

文章编号: 1006-3080(2021)01-0116-07

DOI: 10.14135/j.cnki.1006-3080.20191203005

一种可升降式变电站室内巡检机器人控制系统设计

姚楚阳, 刘爽

(华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘要: 针对变电站室内环境复杂, 人工巡检强度大, 传统巡检方式覆盖范围小、效率低的问题, 研究了一种可升降式变电站巡检机器人。首先, 根据变电站室内环境和巡检点的位置信息, 设计了一种改进 Floyd 全局路径规划算法以搜索执行巡检任务的最优路径, 提升了机器人执行巡检任务的效率。其次, 设计了一种基于欧拉数值积分的轨迹跟踪控制算法, 提升了机器人的控制精度。最后, 设计了升降平台和摄像头云台的控制方法。为了验证该控制系统方案的可行性, 在室内环境进行了实验, 结果表明机器人在执行完多次巡检任务后位置累积误差范围为 10 cm, 可以准确采集到电力设备图像数据, 满足变电站巡检任务要求。

关键词: 变电站巡检机器人; 运动控制; 路径规划; 轨迹跟踪

中图分类号: TM63; TP242

文献标志码: A

变电站电力设备巡检是维护电力系统正常运作的重要途径。在我国的一些偏远地区, 变电站分布较为分散, 传统的人工巡检方式劳动强度大, 受恶劣天气干扰大^[1-2], 很难满足对变电站电力设备的检测和维护要求。近年来, 随着机器人技术的飞速发展, 以机器人巡检代替人工巡检成为未来电力设备检测的发展趋势。

文献 [3] 提出了一种基于引导线识别的视觉导航巡检机器人, 采用比例-积分-微分 (PID) 控制实现电力机器人对引导线的实时跟踪。文献 [4] 提出了一种变电站轨道式巡检机器人, 利用射频识别 (RFID) 对机器人定位, 采用凸点碰撞传感器产生的脉冲信号控制机器人停车巡检。文献 [5] 提出了一种射频识别和视觉结合的巡检机器人导航定位方法, 通过基于道路边沿特征的视觉导航, 在行进路径关键点处设置 RFID 标签来确定机器人所在区域, 然后利用视觉识别路标确定机器人的位置。

目前, 应用于变电站室内巡检机器人的移动方式有固定轨道式和轮式。固定轨道式可以让机器人依靠轨道的滑动运行, 优点是能够进行精确定位, 环

境适应性较强, 但它的灵活性有待提高, 运行路径单一, 且导轨铺设和维护成本较高^[6]; 轮式移动机器人具有移动范围广、机动灵活等优点, 但由于变电站特殊的室内环境, 仪表柜之间最窄距离只有 80 cm, 某些设备造价昂贵且极易损坏^[7], 在这种环境下, 巡检机器人必须要有极高的控制精度, 且一些仪表柜较高, 传统的轮式移动机器人很难覆盖到较高的电力设备。

针对以上问题, 本文提出一种可升降式变电站巡检机器人。采用两轮差动移动平台, 并设计相应的路径规划和导航算法, 实现对变电站室内仪表的实时监测。

1 巡检机器人设计

1.1 组成和结构

变电站巡检机器人由自主导航系统、图像采集系统、远程终端操作系统组成。机器人自主导航系统可自主规划路径到达指定位置, 途中遇到障碍可自动避障。图像采集系统由升降平台、监控云台构

收稿日期: 2019-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(51975214)

作者简介: 姚楚阳(1995—), 男, 安徽人, 硕士生, 研究方向为机械工程。

通信联系人: 刘爽, E-mail: shuangliu@ecust.edu.cn

引用本文: 姚楚阳, 刘爽. 一种可升降式变电站室内巡检机器人控制系统设计[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2021, 47(1): 116-122.

Citation: YAO Chuyang, LIU Shuang. Design of a Control System for an Indoor Substation Patrol Robot with Lifting Platform[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2021, 47(1): 116-122.

成, 图像采集系统可采集仪器仪表信息发送给远程控制终端。远程终端操作系统提供给用户基于 Windows 系统的操作界面, 用户通过界面可向机器人发送指令(如启动机器人到达指定位置、控制平台上升或下降到指定高度、监控云台水平或上下旋转到指定角度、采集图像)。巡检系统结构如图 1 所示。

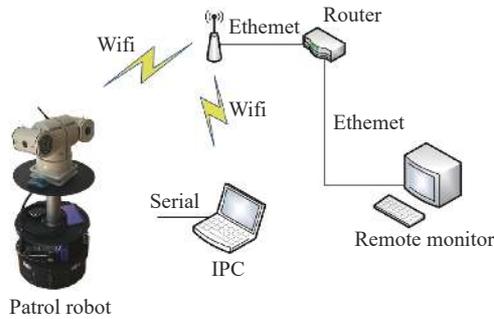


图 1 巡检系统结构

Fig. 1 Structure of patrol system

1.2 硬件设计

巡检机器人硬件构成如图 2 所示, 摄像头云台和工控机(IPC)通过路由器和远程终端通信, 激光雷达和升降平台直接连在工控机上, 编码器、惯性测量单元(IMU)连接在 Arduino 控制板上, Arduino 控制板通过串口与工控机相连, 工控机融合编码器和 IMU 数据计算得到里程计信息。

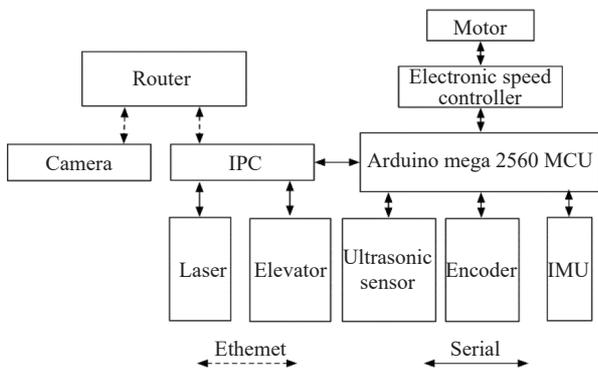


图 2 巡检机器人硬件构成

Fig. 2 Patrol robot hardware composition

1.3 软件设计

图 3 所示为巡检机器人的软件框图。巡检机器人软件设计分为应用层、运动控制层和驱动层。应用层包括指令输入和图像数据存储两个模块, 主要用于给机器人下发指令和存储机器人获取的图像数据。运动控制层嵌入在工控机当中, 工控机基于 Ubuntu 操作系统, 其中, 建图、全局路径规划、定位导航这 3 个模块基于 ROS 开源操作系统设计。建图

模块采用 Gmapping 算法建立变电站环境地图^[8]; 全局路径规划模块根据巡检点和路径关键点规划出最优路径; 定位采用自适应蒙特卡洛粒子滤波算法估计出机器人在当前地图中的位置姿态^[9], 导航使机器人完成点到点之间的运动。驱动层包括机器人底盘的电机驱动、升降平台驱动和摄像头云台驱动。

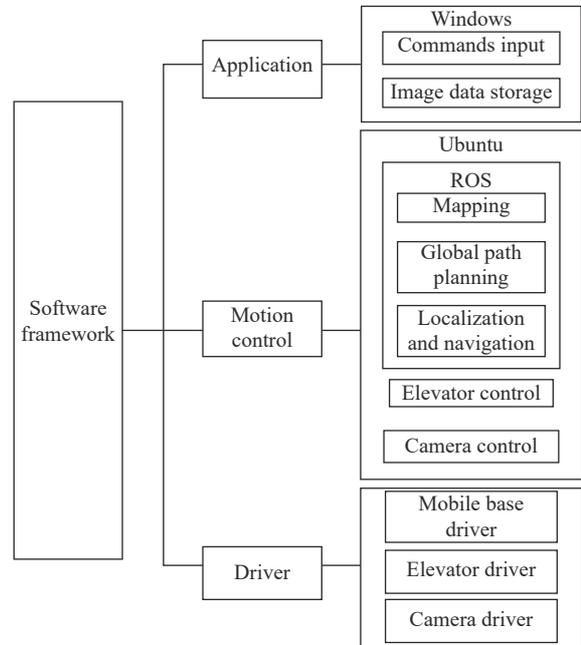


图 3 巡检机器人软件框图

Fig. 3 Patrol robot software framework

2 巡检机器人路径规划

巡检机器人的巡检路径具有高重复性^[10], 设计路径规划算法获得最优的全局巡检路径, 能够显著提高巡检效率。

根据变电站环境特征, 可将巡检点与关键点连接起来形成非连通无向图, 其中巡检点是机器人执行巡检任务时需要停车检查的点, 关键点是机器人进行转向的点。非连通无向图边的权值为对应节点间的距离。操作人员输入待巡检的巡检点, 机器人规划出一条遍历每个巡检点并回到初始位置的路径, 要求机器人绕过障碍物并且行驶路程最短。基于以上需求, 本文提出了一种改进 Floyd 算法的最短路径规划算法。

2.1 改进 Floyd 算法原理

以 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n | s_i \in S\}$ 表示所有巡检点和关键路点的集合, $G = \{g_1, g_2, \dots, g_k\}$ 为用户输入的巡检点。 $P_{path} = \{p_1, p_2, \dots, p_i\}$ 为机器人到达点的先后顺序的集合, $f(x)$ 表示当前路径机器人走过的总路程, 则

$$f(x) = \sum_{i=1}^{l-1} d(p_i, p_{i+1}) \quad (1)$$

其中: $d(p_i, p_{i+1})$ 表示 p_i, p_{i+1} 之间的距离(选取的距离是欧式距离)。根据巡检任务的要求,要使 $f(x)$ 值最小,则要得到机器人到达点的先后顺序的最优集合 P 。

任意两点间最短路径可由 Floyd 算法求得,对于每一对顶点 u 和 v ,判断是否存在一个顶点 w ,使得 $u \rightarrow w \rightarrow v$ 的路程比已知的路径更短,如果是则更新它^[11]。迭代公式如下:

$$d[u, v] = \min\{d[u, w] + d[w, v], d[u, v]\} \quad (2)$$

邻接矩阵 $D(v, w)$ 表示 S 中 v 点到 w 点的最短路径,将计算出的任意两点间的最短路径储存在 D 中。

对 G 求全排列可以得到巡检点先后抵达顺序的所有组合,当 G 中有 k 个元素,则所有组合有 $k!$ 个元素。从 D 中查找两两点间的最短路径并连接起来可以得到 $k!$ 个 P_{path} 数组,记为 $P[k!] = \{P_1, P_2, \dots, P_{k!}\}$ 。令 $\phi_n(x) = \min_{0 \leq n \leq k!} \{f(x_n)\}$,求解 $\phi_n(x)$ 得到 n 使得 $f(x_n)$ 最小,即 P_n 为最终解得的路径。

2.2 改进 Floyd 算法步骤

改进 Floyd 算法步骤如下:

(1)以邻接矩阵存储任意两个巡检点和关键点之间的权值,若两点非连通,则其权值设置为一个极大值;

(2)通过 Floyd 算法求解出任意两个巡检点之间的最短路径;

(3)对输入的巡检点排列组合;

(4)对每种巡检点可能的组合情况,将通过 Floyd 算法求解出的点与点之间的最短路径连接起来,求解其路径总权值;

(5)比较得出总权值最小的一条路径,为所求的最优路径。

3 巡检机器人运动控制

巡检机器人的运动控制包括移动平台的导航和升降平台、摄像头云台的控制。机器人到达指定巡检点,升降平台上升至指定高度,摄像头云台旋转至相应角度采集电表信息并返回初始点,定义为完成一次巡检周期。

3.1 导航

3.1.1 轨迹跟踪 通过路径规划算法计算机器人的移动路径后,机器人需要跟踪这条路径(从当前位姿点到达目标位姿点)。本文研究的是两轮差动驱动

移动机器人,机器人的位姿可以由包含 3 个元素的向量 $[x, y, \theta]^T$ 表示,其中 (x, y) 表示机器人在地图中的位置, θ 表示机器人的姿态,如图 4 所示。

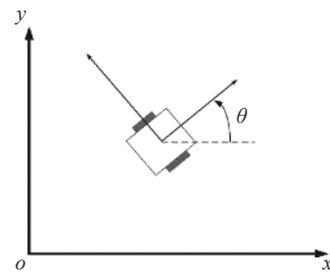


图4 机器人位姿示意图

Fig. 4 Schematic diagram of robot pose

在不考虑车轮滑动的情况下,如图 5 所示的轮式移动机器人的运动学模型可以描述为^[12]

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: $\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix}$ 表示机器人的控制率, $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}$ 分别表示 $\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}$ 和 $\frac{d\theta}{dt}$ 。

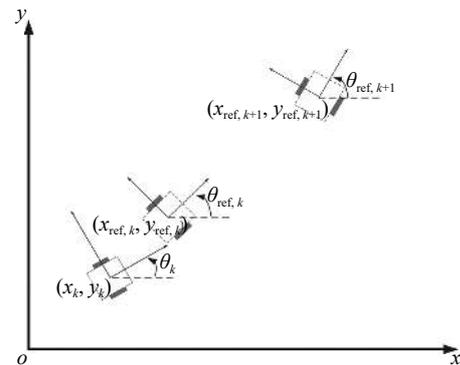


图5 轨迹跟踪示意图

Fig. 5 Schematic diagram of trajectory tracking

(1)位置控制

考虑如下微分方程

$$\begin{aligned} \dot{y} &= f(y', u, t) \\ y'(0) &= y'_0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中: y' 为控制系统的输出, u 为控制输入, t 为时间。 $y'(t)$ 在离散的时间点 $t = kT_0$ (其中 T_0 为采样周期, 采样点 $k \in \{0, 1, 2, 3, \dots\}$) 表示为 y'_k , 则

$$y'_{k+1} = y'_k + \int_{kT_0}^{(k+1)T_0} f(y', u, t) dt \quad (5)$$

根据欧拉数值积分法^[13], 有

$$y'_{k+1} \cong y'_k + T_0 f(y'_k, u_k, t_k) \quad (6)$$

机器人的参考轨迹由上文提到的路径规划器生成,机器人跟踪这条参考轨迹行驶到目标位姿点,直到给定目标点与机器人实际到达位姿点之间的误差在允许范围内停止。

设 $\mathbf{q}_k = [x_k, y_k, \theta_k]^T$ 为机器人在第 k 个采样点的实际位姿向量; $\mathbf{q}_{\text{ref},k+1} = [x_{\text{ref},k+1}, y_{\text{ref},k+1}, \theta_{\text{ref},k+1}]^T$ 为机器人在第 $k+1$ 个采样点的参考位姿向量; $\mathbf{q}_k = [x_k, y_k, \theta_k]^T$ 为机器人在第 k 个采样点的实际位姿向量; $\mathbf{q}_{\text{ref},k} = [x_{\text{ref},k}, y_{\text{ref},k}, \theta_{\text{ref},k}]^T$ 为机器人在第 k 个采样点的参考位姿向量。

当 $|\theta_{k+1} - \theta_k| < \varepsilon$ (ε 为一个极小值) 时,根据式(3)和式(6),可得

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ \theta_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \theta_k \end{bmatrix} + T_0 \begin{bmatrix} \cos \theta_k & 0 \\ \sin \theta_k & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_k \\ w_k \end{bmatrix} \quad (7)$$

为了得到一条平滑的轨迹,定义目标位姿向量 \mathbf{qd}_{k+1} 为

$$\mathbf{qd}_{k+1} = \begin{bmatrix} xd_{k+1} \\ yd_{k+1} \\ \theta d_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\text{ref},k+1} \\ y_{\text{ref},k+1} \\ \theta_{\text{ref},k+1} \end{bmatrix} - K \begin{bmatrix} x_{\text{ref},k} - x_k \\ y_{\text{ref},k} - y_k \\ \theta_{\text{ref},k} - \theta_k \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中: K 表示机器人控制参数,满足 $0 < K < 1$ 。则由 $[v_k, w_k]^T$ 可计算得到使机器人从当前位姿 \mathbf{q}_k 行驶到目标位姿 \mathbf{qd}_{k+1} 的控制率,定义

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ d\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xd_{k+1} - x_k \\ yd_{k+1} - y_k \\ \theta d_{k+1} - \theta_k \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \theta_k & 0 \\ \sin \theta_k & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

结合式(8)和式(9),可得

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} v_k \\ w_k \end{bmatrix} = \frac{1}{T_0} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ d\theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \begin{bmatrix} v_k \\ w_k \end{bmatrix} = \frac{1}{T_0} \mathbf{A}^T \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ d\theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} v_k \\ w_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dx}{T_0} \cos \theta_k + \frac{dy}{T_0} \sin \theta_k \\ \frac{d\theta}{T_0} \end{bmatrix} \quad (12)$$

为了保证式(7)有确定的解,必须存在常量 C_1 、 C_2 使得

$$C_1 \begin{bmatrix} \cos \theta_k \\ \sin \theta_k \\ 0 \end{bmatrix} + C_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ d\theta \end{bmatrix}, C_1, C_2 \in \mathbf{R} \quad (13)$$

$$C_1 \begin{bmatrix} \cos \theta_k \\ \sin \theta_k \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \frac{\sin \theta_k}{\cos \theta_k} = \frac{dy}{dx} \quad (14)$$

式(11)中的姿态角保证了控制系统方程(7)有解,这个姿态角定义为 θ_{ezk} ,可由式(15)计算得到。

$$\theta_{\text{ezk}} = \tan^{-1} \frac{dy}{dx} \quad (15)$$

最后,机器人的设计控制率为

$$\begin{bmatrix} v_k \\ w_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (dx \cos \theta_{\text{ezk}} + dy \sin \theta_{\text{ezk}}) / T_0 \\ d\theta / T_0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

(2)姿态控制

机器人在行驶到路径关键点转向时经常过冲,会使机器人沿着预先设计的轨迹震荡甚至偏离轨迹。为了减小机器人在路径关键点因转向而产生的过冲问题,设计姿态控制器(图6)。控制器会判断机器人是否已到达路径关键点,若是,则姿态控制器按式(17)计算机器人从当前位姿点到下一个关键点的航向角度差 $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0 = \tan^{-1} \sqrt{\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}} \quad (17)$$

根据 $\Delta\theta$ 的正负,以恒定的角速度 ω 自转,使机器人朝向下一个关键点,到指定误差允许范围内停止自转。

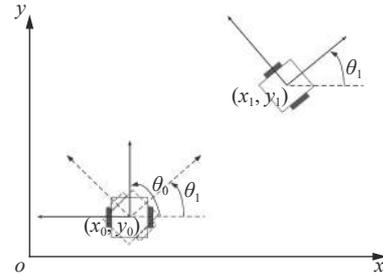


图6 姿态控制示意图

Fig. 6 Schematic diagram of orientation control

3.1.2 避障 图7所示为机器人避障的示意图。根据超声波模块的数据判断障碍物与机器人距离是否小于 L ,若是,则使机器人的线速度以一定比例衰减为0,机器人停止。

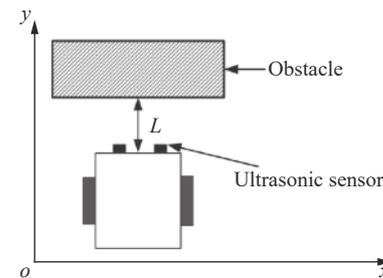


图7 巡检机器人避障示意图

Fig. 7 Schematic diagram of patrol robot obstacle avoidance

3.2 升降平台及摄像头云台控制

3.2.1 升降平台控制 升降平台与工控机通过 RS485 协议通信,工控机通过串口向升降平台微控制器发

送命令, 命令格式固定为八个字节的十六进制数。当升降平台微控制器收到工控机发送的命令后, 控制升降平台上升、下降、停止。

3.2.2 摄像头云台控制 摄像头云台通过 TCP/IP 协议与远程终端通信, 当固定好 IP 地址、端口号后, 远程终端与摄像头云台建立起通信。摄像头运动分为水平旋转和上下旋转, 操作人员通过远程终端向摄像头云台发送水平、上下旋转指定角度的命令, 摄像头云台执行相应的命令, 使其对准待巡检的设备, 采集设备图像。

4 实验结果及分析

为了验证轨迹跟踪控制器控制效果, 在 Gazebo 仿真环境下对机器人进行轨迹跟踪控制实验(图 8)。Gazebo 是 ROS 中一款实现物理仿真的工具包, 可以模拟机器人和环境的很多特性。机器人初始位置为

(0, 0), 让机器人分别跟踪 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的矩形和半径为 2 m 的圆形路径, 并进行了多次仿真实验, 得到最佳控制参数 $K=0.9$ 。

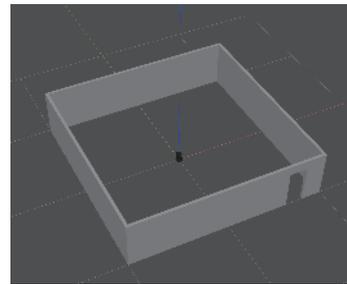


图 8 Gazebo 仿真环境

Fig. 8 Gazebo simulated environment

图 9 所示为机器人仿真轨迹和参考轨迹。可以看出机器人仿真轨迹最大误差出现在转角处, 并且逐渐趋向于参考轨迹。图 10(b) 所示为机器人在行驶了约 10 s 后最终趋于设定的圆形轨迹。由图 10

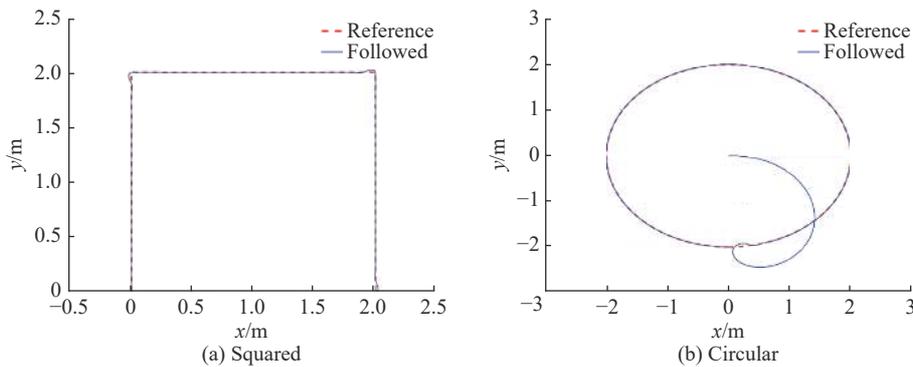


图 9 仿真轨迹和参考轨迹

Fig. 9 Simulated and reference trajectory

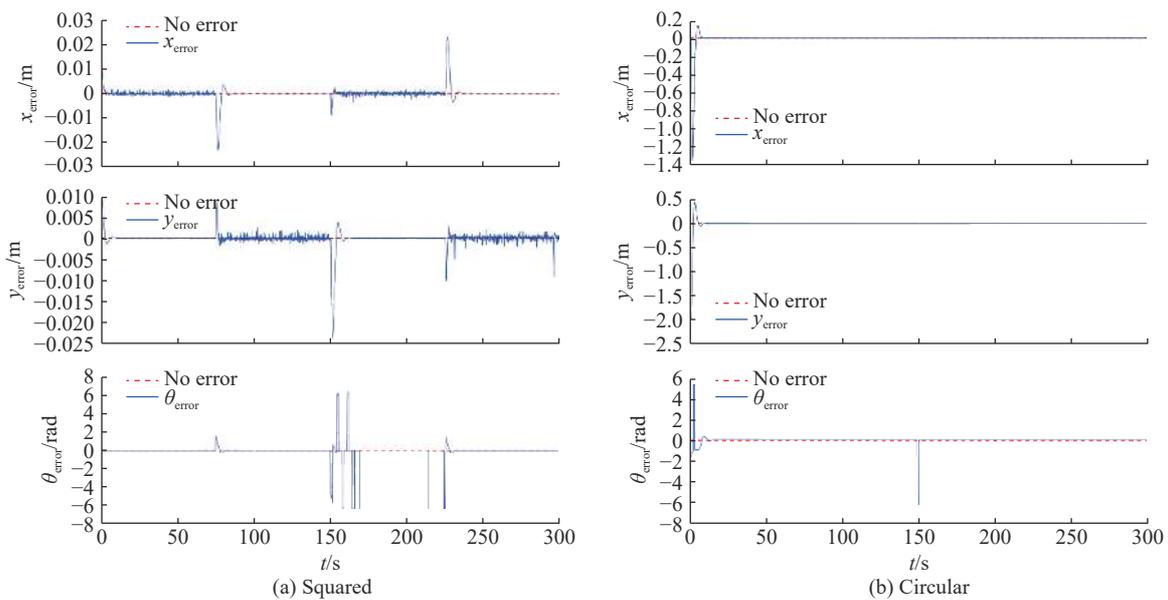


图 10 x 、 y 、 θ 的跟踪误差

Fig. 10 Tracking error of x , y and θ

- [3] ZUO M, ZENG G, TU X. Research on navigation of substation patrol robot based on guideline visual recognition[C]// International Conference on Electrical & Control Engineering. [s.l.]: IEEE Computer Society, 2010.
- [4] 苏尚流, 缪希仁. 基于微型摄像头的轨道式变电站巡检机器人[J]. 电器与能效管理技术, 2015(13): 19-23.
- [5] WANG H, XIE X Z, LIU R. Combination of RFID and vision for patrol robot navigation and localization[C]// Control Conference. [s.l.]: IEEE, 2010.
- [6] 陈玉波, 袁秉森. 一种轨道式变电站巡检机器人的研究与应用[J]. 电气应用, 2015(13): 126-129.
- [7] GAO Y, LI S, WANG X, *et al.* A patrol mobile robot for power transformer substations based on roS[C]// 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Shenyang, China: IEEE, 2018.
- [8] OMARA H I M A, SAHARI K S M. Indoor mapping using kinect and ROS[C]// International Symposium on Agents, [s.l.]: IEEE, 2016.
- [9] DELLAERT F, FOX D, BURGARD W, *et al.* Monte Carlo localization for mobile robots[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. [s.l.]: IEEE, 1999.
- [10] 冯坤, 马磊, 孙永奎. 基于激光传感器的变电站巡检机器人导航[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(2): 124-126, 138.
- [11] TAKAOKA T. Shortest path algorithms for nearly acyclic directed graphs[J]. Theoretical Computer Science, 1997, 203(1): 143-150.
- [12] CAMPION G, BASTIN G, D'ANDREA-NOVEL B. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 12(1): 47-62.
- [13] SCAGLIA G, ANDRÉS R, QUINTERO L, *et al.* A linear-interpolation-based controller design for trajectory tracking of mobile robots[J]. *Control Engineering Practice*, 2010, 18(3): 318-329.

Design of a Control System for an Indoor Substation Patrol Robot with Lifting Platform

YAO Chuyang, LIU Shuang

(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: As the complex environment of indoor substation, the coverage of traditional inspection methods is limited with low efficiency. In order to release human resources, an indoor patrol robot with lifting platform is designed to monitor substation facilities. Firstly, an improved Floyd path planning algorithm is designed to search for the optimal path of the inspection task, which improves the patrol efficiency. Secondly, a trajectory tracking controller based on Euler numerical integration method is designed to improve the control precision of the robot. Finally, a control method of lifting platform and camera is proposed. To verify the feasibility and performance of the proposed control system, both simulation and experimental results are presented and discussed, showing the good performance of the trajectory tracking controller. After the robot performs multiple inspection tasks, the cumulative position error fluctuates within 10 cm, and the image data of the power equipment can be accurately collected, which meet the substation inspection task requirement.

Key words: substation patrol robot; motion control; path planning; trajectory tracking