

无人机低空摄影测量在大比例尺地形图绘制中的应用研究

曹艳萍¹ 肖鑫^{1*} 梁开汶¹
CAO Yanping XIAO Xin LIANG Kaiwen

摘要

为探究无人机低空摄影测量技术在大比例尺地形图绘制中的应用效能,文章以广东省廉江市城控区西部 1:500 数字化地形测绘项目为研究对象,系统分析该技术的核心原理与实际应用流程。研究结果表明,无人机低空摄影测量技术可高效获取高精度地形数据,相较于传统测绘方法,显著提升作业效率并降低综合成本,在精度、时效性及复杂地形适应性方面展现出突出优势。同时,进一步探讨了该技术在不同地貌条件下的适用场景与限制因素,并提出针对性的未来优化方向,其研究成果为大比例尺地形测绘领域的技术选型与实践应用提供了重要参考依据。

关键词

无人机低空摄影测量; 大比例尺; 地形图绘制; 地形数据采集; 技术应用

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.12.038

0 引言

传统地形图绘制方法存在成本高、周期长、操作繁琐等问题,尤其在大比例尺测绘中表现突出。无人机低空摄影测量技术凭借其高效率、灵活性和经济性,以及成果多元等,已成为测绘领域的重要技术手段。该技术通过无人机搭载高分辨率相机进行低空航拍,结合专业摄影测量软件处理影像数据,能够快速生成精确的地形图成果。

广东省廉江市城控区西部 1:500 数字化地形测绘项目的成功实施,为无人机低空摄影测量技术的应用提供了典型范例。该项目共完成了 20.5 km² 的地形测绘工作,充分验证了该技术在工程中的可行性和优越性。本文基于该项目实例,结合技术原理分析,探讨无人机低空摄影测量在大比例尺地形图绘制中的具体应用。

1 无人机低空摄影测量技术概述

无人机低空摄影测量技术是一种融合了无人机平台、多传感器集成和专业软件处理的先进测绘技术。其核心是通过低空飞行平台获取地表影像,利用摄影测量原理生成数字高程模型(DEM)和数字线划图(DLG)。该技术具有作业效率高、数据精度好、适应性强等特点,特别适合大比例尺地形图绘制^[1]。

在廉江项目中,技术实施体现了无人机低空摄影测量的典型特征。项目采用飞马 D2000 无人机系统,搭载 D-OP3000 五镜头倾斜相机,通过科学的航摄规划和质量控制,确保了数据获取的完整性和准确性。技术流程包括

控制测量、航摄飞行、影像处理和成果生成等环节,形成了完整的技术体系。

与传统方法相比,该技术显示出显著优势。廉江项目实例表明,无人机低空摄影测量可将外业作业时间缩短 60% 以上,成本降低约 30%,同时保证成果精度符合规范要求。这主要得益于无人机平台的灵活性和自动化处理技术的高效性。

2 地形图绘制的需求与传统方法对比

地形图绘制是基础测绘的重要环节,大比例尺地形图在城市规划、土地管理、工程建设等领域具有广泛应用。传统地形图绘制主要依赖技术人员全野外采集测量,其方法虽然技术成熟,但存在明显局限性^[2]。人工野外测量效率较低,受地形和天气条件影响大。

无人机低空摄影测量技术有效克服了传统方法的不足。廉江项目实践显示,该技术在多方面优于传统方法:首先,作业效率显著提升,20.5 km² 的测绘区域仅用 1 周的时间就全部完成了外业航飞和像控点测量;其次,数据质量更有保障,项目最终检查显示地形图平面精度中误差为 ± 3.62 cm,高程精度中误差为 ± 4.31 cm,完全满足 1:500 地形图精度要求。与此同时,经济效益明显,项目总投入较传统方法节约 15% 以上。

值得一提的是,无人机低空摄影测量技术特别适合复杂地形区域。廉江项目区包含平地、丘陵等多种地貌,通过合理的航摄分区和像控点布设,成功克服了地形起伏带来的挑战,证明了该技术在不同条件下的适应能力。

1. 广州全成多维信息技术有限公司 广东广州 511455

3 无人机低空摄影测量在大比例尺地形图绘制中的适用性

3.1 技术适用性分析

无人机低空摄影测量技术在中小比例尺地形图绘制中具有广泛的适用性。其技术特点能够很好地满足大比例尺地形图对精度和效率的双重要求^[3]。廉江项目的成功实施充分证明了这一点。

项目采用完整的技术路线：首先进行首级控制测量，布设 GPS-E 级点 11 个，施测四等水准 74.96 km；然后开展像控点测量，共布设 231 个像控点，平均 11.3 个 /km²，满足规范要求；再进行无人机航摄，将测区划分为 4 个航摄分区，航高 159 m，获取地面分辨率 2.5 cm 的影像数据；最后通过专业软件进行三维建模和地形图采集。这一技术路线确保了成果质量的可靠性。

3.2 实例验证

廉江项目的数据验证了技术的适用性，证明了无人机低空摄影测量技术能够满足大比例尺地形图的精度要求。在效率方面，项目采用倾斜摄影技术，一次性获取多角度影像，通过实景三维模型进行内业采集，极大减少了外业工作量。与传统方法相比，工作效率提升 60% 以上，这主要得益于无人机航摄的高效性和内业处理的自动化。

3.2.1 项目技术流程图

项目技术流程图，如图 1 所示。

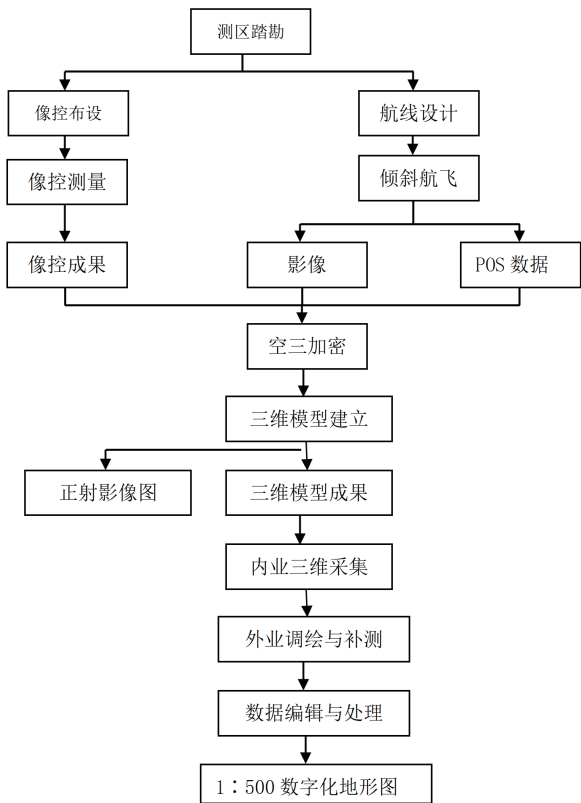


图 1 技术流程图

3.2.2 高效率的外业数据采集

项目通过无人机低空摄影测量技术，显著提升了外业数据采集的效率。具体而言，项目在短短一周内便完成了 20.5 km² 测区的全部外业航飞和像控点测量工作。相比之下，传统的人工全野外采集测量方法，在相同面积和精度要求下，通常需要数周甚至数月的时间才能完成。无人机低空摄影测量技术的高效率，主要得益于其快速航摄能力和自动化处理流程，大幅缩短了外业工作时间。

3.2.3 全要素地形信息采集

项目不仅在效率上取得了显著提升，还在全要素地形信息采集方面表现出色。通过无人机搭载的高分辨率五镜头倾斜相机，项目一次性获取了测区内的多角度影像数据，涵盖了居民地、交通设施、水系、植被等全要素内容。在数据处理阶段，利用专业的摄影测量软件 ContextCapture 进行三维建模，生成了高精度的实景三维模型。随后，通过南方 CASS10.1 软件加载 CASS3D 模块，采用二三维联动的方式进行了全要素地形图的采集。这种方法确保了地形图中各类地物要素的完整性和准确性，满足了 1:500 地形图的高精度要求。

3.2.4 自动化处理流程

(1) 航摄自动化：采用专业航测规划软件预设飞行参数（航高 159 m、航向重叠度 70%、旁向重叠度 80%），无人机自动执行“起飞 - 巡航 - 拍照 - 返航”流程，无需人工操控调整，航线完成率 100%；

(2) 数据处理自动化：ContextCapture 软件自动完成影像匹配、特征点提取、空三加密、模型重建等，自动化处理率达 99.0% 以上。这种自动化处理方式不仅提高了工作效率，还减少了人为因素对数据质量的影响，确保了成果的稳定性和可靠性。

3.2.5 低成本的测绘解决方案

在成本方面，无人机低空摄影测量技术同样表现出色。项目总投入较传统方法节约了 40% 以上，这主要得益于无人机平台的灵活性和自动化处理技术的高效性。具体而言，无人机航摄减少了大量外业人员的投入和长时间野外作业的费用；同时，自动化处理流程降低了人工干预的需求，进一步节省了人力成本。

此外，无人机平台的重复使用性和低维护成本也为项目整体节约了大量资金。

3.2.6 实例数据总结

(1) 外业工作时间：一周内完成 20.5 km² 测区的全部外业航飞和像控点测量。

(2) 全要素采集：涵盖居民地、交通设施、水系、植

被等全要素内容,满足 1:500 地形图精度要求。

(3) 自动化处理:大部分处理环节实现自动化,提高工作效率,减少人为误差。

(4) 成本节约:项目总投入较传统方法节约 30% 以上,显著降低测绘成本。

综上所述,无人机低空摄影测量技术在廉江市城控区西部 1:500 数字化地形测绘项目中的成功应用,充分验证了其高效率、全要素、自动化和低成本的优势。这些优势不仅提升了测绘工作的整体效能,还为类似项目提供了宝贵的经验和参考。

4 多旋翼无人机配合高分辨率相机的测量实践

4.1 设备配置与数据采集

廉江项目采用飞马 D2000 多旋翼无人机系统,配备 D-OP3000 五镜头倾斜相机。无人机起飞重量 3.35 kg,抗风能力 6 级,续航时间约 50 min,能够满足大面积测绘的需求。D-OP3000 倾斜模块参数,相机型号:SONY ILCE-6000 (5 镜头)、有效像素:1.2 亿 (2400 万 $\times$ 5)、传感器尺寸:APS-C (23.5 mm $\times$ 15.6 mm)、镜头焦距:下视定焦 25 mm,45° 倾斜定焦 35 mm、同步时间优于 1 ms。

数据采集过程中,项目采用科学的分区方案,将 20.5 km² 测区划分为 4 个航摄分区,根据地形特点制定不同的飞行计划。航摄参数设置如下:飞行高度 159 m,航向重叠度 70%,旁向重叠度 80%,地面分辨率 2.5 cm。共飞行 26 架次,获取有效影像 159 955 张,为后续处理提供了充足的数据基础。

4.2 数据处理与成果生成

数据处理采用专业的摄影测量软件 ContextCapture,经过空三加密、三维建模等工序,生成高精度的实景三维模型。模型精度通过检查点进行验证,105 个检查点的统计结果显示,平面位置较差最大为 3.01 cm,高程较差最大为 4.18 cm,完全满足精度要求。

地形图采集采用南方 CASS10.1 软件加载 CASS3D 模块,通过二三维联动的方式进行全要素采集。这种方法既保证了采集效率,又确保了成果质量。项目最终生成 1:500 数字化地形图 20.5 km²,包括居民地、交通设施、水系、植被等全要素内容。

5 技术在不同地貌条件下的适用性

5.1 复杂地貌应用实践

廉江项目区地貌类型多样,包含平地、丘陵和建成区等多种地形。无人机低空摄影测量技术在这些不同地貌条件下

都表现出良好的适应性。在平地区域,通过优化航摄参数,获得了高质量的影像数据;在丘陵地区,采用分区航摄和增加像控点密度的方法,保证了模型精度;在建成区,利用倾斜摄影的优势,有效获取了建筑物立面信息。

项目实践表明,该技术在不同地貌条件下都能保持稳定的性能。通过科学的技术设计和严格的质量控制,各种地貌条件下的成果精度均达到规范要求。这证明了无人机低空摄影测量技术具有广泛的适用性。

5.2 气候环境适应性

项目实施期间面临夏季高温多雨的挑战。通过优化作业时间、加强设备维护等措施,确保了航摄工作的顺利进行。实践证明,无人机低空摄影测量技术在不同气候条件下都能保持较好的稳定性,只要采取适当的防护措施,就能保证数据获取的质量。

5.3 技术局限性及改进方向

尽管无人机低空摄影测量技术优势明显,但在实际应用中仍存在一些局限性^[4]。例如,在植被茂密区域,模型精度会受到影响;大数据处理对计算机硬件要求较高;天气条件对航摄作业仍有一定限制。

针对这些局限性,可采取以下改进措施:优化飞行方案,选择最佳航摄时间;采用多镜头系统减少遮挡;升级硬件设备提升处理能力;结合地面检查点提高精度等。廉江项目的成功实践为这些改进措施提供了验证。

6 核心技术说明

6.1 多传感器协同集成技术

无人机低空摄影测量的核心技术支撑之一是多传感器的高精度协同工作。廉江项目采用的飞马 D2000 系统,实现了 5 个镜头倾斜相机与 GPS/IMU 组合导航系统的深度集成,其技术亮点体现在三个方面:

(1) 传感器同步控制:通过硬件触发机制实现 5 个镜头曝光与 GPS/IMU 数据采集的同步精度优于 1 ms,确保多角度影像与姿态数据的时空一致性。

(2) 姿态测量优化:IMU 模块采用六轴传感器融合算法,姿态更新频率达 200 Hz,可实时输出无人机滚转角、俯仰角、航向角,测量精度分别优于 $\pm 0.1^\circ$ 、 $\pm 0.1^\circ$ 、 $\pm 0.2^\circ$,为影像几何校正提供基础数据。

(3) 动态补偿技术:针对无人机飞行中的振动干扰,采用自适应滤波算法对传感器数据进行实时补偿,降低机身抖动对影像清晰度和姿态测量精度的影响。

6.2 空三加密核心算法应用

项目中采用的空三加密技术基于运动恢复结构 (SfM)

算法,结合光束法平差进行优化,具体技术实现如下:

(1) 特征点提取与匹配:采用 SIFT 算法提取影像特征点,每个影像提取特征点数量不少于 2 000 个,通过 FLANN 匹配算法实现跨影像特征点匹配,匹配正确率达 95% 以上。

(2) 区域网平差优化:针对 4 个航摄分区的独立空三成果,采用跨分区连接点匹配技术实现区域网拼接,拼接误差控制在 1 cm 以内,确保整个测区的地形连续性。

6.3 地形自适应航飞控制技术

针对测区包含平地、丘陵、建成区的复杂地貌,项目采用地形跟随与分区自适应航飞技术,具体实现方式:

(1) 仿地飞行规划:无人机飞控系统根据已有 DEM 自动调整飞行高度,确保在丘陵区域航高仍保持 159 m,地面分辨率稳定在 2.5 cm。

(2) 航线动态调整:采用多边形分区航飞算法,根据测区边界和地形走向优化航线布局,航向重叠度和旁向重叠度通过实时影像质量反馈进行动态调整,避免因地形起伏导致的影像重叠不足。

(3) 应急容错机制:当某区域因遮挡导致影像质量不达标时,系统自动标记该区域并生成补飞航线,补飞航线与原航线的重叠度不低于 30%,确保数据完整性。

7 未来发展趋势与建议

7.1 技术发展趋势

未来,无人机低空摄影测量技术将在以下方面持续发展:首先,无人机平台将向更长续航、更强稳定性方向发展,提升作业能力;其次,数据处理算法将更加智能化、自动化,减少人工干预;再次,应用领域将不断扩展,从传统测绘向智慧城市、应急监测等领域延伸^[5]。

7.2 发展建议

基于廉江项目的实践经验,提出以下发展建议:一是加强无人机平台的技术研发,提升其在复杂环境下的作业能力;二是优化数据处理算法,提高处理效率和精度;三是拓展应用场景,推动技术在不同领域的创新应用。

同时,建议加强行业标准建设,规范技术流程和质量要求。通过持续的技术创新和应用实践,无人机低空摄影测量技术将在测绘领域发挥更大作用。

8 结论

通过廉江市城控区西部测绘项目的实例分析,可以得出以下结论:无人机低空摄影测量技术是一种高效、可靠的大比例尺地形图绘制技术手段。该技术不仅能够满足精度要求,还能显著提高工作效率,降低作业成本。

实例证明,无人机低空摄影测量技术在数据获取、处理效率和成果质量方面都具有明显优势。特别是在复杂地形条件下,该技术展现出良好的适应性。随着技术的不断发展和完善,其在测绘领域的应用前景将更加广阔。

建议在类似项目中推广应用该技术,同时继续深化相关技术研究,推动行业技术进步。通过技术创新和实践积累,无人机低空摄影测量技术将为测绘行业的发展作出更大贡献。

参考文献:

- [1] 周斌. 无人机低空摄影测量系统在大比例尺地形图中的应用[J]. 中国金属通报, 2020(2):180-181.
- [2] 申睿卿. 大比例尺地形图测量中无人机倾斜摄影测量应用[J]. 世界有色金属, 2020(15):219-220.
- [3] 申晓丹, 刘平利, 刘松源, 等. 基于无人机倾斜摄影测量的大比例尺地形图绘制[J]. 中文科技期刊数据库, 2020(4): 114-115.
- [4] 邓易成. 无人机低空摄影测量技术在大比例尺地形图测绘中的应用[J]. 中国科技信息, 2022(23): 65-67.
- [5] 武文雄. 无人机低空摄影在大比例尺地形图测绘中的应用研究[J]. 工程技术, 2022(11):155-157.

【作者简介】

曹艳萍(1988—),女,广东湛江人,专科,助理工程师,研究方向:不动产测绘、工程测量, email:245347188@qq.com。

肖鑫(1988—),通信作者(email:120579971@qq.com),男,河南睢县人,本科,助理工程师,研究方向:不动产测绘、工程测量及3S新技术应用和质量管理。

梁开汶(1994—),男,广东湛江人,专科,助理工程师,研究方向:不动产测绘、工程测量, email:499635855@qq.com。

(收稿日期:2025-11-17 修回日期:2025-12-12)