

# UAV-SfM技術による急崖岩盤斜面に適した 三次元地形モデル構築手法の検討

日外 勝仁<sup>1\*</sup>・山崎 秀策<sup>1</sup>・倉橋 稔幸<sup>1</sup>

<sup>1</sup>土木研究所 寒地土木研究所 防災地質チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)  
\*E-mail: agui-k@ceri.go.jp

本研究は、開口亀裂分布を含む岩盤斜面の3次元形状を把握することで、崩壊危険岩体の位置・形状や崩壊メカニズムのより正確な推定を可能にすることを最終的な目標としている。その最初の取り組みとして、UAV撮影写真からSfM技術を用いて三次元地形モデルを構築するにあたり、急崖岩盤斜面に適した方法について、地形再現性に影響を与えそうな諸条件(分解能、写真枚数、点群密度、レンズの射角、撮影角度、標定点配置など)の基で現地検証を行った。その結果、オーバーハングが有り金網で覆われた急崖岩盤斜面の形状を正確にモデル化するためには、撮影画像の分解能が10mm以下の細かさで、オーバーハング下端部などで死角が生じないように高ラップ率で、広角側での、撮影が必要なが明らかとなった。

**Key Words :** uav, structure from motion, 3D terrain model, steep rock slope, rockfall protection net

## 1. はじめに

近年の無人航空機(Unmanned Aerial Vehicle, 以下 UAV)の目覚ましい進歩により空中撮影が手軽になり、SfM(Structure from Motion)技術を用いた写真からの三次元地形モデルの構築が迅速かつ簡易に行えるようになってきた。それにより、斜面防災の分野において、斜面災害発生後の崩壊状況の把握にUAVが使われる機会が増えるとともに、斜面点検などの維持管理への適用を想定した高精度化かつ省力化に向けた様々な取り組みが行われているところである。

しかしながら、SfM技術を用いた地形モデルの構築において、遷急線やオーバーハングの地形を呈して金網が施工されることの多い急崖岩盤斜面を対象とした場合は、遷急線上位部やオーバーハング下側部などでの死角の発生や、金網被覆部での地表面形状の不取得などの問題があることがこれまでの研究で指摘されている<sup>1)</sup>。図-1に示すように、金網の縦と横のワイヤーとそれに囲まれた金網部が岩肌から浮いた形でモデル化され、金網の下側の斜面表面の形状が正確に再現できていない。

そこで、微地形把握に向けて、岩盤斜面を被覆する金網の影響を受けにくいUAVによる空中撮影方法を検討するため、距離や方向などの撮影条件を様々な写真から地形モデルを構築して比較検証を行った。その結果明らかとなった、金網を伴ったオーバーハングした急

崖岩盤斜面に対してもより正確な地形モデルの構築が可能となる様なUAV撮影方法等について紹介する。

## 2. 検証方法

出尾根の先端が浸食・切土されて急崖となり、全面に金網が施工されている比高約100mで露岩した図-2に示す岩盤斜面を検証対象とした。SfM技術を用いた写真からの三次元地形モデルの構築にあたっては、Agisoft Photoscan Ver.14.1を用いた。また、解析に使用したパソコンの仕様は、OSがWindows 10 Pro(64bit)、プロセッサがXeon E5-2680(8コア割り当て)、物理メモリが64GB、グラフィックがNVIDIA GRID K2 GPUである。

### (1) 金網の影響を受けないための撮影画質比較

金網の下のオーバーハング形状などを正確に捉えた地形モデルを構築可能とする撮影方法を探るため、撮影機材や撮影距離を変えて写真画質を上げることと水平/鉛

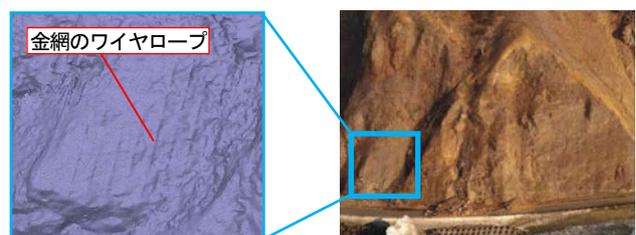


図-1 岩盤斜面金網部の地形モデル化例<sup>1)</sup>

直方向の撮影角度を工夫することの2つに注目した。

一般的にデジタルカメラで撮影した写真の画質を左右する要素としては、カメラの性能といったハード的なものと、撮影時のカメラの設定や撮影距離といったソフト的なものの2種類がある。まず、カメラのハード性能に関しては、一眼レフカメラのような大きなカメラには、イメージセンサやレンズ口径が大きく、明るい質の良いレンズが使われていることが多い。このため、コンパクトなカメラに比べて、イメージセンサでの受光量も多くなり、画質も良くなると考えられる。一方、カメラのソフト設定に関しては、図-3に解説するように、イメージセンサ1画素分の撮影範囲の大きさ、すなわち、分解能は、撮影仕様と撮影距離によって定まる指標である。そのため、高解像度で撮影するほど高分解能の画像となる。

そこで、最大解像度は同程度(約2000万画素)ながらもセンササイズとレンズの明るさが異なる機材として、内蔵式小型カメラを搭載したPhantom4Pro、交換式中型カメラを搭載したInspire2、後載式一眼レフカメラを搭載したS-1000の3機種を選定し(図-4)、光量(レンズ口径)の違いによる金網の地形モデル化状況を比較した。次に、分解能については、カメラ側の解像度設定をほぼ同じ2000万画素と固定した上で、撮影距離を100m、75m、50m、30m、20mと順次近づけていき、分解能の違いによる金網の地形モデル化状況を比較した。対象金網の仕様は図-2に附記したとおりである。現地の日照状況等により前後するが、その他の撮影条件の目安を以下に示す。ISO:100, シャッター速度:1/400, 絞り:可変(シャッター速度優先), 航行速度:10km/hr, カメラ方向:機種正対/水平, 画像ファイル形式:JPEG低圧縮。

(2) オーバーハングを捉えるための撮影角度比較

次に、金網の下のオーバーハング形状のモデル再現性に関して検討を行った。比較項目としては、前節で比較

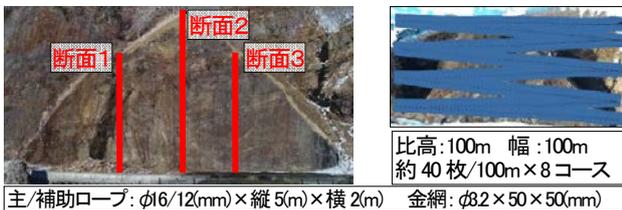


図-2 検証対象の金網施工斜面と UAV 撮影軌跡図

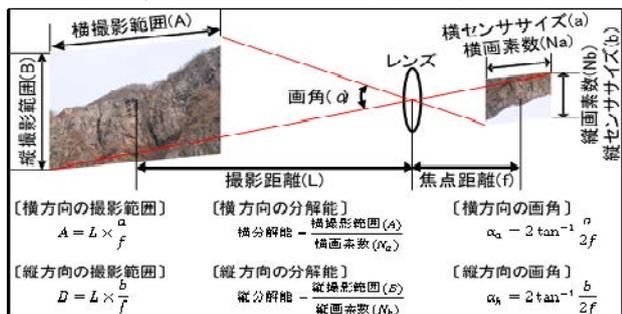


図-3 デジタルカメラの仕様及び撮影条件と撮影画像の関係<sup>2)</sup>

した撮影距離の他に、水平/鉛直の撮影角度に着目し、図-5に示す組み合わせ条件の下、Phantom4Proで撮影した写真から構築した地形モデルの縦断面を切出し、金網施工箇所のオーバーハング形状の再現性を比較した。ただし、水平方撮影角度は、左右30°と正対の3ケースを比較した。また、鉛直撮影角度は、大半のUAVが鉛直下方からほぼ水平方向までしか撮影できないため、伏角が0°、15°、30°、45°、60°の5ケースとした。

以上の比較について、3機種のUAVで撮影距離と撮影方向を違えた81通りの組み合わせを検証した(表-1)。

(3) 撮影角度における比較

3章(2)節で後述する水平撮影角度を違えた地形モデルの比較結果において、撮影角度によっては微地形の再現精度バラツキがでることが確認された。そこで、極端に地形再現性の悪くなる場合を回避する方法として、1方向のみの撮影ではなく、異なる複数の方向の撮影を混ぜた写真から地形モデルを構築し、地形再現性の低下を防げないか追加検証を行った。また、撮影方向の数によって結果として解析に供する写真総数が増えることで、地形モデルの精度に影響する可能性を考慮し、総写真枚数を間引いて揃えたケースについても比較を行った。



図-4 比較検証に用いた UAV と搭載カメラの仕様<sup>1)</sup>

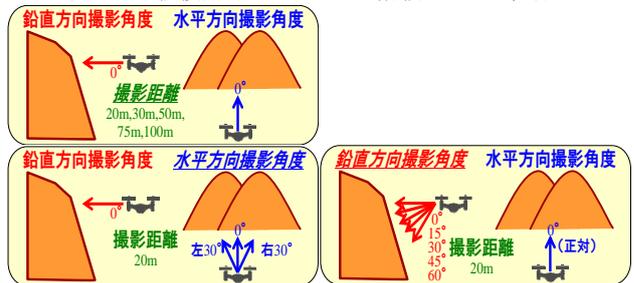


図-5 デジタルカメラの仕様及び撮影条件と撮影画像の関係

表-1 金網施工斜面に対する撮影条件<sup>1)</sup>

撮影方向	撮影距離				
	20m	30m	50m	75m	100m
機首正対/水平	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/-	P/I/S
機首左30度/水平	P/I/-	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/S
機首右30度/水平	P/I/-	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/S
機首正対/伏角15度	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/S	P/I/S
機首正対/伏角30度	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/S	P/I/S
機首正対/伏角45度	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/S	-/-/S
機首正対/伏角60度	P/I/-	P/I/-	P/I/S	-/-/S	-/-/S

P: Phantom4Pro、I: Inspire2、S: S-1000、-: 未実施

#### (4) 撮影枚数とラップ率における比較

急崖岩盤斜面は、顕著な遷急線やオーバーハングだけではなく、深い谷や岩塔状を呈することもあり、死角なく写真に収めるためには、水平方向や垂直方向など多様な角度からの撮影が必須となる上に、高解像度の撮影を行うと1回の撮影範囲が狭まるため、写真枚数の益々の増加が想定される。本論文に示す一連の解析における、撮影枚数と解析時間の関係を図-6に示す。

SiM手法では、複数の写真の中から同じ箇所（特徴点）が写った写真を見つけ出し、撮影座標と各特徴点の座標の位置関係を解くことで、点群の座標を算出している。そのため、写真の枚数が増えるにつれ、同一特徴点を見つけるために比較する画像の組み合わせ数も増加するため、画像認識処理に要する時間の増加割合も大きくなったと思われる。また、写真枚数が増えすぎると、時間が掛かりすぎるばかりではなく、パソコンのCPU性能や搭載メモリ量によっては、エラーとなる場合もある。

そこで、図-2に示すUAV撮影軌跡を基本として写真の間引きを行い、その時の撮影枚数とラップ率（1点捕捉写真枚数）の関係に留意しつつ、撮影枚数における構築地形モデルの断面形状の差異を検証した。

#### (5) 異なる焦点距離における比較

図-3に解説したように、撮影範囲はセンササイズと撮影距離・焦点距離により定まるため、焦点距離が異なっても、撮影距離を調整することで、分解能（撮影範囲／画素数）が等しい撮影が可能となる（図-7）。そこで、表-2に示す焦点距離の異なるレンズを用いて、同じ分解能となる様に撮影を行い、焦点距離（画角）による構築される地形モデルの差異を比較検証した。

#### (6) その他の撮影に関する比較

一般に撮影時のシャッター速度を速くすると、ブレに

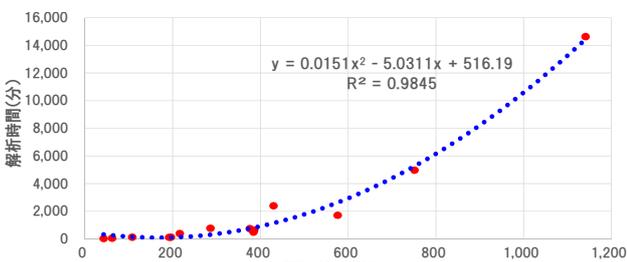


図-6 写真枚数と地形モデル解析時間の関係例<sup>2)</sup>



図-7 焦点距離（画角）による撮影距離の違い

表-2 焦点距離を変えた撮影条件と点群密度<sup>2)</sup>

カメラ	焦点距離	撮影方向（仰角）	シャッター速度	ISO	写真点数	点群密度（点/m <sup>2</sup> ）
X5S	15mm	水平	1/400	100	403	5,369
	45mm				371	5,829

よる影響が小さくなる一方で、画像は暗くなるというデメリットもある。そこで、シャッター速度の違いによる地形モデルへの影響を検討する目的で、表-3の条件で比較検証を行った。また、UAVを停止させずに航行させながら撮影した場合に、その航行速度による地形モデルへの影響を検討する目的で、表-4の条件で比較検証を行った。UAV撮影時には、非圧縮のRAWファイルや不可逆圧縮のJPEGファイルなど、保存形式を選択できるカメラもある。非圧縮のファイルだと画質の低下はないもののファイルサイズが大きく、記録に時間がかかり、短時間間隔の連続撮影に向かないというデメリットもある。そこで、画像圧縮率の違いによる地形モデルへの影響を検討するため、図-8の条件を比較検証した。

### 3. 実験結果

#### (1) 撮影画質による金網の地形モデル状況の違い

機材と距離を変えた条件で撮影した画像から構築した地形モデルの俯瞰正面図を図-9に示す。UAVの機種毎に撮影距離の順に並べ、各図の左肩に解析に供した画像の分解能を付記した。いずれの機種においても、撮影位置が斜面に近づくにつれ、地形モデルにおける金網の見え方は少なくなっている。地形モデル上で金網がほぼ現れなくなる境は、撮影画像の画質に係わるレンズの明るさやセンササイズといった使用機材の違いによらず、撮影距離・焦点距離・1画素のサイズの3要素から計算される「分解能」によって定まり、その値は約10mmであると確認された。この10mmという分解能は、φ3.2mmの金網は捕捉できず、φ12mmやφ16mmのワイヤロープは捕捉はできるものの複数写真において同一の特徴点としては抽出生成しづらく、金網&ロープがモデル化され難いと推察される。このことから、金網が施工された岩盤斜面の地形モデルを構築するためには、UAVに搭載さ

表-3 シャッター速度を変えた撮影条件と点群密度

カメラ	焦点距離	撮影方法	シャッター速度	ISO	F値	写真点数	点群密度（点/m <sup>2</sup> ）
X5S	15mm	水平方向に航行速度4km/hで停止させずに撮影	1/200	100	自動	57	5,637
			1/500			66	7,975
			1/1000			64	7,572
			1/2000			66	5,702

表-4 航行速度を変えた撮影条件と点群密度

カメラ	焦点距離	撮影方法	航行速度	シャッター速度	ISO	写真点数	点群密度（点/m <sup>2</sup> ）
X5S	15mm	水平方向に航行させて機体を停止させずに撮影	5km/h	1/320	100	38	450
			10km/h			18	466
			20km/h			9	425

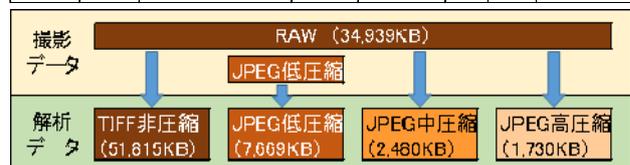


図-8 撮影時と解析時の画像ファイル形式

れたカメラの仕様や撮影設定に応じて、分解能が10mm程度  
の細かさとなる撮影距離を前もって算出した上で UAVの飛行  
撮影計画を立てる必要があるといえる。

(2) 撮影条件による地形モデル縦断面形状の違い

撮影距離や撮影方向による、オーバーハング部の地形再  
現性の差異を検証した。地形再現性においては、使用機材の  
差はあまり影響しないことから、比較した3機種の中で最も  
安価で普及している Phantom4Pro を取り上げ、撮影距離、  
水平方向の撮影角度、鉛直方向の撮影角度など、異なる  
撮影条件下で構築した地形モデルのオーバーハング部の  
縦断面形状を比較した (図-10)。

斜面と正対した水平撮影で撮影距離のみを変えた比較  
においては、撮影距離が50mを超えると、オーバーハング  
があまり再現されておらず、誤って金網の表面を捉えて  
いる部分も多くなった。

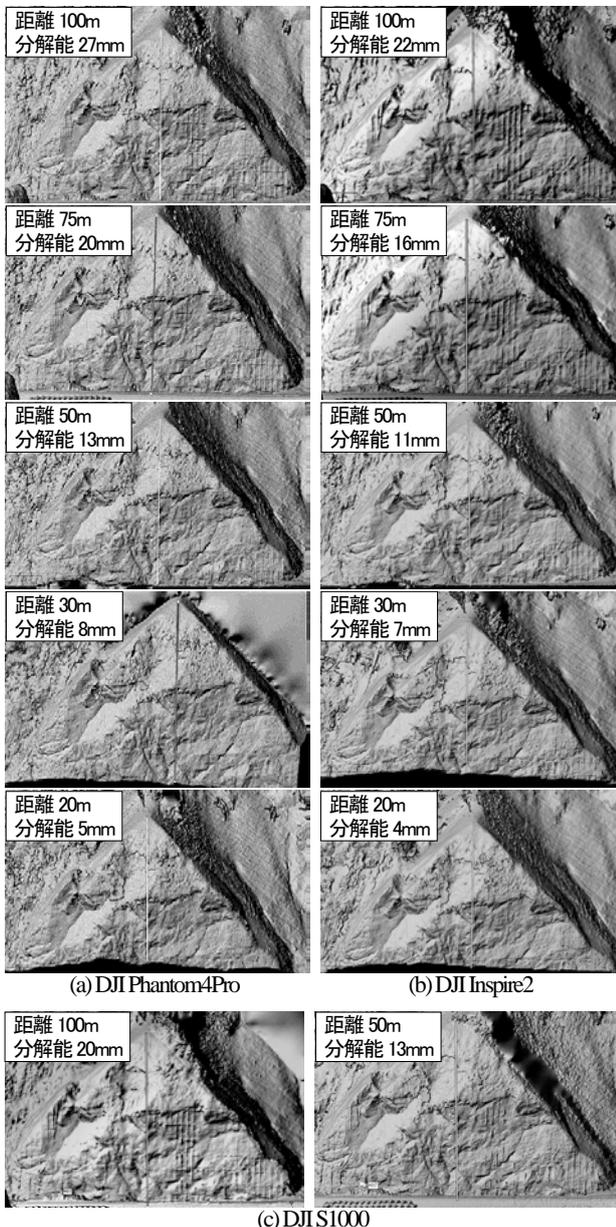


図-9 デジタルカメラの仕様及び撮影条件と撮影画像の関係<sup>1)</sup>

水平撮影角度の比較においては、正対と左30度の2ケ  
ースはほぼ同じ形状で斜面表面が正確に捉えられている  
と思われるのに対し、右30度のケースのみ金網表面を捉  
えて著しく精度が悪くなっている。このことから、実際  
の斜面形状・金網状況と撮影方向の組み合わせによっ  
ては、極端に精度の出ない危険があることが分かり、精  
度確保に向けた撮影角度の検証は、今後の課題といえる。

垂直撮影角度の比較においては、斜面との撮影距離は  
20mで最も接近した、分解能の高いケースにも係わらず、  
伏角が15度を超えると金網が目立つようになり、中には  
オーバーハング地形が全く再現されないケースもあった。

また、オーバーハング部の突出部の下側がモデル化さ  
れない原因は、金網の影響ではなく、撮影の死角になっ  
ていたためと考えられる。窪みが顕著なオーバーハング  
部の下側を捉えるには、凹みの位置より低い高度から、  
水平方向より上向きの角度で撮影範囲に収める必要があ  
る。実際の撮影では、図-3に示したように、撮影できる  
上下の角度幅(縦画角)を持っているため、水平より上  
向きの射線で撮影を行わなくても、画角と撮影高度差に  
よっては、オーバーハング部の下側を撮影することは可  
能である(図-11)。ただし、UAVの鉛直方向撮影角度  
が鉛直下方から水平までの機種が大半であることを考え  
ると、水平方向で撮影したとしても、オーバーハング部  
に対しては、縦画角の内、上半部しか有効でないこと  
になる。撮影高度による撮影範囲のズレ率と写真のラッ  
プ率/撮影枚数、及び、上半部だけを見たときのラッ  
プ率/撮影枚数を図-12に示す。ステレオ化には原理上2枚  
以上の写真が必要であり、撮影不良を想定して3枚以上  
の撮影枚数が必要条件だと仮定すると、上半部ラッ  
プ率は70%弱となるため、オーバーハング形状を正確  
に把握するためには、鉛直方向の全体ラップ率が85%  
以上となる小高度差の撮影が必要であると考えられる。

(3) 撮影角度のバラツキの違いによる地形再現性

正面と左右30度の3方向からの写真を元に、単一及び  
混在方向写真による地形モデル断面形状を図-13に示す。

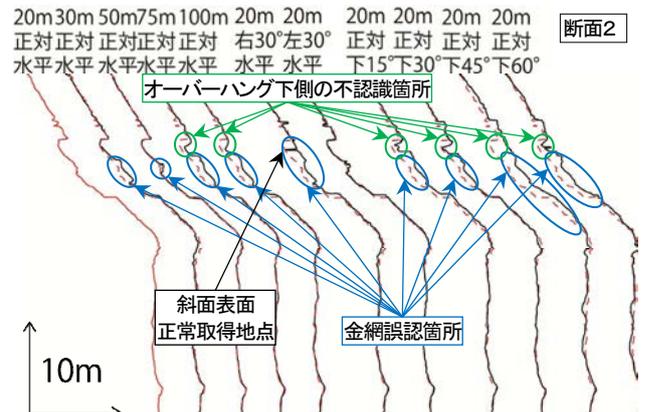


図-10 撮影距離と撮影角度による地形モデルの違い<sup>1)</sup>

単一方向では、右30度のみで金網表面を多く捉えているのに対し、撮影方向を混在することで、全体的には金網捕捉部分の割合は減り、改善が見られる。

また、撮影枚数を間引いて400枚弱程度に揃えた比較では、予想とは異なり、枚数の少ない方が金網捕捉の比率が小さい結果となったため、次節で、写真枚数と地形モデル構築状況について、詳しい検証を行った。

#### (4) 撮影枚数とラップ率の関係

図-2に示す全430枚の写真から、数枚おきに間引くことで撮影枚数を減らした場合(430・286・216・108・62・43枚)のラップ率の違いを図-14に示す。ラップ率は撮影枚数が216枚までは概ね80%と以上となっている。写真枚数が108枚になるとカメラとの距離が近い斜面脚部にラップ率が20%程度となる範囲が出始め、43枚では斜面中腹部までラップ率40%未満の範囲がおよんだ上に斜面中腹や脚部にモデルの空白域が散見されるようになる。

Agisoft Photoscanによる地形モデル構築解析の際は点群密度を[高]設定としているため、撮影枚数が108枚以上の4ケースは、点群密度が2,000点/m<sup>2</sup>強でほぼ等しくなり、モデル充填状況(図-14)や、地形モデル縦断面形状(図-15)も然程差のない結果となった。このことから、

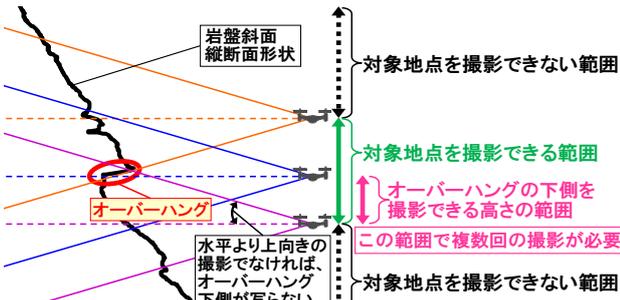


図-11 オーバーハング形状を把握できる撮影位置関係

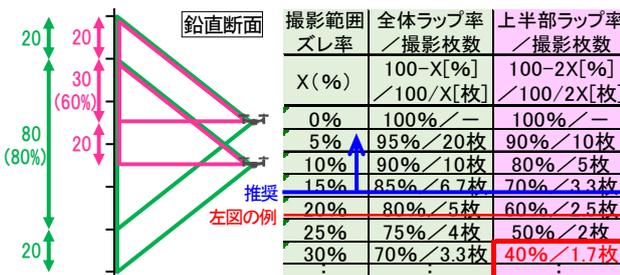


図-12 オーバーハングに対する鉛直ラップ率の算出

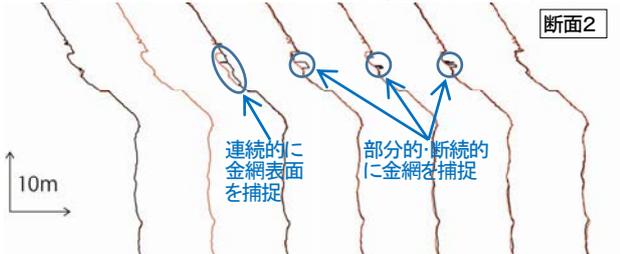


図-13 撮影角度の異なる写真による断面形状の違い<sup>2)</sup>

地形モデル構築には、点群密度が2000点/m<sup>2</sup>以上となる撮影枚数があれば十分と思われる。また、写真が108枚の時の最下段水平1列のサイドラップ率は50%と低い値となっている。最下段は、斜面の脚部で撮影距離が近くなり1回の撮影範囲も狭まる場合が多い上に、垂直ラップも見込みづらいため、撮影密度に留意が必要である。

#### (5) 焦点距離の違いによる地形再現性

地形モデル断面形状については、全体的な形状はほぼ変わらないものの、望遠側(焦点距離:45mm)では、青丸箇所を示す棘状の乱れが多くみられ、DEM図においても、金網の影響がやや強く出ている(図-16)。このことから、撮影範囲やラップ率を等しく撮影するのであれば、広角側のレンズの方が、金網施工斜面の微地形の再現性は高くなると思われる。

#### (6) その他の撮影設定の違いによる地形再現性

シャッター速度が早くなると手振れによる影響が低く

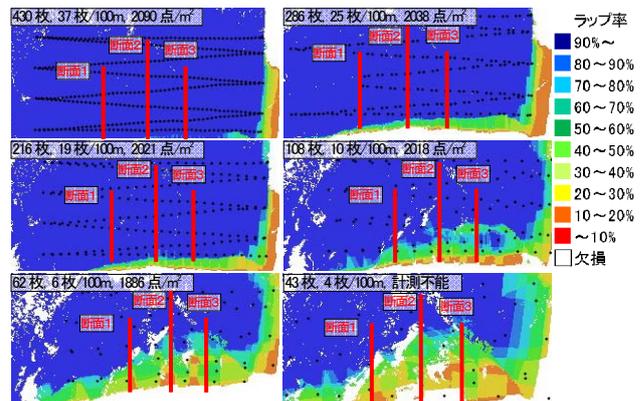


図-14 撮影枚数・ラップ率によるモデル充填状況<sup>2)</sup>

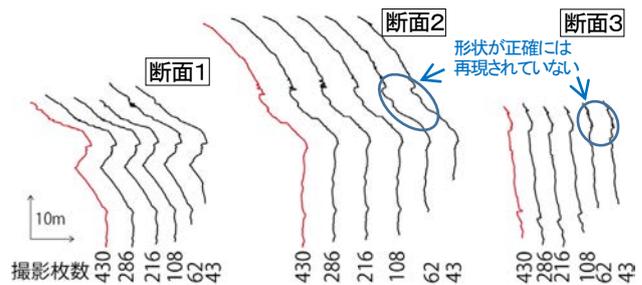


図-15 撮影枚数による断面形状の違い<sup>2)</sup>

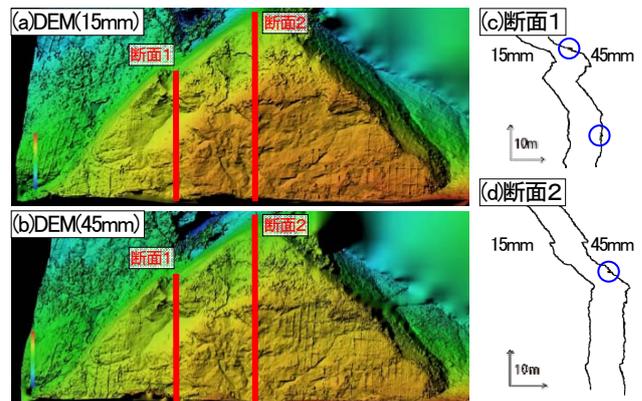


図-16 焦点距離によるDEM・断面形状の違い<sup>2)</sup>

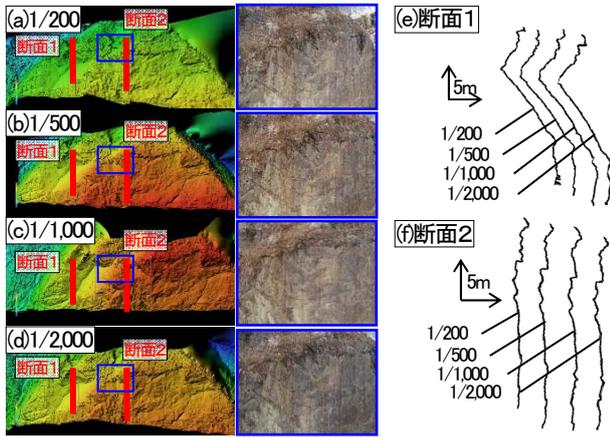


図-17 シャッター速度による DEM・断面形状の違い

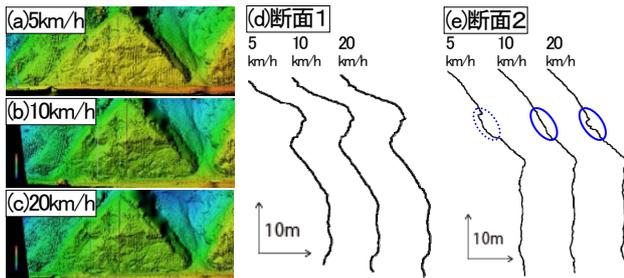


図-18 航行速度による DEM・断面形状の違い

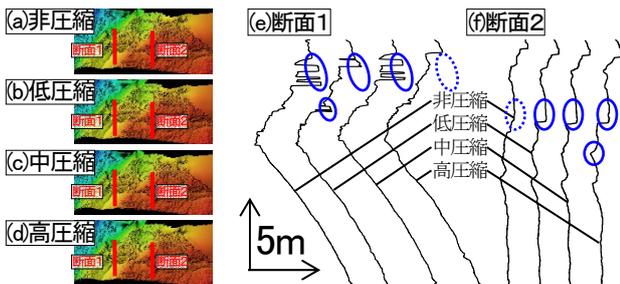


図-19 画像圧縮率による断面形状の違い

なると考えられるが、地形モデルの形状で見る限りほとんど差は認められない(図-17)。航行速度にもよるが、手振れが生じない程度であれば、地形モデルの形状には大きな差は生じないものと思われる。

航行速度が遅いもの以外で地形の再現性が低い結果となったが、航行速度の影響ではなく、撮影枚数が減ったことが主因である可能性が高いと思われる(図-18)。

圧縮率による形状の違いは顕著ではなかった。ただ、画質の悪い高圧縮の場合は、金網自体が明瞭に捉えられていないためにモデル化されない反面、岩盤形状が再現できていない箇所があり、適さないと思われる(図-19)。

#### 4. まとめ

金網やオーバーハングのあるような急崖岩盤斜面を対象とした UAV-SfM 手法による地形モデル構築における、UAV 撮影時の留意点は以下にまとめられる。

- ・地形モデルの精度に最も影響すると思われる指標は、機材仕様によらず、撮影設定や撮影距離によって定まる分解能である。
- ・撮影設定から定まる撮影範囲を事前に把握した上で、ラップ率が高くなるように1点を複数回捉えられる撮影を行い、特徴点を偏りなく高密度(2000点/m<sup>2</sup>)で生成できることが望ましい。
- ・その撮影の際、最下段は、ラップ率が低くなり易いので、撮影密度を上げるなどの工夫が必要である。
- ・その上で、ワイヤロープ径が10~20mm程度である金網の下の方盤形状を正確に把握するためには、分解能が10mm程度になるまで接近し、焦点距離の短い広角側での撮影が望ましい。その際、オーバーハングの下端部などでは、死角が生じないように垂直ラップ率が85%以上となる小さな高度差で密な撮影が必要となる。

#### 参考文献

- 1) 日外勝仁, 角田富士夫, 倉橋稔幸: 急崖岩盤斜面の UAV 撮影写真を基にした三次元地形モデルの構築, 平成 30 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp.1-2, 2018.
- 2) 日外勝仁, 山崎秀策, 倉橋稔幸: 急崖岩盤斜面の UAV 撮影写真を基にした三次元地形モデルの構築(その 2), 令和元年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp.33-34, 2019.

## EXAMINATION ON CONSTRUCTING 3D TERRAIN MODEL USING UAV-SfM TECHNOLOGY FOR STEEP ROCK SLOPES

Katsuhito AGUI, Shusaku YAMAZAKI and Toshiyuki KURAHASHI

The purpose of this study is to develop technologies that enable the accurate estimation of the locations, shapes, and collapse mechanisms of rock masses at risk of collapse by clarifying the 3D shape of steep rock slopes that include distributed open crevices. As the first step toward constructing a 3D terrain model by using UAV photos and SfM, we conducted an onsite examination to explore suitable modeling methods for a steep rock slope. The examination clarified that, in order to create an accurate model of the shape of a steep rock slope which has an overhung and is covered with a steel net, it is necessary to shoot photos with a fine resolution of 10mm or higher, a high lap ratio, and a wide-angle side.