引文格式：李波,刘晗,冯启翔. 多源数据融合技术在广东省历史建筑精细测绘中的实践[J]. 地理空间信息, 2026, 24(7): 120-124. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2026.07.023

多源数据融合技术在广东省历史建筑精细测绘中的实践

李　波[1]，刘　晗[1]，冯启翔[2*]
（1. 广东省城乡规划设计研究院科技集团股份有限公司 广东省智慧安全城市规划与监测重点实验室，广东 广州 510315；
2. 广州市自然资源测绘有限公司，广东 广州 510180）

摘　要：为解决传统测绘在历史建筑精细测绘中效率和精度低、信息收集难的问题，以广东省历史建筑为研究对象，提出了一套结合静态定点三维激光扫描、无人机倾斜摄影测量与高清纹理信息采集技术的多源数据协同测绘方法。通过效率提高数学模型和误差传播模型反映多源数据融合技术相较于传统测绘的优势。项目实践结果表明，点云数据拼接中误差可控制在5 mm以内，整体测绘效率提高约6倍。该方法可为历史建筑精细测绘创建高精度的数字化档案，为实景三维城市和城市信息模型（CIM）平台建设提供坚实基础。

关键词：历史建筑精细测绘；三维激光扫描；倾斜摄影测量；多源数据融合；实景三维；CIM
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）07-0120-05

Practices of Multi-source Data Fusion Technology in the Fine Surveying and Mapping of Historical Buildings in Guangdong Province, China

LI Bo[1], LIU Han[1], FENG Qixiang[2]
(1. Guangdong Urban-rural Planning and Design Research Institute Technology Group Co., Ltd., Guangdong Provincial Key Laboratory of Smart and Safety City Planning and Monitoring, Guangzhou 510315, China;
2. Guangzhou Natural Resources Surveying and Mapping Co., Ltd., Guangzhou 510180, China)

Abstract: In order to solve the problems of low efficiency, low accuracy and difficult information collection of traditional surveying and mapping in the fine surveying and mapping of historical buildings, taking the historical buildings in Guangdong Province, China as the research object, we put forward a multi-source data collaborative surveying and mapping method combining static fixed-point 3D laser scanning, UAV oblique photogrammetry and high-definition texture information acquisition technology. The mathematical model of efficiency improvement and error propagation model were proposed in the method, which showed the advantages of multi-source data fusion technology compared with traditional surveying and mapping. The project practice results show that the mean square error of point cloud data mosaic can be controlled below 5 mm, and the overall surveying and mapping efficiency can be improved by about 6 times. This method can create high-precision digital archives for the fine surveying and mapping of historical buildings, and provide a solid foundation for the 3D real scene urban construction and the establishment of city information model (CIM) platform.

Key words: fine surveying and mapping of historical building, 3D laser scanning, oblique photogrammetry, multi-source data fusion, 3D real scene, CIM

为引导历史建筑文化遗传的保护工作，住房和城乡建设部明确要求各地运用现代化测绘技术对历史建筑进行精细化测绘和数字化建档工作[1-2]。传统测绘采用逐点测量的作业模式，作业效率偏低。历史建筑的核心集中体现在复杂的立面肌理、细部装饰和独特的三维空间构造上，逐点测量的作业模式无法完整采集特征，会遗漏斗拱、浮雕等关键装饰构件或难以精准还原建筑整体的空间拓扑关系，因此无法支撑历史建筑精细化保护的实践需求，难以适配当前数字化保护和智慧城市建设的发展趋势。随着测绘科学技术的不断迭代更新，三维激光扫描、倾斜摄影测量等高新测绘技术逐步应用于历史建筑测绘领域，为突破传统技术瓶颈提供了全新路径[3-4]。三维激光扫描技术凭借非接触、高精度、高效化的优势，能实现毫米级精度的

项目来源：国家自然科学基金面上项目（42371406）。
第一作者简介：李波（1986—），本科，工程师，从事工程测量、界线与不动产测绘、航空摄影测量等工作，E-mail：13802923360@163.com。
通信作者：冯启翔（1984—），硕士研究生，高级工程师，从事工程测量、界线与不动产测绘、航空摄影测量等工作，E-mail：52445063@qq.com。

细部特征采集[5]；倾斜摄影测量技术可快速获取建筑全貌的彩色纹理信息，大幅提升测绘作业的整体效率。单独采用两种技术均存在明显的局限性，如点云数据缺乏彩色纹理且倾斜摄影测量易出现纹理变形、拉花等精度问题[6-8]，因此多源数据融合技术成为弥补单一技术缺陷以及实现精细化测绘的必然选择[9]。目前多源数据融合技术已成为测绘领域的研究热点，但国内外研究仍存在明显不足，尚未形成适配复杂历史建筑的系统方案。国外学者[10-13]侧重多传感器融合算法优化，聚焦大型建筑或城市尺度测绘应用，对特征点复杂的小型历史建筑和建筑细部融合精度的研究较少；国内学者则专注于单一高新测绘技术的应用优化，缺乏点云、倾斜模型与高清纹理的协同融合研究，难以满足历史建筑精细化测绘对数据精度、完整性和可视化效果的要求。本文以广东省历史建筑精细测绘项目为例，提出了多源数据融合测绘技术方案，并验证了其可行性和有效性，可为南方地区同类型历史建筑精细化测绘提供技术参考。

1　总体技术路线

本文选取广东省第二批18处历史建筑作为研究对象与核心区域。该批次建筑包含岭南传统民居、宗族宗祠，且涵盖近现代历史建筑，类型丰富多样，具有鲜明的区域建筑特点和技术测绘重难点。所选建筑均延续典型岭南建筑风貌，结构复杂，雕花、斗拱等细部装饰繁复，部分为砖木混合结构，内部空间局促狭窄且四周遮挡严重。多数建筑位于房屋密集、地形起伏较大的区域，周边障碍物密集。复杂的细部装饰要求毫米级精度以还原建筑原貌与工艺细节，内部遮挡易导致点云数据空洞或缺失，密集环境影响无人机飞行安全和空中摄影数据完整性，这些问题成为实际测绘的重点难题。由此可知，建筑特征与测绘难点交织，为多源数据融合技术提供极具代表性的实践场景。在研究区实地采集的各类数据和基础资料，可为多源数据融合测绘方法的有效性验证和实际应用提供坚实基础。结合岭南地区历史建筑的共性特征，本文形成的技术成果，能为我国南方地区同类历史建筑的精细化测绘工作提供切实可行的参考。

本文采用2000国家大地坐标系，利用地面三维激光扫描仪获取建筑的高精度点云数据，利用无人机倾斜摄影技术获取建筑的全景要素和周边环境影像数据，利用高清单反相机收集建筑复杂的细节纹理。按照相关规定[14-15]，本文的总体技术路线见图1。

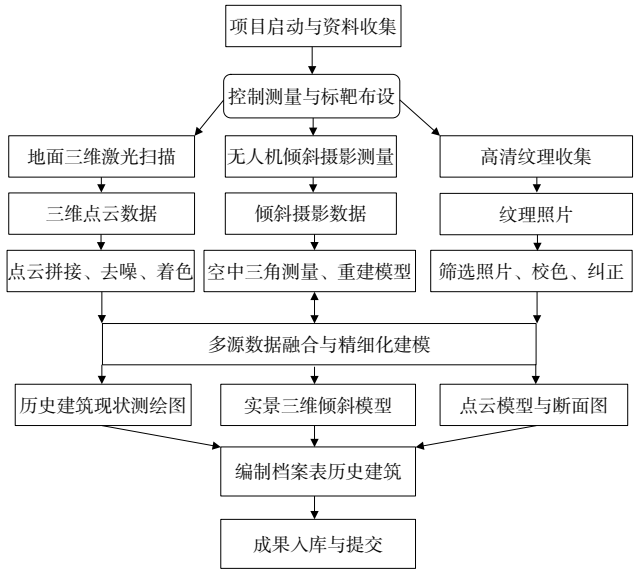


图1　历史建筑精细测绘总体技术路线

2　历史建筑精细测绘实施流程

2.1　静态定点三维激光扫描技术

本文采用天宝Trimble X7三维激光扫描仪采集高精度点云数据，通过激光测距和精密角度测量，获得目标点的三维坐标值。三维坐标的计算公式为[16]：

$$\begin{cases} X = S\cos\theta\cos\alpha \\ Y = S\cos\theta\sin\alpha \\ Z = S\sin\theta \end{cases} \tag{1}$$

式中，S 为中心点至被测点的斜距（mm）；α 为横向角（°）；θ 为纵向角（°）。

天宝Trimble X7三维激光扫描仪内置的测距与测角模块可实现单点测距误差±2 mm，测角误差高出3″。由项目历史建筑中采集的数据可知，三维坐标误差值达到毫米级标准，恰好为多源数据融合建立了高精度的数学框架。本文按照先整体后局部、先外部后内部的原则，对建筑主体按100 m距离处点云间距5 cm分辨率扫描，对雕花和梁架等细节化关键点，则加密至100 m距离处2 cm分辨率。邻近测站间的点云重叠度不低于30%，每站布设标靶不少于4个，相邻站点公共标靶不少于3个，以确保高精度且利于拼接。各项指标完全符合相关规程的严格规定[15]。琼斋书院为岭南传统宗祠类建筑，梁架雕花复杂、斗拱结构精巧，部分梁架被匾额、梁柱遮挡，传统测绘难以精准获取细节数据。本文以该书院为例，采用天宝Trimble X7三维激光扫描仪，在书院外部布设3个测站、内部布设2个测站，对雕花、斗拱等关键部位采用100 m距离处2 cm分辨率加密扫描，每站布设5个标靶，4个相邻测站公共标靶，有效解决遮挡部位的

数据采集难题，最终获取的梁架点云数据清晰，可精准还原雕花纹路和斗拱结构细节，坐标误差控制在2 mm以内。

2.2 无人机倾斜摄影与纹理采集技术

本文选取的历史建筑多位于环境复杂、房屋密集的区域，工作人员采用搭载五镜头倾斜相机的大疆M300无人机进行影像数据采集，需保证拍摄数据的航向重叠度平均不低于85%，旁向重叠度平均不低于75%，平均分辨率不低于3 cm。采集的数据可覆盖历史建筑的建设控制带、保护范围以及建设控制地带外25 m范围，上述技术要点参照相关规范实行[17]。无人机倾斜摄影模型成果见图2。



图2 无人机倾斜摄影模型成果示意图

建筑立面和室内纹理难以通过无人机采集，本文采用佳能5D3相机（2 110万像素）进行补充采集，严格遵循正对拍摄的原则，确保纹理清晰不变形。外业采集照片后，工作人员采用ColorChecker校色卡对照片进行色彩一致性校正，再对行人、电线等干扰物进行判读与删减，最后进行照片校正，保证纹理信息细致、准确。纹理照片校正前后对比效果见图3。



图3 纹理照片校正前后对比示意图

坡头梁氏宗祠（群德学校旧址）周边房屋密集，电线纵横交错，屋顶为岭南特色歇山顶，脊饰复杂且建筑立面有多处彩绘。本文以该建筑为例，采用大疆M300无人机搭载五镜头倾斜相机，设置飞行高度为50 m，航向重叠度为88%和旁向重叠度为78%，避开电线干扰，分3个架次完成数据采集，成功获取建筑屋顶脊饰和周边环境的完整镜像。立面纹理通过佳能5D3相机进行采集，对彩绘部位进行正对拍摄，每处彩绘拍摄3~5张，经校色校正后，彩绘颜色还原度高、无变形、无干扰，为后续纹理映射提供了高质量数据。

2.3 多源数据融合的效率优势量化模型

为满足精细化测绘要求，本文建立综合效率增益模型来定量评估多源数据融合技术的效率优势。传统测绘和多源数据融合技术的计算公式为：

$$T_{\text{trad}} = N \times t_s \tag{2}$$

$$T_{\text{new}} = M \times t_{\text{scan}} + T_{\text{post}} \tag{3}$$

式中，t_s 为单点测量耗时（min/点）；N 为采集的特征点总数量（个）；t_{scan} 为单站扫描耗时（min/站）；M为布设站点总数；T_{post}、T_{trad}、T_{new} 分别为内业数据处理、传统测量、多源数据融合技术耗时（min）。

本文以琼斋书院为例，采用传统测绘方法开展实测工作。现场受通视条件限制，测绘过程需频繁搬站设站，仅采集建筑外围轮廓数据就需两名技术人员耗时1 d，建筑内部梁架、雕花等细部特征信息的采集则更耗时。经统计，该建筑所有特征点（$N \approx 1\,200$ 个）的数据采集需3名技术员耗时2 d，$t_s \approx 2$ min，$T_{\text{trad}} = 2\,400$ min。采用多源数据融合技术收集建筑特征点数据时，假设 $M = 6$，$t_{\text{scan}} = 3$ min，数据内业自动化处理耗时 $T_{\text{post}} = 240$ min，则 $T_{\text{new}} = 258$ min。因此，多源数据融合方法比传统测绘的效率约提高9.3倍。考虑情况复杂多变的测绘环境以及工作辅助时间的消耗，可视实际效率提高约为6倍。效率的提升随数据采集维度的提升而增加，传统测绘获取的是离散几何特征数据点，多源融合技术单个设站即可获得超过约3×10^7个点云数据，6站可获取超过2×10^8个点云数据，获取数据量提升约10^5倍。

2.4 点云数据拼接精度控制与误差传播分析

点云数据拼接精度是决定多源数据融合质量的核心标准，拼接过程实质上是坐标变换的过程。假设两个相邻测站 i、j 的局部坐标系分别为 $\{i\}$ 和 $\{j\}$，公共标靶点在两个局部坐标系下的坐标分别为 P_i^{local} 和 P_j^{local}。通过旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$（3×3正交矩阵）和平移向量 $\boldsymbol{T}$（3×1）将局部坐标系转换成全局坐标系，即

$$P_j^{\text{global}} = \boldsymbol{R} \times P_i^{\text{local}} + \boldsymbol{T} + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{\varepsilon} = \left[\varepsilon_x\ \varepsilon_y\ \varepsilon_z\right]^{\mathrm{T}}$ 为残差向量（mm）。

通过最小二乘原理求解最优 $\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{T}$，使所有公共标靶点的残差平方和最小，即

$$\min \sum_{k=1}^{n} \left\| \varepsilon_k \right\|^2 = \min \sum_{k=1}^{n} (\varepsilon_{x,k}^2 + \varepsilon_{y,k}^2 + \varepsilon_{z,k}^2) \tag{5}$$

拼接中误差的计算公式为：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} \left\| \varepsilon_k \right\|^2} \tag{6}$$

式中，n 为参加拼接的公共标靶点数量，本文采用天

宝X7内嵌的惯性测量单元，结合现场匹配技术，将σ严格控制在设计的数值内。

研究区中18处历史建筑的拼接中误差见表1，所有建筑均满足拼接中误差小于5 mm的技术要求，其中书房岭村祠堂的精度最高，拼接中误差为1.185 mm，高于相关规程的技术要求[15]。研究表明，高精度拼接为后续精细化制图和三维模型重建奠定了坚实的数学基础。

在原有已明确的点云拼接精度控制方式的基础上，本文进一步补充点云数据与倾斜摄影模型、高清纹理的融合配准方法，坐标统一策略以及融合误差控制等关键技术细节。通过提取点云数据与倾斜摄影模型的共通点（建筑房屋角、围墙边角等）构建特征点并完成粗匹配，再迭代优化消除匹配误差，实现两个数据的精确配准。点云数据与高清纹理的融合则采用纹理映射技术，将校色校正后的高清纹理图像与配准后的点云数据进行一一对应，利用纹理坐标映射算法确保纹理信息与点云数据空间位置的精确联合，从而提升整个三维模型的可视化保真度。在坐标统一策略方面，研究区以2000国家大地坐标系为坐标基准，通过七参数转换法求得静态三维激光点云扫描、无人机倾斜摄影模型和高清纹理数据的坐标转换参数，将坐标统一转换至2000国家大地坐标系，从而解决不同数据源坐标基准不一致的问题，为多源数据融合建立统一坐标基准。在融合误差控制方面，严格采用异常值剔除和多轮迭代优化策略，先剔除点云数据中的噪声点、冗余点等异常值，减少其对融合精度的干扰；再以中误差为融合误差的评价标准，对配准后的多源融合数据进行误差检查，若误差超过规范数值，则重新开展配准和融合操作；最后使融合数据的精度保持一致，且整体误差控制在5 mm以内，满足历史建筑精细测绘的精度要求。

表1　18处历史建筑的拼接中误差统计值列表

建筑编号	建筑名称	拼接中误差/mm
440902_MM_02_001	琼斋书院	1.682
440902_MM_02_002	立平岭祠堂	1.414
440902_MM_02_003	革命烈士李淑明故居	1.541
440902_MM_02_004	玉书楼	1.460
440902_MM_02_005	中心洋楼	1.311
440902_MM_02_006	邓倫故居	1.478
440902_MM_02_007	坡头梁氏宗祠（群德学校旧址）	1.786
440902_MM_02_008	龙江亭	3.429
440902_MM_02_009	书房岭村祠堂	1.185
440902_MM_02_010	黄日太祖屋	1.913
440902_MM_02_011	电茂干渠碧桥渡槽	2.585
440902_MM_02_012	苏联专家楼-1、2、3	1.514、1.700、1.793
440902_MM_02_013	中国第四工程局宿舍旧址	1.854
440902_MM_02_014	茂名大酒家	2.220
440902_MM_02_015	高山桥头方尖碑	3.331
440902_MM_02_016	羊角粮站（储粮仓、宿舍楼）	1.776、1.805
440902_MM_02_017	兵役局	1.701
440902_MM_02_018	河西新华书店	1.639

3　现代与传统测绘技术采集精度和效率分析

为直观反映多源数据融合技术的优势，以琼斋书院数据为例，本文对传统测绘方法与多源数据融合技术方法的效率和精度进行对比。传统测绘方法采用全站仪与测距仪对对象进行逐点测量，现代测绘采用多源数据融合技术方法，对比结果见表2，可以看出，多源数据融合方法的各对比项均优于传统测绘方法，特别体现在苏联专家楼数据上，该建筑具有复杂的构件和细节性装饰物，传统测绘方法只能采集离散特征点，而多源数据融合方法通过点云数据采集能更精准地获得建筑细节信息。结合误差传播公式的优化，保证点云数据模型更贴合历史建筑现状，为后续历史建筑精细化测绘和数字化建档提供依据。

表2　现代与传统测绘技术的精度和效率对比

对比项	传统测绘方法	多源数据融合方法	数学基础优势
外业耗时	3人小组需2 d	2人小组需0.5 d	效率提高约6倍
数据量	离散特征点约为1 200个	点云数据量约为2亿个	数据量提高约10^5倍
测绘图绘制	项目草图与内外业绘图	基于加载点云数据绘制	误差小于2 mm
数据精度	±3~±5 cm	优于±5 mm	测绘精度更精细
细节化构件呈现	简易处理细节化构件	真实还原构件原状	保真度达毫米级
纹理信息呈现	无相关纹理信息	精细化模型	地理空间位置误差小于3 mm

4　结　语

本文以广东省历史建筑为研究对象，开展多源数据融合技术在历史建筑精细测绘中的实践，提出了一套结合静态定点三维激光扫描、无人机倾斜摄影测量与高清纹理采集技术的多源数据协同测绘方法，明确各技术的应用流程、参数设置和操作要点，并建立效率提高数学模型与误差传播模型，量化多源数据融合技

术的优势。实践结果表明，该技术实现了历史建筑从外业数据采集到内业处理、建模、绘图的全数字化流程，点云数据拼接误差可控制在5 mm以内，整体效率较传统测绘方法提高约6倍，数据量提升约10^5倍，能精准还原历史建筑的细部特征和空间结构，满足历史建筑精细测绘的精度要求。

本文重点聚焦岭南历史建筑独特的结构特点和实际测绘中的重难点问题，补充多个典型建筑的实地技术应用案例，结合具体场景呈现应用细节，优化配准方法、完善坐标统一策略和细化误差控制措施，解决以往技术短板，实际验证多源数据融合技术在复杂岭南历史建筑测绘中的可行性与有效性，为我国南方区域同类型历史建筑的精细化测绘提供了一套可借鉴的技术路线，为岭南历史文化瑰宝的长效保护提供数据支撑，为实景三维城市建设和CIM平台搭建奠定坚实的技术基础与数据保障[18-19]。然而，本文仍有一定的局限性：三维激光扫描设备购置成本高，且后期维护和人员培训等投入较大，限制了其推广应用；砖木结构历史建筑内部梁架密集且装饰繁复，内外部易受遮挡，导致点云数据出现空洞，需采用手持激光扫描仪补充采集，增加了工作量和时间成本；仅聚焦于精细测绘，未实现与物联感知数据的动态关联，无法满足建筑结构稳固监测与白蚁防治动态监测等延伸需求。未来研究将重点在以下方面开展工作：探索低成本测绘设备的适用性，创立适合对应项目的分级测绘技术方案，降低多源数据融合技术的推广应用门槛；研究点云数据空洞的智能化分析补全算法，提高数据采集的完整性和智能化水平；推动历史建筑测绘成果与CIM平台的深度融合，建设具有中国特色的可持续更新的历史文化遗产数字孪生系统，拓展成果的应用场景，为历史建筑保护提供更全面的技术支撑。

参考文献

[1] 住房和城乡建设部建筑节能与科技司. 关于请报送历史建筑测绘建档三年行动计划和规范历史建筑测绘建档成果要求的函:建科保函[2019]202号[Z].

[2] 广东省住房和城乡建设厅. 广东省历史建筑测绘建档三年行动计划(2020—2022年):粤建节[2020]14号[Z].

[3] 殷文卿,李怡彬,赵长明,等. 基于无人机贴近摄影测量技术的传统文化建筑精细三维建模研究[J]. 工程技术研究,2024,9(14):203-206

[4] 龚强,王同琛,季雨微. 实景三维创新应用综述[J]. 测绘与空间地理信息,2025,48(12):1-3

[5] 李盎然,邓文彬,侯雪晴. 三维激光扫描技术在古建筑测绘中的应用[J]. 地理空间信息,2022,20(7):101-103

[6] 范凯威. 泉州桥梁文化遗产数字化保护路径研究:以安平桥为例[D]. 泉州:华侨大学,2023

[7] 崔诏,莫玉兵,杨枫. 无人机倾斜摄影测量技术在古建筑保护中的应用[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(增刊1):292-294

[8] 王炎. 基于多源点云数据融合的建筑物精细化建模[J]. 地矿测绘,2025,41(2):45-49

[9] 陈志,李阳靖,罗超,等. 空地一体多源数据融合的历史建筑数字化关键技术研究[J]. 测绘通报,2025(增刊1):179-184

[10] Roggero M, Diara F. Multi-sensor 3D Survey:Aerial and Terrestrial Data Fusion and 3D Modeling Applied to a Complex Historic Architecture at Risk[J]. Drones, 2024, 8(4):162

[11] Li W,Chen M,Huang M,et al. Registration of Aerial Images and LiDAR Point Clouds by Exploiting Global-Local Geometric Constraints of Buildings[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2025,18:11093-11110

[12] Javier R,Serafin M L,Julian M D A,et al. Multisensor Data Fusion by Means of Voxelization: Application to a Construction Element of Historic Heritage[J]. Remote Sensing, 2022,14(17):4172

[13] Zhao J, Cao M, Yang J. Building Contour Extraction from Fused LiDAR and Photogrammetric Point Clouds Using PointNet[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2025,48(W14):437

[14] 古建筑测绘规范:CH/T 6005-2018[S].

[15] 地面三维激光扫描作业技术规程:CH/Z 3017-2015[S].

[16] 李峰,王健,刘小阳,等. 三维激光扫描原理与应用[M]. 北京:地震出版社,2018

[17] 低空数字航空摄影规范:CH/T 3005-2021[S].

[18] 王琳,张永康,李岩. 基于新型测绘技术与BIM融合的建筑文化遗产数字化应用研究[J]. 建筑与文化,2024(7):206-208

[19] 王树魁,崔蓓,迟有忠,等. 南京CIM全息底板建设初探[J]. 地理空间信息,2023,21(2):41-45