

フォトグラメトリを用いた個人による3Dデジタルアーカイブの可能性

Possibility of 3D digital archiving by individual using photogrammetry

古川耕平 *FURUKAWA, Kohei*

要旨

近年、自然災害や紛争の際に、SNSを用いた個人単位での情報発信が活発になされるようになった。その情報は、現在でも当時の様子を知る重要なデジタル資料として活用されており、今後、個人の小さな記憶をデジタルで記録し、伝承していくアーカイブの重要性はますます高まっていくと考えられる。

一方、近年フォトグラメトリ法を用いた3Dモデリング手法の登場により、既存の写真や動画のように、3Dデータを個人単位でも容易に作成できる環境が整いつつある。

本稿ではこれまで一般的ではなかった個人による3Dデジタルアーカイブの可能性について、いくつかの事例を踏まえて機材や作業工程などのコストの観点から検証する。

Abstract

In recent years, dispatch of information on an individual basis using social networking services (SNS) has become active in the event of natural disasters and conflicts. This information is still used as an important digital resource for understanding the situation at the time, and it is thought that the importance of archives for digitally recording and passing on small personal memories will increase in the future.

On the other hand, with the recent emergence of 3D modeling methods using photogrammetric methods, an environment has been created in which 3D data can be easily created by individuals, just like existing photographs and videos.

This paper examines the possibility of 3D digital archiving by individuals based on several case studies, which has not been common until now.

キーワード

3Dデジタルアーカイブ／フォトグラメトリ法／個人アーカイブ

Keywords

3D Digital Archive／Photogrammetry／Personal Archiving

1. はじめに

日本では、昔から台風や地震等の災害によって、多くの人や文化が被害を受け、失われてきたことは、過去に記録され遺された文献資料から判明している。現代においても当時の様子を伺い知ることができるのは、記録が伝承されてきたからであり、特に公式記録のない時代においては、当時の関係者の日記や絵図など、個人的な記録に拠るところも大きい。このように個人単位で記録され、伝えられてきた情報は、小さなものであれ重要な役割を果たしてきた。

現代においても1995年の阪神大震災を契機に、失われる文化を記録し、後世に伝承していこうとする機運が高まった。2011年の東日本大震災では、マスコミの取材による情報だけでなく、それ以外の個人のSNSユーザを中心に、様々な情報がリアルタイムで記録され、発信されることとなった。これは2010年からのスマートフォンの急激な普及と共にSNSの需要も大きく伸び始めていた時期とも重なり、誰でも容易に写真や動画で記録し、即時的にインターネット上にアップロード可能な環境が整いつつあったことも大きな要因であろう。

当時発信された震災の生々しい記録は、10年以上経過した現在でも、当時の人々の個々の様子を伺い知ることのできる貴重なアーカイブとして閲覧することが可能である。

2022年のロシアによるウクライナ侵攻では、衛星写真とドローンによる映像を用い、被害を受けた都市の街並みを3Dモデルで可視化した東京大学の取り組み^[1]によって、3Dデジタル再現手法の有用性が改めて示された。詳細に再現されたCG映像の一部には、現地住民による個人的なデジタル写真を基に生成した3Dデータが使われており、個人が発するデジタル情報の重要性を示唆する一つの事例である。

一方、近年は3Dデータそのものについても、3D制作に馴染みのない一般の個人（以下、一般の個人とする）が、低コストでモデルを生成することが可能となりつつある。

これまで3Dデータを用いたアーカイブコンテンツの取り組みは、予算や機材、期間、人員などの問題から、比較的大規模なプロジェクト単位^{[2][3]}でのみ行われることが多かった。個人による3Dデジタルアーカイブの活動事例は少なく、一部専門家による報告が確認される程度であった^[4]。

しかし、この数年間におけるフォトグラメトリ法による3Dモデリング手法の実用化により、個人単位でのデジタル技術に掛かるコストの問題が大幅に軽減されている。

フォトグラメトリを実際に運用するノウハウも、専門書やWeb上において既に広く一般に公開されている。特筆すべきは、既にカメラを備えたスマートフォンのアプリケーション^{[5][6][7]}のみで、対象の3Dモデリングまで作成可能となったことが挙げられる。Sketchfab^[8]を始めとする3Dモデルデータ投稿サイトなどとも併せ、個人がデータを公開するための新たな環境が整備されつつある。

このような状況において、現在のSNS上で発信される膨大なデジタル写真や動画のように、3Dモデル制作に特別な知識やスキルを持たない一般の個人（以下、一般の個人とする）でも、3Dモデルデータを発信・公開できるようになれば、それらのデータがインターネット上に3Dモデルのビッグデータとして集積・構築され、その時々貴重な三次元情報をアーカイブとして有効的に活用することも考えられる。

そこで本稿では、既存の3Dモデリング手法の課題に触れつつ、現状のフォトグラメトリ手法による3Dモデリング手法が、個人に対して与える作業コストについて実際のデジタルアーカイブ事例を踏まえながら明らかにする。その上で3Dデジタルアーカイブ環境に、一般の個人が気軽に参加し得る可能性を考察する。

2. 既存手法の課題点

まず、フォトグラメトリ法を含む従来おこなわれてきた立体物に対する3Dデジタルアーカイブの手法とその課題点について、以下に簡単に整理する。

(1) CADソフトウェアおよび3DCGソフトウェアによる3Dアーカイブ

デジタルアーカイブ活動の初期の段階から試みられてきた本手法は、主として専門知識や技術を習得した人間の手作業による3DCG制作が中心となる。後述する手法と比較し、失われた有形の対象物をゼロベースでモデル化する場合には、一定程度有効な手法である。

現存する対象物に対しては、平面図等の参考資料や、実地調査で得られた情報を用いた3Dモデリングによる再現等が可能である。そのための専用のソフトウェアのオペレーションに関する知識と技能、経験が必要とされる。建築物等の比較的大きな対象物の場合、データの取得において、天頂方向からの計測や撮影の際には大掛かりな装置やドローンなどの特殊な機材の導入が必要となる。

また広いエリア全体を再現する際の地形データの再現については、基本的に空撮写真や市販3Dマップデータを使用するが、過去の状態の正確な地形情報については参考となるデータはほとんど存在せず、推測による再現とする場合が多い。

このように、3Dモデルの裏付けとなる情報の正確性・真正性、またはそれを作成するオペレータの技量によって再現性に影響が出ることは、本手法の根本的な課題である。

全体の工程に要する作業時間は、作業人員や対象規模、再現性のレベルに拠るが、数か月以上に及ぶケースが多い。

(2) 3Dスキャナを用いた立体情報計測によるデジタルアーカイブ

3Dスキャナを用いた対象の3Dデータ化は、(1)の手法と比較し、現存する対象物の正確な情報の記録および再現に対して非常に有効な手段であるといえる。レーザー光を対象物に放射状に照射し、反射し戻ってくるまでに掛かる時間を基に物体形状の3次元座標を測定する手法であり、現在では0.1mm単位という高精細な点描データを取得することが可能となっている。小規模な対象物には特に有効であるが、エリア計測においても、範囲は限定されるものの正確な計測が可能である。

一方で3Dスキャナは一般的に透明なもの、光沢のあるもの、また光を反射しない黒色の対象物等のデータ計測を不得手とする。このような場合、通常サーフェイサーと呼ばれる塗料や白粉を表面に塗布しスキャニングを可能とするが、破損や汚損の可能性を考慮すれば、文化遺産には適さないことが多い。

またその特性上、巨大な対象物や、複雑な形状を持つ対象物に対しては、レー

ザー光の死角となる場所や、周囲の光源の影響による歪みやノイズ等が生じる。最終的には、これらのノイズや欠損データを埋め合わせる工程が必須となるために、複数の地点から計測した点描データを正確に合成し、適切なポリゴンデータとして処理する知識、技能が要求される。加えて、使用機材が高額であることも個人単位での利用には不向きである。

全体の工程に要する作業時間は、3Dデータのスキャンとそれ以降の作業がほぼ自動化されているため(1)に比して数週間程度まで短縮される。

(3) フォトグラメトリ法を用いた立体情報計測によるデジタルアーカイブ

フォトグラメトリ法は、図1に示すように、多視点から撮影された複数枚の静止画像内の被写体の特徴点を合成し、点群データとして被写体の3次元情報を取得するものである。この点群データをポリゴンデータに変換することで3Dモデルの作成が可能となる。PCとソフトウェア、デジタル画像のみで対象物の形状データを構築可能な点が大きな特徴であり、既存の方法に比べ比較的手軽なことから、現在考古学分野などにおいても、いくつか活用の試みが報告されている^{[9][10]}。

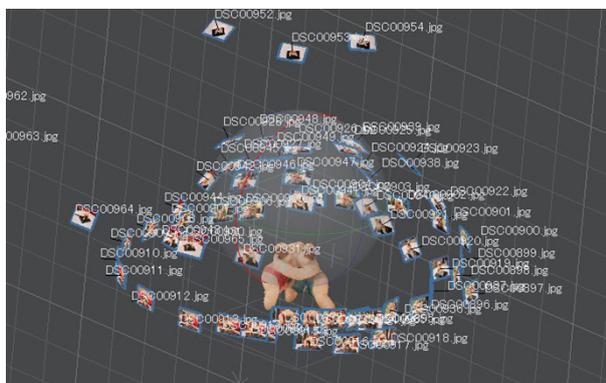


図1: 対象とカメラの3次元位置

[11]「デジタルアーカイブにおける記憶の可視化
-Photogrammetryの手法を例に-」より引用

本手法は、写真画像から3Dモデルの生成をおこなうため、現存する対象物に対してのみ有効である。3Dモデリングの精度を向上させるためには、一般的に高解像度な画像と、対象物を取り囲むように全周囲から数百枚程度の写真撮影が必要とされる。このため(2)の手法と同様に、カメラの死角となる部位や、対象規模によっては天頂方向からの撮影が困難であることなど、既存手法と共通する課題が存在する。

全体の工程に要する作業時間は、求められる精度や対象物のサイズに応じて異なる。高精細なデジタルアーカイブを前提として3Dモデル作成する場合は、(1)や(2)の手法に比べ大幅に短縮されるものの、相応の撮影時間や作業プロセスが必要となる。

以上から本稿では、各手法の共通の課題を、基本的に①使用機材 ②作業工程の長さや煩雑性 ③3Dモデルの再現性(精度)の3点に整理した。この3つの課題がすなわち一般の個人の3Dモデリングやアーカイブ活動に対する課題であると想定し、以下に検証をおこなうこととする。

3. フォトグラメトリ法による3Dデジタルアーカイブ事例検証

前章で整理した既存手法の3つの課題について、フォトグラメトリ法による3Dアーカイブの実例を基に、現状のフォトグラメトリ法を用いた個人の3Dアーカイブの可能性を検証する。今回はアーカイブ対象の規模ごとに、湯（2018）および、李（2019）による3つのデジタルアーカイブ事例^{[11][12]}を取り上げる。

これらの事例は、大学院修士課程における専門研究であるが、市販の機材によるフォトグラメトリ法を用いた3Dモデリングの具体的なプロセスを、具体的に窺い知ることのできる分かりやすい実例である。

ここでは対象規模を以下の3つに区分し、それぞれについて、上記①～③の課題を以下に検証する。

- ・小規模（10cm程度の物体）
- ・中規模（1m程度の物体）
- ・大規模（広域エリア）

なお、文中における「3Dモデルの再現性」とは、主としてモデルのサイズ（比率）・形状・表面質感等の正確性を指す。本事例では、サイズ・形状については3Dモデルを三面図に投影し、実測値を踏まえ、実物の写真と照合するなどして検証をおこなっている。質感は、実物のテクスチャ画像を用い、可能な限り正確に比率や位置を現物に合わせてUV展開するなど、見た目の再現性を重視している。

各事例の作業工程は、いずれも大きく「写真撮影」「3Dモデル生成」の2つの工程に分けられて実施されている。

各対象規模のフォトグラメトリ法による3Dモデリング事例において、具体的な作業工程に係るコスト、およびモデルの再現性を踏まえて、その有効性と課題を踏まえながら検証する。

3つの事例では、デジタルアーカイブとして一定の再現性を担保するため、前述したスマートフォンのアプリケーションは使用せず、高性能なスマートフォンカメラ、または一眼レフカメラと、市販のPCを用いている。

使用機材はデータ管理や作業の効率性を考慮し、すべて個人所有の物である。なお、いずれもフォトグラメトリの専門家ではない個人が単独で実施した事例であり、本人以外は、3Dモデリングの作業工程に一切関与していないことを付言しておく。

3-1. 小規模(10cm程度の物体)

周囲のあらゆる角度から撮影可能な小規模な対象物は、モデリングに使用する撮影枚数も少なく、最もフォトグラメトリ法を用いた3Dモデリングに適している。本事例では約6cmの人形を対象としており、実際の撮影段階における機材は、回転台とデジタルカメラのみの最小構成でおこなわれた。

①使用機材

本事例における主な使用機材は以下のとおりである。

- ・デジタル一眼レフカメラ：

本体：Sony α 7 II、レンズ：SEL35F28Z、マクロコンバータ

手持ち撮影

・PC :

ノート PC (形式不明)

・主な使用ソフトウェア :

Adobe Photoshop, Lightroom, Metashape, Zbrush

②作業工程

まず写真撮影段階については、**図1**のように、手持ち撮影によって対象の全方位から、合計数十枚程度の画像を取得し、対象の三次元座標の情報を得ている。対象物を持ち出すことができず、使用機材が制限され、撮影条件の悪い中であつたため、クオリティを高めるために撮影時にはf値、ISO値、シャッタースピード等の調整をおこなっている。

次に3Dモデル生成段階では、撮影した画像をフォトグラメトリ専用のソフトウェアを用いて、ある程度自動的に処理をおこない、大まかな立体形状を生成する。その後、得られたデータの欠損や破綻に対し、Zbrush等の3DCGソフトウェアで形状を修復していく。さらにポリゴン数の調整、テクスチャ処理等の作業を実施している。

③3Dモデルの再現性

微細なまゆ玉の繊維など、人形表面の質感再現については不十分な部分も見受けられるが、最小限の機材構成にもかかわらず、**図2**に示すように、形状や色彩などは十分に再現できている。



図2: 小規模な対象物の3Dモデルの例

[11]「デジタルアーカイブにおける記憶の可視化
-Photogrammetryの手法を例に-」より引用

3-2. 中規模(1m程度の物体)

対象物に対し、カメラのみの最小構成の機材で、全周囲から撮影可能な最大限の規模である。これ以上に大きくなると、脚立やクレーン等の機材等が別途必要となるため、個人で作業可能な対象としてはこの規模が限界である。

ここでは、**図3**に示すように、屋外に長期間放棄され劣化の進んでいた竈門を、フォトグラメトリ法を用いて3Dモデル化し再現している。

①使用機材

本事例における主な使用機材は以下のとおりである。

- デジタル一眼レフカメラ：
本体：Sony α 7 II、レンズ：SEL35F28Z、三脚
- PC：
ノート PC（形式不明）
- 主な使用ソフトウェア：
Adobe Photoshop, Lightroom, Metashape, Zbrush
- その他：
偏光フィルター、背景布 等

本事例では、一般に市販されている比較的安価な機材を用いて撮影および3Dモデリングをおこなっている。3Dモデルの精度低下や、作業時間の増大を許容するならば、カメラやモバイルPCは、より安価な製品で代用することが可能である。

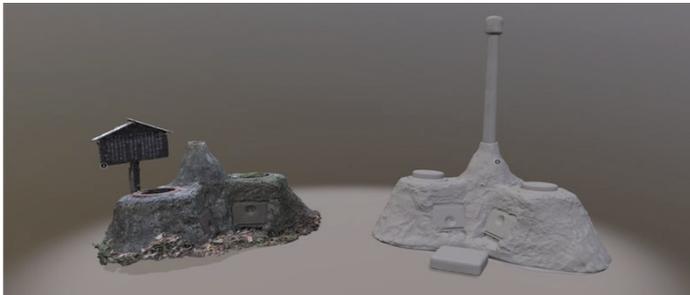


図3：フォトグラメトリ法を用いた竈門の3Dモデル
[11]「デジタルアーカイブにおける記憶の可視化
-Photogrammetryの手法を例に-」より引用

②作業工程

写真撮影段階では、手持ち撮影によって対象の周囲から合計150枚強の画像を取得し、対象の三次元座標の情報を得ている。ここで課題となるのは、現地での撮影環境に対応した撮影方法が必要になる点である。特に屋外での数百枚に及ぶ長時間の撮影時間や、天候や時間帯による環境光、物体表面に映り込む陰影の対処を適切におこなうには、撮影に関する知識と経験が不可欠であるといえる。本事例では試行錯誤を繰り返しつつ、撮影を終えるまでに数時間程度要している。

3Dモデル生成段階では、他の事例と同様、ソフトウェアを用いて大まかな立体形状を生成し、生成された3Dモデルの欠損や破綻に対し、3DCGソフトウェアによる形状の修復、ポリゴン数の調整、テクスチャ処理等を実施し、再現性を高めている。

③3Dモデルの再現性

図4に示すように、最終的に作成された3Dモデルは、拡大しても目立ったポリゴンの欠損や破綻は見られない。竈門の表面に残る穴や凹凸、傷などの詳細情報まで再現できており3Dモデルの再現性の高さが分かる。

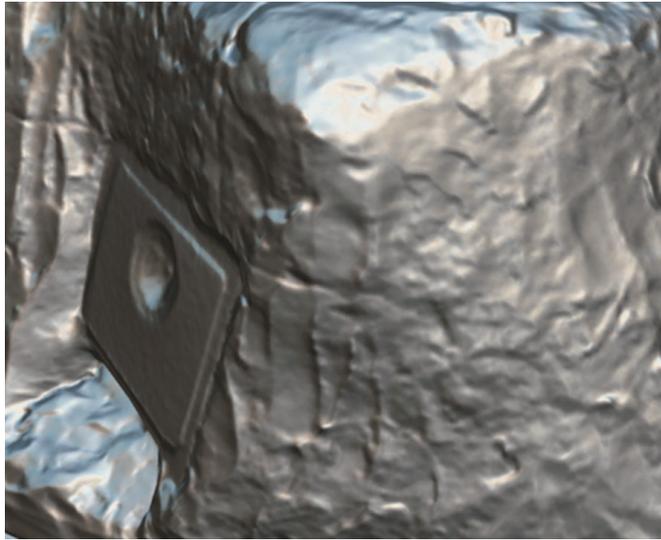


図4: 竈門の3Dモデルの拡大図

[11]「デジタルアーカイブにおける記憶の可視化
-Photogrammetryの手法を例に-」より引用

3-3. 大規模(広域エリア)

本事例は、京都における神社境内をデジタル再現したものである。従来、エリアという立体的な空間情報を正確に把握するためには、測量などの専門的な作業が必要となるが、本事例ではこれらの作業をフォトグラメトリ法で代替し、空間そのものの再現を試みた。

①使用機材

本事例における主な使用機材は以下のとおりである。

- スマートフォンカメラ：
Huawei Nova 2
- PC：
ノート PC (Dell Gaming Laptop G7 7588)
- 主な使用ソフトウェア：
Adobe Photoshop, Blender, Metashape, Zbrush

②作業工程

基本的な作業工程は他の事例と同様であるが、大きな違いは対象単体ではなく、神社境内という比較的広域なエリアと、その空間を対象とした点にある。エリアが広範囲であるため、機動性確保のためにスマートフォン搭載のカメラを使用し撮影をおこなった。

はじめにエリア全体を可能な限り網羅できるよう、図5に示すようにエリアを分割し、エリアごとに撮影ルートを設けて撮影を実施した。撮影作業には1日を要し、最終的な撮影画像総数は730枚、うちソフトウェアによる識別・解析に使用可能なものは539枚であった。その後の点群データの処理時間は約70時間に及んでいる。

しかし広範囲なエリアすべてを完全に網羅することができず、得られた点群データに多数の欠損が発生するという課題が生じた。本事例では、このデータ自体から生成される3Dモデルの使用は困難であると判断し、手作業による3Dモデリングのためのリファレンスモデル(図6)として利用した。

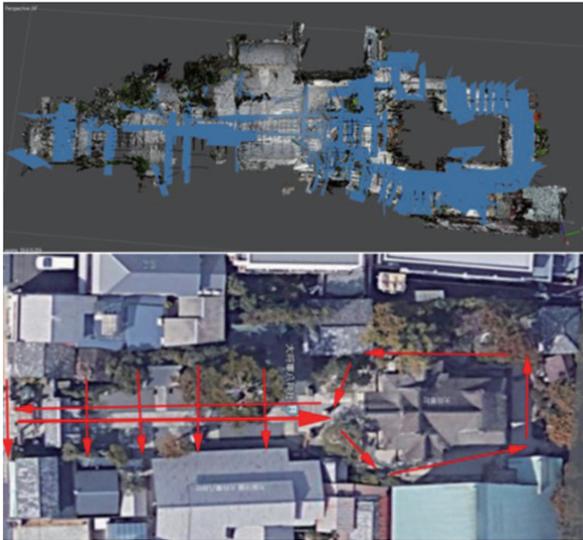


図5: 境内のエリアごとの撮影ルート



図6: エリア全体の点群データによるリファレンスモデル
 いずれも[12]「大將軍八神社における星辰信仰のデジタルアーカイブの一試行」より引用

具体的には、点群データで得られたエリアや建造物のおおまかなサイズや形状、空間位置関係などを3次元的な下敷きとし、地図情報や航空写真などとも照合させつつ、これをトレースする形で別途3DCGソフトウェアにてエリア全体の再現をおこなっている。

③3Dモデルの再現性

本事例では広範囲なエリア全体を、フォトグラメトリ法のみで再現しようと試みた。エリア全体の構造物のサイズ、形状、位置関係などの三次元情報については、写真や地図データと照合した結果、おおむね正確に取得できたが、得られた点群データから生成した3Dモデルの再現性は十分な水準に達しなかった。これは使用機材の性能の問題よりも、広範囲なエリアを網羅しきれなかった点に原因がある。

4. 考察

上記の2つのアーカイブ事例を通じ、精度の担保を前提とした3Dアーカイブ作成において、CADや3Dスキャナを用いた従来手法の課題である①使用機材

②作業工程の長さや煩雑性 ③3Dモデルの再現性の課題がフォトグラメトリ法によって、改善された点について考察する。

(1) フォトグラメトリ法による改善点

まずそれぞれの課題について、フォトグラメトリ法による改善が改めて確認された。

第1に、使用機材については、対象規模の違いに関わらず、市販の機材と一般の個人によって3Dモデリングが達成されている点、第2に、作業工程の長さと同雑性については、基本的には写真撮影という一般的な作業のみで、対象物の情報収集が可能であり、これにより従来手法よりも大幅に作業時間が短縮されている点、第3に、3Dモデルの再現性については、対象規模ごとにはばらつきは見られるが、特に小規模な対象物であれば、ポリゴンの欠損や破綻、形状の歪みなどもほぼ認識できないレベルで再現されている。

(2) フォトグラメトリ法における課題点

一方で、一定以上の精度の3Dモデリングをおこなう場合、特に②作業工程の長さと同雑性において、未だ改善の余地があることも改めて確認された。

すなわち第1に、前段階の写真撮影工程と点群データ取得後のデータ調整作業において、一定程度の技術や経験、知識が求められる点、第2に小規模モデルの制作であっても数時間以上の作業時間が発生する点、第3に広範囲なエリアの3Dモデル化については、個人作業のデータ計測範囲と再現性に限界が確認された点である。

加えて従来手法と異なり、フォトグラメトリ法では、撮影された画像のクオリティによって生成される3Dモデルに違いが出る。このため特に屋外では撮影時の天候や気温、時間帯によって生じる不確定な要素に、適切に対応するための高いスキルも要求される。

以上のことから、フォトグラメトリ法を用いた3Dモデリングは従来手法と比較し、全体として①使用機材、②作業工程の長さと同雑性については改善が見られた。また小規模から中規模の対象のように、素材となる画像データが十分に取得できた場合は、③3Dモデルの再現性についても、高い精度が認められた。しかしながら、②については改善傾向にあるとはいえ、再現性をある程度担保するためには、小規模なモデルであっても相応の作業時間が必要となるなど、現状では、未だ一般の個人が容易に3Dアーカイブに参入できる段階にあるとはいえない。

5. 終わりに

本稿では、フォトグラメトリ法を用いた3Dモデリング手法の登場と、それに伴う必要コストの緩和が、個人による3Dデジタルアーカイブの実現可能性について考察をおこなった。

ここでは現状の3Dデジタルアーカイブ作成における課題について、①使用機材 ②作業工程の長さと同雑性 ③3Dモデルの再現性の3つに整理した上で、市販の機材(カメラ・PC)とソフトウェアのみを用いた実際のデジタルアーカイブ事例を取り上げ、それぞれの課題について検証した。

その結果、フォトグラメトリ法による3Dモデリング法は、従来手法と比較し、全体的に課題が改善されていることが確認された。しかしながら3Dモデルの再

現性の担保を前提とした場合、未だに制作工程で必要とされる作業コストは大きく、現状ではフォトグラメトリ法による3Dモデリングが一般の個人に普及する段階にはないと結論付けた。

また冒頭で触れた、スマートフォンのアプリケーションを用いた手軽なモデリング手法も、フォトグラメトリ法を応用したものである以上、本稿で指摘した課題のすべてを解消するには至っていない。ただしこの手法は、写真画像のみで処理をおこなうシンプルなフォトグラメトリ法との高い親和性を持ち、従来手法の課題であった①使用機材、②作業工程の長さと同様性については、既に大幅な改善を実現している。

最後に、実際に筆者がWIDAR^[13]を用い、スマートフォンのみで3Dモデリングを試行し、作成した作例を図7に示す。今回はアプリケーションをダウンロードした後、一切の予備知識がない状態のまま手探りで試行した1回目の試作画像であるため、完成したモデルの再現性は低いが、以下の特長が確認できた。すなわち、第1に、全周囲からの写真撮影を、動画撮影とすることで工程の煩雑性を改善している点、第2に、アプリのボタンを数回タップするだけのシンプルかつ分かりやすい操作性である点、第3に、アプリケーションのダウンロードから3Dモデル完成までの全作業工程が短時間（20分程度）で完了する点、である。



図7: WIDERによって試作した3Dモデル
全体像(左)、3Dモデルの拡大図(右)(筆者撮影)

このように依然解消すべき課題は残されているものの、フォトグラメトリ法を応用した手法の登場により、従来よりも一般の個人の3Dモデリングに対する敷居が段階的にはあるが、確実に下がっていることは明らかである。WIDERの事例のように、専門的知識を必要とせず、初見であっても、手軽に識別可能なレベルの3Dモデルが生成できるようになったことは、今後、一般の個人の3Dモデリング環境を促進させる一助となる可能性を示唆するものであるといえよう。

将来的に一般の個人によって可視化され発信された大量の3Dモデルデータが、ビッグデータとして蓄積され、デジタルアーカイブの役割を果たす可能性に期待したい。

謝辞

本稿の執筆にあたり、貴重なデータをご提供いただいた湯宇氏、李明可氏に厚く御礼申し上げます。本研究はJSPS 科研費 JP18K12002の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 渡邊英徳「3Dマップで可視化されるウクライナの被害 位置情報が加えられた写真の“束”が伝える大切なこと」, 東京大学Webサイト” https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/features/z1304_00151.html”, 最終閲覧日 2022年6月27日
- [2] 新村龍也他『北海道産鱗脚類化石のデジタル生体復元-フォトグラメトリーおよび 3D CG ソフトによる制作』, 2016
- [3] 出水享『軍艦島3Dプロジェクト—最新のインフラ点検技術を活用したデジタルアーカイブ—』, 土木学会誌, 2016
- [4] 龍 lilea 「【フォトグラメトリー】 建築デジタルアーカイブ」, 2019, STYLY, “<https://styly.cc/ja/>”, 最終閲覧日 2022年6月29日
- [5] Paolo Dabove, Nives Grasso, Marco Piras, “Smartphone-Based Photogrammetry for the 3D Modeling of a Geomorphological Structure”, Applied Sciences, 2019, 9(18), 3884
- [6] Polycam, “<https://poly.cam>”, 最終閲覧日 2022年6月28日
- [7] Metascan, “<https://metascan.ai>”, 最終閲覧日 2022年6月28日
- [8] Sketchfab” <https://sketchfab.com>” 最終閲覧日 2022年6月28日
- [9] 中園聡『三次元考古学の新天地』, 季刊考古学 第140号, p14, 2017
- [10] 野口淳『文化財の壺Vol.6 文化財方法論研究会2018 特集 文化財の記録を少し先へ、石器の三次元計測と三次元形態研究2』, 奈良文化財研究所, 2018
- [11] 湯宇「デジタルアーカイブにおける記憶の可視化 -Photogrammetryの手法を例に-」, 2018年度映像研究科修士論文, 2018
- [12] Li Mingke 「大將軍八神社における星辰信仰のデジタルアーカイブの一試行」, 立命館映像学, pp200-217, 2019
- [13] WIDAR” <https://widar.io>”, 最終閲覧日 2022年11月1日