

(54) 橋梁点検の効率化に資する点検支援技術(UAV)と3次元モデル活用ソフトウェアの考察

服部 達也¹・下川 光治¹・榎本 真美¹・二宮 建¹・森川 博邦¹

¹正会員 (国研)土木研究所 先端技術チーム(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: hattori-t573bt@pwri.go.jp, shimokawa-m574bs@pwri.go.jp, enomoto-m574bs@pwri.go.jp, ninomiya-t574bt@pwri.go.jp, morikawa-h573ck@pwri.go.jp

老朽化する橋梁の維持管理や、点検技術者不足を背景として、橋梁定期点検へのUAV等の点検ロボットの導入が進められている。本稿では、橋梁点検への3次元モデル活用ソフトウェア(SfMソフトウェア等)による効果、飛行型橋梁点検ロボット(UAV)に期待する機能、3次元モデル活用ソフトウェアに期待する機能について報告するものである。

Key Words : bridge inspection, inspection robot(UAV), structure from motion(SfM), bridge 3D model

1. 背景

日本国内には、国民生活に不可欠な共有財産の1つである道路橋(橋長2m以上)が約72万橋あり、その半数は高度成長期に建設されたもので、40年以上にわたり供用されている。この老朽化した橋梁を効率的に維持管理することは社会的な要請となっている。

国土交通省では、橋梁定期点検要領¹⁾に基づき、5年に1回、点検技術者が全橋梁の全部材を近接目視し、確認した損傷状態などを踏まえ、健全性を診断し、適切に措置することを定めている。橋梁への一律な点検は、人・時間・費用を多く必要とする。

一方、少子高齢化等による土木分野の技術者不足もあり、“橋梁点検の生産性向上”は、膨大な橋梁を適切に維持管理するため、喫緊の課題となっている。

橋梁定期点検要領では、「近接目視によるときと同等の診断ができると判断した場合には、その他の方法についても近接目視を基本とする範囲と考えてよい」と記載しており、“その他の方法”となる点検支援技術の活用促進は、「新技術利用のガイドライン(案)」等²⁾に示されている。点検支援技術は移動撮影し各部材を記録することから、入出力情報として3次元情報との相性が良い。

本稿は、橋梁点検へ3次元モデルを活用した場合の効果を整理し、点検支援技術のうち飛行型ロボットであるUAV(Unmanned Aerial Vehicle)に期待する機能と、3次元モデル活用ソフトウェアに期待する機能について考察を行ったものである。

2. 3次元モデル活用ソフトウェアによる効果

本稿の3次元モデル活用ソフトウェアは、3次元モデル(点群モデル)を生成するStructure from Motion(以下SfM)ソフトウェアと、3次元モデル処理ソフトウェアを組合わせたものとする。SfMソフトウェアで得られる撮影位置や撮影方向の精度は高く、著者らは、ひび割れ幅計測への影響が著しく小さいことを検証している²⁾。

3次元モデル活用ソフトウェアによる効果は、視認性と位置関係の明確化であり、具体的には、①橋梁の3次元モデル(点群モデル)の作成、②画像の撮影位置・撮影方向の視覚化、③3次元モデルと画像を重ねて表示することによる画像位置の視覚化、④変状状況の把握と3次元モデル上での変状位置の表示、⑤3次元モデルをベースとして画像、変状形状と属性情報を関連付けて保存することがあげられる(図-1参照)。

さらに、②画像の撮影位置、④変状位置より、画像と変状の相対的な位置関係(角度と距離)が明確になる。これにより、斜め方向から撮影した画像でも、幾何学的に

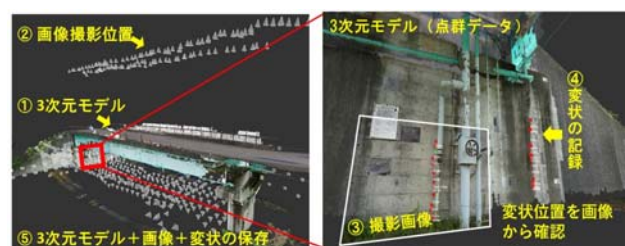


図-1 3次元モデルの活用イメージ

変換した正対(オルソ)画像を作り、画像中のピクセル数と色調からひび割れ寸法の計測が可能となる(図-2参照)。

なお、図中ではオルソ処理時の画素分解能の低下を抑えるために元画像の画素を縦横10分割とし画素数を100倍にしている。

また、⑤3次元モデル/画像/変状の保存により、膨大な画像の管理、変状位置の管理を効率的に行うことが可能となる。そのためには利用法とデータの標準化が重要である。

3. 橋梁点検用UAVに期待する機能

点検支援技術は、移動原理から「飛行型(UAV)」 「アーム型」 「懸架型」 「接触型」 に分類される³⁾。本稿では、飛行型(UAV)について着目した。なお、橋梁点検用UAVは、i-Constructionの土工の出来形管理で用いるUAVと比較して、橋梁の下側飛行による非GNSS下で、橋梁に接近し0.2mmのひび割れを確認するなど、機体の技術的難易度が高い(表-1参照)。

橋梁点検支援技術を効果的に利用するには、前回画像と同一画角の画像や、画素分解能が一定の連続画像など、点検撮影に望まれる項目を想定できる。また、画像撮影だけではなく浮き調査のため打音検査の実施などもニーズとして想定される。これらを点検支援技術に期待する事項としてUAVの機能について整理した(表-2参照)。また、実装状況についても記載した。この中には実用化されていない機能を含む。

期待する機能のうち、いくつかの機能(表中でアンダーラインした機能)について説明する。

C飛行制御「撮影位置座標と撮影方向を指定して撮影する機能」：変状の進行具合を確認するためには、前回画像と同じ画角の画像で比較することが多い。現在の点検では、点検技術者が前回画像を手を持ちながら、同じ画角になるように工夫して撮影している。UAVのプログラム飛行に期待する機能である(図-3参照)。

C飛行制御「手動操作時に一定の撮影距離で撮影する機能」 Dカメラ「スケール表示機能」：震災時緊急点検では、限られた時間内で効率的に健全性や供用安全性について判定することが求められるため、桁端部(支承部)、コンクリート部材の浮き、ボルト破断やゆるみの有無などを集中的に確認している⁴⁾。そのため、UAVカメラの映像をリアルタイムで見て変状有無を確認する際に有効な機能である。

C飛行制御「群体飛行」：現在の点検支援技術は、普及初期段階で台数も少なく同時使用が1台であるため、撮影に要する時間が長い。撮影時間の短縮とUAV故障時の冗長性を確保するための機能である。将来的に5～



図-2 斜め方向からの寸法計測の例

表-1 橋梁点検用 UAV と土工出来形管理用 UAV の違い

	橋梁点検のUAV	土工の出来形管理のUAV (i-Construction)
目的	損傷確認(幅0.2mmのひび等)	形状確認(基準値50mm)
飛行場所	構造物周辺(接触～数m) (周囲に架空線、電柱あり)	上空50m程度 (周囲に障害物なし)
制御方法	非GNSS方式 (橋梁下面はGNSS不可)	GNSS制御
難易度	高い: 構造物接触の可能性あり	橋梁点検UAVよりも低い

表-2 橋梁点検支援技術(飛行型)に期待したい機能

区 分	機 能	実装状況			備考
		イ	ロ	ハ	
飛行方法	A 安全	○	○	○	
	○ 一般的な飛行・離着陸・姿勢制御機能				
	○ SLAM技術を用いた衝突回避機能				
	○ 接触時に安定して飛行できる機能	○			
	B 飛行範囲	○	○	○	
	○ 橋梁側面の飛行				
	○ 橋梁下面の飛行	○	○	○	
	○ 桁桁橋の桁内部の飛行	○	○	○	
	○ 支承部周辺での周回飛行			○	
	C 飛行制御	○	○	○	
画像撮影	○ 非GNSS下におけるプログラム飛行		○		
	○ 非GNSS下におけるプログラム飛行で一定の撮影距離と一定のラップ率で、橋梁を網羅的に撮影する機能		○		
	○ 非GNSS下におけるプログラム飛行で橋梁上の撮影対象箇所の座標値を元に飛行し、撮影する機能		○		
	○ <u>非GNSS下におけるプログラム飛行で撮影位置座標(xyz)と撮影方向(φ, κ)を指定して撮影する機能</u>		○		図3
	○ 飛行プログラムの自動生成機能(準備作業の軽減)				
	○ <u>手動操作時に、一定の対物距離で飛行して撮影する機能</u>	○			
	△ UAVの自律飛行目的に応じた飛行中のプログラム作成				
	△ <u>非GNSS下における群体飛行</u>				
	△ 非GNSS下における群体プログラム飛行				
	D カメラ	○	○	○	
点検作業	○ 画像撮影を容易にするため、インターバル撮影をする機能		○	○	
	○ 広範囲・高精細な画像用に、一眼レフカメラによる撮影機能		○	○	
	○ コンクリート面を画素分解能0.5mm/pixel以上の対物画素分解で撮影する機能		○	○	
	○ <u>リアルタイム画像の中で、スケールを表示する機能</u>				
	○ <u>全天球(360度)撮影機能</u>				図4
	E 座標出力	○			
	○ 非GNSS下で飛行経路(画像撮影箇所)を出力する機能				
	△ 非GNSS下で画像撮影箇所を画像ファイルにExif情報として保存する機能				
	○ 飛行範囲内の3次元点群モデルを生成する機能		○		
	F 点検作業			○	
	○ 利用方法の拡大のため、現地到着から20分以内の飛行				
	○ 発見した要注意箇所や追加標点を、マーキングする機能				
	○ コンクリート面の剥離調査のための打音検査を行う機能				
	△ 緩み対応として、ボルト・ナジの増し締めを行う機能				
	△ 鋼材亀裂確認や、発錆防止のため、汚れを拭き取る機能				
	△ 超音波探傷法による鋼床版亀裂の検出機能				
	○ 点検や補修作業の支援として、作業用資機材の運搬機能				

※ 実用化済の機能は、土木研究所で確認している機能について ○ △ を記載

※ イ: 壁面接触移動型を想定、ロ: 基地局(TS等)制御型を想定、ハ: SLAM衝突回避型を想定

10台での同時飛行を期待している。

Dカメラ「全天球(360度)撮影機能」：全天球カメラは容易に網羅的な撮影が可能であり、画像品質は劣るが、鋼材発錆やボルトの欠落有無などが確認できることから期待した機能である。また、3次元モデルの作成が容易であり、補修設計時の補修部材の搬入可否検討にも利用可能である(図-4参照)。

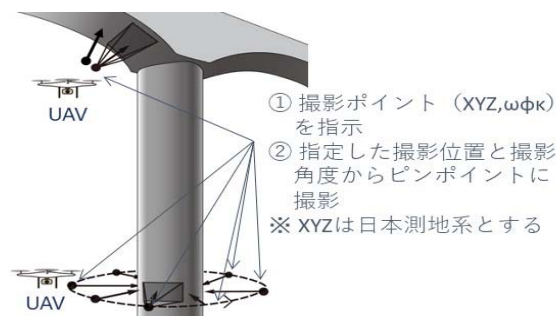


図-3 撮影位置方向の指定機能

4. 3次元活用ソフトウェアに期待する機能

橋梁点検に3次元活用ソフトウェアを使う場合には2章の①～⑤のような効果が期待できるが、これらすべてを行えるソフトウェアはない。そこで、UAVにより得られる画像を効率的に扱うために望まれる項目を想定し整理した(表-3参照)。この中には実用化されていない機能を含む。表中の①～⑤は2章の効果①～⑤に対応している。

期待する機能のうち、いくつかの機能(表中でアンダーラインした機能)について説明する。

①モデル作成「ブロック分割・結合機能」：SfMによって作成される3次元モデルは、形状が崩れてしまうことがあり、このような場合には、SfMソフトウェアで処理する画像の選定に戻ることとなる。この手戻りを減らすための機能であり、形状が崩れた3次元モデルを任意の箇所で分割する機能と、部分的な3次元モデルを用いて位置・大きさ・方向を調整して結合する機能の2つに大別される。分割・結合では相対的な撮影位置を保持することとする。なお、部分毎の3次元モデルしか作成できない場合には標定点が部分毎に必要となるが、結合して全体3次元モデルを作成する場合には、必要とする標定点が少なくなるメリットがある(図-5参照)。

②撮影位置の視覚化「個別撮影画像の登録」：SfM解析から漏れてしまい位置情報が付与されなかった写真を3次元モデル上に登録する機能である。大まかな位置を指定することにより位置を自動推定することを望んでいる(図-6参照)。また、橋梁管理に3次元モデルを利用する場合には、日常巡視により撮影した最新画像の登録機能が求められると考えており本機能が適用可能である。

③画像の可視化「隣接画像への移動機能」：3次元モデル上に表示した画像を見ながら変状確認を効率的に行うには、任意方向の隣接画像へ視点移動する機能が有効である。隣接画像への移動時に画像方向(カメラ内CCDの上方向)に表示画面の上方向を固定して背景画像を回転させる方法がある。しかし、床板下面撮影では画像方向が一定に揃わないことがあるため、隣接画像への視点移動時に、背景画像や変状の方向が回転してしまい作業者が変状を理解しにくくなる。そのため、背景画像の方向を固定して画像を回転させる機能である(図-7参照)。



図-4 全天球(360度)画像の利用

表-3 3次元モデル活用ソフトウェアへの期待したい機能

区 分	機 能	備 考
① 3次元モデル(点群モデル)の作成	基本機能 ○ 橋梁撮影画像から、橋梁3次元モデル(点群モデル)作成機能 ○ SfM作成時の画像EXIF位置情報(位置・方向)を利用する機能 ○ 日本測位系での点群管理機能 ○ 3次元モデルor画像上での標定点座標の入力機能 ○ 任意視点・任意方向からの3次元モデルの表示機能 ○ 任意視点・任意方向からの3次元モデル表示条件の保存機能 ○ 3次元モデル上の不要点群の削除 ○ オルソモザイク画像(オルソ幾何補正画像をモザイク処理した画像)を作成する機能	凡 例 ○ 実用化済の機能 △ 実用化前の機能
	ブロック分割機能 △ SfMによって作成される3次元モデルの形状が崩れた場合に、3次元表示の画面上で、3次元モデルを任意の箇所でブロック分割する機能。 △ ブロック分割時には、該当する画像(ファイルと位置情報)もグループ分けする機能	
	ブロック結合機能 ○ ブロック分割された3次元モデル(部分的に作成した3次元モデルを含む)を、3次元モデル上で、画像撮影位置情報を含めて、任意に組み合わせる機能	
	既存モデルの利用 △ 既存点群の形状を利用して3次元モデルの形状を作成する機能(レーザーキャナにより作成した点群、過去にSfMで作成した点群を対象) △ BIM/CIMモデルなど3次元モデルの形状を利用した3次元モデル作成機能	
② 画像の撮影位置・撮影方向の視覚化	基本機能 ○ 画像撮影位置の推定機能 ○ 3次元モデル上での、撮影位置の表示機能 △ オルソモザイク画像の解像度不足時にオリジナル画像を参照するために、オルソモザイク画像から該当するオリジナル画像へ関連付ける機能 個別画像追加機能 △ 個別に撮影した画像や、SfMに利用されなかった画像を、3次元モデル上の撮影箇所付近を指定すると、過去の画像や3次元形状と照らし合わせて正しい位置を推定して登録してくれる機能	図5 図5 図5 図6
③ 3次元モデル上での画像の視覚化	○ 3次元モデルと、画像を重ねて表示する機能 ○ 3次元モデル上で表示する画像から、任意方向の隣接画像に視点を移動する機能 △ 隣接画像に視点を移動する際に、ラップ率20程度となるように表示画像を選択する機能 △ 隣接画像に視点を移動する際に、3次元モデル上の表示方向を固定し、画像を回転させる機能 △ 画像の位置を確認しやすくするために、低縮尺の3次元モデル上で、表示している画像の位置を示す機能	図7 図7
	△ 画像上の変状を確認して、長さ・幅を計測する機能 △ 変状計測の補助として、仮想スケール、仮想クラックスケールの表示や、正対画像表示をする機能 △ 確認した変状の位置、変状内容を登録する機能(位置はポリラインで保存) △ 確認作業の漏れを防ぐために、変状確認済み/未確認 が分かる、塗り分け図を表示する機能 △ 変状確認時に確認中の画像の位置が分かるように、『全体図(点群と画像位置)』『拡大図』『2画面表示する機能 △ 確認した変状情報を3次元モデル上で表示する機能(ピン表示と、ポリライン表示を選択式) △ 変状箇所の時間変化を表現するために、撮影時期の異なる画像を表示する機能	
④ 変状状況の把握と3次元モデル上での変状位置の表示	△ 3次元モデル・撮影位置・変状情報を、共通形式で保存する機能 △ 共通形式で保存された、3次元モデル・撮影位置・変状情報を表示する機能(オルソモザイク画像を利用して作成した、変状情報の表示を含む) △ 橋梁点検調査の様式出力機能(様式9: 損傷図、様式10: 損傷写真、様式11: 損傷程度の評価記入表)	

※ 実用化済の機能は、土木研究所で確認している機能について ○ △ を記載

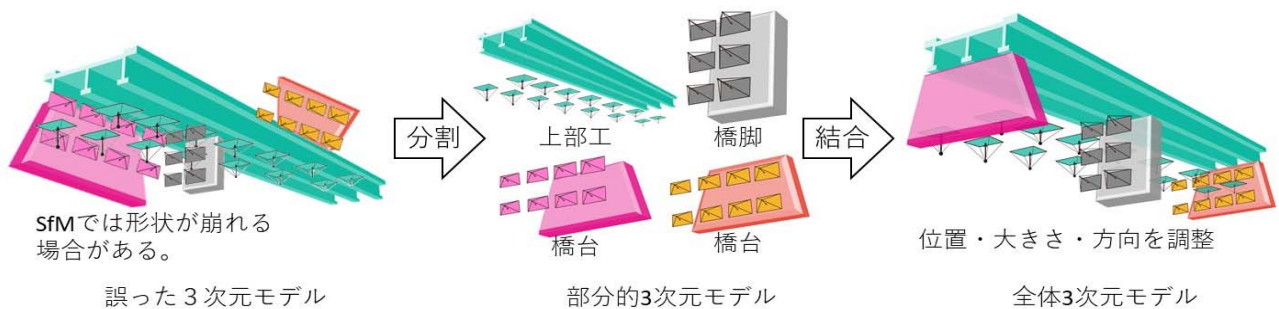


図-5 ブロック分割・ブロック結合機能

橋梁端部の撮影や鉸桁橋の桁内撮影では、UAVの移動範囲が限られることから、カメラの向きを変えて撮影することが多いため、本機能が有効であると考えられる。

5. 結論

本稿では、橋梁点検への3次元モデル活用ソフトウェアによる効果を整理した。さらに、点検支援技術のうち飛行型ロボット(UAV)に期待する機能、3次元モデル活用ソフトウェアに期待する機能について整理した。

今後は、橋梁点検への3次元点検手法の一般化に向けて、下記3項目を予定している。

- ・ 点検支援技術を用いた橋梁点検を支援するための、撮影方法や3次元化処理を記した作業手順マニュアルの整備
- ・ 3次元データを活用した橋梁点検成果品の納品要領および管理方法に係る関連基準の整備
- ・ 画像から効率的に変状把握をする支援技術(AIによる変状自動抽出、画像処理による変状強調)に関する検討

6. おわりに

将来的には、点検支援技術にて収集したメンテナンス情報が、BIM/CIMなどの設計施工情報とサイバー空間上で統合化され、CPS (Cyber-Physical System)として変状程度の定量的な分析が可能となり、現地作業の短縮化や補修作業の最適化などインフラメンテナンスの生産性向上が進むと考えている。

そのためにも、本稿で整理した橋梁点検ロボットや3次元活用ソフトウェアの機能が、開発者の目標設定の一助になれば幸いである。

謝辞：本研究では、橋梁撮影検証に関して、鳥取県と茨城県から検証場所を提供していただいた。また、共同研究者であるイリノイ大学が開発するSfMソフトウェア

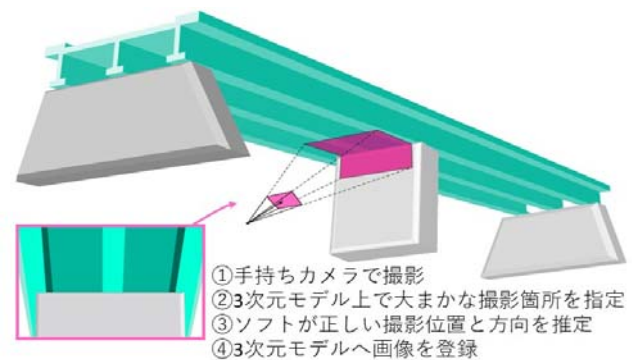


図-6 個別画像の登録機能

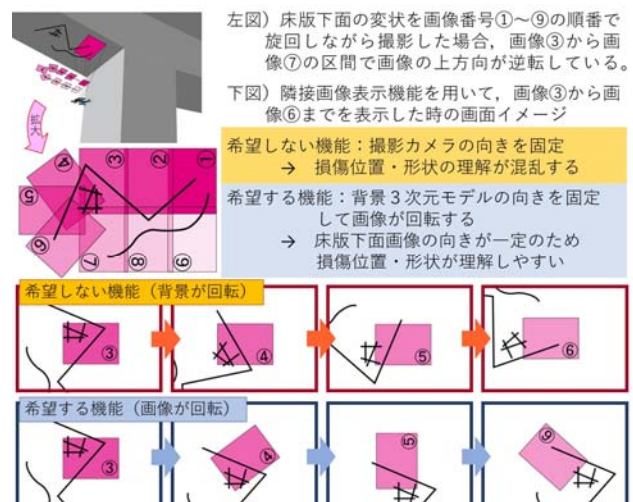


図-7 隣接画像表示での画像回転機能

「Reconstruct」を使用した。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：橋梁定期点検要領，pp.5-19,2019，<<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen.html>>,(入手 2020.4.1)。
- 2) 下川光治，新田恭士，二宮建，田中洋一：橋梁点検画像の3次元管理に関する考察，令和元年建設施工と建設機械シンポジウム，pp. 177-180, 2019。
- 3) 国土交通省 新技術利用のガイドライン(案)，pp.7，2019，<<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen.html>>,(入手 2020.4.1)。
- 4) 国土交通省 東北地方整備局 道路部，国土技術政策総合研究所 道路構造物管理研究室：道路橋の震災時緊急点検・応急調査の手引き(案) ver.1.0，pp.6-17，2012。