

解説

インフラ点検の現状と新技術利用の動向 —デジタル画像を用いたインフラ点検の効率化—

木本啓介*, 松田 浩**, 出水 享***

Current State of Infrastructure Inspection and Trends in New Technology Utilization —Efficient Infrastructure Inspections using Digital Image—

Keisuke KIMOTO, Hiroshi MATSUDA and Akira DEMIZU

Close-up visual inspection by inspection technicians of infrastructures has various problems such as ensuring safety and high cost. Inspections using digital images are highly expected to improve efficiency by shortening the construction period, reducing costs, and ensuring safety. Therefore, the authors showed the relationship between the pixel resolution and crack width of an image suitable for inspection, and the optimum method for making an object three-dimensional by SfM / MVS, and explained the effectiveness of inspection using digital images. The authors also showed the effectiveness of inspections using robot technology such as drones, and explained the points of interest in selecting robot technology and the procedure for formulating an implementation plan.

Keywords: Digital image, Robot technology, Drone, Infrastructure inspection, Structure from motion/ multi view stereo (SfM/MVS)

1. はじめに

1. 1 インフラ点検の現状

現在わが国には橋長 2m 以上の橋梁が約 73 万橋あり、このうち地方公共団体が管理する橋梁は約 66 万橋と全体の 9 割以上を占めている。コンクリート構造物においては、目視点検によりひびわれ等の発生状況・進展を把握し、補修することは、長寿命化にとって極めて重要である。道路橋については、2014 年に国土交通省より「道路橋定期点検要領」¹⁾が示され、近接目視点検によりすべての橋梁を 5 年に 1 回の頻度で定期点検を実施することが義務化された。しかし、少子高齢化、人口減少に伴う自治体の財政難、技術職員の不足のため、十分な点検が実施できていない現状がある。更に、建設後 50 年を超えた橋梁 (2m 以上) の割合は、2016 年では 20% であるが、10 年後には 44% に急増することが見込まれており、より効率的な橋梁点検手法の開発が急務となっている。しかし、従来の近接目視点検では、人がコンクリート表面を目視し、ひびわれが確認された箇所ではクラックスケールによる幅の計測、コンベックスによる長さの計測、チョーキングしてスケッチによる記録と写真撮影、そして損傷図の作成と点検作業に時間と労力を要している。また人がアクセスできない場合は、高所作業車や足場仮設、ロープアクセスなどで近接し同様の作業を

行うため、安全の確保やさらに費用が嵩むこと等々の課題を抱えている。そのため、効率的な点検手法としてドローン等のロボット技術の活用による工期短縮、費用縮減とともに客観的データ取得による定量化・高度化など大きな期待がある。

1. 2 道路橋定期点検要領の改定

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

2. 画像を用いたコンクリートの点検

2. 1 画像を用いた点検の利点

目視調査に置き換わる方法としてデジタルカメラで遠隔・非接触で撮影した画像を用いてコンクリート表面の劣化状況を判断する方法が研究・開発され、建築物や橋梁・トンネルといったインフラ構造物の点検に活用されている。コンクリート表面を撮影した画像から損傷を視認 (人が目で認識すること)・検出 (画像解析により自動もしくは半自動で損傷を認識すること) し、損傷程度を評価することは従来の点検手法と比較し、現場作業の省力化、安定した室内作業による点検漏れの防止や安全性の向上、複数人が同じ画像を確認することで判定結果の客観性向上など多くの

原稿受付 2021 年 4 月 30 日

* 株式会社計測リサーチコンサルタント (〒732-0029 広島県広島市東区福田 1-655-1)

** 正会員 長崎大学大学院工学研究科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)

*** 長崎大学大学院工学研究科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)

【成果品納品までのプロセス】

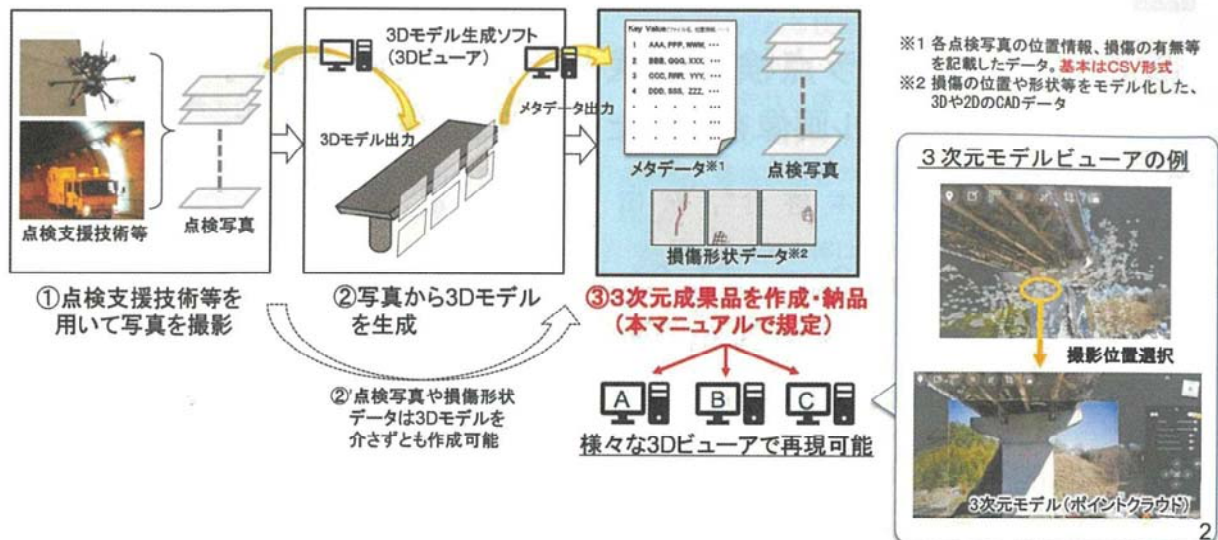


Fig. 1 The process of delivering the deliverable (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: Revision of delivery manual for 3D deliverables)

利点を有している。しかし、画像を用いた点検では画像処理に要する時間が増大するほか、ひびわれや遊離石灰、剥落などの画像で判読できる損傷の把握は可能だが、浮きや空洞などの触診（打音検査）で判断すべき損傷は把握することはできないなどの課題も存在する。また、人が容易にアクセスできる橋梁に対しては、画像を用いた場合の方が高コストとなってしまうことも考えられ、必ずしも画像を用いた点検が効率的な手法であるとは限らない。しかし、画像を用いた点検を1次スクリーニングとして、その後点検技術者が近接点検する面積を限定もしくは低減することも可能であり、橋梁の環境条件や予算によって適切な点検手法を取捨選択し、橋梁点検全体の効率化も期待できる。加えて、画像を用いた点検では、各部位の展開画像や橋梁の3Dモデル化などにより経年的な損傷進展の比較など今後の維持管理の効率化、高度化に向けた付加的な基礎データを蓄積できる重要なメリットを有している。

国土交通省は、Fig. 1 (3次元成果品マニュアルの改定「点検支援」⁴⁾)に示すように点検支援技術等を用いて取得した画像等から3次元モデルを作成し、その3次元モデル上での損傷位置の管理に必要なデータの納品仕様を定めることを目的として、2018年3月に「点検支援技術（画像計測技術）を用いた3次元成果品納品マニュアル【橋梁編】（案）」⁵⁾を示した。各地方整備局等における定期点検業務にて、本マニュアルを適用したデータ作成を試行し、マニュアルの改定が毎年度行われ、2021年3月に第4版が示された。

2. 2 画素分解能と視認可能な最小ひびわれ幅

画像を用いた点検では、撮影画像から非常に微細な色情報であるひびわれを判読する必要があるが、撮影機構（ミラーの有無、レンズ交換の可否等）やセンササイズ（フルサイズ、APS-C等）、画素数などのスペックはカメラごとに異なり、これらの違いによりひびわれの視認性に差が生じ

Table 1 Camera used for verification

	Camera Type	Sensor Size	Number of Pixels
A	Single-lens reflex	35.9×24.0mm	24.3 megapixels
B	Single-lens reflex	23.5×15.6mm	24.1 megapixels
C	Mirrorless	35.9×24.0mm	36.4 megapixels
D	Mirrorless	17.3×13.0mm	16.0 megapixels



Simulated crack sheet

Concrete panel

Fig. 2 Sample used for visibility evaluation

ることが推測される。そこで、筆者らはセンササイズに主に着目し、Table 1に示すセンササイズの異なる一眼レフカメラ2台・ミラーレスカメラ2台の計4台のカメラを用いて、画素分解能と視認可能なひびわれ幅の関係性を明らかにする検証を行った⁶⁾。検証結果を以下に解説する。

ひびわれのサンプルとしてFig. 2に示す「模擬ひびわれシート」と数種類のひびわれを生じさせた「コンクリートパネル」を用意し、それらを対象に撮影距離を變えることで画素分解能を變化させて撮影し、画像からカメラ機種・画素分解能とPCモニタ上で視認可能な最小ひびわれ幅の関係性を検証した。Fig. 3は、各カメラの画素分解能と視認可能な最小ひびわれ幅の関係性をグラフ化したものであり、

(a)、(b)より相関があることが分かる。低分解能になるほどカメラ毎のバラつきが大きくなる傾向が見受けられるが、(c)に示すように画素分解能1~3mm/pixelでは大きな差は見受けられない。その中でも【A】と【C】はグラフの傾きが小さく、ほぼ同等の傾向を示しており、【B】、【D】の2種に比べ、視認性は優位である。【B】、【D】はセンササイズが異なるもののほぼ同等の視認性評価の結果が得られており、ひびわれの視認性にはセンササイズの大きさも

重要な要素であるが、センサを構成している素子（ピクセル）の大きさが最も重要な要素であると推測される。【B】、【D】はほぼ同じ画素ピッチであり、1 素子当たりの受光面積が他 2 機種に比べ小さいことが、視認性がやや低くなった要因と考えられる。(d) は最小ひびわれ幅 1.6mm、画素分解能 5mm/pixel までの全結果をプロットし、画素分解能と視認可能な最小ひびわれ幅の関係性の 1 次近似式を示したものである。◆がコンクリートパネル、●が模擬ひびわれシートを用いて評価したものであり、2 つの 1 次近似式

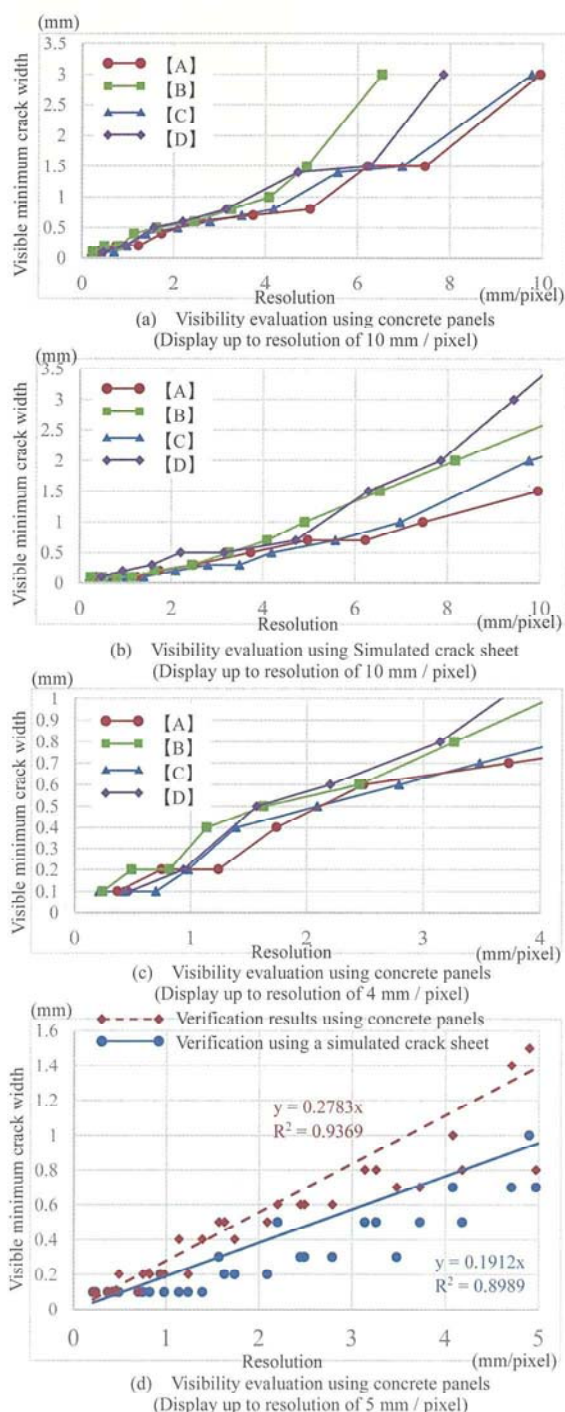


Fig. 3 Relationship between resolution and visible minimum crack width

を逆算すると、1.5mm 幅程度までのひびわれを視認するためには、抽出すべきひびわれ幅の約 4~5 倍の画素分解能が必要である。

画像を用いたコンクリート構造物の点検では、高い視認性を確保するためにセンササイズが大きく、画素ピッチも大きなカメラを用いることが推奨され、抽出すべきひびわれ幅の約 4~5 倍の画素分解能を持つ画像の撮影が必要である。これらを踏まえ、対象となるコンクリート表面の状況や撮影環境に応じて適切な画素分解能を設定し、効果的、効率的な撮影計画を立案すること望ましい。

2. 3 SfM/MVS を活用した点検

画像を用いた点検の中でも撮影画像から SfM/MVS (Structure from Motion/ Multi View Stereo) により点検対象構造物の 3D モデルを生成し、展開画像（オルソ画像）を作成して損傷を抽出する手法が広く活用されている。撮影画像をテクスチャとした 3D モデルが生成されるため、3 次元的に位置を把握しながら損傷抽出も可能となる。またオルソ画像を用いる場合、点検者は現地での近接目視点検と同じ感覚で対象構造物を面的かつ網羅的に点検できるため、定量的で客観的な判断に基づく位置精度の高い損傷抽出結果を得ることも可能である。

しかし SfM/MVS 解析を行うためには一定のルールに則った特殊な撮影が必要のため、筆者らは「中小橋梁の点検における SfM の活用方法の比較・検証」(実験力学, 第 17 巻, No.4, 290-297) 7)にて、特別な技術や知識がない人でも

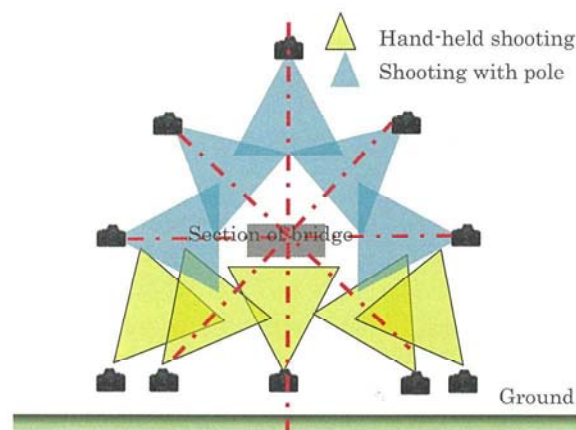


Fig. 4 Shooting position necessary for SfM

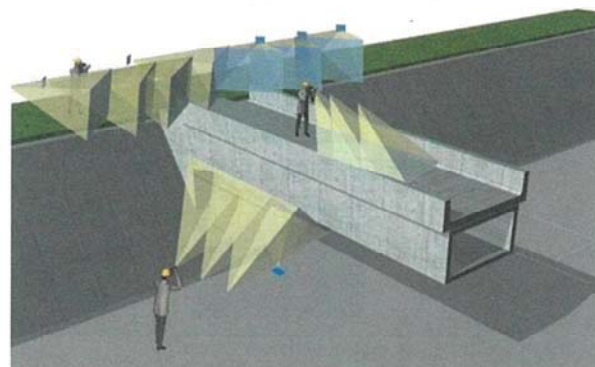


Fig. 5 Shooting position only for hand-held shooting

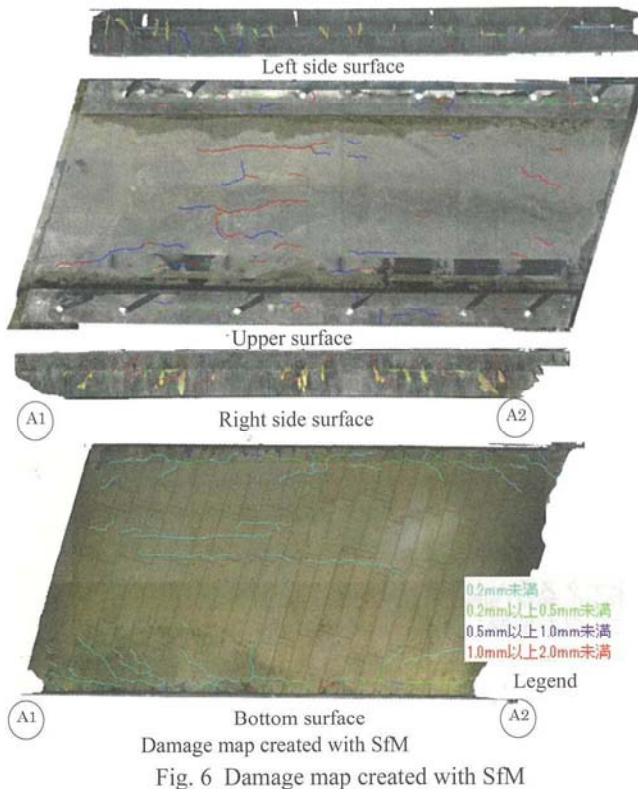


Fig. 6 Damage map created with SfM

容易に画像取得できるよう、中小橋梁を対象として、効率的な撮影方法の検証を行った。検証結果を以下に解説する。

対象とした橋梁は橋長 9.6m, 幅員 4.2m の RC 中実床版橋で、ドローン等を用いず手持ちとポールを用いてあらゆる方向から画像を取得し、SfM/MVS により橋梁の 3D モデルを構築するための最適な撮影位置を検証したところ、Fig. 4 に示すように橋梁を中心とした放射状 8 方向の撮影が最低限必要であった。可能な範囲で 8 方向の間を補完する撮影も加える事で、より確実に 3D モデル化が可能となる。橋梁下にアクセスできない場合などは、Fig. 5 のように両岸から撮影を実施しても 3D 化は可能であるが、画像品質や 3D モデルの品質は低下する。また、幅員が広い場合は桁下面および橋面にて複数測線撮影し、左右の関連性を持たせることで応用が可能である。ただし、いずれの場合においても撮影者は SfM 解析の基本情報であるラップ率等の最低限の基礎知識は習得しておく必要がある。

また、SfM 解析で作成した 3D モデルには、撮影画像と同質の画像がマッピングされており、そこからオルソ画像を生成し、Fig. 6 に示すような位置精度の高い損傷図を作成することが可能である。

3. ドローン等ロボット技術を用いた点検

3.1 ロボット技術に要求される性能・機能

インフラ点検に適用可能なロボット技術が SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」などで研究開発され、社会実装されている技術もある。開発された点検ロボットは、目的・用途、移動機構、制御方法により分類され、それらの中から点検

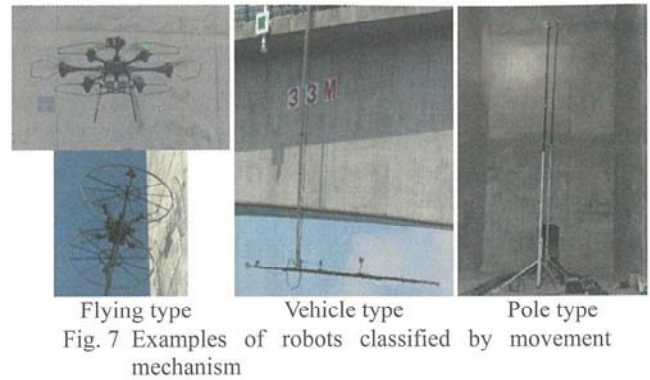


Fig. 7 Examples of robots classified by movement mechanism

目的や対象橋梁の構造形式、構造諸元、架橋環境等を踏まえ、下記 4 点の機能・性能を有することに着眼し適切なロボットを選定する必要がある。Fig. 7 は移動機構により分類したロボットの例である。

(1) 近接機能: オペレータの技量に依存せず安全に点検対象構造物に近接すること

オペレータ依存の場合、計画位置へのロボットの誘導や撮影距離確保に非常に高度な操縦技術が必要となり安全性・再現性・安定性に欠けるため、計画した撮影距離を自動で一定に保ち近接画像を取得可能なロボットを選定する。

(2) 位置制御機能: 安定的に均質なデータが取得できること

撮影距離を維持しつつ欠落のないよう撮影対象部位を、網羅的に画像撮影を行うことと、SfM/MVS により 3D モデルを構築する場合、オーバーラップ 80%, サイドラップ 50% 以上の連続画像撮影が確保できる安定的な飛行が可能なロボットを選定する。

(3) 計測性能: 損傷評価に資する品質のデータが取得できること

「道路橋定期点検要領」¹⁾で定義された損傷のうち、色情報により判読可能な損傷を、確実に抽出できる画像を撮影可能なロボットを選定する。ただし、目標とする撮影画素分解能は、抽出対象の損傷の種類や選定したロボットの制約条件、現地作業性などを総合的に考慮し、設定する。

(4) 安全性能: 第三者被害を与えないこと

安全対策の観点から、ロボットが何らかの原因によって制御を失った場合においても第三者に被害を及ぼさないように緊急対応する機能を有したロボットを選定する。

3.2 ドローン(ロボット技術)を用いた点検の流れ

ロボット技術の多くは、その使用に際して架橋環境や天候等の環境条件の制約を受ける。特に飛行型ロボット(ドローン)は、「航空法第 132 条の 2」に則った飛行計画の策定が必要であり、インフラ点検においては、i-Construction の出来形管理に用いるものより高精度な性能・機能を有していることが求められるため、現地踏査により運航の障害となる事象を抽出し、安全で適切な点検計画を策定することが重要である。

Fig.8 は、「ロボット技術を活用した橋梁点検指針」(SIP

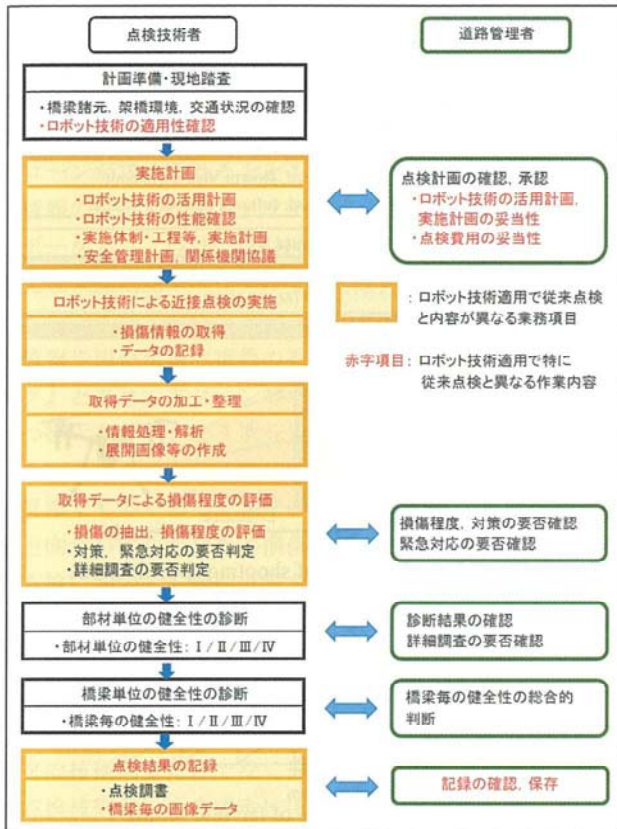


Fig. 8 Bridge inspection procedure using robot technology (Applicability evaluation committee of new technology for bridge inspection: Bridge inspection guidelines utilizing robot technology)

インフラ地域実装支援鳥取大学チーム, 2019) ⁸⁾に示されたロボット技術を活用した橋梁点検の手順であり, 従来の点検手順と比べて, その手法や作業内容が異なる. 点検技術者は, 現地踏査等により架橋環境を確認し, ロボット技術の機能および性能や取得可能な情報, 現地条件, 要求される点検結果, 安全管理などを総合的に勘案し点検実施計画を作成することが必要である. なお, 従来定期点検の一環として行われてきた応急措置 (剥離箇所のたたき落としおよび防錆処理等) は現状のロボット技術では行えないため, 応急措置の必要な箇所については, 別途の対応が必要である. また, ロボット技術を用いて画像撮影を行う場合でも 2.3 で示した撮影方法を実施することで, 橋梁の 3D モデル作成も可能である.

3. 3 損傷評価に資するデータの取得と損傷評価

点検技術者の近接目視による点検の「見る」という行為の代替として, カメラを搭載したドローンによる近接画像撮影が広く活用されている.

画像の取得方法は局所的撮影と網羅的撮影に分けられ, 前者は継続的な監視が必要な箇所や支承などの部位をスポット的に撮影するもので定期的に同位置から同精度の画像取得が求められる. 後者は損傷部だけでなく健全部も含めて調査対象全体に渡って画像を取得するもので, 抽出すべき損傷に応じた撮影距離を維持しながら均質なデータを取得することが求められる. 人による点検に比べて膨大なデ

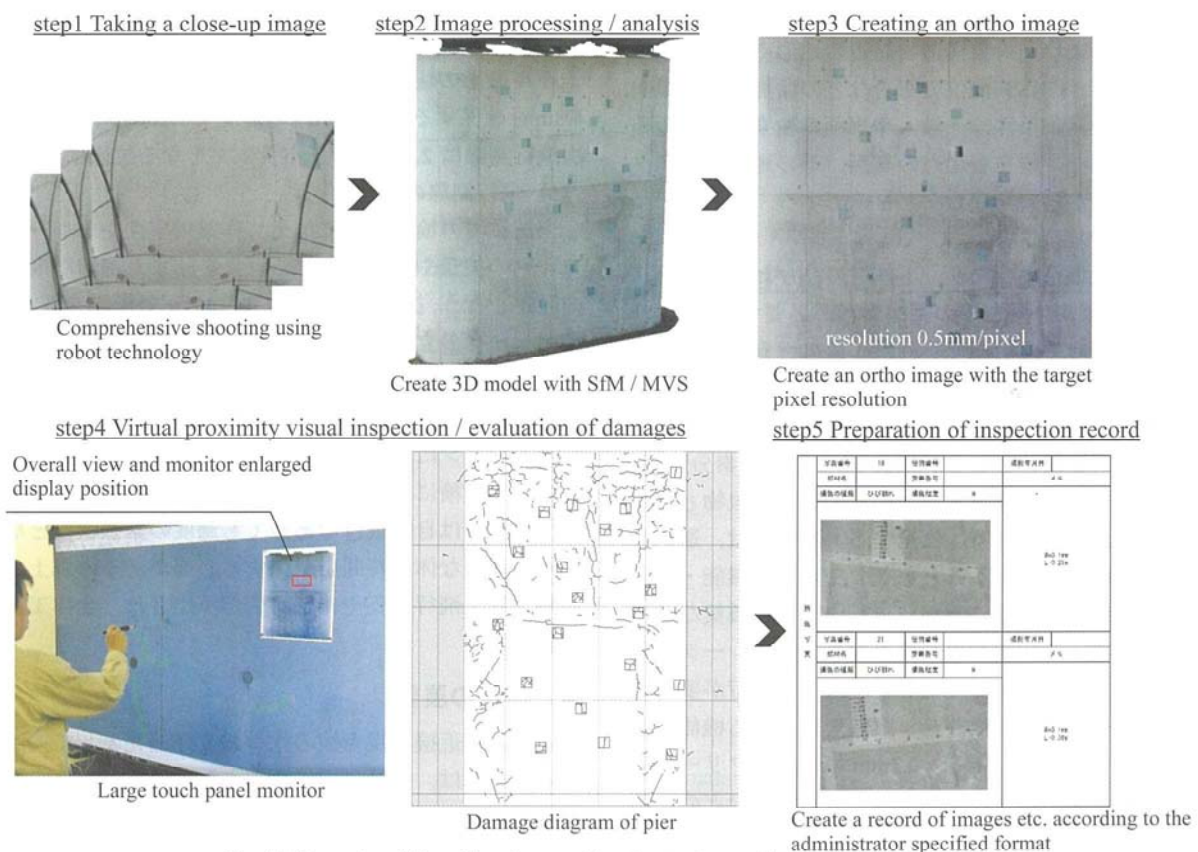


Fig. 9 Example of flow from image shooting to inspection record creation

ータが取得され、その時に必要な情報を抽出できるが、損傷等の位置を特定する画像処理技術が必要である。その中でも高いラップ率での撮影が必要だが、SfM/MVSを用いた展開画像作成が有用であり、点検技術者は部材全体の中で位置と形状を把握しながら網羅的に損傷を抽出することができ、「ひびわれ位置・幅判読図化システム」⁹⁾を用いたバーチャル近接目視点検が可能となる。「ひびわれ位置・幅判読図化システム」は、2012年に西村らが開発したシステムであり、クラックインデックス [CI]:「特徴値×分布幅」という指標により、半自動で画像上のひびわれを検出でき、損傷図作成の大幅な省力化が可能である。これを大型モニタに等倍表示した展開画像に適用することで、近接目視点検と同じ感覚の「バーチャル近接目視点検」により損傷程度の評価や損傷図を作成できる。Fig. 9はSIPインフラ江島大橋プロジェクト（研究責任者：黒田保教授）¹⁰⁾で実施された画像撮影から点検調査作成までの事例である。

3. 4 インフラ点検におけるドローンの実施計画

ドローンを用いたインフラ点検の実施計画作成にあたり、着目すべき点や機器選定などを以下に解説する。

(1) 要求成果の確認

抽出すべき損傷や点検結果の提出方法を管理者と協議する。抽出すべき損傷がコンクリート部材のひびわれや剥落、鉄筋露出、漏水もしくは鋼部材の腐食等の色情報により判読が可能なものであればカメラを用い、変位や変形などが対象の場合は、地上型レーザスキャナ等の3次元形状取得方法の検討が必要となる。

(2) 対象構造物の周辺環境の確認

現地踏査等により、対象構造物周辺の地形や環境、電線等障害物の有無、GNSS測位の可否などの環境条件、風向風速や日影等の気象条件、一般人や車両の往来等の交通条件の確認やドローン離発着地点の有無、その地点へのアクセス方法とそこからの見通しなどを確認する。

(3) 使用機材の選定

抽出すべき損傷がコンクリート部材のひびわれの場合、その4～5倍の画素分解能での画像撮影が必要である。より現実性を保つために、可能であれば3倍の画素分解能で撮影することも推奨される。微細な色情報を取得するためにはセンササイズの大きなカメラと焦点距離50mm程度以下の広口径レンズを用いることが望ましい。目標画素分解能、使用カメラ、レンズを選定すると撮影距離（対象物とドローンの離隔）が決定される。使用するドローンは、選定したカメラが搭載可能であることと3.1で示した機能・性能を有するものを選定することが望ましい。特に橋梁などでは非GNSS環境下での撮影が必要となり、オペレータから離れた地点で対象物と適切な離隔を維持した飛行が要求されるため、オペレータに依存せず離隔を維持する機能を保持したドローンが有用である。0.2mm幅のコンクリートのひびわれを抽出する場合の使用機材と撮影距離などの一例をTable 2およびFig. 10に示す。

Table 2 Example of equipment specifications

Drone	DJI M210 RTK V2
Size	883×886×427 mm
Maximum payload	1.23kg
Maximum flight time	24min
Obstacle detection	Forward, Down: Vision system Upward: Infrared detection system
Camera	Zenmuse X7
Sensor Size	23.5×15.7mm
Number of Pixels	24MP (6016×4008)
Focal length	35mm

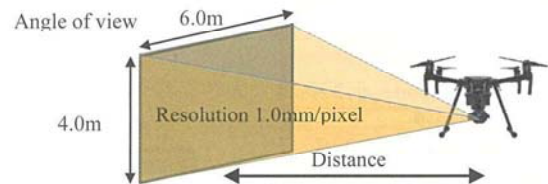


Fig. 10 Example of shooting specifications

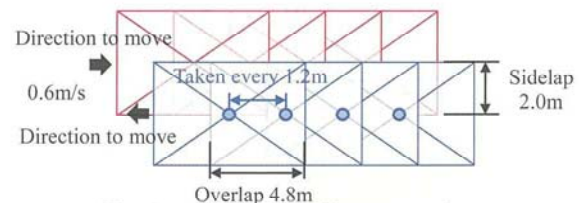


Fig. 11 Example of lap rate setting

(4) ラップ率

SfM/MVSを行うためにはオーバーラップ80%、サイドラップ50%を維持した連続撮影が必要となる。Fig. 10のケースで横方向にドローンを飛行させ、2秒に1度のインターバル撮影の場合、Fig. 11に示すようにオーバーラップ4.8mを確保するため0.6m/sの速度で1.2m毎の撮影を行い、次飛行測線は2.0mのサイドラップとなる位置に設定する。

(5) 飛行測線の設定

上記までの検討項目に加え、作業効率性やドローンオペレータの技量や経験に基づく意見を踏まえ適切な飛行測線の設定を行う。撮影は対象物に対して正対撮影を基本とし、オペレータの立ち位置や視認性、対象物の位置や形状を考慮して横移動か縦移動を決定する。一定の撮影距離とラップ率を維持した飛行が求められるため、位置制御機能を有したドローンによる自動飛行による撮影が望ましい。また、インフラ点検においては対象物に近接した飛行となるため、オペレータは自動飛行であっても過度の緊張状態となることから適度な休息時間を確保する必要がある。以上の検討結果より全飛行延長や作業時間が算出され、全体工程が決定される。

4. 今後の展望

人による近接目視点検の代替および補完として、画像を用いた点検は、今後大いに活用されていくと考えられる。特に足場仮設やロープアクセスなどにより人が近接する必要がある場面においては、ドローン等のロボット技術によ

る点検が有効である。しかし、ドローンの活用事例の中でも特にインフラ点検は難易度が高く、オペレータの技量や経験に依存することなく適切な位置を飛行する高精度な運動機能（近接機能・位置制御機能）を有した安全性の高いドローンが求められるとともに、取得した画像などへの位置情報の付与、つまりメタデータの提示が要求される。メタデータとは、「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）」⁹⁾において、『対象となる構造物が位置する座標系情報、撮影した写真の位置情報や損傷情報（損傷の有無、種別など）を記載したデータ』とされ、ドローン等ロボット技術で取得した高品質かつ膨大なデータを 3 次元空間上への配置や必要情報の検索を行うことにより、効率的で高度なインフラの維持管理を目指すものである。メタデータの蓄積により画像撮影位置と向きが明らかなため損傷位置の把握が容易となり、次回点検においても撮影位置を指定した同位置からの局所的撮影による経年比較が可能となる。このように蓄積した点検記録は、損傷を自動で判読する AI の技術開発に必要な教師データとしても活用が期待されている。

また、ドローンによる点検の普及には、ドローンオペレータの技術向上だけでなく飛行計画を含む実施計画作成者（点検技術者）の育成や技術向上も不可欠である。さらにはデータや点検記録を一元管理できる共通フォーマットの定義やプラットフォームの構築など管理者や点検技術者が

共に使いやすい仕組みや環境づくりが必要である。点検技術の向上と点検体制の整備がともに推進されることで、今後インフラ点検の効率化が飛躍的に図られていくであろう。

参考文献

- 1) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Periodic inspection manual of bridge* (in Japanese), (2014), (Revised, 2019).
- 2) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Performance catalog of inspection support technology* (in Japanese), (2020).
- 3) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Guidelines for using new technologies* (in Japanese), (2019).
- 4) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Revision of delivery manual for 3D deliverables* (in Japanese), (2021).
- 5) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Delivery manual for 3D deliverables using inspection support technology (image measurement technology)* [Bridge edition] (in Japanese), (2018), (Revised, 2021).
- 6) Kimoto, K. Matsuda, H.: Verification of digital image resolution and visible crack width of concrete (in Japanese), *Journal of structures and materials in civil engineering*, **35** (2019), 115-122.
- 7) Kimoto, K. Matsuda, H.: Comparison and verification of utilizing method using SfM in inspection of medium and short span bridges (in Japanese), *J. JSEM*, **17-4** (2017), 290-297.
- 8) Applicability evaluation committee of new technology for bridge inspection: *Bridge inspection guidelines utilizing robot technology* (in Japanese), Team to support regional implementation (SIP infrastructure, Tottori University), (2019).
- 9) Nishimura, S. et al: The development and evaluation of telemetry in bridge maintenance (in Japanese), *Journal of Applied Survey Technology*, **24** (2013), 52-61.
- 10) Applicability evaluation committee of new technology for bridge inspection: *The report of Eshima-Ohashi bridge project* (in Japanese), Team to support regional implementation (SIP infrastructure, Tottori University), (2019).