

基于多时相点云数据的大型古建筑形变监测研究

——以苏州虎丘塔为例

陆建华, 吕志才

(苏州市测绘院有限责任公司, 江苏 苏州 215000)

摘要: 地面三维激光扫描系统可以快速、全面地获取被监测对象的海量三维点云数据, 在古建筑三维形变监测领域该技术开始得到应用。通过介绍虎丘塔三维激光点云数据的采集、处理与精度检核方法, 以及通过多时相点云数据偏差分析结果对比塔身变化情况, 研究了三维激光扫描技术在古建筑形变监测方面的可行性。

关键词: 三维激光扫描; 多时相点云数据; 虎丘塔; 形变监测

中图分类号: P235

文献标识码: A

Deformation monitoring of large ancient architectural buildings based on multi-temporal point cloud: A case study of Suzhou Tiger Hill Pagoda

Lu Jianhua, Lyu Zhicai

(Suzhou Surveying Institute Company, Suzhou 215000, China)

Abstract: The Terrestrial Laser Scanning (TLS) System can obtain massive 3D point cloud data from monitored objects rapidly and comprehensively. It can be applied in field of deformation monitoring for large ancient buildings. In this paper, the method of point cloud data acquisition, registration, and precision analysis for the Tiger Hill Pagoda is presented, and the multi-temporal point cloud data are used to find the tower body changes. The feasibility of applying 3D laser scanning technology in deformation monitoring of ancient architecture is studied.

Key words: 3D laser scanning; multi-temporal point cloud; Tiger Hill Pagoda; deformation monitoring

0 引言

古建筑三维形变是一种常见的文物病害, 它是指古建筑在长期保存过程中由于环境变化、营力侵蚀(风化、流水、冰冻)等因素导致的整体或局部在三维空间发生的位移、变形、脱落等一系列不利于文物安全或有损文物外貌的变化。

传统形变监测多为单点式监测, 如安装应力应变传感器、用测绘仪器(全站仪、水准仪、GPS)等, 由于采样点少, 难以发现细微变化, 很难反映变形的全部特征, 这必将延误对古建筑进行有效保护, 导致形变进一步扩大; 再者, 常规形变监测劳动强度大, 且文物工作人员无法到达或者人员的接触易造成文物的损害, 如虎丘塔

这种高层古建筑, 造成无法进行全面监测; 最后, 单点式形变监测不能对以后的修复工作提供有意义的帮助^[1]。因此, 在进行修复时, 文保人员更多地依赖于经验和主观的判断, 这不可避免地导致了修复工作的不科学性。

三维激光点云数据记录了被扫描物体某一时刻的静止状态, 按时间采集的三维点云可以记录被扫描物体一段时间内的变化, 称这种时序三维点云为多时相点云数据。多时相点云是分析被扫描物体时空形态变化的重要数据源^[2]。国内外对该技术应用与古建筑形变监测领域已进行了一定的研究, 李树

收稿日期: 2015-09-14; 修订日期: 2016-01-06

作者简介: 陆建华(1974-), 男(汉族), 江苏苏州人, 硕士, 高级工程师。

坤^[3]利用多时相点云数据分析了贴金石质文物表面病害情况。周伟等^[4]通过采集点云数据,利用激光扫描技术对颐和园内佛香阁通天柱进行了精密监测。日内瓦大学 Alessandro 等人^[5]通过对圣苏菲亚大教堂进行三维扫描研究,对大型复杂的古建筑进行了形变监测与分析。Allen 等^[6]利用地面三维激光扫描仪对圣皮埃尔大教堂进行全面的三维重建与形变监测。

1 技术路线

虎丘塔又称云岩寺塔,如图1所示,现存塔身建成于公元961年(北宋建隆二年),七层八面,高47.7m,重6000多吨,是以砖结构为主的仿木构楼阁式砖塔,斜而不倒,是10世纪长江流域砖塔的代表作。也是苏州市现存建筑中的“第一寿星”、苏州古城的地标之一,1961年被国务院公布为第一批全国重点文物保护单位,2014年成为世界文化遗产景点。



图1 虎丘塔

Fig. 1 Suzhou Tiger Hill Pagoda

自宋代以来虎丘塔历经灾难,受损严重。建国后分别在1957年与1986年完成两次抢救性维修,对塔基进行了整体加固,使之成为一体。二十多年来苏州市测绘院对古塔的监测和分析表明,古塔未出现明显的不均匀沉降,塔体仅有微小的倾斜,目前仍属渐变过程^[7]。但近年来由于暴露在外的塔体受到雨水(酸雨)、冰雪等侵蚀,风化严重,出现了如图2所示的隐木腐蚀导致斗拱掉落与砖块掉落等情况(每年超十块),如何利用现代测绘技术对塔身形变实施监测,是摆在文保与测绘工作者面前的重要课题,而将三维激光扫描技术用于虎丘塔形变监测将是这方面一个重要的尝试。

基于单点监测方法仅仅依靠少量监测点是不能获取充足的塔身形变病害信息,对古塔安全评估容易出现差错。三维扫描技术可以快速准确采集古塔完整点云数据,通过处理与分析能够精确准确获取各部分不同时期三维数据,实现虎丘塔三维空间形



图2 虎丘塔斗拱掉落情况

Fig. 2 Bucket arches shedding condition of the Pagoda

变监测和分析。虎丘塔形变监测分为3个部分,包括数据采集、数据处理、数据分析。数据采集包括塔身点云数据采集、固定标靶数据采集。数据处理主要进行整体点云数据拼接、去噪与滤波。数据分析主要包括不同时相点云数据的偏差分析与所反映的塔身形变分析。

2 激光点云数据采集

选用Faro公司Focus3D三维激光扫描仪对虎丘塔进行点云数据采集,Faro Focus3D参数如表1所示。

表1 Faro Focus3D性能参数

Table 1 Performance parameter of Faro Focus3D

技术规格	参数	技术规格	参数
扫描方式	相位式	垂直视野	300°
测量范围	0.6~120m	水平视野	360°
测量速率	976000点/秒	点位误差	±2mm

利用该扫描仪对虎丘塔外部进行了两期(维修前、维修后)数据采集,借助脚手架平台以分层扫描方式确保整体塔身数据的完整性。垂直方向共架设14层(如图3所示),水平方向在每层的塔角处分设8个测站(如图4所示)。

同时在塔身壶门内布设12个固定标靶球(标靶与塔身固定),以便于完成不同测站与不同时相的点云拼接,在布设时标靶球不能在同一条直线上或同一个平面内。图5为现场扫描与标靶布设示意图。第一期与第二期同样采集了112站数据。

3 激光点云数据处理

激光点云数据处理主要包括点云的拼接、去噪、滤波等,本文主要介绍对形变监测影响较大的点云拼接。

3.1 点云拼接

不同测站与不同时相的点云数据高精度配准是形变监测的基本前提,是降低伪监测风险、提高监

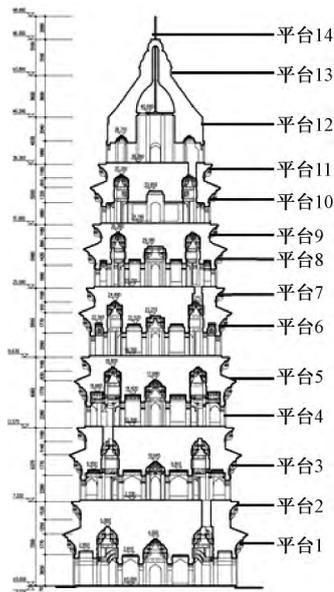


图3 垂直设站方式

Fig. 3 Vertical direction erection method

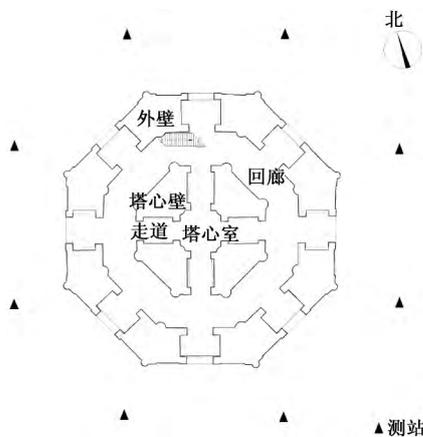


图4 水平设站方式

Fig. 4 Horizontal direction erection method



图5 现场扫描与标靶布设示意图

Fig. 5 Operation site and the layout plan of the target ball

测可靠性的关键技术。常用的配准方法有：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。配准精度主要取决于标靶或同

名点的识别精度。通常情况下，方法①的配准精度最高，方法②的配准精度与扫描点的密度成正比，即点云密度大，配准精度则高，反之亦然^[8]。点云配准实质上是不同测站的坐标系进行统一的过程，通过两个不同测站 Q_1 和 Q_2 数据中 3 个或 3 个以上的同名点，利用空间坐标转化模型将一个测站的数据转换到另一个测站的基准坐标系中。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：

$$Q_2 = RQ_1 + T \quad (2)$$

式 (2) 中： R 为两坐标系之间的旋转矩阵， T 为平移矩阵，表示坐标原点的平移量。虎丘塔扫描工作中采用基于球形标靶的拼接方式，在多个测站扫描同一组标靶，通过合理设站及布设标靶，使各相邻测站均能扫描到 3 个以上的同名标靶。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 个站点依然有公共标靶可进行拼接，这样保证了多于 3 组的控制点数目，可获得最小二乘意义上的变换参数，从而完成对各站数据的精确拼接。图 6 为虎丘塔整体拼接的结果。两期点云数据整体配准同样使用该 12 个标靶球完成。



图6 虎丘塔整体拼接点云图

Fig. 6 Integral point cloud of Tiger Hill Pagoda

3.2 点云数据精度检核

为检验点云成果整体精度，确保形变监测结果的正确性，项目实施中利用布设的标靶球进行了点云质量整体评定。如图 7 所示，在水平方向上瞄准球标靶的左右边缘，测出方位角 A_1 、 A_2 并取平均；同样，在垂直方向上瞄准球体的上下边缘，测出天顶距 Z_1 、 Z_2 ，并取平均^[9]；依据两个方向的平均值

可以确定球的表面中心，此时可以测出测站到表面中心的距离 S' ，根据上下边缘的天顶距 Z_1, Z_2 和至球表面的斜距 S' ，可以求出球的半径 r ：

$$\begin{cases} e = \frac{1}{2}(Z_2 - Z_1) \\ r = (S' + r) * \text{sine} \end{cases} \quad (3)$$

根据极坐标测定空间点位的公式可得球心的三维坐标为：

$$\begin{cases} X = X_A + S * \text{sine} * \cos\alpha \\ Y = Y_A + S * \text{sine} * \cos\alpha \\ Z = Z_A + S * \text{cose} \end{cases} \quad (4)$$

其中： $\alpha = \frac{1}{2}(A_1 + A_2)$

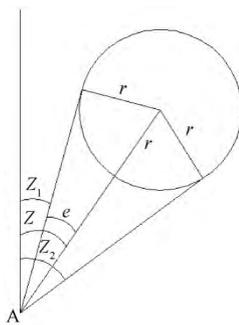


图 7 全站仪测球体球心

Fig. 7 A method using total station to extract center of the sphere

项目利用虎丘塔四周布设的长期变形监测墩对标靶球进行了观测（见图 8），全站仪在监测墩处共架设 4 站，每测站至少测量 3 个球心坐标，标靶球按 1~12 号分别命名。本次所采用靶标球半径为 0.0725m，通过比较全站仪实测半径与真实球半径，检核全站仪测量靶标球球心精度。经分析可知，两者较差均在 ±1mm 以内，球半径较差中误差为 ±0.623mm。



图 8 变形监测墩

Fig. 8 Deformation monitoring pier

在配准后的整体点云中提取出标靶球点云数据，利用 MATLAB 编程实现了基于总体最小二乘（Least Squares, LS）的球心拟合算法^[10]，并计算出 12 个球心坐标。由于全站仪坐标系与点云坐标系未进行统一，因此本文通过比较球心距的方法来进行精度检核。共检测球心距 29 个，其中最大偏差为 1 号与 11 号标靶，偏差值为 23.9mm，计算得出的球心距偏差中误差为 ±7.5mm。由此可得塔身整体配准精度较高，满足古建筑形变监测的要求。

4 塔身形变分析

为了确保标靶球的稳定及后期拼接质量，同样利用虎丘塔四周布设的长期变形监测墩对其进行了定期监测。通过在监测墩上架设高精度全站仪，对标靶球进行球心坐标采集，分别于施工前、施工中、施工后监测 3 期数据，监测数据如表 2 所示。同时由表 3 监测数据变化量与表 4 监测数据点位精度分析可知，与第一期监测数据相比，第二期、第三期最大点位误差分别为 0.0014m 与 0.0013m，点位中误差分别为 0.0009m 与 0.0011m，且点位中误差在 X、Y、Z 分量上均小于 0.001m，监测结果显示标靶球在作业期间位置稳定，未发生明显位移，满足数据配准拼接要求。

表 2 标靶球监测数据表
Table 2 Monitoring data of target ball

编号	第一期实测球心坐标			第二期实测球心坐标			第三期实测球心坐标		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	46344.8133	46038.7278	32.5511	46344.8134	46038.7283	32.5503	46344.81245	46038.7294	32.5506
2	46342.8271	46044.5470	39.8231	46342.8273	46044.5477	39.8225	46342.82636	46044.5479	39.8232
3	46337.8772	46046.6544	39.4573	46337.8773	46046.6551	39.4572	46337.87659	46046.6557	39.4579
4	46332.2521	46044.9379	46.2451	46332.2518	46044.9382	46.2443	46332.25089	46044.9370	46.2446
5	46329.4081	46040.0046	45.8687	46329.4080	46040.0049	45.8679	46329.40714	46040.0046	45.8682
6	46330.9614	46034.4555	52.3665	46330.9611	46034.4565	52.3662	46330.96001	46034.4564	52.3672
7	46336.2744	46031.5243	52.1525	46336.2741	46031.5246	52.1520	46336.27344	46031.5234	52.1523
8	46342.2815	46033.2132	58.2515	46342.2804	46033.2135	58.2513	46342.27924	46033.2134	58.2520
9	46342.1155	46043.1460	63.7351	46342.1149	46043.1467	63.7350	46342.11397	46043.1465	63.7357
10	46338.1732	46046.1616	63.2441	46338.1728	46046.1623	63.2430	46338.17144	46046.1616	63.2433
11	46331.7547	46045.1777	69.2361	46331.7541	46045.1779	69.2354	46331.75316	46045.1774	69.2357
12	46330.0028	46039.9589	69.1519	46330.0024	46039.9592	69.1516	46330.00182	46039.9584	69.1521

表 3 标靶球监测数据变化量
Table 3 Analysis of monitoring data of target ball

编号	一二期变化量				一三期变化量			
	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	点位误差 (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	点位误差 (m)
1	-0.0001	-0.0005	0.0008	0.0009	-0.0011	-0.0003	0.0006	0.0013
2	-0.0002	-0.0007	0.0006	0.0009	-0.0002	-0.0007	0.0006	0.0009
3	-0.0001	-0.0007	0.0001	0.0007	-0.0006	-0.0007	0.0003	0.0010
4	0.0003	-0.0003	0.0008	0.0009	0.0012	-0.0003	0.0001	0.0012
5	0.0001	-0.0003	0.0008	0.0009	0.0003	-0.0003	0.0008	0.0009
6	0.0003	-0.001	0.0003	0.0011	0.0001	-0.001	0.0003	0.0010
7	0.0003	-0.0003	0.0005	0.0007	0.0012	-0.0003	0.0003	0.0013
8	0.0011	-0.0003	0.0002	0.0012	0.0001	-0.0007	0.0009	0.0011
9	0.0006	-0.0007	0.0001	0.0009	0.0002	-0.0007	0.0001	0.0007
10	0.0004	-0.0007	0.0011	0.0014	0.0007	-0.0003	0.0011	0.0013
11	0.0006	-0.0002	0.0007	0.0009	0.0005	-0.0003	0.0006	0.0008
12	0.0004	-0.0003	0.0003	0.0006	0.0008	-0.0005	0.0001	0.0009

表 4 标靶球监测数据点位精度分析
Table 4 Precision analysis of the target ball monitoring data

$M 12_x$	$M 12_y$	$M 12_z$	$M 12_{xyz}$	$M 13_x$	$M 13_y$	$M 13_z$	$M 13_{xyz}$
0.0005	0.0006	0.0006	0.0009	0.0007	0.0006	0.0006	0.0011

为了对塔身形变进行分析，以维修前第一期扫描数据为参考对象，将维修中第二期扫描数据与其进行偏差分析比较。使用塔身均匀布设的 12 个球形标靶将第二期数据全部配准到第一期数据上去。由于两期数据量较大，直接进行整塔偏差分析对计算机性能要求较高。因此采用分层分面裁剪的方法进行分块计算分析，共将虎丘塔（7 层 8 面）分成 56 块分析区域。以六层南侧为例，使用 Geomagic 软件的 3D 比较功能将第一期与第二期数据进行偏差计算，通过计算可识别出塔身形变区域，并以高亮的圆形标定，如图 9 所示，计算机自动识别出六层墙裙顶部斗拱发生了形变事件（斗拱脱落，如图 2 所示）。

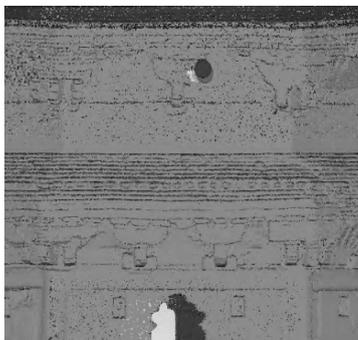


图 9 塔身形变标定

Fig. 9 Deformation calibration of the Pagoda

同时可计算出六层南侧两期数据的形变监测数据：根据两期数据偏差分析结果图（见图 10）得

出平均偏差值为 $-0.0840\text{m} \sim 0.0002\text{m}$ ，标准偏差为 0.0048m ，最大偏差为 0.2m 。其中平均误差指从测试对象到参考对象上任一点的平均偏差距离，标准偏差指测试与参考对象比较后的所有随机误差按正态分布规律时的均方根误差（即标准偏差），最大距离指从测试对象到参考对象上任一点的最大偏差距离。分析结果表明，六层南侧发生斗拱脱落情况，脱落斗拱最大尺寸约为 20cm 。表 5 为两期数据偏差分布表，分析可得出 99.8322% 的点位误差小于 1cm ，说明除斗拱脱落以外，该区域塔身整体情况较为稳定，无明显形变事件发生。

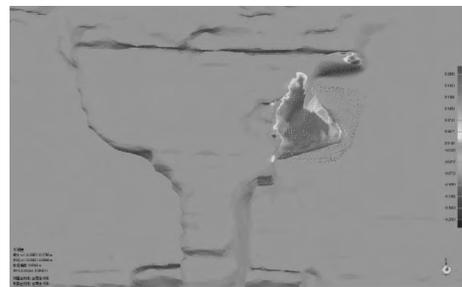


图 10 两期数据偏差分析结果

Fig. 10 Analysis result of two period data deviation

5 总结与展望

以上分析和实验结果表明，三维激光扫描系统数据采集全面，改变了传统单点量测方式，可以较为准确地表达监测对象真实复杂的状况。监测结果

表 5 偏差分布表
Table 5 Distribution of deviation

\geq Min (m)	<Max (m)	点数 (个)	百分比 (%)
-0.2000	-0.1683	1	0.0001
-0.1683	-0.1366	34	0.0042
-0.1366	-0.1050	68	0.0084
-0.1050	-0.0733	10	0.0012
-0.0733	-0.0417	12	0.0015
-0.0417	-0.0100	24	0.0030
-0.0100	0.0100	804945	99.8322
0.0100	0.0417	205	0.0254
0.0417	0.0733	184	0.0228
0.0733	0.1050	208	0.0258
0.1050	0.1366	208	0.0258
0.1366	0.1683	221	0.0274
0.1683	0.2000	177	0.0220

对普通文保工作者来说简单易懂。因此非常适合使用在古建筑形变监测项目当中。另外，三维激光扫描技术具有测量速度快、点云密度高、可以全天候监测等特点，可以为准确监测塔身形变的发生位置及形变情况提供第一手的连续可靠的数据及其相关信息资料，不失为古建筑形变监测的新途径。

本文从整体偏差的角度考虑了形变事件，然而形变情况是三维方向的，本文仅仅给出了整体的变化量，所以今后可以通过特征提取算法计算特征的变化来反映古建筑的形变情况。同时关于扫描仪形变监测的精度评定以及误差分析，目前没有系统的说明，需要进一步分析误差，改正误差，提高监测精度。总之，将三维激光扫描技术应用于大型古建筑形变监测具有重要的研究意义。

参 考 文 献

- [1] 杨刚亮. 关于“病害调查”的若干思考 [N]. 中国文物报, 2010.
Yang Gangliang. Some thoughts on the investigation of disease [N]. China Culture Relics, 2010. (in Chinese)
- [2] 张良. 基于多时相机载 LiDAR 数据的三维变化检测关键技术研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- Zhang Liang. Study on the technical issues of three dimensional change detection based on multi-temporal LiDAR data [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese)
- [3] 李树坤. 基于多时相点云的贴金石质文物病害检测 [D]. 北京: 北京建筑工程大学, 2013.
Li Shukun. Disease detection for stone relics laced with gold based on multi-temporal point cloud [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013. (in Chinese)
- [4] 周伟, 李奇, 李畅. 利用激光扫描技术监测大型古建筑变形的研究 [J]. 测绘通报, 2012, (4): 52~54.
Zhou Wei, Li Qi, Li Chang. Deformation monitoring study on large-scale heritage building using laser scanning technologies [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012, (4): 52~54. (in Chinese)
- [5] Alessandro. George. Nadia Virtual Hagia Sophia: Restitution, visualization and virtual life simulation 2002.
- [6] Allen, Alejandro, Benjamin. New methods for digital modeling of historic sites [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 23 (6): 32~44.
- [7] 袁铭, 王建辉, 周醉等. 一种古建筑三维建模方法 [J]. 苏州科技学院学报 (工程技术版), 2009, 22 (1): 43~47.
Yuan Ming, Wang Jianhui, Zhou Zui et al. An ancient architecture 3D construction [J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology), 2009, 22 (1): 43~47. (in Chinese)
- [8] 卢小平, 王玉鹏, 卢遥等. 齐云塔激光点云三维重建 [J]. 测绘通报, 2011, (9): 11~14.
Lu Xiaoping, Wang Yupeng, Lu Yao et al. Qiyun pagoda 3D model reconstruction based on laser cloud data [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011, (9): 11~14. (in Chinese)
- [9] 程效军, 贾东峰, 程小龙. 海量点云数据处理理论与技术 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2014: 108~110.
Cheng Xiaojun, Jia Dongfeng, Cheng Xiaolong. The theory and technology of mass point cloud data processing [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2014: 108~110. (in Chinese)
- [10] Golub G H, Van Loan C F. An analysis of the total least squares problem. Numer Anal, 1980, 17 (6): 883~893.