

无人机自主巡检过程中拍摄点位偏移问题的研究及解决措施

周福文¹, 吕佳², 许润韬¹, 付师瑀¹, 吴诗优¹

(1. 国网江西省电力有限公司南昌供电分公司, 江西 南昌 330069; 2. 国网江西省电力有限公司供电服务管理中心, 江西 南昌 330013)

摘 要:随着架空线路的不断增加,无人机技术成为了输电线路巡检的关键支撑。国网江西省电力有限公司近年来不断推广无人机自主巡检技术在基层的应用,技术人员在应用过程中,发现自主巡检拍摄的照片存在偏移问题。为了确定影响拍摄点位偏移的主要因素,设计了不同的试验,分别研究了GPS/北斗RTK差分定位系统、无人机偏航运动、云台俯仰运动、云台偏航运动对拍摄点位偏移的影响。研究表明,无人机在执行航线过程中,云台发生的偏航运动是使得拍摄点位偏移的主要因素。文中提出可以通过设置云台偏航回中的校准办法,在航线规划阶段或者自主巡检过程中解决拍摄点位偏移的问题,提高自主巡检的可靠性和准确性。

关键词:无人机自主巡检;RTK差分定位系统;拍摄点位偏移;云台偏航

中图分类号:TP 274 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2026)02-0022-05

0 引言

架空输电线路作为电力系统的重要组成部分,其安全稳定运行情况直接影响着电网供电的可靠性和持续性。近些年,雅中—江西±800 kV特高压直流工程、长沙到南昌1000 kV特高压交流工程、武汉到南昌1000 kV特高压交流工程陆续投产,江西电力网架得以不断完善^[1-3],架空输电线路长度持续增长,人均运维线路长度不断增长,传统的人工巡视已经无法满足安全稳定的需要。无人机因其便捷、高效的特性,迅速成为了输电线路巡检工作中的关键支撑^[4-6]。

大疆Mavic3T/E系列无人机同时搭载了长焦镜头和热成像镜头,因优异的续航能力,在江西电网的输电运检专业中获得了广泛应用^[7]。运维人员通常使用手动操作无人机的方式,对输电杆塔进行精细化巡检,其操作十分复杂,对飞手的能力要求很高。而无人机自主巡检可使无人机按照预设航线飞行,对输电线路杆塔绝缘子串、金具等各类线路部件进

行自动化巡检,因其简便的操作方式,不仅提高了巡视效率,同时可大幅扩大无人机在基层的应用范围^[8-10]。但是,在使用过程中发现,无人机在自主巡检过程中会发生拍摄点位偏移的问题,即航线规划的拍摄点和无人机实际执行的拍摄点所拍摄的照片不一致。

为了解决无人机自主巡检过程中拍摄点位偏移的问题,文中通过设计不同的试验,分别研究GPS/北斗RTK差分定位系统、无人机偏航运动、云台俯仰运动、云台偏航运动对拍摄点位的影响,确定了影响无人机拍摄点位偏移的主要因素,并提出了相应的解决方法。

1 试验设计

1.1 点位偏移问题

无人机的航线通常使用大疆智图软件规划,过程中可以看见拍摄图像的预览图,并且设置无人机偏航角和云台俯仰角,预览图样式如图1所示,杆塔顶部横担位于画面中心。

收稿日期:2025-12-26

作者简介:周福文(1994),男,硕士,工程师,主要研究方向为输电线路巡检、无人机巡检及无人机数字化应用。

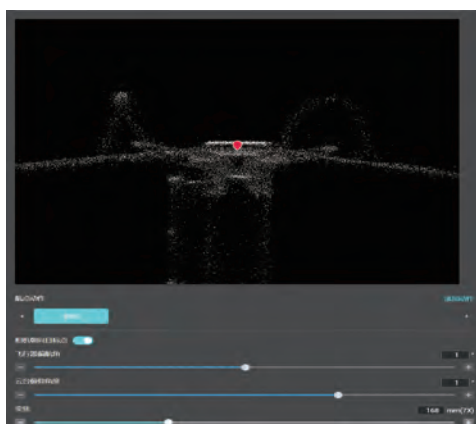


图1 航线规划软件中的拍摄预览图

实际执行后拍摄的照片如图2所示,发现杆塔横担明显处于画面右上方,拍摄点位出现了偏移,导致右侧地线耐张线夹画面缺失,严重影响巡检质量。



图2 无人机实际拍摄的图像

1.2 影响因素分析

根据相机成像的原理,影响拍摄照片的主要因素是位置和拍摄角度。自主巡检过程中,影响无人机位置的主要因素是实时动态载波相位差分(real time kinematic, RTK)技术,RTK通过对定位系统提供的数据进行解析,使得无人机获得高精度准确定位。目前使用的定位系统为GPS和北斗,因此需要研究不同定位系统对无人机拍摄点位的影响。

无人机的拍摄角度除了受其自身偏航运动的影响外,还与其摄像头云台的俯仰运动和偏航运动有关,因此还需要研究无人机偏航运动、云台俯仰运动、云台偏航运动对拍摄点位的影响。

1.3 试验方法

为了更加直观分析点位偏移的问题,将规划拍摄的预览图和实际拍摄的图像嵌入坐标系中,如图3和图4所示,并以横轴偏移百分率和纵轴偏移百分率的方式,量化拍摄点位的偏移。图中的点位偏移描述为横轴偏移率20%、纵轴偏移率40%。

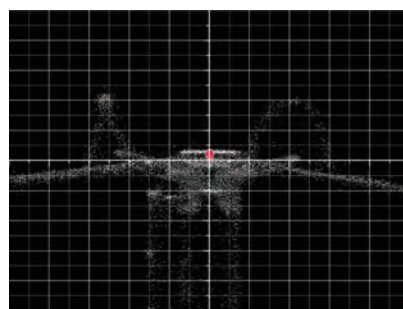


图3 嵌入坐标系后拍摄预览图



图4 嵌入坐标系后实际拍摄图

借此方法,对各个影响因素进行了试验设计。

GPS/北斗RTK差分定位系统:无人机分别应用GPS和北斗两个定位系统,多次去执行同一条航线,获得实际拍摄的图像,与规划的图像进行偏移率对比分析。

无人机偏航运动:设计一条无人机只进行偏航运动的航线,分析无人机偏航运动对拍摄点位偏移的影响。

云台俯仰运动:设计一条无人机只进行云台俯仰运动的航线,分析无人机云台的俯仰运动对拍摄点位偏移的影响。

云台偏航运动:Mavic3T/E无人机的云台无法直接进行偏航运动,只可以进行云台偏航回中的操作,因此对于同一条航线,使用云台偏航回中执行一遍和不使用云台偏航回中执行一遍,对获得的图像进行偏移率分析,获得云台偏航运动对拍摄点位的影响。

2 试验结果与分析

2.1 GPS/北斗RTK差分定位系统的影响

航线设置从左到右依次拍摄杆塔两侧的绝缘子串,共设置6个拍摄点位,GPS和北斗定位系统的拍摄横偏移率如图5所示,纵偏移率如图6所示。

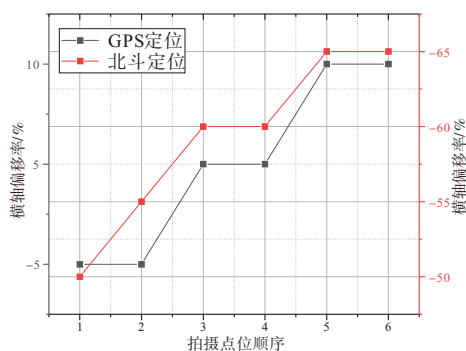


图5 GPS/北斗定位系统横轴偏移率

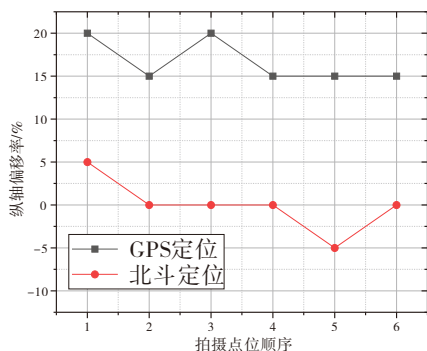


图6 GPS/北斗定位系统纵轴偏移率

试验结果表明,无人机在GPS和北斗定位系统下,自主巡检过程中的拍摄点位均出现了偏移现象。其中,GPS和北斗定位系统下,拍摄点位的横轴偏移率都随着拍摄点位的增大而增大,且北斗定位系统下的横轴偏移率更大;纵轴偏移率则是GPS定位系统大于北斗定位系统。

将GPS定位模式下,横轴偏移率和纵轴偏移率放在同一个图中对比,如图7所示。可以看出,随着拍摄点位顺序的增大,横轴偏移率逐步增大,纵轴偏移率变化不大。

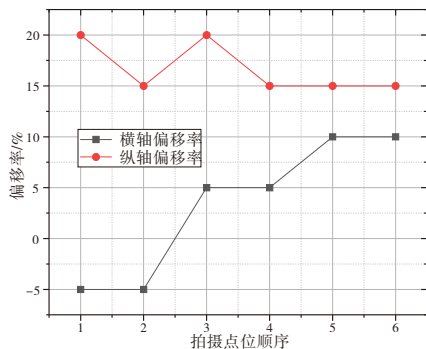


图7 GPS定位模式下横轴偏移率和纵轴偏移率对比

综上所述,无人机拍摄点位的偏移与其定位模式的类型无关,横轴偏移率随着拍摄点位的顺序增大而增大,这表明存在其他影响拍摄点位的因素,且形成了累计误差。

2.2 无人机偏航运动的影响

将无人机的位置固定在某个点,只调整其偏航角度,将偏航角度按 $0\sim 10^\circ$ 依次调整后,再回到 0° ,再按 $0\sim 10^\circ$ 调整,用以探究无人机偏航运动对拍摄点位偏移的影响,试验结果如图8所示。

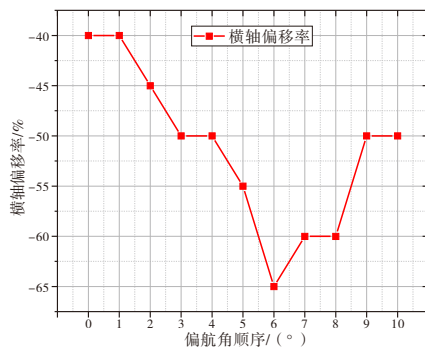


图8 无人机偏航运动对拍摄点位横轴偏移率的影响

试验结果表明,无人机偏航运动显著影响了拍摄点位的横轴偏移率。随着偏航角的增大,横轴偏移率先增大后减小。

在上述航线中,无人机的偏航角会有三次为 0° ,为了探究无人机偏航运动后,相同位置的偏航角对拍摄点位横轴偏移率的影响,对该条航线执行了4次飞行,试验结果如图9所示。

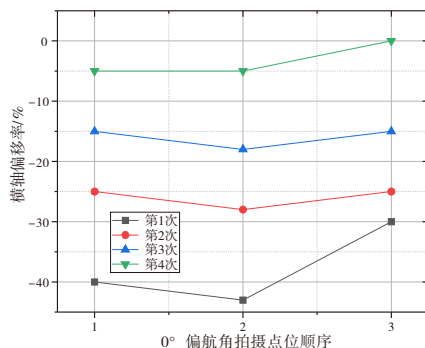


图9 偏航运动后同位置拍摄点位的偏移

试验结果表明,无人机在进行偏航运动后,4次航线试验中,同位置偏航角的横轴偏移率随着拍摄点位的变化趋势相同,而横轴偏移率的大小则取决于初始横轴偏移率。这表明无人机的偏航运动不是构成拍摄点位偏移的关键因素,还存在其他影响拍摄点位的初始横轴偏移率的因素。

2.3 无人机云台俯仰运动的影响

与无人机偏航运动的试验设置类似,将无人机位置固定在某个点,只调整其云台俯仰角,俯仰角度按 $0\sim 10^\circ$ 依次调整后,回到 0° ,再按 $0\sim 10^\circ$ 调整,研究无

人机云台俯仰运动对拍摄点位偏移的影响,试验结果如图10所示。

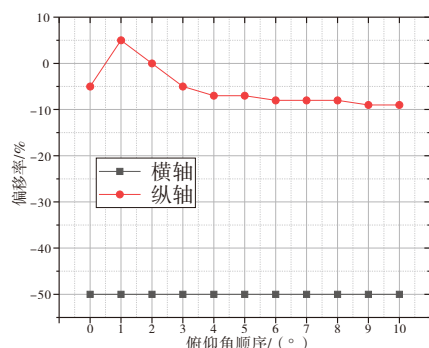


图10 云台俯仰运动对拍摄点位偏移率的影响

试验结果表明,无人机云台俯仰运动对拍摄点位的横轴偏移率无影响,对拍摄点位的纵轴偏移率影响不大。

在上述航线中,无人机的云台俯仰角会有三次为 0° ,为了探究无人机云台俯仰运动后,相同位置的云台俯仰角对拍摄点位偏移率的影响,对该条航线执行了4次飞行,试验结果如图11和图12所示。

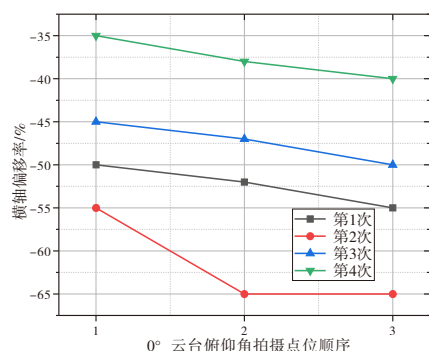


图11 云台俯仰运动后同位置拍摄点位的横轴偏移率

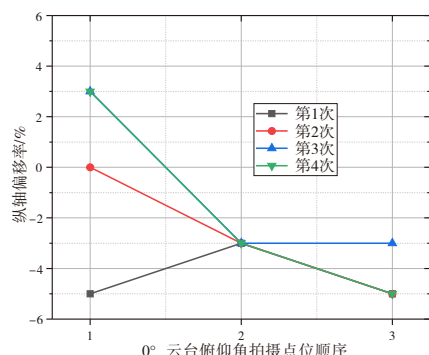


图12 云台俯仰运动后同位置拍摄点位的纵轴偏移率

试验结果表明,无人机云台进行俯仰运动后,4次航线试验中,同位置偏航角的横轴偏移率随着拍摄点位的变化趋势相同,而横轴偏移率的大小则取决于初始横轴偏移率;纵轴偏移率则变化不大,且偏移率

很低。这表明无人机云台的俯仰运动同样不是构成拍摄点位偏移的关键因素,还存在其他影响拍摄点位的初始横轴偏移率的因素。

2.4 无人机云台偏航运动的影响

航线设置为从左到右,依次拍摄杆塔两侧的绝缘子串,共设置6个拍摄点位,与2.1节中的航线相同,在每个点位拍摄前,均使用遥控器上云台偏航回中功能。试验结果如图13所示。

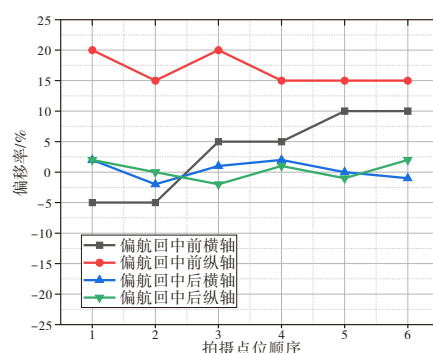


图13 云台偏航回中前后偏移率的对比

试验结果表明,云台偏航回中后,横轴偏移率和纵轴偏移率均得到了有效控制,处于 $-5\%\sim 5\%$ 的区间,且波动不大。这表明Mavic3T/E无人机在执行航线的过程中,云台的偏航角会发生变动,这是导致拍摄点位出现偏移的主要原因。

3 解决措施

Mavic3T/E无人机自主巡检过程中拍摄点位偏移问题的主要原因为摄像头云台出现偏航运动。因此,可以通过对云台偏航运动进行回中校正的方法解决该问题,根据实际情况,校正操作可以选择在航线规划的阶段或者自主巡检的过程中进行。

在需要对杆塔绘制新的精细化飞巡航线时,可以参照图14所示的标准化作业流程进行航线规划操作,在航点动作中的拍照指令前添加云台回中操作指令,获得的新航线在Mavic3T/E无人机上执行时,将不会出现显著的点位偏移问题。

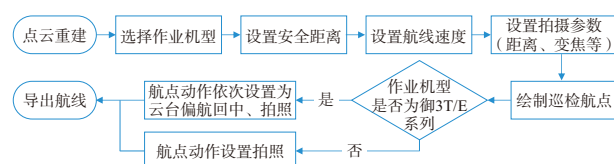


图14 航线规划标准化作业流程

对于已经规划好的航线,在 Mavic3T/E 无人机上执行时,可以参照如图 15 所示的自主巡检标准化作业流程,在每次拍照前手动使用遥控器云台偏航回中功能,即在自主巡检过程中解决点位偏移问题,使得之前已规划好的海量自主巡检航线重新得以利用。

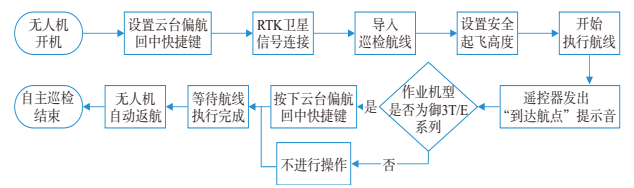


图 15 自主巡检标准化作业流程

4 结语

- 1) GPS/北斗 RTK 差分定位系统、无人机偏航运动、云台俯仰运动均不是无人机在自主巡检过程中拍摄点位发生偏移的主要因素。在执行航线过程中,无人机云台发生的偏航运动是影响拍摄点位准确性的主要因素。
- 2) 无人机自主巡检过程中,在每个拍摄点位拍照前,手动使用遥控器云台偏航回中功能,或在航线规划阶段的航点动作里添加云台偏航回中指令,可使得拍摄点位的偏移率显著减小,提高自主巡检的质量。

参考文献:

[1] 舒展,张伟晨,王光,等.特高压直流接入江西电网后的故障影响分析及其应对措施[J].电力系统保护与控制,2019,47(20):163-170.

[2] 武汉至南昌 1000 kV 特高压工程的“高空舞者”[J].江西电力,2023,47(06):63.

[3] 李博江,石维韬,叶倩,等.特高压南昌站投切空载线路、空载变压器时过电压和过电流仿真计算[J].江西电力,2024,48(04):16-19,22.

[4] 邓亮,李鑫,李晋强,等.旋翼无人机在输电线路中应用 X 射线无损检测技术的研究[J].机电产品开发与创新,2025,38(06):14-17,20.

[5] 杨杰.基于无人机协同的输电线路智能巡检与故障诊断技术[J].电气应用,2025,44(11):153-158.

[6] 卞昌浩.输电线路自主巡检无人机避障路径控制方法[J].自动化应用,2025,66(22):135-137.

[7] 龙飞.大疆无人机御 3 航拍摄影与后期从入门到精通[M].北京:化学工业出版社,2024.

[8] 严尔梅,刘博迪,时磊,等.基于 5G+云边 AI 协同的无人机输电线路巡检应用研究[J].计算技术与自动化,2025,44(04):166-172.

[9] 吴健.基于无人机的架空输配电线路自主巡检技术研究[J].科技资讯,2025,23(24):87-89.

[10] 程俊翔,何相奎,金哲,等.输电线路高精度自主巡检智能机巢系统研究与应用[J].内蒙古电力技术,2026,44(01):45-51.

(上接第 7 页)

参考文献:

[1] 李运涛,刘同杰.GW16A-252DW 型隔离开关拒动故障原因分析及处理[J].四川电力技术,2014,37(02):75-77.

[2] 盛明学,王志清.户外高压隔离开关常见故障的原因分析与处理[J].高压电器,2010,46(10):93-96.

[3] 夏业波.隔离开关控制回路常见问题及处理措施[J].设备管理与维修,2019(22):96-97.

[4] 张帆.一起 GW22A-252II 型隔离开关拒动故障原因分析及处理[J].江西电力,2019,43(12):29-32.

[5] 祖武强,霍克伟.一起 220 kV 敞开式隔离开关拒分的原因分析[J].红水河,2016,35(04):99-100,115.

[6] 张秀斌,温定筠,彭鹏,等.110 kV GIS 隔离开关故障原因分析及反事故措施研究[J].电工技术,2014(06):51-52.

[7] 万寿雄.一起接地开关故障引起两座变电站跳闸的事故分析[J].电气技术,2024,25(06):72-76,81.

[8] 田世济,房崇峰,高田雨.GW7B-550 型接地开关故障缺陷分析与处理[J].电工技术,2021(04):83-84.

[9] 邱志斌,阮江军,黄道春,等.高压隔离开关机械故障分析及诊断技术综述[J].高压电器,2015,51(08):171-179.

[10] 李娜,马飞越,牛勃,等.750 kV 敞开式接地开关异常合闸故障分析[J].四川大学学报(自然科学版),2020,57(06):1131-1136.

[11] 朱青,刘波,李万民,等.弹簧应力松弛对 GIS 故障关合接地开关关合特性的影响研究[J].四川电力技术,2020,43(01):31-34,66.