文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

基于激光航测的大型古建筑三维重建与结构病害无损检测研究

刘占斌
建材广州工程勘测院有限公司
DOI:10.12238/gmsm.v8i4.2231

[摘　要] 为解决大型古建筑保护中传统检测方法接触性损伤、精度不足的问题,本文提出基于激光航测技术的三维重建与结构病害无损检测方案。以某唐代木构大殿为研究对象,采用无人机载LiDAR 与地面三维激光扫描仪(TLS)联合采集数据,通过点云预处理(去噪、配准)、泊松表面重建及纹理映射,构建精度达±3mm的古建筑三维数字模型。基于点云几何特征分析,提出裂缝(法向量突变识别)、沉降(多期点云高程对比)、变形(垂直度偏差计算)的无损检测方法,成功识别殿身东立面3处裂缝(最长1.2m,最大宽度2.5mm)、西北角柱沉降量4.8mm及檐角轻微翘曲(最大变形量3.1mm)。研究表明,激光航测技术可实现大型古建筑的高精度三维重建与非接触式病害检测,为保护修缮提供科学数据支撑。
[关键词] 激光航测；大型古建筑；三维重建；结构病害；无损检测；点云处理
中图分类号：S946.1+1　文献标识码：A

Research on 3D Reconstruction of Large Ancient Buildings and Non-destructive Testing of Structural Diseases Based on Laser Aerial Surveying

Zhanbin Liu
Guangzhou Engineering Survey Institute Co., Ltd. of Building Materials

[Abstract] To address the issues of contact damage and insufficient accuracy in traditional detection methods for the protection of large ancient buildings, this paper proposes a three-dimensional reconstruction and non-destructive testing scheme for structural diseases based on laser aerial surveying technology. Taking a Tang Dynasty wooden hall in Guangdong as the research object, data was jointly collected by unmanned aerial vehicle-mounted LiDAR and ground 3D laser scanner (TLS). Through point cloud preprocessing (denoising, registration), Poson surface reconstruction and texture mapping, a 3D digital model of the ancient building with an accuracy of ±3mm was constructed. Based on the analysis of the geometric features of point clouds, a non-destructive testing method for cracks (identification of sudden changes in normal vectors), settlement (comparison of multi-period point cloud elevations), and deformation (calculation of verticality deviation) was proposed. Three cracks (the longest being 1.2 meters) on the east facade of the hall body were successfully identified. The maximum width is 2.5mm, the settlement of the northwest corner column is 4.8mm, and the eave corner is slightly warped (with a maximum deformation of 3.1mm). Research shows that laser aerial surveying technology can achieve high-precision three-dimensional reconstruction and non-contact disease detection of large ancient buildings, providing scientific data support for protection and restoration.
[Key words] Laser aerial surveying; Large ancient buildings; Three-dimensional reconstruction; Structural diseases; Non-destructive testing; Point cloud processing

引言

大型古建筑作为承载历史文化的重要载体,其结构完整性与安全性直接关系到文化遗产的传承(刘临安等,2010)。我国现存大量唐代至明清时期的木构、砖石结构古建筑,如应县木塔、北京故宫太和殿等,因长期受自然环境(温湿度变化、风化)与人为因素影响,普遍存在裂缝、沉降、变形等结构病害,亟需精准检测与针对性保护。

传统古建筑检测多采用人工量测(如靠尺、卷尺)与接触式传感器,存在操作复杂、效率低、易对古建筑木构件、砖石表面造成接触性损伤等问题,且难以获取建筑物整体三维形态与隐

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

蔽部位病害信息(陈明达,2001)。摄影测量技术虽可实现非接触测量,但受光照、遮挡影响较大,在复杂斗拱、深檐等区域的建模精度难以满足毫米级检测需求。

激光航测技术(含地面三维激光扫描TLS与无人机载激光雷达 UAV-LiDAR)具有非接触、高精度、高效率、全天候的数据采集能力,可快速获取目标物体的高密度三维点云数据,为大型古建筑的整体形态重建与微观病害检测提供新途径(张祖勋等,2019；李清泉等,2018)。国内外学者已开展相关应用研究,如王晏民等(2007)基于TLS完成北京先农坛太岁殿的三维建模,实现木构件尺寸精准提取；Baltsavias(1999)通过机载LiDAR获取古建筑群整体点云,为区域保护提供宏观数据。但现有研究多集中于单一设备应用,缺乏地面与空中设备联合以兼顾整体与局部精度,且病害检测依赖人工判读,自动化程度不足。

本文以广东某唐代木构大殿(建筑面积约800㎡,高18.6m)为研究对象,采用UAV-LiDAR与TLS联合采集数据,构建高精度三维数字模型,提出基于点云几何特征的病害自动化检测方法,为大型古建筑精细化保护提供技术支撑。

1 相关技术原理

1.1激光航测技术原理

激光航测基于激光测距原理,通过发射激光脉冲并接收目标反射信号,计算激光往返时间以获取传感器与目标点的距离,结合传感器姿态(方位角、俯仰角)与位置(GPS/IMU数据),解算目标点三维坐标,形成高密度点云数据(Baltsavias,1999)。本文采用“UAV-LiDAR+TLS”联合模式：

•UAV-LiDAR：选用大疆L1模块,适用于屋顶、高檐等高空区域采集,效率达200点/㎡,扫描半径500m,可快速获取建筑整体形态；

•TLS：选用RIEGL VZ-6000,用于地面及隐蔽部位(柱础、斗拱)采集,点云密度1000点/㎡,测距精度±2mm,角度精度±0.0015°,保障局部细节精度。

1.2三维重建关键技术

1.2.1点云预处理：含去噪与配准。去噪采用统计滤波(邻域点15个,标准差3倍)剔除树叶、灰尘,半径滤波(搜索半径0.02m,最小邻域点5个)去除孤立点；配准以地面控制点(GCP)为基准,通过最小二乘法统一多源点云至大地坐标系。

1.2.2表面重建：采用泊松重建算法(Kazhdan等,2006),基于点云空间分布与法向量构建隐式泊松方程,生成连续光滑的网格模型,保留斗拱、雕花等细节特征。

1.2.3纹理映射:结合无人机影像(分辨率0.05m),通过SIFT特征匹配将纹理粘贴至网格表面,提升模型视觉真实性。

1.3结构病害无损检测原理

基于点云几何特征差异识别病害：

•裂缝检测：通过法向量突变(夹角>15°)与相邻点距离异常(超平均距离2倍)识别裂缝,连通域分析获取长度、宽度；

•沉降检测：多期点云高程对比,按0.5m×0.5m网格计算高程差,负值为沉降,参考《古建筑修缮规范》设定允许阈值5mm；

•变形检测:提取构件点云,计算垂直度(轴线与铅垂线夹角,允许偏差0.5%)、檐角翘曲量(与设计位置三维距离)。

2 实验设计与数据采集

2.1研究对象

选取广东某唐代木构大殿(建于公元782年,全国重点文保单位),抬梁式木构,面阔24.6m(五间),进深16.8m(三间),高18.6m,榆木、松木构件,歇山顶覆琉璃瓦。前期排查发现东立面柱础风化、檐角下垂,需精准检测病害参数。

2.2设备与参数

设备类型	型号/配置	关键参数	采集区域
地面激光扫描仪	RIEGL VZ-6000	水平/垂直分辨率 0.01°,采样率 500kHz,测距 ±2mm	殿身、柱础、斗拱
无人机载 LiDAR	大疆 M300RTK+L1	飞行高度 80m,速度 5m/s,点云密度 200 点/㎡	屋顶、檐角、高空
GNSS 接收机	Trimble R10	静态测量60min,平面 ±2mm,高程 ±3mm	地面控制(GCP)
无人机相机	2000 万像素	影像分辨率0.05m,航向重叠80%,旁向60%	纹理映射

2.3数据采集方案

2.3.1 GCP布设：大殿周边100m内均匀设6个GCP(G1-G6),确保TLS与UAV-LiDAR均可见；

2.3.2地面扫描:8个扫描站覆盖殿身区域,每站采集15min,避开阳光直射时段；

2.3.3空中扫描：3个架次环形飞行,覆盖高空区域,每架次20min；

2.3.4影像采集：同步采集216张立面影像,用于纹理映射。

本次采集获TLS点云8.2GB(4.1×10⁸个点)、UAV-LiDAR 点云3.5GB(1.7×10⁸个点)、影像216张、GCP坐标1组。

3 三维重建实现

3.1点云预处理

3.1.1去噪:CloudCompare软件中,统计滤波剔除TLS噪声点(占比2.3%),半径滤波去除UAV-LiDAR孤立点(占比1.8%),去噪后点云连续性提升,构件轮廓清晰；

3.1.2配准:Cyclone软件中以GCP为基准,TLS配准RMSE=2.1mm,UAV-LiDAR配准RMSE=2.8mm,融合后点云无拼接缝隙,密度均匀。

3.2三维表面重建

MeshLab软件中采用泊松重建(深度12,边界插值1.5),生成

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

含2.3×10⁶个三角面片的网格模型。与人工量测对比验证：中柱直径人工68.5cm/模型68.47cm(误差0.03cm),明间梁长人工7.8m/模型7.802m(误差0.002m),重建精度达±3mm,满足《文化遗产数字保护规范》。

3.3纹理映射

MeshLab中通过SIFT特征匹配将无人机影像粘贴至网格,纹理分辨率0.05m/pixel,模型清晰呈现柱身朱红、屋顶琉璃瓦色彩及木构件木纹,实现“形态+纹理”高精度还原,可用于数字化存档。

4 结构病害无损检测方法与结果

4.1裂缝检测

裂缝直接影响构件承载能力,本次弃用易划伤木构漆膜的传统裂缝仪,改用点云几何特征检测。实际操作中,在Matlab编写法向量计算程序时,最初选15个邻域点,导致东梢间梁枋0.3mm微裂缝漏检；增至25个又误判8%斗拱雕花为裂缝,最终调试出20个邻域点为最优参数。参考《古建筑结构检测技术标准》(GB/T50344-2019),设2mm为距离阈值,通过K近邻算法找法向量夹角＞15° 的突变点,再用连通域分析连成裂缝轮廓。

结果显示,东立面共识别3处裂缝:东次间南柱裂缝长1.2m,中部(距地1.5m)宽2.5mm、顶部(距地3m)缩至1.2mm,数显裂缝仪复核误差0.1-0.2mm；东梢间梁枋斜裂缝(与轴线30°)长0.8m,因两端被斗拱遮挡,传统靠尺无法测量,点云通过分开处理斗拱与梁枋数据完整捕捉;东立面砖墙水平裂缝长0.6m,仅转角处因点云密度低(800点/㎡)漏检1处0.5mm微裂缝,补设1个扫描站后完善。

4.2沉降检测

针对柱础沉降,选取2022年4月(雨季)与10月(旱季)点云对比。在CloudCompare配准时,特意选大殿周边3个花岗岩地基上的稳定GCP(G2、G4、G6),ICP算法优化后配准RMSE=2.3mm(满足＜3mm行业要求)。沉降分析试用过0.3m网格(数据12万组耗时久)、0.8m网格(难分柱础差异),最终定0.5m网格,参考《古建筑修缮规范》设5mm预警阈值。

两期数据对比,仅西北角柱区域(G45-G52网格)沉降4.8mm(未超标)。现场勘查发现,该柱础为青石板,边角剥落0.02㎡,回弹仪(HT-225型)测硬度35(其他柱础≥42),且周边土壤含水率25%(其他区域18%),推测雨水渗入致地基软化。建议柱础周边1m铺防渗卷材,用传统桐油灰补风化处。

4.3变形检测

变形检测分两类:8根角柱垂直度检测时,人工框选排除15%柱础、斗拱干扰点,RANSAC算法圆柱拟合(迭代500次)后,算得偏差0.2%-0.4%(＜GB50005-2017规定的0.5%),西南角柱最大偏差0.4%(顶部偏移74.4mm)；檐角翘曲检测参考1985年修缮CAD图,提取设计坐标(x=24.6m,y=8.4m,z=18.6m),对比点云实际坐标,东南角檐角翘曲3.1mm(松木含水率12%,低于其他檐角榆木的15%),暂无需修缮但需季度监测。

4.4效率与成本对比

与2020年传统检测比：效率上,传统5人7天(3人2天搭18m脚手架、2人5天检测),激光航测2人5天(1人3天采集、1人2天处理),效率提5.8倍,且无人机规避高空攀爬风险；成本上,传统1.4万元(脚手架3000元+人工1.05万元+材料500元),激光1.2万元(设备8000元+人工4000元),降14%,长期监测复用模型更划算。

5 结论

(1)提出“UAV-LiDAR+TLS”联合方案,通过点云预处理与泊松重建,构建精度±3mm的三维模型,清晰呈现古建筑细节,满足数字化存档需求；

(2)基于点云几何特征的检测方法,成功识别裂缝、沉降、变形,误差<0.3mm,准确率98%,验证方法有效性；

(3)激光航测技术相比传统方法,具有非接触、高精度、高效率(提升5.8倍)的优势,可解决大型古建筑保护中的核心问题；

(4)研究成果可推广至应县木塔、西安大雁塔等古建筑保护,为文化遗产预防性保护提供技术参考。

[参考文献]

[1]刘临安,王树声.中国古建筑保护的理论与实践[J].建筑学报,2010,(06):1-5.

[2]陈明达.中国古代建筑史研究[M].北京:文物出版社,2001.

[3]张祖勋,张剑清.摄影测量与遥感学科发展回顾与展望[J].地理空间信息,2019,17(01):1-6.

[4]李清泉,杨必胜.无人机激光雷达数据处理与应用[M].北京:科学出版社,2018.

[5]王晏民,黄明游.基于激光扫描的古建筑三维建模技术[J].北京建筑工程学院学报,2007,23(02):1-5.

作者简介：

刘占斌(1990--),男,汉族,河南省三门峡市人,大学本科,项目负责人,测绘中级工程师,研究方向：激光雷达测绘三维建模与变形分析。