

输电线路巡线机器人障碍物识别综述

林国, 李伟超

(郑州航空工业管理学院 计算中心, 河南 郑州 450015)

摘要: 分别从多传感器导航、单帧图像处理、双目视觉和主动学习等几个方面对现有国内外输电线路巡线机器人障碍物识别方法进行了分类比较, 总结出输电线路巡线机器人障碍物识别技术的发展方向: 利用传感器信息融合技术以提高对障碍物探测的准确性, 研究智能化高的障碍物识别算法, 设计能适应各种环境的输电线路巡线机器人障碍物识别方法。

关键词: 输电线路; 巡线机器人; 障碍物识别

中图分类号: TP242

文献标志码: A

Overview on obstacle recognition of power transmission line inspection robot

LIN Guo, LI Wei-chao

(Comp. Center Zhengzhou Inst. of Aero. Ind. Mana. Zhengzhou 450015, China)

Abstract: The classification and comparison methods of the obstacle recognition of inspection robot in power transmission line with the domestic and foreign research progress were carried out from the aspects of multi-sensor-based navigation, single-frame image processing, binocular vision and active learning. The development direction of the future to the obstacle recognition technology for power transmission line inspection robot was summarized. The sensor information fusion technology will be used to improve the accuracy of obstacle detection, the intelligent and automated high obstacle recognition algorithm will be studied, obstacle recognition methods that adapt to various environment for power transmission line inspection robot will be designed.

Key words: power transmission line; inspection robot; obstacle recognition

0 引言

传统的输电线路巡视方法有人工地面目测法和直升机巡线航测法 2 种。文献 [1] 分别讨论了利用直升机和无人驾驶飞机进行巡检的方法, 并于 2001 年成功对四川输电线路进行了巡检维护。但人工地面目测法劳动强度大, 工作效率低, 探测精度

低, 可靠性差; 而直升机巡线航测法在一定程度上提高了探测精度和可靠性, 但增加了技术难度和运行费用。新兴的机器人巡视方法可以替代人工巡视方法, 既提高巡视的效率, 又提高了巡视的精度和可靠性, 因此巡线机器人成为巡线技术研究的热点。

输电线路巡线机器人是一种能在输电线路带电情况下, 沿着相线或地线滚动爬行的特种移动机

收稿日期: 2012 - 04 - 02

基金项目: 河南省科技攻关项目(112102210024); 河南省基础与前沿技术研究计划项目(112300410215)

作者简介: 林国(1976—), 男, 江苏省扬州市人, 郑州航空工业管理学院工程师, 主要研究方向为计算机应用。

器人,它能跨越防震锤、耐张线夹、悬垂线夹、杆塔等障碍,利用携带的检测仪器代替人对杆塔、导线、避雷线、绝缘子、线路金具、线路通道等实施接近检查.这种作业方式大大减轻了输电线路维护人员的劳动强度,提高了巡检效率与质量,对保证输电系统的安全可靠运行具有重要意义.

1980年代末,国际上开始研制高压输电线路巡线机器人.1988年,J.Sawada等^[2]研制了光纤复合架空地线巡检机器人,该机器人采用多关节小车结构和“头部决策,尾部跟踪”的仿生控制体系,能跨越分支线、绝缘子等障碍物;2001年,S.Peungsungwal等^[3]设计了一台自给电巡线机器人原型,采用爬行电力线路上的电流互感器获取感应电流,作为机器人的工作电源,解决了巡线机器人长时间驱动的动力问题,并初步实现了根据摄像机图像判断电力线上绝缘子等障碍物位置的视觉导航功能;S.Montambault等^[4]于2003年开始对HQ LineROVer遥控小车的研制,但是HQ LineROVer没有越障功能,只能在两塔杆之间进行电力作业,该研究小组于2006年已经研究出新一代的巡检机器人^[5].

国内对于高压输电线路巡线机器人的研究始于1990年代末,在863计划的支持下,武汉大学、中国科学院、山东大学分别研制出了500 kV地线、220 kV和110 kV相线巡线机器人实验样机^[6].中国科学院对巡检机器人的研究主要集中在机构的设计方面,实现俯仰、旋转、爬坡等功能,以适应柔性输电线路的要求.目前这些研究单位正在进行智能化程度高、越障能力强的自治巡线机器人的研制工作.近年来,上海大学和江苏大学对巡线机器人也展开了一定的研究,并取得了一些成果.刘溯奇等^[7]将一种基于嵌入式视觉的新型巡线技术应用于自主巡线机器人中,经实践验证,该新型巡线机器人实时性强,稳定性好,控制精度高.

从上述国内外已取得的研究成果可以看出,无越障能力的输电线路巡线机器人技术已经较为成熟,并且已经进入实用阶段,例如日本Sato公司、美国Machtech等公司研发的巡线机器人不需要人工的参与,可以完成两线塔之间电力线路的检查,但是作业范围太小,自治程度低.而具有越障功能的巡线机器人目前还处在实验阶段,要实现大范围、长时间的巡检作业,还需要进一步研究^[8].

输电线路巡线机器人在设计过程中的关键技

术主要包括越障机构设计、电能供应、障碍物的识别、导航和行为规划、线路故障检测和定位、智能控制、通讯技术等方面.机器人要沿着输电线路行走,需要跨越各种类型的障碍物^[9].因此,障碍物实时检测和识别对机器人导航和行为规划起着至关重要的作用.输电线路巡线机器人导航技术从最开始的无越障机器人,到利用线路障碍物参数输入机器人进行越障操作,再到利用多传感器获取障碍物信息,以及目前正在研究的利用图像传感器来获取障碍物信息,从而进行障碍物类型的识别,识别的准确率在不断提高,同时对于实时性的要求也越来越高.目前,输电线路巡线机器人障碍物识别的基本方法主要有基于多传感器障碍物识别、基于机器视觉的障碍物识别和基于主动学习的障碍物识别.

本文将主要对目前输电线路巡线机器人设计中的障碍物识别和定位技术进行总结和分类对比,指出其未来发展方向.

1 多传感器电磁导航

乐滨等^[10]根据多电磁传感器信号的接入方法设计了信号处理电路,得到了满足巡线机器人要求信号稳定、信噪比高的信号处理电路.黄潇嵘等^[11]提出了采用激光扫描面传感器实现巡线机器人在越障过程中的空间定位,它采用一定的逻辑算法,利用激光传感器的反馈在三维空间中准确地定位线路,实现机器人在无人工干预状态下的自主越障,该方法稳定可靠,实时性好,能满足实际运行中的巡线要求.陈中伟等^[12]提出了一种高压巡线机器人电磁传感器导航方法,导航系统主要由电磁传感器测头、信号调理电路、A/D转换部件、控制器及机械本体等部分构成,在每个机器人手臂上设计3组电磁传感器测头,组成传感器测头阵列组,用于实现对高压导线位姿的识别.此外,还有文献中设计了一种相对值算法来实现机器人导航,如文献^[13]对电磁导航方法在PC104平台上进行了实现,由于在现场运行时,信号容易受到干扰,所以设计了带通滤波器(IIR)来对信号进行处理,准确地提取电动势的幅值,从而精确地得到机器人手臂和输电导线之间的位姿关系;文献^[14]对电磁导航中的多个电磁传感器信号的接入和处理过程进行了讨论,并提出了一些解决方案,例如通道切换、滤波、放大、量程切换等,这种方式克服了高压电磁场对电磁传感

器带来的影响,获得较高品质的信号。

电磁传感器导航的显著特点就是能避免强电场和强磁场的干扰,传感器结构小巧,重量轻,便于安装,软件处理方便,造价低廉。实验证明这种方法切实可行,能满足带电运行的要求;但是这种方法并不能识别障碍物的类别,只能检测到线路上的障碍物和机器人手臂的距离等信息。因此,这种导航方法不能获得完整的障碍物信息。

2 机器视觉障碍物识别

传统的基于线路知识库的导航方法和电磁导航方法在一定程度上不能获得障碍物的完整信息,从而对输电线路巡线机器人行为规划起到一定的阻碍作用。CCD 图像传感器被应用到输电线路巡线机器人导航领域,在巡线机器人前方安装摄像头,通过对摄像头沿线拍摄的图像进行各种障碍物的识别,以控制机器人执行相应的动作规划,实现机器人的自动运动。常见的线路障碍物主要包括防震锤、悬垂线夹和单串绝缘子,耐张线夹和双串绝缘子等。目前,根据机器人上安装的摄像头个数,可以分为基于单帧图像的障碍物识别和基于双目视觉的障碍物识别与定位。

2.1 基于单帧图像的障碍物识别

基于单帧图像的障碍物识别方法是通过对摄像头拍摄的单帧图像进行处理,实现对障碍物识别的方法。目前,这种方法主要是在图像中寻找障碍物目标,然后通过图像处理的方法提取障碍物目标,根据障碍物的特征设计相应的分类器来实现对障碍物的识别。

2.1.1 基于障碍物特征的识别 夏澎等^[15]设计了一种基于 CMOS 图像传感器的视觉巡线机器人系统,并提出了一种新型的巡线技术,该机器人巡线实时性强、准确度高、稳定性好。文献[16]提出了一种基于障碍物特征的输电线路障碍物自动识别系统,该系统能快速准确地在实验室环境下区分悬垂线夹和跳线线夹,满足机器人正常行走,但是无法判断防震锤等障碍物;同时由于实际的应用中障碍物图像的对比度低,背景比较复杂,干扰多,所以要实际应用还需要进一步研究。

基于障碍物特征的单帧图像识别计算速度快,能满足实时性要求,但对障碍物图像的对比度、背景和干扰比较敏感,且不能得到距离信息。

2.1.2 基于结构约束的障碍物识别 文献[17-19]中分别对基于结构约束的输电线路障碍物识别方法进行了研究。虽然防震锤、悬垂线夹、耐张线夹和绝缘子等没有丰富的表面纹理和明显的颜色特征,而且相互链接,难以分成独立的区域,但基于结构约束的障碍物识别算法可根据障碍物的外观、形状和结构等特点,选择障碍物图像中的直线、圆、椭圆等图形基元作为障碍物存在的线索,然后结合输电线路结构对图形基元位置的约束来识别不同类型的障碍物。这样障碍物类型识别问题就转化为将障碍物从背景中分别出来的 2 个分类问题,从而简化了分类器的设计。

在预处理阶段,主要包括图像模糊处理、图像滤波、色彩转换等。文献[20]分别对输电线路障碍物图像的模糊问题进行了讨论,主要从水平运动模糊和垂直运动模糊 2 个方面来处理,使用神经网络算法对运动方程中的参数进行估计,并对各种实际的输电线路环境中的模糊运动情况进行了实验,恢复出来的效果比较好。文献[21]在图像预处理阶段,为了减少导线电磁场等因素的干扰噪声,使用形态学方法和高斯平滑等预处理方法对图像噪声进行处理,然后使用改进的OTSU算法对图像边缘进行检测,得到了很好的边缘检测效果。

在处理阶段,主要包括对图像进行边缘检测和分割,提取障碍物目标,然后从目标中提取图形基元。文献[19]首先提出一种直线提取算法来提取直线,然后在直线的周围使用圆和椭圆检测算法搜索圆和椭圆,这样缩小了搜索空间,节约了识别时间。障碍物识别的主要任务是从提取的各种图形基元中根据基元的结构特点和位置关系来判断障碍物的类型。

基于结构约束的单帧图像识别具有基于障碍物特征的单帧图像识别的优点,即计算速度快,能满足实时性要求;但也有相似的缺点,即当障碍物图像的对比度低、背景比较复杂、干扰多的时候难以提取图形基元,且不能得到距离信息。

2.2 基于双目视觉的障碍物识别与定位

输电线路巡线机器人导航要完成的主要任务包括: 1) 实时识别障碍物的类型,根据障碍物类型规划越障策略; 2) 实时探测和定位障碍物,指导机器人趋近障碍物,避免碰撞。文献[22]实现了视觉导航中的障碍物识别和定位。在输电线路巡线机器

人前方安装用左右2个摄像头,利用左边的摄像头拍摄单帧图像来识别障碍物类型,用左右2个摄像头立体视觉的方法来实现障碍物的定位.在障碍物识别过程中,首先使用高斯滤波和Canny算子提取图像边缘,再使用霍夫变换进行直线检测实现相线的识别和定位,然后从边缘图像中快速可靠的抽取圆、椭圆等图形基元,最后根据几何基元的特征和线路的结构信息,判断障碍物的类型.该研究在基于立体视觉的障碍物定位过程中,使用双目视觉原理来检测障碍物与机器人之间的距离.

基于双目视觉的障碍物识别既能识别障碍物类别,又能获得障碍物的距离信息,且实时性较好.但其对复杂图像仍比较敏感,难以提取图形基元,且采用双摄像头的任务单一,无法与其他用途共享摄像头.

3 主动学习的障碍物识别

输电线路巡线机器人的目的是实现输电线路的故障自动检测.随着技术的发展,巡线机器人正向越来越智能化的机器人系统发展.具有视觉系统的输电线路巡线机器人还处在实验阶段,真正的应用还需要一定的时间.目前具有视觉系统的障碍物一般指在机器人的云台上安装的CCD摄像头对输电线路及相关设备进行监控.智能化的视觉导航系统对于机器人自动化程度具有很大的意义.

文献[23-24]分别提出了2种智能化的输电线路巡线机器人识别技术.文献[23]以绝缘子图像的识别为实例,首先使用中值滤波去除图像的噪声,并保留图像的边缘细节,然后使用OTSU自适应阈值算法对图像进行分割,最后对分割后的图像进行形态学操作,消除内部孔洞,这样得到完整的目标边缘信息,再对目标图像提取特征.在实际的应用中,可以通过采集部分障碍物图像进行训练,把机器人在实时运行过程中采集到的障碍物作为测试集,实时地测试障碍物的类型,从而实现对障碍物的主动学习识别,提高机器人的自动化能力.文献[24]提出了一种基于Adaboost算法的训练强分类器来提高分类的可信度,采用“先重后轻”的级联分类器进行粗检,随着分类器特征越来越多,逐步对障碍物进行细检.

主动学习的障碍物识别还处在实验室研究阶

段,虽然该识别方法的准确率较高,自动化程度高,但其计算比较复杂,需要一定的训练集,而且目前这种方法只能实现其中某一种障碍物的识别,还没有实现多种障碍物的多分类识别,且随着摄像机光轴和电力线夹角增大,会出现漏检现象,这还要更进一步研究.

4 结语

本文从多传感器导航、机器视觉障碍物识别和主动学习的障碍物识别的几个方面对现有输电线路巡线机器人障碍物识别方法进行了分析,认为这些障碍识别方法都有自己的优缺点.无论哪种算法,最终的目的是为了满足不同巡线机器人实时越障要求.因此未来障碍物识别技术的发展方向和值得研究的课题应主要体现在以下几个方面:

- 1) 通过研究多传感器信息融合技术来获得更有效的环境信息,以提高对障碍物探测的准确性.
- 2) 针对输电线路障碍物特征,设计快速、特定的障碍物特征提取方法和分类方法.
- 3) 针对巡线机器人障碍物图像,设计特定的预处理方法以更好地解决干扰、模糊等问题.
- 4) 开发分布式多巡线机器人系统,通过巡线机器人群体有组织的协作和群体间的知识共享和交换,进一步提高障碍物识别的灵敏度和可靠性.

参考文献:

- [1] 陈晓兵,马玉林,徐祖舰.无人飞机输电线路巡线技术探讨[J].南方电网技术,2008,2(6):59.
- [2] Sawada J, Kusumoto K, Munakata T. A mobile robot for inspection of power transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(1):309.
- [3] Peungsungwal S, Pungsiri B, Chamnongthai K, et al. Autonomous robot for a power transmission line inspection[C]//The 2001 IEEE Int Symposium on Circuits and Syst, Sydney: IEEE, 2001:121-124.
- [4] Montambault S, Pouliot N. The HQ LineROVer: contributing to innovation in transmission line maintenance[C]//Proc of the 2003 IEEE 10th Int Conf on Trans and Distribution Construction Operation and Live2line Maintenance, Montreal: IEEE, 2003:33-40.
- [5] Montambault S, Pouliot N. Linescout technology: development of an inspection robot capable of clearing obstacles while operating on a live line[C]//IEEE 11th Int Conf

- on Trans & Distribution Construction Operation and Live-Line Maintenance, Albuquerque. [s. n.] 2006: 15 - 19.
- [6] 吴功平,肖晓晖,肖华,等. 架空高压输电线路巡线机器人样机研制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 90.
- [7] 刘溯奇,郝卫东,林添成,等. 基于嵌入式的视觉巡线机器人系统设计[J]. 工程设计学报, 2008, 4(2): 94.
- [8] Katrasnik J, Pernus F, Likar B, et al. A survey of mobile robots for distribution power line inspection [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(1): 485.
- [9] 佘松宜,翁桃,廖云杰,等. 巡线机器人的研究综述及面向智能电网技术的一些探讨[J]. 四川电力技术, 2009, 12: 47.
- [10] 乐滨,方宏良,胡睿,等. 高压输电线巡线机器人多电磁传感器的信号处理[J]. 机械与电子, 2008(8): 64.
- [11] 黄潇嵘,阮毅,李正,等. 500 kV 超高压架空输电线路巡线机器人的空间巡线方法研究[J]. 机床与液压, 2011, 39(11): 36.
- [12] 陈中伟,肖华,吴功平. 高压巡线机器人电磁传感器导航方法[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(9): 33.
- [13] 伍洲,方彦军,赵芄. 高压巡线机器人电磁导航系统设计与实现[J]. 华东电力, 2008, 36(3): 294.
- [14] 乐滨,方宏良,胡睿,等. 高压输电线巡线机器人多电磁传感器的信号处理[J]. 机械与电子, 2008, 8: 64.
- [15] 夏澎,郝卫东,刘溯奇. 基于 S3C2410 的视觉巡线机器人系统设计[J]. 计算机系统应用, 2009(5): 111.
- [16] 熊晓明,梁自泽,谭民. 输电线路障碍物的自动识别系统[J]. 高技术通讯, 2005, 15(2): 39.
- [17] 张运楚,梁自泽,傅思遥,等. 基于结构约束的架空输电线路巡线机器人障碍识别[J]. 机器人, 2007, 29(1): 1.
- [18] 左岐,王远方,侯增广,等. 一种约束条件下有效识别障碍物的方法[J]. 冶金自动化, 2009(S1): 677.
- [19] Fu Siyao, Li Weiming, Zhang Yunchu, et al. Structure-constrained obstacles recognition for power transmission line inspection robot [C] // 2006 IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems, Beijing: IEEE, 2006: 3363 - 3368.
- [20] Fu Siyao, Zhang Yunchu, Cheng Long, et al. Motion based image deblur using recurrent neural network for power transmission line inspection robot [C] // Proc of the 2006 Int Joint Conf on Neural Networks, Hong Kong: IEEE, 2006: 3854 - 3859.
- [21] 胡彩石,吴功平,曹珩,等. 高压输电线路巡线机器人障碍物视觉检测识别研究[J]. 传感技术学报, 2008, 21(12): 2092.
- [22] 李全民,张运楚,李俊策. 架空输电线路巡线机器人的视觉导航[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(19): 221.
- [23] 刘国海,朱珠. 图像处理技术在超高压巡检机器人视觉系统中的应用研究[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(1): 136.
- [24] 詹朝铖,李正波. 基于 Adaboost 的架空输电线路巡线机器人障碍识别[J]. 计算机与数字工程, 2009, 37(11): 130.