

文化財の三次元記録とその活用

山口欧志

I はじめに

三次元記録はこの20年ほどで大きく一般化した。以前は専用の高価な機器が必要だったが、今では多くの人が手にする携帯型電子端末で三次元形状と色を記録できるようになった。しかも専門的な知識や機器の高度な理解は不要だ。はじめてスマートフォンにふれるような人でもできる。さらには電子計算機の飛躍的な機能向上と高速通信網の実現により、インターネット上に公開されたものであれば誰でもどこにいても文化財のデジタルデータを操作できるようになった。

そのような時代の三次元記録と活用について、これまでの取組を整理しながら現状の課題や今後の可能性を検討したい。近年のICTの急速な進展は今後一層加速する傾向があり、2020年代にも大きな変化が訪れるだろうが、文化財の三次元記録とその活用の課題はすでに90年以上の歴史があるので、とても簡略なものではあるが現時点での見取り図を得ておくことはまったくの無駄にはならないだろう。

II 文化財の三次元計測小史

文化財を立体のまま記録し表現したい。そう考えたのは新しい話ではない。日本考古学の礎を築いた濱田耕作は1930年に「所詮三「ダイメンション」を有する品物は、矢張り三「ダイメンション」のものを以ってしなければ、其の眞の性質を傳へることは困難である」と記した（濱田1930）。日本考古学の黎明期にすでに三次元記録への問題意識があったことが窺える。

濱田の指摘から24年後の1954年、文化財保護委員会は、東京大学生産技術研究所丸安研究室と国土地理院の協力を得て航空写真測量を実施し、平城宮跡調査を目的とした1/1000の地形図を作成した。この取組が日本における文化財の三次元計測の端緒といえるだろう。翌1955年、奈良文化財研究所は飛鳥地方の発掘調査のため、遺跡の大縮尺図の作成を目的とした航空写真測量による飛鳥地方の地形図を作成し、以降平城京の1/1000の地形図の作成へと展開した（牛川1964）。

地上写真測量は、1959年の丸安らによる鎌倉大仏の地上写真測量が、日本における初の



図1 奈良文化財研究所が導入した解析図化機
(平城宮跡資料館で展示されている)

文化財写真測量事例である(丸安1960)。奈良文化財研究所も写真測量用の機器や図化機(図1)を購入して本格的に地上写真測量を文化財調査に導入し、1963年以降、発掘調査によって検出した遺構や古墳、庭園、石垣、埴輪、石造物、石器、仏像、美術工芸品、建造物、グスクなど、様々な文化財への応用が進んだ(坪井ほか1969)。

2000年代に入ると、トータルステーションやRTK-GNSSの普及が進むとともに、調査記録の効率化を主眼としたデジタル写真計測の導入が始まった(金田ほか2007)。そして2000年代後半には固定式の三次元レーザースキャナーが導入され(金田ほか2010)、2010年代前半に廉価な三次元計測を実現するSfM-MVSを様々な文化財の三次元記録に応用(山口2016)、続く2000年代後半にはLiDARによる広範囲の迅速な計測を実現した(金田ほか2018)。そして現在、日本の地方自治体や大学・研究機関による文化財の三次元計測の導入は急速に進んでおり、一定程度普及したといえる。

なお、「記録」とは広辞苑によれば「のちのちに伝える必要から、事実を書きするすこと」とあり、「計測」とは「種々の器械を使って、長さ・重さ・容積などをはかること」とある。記録は残し伝えること、計測ははかることに重きをおいている。文化財を対象とするなら記録は目的であり、計測は目的を達成するための方法といえる。目的と方法を混同してはならない。ICTなどの急速な進展により、様々な分野で日々新たな方法が発案され実用化されている。したがって、それらの新たな情報も収集し、文化財調査への応用開発を通じて、より廉価で簡便な質の高い三次元記録の方法の実現を図る必要があるだろう。

III 三次元計測の道具と技術

1 文化財の三次元計測における「精度」の整理

三次元計測に使う道具と支える技術にふれる前に、文化財の三次元計測を考える上で重要な用語「精度」について整理したい。一般に文化財における三次元計測の「精度」は、日本の国家規格である日本工業規格(JIS)「計測用語: JIS Z 8103: 2019」が「測定値と測

定対象量の真値との一致の度合い」と定義する「精確さ」(もしくは総合精度) (measurement accuracy) といえる。この「精確さ」とは、「真度」(「正確さ」とも) と「精密さ」を含めた測定対象量の真値との一致の度合いである。

したがって文化財における三次元計測の「精度」は、正確さ (accuracy) と精密さ (precision) に分けて考えることができる。正確さとは、「無限回の反復測定によって得られる測定値の平均と参照値との一致の度合い」であり、要するに真値からの一致の度合いである。他方、精密さとは、「指定された条件の下で、同じ又は類似の対象について、反復測定によって得られる指示値又は測定値の間の一致の度合い」であり、ばらつきの程度、再現性の度合いである。以降小論では、一般的な機器の仕様表記との整合性を図るため、真度 (正確さ) の意味で正確度を、精密さの意味で精密度を用いる。

文化財の三次元計測の場合、正確度と精密度以外にもう一つ重要な要素がある。それはデータの細かさの度合を示す解像度 (resolution) である。解像度とは、画像処理分野由来の用語で、一般に画像を表現する格子 (画素) の細かさの度合いを意味する。分解能ともいう。一画素 (pixel) の大きさが小さいほど解像度が高い。文化財を三次元計測するといつても、たとえば土器外面全体の形状と小型金属製装飾品の形状を捉るために必要なデータの細かさが異なるように、それぞれ目的に適した解像度のデータを得ることが求められる。この適切な解像度を検討するには、標本化定理が参考となる。

標本化定理は、画像処理などの分野において広く知られる、アナログ画像からデジタル画像への変換などで元の画像の再現に必要な指標である。標本化定理は、あるアナログ信号をデジタル信号に変換する時、元の信号に含まれる周波数成分の 2 倍より高い周波数でサンプリングすれば、元の信号を再現することができるというものである (図2)。これをふまえるなら、例えば形状のパターンを捉えるには、そのパターンの最低 2 倍以上の細かさ (解像度) で形状を記録する必要がある。

以上、文化財の三次元計測における「精度」を検討するには、「正確度」・「精密度」・「解像度」の 3 点の指標があることを提示し、それについて概略を述べた。これを図式化したものが図3である。一般に、文化財を計測する際の「精度」は、これらの指標を含めたものと指すことが多いので、文化財の計測方法の検討や妥当性を評価する際には十分に留意したい。

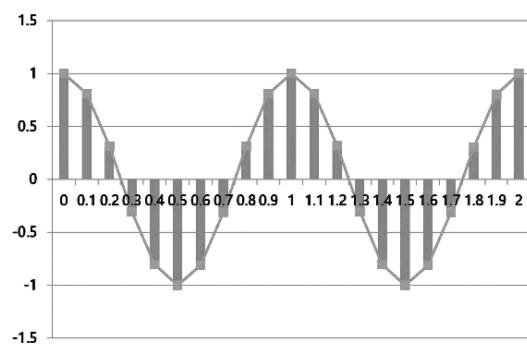


図2 信号 (波長) の標本化例

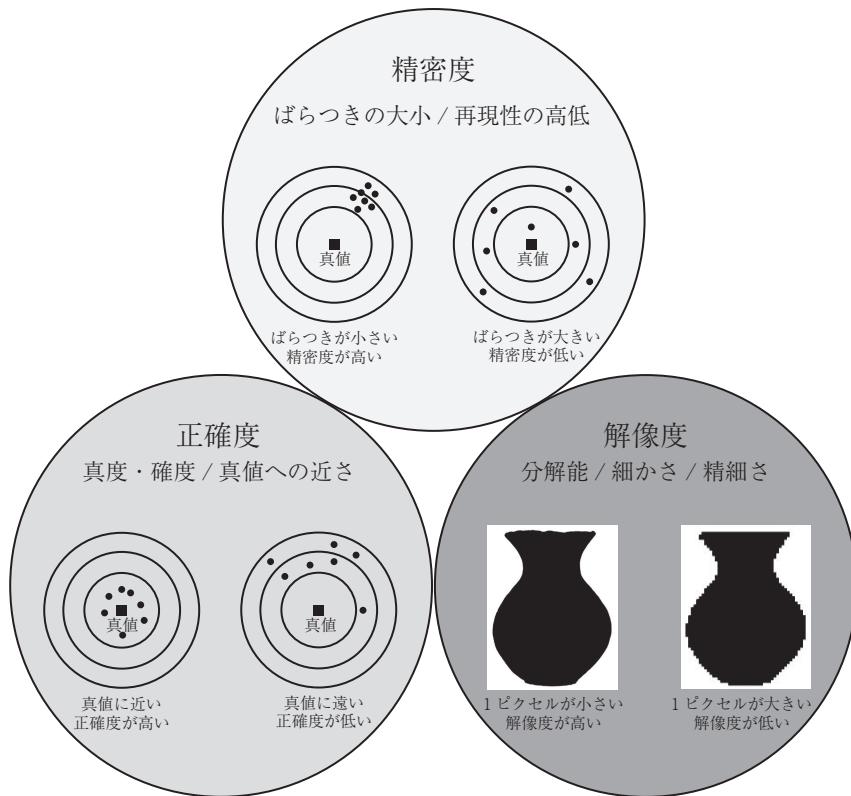


図3 文化財の三次元計測時の精度に関する3つの指標

2 三次元計測の道具と技術

・GNSS

GNSS (Global Navigation Satellite System／全球測位衛星システム) は、米国のGPS (Global Positioning System) や日本の準天頂衛星QZSS (Quasi-Zenith Satellite System／みちびき)、ヨーロッパのGalileo、ロシアのGLONASS、中国のBeiDouなどの測位衛星システムの総称である。

このGNSSを利用する測位の方法の1つにネットワーク型RTK (Real Time Kinematic)-GNSSがある。ネットワーク型RTK-GNSSとは、現場で取得する衛星データと、周辺の電子基準点等の観測データから得る補正情報を用いて、センチメートル級の測量を即時に行う方法である (国土地理院2013)。その特徴は、上空が開けている場所でありインターネットを利用できる環境下であれば、日本国内のほとんどの地域で1～2cm程度の精度で地球上の位置を短時間に計測できる点にある。

従来、初期導入コスト・運用コスト共に高価であったが、近年廉価なGNSS受信機が登場し初期導入費用が格段に下がるとともに、複数の民間の廉価な補正情報配信サービスが

開始したので維持運用費用も縮小した。その結果、初期導入費用は約8万円から、1か月当たりの運用費用は約4千円となり、ネットワーク型RTK-GNSSを用いた計測が一段と利用しやすくなった。構築したネットワーク型RTK-GNSSの具体的な構成は表1のとおりである。

この廉価なネットワーク型RTK-GNSSの計測精度や計測時間の計測試験を平城宮跡内の三級基準点を用いて国土地理院の「作業規程の準則」(国土交通省国土地理院2020)に則り実施した(図4)。その結果、基準点成果表の数値との違いは垂直方向で1~2cm程度¹であり、短時間にFIX解を得ることができることから、十分に実用的であると評価した(金田・山口2019、山口・岸田・金田2022)。

今回構築した仕組みは、文化財調査のための基準点の計測をはじめ、SfM-MVSで構築する三次元モデルに大きさや地球上の位置を与えるためのGCP(Grand Control Point)の計測、遺跡の地中レーダー探査機器の位置のリアルタイム取得やハンドヘルド型LiDARなどに使用している(図5・8)。その他には水中遺跡の調査等にも応用できるだろう。廉価で安定して精度の高い位置情報を取得でき、汎用性の高い道具といえる。

表1 ネットワーク型RTK-GNSSの構成

種別	製品名など
GNSSレシーバー	ビズステーション DG-PRO1RWS
小型軽量GNSSアンテナ	小峰無線 QZG12 fQ
モバイルバッテリー	cheero Power Plus 5 Stick 5000mAh
補正情報配信サービス	docomo IoT高精度GNSS位置情報サービス
インターネット回線	NifMo SMS対応SIM 3GB



図4 ネットワーク型RTK-GNSS



図5 地中レーダー探査機との連動



図6 LiDARとの連動

・三次元レーザースキャナー

三次元レーザースキャナーによる計測は図4に挙げた代表的な非接触式三次元計測手法の能動的手法を用いる。三次元レーザースキャナーによる計測は、設置方式や計測方式等によって様々な特徴をもつ手法がある。ここでは計測範囲が大きく異なる2種類の三次元レーザースキャナーを取りあげる。

まず広範囲を計測する三次元レーザースキャナーの一例として、FARO社Focus 3D S70を挙げる。この三次元レーザースキャナーは複数に変調させたレーザー光の位相差により対象物との距離を算出する光位相差方式の測定器であり、一般に光時間差（Time of Flight）方式の測定方法と比較して短時間に計測が可能である。

この三次元レーザースキャナーは三脚等を固定して使用する（図7）。その性能は機器の仕様上、1秒間に最大約97万点を計測し、その3次元位置精度はおよそ $\pm 2\text{ mm}$ である。計測範囲は最大距離70m、水平視野360度、垂直視野300度の範囲を一度に記録するこ

ができる。対象物の色は本体に内蔵するカメラで記録する。一回の計測時間は計測密度等に拠るが5分程度を目処に使用することが多い。機器からみて柱や樹木の裏側は死角となり計測できない。そこで欠落する部分は機器を移動させ計測する必要があり、平板測量同様に効率よく過不足無く計測できるよう計画する必要がある。

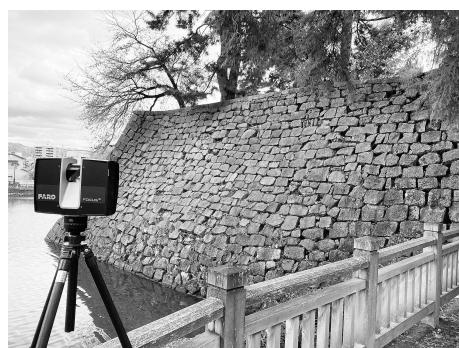


図7 広範囲用三次元レーザースキャナー

この機器の長所は、レーザー光を利用す

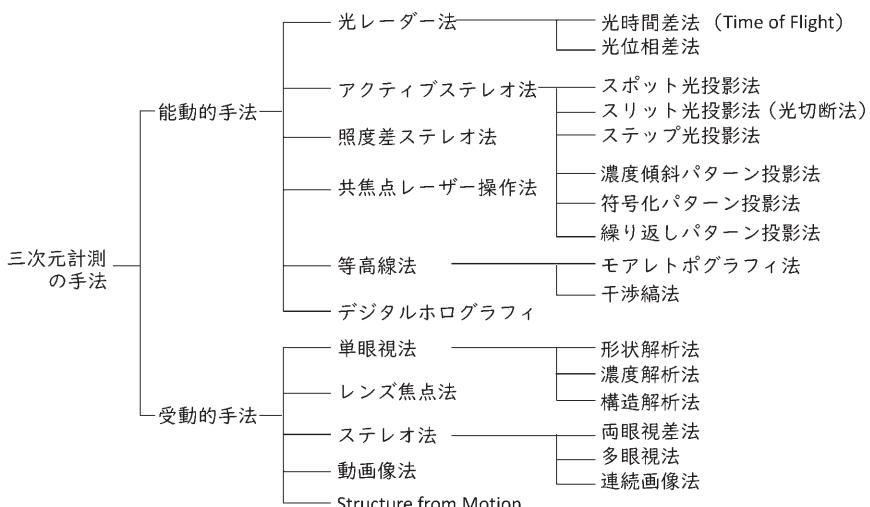


図8 代表的な非接触式三次元計測の手法（村上1996に追記して作成）

るため暗所でも形状を三次元計測できる点、一定の精度で計測できる点などを挙げることができる。またGNSSを内蔵するため、単独測位²ではあるが機器の地球上のおよその位置を記録することも可能である。

主な計測対象は、遺構や遺跡の発掘調査区、石室や洞窟遺跡、窯跡や石垣、近代建物といった建造物などがある。計測精度と計測密度を維持しつつ、より大規模な文化財を対象とする場合は、さらに長距離を計測できる三次元レーザースキャナーを利用する。遺物の三次元計測には近接計測型の三次元レーザースキャナーやSfM-MVSが対応する。また群集墳や大規模古墳など広範囲を短時間に三次元計測したい場合には2～3cmの精度で計測可能なハンドヘルド型LiDARなどを利用するほうが良い。

他方、遺物などの比較的小規模の対象を非常に高い正確度と精密度および解像度で計測するには、FARO社 8-Axis QuantumS ScanArm V 2といった近接計測型の高機能な三次元レーザースキャナーが有効である（図9）。この装置は接触式/非接触式の両方に対応する。非接触式の計測では、アクティブステレオ法のスリット光投影法（光切断法）を用いる（図8）。その性能はカタログ仕様上、正確度0.03mm、精密度0.03mmであり、実機の仕様は正確度0.015mm、精密度0.0123mmである。この機器の性能は2021年時点の市販機では世界最高クラスに相当する。図10のように縄文土器の縄目の計測や、出土錢の表面に残る調整などの僅かな痕跡を計測することも可能である。

またこの機器はとても質の高い計測データを取得できるので、他の計測方法との比較のための参照データ（reference data）を得る目的にも利用している。計測機器による仕様上の精度が無い三次元計測方法の精度評価をする際には、本機器を用いることにより参照データとの差を定量的に評価できる点で有効性は高い。非常に高価な機器のため多くの組織での導入は難しいが、同様の機器は各地の産業技術総合センター等が実施する有償貸し出しサービスを利用すれば使用が可能である。

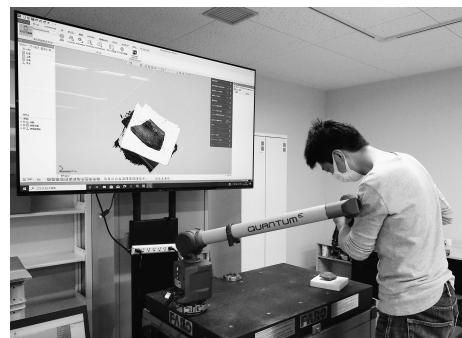


図9 アーム型三次元レーザースキャナー

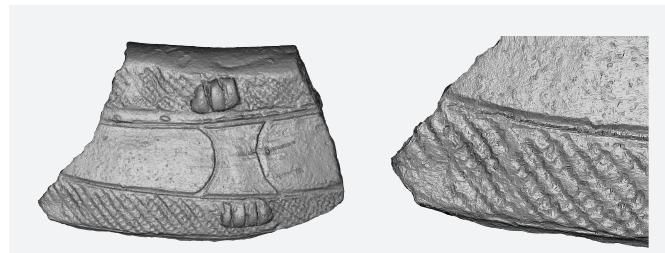


図10 縄文土器の三次元計測結果（左）とモデルの一部を拡大したもの（右）

・LiDAR

LiDARとは、Light Detection And Ranging（光検出と測距）またはLaser Imaging Detection and Ranging（レーザー画像検出と測距）の略称である。LiDARの開発は、1960年代に宇宙観測や気象観測、海洋の水深計測の分野で始まり、近年は機器の小型化やコンピューターの性能向上が進み、車輌やUAV（Unmanned aerial vehicle：無人航空機）への搭載が普及するなど、急速に進展している計測技術である（大政ほか2010）。

LiDARによる三次元計測は、レーザー光を機器から発射したレーザーが対象物にあたり機器に反射したレーザー光を利用して対象の三次元形状を計測する手法である。航空機に搭載して地形の測量を実施する航空LiDARや、自動車の自動航行支援などに使用されている。従来の三脚を据えて計測する固定式の三次元レーザースキャナーとLiDARの違いの原理的な違いはないが、LiDARは機器が移動しながら計測する点に特徴がある。そのため樹木下など見通しの利かない場所でも迅速に広範囲の計測ができる点に長所がある。またSfM-MVSと比較して解析にかかる時間を省力できる。他方、計測精度は一般的に固定式の三次元レーザースキャナーが2 mm程度に対してLiDARは2～3 cm程度である点に注意が必要である。

奈良文化財研究所ではハンドヘルド型LiDARの文化財調査への応用研究を進め、一定の調査成果を蓄積している（金田2018）。ハンドヘルド型LiDARの最も大きな特徴は、すでに国内外の多くの調査研究が導入している航空機に搭載したLiDARによる計測と比較して計測距離が近いので、より高密度に計測できる点にある。この機器は半径約100m、水平360度^oと垂直視野30^oの範囲を±約3 cmの精度で1秒間に約300,000点計測する（図11）。点群の地球上の位置は、LiDAR上部に取り付けたネットワーク型RTK-GNSSで取得するか、別途設けた地上基準点（GCP: Ground Control Point）を用いて算出する。なお、



図11 ハンドヘルド型LiDAR

この機器は色情報を取得できないが、近年登場した機器の中にはLiDAR計測時に色情報を取得可能なものもある。建造物群の規模やそれら形状の記録、群集墳や山岳信仰遺跡など広範囲の三次元計測に有効である。計測したデータのうち樹木など不要部分はコンピューター上で容易に削除することができ、任意間隔での等高線生成なども可能である。

LiDARは2020年代以降の低廉化と簡便化により導入がますます進んでいる。たとえばスマートフォンなどのモバイル端末に搭載された簡易LiDARによる計測は、すでに土木建設の現場で導入が進められており、

国土交通省による要領が公開されている（国土交通省2022）。ただし、土木建設の現場と文化財調査の現場では当然ながら記録の目的や必要な記録の質が異なるため十分な検証が必要であり、現在調査研究中である。これに加え、計測からデータ解析および図面作成まで一貫して処理する廉価な仕組みの開発を進めている。今後は文化財調査の方法にLiDARの導入がますます普及すると考える。

・SfM-MVS

SfM-MVS（Structure from Motion and Multi-view Stereo : SfM/MVSとも表記する）は、写真測量（Photogrammetry：フォトグラメトリ）の一種である。SfM-MVSは、Structure from Motion と Multi-view Stereo それぞれの技術の略称の組み合わせである。SfMは、ある対象を撮影した複数の画像から、画像を撮影したカメラの位置や姿勢そしてレンズの歪みなどを算出し、画像中の特徴点から疎な三次元点群を生成する。MVSはSfMで推定した画像特徴点とステレオペア画像の複数の組み合わせから高密度な三次元モデルなどを構築する。

このSfM-MVSは、ロボット制御などを目的とするコンピュータービジョンなどの分野由来の技術である。1980年代に理論的研究が進み、ICTの急速な進展による計算速度の向上やインターネットを介したデジタル画像の蓄積が進んだ結果、2000年代には応用研究が急速に增加了（織田2016）。2010年代には他分野に普及し現在では土木建設・農林業・災害による被害の記録など様々な分野で導入が進み、文化財分野でも普及が進んだ。SfM-MVSで構築する三次元モデルは、元となる画像から構築するので高精細な質感を記録できるほか、過去に撮影された写真測量用の画像や、赤外線カメラで撮影した画像なども利用でき、文化財のように過去の情報や目視できない表面の情報も重要な事例に適している。

奈良文化財研究所では、これまでの約70年にわたる文化財の写真測量に関する調査研究の蓄積を継承しながら新たな手法の開発研究を進めており、SfM-MVSの文化財への応用にもいち早く着手した（金田2014）。SfM-MVSは、従来の三次元計測方法と比較して廉価で簡便に着手できる点に大きな長所があり、構築する三次元モデルの質は元となる画像の質が大きく左右する点に短所がある

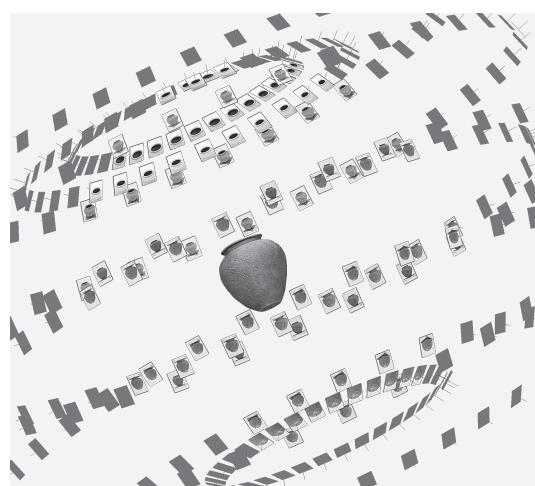


図12 SfM-MVSのイメージ

表2 三次元レーザースキャナーとSfM-MVSの比較

三次元レーザースキャナー		SfM-MVS
導入費用	相対的に高い（数万～数千万円）	相対的に低い（0円～）
精密度と正確度のコントロール	ある程度可能（機器の仕様や目安）	ゆらぎの幅は大きい（知識・技術・環境次第）
対応可能な空間スケールと解像度	限定的。それぞれ対応機器が必要。高解像度ほど高価な傾向	柔軟市販のカメラで対応
不得意な材質や色	ガラス質・透明色・黒色光沢のあるものなど	左と同様だが、撮影の工夫次第
大きさの情報	計測時に取得	外部指標が必要
色・質感	一般的に右に劣る	元データとなる画像次第
機動性	一般的に右に劣る	高い
元データからの再解析	専用プログラムが必要	専用プログラムは不要

(表2)。そこで前述の高機能な三次元レーザースキャナーを用いた計測精度の比較検証をおこなった。結果、適切な画像を取得して適切に解析すれば、現時点で正確度と精密度の最も高い水準にある三次元レーザースキャナーと比較しても問題ない質のモデルを構築できることを明らかにした（山口2021）。

また、一脚やUAV (Unmanned Aerial Vehicle: 無人航空機)、電動回転台などの撮影補助機材を導入して効率良く質の高い画像を安全に取得する仕組みを実現してきた。そして、土器などの小さなものから、遺構あるいは調査区全体、遺跡の周辺地形といった大きなものにいたるまで、様々な目的と条件下において計測と応用を蓄積している。

SfM-MVSは、デジタルカメラとコンピューターがあれば誰でも着手できるので文化財調査組織や大学研究室等で導入事例が急速に増加している。しかしその計測の質は、計測者の知識や技術が大きく左右する点が課題である。そこで、奈良文化財研究所では主に全国地方自治体の文化財担当者に向けた文化財専門研修などで「文化財三次元計測」課程を開講し、SfM-MVSを利用した文化財計測の基礎の普及を図っている。

IV 三次元計測の事例

これまでの計測事例の一部を挙げると、土器に残るイネモミの圧痕、土器・陶磁器、銭・銭範、木簡・木材などの木製品、石棺や石垣・石碑・磨崖仏などの石造物、出土瓦、古墳壁画、発掘調査により検出した遺構、発掘調査区全体、遺跡の周辺地形、被災した文化財の詳細な状況記録などがある（山口2018）。実はこれらは全てSfM-MVSを用いて三次元計測した例である。その中には単純な撮影にいくつかの工夫を施すことによって計測の省力化やSfM-MVSの応用可能性を拡大したものがある。誰でも導入可能な方法なので紹介したい。

1 手間を省く、確実にする

SfM-MVSによる遺物の三次元計測を実施するには、撮影していない部分が無いよう、図12のように様々な角度から遺物を撮影する必要がある。この時の写真撮影は、遺物は固定しカメラを移動させるか、遺物を回転させカメラは固定するかの方法がある。たとえば後者の方法では、回転させる角度に過不足が生じることがあり、また毎回手動でシャッターを切る手間がある。そこで市販の電動回転台（Foldio360）とタブレット端末と組み合わせ、回転台を15度回転させ、遠隔で合焦し、シャッターを切る信号をカメラに送る、というような動作を自動的に1周分繰り返すよう設定した（図13）。

このような少しの工夫により、撮影時の機材の移動や遺物の回転、カメラの合焦・撮影といった一連の手間を大幅に省き、SfM-MVSの解析に必要な画像の確実な取得を実現することができる。現在は一層の省力化と自動化および安全性の向上を目的とした撮影作業のロボタイゼーション（ロボット化）の実現を図っている。

2 方法を組み合わせる

小さなもの三次元計測は難しい。たとえば幅1cm未満の圧痕が断面に残る土器破片がある。このような土器圧痕は、前述の三次元レーザースキャナーでも原理上計測することが難しい。そのためシリコンレプリカSEM法や軟X線撮影による記録が主要な方法である。ただしこれらの方法は高価な機器が必要なこと、前者はシリコンを注入・剥離するため資料を侵襲する可能性を拭いきれない。

そこでSfM-MVSによる非侵襲・非接触な三次元計測を検討した。しかし、土器圧痕のような小さな対象の場合、マクロレンズを用いた近接撮影する必要があるが被写界深度が浅くボケやすい。SfM-MVSによる三次元計測の質は、解析する対象の画像群の質が大きく左右する。ボケ（合焦していない）やブレた画像群は解析に不要であるばかりでなく、障害となる。そこで近接撮影による画像のボケを解消する方法として、深度合成（多焦点合成：focus stacking）を導入した（山口2017）。深度合成は合焦位置を前後に僅かにずらしながら撮影した連続画像



図13 遺物を電動回転台に載せ自動撮影する様子

から各画像の合焦した画素のみを抽出して合成し、すべて合焦した画像を生成する技術である（図14）。

効率よく合焦位置を僅かにずらしながら撮影する方法は、カメラを移動させるか、カメラ内部で合焦位置を移動させるかの2つの方法がある。前者はマクロスライダーを導入する必要があるが、一般的な市販のカメラの大多数が対応する。後者は三脚等にデジタルカメラを固定し、カメラに内蔵されたプログラムか外部のプログラムで合焦位置を変えて撮影する。この方法は前者と比較して使用機材が少なく撮影時間を短縮できるが、対応するデジタルカメラは限られる。撮影した画像から深度合成を実行するために用いたプログラムは、市販のHelicon Focusである。深度合成の専用プログラムはHelicon Focusの他にZerene Stackerなどがあり、オープンソースプログラムのImageJでもプラグインを導入することにより実行できる。

図15は生成した深度合成画像である。圧痕の中に肉眼では確認できない顆粒状突起を視認でき、その特徴からイネモミによる圧痕であることを確認できる。このような画像群を元にSfM-MVSで土器圧痕の三次元モデルを構築する（図16）。さらに、構築した土器圧痕の三次元モデルの凹凸をコンピューター上で反転させると、圧痕原体を仮想復元することができる（図17）。このように、土器表面に確認できる圧痕は、非侵襲・非接触かつ高価な機器を利用することなく三次元計測することができる。またこのSfM-MVSと深度合成を組み合わせる方法は、土器圧痕に限らず、出土銭貨・錢范の錢文、金属製品の微細な意匠など文化財の小さな痕跡の立体的な記録に応用することができる。



図14 深度合成後の画像



図15 深度合成による顆粒状突起を可視化

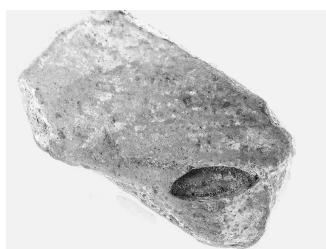


図16 土器圧痕の三次元モデル



図17 圧痕原体の仮想復元

3 記録時間を平準化する

遺跡の発掘調査における記録は、その場その時に現場に臨む者にしかできない作業である。しかも発掘調査を行った後の遺跡の大半は、「記録保存」という形でしか残し伝えることができない。それゆえ、時間的・予算的に限られた条件の中でも適切な水準の記録を可能な限り実現しなければならない。しかし、石組暗渠や木樋暗渠のような立体的で細かな実測が必要な遺構や、いわゆる瓦溜や土器溜などのように出土遺物が幾重にも重なる出土状況の詳細な記録は、従来の伝統的な方法だけでは時間を大幅に必要とする。結果として事前に立案した発掘調査計画に大きな影響を及ぼすこともある。このような課題の解決にもSfM-MVSを利用した三次元記録は有効である。具体的な例として、近年の平城宮跡での発掘調査における導入例を挙げる（山口2021）。

2020～2021年に平城宮東方官衙地区で実施した平城第621次調査は、前年の平城第615次調査で検出した大型基壇建物SB19000の西隣に位置する区画を発掘調査した。その結果、大型基壇建物区画の築地塀、溝、基幹排水路、石組暗渠、木樋暗渠、瓦樋、掘立柱建物、柱穴などの遺構を検出し、多数の遺物が出土した（大澤2021）。

このような立体的で複雑な遺構の記録に対応するため、SfM-MVSによる三次元記録とオルソ画像作成による実測下図の作成を実施し、発掘調査の記録の質の向上とともに迅速化・簡便化を図った。写真撮影は1名でも可能だが安全性と確実性を考慮してタブレット端末を使用してリモート撮影を担当する者、カメラを装着した一脚の移動と保持を担当する者の2名で実施した。現場での一般的な作業手順は、①計測計画の立案、②基準点用マーカーの配置、③計測手簿の記入、④基準点用マーカー位置（国家座標）の計測、⑤グレーカードの撮影、⑥基準点用マーカーを構図の中心にした写真撮影、⑦調査区全体の三次元モデルを構築するための写真撮影、⑧重要度の高い部分の詳細な三次元モデルを構築するための写真撮影と

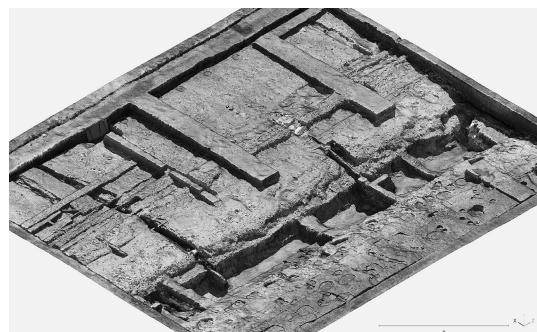


図18 平城宮跡第621次発掘調査区の三次元モデル

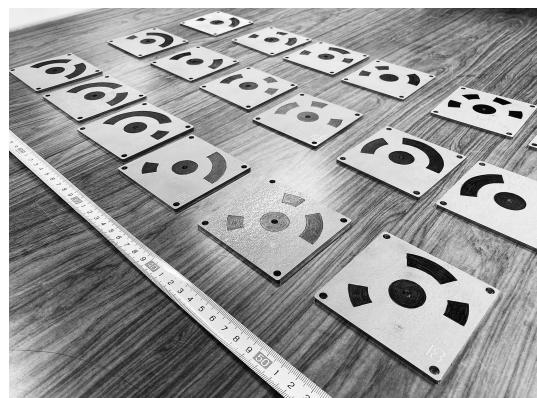


図19 自動検出可能な基準点用マーカー

した。これらの作業には以下の道具を使用した。このうちの基準点用マーカー（図19）は、ステンレス製プレートにSfM-MVS実行プログラムでの自動検出が可能なコードを刻み、油性黒マジックで加工部分を黒塗りした再利用可能なものである。このプレートの中心にはGNSSのポールやトータルステーション用プリズムポールを挿す穴を設け、四隅には発掘調査でしばしば使用する釘を打てる大きさの穴を設けプレートを固定できるようにしている。このような自動検出可能な基準点用マーカーは利用せずともSfM-MVSは実行可能だが、利用すると多数の画像からマーカーの中心点を検出する手作業だけでなく、検出精度自体を高めることができるので、常用している。

- ・レンズ交換式ミラーレスデジタルカメラ（マイクロフォーサーズセンサー）
- ・24mm単焦点レンズ（35mm換算）
- ・一脚（最大伸長約6m）
- ・自由雲台
- ・グレーカード（ホワイトバランス調整用）
- ・タブレット端末（リモート撮影用）
- ・基準点用マーカー
- ・Agisoft社Metashape Professional
- ・QGIS

写真撮影後は画像群に不足が無いか確認するための仮解析をラップトップ型PCを用いて直ちに行い、不足があればその場で追加撮影できるようにした。質の高い三次元モデルを構築するための本解析はワークステーションを用いた。写真的現像から図の作成までの解析に要した時間は約5時間（うち約9割は自動処理）であった。SfM-MVS実行プログラ

ムは、上記以外にも複数ある。現在は要求される計算機の性能が低く、解析時間がより短いRealityCaptureを使用した解析も実施している。

三次元モデルの構築からオルソ画像の作成まではMetashape Professionalでおこなった。続いてオルソ画像への任意間隔の格子の挿入や座標の描画などはオープンソースプログラムのQGISを使用した。

図20はこれら一連の作業を実施した結果である。この発掘調査では、一辺約2cmの礫も多量に検出したので、これらが判別可能な結

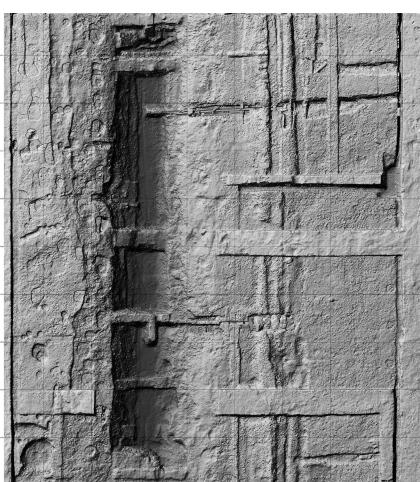


図20 三次元モデルから作成した実測下図

果を得られるよう地上解像度約1mmのオルソ画像を作成した。このほか、標高モデル(DEM: Digital Elevation Model)を利用した段彩図や地表面の凹凸を強調して可視化した図などを作成した。調査区全体の三次元計測で生じた誤差(RMSE: 平均平方二乗誤差)は約1.4cmであり、縮尺1/20の平面図の作成目的には十分だと評価した。

発掘調査現場でのSfM-MVSを利用した三次元記録の有効性は、たとえば井戸跡や幅の狭い調査区など狭小空間の記録や、脆弱な土壤環境下での記録の安全性の向上といった点からも指摘することができる。SfM-MVSは人が身動きできない場所であっても、対象について十分な画像さえ取得することができれば三次元記録することができる。たとえば狭小な調査区を記録するばあい、人は調査区内に立ち入らずにカメラを取り付けた一脚を移動させて写真撮影し、三次元記録することも可能である。

そして発掘調査現場におけるSfM-MVSを利用した三次元記録は、対象の三次元形状だけでなく質感を写実的に記録する。写真や実測図は発掘現場に臨む調査者が認識したものを作り記録するため、調査者が認識しなかったものは記録に残らないこともある。しかし、調査区全体の写実的な記録は、調査者が見逃した過去の出来事の痕跡(たとえば遺構の僅かな痕跡や地震や洪水など自然災害の痕跡)を第三者が認識できる可能性をもたらす。こうした可能性は、遺跡の発掘調査の再現性の向上に寄与し、「記録保存」の深化につながるばかりでなく、我が国が進めるデジタルツインの実現に資する。

V 三次元計測データの活用

文化財の三次元計測データを単なる文化財の記録ではなく、デジタル文化資源の基盤として捉え、文化財に関わるさまざまな分野の学術的知見を融合させることができれば、文化財の新たな可能性の開拓に発展するだろう。まずは三次元プリンタを利用した廉価なレプリカ作成やXR(クロスリアリティ: AR、VR、MRの総称)を利用した調査支援(金田ほか2021)など、三次元計測データのこれまでの活用例を列挙して整理したいが、紙幅の関係上すべては紹介できない。ほんの数例を取りあげたい。

1 調査研究

遺跡の発掘調査で出土する遺物は、そのほとんどが当時の形を保ったままで出土することはない。多くの場合、複数に割れた状態で出土するので接合作業が必要である。時には整理作業完了後、しばらくして接合できそうな破片を新たに確認することもある。しかし先に整理作業を終えた資料は展示中。物理的に接合するのは難しいので何らかの手段で接合したい。そんな課題はあるだろう。

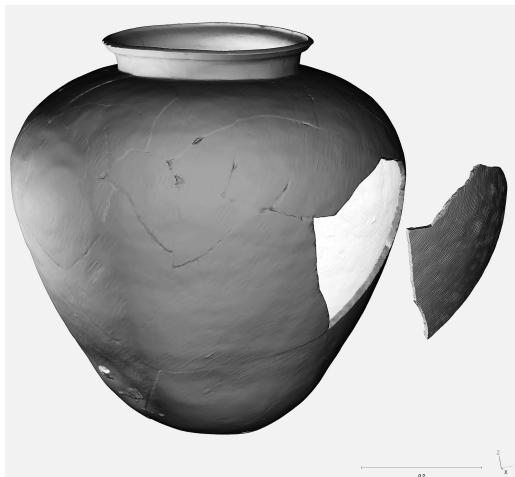


図21 コンピューター上で遺物の接合



東大寺式軒丸瓦 6235C (低解像度版)



図22 Sketchfabを利用した三次元モデルの公開

図21は西大寺食堂院から出土した須恵器大甕であり、以前に三次元計測したデータに、新たに三次元計測した破片のデータをコンピューター上で仮想的に接合する過程のものである（小田ほか2021）。2つの三次元モデルデータの仮想的な接合は、オープンソースプログラムのCloudCompareを利用した。またこの研究では、大甕内面に確認した液体の水位を示すと考えられる複数のリング上の痕跡を根拠に、コンピューター上で大甕を傾けて設置し、その姿勢で仮想的に水を入れた時の容量を算出した。

このような取組は、実物資料の観察と三次元計測データの活用によってこそ実現するものであり、当時の調理や甕の使用実態に迫る方法だといえる。他にも碑文遺構の仮想復元（山口2021）、出土木材の組み合わせの仮想復元（中村・浦2019）などの研究事例があり、今後も様々な資料に応用が進むと期待できる。

2 インターネットブラウザを用いた発信

三次元計測データを利用した動画製作は高度な専門知識が無くとも着手で

きるので、発掘調査成果のイメージを手間無く簡便に多くの人に見せたい時に有効である。ただし、動画は閲覧者が好きな方向や大きさで成果を閲覧することができない。

こうした課題に応える策として、Sketchfabのような三次元モデルプラットフォームの利用がある。大英博物館は2014年から、スミソニアン博物館では2019年から利用を開始している。奈良文化財研究所は2022年3月から運用を開始した（図22）。日本国内では他に

大阪歴史博物館や埼玉県立さきたま史跡の博物館、熊本県教育庁文化課、丹波市教育委員会文化財課、養老町教育委員会生涯学習課などが運用している。

Sketchfabは利用者が多く、現時点で最も代表的な三次元モデルプラットフォームであり、公開したデータが多く人の目にふれやすいサービスである。データのアップロード方法も分かりやすく、三次元空間上の任意の位置に注釈を設定することも可能だ。しかし文化財データを外部機関に預けるので、利用規約をよく理解した上で導入が適切かどうかを判断する必要がある。三次元モデルを公開する方法は、Sketchfabなどの外部サービスを利用する以外にも方法はある。たとえば自組織が管理するサーバー上にオープンソースプログラムのPotree³や3DHOP⁴が動作する仕組みを組み込む方法がある。この場合は、データ容量の制限など外部サービス規定に左右されることなく、三次元モデルを公開できる。もちろん、低解像度版をSketchfabで公開し、高解像度版を自前のサービスで公開するという方法もあるだろう。

3 文化財を楽しむ、可能性を拓く

世代や地域を超えて多様な人々が文化財を楽しむ場を作りたい。特に、こどもに文化財に興味をもってもらうにはどうすればよいか。その試行錯誤の一環として、ゲーミフィケーションという手法を導入する取組を2017年に開始した（山口ほか2022）。ゲーミフィケーションとは、ゲームの考え方やデザインなどの要素をゲーム以外の対象に応用し、対象への興味・関心の喚起や理解を促進させる手法である。文化財分野でビデオゲームをプラットフォームとする取組は、先行研究ではAndrew Reinhard（2018）による研究が代表的であり、海外では複数の組織がビデオゲームを運用している⁵。いっぽう国内では国立文化財機構文化財活用センターによるNintendo Switchのゲームソフト『あつまれ どうぶつの森』を利用した「ぶんかつ島」が代表例だが、比較的事例が少ないという現状である。

ゲーミフィケーションのプラットフォームにはMojang社のMinecraftを使用している。Minecraftは、立方体のブロックで構成された三次元のサイバー空間で、プレイヤーがブロックを自由に設置・破棄して世界を創造・変更・破壊・冒険する。2020年5月の時点で全世界の月間アクティブユーザー数約1.2億人を数えるビデオゲームである。Minecraftはゲームとして楽しむだけではなく、小学生から高校生を対象とした地理教育やプログラミング教育に利用されているほか、多様な社会層が参画するまちづくりワークショップへの導入例もある（岩橋ほか2021）。さらには環境保護や脱炭素社会に向けた取組（Minecraft2022）にも利用されるなど、多くの事例を挙げることができる。

このMinecraftを利用して、発掘調査が明らかにした平城宮の遺構や復元遺構などの三次元データをMinecraftに反映させた（図23・24）。実物のデータから構築した世界をユー



図23 写真平城宮跡「内裏の井戸」(復元)



図24 Minecraft世界の平城宮跡「内裏の井戸」

ユーザーが自由に歩き回り、発掘・建築・地層の観察・破壊などの体験を通して、遺跡を楽しみながら地域や歴史、そして文化財科学を知ることに繋げたいと考えている。そのため、今後はMinecraft世界での発掘体験や復元建造物の実装を図るほか、平城宮跡でのMinecraftイベントの実施や、平城宮跡をモデルとしたMinecraftデータの公開を実現できるよう、調査研究と準備を進めていきたい。遺跡の三次元計測データをMinecraft世界で活用することにより、子どもと文化財の距離を近づけることは、自らが住む土地の理解を深め、さらには文化財への興味・感心の喚起にも発展する可能性をもつと期待する。

VI おわりに

拙稿では、まず奈良文化財研究所における三次元計測略史をまとめ、文化財の三次元形状をいかに計測するか試行錯誤を続けてきた先達の知恵と工夫の蓄積を確認した。それから三次元計測の精度について「精密度」「正確度」「解像度」の3つの指標から整理し、直近10年で大きく進展した4つの三次元計測方法を紹介した。次に、これらをふまえて実施してきた三次元計測の事例を挙げてそれぞれの特徴と長所を述べ、最後に三次元計測データの活用例を提示した。

しかしこまでのところ、遺跡調査へのデジタル三次元記録の応用は、従来方法の一部置き換えや支援に留まっており、遺跡調査の質の大幅な向上や文化財調査の変革に寄与しているとは言い難い状況にある。しかし世界はSDGsや脱炭素社会の実現に向けた変化を求めており、社会はSociety 5.0の実現に向けDX（デジタルトランスフォーメーション：Digital Transformation）に係る具体的な取組を土木建設や農業、医療、災害対応といった様々な分野で開始している。遺跡調査も決してそのような動きと無関係でいることはできない。理想とする遺跡調査のために常にこうしたいという具体的な考えを抱きつつ、不可

避の変化を見据えた試行錯誤をあらかじめ進めておく必要があるだろう。そのような状況においては、遺跡を守り伝えるための三次元計測とそのデータ活用は今後一層の重要度の高い鍵になると考える。

註

- 1 この値は高価な測量用機器による結果と大きく変わらない。
- 2 単独測位の水平精度は一般的に約10m程度である。
- 3 Potree (<https://github.com/potree/potree/>) 2022年5月12日確認
- 4 3DHOP (<https://www.3dhop.net/>) 2022年5月12日確認
- 5 たとえばDiG-iT! GamesによるEducational Games (<https://dig-itgames.com/educational-games-social-studies-science-math/>) や、Australian National Maritime MuseumによるWreck Seeker (<https://www.sea.museum/explore/apps-and-games/wreck-seeker>) など。2022年5月12日確認
- 6 奈良文化財研究所は、デジタル技術による文化財情報の記録と利活用に関する情報や論考をまとめた冊子をウェブサイトのリポジトリに登録し、公開している。その一部を引用参考文献の末尾に挙げた。

参考文献

- 濱田耕作 1930 『考古学関係資料模型目録』
- 牛川喜幸 1964 「写真測量の文化財調査への応用」『奈良国立文化財研究所年報』 奈良国立文化財研究所 pp.24-25
- 丸安隆和・大島太市・薦岡康子・津田昌明 1960 「写真測量を利用した三次元の精密測定：鎌倉大仏の測定を例にとって」『生産研究』第12巻第6号 東京大学生産技術研究所 pp.37-41
- 坪井清足・牛川喜幸・長谷川誠・伊東太作・佃幹雄 1969 「写真測量の文化財調査への応用 2」『奈良国立文化財研究所年報』 奈良国立文化財研究所 pp. 2-12
- 小林和夫 2004 「写真測量における三次元画像計測」『日本写真学会誌』第67巻5号 日本写真学会 pp.463-472
- 金田明大・加藤雅士・長谷川透・市大樹・竹本晃・小田裕樹 2007 「石神遺跡（第18・19次）の調査—第140・145次」『奈良文化財研究所紀要2007』 奈良文化財研究所 pp.93-101
- 金田明大・木本拳周・川口武彦・佐々木淑美・三井猛 2010 『文化財のための三次元計測』 岩田書院
- 山口欧志 2016 「SfM-MVSによる文化遺産の計測」『文化財写真研究』第7号 文化財写真技術研究会 pp.14-17
- 金田明大 2018 「SLAM技術を用いた森林内遺構の迅速な計測」『第35回日本文化財科学会大会研究発表要旨集』 日本文化財科学会 pp.380-381
- 村上伸一 1996 『画像処理工学』 東京電機大学出版局
- 国土地理院 2013 「ネットワーク型RTK測量について」 <https://www.gsi.go.jp/common/000080891.pdf> 2022年4月20日最終確認
- 金田明大・山口欧志 2019 「廉価型GPSの遺跡探査への利用」『日本文化財科学会第36回大会発表要旨集』 日本文化財科学会 pp.82-83

- 山口欧志・岸田徹・金田明大 2022「低コストネットワーク型RTK-GNSSの遺跡調査への利用」『日本文化財科学会第39回大会研究発表要旨集』 日本文化財科学会 pp.262-263
- 大政謙次・秋山幸秀・石神靖弘・吉見健司 2010「ヘリコプター搭載の高空間分解能Scanning Lidarシステムによる樹冠高の3次元リモートセンシング」『日本リモートセンシング学会誌』第20巻4号 日本リモートセンシング学会 pp.394-406
- 国土交通省 2022「3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）」
- 織田和夫 2016「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』55（3）日本写真測量学会 pp.206-209
- 金田明大 2014「Structure from Motionによる遺構計測の試行」『奈良文化財研究所紀要2014』奈良文化財研究所 pp.44-45
- 山口欧志 2021「文化財の三次元計測方法による収集データの比較」『日本考古学協会第87回総会研究発表要旨』 日本考古学協会 pp.31
- 山口欧志 2018「文化財のデジタル文化資源化：見たままの姿を伝え、深層を探る」『デジタル技術で魅せる文化財：奈文研とICT』 クバプロ pp.135-158
- 山口欧志 2017「土器圧痕の超適応的な三次元デジタルレプリカ法」『日本文化財科学会第34回大会研究発表要旨集』 日本文化財科学会 pp.64-65
- 山口欧志 2021「遺跡発掘調査記録のDXの試行」『日本文化財科学会第38回大会研究発表要旨集』 日本文化財科学会 pp.260-261
- 大澤正吾 2021「平城宮東方官衙地区の調査（平城第621次）」『奈文研ニュース』No80 奈良文化財研究所 p. 3
- 金田明大・村田泰輔・山口欧志・上相英之 2021「MRを利用した発掘調査支援システムの試行」『日本文化財科学会大会第38回大会研究発表要旨集』 日本文化財科学会 pp.252-253
- 小田裕樹・三舟隆之・山口欧志・金田明大 2021「西大寺食堂院出土須恵器甕と内面の痕跡—第404次」『奈良文化財研究所紀要2021』 奈良文化財研究所 pp.184-185
- 山口欧志 2021「モンゴル国ドンゴイン・シレー遺跡の三次元記録」『金大考古』第79号 金沢大学人文学類考古学研究室 pp.43-51
- 中村亜希子・浦蓉子 2019「出土木材の三次元配置構造の復元」『奈良文化財研究所紀要2019』奈良文化財研究所 pp.54-55
- 【公式】奈良文化財研究所（@nabunken）-Sketchfab (<https://sketchfab.com/nabunken>)
- Andrew, Reinhard, 2018, Archaeogaming: An Introduction to Archaeology in and of Video Games, Berghahn Books.
- 岩橋純子・白石喬久 2021「ゲーミフィケーションを用いた地理・地学の学習支援に関する研究（第3年次）」『国土地理院令和2年度調査研究年報』 pp.210-213.
- 山口欧志・上相英之・村田泰輔・金田明大 2022「Minecraftを利用した遺跡体験システムの試行」『日本文化財科学会第39回大会研究発表要旨集』 日本文化財科学会 pp.44-45
- 奈良文化財研究所 2022『考古学・文化財デジタルデータのGuides to Good Practice』第31冊
- 奈良文化財研究所 2022『文化財と著作権』第34冊

挿図出典

いずれも筆者作成および筆者撮影