

光学的計測手法による仮設足場を必要としない 橋梁点検手法の開発

木本啓介*・山口浩平**・奥松俊博**・河村太紀***・松田浩**

The Development of Inspecting Method about Bridge without Temporary Scaffold Using Optical Measurement Techniques

by

Keisuke KIMOTO*, Kohei YAMAGUCHI**, Toshihiro OKUMATSU**,
Taiki KAWAMURA***, Hiroshi MATSUDA**

This paper shows the development of inspecting method about bridge without temporary scaffold, using and applying the optical measurement techniques about Unmanned Aerial Vehicle and Structure from Motion. In late years UAV and SfM progress innovatively, they are becoming common techniques. SfM is a technology for building a 3D model of the target structure only images taken from multiview. By using the UAV, it is possible to acquire an image from a view point which cannot be confirmed normally, it can be more effective inspection.

Thereupon authors verified their techniques at the several bridges, and summarized the measurement range, photography method, measurement precision and investigation time for future use.

Key words(10pt, bold, Italic) : *Structure from Motion (SfM), Unmanned Aerial Vehicle (UAV), bridge inspection*

1. はじめに

現在わが国には橋長 2m 以上の橋梁が約 70 万橋、そのうち橋長 15m 未満の橋梁が約 50 万橋存在する。平成 26 年に国土交通省より、それら全てを近接目視点検により 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、それらの多くを市町村が管理しており、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¹⁾、より効率的な橋梁点検手法の開発が急務となっている。また、従来手法による近接目視点検では、構造物に近

接するために、橋梁点検車・高所作業車等の使用や、足場の仮設、ロープアクセスによる特殊作業、それに伴う交通規制などが必要となり (Fig. 1), 点検コスト・労力の縮減が課題となっている。

そこで、近年の PC の性能や画像解析技術の向上により一般化してきた SfM (Structure from Motion) 技術を橋梁調査へと応用することで、点検の省力化、効率化が可能であると考ええる。SfM とは、多視点から撮影した画像のみで対象構造物の 3D モデルを構築する技術で、一般的なデジタルカメラで容易に画像を撮影し、室内作業により、PC 上で点検作業が可能と思われる。3D レーザスキャナなども遠隔地からの計測は可能だが、取得データは点群であり、あくまで形状を再現

平成 29 年 6 月 26 日受理

* 工学研究科博士後期課程生産システム工学システム工学コース (Graduate School of Engineering)

** 工学研究科システム科学部門 (Division of System Science)

*** 工学研究科博士前期課程総合工学専攻構造工学コース (Graduate School of Engineering)



Fig. 1 吊足場とロープアクセスによる橋脚の点検

するのみである。SfM の場合、形状も再現でき、リアルな色情報も取得でき、高精度に損傷を把握できる点で橋梁点検においては、非常に有効な手段と思われる。

また、画像の撮影には「空の産業革命」と呼ばれ、近年急速に普及している UAV (Unmanned Aerial Vehicle: 無人飛行体) を用いることで、通常では確認できない視点からの画像を取得でき、より効果的な点検が可能であると考えられる。

そこで、斜張橋のコンクリート主塔を対象として、UAV を用いた損傷調査の有効性について検証した。

2. 適用技術

2.1 SfM (Structure from Motion)

SfM とは、多視点から撮影した画像を元に、撮影対象物の 3D モデルを構築する技術である。

従来の写真測量と異なり、80%ラップを目標とし、被写体の表面上にある特徴点を異なる方向から撮影した画像の組み合わせから順々に、ステレオ法によりその点とカメラの位置、すなわち 3 次元座標 (X, Y, Z) を自動特定していく (Fig. 2)。こうして得られる点群を基に、それらを節点とする三角形面要素である TIN (Triangulated Irregular Network) を作成し、3D モデルを構築する。ここで、特徴点とは、画像上のある点で、周囲と比較して輝度すなわち色や明るさが異なる点のことである。2 枚の画像上の領域 (i, j) 内にある特徴点 p と q について、それぞれの領域内での周囲との輝度 T の差の総和 J、すなわち周囲との色や明るさの違いの程度を算出し、その値がある判定値に収まる場合に同一点であると判断する (Fig. 3) ²⁾。生成した TIN には、撮影画像がテクスチャとしてリンクしており、被写体を忠実に再現した 3D モデルが構築される。Fig. 4 に撮影画像 (一部抜粋) から SfM 解析により作成した 3D モデルの構築例を示す。

また、対象範囲内に座標値の明らかな標定点 (ターゲット) を 3 点以上設置し、画像に写し込むことで、生成する TIN にスケールを与えることが可能である。

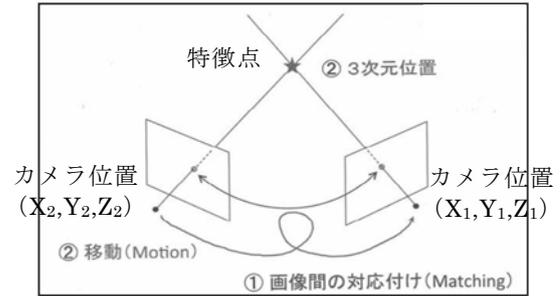
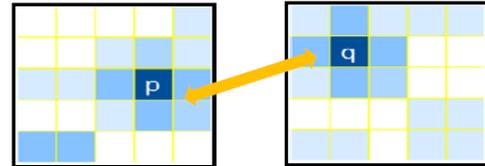
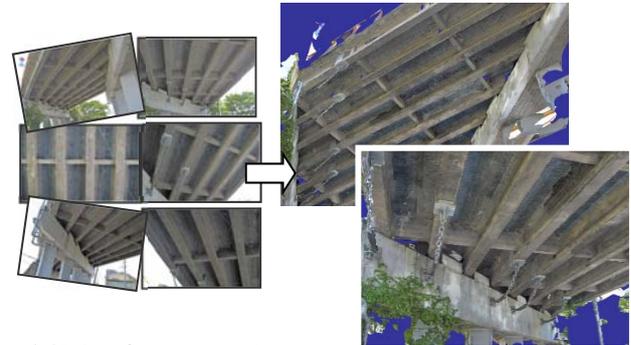


Fig. 2 特徴点・カメラ位置の算出方法



$$J(p, q) = \sum_{i,j} |T_p(i, j) - T_q(i, j)|^2$$

Fig. 3 特徴点の判定



多視点で撮影した画像

SfM 解析結果

Fig. 4 SfM による 3D モデル構築例

Table 1 SfM 解析ソフトウェアの概要

ソフト名	S	P
メーカー	A 社	B 社
原理	SfM	SfM
カメラキャリブレーション	なし (パラメータ入力可)	あり
点群編集	なし	あり
計測機能	距離 (Viewer ソフト)	距離・面積・ 堆積
オルソ画像出力	なし	あり
稜線認識	あり	なし

2.2 解析ソフトウェアの比較

現在、SfM 解析を行うソフトウェアは、数種類普及しており、中でも最も一般的と思われる A 社の S ソフト、B 社の P ソフトの 2 種類について、機能を比較し、Table 1 に纏めた。また、コンクリート構造物を撮影した同一画像を用いて、それぞれのソフトで生成される 3D モデルの比較を行った。

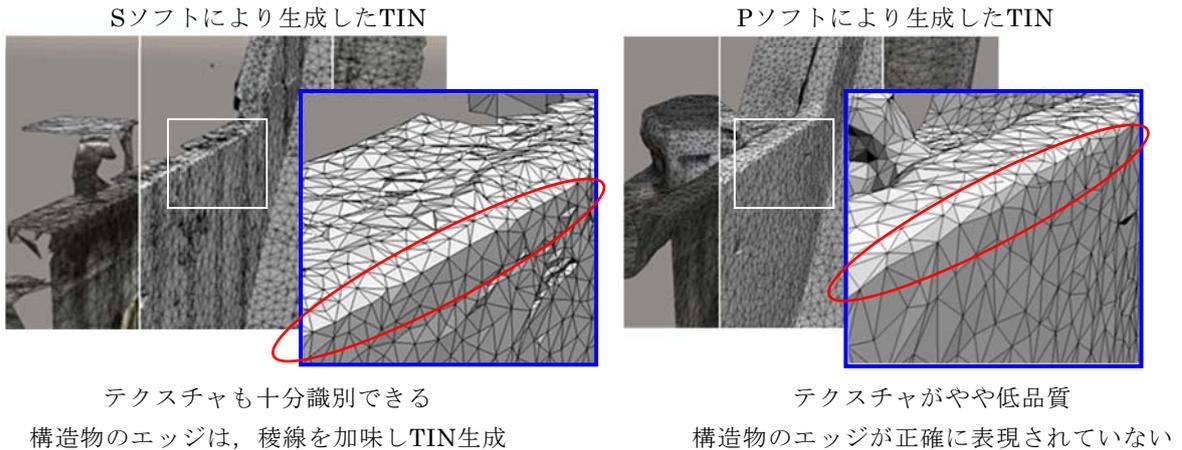


Fig. 5 コンクリート構造物エッジの再現性比較

比較した結果、Pソフトは、編集機能を多く有しており解析の柔軟性が高いが、テクスチャがやや低品質であり、モデルで構造物のエッジが正確に表現されていない。一方、Sソフトは、編集機能をほとんど有しておらず、モデル作成だけの必要最低限の機能となっているが、撮影画像の解像度に近いテクスチャが、貼り付けられている。更に、自動解析を行う上で、稜線を加味しTINを形成するため、構造物のエッジの再現性が高い(Fig. 5)。橋梁点検では、対象構造物の再現性・損傷の認識度を重視するため本研究では、Sソフトを使用して検証を実施することとした。

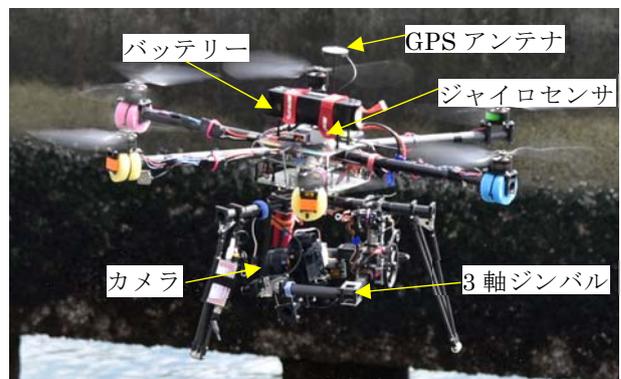


Fig. 6 UAV の代表的な構成 (カメラ搭載型)

2.3 UAV (Unmanned Aerial Vehicle)

UAV は、小型無人航空機の総称であり、空中写真測量、航空 LiDAR、地上計測に加わる計測手段として、測量・土木分野で定着してきている。これまで困難とされてきた危険箇所や災害発生直後の現場などの調査が可能と期待され、橋梁点検への適用が十分可能である。

Fig. 6 に示すよう UAV には、GPS アンテナ・ジャイロセンサ・バッテリーが搭載されており、予め飛行経路を設定することで、自動飛行も可能である。カメラを搭載する場合、地上から撮影範囲を常にモニタしながら、カメラを上下左右自在に回転できる3軸ジンバルを操作し、シャッターを切ることのできる機器構成となっている。ジンバルは自動的に水平を保つように制御されるため、撮影者の意図を反映した画像を容易に取得できる。

Table 2 に UAV の特徴を纏めた。従来のラジコンヘリに比べ小型・軽量で安定性に優れており、より安全な飛行が可能である。モーター駆動のため、比較的静音だが、飛行時間はバッテリー容量に依存し、20分程度と短い。操作に免許は不要だが、昨今、UAV の安全

Table 2 UAV の特徴

長所	小型・軽量のため運搬容易
	操作者の免許不要
	動作は静音 (モーター駆動)
	羽枚数が多く、飛行は安定
短所	簡単に上空から写真を撮影
	飛行時間は短い (20分程度)
	強風時は使用困難 (10m/s 以上)
	150m 以上高度飛行、人口密集区域での飛行は許可が必要
	目視外飛行は禁止

性が問われ、社会問題となったため人口密集区域や高度 150m 以上での飛行、目視外飛行等は、事前に国土交通省へ申請を行うよう 2015 年 12 月に航空法が改正された。

本研究でも UAV の安全には充分配慮し検証を行ったが、気象や電波などの影響を受けやすく、安全に飛行するためには、制約が多々ある。その他、道路・鉄道・橋梁・電波塔・高圧電線の近傍での飛行は、特に注意する必要がある、操縦者の熟練度も不可欠である。

3. 長大橋での検証

3.1 概要

長崎県が実施する橋梁点検には、通常の5年に1度の近接目視による定期点検に加え、橋梁規模や構造特性が大きく異なる橋梁および地域に与える影響が大きい橋梁（重点維持管理橋梁）では、1年毎の点検（以降、1年点検と呼ぶ。）も実施されている。1年点検では、地上から確認可能な定点観測ポイントの劣化進行状況を確認している。

そこで、1年点検時に UAV-SfM を活用することで、通常ではロープアクセスや仮設足場を用いた近接目視点検でしか確認できない、より広範囲な個所も安全・迅速かつ低費用で損傷状況を確認することが可能となる。加えて、画像により損傷評価を行うため調査技術者の技量に捉われない定量的な判断ができ、デジタルデータを蓄積することで、経年的な比較も容易となる。近接目視点検に代わる新たな点検手法として確立できれば定期点検への適用も充分可能である。

本研究では、Fig.7 及び 8 に示す佐賀県唐津市肥前町星賀と長崎県松浦市鷹島町神崎免を結ぶ鷹島肥前大橋（斜張橋）のコンクリート主塔（4P）を対象に SfM を用いた調査を実施し、既存の点検結果との比較及び調査時間の把握を行った。以下に鷹島肥前大橋の橋梁データを記載する³⁾。

- 橋 梁 名 : 鷹島肥前大橋
- 路 線 名 : 一般県道鷹島肥前線
- 橋 長 : L = 1251.00m
- 全 幅 員 : W = 11.50m
- 上部工形式 : 5 径間連続鋼 2 主桁, 5 径間連続斜張橋, 4 径間連続鋼 2 主桁
- 下部工形式 : 橋台 (2 基), 橋脚 (13 基)
- 仮設年次 : 2009 年 (平成 21 年)

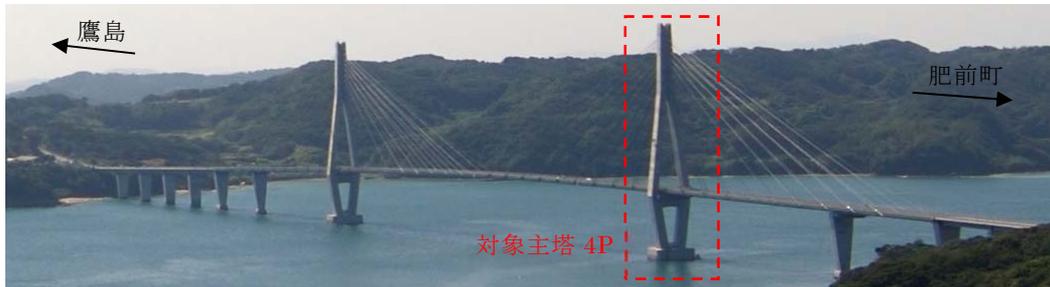


Fig. 7 鷹島肥前大橋

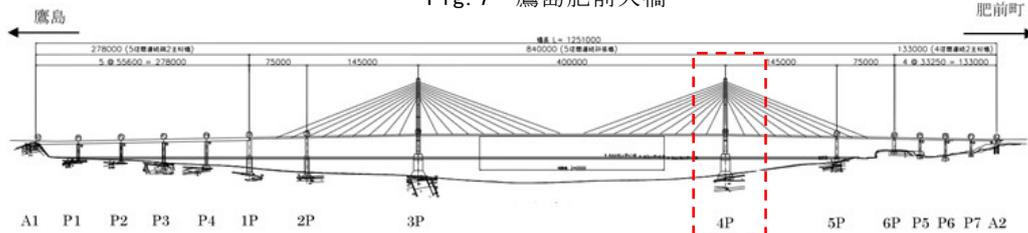


Fig. 8 鷹島肥前大橋側面図

3.2 使用機材

本研究で用いた UAV 及びデジタルカメラの仕様を Table 3 及び 4 に示す。使用した UAV は、ペイロードが 2.5kg まで可能な DJI 製の Spreading Wings S900 である。橋梁の立地上、風が強いことが想定されたため、やや重量のあるカメラが搭載可能で耐風安定性のある当機種を選定した。使用したカメラは、フルサイズのセンサを搭載し、3600 万画素と高画素の撮影が可能な SONY 製のミラーレスカメラ α7R を選定した。Fig.9 に α7R を搭載した Spreading Wings S900 の状況写真を示す。

Table 3 使用した UAV の仕様

DJI Spreading Wings S900	
ペイロード	2.5kg
耐風安定性	8m/s
飛行時間	~15min
飛行距離	2km
GPS	1 周波

Table 4 使用したカメラの仕様

ミラーレスカメラ SONYα7R	
画素数	7360 × 4912 (36M),
センサーサイズ	35mm フルサイズ
焦点距離	35mm
重量	580g (レンズ含む)

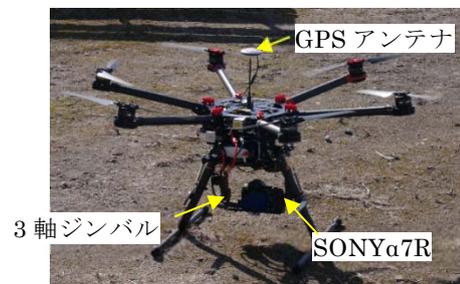
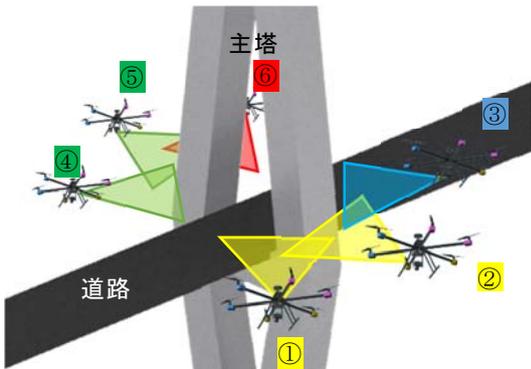


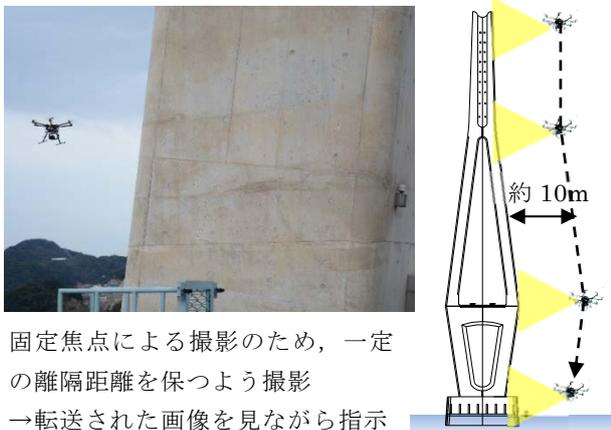
Fig. 9 使用した UAV

3.3 計測内容と作業の手順

ミラーレスカメラ Sony α 7R を搭載した UAV を用い、主塔の海側面、橋軸面 (45 度方向) を撮影した (Fig. 10 の 6 測線)。コンクリート表面の 0.2mm 幅のクラックを把握するためには、2mm/pix の解像度で撮影を行えばよいが、より高解像度の画像を取得するため、目標解像度を 1.5mm/pix と設定した (「コンクリート診断技術 ’16」内の「デジタル分解能が 2mm/pix の画像の場合、PC モニタ上で 0.2mm 幅のひび割れを認識できる」を参照⁴⁾)。解像度が一定となるよう撮影するためには、Fig. 11 に示すよう対象面より 10m 程度の距離を維持する必要がある。そこで、UAV 操縦者と画像確認者の 2 名体制で飛行させた。画像確認者は、タブレットに伝送されてくる撮影画面を手元でリアルタイムに確認しながら、撮影画角に対する対象物の写り込みの大きさによって撮影距離・解像度を把握し、操縦者に飛行位置の指示を出した (Fig. 12)。SfM 解析により撮影画像から 3D モデルを作成するため、隣接画像は全て 80% ラップとし、撮影はインターバル撮影により 1 回/秒で実施した。また、生成した TIN にスケールを与えるため、3D レーザ計測を実施し、任意点の座標値を標定点として利用した。Fig. 13 に作業の手順を示す。



①②, ④⑤は1回のフライトで撮影実施
Fig. 10 撮影イメージ (主塔外側の6測線)



固定焦点による撮影のため、一定の離隔距離を保つよう撮影
→転送された画像を見ながら指示

Fig. 11 UAVフライト計画

3.4 撮影結果

主塔の海側面 6 測線の撮影に合計 4 フライトを実施し、1 フライト約 12 分で完了した。1 回/秒のインターバル撮影のため、全体で約 600 枚の画像を取得した。UAV を使用することで、通常では、ロープアクセス等でしか確認できない主塔頭頂部などの画像も容易に取得でき、画像を拡大するとコンクリート表面の状況も鮮明に認識することができた。Fig. 14 に主塔頭頂部の撮影画像例を示す。



Fig. 12 撮影時の体制

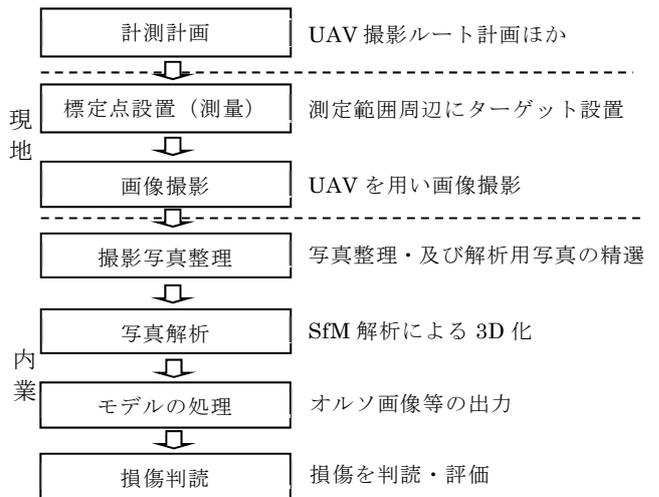


Fig. 13 作業の手順



Fig. 14 撮影画像例

3.5 SfM 解析～オルソ画像作成手順

従来の写真測量では、UAV で取得した膨大な枚数の標定作業を手動で行う必要があり、画像全てのマッチングを行うのに多大な時間を要し苦慮していたが、SfM 解析では、特徴点を用いた自動標定のため、大幅な省力化が可能である。また、写真測量では奥行きのある形状の場合、形状を忠実に再現することが困難であったが、SfM では多方向から撮影した画像でも容易に解析ができ、奥行きのある面のモデル生成も可能である。

Fig. 15 に解析の手順と結果を示す。まず、撮影した画像より、ブレ・ピンボケ画像を除去する。併せて UAV の撮影では、インターバル撮影により、UAV の離陸時から着陸時まで常に撮影を行っており、重複した写真が多々あるため、適度なラップを確保した画像を精選する。次に、精選した画像を自動標定による解析にかけ、特徴点・カメラ位置を算出する。この時点で、大まかな形状を PC 上で確認し、成型されていない場合は数度解析を繰り返す。その後、算出した特徴点を元に、TIN を構築し、撮影画像をテクスチャとしてマッピングすることで 3D モデルが生成される。このモデルは、PC 上で自由に拡大縮小・移動回転が可能のため、任意の視点からモデルを閲覧可能である。生成したモデルを他 CG ソフト（本研究では、Autodesk 社 3dsmax を使用）へ移行し、オルソ画像を出力し、損傷調査のベース図を作成する。SfM によるモデルの生成まで、約 5 日間要した。

3.6 損傷図作成

SfM により作成したマッピング付きの 3D モデルより、2mm/pix の解像度のオルソ画像を生成し、国土交通省が示す橋梁定期点検要領で示すひび割れ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、抜け落ち、補修・補強材の損傷⁵⁾等の損傷を対象に画像から判読可能なものについて損傷図化を行った。その中で、ひび割れの位置・幅の自動判定には、木構造フィルタを用いたものなど存在するが、本研究では、クラックインデックス（以下[CI]）を用いた「ひび割れ位置・幅判読図化システム」を使用した。「ひび割れ位置・幅判読図化システム」は、ひび割れ部の特徴量の総和[CI]とひび割れ幅の相関により、半自動でひび割れ位置・幅を抽出するシステムである⁶⁾。

損傷判読は、Fig. 16 に示すようマルチ画面で作業を行い、左画面では「ひび割れ位置・幅判読図化システム」を用い、オルソ画像を下図として損傷を抽出し、画像上に記載していく。その際、画像解像度が 2mm/pix の場合、約 3.5m×1.5m 範囲を 1 画面に表示し、損傷を探索する。このとき、ほぼ目視判読レベルとなるように、画像を PC 上で拡大して、詳細に判読している。右画面には、3D モデルを表示し、様々な視点より 3 次元で対象範囲を確認することに利用している。3D モデルを見ながら、損傷を探索することで、2 次元では分からない段差や孕みなどの変状も確認することが可能であり、室内の落ち着いた状況で作業が可能なお点でも非常に有効な手法である。記載した損傷は、CAD データへの変換し、管理図面などへの転記も可能である。

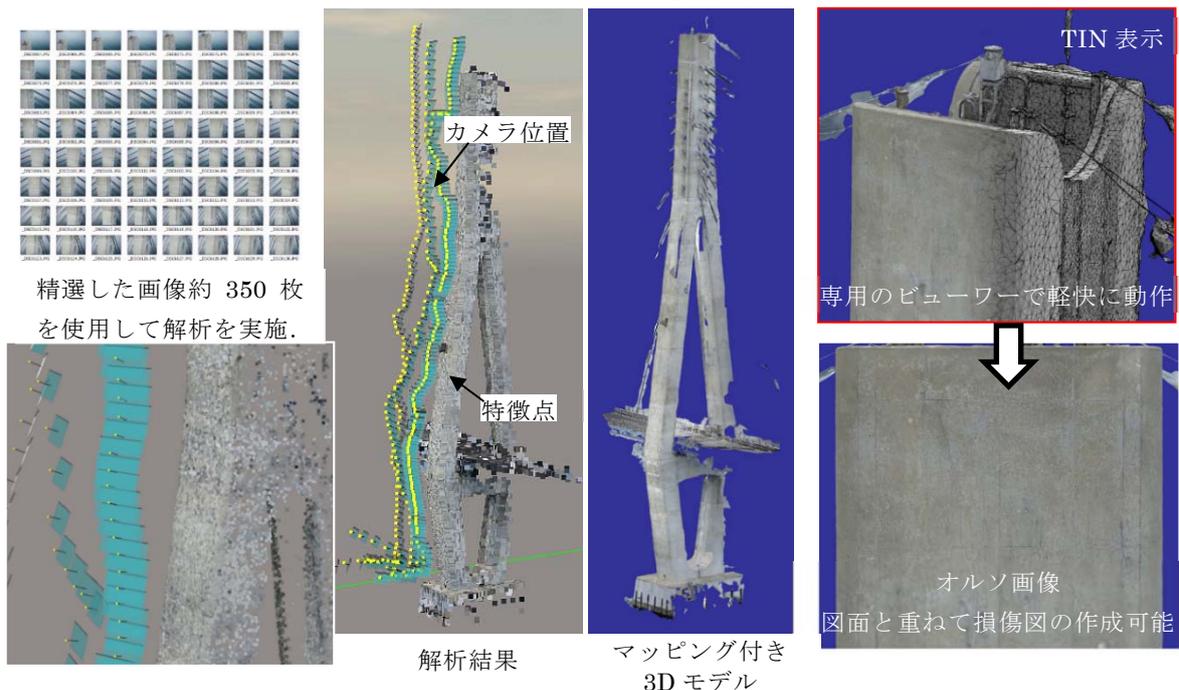


Fig. 15 SfM解析～オルソ画像作成手順



Fig. 16 損傷抽出作業状況

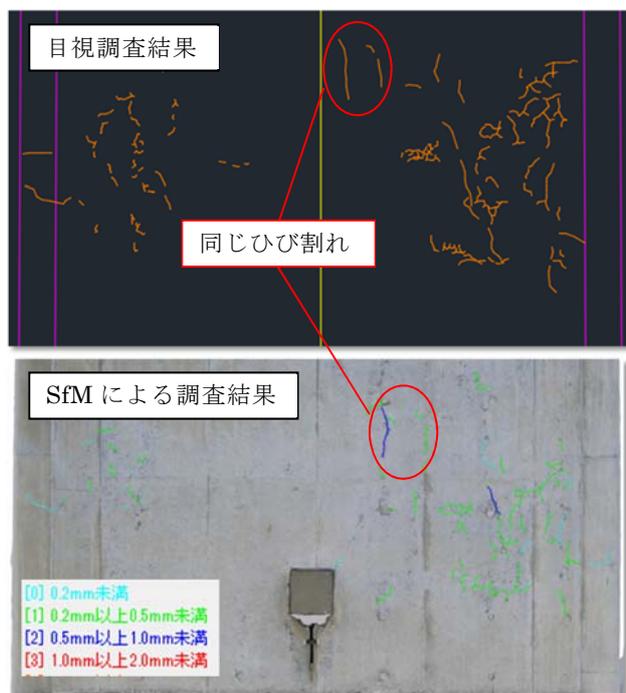


Fig. 17 調査結果の比較

3.7 考察

撮影画像・3Dモデルで損傷を確認した結果、今回対象とした主塔には目立った損傷はなかったが、その中でも目視調査結果と可能な範囲で、SfMを用いた結果と比較を実施した。

SfMを用いた結果では、Fig. 17に示すようH26年度の目視調査とほぼ同等のひび割れを抽出できたが、SfMによる調査、目視調査とも微細ひび割れを詳細に抽出してあるものの、やや位置関係に差異が見受けられる。目視調査の場合は、スケッチにより記録するため、位置精度の点では劣ると考えられるが、SfMを用いた場合は、画像を同時に記録し保存するため位置の再現性は非常に高いと考える。また、目視調査結果では、すべて0.1mm幅と記載されているが、SfMの調査結果では、全体的に0.2mm幅程度、一部0.5mm以上と判断し

たひび割れもある。[CI]を用いたひび割れの抽出の場合、コンクリート表面の色・汚れにより結果がばらつくことがあるため、本研究でも汚れなどが影響している可能性も考えられるが、この対象範囲のみでは、評価し難い。ひび割れ幅については、明確な真値を取得できる橋梁を対象として、継続的に検証を行い、取得画像とひび割れ幅の関係性を明らかにする必要があると考える。

通常の見視点検では、複数の作業員の技量・解釈に委ねられる部分が多く、損傷位置の記録など定量的な判断が難しいが、SfMによる調査では画像を元に損傷判読を行うため、定量的な判断が可能で、3Dモデルからは断面など任意位置の3D情報の抽出が可能である。また、定期的に同様のデータを取得することで、経年的な比較や劣化の進展なども容易に確認が可能である。このように3Dモデル・画像等の付加価値のあるデータを蓄積するため、今後の維持管理の上では、充分メリットのある調査手法であるといえる。

3.8 課題

UAV-SfMによる調査は、上記のとおり有効な手段ではあるが、以下の課題も存在する。

UAVの安全性には十分配慮する必要があり、特に本研究で実施したような橋梁の場合は、絶えず風が吹いており、気象条件などには注意すべきである。また、UAV-SfMを用いた場合、現地作業は大幅な省力化・ローコスト化が可能だが、解析作業には多大な時間を要する。更に、SfMでは特徴点を元に3Dモデルを構築するため、特徴点の抽出が困難な均一に塗装された鋼構造物や繰返し模様の部材・細い部材などは、解析できない部分が存在する。また、「うき」など接触調査が必要となる項目については、画像からでは判読が困難なため、現状では画像を用いた調査が近接目視調査の代替案として不適と評価されているものと考えられる。

4. まとめ

UAVを用い撮影した画像からSfM技術により3D化し、損傷図を作成することは、点検手法として充分活用でき、足場を仮設し調査を行う場合と比較し、大幅な省力化・ローコスト化できる手法であると考えられるが、ひび割れ幅の検出精度不足や接触調査が必要な「うき」などを把握できないことから、画像を用いた調査が近接目視調査の代替案としては、まだ認められていない。しかし、画像を用いた手法を1次スクリーニングとして実施することは、有効な手段であると考えられる。1次スクリーニングにより、詳細点検が必要な箇所を選定

することで、適切な時間・予算・人員を配分することができ、効果的・効率的な点検が可能となる。

また、UAVを用いた調査は、多方面（河川調査・ダム調査等）での活用も期待でき、災害時の概略の対策設計などにも十分活用が可能である。ただし、UAVについては、安全性を十分に確保する必要があり、安全性・コストの点から全ての場合においてUAVが効果的であるわけではない。要求成果に応じて適切な計画を立案し、手撮影によるSfM解析なども有効に利用していくべきである。更には、SfM解析では現況を忠実に再現したAsbuiltな3Dモデルを構築できることから、現在普及しつつあるBIM・CIMへの展開も有効であると考える。

今後は、撮影解像度とひび割れ幅の関係性の明確化や真値との比較による検出精度の向上、そして解析時間の縮減等の課題について、継続的に検証を行い、解決策を明らかにしていく必要がある。

謝辞：本研究は、平成26年度国土交通省建設技術研究開発助成制度（光学的計測法を用いた効率的・低コストな新しい橋梁点検手法の開発）において、検証しました。

長崎県土木部道路維持課様には、鷹島肥前大橋というフィールド・調査結果を提供していただき、感謝致します。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路メンテナンス年報，
http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/28_3main_t.pdf, p.27, 2016.9.
- 2) 小沼 恵太郎, 西村 正三: 多視点画像3Dモデル構築システムの橋梁調査への適用性について, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集, VI-511, Vol.69, 2014.9.
- 3) 長崎県土木部 道路維持課：長崎県重点維持管理橋梁詳細点検（5年点検）業務委託（鷹島肥前大橋）報告書, 2015.3.
- 4) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'16, pp.110-111, 2016.2.
- 5) 国土交通省：橋梁定期点検要領, pp.8-13, 2014.6.
- 6) 西村 正三, 木本 啓介, 松岡のどか, 大谷仁志, 緒方 宇大, 松田 浩：橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価, (社)日本測量協会 応用測量論文集, pp.52-61, Vol.24, 2013.1.