引文格式：王越, 何伟, 李华, 等. 融合空-地LiDAR和倾斜摄影的高层建筑物三维建模[J]. 地理空间信息, 2023, 21(6): 49-52. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.06.013

融合空-地LiDAR和倾斜摄影的高层建筑物三维建模

王　越[1]，何　伟[1]，李　华[1]，张万杰[2]，李　维[1]
（1. 武汉市测绘研究院，湖北 武汉 430022；2. 武汉大学遥感信息工程学院，湖北 武汉 430079）

摘　要：城市高层建筑物三维建模时，受数据采集视角及目标相互遮挡等因素的影响，易出现数据盲区，进而直接影响建筑物三维模型的效果。针对这一问题，提出了一种综合“机载LiDAR+地面LiDAR+倾斜摄影”技术的高层建筑物三维建模方法。首先对“空-地”点云进行配准得到建筑物的融合点云，然后通过对建筑物轮廓线的提取得到建筑物的几何模型，接着分别对建筑物的顶部和立面采用不同的影像数据源进行模型的纹理映射，最终得到建筑物的三维模型。通过对城市建筑密集区某高层建筑物的三维建模实验，结果表明所建立的建筑物三维模型几何结构完整、纹理清晰，能够满足建筑物三维精细建模的要求。

关键词：LiDAR；倾斜摄影；高层建筑物；三维建模
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）06-0049-04

3D Modeling of High-rise Buildings Based on Integration of Airborne and Terrestrial LiDAR and Oblique Photography

WANG Yue[1], HE Wei[1], LI Hua[1], ZHANG Wanjie[2], LI Wei[1]
(1. Wuhan Geomatics Institute, Wuhan 430022, China;
2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In the 3D modeling of urban high-rise buildings, due to the influence of factors such as data acquisition perspective and mutual occlusion of targets, data blind areas are easy to occur, which directly affects the 3D model effect of buildings. To solve this problem, we proposed a 3D modeling method of high-rise buildings combining airborne LiDAR, terrestrial LiDAR and oblique photography technologies. Firstly, we registered the point clouds from air to ground to obtain the fusion point cloud of building, and obtained the geometric model of building by extracting the contour lines of building. Then, we used multi-source images for texture mapping of the model on the top and facade of building. Finally, we obtained the 3D model of buildings. Through the 3D modeling test of a high-rise building in a densely built-up area of the city, the result shows that the 3D models of buildings have complete geometric structure and clear texture, which can meet the 3D fine modeling requirements of buildings.

Key words: LiDAR, oblique photography, high-rise building, 3D modeling

目前，建筑物三维建模主要包括基于倾斜摄影测量技术或基于激光雷达技术的2种建模方式[1]。然而，利用单一技术方式进行建筑物建模时，受飞机飞行高度、相机镜头角度、地面树木遮挡及扫描仪视角限制等因素的综合影响，数据采集时易产生盲区，最终将直接影响模型重建的效果[2]。而且随着城市化建设进程的加快，高层建筑物不断增加，尤其是对于高楼密集区，建筑物间的相互遮挡现象更为普遍，导致依靠单一技术手段难以获取完整的建筑物结构和纹理数据，这已成为建筑物三维建模中亟待解决的问题[3-5]。

针对高层建筑物楼体高大且复杂的特点，本文将激光扫描和倾斜摄影的优势相结合，综合利用“机载LiDAR+地面LiDAR+倾斜摄影”3种技术手段，在获取建筑物“空-地”点云数据和纹理信息的基础上，采用一种融合建模方法实现了高层建筑物的三维建模，并通过实验证明了该方法的可行性。

1　3种技术的建模特点

1.1　机载激光雷达技术

机载激光雷达（机载LiDAR）是一种新型的空间对地观测技术，具有获取数据速度快、精度高、范围大等特点。该技术以飞机作为激光扫描平台，通过集成全球定位系统、惯性导航系统和激光测距系统，可快速获取大量且密集的高精度三维点云数据，常用于

收稿日期：2022-01-30；修回日期：2022-04-17。
项目来源：国家重点研发计划资助项目（2016YFB0502200）。
第一作者简介：王越（1989—），硕士研究生，工程师，注册测绘师，主要从事LiDAR技术相关的研究及应用工作，E-mail：ywangwhu@163.com。

生成数字高程模型（DEM）、数字表面模型（DSM）及构建城市实景三维的地表场景。在建筑物三维建模方面，其优势在于可以获取较为精细的建筑物顶部和立面的结构信息，有利于提取建筑物轮廓线以实现建筑物模型单体化。然而，对于高层建筑物三维建模，该技术的局限性在于：①缺乏纹理信息；②由于机载激光发射视角的限制，受高楼楼体间相互遮挡、地面植被遮盖等影响，高楼底部的点云会相对稀疏，甚至可能出现部分数据缺失。

1.2 地面激光扫描技术

地面激光扫描（地面LiDAR）采用地面固定站式激光扫描方法进行点云数据采集，具有效率高、精度高、采样率高等优点。对于高层建筑物，扫描时需围绕建筑物进行环绕式架站，以实现对建筑物立面视角的全覆盖，能有效补充高大建筑物底部的细节信息。同时，利用与激光扫描同步采集的目标影像能够获取高分辨率的建筑物底部纹理。该技术的局限性在于：①因扫描在地面进行，建筑物顶部信息无法获取；②随着地面激光扫描仪到目标物距离和激光束入射角度的变化，建筑物越高处的点云密度越低、质量越差。

1.3 倾斜摄影测量技术

倾斜摄影测量是一种多角度观测的测量技术，通过在同一飞行平台搭载多个传感器，可从垂直下视、前视、后视、左视、右视5个角度同时采集地面影像，获得建筑物顶部及各立面的纹理信息。通过对倾斜影像进行一系列处理，可实现地面场景的快速三维重建。该技术应用于高层建筑物建模时也存在一定的局限性。

1.4 3种技术融合建模思路

为尽可能克服单一技术三维建模的局限性，最大限度克服高层建筑物建模中视角受限、相互遮挡、纹理拉花等影响，本文提出了一种综合“机载LiDAR+地面LiDAR+倾斜摄影”技术的高层建筑物三维建模思路：通过融合3种技术进行“空-地”联合数据采集，并优先选取空中视角的点云和影像参与高层建筑物顶部及上部立面的重建，再选取地面视角的点云和影像参与高层建筑物底部立面的重建，以尽可能地保证高层建筑物点云、影像数据的完整性，解决高层建筑物结构缺失、纹理映射等问题，提升高层建筑物建模精度并改善模型效果。

2 高层建筑物融合建模方法

融合“空-地”LiDAR和倾斜摄影的高层建筑物三维建模方法可分为数据采集、数据处理和三维建模3个阶段。首先，通过机载LiDAR和地面LiDAR获取高层建筑物顶部和全部立面的点云，并分别对点云进行去噪、分类等进行预处理。再通过建筑物点云的“空-地”配准，得到空地一体化的建筑物融合点云。以“空-地”融合点云为基础，提取建筑物轮廓线，重建建筑物结构。接着，以空中三角测量所获取的摄影机位置和姿态参数以及机载LiDAR所获得的DSM为基础，从倾斜摄影获取的高层建筑物顶部及立面影像出发，对倾斜摄影的影像进行正射纠正，将其作为建筑物顶部及上部立面纹理；借助地面激光扫描仪配备的相机，在采集点云的同时，同步获取建筑物底部的立面影像，并在点云和影像配准过程中对立面影像进行纠正。最后，将建筑物顶部、上部及底部立面纹理分别映射到建筑物模型体上，最终生成高层建筑物的三维模型。

2.1 数据采集

数据采集阶段，本文采用新型机载混合型传感器Leica CityMapper-2进行航摄数据采集，单次飞行可同时获取实区域的机载激光点云和多视角影像（包括1个垂直下视和4个倾斜视角）。地面部分的数据采集使用FAROS350架站式三维激光扫描仪，测站间用标靶球作为连接点，并同步拍摄高层建筑物的立面影像。

2.2 数据处理

2.2.1 原始数据预处理

利用Leica CityMapper-2配套软件HxMap对机载原始数据进行预处理，包括机载激光点云和倾斜影像的数据检校、坐标转换、影像调色、点云和影像的配准等[6]。在此过程中，通过引入多节点的并行计算，以大幅提升数据处理效率。同时，利用FARO SCENE软件对FARO S350的地面原始数据进行预处理，包括标靶球自动识别、测站间点云自动拼接、点云去噪、点云和影像的配准等。

2.2.2 激光点云数据处理

激光点云数据处理主要包括点云分类、建筑物立面分割和“空-地”点云配准等内容，目的是获取完整的建筑物融合点云，并将其作为建筑物建模的基础。点云数据处理步骤如下：

1）点云分类。利用预处理后的机载LiDAR数据进行点云分类，分为两步进行：①先进行点云滤波，将点云分离成地面点和非地面点；②对于非地面点，通过进一步细分，提取出建筑物点云。在点云分类基础上，可生成数字表面模型（DSM）。

2）建筑物立面分割。结合建筑物所在区域的基础地形图，通过设置建筑物轮廓线缓冲区，对地面LiDAR点云中的平面特征进行检测，分割出建筑物立面点云。

3）“空–地”点云配准。“空–地”点云配准是建筑物三维建模的基础，通过建立“空–地”点云的空间关系，对“空–地”不同平台的建筑物点云数据进行配准，以实现不同平台点云数据的空间基准统一，最终获取完整的建筑物融合点云。“空–地”点云配准具体分三步：①点云消冗：对冗余的点云数据进行删除和清理，只保留目标建筑物范围内的点云；②粗配准：利用“空–地”点云中3对以上的同名点（如房角等特征部位），计算坐标转换参数，将机载和地面点云统一到相同坐标系下。经粗配准后，“空–地”点云的重合程度已经较高，可为后续的精配准提供较好的点云初始配准位置；③精配准：采用迭代最近点算法（ICP）进行点云精确配准[2]，通过点与点之间的匹配进行旋转和平移，直至点与点之间的距离小于预先设定的阈值，经过全局配准的多次迭代，基于最小二乘实现“空–地”点云的最优匹配。

2.2.3　倾斜摄影数据处理

倾斜摄影数据处理主要包括空三加密、匀光匀色、影像纠正等内容。其中，空三加密利用倾斜影像及外业像控数据，提取大量的特征点，并采用多视匹配及密集匹配等技术进行同名点匹配，获取较为精确的外方位元素，为下一步三维建模做好准备。为保证后续纹理贴图效果，还需对影像进行匀光匀色处理，这样可以保证建筑物顶部及各立面的纹理影像色调过渡自然、反差适中，且无明显的拼接线。匀光匀色后，分别对倾斜影像和地面影像进行纠正：结合影像内、外方位参数和DSM等数据，对倾斜摄影的垂直下视影像进行正射纠正，获取建筑物顶部纹理；再对4个斜视影像进行纠正，获取建筑物立面纹理。此外，还需对地面采集的立面影像进行纠正，并优先选用地面影像作为建筑物底部纹理。

2.3　三维建模

2.3.1　建筑物轮廓线提取

建筑物轮廓线提取是建筑物三维建模的关键环节。利用“空–地”融合后的建筑物点云，分别对建筑物顶部和立面细节特征进行提取，获取能够反映建筑物主要结构的轮廓线。顶部特征主要利用机载LiDAR数据提取，采用边缘点检测算法，如Alpha Shape，探测出建筑物顶部轮廓点，再连接多个轮廓点构成建筑物顶部轮廓线。立面及窗户等细节特征则利用“空–地”融合点云提取，由于窗户处的玻璃反射率较低，当以建筑物立面为投影面将建筑物点云投影后，窗户局部区域的点云密度明显低于墙面部分，通过检测轮廓点获取窗户的角点坐标，从而构建建筑物立面及窗户模型[7]。此外，由于通过点云提取的初始建筑物轮廓线往往粗糙且不规则，还需对轮廓线进行平滑和规则化，并将其恢复为相互垂直或平行的关系。

2.3.2　模型纹理映射

利用建筑物轮廓线建立三维模型体后，还需对其进行纹理映射，以生成带纹理的建筑物三维模型。纹理映射分为3步骤：①纹理影像选择与提取：通过倾斜摄影和地面拍摄均可获取建筑物的立面纹理。②纹理范围确定与裁切：根据模型纹理映射的范围确定数据源影像上纹理区域的大小，并按照纹理范围进行影像裁切；③纹理与三维模型配准：将建筑物三维模型体上的每个顶点与待贴纹理的影像坐标进行配准，实现三维模型与纹理的对应，完成建筑物三维模型的纹理贴图。

3　高层建筑物三维建模实验

3.1　实验区域与数据情况

本文选取位于武汉市中心的某高层建筑物（下文简称实验大楼）进行融合“机载LiDAR+地面LiDAR+倾斜摄影”技术的高层建筑物三维建模实验。该实验大楼地处城市商业及金融中心，地上部分共24层，楼体总高度121.4 m。实验大楼周边高楼林立，楼体间的相互遮挡现象较为明显，适宜采用本文方法进行三维建模。

数据采集按前文2.1节介绍的方法进行。机载数据采集平台为皮拉图斯PC–6有人机，激光雷达的有效脉冲频率为2 MHz，所获取的地表点云密度优于35点/m^2；在飞行相对航高约850 m时，所获取的影像地面分辨率优于3 cm。地面激光扫描共设12个测站，扫描速率为976 000点/s，最大扫描距离350 m，在每一个测站同步拍摄了实验大楼各立面的全景影像。

3.2　数据处理过程

在对原始点云数据进行预处理后，分别在机载和地面点云中选取实验大楼的4个同名房角点完成粗配准，再利用ICP算法实现点云的精配准，所获得的“空–地”融合点云如图1所示。在点云与影像配准后，还可获得实验大楼的彩色点云，如图2所示。以实验大楼的“空–地”融合彩色点云为基础，在少量人工干预的引导下，半自动地依次进行实验大楼的轮廓点检测、轮廓点连接和轮廓线提取及其规则化，

所得结果如图3所示。接下来是对由实验大楼轮廓线构成的三维模型体进行纹理映射。其中，实验大楼顶部及上部各立面的纹理分别取机载垂直下视和倾斜多视影像，而实验大楼约1/3高度以下的底部各立面纹理则主要取地面同步采集的全景影像。将三维模型体与对应纹理影像进行坐标配准后，即可完成纹理贴图，带纹理的试验大楼三维模型如图4所示。

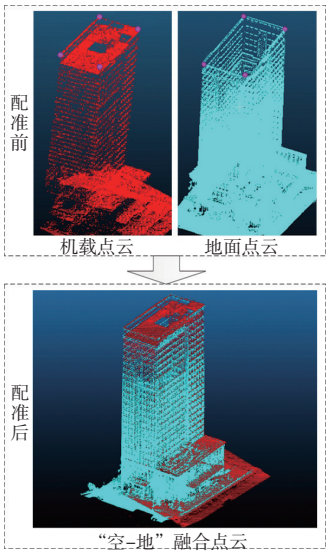


图1 “空-地”融合点云示意图



图2 彩色点云示意图

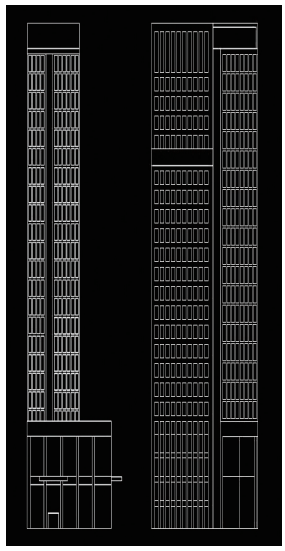


图3 轮廓线提取结果示意图

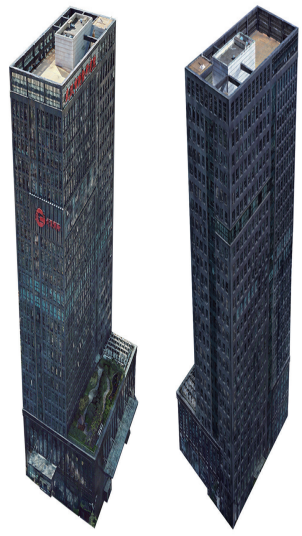


图4 三维建模结果示意图

3.3 实验结果分析

从图3可以看出，融合建模方法所得到的实验大楼轮廓结构线可逼真地再现建筑物顶部及立面细节，建筑物外部结构相较于倾斜摄影Mesh模型的表现更为完整，有利于实现模型的单体化。从图4所示的三维建模结果可以看出，整个实验大楼从顶部到各立面，其纹理真实、完整、清晰且色调均匀，无明显的纹理空洞、变形和拉花等现象，表现出了较好的模型可视化效果。

为了验证所建立的三维模型的几何精度，利用全站仪对实验大楼三维模型的几何精度进行检测。共选取20个检查点，将各点的三维模型坐标与实测点位坐标进行比较，检测结果表明，融合建模方法建立的三维模型的总体平面、高程中误差均优于0.05 m，可满足建筑物精细化三维建模的需要。

综合以上分析说明，采用本文的高层建筑物三维建模方法能较好地克服单一技术建模的局限性，有效解决高层建筑物建模中存在的几何结构和纹理缺失问题，且在模型精细程度、纹理质量和几何精度等方面均具有良好的表现。

4 结 语

融合“机载LiDAR+地面LiDAR+倾斜摄影”技术的高层建筑物三维建模方法，较好地克服了高层建筑物三维建模中存在的问题，提高了高层建筑物几何结构和纹理采集的完整性以及三维模型的重建质量。随着倾斜摄影、激光扫描和空地一体化等技术的发展，融合“空-地”LiDAR和倾斜摄影技术建立的三维模型凭借其集成多源数据的优势，将为建筑信息模型构建和智慧城市建设提供更精确的空间信息参考。

参考文献

[1] 向云飞. 基于机载LiDAR和倾斜摄影的城市建筑物三维建模[D]. 成都:成都理工大学,2016

[2] 王树臻,郑国强,王光生,等. 多源点云数据融合的建筑物精细化建模[J]. 测绘通报,2020(8):28-32

[3] 宋洪英,曹坤,闫晓楠. 基于三维激光扫描的高层建筑建模研究[J]. 粘接,2021,47(8):123-126

[4] 江宇,韦兴荣,王国飞,等. 机载和车载LiDAR融合构建高精三维城市模型研究[J]. 地理空间信息,2021,19(12):81-83

[5] Chen K, Xue F, Lu W. Development of 3D Building Models Using Multi-source Data: A Study of High-density Urban Area in Hong Kong[C]//Proceedings of Lean & Computing in Construction Congress. Hera Klion,2017:609-616

[6] Toschi I, Remondino F, Rothe R, et al. Combining Airborne Oblique Camera and Lidar Sensors: Investigation and New Perspectives [C]//Ternational Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Karlsruhe,2018:437-444

[7] 谢秋平. 综合机载与车载LiDAR数据的建筑物三维重建[D]. 焦作:河南理工大学,2015