

写真測量とレーザスキャナにもとづいた文化財の過去 と現在の視覚的照合

バルバル神殿を事例として

安室喜弘^{*,**} 森 直紀^{**} 廣瀬 詢^{***} 藤里和樹^{***} 高橋里緒^{**} 檀 寛成^{**}
肥後時尙^{*,****} 末森 薫^{*} 吹田 浩^{*,*****} サルマン・アルマハーリ^{*,*****}

Visualization of the Temporal Changes in a Documented Cultural Heritage Based on Photogrammetry and Laser Scanning: Case Study of Barbar Temple

Yoshihiro YASUMURO^{*,**} Naoki MORI^{**} Makoto HIROSE^{***}
Kazuki FUJISATO^{***} Rio TAKAHASHI^{**} Hiroshige DAN^{**} Tokihisa HIGO^{*,****}
Kaoru SUEMORI^{*} Hiroshi SUITA^{*,*****} Salman Almahari^{*,*****}

1 はじめに

1.1 背景

関西大学の国際文化財・文化研究センターでは、海外にて複数の文化財を対象に文化財の保全・修復に関する研究を文理連携体制で進めている。エジプトでのプロジェクトでは、発掘・調査が過去に実施されているイドゥートのマスタバにおいて、構造物が全面的に露出した状態で、一部は復元や補強が完了し一般にも公開されている。筆者らは、写真測量とレーザ測量を用いた非接触な3次元計測技術により、壁画やレリーフなどの精細な性状も含めた文化財の形状計測を実施し、文化財の保全・修復の作業および研究の進展に応じた情報共有の仕組みを提案し実装を進めてきた。一方、バーレーンでのプロジェクトにおける調査対象の1つであるバルバル神殿は、現在までに発掘作業は終了しているものの、神殿の大部分が埋め戻された状態で保全・修復作業が続けられている。そのため、現在埋没している多くの構造をふくめて、神殿の過去の発掘調査や、その

後の調査・修復記録と現状とを明示的に結び付け、過去からの変容を把握しながら保全・修復作業を行っていく必要がある。しかし、3次元データを用いた文化財の調査分析やその公開方法に関する研究は数多くの実施例があるものの、文化財の継続的な維持・管理の支援となるような情報技術に関する研究例は少ない。

1.2 目的

本稿で対象とするバルバル神殿は、バーレーン王国バルバル村に位置する遺跡であり、1954年にP. V. Glovにより発見され、デンマークの調査隊により1954年と1961年に組織的な発掘調査 [Andersen and Højlund 2003] が行われた。このバルバル神殿はバーレーン最大の神殿であり、建造時代が異なる3つの神殿が同一の場所に重なるように建設されている。最初の神殿は紀元前3000年紀に建造されたものと考えられており、元の神殿の上に約500年後に2番目の神殿が建造され、さらにその後3番目の神殿が建造されたとされる。ディルムン文化に属するこの神殿

* 関西大学国際文化財・文化研究センター (Center for the Global Study of Cultural Heritage and Culture, Japan)

** 関西大学環境都市工学部 (Faculty of Environmental and Civil Engineering, Kansai University, Japan)

*** 関西大学大学院理工学研究科 (Graduate School of Science and Engineering, Kansai University, Japan)

**** 関西大学大学院文学研究科 (Graduate School of Letters, Kansai University, Japan)

***** 関西大学文学部 (Faculty of Letters, Kansai University, Japan)

***** バーレーン王国文化・文化財局 (Bahrain Authority of Culture and Antiquities, Bahrain)

は、知恵と水の神エンキに捧げられ、湧き水は礼拝者のための精神的重要性を持っていたと考えられる文化財である。この遺跡はユネスコ世界遺産の暫定リストに登録されているが、デンマーク隊の調査のほか、バーレーン当局による再調査も行われた後、調査の度に神殿は保全のために埋め戻され、現在では一部が露出した状態で公開されている。その過程では、部分的な修復や補強が施されているほか、移動・紛失した石材も確認され、過去の調査記録と現状が大幅に変化している箇所も散見される。写真や測量データを豊富に含んだ調査記録と比べても、現状との照合が困難な場合がある。今後、遺跡の調査の進展、維持・管理、復元、補修、バーレーン当局が目指す世界遺産登録のためには、調査記録の履歴を明確にして、現状を把握し、今後の所作に結びつけることが重要となっている。このような点を踏まえ、発掘と保全のために埋め戻しが繰り返し行われる現場において、過去のデータに遡って照合しながら変容の把握ができるような情報の一元化を支援する。

1.3 文化財への3次元計測データの活用

近年では、文化財保全修復プロジェクトに3次元計測データを用いることで、文化財の現状を克明に記録し、劣化や破損が生じた場合にも修復に活用することができる [岡本他 2002]。アメリカの非営利団体CyArk¹⁾は3次元レーザスキャンや写真測量を用いて、世界各地で200か所もの遺跡を記録している。アメリカのスミソニアン博物館²⁾や池内らによるバイヨン寺院の3次元デジタルアーカイブ [池内・

大石 2010] などのように、保全修復だけでなく、3次元計測データが教育や研究で活用されている。これらのシステムはプロジェクトの成果報告や、その情報公開を想定したものが多く。一方、本プロジェクトのように、調査が進行中の文化財において、過去からの調査を踏まえながら、調査結果を比較・更新を進めていく上では、必ずしも効果的な活用方法が確立されているわけではない。

また、AR (Augmented Reality: 拡張現実) と呼ばれる技術の利用が普及している。ARは現実世界に関連づけて付加情報を重ねて表示し、視覚的に情報を強化する映像提示技術で、文化財においても対象となる物体に視覚的な情報を提供するサービスが展開されている。Fig. 1に示すように、レノボ・ジャパンは、GoogleのAR技術Tangoを用いて、京都にある国宝の建築物、二条城・二の丸御殿の内部をキャラクターがガイドするARツアー用アプリケーション³⁾を提供している。特定のスポットにカメラをかざすと、カメラ内にキャラクターが表れ、スポットの解説や関連する映像をデバイス上に表示してくれる。キャラクターがスポットを解説してくれることで、利用者は楽しみながら、文化財についての歴史について学ぶことができる。また、文化財を対象とした学術研究にもARは利用されている。松下らは、エジプトのイドウートのマスタバ墓を対象に文化財の保全修復プロジェクトにおける異分野・異文化間での連携を現場において支援することを目的としたARインタフェースを提案した [松下他 2015]。このインタフェースは、カメラで撮影された画像内の自然特徴を用いたマーカレスARの手法を



Fig. 1 二条城二の丸御殿 (左) にARを用いたサービスの例 (右) : ユーザの携帯端末の実写像の中で人気漫画の登場キャラクターが建物内を案内してくれる

1) CyArk : <http://www.cyark.org/>

2) Smithsonian X 3D : <http://3d.si.edu/>

3) ONE PIECE「京都 麦わら道中記? もう一つのワノ国? ロビン&フランキー 二条城歴史ARツアー」: https://sp.shonenjump.com/j/op-20th-anniv/kyoto/char_07.html

適用し、実際の現場で新しい情報の作成や追加を可能にした。このように、文化財を対象にした情報のデジタル化に伴って、ユーザインタフェースとしてのARによる情報の可視化サービスは今後も拡大していくものと考えられる。

2 方法論

2.1 概要

ここでは、Fig. 2に示すように、写真測量にもとづくSfM (Structure from Motion) 技術とレーザスキャナを用いた記録手法に基づいて、時間を隔てた文化財の視覚的な情報を精緻に重畳表示することで、変容を確認するための支援を図る。現場の現状をデジタル化する作業としては、写真測量により写実的に3次元復元したものに、レーザ計測で取得した対象の実寸を与える。実寸に合わせた3次元復元結果に過去の記録写真の撮影視点を計算により重ね合わせることで、視覚的に様態の一致または不一致を確認できるようにする。技術的には、過去の写真を撮影した視点を推定し、現状の文化財の像を生成する際の視点を、その撮影視点に一致させることで実現する。これにより、発掘と保全のために埋め戻しが繰り返し行われる現場において、変容の履歴作成を支援する。

2.2 写真測量とレーザ測量による3次元形状の記録

多視点で撮影された複数の画像において共通して写った同一の点について、三角測量の原理を適用することより3次元座標を得ることができる [Hartley and Zisserman 2000]。近年、カメラを移動させながら撮影して得られる画像群から、画像に捉えたシー

ンの3次元形状と各画像の撮影位置を同時に復元する技術として、SfM [Tomasi and Kanade 1992] が普及している。この技術は、カメラ撮影による非接触な3次元計測であり、異なるカメラで撮影された写真も併用できるので、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) による空撮画像による広範囲の3次元形状の復元に加え、UAVが撮影しづらい部分を手持ちカメラによる写真で補完することもできる。SfMは、原理的には対象物の実寸を復元することができないため、通常、スケールが分かるマーカや、水準点などのGCP (Ground Control Point) を写しこんだ画像を複数含めることにより、実寸や測地座標系を与えることができる。ここでは、同じシーンをレーザスキャナで計測したデータに対して、スケールと位置合わせを実施することで、SfMに実寸を与える。

2.3 カメラの視点推定

過去の測量図面のようにオルソ画像となっているデータについては、平行投影による写像であるため、投影面さえ規定できれば、投影面上での平行移動と回転移動の調整によって重ね合わせが可能である。特に平面図であれば、方角と測地点があれば、自ずと過去の測量データと現在の写実的な様相との重ね合わせが可能である。

一方、通常のカメラ撮影による写真記録では、透視投影による結像で画像が生成されている。これは、ピンホールカメラモデルで表現され、Fig. 3に示すように、撮影面上の一点からカメラの焦点を通る視線は、3次元空間で直線を描き、被写体上で対応する点に到達する。1つの画像にとらえられた複数の点において、この関係が同時に成立することを制約とすると実世界のカメラの撮影位置と向きが一意に

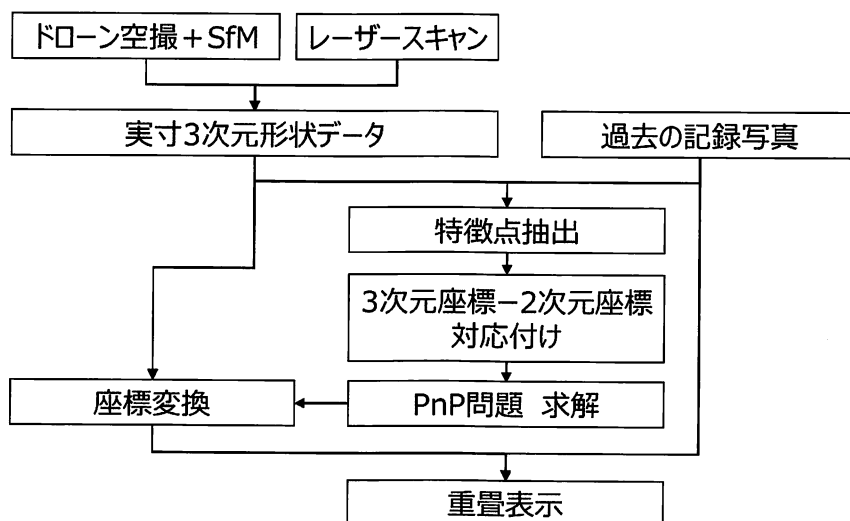


Fig. 2 提案手法の処理の流れ

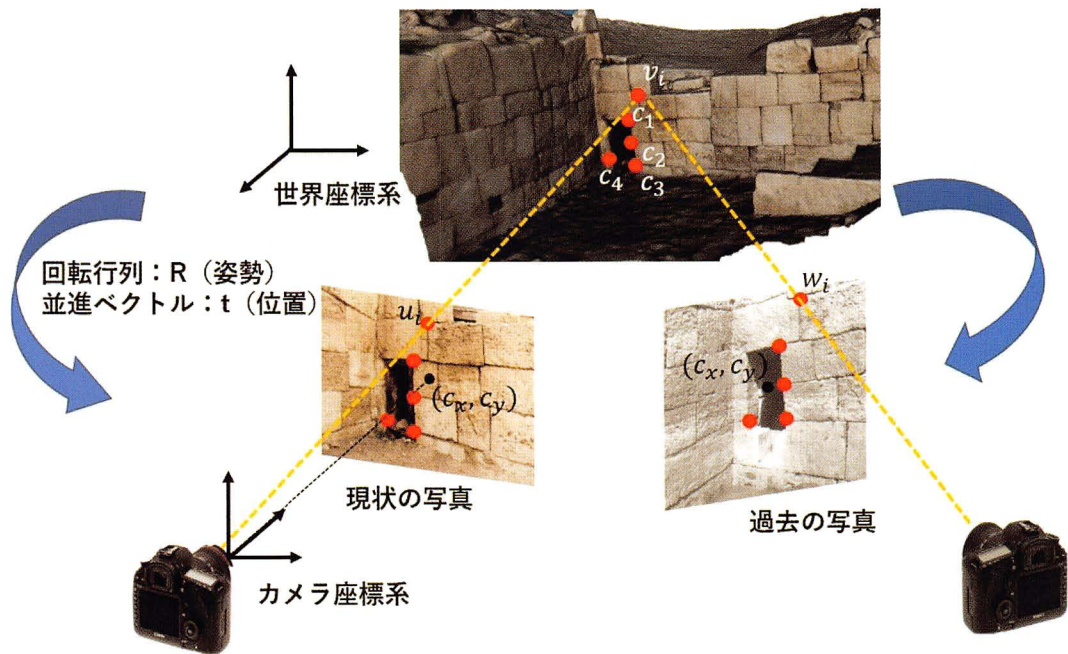


Fig. 3 カメラと実世界の関係と提案する過去のカメラの関係：
現在と過去で不変な特徴点を選択し、過去のカメラの撮影位置と姿勢を求める

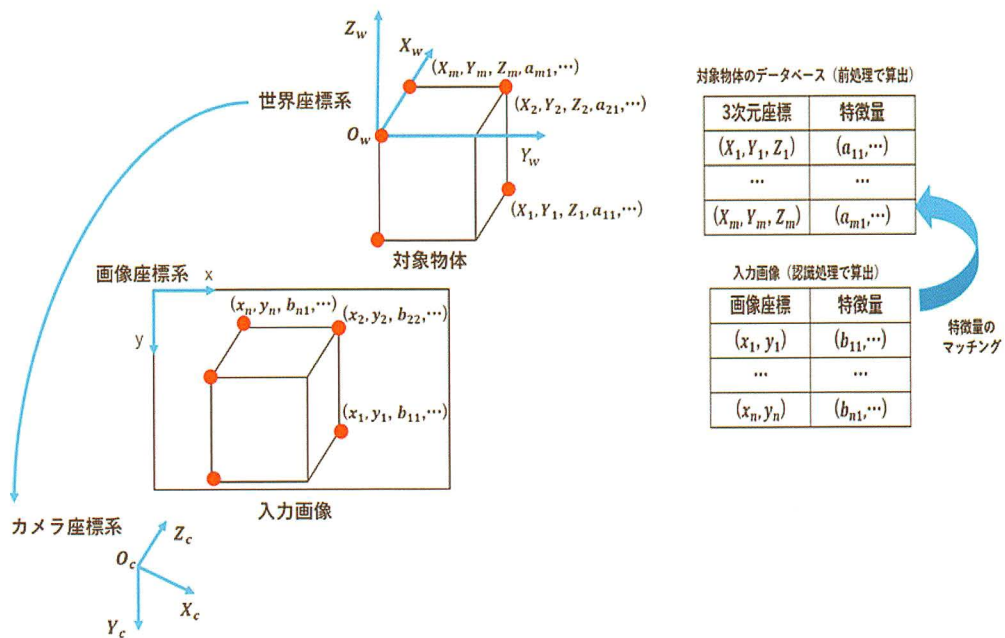


Fig. 4 自然特徴ベースのカメラの位置姿勢推定の仕組み：
データベース上の特徴量と新たに撮影したカメラの特徴量とで対応付けを行う

求めることができる。この問題はカメラの位置と姿勢（外部パラメータ）を推定する問題として定式化され、PnP (Perspective-n-Point) 問題と呼ばれる [Hartley and Zisserman 2000]。マーカレス AR を実現するための重要な手法の 1 つである。マーカレス AR は物体の自然特徴点を用いて PnP 問題を解決し、カメラの位置・姿勢を推定するもので、特定の

マーカの敷設を必要としない AR アプリケーションが可能となる。Fig. 4 に示すように、画像内の対象物体の自然特徴点 (Fig. 4 中の赤点) とその実世界での座標を予め対応付けて登録しておき、入力画像から検出した特徴量と登録された自然特徴量とを対応付けることで、PnP 問題を定式化し、入力画像を撮影したカメラの位置・姿勢を算出することが可能

4) OpenCV: <http://opencv.org/>

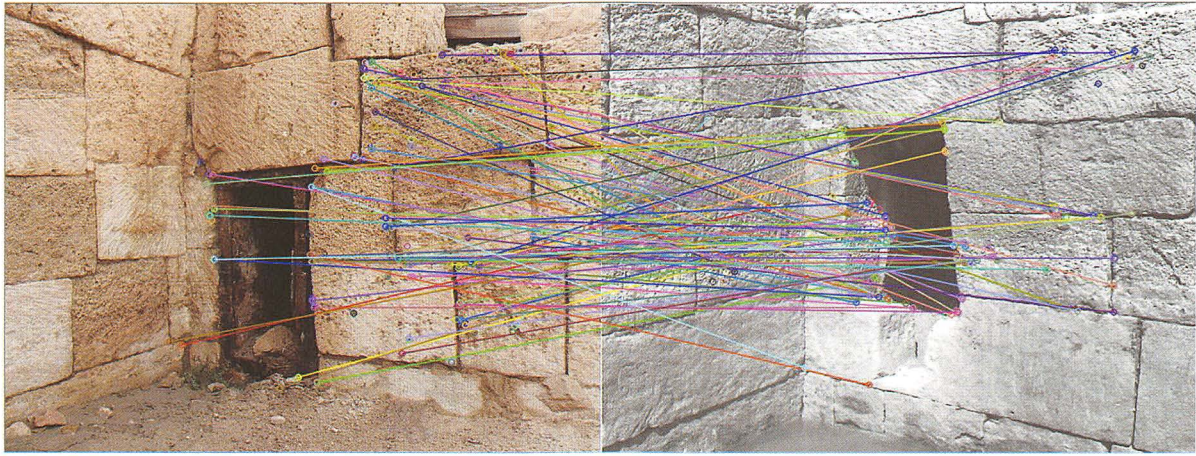


Fig. 5 60年を隔てた現状と過去での画像特徴マッチング処理の例：
目視では同じ個所に見えても、画像処理で抽出される自然特徴では自動的な対応づけが難しいものが多い

である [松下他 2015]。オープンソースの画像処理ライブラリ OpenCV⁴⁾ には、SIFT や SURF、ORB といった画像の自然特徴を検出するアルゴリズムが数多く実装されており [藤吉・安倍 2011]、その多くが無償で利用できる。しかし、Fig. 5 に示すように、今回の場合、年数を隔てた過去の記録写真と現状の写真とでは、被写体および画像の性状が異なるため、抽出した特徴量による自動的な対応付けが正しく機能しない。したがって、本稿では手動で過去の写真と実世界での現状の 3 次元形状特徴の対応付けを行い、PnP 問題を求解する方針を取る。

2.4 時期の異なる記録写真の重畳

PnP 問題を求解し得られたカメラの外部パラメータを現状の 3 次元形状の観察視点として適用することで、過去の記録写真の撮影位置と姿勢を現在に再現する。視点が整合した 3 次元形状に過去の記録写真を重ね合わせることで、過去の記録写真と同視点で現状との変容を確認することが可能になる。過去と現状の視覚的に重ねて違いを可視化する方法として、過去の写真もしくは現状の 3 次元形状のどちらかを透過させて表示することが考えられる。しかし、全体を透過してしまうと双方の状態が見える代わりに、双方の色が混ざること、形や模様などの特徴的な部分も目立たなくなってしまう。そこで、ユーザが画像の内容を認識しやすくし、変容の確認作業の支援となるように、重畳する写真内の輪郭などの画像特徴抽出をおこなう。視覚的な特徴のみを抽出して、色相を変えて強調表示することで、透過表示により色が混ざっても認識しやすく、ユーザは視覚的な変容を容易に視認することが可能になる。

3 実測と実装

3.1 全域に対する過去の測量図面と現状との比較

(1) 全域に対する写真測量

2016年11月に行われたバルバル神殿での実地計測では、主に UAV (DJI 社製 Phantom 2) にデジタルカメラ (Go Pro 製 HERO 4、1200万画素、30fps) を搭載して空中からの動画撮影 (Fig. 6) を行ったほか、地上ではデジタル一眼カメラ (Sony 製 Nex 5、6000×4000画素) による写真撮影を行った。UAV は安定して比較的低い高度で撮影ができ、約 6 分程度の撮影を数回実施し、一度の撮影で記録される動画から 1000 程度のフレームを画像として抽出することにより、各画像で重複部分を十分に含む画像列が得られる。450 枚の画像 (Fig. 7 に一部を示す) を選択し、PhotoScan Professional (Agisoft 社製) を用いて SfM を実施した。PC (Windows 8、Intel Core i7 - 3770、3.4GHz dual、32GB RAM) により約 20 時間の処理を経て、309 万頂点、616 万ポリゴンの 3 次元

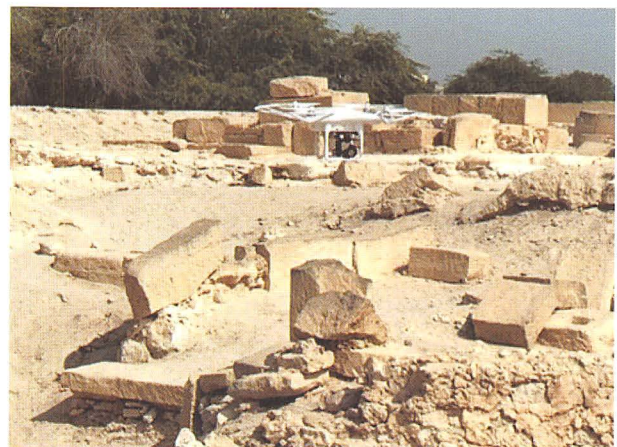


Fig. 6 UAV による撮影の様子：比較的低空から低速に移動しながら網羅的な撮影を試みた。

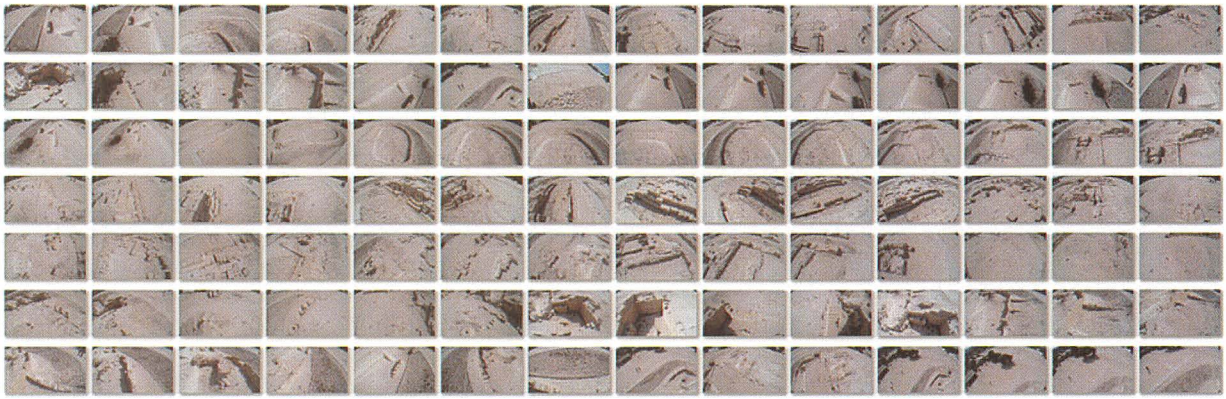


Fig.7 空撮により得られた写真の例：UAVによる空撮動画より抽出フレーム画像450枚を得た

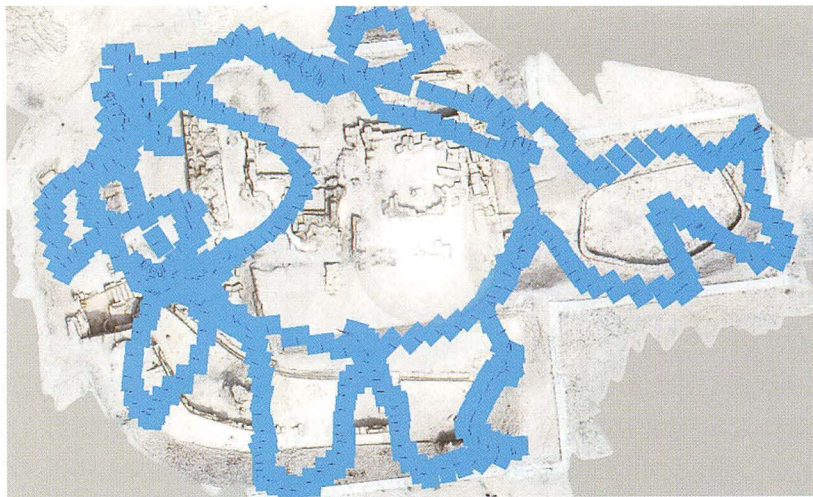


Fig.8 空撮の際のUAVの飛行軌道：SfMによるカメラ撮影位置の推定結果による

データを得ることができた。Fig. 8では、SfMで復元されたバルバル神殿の全体像と、空中での撮影位置を示している。

(2) 全域に対するレーザスキャン

2017年3月に、バルバル神殿の遺跡全体にわたり、レーザスキャナによる計測を実施した。レーザスキャナはレーザの照射による能動的な計測原理による測量であるため、計測密度を設定でき、直接実寸データが得られる。しかし、およそ東西70m、南北60mほどの敷地内で、複雑な形状の遺構をすべて計測するためには多くのスキャン回数を必要とする。時間的な制約のもとで、データの取り残しを防ぐために、スキャナの設置位置の配置を最適化した計測計画を準備した [檀 2016]。この方法では、計測対象となる構造物の外形を示す3次元モデルが必要となる。今回は、2016年11月の調査で実施したUAVによる空撮画像を用いたの結果を用いた。Fig. 9に示すように、メッシュ数を約5000程度にして簡略し (Fig.9 (左))、

その頂点をスキャナ設置の候補位置とした (Fig.9 (右) の黄点)。なお、計測対象としてデータの取得漏れを避けたい箇所を指定し (Fig.9 (右) の赤色部分)、この部分を網羅するためのスキャン回数とその最適な配置を求めた。その結果、Fig.10に示す20か所から計測するという計画となった。この計画にしたがってスキャンを実施し、Fig.11に示すように全体を網羅した色付きの3次元点群データを得た。

(3) 測量図面の重畳比較

Andersenら [Andersen and Højlund 2003] による測量結果 (Fig. 12) に当該SfMの結果を重畳したものをFig. 13に示す。SfMの処理そのものでは、原理的には絶対的なスケールや座標を得られないため、一般的に測地基準点にマークを設置するなどして写真情報に取り込んでおき、3次元復元後に実寸に合わせたスケールや測地座標への変換が行われる。今回は、レーザスキャナによる点群データと形状マッチングによる統合処理することによりSfMデータに実寸を与え

5) CloudCompare : <http://www.danielgm.net/cc/>

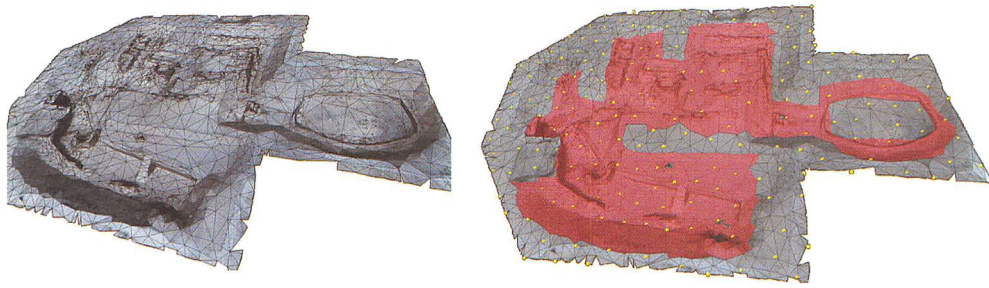


Fig. 9 Barbar 神殿におけるスキャナ設置計画の最適化に用いた3次元モデル
(左：メッシュ数を削減した3次元モデル、右：スキャナ設置の候補位置)

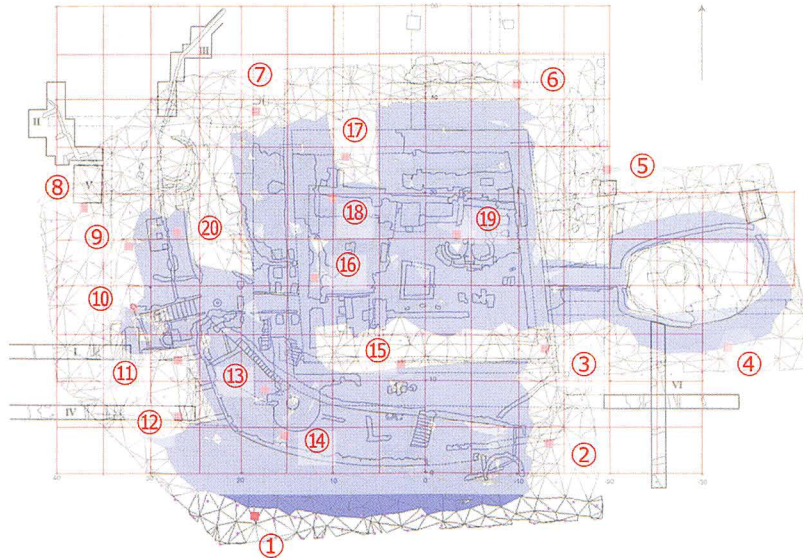


Fig. 10 最適化計算によって得られたスキャナ設置地点 (①～⑳)

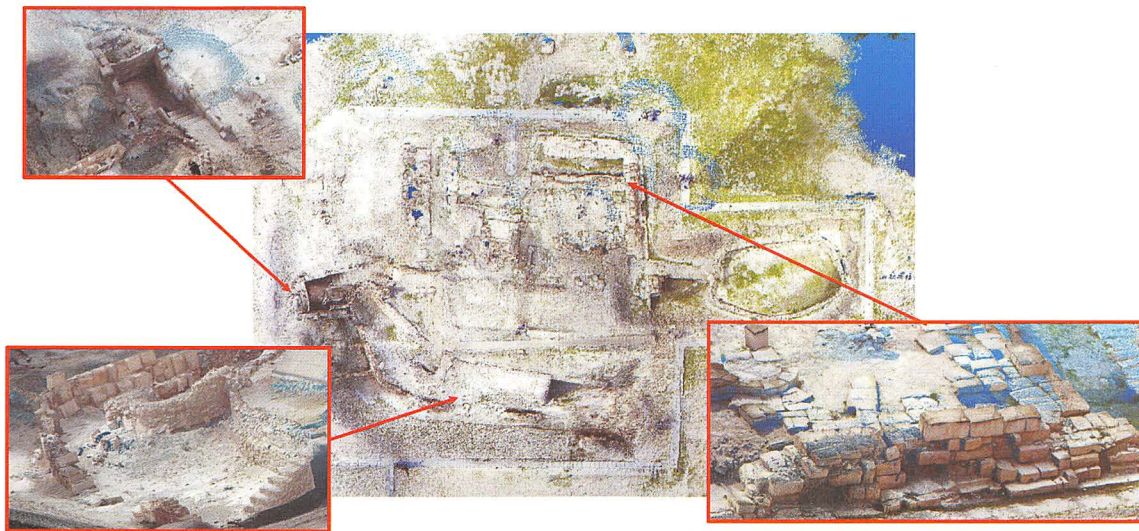


Fig. 11 遺跡全体を網羅した色付きの3次元点群データ

た。この処理にはフリーソフトである CloudCompare⁵⁾を使用した。これを平行投影によるCGレンダリングでオルソ画像を生成し、Andersenらによる測量結果に合わせて、手動で位置合わせを行った。結果として、両者は整合しており、Andersenらの調査当時と現状

とでは、大局的に大きな違いは見られないものと考えられる。SfMの結果としても系統的な大局的な誤差はなく、対象地域を俯瞰して把握する上での3次元マップとしての利用価値が期待できる。

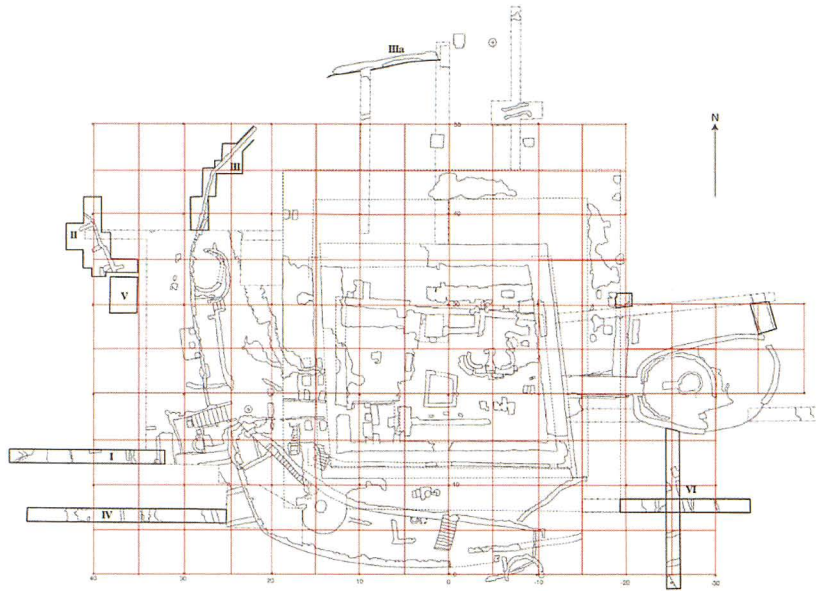


Fig. 12 Barbar 神殿の測量図：Andersen ら [Andersen and Højlund 2003] による測量結果にグリッドを挿入する加工を施した

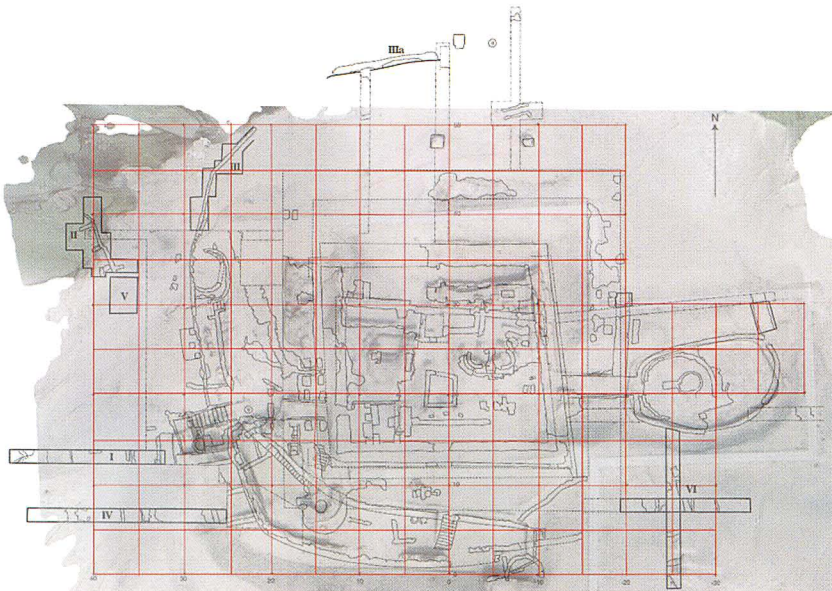


Fig. 13 Barbar 神殿の測量図に空撮による SfM の結果から得られたオルソ画像を重畳した様子

3.2 局所領域に対する写真記録における経時変化の可視化

(1) 対象箇所の詳細な 3 次元データの取得

今回は、バルバル神殿内の水源とされた場所（水槽）を対象とし、本手法を適用した。2017年3月に行われた実地調査で UAV (DJI 社製 Phantom 4 Pro) に搭載されたデジタルカメラ（解像度：5472×3078画素）と照合調査用に使用したデジタルカメラ（Canon 社製 EOS Kiss x7i, 解像度：5184×3456画素）で撮影された画像49枚を選択し、PhotoScan Professional (Agisoft 社製) を用いて SfM を実施し、対象とする空間の 3 次元形状の復元を行った。PC (Windows10, Intel Core i7 -6950X, 3.00GHz dual,

128GB RAM) により (Fig. 7) により、約100万頂点、約 2 万ポリゴンの 3 次元形状を復元した (Fig. 14, Fig. 15)。SfM の実施において、今回は写真撮影の際にスケールの分かるマーカを設置していないため、同じ場所をレーザスキャナで計測して得た 3 次元点群データと統合することにより、実寸に合わせる。スキャンデータには、2017年12月にレーザスキャナ Focus 3D X330 (FARO 社製) を使用して実測したものをを使用した。

スキャナでの計測においては、3 次元データの取り残しを防ぎ、かつ効率的に進められるように、遺構全体のスキャンと同様にスキャナの最適な配置計画を実施した。2017年3月の調査で取得した SfM の



Fig. 14 3次元復元に使用した画像



Fig. 15 画像から復元した3次元形状

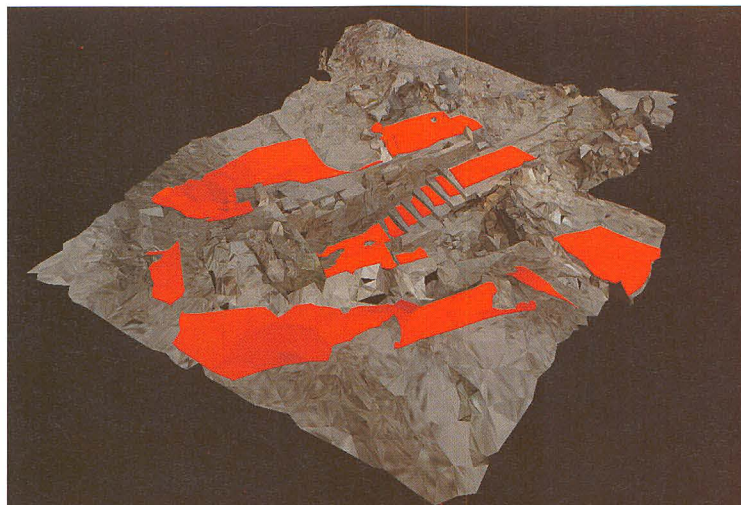


Fig. 16 最適化計画に用いた3次元モデル：赤い部分がスキャナが配置できる場所を示す

結果を用いて対象箇所的外形モデルを用意した。Fig. 16のように、足場としてスキャナを配置できる箇所のメッシュを手動で作成し、その頂点をスキャナ設置候補点とした。元の3次元メッシュを網羅的に計

測すべき対象として最適化問題を解き、最適なスキャナ設置位置として11か所が算出された (Fig.17 (左) の赤点)。現地での実測においては、この計画により指定されたスキャナ設置位置を特定するため

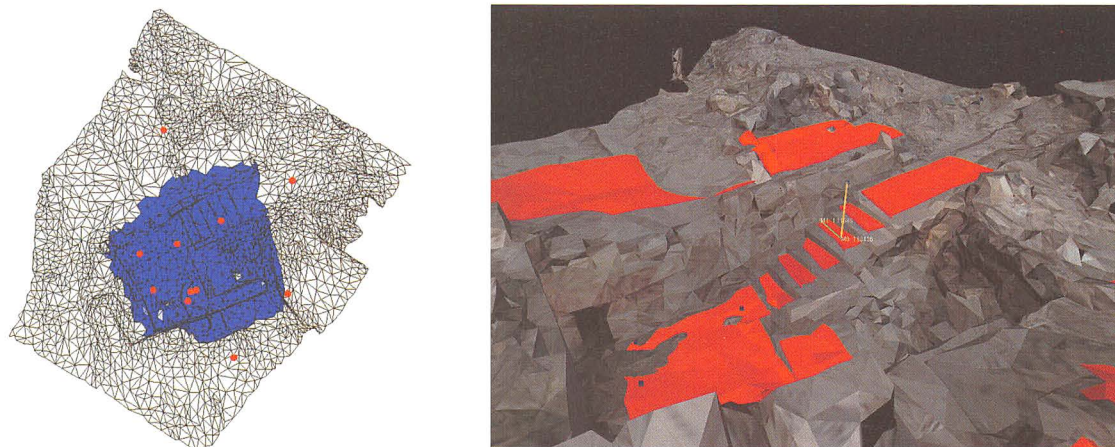


Fig. 17 最適化されたスキャナ設置計画の平面図 (左) と物差しツールによるスキャナ設置位置の確認の様子 (右)



Fig. 18 レーザスキャナの計測結果



Fig. 19 実地でのレーザスキャナでの計測の様子

に、周辺の壁や角などの特徴的な部分から距離をデータ上で確認しておき、現場でも同様の寸法を測ってスキャナを位置決めした。以上のように、対象空間のスキャンデータを網羅的に取得した。11ヶ所での計測で取得したスキャンデータに対して、点群データ処理ソフトウェア SCENE (FARO 社製) を用いて統合処理を行い、Fig. 18に示すような対象空間の詳細な 3次元データを得た。Fig. 19はレーザスキャナを用いた現場での計測の様子である。Fig. 20に示すように、スキャンで得られた点群を参照データ (reference) とし、SfM による 3次元形状データが一致するように、移動・回転・スケールの変換パラメータを求める。以上の処理により、複数の写真から SfM と 3次元レーザスキャナを用いて、スケールを実寸に合わせた 3次元形状データを取得した。

(2) カメラの内部パラメータ

過去の写真撮影視点を PnP 問題として推定するためには、当時使用されたカメラの内部パラメータを用いる必要があるが、当時のカメラ機材についての情報は不明である。2017年3月の調査で過去の記録との照合時に使用したカメラ (Canon 社製 EOS Kiss x7i) で代用し、焦点距離を調整することで対応した。内部パラメータの推定処理には Zhang [Zhang 2000] の方法を用いる。この方法は、OpenCV のライブラリとして実装されたものが利用可能であり、C++ の開発環境で実行した。内部パラメータ推定に必要な重要なパラメータの1つであるレンズの焦点距離は、照合時に使用したカメラの焦点距離である 18mm を用いた。キャリブレーション用のチェッカーボードの 1マスの大きさは 20mm、内側のコーナ

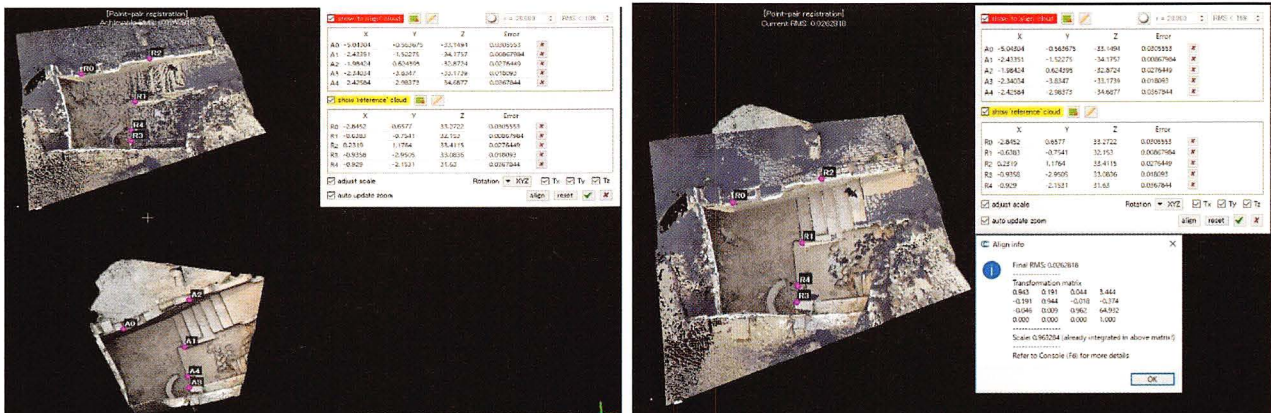


Fig. 20 レーザスキャン点群と SfM で復元した 3次元形状データのスケール合わせ：スキャンデータと SfM データで類似する箇所を 5つ選択する (左) ことで、結合し実寸を取得した (右)

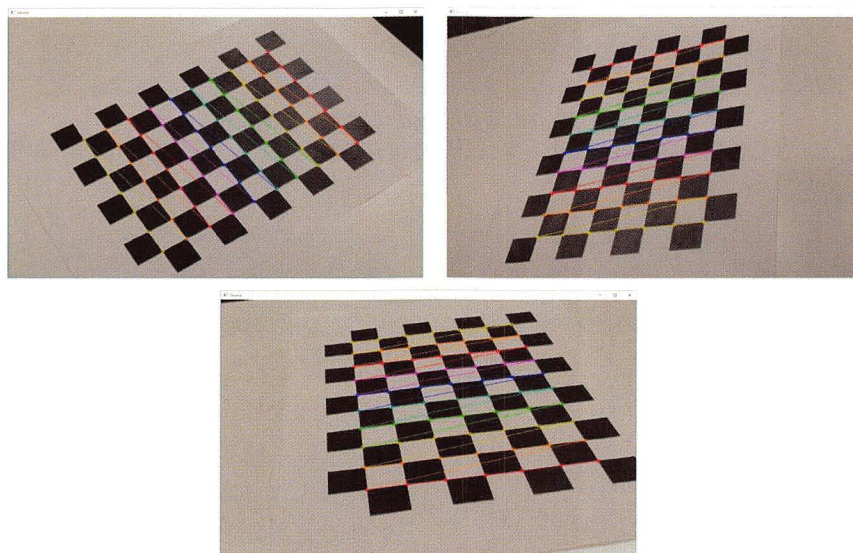


Fig. 21 カメラキャリブレーションの実行結果：すべてのコーナーが正しく検出された場合は内部で定義された 9色で描画される

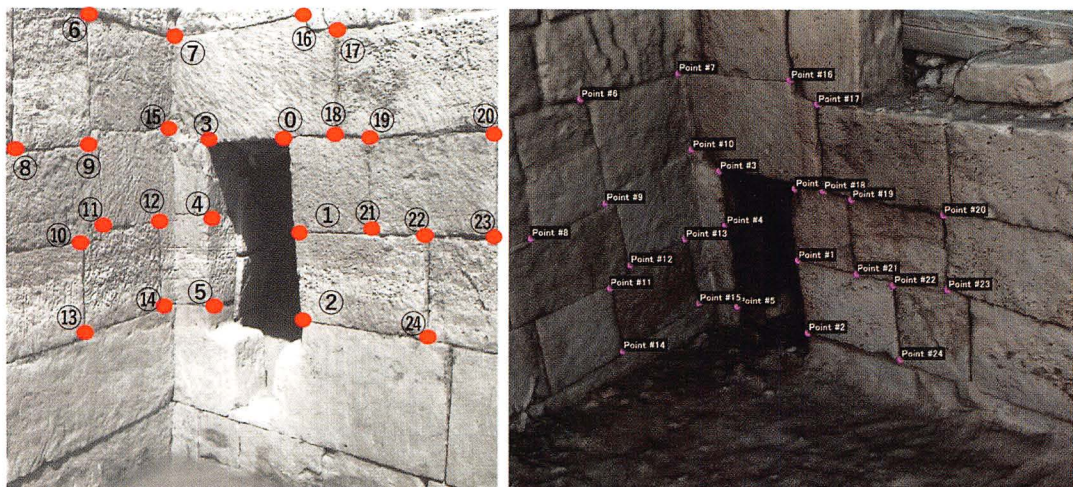


Fig. 22 2次元座標と3次元座標の対応付け
過去の記録写真（左）とSfMで復元した現状の3次元形状（右）とで不変な点を25個選択した。

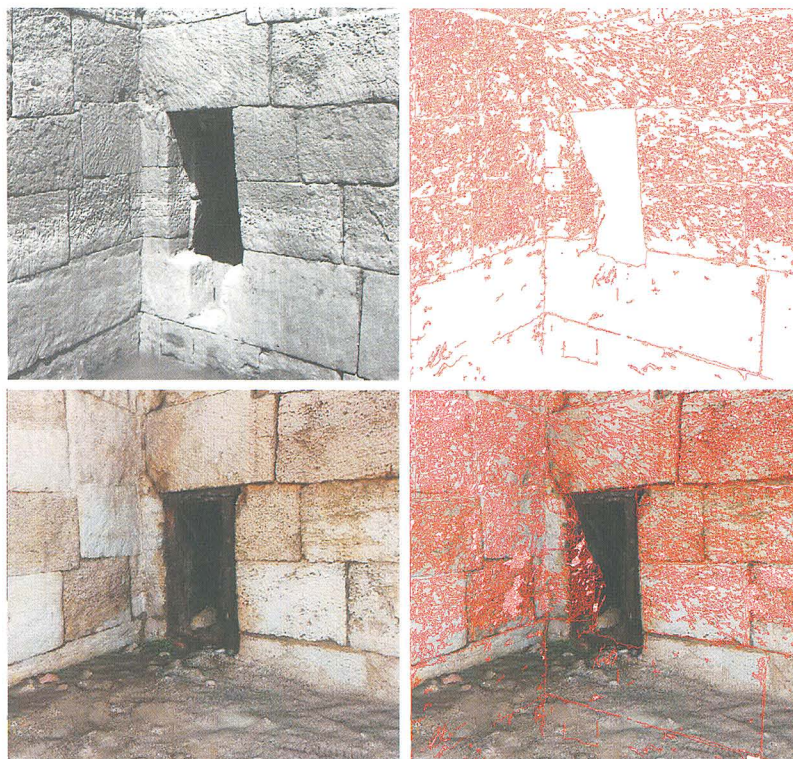


Fig. 23 過去の写真を現状に重畳した結果例：
過去の記録写真（左上）から抽出した特徴（右上）を、SfMで復元した現状の3次元形状（左下）に重畳した結果（右下）

一数を縦が7、横が10のものを利用した。焦点距離を18mmに固定したカメラで、チェッカーボード全体が映り込むように、位置と姿勢を変えながら撮影した画像20枚を用いてカメラの内部パラメータを推定した。Fig. 21は、カメラキャリブレーションの実行画面である。

(3) カメラの外部パラメータ（視点位置）の推定
カメラの外部パラメータの推定には、カメラの内

部パラメータと画像の2次元座標と物体の3次元形状の対応が必要である。カメラの内部パラメータは、(2)で推定した結果を使用した。次に、2次元座標と3次元座標の対応付けについて述べる。2.4で述べたように、過去の写真と現在の写真では、自然特徴量で正しく対応付けを行うことができないため、手動で2次元と3次元の座標対応をとった。Fig. 22は、過去の記録写真と現状の3次元形状から、手動で選択した対応点を示したものである。過去の画像

と現状の3次元復元データを見比べて、石材の角や石垣のかみ合いなどの特徴的な箇所から、現在に残っている特徴点を25個選択した。過去の画像からの2次元座標の取得には標準的なレタッチソフトを用い、3次元形状データからの3次元点座標の取得には、CloudCompareのマウスピーッキング機能を用いた。以上のように、取得したカメラの内部パラメータと、2次元と3次元の座標対応からOpenCV内のPnP問題の解法実装であるsolvePnP関数を用いて、カメラの外部パラメータを求解した。

(4) 過去と現状との変容の可視化

CGによる過去と現状の可視化の表示には、コンピュータグラフィックスAPI(Application Programming Interface)であるOpenGLを用いてC++でプログラムを作成して実施した。(3)で取得したカメラの外部パラメータをOpenGLのライブラリにより視点と注視点を適用することで、過去の撮影位置から見たCGとして現状の3次元モデルを再現することができた。これにより、視線方向と注視点の関係は正しく再現できたが、過去の写真と現状の再現像とでは表示される範囲に違いが生じた。これは、PnP問題の求解に用いた内部パラメータの画角(焦点距離)を暫定的に18mmとしてPnP問題を処理したためであり、3次元モデルのCG表示における画角を調整することで、過去の写真と現状の3次元モデルとが一致するような重畳表示が可能となった。

次に、現状との比較をするうえで指標となるような、石材の輪郭や石組みの線や、表面の凹凸を反映した視覚的にも視認できるような特徴を、過去の記録写真から抽出した。OpenCVに実装されているCannyによるエッジフィルタを用い、任意の連続的な線状の画像特徴を抽出した。抽出された特徴の輝度が高い部分を残して強調色に変換し、それ以外の部分を透過させた画像をPhotoShop(Adobe製)で作成した(Fig. 23(右上))。この画像を、過去の写真と入れ替えて3次元形状に重ね合わせることで、Fig. 23(右下)に示すように、文化財の過去と現在の状態を同一画面上で照合できるデータとなった。これにより、当該の写真部分においては、大きな石材の欠損や、石組みのひずみなどは認められないことが分かったが、一部、取水口とされていた矩形の窓枠の形状に変容が確認できるほか、埋め戻された土中の石材部分を仮想的に透過して見ることで、地表に出ている部分との位置関係も確認できる。

4 おわりに

本稿では、文化財の調査記録の履歴を遡って現状との変容を確認する必要性に注目し、現状を3次元化したデータを過去の写真記録に重畳表示することにより、変容の確認作業を支援するシステムを提案した。

UAVとデジタルカメラで撮影した画像からSfMを用いて復元した3次元データとレーザスキャナによる3次元点群データから現状の詳細な立体データを取得し、過去の記録写真の2次元座標値との対応を利用して、撮影が行われたカメラの位置を推定し、3次元復元された現在の状況に過去の写真を重畳することを可能にした。今後、より多くの個所について適用し、遺跡全体での過去の記録との照合作業での運用を図るとともに、重畳表示する特徴抽出については、特徴の種類や注目箇所などについてユーザに自由に設定できるように自由度のあるユーザインタフェースを設計することが課題として挙げられる。また、本システムによる検証結果を蓄積し共有するために、文化財の維持管理を目的とした3次元デジタルアーカイブの実装についても検討を進めている。

謝辞

現地調査において協力を賜ったバーレーン王国文化・文化財局の協力に謝意を表す。また、本研究の一部は独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金(15H02983、15K02977)の助成による。

参考文献

- Andersen, H. H. and F. Højlund 2003. *The Barbaric Temples*, Moesgaard.
- Hartley, R. and A. Zisserman 2000. *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, New York.
- Tomasi, C. and T. Kanade 1992. "Shape and Motion from Image Streams under Orthography: a Factorization Method," *Int'l. J. Computer Vision* 9 (2), 137-154.
- Zhang, Z. 2000. "A Flexible New Technique for Camera Calibration," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22 (11), 1330-1334.
- 池内克史、大石岳史 2010『3次元デジタルアーカイブ』、東京大学出版会。
- 岡本篤志、牧野隆夫、長島茂、上野恵士 2002「文化

- 財の保全修復における三次元デジタルアーカイブの可能性」、『情処研報』107、39-45。
- 檀寛成 2016『ピラミッドの最適計測プランの作成』、オペレーションズ・リサーチ学会。
- 藤吉弘亘、安倍満 2011「局所勾配特徴抽出技術 - sift 以降のアプローチ -」、『精密工学会誌』77、1109-1116。
- 松下亮介、肥後時尚、吹田浩、安室喜弘 2015「考古学プロジェクトにおける 3D デジタルアーカイブのための AR インタフェース」、『第20回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集』、pp. 259 - 262。

Abstract

As part of the conservation and restoration work undertaken by the Center for the Global Study of Cultural Heritage and Culture (CHC) in Kansai University, the authors have developed systematic solutions to introduce information and communications technology (ICT) for on-site work. This paper explores a technique for visualizing the changes over time of the cultural heritages. In many cases, modern survey records conducted by different teams in different ages have a history at the same cultural heritage site. These survey and/or conservation records are published to be shared in public; however, it is not easy to compare the recorded information and the current conditions. In the same manner, the number of transitions in the history of survey results cannot be precisely united and compared to manage the cultural property over the generations. Survey drawings are typical quantitative data, whereas qualitative information relies on hand-written line drawings and photos obtained from numerous studies conducted on cultural property and archeological surveys. Even though 3-dimensional surveys for recording the details of the shapes of the sites and relics by photometric surveys and/or laser-scanning techniques have become available recently, decades-old past records of monochrome photos are hardly utilized for quantitative or qualitative examination of identical historical objects. This report addresses the abovementioned problem by proposing a method to utilize a photometric technique to integrate newly taken current photos and the old photos from past surveys in identical 3-dimensional space. We demonstrate photo-realistic computer graphics (CG) rendering of the current situation overlaid onto old photos that were taken 60 years ago from the actual archeological site of the Barbar Temple in Bahrain.