

基于多源数据融合建模的技术研究

李垦一

桂林理工大学, 广西 桂林 541000

DOI:10.61369/UAID.2025020024

摘要 : 倾斜数字航空摄影技术是目前应用最为广泛的实景三维模型重建方案,但由于航飞高度、拍摄角度等条件制约,在建筑密集、植被茂密等区域,航摄影像难以反映地物局部细节,致使重建的三维模型出现破洞、扭曲拉花的情况。为解决此类问题,采用无人机倾斜数字航空摄影技术,搭配地面近景摄影测量、三维激光扫描进行数据补充,可有效提高三维模型重建质量。

关键词 : 实景三维模型重建; 空地一体; 激光点云; 多源数据融合

Research on Multi-source Data Fusion Modeling Technology

Li Kenyi

Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541000

Abstract : Oblique digital aerial photography technology is currently the most widely used solution for real-scene 3D model reconstruction. However, due to constraints such as flight altitude and shooting angle, aerial images struggle to capture local details of ground objects in areas with dense buildings or lush vegetation. This leads to issues like holes, distortions, and blurring in the reconstructed 3D models. To address such problems, using UAV (Unmanned Aerial Vehicle) oblique digital aerial photography technology, supplemented by ground close-range photogrammetry and 3D laser scanning for data supplementation, can effectively improve the quality of 3D model reconstruction.

Keywords : real-scene 3D model reconstruction; air-ground integration; laser point cloud; multi-source data fusion

引言

近年来,随着新型基础测绘、实景三维中国建设、数字孪生、智慧城市等项目的落地推进,对实景三维模型的精细程度提出了更高的要求。倾斜航空摄影凭借多角度、高重叠的航摄影像,可高效获取城市级实景模型^[1-3]。但由于被摄物体遮挡,或结构复杂,导致模型成果存在扭曲拉花、破洞。对于航摄影像存在遮挡的区域可通过多角度补充拍摄,对于结构细小或镂空结构多的地物可通过三维激光扫描获取点云数据,实现倾斜影像、近景摄影、激光点云,空地一体的多源数据融合建模^[4-6]。

一、技术路线

以倾斜数字航空摄影为主体,搭配近景摄影测量、三维激光扫描为补充的空地一体多源数据融合建模的主要步骤如下:

- (1) 通过常规倾斜数字航空摄影,获取测区整体的倾斜航摄影像;
- (2) 根据项目要求,对重点对象,和倾斜航摄影像不满足要求的区域进行补充拍摄。拍摄方法包括:交叉环绕航摄、贴近航摄、地面拍摄;
- (3) 对结构复杂、镂空结构多的地物,进行三维激光扫描;
- (4) 进行空地一体、影像+点云的多源数据融合建模。

二、数据采集

(一) 倾斜数字航空摄影

相较于传统的航空摄影,倾斜摄影技术(Oblique Photography Technique)是在飞行平台上搭载多镜头或单镜头的航摄相机,可以从垂直、前视、后视、左视、右视等多个角度拍摄地物影像。倾斜航空摄影的优点是数据采集效率高、覆盖范围广、纹理信息丰富,能够快速获取大面积区域的影像数据。但其缺点也较为明显,在建筑物密集区域或植被茂密区域,由于遮挡问题,容易导致重建的实景模型出现空洞、扭曲、拉花和纹理缺失。

常规的倾斜航摄，通常采用五镜头或单镜头相机进行拍摄，五镜头的航线一般为“S”形航线，单镜头航线有五向航线、“井”字交叉航线，以及大疆自研的“智能摆拍”模式。

五镜头的“S”形飞行模式，是外业效率最高的航摄模式，通过集成的五镜头相机，同时拍摄前、后、左、右和下视五个方向的地面照片。但是该种航摄模式会有大量的冗余照片，并且硬件成本较高。单镜头的五向航向，是固定镜头方向，从五个方向（前、后、左、右和下视）对整个测区依次飞行五遍，是效率最低的航摄模式。“井”字交叉航线，类似两条“S”形航线以90°交叉布设，在地面分辨率、重叠度等其它参数不变的情况下，航线长度是“S”形航线的两倍，拍摄照片数量是五镜头的2/5，是一种折中方案。

“智能摆拍”模式根据用户划定的测区范围，自动生产航线及规划拍摄动作，在飞行过程中，自动控制镜头进行多角度拍摄，在测区内不同的航线阶段会有对应的摆动策略。图1为大疆“智能摆拍”模式大致的摆动策略。

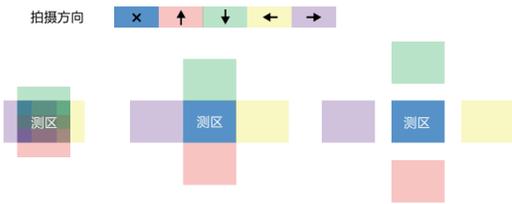


图1 智能摆动策略示意图

注：“x”表示下视方向。

受限于云台的机械摆动速度，“智能摆拍”的航飞速度不能过快。用户无法设置“智能摆拍”航线的飞行速度，而是由软件根据搭载的拍摄负载、飞行高度、重叠度等参数，自动设置航线飞行速度。在测区中间区域，由于镜头需要频繁摆动，因此飞行速度一般低于5m/s。而在其他的航摄模式下，飞行速度一般在10m/s ~ 15m/s。因此较低的飞行速度，会导致“智能摆拍”的外业效率低于五镜头的“S”形航线模式，但单镜头的多角度摆动拍摄，相较于五镜头倾斜摄影，大幅减少了照片数量，因此内业处理效率提高了20% ~ 50%。

倾斜航空摄影的飞行高度，一般根据航摄仪器的相关硬件参数，根据需要的地面分辨率，按如下公式计算而来：

$$H = \frac{f \times GSD}{a}$$

式中：

- H —— 摄影相对航高，单位为 m；
- f —— 镜头焦距，单位为 mm；
- GSD —— 地面分辨率，单位为 m；
- a —— 像元尺寸，单位为 mm。

若测区面积较大，或者地形起伏大，则需要综合考虑测区的地形起伏、设备通讯距离、飞行安全、地面分辨率等条件，将整个测区拆分为多个航摄子区。以某个项目测区为例，该测区地形复杂，既有山区地形，又有山谷平地，测区内还有多个电塔、通讯基站这类会影响飞行安全的地物。综合考虑测区内的地形、地

物，最终航摄分区如图2所示：



图2 航摄子区分布图

所有的航摄子区组合起来应能覆盖整个测区范围，此外各相邻的航摄子区之间，还应保留一定的重叠范围，每一航摄子区的航向飞行基线和旁向飞行基线，均应超出本航摄子区的边界范围，超出范围的基线数，按如下公式进行计算：

$$N = \frac{\tan \theta}{2 \tan \frac{\beta}{2} \times (1-P)}$$

式中：

- N —— 理论超出值，单位为条；
- θ —— 倾斜相机角度，单位为度（°）；
- β —— 倾斜相机视场角，单位为度（°）；
- P —— 航向或旁向重叠度。

（二）补充拍摄

在完成整个测区的倾斜航空摄影后，结合项目需要，对重点区域，或倾斜航摄影像中被遮挡的地物，进行补充拍摄。常见的拍摄模式有：交叉环绕航摄、近景摄影。其中近景摄影技术，又可以分为自动近景摄影和手动近景摄影两种，在实际应用中，通常采用贴近被摄物体的航线飞行，来实现自动近景摄影。而手动摄影主要应用在无法进行航飞的区域对地面物体进行手动拍摄。

1. 交叉环绕航线

交叉环绕航线，是通过多个交叉的圆形航线覆盖需要的航摄区域，每个圆形航线上根据需要，设置一定数量的拍照点，各拍照点均匀分布在各自对应的圆形航线上，并且拍照时，每个拍照点都朝对应的圆心方向倾斜摄影，而每个环绕航线之间，又保持一定的重叠范围。交叉环绕航线如图3所示：

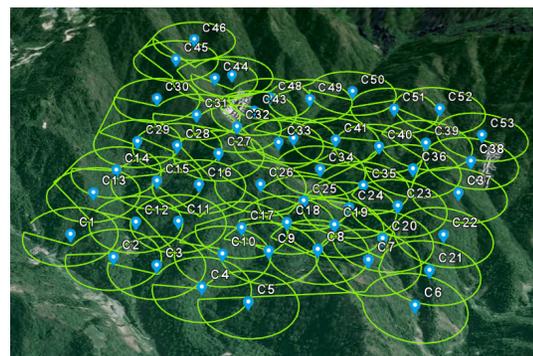


图3 交叉环绕航线示意图

交叉环绕航线，也可以作为整个测区的倾斜航摄方案。都由于目前交叉环绕航线的仿地变高功能较弱，虽然不同的圆形航线

可以设置不同的飞行高度，具备一定的仿地变高功能。但每个圆形航线只能设置成一个统一的飞行高度，所以在地形复杂或建筑密集的区域，环绕航线的飞行半径就不能设置的太大，因此为了保证飞行安全，就只能减小航线半径。但如果环绕航线半径设置过小，则需要大量的圆形航线才能覆盖整个测区，在分辨率、重叠度等参数不变的情况下，就会增加整个测区的航线长度，致使外业飞行效率过低。因此在实际应用中，往往将其作为重点区域的补充拍摄手段。

2. 贴近航线

根据被摄物体的形状、尺寸，有多种贴近航摄方法：

(1) 单点环绕航线

单点环绕航线是以被摄物体的水平中心作为圆心，根据被摄物体，设置合适的环绕半径，实现对某一物体或区域的多层环绕航线，单点环绕航线如图4所示：

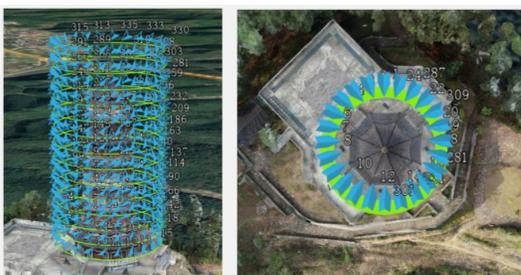


图4单点环绕航线示意图

(2) 贴近航摄

若被摄物体的水平截面不适合圆形环绕，则可根据被摄物体的形状设置多边形贴近航线，生成平行于被摄物体水平轮廓线的航线，如图5所示：



图5多边形贴近航线示意图

除了根据导入的边界范围生成航线外，还可以根据物体粗糙或稀疏点云，生成贴近航线，如图6所示：

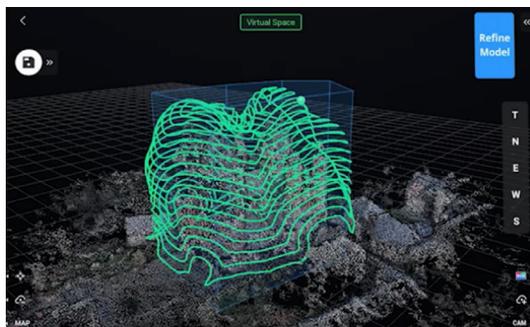


图6基于稀疏点云的贴近航线示意图

此外，还有只针对某一个平面的贴近航线，如被摄物体为山坡或只需要针对物体某一侧面进行精细化建模，就可以使用坡面航线模式。坡面航线是生成一个矩形被摄面，根据需要设置被摄面的长宽尺寸、垂直倾角，可形成完全垂直或带有一定坡度的坡面航线，如图7所示：



图7坡面航线示意图

3. 地面补拍

类似建筑底层，由于树木、线路，或行人车辆等因素干扰，无法进行航摄的区域，可以采用地面拍摄的方法作为补充。目前地面拍摄的设备很多，专业的有手持式带三轴云台的数码相机、集成惯性导航功能的拍照设备，此外传统的数码相机、运动相机，甚至普通的手机也能进行地面拍照。

地面拍摄相较于航空摄影，不受空域条件制约，更灵活便捷，但也需要注意拍照的焦距、分辨率、重叠度等因素。仅凭拍摄人员的感官估计，地面拍摄的重叠度往往不如航线自动拍照的重叠度准确、稳定，如果拍摄的地面照片重叠度过低，若不满足内业处理要求，则可能会导致空三构网失败。因此在地面拍摄的过程中，尤其应注意照片重叠度，如图8所示：

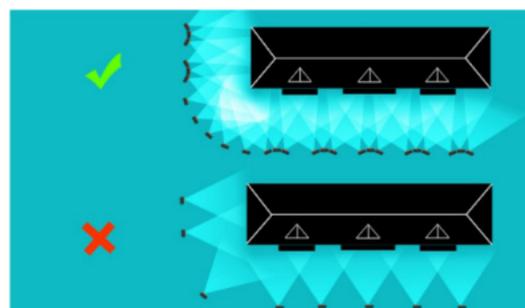


图8地面拍摄重叠度

此外，近距离拍摄的照片应与航摄影像有足够的公共内容，便于内业处理数据时进行匹配融合。而且和航摄影像的分辨率不应差异过大，应做好衔接过渡，如图9所示：



图9近景摄影的衔接过渡

(三) 三维激光扫描

三维激光扫描，是通过发生激光脉冲，获取物体表面的点云

集合，点云数据主要包含 X、Y、Z 坐标和反射强度等相关信息。三维激光扫描可直接获取物体表面的坐标信息，相较于摄影测量，更适用于弱纹理，或镂空结构、细小结构等复杂物体的三维建模。此外，在不考虑点云赋色的情况下，三维激光扫描可以不受光照条件的限制，即使在光照条件差的环境下，也能对地物进行激光扫描。

根据扫描方式的不同，三维激光扫描技术可以分为机载三维激光扫描、车载三维激光扫描、架站式三维激光扫描和手持式三维激光扫描。机载三维激光扫描适合对地物顶部进行大面积的点云扫描，车载则适合对道路沿线的地物进行点云扫描，架站式和手持式的激光扫描一般用于对建筑内部，或小范围、高精度的点云扫描，其中架站式的激光扫描，是精度最高的激光扫描方式，在有效测程内，点云精度可达毫米级。

三、数据处理

以倾斜数字航空摄影的数据作为基础数据，进行初始空三，获取覆盖整个测区的空三成果。在此基础上，融合各种补充拍摄的影像数据，如环绕航线、贴近航线、地面拍摄的影像数据。

其中环绕航线、贴近航线的融合较为简单，目前主流的航测无人机基本都带有 POS 信息（Positioning and Orientation System，定位定向系统），在机载 POS 信号正常的情况下，倾斜航空和贴近航摄获取的航摄照片都能有厘米级别精度的位置信息。

而地面拍摄的影像数据，可能由于没有位置姿态信息，或者位置姿态信息的定位精度不高，因此在完成局部空三后，只能获取独立坐标系下的坐标数据，需要通过手动指定连接点的方式，将局部空三成果和基础空三成果进行配准，再根据航摄影像和地面影像的公共区域，进行数据融合。

三维激光扫描获取的点云数据，在和影像数据进行融合之前，应先进行预处理，点云预处理主要包括：点云解算、配准平差、降噪、抽稀和绝对定向。在完成预处理后，再将点云数据导入软件中，和影像数据进行融合处理。

在整个数据处理过程中，空中三角测量（Aerial Triangulation）是核心环节，其本质是通过同一地物点在不同重叠影像中的同名像点，计算得到相邻影像的相对位置关系，实现影像数据的相对定向。通过少量的地面控制点或仅基于影像自身的定位信息，将相对定向的自由网转换到真实的大地坐标系下，实现绝对定向。空中三角测量的计算过程大致可分为：数据准备、内定向、相对定向、绝对定向、区域网平差五个核心步骤。

而融合点云的数据处理，则可以根据导入的激光点云数据，将其作为空三处理时的已知条件，将点云作为额外观测值，通过平差优化，提高相机位置和姿态的解算精度。此外，在模型重建时，点云数据还可以作为 Mesh 模型的约束条件，强制三角网贴合

点云表面，并保留点云的几何特征。

四、模型精细程度

如图 10 所示，这是一个包含倾斜航空摄影、贴近航摄、地面拍照的空地一体影像数据融合建模的项目。

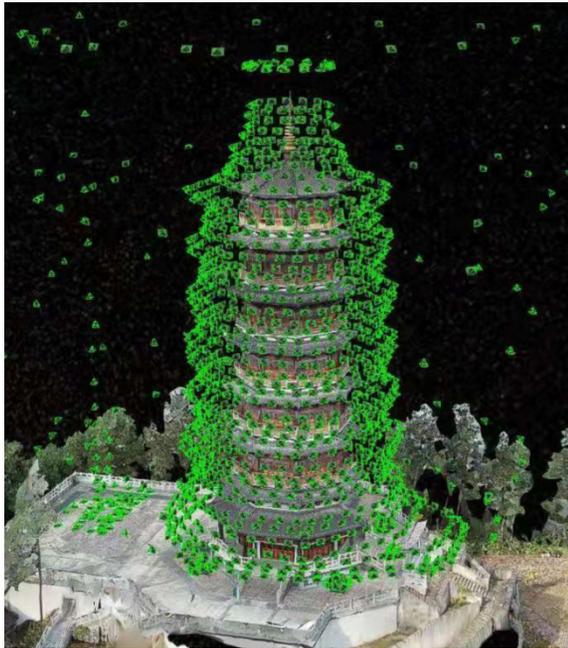


图 10 空地一体影像数据

倾斜航空摄影，只有从上至下的拍摄角度。而包含近景摄影的空地一体化的融合数据，能够对地物实现多角度、多层级的拍摄，从而获取传统航测无法拍到的细节特征（如屋檐下、建筑内部）。



图 11 屋檐下方的建筑模型



图 12 门洞内部的建筑模型

由于三维激光扫描能够获取物体表面详实的点云数据，因此相较于只有影像数据的重建模型，能够更详细的反映物体的几何

特征。此外，由于三维激光扫描可以直接获取物体表面点云，对弱纹理的物体，点云数据也能够显著提高空三计算的成果质量。如下图所示，左侧为基于影像数据完成的重建模型，右侧为影像数据和三维激光扫描的点云数据融合建模的重建模型，右侧的模型能够更为精确的反映物体表面的细小结构。

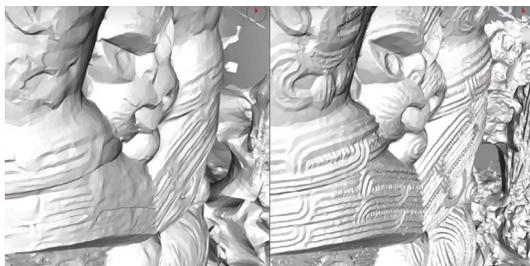


图 13 影像数据和影像、点云融合数据建模对比图

五、结论

倾斜航空摄影、近景摄影（贴近航摄和地面拍摄）、三维激光扫描的多源数据融合建模，是解决单一数据源局限、实现高精

度三维场景重建的一种方法。但多源数据融合建模，目前仍存在着几点瓶颈：

近景摄影的外业效率低，难以适应大规模场景；

数据量庞大、对内业处理的硬件配置有较高要求，数据处理耗时长，建模效率低；

部分数据的配准、特征识别，需要人工干预，依赖手动选点；

设备成本高，尤其是三维激光扫描设备的成本较高。

而高斯泼溅（Gaussian Splatting）是近年来计算机图形学和三维重建领域备受关注的核心技术，其核心思想是通过一组三维高斯函数（高斯椭球）来表示和渲染三维场景，在保证高视觉质量的同时实现实时渲染性能，该技术显著改善传统实景三维模型中建筑边缘锯齿、植被细节丢失等问题，尤其在镂空结构（如电线塔）的变现上优势突出，同时也能基于影像数据和点云数据进行融合建模，是目前实景三维模型重建的一个热门课题。

参考文献

- [1] 孙宏伟. 基于倾斜摄影测量技术的三维数字城市建模 [J]. 城市勘测, 2014, 37(01): 18-21.
- [2] 王琳, 吴正鹏, 姜兴钰, 陈楚. 无人机倾斜摄影技术在三维城市建模中的应用 [J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(12): 30-32.
- [3] 周晓敏, 孟晓林, 张雪萍, 弥永宏. 倾斜摄影测量的城市真三维模型构建方法 [J]. 测绘科学, 2016, 41(09): 159-163.
- [4] 卞敏, 徐亮, 骆元鹏, 周晓波, 赵慧峰, 杨化超. 空地一体精细化三维模型构建方法 [J]. 测绘通报, 2019(09): 83-86.
- [5] 何原荣, 陈平, 苏铮, 王植, 李权海. 基于三维激光扫描与无人机倾斜摄影技术的古建筑重建 [J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(06): 1343-1352.
- [6] 李晓斌, 林志军, 杨玺, 景行, 文习鹤. 基于激光扫描和倾斜摄影技术的三维实景融合建模研究 [J]. 激光杂志, 2021, 42(08): 166-170.