

SfM 多視点ステレオ写真測量による地形モーデリングの基礎 内山庄一郎（防災科学技術研究所）・早川裕式（東京大学 CSIS）

SfM (Structure from motion) 多視点ステレオ写真測量技術による解析により、撮影対象物の立体モデルが作成される。地表面を撮影した写真を用いた場合、地表面の立体モデルが作成される。フィールドで取得した対空標識の位置座標を立体モデルに与えることにより、地理座標を持った地表面三次元モデルとなる。地図成果であるオルソモザイク画像は、この地表面三次元モデルを上から正射投影した画像であり、DSM (Digital surface model; 地表面数値標高モデル) は三次元モデルを一定間隔のメッシュで分割し、メッシュ内の標高に相当する値が格納されたデータである。これらの情報を GeoTiff ファイル等の地理空間情報として出力することにより、最終的な地図成果が得られる。

なお、本稿では、一部に古いバージョンの図や説明があります。

写真測量の特徴：レーザー測量との対比

写真測量とレーザー測量は相補的な特徴を持ち、どちらがより優れているかという議論は適当ではない。それぞれの手法の特徴をよく把握し、適切な手法を選択する。

1) 情報を取得する手法の違い

写真測量は、レンズを通して撮像素子 (CMOS 等) に入射した物体からの可視光線の反射光をデジタル的に增幅して得られた画像（写真）を使用する。いわば Passive なセンシング技術。写真測量、特に SfM 写真測量では、画像中の「特徴点」を抽出し、隣接画像と共に特徴点について、撮像素子とレンズ焦点位置から特徴点を通る光線の関係性を解析することにより、物体の立体形状を求める。つまり、SfM 写真測量では十分な数の特徴点が得られることが必要条件となる。この条件を満たさない物体、つまり計測に向かない物体は、透明なもの、テクスチャが弱い・ないもの (ex.ホワイトボード) 、光沢が強いもの等が挙げられる。

レーザー測量では、計測装置からパルスレーザーを発射し、物体で後方散乱した反射波を受光し、物体までの距離と反射強度の情報を得る。いわば、Active なセンシング技術。レーザー測量では、物体に対し直接レーザーを放射するため、物体表面のテクスチャの有無はほとんど影響がない。

2) 取得できる情報の違い

写真測量は、二枚の写真に写っている物体上の同じ点を、三角測量の原理で座標計測する。したがって、取得できる情報は、複数の写真に写っている対象物の計測値である。言い換えれば、写真に写っていない物体（例：森林の下の地面）や、複数の写真に写っていない（単体の写真にしか写っていない）物体については、計測を行うことはできないため、情報は得られない。また、可視光カメラを使用する場合は、夜間や暗い屋内など、環境光が十分ではない条件では計測（写真撮影）を行うことができない。

レーザー測量では、計測装置から放射したレーザー光が物体に反射して、計測装置に到達するまでの時間を計測する。この原理により、装置から物体までの距離情報を得る。一回のレーザー光の放射により、経路上の複数の物体からの反射波を得る。例えばレーザー光が樹冠の隙間を通過して地表面に到達した場合は、樹冠の天面および地表面までの距離の、少なくとも二つの距離情報を得ることができる。さらに、自らレーザーを照射するため、環境光の影響は少ない。ただし、霧や雲、水面など、レーザー光を吸収する物質で満たされている場合は計測することができない。回転ミラー等の装置でレーザー照射角を変化させることにより、ライン状に距離情報を取得する。また、航空機などの移動体に搭載する、あるいは装置そのものを水平に回転させることにより面的に走査する。

3) 情報の取得にかかる時間の違い

いずれの手法も、計測や撮影の時間に加えて、解析や編集にかかる時間を要する。

写真測量では、一枚の写真撮影に要する時間は露光時間（シャッタースピード）に依存する。例えば、晴れの日の屋外であれば、露光時間は 1/1600 秒前後となる。写真測量では、対象物の三次元形状を求めるために、異なる位置から対象物を撮影した複数枚の写真を必要とする。カメラリグ（数個～数百個のカメラが設置された設備）を使用すれば、多視点の写真を一回のシャッターで撮影することができるため、動く物体の計測も可能である。地形のように、対象物のサイズが大きく不動な場合は、航空機等で飛行しながら垂直直下方向の写真を撮影することで多視点の写真を撮影する。この場合は、情報の取得にかかる時間は長くなる。

レーザー測量では、装置から発射されるレーザーは 1 管であるが、装置の内部にある回転ミラーを高速で動かすことにより、上下または左右方向について、連続的にレーザーの放射と反射波の受光を行う。装置を移動体（航空機や車両）に搭載し移動しながら計測を行うことにより、地表面をシームレスにスキャニングする。この場合、慣性航法装置等により、装置の三次元的な位置計測も同時に必要となる。地上レーザー測量の場合は、計測装置をゆっくりと回転させることにより水平方向をスキャニングする。写真のように一回のレーザー照射でシーン全体の情報を得ることができないため、動体の計測は難しい。

4) 解析にかかる時間の違い

写真測量、特に SfM 写真測量の場合は、使用する写真の総画素数と枚数、ワークステーションの計算性能に依存する。ハンズオンでは非常に高速な例として、400m 四方を 120 秒程度でオルソモザイク画像まで作成するデモを行った。計測に使用するための精密な解析では、数時間から時に 100 時間を超える計算処理を必要とする。利用目的に応じて解析の時間コストの調整ができるこども特徴である。

レーザー測量、特に 地上レーザー測量の場合は、点群データの地上基準点へのジオリファレンス、地表面と乖離した位置に生じた計測点などのノイズフィルタリング、複数の地点から計測した点群の位置合わせを行うレジストレーションなどの作業を行う。

5) 精度の違い

中距離（数百メートル）における SfM 写真測量、地上レーザー測量では、同程度の分解能が期待できる。精度に関しては、いずれの計測手法も計測手法の技術的な原理のみを根拠とした単純比較はできない。原理的な誤差、計測環境に起因する誤差、地上基準点の座標計測誤差、観測技能による誤差のいずれもが、有意に最終的な精度に影響を与えることがその理由である。

計測手法の技術的・原理的な誤差として、例えば写真測量であれば、レンズ歪み補正の不完全さに起因するゆらぎ、レーザー測量であれば、レーザー光の入射角と後方散乱の関係による精度劣化や大気・距離による減衰がある。着目すべきは、どちらの手法であっても、必ずしも全域で一様の計測精度が保証されないことである。また、写真測量、レーザー測量とともに、地上基準点の座標計測誤差が強く影響する。技能による誤差要因として、写真測量であれば写真の品質、オーバーラップの取り方、地上基準点の設置の方法が影響する。レーザー測量では、機器の設置誤差、レジストレーション地点や地上基準点の設置方法が影響する。

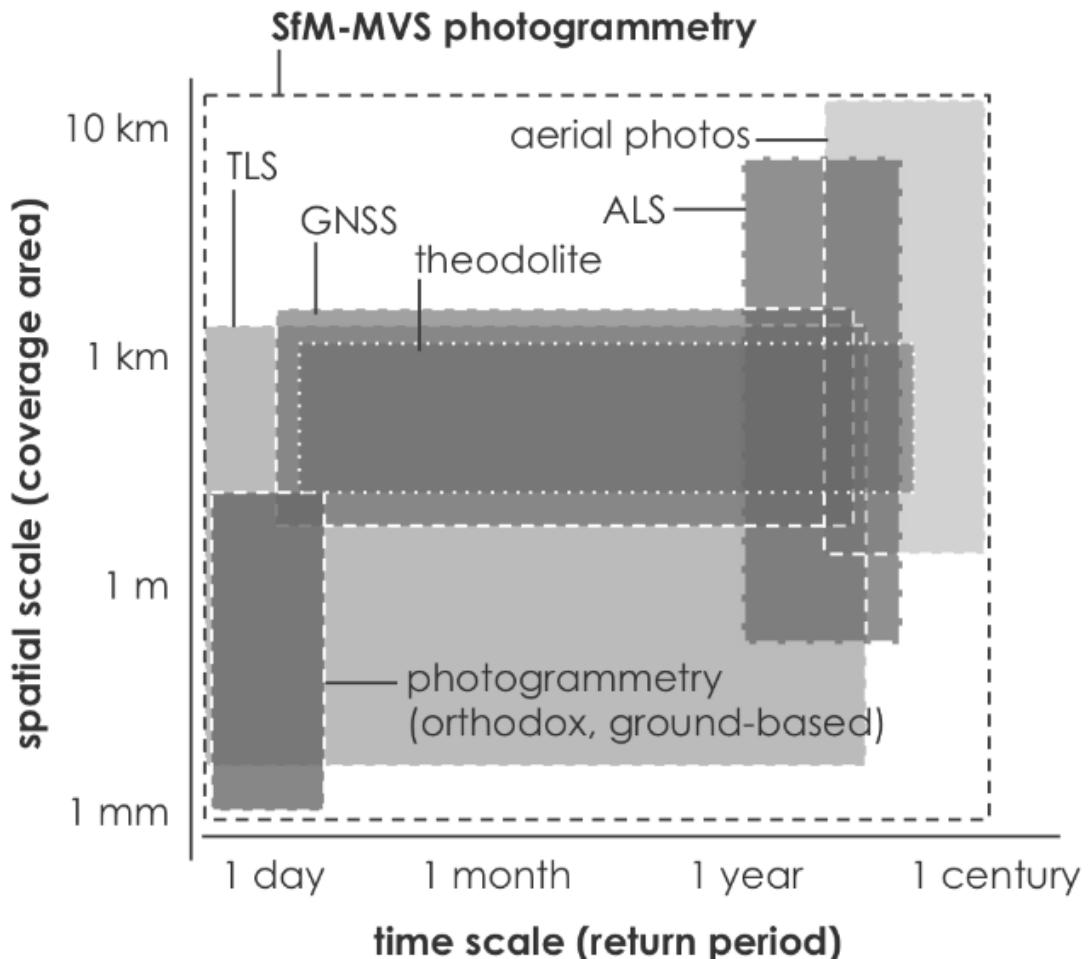


Fig. 1. Coverage of spatial and time scales by various methods for topographic measurements (modified after Heritage and Large, 2009). SfM-MVS photogrammetry covers almost entire space of these methods.

出典：早川・小花和（2016）小型無人航空機を用いた SfM 多視点ステレオ写真測量による地形情報の空中計測. 物理探査, 69 (4), 297-309. doi:10.3124/segj.69.297
http://www.csis.u-tokyo.ac.jp/~hayakawa/resources/Hayakawa_Obanawa_2016_UAS-SfM_ButsuriTansa.pdf

6) 導入にかかる初期コストの違い

写真測量を行うには一般的に、1) 対象物に対する多視点の写真、および 2) 写真内の地上基準点とその座標値を必要とする。近年は、民生用のデジタルカメラの高解像度化、GNSS の低価格化、無人航空機の普及と SfM ソフトウェアのパッケージ化などによって、100 万円未満の初期コストで、数 cm の分解能を持つ地図成果（オルソモザイク画像、地表面標高モデル）を得ることができる。

航空レーザー測量の実施は、専門の機材と技術を保有する事業者に依頼する必要があり、コストも相応の大きさとなる。地上レーザー測量の機材は、数百万円～3000 万円程度であり、初期投資としては大きい。

7) 観測コスト、機動性、観測頻度の違い

航空レーザー測量や航測カメラを使用した航空写真測量は外注による作業を行う必要があり、一回の観測コストは大きくなる。無人航空機を使用した写真測量や地上レーザー測量は、観測の度に必要な特別な費用は発生しないため、観測場所までの旅費を除外すれば、一回の計測コストは小さい。一回のデータ取得にかかるコストが低い手法であれば、定期的、あるいは頻回の観測や、イベント（豪雨、崩壊等）直後の機動的な観測が実施しやすい。計測コストの低さは、現実的な観測頻度となって現れる。UAV と SfM 写真測量による観測や、地上レーザー測量のように、個人レベルで可搬・運用できる機材は機動性が高く、より高い観測頻度を実現しうる。これは、時間分解能の向上に寄与する

8) 機動性に影響を与える可搬性の問題

加えて指摘するならば、観測機材の物流ネットワークによる輸送の可否は重要である。大手物流（日本郵便、ヤマト運輸、佐川急便）の標準的な最大荷物サイズは、3 辺合計 160cm、最大 30kg であり、これを超える荷物の発送には制限が生じる。機材の梱包時のサイズを把握することは、観測機会の確保において現実問題として重要である。

無人航空機に限らず、大容量のリチウムポリマー・バッテリーには、輸送や航空機搭載に関する制限がある。航空機や物流会社による輸送が法的に困難である場合、自分が運転する車で輸送する必要があり、機動性に大きく影響する。目安として、電圧 (V) と容量 (Ah) の積が 100Wh を超えるバッテリーは、輸送前に航空会社や運送会社に輸送の可否を確認する必要がある。

同様の観点で、海外での計測を行う場合は、輸送方法と所要時間、輸出入の可否、許可取得、相手国における関連法規（電波、航空、機器使用）等、いくつかの課題を解決する必要がある。

目次：

1. 基幹技術
2. 写真測量のソース（写真画像）
3. ハードウェア
4. PhotoScan 初期設定
5. Lens（レンズ歪み補正ソフトウェア）
6. Workflow: Align Photos
7. Workflow: Build Dense cloud, および Build Mesh
8. Workflow: Build Texture
9. Mask 处理
10. 複数 Chunk 处理

1 基幹技術

SfM-MVS ソフトウェアは、以下のようなコンピュータビジョン分野の研究成果およびソフトウェアメーカー独自のアルゴリズムがパッケージされたものである。ここでは、Agisoft PhotoScan を使用し SfM 多視点ステレオ写真測量による地形モデリングを学ぶ。

1.1 画像マッチング、撮影位置・方向（カメラポジション）推定

➢ SIFT: Scale-invariant feature transform

http://en.wikipedia.org/wiki/Scale-invariant_feature_transform

➢ Bundle adjustment

http://en.wikipedia.org/wiki/Bundle_adjustment

1.2 三次元モデル生成

➢ SfM: Structure from motion

http://en.wikipedia.org/wiki/Structure_from_motion

➢ PMVS: Patch-based Multi-view Stereo

<http://www.di.ens.fr/pmvs/>

➢ CMVS: Clustering Views for Multi-view Stereo

<http://www.di.ens.fr/cmvs/>

1.3 PhotoScan と同種のソフトウェアの一例（アカデミック、非商用はフリー）

➢ VisualSFM : A Visual Structure from Motion System

<http://ccwu.me/vsfm/>

2 写真測量のソース（写真画像）

写真測量成功のための重要なポイント：高品質かつ十分な数の写真を用意すること。解析に投入する一連の写真の品質で決定する。

2.1 高品質：以下の条件を満たす写真を撮影する

- カメラブレがない
- グラウンドスミア（GSD よりも移動速度が速い際に発生するブレ）がない
- ピントが合っている
- 明部（ハイライト）が白飛びしていない（Fig.2.1）
- 暗部（シャドウ）が黒潰れしていない（Fig.2.2）
- カメラ側で輪郭補正などの不要な処理が無いくこと（Fig.2.3）
- JPEG 圧縮ノイズ（ブロック状のノイズ）が出でていない（Fig.2.4）
- 高感度すぎる ISO 設定によるノイズが出でていない（Fig.2.4）
- 解像度が高い：最低 5Mpx。高画素すぎると別の問題も生じうる（後述）
- 適度な広角画像：27~50mm（35mm 換算）程度がベスト（Fig.2.5, Fig.2.6）
- 撮影位置情報を持つ：GNSS 等で計測された経緯度・標高
- EXIF 情報を持つ：f 値、焦点距離
- ビルトインレンズプロファイルが【適用されていない】こと（Fig.2.7 左）
- できれば RAW 形式で撮影された写真を使用する（Fig.2.7 右）
- 画素の位置が変更になるようなレタッチを【行ってはならない】

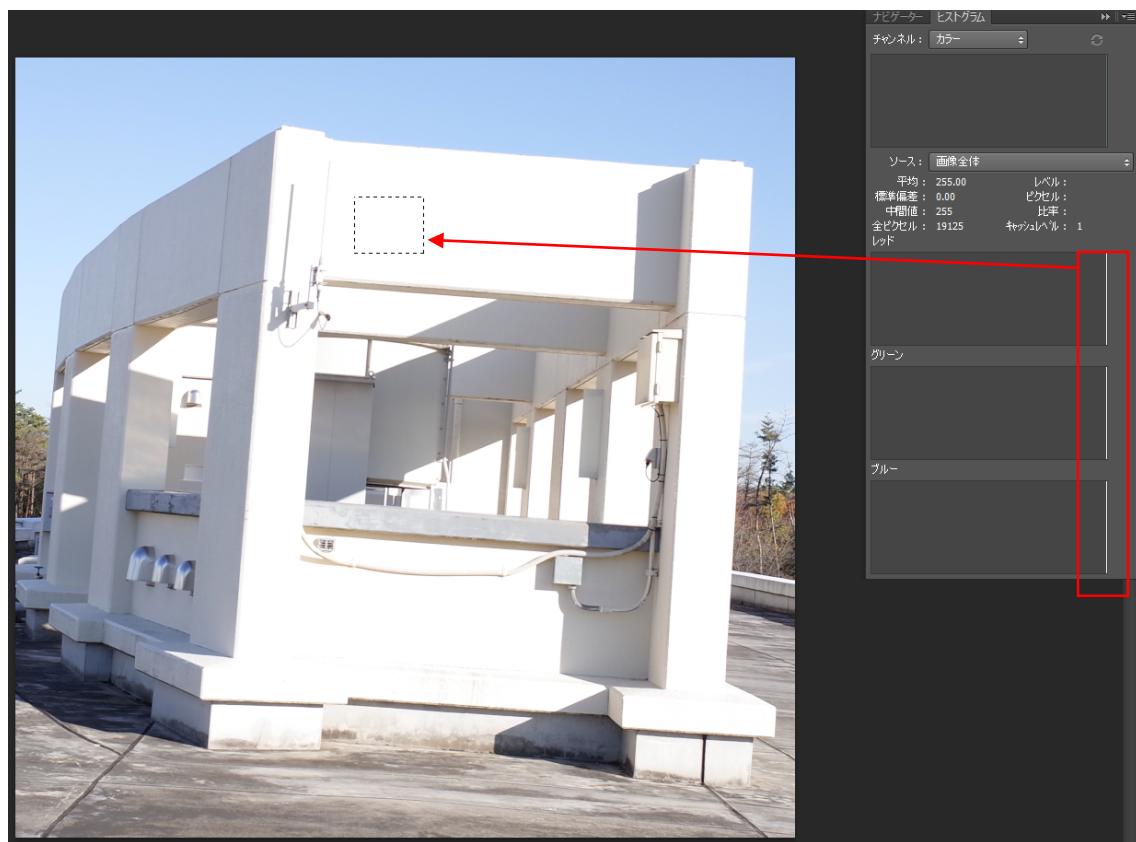


Fig.2.1 明部（ハイライト）の情報が失われている（白飛び）

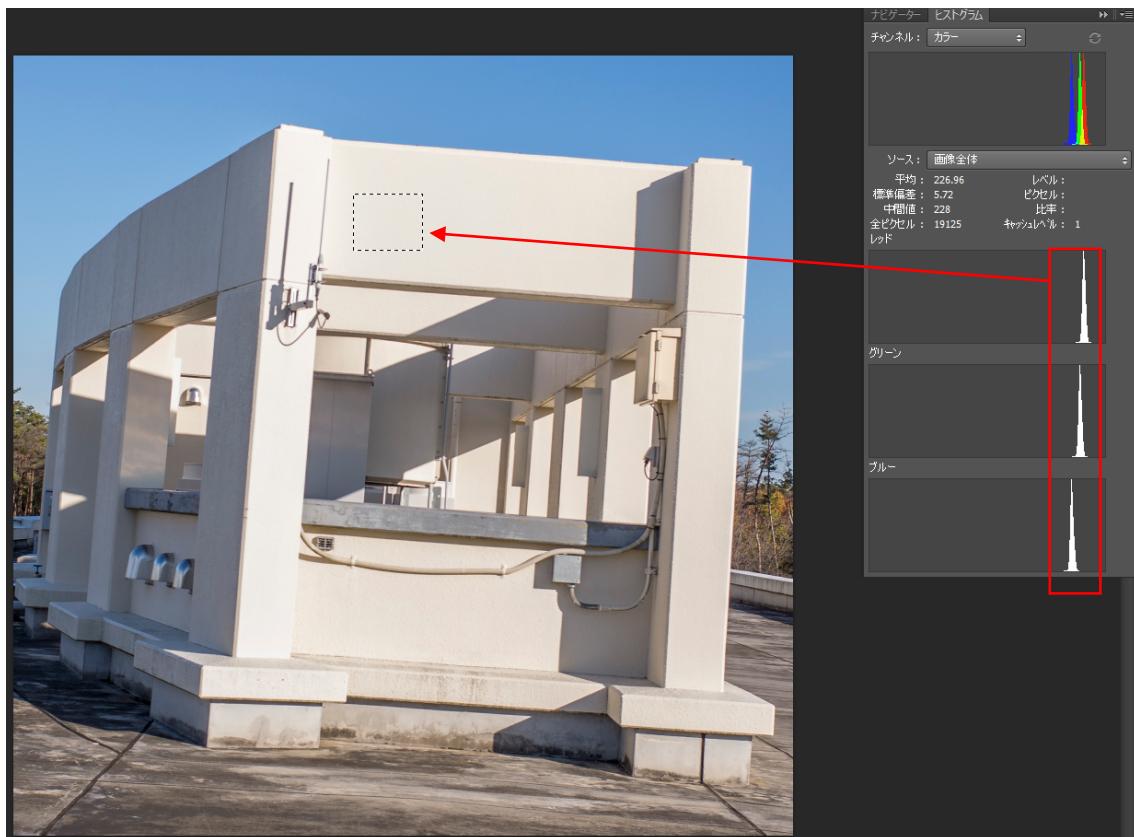


Fig.2.1 白飛びした場合、RAW 画像から明部（ハイライト）の情報を復元すること

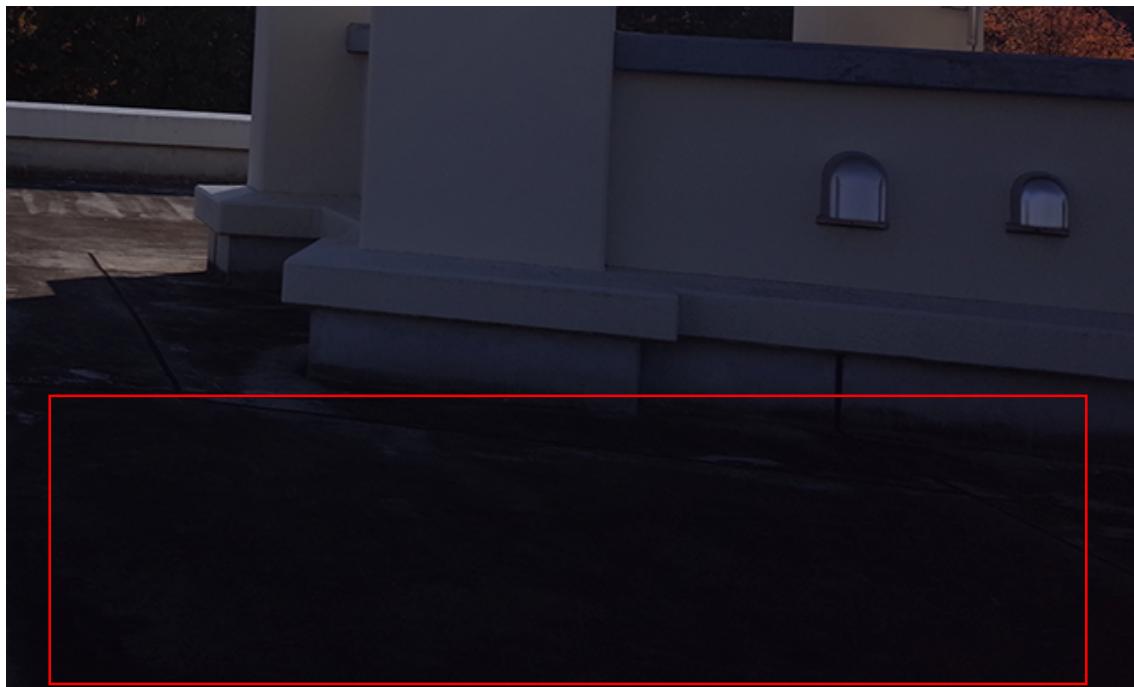


Fig.2.1 暗部（シャドウ）の情報が失われている（黒潰れ）



Fig.2.1 黒潰れした場合、RAW 画像から暗部（シャドウ）の情報を復元すること



Fig.2.3 カメラ側の画像処理エンジンで行われる不要な画像処理の NG 例。樹林のテクスチャーガベた塗りの水彩画のようになっている（GoPro3 画像の等倍表示）。輪郭補正、超解像処理、様々な機能が提供されているが、写真測量には一切不要。全部オフにする。



Fig.2.4 ノイズが多い画像の NG 例。ブロック状の JPEG 圧縮ノイズ、高すぎる ISO による虹色粒状のノイズが画像全面に観察される。（GoPro2 画像の等倍表示）



Fig.2.5 広角過ぎる画像の NG 例：画角 170 度の超広角レンズにより、画像周辺が激しく変形している（GoPro2 画像）

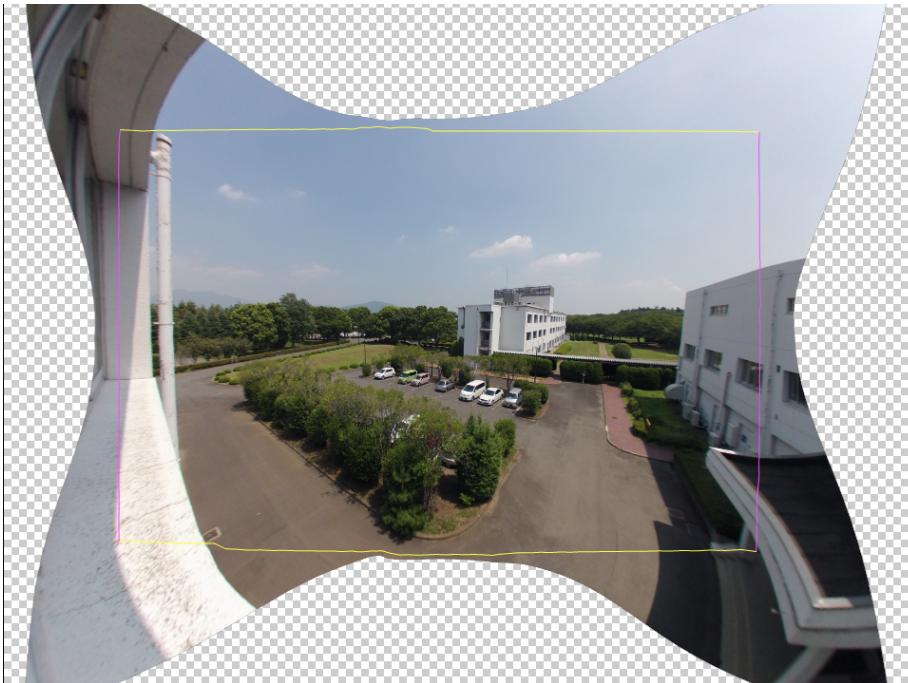


Fig.2.6 広角補正（レンズ歪み補正）の例：超広角レンズで撮影した画像に対しレンズ歪み補正をかけると、周辺は切り落とされる。残った画像のサイズはオリジナル画素数の半分以下に減少する。さらに、歪み補正処理によって画像の鮮明度（シャープネス、解像感）が低下する。オーバーラップ率も低下する。超広角レンズは撮影範囲が広くて魅力的に思える場合もあるが、写真測量の精度の面では、良いことは何も無い。



Fig.2.7 (左) ビルトインレンズプロファイルを適用しないこと

Fig.2.7 (右) 可能な限り RAW 形式で記録すること

2.2 用意する写真の分量

撮影対象のサイズ、撮影距離、対象物の凹凸度に応じて以下の条件を満たすこと。いうまでもなく、写真に写っていない部分の 3D モデルを構築することはできない。

- 地形モデルを作成する場合は、垂直写真を撮影する。必要な写真のオーバーラップ（重複）率は進行方向、横方向ともに 80%。
- 建物や石ころなどの 3D オブジェクトの場合は、対象物に対し平行移動で撮影する (Fig.2.8, 2.9)。あるいは、対象物を中心にカメラを回して撮影する (Fig.2.10, 2.11)。
- 対象物の凹部の内側の形状も再現したい場合は、写真のオーバーラップを高くする。撮影対象までの距離が近いほど、再現したい凹部が深いほど、高いオーバーラップ率で写真を撮影する必要がある

- 撮影位置を定位置に固定して、撮影方向だけを変えることは NG。画像間に視差が生じないため、モデル作成に失敗する。

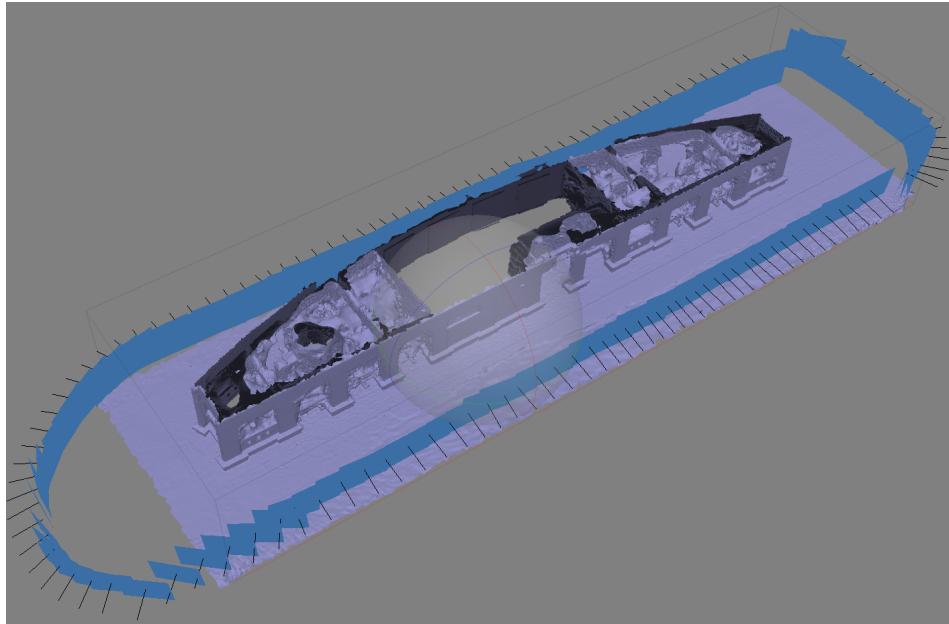


Fig.2.8 建物を撮影する場合のカメラ位置。対象物に対して平行移動で撮影する。（建物屋上の構造物、長さ 40m、高さ 3m）

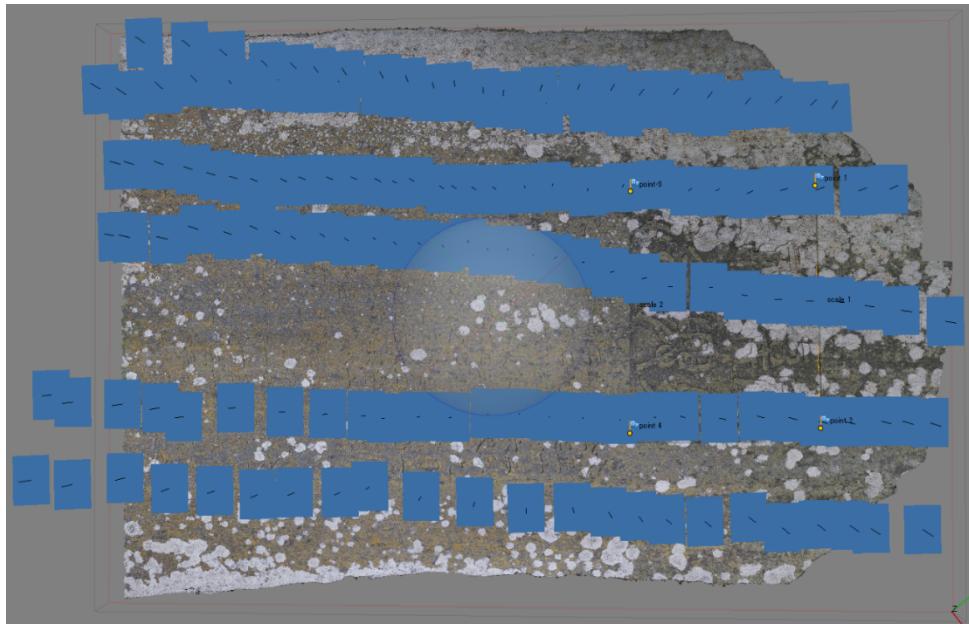


Fig.2.9 平面的なオブジェクトを撮影する場合のカメラ位置。オブジェクトに対して平行移動で撮影すること。（石碑、高さ 1.5m、幅 0.6m）

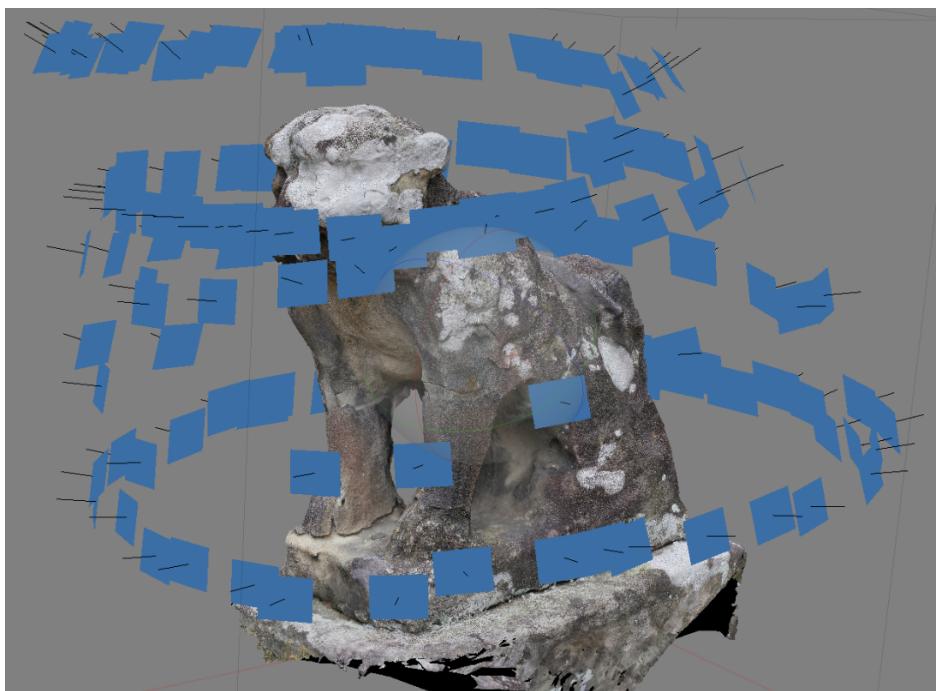


Fig.2.10 立体オブジェクトを撮影する場合のカメラ位置。対象物を中心に円を描くように上から下まで高密度に撮影する。（石像、高さ 80cm）

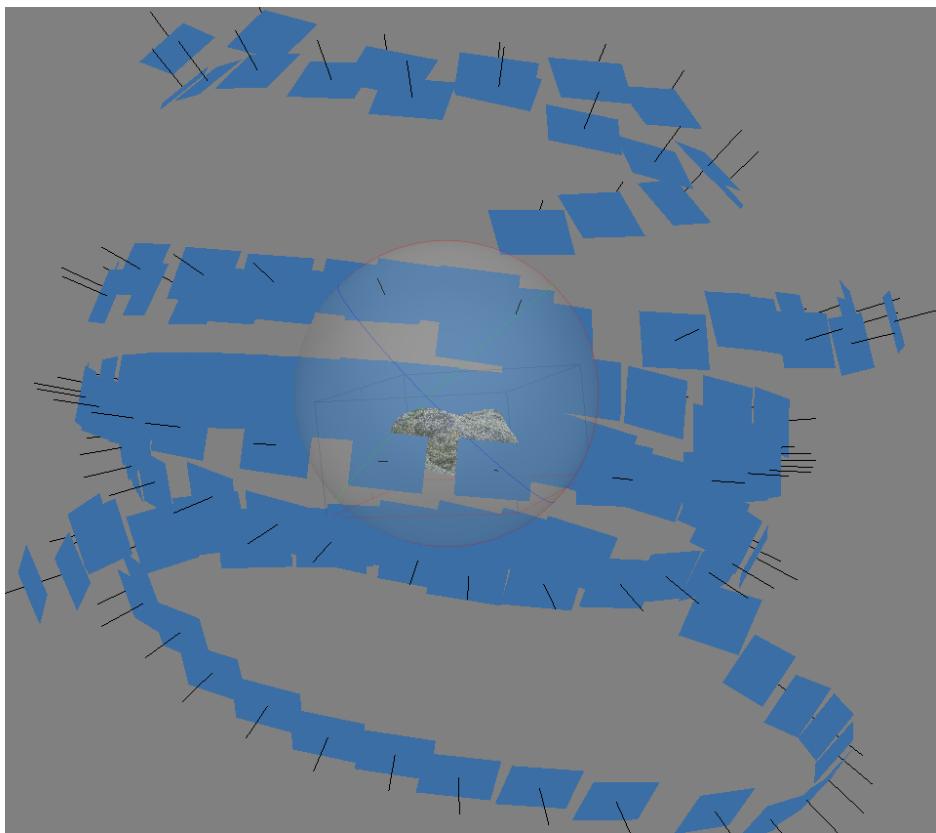


Fig.2.11 立体オブジェクトを撮影する場合のカメラ位置。カメラを対象物に向けて円を描くように複数の角度から高密度に撮影する。（長径 7cm の円礫）

写真測量の精度を高めるには、大量の写真を精密に組み合わせ、視差を計算し、対象物の表面形状を高密度な 3D ポリゴン（Face）で埋め尽くした三次元モデルを構築する必要がある。結局のところ、最終成果品として高精度な 3D モデルや DSM を限られた時間内に生成するためには、膨大な計算リソースが必要となる。

3.1 CPU

PhotoScan はマルチスレッド対応のため、OS が認識するすべての CPU コアを 100% 使用して計算を行うことができる（Fig.3.1）。最新のアーキテクチャ、高いクロック速度、多くの物理コアを持つ CPU が望ましい。

また、GPU を計算に利用する場合、GPU ボード 1 基につき GPU 管理のために CPU 物理コアが 1 つ（HT 有効の場合 2 つ）必要となる。複数の GPU ボードを持つ計算機の場合、PhotoScan の計算に使える CPU リソースが減少するため、CPU のマルチソケット構成が必要になるだろう。

3.2 CPU のハイパスレッディング（HT）

以下の環境におけるテストでは HT 有効のほうが概ね約 20%程度、高速であった。ただし Xeon CPU の場合、HT 無効のほうが高速という報告もある。いずれにせよ、各自の環境でテストを行うことを推奨する。

テスト環境：

CPU: Core i7 Extreme 3970X (Sandy Bridge, 6 Cores, 3.5-4.0GHz)

写真枚数：62 枚

結果：ハイパスレッディング有効

Align Photos: 434.439 sec. (24.7%高速)

Build Geometry: 198.227 sec. + 69.128 sec. (19.5%高速)

Build Texture: 74.003 sec. (8.7%低速)

結果：ハイパスレッディング無効

Align Photos: 541.912 sec.

Build Geometry: 248.151 sec. + 71.253 sec.

Build Texture: 67.549 sec.

3.3 GPU

PhotoScan は OpenCL 対応の GPU を計算リソースとして利用することができる（Fig.3.2）。GPU は、CPU（コア数 2~6 個）と比してコア数（例：nVidia GeForce GTX680 の場合、GPU コアは 1536 個）が非常に多いため、科学技術計算のような単純計算であれば CPU の数倍から百数十倍のスピードで計算を行うことができる。以下の環境におけるテストでは、GPU を有効にすることにより約 3 倍、高速であった。これを活用しない手はない。

テスト環境：nVidia GeForce GTX680、Core i7 Extreme 3970X（HT 有効）

結果：GPU 有効

Reconstruction Depth: 2h 02min 18sec (約 3 倍高速)

結果：GPU 無効

Reconstruction Depth: 5h 53min 36sec

3.4 物理メモリ

物理メモリは、多ければ多いほど良い。処理する写真画像の枚数や処理メソッドによるが、本格的に利用するのであれば最低でも 32GB は必要であろう。特に、建物などの三次元オブジェクトを処理する Arbitrary mode では膨大なメモリが必要になる。以下に、必要な物理メモリの目安を掲載する。

Aligning Photos 処理：

Photos	100	200	500	1000	2000	5000	10000
Memory consumption	500 MB	1 GB	2.5 GB	5 GB	10 GB	25 GB	50 GB

Building Model (Height-field mode)処理：

Photos	100	200	500	1000	2000	5000	10000
Lowest quality	25 MB	50 MB	125 MB	250 MB	500 MB	1.25 GB	2.5 GB
Low quality	100 MB	200 MB	500 MB	1 GB	2 GB	5 GB	10 GB
Medium quality	400 MB	800 MB	2 GB	4 GB	8 GB	20 GB	40 GB
High quality	1.6 GB	3.2 GB	8 GB	16 GB	32 GB	80 GB	160 GB
Ultra high quality	6.4 GB	12.8 GB	32 GB	64 GB	128 GB	320 GB	640 GB

Building Model (Arbitrary mode)処理：

Photos	20 - 50	100	200	500
Lowest quality	100 MB - 300 MB	150 MB - 450 MB	300 MB - 1 GB	1 GB - 3 GB
Low quality	500 MB - 1.5 GB	750 MB - 2.2 GB	1.5 GB - 4.5 GB	4 GB - 12 GB
Medium quality	2 GB - 6 GB	3 GB - 9 GB	6 GB - 18 GB	15 GB - 45 GB
High quality	8 GB - 24 GB	12 GB - 36 GB	24 GB - 72 GB	60 GB - 180 GB
Ultra high quality	32 GB - 96 GB	48 GB - 144 GB	96 GB - 288 GB	240 GB - 720 GB

Decimating Model 処理：

Faces (millions)	1	5	10	20	50	100	200	500
Memory consumption	128 MB	640 MB	1.3 GB	2.5 GB	6.2 GB	12.5 GB	25 GB	63 GB

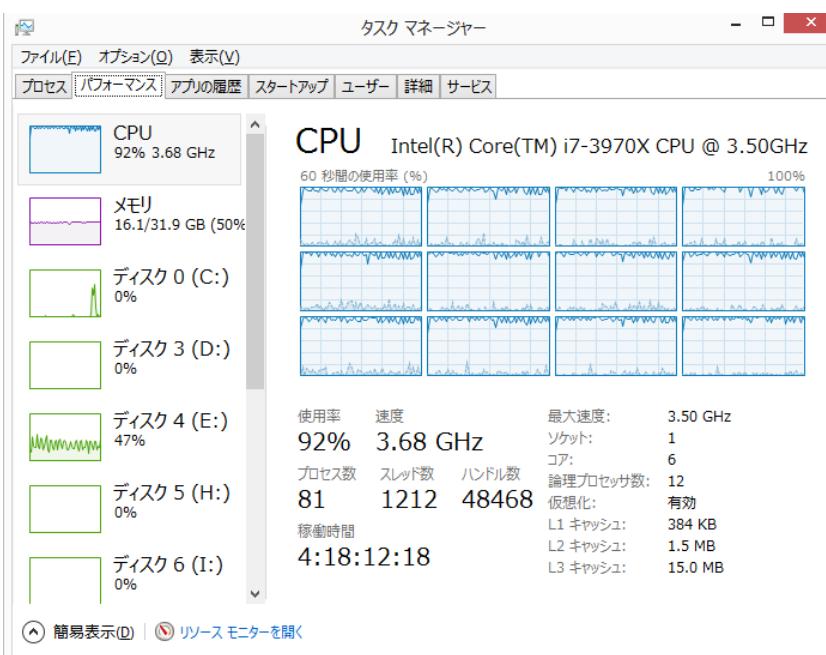


Fig.3.1 Generating Mesh 処理中の CPU 利用率。PhotoScan はマルチスレッド対応アプリケーションのため、計算機に搭載する全 CPU コアを使い切る。

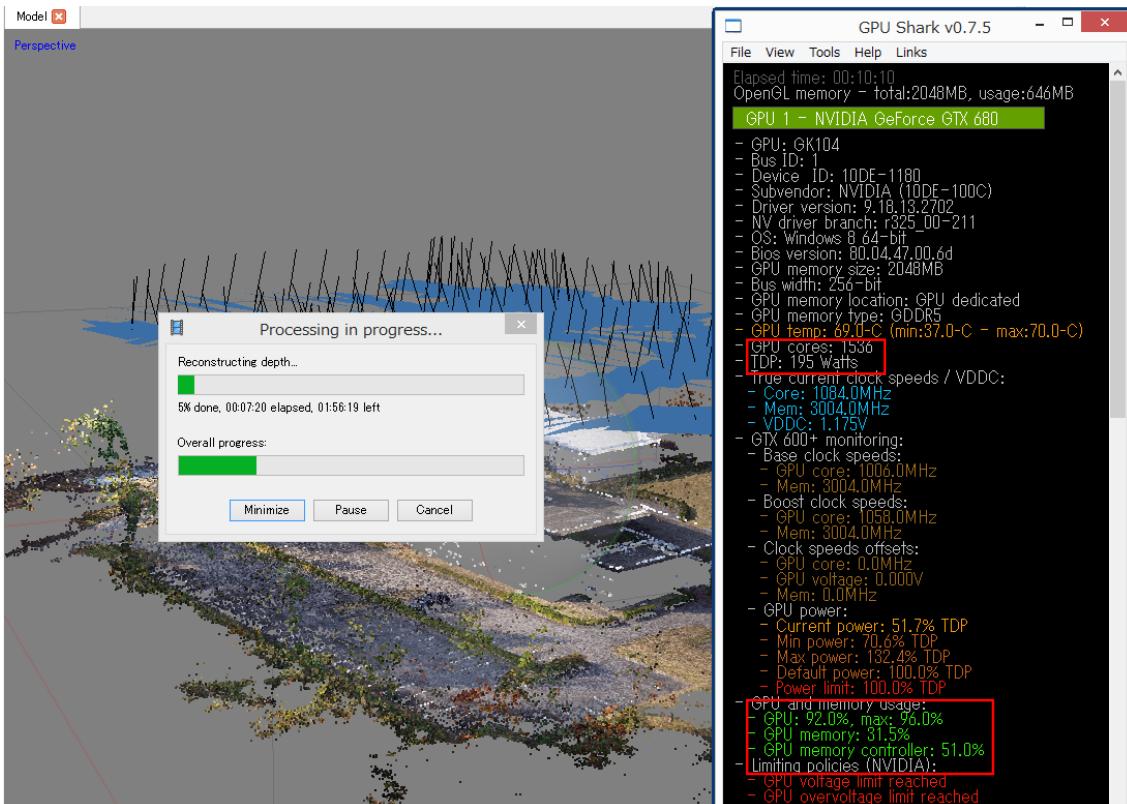


Fig.3.2 Reconstruction Depth 時処理に GPU を利用している状態。GPU を使用しない場合に比して約 3 倍高速であった。（GPU コア数 1536 個、GPU 使用率 96%（最大値）、nVidia GeForce GTX680 の例）

4 PhotoScan 初期設定（注：バージョンが古いのでレイアウトが異なります）

ツールの場所や Fig は Windows OS 版であり、Mac などとは異なることがある。

➤ 初期設定「Tools」 - 「Preferences」

Preferences では、OpenCL (GPU 計算) 関連の設定 (Fig4.1) 、画像マッチング関連の設定 (Fig.4.2) を行う。

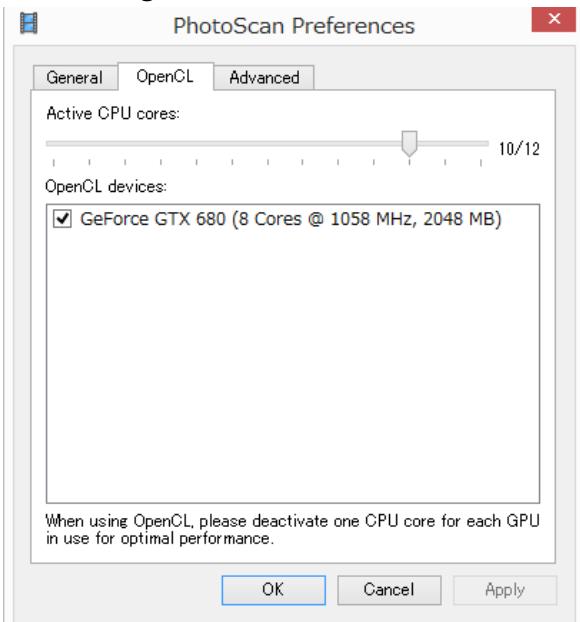


Fig.4.1 OpenCL の設定

GPU を計算処理に利用する場合は、

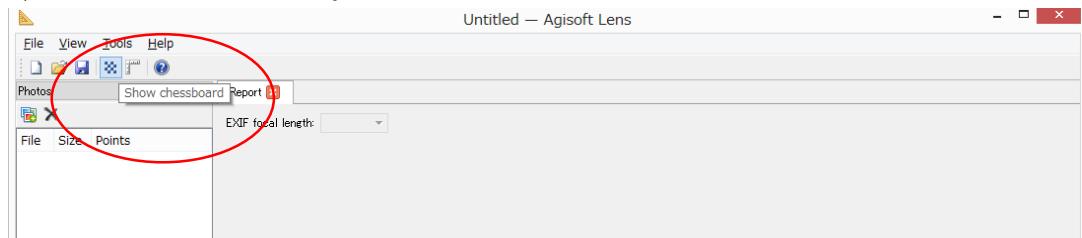
- 1) OpenCL devices にリストアップされた GPU ボードにチェックを入れる。
- 2) GPU ボード 1 枚につき、GPU 管理用の CPU の「物理コア」が 1 つ必要になる。
Active CPUcores の設定を一つ減じる。ただし、CPU のハイパースレッディングが有効な場合は 2 つ（物理コア 1+仮想コア 1=完全な物理コア 1）を減じること。（注：最新版では自動で使用する CPU 数を変更するようです）

OpenCL devices にリストアップされない場合、その計算機に搭載されている GPU は PhotoScan で利用できない。OpenCL 対応の GPU にもかかわらずリストアップされない場合は、最新の GPU ドライバをインストールして OS に正しく GPU デバイスを認識させる必要がある。OS がただしく認識していれば、特別な操作をすることなくリストアップされる。

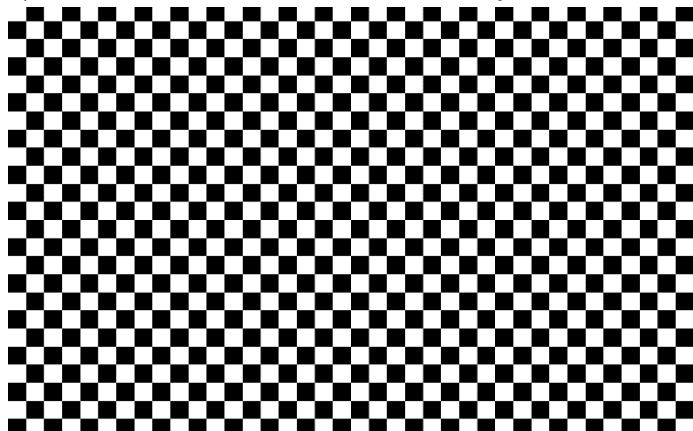
5 Lens (レンズ歪み補正ソフトウェア)

写真画像のレンズ歪みを除去するためのレンズ歪み補正パラメータを計算するソフトウェア「Lens」は無償で利用できる。このソフトウェアで手持ちのカメラのレンズ歪みを補正することで、より高精度な 3D モデルの構築が可能になる。以下にレンズ補正パラメータ取得までの流れを解説する。

- 1) Lens を起動する。



- 2) Show chessboard をクリック。画面いっぱいに白黒の模様が表示される。



← モニタに表示される模様。

- 3) 空撮に使うカメラでモニタに表示された Chessborad をカメラの角度を僅かにずらしながら 3 枚以上撮影する。画像は多ければ多いほど良い。20 枚くらい撮影した。



※画面の中央にレンズを据えて、左に少し振って一枚、正面に向けて一枚、右に少し振って一枚撮影する。枚数は多くても良い。

※できるかぎり大きなモニタを使う。モニタが完全に平面であると仮定して、レンズゆがみを求めるため、液晶プロジェクターのスクリーン投影映像は使用できない。

※モニタの枠が撮影画像に入ってしまう問題ない

※絞り値でレンズ特性が変わるため、絞りは空撮時と同じ設定にする

※同じくレンズ特性が変わるために、マクロモードにしない

※手ぶれしないこと

※蛍光灯や外の光がモニタに反射しない環境で撮影すること

※Chessborad を、液晶プロジェクタスクリーンなどの歪みのある物体に表示しないこと

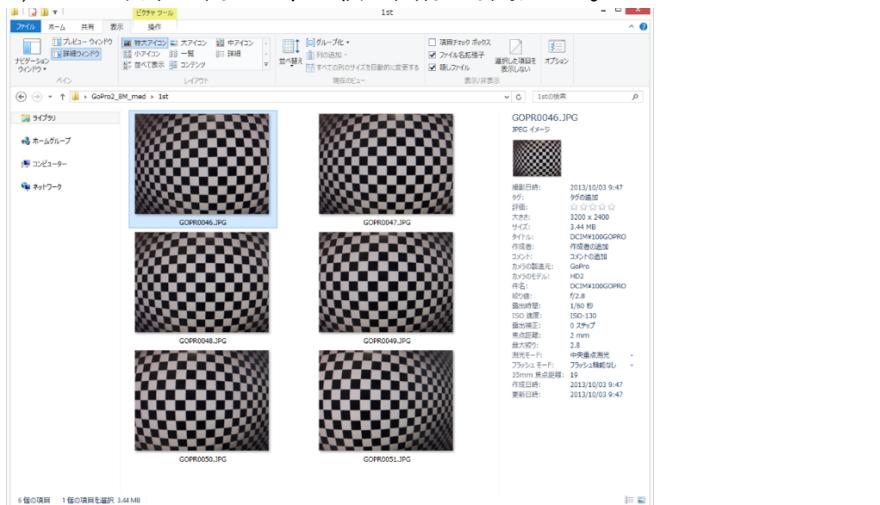
※ズームレンズは、鏡筒が動かないようにガムテープ等で固定する

※品番が同じでも個体が違えば、異なるレンズパラメータを持つ。それぞれ独立して計測する必要がある

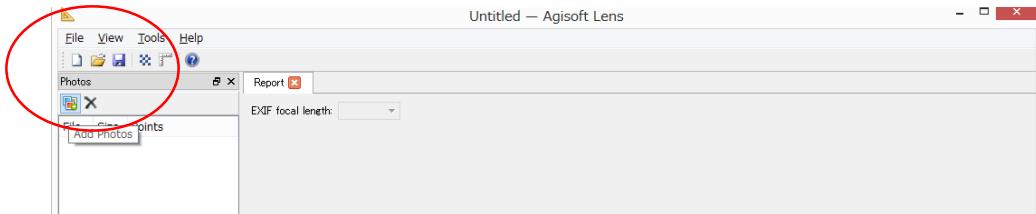
※オーバーホールに出すなど、レンズ・CMOS の構造に触れる作業を行った場合は、再度、計測を行う

※ビルトインレンズプロファイルが適用されない写真を使用すること。RAW 形式がベスト

4) 以下の例では、6 枚の画像を撮影した。

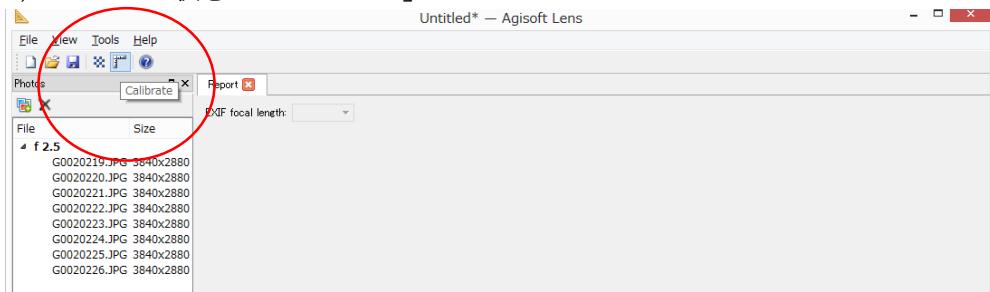


5) 撮影した画像を Lens に追加（Add Photos）する。



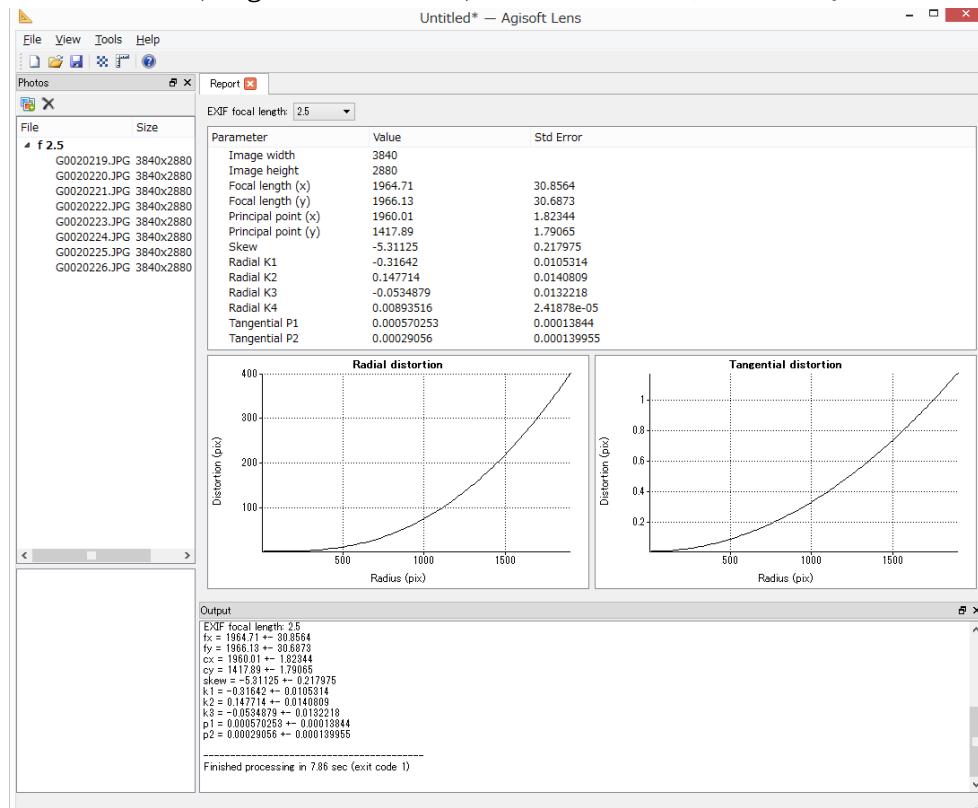
6) 撮影した画像を Lens に追加した状態。

7) この状態で「Calibrate」をクリック



8) すべてチェックを入れて OK をクリックするとレンズ補正パラメータの計算（推定）が始まる。

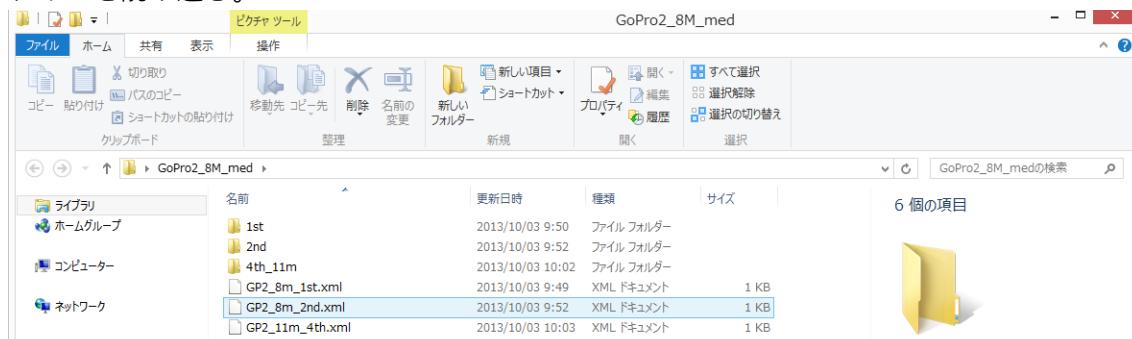
9) レンズ補正パラメータの推定計算が終了すると、radial distortion（樽型歪み）、円周方向歪み（tangential distortion）のグラフなどが表示される。



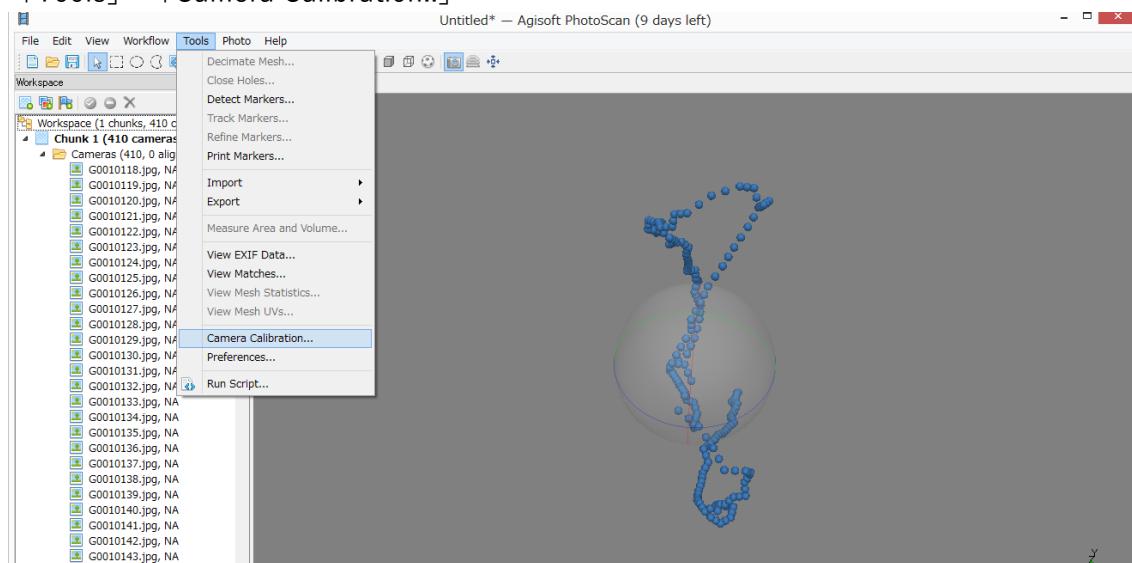
10) 「File」コマンド-「Save calibration」をクリックし、任意の場所に補正パラメータを保存する。

※PhotoScan 用の補正パラメータは「Save calibration」から保存すること。「Save」や「Save as..」では、PhotoScan 用のファイル形式にならない。

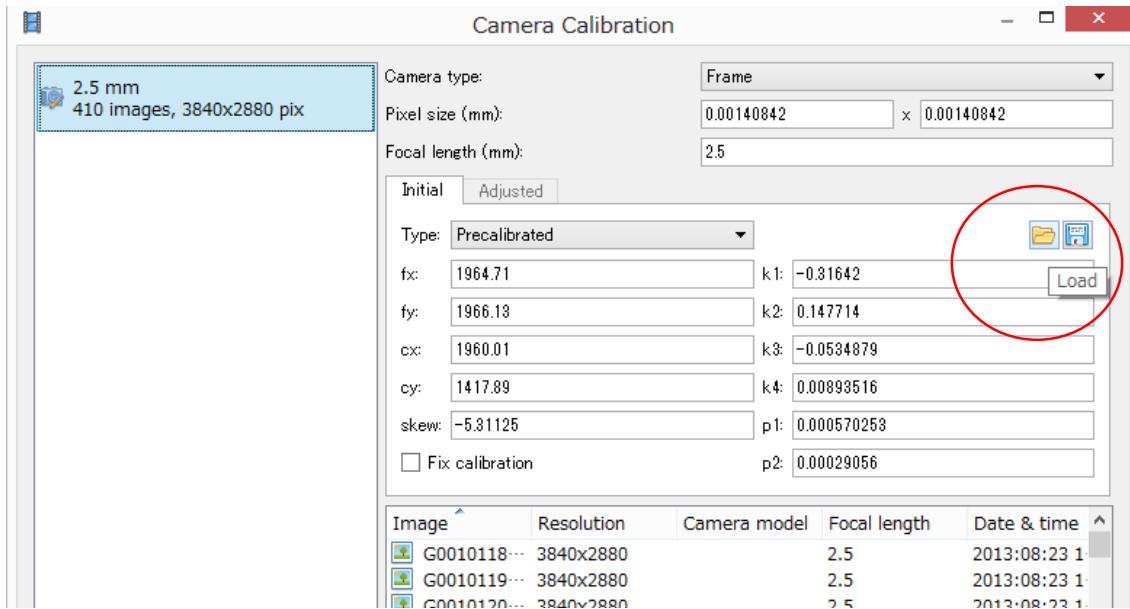
11) PhotoScan 用の補正パラメータファイル (.xml 形式)。PhotoScan ではこのファイルを読み込む。



12) PhotoScan を起動し、写真画像を読み込んだ後に補正パラメータを読み込む。
 「Tools」-「Camera Calibration..」



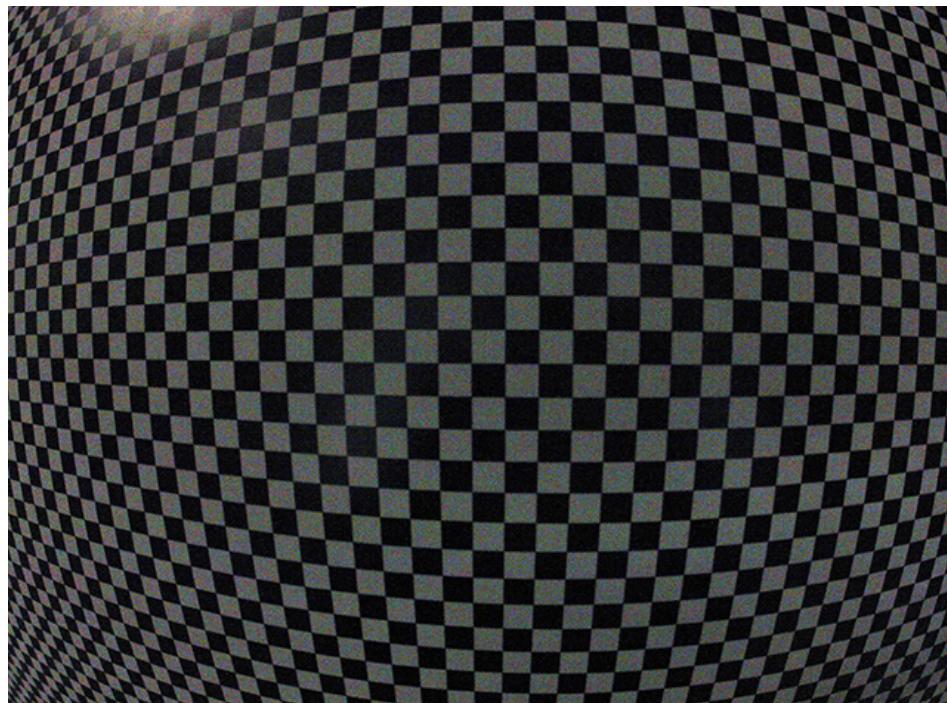
13) 「Load」アイコンをクリックし、レンズ補正パラメータを読み込む。Type が「Precalibrated」になれば成功。OK をクリックして完了。



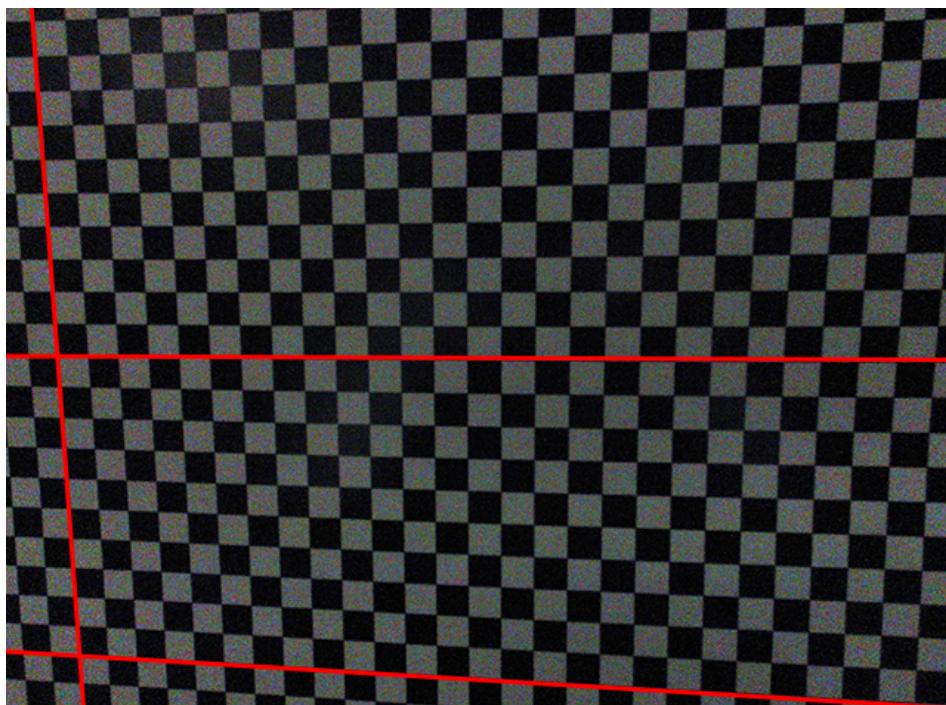
PhotoScan では、Lens で作成したレンズ補正パラメータで歪みを除去した写真画像を出力できる。これによって、レンズ補正が行われているかどうかを確認できる。

歪み補正したい写真画像を読み込み、レンズ補正パラメータを読み込んだ状態で「Align Photos (Accuracy は Low で良い)」処理を実行する。「Align Photos」処理を行うまでは歪み除去済み画像を出力することはできない。

次に、「Tools」 - 「Export」 - 「Undistort Photos」を選択し、オプション全てにチェックを入れて出力先フォルダを選択する。



歪み補正前（オリジナル）の写真画像
(ゆがみ補正効果の例のために GoPro2 を使用, 画角 Medium)



Lens で作成した補正パラメータによる歪み補正後の写真画像。赤い線を見ると、画像の中央および周辺部においても、歪んでいたチェッカーボードが補正され、正しい幾何学模様を示していることがわかる。ただし、チェッカーボードの縞模様の数はオリジナルより少ない。画像補正によって周辺部が切り捨てられている。

6 Workflow: Align Photos

Align Photos の注意点：

Accuracy は通常は「High」を選択する。

「Low」を選択すると、計算が速いが精度は荒くなる。さらに、特徴点が少ない画像の場合は「Low」で処理すると失敗する場合がある（Fig.6.1、Fig.6.2）。

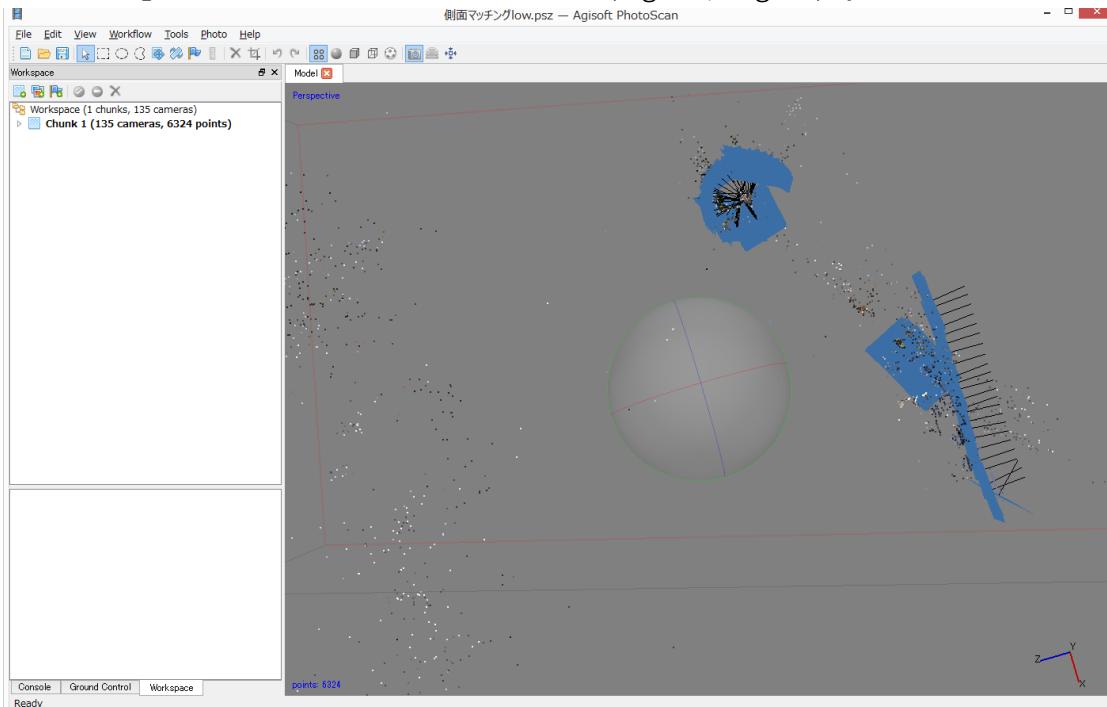


Fig.6.1 Align Photos 「Accuracy: Low」で撮影位置を推定した結果。カメラポジションの推定は不正確で、この先の処理は不可能。

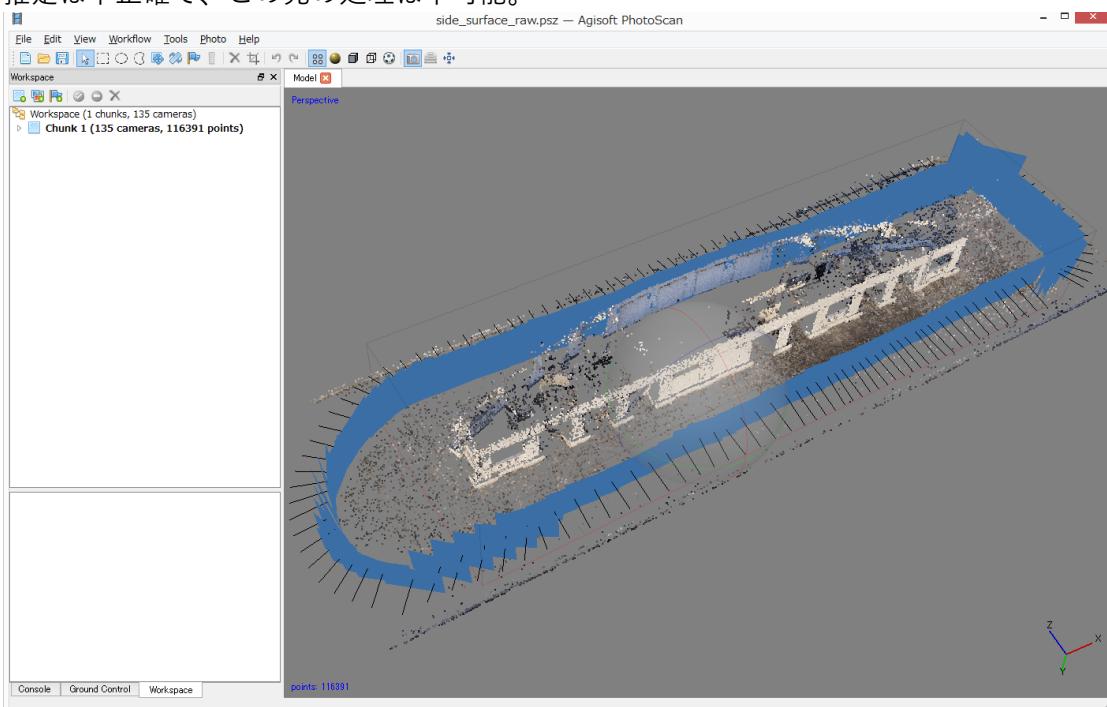
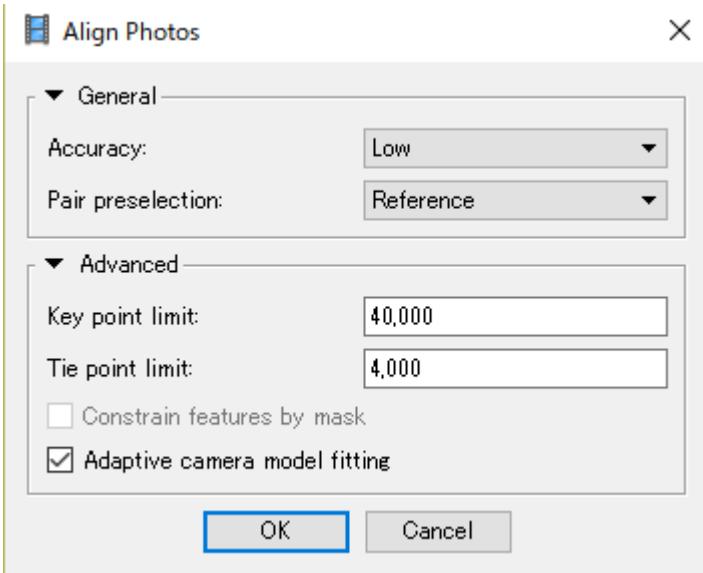
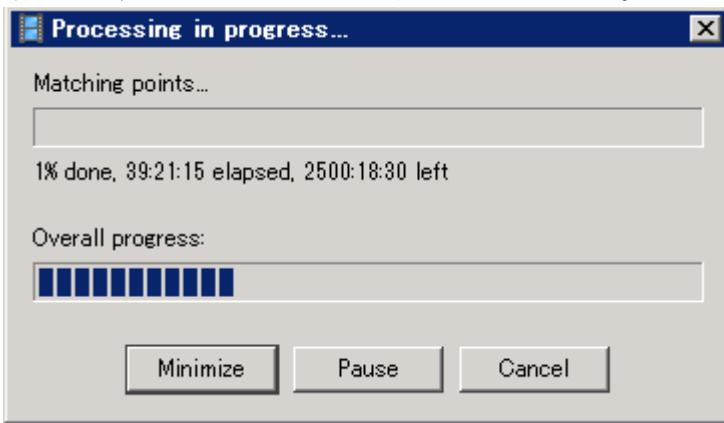


Fig.6.1 Align Photos 「Accuracy: High」で撮影位置を推定した結果。正しく整列した。



Pair preselection では、「Reference」を使用する。通常、それ以外は使用しない。Reference 設定は、画像の EXIF にある撮影位置情報（経緯度・高さ）を参照し、隣接写真を空間的に検索し、Tie point（画像間の共通点）の処理に用いる写真ペアを高速に決定する。なお、Reference は、撮影位置情報が無い場合は使用できない（エラー終了する）。多くの写真に位置情報があれば、一部の写真の位置情報が無くても処理可能。

Disable は、読み込んだ画像すべての総当たりでペアとなる写真を検索する。写真数が増えれば、処理にかかる時間は莫大なものになる。例えば下の図。



Advanced セクションでは、画像から抽出する特徴点の数（画像一枚当たり）を設定する。デフォルトでは Key point limit は「40000」、Tie point limit は「4000」である。通常はこの設定で問題ない。特徴点が少ない画像（テクスチャーが少ない、平坦でのっぺりとした画像やとても古い空中写真等）は、抽出する特徴点の数を増やすと良い結果が得られる場合がある。

なお、「0」を設定すると、可能な限り特徴点を抽出するモードとなる。ただし、不正確な特徴点も抽出されるため、結果としてノイジーな点群となる。また、計算時間が大幅に増加する。

7a Workflow: Build dense cloud

Build dense cloud フェーズでは、三次元の高密度点群を作成する。

Quality は最高が Ultra high、次いで High, Medium, Low、最低が Lowest の 5 段階。Ultra high は、オリジナル写真画像の全ての画素に対して Depth map を計算する。Quality が下がるごとに、画像を 1/4（幅と高さを半分にする）にリサイズして Depth map を計算する。たとえば、GSD 3cm の写真であれば、Ultra high で得られる地上解像度は GSD と同じ 3cm、High になると 6cm、Medium なら 12cm、Low だと 24cm、Lowest では 48cm になる。

処理時間は、単純に倍数で増減しない。感覚的に、Ultra high は High の 10 倍以上、High は Medium の 8 倍、Medium は Low の 4 倍、Low は Lowest の 3 倍程度の所要時間となる。なお、オルソ画像しか使用しないのであれば、Quality はオルソ画像の品質に対する影響が小さいため、Lowest で問題ない。

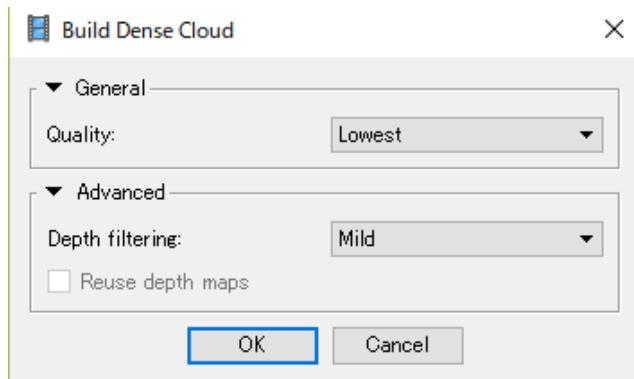


Fig.7a.1 Build dense cloud ウィンドウ。

Depth filtering セクションでは、Build dense point cloud 処理における「外れ値」のフィルタリングの強さを設定する。ノイズの多い画像や、焦点が合っていない画像は、Dense point cloud で作成される点群の位置が、正しい位置からズレた場所に生成される原因となる。

デフォルトは「Aggressive」でありフィルタが強く適用される。「Mild」はフィルタの適用度合いが弱い。このため、撮影対象物の表面の微細な形状も再現しうる。ただし、使用的する写真の品質が悪ければ、ノイズも相応に増える。航空写真を用いて地形面の三次元モデルを作成する場合は「Mild」が良い。

7b Build Mesh

Build mesh 処理では、TIN モデルを生成する。Surface type は、Height field および Arbitrary の 2 種の方式がある。これらは必要な計算時間やハードウェアリソースが大幅に異なるため、モデル化したい対象物に応じて、適切な種類を選択する必要がある。

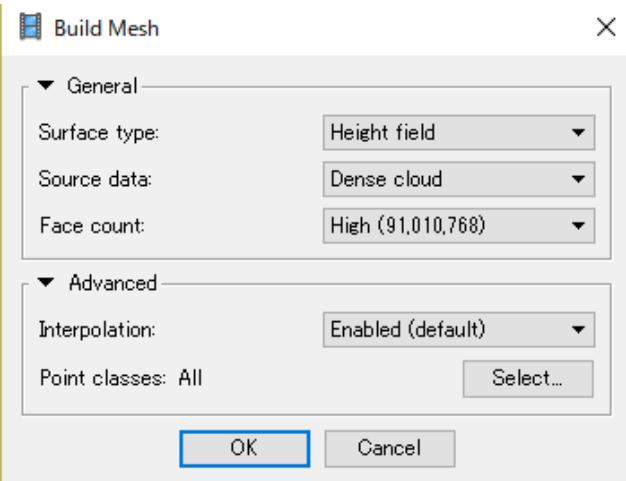


Fig.7.1 Build Mesh ウィンドウ。Surface type を適切に選択すること。

Surface type: Height field

垂直写真（国土地理院などの垂直写真、UAV の高解像度垂直写真も含む）から地形モデルを生成する場合に使用する。DSM、オルソフォト（正射画像）を作成するのであればこのモードを使用する。

ポイント：

- ・実際には三次元モデルではなく、2.5 次元モデルを生成する。
- ・たとえば樹木の場合、樹冠と幹を表現できない（Fig.7.2 の左）。
- ・計算リソース（特にメモリ）消費が少ない。32GB のメモリで 200～500 枚程度の写真を処理可能
- ・計算時間が短い

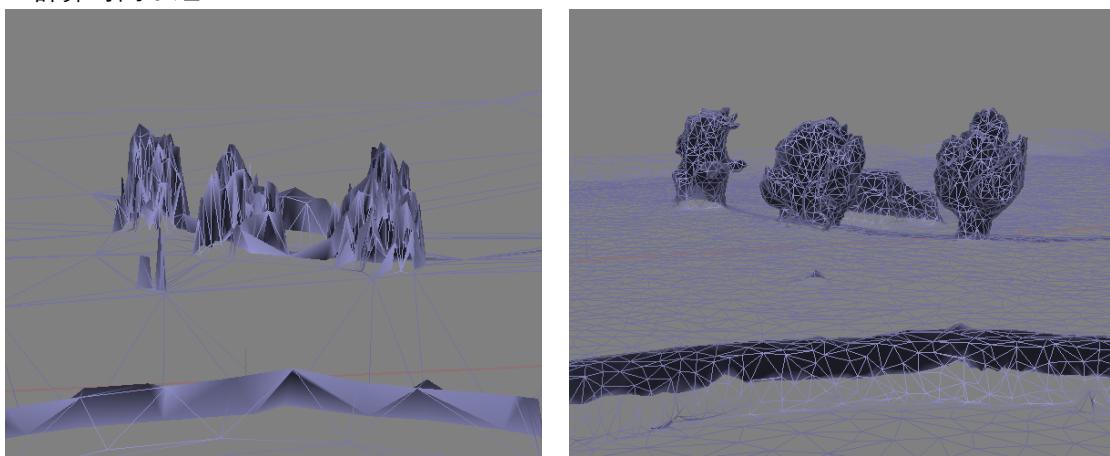


Fig. 7.2 立ち木（3 本）をモデル化。左 Height field、右 Arbitrary。

Surface type: Arbitrary

建物、洞窟内部、オーバーハング露頭、人物などの完全な三次元形状を再現する場合に使用する。オルソフォトや地形図の生成には向かない。

ポイント：

- ・完全な形状の三次元モデルを生成する。
- ・たとえば樹木の場合、樹冠と幹を区別できる。（Fig.7.2 の右）。
- ・露頭や岩石、石像など、小規模な対象であれば精密な立体モデルを生成できる（Fig.2.10、Fig.11.5、Fig.7.3）。
- ・計算リソース（特にメモリ）消費が非常に大きい。32GB メモリの場合、現実的には 100～200 枚程度の写真の処理が限界

- 計算時間が非常に長い。

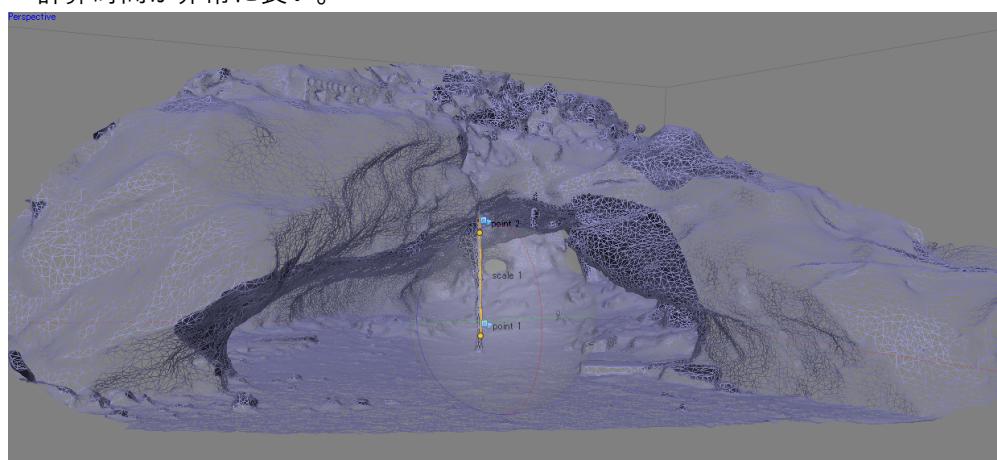


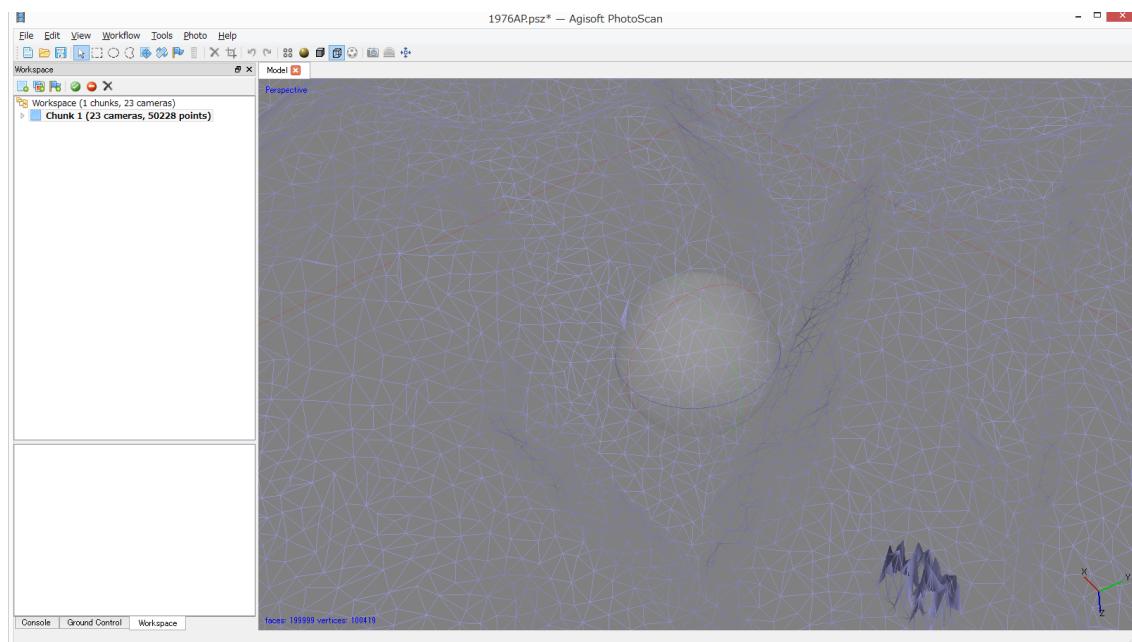
Fig.7.3 とあるノッチの立体モデル。洞窟状に奥行きのあるモデルも生成できる。

Face count の設定

三次元モデルの表面を構成する三角形のポリゴンの数を指定する。通常は High で良い。High は、Dense point cloud の 1/5、Medium は 1/15、Low は 1/45 となる。

Interpolation の選択

- Enabled : 特徴点が得られず、Dense point cloud が得られなかった場所について、穴を埋めた Surface を生成する。大きすぎる穴は埋まらない。
- Disable : 穴を埋めない。特徴点が得られた場所のみ Surface が生成されるため、三次元モデルを厳密に評価する際に、直接三次元モデルが得られた地点と、そうでない地点とを区別することができる。モデルの評価に有用。



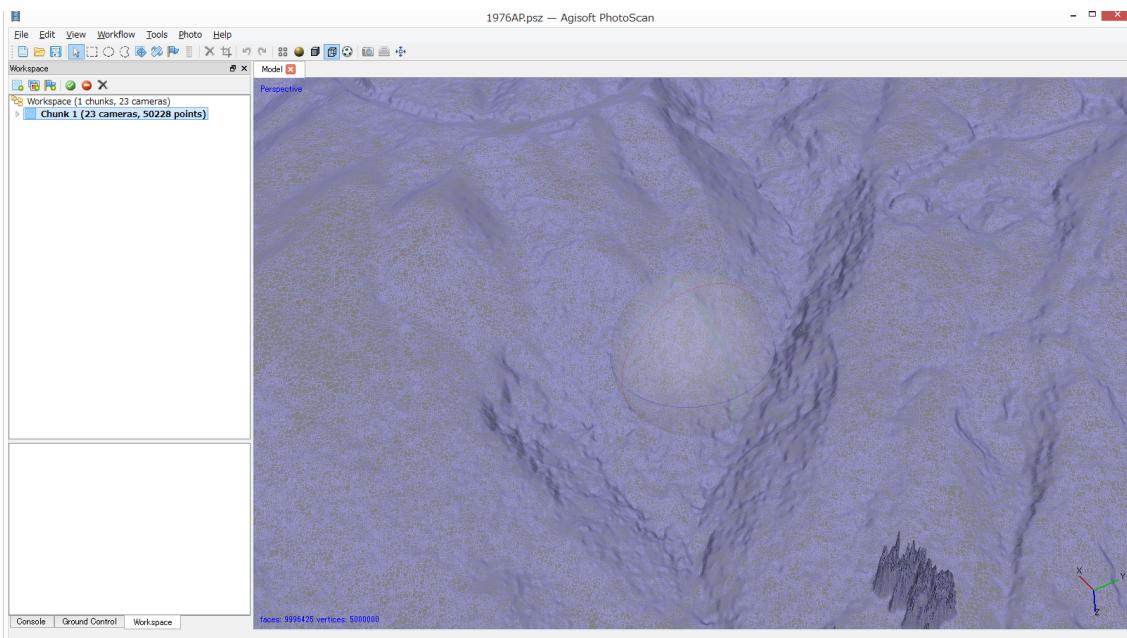


Fig.7.4 Face count による地形表現の違い。上 20 万、下 1000 万。
 地形を表現する場合 20 万では Face の数が足りない。（伊豆大島 1976 年垂直写真）

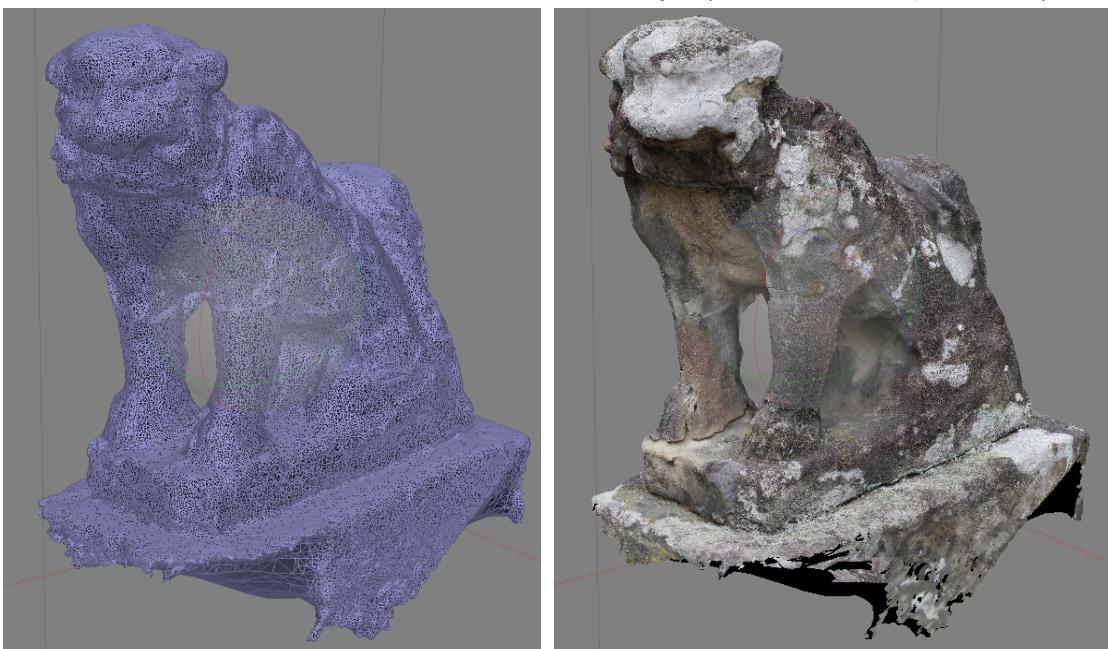


Fig.7.5 Arbitrary, Target quality: Medium, Face count: 200000 で生成したモデル（高さ約 80cm）
 左がワイヤーフレーム表示。モデル表面を高密度に Face（三角形のポリゴン）が覆っており、石像の細かな凹凸も表現できている。右が Texture を貼り付けた表示。

【注意】

地形モデル等では Height field の Face count は 100 万～1000 万が適切な値だが、3D PDF などにエクスポートする場合は、そのままでは Face の数が多すぎるため、出力された PDF を開いても正しく表示できない。3D PDF などにエクスポートする場合は、「Tools」 - 「Decimate Mesh…」でメッシュの数を 20 万程度に間引いてからエクスポートする（Fig.7.6）。

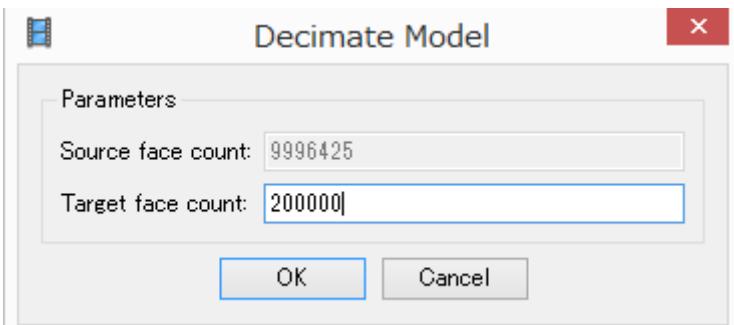


Fig.7.6 Decimate Model ウィンドウ。PDF などにエクスポートする場合は、Target face count を「20 万」程度に設定し、多すぎる Face を間引く処理を行う。

8 Workflow: Build Texture

Build Texture では、PhotoScan のモデルに写真画像を貼り付ける処理を行う。ここで生成したテクスチャは、3D PDF や、他の三次元アプリケーションにエクスポートする際の UV map となる。

「Workflow」 - 「Build Texture」をクリックする。

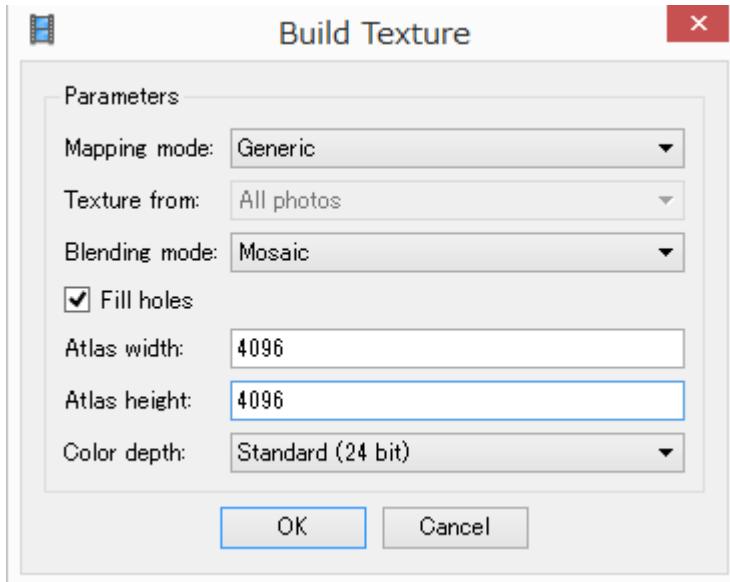


Fig.8.1 Build Texture ウィンドウ。Mapping mode を適切に選択すること。

Mapping mode の選択：最初は Generic でよい。

Generic：汎用的に使って便利。Arbitrary でモデルを生成した場合は Generic を使用する。

Adaptive orthophoto：オルソ画像 + 建物などの側面のテクスチャも再現したい場合。

Orthophoto：オルソ画像を作成したい場合。

Spherical：円盤のような球形の物体の場合に選択する。

これ以外の選択肢は通常は使わない。

Blending mode の選択：通常は Mosaic でよい。

Mosaic：ソースの写真画像から「切り出して」貼り付ける。解像感の高いシャープなテクスチャとなる。

Average：ソースの写真画像をブレンドして貼り付ける。もっさりとした解像感を持つテクスチャになる。ソースの写真画像の明暗の差が大きい場合など、Mosaic で貼り付けると一様のテクスチャにならない場合は Average を使ってもよい。

Max/Min intensity：通常は使わない。

Fill holes：通常はチェックを入れる。精密なモデルを生成し、穴の有無を検証したい場合などはチェックを外す。ここでいう「holes」とは、モデルの形状が持つ穴ではなく、視差が計算できずにモデルを構築できなかったために生じた Face の抜け (holes) であることに注意する。

Atlas width/height：モデルに貼り付ける画像 (UV map) のサイズを設定する。Width と height は同じ値を設定する。デフォルトは 2048。推奨は 4096 (Fig.8.2)、最大で 8192 を設定する。8192 以上の数字を与えて、見た目の解像感はほぼ変わらず、計算時間が長く、表示が遅くなるだけ。逆に、数字を小さくすると粗いテクスチャとなるが、表示は早くなる。

なお、この数字は Photoscan や 3D PDF にエクスポートするモデルのテクスチャーの画像サイズを決めるものであり、オルソフォトの生成（Export orthophoto）などとは無関係。

Color depth : Standard (24bit) でよい。HDR 画像を用意した場合は HDR (96bit) も利用可能。



Fig.8.2 Build Texture 処理の結果。Mapping mode: Generic, Blending mode: Mosaic, Fill holes: Checked, Atlas width/height: 4096。Atlas width/height は 4096 で十分に解像感の高いテクスチャーが得られる。



Fig.8.3 Build Texture 処理の結果。Mapping mode: Generic, Blending mode: Mosaic, Fill holes: Checked, Atlas width/height: 1024。Atlas width/height を 1024 まで下げるとき、かなり粗いテクスチャになる。ただし、表示は高速になるため、速度の遅いノート PC 等で使用する場合や、3D PDF にエクスポートしてメールで添付する場合には有用な設定となる。

【UV map とは】

PhotoScan に限らず、3D モデルを扱うアプリケーションでは、立体モデル（Face で構成された立体物の表面モデル）と、そこに貼り付けるテクスチャを別に管理している。UV map とは、モデルに貼り付けるテクスチャ画像を指す（Fig.8.4）。通常は正方形。



Fig.8.4 UV map の例。ソフト上では Fig.8.3 のように表示される
9 Mask 処理

写真測量のソース画像には、モデル化する際に不必要的部分が含まれる（Fig9.1）。この場合、不必要的領域に Mask を作成することで、モデルの生成対象から外すことができる（Fig.9.2）。しかし、通常の作業では 100 枚を超える写真をソースとして利用する。これらすべての写真に対し、手動でマスク生成作業を行うのはとても現実的ではない。そこで、簡易な方法で効率よく Mask を生成する手法を解説する。
なお、この手法は Arbitrary なモデルに限らず、Height field で処理するモデルに対しても有効である（例：黒い枠のある航空写真の黒枠の内側だけを処理する場合）。



Fig.9.1 ソース画像。背景の方眼模様はモデル化の際に不必要的領域。

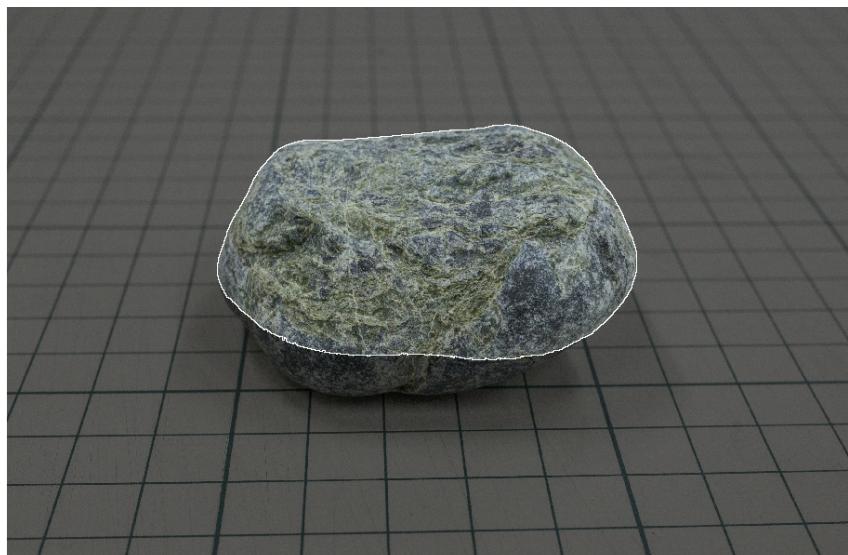


Fig.9.2 ソース画像に対し Mask を適用した例。薄く黒く塗りつぶされている領域が Mask。Mask された領域はモデル生成の計算に使われない。

- 1) まずは初回の Build Mesh までの処理を行う。最終的なモデルを作るわけではないので、Build Dense cloud の Quality は低く（Lowest）、Build Mesh の Face count は少なく（Low）の設定で処理する。

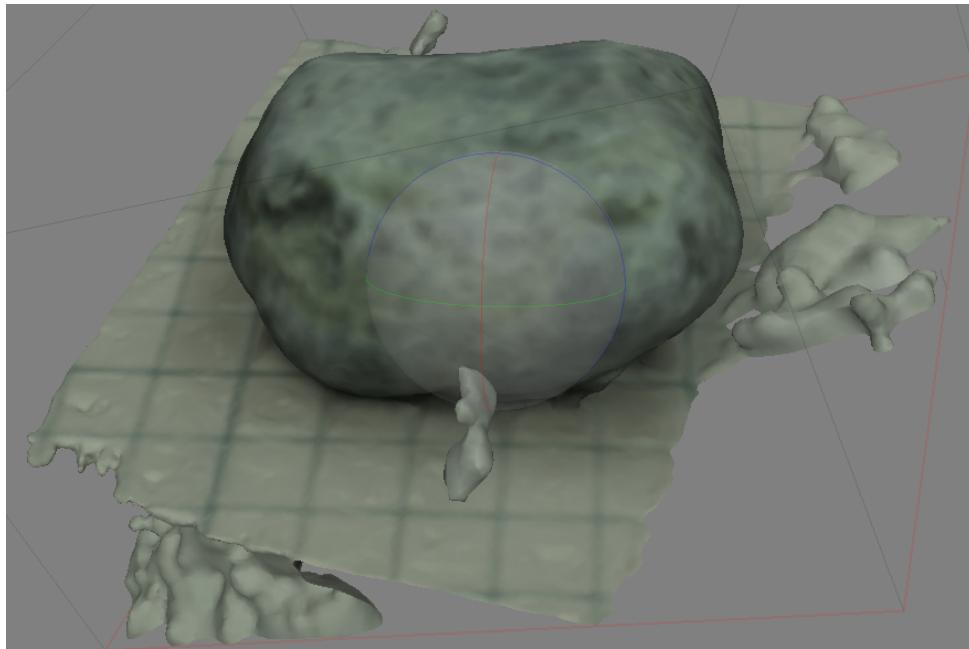


Fig.9.3 初回の Build Mesh が完了した直後。不必要な領域やゴミがモデル化されている。

2) モデル化しなくてよい領域などを削除し、整形する。

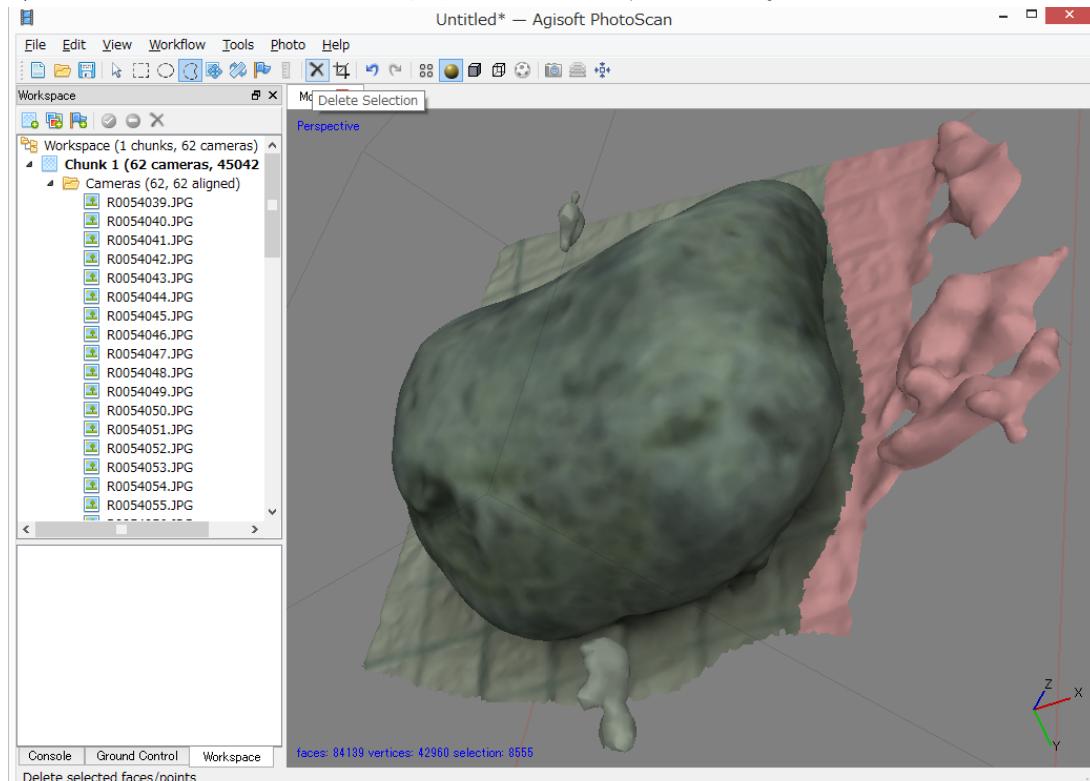


Fig.9.4 モデル化しなくてよい領域を削除する。ツールバーの「Free-Form selection」ツールなどで不必要的領域を選択し、「Delete Selection」ボタンを押して削除する作業を行う。

3) 整形したモデルから Mask を自動生成する。「Tools」 - 「Import」 - 「Import masks…」を選択する（Fig.9.5）。以下の設定を行い、OK を押すと Mask が自動生成される。

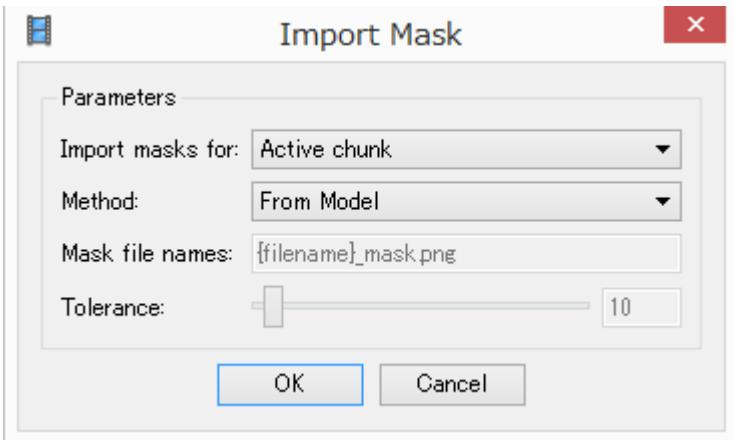


Fig.9.5 Import Mask ウィンドウ。

Import masks for : 「Active chunks」を選択する。複数の Chunk がある場合は注意する。Workspace で黒太文字になっている Chunk が Active chunk。

Method : 「From Model」を選択。

- 4) 再度、Build Geometry 処理を実施すると、Mask した領域が無視されるため、よりキレイなモデルが生成される (Fig.9.7)。

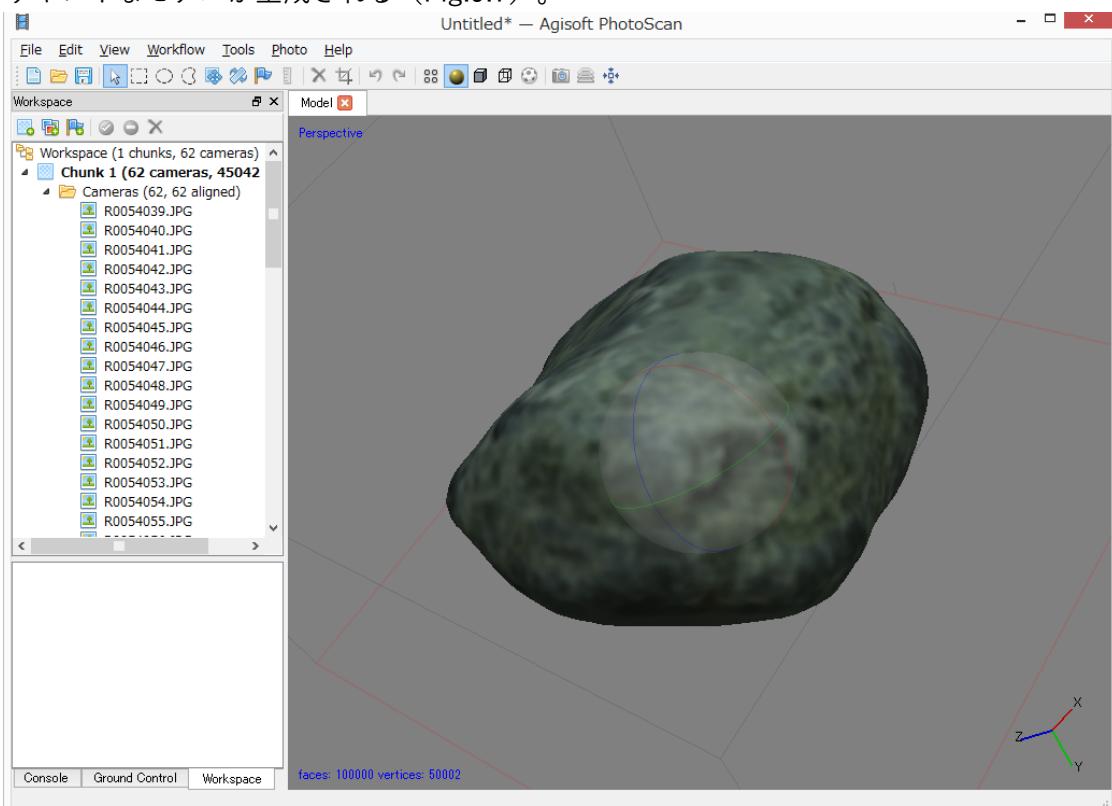


Fig.9.7 Mask が適用されたために、不必要な領域やゴミがモデル化されなくなった。

- 5) 必要に応じて 2)～4)の工程を繰り返す。
 6) ゴミや不必要領域がなくなったら、より Quality が高く、Face の多いモデルを計算する。

Photos ペインの「Show masks」ボタンをクリックすると、ソースの写真画像に適用された Mask を一覧で確認できる (Fig.9.8)。

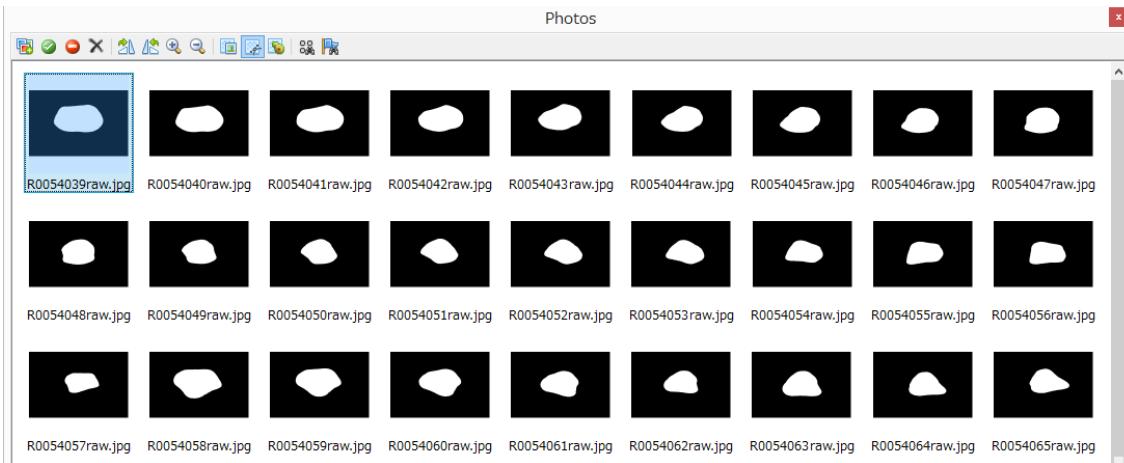


Fig.9.8 Photos ウィンドウから「Show masks」ボタンをクリックした様子
 黒が Mask。白が三次元モデルの計算対象領域

10 複数 Chunk 处理

UAV の飛行コースが複数ある場合や、対象物を複数のパートに分けて撮影した場合など、それぞれを個別の Chunk (ひとまとまりの写真画像) に分けて処理し、後ほど合成することができる。ここでは、三次元オブジェクト（蛇紋岩の石ころ）の例で解説する。長径約 7cm の蛇紋岩の円礫を表面 (Fig.11.1) と裏面 (Fig.11.2) の 2 回に分けて撮影し、上下のパートを合成して完全な丸い円礫の 3D モデル (Fig.11.3) を構築した。

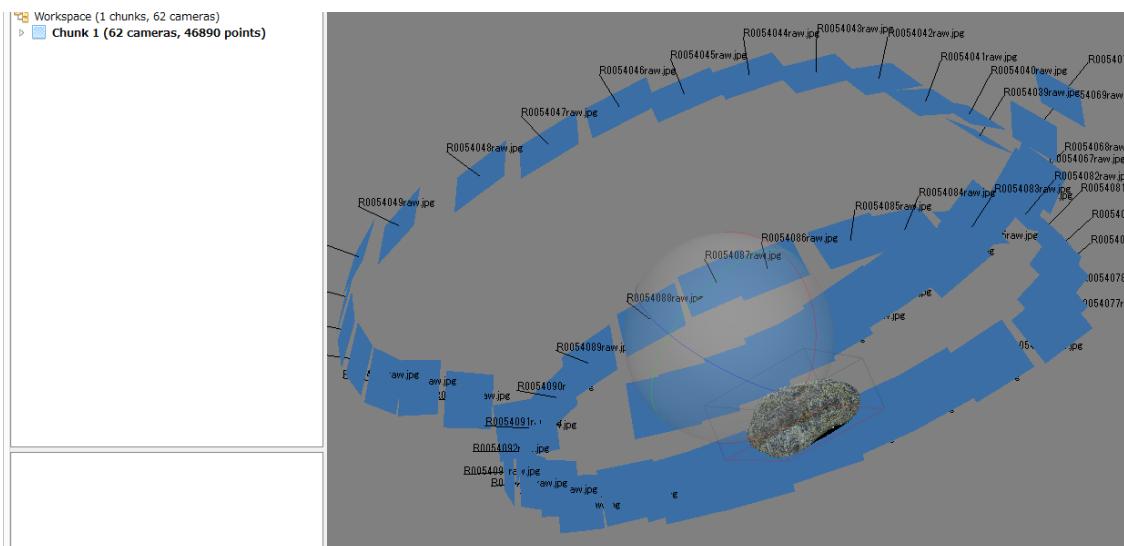


Fig.11.1 表面のモデリング。

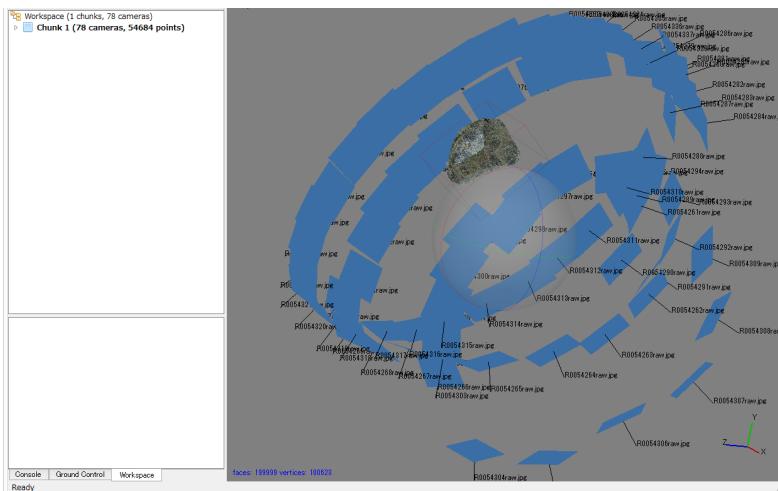


Fig.11.2 裏面のモデリング。

それぞれの面のモデリング終了後、次の処理を行う。なお、一つのファイルで Chunk を分けて処理をしても、二つのファイルに分けて処理をしても、どちらの方法でも構わない。

「Workflow」 - 「Align Chunks」を選択する (Fig.11.3)。

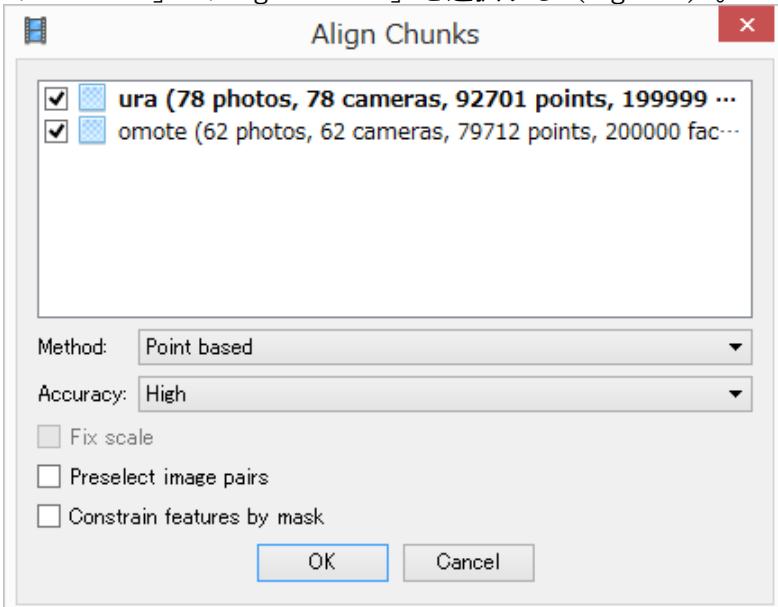


Fig.11.3 Align Chunks ウィンドウ。Method は Point based を選択。GCP を設定している場合など、「すべての Chunk で共通の Marker 名称を持つ」Marker を設定していれば、Method で Marker based を使用できる。同様に、共通の写真画像を使用している場合は Camera Based でも良い。Accuracy は「High」一択で。

Align Chunks が完了しても、PhotoScan の画面上では何も表示は変化しない。次に、「Workflow」 - 「Merge Chunks」を実行する。

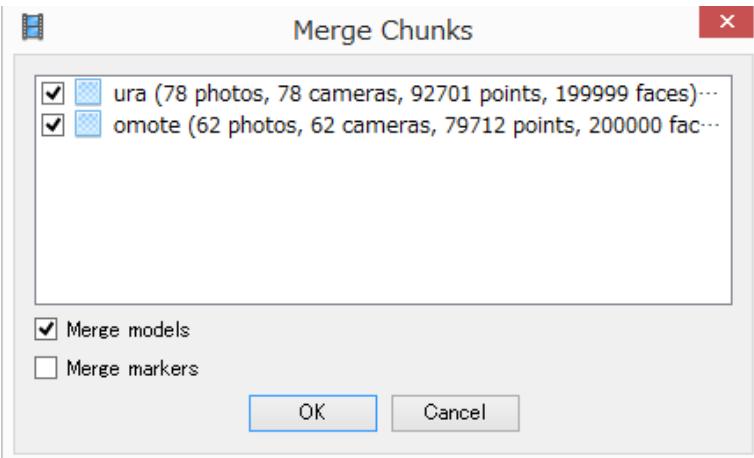


Fig.11.4 Merge Chunks ウィンドウ。マージしたい Chunk にチェックを入れる。Merge models にもチェックを入れる。Marker も Merge したい場合は Merge markers にもチェックを入れて OK をクリックする。

Merge が成功すると Workspace に「Merged Chunk」が追加される。

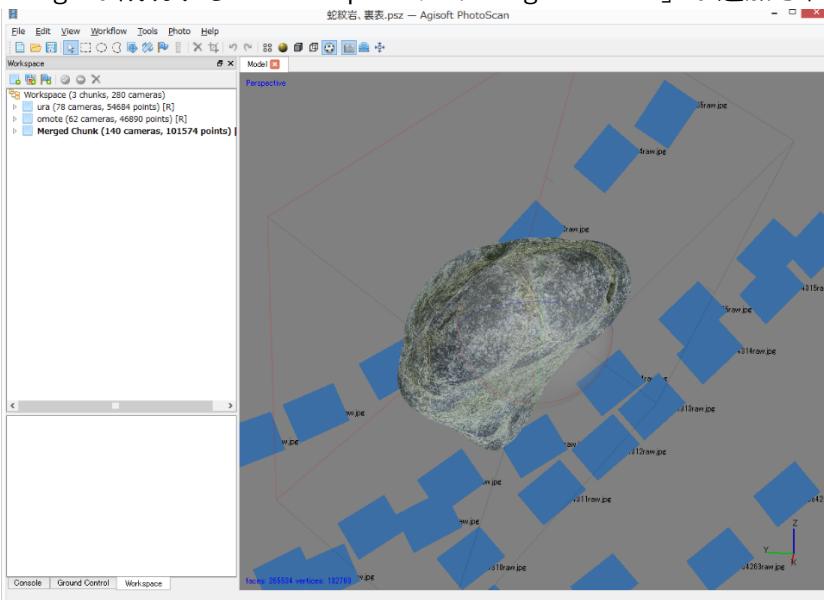


Fig.11.5 表面、裏面のモデルをマージして一つのモデルを生成した。

参考文献

内山庄一郎・井上 公・鈴木比奈子 (2014.02) SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究. 防災科学技術研究所研究報告, 81, 37-60.
http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied_report/PDF/81/81-4uchiyama.pdf

早川裕式・小花和宏之・齋藤 仁・内山庄一郎 (2016.07) SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学的応用. 地形, 37 (3), 321-343.
http://www.csis.u-tokyo.ac.jp/~hayakawa/resources/Hayakawa_et al_2016_SfMgeomor_TJGU.pdf

参考 1：UAV-SfM による地図作成技術の概要

UAV と SfM を用いた地図作成の一般的な流れは次のようになる。

- 1) 撮影領域を定め、
- 2) 対空標識の設置と計測を行い、
- 3) 飛行計画を立てて
- 4) 写真撮影フライトを行い、
- 5) 撮影写真と対空標識の位置座標を計算ソースとして SfM 解析を行う。
- 6) 成果物としてオルソモザイク画像および DSM (Digital surface model; 地表面数値標高モデル) を出力する。

高精度な成果を得るためにには、考慮すべき点が多く、作業全体の計画の緻密さが成否を分けるといつても過言ではない。以下に、基本的な留意点を述べる。

対空標識：10 地点以上、検証点も同程度

- ・ 撮影領域の内側かつ、複数枚の写真に写りこむように設置する。
- ・ 高精度な GNSS 等で位置座標を計測する。
- ・ 水平分布のみならず垂直（標高）方向も広くカバーするように配置する。
- ・ 二時期の DSM の変化抽出を行う場合は、対空標識の設置場所と計測精度が不適切であると、意味のある結果は得られない。

飛行計画

- 1) UAV 搭載の写真機材の性能（センサーサイズ、画素数、焦点距離、FOV）を把握する
- 2) 作業目的に適う地上分解能 (GSD) が得られる対地高度を求める
- 3) 飛行する対地高度が決まれば一枚の撮影範囲が決まる
- 4) 撮影機材における画像記録スピードを実験で求める
- 5) 画像記録スピードを超えないよう、UAV の進行方向において隣接する写真間の重複率が 80% 以上になる飛行スピードを決定する
- 6) 加えて、飛行コース間の写真の重複率も 80% 以上となるように飛行コースを計画する
- 7) 飛行コースと飛行スピードから推定される総飛行時間を求める
- 8) 総飛行時間を、使用する機材の実質的な飛行可能時間で割ることにより、概略の全飛行回数が求まる。

上記に加えて、航空法、機材の運用限界、安全確保のための体制、運航者および運航に関わる者の技能・知識、気象条件（風、気温、雲量、太陽高度・方位、日射、積雪、湿度）および地形（平地、山地、起伏）を考慮した計画立案が必要となる。

FOV: Field of View 画角（写真の対角線方向の角度）

GSD: Ground sample distance 地上分解能（一画素あたりの地表面の実寸サイズ）

参考 2：ビルトインレンズプロファイル（BiLP）の悪影響



Fig. 12.1 RAW データに BiLP 情報が含まれる旨のメッセージ。このカメラで Jpeg を保存すると、無条件に BiLP が適用される。オフにすることができない。このソフトウェア（Adobe Camera Raw）では、BiLP を無効にした現像ができない。Raw Therapeeなどの別のソフトウェアで現像を行う必要がある。

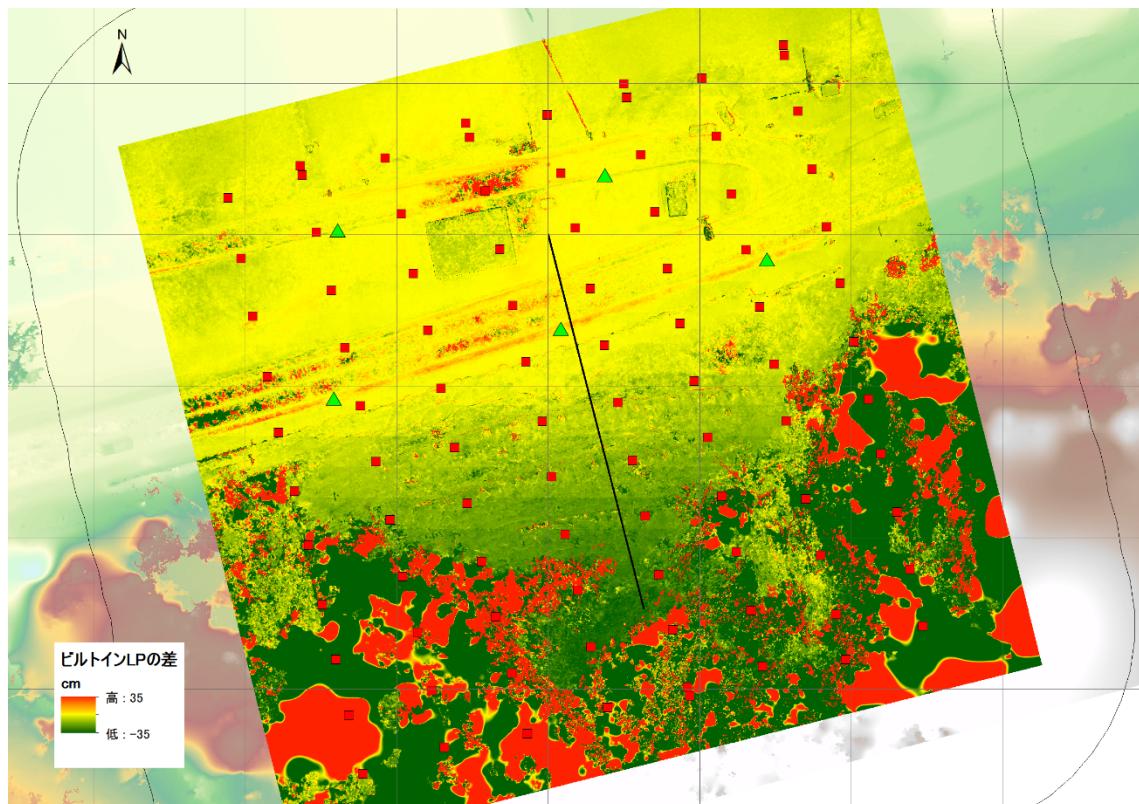


Fig.12.2 BiLP 無しの写真で作成した地形モデルと、BiLP が適用された Jpeg 写真で作成した地形モデルの垂直方向の差。▲は地上基準点、■は撮影位置。

地上基準点からの距離が離れるほど、垂直方向の差が大きくなることが読み取れる。

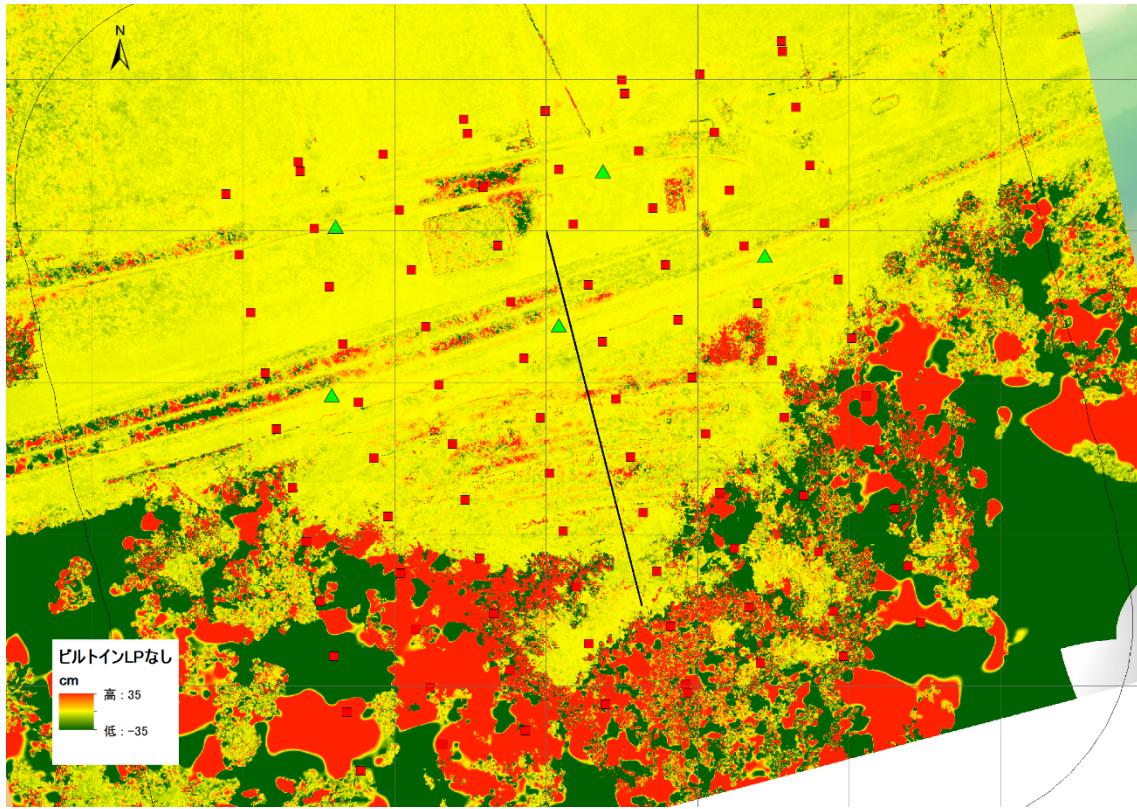


Fig.12.3 SfM ソフトウェアで、RAW 画像 (dng 形式) を直接読み込んで作成した地形モデルと、Raw Therapee (現像ソフトウェア) で BiLP を削除して Tiff 化した写真で作成した地形モデルの垂直成分の差。▲は地上基準点、■は撮影位置。
 全域で、ほとんど差がない（黄色）ことが読み取れる。若干の差があるのは、斜面上に垂直に設置された雪崩防止柵や家屋の壁の水平位置のわずかな誤差によって生じるもの。

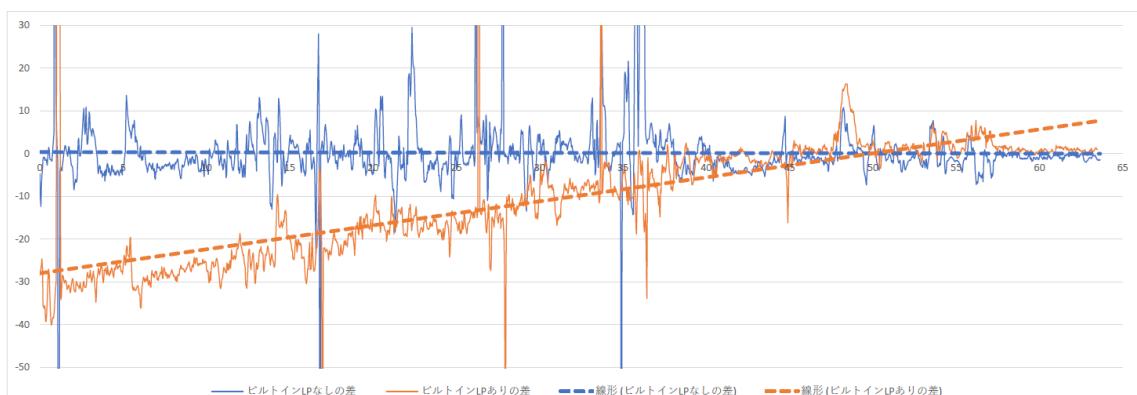


Fig.12.4 図中の黒線の断面図（下から上へ）
 オレンジ色が、BiLP 無しと BiLP 適用 Jpeg で作成したモデル間の垂直成分の差
 (Fig.12.2)
 青色が、BiLP 無しの写真で作成した地形モデル同士の垂直成分の差 (Fig.12.3)
 破線は近似直線。

参考 3：適切な GSD（地上分解能）の決定

4 つの物体認識レベル：ジョンソン基準（Jhonson, 1958）

1 検知（Detection）、2 向きが分かる（Orientation）、3 認識（Recognition）、4 識別（Identification）。この基準は、現在のカメラやセンサーの「視力」を評価する際にも参考にされる。

Table I - Optical Image Transformations

TARGET	RESOLUTION PER MINIMUM DIMENSION				
	Broadside View	Detection	Orientation	Recognition	Identification
Truck	.90	1.25	4.5	8.0	
M-48 Tank	.75	1.2	3.5	7.0	
Stalin Tank	.75	1.2	3.3	6.0	
Centurion Tank	.75	1.2	3.5	6.0	
Half-track	1.0	1.50	4.0	5.0	
Jeep	1.2	1.50	4.5	5.5	
Command Car	1.2	1.5	4.3	5.5	
Soldier (Standing)	1.5	1.8	3.8	8.0	
105 Howitzer	1.0	1.5	4.8	6.0	
<hr/>					
Average	$1.0 \pm .25$	$1.4 \pm .35$	$4.0 \pm .8$	6.4 ± 1.5	

この表は、物体を認識するために必要な空間周波数（ラインペア）を様々なターゲットに対して実験を行った結果をまとめたものである。着目すべきは最下段の Average で、各認識レベルに必要な空間周波数（ラインペア）は一定の値に収まる、という点である。空間周波数（ラインペア）の値を 2 倍すると画素数と読み替えることができる。

以上をまとめると、物体の認識に必要な画素数は以下のようになる。

- | | |
|-----------------------|----------------------|
| 1 検知（Detection） | 2 画素 ± 0.5 画素 |
| 2 向きが分かる（Orientation） | 2.8 画素 ± 0.7 画素 |
| 3 認識（Recognition） | 8.0 画素 ± 1.6 画素 |
| 4 識別（Identification） | 12.8 画素 ± 3.0 画素 |

なおこの値は、物体とその背景とのコントラスト差が十分にあることを前提としている。

例えば、GSD（地上分解能）が 16.5cm の空中写真を使用した場合、上から見た人間（75cm × 30cm）は 4.5 画素 × 1.8 画素で描画される。この画素数は、「検知」と「認識」の中間となる。人間の立っている背景とのコントラストが明瞭な場合や、周囲の状況もふくめて判断するならば、そこに人間が存在していることをぎりぎり認識できる可能性がある、といえる（Fig.13.1）。



Fig.13.1 GSD が 16.5cm の空中写真で人間を上から見た例
「認識」レベルには少し画素が足りないが、この例では、道路上で、同じ程度の長さで影があり、服の色が異なるが頭部は白いヘルメットであることから、人間と認識できる。



Fig.13.2 GSD が 16.5cm の空中写真で車輛（乗用車、トラック）を上から見た例

同じ空中写真で車輪（2.0m × 5.0m : 12.1 画素 × 30.3 画素）を見た場合は、「識別」に必要な画素数を大きく超えるため、容易に「識別」できる。



Fig.13.3 UAV 搭載カメラで撮影した写真の例

この写真は、GSD 3.3cm の地上分解能で撮影した積雪表面の様子である。ここに、オレンジ色で緑のキャップの 350cc のペットボトルが「認識」できる。分かるだろうか。

以上の知見を活用すると、地形モデルを作成する際の GSD の決定において参考になる。何のために、どのサイズの物体を、どの認識レベルで撮影したいのであろうか。その物体は、その物体が存在する周囲とのコントラストの差はどの程度あるだろうか。コントラストが大きければ、より少ない画素で目的の認識レベルを実現できる。その逆もあり。そのように考えると、おのずと必要な GSD が求まる。

参考文献：

John Johnson (1958) Analysis of image forming systems., in Image Intensifier Symposium, AD 220160 (Warfare Electrical Engineering Department, U.S. Army Research and Development Laboratories, Ft. Belvoir, Va., 1958), pp. 244–273.

参考 4：GCP（Ground control point: 地上基準点）の設置

GCP は、マーカー（Markers）ツールを使用して、写真上の場所を指定する。マーカーは、GCP の設置のほか、写真配置の最適化、座標系の設定、シーン内の距離とボリュームの測定、そしてマーカベースのチャンクアラインメントにも使用される。どの用途で使用しても、設置の手順やマーカーアイコンの見た目は変わらない。ソフトウェアの挙動をよく理解する必要がある。ここでは、GCP としてマーカーを設置する方法を説明する。

なお、写真の品質や解析処理のフィージビリティーを評価する目的で Workflow の各解析処理を試験的に実施する場合、GCP の設置は必須ではない。ただし、カメラの座標が与えられていない状態で解析を実施すると、モデルの天地や方位が正しく表示されない。



GCP の設置

GCP は、写真上にマーカーを配置し、配置したマーカーに位置座標の数値を与えることによって行う。マーカーの配置方法には、手動マーカー配置とガイド付きマーカー配置の 2 つの方法がある。設置の際の挙動や実施条件が異なる点に注意すること。

1. 手動アプローチは、GCP が見えている複数の写真に対し、マーカーを手動で配置する方法である。手動によるマーカーの配置は 3D モデルを必要としない。つまり、Align photos の前でも実行できる。
2. ガイド付きアプローチを行うには、Build dense cloud で作成した 3D モデルが必要となる。GCP が写っている一枚の写真にマーカーを配置すると、3D モデル上の GCP に対応する場所に自動的に投影し、マーカーが見えている残りの写真についても、自動でマーカーを配置する。その後、個々の写真に自動的に配置されたマーカーを、精度を向上させる目的で、より正しい位置に手動で配置し直すこともできる。ガイド付きアプローチは、マーカーの配置作業を大幅に高速化し、誤った位置にマーカーを配置する可能性を低減する。特別な理由がない限り、この方法が推奨される。

参考 5：カメラアライメントの最適化：Optimize cameras

Align photos の処理過程で、写真の内部・外部標定要素を推定する。この推定は、画像データのみを使用して実行され、誤差を含む。誤差の要因は、隣接する写真間の重なり量やオブジェクト表面の形状など、多くの要因に依存する。海や水面が広い面積を占める場合は、推定結果を悪化させる原因となるため、当該領域に Mask 处理を行う必要がある。

モデル座標を地理座標系に変換する際、モデルは 7 パラメータ変換（変換のための 3 つのパラメータ、回転のための 3 つのパラメータ、スケーリングのための 1 つのパラメータ）を使用して線形変換される。この変換では線形誤差のみを打ち消すことができるが、非線形成分を除去することはできない。

モデルの非線形変形を行うには、既知の基準座標に対し、ジオリファレンスされた座標およびカメラパラメータ（内部標定要素）を使用して Optimize cameras を実行する必要がある。Optimize cameras による最適化中に、再投影誤差と基準座標ずれ誤差の合計を最小にするように、ジオリファレンスされた座標とカメラパラメータを調整する。

より優れた最適化結果を得るために、あらかじめ Sparse point cloud 上の誤差の大きい点を削除することが望ましい。Gradual selection を使用してフィルタリングし、誤差の大きい点を削除する。

Optimize により、ジオリファレンス精度を大幅に改善することができる。モデルを測定用途に使用する場合は、最適化を実行する必要がある。

Optimize cameras の注意事項

接線歪みパラメータ p3、p4 は、p1、p2 の値が Align photos 後に値が推定されていた場合のみ、最適化に使用できる。

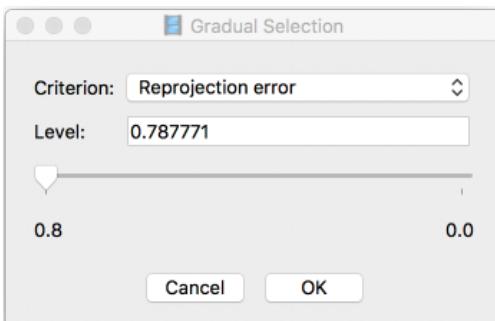
Dense point cloud および Mesh が存在する場合は、Optimize cameras 実行後にクリア（消去）される。Optimize cameras 後に再構築する必要がある。

Optimize cameras を実施するタイミング

GCP 設置後、カメラの位置情報を使用せず（Uncheck）、GCP の位置座標を使用して Optimize cameras を実行するのがベストなタイミングとなる。この理由は、一般的に、カメラ位置の GNSS データと比較して、GCP の座標は高い精度で測定されるためである。さらに、GCP とカメラの座標は、異なる座標系で測定されることが多く、カメラと GCP の両方のデータを同時に最適化することができない。GCP を使用することで、より正確な最適化結果を得られる。最適化の結果は、Reference ペインの Error 項目から評価できる。

参考 6：Sparse point cloud のフィルタリング

Sparse point cloud 中に大きな再投影誤差を持つ点がどこにあるかを知ることや、高いノイズ量を表す点を除去することは有用である。この作業のため、Gradual selection ツールから、Sparse point cloud をフィルタリングする各ツールが利用できる。フィルタリング手法（Criterion）には以下の方法がある。



Reprojection error

大きな再投影誤差は、ポイントマッチング処理において、対応する特徴点の投影精度が低いことを示す。誤ったマッチングが行われた場合も同様である。これは、水面やテクスチャーの弱い建物の屋根などの人工物で多く見られる。このようなポイントを削除すると、後続の Optimize cameras によるモデルの最適化処理の精度が向上する。推奨値は 0.5 から 1.0 程度。Reconstruction uncertainty と合わせて使用し、削除するポイント数は、Sparse point cloud の全ポイント数の 5%程度を目安とし、10%を超えないようにする。削除しすぎると Dense point cloud を生成できなくなる。

Reconstruction uncertainty

写真と写真の距離（ベースライン）が近すぎる、つまりオーバーラップ率が高すぎる写真から Reconstruct された点群は、不確定性が高くなる。これは、無人航空機の離着陸における垂直上昇/下降中に連続で撮影した写真や、上空でホバリング中にインターバルタイマーで連続撮影を行なった場合などに発生する。このような点は、モデルの表面から顕著に逸脱し、点群中のノイズとなる。このようなポイントを削除しても最適化（Optimize cameras）の精度に影響はないが、Dense point cloud を作成する前に削除すると、点群の視覚的外観や、DSM の異常値を改善する。ベースラインが近すぎる写真をあらかじめ削除することも効果的である。推奨値は、20 から 100 程度。Reprojection error と合わせて、元の Sparse point cloud のポイント数に応じて、削除しすぎないように注意する。

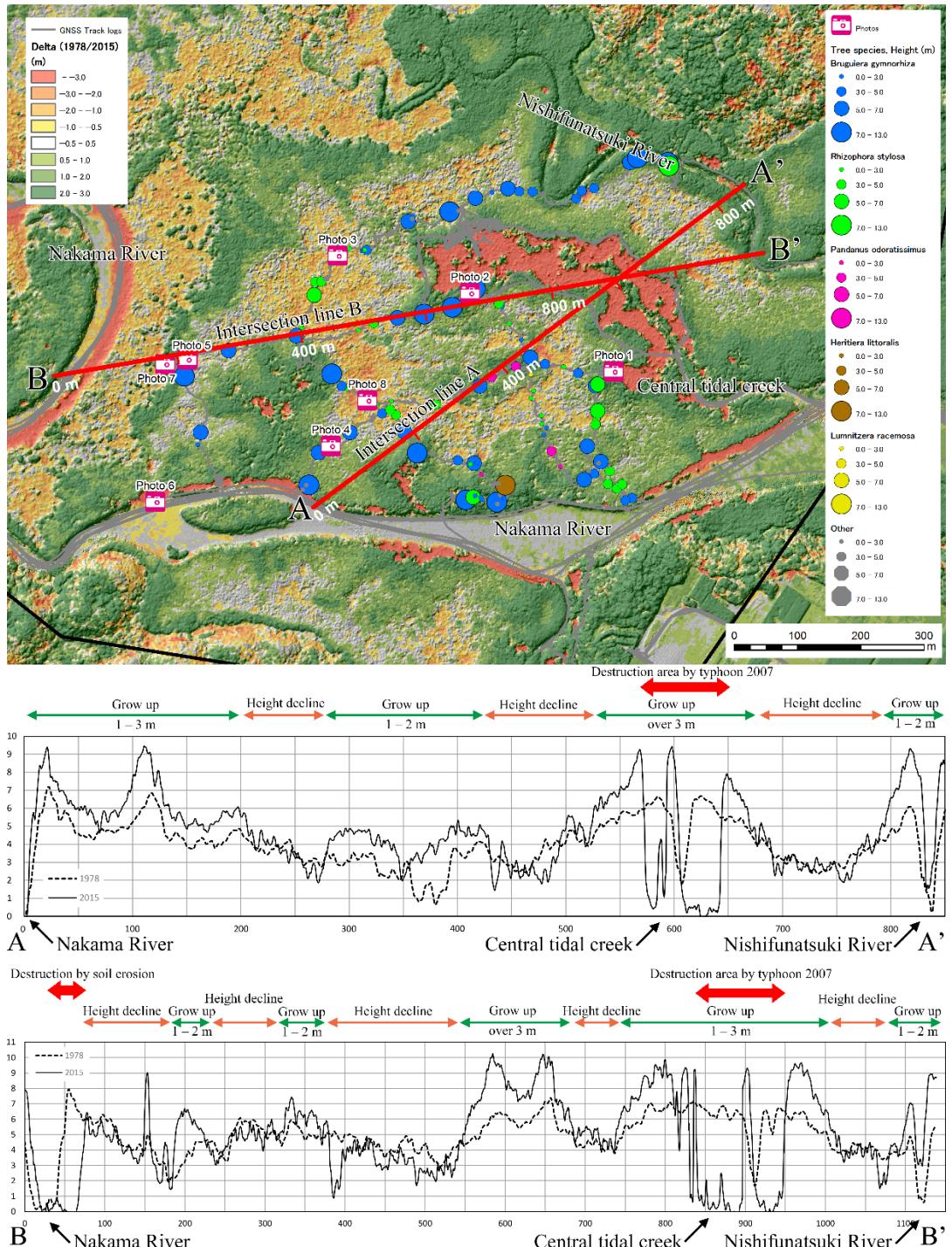
Image count

最小で 2 枚の写真に写っているすべての画素について点群が計算される。しかし、2 枚の写真にしか写っていない画素は、正確さが劣る。Image count フィルタにより、そのような信頼できない点を取り除くことができる。

Projection Accuracy

このフィルタは、特徴点が抽出された領域が大きいために局所性が低い点を除外する。

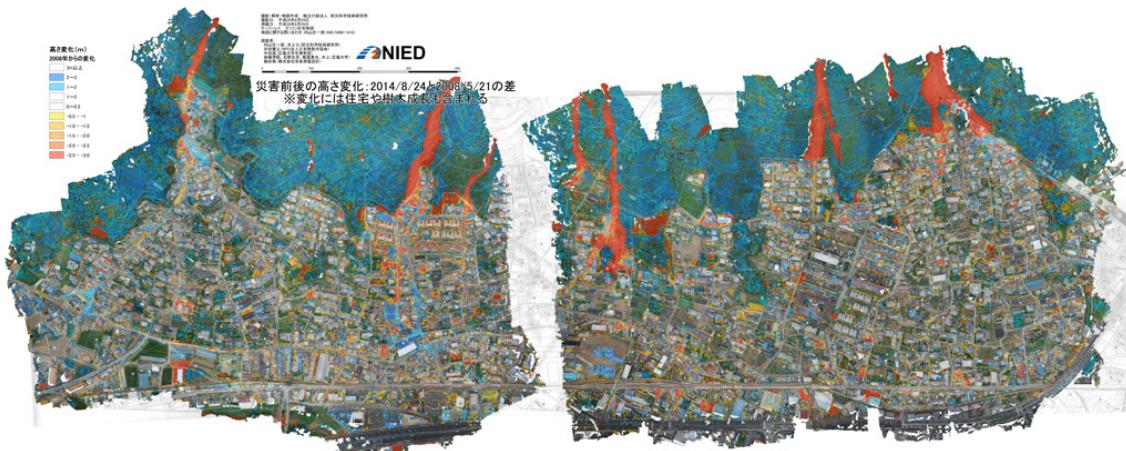
事例 1：アナログ空中写真と UAV 写真による二時期の DSM の比較



1978 年・2015 年の DSM から 2006 年と 2007 年の台風によって破壊され倒壊したと考えられるマングローブ林の範囲を抽出。1978 年からの 37 年間で、マングローブ林の成長および、樹冠が低下している領域の存在を示唆。

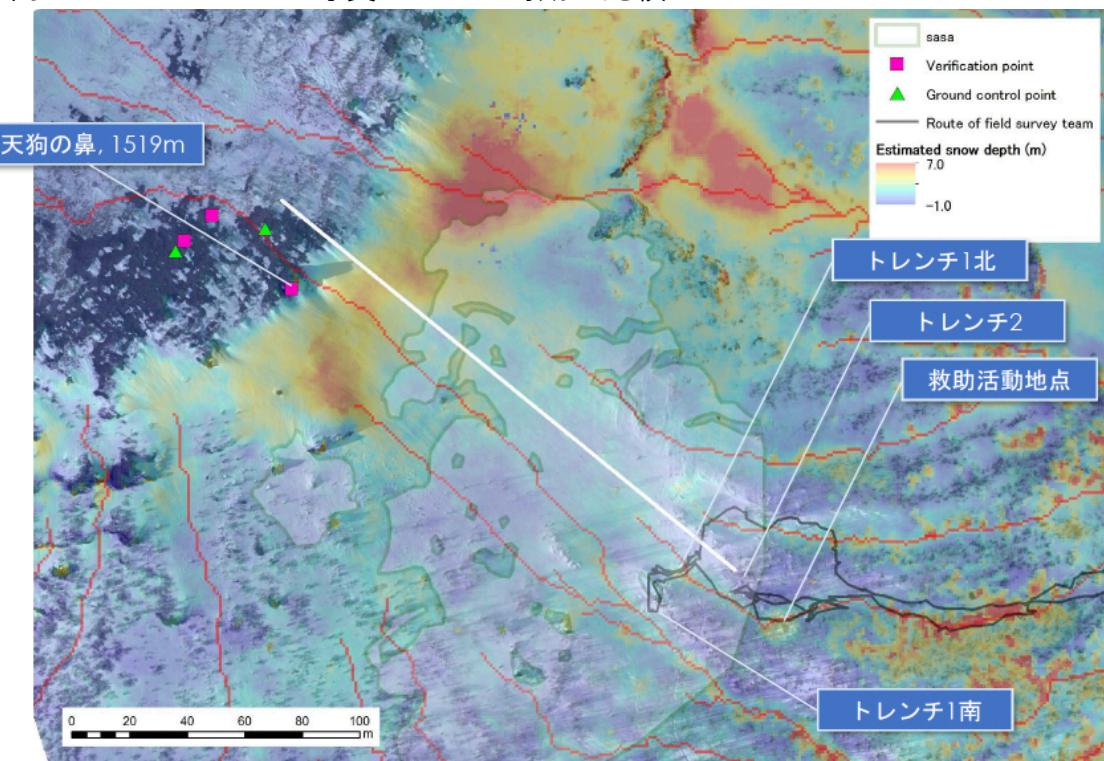
Shoichiro UCHIYAMA1 and Toyohiko MIYAGI (2016) Acquisition and utilization of high-definition digital surface models through aerial photography using a small unmanned aerial system: an example of typhoon damage in Iriomote Island mangrove forests, Japanese Geomorphological Union, 37-1, p. 159-173.

事例 2：デジタル空中写真と UAV 写真による二時期の DSM の比較



2014 年広島市の土石流災害における捜索支援地図の作成
 無人航空機撮影写真：対地高度 150m、約 5,500 枚（解析は約 770 枚使用）
 空中写真：2008 年撮影空中写真 (DMC) 25 枚
 地上基準点測量の実施：GNSS (VRS)、30 点
 住宅地図（株式会社ゼンリン）

事例 3：LIDAR と UAV 写真による二時期の比較



2017 年栃木県那須町の雪崩調査：積雪深の推定
 観測範囲は東西 900m、南北 550m、標高差は 320m
 対地高度は 150m、撮影写真的地上解像度は約 3.3cm/px
 垂直誤差：地上基準点と検証点の計 18 点の平均値が 0.41cm、最大値 9.5cm、最小値-7.7cm、標準偏差は 4.46