

# 齐云塔激光点云三维重建

卢小平<sup>1</sup>,王玉鹏<sup>2</sup>,卢遥<sup>3</sup>,葛晓天<sup>1</sup>,宋碧波<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学 矿山空间信息技术国家测绘局重点实验室,河南 焦作 454003; 2. 太原航空摄影有限公司,山西 太原 030031; 3. 中国科学院 遥感应用研究所,北京 100101)

## Qiyun Pagoda 3D Model Reconstruction Based on Laser Cloud Data

LU Xiaoping, WANG Yupeng, LU Yao, GE Xiaotian, SONG Bibo

**摘要:** 三维激光扫描技术可以在不接触、无损害的前提下,将珍贵古建筑的几何、颜色、纹理等信息记录下来,用于对历史遗迹的保存和修复。利用三维激光扫描仪获取国家重点保护文物——洛阳白马寺齐云塔的激光点云数据,通过对比分析 Cyclone、CAD、Geomagic Studio 等软件对点云数据的处理方法,制作完成齐云塔 DLG 文件、线框三维模型和 TIN 模型,并给出处理点云漏洞的一般准则。

**关键词:** 三维激光扫描; 激光点云; 线框三维模型; TIN 模型; 点云漏洞

### 一、引言

现存的许多珍贵文物由于年代久远以及受人类活动影响,遭到破坏的程度与日俱增。因此,利用先进技术手段来保护这些宝贵的文化遗产已成为亟待解决的全球性难题。由于三维激光扫描技术具有非接触式、面测量、速度快、同步获得纹理信息等优点,可以在不接触、无损害的前提下,将珍贵古建筑的几何、颜色、纹理等信息记录下来,为这些历史遗迹保存一份完整、真实的数据记录,一旦遭到意外破坏,即可根据这些真实的数据进行修复<sup>[1]</sup>。斯坦福大学和华盛顿大学于1999年在佛罗伦萨对米开朗琪罗的大卫雕像进行了精度为 $\pm 0.25$  mm的扫描,成果数据包括20亿个三角形的TIN模型数据和7000多幅彩色纹理照片<sup>[2]</sup>;2002年日本东京大学利用三维激光扫描技术,虚拟模拟了奈良东大寺的大雄宝殿和大佛<sup>[3]</sup>;1995年敦煌莫高窟“数字化虚拟洞窟”项目启动,开创了国内文物数字化保护的先河。2005年北京建筑工程学院与云冈石窟研究院合作,将三维激光扫描技术首次应用到了石窟文物的数字保护中;2006年北京建筑工程学院又承担了故宫古代建筑数字化保护项目,将三维激光扫描技术在文物保护领域的应用推上了新的台阶。

### 二、野外扫描及控制网建立

#### 1. 齐云塔简介

洛阳白马寺齐云塔创建于东汉永平十二年(公

元69年),后毁于战火,现存塔身为金大定十五年(公元1175年)重修,距今已有800多年的历史,是洛阳市现存的最早古建筑,也是中原地区为数不多的金代建筑遗存。该塔现为国家重点保护文物,具有很高的历史、科学和艺术价值,对研究金代建筑特征,尤其是中原地区金代砖塔结构特点提供了不可多得的实物例证。近年来齐云塔连遭雷击3次,西北角多层砖檐断裂、脱落,加之塔基部分砖体碱化甚至酥软,致使塔身整体向西北倾斜,损毁程度十分严重。后经文物保护部门对塔身进行加固维修,倾斜状况有所改善。但为了预防齐云塔再次遭受不可预测性的自然灾害,国家文物局决定对其启动数字化保护项目,并由白马寺管委会与河南理工大学矿山空间信息技术国家测绘局重点实验室合作共同完成该项目。

#### 2. 仪器介绍及工作流程

对齐云塔进行三维激光扫描使用的是徕卡 ScanStation2 全站式扫描仪。仪器扫描视角为 $360^\circ \times 270^\circ$ ,设站灵活,扫描速度为50000点/s,扫描距离为300 m,点位标称精度为 $\pm 6$  mm。

徕卡 ScanStation2 扫描仪配备的专用标靶如图1所示,在扫描过程中可以用软件控制终端指示扫描仪对标靶进行扫描,从而直接获取标靶的靶心坐标。获取的靶心坐标被赋予名称并在点云中以特殊形态显示,而无需人工提取标靶。图2是使用 ScanStation2 扫描仪的作业流程。



图1 标靶

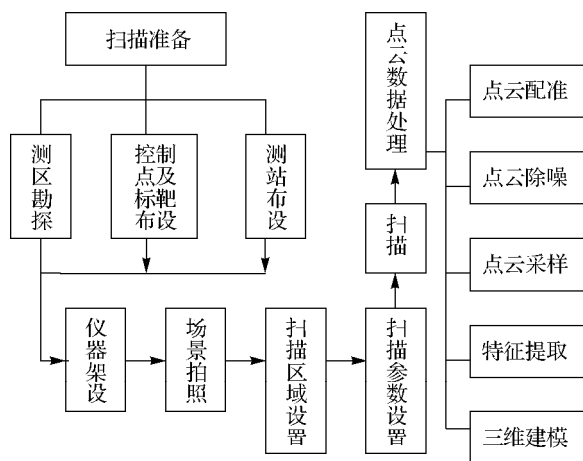


图2 ScanStation2 作业流程

### 3. 控制网的建立

齐云塔高 26 m, 由 13 层组成(如图 3 所示)。为了尽可能完整地获取整个塔身的的数据, 利用脚手架对其依次进行分层扫描(如图 4 所示), 并在每层的塔角处分设 4 个测站。首级控制网由在塔基地面上布设的 5 个 GPS 永久控制点组成, 二级控制网由在塔周围栏杆布设的 14 个固定标靶构成(实测的相对精度为  $\pm 1$  mm)。图 5 中三角形表示 GPS 点, 圆圈为标靶。



图3 齐云塔外观



图4 扫描现场

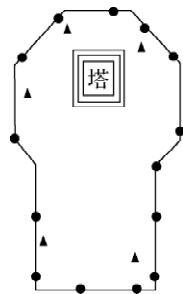


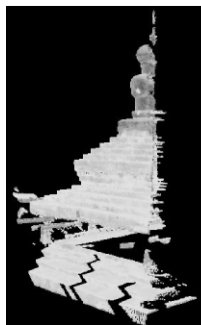
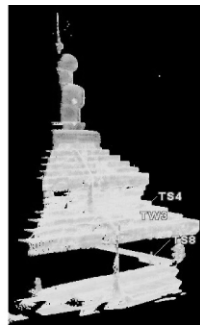
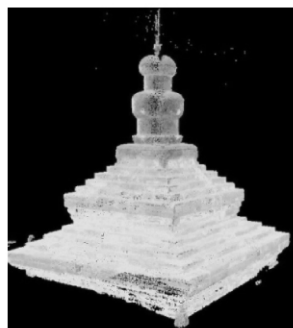
图5 控制网的布设

### 三、激光点云预处理与齐云塔三维重建

点云数据的预处理包括点云的配准、除噪、采样等, 经过预处理的点云数据将直接用于生产线划图、三维模型等产品。因此, 点云预处理质量的高低将直接影响到测绘成果的精度。

#### 1. 点云数据的配准

在每一站点上获取的点云数据都是基于仪器内部自定义的独立坐标系, 即这些坐标系都是互相独立的。为了得到扫描对象的完整表示, 必须将每个站点的数据转化到同一个局部坐标系或大地坐标系中。常用的配准(如图 6 所示)方法有: ① 基于标靶的配准; ② 基于同名点的配准; ③ 基于标靶和同名点的混合配准。在标靶扫描不出错误的前提下, 上述 3 种方法中基于标靶的配准精度最高; 基于同名点的配准精度受制于激光扫描点的密度, 即密度越大, 精度越高, 密度小则精度就低。

(a)  $P_1$  测站点云(b)  $P_2$  测站点云

(c) 配准后的点云

图6 配准前后的点云示意图

点云配准实质上是两个空间直角坐标系之间的转换<sup>[5]</sup>,即在两个不同测站 $P_1$ 和 $P_2$ 数据中寻找3个或3个以上的同名点,以其中一个测站的坐标系为基准,将另一个测站的数据通过空间直角坐标转化模型转换到基准坐标系中。转化模型公式为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (1)$$

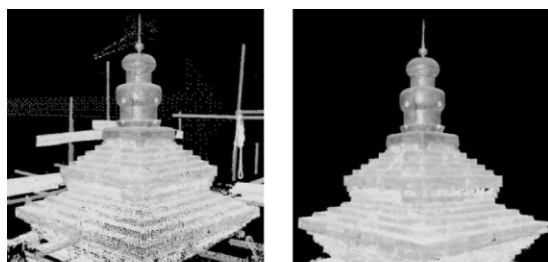
即

$$P_2 = RP_1 + T \quad (2)$$

式中 $R$ 为两个坐标系之间的旋转矩阵(由3个旋转角度 $\phi$ 、 $\omega$ 、 $\theta$ 确定); $T$ 为平移矩阵,表示坐标原点的平移量。解算 $R$ 、 $T$ 的过程实质上就是解算6个待定参数 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ 、 $\phi$ 、 $\omega$ 、 $\theta$ 的过程。

## 2. 点云降噪

三维激光扫描仪在实际扫描过程中获取的点云通常包含了大量的不属于研究对象的数据,称为噪声点(如图7所示)。噪声点的来源有:①扫描范围设置时超出扫描对象部分的地物点;②扫描过程中因行人、车辆、鸟类等穿过扫描区域时形成的离散点;③由于激光光束存在离散度,可能会接收到不同物体返回的反射光束从而产生噪声,这种噪声在物体边缘十分明显<sup>[4]</sup>。



(a) 未除噪的点云 (b) 除噪后的点云

图7 除噪前后的点云示意图

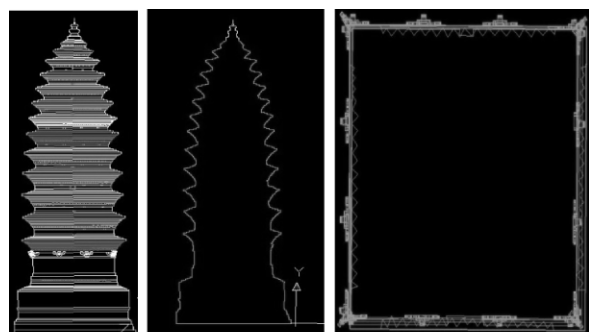
## 3. 重采样

三维激光扫描获得的点云数据量通常很大,这样会导致处理速度缓慢,不利于后续的三维建模,因此必须对点云数据进行重采样。这是由于相邻测站之间有一定的重叠区域,当所有测站拼接为整体后会存在大量的重叠点云,造成“数据描述重叠”。经过重采样之后,这类区域以一定的密度保留必要的激光点,多余的将被删除。同时,由于扫描参数中激光点密度只表示在某一距离上激光点的间隔,超过这一距离时密度低于设定值,反之则大于设定值,即在一个测站获取的物体表面点云数据远离扫描仪的稀疏,距离近的则稠密。重采样后

高于采样密度的点云将被抽稀(即剔除多余的数据)。如齐云塔的点云经过配准、除噪之后,包含了3727万个激光点,而以5mm为间隔进行重采样之后,激光点仅剩下2435万个,说明冗余数据几乎占了1/3。

## 4. DLG 产品制作

线划图件(DLG)是建筑物传统测绘的重要成果之一,包括平面图、立面图和剖面图等,这些图件可以表示建筑物的各种尺寸、内部构造、分层情况、门窗梁柱的位置和形式、装饰的设计样式等。Cyclone软件中的配套插件CloudWorx可以将点云数据导入到CAD,这样就可以利用CAD强大的制图功能为制作各种线划图提供快速和方便的途径。图8为齐云塔的部分线划图。



(a) 立面图 (b) 外轮廓图 (c) 一层平面图

图8 齐云塔线画图

## 5. 三维模型构建

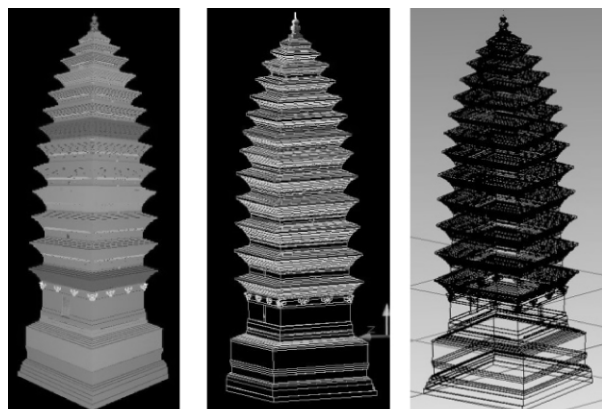
### (1) 线框三维模型

线框三维模型是用直线勾勒并辅助少量曲线的方式来描述物体的三维形状,适用于由规则平面构成的物体表面。齐云塔除了一层的仿木构式斗拱和塔顶宝瓶属于较复杂曲面外,其余的都是四方密檐式结构,可以方便地构建其线框三维模型。Cyclone软件中的“create object”组件所提供的“patch”、“cylinder”、“sphere”、“box”等命令具有精度高、速度快、构造简单等特点,可从点云中直接拟合平面、圆柱、球体、长方体等基本立体形状。经过Cylone软件初步构造的线框模型,还能以DXF的格式导入CAD、Creator、3ds Max等软件中,进一步作细节修饰、渲染、纹理映射等技术处理(如图9所示)。

### (2) TIN 模型

构建TIN模型需要完整的点云数据,否则只能生成不完整的TIN模型。实际上在对大型且结构复杂的建筑物进行三维激光扫描时,由于受种种客观条件的限制,会经常遇到点云漏洞问题。目前,解

决漏洞问题主要有以下两种方法。



(a) Cyclone效果 (体着色) (b) CAD效果 (c) Creator效果

图9 用不同软件处理的齐云塔线框模型的效果

1) 直接补洞: 直接补洞是通过计算出漏洞周围激光点的坐标信息, 利用某种插值方法在无序点中将有序点插入空隙。以 Geomagic Studio 软件为例, 该方法对表面比较平缓的点云数据处理效果较好, 但对表面起伏变化复杂的点云进行大面积补洞时, 常常会出现错误(如图 10 所示)。针对这种情况, 需要将存在漏洞的点云分块处理, 尽可能使每一小块呈现一种变化趋势, 补洞才能达到预期效果(如图 11 所示)。

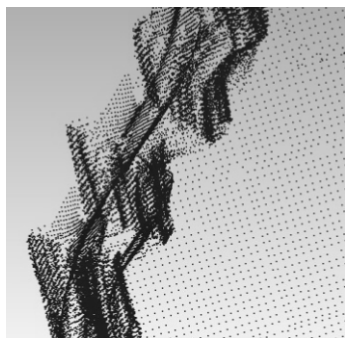


图10 补洞出现的错误

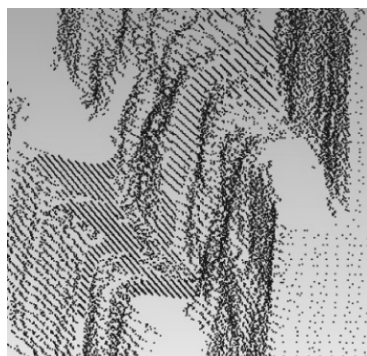


图11 分块补洞的效果

2) 对 TIN 模型补洞: TIN 模型补洞也是一种数据插值方法。Geomagic Studio 软件的三角网插值分为“曲率”、“切线”和“平面”3种, 可以视具体情况对不同种类的漏洞进行填补。对于面积较大、曲率变化较大的漏洞, 应先使用“桥”工具(如图 12 所示)按照点云分块原则对漏洞进行分块, 尽量使每一块处于一种曲率变化范围之内, 图 13 即为分块填充后的效果。经过补洞后的 TIN 模型, 还需要进行平滑、简化、锐化、雕刻、渲染等处理, 以便使模型更加美观、真实(如图 14 所示)。

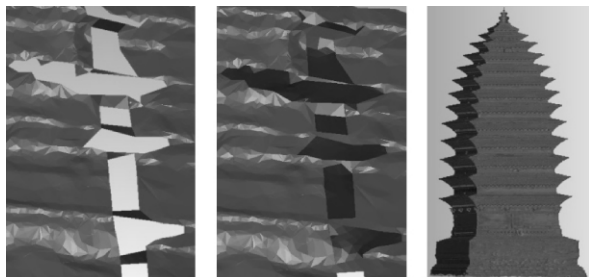


图12 搭桥 图13 分块填充 图14 齐云塔 TIN 模型

#### 四、结束语

本文通过洛阳白马寺齐云塔文物保护项目的实施, 利用三维激光扫描技术对塔身进行了分层扫面, 并对获取的海量点云数据进行了预处理, 制作完成了齐云塔 DLG 线划图件及线框三维模型, 所取得的成果可为我国文物数字化保护工作提供经验和借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 吴海毓. 三维激光扫描技术在古建筑数字化保护中的应用[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2008.
- [2] 张远智, 胡广洋, 刘玉彤, 等. 基于工程应用的3维激光扫描系统[J]. 测绘通报, 2002(1): 34-36.
- [3] TAKESHI Oishi. Digital Restoration of the Cultural Heritages[D]. Tokyo: University of Tokyo, 2002.
- [4] 官兰云. 地面三维激光扫描数据处理中的若干问题研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [5] 宋碧波, 卢小平, 卢遥. 基于点云数据的建筑物三维重建[J]. 测绘通报, 2010(S0): 228-229.
- [6] 古林玉, 卢小平, 李英成, 等. 基于 LiDAR 点云与特征线的 DEM 更新方法[J]. 测绘通报, 2011(2): 17-20.
- [7] 左志权, 张祖勋, 张剑清, 等. DSM 辅助下城区大比例尺正射影像镶嵌线智能检测[J]. 测绘学报, 2011, 40(1): 84-89.
- [8] 杨必胜, 魏征, 李清泉, 等. 面向车载激光点云快速分类的点云特征图像生成方法[J]. 测绘学报, 2010, 39(5): 540-545.