

# 基于无人机摄影测量的地形图测绘技术与应用

杨 灵

四川建筑职业技术大学测绘工程系, 四川 德阳

收稿日期: 2026年6月9日; 录用日期: 2026年7月1日; 发布日期: 2026年7月14日

## 摘 要

针对传统地形图测绘中依赖大量野外实测、作业周期长等局限性, 本文系统阐述了无人机摄影测量技术在大比例尺地形图测绘中的应用方法及作业流程。具体而言, 采用无人机获取外业影像数据, 在内业处理阶段, 对影像数据及其他辅助数据进行自动化处理与解算, 最终基于解算生成的正射影像或数字线划图成果, 导入制图软件进行地形图要素的矢量化编辑与成图输出, 并讨论了复杂场景下典型问题及解决方法。该作业流程有效突破了传统测绘需进行大量野外数据采集的局限, 显著提高了地形图生产的效率、灵活性与安全性, 同时降低了对作业人员野外工作强度的要求。研究成果为大比例尺地形图测绘的技术升级提供了系统的理论参考与可行的技术支持, 对推动无人机摄影测量在地形测绘中的工程化应用具有积极意义。

## 关键词

无人机, 摄影测量, 地形图测绘

# Techniques and Applications of Topographic Mapping Based on UAV Photogrammetry

Ling Yang

Surveying and Mapping Engineering Department, Sichuan University of Architectural Technology, Deyang Sichuan

Received: June 9, 2026; accepted: July 1, 2026; published: July 14, 2026

## Abstract

In view of the limitations in traditional topographic mapping, such as the reliance on extensive field measurements and the long operation cycle, the application method and operation flow of UAV photogrammetry in large-scale topographic mapping are systematically introduced. Specifically, using UAV to obtain field imaging data, in the internal processing stage, image and auxiliary data are automatically processed and calculated. Based on the generated DOM or DLG products by the calculation, topographic map elements are vectorized and edited using mapping software, and the mapping

output is achieved. Moreover, representative problems and proposed solutions within complex scenarios are presented. This workflow overcomes the need for extensive field data collection of traditional mapping, significantly improving efficiency, flexibility, and safety of topographic mapping production while reducing the field labor intensity of the operators. The findings offer theoretical and technical support for upgrading large-scale topographic mapping and have positive significance for promoting the engineering application of UAV photogrammetry in topographic mapping.

## Keywords

UAV, Photogrammetry, Topographic Mapping

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着经济的持续发展和城市化进程的不断加快,数字中国与智慧城市的建设对地形图的精度及现势性提出了更高的要求。传统地形图测绘方法主要依赖 GPS-RTK、全站仪等设备进行野外数据采集,并结合内业计算机处理完成成图。该流程不仅操作繁琐、耗时耗力,其成果的精度与可靠性也极易受到外界环境及天气条件的干扰。近年来,在低空经济快速发展的背景下,无人机已广泛应用于工业、农业及服务业等多个领域。凭借其轻便、灵活、高效及成本低廉等显著优势,无人机摄影测量技术正逐步取代传统测绘手段,成为当前地形图测绘的主要方式[1][2]。王晨旭等(2023)在带状密林高山区通过机载 LiDAR 获取正射影像,验证了无人机测绘在复杂地形区生成 1:2000 比例尺地形图的技术可行性[3]。Abdel-Maksoud 等(2024)在埃及开罗约 2.65 km<sup>2</sup> 区域内对比了 Pix4Dmapper 与 Agisoft Metashape 的处理精度,在使用 7 个地面控制点(GCP)时,Pix4Dmapper 的精度更优[4]。Dharshan Shylesh 等(2023)系统探究了 GCP 的数量、质量和空间分布对无人机测绘产品平面与高程精度的影响,为像控点的优化布设提供了理论指导[5]。Nwilag 等(2023)验证了低空无人机数字地形制图的可行性,通过 20 个地面控制点评估,生成的三维模型水平 RMSE 为 0.033 m,垂直 RMSE 为 0.042 m,可满足 1:200 比例尺地形图的精度要求[6]。

当前研究多聚焦于单一技术环节或特定场景,对从外业数据采集到内业地形图成图的完整工艺流程缺乏系统性的梳理与归纳。这导致工程技术人员在实际项目中缺少清晰、可复用的技术指导。

本文系统阐述基于无人机正射影像的地形图制作完整流程,涵盖任务规划、像控点布设、影像获取、Pix4Dmapper 空三加密与密集匹配、DSM/DOM 生成及 CASS 数字线化制图等关键环节,并讨论了典型复杂场景下的应对措施。研究成果旨在为无人机正射影像地形图测绘提供系统化参考。

## 2. 无人机航摄系统组成

无人机航测系统的组成主要包括外业数据采集部分以及内业数据处理系统两部分,数据采集又主要包括了无人机的飞行平台、任务载荷以及飞行控制系统,其结构组成如图 1 所示。

### 2.1. 飞行平台

无人机飞行平台负责搭载传感器飞到任务区进行数据的采集,其类型根据任务的需求来进行确定,一般可采用多旋翼、固定翼、直升机等[7]。进行航测时一般采用多旋翼无人机,这种机型灵活、轻巧,对起飞和降落的位置要求不高,适合多种空间的使用。

2.2. 任务载荷

任务载荷主要用于获取任务区的数据信息，一般可采用航拍相机、倾斜摄像机、激光雷达、红外传感器等。不同类型的载荷可针对性地解决实际问题，不仅提高了无人机工作的效率，还对无人机的创新和发展具有推动作用。

2.3. 飞行控制系统

飞行控制系统可以对无人机实行精准定位及导航，通过实时查看无人机的状态以提高无人机飞行的安全性能。

2.4. 数据处理

数据处理系统可对采集的不同类型的数据进行处理、分析及可视化，以生成多种格式的数据，为各行各业的研究使用提供数据支持。

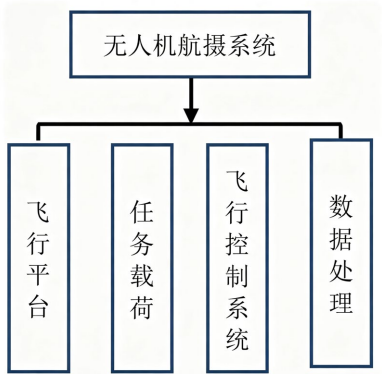


Figure 1. UAV photogrammetry system  
图 1. 无人机航摄系统

3. 无人机航测系统大比例尺测图

3.1. 工作流程

无人机摄影测量的工作流程大致可分为外业和内业：外业主要包括任务和测区的分析、测区勘察、航线规划，像控点布设与采集以及影像数据的获取等，内业主要包括利用 Pix4Dmapper 软件对获取的外业数据进行处理，主要生成数字地表模型(Digital Surface Model, DSM)和数字正射影像(Digital Orthophoto Map, DOM)成果，再利用 CASS 绘图软件对生成的数据进行数字线化图的制作。基本流程如图 2 所示。

3.2. 任务测区分析

根据任务需求，首先需要明确无人机的具体作业区域，并系统收集该区域内所有可获取的相关资料与信息，包括影像、照片、文字等多种数据格式。具体包括但不限于以下内容[8]：

- 1) 全面掌握任务区域的地形地貌特征以及周边重要设施(如高压线、居民楼、道路等)的分布情况，通过对上述资料的综合分析，合理确定无人机的起降点位置；
- 2) 明确具体的作业范围，并查明该区域内的禁飞与限飞规定，在飞行任务执行前，应确认任务区域是否属于禁飞或限飞区，对于涉及大城市、机场等敏感区域，需提前完成空域申请手续；
- 3) 无人机航空摄影测量的外业数据采集主要以获取影像照片为目标，而能见度、云高、风速等自然

因素对影像质量及后续处理精度具有显著影响，因此必须明确作业期间的天气与气候条件，以保障测量成果的精度与可靠性。

在充分整理已有资料并开展实地勘察的基础上，结合设备性能与任务具体要求，制定详尽的作业流程方案，并同时拟定相应的备用应急方案。

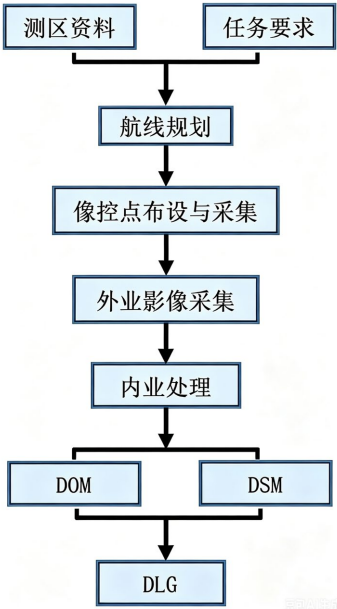


Figure 2. The workflow of UAV photogrammetry  
图 2. 无人机摄影测量的工作流程

3.3. 航线规划

航线规划作为无人机外业作业中的核心环节之一，其合理性直接关系到后期数据处理的精度与可靠性。技术人员在充分整合测区已有资料与具体任务需求的基础上，结合实地踏勘结果，开展航线规划工作。依据实际作业需求，既可在任务执行前预先规划飞行路线并导入无人机系统，也可在现场根据环境条件实时进行航线设计。在航线规划过程中，需对系列关键参数进行合理选择与设定，具体参数值应参考无人机倾斜摄影测量的相关技术规范及任务的具体要求。需设定的主要参数包括：航线类型、影像的航向重叠度与旁向重叠度、飞行高度、拍照间隔等。

根据地面分辨率(Ground Sampling Distance, GSD)设置合适的航高：

$$H = f \times GSD / a \tag{1}$$

式中： $H$ ——相对航高；  
 $f$ ——镜头焦距；  
 $GSD$ ——影像地面分辨率；  
 $a$ ——像元尺寸。

3.4. 像控点布设与采集

在传统摄影测量中，相对定向与绝对定向过程通常需要布设大量控制点，由此导致外业工作量巨大，严重制约了作业效率。空中三角测量技术仅利用少量控制点即可完成建模平差计算，有效解决了上述问

题,显著提升了工作效率并降低了作业成本[9][10]。为保证外业获取影像的质量以及内业成图的精度,需在测区范围内依据像控点布设原则并结合实地情况,科学布设与采集像控点[11]。像控点的布设方式可分为飞行前布设与飞行后布设两种情形。飞行前布设像控点虽然能够确保控制点位置明确且易于识别,但在外业采集过程中易受环境因素影响,导致精度损失。飞行后布设则是在获取影像之后,于内业数据上选取显著的标志点,再由外业人员进行实地测量,该方法对专业人员的技能水平要求较高。

像控点的选择可以根据规则进行现场涂刷的,也可以是实地获取的包括地面斑马线、小路岔口等。市面上很多地无人机均有免像控系统,在实际操作过程中可以不进行像控点地布设和采集,根据实际情况酌情选择。

### 3.5. 外业影像采集

在完成航线规划与相关参数设定之后,作业人员需对无人机的各项状态进行全面检查,并确认周边环境满足安全飞行条件,方可启动飞行任务。无人机起飞后,首先抵达预设的航摄起始点,随后按照既定航线执行航空摄影任务。在整个外业飞行过程中,作业人员可通过地面控制站对无人机的实时位置、电量状态及飞行路线等进行动态监测。受外业航摄过程中风向、光照等环境因素的干扰,飞行作业结束后,无人机应在指定地点安全降落。此时需及时对所获取的影像质量进行检查,以备后续数据处理使用。对于存在质量问题的影像,应及时组织重新采集或补拍,确保数据完整可靠。

### 3.6. 生成正射影像

传统的无人机航片处理软件通常面临数据处理量庞大、处理流程中人工干预环节较多,以及成果精度难以满足实际生产需求等局限性。相比之下,Pix4Dmapper 是一款支持无人机自动化航测功能的三维建模软件,凭借其全自动处理、高效运算及专业级精度的显著优势,在无人机航测领域得到了广泛应用[12][13]。其主要流程包括:

#### 1) 新建工程、导入数据

新建工程文件,输入外业采集的数据,包括影像数据、像控点、POS 数据等基础信息(如图 3 所示)。

#### 2) 全自动处理

全自动处理流程主要涵盖三个核心模块:初始化处理、点云与纹理生成以及 DSM (数字表面模型)、正射影像与指数的计算。用户可根据具体任务需求,对各模块的处理参数进行灵活设定,并自主选择输出成果的文件格式,以满足不同应用场景下的数据要求。

#### 3) 成果输出

主要输出成果为:数字正射影像(DOM)数据、数字表面模型(DSM)数据、点云数据以及质量报告等。质量报告包括快速检查和最终报告分析。快速检查主要检查获取影像匹配结果的质量以及相机参数优化的质量是否满足任务需求。最终的报告则需要关注空中三角测量的误差、相机的自检校误差以及控制点的误差。

### 3.7. 数字线化图

在制图软件中加载 DOM(数字正射影像)数据后,依据相关测绘规范及成图要求,对影像中的地物平面信息进行系统提取。主要提取的地物类型包括:房屋建筑、道路、河流、各类界线等。完成数字线化图的初步编绘后,成果可交付用于外业调绘工作。

针对内业解译过程中存在的影像模糊、地物缺失或无法准确判读的情况,需通过外业实地检查或补测,以更新数字地形图。对于植被覆盖密集或阴影遮挡严重的区域,还应采用网络 RTK (实时动态差分)技术实测高程注记点,其测量参数设置应与像控测量保持一致,确保数据精度与系统一致性。

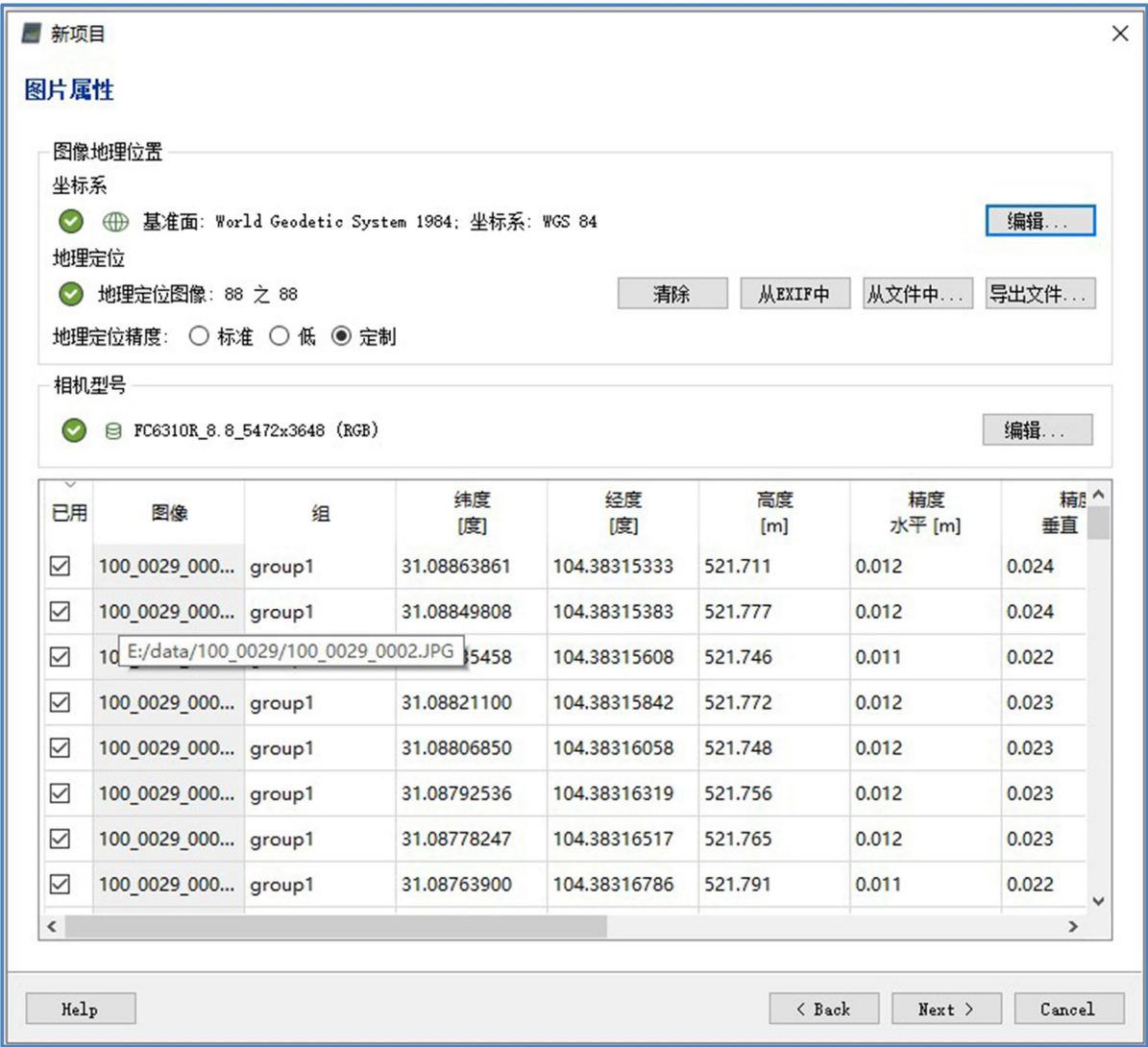


Figure 3. Image loading  
图 3. 影像加载

### 3.8. 典型问题及工程解决方案

在实际地形图测绘工程中，尽管无人机倾斜摄影技术结合相关软件已能高效生成预期数字产品，但复杂场景会导致严重的数据缺陷。针对植被茂密区、城市峡谷区以及水体/高反光屋顶等弱纹理区域，总结典型问题表现及其在生产流程中的成熟解决方案。

#### 3.8.1. 植被茂密区域的地面高程提取问题

在林地、灌木丛或高草地覆盖区，建模软件通过密集匹配生成的 DSM 主要反映树冠或植被顶面高程，与真实地面往往相差数米[14]。若直接基于该 DSM 在 CASS 中自动生成等高线，会导致等高线异常隆起、沟谷位置偏移，无法满足地形图的高程精度要求。针对该问题可分别从外业和内业两个阶段进行处理：

- 1) 外业阶段：选择植被落叶期或非生长季飞行，适当提高航向和旁向重叠度。
- 2) 内业处理：利用 Pix4Dmapper 提供的点云滤波工具，选择适用于林区的参数，滤除植被点[15]。

### 3.8.2. 城市峡谷区域的阴影与遮挡

城市峡谷(两侧高层建筑、街道狭窄)中,正射影像因太阳高度角或建筑遮挡,常产生两类问题:① 阴影区纹理缺失:高楼阴影覆盖的地面区域影像亮度极低,导致 DSM 中出现空洞或高程异常;② 建筑物边缘畸变:密集建筑群中,下视影像由于透视投影,建筑顶部边缘会“拉花”或产生虚假高程,影响建筑物轮廓线及周边地面高程的准确采集[16]。针对该问题可分别从外业和内业两个阶段进行处理:

1) 外业阶段:尽量选择正午前后飞行,缩短阴影长度。增加像控点密度,且分布于建筑底层墙角、道路标线等稳定位置,以弥补空中三角测量的不稳定。

2) 内业处理:在 Pix4Dmapper 软件中,对阴影区影像进行直方图均衡化,提升暗部纹理可匹配性。利用 DOM 提取建筑物轮廓,在 DSM 中将建筑物覆盖区域掩膜剔除,仅保留地面点云生成 DEM。

### 3.8.3. 弱纹理区域(水体与高反光屋顶)的数据质量保证

水体与高反光屋顶,纹理重复、低反差,镜面反射使匹配失败,导致轮廓范围线断裂不连续,无法准确描绘。

1) 外业阶段:选择阴天、多云或清晨/黄昏飞行。对重要建筑物的屋顶角点,使用 RTK 或全站仪实测。

2) 内业阶段:预先标注测区内所有水体及高反光建筑。空三计算后,在 Pix4Dmapper 的点云编辑中手动删除反光区域的错误飞点。

## 3.9. 精度评价

构建覆盖数据采集、处理及成果检验的全流程控制体系对无人机倾斜摄影测量地形图进行精度评价:

1) 在影像采集环节,应严格规划飞行航线和像控点布设,确保影像重叠度、分辨率及清晰度满足地形图测绘规范,对存在云雾遮挡或对焦失真的影像及时补拍。

2) 在空三加密与平差处理中,采用高精度 POS 辅助与密集匹配点云,通过多级控制网严密平差减小系统误差,使平面中误差和高程中误差分别符合相应限差要求。

3) 在地形图成果验证方面,利用野外实测检查点对等高线、高程注记及地物轮廓进行对比统计,建立误差分布模型,量化评定成果的可靠性与一致性,为地形图应用提供精准的数据支撑。

## 4. 结语

随着社会不断发展所带来的机遇和挑战,传统的测绘形式已经逐渐被新兴技术所替代,无人机技术的高速发展更是为测绘工作开展提供了极大的技术支持。本文系统地阐述了无人机摄影测量在大比例尺地形图测绘中的方法流程,结合内、外业作业流程与特点,展示了无人机摄影测量相对传统测绘方式的优越点。同时,针对植被茂密区、城市峡谷阴影区及水体/高反光屋顶等弱纹理区域三类典型复杂场景,分别从外业采集优化和内业处理提出了工程解决方案,有效提升了复杂环境下的成果质量。本研究为大比例尺地形图测绘的发展提供了理论参考和技术支持。

## 参考文献

- [1] 陈晨. 无人机航空摄影测量在地形图测绘中的应用[J]. 智能建筑与智慧城市, 2024(9): 46-48.
- [2] 赵文娇. 无人机摄影测量技术在地形图测绘中的应用[J]. 数字通信世界, 2022(9): 115-117.
- [3] 王晨旭, 代赫男, 张涛. 覆盖 1000 km 带状密林高山区的机载激光雷达点云数据及正射影像处理[J]. 测绘通报, 2023(S1): 15-20.
- [4] Abdel-Maksoud, H., Aziz, T.A., Elsharkawy, A.S. and Moursy, O. (2024) Enhancing Elevation Surface Precision through Comparative Analysis of Photogrammetric Software Using UAV Data: A Case Study in Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 17, Article No. 229. <https://doi.org/10.1007/s12517-024-12033-z>

- 
- [5] Dharshan Shylesh, D.S., Manikandan, N., Sivasankar, S., Surendran, D., Jaganathan, R. and Mohan, G. (2023) Influence of Quantity, Quality, Horizontal and Vertical Distribution of Ground Control Points on the Positional Accuracy of UAV Survey. *Applied Geomatics*, **15**, 897-917.
- [6] Nwilag, B.D., Eyoh, A.E. and Ndehedehe, C.E. (2023) Digital Topographic Mapping and Modelling Using Low Altitude Unmanned Aerial Vehicle. *Modeling Earth Systems and Environment*, **9**, 1463-1476. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01677-z>
- [7] 张建利. 无人机航测成图质量控制研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2018.
- [8] 孙烽龙. 小型无人机航测系统大比例尺测图方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [9] 李淑敏. 基于无人机摄影测量的大比例尺地形图测制关键技术[J]. 工程建设与设计, 2024(4): 132-134.
- [10] 晁冲, 褚会鹏. 无人机遥感技术在测绘工程测量中的应用研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9(12): 202-204.
- [11] 林良基. 无人机像控点布设对空三精度的影响研究——以 1:500 比例尺地形测图为例[J]. 现代测绘, 2024, 47(6): 35-39.
- [12] 毛志芳, 查燕萍. 无人机倾斜摄影技术在地籍测量中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(1): 206-208.
- [13] 张迷霞, 栾俊, 游于陆, 等. 无人机航空摄影测量与遥感行业发展现状与趋势[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(1): 38-41+46.
- [14] Tonkin, T.N., Midgley, N.G., Graham, D.J. and Labadz, J.C. (2014) The Potential of Small Unmanned Aircraft Systems and Structure-From-Motion for Topographic Surveys: A Test of Emerging Integrated Approaches at Cwm Idwal, North Wales. *Geomorphology*, **226**, 35-43. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.021>
- [15] 惠振阳, 程朋根, 官云兰, 等. 机载 LiDAR 点云滤波综述[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 7-15.
- [16] Wang, C., Zhang, T., Tao, L. and Lin, J. (2025) Restoring Anomalous Water Surface in DOM Product of UAV Remote Sensing Using Local Image Replacement. *Sensors*, **25**, Article 4225. <https://doi.org/10.3390/s25134225>