

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.03.025

变电站二次设备全向巡检机器人精确定位与作业辨识

李杰^{1,2}, 董林杰¹, 汤小兵³, 张文彬¹, 王兴松¹

(1. 东南大学机械工程学院, 江苏 南京 211189; 2. 南京邮电大学自动化学院、人工智能学院, 江苏 南京 210023; 3. 南京国电南思科技发展股份有限公司, 江苏 南京 210007)

摘要:通过巡检机器人进行变电站二次设备的监测是提升电力设备自动化、智能化管理的重要方式,有利于保障电力工程设备的安全运行。文中开发了一种用于变电站二次设备自动化巡检的 Mecanum 轮式全向移动机器人,其具备自主导航定位与作业辨识的能力,可极大提升设备巡检效率及保护压板状态识别准确性。通过 Mecanum 轮的驱动方式实现巡检机器人在狭窄作业环境下的灵活运动与姿态调整,通过多轨道升降平台实现对 350~1 800 mm 高度范围内的二次设备及压板的图像采集与状态辨识。机器人采用基于激光雷达的即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM) 导航方法进行自主定位导航,并结合基于视觉的路径提取与跟踪算法进行姿态位置修正,实现在待测点位置的精确定位。同时,提出了基于颜色辨识的图像排列与状态辨识方法,针对二次设备保护压板连通状态进行识别和判断。实验结果表明,研制的变电站二次设备巡检机器人可以实现自主导航与位置精确定位,在路径跟踪过程中最大偏角和偏距分别为 $\pm 3^\circ$ 和 ± 8 mm。结合机器视觉与颜色辨识的压板辨识方法可以准确识别压板状态,识别准确率大于 95.80%,有助于提升机器人自动化的电力巡检作业水平。

关键词:电力巡检;压板状态辨识;巡检机器人;导航与定位;路径跟踪;机器人控制

中图分类号: TM930

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)03-0234-10

0 引言

自 20 世纪 80 年代电力改革以来,中国电力系统已经经历了几轮重要的变革与发展,电力技术不断升级,大量电网设备、变电站的建设极大地提升了电力系统的承载能力。变电站二次设备是指在变电站中用于电流、电压、保护等信号的测量、控制、保护和通信等方面的设备,通常用于低压、中压和高压电力系统中,来确保电力系统的安全和稳定运行。常见的变电站二次设备包括电流互感器、电压互感器、保护继电器、母线差动保护装置、通信装置等。电力设备的巡视、检测对于电力系统安全运行至关重要。

在过去,电力巡检主要依靠人工方式,但人工巡检效率低下,且存在安全隐患。随着机器人技术的发展,电力设备巡检机器人被大量研究和推广^[1-3]。巡检机器人能够自主完成电力设备的检测与监控,在高压线路^[4-7]、户外电力设备^[8-10]、室内二次设备^[11-12]等多种场景下可以发挥重要作用,具备高效率、高精度、高安全性等多方面优势,可极大提升电力设备的巡检效率。

针对变电站室内二次设备的安全检查,传统巡检方式通过人员现场巡视,工作量繁重,人工成本高,并且难以保证巡检效率和准确性,可能出现漏

检、漏查等情况,存在效率低、成本高等问题,而引入智能化的机器人巡检方式可以对上述问题进行提升与改进^[13-17]。针对变电站二次设备的巡检需求,近年来与智能机器人相关的研究和应用也不断增加。多种室内二次设备巡检机器人被开发和测试,比如:一种具有机械臂的无轨机器人,能够在狭窄、复杂的室内变电站中自主导航和检测设备^[18];一种轨道式巡检机器人,可以对设备指示灯、设备温度、声音状况等进行定期巡检并综合分析判断,快速全面地掌握变电站内二次设备的运行情况^[19];一种柔索驱动的电力巡检机器人,可有效解决变电站室内复杂场景下运动系统误差大而导致巡检点位覆盖范围窄的问题^[20];一种具有灵活的无轨式多自由度机械臂操作的电力巡检机器人,采用模糊比例-积分-微分控制提升了多自由度关节的定位控制精度,可满足配电站巡检工作要求^[21]。多种形式及功能的变电站二次设备巡检机器人有助于提升巡检效率、降低人工成本,并通过实时反馈到监控系统极大提升变电站设备的运行安全性与智能化程度^[22]。

变电站二次设备巡检机器人依旧面临着诸多亟待突破的技术难点。在机器人室内精确定位方面,变电站内部由于存放了大量设备,如变压器、开关柜、电缆等,环境复杂度高,同时由于存在各种干扰源,如高压电场、磁场等,机器人定位传感器测量准确性受到极大影响^[23],机器人通过多种传感器融

收稿日期: 2023-10-18; 修回日期: 2023-12-29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFF0500900)

合与协作可有效提高导航与定位精度^[24]。在二次设备状态判断方面,由于设备种类和形式繁多,机器人需要具备准确的状态评估和判断能力^[25-28]。利用机器人自动导航技术与智能识别技术可以提高二次设备监控和辨识的效率与准确性,为变电站二次设备的安全可靠运行提供保障。

文中针对变电站二次设备巡检过程中遇到的难题,设计并研制基于 Mecanum 轮的全向移动巡检机器人,同时可以携带工业相机与热成像仪等测量仪器在垂直方向进行精确高度调节。Mecanum 轮的驱动形式使机器人具备了三自由度灵活运动和姿态调节的能力。通过多轨道升降方式,可以确保机器人对不同高度的变电站二次设备进行视觉、温度等方式的监控与辨识。为实现对室内电力二次设备的精确定位与导航,文中提出了基于激光雷达的即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)导航与基于视觉的路径跟踪相结合的精确定位方法。文中提出基于图像处理与颜色辨识的二次设备的保护压板状态辨识方法,可实现准确识别不同颜色压板的连通状态,并回传到智能运维系统进行存储与管理。并且,在变电站室内环境下对巡检机器人进行实验与测试,验证了机器人系统的导航运行精度与作业识别效果。文中研制的巡检机器人系统极大提升了变电站二次设备的智能化、自动化巡检水平。

1 巡检机器人设计与分析

1.1 巡检机器人平台

室内环境下的变电站二次设备通常是密集分布,一般由多组设备柜构成,尤其是早期建设的变电站二次设备安装位置较为集中,预留给机器人转向与姿态调整的空间少。针对狭窄、密集的变电站二次设备的室内环境,文中开发一种基于 Mecanum 轮全向驱动的巡检机器人,如图 1 所示,机器人整体系统包括全向移动平台、多轨道升降平台、监控与测量平台等。

表 1 为变电站二次设备巡检机器人性能参数,其中驱动轮采用 127 mm 直径的 Mecanum 轮,机器人通过 4 组 Mecanum 轮的驱动形式实现全向移动。多轨道升降平台由 2 组同步轨道、2 组步进电机、多个限位开关等部件组成,可实现监控与测量平台在 350~1 800 mm 的不同高度位置精确控制。机器人通过内部安装的锂电池进行供电,可实现 4 h 的连续工作,并且可以在非工作状态下自动返回充电位置进行充电。

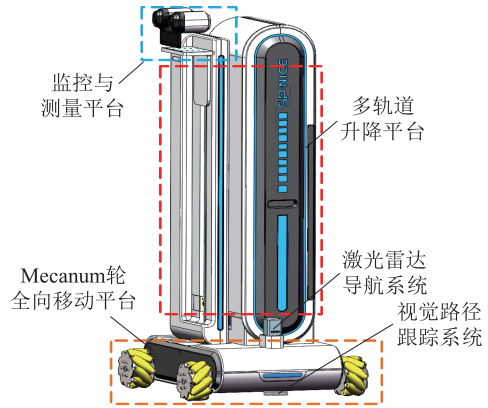


图 1 变电站二次设备巡检机器人平台

Fig.1 Substation secondary equipment inspection robot platform

表 1 变电站二次设备巡检机器人性能参数

Table 1 Performance parameters of substation secondary equipment inspection robot

参数	数值
外形尺寸(含驱动轮)	710 mm×630 mm×1 380 mm
驱动轮直径/mm	127
负载性能/kg	120
升降高度/mm	350~1 800
最高速度/(m·min ⁻¹)	30
最大工作时间/h	4
转向半径/mm	0

图 2 为巡检机器人系统组成。机器人控制系统主要由运动控制系统、激光雷达导航系统、视觉路径跟踪系统、压板状态识别系统等组成。运动控制系统包括移动控制系统电路、升降控制系统电路等硬件电路,其中升降控制系统中增加限位与反馈传感器并通过 I/O 接口反馈位置信息,保障升降平台运行安全性;视觉路径跟踪系统由位于底部中心位置的跟踪相机与识别主机(研华 MIO-2261N)组成,可实现对设定路径的跟踪运行与定点停车;压板状态识别系统通过工业相机获取图像,并通过机器人控制主机进行数据处理与压板状态辨识;导航系统由激光雷达、惯性传感器(inertial measurement unit, IMU)等组成,采用通用串行总线(universal serial bus, USB)进行数据反馈,并通过机器人控制主机与运动控制系统、视觉路径跟踪系统进行数据通信。

变电站二次设备巡检机器人系统的功能包括:

(1) 运动与升降功能。通过 Mecanum 轮移动平台进行全向移动,并结合多轨道升降平台到达待测设备的指定高度。

(2) 自主导航功能。结合激光雷达、里程数据以及 IMU 数据进行室内环境定位与地图构建,并按照工作流程到达待测设备的位置。

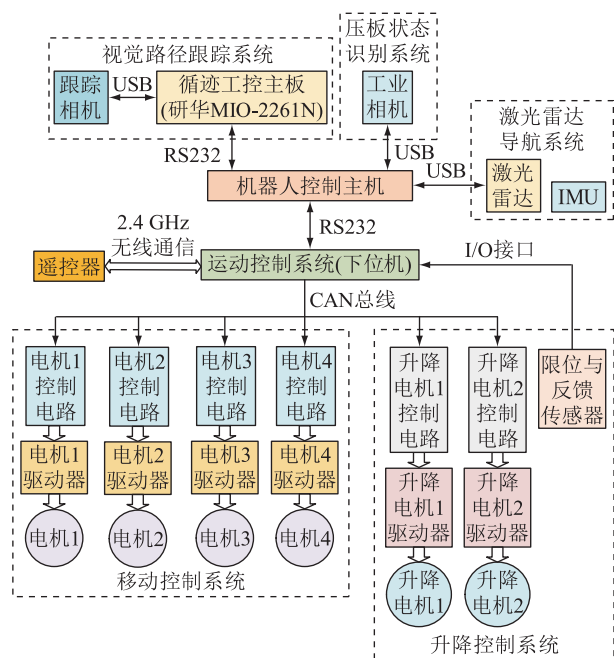


图2 巡检机器人系统组成

Fig.2 Inspection robot system composition

(3) 视觉路径跟踪与精确定位。由于采用SLAM技术导航与定位的精度有限,为实现毫米级别的机器人位置定位,通过获取设定路线的偏角、偏距以及停止位置进行机器人精确定位,可以有效减少位置偏移对压板状态辨识带来的干扰与影响。

(4) 压板状态辨识。通过监控与测量平台中的工业相机可以获取二次设备保护压板的图像,并结合改进的图像处理与颜色辨识方法进行压板类型与连通状态识别。

1.2 机器人移动与升降运动分析

图3为变电站二次设备巡检机器人的运动分析。建立机器人的运动坐标系 XOY ,机器人的前进速度为 v_x ,左右移动速度为 v_y ,旋转角速度为 ω 。

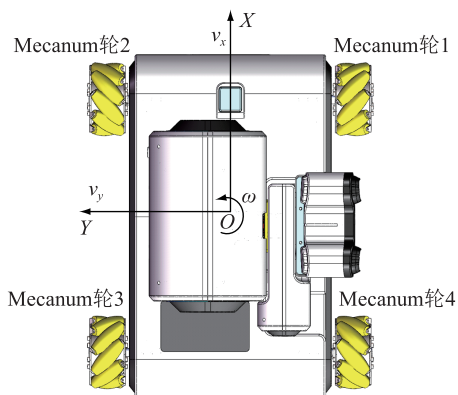


图3 机器人全向移动分析

Fig.3 Robot omnidirectional motion analysis

通过分析机器人运行速度与各Mecanum轮的

运动关系,可得机器人逆运动学方程为:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = \frac{1}{R} \left[v_x + v_y \cot \alpha + \left(\frac{W}{2} + \frac{L}{2} \cot \alpha \right) \omega \right] \\ \dot{\theta}_2 = \frac{1}{R} \left[v_x - v_y \cot \alpha - \left(\frac{W}{2} + \frac{L}{2} \cot \alpha \right) \omega \right] \\ \dot{\theta}_3 = \frac{1}{R} \left[v_x + v_y \cot \alpha - \left(\frac{W}{2} + \frac{L}{2} \cot \alpha \right) \omega \right] \\ \dot{\theta}_4 = \frac{1}{R} \left[v_x - v_y \cot \alpha + \left(\frac{W}{2} + \frac{L}{2} \cot \alpha \right) \omega \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{\theta}_i$ ($i=1,2,3,4$)为Mecanum轮 i 的转速; R 为Mecanum轮的半径; W 、 L 分别为机器人前后、左右轮的轮距; α 为Mecanum轮上小滚轮的倾斜角度。

矩阵形式如式2所示,其中 $K_p = \frac{W}{2} + \frac{L}{2} \cot \alpha$,

$$[\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3 \ \dot{\theta}_4]^T \in \mathbf{R}^{4 \times 1}, [v_x \ v_y \ \omega]^T \in \mathbf{R}^{3 \times 1}.$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & \cot \alpha & K_p \\ 1 & -\cot \alpha & -K_p \\ 1 & \cot \alpha & -K_p \\ 1 & -\cot \alpha & K_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

Mecanum轮巡检机器人在导航、路径跟踪与定位过程中利用传感器测量机器人位置偏差,并根据逆运动学方程控制机器人每个轮子进行速度修正。

同时,机器人通过编码器获取各Mecanum轮的转速,并通过运动学方程计算机器人的运行速度:

$$\begin{cases} v_x = \frac{R}{4} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \\ v_y = \frac{R}{4} (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4) \tan \alpha \\ \omega = \frac{R}{4} (1/K_p) (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \end{cases} \quad (3)$$

矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \tan \alpha & -\tan \alpha & \tan \alpha & -\tan \alpha \\ \frac{1}{K_p} & -\frac{1}{K_p} & -\frac{1}{K_p} & \frac{1}{K_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

如图4所示,在巡检机器人高度方向,通过2组升降轨道对监控与测量平台进行提升控制,2个轨道坐标系分别为 $X_1Y_1Z_1$ 与 $X_2Y_2Z_2$ 。 X 与 Y 坐标轴方向通过机器人运动系统来控制,高度方向 Z 坐标轴

通过 2 个轨道的高度(分别为 z_1 和 z_2)进行叠加,机器人提升高度计算公式为:

$$h = z_1 + z_2 \quad (5)$$

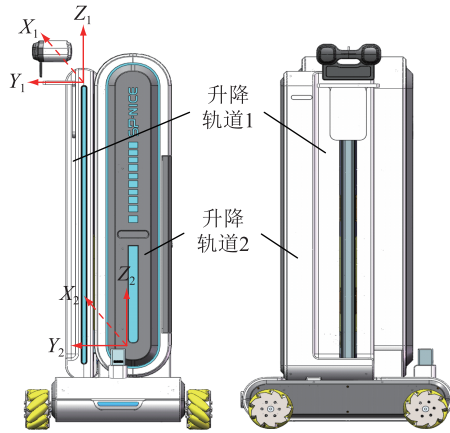


图 4 巡检机器人升降运动分析

Fig.4 Lifting motion analysis of inspection robot

在高度调节方面,优先通过 z_1 进行高度提升,当 z_1 达到极限位置(最大高度 900 mm),会触发升降轨道 1 上端限位开关,进而机器人通过升降轨道 2 调整 z_2 的大小。

2 机器人导航与精确定位

2.1 机器人导航与定位方式

为实现变电站二次设备巡检机器人在室内环境下的导航与定位,采用基于激光雷达、IMU 与里程数据的 SLAM 导航方法,实现机器人的自主运行。同时,由于 SLAM 导航的定位精度为厘米级别,且机器人姿态调整也可能存在较大偏差,文中采用 SLAM 导航与路径跟踪结合的精确定位方法,以实现毫米级别的坐标定位,并调整修正航向角(与循迹线的偏角)保证机器人姿态准确。图 5 为变电站二次设备室内布局以及机器人运行路线,其由导航路线与跟踪路线组成。

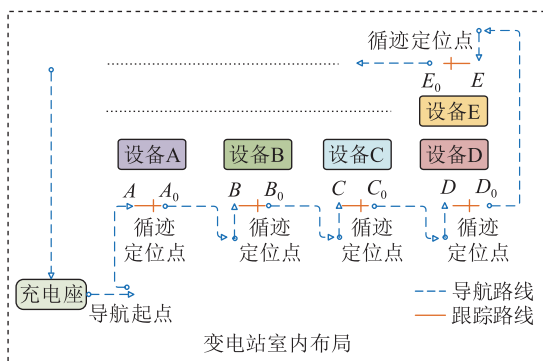


图 5 变电站二次设备巡检机器人导航与定位方式

Fig.5 Navigation and positioning of substation secondary equipment inspection robot

为更加准确计算机器人实时的位置、速度与姿态角度,采用多组传感器数据进行位置与状态估计。编码器实时采集机器人 4 个 Mecanum 轮的转速,并根据运动学方程计算机器人在 3 个自由度上的速度值 v_x 、 v_y 和 ω 。但由于运行过程中机器人可能出现打滑、颠簸情况,通过速度直接积分获得的机器人航向角的累计误差较大,所以使用 IMU 来获取机器人的旋转角。IMU 采用 MPU9250 传感器,同时采集三轴加速度、三轴陀螺仪与三轴磁力计数据,并使用 Madgwick 算法计算其四元数,获取机器人在运行过程中的航向角。

在 SLAM 导航过程中,机器人首先基于 Rao-Blackwellized 粒子滤波器(Rao-Blackwellized particle filter, RBPF) Gmapping 方法构建室内环境地图。RBPF 是用于动态系统状态估计的粒子滤波器的变种,结合粒子滤波和贝叶斯推理来提高状态估计的效率和准确性。RBPF 原理是将状态向量分为两部分,一部分使用贝叶斯推理进行解析估计,另一部分则使用粒子滤波进行估计。使用贝叶斯推理进行估计的部分被称为条件线性高斯(conditional linear Gaussian, CLG)部分,而使用粒子滤波进行估计的部分则被称为条件非线性(conditional nonlinearity, CNL)部分。

Gmapping 方法构建地图通过估计地图上的联合后验概率 $p(x_{1:t}, m | z_{1:t}, u_{1:t-1})$ 和机器人的轨迹 $x_{1:t} = x_1, \dots, x_t$, 其中 m 为环境地图信息。在给定移动机器人获得的观测值 $z_{1:t} = z_1, \dots, z_t$ 和里程测量值 $u_{1:t-1} = u_1, \dots, u_{t-1}$ 的情况下进行估计,公式为:

$$p(x_{1:t}, m | z_{1:t}, u_{1:t-1}) = p(m | x_{1:t}, z_{1:t})p(x_{1:t} | z_{1:t}, u_{1:t-1}) \quad (6)$$

首先估计机器人的轨迹 $p(x_{1:t} | z_{1:t}, u_{1:t-1})$,然后在已知机器人轨迹和传感器观测数据情况下计算给定轨迹的地图 $p(m | x_{1:t}, z_{1:t})$ 。由于地图构建依赖机器人的姿态估计, RBPF 使用粒子滤波来估计机器人位姿,最常用粒子滤波为序贯重要性重采样(sequential importance resampling, SIR)滤波器,其通过不断迭代来估计每一时刻机器人的位姿。通过采样、计算权重、重采样、地图的步骤估计进行地图构建。图 6 为机器人对变电站室内环境的地图构建与导航过程。

构建变电站室内地图环境后,采用 A* 算法或局部路径规划器(Teb_local_planner)进行路径规划并到达指定位置(如 A、B、...),该位置在机器人跟踪路径上。为实现高精度的停车定位,机器人自动切换为路径跟踪模式,并精确到达指定循迹定位点

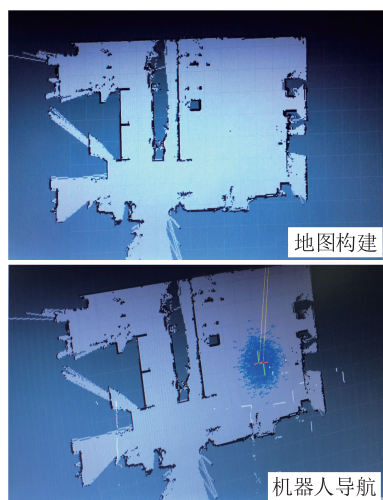


图6 巡检机器人地图构建与导航

Fig.6 Map construction and navigation of inspection robot

(如 A_0, B_0, \dots) 后停车进行巡检作业。机器人导航与定位的步骤如下:

(1) 巡检机器人以充电座为起点出发,运动模式为导航模式,按导航路线运行;

(2) 到达指定作业位置 A , 切换运动模式为路径跟踪模式,沿地面设置的路线跟踪并不断修正机器人的偏角与偏距;

(3) 当机器人通过路径跟踪识别到停车标志位置 A_0 后停车;

(4) 机器人通过升降平台达到待检测设备的高度位置,使用相机完成图像采集与分析;

(5) 机器人升降平台下降到初始状态,运动模式切换为导航模式,采用 SLAM 导航到下一点进行作业,依次在各个设定位置进行巡检作业。

在机器人巡检过程中,SLAM 导航系统一直处于运行状态,但机器人的运动模式在导航、路径跟踪之间切换。在机器人路径跟踪过程中,激光雷达、里程编码器、IMU 的数据仍实时上传到导航系统并更新机器人的实时位置、速度。待一次路径跟踪结束后,机器人的运动模式切换为导航模式,机器人运动转换为导航系统控制。

2.2 路径跟踪与定位原理

巡检机器人通过导航到达初步的作业位置,由于导航运行的精度有限,为实现高精度的工作点停车定位,采用基于机器视觉的路径跟踪与定位方法。巡检机器人通过位于车体正下方的相机采集待跟踪线路,并通过图像处理完成光照调节、图像预处理、图形匹配、路线提取、中心线拟合、偏差计算与停车位置识别等。图 7 为机器人跟踪路径样式与路径识别效果。通过跟踪预先设定路径线,机器

人对其位置偏差与姿态偏差(偏角 α 和偏距 d) 进行精确修正,且到达停车标志位置停车作业。跟踪路径样式为:背景颜色为白色,路径颜色为黑色,宽度为 5 mm,路径总长度为 300 mm,同时在路径末端设置 20 mm×20 mm 黑色方块为停车位置。

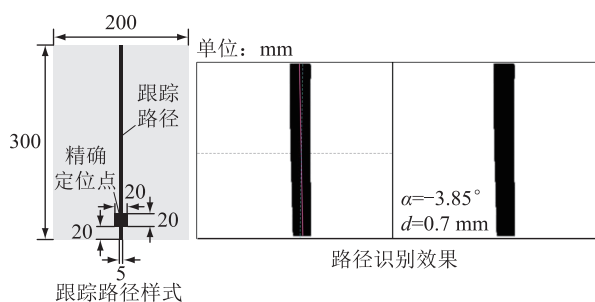


图7 巡检机器人路径跟踪与精确定位

Fig.7 Path tracking and accurate positioning of inspection robot

在路径识别与跟踪过程中,光照调节可以确保获得足够清晰的图像,图像预处理包括中值滤波、阈值分割和去除噪点。同时,通过图形匹配与路径提取过滤图像中非路径的噪点与干扰,并获取二值化的路径图像。

路径中心线拟合过程中采用霍夫变换,在图像坐标系 xOy 中,路径中心线方程可以假设为:

$$y = a_0x + b_0 \quad (7)$$

式中: a_0 为直线的斜率; b_0 为直线在 x 轴向上的截距。将直线映射到霍夫空间后,直线方程可以表示为:

$$b_0 = -xa_0 + y \quad (8)$$

图像空间中的每条线都可以描述为霍夫空间中的一个点,如图 8 所示,点 (x_i, y_i) 和点 (x_j, y_j) 分别对应霍夫空间中的 2 条直线:

$$\begin{cases} b = -x_i a + y_i \\ b = -x_j a + y_j \end{cases} \quad (9)$$

直线方程可以转换为极坐标系下方程:

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad (10)$$

其中,有序数对 (θ, ρ) 为极坐标。因此,跟踪路径的中心线方程可以表示为:

$$y = \frac{-\cos \theta_0}{\sin \theta_0} x + \frac{\rho_0}{\sin \theta_0} \quad (11)$$

式中: (θ_0, ρ_0) 为直线方程 $y = a_0x + b_0$ 转换后的极坐标。

a_0 和 b_0 可以表示为:

$$\begin{cases} a_0 = -\cos \theta_0 / \sin \theta_0 \\ b_0 = \rho_0 / \sin \theta_0 \end{cases} \quad (12)$$

在极坐标系中,点 (θ_0, ρ_0) 代表图像坐标系中的直线,点 (θ_0, ρ_0) 的曲线数量代表图像坐标系中

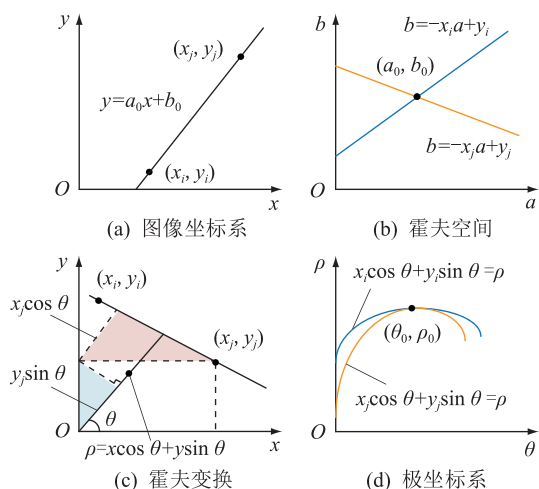


图8 基于霍夫变换的路径中心线提取

Fig.8 Path center line extraction based on Hough transform

直线上的点数。将图像坐标系中的直线转换为极坐标系中的点,可以确定图像坐标系中点数最多的直线为路径中心线。根据路径方程参数 a_0 和 b_0 的数值,路径的偏角和偏距可表示为:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{180 \arctan(-a_0)}{\pi} \\ d = \frac{x_c - b_0}{a_0} - \frac{y_c}{2} \end{cases} \quad (13)$$

式中: (x_c, y_c) 为图像中心坐标。

机器人在沿设定的路径跟踪运行时不断修正偏角 α 和偏距 d ,并在识别到停车标志后停车,进行识别与监测作业。

3 二次设备保护压板状态辨识

二次设备保护压板在布局上呈现密集性,同时在功能上表现出多样性、集成性与复合性,增加了运维人员误操作的可能性。目前的变电站站内设备压板管理模式较为单一,缺乏相关历史数据,无法实时查阅和比对压板数据,给设备运行带来了极大的安全隐患。所以,通过巡检机器人自动监测和辨识保护压板的状况可解决上述问题。

基于图像处理的二次设备状态辨识通常是利用计算机视觉技术对设备进行图像处理,提取关键信息,对设备状态进行判断。图像处理的流程一般包括:通过安装的相机获取变电站二次设备的图像;对获取的图像进行预处理,包括图像去噪、增强、灰度化等处理;对预处理后的图像进行特征提取,如提取设备的轮廓、形状、颜色等特征;根据设备的特征,使用分类算法对设备的状态进行分类,如正常、异常、损坏等;根据分类结果对设备的状态

进行判断,若发现异常或损坏状态,则需要及时维修和更换,确保变电站的安全稳定运行。

由于压板颜色和种类较多,文中采用基于图像颜色信息的颜色匹配与辨识方法来定位、排列和分离图像中的压板。该方法可以提高设备管理的效率和准确性,降低人为误操作的风险,保障电力运维的安全。首先,巡检机器人通过升降平台与工业相机采集二次设备图像。为识别保护压板在图像中的位置与排列关系,对原始图像进行颜色分割(与预设样本颜色匹配),并在分割后的压板二值化图像中进行搜索。由于二次设备保护压板的机柜为标准化设计,压板相对位置及间距为固定值。从图像坐标原点向中心位置搜索,搜索二值图像素中首次出现非零值的坐标位置,取该位置的坐标数列为原始图像的标定点,建立与图像对应匹配点的仿射关系。根据获取图像的大小和位置关系,设定固定尺寸的矩形框,即感兴趣区域(region of interest, ROI)作为每个保护压板的辨识区域,进行压板状态识别。

通过矩形框分块完成标准化图像后,对每一块ROI进行单独的状态辨识处理,利用小顶堆算法计算出二值图中非零点 y 坐标最小的10个点,然后计算出这些点的 x 坐标平均值,得到图像中开关上下连接点的位置。接着,可以通过颜色辨识连接点中央处是否出现对应颜色来判断开关是否连通,从而完成状态辨识。

为了提高压板状态辨识的精度,也可以采用预先剪切出的标准连通状态的图像作为模板,与定位好的压板位置进行初步匹配。如果计算出相关系数大于所设阈值,则判定辨识图像中的压板开关可能处于连通状态。同时,为检验当前压板开关状态是否与正确设定的方式相符,使用预设的正确标准图像与待测压板图像进行算术减运算,运算结果为检测图像与标准图像不符部分,通过判断不符部分的元素是否超过阈值综合得出开关状态。模板匹配方法由于计算复杂并可能出现识别错误的情况,只用来快速评估压板状态而不作为最终标准。

图9为巡检机器人对压板状态辨识的工作过程。巡检机器人首先对采集的设备图像进行标准化,获取待处理区域图像,将原始图像与颜色样本匹配获得二值图。对二值图像进行滤波去噪处理,搜索并确定保护压板上下端点在图像中的位置与坐标。根据图像压板上下两端中央位置区域图像信息值来判断压板的闭合状态。压板状态包括:断开为0,连通为1;备用保护压板为2。压板标号、位

置、状态信息通过巡检机器人记录并发送到后台管理系统。

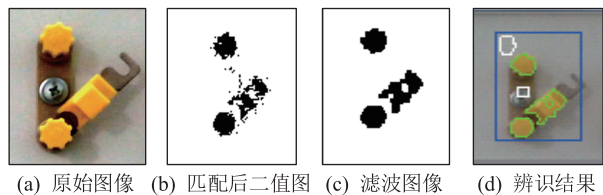


图9 保护压板状态辨识过程

Fig.9 Protection plate status identification process

4 现场实验测试

4.1 机器人导航与路径跟踪实验

通过现场运行测试可有效验证变电站二次设备巡检机器人的运行精度与作业稳定性。设置巡检机器人在湖北某变电站室内环境下进行实验。在变电站室内实验中,机器人通过自主导航系统能进行自主导航运行,可以有效地进行避障与路径规划。同时,地面预先设定了路径跟踪线,机器人通过路径跟踪快速修正自身位置误差与姿态角度,并在识别到停车标志后停车。

图10为巡检机器人导航实验过程中的实际轨迹与理想轨迹。在自主导航运行中,建立室内全局坐标系 X_qOY_q ,机器人从设定的起点出发并在设备外侧、内侧进行路径规划与避障,到达指定的地图坐标。

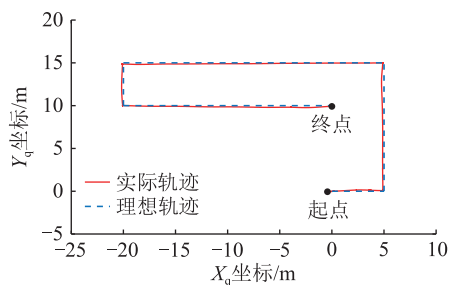


图10 巡检机器人导航运行轨迹

Fig.10 Inspection robot navigation trajectory

图11为机器人在导航运行过程中 X_q 坐标、 Y_q 坐标的误差曲线。机器人通过SLAM导航可以控制机器人到达指定的位置坐标, X_q 坐标、 Y_q 坐标的误差可以保持在0.06 m以内。此时,机器人的定位精度较高,但还未满足最终的作业定位需求。

机器人路径跟踪过程中的偏角和偏距变化如图12所示。机器人通过路径跟踪可以不断修正机器人的位置偏差,调整姿态方向。在路径跟踪起始阶段,由于导航定位精度有限,机器人的偏角和偏距都有可能较大。如图12(a)所示,在路径跟踪过程中,机器人的偏角不断被修正,并最终保持在 $\pm 3^\circ$

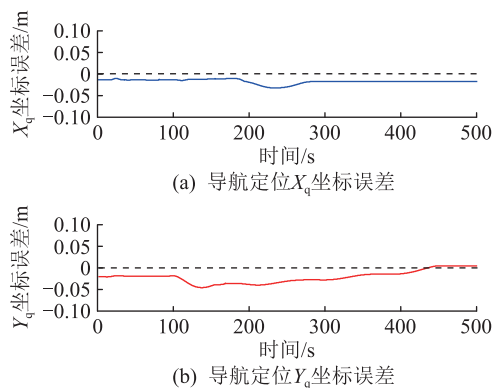


图11 巡检机器人导航坐标误差曲线

Fig.11 Navigation coordinate error curves of inspection robot

以内。如图12(b)所示,在路径跟踪起始阶段,偏距达30 mm,通过机器人跟踪运动调整,偏距被有效修正,最大偏距保持在 ± 8 mm以内。实验结果表明机器人可以实现高精度的路径跟踪,并在路径跟踪末端的停车标志位置稳定停车,为二次设备辨识提供了准确的作业定位。

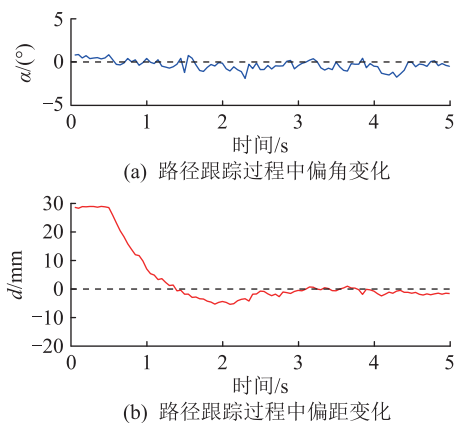


图12 巡检机器人路径跟踪结果

Fig.12 Path tracking results of inspection robot

4.2 机器人压板辨识测试

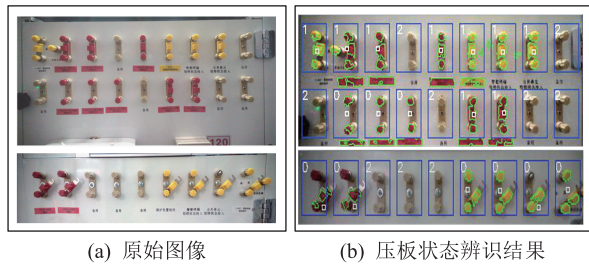
变电站室内二次设备机柜如图13所示,保护压板数量较多,颜色种类多样,分布位置不固定。通过研制的巡检机器人可以替代人工进行自动化巡视与压板状态辨识,并把相关数据接入智能运维系统,实现智能化的变电站二次设备管理与监控。

巡检机器人对二次设备压板图像的辨识处理效果如图14所示。机器人捕获的原始图像包括母线保护压板和线路保护压板。巡检机器人对图像中的保护压板进行定位与排列,在压板状态辨识结果中,经过颜色匹配定位,保护压板区域通过蓝色识别框划分出,并在识别框左上角的位置显示该压板状态辨识结果,0表示断开状态,1表示连通状态,2则表示其为备用保护压板。



图 13 巡检机器人采集的二次设备压板图像

Fig.13 The secondary equipment plate images collected by the inspection robot



(a) 原始图像

(b) 压板状态辨识结果

图 14 保护压板状态辨识结果

Fig.14 Results of protection plate state identification

为了验证保护压板状态辨识的准确性,在实验过程中,对一系列符合国网标准的压板开关进行图像采集与识别测试。表 2 为机器人对保护压板不同状态的识别准确率。通过基于颜色辨识的图像排列与状态辨识方法,机器人可以实现准确识别保护压板的断开状态、连通状态,准确率分别达到 96.56%与 95.80%,对于不在使用状态下的备用压板识别准确率为 98.33%。实验结果表明,机器人可以完成对变电站二次设备保护压板的较高准确度的识别与状态区分,有助于实现变电站二次设备的智能、快速巡检。受环境光照变化、拍摄方位等因素影响,存在部分未识别情况,可针对识别参数以及机器人巡检姿态进一步优化以提升机器人系统的稳定性及可靠性。

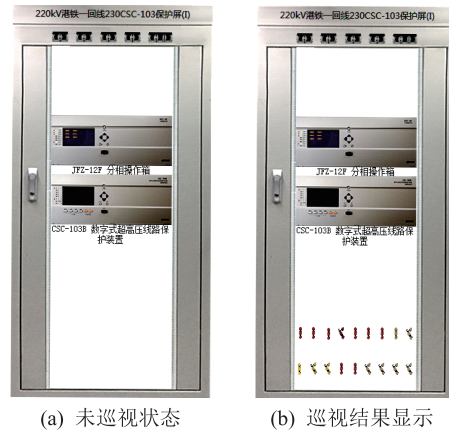
表 2 保护压板状态识别准确率

Table 2 Protection plate status identification accuracy

保护压板状态	测试数量	识别正确数量	准确率/%
断开状态	320	309	96.56
连通状态	262	251	95.80
备用压板	60	59	98.33

巡检机器人对变电站室内二次设备的保护压板依次进行状态辨识,并将结果数据上传至管理系统,完成对二次设备状态的实时管理与监控。图 15 为二次设备机器人巡视结果在管理系统中的显示效果。未巡视前,在管理系统界面中二次设备机柜呈空白状态;完成机器人巡视后,各保护压板状态于管理系统界面实时显示。通过机器人作业可极

大提升变电站二次设备的智能化巡检水平。



(a) 未巡视状态

(b) 巡视结果显示

图 15 二次设备机器人巡检结果

Fig.15 Robot inspection results of secondary equipment

实验测试结果表明,巡检机器人可以准确导航与定位,到达指定的作业位置,并实现对变电站二次设备压板状态的准确识别,有助于提升变电站电力巡检的自动化、智能化的水平。

5 结论

针对变电站高效、准确的巡检需求,文中研制了一种用于变电站二次设备巡检的 Mecanum 轮式机器人,可实现对二次设备高效、精确的检测与状态辨识。机器人以 Mecanum 轮的驱动形式在室内狭小环境下进行灵活运动与姿态调整,并通过多轨道升降平台精确控制检测相机在高度上的位置,范围为 350~1 800 mm,可实现二次设备机柜的全覆盖图像采集。机器人通过基于激光雷达的 SLAM 导航与基于视觉的路径跟踪相结合的方式,实现了对室内机柜位置的精确定位。同时,机器人基于颜色辨识以及图像处理方法对待测区域进行图像排列及保护压板状态辨识。

变电站室内环境下的实验结果表明巡检机器人具备自主导航与精确定位能力,在路径跟踪与姿态调整过程中,最大偏角与偏距可分别保持在 $\pm 3^\circ$ 与 ± 8 mm 范围内。压板辨识方法可以准确识别压板连通状态,识别准确率大于 95.80%。该巡检机器人系统具备良好的运行与作业能力,有助于推动二次设备巡检的自动化与智能化发展。

未来的工作中,对于巡检机器人将进行更多的实地测试研究,优化与提升其性能,并结合更加快速、准确的智能识别算法进行巡检作业,提升电力运维系统的智能化水平。

参考文献:

[1] GAO Y, SONG G M, LI S T, et al. LineSpyX: a power line in-

- spection robot based on digital radiography[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4759-4765.
- [2] DONG L J, CHEN N C, LIANG J W, et al. A review of indoor-orbital electrical inspection robots in substations[J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2023, 50(2): 337-352.
- [3] 刘乐, 隗震, 姜志鹏, 等. 变电站巡检机器人无线充电系统辐射屏蔽设计[J]. 电瓷避雷器, 2022(6): 62-69.
LIU Le, WEI Zhen, JIANG Zhipeng, et al. Radiation shielding design of wireless charging system for substation inspection robot[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6): 62-69.
- [4] IVERSEN N, SCHOFIELD O B, COUSIN L, et al. Design, integration and implementation of an intelligent and self-recharging drone system for autonomous power line inspection[C]//2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). ACM, 2021: 4168-4175.
- [5] LI X P, SHANG D Y, LI F J, et al. The climbing performance analysis of a robot for power line inspection with retractable double serial manipulators[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(9): 4946-4961.
- [6] YANG L, FAN J F, LIU Y H, et al. A review on state-of-the-art power line inspection techniques[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(12): 9350-9365.
- [7] ALHASSAN A B, ZHANG X D, SHEN H M, et al. Power transmission line inspection robots: a review, trends and challenges for future research[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 118: 105862.
- [8] 朱天敬, 郭健虎, 张斌, 等. 智能巡检机器人应用问题与解决方案[J]. 黑龙江电力, 2018, 40(4): 307-310.
ZHU Tianjing, GUO Jianhu, ZHANG Bin, et al. Application problem and solution of intelligent inspection robot[J]. Heilongjiang Electric Power, 2018, 40(4): 307-310.
- [9] 车玉秋, 时存, 郭丹蕊. 移动电力巡检机器人底盘的设计与研究[J]. 南方农机, 2019, 50(22): 126-127.
CHE Yuqiu, SHI Cun, GUO Danrui. Design and research of mobile electric inspection robot chassis[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2019, 50(22): 126-127.
- [10] CHENG M, XIANG D. The design and application of a track-type autonomous inspection robot for electrical distribution room[J]. Robotica, 2020, 38(2): 185-206.
- [11] ZHANG Z L, FU B, LI L Q, et al. Design and function realization of nuclear power inspection robot system[J]. Robotica, 2021, 39(1): 165-180.
- [12] 姚传涛, 褚海洋, 王坤, 等. 室内电力巡检机器人的设计与实现[J]. 电力设备管理, 2021(5): 47-48.
YAO Chuantao, CHU Haiyang, WANG Kun, et al. Design and realization of indoor electric power inspection robot[J]. Electric Power Equipment Management, 2021(5): 47-48.
- [13] 黄山, 吴振升, 任志刚, 等. 电力智能巡检机器人研究综述[J]. 电测与仪表, 2020, 57(2): 26-38.
HUANG Shan, WU Zhensheng, REN Zhigang, et al. Review of electric power intelligent inspection robot[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 26-38.
- [14] 刘宾, 伏磊, 王一琛, 等. 关于电力巡检机器人的研究[J]. 电工技术, 2022(6): 3-5, 9.
LIU Bin, FU Lei, WANG Yichen, et al. Research on power inspection robot[J]. Electric Engineering, 2022(6): 3-5, 9.
- [15] CHEHRI A, JEON G, FOFANA I, et al. Accelerating power grid monitoring with flying robots and artificial intelligence[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2021, 5(4): 48-54.
- [16] 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.
- [17] 杨权, 樊绍胜. 基于图像预处理和语义分割的电力巡检机器人视觉导航方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 248-258.
YANG Quan, FAN Shaosheng. Visual navigation method for electric power inspection robot based on image preprocessing and semantic segmentation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 248-258.
- [18] WANG C J, YIN L, ZHAO Q, et al. An intelligent robot for indoor substation inspection[J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2020, 47(5): 705-712.
- [19] 陈学伟, 王伟, 田新成, 等. 基于机器视觉的变电站二次设备智能巡检方法[J]. 电工技术, 2022(18): 25-27.
CHEN Xuewei, WANG Wei, TIAN Xincheng, et al. Intelligent inspection method for secondary equipment in substation based on machine vision[J]. Electric Engineering, 2022(18): 25-27.
- [20] 邹蓉蓉, 黎大健, 覃剑, 等. 变电站室内索系驱动巡检机器人系统设计与运动学分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 89-97.
WU Rongrong, LI Dajian, QIN Jian, et al. System design of an indoor inspection robot driven by a flexible cable in a substation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 89-97.
- [21] 陈辉, 聂铭. 基于多自由度检测末端的室内无轨式电力巡检机器人研究[J]. 制造业自动化, 2022, 44(3): 90-92, 130.
CHEN Hui, NIE Ming. Research on indoor trackless power inspection robot based on multi-degree-of-freedom detection terminal[J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(3): 90-92, 130.
- [22] 彭志强, 张琦兵, 郑明忠, 等. 基于 GSP 的变电站二次设备一体化运维设计[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 180-185.
PENG Zhiqiang, ZHANG Qibing, ZHENG Mingzhong, et al. Integrated operation and maintenance design of secondary equipment in substation based on GSP[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 180-185.
- [23] 刘磊, 许晓伟, 周桂珍, 等. 基于 UWB 和 IMU 的电力巡检机器人定位方法[J]. 自动化博览, 2022, 39(4): 46-51.

- LIU Lei, XU Xiaowei, ZHOU Guizhen, et al. Localization method of electric power inspection robot based on UWB and IMU [J]. Automation Panorama, 2022, 39(4):46-51.
- [24] 徐波,林谋,左桐舟,等. 基于北斗的多传感器融合机器人定位算法[J]. 供用电, 2022, 39(4):45-51.
- XU Bo, LIN Mou, ZUO Tongzhou, et al. Multi-sensor fusion robot positioning algorithm based on BeiDou [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(4):45-51.
- [25] 周健,李岩,张克声. 变电站二次系统设备屏柜线套标签智能识别系统[J]. 机械与电子, 2018, 36(11):67-70.
- ZHOU Jian, LI Yan, ZHANG Kesheng. Intelligent identification system for equipment screen cabinet line label of substation secondary system [J]. Machinery & Electronics, 2018, 36(11):67-70.
- [26] 王业,崔玉,陆兆沿,等. 基于 CNN 图像识别算法的保护装置智能巡视技术[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6):252-257.
- WANG Ye, CUI Yu, LU Zhaoyan, et al. Intelligent inspection technology of protection device based on convolution neural network image recognition algorithm [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6):252-257.
- [27] 钱金戈,徐丹,史豪杰. 图像识别技术在变电站屏柜巡检中的应用[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(3):7-8, 11.
- QIAN Jinge, XU Dan, SHI Haojie. Application of operation and maintenance of substation cabinet based on image recognition [J]. Industrial Control Computer, 2021, 34(3):7-8, 11.
- [28] LIU M, LI Z, LI Y C, et al. A fast and accurate method of power line intelligent inspection based on edge computing [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 71:3506512.

作者简介:



李杰

李杰(1990),男,博士,讲师,研究方向为巡检机器人与导航控制(E-mail:jieli@njupt.edu.cn);

董林杰(1994),男,博士在读,研究方向为机器人设计与控制;

汤小兵(1980),男,学士,高级工程师,从事继电保护运维应用工作。

Precise positioning and identification of omnidirectional inspection robot for substation secondary equipment

LI Jie^{1,2}, DONG Linjie¹, TANG Xiaobing³, ZHANG Wenbing¹, WANG Xingsong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 3. Nanjing SP-NICE Technology Development Co., Ltd., Nanjing 210007, China)

Abstract: Substation secondary equipment is monitored through inspection robots, providing an important means to enhance power equipment automation and intelligent management, thereby ensuring the safe operation of power engineering equipment. In this paper, a Mecanum wheeled omnidirectional mobile robot is developed for automatically inspecting secondary equipment in substations. It possesses autonomous navigation, positioning, and identification capabilities, significantly enhancing inspection efficiency and the accuracy of protection plate state identification. The Mecanum wheels enable the inspection robot to move flexibly and adjust its attitude within narrow working environments. Meanwhile, a multi-track lifting platform facilitates image acquisition and state identification of the secondary equipment pressure plate, covering a height range of 350-1 800 mm. The robot employs the lidar-based simultaneous localization and mapping (SLAM) method for autonomous positioning and navigation, supplemented by a vision-based path extraction and tracking algorithm for precise position correction at set points. Moreover, a color recognition-based image arrangement and state recognition method is proposed to accurately identify and assess the connection state of the secondary equipment protection plate. Experimental results demonstrate that the substation secondary equipment inspection robot, utilizing Mecanum wheels, achieves successful autonomous navigation and precise positioning, with maximum deflection angles and distances during path tracking processes being $\pm 3^\circ$ and ± 8 mm, respectively. Additionally, the plate recognition method, combining machine vision and color recognition, achieves an outstanding recognition accuracy rate exceeding 95.80%, thereby elevating the level of robot automation in inspection operations.

Keywords: electric power inspection; plate state identification; inspection robot; navigation and positioning; path tracking; robot control

(编辑 陆海霞)