

山地城市中倾斜摄影测量技术研究及应用

投稿人：罗忠平 翟辉龙 何应豪
《重庆市万州区规划设计研究院》

摘要：

2020年全国国土测绘工作会议提出新时期测绘工作“两服务、两支撑”的根本定位，明确要求大力推动新型基础测绘体系建设，构建实景三维中国。为实现地理场景搭建，城市级实景三维主要由倾斜三维模型作为基底数据。为满足万州区国土空间规划、自然资源调查监测、自然资源政务服务等工作需要，我院利用无人机倾斜摄影、模型单体化等技术手段，生产完成了包括实景三维模型、DEM、DOM等数据成果。在项目实施过程中创新技术、优化作业流程、严把质量关，确保项目的实施进度和成果质量。项目的实景三维成果在市政建设、城市规划、乡镇振兴、自然资源数据管理等多个领域得到有效应用，充分证明了实景三维数据的重要价值。

1 项目概述

1.1 项目背景

2019年6月，自然资源部印发《自然资源“十四五”规划编制工作方案》，提出在“十四五”期间大力推进实景三维中国建设，实景三维将在新型基础测绘中占据重要地位。高精度、高现势性的实景三维数据已成为城市规划、建设、精细化管理、三维展示与应用最基础的底层数据。为满足万州区的城市规划建设、审批管理等工作对实景三维产品等基础测绘产品的需要，我院受万州区规划和自然资源局委托，实施中心城区倾斜三维产品生产。

1.2 测区基本情况

万州区位于长江上游地区、重庆东北部，处三峡库区腹心，属长江上游区域中心城市，位于东经 $107^{\circ}55'22''\sim 108^{\circ}53'25''$ ，北纬 $30^{\circ}24'25''\sim 31^{\circ}14'58''$ 。东临云阳县，南接石柱土家族自治县和湖北利川市，西频忠县和梁平县、北界开州区和四川开江县，以丘陵和山地为主。2021年测区总面积112平方公里，位于中心城区。测区高差较大，主城区内交通便利，房屋密集，车流量大，建筑形态复杂且超高层建筑众多，给航摄工作带来较大影响。测区内天气以云雾天气为主，降水较多，航空摄影作业时间窗口稀缺。

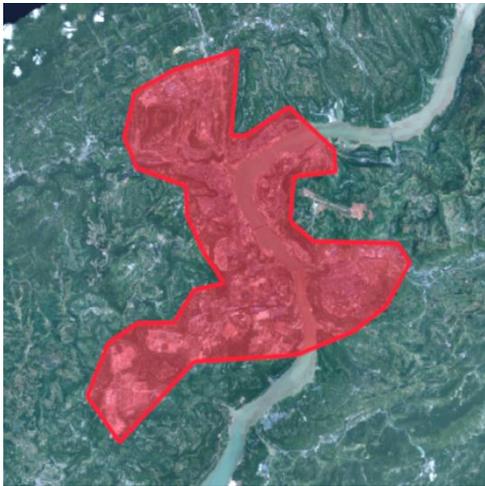


图1 测区范围



图2 测区特点

1.3 成果要求

基本精度指标：平面精度、高程精度应优于 0.05m。产品的纹理精度：无遮蔽的建筑物楼体外形清晰、表面光滑；能够精确表示各类树木的高度及轮廓；立交桥实景三维其正面及侧面纹理应当达到连续、外轮廓清晰的要求；此外，桥下纹理在最大程度上进行内凹表示；道路实景三维应当消除运动车辆对纹理的影响，使道路的纹理得到均匀、连续、合理的表示。

2 技术路线

2.1 技术路线

测区内海拔从 165 米至 650 米，超过 100 米的超高层建筑众多，为应对较复杂的测区现状和高精度的成果要求，本项目设计采用了飞马 D2000 搭载 D-OP4000 倾斜摄影模块的方式进行采集数据，以及相应的影像三维重建和模型单体化处理等技术手段。项目总体技术路线如图 3 所示。

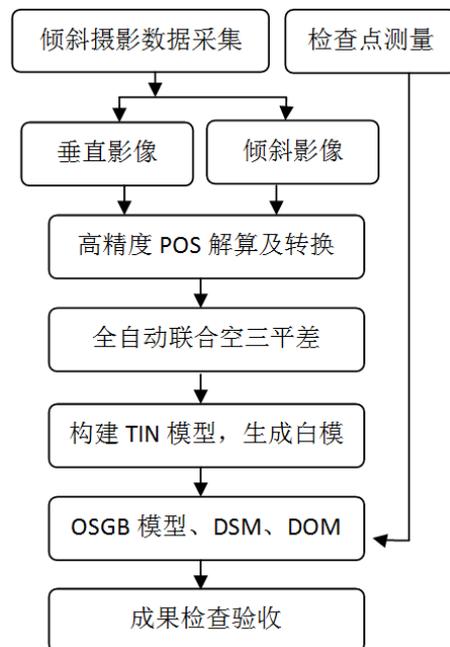


图3 项目实施技术路线

2.2 无人机及载荷

根据项目技术设计要求，项目组选取了飞马 D2000 型无人机作为飞行平台。通过在该平台使用 D-OP4000 倾斜摄影模块作为任务载荷，可以实现以下目标：

(1) D-OP4000 倾斜摄影模块采用全画幅微单相机凭借在感光面积上的优势，在相同像素条件下成像更好，成像质量更佳；

(2) 搭配 40mm/56mm 镜头组合，较长的焦距组合可以满足高落差等复杂环境下的高分辨率数据获取；

(3) 同样的机位下采用同样的焦距和参数进行拍摄，全画幅比 APS-C 画幅获得的照片视角要广，航摄高分辨率影像时可以使用更快的飞行速度；

(4) RTK 高精度实时定位，保持航线稳定性、减少像控点数量、无需地面基站；

(5) 变高飞行适应丘陵区域的地形起伏，满足数据采样率要求。

2.3 数据获取

2.3.1 检查点测量

为满足项目中多个环节的处理及检查要求，在测区内选取和实测一定数量的检查点。利用测区内原有高等级控制点求取平面转换参数和高程拟合参数，检查点外业测量和无人机 RTK 均采用千寻 RTK 网络服务，以满足项目基准的统一性。

2.3.2 针对复杂地形的航线设计

本项目设计测量范围内的地形复杂多变，为兼顾航飞的效率与质量，采用飞马无人机管家的智航线模块进行航线设计，该模块的智能化及自动化程度较高，航线设计主要依据以下原则：

(1) 航摄分区

分区内的地形高差不宜过大；分区内地物景物反差、地貌类型应尽量一致；

(2) 确定分区基准面高度

根据飞马无人机管家提供的 DEM 数据，统计每个分区内最大高程与最小高程，依据《低空数字航空摄影规范》的要求，以及分区地形起伏、飞行安全条件等确定分区基准面高度。

(3) 航线布设

敷设航线时根据分区 DEM，按照分区范围、设定的地面分辨率和重叠度，飞马无人机管家自动进行计算。虽然有仿地飞行能力，但在航线布设时候尽量根据地形特点保证航线直线平飞，减少航线节点，提高作业效率。在投影差突变的地方提高影像重叠度，以保证陡崖、高层建筑等出现明显漏洞。

2.3.3 无人机飞行作业

为满足成果精度要求，航线设计时采用了较高的数据采样率。倾斜摄影采用 2 厘米/像素的分辨率，建筑密集区域 80%和 70%的航向和旁向重叠度。在此条件下倾斜摄影作业的飞行高度为 213 米。无人机飞行时通过使用千寻网络实时 RTK 方式直接获取高精度 POS 信息。



图4 无人机飞行作业

2.4 数据处理

2.4.1 PPK RTK POS 融合解算

利用无人机管家“智理图”模块，进行网络 PPK 预处理，然后进行差分解算，在差分解算中结合各相机的安装角度、飞机姿态以及标记点打标时间进行偏心距改正，解算得到各个相机准确曝光点位置的 CGCS2000 大地坐标，通过坐标转换软件将 CGCS2000 大地坐标转换为 CGCS2000 直角坐标。

2.4.2 基于似大地水准面精化模型的高程转换

本项目 POS 数据采用“千寻位置服务”测量，所得 POS 成果高程为大地高 H ，需要将大地高转换为正常高 h ，二则之间的差异称为高程异常，利用我院在中心城区进行大面积平面和高程数据成果，选择曲面高程拟合得到像控点和 POS 的正常高。经过验证该方法获得的正常高精度满足大比例尺测图要求。

2.4.3 空三解算和三维实景模型构建

根据解算得到的高精度 POS 数据，以中心投影的共线方程作为平差的基础方程，将 POS 成果作为带权观测值，进行整体平差，求解每张影像的外方位元素。在完成影像空三解算后，利用 Context Capture 软件导入空三解算成果，经过影像密集匹配、密集点云构三角网、白模生成以及纹理映射等步骤完成三维实景模型。



图 5

2.5 精度评价

为验证本次建模的精度水平，在测区范围内均匀采集特征检查点，分别对模型进行平面、高程精度检核，精度统计见表 1。

表1 模型精度统计表

检测报告精度									
检查点	X坐标	Y坐标	高程	模型点	X坐标	Y坐标	高程	平面点误差	高程误差
kz167534***	.90053401***	.2650346.4370	kz167c534***	.87943401***	.2588346.5154	0.0220	0.0784		
kz140534***	.86413401***	.7530329.2742	kz140c534***	.82863401***	.6445329.2820	0.1141	0.0078		
kz142534***	.48093402***	.7760384.1310	kz142c534***	.48543402***	.7891384.1122	0.0138	-0.0188		
kz169534***	.11223402***	.7750291.9941	kz169c534***	.10603402***	.7783292.0112	0.0071	0.0171		
kz166535***	.59313402***	.6040260.0346	kz166c535***	.57673402***	.6016259.9785	0.0166	-0.0561		
kz158535***	.39153403***	.3690250.4661	kz158c535***	.38063403***	.3750250.3945	0.0124	-0.0716		
kz157535***	.22513403***	.2720183.5646	kz157c535***	.20833403***	.2754183.4227	0.0172	-0.1419		
kz155535***	.72783404***	.8070203.3469	kz155c535***	.72513404***	.7998203.3106	0.0077	-0.0363		
kz160535***	.14493403***	.8950184.4101	kz160c535***	.11043403***	.8896184.3793	0.0350	-0.0308		
kz165534***	.72113402***	.5440224.7148	kz165c534***	.70073402***	.5449224.6747	0.0204	-0.0401		
kz168534***	.96063402***	.8440299.0478	kz168c534***	.96833402***	.8320299.0834	0.0142	0.0356		
kz164535***	.68283403***	.4280235.8812	kz164c535***	.68653403***	.4072235.9516	0.0211	0.0704		
kz161535***	.19883403***	.8140221.5940	kz161c535***	.20023403***	.8125221.5662	0.0020	-0.0278		
kz162534***	.79143404***	.6870246.0718	kz162c534***	.79103404***	.6855246.0407	0.0015	-0.0311		
kz154534***	.19553404***	.1670184.2084	kz154c534***	.20123404***	.1709184.2251	0.0069	0.0167		
kz153534***	.38733404***	.7660191.4758	kz153c534***	.39793404***	.7568191.4434	0.0140	-0.0324		
kz147534***	.77343404***	.6250196.1730	kz147c534***	.78713404***	.6289196.1399	0.0143	-0.0331		
kz149534***	.85423405***	.5420221.0706	kz149c534***	.86473405***	.5459221.0995	0.0112	0.0289		
kz151535***	.28143404***	.5090278.3631	kz151c535***	.27833404***	.5098278.3480	0.0032	-0.0151		
kz152535***	.79983404***	.7080302.0396	kz152c535***	.78563404***	.7217302.0399	0.0197	0.0003		
kz163534***	.94463403***	.7860296.3627	kz163c534***	.96483403***	.7598296.4072	0.0331	0.0445		

				平面中误差		高程中误差			
				0.0300		0.0500			

经过计算得到，检查点平面中误差为 0.0300m，高程中误差为 0.0500m，模型精度满足项目设计书要求。

3 成果应用

为满足我区规划和自然资源局相关规划和项目审批要求，我院向中科图新定制了《空间信息三维辅助分析系统》，结合实景三维成果的高现势性、高精度的特点，在城市的各项建设管理工作中具有十分广泛的应用前景和较高的应用价值。

3.1 市政建设

实景三维模型能够精准反映现状底物地貌情况，因此可以为城市建设提供精确基础数据。我院生产的万州区中心城区的实景三维数据成果在高峰园市政道路修建工程中得到了应用。该工程在设计阶段利用 BIM 模型和实景三维模型叠加，因此可以实现工程多方案进行对比，精准评估项目与当前环境的协调性，进而可以达到优化设计方案整，提升设计质量的目的。



图6 实景三维用于城市道路建设工程

3.2 规划管理

在城市规划中利用实景三维数据辅助规划重点项目报建审批工作。通过将规划报建三维模型和现状的实景三维模型进行叠加展示，实现真实场景下的设计方案评审和对比，从而确保建筑之间能形成高低错落、疏密有致的城市空间形态，实现优化城市空间的目的。本项目的实景三维成果目前已用于万州区的重点项目规划报建工作，取得了良好的效果和社会效益。



图7 重点项目三维方案审批

3.3 乡村振兴

实景三维数据作为基底数据，结合实景三维建模，高精度高清晰的还原模型，可用于重点建设项目、重点区域的三维精细场景动态展示和高仿真三维可视化模拟，能以极具真实感的光影效果展示乡村振兴建设前的原始场景和规划后的效果场景（图8）。



图8 智慧乡村管理

3.4 自然资源管理

目前万州区正在搭建由智慧医疗、智慧交通、智慧物联等集合而成的智慧万州，计划将城市的地理实体数据、物联感知数据等融合于一体，根据需求构建出服务国土空间规划、自然资源调查监测、自然资源政务服务等的智慧基础数据，服务与自然资源管理。



图9 自然资源数据管理展示

4 总结展望

项目的顺利实施得力于 D2000 无人机和 D-0P4000 倾斜摄影模块在实景三维生产中的巨大优势。该设备操作性简便、飞行稳定、定位精准、数据获取效率高等特性，能有效满足各类地理场景生产需要。通过多个实景三维项目的实施，我院也得出了如下经验和期望：

(1) 利用千寻网络直接获取无人机的高精度 CGCS2000 大地坐标后转换为直角坐标，结合本地的水准面精化模型进行解算，并结合飞行姿态数据解算出每个相机单独的 POS 数据，有效提高了空三质量，大大提高了模型的精度，通过项目试验，能够真正实现免像控作业，提高工作效率。

(2) 典型的山地城市高差较大，地形起伏不平，利用全画幅、长焦距的航摄相机能够解决山地城市中超高层建筑三维模型破顶，同时也解决了由于投影差过大地面分辨率不足的情况。

(3) 实景三维生产流程中，影像三维模型重建和模型单体化耗时较长的生产环节，相比数据获取手段的高效率，后期处理的速度是当前实景三维生产中的瓶颈和短板。除硬件配置外，模型重建的算法优化、模型匀光匀色、自动单体化水平和效率均是当前亟待解决的技术难题。

(4) 实景三维成果在城市规划、建设、精细管理中均具有着非常广阔的前景，并且实景三维也是新型三维地理实体体系中的重要组成部分。作为各部门信息化统一的空间基底，搭建开放包容的数据格式，通用各部门各平台的数据资源，在各行业共同深化研究的基础上，深度融合发展将是实景三维的主要发展方向。