

写真計測技術を活用した斜面点検手法

1. 岩盤斜面点検写真に対する変化箇所抽出手法

1-1. 背景差分法を用いた変化箇所抽出とは?

1-2. 手法概要
&事例紹介

- ・地上から同じ手持ちカメラで撮影した場合
- ・空中から同じUAVで撮影した場合
- ・空中から異なるUAVで撮影した場合

2. 三次元地形モデル構築に向けたUAV撮影条件

オーバーハングし、金網施工された岩盤斜面への対応

【検討項目】 UAV機種と撮影距離, 撮影角度, 撮影枚数, ラップ率,
焦点距離, シャッター速度, 航行速度, 画像圧縮率

斜面点検への“UAV”写真計測技術の活用

カルテ点検時等に撮影される斜面写真に対し、撮影時期の異なる写真を比較することで、

①崩壊等の変状箇所の漏れのない抽出が可能となる

『背景差分法』により、人の目では見落としがちな細かな変化も把握可能となる。さらに、UAV撮影であれば、遷急線の上など地上からは見え難い箇所もカバーできる。

②地形モデルによる形状変化の把握が可能となる

『SfM技術』の発達により、写真から地形モデルを構築することが容易となってきた。その際、オーバーハングがあり金網が施工されているような急崖岩盤斜面に適したUAV撮影条件について、検証結果を紹介する。

写真計測技術を活用した斜面点検手法

1. 岩盤斜面点検写真に対する 変化箇所抽出手法

1-1. 背景差分法を用いた変化箇所抽出とは？

1-2. 手法概要と事例紹介

- ・地上から同じ手持ちカメラで撮影した場合 [①②]
- ・空中から同じUAVで撮影した場合 [③]
- ・空中から異なるUAVで撮影した場合 [④⑤]

2. 三次元地形モデル構築に向けた UAV撮影条件

オーバーハングし、金網施工された岩盤斜面への対応

【検討項目】 UAV機種と撮影距離, 撮影角度, 撮影枚数, ラップ率,
焦点距離, シャッター速度, 航行速度, 画像圧縮率

斜面写真における背景差分抽出の手順

背景画像 (H18. 11撮影)



評価画像 (H19. 11撮影)



色調
補正



ソフトウェアによ
っては、レンズに
よる歪みも補正
して変形される。



落石の発生により
色合いの変わった
箇所が視認し易く
なっている。

比較する前回と**ほぼ同じ構図**の写真
となる様に、前回と**同じカメラ**で、**同じ
位置・角度・設定**で撮影する。

GPS付のカメラであれば、ファイルの
Exif情報に**[緯度]・[経度]・[高度]**の情
報が記録されているので、おおよそ
同じ位置からの撮影は可能。

日の当たり方によって、写真の色調
が変わるため、色調を補正する。

2枚の写真を変形して**重ね合わせる**。

画像編集ソフトで**パノラマ写真**を作る
際の機能を利用する。
(PhotoshopのPhotomerge機能を使用)

2枚の画像の**差分を抽出する**。

重ね合わせた2枚の画像の色の差
分をとることで、**無変化箇所は黒く、
変化箇所は白っぽく**表示させる。

除外すべき差分① 設定差分



焦点距離35mm(緑枠)と焦点距離70mm(赤枠) 設定の異なる画像比較における歪みの抽出

撮影時の焦点距離が異なるため、**レンズによる画像の歪み**が2つの画像で異なる。画像の歪みはレンズの性質上、画像の中心から画像の外縁にむけて大きくなる。背景差分法の実施時にはレンズの歪みを補正するため**正規化**を行っているが、完全には補正しきれていない。そのため**物体の輪郭に沿う形状の差分**が抽出されている。

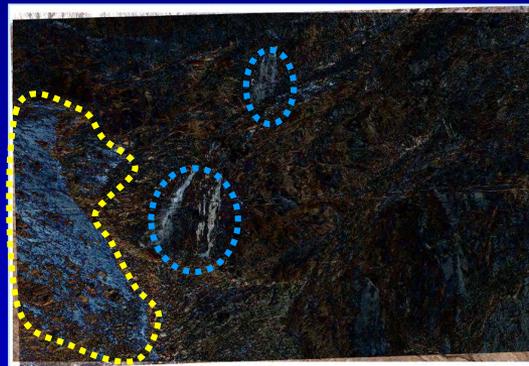
除外すべき差分② 環境差分

日照条件 (陰影・ハレーション)



白点線の範囲は、太陽の位置や天候の差により影の位置・強弱・範囲が異なっており、輝度が異なるため差分として抽出されている。

季節変化 (積雪・氷)



青点線の範囲は、流水・氷柱の有無が差分となって抽出されており、黄点線の範囲は積雪の有無が差分として抽出されている。

植生・流水



緑点線の範囲のように植生の差異がそのまま差分として抽出されるため、夏季などの繁茂期においては、今回比較した秋季・冬季以上の差分が生じるとと思われる。

本当に知りたい差分 ‘実変化’

崩壊(大)



変状(崩落)箇所における形状や色調の違いが差分画像として明確に抽出できている。

落石(小)



差分画像には大きな落石や崩落, 広範な剥離といった変状は認められない。小規模な岩石崩落痕と見られる箇所については差分として抽出されている。

礫・土砂



斜面上部より流出・流下した礫を多く含む土砂の堆積が差分画像として抽出されている。小さな転石・散岩の分布も差分として認識することができる。

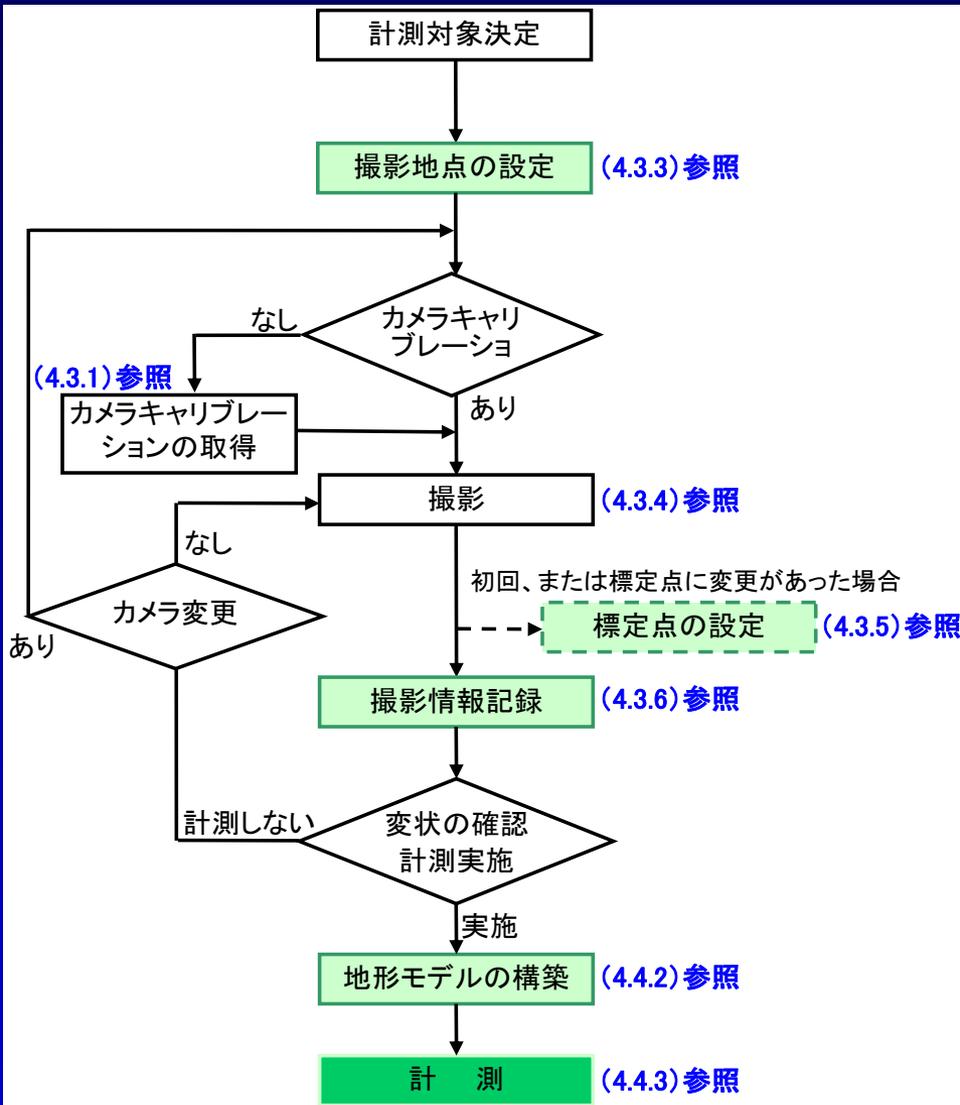
写真計測技術を活用した斜面点検マニュアル(案)

写真計測技術を活用した
斜面点検マニュアル(案)

**【地上撮影編】
として改訂中**

平成 22 年 3 月

独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所



1. 総則.....	1
1.1. 本マニュアルの目的.....	1
1.2. 写真計測技術の概要.....	1
1.2.1. 背景差分法の概要.....	2
1.2.2. 変動量計測法の概要.....	3
2. 点検計画.....	5
2.1. 点検箇所の抽出.....	5
2.2. 点検ポイントの選定.....	7
3. 背景差分法実施方法.....	8
3.1. 背景差分法の特徴.....	8
3.2. 背景差分法の流れ.....	9
3.3. 分解能について.....	10
3.4. 使用する機材.....	12
3.5. 撮影方法(共通編).....	13
3.5.1. 撮影対象の決定と準備.....	13
3.5.2. 撮影時期の違い.....	14
3.5.3. カメラの設定.....	15
3.5.4. 撮影時の注意点.....	16
3.6. 撮影地点の設定(斜面編).....	17
3.7. 撮影地点の設定(構造物編).....	21
3.8. 撮影の記録(共通編).....	24
3.9. 変状箇所の抽出(共通編).....	25
3.9.1. 使用する機材.....	26
3.9.2. 差分検出結果の解釈.....	27
3.9.3. 差分検出結果の記録.....	35
3.9.4. 撮影地点の復元について.....	36
4. 変動量計測法.....	37
4.1. 変動量計測法の特徴.....	37
4.2. 変動量計測法の流れ.....	39
4.3. 変動量計測の方法.....	40
4.3.1. カメラキャリブレーションの取得.....	40
4.3.2. 現地作業で使用する機材.....	41
4.3.3. 撮影地点の設定.....	42
4.3.4. 撮影方法.....	44
4.3.4.1. 撮影機材・設定の検討.....	44
4.3.4.2. 画角の設定.....	48
4.3.4.3. 撮影.....	48
4.3.4.4. 基準の計測.....	49
4.3.5. 標定点の設定.....	51
4.3.6. 撮影の記録.....	53

**【UAV撮影編】
研究開発は終わり
マニュアルとして
とりまとめ中**

寒地土木研究所防災地質チームのHPからDLできます
URL: <http://chishitsu.cri.go.jp/soft.html> (2020.7.1)

写真計測技術を活用した斜面点検手法

1. 岩盤斜面点検写真に対する 変化箇所抽出手法

1-1. 背景差分法を用いた変化箇所抽出とは?

1-2. 手法概要と事例紹介

- ・地上から同じ手持ちカメラで撮影した場合[①②]
- ・空中から同じUAVで撮影した場合[③]
- ・空中から異なるUAVで撮影した場合[④⑤]

2. 三次元地形モデル構築に向けた UAV撮影条件

オーバーハングし、金網施工された岩盤斜面への対応

【検討項目】 UAV機種と撮影距離, 撮影角度, 撮影枚数, ラップ率,
焦点距離, シャッター速度, 航行速度, 画像圧縮率

事例① “崩壊箇所抽出”と崩壊土量推定

撮影距離=79m
カメラ:NikonCoolPixsS2
焦点距離:f=5.8mm
分解能:30mm
サイズ:W=2592,H=1944



道路上の転石や構造物損傷などの**明確な変化**があれば、崩壊**発生源**を意識して探すだろうが、**実際は複数箇所**で**変状**が発生しているかもしれない。

ほぼ同構図の
斜面点検写真



差分画像



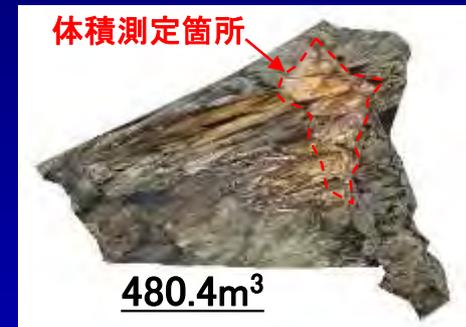
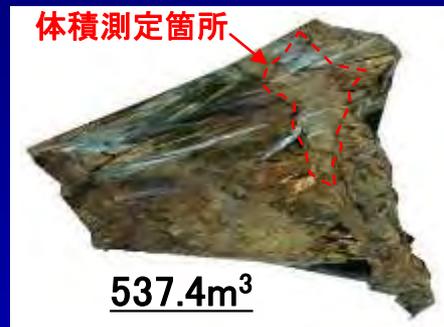
変化箇所の抽出

同地点で撮影時期の異なる2画像の一方をネガポジ反転した後に重ね合わせることで、**変化箇所が白っぽく抽出**される。

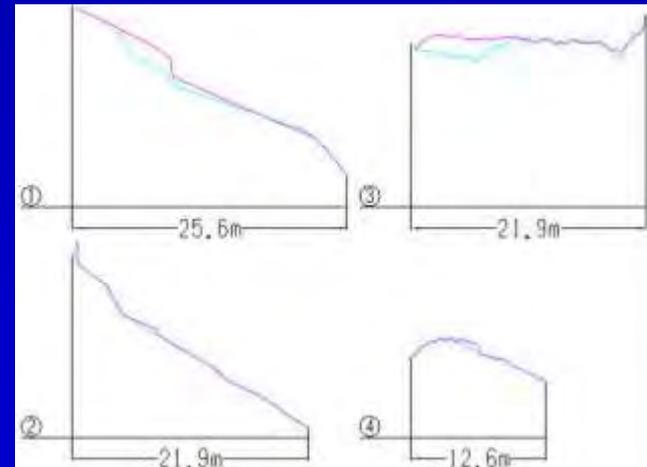
事例① 崩壊箇所抽出と“崩壊土量推定”

写真測量ソフトKuraves(マニュアル作成当時)を用いて、崩壊前後の地形モデルを2つ作成し、その差分から崩壊土量の算出を試みた。

SfM技術が進歩し、より手軽なソフトが出てきており、UAV空中写真ではPhotoscanを用いて三次元地形モデルを作っている。



算出崩壊土量 57.0m³



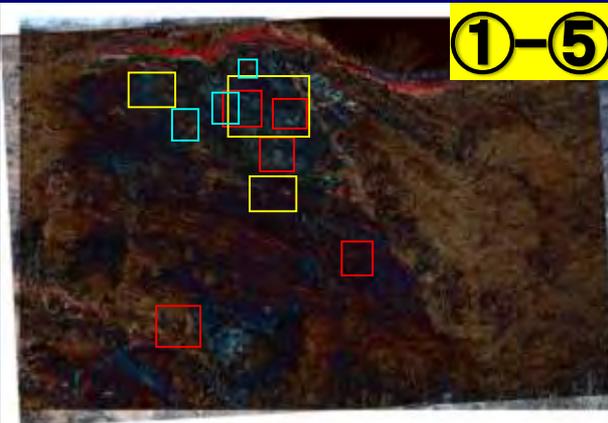
事例② 落石頻発斜面における発生源特定



落石頻発斜面(旧道)において2年3ヶ月間に5回の写真撮影を行い、背景差分をとることで、落石発生状況を解析した。

背景差分画像

同地点で撮影時期の異なる2画像の一方をネガポジ反転した後に重ね合わせることで、変化箇所が白っぽく抽出される。



2006.11.17~2009.2.15
27ヶ月比較
落石;11箇所



(2006.11.17)



(2009.2.15)

ほぼ同構図の斜面点検写真を比較し、変化箇所を抽出

人の目で判別しづらい細かな変化が抽出可能となり、落石発生源評価につながる!!



2006.11.17~2007.12.4
13ヶ月比較
落石;5箇所



2007.12.4~2008.1.30
1ヶ月比較
落石;なし



2008.1.30~2009.1.21
12ヶ月比較
落石;3箇所



2009.1.21~2009.2.15
1ヶ月比較
落石;3箇所

写真計測技術を活用した斜面点検手法

1. 岩盤斜面点検写真に対する 変化箇所抽出手法

1-1. 背景差分法を用いた変化箇所抽出とは?

1-2. 手法概要と事例紹介

- ・地上から同じ手持ちカメラで撮影した場合[①②]
- ・空中から同じUAVで撮影した場合[③]
- ・空中から異なるUAVで撮影した場合[④⑤]

2. 三次元地形モデル構築に向けた UAV撮影条件

オーバーハングし、金網施工された岩盤斜面への対応

【検討項目】 UAV機種と撮影距離, 撮影角度, 撮影枚数, ラップ率,
焦点距離, シャッター速度, 航行速度, 画像圧縮率

検証試験に用いたUAVの例

無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle; UAV), ドローンとか

機体名称	DJI Phantom4Pro	DJI Inspire2	DJI S1000
プロペラ数	4枚(クアッドコプター)	4枚(クアッドコプター)	8枚(オクトコプター)
対角寸法	350mm	605mm	1045mm
合計重量	1388g	3440g	約4400g
最大飛行時間	約 30 分	約 23 分	約15分
GPS/GLONASS	姿勢制御+画像埋込	姿勢制御+画像埋込	姿勢制御と位置誘導
カメラ	FC6310(備え付け)	Zenmuse X5S	Canon EOS5D Mark III
有効画素数	約2000万画素	約2080万画素	約2230万画素
最大解像度	5472 × 3648	5280 × 3956	5760 × 3840
レンズ	(備え付け)	DJI MFT 15mm/1.7ASPH	EF24mm F2.8 IS USM
焦点距離	2.8-11mm [9mm]	15mm	24mm
センササイズ	1型(13.2 × 8.8mm)	4/3型(17.3 × 13mm)	フルサイズ(36 × 24mm)
動画記録サイズ	4096 × 2160 (4K)	4096 × 2160 (4K)	1920 × 1080 (Full HD)

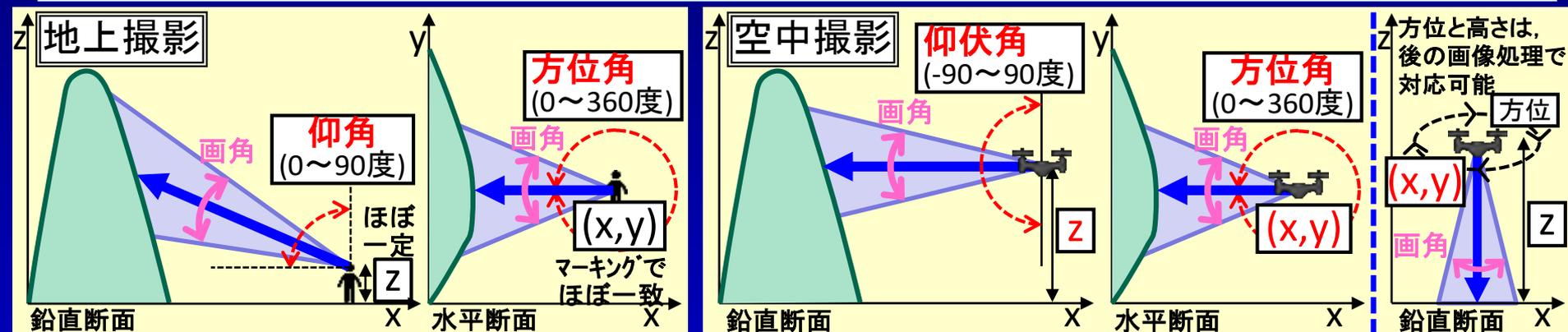


- | | | | |
|---------|--------|--------|---------|
| ・機体 | 小型 | 中型 | 大型 |
| ・カメラ | 小型/固定 | 中型/選択式 | 大型/変更自由 |
| ・機体/カメラ | 連動して | 連動して | 非連動なので |
| 撮影GPS座標 | 画像埋め込み | 画像埋め込み | 時刻読み取り |

同じ構図で撮影する上での[地上/空中]の違い

背景差分法は、従来、**固定カメラ画像の変化把握**を目的としており、デジタルカメラで同じ構図の(中心投影)画像を撮影するためには、
 同じ、**カメラ(レンズ)と撮影設定(画角←焦点距離)**
撮影位置と撮影方向 **による撮影が必要!!**

⇒ **カメラ(同/異)と撮影方向(鉛直/水平)**の条件について検証を行う。



撮影位置は、zはほぼ同一で、x,yについても、マーキング等で一致できる。
 撮影位置が同じとなれば、撮影方向は画像を見比べることで、一致できる。

撮影位置は、画像のExif情報のGPS記録からxyz座標を把握でき、UAV自動航行プログラムにより、位置座標・撮影向き再現はある程度可能である。ただし、GPS(高度)等の精度に課題があり、変数も多いため、画像比較による調整にも限界がある。データ引き渡しや位置調整に手間がかかる。

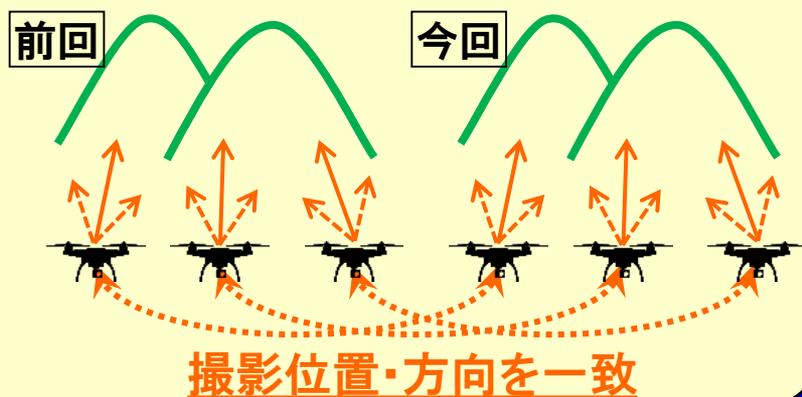
[UAV空中撮影]

- ・同じカメラの場合: 撮影位置・方向を現地作業で完全に一致させるのは困難
- ・違うカメラの場合: 別の方法を要検討

同じカメラで構図の同じ写真を撮るためには

①: 撮影位置・方向を前回と一致させて撮影

②: 前後の撮影画像の色調を補正
→ **撮影画像** から背景差分を抽出

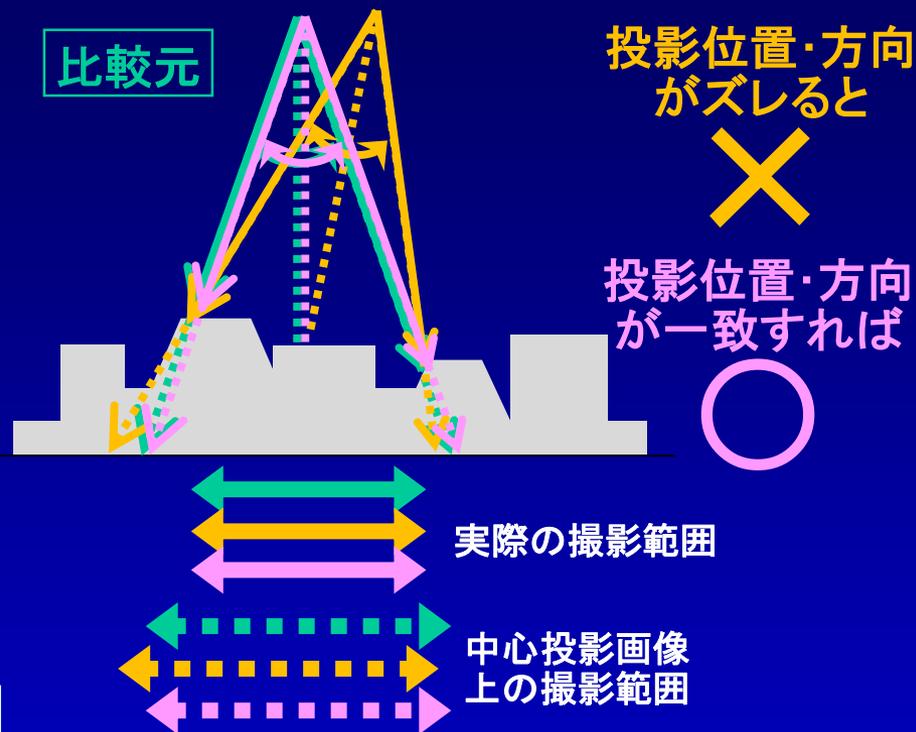


・同じカメラで**撮影の位置・方向を一致**

撮影位置のGPS座標データが埋め込まれた画像が必要

撮影位置をプログラム飛行させ、高度と撮影方向は、画像を見比べて現地微調整する
ズレの許容範囲は、ラップ率90%以上

手間はかからないが、背景差分の精度はあまりよくない



実際の撮影範囲が同じでも、撮影位置と方向が異なると、被写体の形状によっては投影画像の構図は違ってくる。

カメラが同じなら、
同じ位置、同じ方向で
同じ設定で撮影すれば、
構図の同じ写真となる

事例③ 同じUAVによる背景差分[座標入力航行撮影]

自動航行

以前の画像のExif情報から[緯度]・[経度]・[高度]を取得し、同じUAV(Phantom4pro)に座標入力した自動航行で撮影。

↓ 改善

自動航行+画郭調整

以前の画像のExif情報から[緯度]・[経度]・[高度]を取得し、同じUAV(Phantom4pro)に座標入力した自動航行を行い、以前の画像とモニタとを見比べて、[撮影位置と方向]を調整して撮影。



位置座標の再現性が低く、構図にズレが生じ、背景差分の変形重ね合わせが不可となった。



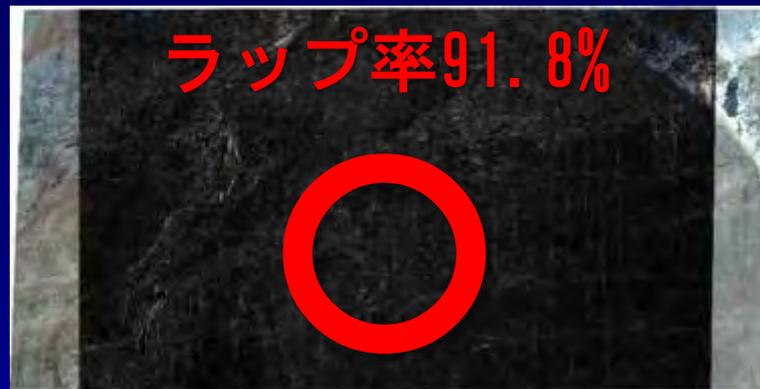
[撮影位置と方向]を目視で調整したことで、背景差分の変形重ね合わせが可能となった。

GPS等による測位精度に限界があり、座標入力した自動航行のみで撮影位置を一致させるのは困難であり、追加での画郭調整が必要となる。→調整の程度は?

背景差分が可能となる構図のズレ程度は？

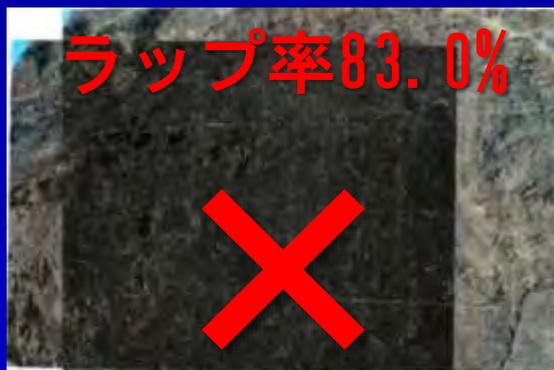


斜面からの距離：20m
撮影水平移動距離：3m

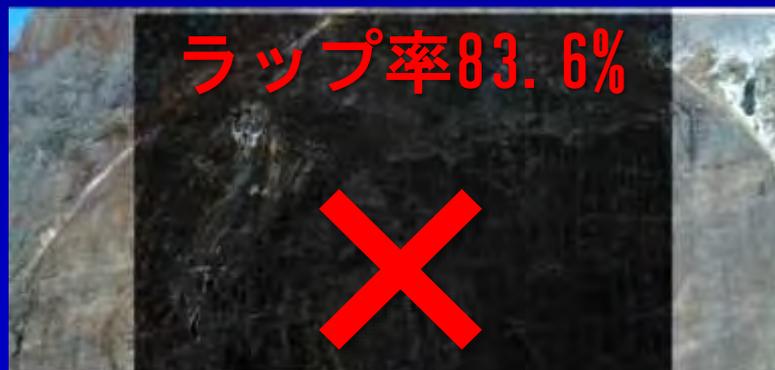


斜面からの距離：50m
撮影水平移動距離：6m

ラップ率 90%



斜面からの距離：20m
撮影水平移動距離：5m



斜面からの距離：50m
撮影水平移動距離：12m

背景差分の抽出が可能となる撮影条件は、UAVの斜面からの距離と撮影水平移動距離から算出される2画像のラップ率が90%以上である

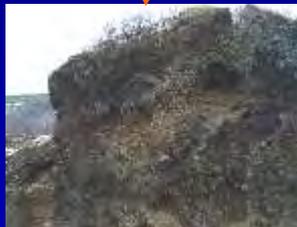
事例③' 同じUAVによる背景差分 [RTK対応UAV]

自動航行 & 画郭調整撮影 [一般UAV]

自動航行撮影 [RTK対応UAV]

2019年Phantom4pro 自動航行のみ
 2018年Phantom4pro 【比較元】
 2019年Phantom4pro 自動航行+画郭調整

2019年Phantom4RTK 【比較元】
 2020年Phantom4RTK 自動航行のみ



色調補正



水平距離:18m
 高度差:20m



水平距離:8m
 高度差:5m

背景差分
 重ね合わせ



水平距離:0.41m
 高度差:0.17m

まとめ

- ・前回画像のExifから取得した[緯度]・[経度]情報を入力して**自動航行**させて撮影する。
- ・**90%以上のラップ率**の写真が必要となり、ズレが大きいと撮影の前に現地画郭調整が必要。
- ・測位精度の高い**RTK対応UAV**は、ほぼ同じ位置へ自動航行でき、差分抽出精度も極めて高い。

写真計測技術を活用した斜面点検手法

1. 岩盤斜面点検写真に対する 変化箇所抽出手法

1-1. 背景差分法を用いた変化箇所抽出とは?

1-2. 手法概要と事例紹介

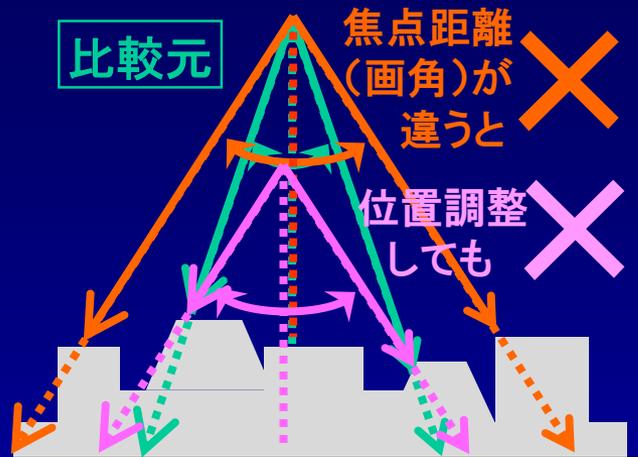
- ・地上から同じ手持ちカメラで撮影した場合[①②]
- ・空中から同じUAVで撮影した場合[③]
- ・空中から異なるUAVで撮影した場合[④⑤]

2. 三次元地形モデル構築に向けた UAV撮影条件

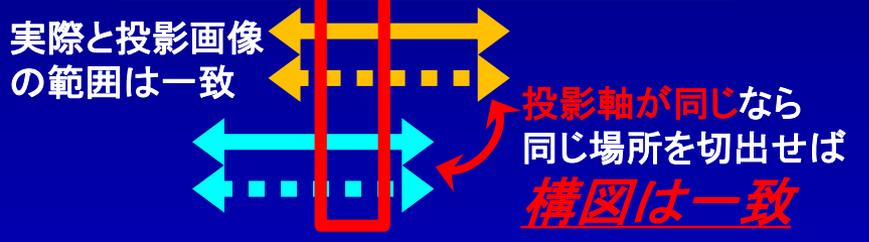
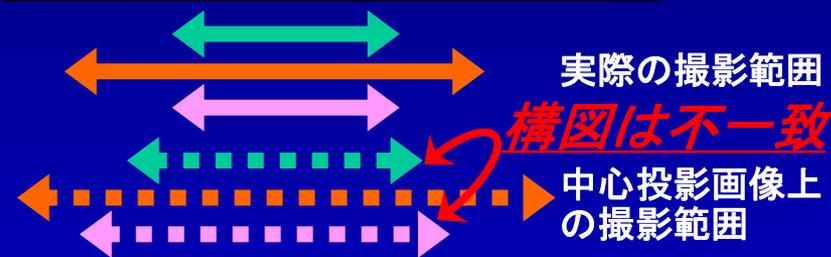
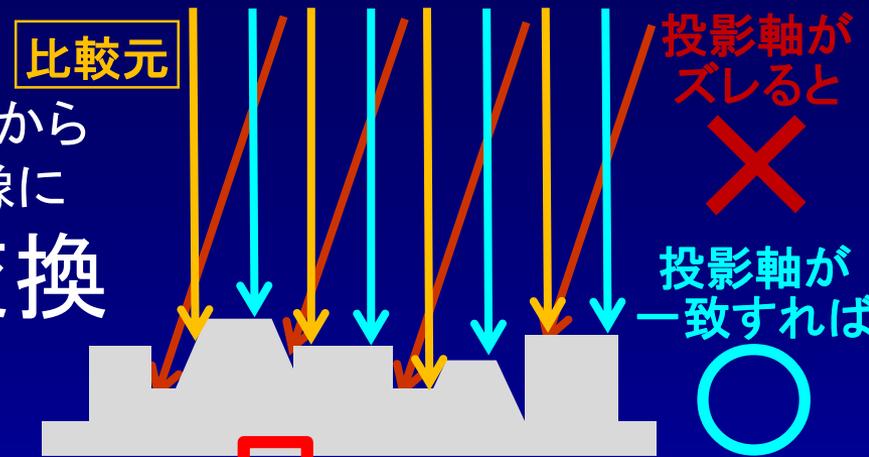
オーバーハングし、金網施工された岩盤斜面への対応

【検討項目】 UAV機種と撮影距離, 撮影角度, 撮影枚数, ラップ率,
焦点距離, シャッター速度, 航行速度, 画像圧縮率

異なるカメラで構図の同じ写真を撮るためには



中心投影画像から
正射投影画像に
オルソ変換

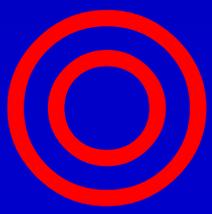


カメラが異なると、
同じ位置から撮影しても、
構図は同じ写真とならない
撮影範囲が等しくなるよう
に撮影位置を調整しても、
中心投影画像であるため、
対象物の形状(高さ)によっ
て、構図はズレてしまう。



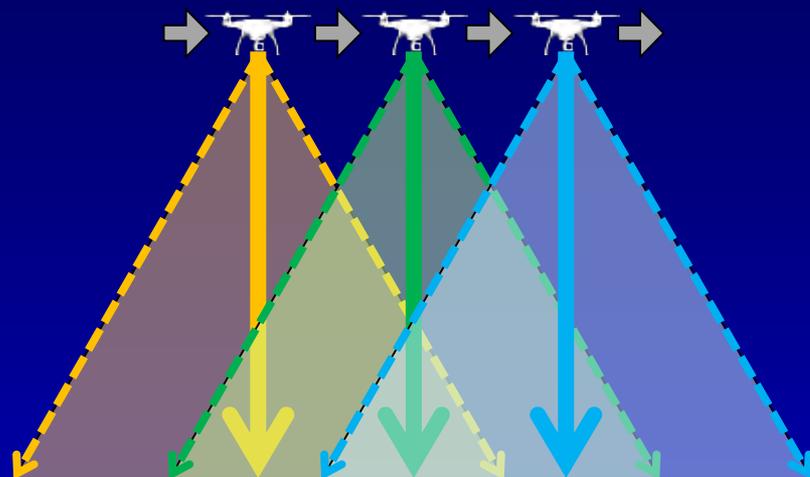
SfM技術により、写真から構築した
三次元地形モデルを活用することで、
カメラ撮影したままの中心投影画像を
正射投影画像にオルソ変換する

正射投影の軸さえ一致すれば、
カメラや撮影位置によら
ず、同じ構図の画像を切り
出すことが可能となる。



写真撮影方向別の2種類のオルソ画像作成方法

鉛直撮影

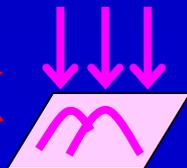
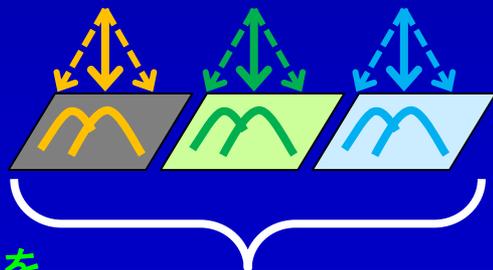


実斜面

撮影写真
(中心投影)



鉛直だと方向を
一致させ易い



オルソ画像
(正射投影) OK

水平撮影 (任意方向)

撮影写真
(中心投影)

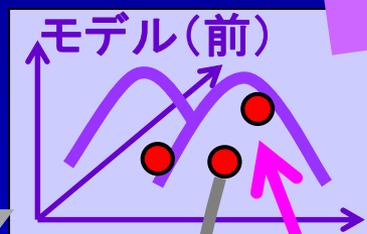


実斜面



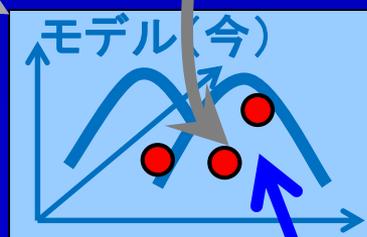
水平だと自由度が高く、方向を一致させ難い

オルソ画像
(正射投影) NG



複数の写真からSfM技術で
三次元地形モデルを構築し、
その表面に写真を張り付けた
テクスチャーモデルを正射投影
した疑似オルソ画像を作成

疑似オルソ画像 OK
(モデルの正射投影)



疑似オルソ画像の正射投影軸
の方向を同じとするため、比較
する地形モデルの座標を一致
させる必要がある。
複数の写真上に共通の標定点を
設け、前の座標値を今のモデル解析
へ反映させる。

異なるカメラで構図の同じ写真を撮るためには

[作業手順]

① 死角がないように撮影

オーバーハング部などで死角がないように高ラップで撮影する

②-a 写真数枚からオルソ画像を作成

ある程度撮影方向を一致させられる
鉛直撮影時のみに適用可能

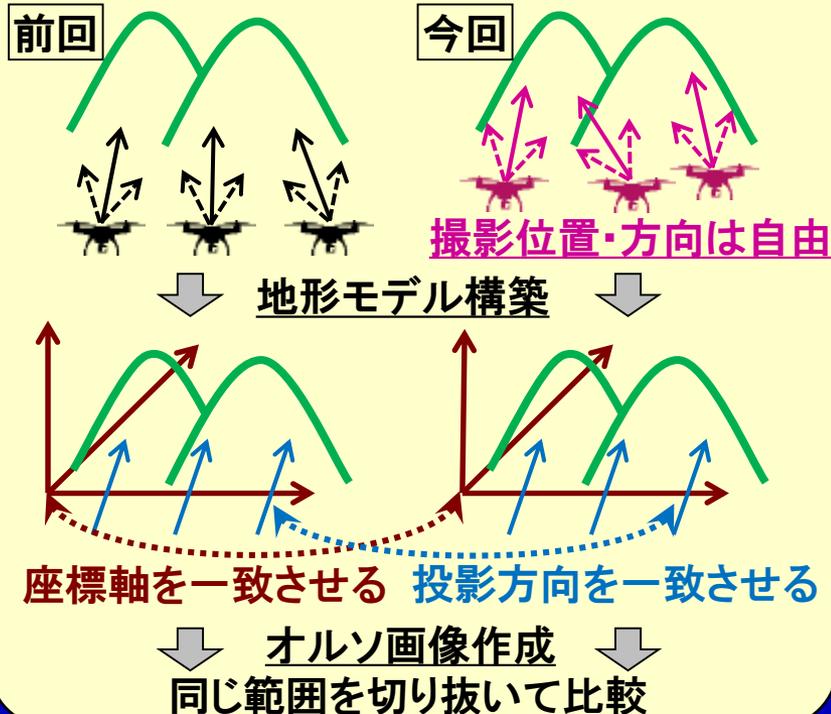
選択

②-b 写真から地形モデルを作成し、 写真を表面にモザイク状に貼り付けた テクスチャーモデルを正射投影した 疑似オルソ画像を作成

位置・方向は自由に撮影を行い、水平
など任意方向において比較できる

③ オルソ画像から背景差分を抽出

b) 疑似オルソ画像を作成して比較



・ 撮影の位置と方向は任意

撮影位置のGPS座標データを埋め込んだ画像から三次元地形モデルを構築し、
軸を一致させたオルソ画像の構築が必要

手間(地形モデル/オルソ)がかかるが、
背景差分の精度は極めて良い

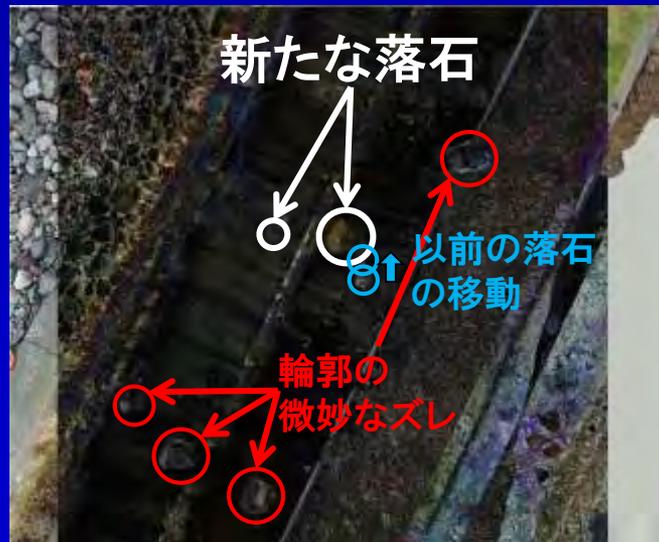
事例④ 異なるUAVによる背景差分[鉛直オルソ画像]



2018年鉛直オルソ画像
Phantom4pro



2020年鉛直オルソ画像
Inspire2+X5s



背景差分画像

新たな落石(白丸)や既存の落石の移動(青丸)等が抽出されている。

カメラ向きを鉛直に向けて撮影した複数枚の写真からSfM技術によりそのままオルソ画像を生成できるため、解析作業性は良い。

2回の撮影方向が厳密には鉛直となっておらず、対象物の輪郭等に僅かなズレ(赤丸)が見られる。

事例⑤ 異なるUAVによる背景差分[疑似オルソ画像]

疑似オルソ画像作成に必要な地形モデル構築時の比較する2モデル間の座標軸調整の有無を比較



Pantom4pro
2017年
疑似オルソ画像



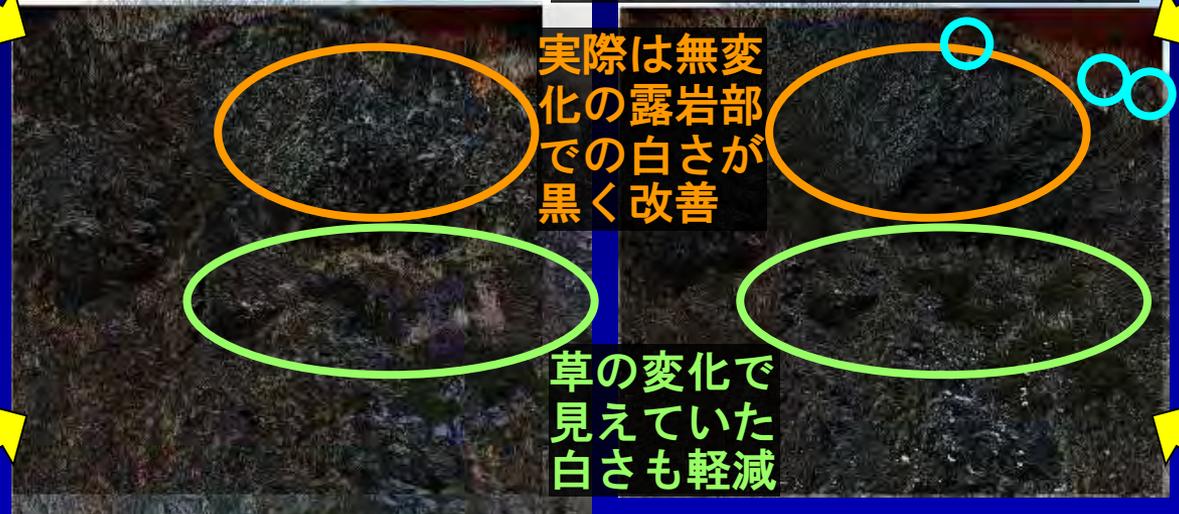
Pantom4pro
2017年
疑似オルソ画像



Inspire2+X5s
2018年
疑似オルソ画像
(軸調整なし)



Inspire2+X5s
2018年
疑似オルソ画像
(軸調整あり)



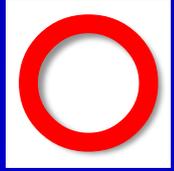
局所的に日当たりが違った部分

実際は無変化の露岩部での白さが黒く改善

草の変化で見ていた白さも軽減

疑似オルソ背景差分画像
(軸調整なし)

疑似オルソ背景差分画像
(軸調整あり)



共通で設定した標定点の2017年モデルでの座標値を2018年モデルの解析に利用

軸調整によりオルソ処理のズレが改善され、露岩部(○)や植生部(○)で見られた白っぽさが減り、細かな変化が視認し易くなった。その結果、岩の起伏部(○)で日の当たり方が違った部分が白く浮かび上がる。

事例⑥ 同じUAVによる背景差分[疑似オルソ画像]



輪郭には僅かにズレが見られるものの、内部はほぼ一致した変形重ね合わせとなった。
前後の色調が異なるため、全体が変化箇所として白く表示されている。

色調補正の
前処理を追加



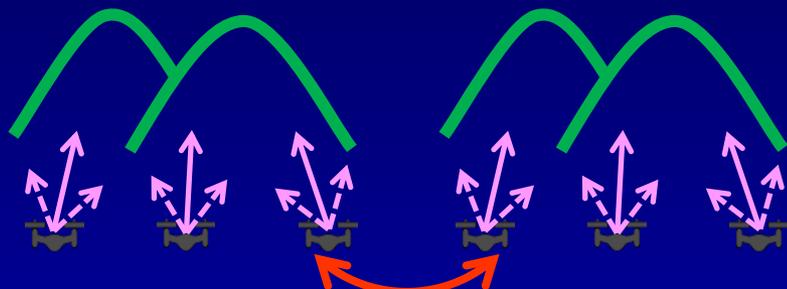
2枚のオルソ画像の色調を等しく調整した後に、重ね合わせを行った。
背景差分抽出では、雪や植生の異なる箇所の他、以前の崩壊跡の拡大部分などが、白っぽい表意となる変化箇所として抽出できた。

撮影の位置・方向ズレの影響を受けない正射投影オルソ画像を色調補正して背景差分をとることで、精度良い変化箇所の把握が可能。

【まとめ】UAVで背景差分を可能とする方法

① 同じUAVを使う場合

→ 撮影画像をそのまま比較



撮影位置・方向を一致させる
RTK対応のUAVであれば、
自動航行撮影でも十分な精度がある。

・同じカメラで撮影の位置・方向を一致

撮影位置のGPS座標データが埋め込まれた画像が必要

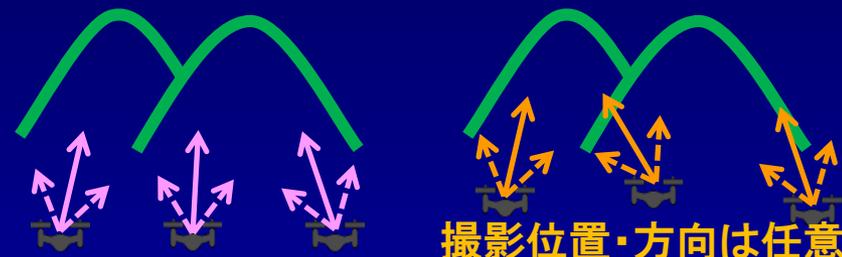
撮影位置をプログラム飛行させ、高度と撮影方向は、画像を見比べて現地微調整する

ズレの許容範囲は、ラップ率90%以上

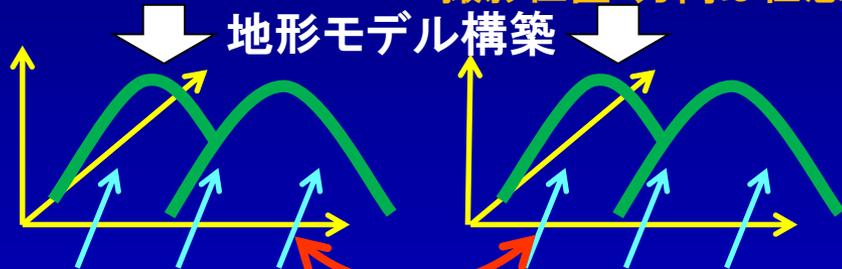
手間はかからないが、
背景差分の精度はあまりよくない

② 異なるUAVを使う場合

→ オルソ画像に変換して比較



撮影位置・方向は任意



正射投影軸を一致させれば、◎

・鉛直では、直接写真からオルソ画像を作成

・水平等の任意方向では、自由な位置・方向から死角なく撮影した複数の写真から三次元地形モデルを構築し、オルソ投影軸を一致させた疑似オルソ画像の構築が必要

手間(地形モデル/オルソ)がかかるが、
背景差分の精度は極めて良い

使用機材及び撮影方向による調査方法の選択

使用機材 (同一性/ 測位性能)	<u>同じ</u>		<u>異なる</u> (同じ場合にも適用可)		
	一般UAV	RTK対応UAV	一般UAV	一般UAV	一般UAV
撮影方向	任意	任意	鉛直	任意	任意
調査方法	撮影写真に対する背景差分法適用	撮影写真に対する背景差分法適用	オルソ画像に対する背景差分法適用	疑似オルソ画像に対する背景差分法適用	疑似オルソ画像に対する背景差分法適用
手順	前回撮影写真のExif情報から取得した位置情報に自動航行させた上で、前回の写真と見比べて図郭が同じになる様に調整しながら撮影する。	前回撮影写真のExif情報から取得した位置情報に自動航行させた上で、撮影する	概ね鉛直方向に撮影した複数枚の写真から、鉛直方向のオルソ画像を作成する。	自由な位置・方向で撮影した写真から、三次元地形モデルを構築し、表面に写真を貼り付けたテクスチャーモデルから疑似オルソ画像を作成する。	自由な位置・方向で撮影した写真から、2時期で共通の標定点を設定した上で三次元地形モデルを構築し、表面に写真を貼り付けたテクスチャーモデルから疑似オルソ画像を作成する。
現地作業	△	○	◎	◎	◎
解析作業	◎	◎	△	×	××
抽出精度	△	○	○	◎	◎◎

写真計測技術を活用した斜面点検手法

1. 岩盤斜面点検写真に対する 変化箇所抽出手法

1-1. 背景差分法を用いた変化箇所抽出とは?

1-2. 手法概要と事例紹介

- ・地上から同じ手持ちカメラで撮影した場合[①②]
- ・空中から同じUAVで撮影した場合[③]
- ・空中から異なるUAVで撮影した場合[④⑤]

2. 三次元地形モデル構築に向けた UAV撮影条件

オーバーハングし、金網施工された岩盤斜面への対応

【検討項目】 UAV機種と撮影距離, 撮影角度, 撮影枚数, ラップ率,
焦点距離, シャッター速度, 航行速度, 画像圧縮率

UAV-SfM技術による岩盤斜面の地形モデル構築

【目的】

UAV空中写真からSfM技術により三次元地形モデルを作成するにあたり、オーバーハングがあり金網の施工された急崖岩盤斜面に対しても、正確に岩盤形状をモデル化するためのUAV撮影条件を現地検証する。

【検討方法】

撮影条件を変えて、構築される地形モデルを比較

【検討項目】

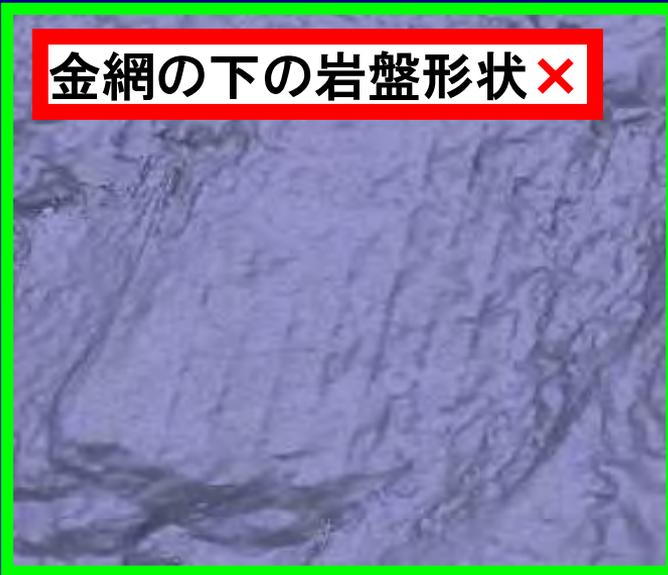
- ・ UAV機種と撮影距離
- ・ 撮影角度(水平/鉛直)
- ・ 撮影枚数とラップ率(写真充填状況)
- ・ 焦点距離, シャッター速度, 航行速度, 画像圧縮率

金網施工箇所の三次元地形モデル作成時の課題



支尾根末端の切土斜面で、オーバーハングがあり、全面に金網が施工。

金網の下の岩盤形状 ×



オーバーハング下部形状 ×

落石対策で金網の施工箇所では、岩盤ではなく、**金網の表面がモデル化**され、金網のワイヤロープが縦に筋状に認められる。

⇒ **金網の影響を受け難く、オーバーハング形状を正確に把握**できるUAV撮影方法を現地検証!!

地形モデル構築に適したUAV撮影条件は

UAV-SfMを用いた、**金網**や**オーバーハング**のある急崖岩盤斜面の地形モデル構築に適した**UAV撮影条件**は、

- ・地形モデルの構築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、1点を複数回捉えた**ラップ率**の高い撮影を行い、**特徴点を高密度**(2,000点/m²)で偏りなく生成できる写真枚数で解析することが望まれる。
- ・その撮影の際、ラップ率が低くなり易い**最下段**は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である**金網**の下の**岩盤形状**を正確に把握するためには、**分解能が10mm**になるまで接近し、**焦点距離の短い広角側**の撮影が望ましい。その際、**オーバーハング****下端部**などでは、死角が生じないように**鉛直ラップ率**が**85%以上**となる小さな高度差での密な撮影が必要である。

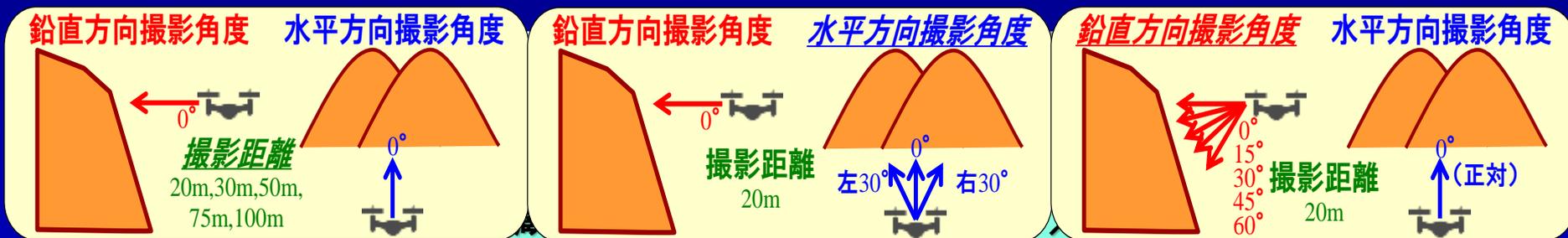
条件①② 機種・撮影距離, 撮影方向による比較



比高：100m 撮影幅：120m超

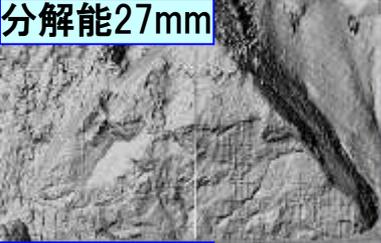
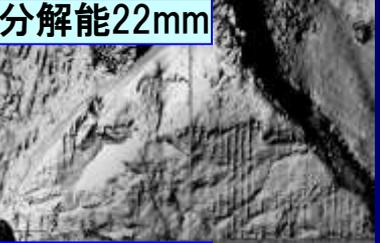
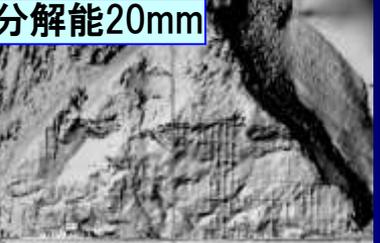
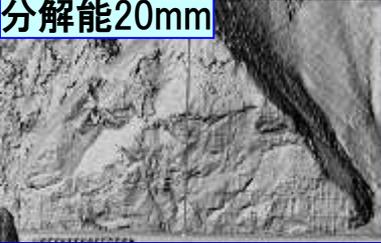
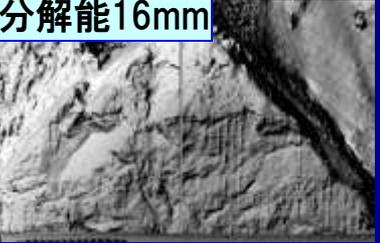
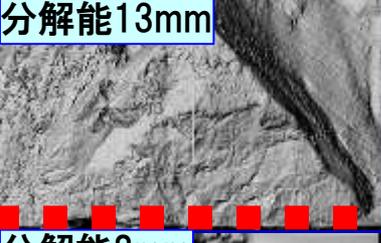
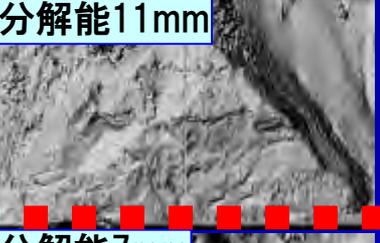
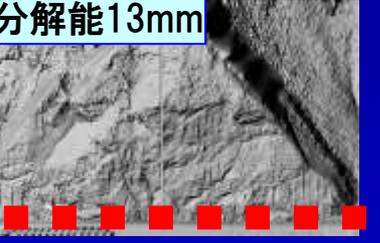
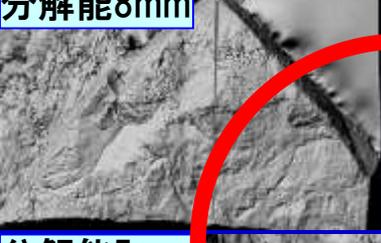
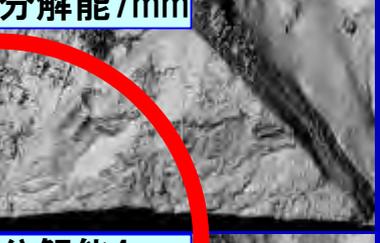
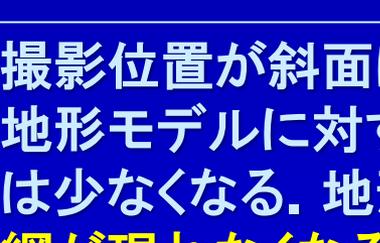
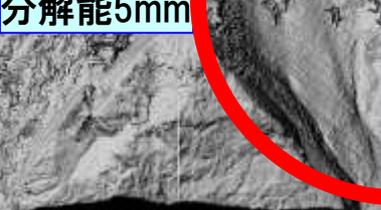
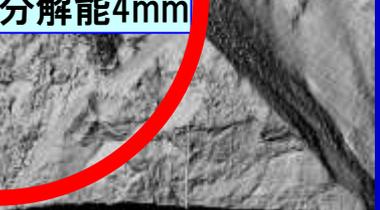
カメラ方向 \ 斜面との距離	20m	30m	50m	75m	100m
機首正対/水平	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/-	P/I/S
機首左30度/水平	P/I/-	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/S
機首右30度/水平	P/I/-	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/S
機首正対/伏角15度	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/S	P/I/S
機首正対/伏角30度	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/S	P/I/S
機首正対/伏角45度	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/S	-/-/S
機首正対/伏角60度	P/I/-	P/I/-	P/I/S	-/-/S	-/-/-

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



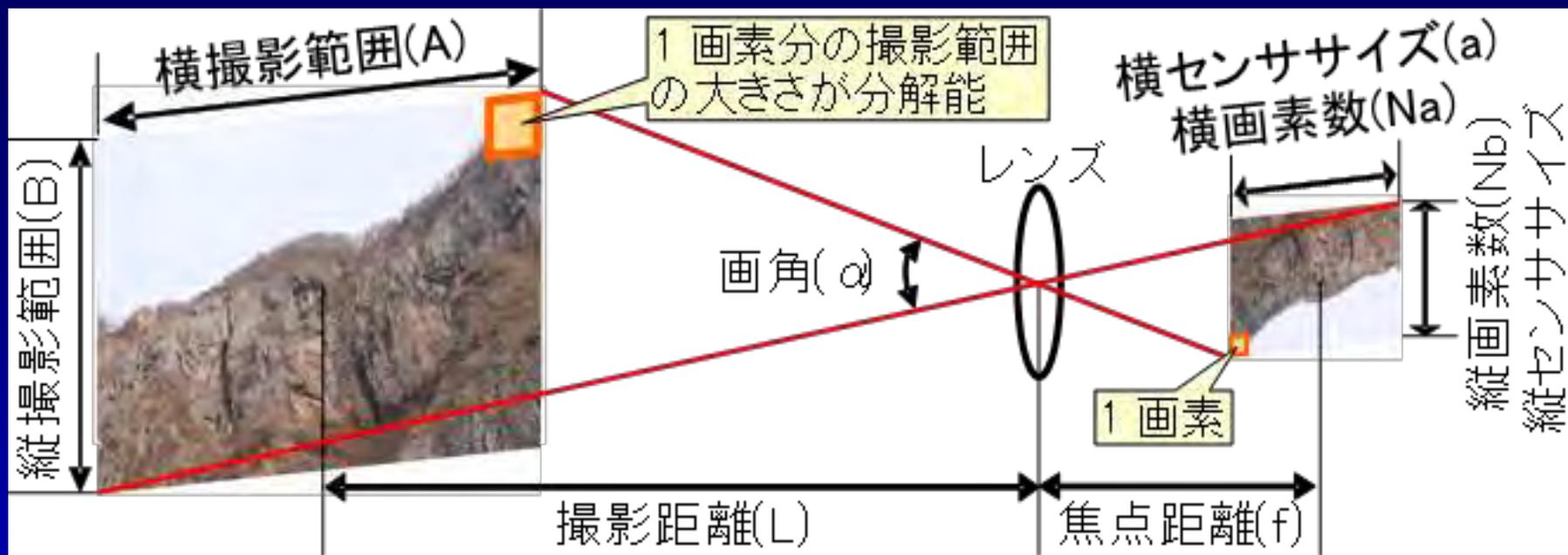
機体名称	DJI Phantom4Pro	DJI Inspire2	DJI S1000
プロペラ数	4枚(クアッドコプター)	4枚(クアッドコプター)	8枚(オクトコプター)
対角寸法	350mm	605mm	1045mm
合計重量	1388g	3440g	約4400g
最大飛行時間	約 30 分	約 23 分	約15分
GPS/GLONASS	姿勢制御+画像埋込	姿勢制御+画像埋込	姿勢制御と位置誘導
カメラ	FC6310(備え付け)	Zenmuse X5S	Canon EOS5D Mark III
有効画素数	約2000万画素	約2080万画素	約2230万画素
最大解像度	5472 × 3648	5280 × 3956	5760 × 3840
レンズ	(備え付け)	DJI MFT 15mm/1.7ASPH	EF24mm F2.8 IS USM
焦点距離	2.8-11mm [9mm]	15mm	24mm
センササイズ	1型(13.2 × 8.8mm)	4/3型(17.3 × 13mm)	フルサイズ(36 × 24mm)
動画記録サイズ	4096 × 2160 (4K)	4096 × 2160 (4K)	1920 × 1080 (Full HD)

機種と撮影距離の違いによる地形モデルの差異

	DJI Phantom4Pro	DJI Inspire2	DJI S1000
撮影距離: 100m	分解能27mm 	分解能22mm 	分解能20mm 
撮影距離: 75m	分解能20mm 	分解能16mm 	
撮影距離: 50m	分解能13mm 	分解能11mm 	分解能13mm 
撮影距離: 30m	分解能8mm 	分解能7mm 	分解能10mm 
撮影距離: 20m	分解能5mm 	分解能4mm 	

撮影位置が斜面に近づくにつれ、地形モデルに対する金網の影響は少なくなる。地形モデル上で金網が現れなくなる閾値は、撮影距離や機材に係わらず、**分解能で約10mm程度**である。

【参考】デジタルカメラの仕様と撮影画像の関係



〔横方向の撮影範囲〕

$$A = L \times \frac{a}{f}$$

〔横方向の分解能〕

$$\text{横分解能} = \frac{\text{横撮影範囲}(A)}{\text{横画素数}(N_a)}$$

〔横方向の画角〕

$$\alpha_a = 2 \tan^{-1} \frac{a}{2f}$$

〔縦方向の撮影範囲〕

$$B = L \times \frac{b}{f}$$

〔縦方向の分解能〕

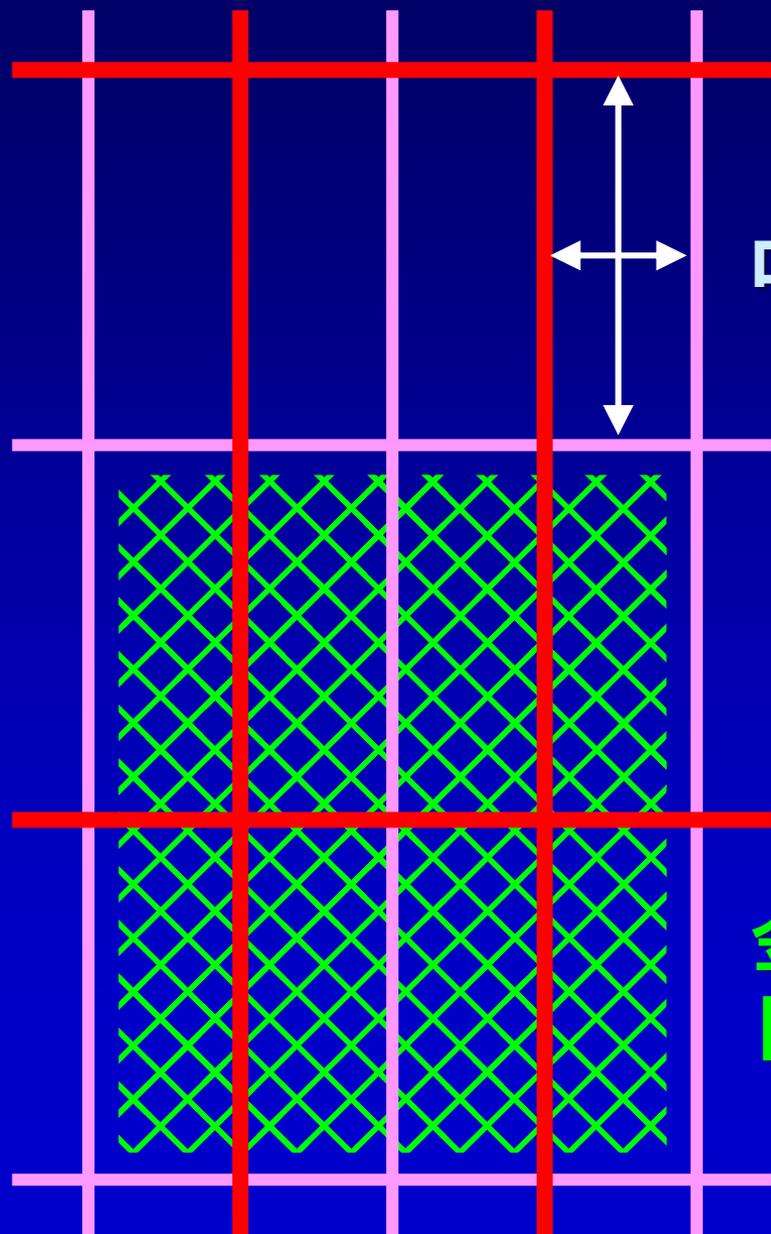
$$\text{縦分解能} = \frac{\text{縦撮影範囲}(B)}{\text{縦画素数}(N_b)}$$

〔縦方向の画角〕

$$\alpha_b = 2 \tan^{-1} \frac{b}{2f}$$

1画素に映り込む対象物の大きさである「分解能」が重要！

対象斜面の落石防護網の仕様 [JFE1000型]



主ワイヤロープ： $\phi 16\text{mm}$

ロープ間隔：横2m×縦5m

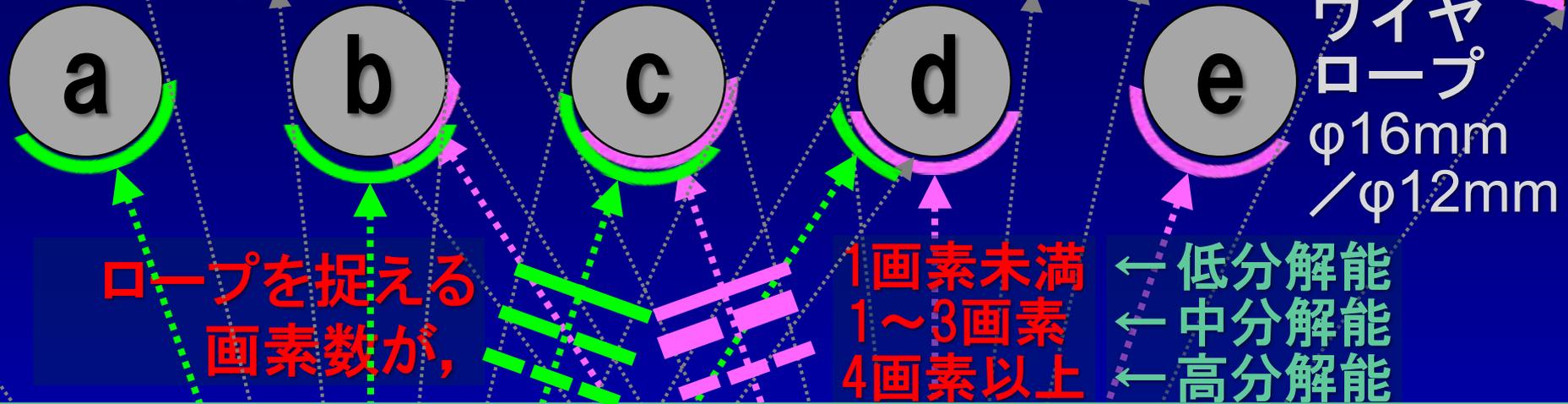
補助ワイヤロープ： $\phi 12\text{mm}$

金網： $\phi 3.2\text{mm}$

目開き：50mm×50mm

別方向画像における金網の捉え方と分解能の関係

水平断面



低分解能・・・全体的に**粗く**捉えられ，金網は個別に**認識されない**

1画素未満

中分解能・・・捕捉画素数や撮影角度などの見え方によっては，

1画素

①金網を同一地点として認識して，**モデル化される**

②撮影角度により，異なる金網として認識されて，**モデル化されない**（広角撮影だと角度が付き易い）

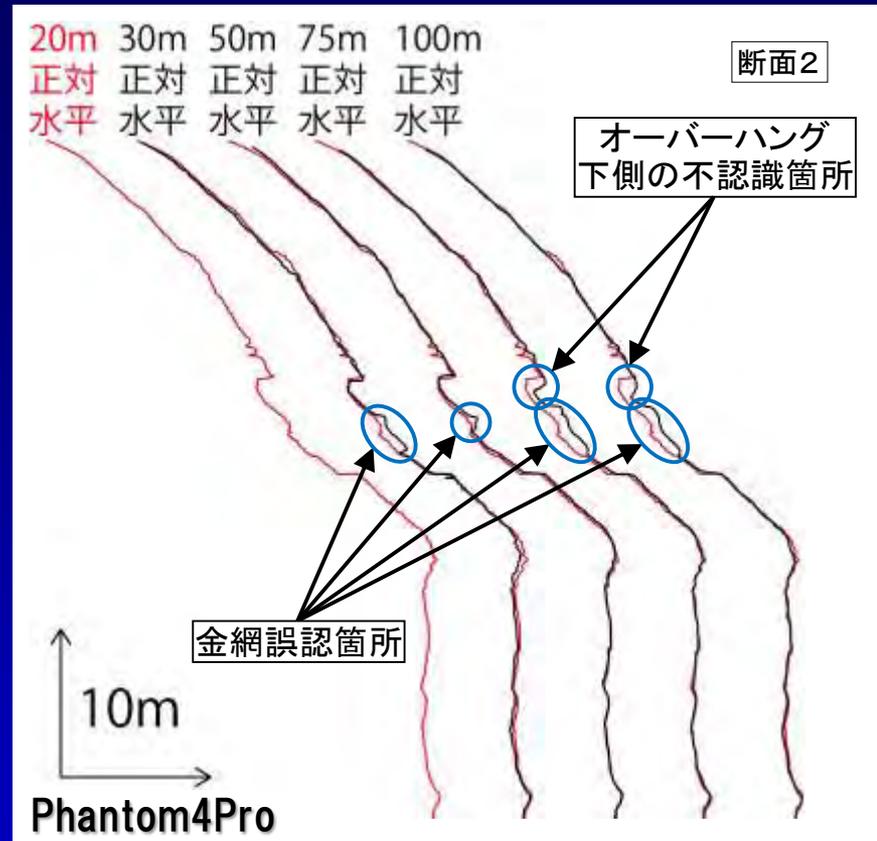
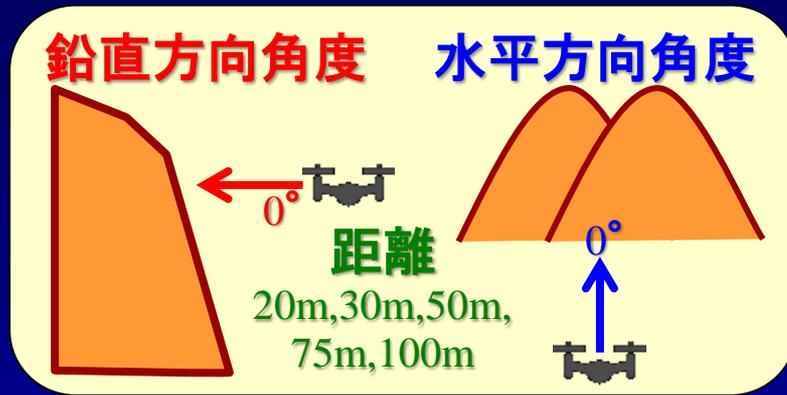
10mm弱

2,3画素

高分解能・・・ワイヤロープ&金網の形状も細かく**モデル化される**

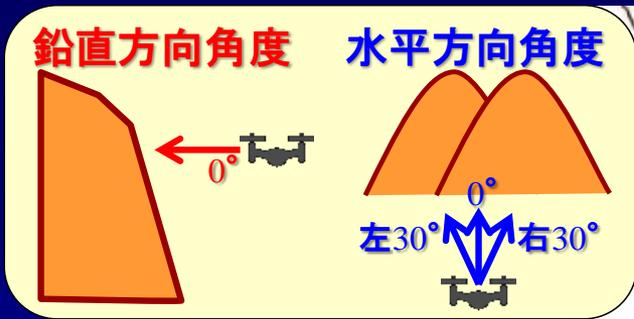
4画素以上

結果① 撮影距離によるオーバーハング形状の違い

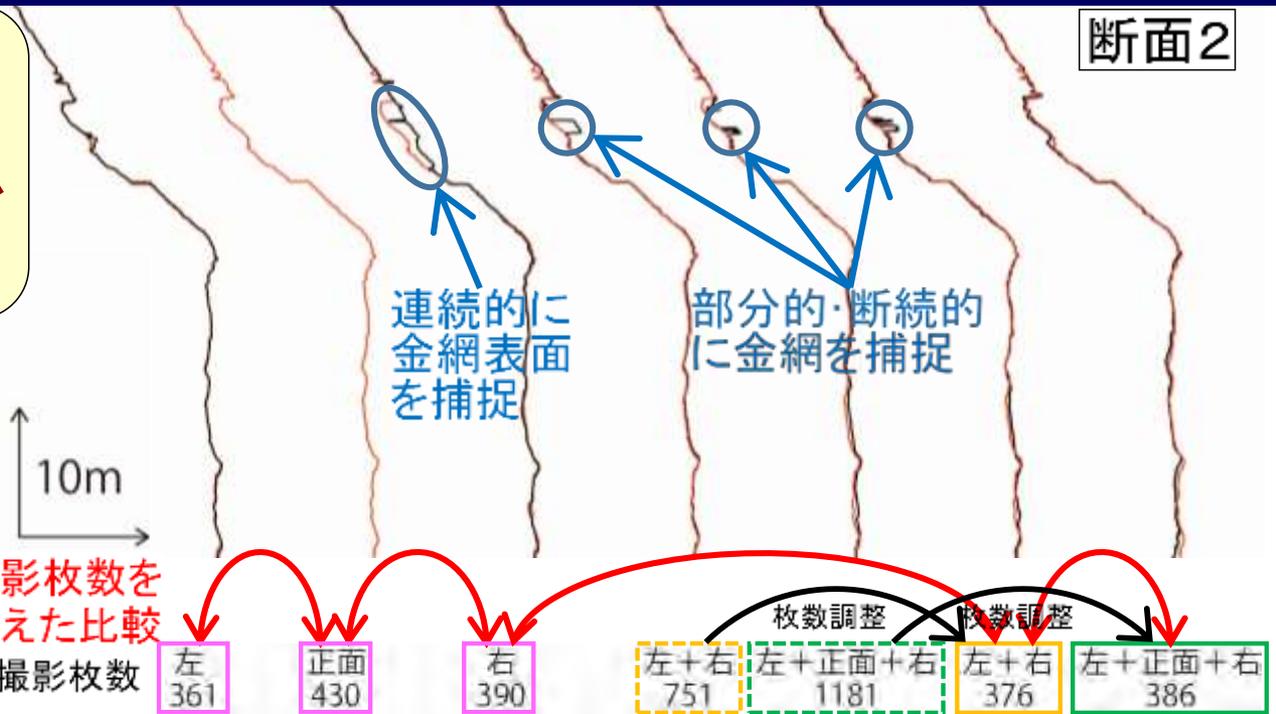


撮影距離が30m(分解能8mm)を超えると、オーバーハングがあまり正確には再現されていない。

結果②-1 水平撮影方向によるオーバーハング形状の違い



断面2



No.	撮影角度	写真枚数
1	左30°	361枚
2	正面	430枚
3	右30°	390枚
4	左+右	361+390→751枚
5	左+右	751→376枚
6	左+正面+右	361+430+390→1181枚
7	左+正面+右	1181→386枚

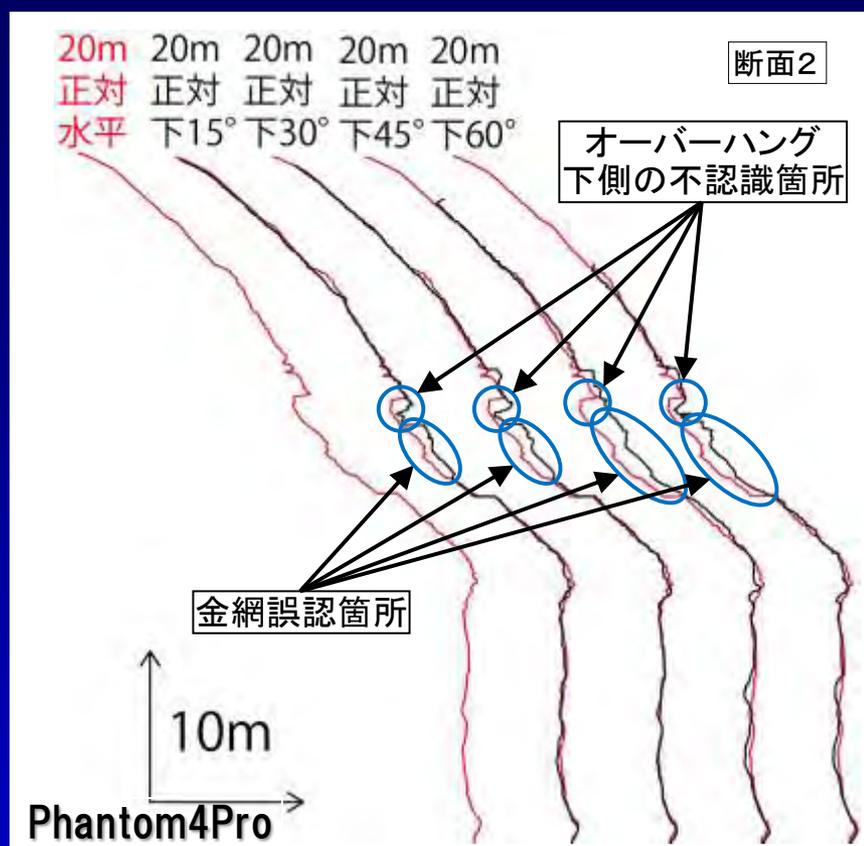
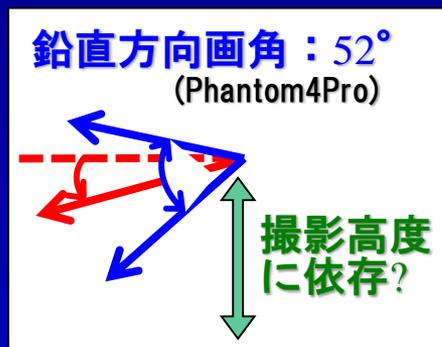
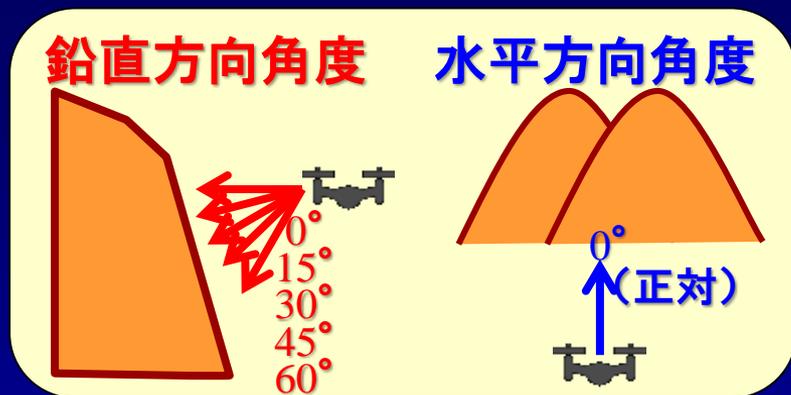
・ある特定の角度によっては著しく精度が悪くなる場合がある。

複数の撮影方向を混ぜ、合計写真枚数の調整も行うと、

- ・金網捕捉範囲も平均化されて部分的に減少
- ・数を揃えるために写真を間引いた方が金網捕捉範囲が減少
- ・右方向に金網を捉えた写真が多く、その枚数が影響していると推察

⇒ 写真状況に左右されて蓋然性が高いため、
撮影方向は正面1方向とし、個々の写真の画質を向上させる必要がある

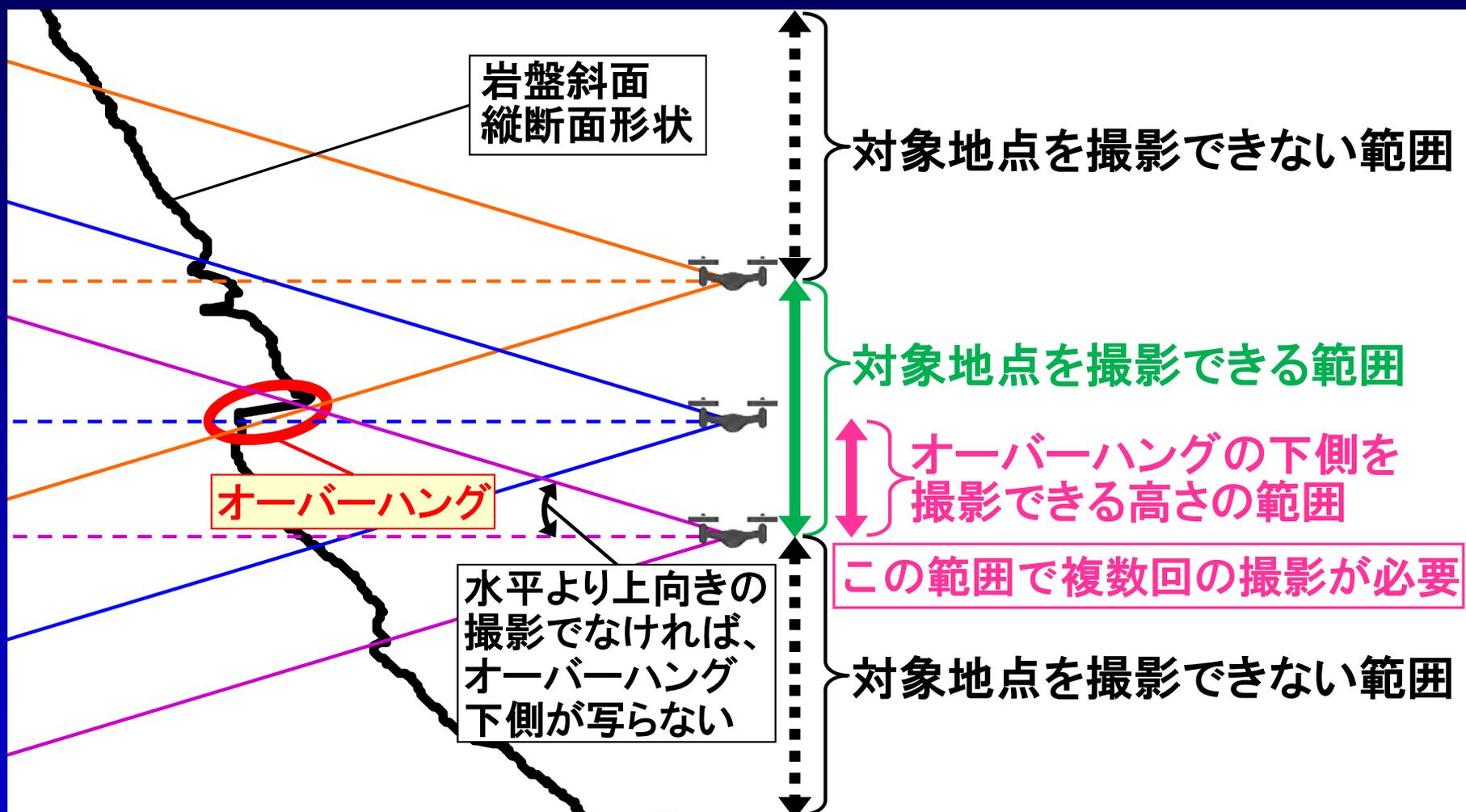
結果②-2 鉛直撮影方向によるオーバーハング形状の違い



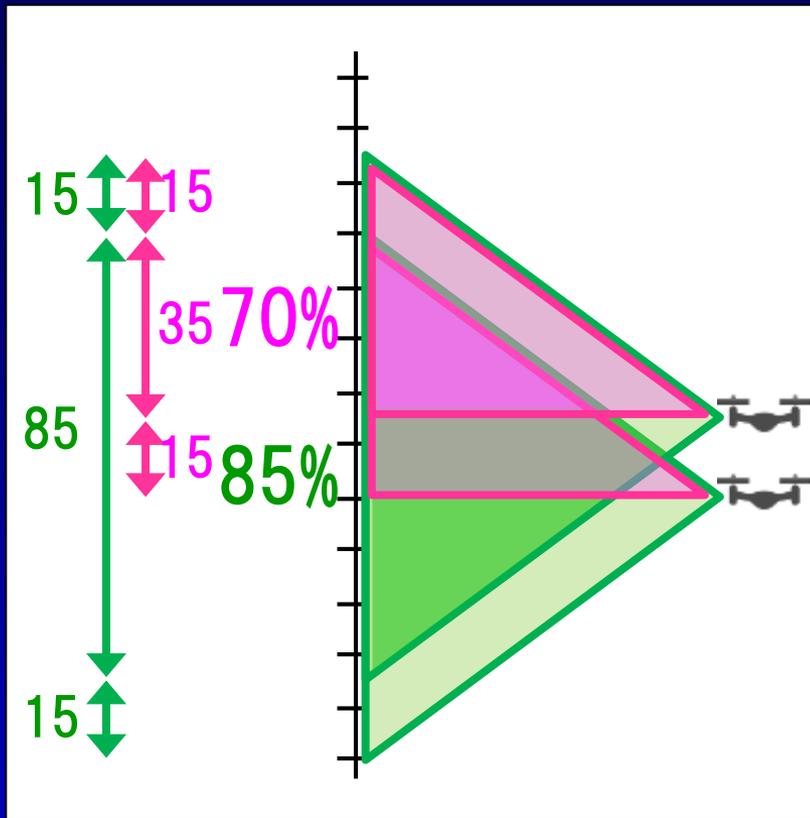
伏角が45度以上だとオーバーハング自体が不明瞭だが、伏角が画角の半分を越え、撮影位置より上方は写らないためと考えられる。

⇒ 水平方向の撮影を標準としつつも、オーバーハングを正しく捉えられる撮影位置や画角等について注意が必要である。

結果②-2' オーバーハング形状を把握できる撮影位置と画角



オーバーハングに対して必要となる鉛直ラップ率



撮影範囲 ズレ率	全体ラップ率 ／撮影枚数	上半部ラップ率 ／撮影枚数
X(%)	100-X[%] ／100/X[枚]	100-2X[%] ／100/2X[枚]
0%	100%／—	100%／—
5%	95%／20枚	90%／10枚
10%	90%／10枚	80%／5.0枚
15%	85%／6.7枚	70%／3.3枚
20%	80%／5.0枚	60%／2.5枚
25%	75%／4.0枚	50%／2.0枚
30%	70%／3.3枚	40%／1.7枚
35%	65%／2.9枚	30%／1.4枚
⋮	⋮	⋮

死角となりやすい顕著なオーバーハング部を撮影する時には、水平方向にカメラを向け、窪みより低い位置から、画角上半部でオーバーハング下側を捉える必要がある。

その際に、上半部で70%、全体で85%以上の撮影ラップ率が必要となる。

条件③ 撮影間隔(撮影枚数)による比較



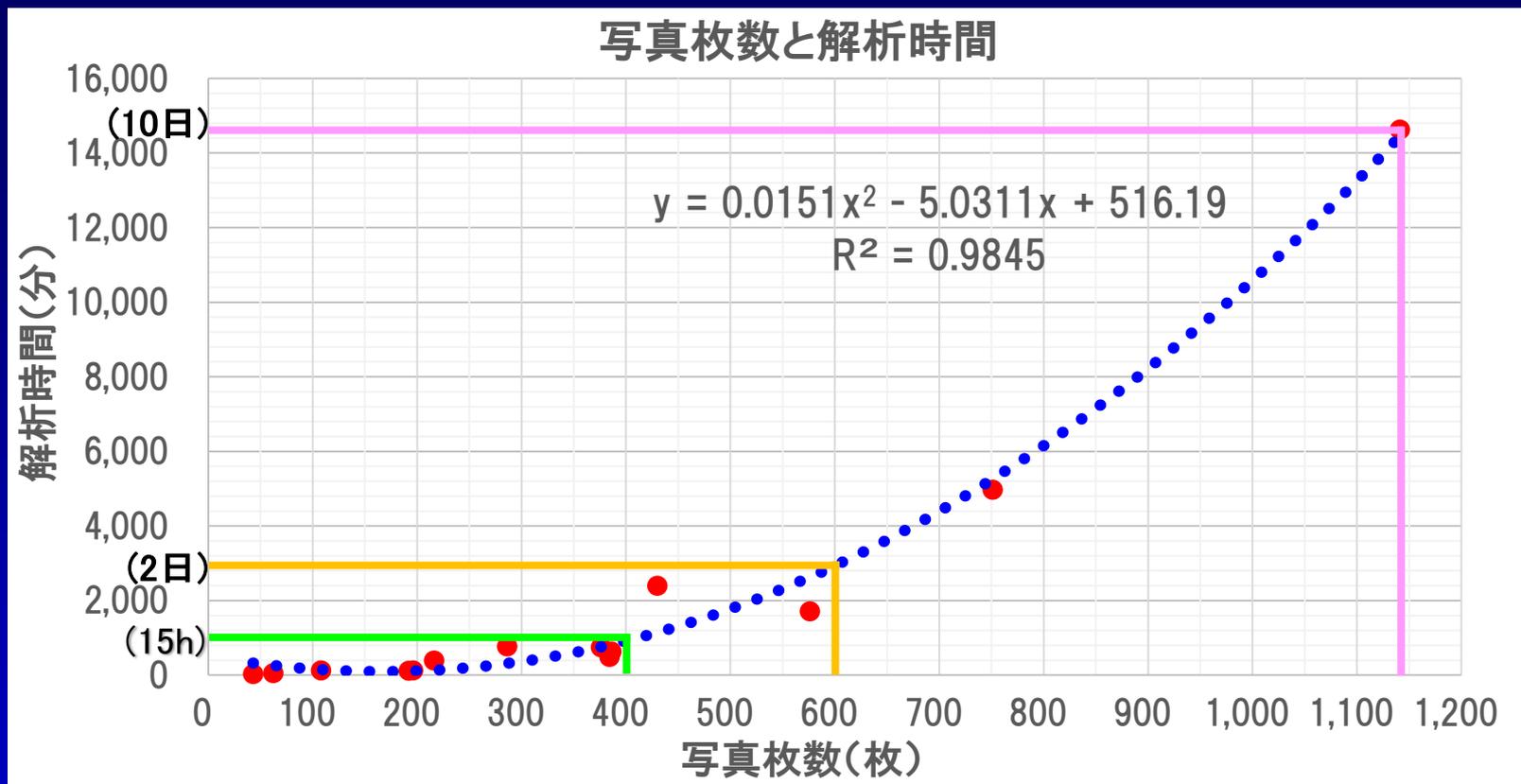
比高：100m 幅：100m
約40枚/100m × 8コース 計 430枚

間引き率	解析枚数	100m 当たり	撮影間隔
1	430枚	37枚	2.7m
2/3	286枚	25枚	4.0m
1/2	216枚	19枚	5.3m
1/4	108枚	10枚	10.0m
1/7	62枚	6枚	16.7m
1/10	43枚	4枚	25.0m

写真を間引き, 430→286→216→108→62→43枚の6ケースを比較

- ・写真の充足率(1点を何枚の写真が抑えているか)
- ・構築地形モデルの段面形状(金網の下の凹地形)

【参考】写真枚数と解析時間の関係

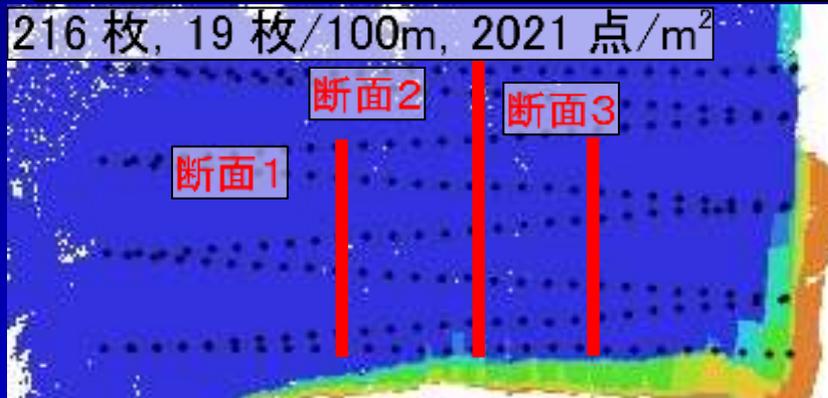


- ・ 写真の枚数が増えるほど、解析時間の増加割合も増す傾向が見られる。
- ・ 解析時間を2日以内とするなら、写真枚数は600枚に抑える必要がある。

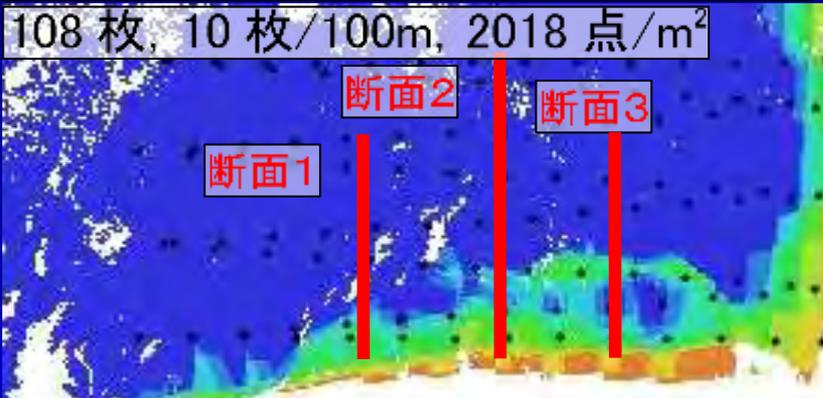
結果③ 撮影枚数・ラップ率によるモデル充填状況

4 ラップ率は、撮影枚数が216枚までは、概ね80%と以上で、108枚に減ると、UAVと斜面の距離が近くなる斜面脚部に、ラップ率20%程度となる範囲が出始め、43枚では、ラップ率40%未満が斜面中腹部まで及んだ上斜面中腹部や脚部にモデル空白域が見られる。

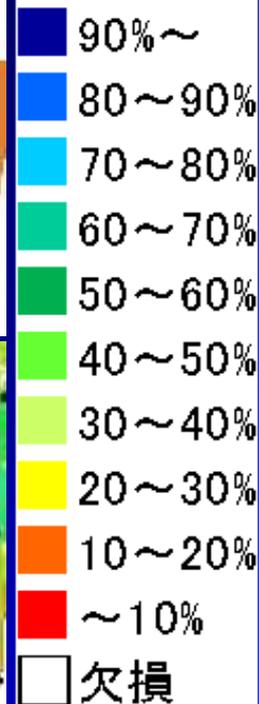
216枚, 19枚/100m, 2021点/m²



108枚, 10枚/100m, 2018点/m²



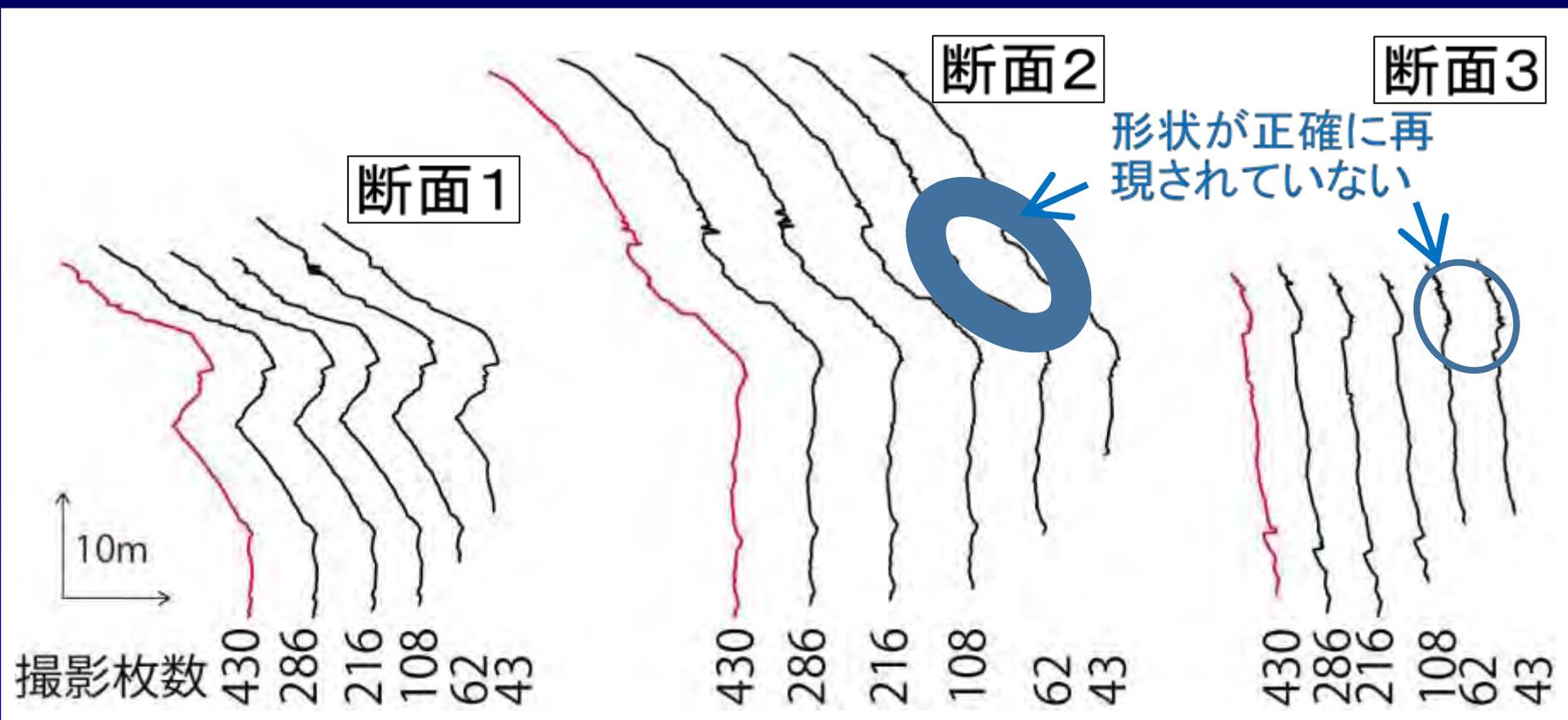
ラップ率



〔考察〕

- ・ 斜面の脚部は距離が近く、1回の撮影範囲が狭くなるため、上部斜面に比べ写真枚数(充足率)が低くなる傾向がある。
- ・ 最下段の1列については、鉛直ラップも見込みづらいため、特に注意が必要である。

結果③ 撮影枚数による断面形状の違い

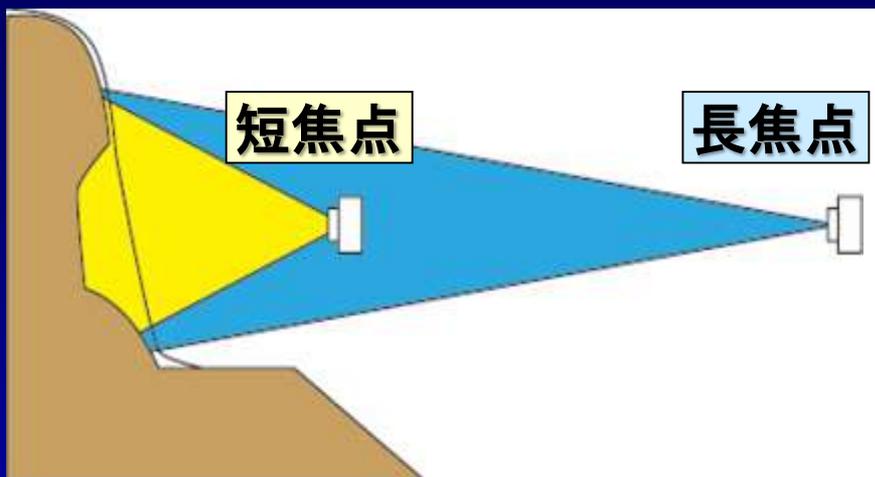


・撮影枚数が108枚以上では、点群密度が2,000点/m²強でほぼ等しくなり、地形モデル縦断面形状も差がない結果となった。

⇒地形モデル構築には、

点群密度が2,000点/m²以上となる撮影枚数があれば十分

条件④ 焦点距離による比較



分解能(撮影範囲と解像度)が等しくなるように撮影距離を調整し, 焦点距離の違いによる影響を評価した.



Inspire2+X5S
+15mmレンズ
画角:72°
分解能:11mm
撮影距離:40m

Inspire2+X5S
+45mmレンズ
画角:27°
分解能:11mm
撮影距離:110m

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 ²)
X5S	15mm	水平	1/400	100	403	5,369
	45mm				371	5,829

入射角度のバラツキによる構築地形モデルの差異

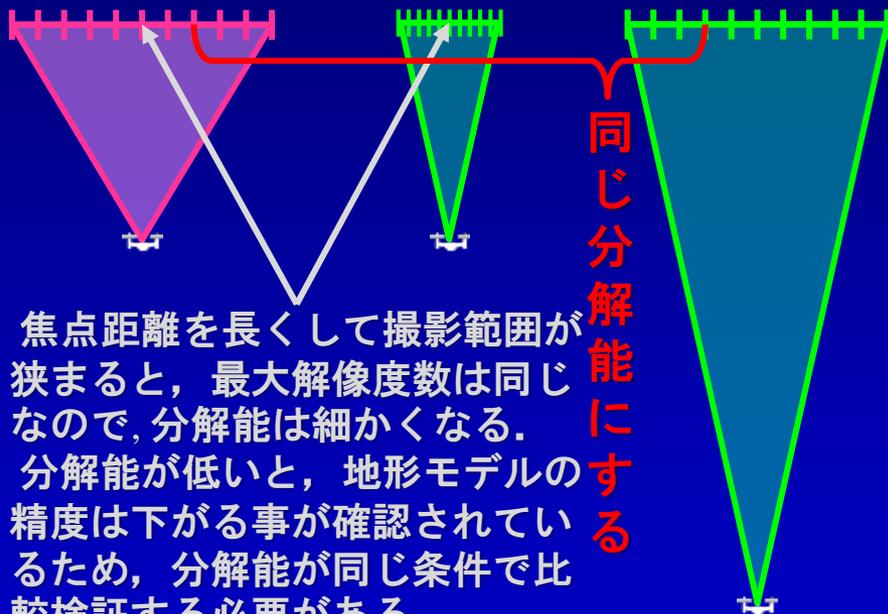
①最大解像度の設定で、焦点距離の小さいワイド端で撮影。

②最大解像度の設定のまま、焦点距離の大きいテレ端に変更。

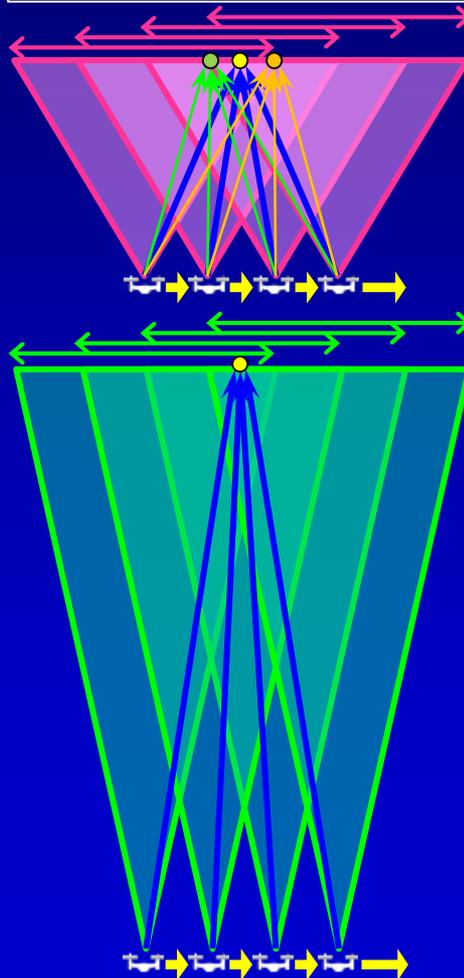
③分解能が等しくなるように、焦点距離に比例した距離で撮影。

④同じ水平移動距離で撮影することで、被撮影地点毎の射線数を等しくし、入射角のバラツキのみを変える。

⑤ラップ率が75%なら、4方向からの撮影となる。撮影斜線の振れ角は、ラップ率の分だけ画角より小さくなる。

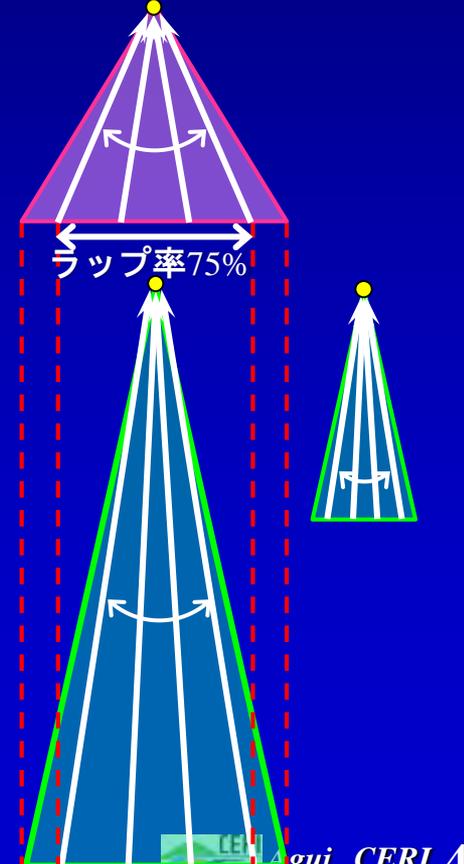


分解能や撮影枚数が同じ条件で、撮影斜線の振れ幅(角度)の大小によって、地形モデルの精度に差異が生じるかを検証する。

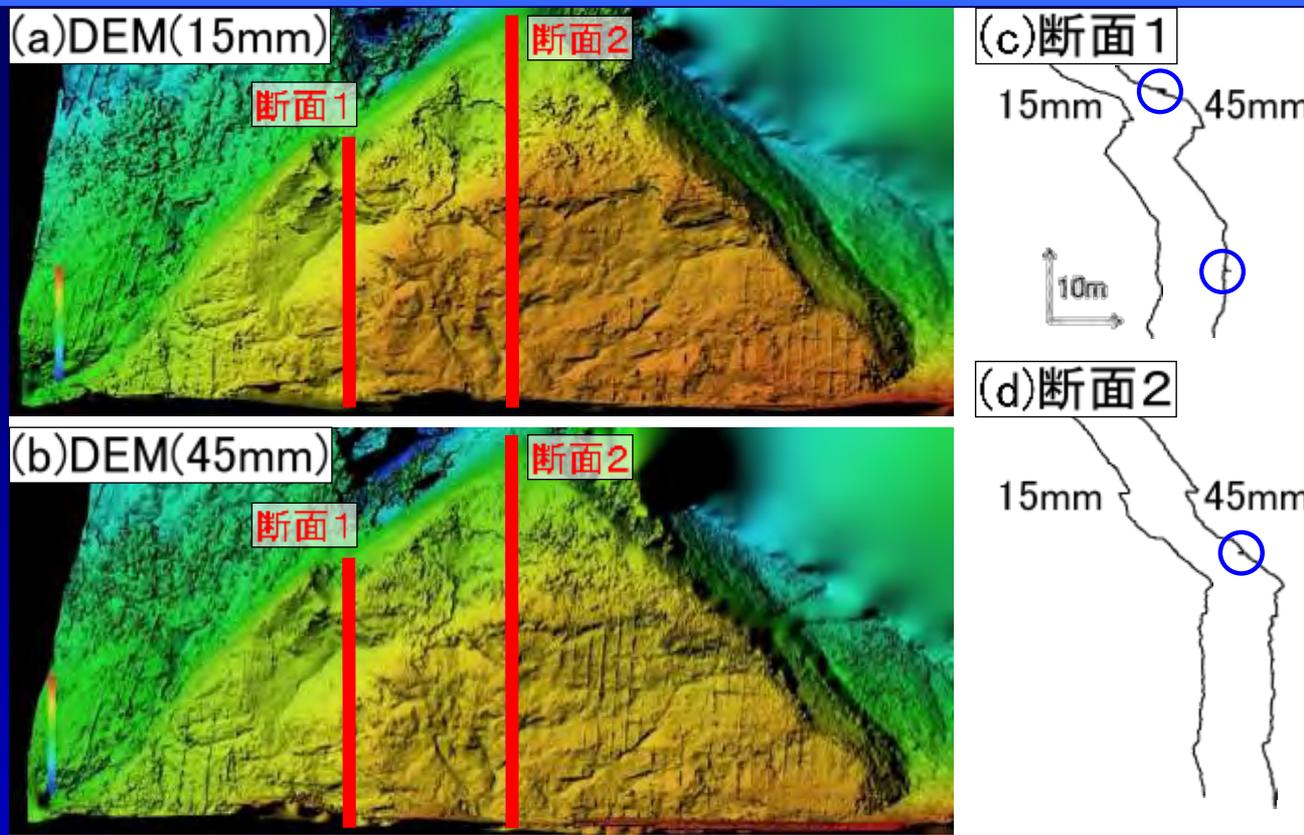


撮影斜線の触れ角

$$2 \tan^{-1} \left(\tan \frac{\text{画角}}{2} \times \text{ラップ率} \right)$$



結果④ 焦点距離による形状の違い



- ・全体的な断面形状はほぼ変わらないものの、
- ・望遠側(45mm)では、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。

⇒ 撮影範囲やラップ率が同じであれば、**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。**

条件⑤⑥ シャッター速度・航行速度による比較

等距離間隔で撮影するため、UAVを停止させずに一定速度で航行させながら、インターバル撮影をする場合がある。

シャッター速度を速くすると、ブレにくくなる一方で、画像は暗くなるため、地形モデルへの影響が懸念される。

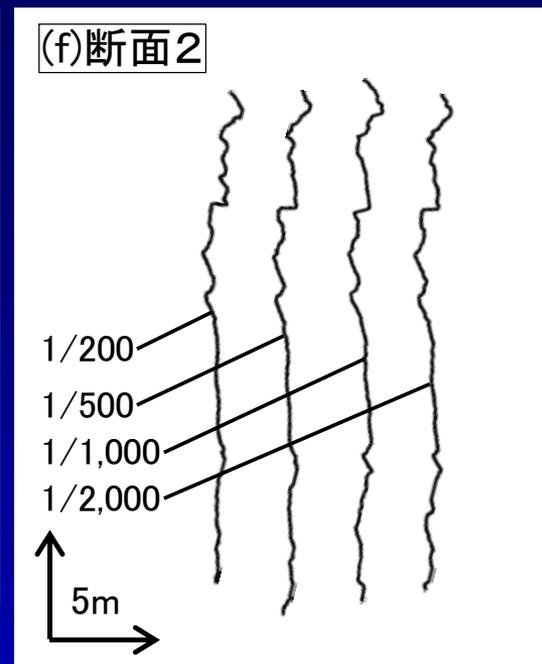
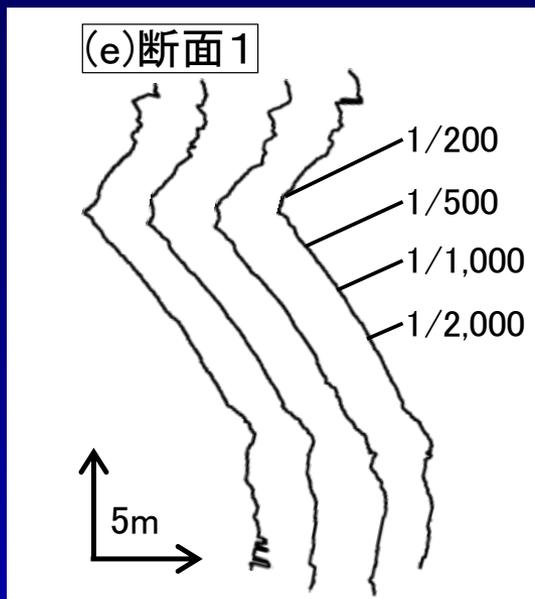
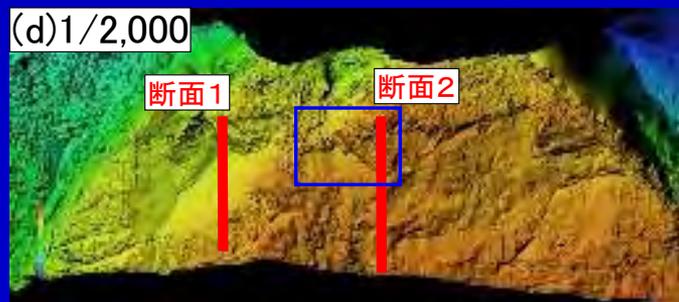
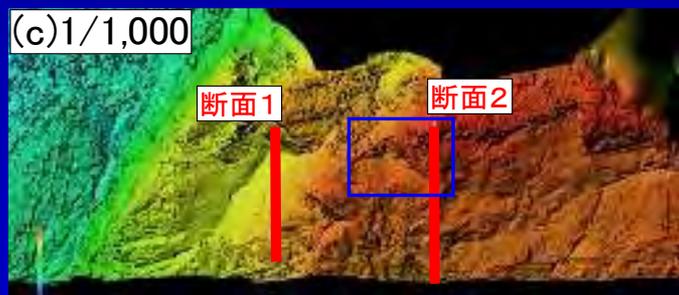
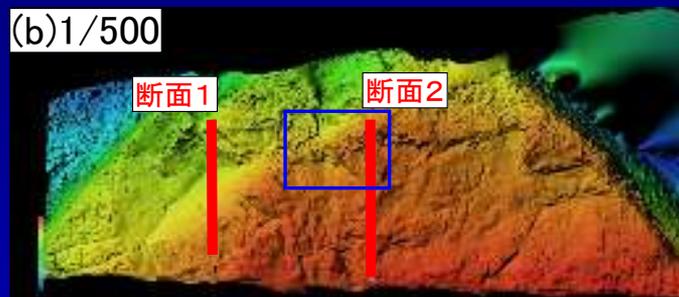
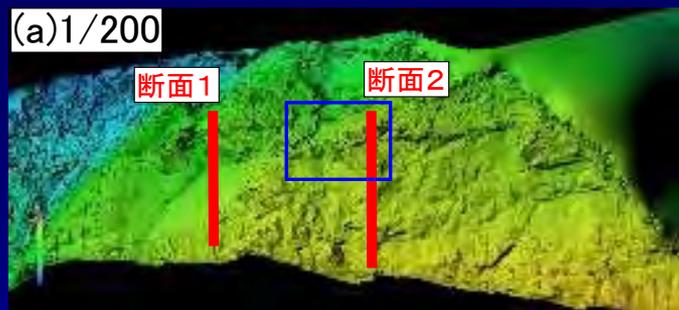
・シャッター速度の比較

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 ²)
X5S	15mm	水平方向に航行速度4km/hで停止せずに撮影	1/200	100	自動	57	5,637
			1/500			66	7,975
			1/1000			64	7,572
			1/2000			66	5,702

・航行速度の比較

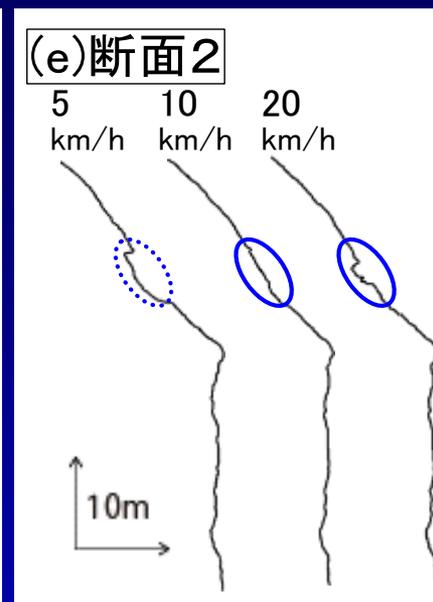
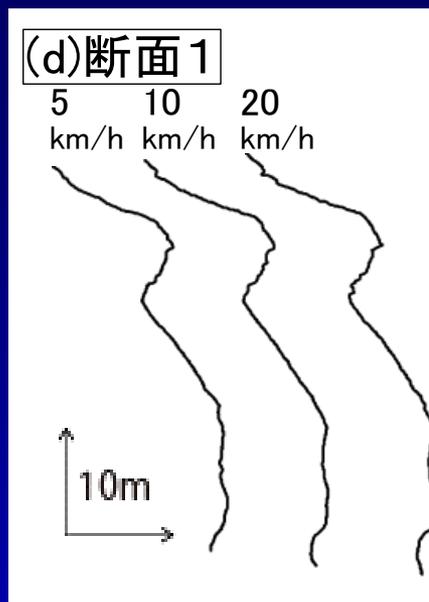
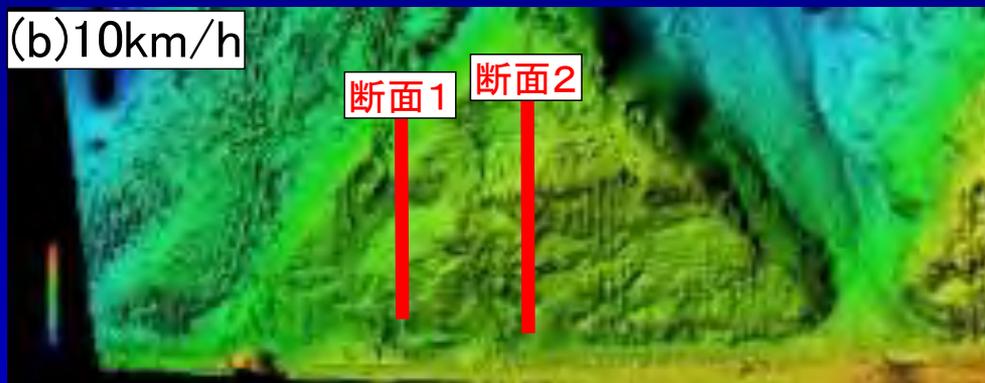
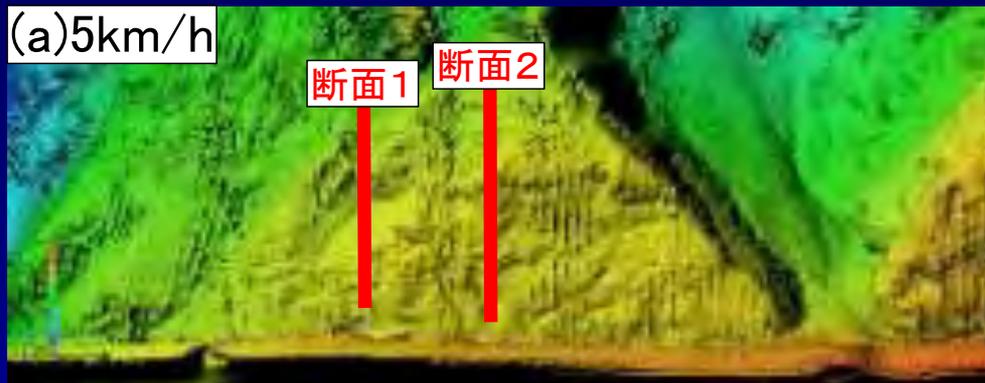
カメラ	焦点距離	撮影方法	航行速度	シャッター速度	ISO	写真点数	点群密度 (点/m ²)
X5S	15mm	水平方向に航行させて機体を停止させずに撮影	5km/h	1/320	100	38	450
			10km/h			18	466
			20km/h			9	425

結果⑤ シャッター速度による形状の違い



シャッター速度が早くなると手振れによる影響が低くなると考えられるが、航行速度が4km/hでは、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。

結果⑥ 航行速度による形状の違い



航行速度が5km/hを超えた2ケースで、凹地形の再現性が低い結果となった。航行速度の影響ではなく、航行速度の増加に伴って撮影間隔が広がり、写真枚数が減ったことが原因だと推察される。

条件⑦ 画像ファイルの圧縮率による比較

RAWファイル・・・非圧縮でファイルサイズは大きく、メディアへの記録に時間がかかり、連続撮影が困難。

撮影時の色情報などが記録されており、ソフトウェアによる後のレタッチ作業が容易。

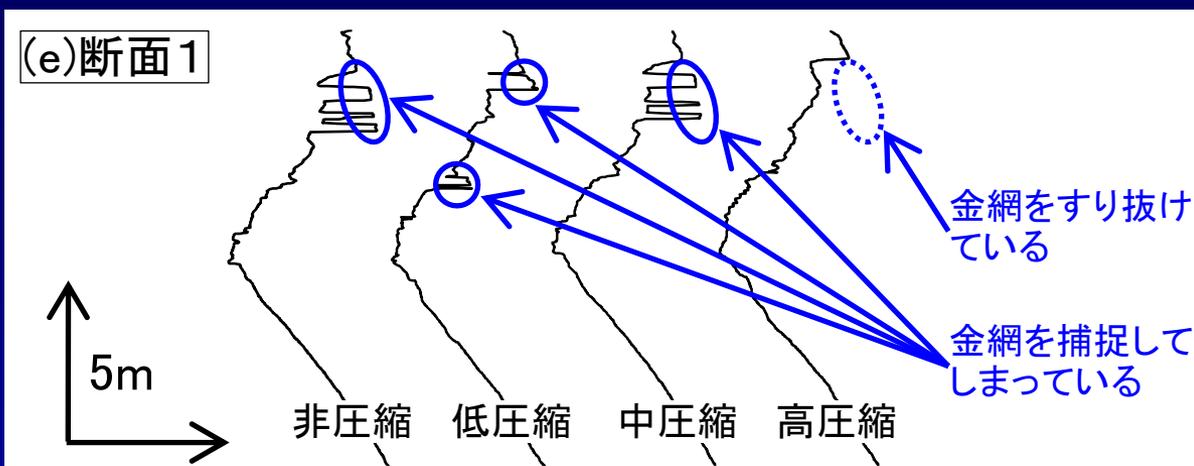
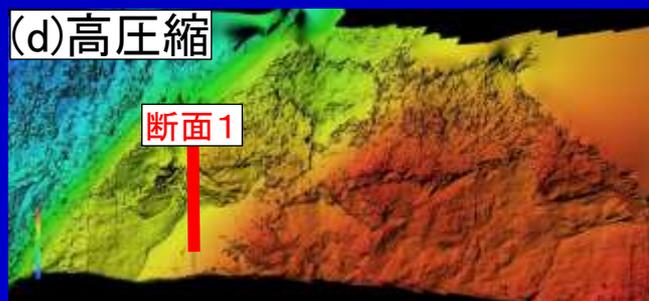
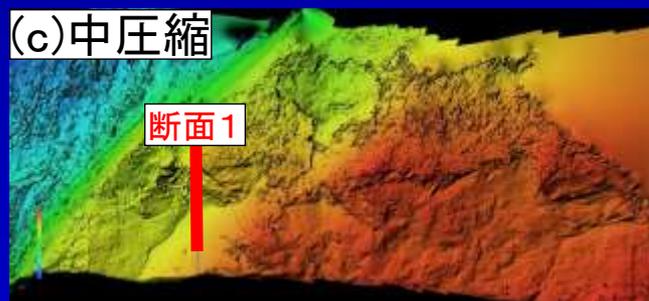
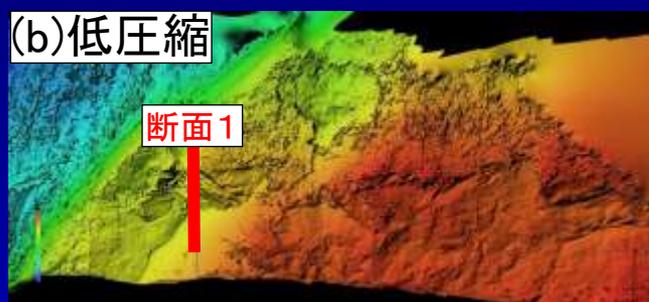
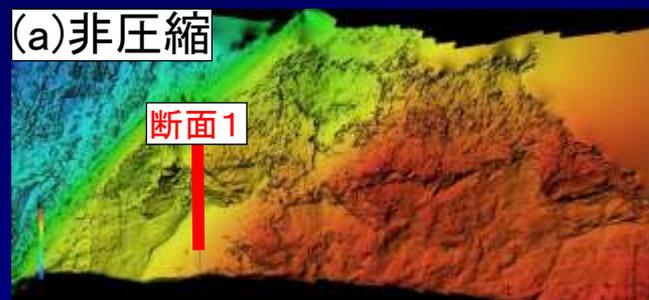
JPEGファイル・・・デジタルカメラ内で現像処理が済んでおり、非可逆圧縮されてファイルサイズは小さい。

現像時に色情報が固定されている上、圧縮により画質の低下が発生。

画像の圧縮による画質低下が、地形モデルへ影響するのかを確認する。



結果⑦ 画像ファイル圧縮率による形状の違い



全体形状に顕著な違いは認められない。金網が大きく浮くオーバーハング下位で、画質の悪い高圧縮の場合に、金網がほとんど捕捉されていなかった。このことは、画像圧縮過程で画像がぼやけ、細い金網上に特徴点を設定し辛くなったためと推察される。

金網下の形状把握に限定すれば、敢えて画質を落とすという試行も有効と思われる。

地形モデル構築に適したUAV撮影条件は

UAV-SfMを用いた、**金網**や**オーバーハング**のある急崖岩盤斜面の地形モデル構築に適した**UAV撮影条件**は、

- ・地形モデルの構築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、1点を複数回捉えた**ラップ率**の高い撮影を行い、**特徴点を高密度**(2,000点/m²)で偏りなく生成できる写真枚数で解析することが望まれる。
- ・その撮影の際、ラップ率が低くなり易い**最下段**は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である**金網**の下の**岩盤形状**を正確に把握するためには、**分解能が10mm**になるまで接近し、焦点距離の短い**広角側**の撮影が望ましい。その際、**オーバーハング****下端部**などでは、死角が生じないように**鉛直ラップ率**が**85%以上**となる小さな高度差での密な撮影が必要である。

最後に

斜面の維持管理・点検においては、斜面崩壊の引き金となるような兆候を見逃さずに捉えることが重要である。

デジタル画像処理，写真測量技術，UAVといった新しい技術を活用し，人の目では見落としがちな微細な変化を，漏れなく，また，経年的に把握することで，斜面災害の防止に繋がることを期待する。