

# 社会実装を指向した橋梁点検ロボットの性能評価法の研究

2020年3月

新田 恭士

# 社会実装を指向した橋梁点検ロボットの性能評価法の研究

新田 恭士

システム情報工学研究科

筑波大学

2020年3月

## 概要

本研究は、ロボット技術を橋梁点検に適用するための性能評価法に関するものである。橋梁点検でのロボットの使用方法は未だ確立しておらず、ロボット自体の性能も発展途上にある。しかし、橋梁点検業務の効率化は喫緊の課題であり、政府が打ち出したロボット新戦略のもと、多くの橋梁を管理する国土交通省においても、製造業、医療、農業分野などと期を同じくし、インフラ分野へのロボット導入について強力に進められているところである。

高度成長期に建設された多くのインフラは老朽化が進み、全国に70万橋ある道路橋についても多くの管理者にとって深刻な課題となっている。橋梁の点検は、遠望からの目視点検だけではなく、手が届くところまで近づく近接目視点検が基本とされ、道路法により5年毎に全ての道路管理者に対して実施が義務付けられている。そして、十分な知識を有する者による点検結果に基づく健全性の診断が義務付けられた。これらの活動の継続により、適切な補修維持を含むメンテナンスサイクルの実現を目指している。

技術者・技能労働者の担い手不足が深刻化するなか、手間とコストを費やす点検作業の効率化を進めることは、インフラ管理に関わる多くの技術者が願っているところである。その具体策の一つとして橋梁点検ロボットの導入を推進し、点検品質を確保しながら効率性を高めることの意義は大きい。一方で橋梁点検は、工場内のロボットとは異なり、変動する風速など屋外の厳しい環境の下で、ひび割れなどの微細な損傷を発見する作業である。

本研究では橋梁点検ロボットの導入を推進するために、従前からの点検方法に比べ点検ロボットが有する優位性に着目することにより、ロボットの長をを活かした利用方法（ユースケース）と性能評価方法について検討を行った。

第1章では、本研究の全体像について説明する。老朽化が進行する我が国のインフラの維持管理を効率的に行うために、橋梁点検ロボットに着目した背景と本研究の進め方について述べる。

第2章では、本研究のテーマである橋梁点検へのロボット導入について、その背景となる橋梁点検現場の実態や橋梁点検ロボットの導入に関わる問題意識について述べる。深刻化したインフラ老朽化を背景に道路法が改正され、全道路管理者に定期的な橋梁点検の実施が義務化されたことに伴い、あらたに策定された技術基準の内容について述べる。また、効率化とコスト縮減が望まれる現在の橋梁点検作業について、その業務手順と成果物に対する要求事項について述べる。また、道路管理者によって異なる点検要領の実態を踏まえ、点検記録に対する品質要求と橋梁点検における課題について整理する。

第3章には、本研究論文の目的を述べる。本研究では、ロボットの強みを活かした使い方（ユースケース）の下で、橋梁点検ロボットの性能評価方法を提案するものである。性能評価結果は、ユーザーの導入判断の参考になるだけでなく、開発者に対するフィードバックにもなることで、改良と進化を評価することにより技術開発の促進にも繋がる。また、性能評価に際してユースケースと要求性能を明らかにすることで、新技術の導入を誘引する環境（例えば、技術基準の整備等）を醸成し、土木分野における橋梁点検ロボット、ひいては先進技術の社会実装を促進することにつながる。

第4章には、橋梁点検に適用されるロボットが持つべき機能と利用場面について示す。先ず、本研究が扱う橋梁点検ロボットの定義、橋梁点検ロボットが持つべき機能、橋梁点検ロボットの性能表示について整理した上で、人の作業を支援する観点から点検とロボットに対する期待、点検ロボットに対するユーザーの不安要素を踏まえ、点検ロボットに期待されるユースケース（利用方法）について述べる。

第5章には、国土交通省で行われた次世代社会インフラ用ロボット現場検証での検証方法と評価方針について整理し、ひび割れの検証結果について分析をおこない現在のロボットの達成水準を整理した。また、これらの成果を参考に策定された橋梁点検ロボットに対する要求性能と評価項目、評価指標について示すとともに、既存の技術評価システムで橋梁点検ロボットを評価する場合の課題について指摘した。

第6章では、橋梁点検ロボットに備わる優れた特長について考察した。特に、ひび割れ等の損傷の位置記録精度においては、現行手法よりも優れていることを明らかにした。さらに画像の分解能にも着目し、画素寸法とひび割れ幅の関係、撮影距離や撮影角度の違いによるひび割れの見え方の違いを分析した。その結果からも、画像の撮影位置を用いた幾何補正により、より精度の高いひび割れ検出が可能であることを示した。また、ロボットが取得した大量の画像から SfM (Structure from Motion) により生成した3次元点群モデルについて、実測値との比較による精度検証を行い高い精度での再現が可能であることを示すとともに、SfMにより推定した3次元モデル上の画像撮影位置、撮影方向についても実測値との比較評価を実施し、撮影位置については誤差5cm以内、撮影方向については誤差0.2度以内と高い精度で推定できることを確認した。さらに、現行の橋梁定期点検要領を分析し、部材番号表や損傷図に書き込まれた矢印や引き出し線など、現行の点検要領において損傷発生位置と損傷写真を関連づけるための作業の効率化や自動化が可能で、3次元モデルを利用した橋梁点検画像の管理手法を提案した。

第7章では、橋梁点検ロボットの社会実装のための実証的評価方法を提案した。橋梁点検ロボットのひび割れ検出能力が幅0.3mm以上のひび割れについても検出率が8割程度に止まることを踏まえ、橋梁点検ロボットを点検範囲の絞り込みに使用（スクリーニング）する考え方を示した。

さらには、スクリーニングへ適用した場合を想定し、橋梁点検ロボットの性能評価方法について、橋梁点検

ロボット単体の性能評価，点検プロセス全体の品質確保と効率化を考慮した総合評価について考察し，橋梁点検ロボット技術の社会実装に向けた実証的な性能評価方法を提案した．これまでの性能評価は，従来技術（従来手法）である人の目視点検との比較を基本としていたため，ロボットやソフトウェアの能力を活かした点検手法での評価が行われていなかった．言い換えると個体差の激しい人が行った点検結果を比較対象としたことで，「点検記録の再現性」や「点検に要求される損傷検出精度の定量化」が明らかにされないまま性能評価が行われていたとも言える．そこで，本研究では記録の再現性や損傷検出精度の定量化を前提として，ロボットが取得した画像の損傷検出精度の評価を，画像の空間分解能等に着目したベンチマーク方式で行うことを提案した．また，3次元モデルによる点検データの管理を見据え，3次元モデルの精度や損傷画像の位置精度，損傷画像の空間分解能や階調，損傷の位置精度を評価対象とすることを提案した．

第8章では，本研究の結論を述べる．本研究でまとめた「橋梁点検ロボットの性能評価法」をまとめるに至って考案した内容を整理するとともに，提案した性能評価手法の有効性を述べる．

最後に第9章において，橋梁点検ロボットの社会実装の促進に向けて，今後の展開と展望を述べる．

膨大なインフラの点検を効果的・効率的に行うとともに，適切に維持管理更新を行うことが喫緊の課題である．本研究では，橋梁点検ロボットの優れた特長に着目し，ロボットの特長を活かした利用方法（ユースケース）において，性能評価手法について様々な観点より検討し，社会実装に貢献するための論考を行った．

最後に，本研究で提案した性能評価方法を実際に有効に働かせるためには，継続的に様々な橋梁や現場条件における検証を積み重ねる必要がある．また，今後の展望として，ロボット技術の導入を進めることで損傷の位置記録精度や再現性など3次元情報としての画像データの持つ価値を引き出すことが可能となり，AI（人工知能）や自律点検ロボットの開発が促進されることにより，世界のインフラマネージメントに貢献することにつながる．

以上の視点から本研究論文をとりまとめた．

# 目次

## 概要

## 目次

1. はじめに	1
2. 背景-インフラ点検に対する社会的要求と課題	3
2.1 法令による橋梁点検の義務化	3
2.2 技術基準の策定（点検品質の確保）	3
2.3 点検の効率化, コスト縮減（点検コストの明確化）	3
2.4 点検業務及びその成果物に対する要求事項（点検根拠の明示）	5
2.5 道路管理者によって異なる点検要領	5
2.6 点検記録に対する品質要求	5
2.7 橋梁点検における課題	5
3. 本研究の目的	6
4. 橋梁点検へのロボット技術の適用	7
4.1 橋梁点検ロボットが持つべき機能	7
4.2 橋梁点検ロボットの性能表示	8
4.3 人による点検とロボットへの期待	9
4.4 点検ロボットに対するユーザーの不安要素	10
4.5 点検ロボットに期待されるユースケース（利用方法）	11
5. 橋梁点検ロボットの現場実証から見えてきた課題	14
5.1 現場実証のねらい	14
5.2 対象技術	15
5.3 検証方法	17
5.3.1 検証フィールドの概要（実橋梁）	18
5.3.2 精度検証のための点検データ作成	20
5.3.3 評価対象とする損傷の種類, 対象部材	21
5.4 評価方法	22
5.4.1 ひび割れ検出精度に関する評価	25
5.4.2 損傷の検出能力の評価の基準データ	28
5.5 評価結果（現状の達成水準）	30
5.6 現場検証活動の成果	32
5.7 橋梁点検ロボットの評価における課題	32
5.7.1 点検対象について	32
5.7.2 環境条件について	32
5.8 既存の技術評価システムと課題	32
5.8.1 新技術活用促進システム (NETIS) における技術評価方法の概要	33
5.8.2 新技術活用システムの活用体系と技術評価	33
5.8.3 登録される技術情報	35
5.8.4 事後評価	35
5.8.5 「有用な新技術」の活用促進	35
5.8.6 リクワイヤメント(性能要求)に基づき評価が行われる「テーマ設定型(技術公募)」	36
5.8.7 橋梁点検ロボットの NETIS 評価事例の考察	36
5.9 まとめ	38

6.	橋梁点検ロボットの点検能力に関する考察	39
6.1	人による点検とロボットによる点検	39
6.2	人によるひび割れの位置記録能力に関する分析	40
6.2.1	現状の点検調書とロボットにより得られた画像の比較	41
6.2.2	ひび割れの位置記録精度に関する考察	47
6.3	分解能から見たひび割れの検出能力の分析	48
6.3.1	画素寸法によるひび割れ幅推定に関する考察	48
6.3.2	画素寸法の違いによるひび割れの見え方	49
6.3.3	幾何補正によるひび割れ検出精度の確保	53
6.4	点検記録としての画像の網羅性	55
6.4.1	画像記録範囲から見たロボットの優位性	55
6.4.2	点検画像の網羅性を確認する方法	60
6.5	橋梁点検ロボットの損傷記録能力における優位性	60
6.5.1	橋梁点検において求められる記録精度	61
6.5.2	損傷記録精度に係る基礎的検証	62
1)	取得画像から構築した3次元モデルの精度	62
2)	画像の撮影位置・撮影方向の推定精度	64
3)	3次元モデル上での損傷位置推定精度	65
6.6	ロボットの特長を活かした3次元モデル上での画像撮影位置の管理	66
6.6.1	3次元モデルでの画像管理	66
6.6.2	点検調書への適用性	68
1)	点検調書が持つべきデータと様式の関連性	68
2)	現行の2次元帳票に代わるビューイメージ	70
3)	調書作成の省力化への寄与	70
6.7	まとめ	72
7.	橋梁点検ロボットの社会実装に向けた実証的な性能評価法の提案	73
7.1	橋梁点検ロボットの特長を活かした点検方法	73
7.1.1	橋梁点検ロボットを用いる場合に考慮すべき得失	73
7.1.2	橋梁点検ロボットの優位性を活かした点検手順の考察	76
7.1.3	橋梁点検ロボットを用いたスクリーニングへの適用	77
7.1.4	評価のためのユースケース	83
1)	近接目視点検結果(チョーキング)の撮影と記録	83
2)	人の近接目視に代わり橋梁点検ロボットを使用して損傷写真を記録	83
3)	橋梁点検ロボットが撮影した損傷写真から損傷展開図を自動作成	84
4)	橋梁点検ロボットが撮影した損傷写真から損傷の種類や損傷程度を自動判別	84
7.1.5	橋梁点検ロボットの社会実装に必要なとなる技術	85
1)	橋梁点検ロボットが取得した大量の画像を管理する技術	85
2)	画像から損傷を自動検出する技術	86
3)	データ統合管理により調書の自動出力や自動解析する技術	86
4)	3次元モデルをベースにした点検データ管理技術(点検調書の3D化)	87
7.2	橋梁点検ロボットの評価の観点	88
7.2.1	橋梁点検ロボットの持つ優位性に着目した評価	88
7.2.2	点検用センサー・プローブシステムとしてのロボットの評価	90
1)	ロボット単体の性能評価方針	91
2)	ロボット単体に対する評価項目	92
3)	ロボット単体の性能評価法についてのまとめ	92
7.2.3	総合的な評価(点検プロセス全体の品質確保と効率化)	93
1)	ロボットを用いた点検プロセス全体の性能評価方針	94
2)	ロボットを用いた点検プロセス全体への評価項目	94
3)	ロボットを用いた点検プロセス全体の性能評価モデルについてのまとめ	94

7.3	橋梁点検ロボット技術の社会実装に向けた性能評価法	95
7.3.1	評価手順の基本的な考え方	95
7.3.2	具体的な実証評価法	96
7.3.3	実証的性能評価において考慮すべき事項	99
7.4	まとめ	104
8.	結論	105
9.	今後の展開と展望	106
10.	謝辞	107
11.	参考文献	108
12.	付録	110

# 1. はじめに

本研究は、ロボット技術を橋梁点検に適用するための性能評価法に関するものである。従来から、橋梁などの土木構造物の点検は人が近接目視により行うことを基本としてきた。近接目視による点検とは、人の手が届く範囲まで近づくことにより変状や損傷の状況を確認する点検方法である。この方法では、人が近接するために足場を設ける必要がありコストと時間を要する。

我が国には、道路橋（橋長 2m 以上）が 70 万橋（図 1-1）、道路トンネルが 1 万本、3000 箇所を超えるダムといった土木構造物が建設され、国民生活に不可欠な共有財産となっている。高度成長期に建設された多くの構造物に老朽化が進行し、また少子高齢化による技能労働者不足も懸念されている（図 1-2）。このような背景から膨大なインフラの点検を効果的・効率的に行い、適切に維持管理更新を行うことが喫緊の課題となっている。

ロボット技術は、近年著しい進歩を遂げており、様々な分野での活用が期待されている。特に、人にとって危険で苦渋な作業や単調な繰り返し作業をロボットに代替させることで、生産性を高めることが求められている。土木構造物の点検作業は、一般的なイメージとは異なりコンクリート躯体で幅 0.2 mm（橋梁床版で幅 0.05 mm）のひび割れを記録する高い検出精度が要求される作業である。

このため、人の作業を単純にロボットで置き換えることは難しく、点検手法そのものを変更することも含めて導入方法を考えていく必要がある。さらには、インフラは長期間にわたり共用されることから、ロボットが取得した画像データの価値に着目することこそが重要であると考えられる。

現在行われている人の眼を信頼した点検手法は、GPU（Graphics Processing Unit）による深層学習やMEMS（Micro Electro Mechanical Systems）等の登場によりロボット技術が現在の水準に達する以前に考案されたものであり、画像から損傷を自動検出するAI（Artificial Intelligence）や自律化されたフィールドロボットの登場に適應するためには、点検ロボットが取得した電子データの利用価値を考慮した点検手法を考慮する必要がある。

点検ロボットが取得する「点検画像（電子データ）」は、人が撮影した「点検写真」とは明らかに異なる価値を有することに着目する。点検ロボットに搭載されたデジタルカメラで撮影した画像には、GNSSやIMU等のセンサーにより位置や姿勢のデータを付加することが可能であり、連続撮影による重複した画像の特徴点からは被写体の3次元情報を推定することが可能である。これら電子データは橋梁点検ロボットを用いることで得ることができ、点検ロボットから得られた電子データを活用することにより点検に必要な「情報」を得ることが可能である。まさに点検ロボットの優れた特長を引き出すことで、「屋外の点検作業（外業）」のみならず「点検報告書の作成（内業）」を含む橋梁点検業務全体の効率改善に繋がると考えている。

実際の橋梁点検は（写真 2-1）は、その重要性に鑑みて、2013 年から定期点検の実施が法律で義務付けられている。しかし、スケールの大きな土木構造物でありながら、技術者による近接目視を基本とした点検方法であることから、ロボット技術の導入が進んでいない。本研究では、点検ロボットによる橋梁点検作業の効率化に着目し、ロボット技術の社会実装に資する性能評価手法を考察する。

具体には、第 2 章で本研究の背景となるインフラ維持管理への社会的要求と、ロボット技術への期待される役割について述べる。第 3 章では、本研究が目指す、土木分野でのロボット技術の社会実装のための技術評価システムについて述べ、本研究の研究対象を明らかにする。第 4 章では、橋梁点検ロボットが持つべき機能を考察する。第 5 章では、既往の取組みとして、国交省が実施した次世代社会インフラ用ロボットの現場実証活動について、その目的と経緯を紹介する（この現場検証では、ロボットの能力が明らかになったことを踏まえ当初設定した目標である「人の代替」から「人の支援」にロボットへの要求を現実的なものに変更した）。

第 6 章では、橋梁点検ロボットの点検能力について整理する。橋梁点検において、最も基本的な損傷となる「ひび割れ」の検出について、現状の技術水準を踏まえつつ、人（点検技術者）による点検結果と橋梁点検ロボットによる点検結果を比較。これにより明らかとなった橋梁点検ロボットの優位性を引き出す作業について分析を行う。第 7 章では、人と橋梁点検ロボットの各々有利な部分を有機的に組み合わせた全体の点検システムを追求するため、例えば、橋梁点検ロボットが優位性を有する位置決め能力を活かしたスクリーニングへの適用など、橋梁点検ロボットを用いて早期に実現可能な点検方式を提案するとともに、点検システムの有効性を示すため、実現場での実証的な性能評価手法を提示した。



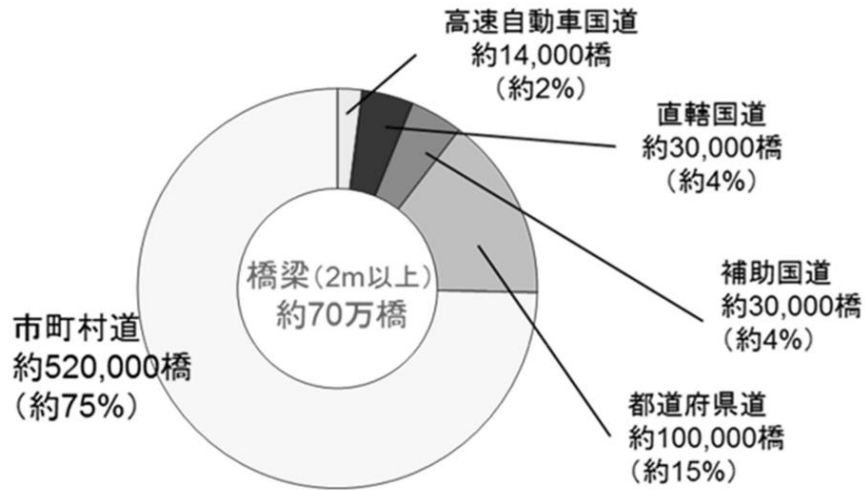


図1-1 国内の橋梁数 (2m 以上)

出典: 国土交通省道路局

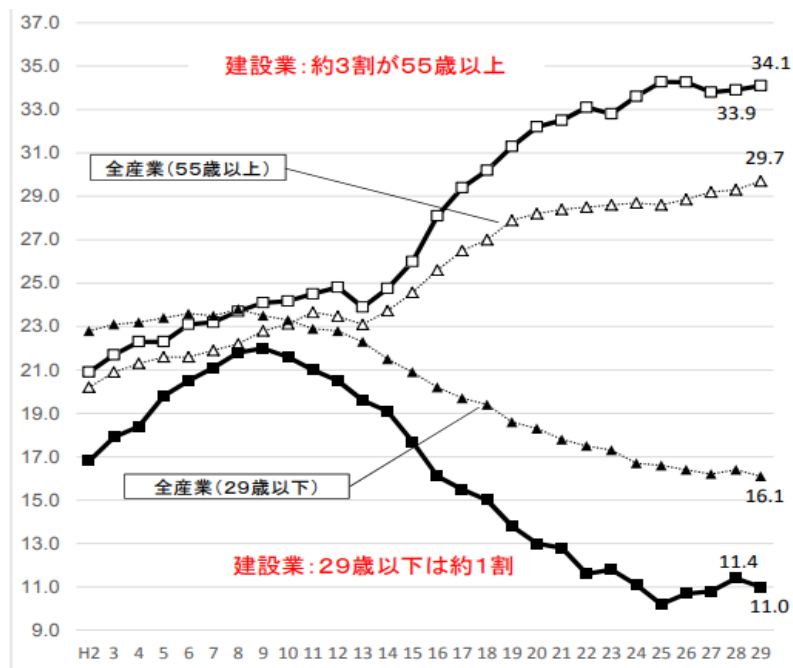


図1-2 建設業における技能労働者の年齢構成の推移

出典: 総務省「労働力調査」を基に国土交通省が算出

## 2. 背景-インフラ点検に対する社会的要求と課題-

### 2.1 法令による橋梁点検の義務化

2013年の道路法改正に伴い橋梁点検は、政令（道路法施工令）及び省令（道路法施行規則）により、①適切な時期に実施すること。則ち5年に1回の頻度で実施すること。②適切な方法で実施すること。則ち、必要な知識及び技能を有するものが行うこと、近接目視によりおこなうこと、健全性の診断を行うことが定められた。これにより、全ての道路管理者において5年毎の橋梁定期点検が義務化された。

### 2.2 技術基準の策定（点検品質の確保）

2014年、法令の要求事項に対応し、全ての道路管理者への技術的助言として道路橋定期点検要領[2]が発行された。さらに国管理の直轄国道については橋梁定期点検要領[1]が改正され省令と整合が図られた。則ち、それまでの「診断」の成果である「対策区分の判定」に加えて、「健全性の診断」を必須とした。図2-1に、定期点検の大きな流れを示した。定期点検においては、近接目視等により把握した損傷について記録するとともに、さらに各々の損傷原因を特定したうえで、部材単位・橋単位で対策の要否を含む「健全性の診断」が行われる。

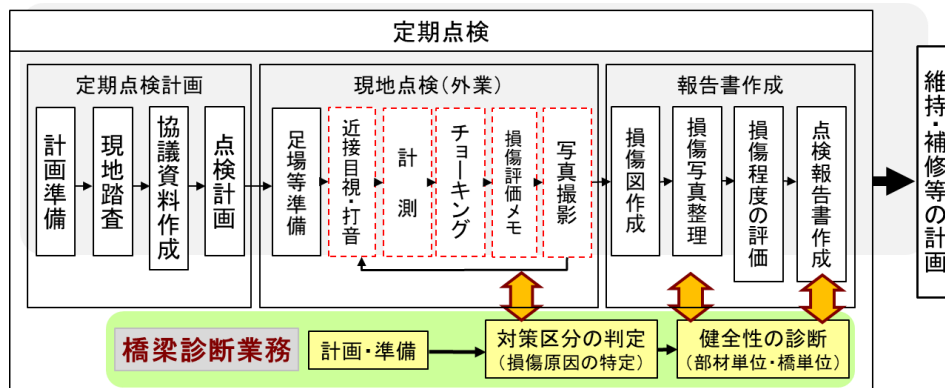


図2-1 国土交通省における橋梁定期点検の流れ

### 2.3 点検の効率化，コスト縮減（点検コストの明確化）

橋梁点検にかかるコストは、5年毎の法定点検が義務化されたことにより管理者の大きな経済的負担となっている。定期点検の方法は、各道路管理者が定めているため、点検費用も一概に言えないが、国土交通省が管理する橋梁については、定期点検に際して全ての部材と要素について損傷を把握し記録することを求めている。その内容は橋梁定期点検要領に定められている。橋梁定期点検要領に基づいて実施される直轄国道の橋梁点検コストについて、橋長との関係を図2-2に示す。ただし、このグラフは無作為に抽出したものであり、全国の統計値ではない。橋梁点検に係るコストは、橋梁の種類や規模、周辺の環境条件等によって大きく変わる。

大雑把に言えば「直接人件費」に加えて橋梁点検車両などの「機械器具費」や、交通規制等に要する「安全費」で構成される（図2-3）。点検業務を自治体の技術系職員など道路管理者が自ら行う場合もあるが、国では専門の点検技術者に委託するケースが多い。点検業務委託費[3]は、直接費及び間接費から構成され、直接費は、直接人件費と直接経費に分類される。直接人件費は、点検に係る人件費であり、計画・準備、現地踏査、定期点検（外業）、点検調書作成（内業）などから構成される。直接経費は、機械経費と安全費等から構成される。

橋梁点検は、全ての部材を近接目視により行うため、現地では足場が必要になる。橋梁の規模が小さく、移動式梯子やリフト車等で近接できる場合は安価に済むが、規模が大きくなると固定足場の設置や、大型の橋梁点検車の使用を検討する必要が生じる。この場合、足場の構築だけでも数百万円を必要とするケースもある（図2-4）。

また、道路管理者により異なるが、点検調書の作成にもコストが掛かっている。国の場合、直接人件費を構成する要素のうち、最も多くを占めるのは「現場での点検作業」よりも、「点検調書の作成」などの内業に係るコストが多くを占めている。橋梁点検ロボットの導入に際しては、現場での点検効率化に加え、足場設置コストの抑制、点検調書作成の効率化などが期待されている。

さらに点検に伴い交通規制を必要とする場合、道路利用者には規制時間による走行時間延長費用が発生していることを忘れてはならない。24時間交通量2万台で片側1車線、橋長30mの橋で規制を行うと、時間価値原単位を乗用車40.1円/分、普通貨物64.2円/分と仮定すると、規制時間を1時間短縮するだけで12.4万円の外部費用低減につながる（別途参考資料提示）。

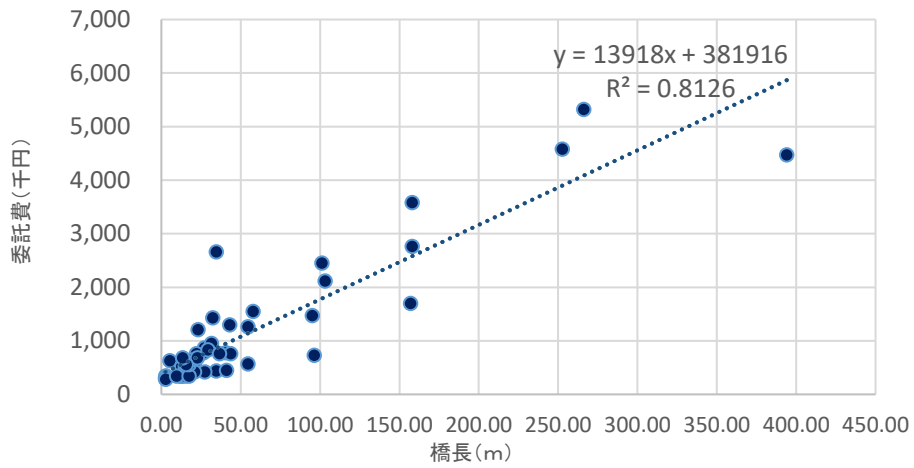


図2-2 橋長と点検コスト(実績値)の関係

(注)このグラフにおいて、国が無償貸付を行う橋梁点検車(大型のもの)に係る機械経費は含まれていない。また、電子納品成果品作成費、安全費も含まない。

出所：橋梁点検業務経験に基づき著者作成

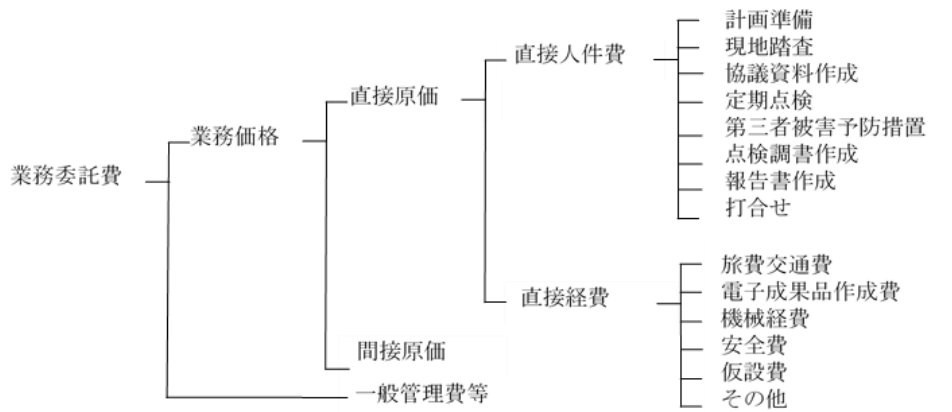


図2-3 橋梁点検のコスト構成

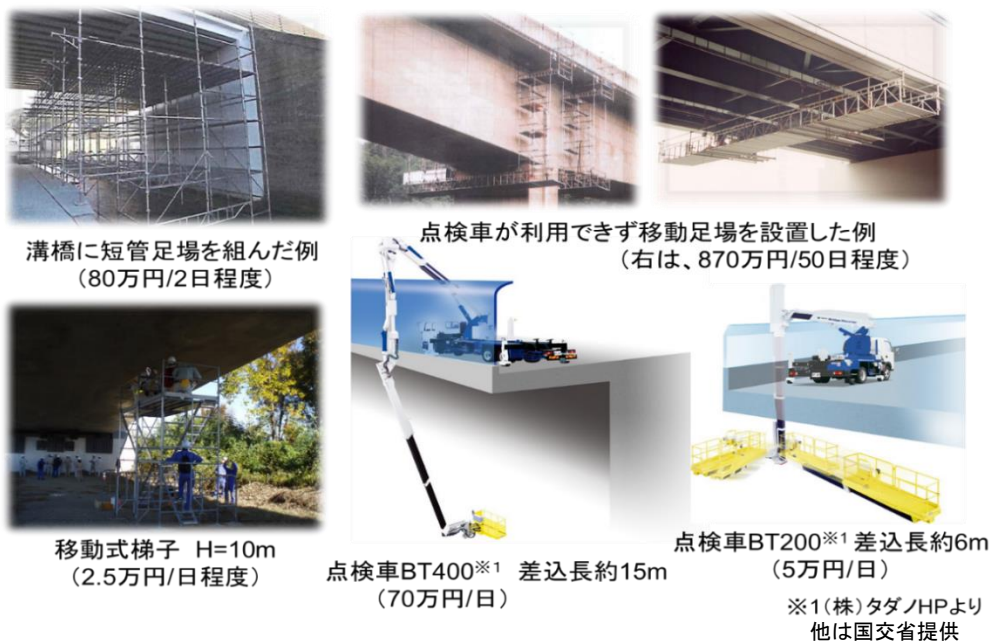


図2-4 橋梁点検足場の例(機械費, または仮設費に相当)

## 2.4 点検業務及びその成果物に対する要求事項（点検根拠の明示）

道路橋定期点検要領が求める「健全性の診断」は、構造物とその構成部材に機能を損なうような変状や障害の有無、または発生の可能性を判定（診断）、記録することが要求され、あわせて必要な措置（対策の必要性や内容、適切な対策時期など）を助言についても要求される[4][5]。

「健全性の診断」を行う者には、自らが全ての部材に近接して診断の根拠となった変状の記録を行うことが求められる。また、直轄施設のみを対象とした橋梁定期点検要領に基づく点検では、法定義務である「健全性の診断」以外にも、全ての部材の現状を統一指標に従って分類（「損傷程度の評価」）することが要求される。

## 2.5 道路管理者によって異なる点検要領

直轄国道の点検では、「損傷程度の評価」と「健全性の診断（対策区分の判定を含む）」が明確にプロセスとして分離されており、前者を「点検業務」、後者を「診断業務」として区分している。これに対して「損傷程度の評価」のプロセスが規定されていない道路橋定期点検要領では、検査者自らが行う「健全性の診断」の根拠となる変状以外の記録は求められていない。直轄国道の点検で行われる「損傷程度の評価」では、劣化傾向を把握するための客観的なデータを収集することを言い、近接目視により確認した変状の事実を指標に従った分類と評価、および記録することが求められるが、「健全性の診断」で必要となる構造特性を踏まえた洞察力や経験を必要としない。

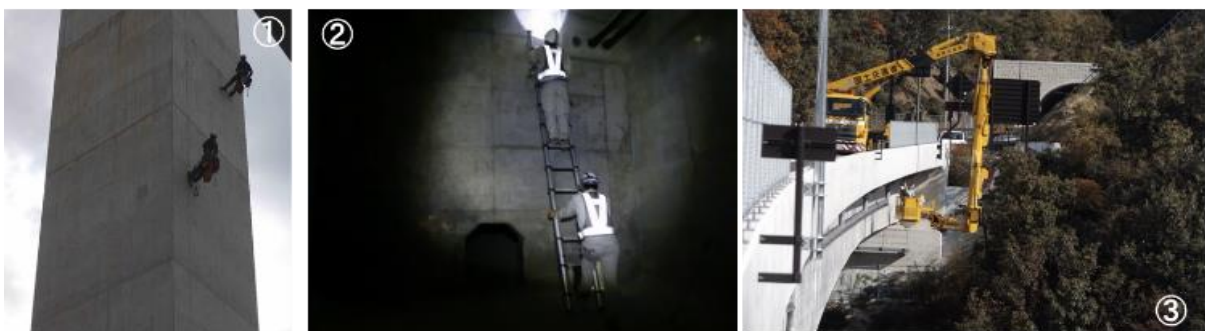


写真2-1 高規格自動車道における橋梁点検の様子  
①ロープアクセス ②梯子での桁内部点検 ③大型橋梁点検車

写真: 国交省提供

## 2.6 点検記録に対する品質要求

法令により「健全性の診断」を行う者は、全ての部材に近接し診断を行い、かつ診断根拠となった変状を記録する必要があるが、それ以外の客観的事実としてのデータの取得や記録については、求められていない。しかし、診断の信頼性等を高める観点から記録充実に対するニーズは根強い。過去からの変化量など損傷の進行を判定するための正確な情報は、診断にも有益であるが、どの程度の精度で記録を作成するかは明確にされていない。

一般論として適確な診断に有益な点検記録には、「再現性」「汎用性」「普遍性」「信頼性」が担保されることが要求される。「再現性」とは、同じ状態に対して同じ記録ができること、「汎用性」とは特定の機器や業者にしか出来ないということがないこと、「普遍性」とは機器や業者が異なっても相対比較が可能であること、「信頼性」とは検出限界や記録される寸法や色等の情報の信頼性が明らかであることを言う。

## 2.7 橋梁点検における課題

### ①近接目視困難箇所での点検

部材内部や桁端部のような狭隘箇所や点検員が入れない箇所、橋梁点検車や高所作業車などを用いても到達できない箇所にも損傷が潜んでいる可能性がある。このように見えない箇所を効率的かつ安全に点検したいという現場のニーズが存在している。

### ②物理的・点検困難箇所での点検

例えば常時流水中にある橋脚周りの洗堀や、地中埋設部など掘削しなければ確認できない箇所にも補修が必要な損傷が存在する可能性がある。道路橋定期点検要領では、物理的困難箇所の近接目視は求めていないが、新技術などにより確認する方法へのニーズが存在する。

### ③点検作業の大変さ、過酷さ

現在の定期点検は、点検員が物理的に近接可能な部材要素の全てを近接目視している。このため、高橋脚のロープアクセスや暗所や足場の悪い箇所における上向き姿勢での梯子点検など、点検員には肉体的に過酷な状態や姿勢での苦渋作業が求められる。

### 3. 本研究の目的

以上の背景から本研究は、これまで人の目視を主体に行われてきた橋梁点検業務を橋梁点検ロボットの導入により効率化する観点から、橋梁点検ロボットに求められる要求性能と評価方法について考察し、開発者と利用者双方にとって有益な性能評価について提案することを目指した。さらに、本研究では単に橋梁点検ロボットの導入可否を判定するものではなく、技術評価が開発者に対し開発目標を与え、利用者には導入に際して有効な判断材料となることを目指す。そのため、橋梁点検ロボットに関する既往の研究開発成果や、これまでに国土交通省が実施した現場検証の取組みを踏まえ、独自の視点から現状の技術水準を考慮した段階的な実用化を可能にする技術評価方法を考察し、橋梁点検の効率化に効果的なユースケースに基づく要求性能（リクワイヤメント）と社会実装に有効な実フィールドでの総合的な技術評価を提案する。

これにより本研究の成果が、企業等における個別技術の開発や製品化において有効な情報をもたらすことで、技術の改良と進化を促し、また開発技術の性能が適切に評価されることで、新技術を活かした業務モデルが創出され、土木分野における新技術の社会実装が促進されることに寄与することを目指す。

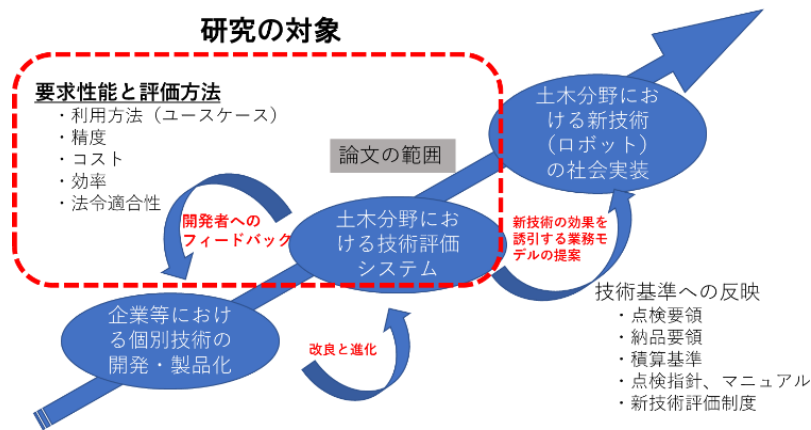


図3-1 本研究の範囲

土木分野での先進技術の導入が進まない最大の要因の一つに、ロボットなどの先進技術を的確に評価するシステムが存在しないことが挙げられる。特に土木分野以外から参入する開発者にとってロボットの開発目標を定量的に設定することが難しい事は、多くのロボット開発者が国土交通省のロボット検証においても指摘している。土木事業の現場は、ほとんどの場合屋外環境であり、構造物ごとに一品生産により設計や施工が行われ、維持管理において、いわゆる現地合せと呼ばれる個別構造物に合せた対応が求められる。橋梁点検作業も例外ではなく、点検対象への接近方法だけでも、形状の複雑さなど多様な条件を考慮する必要があり、人の作業も一律に設定することが難しい。さらに土木構造物は、長期間にわたり多くの利用者が使用するため、その管理者責任も重く、橋梁点検は道路法により5年毎に近接目視を基本として、専門知識を有する技術者による診断が義務付けられている。

一方で、これまで点検作業は人の五感を駆使することによって支えられてきたとも言える、臨機応変に対応できる人と単純に比較すると、総合力で人に勝るロボットを作り出すことは、コストの制約下での実現は難しいと言わざるを得ない。

企業が製品開発を目指すとき、先ずはその製品の使い方、使用条件、目標性能、コストの制約、法令への適合などの開発目標を確定する必要がある。多くのインフラ点検と同様に管理責任を伴う橋梁点検作業は、今日のような機械工学やロボット工学、情報工学が飛躍的に発達する以前から人の手によって行われてきたことから、人を前提に作業手順が構築されており、新技術導入に際して人の能力や作業品質を比較対象として見ることが多い。その場合、人とロボットの単純比較に陥り、ロボットの強みを活かした利用方法を提案する必要があるが、そのための点検基準の変更は、ロボットのユーザーである点検業務受託者から提案することは容易ではない。故に、ロボットの開発者サイドからユーザーに対してプロトタイプを提案を行うことはさらに難しい実情にある。

本研究は、ロボットの強みを活かした使い方（ユースケース）の下で、橋梁点検ロボットの性能を評価することを提案するものである。その性能評価情報は、ユーザーの導入判断に参考となるだけでなく、開発者へのフィードバック情報になると同時に、改良と進化を評価することにより技術開発の促進にも繋がる。

また、性能評価に際してユースケースと要求性能を明らかにすることで、新技術の導入を誘引する環境（例えば、技術基準の整備等）を醸成し、土木分野における橋梁点検ロボット、ひいては先進技術の社会実装を促進することにつながるかと考えている（図3-1）。

## 4. 橋梁点検へのロボット技術の適用

### 4.1 橋梁点検ロボットが持つべき機能

ロボットの定義は、目的に応じて様々なものが存在するため、本研究において、対象とするロボット技術の定義について述べる。例えば、日本工業規格（JIS）では「JIS B 0134」（1998年）により「産業用ロボット」の定義を、「自動制御によるマニピュレーション機能又は移動機能を持ち、各種の作業をプログラムによって実行できる、産業に使用される機械。」と規定している。しかし一般的には、人の代わりに作業を行う装置の場合、ある程度の工程なり手順なりを自動的かつ連続的に行う物がロボットと呼ばれ、単一の動作を行う物や、絶えず人間が操作をする必要がある装置、ブルドーザーやショベルカーなどの操縦者が搭乗する必要性があるものは基本的にロボットとは呼ばれない。その一方で、手動操作であっても、人の形をした機械装置であればロボットの範疇に含む場合もあり、パワードスーツなどを含めた「人の形をした乗り物または作業用機械」についても同様に、一般的にはロボットと呼ばれている。また、作業用機械であっても、高度な遠隔操作や自動制御技術の導入が進み、人間が操縦者から単なる作業指示・命令者に近づきつつある事から、一層境界が曖昧になって来ている。

国土交通省の次世代インフラ用ロボット現場検証プロジェクトにおいては、独自のプログラムにより移動制御される自律飛行タイプのドローンやROVは、ロボットに分類される一方で、常に人が操作する必要があるドローンや点検車両は、厳密には、ロボットの定義には含まれないとしつつも、次世代インフラ用ロボットの現場検証においては、公募手続きにおいて要件を示し、将来的にロボットの要件が具備され有用性が期待される技術・システムについては、幅広く次世代社会インフラ用ロボットに含め検証対象として扱う事としている。また、経産省をはじめとする関係府省・ロボット工業会が共催する「ロボット大賞」の実施要領においては、ロボットの定義を「センサー、知能・制御系、駆動系の3つの技術要素を有する、知能化した機械システム」としている。

本研究は、橋梁点検におけるロボット技術の機能・性能に関して評価方法を研究することから、「センサー、知能・制御系、駆動系の3つの技術要素を有する、知能化した機械システム」としつつ、国土交通省が次世代インフラ用ロボット現場検証プロジェクトにおいて示した広義でのロボットの定義を踏襲する。なお、国土交通省が実施した現場検証プロジェクトの有識者委員会では、橋梁点検で発揮されるロボット技術が持つべき機能を次の4機能に分類している。第一に点検対象に近接する機能（「行く」機能）、第二に損傷状態を把握する機能（「見る・撮る」機能）、第三に損傷程度を評価する機能（「検出する」機能）、そして最後に点検情報を記録する機能（「記録する」機能）である（図4-1）。

なお、これら4つの機能を具備する様々な形式の橋梁点検ロボットが提案され、「移動機能」「位置姿勢特定機能」「検出機能」「記録機能」を実現するため様々な要素技術が組み込まれている（図4-2）。本研究では、これらの要素技術に対する性能評価ではなく、統合化されたシステムとしての橋梁点検ロボット技術が実フィールドにおいてトータルで発揮される機能と性能の評価方法を研究対象とする。

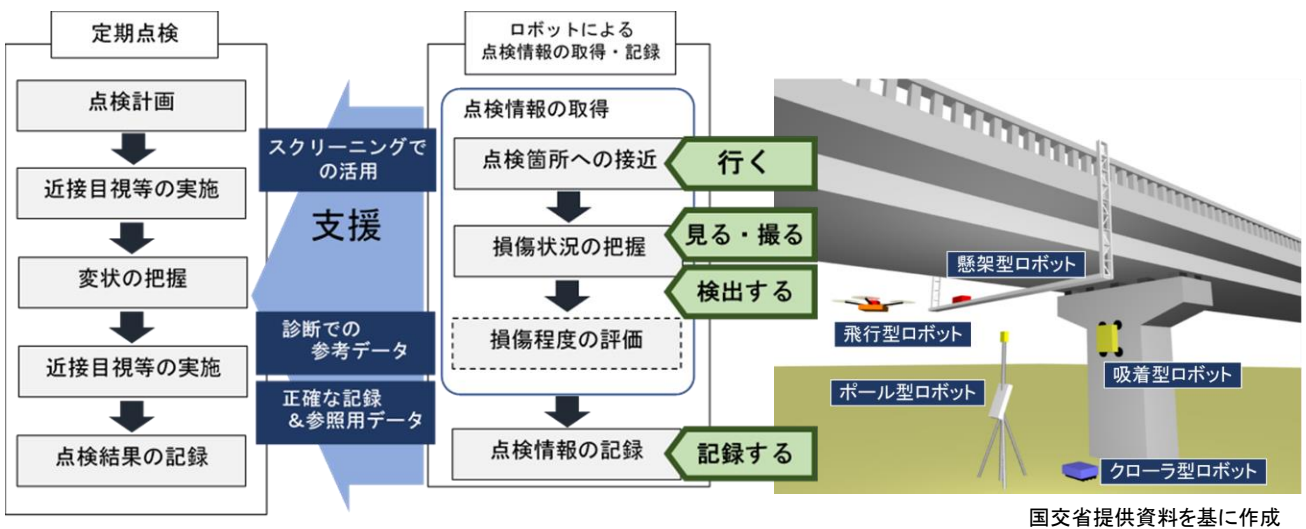


図4-1 橋梁点検ロボットの機能と利用場面

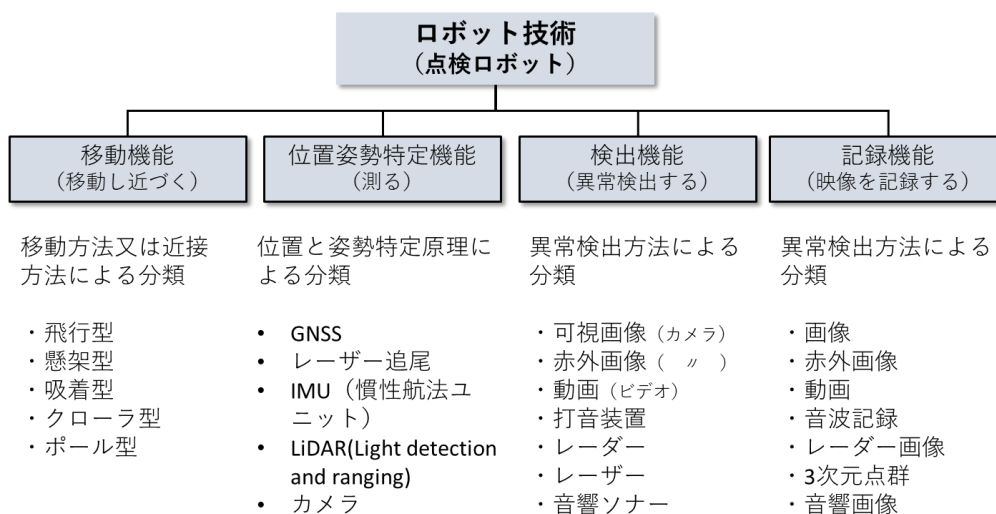


図 4-2 橋梁点検ロボットの機能構成

## 4.2 橋梁点検ロボットの性能表示

一般にロボットを含む新技術の性能表示は、提示する性能項目の設定を含めて供給側である開発企業の責任で行われることが多い。そして、その多くは利用者側（調達者）が技術選定する際の参考として利用される。

しかし、橋梁点検ロボットについては、点検対象である橋梁の形式・規模・立地条件が多種多様である上に、利用時の環境条件が多様であることから、点検に求められる機能と性能が十分に発揮されるかは、その使い方にも大きく影響されるため、性能確認のための条件設定が非常に難しい。

橋梁点検業務は、橋梁に関して十分な知識を持った技術者によって行われる必要から、点検にロボットを使用する場合に、点検で得られる情報の品質管理は無論、点検作業中の安全管理についても点検者の責任下において行われる。このため、国土交通省が橋梁点検業務に橋梁点検ロボットを含む新技術を使用する場合には、点検受注者は、新技術の使用に関して協議を行い、発注者の承諾を得ることとしている[16]。その際、受発注者双方が、国交省が性能提示項目を定めた「新技術の性能カタログ」を用いて、技術の確認を行うこととしている（図 4-3）。

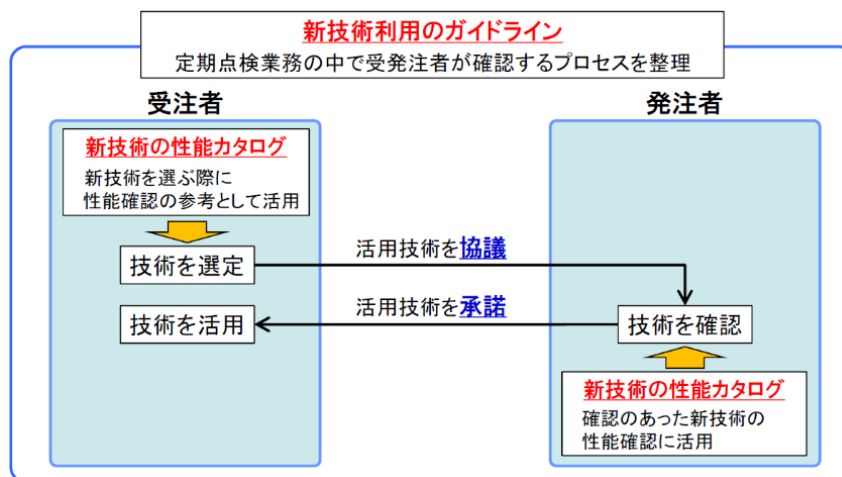


図 4-3 橋梁定期点検における新技術の選定と協議プロセス[16]

出典：国土交通省新技術利用のガイドライン（案）平成 31 年 2 月より

橋梁点検ロボットの性能表示については、国交省が示した「点検支援技術カタログ項目[17]」の中に記載すべき性能項目が提案されている（表 4-1）。そして、これらの性能表示にあたっては、検証値の記載を前提とし動作環境や条件、環境条件を合わせて明示することとしている。

一方で橋梁定期点検の実務では、「ひび割れ」などの損傷を検出するために、橋梁点検ロボットを用いて画像を撮影する際には、カメラの撮影位置によって、画像の見え方や撮影した画像の解像度が大きく変わることから、撮影方法を目的に応じて適切に設定することが求められる。橋梁点検ロボットの使用目的を、「近接目視の代わり」として使用するのか、「近接目視後の記録作成」のために使用するのかによって、要求される性能が変わってくると言える。

表4-1の点検ロボットの性能表示例は、運動性能や計測性能を示してはいるが、使用方法の具体とセットでなければ、点検品質を担保することができないことに留意する必要がある。本研究では、橋梁点検ロボットの具体の使用方法をユースケースとして示すことで、的確な性能表示を可能とすることを旨とする。

表4-1 点検ロボットの性能表示例[16]

基本事項(技術名称他)		
<b>1. 技術概要</b>		
技術区分	点検対象部位	上部構造(主桁, 横桁, 床版等), 下部構造, 支承など
	検出できる変状	腐食, 亀裂, 破断, ひび割れなど
	物理的な計測原理	画像・動画(可視光, 赤外線など), 打音, 電磁波など
移動原理	飛行型, アーム型, 懸架型, 接触型などの移動原理を記載	
外形寸法	可動部がある場合は, 可動部動作時の最大寸法	
運動制御機構	通信	有線, 無線の別, 周波数帯
	測位	運動制御に利用している測位機構, GNSS の方式等
	自律機能	測位結果等を運動制御にフィードバックする機構の有無等
	衝突回避機能	最小進入可能寸法, 衝突回避機構の有無など
センシング原理	パッシブ方式(画像・動画等), アクティブ方式(レーザー, X 戦闘)の別	
センシングデバイス	カメラ	諸元, センサーサイズ, ピクセル数, 焦点距離, ダイナミックレンジ他
	パンチルト機構	パンチルト機構部の可動範囲, 設定可能角度など
	角度記録・制御機構	撮影位置・方向の制御機能の有無など
	測位機構	画像に対し座標を付与する機構を記載(運動制御と別に有するもの)
	ソフトウェア名	画像処理に使用するソフトウェア名
<b>2. 運動性能</b>		
構造物機能での安定性能	風速の条件など	作業可能な最大の瞬間風速などを記載
狭小空間進入性能	最小所要空間寸法等	狭小部位の点検のために進入可能な最小の大きさ
最大可動範囲	移動可能範囲	バッテリー容量やケーブル長, 通信可能距離などの制約を記載
連続稼働時間	有線給電・バッテリー給電の別など	
運動位置精度	運用中の座標成分別の測位誤差を記載	
<b>3. 計測性能(画像計測技術)</b>		
撮影速度	所要の画質を得るために必要な移動速度, 画素分解能, ラップ率など	
最小ひび割れ幅・計測精度	模擬供試体で検出できた最小ひび割れ幅, およびその性能確認を行った検証条件など	
検出精度(長さの相対誤差)	ひび割れ長さ等, 画像から得られた2点間距離の誤差保障値, およびその性能発揮条件など	
位置精度	損傷図と同一座標系での損傷位置座標の誤差の保証値など, およびその性能発揮条件など	
色識別性能	識別可能な色, 識別可能な照度の範囲等	

出典: 国土交通省新技術利用のガイドライン(案)平成31年2月より



### 4.3 人による点検とロボットへの期待

橋梁点検業務に従事している建設コンサルタントなど点検実務者のロボットへの期待は高い。危険の伴う高所特殊作業や高圧潜水作業などは、点検者が身体的あるいは精神的負担に晒されるため、ロボットによる代替や苦渋作業の軽減が望まれる。しかし、その一方でロボットには、人（点検員）の作業を一部代替またはその支援に用いる場合に、人による点検と比べ、安全性や経済性、効率性、精度の全てにおいて、上回ることが要求されている。現状の点検作業は、人の五感への信頼を前提としており、近接目視や打音検査は、作成された点検記録がその精度に曖昧さを含んでいるものの、実行可能性の理由から長期にわたり受容されてきた。

このため、点検ロボットの評価は、人との比較において行われ、人が検出した変状に対して、ロボットがどの程度検出できるかを第三者により証明（評価）することが要求される。

### 4.4 点検ロボットに対するユーザーの不安要素

点検ロボットのユーザーや施設管理者にとって、不安を感じる要素の一つは、ロボットを用いて取得した画像に損傷や変状の「見落とし」や「誤検出」がどの程度生じるかである。加えて、従来の点検手法に対する作業効率や経済性も重要な要素となってくる。

橋梁点検では、気象等の環境条件の違いや、構造物の種類によって、同じロボットでも点検の品質に違いが生じることが想定される。前述のとおり近接目視で行われる橋梁点検では、点検要領に定められた26種類の損傷の位置を確認し、その大きさを計測するとともに画像に記録することが行われている。ロボットで画像を撮影する際に、日照条件によっては強い光によりハレーションが生じ、画像にひび割れなどの損傷が記録されないケースもある。

点検ロボットを用いて取得した画像は、近接目視と異なり、光学カメラの映像を点検後に解析して得られるため、少なからず人の検出した変状や損傷と同じになるとは限らない。

図4-4は、人が目視で検出した損傷の集合(A)とロボットで検出した損傷の集合(B)を模式図化したものである。各々の集合において結果が一致する「正しい検出結果」が得られることが望ましいが、実際にはロボットの誤検出(B-A)やロボットの見落とし(A-B)といった状況が少なからず想定される。しかし、裏を返せばロボットの誤検出(B-A)は人の見落としの可能性もあり、ロボットの見落とし(A-B)は人の誤検出の可能性も完全に否定することはできない。

しかし、点検ロボットを人の代替手段として考える場合に、どの程度の信頼性(検出率)を求めるか判断することは難しい。何故ならば、仮に90%の検出率を求めたとしても、管理者にとって10%の見落としが許容し難い問題として捉えられる可能性があるからである。

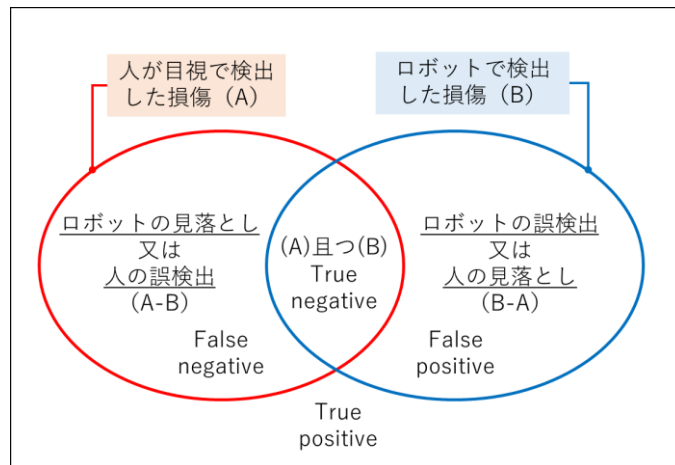


図4-4 検出における正誤の概念

現時点では、橋梁点検ロボットの直接的なユーザーである点検者にとっての、ロボットの適用可否を判断とするために必要な情報やその確認方法について、十分議論されているとは言いがたい。点検者にとっては開発者が示す機械のスペックではなく、実環境で発揮することができるロボットの性能値の情報が重要である。例えば、目視点検でも同様に「風速1~3m/秒の条件下で40mの高さの橋脚全面のひび割れ(幅0.2mm以上)を確実に記録できるか」といった情報である。さらには、点検作業が安全かつ効率的により低コストで実施できるかといった点も重要である。現場検証では、このような利用者が必要とする判断材料となる情報を取得することが求められる。

加えて、実際の現場では、「使いやすさ」の評価も重要であり、現在公共事業新技術活用促進システム(NETIS)では、活用効果調査の結果をフィードバックすることで改善につなげる仕組みが提供されている。

また、新技術の現場導入が進まない原因として「面倒くささ」「わからない」「信用できない」といった心理的要素も無視できない。特に、ロボットの使用が現行基準に適合しているかも重要な判断材料である。

点検ロボットの性能評価においては、これらユーザーの不安解消、あるいは期待と現実のギャップを埋めることに資する評価方法が必要である。

#### 4.5 点検ロボットに期待されるユースケース（利用方法）

現行の橋梁点検において、点検実務者が望む導入効果が期待できる橋梁点検ロボットの利用場面について考察する。橋梁定期点検は道路法の定義に基づくが、概念的には「損傷程度の評価（＝点検）」と「健全性の診断（＝診断）」の二つの行為から成り立っている。いわゆる点検作業は、現地で行われる「足場の設置」から「写真撮影」までの外業と「報告書作成」を指すことが多い。同じく定期点検の範疇に含まれるが、「健全性の診断」は、専門技術者によって行われ、現地で点検員によって確認された損傷の程度（客観的事実）の記録を参考に、損傷発生原因を推定したうえで対策の要否までの検討を含む（図4-5）。

一義的な橋梁点検ロボットの支援対象は、損傷や変状の把握と記録（則ち、狭義の点検）と考えられる。その場合の橋梁点検ロボットの導入範囲を赤枠で示す（図4-5）。橋梁点検ロボットの有効性は、点検記録の品質（「再現性」「汎用性」「普遍性」「信頼性」）、すなわちロボットの性能に依存するため、具体的な運用の方法、範囲については、「損傷の検出精度」や「点検の効率性」等の性能を踏まえて設定する必要がある。

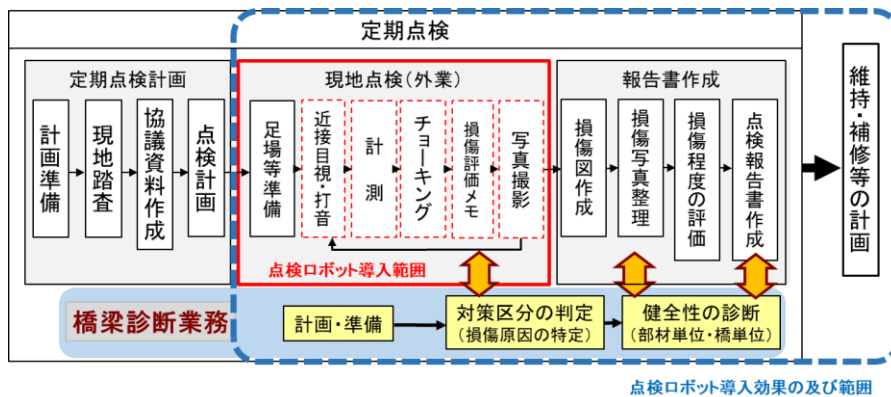
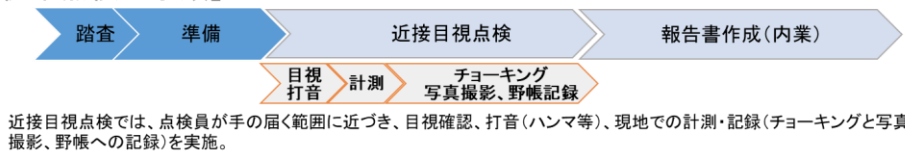


図4-5 橋梁定期点検(直轄)における点検ロボットの導入場面

具体的な橋梁点検ロボットの利用場面について考察すると現行の橋梁点検は、道路法により橋梁を構成する全ての部材要素を近接目視にて行うことを基本としているため、点検ロボットを使用すれば直ちに近接目視点検の代替として認められることにはならない。様々なタイプの橋梁点検ロボットが開発されていることから、その利用方法は限定することは難しいが、「人の近接目視」を前提にすると橋梁点検ロボットは、先ずは人が確認した損傷や変状を記録することが求められる（図4-6）。

しかし前節で述べたとおり、橋梁点検ロボットの損傷記録性能が近接目視で確認すべき損傷を確実に記録できない場合は、あくまで補助的な使用方法に限定される。例えば、点検要領が求める幅0.1mmのひび割れ（PC橋の場合）が検出出来ない場合には、点検員が確認したひび割れをすべて記録することが出来ず「チョーキング」のみしか写らないケースもありえる。このような場合であっても、近接目視点検により点検員が全ての損傷を確認し必要に応じてチョーキングを行うことで、チョーキングが記録された画像であれば、点検記録として用いられる事例はよく見られる。

#### 【従来点検の手順】



#### 【ロボットを用いた点検手順】※人が点検した後、ロボットにより撮影と記録を行う。



点検員による近接目視点検では、点検員が手の届く範囲に近づき、目視確認、打音までは行うが、写真撮影の省略、及びロボットで十分計測可能な変状については、人による計測とチョーキングも省略することで効率化が実現する。

図4-6 「人の近接目視」を前提とした場合のロボットの利用イメージ

橋梁点検ロボットの損傷検出性能が求められる水準を満足し、確認すべき損傷の検出に十分対応できる場合には、人の近接目視に先立ちロボットで人の近接目視範囲を絞り込むことが期待される。前述の利用方法を「点検後の記録に利用」とすれば、「点検前のスクリーニングでの利用」と言える(図4-7)。

例えば、高橋脚など人が近接するには時間や労力がかかる場合に、事前に損傷の位置や有無を確認できれば、点検の効率化に寄与することが期待される。

**【点検後の記録に利用】** ※近接目視には及ばないが、一定程度以上の変状は確実に確認できるレベル。



点検員による近接目視点検では、点検員が手の届く範囲に近づき、目視確認、打音までを行うが、写真撮影の省略、及びロボットで十分計測可能な変状については、人による計測とチョーキングも省略することで効率化が実現する。



**【点検前のスクリーニングに利用】** ※近接目視で確認できる全ての変状をロボットで確認できるレベル。

ロボットによるスクリーニング後の近接目視点検では、点検範囲の絞り込みが行ったうえで、点検員が手の届く範囲に近づき、目視確認、打音までを行うが、写真撮影とチョーキング(軽微な変状を除き)を省略することで、大幅な効率化が実現する。

## 5. 橋梁点検ロボットの現場実証から見えてきた課題

### 5.1 現場実証のねらい

国交省では、橋梁点検等の効率化を目指し、2014年度～2015年度の2か年を費やし公募技術による現場検証を実施した。公募の対象は、数年以内の実用化が見込まれる技術としており、ここでは、“すぐに現場適用が可能なロボット”の見きわめを目的とした。ここで直ちに現場適用可能なロボットの前提として、橋梁定期点検要領に基づき人が行う近接目視点検の手順を、そのままロボットに置き換えることを想定していた。

橋梁点検ロボットの公募に際しては、ロボットに対し求めるニーズを必須要件である「基本要件」と、加えて望まれる「期待項目」を分けて明示し、応募技術の持つ機能や性能を実大スケールの現場環境下において評価することとした。また、ロボットで取得した点検記録は「管理者責任」に直結するため、損傷の検出精度検証や作業中の安全性、経済性について重点が置かれた。

この現場検証と評価の実施にあたっては、「次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会」(H26.2.25 設置)と、そのもとに5つの「専門部会」が設置された。専門部会には、橋梁分野に見識のある学識者、行政関係者、関係研究機関の代表者が参画し、公募条件の設定、検証対象技術の選定、評価方法の決定等の具体的事項について意見を述べた。

その上位の現場検証委員会には、各専門部会の長、ロボット分野の有識者の代表者、行政機関等および研究機関の代表者の参画のもと、分野間共通事項や全体の運営方針について審議された。

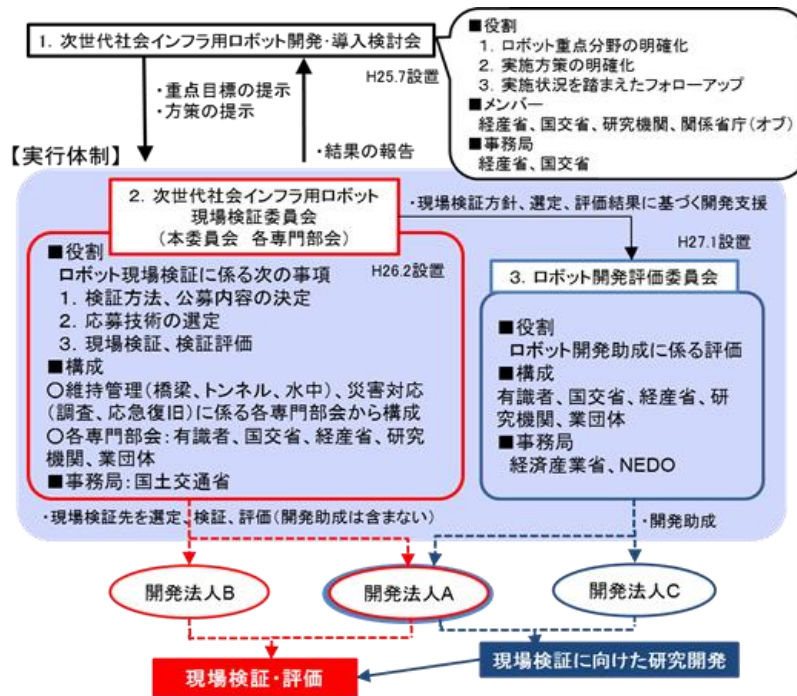


図2: 現場検証の実施体制

国交省提供資料を基に作成

## 5.2 対象技術

### 5.2.1 橋梁点検ロボットの要件

国交相が実施した現場実証が対象とした橋梁点検ロボットは、実用段階にあるロボットとされ公募により選定された。公募要件については、平成 26 年度は「人を代替する点検ロボット」を想定し公募を行ったが、当該年度における現場検証の結果を踏まえ、平成 27 年度は「人を代替する」を公募対象から外し、「人の点検を支援できる点検ロボット」に変更している。

【平成 26 年度の橋梁点検ロボットに対する要求(人を代替する点検ロボットを想定していた)】

平成 26 年度は、人の行う点検をロボットに「代替」または「支援」させることを企図して、次に示す5種類の橋梁点検ロボットを対象に公募が行われた。その評価にあたっては、実際の橋梁において点検調書に記録されるべき精度での損傷検出が可能かという点に重点が置かれた。

- [1] 鋼橋において、桁の「腐食、亀裂、破断、ゆるみ・脱落、防食機能の劣化」について、点検要領に基づく近接目視の代替または支援ができる技術・システム
- [2] コンクリート橋において、桁の「ひび割れ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、うき」について、点検要領に基づく近接目視の代替または支援ができる技術・システム
- [3] 鋼橋・コンクリート橋の床版において、「床版ひび割れ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、抜け落ち、うき」について、点検要領に基づく近接目視点検の代替または支援ができる技術・システム
- [4] 鋼橋においては、桁の添接部のボルトやリベットの「ゆるみ・脱落、破断」、コンクリート橋において、桁の「うき」について、点検要領に基づく打音検査の代替または支援ができる技術・システム
- [5] 鋼橋・コンクリート橋の床版において、「うき」について点検要領に基づく打音検査の代替または支援ができる技術・システム

【平成 27 年度の橋梁点検ロボットに対する要求事項の見直し(人の代替から人を支援するロボットへの変更)】

平成 26 年度の検証では、評価対象技術の全てが点検調書に記載すべき点検情報の取得精度に到達しなかったことから、平成 27 年度の検証では、ロボットによる人の近接目視や打音検査の「代替」を中断し、人が発見した損傷の記録作業の「支援」に目的を特化して、評価対象が次の 10 項目に変更された。さらに、橋梁点検ロボットの制御方法や運動性能の違いによって点検可能範囲が異なることを考慮し、点検対象部位を明確に区分することで、実用的な技術評価が行われた。

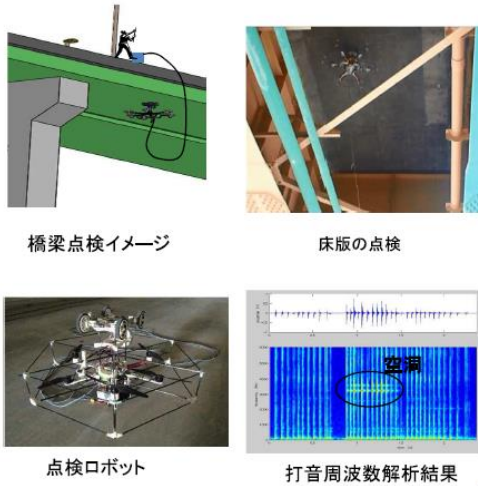
- [1] 鋼橋において、近接目視点検の支援ができる技術・システム
- [2] コンクリート橋において、近接目視点検の支援ができる技術・システム
- [3] 鋼橋・コンクリート橋の床版において、近接目視点検の支援ができる技術・システム
- [4] 鋼橋・コンクリート橋において、打音検査の支援ができる技術・システム
- [5] 鋼橋・コンクリート橋の床版において、打音検査の支援ができる技術・システム
- [6] コンクリート製橋脚・橋台において、近接目視点検の支援ができる技術・システム
- [7] コンクリート製橋脚・橋台において、打音検査の支援ができる技術・システム
- [8] 支承部および桁端周辺の狭隘部において、近接目視の支援ができる技術・システム
- [9] 鋼橋・コンクリート橋の支承部において、打音検査の支援ができる技術・システム
- [10] 鋼橋・コンクリート橋において、点検者を点検箇所近づけることができる技術・システム

### 5.2.2 選定された橋梁点検ロボット

点検ロボットには、点検員の仕事を代替もしくは支援することが求められる。現場検証への応募技術について、その機能を分類すると、①点検対象に移動して近づく機能、②橋梁の状態を見て撮影する機能、③損傷を検出する機能、④損傷を記録する機能の大きく4つの機能に分けることができる。検証対象は、移動手法に着目して「飛行型」「懸架型」「吸着型」「ボール型」「クローラー型」に分類して、13種類の技術が選定された(図5-2)。

平成 26 年度には、31 技術(68 検証項目)の応募があり、「飛行型」が 10 技術、「懸架型」が 2 技術あった。平成 27 年度には、26 技術の応募があり、「飛行型」が8技術、「吸着型」やワイヤーにぶら下がるタイプの新しい「懸架型」が登場した。

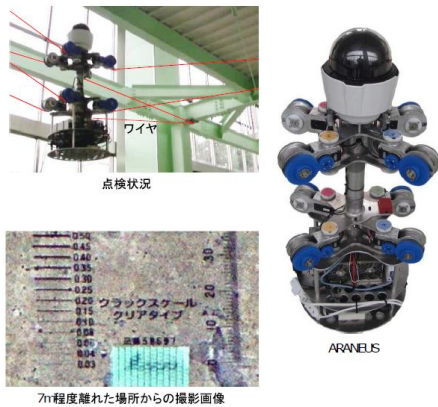
【① 飛行型ロボット(打音機能付き)】



【② 飛行型ロボット(球殻ドローン)】



【③ 懸架型ロボット(ワイヤーロープ制御)】

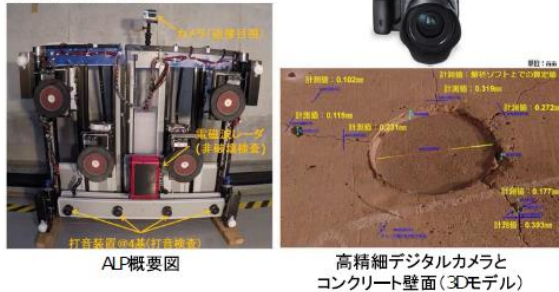


【④ ポール型・UAV 併用型】

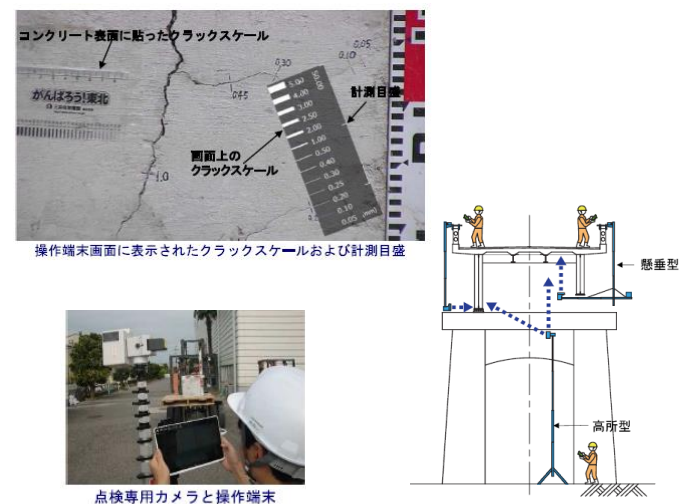


【⑤ 吸着型ロボット】

[写真・イメージ]



【⑥ ポール型ロボット(点検ロボットカメラ)】



国交省提供資料を基に作成

図5-2 現場検証の対象となった橋梁点検ロボットの例

### 5.3 検証方法

橋梁点検ロボットの検証は、実際の橋梁（コンクリート橋及び鋼橋）においてロボットによる点検を実施することで行われた。点検の対象と範囲は、各ロボットの特性に応じて設定され、事前準備の状況、点検中の安全対策、作業時間、作業効率、人員配置、損傷検出能力、点検調書（損傷図と損傷写真）の作成納品までのプロセスを実証の対象とした。また、橋梁定期点検要領に定められた 26 種類の損傷項目のうち鋼橋もしくはコンクリート橋の外観目視により確認できる桁や床版の腐食、ひび割れ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、うき、抜け落ち、亀裂、破断、防食機能の劣化、ボルトやリベットの弛み・脱落等について、ロボットが撮影した画像から検出能力を検証した。

また予め点検作業員による近接目視点検を実施し、橋梁点検ロボットの評価のための基礎資料とした（写真5-1、写真5-2）。



写真5-1 橋梁点検車(BT200)による点検作業(幸久橋)



写真5-2 作業台車(リフト車)による点検作業(蒲原高架橋)

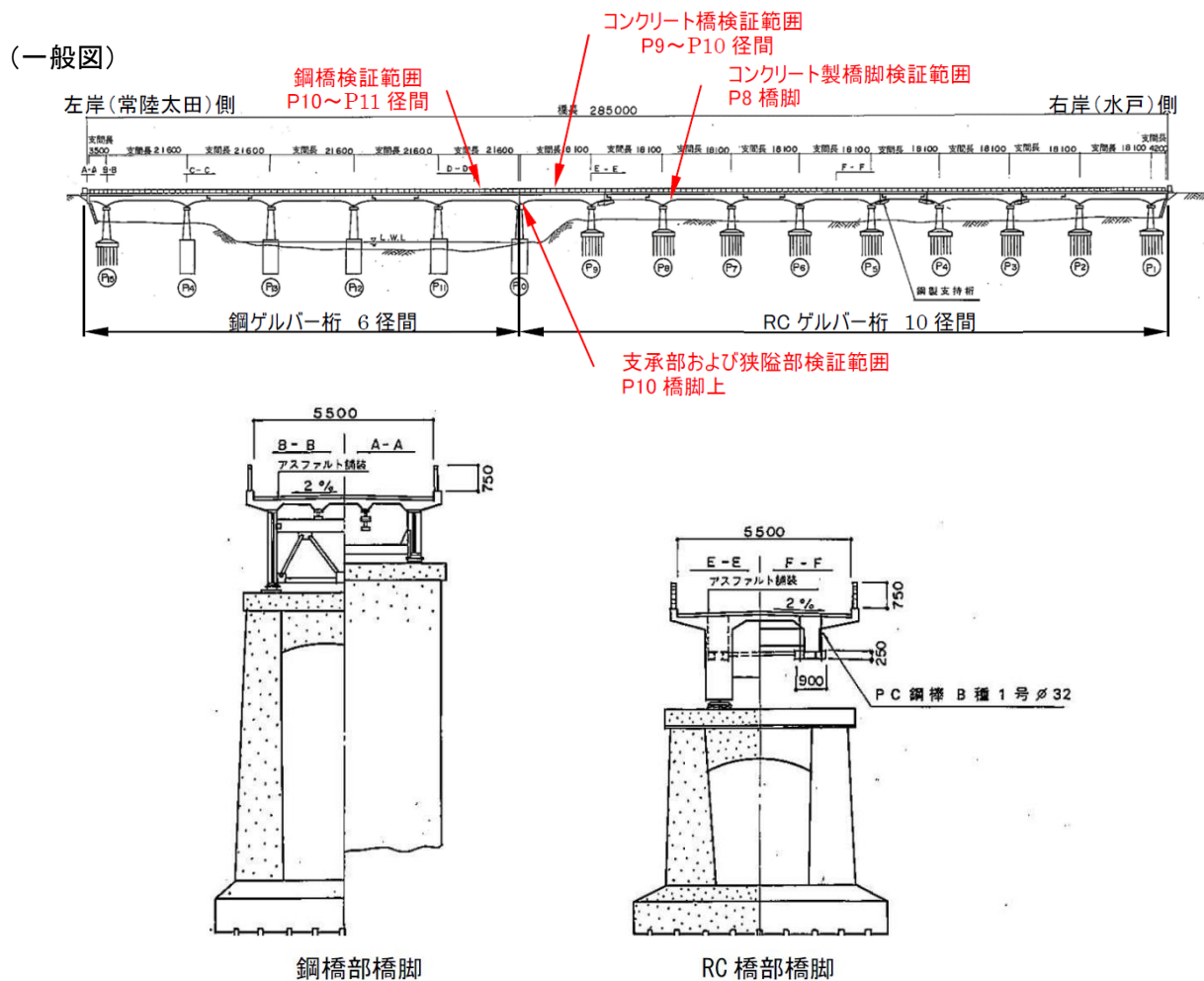
出所：国交省資料

### 5.3.1 検証フィールドの概要（実橋梁）

#### 1) 幸久橋

本橋梁は、鋼桁5径間とRC桁9径間の複合橋であり、建設から80年以上が経過している。損傷が著しく、架け替えが予定されている老朽橋である。桁下は河川敷であり、十分な安全対策のもとで現場検証が行われた。コンクリート部材、鋼製部材ともに様々な損傷が確認できる(図5-3)。

橋種	形式	橋長(m)	桁下余裕高	周辺状況	用途	仮設年	場所
RC橋 鋼橋	RCゲルバー桁 鋼ゲルバー桁 RC橋脚	285	4.5~6.5	河川及び河川敷	道路橋	1935年	茨城県内



コンクリート桁部



鋼桁部



コンクリート製橋脚部

出所: 国交省資料

図5-3 現場検証フィールド(幸久橋)

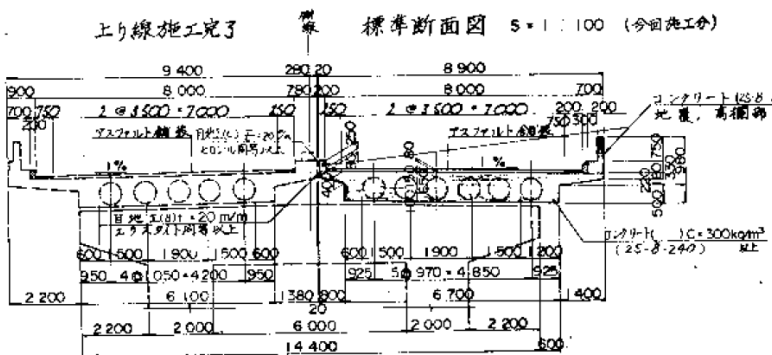
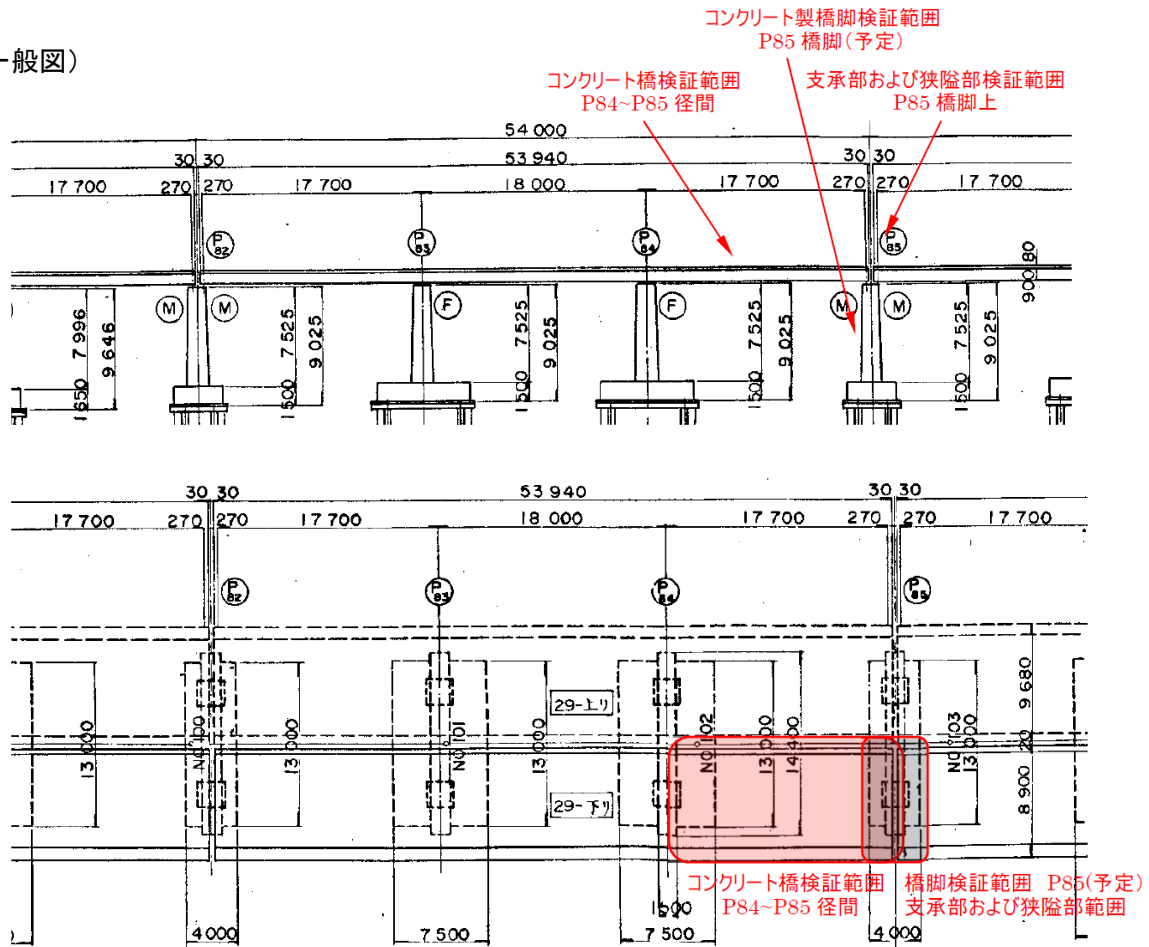


## 2) 蒲原高架橋

本橋梁は、3径間連続 RC 桁の中空床版橋であり、建設から約 50 年が経過している。交通量の多い路線に適切にメンテナンスがなされ損傷は少ない。周辺は住宅地等が連坦していることから、地元説明や飛行制限をかけて十分な安全対策のもとで現場検証が行われた。構造が最もシンプルな床版橋であり、一部に損傷が確認できた(図5-4)。

橋種	形式	橋長(m)	全幅員	周辺状況	用途	仮設年	場所
床版橋	3径間連続 RC 中空床版橋	2611	9.7	平坦地	道路橋	1970 年	静岡県内

(一般図)



床版橋標準断面図(上下線分離)



床版橋下面の様子

図5-4 現場検証フィールド(蒲原高架橋)

出所: 国交省資料

### 5.3.2 精度検証のための点検データ作成

橋梁点検ロボットの有効性を検証するため、橋梁定期点検要領に基づき、点検員による近接目視点検を実施し点検調書が作成された。精度検証の対象とした損傷は、橋梁定期点検要領に定められた26種類とした。道路管理者が行う点検と同様に検調書(損傷図)には、近接目視終了後に損傷毎に撮影した写真を添付し損傷程度の評価(a~eの5段階)を付して整理がなされた(図5-5)。

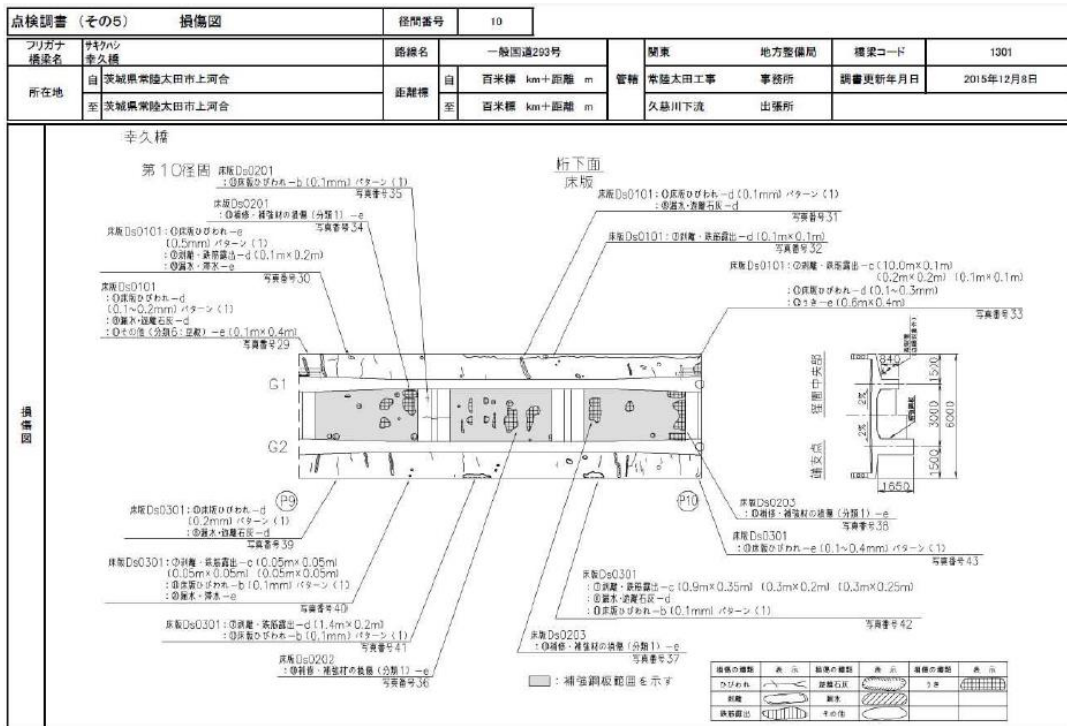


図5-5 検証用に作成された損傷図(点検調書(その5)) 出所: 国交省資料




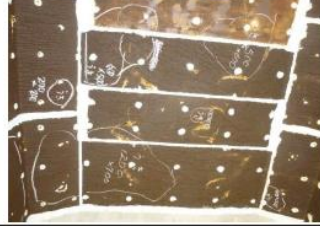
点検調書(その6)		損傷写真		径間番号		10						
フリガナ 橋梁名	幸久橋	路線名	一般国道293号	関東	地方整備局	橋梁コード	1301					
所在地	茨城県常陸太田市上河合	距離標	自 百米標 km+距離 m 至 百米標 km+距離 m	管轄	常陸太田工事 事務所	調査更新年月日	2015年12月8日					
	茨城県常陸太田市上河合				久慈川下流 出張所							
損傷写真	写真番号	31	径間番号	10	撮影年月日	2015.11.18	写真番号	32	径間番号	10	撮影年月日	2015.11.18
	部材名	床版	要素番号	0101	メモ		部材名	床版	要素番号	0101	メモ	
	損傷の種類	潮水・遊離石灰	損傷程度	d	上流側張出し床版に床版ひびわれ(幅0.1mm)及び、遊離石灰が見られる。		損傷の種類	剥離・鉄筋露出	損傷程度	d	上流側張出し床版に鉄筋露出(0.1m×0.1m)及び、剥離(0.05m×0.05m)が見られる。	
					【今回点検他損傷】 ⑩床版ひびわれ-d							
写真番号	33	径間番号	10	撮影年月日	2015.11.18	写真番号	34	径間番号	10	撮影年月日	2015.11.18	
部材名	床版	要素番号	0101	メモ		部材名	床版	要素番号	0201	メモ		
損傷の種類	うき	損傷程度	e	上流側張出し床版に床版ひびわれ(幅0.1~0.3mm)、うき(0.6m×0.4m)及び、剥離(10.0m×0.1m, 0.2m×0.2m, 0.1m×0.1m)が見られる。		損傷の種類	補修・補強材の損傷	損傷程度	e	床版の補強鋼板にうきが見られる。		
				【今回点検他損傷】 ⑦剥離・鉄筋露出-c ⑩床版ひびわれ-d								

図5-6 損傷写真毎に損傷状態のコメントが記載された損傷写真(点検調書(その6)) 出所: 国交省資料

### 5.3.3 評価対象とする損傷の種類，対象部材

検出精度の評価対象とする損傷は，供用中道路のため，陸上部且つ桁下からの外観調査によって検出支援が可能な損傷項目が設定された。路面や舗装，水中部については対象外とされている。これらの損傷が発見されると，橋梁定期点検要領では，前述のとおり，各々の損傷について「写真の撮影」「損傷の大きさの計測」「損傷程度の評価」「損傷図の作成」「写真の整理」を行うことが求められている。

表 5-1 損傷の種類

区分	種類	
鋼	①	腐食
	②	亀裂
	③	ゆるみ・脱落
	④	破断
	⑤	防食機能の劣化
コンクリート	⑥	ひびわれ
	⑦	剥離・鉄筋露出
	⑧	漏水・遊離石灰
	⑨	抜け落ち
	⑩	床版ひびわれ
	⑪	うき
その他	⑬	遊間の異常
	⑭	路面の凹凸
	⑮	舗装の異常
	⑯	支承部の機能障害
	⑰	その他
共通	⑩	補修・補強材の損傷
	⑱	定着部の異常
	⑲	変色・劣化
	⑳	漏水・滞水
	㉑	異常な音・振動
	㉒	異常なたわみ
	㉓	変形・欠損
	㉔	土砂詰まり
	㉕	沈下・移動・傾斜
	㉖	洗掘

※ハッチングされた損傷が検証の対象番号は「橋梁定期点検要領」に対応

表 5-2 対象部材

部位	部材種別		
上部構造	主桁		
	主桁ゲルバー部		
	横桁		
	縦桁		
	床版		
	対傾構		
	横構	上横構	
		下横構	
	主横トラス	上・下弦材	
		斜材，垂直材	
		橋門構	
		格点	
	斜材，垂直材の埋め込み部		
	アーチ	アーチリブ	
		捕剛桁	
		吊り材	
		支柱	
		橋門構	
		格点	
	吊り材の埋め込み部		
ラーメン	主構（桁）		
	主構（脚）		
斜張橋	斜材		
	塔柱		
	塔部水平材		
	塔部斜材		
外ケーブル			
PC定着部			
その他			
下部構造	橋脚	柱部・壁部	
		梁部	
		隅角部・接合部	
	橋台	胸壁	
		翼壁	
		翼壁	
	基礎		
	その他		
	支承部	支承本体	
		アンカーボルト	
落橋防止システム			
沓座モルタル			
台座コンクリート			
その他			
路上	高欄		
	防護柵		
	地覆		
	中央分離帯		
	伸縮装置		
	遮音施設		
	照明施設		
	標識施設		
	縁石		
	舗装		
	排水施設	排水ます	
		排水管	
		その他	
点検施設			
添架物			
袖擁壁			

## 5.4 評価方法

現場検証における橋梁点検ロボットの性能評価は、自然条件のもとで実橋において行われ、点検時の状況に加え点検の結果得られたデータから作成した損傷図及び損傷写真からその「精度」、「効率」、「経済性」について評価が行われた。特に精度の評価については、予め点検技術者が近接目視により実施した点検結果を評価基準に行われた。

加えて、「調書作成支援」や「橋梁点検箇所へのアプローチ性」など、すぐに現場に導入か判断するために示された公募要件に対応した10項目の検証が行われ、最終的に以下に示す4段階での総合評価が実施された。なお、ここで基本要件①～⑤は実現場での導入に向けて必須の要件であり、期待項目⑥～⑩は、実導入への導入にあたり望ましいとされる要件である(表5-3)。これらの結果については、公表されており参考文献と付録において示す。

- I. 試行的導入に向けた検証を推奨する。
- II. 課題の解決を前提に、試行的導入に向けた検証を推奨する。
- III. 課題への対応結果により、試行的導入に向けた検証を推奨する。
- IV. 今回は十分な検証ができていない。

なお、この現場検証から得られた知見を踏まえより評価方法についての精緻化が進められ、現在は橋梁点検ロボットの性能評価項目・評価指標(表5-4)及び橋梁点検ロボットの精度に関する要求性能(表5-5)が提案されている。

これらの評価のうち精度に関する評価については、点検技術者が近接目視により実施した点検結果を比較評価の基準として用いこととしている。精緻化された性能要求は、現行の橋梁定期点検要領に準じており、人が近接目視点検で把握すべき損傷(26項目)に対応したものである。

効率については、点検ロボットでの画像取得を含む点検に要した時間と従来の点検時間と比較した「作業時間比率」で評価した。さらに点検に要したコストについても同様に「コスト比率」により評価を行うこととしている。

表5-3 橋梁点検ロボットの検証項目と判定の観点・方法

項目	内容	評価の観点・方法
基本要件① 調書作成・支援	「橋梁点検要領等」の規定に定める点検調書の作成またはその支援ができる。	提出された損傷図(点検調書その5)および損傷写真(点検調書その6)について、「橋梁定期点検要領」で求められる仕様との整合性、写真の鮮明さなどから判定する。
基本要件② 損傷情報の収集	「橋梁点検要領等」に基づく損傷評価に必要な全てまたは一部の情報を得ることができる。	提出された損傷図に「橋梁定期点検要領」に基づく損傷評価に必要な情報が記録されており、その根拠が損傷写真から読み取ることができるかを、検出された損傷個数等で定量的に評価する。 (○:検出率60%以上, △:同30~59%, ×:同29%以下 検出率以外の指標で×がある場合は1ランクダウン)
基本要件③ アプローチ性	足場の設置等をしなければ、点検のために人が近づけない部位や、狭隘部など人が近づき難い箇所を点検できる。	現場検証状況、提出された点検調書および性能等に関するヒアリング内容等から、対象部位の損傷情報が得られる工夫の有無とその有効性について定性的に評価する。
基本要件④ 効率	現場での点検作業や点検結果の記録、整理作業および調書作成に掛かる費用や手間を削減することができる。 (なお、点検作業に伴う交通規制による社会的損失を加味した費用※で評価する。)	提出された点検調書と、それを参照して「橋梁定期点検要領」で求められる点検調書を作成するのに必要な点検員による点検に掛かる費用、手間の合計値を従来点検による費用・手間と比較して定量的に評価する。提出された点検調書の作成に掛かる費用、手間は、提出された工数等集計結果に基づく。 (◎:従来比20%以上削減, ○:同19%削減~5%増加, △:同6~10%増加, ×:同11%以上増加)
基本要件⑤ 安全性	現場での点検作業における安全確保がなされている。	現場検証状況、提出された性能等に関するヒアリング内容等から、点検作業員、第三者、周辺構造物などに対する安全性を定性的に評価する。
期待項目⑥ 安定性	点検において、外乱(強風、外光(太陽光)や照明など)の影響を受け難いこと。	現場検証状況、提出された点検調書および性能等に関するヒアリング内容等から、取得情報に対する安定性を定性的に評価する。
期待項目⑦ 効率・正確さ	損傷状況の把握、評価が、より効率的あるいは正確になること。	現場検証状況、提出された点検調書および工数等集計結果等から、点検員の手間の削減、精度向上への効果を定性的に評価する。
期待項目⑧ 作業性	現場への搬入、設置及び撤去が容易なこと。	現場検証状況より、搬入、設置撤去に要する時間、手間、設備などから定性的に評価する。
期待項目⑨ 汎用性	今回の検証現場以外でも、より多くの現場において効果を発揮すること。	現場検証状況、提出された性能等に関するヒアリング内容等から、現場条件、構造などへの汎用性を定性的に評価する。
期待項目⑩ 性能保証	性能保証範囲が明確であり、且つ、それを客観的に示せること。	現場検証状況、提出された性能等に関するヒアリング内容等から、性能保証に対する妥当性を定性的に評価する。

出所:国交省資料

表5-4 橋梁点検ロボットの評価項目・評価指標

ユースケースの前提条件							
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 損傷写真の撮影：当該技術(橋梁点検ロボット)が取得した写真を使用</li> <li>・ 損傷図の作成：当該技術で取得した写真等に基づき、別添に定める精度で損傷図を自動で作成。</li> <li>・ 損傷程度の評価：当該技術で取得した写真等に基づき、別添に定める精度で損傷程度の評価区分を自動で判別</li> </ul> ※ 上記とは別に、専門的な知識と技能を有する技術者が近接目視を行った上で健全性の診断を行う。							
評価項目			評価指標			性能評価	
精 度	A-1	損傷写真の記録	点検員が当該技術により取得した写真等 <sup>※1</sup> に基づき、「損傷程度の評価 <sup>※2</sup> 」の評価区分を適切に判別できる精度を有しているか ※1 チョーキングが無い状態での損傷程度の評価区分の判別を想定 ※2 「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)」付録における損傷程度の評価区分に基づく	判読可能率	(近接目視で検出した損傷のうち、当該技術で記録した画像にて判読可能な損傷箇所数) / (近接目視で検出した損傷箇所数)	値が大きい方が高性能	
	A-2	損傷写真の整理	損傷写真に写真番号、径間番号、部材名、要素番号、損傷の種類を自動で整理する機能を有する。	機能の有無	損傷写真の整理機能の有無	有の方が高性能	
	A-3-1	損傷図の作成	当該技術により取得した写真等に基づき、損傷図 <sup>※3</sup> を自動作成することができるか。なお、「損傷程度の評価区分の記載」については評価の対象外とする ※3 損傷図には損傷の種類、発生位置、範囲・状況のスケッチや写真で記録するとともに、代表的な損傷の寸法を記載する。	検出率	ひびわれ ひびわれ以外	当該技術で自動検出できたひびわれ延長/近接目視で検出したひびわれ延長 当該技術で自動検出できた損傷数/近接目視で検出した損傷数	値が大きい方が高性能 値が大きい方が高性能
	A-3-2			的中率	ひびわれ ひびわれ以外	近接目視で検出したひびわれ延長/当該技術で自動検出したひびわれ延長 近接目視で検出した損傷数/当該技術で自動検出した損傷数	値が大きい方が高性能 値が大きい方が高性能
	A-4	損傷程度の評価区分の自動判別	当該技術により判別した損傷種類、損傷程度の評価区分が、点検者が近接目視により実施した評価区分と一致するか	正解率	当該技術による評価区分と近接目視による評価区分が一致する損傷箇所数/近接目視で検出した損傷箇所数	値が大きい方が高性能	
効 率 性	B-1	作業時間比率(外業)	当該技術を導入したことによる従来技術との作業時間比率(外業)	作業時間比率(外業)	(適用条件内は当該技術で実施し、適用条件外は近接目視で実施した場合の作業時間(外業)) / (全部材、全損傷種類、全作業を近接目視で実施した場合の作業時間(外業))	値が小さい方が経済的	
	B-2	作業時間比率(内業)	当該技術を導入したことによる従来技術との作業時間比率(内業)	作業時間比率(内業)	(適用条件内は当該技術で実施し、適用条件外は近接目視で実施した場合の作業時間(内業)) / (全部材、全損傷種類、全作業を近接目視で実施した場合の作業時間(内業))	値が小さい方が経済的	
経 済 性	C-1	コスト比率(外業)	当該技術を導入したことによる従来技術とのコスト比率(外業)	コスト比率(外業)	(適用条件内は当該技術で実施し、適用条件外は近接目視で実施した場合のコスト(外業)) / (全部材、全損傷種類、全作業を近接目視で実施した場合のコスト(外業))	値が小さい方が経済的	
	C-2	コスト比率(内業)	当該技術を導入したことによる従来技術とのコスト比率(内業)	コスト比率(内業)	(適用条件内は当該技術で実施し、適用条件外は近接目視で実施した場合のコスト(内業)) / (全部材、全損傷種類、全作業を近接目視で実施した場合のコスト(内業))	値が小さい方が経済的	
※精度は、「橋梁定期点検要領」の損傷の種類①～⑥別、対象部材のパッケージ別に指標値を算出する。 ※効率性及び経済性は、損傷の種類のパッケージ別、対象部材のパッケージ別に指標値を算出する。 ※予め申請した適用条件(対象部材、対象作業、損傷の種類)の、試験・評価を行う。							

出所: 国土省資料

表5-5 橋梁点検ロボットの精度に関する要求性能(リクワイアメント)


区分	種類	要求性能(精度)				【参考】「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) 付録	
		[A-1]	[A-2]	[A-3] 損傷図の作成	[A-4] 損傷程度の評価区分の自動判別	損傷程度の評価区分	
鋼	① 腐食	当該技術により取得した写真等に基づき、点検員が「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)」付録における「損傷程度の評価」の評価区分を自動で判別することができるか。	損傷の状態が判読できる写真が、写真番号、径間番号、部材名、要素番号、損傷の種類を自動で記録し、整理できる。	損傷の発生している場所と範囲が径間別の損傷図に記録できる。	当該技術により「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)」付録における「損傷程度の評価」の評価区分を自動で判別することができるか。 ※評価区分は、点検者が近接目視により実施した評価区分を正解とする。	5段階評価	a 損傷なし b 表面的な錆で、著しい板厚減少は視認出来ない。損傷箇所は局部的。 c 表面的な錆で、著しい板厚減少は視認出来ない。全体に錆び又は広がりのある発錆箇所が複数。 d 表面に膨張又は板厚減少が視認。損傷箇所は局部的。 e 表面に膨張又は板厚減少が視認。全体に錆び又は広がりのある発錆箇所が複数。
	② 亀裂			損傷の発生している位置と範囲、寸法を径間別の損傷図に記録できる。		3段階評価	a 損傷なし b 溶接接合部などに塗膜割れが確認。亀裂であっても、極めて小さく、数が少ない c 線状の塗膜割れが生じている。又は、亀裂の疑いが否定出来ない塗膜割れが生じている。
	③ ゆるみ・脱落			損傷の発生している位置と範囲、各損傷の数、ボルトの種類(材質)を径間別の損傷図に記録できる。		3段階評価	a 損傷なし b 数の大小で区分 c ゆるみ・脱落が生じている数が少ない。(1群当たり5%未満) e ゆるみ・脱落が生じており、数が多い。(1群当たり5%以上)
	④ 破断			損傷の発生している位置と範囲、寸法を径間別の損傷図に記録できる。		2段階評価	a 損傷なし e 破断している
	⑤ 防食機能の劣化			損傷の発生している場所と範囲が径間別の損傷図に記録できる。		4段階評価(塗装仕様)	a 損傷なし b 塗膜の劣化状況で区分 c 最外層に変色や局所的なうきが生じている。 d 塗装が部分的に剥離し、下塗りが露出している。 e 塗装の劣化範囲が広く、点錆が発生
コンクリート	⑥ ひびわれ			最大 RC:0.2mm以上、PC:0.1mm以上のひび割れについて、方向と本数、長さがわかるように、損傷の発生している位置と範囲、寸法を径間別の損傷図に記録できる。		5段階評価	a 損傷なし b 最大ひび割れ幅が小さい(RC:0.2mm未満)、最小ひび割れ間隔が大きい(0.5m以上) c 最大ひび割れ幅が小さい(RC:0.2mm未満)、最小ひび割れ間隔が小さい(0.5m未満) d 最大ひび割れ幅が中(RC:0.2~0.3mm)、最小ひび割れ間隔が大きい(0.5m以上) e 最大ひび割れ幅が中(RC:0.2~0.3mm)、最小ひび割れ間隔が小さい(0.5m未満) f 最大ひび割れ幅が大(RC:0.3mm以上)、最小ひび割れ間隔が大きい(0.5m以上) g 最大ひび割れ幅が大(RC:0.3mm以上)、最小ひび割れ間隔が小さい(0.5m未満)
	⑦ 剥離・鉄筋露出			損傷の発生している場所が径間別の損傷図に記録できる。		4段階評価	a 損傷なし b 剥離のみ c 鉄筋が露出しているが、腐食は軽微 d 鉄筋が露出し、著しく腐食又は破断している
	⑧ 漏水・遊離石灰			損傷の発生している位置と範囲、寸法、漏水のみか遊離石灰が発生しているかの区別、錆汁の有無、当該部分のひびわれの状況を径間別の損傷図に記録できる。		4段階評価	a 損傷なし b 漏水と遊離石灰の状態で区分 c ひび割れから漏水。錆汁や遊離石灰は見られない d ひび割れから遊離石灰。錆汁はほとんど見られない e ひび割れから著しい遊離石灰又は、漏水に著しい泥や錆汁の混入がある。
	⑨ 抜け落ち			損傷の発生している場所と範囲、寸法を径間別の損傷図に記録できる。		2段階評価	a 損傷なし e 抜け落ちがある
	⑩ 床版ひびわれ			最大 0.05mm以上のひび割れについて、方向と本数がわかるように、損傷の発生している位置と範囲、寸法を径間別の損傷図に記録できる。		5段階評価	a 損傷なし b 1方向:ひび割れ間隔1m以上、最大幅 0.05mm 以下、漏水なし c 1方向:ひび割れ幅は問わない、最大幅 0.1mm 以下が主 漏水なし 2方向:格子 0.5m 以上、ひび割れ幅は 0.1mm 以下が主 漏水なし d 1方向:ひび割れ幅は問わない、最大幅 0.2mm 以下が主 漏水 有無 2方向:格子 0.5m 以上、ひび割れ幅は 0.2mm 以下が主 漏水 有無 e 1方向:ひび割れ幅は問わない、最大幅 0.2mm 以上が主、部分的な角落ち 漏水 有無 2方向:格子の大きさは問わない、ひび割れ幅は 0.2mm 以上が主、部分的な角落ち 漏水 有無
	⑪ うき			損傷の発生している場所と範囲、寸法を径間別の損傷図に記録できる。		2段階評価	a 損傷なし e うきがある
その他	⑬ 遊間の異常			”		3段階評価	a 損傷なし b 異常の大小で区分 c 左右の遊間が極端に異なる、又は遊間が橋軸直角方向にずれている e 伸縮継手の橋の歯が完全に離れている。または、桁とパラベット、桁同士が接触
	⑭ 支承部の機能障害			”		2段階評価	a 損傷なし e 支承の機能が損なわれているか、著しく阻害されている可能性
共通	⑩ 補修・補強材の損傷			”		3段階評価	a 損傷なし b 補修補強材の種類 c 補強材に軽微な損傷 e 補強材に著しい損傷
	⑮ 定着部の異常			”		3段階評価	a 損傷なし b 損傷パターン c 定着部のコンクリートに損傷 e 補強材に著しい損傷
	⑰ 変色・劣化			”		2段階評価	a 損傷なし e 変色している(硬化、ひび割れ)(脆弱化、ひび割れ)
	⑱ 漏水・滯水			”		2段階評価	a 損傷なし e 伸縮装置、排水桝からの総帥、支承、箱桁内の滯水
	⑲ 変形・欠損			”		3段階評価	a 損傷なし b 損傷の大小で区分 c 部材が局部的に変形、又は一部が欠損 e 部材が局部的に著しく変形、又は一部が著しく欠損
	⑳ 土砂詰まり			損傷の発生している位置と範囲を径間別の損傷図に記録できる。		2段階評価	a 損傷なし e 排水桝、支承周辺に土砂詰まり
	㉑ 沈下・移動・傾斜			損傷の発生している位置と範囲、寸法を径間別の損傷図に記録できる。		2段階評価	a 損傷なし e 支点(支承)又は下部工が沈下・移動・傾斜

### 5.4.1 ひび割れ検出精度に関する評価

実際の橋梁点検では、「最大ひび割れ幅」に着目し「損傷程度の区分」を行うことが要求される(表 5-6)。「損傷程度」を大中小の三段階に区分するにあたっては、RC 構造物については最大ひび割れ幅 0.3 mm 以上もしくは PC 構造物については 0.2 mm 以上のものは損傷程度の「大」なるものとして区分することが要求されている。また、損傷程度が小さなものは、RC 構造物で 0.2 mm 未満のものについて、PC 構造物で 0.1 mm 未満のものを区分することとしている。この損傷程度の「小」に分類するものは、最大ひび割れ幅 0.1 mm 未満としていることから、現実的には、目視でひび割れの存在に気づいた場合は、「小」に区分すると解釈される。また、橋梁の床版ひびわれについては、同じひび割れを扱うことに変わりはないが、主に疲労損傷の発見に着眼点がおかれている点が異なるが、ひび割れ検出能力に関する性能評価の考え方は同じである(表 5-7)。

ここに、ひび割れ幅 0.1 mm 未満あるいは 0.2 mm 未満のひび割れに対する記録能力を評価の是非についての議論は、維持管理技術の専門家の判断に委ねることとし、ここでは重視しない。実際の評価は、人が近接目視で検出したひび割れに対して、ロボットが撮影した画像で判読できるかで評価が行われたことから、ロボットの導入判断において、人の検出能力が一つの目安になっている点が重要な事実である。

橋梁点検ロボットのひび割れ検出精度の評価は、前述のとおり点検ロボットが取得した画像の品質、および画像を基に作成された損傷図に対して行われた。画像の品質評価にあたっては、3 人の経験豊富な点検技術者が、3 人一致して点検ロボットが取得した画像から、別途近接目視点検により発見された損傷を判読できるかを評価している。その判読にあたっては、損傷程度の評価の基準に基づき 5 段階で行われる(図 5-7)。なお、ロボットが撮影した画像について、不鮮明なものや、ピントが合っていないもの等の判読できないものについては、評価の対象外とされた(写真 5-3)。

		2方向ひびわれ		
		c	d	
損傷程度評価の目安例				<u>ひびわれ幅が判別できる。</u> 
				<u>ひびわれの方向が判別できる。</u> 
				<u>漏水・遊離石灰の有無が判別できる。</u> 

出所: 国交省資料

図5-7 判読可能率の評価において求められる損傷程度の評価の目安(床版ひびわれの例)

表5-6 橋梁点検における「ひび割れ」の記録精度と評価区分

(要求精度)  
 点検員が写真を見て、最大ひび割れ幅に着目した大・中・小の損傷程度の区分ができ、代表的なひび割れの主要寸法が判読可能な画像精度を有していること。

a) 最大ひび割れ幅に着目した程度

程度	一般的状況
大	ひび割れ幅が大きい(RC 構造物 0.3 mm以上, PC 構造物 0.2 mm以上)
中	ひび割れ幅が中位(RC 構造物 0.2 mm以上 0.3 mm未満, PC 構造物 0.1 mm以上 0.2 mm未満)
小	ひび割れ幅が小さい(RC 構造物 0.2 mm未満, PC 構造物 0.1 mm未満)

※ひび割れ間隔、ひび割れパターンについては、点検員が写真を見て区分するものとする。

(損傷程度の評価区分)  
 損傷程度に関する最大ひび割れ幅と最小ひび割れ間隔の要因毎に、その一般的状況から判断した規模の大小の組合せによることを基本とする。

区分	最大ひび割れ幅に着目した程度	最小ひび割れ間隔に着目した程度
a	損傷なし	
b	小	小
c	小	大
	中	小
d	中	大
	大	小
e	大	大

b) 最小ひび割れ間隔に着目した程度

程度	一般的状況
大	ひび割れ間隔が大きい(最小ひび割れ間隔が概ね 0.5m 未満)
小	ひび割れ間隔が小さい(最小ひび割れ間隔が概ね 0.5m 以上)

表5-7 橋梁点検における「床版ひび割れ」の記録精度と評価区分

(要求精度)  
 点検員が写真を見て、全てのひび割れについて、ひび割れ幅、ひび割れの方向、間隔、漏水・遊離石灰の有無が判別可能な画像精度を有していること。

(損傷程度の評価区分)  
 損傷程度の評価区分は、次の区分による。

	1 方向ひび割れ		2 方向ひび割れ	
	ひび割れ	漏水・遊離石灰	ひび割れ	漏水・遊離石灰
b	・ひび割れは主として1方向のみ ・最小ひび割れ間隔は概ね 1m 以上 ・最大ひび割れ幅は 0.05 mm以下(ヘアークラック程度)	なし		
c	・ひび割れは主として1方向のみ ・最小ひび割れ間隔は問わない ・最大ひび割れ幅は 0.1 mm以下が主(一部には 0.1mm 以上の存在)	なし	・ひび割れは格子状 ・格子の大きさは 0.5m 程度以上 ・ひび割れ幅は 0.1 mm以下が主(一部には 0.1 mm以上も存在)	なし
d	・ひび割れは主として1方向のみ ・最小ひび割れ間隔は問わない ・最大ひび割れ幅は 0.2 mm以下が主(一部には 0.2mm 以上の存在)	なし	・ひび割れは格子状 ・格子の大きさは 0.5m~0.2m ・ひび割れ幅は 0.1 mm以下が主(一部には 0.2 mm以上も存在)	なし
	・ひび割れは主として1方向のみ ・最小ひび割れ間隔は問わない ・最大ひび割れ幅は 0.2 mm以下が主(一部には 0.2mm 以上の存在)	あり	・ひび割れは格子状 ・格子の大きさは 0.5m~0.2m ・ひび割れ幅は 0.1 mm以下が主(一部には 0.2 mm以上も存在)	あり
e	・ひび割れは主として1方向のみ ・最小ひび割れ間隔は問わない ・最大ひび割れ幅は 0.2 mm以上が目立ち、部分的な角落ちも見られる	なし	・ひび割れは格子状 ・格子の大きさは 0.2m 以下 ・ひび割れ幅は 0.2 mm以上が目立ち、部分的な角落ちも見られる	なし
	・ひび割れは主として1方向のみ ・最小ひび割れ間隔は問わない ・最大ひび割れ幅は 0.2 mm以上が目立ち、部分的な角落ちも見られる	あり	・ひび割れは格子状 ・格子の大きさは問わない ・ひび割れ幅は 0.2 mm以上が目立ち、部分的な角落ちも見られる	あり

出所:国交省資料

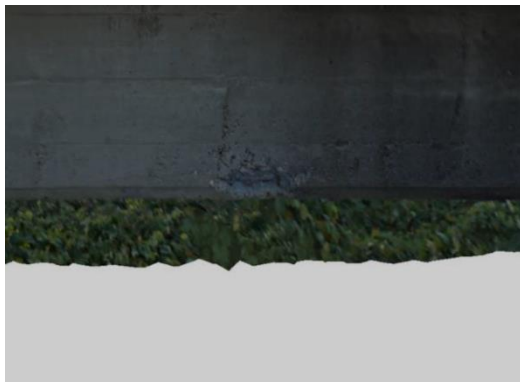




画像がぶれており損傷程度の評価が困難  
【床版ひびわれ、漏水・遊離石灰】



ピントが甘く、損傷の種類・損傷程度の評価が困難  
【腐食又は防食機能の劣化】



背景とのコントラストから画像が暗く、損傷程度の  
評価が困難  
【剥離・鉄筋露出】



逆光で、損傷の有無の評価が困難  
【腐食又は防食機能の劣化】



画像が不鮮明で、損傷の有無の評価が困難  
【漏水・遊離石灰】



画像の解像度が低く、損傷か汚れかの判別が困難  
【防食機能の劣化】



対象に正対しておらず、損傷の評価が困難  
【腐食又は防食機能の劣化】



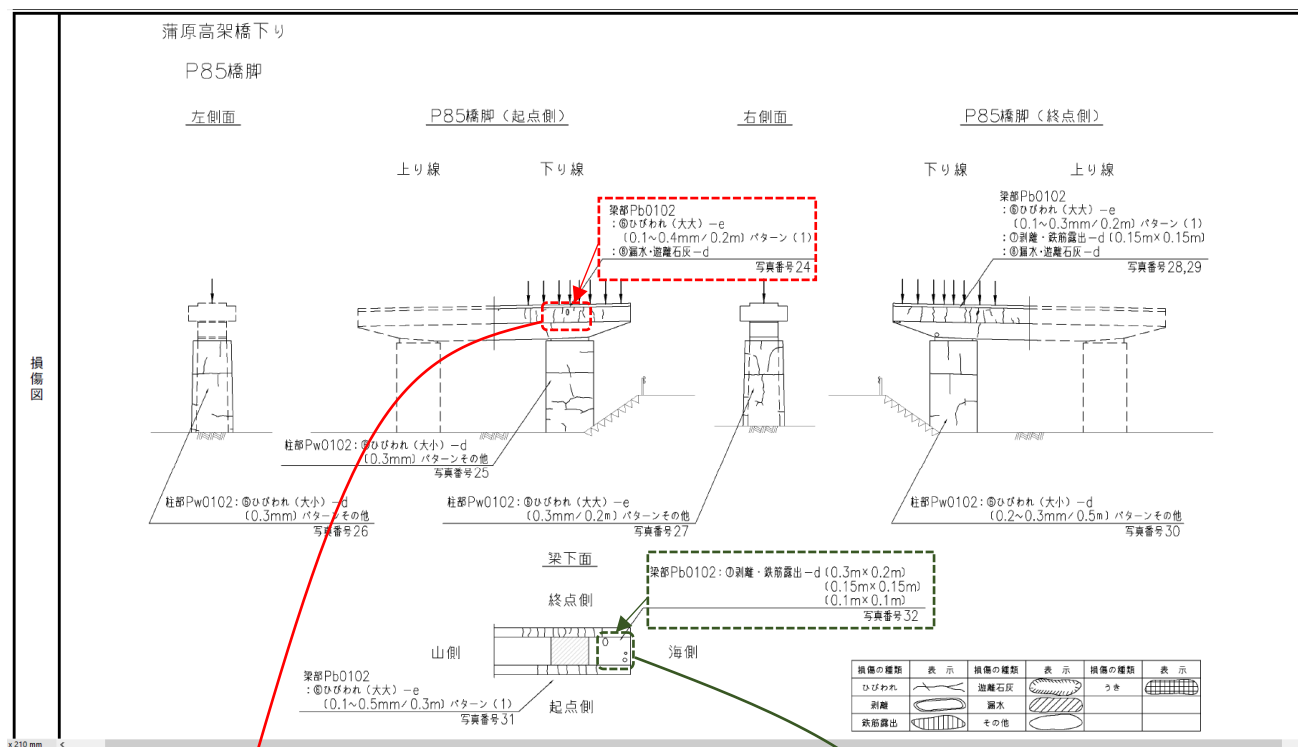
写真が歪んでいる。

写真5-3 画像判読可否の判定の目安（「不可」とする画像の例） 出所：国交省資料を基に作成

### 5.4.2 損傷の検出能力の評価の基準データ

ひび割れ検出能力の評価基準となる損傷図及び損傷写真について述べる。前述のとおり画像の評価は、判読可能率によって評価される。一般的に人が撮影した損傷は、損傷状況を確認し易いよう見やすい角度から撮影される。しかしながら、最大ひび割れ幅 0.2 mm 程度のひび割れになると必ずしもひび割れが鮮明に記録されていない場合もあり、フォーキングのみでしか識別できない写真もある。ロボットが撮影した画像に対する判読可否の評価は、予め点検員が近接目視等により確認した損傷について、その損傷発生位置を記録した損傷図と照合することで、画像等から判読できるかを確認するものである。

損傷図は、平面展開図に引き出し線を用いて、損傷発生位置を記録確認することができる(図5-8)。また、損傷図には特定の損傷が見つかった位置情報を引き出し線により示している。被評価者(ロボット開発者等)は、橋梁点検ロボットにより取得した損傷の画像と発生位置を損傷図上に図示することで、評価者に損傷の種類、損傷程度の評価、その確認位置について評価を受けるものである。



写真番号	24	径間番号	85	撮影年月日	2015.11.05
部材名	梁部	要素番号	0102	メモ	
損傷の種類	漏水・遊離石灰	損傷程度	d	P85橋脚梁部(起点方)に遊離石灰及び、ひびわれ(幅0.1~0.4mm、間隔0.2m程度)が見られる。	
【今回点検他損傷】 ⑥ひびわれ-e					

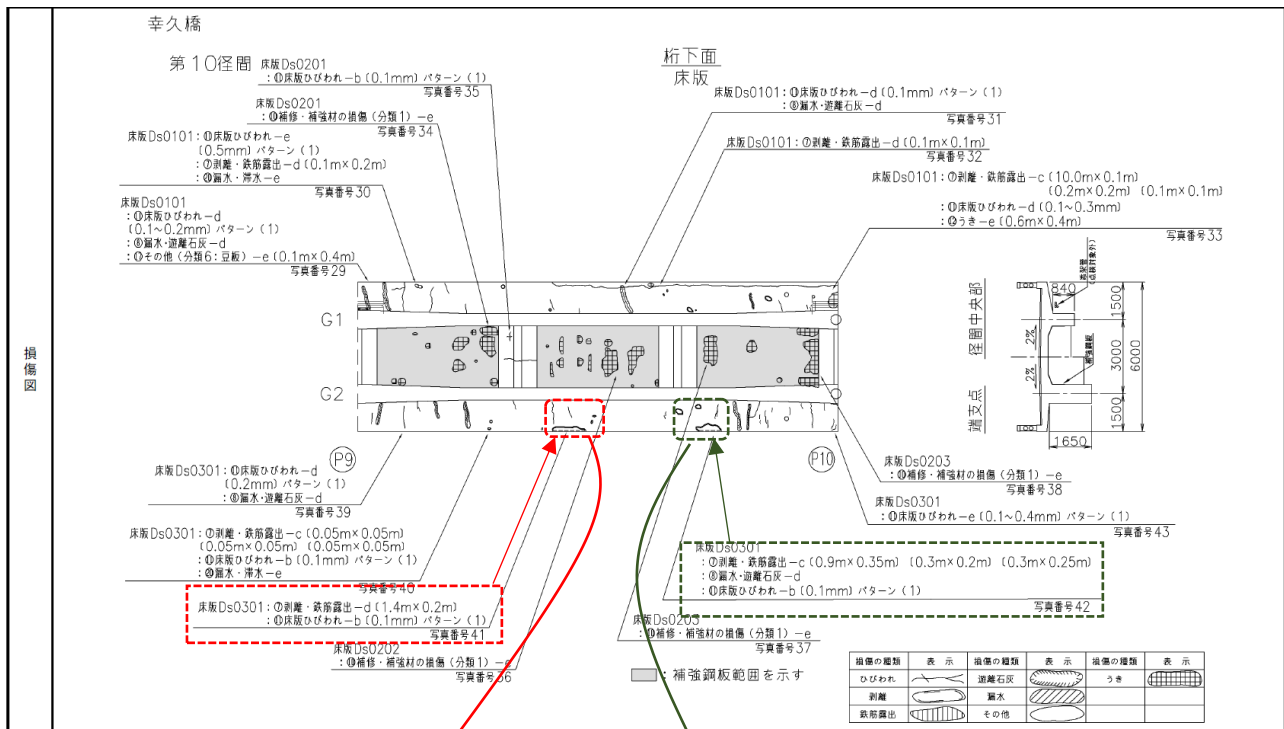


写真番号	32	径間番号	85	撮影年月日	2015.11.05
部材名	梁部	要素番号	0102	メモ	
損傷の種類	剥離・鉄筋露出	損傷程度	d	P85橋脚梁部下面(海側)に鉄筋露出(0.3m×0.2m)、(0.15m×0.15m)、(0.1m×0.1m)が見られる。	



図5-8 現場検証で使用された点検調書と損傷写真のサンプル  
蒲原高架橋第85橋脚梁下面(Pb0102)の剥離・鉄筋露出・漏水遊離石灰

国交省資料を基に作成



写真番号	41	径間番号	10	撮影年月日	2015.11.18	写真番号	42	径間番号	10	撮影年月日	2015.11.18
部材名	床版	要素番号	0301	メモ		部材名	床版	要素番号	0301	メモ	
損傷の種類	剥離・鉄筋露出	損傷程度	d	下流側張出し床版に鉄筋露出(1.4m×0.2m)及び床版ひびわれ(幅0.1mm)が見られる。 【今回点検他損傷】 ①床版ひびわれ-b		損傷の種類	漏水・遊離石灰	損傷程度	d	下流側張出し床版に床版ひびわれ(幅0.1mm)、遊離石灰及び剥離(0.9m×0.35m, 0.3m×0.2m, 0.3m×0.25m)が見られる。 【今回点検他損傷】 ⑦剥離・鉄筋露出-c ①床版ひびわれ-b	

図5-9 現場検証で使用された点検調書と損傷写真のサンプル  
幸久橋第10径間床版下面(DS0301)の剥離・鉄筋露出・漏水遊離石灰

国交省資料を基に作成

検出能力の確認は、被験者が提出した損傷図に予め近接目視により確認された損傷があり、かつ損傷写真から当該損傷が判読できるかを確認することで行われる。人が撮影した写真は、損傷を視認した後に記録として撮影するため、損傷の位置関係をチョーキングやスケール感とともに損傷度合いを強調するように記録されることが多い。

一方、橋梁点検ロボットで取得する画像は、連続的に構造物表面を網羅的に撮影することが多く、操縦者が損傷を視認していないため、損傷状態を強調する撮影は行われませんが、後工程で損傷状態(大きさや範囲等)と損傷の位置を画像で確認・分析する必要がある。

## 5.5 評価結果（現状の達成水準）

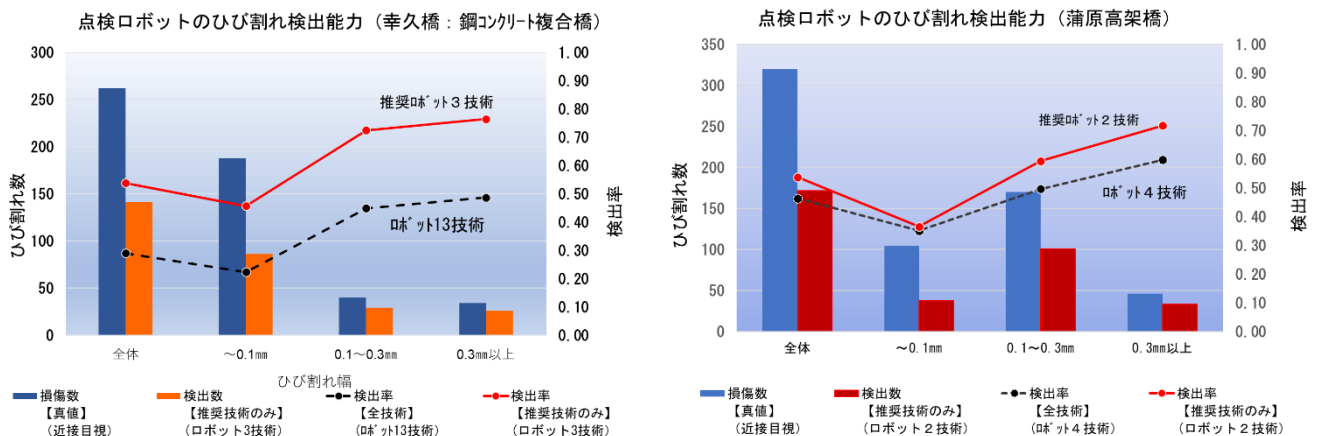
国交省が実橋において実施した橋梁点検ロボットの現場検証の結果は、公表されており国交省が報道発表資料としてWebサイト(<https://www.mlit.go.jp/common/001125338.pdf>)に掲載しており、公表資料については誰でも入手することが可能である。公表資料についての説明は資料に委ね、ここでは最も基本的な損傷であるコンクリートのひび割れの検出精度に着目し、その検出率について考察する。

現場検証では、橋梁点検ロボットにより撮影された画像について、損傷の判読が可否について3人の熟練点検技術者が確認し、判読可能率という指標で評価が行われた。これは、橋梁点検ロボットで取得画像からひび割れ幅や長さを計測できるかを評価したものではなく、近接目視で検出された例えば幅 0.3 mm以上のひび割れを、ロボットが撮影した画像から直接読み取れるかを、評価したものである。

実際の橋梁点検業務では、損傷の発生位置の記録に加えて、損傷程度を評価することが要求される。橋梁定期点検要領では、ひびわれについて「最大ひび割れ幅」、「ひび割れ長さ」、「ひび割れ間隔」を考慮し5段階で評価することとしている。ひび割れの幅は、気温によっても収縮するうえ、ひび割れ幅も一定ではないため、現状の点検ではチョーキングにより最大ひび割れ幅を計測した位置を示すとともに、ひび割れ端部が不明瞭な対象についても、補助線を記すことで損傷図作成時の参考としている。前述の要求性能(表5-5)は、この損傷程度の評価ができる品質を要求している点が重要な点である。

図5-10は、平成27年度の現場検証のデータを基に作成したひび割れ幅に対する橋梁点検ロボットの検出能力について示したものである。このグラフの縦軸には「ひび割れの数」と「検出率」を示した。このグラフにおける「検出率」は、次式で定義する。

$$\text{「検出率」} = \frac{\text{（近接目視点検で把握された「ひび割れ」のうち、画像から判読できた数）}}{\text{（近接目視点検で把握された「ひび割れ」の数）}}$$



出所：国土交通省次世代インフラ用ロボット現場検証データを基に作成

図5-10 現場検証におけるひび割れ幅と検出率の関係

国土交通省が実施したインフラ用ロボット現場検証における橋梁点検ロボットのひび割れ検出能力は、結果的に平均的なロボットでは0.3 mm幅のひび割れの検出能力は50~60%程度であり、推奨評価を受けたロボットでも70~80%に検出率が止まっていることが判る。

言い換えると幅 0.3mm以上のひび割れであっても20~30%判読できないことを意味する。当初、橋梁点検ロボットは、すぐにでも導入できる期待のもとで実証が行われたが、現場実証を通じ橋梁点検ロボットの損傷検出能力が明らかになるにつれ、ロボットによる“点検員の代替”から、“点検員の支援”へと目標が現実的なものに変化した。

なお、国土交通省が公募した橋梁点検ロボットの現場検証について、ロボット毎に「その他の主な損傷」についての検出能力(判読可能率)を示す(図5-11)。

この検出率からは、橋梁点検ロボットを用いた場合、人の近接目視に比べ検出漏れ(欠測)が多く生じることが明らかになった。多くのロボットの検出率が50%に満たないが、比較的性能の良いロボットについては、70%を超えるものもある。この結果を見ると、現状の性能水準ではロボットによる点検員の代替は困難と言わざるを得ない。しかしロボットの検出能力は、ひび割れ幅が大きくなるほどに検出率が向上することが判った。このことから、橋梁点検ロボットが人を代替できないが、事前スクリーニングに用いるなど、人の作業範囲(目視点検範囲)を絞り込むために必要な検出精度を示せる可能性はあると考える。

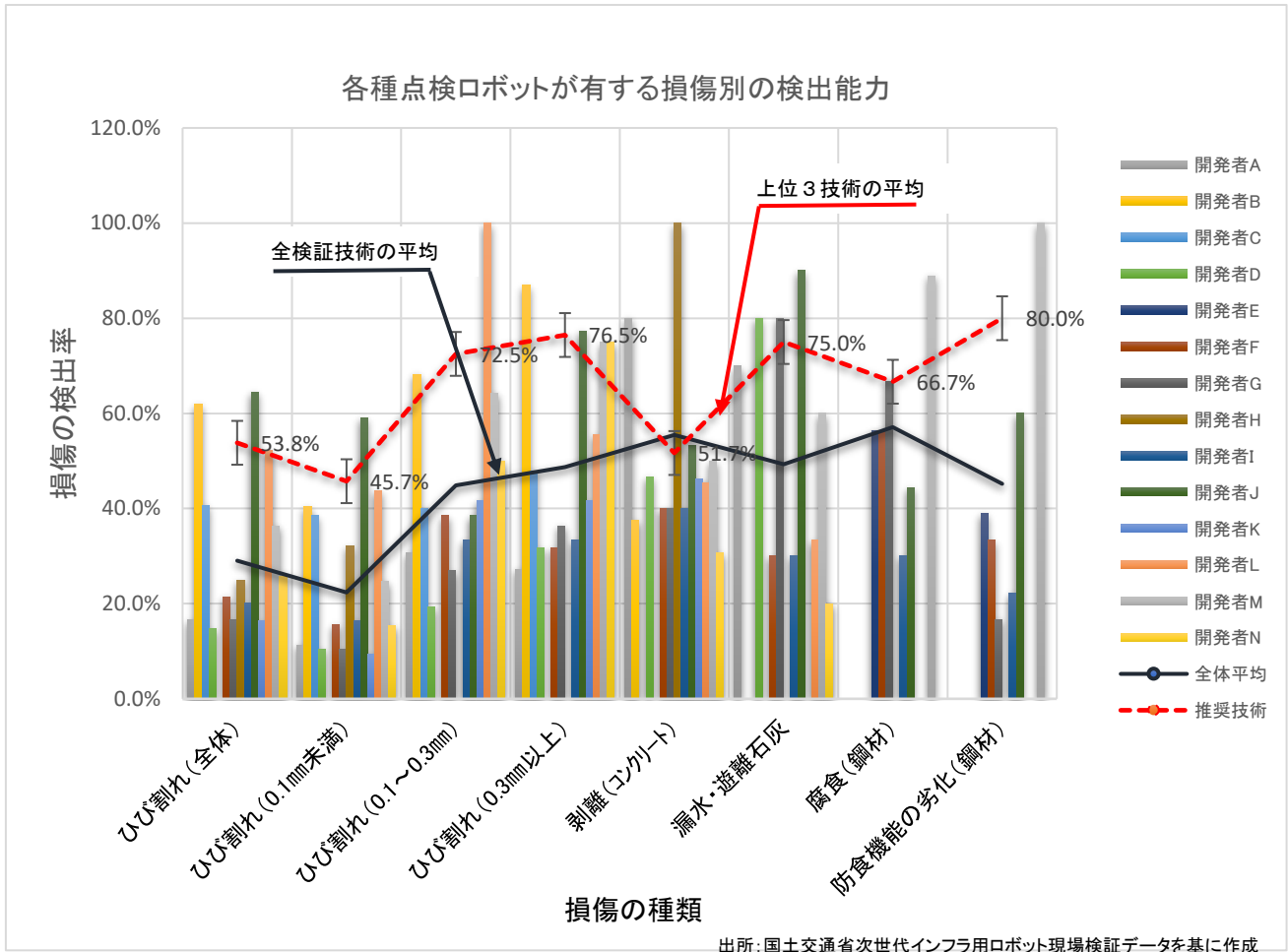


図5-11 現場検証における橋梁点検ロボットの損傷検出率の関係

## 5.6 現場検証活動の成果

国交省が行った現場検証は、実大スケールの橋梁において橋梁点検ロボットの性能評価を実施し、構造物の大きさや風速・日照等の実際の環境条件の下で、点検技術者が行った点検成果物との比較において、検出性能の評価結果について示したことは大変意義があったと言える。

加えてこの検証では、構造物の損傷検出性能だけでなく、風速変動などの環境条件の違いが検出性能に差異を及ぼすことや、撮影した膨大な数の画像を点検調書に整理する時間やコストについても検証したことは、社会実装を進めるうえで重要な検証要素であることも明らかになった。

一方で、室内試験では確実に検出できると思われたコンクリートのひび割れが、現場検証では 0.3 mm を超える比較的大きなひび割れでも検出精度が 70～80% 程度に止まったことは、橋梁点検ロボットの検出性能のさらなる改善がなされない限り、本格的な普及が難しいことが一つの結論として得られた。これらの実証活動の成果として、点検要領の改訂や点検ロボットの性能カタログの作成など、点検ロボットの実用化・社会実装に向けて大きな進歩が得られたと言える。

## 5.7 橋梁点検ロボットの評価における課題

橋梁点検ロボットの評価には、橋梁点検ロボットの使用目的である「損傷の記録(点検要領に定められた評価基準に従って区分される損傷の規模や進行の度合いを客観的に記録すること)の一部または全部を支援・代替すること」の可否を明らかにし、その根拠を定量的・客観的に示すことが求められる。

さらに性能確認に際しては、その使用条件を明らかにする必要がある。橋梁点検の場合、点検要領に定められた損傷(26 種類)の損傷程度を評価基準に従って記録するが、損傷の検出精度は勿論、点検作業の効率性・安全性・経済性といった視点からも評価が行われるべきである。その際、評価対象の橋梁点検ロボットの性能確認を行った際の制約条件となった橋梁の形状・規模・材質といった「点検対象の違い」に加え、点検を実施する「環境条件の違い」に留意して行う必要がある。

### 5.7.1 点検対象について

点検対象としての橋梁は、その主材料からコンクリート(RC)橋、コンクリート(PC)橋、鋼橋に分類され、主桁の形状から桁橋、床版橋、ラーメン橋、トラス橋、アーチ橋、吊り橋、斜張橋、Box カルバート橋などのタイプが存在する。さらに橋の構成要素・部材も橋桁、床版、橋脚、橋台、伸縮装置、支承など多岐にわたる。これらについても、点検対象として点検の可否を明確にする必要がある。

国土技術政策総合研究所がとりまとめた研究報告「道路橋等の点検効率化等への計測・非破壊検査技術の適用性に関する共同研究(Ⅲ)ー道路橋狭隘部の外観性状調査機器の性能評価試験法開発のための基礎研究ー(国総研資料 第 1030 号 平成 30 年 4 月)」では、実橋の点検において近接目視が困難な狭隘部について分析している。また、当該報告書には、調査対象とした国内 2,700 橋あまりの橋梁形式の内訳とともに、点検困難橋梁がその半数にのぼると報告している。近接目視による点検困難箇所の分類として、大きく「狭隘部」「狭隘部以外」に分類している。「狭隘部」とは、部材間の隙間が狭隘で、人が近づけない構造であり、例えば主桁と添架物の隙間や落橋防止構造の背面などをいう。また、高橋脚や幅広幅員橋梁なども、一般に用いられる橋梁点検車や高所作業車を用いても点検対象部材に近接することができないことから足場設置などの別途の手段が必要としている。

点検対象の大きさも重要である。橋梁のスパンは大きなものになると 300m 程度、橋脚高さでは 120m を超えるものもある。このような大規模橋梁になると飛行型点検ロボットの操作では、機体を視認することが困難となるため、自律飛行機能などが必要となり、写真撮影位置などの記録においても高い性能と精度が要求されることになる。

### 5.7.2 環境条件について

実際の橋梁点検では、現場毎に安全性や効率性、経済性に対する要求が異なる。また、橋梁は河川や道路、鉄道を跨ぐことから周囲に様々な安全対策が要求される。桁下空間の交通量が多い橋や鉄道がある所では、点検可能時間が制約されることもある。点検効率について言えば、単位面積当たりの損傷数によっても作業効率も大きく変化する。橋梁点検ロボットの運動性能に関しても、例えば、橋脚や橋桁まわりにはその形状等に応じて複雑な風の流れが発生するため、橋梁点検ロボットの位置制御性能に大きな影響を与えることが確認されている。また、日照の状況により構造物表面のひび割れの見え方が変わるため、日射角度の違いも性能に影響を及ぼす。

## 5.8 既存の技術評価システムと課題

国土交通省には、新技術活用評価システム(NETIS: New Technology Information System)[9]など、公共事業で活用される新技術を評価する仕組みが存在する。橋梁点検ロボットもいくつかが登録されている。NETIS は、新技術が公共工事で活用された際の活用効果データを蓄積し、その特長を既存技術と比較することで総合的に評価し活用を促す仕組みである。

これまで土木構造物の点検は、近接目視や打音検査といった人の五感を頼りに行われている。このため、これまで橋梁点検ロボットを導入する試みにおいては、人が行った点検結果と比較することが必要と考えられてきた。しかし、この方法では橋梁点検ロボットの持つ優位性を活かすことができないため、人に出来て橋梁点検ロボットに出来ない部

分が強調され、総じて低い評価が下されがちである。

このように人の作業を比較対象とする場合、人の作業能力が作業条件の違いによって変化することに加え、作業方法自体が人力を前提としているため、橋梁点検ロボットの優位性を引き出すような業務プロセスを設定しないまま評価が行われている。NETIS は、多様な施工条件に対応し、実用性を評価する点で有効に機能している。しかし橋梁点検ロボット技術への適用については、限界があると考えられる。

### 5.8.1 新技術活用促進システム (NETIS) における技術評価方法の概要

国土交通省は、民間が開発した優れた新技術を公共事業で活用促進するため、平成 10 年度より新技術活用促進システム (NETIS) を設け運用している[8][9]。NETIS が対象とする技術は、材料、施工法、機械、システムと幅広い技術領域をカバーしている。

NETIS 最大の長は、新技術の活用促進のための技術評価プロセスが制度に組み込まれていることにある。このため、対象となる技術は、開発中の技術ではなく実績が無くとも実用化済の技術を対象としている。登録者は、登録技術が実用段階にあり、技術の成立性が技術開発者等によって確認されていることと、当該技術の適用範囲において従来技術に比べ活用の効果が同程度以上の技術又は同程度以上と見込まれる技術であることを示さなければならない。

なお、NETIS における新技術の定義は、「技術の成立性が技術開発した民間事業者等により実験等の方法で確認されており、実用化している公共工事等に関する技術であって、当該技術の適用範囲において従来技術に比べ活用の効果が同程度以上又は同程度以上と見込まれる技術をいう。」と定められている[8]。そして新技術に関する情報は、開発者の責任において「技術の適用範囲」や「性能に関する情報等」がデータベースに登録されるため、新技術活用の採否については、利用者が個別の現場条件を踏まえ判断することとされている。NETIS は、公共事業の現場が抱える課題に対応するために新技術を導入したいと考える者にとって、判断を支援し、導入効果が期待できる適用条件において導入することとされている。公共事業において新技術が活用された場合には、利用者らに活用効果調査の実施が義務付けられ、その結果に基づいて有識者等により事後評価が行われ、事後評価情報が蓄積され、開発者にフィードバックされるとともに、優れた技術に対しては導入のインセンティブが付与される仕組みとなっている。

平成 17 年度には、登録技術数も 4000 技術を超え玉石混淆の状態になったことから、国土交通省により「試行調査方式」と「テーマ設定技術募集方式」に再編強化[9]がなされて現在に至る。次に、NETIS における新技術の活用体系を述べる。

### 5.8.2 新技術活用システムの活用体系と技術評価

国土交通省は平成 17 年度に、活用実績の少ない新技術について現場での確実な試行を促進し事後評価を行うシステムを再編・協会し、平成 18 年度には、さらなる新技術の活用促進に向けて活用後の事後評価を徹底する取り組みを盛り込み、本格的な新技術活用システムの運用を開始した。ここで述べる「試行」とは、技術の成立性等申請情報の妥当性を確認するため新技術を直轄工事等において用いることを示す。「活用」とは、新技術を直轄工事等において用いることを示しており、試行は活用に含まない。

特に現場での新技術活用にあたり、現場のニーズ等により必要となる新技術を対象に発注者の指定により活用を行う「発注者指定型」、施工者(受注者)からの提案により活用を行う「施工者希望型」、開発者からの真正により試行現場を照会し活用を行う「試行申請型」、発注者が現場のニーズ等により求める技術募集テーマ等を明確にしたうえで、新技術を募集し選考した技術の活用を行う「テーマ設定型(技術公募型)」の5つの類型が設定された(図5-12)。以下にその概要を整理する。なお施工者希望型については、採用形態の違いから2つに分けている。

- ① 「試行申請型」は、NETIS 申請者の試行申請に基づき、事前審査の結果を踏まえて活用の前に実施するものをいう。事前審査の結果は、NETIS(評価情報)に掲載し、公表する。
- ② 「施工者希望型」(総合評価方式における技術提案の場合)は、総合評価方式における技術提案に基づき施工者が NETIS 登録技術の活用等の提案を行うことをいう。
- ③ 「施工者希望型」(請負契約締結後提案の場合)は、請負契約締結後における技術提案申請に基づき施工者が「施工計画書」に反映し、NETIS 登録技術の活用等をいう。
- ④ 「発注者指定型」は、NETIS 登録技術を対象に適用範囲と活用効果等の確認または「有用な新技術」の活用促進を目的に発注者が指定することをいう。
- ⑤ 「フィールド提供型」は、具体の現場を想定して求める技術要件を明確にした上で、広く技術開発者から技術提案の募集を行い、NETIS 登録技術について審査・選考し、工事等の発注にあたって発注者が指定、試行することをいう。
- ⑥ 「テーマ設定型」(技術公募)は、直轄工事等における現場ニーズ・行政ニーズ等により、求める技術募集テーマ等を設定し、評価指標、要求水準、及び試験法等(以下「リクワイヤメント等」という。)を明確にした上で、技術を開発した民間事業者等から技術を募集し、同一条件下の現場実証等を経て、個々の技術の特徴を明確にした資料(以下「技術比較表」という。)を作成し、工事等の発注に当たって発注者が新技術を指定することにより活用を促進する取組みをいう。

5つの活用類型において共通して重要とされていることは、技術評価情報の収集である。土木事業における新技術の導入に際しては、土木事業が多様な条件のもと一品生産で行われることから同一技術でも、その適用条件や使い方によって導入効果に差異が生じるため、導入判断を援助する技術評価情報の提供が、この制度の根幹をなしており、実績情報を重視している。そして、これらの実績情報は新技術の活用効果調査において収集され NETIS 評価情報として蓄積されている(図5-12)。

活用効果調査の結果は、一定件数が蓄積されると既存技術との比較において「技術の優位性」や「安定性」の評価に応じて、公共事業での活用を促進するための評価が有識者等の参画する新技術活用評価会議(地方整備局等)により選定され、全国から推薦された有用な新技術について、活用促進の対象技術として新技術活用システム検討会議においてオーソライズされる仕組みが構築されている。

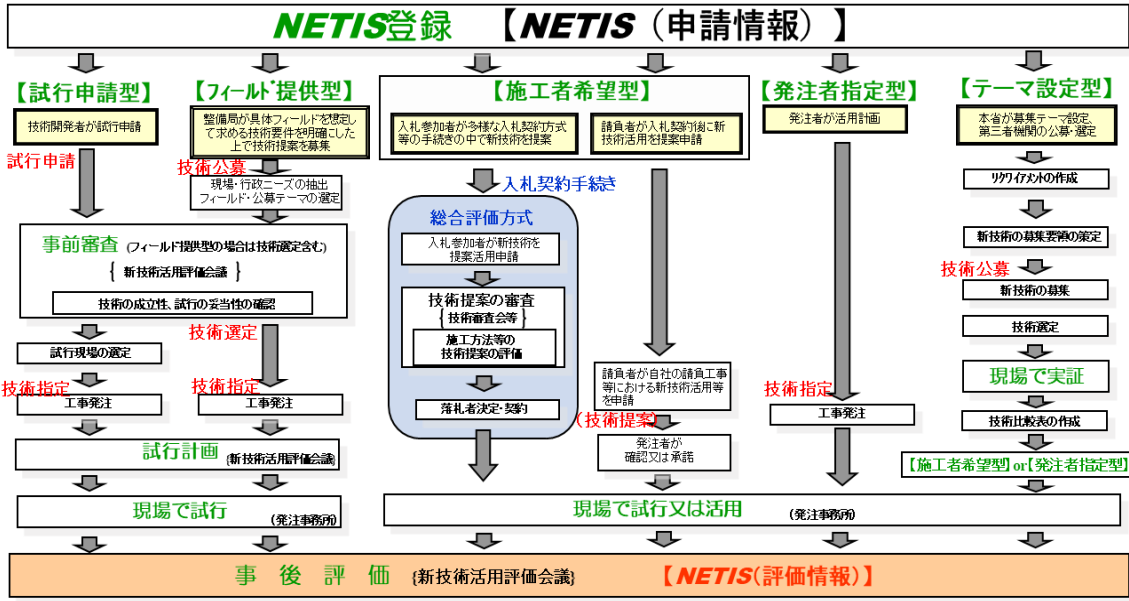


図5-12 公共工事における新技術活用システムにおける技術評価の仕組み[9]

(出典)資料(「公共工事等における新技術活用システム」実施要領平成 30 年 5 月一部改正)を基に著者が作成

NETIS 登録技術は、技術開発が終了し開発者の責任のもと製品化された技術が対象であるが、技術開発の継続により改良が行われるものも含まれる。活用効果調査のデータは、開発者に対する貴重なフィードバックの役割も果たしている。



### 5.8.3 登録される技術情報

NETISに掲載される技術情報は、「申請情報」と「評価情報」により構成される。先ず登録者（開発者）が、その責任において「申請情報」を作成しNETISに登録を行う。「申請情報」には、①技術の概要、②従来技術との比較、③特許・審査証明、④単価・施工方法、⑤問合せ先・その他、⑥詳細説明資料、が含まれる。申請情報に基づいて技術が活用された場合に、活用効果調査が行われ、その情報が「評価情報」として蓄積されることになる。

新技術の「申請情報」がNETISに登録されるとユニークな登録番号が付与され、技術名称と登録番号がセットになり、最長10年の掲載期間の間、技術活用や評価が行われる。この間に技術改良等がなされ性能が向上した場合は、新たに登録審査を再度行い、別の登録番号が付与されることとされている。

特に「申請情報」のうち②従来技術との比較に関する情報は、当該新技術の性能評価におけるの基本情報となるため、比較対象技術（従来技術）の性能の定量化は慎重になされる必要がある。従来技術との比較に関して登録される情報は、「比較する従来技術の名称」に加え、比較項目として「経済性」「工程」「品質」「安全性」「施工性」「周辺環境への影響」の各項目について3段階（向上・同程度・低下）で特性を示すとともに、比較の根拠を示すこととしている。さらに、「その他、技術のアピールポイント等」について補足することが可能である。なお、経済性と工程については、費用（単価）や所要日数（日）での定量化された情報が掲載される（図5-13）。

「評価情報」は、活用効果調査結果をもとに作成されるが、評価結果のみが公表され、その根拠データは非公表とされている。

技術名称	橋梁点検カメラシステム 見る(みる) 診る(みる)	登録番号	KK110083-VR
事前審査	試行実証評価	活用効果評価	五
活用効果調査入力様式	活用期間等	活用期間	平成30年9月13日

上記※印の情報と以下の情報は申請者の申請に基づき掲載しております。申請情報の最終更新年月日:2018.08.24

項目	活用効果	比較の根拠
経済性	向上(18.39%)	新技術は点検車運転手(特殊)、点検人員が削減された。
工程	同程度	
品質	向上	水平及び和道方向の点検範囲が拡大した事と、鉄筋部の点検が容易になったことにより、近接目視の代替で点検範囲が拡大された。さらに取得画像を複数の技術者による確認が可能となった。
安全性	向上	点検作業は橋面上の安全な場所における目視点検となるため従来のような点検技術者に対し危険性の高い箇所作業環境が改善された。
施工性	向上	作業スペースの狭小化(2.7m)、点検可能な適合橋梁(標準、短冊、架橋条件等)の範囲拡大。また、点検画像及び音声を複数の技術者がリアルタイムに及方向通信にて確認できた。
周辺環境への影響	向上	点検作業時の交通規制の縮小化または回避要無、歩行者への影響回避等周辺環境への影響も少なくなった。
その他、技術のアピールポイント等	歩道橋、近接橋、交通規制が困難な橋梁、桁下空間の小さい橋梁、主構や部材が密な橋梁等で橋梁アームバケットの挿入が困難な橋梁。	並行型 縦+型

項目	従来技術	新技術	向上の程度
経済性	246700円	302275円	18.39%
工程	1日	1日	0%

項目	仕様	数量	単位	単価	金額	備考
橋梁点検作業	技術(A)	1	日	38900円	38900円	
橋梁点検作業	技術(B)	1	日	22700円	22700円	
画像処理	技術(A)	3	日	38900円	116700円	
点検車運転	点検車(賃料)	1	日	60000円	60000円	システム台車1式の賃料
点検車運転	運転手(特殊)	1	日	0円	0円	技術員が兼務
交通整理	交通誘導員	1	人	8400円	8400円	誘導員1名

項目	仕様	数量	単位	単価	金額	備考
橋梁点検作業	技術(A)	0.75	日	38900円	29175円	
橋梁点検作業	技術(B)	0.75	日	31600円	23700円	
画像処理	技術(A)	3	日	38900円	116700円	
点検車運転	点検車(賃料)	1	日	10000円	10000円	
点検車運転	運転手(特殊)	1	日	15900円	15900円	
交通整理	交通誘導員	2	人	8400円	16800円	誘導員2名

図5-13 NETIS 申請情報(従来技術との比較)の例示[8]  
～橋梁点検システム 見る(みる)診る(みる)KK110083-VRより～

### 5.8.4 事後評価

NETISに登録された技術の「試行」、「活用」後は、NETIS申請者及び利用者（この場合、発注者である国土交通省の担当者、新技術を採用した工事の責任者等(施工者)を指す)は活用効果調査表を国土交通省に提出し、活用効果調査結果に基づき必ず事後評価を有識者等の参画する評価会議において実施し、事後評価を受けた新技術は「NETIS(評価情報)」に掲載し、公表することとされている。

なお、活用効果調査では、NETIS申請時に登録された従来技術との比較において「経済性」「工程」「品質・出来形」「安全性」「施工性」「環境」の6項目について、工事での活用の結果、従来技術と比較して工事全体でどうであったかを調査することとしている。評価指標については、従来技術と比較してどうであったか5段階（大幅に優れる、優れる、同等、劣る、大幅に劣る）で評価することとされている。

### 5.8.5 「有用な新技術」の活用促進

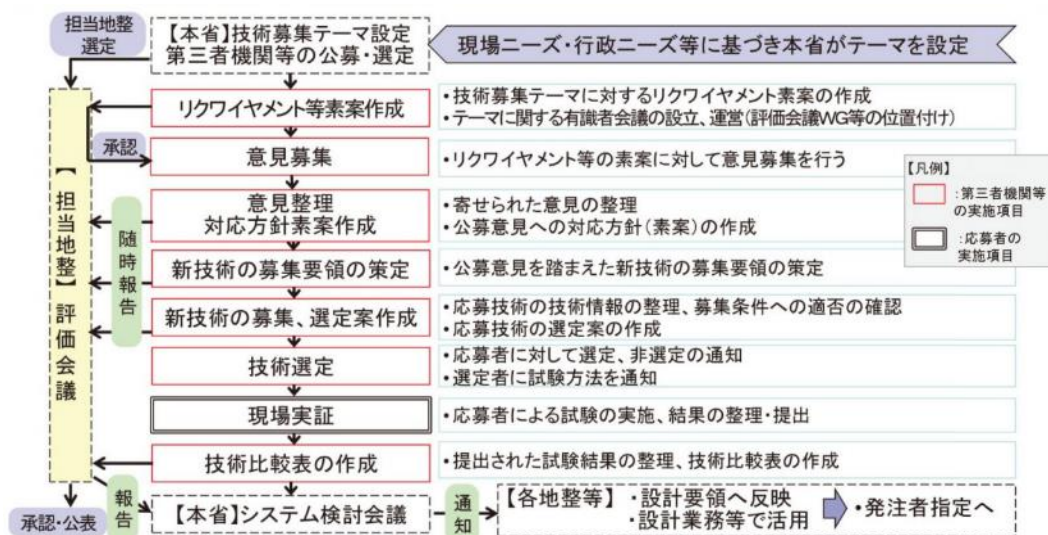
技術の優位性が高く安定性が確認されている新技術については、国土交通省が「設計比較対象技術」として概略設計、予備設計、詳細設計において設計比較の対象を位置づける。

また、技術の優位性は高いとの評価ではあるものの、実績が少なく安定性が確認されていない新技術は、「少実績優良技術」として技術の安定性が確認されるまで、より広い範囲での「試行」が促進される。産学官で構成する評価会議では、優れた新技術について活用促進を図る目的で「活用促進技術」として指定し、申請者へ通知する。発注者は、「発注者指定型」等で計画的に「活用促進技術」等の活用促進を図る。

なお、「活用促進技術」については、指定から概ね3年程度のフォローアップを実施する。産学官及び研究機関で構成する国土交通省新技術活用システム検討会議（国土交通省）（以下「システム検討会議」という。）では、技術の水準を一層高めるため画期的な新技術について「推奨技術」、「推奨技術候補」として指定し、申請者へ通知がなされる。

### 5.8.6 リクワイヤメント(性能要求)に基づく評価が行われる「テーマ設定型(技術公募)」

「テーマ設定型(技術公募)」は、平成26年の実施要領改定に伴って追加された方式である(図5-13)。その特徴は、現場からのニーズに基づき設定した技術テーマに対して、実務上必要とされる「要求性能(リクワイヤメント)」と「現場実証試験の方法」を設定し、現場検証において要求性能の達成度を確認することにより、新技術の現場導入に必要な評価をスピーディーに実施することを目指している。評価対象技術については、従来方法や類似技術との「技術比較表」を作成し、その技術特性(類似技術との違い)を明らかにすることも重要な特徴である。



出所:NETISプラス(先端建設技術センター)第15号(2019夏)より

図5-13 NETIS テーマ設定型(技術公募)の技術評価フロー[10]

### 5.8.7 橋梁点検ロボットのNETIS 評価事例の考察

#### ①検証条件と総合評価の必要性

橋梁点検ロボット技術を評価する場合、その性能が実用に耐える水準にあるかを明らかにする必要がある。そのためには、先に述べたように予め使用条件と要求性能(リクワイヤメント)を設定したうえで性能の確認を行う必要がある。橋梁点検の場合、損傷(26種類)の検出精度が重要であることは勿論であるが、点検作業の効率性・安全性・経済性といった視点に加えて、点検対象となる橋梁の形状・規模・材質といった「点検対象の違い」に加え、点検を実施する「環境条件の違い」に留意して行う必要がある。

公共事業に使われる新技術は、全てがNETISに登録され活用効果調査と事後評価により有用な技術の普及促進が図られるが、橋梁点検ロボット技術についても対象とされている。そしてNETISは、土木工事への適用を想定することから、様々な特性を持つ技術が対象となる点からも、従来技術との比較を行うことで優位性を評価する方法は合理的であったと言える。一方で性能の比較は同一条件で実施してこそ可能であり、個別の条件が大きく異なる場合は、性能評価の前提となる適用条件をしっかりと記録する必要がある。

#### ②技術改良への対応

橋梁点検ロボットの評価結果は、現場の課題を開発者へフィードバックし技術改良を促進に資することが望まれる。一般にロボット技術の性能を適切に評価するためには、評価対象を明確に定義した上で、評価指標と検証環境を規定する必要がある。とりわけ、ロボットは前述の定義のとおり様々な機能を組合せによって実現するため、ロボットを構成する要素技術の改良・変更により、その性能が大きく変更される。近年では、新たな要素技術が次々製品化される日々更新されることから、ロボットの性能評価情報は、短期サイクルで更新できることが望ましい。

NETISへの技術登録に際しては、「技術的に成立していること」が前提となるため、申請情報の登録に際して開発途上の技術は登録することが出来ない。また評価情報は、現場で実際に使われることによって行われる事後評価をベースとしていることから、現状の業務ルールに適合することも必要条件となる。橋梁点検ロボットのように、従来、現場条件に合わせて人が工夫して行っていた作業を橋梁点検ロボットに置き換える場合、そもそも技術的に成立しているかを評価することが課題となる。

#### ③NETISにおける橋梁点検ロボットの評価事例の分析

NETISでは、技術評価にあたり「比較する従来技術」を開発者が設定し、比較対象技術に対する新技術の優位性を評価する方法が採用されている。ロボット技術の場合、この比較する技術が「人による作業」が対象になるため、自ずと人と人の作業プロセスがロボットの評価基準となることが多い。例えば、次世代

社会インフラ用ロボットの現場検証で高い評価を得た「橋梁点検カメラシステム 見る(みる) 診る(みる) (NETIS KK110083-VR)」を例に示すと、橋梁点検ロボット技術が経済性、行程、品質・出来形、安全性、施工性、環境のすべてにおいて従来技術(人の近接目視による橋梁下面の点検)に対して劣るとの評価が公開されている(図5-15)。

活用効果評価結果		公開版										
平成 29年度		中部地方整備局 / 新技術活用評価会議										
NETIS 情報	開発目標	省力化、経済性向上										
	新技術登録番号	KK-110063-A	区分	システム	有用な技術の位置づけ							
	分類	調査試験 - 構造物調査 - 非破壊試験、調査										
	新技術名	橋梁点検カメラシステム 見る(みる) 診る(みる)										
	比較する従来技術(従来工法)	近接目視による橋梁点検を橋面上から遠隔操作によるビデオカメラで行う近接目視代替点検技術。										
	新技術の概要及び特徴	橋梁下面の目視点検を橋面上の安全な位置からの遠隔操作により撮影されたビデオ画像を通して近接目視代替点検を行う技術										
活用効果評価	所見	上部コンクリート下面の形状が凹凸の多い構造物でも対応可能であり、リアルタイムで映像確認ができることや海上作業を必要としないなど優れた点がある。一方、アーム長が港湾構造物を確認するには短いなど今後の改良が必要な項目もある。										
	次回以降の評価に対する視点と評価の必要性	可視範囲内における結果は、従来技術と同等以上の性能を有しているが、橋樑という構造を考えると実際の点検ができていない。可視範囲の拡大後に改めて評価する必要がある。よって情報識別記号「VR」とする。		項目の平均(点)と従来技術(従来工法)(点)の比較								
	留意事項	点検範囲が水平アーム(長さ7.0m)上のカメラで撮影する範囲に限定される。係留設備により点検が困難な場合がある(全くできないか点検範囲が狭くなる)										
	試行調査における改良点及び要望	橋樑下面全体を点検することができないことから、今後の改良が必要と思われる。										
活用効果調査結果	対象工事	1	橋樑上部コンクリート下面のひび割れや浮き・剥離等を効率的に計測可能な技術				従来技術	テーマ設定型				
		2					従来技術					
		3					従来技術					
		4					従来技術					
		5					従来技術					
	参考	項目	ケース番号および年度	1	2	3	4	5			項目の平均(点)	従来技術(従来工法)(点)
			H20									
			経済性									
			工程									
			品質・出来形									
安全性												
施工性												
環境												
その他												
総合評価点												
今後、当該技術を活用出来る工事に活用したいか	今後最も活用したい	活用を検討したい	場合によっては活用することもある	技術の改良を強く望む	各項目における判定							
	-	-	100%(1件/1件)	-	A	従来技術より極めて優れる						
					B	従来技術より優れる						
					C	従来技術と同等						
					D	従来技術より劣る						
連絡調査の必要性												
連絡調査												

出所: NETIS

図5-15 NETIS 評価情報(公表版)に見る橋梁点検ロボットの評価事例[8]  
~橋梁点検システム 見る(みる) 診る(みる) KK110083-VR より~

NETIS の活用効果調査は、5 件以上蓄積されると活用効果評価が実施される。ここに事例[●]を挙げてロボット技術の評価方法について述べる。事例は、平成 29 年度に活用効果評価結果が公開された橋梁点検カメラシステムに関する具体的な記載例である。NETIS 情報の欄には、比較対象技術(従来工法)として「船上または潜水士による目視調査」が記載されている。人の近接目視を基本とする点検手順が技術基準等における業務標準とされている場合、これを支援もしくは代替する橋梁点検ロボット技術の登録に際しては、

人による作業が比較対象として設定されることが多い。

この事例では、橋梁点検ロボット技術の新規性が「橋梁下面の目視点検を、橋面上の安全な位置からの遠隔操作により撮影されたビデオ画像により近接目視代替点検を行う技術」としている。撮影可能な範囲内では、人の近接目視と同等以上の性能を有しているとしながらも、ロッドの長さである7mを超える栈橋の下面では死角が生じることから、点検可能範囲の拡大が求められている。条件によっては、高い性能を発揮できる技術であっても、結果的に従来技術よりも劣るとされている。

これまで土木構造物の点検は、近接目視や打音検査といった人の五感を頼りに行われている。このため、これまで橋梁点検ロボットを導入する試みにおいては、人が行った点検結果と比較することが必要と考えられてきた。しかし、この方法では橋梁点検ロボットの持つ優位性を活かすことができないため、人に来て橋梁点検ロボットに出来ない部分が強調され、総じて低い評価が下されがちである。

この事例のように人の作業を比較対象とする場合、人の作業能力が作業条件の違いによって変化することに加え、作業方法自体が人力を前提としているため、橋梁点検ロボットの優位性を引き出すような業務プロセスを設定しないまま評価が行われている。NETISは、多様な施工条件に対応するため、個別の性能を正確に評価することよりも実用性を重視しシステム全体として使える技術の評価の意味において、有効に機能している。しかし橋梁点検ロボット技術への適用については、限界があると考えられる。

## 5.9 まとめ

本章での検討により得られた結論は、以下のとおりである。

- (1) 国土交通省が公募により実施した橋梁点検ロボットの性能検証では、平成26～27年度にかけて延べ57技術を検証した。対象となった橋梁点検ロボットの種類は、飛行型ロボット、懸架型ロボット、吸着型ロボット、ポール型ロボットなどがあり、実際の鋼橋やコンクリート橋において実機を用いた性能検証が行われた。性能検証では、橋梁点検ロボットで概ね1スパン程度の部分的な点検を実施し、それぞれの点検ロボットで撮影した画像等を基に作成された点検調査書とロボットの動作状況等を評価対象とした。
- (2) 橋梁点検ロボットの性能評価は、「精度」「効率性」「経済性」について評価がなされた。評価は人の近接目視点検と比較することを基本により行われた。橋梁点検ロボットの性能を評価するために、事前に従来方法（近接目視）により点検が行われ、損傷図、損傷写真等の点検調査書が性能評価の基準として作成された。
- (3) 人の近接目視点検の結果との比較を主体とした性能検証の結果、最も基本的な損傷であるコンクリート部材（橋脚、床版、コンクリート桁）の「ひび割れ」の検出能力については、最大幅0.3mm程度のひび割れで概ね50%程度、優れたロボットで80%程度の検出率であった。この検出率は人が検出したひび割れの数に対するロボットが撮影した画像から検出できた割合である。この結果から比較的大きなひび割れ幅である0.3mmのものについても、目視点検の結果と比較して2割程度の見落としがあることが判った。
- (4) 公共事業で使われる新技術を格納したデータベースシステムである新技術情報提供システム（NETIS）は、登録された新技術が活用されると、関わった技術者により活用効果調査が行われ、新技術に対応する従来技術との比較により評価情報が蓄積される。橋梁点検ロボットについても活用効果調査結果が複数登録されているが、開発者が「経済性」「品質・出来形」「安全性」などで優れると自己評価している一方で、公表された活用効果調査結果は、人の近接目視との比較により「経済性」「工程」「品質・出来形」「安全性」「施工性」「環境」の全てにおいて従来技術に劣るとの評価が多くを占めている。
- (5) 国土交通省が公表した橋梁点検ロボットに対する要求性能は、直轄国道の橋梁点検に適用される「橋梁定期点検要領」に示された損傷程度の評価の判定に必要な情報を取得できる性能を要求している。例えば、ひび割れを例にとると最大ひび割れ幅0.2mm（RC）又は0.1mm（PC）以上、床版ひび割れについては最大0.05mm以上のひび割れについてその方向と本数を識別できることが要求される。評価に際しては、予め近接目視で検出したひび割れの延長に対する「検出率」「的中率」で評価を行う。幅0.1mm以下のひび割れについては、3割程度しか判読できていないことから単純に人の点検をロボットに代替させる場合、現状の橋梁点検ロボットの多くが要求水準に達していないことが判る。
- (6) NETISは、多様な施工条件に対応するため、個別の性能を正確に評価することよりも実用性を重視しシステム全体として使える技術の評価するために、開発者が示した適用範囲内で使用された全ての実績を評価対象としており、このことから実績が豊富であり有効に機能している。一方で橋梁点検ロボットは対象構造形式や部材種類の多様さもあり、適用範囲であっても使用条件の違いによって人の作業効率も大きく変化する。さらに作業方法自体が人の作業手順を前提としていることから、橋梁点検ロボットの優位性に着目した業務プロセスを設定しないまま評価が行われている。このため、活用効果調査を橋梁点検ロボットの性能評価として判断材料にするには、限界があると考えられる。

## 6. 橋梁点検ロボットの点検能力に関する考察

### 6.1 人による点検とロボットによる点検

既に製造業では多くのロボットを導入している。FA(Factory Automation)の現場では、繰返し作業の緻密さや正確さなど、ロボットの優れた特長を活かすことで生産性向上を実現している。

屋外で行われる橋梁点検作業では、工場内の生産作業とは異なり自然環境の影響を受けるのみならず作業条件が一律に定まることはない。ロボットを導入する際に、これまで人が行っていた作業を単純にロボットに代替させる意図の下、人の能力(ここでは点検能力)と単純に比較すると、ロボットに不足する機能や性能に注目しがちになり結局人と同等の水準が実現されない限り導入することが出来なくなる。

すなわち現行の点検要領は人による点検作業に最適化されたものであり、この点検手法の下では五感を駆使する点検技術者に優るロボットは現時点では見当たらない。状況に応じて損傷に近づいたり離れたり、角度を変えて視たりすることができる臨機応変の動きは、現在の橋梁点検ロボットには及ばないことから、人の目は極めて高性能なセンサーともいえる。しかし点検員には弱点もある。人の損傷検出能力が、どれほど優れていても、損傷位置を正確に記録することは得意でない。その証左として点検業務においては、点検調書の作成が人件費の最も多くを占める作業であり外業の人件費を上回る。点検調書は損傷展開図に引き出し線で損傷発生位置を記録することであり、損傷写真を展開図上に紐づけることに多くの労力が費やされている。

本研究では、橋梁点検作業におけるロボットの導入を推進するため、ロボットの持つ優位性に着目し、その不利な部分も踏まえ、ロボットの特徴を生かした作業手順を提案する。言い換えると、単に人の点検能力(損傷検出能力)とロボットの検出能力と比較するのではなく、ロボットに有利な業務プロセスを構築し、ロボットの発展段階に応じた人との補完を前提に、総合的に点検性能を評価することが重要であると考ええる。

本章では、ロボットで取得した点検画像を活用することにより損傷の位置記録精度が高まること、さらに位置記録精度が高まることによって、過去の点検記録と照合すれば損傷の進行を把握することが可能となることなど、橋梁点検ロボットの優位性を示す。

そのため、橋梁点検において、最も基本的な損傷となる「ひび割れ」の検出について、現状の技術水準を踏まえつつ、人(点検技術者)による点検結果と橋梁点検ロボットによる点検結果を比較。これにより、これまで人の点検能力を基準としていた橋梁点検ロボットの性能評価について、具体的なユースケースを想定し橋梁点検ロボットの優位性を引き出す点検作業手順について分析を行った。本論文では、この結果に基づき、段階的な橋梁点検ロボットの導入に向けた性能評価手法を提案する。

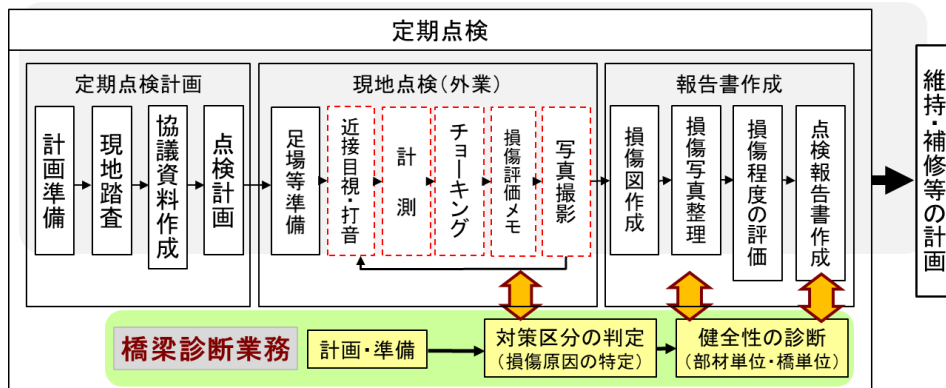


図2-1 国土交通省における橋梁定期点検の流れ

## 6.2 ひび割れの位置記録能力に関する分析

橋梁点検業務の効率化を目的に橋梁点検ロボット導入を考察する際には、変状や損傷の発生位置の記録精度を評価することが重要である。現行の目視点検では、点検員は損傷毎に「損傷程度の評価」を行い概ね5段階に区分する。橋梁点検におけるひび割れの評価区分と観察項目と判断基準を示す(表6-1)。

ひび割れの程度を評価する際、発生原因が材質劣化によるものか外力性によるものか、さらには繰返し荷重による疲労劣化なのかなどを見極める必要がある。ひび割れを特徴づける、発生位置とひび割れ方向は、引っ張り力が作用した方向を推定するための情報となる。同様のひび割れであっても、発生する位置によっては、対策の必要性の優先度が異なる(表6-2)。点検調書だけで正確にひび割れの位置や原因を判断することが難しい場合は、健全性の診断に際して再度現地で目視確認することが必要とされてきた。

表6-1 ひび割れの評価区分と損傷の程度

評価区分	損傷の程度
a	損傷なし
b	①ひびわれ幅が小さい(RC構造物 0.2mm 未満, PC構造物 0.1mm 未満)、且つひびわれ間隔が大きい(最小ひびわれ間隔が概ね 0.5m 以上)
c	①ひびわれ幅が小さい(RC構造物 0.2mm 未満, PC構造物 0.1mm 未満)、且つひびわれ間隔が小さい(最小ひびわれ間隔が概ね 0.5m 未満) ②ひびわれ幅が中位(RC構造物 0.2mm 以上 0.3mm 未満, PC構造物 0.1mm 以上 0.2mm 未満)、且つひびわれ間隔が大きい(最小ひびわれ間隔が概ね 0.5m 以上)
d	①ひびわれ幅が中位(RC構造物 0.2mm 以上 0.3mm 未満, PC構造物 0.1mm 以上)、且つひびわれ間隔が小さい(最小ひびわれ間隔が概ね 0.5m 未満) ②ひびわれ幅が大きい(RC構造物 0.3mm 以上, PC構造物 0.5mm 以上)、且つひびわれ間隔が大きい(最小ひびわれ間隔が概ね 0.5m 以上)
e	①ひびわれ幅が大きい(RC構造物 0.3mm 以上, PC構造物 0.6mm 以上)

外観上、一見同じ様なひび割れであっても発生位置と方向によって、健全性評価に際しては意味合いがことなることから、構造全体や部材全体における位置関係を適切に記録する必要がある。橋梁定期点検要領では、特に重点的に着目する必要がある箇所を示している(表6-2)。なお、ひび割れ発生位置によって発生原因や留意点が異なる(図6-1, 図6-2)。これらは、ひび割れパターンとして記録することとされている。

表6-2 ひび割れの発生位置と着目点

着目箇所	内容
①端支点部	支承反力, 地震, 温度変化による水平力, 伸縮装置からの漏水等により損傷を受けやすい。
②中間支点部	中間支点部(連続桁)では, 負の曲げモーメント及びせん断力が最大となり, かつ集中的な支点反力を受け応力状態が複雑となる部分であり, ひびわれが発生しやすい。
③支間中央部	曲げモーメントが極大となる部分であり, 曲げひびわれが発生しやすい。
④支間1/4部	鉄筋の曲げ上げ点で鉄筋量が少なく, 支承の作動不良等により思わぬひびわれが発生することがある。
⑤打継目部	乾燥収縮や施工不良によるひびわれ, 剥離, うき, 漏水が発生しやすい。
⑥セグメント目地部	セグメント施工の場合, 打継目と同様の損傷が発生しやすい。
⑦定着部	ウェブやフランジに突起を設けてPC鋼材を定着している部分では, 引張応力の集中によるひびわれが発生しやすい。また, 定着部は後打ちコンクリートで覆われており, 打継目地より雨水が浸透しやすく定着装置が腐食しやすい。
⑧切欠部	主桁断面が急激に変化する部分(ゲルバーヒンジ部や桁切欠部等)では, 応力集中によるひびわれが発生しやすい。



図6-1 支間1/4, 主桁直角方向の桁下面, 又は側面の鉛直又は斜めひび割れ

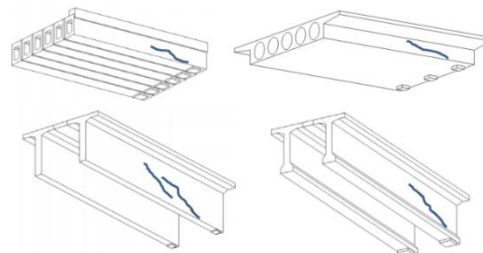


図6-2 支点部, 支点付近の腹部に斜めに発生しているひび割れ

## 6.2.1 現状の点検調書とロボットにより得られた画像の比較

現場検証では、点検員が作成した点検調書を基準に橋梁点検ロボット技術の性能評価がなされた。実際の点検業務では、調書に記載する損傷の位置は、写真と野帳に記録した情報をたより作成する。具体的には、点検員が現地で近接しクラックスケールや標尺を用いて幅や長さを計測するが、損傷位置については、多くの場合測、量機器を用いず大凡の位置を記録しているに過ぎない。そこで現場検証とは別に橋梁点検ロボットを用いた橋梁点検業務の試行で取得した点検画像と、それ以前の過去の点検業務で作成された損傷図を比較することにより、現状の点検調書における位置の精度を分析した。損傷写真の撮影は、人の場合ピンポイントで損傷そのものを撮影するが、橋梁点検ロボットで撮影した画像は、損傷位置を狙って撮影するものではないため、枚数が膨大となるが網羅性は高い。(①高橋脚の事例)と(②床版の事例)は、比較的位置関係がしっかり記録できた事例である。

### ① 高橋脚の事例（4径間連続箱桁PC高架橋）

高橋脚の点検は、特殊高所技術と呼ばれるロープアクセスにより近接目視で行われる(写真6-1, 写真6-2)。この事例は、4径間連続箱桁PC高架橋の第二橋脚(高さ44m, 桁高10m)の側面の点検記録(損傷図)である。図6-5は、赤線が近接目視で記録されたひび割れであり、青線が飛行型ロボットにより記録された画像をもとにトレースしたひび割れである。

近接目視点検によって作成された損傷図(図6-5)には、図中⑦⑧⑨のひび割れのみが引き出し線により記録されているが、点検調書に損傷写真が添付されたのは⑦のひび割れのみであった(写真6-3)。ひび割れ⑦について橋梁点検ロボットが撮影した画像と比較した結果、ひび割れの位置は、実際の位置よりも下方向に1900mmずれていることが確認できた。近接目視点検で確認したクラックと比較すると平均950mmが上下方向に相違があることが判った。ロープアクセスでは、橋桁を起点に作業を行うため下に離れるほど誤差が大きくなるも考えられる。また、損傷図に記載されたひび割れ⑦の形状は、損傷写真とは異なり、もし写真が無ければ、後年に比較することも難しいと思われる。

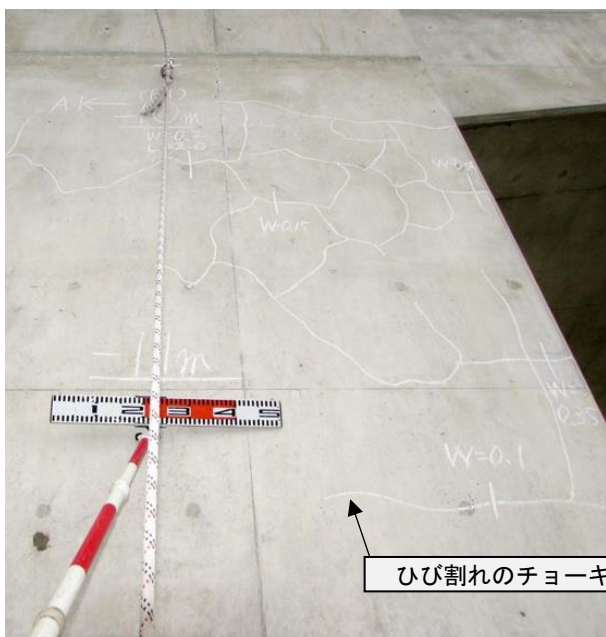


写真6-1 高橋脚側面での損傷位置の記録



写真6-2 高所特殊技術による点検の様子

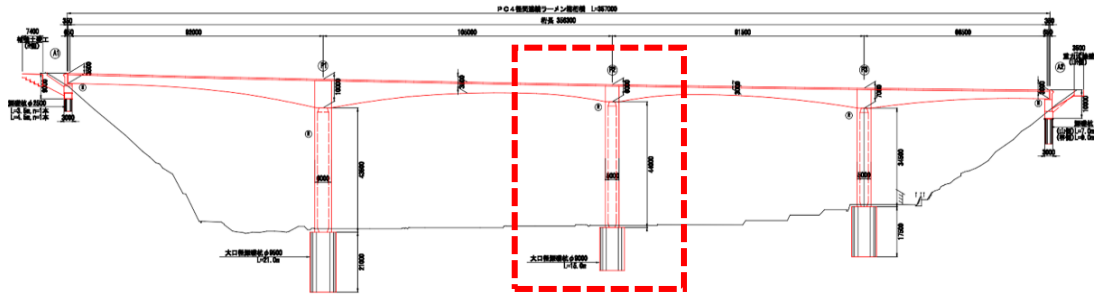


図6-3 検証対象の一般図

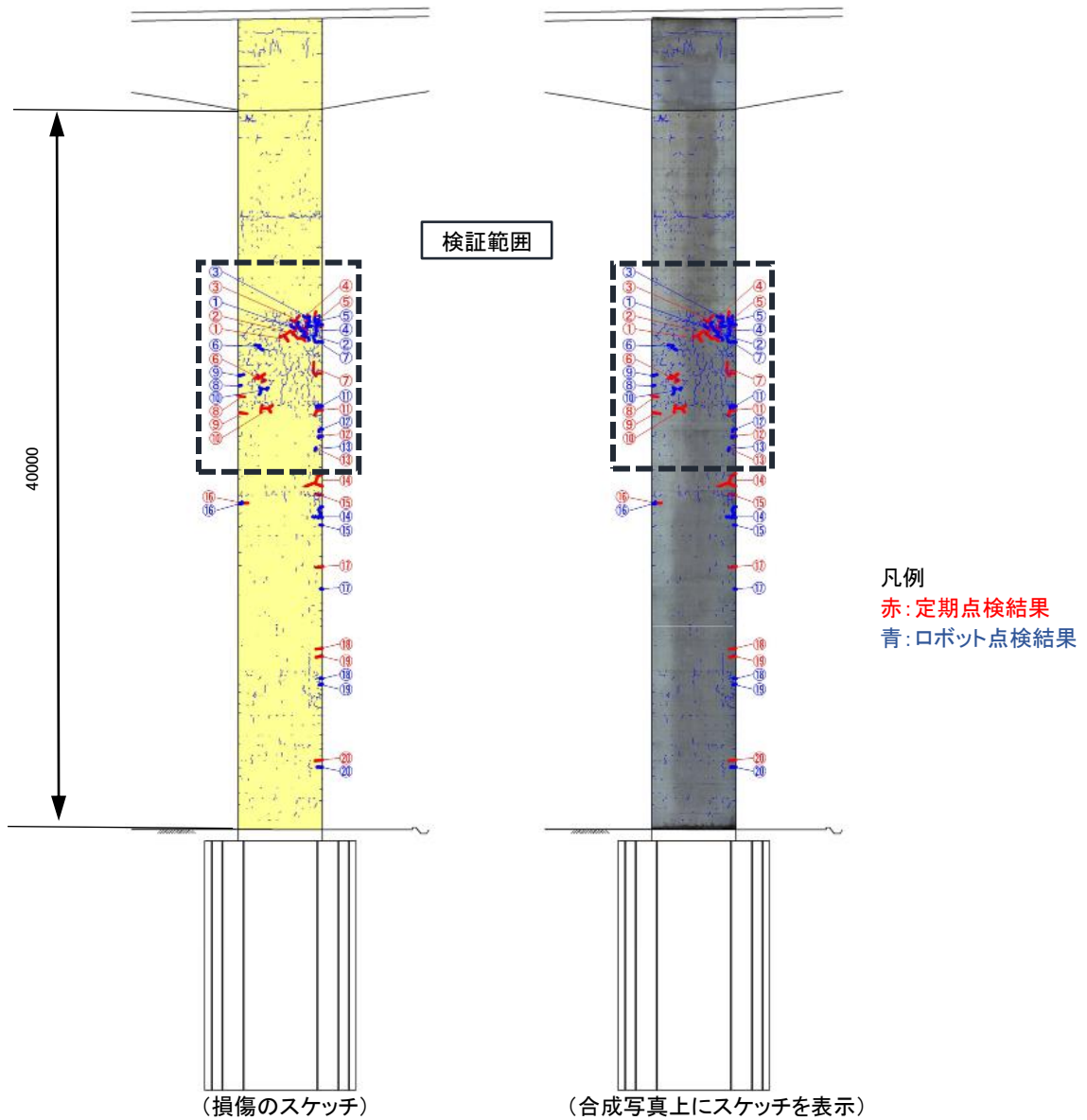
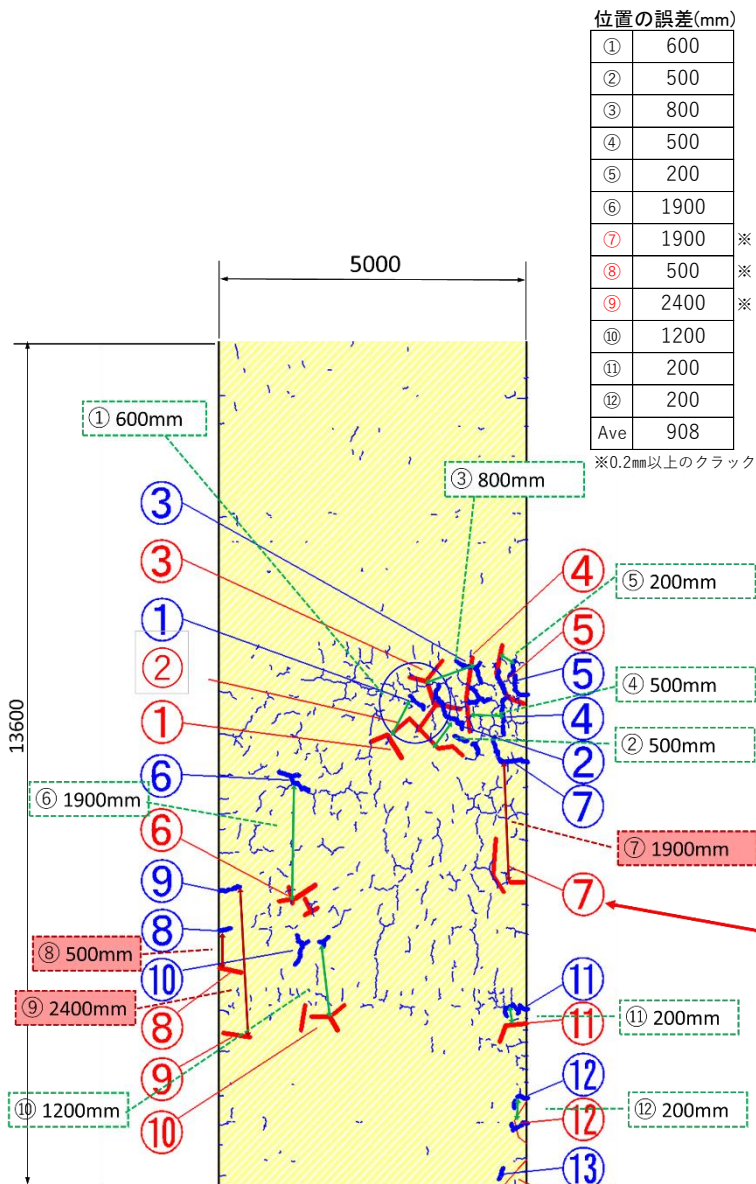


図6-4 高橋脚における損傷位置記録精度の検証範囲

出所: 国土交通省次世代インフラ用ロボット現場検証データを基に作成





凡例

- 赤: 定期点検結果に記載のあった「ひび割れ」  
うち、⑦⑧⑨のひび割れのみ「損傷写真」が残っている。
- 青: 点検ロボットが撮影した画像から検出した「ひび割れ」



写真6-3 定期点検報告書に添付されたひび割れ⑦の写真

図6-5 高橋脚側面での損傷位置の比較

出所: 国土交通省次世代インフラ用ロボット現場検証データを基に作成

## ② 床版の事例（鋼 5 径間連続トラス橋の場合）

この事例は、1 径間が長さ 80m×幅 12m の連続トラス橋の床版の点検記録（損傷図）である。一般的に橋梁の床版の点検記録は、径間毎に点検範囲を区分して作成される。ここでは 1 径間を 80 分割し各パネルに対して要素番号を付与し管理している（図6-6）。なお、要素番号図は損傷の経年変化を知るため、前回の点検記録から更新してはならないとされている。各パネルのサイズは、図面にあるとおり 2,650 mm×5,000 mm である。

床版は 5 本の鋼主桁の上に設置され、斜めの線は横構である。写真3は、床版の1パネルを比較したもので、橋梁点検ロボットが撮影した画像から、床版のパネル 1 枚あたり9枚の画像を合成した後に作成している。赤線が近接目視で確認されたひび割れの記録であり、青線がロボットの画像からトレースした記録である。点検員が作成した過去の点検記録と比較すると、ひび割れの位置が最大 1700 mm、平均すると 500 mm～1000 mm の位置記録精度に違いが見られた。画像を根拠とするロボット点検の方が位置精度では、優れていることが判る。また、画像からは、損傷図には記載されず判らない大小クラックの方向や間隔、貫通クラック周辺の漏水状況が確認でき、損傷進行の判定に有益な情報が得られることが判る。

0101		0103		0105		0107		0109		0111		0113		0115	
0201	0202	0203	0204	0205	0206	0207	0208	0209	0210	0211	0212	0213	0214	0215	0216
0301	0302	0303	0304	0305	0306	0307	0308	0309	0310	0311	0312	0313	0314	0315	0316
0401	0402	0403	0404	0405	0406	0407	0408	0409	0410	0411	0412	0413	0414	0415	0416
0501	0502	0503	0504	0505	0506	0507	0508	0509	0510	0511	0512	0513	0514	0515	0516
0601		0603		0605		0607		0609		0611		0613		0615	

図6-6 床版の要素番号図（事例）

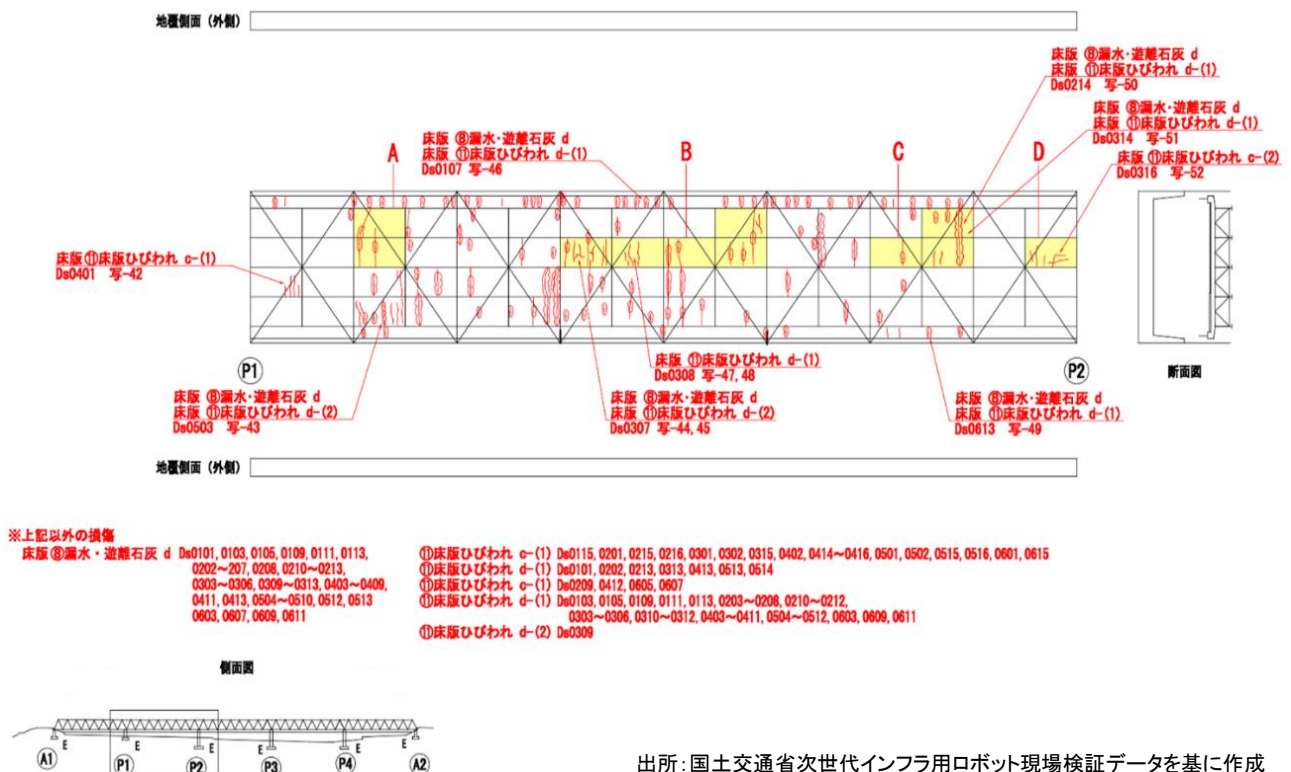
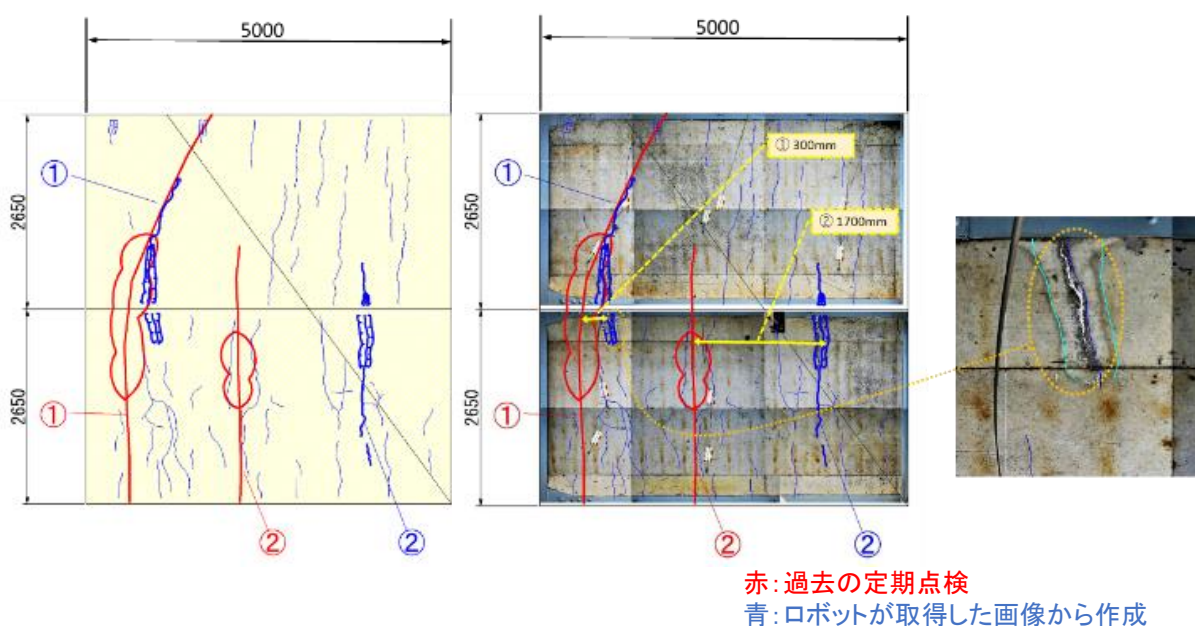


図6-7 床版の損傷展開図（事例）

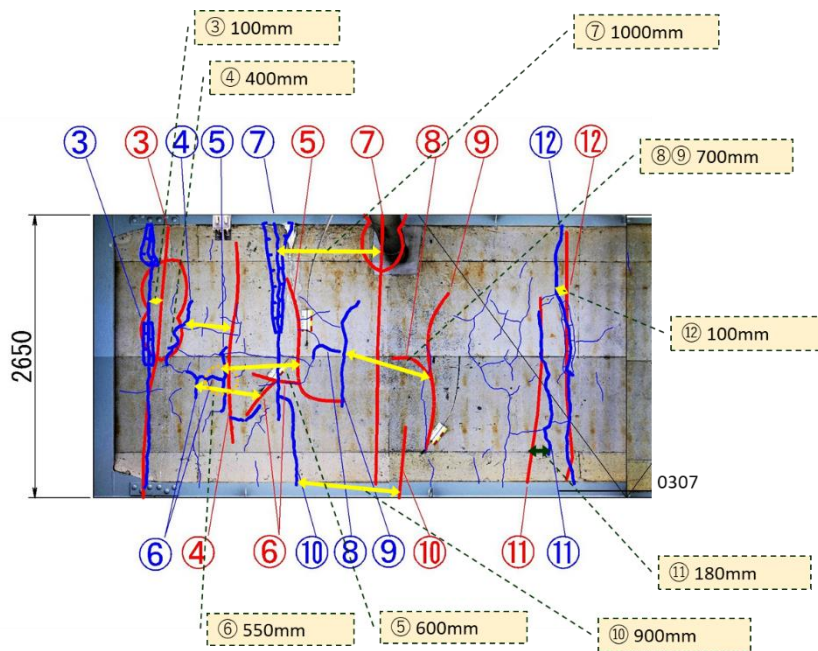
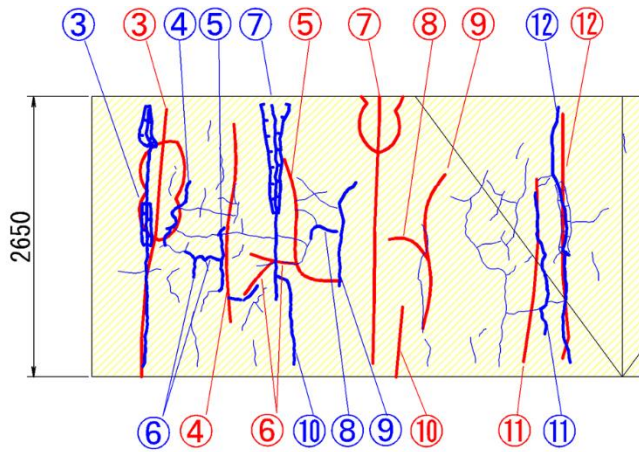


出所:国土交通省次世代インフラ用ロボット現場検証データを基に作成

図6-8 点検員の作成した損傷図と合成画像から作成した損傷図の比較

図6-8は、図6-7に示した検証範囲(区画 A)について定期点検の結果と点検ロボットの画像を比較したものであり、点検記録ロボットが撮影した画像から、床版のパネル 1 枚あたり9枚の画像を合成した後に作成している。赤線が近接目視で確認されたひび割れの記録であり、青線がロボットの画像からトレースした記録である。点検員が作成した過去の点検記録と比較すると、ひび割れの位置が最大 1700 mm、平均すると 500 mm~1000 mmの位置記録精度に違いが見られた。画像を根拠とするロボット点検の方が位置精度では、優れていることが判る。また、画像からは、損傷図には記載されず判らない大小クラックの方向や間隔、貫通クラック周辺の漏水状況が確認でき、損傷進行の判定に有益な情報が得られることが判る。

図6-8左の画像は、定期点検で作成された実際の損傷図の抜粋である。人が近接目視で確認した結果を記載している。赤線で描かれたひび割れに加え、漏水と遊離石灰の範囲を囲み線で記録している。右側は、橋梁点検ロボットで撮影した画像を合成したのち、損傷をトレースし描きこんだものである。これらを比較するとひび割れの位置に、最大 1700 mmの相違が確認できた。位置の違いだけでなく、漏水と遊離石灰の状態についても写真からは正確に読み取ることができる。また、中央の拡大写真は、ひび割れの周りに白い析出物が見られること、その外縁を漏水が確認できることから、貫通ひび割れの可能性も読み取れる。



位置の誤差(mm)	
③	100
④	400
⑤	600
⑥	550
⑦	1000
⑧	700
⑨	700
⑩	900
⑪	180
⑫	100
Ave	523

出所:国土交通省次世代インフラ用ロボット現場検証データを基に作成

図6-9 区画Bでの損傷位置の比較

図6-9の上段の図は、定期点検で作成された実際の損傷図の抜粋である。点検員が近接目視で確認した結果を記載している。図6-8と同様にひび割れに加え、漏水と遊離石灰の範囲が記録されている。下段のロボットが撮影した画像をもとに作成した損傷図と比較すると、位置の違いは最大1000mm、平均523mmであった。床板のひび割れは、0.05mm以上を記録するとされているため、確認された微細なひび割れも検出していることが判る。また、床板が繰返し载荷による疲労破壊の有無を確認し、予防保全が有効な場合は対策の要否を判断することになる。上段の点検記録では、膨大な面積を目視で確認しているため全てを詳細に記録していないと考えられるが、下段の画像は、クラックの方向とパターン、格子状クラックにまで損傷が進行した場合の角落ちの有無が画像から確認できることから有効である。

## 6.2.2 ひび割れの位置記録精度に関する考察

### ①近接目視によるひび割れの位置記録精度

現行の点検では損傷の位置の記録精度について定量的な要求が示されていない。実際に橋梁点検では人が損傷の近傍まで移動し、損傷の位置をおおまかに構造物の特徴から推定し記録が行われている。その意味では、位置記録精度は点検員の判断に依存していると言える。比較的関係が明確な2つの事例の比較であるが、点検員が作成した損傷図に記録された損傷の位置とロボットが記録したひび割れ位置の間には、相当な開差があることを確認された。点検対象表面に目印となる特徴が乏しく、単調で位置関係の記録が困難と思われる高橋脚(事例1)では、最大2,400 mmの相違、目印となる構造物が多く比較的関係性を記録しやすいと思われる床版(事例2)でも最大1,700mmの相違が確認された。ロープアクセスを必要とする高架橋の橋脚の点検では、橋桁からの距離に目当てをつけて記録が行われている。これらは一部の点検記録に対する分析に過ぎないが、現状における損傷位置の記録精度にバラつきがあり、正確さに欠ける可能性を示すものでもある。

仮にひび割れの形状や発生位置について、現状の点検方法のまま記録精度の向上だけを求めることは、点検員の負担を相当増加させることにも繋がり合理的でないことも明らかである。特に床版のひび割れは、ひび割れ一つ一つの位置や形状が重要ではなく、パターンとして損傷程度を判断するため、位置精度を求めてこなかった。この程度の損傷位置の差異について疑問視することはなかったと言える。むしろ、ひび割れの形状についても、写真に写したチョーキングから作成しているため、ひび割れが写らない損傷写真では形状もチョーキング画像のみが手がかかりとなる。

実務的に損傷の記録に対して位置記録精度を求めていないことから(常識的な範囲では求めているが)、これまでに作成された損傷図に記載された損傷の形状や位置について、記録精度を分析しないが、道路管理者が保有する点検調書(損傷写真)においては、必要に応じて前回の定期点検(5年前)に撮影した損傷写真を並べて示すことがある(図6-10)。これは、損傷の進行を示すニーズがあることを意味しており、過去の健全な状態との比較を含めて、位置情報を残すことへのニーズがあることを裏付けている。

点検調書(その6) 損傷写真		径間番号	1	起点側	緯度	経度	終点側	緯度	経度	橋梁ID	278
フリガナ		路線名		管轄				橋梁コード			
橋梁名		距離標	自 百米標95.2km + 距離20m 至 百米標95.4km + 距離0m	管轄				調査更新年月日			
所在地	自 至			管轄				最新点検年月日			
写真番号	9	径間番号	1	撮影年月日	2016.11.22	写真番号	10	径間番号	1	撮影年月日	2011.12.14
部材名	支承本体	要素番号	0102	メモ		部材名	支承本体	要素番号	0102	メモ	
損傷の種類	腐食	損傷程度	b	腐食(小ハ)		損傷の種類	その他(任意)	損傷程度		前回写真 423 05防食機能の劣化-c(分類-1) *進行あり アンカーボルトBa0102は健全	
											
点検時の支承装置				前回点検時の支承装置							
写真番号	11	径間番号	1	撮影年月日	2016.11.22	写真番号	12	径間番号	1	撮影年月日	2016.11.22
部材名	支承本体	要素番号	0302	メモ		部材名	落橋防止システム	要素番号	0101	メモ	
損傷の種類	防食機能の劣化	損傷程度	c	(分類-1) アンカーボルトBa0302は健全		損傷の種類	腐食	損傷程度	b	腐食(小ハ) 05防食機能の劣化-e(分類-1) 落橋防止システムSF0201も同様 *新規	
											

図6-10 損傷写真に見られる経年変化の比較(赤枠：今回点検、青枠：前回点検) 国土省資料を基に作成

### ② 損傷位置の記録に関する橋梁点検ロボットの優位性

一方、橋梁点検ロボットで取得した画像は、構造物の全面(ロボットが撮影できる範囲)をカバーすることから、多数の画像を合成処理する必要はあるが、位置精度を推定することが可能であり、損傷位置を正確に記録することに関しては、ロボットの画像に優位性があると言える。

なお、橋梁点検ロボットで取得した画像から損傷の位置を推定する場合、カメラの機能で個々の写真にGPS座標を

組込む方法もあるが、その場合、損傷の位置ではなく画像の撮影位置が記録されるため、損傷の位置をより正確に推定するためには、航空写真測量と同様に複数の画像を正射変換し、それらをつなぎ合わせる必要がある。現在の橋梁点検では、人が撮影した損傷写真を平面図上で管理するため、手作業で行う場合相当の手間と時間を要し効率的ではない。近年、コンピュータビジョンの分野では、カメラで撮影した複数の画像から、各画像の撮影位置を推定し、同一地点に対するそれぞれの画像の視差から対象物全体の3次元モデルを生成するSfM (Structure from Motion) と呼ばれるソフトウェア技術が、様々な分野で応用されている。この複数の画像をSfM処理することで生成された3次元モデルは、多くの点群データ(3次元 point cloud)で表現され、モデルの再現精度は、カメラの画素数、焦点距離、対象物までの距離、重複率(二方向の重複率;オーバーラップとサイドラップ)に影響される。また、こうして生成された3次元モデルは、画像上の特徴点を自動的に解析することで点群の相対的な位置関係を推定するため、画像上の特徴点に位置座標を与えることで、正確な大きさや位置を特定することができる。

そこで、橋梁点検ロボットが取得した画像から3次元モデルの生成の可能性について、飛行型ロボット(UAV)を用いて、実際の橋梁を撮影した画像から検証を行い、SfMを用いて生成した3次元モデルから損傷位置を良好な精度で推定できることを確認した。SfM処理機能を有するソフトウェアは市場での調達が可能であり、近年はクラウド上に画像データをアップロードすることにより、3次元モデル化処理が自動で行えるサービスも事業化されている。

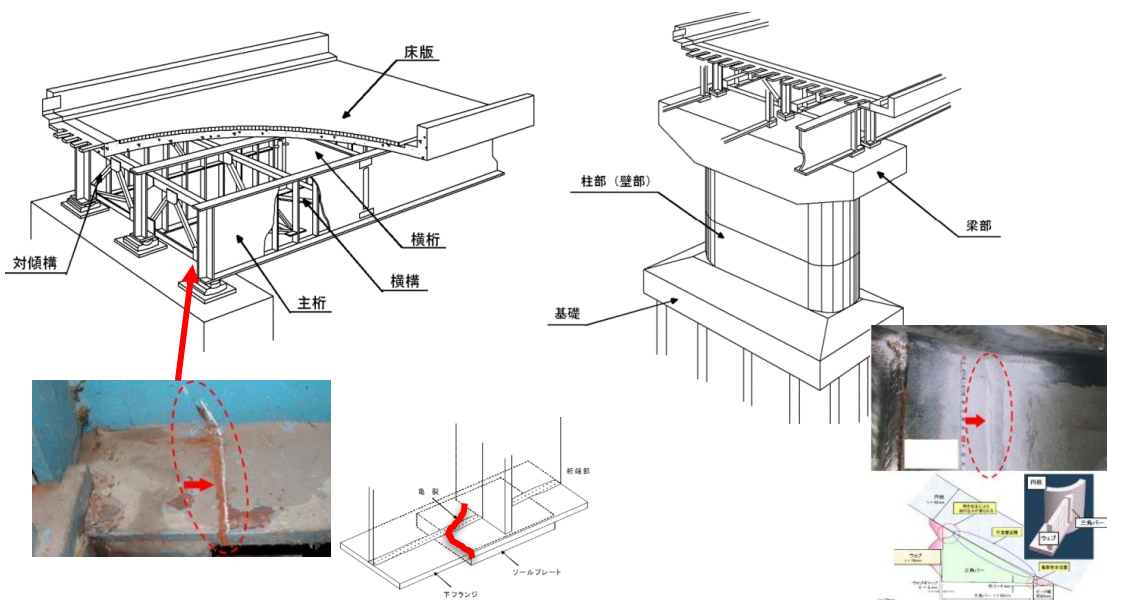


図 6-11 橋梁点検写真管理の難しさ

国交省資料を基に作成

## 6.3 分解能から見たひびわれ検出能力の分析

### 6.3.1 画素寸法によるひび割れ幅推定に関する考察

コンクリート構造物の点検では、「ひび割れ」の検出に際し「ひび割れ幅」と「ひび割れ長さ」を測ることが要求される。一般に近接目視点検では、点検員がクラックスケール等を用いて計測した「ひび割れ幅」と「ひび割れ長さ」を損傷図に記載し、必要に応じてチョーキングと一緒に撮影したものを、損傷写真として記録する。この時撮影される損傷写真には、必ずしもひび割れが写っていない。これは、損傷写真から、ひび割れ幅等を計測することがないからであり、計測は現地で行われることから写真からはチョーキングなどでひび割れの大概の位置が確認できれば良いとされている。

一方で、橋梁点検ロボットを点検に用いる場合は、目視点検に先立って撮影されることから、ひび割れの位置や長さ、幅が画像から計測できることが要求される。この点が、人が撮影する画像と橋梁点検ロボットが撮影する画像の間の大きな違いである。

前述のとおり国交省の現場検証では、画像からひび割れの検出精度を「判読可能率」を用いて評価が行われた。ここで「判読可能率」とは、点検員が近接目視で記録したひび割れのうち評価対象である画像から熟練技術者3名が揃って判読できる判断したひび割れの割合と定義された。橋梁点検ロボットが搭載するカメラについて、ひび割れの識別能力を評価するならば、カメラのレンズ仕様や画素数(解像度)、撮像素子(イメージセンサ)の大きさ等からも光学的な分解能に着目して性能を評価することも考えられるが、点検現場の多様性や環境の影響を考慮し、カメラの仕様から推定される性能ではなく、最終的な画像を評価対象として、「ひび割れ等の損傷の検出能力」を評価している。

その結果、ひび割れの判読可能率は、平均的な橋梁点検ロボットで50%程度、最も優れたロボットでも80%程度に

とどまっている。判読可能率が低くとどまっている原因の一つには、人の作成した点検記録を評価基準としていることがある。加えて、判読可否の判断を「プリントされた画像」あるいは「ディスプレイに表示された画像」に対して人の識別能力によって行ったことも、要因として考えられる。

そこで、損傷画像を画素レベルで視認できるところまで拡大し、ひび割れ幅の推定の妥当性について検証した。画像は、画素が識別できるレベルまで拡大すると図6-12に示すようなグリッドになる。今、画素サイズが 0.1 mm の画像で 0.1 mm 幅の直線を撮影し映像化すると、①～④に示すように、①ひび割れと画素がちょうど重なるケース、②ひび割れが二つの画素に部分的に重なるケース(ここでは、1/3 と 2/3)、③ひび割れが二つの画素に同じ割合で重なるケース(ここでは、1/2 と 1/2)、④ひび割れが画素のタイルに対して斜めに位置したケース、が考えられる。この場合、各画素は、カラー画像の場合、R(レッド)・G(グリーン)・B(ブルー)の三原色に 255 階調で表現される。各素子の濃淡は、ひび割れの重なる割合によって表現される。各々の受光素子に入る光子の数に比例して色の階調が決まる。

この場合、ひび割れ幅の推定は、色調に着目して判断することで原理的には可能と考えられるが、人の目で定量化することは難しいし、実務上は非効率である。しかし、画像の仕様が明らかな場合は、画像認識技術や AI のディープラーニングによりひび割れ幅の識別を可能とする技術開発は、いくつかの試みが報告されている。

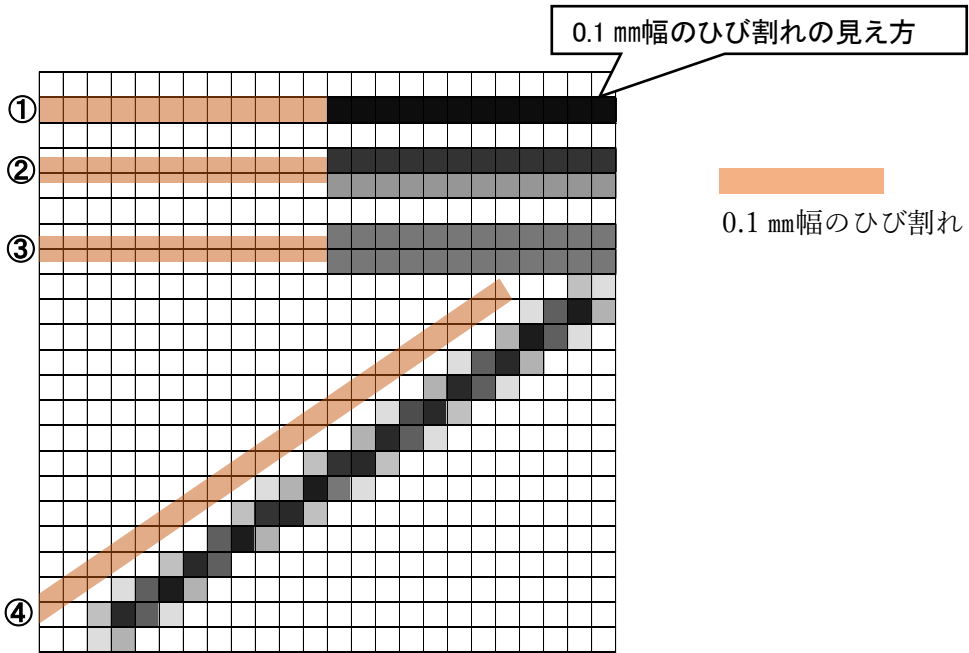


図6-12 ひび割れを画素レベルまで拡大した場合の見え方のイメージ

国交省の現場実証では、点検現場を取り巻く様々な制約や環境条件を考慮し、カメラの仕様から推定される検出能力ではなく、橋梁点検ロボットに搭載し実際に撮影した画像を対象に「ひび割れ等の損傷の検出能力」を評価した。その結果、ひび割れの判読可能率は、平均的な橋梁点検ロボットで 50%程度、最も優れたロボットでも 80%程度にとどまっている。

判読可能率が低くとどまっている要因には、撮影条件や画角等がバラバラだったことが考えられる。加えて、この判読可能率の評価に際して、人の作成した損傷図を評価基準とし、評価対象にうつった損傷の判読可否を「プリントされた画像」あるいは「ディスプレイに表示された画像」に対して、画像を拡大することなく評価を実施したことも要因として考えられる。

そこで、撮影位置(焦点距離)から対物画素寸法が明らかとなる前提のもと、損傷画像を画素レベルで視認できるところまで拡大し、ひび割れ幅の推定の妥当性について検証した。

### 6.3.2 画素寸法の違いによるひび割れの見え方

点検ロボットを用いて橋梁の点検画像を撮影すると、被写体との距離や角度といった撮影条件の違いによって、たとえ同一の損傷であっても見え方が大きく変化する。ひび割れ撮影時の焦点距離や撮影角度の違いに応じて1画素が表現するひび割れの寸法も異なってくる。点検ロボットで撮影したひび割れの大きさを明らかにするためには、画像の撮影条件から、1画素あたりの寸法(以降、「対物画素寸法」とする)を推定する必要がある。加えて前述のとおり、対物画素寸法だけでなく、輝度や明度等の1画素で表現できる階調も重要な情報となる。

本研究では、実際の橋梁点検画像におけるひび割れの識別能力の評価方法を考察するために、土木研究所内に

ある実橋梁のカットモデル(写真 6-4)を用いてひび割れ画像を撮影し画素寸法の違いによる見え方の違いを検証した。なお、撮影は、主桁及び地覆部コンクリート表面のひび割れを対象に、市販の 4200 万画素のカメラ(ソニー製  $\alpha 7 II$ )を使用し、対物画素寸法が 0.1~1.0 mm/pixel になるよう部材表面の法線方向に撮影距離を 6 段階に分け画像を取得した(表6-3)。



写真6-4 クラックの撮影を行った土木研究所内の実橋梁カットモデル

表 6-3 クラックの撮影条件

センサ諸元 【使用カメラ: sony $\alpha 7 II$ 】	焦点距離 (mm)	センサーサイズ 横(mm)	センサーサイズ 縦(mm)	画素数横	画素数縦	素子サイズ/mm		画素数
		35	35.9	24	7952	5304	0.004515	
画角横 (垂直方向)	撮影距離 (m)	撮影範囲 横/m	撮影範囲 縦/m	写真間 基線長率	写真間 基線長	コース間 基線長率	コース間 基線長	地上画素寸法 (mm)
	0.8m	0.82m	0.55m	0.2	0.16m	0.4	0.33m	<u>0.10mm</u>
	1.6m	1.64m	1.10m	0.2	0.33m	0.4	0.66m	<u>0.21mm</u>
	2.4m	2.46m	1.65m	0.2	0.49m	0.4	0.98m	<u>0.31mm</u>
	3.0m	3.08m	2.06m	0.2	0.62m	0.4	1.23m	<u>0.39mm</u>
	5.0m	5.13m	3.43m	0.2	1.03m	0.4	2.05m	<u>0.64mm</u>
	8.0m	8.21m	5.49m	0.2	1.64m	0.4	3.28m	<u>1.03mm</u>
※1 撮影範囲(横・縦) = 撮影距離 ÷ 焦点距離 × センサーサイズ(横・縦)								
※2 写真間基線長 = 撮影範囲(横) × 写真間基線長率								
※3 コース間基線長 = 撮影範囲(横) × コース間基線長率								
※4 地上画素寸法 = 撮影距離 ÷ 焦点距離 × 素子サイズ								



### ① 撮影距離の違いによる見え方の違い

橋桁の表面にある幅 0.20mm のひび割れを正対方向に異なる距離から撮影した画像を示す(写真6-5)。ここに示す画像は、表6-3の条件に基づき撮影した画像を市販ソフトウェアにより引き延ばし拡大したものである。これらの画像から、対物画素寸法の1/3程度まではひび割れを識別できる可能性を確認できた。このように画像の撮影距離の違いにより同じひび割れ幅であっても見え方が大きく異なり、対物画素寸法がひび割れ幅の3倍を超えると識別できない(ひび割れが記録できない)ことが判る。UAV などを用いて点検画像を撮影する場合は、これら画像を撮影したカメラの場合は、点検対象に 5.0m より接近する必要があると言える。また、ひび割れの識別は、必ずしも画素寸法だけで決まるものではなく、明度などの画素が保持する階調の情報と合わせ評価する必要があると言える。

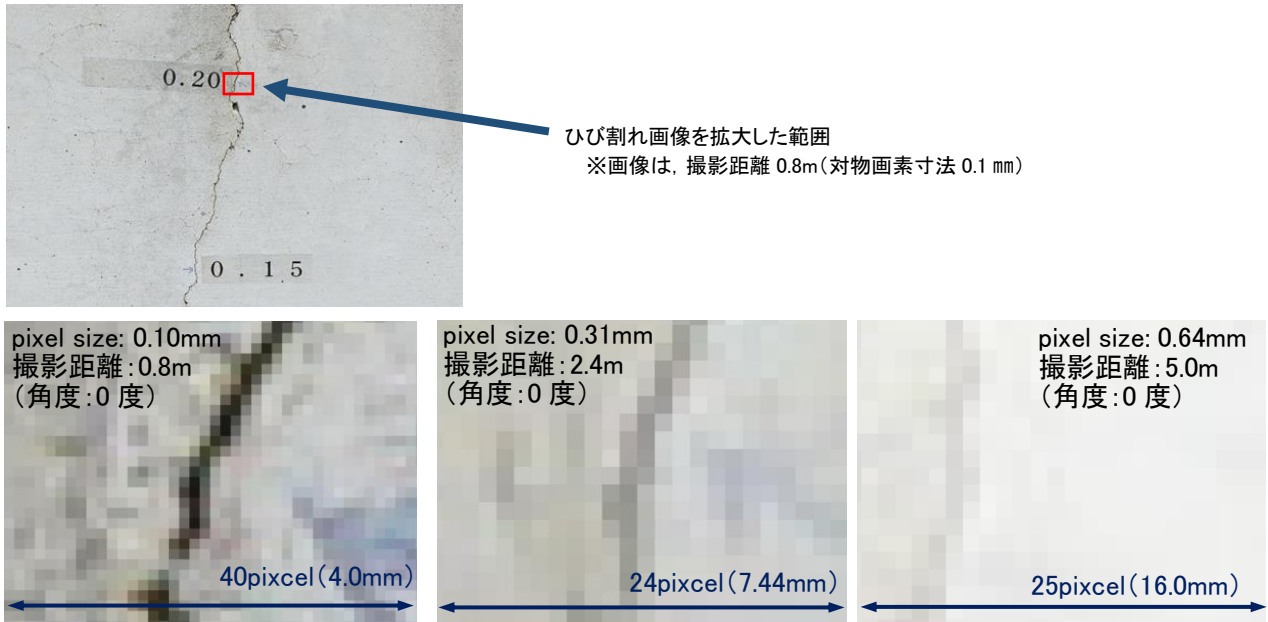


写真6-5 距離の違いによるひび割れの見え方の違い

### ② 回転による見え方の違い

前項で示した幅 0.20mm の同一のひび割れを、カメラを正対方向に向けたまま、撮影方向を軸に 45 度回転させて写した画像を示す(写真6-6)。カメラを回転させることにより画像の見え方が若干変化するものの、ほぼ同一のひび割れ形状を再現できていることが確認できた。これらの画像から、同じひび割れを同じ距離から撮影する場合、撮影方向が同じであればカメラが回転しても、ひび割れの識別には影響がほとんどないことが判る。この画像は対物画素寸法が 0.1 mm であることが予め判っているが、画像から最大ひび割れ幅を推計する場合、ひび割れ直角方向に2~4画素に跨って黒い影の部分が判読できる。

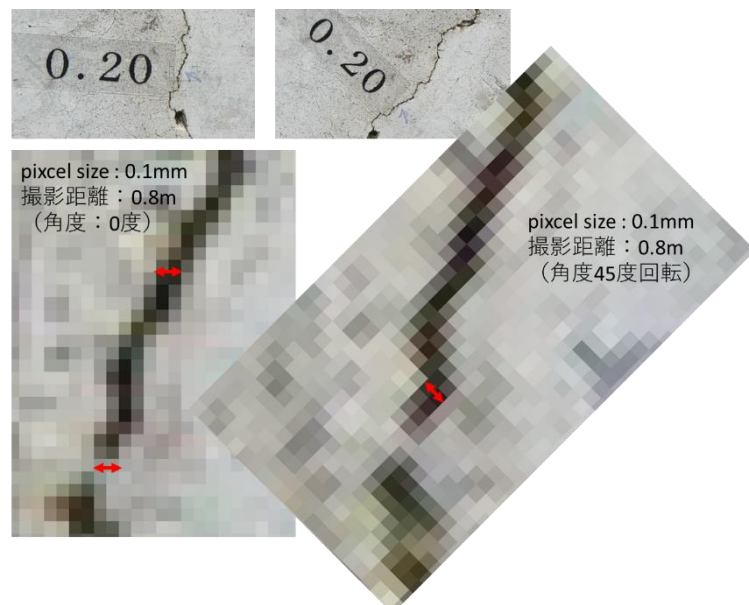


写真6-6 回転によるひび割れの見え方の違い

### ③ 色調の違いによる見え方の違い

同じ幅のひび割れであっても、使用材料や建設時期の違いによって色調が異なることがある。建設後時間が経過するとコンクリート表面が変色し黒ずむことがある。色の変色し黒ずんだコンクリートと白っぽいコンクリート表面のひび割れの画像の比較を行った(写真6-7)。ひび割れ検出においては、コンクリート表面が変色した場合と、白っぽい場合では、ひび割れの見分けやすさが違うことが判る。

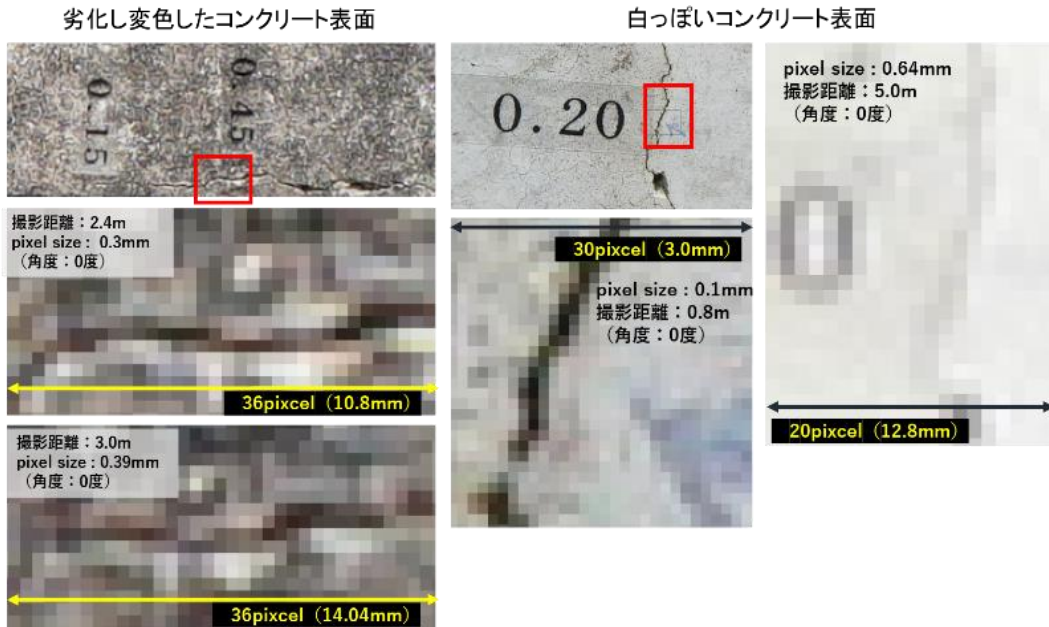


写真6-7 画素レベルでのひび割れの見え方の違い

### ④ 撮影角度の違いによる見え方の違い

同じ幅のひび割れであっても、角度の違いによって実際よりもひび割れ幅や長さが小さく見える。例えば、斜め45度から撮影するとひび割れ幅は、画像は  $\text{COS}45^\circ$  倍(0.71倍)に見える。実際の画像で比較すると部材の形状は、見え方が大きく異なる(写真6-8)。一方、ひび割れの拡大画像(写真6-9)では、画素サイズがひび割れ幅の1/2程度であることから肉眼では見分けることが難しいが、対物画素寸法が異なるため、角度を考慮すれば画像からひび割れの大きさを推計できる。

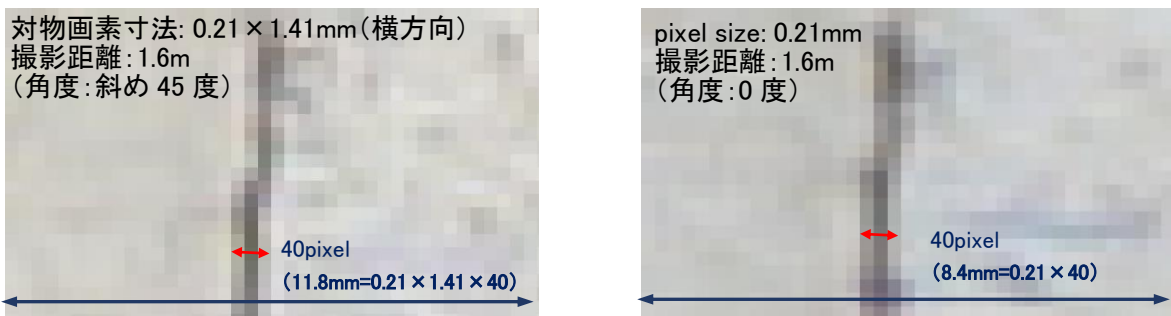


写真6-9 撮影角度の違いによるひび割れ(拡大)の見え方の違い

### 6.3.3 幾何補正によるひび割れ検出精度の確保

前項までの分析からも、点検画像からひび割れ幅を識別することは、表面の色味やコントラストにも影響され一概には言えないが、概ね画素サイズの3分の1程度までは識別できる可能性を確認できた。画素レベルでの損傷識別能力を分析したことで、対物画素寸法を考慮した撮影を計画すれば、UAV など飛行型ロボットに搭載した市販カメラでも、3m 程度の離隔から0.1 mm程度のひび割れ検出も可能であることが判る(ただし、ロボットの位置制御と撮影が確実に行われることで、空間分解能と明度や彩度の諧調が確保された画像であることが前提である)。

橋梁点検作業で把握することを求められるひび割れの検出精度は、管理者によってことなるが、直轄管理橋のPC橋では幅0.1 mm程度のひび割れまでを記録することとしている。また、RC橋脚などでは幅0.2 mm程度のクラックを検出すればよいことから、UAV などを用いて撮影した画像からひび割れが検出できれば、実務的には相当大きな効果が期待できる。

しかし、UAV などを用いて画像を撮影する場合、必ずしも構造物に正対できるとは限らない。構造物表面に対して斜め方向から撮影した画像は、見かけ上ひび割れ幅が細く見えてしまうことから、仮に幅0.2 mm以上の斜め方向から撮影する前提で全てのひび割れを検出する場合には、点検ロボットの空間解像度は、0.2 mm以下の損傷を検出できることが要求される。本節では、画像の幾何補正によるひび割れ検出精度確保の可能性について考察する。

構造物の表面に対してカメラの撮影方向が既知の場合(図6-13)に、カメラの撮影方向ベクトルを用いてホモグラフィ一行列による点検画像の射影変換等により正対画像に補正することが可能である。

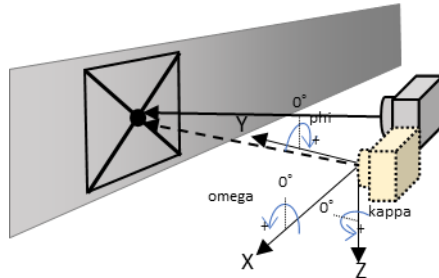


図6-13 点検画像の撮影方向による補正

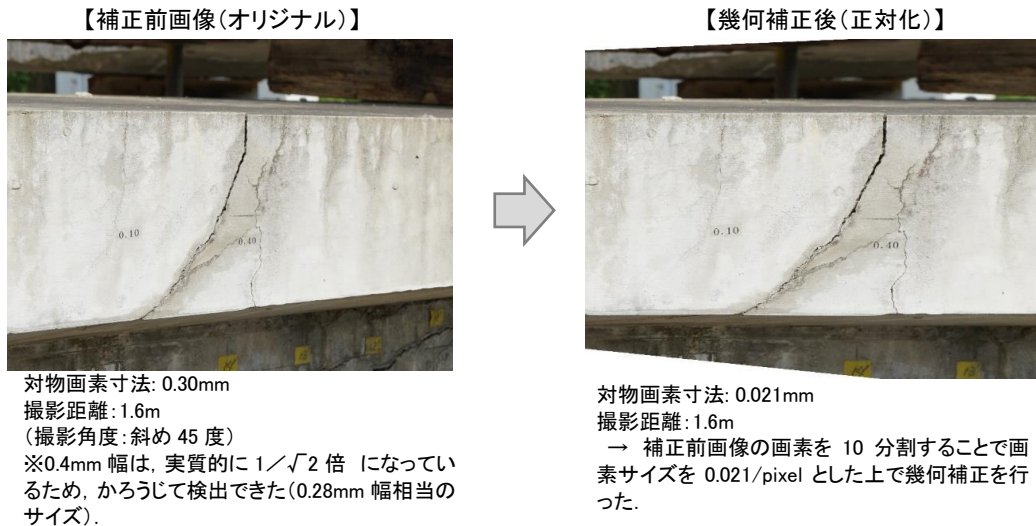


写真6-10 斜め 45 度から撮影した点検画像の正対化補正

画像の幾何補正については、留意すべきことがある。写真6-10 に示す補正前画像から幾何補正すると、ひび割れを表現するための最小画像構成要素である画素のサイズが 0.3 mmであることから、それ以下の変化については明度などの階調情報でしか表現されない。そこで、補正前画像をソフトウェアにより細分化(1画素を水平方向に10分割)したのちに水平方向に幾何補正を行った(写真6-10右)。その時の幾何補正前後の画像を拡大し比較したところ、補正前の1画素(細分化後は10画素)で表現していたひび割れが14画素で表現されていることが確認できた(写真6-11)。このことから、点検画像について撮影位置や撮影方向、点検対象との距離・角度等の撮影条件を用いて、点検画像を幾何補正することにより、ひび割れ等の大きさを推定できる可能性を確認することができた。

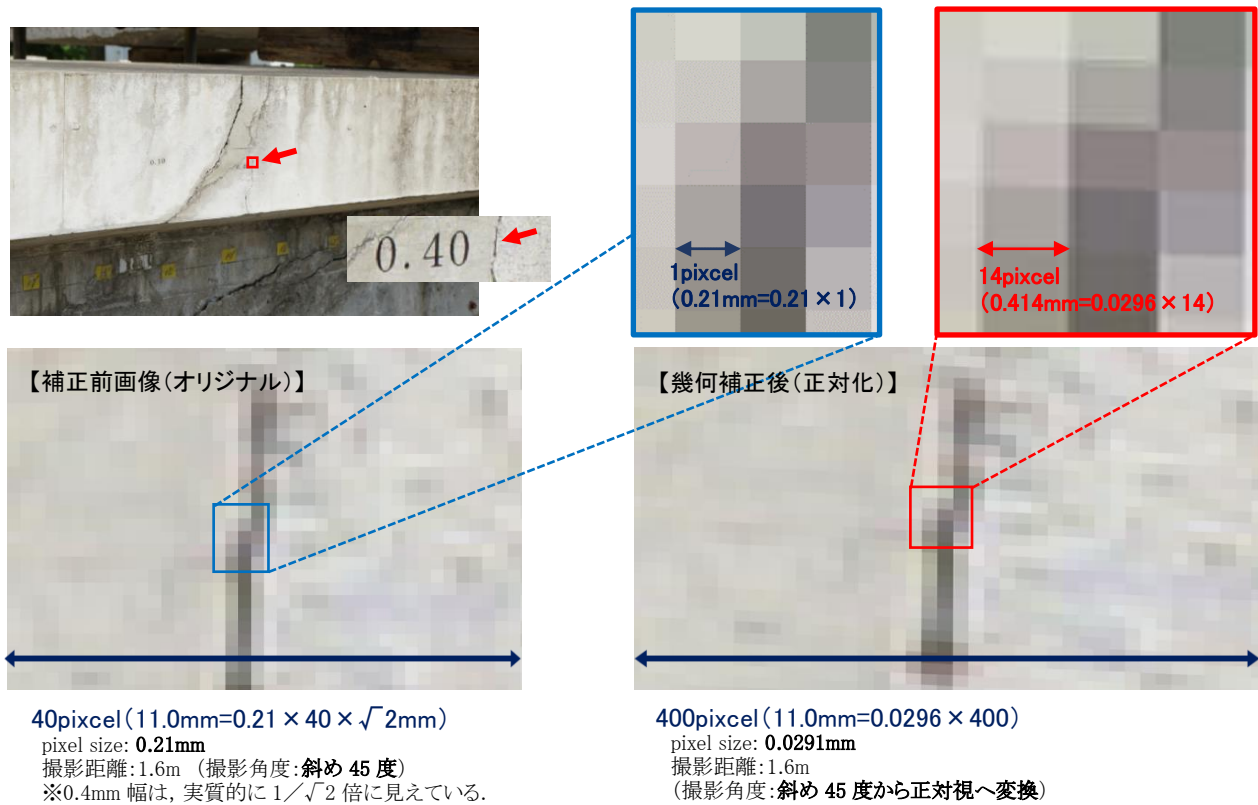


写真6-11 画素細分化後の幾何補正によるひび割れ画像の変化

橋梁点検の実務では、ひび割れの有無を確認するだけでなく、最大ひび割れ幅やひび割れ長さ、ひび割れの方向や間隔を確認し記録することが求められる。これらのひび割れの大きさ等を画像から推定するためには、撮影条件(カメラの焦点距離、対物距離、部材表面の法線と撮影方向の相対角度)を把握する必要がある。3次元空間上における点検画像の撮影条件の推定に関しては後述するが、本項では点検画像の分解能に着目し橋梁点検に求められる検出精度を確保するための考察を行った。

## 6.4 網羅的に撮影された点検画像の優位性

### 6.4.1 画像記録範囲から見たロボットの優位性

ここでは、点検ロボットを用いて網羅的に撮影された画像について、点検成果の視点からみた優位性について考察する。一般的に行われる人の近接目視点検では、点検員は損傷や変状を確認した箇所のみ画像を撮影するため、構造物全体に亘って網羅的に画像が記録されることはない。人が撮影した損傷写真は、点検調書の中に矢印を用いて展開図上に撮影位置を明記することによって管理される。これは不必要に画像を増やさない点からも、合理的な方法であったと言える。しかし、点検を行った者以外には損傷位置を確認することが難しく、損傷の見落としや誤認などの単純なミスについても施設管理者は確認することが出来ない状況にある。さらに6.2節でも述べた通り、人が行う損傷の位置記録精度にはバラつきがあることが明らかであり、5年毎に行われる定期点検において、前回の点検で事実と異なる位置に記録された損傷を発見するために割かれる労力や、点検記録の修正に費やされる労力に関して改善の余地がある。

本研究では、この点に着目し橋梁点検ロボットから得られる大量の画像から生成可能な“位置関係が明らかにされた画像”のもつ優位性について整理する。

まず、人の近接目視点検で記録される画像と、橋梁点検ロボットを用いた画像の記録範囲の網羅性の違いに着目し、a)～d)の4パターンに分類した(図6-14)。先に述べたとおり人の近接目視点検では、画像が記録される範囲が損傷発生部位に限定されるため画像の網羅性がないことから、画像から損傷位置の推定できない(右端d)のケース。構造物の表面を全面に亘って撮影した場合には、画像から全ての損傷について位置を確認することが可能となる(左端a)のケース)。また、実際の橋梁点検は様々な環境条件の下で行われるため、飛行型ロボットで撮影する場合にも風雨や支障物の影響により全面撮影できない場合もある(左から2・3番目、b)c)のケース)。この様な場合では、全ての損傷の位置を確認することは出来ないものの、画像の相対的な撮影位置が判ることから損傷位置の推定は可能である。橋梁点検ロボットのためのインフラマーカーなどを用いることで点検対象の画像の網羅性が乏しい場合でも損傷位置の推定が可能である。

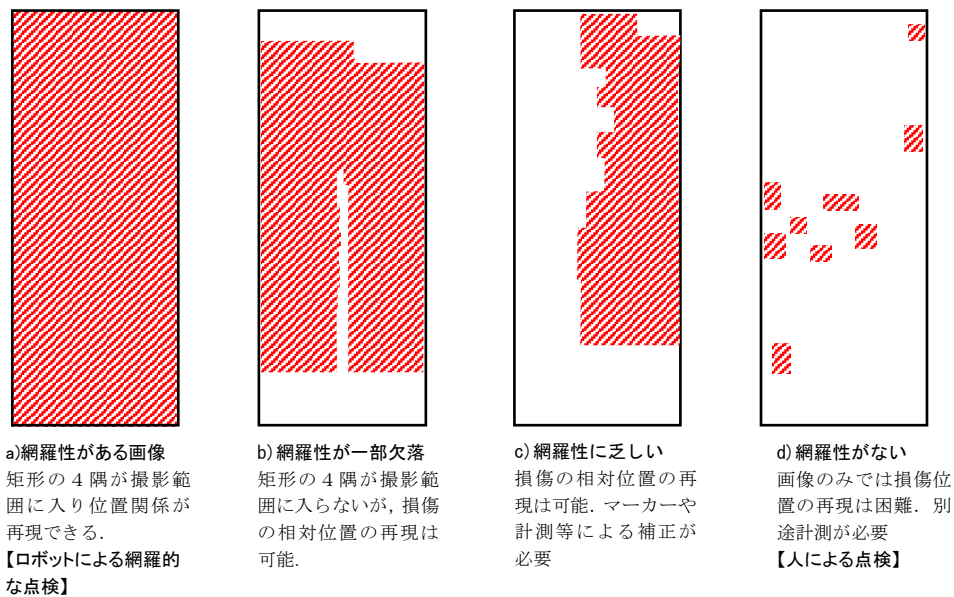


図6-14 人と点検ロボットの画像撮影範囲の違い

次に、画像撮影範囲の網羅性に違いがあることを踏まえ、いくつかの事例を用いて点検業務における有用性を考察する。

まず、網羅的に撮影が行われた事例を示す(図6-14のa)に相当)。図6-15は、飛行型ロボットを用いて撮影した橋梁の点検画像を合成し作成した点検調書(旧橋梁定期点検要領に基づく損傷図(様式5))である。図中には引き出し線によって多くの損傷位置が示されているが、そのうちの1つ写真番号15に示す損傷写真を図6-16に示す。また比較のために同一の橋梁を対象に、現在一般的に行われている近接目視点検によって作成された点検調書(旧橋梁定期点検要領に基づく損傷図(様式5))を示す(図6-17、図6-18)。

図6-17に示す損傷図は、橋梁の径間毎に展開図を作成し“矢印”と“引き出し線”を用いて損傷の位置を示すとともに“損傷の種類”と“損傷程度の評価”、“写真番号”、“損傷の発生した部材番号”が記される。飛行型ロボットで撮影した画像から作成した損傷図(図6-15)についても、同様の内容が記載されており同等であることが判る。さらに損傷図において写真番号が示された損傷については、当該損傷を撮影した損傷写真が別の様式に整理される(図6-18)。

飛行型ロボットで取得した点検画像を合成することによって作成した点検調書においても同様の損傷写真を作成することが可能である(図6-16)。このことから、点検ロボットにより全面的な画像が取得できる場合には、人の近接目視点検と同等の損傷図を作成することが可能であることが判る。さらに、この事例では損傷図に示した展開図に合成写真を重畳することにより、個々の損傷の位置関係の正確さを担保している。目視点検により作成された点検調書では、損傷の位置関係の正しさが担保できないことは、「6.2 人によるひび割れの位置記録能力に関する分析」において考察したとおりである。

また、点検ロボットで取得した画像を合成することによって、画像の位置関係と損傷位置を推定する方法は、点検員が作成した損傷図に比べ損傷の位置を確認できる点においては同等であるが、損傷写真の全体に対する位置関係や撮影に漏れがある場合に容易に確認することができる点も有利な点である。特に補修の可否を現場において確認する際には、現状で行われる平面図上に図示された矢印のみを頼りに探す場合に比べて、周辺の画像と連続的な状況を確認できることから効率的に損傷を特定することが可能である。

しかし、これらのモザイク画像を用いて損傷図を作成するためには従前と同じ作業プロセスに加えて写真合成処理を行う必要が生じるため、調書作成作業だけに着目すれば経済性が低下することになる。

幸久橋

第8径間

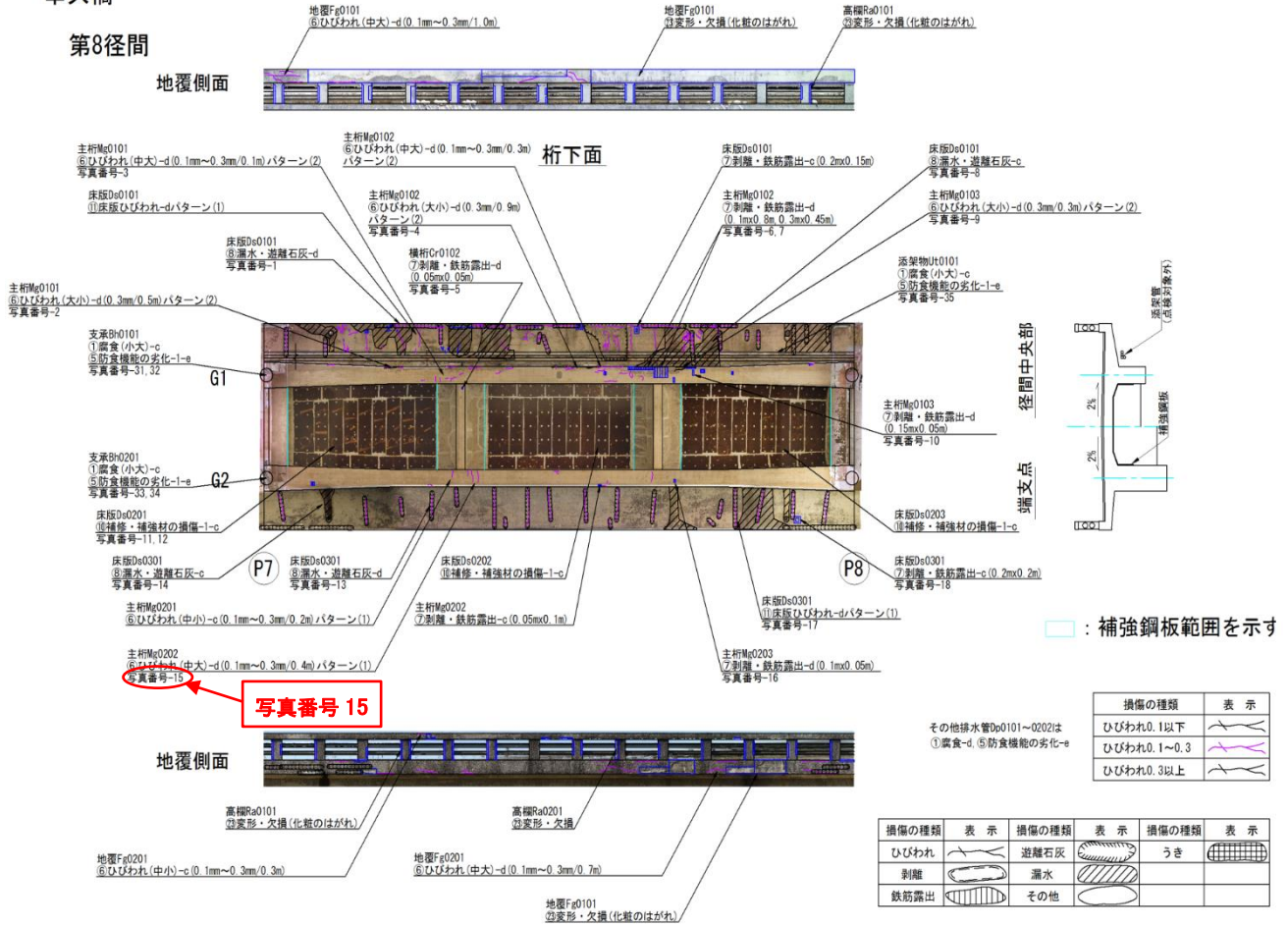


図6-15 飛行型点検ロボットの画像を合成し損傷図を作成した例

国土交通省次世代インフラ用ロボット現場検証報告書より

ルーチェサーチ作成

写真番号	15	径間番号	8 <th>撮影年月日</th> <td></td>	撮影年月日	
部材名	主桁	要素番号	0201	メモ	
損傷の種類	ひびわれ	損傷程度	d	ひびわれ0.1~0.3mm L=400mm×2箇所 L=200mm×1箇所 L=100mm×1箇所	

図6-16 飛行型ロボットで撮影した主桁下面の損傷画像(点検調書から抜粋)

国土交通省次世代インフラ用ロボット現場検証報告書より

ルーチェサーチ作成

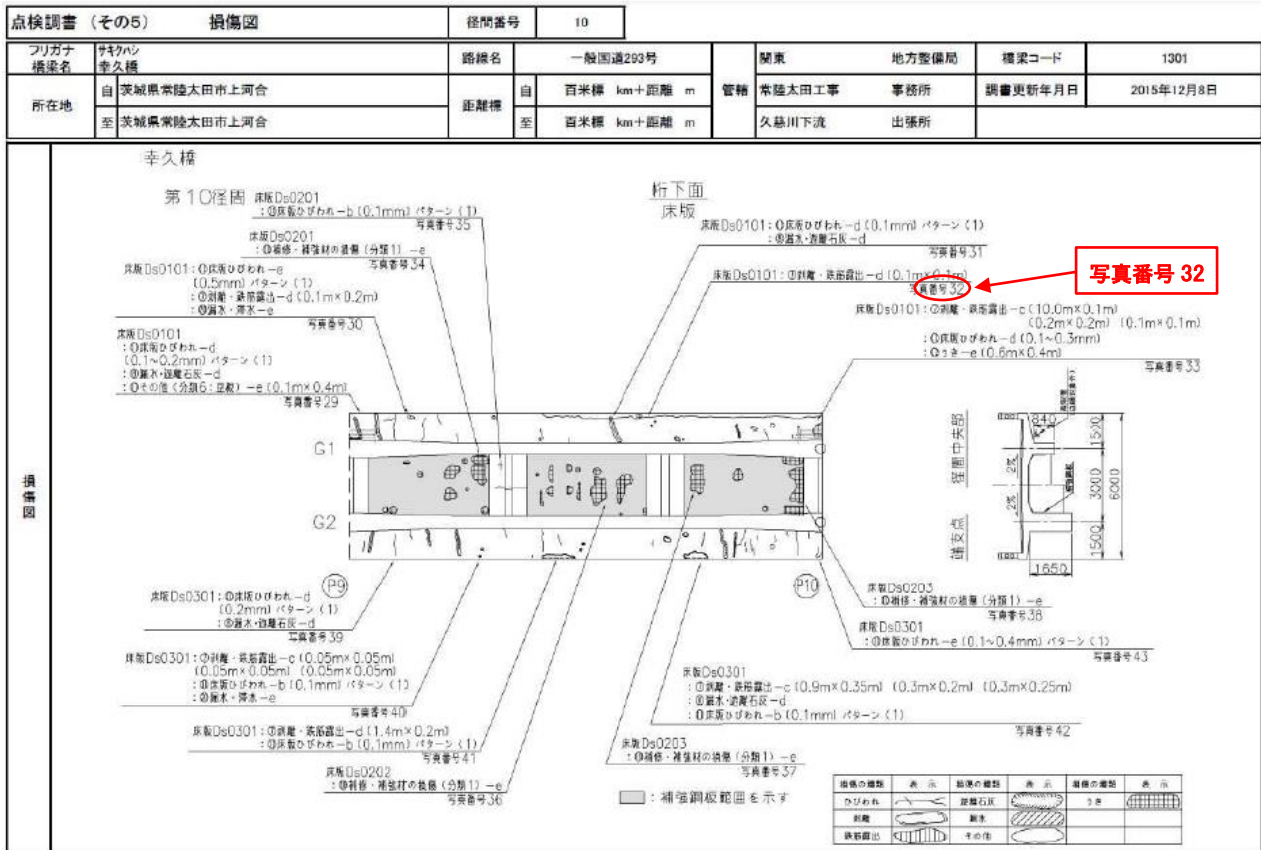


図6-17 一般的な橋梁点検で作成される損傷図(検証用に作成されたもの)

出所:国土交通省次世代インフラ用ロボット現場検証報告書より

点検調査 (その6)		損傷写真		径間番号		10	
フリガナ 橋梁名	サキカン 幸久橋	路線名	一般国道293号	関東	地方整備局	橋梁コード	1301
所在地	自 茨城県常陸太田市上河合	距離標	自 百米標 km+距離 m	管轄	常陸太田工事 事務所	調査更新年月日	2015年12月8日
	至 茨城県常陸太田市上河合		至 百米標 km+距離 m		久慈川下流 出張所		

写真番号	31	径間番号	10	撮影年月日	2015.11.18	写真番号	32	径間番号	10	撮影年月日	2015.11.18
部材名	床版	要素番号	0101	メモ		部材名	床版	要素番号	0101	メモ	
損傷の種類	漏水・遊離石灰	損傷程度	d	上流側突出し床版に床版ひびわれ(幅0.1mm)及び、遊離石灰が見られる。 【今回点検他損傷】 ①床版ひびわれ-d		損傷の種類	剥離・鉄筋露出	損傷程度	d	上流側突出し床版に鉄筋露出(0.1m×0.1m)及び、剥離(0.05m×0.05m)が見られる。	
写真番号	33	径間番号	10	撮影年月日	2015.11.18	写真番号	34	径間番号	10	撮影年月日	2015.11.18
部材名	床版	要素番号	0101	メモ		部材名	床版	要素番号	0201	メモ	
損傷の種類	うき	損傷程度	e	上流側突出し床版に床版ひびわれ(幅0.1~0.3mm)、うき(0.6m×0.4m)及び、剥離(10.0m×0.1m,0.2m×0.2m,0.1m×0.1m)が見られる。 【今回点検他損傷】 ①剥離・鉄筋露出-c ②床版ひびわれ-d		損傷の種類	補修・補強材の損傷	損傷程度	e	床版の補強鋼板にうきが見られる。	

図6-18 一般的な橋梁点検で作成される調書の損傷写真(検証用に作成されたもの)

出所:国土交通省次世代インフラ用ロボット現場検証報告書より



次に、網羅性に欠落がある事例を示す(図6-14のc)に相当). 同じく飛行型ロボットによる高橋脚の点検で撮影範囲に漏れがあった事例である(図6-19). 広範囲を詳細に視る必要がある構造物の点検では、気象等の要因により網羅的に画像取得できないことがある. 撮影範囲の網羅性を個々の画像からは判断することは困難できないが、撮影した範囲の合成画像を作成することで相対的な位置関係を判読できる場合がある. このケースでは網羅性に乏しいものの、橋脚の角とコンクリート打継目の位置から点検画像と損傷の相対位置を再現することが出来たことから、画像取得範囲を示すことが出来ている. 言い換えれば、画像の欠落した範囲も確認できることから、不足した範囲の補完を含め点検品質を管理することも可能であることが判る. このことから撮影した点検画像を連続的に撮影することで、点検を行った範囲と検出した損傷の位置を確認することができる点において有利であることが明らかである.

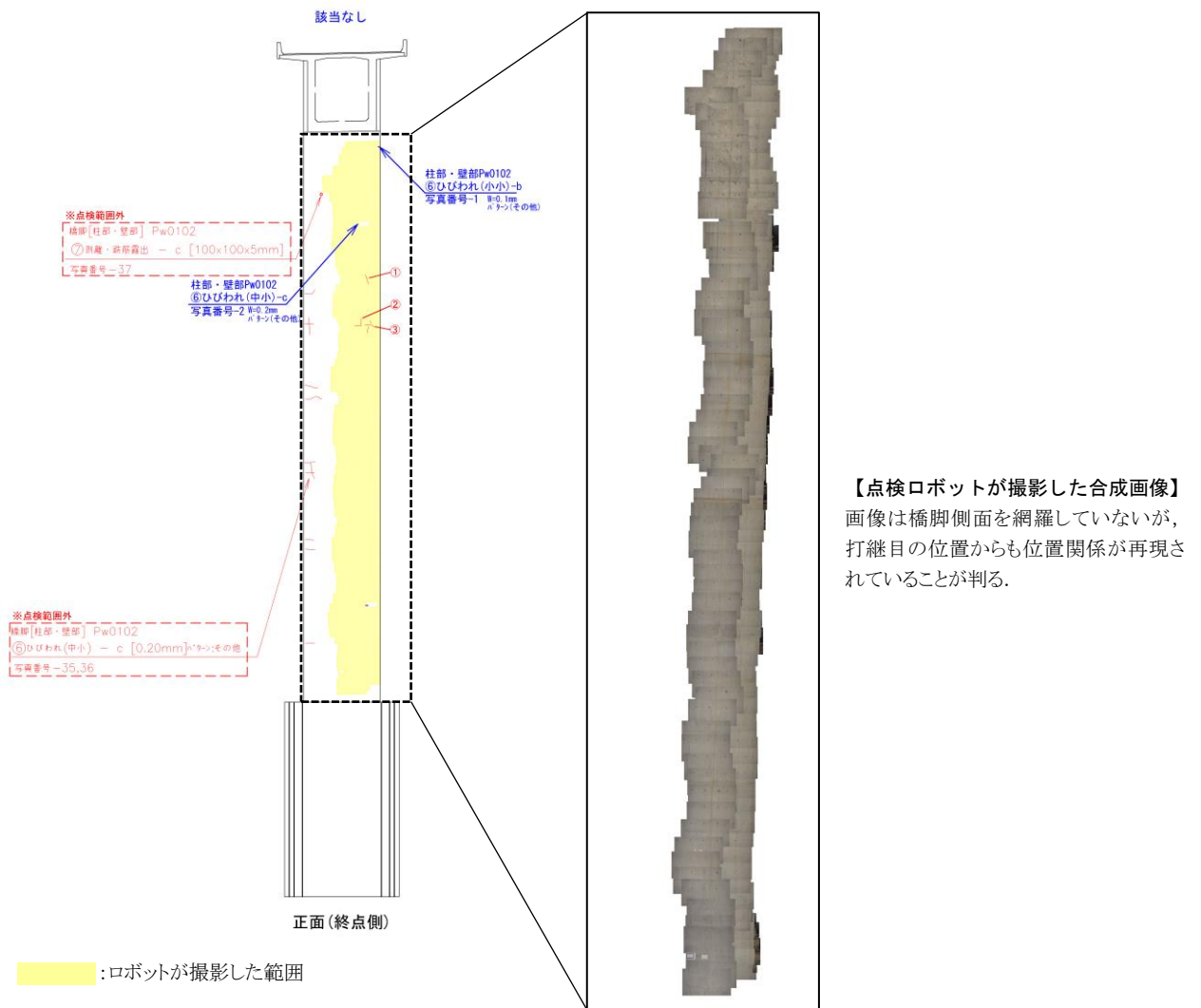


図6-19 飛行型ロボットが撮影した高橋脚の合成画像の例

出所: 国土交通省次世代インフラ用ロボット現場検証報告書より

### 6. 4. 2 点検画像の網羅性を確認する方法

次に、同じく飛行型ロボットによる鋼橋の床版部分の点検において撮影範囲の確認が困難であった事例を示す(図6-20)。これは撮影画像の一部欠落がある事例である(図6-14のc)に相当)。単調なパターンを繰り返す構造物の点検では、画像の特徴が乏しく撮影位置の特定が難しいケースがある。そのような場合でも連続的に撮影範囲を重複させながら撮影することで位置関係を明らかにすることが可能である。この事例では、撮影した角度や床版との距離の違いに応じて鋼材部が見え方が変化していることから位置関係の整理に手間を要した。この事例からは、点検画像の網羅性を確認するためには、画像の連続性や重複による補完が必要であることが判る。

以上から、橋梁点検ロボットを用いるメリットとして、点検範囲を網羅する適切に撮影された画像を合成することで損傷の位置関係を推定することが可能であり、人の目視点検に比べてより正確な損傷位置を示すことができる点で有利であることが確認できた。加えて橋梁を構成する全ての部材と要素を近接目視により点検することを求める現行の橋梁定期点検要領に対しても、橋梁点検ロボットの撮影範囲を明確に再現できる点において優位性があると言える。

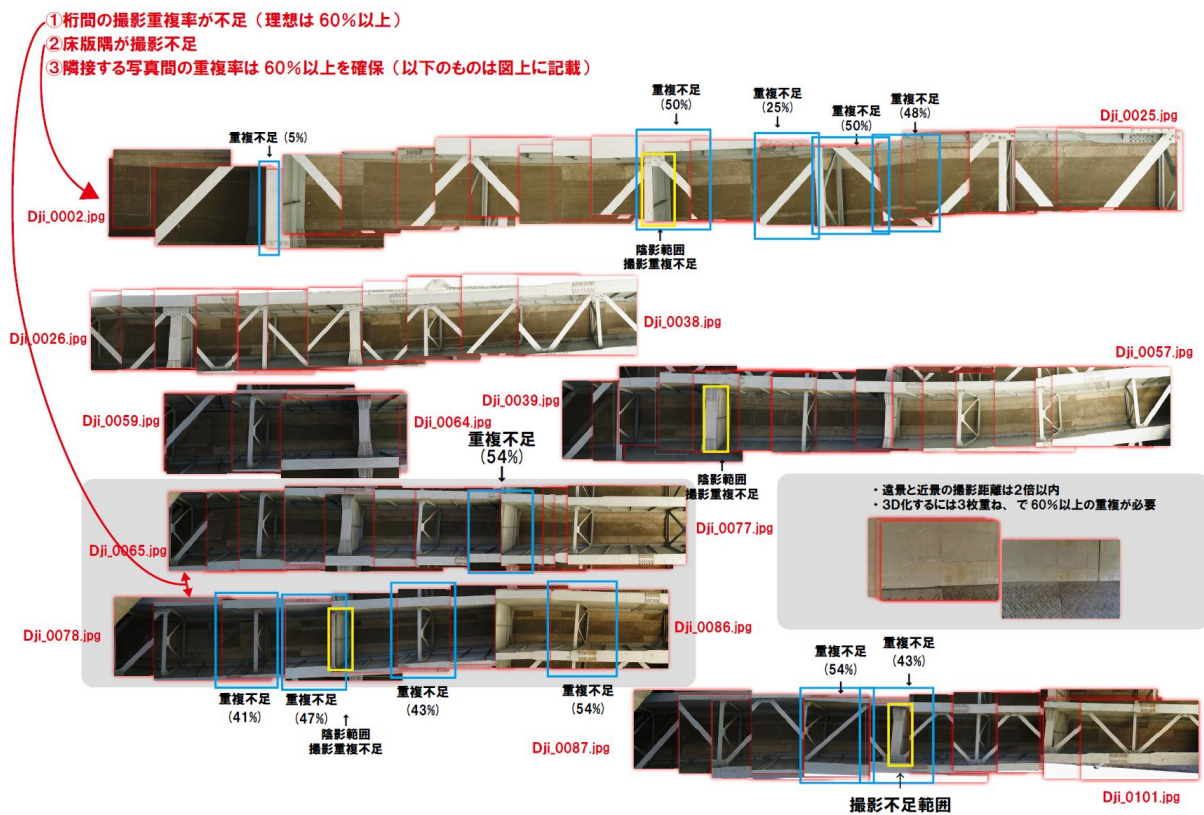


図6-20 飛行型ロボットが撮影した鋼製桁及び床版の合成画像の分析例

### 6. 5 橋梁点検ロボットの損傷記録能力における優位性

前節では橋梁点検ロボットを用いることで目視点検よりも正確に損傷位置を記録できること、ロボットを用いた場合に点検範囲(画像を取得した範囲)を確認できる点を明らかにした。

ここでは、橋梁点検ロボットを用いて取得した画像の撮影位置の推定に関する優位性を明らかにする。そのために、橋梁点検において求められる損傷位置の記録精度について述べる。次に損傷の発生位置を記録するための損傷画像の撮影位置や撮影方向・撮影範囲を3次元モデル上で表現管理するためにSfM(Structure from Motion)と呼ばれるソフトウェア技術を用いて橋梁の3次元モデルを構築するとともに、画像の撮影位置・撮影方向の推定精度について検証を行うことで橋梁点検ロボットの損傷記録能力に関する優位性を明らかにする。

### 6.5.1 橋梁点検において求められる位置記録精度

橋梁点検ロボットを用いた点検では、人の近接目視に先立ちロボットを用い網羅的に画像を取得することで、人による近接目視範囲を絞り込むことで効率化が図られる（図6-2 1）。その際、画像から確認した損傷や変状の位置記録精度は、人が確認すべき場所を特定するために必要な情報であり、その精度が低下すれば人の点検効率も低下する。一方で点検ロボットの移動経路と撮影位置・撮影方向・撮影角度は、わずかな揺らぎによって点検画像の画像中心の座標は影響を受ける（図6-2 2）。このため撮影経路や撮影位置、撮影方向を正確に制御することは極めて難しい。

著者の経験上、少なくとも点検員が指示された位置から、一目で損傷を視認できる程度の位置記録精度が必要であると考え、位置記録精度として損傷がある実際の位置から概ね 10 cm 程度の範囲を指示できる精度が必要と考える（図6-2 3）。

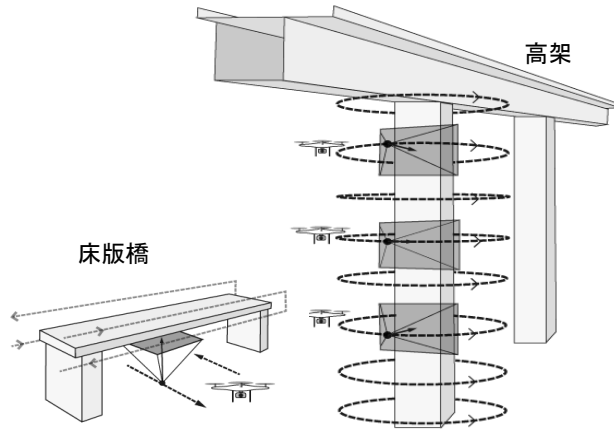


図6-21 飛行型点検ロボットによる撮影イメージ

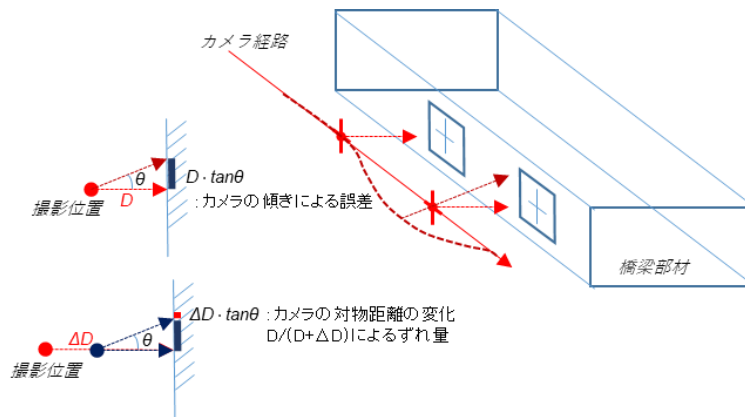


図6-22 飛行型点検ロボットの画像撮影時の誤差要因イメージ

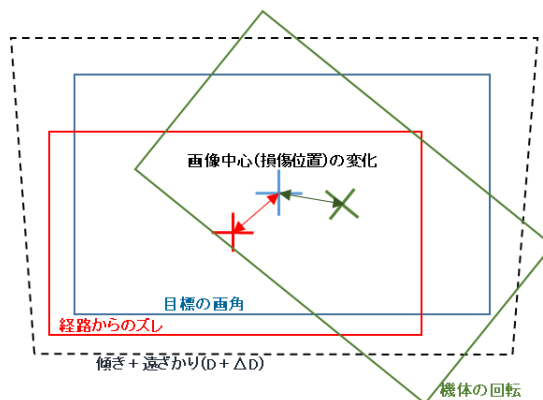


図6-23 点検ロボットの撮影時の姿勢による画像の違い  
～画像の位置記録誤差が 10 cm 程度に収まることが目標～

## 6.5.2 損傷記録精度に係る基礎的検証

ここでは、点検ロボットで撮影した画像について、損傷位置の記録精度を検証し点検ロボットから得られる画像の空間解像度推定への可能性等の利点について考察する。点検ロボットにより得られた大量の画像を用いるメリットとして、「撮影した点検画像から3次元モデルの構築が可能であること」、「3次元モデル上で点検時に撮影した画像の撮影位置と撮影方向ベクトルを可視化できること」、「3次元モデル上で損傷の位置推定が可能であること」の3点を挙げる事ができる。次にこれらの点検画像から構築した3次元モデルの精度、画像の撮影位置・撮影方向の推定精度、3次元モデル上での損傷の位置推定精度について検証した結果を示し、点検ロボットで取得できる画像の損傷評価における有用性を示すものである。

### 1) 取得画像から構築した3次元モデルの精度

橋梁部材の損傷位置を記録するためには、現状の点検調査書作成時に2次元展開図面を作成し引き出し線を用いて、径間番号、部材番号、損傷写真番号に関連付ける作業が必要となる。実座標で作られた3次元モデルと損傷の位置座標があれば、ソフトウェア処理により大幅なる省力化が可能となる。

そこで、画像から構築した3次元モデルがどの程度の精度で構築できているかを検証した。土木研究所内にある鋼製橋梁(写真6-12:2径間連続鈹桁橋:橋長40m,幅員8m,橋脚高さ約7.5m)を対象に、橋台、主桁下面、主桁側面をUAVに搭載した一眼レフカメラ(Sony製α7II)で撮影した、811枚の画像を用いて3次元モデルをSfMにより生成処理した。撮影は、国土交通省の「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」を参考に一定の重複率(隣接写真重複率80%,コース間重複率60%)の下で撮影を行った。なお、SfMによる処理に際しては、811枚に加えて、測量用反射プリズムを付けたカメラで撮影した画像を15枚使用し、これらの画像については、撮影位置座標及び撮影方向ベクトルを光波測距儀で計測し精度の検証を行った。

さらに、より効率的に3次元モデルを構築するために橋梁点検ロボットによる近接撮影とは別に、遠景画像を撮影することにより3次元モデルの構築を試みた。

飛行経路の設定は、道路橋上部のUAVによる飛行は、道路利用者の安全確保のために避け、橋梁から8mの離隔を取り飛行経路(撮影経路)を設定した。飛行経路は、①垂直撮影(高度40m)、②斜め撮影(高度20m)、③側面上段、④側面中段、⑤側面下段、の5経路として、垂直飛行により橋梁外周に基準点4点を設置し、基準点4点毎に3枚以上が画像に移るように設定した(図6-24)。撮影は、写真測量の考え方をベースとし、位置精度は「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」および「空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領」の±0.1m以内となるように計画した。

このようにして撮影した遠景画像から、SfMソフトウェア(ここではPix4d社製Pix4Dmodel)を用いて3次元モデルを構築した(図6-25)。なお、3次元モデルに付与した評定点4点の座標と実測値との誤差を示す(図6-25,表6-4)。構築した3次元モデルを構成する各部位においてどの程度の精度があるかを検証するために、標定点以外の検証点38点(上面、側面、橋脚、橋台各5点以上)を設定・測量し、3次元モデル上での検証点位置と比較を実施し、後述するが各検証点の位置ずれは、最大でX方向:0.025m, Y方向:0.031m, Z方向:0.041mであり、いずれも±5cm程度の精度を満たしていることが確認した。



写真6-12 検証対象橋梁(2径間連続鈹桁橋:橋長=40m,幅員=8m,高さ=7.5m(土木研究所内))

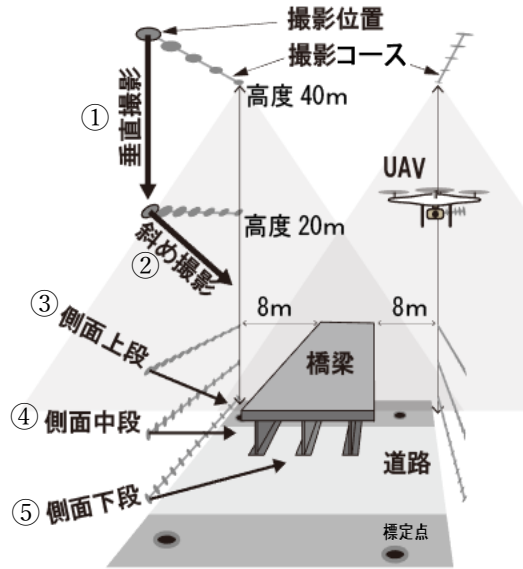


図6-24 遠景画像撮影のための飛行経路イメージ



図6-25 遠景撮影から構築した3次元モデル  
～評定点と検証点を表示(Pix4Dmodelで作成)～

表6-4 遠景画像から生成した3次元モデルの精度(評定点における実測値との差)

標定点名	X(m)	Y(m)	高さ方向(m)
T1	-0.002	0.007	-0.004
T2	-0.001	-0.002	0.005
T3	0.006	0.005	-0.004
T4	-0.003	-0.01	0.005
最大値	0.006	0.01	0.005
標準偏差	0.004	0.007	0.005

(水平位置と標高の制限値) 標準偏差=0.060m / 最大値=0.120m

## 2) 画像の撮影位置・撮影方向の推定精度

次に画像の撮影位置と撮影方向の推定精度について検証した。SfM ソフトウェアを用いて橋梁の3次元点群モデルを構築する過程で、3次元モデル生成に使用した画像の位置関係が推定できる。この機能を利用すれば、点群モデルの上に、点検画像の撮影位置と撮影方向ベクトルを可視化することが可能である。撮影位置と撮影方向が推定できれば、点検ロボットを過去に損傷を撮影した位置へ誘導し、同一の視点から損傷を観察することが可能となる。いわば定点観測を可能とするものであり、損傷の進行をより正確に評価できる可能性を上げることができる。さらに、「6.3分解能から見たひび割れの検出能力」で述べたとおり、撮影したカメラの位置から画像の空間分解能や撮影角度を用いてひび割れの大きさを定量化することが可能となる。

そこで、SfM から推定したカメラの撮影位置と撮影方向ベクトルの精度を実測により検証した。カメラ撮影位置と撮影方向の推定精度を検証するためには、撮影時のカメラの撮影位置と被写体の位置を正確に把握する必要がある。このため、SfM 処理に使用する画像のうち 15 枚については、撮影方向検証用の座標値が定まっている標定点を橋台、鋼製桁下面、鋼製桁側面に各 5 点設置し、カメラの画像中心が、標定点となるように撮影した。合わせて撮影位置を、カメラに測量用プリズムを取り付けることで、光波測距儀を用いて計測することにより正確な位置を把握した(図6-26)。SfM で構築した 3 次元点群モデルと光波測距儀で得られた画像の撮影位置情報を比較した結果、SfM で算出した撮影位置の実測値との誤差は、最大 3.4 cm であり、高い精度で推定できることが判った(表6-5)。

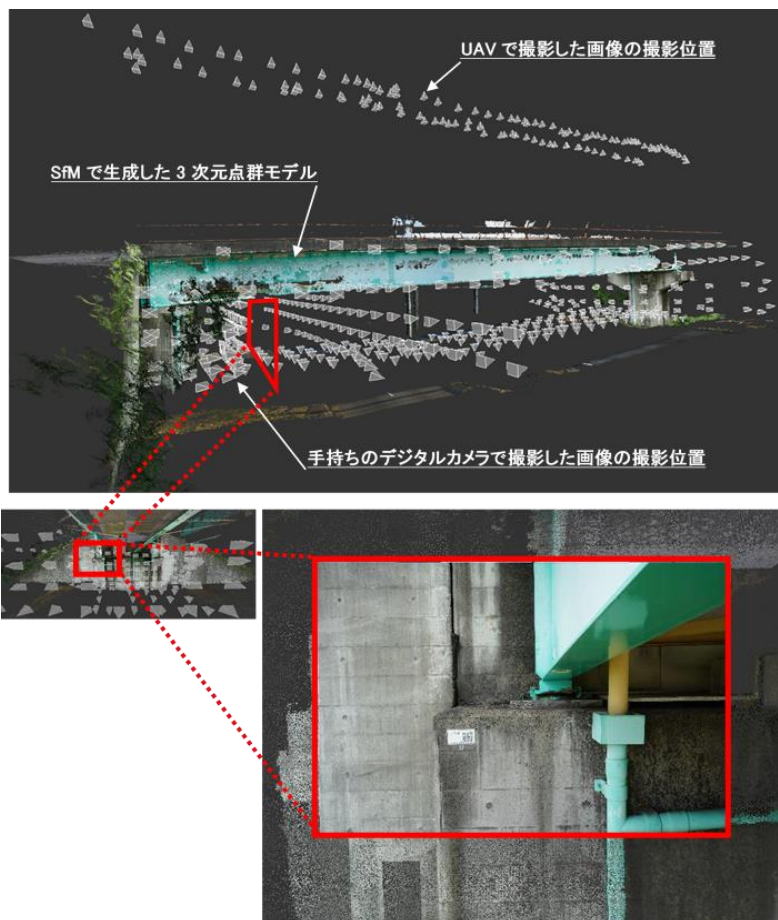


図6-26 3次元点群モデル上への UAV 撮影画像の撮影位置と方向ベクトルの表示  
～撮影時の視点から画像を可視化できる特長を有する～

表6-5 撮影位置(実測)とSfM推定位置の差(検証結果)

検証場所	橋台		主桁下フランジ下面		主桁側面	
	水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向
最大開差(m)	0.010	0.008	0.005	0.009	0.034	0.003
標準偏差(m)	0.007	0.007	0.004	0.008	0.030	0.002
(水平位置と標高の制限値) 標準偏差:0.060m / 最大値:0.120m						

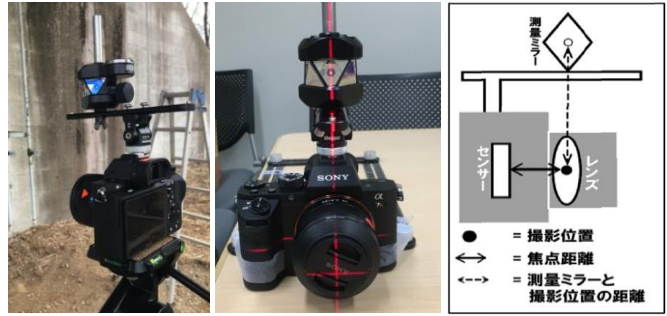
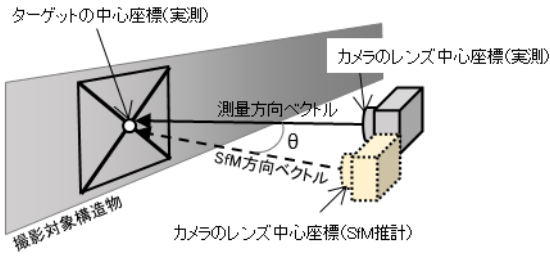


図6-27 :測量用反射プリズム付カメラによる検証

写真6-13 検証に用いた測量用反射プリズム付きカメラ

表6-6 実測値とSfM推定位置の違いによる撮影方向ベクトルの角度差

ターゲット No	ターゲット位置座標			測量方向ベクトル			SfM方向ベクトル			角度差: $\theta$ (degree)
				撮影位置 (実測値)			撮影位置 (SfM算出値)			
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	
1	21715.974	12240.774	31.061	21713.384	12239.279	31.068	21713.394	12239.281	31.060	0.167
2	21715.975	12240.773	30.662	21713.388	12239.278	30.665	21713.397	12239.282	30.655	0.186
3	21715.975	12240.773	30.262	21713.387	12239.278	30.265	21713.400	12239.283	30.258	0.134
4	21715.978	12240.774	29.862	21713.387	12239.278	29.863	21713.395	12239.282	29.859	0.084
5	21715.98	12240.773	29.462	21713.388	12239.278	29.464	21713.396	12239.282	29.458	0.108

### 3) 3次元モデル上での損傷位置推定精度

点検画像を3次元モデル上に表現することのもう一つのメリットは、点検時に撮影した画像の撮影位置と撮影方向を推定できるだけでなく、損傷の位置を直接推定する出来ることにある。損傷位置情報が信頼できれば経年変化の確認や損傷原因の検討において、診断精度向上や効率化にもつながる。

そこで、損傷位置の推定精度を検証するため、損傷に見立てたターゲット（測量用反射シート）を橋梁表面（上面、側面、橋脚、橋台各5点以上）に貼り付けることで精度検証を実施した（図6-28）。3次元点群モデルは、面を形成していないため損傷位置検証においては、ターゲットの中心に相当する点が見つけれないものは対象から除却した（図6-29）。評定点は94箇所設置したが3次元点群モデル上で中心に点を視認することができたターゲットは38点であった。これらのターゲットについて光波測距儀を用いて測量した位置座標と比較したところ、各検証点の位置の誤差は、最大でX方向:0.025m, Y方向:0.031m, Z方向:0.041mであり、いずれも±5cm程度の精度を有していることが確認できた（表6-7）。

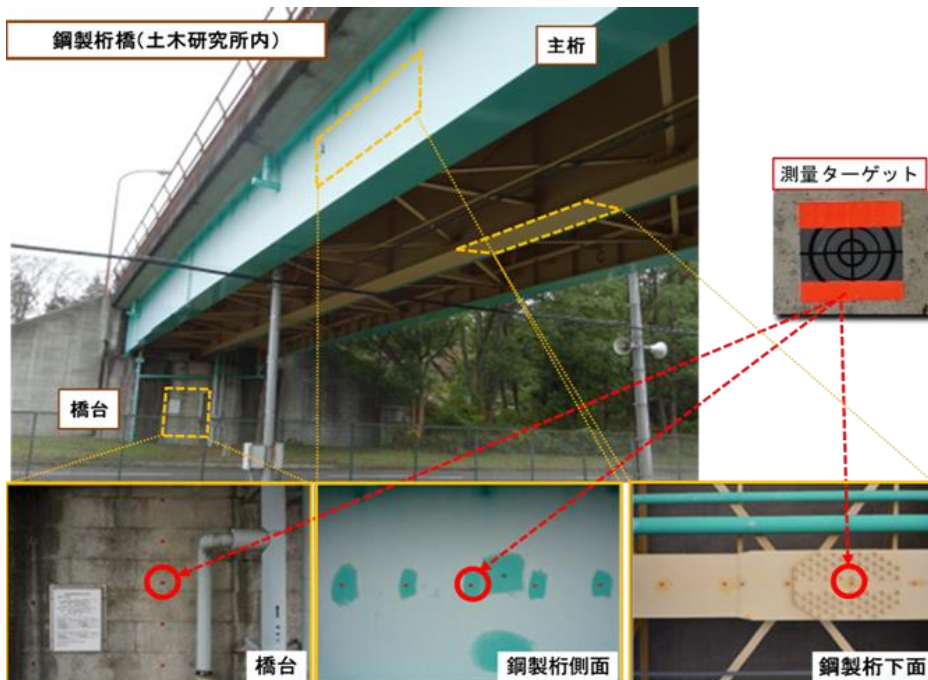


図6-28 3次元モデル化の検証対象橋梁と測量ターゲット設置状況

表6-7 損傷位置の推定精度

		X (m) (水平方向)	Y (m) (水平方向)	Z (m) (高さ方向)
各 部 位 の 平 均	橋台	0.009	0.006	0.032
	主桁側面	0.010	0.006	0.028
	橋脚	0.010	0.005	0.029
	路面	0.006	0.010	0.023
最大値		0.025	0.031	0.041
標準偏差		0.011	0.009	0.029



図6-29 ターゲットの見え方(視認できない例)

## 6.6 ロボットの特長を活かした3次元モデル上での画像撮影位置の管理

### 6.6.1 3次元モデルでの画像管理

前節までの検証結果、点検画像から生成した3次元点群モデルが高い精度で再現できることを踏まえ、現行の平面展開図ベースの損傷図に代わる3次元モデルを利用した点検画像管理の可能性について考察する。

現行の橋梁点検では、損傷の位置を記録するために損傷図を作成する必要があり、損傷図に記載するために必要な部材番号図や損傷写真番号を管理するために多くの時間と労力を費やしている。そこで、点検ロボットにより網羅的に撮影した点検画像から、確実かつ効率的な損傷状況の把握を実現するために、飛行型点検ロボットとSfM (Structure from Motion) 等を用いた。

SfMにより3次元モデルを生成する機能を有するソフトウェアは市場でも調達可能であり、これらを用いて生成した3次元モデル上に写真の撮影位置を復元することが可能である。

実務的に必要な精度を確保しつつ、どこまで効率的に損傷位置を記録できるかが重要である。さらに、SfMにより生成した3次元点群モデルを用いれば、構造物とのカメラ位置関係、カメラの向きを再現することができ、損傷の位置推定が可能となる。図6-29は、著者らが土木研究所内にある鋼橋(単純合成鋼桁橋: 3主桁)をカメラで撮影した画像から、生成した3次元モデルとカメラの撮影位置、および撮影方向と画角を表示したものである。さらには、ロボットの進入がより困難な鋼橋の主桁内部の空間で撮影された画像についても撮影位置を表示することが可能であることを確認した(図6-30)。

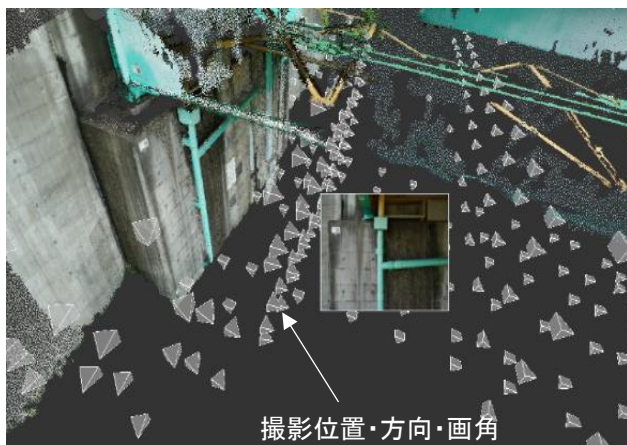


図6-29 3次元モデル上に撮影位置を表示したもの



図6-30 撮影画像と3次元モデルの重ね合わせ



点検ロボットを用いる場合、画像の情報から損傷の位置関係を明確にすることが可能であるが、損傷のない部位の画像も取得するため人の近接目視点検に比べて撮影される画像数が圧倒的に増える。損傷がない部位の画像を残すことへの意見に賛否はあるが、損傷がない事実は損傷発生時期を推定するための根拠になることに加え、画像が網羅的に記録されることで見落としや記録ミスや誤認に対する確認手段としての利用価値が期待できる。特に損傷写真は、点検員のミス等により撮影した位置が判らなくなった画像については、点検資料としての価値が著しく損なわれることになる。点検ロボットが撮影した画像は、網羅的に撮影することで位置関係が明確になるため、点検記録としての画像の有用性を高めることが可能となる。

画像に捉えた損傷の位置を推定する方法としては、①画像相互の相対的な位置関係のみから2次元的に推定する方法と、②各画像の撮影位置と撮影方向から3次元的に推定する方法がある。

画像を合成することにより、その位置関係から損傷位置を推定する方法①については、国交省の現場検証で検証に参加した飛行型ロボットの多くが、点検写真を合成したモザイク画像を点検成果として提出している。現行の損傷図に比べ、点検画像の全体に対する位置関係や撮影漏れの確認が容易である。

3次元的に損傷位置を推定する方法②については、カメラの機能で個々の写真にGPS座標を組込む方法もあるが、その場合、損傷の位置ではなく画像の撮影位置が記録されるため、損傷の位置をより正確に推定するためには、航空写真測量と同様に複数の画像を正射変換し、それらをつなぎ合わせるが必要となる。現在の橋梁点検では、人が撮影した損傷写真を平面図上で管理するため、手作業で行う場合相当の手間と時間を要し効率的ではない。近年、コンピュータビジョンの分野では、カメラで撮影した複数の画像から、各画像の撮影位置を推定し、同一地点に対するそれぞれの画像の視差から対象物全体の3次元モデルを生成するSfMと呼ばれるソフトウェア技術が、様々な分野で応用されている。この複数の画像をSfMにより処理することで生成された3次元モデルは、多くの点群データ(3次元point cloud)で表現され、モデルの再現精度は、カメラの画素数、焦点距離、対象物までの距離、重複率(二方向の重複率;オーバーラップとサイドラップ)に影響される。また、こうして生成された3次元モデルは、画像上の特徴点を自動的に解析することで点群の相対的な位置関係を推定するため、画像上の特徴点に位置座標を与えることで、正確な大きさや位置を特定することができる。また、追尾式トータルステーション(光波測距測角儀)とIMUやジャイロを組み合わせることで推定する方法などが提案されている。また、特徴点となるマーカを構造物表面に設置することで部分的な範囲で撮影した画像にも位置情報を付与することが可能である。



図6-31 SfMにより822枚の画像から生成した3次元点群モデルとUAV撮影画像の重ね合わせ  
～3次元モデル上で画像の撮影位置が明瞭に判る特長を有する～

## 6.6.2 点検調書への適用性

橋梁点検ロボットを用いた点検では、大量の画像を取得することによる取り扱いの煩雑さが懸念される反面、網羅的に画像を取得することで再現性のある記録を残すことができる。さらに SfM 技術を応用することにより 3 次元モデル上で画像の撮影位置や方向ベクトルを確認することができ、災害時の緊急点検など様々な用途での利用が期待できる。

前節では、人が撮影した撮影位置と撮影方向が電子データとして付加されていない画像データについても、予め構築した橋梁の 3 次元モデルと重ね合わせることで統合管理することができることが可能であることを示した。

点検画像の管理は、橋梁が供用される長期間にわたる管理が必要となるため、定期点検時に取得した情報だけでなく、災害時や補修工事に際して取得した情報を管理することが望まれる。また、点検調書は橋梁を維持管理する部署が保管するだけでなく、調査計画部門や工務部門、予算調整や占用調整などにおいても必要とされる場合がある。そこで橋梁点検ロボットが取得した点検画像を効果的に点検調書に格納する方法について考察する。

これは橋梁点検ロボットが取得する大量の画像情報の管理コストが増加することに対する懸念に対して、これらロボットから得られる大量の画像データにより点検調書作成コストが低減できる可能性を整理する必要があるからである。

まず、現在の橋梁定期点検要領(2019年2月改訂)に基づく点検調書を作成するために必要な情報について分析を行い、3次元モデルを適用した場合の点検調書における画像データの管理方法について整理する。

### 1) 点検調書が持つべきデータと様式の関連性

現在の橋梁点検成果は、様式1～様式13に整理される。その内容は、大きく二つの目的に大別できる。一つ目は、損傷の状態、原因、対策の考え方に関する所見、及びその根拠としての把握した橋の状態、並びに対策区分の判定や部材単位での健全性の診断及び道路橋毎の健全性の診断の結果を記入するもの。もう一つは、将来の維持管理の参考となり、かつ維持管理計画の策定や見直しに用いるための損傷程度の評価や外観性状を記録するものである。

まず、点検調書を構成する各帳票とそこに記載される情報項目について整理した結果を示す(図6-32)。



図6-32 橋梁点検調書の各帳票に記載される情報の相関関係  
～各帳票間で多くの情報が重複していることが判る～

(様式の種類)

(損傷の状態, 原因, 対策の考え方に関する所見, 及びその根拠, 健全性の診断の結果)

- 様式その1: 橋梁の諸元と総合検査結果
- 様式その2: 径間別一般図
- 様式その3: 現地状況写真
- 様式その4: 部材番号図及び要素番号図
- 様式その5: 状態把握の方法
- 様式その6: 橋の健全性の診断に関する所見
- 様式その7: 対策区分判定結果(主要部材)
- 様式その8: 対策区分判定結果(様式その7以外の部材)

(将来の維持管理の参考)

- 様式その9: 損傷図
- 様式その10: 損傷写真
- 様式その11: 損傷程度の評価記入表(主要部材)
- 様式その12: 損傷程度の評価記入表(様式その11以外の部材)
- 様式その13: 損傷程度の評価結果総括

このうち損傷写真を掲載する様式は, 3種類(様式3, 様式6, 様式10)である。様式3に記載される写真が橋梁の損傷画像ではなく, 構造物全体や周辺状況を点検作業に先立ち記録することにより, 橋梁が設置されている状況を診断技術者や管理者と共有するためのものである。様式6の健全性の診断の根拠として用いられる写真は, 様式10の損傷写真に記録された損傷と基本的に同一のものである(診断技術者が自ら撮影する場合は, 別の画像となる)。

これらの損傷写真には個別に「写真番号」が付与され, 損傷図上に図示される損傷位置の情報に「スパン番号」「部材番号」「要素番号」により関連付けがなされ, また現地で損傷を近接目視確認した点検員の判断により点検要領に基づき客観的かつ機械的に「損傷の種類」「損傷の程度」が付与される。

図6-32に記載した各様式に赤字で記載した情報項目は, すべて「様式10(損傷写真)」を作成する際に記録すべき情報項目であり, 同じ情報を異なる形式(罫表等)に整理しなおしているに過ぎないとも言える。各様式は, それぞれの用途に応じて作成されるため必要性は十分にある資料であるが, これらの情報を連携させるための鍵が位置情報であることから, 位置情報を持たない画像の整理を行う必要がある現行の点検調書の作成には, 大変な労力が費やされていたと言える。橋梁点検ロボットが撮影する大量の画像は, それを基に3次元モデル化することによって位置情報が明らかになることから, 点検調書の作成を大幅に効率化することができる。

言い換えれば, 3次元モデルを作成することで生成した位置情報と撮影方向ベクトルを利用することにより, 画像データである損傷写真から, 3次元モデルから判読した「スパン番号」「部材番号」「要素番号」を付与し, さらに「損傷の種類」「損傷の程度」を付加することにより, 多くの様式作成の自動化が可能になると言える(図6-33)。なお, 現在記録している「スパン番号」「部材番号」「要素番号」は, 損傷位置を記録するために必要としているため, 撮影位置が明確になれば敢えて「部材種別」ごとに作成していた「部材番号表」を作成する必要性もなくなると言える。

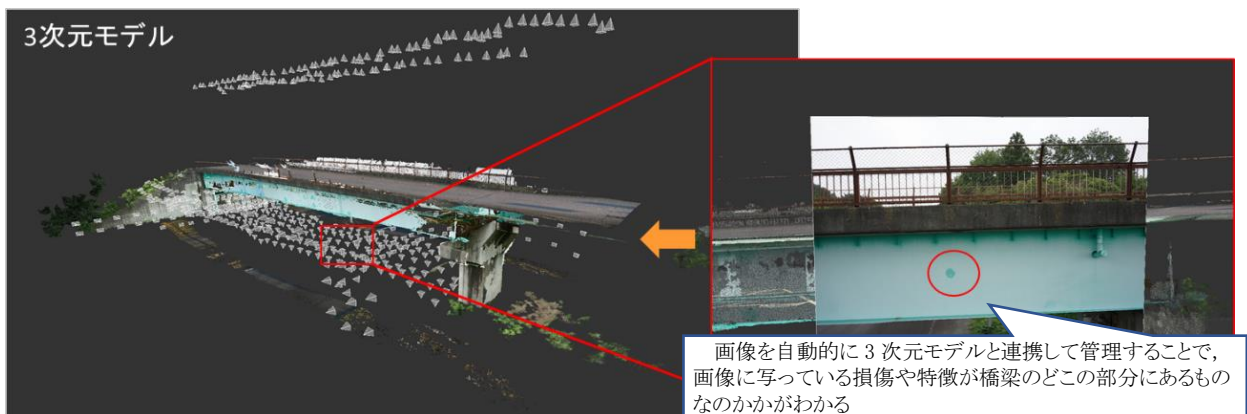
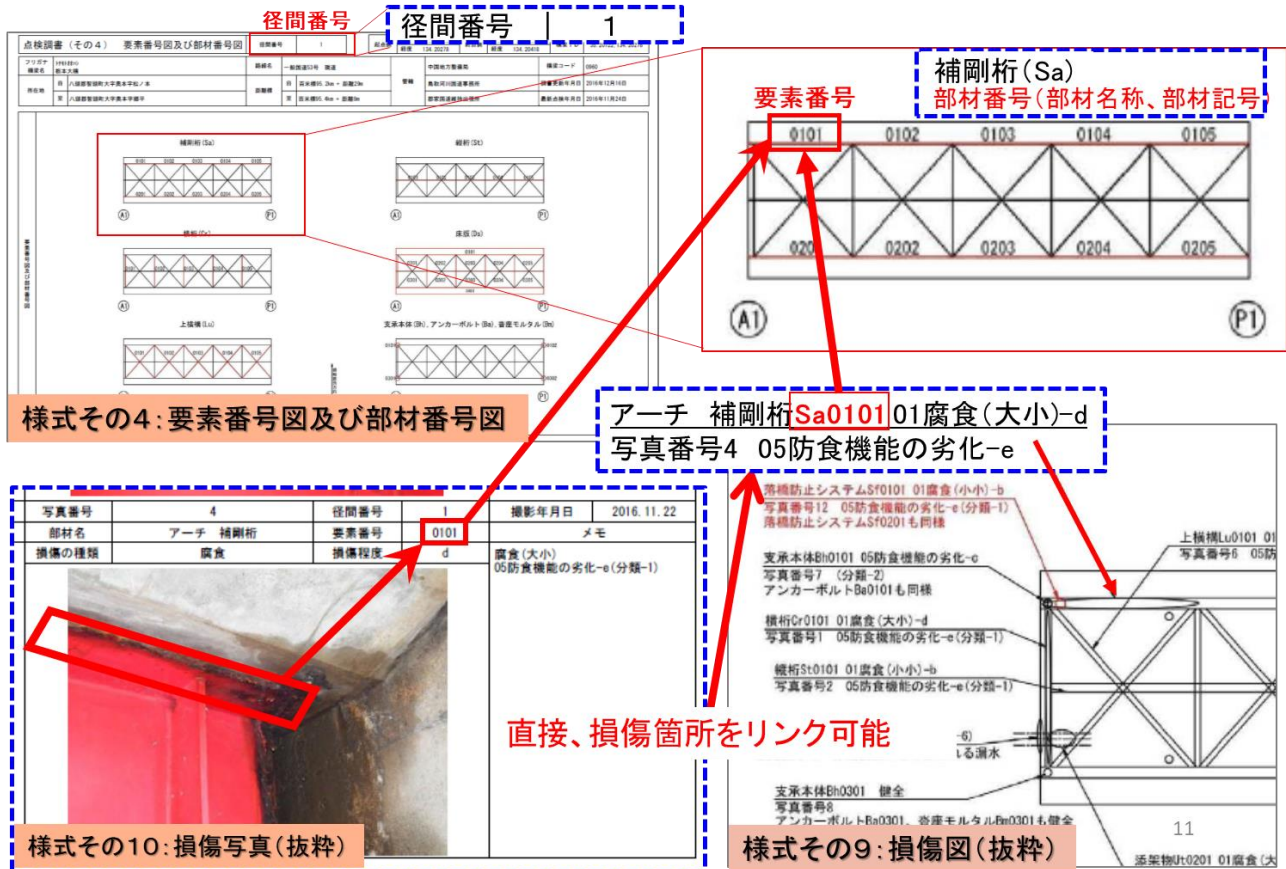


図6-33 3次元モデルから画像の撮影位置の読み取り

## 2) 現行の2次元帳票に代わるビューイメージ

点検ロボットで撮影した橋梁点検画像から3次元モデルを生成することで、撮影した大量の画像に対して(1)画像の撮影を位置、撮影方向を自動推定、(2)点検対象橋梁の3次元モデル(点群データ)を作成、(3)画像を3次元モデルに関連付けて管理、(4)3次元モデルと画像を重ねて表示することが可能であることを踏まえ、これら3次元モデルを用いた具体的な点検調書の効率化方法を述べる。

まず、橋梁点検ロボットの使用により増えた橋梁点検画像を効率的に整理するための要求は強い。従来の点検においては、例えば、損傷が発生した位置を特定するために損傷写真の整理は、要素番号図および部材番号図を用いて、図6-34の様に整理される。ここからは、撮影した損傷写真の位置を示すために部材レベルで要素番号を与え整理をしていることが判る。部材番号表は橋梁点検ロボットで撮影した大量の画像を、このような手法で整理することは現実的ではないが、3次元モデルの利用により部材表などの作成を省略することが可能である。



## 3) 調書作成に係る省力化への寄与

橋梁点検ロボットが撮影した画像から3次元モデルを生成することのメリットについてまとめる。現在の点検で人が作成する必要があった全ての帳票(様式1~様式13)を分析した結果、撮影位置と方向ベクトルを持つ損傷画像を用いれば、様式10(損傷写真)を作成することで、全ての点検帳票の作成の大部分を自動化することが可能であることが判る。現行の点検帳票は図6-32に示すとおり、様式10(損傷写真)を作成する際に「スパン番号」「部材番号」「要素番号」「写真番号」を設定する必要がある。これは、点検対象橋梁の構造形式に応じ別途作成される様式4(部材番号図及び要素番号図)に従って設定される。また、様式4を設定するためには、様式2(径間別一般図)を作成することで示される「平面図」「側面図」「横断図」に基づき使用部材毎に「部材番号」を割り振っている。この部材番号は橋梁の完成図があれば比較的効率的に作成することができるが、古い橋梁で図面がない場合には大変な労力を要する。しかし、3次元モデル上で損傷の位置を示せるのであれば、損傷写真の位置を特定するためには全く不要の作業となるため、様式2と様式3は省略可能である。さらに様式10を作成する際に、「スパン番号」「部材番号」「要素番号」「写真番号」を設定することも不要である(図6-36)。その場合、様式10には「損傷の種類」「損傷の程度」を各損傷画像に対して適切に付加すればよく、様式9(損傷図)も損傷のスケッチ以外については自動で生成することが可能である。様式9(損傷図)を3次元モデル上で位置確認した画像から作成するイメージを示す(図6-35)。

様式3(現地状況写真)については、写真番号と撮影位置(メモ)、撮影年月日を記録するだけでよいことから、損傷写真と同様に3次元モデル上で管理することが可能である。また、様式11及び様式12については「損傷程度の評価」を

記録する帳票であり、様式9及び様式10のデータを用いて損傷のリストを作成するものであり、各損傷写真に対して損傷の程度及び損傷に関する定量的に取得したデータが付与されることで自動作成が可能である。なお、様式7及び様式8に係る「対策区分の判定」については、専門技術者による判断が必要な部分である。

以上述べたとおり、画像データの利用価値に着目することで、点検調査の作成作業が大幅に効率化できる可能性を示した。

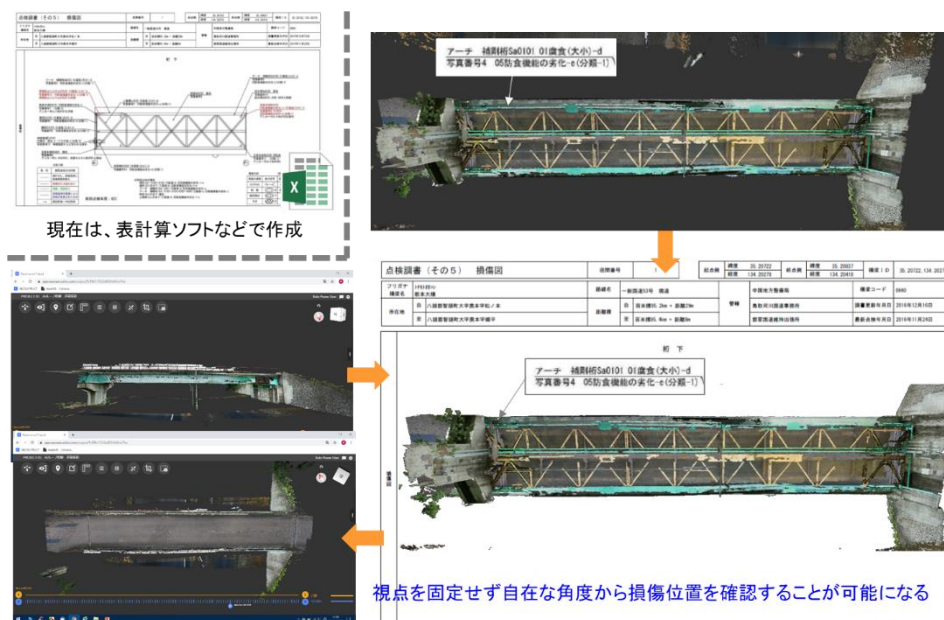


図6-35 3次元モデルを用いた損傷展開図のイメージ  
～損傷位置を示すための部材番号が不要になることで大幅に調書作成工数が削減できる～

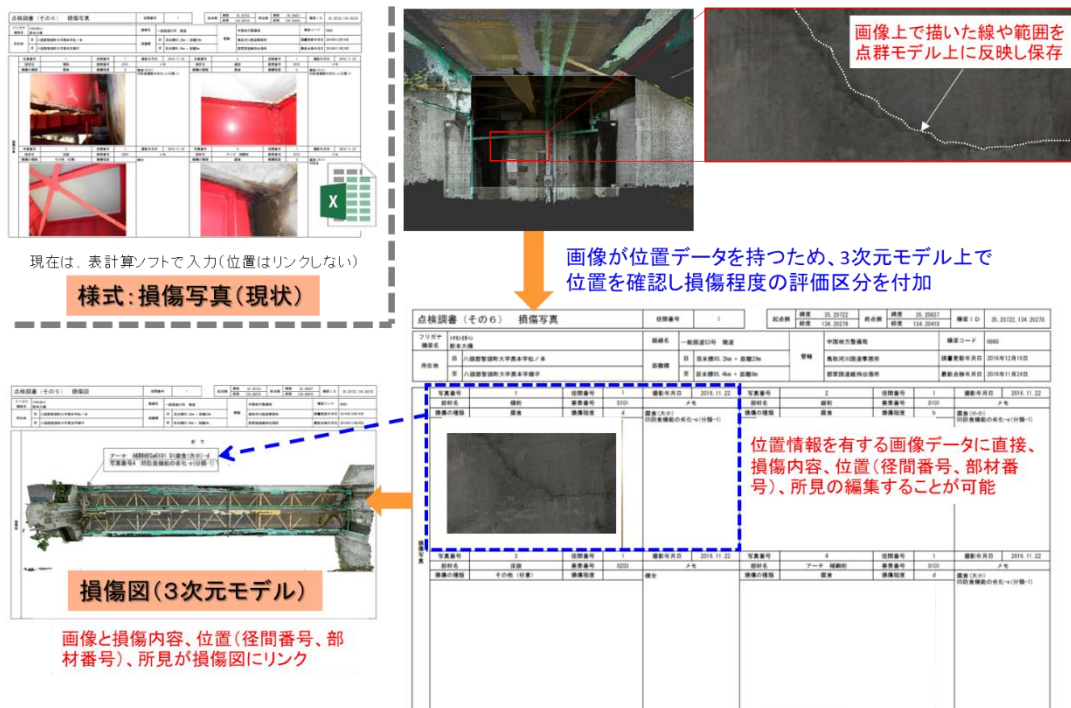


図6-36 損傷画像整理の省力化イメージ  
～位置情報を持つ画像に損傷情報を付加することで全ての調書作成(診断部分を除く)が可能～

## 6.7 まとめ

本章での検討により得られた結論は、以下のとおりである。

- (1) 橋梁点検ロボットを利用し取得した画像について、損傷位置の記録精度を確認した。橋梁点検ロボットで取得した画像から作成した損傷図と従来手法(人の近接目視)で作成された損傷図を比較したところ、人が記録した損傷図には、損傷の位置に実際と大きなずれがある事が判った。ロープアクセスにより点検が行われた高さ40mの高橋脚では最大で2.4m(平均0.9m)の誤差が確認された。また、トラス橋の床版についても比較的目印が多いものの最大1.7m(平均0.5m)の誤差が確認された。損傷位置の記録精度においてロボットに優位性があることが判った。
- (2) 損傷位置の記録精度については、損傷の経年変化を把握するために現行の点検調書(損傷写真)においても前回の点検写真と並べ比較するなどニーズがあることが判った。
- (3) 損傷画像について、画素寸法の違いによるひび割れの見え方の違いについて検証した。その結果、同一仕様のカメラで撮影した画像でも、撮影距離や撮影角度、カメラの回転、部材の色調の違いによって見え方が大きく異なることを確認した。例えば、4200万画素のカメラで撮影した場合、0.2mm幅のひび割れの識別は、2.4mの離隔距離までは鮮明に識別することが可能であるが、5m以上離れると識別が難しくなる。対物画素寸法の約3倍程度までひび割れの識別の限界である。
- (4) 橋梁点検ロボットで損傷画像を撮影する場合、同じカメラで撮影して点検対象との距離の違いによって1画素が表現する寸法に大きな違いが生じる。このことから、点検対象部材との離隔距離を管理する必要性が明らかになった。一方、人が撮影する損傷画像は、撮影位置の記録が撮影者の目測を基にした野帳メモや記憶に依存することが多く、損傷写真の正確な撮影位置を記録することは難しい原因と考えられる。
- (5) 橋梁点検では正対写真を撮影することが難しく、損傷写真と点検対象の間に角度がつくことがある。この場合、画像からひび割れ長さや損傷の大きさを計測することはできないが、画像の撮影角度を用いて幾何補正することにより正対画像の生成が可能であることを確認した。
- (6) 橋梁点検ロボットを用いると、人が撮影する損傷画像に比べ大量の画像(100倍を超える画像枚数)を取得する必要が生じる。これらの画像の取扱いには手間と労力を要するが、橋梁点検ロボットで撮影した連続画像をソフトウェア処理することで、各々の画像の特徴点から3次元モデルを生成することが可能となり、画像の撮影位置と撮影方向を自動的に推定できることを確認した。
- (7) 橋梁点検ロボットが撮影した画像から損傷の大きさ等を推定するため、SfM(Structure from Motion)により撮影位置と撮影方向を推定できることを確認した。点検ロボットで撮影した画像を基に生成した橋梁の3次元点群モデルの精度は、4点の基準点座標を付与することで、全体として±5cm程度の精度で再現できることを確認した。また、画像の撮影位置と撮影方向について、SfMで推計した位置座標及び撮影角度と実測値の比較を行い最大でも3.4cm程度の誤差に収まることから実用上十分な精度が確保できることを確認した。画像の撮影方向についても実測値との差は最大0.2度の誤差に収まり実用上支障のないレベルでの推定が可能であることを確認した。
- (8) 橋梁点検ロボットが撮影した画像からSfMにより推定した損傷位置(構造物表面上)の精度について、測量ターゲットを94箇所設置し位置精度を検証したところ、点群で視認できた評定点についてXYZの各方向成分いずれも±5cm以内の精度に収まったことから、管理上十分な精度であることを確認した。
- (9) 橋梁定期点検要領に基づく点検調書の作成において、損傷写真と損傷図の自動作成のための分析を行った。SfMによる損傷写真撮影位置の自動推定機能を用いることで、損傷写真登録時に着目する損傷種類と損傷程度の評価情報を入力することにより、大部分の処理を自動化することが可能であることを示した。

## 7. 橋梁点検ロボットの社会実装に向けた実証的な性能評価法の提案

本章では、橋梁点検ロボットを実際の点検業務で使うために必要な評価手法について考察する。第5章では、点検ロボットの現場検証から、人の能力との比較をベースにした評価方法についての課題について整理した。第6章では点検ロボットの有する特長に着眼し、ひび割れ検出能力、位置記録精度、網羅的に取得した画像の有効性について述べた。これらの考察から、点検ロボットには優れた特長があるものの、既往の性能評価方法では、多様な現場条件下への評価結果の適用性に課題を残していることが明らかである。このため、本研究では点検ロボットの性能評価に際して次の2点を考慮する必要があると考える。

### ① 点検ロボットの導入是非の判断は、成果物である「点検調書の品質」と「費やされるコスト」によってなされる。

点検ロボットの有用性は、プロセス全体の効率化を是とし、近接目視作業のみに着眼すべきではない。一連の点検作業を構成する「行く」「見る・撮る」「検出する」「記録する」といった各プロセスをロボットが支援することで得られた最終成果物である「点検調書の品質」と「費やされるコスト」によって評価することができる。言い換えれば、一部の作業プロセスに着目した性能評価において、優れた性能が確認されたとしても、点検調書の品質確保とコスト維持が両立しなければ社会実装は進まない。

### ② ロボットの特性を考慮した様々な現場条件下での検証が必要となる。

橋梁点検は対象となる構造形式・部材、現場条件が極めて多種多様であることから、損傷検出能力に関して人とロボットを単純比較すれば、ロボットの能力が人に及ばない条件は必ず存在する。このため限られた条件下での性能評価は多種多様な現場条件への適用の判断根拠にはならないため、ロボットの特長を活かせる様々な現場条件下での試行が必要となる。

様々な現場条件への適用判断に資する性能評価を行うためには、点検ロボットの持つ基本性能に応じたユースケース(基本的なロボットの利用方法)と要求性能(評価指標)を明確にする必要がある。当然ながら、個々のロボットの適用可能条件(対象橋種や対象部材、想定される気象条件等)の範囲で運用することが前提となる。

そこで本章においては、先ずロボットの特長を活かした点検方法を考察し、点検ロボットを評価する視点を明確にする。点検方法の設定に際しては、点検ロボットの性能に応じて適用可能な点検手順を提案する。則ち、点検ロボットで対応できないところは、人による目視点検と組み合わせることで導入し易いところから実装できれば良いとの考えである。また点検手順の提案に際して、必要な周辺技術についても考察する。

## 7.1 橋梁点検ロボットの特長を活かした点検方法

### 7.1.1 橋梁点検ロボットを用いる場合に考慮すべき得失

多くの点検ロボットは、ひび割れ検出率に関し現場検証の結果を見る限りでは人の能力に及ばない。よって単純に人の役割をロボットに置き換えるだけでは効率化を実現できない。人とロボットの有利な部分を組合せ、無駄を削ることによって、初めて効率的な橋梁点検を実現することが可能となる。点検ロボットが持つ特長である正確性・安定性・効率性・安全性などに着目し、性能に応じてロボット技術を活かせる点検方法を提案することで、早期の社会実装により開発投資が促され、比較的短期間での実用的なシステムの実現に可能性を見通すことが期待できる。

先ず、国交省が行った橋梁点検ロボットの現場検証を参考に考慮すべき点検ロボットのメリットとデメリットを整理する。

#### 1) 点検ロボットを用いることのメリット

橋梁点検ロボットの持つ優れた能力の一つに、「損傷の発生位置を正確に記録する能力」がある。過去の橋梁点検ロボットの検証では、この点に着目されることはなかった。損傷の発生位置を正確に記録することは、位置決め能力を活かしたスクリーニングの実現や、診断時にも損傷発生原因を推定する際に有用な情報を与える。

例えば、ひび割れの発生位置やその方向からは、応力が作用した方向が判るため、どのような外力が部材に作用したか大まかに推定できる。橋梁点検ロボットが持つ優れた能力の一つである損傷位置記録能力を活かす場合でも、画像だけでなく、ロボットの効率性、記録の正確性や網羅性を活かしつつ、総合的にその能力を評価するためには、新たなユースケースを提案し、実現場における検証を通じて、様々な現場条件下における点検での有用性を裏付ける証拠を得る必要がある。

橋梁点検ロボットには飛行型や懸架型など様々な種類があり、点検対象の橋梁についてもアーチ橋やラーメン橋など規模や形状の違いによっても点検可能範囲が違ってくる。さらには、ロボットの有する機能や性能によっても、接近方法や点検方法が異なる。また、樹木や建物等の障害物の存在によっても、点検の効率が大きく影響を受ける。

以上をまとめると、点検ロボットを用いるメリットとして以下の項目が挙げられる。

- ・ 正確に損傷位置を記録できる(再現性)
- ・ 画像から損傷の大きさを定量化できる(検出精度)
- ・ 危険で苦渋を伴う作業を一部代替できる(安全性)
- ・ 損傷をむらなく安定して検出できる(検出精度)
- ・ 点検範囲を客観的に記録し点検漏れを検証できる(網羅性)

- ・ 損傷位置を用いて効率的に調書を作成できる(効率性)
- ・ 足場などの仮設や高額な機材の使用を最小化できる(経済性・効率性)
- ・ 位置推定を利用した調書作成の自動化(効率性)
- ・ 損傷が見当たらない範囲を記録でき点検範囲を事前に絞り込める(効率性・安全性)

## 2) 点検ロボットを用いる際に考慮すべき不利な点

橋梁点検ロボットの導入に伴う不利な点についても十分に考慮する必要がある。国交省の現場検証の結果では、橋梁点検ロボットの全てについて損傷検出率が、肉眼での近接目視に比べ劣る結果を示した。これは人の損傷発見能力が優れていることによるが、点検時に様々な角度から損傷を詳しく観察し、確実に損傷状態を把握しているからである。そのため、人が撮った写真は、人が特徴を認識しやすい角度から撮影されている(写真7-1左,写真7-3)。一方、ロボットは構造物に正対し機械的に次々と画像を撮影するだけである(写真7-1右)。

現状の橋梁点検ロボットは、高精細な撮影画像を遠方からモニタリングする機能を具備していないため、撮影が終了し損傷画像をロボットから回収するまで、高精細な画像を点検員が見ることはできない。

また、橋梁点検ロボットを用いて撮影した写真は、点検員が損傷部材名、損傷の大きさや種類、損傷程度(5段階評価)を判読する必要があるが、人が認識するには機械的で一つ一つの損傷の認識に時間を要する。また、大量に撮影された画像は、一定の重複があるため、同一の損傷が複数の写真に記録されており、人が見るには量が多く位置関係の整理にも時間がかかる。

以上の点検ロボットを用いる際に考慮すべきデメリットをまとめると以下のとおりである。

- ・ 微細なひび割れの検出能力が人よりも劣る(検出精度)
- ・ 大量の画像を人が判読する必要がある(効率性)
- ・ 画像から損傷を認識ことが困難で苦渋(効率性・苦渋性)
- ・ 個々の点検画像からは損傷の全体像を掴みにくい(業務適合性)
- ・ 狭隘部や複雑な構造の点検ができないことが多い(適用範囲)

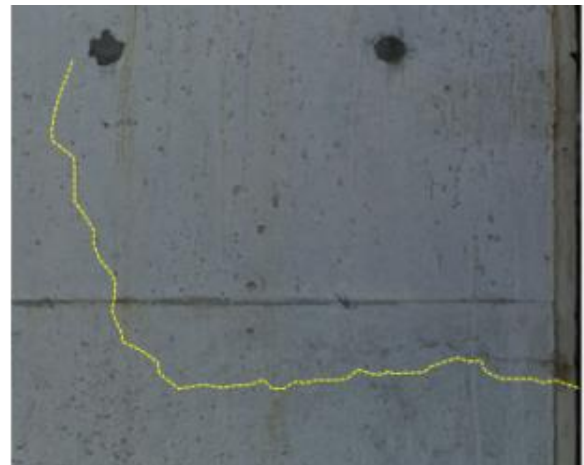


写真7-1 人が撮影したひび割れ(左)とロボットが撮影したひび割れ(右)違い  
 ～ 一見ただけでは、同一のひび割れと認識することは難しい。～

## 3) 人が作成する点検記録としての画像の特徴

定期点検調書記録される写真は、点検員が近接目視による確認した損傷を撮影したものであり、必ずしも一定の焦点距離と画角のもとで、正対し撮影したものではない。過去に作成された橋梁定期点検報告書に記録された損傷写真は、ほぼ全てが撮影条件を規定せずに撮影されたものである。このため損傷写真から、機械的にひび割れの幅や長さを計測することは、困難であり、出来るとしても大変な手間を要することになる。実際の点検では、近接目視時に実測した数値を点検員が記録して持ち帰り、損傷発生位置を損傷図上に示すとともに、損傷毎に写真の横の欄に損傷程度と共に記している。

また、点検調書の損傷写真には、ひびわれ自体が明瞭に映っていないものが多く、その場合チョーキングによって示された補助線により、おおよその位置を推定できる程度である(写真7-2)。損傷図にはひび割れの形状を記載する必要がないため、点検員がひび割れの重要度を鑑み、必要に応じて詳細な記録を作成する場合がある。例えば、コンクリート床版のひび割れについては、ひび割れの長さや形状を正確に記録することよりも、「ひび割れの密度」や「ひび割れの方向(格子状のひび割れの有無)」、「角欠けの有無」を診断技術者は重視している。また塩害などの損傷原因を見極めるために錆汁による変色や、うき剥離による鉄筋露出などに着目している。点検ロボットを用いる場合は、これらのニーズを考慮して損傷画像に記録された損傷の状況等をわかり易く示す必要がある。







点検調書 (その6)		損傷写真		経路番号	10							
フリガナ 橋梁名	ササカ 幸久橋	路線名	一般国道293号		関東	地方整備局	橋梁コード	1301				
所在地	自 茨城県常陸太田市上河合	距離標	自	百米標 km+距離 m	管轄	常陸太田工事	事務所	調査更新年月日	2015年12月8日			
	至 茨城県常陸太田市上河合		至	百米標 km+距離 m		久慈川下流	出張所					
損傷写真	写真番号	31	経路番号	10	撮影年月日	2015.11.18	写真番号	32	経路番号	10	撮影年月日	2015.11.18
	部材名	床版	要素番号	0101	メモ		部材名	床版	要素番号	0101	メモ	
	損傷の種類	漏水・遊離石灰	損傷程度	d	上流側橋出し床版に床版ひびわれ(幅0.1mm)及び、遊離石灰が見られる。		損傷の種類	剥離・鉄筋露出	損傷程度	d	上流側橋出し床版に鉄筋露出(0.1m×0.1m)及び、剥離(0.05m×0.05m)が見られる。	
					【今回点検他損傷】 ①床版ひびわれ-d							
写真番号	33	経路番号	10	撮影年月日	2015.11.18	写真番号	34	経路番号	10	撮影年月日	2015.11.18	
部材名	床版	要素番号	0101	メモ		部材名	床版	要素番号	0201	メモ		
損傷の種類	うき	損傷程度	e	上流側橋出し床版に床版ひびわれ(幅0.1~0.3mm)、うき(0.6m×0.4m)及び、剥離(10.0m×0.1m, 0.2m×0.2m, 0.1m×0.1m)が見られる。		損傷の種類	補修・補強材の損傷	損傷程度	e	床版の補強鋼筋にうきが見られる。		
				【今回点検他損傷】 ①剥離・鉄筋露出-c ②床版ひびわれ-d								

写真7-2 点検調書に貼付された損傷写真の例  
～「チョーキング」は見えるが「ひび割れ」は見えない～

出所:国土交通省次世代インフラ用ロボット現場検証報告書より



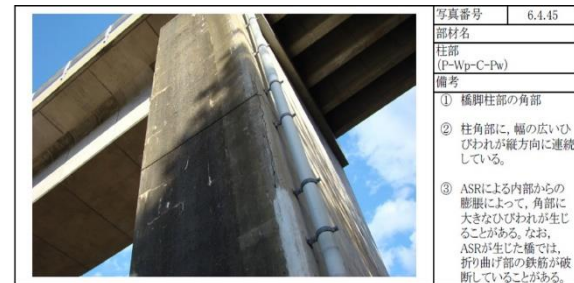
床板(漏水・遊離石灰)



橋脚(漏水・遊離石灰)



剥離・錆汁・鉄筋露出



橋脚(ひび割れ)

写真7-3 点検調書に貼付された損傷写真の例  
～わかり易さを考慮し損傷を強調した画像～

出所:国土交通省次世代インフラ用ロボット現場検証報告書より

#### 4) 橋梁点検ロボットの使用が困難な条件

橋梁点検ロボットは、人に代わり危険な場所での作業ができる特長を有するが、個々のロボットには構造上の理由などから適用が困難な条件が存在する(写真7-4)。以下に例を示す。

- ・ 部材が輻輳する狭隘部の点検は不可能（主桁、横桁、横構の部材が輻輳）
- ・ 上弦材の下面、下弦材の上面に検査不可の部材がある。（弦材部材の部位）
- ・ 橋台、端横桁に囲まれた狭隘部、特に内桁の支承周辺
- ・ 内桁の下フランジ上面 など

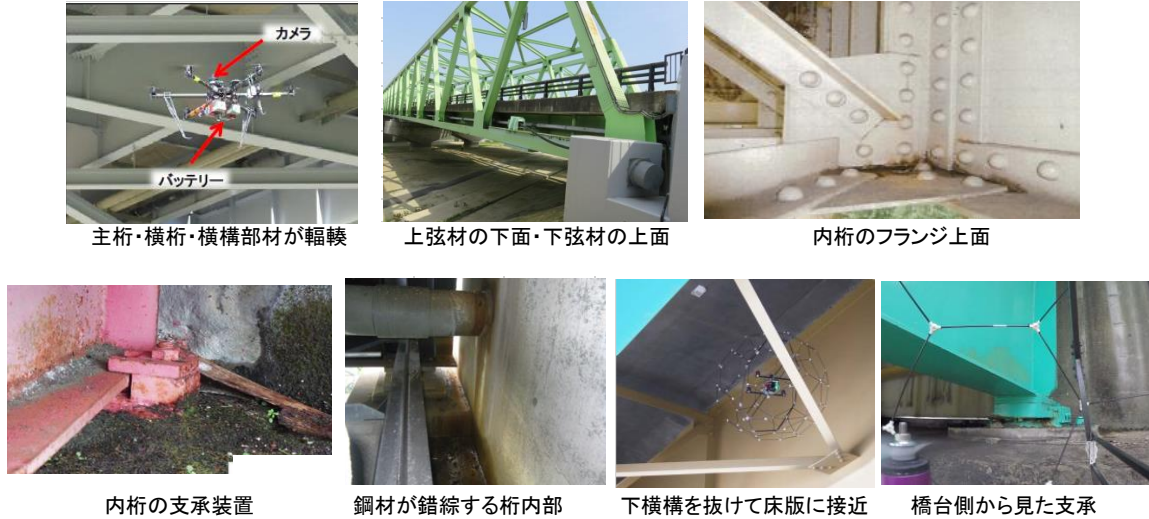


写真7-4 橋梁点検ロボットの使用が困難な条件の例

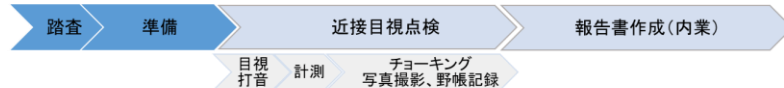
出所：国土交通省次世代インフラ用ロボット現場検証報告書より

#### 7.1.2 橋梁点検ロボットの優位性を活かした点検手順の考察

前節で述べた橋梁点検ロボットの得失を考慮し、ここでは点検業務全体の効率化につながる、人とロボットの組合せによる効果的な点検手順(ユースケース)を考察する。橋梁点検ロボットが有する損傷(ひび割れ等)検出能力の性能を2段階に分け、点検ロボットのユースケースを考察する(図7-1)。

第一にロボットの損傷検出性能が「近接目視に及ばないが、一定程度以上の変状は確実に確認できる」レベルにある場合(レベル1)。第二にロボットの性能が近接目視で確認を求められる全ての変状を記録できる「レベル」にある場合(レベル2)を考える。

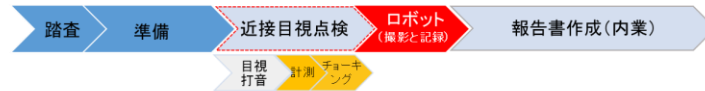
##### 【従来点検の進め方】



近接目視点検では、点検員が手の届く範囲に近づき、目視確認、打音(ハンマ等)、現地での計測・記録(チョーキングと写真撮影、野帳への記録)を実施。

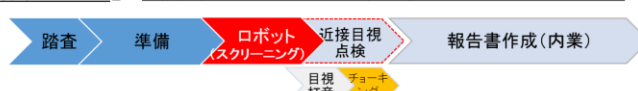
(レベル1)

##### 【ロボット手法(当面)】※近接目視には及ばないが、一定程度以上の変状は確実に確認できるレベル。



点検員による近接目視点検では、点検員が手の届く範囲に近づき、目視確認、打音までは行うが、写真撮影の省略、及びロボットで十分計測可能な変状については、人による計測とチョーキングも省略することで効率化が実現する。

##### 【目指すところ】※近接目視で確認できる全ての変状をロボットで確認できるレベル。(レベル2)



ロボットによるスクリーニング後の近接目視点検では、点検範囲の絞り込みが行ったうえで、点検員が手の届く範囲に近づき、目視確認、打音までは行うが、写真撮影とチョーキング(軽微な変状を除き)を省略することで、大幅な効率化が実現する。

図7-1 点検ロボットの段階的な導入イメージ

## 1) レベル1のロボットを利用した点検（目視点検結果の記録装置としての利用）

現行の橋梁点検では、点検員は手が届く位置まで点検対象部材に接近し、ひび割れ等の損傷を確認した場合はクラックスケール等を用いて計測した後、白墨等を使って部材表面にチョーキングと呼ばれるマーキングを施す。そして点検報告書に記録するための損傷写真を撮影する。そこで、点検員は部材の“損傷の程度”を目視により評価し記録を作成する。

ロボットの性能がレベル1の場合、点検員が施したチョーキングの存在を前提にロボットにより画像を撮影する使い方が考えられる(図7-1、青枠内)。この手順では、点検員が全ての部材に近接して目視確認を行い、必要に応じ打音検査を行うが、点検員による写真撮影の省略、ロボットが取得した画像で計測可能な変状については、人による計測とチョーキングを省略することで効率化が実現する。前項に示した損傷写真事例(写真7-2)のように、損傷写真には「ひび割れ」は写っていないが「チョーキング」が記録されていることから、ロボットが撮影する画像にはチョーキングのみが記録されることを想定している。

すなわち、性能がレベル1の点検ロボットでのユースケース(ロボット手法(現状)は、ロボットの適用を人の近接目視点検後に行われる「損傷写真の撮影」、「記録作成」といった補助的な業務に限定した利用方法であり、人が行う作業も部分的に省力化されるにとどまることから、ロボット導入効果も限定的なものになる。

言い換えれば、この利用方法においては橋梁点検ロボットに対する性能評価は、第5章に述べた国交省の現場検証で実施された方法に基づき、人が近接目視で見つけた損傷のうち、ロボットがどの程度検出(記録)することが出来るかを「判読可能率」といった指標で評価する方法を適用することで対応可能である。まさに、人が近接目視を必ず行うことから、管理者責任の面からはリスクを抑えた堅実な方法である。

## 2) レベル2のロボットを利用した点検（目視点検範囲のスクリーニングへの利用）

ロボットの性能がレベル2の場合、点検員が近接目視を行う前に点検ロボットを用いて部材の画像を取得することにより、点検員が近接目視すべき範囲を絞り込むこと(スクリーニング)が可能である(図7-1、赤枠内)。ロボットが取得した画像には、点検員が近接目視で確認すべき変状や損傷が全て記録されているため、この方法ではチョーキングによる補助を必要としない。点検員は、確認すべき損傷に絞り込んで近接目視するだけでなく、写真撮影とチョーキングを省略することができ大幅な効率化が実現する。

ただし、橋梁点検ロボットの損傷検出能力は、ロボットに搭載したカメラの性能によるだけでなく、現場制約などの環境条件にも影響されることから、点検ロボットを用いる場合は所定の性能が発揮されるよう慎重を期す必要がある。

レベル2の使用方法について考えると、例えば、人よりもロボットが効率的にアクセスできる高橋脚に限定すれば、幅0.2 mm程度のひび割れを検出することが可能なロボットは存在する。人が近接目視点検を行う前に、点検ロボットで画像を撮影することで目視範囲をスクリーニングできる。仮に、チョーキング(補助線)による支援なしに幅0.2 mm程度のクラックを検出することが難しくとも、短時間で全面を撮影できるのであれば、損傷箇所だけを人が撮影し、損傷発生位置の記録は、点検ロボットで行っても十分効率化が図れる。人の代替で使うことに限定しなければ、様々な効率化の実現が可能である。

### 7.1.3 橋梁点検ロボットを用いたスクリーニングへの適用

現状ですぐに利用可能なロボットの多くがレベル1の検出性能に留まることから、今後さらなる技術開発を促し点検効率化を迫るためには、作業者(による従来の点検方法)とロボット(などの新技術による点検法)の各々有利な部分を有機的に組み合わせた全体の点検システムとして追求することが重要である。例えば、ロボットが優位性を持つ位置決め能力等を活かしたスクリーニングへの適用など、ロボット技術が生きる点検方式に対応した技術評価手法により、技術開発を促進しつつ、社会実装しながら改善を進めるアジャイル開発に対応した導入環境が期待されている。

そこで、先に述べた性能がレベル2のロボットを用いたユースケースにおいて、例えば狭小空間での点検などロボット技術の性能によっては損傷の検出が難しい部位においてはロボットを用いず人が点検を行うこととし、ロボットは高い点検効率が期待できる点検が容易な部分に限定し活用することで、橋梁点検ロボットの損傷検出精度だけに捉われず、安全性や効率性、経済性などを勘案し、総合的な優位性を評価することが可能となる。

ここでは、点検員が近接目視により点検すべき範囲を絞り込む「スクリーニング」について、手法の有効性と期待される効果について考察する。橋梁点検ロボットの性能を的確に評価するためには、前提となるロボットの性能が確保されていることに加え、飛行経路設定や画像解析の自動化等によってもたらされる作業効率の向上など、具体的な効果を明確にするための検証が要求される。

そのため、まず点検ロボットを用いた橋梁点検における基本的な業務の流れを現行の点検手順との比較において明らかにする(図7-2)。橋梁点検の業務範囲は、計画準備から始まり報告書を完成するところまでとする。橋梁点検は大きく分けて、「準備段階(計画準備～協議資料作成)」「定期点検(現地での点検作業)」「報告書作成(点検記録の整理、健全性の診断、点検調書作成)」の3段階から構成される。橋梁点検に点検ロボットを使用する場合には、準備段階から関係機関との協議において点検の手順が異なるが、ここでは点検作業と記録整理に着眼して効果が期待される作業を整理した。

効果が期待できるポイントは4点考えられる。第一に現地での点検作業の開始時に行われる足場の設置前に点検ロボットで画像を取得し、損傷状況を把握することで、近接目視が必要な範囲を事前に絞り込むことが可能となる(図7-2、

ポイント1). 点検範囲の絞り込みによって、点検員による近接目視が必要と判断される場合のみ、近接目視点検を実施することになる。事前の画像取得が困難な箇所については近接目視や打音検査を実施する必要がある。言い換えれば、近接目視の要否を画像から判断できる場合は、必要に応じて近接目視は省略することが可能となり、高額なコストを要する足場の設置削減や橋梁点検車等の機材の使用日数を削減することが可能となる(図7-2、ポイント2)。また、画像で損傷がないと判断できる場合は、近接目視を省略するなどにより効率化が図れる。さらに、事前に取得した点検画像により損傷を把握できることから、点検員の作業は確認行為が主体となりチョーキングの省略や、確認としての計測の重点化、写真撮影の省略等により大幅に効率化がなされる(図7-2、ポイント3)。その際、事前に直ちに補修する必要があれば損傷の進行に対して抑止効果も期待できる。また、点検ロボットが取得した損傷画像は、近接目視点検によって確認された後、SfM等のソフトウェア処理によって撮影位置及び損傷の位置が推定(出力)され、その情報を基にひび割れ幅や大きさなど幾何補正による精度の高い損傷程度の評価が可能となる(図7-2、ポイント4)。

なお、従前から橋梁点検業務において最も直接人件費の工数割合が高く、点検員の作業負荷の大きかった損傷写真を展開図に整理する作業(橋梁定期点検要領の様式5、様式6)の省力化については、再現性の高い画像データを根拠に点検データを作成し納品することが可能となる。

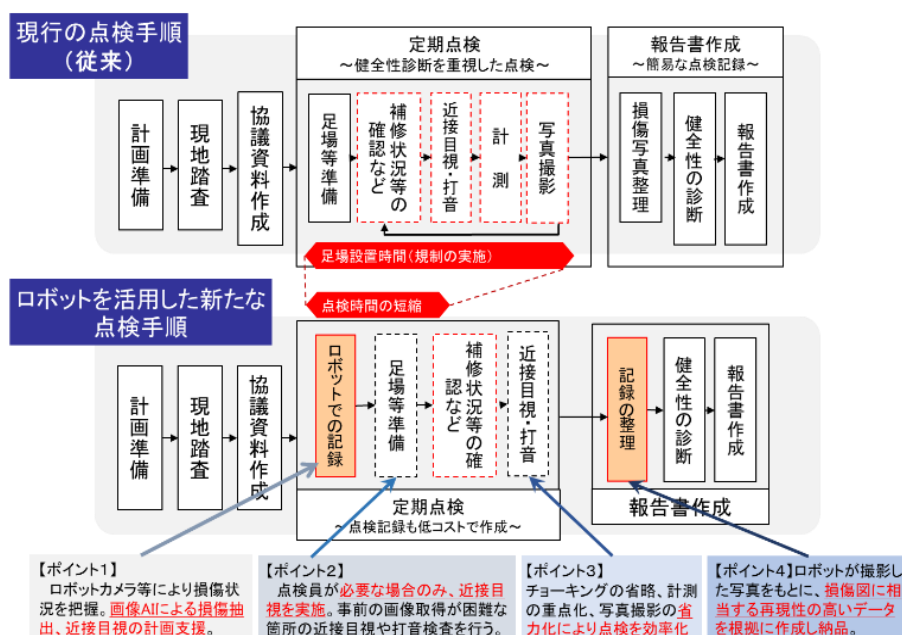


図7-2 橋梁点検ロボットの優位性を活かした点検手順案

## 1) 橋梁点検ロボットを用いたスクリーニング手順

ここに近接目視範囲のスクリーニングを想定した橋梁点検ロボットの利用手順について示す。現行の橋梁点検ロボットが技術的には現在も発展途上にあることから、橋梁点検ロボットによるスクリーニングは、安全性や効率性、損傷検出精度の確保などを勘案し実施可能な範囲を対象として、技術水準の向上に応じて段階的に適用範囲が拡大されることを前提とする。

### ① 計画準備

現行の定期点検では人が近接するために、橋梁点検車(上部工、橋脚上部)、ロープアクセス(上部工、橋脚)、移動式吊足場(上部工)、はしご・足場(上部工、箱桁内部、橋脚)など現場の条件に応じて計画される。また、作業中の安全管理は特に重要であり、路面上や橋梁下空間の利用状況(河川、鉄道、道路など)に応じ、点検作業の実施条件について各管理者や警察等との協議が行われる。特に飛行型点検ロボットを用いる場合、航空法に基づき操作者が機体を見通せる必要がある。レーザー追尾方式など基地局から機体までの離隔条件や突風の影響など、使用する橋梁点検ロボットによっては、飛行経路と地形との関係によっては制御上の死角が生じることもあるため、各種ロボットの性能を十分理解して綿密な踏査が必要である。

橋梁点検ロボットを用いた点検では、損傷画像等の位置についてSfM等による解析処理により推定することから、前述のとおり重複率を考慮した遠景と近景の適切な画像取得計画を立案する必要がある(図7-3)。

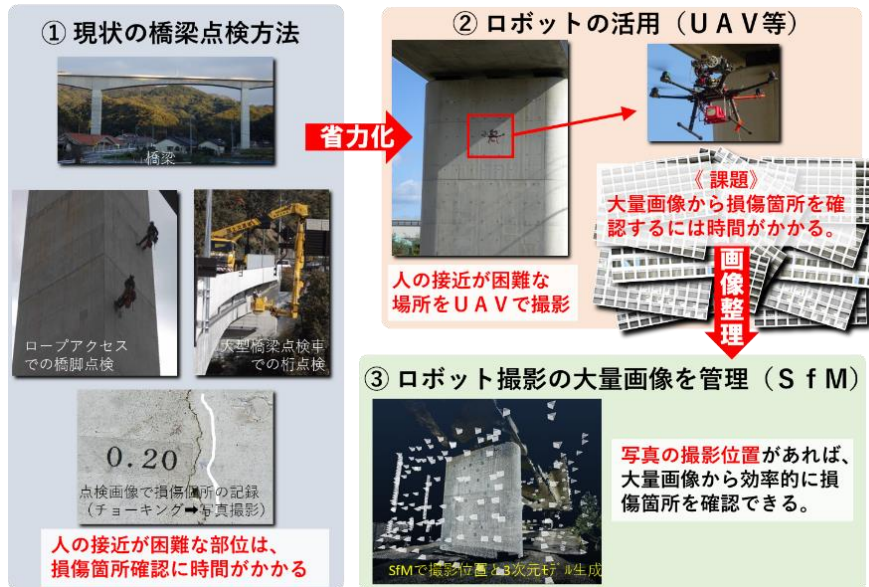


図7-3 橋梁点検ロボットによる点検画像と3次元モデルの生成

## ② 橋梁点検ロボットの選定

橋梁点検ロボットの選定は、ロボット点検の対象範囲とする部材の構造形式や周辺状況を踏まえ、人の近接目視と最適な組合せのもとに考慮する。その際、気象条件(風速や日照等)、周辺利用状況(交通状況等)といった現場の制約に加え作業時の安全性確保や作業効率に留意する。

国土交通省のガイドラインでは、橋梁点検ロボット等の点検支援技術を使用する場合、現場条件や構造、設置状況等を十分に把握したうえで、使用するロボットの選定理由と活用範囲、活用目的を「点検支援技術使用計画」として明示することが求めている。

### 1) 対象部位・部材及び対象変状

点検支援技術により把握しようとする対象部位・部材と変状の種類を設定する。鋼橋では主桁の他に様々な鋼材の点検が必要となるため、竣工図面や過去の点検調書を踏まえ橋梁点検ロボットの近接可否と画像撮影の可否を検討する必要がある。形状がシンプルなコンクリート部材でも、橋脚や床版張出部などが複雑な形状を有する場合もある。

### 2) 橋梁点検ロボットを用いる目的と範囲

構造物のどの範囲に橋梁点検ロボットを活用する範囲を明示する。橋梁点検においては、例えば桁端部などカメラを構造物に正対させることが難しい部位や、専用物などにより点検しづらい範囲を考慮し、橋梁点検ロボットが出来ない範囲は人が近接することとして、正確に点検できる範囲を明示する必要がある。

また設定した範囲にある部材と部位について、変状(損傷)の把握、記録の作成、健全性の診断に有用な追加的な情報の取得等、橋梁点検ロボット活用の目的を設定する。

### 3) 橋梁点検ロボットを用いる程度

橋梁点検ロボットで取得できる情報や精度には、それぞれのロボットで違いがあるため、活用目的を達するためのロボットの活用の程度について設定する。例えば、点検支援技術のみで損傷程度の評価まで行うのか、近接目視と併用するのか等について設定する。

## ③ 画像撮影計画の立案

使用する橋梁点検ロボットが決まると、点検対象橋梁の規模や構造を考慮して、ロボットによる点検撮影範囲を決定する。ロボットによる点検が困難な範囲は、従前と同様に人が点検を実施する(図7-4)。ロボットにより撮影する場合は、道路橋定期点検要領が橋梁の全部材の近接目視を求めていることから、人が近接目視する場合とは異なり、点検範囲すべての画像を記録することが求められる。

橋梁点検ロボットによっては、所要の性能を担保するために現場での精度検証が必要なものについては、その方法、頻度等を整理した精度管理計画を立案する。例えば、ロボットによる損傷や変状の撮影は、0.2 mm幅のひび割れを撮影する場合と0.1 mm幅のひび割れを撮影する場合には、必要な画像分解能が異なることとなるため、必要な画像を取得するために必要な撮影経路を検討する。また、撮影位置をSfMにより推定する場合には、精度良く3次元モデルを構築できるよう撮影時の重複率なども考慮する。

橋梁は径間が100mを超えるものもあるため、橋梁点検ロボットの撮影速度や画像の重複度にも留意し、撮影スケジュールを立てる必要がある。

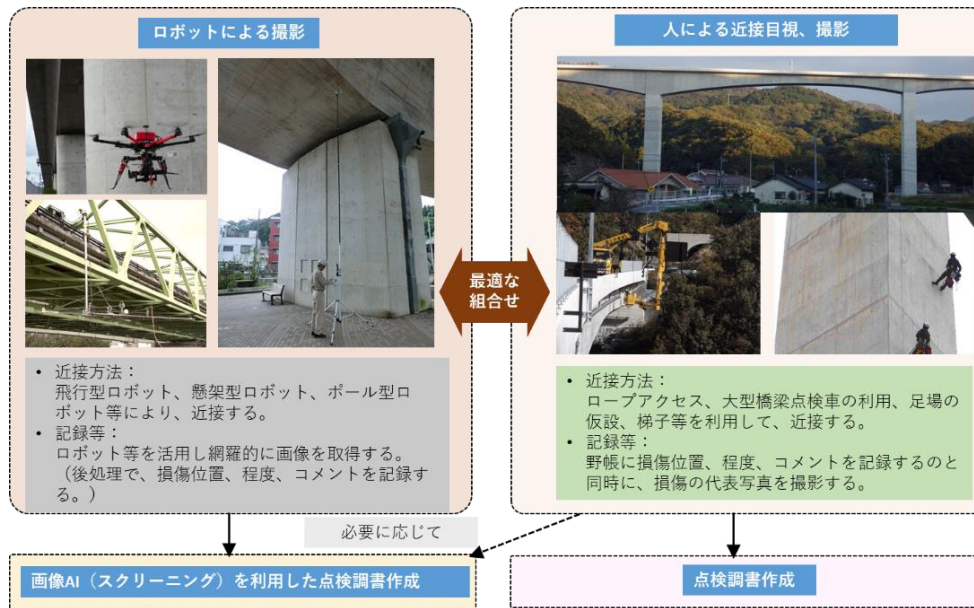


図7-4 橋梁点検における人とロボットの組み合わせ

#### ④ 橋梁点検ロボットによる点検画像の撮影

選定した橋梁点検ロボットを用いて点検を行う。撮影計画に基づき通行車両や周辺の安全確保に留意しながら画像を撮影する。実際の橋梁は、数100mを超える規模の橋もあり、全体を正確に記録するため、画像の撮影位置を効率的に管理することが必要となる。橋梁点検ロボットの撮影に際しては、様々な橋種の形状に応じて工夫する(図7-5)。

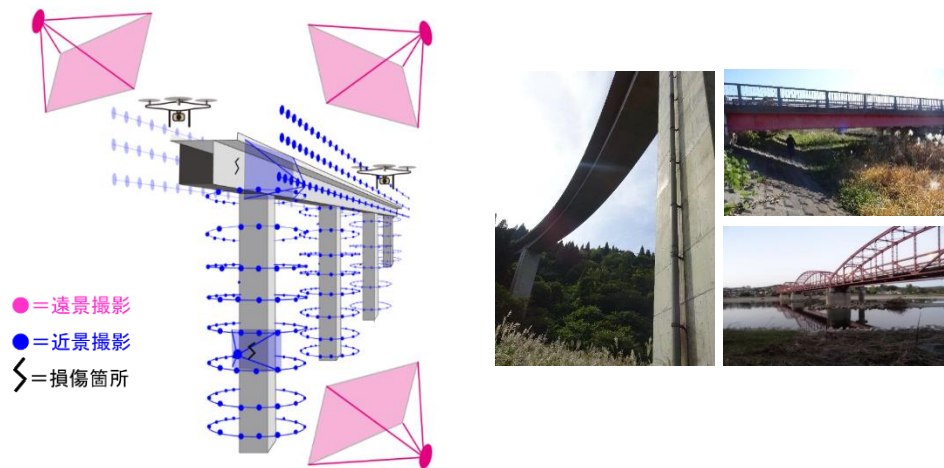


図7-5 様々な橋種と飛行型橋梁点検ロボットによる撮影イメージ

#### ⑤ 撮影画像による3次元モデルの評価

現状の橋梁点検では、人が撮影した損傷写真を平面図上で管理するため、手作業により写真の位置関係を整理している。橋梁点検ロボットで撮影した点検画像は、量も多く、人手で整理するには手間と時間を必要とするため、効率化が課題となっている。そこで市場で調達できる SfM ソフトを活用することで、点検画像の撮影位置、撮影方向の自動推定を行い、さらに3次元モデル上で、点検画像を管理する手法を提案している。これにより、損傷位置の記録と確認作業を大幅に効率化できると考えている。

例えば、コンクリート部材を撮影する場合0.2mm程度の損傷を識別可能な分解能で画像を撮影すると、1ピクセル当たり少なくとも0.3mm程度の分解能が必要となるため、100万画素程度のカメラで撮影することを考えると、橋長150m程度のPCラーメン橋でも1橋分の全外観の点検画像枚数は4万枚程度となる。これらの画像の撮影位置を適切に管理するためには、2次元モザイクを作成すると、合成のプロセスで原理的に元画像の分解能が低下するため、合成処理を

行わず 3 次元モデル上で各々の画像を管理する場合、平面図に展開することは現実的ではない。

なお、橋梁の 3 次元モデルは BIM/CIM で作成したモデルも十分活用可能であるが、SfM ソフトより構築した 3 次元点群モデルでも、画像や損傷の位置関係を示す上では十分に有効である。

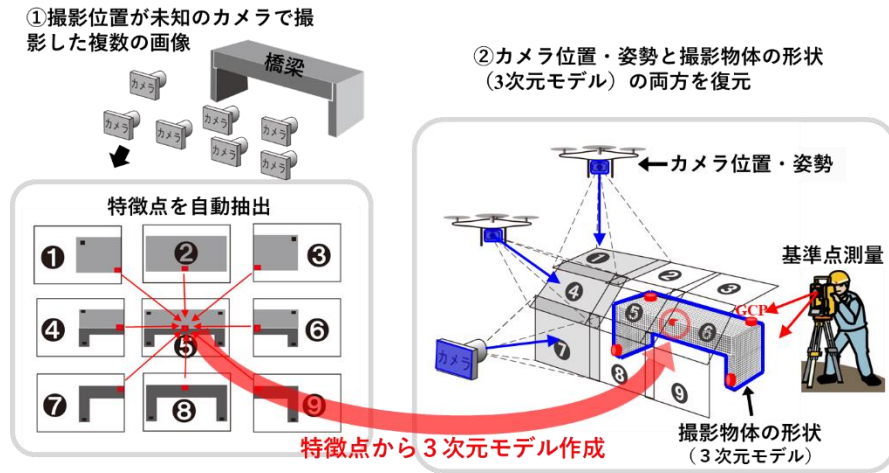


図7-6 SfMによる3次元モデルの生成

## ⑥ 点検報告書の作成

現行の橋梁定期点検要領に基づき作成される報告書は、橋梁毎に作成する必要があり各道路管理者によって報告書の様式が定められている。橋梁の径間毎に損傷種類と位置について、損傷の程度を図面上に図示するとともに、画像を整理し、損傷のリストを作成する。このうち、損傷の発生位置を示すことが重要であり、このため、点検時に撮影した画像の位置を部材番号等により整理する。

## 2) 床版橋へのスクリーニング手法適用の考察

次に最も一般的な橋梁構造の一つである床版橋へのスクリーニング手法適用について考察する。床版橋は、最も一般的な橋種であり、自治体が管理する全国の橋梁の 57% を占める。このタイプの橋梁は、比較的構造が単純で橋長 15m 以上のものの 20% (約 30,000 橋)、橋長 2m~15m 未満の橋梁の 68% (約 345,000 橋) を占める。

前節で述べたユースケースにおいて、橋梁点検ロボットで取得した画像から点検範囲のスクリーニングを行う場合、床版下面全面への近接目視は一定程度以上の損傷が点検ロボットにより確認された場合など、近接目視が必要な箇所のみ点検員による目視点検を実施する (図7-7)。近接目視の点検範囲が絞られることで、直接人件費の 5 割を閉める「点検作業」と「点検調書作成」のコスト低減が期待できる。橋梁点検ロボットが撮影した画像から、点検員が近接し確認すべき損傷の有無について画像処理技術 (例えば人工知能) を用いた自動検出により判別、この結果から必要な場合のみ点検技術者が近接目視を行う。ロボット点検調書および近接確認の結果、さらに詳細状況を把握すべき範囲について、詳細に確認 (詳細確認) し、写真撮影、記録してロボット点検調書を補完する。

点検者による点検作業のメリハリがつけられることで、「点検作業」(調査、チョーキング、写真撮影、野帳記録) の低減と、「点検調書作成」における、データ整理、損傷図作成等の工数、費用の削減が期待できる。

前提条件として、ロボット点検によるそれぞれの作業が点検者による作業の削減費用以内であること、また点検および調書の精度、品質が従来程度以上であることが必要。この場合の点検コスト低減の可能性については、「点検作業」「点検調書作成」にかかるコストが 50% 削減すること、全体で 3 割程度のコスト削減が可能となる (表7-1)。

橋梁点検ロボットを用いたこの点検手法が従来手法と異なる点は、従前の点検手法において「点検作業」では、近接目視により損傷の計測を行った後、内業で点検調書を作成している。このため点検調書に記載される損傷画像には、チョーキングが判読できるものの 0.2mm 程度のひび割れ等が確認できない場合もあり、必ずしも画像で残すことが要求されていない。一方、画像を使った点検では、スクリーニングの根拠としても、画像から損傷が確実に読み取れる必要があり、この点が、従来点検と全くことなる。この画像の取得には、橋梁点検ロボットに搭載されたカメラ等を想定するが、点検員がズーム機能を使って手でカメラ撮影する方法も考えられるが、いずれの場合も“捉えるべき損傷”の画像を確実に取得する必要がある。

さらに従来手法では、実態として「点検調書作成作業」の中で、まず近接目視で収集した記録写真や野帳の整理 (写真の取舍選択や、位置との関連付け等) した後に、各調書を作成している。この作業量は、損傷の数

に比例し、市販ソフトが使う場合も多いが、損傷図や損傷写真(旧橋梁定期点検要領の様式6相当)は個々に手作業で行われ工数が費やされる。特に点検業務全体のコストに占める割合が大きい機材費(橋梁点検車、高所作業車、梯子など)については、スクリーニングによるコスト低減の可能性が期待できる。

また、このケースにおいて効率化・工数低減を実現するために点検データの効果的な納品方法について工夫が必要となる。橋梁定期点検要領に基づく点検では、直接原価(直接人件費+直接経費)に占める比率は、いずれでも「点検調書作成」が最も高く、つづいて高所作業車、梯子の場合には「点検作業」、橋梁点検車の場合には「機械経費」が高い。従って、画像AIでの点検支援では「点検作業」、「機械経費」の費用削減とともに「点検調書作成」のデータ整理、損傷図作成等の工数削減を可能とする納品方式に変更する必要がある。

下面の損傷状況(ロボット+AI点検による損傷図)

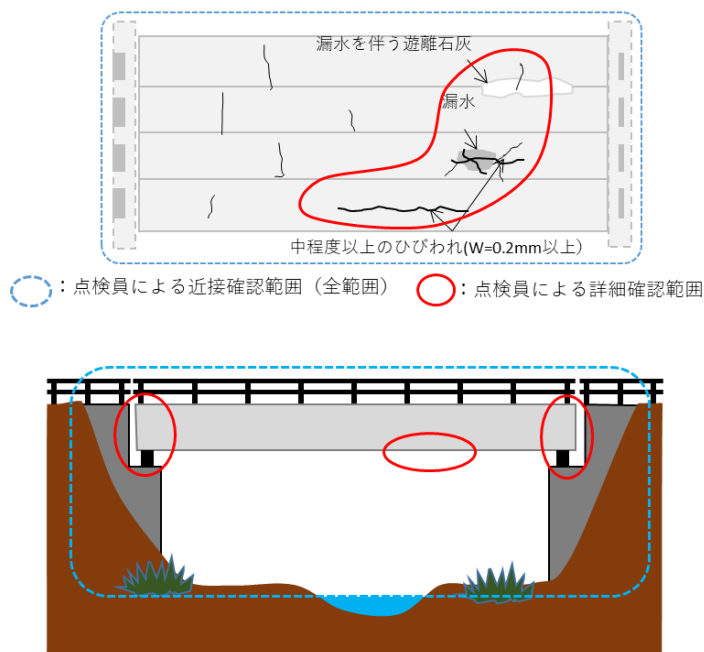


図7-7 ロボット等による点検範囲のスクリーニングのイメージ

表7-1 橋梁点検費用の試算例

	橋梁点検車(BT-200)場合				高所作業車の場合				梯子の場合			
	金額	直接原価に占める比率	所要時間	所要人工(人・時間)	金額	直接原価に占める比率	所要時間	所要人工(人・時間)	金額	直接原価に占める比率	所要時間	所要人工(人・時間)
業務委託料	976,200				916,450				807,700			
消費税相当額	72,300				67,200				59,800			
業務価格	903,900				848,550				747,900			
一般管理費	301,300				282,850				249,300			
業務原価	602,600				565,700				498,600			
直接原価	443,900	100.0%			396,200	100.0%			329,100	100.0%		
直接人件費	294,800	66.4%			314,700	79.4%			314,700	95.6%		
計画準備	30,200	6.8%	4.4	9.0	30,200	7.6%	4.4	9.0	30,200	9.2%	4.4	9.0
現地踏査	28,900	6.5%	2.4	6.8	28,900	7.3%	2.4	6.8	28,900	8.8%	2.4	6.8
関係機関協議	400	0.1%	0.1	0.1	0	0.0%			0	0.0%		
点検作業	60,900	13.7%	4.8	16.8	81,200	20.5%	6.4	22.4	81,200	24.7%	6.4	22.4
点検調書作成	160,400	36.1%	18.4	46.0	160,400	40.5%	18.4	46.0	160,400	48.7%	18.4	46.0
報告書作成	12,800	2.9%	0.7	3.2	12,800	3.2%	0.7	3.2	12,800	3.9%	0.7	3.2
打合せ協議	1,200	0.3%	0.1	0.2	1,200	0.3%	0.1	0.2	1,200	0.4%	0.1	0.2
直接経費	149,100	33.6%			81,500	20.6%			14,400	4.4%		
機械経費	98,900	22.3%	0.6		71,200	18.1%	0.8		4,800	1.5%	0.8	
安全費	43,000	9.7%			0	0.0%			0	0.0%		
仮設費	0	0.0%			0	0.0%			0	0.0%		
旅費交通費	7,200	1.6%			9,600	2.4%			9,600	2.9%		
間接原価	158,700				169,500				169,500			



### 7.1.4 評価のためのユースケース

橋梁点検ロボットの利用場面は、点検対象や使用する橋梁点検ロボットによって異なるため、ユースケース毎に評価する必要がある。ここでは、現状の近接目視点検の手順である、点検員が手の届く範囲に近づき、目視確認、打音（ハンマ等）、現地での計測・記録（チョーキングと写真撮影、野帳への記録）において、ロボットの利用場面を4種類のユースケースとして設定した。その各々について以下にまとめる。

#### 1) 近接目視点検結果（チョーキング）の撮影と記録

使用する橋梁点検ロボットの損傷検出精度が近接目視には及ばないが、チョーキングと一定程度以上（0.2 mm幅より大きなひび割れ等）の損傷について確実に画像を記録することができる性能を有する場合のユースケースAを設定する（図7-9）。

この場合のロボットの使用は、点検員による近接目視点検（目視、打音、計測、チョーキング）が終了した後、点検ロボットを用いて、損傷と同時に点検員が構造物表面に残したチョーキングを記録する。従来は点検員が行っていた作業（図7-8）のうち、写真撮影や野帳への記録の省略が可能となることに加え、損傷展開図作成のための記録作業の省略が可能となる。さらに、人の近接目視点検の前にロボットを用いることで、点検員が確認すべき変状を事前に把握することでポイントを押さえた効率的な点検作業が可能となる。

このユースケースの効果は、橋梁点検員による近接目視点検後の損傷箇所のチョーキングを橋梁点検ロボットが記録することで、「現地作業時間の短縮」「点検調書（損傷写真）の作成効率化」「規制時間の短縮」「コスト縮減」等が期待できる。

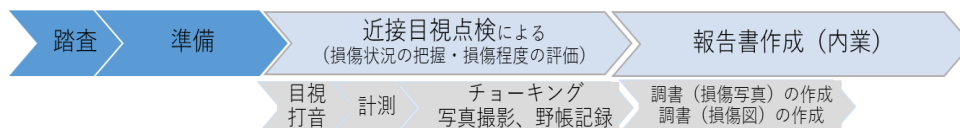


図7-8 従来の点検手順



図7-9 近接目視点検後にロボットを用いて撮影と記録を行う手順(ユースケース A)

#### 2) 人の近接目視に代わり橋梁点検ロボットを使用して損傷写真を記録

橋梁点検ロボットの損傷検出精度が人の近接目視点検と同等水準に達している場合のユースケースBを設定する（図7-10）。ロボット使用の前提として、チョーキングがない状態で、点検ロボットで撮影した画像のみから近接目視確認する必要がある全ての損傷を判読できる条件を満たす必要がある。

この場合のロボットの使用は、点検員が近接目視点検を行う前に点検ロボットを使用し、目視で確認すべき全ての損傷等を画像に記録する。従来は点検員が近接目視によって行っていた「損傷状況の把握」「損傷程度の評価」について、点検画像を判読することにより実施することが可能となる。損傷の程度に応じて近接目視や打音を行う必要があるが、写真撮影・チョーキングを省略することで点検作業の大幅な効率化が実現。

このユースケースの効果は、ロボットで撮影した画像を使い橋梁点検員が損傷状況の把握、損傷程度の評価を行うことで、「現地作業時間の大幅な短縮」「規制時間の短縮」「点検コストの縮減」などが期待できる。

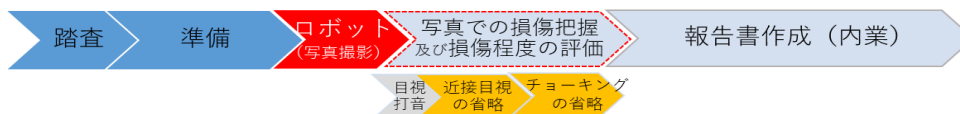


図7-10 近接目視点検の前にロボットを用いて撮影と記録を行う手順(ユースケース B)

### 3) 橋梁点検ロボットが撮影した損傷写真から損傷展開図を自動作成

使用する橋梁点検ロボットの損傷検出精度が、人の近接目視点検と同等水準に達している場合のユースケースCを設定する（図7-11）。

近接目視点検では、点検員が手の届く範囲に近づき、目視確認、打音（ハンマ等）、現地での計測・記録（チョーキングと写真撮影、野帳への記録）を実施する。損傷を視認した場合には、損傷写真を撮影し、現場点検作業の終了後に、内業で点検写真の撮影した位置等を確認し、点検対象の展開図上に矢印と引き出し線を用いて、損傷の種類や、損傷の程度、写真番号などを整理する。

さらに、点検で撮影した画像の位置関係を再現できる精度で画像を取得することにより、損傷展開図の作成プロセスを一部または全部を自動化することを想定。ロボット使用の前提として、橋梁点検ロボットの損傷検出精度がチョーキングのない状態で、点検ロボットが撮影した画像のみから近接目視確認する必要がある全ての損傷を判読できる条件を満たす必要がある。

このユースケースの効果は、橋梁点検ロボットによる事前計測（規制不要）に加え、橋梁点検員による近接目視点検後の損傷箇所のチョーキングを橋梁点検ロボットが記録することで、「現地作業時間の短縮」「点検調書（損傷展開図）の作成効率化」「規制時間の短縮」「コスト縮減」等が期待できる。



図7-11 近接目視点検前後にロボットを用いて撮影と記録を行い、損傷展開図作成の自動化までの手順(ユースケース C)

### 4) 橋梁点検ロボットが撮影した損傷写真から損傷の種類や損傷程度を自動判別

使用する橋梁点検ロボットの損傷検出精度や損傷種類の判別精度が、人の近接目視点検と同等水準に達している場合のユースケースDを設定する（図7-12）。

この場合の橋梁点検ロボットは、取得した損傷画像から損傷種類の判別、損傷程度の評価をソフトウェアにより自動化する。点検員が損傷を近接目視で見つけた場合に記録する画像数に対し、橋梁点検ロボットが取得する画像は、損傷の有無にかかわらず撮影されるため、大量のロボット取得画像から、効率的に損傷の種類と損傷程度の評価を実施する。これまで人が行っていた、目視確認、打音（ハンマ等）、現地での計測・記録（チョーキングと写真撮影、野帳への記録）をロボットが実施。損傷を視認した場合には、損傷写真を撮影することに加え、現場点検作業の終了後に、内業で点検写真の撮影した位置等を確認し、点検対象の展開図上に矢印と引き出し線を用いて、損傷の種類や、損傷の程度、写真番号などを整理する。

このユースケースの効果は、橋梁点検員に代わりロボットを用いて撮影した画像から自動で損傷状況の把握、損傷程度の評価を行うことにより、「近接目視、及びチョーキングに係る現地作業時間の短縮」「規制時間の短縮」「点検コストの縮減」などが期待できる。

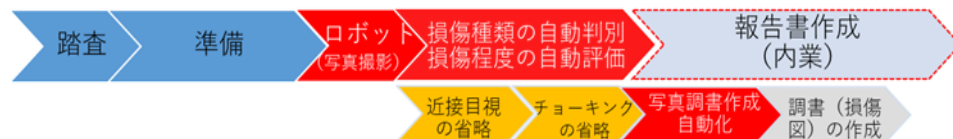


図7-12 近接目視点検前後にロボットを用いて撮影と記録を行い、損傷展開図作成の自動化までの手順(ユースケース D)

### 7.1.5 橋梁点検ロボットの社会実装に必要な技術

前項に示したユースケースを橋梁点検ロボットによって実現するために、ソフトウェア技術の有効活用について考慮する必要がある。一連の橋梁点検作業を効率的に進めるためには、橋梁点検ロボット単体だけでなく、損傷画像データを可視化する技術の洗練も欠かせない。ここでは、点検ロボット単体の性能向上だけでなく、データ処理技術の利用を含む橋梁点検システムに必要な技術について考察する。

次に示す技術は、いずれも点検ロボットの導入に際して不可欠な技術であり、ロボットの性能評価に際しても一体的に扱うことが前提となる技術である。例えば、点検調書の作成時に、撮影位置の推定や、撮影漏れを確認する際にこれら技術と連動しなければロボットも点検システムとして成立しない。

#### 1) 橋梁点検ロボットが取得した大量の画像を管理する技術

ロボットで点検画像を撮影すると、点検で要求される 0.2 mm 程度のひび割れが記録するため、1 ピクセル=0.1 mm 相当で記録しようとする、3677 万画素の 1 眼レフカメラで撮影範囲 736 mm×491.2 mm で記録する必要がある。この場合、高さ 50m×幅 5m の橋脚 1 本(4 面)を撮影するためには、ラップ率を 50%として、5500 枚の画像を撮影する必要がある。いくつかの橋梁点検ロボットに搭載されているカメラには 100 万画素クラスのものも見られることから、膨大な画像を処理確認する必要が生じている。

近接目視によって記録される1橋梁あたりの損傷写真の数は、橋梁の規模にもよるが多くても数 100 枚程度である。一方で橋梁点検ロボットは、損傷の有無に関わらず構造物表面を全面近接画像により記録することから、1橋梁あたり1万枚を超える大量の画像を扱う必要がある。

これらの画像データ(動画及び静止画)は、橋梁点検成果物の一部として撮影位置等を明らかにする必要から、画像データに“メタデータ”と呼ばれる管理情報を合せて管理する必要がある。このため国土交通省では2019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)」を公表し、画像にExif(Exchangeable image file format)情報として撮影日時やカメラ仕様、GNSS情報などを格納する他、点検写真のメタデータとして、写真の中心位置座標・カメラ中心位置座標・撮影方向(オイラー角、四元数)・写真寸法・写真の四隅の座標等について格納することを求めている。これらの撮影方向や撮影位置座標は、6.2 及び 6.3 節で考察したとおり画像からひび割れ等の損傷の大きさを正確に推定するためにも必要な情報である。橋梁下の点検ではロボットの位置をGNSS測位では精度を確保できないが、6.5 節で示したように 3 次元モデルから推定することが可能である。

これら大量の画像を必要に応じて管理者が閲覧するために、画像データを効率よく納品し管理することが必要となる。本研究では、Web上のクラウドサービスとしてSfMによる3Dモデル構築が可能なReconstruct社のクラウドサービスやPix4D mapper(Pix4D社)等を用いて、橋梁点検画像データからモデリングを行った(図7-13)。



図7-13 クラウドを利用した大量の橋梁点検画像の保管技術のイメージ

また、橋梁点検画像データは損傷の経年変化を把握するためにも 3 次元的な損傷位置を特定するだけでなく時間的・空間的な管理が必要となる。これを実現する基盤システムは地図情報システムをベースにクラウド上でデータ共有が可能な国土交通省のインフラ情報プラットフォームなどが公開されている。

## 2) 画像から損傷を自動検出する技術

点検ロボットが取得した点検画像は、微細な損傷を検出するため近接画像であり、人が目で損傷の有無を近接目視と同等の精度で確認する場合には、必要に応じて画像を実物大のサイズまで拡大することが必要になる。

前項に示すように人が近接目視すべき範囲をスクリーニングする際、個々の画像について損傷の有無を確認する必要があり、これを人が肉眼で行うことは、時間効率的に考えても現実的ではない。

そこで、人が大量の画像を目視で確認する代わりに、画像から損傷を自動検出する技術が必要となる。これは、点検ロボットの社会実装において欠くことのできない技術である。既に土木構造物の点検画像から人工知能(AI)等を用いてひび割れを検出する技術は数多く研究がなされ既に一部の技術が実用化されている。

ただし、画像から損傷を自動検出するためには、6.3 節及び 6.5 節にて考察したとおり点検画像の撮影位置と撮影方向を用いて、あらかじめ画像の対物画素寸法を明らかにする必要があり、これができる場合にのみ損傷の自動検出が可能となる。

国土交通省では、ロボットによるインフラ点検のためのAI開発を促進するための教師画像データの整備を進めている(図7-14)。

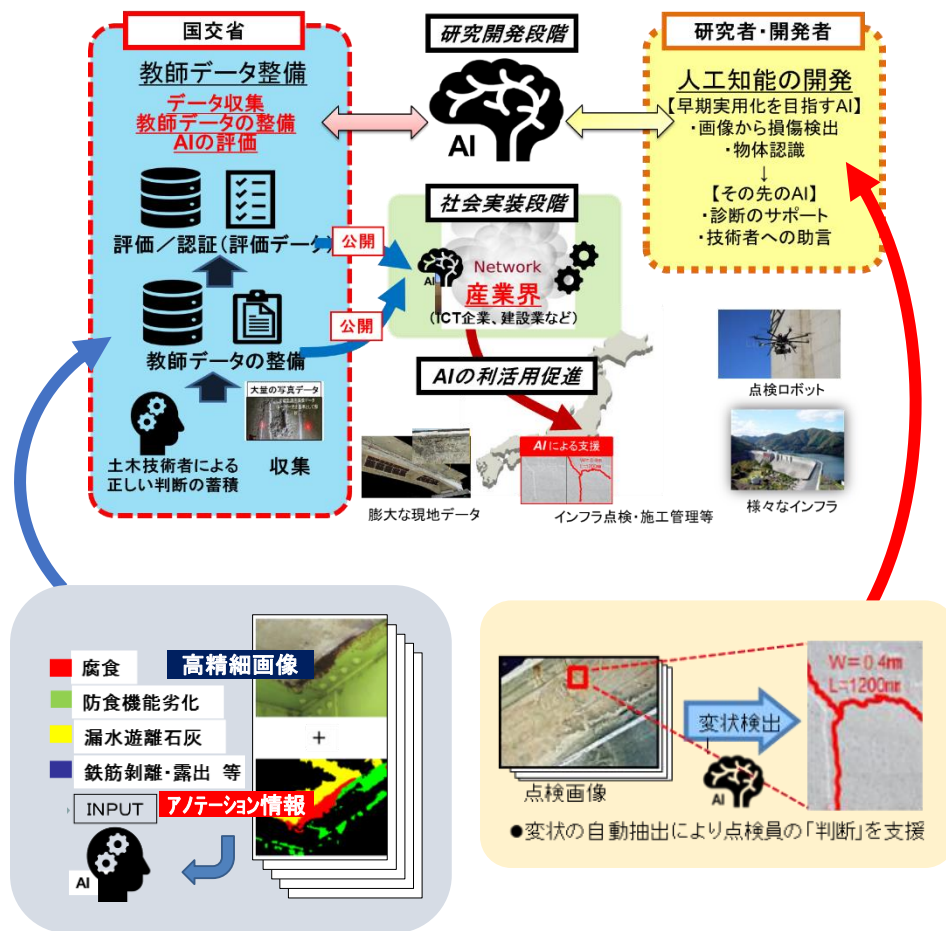


図7-14 国交省が進めるインフラ点検ロボットのための教師画像データ整備

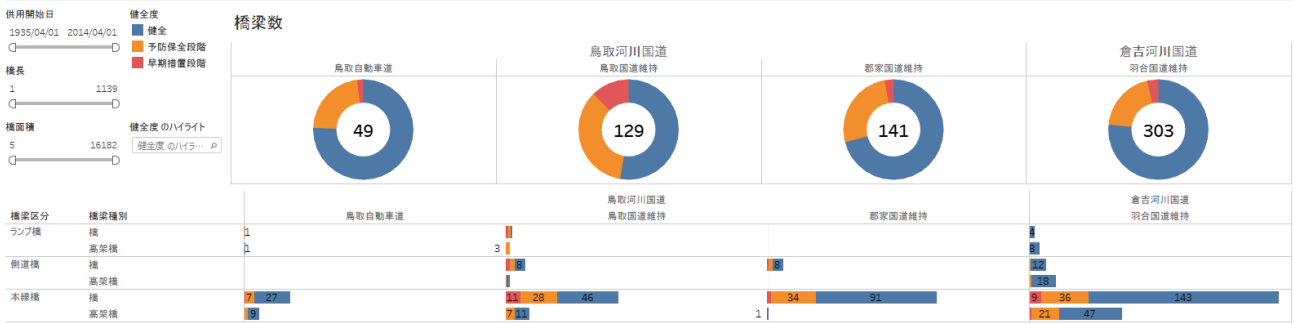
出所:国土交通省資料

## 3) データ統合管理により調書の自動出力や自動解析する技術

点検の目的は、橋梁の健全性の維持であることから、点検調査を作成するだけではなく、その先の診断と措置(補修や維持管理)を考慮する必要がある。個別の橋梁に関する点検報告書と、管理者が管理すべき多数の橋梁の健全性把握に資する調書を統合処理するとともに、点検記録が補修や維持管理までの一連の記録と連携し、メンテナンスサイクルに資する情報管理につながらなければ点検ロボットの導入は進まない。

例えば、現在の点検調書をクラウド上で共有することにより膨大な橋梁の損傷画像や損傷傾向を、維持作業を行う出張所職員や補修設計や予算計画を担当する職員の業務に最適化したビューをダッシュボードを用いて構築することが容易に可能である(図7-15, 7-16)。

### 橋梁カルテ基礎データ



### 一覧

名称/別名	橋梁番号	路線名称	点検年月日..	健全度	代表対策区分
鳥取川橋	8730373000	一般国道373号 新道	2014	予防保全段階	C1
大いす橋	8730053002	一般国道53号 現道	2016	予防保全段階	S1
おき橋	8730373002	一般国道373号 新道	2014	健全	B
おき橋	8731009069	一般国道9号 新道	2015	健全	B
おき橋	8731009071	一般国道9号 現道	2015	健全	B
おき橋	8731009167	一般国道9号 新道	2015	予防保全段階	C1
おき橋	8731009096	一般国道9号 現道	2016	健全	B
おき橋	8730029044	一般国道29号 現道	2015	健全	B
おき橋	8730053002	一般国道53号 現道	2016	健全	B
おき橋	8730053013	一般国道53号 現道	2015	予防保全段階	C1
おき橋	8730373002	一般国道373号 新道	2016	健全	B
おき橋	8730053009	一般国道53号 現道	2015	健全	B
おき橋	8730029079	一般国道29号 新道	2014	予防保全段階	C1
おき橋	8730029069	一般国道29号 新道	2017	早期措置段階	C2
おき橋	8731009132	一般国道9号 新道	2014	健全	B
おき橋	8731009358	一般国道9号 新道	2017	健全	B
おき橋	8731009361	一般国道9号 新道	2018	予防保全段階	C1

図7-15 ダッシュボードを用いた橋梁点検データのビューイメージ(地図での検索)

対象橋梁: **因幡大橋(上り)**

橋梁管理番号: 1873084116000000  
 名称: 因幡大橋(上り)  
 名称別名: 伊賀野上(上り)  
 事務所: 鳥取河川国道  
 橋梁形式: 単純非合成版桁橋, 2経間  
 橋梁種別: 橋

▼ 工程 > 材料 > 部材 でフィルターを行う

下部構造	橋台	下部構造	基礎	下部構造	橋脚	上部構造
コンクリート						
Ac	Ap	Aw	Ax	Cr	Ds	Ff
鋼	Mg	Pb	Pw	Px	St	その他の材料

要素番号の数 1873084116000000

工程	材料	部材種別	a	b	c	d	e	x
上部構造	コンクリート	床版	8	68	86			
	鋼	橋桁	S1	89	7	133		
	主桁		33	13	21	31	40	98
	縦桁							
	床版							
下部構造	基礎	コンクリート						
下部構造	橋脚	コンクリート						
	橋脚	鋼						
	橋脚	鉄筋						
	橋脚	コンクリート						
	橋脚	鋼						
	橋脚	鉄筋						

損傷程度(1873084116000000)

工程	材料	部材種別	要素番号	損傷の種類	経間番号							
					1	2	3	4	5	6	7	
上部構造	コンクリート	床版	0101	剥離・鉄筋露出	d	d	d	d	d	d	d	d
				漏水・遊離石	b	d	d	d	d	b	d	c
				床版ひびわれ	c	b	b	b	b	b	b	b
				漏水・遊離石	c	b	b	d	d	d	d	b
				床版ひびわれ	c	b	b	d	d	d	b	b
				漏水・遊離石	c	b	b	b	b	c	d	b
				床版ひびわれ	c	b	b	d	d	d	b	b
				漏水・遊離石	c	c	c	b	b	b	b	b
				床版ひびわれ	c	c	c	b	b	b	b	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c	c	c	d	d	c	c	b
				床版ひびわれ	c	c	c	d	d	c	c	b
				漏水・遊離石	c</							

#### 4) 3次元モデルをベースにした点検データ管理技術(点検調書の3D化)

現行の橋梁点検調書では損傷位置を正確に記録するための要求精度が明らかにされていない。6.2節に述べたとおり、点検員が目視をベースに作成した記録を基に調書を作成している。橋梁の健全性を診断する際の根拠となる“損傷状態の記録”については、施設管理者が定める様式に基づいて平面展開図上に簡略記号を図示し、損傷写真は引き出し線を用いて写真番号を記載する方法等が用いられている。この方法では、位置の記録に関する要求精度や損傷位置を計測する方法も定められていないため、6.2節の分析に示すとおり図示された損傷の位置が実際の位置と異なって記録されることがある。損傷の位置記録精度がこれまで明確にされなかった理由については、実務的には点検に必要な技術力と知識を有する点検員が、近接目視によって損傷を確認しているため、点検の目的は完遂されており、むしろ精緻な記録を作成する労力を割くよりも重大な損傷を見逃すことがないよう効率的に作業することが重視されてきたからであると思われる。

6章で考察した通り、ロボット技術の適用により効率的に損傷画像の撮影位置を推定することが可能であることをから、今後は損傷の位置管理が可能な3次元モデルをベースとした点検データの管理技術の実現が望まれる(図7-17)。



図7-17 3次元モデルをベースにした点検データの共有と統合化イメージ

## 7.2 橋梁点検ロボットの評価の観点

本節では橋梁点検ロボットの評価の視点について考察する。第5章に述べたとおり、これまでの橋梁点検ロボットの評価では、すぐに使える技術を見極めるために「1. 検出精度」・「2. 効率」・「3. 経済性」を評価項目としている。しかしこれらの評価指標だけでは、第6章で述べた「ロボットの優れた特長」を引き出すための評価には不十分であることが明らかである。人の作業を単純にロボットで置き換える場合は、これらの指標だけで評価することも考えられるが、ロボットが取得した画像データの価値に着目することこそが重要であると考えられる。これまでの人の眼を信頼した点検手法は、GPU(Graphics Processing Unit)による深層学習やMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)等の登場によりロボット技術が現在の水準に達する以前に考案されたものであり、画像から損傷を自動検出するAI(Artificial Intelligence)や自律化されたフィールドロボットの登場に適応するためには、点検ロボットが取得した電子データの利用価値を考慮した点検手法を考慮すべきである。ここで点検ロボットが取得した「電子データ」と述べたのは、本研究で扱った「点検画像」は人が撮影した「点検写真」とは明らかに異なる価値を有することを強調したいからである。点検ロボットに搭載されたデジタルカメラで撮影した画像には、GNSSやIMU等のセンサーにより位置や姿勢のデータを付加することが可能であり、連続撮影による重複した画像の特徴点からは被写体の3次元情報を推定することが可能である。これら電子データは橋梁点検ロボットを用いることで得ることができ、点検ロボットから得られた電子データを活用することにより点検に必要な「情報」を得ることが可能であること一端を第6章で示した。まさに点検ロボットの優れた特長を引き出すことで、「屋外の点検作業(外業)」のみならず「点検報告書の作成(内業)」を含む橋梁点検業務全体の効率改善に繋がると考えている。

そこで、評価に求められる視点は次の2点存在すると考えた。まずは「ロボット単体の性能評価」の視点、これは橋梁点検ロボットの優位性を引き出すために必要な視点である。もうひとつは「総合的な評価」の視点、これは橋梁点検プロセス全体の品質確保と効率化のために必要な視点である。

### 7.2.1 橋梁点検ロボットの持つ優位性に着目した評価

本研究では橋梁点検ロボットの評価にあたり、ロボットから得られる「電子データ」の後工程での利用価値に着目し評価項目を新たに追加した(図7-18)。

追加した評価項目は、検出精度に関わる指標として「4. 位置の記録精度」「5. 網羅性」「6. 画像の精度」の3項目。これにより直接的には、損傷位置の記録が改善され、前節に示した点検ロボットによるスクリーニングが可能となる。また、「損傷の位置精度」と「画像の網羅性」に加えて「画像の精度」が確保されることにより同一箇所での経年変化の確認が可能になるなど、これまでの点検調査の内容を超えた情報の集積が可能となる。

さらに損傷を写した画像の位置記録精度や画像そのものの精度が確保されることにより、点検調査作成プロセスにおける「損傷写真」や「損傷リスト」に係るレポート作成の自動化が可能となる。点検ロボットの性能が向上すれば、「効率」や「経済性」の評価においても、「屋外の点検作業(外業)」のみならず「点検報告書の作成(内業)」を含む橋梁点検業務全体を対象とすることから、「2. 効率(点検調査作成の効率化)」と「3. 経済性(調査自動化)」を追加した。

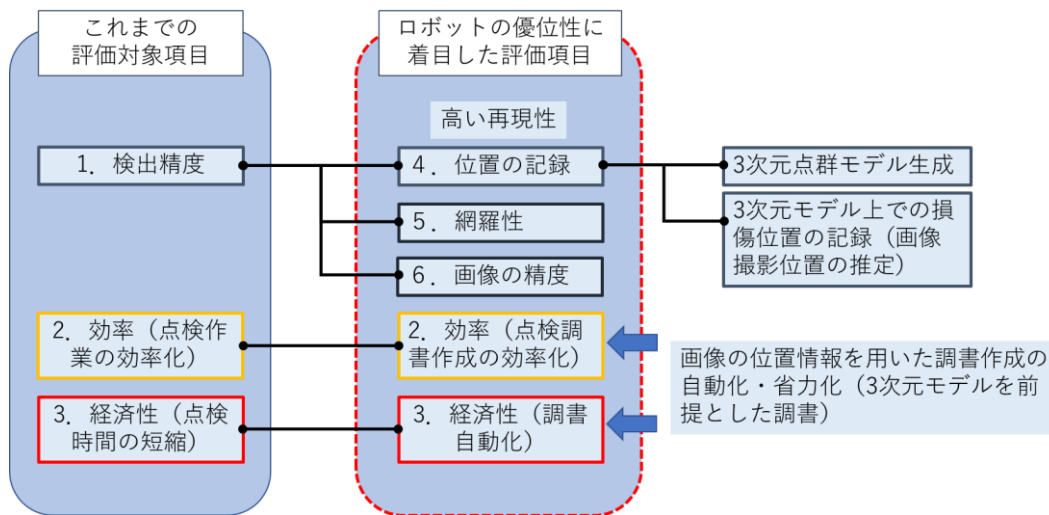


図7-18 橋梁点検ロボットの持つ優位性に着目した評価項目

これまでの橋梁点検では、点検員が作成する点検報告書には、損傷図と呼ばれる平面展開図に矢印と引き出し線で損傷種別と発生位置を記録している。損傷には、損傷ランクを付与することになっているが、点検対象の全表面を画像に記録していないため、見落としが生じても確認する方法はない。

橋梁点検ロボットは、これまでの100倍を超える数の画像を取得することにより損傷の位置を正確に記録することが可能であるが、その作業を人手で行うことは点検業務の効率を低下させる。これまでの点検ロボットの評価では、納品方法については、現在運用されているペーパーベースの様式で評価を行ってきた。本研究では、3次元モデルで表現することの有効性に着目し3次元モデルでの自動処理を前提とした性能評価を提案することとした。なお、橋梁点検は対象部材も多岐に及ぶため、評価に際して以下の視点を取り入れることで、ロボットの部分的活用や人とロボットが分担して点検を行う場合の判断材料となる評価を実施する。

- (1) 橋梁点検ロボットが、近接目視範囲の絞り込み(スクリーニング)に有効であることが確認できる性能評価
- (2) 人が目視確認した損傷位置を正確に記録できることを確認できる性能評価

位置精度を高めることで、目視点検範囲の絞り込みが可能となることに加え、ひび割れの発生位置や方向を正確に記録することで診断精度の向上が期待できる。これらの効果が得られる根拠として、検出能力から見た損傷の記録精度(検出率)、損傷位置の記録精度に関する従来点検手法との比較、作業効率から見た有効性(目視点検との作業効率の比較)が挙げられる。これらの点を踏まえて、橋梁点検ロボットの社会実装による効率的な点検の実現に加え、客観的で再現性のある点検記録を残すことを目指すため、ロボットの持つ優位性に着目した新たな評価方法の基本方針を次のとおり考案した。

#### ① 自然環境条下の橋梁での性能評価を実施【共通】

国交省が実施したコストや安全性、検出精度、効率といった現場検証における総合的な評価の視点に加え、スクリーニングへの適用などロボット技術の優位性に着目した評価を行う。なお、評価は人との比較ではなくベンチマーク(基準値)評価とすることで、結果に汎用性を持たせ様々な現場条件への導入判断に資する評価とする。

#### ② 点検ロボットシステム「単体の評価」と、点検に係る「総合的な評価」の実施【共通】

ロボット単体の性能に着目し、国交省が定めた性能カタログの各種性能の現地確認に加え、標準的な現場条件における作業コストや作業効率を含む総合的な評価の2つの視点から評価を行う。

#### ③ 橋梁3次元モデルの精度評価【要素・単体】

納品対象となる橋梁3次元モデルの精度評価を行う。損傷画像の撮影位置・撮影角度、損傷位置の精度についても対象とする。

#### ④ 損傷画像の精度評価【要素・単体】

点検画像の撮像能力、およびその管理方法、空間解像度(標準対物画素寸法)と輝度(彩度)の階調を評価する。

#### ⑤ 損傷位置の再現性評価【要素・単体】

損傷の進行(経時変化)を比較するため損傷位置の推定精度を評価する。

#### ⑥ 3次元モデルでの点検画像交換を前提とした性能評価【要素・単体】

点検ロボットのメリットを享受するために不可欠な3次元モデルでの点検画像管理、画像交換を前提とした作業効率や点検精度の評価を行う。

#### ⑦ 点検作業全体の自動化率の評価【要素・単体】

ロボットの異動経路計画、機械操作、画像の整理、調書作成作業における自動化率を評価する。

#### ⑧ 作業効率の評価【総合】

現場点検作業(準備～撤収まで)、点検調書の作成、3次元モデル化までの処理に係る効率を評価する。

#### ⑨ オペレーション性の評価【総合】

外業の必要人員、要求される高度技量・資格要件、準備・補助作業の多少・難易度を評価する。

#### ⑩ 点検成果品質の総合評価【総合】

橋梁点検成果となる損傷画像については、点検調書作成までの全てのプロセスで使用する技術(例えば、点検ロボット、画像センサー、測位センサー、3次元処理ソフトウェア)を複合した、最終的な成果品質で評価を実施する。



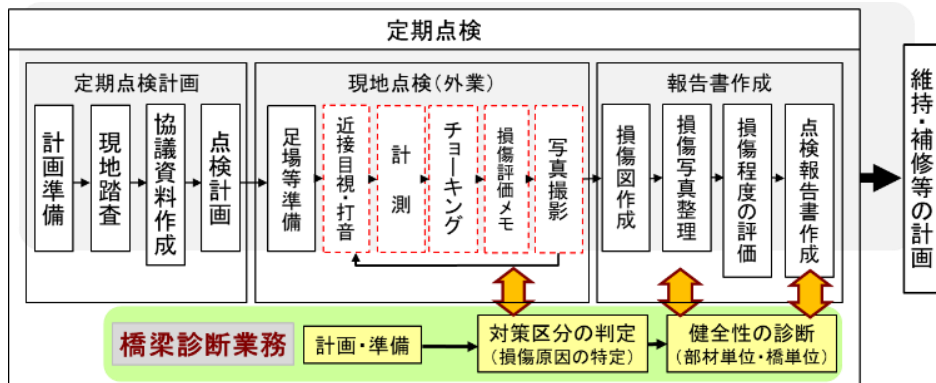


図7-19 総合的な評価の対象とする点検プロセスプロセス

### 7.2.2 点検用センサー・プローブシステムとしてのロボットの評価

橋梁点検ロボットの点検用センサー・プローブシステムとしての優位性に着目した評価は、ロボットの持つ、移動機能、位置姿勢特定機能、損傷検出機能、記録機能などの基本的な性能について行う。

ロボットが取得した画像から橋梁3次元モデルを生成することで、損傷画像の撮影位置や損傷位置を高精度に推定できることが、原理的には明らかになった。

これまでの人の点検結果(損傷図)との比較による性能評価では、結果的に個体差のある人間の視力を上回る評価は難しい。言い換えればロボットの強みを引き出せる前提条件が出来ていなかった。そこで、橋梁点検ロボットが撮影した画像を個別に評価するだけでなく、取得データ全体に着目し、橋梁点検ロボットで取得した網羅的な点検画像を用いて、画像の撮影位置、損傷の発生位置をより正確に推定できることを評価する。位置情報を正確に推定できることで、これまで人手に依存していた、画像の撮影位置の整理作業を自動化することが可能となり、大幅な内業(点検調査作成)の効率化においてロボットの有効性を評価できることが判った。

また、橋梁点検ロボットが構造物表面を網羅的に撮影できることを評価する。これにより、画像の分解能が0.1mm幅のクラックを識別できるほど精密でなくとも、スクリーニングとして点検画像を取得することで、人による近接目視範囲を絞り込むことが可能であること。床版コンクリートのひび割れや、PC構造物については、幅0.1mm程度のひび割れについても記録を作成することとされているが、多くの部材については、橋梁点検ロボットを用いて幅0.2mm程度のひび割れ相当の損傷までを調書に記録している。網羅的に画像を残すことで、損傷等がまったく確認されなかった範囲については、近接目視を省略することが可能となる。

このように橋梁点検ロボットが撮影した範囲を画像で確認することで、大幅な省力化が期待できる。

橋梁点検ロボットの単体性能の評価に際しても、その評価は、ロボットの機能や使用意図に応じて異なることを考慮する。図7-20に示すように橋梁点検ロボットの性能は、移動機能や損傷検出機能の組合せである。例えば、検出機能を計測精度で評価する場合、強風下での橋脚のひび割れ検出率(赤枠:①)や、移動機能を効率性で評価する場合、ある気温での床版のうきを検出する場合の所要時間(青枠:②)のように、同一ロボットの持つ性能は、その機能と発揮される目的性能を勘案し総合評価を行う。

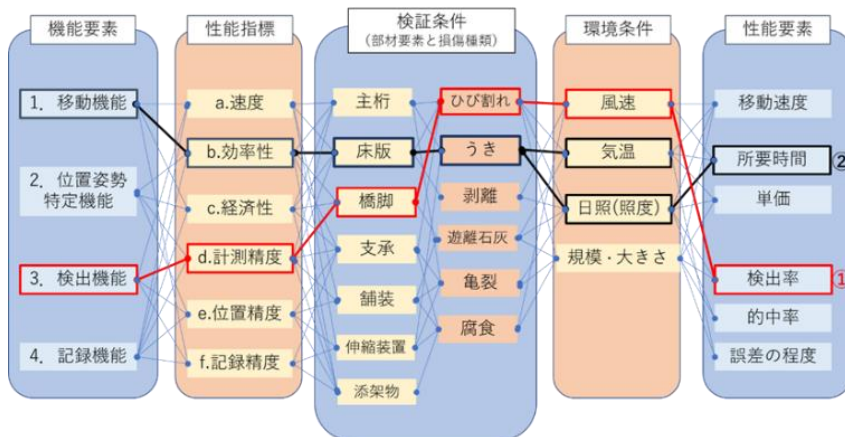


図7-20 橋梁点検ロボットの性能評価に必要な情

## 1) 点検用センサー・プローブシステムとしてのロボットの性能評価方針

### (方針1) 自然環境条下の実橋梁において性能評価を実施すること

橋梁点検ロボットの性能評価は、橋梁の構造形式や規模が個別橋梁で異なることや、ロボット毎に構造物へのアクセス方法や点検経路が異なることから、条件を固定せず必要に応じて条件選択が可能な実橋梁において性能評価を可能とする必要がある。

また屋外の実物大橋梁で性能試験を行う利点として、時々刻々変化する自然条件の影響を考慮することが可能な点が挙げられる。また、過去の性能検証では、季節や時間帯の違いによっても環境条件が変化するため、作業効率や検出率などの性能評価に影響が及ぶことが判っている。

床版下の点検は、GNSS の信号も入らず精度の高い測位が難しいうえ、橋梁を構成する部材は複雑且つ多様な形状を有している。このため点検ロボットが取得する画像についても、多くの場合が正対画像を撮影することが難しいため、3次元モデルを構成するためには適切な撮影経路で一定以上の重複率の下で画像を取得する必要がある。

また、橋梁の大きさも重要な検証条件になる。例えば 50m を超える橋脚高を有する橋梁を点検する場合、点検ロボットの操作も 50m 程度離れたところから行う必要がある。橋梁構造は鋼橋、コンクリート橋、桁橋、アーチ橋、トラス橋など様々な形式が存在する。性能検証のためだけに実橋梁のスケール感を再現することは困難であるため、性能評価試験を実施した場合、橋梁の諸元情報に加えて、風速や気温、天候などの環境条件は自然環境条件とし、記録することが必要となる。実際の点検現場に近い条件を再現することで的確にロボットの点検性能を確認することができる。

### (方針2) 検出精度は、様々な条件へ適用可能なベンチマーク方式での性能評価を実施すること

これまで点検ロボットの性能検証は、第5章でも述べたとおり人の近接目視点検の結果と比較することにより行われてきた。この検証方法は施設管理者に対して「同等以上の能力がある」と言えることから、一見説得力がある様に見えるが、人の点検結果が正確であることが前提となる。例えば、100箇所のひび割れのうち1割が正確に記録できていないとすれば、理論的に90%の検出率を有するロボットの検出率は約8割に低下する。

ここでは第6章の考察を踏まえ、点検ロボットの検出精度を、ロボットで記録した画像の「空間分解能」と「輝度の階調」で定量的に評価することを提案する。点検ロボットへの要求として、一定の幅をもったひび割れの見落としがないことや、一定幅以上のひび割れを確実に捉えることが重要になることが既に述べたユースケースからも明らかである。

このとき考慮すべき点として点検ロボットのひび割れ検出精度は、同じ点検ロボットに搭載された同じカメラであっても、カメラが被写体に接近すれば損傷画像の「空間分解能」は高い精度を示すことになるが、点検ロボットの離隔が定まらず損傷との距離が変動する場合は、損傷画像の空間分解能もばらついて定まらなくなる点である(図7-14)。

これまでの検出精度の評価は、このようなロボットの特性を考慮し、点検プロセスを対象とせず、提出された損傷画像のみを評価の対象としてきた。結果的に「空間分解能」の情報が欠落した「単なる画像」に損傷が見えるか否かを判定し検出率を評価していたと言える。実際には、その大きさを画像から判断する術を考慮していなかったのである。

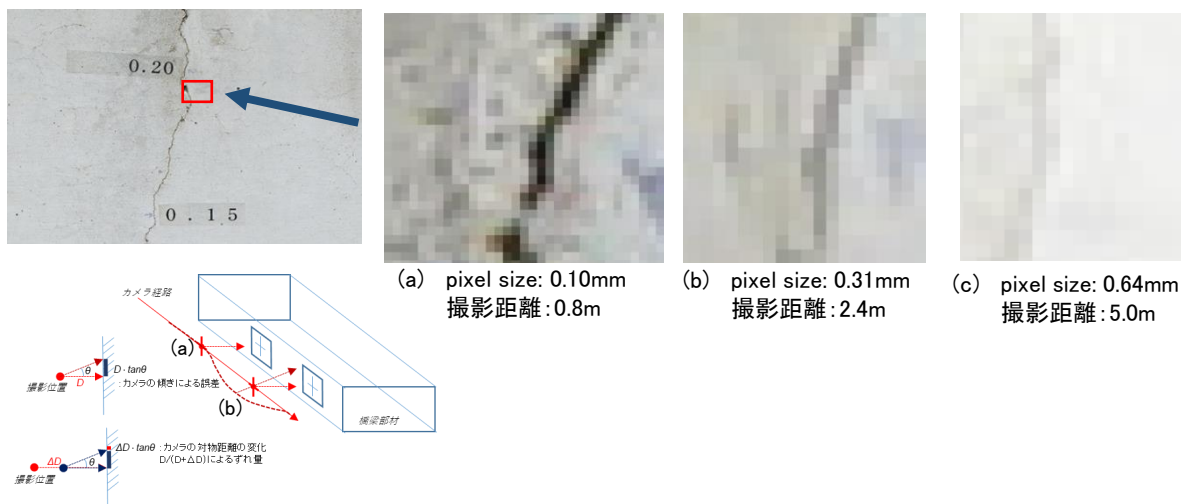


図7-14 ロボットの移動経路が空間分解能に与える違い

～同一のカメラ・ロボットでも損傷の見え方は刻々と変化する～

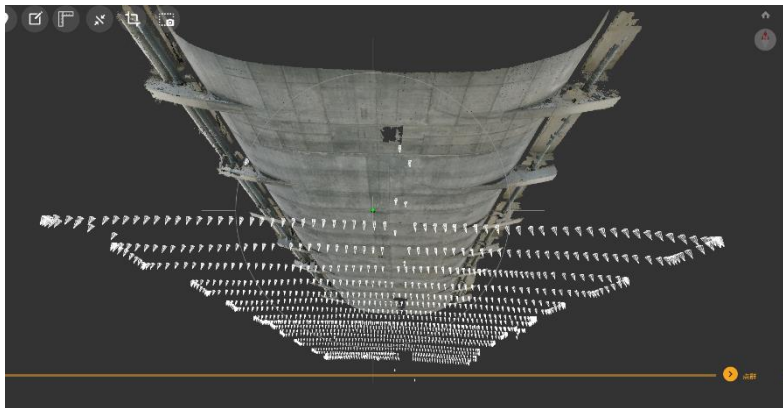
なお、「空間分解能」を評価するためには、「損傷との距離」と「損傷との角度」がおおよそ推定できていることが前提となる。実際の橋梁にひび割れ幅がそれぞれ異なる既知のひび割れを複数指定(100㎡あたり1箇所以上)し、これをベンチマークとして点検ロボットが撮影した画像と空間分解能について評価することとする。この検証においては、点検範囲の画像が網羅的に撮影できていること、画像取得経路が適切に設定され3次元モデル上で位置が明

確にできることが前提となる。則ち損傷検出精度の評価は、何らかの方法でロボットの撮影位置と対損傷距離が推定できる点検ロボット・システムでなければならない。

(方針3) 橋梁点検ロボットが、必要な距離まで橋梁に接近し所定の範囲を網羅的に撮影できることを評価する。

橋梁点検ロボットは、少なくとも検出精度を評価する前提として、とある構造形式の橋梁の所定の範囲を、適切な距離まで近づいた状態で網羅的に画像を取得することが重要である。国交省が実施した現場検証で評価項目とされたコストや安全性、検出精度、効率といった評価の視点に加え、橋梁点検ロボットがスクリーニングで求められる最低限の空間分解能をもった画像を取得した証拠として、橋梁点検ロボットの移動経路(画像撮影位置)を評価対象とする。点検ロボットが予め計画した経路を飛行し撮影した場合、点検画像と3次元点群モデルだけでも網羅性の不足する範囲や離隔が適切でない画像が一目で確認できることからスクリーニングへの適用可否を評価することが可能である。これらの画像撮影は人では大変な労力を要するため、ロボット技術の優位性に着目したことで可能となったものである。なお、評価は人との比較ではなくベンチマーク(基準値)による精度評価の前提となるが、評価結果は様々な形状の橋梁に対する適用可否の判断に資するものであると言える。

例えば、図7-22は飛行型点検ロボット(デンソー製)が岐阜県にある各務原大橋を撮影した画像502枚から生成した3次元モデルである。これらの画像(jpeg形式)に位置情報は付与されていないが、計画どおり正確な飛行経路において構造物との距離に異常がなく撮影されたことを一目で把握することが可能である。



出所:デンソー製橋梁点検ロボットの画像から著者が作成

図7-22 ロボットの移動経路から空間分解能と網羅性を評価  
～画像から撮影位置を推定できることでスクリーニング性能を確認できる～

## 2) 点検用センサー・プローブシステムとしてのロボット単体に対する評価項目

前節では点検用センサー・プローブシステムとしての橋梁点検ロボット単体に着目した性能評価について定めた。ここでは、方針に基づいてロボットの評価項目について定めた。以下に項目を挙げる。

### (項目1) 橋梁3次元モデルの精度

点検画像を納品するための橋梁3次元モデルの再現精度を評価する。本研究では点検画像から作成した橋梁3次元点群モデルを生成することが可能であることを示したが、レーザー計測や設計データを用いても構わない。橋梁点検ロボットで取得した点検画像と損傷位置を管理する目的とする次元モデルであり、その大きさや位置関係について、主要な部材の諸元を用いて評価する。なお性能評価に際しては、少なくとも4点以上の評定点とその座標を提供し点検ロボットがGNSSなどの測位システムを使用するか否かに関わらず直交座標系により3次元モデルによる精度評価を行う。

なお6.5.2節に示した通り、橋梁構造が複雑になれば3次元モデル構築の難易度も増すため、形状に関する精度検証は、概ね橋梁を構成する各面2点程度を検証点として設定する。例えば単純な形状のPC高架橋の場合では、1径間あたり10点程度で評価することになる。

### (項目2) 損傷画像の位置精度

損傷画像は、橋梁定期点検要領では様式10に調製仕様が定められている。6.2節で述べたとおり損傷画像は対策区分の判定及び健全性の診断根拠となる重要な情報であるとともに、スクリーニングにおいて使用する場合は、点検範囲を指示する根拠となり、将来的には橋梁点検ロボットを損傷位置へ誘導する位置決め指示に必要な情報となる。

損傷画像の位置精度については、「撮影位置」「撮影角度」の精度を評価対象とする。なお性能評価に際しては、基本方針で述べたとおり、画像の空間分解能を推定するために必要な情報であることから、ベンチマークとしたひび割れについて精度を検証する。

### (項目3) 損傷画像の空間分解能と諧調

損傷画像は、その位置精度に加えて空間解像度(標準対物画素寸法)と輝度(彩度)の階調を評価する。ひび割れ

の検出精度を評価するためには、撮影位置から推定した損傷を写した部分の画素寸法が重要である。性能評価に際しては、ベンチマークのひび割れの実測値との比較により精度を検証する。

実際の橋梁には、0.3mm幅を超えるひび割れは、いわゆる微細ひび割れに比べて少ないため、模擬クラックシート等を用いて評価することができる。次に輝度の階調については、6.3節に示した通り空間解像度と合わせて、ひび割れ幅等を推定する際に重要な情報である。

#### (項目4) 損傷位置の精度

損傷位置の記録精度は、損傷の経年変化を比較することを可能とする。その評価に際しては、橋梁の3次元モデルの精度評価と同様に評定点を用いて評価することが可能である。要求精度については、現地で人が損傷を探す場面を想定すると直径20cm程度の範囲であれば、一目で視野に入ることからも、3次元モデル上での位置要求精度はおおむね10cm程度の誤差までは実務上支障がないと考えられる。

### 3) ロボット単体の性能評価法についてのまとめ

これまで第6章では橋梁点検ロボットの点検能力を分析し、これまで着目されていなかったロボットの持つ位置記録精度の優位性について述べたが、現行の点検では損傷の位置の記録精度について定量的な要求が示されていない。実際に橋梁点検では人が損傷の近傍まで移動し、損傷の位置をおおまかに構造物の特徴から推定し記録が行われている。例えば、6.2節の分析に示したようにロープアクセスを必要とする高架橋の橋脚では、橋桁からの距離に目当てをつけて記録が行われている。6.2節の結果は、一部の点検記録に対する分析に過ぎないが、現状における損傷位置の記録精度にバラつきがあり、正確さに欠ける可能性を示すものでもある。その対策として6.5節の考察では、ロボットで取得した画像を解析することで損傷の位置を精度良く記録することが可能であることを示した。今後ロボットやAI・ICTの活用が進めば、位置決めなどの用途において位置精度が重要性を増すと言える。そこで本研究では、撮影した画像の位置情報の重要性に着目した性能評価の実施を主張するものである。

また、橋梁点検における成果物である「点検調書」の可用性を高めることが重要である。6.6節で述べたとおり、現在の点検調書は、損傷の位置を平面展開図と部材番号表や写真番号により管理しているため、膨大な労力が費やされている。その一方で、点検調書から損傷を確認するために必要な記録精度に達していない。本研究では、調書の作成には品質が重要であり、その作成は多くのコストを費やす作業であることから「効率性」「経済性」の両面から評価を行う必要があると考える。前節でも述べたとおり、点検調書には確認された損傷とその位置情報を紙面管理するために、複数の様式を部材番号・写真番号・損傷番号等に関連づけて作成する必要があり複雑なものとなっている。特に複雑な構造を持つ橋梁については、2次元図面に表現することもあり調書の枚数も膨大なものとなる。橋梁点検ロボットが撮影した画像を従来の手法で管理することは、相当のコスト増を招くことから、本研究では点検画像の管理を3次元モデルにより行うことを前提とする。3次元モデルの有用性については、6.6節に示したとおりである。このため、点検調書作成に係る「効率」および「経済性」の評価については、橋梁定期点検要領の定められた紙ベースで様式の作成を比較の対象とせず、6.6節に例示したとおり、3次元モデルにて必要な情報が閲覧できれば要件を満たすこととして扱うこととした。

## 7.2.2 総合的な評価（点検プロセス全体の品質確保と効率化）

橋梁点検ロボットを用いた点検では、取得した大量の画像データの取扱いが懸念される一方で、SfM等で生成した3次元モデルを用いた撮影位置の自動推定が可能であることを示した。このように従前の業務プロセスでは行われていなかった新たな業務プロセスを前提にしなければ、ロボット技術の導入効果を適切に評価することはできない。

橋梁点検ロボットの総合的な評価は、ロボット単体の優位性に着目した評価だけではカバーできないプロセス全体への効用に着目して行う。前述のとおり、橋梁点検ロボットの活用で「屋外の点検作業」のみならず、点検ロボットから得ることのできる電子データを活用することにより画像の撮影位置などの推定が可能となることから、「点検報告書の作成(内業)」についても、情報処理技術の発展により更なる効率化が期待できる。

例えば、損傷を写した画像の位置記録精度や画像の分解能等が確保されることにより、図7-6に示したとおり点検調書作成の効率化や点検調書作成の自動化が可能となることから、橋梁点検ロボット単体がもたらす直接的な利用効果(「点検作業の効率化(外業)」や点検時間の短縮による「経済性」など)に加えて、これらを検討すべき項目として検討する。

総合的な評価は、これまでに実施された技術評価でも着目されており、5.8節に示したNETISにおいては「経済性」「工程」「品質」「安全性」「施工性」「周辺環境への影響」などを評価対象として、従来技術と比べて「極めて優れる」「優れる」「同等」「劣る」の4段階で評価されている。ここでの従来技術は、「人の近接目視点検」である。また、次世代インフラ用ロボット(橋梁点検ロボット)の現場検証でも、5.4節に示したように「調書作成・支援」「効率」などを評価項目(基本要件)として、点検調書に必要な情報が取得できる前提の下で、調書作成に係る手間や費用の削減について定量的な評価指標が設定された。さらに、現場検証から得られた知見を踏まえて精緻化された評価項目・評価指標(表5-4)および要求性能(表5-5)では、「損傷写真の整理」や「損傷図の作成」において自動化に着目した評価項目を設定している。しかし、この性能評価においては、指標の設定は「損傷写真の自動整理機能の有無」や「損傷の検出率や的中率」といった精度に関する評価とコスト(内業及び外業)、作業時間(内業及び外業)の部分的な評価に止まっている。

総合的な評価に期待される視点は、橋梁点検ロボットを新たなユースケースの下で、調書作成までなどの点検プロセス全体への導入効果を明らかにすることにある。

## 1) ロボットを用いた点検プロセス全体の性能評価方針

### (方針4) 人とロボットの分担を想定した点検プロセス全体の作業効率を評価

橋梁点検の作業効率は、橋種や現場条件によっても異なる。また点検ロボット毎に点検可能な範囲、部材要素も異なる。作業効率は、本来数多くの橋梁点検作業について実績を統計的手法で処理することによって明らかにできるが、橋梁点検ロボットの多くが全ての橋種や全部材要素の点検を行える訳ではなく、ロボットの得意な部分に限定した活用についても評価することが必要である。

橋梁点検ロボットの作業効率については、例えば矩形断面の高橋脚のみを対象とするものや、PC高架橋の箱下駄内部のみを対象とするものもあるため、作業効率の評価においては、橋梁点検ロボットのみでなく人とロボットの組み合わせ作業による効率改善効果を導出することとする。評価に際しては、人とロボットの役割分担を明確にするとともに、点検調書作成においても、人の点検結果とロボットによる点検結果を組み合わせることで点検の成果物を作ることが重要である。検証は、実橋梁において一連のプロセスを点検作業から点検調書の作成までの作業効率を評価することにより行う。

### (方針5) 橋梁点検ロボットの扱い易さ(オペレーション性)を評価

橋梁点検ロボットの扱い易さは、「施工性」「安全性」「周辺環境への影響」と密接に関連する。橋梁点検は野外で行われ、様々な制約条件や環境条件に晒される。ロボットの性能評価の難しさは、確認できた性能の再現性をいかに担保するかにある。自然条件下の橋梁での性能評価を実施することで、飛行型点検ロボットは風速変動の影響を受けふらつくことが予想される。点検の品質に関しては、このような条件で撮影された画像が、画素レベルで適切に損傷を捉えているかは勿論、画像取得範囲から点検の網羅性が確保されているかといった点については、点検ロボット単体の性能として損傷画像の位置記録精度や画像の分解能等により評価することとした。一方で、精度の確保された損傷画像の取得は、ロボットが正確な経路を辿って点検を行わない限り為しえないが、オペレータに高度な操縦技術が要求されることや、立ち入り規制や仮囲いなど安全確保のための措置が要求されるケースが考えられる。5.4節で示した「安全性」「安定性」「作業性」「汎用性」といった評価項目について検証することが必要である。

橋梁点検ロボットの扱い易さ(オペレーション性)については、点検経路作成や遠隔操縦の自動化(自律制御の実現)による必要人員の数、機材の設営から撤去に要する時間、点検データの調書作成の自動化による作業プロセスの省略の程度などを評価することにより行う。

## 2) ロボットを用いた点検プロセス全体への評価項目

### (項目5) 3次元モデルでの点検画像交換を前提とした調書作成プロセスの効率化

点検ロボットから取得した大量の点検画像を人力で帳票に整理することは経済性からも現実的でない。点検ロボットのメリットを活かすためには、6.6節に示すように点検調書を自動化するソフトウェア技術を実装する必要がある。そこで、橋梁定期点検要領に基づく調査「様式10(損傷写真)」「様式9(損傷図)」「様式13(損傷程度の評価結果総括)」について、その調書作成プロセスにおける入力項目が自動化される割合を評価する。

### (項目6) 点検作業全体の効率化

実際に橋梁点検ロボットを利用する場合、飛行型点検ロボットでも、懸架型点検ロボットに関わらず、橋梁の点検では、橋梁構造の複雑さに程度に応じて、より高度な操作に習熟したオペレータの技量が不可欠である。

点検ロボットの移動経路の計画立案、簡易なプログラムによる自律飛行機械操作、点検画像の整理、調書に必要な損傷程度の評価などの作業における自動化の割合を評価する。

## 3) ロボットを用いた点検プロセス全体の性能評価モデルについてのまとめ

橋梁点検は野外で行われ、様々な制約条件や環境条件に晒される。ロボットの性能評価の難しさは、確認できた性能の再現性をいかに担保するかにある。自然条件下の橋梁での性能評価を実施することで、飛行型点検ロボットは風速変動の影響を受けふらつくことが予想される。このような条件で撮影された画像が、画素レベルで適切に損傷を捉えているかは勿論、画像取得範囲から点検の網羅性が確保されているかといった検証を行う必要がある。

これまでの橋梁点検ロボットの精度評価は、人が作成した点検記録との比較をベースとしていたため、他の現場へ導入する際の判断材料とすることが難しかったが、橋梁3次元モデルを用いることで撮影位置と撮影方向が判ることから、風速の影響を受けた場合に、対物画素寸法(解像度)の変化に対しても、検証点(ベンチマーク)における評価が可能となる方法を提案することができた。さらに、外業のみならず、ロボットを用いた橋梁点検では、損傷等の位置情報に着目し、一定の位置精度を有する点検記録の自動作成が原理的に可能であることが判った。現状の点検記録では、損傷展開図に図示された引き出し線の先端部(矢印)の位置のみで損傷の位置を管理しているため、実際の損傷写真の位置は明確にされていない。損傷写真の位置が明確になることで、これまで人手を要していた点検調書を構成する様式間の紐づけ作業(照合)を削減することが可能となり、大幅に点検調書を作成するプロセスの効率化が可能となる。また、損傷の位置が明確になることで、現状よりも効率的な点検と管理を実現することが可能となる。

### 7.3 橋梁点検ロボット技術の社会実装に向けた具体的な性能評価手順

これまでの検討を基に、さまざまな条件下で行われる橋梁点検実務への点検ロボットの導入判断と、開発者に対するフィードバック、改良進化した技術の適切な評価、点検ロボットの導入に適した業務モデルの構築、技術基準類への反映に資する橋梁点検ロボットの性能評価手順を提案する(図7-23)。

前述のとおり、橋梁点検ロボットに期待できる導入効果は、ロボットが行う点検画像の取得だけにとどまらず、点検調書作成の効率化や自動化による省力化やコスト効果についても評価対象に含めた。

また、多様な現場条件への適応性を評価するために“実橋での実証を通じた性能評価法”を提案するとともに、ロボットの性能に応じて、様々な利用方法に対応できるようユースケースに対応して総合的な評価を実施することとした。

これまでの性能評価方法では、環境条件や人の判読能力のばらつきを考慮する必要性があった。ある条件下で行われた性能評価の結果が、全ての現場での性能を担保するものではないことから、様々な現場条件で橋梁点検ロボットを検討するにあたり、安心して技術導入するために必要な情報を明らかにすることと、現場が心配するリスクに対して、評価ができていくことが重要である。

加えて、更なる技術の進歩やニーズの顕在化に合わせて、評価方法がフレキシブルに進化させることが出来なければならぬ点も、評価方法を考案する上で重要な視点であると考え。

提案する実証評価方法は、新たな点検システムの機能・性能を評価するために、「橋梁点検ロボットの優位性が活かせるユースケース」「システムの有用性を確認するための評価項目と評価方法」を示している。

本論文では、橋梁点検ロボットの実証的評価法を構成する基本的な考え方である、「検証手順」「検証フィールド」「評価項目と評価指標」「要求性能」「評価の根拠(エビデンス)」「評価対象技術の特定」の6項目について述べる。

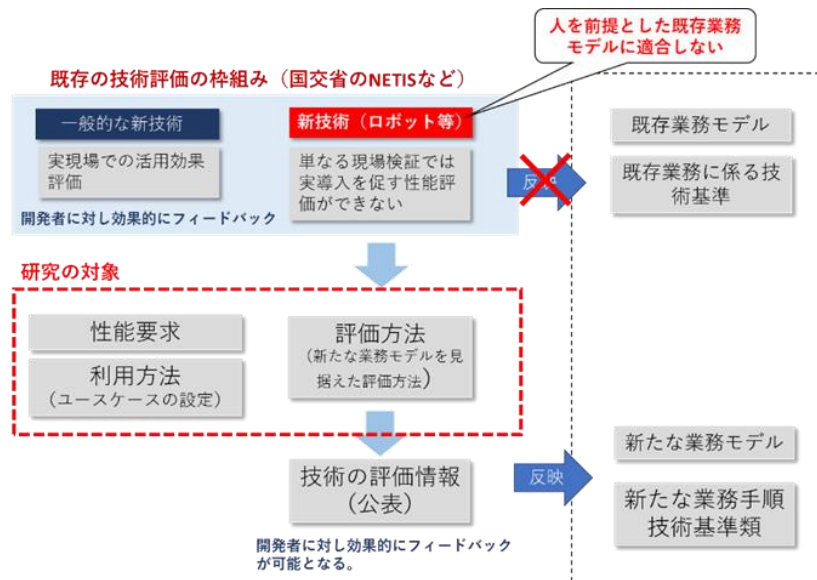


図7-23 本研究が対象とする橋梁点検ロボットの性能評価の位置づけ

#### 7.3.1 評価手順の基本的な考え方

橋梁点検ロボットの性能評価が公正明大かつ客観的に行われるように、検証手順は定量的な評価に努め再現性が確保できるよう配慮すべきである。

##### 1) 事前準備(評価基準となるベンチマークの設置と計測等)

性能評価は、橋梁点検ロボットを実橋梁の点検作業に用いることで「精度」「効率」「コスト」を明らかにするものである。このうち「精度」に関しては、ロボットが取得する損傷画像の「位置記録精度」と「空間分解能」「階調の確保」について確認するため、評価者は事前に模擬クラックや測量用位置マーカーなどのベンチマークを設置し、その位置情報を測量等により正確に記録する。

##### 2) 橋梁点検ロボットによる損傷の検出と記録

橋梁点検ロボットの性能評価を受けるために開発者は、実際の橋梁において予め設定したユースケースに基づいて点検を実施する。評価対象となる橋梁点検ロボットの強みが最大限に発揮できるように事前に評価者とユースケースの設定について調整する。また評価者に提出する検証中のデータを確実に取得し整理する。評価者は、作業時間や点検状況について正しく客観的な情報を収集する。

##### 3) データの提出と保管

橋梁点検ロボットで収集したデータ、及び評価者が記録したデータについては、開発者と評価者が同じものを保管することとし、評価結果も合わせて共有する。

### 7.3.2 具体的な実証評価法

前節で橋梁点検ロボットの性能評価を行うための基本的な考え方を示した。一方で性能評価の結果は、橋梁点検業務でのロボット導入の適否の判断材料となることから、確認した性能に対して検証条件と再現性が確保できるようにする必要がある。そのため、検証に先立ち「性能を検証のためのフィールド」、「ユースケースと要求性能」、「評価項目と評価指標」について述べる。

#### 1) 検証のフィールド

##### ① 実橋梁での検証

検証フィールドの選定は、評価結果を左右する重要なポイントである。前述のとおり実際の橋梁点検は様々な環境条件下で行われるため、様々な構造形式に対し実物大スケールで行う必要がある。検証条件を代表するフィールドを再現することは極めて現実的でないため、性能検証は可能な限り実橋で行うこととし、橋梁点検ロボットの開発者の設定するユースケースの特性を考慮して慎重に選定する必要がある。選定に際しては、ロボットの適用範囲内での有効性を確認するため、現場で想定されるリスクを明らかにし、利用者の導入判断の材料となるように適切な条件を確保することが重要である。

##### ② 開発者に対して提供すべき事前情報

橋梁点検ロボットの開発者には、通常の定期点検に先立って点検者が収集すべき「橋梁の諸元」「過去の点検記録」など橋梁点検に必要な一通りの情報を提供する必要がある。また、損傷写真の撮影位置や撮影方向、損傷の位置、3次元モデルを納品する必要があるから基準点(最低4点、規模に応じて設定)の情報を提供する。

##### ③ 評価者による事前の準備

橋梁点検ロボットの性能評価を的確に行うため評価者は、ロボットのユースケースに応じた検証フィールドを提供する必要がある。橋梁点検ロボットの性能水準を踏まえ、道路管理者にとってのメリットが(ロボットの導入効果が)期待できる条件を選定する必要がある。例えば、人がロープアクセスにより実施している高橋脚など、比較的ロボットの導入効果が期待できるフィールドであることが望ましい。また、精度検証のための点検データの作成は、過去の検証では対象部材単位で従来手法(人の近接目視点検)により橋梁定期点検要領に基づき点検調書を作成していたが、画像の位置記録精度や分解能により性能評価する場合には、橋梁構造や規模を勘案して、ユースケースに応じて数か所をランダムに選定しベンチマークとすればよい。

##### ④ 検証フィールドの事例(土木研究所の実施事例)

橋梁点検ロボットが撮影した点検画像の精度や運動性能について全ての点検画像を保存し評価結果の再現性を担保するため、性能検証に先立ち評価基準となるベンチマークの設置と計測等を実施した。検証フィールドとする土木研究所内南ループ橋にベンチマークを設置した。ベンチマークの設置に際しては、測量法第34条に基づき、測量精度、使用する測機器、観測方法等の規格を統一した技術基準である「作業規定の準則」を遵守して行った。

具体には、検証フィールドの周辺(土木研究所敷地内)に電子基準点を用いて2級基準点(2点)を新規に設置した。さらにこれを用いて4級基準点(4点)を設置、高さについては国家水準点から3級水準測量により求めた。また、4級基準点から光波測距儀を使い橋梁の主桁や横桁、床版(いずれも桁に囲まれた空間内)にベンチマーク(検証点)を設置した。検証点の設置数は、各面の4隅を含む4点以上を設置している。これにより点検対象面が確定し低限の精度(2cm以内)を担保した(写真7-5)。



写真 7-5 桁内部に設置した検証点とクラックスケール

## 2) 要求性能（ユースケースに応じて設定）

要求性能（リクワイアメント）は、橋梁点検ロボットを使用する際の判断基準値となる重要な項目である。特に損傷写真について、現状では人が近接目視後に撮影した損傷写真にはチョーキングは判読できるものの肝心の損傷が判読できないものもある。人が損傷を目視確認して記録を作成する場合には支障ないとされるが、橋梁点検ロボットで撮影した画像に判読できる損傷が見当たらない場合、ロボットが撮影した画像の記録能力（精度）を把握していない限り、スクリーニングは勿論、ユースケースA（図7-5）に示した目視点検後（チョーキングあり）の写真記録にすら使用できない。チョーキングすら記録できない場合があるからである。

言うなれば要求性能は、ユースケース毎に設定しロボットを使用する際の判断基準として用いられるものである。国土交通省が公表した、橋梁点検ロボットに関する要求性能は表5-5に示す通り、ロボットが撮影した画像を利用して「損傷図を作成」や「損傷程度の評価区分の判定」を行うために必要な目安を示している。これらの目安は、橋梁定期点検要領において定められた損傷程度の評価区分に対応するものであり、例えばPC橋の幅0.1mm以上のひび割れを幅0.1mm刻みで判読できることを求めているが、あくまで画像を人が目視で判読できるかといった視点で記述されている。

本研究では、橋梁定期点検要領が要求する「損傷程度の評価区分の判定」に使用できる画像精度（表5-5（A-4）損傷程度の評価区分の自動判別）をロボットに要求することとした。このためには、幅0.2mm程度のひび割れが確実に検出できれば、橋梁の健全性診断に必要な精度を有しており、スクリーニングに使用可能として考えている。

また、ユースケースの設定においては、ロボットの点検対象部材や範囲を明示することも重要である。狭隘部の画像撮影可否など、評価対象ロボットの運動性能の違いが判断できるように留意する必要がある。写真 7-6 は、鋼橋の橋桁内部空間を飛行し点検中の飛行型点検ロボットである。

### ※ユースケース設定例

（点検対象）

鋼製橋梁の主桁（各フランジ上下面）・横桁・横構などの鋼部材、床版下面、支承装置、橋脚と橋台

（利用場面）

人による目視点検に先立ち構造物の表面画像をロボットにより撮影することで近接目視点検範囲のスクリーニングを行う（ユースケースB）。



写真7-6 桁内狭隘空間の点検する飛行型点検ロボットの例

## 3) 評価項目と評価指標

### ① 評価項目

評価項目は、評価対象技術の特長を定量的に表現するための重要な情報である。橋梁点検ロボットの基本性能は、評価対象技術の開発者によって提示されるカタログ集（表 4-1）が参考になる。実橋梁において検証により示す評価項目は、ロボットの仕様に基づく客観的性能ではなく、当該橋梁点検ロボットの使用方法（ユースケース）を踏まえたものでなければならない。

実橋梁での性能評価に際しては、具体のユースケースに基づき評価項目を選択する。現在、国土交通省が公表している橋梁点検ロボットの性能評価項目は、第5章の表 5-4 に示すとおり「精度」「効率性」「経済性」の3分類であり、精度に関しては「損傷写真の記録」「損傷写真の整理」「損傷図の作成」「損傷程度の評価区分の自動判別」としている。これら精度に関する評価項目は、人が近接目視により作成した点検調書との比較を想定しているものであり、ユースケースとして専門的な知識と技能を有する技術者が近接目視を行った上で健全性の診断を別途行うことを前提としている。

本研究では、7.1 節において述べた橋梁点検ロボットの特長を踏まえたユースケースにおいて、ユーザーが



導入判断に必要となるであろう「損傷画像の位置記録精度」「損傷画像の品質(空間分解能と輝度(彩度)の階調)」「損傷画像の品質(正対画像)」「3次元モデルの精度」「損傷画像の網羅性」などの評価項目を新たに追加し、橋梁点検ロボットの評価項目として作成した。これを表 7-2 に示す。

## ② 評価指標

評価指標は、評価項目と合わせてユーザーが橋梁点検ロボットの点検対象における適用性を判断する際の重要な判断材料になる。7.1 節で示したユースケース A(図7-5)では、チョーキングを前提に橋梁点検ロボットを使用しているが、仮にロボットの損傷検出能力が高ければ、チョーキングなどを使用せず損傷写真の撮影に橋梁点検ロボットを使用することができる。

つまり評価指標の設定は前述の評価項目に対応しているが、同じ指標を用いてもユースケース毎に性能値の持つ意味が変わってくることになる。現在、国土交通省が公表している橋梁点検ロボットの性能評価項目は表 5-5 に示すとおりである。精度に関しては「損傷写真の記録」「損傷写真の整理」「損傷図の作成」「損傷程度の評価区分の自動判別」について設定している。これら精度に関する評価項目は、人が近接目視により作成した点検調書との比較を想定しているものであり、橋梁点検ロボットで取得した画像の撮影位置については、人が判断することを前提としている。

本研究では、前述のとおり橋梁点検ロボットの画像から撮影位置を推定し徹底した効率化を実現するために、「損傷画像の位置記録精度」「損傷画像の品質(空間分解能と輝度(彩度)の階調)」「損傷画像の品質(正対画像)」「3次元モデルの精度」「損傷画像の網羅性」などの追加評価項目に対応した定量的な評価指標を設定した。これを表 7.3 に示す。

### 7.3.3 実証的性能評価において考慮すべき事項

道路橋の定期点検は全ての道路管理者に義務付けられ、5年毎に近接目視点検を行い健全性の診断を行うこととされている。このため、橋梁点検ロボットの要求性能は、各道路管理者が定める点検方法に必要な要求性能を満足する必要がある。言い換えると橋梁点検に係る技術基準類への整合が必要である。

本研究で設定した損傷画像の評価指標は、橋梁点検ロボットによる点検作業の効率化と省力化を進めるため3次元モデルによる点検画像の管理を想定したものである。損傷画像の評価指標を設定した。損傷画像の位置記録精度は概ね 10cm の誤差に収まれば実用上問題はないと考えるが、各管理者と協議に基づいて決める必要がある。

#### 1) 評価の根拠

##### ① 評価基準

橋梁点検ロボットの性能評価での評価基準は、検証フィールドの特徴(橋種、点検対象範囲、規模、周辺環境条件など)や想定するユースケースに応じて異なってくる。国土交通省が実施した現場検証における最大幅 0.3mm のひび割れ検出能力が検出率で平均 50%、優れた性能を示したロボットでも 80%程度であったことから、ひび割れ検出能力の評価基準の設定に際しては、実用性を十分に考慮する必要がある。

橋梁点検ロボットのユーザーや施設管理者にとっての不安要素は、ロボットを用いて取得した画像に損傷や変状の「見落とし」や「誤検出」がどの程度生じるかである。橋梁点検では、構造物の種類によって、同じロボットを用いても点検の品質に違いが生じることが想定される。点検ロボットを用いて取得した画像は、近接目視と異なり、光学カメラの映像を点検後に解析して得られるため、少なからず人の検出した変状や損傷と同じになるとは限らない。橋梁点検ロボットを人の代替手段として考える場合には、信頼性(検出率)の目標をどこにするか判断することは難しい。仮に 90%の検出率を求めたとしても、管理者にとって 10%の見落としが許容し難い問題として捉えられる可能性があるからである。

損傷検出能力が十分に高くないと判断された場合であっても、点検範囲のスクリーニングにおいて効果を発揮することが可能である。例えば、橋梁の第三者被害防止措置のために落下する危険がある部位の全面に対して実施されるコンクリート部材の「うき・剥離」検出を目的とする打音検査において、打音範囲の絞りこむために有効と判断された新技術(赤外線カメラを用いたコンクリート構造物のうき・剥離検出システム)は、検出率の定義を「うき・剥離」の位置で評価するのではなく、その範囲で評価することにより、検出率 100%となり点検への適用が進んだ。

2015 年度に行われた「うき・剥離」の検出技術の検証における損傷種類別の検出精度は、対象コンクリート面の打音検査で確認されたうき・剥離 90 箇所全てを検出した。また、当該技術で検出した 350 箇所のうち 90 箇所が従来法により損傷と確認されたことから、新技術の適用条件の範囲内では検出率 100%(精度)、ヒット率 26%(効率)の評価を得た(付録参照)。

表 7-4 検出率とヒット率の概念

出所：国土交通省次世代ロボット導入検討委員会資料

		人の近接目視点検の結果	
		損傷なし	損傷あり
ロボット取得画像の判読結果	損傷なし	正しい測定 (True Positive) 「健全 (Positive) であることを、正確に検知 (True)」	誤った測定 (第2種の誤り) (False Negative) 「不健全 (Negative) であるのに、健全と誤って検知 (False)」 【発生確率：β】
	損傷あり	誤った測定 (第1種の誤り) (False Positive) 「健全 (Positive) であるのに、不健全と誤って検知 (False)」 【発生確率：α】	正しい測定 (True Negative) 「不健全 (Negative) であることを、正確に検知 (True)」

「検出率」： $1 - \beta$  (式1) (※打音必要箇所の未検知(β)の無い割合)  
 「ヒット率」： $1 - \alpha$  (式2) (※システムの打音必要判定箇所内、真に打音必要の割合)

一方、本研究では点検ロボットに搭載したカメラの損傷検出能力は、画像の空間分解能と輝度の階調を確保したうえで、ロボットによる撮影位置と撮影角度の管理を適切に行うことで確保できると考えた。点検前にカメラの性能に応じて撮影計画(撮影時の離隔距離と角度(基本は正対))を立案することで、論理的には100%の検出が可能となる。撮影位置がずれた場合などは、撮影位置を管理することで、精度が確保できない位置等から撮影した画像を棄却することが可能となる。

② 評価者

点検ロボットの評価は、これまで人との比較において行われ、人が検出した変状に対して、ロボットがどの程度検出できるかを第三者により証明(評価)することが要求されてきた。また、橋梁点検ロボットの性能評価は、これまでフィールドを提供できる道路管理者(国交省や地方自治体など)によって行われており、点検業務の委託者でもあることから、ロボット開発者が自ら実施した性能評価はカタログと見做され、客観的な性能評価方法としても認められなかった。福島県が整備した福島ロボットテストフィールドでは、橋梁点検ロボットのためのテストサイトが整備されている。このような施設についても、客観的でオープンな性能評価方法の下で性能評価が進むことが期待される。

③ 性能評価に関する記録の作成

橋梁点検ロボットの適用性をユーザーが判断するためには、性能カタログ等のロボットの仕様に関する情報に加えて、橋梁点検ロボットの性能評価結果、性能評価の根拠となるユースケースや評価項目、および画像やこれを基に作成した損傷図等データについては、すべて評価記録として残すことが必要である。

国交省の現場検証では、橋梁点検ロボットの評価結果について公表されたが、点検業務への適用性を判断するためには、検証フィールドの詳細や取得解析した画像データを提示が必要である。特に撮影した損傷画像と生成した3次元モデルについては、損傷画像の「位置記録精度」「損傷画像の品質(空間分解能と輝度(彩度)の階調)」「損傷画像の品質(正対画像)」「3次元モデルの精度」「損傷画像の網羅性」の全てが必要であり、部分的な画像だけでは、網羅性の確認や3次元モデルの精度についての確認が難しい。少なくとも橋梁点検ロボットとして実用レベルにある技術については、「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)」に基づく成果品に相当する情報が望ましい。

④ 評価結果の公表範囲

性能評価の根拠データの公表については、一つには開発者へのフィードバック情報、一つにはユーザーに対する導入可否の判断材料を提供する意味において重要な意義がある。橋梁の管理者にとって、点検結果の詳細が判る情報を一般公開することに対しては、管理責任上難しい部分もあることから、橋梁の特定ができないよう工夫が求められる。

2) 性能の再現性を重視した評価対象技術の特定

① NETIS(新技術情報提供システム)における技術特定

橋梁点検ロボットに限らず新技術は、現場での試行錯誤を繰返し改良が進められる。NETISに登録可能な技術は、技術の成立性が確認されており、その適用範囲において従来技術に比べ活用効果が同等以上と見込まれるものと定義されている。このため開発中の技術では登録できない。橋梁点検ロボットは、第4章で定義したとおり「損傷に近接する機能」「損傷状態を把握する機能」「損傷程度を評価する機能」「点検情報を記録する機能」を有するものを点検ロボット技術と定義しているため、ロボットを構成する多くの要素技術は常に見直しが行われ進化している。

本研究では、橋梁点検ロボットの性能検証の対象となるロボット技術については、NETISに登録された技術だけでなく、開発中の技術についても評価対象とすることに加え、同一の橋梁点検ロボットであってもその使用方法によって評価項目と性能評価値が異なることを前提にしている。言い換えれば、同一技術が、適用条件の

違いによって性能評価結果が異なることを想定している。このため、NETIS への掲載技術の評価に際しては、評価項目の設定を含め、必ずしも活用効果調査と同じ評価にならないことから、①ユースケース、②適用範囲(検証フィールドの条件)、③評価の根拠となる損傷画像及び 3 次元モデルについて、参考情報として掲載することを推奨する。

② 性能カタログ集への登録による技術特定

橋梁点検ロボットの活用を促進するために、国土交通省が現場検証等により実用性を評価した技術については、国土交通省が作成した「点検支援技術 性能カタログ(案)」において公表し、新技術利用のガイドライン(案)において橋梁点検業務において橋梁点検ロボットの導入判断に係る確認プロセスが明確にされている。この性能カタログに掲載される技術についても、実用段階にある技術が対象とされている。

本研究では、橋梁点検ロボットの性能評価の前提として同一技術であっても使用方法によって性能評価値が異なることから、性能カタログ掲載技術についての性能評価結果の提示に際しても、①ユースケース、②適用範囲(検証フィールドの条件)、③評価の根拠となる損傷画像及び 3 次元モデルについて、参考情報として掲載することを推奨する。

表7-2 橋梁点検ロボットの評価項目

評価項目	評価項目の説明	
精 度	損傷写真の記録	点検員が評価対象技術により取得した写真等 <sup>※1</sup> に基づき、「損傷程度の評価※2」の評価区分を適切に判別できる精度を有しているか ※1 チョーキングが無い状態での損傷程度の評価区分の判別を想定 ※2 「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)」付録における損傷程度の評価区分に基づく
	損傷写真の整理	損傷写真に写真番号、径間番号、部材名、要素番号、損傷の種類を自動で整理する機能を有する。
	損傷図の作成	当該技術により取得した写真等に基づき、損傷図 <sup>※3</sup> を自動作成することができるか。なお、「損傷程度の評価区分の記載」については評価の対象外とする ※3 損傷図には損傷の種類、発生位置、範囲・状況のスケッチや写真で記録するとともに、代表的な損傷の寸法を記載する。
	損傷程度の評価区分の自動判別	評価対象技術により判別した損傷種類、損傷程度の評価区分が、点検者が近接目視により実施した評価区分 <sup>※4</sup> と一致するか ※4 予めベンチマーク損傷に対してなされた損傷程度の評価区分
	損傷画像の位置記録精度	評価対象技術により取得した損傷画像の撮影位置又は、損傷の位置について、その位置に関する記録精度を評価する。精度評価は、損傷位置が測量により計測した真値との差異をもって評価する。
	損傷画像の品質(空間分解能と輝度(彩度)の階調)	評価対象技術により取得した損傷画像の空間分解能および輝度(彩度)の階調が適切に確保されていることを評価する。空間分解能は、損傷画像の画素あたりの寸法が一定水準以上であることを確認することによって評価する。また、空間分解能と階調の組合せにより、損傷種類毎に設定したベンチマークについて「損傷程度の評価」の評価区分が判読できる精度を有しているかにより評価する。
	損傷画像の品質(正対画像)	評価対象技術により取得した損傷画像を、撮影位置と撮影角度等の情報を用いて幾何補正できる場合に評価する。幾何補正により生成した画像を正対画像とすると、正対画像の品質評価は、一律の空間分解能と輝度(彩度)の階調が確保されている事を評価する。
	3次元モデルの精度	評価対象技術により取得した損傷画像をすべて管理できる範囲を網羅した橋梁 3次元モデルの精度を評価する。精度評価は、指定された基準点と評定点(各面毎に2点程度)の位置が、測量により計測した真値と3次元モデル上に再現された位置との差異をもって評価する。
	損傷画像の網羅性	評価対象技術により取得した画像が、その品質を満足する前提で適用範囲を網羅的にカバーしていることを評価する。網羅性の評価は、作成したモザイク画像等により 60%の重複率を有する範囲の割合により評価する。
効 率 性	作業時間比率(外業)	評価対象技術を導入したことによる従来技術との作業時間比率(外業)
	作業時間比率(内業)	評価対象技術を導入したことによる従来技術との作業時間比率(内業)
	損傷図作成に要する時間	評価対象技術により取得した画像を用いて、損傷図と同等の情報を画面に表示するために要する作業時間(コンピュータによる処理時間を含む)
	損傷写真の整理に要する時間	評価対象技術により取得した全ての画像を、損傷写真と同等の情報を画面に表示するために要する作業時間(コンピュータによる処理時間を含む)
	点検調書(全様式)の作成に要する時間	評価対象技術により取得した画像を用いて、損傷図や損傷写真を含むすべての帳票と同等の情報を表示するために要する作業時間(コンピュータによる処理時間を含む)
経 済 性	コスト比率(外業)	評価対象技術を導入したことによる従来技術とのコスト比率(外業)
	コスト比率(内業)	評価対象技術を導入したことによる従来技術とのコスト比率(内業)

表7-3 橋梁点検ロボットの評価指標

評価項目	評価指標			
精度	損傷写真の記録	判読可能率	(ベンチマーク損傷※5のうち、当該技術で記録した画像にて判読可能な損傷数) / (予め設定したベンチマーク損傷※5の数) ※5 位置・大きさ等を計測済みの損傷、または同等の模擬損傷	
	損傷写真の整理	機能の有無	損傷写真の整理機能の有無	
	損傷図の作成	検出率	評価対象技術で自動検出できたひびわれ延長/近接目視で検出したひびわれ延長	当該技術で自動検出できたひびわれ延長/予め設定したベンチマーク損傷※5(ひびわれ)の延長 ※5 位置・大きさ等を計測済みのひびわれ、または同等の模擬損傷
		的中率	評価対象技術で自動検出できた損傷数/近接目視で検出した損傷数	ベンチマーク損傷※5のうち、当該技術で自動検出できた損傷数/予め設定したベンチマーク損傷※5の数 ※5 位置・大きさ等を計測済みの損傷、または同等の模擬損傷
		的中率	近接目視で検出したひびわれ延長/評価対象技術で自動検出したひびわれ延長	ベンチマーク損傷※5(ひびわれ)の延長/当該技術で自動検出したひびわれ延長 ※5 位置・大きさ等を計測済みのひびわれ、または同等の模擬損傷
		的中率	近接目視で検出した損傷数/評価対象技術で自動検出した損傷数	予め設定したベンチマーク損傷※5の数/当該技術で自動検出した損傷数 ※5 位置・大きさ等を計測済みの損傷、または同等の模擬損傷
	損傷程度の評価区分の自動判別	正解率	当該技術による評価区分とベンチマーク損傷の評価区分が一致する損傷箇所数/予め設定したベンチマーク損傷※5の数 ※5 位置・大きさ等を計測済みの損傷、または同等の模擬損傷	
	損傷画像の位置記録精度	位置記録の誤差平均(cm)	評価対象技術により取得した損傷画像の撮影位置又は、損傷の位置について、その位置に関する記録精度を評価する。精度評価は、損傷位置が測量により計測した真値との差異をもって評価する。	
	損傷画像の品質(空間分解能と輝度(彩度)の階調)	空間分解能(mm/ピクセル) 輝度(彩度)の階調	評価対象技術により取得した損傷画像の空間分解能および輝度(彩度)の階調が適切に確保されていることを評価する。空間分解能は、損傷画像の画素あたりの寸法が一定水準以上であることを確認することによって評価する。また、空間分解能と階調の組合せにより、損傷種類毎に設定したベンチマークについて「損傷程度の評価」の評価区分が判読できる精度を有しているかにより評価する。	
	損傷画像の品質(正対画像)	幾何補正精度 空間分解能(mm/ピクセル) 輝度(彩度)の階調	評価対象技術により取得した損傷画像を、撮影位置と撮影角度等の情報を用いて幾何補正できる場合に評価する。幾何補正により生成した画像を正対画像とすると、正対画像の品質評価は、一律の空間分解能と輝度(彩度)の階調が確保されている事を評価する。	
3次元モデルの精度	評定点の平均誤差(cm)	評価対象技術により取得した損傷画像をすべて管理できる範囲を網羅した橋梁3次元モデルの精度を評価する。精度評価は、指定された基準点と評定点(各面毎に2点程度)の位置が、測量により計測した真値と3次元モデル上に再現された位置との差異をもって評価する。		
損傷画像の網羅性	網羅率(%)	(評価対象技術により取得した画像の表面積(重複率 60%以上の範囲) / (撮影対象範囲の表面積))		
効率性	作業時間比率(外業)	作業時間比率(外業)	(適用条件内は当該技術で実施し、適用条件外は近接目視で実施した場合の作業時間(外業)) / (全部材、全損傷種類、全作業を近接目視で実施した場合の作業時間(外業))	
	作業時間比率(内業)	作業時間比率(内業)	(適用条件内は当該技術で実施し、適用条件外は近接目視で実施した場合の作業時間(内業)) / (全部材、全損傷種類、全作業を近接目視で実施した場合の作業時間(内業))	
	損傷図作成に要する時間	損傷図作成時間(h)	評価対象技術により取得した画像を用いて、損傷図と同等の情報を画面に表示するために要する作業時間(コンピュータによる処理時間を含む)	
	損傷写真の整理に要する時間	損傷写真整理時間(h)	評価対象技術により取得した全ての画像を、損傷写真と同等の情報を画面に表示するために要する作業時間(コンピュータによる処理時間を含む)	
	点検調書(全様式)の作成に要する時間	調書作成時間(h)	評価対象技術により取得した画像を用いて、損傷図や損傷写真を含むすべての帳票と同等の情報を表示するために要する作業時間(コンピュータによる処理時間を含む)	
経済性	コスト比率(外業)	コスト比率(外業)	(適用条件内は当該技術で実施し、適用条件外は近接目視で実施した場合のコスト(外業)) / (全部材、全損傷種類、全作業を近接目視で実施した場合のコスト(外業))	
	コスト比率(内業)	コスト比率(内業)	(適用条件内は当該技術で実施し、適用条件外は近接目視で実施した場合のコスト(内業)) / (全部材、全損傷種類、全作業を近接目視で実施した場合のコスト(内業))	

## 7.4 まとめ

本章では橋梁点検ロボットの社会実装に向け、ロボットの利用方法を考察し、そのための実証的な性能評価法を提案した。点検ロボットの持つ特長を活かした点検方法(ユースケース)を提案し、点検作業(外業)だけでなく点検ロボットにより取得したデータの利用価値に着目することで点検調書作成作業(内業)にも考察の範囲を広げ、橋梁点検ロボットの取得する画像に対する評価項目を具体化した。

橋梁点検においては、これまで損傷位置を正確に記録するルールがなかった。このため橋梁点検では、点検員が橋梁の健全性を診断する際の根拠となる“損傷状態の記録”について、施設管理者が定める様式に基づいて平面展開図上に簡略記号を図示し、損傷写真は引出線を用いて写真番号を記載するなどの方法により多大な労力をかけて損傷の位置関係の記録に努めてきた。

本研究によって橋梁点検ロボットが取得する大量の画像から損傷の正確な位置の再現性に着目したことにより、構造物の健全性を評価するために必要な、損傷の正確な位置の記録精度を向上することが可能となり、維持管理の効率性や信頼性の改善に効果をもたらすことが可能となる。

本章での検討により得られた結論は、以下のとおりである。

- (1) 橋梁点検ロボットの持つ優れた能力と大量の画像を人が判読する必要性や微細なひび割れの検出能力が現状では人よりも劣ることなど、橋梁点検ロボットを用いる際に考慮すべき得失を踏まえ、ロボットの持つ特長を活かした点検手順を考案した。
- (2) また、点検ロボットの損傷検出精度を「近接目視には及ばないが、一定程度以上の変状は確実に確認できる(レベル1)」と「近接目視で確認を求められる全ての変状を記録できる(レベル2)」に分け、損傷検出精度に応じ橋梁点検ロボットを用いた段階的な導入イメージを整理した。
- (3) 橋梁点検ロボットを用いて人の近接目視点検範囲の絞り込み(スクリーニング)に使用する場合の点検手順を検討し、4種類のユースケースを設定し期待される効果を考察した。
- (4) 橋梁点検ロボットの社会実装に今後必要となる技術として、①橋梁点検ロボットが取得した大量の画像を3次元モデル上で撮影位置により管理する技術、②画像から損傷を自動検出する技術、③データ統合管理により調書の自動出力や自動解析する技術をリストアップしそれらについて考察を加えた。
- (5) 橋梁点検ロボットが取得した大量の画像から撮影位置を正確に推定できる特長を活かし、これまでの評価項目である「検出精度」「効率(点検作業の効率化)」「経済性(点検作業時間の短縮)」に加え「損傷位置の記録精度」「点検範囲の網羅性」「画像の精度」「効率(点検調書作成の効率化)」「経済性(調書の自動化)」を新たに追加提案した。これらは、画像の位置情報を用いた調書作成の自動化と省力化に必要な評価項目として、3次元モデルを前提とした業務モデルの実現を可能とするものである。
- (6) 橋梁点検ロボットの性能評価を行うための基本方針を設定し、「橋梁点検ロボット単体の性能評価」と点検プロセス全体の品質確保と効率化を考慮した「総合的な評価」について、評価方法を提案した。
- (7) 「橋梁点検ロボット単体の性能評価」については、個体差のある人の点検結果と比較するのではなく、橋梁点検ロボットにより取得した画像の再現性に着目しベンチマーク方式が有効でありその方法を示した。また、3次元モデルによる点検データの管理を見据え、3次元モデルの精度や損傷画像の位置精度、損傷画像の空間分解能や階調、損傷の位置精度を評価対象とすることを提案した。

## 8. 結論

本研究では、橋梁点検ロボットの社会実装に資する技術評価方法について考察を行った。これまでに国土交通省がロボットの導入のために実施した現場検証の取組みの結果や、現状のロボット技術の研究開発動向などを踏まえ、現状の技術水準を考慮した段階的な実用化を可能とするために橋梁点検ロボットの有する強みを分析し、ロボットの強みを活かした効率的な橋梁点検のユースケースを検討した。

点検員の目視点検を中心に行われてきた橋梁点検においては、損傷位置を正確に記録するルールがなかったが、本研究において橋梁点検ロボットが取得する大量の画像から損傷の正確な位置の再現性に着目したことにより、損傷位置の記録精度を向上することが可能となり、ひいては維持管理の効率性や信頼性の改善に効果をもたらすことが可能となることを明らかにした。

このため、これまでの橋梁点検ロボットの評価で主に行われていた「人の能力との比較」に代わり、橋梁点検ロボットの持つ優位性に着目した評価項目として、ロボットの高い再現性に着目し「損傷位置の記録精度」「点検範囲の網羅性」「画像の精度」に加え、3次元点群モデルを利用することで実現可能な「点検調書作成の効率化」「調書作成の自動化による経済性」について評価項目として設定した。

また、橋梁点検ロボットに求める要求性能(リクワイヤメント)と社会実装に有効な技術評価についても提案し、その評価方法の一部を試行することで提案の有効性等について考察を行った。

本研究に取り組んだ結果、橋梁点検ロボットの損傷検出精度は人を代替できる水準には到達していないが、点検ロボットは損傷の位置特定精度などにおいて、極めて優れた性能を有することが判った。これまで橋梁点検では、損傷位置の記録精度に関してルールが整備されていないため、点検記録に残された損傷の位置にはかなりの誤差があることも確認された。一方で、構造物の健全性を評価するためには、損傷を正確に記録することにより、維持管理の効率性や信頼性の改善に効果がある。

従来の橋梁点検では、橋梁の健全性を診断する際の根拠となる“損傷状態の記録”については、施設管理者が定める様式に基づいて平面展開図上に簡略記号を図示し、損傷写真は引出線を用いて写真番号を記載する方法が用いられてきた。この点検調書には、位置の記録に関する要求精度が定められていないことや、損傷の位置を計測する方法も定められていないため、図示された損傷の位置が実際の位置とは異なって記録されることも多く見られる(筆者の分析によると、橋脚で2m程度、床版で1.5m程度の誤差が見られる)。この記録精度に関しては、点検に必要な技術力を有する点検員が、近接目視によって損傷を確認しているため、点検の目的は十分に果たされてきた。むしろ精緻な記録を作成するための労力よりも、重大な損傷を見逃すことがないよう効率的に作業することが重視されてきたと言える。

本研究では、橋梁点検ロボットの持つ損傷の検出精度に加えて、位置特定精度にも着目した性能評価方法を提案することにより、一定の精度を有する点検記録を作成することが可能となり、現状よりも効率的な点検の実現を可能とした。

また、橋梁点検において、も基本的な損傷となる「ひび割れ」の検出について、現状の技術水準を踏まえつつ、人(点検技術者)による点検結果と橋梁点検ロボットによる点検結果を比較。これにより、これまで人の点検能力を基準としていた橋梁点検ロボットの性能評価について、新たなユースケースを想定しロボットの優位性を引き出す作業について分析を行った。

人を単純に橋梁点検ロボットに代替させる考え方に代わる、人とロボットの各々有利な部分を有機的に組み合わせた全体の点検システムとして、橋梁点検ロボットが優位性を有する位置決め能力を活かしたスクリーニングへの適用など、橋梁点検ロボットを用いて早期に実現可能な具体的な点検方式を提案した。さらに、これらの優位性を含め、ユーザーからも信頼される客観的な技術評価手法を提案した。

## 9. 今後の展開と展望

道路橋の点検は、近接目視を基本とし、必要に応じてクラックスケール等により、ひび割れの位置、方向や間隔、ひび割れの幅や長さ等を計測し、その結果を基に健全性の診断と、補修等の対策区分を判定することが、橋梁定期点検要領や道路橋定期点検要領などで定められている。これまで、ロボットの導入に際しては、“人の代替”か“人の支援”のどちらを目指すかといった議論がなされてきた。

点検員による点検では、点検中に見つけた損傷について、その状況に応じ観察し記録することが可能であり、人に備わった極めて高性能なセンシング能力を発揮する。別の言い方をすると、技術者の眼は、様々な角度や距離から損傷（ひび割れ等）の状態を特定し、また、錆汁や析出物の有無も同時に確認できることから、損傷原因特定につながる様々な情報の記録が可能である。

一方、現状の点検ロボットで画像を取得する場合は、そのような臨機応変の対応は難しく、大量で画一的な画像データを取得することにより目視で確認すべき損傷（一定の大きさを有する損傷等）を抽出し、正確な記録を作成できる利点がある。

現状の点検記録は、その多くが大まかな位置と損傷種別とその状態区分（大抵が5段階評価）を記録している。橋梁点検においては、点検で発見された損傷情報を総合的に判断して、補修等の措置を判断する“健全性の診断”を行っている。このため、位置記録精度は、かなり曖昧であるものの信頼に足る点検品質を実現していると言える。

本研究では、橋梁点検分野へロボット技術導入が進まない要因の一つであった、橋梁点検ロボットの性能を的確に評価するシステムの構築を試みた。土木分野以外から参入する開発者にとっても、一品生産的で多様な構造を持つ橋梁を対象に、屋外の自然環境下で使用される点検ロボットの開発目標を設定することが難しかった。

そこで本研究では、ロボットをスクリーニングに用いることを提案した。ロボットの導入を段階的なものとし第一歩をスクリーニングに用いることで、人が目視で確認すべき範囲を絞り込むことで効率化を実現する。そのスクリーニングに用いる際に必要な性能値と評価方法を提案することで、ロボット点検の実用化を可能とした。

全国に70万橋以上存在する橋梁の点検においてロボット技術の有用性を確認するためには、適切なユースケースを定め実証評価を行い、システム開発者には要求と橋梁点検ロボットが稼働する環境を示し、ユーザーには利用の効果を示すことこそが重要である。

本研究で提案したロボットのユースケースでは、人の目視による点検を必要とするため、さらにロボット技術が進化した近い将来に実現が期待される橋梁点検ロボット像は、「人の点検を完全代行できる自律点検ロボット」である。そのためには、構造物表面を効率的に撮影するための経路生成と制御技術当の開発が必要とされる。現時点では人の近接目視を代替するほどの検出精度（解像度）、記録精度には到達していないため、本研究で直ちに実現が望まれる人の近接目視と併用することで、点検の効率化を実現するユースケースを設定し、その実現のための実証的評価方法を考案した。

考案した手法を具体的な事例に適用し、その妥当性については継続的に検証を受ける必要がある。現在、国交省が推進している橋梁やトンネル構造物点検へのロボット技術や人工知能（AI）技術の導入に際しては、技術開発を担う企業等から、開発した新技術を適用した新しい業務モデルを設定することが難しく、既存手順の一部を置き換えにより改良する程度の適用が大多数を占めている。今後、革新的な新技術を用いて、業務モデルそのものを大胆に変えることにより、新技術導入の可能性を拓げるために、本研究では、橋梁点検ロボットの適用を例に挙げ、その適用に欠かせない人工知能（AI）の教師データの開発、評価方法を合わせ提案することにより、現在進めている官民研究投資拡大プログラムでの試行および検証結果と合わせて手法の有効性を検証したいと考える。

これまでに考案した下記のアイデアについて、それらの有用性について、社会的受容性、社会実装の実現性、コスト、精度、生産性の要素を適化するものであることの論拠を整理し考察したいと考える。

なお、今後の公共土木事業における新技術導入プロセスの改良を大きなテーマとして、ロボット技術等の先進技術の導入において、現状の課題がどこにあって、自らが提案した実フィールドでの技術評価が、民間企業の開発者に開発のモチベーションを与えるのみならず、既存の業務に安住することなく、新しい業務モデルを生み出すための機会になると考える。この提案によりロボット技術については、今年度からようやく導入が始まった段階であるが、着実に効果が表れつつある。

公共土木事業を中心としたインフラ整備に係る建設産業は、整備されたインフラが世代を超えて供用されることから、技術導入に慎重な姿勢を保持し続けてきましたが、Society5.0に代表される社会環境の変革に日本が乗り遅れないためには、新しい技術を導入に際し、その技術が有する潜在的なポテンシャルを大限に引き出せるような仕組みが必要であり、ただ単に人を前提とした業務プロセスを、再定義することによる技術検証手法を提案し、全国の実証フィールドにおいて試行することにより、導入を加速させたい。



## 10. 謝辞

本研究の実施に際しては、筑波大学大学院情報システム研究科武若聡教授のご指導をいただきました。本格的な研究の経験がない私を社会人博士課程早期履修プログラムへ受入れて頂いたこと、いつも確かな見識と助言により導いて頂いたことに心より感謝申し上げます。

筑波大学名誉教授の油田信一先生には、本研究に取り組む動機となった次世代社会インフラ用ロボット導入推進委員会委員として点検ロボットの導入の検討段階から、さらには土木研究所招聘研究員としての立場からもご指導を賜わった。論文の執筆がなかなか進まない私に入学直後より温かいプレッシャーをかけ続けて頂いた。油田先生のご指導なくして本論文の完成は為しえなかった。心より感謝申し上げます。

筑波大学大学院情報システム研究科構造エネルギー工学専攻教授の京藤敏達先生、庄司学教授、白川直樹准教授には、的確かつ有意義なご助言をいただいたことに心より感謝申し上げます。

横浜国立大学先端科学高等研究院特別上席特別教授の藤野陽三先生には、国土交通省次世代社会インフラ用ロボット導入検討委員会(橋梁維持管理部会)委員長として、多くの橋梁点検ロボットの現場検証において心強いご指導を賜わった。また、SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)のプログラムディレクターとして橋梁点検ロボットの研究開発と社会実装においても多大なるご指導を賜わった。

橋梁点検ロボットの現場検証と評価にあたって同委員会委員でもある東京大学浅間一教授からは、フィールドにおけるロボットの評価に対して基調なご意見をいただいた。

国土交通省総合政策局公共事業企画調整課において私とともにロボット施策を担当した増達郎課長補佐(現能代河川国道事務所長)、大槻崇課長補佐(現国総研主任研究官)、近藤弘嗣課長補佐(現道路局課長補佐)、渡邊賢一課長補佐、中根亨係長(現小樽開発建設部道路調査官)、東山遼係長、川口貴大係長、松村潤係長を始めとする政策部門の諸氏には貴重なデータやアイデアの提供に協力頂いた。また橋梁調査会の大石龍太郎常務理事(現在、イベント白石取締役)をはじめ諸氏には、橋梁点検の要諦について丁寧にご指導を賜った。

国土交通省道路局国道技術課保全企画室の長谷川朋弘室長(現長野県土木部長)、伊藤高室長(現茨城県土木部長)、森下博之企画専門官(現国交省施工安全企画室長)他の諸氏には現場検証における技術評価に際して道路管理者として貴重な意見を、大臣官房技術調査課手塚寛之調整官、内閣府官武晃司参事官他の諸氏には新技術評価及び地方展開に係る貴重な意見を賜った。

自治体における実証に関して、SIP地域実装活動を推進にリーダーシップを発揮されたSPDの若原敏裕先生(大崎総合研究所)、岡田有策教授(慶応大学)、さらに地域実装推進の旗印として推進された六郷恵哲教授(岐阜大学)、黒田保教授(鳥取大学)には、本研究の推進の原動力となった問題意識を与えていただいた。

橋梁点検ロボット開発者として現場検証後も粘り強く実用化を推進されている毛利茂則氏(ジビル調査設計)、渡辺豊氏(ルーチェサーチ)、加藤直也氏(デンソー)ほか多くの開発者の皆様、Mani Golparvar 氏(Illinois University)、福地良彦氏(オートデスク)、緒方正剛氏(先端建設技術センター)には3次元モデルの導入に多くの助言を頂いた。

本研究を進めるにあたり、AI共同研究のもとロボットの使用方法や画像情報の利用方法に関し多くの貴重な意見や指導を賜った土木研究所西川和廣理事長、有田幸司技術推進本部長、金澤文彦構造物メンテナンスセンターグループ長他に心より感謝申し上げます。

土木研究所先端研究チームのメンバーとして共に過ごした吉永弘志氏、橋本毅氏、上野仁士氏、吉田潔氏、山田充氏、山内元貴氏、イルポ(Ilppo Niskanen)氏(オウル大学)、内川友里氏には温かく励まして頂いた。

特に私とともに橋梁点検ロボットの社会実装に不可欠な点検画像AIの研究に共に取り組んでいる交流研究員の下川光治氏(アジア航測)には画像検証や測定の観点から、榎本真美氏(パシフィックコンサルタンツ)には画像処理と情報統合利用の観点から、二宮和也氏(日本工営)には3D点検調書の構想づくりにご協力頂いた。また服部達也氏、田中洋一氏には主任研究員としてこの研究に多くのヒントを与え支えていただいた。岡田佳代子さんには、図表の作成にご協力いただいた。

最後に、この論文をまとめるにあたり温かく支えてくれた私の妻智美、真麻、真識、遠くから励ましてくれた両親と兄弟友人らに心から感謝を申し上げます。

## 11. 参考文献

- [1] 国土交通省道路局, 橋梁定期点検要領(H31.2)  
[http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4\\_1.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4_1.pdf)
- [2] 国土交通省道路局, 道路橋定期点検要領(H31.3)  
[http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3\\_1\\_6.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3_1_6.pdf)
- [3] 国土交通省道路局, 橋梁定期点検積算基準
- [4] 国総研資料第 0748 号:道路橋の定期点検に関する参考資料(2013 年版)
- [5] 国総研資料第 0829 号:道路構造物管理実務者研修(橋梁初級I)道路橋の定期点検に関するテキスト
- [6] 土木研究所資料第 2652 号:橋梁損傷事例写真集
- [7] 次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会橋梁維持管理部会, 橋梁維持管理技術の現場検証・評価の結果, 平成28年3月30日, <http://www.mlit.go.jp/common/001125338.pdf>
- [8] 国土交通省, 新技術情報提供システム(New Technology Information System), <http://www.netis.mlit.go.jp>
- [9] 平成 18 年 7 月 5 日付, 国土交通省通達「公共工事等における新技術活用の促進について」(国官技第 86 号, 国官総第 237 号)
- [10] 矢野公久;先端建設技術センター;NETISプラス第 15 号, pp.2~5, 2019 夏,
- [11] 藤野陽三;次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進, 日本ロボット学会誌 34 巻 9 号, pp.572-574,2016.11
- [12] 新田恭士;次世代インフラ用ロボット現場検証の取り組みについて, 日本ロボット学会誌 34 巻 8 号, pp. 492-496, 2016.10
- [13] 国土交通省次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会;橋梁維持管理技術の現場検証・評価の結果, H28.3 <http://www.mlit.go.jp/common/001125338.pdf>
- [14] SIP インフラ江島大橋プロジェクト;実証試験報告書, H31.3
- [15] 岐阜大学 SIP 実装プロジェクト;平成29年度活動報告書, H30.4  
[http://me-unit.net/wp-content/uploads/2018/04/20180425-H29\\_Research\\_Report.pdf](http://me-unit.net/wp-content/uploads/2018/04/20180425-H29_Research_Report.pdf)
- [16] 岐阜大学 SIP 実装プロジェクト 新しい橋梁点検技術の適用性評価委員会;ロボット技術を取り入れた橋梁点検指針(案), H30.4  
[http://me-unit.net/wp-content/uploads/2017/01/20180425-Bridge\\_Inspection\\_Guideline.pdf](http://me-unit.net/wp-content/uploads/2017/01/20180425-Bridge_Inspection_Guideline.pdf)
- [17] 国土交通省;新技術利用のガイドライン(案), H31.2  
[http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo5\\_1.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo5_1.pdf)
- [18] 国土交通省;点検支援技術 性能カタログ(案), H31.2 時点  
[http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo5\\_2.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo5_2.pdf)
- [19] 日本コンクリート工学会;コンクリートの診断技術'18[基礎編], 3.4.2, H30.2
- [20] 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), H31.3  
<http://www.mlit.go.jp/common/001284069.pdf>
- [21] 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, H31.1
- [22] SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術 SIP インフラ地域実装支援チーム;SIP インフラ新技術地域実装活動報告書, H31.1
- [23] Yasushi NITTA, Takashi YOSHIDA;Field Verification and Evaluation of Technology Towards Introduction of Underwater Inspection Vehicle, Journal of Disaster Research, Vol.13 No.4, pp. 624-636, 2018
- [24] 下川光治, 新田恭士ほか;構造物点検のための画像の撮影位置と管理手法に関する考察,建設機械と施工法シンポジウム 2019.12
- [25] 新田恭士;国土交通省における ICT,次世代インフラ用ロボットの導入推進の取組について, 計測と制御 第 55 巻 第 6 号, pp.470-476, 2016.6
- [26] 新田恭士;次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の取組, 建設機械施工 Vol.67 No.12 December 2015
- [27] 寺戸秀和, 新田恭士;道路トンネルの点検におけるロボットの利用法とその評価方法について, トンネル工学報告集, 第 26 巻, I-17, 2016.11.
- [28] 寺戸秀和, 新田恭士;トンネル覆工画像取得車両の形状計測検証の試行, 土木学会第 72 回年次学術講演会概要集, VI-969, 2017.9.
- [29] 新田恭士ほか;超長距離無人化施工技術の適用性に関する考察 一雲仙普賢岳における超長距離遠隔操作実証実験の概要一, 第 13 回建設ロボットシンポジウム論文集 pp.41-50, 2012.9
- [30] 社団法人 日本測量学会 :解析写真測量 ,52 巻・2 号, pp.75~83, 2013
- [31] 織田和夫;講座:バンドル法 第八回コンピュータビジョンとバンドル法,写真測量とリモートセンシング,52 巻・2 号, pp.75~83, 2013
- [32] 国土交通省:作業規定の準則, 国土交通省告示 第 565 号, pp.12~38, 平成 28 年 3 月 31 日
- [33] 国土交通省:UAV を用いた公共測量マニュアル(案), pp.25~26, 平成 28 年 3 月 30 日
- [34] 国土交通省:空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案), pp. 10~64, 平成 30 年

3 月

- [35] 国土交通省;無人航空機(ドローン, ラジコン機等)の安全な飛行のためのガイドライン, H30.3  
[http://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_tk10\\_000003.html](http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html)
- [36] 林利行, 大石龍太郎, 吉田好孝, 安井成豊: 現行のロボット技術等による橋梁点検を支援するためのインフラ構造の検討, 土木技術資料, Vol59, No.8, 10-13, 2017
- [37] Youngjib Ham, Kevin K. Han, Jacob J Lin and Mani Golparvar-Fard; Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works, Visualization in Engineering (2016), <https://viejournal.springeropen.com/track/pdf/10.1186/s40327-015-0029-z>
- [38] ARIA Team (2015); "The Aerial Robotic Infrastructure Analyst (ARIA) project.", <<http://aria.ri.cmu.edu/>>.
- [39] 庄野 昭・齋藤 淳: コンクリート表面のひび割れ評価方法, ハザマ研究年報(2009.12)
- [40] (社)日本コンクリート工学協会.コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針, 2003, p.61
- [41] 外川勝, 小出博, 中居誠: デジタル画像による橋梁損傷調査, 土木学会第 57 回年次学術講演会, 2002.9, <http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/2002/57-cs/57-cs-0034.pdf>
- [42] 小出博他: デジタル画像によるコンクリート構造物のひび割れ認識アルゴリズムの開発, 土木学会第 55 回年次学術講演会,
- [43] 外川勝他: デジタル画像による撮影角度と認識可能なひび割れ幅の検証, 土木学会第 55 回年次学術講演会
- [44] 上北正一他: デジタル画像 RC 床版劣化判定システムの判定検証 土木学会第 58 回年次学術講演会
- [45] 佐々木康史他: デジタル画像による床版劣化判定システムの開発, 土木学会第 56 回年次学術講演会
- [46] 道路橋の RC 床版に関する調査研究および補修・補強について, 北海道開発局開発土木研究所 月報 昭和 51 年 4 月
- [47] 2001 年制定コンクリート標準示方書『維持管理編』制定資料 土木学会
- [48] Kazunori Watanabe, Kenji Ikeda, Satoshi Sasaki, Hiroshi Koide, Toshio Yamamoto; "Development of Bridge RC Deck Slab Deterioration Assessment System by The Digital Images", 18th US-Japan Bridge Engineering Workshop, St. Louis, Missouri, Oct.2002
- [49] 早坂洋平, 佐藤久, 永見武司, "デジタル画像を活用した道路構造物のひび割れ検出技術の開発", 第27回土木学会東北支部技術研究発表会, 2016
- [50] 佐藤久, 早坂洋平, 永見武司, 小林匠, 増田健, "デジタル画像によるコンクリート構造物のひび割れ自動抽出技術の開発", 土木学会第 70 回年次学術講演会, 5-027, 2015
- [51] 山本泰造, 仲田慶正, 今川雄亮, "デジタルカメラ点検システムの開発と検証", 土木学会第 70 回年次学術講演会, 6-485, 2015
- [52] RGUIG MUSTAFA, EL AROUSSI MOHAMED, "CONCRETE CRACK DETECTION BASED MULTI-BLOCK CLBP FEATURES AND SVM CLASSIFIER", Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol. 81, No.1, 151-160, 2015
- [53] 河村圭, 吉野孝亮, Amir Tarighat, 中村秀明, "遺伝的アルゴリズムおよび決定木を用いたひび割れ抽出のための画像処理パラメータ有効範囲の特定", 土木学会論文集F3, Vol.69, No.2, I13-I23, 2013
- [54] 小山哲, 丸屋剛, 堀口賢一, 澤健男, "ガボールウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発", 土木学会論文集 E2, Vol.68, No. 3, 178-194, 2012
- [55] 富山真一, 大平倫宏, 高橋聖, 中村英夫, "DoG画像を用いたひび割れ検出手法におけるノイズ削除処理の改良", 信学技報, IE2010-181, MVE2010-169, 207-212, 2011
- [56] 大島義信, 八木康人, 河野広隆, "ASR 診断のためのパターン認識手法の開発", コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, 787-792, 2008
- [57] 西川貴文, 吉田純司, 杉山俊幸, 斉藤成彦, 藤野陽三, "木構造状フィルタを用いたコンクリートのクラック抽出のためのロバストな画像処理システム", 土木学会論文集 A, Vol. 63, No.4, 599-616, 2007
- [58] 佐藤久, 遠藤重紀, 早坂洋平, 皆川浩, 久田真, 永見武司, 小林匠, 増田健, "デジタル画像からコンクリートひび割れを自動検出する技術の開発", NEDO インフラ維持管理技術シンポジウム, 2018.10.30

## 12. 付録

### (付録4) スクリーニングの概念を取り入れた技術評価事例

#### (コンクリート構造物のうき・剥離を検出可能な非破壊検査技術の評価)

本資料は、第三者被害防止措置要領に基づくコンクリート部材の打音検査範囲のスクリーニングに適用された非破壊検査技術の評価事例である。本事例は、次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会(橋梁維持管理部会)において審議され、橋梁点検技術では性能要求(リクワイアメント)に基づく初めての評価事例であり、公表資料を基に若干の補足を加えたものである。

(評価結果の公表資料)

#### コンクリート構造物のうき・剥離を検出可能な非破壊検査技術の評価

技術名	赤外線調査トータルサポートシステム Jシステム		
開発者	西日本高速道路エンジニアリング四国株式会社		
NETIS番号	SK-110019-V		
技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・橋梁等のコンクリート構造物のうき・剥離などの変状箇所を、赤外線法により、高精度かつ定量的に検出する点検技術。</li> <li>・遠望非接触の非破壊検査のため、足場や交通規制が不要。</li> <li>・独自に開発した損傷判定支援システムにより、解析作業の熟練度にかかわらず、赤外線画像から変状箇所の損傷状態を定量的に判定することが可能。</li> </ul>		
測定状況			
対象物	コンクリート構造物のうき・剥離の検出		
従来の方法	打音検査		
技術の特徴	必要な機器・装置等(計測)	冷却型高性能赤外線カメラ(素子:InSb)、調査支援モニター、デジタルカメラ(可視画像)、熱環境測定装置	
	必要な能力・資格等(計測)	無し	
	必要な機器・装置等(解析)	損傷判定支援ソフト	
	必要な能力・資格等(解析)	無し	
	(参考) 概略費用	計測費用(直接人件費) <sup>※1</sup>	841,500円(／300m <sup>2</sup> ×30橋)
		計測費用(直接経費) <sup>※2</sup>	568,500円(／300m <sup>2</sup> ×30橋)
解析費用(直接人件費) <sup>※3</sup>		882,850円(／300m <sup>2</sup> ×30橋)	
計	2,292,850円(／300m <sup>2</sup> ×30橋)		
適用条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>・天候が雨天でないこと。</li> <li>・調査対象部位が湿潤状態でないこと。</li> <li>・亜鉛を含む防錆スプレーなど、金属系の塗料をコンクリート表面に塗布した部位でないこと。</li> <li>・熱環境測定装置に検出可能な温度差が発生すること。</li> <li>・調査対象に対する対象面角度の最小角度が30°以上確保できること。</li> <li>・撮影箇所から調査対象部位の視通が確保できること。</li> <li>・調査時間帯は原則として夜間とする。</li> <li>・コンクリート表面から4cm奥までのうき・剥離</li> <li>・日較差(1日の最高気温と最低気温の差)7℃以上が望ましい。</li> <li>・撮影距離約50m未満(ただし、レンズや、距離計の変更により80m程度まで対応可能)</li> </ul>		
利用場面(ユースケース)	本技術は、「橋梁における第三者被害予防措置要領(案)」(平成28年12月)に基づき実施される措置において、落下する可能性のある損傷(コンクリートのうき・剥離)のある箇所を推定し、打音検査が必要な箇所を事前にスクリーニング(抽出)する目的で使用される。		
要求性能(リクワイアメント)	適用条件下において検出率が100%であること		
試行結果	①精度 検出率 <sup>※4</sup>	100% (うき:52箇所／52箇所、剥離:38箇所／38箇所) 【○】	
	②効率性 ヒット率 <sup>※5</sup>	26% (90箇所／350箇所)	
要求性能への適合性	本技術は、利用場面及び適用条件において要求性能を満足すると認める。		

※1 計測費用(直接人件費):NETIS申請情報「施工単価」における「熱環境測定装置設置」、「赤外線調査」、「熱環境測定装置撤去」を計上

※2 計測費用(直接経費):NETIS申請情報「施工単価」における「機械器具費(ライトバン)」、「機械器具費(赤外線カメラ)」を計上

※3 解析費用(直接人件費):NETIS申請情報「施工単価」における「可視画像展開図作成」、「調査結果のまとめ」を計上

※4 検出率=(従来方法による点検で把握された損傷のうち、当該技術で検出<sup>※6</sup>できた損傷数)／(従来方法による点検で把握された損傷数)

※5 ヒット率=(当該技術で異常が検出<sup>※6</sup>された箇所数のうち、従来方法による点検で損傷が把握された箇所数)／(当該技術で異常が検出<sup>※6</sup>された箇所数)

※6 損傷グレードが「観察」、「注意」、「要注意」の全てを対象とする

※7 試行結果における損傷の対象は、当該技術適用条件内のコンクリートのうき・剥離

※8 第三者被害予防措置は、「橋梁における第三者被害予防措置要領(案)」(平成28年12月)に基づく措置

※9 「試行結果-①精度-検出率」の欄に○が付されている技術は、要求性能(リクワイアメント)を満たしている技術

(補足)

		人の近接目視点検の結果	
		損傷なし	損傷あり
ロボット取得画像の判読結果	損傷なし	正しい測定 (True Positive)  「健全 (Positive)であることを、 正確に検知 (True)」	誤った測定 (第2種の誤り) (False Negative)  「不健全 (Negative)であるのに、健全と誤って検知 (False)」  【発生確率: $\beta$ 】
	損傷あり	誤った測定 (第1種の誤り) (False Positive)  「健全 (Positive)であるのに、不健全と誤って検知 (False)」  【発生確率: $\alpha$ 】	正しい測定 (True Negative)  「不健全 (Negative)であることを、 正確に検知 (True)」

表 検出率とヒット率の概念

「検出率」:  $1 - \beta$  (3)  
(※打音必要箇所の未検知( $\beta$ )の無い割合)

「ヒット率」:  $1 - \alpha$  (4)  
(※システムの打音必要判定箇所の内、真に打音必要の割合)

この事例では、点検ロボットによる損傷(うき・剥離)の検出性能を評価するために「検出率」と「ヒット率」という2つの指標が定義された。

これらの指標について、既存の統計的品質管理概念との整合について表に示す。JIS「品質管理」の用語では、「検出能力」は測定方法全体の性能を表しているとの参考解説の他は、「検出力」を $1 - \beta$ と定義している。ただし、この $1 - \beta$ は測定対象の真値の捕捉確率となっているため、人間の測定との比較を前提とした性能評価では、「検出力」という用語の使用は誤解を生む可能性があり、新たに検出率として式(1)を定義し、検出範囲における真値の割合をヒット率として式(2)に定義した。

## (付録5)

### 次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会 橋梁維持管理部会の実施した現場検証条件について

平成 28 年 3 月 30 日報告書などより抜粋

評価結果の公表資料の所在:<http://www.mlit.go.jp/common/001125338.pdf>

#### 1. 国土交通省が実施した現場検証における橋梁点検ロボットの公募について【公募条件】

現場検証においては、検証対象として募集した[1]～[10]の技術について、橋梁点検においてロボット技術が全てを満たすべき要件を「基本要件」として設定した。さらに、現在の橋梁維持管理で課題となっている項目で、効果が期待される項目について「公募技術に期待する項目」として設定された。

[1] 鋼橋において、桁の「腐食、亀裂、ゆるみ・脱落、破断、防食機能の劣化」について、点検要領に基づく近接目視点検の支援ができる技術・システム

##### 【基本要件】

- ① 「橋梁定期点検要領 平成 26 年 6 月発出」(以下、「橋梁定期点検要領」という)、「道路橋定期点検要領 平成 26 年 6 月発出」(以下、「道路橋定期点検要領」という)及び「橋梁における第三者被害予防措置要領(案)平成 16 年 3 月国土交通省道路局国道・防災課」(以下、「第三者被害予防措置要領」という)(これら3つの要領について、以下、「橋梁点検要領等」という)における桁の「腐食、亀裂、ゆるみ・脱落、破断、防食機能の劣化」の全てまたは一部について、近接目視を主体とする点検の支援を通じて、「橋梁点検要領等」の規定に定める点検調書の作成またはその支援ができる。なお、ここでの「支援」とは、従来点検の全ての代替には至らぬものの従来点検と組合せて補完的に行うことで、全体として点検の効率化、省力化あるいは高度化を図ることができることをいう。ただし点検精度を低下させるものであってはならない。
- ② 「橋梁点検要領等」に基づく損傷評価に必要な全てまたは一部の情報を得ることができる。ここでいう損傷評価に必要な情報とは、「橋梁点検要領等」に規定される各損傷の程度の判定で求められる状況が識別できる画像あるいはその他のデータをいう。例えば、「腐食」に対しては、損傷の深さと損傷の面積の状況が、深さにおいては板厚減少の有無、面積については、局部的か否かが識別できる情報が得られること。また、コンクリートの「ひびわれ」に対しては、最大ひびわれ幅と最小ひびわれ間隔のそれぞれの情報として、ひびわれ幅に関しては 0.1mm 単位で識別できること、ひびわれ間隔については平均的な間隔として数十 cm 程度の単位で読み取り可能であることが要求される。その他の各損傷評価で要求される一般的性状については、「橋梁点検要領等」に基づくこととした。
- ③ 足場の設置等をしなければ、点検のために人が近づけない部位や、狭隘部など人が近づき難い箇所を点検できる。なお、当該箇所へのアプローチ方法は特段限定しない。
- ④ 現場での点検作業や点検結果の記録、整理作業および調書作成に掛かる費用や手間を削減することができる。
- ⑤ 現場での点検作業における安全確保がなされている。この場合、公募技術本体における安全対策に限らず、危険箇所に対する立ち入り禁止等の措置も含む。

##### 【公募技術に期待する項目】

- ⑥ 点検において、外乱(強風、外光(太陽光)や照明など)の影響を受け難いこと。
- ⑦ 損傷状況の把握、評価が、より効率的あるいは正確になること。
- ⑧ 現場への搬入、設置及び撤去が容易なこと。
- ⑨ 今回の検証現場以外でも、より多くの現場において効果を発揮すること。
- ⑩ 性能保証範囲が明確であり、且つ、それを客観的に示せること。

[2] コンクリート橋において、桁の「ひびわれ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、補修・補強材の損傷、うき、定着部の異常」について、点検要領に基づく近接目視点検の支援ができる技術・システム

##### 【基本要件】

- ① 「橋梁点検要領等」における桁の「ひびわれ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、補修・補強材の損傷、うき、定着部の異常」の全てまたは一部について、近接目視を主体とする点検の支援を通じて、「橋梁点検要領等」の規定に定める点検調書の作成またはその支援ができる。
- ② 前述[1]の②～⑤に同じ。

##### 【公募技術に期待する項目】

- ③ 前述[1]の⑥～⑩に同じ。

[3]鋼橋・コンクリート橋の床版において、「床版ひびわれ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、抜け落ち、補修・補強材の損傷、うき」について、点検要領に基づく近接目視点検の支援ができる技術・システム

【基本要件】

- ① 「橋梁点検要領等」における床版の「床版ひびわれ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、抜け落ち、補修・補強材の損傷、うき」の全てまたは一部について、近接目視を主体とする点検の支援を通じて、「橋梁点検要領等」の規定に定める点検調書の作成またはその支援ができる。
- ② 前述[1]の②～⑤に同じ。

【公募技術に期待する項目】

- ③ 前述[1]の⑥～⑩に同じ。

[4]鋼橋においては、桁の添接部のボルトやリベットの「ゆるみ・脱落、破断」について、コンクリート橋においては、桁の「補修・補強材の損傷、うき、定着部の異常」について、点検要領に基づく打音検査の支援ができる技術・システム

【基本要件】

- ① 「橋梁点検要領等」におけるボルトやリベットの「ゆるみ・脱落、破断」、コンクリート橋においては、桁の「補修・補強材の損傷、うき、定着部の異常」の全てまたは一部について、打音検査を主体とする点検の支援を通じて、「橋梁点検要領等」の規定に定める点検調書の作成またはその支援ができる。
- ② 前述[1]の②～⑤に同じ。
- ③ 打音検査に伴い、鏽、コンクリート片等の落下物が生じる場合については、落下物を回収できるか、または落下することを前提に安全対策を講じるものとする。

【公募技術に期待する項目】

- ④ 前述[1]の⑥～⑩に同じ。
- ⑤ 「第三者被害予防措置要領」における「応急措置」（コンクリート部材のうきなどで剥落の恐れのある範囲をハンマーでたたき落とす 等）ができること。

[5]鋼橋・コンクリート橋の床版において、「うき、補修・補強材の損傷」について、点検要領に基づく打音検査の支援ができる技術・システム

【基本要件】

- ① 「橋梁点検要領等」における床版の「うき、補修・補強材の損傷」の全てまたは一部について、打音検査を主体とする点検の支援を通じて、「橋梁点検要領等」の規定に定める点検調書の作成またはその支援ができる。
- ② 前述[4]の②～③に同じ。

【公募技術に期待する項目】

- ③ 前述[4]の④、⑤に同じ。

[7]コンクリート製橋脚・橋台において、「補修・補強材の損傷、うき、定着部の異常」について、点検要領に基づく打音検査の支援ができる技術・システム

【基本要件】

- ① 「橋梁点検要領等」におけるコンクリート製橋脚・橋台の「補修・補強材の損傷、うき、定着部の異常」の全てまたは一部について、打音検査を主体とする点検の支援を通じて、「橋梁点検要領等」の規定に定める点検調書の作成またはその支援ができる。
- ② 前述[4]の②～③に同じ。

【公募技術に期待する項目】

- ③ 前述[4]の④、⑤に同じ。

[8]鋼橋及びコンクリート橋の支承部(支承本体,アンカーボルト,落橋防止システム,沓座モルタル,台座コンクリート),および桁端周辺の狭隘部において,支承本体の「破断,遊間の異常,支承部の機能障害,変色・劣化,土砂詰まり,沈下・移動・傾斜」,鋼製部材の「腐食,亀裂,ゆるみ・脱落,破断,防食機能の劣化」,コンクリート部材の「ひびわれ,剥離・鉄筋露出,うき,漏水・滞水,変形・欠損」について,点検要領に基づく近接目視の支援ができる技術・システム

【基本要件※1】

- ① 「橋梁点検要領等」における支承本体の「破断,遊間の異常,支承部の機能障害,変色・劣化,土砂詰まり,沈下・移動・傾斜」,支承部を構成する鋼製部材の「腐食,亀裂,ゆるみ・脱落,破断,防食機能の劣化」,及びコンクリート部材の「ひびわれ,剥離・鉄筋露出,うき,漏水・滞水,変形・欠損」の全てまたは一部について,近接目視を主体とする点検の支援を通じて,「橋梁点検要領等」の規定に定める点検調書の作成またはその支援ができる.
- ② 前述[1]の②～⑤に同じ.

【公募技術に期待する項目】

- ③ 前述[1]の⑥～⑩に同じ.
- ④ なお,桁端周辺の狭隘部とは,橋台や掛け違い部の橋脚上に位置する主桁の端部周辺を意味し,直接目視することができない範囲(例えば支承のパラペット側の側面など)まで含めて目視を支援できる技術を求める.

[9]鋼橋及びコンクリート橋の支承部(支承本体,アンカーボルト,落橋防止システム,沓座モルタル,台座コンクリート),および桁端周辺の狭隘部において,ボルトの「ゆるみ・脱落,破断」,コンクリート部材の「うき」について,点検要領に基づく打音検査の支援ができる技術・システム

【基本要件】

- ① 「橋梁点検要領等」における支承部のボルトの「ゆるみ・脱落,破断」,コンクリート部材の「うき」の全てまたは一部について,打音検査を主体とする点検の支援を通じて,「橋梁点検要領等」の規定に定める点検調書の作成またはその支援ができる.
- ② 前述[4]の②,③に同じ.

【公募技術に期待する項目】

- ③ 前述[4]の④,⑤に同じ.

[10]鋼橋・コンクリート橋において,点検者を点検箇所近づけることができる技術・システム

【基本要件】

- ① 「橋梁点検要領等」に基づく点検の実施における技術とする.
- ② 橋梁路面上の通行車両,歩道上の人,橋下の車両や人,点検者,その他の第三者にとって安全な装置であるものとする.
- ③ 従来する方法(足場の設置や橋梁点検車の利用等)と比較して,点検作業効率や安全性が向上し,且つ,それらの効果に対する経済性が妥当である.

【公募技術に期待する項目】

- ④ 現状の橋梁点検車と比較して,交通の障害を,より小さくできること.
- ⑤ 現状の橋梁点検車と比較して,アプローチ性が高いこと.
- ⑥ 現場への搬入,設置及び撤去が容易なこと.
- ⑦ 今回の検証現場以外でも,より多くの現場において効果を発揮すること.(汎用性)



## 2. 橋梁点検ロボットの現場検証の評価結果について

国交省による橋梁点検ロボットの検証は、平成 26 年度及び 27 年度において実施された。平成 26 年度の検証は、新浅川橋(東京都八王子市)、浜名大橋(静岡県湖西市)、国総研内橋梁(茨城県つくば市)で行われた。予め点検技術者が近接目視による点検結果を用意しておき、各ロボット技術の開発者から提出されたコンクリート桁や鋼桁、床版の損傷に関する点検結果と照合することで評価が行われた。また点検効率や安全性についても評価が行われた。浜名大橋で行われた検証では、風速が速かった(平均 5~8m/sec, 最大で 16m/sec)ことから、安定して飛行できないロボットが続出した。平成 27 年度の検証は、蒲原高架橋(静岡市)と幸久橋(茨城県那珂市)で行われた。前年度の検証結果を踏まえて技術改良されたロボットが多く、前年度と同様に点検技術者の点検結果とロボットの点検成果を比較することで損傷等の検出精度が検証された。さらに損傷程度の検出精度の他にも、調書作成支援や橋梁点検箇所へのアプローチ性や作業効率など10項目の検証が行われ、最終的に以下に示す 4 段階での総合評価が実施された。

- I. 試行的導入に向けた検証を推奨する。
- II. 課題の解決を前提に、試行的導入に向けた検証を推奨する。
- III. 課題への対応結果により、試行的導入に向けた検証を推奨する。
- IV. 今回は十分な検証ができていない。

### 2-1. ロボット技術に対する評価

実際の橋梁点検を模擬して行った現場検証の結果、国土交通省は各ロボット技術に対する評価結果を公表した。公募要領に示された基本要件および期待項目について、下表に示す観点・方法により評価を実施した。各評価については、検証現場における固有の諸条件下(構造、桁下の使用条件、周辺環境など)での実施結果に基づくものであり、また、比較する従来手法は直轄国道を対象とした「橋梁定期点検要領」に基づいている。従って、諸条件や適用する点検要領の要求内容等が異なると、評価は変わること留意を要する。なお、各評価項目については、良好~不可までの4段階で評価し、評価できないものは評価から外されている。

項目	内容	評価の観点・方法
基本要件① 調書作成・支援	「橋梁点検要領等」の規定に定める点検調書の作成またはその支援ができる。	提出された損傷図(点検調書その5)および損傷写真(点検調書その6)について、「橋梁定期点検要領」で求められる仕様との整合性、写真の鮮明さなどから判定する。
基本要件② 損傷情報の収集	「橋梁点検要領等」に基づく損傷評価に必要な全てまたは一部の情報を得ることができる。	提出された損傷図に「橋梁定期点検要領」に基づく損傷評価に必要な情報が記録されており、その根拠が損傷写真から読み取ることができるかを、検出された損傷個数等で定量的に評価する。 (○:検出率 60%以上, △:同 30~59%, ×:同 29%以下 検出率以外の指標で×がある場合は 1 ランクダウン)
基本要件③ アプローチ性	足場の設置等をしなければ、点検のために人が近づけない部位や、狭隘部など人が近づき難い箇所を点検できる。	現場検証状況、提出された点検調書および性能等に関するヒアリング内容等から、対象部位の損傷情報が得られる工夫の有無とその有効性について定性的に評価する。
基本要件④ 効率	現場での点検作業や点検結果の記録、整理作業および調書作成に掛かる費用や手間を削減することができる。 (なお、点検作業に伴う交通規制による社会的損失を加味した費用※で評価する。)	提出された点検調書と、それを参照して「橋梁定期点検要領」で求められる点検調書を作成するのに必要な点検員による点検に掛かる費用、手間の合計値を従来点検による費用・手間と比較して定量的に評価する。提出された点検調書の作成に掛かる費用、手間は、提出された工数等集計結果に基づく。 (◎:従来比 20%以上削減, ○:同 19%削減~5%増加, △:同 6~10%増加, ×:同 11%以上増加)
基本要件⑤ 安全性	現場での点検作業における安全確保がなされている。	現場検証状況、提出された性能等に関するヒアリング内容等から、点検作業員、第三者、周辺構造物などに対する安全性を定性的に評価する。
期待項目⑥ 安定性	点検において、外乱(強風、外光(太陽光)や照明など)の影響を受け難いこと。	現場検証状況、提出された点検調書および性能等に関するヒアリング内容等から、取得情報に対する安定性を定性的に評価する。
期待項目⑦ 効率・正確さ	損傷状況の把握、評価が、より効率的あるいは正確になること。	現場検証状況、提出された点検調書および工数等集計結果等から、点検員の手間の削減、精度向上への効果を定性的に評価する。
期待項目⑧ 作業性	現場への搬入、設置及び撤去が容易なこと。	現場検証状況より、搬入、設置撤去に要する時間、手間、設備などから定性的に評価する。
期待項目⑨ 汎用性	今回の検証現場以外でも、より多くの現場において効果を発揮すること。	現場検証状況、提出された性能等に関するヒアリング内容等から、現場条件、構造などへの汎用性を定性的に評価する。
期待項目⑩ 性能保証	性能保証範囲が明確であり、且つ、それを客観的に示せること。	現場検証状況、提出された性能等に関するヒアリング内容等から、性能保証に対する妥当性を定性的に評価する。

※点検作業に伴う交通規制による社会的損失を加味した費用  
 従来点検では橋梁点検車の使用を仮定し、橋梁点検車の設置のための交通規制により生じる走行時間延長費用とする。なお算定では、24 時間交通量約 2 万台、大型車混入率 24%の時間交通量データを使用した。

◎	良好	○	可	△	課題が残る	×	不可	-	評価できない
	可に比べて更なる有効性が認められる。		实用レベルでほぼ問題ない程度である。		实用レベルで容認できるが、改善が望まれる課題がある。		実用上、限定的な使用に留まる。		十分な検証ができていないなどの理由で、今回の評価対象外。

## 2-2. 応募技術に対する個別評価

評価対象となった技術については、それぞれ対象技術の名称と共に、技術概要と主要技術構成、検証実施項目等について明示し、評価結果として技術に対する総合評価、課題、想定される適用範囲、期待される活用場面、期待される改良・開発事項について定性的にフィードバックが行われるとともに、前に述べた基本要件と期待項目について評価結果を記載したものが公表された。なお、これらの評価の根拠データについては、研究開発途上の技術もあることから非公開とされ、開発者のみに情報提供されている。

なお、各技術に対する評価結果の公表は、現場検証で確認した事項を挙げ、橋梁点検に対する支援効果の程度を踏まえ、総合的な評価結果として以下の 4 クラスで評定。

### I. 試行的導入に向けた検証を推奨する

検証において、点検支援(点検情報の取得・記録)での効果を有する可能性が高いことが確認され、試行的導入に向け更に種々の条件を想定した検証が望まれる技術。

### II. 課題の解決を前提に、試行的導入に向けた検証を推奨する

公募で求める基本要件との整合性や、安全性、信頼性などにおいて若干の課題が残り、現状では点検支援(点検情報の取得・記録)での効果が限定的となることが判明した技術。

現場検証で確認された課題の解消により、早期に实用レベルでの支援効果が得られる可能性があることから、課題の解決を前提として試行的導入に向けた種々の条件を想定した検証が望まれる。

### III. 課題への対応・結果により、試行的導入に向けた検証を推奨する

現場検証では、公募で求める基本要件との整合性や、安全性、信頼性などの基本的な要素に係る課題があることが判明した技術。試行的導入に向けて、確認された課題への対応と、その結果の検証が必要である。

### IV. 今回は十分な検証ができていない

現場検証では、機器・システムの不調や開発途上などの理由により、提案されたシステムでの検証に十分なデータが得られなかった技術。今後の開発状況をみて検証の可能性を検討する必要がある。

なお、総合評価の結果に応じて、「課題」、「想定される適用範囲」、「期待される活用場面」、「期待される改良・開発事項」等のコメントを記している。なお、「試行的導入に向けた検証」とは、実際の点検業務と同一の環境下で検証を行う「試行的導入」に向け、ロボット技術による支援の内容・効果、検証方法を具体化するため、及び、各技術の課題への対応状況等を確認するため、適宜、必要な現場検証を行うことをいう。

○技術名称	構造物点検ロボットシステム「SPIDER & Giraffe」 副題: 小型無人ヘリまたはポール搭載カメラによる構造物点検および点検調査作成支援システム													
○応募者	ルーチェサーチ株式会社													
○共同開発者	広島工業大学、株式会社建設技術研究所													
○技術概要 (自己申告)	人が近接することなく、デジタルカメラを搭載したロボット(UAV、ポール型)により撮影した写真の画像処理を行い、橋梁全体の3次元または2次元画像を作成し、画像から発生している損傷箇所・損傷程度を正確に把握し、橋梁点検調査の作成支援を行う技術システムである。	(外観・イメージ) LJAV点検ロボ  ポール搭載カメラ 												
○対象分野	橋梁維持管理													
○技術構成	<table border="1"> <tr> <td>移動機</td> <td>飛行型(無人航空機)</td> <td>寸法: 950mmx950mmx400mm、重量: 8kg</td> </tr> <tr> <td>センサー</td> <td>静止画取得</td> <td>最大画素数: 4,240万画素数(SONY α7R II)</td> </tr> <tr> <td>データ処理</td> <td>オルソ化</td> <td>オルソ作成(自社開発)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>ひびわれ解析</td> <td>画像からひびわれ幅と長さ解析(自社開発)</td> </tr> </table>	移動機	飛行型(無人航空機)	寸法: 950mmx950mmx400mm、重量: 8kg	センサー	静止画取得	最大画素数: 4,240万画素数(SONY α7R II)	データ処理	オルソ化	オルソ作成(自社開発)		ひびわれ解析	画像からひびわれ幅と長さ解析(自社開発)	
移動機	飛行型(無人航空機)	寸法: 950mmx950mmx400mm、重量: 8kg												
センサー	静止画取得	最大画素数: 4,240万画素数(SONY α7R II)												
データ処理	オルソ化	オルソ作成(自社開発)												
	ひびわれ解析	画像からひびわれ幅と長さ解析(自社開発)												
○問い合わせ先	ルーチェサーチ株式会社 代表取締役 渡辺 遼 Tel: 082-209-0230 Mail: yutaka@luc-s.jp URL: http://luc-s.net/													
●検証項目	[2]・[3]・[6]・[8] (詳細内容は、本書p.21に記載)													
●検証場所	蒲原高梁橋(国道1号、静岡県静岡市)													
●検証内容	コンクリート橋の橋桁上床版、支床周りの鉄筋部、およびコンクリート橋脚の近接目視の支援として、「損傷情報の取得及び記録」に係る、「取得情報の精度、記録の妥当性、作業の効率性、汎用性、及び安全性」について検証を実施。	 点検状況   合成画像と点検図												

○技術名称	構造物点検ロボットシステム「SPIDER & Giraffe」																							
●評価結果【実用検証評価】	<p><b>I. 試行的導入に向けた検証を推奨する</b></p> <p>○検証現場では、安定して飛行し、画像を取得する状況を確認した。 ○検証時に確認した飛行体の安定性は高いものの、操縦者の技量に依存する部分が多いと見受けられた。衝突などへの安全性についても同様で、制御や機能面での安定性、安全性の向上を図ることが望まれる。 ○取得された点検情報として、損傷写真と点検記録として十分な品質を有することを確認した。また、ポールカメラの併用により、支床周りの鉄筋部の画像も良好に取得できることが確認した。 ○損傷検出精度は、ひびわれ損傷についてはほぼ検出されているが、それ以外の剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰の検出精度は十分とは言えない。鮮明な画像は取得出来ていることから、画像から損傷を検出する技術の向上が課題と考えられる。</p> <p>以上の結果から、本システムは現状で点検への支援効果は期待できるが、検証が必要な事項も残すことから、総合評価として、試行的導入に向けた検証を推奨するとした。</p>																							
課題	【損傷検出精度の向上】 画像から損傷を検出する技術の向上が必要である。																							
想定される適用範囲	<ul style="list-style-type: none"> <li>・部材が複雑せず比較的平面で構成される構造(コンクリート橋や高橋脚、主塔など)であること。</li> <li>・橋下に操縦者が進入可能であること。(点検範囲が確認できれば、一部に河川などで進入できない箇所がある状況でも可)</li> <li>・マルチコプターの飛行が可能あるいは必要な許認可が得られる場所であること。(航空法対応)</li> </ul>																							
期待される活用場面	上記の適用範囲にある橋梁で、近接目視のために橋梁点検車や高所作業車が必要となり、比較的損傷が多く点検に時間を要する場合に、現場点検時間の短縮(橋梁点検車が必要な橋梁では、交通規制時間の短縮により社会的損失の低減)が期待できる。																							
期待される改良・開発事項	【安全性の向上】 操縦者の技量によらない、逃走防止および衝突に対する安全設備の整備。																							
参考: 今回の現場検証における応募要件・項目についての判定結果(今回の検証現場・検証橋梁の推奨条件下での結果)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>検証項目</th> <th>判定</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>基本要件① 点検調査の作成・支援</td> <td>△</td> </tr> <tr> <td>基本要件② [2]コンクリート橋の目視支援 [3]コンクリート鉄筋の目視支援 [6]コンクリート橋脚の目視支援</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>基本要件③ 足場を必要とする部位を足場なしで点検可能(アクセシビリティ)</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>基本要件④ 現場での点検作業結果の記録、整理作業、調査作成の費用や手間を削減できる</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>基本要件⑤ 現場での安全確保</td> <td>△</td> </tr> <tr> <td>期待項目⑥ 強風、太陽光、照明などの影響を受けにくい</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>期待項目⑦ 損傷状況の把握、評価がより効率的あるいは正確になる</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>期待項目⑧ 現場への搬入、設置及び撤去が容易なこと</td> <td>◎</td> </tr> <tr> <td>期待項目⑨ 他の多くの現場において効果を発揮できる(汎用性)</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>期待項目⑩ 性能保証範囲が明確であり、かつそれを客観的に示すこと可能</td> <td>○</td> </tr> </tbody> </table> <p>判定凡例 ◎:良好 ○:可 △:課題が残る ×:不可</p>		検証項目	判定	基本要件① 点検調査の作成・支援	△	基本要件② [2]コンクリート橋の目視支援 [3]コンクリート鉄筋の目視支援 [6]コンクリート橋脚の目視支援	○	基本要件③ 足場を必要とする部位を足場なしで点検可能(アクセシビリティ)	○	基本要件④ 現場での点検作業結果の記録、整理作業、調査作成の費用や手間を削減できる	○	基本要件⑤ 現場での安全確保	△	期待項目⑥ 強風、太陽光、照明などの影響を受けにくい	○	期待項目⑦ 損傷状況の把握、評価がより効率的あるいは正確になる	○	期待項目⑧ 現場への搬入、設置及び撤去が容易なこと	◎	期待項目⑨ 他の多くの現場において効果を発揮できる(汎用性)	○	期待項目⑩ 性能保証範囲が明確であり、かつそれを客観的に示すこと可能	○
検証項目	判定																							
基本要件① 点検調査の作成・支援	△																							
基本要件② [2]コンクリート橋の目視支援 [3]コンクリート鉄筋の目視支援 [6]コンクリート橋脚の目視支援	○																							
基本要件③ 足場を必要とする部位を足場なしで点検可能(アクセシビリティ)	○																							
基本要件④ 現場での点検作業結果の記録、整理作業、調査作成の費用や手間を削減できる	○																							
基本要件⑤ 現場での安全確保	△																							
期待項目⑥ 強風、太陽光、照明などの影響を受けにくい	○																							
期待項目⑦ 損傷状況の把握、評価がより効率的あるいは正確になる	○																							
期待項目⑧ 現場への搬入、設置及び撤去が容易なこと	◎																							
期待項目⑨ 他の多くの現場において効果を発揮できる(汎用性)	○																							
期待項目⑩ 性能保証範囲が明確であり、かつそれを客観的に示すこと可能	○																							

公表されたロボット技術の評価結果の例(ルーチェサーチ株)

2-3 現場検証に対する有識者委員会の評価(総評)

国土交通省が平成26年度から平成27年度の2箇年にかけて実施した橋梁点検用ロボット技術の現場検証の結果を審議した有識者委員会である「次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会橋梁部会(委員長:藤野陽三先生)」は、ロボット技術の評価結果公表にあたり次のように総括した。

現場検証では、多種多様な形態の橋梁点検ロボット技術の開発・改良が進んでおり、それらのロボット技術が人による点検を様々な形で「支援」する可能性が確認された。現場検証を実施したロボット技術は、『移動機構』として「飛行型、懸架型、車両型、ポール型、吸着型等」、『センサー』として「カメラ、赤外線等」、『データ処理』として「損傷自動抽出・解析、オルソ化、3次元化等」と、これらの組合せにより多種多様に構成されていた。

これらの各種ロボット技術による、一連の点検作業における支援には、いくつかの働きとその効果とがあり、その主要なものとして次を掲げた。

(点検を支援する際のロボット技術の主要な働き)

- ・「人が近接することが困難な点検箇所へ近接」(行く)し、「写真や動画等を取得」(見る・撮る)する働き
- ・複数の画像データ等から「損傷を見つけ出し、必要な情報(寸法や損傷の状態)を把握」(検出する)し、その後の再点検のために「損傷の程度や位置等を確認しやすく整理」(記録)しておく働き

(点検に対するロボット技術による支援の主要な効果)

- ・人が点検する前に、橋梁の全体的な損傷状況を把握することで、「重点的に把握すべき箇所を認識」し、「重大な損傷の早期発見・対策」につながり、橋梁の安全性の向上に資する効果
- ・「点検調査を作成」する際に、ロボット技術により取得され、その位置がわかり易く整理された「写真を効率的に利用」する効果
- ・点検調査で利用する写真の他にも、場所と時間の情報が付与された写真データと共に、平面或いは立体のモデルとして記録し、次の点検において、「損傷程度の進行等の経年変化を把握しやすく」する効果

また、以下は、取得写真等の精度と各インフラの管理者が求める点検内容に依り、必ずしも断定できないが、より大きな

効果が生じる可能性がある。

- ・ 高所で危険、或いは、膨大な資器材を必要とする等、人が近づくことが困難な点検箇所について、ロボットにより取得した写真等より、人が近接するべきかどうかを判断し、状況により人の近接を省き、「安全性向上・効率化」する効果

2年間に亘る現場検証では、こうした各種ロボット技術が、一連の点検作業における「行く」、「見る・撮る」、「検出する」、「記録する」の各過程について、いくつかの支援の可能性が確認され、また、実用上の課題も明らかになった。

今回の現場検証を通じて、多種多様なロボット技術の点検における支援の可能性は確認できたものの、限られた場所及び時間での検証であったため、実際の点検作業における効果や課題は、十分に検証できていない。例えば、相当に高い場所や河川の水上部、トラスやアーチ構造の橋梁等の接近困難な箇所への近接、実際は必ずしも同一ではない現場条件(日照、風速、交通状況等)の違いによる影響、点検実務に見合う作業量に掛かる時間及び費用等は、十分に確認できていない。

そのため、実際の点検業務と同一の環境下で検証を行う「試行的導入」に向けた準備として、今回の現場検証・評価の結果を踏まえ、ロボット技術による支援の効果を具体化し、適宜、必要な現場検証を行い、検証項目や内容、方法について、引き続き検討を進めることが求められる。

### ●点検のプロセスにおけるロボット技術の支援の可能性と課題

さらに二年間の現場検証から、各種のロボット技術が、点検作業における『行く』、『見る・撮る』、『検出する』、『記録する』の各過程において、いくつかの支援の可能性が確認され、また、更なる活用に向けた課題も明らかになったと評価した。

『行く』は、必要な情報を取得できる位置に接近することである。ここでは移動可能の広さ、動きの安定性の他、安全性、操作性、効率などを評価した。検証の結果、『行く』機能は概ね実現されており、【機構】により幾つの特徴を有することが確認された。

【飛行型】(無人航空機)は、移動範囲の広さ、速さに優位性がある一方で、主桁などで囲まれた空間への進入や安定性(特に耐風安定性)、安全性については課題が見られた。しかしながら、2カ年の現場検証を通じて安定性は大幅に向上し、また、空間認識や自律制御技術の導入、飛行体をフレームで囲み点検対象物への接触を可能とする等の改良がなされ、適用範囲の拡大が見込まれる。

【懸架型】は、主桁や高欄からカメラ等を搭載した梁を吊り下げるもので、梁に代えてワイヤーを用いる技術もあった。いずれも点検作業を橋上でおこなうことができるため、桁下の地形や環境への適応性は高い。現地での搬入や組立のためには全体的に軽量化が必要な反面、移動・回転・伸縮等に必要の機構が重装化し、その改良に課題が見受けられた。ただし、中には、タブレットに接続された数台の市販カメラを単純な梁に設置し、手動で動かす簡素な構造もあった。

【車両型】と呼ぶ搭乗型の台車あるいは特殊車両をベースとしたシステムは、他の機構と比較して安定性で優れている。これらは安定した車体から伸びる多関節アームや梁を用いて点検箇所に接近する方式で、移動範囲としては、広範囲を速く動くことは不得手であるが、損傷情報を丁寧に観察するのに有効な技術と言える。

【ボール型】は、移動可能範囲は狭いが、簡便性に優れる技術と言える。携帯性を優先して多くの機能は盛り込めないが、ソフトウェア的に機能を付加する技術もあり、実用性は高い技術と言える。

【その他の移動機構】として、壁面や橋桁に吸着して固定・移動するロボット技術もあった。これらは新しい機構として橋梁点検ロボットへの適用の可能性を示すことができたが、実用までには小型化や信頼性の向上など、更なる改良が必要と考えられる。

『見る・撮る』では、目視検査の支援を目的としたカメラと打音検査を支援する打音装置などがあり、鮮明な画像の取得や損傷を見分けるデータの採取が求められる。

『見る・撮る』は、応募技術により品質に差が見られたが、幾つかの技術については点検情報の取得に実用的なレベルであることが確認された。鮮明な画像の取得では、解像度やレンズなど「カメラ本体の性能」の他、移動機構に装着する際の「マウント方法」や「撮影方法での工夫」が品質を左右する。

一般的には「カメラ本体の性能」はカメラの大きさや重さと比例するため、搭載する移動機構の性能や撮影対象の特性を踏まえた選択が必要である。今回は飛行型でも高性能カメラを搭載するものが多く、カメラの高性能化に合わせて進化する可能性が見て取れた。カメラの「マウント方法」は様々あり、単に移動機構に固定したもの、雲台に免震機構を有するもの、短軸あるいは多軸可動軸を持つものがあった。また、「撮影方法」については、一定時間間隔で撮影するもの、カメラから電送された画像を確認しながら撮影(シャッター操作のみ)するもの、同じく画像を確認しながらカメラの操作(ズームや方向転換、シャッター操作)できるものに分かれた。

幾つかの技術では、これら機能をバランス良く実現し、従来の点検員による撮影画像と比べても遜色ない画像が得られているものもある一方で、記録として不十分な画像も幾つか見られた。今回の評価結果を踏まえた改良を待ちたい。

「打音検査装置」については、叩く、集音するといった機構は、ほぼ実用段階であることが確認された。ただし、被検査物表面の状態(風化状況や砂塵などの付着)やノイズの影響などについては十分な検証に至っていない。今後も継続して検証する必要がある。

『検出する』については、画像や打音などのデータから損傷を識別し、損傷の程度を表す定量的(サイズや長さ等)、定性的(色や表面状態等)な情報を解析することである。今回検証をおこなった範囲では、画像からコンクリートのひびわれを自動検出し、ひびわれ幅や長さなどの情報を得られるものもあったが、実用的な精度には至っていない。今回の検証技術の中では、画像から手作業で損傷を抽出、測定をおこなう応募者が多かったが、開発中あるいは開発予定との回答も多く聞かれた。

「打音」については、今回いくつか自動解析技術の検証を実施し、一部支援の可能性も見られたものの、検出した損傷を記録する方法についての対処が望まれる。なお、打音検査装置に代わる装置として、赤外線カメラによる損傷検出技術については、適用条件に制約はあるが、一定の損傷の検出は可能であることが確認された。

『検出する』作業は、今回の検証により点検作業全体の中で費用、手間の占める割合が大きく、この改良は効率の向上に大きく貢献することが見込まれる。画像利用、解析技術は異分野でも発展が見込まれる技術であり、そこで培われた技術の展開も含めて、今後の改良が期待される。

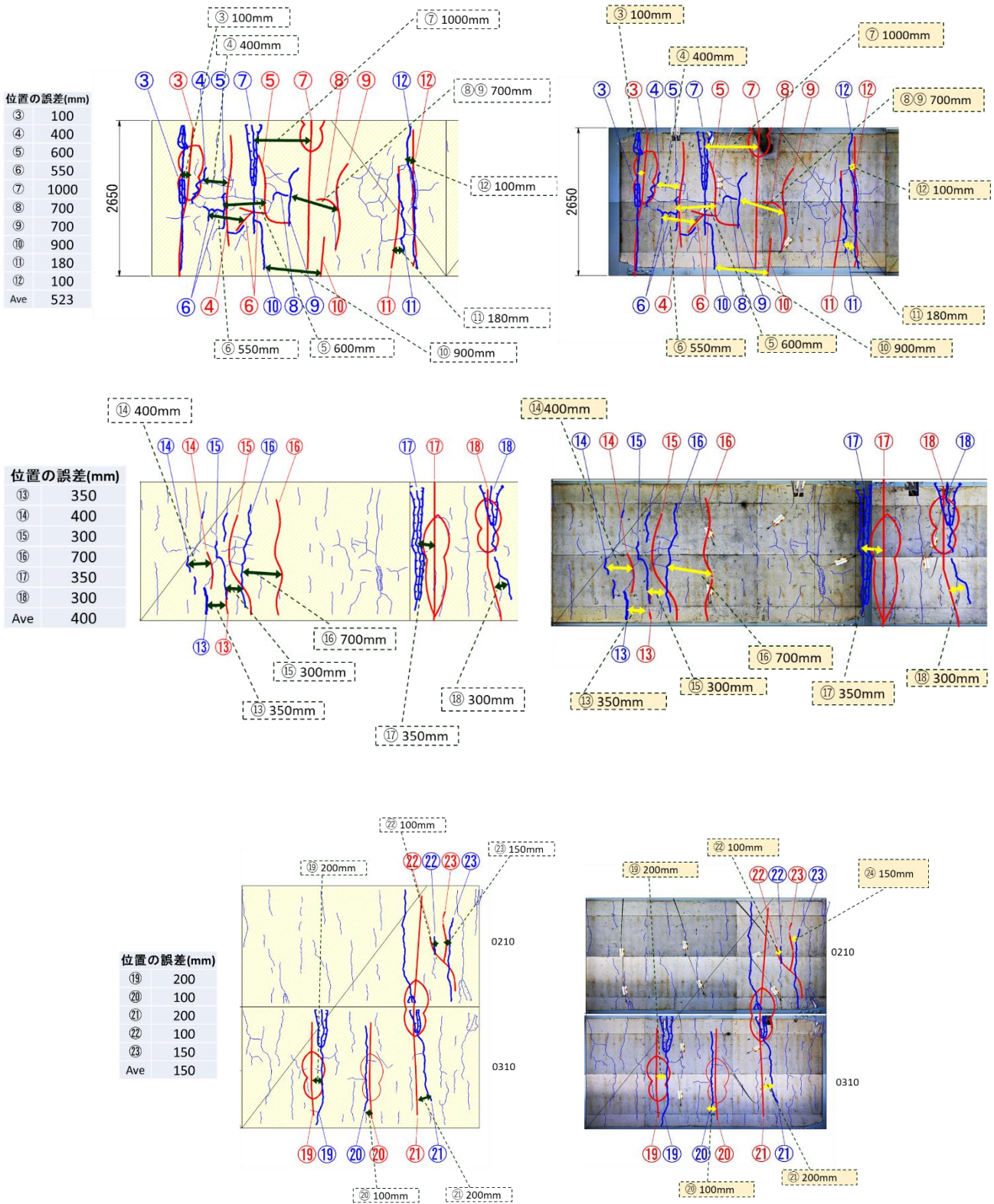
『記録する』について、今回の検証範囲では各応募者から提出された点検調書に記された損傷図と損傷写真が記録としての品質を有するかどうかで判定した。多くは一定の品質を有しており、点検への支援効果が認められた。ただし、一部の損傷写真で鮮明さが欠ける理由で記録として不十分なものも見られた。

なお、現場検証では、最新版の橋梁定期点検要領に基づく紙媒体の調書を基本として求めたが、近年の情報通信技術の進歩を鑑みると、コンピュータ上で画像データやCAD等の電子媒体の調書の実現も期待される。今回の検証でも一部の応募者より、撮影した二次元画像を三次元化したモデルが、参考資料として提出された。

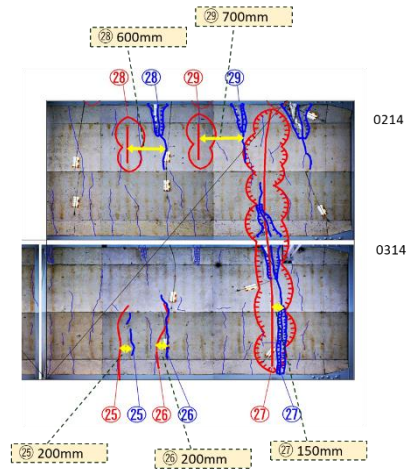
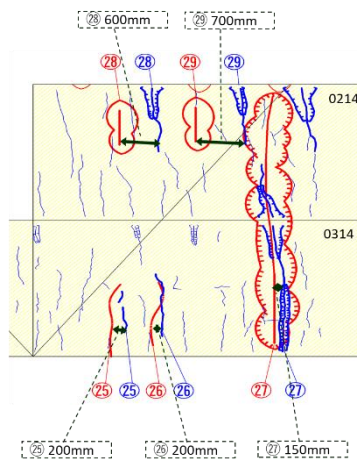
今後、こうした最新技術を活用した管理方法についても検討されていくことが期待される。

以上

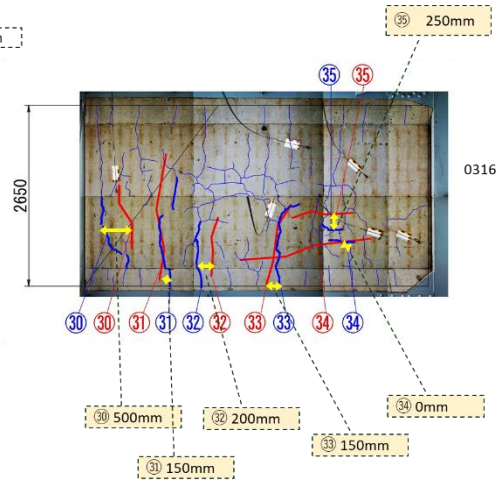
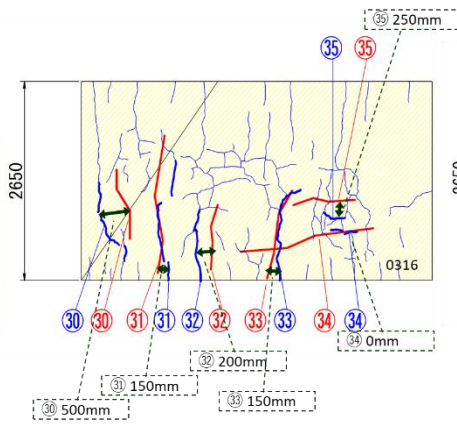
(付録6) 目視点検による損傷位置の記録精度検証データ  
 図6-7 図6-8に関連する他のデータ



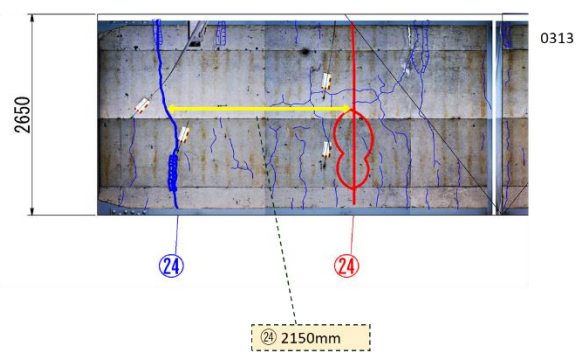
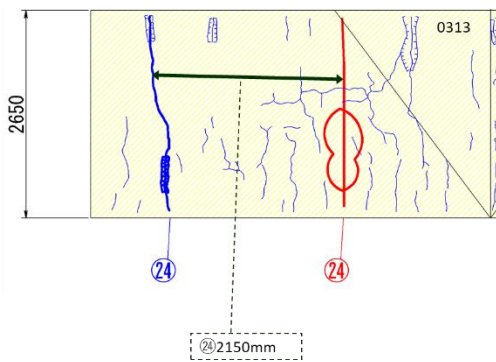
位置の誤差 (mm)	
㉕	200
㉖	200
㉗	150
㉘	600
㉙	700
Ave	370



位置の誤差(mm)	
㉚	500
㉛	150
㉜	200
㉝	150
㉞	0
㉟	250
Ave	208.3



位置の誤差(mm)	
㉠	2150
Ave	2150



(付録6) 目視点検による損傷位置の記録精度検証データ  
 図6-4 図6-5に関連する他のデータ

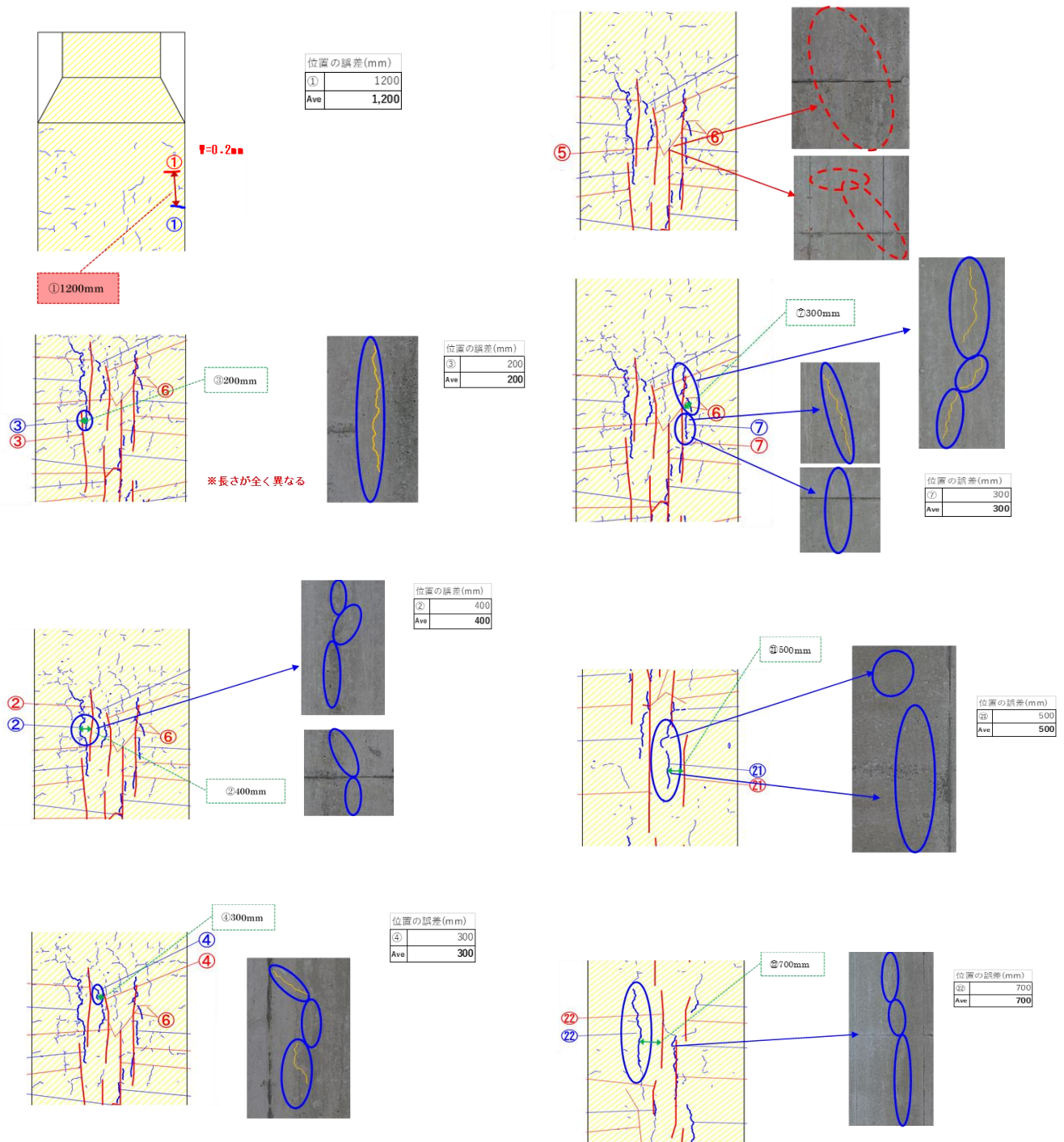








表6-6 実測値とSfM推定位置の違いによる撮影方向ベクトルの角度差 の根拠

ターゲット No	ターゲット位置情報			測量方向ベクトル			SfM方向ベクトル		
				撮影位置：測量計測値			撮影位置：SfM算出値		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	21715.974	12240.774	31.061	21713.384	12239.279	31.068	21713.394	12239.281	31.060
2	21715.975	12240.773	30.662	21713.388	12239.278	30.665	21713.397	12239.282	30.655
3	21715.975	12240.773	30.262	21713.387	12239.278	30.265	21713.400	12239.283	30.258
4	21715.978	12240.774	29.862	21713.387	12239.278	29.863	21713.395	12239.282	29.859
5	21715.98	12240.773	29.462	21713.388	12239.278	29.464	21713.396	12239.282	29.458

ターゲット No	測量方向ベクトル			SfM方向ベクトル			角度：θ (degree)
	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	-2.590	-1.495	0.007	-2.580	-1.493	-0.001	0.167
2	-2.587	-1.495	0.003	-2.578	-1.491	-0.007	0.186
3	-2.588	-1.495	0.003	-2.575	-1.490	-0.004	0.134
4	-2.591	-1.496	0.001	-2.583	-1.492	-0.003	0.084
5	-2.592	-1.495	0.002	-2.584	-1.491	-0.004	0.108

	カメラ位置			Omega	Phi	Kappa	写真位置 (ターゲット)			撮影ベクトル成分			ベクトル長	
	Xb	Yb	Zb				Xa	Ya	Za	Xa-Xb	Ya-Yb	Za-Zb		AB
TS	1	21713.384	12239.279	31.068			21715.974	12240.774	31.061	2.59	1.495	-0.007	2.990514003	
	2	21713.388	12239.278	30.665			21715.975	12240.773	30.662	2.587	1.495	-0.003	2.98790947	
	3	21713.387	12239.278	30.265			21715.975	12240.773	30.262	2.588	1.495	-0.003	2.988775334	
	4	21713.387	12239.278	29.863			21715.978	12240.774	29.862	2.591	1.496	-0.001	2.991871989	
	5	21713.388	12239.278	29.464			21715.98	12240.773	29.462	2.592	1.495	-0.002	2.992238794	
PIX4D	Xb'	Yb'	Zb'	Omega	Phi	Kappa	Xa	Ya	Za	Xa-Xb'	Ya-Yb'	Za-Zb'	AB'	
	1	21713.394	12239.281	31.059835	90.338141	-59.84366	0.122182	21715.974	12240.774	31.061	2.579544	1.49254	0.001165	2.980222182
	2	21713.397	12239.282	30.655383	90.201122	-59.85008	0.338415	21715.975	12240.773	30.662	2.577917	1.491071	0.006617	2.978085387
	3	21713.4	12239.283	30.258421	90.132809	-59.77824	0.217673	21715.975	12240.773	30.262	2.574888	1.490033	0.003579	2.974938548
	4	21713.395	12239.282	29.858665	90.266917	-59.83067	0.289626	21715.978	12240.774	29.862	2.58265	1.491815	0.003335	2.982549939
5	21713.396	12239.282	29.458449	90.328874	-59.87287	0.587925	21715.98	12240.773	29.462	2.583596	1.491392	0.003551	2.98315789	

**SfM推定方向角と実測方向角の差**

点A (ターゲット：損傷位置) = (Xa, Ya,

点B (撮影位置) = (xb, Yb,

点B' (SfMで推定した撮影位置) = (xb', Yb', Zb')

$$|BA| |B'A| \cos\theta = (Xa-Xb)(Xa-Xb') + (Ya-Yb)(Ya-Yb') + (Za-Zb)(Za-Zb')$$

$$\cos\theta = \frac{\{(Xa-Xb)(Xa-Xb') + (Ya-Yb)(Ya-Yb') + (Za-Zb)(Za-Zb')\}}{|BA| |B'A|}$$



(付録7) 解像度チャートの例

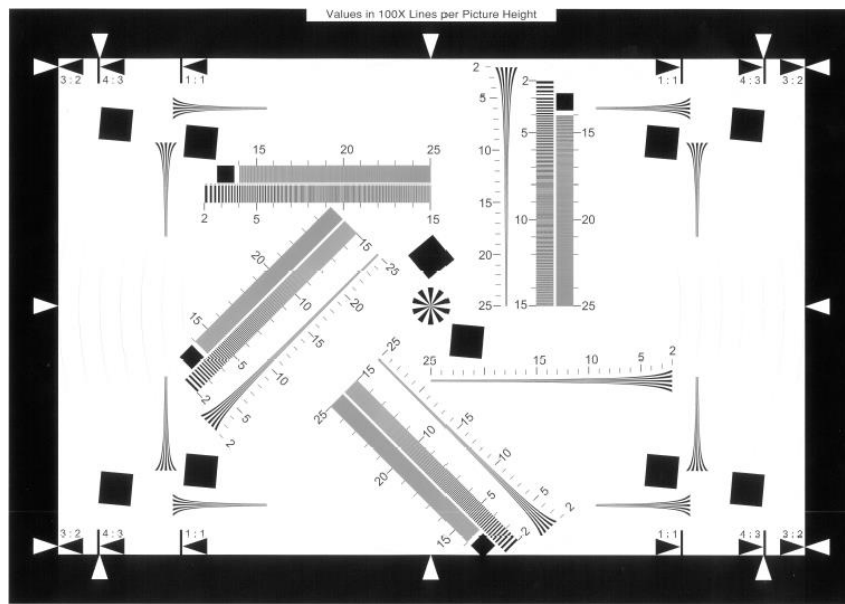


図1 Values in 100X Lines per Picture Height

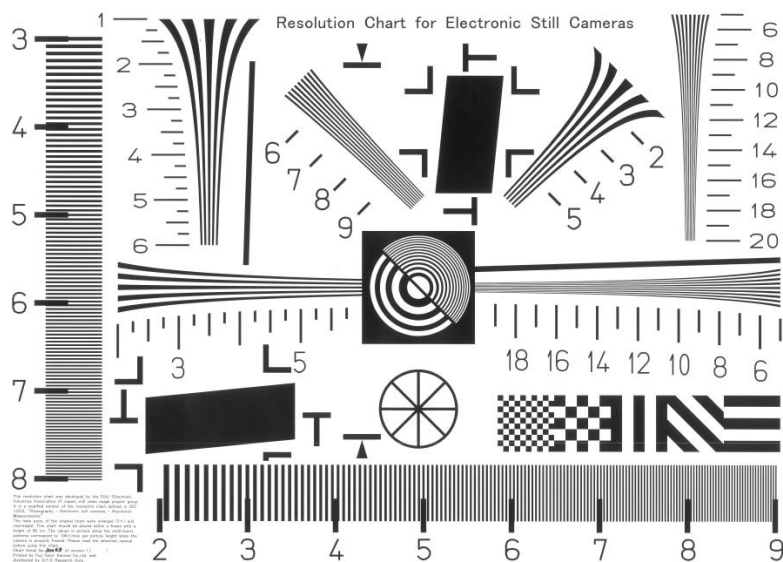


図2 Resolution Chart for Electronic Still Cameras

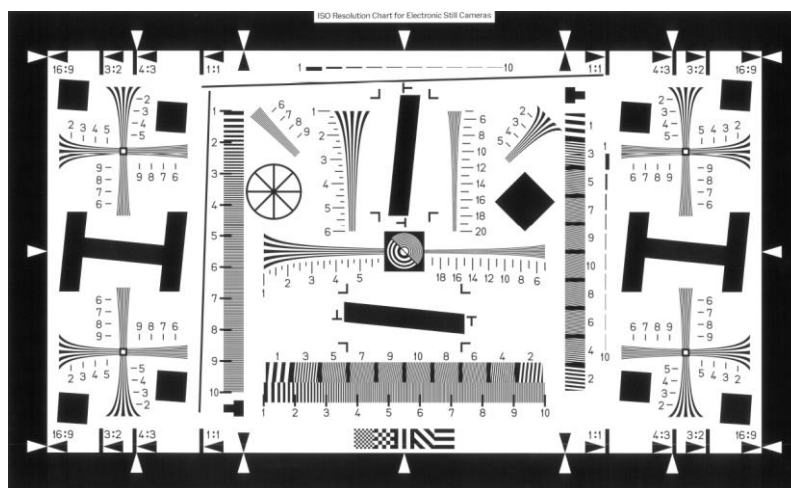


図3 ISO Resolution Chart for Electronic Still Cameras

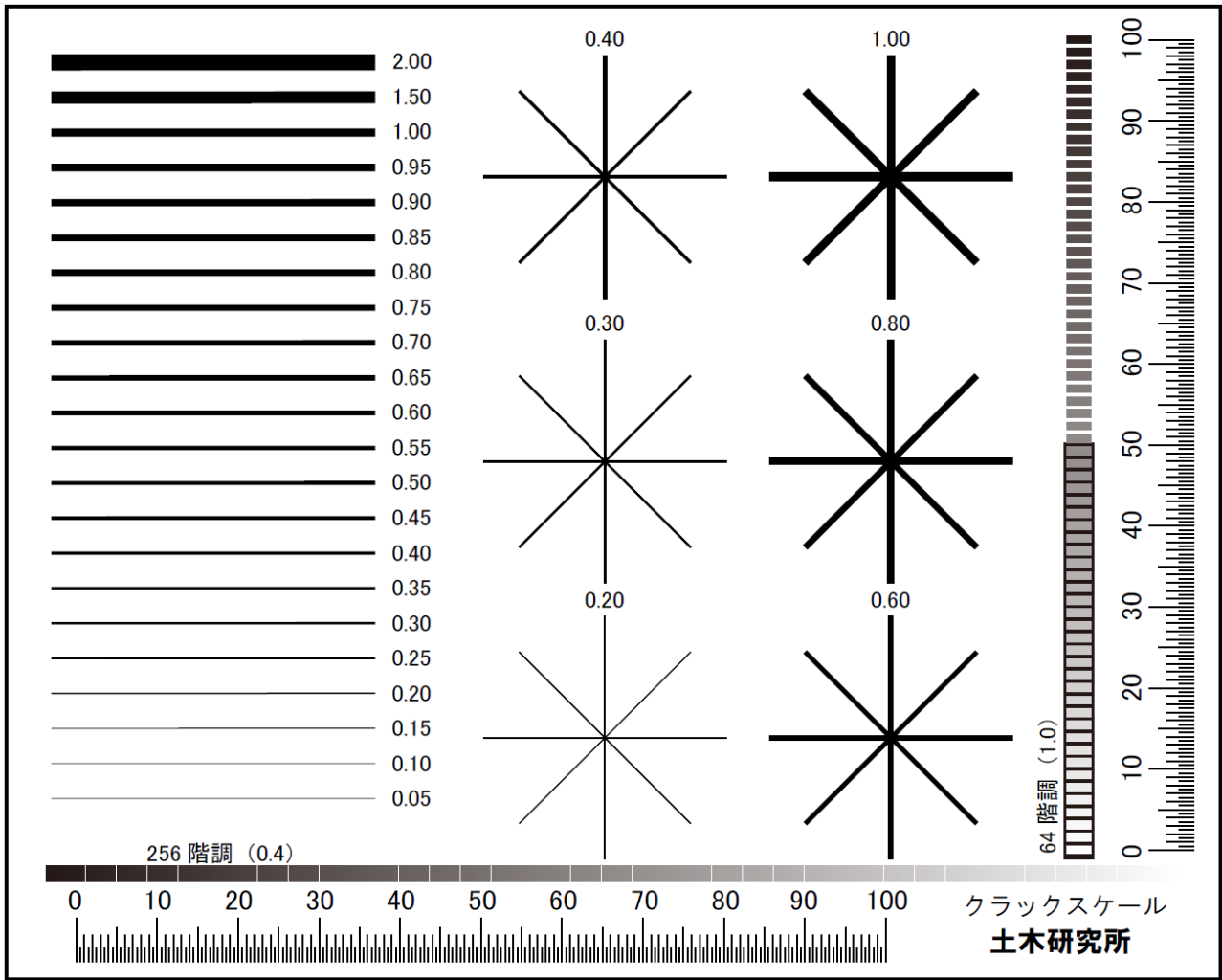


図4 分解能確認用シート



図5 橋梁用位置マーカー

## 論文リスト

### ■公表済み査読付き論文

- (1) Yasushi NITTA and Takashi Yoshida, “Field Verification and Evaluation of Technology Towards Introduction of Underwater Inspection Vehicle”, Journal of Disaster Research (Vol.13 No.4, pp. 624-636, 2018), 2018.8
- (2) Shigeo KITAHARA, Yasushi NITA, Shigeomi NISHIGAKI “Efforts to Unmanned Construction for Post-disaster Restoration” 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISRAC), 2019.6
- (3) Hajime ASAMA, Kazuhiro Chayama, Yasushi NITTA etc, “Technology of Unmanned Construction System in Japan”, Journal of Robotics and Mechatronics (Vol.26 No.4, pp. 403-417, 2014)
- (4) 下川光治, 新田恭士他 “構造物点検のための画像の撮影位置と管理手法に関する考察”, 建設機械と施工法シンポジウム, 2019.12
- (5) 新田恭士, 松尾修, 北原成郎, 黒田昇, 田村圭司, 下田孝徳, ”超長距離無人化施工技術の適用性に関する考察 一雲仙普賢岳における超長距離遠隔操作実証”, 第 13 回建設ロボットシンポジウム論文集 pp.41-50, 2012.9
- (6) Yasushi NITTA, Kouki ASO, Hyoei MIYAMURA, ” Examination Concerning Multifunctional Snow Removal Machinery”, 12nd International Winter Road Congress(PIARC), Torino Italy, Topic VI SessionIV-1, 2006.3.28
- (7) 藤島崇, 新田恭士, ” 地形確認業務への情報化施工の適用に関する一提案”, 土木学会 土木情報利用 技術論文集 Vol.13 pp.261-270, 2004
- (8) 藤島崇, 新田恭士, ” 道路工事における出来形管理の実証実験”, 土木学会 土木情報利用技術論文集 Vol.13 pp.251-260, 2004
- (9) Yasushi NITTA, ” ITS Application in the field of snow removal in Japan”, 8th World Congress on Intelligent Transport systems, Sydney Australia (第8回論文集), 2001.9
- (10) Yasushi NITTA, ” Study on the overall system architecture of construction equipment support information system”, 17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISRAC), 2000.9