

橋梁点検においてロボットが撮影した画像から抽出された損傷の精度確認試験

計測リサーチコンサルタント ○木本啓介

鳥取大学 黒田保

鳥取県 藤井優

1. はじめに

1.1 背景

2014年度からスタートした内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」[1](以降 SIP インフラと記す。)では、インフラの維持管理に必要な新技術が研究開発されており、これらの活用により、中長期的な維持管理・更新等に係るトータルコストの縮減や維持管理業務の効率性の向上に寄与することが期待されている。そしてこれら新技術の社会実装のため、地域の大学等を拠点とした12の地域実装支援チームが組織されている。地域実装支援チームのひとつである鳥取大学チーム(研究責任者:黒田保)は、図1および図2に示す江島大橋を対象モデルとしてロボット技術を活用した橋梁点検の実証試験(江島大橋プロジェクト)を実施した[2]。

本論文では、実証試験のうち画像撮影ロボットの精度確認試験について述べる。ロボットで取得した画像データの精度を確認するには、撮影の対象部位を人による近接目視で確認する必要があるが、実証試験対象の江島大橋主橋梁部はそれができない。そ



図1 江島大橋全景

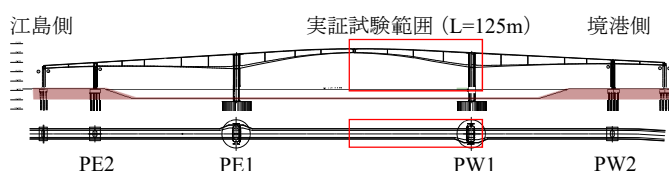


図2 江島大橋一般図 実証試験対象範囲

こで、人による近接目視が可能な試験ヤードを確保し、江島大橋の点検と同じ条件で画像撮影ロボットの計測性能(①計測可能なひびわれ幅および計測精度, ②損傷の大きさおよび位置の計測精度, ③色の識別性能)の検証を目的に精度確認試験を実施した。

1.2 江島大橋について

江島大橋は鳥取県境港市渡町と島根県松江市八束町江島の間にかかる大型橋梁で、平成16年に供用を開始した。全長は1446.2mで、中海をまたぐ主橋梁部は中央径間250mの5径間連続PC有ヒンジラーメン箱桁橋である。箱桁の高さ(最大15m)や橋梁の勾配(最大6.1%)、海面からの高さ(最大44.7m)といった構造的制約条件と約15,000台/日の交通量があり仮に片側通行規制した場合に発生が予測される重大な渋滞による社会的損失から橋梁点検車を用いた人による近接目視点検が困難となっている。

2. 適用した画像撮影ロボット技術

SIPインフラ等で開発されすでに実用化段階に到達している橋梁点検ロボット技術の中から、点検対象部位に対する適用性を評価したうえで表1に示す3つの技術を選定した。このとき、ロボット技術には、オペレータの技量に依存せず安全に対象に近接すること、安定的に均質なデータが取得できること、第三者被害を与えない措置が可能であること、そしてそれらを満たしたうえで損傷評価に資する品質のデータが取得できることが要求される。抽出の対象とするひびわれ幅は、0.1mm幅以上とした。

(i)橋梁点検ロボットカメラは、ポールの先に搭載されたカメラを手元のタブレットPCにより操作し、任意範囲を1点から放射状に連続撮影する技術である。連続撮影された複数枚の画像からスティッチにより合成画像を作成し、デジタルクラックスケールやL型スケールを用い、ひびわれ幅などの損傷抽出

を行う。撮影目標解像度は、0.3mm/pixel である。(ii) 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』は、橋面歩道上の操作台車から鉛直ロッドを介して水平アームユニットを吊り下げ、アームユニットに搭載したカメラを遠隔操作してクラックスケールと共に近接画像を撮影する技術である。撮影した画像は、あおり補正等により合成し、展開画像を作成する。展開画像から損傷を抽出し、ひびわれ幅は同時に撮影したクラックスケールを用い算出する。撮影目標解像度は、0.4mm/pixel である。(iii) 二輪型マルチコプタは、車輪付きの UAV が遠隔操作により接近・接触し、搭載されたカメラで連続的に近接画像を撮影する技術である。撮影した画像は、SfM (Structure from Motion) により接合され、対象範囲のオルソ画像を生成する。オルソ画像からデジタルクラックスケールなどを用いてひびわれなどの損傷抽出を行う。撮影目標解像度は、0.3mm/pixel である。

3. 精度確認試験

3.1 試験評価方法

精度確認試験ヤードを事前調査したところ 0.1mm 幅のひびわれは見受けられるものの 0.2mm 幅以上のひびわれがなく、錆汁や遊離石灰などの損傷も見られないため、計測性能を検証するために必要な損傷

表 1 適用したロボット技術

略称	(i)	(ii)	(iii)
ロボット技術名称	橋梁点検ロボットカメラ	橋梁点検支援ロボット『見る・診る』	二輪型マルチコプタ
分類① (用途・目的)	画像撮影ロボット	画像撮影ロボット	画像撮影ロボット
分類② (近接機構)	ポール型ロボット	車両型ロボット	飛行型ロボット
分類③ (制御方法)	遠隔操作型ロボット	遠隔操作型ロボット	遠隔操作型ロボット
開発チーム	三井住友建設 日立産業制御ソリューションズ	ジビル調査設計	富士通
撮影状況			

画像を他のコンクリート構造物を対象に高解像度撮影し、20cm 角のシートに印刷して精度確認試験ヤードに貼付し損傷の代用とした。

各開発チームは精度確認試験ヤードにて、実証試験と同様の仕様および手順で計測し、指定した損傷部の計測結果と著者らが事前に計測した「真値」と比較して精度を確認した。「真値」は、入念な近接目視点検と高精細なオルソ画像を用いて取得した。

3.2 評価対象

松江市側取付高架橋部のうち図 3 に示す高所作業車で箱桁下面に近接できる区間の PE10 橋脚に図 4 の 2 種類計 10 枚の「ひびわれ画像シート」、「模擬ひびわれシート」、「標定用ターゲット」を貼り付けて評価対象とした。

【ひびわれ画像シート】

表面の汚れが少ないグループ A (5 枚) と錆汁や汚れが目立つグループ B (5 枚) の 0.1~2.0mm 幅前後のひびわれを有する「ひびわれ画像シート」を計 10 枚準備した。各シートには 5 もしくは 10 ヶ所 (全 90 ヶ所) のひびわれ幅計測位置を矢印で示した。

【模擬ひびわれシート】

段階的に白からグレイ値を変えた背景色の上に 0.1~3.0mm 幅のひびわれを模した線が配置された 20cm 角の「模擬ひびわれシート」を貼り付け、撮影画像から背景色とひびわれの視認性を検証した。

【標定用ターゲット】

画像解析のための標定用ターゲット (5cm 角) を複数枚貼付して、その位置情報 (座標) をトータルステーションにより測量して開発チームに配布した。

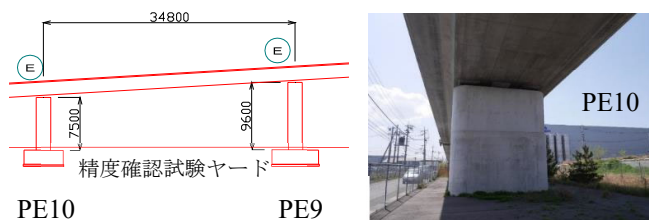
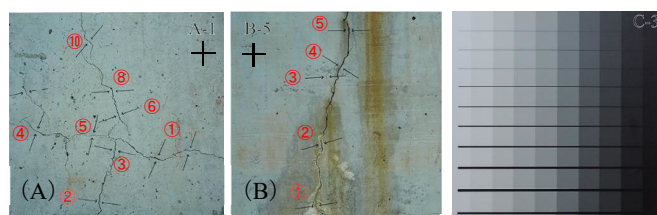


図 3 精度確認試験ヤード



ひびわれ画像シート 模擬ひびわれシート

図 4 評価対象のシート

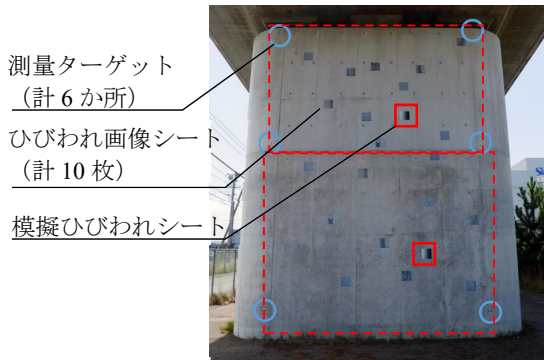


図5 精度確認試験対象の橋脚 (PE10)

各評価ターゲットの設置状況を図5に示す。

3.3 精度確認試験結果

(1) 計測可能なひびわれ幅の計測精度

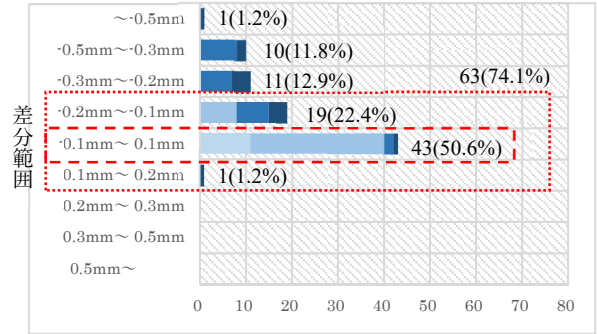
3つのロボット技術が判定したひびわれ画像シート上のひびわれ幅計90箇所の精度確認を行った。図6に真値幅を基準に0.2mm未満, 0.2mm以上0.5mm未満, 0.5mm以上1.0mm未満, 1mm以上の4つに区分し, 真値と計測値との各差分の個数を積み上げたグラフを示す。誤差 ± 0.2 mmを許容範囲と仮定した場合, 正答率は(i)が74.1%, (ii)が98.9%, (iii)が92.2%であり, 誤差 ± 0.1 mmを許容範囲と仮定した場合, 正答率は(i)が50.6%, (ii)が82.2%, (iii)が77.8%であった。(i)が他2つの技術と比較して, やや正答率が低い結果となったが, その操作性や簡易性を考慮すると点検精度として十分な結果であると考えられる。また, 幅の差分の範囲にそれぞれのロボット技術に応じた傾向が見受けられた。これらの要因は撮影方法やカメラの性能, ひびわれ幅算出方法によるものと考えられる。各技術で使用カメラが異なるため一概には言えないが, これらの結果より, 解像度約0.3mm/pixelの画像から0.1mm幅のひびわれは, 十分抽出可能であると言える。

(2) 損傷の位置の精度確認

ロボットによる撮影画像から作成した損傷図を事前に準備した「真値損傷図」と重ね合わせて比較することで, ロボットによるひびわれ計測の精度を検証した。各チームが作成した損傷図と真値損傷図を重ね合わせた結果を図7に示す。

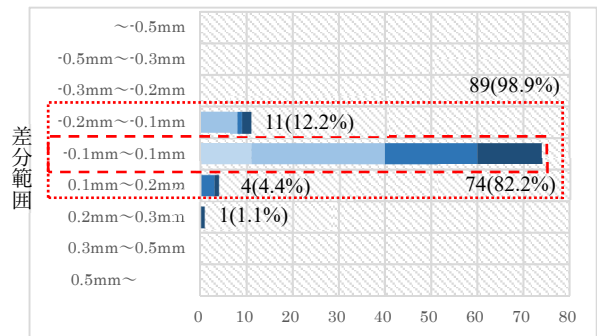
(i)はひびわれの位置に差が生じている。これは, カメラ位置を中心とし放射状に撮影した画像から損傷をスケッチするため生じていると推測されるが, 型枠目地を基準とすることでひびわれの位置を大きく

真値幅による区分



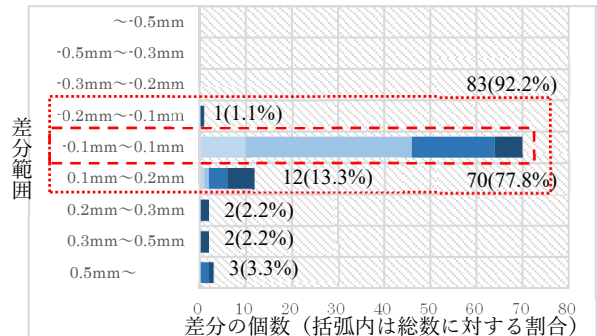
平均値: -0.15mm 標準偏差: 0.14mm

(i)橋梁点検ロボットカメラ



平均値: -0.04mm 標準偏差: 0.09mm

(ii)橋梁点検支援ロボット『見る・診る』



平均値: 0.09mm 標準偏差: 0.18mm

(iii)二輪型マルチコプタ

■ 0.2mm 未満 ■ 0.2mm 以上 0.5mm 未満 ■ 0.5mm 以上 1mm 未満 ■ 1mm 以上

図6 真値との差分の範囲

誤認識する可能性は低いと考えられる。(ii)と(iii)は, 正対撮影した画像からあおり補正等による展開画像やSfMを用いたオルソ画像を作成し, 図面と重ね合わせて, 画像上をトレースしているため, 高精度な位置情報を持った損傷図が作成されている。

(3) 色の識別性能の確認

撮影画像から色情報により抽出すべき損傷は, 遊離石灰および鉄筋腐食に伴う錆汁の発生であり, これらの視認(目視で認識)が画像から可能かグループBのひびわれ画像シートのうちB-5を用いて検証した。貼付したシートのスキャン画像とオリジナル画像からB-5範囲のみを抜粋した画像を図8に示す。

(i)の画像は彩度が低下しており, やや視認性が劣

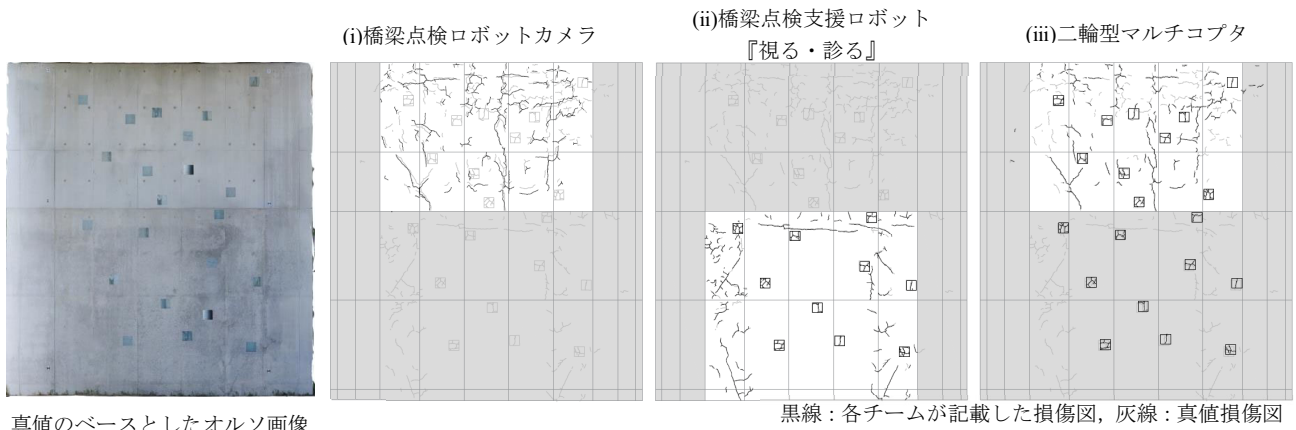


図7 損傷図の比較

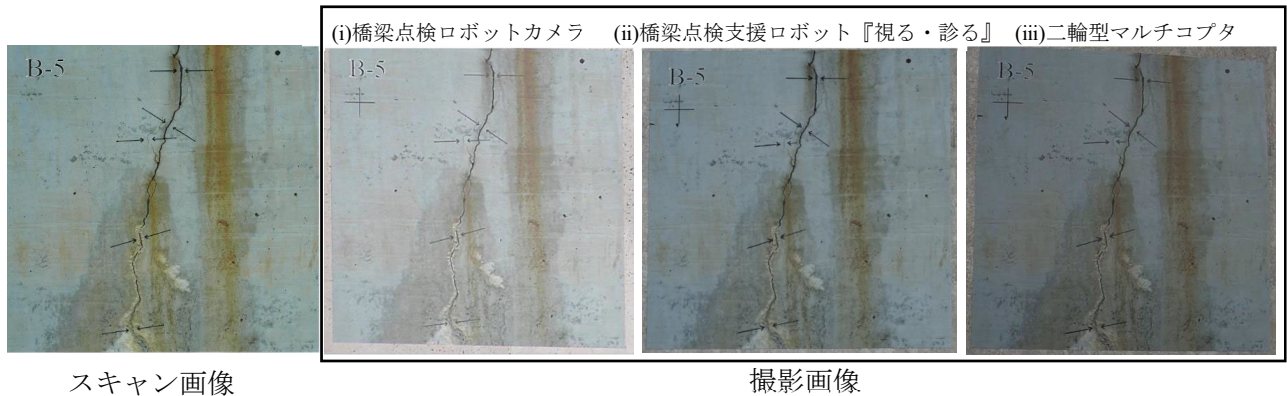


図8 B-5を用いた色の識別性能確認

るが遊離石灰と錆汁は視認可能なレベルである。しかし、コントラストや色差が小さい場合は視認性が更に低下し、損傷の見落としにつながる可能性があるため、十分な光量下での撮影や適切なカメラ設定等注意が必要である。(ii)と(iii)はやや暗めの画像であるが、十分遊離石灰と錆汁は視認可能である。

4. まとめ

画像を用いた損傷抽出精度は、撮影解像度やセンサーサイズ等のカメラ性能に依存すると考えられる。そのうち、撮影解像度については、0.3mm/pixelの画像から0.1mm幅のひびわれの幅・位置の抽出、さらには遊離石灰等の色の識別による損傷抽出も十分可能であった。精度確認試験により本プロジェクトで適用した3つの画像撮影ロボットは損傷抽出において、橋梁点検に活用するための十分な精度を有していることが実証できた。今後、新たな画像撮影ロボットを橋梁点検に活用する場合、同様の精度確認試験により、各ロボット技術の保有精度を実証することが可能と言える。

鳥取県では、これらの結果を基に2019年3月に「積算基準」と「特記仕様書(案)」[3]を発出した。

鳥取県では今後ロボット技術の適用事例を増やし、新たな課題抽出や適用性の検証を行いつつ、本格的な社会実装に向かっていくことが期待される。

謝辞

本プロジェクトの実施にあたりご支援を頂いた国立研究開発法人科学技術振興機構に感謝申し上げます。また、フィールドを提供頂いた境港管理組合、鳥取県、島根県ならびにロボット技術開発者や実証試験に参加頂いた皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 科学技術振興機構 (JST), インフラ維持管理・更新・マネジメント技術, <https://www.jst.go.jp/sip/k07.html>
- [2] 公益社団法人土木学会技術推進機構 SIP インフラ連携委員会, 2019. SIP インフラ新技術地域実装活動報告書～地域のインフラ維持管理の今後に向けて～, pp. 104-107.
- [3] 鳥取県, 2019. ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準, ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務委託特記仕様書(案), <http://www.tctcplaza.or.jp/front/pages/view/114>