

文章编号: 0494-0911(2012)04-0052-03

中图分类号: P21

文献标识码: B

利用激光扫描技术监测大型古建筑变形的研究

周伟^{1,2} 李奇^{1,2} 李畅³

(1. 联合国教科文组织 国际自然与文化遗产空间技术中心, 北京 100094; 2. 中国科学院 对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094; 3. 华中师范大学, 湖北 武汉 430079)

Deformation Monitoring Study on Large-scale Heritage Building Using Laser Scanning Technologies

ZHOU Wei, LI Qi, LI Chang

摘要: 通过对颐和园佛香阁的激光扫描, 完成佛香阁整体点云数据的拼接, 并使用椭圆拟合方式描述佛香阁的通天柱, 最终得到佛香阁通天柱的倾斜方向及倾斜角度, 为古建筑保护提供数据支撑。

关键词: 激光扫描; 点云拼接; 古建筑测绘; 变形监测; 文物保护

一、引言

颐和园是世界现存最大、最完整的历史皇家园林和世界遗产地, 其标志建筑——佛香阁作为代表中国传统建筑最高成就的精美文物建筑, 包含着深邃的历史文化内涵。“冠山楼阁三重峙”的佛香阁以其自身的雄浑凝重和所处位置的显著, 成为颐和园不可取代的标志和象征。“佛香阁”建在距地面约 40 m 高的花岗岩高台之上, 平面为八角形, 外檐 4 层内檐 3 层, 以 8 根坚硬的大铁梨木为擎天柱, 通高 36.47 m。

激光扫描作为一种直接获取物体表面三维信息的手段, 可以快速生成地物的高精度点云模型, 已广泛应用于古建筑保护。本文通过激光相邻站点间同名标靶匹配和引入带绝对坐标的平面标靶进行整体坐标转换两种方式对佛香阁进行整体拼接, 采用椭圆拟合方式描述佛香阁通天柱的点云断面, 以椭圆圆心为基准监测佛香阁的倾斜方向及角度。

由于佛香阁体量巨大, 首先采用 GPS 联测在佛香阁的北面放置了 3 个绝对定向点, 并通过全站仪围绕佛香阁作闭合导线控制测量, 作为测区的基本控制。

二、激光数据采集

选用德国 Z+F 公司 IMAGER 5006i 三维激光扫描仪对佛香阁进行近距离数据采集, IMAGER 5006i 的扫描范围为水平 360°、垂直 310°, 最大测距

约为 79 m。佛香阁体量较大, IMAGER 5006i 的相位式测距方式可在近距离扫描时获取较好精度的数据, 远距离整体扫描佛香阁时则选用 Leica C10, 其最大测距约 300 m, 可对佛香阁整体进行精度较高的数据采集。两款仪器优势互补, 确保了数据采集的完整性和准确度。

三、相邻站点的点云拼接

激光扫描仪在某一站点采集数据时, 由于受到观察方向和目标本身形状的限制, 不可能获得扫描目标的完整信息。为了重建地物的完整三维模型, 需要选择不同的站点对地物进行扫描。获取数据时, 由于每个站点获取的激光扫描数据都位于各自的激光扫描坐标系中, 需要将不同站点获取的激光点云数据统一到某个固定的坐标系中。实际工作中从多个测站对同一组标靶进行扫描, 使得各站的扫描结果中相邻两站均包含 3 个以上不共线且不共面的同名标靶。如果控制点数目多于 3 组, 就可以获得最小二乘意义上的变换参数, 有多余观测时, 可迭代求解直到未知数的改正数足够小为止, 从而完成对各站数据的精确拼接。

佛香阁为 3 层 4 重檐的古建筑, 其整体拼接存在 7 个问题: ① 单层室外走廊拼接; ② 单层室内拼接; ③ 单层室内与室外的拼接; ④ 单体构建扫描的拼接; ⑤ 层与层之间的拼接; ⑥ 佛香阁外围整体扫描站点间的拼接; ⑦ 佛香阁外围整体扫描与单层整体的拼接。激光扫描佛香阁的站数达到 92 站, 点云

收稿日期: 2012-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(41001204); 文物保护科学和技术研究课题(20100306)

作者简介: 周伟(1984—), 女, 湖北仙桃人, 硕士, 主要研究方向为机载激光扫描、地面激光扫描和世界遗产监测保护。

噪声的存在使基于最邻近点的匹配方法受到点位误差的影响,在相邻点云逐一配准直至生成完整景观模型的过程中,配准点的点位误差会不断积累,可能会影响佛香阁的整体拼接精度。本次测量中除了采用相邻站点有多个共同标靶的拼接方式,还尽量布设多余标靶以增加多余观测,使拼接过程中即便跨1~2个站点依然有共同标靶可进行拼接。同时使用全站仪测量平面标靶的绝对坐标,利用点云中标靶引入的绝对坐标,建立经过拼接后获得的点云模型相对坐标系与绝对坐标系之间的非刚体转换关系,从而实现点云坐标与大地坐标的统一,图1、图2为佛香阁整体拼接的结果。



图1 佛香阁整体拼接结果

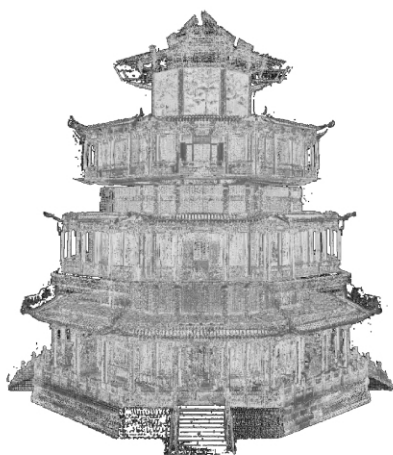


图2 3个单层整体拼接的结果

四、椭圆拟合

由于佛香阁通天柱经历多次维修,从点云中柱

子的横向断面可以看出通天柱并非正圆,如图3所示。

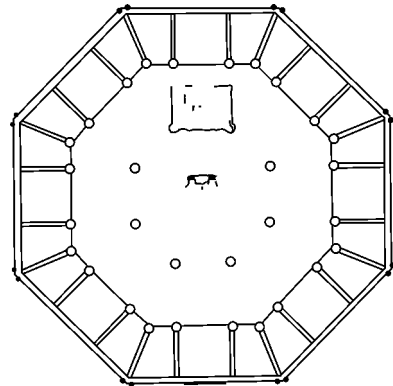


图3 点云横向断面图

为了能精确获得佛香阁通天柱的倾斜方向及角度,提出采用椭圆拟合的方式来确定柱心位置。如图4所示,中心点 $O(x_0, y_0)$ 、边界点 $Q(x_i, y_i)$ 和相应的椭圆点 $P(x, y)$ 在同一条直线上。这样,边界点到中心的欧氏距离可以表示为

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \tag{1}$$

拟合点到中心的欧氏距离可表示为

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \tag{2}$$

取所有边界点到拟合点距离平方和最小即为小二乘意义下的最好拟合,取目标函数为

$$J = \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - \sqrt{\frac{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}{(x_i - x_0)^2} - (x - x_0)^2} \right)^2 \tag{3}$$

式中

$$(x - x_0)^2 = \frac{a^2 b^2}{a^2 \left(\frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \sin \theta + \cos \theta \right)^2 + b^2 \left(\sin \theta - \frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \cos \theta \right)^2} \tag{4}$$

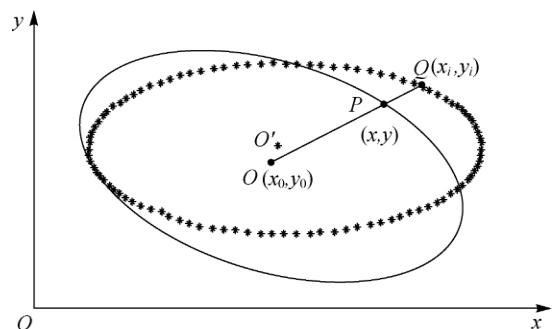


图4 椭圆拟合

令 J 取最小值, 则可得与数据点非线性最小二乘意义下拟合的最佳椭圆, 确定其中心坐标、长短轴长和旋转角度。

五、佛香阁通天柱的倾斜方向及角度

为了求出每根通天柱的垂直走向, 在佛香阁整体点云每一层楼的底部及顶部共切出 8 个横向断面, 并用椭圆拟合的方式确定每个断面的柱子圆心, 将佛香阁通天柱横向断面的柱心连接以确定佛香阁通天柱的倾斜方向(如图 5 所示)。通过量测通天柱柱心连线与水平面的夹角可知每根通天柱的倾斜角度依次为: 0.73620° 、 0.84280° 、 0.68100° 、 0.80550° 、 0.67320° 、 0.64870° 、 0.70510° 、 0.67740° , 佛香阁通天柱略微向东南方向倾斜, 倾斜角度约为 0.7° 左右。

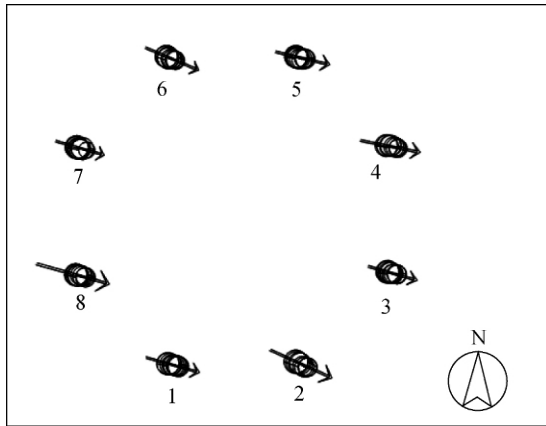


图 5 通天柱倾斜方向

六、结束语

本文配合国家重点文物的修复与保护, 利用激光扫描技术对颐和园佛香阁进行了精细测绘, 完成了三层四重檐的大型古建筑激光点云数据拼接, 并

给出了科学的数据用来精确监测佛香阁的现存状况。通过对该课题的深化研究, 摸索并建立起精细化的监测保护体系, 使国家文物保护由粗放向精细过渡, 从而做到了与世界遗产保护的科学管理同步发展。

参考文献:

- [1] 李志林, 朱庆. 数字高程模型 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000.
- [2] 安新源, 周宗潭, 胡德文. 椭圆拟合的非线性最小二乘方法 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(18): 188-192.
- [3] 赵煦, 周克勤, 闰利. 基于激光点云的大型文物景观三维重建方法 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(7): 684-687.
- [4] 朱宜萱. 基于等值线图的乐山大佛三维可视化 [J]. 测绘信息与工程, 2003, 28(1): 17-18.
- [5] 王昌翰, 向泽君, 刘洁. 三维激光扫描技术在文物三维重建中的应用研究 [J]. 城市勘测, 2010(6): 67-70.
- [6] 尤红建. 激光三维遥感数据处理及建筑物重建 [M]. 北京: 测绘出版社, 2006.
- [7] 李奇, 马洪超. 基于激光雷达波形数据的点云生产 [J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 349-354.
- [8] LI Qi, MA Hongchao, WU Jianwei, et al. Filter Algorithm for Airborne LiDAR Data [C] // Proceedings of the SPIE. [S.l.]: SPIE, 2007.
- [9] VOSSSELMAN G, GORE B G H, SITHOLE G, et al. Recognising Structure in Laser Scanner Point Clouds [J]. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004, 46(8): 33-38.
- [10] RABBANI T, DIJKMAN S, Van DENHEUVEL F, et al. An Integrated Approach for Modeling and Global Registration of Point Clouds [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 6(1): 355-370.