

基于触屏控制的遥操作排爆机器人设计

王少伟, 张伟军, 艾 田

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要:针对传统排爆机器人行走机构的缺陷,设计了一种轮摆履复合的排爆机器人。基于 Beckhoff 控制器和 Elmo 驱动器实现了机器人的运动控制系统。通过设计通信系统、图像实时传输系统和虚拟机器人交互系统,实现了机器人的遥操作,并结合各子模块开发了一整套基于触摸屏的控制软件。实验证明该排爆机器人移动性能好,触控软件操作方便,交互性好。

关键词:触摸控制;机械结构;运动控制系统;EtherCAT 总线;软件架构

中图分类号:TP24 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2257(2018)07-0067-05

Design of Tele Control EOD Robot Based on Touch Screen

WANG Shaowei, ZHANG Weijun, AI Tian

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: There are some defects in the moving structure of traditional EOD. In order to make improvement, a new type EOD robot with conforming moving structure of wheels, pendulums and caterpillars is proposed in this paper. First, the robot's motion control system was designed based on Beckhoff controller and Elmo driver. Then, the tele control was realized through the design of the communication system, image real-time transmission system and virtual robot interaction system. In addition, a set of touch-control software was developed in combination with each sub-module. Experiments show that the EOD robot has good mobility and the touch software can interact with the robot stably and conveniently.

Key words: touch control; mechanical structure; moving control system; EtherCAT bus; software architecture

0 引言

随着国际上恐怖主义活动日益猖獗,排爆机器人已成为保障社会安全,减少公安人员伤亡的必备装备。排爆机器人主要用于代替人工,直接在案发现场排除和处理爆炸物以及其他危险品,是排爆专业队伍中必不可少的重要装备^[1]。排爆机器人的研制始于 20 世纪 60 年代,英国 Morfax 公司生产的“小推车”举世闻名,采用橡胶履带,有一整套的无线电控制系统及彩色电视摄像机,已向多个国家军

警部门出售^[2]。美国 Wolstenholme 机器公司生产的 MR5 和 MR7 排爆机器人备有 6 个车轮、1 套活动履带,必要时将履带装上,能够适应多种地形活动^[3],缺点是外形尺寸大,更换履带费时费力。国内多家机构也积极开展相应的研究。中国科学院沈阳自动化研究所研究的“灵蜥”多功能排爆机器人采用轮腿履复合型运动机构,具有很好的越障能力,手臂具有 4 自由度,配备了多功能工具包^[4],手臂可作业范围有限。中国航天科工集团公司自主研制了第二代排爆机器人“雪豹-10”,在操控性能、

收稿日期:2018-02-06

作者简介:王少伟 (1993—),男,山西吕梁人,硕士研究生,研究方向为特种机器人遥操作;张伟军 (1970—),男,上海人,博士,副教授,研究方向为恶劣环境特种机器人、主从遥操作;艾 田 (1993—),男,安徽池州人,硕士研究生,研究方向为特种机器人嵌入式控制软件开发。

运动性能和机械臂控制精度上高于其他同类产品,且具有一定自主能力,可在有限的人工参与下半自动地完成搜爆排爆任务。上海交通大学的陈曦等人研究了一种八轮式排爆机器人,该机器人用平板电脑控制,移动机构采用独特的八轮结构,越障能力强,但是体型较大,使用场合受限^[5]。

综上所述,排爆机器人普遍存在体型较大,作业范围有限的问题。结合实际应用需求,设计的排爆机器人运动机构采用了轮摆履复合的结构,有很好的越障能力,机器人车体宽 40.5 cm,能够应用于行走空间较窄的场合;机械臂共 6 自由度,伸展可达 2 m,作业范围大;控制方式采用触摸屏遥控或者线控的方式,获取的图像清晰稳定,并且具有虚拟机器人交互的功能,提高了操作效率。

1 机器人机械结构设计

摆臂式排爆机器人的车体结构如图 1 所示。整个移动平台共有 4 组轮系和摆臂的组合结构,分别分布在底盘的四角,每组结构包含 1 个车轮和 1 只摆臂,并且利用履带将两者耦合在一起,车轮和摆臂分别由 1 个电机驱动。在行走前进和后退过程中,左右 2 组车轮等速自转实现正常的行驶功能;在转弯过程中,左右 2 组车轮差速转动从而实现大半径转弯和原地转弯;在越障过程中,通过调整单个摆臂或者分组调整摆臂从而跨越障碍物。这种独特的轮摆结构具有很好的移动性和越障能力。

该排爆机器人的机械臂结构如图 2 所示。机械臂共 6 个自由度,包括腰回转、大臂俯仰、中臂俯仰、小臂俯仰、腕回转和手爪开合,各关节都采用直流伺服电机驱动。手爪开合属于独立自由度,剩下的 5 个自由度形成了空间冗余结构,从而可以实现机械臂末端联动的功能。

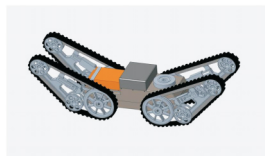


图 1 机器人车体结构

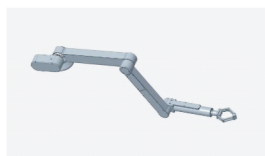


图 2 机器人机械臂结构

该机器人车体窄,机械臂较长,且可以站立行走,如图 3 所示,大大增加了工作空间,可以广泛应用到汽车、高铁和飞机的反恐排爆活动中。

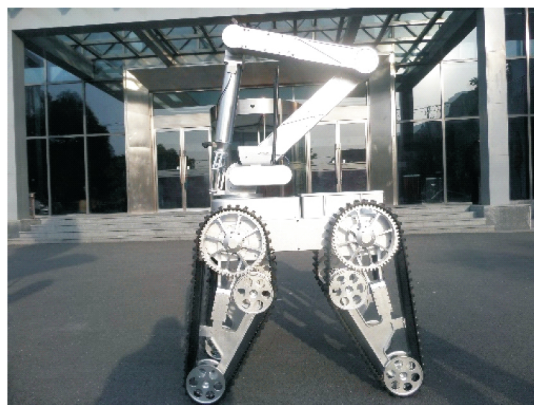


图 3 机器人站立姿态

2 机器人运动控制系统设计

该排爆机器人的运动控制系统架构如图 4 所示。机器人共 14 个自由度,皆由同一个控制器控制。

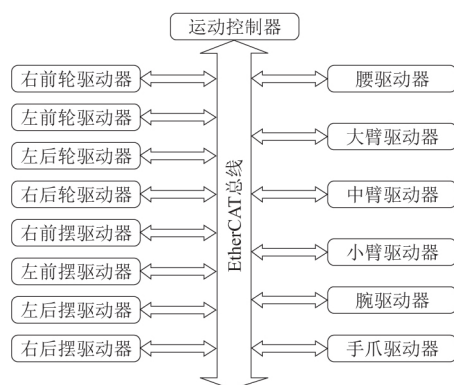


图 4 机器人运动控制架构

车体的控制包含 4 个车轮电机的控制和 4 个摆臂电机的控制。手臂的控制包含 6 个电机,其中包括了 2 个回转关节的控制、3 个俯仰关节的控制和手爪的开合控制。手臂的控制方式有单轴点动和末端联动 2 种控制方式,所有的控制都是通过 EtherCAT 总线来控制的。运动控制系统的功能结构如图 5 所示。

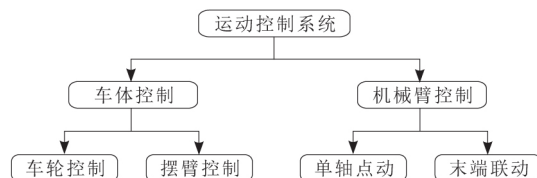


图 5 运动控制系统的功能结构

排爆机器人采用了 Beckhoff 控制器,其底层系统软件主要为 TwinCAT3,主要使用 PLC ST 语言和 C++,PLC ST 在软件底层可以很好地支持浮点运算;控制器支持 EtherCAT 总线协议、EtherNet 通信和 RS232 通信。该控制器利用 EtherCAT 总线,传输速率快,只需 30 μ s 就可以更新 1 000 个 I/O

口, $131\ \mu\text{s}$ 就可以传输 64 个开关量, 且可靠性高, 具有很好的实时性和同步性, 可以很好地满足控制需求。

排爆机器人所用的驱动器为 ELMO 公司的 G-MOLWHI 系列, 可以实现速度环控制、位置环控制和电流环控制, 并支持 EtherCAT 通信和 RS232 通信, 此外还留有少量的 I/O 口, 可以作为扩展功能使用。

3 机器人遥操作的设计与实现

遥操作控制在移动机器人平台上的应用是现阶段遥操作主要研究点之一^[6]。复杂环境遥操作排爆机器人可在复杂且危险的环境下, 由人在远端遥操作, 代替人去现场执行勘测、采样等多种任务^[7]。

在此, 排爆机器人遥操作的实现, 主要基于可靠的通信系统、图像实时传输系统和虚拟机器人交互系统。通信系统负责遥操作控制中控制信息和图像的传递; 图像系统是观察现场的眼睛; 虚拟机器人可以反馈机器人实时姿态。

3.1 通信系统的设计与实现

本文主要讨论上位机控制软件和下位机机器人控制器之间的通信系统。排爆机器人上、下位机之间的通信分为无线和线控 2 种方式, 且 2 种通信方式之间可以切换。线控通信方式通过 RJ45 接口实现。对于无线通讯方式, 采用 2 部 AirMesh900 电台来实现, 一部设置为 AccessPoint 模式与上位机通过 RJ45 接口连接, 另一部设置为 Station 模式与下位机机器人控制器通过 RJ45 接口连接。将 2 部电台 IP 地址设置为同一网段, 在通电后就会自动握手连接, 该型号电台, 传输速率可达 20 Mbit/s, 非视距可以达到 100~500 m, 且工作稳定, 能够很好地满足通信需求。通信系统结构如图 6 所示。

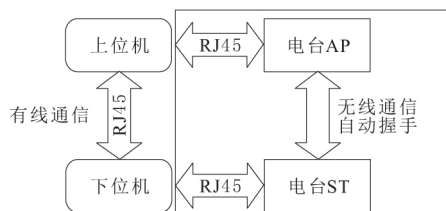


图6 通信系统结构

上、下位机数据传输协议使用 ADS 通信协议, 即自动化设备规范, 该协议描述了一种与设备和现场总线无关的接口, 管理 ADS 设备的通讯渠道。ADS 是在 Beckhoff 控制器 TwinCAT 系统中读取和写入数据, 以及进行指令传输的独立于介质的协议, 底层基于 TCP/IP 协议, 是一种专有协议。

3.2 多路图像实时传输系统实现

图像模块借助于 C# 的 Winform 框架实现, 编译环境为 Win10 系统。排爆机器人共安装了 5 路海康数字摄像头。其中, 车前和车后各安装了 1 路摄像头, 用于在车行驶过程中观察车前后状况; 在腰部也安装了 1 路广角摄像头, 可以随着腰的回转而回转, 用于观察全局环境; 在中臂安装了 1 路针孔摄像头, 用于观察中臂后面关节的姿态; 在手爪处也安装了 1 路针孔摄像头, 用于观察手爪抓取情况。

选用的摄像头支持多种获取视频流的方式, 如 TCP, UDP, RTP 等方式。考虑到图像系统实施的稳定性和方便性, 机器人图像系统采用了 TCP 的方式通过摄像头的 RJ45 接口来获取视频流。该摄像头还支持多种参数的修改, 这些参数主要包括码流类型、分辨率、图像质量、视频码率、视频帧率和视频编码类型。当设置好参数后, 摄像头按照所设参数自动对视频流编码和解码。考虑到实际应用场合的要求, 包括视频流畅度、视频质量和通信带宽等因素, 再结合摄像头实验的结果, 参数确定如表 1 所示。图像实时显示系统支持 5 路视频流同时实时显示和录像, 也支持单路图像放大或者缩小显示。

表1 摄像头参数

项目	参数
码流类型	视频流
分辨率/(px/in)	176×144
图像质量	一般
视频码率/(kbit/s)	256
视频帧率/Hz	16
视频编码类型	H264

3.3 虚拟机器人交互功能实现

利用摄像头可以观察周围环境和手爪抓取情况, 但是很难了解到机器人本体的位姿信息, 为了改善此情况, 为排爆机器人设计了虚拟机器人, 使之能够反馈机器人机械臂本体的位姿, 这显著提高了操作者的作业效率。

建立虚拟交互机器人的前提是需要机器人三维模型。本文用 Pro/E 对排爆机器人建模, 考虑到交互实时性需求, 故在建模时忽略掉了一些小零部件, 这样会有效地减轻计算负担, 只对机械臂各关节、车体和摆臂 9 个部件三维建模。

利用 Unity3D 作为虚拟交互软件平台, 在该平台建立虚拟机器人实现交互功能。为了使三维模型适应 Unity3D, 将 Pro/E 中的三维模型导出为 U-

nity3D 支持的 obj 格式,再添加入 Unity3D 中,然后为模型添加材质,增强显示效果。为了实现虚拟机器人各部件之间的随动,在 Unity3D 中采用树状节点的方式对各关节分类,父节点包含子节点,子节点又作为父节点包含另外的子节点,这样实现了子节点跟随父节点随动。

然后,改变各部件中心坐标和旋转角度,完成虚拟机器人的装配。编写脚本,将脚本附到某一个 GameObject 对象,将程序中的各个 GameObject 对象指定到对应的部件,再在脚本中添加 GUI 设计,最后将 Unity3D 工程导出为交互窗体。在该窗体的 GUI 中添加了虚拟机器人正视、俯视、侧视视图的切换功能,以及各部件运动角度的显示。

对于虚拟机器人和机器人本体的交互,在上位机控制软件和虚拟机器人之间采用 UDP 通信来实现机器人位姿信息的传输,虚拟机器人接收到相应的位姿信息后更新各部件姿态并显示。

4 触控端软件整体架构设计

4.1 软件功能需求分析

本文设计的排爆机器人的触控端软件功能分为 3 部分:机器人运动控制、图像实时显示和虚拟机器人动态交互。

机器人运动控制功能主要分为摆臂的单轴点动、摆臂的分组控制和耦合控制、车体行驶控制、机械臂各关节的单轴点动、机械臂末端联动和抓取、机器人辅助功能。根据机器人运动控制功能需求,在机器人控制软件中增加了 3 种控制模式,各模式之间可以直接切换,3 种模式如下:

a. 一般模式下,主要实现摆臂的单轴点动和机械臂各关节的单轴点动。

b. 车模式下,主要实现车体的前进、后退、行进中转弯和原地转弯。

c. 手模式下,主要实现机械臂的末端联动和抓取。

考虑到机器人实际作业的要求,摆臂的分组控制和耦合控制以及机器人辅助功能在 3 种模式下都可以运行。摆臂分为前摆臂和后摆臂 2 组,可以对每组摆臂单独控制,当同时控制 2 组摆臂同时向上或者向下运动时实现了耦合控制。机器人辅助功能有速度调节、机器人运动暂停和急停、急停复位、各关节一键还原姿态、机械臂一键摆抓取姿态、机器人使能状态显示、通信状态显示、错误消息显示,

以及运动信息显示等。

图像实时显示功能主要实现 5 路图像的同步实时显示、单路图像的放大显示和各路图像的录像功能。

虚拟机器人动态交互主要实现机械臂和摆臂的姿态动态更新、各关节运动角度显示。

4.2 软件整体架构设计与实现

车模式下车体的行驶控制与手模式下机械臂末端联动控制和抓取,借助于 SMC3 系列三轴霍尔操纵杆。该操纵杆为数字量摇杆,精度高,头部带有按钮,适用于 RS232 通信。车模式车体的控制用 X 轴来控制车体的前进和后退,Y 轴来控制车体原地转弯,X 轴和 Y 轴结合进行行驶中转弯;手模式机械臂的控制分别用 X 轴、Y 轴和 Z 轴来控制机械臂末端在全局坐标系相应方向的平动,三轴结合来控制机械臂末端的复合运动。排爆机器人控制箱如图 7 所示。



图 7 控制箱

本文采用 C# 的 WPF 框架来编写控制软件界面,编译环境为 Win10 系统。软件整体架构如图 8 所示,将软件整体功能以及各模块和软件之间的拓扑关系清晰展示出来。

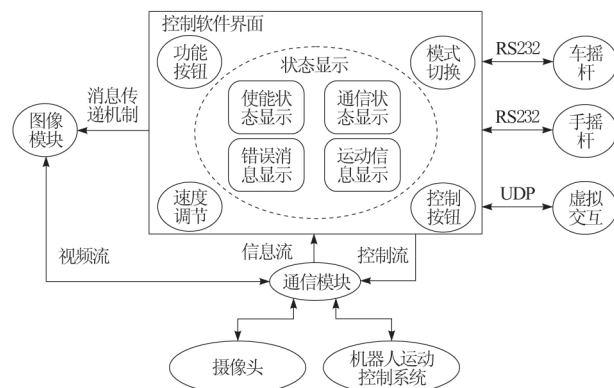


图 8 控制软件整体架构

对于图像实时显示系统,考虑到实际应用中可能出现控制软件崩溃问题,在设计时图像显示系统作为 1 个单独的模块来实现。这样的好处是当控制软件崩溃的时候图像显示模块还可以显示图像。图像的显示、放大和录像功能是通过 2 个软件,并通过消息传递机制通信来实现的。

虚拟机器交互窗口嵌入到控制软件界面预留好的区域,控制软件将数据发送到虚拟机器人窗口,完成数据交互。

最终的控制软件界面如图9所示。



图9 控制软件界面

5 结束语

设计了基于触屏控制的遥操作排爆机器人,经过多次实验,证明了该机器人很好地实现预期指标。该机器人可靠通信距离100 m以上;图像流畅清晰;虚拟机器人能够实时反馈机器人本体姿态,对操作者要求低,提高了作业效率;具有很好的越

障能力,最大能够爬倾斜角 45° 的楼梯;行走速度最大可达3.6 km/h;在机械臂完全伸展的情况下最大抓取质量5 kg。该排爆机器人能够适用于多种场合,后续将在现有机器人基础上增加多种传感器,来增加机器人的自主性和交互性。

参考文献:

- [1] 杨德治,明守远.地面排爆机器人的应用[J].机器人技术与应用,2004(4):30-36.
- [2] 范路桥,姚锡凡,祁亨年,等.排爆机器人的研究现状及其关键技术[J].机床与液压,2008,36(6):139-143.
- [3] 莫海军,吴少炜.排爆机器人及相关技术[J].机器人技术与应用,2005(4):31-36.
- [4] 钟国梁.排爆机器人运动控制系统的研究与实现[D].广州:华南理工大学,2009.
- [5] 陈曦,袁建军,胡学甲.基于触控终端的排爆机器人设计[J].机电一体化,2016,22(7):41-44,51.
- [6] Hasunuma H, Nakashima K. The tele-operation of the humanoid robot-workspace extension of the arm with step motion[C]// Proceedings of 2005 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots Tsukuba, 2005:245-252.
- [7] 曹宇.危险复杂环境遥操作机器人测控系统研究[D].南京:东南大学,2016.

(上接第66页)

参考文献:

- [1] 郭绍伟,牛铮,李昊扬,等.干式空心电抗器匝间过电压的诊断判据[J].高压技术,2018,44(3):804-811.
- [2] 彭庆军,姜雄伟,马仪,等.基于有限元方法的35 kV干式空心并联电抗器匝间电场分布研究[J].高压电器,2018,54(2):147-152.
- [3] 王琼,辛力坚,张冬,等.干式空心电抗器匝间绝缘缺陷诊断试验及其解体分析[J].电力电容器与无功补偿,2017,38(6):64-69.
- [4] 车传强,刘利强,王亚杰,等.干式空心电抗器匝间绝缘试验[J].电力电容器与无功补偿,2017,38(6):75-79.
- [5] 孙春侠,郑莉军.干式铁心并联电抗器气隙分布对损耗的影响[J].电力电容器与无功补偿,2017,38(6):80-82,86.
- [6] 黄文武,凌云,吴玉坤,等.干式空心电抗器匝间短路故障特性的研究[J].变压器,2017,54(10):14-18.
- [7] 赵春明,朱大铭,司昌健,等.匝间短路干式空心并联电抗器故障电流分析[J].变压器,2017,54(9):34-38.
- [8] 徐林峰,毛启武,欧小波,等.干式铁心并联电抗器允许最大振幅的探讨[J].变压器,2015,52(12):26-29.
- [9] 郭小兵,谭向宇,朱涛,等.故障位置和频率对干式空心并联电抗器参数的影响[J].电力电容器与无功补偿,2015,36(6):86-90.
- [10] 虞振洋,王世山.基于有限元模型重构的多物理场耦合空心电抗器优化设计[J].电工技术学报,2015,30(20):71-78.
- [11] 苟烜齐,刘轩东,杨昊,等.匝间绝缘故障对干式空心电抗器电感参数影响的仿真研究[J].高压电器,2015,51(10):117-121,127.
- [12] 王锋,宓传龙,张磊.基于ANSYS的干式空心电抗器抗震分析[J].电力电容器与无功补偿,2015,36(4):67-71.
- [13] 徐禄文,罗鹏,邹岸新,等.基于矩量法的空心电抗器工频磁场仿真分析[J].高压电器,2015,51(7):26-31.
- [14] 葛少杰,董万光.一起10 kV干式铁心电抗器烧毁事故原因分析[J].电力电容器与无功补偿,2015,36(2):89-92.
- [15] 常会军,毛爱明,郝天瑞,等.干式铁心串联电抗器损坏的原因分析[J].电力电容器与无功补偿,2015,36(1):61-63.
- [16] 张良,吕家圣,王永红,等.35 kV干式空心电抗器匝间绝缘现场试验[J].电机与控制学报,2014,18(6):66-71.