

引用本文:郭 明,闫冰男,周腾飞,等. 激光雷达技术在应县木塔形变分析中的应用[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(2):109-117.
GUO Ming, YAN Bing-nan, ZHOU Teng-fei, et al. Application of LiDAR Technology in Deformation Analysis of Yingxian Wooden Pagoda [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(2): 109-117.

DOI:10.19815/j.jace.2019.03061

激光雷达技术在应县木塔形变分析中的应用

郭 明^{1,2,3,4}, 闫冰男¹, 周腾飞¹, 陈朝阳¹, 张 晨¹, 刘运明⁵

(1. 北京建筑大学 测绘与城市空间信息学院, 北京 102616; 2. 北京建筑大学 代表性建筑与古建筑数据库教育部工程研究中心, 北京 102616; 3. 北京建筑大学 现代城市测绘国家测绘地理信息局重点实验室, 北京 102616; 4. 北京建筑大学 建筑遗产精细重构与健康监测北京市重点实验室, 北京 102616; 5. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101)

摘要:为了更好地对应县木塔进行保护,需要分析其形变程度,了解木塔的健康状况,进而制定科学的保护方案。利用地面激光雷达、高精度全站仪等测量传感器,通过激光雷达扫描和全站仪控制测量相结合的方案采集监测数据。首先对采集的点云数据进行预处理,外部点云采用整体配准算法进行配准,通过特征进行粗配准和迭代最近点(ICP)算法进行精配准的两次配准,配准后根据控制点完成内、外点云坐标转换,通过罗德里格矩阵求解空间转换参数,最终得到绝对坐标系下的整体点云模型。对点云模型进行多种剖切,测量出柱子的倾斜角度、偏移距离以及整体倾斜角度等数据,定量分析单柱、单层及整体的形变。结果表明:应县木塔各层柱子都存在形变,木塔第2层形变较大,其中M2W23号柱子倾斜最严重;各层均向东北方向有不同程度的倾斜,西南面柱子的位移量普遍较大;从整体上看,木塔向东北方向倾斜并存在着复杂的扭转变形,木塔西侧由南向北发生顺时针扭转,东侧由南向北发生逆时针扭转;应县木塔正处于严重的形变中,急需进行保护。

关键词:应县木塔;形变分析;激光雷达扫描;点云模型

中图分类号:TU196

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)02-0109-09

Application of LiDAR Technology in Deformation Analysis of Yingxian Wooden Pagoda

GUO Ming^{1,2,3,4}, YAN Bing-nan¹, ZHOU Teng-fei¹, CHEN Zhao-yang²,
ZHANG Chen¹, LIU Yun-ming⁵

(1. School of Geomatics and Urban Spatial Informatics, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China; 2. Engineering Research Center of Representative Building and Architectural Heritage Database of Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China; 3. Key Laboratory of Modern Urban Surveying and Mapping. National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China; 4. Beijing Key Laboratory for Architectural Heritage Fine Reconstruction & Health Monitoring, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China; 5. Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co., Ltd, Beijing 100101, China)

收稿日期:2019-04-22

基金项目:国家自然科学基金项目(41601409,41971350);北京市教委科研计划项目(KM201810016013,KM201510016016);北京市属高校基本科研业务费项目(X18050,X18001);北京建筑大学科研基金项目(KYJJ2017024)

作者简介:郭 明(1981-),男,湖北黄陂人,副教授,工学博士,E-mail:guoming@bucea.edu.cn.

通信作者:刘运明(1980-),男,山东德州人,高级工程师,E-mail:liyunming@cki.com.cn.

Abstract: In order to protect Yingxian wooden pagoda better, it is necessary to analyze the degree of deformation and understand the health status, so as to formulate a scientific protection program. The monitoring data was collected by the combination of lidar scanning and total station control measurement by using ground lidar, high-precision total station and other measuring sensors. Firstly, the collected point clouds data was preprocessed, and the external point clouds were registered by the overall registration method. The internal point clouds performed two registrations of coarse registration through feature and fine registration by the iterative closest point (ICP) algorithm, which were the main data of deformation analysis and required high accuracy. After registration, the coordinate transformation between internal and external point clouds was carried out according to control points. The space transformation parameters were solved by Rodrigues matrix and finally the overall point clouds model in absolute coordinate system was obtained. The point clouds model was cut in various ways to measure the deviation angles and distances of columns and the inclination angles of whole pagoda. Then the deformations of the single column, single layer and the whole pagoda were quantitatively analyzed. The results show that all the columns of Yingxian wooden pagoda are deformed, the second layer of Yingxian wooden tower has a large deformation, of which the M2W23 column has the most serious inclination. Each layer inclines to the northeast in varying degrees, the inclination degree of the southwest columns is generally large. On the whole, the wooden pagoda inclines to the northeast with complex torsional deformation, the west side is turned clockwise from the south to the north, but the east side is turned counterclockwise from the south to the north. In brief, Yingxian wooden pagoda is undergoing serious deformation, which urgently needs protection.

Key words: Yingxian wooden pagoda; deformation analysis; LiDAR scanning; point clouds model

0 引言

应县木塔又称佛宫寺释迦塔,位于山西省应县西北隅,建于辽代清宁二年(1056年)是中国现存最高最古老的木构塔式建筑,历史文化价值极高^[1]。长期以来,应县木塔经历过多次自然和人为破坏,木材承载能力减弱,部分构件损坏,使木塔产生不同程度的倾斜、扭转等形变,并且随着时间的推移日趋严重^[2]。应县木塔是中国木结构古建筑的典型代表,对应县木塔进行保护也是古建筑文化遗产保护领域的重要工作,通过测绘手段获取木塔现状数据,对其形变进行全面分析,以便制定合理的保护方案,科学保护木塔安全。

近年来大多学者从结构的角​​度采用有限元方法分析应县木塔的形变及结构受力情况^[3]。陈特等^[4]通过有限元模型评估应县木塔的稳定​​性,分析出木塔二层明层的破坏始于西南面外檐中柱的局部失稳,该柱因柱脚樨局部最大拉应力过大而发生损伤。陈平等^[5]建立应县木塔二层明层柱网的有限元模型

并进行纠偏分析,为木塔的进一步加固设计提供依据,并提出纠偏方案。杜雷鸣等^[2,6]构建有限元分析模型,进行了重力和地震作用下的结构受力分析,对木塔结构抗震性能进行了安全评估。也有利用工程测量方法研究应县木塔,隋坤等^[7]分析出木塔总的趋势是南高北低,各层间处于相对扭曲状态。由于古建筑木结构与现代混凝土建筑结构不同,单柱的局部失稳将引起木塔整体坍塌^[8],因此本文主要测量单柱的形变,从测绘的角度定量分析应县木塔的形变情况。

激光雷达扫描技术是一种全新的测绘手段,凭借其高效率、高精度、不接触古建筑本体的优势,在古建筑勘测中被越来越多地应用。通过激光雷达扫描技术可以获取古建筑精细的三维信息^[9-10],是古建筑文化遗产管理的重要手段和工具^[11];全站仪的测量精度可达到亚毫米级,在密集型遗产监测中常作为一种全局控制手段^[12]。本文通过不同的地面激光雷达扫描仪获取木塔内、外的点云数据,同时在木塔周围布设标靶控制点,通过全站仪控制测量建

立监测的绝对坐标系。采集到的点云数据首先要进行预处理,外部点云采用整体配准的算法,内部点云采用特征配准的粗配准和迭代最近点(ICP)算法精配准的两次配准,再通过控制点将内、外点云转换到绝对坐标系中,得到整体的点云模型。通过对点云模型进行多种剖切,测量出木塔各层柱子的偏移角度、距离以及整体的倾斜角度等,根据测量数据分析木塔单柱、单层到整体的偏移程度、倾斜方向以及扭转趋势等。

1 监测方案及数据获取

1.1 监测方案

根据应县木塔的地理位置、周围环境、建筑结构以及扫描精度要求,制定合理的监测方案,如图 1 所示。利用中远程、近程地面激光扫描仪以及全站仪等测量传感器,获得能反映木塔特征变化的高精度监测数据。通过中远程地面激光扫描仪采集木塔外部点云,但是木塔屋檐容易遮挡并且无法获取木塔内部点云,这时通过近程扫描仪采集内部点云;同时利用全站仪进行控制测量,根据已有监测控制点的分布在木塔周围布设标靶纸,每层至少布设 3 个标靶点。将塔内、塔外点云配准后,经过控制点进行坐标转换,得到整体的点云模型,实现传统测量与激光雷达扫描的坐标统一,便于进行形变分析。为了保证数据拼接质量,相邻站点之间数据重合度应达到 30% 以上,相邻站点之间至少有 3 个不共面的公共标靶。

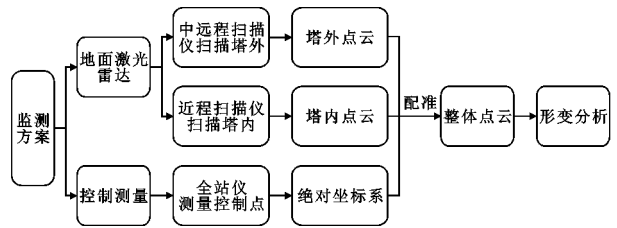


图 1 监测数据获取技术路线

Fig. 1 Monitoring Data Acquisition Technology Route

1.2 塔外数据获取

中远程激光扫描仪的测程可以达到 1 200 m,适用于远距离大范围的扫描。采集数据时在应县木塔外部设置 10 个测站(图 2),共布设 25 个标靶控制点。为了保证数据配准和坐标转换的精度,对 25 个标靶点控制进行高精度扫描,标靶纸及标靶点云如图 3 所示。

在单站扫描过程中,设置粗略扫描精度为 0.04 $\text{cm} \cdot \text{m}^{-1}$,对木塔所在区域做高精度扫描,精度为

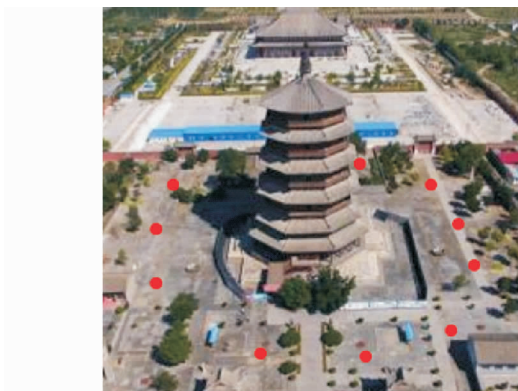


图 2 外部扫描站点分布

Fig. 2 External Scan Site Distribution

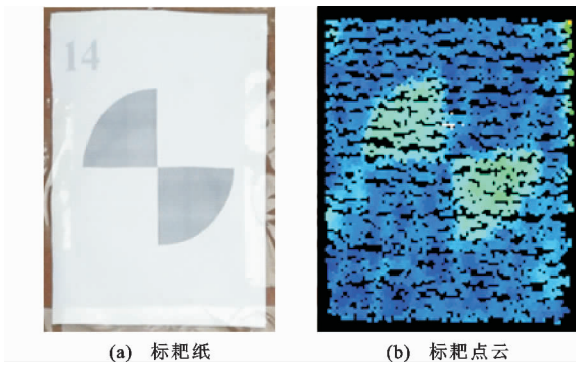


图 3 标靶纸及标靶点云

Fig. 3 Target Paper and Target Point Clouds

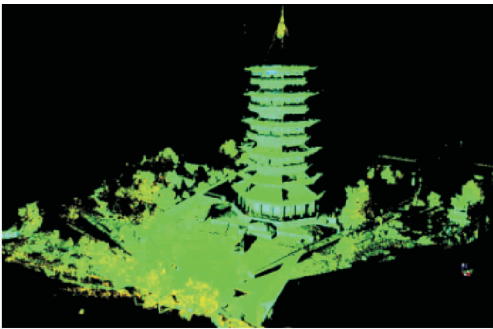
0.01 $\text{cm} \cdot \text{m}^{-1}$,单站扫描数据如图 4 所示。

1.3 塔内数据获取

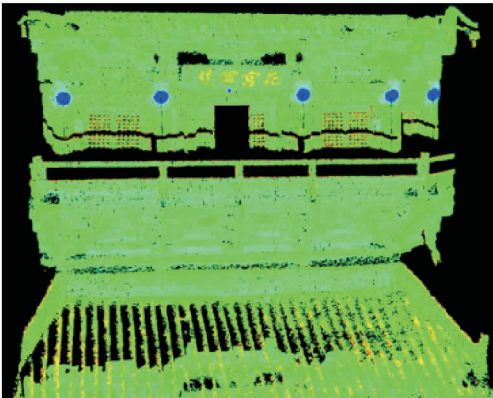
近程激光扫描仪的测程为 0.5~130 m,扫描仪轻巧,便于携带,因此用于采集木塔内部数据。应县木塔每层均由 8 根内柱和 24 根外柱支撑,在扫描过程中对内中外三侧进行扫描(图 5),设置扫描分辨率为 0.07 $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$,保证每根柱子都能扫描清楚且没有遗漏部分。为方便数据配准,每两站之间通过标靶球连接(图 6),木塔上下 2 层通过楼梯上特征点、特征面连接。

1.4 控制点数据获取

为了精确测定应县木塔的形变,需要建立较高精度的控制网^[13],通过全站仪进行控制测量,建立应县木塔的监测绝对坐标系。应县木塔院内已经埋设了固定的监测控制点,根据这些控制点的分布在木塔周围布设标靶纸,标靶纸易于粘贴和清理,不会对木塔造成伤害。标靶控制点布设应该精简,外侧主要分布在木塔东南面和西面,内侧布设在柱子上,每层至少布设 3 个标靶点。木塔东南面标靶纸分布如图 7(a)所示,图 7(b),(c)分别为外部和内部布设的标靶纸。



(a) 粗扫点云数据



(b) 局部精扫点云数据

图 4 塔外单站扫描数据

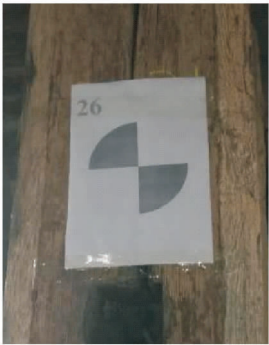
Fig. 4 Single-station Scan Data Outside Pagoda



(a) 东南面标靶纸分布



(b) 外部标靶纸



(c) 内部标靶纸

图 7 标靶纸控制点

Fig. 7 Target Paper Control Points

2 监测数据预处理

监测数据预处理即为点云配准,点云配准是获得完整点云模型的必要步骤,配准质量也关系到后续成果的整体质量^[14]。外部点云采用整体配准方法,内部点云首先通过特征进行粗配准再使用 ICP 算法精配准,最后由标靶控制点将内外点云均配准到绝对坐标系中。点云配准通过罗德里格矩阵求解空间转换参数,最终得到带有绝对坐标的整体点云模型,配准流程如图 8 所示。

2.1 外部点云配准

整体配准将多站数据根据其中的约束关系一次性转换到统一的坐标系下,进行整体配准时必须以高精度的控制约束为基础^[15],同时点云中要具备足够的约束求解空间转换参数^[16]。获取监测数据时,在应县木塔外部布设大量标靶,可以将标靶控制网作为基准,因此外部点云适用于整体配准。以标靶点构造点约束误差方程,则扫描点云中的标靶点 $X_0(x_0, y_0, z_0)$ 与其观测值 $X(x, y, z)$ 有如下关系^[17]

$$X_0 - (-\lambda R X_t + \Delta X) = 0 \tag{1}$$

式中: R 为站点变换旋转矩阵; ΔX 为平移参数,

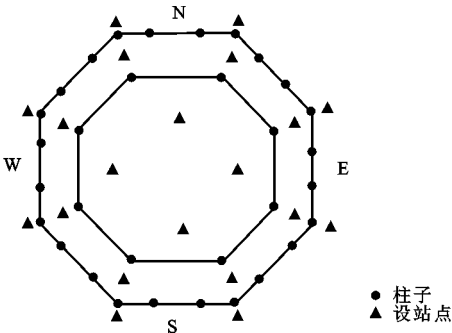


图 5 内部扫描站点分布

Fig. 5 Internal Scan Site Distribution



图 6 标靶球

Fig. 6 Target Sphere

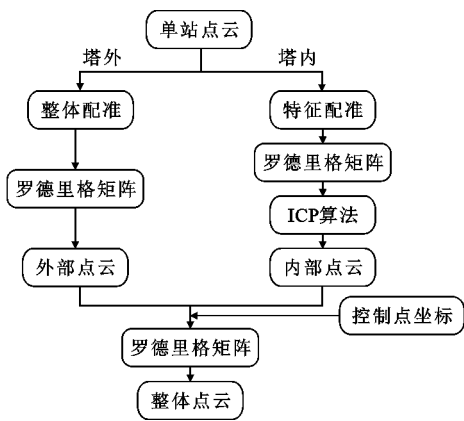


图 8 点云数据配准流程图

Fig. 8 Point Clouds Data Registration
Flow-process Diagram

$\Delta \mathbf{X} = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$; λ 为尺度参数,一般在点云运算中取 $\lambda = 1$ 。

大旋角空间变换的角度参数求解通常用罗德里格矩阵,由反对称矩阵 \mathbf{S} [式(2)] 构建, $\mathbf{R} = (\mathbf{I} + \mathbf{S}) \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{S})^{-1}$, 其中 \mathbf{I} 为 3 阶单位阵。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & -c & -b \\ c & 0 & -a \\ b & a & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: a, b, c 为 3 个独立的参数。

结合罗德里格矩阵线性化展开得到点的误差方程为

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{t} + \mathbf{B} \mathbf{X} - \mathbf{L}_1 \quad (3)$$

$$\mathbf{V}_1 = [V_x \quad V_y \quad V_z]$$

$$\mathbf{A}_1 = -\mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_0 & \mathbf{B}_0 & \mathbf{C}_0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_0 = \frac{2a}{\Delta} \begin{bmatrix} \Delta x - x_0 \\ \Delta y - y_0 \\ \Delta z - z_0 \end{bmatrix} + \frac{2}{\Delta} \begin{bmatrix} a & -b & c \\ -b & -a & -1 \\ c & 1 & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_0 = \frac{2b}{\Delta} \begin{bmatrix} \Delta x - x_0 \\ \Delta y - y_0 \\ \Delta z - z_0 \end{bmatrix} + \frac{2}{\Delta} \begin{bmatrix} -b & -a & -1 \\ -a & a & -c \\ 1 & -c & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_0 = \frac{2c}{\Delta} \begin{bmatrix} \Delta x - x_0 \\ \Delta y - y_0 \\ \Delta z - z_0 \end{bmatrix} + \frac{2}{\Delta} \begin{bmatrix} -c & -1 & a \\ 1 & -c & -b \\ a & -b & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\Delta = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$$

$$\mathbf{t} = [d\Delta x \quad d\Delta y \quad d\Delta z \quad da \quad db \quad dc]$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{R}^{-1}$$

$$\mathbf{X} = [dx_0 \quad dy_0 \quad dz_0]^T$$

$$\mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} x_0 - \Delta x \\ y_0 - \Delta y \\ z_0 - \Delta z \end{bmatrix}$$

式中: \mathbf{V}_1 为观测值改正数; \mathbf{A}_1 为空间变换参数相关的系数矩阵; \mathbf{t} 为空间变换参数改正数; \mathbf{B} 为待定点系数矩阵; \mathbf{X} 为待定点改正值; \mathbf{L}_1 为观测值残差。

配准后点云的平均误差在 5 mm 以下,如图 9 所示。

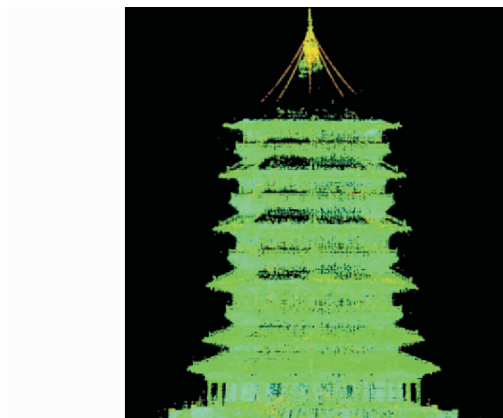


图 9 应县木塔外部点云

Fig. 9 External Point Clouds of Yingxian Wooden Pagoda

2.2 内部点云数据配准

内部点云是形变分析的主要数据,对数据的精度要求高,因此进行两次配准。由于在采集木塔内部数据时布设了标靶球,其他的同名特征也比较明显,所以先利用特征进行粗配准,同一层相邻测站点云以标靶球为特征进行配准,上下层点云以楼梯上特征点、特征面进行配准。粗配准后点云大致重合但精度不高,此时利用 ICP 算法再次配准能提高配准精度。

特征配准由 3 个不同的同名特征计算出空间变换参数进而完成配准。相邻两测站中的同名特征点分别为 $\mathbf{X}'_0(x'_0, y'_0, z'_0)$ 和 $\mathbf{X}'(x', y', z')$, 两点间偏移量为 $\Delta \mathbf{X}(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$, 两点之间有如下的关系^[18]

$$\mathbf{X}'_0 = \mathbf{R} \mathbf{X}' + \Delta \mathbf{X} \quad (4)$$

重心坐标分别为 \mathbf{X}_m 和 \mathbf{X}_n , 重心化坐标为

$$\mathbf{X}_0 = \mathbf{X}'_0 - \mathbf{X}_m, \quad \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{X}' - \mathbf{X}_n$$

坐标重心化后满足 $\bar{\mathbf{X}}_0 - \mathbf{R} \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{0}$ 。线性化后得到如下方程

$$\begin{bmatrix} 0 & -\bar{z}_0 - \bar{z} & -\bar{y}_0 - \bar{y} \\ -\bar{z}_0 - \bar{z} & 0 & \bar{x}_0 - \bar{x} \\ \bar{y}_0 + \bar{y} & \bar{x}_0 + \bar{x} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{x}_0 - \bar{x} \\ \bar{y}_0 - \bar{y} \\ \bar{z}_0 - \bar{z} \end{bmatrix} = 0$$

令

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\overline{z_0} - \overline{z} & -\overline{y_0} - \overline{y} \\ -\overline{z_0} - \overline{z} & 0 & -\overline{x_0} - \overline{x} \\ \overline{y_0} + \overline{y} & \overline{x_0} + \overline{x} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{t} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \overline{x_0} - \overline{x} \\ \overline{y_0} - \overline{y} \\ \overline{z_0} - \overline{z} \end{bmatrix}$$

旋转参数的误差方程可以表示为

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{t} - \mathbf{L} \tag{5}$$

求解罗德里格参数构造矩阵 \mathbf{R} 后, 平移参数的误差方程可表示为

$$\mathbf{V} = \Delta\mathbf{X} - (\mathbf{X}'_0 - \mathbf{R}\mathbf{X}') \tag{6}$$

ICP 算法以不停迭代运算求出最优的旋转和平移参数, 对点云初始位置要求比较高, 经过特征配准后的点集位置相差小, 满足 ICP 算法的条件, 再次配准能使两测站对应点间的距离误差最小^[19]。给定相邻两站点云 $P = \{P_i\}_{i=1}^{N_P}$ 和 $X = \{X_i\}_{i=1}^{N_X}$, 在 X 点集内搜索距离 P 中的每一个点 P_i 的最近点 Y_i , 建立点对的映射关系, $P = \{P_i\}_{i=1}^{N_P}$ 的对应点集即为 $Y = \{Y_i\}_{i=1}^{N_Y}$, 可表达为下式^[20]

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}(P, X) \tag{7}$$

式中: \mathbf{C} 为对应点的坐标变换, 不停迭代直到满足精度为止。

粗配准后的点云误差在 7 mm 以下, 经过 ICP 算法再次配准的误差在 2 mm 以下, 二层至五层的内部点云模型如图 10 所示。

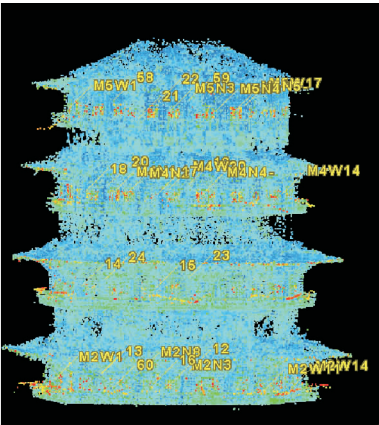


图 10 应县木塔内部点云

Fig. 10 Internal Point Clouds of Yingxian Wooden Pagoda

2.3 点云数据坐标转换及内外部数据配准

由于内部点云和外部点云都完成了配准, 因此内外部数据可看作两站点云, 将内部点云和外部点云均配准到控制点坐标下, 既实现了内外部点云的配准, 也完成了点云坐标的转换。根据 3 个同名标

靶点坐标可以求出旋转参数和平移参数, 存在多余观测时, 可根据最小二乘平差求出最优解, 两站之间的空间转换模型为^[21]

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \tag{9}$$

$[X \ Y \ Z]^T$ 和 $[x \ y \ z]^T$ 表示相邻两测站中的同名特征点坐标, 结合罗德里格矩阵求出点误差方程, 如式(5)所示, 由于各控制点的权重相同, 根据最小二乘准则得

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{L} \tag{9}$$

求出旋转参数的最优解, 代入转换模型求出平移参数 $[\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]^T$ 。配准后平均误差在 5 mm 以下, 配准后的数据未出现分层情况, 满足精度要求, 整体点云如图 11 所示。

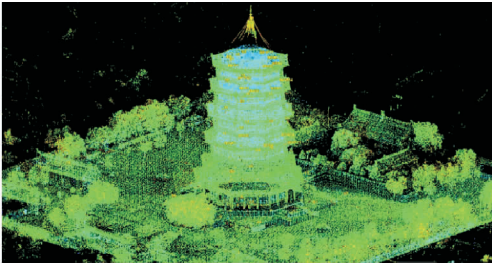


图 11 应县木塔完整点云

Fig. 11 Complete Point Clouds of Yingxian Wooden Pagoda

3 形变分析

应县木塔形变主要是由柱子形变引起的, 因此主要分析柱子形变。从不同视图的整体点云中截取柱子点云, 测量出各柱子的倾斜角度、偏移距离; 对模型整体同样进行剖分, 测量整体的倾斜角度。根据测量数据分析单柱倾斜、单层位移、柱结构纵向倾斜、木塔整体倾斜和扭转等形变情况。

3.1 单柱倾斜分析

截取每根柱子的完整点云, 在正视图和左视图中量测柱子的倾斜角度。将柱头、柱脚的点云数据拟合成圆, 柱子边缘的点云数据拟合成直线, 连接柱头、柱脚的圆心得到柱子的中心线, 同时过柱脚圆心做出柱子垂线, 垂线与中心线所形成的夹角视为柱子的倾斜角度。图 12 为应县木塔第 2 层部分柱子的倾斜角度。西南面柱子倾斜角度最大, 向东最大倾斜 3.43°, 向北最大倾斜 5.05°; 东北面柱子倾斜角度最小, 向东最大倾斜 0.43°, 向北最大倾斜 0.26°; 各面柱子向东北方向有不同程度的倾斜, 西南面柱子倾斜情况最严重, 东北面柱子倾斜角度小。

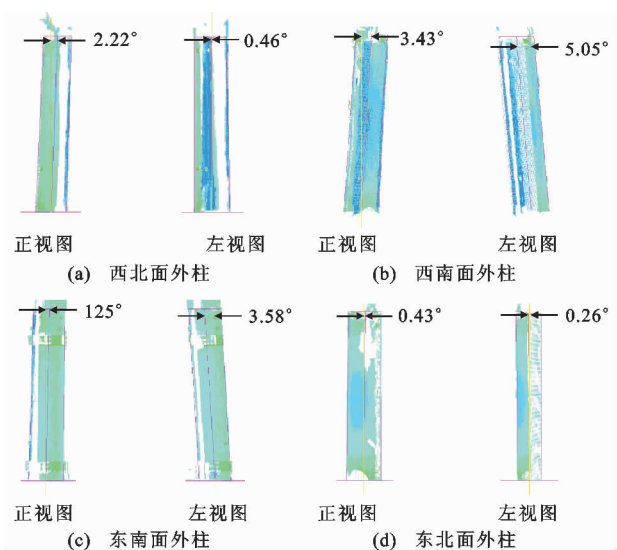


图 12 第 2 层部分柱子倾斜角度

Fig. 12 Inclination Angles of the Second Layer Partial Columns

3.2 单层位移分析

截取每层柱头、柱脚的点云,根据点云拟合出圆,叠加 2 层数据量测出柱头圆心到柱脚圆心 3 个方向的位移,横向偏移表示沿东西方向的位移,纵向偏移表示沿南北方向的位移,综合偏移表示柱头、柱脚圆心的直线距离,图 13 为第 2 层柱子的偏移。

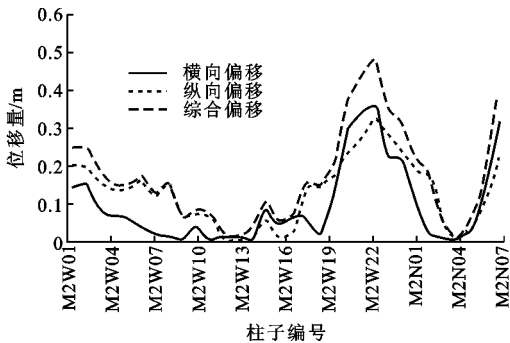


图 13 应县木塔第 2 层位移

Fig. 13 Displacement of the Second Layer of Yingxian Wooden Pagoda

第 2 层西南面(M2W22~M2W24)外柱在 3 个方向的位移都很大,其中 M2W23 号外柱形变最大,向东偏移 0.356 m,向北偏移 0.326 m,综合偏移 0.483 m,这面柱子严重向东北方向倾斜;南面、东南面、东面(M2W01~M2W10)外柱纵向偏移较大,柱子向北方向的倾斜程度比向东方向严重,并且倾斜程度逐渐减少;东北面(M2W10~M2W13)是平均倾斜程度最小的面,柱子变形程度最小,其中 M2W12 号外柱的南北位移是第 2 层中最小的,向北偏移 0.002 m;北面(M2W13~M2W16)外柱横

向偏移较大,柱子向东方向的倾斜程度较大;西北面和西面(M2W16~M2W22)外柱偏移量逐渐增大,柱子向东北方向的倾斜程度逐渐增大。内柱的位移量和外柱不同,但同方位内柱和外柱的偏移方向相同,东北角的 M2N05 号内柱变形最小,向东位移值最小为 0.002 m,综合位移最小为 0.005 m。其他层的偏移方向与第 2 层类似,但位移量偏小,分析得出应县木塔各层均向东北方向有不同程度的位移,每层西南面柱子位移最大,东北面柱子位移最小。

3.3 柱结构纵向倾斜分析

为了直观分析各层柱子的倾斜,从点云模型的俯视图中沿对角线方向截取整体的柱子点云,图 14 为北偏东 67.5°方向上截取的点云。纵向来看,应县木塔各层的倾斜程度不同,二层和三层的倾斜程度远大于上部 2 层,第 5 层的倾斜程度相对最小,第 2 层的倾斜程度最大,第 2 层明层西南面柱子发生了严重的变形,现已对西南面内柱进行了加固。

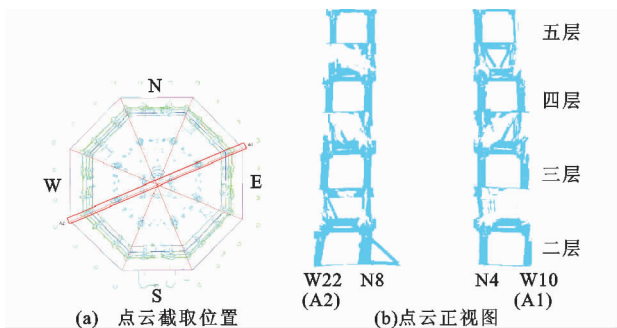


图 14 应县木塔柱结构纵向倾斜分析示意图

Fig. 14 Diagram of Longitudinal Inclination Analysis of Column Structure in Yingxian Wooden Pagoda

3.4 木塔整体倾斜分析

从整体模型中截出木塔的纵截面,在截面中将木塔第 1 层和第 5 层两侧的点云拟合出边缘线,连接两侧边缘线中点作为假定中心线,取中心线中点作为该层的中心点,连接 2 层中心点得到木塔的倾斜方向线,同时过底层中心做垂线,倾斜方向线和垂线的夹角即为倾斜角度。图 15 为东西方向和南北方向对角线的截面,可以看出木塔整体向东倾斜 0.35°,向北倾斜 0.54°。由此分析应县木塔整体的倾斜方向为东北方向,和单柱以及单层的倾斜方向一致。

3.5 木塔整体扭转分析

通过结构剖切,可以快速精确得出应县木塔的扭转姿态^[22]。在木塔点云模型中沿着每一层最外沿进行剖切,拟合出每层的外侧边缘,连接对角点做出对角线,叠加各层数据,如图 16 所示。由于木塔

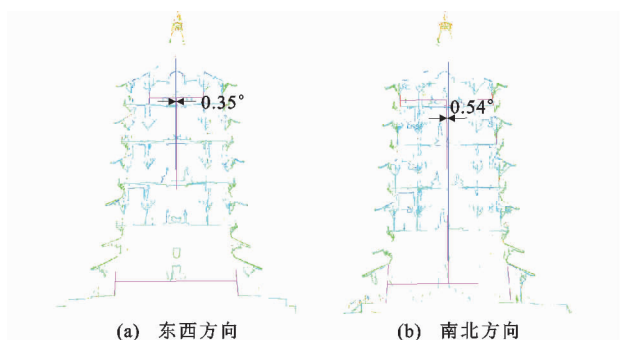


图 15 应县木塔整体倾斜示意图

Fig. 15 Diagram of Overall Inclination of Yingxian Wooden Pagoda

每层相同位置的对角线不重合,因此木塔存在扭转变形。相对底层来说,各层对角线的位置和相对位移不同,表明木塔发生的扭转是复杂的,如图 16 箭头所指,木塔整体扭转趋势为西侧由南向北发生顺时针扭转,东侧由南向北发生逆时针扭转,并且上下 2 层的相对扭转程度各不相同。

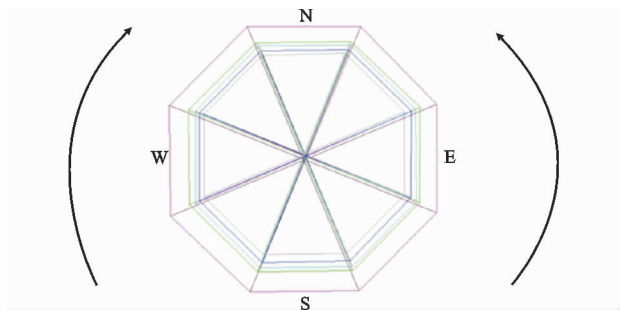


图 16 应县木塔扭转示意图

Fig. 16 Diagram of Torsion of Yingxian Wooden Pagoda

4 结 语

(1)通过激光雷达扫描技术获取应县木塔内外的点云数据,利用全站仪控制测量得到标靶控制点坐标,进行点云配准及坐标转换等处理后得到绝对坐标系下的整体点云模型。对应县木塔各层柱子的偏移量以及偏移角度进行了测量,由测量数据定量分析了目前的形变情况。分析得出应县木塔所有柱子都存在变形,第 2 层柱子的倾斜角度和位移都大于其他各层,其中 M2W23 号柱子形变最严重;单层来看西南面柱子偏移程度比其他面严重,各层向东北方向存在不同程度的倾斜;纵向看应县木塔二、三层的倾斜程度比四、五层要大;在纵截面中测量整体的倾斜角度,同样表明木塔的倾斜方向为东北方向;同时木塔存在复杂的扭转变形,扭转趋势为西侧由南向北顺时针扭转,东侧由南向北逆时针扭转。依据测量数据分析了应县木塔的形变,但没有分析

各柱、各层的承载力大小和受力情况,还需进一步研究。

(2)通过三维激光雷达技术可以采集到相对完整的高精度点云数据,构建出精确的应县木塔点云模型,对点云模型测量可得出倾斜角度及位移量,方便对木塔的整体姿态、偏移、倾斜、扭转等情况进行全面分析,对研究应县木塔的形变有重要意义,本文的技术方案对研究中国其他物质文化遗产同样具有应用价值。

参考文献:

References:

- [1] 徐 桑,李子剑,刘 鲁.高效的建筑动态建模方法研究——在应县木塔三维复原中的应用与分析[J]. 华中建筑,2003,21(1):54-57.
XU Shen, LI Zi-jian, LIU Lu. Research on Efficient Dynamic Modeling Approach in Architecture — Application and Analysis in Three-dimension Recovery of Yingxian Tower[J]. Huazhong Architecture, 2003, 21(1): 54-57.
- [2] 杜雷鸣,李海旺,薛 飞,等.应县木塔抗震性能研究[J]. 土木工程学报,2010,43(增 1):363-370.
DU Lei-ming, LI Hai-wang, XUE Fei, et al. The Study of Seismic Behaviors of Yingxian Wooden Pagoda[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S1): 363-370.
- [3] 薛建阳,张雨森.应县木塔结构变形现状及分析[J]. 建筑科学与工程学报,2019,36(1):32-40.
XUE Jian-yang, ZHANG Yu-sen. Present Structural Deformations and Analysis of Yingxian Wooden Pagoda[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(1): 32-40.
- [4] 陈 特,于林波.应县木塔的稳定评估[J]. 水利与建筑工程学报,2013,11(5):102-106.
CHEN Te, YU Lin-bo. Appraisal on Stability of Yingxian Wooden Tower[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(5): 102-106.
- [5] 陈 平,李良君,陈厚飞,等.应县木塔二层明层有限元分析及纠偏方案探讨[J]. 建筑结构,2011,41(增 1):1490-1493.
CHEN Ping, LI Liang-jun, CHEN Hou-fei, et al. Finite Element Analysis and Correcting Program of Yingxian Wooden Tower's Second Floor[J]. Building Structure, 2011, 41(S1): 1490-1493.
- [6] 陈志勇,祝恩淳,潘景龙.应县木塔精细化结构建模及水平受力性能分析[J]. 建筑结构学报,2013,34(9):

- 150-158.
- CHEN Zhi-yong, ZHU En-chun, PAN Jing-long. Lateral Structural Performance of Yingxian Wood Pagoda Based on Refined FE Models[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(9): 150-158.
- [7] 隋坤, 郭文生, 陈国顺. 用工程测量方法研究应县木塔损坏的原因[J]. 山西地震, 1998(3/4): 50-53.
- SUI Kun, GUO Wen-sheng, CHEN Guo-shun. Study on Damage Cause of Yingxian Wooden Tower by Method of Engineering Surveying[J]. Earthquake Research in Shanxi, 1998(3/4): 50-53.
- [8] 陈厚飞. 应县木塔柱网变形及稳定分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- CHEN Hou-fei. The Deformation of Column Grid and the Stability Analysis for the Yingxian Tower[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010.
- [9] 丁延辉, 高清林. 三维激光扫描技术在古建筑保护中的应用[J]. 北京测绘, 2017(增2): 63-67.
- DING Yan-hui, GAO Qing-lin. The Application of 3D Laser Scanning Technology in Ancient Architecture Protection[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2017 (S2): 63-67.
- [10] URAY F, METIN A, VARLIK A. 3D Architectural Surveying of Diyarbakir Wall's Ulu Beden Tower with Terrestrial Laser Scanner[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2015, 15: 73-78.
- [11] CANUTO M A, ESTRADA-BELLI F, GARRISON T G, et al. Ancient Lowland Maya Complexity as Revealed by Airborne Laser Scanning of Northern Guatemala[J]. Science, 2018, 361(6409): eaau0137.
- [12] 高超, 王国利, 李群, 等. 基于多源数据的古塔三维精细化建模[J]. 工程勘察, 2018(4): 36-40.
- GAO Chao, WANG Guo-li, LI Qun, et al. Precise 3D Reconstruction of Ancient Pogoda Based on Multi-source Data[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018(4): 36-40.
- [13] 苏超威. 应县木塔安全监测及数据分析方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- SU Chao-wei. Study on Safe Monitoring and Data Analysis Method of Yingxian Wood Pagoda[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017.
- [14] 吴桂凯, 王国利. 基于地面激光点云的建构筑物施工监测与质量检测技术综述[J]. 工程勘察, 2017(7): 39-45.
- WU Gui-kai, WANG Guo-li. Review of Construction Monitoring and Quality Testing Technology Based on Terrestrial Laser Point Clouds[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017(7): 39-45.
- [15] 王国利. 地面激光雷达距离影像配准研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2006.
- WANG Guo-li. Research on Registration of Ground Lidar Range Image[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2006.
- [16] 郭明, 潘登, 赵有山, 等. 激光雷达技术与结构分析方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2017.
- GUO Ming, PAN Deng, ZHAO You-shan, et al. LiDAR Technology and Structure Analysis Method[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2017.
- [17] 王国利, 王晏民, 石宏斌. 地面激光点云模型构建原理[M]. 北京: 测绘出版社, 2017.
- WANG Guo-li, WANG Yan-min, SHI Hong-bin. Constructing Theory of Terrestrial LiDAR Point Cloud Model[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2017.
- [18] 王晏民, 黄明, 王国利, 等. 地面激光雷达与摄影测量三维重建[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- WANG Yan-min, HUANG Ming, WANG Guo-li, et al. Terrestrial LiDAR and 3D Reconstruction of Photogrammetric[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [19] 刘志超, 顾广杰. 多站激光扫描点云配准算法研究[J]. 海洋测绘, 2018, 38(5): 36-40.
- LIU Zhi-chao, GU Guang-jie. Research on Point Clouds Registration Algorithm by Multiple Scans[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2018, 38(5): 36-40.
- [20] 朱明月. 地面三维激光扫描数据配准方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- ZHU Ming-yue. Research on Data Registration Method of Terrestrial 3D Laser Scanning[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [21] 纪超, 丁克良, 张春禄, 等. 基于罗德里格矩阵的整体最小二乘三维坐标转换模型[J]. 北京测绘, 2016(4): 1-5.
- JI Chao, DING Ke-liang, ZHANG Chun-lu, et al. Algorithm of Total Least Squares in Coordinate Transformation Based on Rodrigues Matrix[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2016(4): 1-5.
- [22] 王国利, 吴桂凯, 王晏民, 等. 多源数据古塔变形监测研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(4): 496-504.
- WANG Guo-li, WU Gui-kai, WANG Yan-min, et al. Deformation Monitoring of Ancient Pagoda with Multi-source Data[J]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(4): 496-504.