引文格式：苏秀永,金雨奇,王磊,等. 融合多源激光点云数据的亚运场馆建模研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(6): 101-104. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.06.024

融合多源激光点云数据的亚运场馆建模研究

苏秀永[1,2]，金雨奇[1,2]，王　磊[1,2]，柴路嘉[1,2]
（1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司，浙江 杭州 310014；2. 浙江华东测绘与工程安全技术有限公司，浙江 杭州 310014）

摘　要：为了获取体育场馆内外建筑结构的三维信息，构建完整的三维实景模型，在分析多种非接触式测量技术的各自特点和局限性基础上，结合无人机机载LiDAR和地面三维激光扫描仪的优势，提出一种使用空地2种激光点云数据进行初始配准、精确融合，进而实现体育场馆三维重建的方法。以某亚运体育场馆为应用研究对象，结果表明：该方法可以有效地采集、处理海量点云数据，构建的模型纹理清晰，几何结构完整；使用全站仪、手持测距仪实地检测，平面和高程中误差分别是±0.136 m、±0.087 m，边长最大较差15 cm。通过工程实践，验证了上述建模方法具有一定的有效性和实用性，同时进行了深入探讨分析并提出了改进思路。

关键词：激光技术；融合建模；点云配准；无人机机载LiDAR；地面三维激光扫描仪；亚运体育场馆
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）06-0101-04

Research on Asian Games Stadium Modeling Using Multi-source Laser Point Cloud Data

SU Xiuyong[1,2], JIN Yuqi[1,2], WANG Lei[1,2], CHAI Lujia[1,2]
(1. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;
2. Zhejiang Huadong Mapping and Engineering Safety Technology Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

Abstract: To obtain the inside and outside structure 3D information of stadium and construct a complete 3D real model, we analyzed the characteristics and limitations of various non-contact measurement technologies at first. And then, combined with the advantages of unmanned aerial vehicle (UAV) airborne LiDAR and ground-based 3D laser scanner, we proposed a method of initial registration and accurate fusion using laser point cloud data of space and ground to realize the 3D reconstruction of stadium. Finally, taking an Asian Games stadium as the research object, we found that this method could effectively collect and process massive point cloud data, and the constructed model had clear texture and complete geometric structure. By using total station and handheld rangefinder, the errors of plane and elevation were ± 0.136 m and ± 0.087 m, respectively, and the maximum difference of side length was 15 cm. Through the engineering practice, we verified the validity and practicability of this modeling method, and put forward the improvement idea based on the in-depth discussion and analysis.

Key words: laser technique, fusion modeling, point cloud registration, UAV airborne LiDAR, ground-based 3D laser scanner, Asian Games stadium

使用无人机倾斜摄影获取的影像数据生成三维模型，在实景三维建模技术中，有着成本低、效率高的优势[1]。文献[2]基于无人机倾斜摄影三维建模和应用，文献[3]基于无人机倾斜摄影测量三维建模及精度评价，详述了用多视角影像进行密集匹配并生成稀疏点云数据，构建三角网，最后进行纹理映射，进而生成三维实景模型。相较于传统人工建模手段，基于无人机倾斜摄影技术的建模效率明显得到了很大提高[4]。相较于由三维激光点云数据构建模型，无人机倾斜摄影外业数据采集受限条件多、内业数据处理步骤多，点云精度低，产品生产周期较长。

三维激光扫描技术在快速性、穿透性、主动性和高精度方面具有良好的性能，近几年得到了广泛应用，其主要优势在于可以快速获取海量点云数据[5-6]。文献[7]基于激光扫描技术的建筑物三维重建，研究采用三维激光点云进行建模的方法能较好地重建结构复杂的目标物体，且可依据三维模型所需精度对扫描分辨率进行设置；文献[8]研究表明，激光测高相对精度可达到5 cm，平面位置精度约为飞行高度的1∶1 000；文献[9]研究分析，目前低空机载激光雷达，组合宽角

收稿日期：2022-11-24。
项目来源：湖北省科技重大项目（2021AAA010）；自然资源部国土卫星遥感应用重点实验室开放基金资助项目（KLSMNR-G202203）。
第一作者简介：苏秀永（1976—），高级工程师，研究方向为遥感遥测、精密工程测量，E-mail：809863884@qq.com。

相机，平面精度可满足1∶500地形图测绘，可达亚米级精度。激光虽具有穿透性，但穿透能力有限，无法达到目标物体下部、内部；文献[10]验证了综合应用无人机倾斜摄影、机载LiDAR和站式扫描技术测绘地籍的可行性。使用上述3种测量技术对同一目标物体进行信息采集，均可获得点云数据。利用密集匹配算法把多源点云匹配到一起，融合为一体后进行整体建模，即为融合建模。

基于上述分析，针对某亚运场馆三维建模，利用地面三维激光扫描技术获取场馆内外高精度三维信息[11]，同时尝试利用无人机机载LiDAR技术获取场馆外部点云数据。2种技术所获取的两类点云经过初步处理、精确融合[12]后，用于场馆三维实景模型构建，以此来增强场馆信息的真实性、完整性及有效性[13]。最后，用全站仪、手持测距仪实地检测，以中误差、相对中误差衡量所建模型精度。

1 工程实践

1.1 多源点云数据获取

多源点云的获取、拼接及融合方法选择，是融合建模质量的关键。

1.1.1 无人机机载LiDAR数据采集

选用大疆WIND-4无人机搭载HS-600机载激光雷达系统，依据场馆外形轮廓纵横方向及航飞时日照情况，布设成呈井字形4条航线。飞行速度设定为6.8 m/s 1个架次，相对航高80 m，航线间距100 m，航线总长度2.1 km，旁向重叠度50%。航飞扫测数据采集过程中架设1台地面GNSS基站。获取的机载LiDAR数据包括激光点云数据、轨迹数据、POS数据等。轨迹数据直接存在平板电脑中的工程文件中，原始激光点云数据（*.rxp格式）存在激光扫描仪的内存中，在数据采集结束后，从扫描仪中将数据拷贝到平板控制电脑中，用RiPROCESS转换成LAS格式。

1.1.2 地面三维激光扫描数据采集

选用天宝X7三维激光扫描仪，根据现场踏勘情况，确定扫描路线，分5个扫描区块，初选153个扫描测站位置，其中场馆内部52个，场馆外部101个。天宝X7测程0.6～80 m、3D点精度2 mm @ 20 m，据此，测站间距不超过20 m，扫描精度选择高精度模式。相邻2个测站的扫描重叠度大于30 %，力求重叠区域有明显的空间特征轮廓，并在相邻测站之间均匀设置3个以上的标靶，以便于将不同测站获取的三维点云拼接成一个整体[14]，提高配准精度。用于绝对定位的20个标靶，每个扫描区块各4个，按图根据点精度要求实测其坐标（城市坐标系、1985国家高程基准）。

扫描场馆内部空间时，布设多个标靶纸，并在入口处架设一站，用于场馆内、外部点云拼接。各个扫描区块间有一定的扫描重叠区域。扫描作业过程内，劝阻施工人员绕行，以减少内业点云滤波处理工作，期间考虑局部临时堆放物体遮挡和场馆轮廓细节，较原计划增设了7个扫描测站。扫描作业共历时3 d。

1.2 多源点云数据处理及利用

1.2.1 无人机机载LiDAR数据处理

轨迹数据在Trimble Applanix的软件POSPAC中进行解算，利用架设的GNSS基准站，对飞行的轨迹数据、姿态数据进行后差分解算，得到精确轨迹信息（*.out）。利用POSPPAC解算的轨迹数据，在RiPROCESS中对各航带的数据进行分别的解算及拼接，得到高精度点云数据，导出点云数据（*.LAS）及轨迹数据（*.txt）。

经过检查和预处理的机载LiDAR点云数据，采用处理软件TerroSolid，进行点云自动分类（粗分类）、构建并观察模型，再进行点云人工编辑分类（精分类），分离出目标点与非目标点。机载LiDAR内置的定位定向系统可以直接提供点云的城市坐标系下坐标（1985国家高程基准），LiDAR点云效果如图1所示。

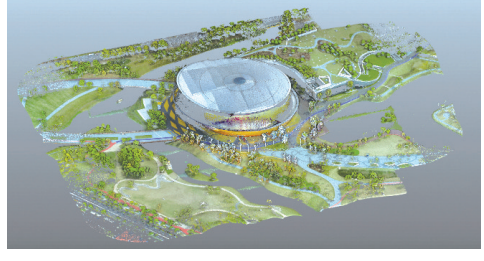


图1 机载LiDAR点云

1.2.2 地面三维激光扫描处理

天宝X7三维激光扫描仪在±5°范围可高精度自动整平，Trimble X-Drive偏转系统可实现自动效准。基于视觉追踪技术[15]自动配准，扫描仪通过内置HDR视觉追踪相机和IMU实时计算2个连续站点间的相对位置[16]，完成最后一站时即可获取整体点云。自带天宝Perspective软件，用于扫描仪的参数设置、三维数据可视化和外业数据处理，功能包括外业自动配准、注释和测量，着色、精化输出整体点云。配准助手Trimble Registration Assis具有相邻测站自动配准、扫描区块整体精细化处理（基于几何特征约束）和产生报告功能。生成的配准报告内容，如表1所示。

表1　配准报告

对象名称	点云之间的误差/mm	重合点/%	可信度/%
2	0.913	82	100
5	1.630	60	96
20	1.978	74	100
21	1.375	58	100
…	…	…	…

天宝X7工作过程中为360°×282°扫描，会采集大量冗余数据，未经处理的点云包含人、障碍物等噪点，未经处理点云效果见图2。使用SCENE软件的裁剪功能对各扫描区块外业获取的多站整体点云编辑删减，保留目标物体及附近点云数据。对点云进行去噪、滤波等操作，删除点云中的人、障碍物及离散点，对海量点云数据精简，单站点云效果见图3。利用地面三维激光扫描中用于绝对定位的20个靶标的2套坐标求得转换参数，将5个扫描区块的点云从各自相对坐标系转至同一城市坐标系（1985国家高程基准），拼接并检查，拼接成果见图4。



图2　单站地面三维激光扫描点云噪点

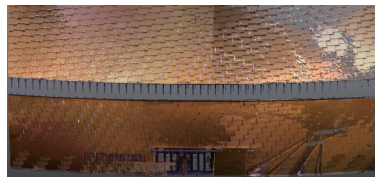


图3　单站地面三维激光扫描点云

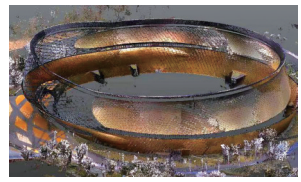


图4　地面三维激光扫描点云拼接效果图

1.3　基于ICP算法的多源点云数据融合、模型构建

融合建模的关键是点云精确配准，目前点云精确配准的主流算法是ICP（迭代最近点）算法或其变种[17]。传统的ICP算法，直接利用点云数据进行配准，属无特征的配准，实质是通过点与点之间的匹配进行旋转和平移，利用最小二乘法作为衡量标准，直至点与点之间的距离达到预先设定的阈值。即已知2个待配准点云 p 和 q，点云 p 中的点 p_i 从点云 Q 中查找距离 p_i 欧氏距离最短的点 q_i，并以 p_i 和 q_i 作为对应点对获取变换矩阵，剔除一些距离较远点对，点云中每个点均参与查找，通过 k 次迭代运算，极小化误差函数，最终得到最优变换矩阵，使两点云融合。传统的ICP算法计算速度慢，只适用于存在明确对应关系的点集[18]。

$$f(R,\boldsymbol{T})=\frac{1}{k}\sum_{1}^{k}\left\|q_i-\left(Rp_i+\boldsymbol{T}\right)\right\|=\min \tag{1}$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}\cos\alpha & -\sin\alpha & 0\\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\beta & 0 & -\sin\beta\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\beta & 0 & \cos\beta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma\\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}t_x\\ t_y\\ t_z\end{bmatrix} \tag{3}$$

式（1）~（3）是点云配准基本公式，$\boldsymbol{R}$ 为旋转矩阵；$\boldsymbol{T}$ 为平移矩阵；α、β、γ 为沿X、Y、Z轴的旋转角；t_x、t_y、t_z 为沿X、Y、Z轴方向的位移量。

基于几何特征约束的、基于KDTree改进的等诸多变种ICP算法，改进思路基本一致：改善搜索邻近点过程和加快收敛速度，提高融合数据精度。其中基于KDTree改进的ICP算法，更适用于外部异形结构的体育场馆点云融合。ICP算法对多源点云的初始（粗）配准位置要求较高，多源点云要在统一坐标系内，2个点云具有包含关系。本实验项目2种经过粗分类和精分类处理的点云数据，同是城市坐标系下的las格式；场馆外部从附近地面至建筑物檐口，同时有地面三维激光点云数据和机载LiDAR点数据，符合ICP算法融合建模要求。

根据数据源类型、点云精度、点云尺度的不同，以其中一种数据源为基准，分别将其他数据源的点云与之进行融合。考虑到地面三维激光点云数据比机载LiDAR点云数据精度高、密度大，在对实验区域机载和地面三维激光点云数据进行预处理的基础上，分别选取各点集共轭特征点，以高精度的地面点云为基准，将机载点云融合到地面点云中。本文将Cloud Compare作为点云融合平台，分别选取待融合点云不在同一条直线上的3个以上的特征点，利用ICP算法进行精确融合，迭代调整融合精度，降低融合误差。最终完成了体育场馆外部地面以上至建筑物檐口以下部位的两类点云融合，获得完整的体育场馆室内外点

云数据。在显示界面可以查看融合后的点云效果，进而利用完整的点云数据构建TIN，并用彩色点云进行纹理映射，生成三维实景模型。

2 精度检验与分析讨论

着重检查场馆外部地面以上至建筑物檐口以下部位，用全站仪实测30个明显特征点作为检查点，计算融合模型的平面中误差和高程中误差分别是0.136 m、0.087 m；用手持激光测距仪实地测量场馆内外明显轮廓之间距离，同所构建的模型比较，共检测23处，最大较差15 cm。该模型的误差均在建筑模型的精细建模要求的0.2 m[19]之内。

机载LiDAR航飞扫测数据采集过程中架设1台地面GNSS基站，后差分解算，获取精确轨迹信息，以提高定位精度。地面架站式天宝X7扫描作业时，每个扫描区块设站多达20站以上。经查验，首末测站点云重复部分中的同名特征点最大点位相差0.193 m，小于四等点云的特征点间距0.4 m[20]限差。点位较差较大原因分析：天宝X7扫描作业过程中，每个测站坐标系都是局部坐标系，基于视觉追踪技术的自动配准，就是选用相邻测站下点云中的同名特征点，通过平移和旋转，将2个不同坐标系下的点云“拼接”到同一个测站坐标系中；点云配准存在误差，多站自动配准必然引起误差传递，使得点云模型首末端点处的点云错位。在后续其他场馆扫描作业时改进思路：增加扫描区块以减少各扫描区块设站数，多个扫描区块点云各自从测站坐标系转至相同的城市坐标系后，再拼接（实质是基于控制点的初始配准，适用于2～4等点云），同名特征点点位较差会有所改善。

两类三维点云融合后的空间匹配精度越高，构建模型精度越高。融合后的点云精度与2个方面有关：一是两类三维点云的精度，上述实践项目使用的低空机载激光雷达，测距精度优于10 mm，定位精度可达厘米级，天宝X7扫描仪通过标靶、视觉追踪技术进行拼接后，其点云自身的空间相对精度可达毫米级，因此以地面三维激光扫描点云作为参考点云，机载LiDAR点云作为目标点云；二是选取的同名空间特征点的点位分布、点位数量和空间位置定位精度，直接影响粗配准，上述实践项目充分考虑利用靶标提高点云的粗配准，为后续的精细配准提供较好的点云初始迭代位置，避免因为没有较好的初始迭代位置，而引起ICP算法陷入局部最优解，得不到全局最优解。

此外，考虑场馆内外细节繁杂，地面激光扫描作业时，多布设标靶、标靶纸，以提高各站扫描点云配准精度；设法提高沿场馆周边布设的地面控制网点精度，共同用于空、地扫描数据的坐标转换、配准；海量点云数据融合，算法选择尤为重要，结合上述实践项目环境特征和点云规模，选择基于KDTree改进的ICP算法，能提高运算速度的同时获得较高精度的融合数据。

3 结 论

多源数据融合建模已成为常态。针对外形结构复杂的亚运体育场馆，尝试使用地面三维激光扫描技术结合无人机机载LiDAR技术，获取了完整的、全方位的场馆空间信息，弥补了单一激光点云存在的局限性，2种技术优势互补，明显提高了外业效率，降低了外业劳动强度。

2种激光点云数据，有效重叠区域较少，基于控制点的初始配准，简单易行有效、重合度高，再使用改进的ICP算法进行精确配准、融合，进而重建的三维模型，能够真实反映亚运场馆内、外完整细节，观感质量较好。经实地检测，融合建模精度较高，能满足该工程项目三维可视化、三维全景漫游展示、竣工资料归档等需求。

在验证分析本方法有效性、实用性的基础上，探讨了发现的问题之改进思路。空地两类激光点云在精度、密度等方面存在的差异，致使在初始配准过程中，需要较多的人工干预，今后将进一步研究。

参考文献

[1] 卞敏，徐亮，骆元鹏，等. 空地一体精细化三维模型构建方法[J]. 测绘通报，2019(7):83-86

[2] 吕慧娟. 无人机倾斜摄影三维建模和应用[J]. 山西建筑，2018，44(16):180-181

[3] 周吕，李青逊，权菲，等. 基于无人机倾斜摄影测量三维建模及精度评价[J]. 水力发电，2020，46(4):41-45

[4] 于麒. 民用无人机倾斜摄影测量在工程中的应用与分析[J]. 低温建筑技术，2019，41(11):128-130

[5] 王智，薛慧艳. 三维激光扫描技术在异形建筑竣工测量中的应用[J]. 测绘通报，2018(7):149-152

[6] 刘慧颖，孙玉国. 基于激光雷达的空间三维图像绘制系统[J]. 电子测量技术，2019，42(17):174-178

[7] 刘宇，宋羽，石信肖. 基于激光扫描技术的建筑物三维重建[J]. 北京测绘，2020，34(5):39-42

[8] 刘经南，张小红，李征航. 影响机载激光扫描测高精度的系

（下转第108页）