

(13) 土木構造物の 3 次元モデル生成のための 目視検査時のカメラ配置

内藤 直人¹・笠原 康平²・村田 和哉³・増田 雄輔⁴・
向嶋 宏記⁵・小林 裕介⁶

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: naito.naoto.55@rtri.or.jp

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: kasahara.kohei.70@rtri.or.jp

³正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: murata.kazuya.77@rtri.or.jp

⁴正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: masuda.yusuke.14@rtri.or.jp

⁵(公財) 鉄道総合技術研究所 信号・情報技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: mukojima.hiroki.27@rtri.or.jp

⁶正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: kobayashi.yusuke.22@rtri.or.jp

土木構造物の維持管理において、SfM を活用して検査の精度向上や省力化を図ることが期待されている。本研究では、全般検査が多くの構造物を対象に限られた時間の中で実施されている実情を考慮して、検査時に SfM を意識することなく、自動的に取得された画像を用いて 3 次元モデルを生成することを目指した。本稿では、SfM に適した画像を効率良く取得するため、3 次元モデルの完成度と精度に及ぼすカメラ配置の影響を調べた。

その結果、前方と左右真横の 3 台のカメラ配置で撮影すると、前方の 1 台、左右 45° の 2 台のカメラ配置と比較して、3 次元モデルの完成度および精度が高まることがわかった。基本的に検査では対象構造物に正対する場面が多くなるため、検査者の進路方向に歪みが大きい画像端部が位置するカメラ配置は好ましくないことがわかった。

Key Words: SfM, 3D model, camera installation direction

1. はじめに

鉄道の土木構造物は、2 年に 1 回の頻度で目視を主体とした検査（全般検査）が行われている。全般検査において、健全度が低いと判定された場合には、個別検査と呼ばれる計測機器等を用いた詳細な検査が実施され、必要に応じて補修・補強や監視等の措置がとられる¹⁾。

著者らは、この目視検査を基本とする全般検査に着目し、検査時に撮影される画像から、Structure from Motion（以下、SfM）技術により検査対象となる土木構造物の 3 次元モデルを生成し、この 3 次元モデルを活用することで、検査精度の向上や検査業務の省力化を図るシステムの構築を目指している。既報^{2,3)}では、全般検査毎に

構造物の 3 次元モデルを生成することで、変状の抽出や変状の進行性の評価において精度の向上が見込めることや、3 次元モデルと静止画の撮影位置の対応等により、現場技術者の記録・情報管理作業を軽減できることを示している。

このように 3 次元モデルを検査に活用する上では、3 次元モデルが適切に生成されることが前提となり、とりわけ 3 次元モデル生成のための画像の取得方法が重要となる。一方で、全般検査が多くの構造物を対象に、限られた時間の中で実施されている実情を考慮すると、検査実務にくわえて 3 次元モデル生成のための画像撮影を実施することは、かえって検査労力を増やしたり、検査時間を圧迫し検査精度の低下に繋がるのが危惧される。



図-1 対象構造物と検査状況

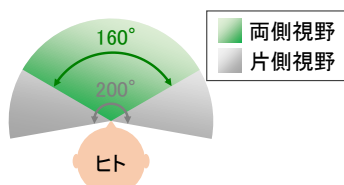


図-2 視野のイメージ

このような背景を踏まえ、本研究では、検査者が3次元モデル等を意識せずに目視による検査のみを実施し、ヘルメットに装着したウェアラブルカメラが自動的に取得した画像のみを用いて3次元モデルを生成できることを目指すこととした。検査労力を増やすことなく SfM に適した画像を取得するには、主に以下の2つの作業が考えられる。1つは、カメラの台数や設置方向等のカメラ配置を適切に行うことで、対象物の3次元モデルの生成に必要な画像をもれなく取得する作業である。さらに、撮影範囲および撮影方位角の増加により3次元モデルの生成範囲や精度に影響を及ぼす指標の1つであるラップ率の向上が見込まれる。もう1つは、現場で撮影した画像から SfM に適した情報を抽出するための、エッジの検出や人・空のマスク等の画像処理作業があり、既に一部開発を始めている³⁾。したがって、本稿では、3次元モデルの完成度と精度に及ぼすカメラの台数や設置方向といったカメラ配置の影響を調べた。

2. 画像の撮影条件

画像の撮影条件として、対象構造物、カメラ、検査者の動き方を以下のとおりに設定することとした。

(1) 対象構造物

対象構造物は、国土交通省が第4次社会資本整備重点計画のメンテナンス技術の向上において重点3分野の1つに掲げている橋梁を選定することとし、本研究では鉄道総合技術研究所が実験設備として所有する橋梁を対象とした。対象構造物と検査状況を図-1に示す。

(2) カメラ

カメラは、検査を阻害しないよう、ヘルメットに装着可能な小型カメラとして SONY アクションカム FDR-

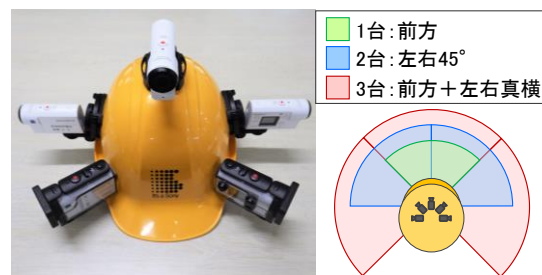


図-3 カメラ設置状況と水平画角

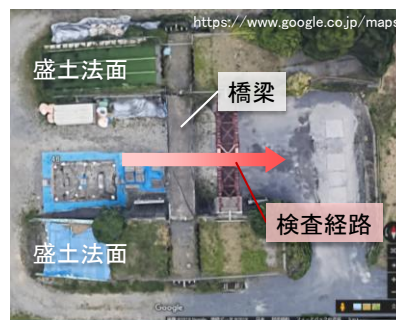


図-4 検査経路 (GoogleMap から引用・加筆)

X3000 (水平画角 90.6°) を用いることとした。撮影方法は、SfM に必要な画像情報が欠損しないよう、動画撮影で画像データを取得して、そこから静止画を切り出すこととした。記録画素数は 1920×1080pixels、フレームレートは 60fps、手振れ補正機能有で撮影した。

カメラ配置は、検査者の負担にならないような現実的な台数で検査者の視野(図-2)を撮影できるように、図-3に示すような配置とした。カメラ配置以外の撮影条件が同一となるよう、撮影は5台同時に実施し、3次元モデルの生成に使用するカメラの組み合わせは、できるだけ少ない台数で広範囲を撮影できるように、カメラの水平画角を考慮して、前方のカメラのみを用いた1台の場合、左右45°のカメラを用いた2台の場合、前方と左右の真横のカメラを用いた3台の場合とした。

(3) 検査時の動き方

検査経路は、対象構造物や検査者に依存することが考えられ、検査項目を考慮した経路とすることが望ましいが、検査経路が複雑であると、カメラ配置が3次元モデルの生成範囲と精度に及ぼす影響を抽出することは容易ではない。さらに、SfM では、対象物を様々な方位角から撮影することが望ましく、検査経路が複雑なほど撮影方位角が増え、SfM にとって有利な条件になると考えられる。これらの理由から、本検討における検査経路は、図-4に示すように橋梁の中心を直進する単純なものとし、移動速度や首振りなどの検査者の動作も以下のように単純化した。

実際の検査時の移動速度は不均等であり、立ち止まるような状況も想定されるが、本検討では動画撮影で画像データを取得することで、SfM に必要な画像情報が欠損

しないようにした。そのため、本検討ではカメラ配置に関する検討に焦点を当てるため、速度の条件を単純化することとし、移動速度は 50m/min 程度で等速となるようにした。

実際の検査時には、構造物を目視するための首振り動作がある。そこで、本検討では、表-1に示すように等速移動するパターン1と、移動時に構造物全体を視回するような状況を想定して、検査経路を等速で移動しながら首振りするパターン2を設定した。首振りの範囲は正面から左右 45° の範囲とした。首振り速度は、1 歩で首を 45° 回転するように調整したため、4 歩で首振りが一往復する計算となる。図-5 は歩数に対応する首振りサイ

表-1 検査パターン

パターン	動き方	動画撮影時間
1	等速	25 秒
2	等速（首振り有）	

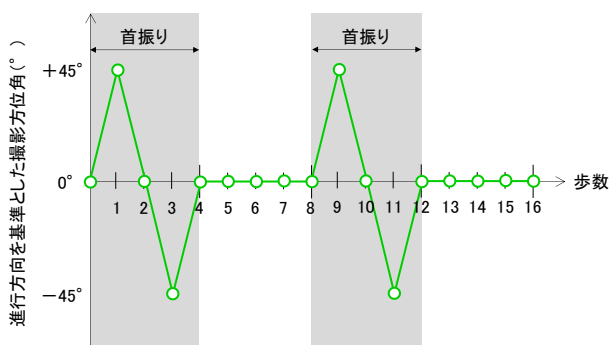


図-5 歩数に対応する首振りサイクル

クルを示しており、4 歩を 1 サイクルとして、首振りがあある区間とない区間を交互に繰り返している。

3. カメラ配置が3次元モデルの完成度と精度に及ぼす影響

本章では、撮影された動画から任意の時間間隔で抽出した静止画を用いて生成された対象構造物の 3 次元モデルを比較する。本稿では、対象構造物全体の概形が 3 次元モデルで生成されているかどうかの指標（以下、完成度）と、構造物の稜線等の詳細な形状が再現されているかどうかの指標（以下、精度）について比較することとした。

静止画を抽出するフレーム間隔は、3 次元モデルが高精度に生成されている既往の文献⁴⁾のオーバーラップ率 90%を参考にして、パターン 1 の条件でオーバーラップ率が 90%程度となるように、60 フレームに 1 枚とした。生成した 3 次元モデルを表-2 に示す。

(1) 検査パターン1：等速移動の場合

前方の 1 台のカメラを用いた場合、橋梁全体が概ね再現できるものの、複数のカメラを用いる場合に比べて 3 次元モデルの生成される範囲が狭くなった。ただし、橋台の稜線は、3 次元モデルが生成されている範囲で良好に再現されている。

表-2 SfM で生成された 3 次元モデル（橋梁全体図中の黄色点線枠内を橋台拡大図として表示）

			カメラ配置		
			1台（前方）	2台（左右45°）	3台（前方+左右真横）
検査パターン	パターン1 等速	橋梁全体			
		橋台拡大			
		コメント	撮影範囲が狭いものの、概ね構造物全体が再現されている。	構造物全体が上手く再現されておらず、歪んでいる部分がある。	構造物全体が再現され、稜線も良好に再現されている。
		解析時間	5分18秒	7分50秒	11分14秒
	パターン2 等速× 首振り有	橋梁全体			
		橋台拡大			
		コメント	構造物全体が再現されているが、稜線が上手く再現されていない。	構造物全体も一部歪んでおり、稜線も上手く再現されていない。	構造物全体が再現され、稜線も良好に再現されている。
		解析時間	5分50秒	13分5秒	10分4秒

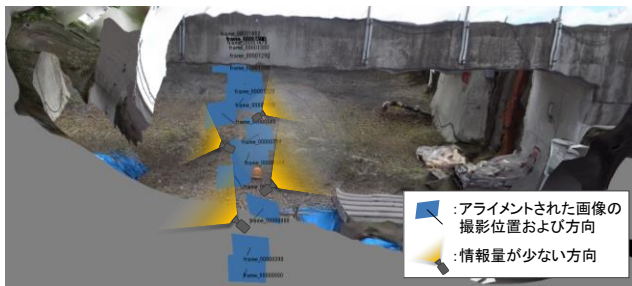


図6 首振りによる情報量の低下箇所のイメージ

左右 45° の 2 台のカメラを用いた場合、1 台のカメラを用いる場合に比べて撮影範囲が広がるため、3 次元モデルの生成範囲が広がることが考えられたが、桁中央から左側にかけてモデルが概形すら認識できないほど大きく歪む結果となり、カメラ 1 台の場合よりも 3 次元モデルの完成度が低下する場面があることがわかった。これは、レンズの曲率によって歪みが大きくなる画像端部が、2 台のカメラの画像の境界部であることが要因と考えられる。橋台の稜線については、モデルが再現されている範囲で良好に再現されている。

前方と左右真横の 3 台のカメラを用いた場合、橋梁全体が再現され、橋台の稜線も良好に再現できる結果となった。

等速に直進する撮影条件の場合には、モデルの完成度は、前方と左右真横の 3 台、前方の 1 台、左右 45° の 2 台の順に高い結果となり、モデルの精度については、人の視覚で認識する限りカメラ配置の影響は少ないことがわかった。本検討条件では、前方と左右真横の 3 台の場合に 3 次元モデルの完成度が最も高くなるが、解析時間についても最も長くなった。

(2) 検査パターン 2：等速移動で首振り有の場合

前方の 1 台のカメラを用いた場合、首振りをするだけで撮影範囲が広がるため、3 次元モデルの生成範囲が広がることが考えられたが、生成された 3 次元モデルの範囲は検査パターン 1 と比較して変化がなく、橋台の稜線は歪む結果となった。これは、図-6 に示すように、首振りによって等速移動時よりも情報量が低下する箇所があるためと考えられる。

左右 45° の 2 台のカメラを用いた場合、橋梁全体の概形は概ね再現されているものの、桁の中央が一部歪む結果となった。この理由として、桁の中央部分は 2 台のカメラの画像境界に位置し、歪みが大きい画像情報をもとにモデルが生成された可能性が挙げられる。また、橋台の稜線も歪む結果となった。これは、カメラ 1 台の場合と同様の理由によるものと考えられる。

前方と左右真横の 3 台のカメラを用いた場合、橋梁全体が再現され、橋台の稜線も良好に再現できる結果とな

った。

首振りを実施しながら等速移動する場合、モデルの完成度は、前方と左右真横の 3 台、前方の 1 台、左右 45° の 2 台の順に高い結果となり、モデルの精度についても、同様の順に高い結果となることがわかった。本検討条件では、前方と左右真横の 3 台の場合に 3 次元モデルの完成度および精度が最も高くなるが、解析時間は 1 台の場合に比べて 2 倍程度長くなった。

4. まとめ

本稿では、構造物の目視検査時にヘルメットに装着したウェアラブルカメラによる撮影画像を用いて 3 次元モデルを生成する場合に、3 次元モデルの完成度と精度に及ぼすカメラ配置の影響を調べた。得られた主な結果は以下のとおりである。

等速に直進する撮影条件の場合、3 次元モデルの完成度は、前方と左右真横の 3 台、前方の 1 台、左右 45° の 2 台の順に高い結果となり、人の視覚で認識する限りカメラ配置が 3 次元モデルの精度に及ぼす影響は小さいことがわかった。

また、首振りしながら等速に直進する撮影条件の場合には、3 次元モデルの完成度および精度は、前方と左右真横の 3 台、前方の 1 台、左右 45° の 2 台の順に高い結果となることがわかった。

3 次元モデルの完成度と精度は、首振りの方法や移動経路にも依存するため更なる検討は必要であるものの、基本的に検査では対象構造物に正対する場面が多くなることが考えられるため、検査者の進路方向に歪みが大きい画像端部が位置するようなカメラ配置は好ましくないといえる。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物，pp.5-16，2010.
- 2) 小林裕介，松丸貴樹，長峯望，新名恭仁：SfM 技術による三次元モデルを用いた目視検査支援システム，日本鉄道施設協会誌，pp.32-33，2019.2.
- 3) 新名恭仁，野中秀樹，小林裕介，長峯望，西岡英俊：多視点画像 3 次元モデルの土木構造物維持管理への適用に向けた提案と試行結果，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.74，No.2，I_19-I_30，2018.
- 4) 早川健太郎，黒台昌弘，笠博義：建設分野における UAV の活用事例と UAV 画像による 3 次元モデリング，日本リモートセンシング学会誌，Vol.38，No.3，99.213-218，2018.