无人机倾斜摄影测量三维建模技术及应用分析

郭晓辉
上海华测导航技术股份有限公司，上海 201702

DOI: 10.61369/TACS.2026090007

摘　　要： 随着实景三维、数字孪生技术的迅速发展，各行各业对于空间地理数据的精度、完整性、时效性要求也越来越高。无人机倾斜摄影测量三维建模技术依靠多角度成像、智能数据处理技术，高效准确地复现现实世界，很好地克服了传统测绘技术的不足之处。本文对技术核心原理、组成体系和标准化作业流程进行系统的阐述，分析技术的优势，结合多领域实际场景来分析应用价值，探究存在的实施难点，提出优化路径，促进行业数字化转型，为该技术的规模化推广和精细化工程应用提供一定的参考依据。

关 键 词： 无人机；倾斜摄影测量；三维建模

Analysis of Human-Machine Collaborative Inclinometric Photogrammetry-Based 3D Modeling Technology and Its Applications

Guo Xiaohui
Shanghai Huace Navigation Technology Co., Ltd., Shanghai 201702

Abstract: With the rapid advancement of real-scene 3D modeling and digital twin technologies, industries across various sectors are placing increasingly higher demands on the accuracy, completeness, and timeliness of spatial geographic data. The drone-inclinometric photogrammetry-based 3D modeling technology leverages multi-angle imaging and intelligent data processing techniques to efficiently and accurately reproduce the real world, effectively overcoming the limitations of traditional surveying and mapping methods. This paper provides a systematic exposition of the core technical principles, the system architecture, and the standardized operational workflow; analyzes the advantages of this technology; evaluates its application value through case studies from multiple practical domains; explores the challenges encountered during implementation; proposes optimization pathways; promotes the digital transformation of the industry; and offers a reference basis for the large-scale adoption and refined engineering applications of this technology.

Keywords: UAV; Inclinometric photogrammetry; 3D modeling

一、无人机倾斜摄影测量三维建模核心技术概述

（一）技术基本原理

无人机倾斜摄影测量三维建模依靠多视角摄影测量和计算机立体视觉理论来完成作业，不同于传统的垂直摄影只采集地物顶部影像的方式，用搭载多镜头相机的无人机，从多个角度、全方位地采集地表影像，获取地物的平面轮廓、立体结构、立面纹理等全方位的空间信息。采集大量的原始影像之后，用专业的软件对影像进行预处理、同名点匹配、空中三角测量加密和坐标解算等一系列的处理工作，得到测区的稀疏点云和密集点云，准确地反映地形起伏和地物的空间位置关系。最终经过网格重构、纹理映射、模型修饰等自动化处理得到带真实纹理和准确坐标的实景三维模型，完成对现实场景的数字化复制，给各种空间分析和工程应用提供可靠的三维数据支持[1]。

（二）核心技术组成

无人机倾斜摄影三维建模是一个完整的协同工作系统，主要由四个部分组成，保证建模精度和作业效率。无人机飞行平台主要采用多旋翼设备，具有起降灵活、低空稳定、场地适应性强等特点，可以满足各种复杂的作业环境，按照预定的参数完成全自动航线飞行，保证影像采集的均匀全覆盖。倾斜摄影传感器是数据采集的中心，采用垂直加倾斜多镜头组合方式，可以无死角地对地物的细节纹理和立体特征进行全方位的捕捉，高分辨率成像能力给高精度建模提供高质量的原始数据。数据处理系统依靠专业的软件来执行影像校正、匹配、空三解算和点云生成，去除误差数据，创建起标准化的基础数据体系。三维建模系统利用点云网格化、纹理贴合、孔洞修补等技术，得到标准、高精度的实景三维模型。

二、无人机倾斜摄影测量三维建模完整作业流程

（一）前期准备阶段

前期准备工作是保证建模精度、保证作业顺利进行的基础工

作者简介：郭晓辉（1990.11—）汉族，籍贯：河南省虞城县；本科学历，中级工程师，研究方向：激光、影像三维重建。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

作，有四项主要工作。对测区进行实地勘察，了解区域地形地貌、地物分布、空域条件、障碍物情况，排除安全隐患，确定作业重点难点。根据建模精度要求以及应用场景来确定飞行作业方案，科学设置飞行高度、航线间距、影像重叠度等关键参数，并且还要顾及作业精度和作业速度。对无人机、摄影传感器、定位设备进行全部调试和精度校验，消除设备误差造成的建模质量问题。按照行业规范均匀布置、精确测量像控点，全面覆盖测区，给后续空三解算和模型坐标校正提供可靠的平面和高程控制依据。

（二）外业影像采集阶段

外业影像采集是决定三维模型是否完整、真实的中心工作。作业时无人机按照预定的航线和参数自动稳定飞行，倾斜摄影相机从各个角度进行全覆盖的影像拍摄，批量采集地表原始影像数据[2]。作业全过程要持续对设备运行状况、飞行姿态以及影像采集品质实施监控，迅速应对天气转变、信号受阻、障碍物遮挡等突发状况，保证所获取的影像足够清晰，没有模糊之处，无过曝情况出现，也绝不会遗漏任何一个拍摄点，各项参数均达到技术标准的要求。对高层建筑、山地陡崖、复杂构筑物等特殊区域采取局部补飞、改变拍摄角度等方式来弥补数据的不足，从源头上杜绝由于复杂区域影像缺失造成的建模过程中出现孔洞、细节缺失等问题。

（三）内业数据处理阶段

内业数据处理就是把原始影像变成标准的建模数据的过程，主要是去掉误差，规整数据。进行影像预处理，挑选出清晰有效的成像数据，剔除模糊、遮挡、重复、过曝的无效影像，完成镜头畸变校正和色彩统一处理，消除设备和环境造成的基础误差。之后利用软件算法进行影像同名点自动匹配，得到密集匹配点，再根据外业布设好的像控点开展空中三角测量加密和坐标解算，准确求出每一张影像的外方位元素，建立测区稀疏和密集点云模型。处理过程中对空三精度进行了严格控制，人工剔除匹配噪声点和误差点，改善点云结构，完整地再现测区地形地物的空间分布情况，给模型的建立提供准确的数据基础。

（四）三维模型构建与优化阶段

本阶段利用预处理得到的密集点云数据进行模型构建和精细化优化。利用软件把离散点云数据转换成网格化结构，拼接成连续完整的三维网格曲面，恢复测区地形形状和地物立体轮廓。接着进行纹理映射处理，把原始影像真实色彩、质感纹理准确地贴合到网格模型表面上，得到初始实景三维模型。初始模型中会存在孔洞、纹理畸变、边角锯齿状、多余的面片等问题，必须依靠人工仔细修改模型后才可消除这些问题。按照行业应用需求对模型进行坐标转换、格式优化、分层分类等处理工作，从而提高模型的精细度、真实性、场景适配性。

（五）成果验收交付阶段

模型建立完成之后，就要依照行业技术标准和项目具体要求，就成果的完备程度展开严格的验收工作。验收重点在于模型的坐标精度、地形还原度、地物完整性、纹理真实性、细节精细度等主要方面，全方位查找模型存在的空间误差、细节瑕疵、结构漏洞等各类问题，对不合格之处实施二次精细化改良并加以修正，从而保证成果完全符合标准要求。验收合格后，整理出全套作业成果，即高精度三维模型、作业技术报告、飞行参数说明、数据处理日志等资料，规范归档后完成成果交付，为后续各行业的数字化应用、数据分析和二次开发提供完整的、合规的、准确的三维数据支持。

三、无人机倾斜摄影三维建模技术核心优势

（一）作业高效

相比传统的手工建模和垂直摄影建模技术，它具有自动化程度高、外业采集和内业处理都依靠智能设备和专业软件来完成的特点，大大减少了人工干预，提高了整体的作业效率[3]。技术场景适配性极高，不受复杂地形、场地环境的限制，可以适应城市城区、乡村田野、山地林区、河道水域、各种工程施工现场等各种场合，既可以做小范围高精度精细化建模，也可以做大范围区域整体建模。无人机设备起降方便、不需要专门的作业场地，机动灵活，可以应对应急测绘、快速建模等紧急任务，比传统测绘技术的时效性高很多，作业灵活性强。

（二）模型真实性高

传统的垂直摄影只能得到地物顶部的平面信息，不能还原出立面结构和侧面纹理，建模出来的立体感差、细节少。无人机倾斜摄影依靠多视角拍摄方式，可以全方位获取地物立体结构、立面纹理、空间姿态等各方面信息，建模成果可以1:1真实还原现实场景的地形地貌、建筑细节和环境风貌，可视化效果逼真自然。模型装载准确的空间坐标，高程，尺寸等地理信息，既有较好的视觉展现效果，又有较高的专业数据精度，既可以实现场景的可视化展示，也可以支持空间测量，数据分析，仿真模拟，方案比对等各种专业的操作，实用性强。

（三）性价比突出

传统的三维建模依靠大量的手工测绘、手动勾勒和贴图渲染，人力、时间成本高，大范围的建模作业成本会大幅度增加。无人机倾斜摄影建模是以设备自动化、智能化作业为特点，大大减少人工投入，大幅缩短项目作业时间。无人机设备运维成本低，不需要大型作业设备和专用作业场地，软硬件投入门槛低。在保证建模精度、细节完整、成果合规的基础上，大幅度降低三维地理数据获取和实景建模的综合成本，打破传统建模高成本的限制，适合各个行业规模化、常态化、大批量的建模作业推广使用。

（四）精度稳定性强

依靠标准化的作业流程以及智能化的数据处理算法，模型的精度可以被控制，成果的一致性也很好，完全符合国家测绘行业的规范标准。经由规范的像控点布置、严谨的空中三角解算、细致的点云降噪及模型改良，可以系统地控制建模误差，很好地避免了传统的人工建模精度参差不齐、人为误差较大的问题。建模成果格式统一规范、数据体系完备规范，兼容性强，可以直接对接各种地理信息系统、数字化管理平台和仿真系统，便于数据共

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

享、成果复用、二次开发和深度挖掘，适合各种高精度专业应用场合。

四、无人机倾斜摄影三维建模技术的主要应用领域

（一）城市规划与智慧城市建设

实景三维模型是智慧城市数字底座的基础数据，可以快速创建出城市全域的数字孪生场景，把城市的建筑、道路、水系、绿地、市政设施等空间分布和立体形态全部展现出来。利用三维模型可以进行规划方案仿真比对、空间布局分析、视线模拟、城市风貌管控等，在城市规划工作中可以克服传统二维图纸规划的不足，提高规划方案的科学性、前瞻性。三维模型同城市智能化治理平台深度对接，在违建排查、市容管理、交通优化、应急调度等各方面发挥作用，将城市治理由原来粗放型转变为精细化、可视化、智能化的管控方式，助推智慧城市全域化创建。

（二）工程建设与施工管理

该技术可以对建筑、市政、公路、水利等各种工程的整个生命周期进行全方位的服务。工程勘察设计阶段，全域三维模型可以准确地体现现场区地形地貌及周边环境，为工程选址、场地规划、土方计算、方案优化提供直观的数据支持，很好地防止了设计上的错误以及施工过程中的风险。施工阶段采用周期性无人机建模更新实景模型的方式，可以对施工进度进行实时的监控，并且可以对施工质量进行检查和核查，还可以对施工偏差进行监测，从而达到施工全过程可视化控制的目的，及时发现并纠正施工中存在的问题。工程竣工之后，可以利用高精度模型来完成数字化竣工验收，取代传统的手工测绘验收方式，创建工程永久化的数字化档案，给后期的运维、改造、修缮提供数据支撑。

（三）国土空间规划与自然资源管理

国土空间治理和自然资源管控当中，它给资源普查、空间管控、动态监测赋予了高效的科技支撑。经由创建全域实景三维模型，可以准确复现土地利用状况、地形特性以及自然资源的散布情况，给国土空间规划制订、土地权属调查、用地审批、耕地守护赋予精确的三维数据。相比传统的二维调查方式，三维模型可以清楚地看出各种地类的空间界限和立体特点，从而大大提高资源核查、土地调查的准确率。利用周期性的建模数据对比，随时了解耕地占用、土地违法建设、资源开发、生态破坏等自然资源执法监管和生态修复的情况。

（四）文旅资源保护与开发

该技术给文旅资源数字化保护和创新发展赋予了核心技术支撑，尤其适合于那些不能再生的文物古迹和自然景观。对古建筑、古遗址等易损耗的文化资源进行高精度三维建模，可以全面地复现它的立体结构、外观纹理和细节风貌，形成永久的数字化档案，有效地防止由于自然风化、人为破坏造成的资源流失，从而达到文物资源长效数字化保护的目的。从文旅开发的角度来说，用实景模型来规划、改善景观和线路规划活动可以避免过度开发而造成的生态环境和人文资源破坏。根据三维模型可以开发出线上漫游、虚拟景区、数字展陈等产品，扩大文旅传播的途径，促进文旅产业的数字化升级。

（五）应急测绘与防灾减灾

无人机倾斜摄影建模机动灵活、响应迅速、不需要人员进场，是防灾减灾和应急救援的主要测绘方式。地震、洪涝、滑坡、泥石流等灾害发生之后，设备能够迅速到达受灾地区，迅速完成灾区全域三维建模，准确还原地形损毁、建筑坍塌、道路阻断、水域变迁等真实灾情，给灾情评估、救援路线规划、人员搜救、物资调配提供直观精准的空间数据支持。利用灾前灾后模型数据对比可以得到灾害造成的破坏范围和损失情况，为灾后重建规划、灾害风险评估、防灾预案修订等提供依据，提高应急处置和防灾减灾智能化、精准化的程度。

参考文献

[1] 黄腾达 . 手持 SLAM 激光雷达室内三维测绘精度测试 [J]. 地理空间信息，2024,22 (05):78-81.

[2] 林俊光 . 复杂街巷环境手持激光 SLAM 测绘误差来源分析 [J]. 矿山测量，2023,51 (04):45-49.

[3] 马茜芮，黄振华 . 无人机倾斜摄影测量技术在地籍调查中的应用 [J]. 测绘通报，2020 (S1):118-121.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License