文化資源の三次元デジタルアーカイブ化手法と VR 利用に関する研究

菅野 美紀1 三島 直也2 北山 耕平2 硴崎 賢一3 荒木 俊輔3

概要:本研究では教育・観光分野での利用を目的として文化資源のデジタルアーカイブ化手法と,アーカイブデータのの利用法について議論を行った。デジタルアーカイブ化手法については SfM を採用し,より効率良く品質の良いモデルを生成するための調査を行った。その結果,入力画像数の単調増加に対し処理時間は指数的に,モデルの面数は対数的に増加することから,過度に画像を使用すると生成効率が下がることがわかった。また,撮影機材に関しては一眼レフカメラとスマートフォンのカメラを比較した結果,画角とレンズの精度の違いから一眼レフカメラの方がより品質の良いモデルを生成することができた.最後に,実験で生成したジオラマのモデルを VR に導入し,生成したモデルが VR でも利用可能であるかどうかの評価を行った.

キーワード:三次元デジタルアーカイブ,文化資源,三次元点群,三次元モデル,VR,SfM

Research on 3D Digital Archive Method and VR Utilization for Cultural Resources

MIKI SUGANO $^1\,$ Naoya MISHIMA $^2\,$ Kohei KITAYAMA $^2\,$ Ken'ichi KAKIZAKI $^3\,$ Shunsuke ARAKI $^3\,$

Abstract: In this research, we discussed the digital archive method of cultural resources and use of archive data for education and tourism. We adopted SfM as a digital archiving method and conducted research to generate more efficient and higher quality models. As a result, the processing time increased exponentially and the number of faces of the model increased logarithmically with the monotonic increase in the number of input images, indicating that excessive use of images reduced the generation efficiency. In addition, as a result of comparing a SLR camera and a smartphone camera, the SLR camera was able to generate a higher quality model due to the difference in angle of view and lens accuracy. Finally, the model of the diorama generated in the experiment was introduced into a VR system, and it was evaluated whether the generated model had reproducibility that could be used in VR.

Keywords: 3D digital archives, cultural resources, point cloud, 3D model, VR, SfM

1. はじめに

昨年,日本では文化財保護法の改定もあり,文化資源を 積極的に活用していこうという動きがある.本項では,飯 塚市歴史資料館に展示されている発掘現場のジオラマや出土品などの文化資源を対象に、より効率的に三次元デジタルアーカイブ化を行う手法の調査と、発掘編場のジオラマを VR(Vurtual Reality) に利用することの検討を行う.

2. 文化資源の三次元デジタルアーカイブ化

2.1 文化資源のデジタルアーカイブ化

文化資源は適切な環境で細心の注意を払って管理してい

¹ 九州工業大学 情報工学部

Kyushu Institute of Technology

² 九州工業大学 大学院 情報工学府

Kyushu Institute of Technology

³ 九州工業大学 大学院 情報工学研究院 Kyushu Institute of Technology

IPSJ SIG Technical Report

たとしても、年月の経過とともに劣化,退色等は避けられない。特に展示・公開されている文化資源はより劣化が促進されるため、保存と公開の間のジレンマが美術館や博物館等での課題であった[1].

そういった中、近年は文化資源として扱い、積極的に社会に活用していくためにデジタルアーカイブ化を促進させる動きがある。デジタルデータとして保存された文化資源は情報の損失なく半永久的に保存され、ネットワーク技術を活用することによって時間と空間を超えて人々に共有することが可能になる。我々は、デジタルアーカイブの中でも、有形の文化資源の立体形状をそのまま三次元情報として記録することのできる三次元アーカイブについて研究を行っている。三次元デジタルアーカイブは保全・研究分野や、観光教育分野など幅広い分野で利用されている。そこで我々は、それぞれの分野で使用される三次元デジタルアーカイブのデータ形式が異なることに着目した。

2.1.1 保全・研究分野への利用

保全・研究分野では主に建築物を対象として、いつ失われるかわからない文化資源の復元や補修のための計測・損傷調査を行なっている。したがって、保全・研究分野においては建築物の表面形状を精密に記録した三次元点群が必要される。

2.1.2 教育・観光(地域学習)分野への利用

デジタルアーカイブを用いた観光や地域学習向け事業の一つに $VR \cdot AR$ コンテンツがある。デジタルアーカイブであればセキュリティ上や安全上の問題で公開されていない箇所も $AR \cdot VR$ を通して自由に閲覧することができる。

前項で述べたように、保全・研究分野では対象の形状を 記録した三次元点群を利用しているが、三次元点群は近づ いたり拡大すると点が霧散するという特性から閲覧には適 していない. したがって、主に閲覧を目的とする教育・観 光分野においては三次元点群から生成した三次元モデルが 利用されている. そして、この三次元モデルは実際の表面 形状の視認できないほどの精密さより、外見的特徴をいか に忠実に再現するかが重要とされる.

2.1.3 本研究のデジタルアーカイブ化の対象物

地方の地域文化の継承における問題の一つは情報の拡散力の低さである。観光や地域学習などを目的に訪れた人々や地域住民にしか文化資源を共有できず、高齢化に伴いさらにその文化を知る人々が減少することが懸念される。この問題に対し、デジタル化された文化資源は保存だけでなく、館内での利用、インターネットを通じた世界中への拡散など様々に利用可能である[3].

そこで本研究では、飯塚市歴史資料館に展示されている図1に示す立岩遺跡発掘現場のジオラマとその他の出土品についてデジタルアーカイブ化を行った。立岩遺跡の発掘は1963年に始まり2年間の調査の後に埋め立てられ、現在は閑静な住宅地の中に丘として残されているのみであ

る [2]. したがって、甕棺等が発掘された当時の遺跡の状況は館内のジオラマと写真 (図 2) でしか見ることができない. 飯塚市歴史資料館に限らず、発掘現場はそのままの状態で保存されることは少なく、多くは報告書等の記録を残した後に埋め立てられてしまう [4]. 近年では発掘現場の記録や報告として三次元計測によるデジタルアーカイブ化が行われているが [5], この立岩遺跡の発掘現場に関してはジオラマと約 50 年前の断片的な写真のみでの記録しか残されていないことからジオラマが正規の記録として扱われているため、それをデジタルアーカイブとして保存・活用したいという意向がある.



図 1 立岩遺跡発掘現場のジオラマ



図 2 立岩遺跡の発掘当時の写真[2]

2.2 三次元デジタルアーカイブ手法

三次元デジタルアーカイブ化ではは主に三次元点群として取得される。三次元点群データとは計測する対象の表面の座標情報とRGB情報を持った点の集合体である。三次元点群の取得には、レーザープロファイラ(三次元レーザースキャナ)、深度カメラ、SfM などが用いられる。これらの機材で取得した地形や物体のデータをコンピュータの仮想空間上に点の集合体として記録する。そこで本研究では、SfM を用いて文化資源のデジタルアーカイブ化手法について調査を行なった。SfM は、計測条件の設定や写真の撮影が適切に行われれば十分な精度を持ち、解像度の高いテクスチャが貼られたモデルを生成できることから、現物の忠実な再現が可能であると期待できる。

3. SfM による三次元モデル生成実験

3.1 SfM の概要

SfM(Structure from Motion) は対象を複数視点から撮影した画像を基に自動で三次元情報を復元する手法である.この手法を用いて画像の入力に対し三次元点群及び三次元モデルの自動生成を行うソフトウェアを SfM ソフトウェアという. SfM ソフトウェアの典型的な処理手順を以下に示す [6].

- (1) タイポイントの自動取得
- (2) カメラ位置・姿勢の推定、タイポイントの三次元座標の算出
- (3) 多視点画像計測による点群生成
- (4) 自由表面形状モデリング

SfM を使用するにあたり、入力する画像はただ対象を複数の角度から撮影するだけでは、欠損や影のあるモデルが生成される場合がある。したがって、現物を忠実に再現したモデルを生成するには撮影の際にいくつかの注意点がある。まず、画像間での対応点をより多く抽出できるように、画像内に写る全ての対象がピンボケなくはっきり写るようにし、同じ地点の視差がわかるような撮影角度を決める必要がある。次に、モデルのテクスチャは入力画像を元に生成するため、影があるとそのままテクスチャに反映されてしまう。そのため、多くの写真で同じ場所に影が入らないように光源を工夫する必要がある。また、画像に写ってないものは認識されないため、遮蔽部分が他の画像では写るように、形状が複雑なものは意識的に多めに画像を用意する必要がある。

3.2 実験

本実験ではSfM ソフトウェアの「Agisoft 社 Metashape」を用いてジオラマの三次元モデルの生成を行った。SfM によるモデルの品質は入力となる画像に依存することから,使用する画像の枚数,撮影機材,撮影方向を変更してモデル生成を行い,特性を調べることでより効率的にモデルを生成する方法を調査した。

3.2.1 実験環境

• CPU: Intel(R) Core(TM)i5-4460 CPU@3.20GHz

• メモリ: 32GB DDR3

• GPU: NVIDIA GeForce GTX 970

3.3 画像数の変化による処理時間と品質への影響の調査 実験

本実験は品質の良いモデルをより短い処理時間で生成するための指標を得ることを目的し,入力画像数の変化に対するモデル生成時間と,生成したモデルの品質について調査を行なった.

3.3.1 計測対象

図1立岩遺跡のジオラマ

3.3.2 実験方法

以下に実験の流れを示す.

- (1) MetaShape の 1 つのプロジェクトに 100 枚の画像の 位置・姿勢推定を行う.
- (2) 20 枚ずつ画像を間引いていき,100,80,60,40,20 枚のそれぞれでプロジェクトを生成する.
- (3) 各プロジェクトで高密度点群生成,メッシュ構築,テクスチャ構築をする.
- (4) 各処理時間,点群の点数,モデルの面数を記録する.

まず、Metashapeで1つのプロジェクトを作成し、一眼レフカメラで撮影した解像度350dpi、TIF形式の300枚の画像を取り込みアラインメント(カメラの位置・姿勢推定)を行った。その際すべての画像の位置推定に成功するとは限らないため、失敗したものについては削除し、100枚になるまで満遍なく間引き初期状態とした。次に、画像を100、80、60、40、20枚と同様に満遍なく20枚ずつ間引き、各枚数の段階でプロジェクトを複製し、計5つのプロジェクトを作成した。そして、各プロジェクトで高密度点群生成、メッシュ構築、テクスチャ構築を行い、各処理時間と点群の点数、モデルの面数を記録した。

3.3.3 結果

モデル生成までの総処理時間(点群生成時間+モデル生成時間),モデルの面数を表1に,画像数に対する面数・モデル生成の総処理時間の関係グラフを図3に示す.

表 1 画像数に対する各処理時間と面数

画像数	総処理時間[分]	面数[面]
20	37	3,996,140
40	104	6,665,374
60	186	9,159,042
80	302	10,117,803
100	462	10,584,364

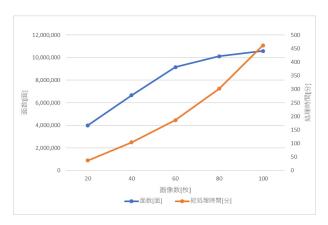


図 3 画像数と面数・総処理時間の関係グラフ

次に 20 枚,60 枚,100 枚の場合での生成したモデルの

全体像を図 4~図 6 に, 甕棺部分の拡大図を図 7~図 9 に示す.

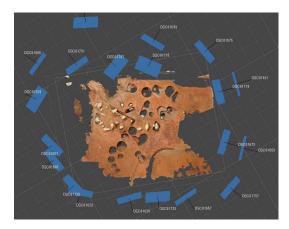


図 4 画像数 20 枚の場合のモデルの全体図

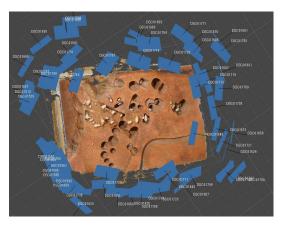


図 5 画像数 60 枚の場合のモデルの全体図

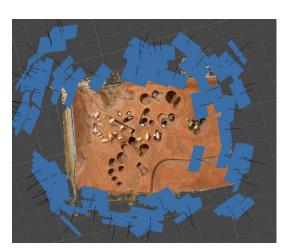


図 6 画像数 100 枚の場合のモデルの全体図



図 7 画像数 20 枚の場合のモデルの拡大図



図 8 画像数 60 枚の場合のモデルの拡大図



図 9 画像数 100 枚の場合のモデルの拡大図

3.3.4 考察

まず、画像数に対するモデルの形状の変化について述べる。図3より、画像数が増加すると面数・処理時間が増加していることから、画像数はモデルの形状に影響を与えることを確認した。面数の増加は図4~図6のモデル全体像の範囲が20枚から100枚にかけて拡大していることからも確認できる。また甕棺に注目すると、100枚で生成したモデルに対して20枚で生成したモデルは欠損が生じている。そこで、画像数の変化が点群生成時に与えた影響を調査するため、20枚と100枚で甕棺部分拡大図の一番手前の甕棺に注目して比較を行った。結果を図10に示す。比較の結果、100枚の点群は甕棺の全体像を再現している一

情報処理学会研究報告

IPSJ SIG Technical Report

方,20 枚の点群は大きく欠損している部分や座標算出の誤りによるノイズが見られた.これは、画像数が少ない場合に画像間の同一箇所を撮影している部分が減少し対応点が少なくなる事と、対応点の視差情報の不足が原因であると推測する.点群の欠損やノイズはメッシュ生成時に実物の甕棺にはない凹凸を生じさせるため、本来の滑らかな形状の再現が不可能になる.したがって、対象の全体を満遍なく撮影した画像を使用していても、対応点の抽出が不十分でモデルに欠損が生じている場合は画像数が不足しているため、更に画像を追加する必要がある.

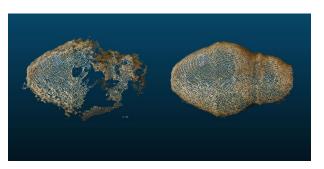


図 10 甕棺の点群比較(左:20枚 右:100枚)

次に、画像数に対する点群生成時間と面数について述べる。図3より画像数の単調増加に対して、面数は対数的に、処理時間は指数的に増加している。したがって、面数の増加率が低下した段階でそれ以上に画像を増加させるとモデルの質に対する時間効率が悪くなる事がわかった。

以上から、モデル生成において画像数はモデルの形状及び処理時間に影響を与える事がわかった。画像が多いほど点群生成時に欠損が発生しにくくなり漏れの少ないモデルが生成される。しかしながら、過度に画像数を増加させた場合処理時間かかる一方、一定の枚数を超えるとモデルの品質の変化を確認できなくなるため、モデルの質に対する生成時間の効率が悪くなる。三次元モデルの使用用途とそれに伴う質のレベルの要求に対し、適切な画像数を選択する事で効率良くモデル生成を行う事ができる。今後は、対象の形状やスケールに対して必要な画像数の一般化を行う必要がある。

3.4 撮影機材の変化による品質への影響の調査実験

本実験では、一眼レフカメラで撮影された画像とスマートフォンで撮影された画像のそれぞれでモデルを生成し、各デバイスの画素数及び画角(焦点距離)の違いによるモデル生成の影響について調査することを目的とする.

3.4.1 計測対象

図1立岩遺跡のジオラマ

3.4.2 実験方法

前節の実験により生成した一眼レフカメラの画像 60 枚から生成したモデルと、スマートフォンによる画像 60 枚か

ら生成したモデルで比較を行う. 一眼レフカメラとスマートフォンの画像の画素数と画角を表 2 に示す.

表 2 各撮影機材の画素数と画角

撮影機材	画素数	画角
スマートフォン	24,000,000	標準
一眼レフカメラ	12,192,768	広角

各カメラ位置は以下の図??に示す.



[1] 一眼レフカメラ

[2] スマートフォンのカメラ

図 11 各カメラ位置

3.4.3 結果

生成したモデルを図 12, 図 13 に, 甕棺部分の比較図を図 14 に示す.

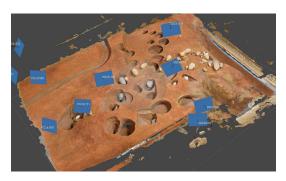


図 12 一眼レフカメラによるモデル



図 13 スマートフォンによるモデル





[1] 一眼レフカメラ

[2] スマートフォンのカメラ

図 14 甕棺の比較図

3.4.4 考察

各カメラで撮影された画像の画素数と画角の違いから考察を行う.

まずモデル生成時の処理時間とモデルの面数であるが, 一眼レフカメラの方がスマートフォンより処理時間が長 く,モデルの面数も約4倍多いという結果を得た.画素数 の差が約2倍であることに対し、面数の差が約4倍となっ ていることから画素数と画角の両方が影響していると推測 した. 一眼レフカメラの画角はスマートフォンのカメラの 画角より狭いことから,画像内の同じ範囲の画素数が多く なる (図 15). したがって、同じ場所でも一眼レフカメラの 方が多くの特徴点が抽出されたため面数が増加したと考え る. また, 画角の影響は図12, 13から点群の生成範囲に おいても確認する事ができる.一眼レフカメラは対象に注 視して撮影するためジオラマ部分のみの三次元モデルが生 成されているが, スマートフォンによるモデルではジオラ マの台座の部分まで生成されている事がわかる. このこと から広角のスマートフォンのカメラでは一眼レフカメラよ り広い範囲のモデルを生成する事ができるため、60枚より 少ない枚数でも全体像を再現できると考える.





[1] 一眼レフカメラ

[2] スマートフォンのカメラ

図 15 画角の比較図

表面形状については、図 14 の甕棺の表面を見ると一眼レフカメラのモデルの方が表面が滑らかであることが確認できる。これは、面の数が多いだけでなく、レンズのサイズによる歪みの大きさも影響していると考える。画像処理をする際には、まずカメラの歪みを補正する必要がある。この時、一眼レフカメラよりスマートフォンのカメラの方がレンズが小さいため歪みが大きく、補正をしてもなお歪みの影響が残ったことにより実際の形状から外れた対応点が生成された可能性がある。

また、画像の画素数はテクスチャにも反映されている。図 14より、地面の部分のテクスチャが一眼レフの方がはっきりとしており、スマートフォンの方は画像がぼやけている印象を受ける。テクスチャには三次元復元に使用される画像が使われるため、画像の画素数がそのままモデルの表面の質感の表現に影響する。

以上から、一眼レフカメラで撮影した画像を用いた方が モデルの質が良いと言える。したがって、今回のようにモ デルの細部の再現度も必要とする場合は絞りを開いた状態 の一眼レフカメラで撮影したものを用いた方がより質の高 いモデルが得られることがわかった。

3.5 実験のまとめ

SfM ソフトウェアによる三次元モデル生成は画像解析 の計算により三次元形状を復元する間接計測であるため, レーザープロファイラのような直接計測によるものではな い. そのため実物のスケールは考慮されておらず、対象の テクスチャによっては計測に不安定さがある. しかしなが ら、実物の外観的特徴を損なうことのない形状を再現でき ており, 画像から生成したテクスチャが貼られる事で現物 の外観や質感を表現したモデルが生成できることを確認し たため、閲覧をメインとする利用法において適した手法で ある. したがって、SfM ソフトウェアを用いて低コストに 文化資源の外観的特徴を表すことのできる三次元モデルを 生成する手法は, モデルの表面形状の正確性より三次元モ デルの見た目を重視する教育・観光分野において効率良く 要求を満たす手法であると言える.しかしながら,画像の 視覚情報のみで三次元復元を行うため、画像の撮影方法や 枚数、撮影するカメラの画角や画素数がモデルの質に大き く影響を与える. そのため, デジタルアーカイブ化する対 象の形状や三次元モデルの使用目的に応じて,撮影する方 向や枚数, 撮影するカメラを使い分ける必要がある.

4. ジオラマのモデルの VR 利用に対する評価

本章では、実験にて生成したジオラマのモデルを実際に VRに導入し、教育・観光利用に必要となる自由な閲覧に 必要な機能の実装について述べる。また、実装した上で発 生した問題点についてまとめ、今後の展望を示す。

4.1 ジオラマの VR 利用

本研究では、飯塚市歴史資料館の立岩遺跡発掘現場のジオラマを三次元モデルにデジタルアーカイブ化し、VRコンテンツへの利用を検討する。立岩遺跡は現在埋め立てられているため、立体の資料としてはジオラマでのみ記録されていることからジオラマが発掘現場の正規の記録として扱われている。飯塚市歴史資料館では当時の発掘された様子をジオラマだけでなくデジタルアーカイブとして残し、より多くの人に発掘の様子を感じてもらいたいとの意向が

IPSJ SIG Technical Report

ある.そこで我々はジオラマの世界を現実的に体験できるコンテンツに向けて,VR空間内にジオラマのモデルを拡大表示し,内部を自由に歩き回ることで閲覧するシステムを作成した.飯塚市歴史資料館だけでなく,各地で現在は見ることのできない風景をジオラマとして展示している施設は数多くあり,それらをデジタルアーカイブ化しVR利用することで,CGによる三次元復元を行わずとも新たな観光資源とする事ができると考える.

4.2 VR での閲覧機能の実装

本節では、実際に VR 表示を行った結果、VR 利用により発生した問題点について述べる.

Unreal Engine 4[7] を用いて VR 視点で立岩遺跡のジオラマ内を閲覧した様子を図 16 に示す.



図 **16** VR で見たジオラマ

VRでの移動方法は実際に歩いて移動することが基本であるが、HMDの移動を感知できる範囲よりジオラマの環境が広域であるため、自由にジオラマ内を移動できるようにコントローラのスティックを傾けることで平行移動を実装した。今回使用するジオラマには地面に穴があることから、内部に入るための上下の移動も必要である。本システムでは地面の地形に合わせてユーザーの高さの変化視線を上げた状態でスティックを前方に倒すと上方へ、視線を下げた状態で下方へ進むように実装した。

4.3 VR 表示したことによるモデルの問題点

モニター上で俯瞰して見た際には、SfM により一眼レフカメラの画像 60 枚から作成した三次元モデルの形状は実物の外見的特徴を十分に再現出来ていると判断した. しかしながら、VR によって甕棺を実物のスケールで目の前にしたとき、モニター上では微小な欠損であったが、VR では数十センチメートルで閲覧するため視覚的影響が大きいことがわかった.



図 17 甕棺内部の形状が不明瞭になっている様子



図 18 甕棺の地面との接地部分の欠損の様子

4.4 VR を通しての今後の展望

SfM により生成したジオラマの三次元モデルを VR で表示した際に、甕棺と地面の接する部分の欠損が目立つという問題点があった。これらに問題に対し、今後の展望として次の二つの方法を検討する。一つは、単体で展示されている甕棺を個別でデジタルアーカイブ化し、ジオラマのモデルに導入する手法である。二つ目は、カメラが近づくことができない、または複数方向からの撮影が不可能であることにより、画像ベースでの三次元復元が困難な対象においてレーザー方式の小型深度カメラを用いて点群を生成する方法である。

まとめ

本研究では、小型文化資源を教育・観光分野に利用することを目的とした三次元モデルの生成手法の調査と、モデルの VR 利用の一つとしてジオラマを拡大して表示し、内部を自由歩行できる機能を実装した。三次元モデルの生成手法では SfM を用いた手法が最も現物の形状を再現できる手法であった。その際に使用する画像の特性及び枚数によるモデルへの影響について実験を行い、要求に応じたモデル生成の効率化を図った。VR の実装においては、発掘現場のモデルを拡大して閲覧することで当時の現場の再現を行った。しかしながら、モデルを拡大して VR の視点で

情報処理学会研究報告

IPSJ SIG Technical Report

見ることでモデルの一部の欠損が目立つという問題点が挙がった. 今後は, 三次元モデル生成手法の再検討を行う.

謝辞 本研究を行うにあたり、写真の撮影を許可して頂いた飯塚市歴史資料館の関係者各位に深く感謝致します.

参考文献

- [1] 文部科学省, "調査研究協力者会議等 デジタルミュージアムに関する研究会 新しいデジタル文化の創造と発信(デジタルミュージアムに関する研究会報告書)1. 文化資源等のデジタル・アーカイブについて," [オンライン]. Avarable: https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/sonota/002/toushin/07062707/002.htm. [アクセス日: 4 2 2020].
- [2] "立岩遺跡," [オンライン]. Avarable: http://inoues.net/ruins/tateiwa.html. [アクセス日: 4 2 2020].
- [3] 江上敏哲, "発掘調査報告書とデータの公開利用 「記録 保存」と情報のフロー、再現性・再利用性-," 奈良文化財 研究所研究報告,第 24 冊, pp.211-217, 2020.
- [4] 野口淳, "海外の日本研究と知のネットワーク -デジタルアーカイブのユーザを考える-," 奈良文化財研究所研究報告,第 24 冊, pp.32-36, 2020.
- [5] 三戸部秀樹, "発掘調査から報告書公開までのデジタル技術," 奈良文化財研究所研究報告,第24冊,pp.77-94,2020.
- [6] 織田和夫, "解説: Structure from Motion(SfM) 第一回 SfM の概要とバンドル調整," 写真測量とリモートセンシ ング, VOL.55, NO.3, pp.206-209, 2016.
- [7] EPIC GAMES, "Unreal Engine 4 ド キュメント," [オンライン]. Avarable: https://docs.unrealengine.com/ja/index.html. [アク セス日: 27 2 2020].