

# 文物建筑测绘中三维激光扫描技术的核心问题研究

白成军<sup>1</sup>, 吴葱<sup>2</sup>

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 建筑学院, 天津 300072)

## Study on the Core Questions of the Application of 3D Laser Scanning to Metric Survey of Historic Buildings

BAI Chengjun, WU Cong

**摘要:** 总结三维激光扫描技术在文物建筑测绘中应用的技术路线, 运用传统大地测量学中控制测量和误差传播的相关理论, 重点分析三维激光扫描技术中的坐标转换和点云最弱点位置及精度问题。

**关键词:** 文物建筑测绘; 三维激光扫描; 坐标转换; 最弱点

### 一、引言

文物建筑测绘是文物建筑保护的前提, 既是取得文物保护第一手资料的有效途径, 也是文物建筑后续研究工作的基础。传统的人工单点接触式测绘效率低下, 测绘成果没有统一标准, 精度无法保证。落后的测绘技术制约着文物建筑测绘工作的高效开展。

三维激光扫描技术是一种以三维激光扫描技术和扫描信息处理技术为核心的数据采集和处理技术。三维激光扫描技术满足了文物建筑测绘领域所要求的快速、非接触、高密度、数字化等数据采集的要求, 因而迅速被大量建筑类高等院校和文物保护单位所采用。三维激光扫描技术是一种建立在测量学科、仪器光电子学科、图形图像处理等多种学科基础上的综合性技术。应用的核心问题是如何根据文物建筑的特点正确评价数据精度和合理利用数据成果。本文运用传统大地测量学中控制测量和误差传播的相关理论, 分析了点云坐标转换和最弱点精度评定的相关核心问题。

### 二、三维激光扫描技术的基本原理

#### 1. 三维激光扫描的原理

三维激光扫描仪相当于一个高速旋转的全站仪系统, 扫描工作就是按照预先设定的步进距(水平方向和竖直方向的步进角度)步进扫描, 步进的同时利用脉冲式或相位式测距方式测距、利用接收到的回光强度给每一个扫描“点”赋予明暗的灰度

属性。如果内置 CCD 相机, 可以同时采集扫描对象的颜色信息, 经后续配给后得到“点”的真色彩属性, 所有点的集合称为“点云”。

如图 1 中, 任一扫描点  $P$  在扫描坐标系中的测站坐标可以表示为

$$\left. \begin{aligned} X_p &= S \cos m \cos n \\ Y_p &= S \cos m \sin n \\ Z_p &= S \sin m \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

地面三维激光扫描技术中的所用的激光器通常为气体激光器或半导体激光器, 波长范围从 400 ~ 1200 nm 不等, 颜色为绿色或近红外。根据测距方式不同分为脉冲式扫描和相位式连续波扫描; 角度测量方式为等角度步进式; 整体扫描方式有摆动扫描镜式、旋转棱镜式和旋转正多面体式。

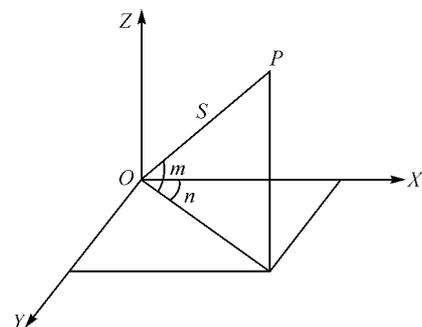


图 1 激光扫描原理

基于上述原理的测角精度通常为  $\pm 25''$ , 测距精度为  $\pm 4 \text{ mm}@ 50 \text{ m}$ 。最大测距范围依赖于所采用的激光波长、激光功率和被扫描对象的反射率。激

收稿日期: 2011-01-14

基金项目: 国家自然科学基金历史建筑遗产图像记录规范化研究(50578107)

作者简介: 白成军(1973—), 男, 宁夏中卫人, 硕士, 讲师, 主要从事建筑工程测量及文物建筑测绘方面的研究工作。

光发散角是影响扫描质量的关键指标之一, 现有的扫描设备激光光斑大小通常标注为 6 mm@50 m。

### 2. 三维激光扫描技术在文物建筑测绘中的技术路线

大多文物建筑内部梁架露明, 遮挡严重。而文物建筑测绘需要绘制建筑的平、立、剖面图和构件的大样图。这就需要在扫描数据采集前首先在踏勘现场的基础上布设、测定高密度、高精度的控制网, 然后根据扫描设备的特点和扫描对象的色彩、材质等属性进行扫描测绘。初步处理后的点云图, 要在现场校核, 对于扫描过程中遗漏的, 进行补扫; 无法进行扫描的死角部分采用手工补测; 同时由于点云图的识别能力较差, 可在现场勾画建筑构件的分块图等建筑纹理。根据文物建筑的特点, 在使用中总结出了三维激光扫描技术在文物建筑测绘中的技术实施路线, 如图 2 所示。

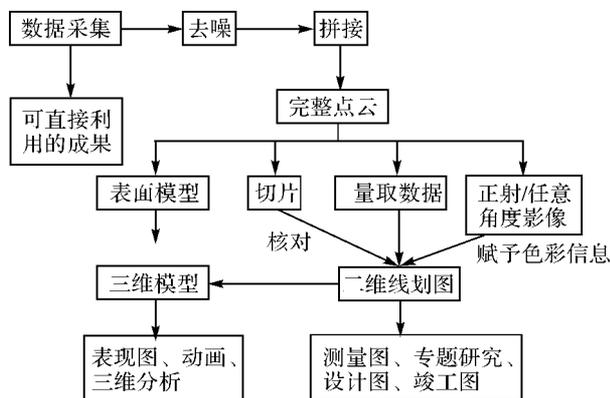


图 2 文物建筑扫描数据采集和利用流程

## 三、三维激光扫描技术用于文物建筑测绘的核心问题

### 1. 坐标转换

几乎任何扫描对象都不可能在一个测站上完成扫描工作, 这就需要将不同测站上的扫描数据进行坐标转换, 统一到同一坐标系中, 称之为“相对定向”或“拼接”。如果要和大地测量坐标系联接, 还需要进行数据的“绝对定向”。

如图 3 所示, 任一点在测量坐标系和扫描坐标系中的坐标分别为  $(X, Y, Z)$  及  $(x, y, z)$ , 假定  $(x_0, y_0, z_0)$  及  $(\psi, \omega, \gamma)$  为两个坐标系间平移和旋转参数, 同时假定  $\cos \theta_{x_x}$  表示  $X$  与  $x$  轴之间的方向余弦,  $\cos \theta_{x_y}$  表示  $X$  与  $y$  轴之间的方向余弦。依此类推, 在两种坐标系间的缩放比例为 1 的情况下, 从空间解析几何可知, 扫描目标的任一点在扫描坐标系与

测量坐标系中的坐标关系式为

$$\left. \begin{aligned} X &= a_1x + a_2y + a_3z + x_0 \\ Y &= b_1x + b_2y + b_3z + y_0 \\ Z &= c_1x + c_2y + c_3z + z_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{x_x} & \cos \theta_{x_y} & \cos \theta_{x_z} \\ \cos \theta_{y_x} & \cos \theta_{y_y} & \cos \theta_{y_z} \\ \cos \theta_{z_x} & \cos \theta_{z_y} & \cos \theta_{z_z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

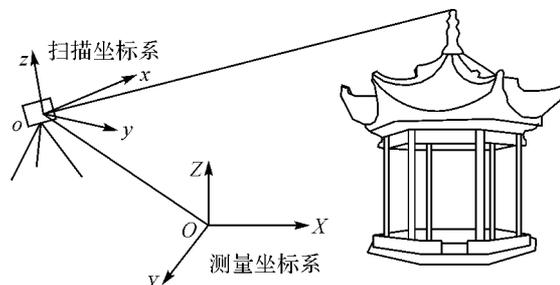


图 3 坐标系的转换

在实际扫描应用中, 坐标系间的旋转参数  $(\psi, \omega, \gamma)$  和平移量参数  $(x_0, y_0, z_0)$  共 6 个参数需要 3 对共轭来解算, 求出 6 个坐标变换参数就可以计算出每个扫描点的大地测量坐标, 完成坐标转换工作。

中国传统建筑特有的结构形式和风格特点, 以及对此进行文物建筑扫描测绘工作的目的, 决定了扫描测站数的庞大和扫描角度的多样。为了控制误差的累积, 以提高数据精度, 实际应用中通常采用基于控制测量的单站拼接、基于控制测量支导线拼接、基于控制测量的后方交会拼接、基于控制测量的符合导线拼接和闭合导线拼接方式, 以及基于标靶和特征点的自由叠加拼接方式。

### 2. 点云数据的最弱点及其精度分析

根据激光测距的原理和测角误差的传播特点, 扫描点的点位误差来源于测距误差和测角误差, 所以单测站扫描点云的最弱点位于扫描范围的最远点。

根据测量学中符合导线和闭合导线的最弱点位于导线的中间位置可知, 基于标靶和特征点的自由叠加拼接方式中, 坐标转换后点云的最弱点位于叠加路线的中间扫描站上。

基于控制测量的拼接方式中,坐标转换后点云最弱点位置与所采用的控制测量形式有关。依据误差传播定律,一般来讲,控制测量的最弱点位于距离高等级控制点的综合最远点处。所以扫描点云的最弱点位于以控制测量的最弱点为坐标转换基点的扫描测站上。

作为坐标转换基础的控制测量,常用的形式有GPS网、边角网、导线网、前(后)方交会等。根据测量学误差理论分析,导线网中控制测量的最弱点位于支导线的末端或符合导线及闭合导线的中间点处,而GPS网、边角网、导线网、前(后)方交会等则要根据网的形式和大小进行精度分析和估算。

以符合导线和闭合导线为例,结合式(1)及式(2),可得出最弱点最终点位精度如下。

依据式(1),单扫描测站扫描点位精度计算公式为

$$\left. \begin{aligned} M_x^2 &= \cos^2 m \cos^2 n \cdot m_s^2 + (\cos^2 n \sin^2 n + \cos^2 m \sin^2 m) S^2 m_\alpha^2 \\ M_y^2 &= \cos^2 m \sin^2 n \cdot m_s^2 + (\sin^2 n \sin^2 m + \cos^2 n \cos^2 m) s^2 m_\alpha^2 \\ M_z^2 &= \sin^2 m \cdot m_s^2 + s^2 \cos^2 m \cdot m_\alpha^2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

假定扫描距离为30 m、扫描仪的测距中误差和测角中误差分别为 $\pm 6$  mm和 $\pm 12''$ ,考虑最不利的情况下按照式(5)计算的点云最弱点P点点位中误差 $M_p$ 约为 $\pm 12.5$  mm。

假定测站间拼接转换以必要的3个点作为拼接公共点,同时遵照测量学科中精度控制规定之支导线的边数不得多于2个的规定,则经2次自由叠加拼接后的点云最弱点点位中误差为

$$M = \pm \sqrt{2} M_p = \pm 17.4 \text{ mm}$$

控制测量的精度,依据误差传播规律,最有利的情况下作为控制测量的符合导线和闭合导线边数不超过5个,假设控制测量按照二级导线的要求进行,精度估算后最弱控制点点位中误差 $M_{\text{控}}$ 约为 $\pm 3$  mm计算。

综合上述各项,在最有利的情况下三维扫描点云最弱点的最终点位中误差 $M_{\text{弱}}$ 为

$$M_{\text{弱}} = \pm \sqrt{M_{\text{控}}^2 + M^2} = \pm 17.6 \text{ mm}$$

由此可见,三维激光扫描的误差主要是扫描数据的测量误差,但根据测量误差理论中的三分之一法则,可以通过提高拼接点的精度来提高扫描点的精度。

#### 四、结论

1) 从上述分析可以看出,随着扫描过程中自由叠加拼接次数的增加,点云的误差随之叠加且急速放大;在无法提高扫描设备精度的情况下提高扫描点云精度的最有效途径就是提高拼接点的精度。

2) 基于当前技术的三维激光扫描设备无法达到建筑变形测量的毫米级精度。

3) 为了控制误差累积,提高扫描精度,三维激光扫描测绘和传统测绘一样,测绘前首先要进行基于精度评估的技术设计。

#### 参考文献:

- [1] 宁津生,王正涛. 测绘学科发展综述[J]. 测绘科学, 2006, 31(1): 9-15.
- [2] 李清泉,杨必胜,史文中,等. 三维空间数据的实时获取、建模与可视化[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [3] WOLF P R, DEWITT B A. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS[M]. 3 Ed. Florida: Florida University Press, 2000.
- [4] 李田泽. 空间三维表面测量的新方法[J]. 上海计量测试, 2000(1): 27-29.
- [5] 楚长青,麻风海. 三维激光扫描仪点云数据在 Micro Station 下的处理研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2007(10): 114-116.
- [6] 余明,丁辰,过静琚. 激光三维扫描技术用于古建筑测绘的研究[J]. 测绘科学, 2004(10): 69-70.
- [7] 林源. 古建筑测绘学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [8] 张祖勋,张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996.
- [9] 罗哲文. 中国古代建筑[M]. 上海: 上海古籍出版社, 2001.