

UAV と高画素カメラを用いた供用中の道路橋 3 次元計測

(株)大林組 正会員 ○近藤 岳史
(株)大林組 正会員 山口 貴志 (株)大林組 正会員 青木 峻二
(株)WorldLink & Company/Skyline Japan 雨谷 周也
京都大学 東南アジア地域研究研究所 渡辺 一生

1. はじめに

近年、全国で供用開始から約 50 年を経過した高速道路橋のコンクリート床版取替工事が頻繁に行われている。同工事の設計には供用中の道路橋の 3 次元出来形形状を施工上許容できる精度（当社実績で絶対位置精度 $\pm 10\text{mm}$ 未満）で取得する必要がある。一般には、同出来形を取得するためには路上を一部規制して 3D レーザースキャナ（以下 LS とする）を用いた計測作業が必要となり、道路利用者への不便と共に規制帯の設置・撤去などの危険作業が伴う。一方路下については、橋脚高が高い場合、地表面から LS で計測しても得られる点群密度が小さくなるため、設計に必要な橋梁の 3 次元形状を精度よく取得できないという課題がある。

そこで路上については交通規制を行わずに、UAV（Unmanned Aerial Vehicle）と高画素（1.5 億画素）カメラを用いた SfM（Structure from Motion）による 3 次元計測（点群生成）を行った。一方路下については、現状上記カメラを搭載して上向きに撮影できる UAV が市場にないため、地表面に三脚を設置して撮影した写真から路上同様に SfM によって 3 次元点群データを生成し、今後の課題解決の可能性を検証した。

上記によって得られた路上および路下の 3 次元点群データ精度を検証した結果、路上については従来の LS と同程度の精度を担保することに成功し、路下についてもいくつかの課題は残るものの、目標精度が担保できる可能性が示唆されたのでその経緯について詳述する。

2. 現場概要

今回対象とした道路橋は長野県茅野市にある中央自動車道の諏訪 IC～諏訪南 IC 間に位置する弓振川橋の上り線部分である（図-1）。橋長 203.5m、幅員 10.15m、上部工形式は 4 径間連続中空床版+鋼単純鈹桁+4 径間連続中空床版の 3 連から構成される。このうち計測対象範囲としたのは鋼単純鈹桁部分で、支間長 38.4m である。今回は後述のとおり路上および路下に分けて計測（写真測量）を行ったが、双方の計測結果を合成するために図-2 に示すとおり標定点（基準点）を 23 箇所（路上用：A1～A9、路下用：B1～B14）に配置し、基準点測量および水準測量により当該箇所の X、Y、Z 座標（世界測地系座標）を取得した。

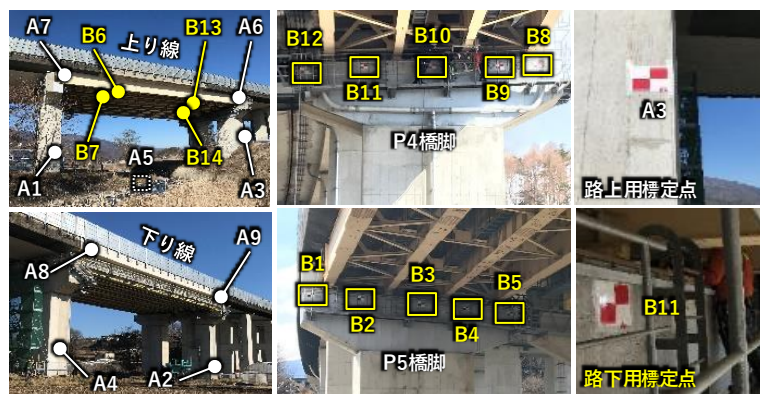


図-2 標定点（基準点）配置状況

キーワード 高画素カメラ，UAV，SfM，道路橋，供用中，3 次元出来形計測

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2 丁目 1 5 番 2 号 株式会社大林組 生産技術本部 TEL 03-5769-1253

3. 路上および路下の計測方法

(1) 路上の計測方法（UAV による上空での写真測量手順）

路上の交通規制を実施せずに3次元計測を行う方法として高画素カメラを搭載した UAV による写真測量を次の手順で行った。

- 地表面にて**表-1**の路上用高画素カメラ（Phase One iXM-RS150F）にレンズ（焦点距離 55mm）をセット。カメラのピント位置は路上および後述する路下からの撮影離隔距離が被写界深度（カメラのピントが合う範囲）に収まるように設定（被写界深度：14m～無限遠）。
- a) の設定を行った**表-1**の機器を UAV にセットし、マニュアル操作にて離陸、上昇。
- 所定の高度に到達後、予め設定しておいた飛行経路に沿って自動飛行しながらタイムラプス撮影（上下・左右のオーバーラップ率:80%）。なお、高速道路直上の飛行を避け、かつ安全な離隔距離を保ちながら、**図-3**に示す通り飛行角度を変えて写真測量を実施。カメラの基本設定は ISO 感度 200, シャッタースピード 1/1000s, 絞り（F 値）f/11。
- 写真測量完了後、マニュアル操作にて UAV を降下、着陸。

表-1 路上用高画素カメラ及び UAV の仕様

機材名	姿 図	仕 様
高画素カメラ Phase One iXM-RS150F (55mm レンズ)		・センササイズ: 53.4 x 40 mm ・画素数: 14,204 x 10,652 px ・IFov: 0.068 mrad ・分解能 1mm/px 時の撮影距離: 14.6m ・シャッタースピード: 1/4,000sec - 60mins ・ISO 感度: 50 - 6,400 ・ダイナミックレンジ: 14.5stop ・色深度: 14bit
UAV DJI M600 Pro		・対角寸法: 1,133 mm ・重量: 9.5 kg (カメラ搭載時約 14kg) ・最大離陸重量: 15.5 kg ・最大風圧抵抗: 8 m/s ・運用限界高度: 2,500 m ・動作周波数: 2.4~2.483 GHz

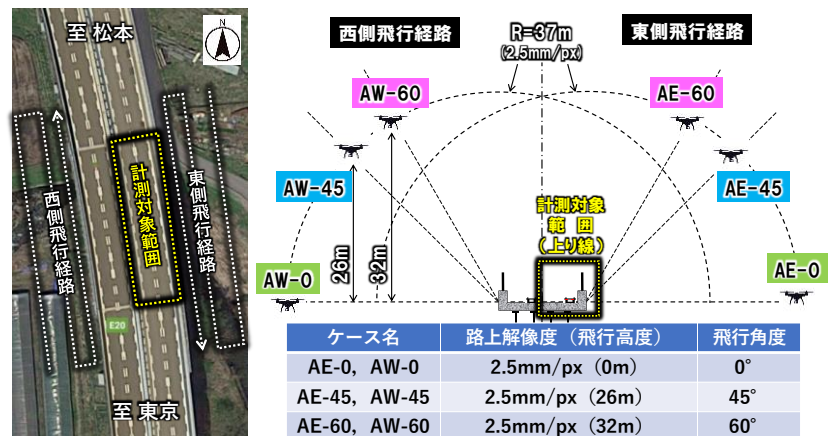


図-3 路上撮影飛行経路及び仕様

高速道路直上の飛行を避け、かつ安全な離隔距離を保ちながら、**図-3**に示す通り飛行角度を変えて写真測量を実施。カメラの基本設定は ISO 感度 200, シャッタースピード 1/1000s, 絞り（F 値）f/11。

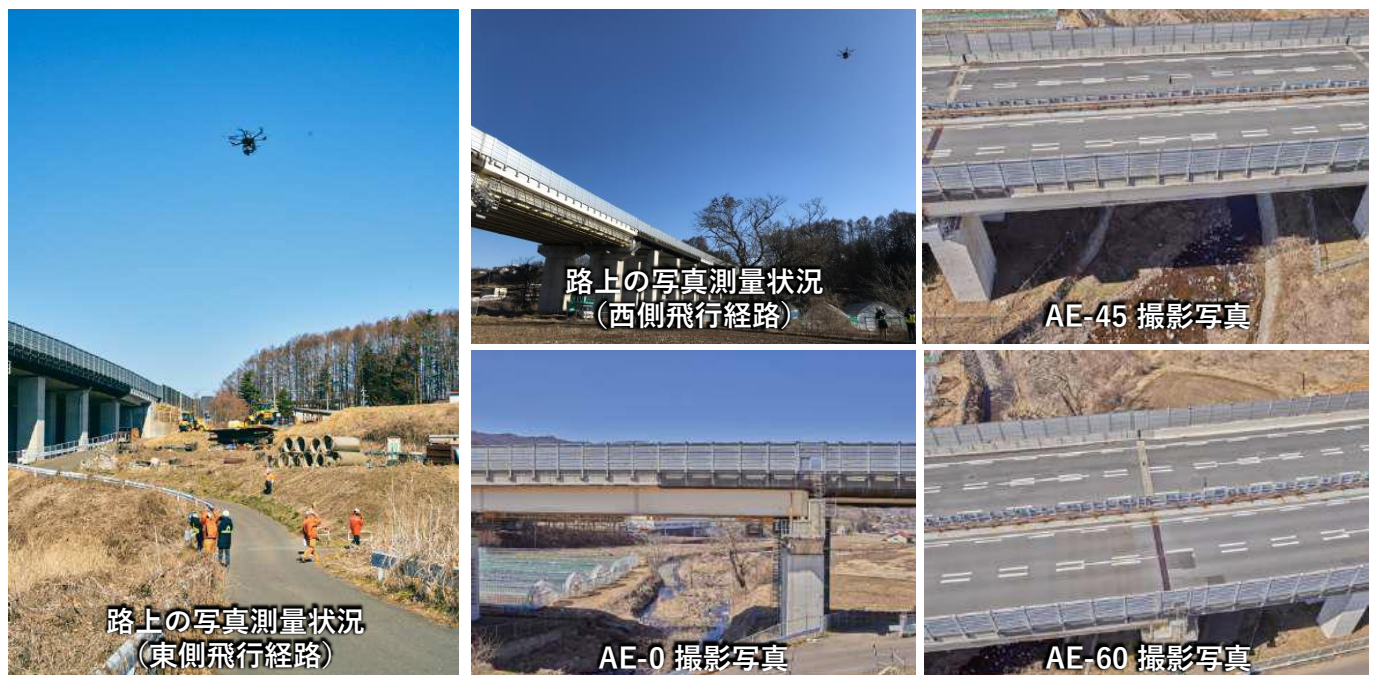


図-4 路上の写真測量状況および撮影写真の一例

上記の手順に従い、**図-3**に示す仕様¹⁾（路上解像度 2.5mm/px，撮影離隔距離 37m）にて東西側 2 つの飛行経路で写真測量を実施した。なお，SfM の精度を高めるためにはできるだけ影のない条件下で撮影することが望ましいため，東側の撮影（**図-3**の AE-0，AE-45，AE-60）を午前中に行い，西側の撮影（同 AW-0，AW-45，AW-60）を午後に実施した。**図-4**に路上の写真測量状況および撮影写真の一例を示す。

(2) 路下の計測方法

(三脚を用いた地表面での写真測量手順)

路下における三脚を用いた地表面からの写真測量を次の手順で行った。

- a) 路上での写真測量時に使用したレンズ（焦点距離 55mm）のピントを固定したまま，

表-2の路下用高画素カメラ（Phase One XF IQ4 150MP（55mm レンズ））にセット。

- b) **図-5**に示す横断方向の撮影位置（GW-45～GE45）にて，**表-2**のカメラを三脚に固定し，オーバーラップ率およびサイドラップ率が共に 80%以上となるように，カメラと三脚を移動させながら手動でシャッターを切って撮影。カメラの基本設定は ISO 感度 200，シャッタースピード 1/800 または 1/400s，絞り（F 値）f/10 または f/8。

一般に，カメラおよびレンズが異なるデータを用いて SfM 処理を同時に行うことは困難で

ある。またレンズ固有の歪みも SfM 処理における重要な要素である。今回は路上と路下では異なるカメラを使用しているが，両カメラのセンサは同一であり，カメラレンズも転用していることから上記の問題を回避できる。**図-6**に路下の写真測量状況および撮影写真の一例を示す。

表-2 路下用高画素カメラの仕様

機材名	姿 図	仕 様
高画素カメラ Phase One XF IQ4 150MP (55mm レンズ)		・センササイズ：53.4 x 40 mm ・画素数：14,204 x 10,652 px ・IFOV：0.068 mrad ・分解能 1mm/px 時の撮影距離：14.6m ・シャッタースピード：1/4,000sec - 60mins ・ISO 感度：50 - 6,400 ・ダイナミックレンジ：14.5stop ・色深度：16bit

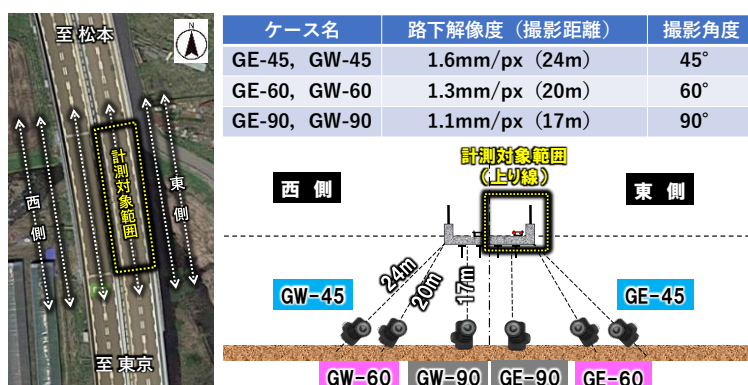


図-5 路下撮影経路及び仕様



図-6 路下の写真測量状況および撮影写真の一例

4. 計測結果

(1) 路上の3次元点群データ

3. (1) で撮影した写真 69 枚に図-2 に示す標定点座標 (A1~A9) を付与して路上の SfM 処理を実施し、3次元点群データを生成した (図-7)。アスファルト舗装およびコンクリートの高欄部分は非常に微細な部分まで鮮明に再現することができた。これは表-1 に示す路上用高画素カメラにより、被写体である高速道路の路上解像度を 2.5mm/px まで精密化しても広範囲の撮影が可能であることから、SfM による特徴点のマッチングが高精度で達成されたためである。他方、図-7 に示すとおり特徴点の少ない主桁側面部については特徴点のマッチングが成立せず点群が生成されない部分が見られた。

(2) 路下の3次元点群データ

3. (2) で撮影した写真 181 枚に図-2 に示す標定点座標 (A1~A9 および B1~B14) および対象物の特徴点 (鋼材の錆や傷) をとらえるためのポイント (MTP : マニュアルタイポイント) を 37 点付与した上で路下の SfM 処理を実施し、3次元点群データを生成した (図-8)。路下は路上と異なり UAV が使用不可のため、GPS 信号を写真に付与できない。したがって正確な撮影位置が不明瞭となり、マッチング成立に多くの MTP が必要となった。また、路下は日が当たらない部分が多く、撮影した RAW データの中には暗い印象

のものがあつたため、RAW データを JPEG データに現像する際に明るさを調整することで対応した。SfM 処理の結果、図-8 に示す通り、全体としてはマッチングに成功したが、路上と同様に主桁部分の SfM がマッチングされず点群が生成されない、死角部分の点群が生成できない、および対傾構や主桁スティフナー部分は生成された点群に多くのノイズが発生するなどの課題も確認された。発生したノイズは3次元点群処理ソフトにより除去したが、ノイズではない点群も一部同時に除去されてしまうため、全体的に点群密度は低くなり、端部も曖昧な仕上がりとなった。

(3) 路上および路下の3次元点群データの精度

4. (1) および 4. (2) で得られた3次元点群データの精度検証を行った。検証の真値として、路上については交通規制を行い、LS (FARO Focus 3D X 330, 点群密度 : 2mm@10m, 測距精度 : 2mm@10 m) を用いて計測した3次元点群データを採用した。また路下についても地表面から上記と同じ LS を用いて計測した3次元点群データを真値とした。本手法はこれまで当社が複数の床版取替工事の実現場で行ってきた実績のある

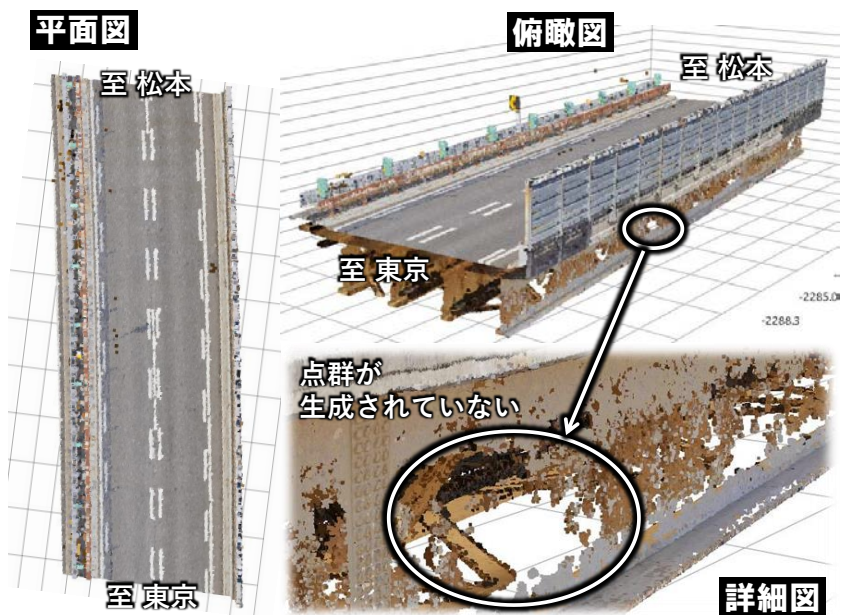


図-7 路上の3次元点群データ

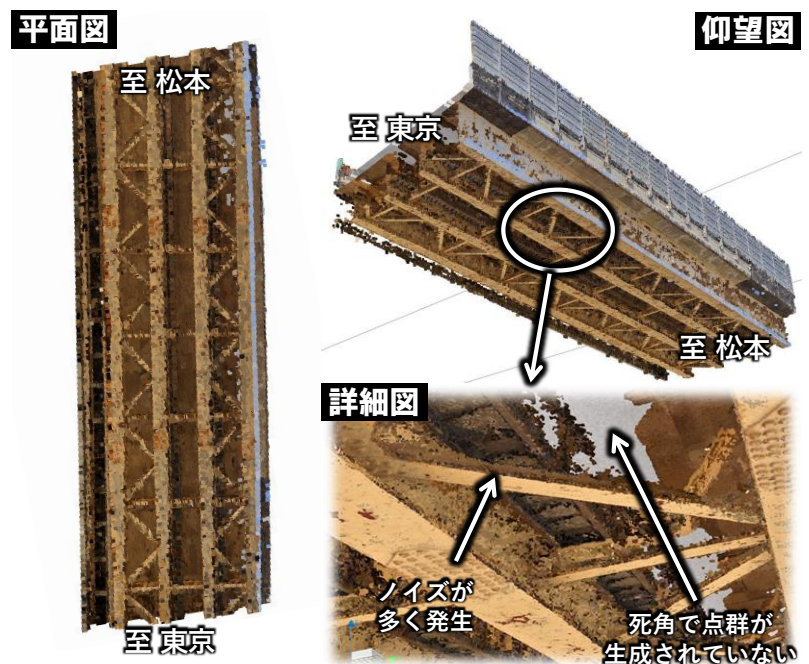


図-8 路下の3次元点群データ

方法である．また目標精度は絶対位置精度 $\pm 10\text{mm}$ 未満としたが，これは図-9に示す床版取替工事の標準的な断面図において主桁フランジ上の調整コンクリートの出来形寸法許容範囲を満足するための上下限值である．図-10に今回比較対象とした計測位置を示す．点群データの精度比較は以下の手順で行った．

- 3次元点群処理ソフトを用いて各点群データから TIN サーフェスを作成．
- 各 TIN サーフェスで同位置 (X, Y 座標) の断面を切り出し，同断面内の複数箇所 (図-10 の A~U, a~j) の Z 座標真値に対する差分を算出 (図-11, 12)．

検証の結果，図-10の縦断面図に示す計測箇所 A~G (床版上) および O~U (下フランジ) では全ての箇所でも目標精度を満足できたが，H~N (床版下) では上記2箇所に対して計測値の標準偏差が大きく，すなわちばらつきがあり，一部目標精度を満足できない箇所が見られた．これは上述の通り，路下は SfM に相性の悪い特徴点の少ない鋼材が多く，かつ入り組んでいることで多くの死角ができたことが原因と考えられる．一方横断面図の計測箇所 a~j ではすべての箇所でも目標精度を満足できたが縦断面図と同様に床版下 (d~f) の計測値はばらつきが大きい傾向が見られた．

5. おわりに

供用中の高速道路において交通規制を行わずに，路上 (床版上) の3次元出来形計測を実施した．高画素カメラを搭載

した UAV にて路上解像度 2.5mm/px で写真測量を行い，標定点座標を付与して SfM 処理により生成した点群で，絶対位置精度 $\pm 10\text{mm}$ 未満を達成した．なお，筆者は UAV 飛行中に高速道路上を実際に乗用車で走行し，図-3の AW-45 および AE-60 ではドライバーの視界に大きな影響がないことを確認した (図-13)．

一方，路下 (床版下および下フランジ) については，路上と同様に高画素カメラを上向きに搭載できる UAV が市場にないため，高画素カメラを地表面に三脚で固定し，撮影した写真から路上と同様に標定点座標および MTP を付与して SfM 処理によって点群を生成した．路下は SfM のマッチングが成立しにくい特徴点の少ない鋼材が多く，それらが入り組んでいるため死角が多くなることが原因で，得られた点群精度は路上に比べて低く，わずかに目標精度を担保できない箇所が見られた．また得られた点群にノイズが多く発生するという課題も明らかとなった．さらに路上と同様に UAV を用いて路下での写真測量を行う上では桁下の非 GPS 空間でも安定した写真測量が可能な機体の調達という課題も残っている．しかしながら得られた点群の絶対精度は最

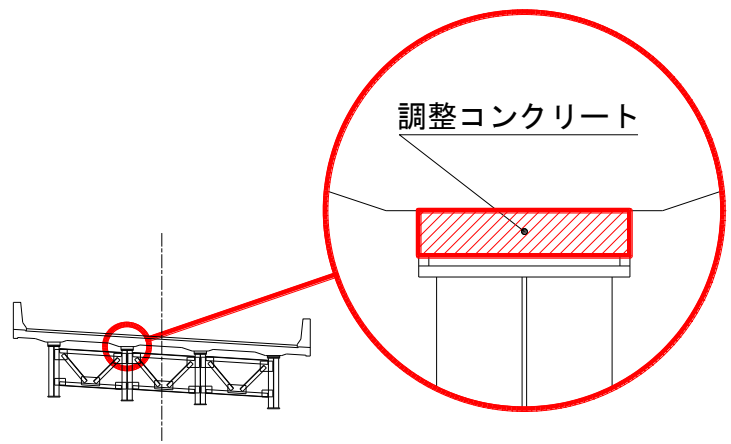


図-9 床版取替工事の標準的な断面図

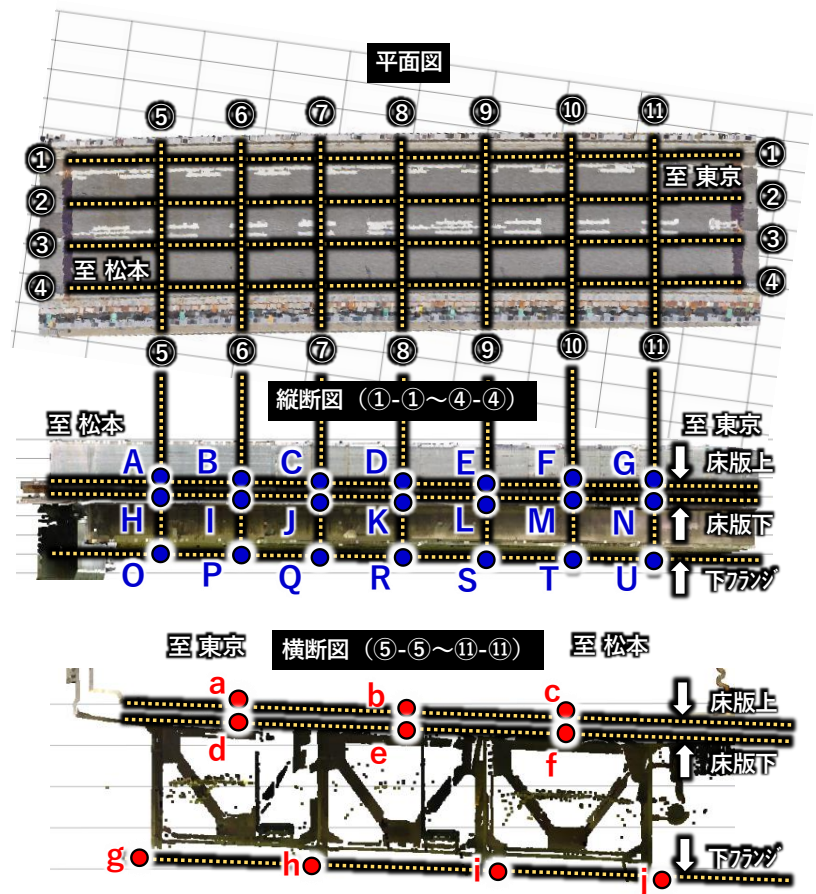


図-10 床版取替工事の標準的な断面図

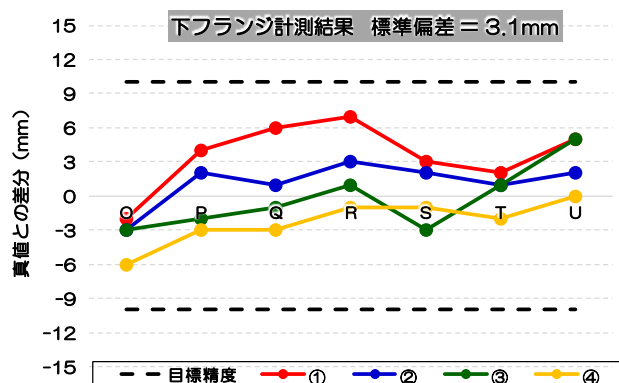
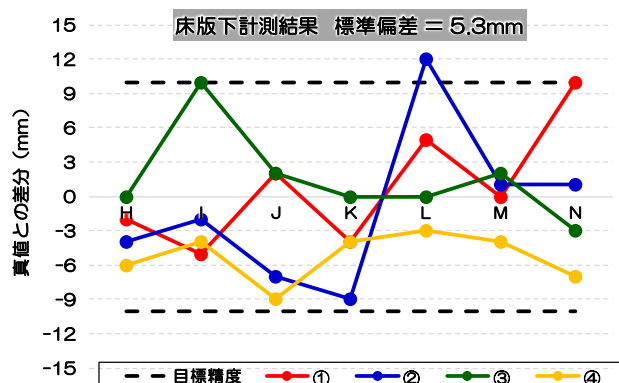
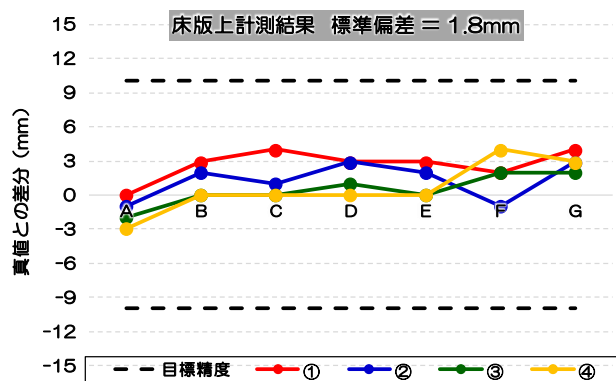


図-11 点群精度検証結果（縦断面図）

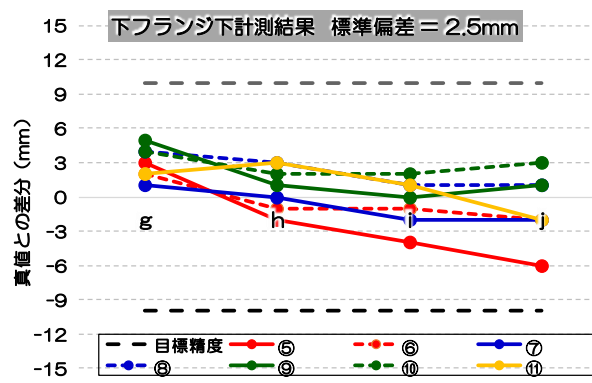
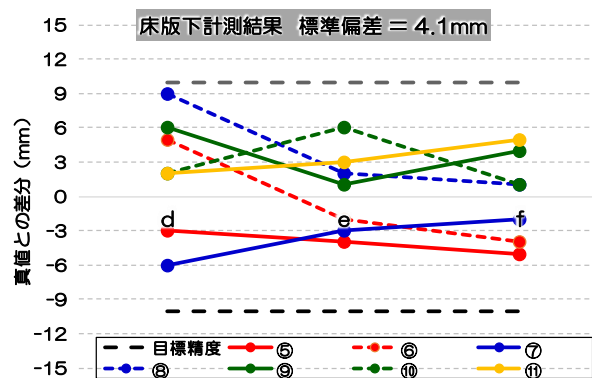
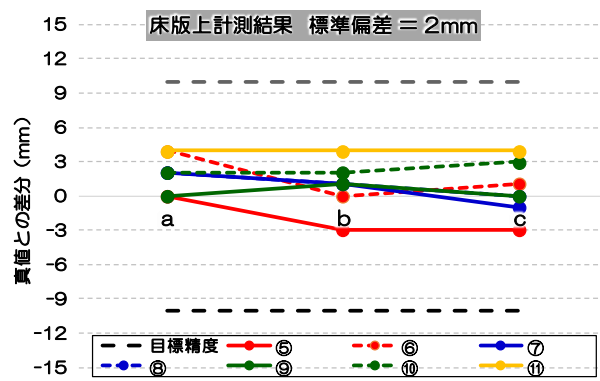


図-12 点群精度検証結果（横断面図）

大でも誤差 12mm であり，死角範囲を極力低減するなど撮影方法の工夫により目標精度である絶対位置精度 $\pm 10\text{mm}$ を担保できる可能性はあると考えている。

今後は上記路下の課題に早急に対応し，全国の床版取替工事の現場で実績を重ね，更なる技術発展と共に社会的ニーズへの貢献を図っていく所存である。

6. 参考文献

- 1) 近藤岳史，山口貴志，日暮一正，UAV と高画素カメラを用いた SfM による既設橋梁の 3 次元計測，令和 2 年度土木学会全国大会 第 75 回年次学術講演会，2020 年
- 2) 近藤岳史，山口貴志，青木峻二，山崎文敬，供用中の高速道路橋における 3 次元出来形計測について，第 29 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，2020 年

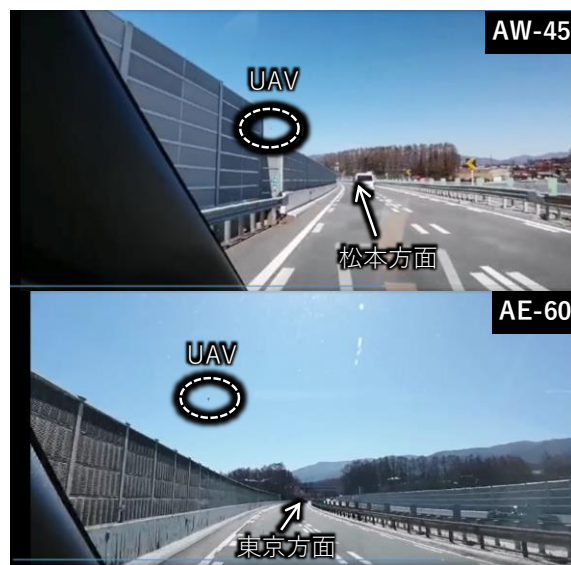


図-13 UAV 飛行時のドライバー視界