小規模橋梁の安全確認のための効率的点検技術の研究開発

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次元モデル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つの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大いに期待できる．

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，点検困難なものが少なくない．

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”という選択をすることがある．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年に国土交通省は定期点検要領を見直し，近接目視を基本とするが，点検員による近接目視を補完・代替する新技術の活用を認める改訂が行われた[2)]．これにより，近接することが容易でない箇所においてドローンによる状況把握やロボット等の利用が条件付きで認められた．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，もしくは人が入れ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で，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，実装に向けた考察を加えた．

(1) 点検ロボットの開発

少子高齢化など建設産業における労働力不足や地方公共団体における技術者不足の懸念や安全に，経済的に点検をすることを目的に点検ロボットの研究開発が盛んに行われている．国土交通省より，点検支援技術をまとめた資料が公開[3]されているが，多くはドローンを用いた支援技術であり，比較的規模の大きな橋梁を対象にしている．この研究では，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

著者らの 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た．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．本研究で開発したロボットをに**図-2** 示す．ロボットの主要な諸元一覧を**表-1** に示す．

(2) 3 次元モデルデータ作成の効率的手法の検討

国土交通省では，2012 年度から CIM モデル事業を実施しており，インフラの設計業務や工事の現場において 3 次元モデルを用いた関係者間での情報共有および安全性向上の効果を確認してきた．山岡[4),5)]らが CIM モデル作成仕様に基づき，設計段階で作成された精緻な CIM モデルを用いて維持管理での利用方法を検証している．また，清水[6)]らが 3 次元モデル上で点検時に撮影した写真を管理するシステムを開発している．この研究の中ではパラメトリックモデリングによる 3 次元モデルの構築手法についても提案しており，維持管理で 3 次元モデルが存在しない既設橋梁に対して新たに作成する場合に非常に有効である．ただし，これらの事例では人やドローンで撮影した写真の例が多く，自走するロボットで小規模橋梁の桁下を撮影した写真から 3 次元モデルを作成した例はない．

そこで，本研究では人の代わりに橋梁の桁下に進入していく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 次元モデル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

図-1 小規模橋梁における点検作業状況

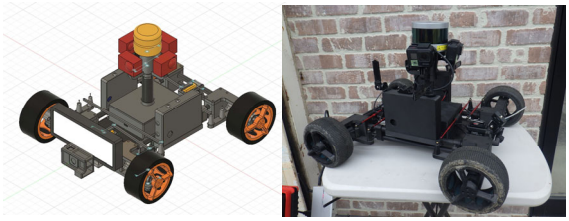


図-2 開発したロボットの画像
(左：3DCAD，右：ロボット全景)

表-1 開発したロボットの諸元一覧

諸元	内容
サイズ	全長 592mm/全幅 498mm 全高 375mm
重量	4 kg
送信機	双葉電子工業　14SG ロボット用
受信機	COOLTECH R7008HV
タイヤ	直径 140mm オフロードタイヤ
運動性能	四輪操舵（4WS）

表-2　3D損傷図作成支援システム機能一覧

No	機能
1	橋梁の管理（情報）データ登録
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）

データ化(SfM：Structure from Motion 処理)して，3 次元モデル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れば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データで精度評価を行う．

2 つ目の着眼点として，生成された点群データから 3 次元モデルデータを作成する．現状は CAD 技術者が，経験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 次元モデルデータを作成しており，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[7]（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-2** 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が重要である．

(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，AI（機械学習）により，損傷箇所を自動抽出する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（Panasonic GH5S / GoPro HERO7 の 2 機種を比較），さらに自己位置推定用に LiDAR（Velodyne VLP-16 Hi-Res）を搭載する．

(b) ロボットサイズと運動性能および操作性

ロボットサイズ等の仕様は**表-1** に示した通りである．条件として設定した桁下高さ 70cm に進入可能であり，かつ桁下状況の画像取得をするため，一定の画角を確保するため搭載する機材を配置するベースプレートのタイヤ接地面からの高さを 15cm と設計した．また，小規模橋梁の桁下状況として，ロボットの進入に対して障害物となる堆積物（泥や砂），礫，小石，枯葉，植生等を考慮し，操作性，障害物回避性能を高めるためロボットの 4 輪すべての舵角を与えられる操舵方法である四輪操舵（4WS）とした．さらに，少量の水に対して走行可能とするためタイヤの径を 140mm とした．予備実験では，キャタピラータイプの形状も試行したが，枯葉や枝等を巻き込んでキャタピラーが回転不能になることが頻発したため，タイヤを採用した．バッテリーについては，小型で軽量，大出力であるリチウムポリマー電池を採用し連続走行 1 時間可能となる容量の電池を搭載するスペースをロボット腹部に準備した．狭隘空間に進入したロボットと操縦者との画像伝送については実験を行った対象橋梁において伝送が途切れることがないことを確認した．操縦者の位置を路面中央および橋梁の上流側，下流側それぞれ 20m程度まで少しずつ遠ざかりながら画像伝送を行った結果，画像伝送が途切れないこと確認をした．20m 以上については，対象としている小規模橋梁の点検において必要ないと判断し実験はしなかった．

(c) 実証実験 I

橋長 2.0m，幅員 4.5m，桁下空間高さ 80cm の条件で実験を行い，搭載機器の位置の確認および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．それぞれの実証実験で検討したパラメータについて**表-3** と**表-4** に示す．

表-3 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	

表-4 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	アルミスタッフ/板/人	位置を変えて設置

表-5 実証実験橋梁主要諸元

No	橋長	幅員	桁下高さ	構造形式
橋梁 1	2.0m	4.5m	85cm	RC 床版桁橋
橋梁 2	2.2m	4.0m	70cm	RC 床版桁橋
橋梁 3	13.0m	1.8m	85cm (内空高さ)	コンクリート箱桁橋（水路橋）

表-6 LiDAR に対する検証一覧（実証実験Ⅰ）

		橋梁側面に目標物を設置※			
		なし	あり		
			出口のみ		両側
			離隔あり	離隔なし	
設置角度	水平から 40°	○	―	―	―
	水平(0°)	○	○	○	○
	水平から 15°	○	○	○	○

※目標物は板を橋梁側面に塞ぐように設置

※○は実験したケース

SfM 処理に関するパラメータ検討にあたり，使用するカメラの画質の違いおよび画角の違いを確認するために撮影カメラは 2 機種を選定した．さらにそれぞれの設置方向および広角モードおよび HDR 設定についても On/Off の違いを確認した．また通常点検で利用する器具を標定点として代用することで SfM 処理の生成結果が向上するかを検証するために標定点の有無もパラメータとした．

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(アルミスタッフ/白線/エスロンテープ)

図-3 実証実験作業状況

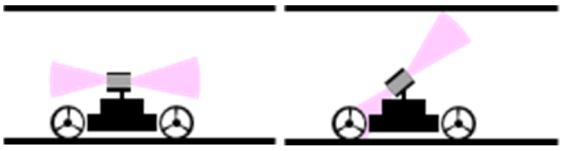


図-4 LiDAR 設置角度

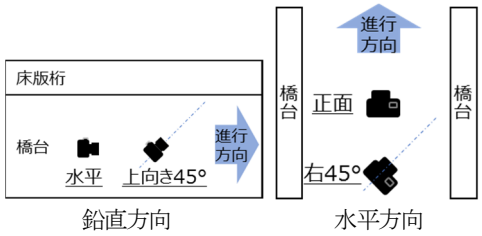


図-5 カメラ設置方向

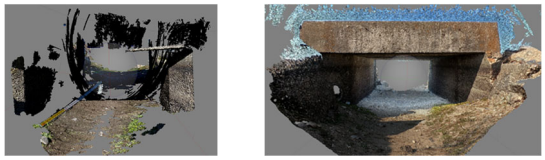
LiDAR に関するパラメータの設定は，レーザーの構造物および目標物への入射角による違いを検証するために LiDAR の設置水平角度を 3 ケースで実施し，また目標物の設置の有無もパラメータとした．

実証実験を実施した橋梁の主要諸元を**表-5** に，実証実験の作業状況を**図-3**に示す．LiDARに対する検証パラメータの条件を**表-6** に，設置角度を**図-4** に示す．また SfM 処理に対する検証パラメータの条件を**表-7**に，カメラの設置方向の条件を**図-5** に示す．

実験の結果，LiDAR を用いた自己位置推定に関しては目標物を橋梁側面に設置しないケースにおいて，いずれも橋梁の形状が再現されないことがわかった．また，LiDAR の設置角度は水平に設置したケースのほうが，再現される傾向となった．これはレーザーが床版下面より

表-7　SfM 処理に対する検証一覧（実証実験Ⅰ）

カメラ機種	カメラ設置方向		撮影方式	静止画撮影ピッチ
	鉛直	水平		
Panasonic GH5S（高画質）および GoPro HERO7（広角）	水平	正面	動画	–
			静止画	100mm
				300mm
				500mm
		右 45°	動画	–
			静止画	100mm
				300mm
				500mm
	上向き 45°	正面	動画	–
			静止画	100mm
				300mm
				500mm
		右 45°	動画	–
			静止画	100mm
				300mm
				500mm



橋梁 1（一眼レフカメラ）　橋梁 1（アクションカメラ）

図-6　SfM 処理結果

(左)一眼レフカメラ　(右)アクションカメラ

図-7　一眼レフカメラとアクションカメラの静止画の比較

も設置した目標物をしっかりと捉えることのほうが形状の再現には有効に働いたと考えた．

ただし，目標物として設置した板を点検時に，設置することは作業性が悪く，設置した板の固定に時間および

表-8　LiDAR に対する検証一覧（実証実験Ⅱ）

LiDAR 角度	正面の目標物	
	側面からの位置	目標物
水平	―	―
水平	接触	人間
水平	接触	アルミスタッフ
水平	離隔 1m	人間
水平	離隔 1m	アルミスタッフ
10°	―	―
10°	接触	人間
10°	接触	アルミスタッフ
10°	離隔 1m	人間
10°	離隔 1m	アルミスタッフ

板　人　アルミスタッフ

図-8　目標物設置状況

人手がかかり非効率である．また，風により板があおられ危険を伴う作業となってしまうことが想定された．

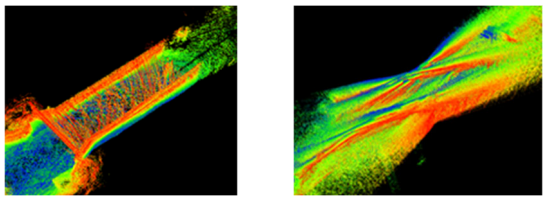
次にロボットで取得した画像データを用い，SfM 処理で 3 次元形状の生成を確認した．同一橋梁で，一眼レフカメラとアクションカメラで取得した画像データで SfM 処理結果を**図-6** に示す．一眼レフカメラで桁下に入る前の形状は部分的に取得できているが，桁下構造部の形状はほぼ取得できなかった．アクションカメラでは桁下も含めて全体形状が取得できた．このような違いが影響し一眼レフカメラでは，点群データに欠落した箇所が多く見られた．これは明るい環境から桁下の暗い環境へ進入したときの明るさ調整の差が影響したと考える．一眼レフカメラとアクションカメラで撮影した静止画像の比較を**図-7** に示す．アクションカメラでは桁下に進入したときの明るさ調整が自動で即座に変更され桁下走行時の撮影画像も鮮明に取得できている．もちろん一眼レフカメラも明るさ調整を変更することができるが，点検の作業性を考え，より簡易的に利用することができるアクションカメラを利用することが適している．またロボットの小型，軽量化に対しても優れている．

(d) 実証実験Ⅱ

LiDAR の自己位置推定に関して実証実験Ⅰの結果をふまえて，実証実験Ⅱでは，従来の点検作業で利用する器具もしくは，点検員自身が目標物の代替にならないかを検証することとした．目標物の表面形状およびサイズの影響を確認するために，目標物がアルミスタッフのケースと点検員自身が目標物になるケースを実施した．実証実験Ⅱで実施した LiDAR の自己位置推定に関する検証パラメータを**表-8** に示す．目標物を設置した作業状況

表-9　SfM 処理に対する検証一覧（実証実験Ⅱ）

カメラ機種	レンズモード	設置方向	照明の有無	撮影方式
GoPro HERO7（広角）	魚眼	横	なし	動画
	魚眼	縦	なし	動画
	広角	横	なし	動画
	広角	横	なし	静止画
	広角	縦	なし	動画
	魚眼	横	あり	動画
	魚眼	縦	あり	動画
	広角	横	あり	動画
	広角	横	あり	静止画
	広角	縦	あり	動画



橋梁 1　　橋梁 3（形状再現できず）

図-9　LiDAR による橋梁桁下形状計測結果

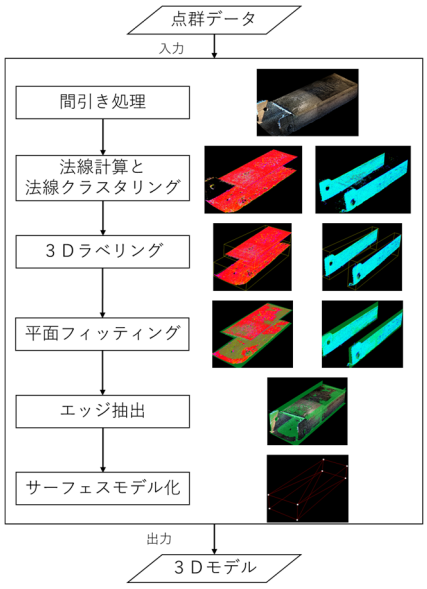


図-10　構築したアルゴリズムのフローと処理イメージ

を図-8 に示す.

実証実験Ⅱでは，アクションカメラの撮影条件に着目した検証パラメータを設定し，3 次元形状の生成に関してどのように影響するかを整理することとした．SfM 処理に関する検証パラメータを表-9 に示す.

実証実験Ⅰで得られた結果から推測した条件を確認すること，また点検の作業性向上と効率性，安全性を考慮した検証パラメータを設定し，類似橋梁 2 橋で同様の実験を行い同様の傾向が再現されるかを確認し，推測した条件の妥当性を検証した.

実験の結果，生成される 3 次元形状に欠損が少なくなるパラメータは，レンズモードは魚眼，設置方向は横向き，照明はありのケースであった．撮影方式は，静止画と動画による差は見られず，動画撮影のほうが現場での作業性がよく，静止画への切り出し間隔を後工程で調整することが可能であり，動画のほうが適していると考える.

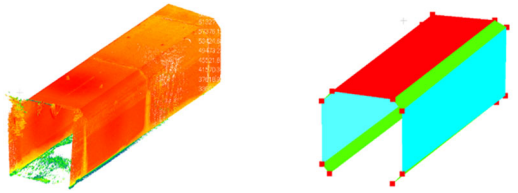
表-10　各工程の処理概要および検討内容/処理内容

No	工程	処理概要	検討内容/処理内容
1	点群データ間引き	SfM で取得した点群データを減少させる.	Octree を採用する事で，間引き処理自体も高速化した.
2	法線クラスタリング	結果生成される平面毎の基となる点群データをグループ分けする.	特定の空間内の点から最小二乗法により平面を生成し，平面毎の法線ベクトルと Z 軸の成す角度から，K-means 法によるクラスタリングを行う.
3	3D ラベリング	モデル化対象外の点群データを除去する.	空間八分木の全ての空間に対して，点群データを含む空間のみを残しつつ，連結可能なグリットをマージ（距離によるラベリング）し，特定ボリュームに達しないラベルを除去する.
4	平面フィッティング	ラベル毎にフィッティングした平面を生成する.	フィッティングの手法として，最小二乗法を使用した．平面は，投影された点を内包する範囲に外形領域を設定する.
5	エッジ抽出	サーフェスモデルの頂点を生成する.	任意の平面とその他の平面の交線を確認し，交線が確認されれば，エッジとして境界を更新する.
6	サーフェスモデル化	生成された頂点からサーフェスモデルを生成する.	ドロネー三角形分割を用い，TIN を生成する．TIN から所定の CAD 形式に変換，出力を行う.

(2)　3 次元モデルデータ作成の効率的手法の検討

次に，LiDAR による橋梁桁下形状計測の結果を図-9 に示す．橋梁 1 では橋梁の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を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 次元モデルデータを生成するアルゴリズムを構築した．アルゴリズムのフローと処理イメージを図-10 に示す．はじめに，処理速度の低下を避けるため点群データの間引き処理を実施する．次に対象物を構成する平面領域を推定するため，クラスタリングを行う．続いてモデル化対象の橋梁以外の点群



地上型レーザースキャナーによる計測点群データ　　生成された 3D モデル

図-11　アルゴリズム動作検証結果

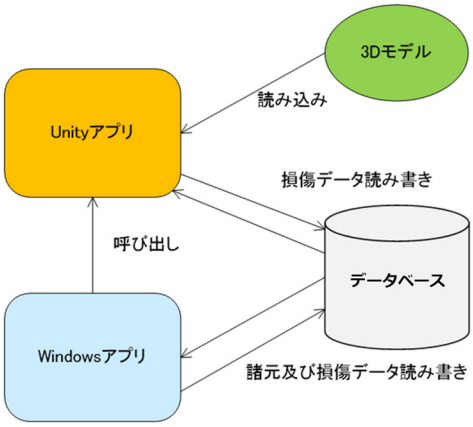


図-12　システム構成図

図-13　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

データが存在すると，モデル化の精度が低下するため，モデル化対象外の点群データを除去し，3D ラベリング処理をしてから平面フィッティング処理を行う．平面が作成されたら，任意の平面とその他の平面の交線をエッジとする．ここまでで生成された頂点からサーフェスモデルつづいて TIN を生成し，所定の CAD 形式への変換というアルゴリズムを構築した．各工程の処理概要および検討内容/処理内容を**表-10** に示す．

アルゴリズムの有用性を確認するため計測データとして精度が高い点群データを検証データとして試行を行い，想定通りの 3 次元モデルデータが生成される事を確認した．なお，理想的な点群データとして検証用点群データは FARO 社製地上型レーザースキャナーFocus S350 を使用した．アルゴリズム動作検証結果を**図-11** に示す．地上型レーザースキャナーで取得した，精緻な点群データを用いて，アルゴリズムの構築が出来た．また，ロボットで取得した画像データを用いて SfM 処理を行い生成されたデータを用いた検証を行い，モデルが構築する事が出来た．生成された 3 次元モデルデータの平面と点群データとの RMS 値を算出し，LiDAR のカタログ精度の「±0.030m」より小さい事が確認ができた．本研究で目的としている維持管理段階で利用するための 3 次元モデルデータに求められる精度として十分な性能を有していると言える．

現在，SfM で生成された点群データを定量的に評価する手法は確立されていないため，今後は評価手法の確立と，実運用に向けたロバスト性の確認として，各種複数の検証を実施していく必要がある．

表-11　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

(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．構築したプロトタイプのシステム構成図を**図-12** に示す．本システムは，2 つのアプリ（Windows アプリ，Unity アプリ）で構成し，それぞれのアプリがデータベースを読み書きをする．

Windows アプリは橋梁の諸元情報，損傷情報および損傷箇所 ID をデータベースに保存する．

Unity アプリでは 3 次元モデルデータを画面上に表示する．このモデルデータ上に損傷データを表示し損傷の状況を確認，修正する機能を持たせている．

橋梁の諸元情報は，すでに自治体で管理している台帳システム等があることを想定して本システムでは最小限の諸元情報を管理できる設計とした．点検情報についても同様に既存システムとの連携を想定して損傷箇所をあらわす損傷箇所 ID をキーとしたテーブルを用意した．

表-11 に展示会来場者約 200 名へのアンケートで得た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-13** に示す．今後の課題として，損傷発生箇所を 3 次元モデルデータ上に，効率良く関連づける仕組みもしくは機器の開発が望まれる．

(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．教師データは著者ら点検技術者が損傷と判断して撮影した過去の損傷写真を用いた．損傷写真へのラベル付けは，点検技術者が実施した場合と，未経験者にサンプルを提供してから実施した場合との比較を行った．

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，網羅的な剥落箇所の認識不足，発生範囲の相違が見られた．損傷として抽出したい箇所，範囲，種類について誤認識が多い結果となった．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入し，後工程の作業に必要十分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．

対象として設定した桁下空間高さ 70cm 以下の小規模橋梁の桁下に進入・退出するロボットの開発した．またロボットに搭載する機器の条件，設置方法について比較検証を行い3次元モデルデータの効率的手法を提案した．

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．

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．

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ＪＫＡ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) 国土交通省：点検支援技術 性能カタログ(案)，2019.
4) 山岡大亮，青山憲明，谷口寿俊，藤田玲，重高浩一：維持管理での利用を想定した橋梁の3次元データモデル標準の策定，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.71-No.2，p.I_204-I_211，2015.
5) 山岡大亮，青山憲明，川野浩平，重高浩一，関谷浩孝：維持管理での活用を目的とした橋梁のCIMモデル作成コストの検証，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.72-No.2，p.I_21-I_28，2016.
6) 清水智弘，吉川眞，瀧浪秀元，御崎哲一，高橋康将，中山忠雅，内田修，近藤健一：3Dモデルを用いた橋梁維持管理システムの開発，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.69-No.2，p.I_45-I_53，2013.
7) 2019 Unity Technologies:Unity-Game Engine, <http://japan.unity3d.com/>，(入手2019.6.17).

(Received October 25, 2019)

RESERCH AND DEVELOPMENT ON EFFICIENT INSPECTION TECHNOLOGY FOR SAFETY VERIFICATION OF SMALL-SCALE BRIDGES

Kazuhiko SEKI, Koichi IWASA,
Satoshi Kubota, Yoshinori TSUKADA, Yoshihiro YASUMURO and Ryuichi IMAI

In 2014, a regular inspection of public infrastructure facilities (bridges, etc.) once every five years became a legal system. Of the approximately 730,000 bridges nationwide, 530,000 are small-scale bridges with a bridge length of 2-15m. These bridges are often not easily accessible by inspection engineers. Therefore, in this study, for the purpose of studying inspection methods as an alternative to visual inspection for small-scale bridges, development of inspection robots, examination of efficient methods for creating 3D CAD data, inspection using 3D models. We examined the results from four viewpoints, the management system of results and the extraction of damaged parts from photographs by AI. As a result of the research, we conducted demonstration experiments several times, arranged the scope of technology application according to the usage scene, and clarified the definition of functional requirements. This can be expected to contribute to the development of more efficient inspection, improvement of productivity, safety, etc. in future small-scale bridges, as a material for development for actual operation.