

多视角三维重建技术在石制品研究中的应用

周振宇¹, 关莹²

1. 中国社会科学院考古研究所, 北京 100071;
2. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京 100044

摘要: 三维重建技术已广泛应用于考古发掘、研究、展示等各个领域。通过对石制品的三维重建, 可以帮助我们获取更加精准的数据信息, 一些过去只能估算的测量指标得以精准化, 由此催生出许多新的研究方法。本文回顾了十几年来三维重建方法在石器分析研究中的实例, 如石制品的表面积、体积测量, 台面、砾石面/人工面、片疤的精确数值获取, 以及三维空间中打击方向、角度的判定等等, 有效推动了石制品的深入研究。不同的三维重建技术各有优劣, 多视角三维重建技术不受设备、场地、人员技术要求的限制, 能够快速、准确地建立石制品的三维模型, 并且获取如面积、体积、角度等通常难以准确测量的数据信息, 其生成的点云、数字高程模型、正射影像图等还可以导入其他软件拓展使用。该技术的诸多优点, 使其可以成为旧石器考古发掘、研究的日常工具。

关键词: 旧石器时代; 石器分析; 多角度三维重建; 精确测量

中图法分类号: K871.11; 文献标识码: A; 文章编号: 1000-3193(2017)01-0038-11

The Application of Three-dimensional Reconstruction Technology in Llithic Analysis

ZHOU Zhenyu¹, GUAN Ying²

1. Institute of Archaeology, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100710, China; 2. Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins of Chinese Academy of Sciences, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China

Abstract: Three-dimensional reconstruction technology has been widely applied in various fields of archaeological excavation and research. Through the three-dimensional reconstruction of stone artifacts, more accurate and objective data can be obtained, inspiring many new research methods and perspectives. Among these applications, *Multi-view 3D Reconstruction* (MVR) technology does not require professional equipment and techniques. Instead, all data collection can be accomplished with a digital camera and a computer. MVR technology has the benefits

收稿日期: 2016-08-26 定稿日期: 2016-10-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41302015); 国家社会科学基金青年项目(15CKG001); 哲学社会科学院创新工程项目(2016KGYJ011)。

作者简介: 周振宇(1983-), 男, 湖北省黄石市人, 中国社会科学院考古研究所副研究员, 主要从事史前考古学研究。
E-mail: zzy529@msn.com.

Citation: Zhou ZY, Guan Y. The application of three-dimensional reconstruction technology in lithic analysis[J]. Acta Anthropologica Sinica, 2017, 36(1): 38-48

of easy operation, lower cost, and high precision. We can obtain precise values for cortex area, flake scars, specimen volume, knapping orientation, angle of points, and so on, through the three-dimensional model generated by Agisoft Photoscan software. Data such as the dense cloud file, model file, digital elevation model (DEM), or orthophoto can also be imported into other software to expand the research. Considering the advantages of this technology, we could adopt it as a commonly used tool for both archaeological excavation and research.

Key words: Paleolithic; Three-dimensional reconstruction; Multi-view; Precise measurement

1 前 言

近年来, 多种三维重建技术已广泛地应用于考古学研究的各个领域。不论是探方, 还是重要遗迹现场的三维信息获取, 对于最大程度地记录考古遗存空间信息、保存遗址发掘场景都具有非常重要的意义。随着“数字博物馆”概念的提出, 器物本身的三维建模也逐渐受到国内文博界的重视。这些应用, 最初期主要以三维激光扫描技术为主, 多用于重要遗迹、古建筑、石窟造像等的三维模型重建^[1-6]。实际上, 三维激光扫描技术在产生之初就曾广泛应用于单体文物的三维重建, 国际上比较知名的应用实例有米开朗基罗的雕像“大卫”、埃及的狮身人面像等, 石制品、陶器、骨骼等也都有使用实例。我国的首都博物馆还利用瓷器碎片三维模型进行虚拟拼对实验, 有效避免了错误拼接造成的文物损伤^[7]。但是, 三维激光扫描技术存在技术门槛高、数据量大、处理周期长、成本昂贵等弊端。在这种背景下, 多视角三维影像重建、高精度 CT 扫描等技术进入学界视野。

多视角影像三维重建技术因其技术要求低和高效率等优势, 已被业界广泛接受。刘建国在国内率先使用该技术, 成功完成了多个重要遗址、遗迹的三维模型重建, 使其成为既能用于展示, 也能在考古研究中发挥巨大作用的利器^[8-9]; 该技术应用于旧石器时代遗址的田野发掘的尝试, 显示其在考古工作中仍有巨大潜能^[10]。本文系统梳理近年来三维重建技术在石制品分析中的应用, 比较不同三维重建技术的优劣, 并重点介绍使用多视角三维重建技术进行石制品建模并获取信息数据的方法。

2 石制品信息的获取方式

石制品是我们认识史前人类及其行为模式, 复原远古历史最为丰富的信息载体, 在大多数旧石器时代遗址中, 石制品是我们了解历史的唯一遗存。因此, 最大程度地获取石制品蕴含的人类行为信息, 是研究者最为关注的问题。定性与定量的描述是获取石制品信息最重要的两个方法, 这些描述一般通过绘图、照相、测量等手段实现。绘图与照相实际上是对石制品在二维尺度上的复原, 将描述对象的所有结构抽象为点、线、面、体, 然后通过离散的测量点绘制二维图, 辅以图像了解标本的外观特征; 而测量则是精确量化石制品特征点, 进行研究、分析。

信息获取是进行石制品分析的基础。石制品分析是旧石器考古学研究最基础也是最重要的研究手段，由此探寻古人类的石器制作工艺技术、生存行为模式以及认知能力，藉此复原人类的起源与演化过程。现今的石制品研究早已摆脱了单纯的定性描述，逐步引入了定量分析、石器制作动态阶段研究等手段。随着研究的不断深入，标本的测量指标逐渐增多，传统的手工测量存在一些弊端：首先，手工测量获取的数据量有限，只能有选择地忽略部分信息；其次，测量是将三维石制品二维化，本体的空间信息无法采集；最后，石制品的一些功能单元如尖角、刃缘、手持部位等难以量化描述，因此，开始有考古学者尝试将生物学中的几何形态学测量方法应用到石制品分析中^[11]。但是，石制品几何形状不规则，手工测量存在局限性，如面积、角度、体积、中心点等均无法获取准确数据，只能估算，主观因素大。随着三维扫描技术的推广，特别是手持三维扫描仪的出现，三维重建技术逐步应用到石制品研究中，极大地拓宽了石制品测量的广度和深度。

3 三维重建在石制品分析中的应用

近十年来，陆续有学者将三维重建技术应用到石制品分析中，取得了良好的效果，原来不可测或测量不精确的面积、体积、角度等指标，在三维模型中可精确描述，为研究提供了真实客观的数据与素材。

以石制品面积观测为例，石制品的砾石面比例一般指示石料利用率，也可根据石制品整体的砾石面比例推测人类对原料或成品的搬运行为。因石制品砾石面形状往往不规则，砾石面比例以估算为主，当砾石面凹陷或凸起时，估算误差较大。有学者通过三维扫描生成打制实验石制品的三维模型，由此获取砾石面比例的精确数值，并使用盲测的方式检验结果，发现传统估算方法得到的砾石面信息精度较低，随着样本量的增大，误差可能是惊人的^[12]。旧石器田野发掘面积限有，不可能穷尽揭露遗址，古人也存在搬运行为，使实际出土石制品总量小于古人类制作的石制品数量，因此，通过出土标本推算遗址古人类打制石片的总量具有十分重要的意义。有学者发现石片的台面面积与石片总量可能存在线性关系，因此计算石片的台面面积成为了一个估算实际石片量的重要途径。台面面积多通过台面厚和台面长来计算，但是几乎没有台面是规则的几何形状，因此这种计算方法得出的结果往往有别于真实的台面面积。而通过三维建模，石片的台面面积能够被准确获取，证实其与石片总量的确存在良好的线性关系，能够作为可靠的推算依据^[13]。

也有学者根据石片工具远端修理的形态，推算加工废弃部分的体积，由此计算修理指数，并由此探讨古人类的流行性、原料利用模式等问题。在过去的实验研究中，多使用游标卡尺或量杯来推算体积，而使用三维重建技术，可精确测量标本的体积，并在模型中模拟出修理废弃部分的体积，获得结果的可信度和关联性均高于手工测量^[14]。

石核表面片疤的分布状态可以反映古人类打制技术，但是片疤的剥片方向多样，人工统计描述需以繁复的方式配多幅示意图。通过三维重建，可以准确统计片疤的剥片方向。除此之外，使用三维模型还可以精确统计石片的弯曲度，石核片疤的弯曲度等等。使用这种方法，精确获取石制品的技术特征，不仅用于不同遗址间的比较，在地层堆积连续的遗

址中，还能清晰观察到人类打制技术的演化过程^[15-16]。

手斧研究一直是旧石器考古学界关注的热点，在对手斧进行手工测量时，器物的定位就存在争议，不同的研究者会使用不同的定位方式，导致同一件标本，不同研究者测量存在差异，甚至同一研究者反复测量同一标本也会存在误差。以色列学者使用三维扫描技术，生成90件阿舍利手斧的三维模型，通过生成的三维点云，计算手斧的中心点，形成一套客观、可重复、精度高的手斧定位方法，由此进行的测量更加精准^[17]。中国学者基于三维扫描技术对丹江口库区手斧的加工程度进行量化分析。通过三维扫描和相关测量软件的应用，研究者获取了手斧体积、表面积数值。同时，利用软件分割功能，研究者将手斧等分为不同部位，即远端、中部和近端，进而定量观察每一部位的加工程度（图1）。通过计算修疤密度指标（Scar Density Index）和修疤面积指标（Flaked Area Index），研究者获取了丹江口库区手斧的加工程度的量化信息，并对影响手斧加工程度的各种可能因素进行了统计学分析。相关性分析结果显示两个指标在测量丹江口库区手斧加工程度上具有较强的一致性，均能有效地反映加工程度的高低^[18]。该研究显示了三维扫描方法在石制品技术分析中的优势和潜力。

上述使用三维重建技术进行的石制品研究均使用激光扫描技术。近些年来，中国科学院古脊椎动物与古人类研究所、高能物理研究所、自动化研究所联合研发的高精度CT扫描仪也被用于石器的三维重建（225kV CT扫描样品直径范围为5mm-100mm，高度为100mm以下，精度30-60μm。450kV CT扫描样品直径范围为100mm-310mm，高度为300mm以下，精度为0.3mm）。尽管这两种方法均可实现石制品的三维化，但存在以下缺点：1) 建立真实三维模型需人工贴模，技术要求高，耗时长；2) 虚拟三维模型石制品表面真实纹理特征缺失（图1）；3) 锐利边缘拟合效果差；4) CT扫描虽可批量扫描小型标本，但国内目前可进行高精度CT扫描的实验室仅有一家，大型标本的精度不高，且同样存在上述缺点；5) 需要专门的仪器设备。

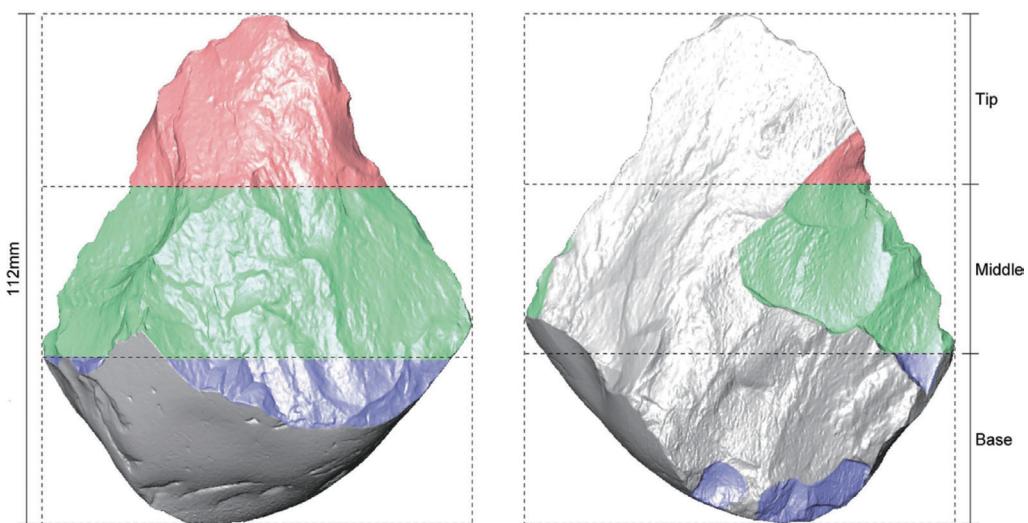


图1 手斧三维扫描（据李浩等，2015）

Fig.1 Segmentation of a 3D scanned handaxe

基于上述缺点，尽管三维重建方法已经在石制品分析中发挥了巨大作用，但仍未有效普及开来。多视角三维重建技术虽然在国内的兴起时间较短，因其能够快速、便捷地获取对象的真实三维模型，且技术门槛低、设备需求简单，考古工作者能够快速掌握并随时、随地应用，目前已迅速应用于我国考古发掘与研究的各个领域。不论是遗址大区域的超低空航拍建模，还是重要遗迹的高精度建模，亦或发掘探方的日常建模均取得了非常好的效果。该技术同样可以使用到单个石制品标本的三维重建中，不仅能够快速完成标本的真实纹理三维重建，还能完成各类数据的测量。对于旧石器考古研究、文物展示、学术交流具有重大意义。

多视角影像三维重建技术基于数字摄影测量原理，与三维激光扫描及其他三维重建技术相比，该技术获取被拍摄对象特征点的数目较少，点云与照片纹理可以严格对应，能够自动生成真实纹理，建模速度快、效果好^[8]。下文将详细介绍该技术在石制品标本三维模型重建中的应用。

4 石制品多视角三维重建

4.1 数据获取

全方位测量是石制品三维模型重建的重要用途之一，因此在进行影像获取前，需设置控制点，使三维模型具备精确的空间坐标数据。因拍摄条件不同，控制点的设置可繁可简，平整的拍摄台面上放置坐标纸，其网格读数即可作为控制点，也可在室内制作专门带坐标点的拍摄台。控制点避免设置在一条直线上，且需保证拍摄台稳固，以免拍摄过程中控制点位移。

获取数字影像是本方法的重要步骤，拍摄的总体原则是依一定的逻辑规律拍摄标本，使影像覆盖到标本的所有部位。如下文中实例，将标本固定放置在拍摄台上，分别以 60-80 度角、30-50 度角、平视围绕标本一圈拍摄三组影像，相邻影像之间应保证 70% 左右的重合度。将标本更换位置翻转，以同样的方法再拍摄三组影像（图 2）。依三维重建的目的不同，拍摄环境和相机的设置存在差异，文中实例均在没有明显阴影的室外晴天条件下拍摄。如对三维模型成像效果要求较高，可在室内使用触角式光源拍摄。

4.1 三维重建

使用 Agisoft Photoscan 软件处理影像，完成三维重建。该软件能够基于影像自动生成高质量三维模型。操作流程较简单：1) 将影像导入软件中，按处理流程建立三维模型；2) 在模型上标注控制点的准确位置并输入三维坐标；3) 最后导出所需的三维模型、正射影像图、数字高程模型等数字成果^[9]。

与遗址的三维重建不同^[10]，石制品的多视角三维重建需使用两组影像，将石器稳固置于工作台上拍摄第一组图像后，将石器倒置，更换位置拍摄第二组影像。Agisoft Photoscan 软件中单击“工作流程”，从下拉菜单中单击“添加照片”，会在工作区中自动生成“chunk 1”，选择第一组影像载入到软件；再新建“chunk2”，将第二组影像导入其中。照片加载完毕后，第一组影像依次完成“工作流程”菜单中的“对齐照片”、

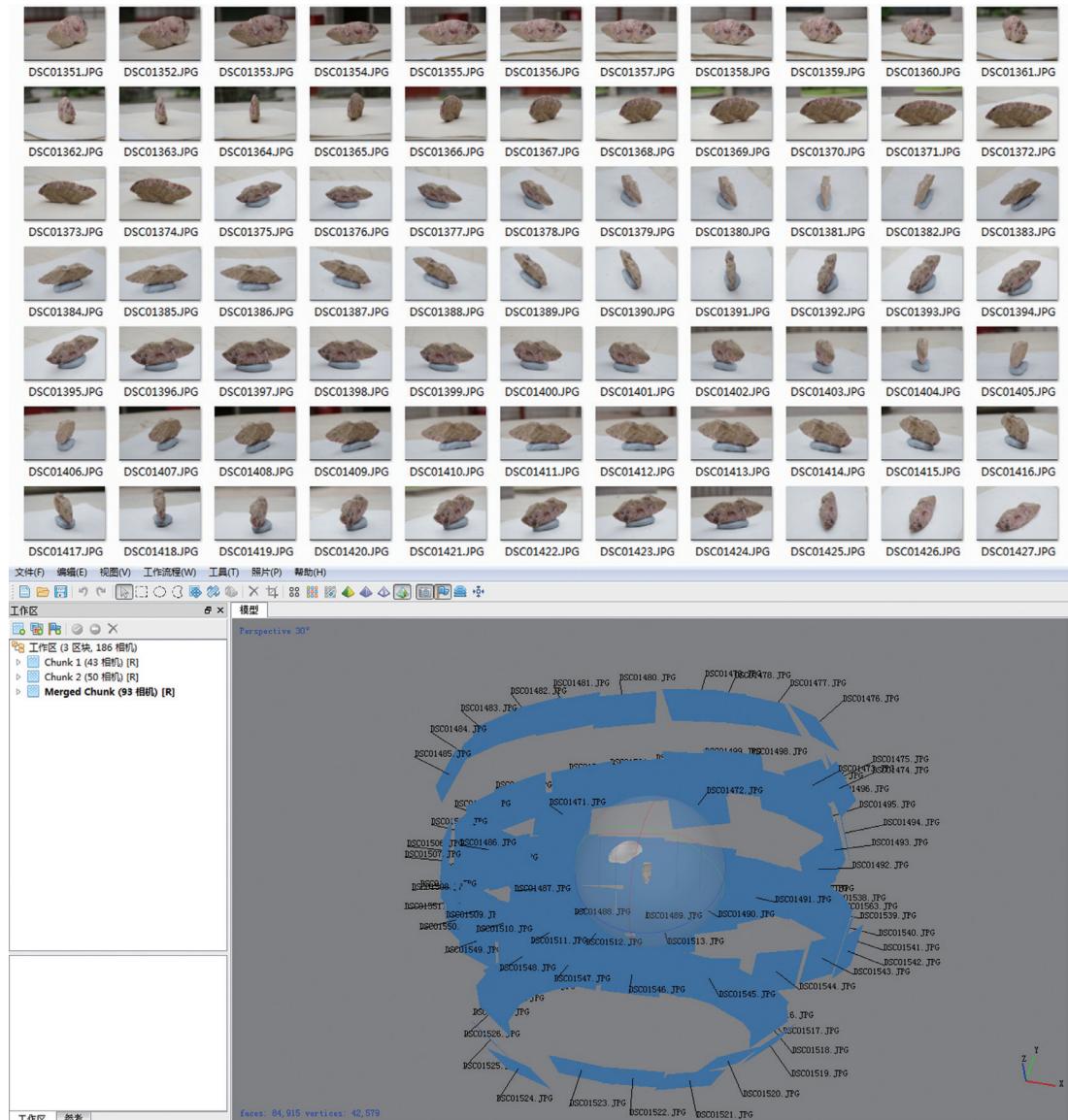


图 2 三维模型数字影像及拍摄角度

Fig.2 Digital files of 3D Model

“建立密集点云”、“生成网格”、“生成纹理”四个步骤，标注控制点，输入各控制点坐标数据。

三维模型生成后需在输入控制点，使其具备真实的空间数据。将鼠标光标置于控制点中心处，右键单击弹出对话框，选择“创建标记”，全部控制点添加完毕后，左键单击软件界面左下角的“参考”，双击“point 1”、“point 2”等控制点的X、Y、Z栏，输入之前所设置的控制点三维坐标数据，进行“设置”后完成三维模型的坐标系设置。为了模型简洁美观，可在设置控制点后删除无关点云（图3）。

第二组影像只需生成密集点云。两组影像分别生成有“chunk 1”、“chunk2”的密集点云，分别编辑两组密集点云，删除石制品之外的数据点，再单击“工作流程”，依次

进行“对齐堆块”、“合并堆块”。两组影像的密集点云对齐、合并后，依次进行“生成网格”、“生成纹理”完成三维重建。“生成网格”数目可以根据石制品标本的个体大小和模型的复杂程度选择20~80万面。“生成纹理”的大小可以修改为6000~20000之间，方式选择“平均”或“马赛克”。

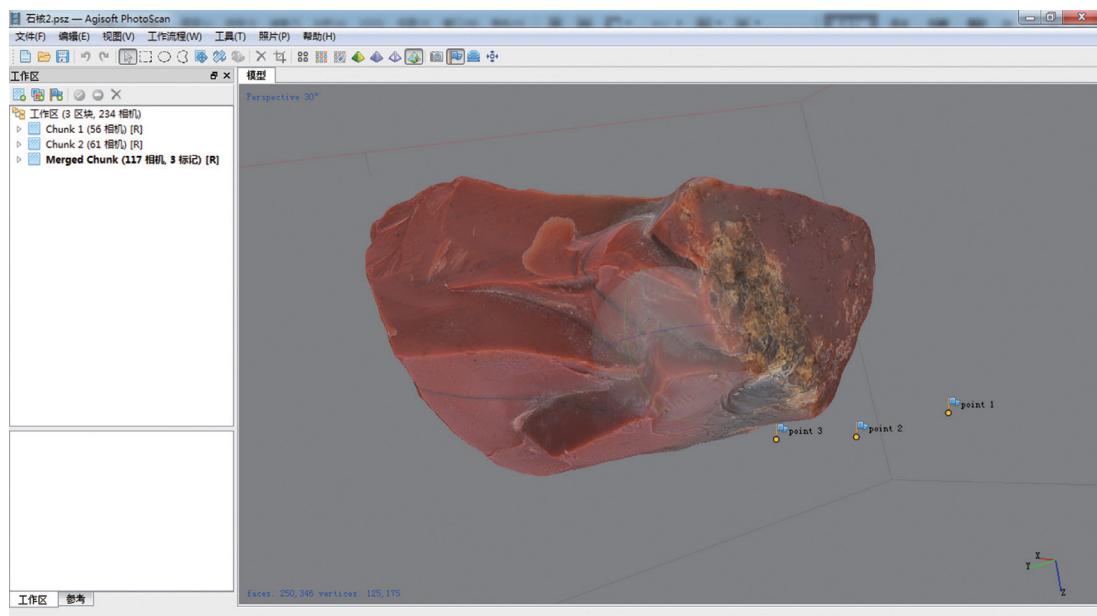


图3 石器三维模型及控制点
Fig.3 3D Model and control points of a core

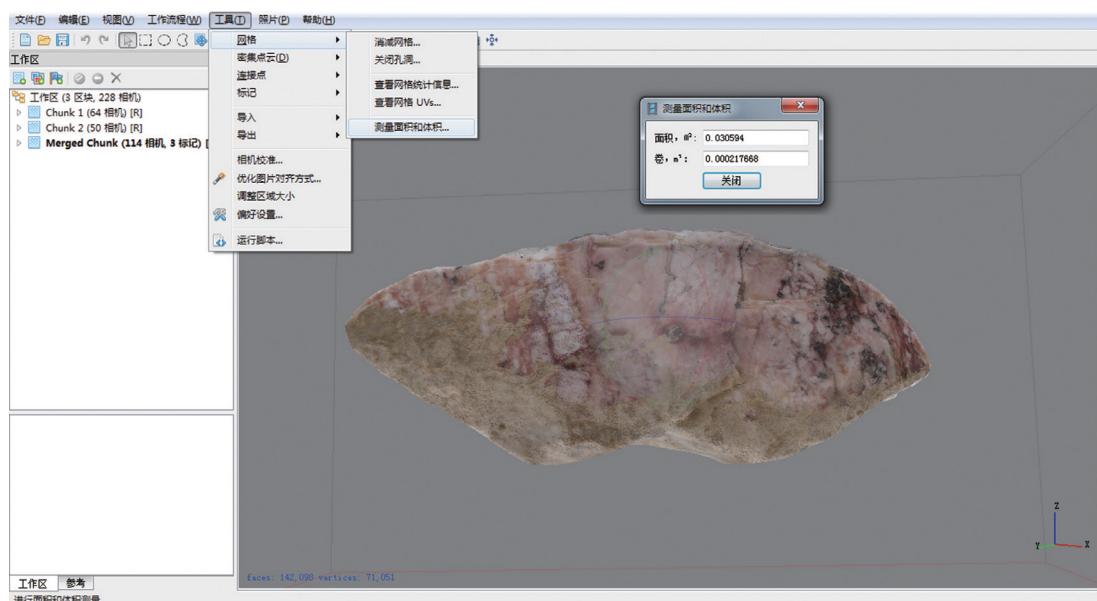


图4 石制品表面积、体积测量
Fig.4 Precise measurement in 3D Model

4.2 数据输出

使用 Agisoft Photoscan 软件可以快速便捷地重建附带精确空间信息的石制品真实三维模型，并导出各种格式的数字成果，全面记录标本的空间信息，可直接测量三维模型的体积和面积，输出各类研究所需的信息，下面将逐项介绍操作方法。

绘图: 单击“文件”下拉菜单中的“导出正射影像”，获得石器需绘图部位的正射影像，直接进行器物线图绘制；

测量器物表面积和体积: 在工具栏下拉菜单中单击“网格”，单击“测量面积和体积”，弹出对话框中直接显示了整个器物的表面积和体积（图 4）；

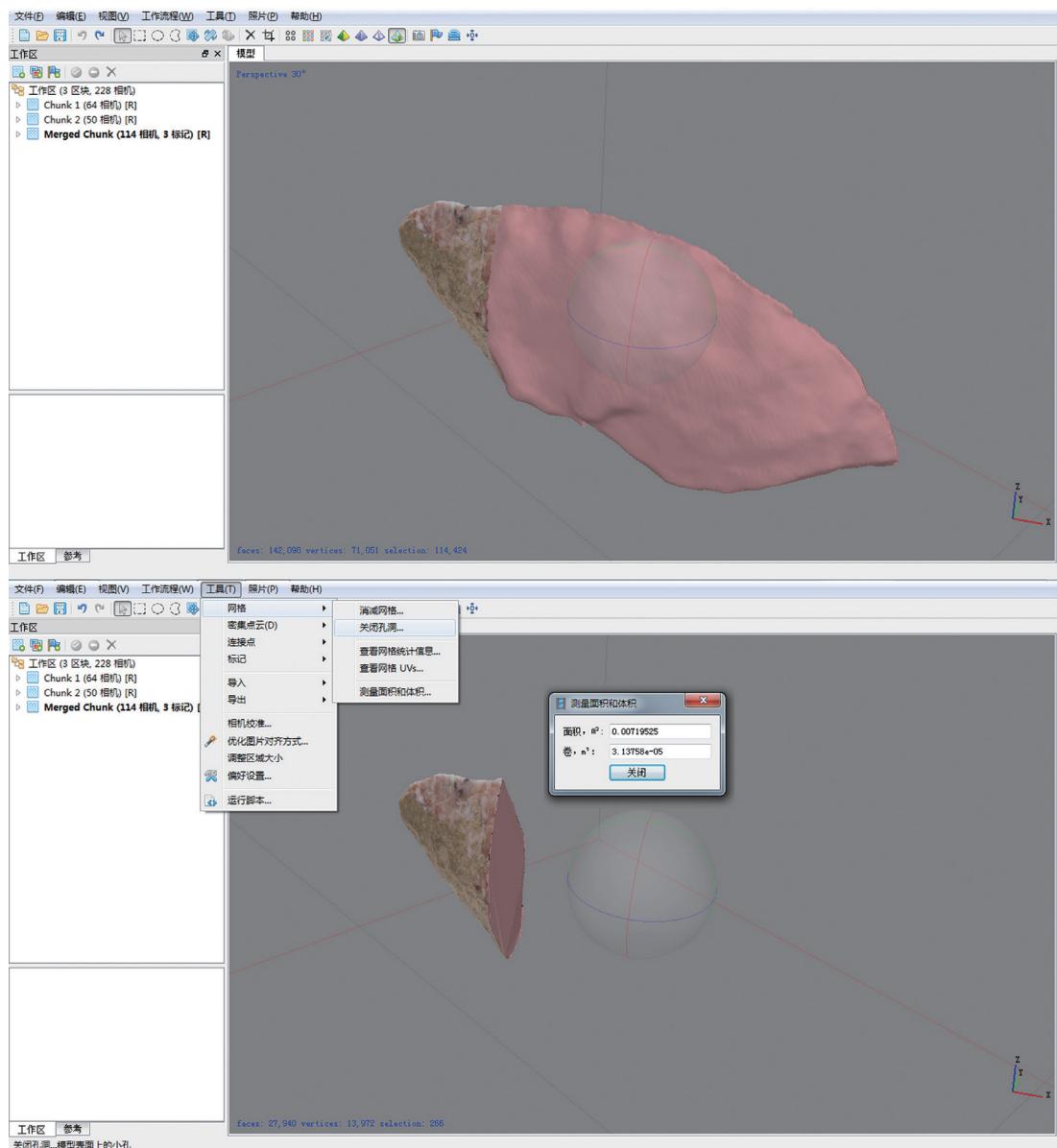


图 5 器物局部体积测量
Fig.5 Volume precise measurement

测量器物局部体积:首先,使用自由选择工具,选中测量体积的范围,然后在“编辑”下拉菜单中单击“反向选择”(图5),删除选中的部分模型,此时剩余的三维模型有一面是未闭合的,Agisoft Photoscan只能测量封闭状态下的体积,在“工具”下拉菜单中单击“网格”,单击“关闭孔洞”,此时可实现模型闭合,测量该区域的面积和体积(图5),需注意的是,软件显示的数值长度有限,超过限值后会以科学计数法表现,应自行换算(图5);

测量器物局部表面积:使用自由选择工具,选中测量面积的范围,然后在“编辑”下拉菜单中单击“反向选择”,删除选中的模型表面,此时应转动模型观察,确认除了需测量区域外,未选中其他点云,然后可测量该区域面积(图6)。为验证测量的精确性,导出正射影像,将正射影像导入Globalmapper软件中选择同一片疤测量,二者数据一致,均为 0.00085 m^2 (图7)。

角度测量:如石制品的尖角、刃角的准确数值。将石制品三维模型调整至合适的位置,导出正射影像,将正射影像导入globalmapper软件中直接测量角度,也可获取相应位置点的三维信息,通过三角函数计算角度。

通过上述方法,可以测量石制品的表面积和体积,如片疤、台面、自然面、人工面、剥片面等的精确面积,石料、器物、特定部位等的精确体积,石片角、台面角、尖角、刃角等的精确角度。从而为石制品研究提供客观、精确的数据。除Agisoft Photoscan之外,目前有多种软件可读取三维模型数据,并进行测量,有待进一步的开发和探讨。

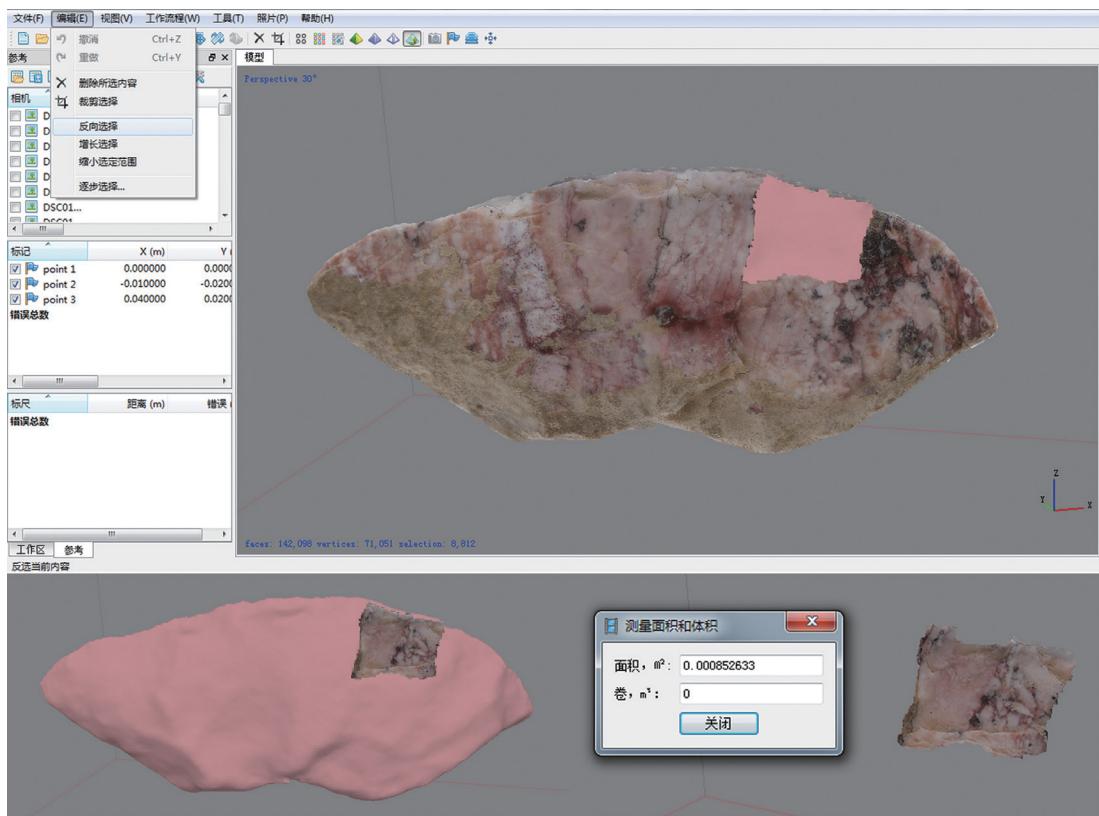


图 6 器物局部表面积测量
Fig.6 Area precise measurement

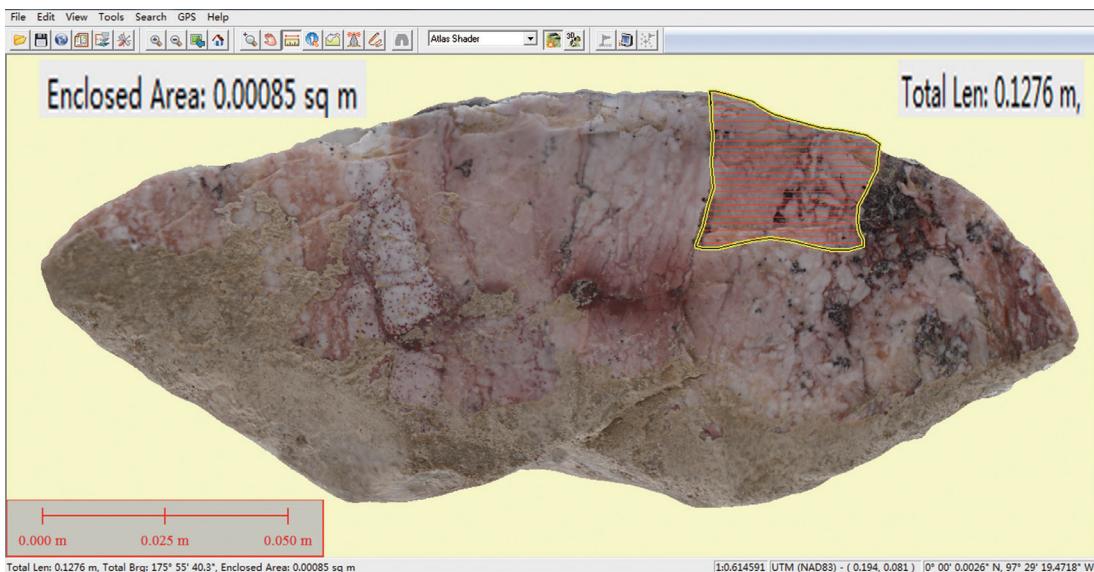


图 7 使用 Globalmapper 软件测量器物局部表面积
Fig.7 Area precise measurement in Globalmapper sofware

5 结 论

旧石器考古研究中, 研究方法的突破与技术手段的发展常常是互相促进, 研究的需求催生了技术的引入与革新, 而技术手段的突破往往也能够激发研究方法的创新。三维重建技术可以帮助我们采集研究所需的信息、数据, 提高了石制品测量信息的精度和广度, 由此催生出许多新的研究方向。多视角三维重建技术能够快速、准确地建立出土遗物的三维模型, 该技术使得三维重建方法更加便捷、易用, 不受设备、场地、人员技术要求的限制。上述特性使其可以成为旧石器考古发掘、研究的日常工具。

除了专业研究外, 该技术同样适用于文博单位的原始资料存档, 结合三维动画软件可实现文物的多视角展示, 甚至可以作为考古发掘报告的附属光盘, 使考古资料更加全面地展示给业界和公众。科技飞速发展带给考古的影响是巨大的, 从信息采集和传播的层面, 早已超越了仅通过线图、照片展示遗址、遗存信息的时代, 重大发现、难以判断的现象、或者无法定性的遗物都可以即时与同行、专家交流、探讨, 比如使用三维重建技术, 在无法接触到实物的情况下可以观察到器物的所有细节, 这在很大程度上提高了发掘、研究的效率和水准。

三维扫描、高精度 CT 扫描、多视角三维重建这三种技术各有优劣, 均能够在旧石器考古研究中发挥巨大作用。易操作、低成本、高精度的多视角三维重建技术具有更好的实用性和推广性, 应能在日常发掘与研究中发挥越来越重要的作用。其生成的点云文件、数字高程模型、正射影像等可导入其他软件, 开发出更多的信息获取途径和方法, 具有非常广阔的应用前景。

致谢：感谢刘建国先生指导本方法应用并对本文提供宝贵意见。感谢审稿专家帮助完善本文，赵海龙、彭菲、李锋亦参与讨论、提供建议，特致谢忱！

参考文献

- [1] 白成军, 王其亨. 三维激光扫描技术在文物及考古测绘中的应用 [J]. 文物, 2013 (3): 88-93
- [2] 王昌翰, 向泽君, 刘洁. 三维激光扫描技术在文物三维重建中的应用研究 [J]. 城市勘测, 2013 (6): 67-70
- [3] 史俊莉. 三维激光扫描技术在石质文物数值模拟中的应用 [J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2015, 30(5/6): 70-75
- [4] 邱兆文, 张田文. 文物三维重建关键技术 [J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2423-2427
- [5] 程小龙, 程效军, 贾东峰, 等. 三维激光扫描技术在考古发掘中的应用 [J]. 工程勘察, 2015, (8): 79-86
- [6] 陈鑫, 程虎伟. 三维激光扫描技术在田野考古中的应用——以黎城金代砖石墓为例 [J]. 文物世界, 2012, (6): 67-69
- [7] 魏薇, 潜伟. 三维激光扫描在文物考古中应用评述 [J]. 文物保护与考古科学, 2013, 25(1): 96-107
- [8] 刘建国. 辽宁建昌县东大杖子 M40 的三维建模与探索 [J]. 考古, 2014, (12): 94-98
- [9] 刘建国. 考古遗址的超低空拍摄与数据处理 [J]. 考古, 2015, (11): 98-104
- [10] 周振宇. 多视角三维重建技术在旧石器时代遗址田野考古中的应用 [J]. 考古, 2016 (7): 87-95
- [11] Shott MJ, Trail BW. Exploring new approaches to lithic analysis: Laser scanning and geometric morphometrics. *Lithic Technology*, 2010, 35(2): 195-220
- [12] Lin SCH, Douglass MJ, Holdaway SJ, et al. The application of 3D laser scanning technology to the assessment of ordinal and mechanical cortex quantification in lithic analysis[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2010, 37: 694-702
- [13] Clarkson C, Hiscock P. Estimating original flake mass from 3D scans of platform area [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2011, 38: 1062-1068
- [14] Morales JI, Lorenzo C, Vergès JM. Measuring Retouch intensity in lithic tools: a new proposal using 3D scan data. *Journal of Archaeological Method & Theory*[J], 2015, 22(2): 543-558
- [15] Clarkson C, Vinicius L, Lahr MM. Quantifying flake scar patterning on cores using 3D recording techniques[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2006, 33: 132-142
- [16] Bretzke K, Conard NJ. Evaluating morphological variability in lithic assemblages using 3D models of stone artifacts[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2012, 39: 3741-3749
- [17] Grosman L, Smikl O, Smilansky U. On the application of 3-D scanning technology for the documentation and typology of lithic artifacts[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2008, 35: 3101-3110
- [18] Li H, Kuman K, Li CR. Quantifying the reduction intensity of handaxes with 3D technology: A pilot study on handaxes in the Danjiangkou Reservoir Region, Central China. *PLOS ONE*, 2015, 10(9): 1-17