

# 40. 橋梁点検画像の3次元管理に関する考察

国立研究開発法人土木研究所 ○ 下川 光治  
国立研究開発法人土木研究所 新田 恭士  
国立研究開発法人土木研究所 二宮 建一  
国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所 田中 洋一

## 1. はじめに

日本国内には、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。今や老朽化した社会インフラ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（以降「定期点検要領」）に基づき、5 年に一回、点検技術者が橋梁の全部材を近接目視することとしている。そして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。

実際の点検では、人の接近が困難な部位で実施する場合、点検に時間がかかることが多い。そのため、点検作業の効率化に対するニーズを受け、対応策として新技術の活用を進めている。

## 2. 本研究の目的

現状の橋梁点検では、人が撮影した損傷写真を平面図上で管理するため、手作業により写真の位置関係を整理している。UAV (Unmanned Aerial Vehicle) 等の新技術で撮影した点検画像は、量も多く、人手で整理するには手間と時間を必要とし効率的ではない。

そこで筆者らは、市場で調達できる SfM (Structure from Motion) ソフトウェアを活用することで、点検画像の撮影位置、撮影方向の自動推定を行い、さらに 3 次元モデル上で、点検画像を管理する手法を提案する。これにより、損傷位置の記録と確認作業を大幅に効率化できると考えている。

また、橋梁の 3 次元モデルは BIM/CIM で作成したモデルも十分活用可能であるが、SfM ソフトウェアより構築した 3 次元モデルでも、画像や損傷の位置関係を示す上では十分に有効である。本稿では、実橋梁を対象として、図-1 に示したように、「検証 1：画像による 3 次元モデルの構築・精度検証」、「検証 2：画像の撮影位置・撮影方向の精度検証」、「検証 3：効率的に 3 次元モデルを構築するための UAV の撮影方法」の検証結果を報告する。

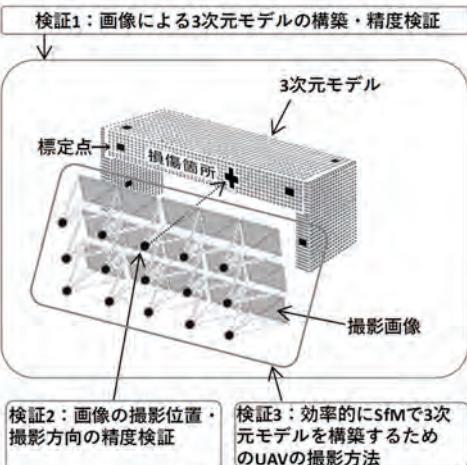


図-1：検証内容の概要図

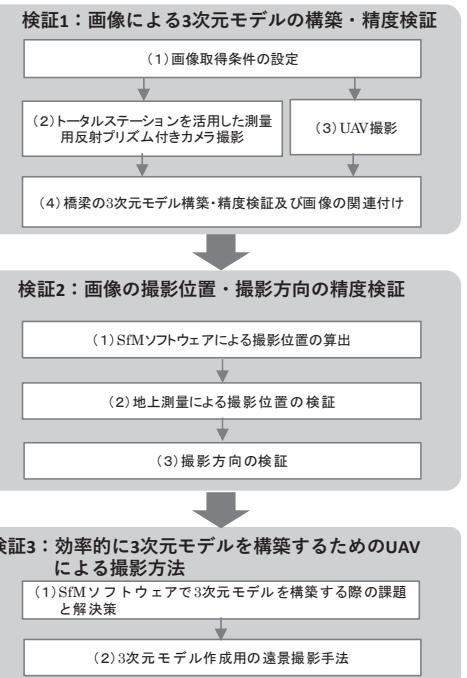


図-2：検討フロー

## 3. 検討フロー

本稿における検討フローを図-2 に示した。

検証 1 では、UAV とデジタルカメラを使用して撮影した画像をもとに、SfM ソフトウェアを用い

て構築した3次元モデルの精度を検証するとともに、画像の管理方法について確認した。

検証2では、損傷箇所を正確に記録するためには、SfMソフトウェアにより自動推定された画像の撮影位置について評価した。また、撮影位置のずれによって発生する撮影方向の変化がもたらす画像への影響について検証し、撮影方向の重要性について整理した。

検証3では、効率的にSfMで3次元モデルを構築するために、標定点の減少を目的としたUAVでの撮影方法について検証した。

#### 4. 検証1: 画像による3次元モデルの構築・精度検証

本章では、UAV等の撮影画像より、SfMソフトウェアにて構築した3次元モデルの精度及び撮影画像の管理について検証した。

##### 4. 1. 画像取得条件の設定

検証対象構造物は、土木研究所構内の橋梁（2径間連続鋼桁橋：橋長=40m、幅員=8m、高さ=7.5m）の橋台、鋼製桁下面、鋼製桁側面で実施した（図-3）。

##### 4. 2. トータルステーションを活用した測量用反射プリズム付きカメラ撮影

撮影位置を現地測量により計測するために測量用反射プリズム付カメラを作成した。

測量用反射プリズム付カメラは、一眼レフカメラの焦点位置直上にトータルステーションの反射プリズムを設置したものであり、設置位置からカメラの焦点位置（以降、撮影位置）を算出可能としたものである（図-4）。

撮影方法は、撮影方向検証用の座標値が定まっている標定点を橋台、鋼製桁下面、鋼製桁側面に各5点設置し、カメラの画像中心が、標定点となるように撮影した（図-5、表-1）。同時に、撮影位置をトータルステーションにより計測することで、正確な撮影位置を把握した。現地測量は、公共測量作業規程に準拠して品質を確保した。

##### 4. 3. UAV撮影

UAVによる撮影距離は、検証対象構造物にUAVが接触せず、安全に飛行するために撮影距離を3mとした。次に画像の撮影間隔は、国土交通省の「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」を参考とし、隣接写真重複率80%、コース重複率60%を行った（図-6）。

##### 4. 4. 橋梁の3次元モデル生成・画像の関連付け

###### （1）SfMソフトウェアによる3次元モデルの構築

UAVで撮影した画像811枚（内訳：橋台228枚、鋼製桁下面331枚、鋼製桁側面252枚）に、



図-3: 検証対象構造物

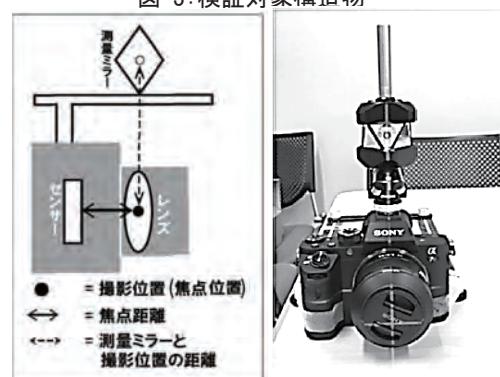


図-4: 測量用反射プリズム付カメラ

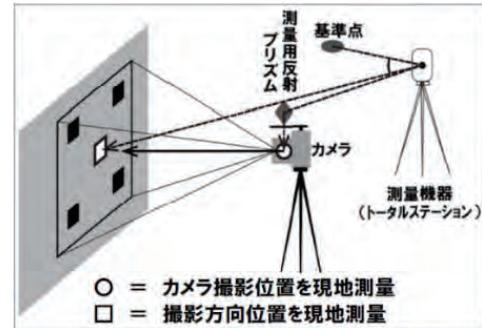


図-5: 測量用反射プリズム付カメラの撮影方法

表-1: 撮影条件

対象橋梁	土木研究所内橋梁 (L=40m、W=8m、H=7.5m)
使用カメラ	SONY α 7 II
撮影距離	3.0m
地上画素寸法	0.40 mm/ピクセル
ひび割れ幅	0.15m以上を確認可能
隣接写真重複率	80%
コース重複率	60%

※隣接写真重複率：最も隣接する写真との重複範囲

※撮影コース：撮影位置を結んだ経路

※コース重複率：撮影コース間で写真が重なる範囲

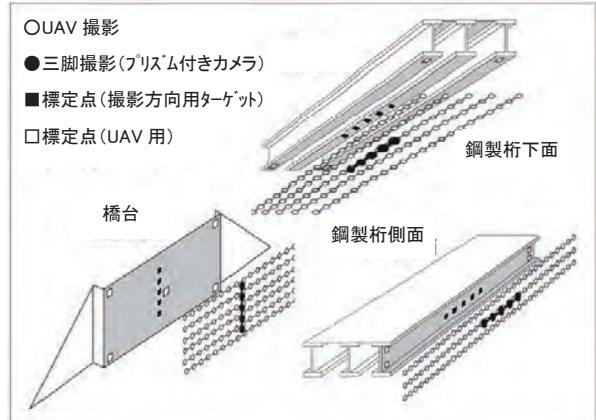


図-6: 検証計画図

測量用反射プリズム付カメラで三脚撮影した画像5枚ずつ15枚を図-6のとおり加えた計826枚を基に、SfMソフトウェアで3次元モデルを構築

した。構築した3次元モデルの精度については、「空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）」に準じた±0.050mとして設定した。

精度検証の結果、橋台、鋼製桁下面、鋼製桁側面の標定点の位置情報について、トータルステーションによる計測値とSfMソフトウェアによる算出値のずれは、すべて±0.050m以内となっており、本研究で想定している3次元モデルの精度基準を満たしていることを確認した。（表-2）

## （2）3次元モデルによる点検画像の管理

SfMソフトウェアにより構築した3次元モデルを基にする点検画像の管理について、図-7、図-8、図-9のとおり検証した。

検証の結果、従来の2次元展開図に損傷箇所を記録する方法から、撮影画像とBIM/CIMモデルを同時に表示する3次元モデルを使用した表示方法にすることで、損傷と鉄筋段落しの位置関係が直感的に把握可能となった。PC橋の場合には、PC鋼線位置の把握も可能となる。

のことから、本管理方法は、点検画像の効率的な管理方法の一つを示すだけでなく、損傷原因の推測にも寄与できると考えられる。

さらに、損傷位置を正確に記録・表示することで、過去と現在の損傷を容易に比較することができ、損傷の進行状況の把握が正確に行える。

## 5. 検証2:画像の撮影位置・撮影方向の精度検証

本章では、損傷箇所を正確に記録するべくSfMソフトウェアにより自動推定された画像の撮影位置を評価するとともに、撮影方向の変化がもたらす画像への影響を検証し、その重要性について整理した。

### 5. 1. SfMソフトウェアによる撮影位置の算出

SfMソフトウェアを用いて、撮影した画像の撮影位置を自動推定した。

### 5. 2. 地上測量による撮影位置の検証

4. 2にてトータルステーションで計測した画像の撮影位置情報を「測量計測値」、5. 1でSfMソフトウェアから得られた撮影位置情報を「SfM算出値」とし、比較した結果を表-3に示す。

表-3より、撮影位置の測量計測値とSfM算出値の差は最大0.034mであり、同等の精度であることを確認した。

よって、SfMソフトウェアにより自動推定した撮影位置は、実橋梁上においてもその精度については、保証できると考えられる。

表-2:3次元モデルのSfMソフトウェアによる基準点残差

	橋台			鋼製桁					
				下面		側面			
	Error X	Error Y	Error Z	Error X	Error Y	Error Z	Error X	Error Y	Error Z
最大値 (絶対値)	0.007m	0.006m	0.009m	0.007m	0.006m	0.006m	0.010m	0.009m	0.010m
標準偏差	0.005m	0.003m	0.000m	0.001m	0.002m	0.003m	0.002m	0.000m	0.001m



図-7:3次元モデルと撮影位置を表示

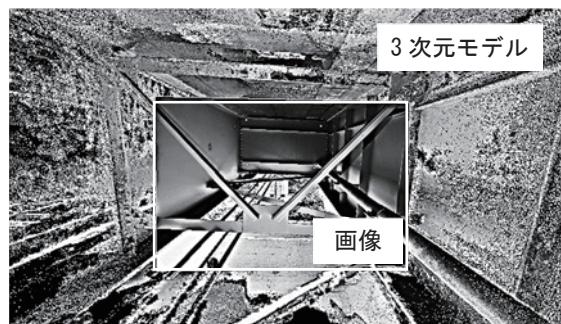


図-8:撮影画像と3次元モデルの重ね合わせ



図-9:写真上に損傷箇所を記録

表-3:撮影位置の測量計測値とSfM算出値の検証結果

検証場所	橋台		鋼製桁下面		鋼製桁側面	
	水平位置	標高	水平位置	標高	水平位置	標高
最大値	0.010m	0.008m	0.005m	0.009m	0.034m	0.003m
標準偏差	0.007m	0.007m	0.004m	0.008m	0.030m	0.002m

\*水平位置と標高の制限値：標準偏差=0.060m、最大値=0.120m

### 5. 3. 撮影方向の検証

#### （1）撮影方向の傾きが及ぼす画像への影響

5. 2より、撮影位置の測量計測値とSfM算出値は、同等の精度であることは確認できたが、完全一致はしておらず、多少の撮影位置のずれが発生していることも事実である。

この撮影位置のずれが及ぼす3次元モデル上の点検画像への影響を確認するために、図-10のような撮影距離、画像中心及び画像幅:L が同一で、撮影方向が傾き： $\theta$  でずれた場合の撮影範囲：PA $\theta$  を算出した。

$$PA\theta = L/\sin(90 - \theta) = L/\cos\theta$$

$\theta$  は、撮影対象表面の垂線からの傾きを意味しているため、 $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$  ( $90^\circ$  以上は、撮影対象表面に接触または死角のため範囲外) とすると、

$$L \leq PA\theta \quad (\theta = 0^\circ \text{ の時 } PA\theta = L = PA)$$

L : 画像幅

$\theta$  : 撮影対象表面に垂直な撮影方向からの傾き

PA : 撮影対象表面に対し、撮影画像の撮影方向が垂直の場合の撮影範囲

PA $\theta$  : 撮影対象表面に対し、撮影画像の撮影方向が  $\theta$  傾いた場合の撮影範囲

つまり、撮影距離及び画像中心を固定した条件下で、撮影方向がずれて撮影した画像は、撮影対象表面を垂直に撮影した画像と比較し、広範囲を撮影しており、画像幅は一定のため圧縮表示される。

上記の算出結果より、この撮影位置の傾き： $\theta$  による撮影対象の圧縮表示の可能性は、ひび割れ幅の過小評価にもつながる要因となる。よって、撮影方向の傾き： $\theta$  の把握は重要な項目となる。

そのため、本研究では、この撮影方向の傾き： $\theta$  についても検証するために、図-11に示す撮影位置から、「現地測量による撮影方向（以降、測量方向ベクトル）」と「SfM ソフトウェアにより算出された撮影方向（以降、SfM 方向ベクトル）」を求めた。

## (2) 測量方向ベクトルの計測

位置情報が既知のターゲットを画像中心として撮影した際のカメラ位置をトータルステーションによって計測した。

## (3) SfM 方向ベクトルの計測

SfM ソフトウェアにて構築した3次元モデルにより撮影位置を求めた。また、画像中心は、①と同様の位置情報が既知のターゲットとした。

## (4) SfM 方向ベクトルの傾きとその影響

表-4に測量方向ベクトルと SfM 方向ベクトルを示すとともに、内積により SfM 方向ベクトルの傾き： $\theta$  を整理した。

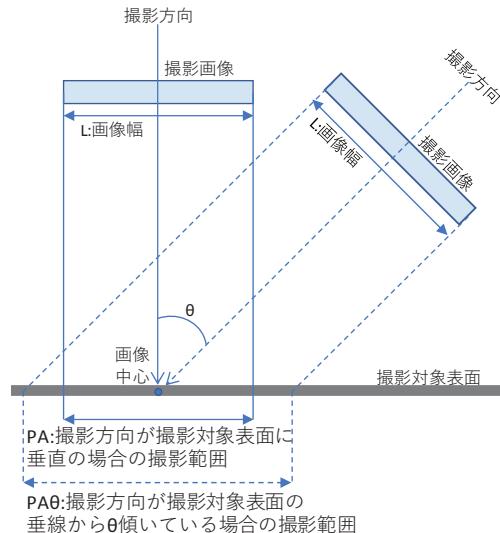


図-10: 撮影方向が傾いた場合の撮影範囲

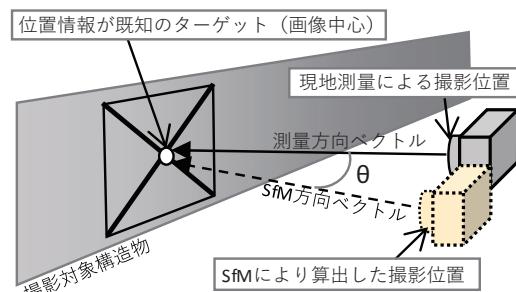


図-11: SfM 方向ベクトルと測量方向ベクトル

表-4: 测量方向ベクトルと SfM 方向ベクトル及び角度

ターゲット No	測量方向ベクトル			SfM 方向ベクトル			角度 : $\theta$ (degree)
	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	-2.590	-1.495	0.007	-2.580	-1.493	-0.001	0.167
2	-2.587	-1.495	0.003	-2.578	-1.491	-0.007	0.186
3	-2.588	-1.495	0.003	-2.575	-1.490	-0.004	0.134
4	-2.591	-1.496	0.001	-2.583	-1.492	-0.003	0.084
5	-2.592	-1.495	0.002	-2.584	-1.491	-0.004	0.108

表-5: SfM 方向ベクトルの傾きによるひび割れ幅の圧縮表示

ターゲット No	画像中心の ひび割れ幅 (mm)	角度 : $\theta$ (degree)	圧縮率 : p	SfM 上の画像中心 のひび割れ幅 (mm)
1	0.2	0.167	0.986	0.197
2	0.2	0.186	0.983	0.197
3	0.2	0.134	0.991	0.198
4	0.2	0.084	0.996	0.199
5	0.2	0.108	0.994	0.199

SfM 方向ベクトルの傾き： $\theta$  より、例として、画像中心に 0.2mm 幅のひび割れがあった場合の圧縮表示について、表-5 に整理した。この 0.2mm 幅のひび割れは、橋梁点検時のひび割れ確認の閾値として用いられる数値である。また、測量方向ベクトルは、撮影対象表面に対して垂直であるとする。

ここで、撮影方向の傾き： $\theta$  による画像中心の圧縮率:p は、以下のように定義した。

$$p = L/(L/\cos\theta)$$

$p$  : 撮影方向の傾きによる画像中心の圧縮率  
 $L$  : 画像幅  
 $\theta$  : 撮影対象表面に垂直な撮影方向からの傾き

今回のケースでは、0.2mm 幅が SfM ソフトウェア上では、ひび割れ確認の閾値以下として圧縮表示されるため、確認対象の損傷から漏れてしまう。

また、計測対象表面に対する垂直撮影は、難易度が高く、レンズも平面ではなく曲面であり、画像中心から離れるときゆがみも生じるため、現在の撮影したひび割れ幅は、実際よりも圧縮表示されていることが推察される。

撮影したひび割れ幅に対して、SfM ソフトウェアより推定した撮影方向の傾きのみならず、実際の撮影方向の傾き及びレンズのゆがみも考慮したひび割れ幅の割戻し係数等を考慮する必要がある。

## 6. 検証 3: 効率的に 3 次元モデルを構築するための UAV の撮影方法

本章では、SfM ソフトウェアで 3 次元モデルを構築する際の課題と解決策となる標定点の減少を目的とした UAV での撮影方法について検証した。

### 6. 1. SfM ソフトウェアで 3 次元モデルを構築する際の課題と解決策

#### (1) 3 次元モデル構築時の課題

4. 4 (1) の方法で、橋梁全体を UAV で撮影した画像より、SfM ソフトウェアを用いて 3 次元モデルを構築した。

この際、1 画像の撮影範囲は、幅 3.2m × 高さ 2.6 m となり、3 次元モデルを構築するための標定点（橋梁側面や各種構成部材に設置）が 40 点必要であった。

標定点の増加は、実運用を想定した場合、「標定点の設置を目的とした橋梁点検車または高所作業車の使用頻度の増加」、「現地測量による座標確定」及び、「SfM ソフトウェア上での各種構成部材の接合」など、作業手間が増えるため効率的な橋梁点検が実施できない状況となる。

#### (2) 3 次元モデルの効率的な作成に向けた提案

SfM ソフトウェアによる 3 次元モデル構築時の標定点数の減少を目的として、遠景撮影（対象物から 8m）の中に近景撮影（対象物から 3m）の一部の画像を合わせて構築した 3 次元モデルと、近景撮影のみで構築した 3 次元モデルを比較しても同等の精度が得られた（図-12）。

遠景撮影による標定点が少ないモデルをコアとしてすることで、近接目視点検画像を使用した 3 次元モデルの作成は、効率化できることが想定される。

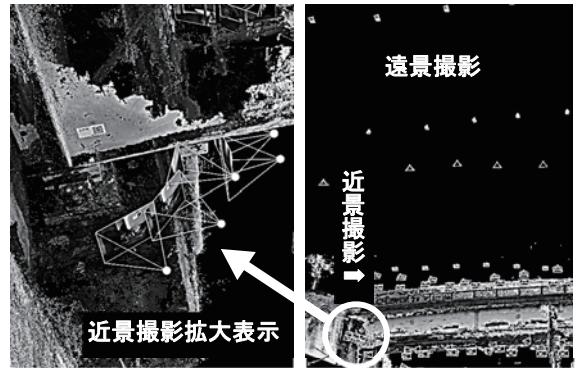


図-12: 遠景及び近景撮影による 3 次元モデル作成検証

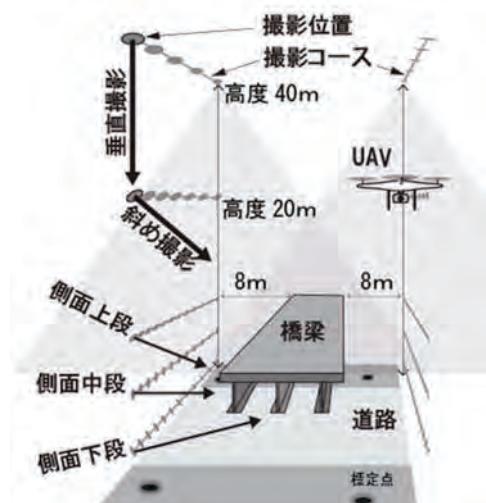


図-13: 遠景撮影計画図

### 6. 2. 3 次元モデル作成用の遠景撮影手法

#### (1) 遠景撮影方法に関する検討

橋梁上空での UAV の飛行は、実運用では困難なため、飛行範囲は橋梁側面より 8m 外側とし、標定点は、設置の効率性を考慮し平面部分に設置した。図-13 に撮影コース（5 コース）を示した。

垂直撮影は、橋梁全体と標定点 4 点（標定点 1 点が 3 枚以上写るよう撮影）を撮影し、位置情報の基準とした。位置精度は「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）」および「空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領」の ±0.1m 以内を準拠とした。

斜め撮影は、垂直撮影と側面撮影を接続するため撮影経路間の中間とした。

側面撮影（上段、中段、下段）は、橋梁形状の把握を目的とした。

また、撮影計画に必要な橋梁範囲および標高は国土地理院地図より入手し、撮影コースの詳細計画は 3 次元 CAD ソフトを用いて作成した。

UAV は、計画した撮影コースを自動飛行可能な DJI Phantom4Pro を用いた。自動飛行ソフトは、DJI GS Pro を用いて、撮影方向はマニュアル調整を行った。SfM ソフトウェアは、Pix4D を使用した。

表-6:遠景撮影のSfM計算結果

標定点名	Error X	Error Y	Error Z
T1	-0.002m	0.007m	-0.004m
T2	-0.001m	-0.002m	0.005m
T3	0.006m	0.005m	-0.004m
T4	-0.003m	-0.01m	0.005m
最大値 (絶対値)	0.006m	0.01m	0.005m
標準偏差	0.004m	0.007m	0.005m

\*水平位置と標高の制限値：標準偏差=0.060m

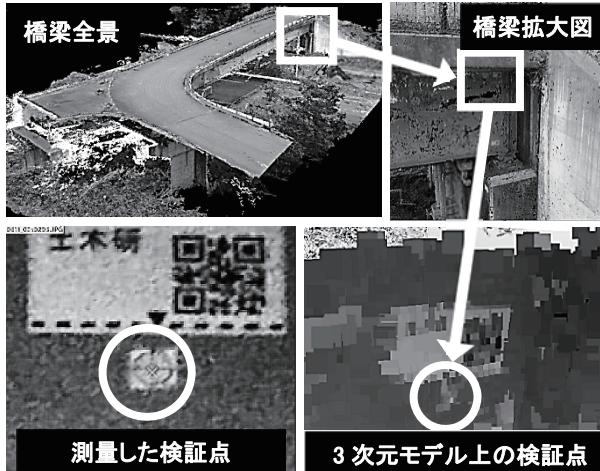


図-14:3次元モデル上の検証点計測

表-7:3次元モデル精度検証結果(検証点38点)

	Error X	Error Y	Error Z
最大値	0.025m	0.031m	0.041m
標準偏差	0.011m	0.009m	0.029m

\*3次元モデルの制限値： $\pm 0.050m$

## (2)遠景撮影を基にしたSfMソフトウェアによる3次元モデルの作成検証

遠景撮影の画像を基にSfMソフトウェアにより構築した3次元モデルの標定点を検証した結果、本研究で想定している3次元モデルの精度基準を満たしていることを確認した。(表-6)。

構築した3次元モデルがどの部分においても同様の精度が保たれていることを検証するために、標定点以外の検証点38点(上面、側面、橋脚、橋台各5点以上)を設定・測量し、3次元モデル上で検証点位置と比較した(図-14、表-7)。

3次元モデルの精度目標は、「空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案)」に準じた $\pm 0.050m$ として設定した。

表-7より、各検証点の位置ずれは、最大でX方向:0.025m、Y方向:0.031m、Z方向:0.041mであり、目標とする3次元モデルの精度を満たしていることが確認できた。

よって、遠景撮影を取り入れることで、SfMソフトウェアを用いた3次元モデルの作成に必要な

標定点数を減少させつつ、構築精度は確保できることを示せた。

また、今回対象とした鉄桁橋(2径間)の3次元モデル作成時間は、撮影計画、実飛行及び3次元モデル構築を含めて概ね1日であった。

## 7.まとめ

本稿では、①3次元モデル上での画像管理方法の実現性と実用性、②SfMソフトウェアを活用した画像位置の自動位置推定の精度確認及び撮影方向把握に関する提言、③効率的にSfMソフトウェアで3次元モデルを構築するためのUAVによる遠景撮影方法について報告し、UAV等によるロボット点検を実用化するにあたって、初めて3次元モデル上での精度検証を行い、今後の納品に向けて、その有効性を明らかにした。

本研究結果より、筆者らが提案する「UAV等のロボットで撮影した大量の点検画像を、SfMソフトウェアと3次元モデルの活用による撮影位置の推定及び画像管理の自動化」は、近い将来での実現性及び橋梁管理者と点検技術者に対する実用性が高いと推察する。

今後は、以下の3点について検討予定である。

- ① 本手法が橋梁定期点検の支援技術となるように、自治体や点検業者を含む各関係機関へのヒアリングも踏まえた必要機能の整理
- ② UAV等のロボットによる橋梁撮影手法の標準化を目指した遠景撮影手法の確立
- ③ ①,②を基礎とした橋梁定期点検結果の管理用プロトタイプシステムを構築し、実橋梁点検での試験導入

## 謝辞

本検証を実施するにあたり、株式会社イクシスより画像提供、アジア航測株式会社よりカメラ位置・撮影位置の現地測量作業の対応の助力、国土交通省国土技術政策総合研究所より種々のご意見を得た。付記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 社団法人 日本測量学会 : 解析写真測量, 52巻・2号, pp.75~83, 2013
- 2) 織田和夫:講座:バンドル法 第八回コンピュータビジョンとバンドル法,写真測量とリモートセンシング, 52巻・2号, pp.75~83, 2013
- 3) 国土交通省:作業規定の準則, 国土交通省告示 第565号, pp.12~38, 平成28年3月31日
- 4) 国土交通省: UAVを用いた公共測量マニュアル(案), pp.25~26, 平成28年3月30日
- 5) 国土交通省: 空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案), pp.10~64, 平成30年3月