引文格式：史晟恺,陈燕,张麟. 一种面向古塔监测的无人机倾斜建模的航线规划[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):92-95. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.06.020

一种面向古塔监测的无人机倾斜建模的航线规划

史晟恺[1]，陈　燕[1]，张　麟[1]
（1. 上海市测绘院，上海 200063）

摘　要：针对无人机面向古塔的倾斜监测提出了一个精细化的三维航线规划方案，代替传统面向地形测绘的五向飞行的规划模式。该方案采用无人机环绕加上升的飞行方式，结合近景的摄影测量，获得被测建筑更加精细的三维构造并使得不同高度部分的精度更统一，尤其是像古塔一类有一定高度且占地较小的建筑。以上海现存13座古塔为研究对象，控制包括重叠度、飞行高度、镜头焦距、离被测建筑距离等参数进行摄影测量及模型构建，最后将该方法得到的成果和五向飞行航测法以及传统测量得到的数据对比。实验表明，该方法相较之前对建筑物侧面特征点的提取更精准，构建表面纹理更精细，有效提高了无人机建筑物倾斜监测的精度。

关键词：无人机；古塔；倾斜监测；航线规划
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）06-0092-04

Air Route Planning of UAV Oblique Modeling for Ancient Pagoda Monitoring

SHI Shengkai[1], CHEN Yan[1], ZHANG Lin[1]
（1. Shanghai Surveying and Mapping Institute, Shanghai 200063, China）

Abstract: In this paper, we presented a refined 3D air route planning scheme for the oblique monitoring of ancient towers employing unmanned aerial vehicles (UAVs). The proposed approach utilized the flight mode of UAV orbiting and ascending, combined with close-range photogrammetry, to obtain a more refined 3D structure of the measured building and made the accuracy of different height parts more uniform, especially for buildings like ancient pagodas that had a certain height and occupy a small area. Taking the 13 existing ancient pagodas in Shanghai as the research objects, we carried out photogrammetry and model construction by controlling parameters including overlap degree, flight altitude, lens focal length, and distance from the measured buildings. Finally, we compared the results obtained by this method with the data obtained by the five-way flight aerophotogrammetry method and traditional measurement. Experimental results indicate that this method, compared to previous approaches, achieves more accurate extraction of architectural features on the building's sides, produces finer surface textures, and effectively enhances the precision of UAV oblique monitoring of buildings.

Key words: UAV, ancient pagoda, oblique Monitoring, air route planning

古塔作为一种历史遗产属于保护建筑，不宜在建筑物表面安装棱镜供仪器测量，这种处理方法可靠，但维护相关测量物是个难题。三维激光扫描仪能够在不改变古建筑外貌的前提下获得测量数据，但是它的效率仍然有提高空间，对顶部的信息采集会出现遗漏。

无人机摄影测量的出现简化了地形测绘，五向飞行方法能够捕捉给定区域内物体的表面外观信息[1]。通过在测量现场建立清晰的控制点并在照片中标记相应的位置，可有效地控制平面测量的精度，但是缺点在于其每次飞行的飞行高度都是均匀的，这导致面向古塔这种单一有高度的建筑时，现有模型用作倾斜监测会显得精度不统一，可靠性差，即使有优化的仿地飞行，也只能对没有超高层结构的区域进行映射。当面对高度较大的建筑，这2种方法都容易导致底部和顶部的精度不一致[2-3]。对此采用无人机三维螺旋环绕的作业方式应用于古塔倾斜监测会比传统五向飞行更有优势，其在不同高度上均能够拍摄到离被测古塔固定距离的照片用于建模，最终使得模型更加精细，精度更加均匀，重要信息更加全面，从而提升无人机应用于古塔倾斜监测的精度及可靠性。

1　相关背景及理论

上海市文物局认定的在上海行政区范围内的古塔共有13座，主要分布在郊区。这些古塔的监测维护以及三维模型的构造，对保护上海历史人文有着重要意义。无人机对这类项目已经有多年应用，其三维航线规划是无人机摄影测量的关键技术，用于确定无人机在三维空间中进行拍摄的飞行路径，进而完成对特定

第一作者简介：史晟恺（1992—），硕士研究生，工程师，主要从事工程测量、摄影测量工作，E-mail：346340968@qq.com。

目标的拍摄作业。对单体建筑的航空摄影测量法主要有单航带飞行法、五向飞行航带法、仿地飞行法、航点飞行法等，针对古塔测绘的以航带法为主[4]，但是会面临精度不统一的风险。

1.1　五向飞行航带法

单镜头的无人机利用五向飞行进行航带拍摄是常用的摄影测量方法，通常应用于地理测绘、制图、城市规划等领域，它是由一个正射航带和周围4个方向的侧视航带组成。通过连续拍摄地面图像，并记录相机的位置、姿态等信息，从而获取地表特定区域的三维信息[5]。它的优点是软件成熟，参数设置简单，航线路径较为安全。且因为在同一个平面上，模型同一高度的分辨率及精度较一致。但它的模型对建筑侧面的结构、纹理还原有限。

1.2　三维螺旋环绕航测法

本文采用三维螺旋环绕的作业方式进行无人机测绘。三维螺旋环绕是以单个位置点或者建筑物作为中心，以一定半径和俯仰角对中心进行环绕飞行，同时无人机在竖直方向上也在缓慢爬升[6-7]。在飞行过程中，相机会根据自身镜头的焦距、飞行半径大小以及设定的重叠度进行定时拍摄。

在使用只有一个摄像头的无人机时，通常需要考虑以下3个方面的航线规划：首先要规划侧面和顶面的飞行路径；其次要设计建筑物面与面交汇点的飞行路径；最后还需要对底部边缘的飞行路径进行优化，这样才可以做到对建筑物的观测和数据采集尽可能不遗漏[8]。环绕时候镜头始终对着被拍摄建筑，周边地形要素的照片会相对较少。如果周边的像控点比较多，可以适当手动操作补拍一些正射图像来扩充刺点数量。

古塔虽然类似于圆柱体，但是塔身依旧有棱角，存在面和面之间的接边问题。该方法下，无人机相对于被拍摄物体的表面是正射拍摄，所以在建筑物面的衔接处，可以选择手动加密拍摄或者设置一个俯仰角的情况下再次进行三维螺旋环绕飞行。由于无人机有安全高限制，纯采用水平视角的三维螺旋环绕飞行的方式，在古塔和地面衔接处的拼接容易出现因图片不足而产生的拟合错误，影响最后的倾斜测量成果，所以建议采用两次交叉飞行或手动拍摄补全这一区域。

2　材料与方法

2.1　材料选择

无人机建模需要用到的操作软件有无人机航线规划和内业建模及数据处理几个部分[9]。无人机的航线规划和操控利用移动端DJI FLY应用来完成，所选的软件需要有二次开发的功能，开发人员可以把三维飞行的路径模型写入程序中，然后作业人员根据要求计算出相应的路径曲线参数并上传进软件就能够在地图上选定作业区域并规划相应的无人机航线。三维螺旋环绕所需的主要参数有中心坐标、环绕半径、环绕速度、拍摄重叠度、云台倾斜角等，随后作业人员从飞行项目中导出拍摄数据作进一步的内业处理，不同建筑根据现场条件设置不同参数。

内业建模环节，可以通过相片优化、空三解算、模型拼接、控制点校准以及纹理上色等操作，实现对古塔的三维重建。上述过在Agisoft Metashape Pro v2.0.2软件中实现[10-11]，该模型能够满足本文对古塔监测所有关键要素的需求。本文采用大疆“精灵4RTK版”无人机，具体参数为：像素大小2.4 μm；焦距5.74 mm；35 mm等效焦距40 mm；有效像素5 472×3 648（2 000万）；传感器尺寸12.83 mm。

2.2　外业测量及建模

本研究对上海郊区多座古塔进行了建模分析，测绘内容是倾斜测量。古塔塔身有四边形和八边形两种，塔高在18~35 m不等，多坐落于公园和寺庙等地，飞行条件普遍良好。由于篇幅关系，下文的分析均以其中一座典型结构的古塔为例。该座古塔主体是砖石结构、木制装饰，建造在平坦的硬化路面，上海古塔以该建造方式居多，故具有一定的代表性。

无人机飞行前确保该区域不处于禁飞区，且提前做好了飞行报备工作。同时为了作对比，在同样的测区除了三维环绕法外，需用原有五向飞行方式单独进行摄影测量，飞行高度和重叠度和环绕法相一致。部分区域为防止建模失败可补充拍摄，如在高空手动拍摄正射照片作为补充数据。此外为了捕捉到相同数量的像控点，设置的飞行区域会大于古塔自身的占地范围，从而覆盖到我们布设在地面上的像控点。

内业的建模环节通过Agisoft Metashape Pro v2.0.2软件里默认的流程，剔除一些无法匹配到具体位置的照片，最终制作出我们所需要的OSGB格式的成果文件。

导入照片后需要根据照片所在位置进行初拼，如果要坐标系转换则需要在这一步上传每张照片转换后的三维位置信息。空三解算的时候，部分手动拍摄的照片若无法通过位置直接解算，则软件不参考位置信息，通过自身的拟合算法计算出姿态信息。之后便可

以根据要求的精细度和成果格式进行模型创建和纹理上色。

2.3 要素提取

要素提取可利用清华山维的EPS工作平台，加载符合软件格式要求的倾斜模型文件就可以进行编辑。该操作界面由左右2个窗口组成，分别是模型和矢量。以倾斜模型数据为底板，切换合适的视角提取所需特征点并勾勒线条，最后导出用于计算古塔倾斜的矢量文件。矢量文件以dwg格式存储，通过AutoCAD打开，计算边长数据、古塔高度数据以及古塔几何中心数据。

3 结果与分析

古塔的高度约35 m。环绕飞行方式下，无人机作业的最大飞行高度设为50 m，飞行半径15 m，云台倾角度30°，飞行速度3 m/s，重叠度80%，航线密度则根据上述算法及参数默认选择，最终共拍摄照片291张。五项飞行方式下，无人机飞行高度也是50 m，重叠度80%，最终共拍摄到542张照片。现场环境如图1所示。



图1 古塔实物图

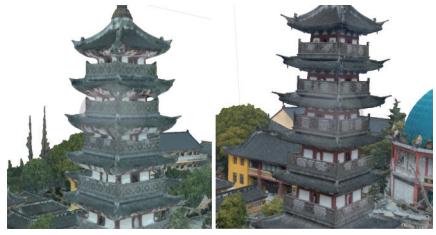
3.1 要素完整性分析

监测所需的要素有：周围地形、古塔基底轮廓、古塔塔顶轮廓、古塔塔身轮廓、古塔高度以及古塔的纹理。

周围地形通过设置合理的飞行半径可以做到对在场地区域内各要素的全覆盖拍摄，且飞行高度只有60 m，环绕时候离开塔身也在20 m以内，这使得GSD可以达到0.82，即每个像素代表0.82 cm，满足1∶500航测的地形要求[12-13]。

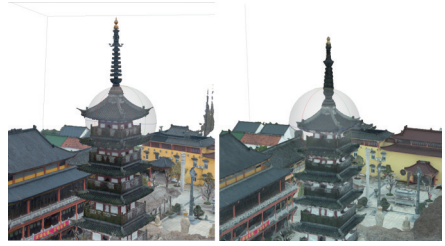
古塔基底、塔身、塔顶等轮廓要素没有缺失或明显变形，与实际形状相匹配，且纹理清晰。古塔高度在模型上计算得到35.866 m，和全站仪直接测量的高度35.824 m一致。

通过对比五向飞行法和三维螺旋环绕法得到的模型，可以看到由于五向飞行法是在高于古塔的顶部以一定的俯仰角进行拍摄，所以塔身部分会存在因屋檐遮挡而出现腊融的情况，见图2。对于需要测量古塔倾斜角度的关键要素，古塔塔顶和塔底基座建模，基座部分两者接近，而塔顶体积较小且结构奇异，五向飞行法得到的古塔顶部对实际建筑的还原情况逊色于三维螺旋环绕法，见图3。



a 五向 b 三维环绕

图2 塔身对比



a 五向 b 三维环绕

图3 塔尖对比

综上所示，要素完整性方面，对于古塔这个单一的监测对象，不同于以往的地形测绘，三维螺旋环绕法相较于五向飞行法得到的模型要素完整性更高。

3.2 精度分析

为了计算倾斜模型自身的精度以及对比三维螺旋环绕航测法和五向飞行航带法的优劣，需要从2个方面进行分析。外业测绘时采用高精度全站仪Leica TS60对被研究的建筑进行散点测量，共测量了该建筑物表面上多个特征点，并以环状形式计算特征点之间对边边长。通过分别将五向飞行航带法和三维螺旋环绕得到的模型与全站仪实测的边长进行对比，可以得出哪种方式的精度更可靠，见表1。

表1 三维边长精度统计表/m

序号	全站仪	五向飞行模型	较差	三维环绕模型	较差/m
1	4.41	4.42	0.01	4.42	0.01
2	4.39	4.41	0.02	4.38	−0.01
3	4.41	4.50	0.09	4.47	0.06
4	4.40	4.57	0.17	4.43	0.03
5	3.63	3.64	0.01	3.61	−0.02
6	3.60	3.52	−0.08	3.64	0.04
7	3.63	3.66	0.03	3.66	0.03
8	5.45	5.55	0.10	5.50	0.05
9	5.47	5.53	0.06	5.55	0.08
10	3.55	3.61	0.07	3.59	0.04

从表1的数据可以看出，2种方式的中误差均满足古塔监测的精度要求。通过三维螺旋环方式得到的建

筑模型长度和全站仪测得边长的最大误差为8 cm，最小误差为1 cm，中误差为4.25 cm。通过五向飞行的方式得到的建模模型长度和全站仪测得边长的最大误差为17 cm，最小为1cm，中误差为7.96 cm。对比可见，三维螺旋环的方式得到的建筑模型的最大边长误差和平均中误差均小于五向飞行法的模型，所以精度更优。

除了要对比边长精度，作为监测还需要对古塔的绝对坐标以及计算出的倾斜角度进行比对。2种方式得到的模型结果分别和已得到多年实践和理论验证具有可靠性的全站仪数据进行比对，具体数据见表2。

表2　倾斜统计表

范围	五向飞行模型		三维螺旋环绕模型		全站仪	
	Y（E，W）	*X*（S，N）	*Y*（E，W）	*X*（S，N）	*Y*（E，W）	*X*（S，N）
塔底中心	−21 545.084	−36 959.663	−21 545.107	−36 959.662	−21 545.154	−36 959.669
塔尖中心	−21 544.804	−36 959.666	−21 544.913	−36 959.733	−21 544.939	−36 959.715
倾斜角度	0°27′24″	0°0′18″	0°18′59″	0°6′57″	0°21′2″	0°4′30″

从表2的数据可以看出，无论是绝对坐标还是古塔水平方向和竖直方向的倾斜角度，三维螺旋环绕的模型比五向飞行的模型更接近全站仪的结果。

3.3　效率分析

前期的像控点布设采用相同的方法和数量，所以这部分时间一致。主要对比外业飞行过程和内页拼接的效率。上文研究对象中五向飞行法共拍摄542张照片，用时约35 min；三维螺旋环绕法共拍摄291张照片，用时约20 min；外业时间上三维螺旋环绕可减少42%的飞行时间；内业拼接上，人工刺点和照片导入等时间接近，模型拼接上五向飞行法共耗时7 h 42 min，三维螺旋环绕法由于照片数量较少耗时6 h 27 min。后期用于监测分析的时间两者一致。其余12座塔外业效率对比如下表3。

表3　外业效率对比表

目标	五向飞行		三维螺旋环绕		
	照片数	时间/min	照片数	时间/min	差值/min
塔1	475	33	287	23	−10
塔2	463	31	312	26	−5
塔3	583	40	342	30	−10
塔4	599	45	355	32	−13
塔5	455	30	319	27	−3
			…		
塔12	447	30	304	25	−5

综合外业和内业处理的时间，三维螺旋环绕法在效率上更加优秀。

4　结　语

提出了一种面向古塔倾斜监测的无人机三维航线规划方案，并和五向飞行作业的结果作了对比，经过实验验证了其可行性和可靠性。使用自动化程序规划的无人机的三维螺旋环绕航线，成功获取了古塔的三维信息，并最终创建了可用于倾斜特征要素提取的三维模型。结果表明，五向飞行法虽然软件成熟、平面地物丰富，但是环绕飞行空间小、垂直细节多、效率高等优势，更适合单体建筑的精细化建模，在古塔健康监测中更实用。这一方法为使用无人机进行古塔倾斜监测的精度提高了有效的解决方案，提高了建筑三维重建的效率，降低了成本，并且操作简单便捷。

参考文献

[1] 崔健. 台风灾害下无人机激光雷达技术的电网巡视应用[J]. 测绘科学,2021,45(4):63-67

[2] 王延寿. 无人机航空摄影技术在三维边坡建模中的应用[J]. 遥感信息,2022,36(5):51-55

[3] 邱春霞,董乾坤,刘明. 倾斜影像的三维模型构建与模型优化[J]. 测绘通报,2017(5):31-35

[4] 金伟,葛宏立,杜华强,等. 无人机遥感发展与应用概况[J]. 遥感信息, 2009,23(5):88-92

[5] 潘绍林. 基于单镜头无人机的胜天水库大坝[J]. 水利水电快报,2024,45(1):23-27

[6] 周骁腾,周政,张书航,等. 面向单体建筑精细化建模的无人机三维航线规划[J]. 地矿测绘,2017,33(2):24-27

[7] 娄宁,马健,杨永崇,等. 倾斜摄影的单体精细化三维建模[J]. 遥感信息, 2020,35(6):44-48

[8] 魏国忠. 新型基础测绘自动制图软件的设计与实现[J]. 遥感信息, 2019,34(3):139-142

[9] 张继贤,张莉,张鹤. 面向新型基础测绘的质检任务探讨[J]. 测绘通报, 2018(7):71-73

[10] 杨必胜,李健平. 轻小型低成本无人机激光扫描系统研制与实践[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(12):1 972-1 978

[11] 文政兵,李冰峰. 基于实景三维模型的地形图质量检验方法[J]. 测绘通报,2023(8):167-171

[12] 程争刚,张利. 一种基于无人机位姿信息的航拍图像拼接方法[J]. 测绘学报,2016,45(6):698-705

[13] 丁玉兰. 无人机搭载大像幅相机在山区测图中的应用[J]. 测绘通报, 2021(增刊):39-42