

橋梁点検における新技術の活用と 今後の展望*

Utilization of Robot Technology and Future Prospects for Bridge Inspection

木本啓介** 大町正和***
Keisuke KIMOTO and Masakazu OMACHI

Key words bridge inspection, robot technology, SIP infrastructure, social implementation, 3D model

1. はじめに

1.1 インフラ点検の現状

現在わが国には橋長2m以上の橋梁が約73万橋あり、このうち地方公共団体が管理する橋梁は約66万橋と全体の9割以上を占めている。コンクリート構造物において、目視点検によりひび割れなどの発生状況・進展を把握し、補修することは、長寿命化にとってきわめて重要である。道路橋については、2014年に国土交通省より「道路橋定期点検要領」¹⁾が示され、近接目視点検によりすべての橋梁を5年に1回の頻度で定期点検を実施することが義務化された。しかし、少子高齢化、人口減少に伴う自治体の財政難、技術職員の不足のため、十分な点検が実施できていない現状がある。さらに、建設後50年を超えた橋梁の割合は、2016年では20%だが、10年後には44%に急増することが見込まれており、より効率的な橋梁点検手法の開発が急務となっている。そのため、ドローンなどロボット技術の点検への活用に対し、工期短縮、費用縮減に加え、データ取得による客観性の向上など点検の効率化および高度化への大きな期待がある。

1.2 道路橋定期点検要領の改定

2019年2月には、「道路橋定期点検要領」¹⁾の改定により近接目視と同等と認められた点検手法の採用が承認され、点検支援技術の活用が可能となった。その場合、「受注者が現場条件や構造、設置状況などを十分に把握したうえで、『点検支援技術の性能カタログ』²⁾などにより使用を予定している技術の特性および仕様を勘案し、選定理由と活用範囲、活用目的を『点検支援技術使用計画』として明示したうえで、点検業務発注者へ協議する」という流れが、「新技術利用のガイドライン」³⁾に示された。

2. ロボット技術を用いた点検

2.1 画像を用いた点検の利点

目視調査に置き換わる方法としてデジタルカメラで遠隔・非接触で撮影した画像を用いてコンクリート表面の劣化状況を判断する方法が研究・開発され、インフラ構造物の点検に活用されている。コンクリート表面を撮影した画像から損傷を視認（人が目で認識）・検出（画像解析により自動もしくは半自動で損傷を認識）し、損傷程度を評価することは従来の点検手法と比較し、現場作業の省力化、安定した室内作業による点検漏れの防止や安全性の向上、複数人が同じ画像を確認することで判定結果の客観性向上など多くの利点を有している。しかし、画像を用いた点検では画像処理に要する時間が増大するほか、ひび割れや遊離石灰、剥落などの画像で判読できる損傷の把握は可能だが、浮きや空洞などの触診（打音検査）で判断すべき損傷は把握することができないなどの課題も存在する。また、人が容易にアクセスできる橋梁に対しては、画像を用いた場合の方が高コストになってしまうことも考えられ、必ずしも画像を用いた点検が効率的な手法であるとは限らない。しかし、画像を用いた点検を一次スクリーニングとして、その後点検技術者が近接点検する面積を限定もしくは低減することも可能であり、橋梁の環境条件や予算によって適切な点検手法を取捨選択し、橋梁点検全体を効率化することも期待できる。加えて、画像を用いた点検では、各部位の展開画像や橋梁の3Dモデル化などにより経年的な損傷進展の比較など今後の維持管理の効率化、高度化に向けた付加的な基礎データを蓄積できる重要なメリットを有している。

2.2 ロボット技術に要求される性能・機能

橋梁点検ロボット技術には、一般的なロボットより高精度な性能・機能を有していることが求められる。特に、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（近接機能）、安定的に均質なデータが取得できること（位置制御機能）、第三者被害を与えない措置が可能であること（安全性能）、そしてそれらを満たしたうえで損傷評価に資

*原稿受付 令和3年12月20日

** (株)計測リサーチコンサルタントクリエイティブ事業部 (広島県広島市東区福田1丁目665-1)

*** (株)計測リサーチコンサルタント事業推進事業部 (広島県広島市東区福田1丁目665-1)

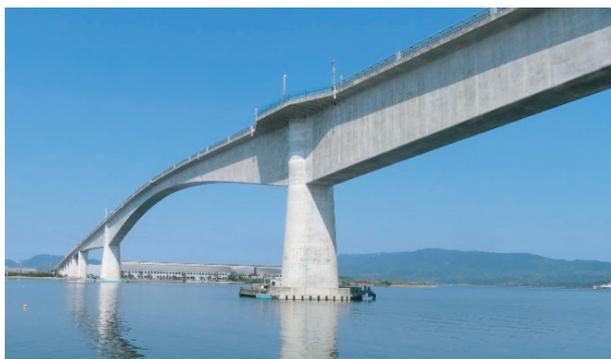


図1 江島大橋全景

する品質のデータが取得できること（計測性能）が要求される。点検目的や対象橋梁の構造形式、構造諸元、架橋環境などを踏まえ、上記4つの機能・性能を有することに着眼し適切なロボットを選定する必要がある。

3. 江島大橋プロジェクト

3.1 江島大橋プロジェクトの概要

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」では、藤野陽三氏（現、城西大学学長）をプログラムディレクター（PD）として、道路橋をはじめとする土木インフラの維持管理・更新・マネジメントに役立つ新技術が開発されており、それらの中には国土交通省の新技術情報提供システム（NETIS）に申請・登録されるなど実用されている技術が多々ある⁴⁾。これらの新技術を社会実装するには、土木インフラの大半を管理している地方自治体への普及展開が重要なため、2016年度に地域の大学を中心とする地域実装支援チームが全国に12チーム組織された。その1つである鳥取大学チームは、人口減少に伴って技術者不足が懸念される地方自治体において、ロボット技術を土木インフラの維持管理・更新・マネジメントにどう活用できるかを主たるテーマとして活動するなかで、境港管理組合協力のもと江島大橋（図1）の定期点検へのロボット技術の適用性を実証する「江島大橋プロジェクト」⁵⁾を実施した。

3.1.1 江島大橋プロジェクトの目的

多くのロボット技術の開発が実用レベルに近づいていることを踏まえ、ロボット技術を橋梁点検の実務に活用するためには、ロボット技術適用時の制約条件や実状に則した点検期間や点検費用、そして点検業務発注時の仕様書、積算基準などを含めた橋梁点検の体制など多くのことを確認する必要がある。江島大橋プロジェクトでは、以下の3つの目的を設定した。

- ・地方自治体において新技術を活用した効率的な橋梁点検を実現する
- ・地元コンサルタントにおいて新技術を活用して点検技術者の育成を図る

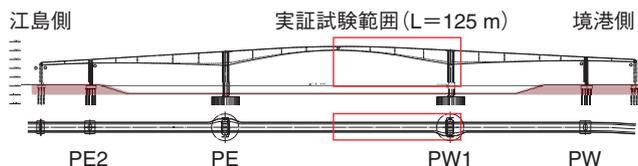


図2 江島大橋一般図 実証試験対象範囲

- ・さらなる新技術の開発を促進する

また、江島大橋における実証試験でロボット技術の適用性を評価するとともに、「ロボット技術を活用した橋梁点検指針」を策定して橋梁点検にロボット技術を適用するための道筋をつけることを目指した。

3.1.2 江島大橋の概要と点検における課題

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、2004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15000台/日の交通量があり、仮に片側通行規制した場合、重大な渋滞の発生が予測され、その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であり、供用開始以来、遠望目視による点検となっている。

3.1.3 実証試験範囲

「複数のロボット技術の組み合わせによる点検の実証」ならびに「従来点検手法では難度が高い部位のロボット技術活用による効率化」という2つの視点から、図2に示す渡海部の中央ヒンジから境港側の橋脚PW1までの125m区間を実証試験の対象範囲と設定した。当範囲での適用性が実証できれば、主橋梁部全体の点検が可能といえる。

3.1.4 ロボット技術の選定と実施体制

2.2に示す機能・性能を有する以下の4つのロボット技術を選定し、それぞれのロボットの特性に合った点検対象部位を設定した。

(i) 橋梁点検ロボットカメラ

ボ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、ひび割れ幅などの損傷抽出を行う。

(ii) 橋梁点検支援ロボット

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とも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などにより合成し、展開画像を作成する。展開画像から損傷を抽出し、ひび割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。

表1 江島大橋プロジェクトで適用したロボット技術

	(i)	(ii)	(iii)	(iv)
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	二輪型マルチコプタ	打音機能付飛行ロボット
分類①(用途・目的)	画像撮影	画像撮影	画像撮影	打音・触診
分類②(近接機構)	ポール型	車両型	飛行型	飛行型
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	新日本非破壊検査
実証試験対象部位	上部工内面 (桁桁内部)	上部工外面 (桁高 10 m 以下) 非常駐車帯張出床版	上部工外面 (桁高 10 m 以上) 橋脚	上部工張出床版下面 (打音検査)
				
協働した建設コンサルタント	ヨナゴ技研コンサルタント サンイン技術コンサルタント	西谷技術コンサルタント	アサヒコンサルタント	荒谷建設コンサルタント

(iii) 二輪型マルチコプタ

車輪付きの有線給電タイプのドローン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割れなどの損傷抽出を行う。

(iv) 打音機能付飛行ロボット

有線式のマルチコプタ上部に車輪駆動機構と打音点検機構を搭載している。マルチコプタの飛行機能で橋梁の床版など人が容易に近づけない部位に接地して車輪を押し当てて走行しながら打撃子により打撃し、音データを収集する。そこから周波数解析により領域ごとの健全度評価指数を集計して浮きの有無を評価する。

また、管理者である境港管理組合と山陰地方でのロボット技術の実装を見据えて、鳥取県と島根県の各自治体、両県の建設コンサルタントの技術者が参画し、実証試験を実施した。特に、地域の橋梁点検に導入するためには、地元建設コンサルタントの技術者がロボット技術を理解し、それを生かした点検を実施することが必要となる。そこで、実証試験にあたって、上記4つのロボット技術開発者と地元建設コンサルタントが協働して点検計画、経費算出、実証試験実施、点検結果整理、報告書作成を実施することとした。適用したロボット技術とその特徴、点検対象部位、協働した地元の建設コンサルタントを表1に示す。

3.2 ロボット技術の精度確認試験⁶⁾

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人の近接が困難である。そこで、人による近接目視で真値の取得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各ロボットが取得したデータと真値を検証する精度確認試験を実施

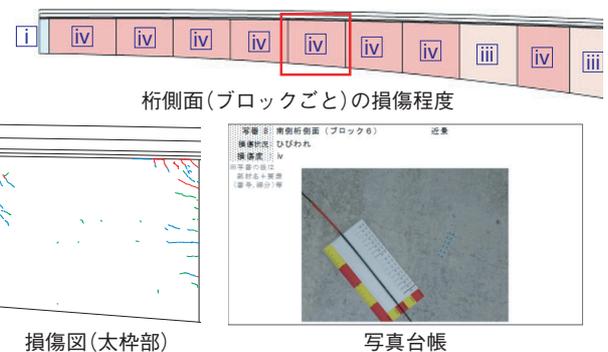


図3 損傷程度評価および点検調査作成例

し、3つの画像撮影ロボットと1つの打音ロボットが橋梁点検を行う上で十分な精度を保有していることを確認した。

3.3 取得データと損傷程度の評価

3.3.1 画像撮影ロボット

江島大橋のような大規模橋梁でロボット技術により近接画像を取得すると膨大な数量となり、個々の画像を確認するには多大な労力が必要となるうえ、位置の把握が困難となり、非効率な点検手法となる。そこで本実証試験では、膨大な撮影画像を接合した展開画像を用いて損傷程度の評価を行った。展開画像を面的に確認することで位置を把握しつつ損傷程度の評価が可能であり、省力化・効率化が図れる。図3に損傷程度評価および点検調査作成例を示す。

3.3.2 打音ロボット

ロボットにより取得したデータを解析した結果、本調査範囲においては浮きと思われる箇所は確認されなかった。

画像撮影ロボット、打音ロボットとも精度確認試験で十分な精度は保有していることが実証されており、実証試験範囲においても同質の情報を取得し、そこから従来の近接

目視点検と同様の損傷抽出、損傷程度評価、点検調書作成が可能であることが実証できた。さらに、展開画像や打音結果を可視化したヒストグラムなどが点検結果の根拠となるため、複数の技術者による精査が可能であり、客観的で定量的な評価が可能というメリットがある。

3.4 社会実装に向けた基礎資料作成

ロボット技術を活用した橋梁点検業務を計画するためには、ロボット技術の機能、計測性能、制約条件および安全性などを把握するための技術資料と積算資料などの基礎資料が必要になる。そこで、本実証試験結果からロボット技術の技術資料と江島大橋渡海部を4つのロボット技術を活用して点検した場合の積算のための基礎資料を作成した。これらの基礎資料をもとに鳥取県は今後のロボットを用いた橋梁点検業務の実施を見据えて、特記仕様書(案)とロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準を作成し、2019年3月に鳥取県建設技術センターHPで公開した。

3.5 江島大橋プロジェクトのまとめ

本実証試験で適用した4つのロボット技術は、精度確認試験と実証試験結果から橋梁点検に適用可能な計測精度を有しており、江島大橋のような大規模な橋梁の点検に対して安全かつ安定的に均質なデータをロボットが近接して取得し、それらのデータを基に損傷程度の評価が十分可能であることが実証できた。さらには、ロボット技術開発者と鳥取県内の建設コンサルタント技術者が協働により実証試験を実施したことは「地元建設コンサルタント技術者のロボット技術を用いた橋梁点検の体感」、「地元建設コンサルタント技術者からロボット技術開発者への将来的なユーザーとしての意見のフィードバックによるさらなる技術開発の促進」という点で両者にとって有益なものであった。

また、本実証試験で得られた成果から鳥取県は2019年3月に「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)」と「ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準」を発出した。加えて、SIPインフラ地域実装支援鳥取大学チームでは、有識者らによる「橋梁点検への新技術の適用性評価委員会」が組織され、委員会より本実証試験の結果を踏まえて「ロボット技術を活用した橋梁点検指針(案)」が示された。当指針は地方自治体などが「道路橋定期点検要領」に基づいて行う橋梁の定期点検においてロボット技術を安全かつ適切に活用することを目的として、ロボット技術活用の基本的な考え方、機能と性能、ロボット技術を点検に活用するための必要な手順、取得したデータの処理および記録作成の留意点ならびにデータの保存・利用方法などについて取りまとめたものである。

4. 今後の展望

今後、鳥取県では江島大橋プロジェクトで作成した基礎資料や指針などを活用し、地元の建設コンサルタントとともにロボット技術の活用事例を増やし、新たな課題抽出や

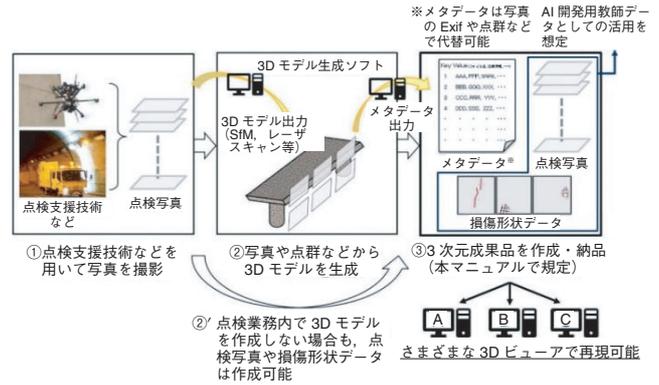


図4 3次元成果品の納品までの流れ(出典:文献7))

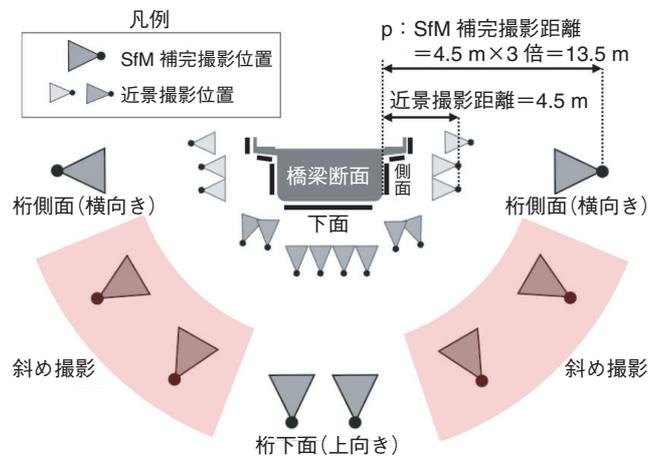


図5 SfM補完撮影計画例(出典:文献8))

適用性の検証を行いつつ、活用の幅を広げ本格的な社会実装に向かっていくことが期待される。

また、国土交通省は、図4に示すように点検支援技術などを用いて取得した画像などから3次元モデルを作成し、その3次元モデル上での損傷位置の管理に必要なデータの納品仕様を定めることを目的として、2018年3月に「点検支援技術(画像計測技術)を用いた3次元成果品納品マニュアル【橋梁編】(案)」⁷⁾を示した。当マニュアルは構造物の経年変化などが比較可能な互換性・継続性のあるデータを蓄積していくものであり、各地方整備局などにおける定期点検業務にて本マニュアルを適用したデータ作成を試行し、より効率的・効果的なマニュアルへの改定が毎年度行われている。国立研究開発法人土木研究所においては、令和元年度、2年度に江島大橋などの橋梁を用い、「点検支援技術(画像計測技術)を用いた3次元成果品納品マニュアル【橋梁編】(案)」に準拠するための効率的なデータの取得方法の検証を行い、その成果が検証事例として公開されている⁸⁾。図5は橋梁点検に資する画像を撮影しつつ、効率的に3Dモデルを作成するための撮影位置を示した断面イメージである。

橋梁点検では、ロボットが対象物に近接して制御するこ

とが要求されるうえ、GNSS (Global Navigation Satellite System) による制御が困難な範囲も多いため、相対位置による制御も不可欠であり、他分野に比べてかなり高度なロボット技術が必要といえる。江島大橋プロジェクトのような難易度の高い実証試験により、高精度かつ安全に近接可能なロボット技術が研究・開発され、ロボット技術を活用した橋梁点検が社会に普及し、橋梁点検の効率化が図られていくことが望まれる。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省：道路橋定期点検要領，(2014) [改定 2019].
- 2) 国土交通省：点検支援技術性能カタログ (案)，(2020).
- 3) 国土交通省：新技術利用のガイドライン (案)，(2019) 1.
- 4) SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術：インフラ技術総覧，(2019).
- 5) SIP インフラ地域実装支援鳥取大学チーム：江島大橋プロジェクト実証試験報告書，(2019).
- 6) 木本啓介，黒田保，藤井優：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，JSPRS 秋季学術講演会発表論文集，(2019) C-6.

- 7) 国土交通省：点検支援技術 (画像計測技術) を用いた 3 次元成果品納品マニュアル【橋梁編】 (案)，(2019) 1.3.
- 8) (国研) 土木研究所：橋梁 3 次元モデルの構築 (検証事例)，(2021).



木本啓介

長崎大学大学院工学研究科博士課程修了，博士 (工学)。光学的計測手法によるインフラ点検や文化財の記録保存業務に従事。画像解析技術・ロボット技術活用による橋梁点検の効率化・高度化に関する研究で博士号取得。令和 3 年度山田一字賞受賞。



大町正和

福岡大学大学院工学研究科博士前期課程修了，修士。コンクリート構造物および鋼構造物の点検・モニタリングに関する技術開発に従事。