引文格式：王彦良,杜鹏超,陈富强,等. 贴近摄影测量在塔式古建筑精准保护决策中的应用[J]. 地理空间信息, 2024, 22(12): 51-54. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.12.012

贴近摄影测量在塔式古建筑精准保护决策中的应用

王彦良[1]，杜鹏超[1*]，陈富强[1]，焦晨焱[1]，刘艳华[1]，吴　芳[1]
（1. 河南省地质局矿产资源勘查中心，河南 郑州 450006）

摘　要：为了提高塔式古建筑保护修缮方案的针对性和有效性，需要依靠高精度、现势性强、完整度高的现状数据辅助决策。采用贴近摄影测量技术对开封铁塔进行观测，针对开封铁塔精准保护决策中面临的问题，优化了作业航线，使得重构后的三维模型完整度有所提升，经相对精度验证，分析了其现状特点和存在的问题，得到了建筑参数、结构变形、外立面破损度等量化数据，有针对性地提出了保护建议和预防措施。结果表明，贴近摄影测量技术能够有效获取塔式古建筑的现状数据，为制定精准保护方案提供有力的决策支持。

关键词：贴近摄影测量；航线规划；精细化建模；古建筑保护
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）12-0051-04

Application of Close-to-photogrammetry in the Precise Protection Decision-making of Ancient Tower Buildings

WANG Yanliang[1], DU Pengchao[1], CHEN Fuqiang[1], JIAO Chenyan[1], LIU Yanhua[1], WU Fang[1]
(1. Mineral Resources Exploration Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: In order to improve the pertinence and effectiveness of the conservation and restoration plan for ancient tower buildings, it is necessary to rely on high-precision, real time, and complete data of the current situation for decision-making. We used close-to-photogrammetry to observe the Kaifeng iron tower. In view of the problems faced in the precise protection decision-making of Kaifeng iron tower, we optimized the operation route, and improved the integrity of reconstructed 3D model. We analyzed the current characteristics and existing problems through the verification of relative accuracy, obtained the quantitative data such as architectural parameters, structural deformation and facades damage, and put forward protection suggestions and preventive measures. The result shows that close-to-photogrammetry can effectively obtain the current situation data of ancient tower buildings, and provide strong decision support for formulating precise conservation plan.

Key words: close-to-photogrammetry, route planning, fine modeling, ancient building protection

贴近摄影测量相较倾斜摄影测量来说作业距离更近，获取目标物的特征纹理细节更多，成果模型的完整度及精细度更高，是国内诸多学者在古建筑的保护研究上常采用的一种摄影测量技术。苗志成[1-3]等运用贴近摄影测量技术对单体建筑物进行了模型构建，并对模型精度进行了对比分析，验证了贴近摄影测量相较于倾斜摄影测量的优势。王云川[4]等则从作业航线规划角度出发，评估了航线规划对摄影测量作业的影响。李天等为倾斜摄影测量设计了环绕式规划并应用于塔式古建筑，验证了作业距离对模型精细度和完整度的提升[5-6]。张旭[7]等采用激光数据融合摄影测量的手段实现了古建筑的精细化建模，改善了古建筑隐蔽处的模型细节。和文斌[8]等则通过贴地飞行作业方法验证了基于三维模型实现精细化量测分析的可行性，对复杂结构目标物的数据分析提供了新的研究思路。

结合上述研究，以开封铁塔为例，通过获取开封铁塔的稀疏点云数据开展贴近摄影测量航线规划，针对檐下隐蔽部位的数据获取，优化航线，实现多角度摆动拍摄，实现开封铁塔的完整精细化三维重构。

1　贴近摄影测量技术

贴近摄影测量技术作为面向目标物的摄影测量技术，在航线规划和设备选取方面与倾斜摄影测量技术相比较为特殊，主要表现为贴近摄影测量航线基于目标物稀疏点云数据规划，针对性及精准度更高；设备选取上依赖于GNSS定位系统确保飞行安全，云台摆动

收稿日期：2023-09-24。
项目来源：河南省地质矿产勘查开发局局管地质科研项目（豫地矿科研[2021]Z-34号）。
第一作者简介：王彦良（1982—），硕士，高级工程师，研究方向为工程测量、地理信息系统、实景三维建设，E-mail：94661608@qq.com。
通信作者：杜鹏超（1995—），本科，助理工程师，研究方向为实景三维建设、智慧城市决策、摄影测量应用，E-mail：924276390@qq.com。

保障更多细节捕获能力。通常的作业流程如图1所示。

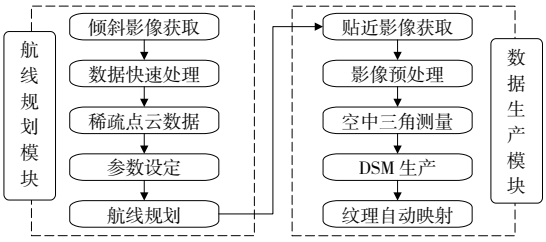


图1 贴近摄影测量技术作业流程图

1.1 航线规划

航线规划时在目标物稀疏点云数据上创建立面，假定飞机作业面与目标物立面平行，航线规划为“弓”形式，由作业距离、相机配置、影像GSD等参数依据设定的重叠度计算水平航线及垂直航线上各航点的位置关系，结合目标物立面边线的地理坐标信息，完成贴近摄影测量航线规划。

作业距离 d 、相机固定参数像元 a 、相机固定参数镜头焦距 f 、影像GSD之间满足如下的几何关系：

$$\mathrm{GSD}=\frac{d\times a}{f} \tag{1}$$

在考虑周边环境及作业安全的情况下，通常通过给定数值 d 来得到影像GSD值，判断是否满足作业要求，若不满足则减小数值 d 直至影像GSD值满足作业要求。

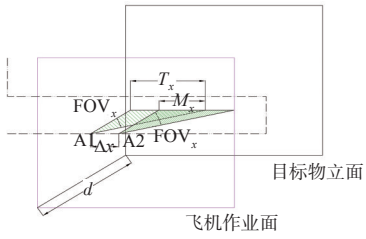


图2 水平航线参数计算示意图

在设定作业距离 d 后，如图2所示，可利用几何关系求得图像在目标物立面有效区域 T 的水平长度 T_x ，即：

$$T_x=2d\times\tan\frac{\mathrm{FOV}_x}{2} \tag{2}$$

式中， d 为设定的作业距离； FOV_x 为相机固定参数视场角FOV在水平方向的角度。

由图像在目标物立面有效区域 T 的水平长度 T_x 求得同一水平航线相邻两航点在水平方向的重叠距离 M_x ，即：

$$M_x=T_x\times P_x \tag{3}$$

式中， P_x 为设定的航向重叠度； T_x 为图像在目标物立面有效区域 T 的水平长度。

由式（3）求得同一航线上航点A1与航点A2的水平距离 Δx 。

$$\Delta x=T_x-M_x=(1-P_x)\times 2d\times\tan\frac{\mathrm{FOV}_x}{2} \tag{4}$$

式中， T_x 为图像在目标物立面有效区域 T 的水平长度； M_x 为同一水平航线相邻两航点在水平方向的重叠距离 M ； P_x 为设定的航向重叠度； d 为设定的作业距离； FOV_x 为相机视场角在水平方向的角度。

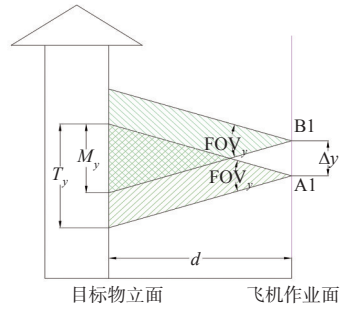


图3 垂直航线参数计算示意图

同理由式（1）、（2）、（3）及式（4）结合图3，可求得同一垂直方向上航点A1与航点B1的垂直距离，即两条航线之间的距离 Δy ，即：

$$\Delta y=T_y-M_y=(1-P_y)\times 2d\times\tan\frac{\mathrm{FOV}_y}{2} \tag{5}$$

式中， T_y 为图像在目标物立面有效区域 T 的垂直长度； M_y 为同一水平航线相邻两航点在垂直方向的重叠距离； P_y 为设定的航向重叠度； d 为设定的作业距离； FOV_y 为相机视场角在水平方向的角度。

在求得 Δx 和 Δy 后，依据创建的目标物立面顶点位置信息，依次求得各航点位置从而完成整条航线规划。

1.2 设备选取

贴近摄影测量对无人机具有较高的要求，首先航线距离目标物较近，无人机应具备高精度GNSS模块和智能避障系统来保障航点的准确和作业安全；其次航线与作业面处于平行状态，无人机应具备可悬停和云台大角度摆动条件，确保在航点进行摆动拍摄，捕获目标物更多隐蔽处的细节。

2 应用案例

2.1 研究区概况

开封铁塔（见图4），坐落于河南省开封市北门大街210号，建于北宋皇佑元年，八角十三层，建筑造型宏伟秀丽，具有典型的中国塔式建筑风格，因其外壁镶嵌的褐色琉璃砖与铁色相似，从元代起民间称其为“铁塔”。

开封铁塔自建成以来历经无数次战火、水患、地震等灾害，亟需开展全方位“体检”来摸清当前铁塔的现状，为铁塔的修缮保护制定精准有效的方案。开



图4　开封铁塔位置示意图

封铁塔的精准保护面临两大难点，其一，开封铁塔整体呈上窄下宽状，每层都有腰檐作为点缀，腰檐自塔身向外伸展的同时向下弯曲，导致檐下部位十分隐蔽，数据获取困难，造成修缮保护制定方案不够全面；其二，开封铁塔缺少量化数据支撑决策，在精准保护方案制定中，单一的观测数据往往缺少相关验证，导致整体方案不够精准。

2.2　数据采集与处理

针对前文提到的檐下部位数据获取困难的困扰，利用贴近摄影测量航线规划和无人机云台可摆动的特点，选用DJI Phantom 4RTK无人机对开封铁塔进行快速倾斜摄影测量数据采集，生成开封铁塔稀疏点云数据，在DPGO软件中基于该数据展开航线规划与调试，设定航向重叠率80%，旁向重叠率80%，不断调整作业距离和云台摆动角度，使无人机在每层腰檐下方可以通过云台的摆动获取檐下部位的细节，经多次调整，设定作业距离为8 m，影像GSD值为0.002 m，作业面划分及三维航线见图5。

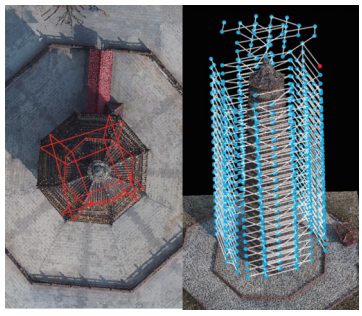


图5　开封铁塔贴近摄影作业面及三维航线

外业数据采集时将航线导入无人机中，执行自动化数据采集，考虑到作业安全，在近地部分手持无人机进行补拍，外业采集情况见表1。

2.3　模型验证

塔式古建筑的保护修缮方案制定，关注最多的当属塔式古建筑的尺寸和结构，因此选择相对精度和完整度作为模型评价指标。

将贴近摄影测量[9]数据构建的三维模型与倾斜摄影构建的三维模型进行对比，着重对比具有历史文化研究价值的佛龛和较为隐蔽的檐下部位等细节，评价模型的精细完整度，见图6。

表1　各立面贴近采集情况

序号	飞行时间	飞行速度/(m/s)	采集部位	拍摄影像数	补采影像数
1	上午8：30	4	东面	790	102
2	上午10：00	4	南面	729	89
3	中午12：00	4	顶部	45	0
4	下午14：00	4	西面	790	79
5	下午16：00	4	北面	622	138



a 贴近摄影佛像　b 倾斜摄影佛像　c 贴近摄影檐下　d 倾斜摄影檐下

图6　贴近摄影与倾斜摄影细节对比效果图

由图6对比可知，基于贴近摄影测量构建的三维模型的精细度要远优于基于倾斜摄影测量所构建的三维模型，同时无人机在腰檐处云台的摆动，大幅提升了开封铁塔的檐下等隐蔽部位的结构细节表现，提高了开封铁塔现状数据的完整度。

相对精度通过外业量测同一高程面的平距值、同一平面位置处的高差值与模型量测值进行验证。外业测量选用全站仪采集坐标点，并计算对应的距离数值，本次共量测计算平距值8个，高差值8个，模型量测基于DasViewer软件，外业量测与模型量测的对比分析见表2。

表2　贴近摄影测量三维模型精度统计/m

误差类型	最小误差	最大误差	均值	中误差
平距值	0.009	0.097	0.032	0.038
高差值	0.012	0.145	0.041	0.056

由表2可知，基于贴近摄影测量构建的三维模型，与外业量测值的误差范围控制在5 cm左右，基于该模型数据进行分析量化，具有一定的参考价值。

2.4　精细模型在精准保护中的应用研究

贴近摄影测量获取的开封铁塔精细化三维模型，为开封铁塔的现状分析提供了翔实的数据基础，可用来支持开封铁塔的研究、修缮、保护和开发利用。

2.4.1　建筑参数的逆向构建

基于获取的高清影像数据，在模型构建过程中提取开封铁塔的密集点云，在PointCab软件中设定投影方向和位置，实现建筑参数的逆向构建。

2.4.2　建筑结构变形评价

研究时视开封铁塔为绝对刚体，于塔基8个面同等距离处量测高程，求得其平均值**.137 m作为起算高程；多人量测求平均值法求得塔顶高程为**5.315 m，计算塔高H为55.178 m。

由塔基外轮廓线拟合求得塔基中心坐标为（****84.287，*****14.856，**.137）；多人量测求平均值法

求得塔顶中心坐标为（****84.966，*****14.414，**5.315），通过几何计算完成开封铁塔结构变形评价。具体分析计算示意图见图7。

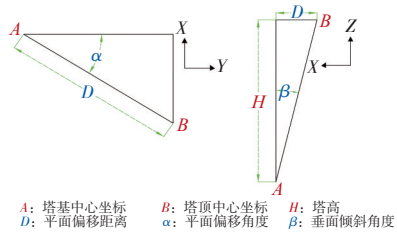


图7 铁塔结构变形分析计算示意图

由A、B、H值计算求得α为33°3′ 44.67″，D为0.81 m，β为0°50′27.70″，即开封铁塔向东偏南33°3′44.67″方向上发生倾斜，倾斜角度为0°50′27.70″，由倾斜产生的塔心平面偏移为0.810 m，变形情况与现状相符。

2.4.3 外立面破损度评估

基于开封铁塔精细化三维模型进行纹理分析，统计由杂草、风化、自然脱落和人为损坏等原因造成的外立面损坏，得到铁塔各个外立面的破损度，用百分比表示，具体见表3。

表3 铁塔外立面破损程度统计

序号	方位	破损程度/%
1	东	8.97
2	东南	6.37
3	南	8.20
4	西南	7.45
5	西	7.08
6	西北	14.90
7	北	13.50
8	东北	11.72

结合上述数据，可知当前开封铁塔外立面破损较为严重的是正北、西北、东北3个外立面。除去人为因素造成的近地部分破损，从开封所处的地理位置和自然气候进行原因分析，因开封市地处黄河中下游，属于暖温带半湿润大陆性气候，四季分明，年降水量充沛，通常受西北季风与西南季风的影响。秋冬季节林木植被树叶脱落，大量黄河风沙、碎石受西北季风影响侵蚀开封铁塔北部相关立面，造成外貌图案破损；春夏季节雨量增多，受西南季风影响大量雨水冲刷开封铁塔南部相关立面，造成外貌颜色失真。

2.5 综合保护建议

1）开展开封铁塔定期监测，建立时序性数学模型。建议采用前述航线规划方法，规划全面、完整、效率高的自动化航线，定期采用航线进行数据采集、模型构建、数据分析，建立时序性数学模型，监测开封铁塔的结构变形、外立面破损度，制定预防方案。

2）加强塔身外立面价值要素保护。基于当前模型量化数据，结合自然气候等多方面因素，开展外立面区域性修复。加强塔身的除草、清洁、排水、防潮工作，提高铁塔北部区域防护林种植密度。

3 结 语

针对塔式古建筑制定精准保护方案中缺少有效决策数据的现状，以开封铁塔为例，分析了开封铁塔精准保护决策中面临的问题，利用贴近摄影测量的优势优化作业航线，重构开封铁塔精细化模型，分析形成量化数据，提出针对性建议，从而辅助开封铁塔精准保护决策。从模型完整度来看，优化过的航线一定程度上将开封铁塔的檐下部位进行了精细还原，使得现状数据更加完整。相对精度的验证则保障了建筑参数、结构变形和外立面破损度等量化数据的可靠性，从而为开封铁塔的精准保护提供了决策分析。

本研究采用的作业方案，从一定程度上解决了塔式古建筑精准保护中的数据支撑问题，但未能深入开展研究，如利用优化后的航线定期开展观测，进行数据分析，得到时间与开封铁塔量化数据的数学关系，建立时序性的数学模型；如开展对开封铁塔内部数据的获取研究，建立支撑内外部全面决策的数据更新机制等，后续将针对上述问题继续开展研究，为塔式古建筑的精准保护提供全面有效的数据辅助决策。

参考文献

[1] 苗志成,杨永崇,于庆和,等. 贴近摄影测量在单体建筑物精细化建模中的应用[J]. 遥感信息,2021,36(5):107-113

[2] 宰春旭. 基于多种摄影方式的精细化三维模型构建方法研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2021

[3] 陈富强,刘志峰,高彦涛,等. 华为云三维实景建模在特大桥检测中的应用[J]. 地理空间信息,2021,19(11):143-146

[4] 王云川,段平,李佳,等. 多旋翼单镜头无人机不同航线规划的三维建模方法评述[J]. 测绘通报,2020, 16(3):105-108

[5] 李天. 基于环绕式倾斜摄影的塔式建筑精细三维建模[J]. 测绘通报,2019(增刊):318-321

[6] 王越,何伟,李华,等. 融合空-地LiDAR和倾斜摄影的高层建筑物三维建模[J]. 地理空间信息,2023,21(6):49-52

[7] 张旭,李新锋,王胜骞,等. 一种融合多源数据的古建筑精细重建方法[J]. 工程勘察,2023,51(3):68-72

[8] 和文斌,甘淑,袁希平,等. 不同UAV航摄方法的3D建模技术及精细化量测分析[J]. 工程勘察,2023,51(9):52-56

[9] 李思婕. 视频影像空间定位方法研究[D]. 南京:南京师范大学,2020