

基于倾斜摄影测量和三维激光扫描的古建筑健康检测

贾晓坤 陈勇国 姚倩 蒋昊霖 杨张慧

湖南科技学院 土木与环境工程学院 湖南永州 425199

[摘要] 古建筑反映了不同朝代的社会文化、艺术风格和科技水平。柳子庙作为纪念柳宗元的历史建筑,承载着近千年的文化底蕴,具有极高的利用价值。对古建筑进行健康检测可为古建筑的保护与修缮提供有力的数据支撑。变形监测是古建筑健康检测中较为常见且十分重要的一项检测内容,传统的监测手段采用全站仪或传感器等对建筑进行测量或数据采集,效率较低,且容易对古建筑造成破坏、损伤。三维激光扫描与无人机倾斜摄影测量技术的出现很好的解决了这一问题,能够不接触目标的情况下对古建筑进行精细化的测量,进而获得建筑的变形情况。本文以柳子庙为研究对象,通过三维扫描与无人机摄影获取了柳子庙正殿三维点云信息,分别采用平整度检测与中心轴线法^[1]对柳子庙 10 面承重墙体平整度和 1 座正殿及 2 座偏殿的垂直度进行分析,结果显示有 2 面墙体平整度标准偏差距离超出 6cm,正殿垂直度超过 0.184,相较于两座偏殿倾斜更严重。该研究表明该方法能够快速有效地进行测量检测,可为后续古建筑保护和修缮提供借鉴。

[关键词] 三维激光扫描;无人机倾斜摄影;垂直度;平整度

引言

古建筑作为人类文明的璀璨瑰宝,承载着深厚的历史、文化与艺术价值,它们是岁月的见证者,更是民族精神与传统文化的重要象征。然而,在时间的长河中,受自然因素和人为活动的双重影响,古建筑一旦被破坏就难以修复与重建,因此对古建筑进行检测并及时发现其存在的风险迫在眉睫。而古建筑结构的垂直度和平整度变化是评估其结构稳定性和安全性的关键指标。

目前,利用三维激光与无人机倾斜摄影测量技术对现代建筑物进行检测已较为成熟,李广等人利用三维激光扫描技术对建筑物墙面平整度进行检测,并于实测技术进行对比,验证该方法的可行性^[2]。何原荣等人利用三维激光扫描技术和倾斜摄影技术相结合的非接触式测量技术开展了古建筑的全方位、精细化三维建模应用研究^[3]。蒋霖等人结合三维激光扫描和倾斜摄影测量的优缺点,提出了一种将三维激光扫描与倾斜摄影测量结合的变电站变形监测方法,建立出监测体完整的三维点云模型^[4]。同年,常志喜采用倾斜摄影测量和三维激光扫描技术相结合的方式对园区地形进行数据采集,对采集数据进行三维建模,并对比两者的解译精度^[5]。周益等人针对传统建模方法存在建筑信息采集不完整引起的模型空洞、扭曲等问题,提出一种无人机影像点云与三维激光点云融合的建模方法^[6]。综合前人研究发现倾斜摄影测量受视角、位置的影响,会出现摄影盲区,底部分辨率相对较低,从而导致建筑物顶部数据精度较高,底部数据检测效果较差。而三维激光扫描技术虽点位测量精度高、速度快,但对于屋顶等顶部无法全面扫描,存在数据缺失、精度低的问

题。将倾斜摄影测量技术与三维激光扫描技术相结合,实现“空地”一体化全面地对古建筑物进行检测的技术仍有待提高。因此本研究利用三维激光扫描技术和无人机倾斜摄影测量技术获取建筑物地面点云数据和顶部影像数据并进行异源数据融合,建模后对墙体的平整度与垂直度进行了分析,旨在为古建筑的保护与修复工作提供富有创新性的思路和科学有效的方法。

1 研究区概况和实验数据

1.1 研究区域概况

柳子庙坐落于湖南省永州市零陵区,该地区属于亚热带季风气候,四季分明,年降水量约为 1200~1500mm,雨水充沛,古建筑受雨水冲刷侵蚀作用大。柳子庙融合了宋、明、清三代的建筑风格,庙宇前后三栋进深,柳子庙内还保存了大量的碑石和题词,不仅展示了古代工匠的精湛工艺,也承载着近千年的中华文化底蕴。2001 年 6 月 25 日,柳子庙被列为第五批全国重点文物保护单位之一,更彰显了其在中国历史文化中的重要地位。

1.2 实验数据

研究对象为永州市零陵区柳子庙正殿及偏殿,数据采集时间为 2024 年 7 月。采用 FARO Orbis 手持式三维激光扫描仪,扫描视场角设置为 360° * 290°,距离采集目标 2m~20m,点云数据精度 5mm,三维激光扫描仪重点扫描屋内及地面附近的墙体和建筑。使用的无人机型号为大疆 Mavic 3E,飞行高度为 100m,航向重叠率为 70%,旁向重叠率为 60%,飞行速度为 10m/s,采用倾斜摄影测量模式采集古建筑屋顶及封火山墙等外立面影像数据。

2 研究方法

2.1 倾斜摄影测量

倾斜摄影测量是通过在无人机上搭载多个不同角度的相机,同时从一个垂直方向和多个倾斜方向对地面目标进行拍摄,获取具有高重叠度的多视角影像数据。这些影像数据不仅包含研究目标真彩色信息及真实纹理,还能通过解算空中三角测量生产真实、立体、直观的三维模型及点云数据。空中三角测量以共线方程组为基础,利用外方位元素计算成像瞬间各相片中地物的像位坐标,并将相邻相片的同名点进行相对定向,最后利用空间辅助直角坐标系完成坐标转换,将像位坐标求解到实地空间直角坐标系。

2.2 中心轴线法垂直度检测

中心轴线法的原理是确定建筑物的中心轴线在 XOY 面的偏移值与轴线高度来计算建筑物垂直度。利用中心轴线在水平方向的偏移量及高差,可以计算不同切片间中心轴线垂直度。在处理过程中,利用平面切片功能,从建筑物的底部开始,自下而上按一米间距进行切割处理,获得切片的中心坐标,计算两两中心坐标的偏移值与高差即可求得不同切片间中心轴线垂直度可表示为式(1)

$$k = \text{dxy} / \Delta h \quad (1)$$

式中: dxy 为不同切片几何中心在 XOY 面的偏移值; Δh 为两切片间的高差。

为了获得古建筑整体垂直度,再利用最小二乘法对若干个中心点坐标进行拟合,即可获得相应的中心轴线,计算出的中心轴线的方向向量为与垂直方向上的单位向量 $n_0 = (0, 0, 1)$ 之间的夹角 θ 正切值,则古建筑整体的垂直度可表示为式(2)

$$\tan \theta = \frac{|m_0 \times n_0|}{m_0 \cdot n_0} \quad (2)$$

式中: m_0 为中心轴线的方向向量; n_0 垂直方向上的单位向量。

3 数据处理

3.1 三维激光扫描数据预处理

三维激光数据导出后首先需建立点与点之间的空间关系和恢复法矢等信息,然后根据标靶球进行多站拼接,将不同位置或时间扫描获取的点云数据对齐、配准,随后对拼接后的数据进行滤波处理,去除噪声和离群点,导出点云数据。

3.2 无人机倾斜摄影数据预处理

将无人机通过倾斜摄影测量采集的航片进行畸变校正和图像分块等预处理,接着通过影像配准和空中三角测量计算每个影像点的空间位置,基于这些数据生成点云,并构建三角网格模型,将纹理映射到模型上以增强细节和真实感,最后进行模型的精细化处理和优化,最终导出为三维点云格式。

3.3 三维激光点云与无人机点云拼接

为了降低点云融合后的拼接误差,需要选用合适的特征地物点对点云数据进行粗配准,粗配准完成后,两种点云将实现基本融合,为了进一步减小人工拼接造成的误差,使用 ICP 算法对点云进行自动化精配准,配准时以三维激光数据为基准,减小相邻两次误差的阈值,调整点云重叠度,最终拼接点云配准精度为 0.076981。

3.4 点云分离与切片

根据研究对象点云特征,如墙体几何形状、颜色、反射强度等分离出 10 面墙体与 3 间殿堂,从地面向上进行间距为 1m 的切片处理,提取切片轮廓并利用几何作图法确定切片的几何中心。根据古建筑高度对正殿进行 4 次切片,对偏殿 1、偏殿 2 分别进行 3 次切片。

3.5 平整度分析

将配准后的点云数据中分离出柳子庙一座正殿及两座偏殿共 10 面墙体(柳子庙平面图及研究对象编号见图 1),通过精细化点云分类,在最大限度地保留墙体主要特征的情况下去除承重柱、门窗等冗余数据。再求解出墙体的最佳拟合面并计算墙面点云到最佳拟合平面的距离,统计这些距离的分布情况,较大的均方根、较大的距离值或较大的距离值波动表示墙体的平整度较差。各墙体平整度偏差距离如图 2 所示,基于距离过滤自动筛选出不平整的墙体部位,可以发现并研究该区域墙体状况(如图 3 所示)。

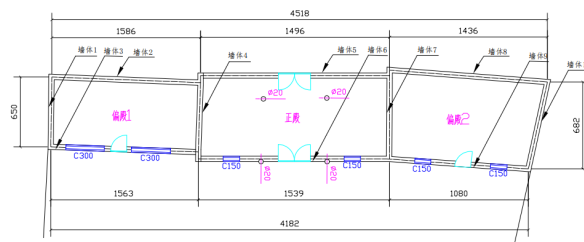


图1 柳子庙平面图(1:100)

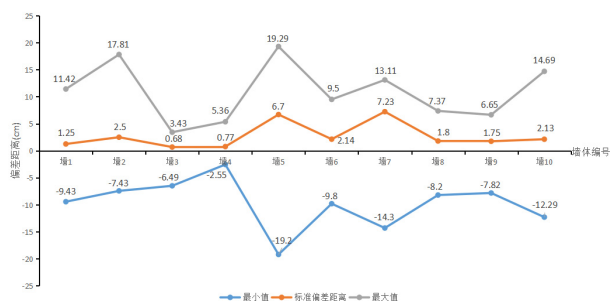


图2 柳子庙各墙体平整度偏差计算结果

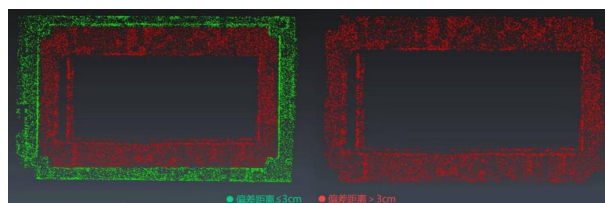


图3 墙体7不平整部位提取

3.6 垂直度检测

使用中心轴线法对柳子庙正殿及偏殿三个主要建筑进行垂直度检测，步骤如下：（1）将三维点云进行多次间距为 1m 的二维切片处理；（2）利用对角线相交计算出每个切片平面

的几何中心；（3）计算不同切片几何中心的偏差及不同切片间的垂直度；（4）利用多个切片的几何中心拟合出中心轴线，计算出中心轴线与单位垂直向量 $n_0 = (0, 0, 1)$ 之间的夹角正切值。垂直度计算结果如表 1 所示。

表 1 柳子庙各层截面中心坐标及垂直度计算结果（m）

名称	切片	X	Y	H	dX	dY	dXY	dH	k	中心轴线
正殿	1	70.673	93.166	88.005	-0.005	-0.163	0.163	0.988	0.165	0.184
	2	70.668	93.003	88.993						
	3	70.699	92.757	89.973						
	4	70.691	92.750	90.978						
偏殿 1	1	70.535	92.880	88.402	0.073	-0.115	0.136	0.992	0.137	0.132
	2	70.609	92.765	89.394						
	3	70.657	92.649	90.387						
偏殿 2	1	42.865	92.956	88.923	0.029	-0.113	0.117	0.994	0.118	0.117
	2	42.894	92.843	89.917						
	3	42.933	92.733	90.910						

4 结果分析

在平整度检测中，点云到最佳拟合平面距离的最大值、最小值以及平均偏差乃是评判平整度的关键指标。大部分墙体的平整度在 1 厘米以内，唯有墙体 5 和墙体 7 的平均偏差较大。通过自动提取距离最佳拟合平面超出 1 厘米的点，发现墙体 5 属于正殿与庭院连接的墙体，其主要为砖石结构且经过抹平修缮处理，其原因为砖石堆砌致使墙体发生错位，而墙体 7 为正殿入口右侧的墙体，出于美观考虑，墙体被设计为边角四周突出、中间凹陷的结构，凹陷部位挂有一定厚度的临摹壁画。总体而言，柳子庙中的墙体仅有墙体 5 发生错位变形，后期应当注重修缮与保护。

在垂直度检测当中，偏移量与倾斜度乃是评判建筑物垂直度的关键指标。由表 1 可知偏殿垂直度受切片高度的影响甚微，中心轴线垂直度和切片垂直度的偏差较小；正殿垂直度伴随切片高度的递增而增大，然而最后一层切片的垂直度显著偏小，与其他切片相较存在较大差异。出现此情况的原因可能是在点云粗配准进程中，由于人工选择特征点时可能出现偏差，致使拼接成果存有局部误差偏大的状况，也可能在去噪时部分噪声点云未能被彻底清理干净，对中心轴线的拟合产生影响；

5 结语

针对柳子庙古建筑的平整度与垂直度检测，本文依托三维激光扫描与无人机倾斜摄影测量技术，运用最小二乘法拟合中心轴线与最佳拟合平面，进而计算轴线偏移量、垂直度以及墙体点云至最佳拟合平面的距离，达成对古建筑垂直度

和平整度的检测目的。相较于传统测量手段，此技术具备精度高、速度快、无损检测等显著优势，可以在建筑物的健康检测中推广应用。

【参考文献】

[1]王二民, 郭际明, 杨飞, 等. 利用三维激光扫描技术检测建筑物平整度及垂直度[J]. 测绘通报, 2019, (06): 85-88. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2019.0190.

[2]李广, 吴长悦, 冯腾, 等. 基于三维激光扫描技术的建筑物墙面平整度检测[J]. 山西建筑, 2017, 43 (11): 204-205. DOI: 10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2017.11.114.

[3]何原荣, 陈平, 苏铮, 等. 基于三维激光扫描与无人机倾斜摄影技术的古建筑重建[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34 (06): 1343-1352.

[4]蒋霖, 吕健春. 三维激光扫描结合无人机倾斜摄影测量的变电站变形监测研究[J]. 红水河, 2022, 41 (02): 88-93.

[5]常志喜. 无人机和地面三维激光扫描仪在 1: 500 城市基本地形图测绘中的应用[J]. 科学技术创新, 2022 (29): 27-30.

[6]周益, 檀丁, 谢亮, 王冬梅. 融合无人机影像点云与三维激光点云的建筑物三维建模研究[J]. 现代测绘, 2022, 45 (04): 16-19.

作者简介: 贾晓坤 (2002—), 男, 河北承德人, 测绘工程专业本科生, 研究方向: 无人机与三维激光扫描应用。

基金项目: 国家级创新创业训练计划项目 (项目编号: 202210551016)