

2014年に国土交通省により、公共インフラ施設(橋梁等)の5年に1度の定期点検¹⁾が法制度化された。それまで点検を定期的に実施していない市町村が管理している橋梁の点検が一斉に実施されている。市町村が管理している橋梁は比較的小規模なものが多く、点検困難なものも少なくない。

点検技術者が危険を冒さずに容易に近づくことができない箇所については、様々な点検器具の使用や点検時期の調整で実施することが多いが、それでも実施できないため“点検不可”という選択も少なくないのが現状である。国内には約73万の橋梁が存在し、その内の約53万

橋が橋長2~15mの小規模橋梁である。このような小規模橋梁では、点検技術者が容易に近づくことができない箇所が多く、要領に準じた目視確認ができない場合がある。さらに2019年に、“新技術による補完・代替を認める改訂”が行われ²⁾、併せて、新技術利用のガイドラインが整備される予定であり、効率的な点検技術の開発、適用範囲等の整理などが求められている。

2. 研究の目的と方法

本研究は、これらの小規模橋梁を対象にして様々な課題・リスクに対して実証実験を行い、利用シーンに応じ

た技術の適用範囲を整理し、機能要件定義を明確にして、実運用に向けた開発をするための一資料を作成することを目的とする。

本研究では、人が進入できない、もしくは人が入っても点検作業を行うだけのスペースが確保できないような箇所、目視点検を代替するためのロボットを開発する。このロボットは様々な土木構造物に対しても有効であると考えられるが、本研究では小規模橋梁を対象に絞り実施する。

本研究の実施方針と着眼点を以下に整理した。ロボットの走行試験、搭載機器によるデータ取得および取得したデータによる後処理作業等の実証実験を実施し、それぞれの課題・適用範囲を整理・抽出し、さらに各作業項目の要求性能へフィードバックすることで、全体最適化を図る。

(1) 点検ロボットの開発

人の代わりに橋梁の桁下に進入していくロボットを開発する。

(a) 条件設定

筆者らの 20 年以上の橋梁点検・調査業務で得られた知見と経験より、ロボットの主な要求仕様は以下の通り定めた。高さ 70cm は、点検技術者が桁下空間に進入できる高さであるが、確認すべき桁（床版）下面を仰ぎ見ることが困難な高さである。対象とした橋梁と同等規模の橋梁における点検作業状況を図-1 に示す。

- 桁下空間高さ 70cm に進入・退出できること
- カメラなど損傷を記録する機器を搭載できること
- 数 cm 程度の凹凸や小石を乗り越え、泥などのぬかるみも走行できること

(b) 実施方針および着眼点

ロボット開発は、はじめに利用シーンを、想定される走行環境、通信環境および視認性の低い環境下でのロボット操縦等の様々な課題に対して選定し、次に搭載機器を検討する。実証実験は、はじめにロボットの走行性能、操縦者(コントローラ)とロボットとの無線通信品質、搭載機器等の取付位置等を検証し、次に搭載機器の種類、機器の取付位置、取得方法の設定を変えて検証する。

(2) 3次元 CAD データ作成の効率的手法の検討

ロボットが取得したデータを用いて、簡易かつ効率的に 3 次元 CAD データを作成する手法を検討する。橋梁点検においても、2 次元の画像データから 3 次元点群データ化(SfM : Structure from Motion 処理)して、3 次元 CAD データ作成までの処理を行う機会が増えてきている。これは、固定型レーザースキャナーで、取得出来ない入り組んだ箇所等を補間する目的として利用する。本研究で対象としている小規模橋梁は同様の条件に近い。

(a) 条件設定

橋梁の形式は様々であるが、小規模橋梁において大部分を占める RC 床版桁橋とボックスカルバート橋に限定する。

(b) 実施方針および着眼点

1 つ目の着眼点として、SfM 処理を行う上で、使用する静止画を一定以上のラップ率で取得することが重要である。それらを人ではなく、ロボットでどのように取得することがよいかを実証実験で検証する。具体的には、写真取得方法（静止画/動画）、写真解像度、ラップ率、対象構造物までの距離・画角および特徴点の有無を設定し、環境を変えて実施し、SfM 処理を経て生成した点群で精度評価を行う。

2 つ目の着眼点として、生成された点群データから 3 次元 CAD データ化をする。現状は CAD 技術者が、経験値および橋梁製作上の知識から、点群データから任意点を選択（クリック）して線分、面を作成し、それらを結合して 3 次元 CAD データ化を行っており、膨大な時間と労力が必要となるためボトルネックとなっている。この作業の省力化、効率化手法を検討する。

(3) 3次元モデルによる点検結果管理システムの検討

施設管理者、点検事業者、補修工事事業者等の構造物のライフサイクルにおける関係者が正確・確実に情報共有できるための管理手法として、『3D 損傷図作成支援システム』のプロトタイプを構築し、必要な機能要件を整理する。開発環境は、3 次元モデルを扱うことが可能な Unity[®]（ユニティ・テクノロジーズ社が提供するゲーム開発統合環境）を利用する。

要求性能は、表-1 のとおり定める。異なる立場の事業関係者間で情報共有ができるプラットフォームとなり得るかどうか重要である。



図-1 小規模橋梁における点検作業状況

表-1 3D 損傷図作成支援システム機能一覧

No	機能
1	橋梁の新規登録
2	橋梁の諸元データの登録・閲覧・編集
3	橋梁の検索
4	橋梁の 3 次元モデルの表示・操作
5	損傷データの登録・閲覧・編集
6	損傷情報の絞り込み表示 (部位/損傷種類/損傷程度)

表-2 検討パラメータおよび資材 (SfM 処理)

項目	値	備考
カメラ機種	一眼レフカメラ アクションカメラ	
カメラ設置方向	鉛直, 水平の 各2ケース	
撮影方法	静止画/動画	静止画は撮影間隔 を3ケース
標定点	設置の有無	床版下面に エスロンテープを 設置
カメラ設定	広角モードの On/Off HDR の On/Off	

(4) AIによる写真からの損傷箇所抽出の検討

ロボットが健全・異常の区別なく大量に取得した画像から、損傷箇所を自動抽出する AI (機械学習) を行うための教師データ作成方法および実運用に向けた要件を整理する。

点検技術者が従来通りの点検手法で構造物に近接し撮影した損傷写真を教師データとして機械学習を行い、識別器を作成する。その識別器を使い、ロボットが取得した写真で損傷箇所の識別を行い、その結果を考察する。

3. 実施内容

(1) 点検ロボットの開発

(a) 搭載機器

主な搭載機器としてロボット操作用のカメラ、損傷取得のためのカメラ (GoPro HERO7), さらに自己位置推定用に LiDAR (Velodyne VLP-16) を搭載する。

(b) 実証実験

実証実験は、はじめに橋長 2.0m, 幅員 4.5m, 桁下空間高さ 0.8m で行い、搭載機器の位置や取得画像を使用した SfM 処理結果の良否, LiDAR による自己位置推定の可否について検証を行う。次に、類似橋梁 2 橋で、検証結果をもとに最適と思われるパラメータで同様の実験を行うことで再現性を確認する。実験で検討したパラメータについて表-2 と表-3 に示す。実証実験の作業状況を図-2 に示す。

(2) 3次元 CAD データ作成の効率的手法の検討

ロボットで取得した画像データを用い、SfM 処理で 3 次元形状の生成を確認した。同一橋梁で、一眼レフカメラとアクションカメラで取得した画像データで SfM 処理結果を図-3 に示す。一眼レフカメラでは、点群データに欠落した箇所が多く見られた。これは明るい環境から桁下の暗い環境へ進入したときの明るさ調整の差が影響したと考える。

表-3 検討パラメータおよび資材 (LiDAR)

項目	値	備考
設置水平角度	水平/15° /40°	
目標物(板)の設置	ロボット進行方向に対して板を設置	位置を変えて設置
目標物(白線)の設置	設置の有無	地面に白い板を設置
目標物の形状・サイズ	スタッフ/板/人	位置を変えて設置



対象橋梁(橋梁 1/橋梁 2/橋梁 3)

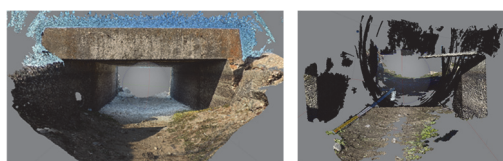


桁下状況(橋梁 1/橋梁 2/橋梁 3)



資材設置状況(スタッフ/白線/エスロンテープ)

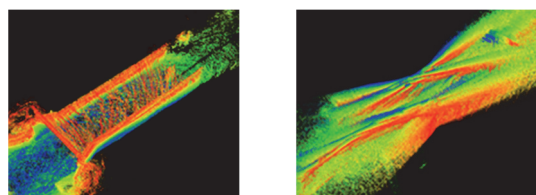
図-2 実証実験風景



橋梁 1 (アクションカメラ)

橋梁 1 (一眼レフ)

図-3 SfM 処理結果



橋梁 1

橋梁 3 (形状再現できず)

図-4 LiDAR による自己位置推定結果

次に、LiDAR による自己位置推定の結果を図-4 に示す。橋梁 1 では形状が確認できたが、橋梁 3 では、形状が確認できなかった。これは設置した目標物が連続的に認識しつづけられなかったことを原因として考える。

また、3 次元点群データから、3 次元 CAD データを生成するアルゴリズムを構築した。構築したアルゴリズムのフローと処理イメージを図-5 に示す。

(3) 3次元モデルによる点検結果管理システムの検討

事業関係者が損傷の発生位置と状況を直感的かつ正確に把握・共有するための「3D 損傷図作成支援システム」のプロトタイプを構築し、関係者ごとの使用範囲、課題の抽出・整理を行った。表-4 に関係者ごとの主な課題を示す。また構築したプロトタイプのメイン画面および損傷データ登録画面を図-6 に示す。

(4) AIによる写真からの損傷抽出の検討

AI の導入に際し、アルゴリズムの検討、環境整備を実施した。ロボットで取得した画像による識別結果には、ひびわれ、剥離および鉄筋露出の誤認識、網羅的な剥落箇所認識不足、発生範囲の相違が見られ、良好な結果は得られなかった。一方、学習環境構築や学習データを作るための知見、条件設定の要件を整理することができた。特に重要となる開発指針と言うべき項目として、以

下の4項目をまとめた。

- 教師データのラベル付けの一貫性を担保して、量に加えて、質の高い学習データ（アノテーション）を用意すること。点検技術者の思考回路を暗黙知から形式知へ文書化し、何をどのように学習させるべきかを整理すること。
- 識別したい損傷対象に対して、必要となる学習データの規模と識別性能との関係をクラス（損傷の種類や程度等）ごとに明らかにすること
- 学習データが本業に負荷なく集められるようなツールやインタフェース、業務と連携した運用プロセスを開発・策定すること
- 教師データは画像ファイル単体で管理せず、橋梁諸元等の他の情報と対になった形で管理すること

4. おわりに

本研究では、小規模橋梁の桁下に進出し、後工程の作業に必要なデータを取得できるロボット開発の要件を技術動向、開発や維持費、汎用性の観点からまとめた。今後、実運用に向けて、様々な橋梁形式、桁下環境におけるさらなる検証が必要となる。

3D 損傷図作成支援システムに関しては、関係者（施設管理者、点検事業者、補修工事事業者等）の視点でシステムの要件および課題について整理した。また、現状の2次元図面の管理手法から、提案している手法に置き換えるための提案活動もあわせて重要である。

AI による損傷抽出に関しては、AI の導入に至るまでの一連の整備について要件を整理した。実用化に至るまでの取り組むべき重点をまとめ、20 年以上の業務実績から点検技術者の損傷評価の経験知を形式知として体系化し、ケーススタディ結果を踏まえた教師データ作成の具体的な方策をまとめた。

謝辞：本研究の成果は、一般財団法人ニューメディア開発協会が受託した公益財団法人 J K A の競輪の補助を受けて実施した補助事業「小規模橋梁の安全確認のための効率的点検技術の調査研究補助事業」の活動の一環である。本研究の遂行にあたっては、関係各位から多大なるご支援を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局 国道・防災課：橋梁定期点検要領 2014.
- 2) 国土交通省道路局 国道・防災課：橋梁定期点検要領 2019.
- 3) 2019 Unity Technologies:Unity-Game Engine, <<http://japan.unity3d.com/>>, (入手 2019.6.17).

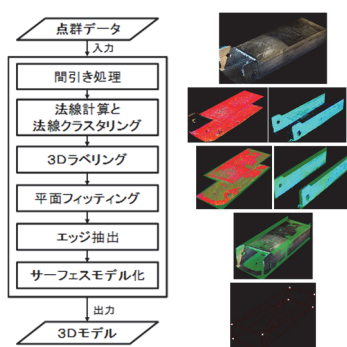


図-5 構築したアルゴリズムのフローと処理イメージ

表-4 事業関係者ごとの課題

区分	課題
施設管理者	・ 管理橋梁全体の適切な修繕計画策定のための支援機能 ・ 既に保有している道路管理システム（台帳システム）との相互運用性
点検事業者	・ 点検調書等の出力機能 ・ 損傷発生箇所の自動登録
補修工事事業者	・ 最適な補修工法、工事計画支援 ・ 工事数量等の自動算出

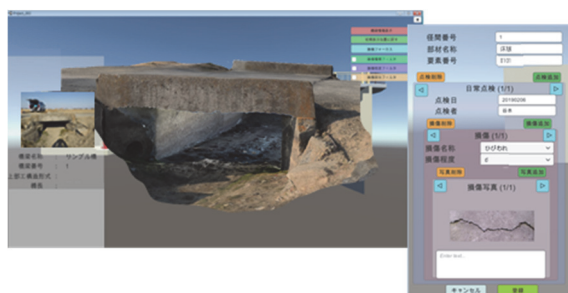


図-6 点検結果管理システムの画面、損傷データの登録・閲覧画面