

写真測量による史跡の 3D モデル生成および 周辺地形の 3 次元構造可視化手法の開発

A method for visualizing three-dimensionally a “3D model of historic sites”
created using photogrammetry and “topography around historic sites”

根路銘もえ子¹ 赤嶺有平²
Moeko NEROME, Yuhei AKAMINE

要約

本研究では、写真測量に基づき「史跡の 3 次元モデル (建造物)」を自動生成するためのフレームワークと、生成した 3 次元モデルおよび衛星写真と標高モデルに基づいた「史跡周辺の地形」とを統合的かつ立体的に可視化するための Web アプリケーションの開発を行っている。同フレームワークを用いることで衛星写真を利用できない場所やドローン等による撮影が制限されている場所であっても、地上撮影が可能であれば 3D モデルを生成可能であることを示した。提案システムは、オープンソースソフトウェアをベースとして構築しているためローコストな運用が可能である。さらに、開発中の可視化ツールは、Cesium.js、Javascript で構築しているため、一般的な Web ブラウザが動く環境であれば、OS やデバイスを問わず利用可能である。

目次

1. はじめに
2. 写真測量
3. 提案システム
4. おわりに

1. はじめに

沖縄県には「グスク」をはじめとする歴史的建造物が数多く存在しており、それらのいくつかは世界遺産として登録されるなど歴史的・文化的価値が高く評価されている。2000 年に世界文化遺産に登録された「琉球王国のグスク及び関連遺産群」については、文化遺産オンライン (2022) や沖縄観光情報 WEB サイト (2022) 等の多くのサイトで情報配信がなされているのに対し、その他の史跡に関する情報は、うらそえ+ (2022) のように個別配信もしくはテーマごとに配信されていることが多い。特に、各史跡の位置関係などの情報は史跡ごとの解説文

1 沖縄国際大学経済学部・沖縄国際大学総合研究機構沖縄経済環境研究所所員 nerome@okiu.ac.jp

2 琉球大学工学部・沖縄国際大学総合研究機構沖縄経済環境研究所特別研究員

や書籍に掲載されているものの、史跡の情報を得たい者がそれを容易に可視化する術はない状況である。一方で、ユンタンザミュージアム（2022）のように時空マップを表示する施設や、コロナ禍の情報発信の工夫として、世界遺産勝連城跡（2021）のバーチャルツアーや首里城公園（2022）のデジタルミュージアム、バーチャル OKINAWA（2022）のメタバース空間での配信などの取り組みも始まっている。これらの新しい取り組みに対応する上で、デジタルアーカイブの重要性はますます高まっている。さらに、歴史的建造物の成り立ちの理解を深めるためには、建造物の形状と周辺地形の関係、各建造物の位置や交通網などの情報も重要である。それらを明確に提示することは、文化的な価値の向上だけでなく、観光資源としての価値の向上も見込めると考えられる。

本研究では、集約すべき情報の中でも史跡の空間的配置に着目し、写真測量を用いて作成した「史跡の3次元モデル」と衛星写真及び標高モデルに基づく「史跡周辺の地形」とを立体的に可視化できる Web アプリケーションの構築を目指す。

2. 写真測量

写真測量とは、対象物を撮影した写真から、対象物の写真から位置・大きさ・形状などの信頼性のある寸法を判定・測量する技術の事である。人間の両眼に対応する2枚の写真に三角測量の原理を適用して、対象物の3次元位置を求める。この写真測量技術は、地形図などに古くから利用されており、大きく分けて「空中写真測量」と「地上（近接）写真測量」の2種類がある。

空中写真測量では、航空機やドローンに搭載されたカメラで撮影する。地形図や大型建造物の測量に向いているものの、機材や撮影方法が特殊であるため、一般的に利用するのが難しい。図1に Google Maps における座喜味城跡の航空写真を示し、図2には Google Earth による3D表示画像を示す。

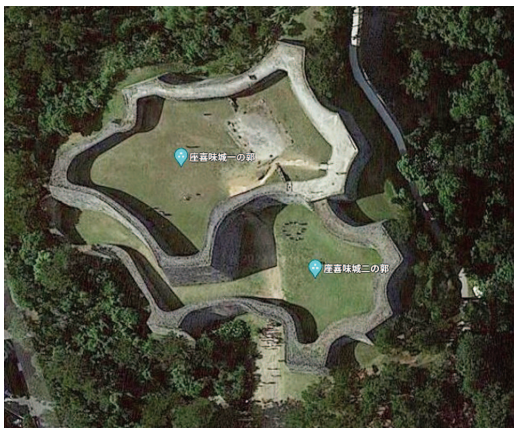


図1. 座喜味城跡の航空写真
(引用：Google Maps より)

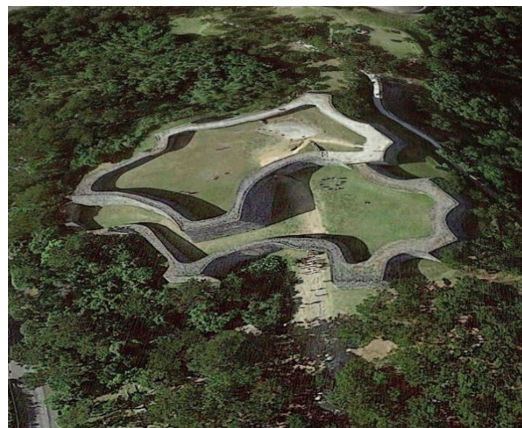


図2. 座喜味城跡の3D表示画像
(引用：Google Earthにより表示)

一方、地上（近接）写真測量は、建築物や工業製品等の計測、発掘調査等の現場検証を目的として、地上に設置もしくは手持ちのカメラで撮影する。図3に、スマートフォン（iPhone X）で撮影した座喜味城跡の写真を示す。



図3. 座喜味城跡の地上での撮影写真例（2022年8月筆者撮影）

いずれの測量方法であっても、信頼性の高い測量のためには、高解像度でブレのない品質の良い画像を得る事が重要である。また、3次元モデルを生成するためには、あらゆる視点から撮影する事も必要である。

3. 提案システム

本研究では史跡の空間的配置を明らかにするために、写真測量から得られる史跡の正確な3次元モデルと、衛星写真及び標高モデルに基づく周辺地形をシームレスに結合して可視化するWebアプリケーションを提案する。

図4は、生成した3Dモデルの首里城を地図上に地形と合わせて立体に表示している様子を示している。一方、本システムでは、図5のように、複数の史跡や古道の関係をも提示できることを目標としている。

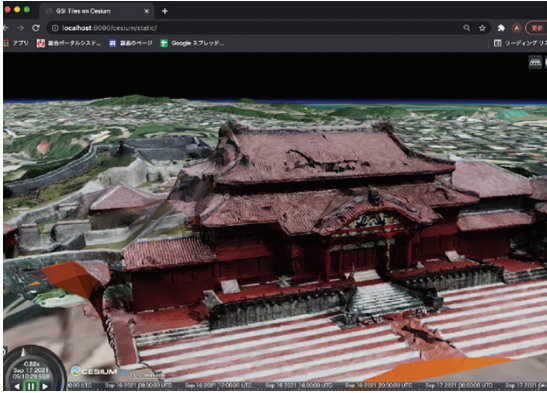


図4. 提案システムによる表示例



図5. 複数史跡の関係 (表示イメージ) 例

3.1. ソフトウェア構成

提案システムは、オープンソースソフトウェア及び独自開発したソフトウェアの組み合わせにより構成される。提案システムの構成を図6に示す。提案可視化ツールは、3Dモデル生成部分とCesium.jsを利用したViewerで構成される。

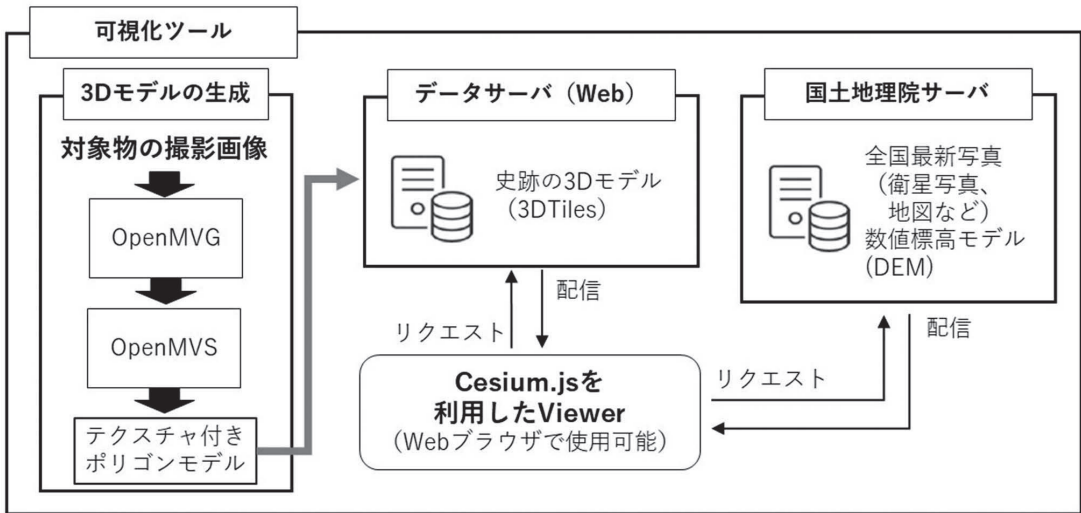


図6. 提案システム構成

3.1.1. 史跡の3次元モデルの生成

グスクは、その大部分が石積みの城壁で占められており、その輪郭は曲線を描いていることが特徴である。したがって、通常の測量により正確な形状を把握することは難しく、また、モデリングツールによる3次元モデルの作成はコストがかかる作業となる。提案システムでは、写真測量を用いることでこのプロセスを半自動化する。図7に示す3Dモデル生成の具体的な

作業は以下の通りである。

1. 史跡内のあらゆる箇所をあらゆる角度から撮影
 - ・本作業は、360度カメラを併用することで効率化できる
2. OpenMVG (Pierre et al. 2012) の利用
 - ・疎な点群データを生成
3. OpenMVS (Goldberg et al. 2011) の利用
 - ・密な点群データの生成
 - ・テクスチャの生成
 - ・ポリゴンモデルの生成

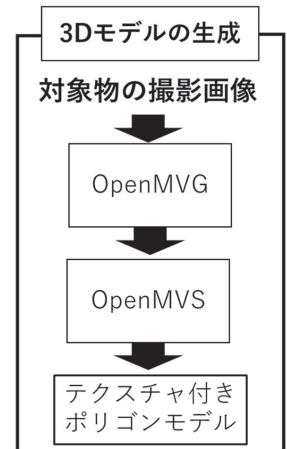


図7. 3Dモデル生成過程

3.1.2. 3次元モデルの可視化

史跡および地形を可視化する Viewer は、Cesium (2020) の一部である Cesium.js を利用して開発した。Cesium は、地理情報を立体的に可視化するためのツール群である。地形に関する情報は国土地理院が提供している数値標高モデル等を利用している。Javascript で構築されているため一般的な Web ブラウザが動く環境であれば、OS やデバイスを問わず利用可能である。

3.2. 撮影の工夫

写真測量の精度を高めるには、オーバーラップ率（複数の写真に同一箇所が撮影されている割合）を考慮して撮影を行う必要がある。また、歩行中に撮影すると手ブレによるボケが発生し特徴点が得られない画像となる。これを回避するために、

- (a) 360度カメラの利用
- (b) カメラスタビライザの利用

を行った。360度カメラにより動画を撮影することで画像中の大部分がオーバーラップするためモデルが途切れるリスクを大幅に低減できる。さらに、カメラスタビライザを用いて動画を撮影し、ブレの少ないフレームを自動抽出することで、通常通りの歩行による撮影でも問題なく写真測量に適した画像を得ることができる。実際に、末吉参詣道を歩きながら動画撮影した写真の一部を図8に示す。城跡は、面積が広い上に多数存在するため撮影条件の緩和は重要な課題である。



図8. 末吉参詣道を動画撮影した写真例（2021年5月筆者撮影）

3.3. 生成 3D モデル

3.2 節のように撮影方法を工夫した結果、得られた 3D モデルを図 9、図 11 に示す。図 9 は、3.3 で紹介した末吉参詣道の古道 3D モデルを示し、図 11 には、中城城跡の城跡 3D モデルを示す。また、比較のために、図 10、図 12 に Google Earth の 3D 画像を示す。

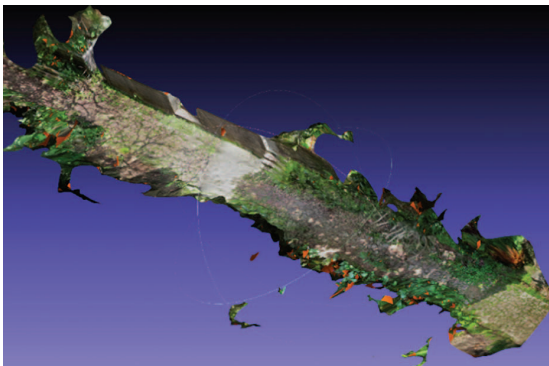


図 9. 撮影画像から 3D モデル化した末吉宮参詣道の一部



図 10. 末吉宮参詣道の 3D 表示画像（引用：Google Earth により表示）

古道や城跡は森林に覆われていることも多く、空撮では測量できない場所も複数ある。特に、今回撮影した末吉宮参詣道は図 8 に示すように木々に覆われた箇所が多い。そのため、図 10 の Google Earth の 3D 表示が緑に覆われ石畳が不鮮明であるのに対し、3D モデル化した図 9

では、石畳がはっきりと再現されている。このことから、上空が樹木に覆われて空撮が難しい場所であっても、3Dモデル生成が可能であることを示した。



図 11. 撮影画像から 3D モデル化した
中城城跡の一部



図 12. 中城城跡の 3D 表示画像
(引用：Google Earth により表示)

一方、中城城跡は大型建造物であるため、写真測量には、ドローン等による空中撮影を行うことが望ましいが、新型コロナウイルス感染拡大による行動制限の影響と文化財破損のリスク回避のため、今回は利用していない。図 11 は、図 9 の古道と同様、地上歩行撮影による 3D モデル化の結果である。図 12 の Google Earth の 3D 表示がそれほど立体的に見えないのに対し、モデル化した図 11 では、城壁の高さ等、立体的に再現されているといえる。

3.4. Viewer による表示

提案システムの要件は次の通りである。

- 3.3 節で作成した 3D モデルの表示
- 標高データを反映させた立体地形の表示
- 3D モデルと立体地形をシームレスに結合して表示

焼失前の首里城の空撮画像より作成した 3D モデル（図 13）と沖縄本島の立体地形（図 14）を結合表示した Viewer 画面を図 15 に示す。

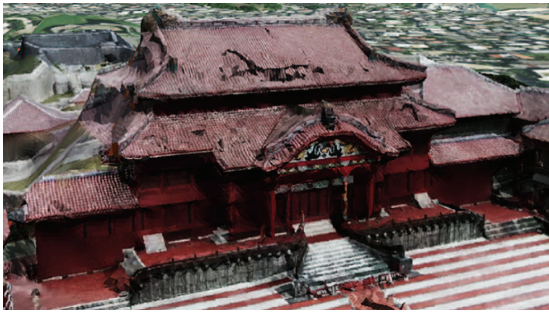


図 13. 首里城の 3D モデル

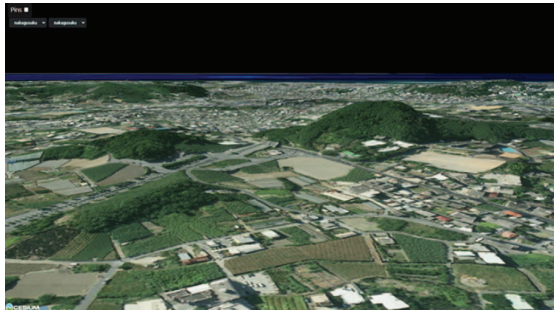


図 14. 沖縄本島の立体地形

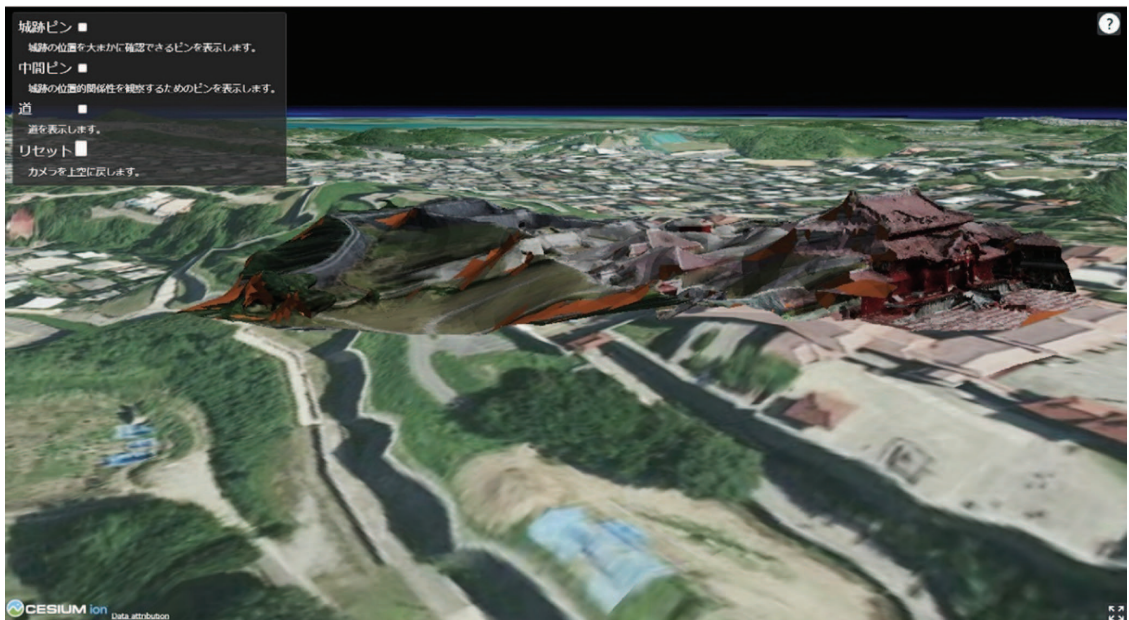


図 15. 3D モデルを結合表示した Viewer 画面

図 15 において、首里城周辺の地形が立体に表示されているだけでなく、首里城の 3D モデルも結合表示ができていることがわかる。他の史跡や古道も立体地形上に示すことで、各史跡

間の位置関係が明示されるため、築城や道路の整備の歴史的背景の理解支援の役割を果たせると考えられる。

4. おわりに

本研究では、史跡の3次元モデルと国土地理院標高モデル等をシームレスに結合することで、城跡とその周辺地形の3次元構造を可視化するソフトウェアの開発を行った。提案手法では、必要な3次元モデルの生成において、オープンソースソフトウェアを用いた写真測量等により半自動生成するプロセスを構築することでコンテンツ生成コストを大幅に低減できることを示した。

課題として、解像度の高いモデルの場合、ダウンロードに時間がかかるため、分割配信や解像度を落とす等の工夫が必要である。また、写真測量の対象が巨大であるため、密な点群の生成コストが高くなる。この点に関しては、可能な場合ドローンによる空撮を利用することや測量範囲の自動分割・結合による改善を目指す。さらに、OpenMVGが巨大なテクスチャ画像を生成する問題があるため、テクスチャ生成アルゴリズムを開発する必要がある。

今後は課題の解決を図るとともに、複数史跡の関係表示、時系列表示の可能性を探る。

謝辞

本研究はJSPS 科研費基盤研究 (C) JP19K01145 の助成を受けたものである。

参考文献・参考サイト

Goldberg, A. V., Hed, S., Kaplan, H., Tarjan, R. E. and Werneck, R. F., Maximum flows by incremental breadth-first search, In Proceedings of the 19th European conference on Algorithms, ESA' 11, pages 457-468, 2011.

文化遺産オンライン, <https://bunka.nii.ac.jp/> (閲覧年月: 2022年2月)

Cesium, <https://cesium.com> (閲覧年月: 2020年2月)

Pierre, M., Pascal, M. and Renaud, M., Adaptive Structure from Motion with a contrario model estimation, ACCV 2012.

沖縄観光情報 WEB サイト おきなわ物語, <https://www.okinawastory.jp/> (閲覧年月: 2022年2月)

世界遺産勝連城跡 公式ホームページ, <http://katsurenjo.jp/lang/> (閲覧年月: 2021年2月)

世界遺産座喜味城跡 ユンタンザミュージアム,

<http://www.yuntanza-museum.jp/tunagaru-map/> (閲覧年月: 2022年2月)

首里城公園, <https://oki-park.jp/shurijo/> (閲覧年月: 2022年2月)

うらそえ+, <https://www.city.urasoe.lg.jp/> (閲覧年月: 2022年8月)

バーチャル OKINAWA, <https://virtualokinawa.jp/> (閲覧年月: 2022年2月)