

報告 長大コンクリート橋におけるロボット技術を取り入れた橋梁点検の試み

蓮池 里菜*1・木下 幸治*2・羽田野 英明*3・六郷 恵哲*4

要旨: 自治体が管理する長大コンクリート橋の点検にロボット技術を取り入れる試みを報告した。委員会を組織し、「ロボット技術を取り入れた橋梁点検指針(案)」を作成した。指針(案)では、近接目視点検の支援として、ロボット技術を活用した事前調査に重点を置いた。橋梁点検の手順として、ロボット技術による点検支援と道路橋定期点検要領に基づく点検の2ステップのフローを提案した。ロボット技術の必要機能を5項目に分類し、「重点的な近接目視実施範囲を抽出するための資料の提供」という機能を定義した。取得情報の精度確保について、各部材の健全性区分がII以上であるか否かが判断可能な精度を確保するという目安を示した。

キーワード: 維持管理, 橋梁, 点検, ロボット技術, SIP (戦略的イノベーション創造プログラム), 新技術

1. はじめに

橋梁やトンネルをはじめとするインフラ構造物を安全快適に保ち長寿命化するうえで、新技術の積極的な導入が望まれている。しかしながら、「新技術の魅力が発注者や受注者といったユーザーに伝わりにくい」、「ユーザーのニーズや困っていることが技術開発者に伝わりにくい」、「新技術導入には基準類や会計検査等の制度上の制約がある」等の理由により、インフラメンテナンス分野では、新技術の導入は容易でない¹⁾。

新技術の開発及び導入に向けた取り組みとして、内閣府主導の「戦略的イノベーション創造プログラム(以後、SIP)」内の「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術(以後、SIPインフラ)」の分野があり、平成26年からSIP維持管理技術の研究開発が活発に行われている。地方自治体等におけるSIP維持管理技術の利用、すなわち社会実装を促すことを目的として、岐阜大学SIP実装プロジェクト(以後、岐阜大SIP)をはじめとする地域実装プロジェクトが活動している(活動期間:2016.9~2019.3)。岐阜大SIPでは、技術のニーズとシーズの交流のための説明会や公開フィールド試験の開催、新技術実装の障害と対策に関する調査、自治体が困っていることへの支援、産官学連携による技術者交流等の活動を行っている^{2),3)}。

ここでは、岐阜大SIPの活動の中から、地方自治体が管理する長大コンクリート橋において、SIPインフラ等で開発された橋梁点検ロボット技術を活用した合理的で効率的な橋梁点検を行なう試みについて、「ロボット技術を取り入れた橋梁点検指針(案)」を中心に述べる。

2. 橋梁点検と点検用ロボット技術導入の試み

2.1 橋梁点検の現状

道路法施行規則(平成26年3月31日公布,7月1日施行)では、近接目視による5年に一回の頻度での橋梁定期点検の実施が規定されている。国と自治体が管理する橋梁の定期点検は、それぞれ「橋梁定期点検要領(平成26年6月,国土交通省道路局国道・防災課)」、「道路橋定期点検要領(平成26年6月,国土交通省道路局)」に基づいて行われている。これらの要領では、損傷状況の記録方法,対策判定区分の有無,点検に携わる技術者の規定等に違いはあるものの,部材単位ならびに橋梁毎の健全性を,I(健全),II(予防保全段階),III(早期措置段階),IV(緊急措置段階)の4区分で診断することとしている⁴⁾。

一方,全国の市町村が管理する橋梁の点検状況を図-1に,岐阜県内の橋梁の点検状況を図-2に示す。図-1からわかるように,平成26年度から実施されている橋梁点検の結果,橋梁の4割近くが健全である(健全性区分:I)と判定されており,特に新しい橋梁については健全な橋梁の割合が高くなっている。さらに,図-2からわかるように,市町村が管理する橋梁の約5割が健全と判定されている。

健全度の診断に影響する損傷に対しては,技術者が近接目視により変状を重点的に把握する必要があるが,たとえばロボット技術を用いた事前調査により近接目視を重点的に実施する範囲を事前に把握することにより,点検作業を効率化できる可能性が高い。さらに,このような事前調査は,橋梁点検車や吊り足場等高価な機材使用の抑制に伴う点検費用低減とともに点検作業の安全性向

*1 岐阜大学 工学研究科生産開発システム工学専攻 (学生会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科准教授 工博 (正会員)

*3 岐阜大学 工学部附属インフラマネジメント技術研究センター客員教授 工博 (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科特任教授 工博 (正会員)

上、さらには交通規制にともなう社会的な経済損失の低減にもつながると考えられる。

2.2 橋梁点検用のロボット技術

岐阜大 SIP では、表-1 及び写真-1 に示すような特徴をもつ7種類の橋梁点検用ロボット技術を取り上げて、説明会ならびに公開フィールド試験を実施した²⁾。これらの技術の内容については、このプロジェクトのホームページで公表している⁷⁾。これらの技術は、点検調査作成の支援を重視して効率化を目指したのから、橋梁全体の損傷状況を詳細にわかりやすく記録する高度化に重点をおいたものまで、様々である。たとえば表-1 中のロボット技術によって得られたコンクリート構造物のひび割れ画像において、岐阜県橋梁点検マニュアル⁸⁾で主桁に対する健全性区分がII以上と判定される0.3mm以上のクラックを検出し、損傷情報を3Dモデル上に可視化することが可能であるという結果が得られている⁷⁾。このような結果より、ロボット技術を前述の事前調査に活用することができると考えられる。

3. 各務原大橋の点検支援

岐阜大 SIP では、「自治体が困っていることへの支援」の一つとして、岐阜県各務原市が管理する各務原大橋(写真-2)の点検の支援を行っている。

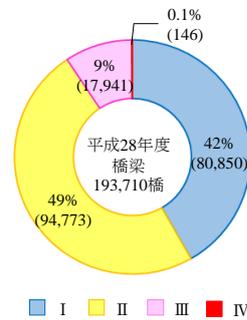
各務原大橋は、岐阜県各務原市の木曾川に架かるPC10径間連続フィンバック橋(橋長594m)である。平成25年度には土木学会田中賞作品賞を受賞している。本橋は、平成30年度に定期点検が予定されているが、歩道幅員が3mと広く、写真-3のように歩車道境界にフィンバック部材もあるため、図-3に示すように大型橋梁点検車(たとえばBT400等)を利用しても橋梁下面の点検作業ができないという課題を抱えている。特に、脚高が10m以上と高く、桁下からの点検作業が難しい河川内径間については、懐幅が5m程度の超大型橋梁点検車、あるいは点検足場設置、高所ロープ作業による橋梁点検作

表-1 橋梁点検用ロボット技術の例

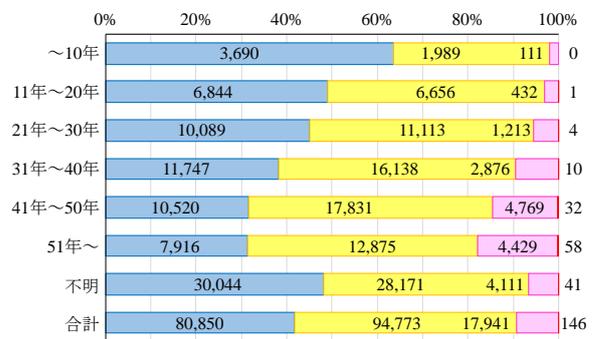
| ロボット技術 | 特徴ある機能の例 |
|--------------|-----------------------|
| 二輪型マルチコプタ | 3Dモデルによる橋梁損傷状況の管理 |
| 可変ピッチ機構付ドローン | 自動飛行による近接撮影と損傷解析システム |
| 橋梁点検ロボットカメラ | PC箱桁橋梁の内外面の効率的な点検 |
| 橋梁点検カメラシステム | 遠隔地の専門技術者による損傷診断 |
| 打音機構付点検ロボット | RC床版の自動打音・近接点検による損傷判定 |
| 球殻付飛行ロボット | 鋼橋RC床版の精密ひび割れマッピング |
| 打音機能付飛行ロボット | RC橋梁下部工の自動打音による損傷判定 |

業が必要となり、コスト面での負担が大きくなる。

岐阜大 SIP では、河川内径間について、SIPインフラ等で開発されている飛行ロボットやロボットカメラ等を用いた事前調査による橋梁点検支援を検討した。なお、

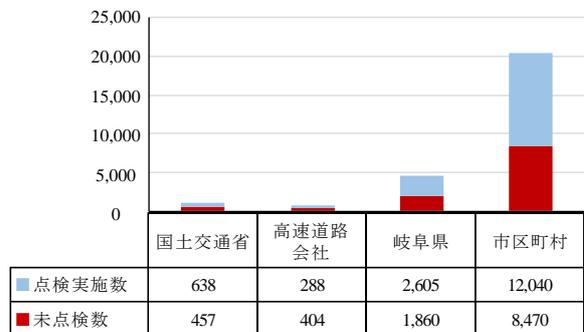


(a) 判定区分別橋梁数

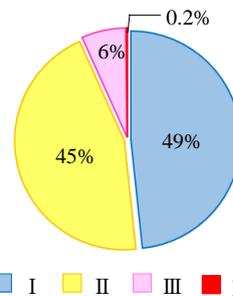


(b) 判定区分及び建設経過年数

図-1 全国の市町村における橋梁点検状況 (道路メンテナンス年報(平成28年度)⁵⁾より)



(a) 橋梁点検実施状況



(b) 市区町村の点検実施橋梁における健全性評価区分

図-2 岐阜県内の橋梁点検状況 (H26～H28) (岐阜県道路メンテナンス会議資料⁶⁾より)

自治体が管理する橋梁の点検にロボット技術を取り入れる場合には、道路橋定期点検要領と整合していることと、ロボット技術を取り入れた点検業務を発注する際の抛りところとなる規定が必要となる。そのため、幅広く有識者を含めた以下に示す委員会を組織し、「ロボット技術を取り入れた橋梁点検指針(案)」とそれに基づく点検要領を作成して、フィールド試験を実施し、その試験結果に基づいて活用する技術を評価し、平成30年度に予定している各務原大橋の点検に適用することを検討している。

3.1 新しい橋梁点検技術の適用性評価委員会

本委員会は、地方自治体が管理するコンクリート橋梁に対して、ロボット技術を取り入れた橋梁点検技術の適用性について検討・審議を実施し、「ロボット技術を取り入れた橋梁点検指針(案)」の作成を目的とし、大学関係者8名、岐阜県コンサルタンツ協会、国土交通省、並びに岐阜県等の管理者等より各1名の計12名により構成されている。なお、本委員会での検討・審議事項は、「橋梁点検適用性評価ワーキンググループ(以下、適用性評価WG)」により原案を作成することとした。本WGは、岐阜県コンサルタンツ協会より3名、大学関係者、橋梁



(a) 二輪型マルチコプタ



(b) 可変ピッチ機構付ドローン



(c) 橋梁点検ロボットカメラ



(d) 橋梁点検カメラシステム



(e) 打音機構付点検ロボット



(f) 球殻付飛行ロボット



(g) 打音機構付飛行ロボット

写真-1 橋梁点検用ロボット技術の例

点検業者、岐阜県建設研究センターより各1名、オブザーバーとして市職員1名の計7名により構成されている。

3.2 各務原大橋点検方法検討会

本検討会は、3.1において作成した指針(案)に基づき、各務原大橋を対象とした点検要領の作成を目的とし、大学関係者7名、各務原市職員、岐阜県コンサルタンツ協会より各1名、オブザーバーとして岐阜県建設研究センターより1名の計10名により構成されている。なお、本検討会での検討・審議事項は、「各務原大橋点検方法ワ



(a) 全景



(b) 主桁・ブラケットの構造

写真-2 各務原大橋外観



写真-3 各務原大橋の歩車道境界部

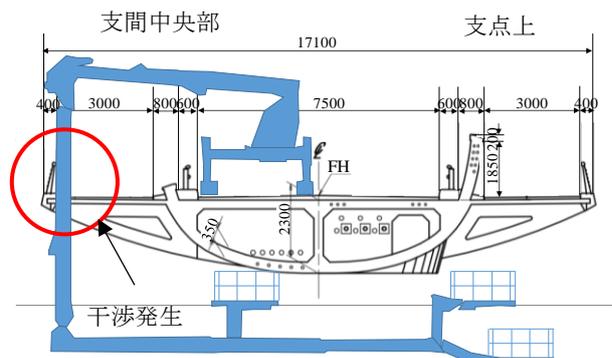


図-3 橋梁点検車(BT400)による橋梁点

ーキンググループ（以下、点検方法WG）」により原案を作成することとした。本WGは、岐阜県コンサルタンツ協会より3名、大学関係者、橋梁点検業者、各務原市職員より各1名、またオブザーバーとして岐阜県建設研究センター1名の計7名により構成されている。

4. ロボット技術を取り入れた橋梁点検指針（案）の概要

本指針では、ロボット技術が人による近接目視点検を様々な機能により「支援」することを基本とし、ロボット技術を活用した事前調査に重点を置くものとした。ロボット技術を活用した事前調査とは、点検対象とする部材について、ロボット等の眼により取得した損傷の有無や程度に関する情報等に基づき、近接目視を重点的に実施する部材や範囲を点検技術者が決めることをいう。

ロボット技術を取り入れた橋梁点検では点検作業の完全代替を目指すとの考えもあるが、これまでのフィールド試験結果等を踏まえると、当面は事前調査に活用することで、ロボット技術の性能更新を促進し、将来的には診断を含めた完全代替を目指すべきであると考えている。

4.1 ロボット技術を取り入れた橋梁点検の手順

ロボット技術を取り入れた橋梁点検として、以下に示すようにロボット技術による点検支援(1)～(5)と、道路橋定期点検要領に基づく点検(6)～(10)の2ステップからなる点検フローを提案した（図-4）。

- (1) 点検技術者は、橋梁点検計画を立案し、道路管理者の確認を得る。
- (2) 点検技術者は、ロボット技術により、事前調査用の情報を取得する。
- (3) 点検技術者は、事前調査用の情報を記録し、橋梁の損傷状況を把握・評価するための資料を作成するとともに、取得情報を第三者が確認可能な形態で整理する。
- (4) 点検技術者は、事前調査用の情報を整理した資料をもとに損傷程度を評価し、当該損傷に対する重点的な近接目視範囲を抽出する。
- (5) 点検技術者は、近接目視のための作業計画を立案する。
- (6) 点検技術者は、近接目視による点検を行う。
- (7) 点検技術者は、近接目視による点検結果及びロ

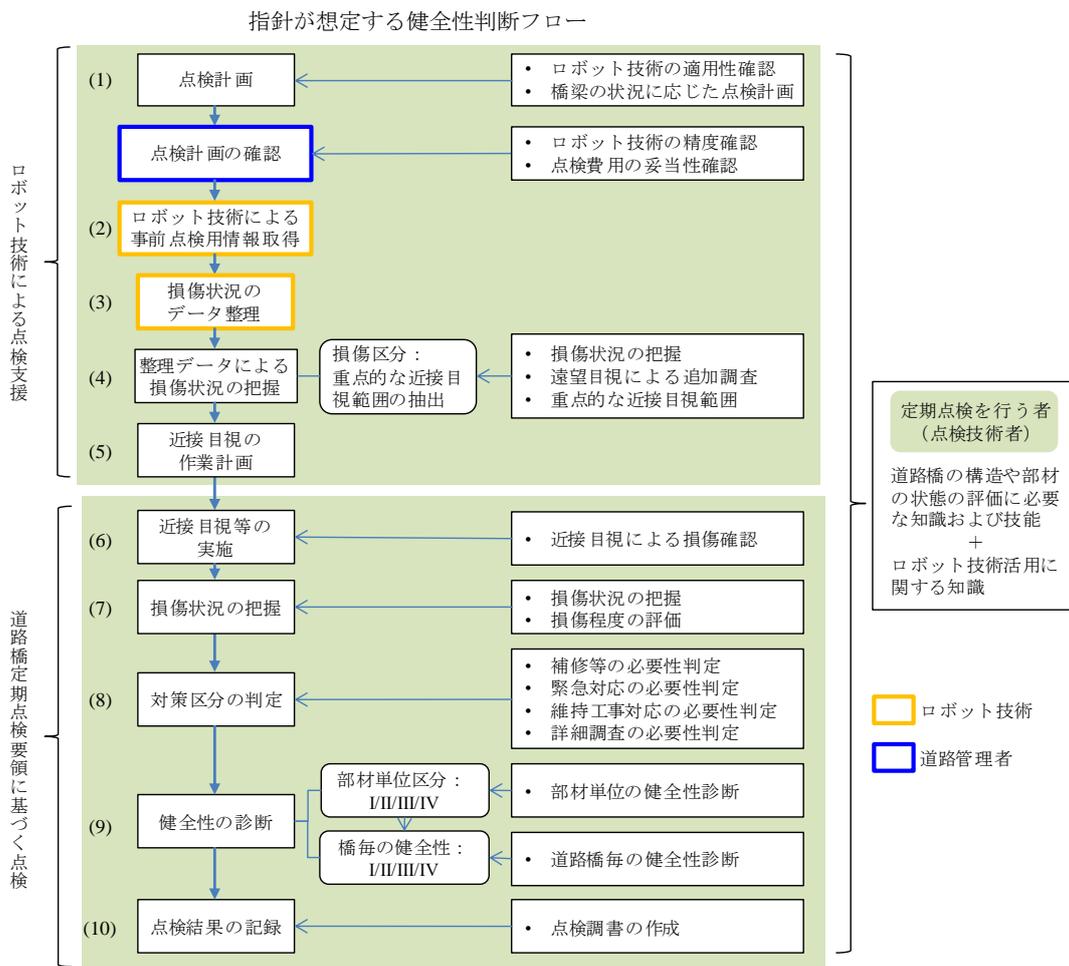


図-4 ロボット技術を取り入れた橋梁点検の手順

ロボット技術により取得・記録された情報を基に損傷状況を把握する。

- (8) 点検技術者は、損傷状況をもとに対策の必要性を判定する。
- (9) 点検技術者は、部材単位及び橋梁全体に対する健全性の診断を行う。
- (10) 点検技術者は、点検結果を、点検要領あるいは道路管理者が定めた様式に基づいて記録する。

4.2 ロボット技術の必要機能の確保

表一に示すように多くのロボット技術の開発が進む中、ユーザーがロボット技術を橋梁点検に活用する上で必要機能が十分には示されてこなかった。その結果、ロボット技術の開発者の視点に依存した技術の高度化が行われたが、橋梁点検に必要な技術の効率化や高度化には必ずしも結び付いていない。そこで、橋梁点検支援のためのロボット技術について、事前調査による情報取得のため、その構成機器（飛行ロボットやロボットカメラ等）およびシステムに対する必要機能を、ユーザー側からの視点で以下に示す5項目に分類整理した。このうち、第3の必要機能では、これまでロボット技術を導入するうえで不明確であった「重点的な近接目視実施範囲を抽出するための資料の提供」という必要機能を定義した。

(1) 点検情報の取得

点検情報の取得とは、損傷状況を確認する部材に近づいて、写真や動画等を撮影する、あるいはたたき点検等の非破壊検査を行う機能である。取得した写真や動画の解像度については、点検技術者による損傷状況の把握と、近接目視点検の必要性判断に必要な精度を有している必要がある。たたき点検等の非破壊検査の情報については、点検技術者がこれをもとに損傷程度を評価するに十分な精度を有している必要がある。また、事前調査では重点的な近接目視が必要な損傷を漏れなく補足することが求められている。

(2) 点検情報の記録

点検情報の記録とは、取得した写真や動画あるいは非破壊検査の情報を確実に記録するとともに適切に整理する機能である。ロボット技術による点検の支援を行う場合には、調査対象の部材範囲全体について、個別の損傷の状況や分布、損傷の見られない範囲を確認可能な情報を記録する必要がある。また、ロボット技術による調査では、従来の手作業の点検に比べて大量のデータが取得されるため、必要な情報を容易に抽出することができるような整理が必要である。

(3) 重点的な近接目視実施範囲を抽出するための資料の提供

重点的な近接目視実施範囲を抽出するための資料の提供とは、点検技術者が損傷状況を把握し、近接目視点検

の重点的な実施を判断するために必要な資料を提供する機能である。特に、点検技術者による現場での情報取得指示や個別情報の確認が困難な場合には、写真等の位置関係を明確化して、点検技術者が部材範囲を漏れなく確認することを可能とする資料が必要である。

(4) 点検調書作成のための資料の提供

点検調書作成のための資料の提供とは、指定様式に基づいた点検調書作成の効率化を図るための資料である。例として、損傷図作成を支援するためには、部材範囲の全体の損傷状況が確認可能なつなぎ写真が有効である。また、点検調書における損傷状況写真を抽出するためには、撮影部位の位置や範囲をわかりやすく整理した写真等が有効と考えられる。

(5) 点検時の橋梁状況を記録したデータの提供

点検時の橋梁状況を記録したデータの提供とは、点検調書に記述されていない健全な部材範囲も含めて、点検時における橋梁の状態を確実に記録したデータの提供である。このようなデータが蓄積されることにより、損傷進行等の経年変化の把握が可能となる。また、場所や時間の属性が付加された写真データ、平面あるいは立体のモデルデータ等、将来の活用に向けたデータの蓄積が望まれる。

5. ロボット技術による取得情報の精度確保

ロボット技術による取得情報をもとに、点検技術者が損傷の状況を確認し、重点的な近接目視実施範囲の抽出に必要となる損傷程度の評価のため、ロボット技術で取得する情報では、各部材において補修が必要となる健全性区分Ⅱ以上となり得る損傷であるか否かが判断可能な精度を確保するものとした。指針では、他の組織での準用に配慮し、具体的な精度については指針の付録で岐阜県での事例として示すものとした。

事例では、岐阜県橋梁点検マニュアル⁸⁾に基づき、コンクリート橋を対象とした場合の取得情報の要求精度を示した。点検技術者が橋梁の各部材の健全性を判定するために求められる情報と、ロボット技術が提示すべきデータを整理した上で、取得情報の要求精度(表一2)を規定した。要求精度については、岐阜県橋梁点検マニュアルでは健全性区分ⅠをⅠa(健全:【健全】構造物の機能に支障が生じていない状態。補修対象外)とⅠb(健全:【経過観察】構造物の機能に支障が生じていないが、軽微な損傷があり、経過観察が望ましい状態。補修対象外)に分類していることから、これを判別する要求精度を考慮した。なお、表一2の内容については、フィールド試験でのロボット技術の検証結果をもとに、委員会において、現在検討中である。

表-2 ロボット技術による取得情報の要求内容（規定値等を検討中）

| | | 要求内容 | 検証方法 |
|------|----------|--|--|
| 検出機能 | 有無 | 損傷の種類を認識できる。 | 左記の項目について確認できる写真や損傷図が提供されること。 提供された写真や損傷図が、近接目視により作成された損傷図と比較して、損傷の位置、範囲、方向が概ね一致していること。 |
| | 位置 | 損傷箇所と他の部材との位置関係をスケッチできる程度に検出できる。 | |
| | 範囲 | 損傷の範囲について、「局所的」あるいは「広範囲」を判断できるような全体像を検出できる。 | |
| | 方向（パターン） | 損傷の方向性（水平、鉛直、斜め、鋼材方向、直交方向）あるいはパターン（網目状）を検出できる。 | |
| | 原因 | 漏水や遊離石灰等、水の影響が懸念される損傷について、水の侵入経路や発生源を検出できる。 | |
| 計測性能 | 大きさ | 【ひび割れ幅】 0.2mm 以上のひび割れ幅を 0.1mm 以内の誤差で計測できる。 | 近接目視により作成された損傷図に記載された損傷、あるいは人工的に作成した精度検証指標の計測結果が、概ね左記に示す許容誤差の範囲内であること。 |
| | | 【ひび割れ長さ、剥離、鉄筋露出、漏水等】 5cm 以内の誤差で計測できる。 (長さ L = ○○○cm, 面積 A = ○○○mm × ○○○mm) | |
| | 量 | 桁遊間や支承の変位を、10mm 以内の誤差で計測できる。 | |

6. あとがき

ここでは、橋梁点検車や吊り足場等高価な機材の抑制による点検費用低減とともに、点検作業の安全性向上、さらには交通規制にとまなう社会的な経済損失の低減にもつながると考えられるロボット技術を活用した橋梁点検の試みを紹介することを目的としており、「ロボット技術を取り入れた橋梁点検指針（案）」を中心として、以下のような事項について述べた。

- 橋梁点検指針の基本的な考え方では、ロボット技術が人による近接目視点検を様々な機能により「支援」することを基本とし、ロボット技術を活用した事前調査に重点を置くことを述べた。
- ロボット技術を取り入れた橋梁点検の手順では、ロボット技術による点検支援と道路橋定期点検要領に基づく点検の 2 ステップの点検フローを提案した。
- ロボット技術の必要機能をユーザー側からの視点で 5 項目に分類整理し、これまでロボット技術を導入するうえで不明確であった「重点的な近接目視実施範囲を抽出するための資料の提供」という必要機能を定義した。
- ロボット技術の取得情報の精度確保については、各部材の健全性区分が II 以上となり得る損傷であるか否かが判断可能な精度を確保するという目安を示し、具体的な要求精度の事例を示した。

本稿に示した活動が、多くのインフラ点検を抱える地方自治体における橋梁点検の参考となれば幸いである。

本研究は、前述の SIP インフラによって実施したものであり、SIP 関係者の皆様、委員会に参画いただいた内閣府や国土交通省、岐阜県、岐阜県建設研究センター、各務原市、岐阜県コンサルタンツ協会の皆様、岐阜大学工学部附属インフラマネジメント技術研究センターの皆様、参画いただいたロボット技術の開発者の皆様、技術

説明会やフィールド試験へご参加いただいた皆様に、多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 牧角龍憲：地方の社会資本整備に果たす学界の役割と取組みに必要な視点，土木学会論文集 F, Vol.62, No.1, pp.162-180, 2006.3.
- 2) 蓮池里菜，木下幸治，矢島賢治，高木朗義，六郷恵哲：インフラ構造物のメンテナンス等への新技術活用における障害と対策に関する考察，土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.73, No.4, pp. I_100-I_111, 2017.12.
- 3) 六郷恵哲，羽田野英明，沢田和秀，木下幸治，川瀬智彦，加藤一郎，一川毅彦：SIP 維持管理技術の地域実装支援としての岐阜大学チームの取組み，第 32 回日本道路会議，論文番号 2043, 2017.10.
- 4) 国土交通省 HP，道路橋定期点検要領：<http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen.html>（閲覧日：2018 年 1 月 5 日）
- 5) 国土交通省 HP，道路メンテナンス年報（平成 28 年度）：http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen_maint_index.html（閲覧日：2018 年 1 月 6 日）
- 6) 国土交通省中部地方整備局岐阜国道事務所 HP，岐阜県道路メンテナンス会議 会議資料，H26～H28 年度点検結果：http://www.cbr.mlit.go.jp/gifu/cooperation/maintenance_kaigi.html（閲覧日：2018 年 1 月 6 日）
- 7) 使いたくなる SIP 維持管理技術の ME ネットワークによる実装 HP：<http://me-unit.net/>（閲覧日：2018 年 1 月 6 日）
- 8) 岐阜県 HP，岐阜県橋梁点検マニュアル（平成 28 年 3 月改訂版）：http://www.pref.gifu.lg.jp/shakai-kiban/doro/doro-iji/11657/index_57545.html（閲覧日：2018 年 1 月 6 日）