引文格式：么晓辉,张绍安. 机载 LiDAR 与倾斜摄影测量融合的地形图生产技术[J]. 地理空间信息, 2026, 24(4):113-116. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.04.023

机载 LiDAR 与倾斜摄影测量融合的地形图生产技术

么晓辉，张绍安*
（中铁上海工程局集团第五工程有限公司，广西 南宁 530104）

摘　要：针对机载 LiDAR 和倾斜摄影技术各自的优势与局限性，采用一种基于公共几何特征（同名线、面）约束的方法，实现 2 种点云数据的融合，以重构实景三维模型，并结合二维和三维模型进行地形图测绘。实验结果表明，采用本方法生产的地形图在平面精度和高程精度上均满足大比例尺地形图测量的要求。与传统倾斜摄影测量技术相比，融合点云技术结合 LiDAR 数据高程精度优势实现了高程精度的显著提升。此外，相较于传统人工测绘，融合点云技术凭借其高效、多元的数据采集手段，为机载 LiDAR 与倾斜摄影测量技术在实际生产应用中提供了新的参考。

关键字：机载激光雷达；倾斜摄影测量；点云数据融合；地形图；几何特征约束
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）04-0113-04

Topographic Map Production Technology Based on Airborne LiDAR and Oblique Photogrammetry Fusion

ME Xiaohui, ZHANG Shao'an
(China Railway Shanghai Engineering Group No.5 Engineering Co., Ltd., Nanning 530104, China)

Abstract: In response to the advantages and limitations of airborne LiDAR and oblique photogrammetry technologies, we introduced a method based on the constraints of common geometric features (homonymous lines and surfaces) to achieve the fusion of two types of point cloud data, thereby reconstructing the 3D model of real scene. Moreover, we conducted topographic mapping by combining 2D and 3D models. Experimental results indicate that the topographic maps produced by this method meet the requirements for large-scale topographic surveying in terms of both planimetric and elevation accuracy. Compared to traditional oblique photogrammetry technologies, the integrated point cloud technology, by taking advantage of the elevation accuracy of LiDAR data, has achieved a significant improvement in elevation accuracy. Furthermore, compared with traditional manual surveying and mapping, the integrated point cloud technology, relying on its efficient and diverse data acquisition methods, has markedly improved the efficiency of digital line graph (DLG) production, thus providing a new reference for the practical application of airborne LiDAR and oblique photogrammetry technologies.

Key words: airborne LiDAR, oblique photogrammetry, point cloud data fusion, topographic map, geometric feature constraint

随着无人机技术与传感器技术的快速发展，无人机搭载的激光雷达（LiDAR）和非量测相机已成为获取地面信息、制作数字地表模型（DSM）、数字高程模型（DEM）和数字线划图（DLG）等数字产品的重要技术手段。LiDAR 技术通过主动激光脉冲探测，可在昼夜条件下获取目标的三维坐标、回波强度及多回波信息，生成具有几何和反射特征的点云数据，并通过点云处理获取真实地表信息，生成高精度 DEM，精确表达地表微地形特征[1]。尽管 LiDAR 技术在滩涂水域[2-3]、荒漠[4]、城市等[5-7]多种地貌条件下的地形图测绘中显示出提高精度、降低外业工作量和缩短成图周期的优势，但其点云数据缺乏颜色和纹理信息，且在复杂地形中可能因遮挡或无回波点云数据而形成空洞[8]，增加了地物识别和绘制的难度。与此同时，倾斜摄影测量技术通过从多个角度捕捉地表的纹理细节、光谱信息和边缘特征，能够直观、真实地还原场景[9]，使得地形图测绘的数据获取更加全面、细致和高效[10-13]。

鉴于 LiDAR 和倾斜摄影各自的优势和局限性，将两者的数据进行融合处理，形成融合点云，并在此基础上构建 DSM、DEM 和 DLG，已成为研究的热点[15]。本文以城市 1∶500 地形图制作为例，选取重庆市某一区域作为实验区，利用机载 LiDAR 和倾斜摄影测量融合点云数据开展大比例尺地形图制作相关实验，旨在为地形图测绘提供一种新的技术途径。

项目来源：中铁上海工程局集团第五工程有限公司科技研发项目（CRECYXGS-技术-2024-001、SHW-2024-引导-04）。
第一作者简介：么晓辉（1986—），本科，工程师，从事施工勘测与点云数据处理工作，E-mail：mexiaohui86@163.com。
通信作者：张绍安（1992—），本科，工程师，从事道路与桥梁工程相关工作，E-mail：17764847762@163.com。

1 技术路线

结合激光和倾斜摄影各自的优势，围绕机载LiDAR点云和无人机倾斜影像匹配点云融合的地形图绘制，其技术流程（如图1所示）。

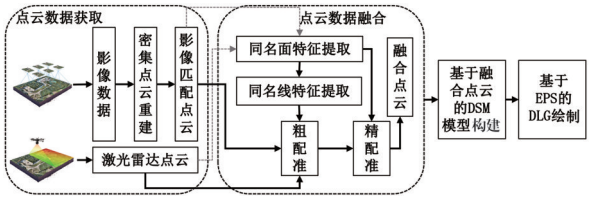


图1 技术路线图

2 点云数据获取

实验区域位于重庆市江津区，测区占地面积约为1.90 km^2，南北长约1 560 m，东西宽约为1 220 m，地形类别为丘陵，植被茂盛，主要包括建筑物、道路、湖泊等自然地理要素。数据采集采用六旋翼无人机（型号KWTX6L-L15）搭载Sony数码相机（ILCE-Alpha 7R IV）和激光雷达传感器（RIEGL VUX-1LR）进行点云数据、影像数据、POS数据等原始数据的采集。其中，ILCE-Alpha 7R IV数码相机配备Exmor R CMOS影像传感器，本次实验中相机相关参数如下：图像大小为9 504×6 336、传感器大小为35.7 mm×23.8 mm、焦距为35 mm、飞行高度为200 m，计算得到地面采样距离（GSD）约为0.02 m；RIEGL VUX-1LR激光雷达传感器测量精度为15 mm，最大测距可达1 540 m，本次实验中的LiDAR平均点云密度约为90 pts/m^2，抽样检查点云成果高程中误差为0.054 m。为了提高数据在后续融合处理中的一致性和可靠性，采用相同的航线规划和飞行高度，并选择天气晴朗的中午进行飞行作业，具体的飞行参数、航线规划如图2所示。

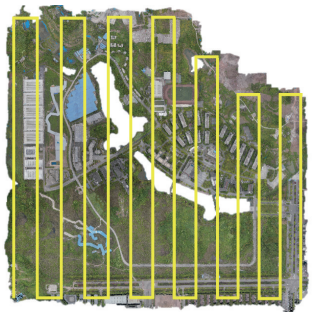


图2 无人机作业航线图

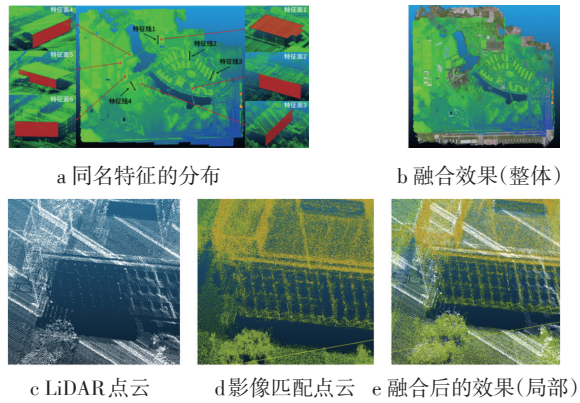
作业过程共获得原始影像数据1 273张，采用ContextCaputure软件对影像进行密集匹配，获得密集影像匹配点云。LiDAR数据采用Ztpointprocess软件将原始数据转换为LAS点云通用格式。对两类点云进行分析发现，均含有一定的噪声点和离群点，为了保证后续数据融合的质量，采用直通滤波和低通滤波，根据高程值对点云数据进行预处理，去除这些噪声点。

3 基于几何特征的点云数据融合

在对比2种点云数据时，注意到影像匹配点云因其包含纹理颜色信息而具有较高的物体区分度，尤其在建筑物顶部信息的完整性和轮廓清晰度方面表现突出。而LiDAR点云则以其均匀分布和高数据精度见长，尤其在建筑物立面信息的完整性方面。为了最大限度地利用这2种点云数据的优势，本研究全面对比分析了迭代优化配准方法[16-18]、基于公共特征的配准方法[19-20]以及基于深度学习的配准方法[21-23]。最终，选择基于公共几何特征（同名线、面）的点云融合方法，该方法利用线、面几何约束关系来求解2个点云集之间的坐标变化参数[19]。

在进行同名线和面特征的选取过程中，关键在于确保这些特征在整个测区内均匀分布，并且避免特征之间存在共线或共面的情况，以增强配准过程的鲁棒性和准确性。通过对研究区域的细致分析，本研究共识别并选取了4组同名线和6组同名面作为关键特征，如图3a所示。

经过粗配准和精配准处理后，点云数据的融合效果显著，如图3b所示。在整体层面上，影像匹配点云和LiDAR点云在坐标系统上实现了精确对齐，确保了数据的一致性。特别地，局部区域的空洞问题，例如建筑立面，得到了有效的修正和填补，如图3c、d、e所示。这些改进不仅提升了点云数据的完整性，也为后续的DSM构建和DLG生产提供了坚实的数据基础。



a 同名特征的分布　b 融合效果（整体）

c LiDAR点云　d影像匹配点云　e 融合后的效果（局部）

图3 影像匹配点云与LiDAR点云的融合

4 DSM模型的重建与DLG生产

4.1 DSM模型的重构

在数字表面模型（DSM）的重构过程中，融合点

云数据的利用是至关重要的。该过程主要涉及2个关键步骤：表面重建和纹理映射。表面重建技术负责将离散的点云数据转换为连续的面模型，通常以三角网格的形式呈现。这一步骤是构建精确DSM模型的基础，它确保了模型的几何精度和细节表现。随后，纹理映射技术将纹理空间中的纹理像素精确映射到屏幕空间中的像素，这一过程不仅涉及到纹理的三维属性定义，还包括了后续光照计算的参与，从而增强了模型的视觉真实性。

本项目采用ContextCapture软件进行DSM模型的重构工作，该软件能够高效处理大规模点云数据，并输出OSGB格式的模型，以满足后续DLG生成的需求。实验结果表明：局部区域的模型细节得到了良好的保留。此外，项目还产出了数字正射影像图（DOM）和数字高程模型（DEM）成果，为DLG的生产提供不同层面的数据。

4.2　DLG生产

DLG生产采用EPS软件二三维联动一体化测图模式进行采集。依据国家基本比例尺1∶500地形图图式相关规范，通过分屏方式加载数字正射影像图（DOM）数据和数字表面模型（DSM）数据，实现了在二维或三维状态下对分类分层要素数据的精确采集。等高线利用DEM成果直接生成，然而，由于激光点云的高程精度较高，自动生成的等高线出现了细小曲折和闭合小圈，需要采用等高线简化算法对等高线进行平滑处理，以提高等高线的准确性和美观度。高程点则在具有较高高程精度的LiDAR数据上直接提取。地物与地貌要素采集完成后，完善要素的属性信息，并对数据进行合法性检查、测点精度检查和量边精度检查，以确保数据的准确性和可靠性。

4.3　成果精度评定

为了验证融合点云数据在1∶500地形图制作中的可行性，本研究选取了220个检查点，利用全站仪对测区地形图的平面和高程精度进行了详尽的检测，相关成果详见表1。依据《基础地理信息数字成果1∶500 1∶1 000 1∶2 000》数字线划图测绘行业标准，丘陵地区地形图的平面和高程精度要求分别为0.3、0.4 m。

表1　测区1∶500地形图点位精度检测结果

检测项	*1	*2	*3	*4	*5	*6	*7	*8	平均
检测点数	30	30	30	30	30	30	20	20	
平面位置中误差/m	0.29	0.24	0.24	0.23	0.25	0.23	0.25	0.24	0.25
高程中误差/m	0.38	0.40	0.35	0.36	0.20	0.39	0.22	0.21	0.31

对表1数据分析发现：平面位置中误差的最大值为0.29 m，平均值为0.25 m；高程中误差的最大值为0.40 m，平均值为0.31 m。这些结果均在规定的精度要求范围内，表明基于融合点云数据制作的1∶500地形图在平地和丘陵地区的平面和高程精度满足行业标准。

为了探究融合点云数据在1:500地形图制作中的精度表现，本研究对比了单一点云（影像匹配点云）与融合点云制作的地形图精度。在2种地形图上，选取了具有代表性的地物点进行对比分析（具体数据见表2）。分析表2的数据可得：融合点云绘制的地形图在平面点位精度为0.240 m，而影像点云制作的地形图精度为0.246 m，两者在平面精度上表现相当。然而，在高程精度方面，融合点云制作的地形图精度为0.25 m，相比之下，影像点云制作的地形图高程精度为0.71 m，前者的高程精度提高了近3倍。这一结果表明，融合点云技术在提升地形图高程精度方面具有明显优势。

表2　部分检查点坐标

	点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
全站仪	X	*96.129	*40.906	*47.992	*86.682	*11.871	*41.880	*48.285	*82.996	*12.145	*48.634
	Y	*65.795	*52.539	*51.665	*52.361	*33.836	*34.466	*33.699	*34.061	*21.853	*22.588
	H	260.27	255.44	255.88	257.91	261.95	261.96	264.04	263.93	261.84	263.93
地形图（融合点云）	X	*96.391	*41.156	*48.237	*86.914	*12.051	*42.058	*48.551	*83.087	*12.342	*48.758
	Y	*65.794	*52.589	*51.584	*52.463	*33.960	*34.681	*33.800	*34.228	*21.909	*22.698
	H	260.01	255.78	256.16	257.87	261.63	261.59	264.05	264.01	264.05	261.55
	△X	0.262	0.250	0.245	0.232	0.180	0.178	0.266	0.091	0.197	0.124
	△Y	−0.001	0.050	−0.081	0.102	0.124	0.215	0.101	0.167	0.056	0.110
	△H	−0.26	0.34	0.28	−0.04	−0.32	−0.37	0.01	0.08	0.12	−0.29
地形图（影像点云）	X	*96.395	*41.157	*48.247	*86.914	*12.056	*42.064	*48.555	*83.093	*12.343	*48.767
	Y	*65.797	*52.595	*51.585	*52.465	*33.969	*34.683	*33.802	*34.236	*21.916	*22.707
	H	260.74	256.40	256.85	258.54	262.30	262.30	264.80	264.80	262.30	264.80
	△X	0.266	0.251	0.255	0.232	0.185	0.184	0.270	0.097	0.198	0.133
	△Y	0.002	0.056	−0.080	0.104	0.133	0.217	0.103	0.175	0.063	0.119
	△H	0.470	0.960	0.970	0.630	0.350	0.340	0.760	0.870	0.870	0.460

5　结　语

本研究探索了影像匹配点云与激光雷达点云数据融合，应用于大比例尺数字线划图（DLG）的生产，并对其数据生产流程及成果精度进行了深入探讨。研究中，利用中型无人机采集了测区的影像和激光点云

数据；经过特征匹配、空三解算、密集匹配等步骤，将影像数据转换为密集点云，并采用线、面几何约束技术，实现了影像点云与激光雷达点云数据的精确融合；基于融合后的点云数据，重构了数字地表模型（DSM），并在EPS软件中加载DSM数据，完成了DLG的绘制工作。实验结果表明：采用融合点云技术生产的DLG成果在精度上满足了大比例尺地形图测绘的要求。

参考文献

[1] 周玉岑,吴际,李小龙. 机载LiDAR与倾斜摄影测量在大比例尺地形图测绘中的应用[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(8):194-196

[2] 郭春海,张英明,丁忠明. 无人机机载LiDAR在沿海滩涂大比例尺地形测绘中的应用[J]. 测绘通报,2019(9):155-158

[3] 姜丙波,柳忠伟,彭云,等. 无人机机载激光雷达在抽水蓄能电站大比例尺地形图测绘中的应用[J]. 测绘通报,2021(增刊):248-251

[4] 王志明,李锁乐. 机载LiDAR技术支持下的荒漠地区1:10 000地形图测绘与研究:以内蒙古阿拉善地区为例[J]. 测绘通报,2019(4):91-95

[5] 陈方圆,李雪杉,王晶玉. 齐齐哈尔地区机载LiDAR数据处理及DEM制作[J]. 测绘与空间地理信息,2020,43(增刊): 128-130

[6] 白斌. 机载LiDAR在大比例尺地形图测绘中的应用分析[J]. 测绘与空间地理信息,2024,47(4):186-188

[7] 郭增林,王显慧,唐露琴. 基于机载激光扫描技术的1:1 000地形图制作[J]. 测绘与空间地理信息,2024,47(9):158-160

[8] 王树臻. 古建筑三维点云配准及精细建模研究[D]. 济南:山东建筑大学,2021

[9] 汤念. 影像匹配点云与地面激光点云配准技术研究[D]. 北京:北京建筑大学,2021

[10] 商建伟. 基于倾斜摄影实景三维模型的大比例尺地形图测绘分析研究[J]. 测绘通报,2020(增刊):195-197

[11] 王虎,吕伟才,苏晓刚,等. 消费级无人机倾斜摄影大比例尺测图技术[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(4):507-511

[12] 丁涛,付贵,刘超,等. 消费级无人机在1:500地形图测绘中的应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(6):840-844

[13] 芦彦霖,张森,汲姣. 低空无人机倾斜摄影测量测图精度实证[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2021,51(6):1921-1931

[14] 路思岐,丰立柱. 影响无人机航摄的高程精度分析[J]. 现代信息科技,2023,7(9):118-120

[15] 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

[16] 荆路,武斌,李先帅. 基于SAC-IA和NDT融合的点云配准方法[J]. 大地测量与地球动力学,2021,41(4):378-381

[17] 谢小鹏,古家威. 一种改进的二维ICP点云配准算法[J]. 激光与红外,2021,51(7):951-955

[18] 胡春梅,费华杰,夏国芳,等. 激光扫描与摄影测量异源点云高精度配准方法[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(24):212-219

[19] 李绕波,袁希平,甘淑,等. 一种基于对偶四元素描述的线面特征约束的点云配准方法[J]. 光学学报,2022,42(2):167-175

[20] 李华蓉,毛宏宇,赵一,等. 线面特征约束的跨源点云配准方法[J]. 地球信息科学学报,2024,26(5):1180-1192

[21] 齐含,刘元盛,宋庆鹏,等. 基于深度学习的点云配准方法综述[C]//中国计算机用户协会网络应用分会2022年第二十六届网络新技术与应用年会,北京,2022

[22] 郭大伟,李景浩,陆军. 三维点云配准的多尺度深度学习方法[J]. 智能系统学报,2024,19(4):817-826

[23] 易见兵,彭鑫,曹锋,等. 多尺度特征融合的点云配准算法研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2024,42(3): 108-120

（上接第21页）

[8] 蒋明鹏,李荣宽,王金泉,等. 基于分布式事务的数据跨网交换技术[J]. 指挥信息系统与技术,2023,14(2):91-94

[9] 李超,韩翔,刘钊,等. 基于可信计算的跨网数据安全交换技术[J]. 计算机工程与设计,2021,42(10):2762-2769

[10] 冯永玉,关纯安,王志强,等. 不动产登记跨网数据交换系统设计与实现[J]. 山东国土资源,2020,36(11):81-84

[11] 聂元铭,韩惠良,顾力平. 跨网数据安全交换技术研究[J]. 计算机安全,2013,12(4):50-52

[12] 李一玮. 国产商用密码技术在城市轨道交通AFC系统的应用[J]. 城市轨道交通研究,2021,24(9):197-199,203

[13] 耿晴,孙续锦,陈涛. 地理信息数据加密控制版权保护系统设计[J]. 地理空间信息,2020,18(3):5-8

[14] 范志坚,付蓉. 安全技术在涉密地理信息分发中的应用[J]. 地理空间信息,2022,20(5):166-168

[15] 谢杨洋. 基于访问控制权限下网络数据资源共享[J]. 才智,2011,11(18):77

[16] 郑祥,顾丹鹏,陈肖勇. 基于XXL-JOB的分布式定时任务研究和应用[J]. 计算机时代,2022,39(6):80-82

[17] 陆颖. 基于XXL-JOB的可视化分布式定时调度平台的设计与实现[J]. 电脑知识与技术,2023,19(14):39-41

[18] 仲崇高,董义炜,宋天慧. 政务大数据共享与融合:问题、模型与框架[J]. 中阿科技论坛(中英文),2022,5(10):50-54

[19] 刘旋律,顾进广. 基于稳定匹配的实时ETL弹性调度机制[J]. 计算机应用与软件,2022,39(2):266-273

[20] 张记强,王仁,蒋欣欣,等. 异构数据库同步技术的研究与实现[J]. 软件工程,2021,24(1):6-9

[21] 艾森,许向彦,王立凯. 基于JSON格式的强度校核软件数据交互接口设计[J]. 软件导刊,2021,20(10):26-30