

第2章 SfM-MVSによる計測方法について

1. Metashape pro版を使用する瓦当文様の三次元計測方法

はじめに

デジタルカメラ等で撮影した複数の写真画像から被写体の三次元情報を復元する SfM-MVS (Structure from Motion and Multi-View Stereo) の技術で取得する三次元計測データは、使用したカメラ・レンズなどの機材や、解析に使用したソフト、それらの設定によって、データの粗密や信頼度に大きな違いが生じる。そこで、ここでは、本科研プロジェクトにおける基本的な瓦当文様の計測方法について報告する。

なお、三次元計測には、資料の全形を計測する場合と、一部のみを計測する場合があるが、同じ密度のデータを取得しようとする場合、前者は後者に比べ、撮影枚数・処理時間・データ量が飛躍的に増加する。本科研プロジェクトは、同範瓦の瓦当文様の比較検討を主な目的としており、範傷など資料表面の微細な凹凸を記録するために、接写写真を多く撮影し、極めて高密度なデータを取得する必要があった。現段階における使用機材のスペックと解析時間、生成データの容量などを総合的に考慮した結果、資料の計測範囲は、基本的には文様の施された瓦当面のみとし、一部資料については解析の精度を落とし全形も計測することとした。ここでは、資料の一部分（文様面のみ）の計測方法について紹介する。

全体の流れとしては、まず写真を撮影し、記録した RAW データを現像することで解析に使用する TIFF の画像セットを取得、それをソフト Metashape pro 版 (Agisoft 社) で解析し、三次元データを生成する。取得した三次元データを二次元に図化するにあたっては、オープンソースソフトウェアである CloudCompare を使用し、データの軸の調整と画像の書き出しをおこなう。以下では、これらの作業手順について、項目ごとに説明する。

1. 写真撮影

生成する三次元データの密度や信頼度は、撮影した写真画像の大きさ・質に大きく依拠する。ここでは SfM-MVS に使用する写真画像の撮影において注意するべき点をいくつか示す。

1-1. 資料の観察

撮影をおこなう前に、資料の状況をよく観察することは必須である。文様の凹凸具合や範傷の有無など、どこを重点的に撮影する必要があるかを確認する。なお、長期間展示・保管されていた資料には埃が積もっていることもあり、拓本を採った際の画仙紙の纖維が付着していることもある。接写をして微細な痕跡を計測する場合は、こういった付着物をあらかじめ丁寧に取り除いておく。

1-2. 資料の設置

当然ではあるが、写真に写らない部分は三次元データを取得することができない。そのため、撮

影の際に資料をどのように設置するかも、三次元計測を成功させるにあたり極めて重要になる。資料の欠損状況等を確認し、安定して据えられる置き方を考えることは言うまでもないが、三脚を使用して撮影する際に、計測したい部分が死角とならないかもあわせて考え、資料を設置する。

また、写真に濃い影が生じてしまうと、信頼度の高い三次元データが取得できない。そのため、後述のように、可能な限り影が生じないよう、均一に光が当たるようにライティングをおこなう。凹凸が比較的少ない資料は、瓦当面が斜めになるように資料を立てかけるだけで撮影できるが（図1-1）、外縁が高い資料などは、適宜ターンテーブルなどを併用して撮影する（図1-2）必要がある。

なお、SfM-MVS によって取得する三次元データは、それ自体では大きさの情報を持たないため、大きさが分かるものを資料と一緒に撮影する必要がある。定規などを一緒に撮影することもできるが、解析のエラー値などを確認しやすくするため、本プロジェクトでは、Metashape pro版で出力できるターゲットマーカーを複数配置した枠を作成し、資料とともに撮影した（図1-2）。

1-3. ライティング

ライティングにはLEDライトを使用した。極端な影が生じないように、上と左右の三方向から均一に光が当たるようにするか、もしくは、カメラのレンズに取り付けるリングライトを使用した。施釉瓦など光が反射しやすい資料を撮影する際は、直接強い光が当たらないように注意する必要がある。

1-4. カメラの設定

撮影の前に、使用するカメラのセンサーサイズや画素数をはじめ、カメラやレンズのスペックを確認し、必要とするデータを取得できる機材かどうか確認する必要がある。カメラのファームウェアにアップデートがないかも確認し、あるようであれば事前にアップデートしておく。

本プロジェクトで使用したカメラは、OM-D E-M1 Mark II（オリンパス社）であり、レンズはマクロレンズ（30mm/F3.5もしくはF2.8）を装着した。SfM-MVS に使用する一連の写真は、F値を固定して撮影する必要がある。カメラは絞り優先モードに設定しF値は10前後に固定した。F値の数値が大きいほど、暗くなり、シャッタースピードが遅くなるため、撮影には必ず三脚を用いる。シャッターを押す際の振動による手振れを防止するため、レリーズやタイマー機能、PCやタブレットを使用してシャッターを切る。測光モードは中央重点測光にし、記録する画像のファイル形式は、一般的なJPEG以外にRAWも必ず記録する。

1-5. 資料の撮影

今回図示した資料は、外区に鋸歯縁をもつ。この場合、まずは、レンズと文様面が平行するように資料・カメラを設置し、画角に文様面全体が収まるようにする。そのうえで、文様面と平行になるようにグレーカードを配置し、資料名等が書かれた付箋などを入れて、1枚撮影する（図2-P4152467）。次に、グレーカードと付箋を取り除き、同じアングルで1枚撮影する（図2-P4152468）。続いて、文様の微細な凹凸を記録するために、接写写真を撮影する。今回は、文様面とレンズの距離がおよそ20cmになるようにして撮影した。接写写真は、上下左右に隣り合う写真が半分程度以



1. 文様面とレンズが平行するように設置



2. ターンテーブル上に設置(ターゲットマークー使用例)

図 1 撮影時の資料の設置

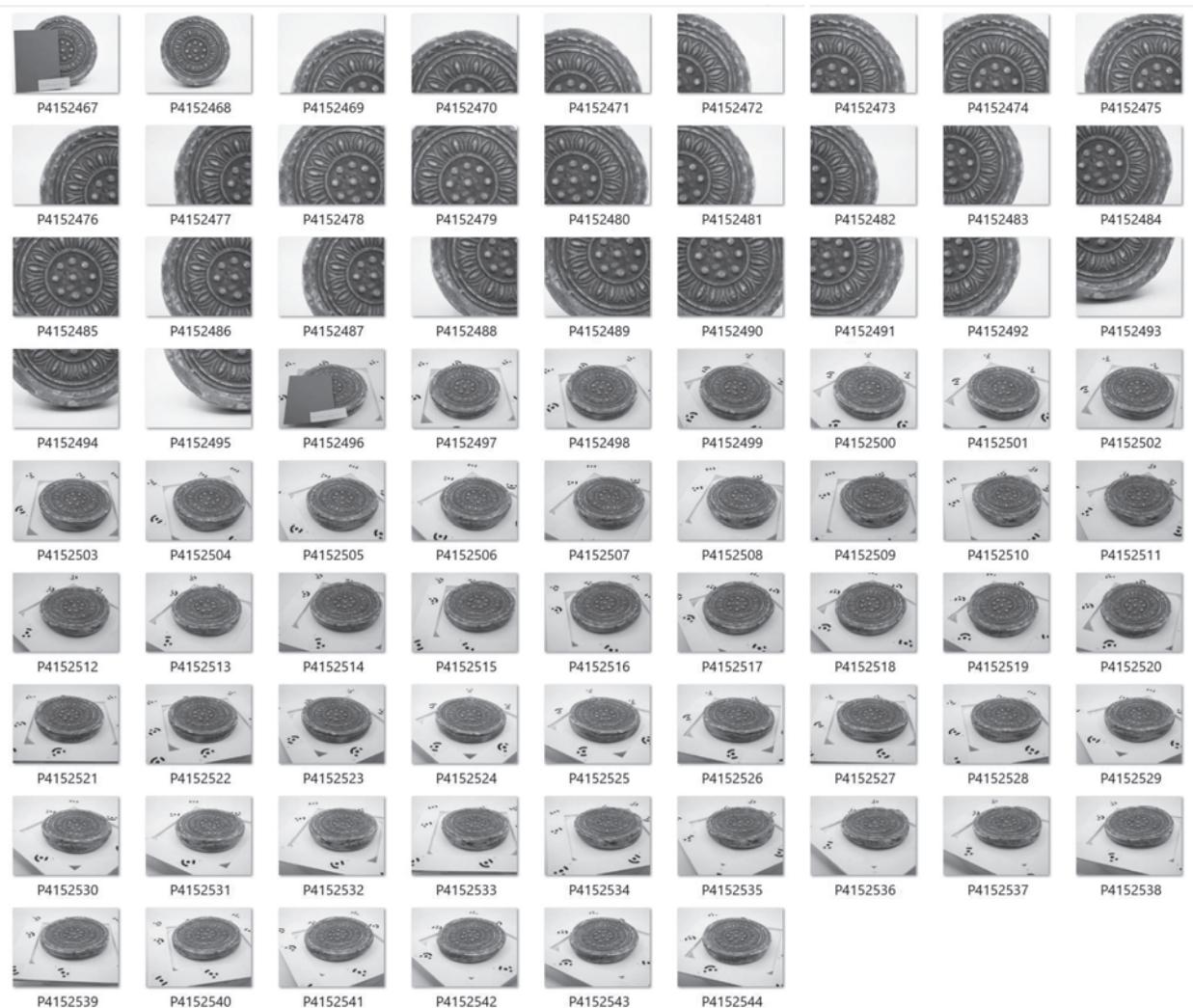


図 2 撮影した全写真

上オーバーラップするように、連続的に撮影する（図2-P4152469～P4152495）。

正面からの接写写真の撮影後、瓦当の文様面が上になるようにしてターンテーブルに乗せる。この時、ターゲットマーカーを配した枠を設置する。画角に文様面と瓦当側面の両方が写るようにカメラを設置し、再度、グレーカードと付箋を入れて撮影する（図2-P4152496）。1周目は、珠紋や蓮子、鋸歯文等、文様の凹凸が激しい部分にピントを合わせて撮影する（図2-P4152497～P4152520）。2周目は、三脚を若干下げ、1周目に比べて瓦当側面が多く写るようにカメラを設置する。ピントは外縁外端に合わせて撮影する（図2-P4152521～P4152544）。各画像には、それぞれ4点程度以上のターゲットマーカーが写るようにした。なお、今回提示した写真画像は、研究協力者である三好佑佳氏によって撮影されたものである。

2. RAWの現像とTIFF画像の書き出し

記録した画像のうち、JPEG画像は、ピンボケなどの有無の確認や、撮影した画像セットで三次元データが取得できるかを急いで確認する必要がある場合の仮解析に使用し、本解析にはRAWデータのホワイトバランス等を補正しTIFF画像として書き出した画像を用いる。以下は、画像の現像と書き出しの手順である。

2-1. データの複製

SDカード等に記録されたデータをパソコンにコピーし、RAWとJPEGで別のフォルダに分ける（図3）。両者を入れるフォルダ名は、撮影資料が分かるように、アルファベットと数字を用いて命名する。JPEG画像を確認し、不要な画像があればJPEG・RAWともにデータを削除する。

2-2. RAWデータの現像

現像ソフトにRAWデータを読み込む。今回、現像ソフトはLightroom（Adobe社）を使用したが、カメラ会社によって無償のソフトが提供されている場合も多い。グレーカードが写った写真のデータを元に、全画像のホワイトバランスを補正する（図4）。写真の明るさにばらつきが認められる場合は、露光量を微調整してそろえる。現像を終えたデータは、撮影日時やカメラの設定などのメタデータを保持するTIFF画像として書き出す。このTIFFの画像セットをSfM-MVSの解析に使用する。

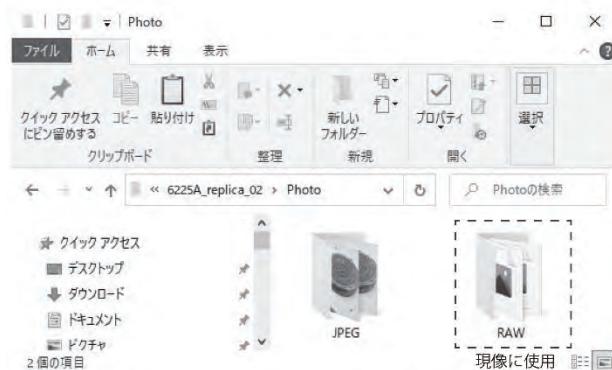


図3 写真データのフォルダ分け



図4 RAWの現像（ホワイトバランスの調整）

3. Metashape pro 版による SfM-MVS の解析

SfM-MVS では、複数の写真画像の情報から、撮影時のカメラ位置を推定し、被写体の形態や質感を再現する。また、大きさ情報を持つターゲットマーカーや定規等を、資料と一緒に撮影することで、三次元データに大きさの情報を与えることができる。以下では、Metashape pro 版 (Windows 64bit 版バージョン 1.7.6) を使用した場合の、SfM-MVS の解析の手順を紹介する。

3-1. 画像の読み込み

2-2 で書き出した一群の TIFF 画像のうち、グレーカードが写ったもの以外を Metashape pro 版に読み込み (Workflow>Add Photos...、図 5-1)、名前を付けて保存する (File>Save as...、図 5-2)。ファイル名は通常、年月日 (例: 20220101) とし、一群の写真を入れたチャンクの名称を、アルファベットと数字で示した資料名とする (例: 6225A)。

3-2. ターゲットマーカーの検出

枠に配置したターゲットマーカーを自動で検出する (Tools>Markers>Detect Markers...)。このターゲットマーカーは、大きさ・形を指定して作成することができる (Tools>Markers>Print Markers...)。遺物の計測の場合、円形 12bit のターゲットマーカーを利用することが多い (図 5-3)。検出後、座標データ (Reference) に表示されたマーカーの名称・数を確認し (図 5-4)、使用していないターゲットが検出されていた場合は削除する。

3-3. 写真のアラインメント

読み込んだ画像のカメラ位置を推定し、粗い点群 (tie point) を生成する (Workflow>Align Photos...)。設定は、精度 (Accuracy) を最高 (Highest) にし、汎用事前選択 (Generic preselection) にチェックを入れる (図 5-5)。アラインメントが終わると粗い点群が表示される。

次に、カメラの最適化をおこなう (Tools>Optimize Cameras...)。なお、2枚の画像から生成されたタイポイントは信頼性が低いため、フィルタリングして (Model>Gradual Selection...>Image count) 削除した後、再度カメラの最適化をおこなう。

写真のアラインメント終了後、モデルの画面にはバウンディングボックスが表示されるが、これを回転・拡大縮小させることで、その後解析する範囲を指定する (図 5-6)。

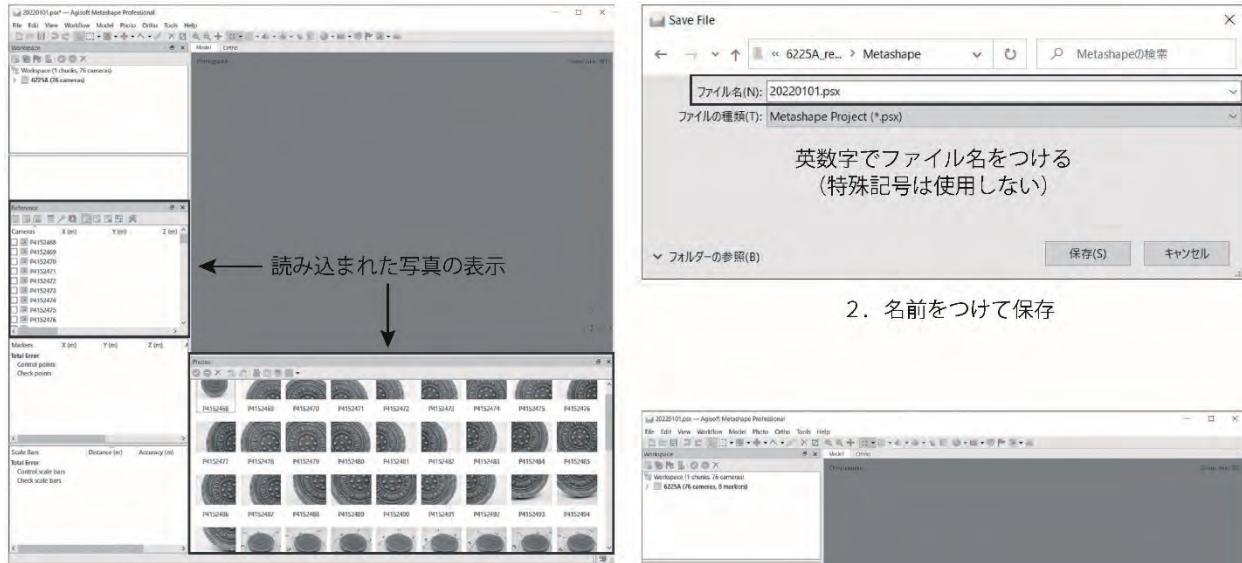
3-4. 画像の背景にマスクを入れる

不要な高密度クラウドを生成させないため、高密度クラウド構築の前に、Photos に表示された画像の資料以外の背景部分を覆うマスクを入れるが、そのマスクを作成するための簡易的なメッシュ (三次元モデル) を生成する (Workflow>Build Mesh...)。この簡易的なメッシュのソースデータは深度マップ (中程度) を選択する (図 6-1)。

生成されたメッシュは、不要部分を選択して削除し (図 6-2)、その後、画像上で右クリックをして画像にマスクをインポートする (Masks>Import Masks...)。マスクは、モデルを置き換える (すなわち、三次元モデル以外の部分を覆う) 形で入れる (図 6-3)。

3-5. 高密度クラウドの構築

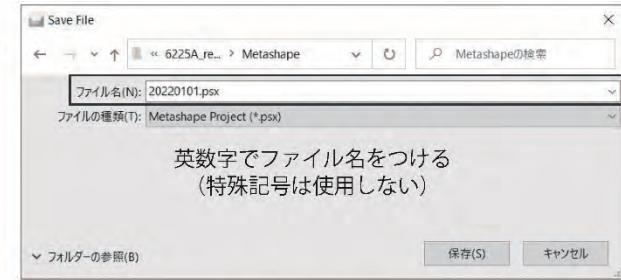
次に、高密度クラウドを構築する (Workflow>Build Dense Cloud...)。高密度クラウドの品質は最高



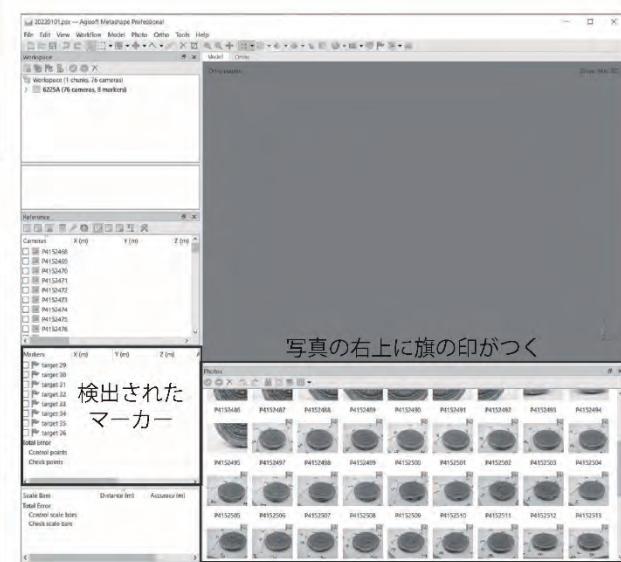
1. 写真的読み込み



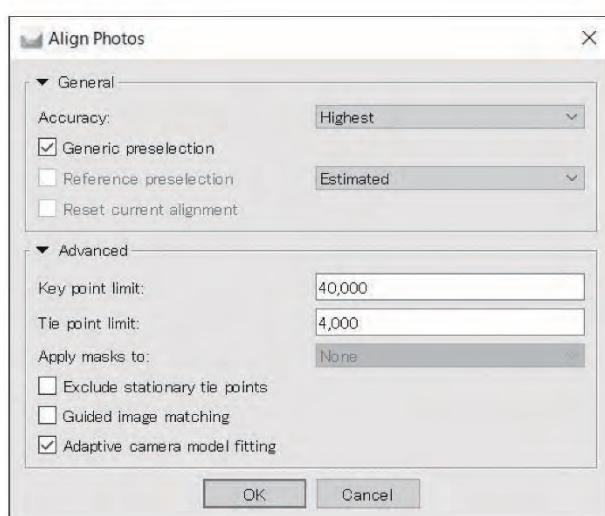
3. マーカーの検出



2. 名前をつけて保存



4. 検出されたマーカーの確認

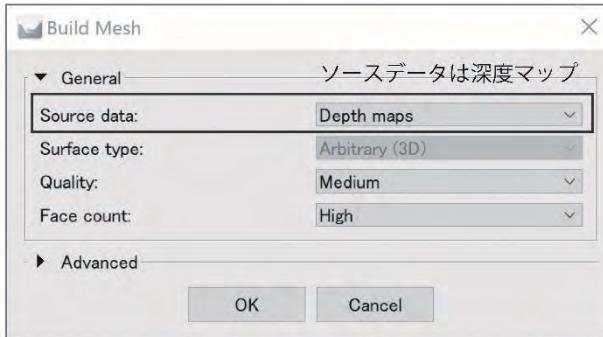


5. 写真的アライメント

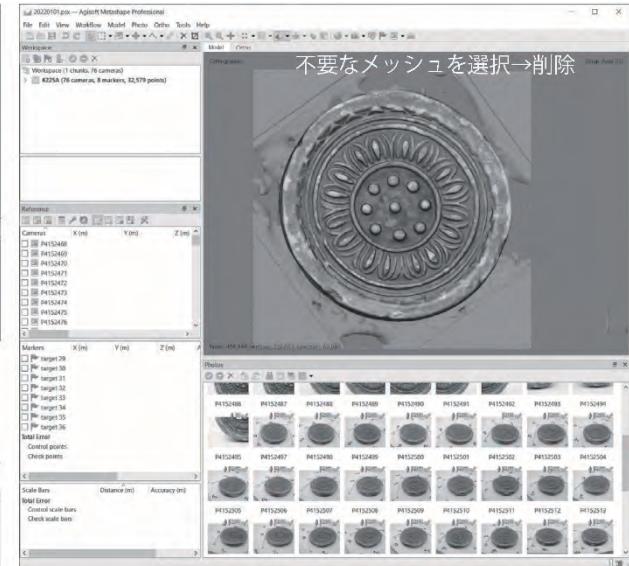


6. パウンディングボックスの調整

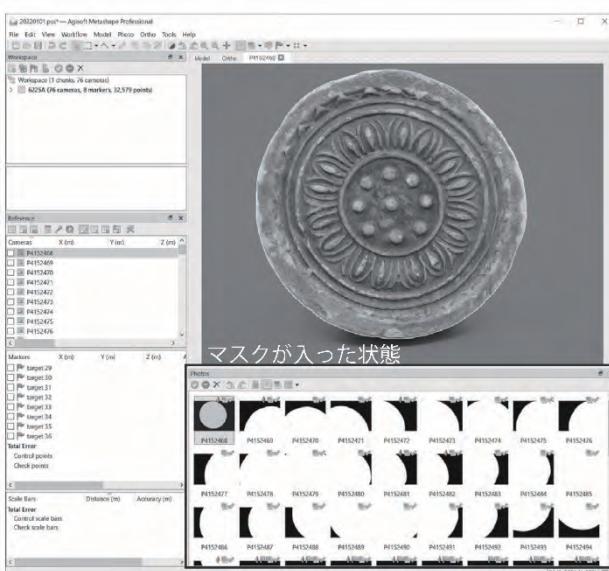
図5 Metashape pro版によるSfM-MVSの流れ (1)



1. マスク用のメッシュ構築



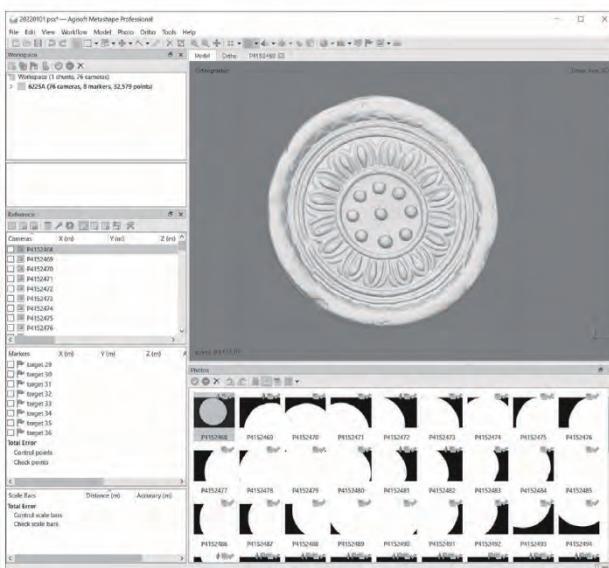
2. 不要なメッシュの削除



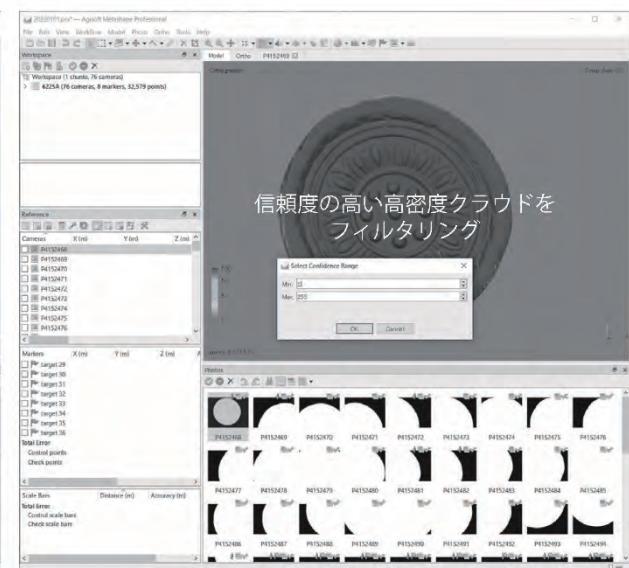
3. 画像の背景にマスクを入れる



4. 高密度クラウド構築



5. 構築された高密度クラウド



6. 高密度クラウドのフィルタリング

図6 Metashape pro版によるSfM-MVSの流れ（2）

(Ultra high) を選択し、ポイントの信頼性を計算する設定にする（図6-4）。構築された高密度クラウド（図6-5）は、信頼度によってフィルタリングし（Tools>Dense Cloud>Filter by Confidence...）、最小値がおよそ2以下のものを選択して削除後、フィルターをリセットする（図6-6）。

3-6. メッシュの構築

以上で選別した信頼度の高い高密度クラウドをソースとして、再度メッシュを構築する（Workflow>Build Mesh...）。この時、サーフェスタイルは自由形状（3D）を、ポリゴン数は高（High）を選び、内挿補間を有効に、頂点カラーを計算するように設定する（図7-1）。

なお、内挿補間を有効にした場合、端部には波状のメッシュが生成される（図7-2）。この不要なメッシュは手動で選択し削除するが、最後に、微細な浮いたメッシュが存在しないかフィルタリングして確認し（Model>Gradual Selection...>Connected Component size...）、ある場合は選択して削除する。

3-7. テクスチャーの構築

次に、構築したメッシュに、色情報・質感であるテクスチャーを貼り付ける（Workflow>Build Texture...）。テクスチャーの種類は「拡散マップ」を選択し、ソースデータは「イメージ」を、マッピングモードは「汎用」を選択する。ブレンドモードは「モザイク（標準）」にし、テクスチャーサイズは4,096ピクセル1枚に指定する。解析が終わると、三次元モデルにテクスチャーが与えられる。

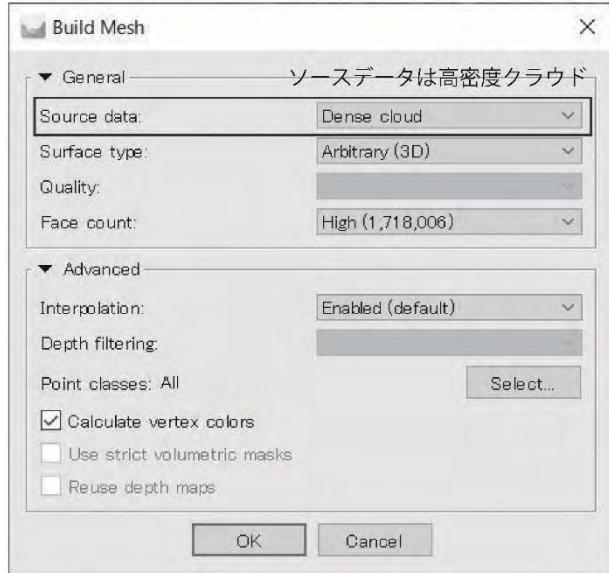
3-8. スケールの設定

最後に、三次元モデルに大きさ情報を与える。座標データ（Reference）に表示されたマーカーの中から2つを選択し、右クリックで「スケールバー作成」を指定する。すると、その間の距離を入力できるスケールバーが作成される（図7-3）。「距離（m）」の空欄をダブルクリックし、あらかじめ測っておいた2点間の距離をメートル単位の数値で入力すると、三次元モデルに大きさ情報が与えられる。スケールバーが1つでも大きさ情報を与えられるが、資料を囲うように配置された任意の4点のマーカー間の距離を入力することで、より信頼度の高い大きさ情報を得ることができる。スケールバーの設定後は、必ず座標データ（Reference）における「トランスフォーム（変換）を更新」のアイコンを押し、スケールバーのエラー値を確認する（図7-4）。

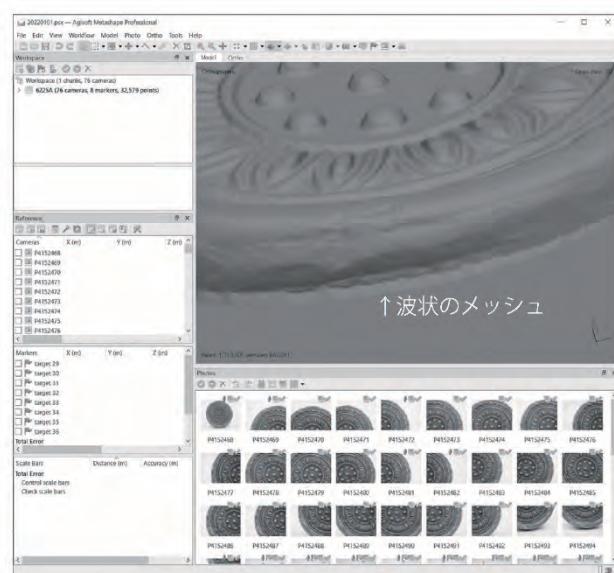
3-9. データの書き出し

取得した三次元データを、他のソフトで閲覧・編集できるように、データ形式を指定して書き出す。高密度クラウドを書き出す場合（File>Export>Export points...）や、三次元モデルを書き出す場合（File>Export>Export Model...）があるが、今回は三次元モデルをWavefront OBJ (*.obj)の形式で書き出した（図7-5）。データは基本的に英数字で命名し書き出すが、三次元モデルをWavefront OBJで書き出すと.obj以外に.mtlと.jpgなど計3種類のデータが生成される（図7-6）。

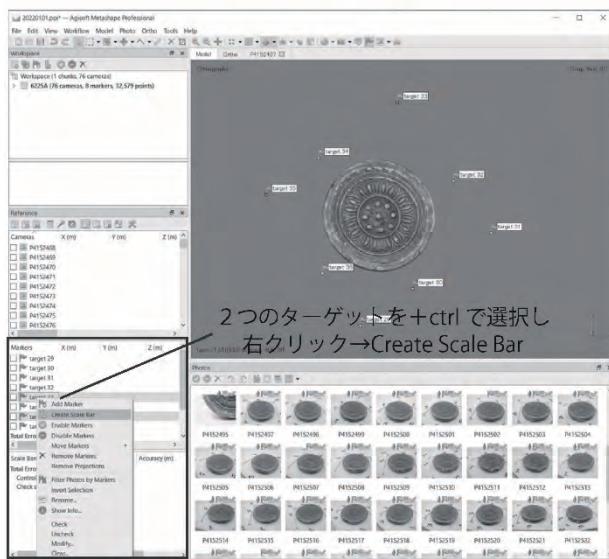
なお、どのように解析して三次元データを取得したかという情報も極めて重要である。三次元モデルの書き出しとともに、解析レポートを作成しPDFとして保存する（File>Export>Generate Report...）。



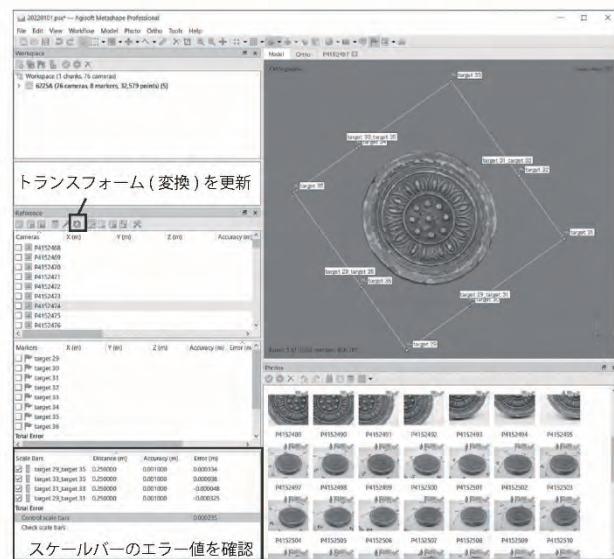
1. メッシュ構築の設定



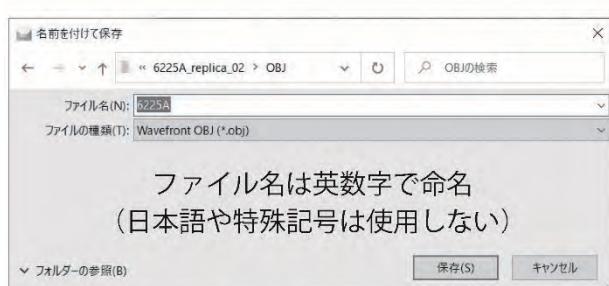
2. 端部に生成された波状のメッシュ



3. スケールの設定



4. スケールのエラー値の確認



ファイル名は英数字で命名
(日本語や特殊記号は使用しない)

5. 三次元モデル (OBJ) の書き出し



6. 書き出された三次元モデル (OBJ) のデータ

図7 Metashape pro版によるSfM-MVSの流れ (3)

4. CloudCompare によるデータの調整と画像の書き出し

Metashape pro から直接画像を書き出すこともできるが、三次元モデルの傾きを微調整し、大きさや色、光源等を指定して画像を書き出すには、外部ソフトを用いる方が容易である。今回は、オープンソースソフトウェアである CloudCompare を使用した。本プロジェクトで利用した最終バージョンは 2.11 である。

4-1. データを CloudCompare に読み込む

CloudCompare を開き、画面の設定をおこなう。初期設定では、画面の色が青から藍色のグラデーションで表示されるため(図8-1)、背景色などの設定をおこなう(Display>Display settings>Colors and Materials)。背景が白の画像を書き出す場合は、display gradient background の欄のチェックを外し、Colors の Background の色を白(HTML:#ffffff)に変える。この場合、Bounding-box や Text の色も、黒など見やすい色に変更する。メッシュの色を変える場合にはDefault Materials の各項目において、ライティングの色を変える場合にはLight の各項目において、同様に設定する。この時、各色の HTML のカラーコード(例:#8d8d8d)を控えておくと、後で同じ条件の画像を書き出すときに便利である。背景色を決めたら Apply と Ok を押して設定を確定する(図8-2)。

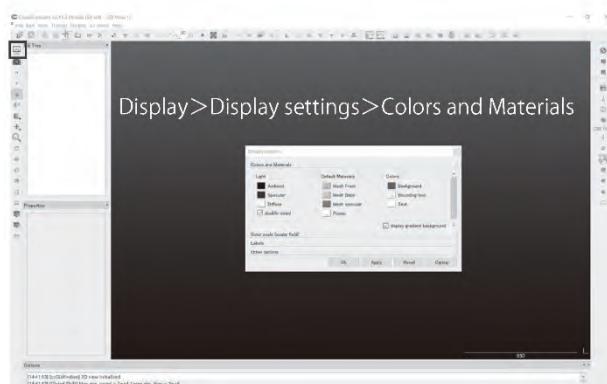
次に、OBJデータを読み込む(File>Open)。画面中央に三次元モデルが表示され、右下にスケールバーが表示される。Metashape でスケールの単位をメートルに設定し解析した場合、書き出された三次元モデルの単位はメートルであるため、スケールバー下の数値の単位もメートルである。なお、CloudCompare には「戻る」機能や自動保存機能がない。そのため、こまめに保存するよう注意する必要がある。保存の際には、保存するファイルなどを選択し、慣れない場合はバウンディングボックスが表示された状態であることを確認してから保存する(File>Save)。データは、ファイル名やファイルを入れるフォルダ名に日本語や特殊記号が含まれないよう、注意して命名する。CloudCompare のデータの拡張子は.bin である。

4-2. 三次元モデルの軸を調整

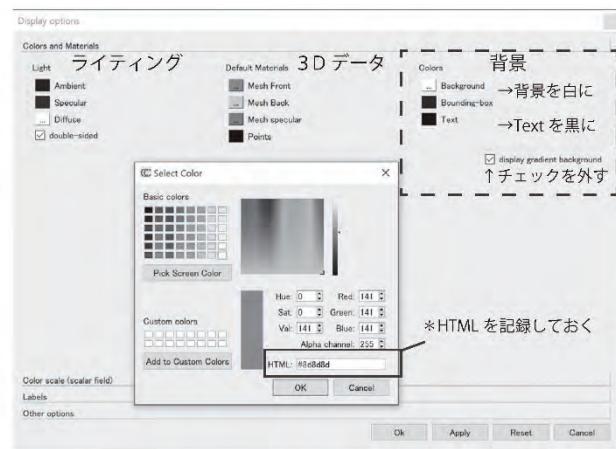
続いて、三次元モデルの軸を調整する。同じ条件のライティングで複数の瓦当文様の画像を書き出す場合は、瓦当面が上になるように三次元モデルの傾きを変える。左列のViewing tools から Set top view を押して表示し、三次元モデルを選択してバウンディングボックスを表示させる。そのうえで、上列のメインツールバーから Translate/Rotate を選択すると、三次元モデルの軸を変えられる(図8-3)。適宜、Viewing tools によって正面や左右からの表示に切り替え、瓦当面が平らになるように調整するが、この時、回転する方向をXYZ の全方向ではなく、ひとつの方向に固定して調整すると扱いやすい(図8-4)。また、テクスチャーよりもサーフェスで表示した方が三次元モデルの傾きを確認しやすい場合は、Properties のMesh のMaterials/textures のチェックを外す。傾きを決めたら緑のチェックボタンを押し、確定する。

4-3. 画像の書き出し

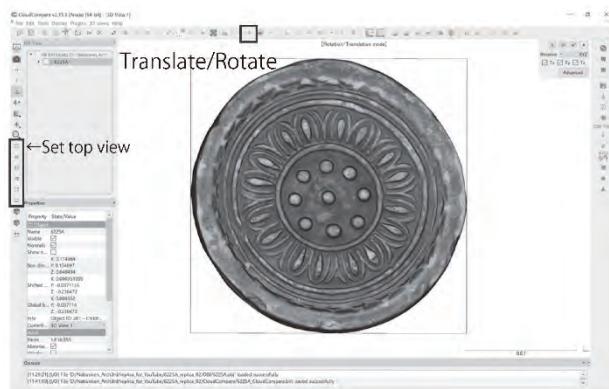
画像を書き出す前に、左のViewing tools から Set current view mode を長押しし、三次元モデルが正射投影表示(Orthographic projection)されているか確認する。正射投影表示になっている場合



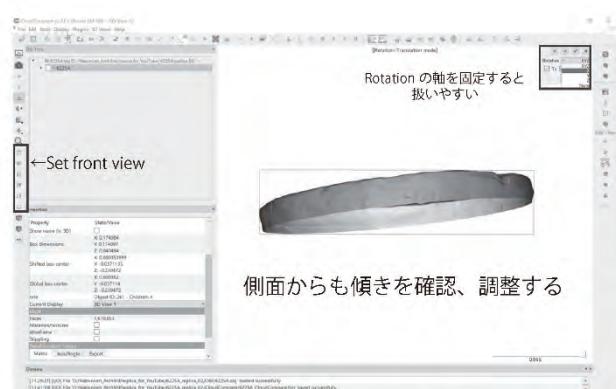
1. CloudCompare の初期設定



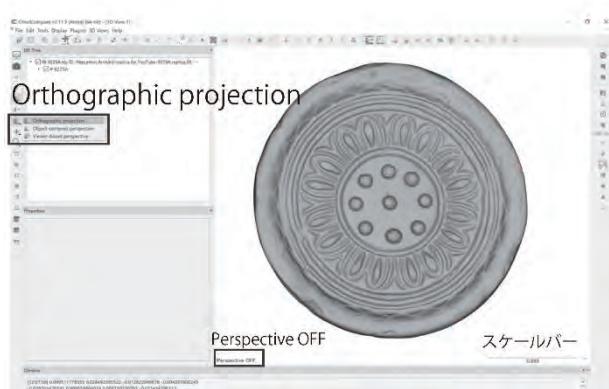
2. 画面の設定



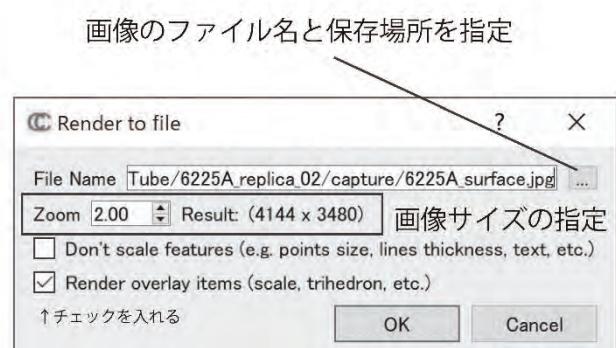
3. 三次元モデルの軸の調整 1



4. 三次元モデルの軸の調整 2



5. 正射投影表示の確認



6. 画像の書き出し

図8 CloudCompare による画像の書き出し



1. テクスチャー画像

2. サーフェス画像

図9 CloudCompareで書き出した画像

は、画面左下に Perspective OFF の文字が表示される（図8-5）。ライティングは、本報告に掲載された図は基本的にサンライトのみを使用した（Display>Lights>Toggle Sun Light）が、範囲等、細かな凹凸をはっきりと表示させたい時には、カスタムライトを使用する。ライトの詳細な設定は、前述した Display>Display settings>Colors and Materials の Light の項目で行うことができる。ここで Ambient や Specular の濃淡を調整する。

ライティングの調節が終わると、いよいよ画像の書き出しである（Display>Render to File）。File Name の項目に書き出す画像の名前を入力し、保存場所を指定する。ディスプレイでの表示以上に拡大して画像を表示したい場合は、Zoom の数値を大きくする。画像サイズは横に示される。スケールも一緒に表示した画像を書き出す場合には、Render overlay items にチェックを入れる（図8-6）。Materials/textures のチェックを切り替えることによって、同じ位置・サイズのサーフェス画像とテクスチャー画像を書き出すと便利である（図9）。

書き出した画像は、Photoshop や Illustrator などのソフトを用いて縮尺を整え使用する。

おわりに

簡単ではあるが、以上が、本科研プロジェクトにおける基本的な瓦当文様の計測および図化の方法である。SfM-MVS による三次元計測は、写真を撮影する機材（カメラ・レンズ）と撮影方法（設定・アングル・枚数等）、解析の設定によって、得られるデータの粗密・質が異なってくる。また、大量の画像を処理するためには、スペックの高いワークステーション等が必要になる。計測の目的や、取得データの利用法を考慮し、それに適した撮影・解析方法を選ぶ必要がある。（中村亜希子）