

蛙跳式充电的无人机自主巡线技术与系统(二): 基于机器视觉的自动充电控制

刘杰荣, 王伟冠, 何其淼, 孔祥轩, 叶蓓, 王师

(广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山 530006)

摘要:近年来多旋翼无人机在中国电力系统中得到了快速的推广和运用,越来越多的电力公司尝试利用无人机进行输电线路巡检。然而无人机在搭载巡检设备后,其续航时间仅为 20 min,续航能力十分有限,巡检时无人机中途降落充电的定位问题也一直存在。因此,该文提出一种基于机器视觉的自动充电控制技术,搭建基于蛙跳式的无人机自主充电系统。系统由无人机平台、自动充电平台和地面控制系统三部分构成,依托智能控制技术和飞控系统,运用机器视觉、图像识别等技术实现无人机的高精度定位和智能精准降落,并结合无人机预设的卡位与地面充电平台充电接口的有效对接,完成无人机动力电池的自动可靠充电,进而实现巡线无人机的自动起降和充电功能。试验结果表明,该蛙跳式自主充电系统有效提高了无人机的续航能力,解决了无人机充电过程中高精度定位等系列技术难题。

关键词:线路巡检;多旋翼无人机;充电平台;续航能力

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.06.022 中图分类号:TM755 文章编号:1673-9140(2021)06-0182-07

Autonomous patrol technology and system of leapfrog-charging UAV (II) : automatic charging control based on machine vision

LIU Jierong, WANG Weiguan, HE Qimiao, KONG Xiangxuan, YE Bei, WANG Shi

(Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Foshan 530006, China)

Abstract: Rotorcraft unmanned aerial vehicle (UAV) has been applied rapidly in the domestic electric power system. However, when loaded with patrol equipment, the drone's endurance time becomes only 20 minutes, which is limited. Therefore, based on machine vision, this paper proposes a key technology of automatic charging control to build the leapfrog automatic charging system. The system comprises of leapfrog type UAV charging platform, UAV automatic charging platform and ground control system. According to the flight control and intelligent control, with the aid of machine vision and image recognition technology to realize high precision positioning and automatic charging platform of intelligent precision landing, considering the connection of the clamping position and charging interface of UAV charging platform, the UAV battery automatic charging and the automatic take-off and landing recharge are realized. The experimental results show that the problem of high precision positioning during UAV charging is effectively solved by using the leapfrog charging platform and machine vision image recognition and shutdown technology.

Key words: overhead powerline inspection; rotor UAV; charging platform; endurance

收稿日期:2019-09-24;修回日期:2019-11-20

基金项目:南方电网公司重点科技项目(GDKJXM20180091)

通信作者:刘杰荣(1985-),男,硕士,高级工程师,主要从事电力设备状态评价与检测方面的研究;E-mail:2034482563@qq.com

在一些不适于人工作业的危险工作环境中,通常采用机器视觉来替代人工视觉,因此,旋翼无人机越来越多的应用于输电线路的巡线作业。通过应用大数据、云计算等高新技术手段,建立智能化无人机巡检体系,利用机器视觉检测方法可以大大提高巡检工作质量和效率。但是无人机续航能力与视觉水平,对巡检效率产生很大的影响。无人机电量用尽后需要人工更换电池,费时费力。无人机降落过程中包括粗定位与精细定位,其通过机器视觉采集图像并进行分析与处理,是无人机能否精细定位的关键因素。随着无人机在电力系统的广泛应用^[1],对其续航能力与视觉水平进行深入研究具有重要意义。文献[2]给出了续航时间与气动参数之间的关系,以遗传算法为工具,进行无人机总体参数的多目标优化,提高了无人机续航性能,使续航时间提升了6.2%;文献[3]针对目前图像处理算法在不确定性问题上的局限性,提出了一种基于粒计算思想的粗糙不确定图像处理方法,降低了图像区域边界的模糊性,实现了灰度边界模糊的图像渐变区域的分割;文献[4]设计了基于机器视觉识别技术的煤矿带式输送机自适应控制系统,运用坐标变换的方式优化煤矿带式输送机的运转,实现了输送机的智能传送;文献[5]通过建立放电容量—端电压模型,并与所需电池功率模型进行数值积分,得到无人机续航能力预测模型,通过实验证明了其模型满足精度要求,但在电池电量预测中存在一些误差,这些误差将直接影响电池续航能力的计算;文献[6]建立了无人机所需功率与可用功率之间的关系,寻找飞行条件、发动机运行状态和螺旋桨特性之间的最优匹配参数,应用序列二次规划算法(sequential quadratic programming, SQP)解决无人机续航难题。

为有效解决多旋翼无人机进行输电线路巡检时的续航能力与视觉水平难题,该文提出一种基于蛙跳式充电平台的解决方案。首先,通过特征检测、机器学习、神经网络等算法,借助多传感器数据融合与智能切换技术获取其特征值,并与充电平台上图案的特征值进行比对,得到充电平台在图像中的位置;然后,进行三维重构,从而获得充电平台相对于无人机的三维相对位置;最后,基于图像定位技术控制无人机精准降落于充电平台上,实现无人机的自主充电。试验表明,依托充电平台并借助机器视觉技术,

可实现无人机远程全自动精准定位与充电,提高无人机的巡检能力。

1 充电平台系统结构及工作原理

跳蛙式充电平台的系统结构如图 1 所示,由无人机平台、无人机自动充电平台和地面控制系统三部分构成。无人机飞行平台包含通信模块、无人机机体、智能飞控模块、GPS 和 RTK(real-time kinematic, 载波相位动态实时差分技术)组合导航控制模块、机器视觉高精度定位系统和无人机动力电池(锂离子电池)充电接口;无人机自动充电平台主要包括:无人机充电接口、恒流/稳压自动充电模块、大功率无线通信模块、夜间感应照明控制模块和三防(防雷击、防雨淋、防盗窃)模块等相关部件;无人机地面控制系统主要由无线远程通信模块及人机交互控制软件等组成。

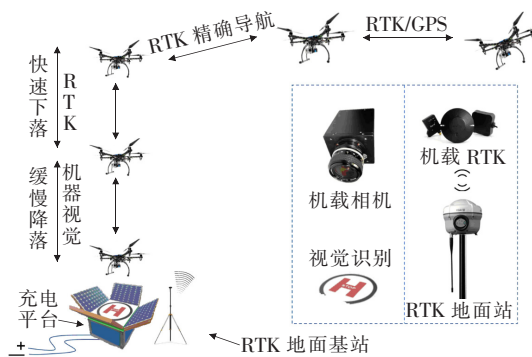


图 1 系统结构流程

Figure 1 Flow chart of system structure

系统工作原理:利用无人机自动起降和自动充电技术,实现“蛙跳式”自动巡检;通过采用组合导航控制模块、机载摄像机等设备,完成高精度定位和无人机在自动充电平台上的智能精准降落;在无人机精准起降到充电平台并完成卡位动作后,实现无人机与充电平台的充电接口自动对接和自主充电。结合智能飞控模块和充电平台,实现无人机自主起降到充电平台进行充电和输电线路的巡检。

2 平台主要子模块及功能

2.1 GPS 和 RTK 组合导航控制模块

要想实现对无人机的充电功能,前提是准确地

定位充电平台位置,并让无人机能飞达充电平台的正上方。RTK 技术是一种实时动态定位技术,通过载波相位观测值,实时地提供达到厘米级精度的三维定位坐标^[7]。在已知充电平台位置的情况下,通过成熟的技术、产品和模块,可以使用 RTK 导航让无人机准确飞达充电平台上方,实现高精度的定位。

在充电平台与无人机相距较远时,利用 GPS/RTK 获得无人机当前的经纬度坐标,通过检索存储在系统中的充电平台经纬度坐标值,并将其设为目标位置。但因 GPS 信号受卫星信号、转换参数等因素的影响,其实时性难以满足实时控制所需精度的技术需求^[8-9]。利用机载高精度惯性传感器延时小、高精度的优点,项目中采用变系数模型的积分估计方法,计算无人机的位置和速度变化,并使用多传感器数据融合方法对惯导传感器采集的数据和 GPS 数据进行融合,得到无人机的实时空间坐标,实现对无人机的飞行方位控制。

2.2 无人机自动充电模块

无人机自动充电模块由四部分组成:220 V 交流电源接口、开关稳压控制电路、锂离子电池恒流/恒压充电模块和 DC 充电接口,各模块的构成如图 2 所示。交流电源接口接入交流电,开关稳压模块将交流转换为直流输出,经过恒流充电模块的恒流控制单元获得稳定的直流电流,平台上的直流输出接口将与无人机上的充电接口进行对接,对无人机的动力电池进行充电。同时通过平台的模块化达到便利运维的目的。

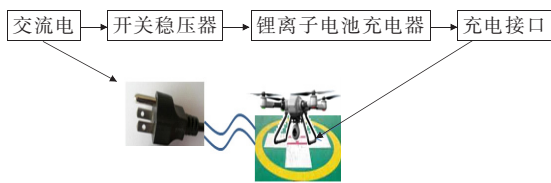


图 2 无人机自动充电模块

Figure 2 UAV automatic charging module

2.3 机器视觉高精度组合定位控制系统

机器视觉是一项包括图像处理、电光源照明、光学成像、智能判断与决策、传感器技术、图像增强和分析等构成的综合技术,是人工智能快速发展的一个分支,其基本特点就是提高了灵活性和智能化程度。通过图像摄取装置带有的光学镜头和感光器件,采集图像并进行处理,进而代替人工视觉实现测

量和分析。图像摄取装置中的感光器件可分为附加金属氧化物半导体组件(complementary metal oxide semiconductor,CMOS)和电荷耦合组件(charge coupled device,CCD)。当目标图像被光电耦合器件感应后,转换成图像感应电信号,根据图像像素分布、亮度和颜色等信息,经图像处理芯片的处理,形成图像的数字化信息及数据文件;数字图像处理系统对上述捕获的图像信息进行分析,提取目标图像的特征,并依此特征进行判别,由此控制无人机的飞行姿态和飞行动作。其基本流程如图 3 所示。

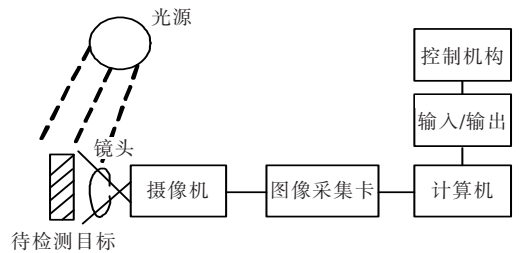


图 3 机器视觉流程

Figure 3 Machine vision flowchart

由于 GPS/RTK 无法确定充电平台的精准位置及充电平台的充电口角度,仅能让无人机飞达充电平台上方。故当 GPS 判断无人机抵达充电平台上方 1 m 以内时,将传感器数据传达至控制机构,无人机切换为机器视觉导引,利用无人机下方装配的摄像头拍摄其正下方的图像,由图形处理器进行特征匹配,得到充电平台相对无人机的准确位置以及充电接口相对无人机的角度。利用图形处理模块对拍摄到的照片进行图像处理,结合多传感器数据融合的算法,对图像数据及惯导数据进行信息融合^[10],获得无人机与充电平台之间的实时的相对位置、角度数据,逐步控制无人机精准降落在离无人机最近的地面充电平台上,并实现无人机的充电接口与充电平台的充电接口之间的精准对接。

其中,利用相机获取无人机下方景物的图像,通过特征检测、机器学习、神经网络等算法,来获取其特征值并与充电平台上图案的特征值进行比对,得到充电平台在图像中的位置,并进行三维重构,从而获得充电平台相对于无人机的三维相对位置,控制无人机精准降落于充电平台上,实现无人机基于图像定位的自动精准降落充电。通过选定合适的机器视觉定位算法,可以提高定位精度,实现无人机自动降落。

2.4 无人机地面站及通信模块

无人机地面站是控制无人机飞行的核心系统,无人机的飞控系统将无人机的当前空间位置坐标、飞行姿态和飞行速度等实时状态信息,通过机载无线远程通讯模块发送到地面工作站,无人机地面站发送控制指令控制无人机的飞行;无人机通信模块包含地面信号收发器、地面控制终端、机载信号收发器。无人机可以将原始数据及计算结果传回地面信号控制终端保存分析,地面控制终端可以发送控制命令控制无人机的飞行。

3 充电平台局部高精度定位

3.1 摄像头标定原理

3.1.1 摄像头内外参数标定

在文 2.3 中阐述的目标检测所获得的目标坐标为图像像素坐标,因此,需要将目标的像素坐标正确地转换为真实空间位置的世界坐标,才能完成目标的位置确定,所需工作是实现相机内外参数的标定。依据数字相机成像原理,像素坐标到世界坐标的转换公式为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 Z_c 为尺度因子; (u, v) 为图像像素坐标; (X_w, Y_w, Z_w) 为目标世界坐标; 等式右边第 1 项为相机内参矩阵,第 2 项为相机外参矩阵; f 为像距,且 $f_x = f/dx, f_y = f/dy$; \mathbf{R} 为旋转矩阵,维度为 3×3 ; \mathbf{T} 为偏移向量,维度为 3×1 。

式(1)为针孔成像原理下像素坐标到世界坐标的转换公式,由于相机的透镜与感光芯片并不完全平行、透镜对光线偏转存在位置上的差异,会造成像点误差,从而不完全满足上述模型的几何关系,因此需进一步对切向和径向畸变进行修正^[11]。

径向和切向畸变产生原因如图 4 所示,径向畸变中的正、负向畸变是由于镜头的形状缺陷,使光线离透镜中心的径向距离和放大率不同所造成的;而切向畸变产生原因是由于摄像机制造上的缺陷,造成透镜本身与光电耦合芯片平面不平行而产生的。

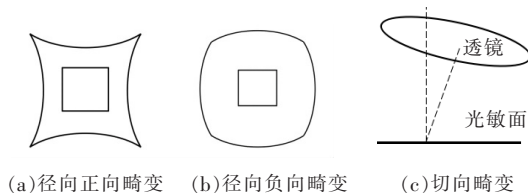


图 4 径向和切向畸变产生原因示意

Figure 4 Diagram of radial distortion form and causes of camera tangential distortion

表述径向和切向畸变的数学模型为

$$\begin{pmatrix} x_{cor} \\ y_{cor} \end{pmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2x^2) \\ p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$r = x^2 + y^2$$

式中 (x, y) 为畸变点在图像上的原始坐标; (x_{cor}, y_{cor}) 为校正后在图像上的新坐标; k_1, k_2, k_3 为径向畸变系数; p_1, p_2 为切向畸变系数。

3.1.2 摄像头的标定

相机标定主流方法是 1999 年微软研究院张正友提出的棋盘标定法,其基本流程^[12]如下。

1) 制作张正友棋盘格标定板。事先设定好标定板的世界坐标系,板上每一小格的大小为已知,这样可得到每一角点在世界坐标系下的物理坐标。

2) 用相机从不同视角拍摄棋盘格。改变棋盘格或摄像机的方向,拍摄一组不同角度的棋盘格照片。

3) 运用图像分析软件,对上述图像中的特征点(标定板角点)进行检测,得到标定板角点的像素坐标值。

4) 求解相机的内、外参矩阵。首先假设在理想无畸变的情况下,初步估算相机的内、外参数;再根据物理坐标值和像素坐标值的关系,求解相机内参矩阵,最后求解每张图片对应的相机外参矩阵。

5) 求解畸变参数,进行畸变修正。考虑畸变模型,运用最大似然估计算法,计算出畸变系数,并进一步提升坐标精度。

张正友棋盘标定法的基本原理是假定标定板平面在 Z 为 0 的平面上,则由式(2)可得成像数学模型:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{Z_c} M(r_1 \ r_2 \ t) = \Pi \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中 Π 为相机内、外参数变换算子。

该文利用待校准摄像头进行标定试验,试验过程:首先,对一系列不同方位和角度姿态的棋盘格图像进行拍摄,得到标定图像,如图 5 所示;然后,运用数字图像软件检测每张棋盘格的角点坐标,如图 6 所示;采用棋盘标定法计算出待校摄像头的内参和外参矩阵,主要参数包括摄像头的径向和切向畸变系数、主点坐标、像距、旋转矩阵 \mathbf{R} 和偏移向量 \mathbf{T} 。其中, \mathbf{R} 、 \mathbf{T} 反映了待校准相机透镜组的中心相对于世界坐标原点的旋转和偏移关系。

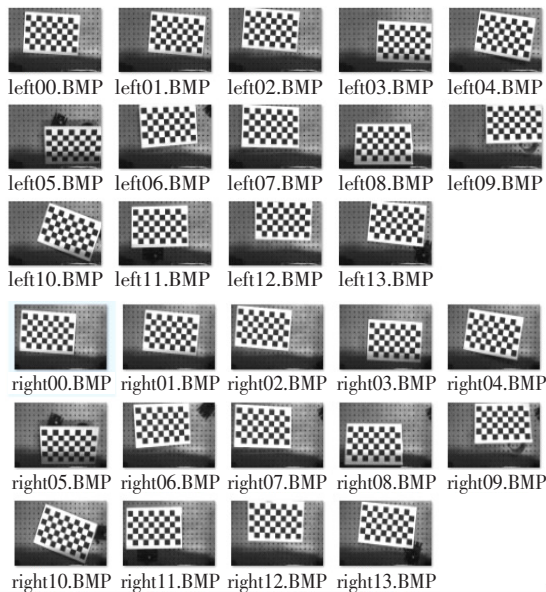


图 5 标定的图像

Figure 5 Calibration image

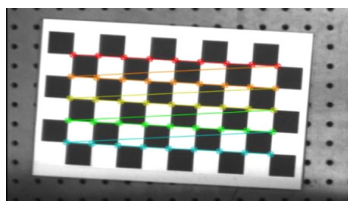


图 6 棋盘格角点检测

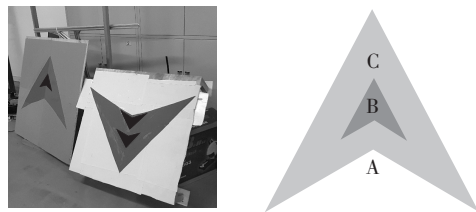
Figure 6 Chessboard lattice corner detection

反复测量摄像头与棋盘格之间的高度 H 以及目标图像指定区域的像素面积 S ,得到若干组 (H, S) 数据,运用最小二乘法拟合出相机高度与像素面积间的关系函数 $H(S)$,完成摄像头深度标定。

3.2 目标检测

1) 目标图形。

为检测无人机充电平台的位置坐标和方向,该文设计的充电平台地标如图 7(a)所示,该图形由 2 个不同灰色的方向箭头构成,深色箭头设置在浅色箭头的中央,而且深、浅色箭头的中心以及箭头的轴线都保持重合,箭头指向亦一致,图形背景设置为白色或其他颜色。如图 7(b)所示,深色箭头的广角顶点 B 的像素坐标代表目标的位置,箭头指向 \vec{AB} 代表地标方向。



(a) 地标实物

(b) 地标图形

图 7 充电平台地标实物、图形

Figure 7 The physical picture and the diagram of the charging platform landmark

2) 检测方法。

通过颜色、形态和连通域分割^[13]等滤波分割手段,将同心同轴的浅色和深色箭头分割出来;并分别对浅色和深色边界进行多边形拟合,获取各自广角顶点的坐标 A 和 B 。深色广角顶点像素坐标 B 为目标位置,浅色广角顶点 A 为原点, A 、 B 二点连成的射线 \vec{AB} 作为地标图像的方向。

3.3 目标定位

在文 3.2 地标图像检测中已得到地标图像的二维坐标和方向,结合文 3.1.2 摄像头的标定数据,可以得到真实世界的三维坐标。

将被检测目标图像区域像素面积代入拟合好的摄像头高度函数 $H(S)$ 中,可得到摄像头与被测目标的距离 H ,代入式(1)中的 Z_c ,结合文 3.1.2 中摄像头的标定流程中第 3 步获得的棋盘角点数据,则能得到像素坐标 (u, v) 所对应的真实三维世界坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 。

4 现场试验测试

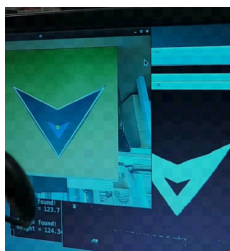
为保证试验的安全性,摄像头校准测试首先在实验室内进行,通过室内实验并达到一定的精度后,再进行室外测试和实际的无人机定位试验。实验测试发现,在室外实际应用中,由于受风力和地效的影响,无人机较难实现毫米级降落偏差,只能达到厘米级定位精度。需进一步采取措施改进算法,或从其他方面提高定位精度。

1) 实验室实验。

在完成摄像头校准测试后,该文进行充电平台地标图形获取测试,实时检测地标图形的坐标、方向及距离,测试结果如图 8(a)所示。通过图像处理,系统能获取毫米级的定位精度。

2) 室外试验。

在室外测试时,无人机不仅需要在远处识别地标图形,而且要准确降落在充电平台表面的地标指定位置,系统采用无人机首先飞行至地标的正上方再缓慢降落的方式。室外设置的地标图像如图 8(b)所示。室外测试发现:无人机能准确识别和定位充电平台的地面目标,并飞行至其正上方,但由于受地面侧风和地效的影响,无人机较难保持稳定的姿态持续下降,下降到平台上的精准度误差达到厘米级精度,需进一步采取措施提高无人机降落过程中的平稳性。



(a) 实验室实验检测结果



(b) 室外试降

图 8 实验室实验检测结果及室外试降

Figure 8 Laboratory test results and outdoor trial drop

5 结语

配网线路环境复杂、巡检工作量大。该文以起飞质量 5 kg 的多旋翼无人机为研究对象,通过图形

处理器进行特征匹配,快速从复杂环境中找到标识物,得到充电平台相对无人机的准确位置和充电接口相对无人机的角度,引导无人机自主降落,并完成充电操作,有效实现了无人机高精度定位,解决了无人机的自动充电、无人机续航等技术难题,实现了无人机起降过程中充电的自动化,避免无人机飞行过程中因电量耗尽而发生坠机事故。实现了配网线路无人机免人工干预的全自动巡检,极大地提高了配网线路巡检效率。

参考文献:

- [1] 冯敏,罗旺,余磊,等.适用于无人机巡检图像的输电线路螺栓检测方法[J].电力科学与技术学报,2018,33(4):135-140.
FENG Min, LUO Wang, YU Lei, et al. A bolt detection method for pictures captured from an unmanned aerial vehicle in power transmission line inspection[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 135-140.
- [2] 刘伏虎,马晓平.小型电动无人机续航性能提升方法研究[J].飞行力学,2010,28(5):13-15.
LIU Fuhu, MA Xiaoping. Research for improving the endurance performance of minitype electric-powered UAV[J]. Flight Dynamics, 2010, 28(5): 13-15.
- [3] 据泽立,杨博,孙浩飞,等.面向电力智能巡检的多机器人系统协同路径规划算法[J].智慧电力,2020,48(6):92-97.
JU Zeli, YANG Bo, SUN Haofei, et al. Cooperative path planning of multi-robot system for power grid intelligent inspection[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 92-97.
- [4] 戚银城,江爱雪,赵振兵,等.基于改进 SSD 模型的输电线路巡检图像金具检测方法[J].电测与仪表,2019,56(22):7-12.
QI Yincheng, JIANG Aixue, ZHAO Zhenbing, et al. Fittings detection method in patrol images of transmission line based on improved SSD[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(22): 7-12.
- [5] CHENG F, WANG H, CUI P. Prediction of electric-powered fixed-wing UAV endurance[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(9): 2170-2179.

- [6] Li Yi, Xiang Jinwu. Optimization of range and endurance of a propeller UAV based on SQP algorithm[C]//IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS), Beijing, China, 2017.
- [7] 郭敬东, 陈彬, 王仁书, 等. 基于 YOLO 的无人机电力线路杆塔巡检图像实时检测[J]. 中国电力, 2019, 52(7): 17-23.
GUO Jingdong, CHEN Bin, WANG Renshu, et al. YOLO-based real-time detection of power line poles from unmanned aerial vehicle inspection vision[J]. Electric Power, 2019, 52(7): 17-23.
- [8] 江永生. QZSS 增强信号对 GPS 定位增强效果的分析[J]. 北京测绘, 2019, 33(8): 969-973.
JIANG Yongsheng. Analysis of enhanced effect of QZSS signal on GPS positioning [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2019, 33(8): 969-973.
- [9] 彭向阳, 金亮, 王锐, 等. 变电站机器人智能巡检技术及应用效果[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 223-232.
PENG Xiangyang, JIN Liang, WANG Rui, et al. Substation robot intelligent inspection technology and its application[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 223-232.
- [10] 胡志鹏, 李忠魁, 高峰, 等. 考虑时变故障率的架空输电线路最优巡检策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 9-17.
HU Zhipeng, LI Zhongkui, GAO Feng, et al. Research on optimal inspection strategy for overhead transmission line considering time-varying failure rate[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 9-17.
- [11] 金立斌, 许王莉, 朱利平, 等. 偏正态混合模型的惩罚极大似然估计[J]. 中国科学(数学), 2019, 49(9): 1225-1250.
JING Libin, XU Wangli, ZHU Liping, et al. Penalized maximum likelihood estimation for biased normal mixed models[J]. Scientia Sinica(Mathematica), 2019, 49(9): 1225-1250.
- [12] 汪首坤, 赵金枝, 姜明, 等. 基于圆形阵列标定板的张氏相机标定法[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(8): 859-863.
WANG Shoukun, ZHAO Jinzhi, JIANG Ming, et al. Zhang's camera calibration method based on circular array calibration plate[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(8): 859-863.
- [13] 吴育武, 刘佳陇, 陈春, 等. 基于多旋翼无人机的输电通道自主巡检技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(10): 84-89.
WU Yuwu, LIU Jialong, CHEN Chun, et al. Research on autonomous patrol inspection technology of power transmission channels based on multi-rotor UAV[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(10): 84-89.