

三维数字化技术在龙门石窟考古中的应用

李兴隆

(首都师范大学历史学院 北京 100048; 龙门石窟研究院, 河南 洛阳市 471023)

摘要: 三维激光扫描与多视角三维重建作为空间信息获取的最新技术手段, 与传统的测绘手段相比具有高效率、高精度、非接触式等优点。本文通过在龙门石窟东山擂鼓台区考古报告绘图中所使用的三维激光扫描绘图成果, 对比龙门石窟东山万佛沟区考古报告绘图中所使用的多视角三维重建绘图成果来介绍两种方法在考古报告线图绘制方面各自的优点和缺点, 以及在石窟考古报告中的应用。

关键词: 龙门石窟 三维激光扫描 多视角三维重建 考古绘图

Abstract: Comparing with traditional surveying technologies, the newest technologies like the Laser 3D scanning and the multi-view 3D reconstruction technology have the advantages of high efficiency, high precision and non-touching. Based on a comparison between the results of surveying and mapping in the Leigutai area on the East Hill of Longmen Grottoes using the Laser 3D scanning technology, and the effects of Wanfogou area by using the technology of the multi-view 3D reconstruction technology, the author tries to summarize the advantages and disadvantages of the two technologies, and introduce their applications in archaeological reports of cave temples.

Keywords: Longmen Grottoes; 3D laser scanning; multi-view 3D reconstruction; archaeological surveying and mapping

石窟考古研究的基础工作是编写洞窟考古报告, 而编写考古报告的重点则是洞窟线图的绘制。要绘制线图自然离不开测量, 传统手工测量方式在实践中越来越显露出很多方面的缺陷和不足。三维激光扫描与多视角三维重建技术作为测绘领域的最新技术手段, 具有高效率、高精度等优点, 能够快速、完整地获得原始测绘数据, 重建扫描实物, 彻底改变了传统的人工单点测量方式。下面分别介绍两种测绘方法及其在龙门石窟考古报告中的应用。

一、三维激光扫描技术及其在龙门石窟考古研究中的应用

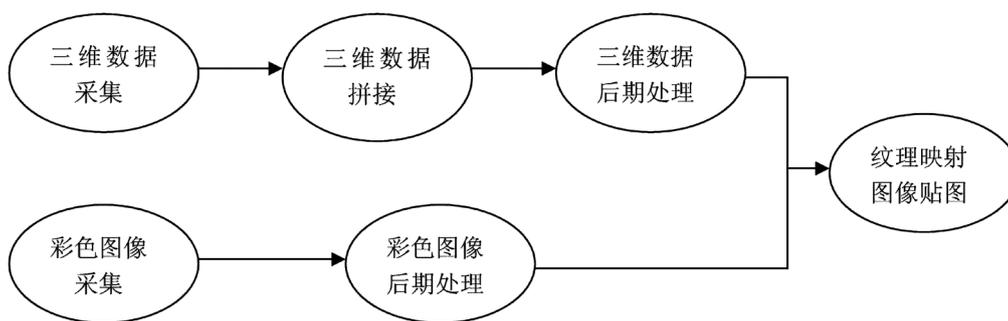
1. 三维激光扫描技术的工作原理及在石窟考古中的具体应用实例

三维激光扫描从获取数据的原理上又可以细分为两种: 结构光三维扫描和激光三维扫描。

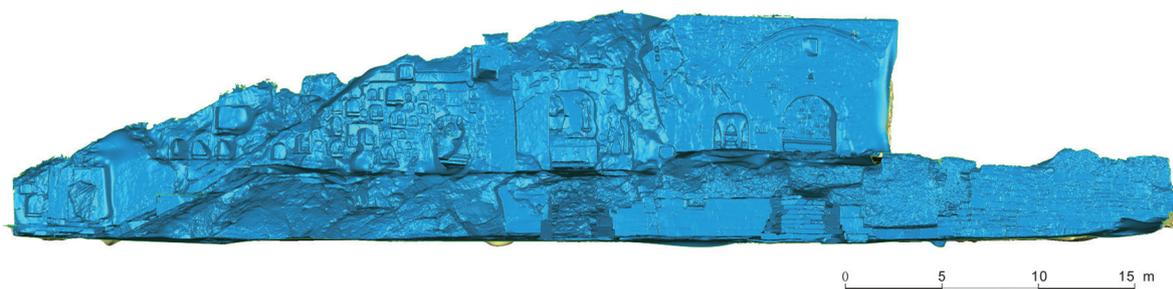
结构光三维扫描采用在物体表面投射激光光栅并用两台相机从不同方位采集图像信息, 变化

的光栅在物体表面产生出不同间隔的明亮条纹, 物体的起伏变形所引起的光栅线条变化便可以转换为物体的表面高度变化信息从而获得被测物体的三维坐标。浙江大学在结构光三维扫描进行文物三维数字化获取方面做了很多工作, 提出了基于 Gray Code+Phase Shifting 的编码方案, 通过图像主动线索特征提取的方法来生成物体的三维模型^[1]。

激光三维扫描则是通过激光发射装置对目标发射激光, 利用扫描仪内置的计时系统测出激光发出和返回的时间差, 从而计算出相应被测点和扫描仪间的距离, 再根据目标物体与扫描仪之间水平方向和垂直方向的角度差值, 实时测算出被测点的三维坐标, 经过相关软件处理、建模得到实际物体的三维几何模型。敦煌研究院在激光三维扫描方面做了许多尝试, 他们使用 DeltaSphere 3000 三维激光扫描仪对莫高窟 158 窟进行了 62 次扫描, 模型数据达 7.8G。使用 KODAK DCS660 型数码相机拍摄佛像纹理和材质照片 484 张, 纹理数据达 4.3G。最终构建出高精度的莫高窟 158



图一 龙门石窟激光三维扫描处理流程图



图二 擂鼓台三洞整体外立面正射影像图

窟三维模型^[2]。

2. 龙门石窟东山擂鼓台区考古报告中所运用的三维激光扫描技术：

龙门石窟的三维激光扫描工作主要是与北京天远三维科技有限公司合作，运用天远三维激光扫描系统结合彩色图像纹理采集系统生成洞窟三维立体数据。三维扫描工作综合运用了结构光三维扫描和激光三维扫描两种技术。对大型洞窟如擂鼓台中洞、擂鼓台南洞主要采用了激光三维扫描技术来生成大型洞窟的空间结构。对擂鼓台三洞内及外壁小龕造像则主要采用结构光三维扫描技术，来生成洞窟造像的细部特征。

具体工作主要有三维数据采集和彩色图像纹理采集，通过三维数据拼接和纹理映射贴图生成完整的三维模型。处理软件使用国际通用的逆向工程软件 Geomagic Studio，根据扫描所得的三维点云数据自动快速生成三维模型，再经过点云的去噪、简化、构网、修补、模型简化等步骤，从而生成精细的洞窟造像三维模型。工作流程为

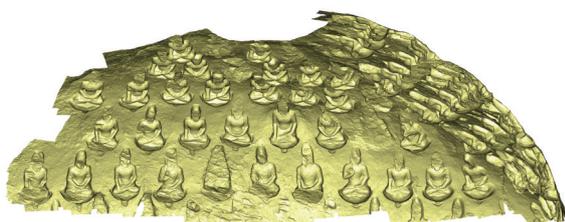
(图一)：

通过激光三维扫描得到擂鼓台三洞及窟前遗址整体连续外立面完整三维模型(图二)，激光三维扫描所得模型精确地显示出了每个洞窟的位置，如图所示整个外立面长达70余米，如果使用传统的拉基线、绑皮尺的方式测量必然会因为距离的拉大而产生很大的误差。

采用结构光三维扫描所得的擂鼓台南洞北壁窟顶造像三维模型(图三)，造像细部特征清晰，对三维模型的正立面截图解决了洞窟顶部造像因为窟顶向内倾斜所造成的造像在正立面图上的透视变形，这种变形无法用传统皮尺直接测量，而三维模型的截图则能较好地反映这种形变。结构光三维扫描所得擂鼓台南洞主尊三维模型正立面截图可以直接用于洞窟造像线图的绘制(图四)。

二、多视角三维重建技术及其在龙门石窟考古研究中的应用

1. 多视角三维重建技术的工作原理及在石窟



图三 擂鼓台南洞北壁窟顶造像三维模型



图四 擂鼓台南洞主尊三维模型及所绘制正立面线图

考古中的具体应用实例。

多视角三维重建技术是以计算机替代传统的人眼双目视觉为原理的一套三维数字多视角三维重建系统。它根据光路可逆性原理,通过在不同位置和方向获取同一物体的两幅以上的数字图像,经过计算机图像匹配及相关数学计算后得到待测物体精确的三维坐标^[3]。三维建模软件主要是由俄罗斯 Agisoft 公司研发的三维建模软件 Agisoft PhotoScan^[4],软件基于计算机视觉系统,运用多视角影像三维重建技术自动生成高质量三维模型,通过添加控制点,最终生成带有真实坐标数据的三维模型。该技术并不需要专业的测量控制系统,仅以普通单反或微单相机作为影像获取工具,使用相机从不同角度围绕被拍摄物体获取多幅数字影像,将所得影像导入软件,软件依据光路可逆性原理,对获取的全部数字影像进行匹配,生成被拍摄物体的表面三维点云,同时可自动加载照片中的纹理从而得到真实三维模型,整个建模流程基本自动化,无需另外做数据配准及模型贴图。

社科院张蕾运用多视角三维重建技术通过在不同场景拍照后拼合的方式生成了邺城佛教造像

的完整三维模型^[5]。而刘建国则在山西省万荣县寿圣寺塔的三维重建中运用无人机航拍加单反相机相结合的方式生成了寿圣寺塔的真实三维模型,节约了搭脚手架所需的大量人力物力^[6]。

2. 龙门石窟东山万佛沟区考古报告中运用的多视角三维重建技术

因为东山万佛沟区域东西向跨度较长,万佛沟内部高平郡王洞和万佛沟口处洞窟的高度差又很大,使用传统方法难于设置统一的基线而无法测量。又因为万佛沟区域许多洞窟前有茂密的树木遮挡,找不到能观测到全部洞窟的通视点,无法使用激光三维扫描生成整个万佛沟区域的外立面。所以选择采用多视角三维重建加全站仪定位的测量方法来生成万佛沟区域的三维模型。

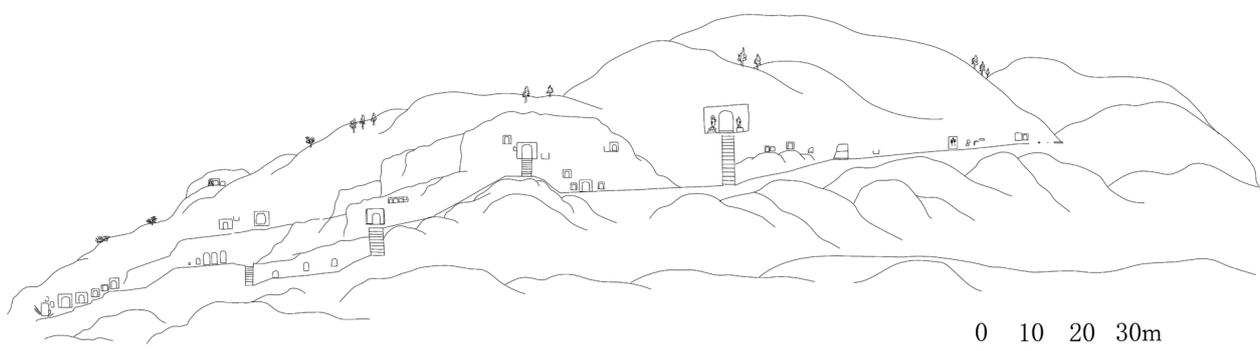
选取万佛沟内一点作为整个万佛沟区的坐标原点,使用全站仪测量万佛沟区每个洞窟的位置特征点,因洞窟前多有树木遮挡所以需要在全站仪进行多次移站,通过全站仪测量即可得到万佛沟区洞窟的准确位置信息,整个万佛沟区共测量 534 个点,进而绘制出万佛沟区域连续外立面图(图五)。

下面结合洞窟三维模型来介绍多视角三维重建的工作流程。

(1) 布置控制点

Agisoft PhotoScan 软件在摄影测量建模过程中,所生成模型仅是对实际物体的形状重建,而与实际物体的大小比例则无法获取,所以为了要获得物体的真实尺寸,需要在进行运算的影像上设置控制点。针对测量设备和洞窟大小的不同可以有二种不同的控制点布置方式:

①对需要高精度建模的单尊造像,使用 Schneider 编码方案的控制点^[7],在洞窟不同位置粘贴不少于四个控制点标记,使用全站仪测得控制点的坐标后填入软件运算,如图六(A)。而对于没有全站仪的情况,可以使用激光测距仪测量,在大型洞窟同一平面四角放置四个控制点,控制点间隔适当距离以减小局部聚集带来的误差,使用激光测距仪精确测量每两个控制点间的距离,转换成三维坐标后填入软件运算即可,如图六(B)。



图五 万佛沟区域连续外立面图

②在相对较小的洞窟中可使用平板控制点法，将一块已经使用游标卡尺精确测量平板上控制点间距离的控制板放置在洞窟内部合适位置，拍照时保持控制板不动，运算时将控制板上控制点间距离填入软件运算，如图六（C）。

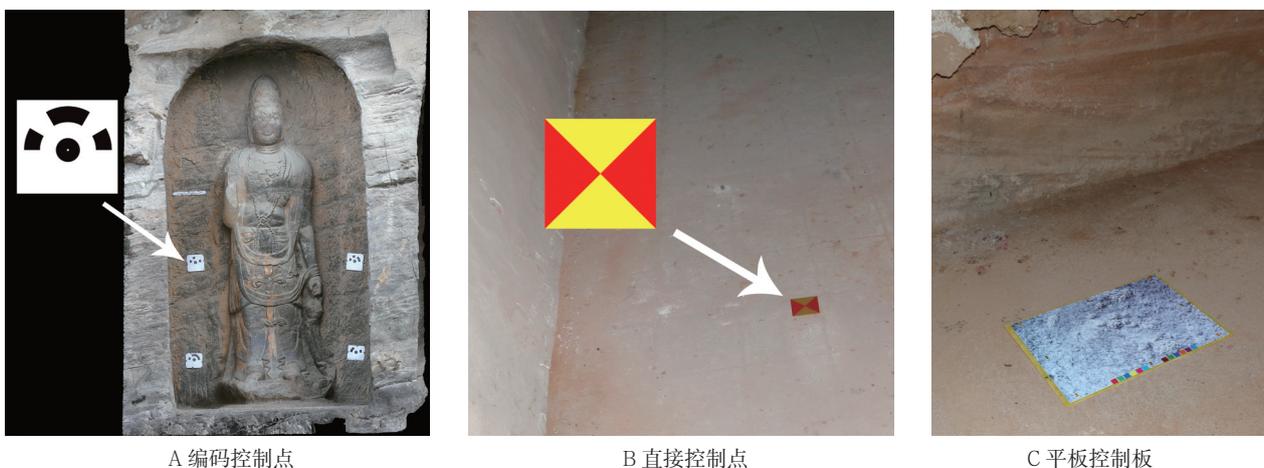
(2) 对洞窟进行全方位的拍照

洞窟内部往往结构复杂，影像的获取必须根据具体洞窟的规模、形态、分布等情况进行选择，而且影像的拍摄效果在一定程度上决定了三维建模的最终效果，故不同类型的石窟在获取影像时需采用不同的拍摄方法，对外立面及连续壁面须正对壁面拍摄，对整体洞窟须在窟内环绕一周拍摄，对单尊造像则绕其一周从不同角度拍摄，站立高大造像须从上部俯拍头顶部分，坐姿造像应从下部仰拍其座下部分（图七）。

(3) 运算生成三维模型及后期处理

对所拍摄照片做简单处理，使得每幅数字影像的亮度、反差、阴影等相对一致，保证每两张照片间重复率达到 80%，将拍摄所得照片整体导入 photostan 软件中，通过软件中对齐照片、建立密集点云、生成网格、生成纹理四步运算即可得到完整的洞窟模型（图八）。左侧为生成的洞窟模型，右侧为相机拍照的照片，程序可以推算出每张照片拍照时的位置信息，左侧模型上每一个蓝色方形即为每一张照片拍摄时相机所在的位置及拍摄角度。在预先布置好的控制点上创建标记，然后在 photostan 软件的视图一窗口一参考中填入测量好的控制点坐标，即可得到与真实洞窟一致的三维坐标。

使用软件的导出正射影像图功能即可截取所需要的立面图、正视图。通过选择特征点后删除部分模型再水平或垂直翻转即可截取所需要的横

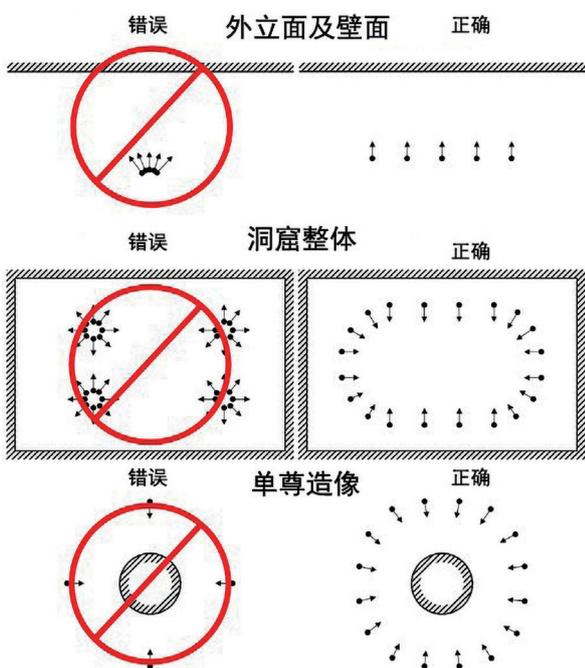


A 编码控制点

B 直接控制点

C 平板控制板

图六 洞窟内布设控制点的三种方式



图七 照片拍摄位置示意图

剖图、纵剖图、平面图（图九）。图中不同部分的造像绘制时使用了不同颜色的线条，这样方便后期编辑、整理，在仅需要轮廓时可以将细部特征隐藏，从而避免了手工绘图不同精细度下的多次

描图。利用 photoscan 提供的导出数字高程模型，可得到洞窟造像的 DSM 数字表面模型数据，在 Global Mapper 软件中可以生成等值线数据，可以直观地反映出造像的一些特征，如造像轮廓线在等高线图上十分清晰（图一〇）。

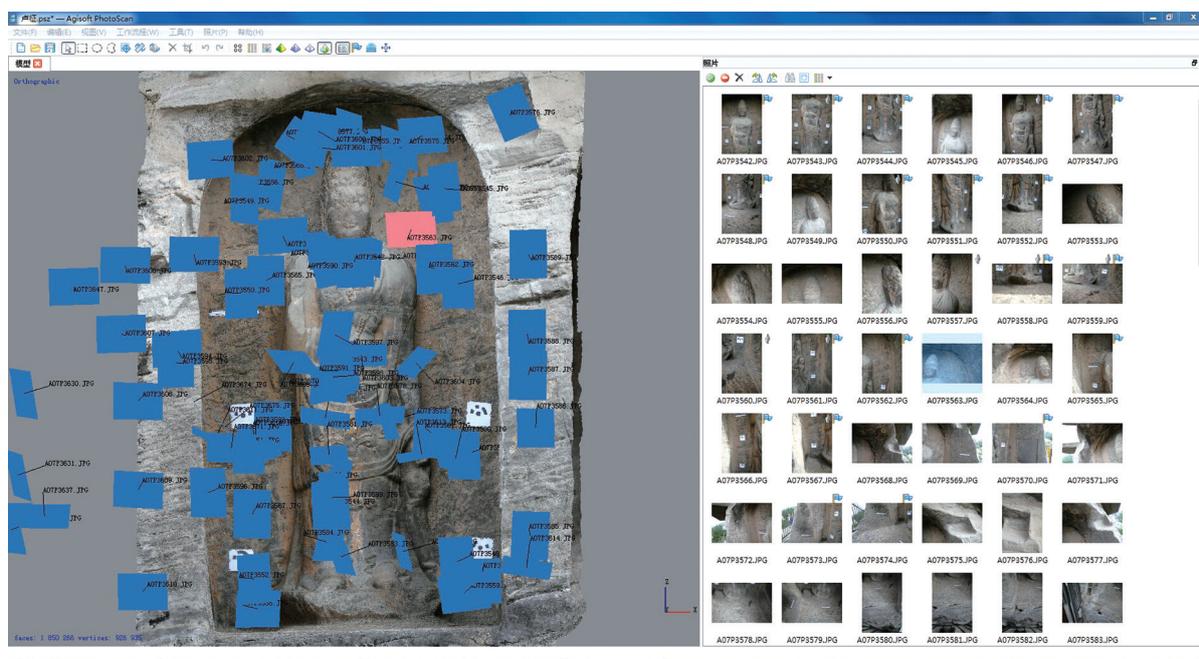
三、两种方法的区别与联系及在使用中遇到的问题

三维激光扫描和多视角三维重建都是获得洞窟三维模型的一种手段，虽然所使用的具体方法不同，但目的相同，都是取得物体的三维模型。

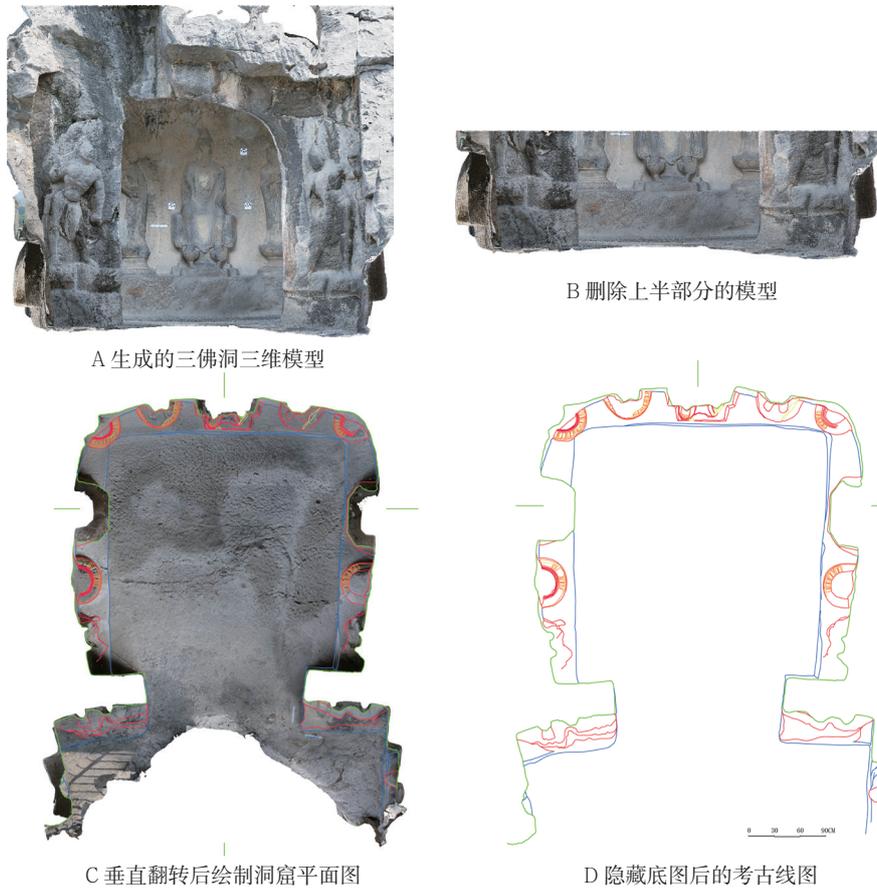
1. 两种三维模型获取方法的对比

结构光三维扫描的优点是扫描精度高，其测量精度单面测量可达 0.02 毫米，连续拼接测量可达 ≤ 0.10 毫米 / 4 米^[8]。但缺点是因为激光光栅投影幅面有限，单次扫描面积过小，需要通过不断拼接扫描才能完成较大洞窟的扫描，而且大型洞窟需要搭建脚手架，需要花费大量的人力物力和时间成本。而激光三维扫描的优点是单次扫描幅面大，扫描速度快，但缺点是扫描精度不高，对造像细部特征表现不完整。

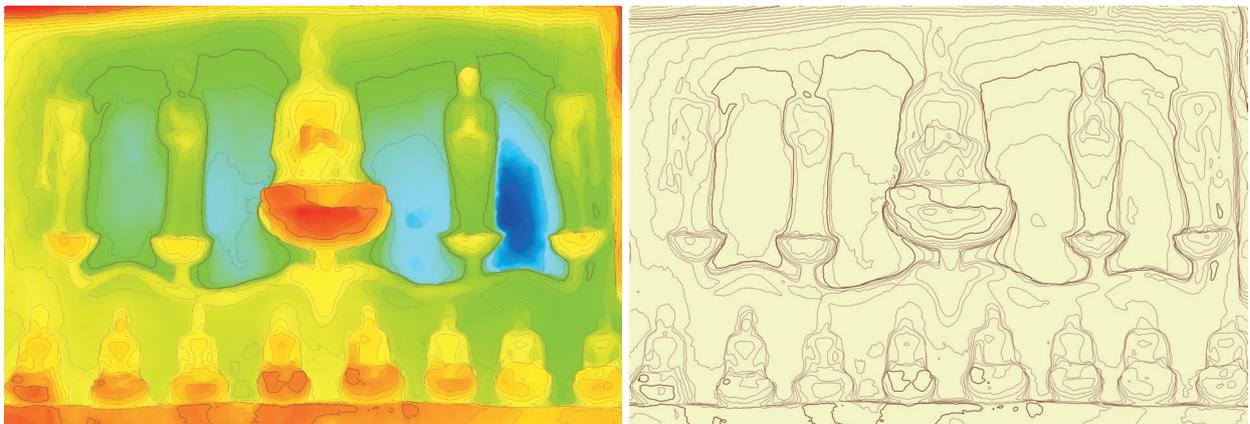
激光三维扫描还有一个缺点是由于目前绝大



图八 东山万佛沟区卢征造像龕三维模型



图九 利用三维模型绘制洞窟平面图步骤



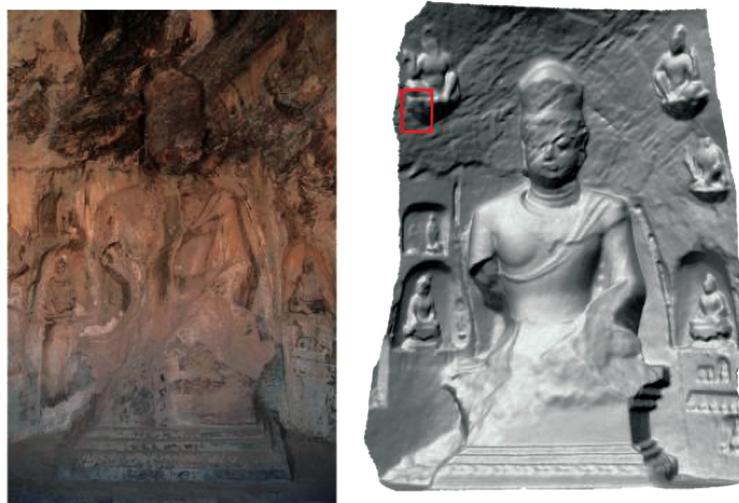
图一〇 高平郡王洞正壁数字表面模型 (DSM) 及等值线图 (5 厘米间隔)

多数的激光扫描仪都只能发射单色激光，扫描所得的三维模型缺少色彩纹理信息，所以需要结合数码相机拍摄的文物图像信息，通过贴图来完成纹理绑定从而得到带有彩色纹理信息的三维模型。在石窟类复杂模型的精细纹理映射与重建方面没有成熟的软件，目前国内仅有武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室为敦煌石窟三维重建定制的纹理映射软件 ModelPainter^[9]，但其造作极为复杂，需要非常高的软件操作水平和美术绘画功底，不利于广泛推广使用。

多视角三维重建系统具有精度高、非接触测量和便携等特点，测量现场工作量小、快速、高效和不易受温度变化、气流变化和振动等外界因素的干扰，所生成的模型自带纹理信息，非常适合在考古工地采集三维模型。

2. 为了减轻考古线图绘制的工作量，尝试对三维模型进行了基于特征线的考古线图提取^[10]，但是效果不理想，因为石窟造像千差万别而且风化严重，多数时候风化、残破痕迹线比造像特征线更加明显，所提取的线图带有过多的风化线、残破线，反而对考古线图的绘制造成干扰（图一一），造像细部特征还是需要人工手工绘制。

3. 三维激光扫描所得三维模型数据量很大，因为当前计算机性能的限制，这种方法对大型洞窟的扫描所得数据需要做一个精简取舍，需要造像细部的保留高精度三维模型，需要外轮廓的可以仅仅保留低精度三维模型。激光三维扫描所得到的三维模型比较精细，适合保存数据及将来的三维打印；而激光扫描数据虽可以后期粘贴纹理特征，但是因为模型生成和拍照不是同时进行的，故贴图效果一般比较差而且费时费力；多视角三



A 造像原始照片

B 生成的三维模型



C 通过模型提取的线图



D 手工绘制的考古线图

图一一 基于三维模型的自动线图提取

维重建所得的三维模型颜色材质较真实，与实物更加接近，所以两种模式应该结合使用。

注 释

- [1] 刘洋:《基于编码结构光的三维扫描仪原型系统研发》，浙江大学硕士学位论文，2005年。
- [2] 刘刚、张俊、刁常宇:《敦煌莫高窟石窟三维数字化技术研究》，《敦煌研究》2005年第4期。
- [3] 张祖勋、杨生春、张剑清等:《多基线数字近景摄影测量》，《地理空间信息》第5卷第1期，2007年2月。

- [4] Agisoft PhotoScan 软件当前版本为 1.7.2, 该软件自 1.5 版本开始更名为 Agisoft Metashape, 因 Agisoft PhotoScan 名称使用较为广泛, 故在此仍沿用原名称。
- [5] 张蕾:《邳城佛教造像的三维重建探索》,《南方文物》2015 年第 4 期。
- [6] 刘建国:《山西省万荣县寿圣寺塔的多视角影像三维重建》,《文物保护与考古科学》2017 年第 5 期。
- [7] 姚喜、栾学科等:《基于特征不变量的近景摄影测量标志点的识别方法》,《测绘技术装备》第 12 卷, 2010 年第 1 期。
- [8] 张恒、李仁举、叶成蔚:《三维摄影测量系统及照相式三维扫描系统的探讨》,《2007¹ 中国仪器仪表与测控技术交流大会论文集》, 第 202 页。
- [9] 常永敏、张帆、黄先锋、刘刚:《基于激光扫描和高精度数字影响的敦煌石窟第 196、285 窟球幕图像制作》,《敦煌研究》2011 年第 6 期。
- [10] Tao Luo, Renju Li, Hongbin Zha,《3D Line Drawing for Archaeological Illustration》,《International Journal of Computer Vision》, vol. 94, no. 1, 2011, pp. 23-35
- (责任编辑: 张西峰)