

## 趣旨説明：計測の最適化を考えよう

野口 淳

(NPO 法人南アジア文化遺産センター／奈良文化財研究所客員研究員)

第 2 回のテーマは、「古墳・横穴墓×3D」である。そしてもう一つのテーマは、目的・対象による計測手法・機器の最適化である。具体的な事例にもとづき議論し、理解を深めるために、対象として横穴式石室・横穴墓が選択された、ということである。

今回も焦点となる 3D 計測は、考古学・埋蔵文化財の分野で従来行なわれてきた計測の方法—計測点を指示・指定して位置座標を取得し計測点間を結線する—とは大きく異なり、対象の表面形状を高い解像度と精度で面的に計測する。しかし 3D 計測といっても、手法や使用機器はさまざまである（金田ほか 2010、金田 2019）。それらは、それぞれに固有の特性をもち、長所と短所がある。特定の手法や機器が他に優越するということではなく、目的によって最適な手段を考えるべきである。今回は、SfM/ MVS による写真計測（フォトグラメトリ）、SLAM、レーザー・スキャナを取り上げるが、ほかにも LiDAR などがある。

最適化について注目したいのは、以下の 3 点である。

**1) 導入・運用の容易さ**は、主に金銭的成本と習熟コストである。解像度において優れた特性を示す手法・機器であっても、導入や運用のハードルが高ければ選択肢としては優先度が下がることもあるだろう。

**2) 解像度**は、細かさだけが注目されがちだが、実際には運用のコストと関連して検討すべき事項である。高い解像度は、計測・処理の時間コストの上昇、データ・サイズの増大による取り回しの困難さ、維持・管理コストの上昇を招く。目的または対象によって必要な解像度が定まる時、入出力の解像度を調整できない機器・手法では、オーバースペックによる損失が生じる場合がある。この点は青木報告に詳しい。考古学・文化財分野に引き付けるならば、どのような縮尺・サイズが必要とされるかを考えれば良い。たとえば  $S=1/40\sim 1/50$  で可視化ないし解析・検討する際に、0.1mm 単位の解像度は本当に必要であろうか？

もちろん、高解像度=大縮尺のデータから、低解像度=小縮尺のデータを生成（リサイズ、リサンプリング）することはできるが、逆は困難であるから、できる限り高解像度の記録を残しておくべきだという思想・設計もあり得る。しかし際限なく解像度を高くすればよいということではない。サイズの大きなデータは保管するだけでもコストがかかるし、何よりも処理するために高スペックのコンピュータが必要となるため、運用コストの増大を招く。

しかし現状では対象や場面ごとの最適解を示すことは難しい。ケースバイケースで対応しつつ、事例を蓄積して最適化を模索するべきだろう（金澤報告参照）。処理・運用環境によりコスト評価も変わるので、画一的な規格化・標準化は避けるべきである。それぞれの環境条件下での、その時点におけるベストを追求するための情報・知識の共有が重要である。

**3) 計測可能範囲・条件**は、機器・手法により大きく異なる。計測可能範囲は、最小計測距離と最大計測距離で定義されるが、多くの場合、段階的（あるいは連続的）に精度・解像度

も変化する。計測可能条件は、考古学・文化財分野では、とくにフィールドワークでの計測記録との関係で、直射日光下での計測が可能かどうか、および外部電源が必要か、バッテリーのみでどの程度稼働できるかが検討対象になるだろう。

次に、これら3点について、今回取り上げる機器・手法ごとに概観してみよう。

**SfM/MVS** は、デジタル画像（静止画・動画）を専用のソフトウェア・アプリケーションで解析処理する。導入の金銭コストは、撮影機材+ソフトウェアの価格となるが、考古学・文化財分野では撮影機材は既に揃っている場合が多い。ソフトウェアの価格は様々だが、必要最小限の機能を確保するためには無償～数万円で、撮影機材の価格を含めなければもっとも安価と言える。ただし無償のソフトは操作性（たとえば日本語化されていない）や機能の制約（SfMのみでメッシュ生成等は別のソフトが必要）がある。

有償の商用ソフトも多々あるが、現状では、主に価格面から Agisoft Metashape が、考古学・文化財分野では最も普及しているように見える。日本語化された操作環境（GUI）も導入・運用コストの低減に一役買っているだろう。ドローン（UAV）や延長ポールを利用した俯瞰撮影による平面的な撮影・処理の場面が多いことも Metashape が有効と見なされる理由の一つかもしれない。価格的には高くなるが（\$3,499）、Professional 版では座標を付与でき、オルソ画像が出力できるので、遺跡や調査区全体を計測し、可視化・図化したい需要に即している。一方、SfM やメッシュ生成、テクスチャ処理などについてはソフトごとの長所短所があるので、たとえば遺物の種類・表面状態別に、異なるソフト（Reality Capture：<https://www.capturingreality.com/>など）の出力と比較する必要がある。

SfM/ MVS の精度・解像度は、主に入力（画像セット）の品質に依拠する。解像度は処理過程において指示・変更することもできる。とくにミクロな表面状態の計測・図化・解析が可能なのは長所である（大村報告）。CPU/ GPU の性能やメモリは、画像サイズや数に対する処理精度・解像度と処理時間（あるいは直接的な処理可能画像数）に影響する。しかしそもそも低品質な画像を改善することはできない（専用ソフトでの画像処理は除く）。処理過程での秘訣や裏技はあるが、基本的に要求されるのは画像取得、すなわち撮影の技量であり、それはかなりの部分で SfM/ MVS 用以外の写真撮影の技術と共通する。計測可能範囲・条件も、写真撮影に準じる。これらの点で、写真撮影の知識・技術を一定程度身に付けている担当者が少なくない考古学・文化財分野では習熟コストが低く、かつ条件も整備しやすいため、SfM/ MVS が普及しているといえるだろう。なお Metashape は、動画や全天球画像も利用可能なため、画像セット作成においてキャパシティが大きい（伊藤報告）

**SLAM** は、Simultaneous Localization and Mapping の略称であり、自己位置推定と地図作成をリアルタイムで行なう技術である。レーザー・スキャナによる測距や、画像による深度認識、モーション・トラッキングなどの組み合わせによる。全自動掃除機が室内の状況を認識し自走する際に利用される技術と言えば分かりやすいだろう。実は、機器導入の金銭的成本において SfM/ MVS と大きく変わらないか、場合によっては安価なこともある<sup>2)</sup>。運用もそれほど複雑ではなく、機器にもよるが習熟は比較的容易である。一方で、他用途への互換性がない専用機器を必要とすることから、コストパフォーマンスの点で SfM/ MVS より劣ると捉えられがちなのかもしれない。また現状では、解像度において SfM/ MVS やレーザー・スキャナより劣る場合が多く、計測可能範囲・条件もタイトである。直射日光下では、SfM/

MVS や中距離用レーザー・スキャナに大きく及ばない。こうしたこともあってか、考古学・文化財分野では知名度・普及度も低い。しかし対象あるいは場面によっては SfM/ MVS やレーザー・スキャナより優位に立つ。金澤報告、岩村報告を参照して欲しい。

**レーザー・スキャナ**は、レーザー光の直進性を利用し、その反射を検出して対象の表面形状を計測するものである。レーザー・スキャナの種類と特性については、金田ほか（2010）に解説されているほか、青木報告で、長所短所が SfM/ MVS との比較を通じて詳説されている。端的に言えば、導入・運用コストは最も遥かに高い。比較的小さな遺物（<300mm 程度）を対象とするのであれば、SfM/ MVS のソフト+撮影機材の導入コストと拮抗する可能性もあるが、古墳の石室クラスの対象に適した機器の導入コストは、最低でも十数倍～百倍以上になる。ただし、高価な機器は計測可能範囲や条件において高い性能を示すため、導入コストとトレードオフの関係にあるとも言える。この場合、広い範囲を短時間で計測できることが最大の魅力である。機器ないし制御・処理ソフトウェアにおいて、計測の解像度を調整できるので、広範囲の計測であっても不必要に大きなサイズのデータを生成することを避けることもできる。導入の初期コストをクリアでき、かつ十分な稼働率が確保されるなら、運用面で償却できるとも考えられるだろう。一方で、広範囲を計測可能な機器は最小計測距離も相対的に大きいため、狭い空間や小さい対象には不向きである。

このほかにも、各機器・手法ごとの特徴、長所と短所は、条件によって様々に挙げることができる。しかし重要なのは、計測機器・手法の違いに関係なく、取得された 3D 計測データを、同じ過程で処理し、利用できることである。たとえば、正射投影（オルソ）図像を作成し、また展開図や断面図を作成する、あるいは各種の画像処理を行なうにあたって、計測機器・手法ごとの特性を考慮する必要があるが、まったく別の過程を準備する必要はない。3D 計測は、考古学・文化財におけるデータ取得モジュールとして、多様で多彩なアウトプットを生み出す基点となる。そこでは、どのような機器・手法を選択し、実施するかは、互換可能な選択肢である。であるからこそ、その時点、場面、条件ごとに最適な選択を行なうことができるよう、知識や経験を共有することが、貴重なデータの記録において最重要タスクだということが理解されるだろう。これこそが、今回、共有したい点である。

その上で、見たことのない図化・視覚化と研究の視点が表れることを期待する。

## 注

1) 2019 年 7 月時点で無償利用できるオープンソース SfM ソフトとして、COLMAP (<https://demuc.de/colmap/>)、Regard3D (<http://www.regard3d.org/>)、MESHROOM (<https://alicevision.github.io/#meshroom>)、VisualSfM (<http://ccwu.me/vsfm/>)、MicMac (<https://micmac.ensg.eu/index.php/Accueil>) などがある。3DF Zephyr (<https://www.3dflow.net/3df-zephyr-pro-3d-models-from-photos/>) は有償の商用ソフトだが無料版でもモデルの出力・保存が可能、ただし処理できる画像は 50 枚まで。

2) たとえば Microsoft Kinect Sensor for Windows や Intel RealSense Depth Camera D435i は、いずれも店頭価格で 3 万円前後、ZenfoneAR (SIM フリー、ストレージ 64GB) は中古価格で 4～5 万円前後。

## 文 献

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  
金田明大 2019「3 次元技術等によるデジタル技術の導入」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用』奈良文化財研究所研究報告第 21 冊