

# 结合激光与视觉点云的古遗迹三维重建应用

张子健<sup>1,4\*\*</sup>, 程效军<sup>1,2\*</sup>, 曹宇杰<sup>1</sup>, 王峰<sup>3</sup>, 喻月<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092;

<sup>2</sup> 自然资源部现代工程测量重点实验室, 上海 200092;

<sup>3</sup> 广州市城市规划勘测设计研究院, 广东 广州 510060;

<sup>4</sup> 城市空间信息工程北京市重点实验室, 北京 100038

**摘要** 针对单一点云数据在古遗迹数据存档和模型重建过程中存在数据缺失的问题, 以柬埔寨吴哥女王宫遗址为例, 提出一套完整和高效的数字化记录与重建方案。通过结合地基激光雷达点云与无人机影像视觉点云, 可以解决模型重建过程中激光与视觉点云的配准和融合以及模型构建与修补等关键问题, 从而获得目标对象的三维模型。在此基础上, 进一步提出的模型应用成果场景漫游动画和平立剖面图, 能够更好地为吴哥女王宫保护、修复和研究提供静态和动态数据基础。所提方案能够为古遗迹保护过程中的数据采集、数字化存档、数据分析、场景展示和遗迹修复等多方面提供数据基础与技术参考, 进一步推动激光雷达在该领域中的应用。

**关键词** 遥感; 激光雷达; 激光与视觉点云; 点云配准与融合; 三维重建; 遗址古迹

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1110001

## Application of 3D Reconstruction of Relic Sites Combined with Laser and Vision Point Cloud

Zhang Zijian<sup>1,4\*\*</sup>, Cheng Xiaojun<sup>1,2\*</sup>, Cao Yujie<sup>1</sup>, Wang Feng<sup>3</sup>, Yu Yue<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Advanced Engineering Surveying Ministry of Natural Resources, Shanghai 200092, China;

<sup>3</sup> Guangzhou Urban Planning and Design Survey Research Institute, Guangzhou, Guangdong 510060, China;

<sup>4</sup> Beijing Key Laboratory of Urban Spatial Information Engineering, Beijing 100038, China

**Abstract** This paper addresses the problem of the lack of single point cloud data for archeological site data archiving and model reconstruction, using the ruins of Banteay Srei in Angkor, Cambodia as a case study, and proposes a complete and efficient digital recording and reconstruction plan. By combining the ground-based lidar point cloud and the UAV-image visual point cloud, the key issues, such as the registration and fusion of the laser and the visual point clouds, and model construction and repair in the model reconstruction process can be solved, and a three-dimensional model of the target object obtained. Based on this, the proposed model application can produce a scene-roaming animation and vertical profile view that can provide an enhanced static and dynamic data basis for the protection, restoration, and research of the Angkor Banteay Srei. The proposed scheme can also provide data foundation and technical reference for data collection, digital archiving, data analysis, scene display, and relic restoration for ancient heritage protection, and further promote the application of the lidar technology to these fields.

**Key words** remote sensing; LiDAR; laser and vision point cloud; point cloud registration and fusion; three-dimension reconstruction; relic sites

**OCIS codes** 280.3640; 010.3640; 110.6880

收稿日期: 2020-04-22; 修回日期: 2020-05-27; 录用日期: 2020-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(41671449, 41974213)、广州市科技计划项目(201704030102)、城市空间信息工程北京市重点实验室经费资助项目(2020219)

\* E-mail: cxj@tongji.edu.cn; \*\* E-mail: z.zhang.tongji@foxmail.com

# 1 引言

遗址古迹作为人类精神文明的重要载体之一,在科技发展、教育和经济等方面发挥着重要的作用,所以应切实做好遗址古迹的保护工作。然而,遗址古迹的所处环境不容乐观,人为破坏和自然腐蚀等因素已对其造成不可逆转的损毁。目前,在遗迹保护方面,一方面缺乏有效的记录手段,无法对某些复杂的构筑物进行数据采集;另一方面缺乏精确的存档数据,难以对破损古迹进行快速和有效的修复与参数化重建。因此,如何对遗址古迹进行有效的数字化记录与三维存档是目前的研究热点之一。

近年来,激光雷达技术(LiDAR)是快速发展起来的主动式观测手段之一,具有观测能力强、精度高和安全性高等优点,已广泛应用于城市建模<sup>[1-2]</sup>、林业调查<sup>[3-4]</sup>、计量测算<sup>[5-7]</sup>及道路监测<sup>[8-10]</sup>等领域。在遗迹保护方面有成功案例,文献[11]利用了IMAGER 5006地面激光扫描仪完成对埃塞俄比亚ALMAQAH寺庙的三维模型重建;文献[12]使用了两种类型的激光扫描仪完成敦煌石窟第196窟和第285窟的球幕图像制作;文献[13]提出了一种利用手持激光扫描仪构建陶寺遗址出土文物的高精度方法。然而,对于一些大型建筑,单一LiDAR数据源会因遮挡等问题难以同时获取古迹的立面和顶部信息,则数据的完整性存在缺失。

目前,针对遗址古迹保护应用更多的是对多数数据源进行采集与记录。文献[14]结合了三维扫描与倾斜摄影测量技术对上海玉佛禅寺大雄宝殿的内部及外部建立精确的三维模型;文献[15]结合了激光扫描仪与数码相机复刻武汉大学古籍馆;文献[16]采用了三维激光技术与近景摄影测量技术相结合的方法重建南昌朱德故居的内外场景。诸多实际应用都表明,对于一些高大建筑或复杂建筑,多源数据的方法相比于单源数据具有更大的优势,并且能够在一定程度上弥补单一数据源的缺点。

本文提出一套完整、高效和多尺度场景下遗址古迹的数字化记录与重建方案,并且在重建三维模型的基础上拓展研究成果,从而获取研究对象的场景漫游动画及三视图。以柬埔寨女王宫的三维重建为例,阐述该方案中数据采集、多源点云配准、数据融合、模型建立、平立剖面图生成和场景漫游制作等关键技术流程。实验研究结果表明,多源遥感数据能够为遗迹三维场景的重建提供基础,重建结果满足实际需求;研究方案及成果能够推动遥感技术在

遗迹保护领域中的应用,具有实际的借鉴意义。

## 2 案例对象与数据采集方案

女王宫位于柬埔寨暹粒省,地处于吴哥窟古迹外圈的东北部。图1(a)为女王宫的俯视全景图,图1(b)为实验数据的主要采集区域。作为吴哥古迹中最为重要的建筑群落之一,由于受到自身建筑风格加之长时间的风化和高湿度环境下的自然腐蚀等因素的共同影响,女王宫有一定的损坏且建筑形态不规则,建筑间隔小,质地脆弱,因此使用传统的测绘手段来采集数据可能会破坏目标地物并存在数据缺失等问题。鉴于此,实验结合无人机(UAV)影像遥感与地基三维激光扫描(TLS)来采集外业数据。TLS主要是对古建筑物的外部立面进行采集,无人机影像遥感主要是对TLS无法采集的顶部数据进行采集。

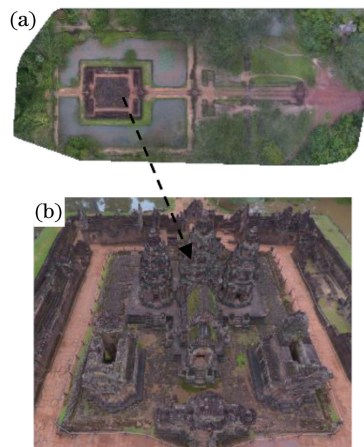


图1 女王宫。(a)俯视全景图;(b)数据的主要采集区域  
Fig. 1 Banteay Srei. (a) Top panoramic view;  
(b) main collection area of data

外业数据的采集过程主要分为地面点云数据的采集与无人机影像的采集两部分。地面点云的采集是同时采用FARO FOCUS 3D 120及FARO FOCUS 3D 330两架扫描仪,在距离研究对象3~5 m处以1:5的分辨率进行扫描,生成的点云精度为 $\pm 3.8$  mm,并分别在目标地物的外围设置41站和47站,站间重叠度达60%,设站分布如图2所示,其中红色标记为FARO FOCUS 3D 120测站的位置,蓝色标记为FARO FOCUS 3D 330测站的位置。无人机影像采用大疆无人机PHANTOM 4 ADVANCED搭载航摄相机来获取,该相机在2.54 cm的分辨率高达2000万像素,满足成像的需求。为了保证影像质量不受太阳光照的影响,作业时间选取当地时间8:00~11:00和14:00~17:00。

当作业时,航线覆盖整个区域,并保证航向重叠度为70%~80%,旁向重叠度为60%~70%。考虑到女王宫的结构复杂性,设计三种不同的高度来获取影像,高度分别为15~20 m、40 m和60 m,每个高度均采用90°垂直拍摄和45°倾斜拍摄两种角度来采集影像,其中无人机在90°垂直拍摄获取的女王宫顶部影像共203张,无人机在45°倾斜拍摄获取的女王宫整体侧部影像共265张。最终外业共布设88站,获取的点云点数为326532303个,无人机影像共468张,影像数据总大小为2.30 GB。

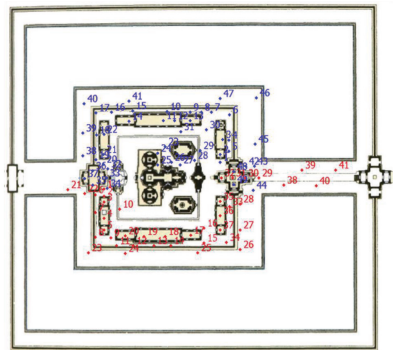


图2 目标区域与外业设站

Fig. 2 Target area and field establishment

### 3 数据处理

的获取和预处理、模型构建及成果获取4个部分组成。

数据的处理流程如图3所示,主要由整体点云

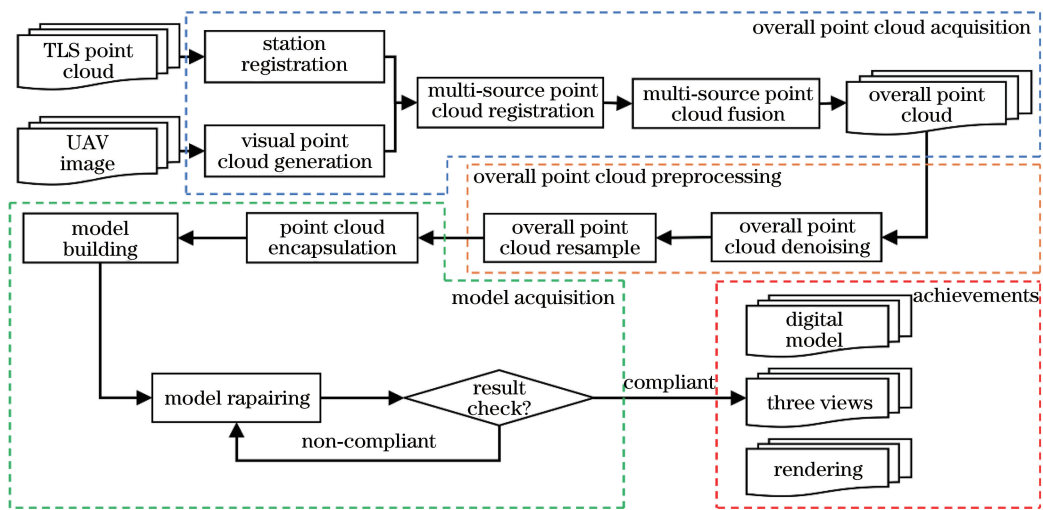


图3 数据的处理流程

Fig. 3 Flow chart of data processing

#### 3.1 视觉点云的生成

对具有地理标记信息的无人机影像进行处理,采用运动结构恢复算法(SFM)来解算原始影像的外方位元素,并计算影像对应地面点的三维坐标,实现特征点的匹配,进而得到密集的视觉点云。

#### 3.2 多源点云的配准与融合

生成视觉点云并完成TLS站间配准后,通过空地云配准将不同源点云转换到统一的坐标系下,如图4所示,其中 $q_k$ 及 $p_k$ ( $i=1,2,3,4$ )分别为两点集特征面上的同名点。点云配准的实质是通过同名点或同名特征来解算转换参数以实现点云坐标的转换,表达式为

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = (1+m) \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $X'$ 、 $Y'$ 和 $Z'$ 为TLS点云的坐标; $X$ 、 $Y$ 和 $Z$ 为视觉点云的坐标; $X_0$ 、 $Y_0$ 和 $Z_0$ 为视觉点云的三个平移参数; $a_1$ 、 $b_1$ 、 $\dots$ 、 $c_3$ 为坐标系三个转角的方向余弦; $m$ 为尺度参数。

由于目标对象的形状不规则、不同传感器的采集视角不统一以及在数据采集的过程中并未设置靶球等因素,所以无法采用无控配准的方法对空地云进行配准。因此,实验采用RANSAC(Random Sample Consensus)算法<sup>[17]</sup>对平面进行拟合,将从空地云中分别获取的多个平面作为同名特征以实现点云配准,具体步骤如下。

- 1) 采用RANSAC算法分别拟合6个平面,包括主塔基面以及四周5个城墙的立面。
- 2) 依次选取主塔基面中两个同名点对和5个城墙的立面中各一个同名点对来计算点云间的变换参数,进而实现粗配准。

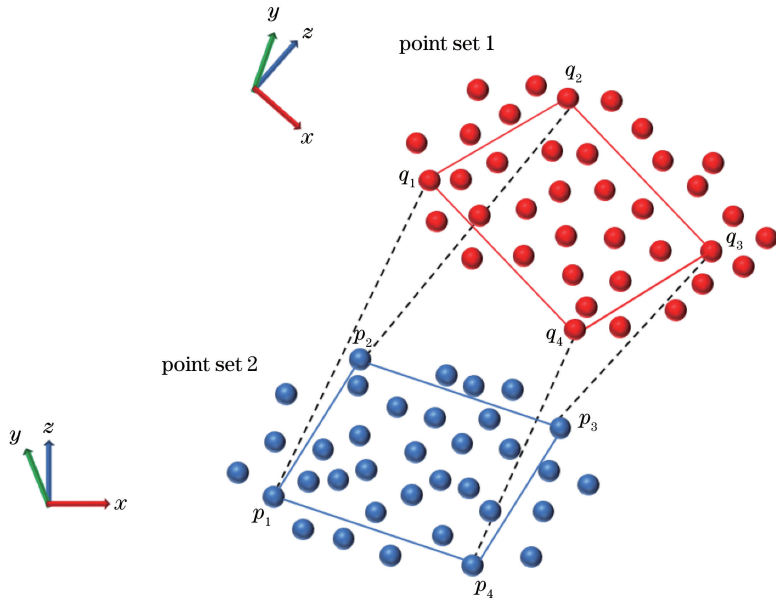


图 4 配准原理示意图

Fig. 4 Schematic of registration principle

3) 采用 ICP(Iterative Closest Point)算法<sup>[18]</sup>对配准结果进行进一步精化,得到最终的坐标转换矩阵。抽

取 50000 个最近邻点对,求得的方均根误差为 0.02 m。空地点云的配准效果如图 5 所示。

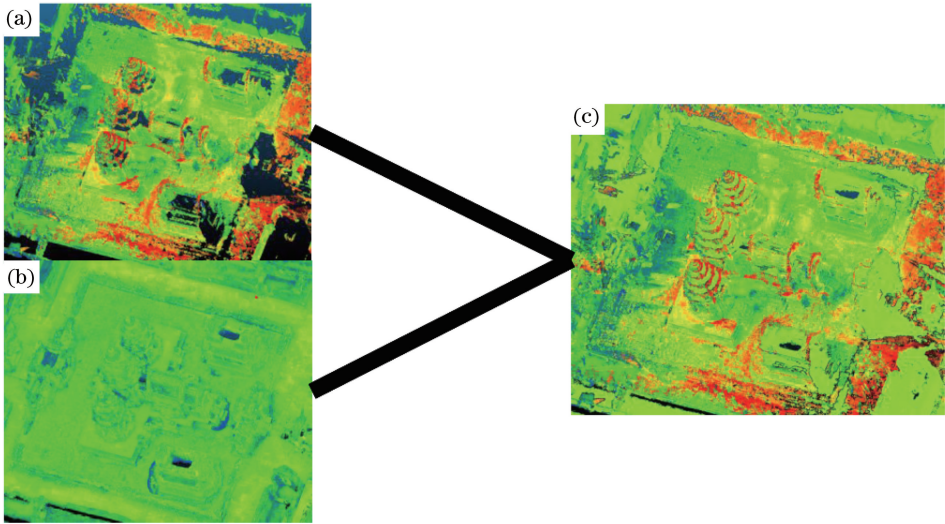


图 5 配准结果。(a)地面点云;(b)视觉点云;(c)配准后的空地点云

Fig. 5 Registration results. (a) Ground point cloud; (b) visual point cloud; (c) visual point cloud after registration

点云配准后,由于 TLS 点云数据具有密度更大和精度更高的优点,并且对其进行单纯的配准会存在数据量增大等问题,因此实验采用以 TLS 点云为基准、视觉点云为补充的融合思路对空地点云进行融合。通过计算视觉点云到 TLS 点云与其对应最近点的距离,设定的距离阈值为 0.1 m。当距离超过 0.1 m 时,表示 TLS 点云数据为空,而视觉点云存在数据,此时提取该部分视觉点云作为 TLS 点云的补充。图 6 为云对云的距离计算结果,其中绿

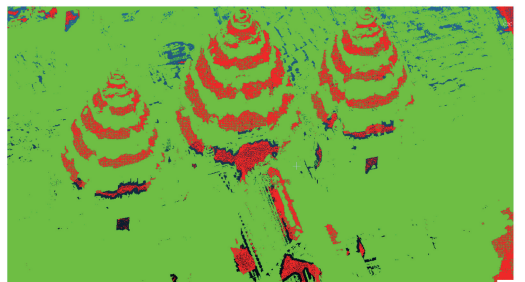


图 6 云对云的距离结果

Fig. 6 Result of cloud to cloud distance

色部分为 TLS 点云,红色部分为从视觉点云中提取的所需点云,提取的点云点数为 6692692 个。

通过配准融合后得到的整体点云,可以弥补地面点云缺乏的顶部信息,以及视觉点云缺少的立面信息,融合结果满足后续的建模要求。

点云配准结果如 7 所示。从图 7(c)可以看到,

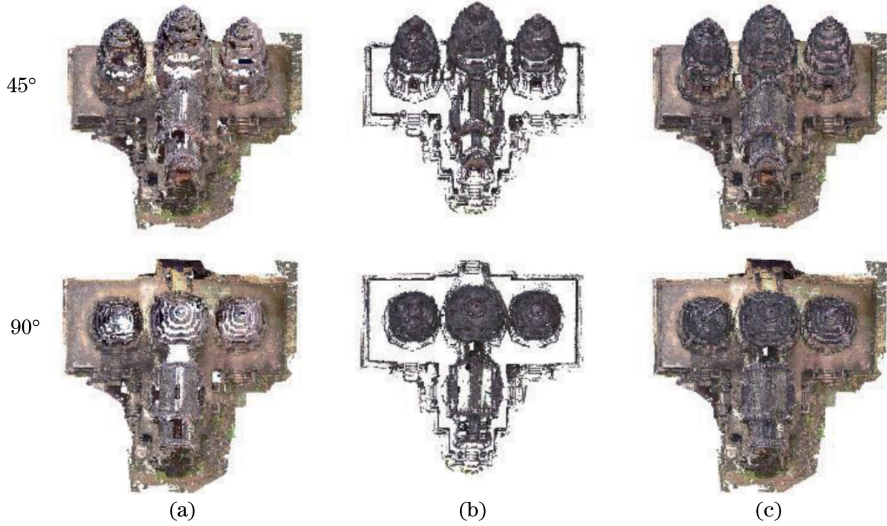


图 7 点云配准结果。(a) TLS 点云;(b)提取后的视觉点云;(c)配准融合后的整体点云

Fig. 7 Point cloud registration results. (a) TLS point cloud; (b) visual point cloud after extraction; (c) overall point cloud after registration and fusion

### 3.3 整体点云的去噪及抽稀

点云去噪是采用距离滤波和人工剔除相结合的方式进行的。距离滤波是通过设置点云到扫描仪的距离极值来剔除遮挡点和异常点,人工方式是剔除

非建模的对象,如树木和行人等,去噪后的点云点数为 325719315 个。去噪效果如图 8 所示,其中图 8(a)为去噪前点云,红色部分为手动选择的树木噪声点,图 8(b)为去噪后的点云。



图 8 去噪前后的点云。(a)去噪前点云;(b)去噪后点云

Fig. 8 Point cloud before and after denoising. (a) Point cloud before denoising; (b) point cloud after denoising

由于大数据量会给后续处理增加计算负担,因此采用基于曲率的抽稀方法对去噪后的点云进行抽稀处理。该方法可以保留边界等曲率变化较大的点,进而有效保留建筑物的轮廓,对于平面等曲率变化较小的点,抽稀效果较为明显。最终的点云点数由 332412007 个降至 136928200 个,数据量实际减少约为 59%。图 9 为一阶梯处抽稀前后的对比结果,其中图 9(a)为抽稀前点云,图 9(b)为抽稀后点云。从图 9 可以看到,一阶梯处的抽稀效果较为明显,两侧石像处的抽稀前后效果变化较小。

### 3.4 整体点云模型构建

点云封装是采用表面封装算法<sup>[19]</sup>对点云进行网格化操作并创建多边形,该算法是基于二维空间 Delaunay 三角化实现的。首先将以点  $P_0$  为中心的整个邻域中的点集投影到该邻域拟合的平面上,这是将复杂的三维问题转化为简单的二维问题。投影后,构建以点  $P_0$  为起点约束的加权 Delaunay 三角化<sup>[20]</sup>,约束加权 Delaunay 三角化虽然符合 Delaunay 三角化的基本原则,即具有空圆特性和最大化最小角特性等,但是又不同于 Delaunay 三角化,该方法需要在 Delaunay 三角化的基础上添加约

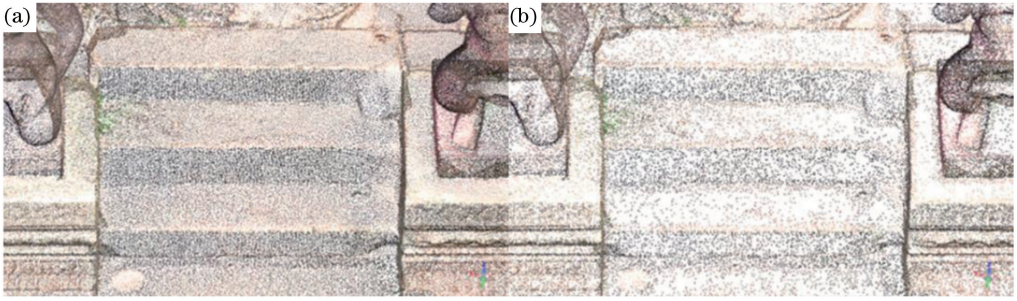


图 9 抽稀前后的点云。(a)抽稀前点云;(b)抽稀后点云

Fig. 9 Point cloud before and after resample. (a) Point cloud before resample; (b) point cloud after resample

束边,可以防止加权之后导致 Delaunay 三角化中点  $P_0$  的对应投影点  $P'_0$  消失的情况,具体步骤如下。

1) 将以点  $P_0$  为中心的邻域点集投影到该邻域拟合的平面上,记该点为  $P'_0$ ,如图 10 所示。

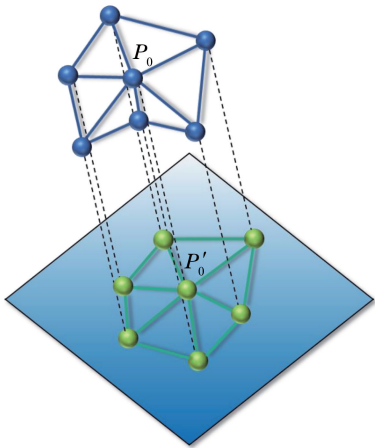


图 10 邻域点集的投影示意图

Fig. 10 Projection diagram of neighborhood point set

2) 对投影后的点集进行加权处理。为了防止出现退化的现象,之后也是对这些带权值的点进行三角化处理,权值  $\omega_i$  取为点集到拟合面的距离平方  $d_{P_i, P'_i}^2$  的相反数,其中  $i$  为常数,表达式为

$$\omega_i = -d_{P_i, P'_i}^2 \quad (2)$$

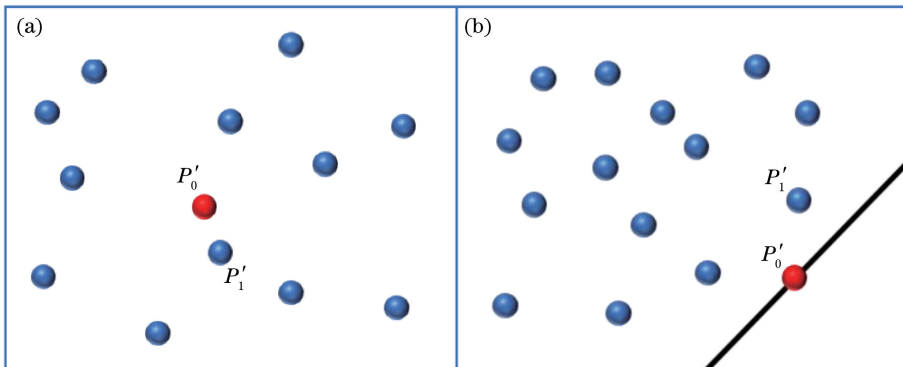


图 11  $P'_0$  位置示意图。(a)  $P'_0$  在内部;(b)  $P'_0$  在边界

Fig. 11 Location diagram of  $P'_0$ . (a)  $P'_0$  inside; (b)  $P'_0$  at edge

3) 对拟合面内的点集进行排序。此时分为两种情况,点  $P'_0$  在点集的内部或点  $P'_0$  在点集的边界,如图 11 所示。对于这两种情况,采用如下方法进行排序。

a. 点  $P'_0$  在点集的内部。从图 11(a) 可以看到,以点  $P'_0$  为旋转中心,采用的是逆时针排序法。若  $P'_0 P'_i$  和  $P'_0 P'_j$  的叉积通过右手定则认为大于 0,即  $P'_0 P'_j$  在  $P'_0 P'_i$  的逆时针方向,并且将距离点  $P'_0$  最近的点作为起始点,其中  $P'_i$  和  $P'_j$  为拟合面内除  $P'_0$  外的任意两点。由此,将除了点  $P'_0$  以外的点集进行排序,顺序为  $P'_1, P'_2, \dots, P'_n$ ,记为集合序列  $M$ 。

b. 点  $P'_0$  在点集的边界。从图 11(b) 可以看到,若除了点  $P'_0$  以外的点均在通过点  $P'_0$  的某条直线的一侧,则认为点  $P'_0$  在点集的边界。此时,同样采用逆时针排序法将距离这条划分直线最近的点作为起始点,将除了点  $P'_0$  以外的点集进行排序,顺序为  $P'_1, P'_2, \dots, P'_n$ ,记为集合序列  $M$ 。

4) 添加约束边。约束边为点  $P'_0$  与点  $P_0$  最近的投影点所组成的边。

5) 将  $M$  中的起始点  $P'_1$  与约束边组成三角形,遍历  $M$  内的其余点,判断其是否在该三角形的外接圆内,若不在该外接圆内,将该三角形输入堆栈  $S$ ,

并继续插入下一个点  $P'_2$ 。利用点  $P'_0$ 、点  $P'_1$  与点  $P'_2$  组成三角形,判断其余点是否在该三角形外接圆内,若在该外接圆内,则删除此三角形,并与新插入的点构成新的三角形,继续判读下一个点。图 12 为

三角化原理。

6) 直到判读完  $M$  中所有的点后,输出  $S$ ,  $S$  中的一系列三角形就是三角化后的结果。点云封装的局部效果如图 13 所示。

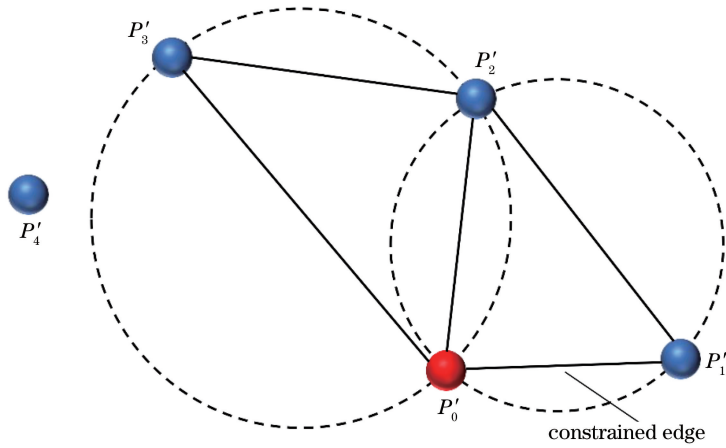


图 12 三角化原理

Fig. 12 Principle of triangulation

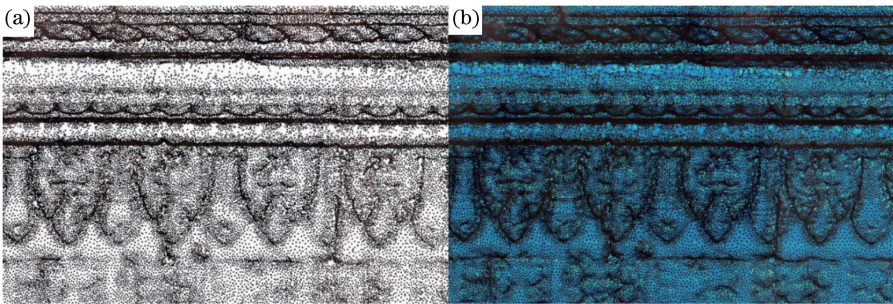


图 13 点云封装的局部效果。(a)点云封装前;(b)点云封装后

Fig. 13 Local effect of point cloud encapsulation. (a) Before point cloud packaging; (b) after point cloud packaging

点云封装成模型后,由于对象构筑物的拓扑关系复杂且曲面交错多,所以自动化生成的模型会存在孔洞和错误的问题。对于错误点,可以使用第三方商业软件,如 Geomagic Studio 对冗余的三角形或点进行去除。对于孔洞,可以通过人工干预和自动修复等方法对孔洞添加平、曲面进行修补,如图 14 中 before repair 所示。针对这一问题,通常首先根据不同项目及实际建模的需求来设定孔洞周边面片曲率的阈值  $\delta_1$  和  $\delta_2$ ,取值范围均为  $0 \sim 1$ ;之后将已有孔洞的周边面片曲率  $\delta_0$  与阈值进行比较,从而将孔洞划分为平面型孔洞、切线型孔洞及曲面型孔洞,具体划分规则及修补方法如下。

1) 当  $|\delta_0| < \delta_1$  时,则将孔洞划分为平面型孔洞,此时添加平面面片进行修补。

2) 当  $\delta_1 < |\delta_0| < \delta_2$  时,则将孔洞划分为切线型孔洞,此时添加切线面片进行修补,而添加面片曲率的绝对值需大于平面面片且小于曲面面片。

3) 当  $\delta_2 < |\delta_0|$  时,则将孔洞划分为曲面型孔洞,此时添加曲面面片进行修补,而添加面片曲率的绝对值需大于切线面片。

三种孔洞修补效果如图 14 中 after repair 所示。

### 3.5 平立剖面图的生成

利用女王宫的三维数字化模型,可以进一步得到遗址的平立剖面图。实验结合 Auto CAD 以人机交互的方式对三维模型进行处理。首先对模型进行三视剖切,根据实际需求手动捕捉剖切面的边界线并进行尺寸标注,具体过程如下。

1) 手动选择所需的切割面,通过点云切割技术对该面进行切割。为了保证平立剖面图的准确性,应沿着  $XOZ$ 、 $XOY$  和  $YOZ$  三个面进行裁剪,并删除非轮廓区以减少后续的计算量。之后对轮廓区的点云进行拟合,考虑到平立剖面图的精确度,点云的轮廓部分应尽量保留。

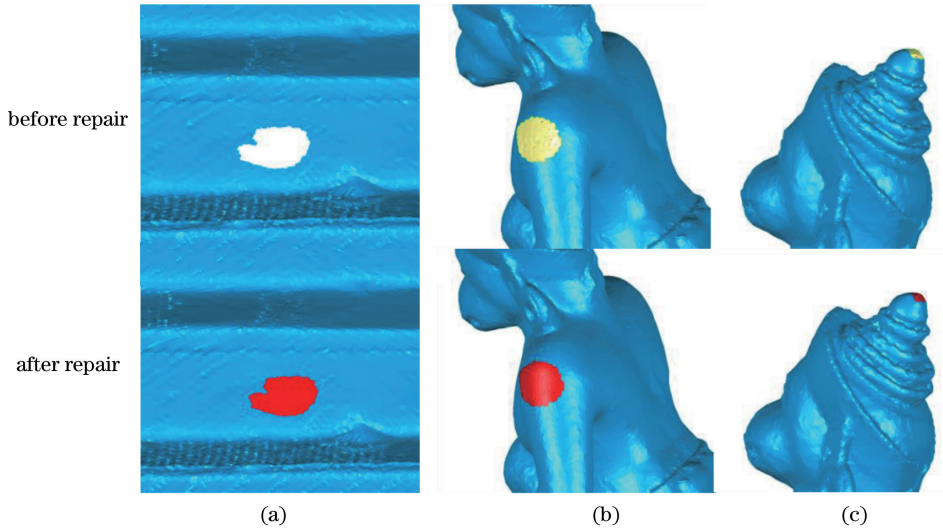


图 14 修补前后模型图。(a)平面型孔洞;(b)切线型孔洞;(c)曲面型孔洞

Fig. 14 Model diagram before and after repair. (a) Plane hole; (b) tangent hole; (c) curved hole

2) 将拟合后的数据导入 Auto CAD 中,利用 CAD 的“多段线”功能连接点云的外边界,并根据实际工程需要形成封闭或非封闭的曲线。

3) 对外边界进行尺寸标注。

实验对女王宫主建筑三主塔部分进行平立剖面图的绘制,获得的三视图成果如图 15 所示,图 15(a)为三主塔平面图,图 15(b)为三主塔立面图,图 15(c)为三主塔剖面图。

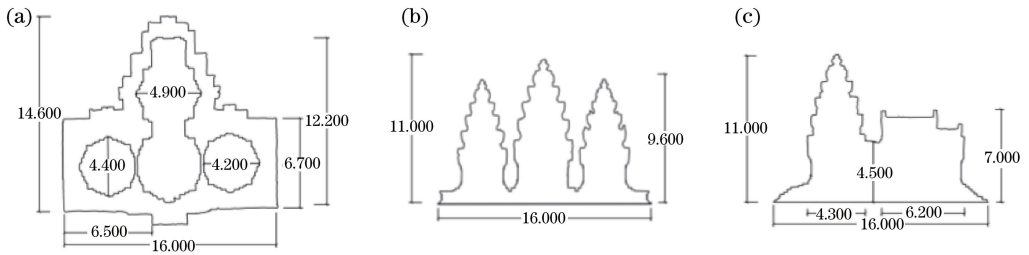


图 15 女王宫主建筑平立剖面图(单位:m)。(a)平面图;(b)立面图;(c)剖面图

Fig. 15 Horizontal vertical section view of main building of Banteay Srei (unit: m).

(a) Plan view; (b) elevation view; (c) section view

### 3.6 场景漫游的制作

建筑物的场景漫游动画有助于对古遗迹的数字化存档、场景展示及遗迹保护意识的宣传。实验对所构建的三维模型进行进一步的加工处理,使用三维渲染工具 Lumion 来制作女王宫的场景漫游,并通过太阳、天空和云、风和反射等效果来实现女王宫的 3D 可视化,最终输出所得模型场景渲染动画的整体和细部截图效果,如图 16 所示,其中图 16(a)为整体渲染结果,图 16(b)和图 16(c)为细部渲染结果。

## 4 结 论

以柬埔寨吴哥女王宫古遗迹为例,通过结合 TLS 激光点云和无人机影像视觉点云,对多源点云数据在古遗迹建模中的应用进行研究,实现目标对

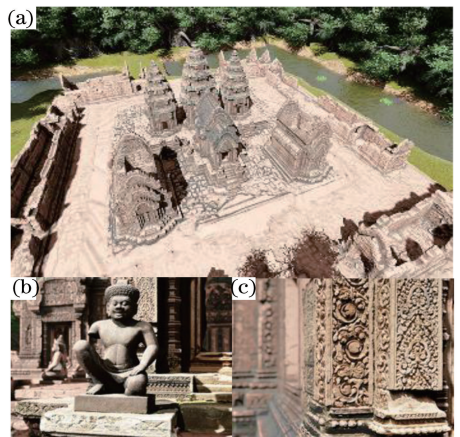


图 16 女王宫场景渲染的效果。(a)整体;(b)细部 1;(c)细部 2

Fig. 16 Rendering diagram of Banteay Srei.

(a) Overall; (b) detail 1; (c) detail 2



象的多源点云配准和融合、模型构建、平立剖面图的生成以及场景漫游的制作。

所得的女王宫三维模型以及进一步获得的模型应用成果场景漫游和平立剖面图能够为女王宫的保护及修复提供数据基础,并有助于女王宫的数字化存档、结构稳定性监测、遗迹修复及保护意识宣传等工作。未来将与 GIS (Geographic Information System)相结合,对多源数据进行融合可以为遗迹保护领域中存档、分析和展示等阶段提供更多的数据与技术选择;与 BIM (Building Information Modeling)相结合可以实现参数化建模,能够进一步提高模型精度、效率和可操作性等。

### 参 考 文 献

- [1] Deng F, Xu G J, Feng C, et al. Building reconstruction using LiDAR data and airborne images [J]. *Journal of Geomatics*, 2010, 35(1): 35-37.  
邓非, 徐国杰, 冯晨, 等. LiDAR 数据与航空影像结合的建筑物重建 [J]. *测绘信息与工程*, 2010, 35(1): 35-37.
- [2] Cheng L, Gong J Y, Li M C, et al. 3D building model reconstruction from multi-view aerial images and LiDAR data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(6): 494-501.  
程亮, 龚健雅, 李满春, 等. 集成多视航空影像与 LiDAR 数据重建 3 维建筑物模型 [J]. *测绘学报*, 2009, 38(6): 494-501.
- [3] Xu Z Q, Cao L, Ruan H H, et al. Inversion of subtropical forest stand characteristics by integrating very high resolution imagery acquired from UAV and LiDAR point-cloud [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(7): 694-703.  
许子乾, 曹林, 阮宏华, 等. 集成高分辨率 UAV 影像与激光雷达点云的亚热带森林林分特征反演 [J]. *植物生态学报*, 2015, 39(7): 694-703.
- [4] Li Z Y, Liu Q W, Pang Y. Review on forest parameters inversion using LiDAR [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1138-1150.  
李增元, 刘清旺, 庞勇. 激光雷达森林参数反演研究进展 [J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1138-1150.
- [5] Zhang J X, Cheng X J, Cheng X L. Application of three-dimensional laser scanning technology in measurement of ship displacement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1204003.  
张吉星, 程效军, 程小龙. 三维激光扫描技术在船舶排水量计量中的应用 [J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1204003.
- [6] Cheng X J, Xiong X X, Yang Z X, et al. Cavern capacity calculation using terrestrial lidar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(23): 231201.  
程效军, 熊鑫鑫, 杨泽鑫, 等. 基于地面激光雷达的洞库容量计量 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(23): 231201.
- [7] Wu Z L, Cheng X J, Xin P K, et al. Calculation method of complex tank capacity based on laser point cloud and building information modeling technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 052802.  
邬镇伦, 程效军, 辛佩康, 等. 基于激光点云与建筑信息模型技术的复杂船舱容积计算方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 052802.
- [8] Cheng B, Guan H Y, Ji Q J, et al. Automatic extraction of pavement cracks information using mobile LiDAR data [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43(8): 130-134, 140.  
成斌, 管海燕, 季秋菊, 等. 车载 LiDAR 数据的道路裂缝信息自动提取 [J]. *测绘科学*, 2018, 43(8): 130-134, 140.
- [9] Zhang L S, Cheng X J. Tunnel deformation analysis based on lidar points [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0404004.  
张立朔, 程效军. 基于激光点云的隧道形变分析方法 [J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0404004.
- [10] Yang M M, Wan Y C, Liu X L, et al. Laser data based automatic recognition and maintenance of road markings from MLS system [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 107: 192-203.
- [11] Lindstaedt M, Mechelke K, Schnelle M, et al. Virtual reconstruction of almaqah temple of yeha in Ethiopia by terrestrial laser scanning [C] // *Proceedings of the 4th ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2011, March 2-4, 2011, Trento, Italy*. [S.l.: s.n.], 2011.
- [12] Chang Y M, Zhang F, Huang X F, et al. Dome image creation by integrating laser scanning data and high resolution images in mogao caves 196 and 285 [J]. *Dunhuang Research*, 2011(6): 96-100, 131.  
常永敏, 张帆, 黄先锋, 等. 基于激光扫描和高精度数字影像的敦煌石窟第 196、285 窟球幕图像制作 [J]. *敦煌研究*, 2011(6): 96-100, 131.
- [13] Cheng X L, Cheng X J, Jia D F, et al. The application of 3D laser scanning in archaeological exploration [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2015, 43(8): 79-86.  
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, 43(8): 79-86.
- [14] Yu F Q, Chen J, Gu Z W. Digital modeling technology for existing historic building based on

- multi-source data[J]. *Building Construction*, 2018, 40(3): 315-317.
- 余芳强, 陈菁, 谷志旺. 基于多源数据的既有古建筑数字化建模技术[J]. *建筑施工*, 2018, 40(3): 315-317.
- [15] Deng F, Zhang Z X, Zhang J Q. 3D reconstruction of old architecture by laser scanner and digital camera [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2007, 32(2): 29-30, 176-177.
- 邓非, 张祖勋, 张剑清. 利用激光扫描和数码相机进行古建筑三维重建研究[J]. *测绘科学*, 2007, 32(2): 29-30, 176-177.
- [16] Yu P Y, Liu Z H. Research on application of cultural heritage modeling based on 3D laser scanning [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(8): 145-149.
- 余培永, 刘昭华. 三维激光扫描支持下的文化遗产建模应用分析[J]. *测绘通报*, 2018(8): 145-149.
- [17] Schnabel R, Wahl R, Klein R. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection [J]. *Computer Graphics Forum*, 2007, 26(2): 214-226.
- [18] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.
- [19] Fletcher G Y, Gloth T, Edelsbrunner H, et al. Methods, apparatus and computer program products that reconstruct surfaces from data point sets: US7023432[P/OL]. 2006-4-4 [2020-4-18]. <http://www.google.co.in/patents/US7023432>.
- [20] Shewchuk J R. Updating and constructing constrained Delaunay and constrained regular triangulations by flips [C] // *Proceedings of the nineteenth conference on Computational geometry - SCG'03*, June 8-10, 2003, San Diego, California, USA. New York: ACM, 2003: 181-190.