

椿井城のデジタルアーカイブとその応用

正司 哲朗*・葛本 隆将**

Digital Archive of the Tsubai Castle and its Applications

Tetsuo SHOJI and Takayuki KUZUMOTO

要 旨

奈良県内には、室町時代から戦国時代に築かれた山城が多く存在しており、その1つに生駒郡平群町の椿井城がある。椿井城の建築物は、すでに存在せず、曲輪、堀切、土塁などの痕跡が残されているが、多大なコストを要する保存整備のあり方を検討するにあたって、残されている遺構の現状を詳細に記録するためのデジタル化が有効である。本稿では、3次元計測による椿井城の調査区をデジタル化する方法、および2016年11月に行われた企画展で展示したシステムについて述べる。

調査区のデジタル化については、平群町教育委員会によって、発掘調査された椿井城の南郭を2種類の方法を用いてデジタル化した。1つは画像計測方法であり、もう1つは、TOF (Time of Flight) 方式のレーザ計測装置を利用するものである。画像計測は、TOF方式に比べて精度が低い、比較的lowコストで実現が可能である。

企画展については、航空レーザ測量によって得られた地形データを3Dプリントしたもの、プロジェクタを用いた地形データのAR表示システム、HMD (ヘッドマウントディスプレイ) を用いた、部分的に復元した椿井城のAR表示システムの3つを展示した。

【キーワード】 3次元レーザ計測、画像計測、拡張現実

I. はじめに

奈良県内には、室町時代から戦国時代に築かれた山城が多く存在しており、生駒郡平群町内には、椿井城のほか、信貴山城、高安山城、下垣内城、西宮城などがある。すでに建築物は存在せず曲輪、堀切、土塁などの痕跡が残されているものが多いが、多大なコストを要する遺構の保存整備の方法を検討していく基礎資料とするため、詳細かつ正確な遺構の現状記録が必要不可欠であり、そのための手段としてデジタル化が非常に有効である。

このような山城をデジタル化するためには、規模とコストに応じて、効率的な手法の選択が必要となる。山上にある山城全体を記録するためには、航空レーザ測量が有効な手法であるが、非常にコストがかかる。他にもGPSを用いたりアルタイムキネマティック測量もあるが、森林に囲まれている場合には、衛星からの信号が安定して受信できないため、利用することができない

平成29年9月12日受理 *社会学部総合社会学科 准教授 **平群町教育委員会総務課学芸員

い。近年では、ドローンを使って、上空から撮影した画像をもとに、画像計測を行う方法が有効であるが、森林がある場合は操縦が困難であり、また、規制もあるため日本国内では簡単に飛行させることができない。

本稿では、平群町内にある椿井城の発掘調査区をデジタル化するとともに、デジタル化されたデータの活用事例について述べる。平群町の調査・企画展示に先立ち、奈良大学と平群町が、包括的な連携のもと、教育、文化、産業、まちづくり等の分野において相互協力し、地域社会の発展と人材育成に寄与することを目的とした協定が平成28年3月に締結された。この協定に基づき、平成28年11月20日に平群町教育委員会主催で行われた企画展「嶋左近と椿井城－松永久秀との相剋」において、展示に関する技術協力を行い、AR (Augmented Reality) 技術を用いた体験型の展示を行った。また、平成29年2月に平群町教育委員会によって、椿井城跡の発掘調査が行われた際には、調査区の詳細なデジタル記録を行った。

AR (Augmented Reality) は、拡張現実と訳され、実世界の情報を仮想世界の情報で拡張する技術であり、近年、様々な分野でも利用されている。例えば、世界文化遺産に登録されている姫路城では、姫路城敷地内に15箇所のARマーカーが設置され、スマートフォンでARマーカーを撮影すると、建物のCG合成や、実写映像が再生するようなシステムが導入されており、誰でも利用することができる¹⁾。他にも、多賀城や安土城、高松城など多くの城にもAR技術もしくはVR (バーチャルリアリティ) 技術が使われている。

本稿では、椿井城の概略、平成28年度に平群町教育委員会によって発掘調査された南第1郭のデジタル化について述べる。また、デジタルデータの活用事例として、3Dプリンタでの出力結果や、AR技術を用いた展示システムについて述べ、今後の課題を示す。

II. 椿井城の概略

椿井城跡は、南北に連なる矢田丘陵の尾根上に築かれた連郭式山城で、途中の鞍部で二分されている。図1(a)の椿井城跡の縄張り図に示すように、鞍部北側の標高241.7mをピークとする郭群を「北郭群」、鞍部南側の標高225.7mをピークとする郭群を「南郭群」と通称している。主要な曲輪には土塁が残り、最南端の曲輪(南第1郭)では、曲輪南縁の土塁中央が開口し、城外へ通じる土橋につないでおり、南方からの攻撃に重点を置いている^{2),3)}。

椿井城は、室町時代から戦国時代にかけて築城されたとされる山城であるが、築城時期や城主が明確ではなく、豊臣秀吉に仕えた戦国武将である石田三成の家臣として、関ヶ原の戦いで活躍した嶋左近(島清興)の代に修築されたものとされる説もある。嶋左近については、これまで同時代の史料があまり知られておらず、不明な部分が多かったが、近年、大阪府内の民家で新たに書状2通が発見された。書状は天正18(1590)年7月19日付けで、常陸(茨城県)の大名である佐竹義宣の家臣・大貫頼久宛のものと、同7月25日付けで、佐竹義久宛のものであり、これらの書状からは、左近が東国大名との交渉に関わっていたことがうかがわれることから、秀吉政権下で官僚的な役割も務めていたことがわかってきた⁴⁾。

現在の椿井城跡には、図2に示すように、建物跡は残されておらず、主郭群は、遺構保護のた

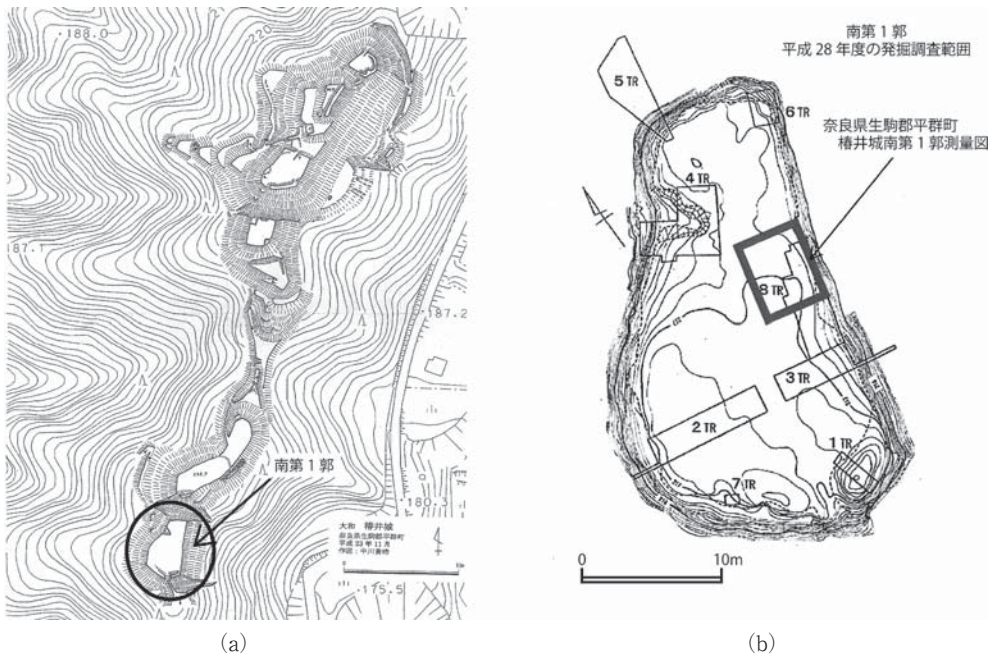


図1 椿井城跡の縄張り図



図2 現在の椿井城跡

め立ち入りが禁止されているが、南郭群は見学することができ、曲輪、堀切、石垣、土塁などが残されている。平群町教育委員会では、2014年度から、椿井城跡の保存を目的に範囲確認調査が実施されており、本稿では、2016年度に行われた第3次調査において、図1(a)に示す南第1郭の発掘区間を3次元計測することでデジタル化した。

Ⅲ. 椿井城のデジタルアーカイブ

1. 発掘調査の概要

平成26年度の平群町教育委員会による発掘調査では、図1(a)に示す南第1郭の東縁部から建物の礎石の可能性のある石列が部分的に検出された。このことから、平成28年度の発掘調査では、図1(b)に示す部分を対象に、南北6m、東西5mの規模で、石列の規模の確認を行った。その結果、西側を除く三方から、「コ」の字型に並んだ石列が検出された。石列の検出長は、北側で3.5m、東側で4m、南側で4.5mであった。西側では、礎石が列状に並んでいた痕跡は

確認されず、これらの石列を建物の基礎と考えた場合、西側の造りをさらに検討する必要があるが、平成26年度の調査^{5),6)}では、東側の石列の外（東）側にさらに石列が1列確認されており、この点も含めて考えると、ほとんど曲輪の肩に接する形で建てられた東西4~4.5 m、南北4 mの規模の建物の復元が可能である。本稿では、このうち平成28年度の発掘調査区の一部を、以下のようにして3次元計測することでデジタル化した。

2. 調査区のデジタルアーカイブ

2.1. 画像計測による調査区のデジタル化

画像計測は、多視点から撮影された画像をもとに、図3に示すように画像中から対応する点を求め、三角測量の原理に基づき計測する方法である。カメラ間の距離は基線長と呼ばれ、基線長が不明な場合には、スケールが未知となる。また、画像中で対応点が見つからない場合には、計測することができない。例えば、対象の表面上に特徴がまったくないようなものに対しては、計測することができない。今回のような調査区は、表面上に特徴がよく現れているため、比較的良好な結果を得ることができる。

さらに、一般的に、1台のカメラを移動しながら撮影した場合、基線長は未知であるため、ス

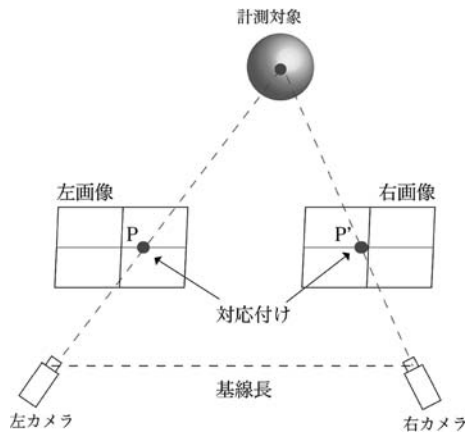


図3 ステレオ法の原理

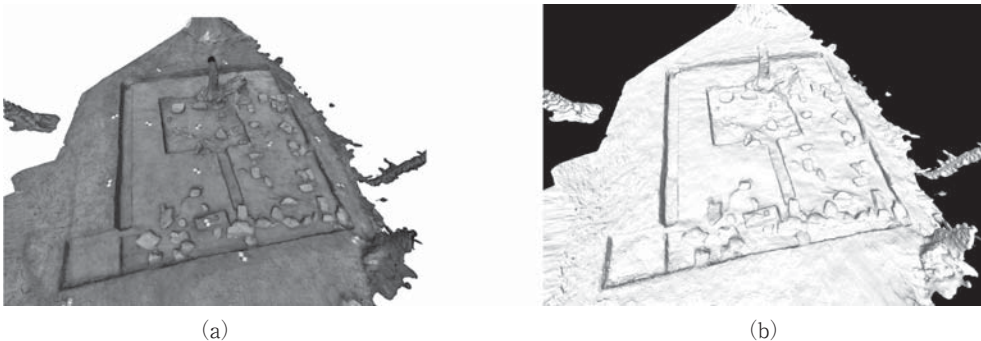


図4 調査区の画像計測結果

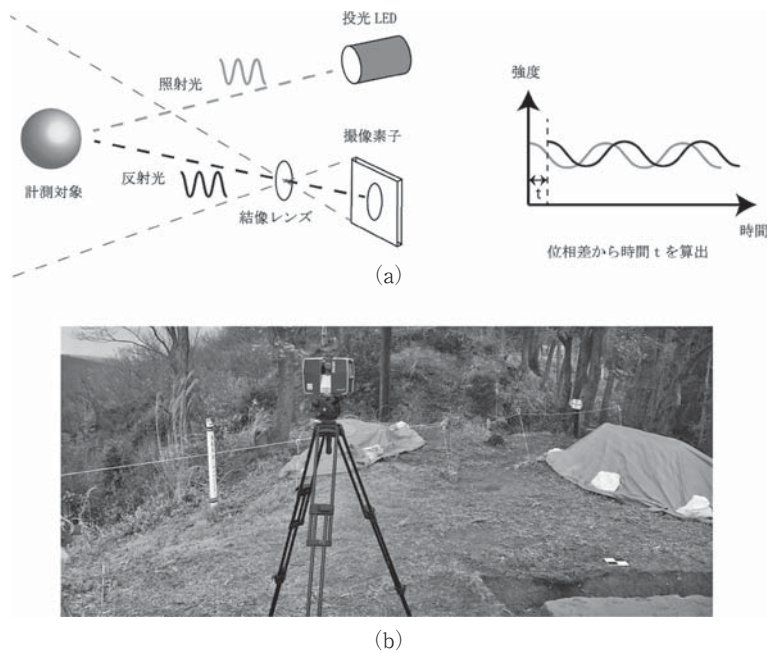


図5 利用したレーザー計測装置

ケールは不明である。スケールを確定するためには、計測対象に、スケールが既知のものを入れて撮影するか、標定点を入れる必要がある。標定点は、測量用 GPS を利用して、座標値を入れることが多い。

本稿では、Canon EOS 7D MarkII を利用して、位置情報の精度が低いが、座標値が分かるようにカメラに付随している GPS を利用し、調査区を 73 視点から撮影し、Agisoft 社 Photoscan Professional を利用して画像計測を行った。画像計測した結果を図 4 に示す。図 4 (a) は計測結果に撮影画像をテクスチャマッピングしたものであり、実際の形状は図 4 (b) である。次に、精度を比較するために、レーザー計測を用いた方法について述べる。

2.2. レーザ計測による調査区のデジタル化

上記で利用した画像計測は、基線長が未知の場合、スケールは不明であるが、レーザー計測装置を利用すればスケールがわかる。また、画像計測のように、対応する点を見つける必要がないため、表面上に特徴がない対象でも計測することが可能である。さらに、レーザー計測の精度は、画像計測の精度に比べて高い。本稿で利用したレーザー計測装置は、図 5 (a) に示すような TOF (Time of Flight) 方式を採用したものである。TOF 方式は、対象に光を照射し、反射して返ってくる時間差を利用するものである。光の速度は一定 (約 30 万 km/s) であるため、装置と対象との距離が、離れば離れるほど返ってくる時間が遅くなるため、その遅延時間を利用して計測するものである。本稿では、TOF 方式を採用したレーザー計測装置である Faro Focus 3D (図 5 (b)) を利用した。この装置は、1 秒間に 976,000 ポイントを計測することができ、計測範囲は 120 m であり、対象の材質にもよるが、計測誤差は 25 m 離れた場所で 2 mm 程度である。図 6

にレーザー計測装置を用いて調査区を計測した結果を示す。

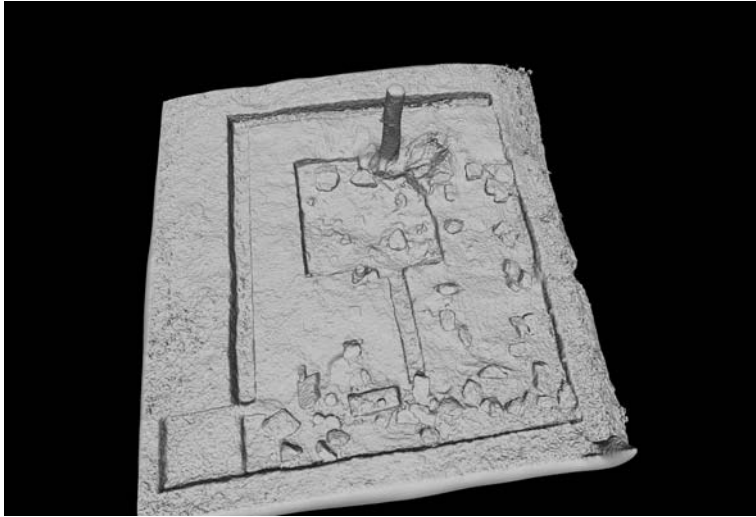


図6 調査区のレーザー計測結果

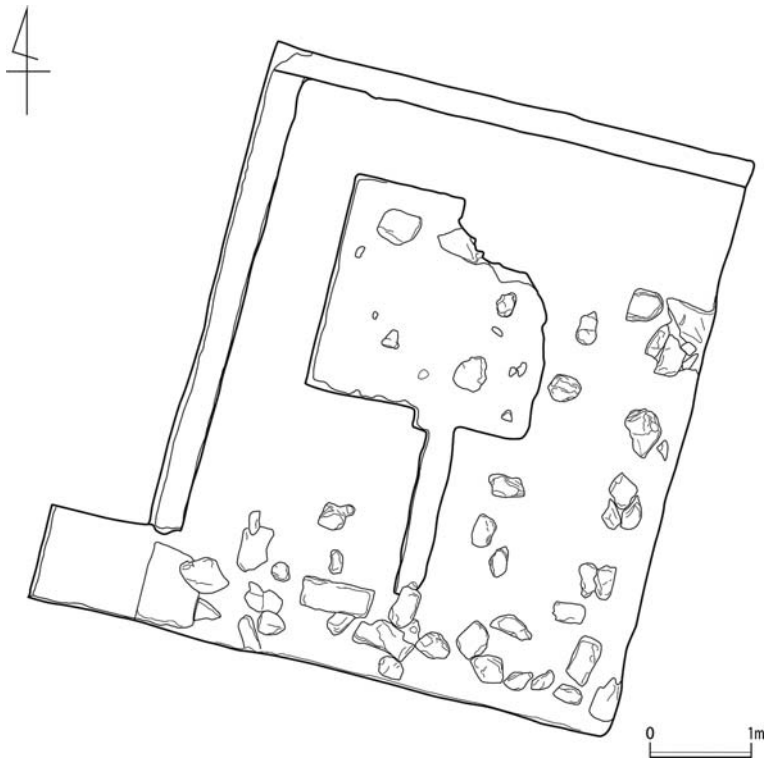


図7 調査区の平面図

2.3. レーザ計測と画像計測の精度比較

ここでは、レーザ計測装置の計測結果と画像計測結果の精度を比較する。図4(b)に示した画像計測結果と比べて、図6のレーザ計測結果のほうが、詳細に表面形状が記録されていることが確認できる。画像計測はスケールが不安定になるため、本稿では、レーザ計測装置の計測データと画像計測データから10箇所を抽出し、スケールを求めると、画像計測のスケールは、レーザ計測装置よりも3.5倍あることが分かった。この原因の1つは、カメラに付随しているGPSを利用したからであり、簡易なGPSを利用した場合、一般的に数十mの誤差が生じるが、画像計測で得られる結果は、おおむね相対的な位置は正しい。レーザ計測装置の計測データを真値と仮定し、画像計測の計測結果をスケール変換したのち、それぞれの計測結果から平均二乗誤差RMSEを求めたところ、0.0198mとなった。

2.4. 計測結果に基づく図面化

ここでは、3次元計測した結果を図面化する方法について述べる。一般的に、カメラのレンズは透視投影モデルであるため、奥行きによる歪みがあり、撮影した画像をそのまま図面化すると正確な図面が描けない。しかしながら、3次元計測したものを正射影モデルで逆投影することで、奥行き情報の歪みを軽減することができる。すなわち、同じ大きさの対象は、奥行きが異なっても、同じ大きさで投影される。計測結果をもとに、図面化したものを図7に示す。なお、ここではGPSの精度が低いため、座標値は入れていない。

IV. 椿井城のデジタルアーカイブの応用

1. 展示概要

ここでは、2016年11月20日に平群町教育委員会主催で行われた企画展「嶋左近と椿井城」で出展した内容について述べる。この企画展では、発掘調査で出土した遺物、発掘調査時の写真や縄張り図など、椿井城の関連資料に加えて、嶋左近が春日大社に奉納した灯籠の拓本などの関連資料も展示され、さらに、デジタルデータを活用し、地形データの3Dプリント出力、プロジェクタを用いた地形データのAR表示、HMD(ヘッドマウントディスプレイ)を用いた椿井城のAR表示の3つの展示を行った(図8)。以下に、それぞれの展示に関する詳細について述べる。

2. 地形データの3Dプリンタ出力

平群町教育委員会は、航空レーザ測量を利用して、図9(a)に示す椿井城跡がある矢田丘陵の地形を計測しており、ここでは、3Dプリンタを利用して、この地形データを印刷したものを展示した。印刷したものは白色であるため、斜光照明を用いることで、椿井城跡の曲輪の陰影を表現し、拡大鏡を使うことで詳細を確認できるようにした。

本稿で利用した3Dプリンタは、熱で溶解する樹脂を1層ずつ積層していく熱溶解積層方式のFLASHFORGE社 Dreamer である。この3Dプリンタの出力できる最大サイズは、225mm×

145 mm×140 mm であり、造形精度は 0.05 mm から 0.3 mm、使用できる樹脂は、主に ABS、PLA の 2 つである。PLA 樹脂は、ABS に比べて収縮せず、歪みが少ない反面、表面加工や塗装しにくいという特徴がある。ここでは、PLA 樹脂を用いて、積層間隔は 0.08 mm に設定し、約 1/6000 スケールで印刷した。印刷時間は約 20 時間であり、印刷した結果を図 9 (b) に示す。

3. プロジェクタを用いた地形データの AR 表示

図 9 (a) に示した地形データは、着色されていないため、図 10 (a) に示すように樅井城跡の縄張り図がわかるように着色した。カメラで図 10 (b) に示す AR マーカーを撮影することで、プロジェクタを通して、樅井城跡の地形データが表示されるようにした (図 10 (c))。なお、図 10 (c) は、利用者が見ているイメージ画像であり、実際には、利用者はプロジェクタで投影されたスクリーンを通して目の前に、地形データを見ることができる。プロジェクタを用いた AR 表示には、以下の環境を用いた。

- CPU : Intel Xeon X 5667 3.07 GHz
- OS : Windows 10 Pro 64 bit
- メモリ : 8 GB
- グラフィックスボード : NVIDIA Quadro K6000 12 GB
- カメラ : IMAGINGSOURCE (DFK 31 BU 03.H · USB 2.0)
- ゲームエンジン : Unity 5.3.4 f 1
- AR ライブラリ : NyARTool

このシステムの特徴は、利用者が AR マーカーを回転させることで、あらゆる角度で地形データを観測できる点である。次に述べる HMD は、1 人で観測するものであるが、プロジェクタを利用したものは、多人数で観測できるものである。

4. HMD を用いた樅井城の AR 表示

図 9 (a) に示した地形データから南郭部分のみを抽出し、平成 27 年度の南第 1 郭の発掘調査に基づき、検出された石列の位置情報をもとに、礎石とその上にあつたと推測される柱や土塁などを CG により部分的に復元を行った (図 11)。HMD を用いた樅井城跡の AR 表示には、以下の環境を用いた。

- CPU : Intel Core i 7-6700 K 4.00 GHz
- OS : Windows 10 Pro 64 bit
- メモリ : 32.0 GB
- グラフィックスボード : NVIDIA GeForce GTX 1080
- HMD : Oculus DK 2
- 2 眼カメラ : Orvision Pro
- ゲームエンジン : Unity 5.3.4 f 1
- AR ライブラリ : Orvision SDK.V 2

このシステムの特徴は、2 眼カメラ (Orvision Pro) を付けた HMD を利用することで、映像を

通して、図 12 (a) の AR マーカー上に、図 11 で示した南第 1 郭を復元した CG を図 12 (b) のように、利用者に立体映像を表示させる点である。なお、図 12 (b) は、利用者が見ているイメージ画像であり、実際には、利用者は HMD を通して、目の前に復元した南第 1 郭を見ることができる。

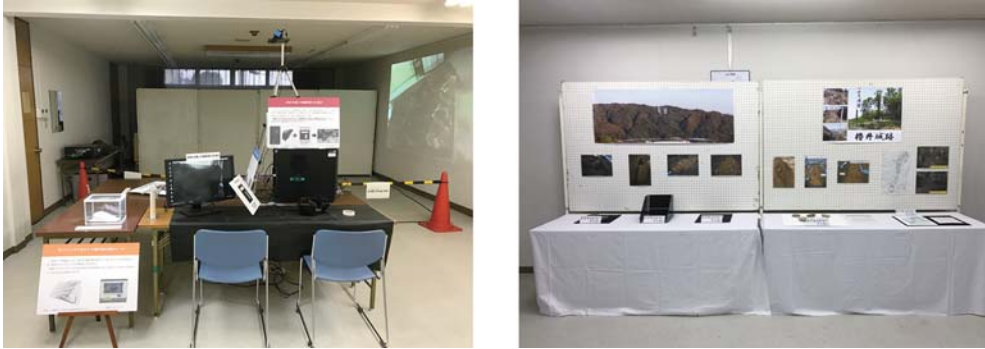


図 8 企画展示の様子

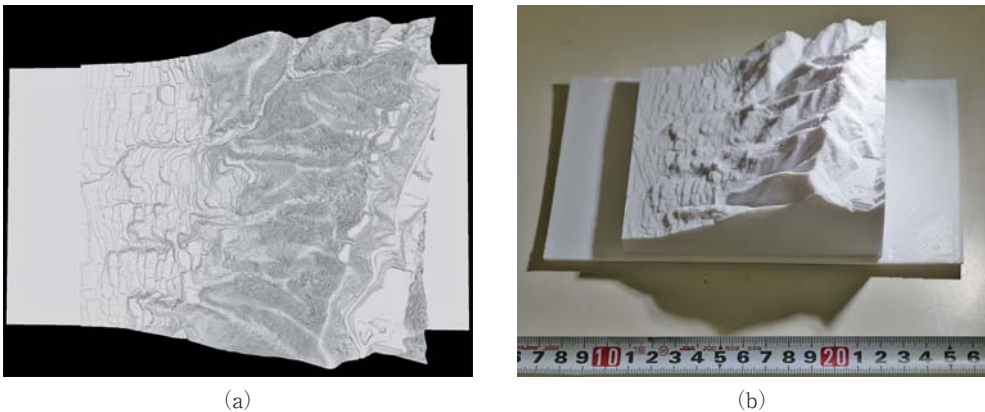


図 9 地形データと 3D プリンタの出力結果



図 10 プロジェクタを用いた地形データの AR 表示

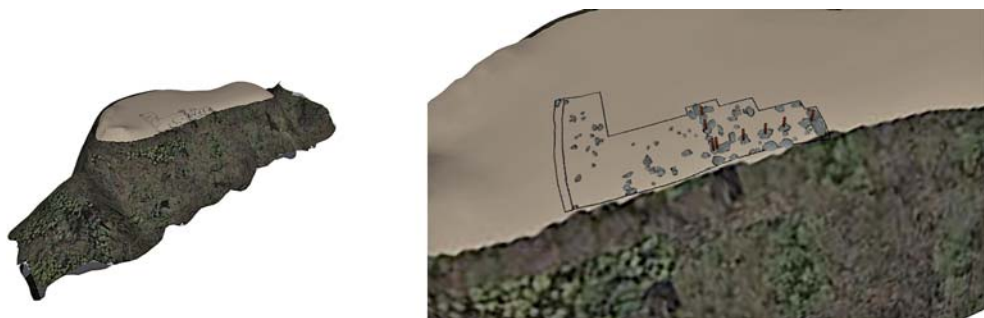


図 11 南第 1 郭遺構の CG 再現

平群町教育委員会



奈良大学社会学部
総合社会学科



(a)

(b)

図 12 HMD を用いた南第 1 郭の AR 表示結果

V. おわりに

本稿では、平群町にある椿井城のデジタルアーカイブ方法と、デジタルデータの活用事例として、AR 技術を用いた展示システムについて述べた。平成 28 年 11 月に行われた企画展示では、幅広い年代の来館者が展示システムを体験し、おおむね好評であった。

発掘調査区のデジタル化については、画像計測、および TOF 方式のレーザ計測により、3次元計測を行い、両者の精度比較を行った。画像計測は、約 0.02 m の精度で全体形状を捉えられていることを確認したが、個々の礎石の形状に対しては精度が低いことが分かった。発掘調査区の南郭は、比較的、空が開けているため、GPS やドローンを用いた計測方法でも可能であるが、土橋や堀切などは広範囲にわたるので、今回利用した固定式の TOF 方式のレーザ計測は非常に時間がかかる。このため、現在、移動しながら計測できるレーザ計測方式を考案している。また、併せて地上からの画像計測も有効的であるため、画像計測を用いた山城の効率的な計測方法についても検討する。

AR 技術を用いた展示システムについては、平成 28 年度の展示では、礎石などを含めて、作成した CG データを使っていたため、今回の発掘調査のデータを用いて、椿井城南郭の復元について取り組む予定である。

注

- 1) 春井浩和、AR アプリを使用した姫路城の新たな展示、2015 年画像電子学会第 43 回年次大会、T 1-5、2015.
- 2) 平井聖、日本城郭大系第 10 巻、新人物往来社、pp.331-332、1980.
- 3) 平群町教育委員会、平群町遺跡分布調査概報、pp.20-21、1989.
- 4) 東京大学史料編纂所、石田三成の腹心 嶋左近の（直筆？）書状発見、https://www.hi.u-tokyo.ac.jp/news/2016/event_20160704.pdf、2016.（2017 年 7 月 31 日参照）.
- 5) 葛本隆将、あすのす企画展、平成 28 年度 椿井城跡発掘調査速報展、会期：平成 29 年 3 月 2 日～3 月 30 日.
- 6) 葛本隆将、椿井城跡、「大和を掘る 35 - 2016 年度発掘調査速報展 -」、奈良県立橿原考古学研究所附属博物館、p.29、2017.

Summary

Many mountain castles that were built from the 15th century to the 16th century remain in Nara. Tsubai Castle in Heguri-cho is one of them. The building has already disappeared, but the moat and the areas enclosed by earthen walls still remain. However, not many of them have been restored or protected yet. Therefore, there is an urgent need to digitize them because they are at risk of being lost. This paper describes the result of digitizing the excavated castle using two methods, and the exhibition held in Heguri-cho.

Regarding the digitization of the excavated castle, one method measured the castle using a 3 D scanning device based on the Time of Flight (TOF) technique, and the other measured the castle using sequential images acquired from a camera. The method of using the 3 D scanning device has very high accuracy, while it takes a good amount of time to measure. Meanwhile, the method of using a camera is less accurate than the 3 D scanning device, while it takes almost no time.

Regarding the exhibition, three exhibits were on display. The first exhibit displayed the topography of the mountain with the castle printed by a 3 D printer. This topography used data measured by airborne laser measurement. The second exhibit displayed the topography of the mountain using a projector, a camera, and AR (Augmented Reality) techniques, and the focal point of this exhibit was a combination of the topography data and live-action images in real time for visitors. The third exhibit displayed a partial restoration of the castle using two cameras, HMD (Head Mounted Display), and AR techniques. The focal point of this exhibit was a stereoscopic combination of the restored castle and live-action images in real time for visitors with HMD.

[Key words] 3 D Laser measurement, Image measurement, Augmented Reality