

建筑物倾斜监测中全站仪自动化观测系统的开发与应用

李发电

湖北瑞康勘测设计有限公司

DOI:10.12238/gmsm.v8i1.2140

[摘要] 在传统建筑物倾斜监测领域,全站仪人工观测存在作业效率低、测量精度易受人为因素干扰等痛点,针对此类问题,本研究构建了基于机器视觉与多站协同技术的全站仪自动化观测系统。通过硬件模块化改造、自动照准算法优化及三维解算模型创新,实现了建筑物倾斜的毫米级实时监测,为建筑保护与高层建筑安全管理提供了高效精准的技术支撑。

[关键词] 建筑物倾斜; 全站仪自动化; 开发与应用

中图分类号: TV 文献标识码: A

Development and Application of an Automatic Total Station Observation System for Building Inclination Monitoring

Fadian Li

Hubei Ruikang Surveying and Design Co., Ltd.

[Abstract] In the field of traditional building inclination monitoring, manual observation using total stations suffers from pain points such as low operational efficiency and measurement accuracy vulnerable to human factors. To address these issues, this study constructs an automatic total station observation system based on machine vision and multi-station collaborative technology. Through hardware modular transformation, optimization of automatic aiming algorithms, and innovation in three-dimensional calculation models, millimeter-level real-time monitoring of building inclination is achieved, providing efficient and precise technical support for building protection and safety management of high-rise buildings.

[Key words] Building inclination; Total station automation; Development and application

引言

建筑物倾斜是反映结构安全状态的关键指标,尤其在古建筑保护、超高层建筑施工及地震灾害监测中具有重要意义。传统全站仪观测依赖人工瞄准与记录,存在观测周期长(单次15-20分钟)、人为误差大(测角精度波动 $\pm 2''$ ~ $\pm 3''$)等问题,难以满足现代工程对高精度、高频次监测的需求^[1]。自动化监测技术通过计算机控制与智能算法赋能,可实现全站仪的全自动目标识别、数据采集与倾斜解算,成为突破传统监测瓶颈的核心路径。本研究以徕卡TS60全站仪为硬件基础,结合OpenCV机器视觉技术与多站协同监测理论,开发适用于复杂建筑形态的自动化观测系统。通过硬件层的智能化改造、软件层的算法创新及工程层的应用验证,构建“硬件控制-图像识别-三维解算”的完整技术链条,旨在提升建筑物倾斜监测的自动化水平与结果可靠性^[2]。

1 全站仪自动化观测系统的硬件架构与控制技术

1.1 智能化硬件改造与传感器集成

为实现全站仪的全自动控制,设计“主控单元-伺服驱动-

通信模块”三级硬件架构。核心控制单元采用Raspberry Pi 4B开发板,搭载定制化Python控制程序,通过Leica Geocom API接口实现仪器初始化、参数设置及数据实时回传,同时支持远程终端的指令接收与状态监控。伺服控制系统集成TB6600步进电机驱动器,通过高精度谐波减速器(传动误差 $\leq 1''$)连接全站仪轴系,结合内置光学编码器(分辨率 $0.1''$)形成闭环反馈控制,实时校准电机转动角度,消除机械传动间隙导致的瞄准偏差。

针对复杂环境对观测精度的影响,在全站仪主机集成多类型辅助传感器,DLS-B15激光测距模组(精度 $\pm 1\text{mm}@100\text{m}$),辅助自动调焦系统快速锁定目标;9轴IMU姿态传感器动态监测仪器整平状态,通过卡尔曼滤波算法补偿 $\pm 5''$ 以内的整平误差;温湿度与气压传感器同步采集环境参数,基于大气折光差修正模型($\Delta D=0.000278 \times (P/273.15-0.378 \times e/T) \times D$)对测距结果进行实时校正,确保原始观测数据的高精度输入。

1.2 基于机器视觉的自动照准算法实现

传统人工瞄准依赖操作人员对棱镜中心的视觉判断,存在

主观误差与效率瓶颈,采用ORB特征匹配算法实现棱镜的自动化识别与瞄准,首先构建包含2000张不同光照、角度条件下的棱镜图像数据集,通过FAST角点检测与BRIEF描述子提取,建立棱镜特征数据库;在实时监测中,利用FLANN快速近邻搜索算法匹配当前图像特征,结合RANSAC算法拟合棱镜几何轮廓,计算其亚像素级中心坐标(精度 ≤ 0.5 像素)。

为实现全站仪视准轴的精准定位,设计三自由度PID控制器驱动伺服电机:通过计算棱镜中心与当前视准轴的水平偏差 ΔH 与垂直偏差 ΔV ,动态调节电机转速(经Ziegler-Nichols整定法优化后确定参数),并引入前馈补偿项消除电机惯性延迟。实验结果表明,自动照准系统在100次重复测试中,水平角误差均值 $\pm 0.8''$,垂直角误差均值 $\pm 1.1''$,较人工瞄准精度提升60%,单次瞄准耗时从2-3分钟缩短至40秒,满足高频监测的实时性要求^[3]。

2 多站协同监测网构建与倾斜解算模型

2.1 空间交会监测网的优化布局

针对古建筑曲面轮廓、高层建筑异形结构的监测盲区问题,构建由基准站、监测站组成的多站协同观测网络。基准站布设于稳定基岩或永久建筑上,采用强制对中基座与高精度水准测量(精度 $\pm 0.3\text{mm/km}$)确保坐标基准的长期稳定性;监测站根据建筑形态呈发散式布局,相邻测站通视距离 $\geq 50\text{m}$,形成3-5个观测视角的空间交会网,有效覆盖目标建筑的全表面。通过NTP时间服务器实现各测站数据采集同步(误差 $\leq 1\text{ms}$),并采用TCP/IP协议建立实时数据传输链路,确保多站坐标解算的时空一致性。

2.2 基于点云拟合的倾斜量解算方法

2.2.1 线性结构的平面直线斜率法

对于柱体、墙体等具有明确线性特征的结构,通过多站扫描获取上、下特征点的三维坐标(基础密度5点/ m^2 可满足线性结构监测,但曲面建筑需 ≥ 20 点/ m^2),采用最小二乘法分别拟合上点集 $P1(x_i, y_i, z_i)$ 与下点集 $P2(x_j, y_j, z_j)$ 的空间直线。定义斜率向量 (k_x, k_y) 为上下直线在水平面上的投影差异,倾斜率 $i = \sqrt{(k_x^2 + k_y^2)} \times 100\%$,倾斜方向由 $\arctan(k_y/k_x)$ 确定。该方法在某古建筑塔身监测中与人工测量结果对比,倾斜量误差 $\leq \pm 1.5\text{mm}$,满足《建筑变形测量规范》(JGJ 8-2016)一级精度要求^[4]。

2.2.2 平面结构的拟合差分法

针对楼板、屋顶等平面型结构,通过多站协同观测获取上下表面的点云数据,采用RANSAC算法分别拟合平面方程 $Ax+By+Cz+D1=0$ 与 $Ax+By+Cz+D2=0$ 。两平面间的垂直距离 $\Delta h = |D1-D2| / \sqrt{A^2+B^2+C^2}$ 反映结构的整体倾斜,结合水平投影长度 L 计算倾斜角度 $\theta = \arcsin(\Delta h/L)$ 。在某超高层住宅施工监测中,该方法与GNSS高程测量结果对比,高程方向倾斜误差 $\leq \pm 3\text{mm}$,验证了算法的可靠性。

3 工程应用与效能分析

3.1 古建筑长期形变监测应用

以某宋代砖石塔(高52m,底部直径8m)为例,传统人工监测受限于登高作业风险与观测效率,仅能实现月度监测,且棱镜瞄

准依赖脚手架辅助,存在文物损伤风险。本系统在塔基周边50-150m范围内布设3台自动化全站仪,采用非接触式反射靶标,实现无接触式监测。雨季(5-9月)监测频率提升至4次/天,通过多站坐标融合解算塔身顶部三维位移,精度达 $\pm 1.5\text{mm}$ 。

连续监测数据显示,塔身年均倾斜速率 0.3mm/月 ,雨季因地基土体含水率增加,倾斜速率提升至 0.5mm/月 ,与埋设的孔隙水压力计数据呈显著正相关(相关系数0.89)。2024年7月暴雨期间,系统检测到单日倾斜增量 1.2mm (超过预警阈值 1mm/d),自动触发声光报警并推送短信至文物保护部门。现场核查发现塔基西侧土体局部掏空,经及时注浆加固后,变形速率降至 0.1mm/月 ,有效避免了结构安全事故。

3.2 高层建筑施工期垂直性监测

某80层超高层住宅(高度260m)采用核心筒+钢结构外框架体系,设计允许倾斜率 $\leq 3\%$,传统监测方法因高空作业风险与通视条件限制,难以满足每日监测需求。本系统在地下室底板布设固定基准站,随施工进度在30层、60层设置移动基准站,通过全站仪天顶距观测实现坐标垂直传递(误差 $\leq \pm 5\text{mm}$)。针对塔吊等施工设备的遮挡问题,开发智能避障算法,当主测站视线被遮挡时,自动切换至2公里范围内的备用测站,确保数据完整率达99.6%。

监测数据显示,自动化系统单栋建筑监测耗时40分钟,较人工监测(4小时)效率提升83%,人力成本降低67%。与楼顶GNSS接收机监测结果对比,平面位移误差 $\leq \pm 2\text{mm}$,高程方向误差 $\leq \pm 3\text{mm}$,完全满足《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2010)要求。施工期间,系统成功预警3次因混凝土浇筑不均导致的临时倾斜(速率 $> 0.2\text{mm/d}$),指导施工方调整工序,避免了结构偏斜风险。

4 现存技术瓶颈与未来研究方向

4.1 现存技术瓶颈

当前全站仪自动化观测系统在极端光照与遮挡场景下,性能表现存在显著短板。在强逆光环境中(光照强度超过 10000lux),过亮的光线会导致棱镜表面产生光斑反射,干扰图像识别算法的正常运行;而在低照度条件下($< 10\text{lux}$),图像传感器采集的画面信噪比降低,使得棱镜特征提取变得困难,最终导致棱镜识别率下降至90%以下。当遮挡物覆盖超过视场角30%时,全站仪的观测路径受阻,单站观测成功率锐减至60%。为突破这一技术瓶颈,亟需引入多光谱成像技术,利用不同波段对光线的敏感性差异提升图像质量;同时结合动态路径规划算法,使全站仪能够实时调整观测角度,规避遮挡物,从而提升复杂环境下的监测可靠性。此外,现有的建筑物倾斜监测系统主要依赖全站仪进行单点测量,在处理曲面建筑时,由于点云密度较低,难以完整捕捉建筑物的整体变形特征。对于复杂形态的建筑物,稀疏的点云数据会导致变形分析出现误差,无法满足高精度监测需求。与之相比,无人机倾斜摄影技术能够生成点云密度 ≥ 100 点/ m^2 的高精度数据,提供丰富的表面纹理与几何信息。因此,亟需建立有效的数据融合机制,将全站仪的高精度单点数据与无人机倾斜摄

影的高密度面数据相结合,实现“点-面”数据的优势互补,从而提升对曲面建筑变形分析的全面性与准确性^[5]。

4.2 未来研究方向

未来建筑物倾斜监测需打破单一技术的局限性,构建多模式融合监测体系。全站仪具备高精度点测量能力,能够对关键部位进行毫米级精度的位移监测;InSAR(合成孔径雷达干涉测量)技术则擅长大面积面测量,可快速获取建筑物整体变形趋势;无人机LiDAR(激光雷达)能够实现高效的三维建模,精准还原建筑空间形态。将这三种技术有机集成,形成“点-线-面”协同监测体系,既能保证关键节点的高精度测量,又能实现建筑整体变形的宏观把控。例如,在超高层建筑监测中,全站仪负责核心筒等关键结构的精确测量,InSAR进行外围区域的面状扫描,无人机LiDAR则用于复杂造型部位的三维建模,三者数据相互验证与补充,为建筑物安全评估提供更全面、准确的依据。传统的建筑物倾斜监测多以事后分析为主,难以提前预判潜在风险。基于LSTM神经网络构建智能预测预警模型,可有效改变这一现状。该模型通过对历史监测数据的深度学习,挖掘建筑物倾斜变化的内在规律,并结合气象数据(如降雨强度、温度波动)与结构参数(材料强度衰减、荷载动态变化)等多源信息,对未来7天的倾斜量进行精准预测,将误差控制在 $\pm 1.5\text{mm}$ 以内。随着建筑结构日益复杂,传统全站仪在高耸结构、跨江桥梁等特殊场景的监测应用中面临诸多挑战。研发微型化传感器是解决这一问题的关键方向。新型微型传感器需集成全站仪核心功能,将体积压缩至 100cm^3 以下,重量控制在 500g 以内,使其能够轻松搭载于无人机或爬壁机器人等移动平台。无人机可利用其灵活的飞行能力,对高层建筑、桥梁拉索等人工难以到达的部位进行快速巡检;爬壁机器人则适用于建筑物立面的近距离监测,能够在复杂曲面结构上

稳定作业。这种微型化与无人化部署方案,不仅能够大幅降低人工监测成本与安全风险,还能显著提升监测效率与覆盖范围,为特殊场景下的建筑物倾斜自动化监测提供更高效的技术手段。

5 结论

本研究开发的全站仪自动化观测系统通过硬件智能化改造与算法创新,有效解决了传统人工监测的效率与精度瓶颈。工程实践表明,系统在古建筑保护与高层建筑监测中具有显著优势,实现了毫米级精度的实时监测与智能化预警。未来需进一步突破复杂环境适应性与多源数据融合技术,推动建筑物倾斜监测向无人化、智能化、预测化方向发展,为基础设施安全管理提供更强大的技术支撑。

[参考文献]

- [1]国家文物局.中国世界文化遗产监测预警体系建设报告(2022)[R].北京:文物出版社,2022:78-82.
- [2]JGJ 8-2023,建筑变形测量规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [3]Fischler M A,Bolles R C.Random sample consensus:a paradigm for model fitting[J].Communications of the ACM,1981:381-395.
- [4]张正禄.精密工程测量[M].武汉:武汉大学出版社,2020:187-192.
- [5]李青岳,陈永奇.工程测量学(第四版)[M].北京:测绘出版社,2018:234-239.

作者简介:

李发电(1987--)男,汉族,湖北人,本科,工程师,研究方向:测绘。