

无人机技术在城市建筑三维精细建模中的研究

刘威

瑞金市规划设计院

DOI: 10.12238/jpm.v6i12.8623

[摘要] 本文通过无人机正射摄影测量得到的空三点云进行贴近摄影航线规划，无人机按照贴近摄影测量航线进行数据采集，高效、精准地获取建筑物的摄影测量资料，应用摄影测量处理软件建立测区实景三维模型，用来解决常规倾斜摄影生产出的模型成果经常会出现凹凸不平、建筑物墙体扭曲、悬浮物等问题。同时利用多次采集影像和提高重叠率的方法解决在建模时出现的模型的重建完整率低、模型的空洞多或者模型缺失的问题，建立高精度模型。

[关键词] 贴近摄影，精细化三维建模，房屋测绘，无人机遥感技术

Research on Unmanned Aerial Vehicle Technology in 3D Fine Modeling of Urban Buildings

Liu Wei

Ruijin City Planning and Design Institute

[Abstract] This article uses aerial three-point clouds obtained from ortho photogrammetry by drones for close range photography route planning. Drones collect data according to the close range photography route, efficiently and accurately obtaining photogrammetric data of buildings. Photogrammetric processing software is used to establish a three-dimensional model of the survey area to solve problems such as unevenness, distorted building walls, and suspended solids that often occur in the model results produced by conventional oblique photography. Simultaneously utilizing multiple image acquisitions and increasing overlap rates to address issues such as low reconstruction completeness, numerous model holes, or missing models during modeling, and establishing high-precision models.

[Key words] Close to Photography, Fine 3D Modeling, House Surveying, Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing Technology

引言

近年来，信息化和智能化城市的建设要求越来越突出，数字城市、智慧城市和数字孪生城市的概念相继提出，城市形态的模拟也从传统的二维平面逐渐发展为可视化效果更好的三维立体。但传统的全站仪、经纬仪和三维激光扫描仪等人工测量手段面临着精度低、效率低、风险高、周期长、作业成本高等各种问题。

倾斜摄影测量技术的出现大规模提升了实景模型构建的快速发展，它可以同时从五个不同的方向：一个垂直方向、四个倾斜方向采集影像，相对于正射影像，愈加真实地反映地物的实际状况。但是倾斜摄影测量技术虽然在一定程度上弥补了传统摄影测量的诸多不足，但它在对于复杂的城市建筑是存在，对与水平面存在较大夹角的斜面目标，难以采集到有效影像数据。尤其建筑物遮挡立面和房檐之下均无法获取所需的影像信息，且摄影距离较远，所恢复模型成果的分率低，纹理信息也不完整，导致最终成果模型存在空洞、拉花等现象，影响模型整体成果的质量和精度^[1]。

在这种情况下，一种新的无人机遥感技术——无人机贴近摄影技术应运而生，这是2019年张祖勋院士提出这一概念，改变了无人机等高飞行方式，其无人机三维航线贴合目标表面，且视角随目标形状改变而变化。贴近摄影测量是继垂直摄影、倾斜摄影以来的第三种摄影方式，它以物体的“面”为摄影对象，属于面向对象的摄影测量，很好地融合了倾斜摄影测量的优势，通过近距离、多角度拍摄，获取多源高分辨率影像，提取高精度地理信息，能够还原目标地物的准确地理位置和精细结构，有效解决了当前倾斜摄影测量拍摄角度受限的问题。

1 无人机贴近摄影测量技术

无人机摄影测量技术是一种可以在低空范围内获取目标的高分辨率影像（厘米或亚厘米级），用于大比例尺测图、精细化三维城市重建、各种工程应用等需要的测量手段。而贴近摄影测量是一种新的摄影测量方式，它主要是利用倾斜摄影影像处理出的粗略模型，进行空中三角测量得到目标的高程和3D点云，然后生成精细化三维航线，精细化三维航线能让飞机贴近物体各个表面（但有所不同的是：近景摄影测量只是高空拍

摄垂直影像与倾斜影像的简单叠加，而贴近摄影是对被摄物体的每一个面进行近距离拍摄，仿佛一张网将目标完全笼罩，从而确保所有影像都是有效的，如图 1 所示。贴近摄影测量对影像的分辨率有更高的要求，这就需要无人机在极近的距离内对目标物进行拍摄。如果无人机的拍摄距离不够近，将无法满足影像分辨率的标准。该技术可以用于智慧城市建设、山体滑坡检测、工业检测、文物保护、农业检测等方面。



图 1 贴近摄影测量航线规划示意图

2. 数据采集工具

本次摄影采用大疆御 3M 无人机进行数据采集。该无人机采用了 MAV1C3E 的广角相机，拥有 4/3CMOS，2000 万像素，支持机械快门，避免果冻效应，免像控，可实现最快 0.7 秒间隔连拍，测绘作业效率大幅提高。低光环境，持续作业，MAVIC3E 广角相机的 3.3 MM 大像元和智能低光模式，大幅提升了低光环境表现，提高日间有效作业时长，适应更多作业场景。MAVIC3E 及 MAVIC3T 都配备了 1200 万像素高清长焦相机，支持最大 56 倍混合变焦，可远距离洞察目标。MAVIC3T 的热成像相机分辨率高达 640×512，支持点测温、区域测温、高温警报、调色盘及等温线等功能，可快速定位目标，辅助作业决策。MAVIC3T 的热成像相机和可见光相机可实现 28 倍联动变焦及连续变焦，便于高效比对，确认细节。巡航时间长达 45 分钟，有效作业时长及作业半径大幅提升。单架次可完成面积 2 平方公里区域的测绘作业。机身配备鱼镜头，可实现无盲区全向感知。还支持设置告警和刹停距离，灵活应对不同作业需求。飞行过程中，云台可以按前、中、后三向摆动拍摄，两条航线即可采集高精度三维模型，大幅提升倾斜摄影效率。支持网络 RTK、自定义网络 RTK 服务以及 D-RTK2 移动站，实现厘米级定位。

3. 航线规划

无人机具有起降灵活和操作方便等特点，被广泛用于执行各行业内的飞行任务，其航线规划方法是完成各飞行任务的前提和关键。一般情况下，无人机的航线规划方法需要生成一条满足飞行任务要求的全局路径，如到达指定目标或完成目标场景覆盖，同时需要在保障飞行安全、避免与障碍物碰撞的前提下，确定在一定条件下的最优航线解^[3]。

本文采取的是精细航线规划，不同于常规航线规划的地方在于——使用无人机遥控器进行常规航线规划，直接在卫星地图上框选勾画试验区，依据低空航空摄影测量规范，设置飞行高度，镜头朝向-90°（垂直于地面），航向重叠率 80%，旁向重叠率 70%。所得数据用于生成试验区低分辨率 DSM 及 DOM。而精细航线规划是在低分辨率 DSM 基础上，结合研究区实际情况，

进行精细航线规划，设置无人机航向重叠率 80%，旁向重叠率 90%，飞行高度（依照具体情况而定），设置镜头角度为垂直于观测面，贴着观测面飞行。

3.1. 拍摄距离约束

当相机参数固定时，无人机与重建目标的距离 d 越小，一张像片中包含的细节越多、影像分辨率越高，但是拍摄的面积就会越小，需要更多的像片才能覆盖完日标，花费的时间也就越多。所以应当首先根据需求确定拍摄距离，影像分辨率与拍摄距离的关系，如式（1）所示。值得注意的是，实际情况中斜面目标是有一定起伏的，但起伏相对于拍摄距离来说较小。实际情况中无人机离斜面的距离会在距离 d 附近小范围波动，但不足以引起影像分辨率产生巨大变化，不会影响最后模型的质量：

$$d = 10 \times GSD \times \frac{f}{\text{pixl_size}} \quad (1)$$

式中， d 为无人机与斜面之间的距离，m；GSD 为影像分辨率，表示单位像素对应的地面大小，cm/像素； f 为无人机镜头的焦距，单位为 mm； pixl_size 为像元大小，单位为 μm 。

3.2. 重叠度约束

为确保目标三维模型的完整性，采集的相邻影像间需有足够的重叠部分。在航线方向上相邻照片的重叠部分与照片长度的比值称为航向重叠度，相邻航线之间的相邻照片的重叠部分与像片宽度的比值称为旁向重叠度：

$$p_x = \frac{q_x}{l_x} \quad (2)$$

$$p_y = \frac{q_y}{l_y} \quad (3)$$

式中， q_x 为航向上相邻影像重叠部分长度，m； q_y 为旁向上相邻影像重叠部分宽度，m； l_x 为像片的长度，m； l_y 为像片的宽度，m； p_x 为航向重叠度； p_y 为旁向重叠度。

无人机拍摄照片的覆盖范围不仅受到拍摄距离 d 的限制，还与相机视场角有关。视场角的大小决定了相机的视野范围，视场角可分为水平视场角、垂直视场角。在航线规划中选择导入的航线，确定高度后对规划对象进行作业。存在空洞、缺失或无法进行拍摄的部分区域，使用手动补拍。



图 2 航线规划前后对比

4. 数据处理和分析

4.1. 原始数据预处理

大疆无人机每次航线任务结束后，均会将此次任务的相关数据保存至镜头内置 SD 数据卡中，形成单独的任务文件夹，文件夹中主要包括影像照片、RTK 定位信息、POS 姿态信息等数据文件。初步浏览文件夹，确定航拍地点、时间与试验任务相对应，查看照片是否清晰、连续，若有少量画面丢失、过曝、模糊或遮挡的照片，予以剔除以减少重建误差，如果残次照片

数量过大或关键点位缺失,则需考虑补拍甚至重拍;由于采集照片时间较长,且采集目标有较多反射面(玻璃),需要注意影像是否存在因为曝光不正常、色彩失真等情况,并对曝光不正常的相片进行修复。

4.2. 影像重建

将符合要求的图片导入建模软件中进行三位重组。在照片位置信息处核实是否存在遗漏拍或不合格的情况;如果存在,即刻对遗漏拍不合格区域进行局部补拍。然后依次进行:1)特征提取与匹配:利用计算机视觉算法,从影像中提取特征点,并在相邻影像之间进行特征点匹配,形成稠密的同名点集合;2)空间定位与相机姿态估计:通过空三解算技术,结合地面

控制点的坐标信息,计算相机的外方位元素(包括摄影中心的空间坐标和摄影姿态);3)三维点云生成:基于特征点匹配和空三解算技术,计算地面特征点的三维坐标,生成点云数据;4)三维模型构建:利用点云数据拟合和曲面重建算法构建观测对象的三维模型;5)纹理贴图:根据相机参数和原始影像,将纹理信息映射到三维模型上,提高模型的真实感;如图3所示;6)结果导出:将重建的三维模型导出为标准格式文件(如DSM、DOM、LAS等),以便在GIS、CASS、CAD和其他地理信息系统中使用。

4.3 结果分析

表1 长度误差统计表

线段	激光测距仪值/m	贴近摄影测量值/m	$\Delta 1/\text{mm}$	倾斜摄影测量值/m	$\Delta 2/\text{mm}$
L1-L2	73.272	73.271	-1	73.444	172
L1-L3	26.416	26.422	6	26.300	-116
L1-L4	17.676	17.669	-7	17.639	-37
L5-L6	1.210	1.215	5	1.095	-115
L2-L8	20.216	20.216	-3	20.226	10

本文通过对比标记点的实际长度与三维模型上的测量长度,实现模型相对精度的评定。其中,贴近摄影测量模型上量取的线段长度减去激光测距仪测量的实际长度记为 $\Delta 1$,倾斜摄影测量模型上量取的线段长度减去激光测距仪测量的实际长度记为 $\Delta 2$,测量数据如表1所示^[4]。

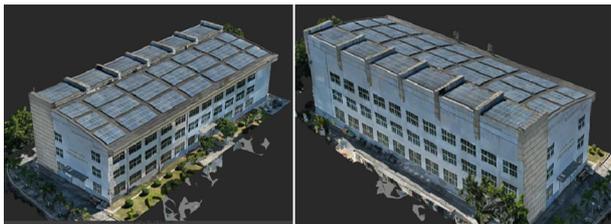


图3 三维实景模型

由表1可知,贴近摄影测量模型误差的最大值为7mm、最小值为1mm、中误差为2.19mm。倾斜摄影测量模型误差最大值为172mm、最小值为10mm、中误差为48.06mm。贴近摄影测量相比于倾斜摄影,其点位的相对精度得到了巨大的提升。在模型的精度与纹理精细度上,贴近摄影得到的模型相较于倾斜摄影测量得到的模型完整性更好、未出现拉花、纹理更清晰,无常规倾斜摄影生产出的模型成果出现的凹凸不平、建筑物墙体扭曲、悬浮物、空洞、飞点等问题,曝光准确、亮度适中。建筑物窗沿、瓷砖、管道、字体等清晰可见。最终模型与实际建筑相比所差无几。



图4 贴近摄影测量(左)与常规摄影测量(右)细节对比

5. 结语

本文基于无人机贴近摄影测量技术能采集房屋建筑物高精度的实时影像数据,完成了多视角影像高度自动化处理,利用图像处理和密集匹配技术自动完成识别和匹配地物特征点,生成数量庞大的三维点云数据,以真实影像进行纹理映射,构建房屋建筑物高精度、纹理丰富的实景三维模型,复现了房屋内外的空间位置、结构特征和纹理信息。该方法使建筑物立面的测绘工作更加高效和精确,能有效减少人力和时间成本,可以在建筑设计、工程施工、城市规划等领域,为决策和设计提供重要的数据支持。这种技术作为一种全新的摄影测量手段,在短时间内得到业内的广泛应用,它不仅可以用于精细化城市实景建模,而且在文物古建筑的保护修复、各种工程监测研究、地质等行业领域拥有广阔的应用前景。同时在高精度定位装置以及三维航线规划的灵活性方面还需要进一步提升性能,我们所需要的是更加便捷的、多样的规划航线,不仅可以是面状、带状,更需要向复杂的三维环绕目标发展。不可否认的是,该方法具有很强的实用性与应用前景,在不久的将来,贴近摄影测量技术必定会更深度地适配测绘行业的需求,在效率、效果、精度方面显示出绝对的优势。

[参考文献]

- [1]冯晖元,李欣,赵鹏.无人机倾斜摄影在实景三维精细化建模中的应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2025,(05):46-48.
- [2]张发岳,闫国云,马小虎,等.基于多层数据融合的无人机精细化三维建模研究[J].青海电力,2024,43(03):34-36.
- [3]王磊.无人机倾斜摄影测量立面贴近精细化三维建模[J].智能城市,2024,10(06):45-47.
- [4]李杨.基于无人机倾斜摄影测量的精细化三维建模及可视化[J].信息记录材料,2024,25(06):223-225+228.
- [5]宁朝阳,葛健,蒲春,等.基于无人机精细航线规划的山区高墩桥梁三维建模研究[J].公路,2024,69(05):147-152.