引文格式：白铁勇,钱素芳,王靠省. 移动式三维激光扫描系统在崖墓考古绘图中的应用[J]. 地理空间信息, 2024, 22(7): 64-67. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.07.014

移动式三维激光扫描系统在崖墓考古绘图中的应用

白铁勇[1]，钱素芳[1]，王靠省[2]
（1. 成都文物考古研究院，四川 成都 610072；2. 中铁二局集团有限公司测量中心，四川 成都 610031）

摘　要：崖墓是四川地区具有地域特色的丧葬形式，数量众多，分布范围广泛。在分析墓葬间的空间分布关系方面，传统测量方法存在作业效率低、总体精度差等问题。因此，以新川创新科技园屈家山2号文物点为例，首先采用基于即时定位与地图构建技术的移动式三维激光扫描系统获取点云数据，再利用专业软件准确绘制墓葬分布图，并与测距仪测量结果进行对比分析。结果表明，移动式三维激光扫描系统可明显提高绘制崖墓分布图的作业效率，且满足测量精度要求，在考古领域中具有较好的应用前景。

关键词：崖墓；即时定位与地图构建；移动式三维激光扫描系统；崖墓分布图
中图分类号：P232　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）07-0064-04

Application of Mobile 3D Laser Scanning System in Archaeological Mapping of Cliff Tombs

BAI Tieyong[1], QIAN Sufang[1], WANG Kaosheng[2]
(1. Chengdu Institute of Cultural Relics and Archaeology, Chengdu 610072, China;
2. Survey Center of China Railway No.2 Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: As a funeral form with regional characteristics in Sichuan, cliff tombs are numerous and widely distributed. In the analysis of spatial distribution relationship between tombs, the traditional measurement methods have some problems, such as low efficiency and poor overall accuracy. Therefore, taking Qujiashan No.2 cultural relic site in Xinchuan Innovation and Technology Park as an example, we used the mobile 3D laser scanning system based on simultaneous localization and mapping (SLAM) technology to obtain point cloud data at first. And then, we used professional software to accurately draw the distribution map of tombs, and compared it with the measurement results of rangefinder. The result shows that the mobile 3D laser scanning system can significantly improve the mapping efficiency of cliff tomb distribution map, and meet the requirements of measurement accuracy, which has a good application prospect in archaeology.

Key words: cliff tomb, SLAM, mobile 3D laser scanning system, cliff tomb distribution map

崖墓是在石崖壁面或岩层中开凿洞穴为墓室的墓葬形式。作为四川地区具有地域特色的丧葬形式，崖墓开始流行于西汉末年，至南北朝时期已延续500多年[1]，以川、渝地区为中心分布，在滇北、黔西、湘西、陕南、豫西南等周边地区也有发现[2]。崖墓不但分布广泛，而且数量众多，在成都新川创新科技园片区分布有6 000余座古代墓葬，其中包含大量崖墓[3]。

为准确、科学地表达墓葬间的空间分布关系，绘制墓葬分布图是一项重要工作，可为后续考古研究提供重要资料。早期绘图采用皮尺和罗盘的方式，存在测量精度低、工作量大、周期长等问题。随着测绘技术的创新与发展，数据获取方式越来越便捷，常用方法包括两种：①利用全站仪或实时动态载波相位差分技术（RTK）等手段采集关键地物、地貌、墓道特征点，然后在专业成图软件中绘制数字线划图；②利用无人机超低空摄影进行三维重建，生成墓葬区的三维模型，然后用专业软件绘制成果图。前者可一次性获得高精度三维坐标，但费时费力，且外业易受通视、信号等因素影响，特别是全站仪需要几个人的配合操作，考古工作人员较难掌握；后者的设备成本低、操作难度小、精度高，但需要考虑空域的问题。两种方法都无法直接获取墓室内的数据，无法对墓葬形制进行准确表达。随着三维激光扫描技术的飞速发展，突破了传统测量中的单点测量模式，能快速获取物体表面的三维空间信息，具有高效、快速、非接触等优势。根据工作模式和载体的不同，三维激光扫描仪分

收稿日期：2023-03-09。
项目来源：国家社科基金重大项目（21&ZD223）。
第一作者简介：白铁勇（1985—），硕士，研究方向为空间考古，E-mail：bty8@qq.com。

为机载三维激光扫描系统、固定式三维激光扫描系统和移动式三维激光扫描系统。机载三维激光扫描系统依赖于全球卫星导航系统（GNSS）和惯性导航系统（IMU），只能用于室外环境；固定式三维激光扫描系统可用于室内外环境，但复杂的墓室结构需要大量换站，再进行点云拼接，数据获取的效率较低；移动式三维激光扫描系统基于即时定位与地图构建（SLAM）技术，无需GNSS信号，数据采集一体化扫描作业，适用于室内外场景，已在测绘领域广泛应用[4–6]。基于此，本文采用移动式三维激光扫描系统进行崖墓分布图的测绘，并对其精度进行验证。

1　绘图方法

1.1　传统绘图方法

目前全站仪、RTK、无人机已作为考古的必备工具，被广泛应用于田野考古绘图中。全站仪或RTK绘图外业先采集特征点（包括遗迹、地形），内业再通过专业成图软件（南方CASS成图系统）绘制分布图；无人机三维重建方法首先利用RTK测设像控点，再采用消费级无人机低空摄影，通过PhotoScan/ContextCapture/Pix4D等三维重建软件生成三维模型、等高线、数字高程模型、数字正射影像等成果，最后利用南方CASS成图系统或清华山维EPS软件绘制成果图。两种方法都可以直接获取墓道的空间分布情况，但不能体现墓室结构[7]。为进一步在分布图上体现各崖墓的形制，传统方法需花费大量时间对纸质的崖墓平、剖面图进行扫描和矢量化，再依据墓道位置进行配准，最后放置在崖墓分布图中，以此表现整个崖墓的空间分布情况[8]。

1.2　移动式三维激光扫描方法

移动式三维激光扫描系统由激光扫描仪、IMU和SLAM算法组合而成[9]。激光扫描仪360°旋转并发射激光束，利用光速计算扫描仪与扫描目标之间的距离；IMU实时记录仪器的姿态数据；利用SLAM算法结合二维点云数据与IMU数据生成精确的三维点云数据。SLAM技术是该方法的核心技术，由机器人领域提出，机器人从未知环境的任意一点出发，在运动过程中通过重复观测到的环境特征定位自身位置和姿态，再根据自身位置构建周围环境的增量式地图，从而达到同时定位和地图构建的目的[10–11]。扫描作业流程包括外业采集和内业处理，其中外业采集负责现场踏勘与路径规划、布测控制点、手持仪器按规划路径进行数据采集；内业处理负责数据解算、坐标转换，利用点云数据进行绘图。

崖墓分布图是对发掘区墓葬分布的具体表现，既要体现整个发掘区地形情况，又要准确绘制每个墓葬的平面形状、位置。通过SLAM技术获取发掘区内地形、墓葬的三维点云数据，再利用专业处理软件对点云进行处理，最后利用绘图软件绘制所需成果。

2　案例实践

屈家山2号文物点位于成都新川创新科技园片区屈家山，山北侧、东侧分布有多座崖墓，且多座崖墓侧室较多，采用传统方法费时费力，因此采用移动式三维激光扫描系统进行测绘，采用英国生产的GeoSLAM ZEB–Horizon仪器获取该文物点的崖墓空间分布关系。

2.1　外业采集

1）现场踏勘。在数据采集前，需对待测区域进行现场踏勘。由于移动激光扫描系统利用IMU和SLAM技术进行数据获取，为减弱累计误差影响、保证点云成果精度，要求扫描路线在规定时间内构成闭合环。在踏勘过程中需对测区面积、墓葬分布、墓室结构等情况有初步了解，进而规划扫描路线；同时在避免遗漏、重复冗余数据较少的情况下，在最短时间内获取所需的空间数据。根据现场探勘情况，将测区分为两块区域进行扫描。

2）布测控制点。由于每次开关机扫描获取的点云数据是在不同的独立坐标系下，为使每次扫描成果的坐标基准一致，每个扫描区域内至少均匀布设3个及以上的控制点，既可保证扫描点云数据精度；又便于内业点云数据的坐标转换。在两个扫描区域内各布设6个控制点（图1），并利用网络RTK测量坐标。

3）数据采集。通过手持扫描仪按前期规划好的路线边走边扫、所见即所得，采用简单高效的方式一次性采集地形、各崖墓的三维点云数据。当遇到控制点时，仪器在控制点上静止放置5 s以上，仪器将自动识别并记录控制点的位置。为提高点云数据的匹配精度和相对点位精度，扫描作业过程中仪器需保持平稳、匀速前进，避免原地转圈、突然跳跃、方向陡变等情况[12]。同时，适当增加行进路线闭合环的数量，以提高成果解算精度与可靠性。在扫描过程中，由于山体部分区域较陡，行走时产生了跳跃，生成的点云数据产生了分层现象，对该区域进行了补测。图1中的红色线条为扫描行走的实际路径，两组扫描时间均控制在20 min以内。

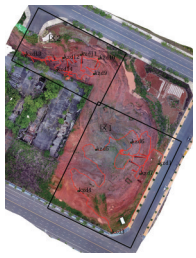


图1 控制点分布与行走路径

2.2 内业处理

野外数据采集完成后，在内业进行点云解算、坐标转换等处理，再利用点云绘制成果图。

2.2.1 点云预处理

首先利用配套的软件GeoSLAM Hub对外业采集的点云原始数据进行解算，自动化处理得到独立坐标系下的三维点云数据和扫描路径，在软件中以二维或三维的形式查看扫描结果，若出现漏扫的区域则及时补测；再将网络RTK获取的控制点坐标输入GeoSLAM Hub软件，自动计算并完成点云的坐标转换工作，生成所需坐标基准下的点云数据。此时，两个扫描区域的点云数据可直接合并在一起，无需拼接。

2.2.2 地形与分布图绘制

1）地形绘制。在实际扫描过程中，由于目标表面材质、周围环境、仪器设备等因素影响，获取的数据存在噪声点，因此需对点云数据进行稀释、降噪、裁剪、删除体外孤点等预处理，以更好地反映目标空间位置信息。在Trimble RealWorks（TRW）中进行点云去噪处理，经点云数据自动分类，将准确提取地面数据，过滤植被、建筑等无用数据。基于点云空间数据可制作测区整体三维模型，也可制作测区的数字线划图。将提取的地面点云数据导入TRW软件，利用“制图/等高线”功能，设置好等高距，即可生成等高线（图2）。

2）崖墓平、剖面图绘制。单个崖墓的平面图也在TRW软件中生成。利用“制图/平面切割”功能，选择不同的切平面即可得到崖墓的平、剖面点云数据，如以Z轴为切平面，即生成崖墓的水平面点云数据。将生成的等高线、墓葬平面点云数据导入CASS软件进行等高线拟合、绘制墓葬和墓室等编辑工作，最终得到崖墓空间分布图（图3）。

3 精度分析

在数据解算中，从刚好满足三维空间坐标转换需求的3个坐标点开始，逐步增加控制点数量，并计算每个控制点的误差情况（表1），可以看出，区域1的控制点误差大于区域2，这是由于区域1的面积较大，且地表特征点较少，因此点位误差较大。另外，采用测距仪测量了多个墓葬的边长尺寸，并在三维点云中量测对应位置的距离，结果见表2，二者的最大较差为1.8 cm，最小较差为0。统计分析发现，两个区域内控制点数量为6个时，中误差相对稳定，分别为4.9 cm和3.4 cm（表3）。此次测量的绝对精度在5 cm以内，各墓葬边长相对误差较小，说明采用移动式三维激光扫描系统绘制崖墓分布图在精度上满足绘图要求[13]。

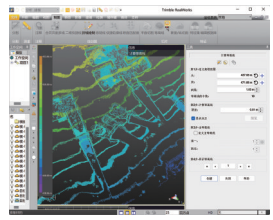


图2 等高线生成图

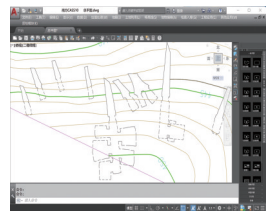


图3 崖墓分布图

表1 控制点中误差/m

区域	控制点数量	控制点名称	中误差
区域1	3	1、3、5	0.040
	4	1、3、4、5	0.046
	5	1、3、4、5、6	0.049
	6	1、3、4、5、6、7	0.049
区域2	3	9、10、12	0.022
	4	9、10、12、14	0.024
	5	9、10、12、13、14	0.036
	6	9、10、11、12、13、14	0.034

表2 相对误差/m

控制点	点云测量	测距仪测量	较差
1	1.170	1.167	0.003
2	1.210	1.220	−0.010
3	1.230	1.244	−0.014
4	1.380	1.385	−0.005
5	1.390	1.391	−0.001
6	1.450	1.462	−0.012
7	1.460	1.478	−0.018
8	1.590	1.593	−0.003
9	1.640	1.640	0.000

与传统方法相比，移动式三维激光扫描系统具有以下优点：①仪器便于携带，外业操作简单便捷，无论是简单还是复杂的墓葬，只需一人手持设备即可对墓葬室内外一体化扫描，快速准确获取三维点云数据，数据采集效率高，内业点云处理、成果制作自动化程度高，工作效率大幅提高；②一次作业，获得多种成果，通过获取的三维点云，可制作三维模型、绘制墓葬平剖面图等多种成果；③采用SLAM技术，不

表3　实测坐标与软件计算坐标较差/m

区域	点名	Δx	Δy	Δh	误差
	kzd1	−0.011	−0.013	0.012	0.044
	kzd3	0.021	0.010	0.002	0.055
	kzd4	0.034	0.006	0.012	0.055
区域1	kzd5	−0.012	−0.039	0.021	0.023
	kzd6	−0.018	0.045	−0.026	0.055
	kzd7	−0.016	0.007	−0.013	0.044
	kzd1	0.002	−0.016	−0.008	0.056
	kzd10	−0.020	0.030	0.026	0.021
	kzd11	−0.006	0.054	−0.004	0.023
	kzd12	0.028	0.008	−0.047	0.036
区域2	kzd13	0.019	−0.008	−0.010	0.046
	kzd14	−0.034	−0.042	−0.008	0.055
	kzd9	0.037	−0.023	−0.004	0.022
	kzd10	−0.023	−0.019	0.047	0.018

注：区域1的中误差为0.049 m；区域2的中误差为0.034 m。

依赖GNSS信号，不受测量环境、墓室内光线的影响，可全天候、全地形作业，在大范围、狭小复杂空间都可以胜任。

4　结　语

相较于传统GNSS、全站仪和无人机作业方法，移动式三维激光扫描系统可实现外业数据采集一次完成，内业半自动成图，精度满足成图要求，省时省力，作业效率大大增加。随着考古数字化的推进，对准确获取和更新考古遗存三维数据提出了更高的要求，移动式三维激光扫描系统在这方面具有很大优势，在考古领域将有更广阔的应用前景。

参考文献

[1] 罗二虎. 四川崖墓开凿技术探索[J]. 四川文物，1987(2):35-38

[2] 索德浩. 四川崖墓起源再论[J]. 中国国家博物馆馆刊，2018(11):24-44

[3] 川观新闻. 一部地下“四川通史”！新川科技园考古发现6 000余座古墓，延续2 000多年[EB/OL]. (2020-05-14)[2023-02-19]https://cbgc.scol.com.cn/news/286026

[4] 黄鹤，佟国峰，夏亮，等. SLAM技术及其在测绘领域中的应用[J]. 测绘通报，2018(3):18-24

[5] 檀继猛，张鹏飞，邵士成，等. 移动式三维激光扫描仪在地下管廊测量中的应用[J]. 测绘通报，2019(12):156-158

[6] 沈良，毛承逆，张雨祥，等. 农村房地一体测量中SLAM与传统测量方法的比较[J]. 地理空间信息，2022，20(7):104-108

[7] 张亮，贺越洋，陈军，等. 四川省简阳市金山村方古井山M10，M13，M23号崖墓发掘简报[J]. 江汉考古，2019(6):50-64

[8] 成都文物考古研究院，双流区文物保护管理所. 成都华阳田家寺墓地[M]. 北京:文物出版社，2021

[9] 张天巧. 无人机倾斜航测技术和SLAM移动测量技术融合在测制1∶500地籍图中的应用[J]. 矿山测量，2020，48(5):14-17

[10] 史殿习，童哲航，杨绍武，等. 面向场景变化的动态自适应同时定位与地图构建[J]. 中国科学:技术科学，2018，48(12):1373-1391

[11] 李效超，王智，孙晓丽，等. 手持式移动三维激光扫描仪在地下空间普查中的应用研究[J]. 城市勘测，2020(2):62-65

[12] 吴献文，史合印. 基于3D SLAM移动式激光扫描技术的地上地下空间一体化测绘[J]. 地矿测绘，2021，37(3):6-11

[13] 田野考古制图标准:WW/T 0035-2012[S].

（上接第40页）

[6] Fotheringham A S，Yang W，Kang W. Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR)[J]. Annals of the American Association of Geographers，2017，107(6):1247-1265

[7] 沈体雁，于瀚辰，周麟，等. 北京市二手住宅价格影响机制:基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究[J]. 经济地理，2020，40(3):75-83

[8] 黄颙昊，杨新苗，岳锦涛. 基于多尺度地理加权回归模型的城市道路骑行流量分析[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2022，62(7):1 132-1 141

[9] 丁亮，钮心毅，宋小冬. 上海中心城就业中心体系测度:基于手机信令数据的研究[J]. 地理学报，2016，71(3):484-499

[10] 谢栋灿，王德，钟炜菁，等. 上海市建成环境的评价与分析:基于手机信令数据的探索[J]. 城市规划，2018，42(10):97-108

[11] 中国城市规划设计研究院，建设部体改法规司. 城市规划基本术语标准[Z].

[12] 王秀兰，李雪瑞，冯仲科. 基于信息熵原理的北京城市扩展研究[J]. 中国人口·资源与环境，2010，20(增刊1):89-92

[13] Li T，Jing P，Li L，et al. Revealing the Varying Impact of Urban Built Environment on Online Car-hailing Travel in Spatio-temporal Dimension: An Exploratory Analysis in Chengdu，China[J]. Sustainability，2019，11(5):362-369

[14] 李苗裔，马妍，孙小明，等. 基于多源数据时空熵的城市功能混合度识别评价[J]. 城市规划，2018，42(2):97-103

[15] 秦昆，许凯，吴涛，等. 智能空间信息处理与时空大数据分析探索[J]. 地理空间信息，2022，20(12):1-11

[16] Downs A. The Law of Peak-hour Expressway Congestion[J]. Traffic，1962，33(3):347-362