

國學院大學學術情報リポジトリ

フォトグラメトリによる石造物の資料化と活用

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2025-02-27 キーワード (Ja): フォトグラメトリ, Metashape, CloudCompare, Sketchfab, 公開 キーワード (En): 作成者: 篠田, 浩輔 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.57529/0002001383

【論文】

フォトグラメトリによる石造物の資料化と活用

篠田 浩 輔

1. はじめに
2. 先行研究
3. 手法
 - 3.1. フォトグラメトリとは?
 - 3.2. ワークフロー
 - 3.2.1. 撮影準備
 - 3.2.2. 撮影
 - 3.2.3. 三次元化
4. タフォノミーの問題－三次元化の過程－
 - 4.1. ライトの有無
 - 4.2. Photoshopによる補正
 - 4.3. ライトの有無とPhotoshopによる補正の有無を比較して
 - 4.4. パソコンの性能差
 - 4.5. Metashapeのバージョン差-1.6.4.10928 : 1.6.5.11249-
 - 4.6. キーポイント数とタイポイント数の違い
 - 4.7. アライメント時のマーカー検知の有無
 - 4.8. 三次元化の過程は必ず記録する
5. 活用事例
 - 5.1. CloudCompare
 - 5.2. 公開
6. まとめ－広がる3Dデータ－

要旨

フォトグラメトリとは複数枚の写真から対象物をパソコン上で三次元化する技術である。そのソフトウェアの導入コストが低い上、操作がしやすく、既存のデジタルカメラとパソコンが使える、その技術の専門家でなくとも容易に三次元化ができる。そのため、個人や民間企業、行政、研究機関、大学などに広がっている。本稿は、筆者がその技術で石造物をどのように三次元化し活用しているかについて述べたものである。先行研究では石造物をどのように三次元化し活用している研究について述べた。手法では筆者が石造物を三次元化する際に用いているワークフローについて詳述した。タフォノミーの問題では容易に3Dデータを入手できるようになった反面、フォトグラメトリには危険性もあることについて述べた。最後に、活用事例について具体的な操作方法を含めて述べ、今後の展望を示した。本稿はただ読むだけでは意味をなさない。実際に撮影して3Dデータを作成し、公開しながら読み進めて欲しい。

キーワード……フォトグラメトリ Metashape CloudCompare Sketchfab 公開

1. はじめに

フォトグラメトリとは複数枚の写真から対象物をパソコン上で三次元化する技術である。近年、直観的に操作できるフォトグラメトリソフトウェアが安価になったため、普及している技術でもある。つまり、導入コストが低く、その技術の専門家でない素人でも容易に対象物を三次元化かつ資料化が可能である。

筆者はこの技術を使い、庚申塔・地藏菩薩・道祖神・地神塔などの石造物を三次元化し資料化して、公開している。今回はその手法について述べていく。

2. 先行研究

考古学でもともと対象物を三次元で記録しようとしていた。浜田耕作は1931年に刊行された『考古学関係資料模型図譜』で「千の言葉を列ねた説明も、一枚の写真図書には若かず、百の図書写真も遂に一箇の模型に及ばない。所詮三「ダイメーション」を有する品物は、矢張り三「ダイメーション」のものを以てしなければ、其の真の性質を伝えることは困難である」と述べている。そして、浜田は対象物を模型にし、三次元で記録している。フォトグラメトリは浜田が目指した方向と一致する。ここではフォトグラメトリによる石造物の資料化に関する先行研究を概観していく。

石造物のフォトグラメトリによる資料化は、既に行われている。永見(2015)では肥前狛犬をフォトグラメトリで記録し、5方向から図示し資料を紹介している。永見は「現状では狛犬の実測図フォーマットが存在しないこと、斜め写真だけでは寸法的な検証ができないことの二点から」(76頁)フォトグラメトリを利用したと述べている。石造物の報告書の中には資料の形態が不明瞭な例も多い。確かに言語化された形態が凡例に図で示されていれば理解できる。しかし、凡例に図示されていない形態もあり、そのような場合は分からない。石造物の一部の写真に掲載している例もある。しかし、永見が述べているように、寸法は分からない。当然、写っていない部分も不明なままである。したがって、石造物を三次元化し、5方向から図示した永見(2015)は画期的である。

加えて、永見(2016)ではフォトグラメトリによる石造物の資料化の有効性について述べている。その有効性は7点ある。1点目は「図化能力の程度に依らずに資料情報を提示できる」(19頁)点である。複雑な像容を持つ石造物は手実測が困難である。だが、フォトグラメトリは撮影さえすれば三次元化できる。2点目は時間短縮である。「手測りの実測図の作制は慣れた者でも丸一日かかる作業量である」(20頁)と書かれているように、凹凸が激しい石造物の手実測は時間がかかる。しかし、像容にもよるが、

フォトグラメトリは30分ほどで撮影を終えてしまう時もある。3点目は「均質な資料報告を行うことができ」(20頁)る点である。手実測は1点目で述べたように図化能力に依る。そのため、精度にバラツキがある。フォトグラメトリは一定のルールに従うことで精度を保てる。4点目は法量を測れる点である。フォトグラメトリで得た3Dデータにスケール情報を与えれば、角度や距離、体積を明らかにできる。5点目は撮影困難な部分を資料化できる点である。縦列に並ぶ石造物の側面や壁に沿っている石造物の裏面は撮影困難である。けれども、フォトグラメトリはそうした部分が写っていれば、三次元化でき資料化が可能である。6点目は機動性である。路傍や墓地、神社、寺院、山中など、石造物はあらゆる場所にある。そうした場所に持っていけない、または、持ち運びが困難である機材は使えない。しかし、フォトグラメトリは最低限カメラさえあれば良い。7点目は導入コストが安価な点である。パソコンとデジタルカメラを持っていれば、フォトグラメトリソフトウェアを購入するだけで三次元化による資料化ができる。そのソフトウェアも安価⁽¹⁾になりつつある。

フォトグラメトリの普及啓発も行われている。永見(2017)、及川(2017)では機材名を挙げ、写真付きでフォトグラメトリによって石造物を記録するワークフローについて述べられている。フォトグラメトリを知っても、最初は何を用意し、どのように作業をするかに悩む。しかし、永見(2017)及び及川(2017)を参照すると、そうした疑問を解消できる。石造物のフォトグラメトリの資料化を普及啓発しているのである。また、永見は九州文化財計測支援集団を結成し、フォトグラメトリのワークショップや支援を行っている。加えて、文化財方法論研究会が2010年より開催され、そこでワークショップも開かれている。

そうして得られた3Dデータの活用も進んでいる。その活用の1つが公開である。3Dデータを公開・共有・売買できるプラットフォームであるSketchfab(<https://sketchfab.com>)を使った公開が進みつつある。永見(2017)はアップロード方法について論じ、Sketchfabという公開の一手段の普及啓発を行っている。

さらに、石造物の保護においてもフォトグラメトリによる三次元化は有効である。山口・金田・中村・石松・八尾(2017)や永見(2019)でも指摘しているが、石造物は風化や破損、盗難の危機に瀕している。さらに、石造物は無指定文化財が多い。そのため、保護の手が及んでいないものもある。だが、カメラさえあれば、フォトグラメトリは地域住民でも石造物を三次元で記録できる。「地域住民による文化財記録や保護への積極的な参加に繋げ」(山口他(2017)、308頁)ることができる。

そうして得られた3Dデータのアーカイブ化も進んでいる。谷川・大橋・内山・浦本・山品・鈴木(2018)では地震津波碑をフォトグラメトリで記録し、データベースを構築している。そして、「地震津波碑デジタルアーカイブ」(<http://www.jamstec>

go.jp/res/ress/tanikawa/intro.html)として公開している。また、小池・拙稿(2020)では三次元化した石造物を「石造物3Dアーカイブ」(<https://stonework-3d-archive.github.io/>)で公開している。

このように石造物の三次元化と活用は進みつつある。

3. 手法

それでは、筆者がフォトグラメトリで石造物を如何に記録しているかを詳述する。

3. 1. フォトグラメトリとは?

そもそもフォトグラメトリとはどのような技術であるか。それは「複数枚の画像から対象物の三次元形状をPC上に復元する」(森2019、17頁)技術である。では、どういうワークフローであるか。

3. 2. ワークフロー

ワークフローを理解する一助とするため、作業風景(写真1)をSketchfabにアップロード(<https://skfb.ly/6WKPw>)した。それを参照しつつ、読み進めて欲しい。

3. 2. 1. 撮影準備

撮影準備は4段階である。

1. 参拝
2. 調査票に記入
3. マーカーを設置
4. 鉄製曲尺付き水平器の設置

それぞれの段階を詳しく述べる。

石造物が寺社にある場合、神主の方や住職の方から撮影許諾をもらう「前」に必ず参拝を行う。また、路傍にある場合でも、石造物に対し、必ず拝む。石造物は寺社や地域の人々にとって信仰の対象である。石造物と石造物を見守っている人々への尊敬の念を態度で示さなければならない。さらに、何者であるかを判然と提示するため、名刺は必須である。

次に、石造物の分類・所在地・緯度・経度・主銘文・願文・種字・地名銘・紀年銘・道標銘・願主(施主)銘・石工銘・元号・造立年・主尊像・その他刻像、事前に決めておいた計16項目を調査票に記入する。なぜならば、フォトグラメトリに失敗するケースもあるからである。現地でも最低限の情報を記入しておく方が安全である。

その後、石造物及びその周辺を清掃する。三次元化されるものは石造物だけではない。石造物に付着している汚れやその周辺にある雑草・落ち葉も三次元化される。石造物のみを三次元化するためには清掃が不可欠である。

清掃後、マグネット付き水平器に鉄製曲尺を貼り付けて設置する。水平器は三次元化後、石造物の3Dデータを水平にするために置く。鉄製曲尺は石造物にスケール情報を付与するためのものである。

3. 2. 2. 撮影

撮影は6段階である。

1. 鉄製曲尺付き水平器を撮影
2. 全体撮影
3. 基本撮影
4. 補強撮影
5. 片付け
6. 拝礼

各段階を述べる前にカメラの設定を述べる。ISO感度は100から400が推奨される。ISO感度が高いと、写真がザラザラしてしまい、スケールが付与しにくくなる。また、ノイズが生じやすくなる。F値については8から16が推奨される。なるべく被写体の周辺にもピントが合うようにする。周辺も写っていると、三次元化されやすくなる。その一方、回析現象に注意しなければならない。シャッタースピードは250分の1秒が推奨される。その理由は手振れを防ぐためである。加えて、手振れ補正をOFFにすることが推奨される。ONであっても、石造物を三次元化できる。しかし、手振れ補正はカメラ内部のパラメーターが自動で変更される。したがって、それぞれの写真のパラメーターがバラバラになる。それによって、ノイズが生じやすくなる。そして、RAWデータで撮影することが推奨される。RAWデータであれば、現像時に露出やRGBを調整することによって、明暗のコントラストや逆光を和らげられるからである。

さらに、撮影方法にルールがある。むやみやたらに撮影したとしても三次元化できるが、撮影枚数が増え、処理時間が増える上、ノイズが生じやすくなる。そうしたことを防ぎ、ノイズが少ない3Dデータを生成するため、以下の5つのルールを守る必要がある。

1. 綺麗な写真を撮影
2. オーバーラップ70%以上
3. 遠近撮影+斜め撮影
4. カメラを動かす

5. 焦点距離を変えない

綺麗な写真で三次元化すれば、ノイズが少ない3Dデータを手に入れられる。綺麗な写真とは手振れ補正がOFFで、ISO感度が低く、ピントが合っており、ブレがない写真である。

しかし、綺麗な写真であっても、オーバーラップが低いと三次元化されない。オーバーラップとは写真の重なる割合である。図2の吹き出しの部分である。では、どうすれば、オーバーラップを70%以上に保てるか。石造物とカメラとの距離が1mあるとする。この場合、0.3mずつずらしながら撮影すると、オーバーラップを70%以上に保てる。したがって、石造物とカメラとの距離が0.5mであれば、0.15mずつずらせば良い。つまり、1m:0.3mの比率を守って撮影すると良い。

さらに、オーバーラップを保ちつつ遠近撮影と斜め撮影を行うと、三次元化に成功しやすい。遠近撮影とは図3のような撮影方法である。近くから撮影した写真と遠くから撮影した写真が両方あると、三次元化されやすい。さらに、斜め撮影も行うと良い。斜め撮影とは図4のような撮影方法である。カメラを石造物に平行させて撮影するのではなく、斜めから撮影するとより三次元化されやすい。

そうした撮影方法を取りつつ、カメラを動かさなければならない。図5のように、カメラを固定させたまま撮影してしまうと、石造物は三次元化されない。必ずカメラを図6のように動かさなければならない。

最後に、焦点距離を絶対に変えてはならない。同じ石造物を撮影したとしても、焦点距離を変えると、フォトグラメトリソフトウェアは異なる石造物の写真と判断してしまう。ゆえに、ズームレンズの場合、図7のようにガムテープでズームリングを固定させてしまうことをお勧めする。また、石造物にズームした写真が欲しいのであれば、カメラ自体を近づけなければならない。

そうしたカメラの設定と撮影の5つのルールを念頭に置きつつ、まず曲尺付き水平器を撮影する。水平器が動いてしまうと、撮影をやり直さなければならない。したがって、水平器を設置し終えたら、すぐに水平器を撮る。加えて、スケール情報を付与する時に使う曲尺も念入りに撮らなければならない。というのも、曲尺が入った写真がなければ、3Dデータにスケールを与えられないからである。

曲尺付き水平器を撮影した後、全体撮影をする。石造物の全体が写る距離から石造物を中心に1周撮影する。終了後、もう少し近い距離からもう1周撮影する。

次に、基本撮影を行う。基本撮影とは石造物の各部分を撮影していく行為である。ラング社が「考古学のためのSfM土器撮影システムティックマニュアル」(<http://www.lang-co.jp/corner20/pg63.html>)で公開している「委託リスト」(www.lang-co.jp/_src/32735763/土器委託リスト%28ウイルスチェック済%29。

xlsx?v=1558681391264)を用いて撮影段数を計算し撮影すると良い。

最後に、補強撮影を行う。三次元化した際に抜けそうな部分を念入りに撮る。例えば、青面金剛像の持物や顔の側面といった入り組んだ部分、屋根の裏や三猿の尻、像容の顎の下の部分といった写真が撮りにくい部分である。換言すれば、写真を撮り忘れていた部分である。フォトグラメトリは写真から三次元化する。したがって、写ってなければ、当然三次元化されない。

撮影を終えたら、片付けをする。そして、再度、石造物や寺社に対して拝礼を行う。

3. 2. 3. 三次元化

三次元化の詳細に入る前に、使用したソフトウェアとパソコンスペックを記す。

フォトグラメトリソフトウェア: Metashape Professional版

CPU: Intel(R) Core(TM) i9-9920X CPU @ 3.50GHz 3.50GHz

メモリ: Crucial DDR4 PC4-21300 CL19 16GB×4(GB)

GPU: Geforce RTX2070 SUPER 8GB

Metashapeでの処理についてはMetashapeをダウンロード⁽²⁾(<https://oakcorp.net/agisoft/professional/>)して執筆者のGitHubから写真をダウンロード(<https://github.com/ShinodaKosuke/pictures-photogrammetry-for-Kokugakuin>)する。そして、パソコンを操作しながら読み進めて欲しい。

三次元化は2段階である。

1. RAWデータをTIFF形式で現像
2. Metashapeで三次元化

まずRAWデータをPhotoshopを使ってTIFF現像する。その際、カラーチャートを写し込んでいれば、色合わせする。色合わせ後、自動補正を行う。補正後、シャドウ及びハイライトを調整し、白飛びしている部分や暗くなりすぎている部分を修正する。それを終えたら、TIFF形式で現像する。JPEG形式でも三次元化される上、三次元化の処理時間が短く、データ量を軽くできる。だが、JPEG形式は「巧妙に可視範囲外の色データを均し…暗い部分の微細な色合いなどが失われて」(森2019, 14頁)しまっている。したがって、TIFF形式が望ましい。いわば、自らがどのような3Dデータを利用したいかによって判断する必要があると言えよう。

現像を終えたら、Metashapeに「ワークフロー>写真の追加」で写真を読み込ませる。

読み込ませ終了後、「ワークフロー>写真のアライメント」で「写真のアライメント」を行う。アライメント時、「精度」「汎用事前選択」「キーポイント制限」「タイポイント制限」「現在のアライメントをリセット」を選択できる。「精度」は「最高・高・中・

低・最低」から選べる。ノイズの発生を防ぐため、「高」が好ましい。しかし、アライメントがうまくいかを試したいだけであれば、「高」でなくても良い。「汎用事前選択」とは写真がアライメントできるか否かを予め判断してくれる設定である。大量の写真処理の際、処理時間を短縮できる。「キーポイント制限」と「タイポイント制限」はデフォルトのままが良い。だが、アライメントに失敗する写真が多くでてしまった時、これらの制限の値を上げると失敗する写真を減らせる。ただし、ノイズが増える。「現在のアライメントをリセット」はアライメント後、写真を追加し処理の際、リセットせず、追加した写真をアライメントできる設定である。処理時間の短縮が可能である。

アライメント後、「ワークフロー>高密度クラウド構築」で高密度クラウドを構築する。高密度クラウド構築時、「品質」「深度フィルタ」「頂点カラーを計算」「ポイントの信頼性を計算」を選択できる。「品質」は「最高・高・中・低・最低」から選択できる。「深度フィルタ」は「無効・強・中・弱」から選択できる。強になるほど、ノイズが少なくなる。「頂点カラーを計算」は色付きの点群にしたい場合、チェックを入れる。「ポイントの信頼性を計算」は高密度クラウドからメッシュを構築したい時、チェックを入れる。高密度クラウド構築後にメッシュ構築を行う際、高密度クラウドを用いることができる。その際、信頼性が低い点群を消去してメッシュを構築すると、綺麗な3Dデータになる。

次に、「ワークフロー>メッシュ構築」でメッシュを構築する。メッシュ構築時、「ソースデータ」「品質」「ポリゴン数」を選択できる。「ソースデータ」は深度マップ、ないし、高密度クラウドから選べる。石造物だけをメッシュ化するならば、深度マップからメッシュ化する方法を推奨する。しかし、凹凸が明瞭なメッシュが欲しいのであれば、高密度クラウドからメッシュ化する方法を推奨する。「品質」は高密度クラウドと同様である。「ポリゴン数」は「高・中・低・カスタム」から選べる。メッシュ数が多ければ多いほど、高精細な3Dデータを手に入れられる。しかし、処理時間及びデータ量は増えていく。3Dデータを使って何をしたいかによって、メッシュ数を判断する必要がある。

メッシュ構築後、「ワークフロー>テクスチャー構築」でテクスチャーを構築する。メッシュに色が付いているので、テクスチャーがなくても良い。だが、テクスチャーがあると、リアルに見える。

テクスチャー構築後、「ビュー>座標データ」からスケール情報を付与する。マウスを右クリックし、「マーカーを追加」を選択する。選択後、三次元化された曲尺にマーカーを追加する。それにより、「座標データ」にポイントが追加される。追加されたポイントを2つ選択して右クリックし、「スケールバーを選択」をクリックする。そ

して、ポイント間の距離を入力すると、スケール情報を付与できる。

以上が三次元化のワークフローである。他にも様々な設定がある。しかし、まずは三次元化をやってみて欲しい。スマートフォンで撮影した写真からも三次元化は可能である。

4. タフォノミーの問題—三次元化の過程—

以上がフォトグラメトリによる三次元化の方法である。ここからはその注意点について説明する。その注意点とは三次元化の過程による処理結果の違いである。

例えば、同じ対象物にライトを当てたか否か以外、すべて同じ条件で撮影して同じ条件で三次元化したとする。同じ対象物を三次元化しているのであるから、まったく同一の3Dデータが生成されるだろうと想像される。だが、処理結果を比較すると、ライトを当てたか否かでタイポイント数や高密度点群数、メッシュ数、処理時間に差が生じる。また、同じRAWデータからTIFF形式とJPEG形式で現像し、Metashapeを使って同じ条件で三次元化したケースもタイポイント数や高密度点群数、メッシュ数、処理時間に差が生じている(中村(2020))。

このように同じ対象物であるといっても、三次元化する際に異なる処理過程を経ると、異なる3Dデータが生成される点に注意しなければならない。つまり、三次元化の処理過程を必ず記録し、歴史資料の復元をする際に確認しなければならないのである。異なる土台にある3Dデータを使って歴史資料の復元をすることは誤った結論を導く。地域差・時代差とした結論は実際には三次元化の処理過程の違いによるものになりかねない。以下は処理過程による差異を実験したものである。

4. 1. ライトの有無

同じ対象物にライトを当てたか否か以外、同じ条件で撮影し三次元化した。ライトの有無が三次元化にどのような影響を与えるかを見ていく。

まず撮影条件について述べる。使用したカメラ及びレンズは富士フィルム社のミラーレス一眼レフカメラX-T100と富士フィルム社のズームレンズXC15-45mm F3.5-5.6 OIS PZである。カメラの設定は焦点距離(35mm換算)を23mmに、ISO感度を1000に、絞りを4.5に固定した。使ったライトはNeewer社のLED216球 CN-216 ビデオライトである。このライトを装着したカメラを三脚で固定した。固定後、ライトのON/OFFを切り替え、RAWデータで撮影した。図8が作業風景である。画素数は6000ピクセル×4000ピクセルである。ライト有りは257枚、ライト無しは254枚撮影した。RAWデータはAdobe社のPhotoshopを用いてTIFF形式で出力した。

次に三次元化の処理過程について述べる。利用したソフトはAgisoft社のMetashape Professional(64bit)、バージョンは1.6.2.10247である。使用したパソコンはOSがWindows 10 Pro 64bit、RAMがCrucial DDR4 PC4-21300 CL19 16GB×4(64GB)、CPUがIntel(R) Core(TM) i9-9920X CPU @ 3.50GHz 3.50GHz、GPUはNVIDIA Geforce RTX2070 SUPERを搭載する。Metashapeの設定について段階ごとに記す。写真のアライメントは精度を「高」、汎用事前選択を「有効」、座標事前選択を「無効」とし、キーポイント制限とタイポイント制限がそれぞれ「40,000と4,000」と設定した。アライメントの最適化はパラメーターを「f, cx, cy, k1-k3, p1, p2」とし、カメラモデルのパラメーターを可変させる、を「無効」とした。深度マップ生成は品質を「中」、フィルターモードを「中」とした。高密度クラウド構築は品質を「中」とした。メッシュ構築はソースデータを「深度マップ」、サーフェイタイプを「自由形状」、ポリゴン数を「中」、内挿補間を「有効」とした。テクスチャー構築はマッピングモードを「汎用」、ブレンドモードを「モザイク」、テクスチャーサイズを「10,000」、テクスチャー数を「1」と設定した。このような条件のもとで三次元化を行った。

その処理結果が表1の「a.ライト有り」と「c.ライト無し」に該当する。表2は処理結果の違いの比を計算したものである。表1のタイポイント数・高密度点群数・メッシュ数、いずれもあまり差異が認められない。また、表2の「c/a」と「a/c」を確認しても同様である。加えて、Sketchfabにアップロードした3Dデータを見ても違いは見受けられない。けれども、まったく同じ3Dデータにはならないと分かる。処理結果の数値が少しずつ異なる。

また、処理時間をまとめたものが表3である。表4は処理時間の違いの比を計算したものである。処理をしている際、他のアプリケーションを開いていたため、目安程度に見ていただきたい。処理結果と同様に処理時間もあまり差異は認められない。しかし、テクスチャー構築のUVマッピングはライト無しの方がライト有りと比べて5割ほど短い処理時間である。

このように処理結果にも、処理時間にもあまり差異は見受けられない。その一方、同じ対象物であるといえども、同じ処理結果ないし処理時間にはならない。

4. 2. Photoshopによる補正

次に「4. 1. ライトの有無」で使用したRAW画像をPhotoshopで補正してMetashapeで処理した。Photoshopによる補正が三次元化にどのような影響を与えるかを見ていく。

Photoshopを使い、対象物と一緒に写し込んだカラーチャートで色合わせし、自動補正を行った。それ以外は「4. 1. ライトの有無」と同条件である。

その処理結果が表1の「b.ライト有り+Photoshop」と「d.ライト無し+Photoshop」である。表2は処理結果の違いの比を計算したものである。表1のタイポイント数・高密度点群数・メッシュ数、いずれもあまり差異が認められない。また、表2の「d/b」と「b/d」を確認しても同様である。加えて、Sketchfabにアップロードした3Dデータを見ても違いは見受けられない。けれども、まったく同じ3Dデータにはならない。

また、処理時間をまとめたものが表3である。表4は処理時間の違いの比を計算したものである。写真のアライメントの時間は「ライト有り+Photoshop」の方が「ライト無し+Photoshop」よりも短い。その一方、最適化時間は「ライト有り+Photoshop」の方が3.7倍長い。加えて、UVマッピング時間は「ライト有り+Photoshop」の方が短い。このように処理時間に差異が見受けられる。

つまり、処理結果にはあまり差異が見受けられない。その一方、同じ対象物であるといえども、同じ処理結果ないし処理時間とはならない。

4. 3. ライトの有無とPhotoshopによる補正の有無を比較して

同じ対象物にライトを当てるか否か、RAW現像時にPhotoshopによる補正をするか否かで三次元化の処理結果ないし処理時間にどのような影響が出るかを見てきた。その結果、判明したことは2点である。1点は差異がほとんどないことである。もう1点はまったく同じ3Dデータが生成されるわけではないことである。

では、ライトの有無とPhotoshopによる補正の有無とを比較するとどうであろうか。まず、Sketchfabにアップロードした3Dデータを見てみる。形態には違いが認められない。だが、色が違う。これはライトを当てた、またはPhotoshopで補正した写真から3Dデータを生成したか否かの違いである。次に処理結果を見てみる。あまり違いは認められない。最後に、処理時間を見てみる。Photoshopで補正した写真から生成した3Dデータの方の処理時間が補正しなかった写真から生成した3Dデータの処理時間よりも2倍ほど長くなっている。このように、タイポイント数・高密度点群数・メッシュ数が2倍・3倍増えたり、2分の1・3分の1と減じたりすることはなかった。だが、まったく同じ3Dデータが得られるということではない。その一方、処理時間はPhotoshopで補正を行った写真を用いると長くなる傾向がある。

つまり、同じ対象物を三次元化したからといって、同じ3Dデータを得られるということではないのである。

4. 4. パソコンの性能差

次に、同じ写真セットを性能差があるパソコンで処理した事例を詳述する。

まず撮影条件について述べる。使用したカメラ及びレンズはSamsung A30 ACV43

である。カメラの設定は焦点距離(35mm換算)を27mmに、ISO感度を200または40に、絞りを3.6に設定した。JPEG形式で216枚撮影した。

さらに、三次元化の処理過程について述べる。利用したソフトはAgisoft社のMetashape Professional(64bit)、バージョンは1.6.5.11249である。使用したパソコンは2種類である。1つは高性能パソコンとしてデスクトップパソコン、もう1つは低性能パソコンとしてノートパソコンを用いた。前者はOSがWindows 10 Pro 64bit、RAMがCrucial DDR4 PC4-21300 CL19 16GB×4(64GB)、CPUがIntel(R) Core(TM) i9-9920X CPU @ 3.50GHz 3.50GHz、GPUはNVIDIA Geforce RTX 2070 SUPERを搭載する。後者はOSがWindows 10 64bit、RAMが16GB、CPUがIntel(R) Core(TM) i7-4700MQ CPU @ 2.40GHzを搭載する。Metashapeの設定について段階ごとに記す。写真のアライメントは精度を「高」、汎用事前選択を「はい」、座標事前選択を「ソース」とし、キーポイント制限とタイポイント制限をそれぞれ「40,000と4,000」と設定した。アライメントの最適化はパラメーターを「f、cx、cy、k1-k3、p1、p2」、カメラモデルのパラメーターを可変させる、を「無効」とした。深度マップ生成は品質を「高」、フィルターモードを「強」とした。高密度クラウド構築は品質を「高」とした。メッシュ構築はソースデータを「深度マップ」、サーフェスタ입を「自由形状」、ポリゴン数を「3,000,000」、内挿補間を「有効」とした。こうした条件のもとで三次元化を行った。

処理結果とその比が表5である。Sketchfabにアップロードした3Dデータを見ても違いは見受けられない。けれども、タイポイント数はノートパソコンの方が20%ほど多い。高密度点群数はデスクトップパソコンの方が15%ほど多い。だが、メッシュ数はノートパソコンもデスクトップパソコンもほとんど変わらない。

また、処理時間とその比が表6である。処理時間はデスクトップパソコンの方がノートパソコンと比べて3分の1である。高性能を有するパソコンの方が処理時間は短いのである。メッシュ構築・高密度クラウド生成・深度マップ生成の順にノートパソコンの方の処理時間が長くなっている。

このように見た目の差異はあまり見受けられない。だが、タイポイント数と高密度点群数に差異が認められる。また、処理時間数も違いが認められる。

つまり、ライトの有無とPhotoshopによる補正の有無と同様に、同じ対象物を三次元化したからといって、同じ3Dデータが得られるということではないのである。

4. 5. Metashapeのバージョン差—1.6.4.10928 : 1.6.5.11249—

次に、同じ写真セットを異なるMetashapeのバージョンで処理した事例を詳述する。

まず撮影条件について述べる。使用したカメラ及びレンズはSamsung A30 ACV43

である。カメラの設定は焦点距離(35mm換算)を27mmに、ISO感度を200または40に、絞りを3.6に固定した。JPEG形式で216枚撮影した。

次いで三次元化の処理過程について述べる。利用したソフトはAgisoft社のMetashape Professional(64bit)、バージョンは1.6.4.10928と1.6.5.11249である。使用したパソコンはOSがWindows 10 64bit、RAMが16GB、CPUがIntel(R) Core(TM) i7-4700MQ CPU @ 2.40GHzを搭載する。Metashapeの設定について段階ごとに記す。写真のアライメントは精度を「高」、汎用事前選択を「はい」、座標事前選択を「ソース」、キーポイント制限とタイポイント制限がそれぞれ「40,000と4,000」とした。アライメントの最適化はパラメーターを「f、cx、cy、k1-k3、p1、p2」、カメラモデルのパラメーターを可変させる、を「無効」とした。深度マップ生成は品質を「高」、フィルターモードを「強」とした。高密度クラウド構築は品質を「高」とした。メッシュ構築はソースデータを「深度マップ」、サーフェスタイプを「自由形状」、ポリゴン数を「3,000,000」、内挿補間を「有効」とした。こうした条件のもとで三次元化を行った。

処理結果とその比が表7である。あまり差異は見受けられない。加えて、見た目もあまり変わらない。その一方で、まったく同じ3Dデータが生成されるというわけではないことが分かる。

また、処理時間とその比が表8である。処理時間はバージョン1.6.5.11249の方が15%ほど短い。特に写真のアライメントのマッチングに関しては、バージョン1.6.5.11249の処理時間はバージョン1.6.4.10928のおおよそ4分の1である。バージョンが高いと、処理時間は短くなっている。

このように見た目や処理結果に差異は認められないが、まったく同じ3Dデータが得られるということではない。その一方、処理時間に関しては差異が見受けられる。

つまり、上記3つの事例と同様に、同じ対象物を三次元化したからといって、同じ3Dデータを得られるということではないのである。

4. 6. キーポイント数とタイポイント数の違い

次に、同じ写真セットをMetashapeで処理する際、写真のアライメントのキーポイント数とタイポイント数を変更し比較した事例を詳述する。

まず撮影条件について述べる。使用したカメラ及びレンズは富士フィルム社のミラーレス一眼レフカメラX-T100と富士フィルム社のズームレンズXC15-45mm F3.5-5.6 OIS PZである。カメラの設定は焦点距離(35mm換算)を23mmに、ISO感度を200から400に、絞りを8に設定した。画素数は6000ピクセル×4000ピクセルである。RAWデータで373枚撮影した。

次にRAW現像について述べる。RAW現像はAdobe社のPhotoshopを用いた。カラーチャートで色合わせをした後、自動補正してTIFF形式で出力した。

次に三次元化の処理過程について述べる。利用したソフトはAgisoft社のMetashape Professional(64bit)、バージョンは1.6.5.11249である。使用したパソコンはOSがWindows 10 Pro 64bit、RAMがCrucial DDR4 PC4-21300 CL19 16GB×4(64GB)、CPUがIntel(R) Core(TM) i9-9920X CPU @ 3.50GHz 3.50GHz、GPUはNVIDIA Geforce RTX 2070 SUPERを搭載する。Metashapeの設定について段階ごとに記す。写真のアライメントは精度を「高」、汎用事前選択を「無効」、座標事前選択を「無効」とした。キーポイント制限とタイポイント制限はそれぞれ「40,000と4,000」としたものとそれぞれ「80,000と8,000」としたものを処理した。アライメントの最適化はパラメーターを「f, cx, cy, k1-k3, p1, p2」、カメラモデルのパラメーターを可変させる、を「無効」とした。深度マップ生成は品質を「高」、フィルターモードを「強」とした。高密度クラウド構築は品質を「高」とした。メッシュ構築はソースデータを「深度マップ」、サーフェスタ입を「自由形状」、ポリゴン数を「3,000,000」、内挿補間を「有効」とした。テクスチャー構築はマッピングモードを「汎用」、ブレンドモードを「モザイク」、テクスチャーサイズを「10,000」、テクスチャー数を「1」と設定した。こうした条件のもとで三次元化を行った。

処理結果とその比は表9である。タイポイント数は当然ながら、タイポイント数を8,000とした方が多い。その一方、高密度点群数はキーポイント数を40,000とした方が80,000としたものよりも30%ほど多くなっている。けれども、Sketchfabにアップロードした3Dデータを見ても違いは確認できない。加えて、アライメントされた写真の枚数がキーポイント数ないしタイポイント数で異なる。キーポイント数80,000は373枚全てアライメントされた。他方、キーポイント数40,000は373枚中366枚に留まった。キーポイント数ないしタイポイント数によってアライメントされない写真がある。

また、処理時間とその比は表10である。キーポイント数を40,000とした方の処理時間が80,000としたものよりも半分ほどになっている。加えて、キーポイント数を40,000とした方は最適化に時間がかかっている。

このように3Dデータの見た目には違いが見受けられない。だが、タイポイント数と高密度点群数に差異が認められる。加えて、アライメントされる写真の枚数も異なる。また、処理時間に関しても差異が認められる。

つまり、上記4つの事例と同様に、同じ対象物を三次元化したからといって、同じ3Dデータが得られるということではないのである。

4. 7. アライメント時のマーカー検知の有無

次に、同じ写真セットをMetashapeで処理する際、マーカーを検知してから写真のアライメントした事例と検知せずに写真のアライメントをした事例を比較してみた。

まず撮影条件について述べる。使用したカメラ及びレンズは富士フィルム社のミラーレス一眼レフカメラX-T100と富士フィルム社のズームレンズXC15-45mm F3.5-5.6 OIS PZである。カメラの設定は焦点距離(35mm換算)を23mmに、ISO感度を200から400に、絞りを8に設定した。画素数は6000ピクセル×4000ピクセルである。RAWデータで366枚撮影した。

次にRAW現像について述べる。RAW現像はAdobe社のPhotoshopを用いた。カラーチャートで色合わせをした後、自動補正してTIFF形式で出力した。

次に三次元化の処理過程について述べる。利用したソフトはAgisoft社のMetashape Professional(64bit)である。バージョンは1.6.5.11249である。使用したパソコンはOSがWindows 10 Pro 64bit、RAMがCrucial DDR4 PC4-21300 CL19 16GB×4(64GB)、CPUがIntel(R) Core(TM) i9-9920X CPU @ 3.50GHz 3.50GHz、GPUはNVIDIA Geforce RTX 2070 SUPERを搭載する。Metashapeの設定について段階ごとに記す。マーカーを検知して以下の処理をしたものとマーカーを検知せずに以下の処理を行ったもの、2種類を処理した。写真のアライメントは精度を「高」、汎用事前選択を「無効」、座標事前選択を「無効」、キーポイント制限とタイポイント制限はそれぞれ「80,000と8,000」とした。アライメントの最適化はパラメーターを「f、cx、cy、k1-k3、p1、p2」、カメラモデルのパラメーターを可変させる、を「無効」とした。深度マップ生成は品質を「高」、フィルターモードを「強」と設定した。高密度クラウド構築は品質を「高」とした。メッシュ構築はソースデータを「深度マップ」、サーフェスタイプを「自由形状」、ポリゴン数を「3,000,000」、内挿補間を「有効」とした。テクスチャー構築はマッピングモードを「汎用」、ブレンドモードを「モザイク」、テクスチャーサイズを「10,000」、テクスチャー数を「1」と設定した。こうした条件のもとで三次元化を行った。

処理結果とその比は表11である。タイポイント数及びメッシュ数はさほど変わらない。しかし、高密度点群数はマーカーを検知して写真のアライメントを処理した方がそうでないものよりも13%ほど少ない。

また、処理時間とその比は表12である。合計の処理時間はどちらも変わらない。しかし、写真のアライメントとアライメントの最適化はマーカーの検知をせずに写真のアライメントをした方が短くなる。

このようにSketchfabにアップロードした3Dデータの見たい目では違いが確かめられないが、高密度点群数に差異が認められる。また、処理時間に関しても同様である。

つまり、上記5つの事例と同様に、同じ対象物を三次元化したからといって、同じ

3Dデータを得られるということではないのである。

4. 8. 三次元化の過程は必ず記録する

ここまで様々な三次元化の過程に関する事例を見てきた。何度も繰り返すが、ここから分かることは、三次元化の過程が違えば、同じ対象物であっても異なる3Dデータが生成されることであるということである。3Dデータを用いて歴史資料の復元をする際、復元した歴史資料が実際の所、三次元化の処理過程による違いであったということ避けなければならない。そのためには必ず処理過程を記録し、後から検討ができるようにしておく必要があるだろう。

5. 活用事例

3Dデータはただ回すだけでない。様々な活用方法があり、それらを紹介する。

5. 1. CloudCompare

CloudCompareとは3Dデータを編集できるフリーソフトウェアである。実際にCloudCompareをダウンロード(<https://www.danielgm.net/cc/>)し、石造物3Dアーカイブ(<https://stonework-3d-archive.github.io/>)から3Dデータをダウンロード⁽³⁾し、パソコンを操作しながら読み進めてもらいたい。

まずダウンロードした3Dデータを「ファイル>開く」で読み込ませる。読み込ませ完了後、「編集>法線>演算>Per-vertex」で法線を計算する。その際、必ず処理するファイルをクリックしなければならない(図9)。クリックすると、図9のように、クリックしたファイルが青く選択される。選択しない限り、処理されない。CloudCompareでの処理の際はこの点に注意しなければならない。計算終了後、3Dデータに陰影が付く。

CloudCompareを使えば、石造物の色を変えられる。「編集>色>固有値にセット>色を選択」で好きな色を選択できる。石造物は風化や苔、汚れによって見えづらくなっている。したがって、色を落とし、観察しやすい色にすると、銘文や像容が見えやすくなる。

また、断面線も作成できる。まず、「Vertices」(図9)にチェックを入れる。チェック後、「ツール>分割>直交断面作成」を選択する。そうすると、図10のように表示される。「ボックス厚さ」(図10の①)を指定し、「複数スライスをエクスポート」(図10の②)をクリックする。クリック後、図11が表示される。断面線を作成する軸方向(図11の①)を設定する。今回はX軸方向とした。設定後、「等高線作成」(図11の②)、「マ

ルチパ)(図11の③)、「長い縁で等高線分割」(図11の④)にチェックを入れる。最後に、何cm間隔で断面線を作成するかを「他のオプション」の「差」(図11の⑤)で決定する。今回は0.5mとした。その結果が図12である。0.5m間隔で断面線が生成される。加えて、「他のオプション」の「差」(図11の⑤)を0mとすれば、最大輪郭線(図13)が生成される。

他にも、「ツール>ポイント選択」で長さや角度を測れたり、「ツール>水平」を選択し、3点を指定すれば、3Dモデルに水平を設定できたりする。3Dデータを使えば、様々な分析ができるのである。

5. 2. 公開

3Dデータの公開も進んでいる。例えば、Sketchfab(<https://sketchfab.com>)を使った公開が広まりつつある。Sketchfabはアカウントを登録すれば、最大50MBある3Dデータをアップロードできる。また、Sketchfabをスマートフォンにダウンロードすれば、ARやVRの機能を利用できる。図14は実際に3DデータをARで表示させたものである。

また、路傍や寺社にある庚申塔や道祖神などの石造物をフォトグラメトリで3Dモデル化し、オープンデータとしてアーカイブする「石造物3Dアーカイブ」(<https://stonework-3d-archive.github.io/>)という取り組みもある。このアーカイブはWikimedia Commonsに3Dデータをアップロードしてメタ情報を付与し、Web地図上で確認できるようにしている。石造物3Dアーカイブではコントリビュータも募集している。

このように、3Dデータの作成に留まらず、公開の動きも加速している。

6. まとめ—広がる3Dデータ—

三次元化し活用する動きは石造物に留まらない。VRで日本百名城の1つである津和野城や熊野古道、大山古墳、長岡宮などを体感したり、ARゴーグルを掛け、文化財や博物館の展示にCG映像や3Dデータを重ねて表示させたり、3Dプリンタで出力したレプリカが制作されたりしている(文化庁地域文化創生本部2020)。今後、3Dデータの活用は進んでいくだろう。今回、石造物の三次元化のワークフローを含め詳細に記述してきた。現在、フォトグラメトリを使った三次元化は安価で、手軽にできるようになっている。三次元化は決して遠いものではない。三次元化はやろうと思えば、誰でもできるようになりつつある。本論文を参照しつつ、実際に三次元化し公開に取り組むことを望む。

謝辞

石造物の三次元化に協力していただいた地域住民の方々や神社・寺院の方々、三次元化の手法についてご教示していただいた方々に末尾ながら、深くお礼を申し上げる。さらに、この度の論文を書くにあたり、國學院大學教授・青木敬先生、國學院大學兼任講師・村松理恵先生、國學院大學大学院生・木村俊哉氏、慶應義塾大学大学院生・井畝良太氏にご指導いただきましたこと、ここにひとこと、深く感謝申し上げます。

註

- (1) 筆者はフォトグラメトリソフトウェアの1つであるMetashapeのアカデミック版を購入した。Standard版は10,800円(2019年5月17日現在)で、Professional版は90,000円(2019年11月18日現在)で購入できた。アカデミック版でないものでも、OakCorp社によるオンラインショップ(<https://oakcorp.net/shop/item/11344/>)を確認すると、Standard版は25,000円(2020年11月28日現在)ほどで購入できる。
- (2) Metashapeは日本語翻訳されている。「Tools>Preferences>Language>Japanese」を選択し、「OK」をクリックすると日本語化される。
- (3) CloudCompareは日本語翻訳されている。「Display>Language Translation>日本語」を選択すると、日本語化される。

引用・参考文献

1. 植田真2018「遺跡調査における計測技術の変遷」『国史学』第226号「計測技術の進展と考古学」国史学会、33-76頁
2. 内山庄一郎・早川裕弐2019「SfM多視点ステレオ写真測量による地形モデリングの基礎」(https://github.com/hdtopography/learning/blob/master/book/SfM-MVS/GIS_uchiyama/1.summary/1.summary.md#写真測量の特徴レーザー測量との対比) (閲覧日2020年11月28日)
3. 及川謙作2017「SfMによる計測のための写真撮影方法と機材：陸奥国分寺中世五輪塔の事例」『文化財の壺』5号「研究するモノに三次元を：2：SfM/MVSを用いた考古資料計測」文化財方法論研究会、24-25頁
4. 金田明大2018「ハンズオン：No.1：文化財の三次元計測(初級編)」文化財方法論研究会：第3回
5. 篠田浩輔・小池隆2020「石造物3Dアーカイブプロジェクト：その手法と可能性」『研究報告人文科学とコンピュータ(CH)』第2020-CH-122巻7号、1-3頁

6. 谷川亘・大橋育順・内山庄一郎・浦本豪一郎・山品匡史・鈴木比奈子2018「歴史地震記録と教訓を後世へ伝えるための徳島県の地震津波碑の3次元デジタル化の取り組み」『日本地球惑星科学連合大会予稿集(Web)』日本地球惑星科学連合、G03-P01 (<https://confit.atlas.jp/guide/event-img/jpgu2018/G03-P01/public/pdf?type=in&lang=ja>) (閲覧日2020年6月9日)
7. 永見秀徳2015「筑後市内の肥前狛犬」『筑後郷土史研究会会誌』第54号、筑後郷土史研究会、63-76頁
8. 永見秀徳2016「石造文化財へのSfMの活用と可能性：三次元計測と写真」『文化財写真研究』7号「写真を活用した新しい技術」文化財方法論研究会、18-21頁 (https://academia.edu/35526934/Utilization_of_SfM_for_Stone_Cultural_Aseets_and_thats_possibility_石造文化財へのSfMの活用と可能性_pdf) (閲覧日2021年1月8日)
9. 永見秀徳2017「石造文化財の三次元計測における作業フロー」『文化財の壺』5号「研究するモノに三次元を：2：SfM/MVSを用いた考古資料計測」文化財方法論研究会、20-23頁
10. 永見秀徳2018「三次元計測の効能：デジカメを使った簡便な計測」九州文化財計測支援集団 (https://www.academia.edu/36007279/Efficacy_of_3D_measurement_Simple_3D_Measurment_by_Digital_Camera_三次元計測の効能_テ_シ_カメを使った簡便な計測_pdf) (閲覧日2020年11月28日)
11. 永見秀徳2019「石造文化財の考古学的研究における三次元計測の効能」狭川真一さん還暦記念会編『論集葬送・墓・石塔：狭川真一さん還暦記念論文集』狭川真一さん還暦記念会、623-632頁
12. 中村亜希子2020「フォトグラメトリーによる三次元計測データの比較」(https://researchmap.jp/nakamura_akiko_2018/presentations/30135679) (閲覧日2020年11月7日)
13. 野口淳2020「CloudCompareによる遺物展開図等の作成」ver.1.1.0、考古学のための3D写真計測ワークショップ：#05
14. 浜田耕作1931「序」『考古学関係資料模型図譜』岡書院、2頁
15. 文化庁地域文化創生本部2020『IT活用：新しい文化体験で地域活性：先端技術による文化財活用ハンドブック』(https://www.bunka.go.jp/tokei_hakusho-shuppan/shuppanbutsu/sentan_handbook/index.html) (閲覧日2020年11月18日)
16. 三井猛2019「ハンズオン：No.5：SfMのための写真撮影」文化財方法論研究会：第4回
17. 森健人2019「フォトグラメトリー(SfM/MVS)による哺乳類標本の3Dモデル化

と3Dプリントによる活用」『考古学・文化財のためのデータサイエンス・サロン予稿集』4「3D×博物館展示×活用」考古形態測定学研究会、12-17頁

18. 山口欧志・金田明大・中村亜希子・石松智子・八尾純子2017「石造物のデジタルドキュメンテーションと活用」『日本文化財科学会第34回大会研究発表要旨集』日本文化財科学会、308-309頁
19. 山口欧志2019「ハンズオンNo.2 : 文化財の三次元計測(中級編)」文化財方法論研究会: 第4回
20. ラング2017「考古学のためのSfM土器撮影システムティックマニュアル」(<http://www.lang-co.jp/corner20/pg68.html>) (閲覧日2020年11月29日)

表1 撮影過程の違いによる処理結果の違い

	a.ライト有り	b.ライト有り+Photoshop	c.ライト無し	d.ライト無し+Photoshop
タイポイント(点)	221,065	218,499	227,887	226,869
高密度点群(点)	17,781,194	18,417,966	18,430,555	18,386,975
メッシュ(面)	628,020	653,993	672,997	662,450
Sketchfab	https://skfb.ly/6Wpo8	https://skfb.ly/6Wpor	https://skfb.ly/6Wpow	https://skfb.ly/6Wpox
QRコード				

表2 撮影過程の違いによる処理結果の違いの比

	b/a	c/a	d/a	a/b	c/b	d/b	a/c	b/c	d/c	a/d	b/d	c/d
タイポイント(点)	0.99	1.03	1.03	1.01	1.04	1.04	0.97	0.96	1.00	0.97	0.96	1.00
高密度点群(点)	1.04	1.04	1.03	0.97	1.00	1.00	0.96	1.00	1.00	0.97	1.00	1.00
メッシュ(面)	1.04	1.07	1.05	0.96	1.03	1.01	0.93	0.97	0.98	0.95	0.99	1.02

表3 撮影過程の違いによる処理時間の違い

		a.ライト有り	b.ライト有り+Photoshop	c.ライト無し	d.ライト無し+Photoshop
アラインメント	マッチング(秒)	168	538	165	525
	アライメント(秒)	80	76	86	85
最適化(秒)		2	11	3	3
深度マップ生成(秒)		904	2,498	940	2,533
高密度クラウド生成(秒)		1,270	1,251	1,228	1,230
メッシュ構築(秒)		630	644	625	626
テクスチャー	UVマッピング(秒)	98	45	58	79
	ブレンド(秒)	79	1,320	77	1,331
合計(秒)		3,231	6,383	3,182	6,412

表4 撮影過程の違いによる処理時間の違いの比

		b/a	c/a	d/a	a/b	c/b	d/b	a/c	b/c	d/c	a/d	b/d	c/d
アラインメント	マッチング(秒)	3.20	0.98	3.13	0.31	0.31	0.98	1.02	3.26	3.18	0.32	1.02	0.31
	アライメント(秒)	0.95	1.08	1.06	1.05	1.13	1.12	0.93	0.88	0.99	0.94	0.89	1.01
最適化(秒)		5.50	1.50	1.50	0.18	0.27	0.27	0.67	3.67	1.00	0.67	3.67	1.00
深度マップ生成(秒)		2.76	1.04	2.80	0.36	0.38	1.01	0.96	2.66	2.69	0.36	0.99	0.37
高密度クラウド生成(秒)		0.99	0.97	0.97	1.02	0.98	0.98	1.03	1.02	1.00	1.03	1.02	1.00
メッシュ構築(秒)		1.02	0.99	0.99	0.98	0.97	0.97	1.01	1.03	1.00	1.01	1.03	1.00
テクスチャー	UVマッピング(秒)	0.46	0.59	0.81	2.18	1.29	1.76	1.69	0.78	1.36	1.24	0.57	0.73
	ブレンド(秒)	16.71	0.97	16.85	0.06	0.06	1.01	1.03	17.14	17.29	0.06	0.99	0.06
合計(秒)		1.98	0.98	1.98	0.51	0.50	1.00	1.02	2.01	2.02	0.50	1.00	0.50

表5 パソコンの性能差による処理時間の違いとその比

	a.ノートパソコン	b.デスクトップパソコン	b/a	a/b
タイポイント(点)	242,316	201,387	0.83	1.20
高密度点群(点)	45,838,446	53,253,533	1.16	0.86
メッシュ(面)	2,894,011	2,932,001	1.01	0.99
Sketchfab	https://skfb.ly/6WqrY	https://skfb.ly/6Wq89		
QRコード				

表6 パソコンの性能差による処理時間の違いとその比

		a.ノートパソコン(秒)	b.デスクトップパソコン(秒)	b/a	a/b
アラインメント	マッチング(秒)	747	1,857	2.49	0.40
	アライメント(秒)	279	267	0.96	1.04
最適化(秒)		17	4	0.24	4.25
深度マップ生成(秒)		7,500	1,317	0.18	5.69
高密度クラウド生成(秒)		8,160	2,472	0.30	3.30
メッシュ構築(秒)		9,240	1,044	0.11	8.85
合計(秒)		25,943	6,961	0.27	3.73

表7 バージョン差による処理結果の違いとその比

バージョン	a.1.6.4.10928	b.1.6.5.11249	b/a	a/b
タイポイント(点)	228,587	242,316	1.06	0.94
高密度点群(点)	47,314,889	45,838,446	0.97	1.03
メッシュ(面)	2,925,440	2,894,011	0.99	1.01
Sketchfab	https://skfb.ly/6WqrK	https://skfb.ly/6WqrM		
QRコード				

表8 バージョン差による処理時間の違いとその比

	バージョン	a.1.6.4.10928(秒)	b.1.6.5.11249(秒)	b/a	a/b
アライメント	マッチング(秒)	3,226	747	0.23	4.32
	アライメント(秒)	266	279	1.05	0.95
最適化(秒)		16	17	1.06	0.94
深度マップ生成(秒)		9,780	7,500	0.77	1.30
高密度クラウド生成(秒)		7,980	8,160	1.02	0.98
メッシュ構築(秒)		9,300	9,240	0.99	1.01
合計(秒)		30,568	25,943	0.85	1.18

表9 キーポイント数とタイポイント数の違いによる処理結果の違いとその比

キーポイント：タイポイント	a.40,000：4,000	b.80,000：8,000	b/a	a/b
タイポイント(点)	296,774	677,475	2.28	0.44
高密度点群(点)	196,739,331	149,527,146	0.76	1.32
メッシュ(面)	2,803,505	2,793,228	1.00	1.00
Sketchfab	https://skfb.ly/6WqqI	https://skfb.ly/6WqqP		
QRコード				

表10 キーポイント数とタイポイント数の違いによる処理時間の違いとその比

	キーポイント：タイポイント	a.40,000：4,000(秒)	b.80,000：8,000(秒)	b/a	a/b
アライメント	マッチング(秒)	5,100	19,080	3.74	0.27
	アライメント(秒)	731	555	0.76	1.32
最適化(秒)		69	13	0.19	5.31
深度マップ生成(秒)		4,500	4,080	0.91	1.10
高密度クラウド生成(秒)		4,920	5,280	1.07	0.93
メッシュ構築(秒)		2,694	2,607	0.97	1.03
テクスチャー	UVマッピング(秒)	606	473	0.78	1.28
	ブレンド(秒)	97	124	1.28	0.78
合計(秒)		18,717	32,212	1.72	0.58

表11 アライメント時のマーカー検知の有無による処理結果の違いとその比

マーカー検知	a.無	b.有	b/a	a/b
タイポイント(点)	677,475	676,773	1.00	1.00
高密度点群(点)	149,527,146	131,930,228	0.88	1.13
メッシュ(面)	2,793,228	2,826,074	1.01	0.99
Sketchfab	https://skfb.ly/6WqqB	https://skfb.ly/6WqqE		
QRコード				

表12 アライメント時のマーカー検知の有無による処理時間の違いとその比

	マーカー検知	a.無(秒)	b.有(秒)	b/a	a/b
アライメント	マッチング(秒)	19,080	19,140	1.00	1.00
	アライメント(秒)	555	736	1.33	0.75
最適化(秒)		13	87	6.69	0.15
深度マップ生成(秒)		4,080	3,840	0.94	1.06
高密度クラウド生成(秒)		5,280	5,100	0.97	1.04
メッシュ構築(秒)		2,607	2,489	0.95	1.05
テクスチャー	UVマッピング(秒)	473	446	0.94	1.06
	ブレンド(秒)	124	125	1.01	0.99
合計(秒)		32,212	31,963	0.99	1.01



図1 作業風景 (<https://skfb.ly/6WKPw>)

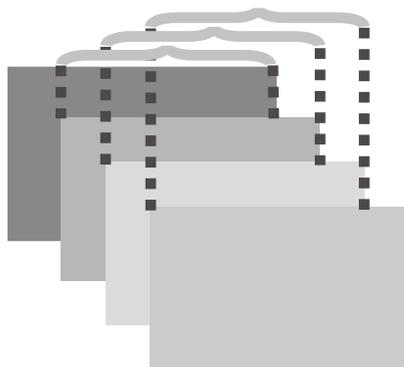


図2 オーバーラップ

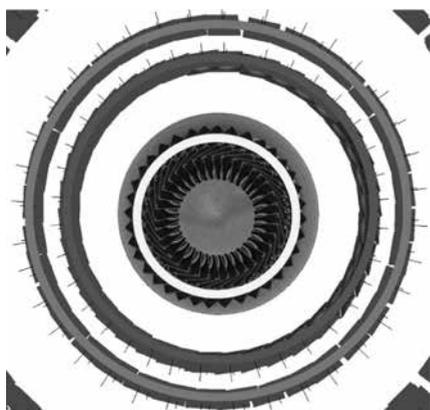


図3 遠近撮影



図4 斜め撮影

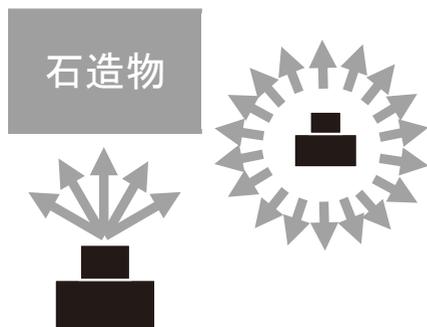


図5 カメラを動かさない撮影方法
(三井2019をもとに筆者が作製)

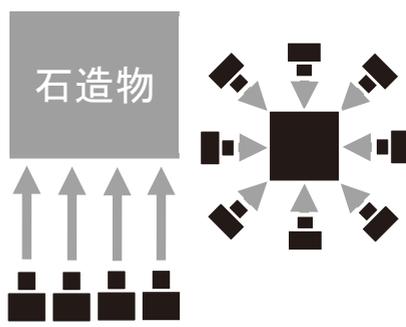


図6 カメラを動かす撮影方法
(三井2019をもとに筆者が作製)



図7 ズームリングをゴムテープで固定する
(筆者撮影)



図8 作業風景 (筆者撮影)

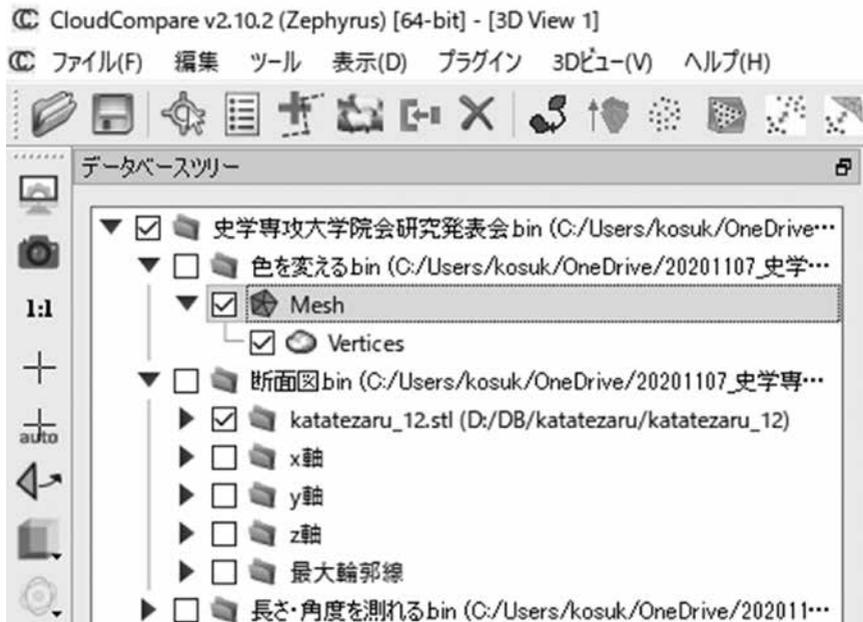


図9 CloudCompareのデータベースツリー



図10 断面線作成 1



図11 断面線作成 2

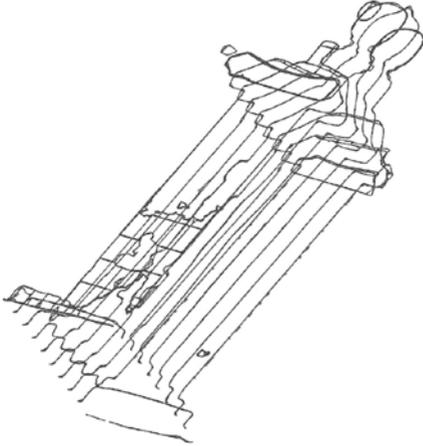


図12 断面線

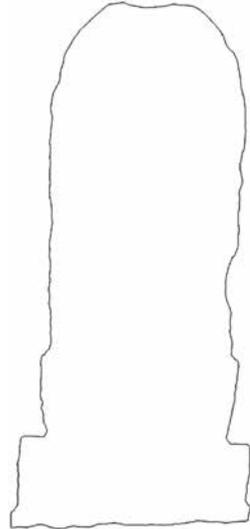


図13 最大輪隔線



図14 ARで表示させた石造物（筆者撮影）