

UAV と SfM を活用した 橋梁 3 次元モデル作成手順の紹介

中景撮影の導入による、部材単位での 3 次元化

服部 達也・下川 光治・藤井 優

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、橋梁定期点検への点検支援技術として、UAV 等の点検ロボットの導入が進められている。このため、土木研究所では、「橋梁 3 次元データを活用する橋梁点検手法（3D 点検手法）」を提案しており、江島大橋（鳥取県）にて現場実証を行った。

本稿では、橋梁の 3 次元モデル作成として、部材毎の 3 次元化と座標付与の方法について具体的に紹介する。さらに、橋梁 3D 点検用プロトタイプシステムを用いた損傷確認の実施例やオルソモザイク画像の活用例を示す。

キーワード：橋梁、インフラ点検、点検ロボット、UAV、SfM、3 次元モデル

1. はじめに

日本国内には、72 万橋の道路橋があり、その半数は高度成長期に建設され 40 年以上にわたり供用されている。橋梁点検では、点検技術者の接近が困難な部位への対応として特殊車両の利用や点検作業および報告書作成作業など人・時間・費用を多く必要としている。さらに、少子高齢化等による土木分野の技術者不足もあり、老朽化した橋梁を効率的に維持管理するため、橋梁点検の生産性向上が求められている。

国土交通省では、橋梁定期点検要領¹⁾にて、適切な維持管理に必要な情報を得ることを目的として、5 年に 1 回の定期点検を定めている。橋梁定期点検要領では、「状態の把握は、全ての部材等について近接目視により行うことを基本とする。」「近接目視による」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。」「近接目視によらないときの状態把握の方法や部位の選定の考え方の妥当性については、後日遡って第三者が検証できるように記録に残すことが必要である。」と記されている。“その他の方法”となる点検ロボットなどの点検支援技術について、「新技術利用のガイドライン（案）」「点検支援技術性能カタログ（案）」に示されている。点検実施者は、橋梁の特徴に応じて、機材（UAV（Unmanned Aerial Vehicle）、懸架型、ポール型等）、記録方法（画像、動画、点群データ）、確認方法（オルソモザイク画像（複数写真を結合した画像）、3 次元モデル）を選択できるようになっ

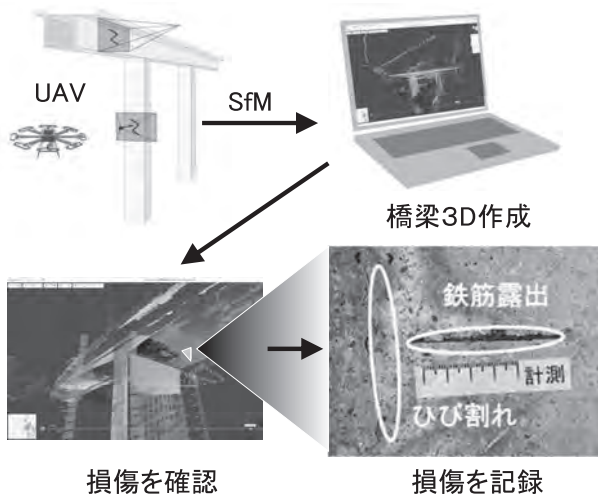
ており、様々な活用が進められている。

大規模な橋梁全体を網羅的に撮影すると撮影枚数が多くなり、写真上の損傷位置の把握に手間と時間を要する（図-1）。そこで、筆者らは、UAV で撮影した写真から 3 次元モデルを作成可能な SfM（Structure from Motion）ソフトウェアで処理すること（以後「SfM 処理」）で、点検写真から撮影位置、撮影方向の自動推定を行い、3 次元モデルから点検写真を選択表示し損傷の確認・記録をする、「橋梁 3 次元データを活用する橋梁点検手法」（以降、「3D 点検手法」）を提案している^{2)~4)}（図-2）。

本稿では、3D 点検手法をハイピア PC 橋である江島大橋の PW2 橋脚付近（鳥取県境港市：高さ 30 m、幅 11.3 m）で実証したので、橋梁の 3 次元モデル作成する方法、プロトタイプシステムやオルソモザイク画像を用いた損傷の確認方法を紹介する。



図-1 大規模橋梁の例：江島大橋



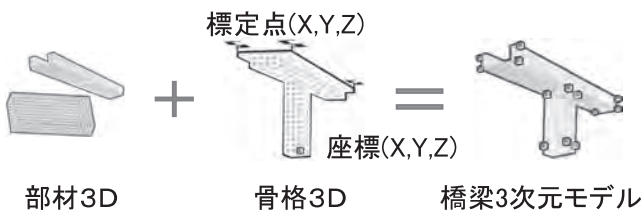
図一2 UAV と SfM を活用した 3D 点検手法

また、本稿は、内閣府「官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM)」の成果の一部である。

2. 橋梁 3 次元モデルの作成方法

(1) 作成手順の概要

本稿では、位置情報を有する橋梁全体 3 次元モデルを効率的に作成する方法として、「部材毎 (橋脚や桁など) の 3 次元モデル」 (以後「部材 3D」) を点検写真から作成し、遠方から撮影した写真及び標定点から位置情報を有する、「橋梁の骨格となる 3 次元モデル」 (以後「骨格 3D」) を組み合わせて作成する (図一3)。

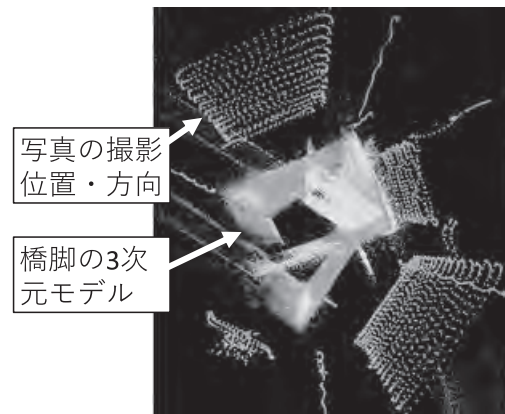


図一3 橋梁 3 次元モデルの作成方法

(2) 橋梁部材 3 次元モデル (部材 3D) の作成

筆者らの提案する 3D 点検手法では、近接目視点検に相当する写真を得るための撮影を「近景撮影」とし、橋梁の側面・下面の各面に対して一定の距離から撮影する。

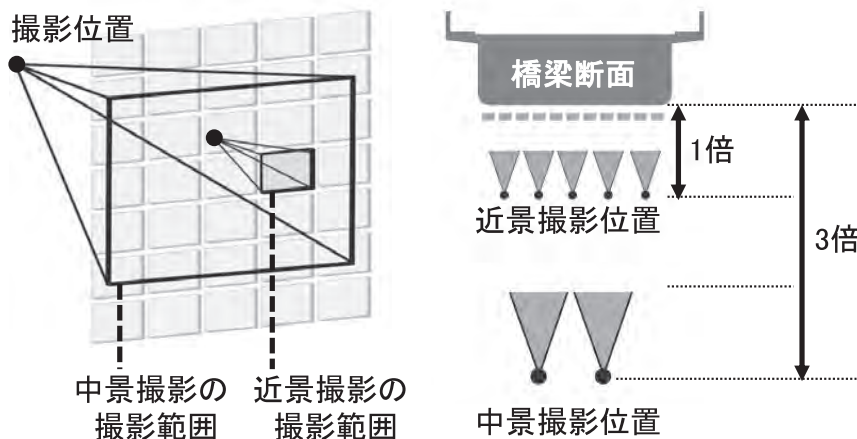
この近景撮影の写真のみで、SfM 処理をした場合、写真間のラップ率の不足や露出変化及び類似部材の誤認識などの影響により、写真の撮影位置や撮影方向の推定等が行えず 3 次元モデルが正しい形状にならない不具合が発生する可能性がある (図一4)。



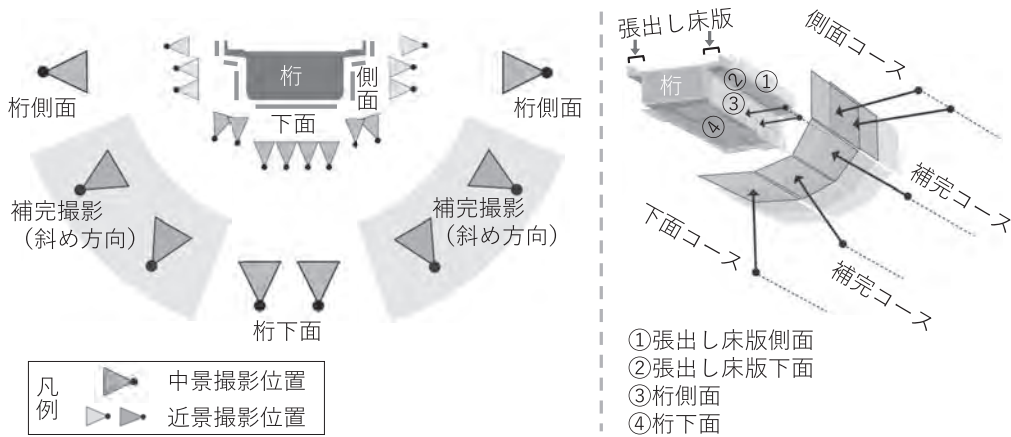
図一4 橋脚 SfM 処理の失敗例

そこで、SfM 処理の不具合解消を目的として、近景撮影よりも広範囲に撮影する「中景撮影」を導入し、撮影距離は、近景撮影の 3 倍とした (図一5)。これは、広い範囲の撮影した写真を加えることで位置推定を行いやすくするものであり、ジグソーパズルを行うときに、完成イラストを見ながらだと迷わなくなることに似ている。

桁側面と桁下面のように撮影方向が異なる面を一度に SfM 処理するには、斜め方向から撮影した写真で補完する必要がある。そこで、桁側面中景撮影コース




図一5 中景撮影のイメージ



図一六 中景撮影の撮影方法

表一 使用機材と撮影諸元

UAV 名称	デンソー社製 産業用可変ピッチ UAV
外観	
寸法	幅:1,500 mm 奥行:1,500 mm 高さ:525 mm
総重量	10.0 kg
カメラ	SONY 製 a 6,400 6,000 × 4,000 pixel
レンズ	単焦点レンズ 35 mm(35 mm換算 55 mm)
近景撮影距離	4.5 m
近景撮影画像	撮影幅 3 m × 高さ 2 m (0.5 mm/pixel)
中景撮影距離	13.5 m
中景撮影画像	撮影幅 9 m × 高さ 6 m (1.5 mm/pixel)
補完コース角度	上向き 30 度程度, 上向き 60 度程度

と、桁下面中景撮影コースの間に2コースを追加した。また、橋脚に対しても同様とした(図一六)。

撮影では、中景撮影のパラメータ値を把握するため、撮影距離や撮影角度を複数パターン計画した。撮影機器は、非 GNSS 環境下において計画通りのプログラム飛行が可能なデンソー製 UAV とした。検証した結果、中景撮影距離および補完コース角度のパラメータ値を得た(表一)。

桁の部材 3D の SfM 処理は、「張出し床版側面」から「桁下面」「反対側の張出し床版側面」までの近景撮影の写真と中景撮影の写真を一度の処理で行った。

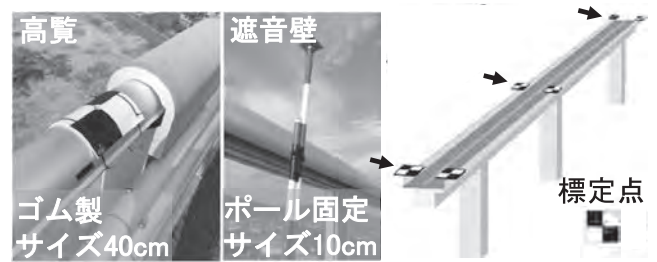
なお、1 回の SfM 処理で処理可能な写真枚数は、PC スペックにより 1,000 ~ 2,000 枚などの上限がある。そのため、読者皆様が実施する場合には、「張出し床版側面」から「桁側面」までで区切るなど工夫して頂きたい。

(3) 橋梁骨格 3 次元モデル (骨格 3D) の作成

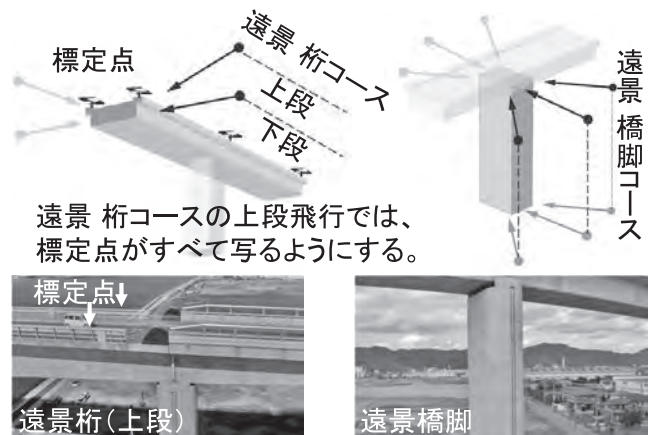
上記の部材 3D は、正しい座標値が設定されていないため、位置や大きさが未確定の状態である。しかし、部材 3D 毎に 4 点以上の標定点測量を現地で行う場合、人手がかかり効率的ではない。そこで、部材 3D へ効率的に座標値を付与するため、骨格 3D 作成方法を考案した。この方法では、少ない標定点から橋梁全体の座標値を算出することができる。

標定点設置場所は、アクセスしやすく GNSS 電波が入りやすい橋梁の路面上(歩道側の手すり等)に設置し、今回の実証では 6 点設置した(図一七)。

標定点を設置後、橋梁全体を遠方から撮影する。こ



図一七 標定点の設置



図一八 遠景撮影のコース図と撮影写真例

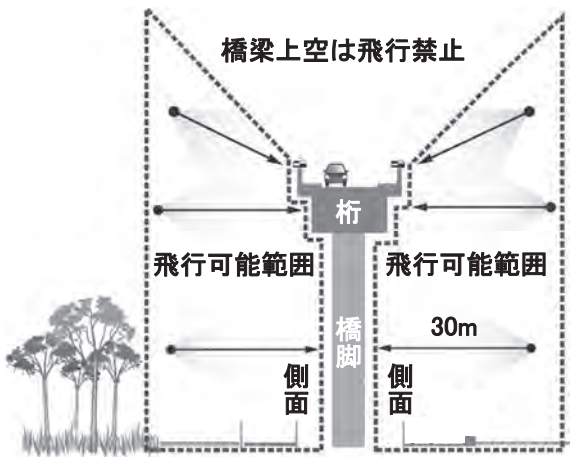


図-9 橋梁周辺の飛行可能範囲の例

の撮影を「遠景撮影」とする(図-8)。撮影コースは、桁に沿って撮影する遠景桁コースと、橋脚を1脚ずつ撮影する遠景橋脚コースがある。遠景桁コースは、上段と下段の2側線の撮影を行い、上段側で撮影した写真には、全ての標定点が写るようにした。遠景撮影の撮影距離は、現地踏査により安全に飛行可能な30m程度(5mm/pixel程度)とした(図-9)。なお、橋梁周辺の飛行可能範囲は、橋梁管理者と協議して決定した。

SfM処理は、上り線側と下り線側で写真の撮影方向が大きく異なるため分けて行った。それぞれの3次元モデルを標定点位置へ移動し統合することで、位置情報を有する骨格3Dが得られた(図-10)。

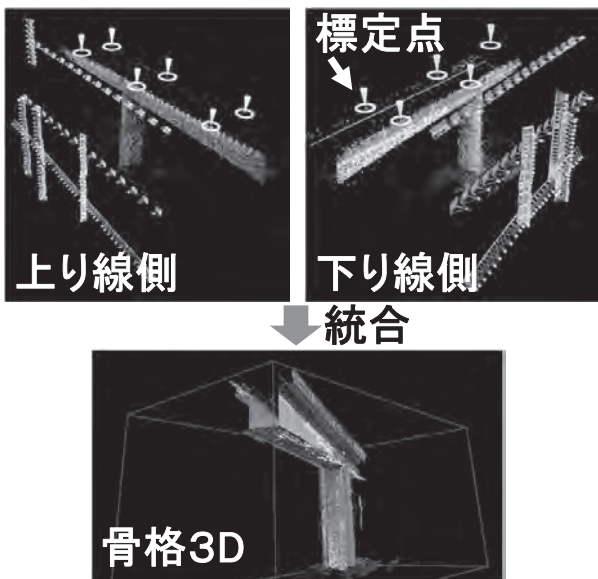


図-10 骨格3Dの作成

(4) 橋梁3次元モデルの作成

骨格3Dから部材3Dへの座標値の付与は、骨格3Dと部材3Dを比較し、形状や色の特徴から同一である

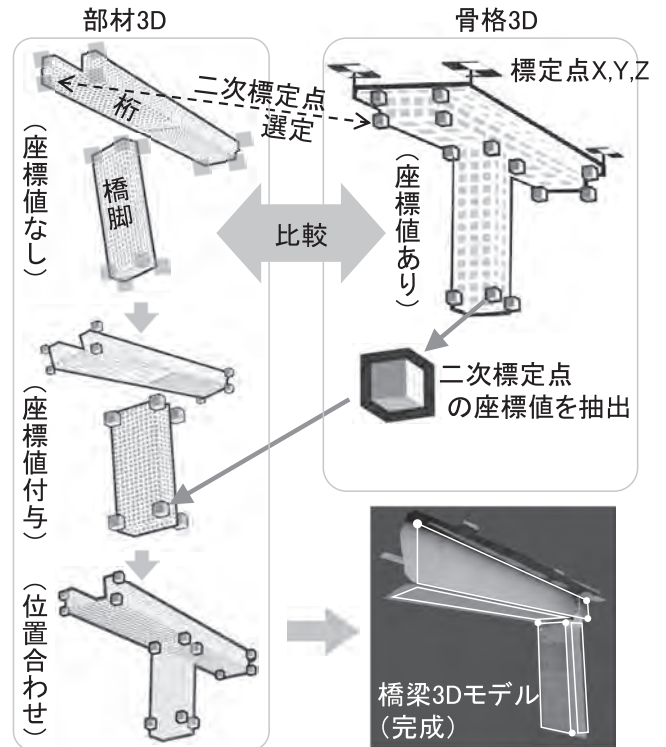


図-11 橋梁3次元モデルの作成

と判断できる箇所を部材3Dの二次標定点として選定した。二次標定点は1つの部材から4点以上を選定する必要がある。次に、骨格3Dから二次標定点の座標値を抽出し、部材3Dへ座標値を付与し、SfMソフトウェアや3次元CAD等で正しい位置へ合わせることで、橋梁3次元モデルが完成した(図-11)。

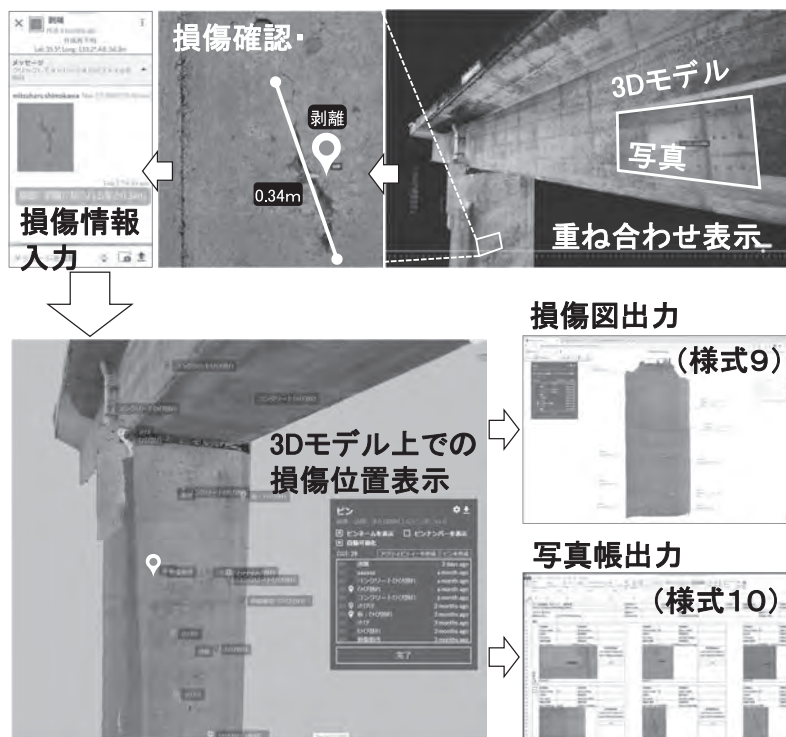
3. 損傷の確認

(1) 3D点検手法用プロトタイプシステム

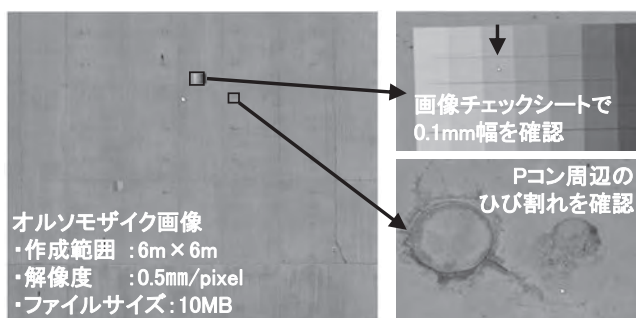
3D点検手法用プロトタイプシステムとして、土木研究所との共同研究にて開発を行っている米国イリノイ大学のReconstructを用いた。Reconstructでは、SfMで作成した3次元モデルと写真を重ね合わせて損傷確認を行い、3次元モデル上のピンへ損傷情報(コメント、画像、計測値)を入力することで、橋梁点検への適用性が高いことを確認した。さらに、損傷図や写真帳へ出力することで、既存の橋梁点検との親和性が高いと考えられる(図-12)。

(2) オルソモザイク画像

SfMソフトウェアのPIX4Dで0.5mm/pixelの解像度を有するオルソモザイク画像を作成した。オルソモザイク画像は、写真上の像を正射投影し、傾きのない、画像の端部でも歪みがない画像に変換したオルソ画像



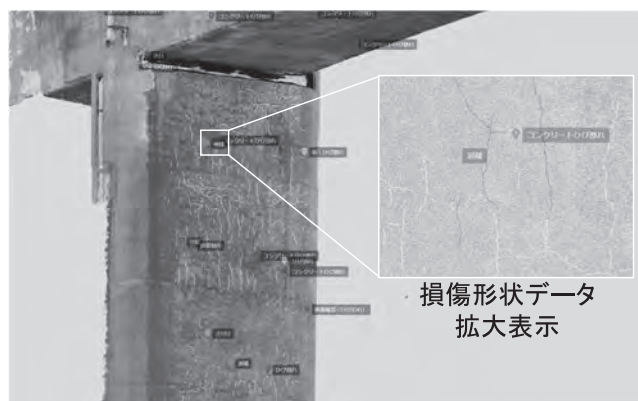
図一 12 Reconstruct の損傷確認方法



図一 13 オルソモザイク画像による損傷確認方法

を、つなぎ目が目立たないよう接合（モザイク）統合した画像である。6 m × 6 m の範囲を接合したオルソモザイク画像の場合には、画面の隅々まで均一の解像度であり、1 枚 1 枚の写真から損傷を確認する場合と比較して容易に損傷を確認でき、面的に広い範囲の点検に有効であることが得られた（図一 13）。

CAD 等で損傷をトレースすることにより、2 次元の損傷形状データが得られる。さらに、入力した損傷形状データは、オルソモザイク画像四隅の 3 次元座標値を参照することで、3 次元空間上の損傷形状データを作ることが可能であり、3 次元モデルと重ね合わせることで把握しやすくなる（図一 14）。



図一 14 3次元モデルへの損傷形状データの表示

4. おわりに

本稿では、「橋梁 3 次元データを活用する橋梁点検手法」(3D 点検手法) について、江島大橋を実証現場とし、橋梁の 3 次元モデル作成方法を紹介した。また、損傷の確認方法として 3D 点検手法用プロトタイプシステムを用いた実施例やオルソモザイク画像の活用例を示した。今回の実証内容は、「橋梁 3 次元モデルの構築（検証事例）」として、土木研究所 HP で公開している。本稿の具体事例を参考として頂き、読者皆様の 3 次元モデルへの敷居が低くなることを期待している。

今後は、鋼橋など複雑度の高い橋梁や、他のインフラ施設についての検証を行っていきたい。

謝 辞

橋梁3次元モデル作成や現場実証にあたっては、SIP インフラ地域実装支援鳥取大学チーム（2016年9月～2019年3月）委員長の黒田保氏（鳥取大学大学院工学研究科）、岡田順三氏（境港管理組合）、若原敏裕氏（株大崎総合研究所）、木本啓介氏（株計測リサーチコンサルタント）および加藤直也氏（株デンソー）の諸氏に多大なるご協力を頂いた。また、ReconstructではMani Golparvar氏（イリノイ大学）、福地良彦氏（オートデスク株）の両氏に多大なるご協力を頂いた。ここに深甚の謝意を表す。



《参考文献》

- 1) 国土交通省, 橋梁定期点検要領, 2019.3.
- 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, 2019.12.
- 3) 二宮建, 榎本真美, 下川光治, 服部達也, 新田恭士: 橋梁3次元データを活用する橋梁点検手法の提案とプロトタイプを用いた効果検証の報告, 第38回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集, pp.37-51, 2020.12.

- 4) 下川光治, 森川博邦, 服部達也, 榎本真美, 二宮建: UAVを活用した橋梁点検の撮影方法に関する考察, 令和2年建設施工と建設機械シンポジウム, pp.161-166, 2019.12.

【筆者紹介】



服部 達也 (はっとり たつや)
元: 国立研究開発法人土木研究所
技術推進本部 先端技術チーム
主任研究員
現: 国土交通省 関東地方整備局
関東技術事務所
建設専門官



下川 光治 (しもかわ みつはる)
元: 国立研究開発法人土木研究所
技術推進本部 先端技術チーム
交流研究員
現: アジア航測(株)
先端技術研究所
主任技師



藤井 優 (ふじい まさる)
鳥取県
県土整備部 技術企画課
参事

