

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.040

基于模板匹配的光伏电站快速自动化三维建模方法

梁石,王超,韩东,施晓东,朱峰

(中国电子科技集团公司第二十八研究所,江苏 南京 210007)

摘要:光伏电站占地面积大,传统重建方法因耗费大量人力物力而难以适用于整个光伏电站的构建,结合无人机技术和摄影测量学,提出一种针对光伏电站由粗到细的三维重建系统。该系统利用无人机硬件进行数据采集,随后依据无人机的空间定位与三角测量技术,借助具有重叠度的影像数据,快速构建出粗略的三角网格模型。在此基础上,通过重复性检测和特征匹配并进行模型优化,进一步生成纹理清晰、细节丰富的精细实景三维模型,从而实现光伏电站的高效三维重建。实验结果表明:所提方法能够有效应用于大范围光伏电站的快速三维重建,且重建结果精度高,满足城市数字化模型的精度要求。

关键词:无人机;倾斜摄影;三维重建;模型优化;光伏电站

中图分类号:TP391.7 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)02-0206-09

Fast Automated 3D Modelling Method for Photovoltaic Power Plants Based on Template Matching

LIANG Shi, WANG Chao, HAN Dong, SHI Xiaodong, ZHU Feng

(The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China)

Abstract: Given the challenge to constructing entire photovoltaic power stations due to extensive area covered by photovoltaic power stations and high consumptions of labour and resources by traditional reconstruction methods, this paper proposes a coarse-to-fine three-dimensional reconstruction system for photovoltaic power stations by integrating UAV technology and photogrammetry. The system utilizes UAV hardware for data acquisition, followed by rapid construction of a preliminary triangular mesh model based on the spatial positioning of the UAV and photogrammetric triangulation technology, using image data with a certain degree of overlap. Subsequently, through repetitive detection and feature matching, and model optimization, a detailed and realistic three-dimensional model with clear texture is generated, thereby achieving efficient three-dimensional reconstruction of the photovoltaic power station. Experimental results indicate that the proposed method proposed can effectively apply to the rapid three-dimensional reconstruction of large-scale photovoltaic power station and the reconstruction results have high accuracy, which meets the accuracy requirements of urban digital models.

Keywords: UAV; tilt photography; 3D reconstruction; model optimization; photovoltaic power station

0 引言

随着城市化进程的加速和对清洁能源需求的增加,光伏电站作为可持续发展的太阳能转换电能的重要基地,其规模不断扩大,尤其是城市屋顶光伏等分布式光伏系统的大量新建。这些光伏设施不仅为城市提供了清洁能源,也逐渐成为城市环境的重要组成部分。因此,快速、高效地对光伏电站进行三维建模,对于城市的数字化管理、能源规划以及光伏电站的运维监控具有重要意义。

对光伏电站进行三维重建能够有效获取真实场景的实物模型,这不仅有利于后续光伏电站的

相关参数计算,例如棚顶的阵列排布、阵列前后间距的设计等,还为电站的智能化运维提供了重要支持。然而,传统的人工建模方法不仅耗费大量人力、物力,而且难以满足快速建模的需求。此外,由于光伏电站的特殊性,如,大规模重复结构(光伏面板阵列)和复杂的地形环境,对建模精度和效率提出了更高要求。现有技术在处理这些复杂场景时,往往存在精度不足或效率低下的问题。

近年来,随着无人机摄影测量技术的发展,基于倾斜摄影测量构建三维模型的作业方式正在智慧城市等领域发挥巨大的作用。倾斜摄影测量采用多相机系统拍摄,可以同时获取物体的多角度

第一作者简介:梁石(1988—),男,湖北鄂州人,高级工程师,硕士,研究方向为指控系统、战术作战及态势显示,ls200201020@163.com。

影像及物体侧面精细纹理信息,处理获取的多角度影像,最终可生成带有真实纹理信息的实景三维模型,在国民经济各领域获得广泛应用。

本文利用无人机倾斜摄影测绘技术对光伏电站进行了三维模型的重建,为后续光伏电站的参数分析提供具体的实物模型。针对渔光互补式光伏电站勘测要求和使用场景,设计由倾斜摄影云台相机 Zenmuse P1 和 DJI M300 RTK 无人机飞行平台组成无人机倾斜摄影系统,采集到具有一定重叠率的影像数据后,经过无人机空间定位和三角测量技术得到粗略的初始模型,再通过重复性检测和特征匹配进行优化,得到纹理清晰、细节丰富的精细实景三维模型。该系统对渔光互补式光伏电站进行测试勘察,重建区域三维模型并与光伏面板实际尺寸进行比较以检验模型精度。

1 相关工作

利用倾斜摄影测绘技术构建三维模型时,在无人机飞行器中布置多台传感器,捕获不同角度定义重叠的图像数据,每张图像使用匹配算法还原其在拍摄时的空间位置和姿态,将二维图像数据转换到三维空间,进而建立具有空间和地理属性的实体三维模型。这种方法通常用于建立大面积的三维模型,因为它易于使用,高效且价格低廉^[1]。

应用于倾斜摄影的三维重建软件也使用了计算机视觉技术。常用的三维建模软件有街景工厂、Pix4Dmapper、PhotoScan 和 ContextCapture (原 Smart3D)。

基于无人机的三维重建技术有着广泛的应用研究。崔瑶瑶等^[2]利用无人机倾斜摄影测绘技术快速创建准确、清晰的三维模型,提高了工作效率,也为不动产测绘提供了一种新的思路。王保国等^[3]为寻找到最佳的三维规划方案,整合了无人机倾斜摄影测绘技术和仿真模拟规划方案的三维模型,对每个方案进行了分析对比。TOPRAK 等^[4]在弗里吉亚地区使用无人机倾斜摄影测绘技术,对多处的遗迹和古迹建立三维模型,该模型可以确定裂缝、封闭和复杂的表面状况并进行仿真分析,这将有助于恢复和保护文化和历史遗址。莲蓉等^[5]利用航空摄影测量测得大范围的数据,再使用近景摄影测量补充细节,创建了山城重庆的三维模型,并介绍了物理单体化和逻辑单体化以及单体化的优缺点,随后使用不同的平台进行三维模型的创建并进行了对比。王勇等^[6]发现无

法将建筑单个地从整体的三维模型分离出来并应用于 GIS 进行下一步操作,通过对已有单体化方法的研究,提出了一种通过在三维模型上进行三角面片的切割,从而将单个模型从整体三维模型分离出来的单体化方法。董潇等^[7]将 Skyline 三维可视化平台与虚拟现实技术相结合,打造扬州市数字信息系统平台,以三维模型为基础,实现三维场景快速导航、查询等功能。崔静等^[8]通过 SuperMap7C 三维可视化平台,将实际三维模型与社区信息相结合,建立了三维社区信息综合管理平台,使社区在智慧化和自动化的方向上迈出了第一步。三维重建在数字化城市建模中有着非常重要的应用需求。

无人机倾斜摄影测绘技术已经应用于不同的行业之中,同时随着行业的需求不断细分和个性化,促使对实景三维模型的建立往精细化和多样化的方向发展。

2 三维建模

在本节中,本文将对提出的三维建模方法进行详细的介绍。图 1 展示了本文提出的基于模板匹配的光伏电站三维建模流程,主要包括以下几个关键步骤。

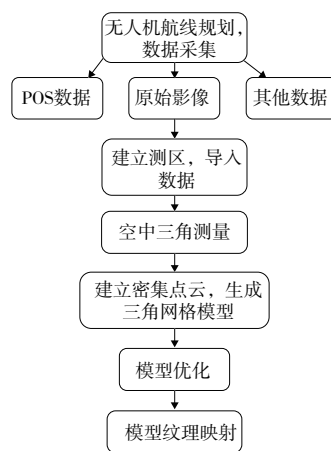


图 1 三维模型重建流程图

1) 数据采集: 基于无人机倾斜摄影系统, 按照规划航线采集多角度影像数据并记录每张图像的位置和姿态信息 (POS 数据)。

2) 初始模型构建: 通过空中三角测量技术, 利用影像数据的重叠部分进行特征点提取和匹配, 计算出影像的空间位置和姿态, 再通过网格化处理, 快速生成粗略的初始三维点云模型。

3) 模型优化: 针对光伏电站中大量重复的光伏阵列结构, 通过二维投影和边界检测算法, 识别

重复模式,提取最小结构单元,确定重复结构之后利用 PPF 特征描述子进行粗配准,结合 ICP 算法进行精配准,将提取的重复结构与实际模型进行拟合,优化模型精度。

4) 模型纹理映射:将采集的高分辨率影像数据映射到优化后的三维模型上,生成带有真实纹理的精细实景三维模型。

这一流程通过模板匹配和特征优化,有效解决了光伏电站大规模重复结构的建模难题,提高了建模效率和精度。

2.1 基于 ContextCompare 的光伏电站初始建模

基于航测区域,进行航线规划和相关参数设置,倾斜航测采集的数据包括各拍摄点的多角度影像信息和对应的 POS 数据,经过空三加密和模型渲染,最终获得初始的光伏电站模型。

1) 航线规划及参数设置

光伏电站无人机巡检航线规划流程如图 2 所示。首先对巡检区域进行划定,之后根据巡检区域设置相机参数、航线高度和速度、重叠率等任务参数,设备即可自动生成巡检航线如图 3 所示,图中的黄线即为自动生成的航线(本刊为黑白印刷,疑问之处请咨询作者)。

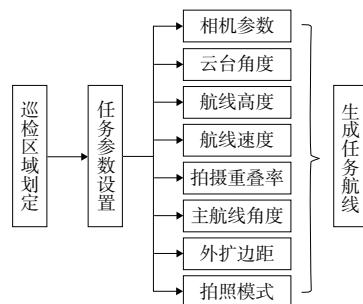


图2 无人机巡检航线规划流程

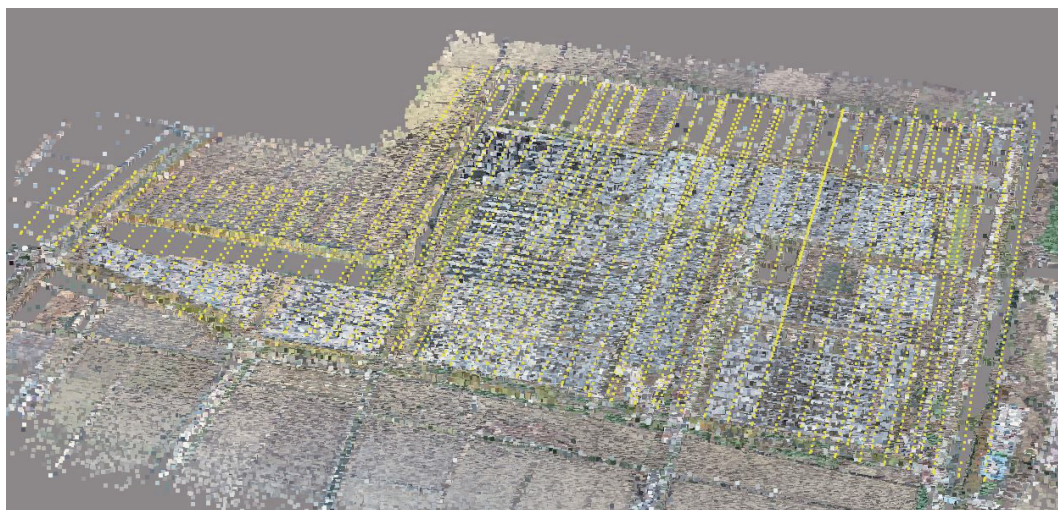


图3 光伏电站倾斜摄影航线规划

倾斜摄影测绘技术所获得的影像分辨率的高低很大程度上取决于无人机飞行的高度,通过飞行高度和地面分辨率的关系,可计算出最佳的飞行高度,其计算公式如下:

$$\frac{a}{D} = \frac{f}{h} \Rightarrow h = \frac{f \cdot D}{a} \quad (1)$$

式中: h 为无人机相对航高; f 为相机的焦距; a 为像元尺寸; D 为影像的地面分辨率。通过这个公式就可以根据地面情况自动调整飞行高度,从而获得合适的影像数据。

2) 无人机位姿获取

在无人机飞行拍摄的过程中,无人机内置的 GPS 定位系统和云台相机稳定器分别记录拍摄每张图像时的位置信息和云台相机的拍摄角度并存

储下来。如图 4 所示, E_x 、 E_y 、 E_z 为地心地固坐标系, B_x 、 B_y 、 B_z 为导航坐标系,分别获得在各个坐标系下的值,即可得到 POS 数据(位置、姿态)。

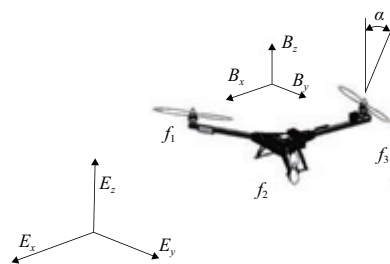


图4 无人机位姿获取

GPS 定位技术可以实时确定无人机的位置,利用地面控制系统控制无人机,监控无人机的飞

行状态,使无人机遵循预定的航线飞行,确保采集数据的准确性。本文利用信息技术打造一个数据处理平台,对航拍图像进行处理,并利用所得数据进行模拟,以提高数据分析能力。所获得无人机位姿信息,用于下一步的空中三角测量计算,并最终完成三维模型^[9-10]的建立。

3) 空中三角测量

空中三角测量就是在立体摄影测量中根据少量的野外控制点在室内进行控制点加密,求得加密点的高程和平面位置的测量方法。空中三角测量由识别图像特征、特征点匹配、点云初值化和误差优化计算4个部分组成。

识别图像的特征是指在图像中找到具有代表性的像素点并使用描述性算子来描述这些点。具体来说,使用 SIFT (scale-invariant feature transform) 算法^[11]对特征点进行筛选。该算法在面对光线变化、缩放、旋转以及透视、仿射变换和噪声等条件下的具备良好的稳定性与抗性,这对于光伏电站复杂光照条件下的影像处理尤为重要。在实际操作中,SIFT 算法首先构建高斯差分(DOG)尺度空间,通过检测图像在不同尺度下的极值点来获取潜在特征点。每个潜在特征点都对应一个响应值,该值反映其稳定性和显著性。本研究设定响应值阈值为0.04,以此过滤掉低对比度区域的特征点。因为这些区域(如光照较暗或纹理相似部分)的特征点稳定性欠佳,易在后续处理中引入误差,剔除它们有助于提升特征点的整体质量。

特征点匹配是将对应图像中具有一定相似度的特征点相互对应,并一一配对。倾斜摄影图像必须具有高度的重叠,因此重叠区域表现出许多相同的特性。计算相似度的方法主要有两种:一种是根据候选点的描述通过阈值过滤算子之间的距离;另一种是使用聚类算法寻找相似性。匹配过程中不可避免地会出现误匹配点,严重影响模型精度。为此,本研究采用了双重检查机制来提升匹配准确性。一方面,结合 RANSAC(随机抽样一致性)算法剔除误匹配点,设置合适的内点阈值。RANSAC 算法通过随机抽样,多次选取部分特征点对拟合模型,依据内点阈值判断其他特征点是否符合模型。误差小于内点阈值的点被认定为内点,否则视为误匹配点并剔除。另一方面,利用极线几何约束进一步筛选。极线几何约束基于双目视觉原理,从不同角度拍摄同一物体时,两幅图像中对应的特征点存在特定几何关系。

在光伏电站影像匹配中,满足该约束的特征点对更可能是真实匹配的,以此进一步去除误匹配点,为后续模型的构建提供更可靠的数据支持。

点云初值化是利用特征点之间的对应关系,计算特征点得到三维坐标的过程。根据小孔成像原理,像平面内的像素点、物点和焦点满足以下关系:

$$Z \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} R & T \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: Z 为相机坐标系下点到相机光心沿光轴方向的距离,也就是深度值; K 为内参矩阵; f 为相机焦距; u_0 、 v_0 为相机成像平面的中心位置; $\begin{bmatrix} R & T \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}$ 为外参矩阵; R 、 T 分别为旋转矩阵和位移矩阵; X_w 、 Y_w 、 Z_w 为实物点的坐标; u 、 v 为像素点坐标。在点云初值化的过程中,图像中的特征点经过矩阵运算转换为实际空间中的三维坐标并建立联系。

在图像模型中,现实空间中的物点和像素点之间存在线性关系,从不同角度拍摄被摄体时,相机的焦点点、现实空间中的物点和像素点之间存在外极几何约束,如图5所示。

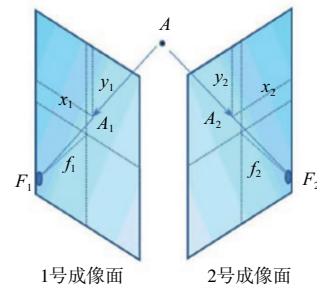


图5 基于两视图的实物点坐标计算原理

在不同位置拍摄的两种图像对应的焦点位置 F_1 、 F_2 ,这里像素点 A_1 、 A_2 指向同一物点 A ,因此在极线平面 F_1AF_2 上存在如下关系式:

$$A_2^T K_2^{-T} E K_1^{-1} A_1 = 0 \quad (3)$$

式中: A_1 、 A_2 分别为像素点 F_1 、 F_2 的坐标 (x_1, y_1)

和 (x_2, y_2) ; K_1, K_2 分别为两相机的内参矩阵; E 为本质矩阵。本质矩阵中有未知数,所有的未知数都可以通过应用 8 组以上的特征点对来解决。然后,使用 SVD 分解,获得相机之间的相对位置,并计算每个特征点的三维坐标,重合的点组越多,计算的精度越高。

4) 网格化

经过空中三角测量获取各个特征点的三维坐标后,采用 Delaunay 三角剖分算法将这些点云数据连接成三角形网格,以形成初步的三维表面。具体来说,对于输入的三维点云,首先从中选取 3 个不共线的点作为初始三角形,再按照 Delaunay 条件(即三角形的外接圆内不包含其他点)逐步添加新的点,并更新三角形。如果新加入的点违反 Delaunay 条件,则重新调整三角形的连接关系(通过边翻转操作)。通过 Delaunay 三角剖分算法,能在保证三角形质量的同时尽可能避免狭长三角形的出现,确保构建的三角网格表面能较好地反映模型的几何形状。随后,通过平滑和滤波等方法对三角网格模型进行处理。这里采用高斯滤波(核大小为 3×3)对三角网格表面进行平滑处理,在保留主要几何特征的同时去除离群点。最后,对生成的三维初始模型进行精度验证,将其与已知的实地测量数据进行对比分析,检查模型的精度。对于发现的误差或异常区域,通过手动调整来确保模型的准确性和可靠性。

2.2 模型优化

通过观察初始模型,发现光伏电站在布局上具有很高重复度,为了提高模型建立的效率,可以在点云模型中提取出重复的模式和最小结构单元,获得模型的特征与对应点云特征后,检索实体模型,进行形状拟合。

1) 重复结构检测

为了降低后期的重复性检测难度,提高效率,将点云投影到二维平面上进行检测。投影之后将得到二维平面上代表着一个个物体的一组组点,根据二维平面的坐标得到每组点云在平面上的边界。

初始模型中光伏阵列与其他物体有着显著的不同,而光伏阵列不仅具有同样的边界,而且其排列也具有一定的规律性。于是提出一种基于二维平面的边界重复结构检测算法,从而将对平面点云的检测转换为对边界形状(矩形)的检测。使用无向图来表示点云边界的拓扑结构,假设一个

集合 φ 包含 3 个元素:矩形的中心 c 、矩形的宽度 w 和高度 h ,即 $\varphi = \{c, w, h\}$ 。将这一集合作为一个顶点,然后搜索每个顶点的邻近顶点,并将它们连接起来,如此便构成了一张无向图,即点云边界假设集合,为 $F = \{\Psi, T\}$ 。

为了方便地说明,将重复结构检测的过程类比为标记问题。给出一组集合 Ψ (投影的点云边界)和一组有限的标签 B (重复的模式),然后遍历每个集合 $\varphi \in \Psi$,找到与其对应的标签 $b_\varphi \in B$,使得目标函数 $T(b)$ 取得最小值。

目标函数定义:每一组模式 B 有其对应的标签函数 b ,对于每一个图顶点 $\varphi_i \in \Psi$,如果 $b_i = \theta$,则将 φ_i 归入对应模式 B 中;如果 $b_i = \text{null}$,则将 φ_i 标记为异常值。为了便于说明,将 B 中的模式 θ 和判定为 θ 的标签视为一体。一个特定的标签 b 有对应的配对模式:

$$\Theta(b) = \{\theta: \theta \in B, \exists \Psi, \text{s.t. } b_i = \theta\} \quad (4)$$

由此,可以通过对 b 进行推理来提取模式主子图。在推导模式主子图提取的目标函数时,考虑的因素主要为图模式的几何误差、规律性和复杂性。首先,同一模式下的点云边界应该具有相似的几何外形,即它们的几何误差应该尽可能地小。其次,图顶点的排列应该是有规律的,即横向或纵向排列。最后,为了简化和优化复杂度,模式的数量应尽可能少。于是设计如下的目标函数:

$$T(b) = \sum_{i=1}^q G_{\varphi_i}(b_i) + \lambda \sum_{\varphi_m, \varphi_n \in \Psi} w_{m,n} M(b_m, b_n) + \gamma |\Theta(b)| \quad (5)$$

式中: G, M 分别为几何相似性和模式的规律性; $w_{m,n}$ 为 b_m, b_n 之间的权重函数,根据 b_m 和 b_n 之间的关系或特征,赋予不同的权重。这样,模型在优化时能够更灵活地处理不同模式之间的关系; $|\Theta(b)|$ 为模式的数量; λ, γ 为权重参数。

式(5)第一项表示图顶点 φ_i 和模式 b_i 之间的几何误差,表达为

$$G_{\varphi_i}(b_i) = \begin{cases} 1, & b_i = \text{null} \\ d(\varphi_i, b_i), & b_i \in B \end{cases} \quad (6)$$

式中 $d(\varphi_i, b_i)$ 表示图顶点 φ_i 和模式 b_i 的区别和排列规律程度。

其中几何误差可用如下公式表示:

$$d(\varphi, b) = \alpha \left[\frac{(w-b_w)^2}{\min^2(w, b_w)} + \frac{(h-b_h)^2}{\min^2(h, b_h)} \right] + \beta \left(\frac{|(c-b_c) \cdot b_v|}{b_l} - \left[\frac{|(c-b_c) \cdot b_v|}{b_l} \right]^2 \right) \quad (7)$$

式中: w 、 h 和 c 分别为假设集合 φ 的宽度、高度和顶点 φ 的中心; b_w 、 b_h 、 b_c 、 b_v 和 b_l 分别为模式 b 的宽度、高度、中心、定向矢量和对齐间隔; α 和 β 为两个权重参数。前一项会减小图顶点之间的几何误差,后一项则增加图顶点有规律的排列。

式(5)第二项 $M(b_m, b_n)$ 则是根据任意两个属于 Ψ 的图顶点 φ_m 和 φ_n 的模式而定义的。利用了 Potts 模型^[12], 如果 $b_m \neq b_n$, 则 $M(b_m, b_n)$ 为 1, 否则为 0。权重函数 $w_{m,n}$ 进一步评估 φ_m 和 φ_n 的排列规律。观察可知, 排列方式相同的图顶点则更有可能属于同一个模式, 所以有了如下的权重函数:

$$w_{m,n} = \exp - \frac{\min^2[(c_m - c_n) \cdot X(c_m - c_n) \cdot Y]}{\delta^2} \quad (8)$$

式中: X 、 Y 为坐标轴上的单位向量; c_m 、 c_n 分别为图顶点 φ_m 和 φ_n 的中心; δ 为常数, 经验值为 2。从公式可以看出, 权重函数增大了具有相同排列方式的图顶点归属于同一模式的概率。

在实际应用中, 模式的数量是没经验值的, 为了降低模式的数量对模式主子图提取的复杂度^[13], 式(5)增加了第三项, 此处采取的是基于迭代图割技术的 α 拓展算法^[14]最小化等式。

2) 模型生成

在拟合过程中, 首先采用 PPF 特征描述子进行粗配准。PPF 的特征由点集中一对点之间的距离与其 3 个向量之间夹角组成, PPF 特征匹配过程如下:

对点 $m_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $m_2(x_2, y_2, z_2)$, 构成一个 PPF 特征, 两点连线中点 O 作为该局部坐标的原点, i_c 、 j_c 、 k_c 为局部坐标系 3 个轴向上的单位向量, 则局部坐标系可由下列矩阵表示:

$$S_c = \begin{bmatrix} i_c & j_c & k_c & \frac{(m_1 + m_2)}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

建立局部坐标系后进行坐标变换。取实体模型中一点 m_c , 局部坐标系为 (x_c, y_c, z_c) , 世界坐标系为 (X_c, Y_c, Z_c) , 假设 i_c 、 j_c 、 k_c 在世界坐标系下为

$$\begin{cases} i_c = (X_{ic}, Y_{ic}, Z_{ic}) \\ j_c = (X_{jc}, Y_{jc}, Z_{jc}) \\ k_c = (X_{kc}, Y_{kc}, Z_{kc}) \end{cases} \quad (10)$$

则可得到局部坐标系与世界坐标系的转换关系如下:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ic} & Y_{ic} & Z_{ic} & \frac{(X_1 + X_2)}{2} \\ X_{jc} & Y_{jc} & Z_{jc} & \frac{(Y_1 + Y_2)}{2} \\ X_{kc} & Y_{kc} & Z_{kc} & \frac{(Z_1 + Z_2)}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = S_c \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

同理, 取点云中对应点 m_r , 局部坐标系为 (x_r, y_r, z_r) , 世界坐标系为 (X_r, Y_r, Z_r) , 可得到局部坐标系与世界坐标系的转换矩阵 S_r 。

当实体模型和点云所提取点的 PPF 特征相同时, 则根据特征建立的局部坐标系也相同, 局部坐标系中构成特征点的坐标也相同。据此可以得到实体模型和点云之间的转换关系:

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} = S_r S_c^{-1} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = T_c^r \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中 T_c^r 为对应点从实体模型到点云的变换矩阵。进行多次的 PPF 特征匹配, 从中选出一个最优的转换矩阵, 通过矩阵变换可以将数模和实测点云初步完成粗配准。最后采用 ICP 算法来最小化点与模型之间的距离, 从而实现模型到点云的精配准, 最后重建得到精细度更高、纹理更清晰的三维模型。

3) 模型渲染

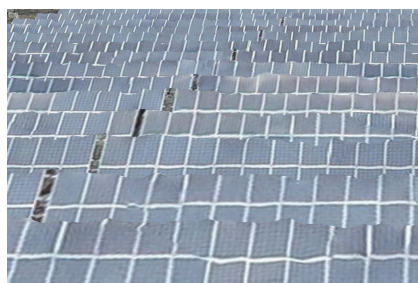
完成模型优化后, 模型渲染成为生成高质量实景三维模型的关键步骤。模型渲染的目的在于为优化后的模型赋予更真实、直观的视觉效果, 使其能够更精确地反映光伏电站的实际状况, 满足各类应用需求, 主要涵盖以下几个环节。

a) 纹理映射: 借助特征匹配与模型优化所确定的对应关系, 将无人机采集的高分辨率影像数据精确地映射到三维模型表面; 以模型表面的某一三角形面片为例, 依据其顶点在影像中的对应像素位置, 运用特定算法计算该面片内各点的纹理值; 通过这一过程, 模型表面能够呈现出逼真的颜色和纹理, 清晰地展现出光伏面板、建筑物和道路等元素的细节特征。

b) 消隐处理: 为准确呈现光伏面板等物体之间的遮挡关系, 采用深度缓存算法 (Z-buffer 算法) 进行消隐处理; 在渲染场景前, 预先初始化一个与屏幕分辨率相同的深度缓存数组, 数组中的每个元素对应一个像素的深度值; 在渲染过程中,

对每个模型面片进行处理,计算其在每个像素位置的深度值,并与深度缓存中已有的值进行比较。若当前面片的深度值小于深度缓存中的值,则更新深度缓存,并绘制该面片;反之,则不绘制该面片,以此方式去除被遮挡的部分,使模型的显示效果更加符合实际视觉感受。

c) 渲染和后期处理:完成上述步骤后,针对光伏电站中不同材质的物体,如光伏面板、支架、建筑物和地面等,对其反射率、表面粗糙度等材质参数进行细致调整,从而完成模型的渲染;随后,对渲染结果进行后期处理,包括色彩校正、对比度调整和细节增强等操作。通过这些处理,进一步提升模型的视觉效果,使其更加贴近真实场景。在图 6 中,对优化后的模型与初始模型进行了对比展示。



(a) 初始模型



(b) 优化模型

图 6 优化前后对比示意图

3 实验结果与分析

本实验的电站占地面积 0.84 km^2 , 飞行面积 1.3 km^2 。航线采用分区域布设,各区域平均航高设定为 100 m ,航向重叠率为 80% ,旁向重叠率为 80% ,地面影像分辨率为 0.03 m ,实验花费时间为 3 d 。对比传统人工测绘方法,该系统适用于中小区域(5 km^2)的快速勘察建模,同时其价格低廉,成本控制在 3 万元以内,尺寸小,方便携带,可灵活地应对各种环境。针对本文的实验地点与情况,考察市场情况后,选取大疆的 Matrice 300 RTK (以下简称 M300 RTK) 和 Zenmuse P1 作为本次实验的设备。根据实验当天的情况,设置合适的

参数,规划航线,高效地完成数据采集,获取高清图像数据。

3.1 硬件平台

本系统首先使用无人机采集光伏电站的图像数据,后续针对所采集到的图像进行一系列处理,所采用的无人机为大疆的 M300 RTK,如图 7 所示。M300 RTK 搭载了大疆先进的飞控系统、视觉与红外感知系统和摄像头,兼容 360° 避障雷达,并具备多方位的定位和避障,适合在大范围、复杂条件下稳定完成飞行任务。



(a) Matrice 300 RTK



(b) Zenmuse P1

图 7 数据采集系统

本文中与 M300 RTK 搭配使用的云台相机是 Zenmuse P1,如图 7(b)所示。Zenmuse P1 是一款具备高性能与多用途特性的航测负载。它配备 4500 万像素全画幅图像传感器,可精准捕捉高分辨率的图像细节。 35 mm 的相机焦距,既能营造良好景深,又能提供广阔视野,充分契合多样化的航测需求。其集成的全局机械快门,能在快速移动中保持稳定拍摄,有效消除运动模糊。支持 DJI DL 卡口,则为镜头的选择与更换提供了灵活空间。

在云台设计上,多轴云台赋予了相机强大的灵活性。平移角度可达 $\pm 320^\circ$,俯仰角度范围为 $-130^\circ \sim +40^\circ$,横滚角度在 $-55^\circ \sim +55^\circ$,即便在复杂环境中,也能实现精准定位。凭借这样的优势,相机可轻松实现多角度摄影,完成倾斜摄影任务,获取全面且高清的图像数据。

3.2 模型构建结果

通过无人机的空间定位与三角测量技术快速构建初始模型,再通过重复性检测和特征匹配,得到纹

理清晰的实景三维模型具有完整的表面信息。

图 8 和图 9 对光伏电站的三维模型和实景卫星图进行了对比。其中,图 8 所示的三维模型展示了 ContextCapture 软件在光伏电站重建中的卓越性能。该模型不仅精确捕捉了光伏面板阵列,还细致地再现了电站内的建筑物和道路网络,有助于深入理解电站的空间布局和功能划分。尽管部分水体因光反射导致的虚假倒影造成了模型扭曲和空洞,需要通过手动调整来优化,但整体模型质量仍然很高。



图 8 光伏电站模型

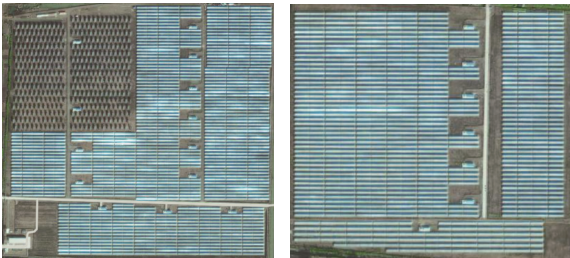


图 9 光伏电站实景卫星

光伏面板作为电站的关键部分,在模型中得到了逼真的呈现。基于真实航拍影像的纹理贴图,不仅清晰细腻,而且色彩和纹理的还原度极高,使得光伏面板的表面细节和电池片清晰可见,为电站的运维管理提供了有力支持。

本文将实际光伏面板的长宽与 ContextCapture 重建出来的三维模型进行了对比,从而检验三维模型的精度。与光伏电站的工作人员沟通得知光伏面板实际尺寸的长×宽为 1 650 mm×992 mm,随机选取模型中 10 个光伏面板利用无人机设备进行三维重建,根据重建结果计算光伏面板的长与宽,并与实际的长宽值进行对比与分析,结果汇总如表 1 所示误差较低,在毫米级范围内。其中光伏面板在长度上的绝对误差范围为 5~18 mm,平均绝对误差为 10.2 mm,相对误差范围为 0.30%~1.09%;宽度上的绝对误差范围为 2~18 mm,平均绝对误差为 6.7 mm,相对误差范围为 0.20%~1.81%。

光伏面板在长度上的误差大于宽度是因为在三维点云生成的过程中,统计滤波等方法可以用于滤除由镜头畸变、虚焦和拍摄精度等设备因素和天气条件、光衍射、物体表面反射等环境因素引起的距离主体较远的噪声,但主体点云附近的噪声点难以去除。这些噪声点也会通过三角化不规则网(TIN)拟合出对象的表面模型,使得模型表面难以平滑,部分位置会出现扭曲,导致测量模型尺寸时出现系统误差。对象测量尺寸越大,系统误差在这方面的影响越大。

表 1 光伏面板长宽对比

编号	长度			宽度		
	长度/mm	绝对误差/mm	相对误差/%	宽度/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
1	1 660	10	0.61	1 010	18	1.81
2	1 645	5	0.30	989	3	0.30
3	1 639	11	0.67	1 002	10	1.01
4	1 656	6	0.36	998	6	0.60
5	1 643	7	0.42	982	10	1.01
6	1 663	13	0.79	994	2	0.20
7	1 665	15	0.91	988	4	0.40
8	1 655	5	0.30	987	5	0.50
9	1 662	12	0.73	986	6	0.60
10	1 668	18	1.09	995	3	0.30

4 结语

本文开发了一套无人机图像基础的三维重建

系统,该系统采用由粗到细的策略进行建模。系统硬件部分由倾斜摄影云台相机和无人机飞行平台构成,而软件部分则依托于无人机的空间定位

数据和空中三角测量技术来实现。这一集成化的解决方案旨在通过自动化流程,从原始图像数据中生成高精度的三维模型。在某光伏电站的应用实例中,该系统通过无人机采集的图像数据,成功重建了电站的三维模型。通过对比光伏面板的实际尺寸与模型测量值,对模型精度进行了验证,其结果满足光伏电站的测绘精度标准。本文所提出的三维重建系统展现出在城市快速建模领域的应用潜力,能够为城市规划和管理提供精确的三维数据支持。

参考文献:

- [1] 卞敏,徐亮,骆元鹏,等.空地一体精细化三维模型构建方法[J].测绘通报,2019(7):83-86.
- [2] 崔瑶瑶,杜甘霖,张玉侠.无人机倾斜摄影三维建模在农房确权登记发证项目中的应用[J].测绘通报,2017(增刊1):192-194.
- [3] 王保国,张润科.无人机倾斜摄影测量在规划方案比选中的应用[J].测绘通报,2018(1):143-146.
- [4] TOPRAK A S, POLAT N, UYSAL M. 3D modeling of lion tombstones with UAV photogrammetry: a case study in ancient Phrygia (Turkey) [J]. Archaeological and Anthropological Sciences, 2019, 11(5): 1973-1976.
- [5] 连蓉,丁忆,罗鼎,等.倾斜摄影与近景摄影相结合的山地城市实景三维精细化重建与单体化研究[J].测绘通报,2017(11):128-132.
- [6] 王勇,郝晓燕,李颖.基于倾斜摄影的三维模型单体化方法研究[J].计算机工程与应用,2018,54(3):178-183.
- [7] 董潇,钱金戈.基于 Skyline 的扬州市三维可视化系统的设计与应用[J].测绘与空间地理信息,2016,39(5):172-175.
- [8] 崔静,陈贵珍,康光清.基于 SuperMap 的三维社区管理系统的设计与实现[J].测绘与空间地理信息,2017,40(7):117-119.
- [9] 朱国强,刘勇,程鹏正.无人机倾斜摄影技术支持下的三维精细模型制作[J].测绘通报,2016(9):151-152.
- [10] 陈嘉琦,张寅,王淑晴.基于 Smart3D 的倾斜影像三维建模研究[J].河南科技,2018(25):16-19.
- [11] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [12] YUAN J, BAE E, TAI X C, et al. A continuous max-flow approach to potts model [C]// Computer Vision - ECCV 2010. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 379-392.
- [13] LI H D. Two-view motion segmentation from linear programming relaxation [C]// 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2007: 1-8.
- [14] ISACK H, BOYKOV Y. Energy-based geometric multi-model fitting [J]. International Journal of Computer Vision, 2012, 97(2): 123-147.

收稿日期:2025-02-19

(上接第 191 页)

- [3] DELEBARRE C, WAGNER V, PARIS J Y, et al. An experimental study of the high speed interaction between a labyrinth seal and an abradable coating in a turbo-engine application [J]. Wear, 2014, 316 (1/2): 109-118.
- [4] PYCHYNSKI T, HÖFLER C, BAUER H. Experimental study on the friction contact between a labyrinth seal fin and a honeycomb stator [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 138: 062501.
- [5] 刘振波. 封严涂层高温高速磨损试验技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [6] FARAOUN H I, SEICHEPINE J L, CODDET C, et al. Modelling route for abradable coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(22/23): 6578-6582.
- [7] PYCHYNSKI T, DULLENKOPF K, BAUER H J. Theoretical study on the origin of radial cracks in labyrinth seal fins due to rubbing [C]// Volume 7A: Structures and Dynamics. San Antonio, Texas, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2013: 1-11.
- [8] YANG Y C, CHANG J Q, MI Z G, et al. Experimental and numerical study on the influence of rubbing force on radial crack initiation in labyrinth seal fins [J]. Aerospace, 2022, 9(12): 831.
- [9] SEICHEPINE J, FARAOUN H, PEYRAUT F, et al. Numerical simulation of the thermo-mechanical behaviour of thermally sprayed abradable coatings [C]// International Thermal Spray Conference ", " Thermal Spray 2008: Proceedings from the International Thermal Spray Conference. Maastricht, The Netherlands: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS - Verlag GmbH, 2008: 1027-1031.
- [10] 汤铁钢, 刘仓理. 高应变率拉伸加载下无氧铜的本构模型研究 [C]// 第十届全国冲击动力学学术会议论文集. 太原: [s.n], 2011: 101.
- [11] 段海涛, 杜三明, 张永振, 等. 高速干滑动条件下钢/铜摩擦副摩擦磨损表面摩擦热规律研究 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(10): 40-42, 99.
- [12] B 布尚 (BHARAT BHUSHAN). 摩擦学导论 [M]. 葛世荣, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007.

收稿日期:2023-06-14