

无人变电站智能机器人的视觉导航研究

左 敏^{1,2}, 曾广平², 涂序彦²

(1. 北京工商大学计算机与信息工程学院, 北京 100048; 2. 北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了在无人变电站利用轮式机器人实现仪表、装置、设备的巡视、检测, 本文提出一种基于“引导线”识别的视觉导航方法. 轮式机器人利用摄像机采集路面环境信息, 通过视频识别引导线, 根据引导线的实际位置与预定位置的偏差, 利用智能 PID 控制方法, 控制机器人左、右轮的运动速度, 从而控制机器人行进的方向. 变电站实际应用效果表明: 该导航方法简单可靠, 完全能满足变电站巡检机器人导航的要求.

关键词: 视觉导航; 引导线识别; PID 控制; 变电站巡检机器人

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 10-2464-05

Research on Visual Navigation of Untended Substation Patrol Robot

ZUO Min^{1,2}, ZENG Guang-ping², TU Xu-yan²

(1. School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;
2. School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper presents a visual navigation method based on guideline visual recognition for wheeled robot to inspect equipment and instrument in unattended substation. Wheeled robot collects the road information via camera and recognizes the guideline. According the deviation of the guideline's actual location and intended location use the PID control technology controls the left and right wheel's speed to control the robot moving direction. The practical application in substation shows that the navigation method is simple and reliable, fully able to meet the navigation requirements of substation patrol robot.

Key words: visual navigation; guideline recognition; PID control; substation patrol robot

1 引言

智能电网是未来电网发展的方向, 即在发电、输电、配电、用电等环节应用大量的新技术, 最终实现电网管理的自动化、综合化、集中化、智能化. 我国已将智能电网建设上升为国家战略. 目前, 随着电力部门自动化技术的提高及通讯网络的全面改造, 特别是“四遥”系统的实现, 即遥测: 采集并传送各种运行参数, 包括各种电气量和负荷等; 遥信: 采集并传送各种保护和开关量信号; 遥控: 接受并执行遥控命令, 主要是分合闸; 遥调: 接受并执行遥调命令, 调节发电机输出功率等. 这些新技术的应用使得变电站无人值守成为可能. 但仅仅依靠“四遥”的技术手段, 实现变电站的无人值守是不完善的, 这是因为变电站是电力重点生产场所, 安全要求非常高. 为了保证安全, 应针对环境状况、设备运行、文明生产等各类情况加以监视. 特别是要防范火灾、爆炸、泄露、失窃以及恶意破坏等对安全生产构成极大威胁的情况加以监视, 即我们通常所说的遥视系统. 目前, 遥视系统已逐步成为无人值守变电站一个十分必要的项目.

但目前遥视系统仍然存在以下问题: 摄像机数目不可能无限增加以使监控区域无盲区; 当有新增监控区域时需对原有系统进行扩容改造. 因此, 采用机器人对无人值守环境下的仪表、装置、设备运行状态的自动巡视、监测就显得极其重要并具实际应用价值^[1].

2 巡检机器人的总体方案

由于变电站内空间有限, 巡检机器人的运动受一定条件限制, 特别是对机器人转弯半径的要求. 因此, 我们采用轮式圆筒形机器人, 其中左右轮为主动轮、万向轮为从动轮配合支撑. 通过对左、右主动轮转速的协调控制, 实现机器人的前进和转向. 巡检机器人示意图如图 1 所示.

在图 1 中, 为了模拟人的感知功能, 在轮式圆筒形机器人的本体上我们安装有: 巡检用全方位摄像机、循迹用固定摄像机、超声测距传感器、六氟化硫泄漏传感器、红外测温传感器、红外测距传感器等. 其中, 两个摄像机是模拟人眼的“人工眼”, 一只“人工眼”用于“巡检”, 另一只“人工眼”用于“循迹”; 超声测距传感器模



图1 电力巡检智能机器人

拟、扩展人的听觉;六氟化硫泄漏检测传感器模拟人的嗅觉;红外测温、测距传感器模拟、扩展人的本体感受器,用于变电站仪表、装置、设备运行状态的自动监测。

为了实现变电站巡检机器人的智能导航、智能控制,我们采用了平行系统的结构,机器人和软件人构成了两级系统:第一级系统是机器人的执行机构和机器人的控制软件——控制软件人,控制软件人(运行于机器人的嵌入式工控机平台)接管机器人的执行机构,全面监控、管理机器人的运动行为及功能。第二级系统是管理软件人(运行于监控网络的服务器平台)通过无线网络与多个下级控制软件人对机器人协同控制与管理^[2]。在两级系统中:一方面,利用控制软件人为巡检机器人建立虚拟模型,使得控制软件人全面接管机器人的硬件系统,并控制机器人外在的行为和功能;另一方面,管理软件人与控制软件人协同完成并行、在线、实时的机器人作业仿真,与机器人协同交互、融合共生、协调进化^[3]。机器人和软件人平行进化与智能协调系统的体系结构如图2所示。

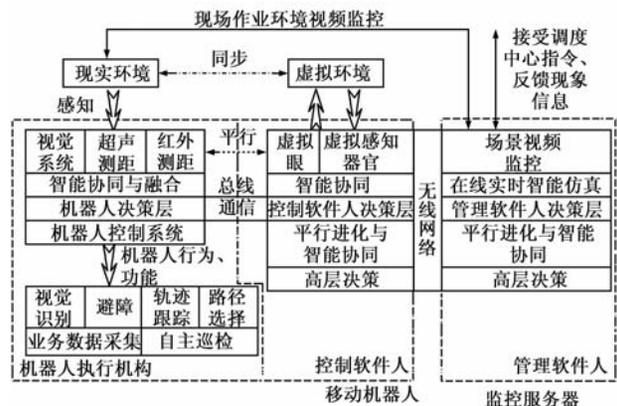


图2 电力巡检智能机器人系统架构

3 巡检机器人的智能视觉导航

“智能导航”是变电站巡检机器人的关键问题之一^[4],目前,机器人常用的机器人导航技术,如:磁导

航、用于室外机器人的差分 GPS 导航、基于无线射频设备的三角定位导航、已知环境下的坐标导航等^[5-7],但是,在变电站中,采用上述导航方法,均有一定的局限性:

由于变电站的电磁干扰,故不宜在变电站内采用磁导航技术;差分 GPS 导航技术主要用于室外能够接收 GPS 信号的地点,故不适用于变电站的室内导航;基于无线射频设备的三角定位导航需安装较多的无线射频点,造成投资大,部署慢;由于变电站内可供机器人行走的区域非常小,部分地段机器人与变电站设备的间隔距离小于 20cm.如单纯采用坐标导航技术势必要求机器人定位精度非常高,这就要求机器人的机械及运动系统精度提高,导致机器人成本大幅增加.为实现在变电站部分区域坐标导航,本文提出了利用视频检测技术实现协同控制,使得机器人的精确旋转精度大大提高,从而使得低精度机器人的坐标导航成为可能。

通过对人类行走行为的分析获知人类行走行为实际上是在人类大脑的协调下进行的一种眼脚协同的行为.根据软件人的拟人特性,本论文提出了一种虚拟眼与虚拟脚在虚拟脑协同控制下的基于“引导线”识别的智能视觉导航方法。

根据机器人巡检任务的需求,预先设计好机器人的巡检路线,在变电站室内地面上绘制红色“引导线”,利用固定安装在机器人本体上的循迹摄像机,识别、跟踪“引导线”,获取路面导航信息,实现机器人高效、稳定的视觉导航^[8,9]。

3.1 “引导线”的识别条件

巡检机器人利用循迹摄像机摄取路面场景,提取视觉导航需要的“引导线”信息,采集的视频数据为 YUV 格式,分辨率大小为 352 * 288。

变电站地面本身画有不同颜色的线条,如黄色的警戒线,绿色的指示线等.为了与之区别我们采用红色的“引导线”,但不同的光照条件对视频识别红色“引导线”影响很大.因此,在视频识别上我们采用 YUV 颜色模型与 RGB 颜色模型融合检测方法.将 YUV 数据转为 RGB 数据的转换公式如下:

$$R = Y + 1.4 * (V - 128) \tag{1}$$

$$G = Y - 0.34 * (U - 128) - 0.72 * (V - 128) \tag{2}$$

$$B = Y + 1.78 * (U - 128) \tag{3}$$

为了识别、跟踪“引导线”,需要判断路面场景中像素点是否是红色的“引导线”,利用以上公式,可给出如下判别条件:如果,路面场景的像素点是红色引导线,那么,该像素点的 RGB 应满足条件(4):

$$(R - G) > Y * 12/255, \tag{4}$$

$$\text{且 } (R - B) > Y * 10/255 > , \text{且 } R > 100$$

实验结果证明利用 RGB 与 YUV 的融合算法^[10,11]可提高在光照干扰条件下识别红色像素的识别率。

3.2 “区域均衡”判别算法

由于变电站室内不同地面的光照条件不同,还有其他光线干扰,为了提高判别的准确性、快速性、简便性,在算法设计上,给出了“区域均衡”判别算法.以 16 × 16 点阵为一个判断区域,计算该区域的平均 RGB 数值,再判断该区域是否属于红色引导线.对于每一个 16 × 16 点阵的判断区域,具体判别如式(5)~(7):

$$P_k = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^{16} A_{ij} \tag{5}$$

$$A_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{非红色像素} \\ 1, & \text{是红色像素} \end{cases} \tag{6}$$

$$P_k > \delta, P_k = 1 \text{ 否则 } P_k = 0 \tag{7}$$

在式(5)~(7)中 A_{ij} 的判断依据红色像素判别条件(4); δ 为判别 16 × 16 点阵区域是否为红色区域的判别阈值,目前我们取值为 180.

实际现场的应用结果表明:“区域均衡”判别算法简单实用,抗光线干扰效果好.基于引导线的视觉识别导航示意图,如图 3 所示.“区域均衡”算法示意图如图 4 所示.

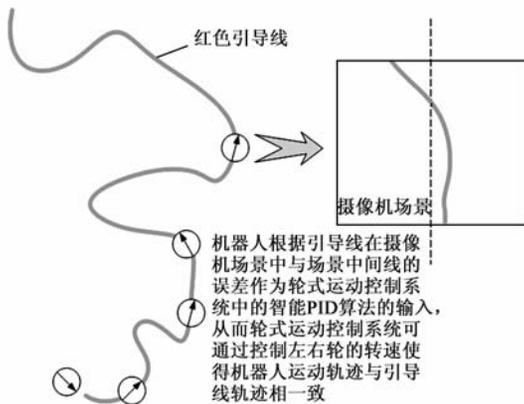


图3 基于导线的视觉识别导航示意图

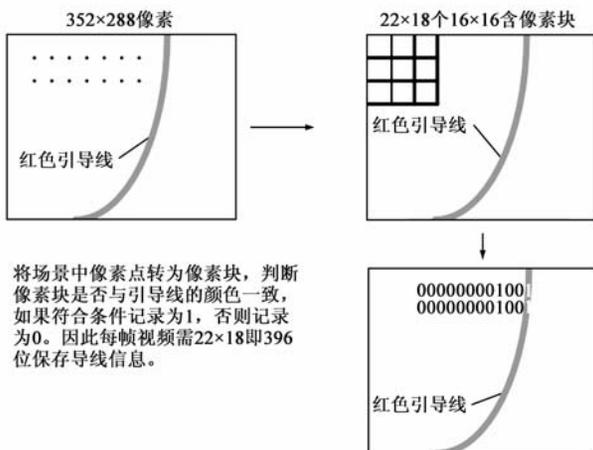


图4 “场景区域均衡判别算法”示意图

3.3 引导线“分段识别”算法

在变电站实际应用过程中发现:由于有些地面光照条件差,导致红色“引导线”发暗,可能产生识别错误.因此,我们给出了引导线“分段识别”算法,根据亮度数据 Y 分段,采用不同的判别标准,对引导线进行分段识别.实际环境应用结果表明,引导线“分段识别”算法的抗干扰性能强、识别准确性高.在不同光照情况下的实验结果表明:在行进速度为 0.4m/s 至 1m/s 区间内,最低照度 0.5lux 以上的环境中,利用“引导线”识别的智能视觉导航系统,都能满足机器人自动巡检工作的需求.

3.4 基于视觉校正的协调控制

在轮式机器人按坐标行走中,控制机器人行走的精度主要依靠机器人车轮旋转的精度.在图 5 中,机器人行走走到坐标 (x_1, y_1) 后将继续行走走到 (x_2, y_2) ,我们通过平面直线夹角公式可计算出机器人旋转角度 θ ,机器人在坐标 (x_1, y_1) 处旋转 θ 后继续前进. θ 角度的精度对于其后到达的坐标 (x_2, y_2) 影响非常大,所以机器人就必须具备非常高的旋转精度才能准确的按坐标行走^[12,13].

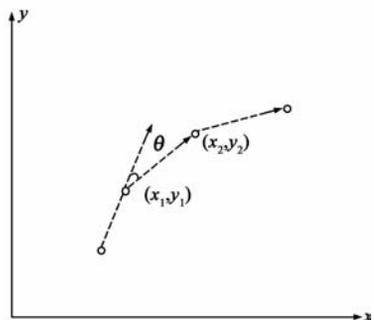


图5 机器人坐标行走旋转夹角示意

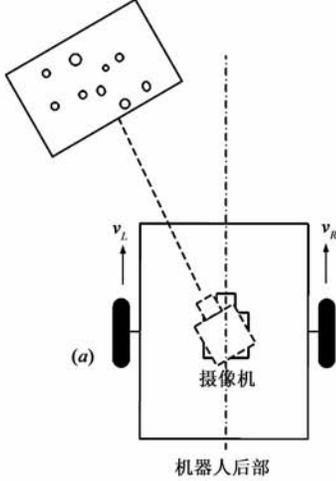
在实际应用中,虽然机器人的车轮旋转通过编码器可以非常准确的测量,但是由于机器人车轮可能会和地面产生滑动,左右轮在运动过程中由于机械精度及齿轮间隙等原因都会造成旋转角度的误差.所以本论文提出了一种利用摄像机旋转的精度来决定机器人旋转精度的方法,方法的原理如图 6 所示.

如果希望机器人旋转 30 度,可以先让摄像机的云台旋转 30 度,保存摄像机摄取的场景,记为场景 A;然后让云台回到原来的位置,再旋转机器人,如果摄像机的场景与先前的场景 A 完全匹配,则机器人旋转的角度为 30 度.由于云台的旋转的精度一般可以达到 0.01 度,所以利用云台旋转的精度来决定机器人旋转精度的方法就很好的解决了机器人按坐标行走中的旋转误差导致的行进坐标点的误差.

4 巡检机器人的智能循迹控制

为了使巡检机器人跟踪“引导线”、实现“循迹”运动,根据智能视觉导航系统提供的“引导线”信息(方位、距离)、当前巡检机器人所在地的信息(方位、距离),进行比较,获得位置偏差信息.利用智能 PID 控制

摄像机先旋转一个 θ 角, 并保存场景图像



机器人和摄像机一起旋转, 当场景与先前保存的场景一致时, 相当于机器人旋转了 θ 角, 这时摄像机旋转的精度就决定了机器人旋转的精度

(b) 摄像机旋转回原来位置

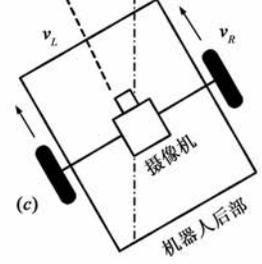
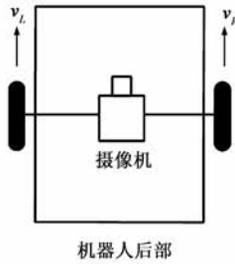


图6 摄像机旋转精度决定机器人旋转精度

方法,对巡检机器人的左、右轮进行转速协调控制,从而,控制机器人前进方向和速度,跟踪“引导线”、实现“循迹”运动.巡检机器人的智能循迹控制系统方案如图7所示.

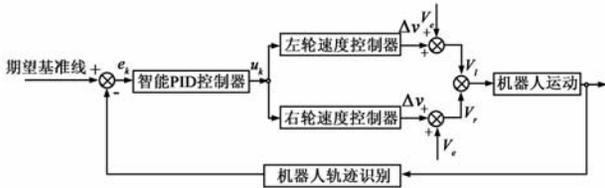


图7 巡检机器人的智能循迹控制系统

在巡检机器人的智能循迹控制系统中,我们采用“智能 PID 协调控制”方法,如式(8)~(10)所示.

$$\Delta u_k = K_p(e_k - e_{k-1}) + K_i \times e_k + K_d(e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}) \quad (8)$$

$$u_k = u_{k-1} + \Delta u_k \quad (9)$$

$$\begin{aligned} V_l &= V_e + u_k \\ V_r &= V_e - u_k \end{aligned} \quad (10)$$

在式(8)中, e_k 为本次检测过程中引导线归一化的横坐标与预定横坐标的差值, e_{k-1} 为上次检测过程中引导线归一化后的横坐标与预定横坐标的差值.智能PID控制器的控制参数(K_p, K_i, K_d)可在循迹过程中,根据专家知识、通过自学习、进行自寻优.式(10)表示巡检机器人左、右轮转速的协调控制律,包括:左、右轮的当前转速,左、右轮的期望转速,左、右轮转速的协调偏差.

5 巡检机器人的智能巡视监测

5.1 智能巡视、自动监测

巡检机器人模拟人的智能感知功能,对变电站仪表、装置、设备运行状态,进行智能巡视、自动监测.其中摄像机模拟人眼,对变电站仪表、装置、设备运行状

态、可见光进行智能巡视、自动监测.利用六氟化硫检测传感器模拟人的嗅觉,可监测变电站大型开关内的六氟化硫是否泄漏.利用红外测温、测距传感器等对变电站仪表、装置、设备的过热、火灾,进行智能监测等.

5.2 电站维护、故障报警

智能巡检机器人具有“电站维护”、“故障报警”等功能.当发现有活动目标(如:人、动物、运动物体等),入侵无人变电站,智能巡检机器人会通过无线网络自动向监控中心发出警报,维护无人变电站的安全.如果智能巡检机器人本身的部件发生故障、影响巡检工作正常运行,也能自动发出故障警报,并保存已有巡检信息.

5.3 电源监测、自动充电

智能巡检机器人具有“电源监测”、“自动充电”、“断电保护”功能.巡检机器人能自动监测自身电池运行状态,当电源电压将出现不足时,能提前发出预报.并且会控制机器人去无人变电站的充电处,接通充电电源,自动进行充电.充电完毕后,原路返回,继续巡检.

6 结论

无人变电站拟人智能巡检机器人以软件人和机器人平行与协同的方式,利用智能视觉导航及智能PID协调控制方法,实现拟人智能巡视、自动监测,电站维护、故障报警、自动充电、断电保护、远程监视等功能.现场实际应用结果表明:系统工作可靠、简便实用,满足无人变电站巡检机器人的任务需求.

采用视觉导航的“拟人智能巡检机器人”还可以进一步提高拟人化、智能化水平.该系统不仅可以在无人变电站推广应用,而且可以移植应用于其他无人值守

的场所,如:“无人供水站”“无人观测站”、“无人供气站”等.

参考文献

- [1] Li Xiangdong, Lu Shouyin, Wang Hong. Design and analysis on the architecture of an intelligent iterative inspection robot[J]. Robot, 2005, 27(06): 502 – 506.
- [2] 曾广平, 涂序彦. “软件人”的概念模型与构造特征[J]. 计算机科学, 2005, 32(05): 135 – 136, 143.
ZENG Guangping, Tu Xuyan. The concept model and construction frame of the SoftMan[J]. Computer Science, 2005, 32(05): 135 – 136, 143. (in Chinese)
- [3] Wang Long, Fu, Feng, Chen Xiaojie, Chu Tianguang, Xie Guangming. Collective behaviors and self-organizing cooperation[A]. Proceedings of the 26th Chinese Control Conference [C]. Piscataway: Inst of Elec. and Elec Eng Computer Society, Piscataway, United States, 2007. 553 – 558.
- [4] 徐德, 谭明. 基于知识的机器人视觉测量分类与进展[J]. 控制与决策, 2010, 25(04): 481 – 486.
XU De, TAN Min. Development and classification of knowledge-based visual measurement for robots[J]. Control and Decision, 2010, 25(04): 481 – 486. (in Chinese)
- [5] 陈凤东, 洪炳熔. 基于特征地图的移动机器人全局定位与自主泊位方法[J]. 电子学报, 2010, 38(06): 1256 – 1261.
CHEN Fengdong, HONG Bingrong. A global localization and self-docking method for mobile robot based on feature map[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(06): 1256 – 1261. (in Chinese)
- [6] 厉茂海, 洪炳熔, 蔡则苏. 一种新的移动机器人全局定位算法[J]. 电子学报, 2006, 34(03): 553 – 558.
LI Maohai, HONG Bingrong, CAI Zesu. A novel Algorithm for mobile robot global localization[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(03): 553 – 558. (in Chinese)
- [7] 弋英民, 刘丁. 有色过程噪声下的轮式机器人同步定位与地图构建[J]. 电子学报, 2010, 38(06): 1339 – 1343.
YI Yingmin, LIU Ding. Colored-State-Noise simultaneous localization and map building for wheel robots[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(06): 1339 – 1343. (in Chinese)

- [8] 杜艳红, 高庆吉, 孙承琦, 曾浩. 基于颜色和形状特征的目标检测与识别[J]. 东北电力学院学报, 2005, 25(01): 48 – 53.
DU Yanhong, GAO Qingjie, SUN Cheng qi, ZENG Hao. Object detection and recognition based on color and shape features [J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2005, (01): 48 – 53. (in Chinese)
- [9] Zhang Haibo, Yuan Kui, Zhou Qingrui. Visual navigation of a mobile robot based on path recognition[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(7): 853 – 857.
- [10] YANG Sen, DONG Ji-wen, LU Shou-yin. Visual navigation method of substation patrol robot[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 11 – 15.
- [11] Forsyth D A, Jean Ponce. Computer Vision[M]. Inc: Prentice Hall, 2003.
- [12] DellaertF, PomerlauD, ThorpeC. Model-based catracking integrated with a road-follower[A]. 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Leuven, Belgium: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2003. 3. 1889 – 1894.
- [13] I Ulrich, I Nourbakhsh. Appearance-based place recognition for topological localization[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. San Francisco: IEEE, Piscataway, NJ, United States, 2000. 4. 1023 – 1029.

作者简介



左 敏 男, 1973 年生于安徽铜陵, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究领域为机器人与人工智能.

E-mail: zuomin1234@163.com

曾广平 男, 1962 年生于湖南石门, 教授, 博士研究生导师, 主要研究领域为人工智能.

涂序彦 男, 1935 年生于江西南昌, 教授, 博士研究生导师, 主要研究领域为人工智能.