

# 室外移动机器人遥操作系统的设计与实现

白冰 吴潇文 刘华平 何克忠

(清华大学计算机科学与技术系智能技术与系统国家重点实验室 北京 100084)

**摘要** 遥操作是移动机器人指挥控制的重要手段之一。介绍了一种新型的室外智能移动机器人遥操作系统。本系统改变传统的固定指挥站,采用基于移动指挥站的操作方式,大大提高了操控的灵活性和系统的隐蔽性。同时,本系统还使用了先进的无线通信技术,开发了良好的人机交互界面,设计了功能全面的遥操作终端、定向天线云台控制系统以及多传感器环境信息采集系统。实验表明,系统能够在野外环境中高效、稳定地完成各种遥操作任务。

**关键词** 室外移动机器人, 移动指挥站, 遥操作

## Teleoperation System for Outdoor Mobile Robot

BAI Bing WU Xiao-wen LIU Hua-ping HE Ke-zhong

(State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Department of Computer & Science Technology,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Teleoperation is one of the most important ways for controlling mobile robots. This paper introduced a new type of teleoperation system for outdoor mobile robot. Different from traditional ways that use a stationary remote-control station, our system adopted a mobile remote-control station which greatly improves the flexibility and concealment of system. The advanced wireless communication technology was applied, and a good human-machine interface was developed in this teleoperation system. Besides, we also designed a multi-functionary teleoperation terminal, a directional antenna control system and a multi-sensory environmental information acquisition system. Some preliminary experimental results verified the effectiveness and stability of the system in performing teleoperation in unknown and unstructured fields.

**Keywords** Outdoor mobile robot, Mobile control station, Teleoperation

## 1 引言

室外移动机器人又称自主陆地车辆或无人驾驶车辆与智能机器人<sup>[1]</sup>。因具有环境适应性强、机动灵活性好等特点,室外移动机器人常被用于执行危险性的任务,如战场的军事巡逻、侦察、监视或生物、化学、核试验场等无人区域内的作业等<sup>[2]</sup>。此外,在空间技术领域,室外移动机器人可以扩展人的感知范围和执行能力,辅助完成许多人类无法进行的工作,如星际探索等<sup>[3]</sup>。

由于当前人工智能发展水平的限制,很难实现机器人在未知环境中完全自主移动。因此室外移动机器人多采用人工遥操作与自动驾驶相结合的方式,建立人机结合的智能系统,发挥各自特长,由机器人代替人去危险区域作业,用人的判断能力和决策水平实施控制,从而提高系统的整体智能水平<sup>[4]</sup>。

在遥操作系统中,驾驶员利用多种传感器获取环境信息,通过人机交互界面远程发送移动导航或操作命令,控制机器人完成特定的任务。传统的基于无线通信的遥操作系统,通过固定基站中的控制平台来实施远程指挥和控制,移动机器

人只能在固定基站无线信号所覆盖的有限区域内进行作业,从而限制了移动机器人的活动范围,削弱了移动机器人的机动性和灵活性。

为解决此问题,我们研制出一套基于移动指挥站的遥操作系统,该系统的主要贡献在于以下 3 个方面:第一是将系统中各子系统进行模块化设计,增强了系统可靠性,也便于系统维护升级。开发了一套多功能遥控驾驶终端,以实施对车体姿态的精确测控;利用高品质的无线数据电台完成测控数据快速、准确地传递;采用高清晰摄像机和宽带图像传输电台建立远程环境感知系统,从而形成具有一定临场感的“动中通”移动指挥方式。第二是在指挥站建立一套定向天线云台控制系统,使用 PID 控制器实现移动过程中定向天线的自动对准,从而大大改善了移动中图像无线传输的性能。第三是利用 GPS 数据和电子地图信息控制指挥站移动以接近被控机器人,缩短通信距离来保证良好的数据通信质量,不但增强了遥控操作的灵活性和机动性,而且大大扩展了室外移动机器人的活动范围,拓展了其在某些特殊领域的应用。如在执行特殊军事任务时,移动指挥站可以方便灵活地进行隐蔽伪装,

到稿日期:2008-03-04 此项工作得到国家自然科学基金(60504003)资助。

白冰 硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统、智能机器人,E-mail:baibing@gmail.com;吴潇文 硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统、智能机器人;刘华平 副教授,研究生导师,主要研究领域为智能控制、智能机器人;何克忠 教授,主要研究领域为智能控制、智能机器人。

从而提高系统的整体机动性和野外战场生存能力。

## 2 遥操作系统的体系结构

遥操作系统的设计目标是在空旷、通视、具有轻度起伏的地形区域内,移动指挥站对移动机器人平台进行远程控制,移动机器人平台通过激光雷达、图像无线电台等多种手段,向移动指挥站的操作员提供机器人平台前后两端各 180°的观测视野和环境信息。

系统主要由移动指挥站和移动机器人两部分构成,二者之间通过数据无线电台和图像无线电台进行远程控制和信息传递,移动指挥站通过多功能遥操作终端实施远程监控,移动机器人通过视频摄像机完成对周围环境的感知<sup>[5]</sup>。

### 2.1 移动指挥站

如图 1 所示,移动指挥站中 3 台嵌入式计算机分别用于电子地图、主监控、辅助监控,此外还包括触摸屏液晶显示器、数据无线电台、图像无线电台、多功能遥控驾驶台、天线云台控制系统、GPS 接收机、高速以太网交换机等。

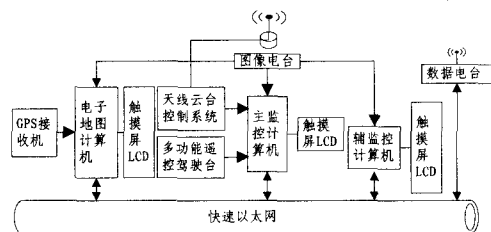


图 1 移动指挥站结构图

运行在移动指挥站上的监控模块通过 GPS 接收机、图像无线电台和数据无线电台,显示其在电子地图上的位置信息、环境视频信息、移动机器人的运行状态参数等。驾驶员通过这些信息做出判断和决策,通过触摸屏、键盘、多功能驾驶仪等多种方式发送相应的控制指令,完成监控状态的切换以及对移动机器人速度、方向、车姿状态等的控制。

利用 GPS 数据信息,在电子地图中可实时显示移动指挥站和移动机器人的当前位置,操作员可根据位置信息控制指挥站移动,以接近机器人来提高通信质量,从而扩大系统活动范围,提高系统的机动性和可靠性。

### 2.2 移动机器人

移动机器人配置有通讯计算机、数据无线电台、图像无线电台、视频切换器、摄像机、GPS 接收机、激光雷达、高速交换机等,还有车体控制部件,如主控器、多种车体控制 ECU、传感器等,它们相互之间以及与通讯计算机通过 CAN 总线互联,结构如图 2 所示。

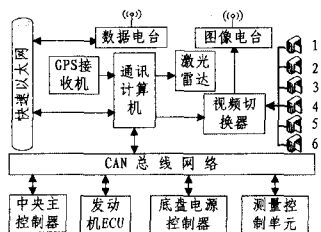


图 2 移动机器人结构图

通讯计算机接收和处理指挥站发送的各种控制指令,通过 CAN 总线发送给各个车体控制 ECU,同时通过 CAN 总线

接收各个传感器对底盘的实时监控数据,将其发送给移动指挥站。CAN 总线主要是为汽车监测和控制而设计,利用其对等、实时、容错性好等特点,可以准确可靠地完成指挥站对移动机器人的指令下达以及状态参数的采集传输。

## 3 多功能遥控终端

多功能遥控终端是系统实施遥操作控制的核心,其硬件部分由遥控驾驶台、测控模块、监控平台构成,软件部分包括测控程序、总控程序等,各模块结构如图 3 所示。

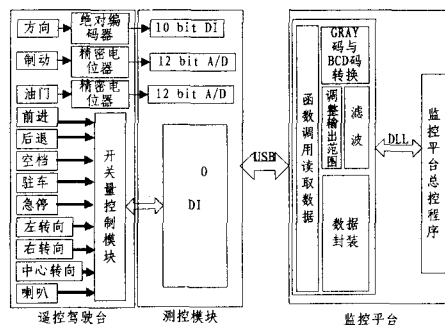


图 3 多功能遥控终端结构图

### 3.1 遥控驾驶台

遥控驾驶台主体是一个多功能一体化驾驶仪,包括方向传感器、油门传感器和制动传感器。油门和制动传感器均采用了特种车辆专用的精密电位器,分别为测控模块提供油门和制动的模拟量信号<sup>[6]</sup>。方向传感器采用 EP50S8 型绝对值型旋转编码器,可提供具有 10bit 精度的数字量编码作为方向数据。此外,在多功能一体化驾驶仪的左右手柄上设计有按键开关,通过开关量控制模块分别提供前进、后退、空档、驻车、急停、左转向、右转向、中心转向、喇叭等 9 种开关量信号。方向盘的中部设置了 LED 指示灯,以显示当前按键状态。驾驶仪接口采用标准航空插头,以保证移动和颠簸中电气连接可靠稳定。

### 3.2 测控模块

测控模块基于 AMUSB-9102 光隔数据测控模板实现。J1 接口为光隔 16bit 输入/输出通道,J2 接口为 12bit 的 AI 通道。监控主机可通过 USB 总线对数据进行读写操作。

测控模块负责采集遥控驾驶台提供的各种数字量和模拟量信号,对收到的模拟量数据进行 A/D 转换,并将结果传递给测控程序,以生成相应的控制指令,最终通过监控平台发送给相应的功能模块<sup>[6]</sup>。在系统中,绝对光码盘以 10bit GRAY 编码方式提供方向数据,由 J1 接口输入经测控程序转换为 BCD 码,提供给遥控和监控界面。油门、制动等模拟量信号通过 J2 接口采集,经测控程序调整和滤波输出给监控平台。各种开关量控制信号由 J2 接口读取后由测控程序封装生成。

### 3.3 监控平台

监控平台包括主控程序和硬件两部分。主控程序根据协议向移动机器人发送远程控制命令和驾驶状态切换信息,采集并显示移动机器人的实时车况数据、环境视频信息、电子地图信息等。此外,主控程序还要完成定向天线云台控制、系统安全监测报警以及网络通信等任务。监控平台各界面显示如图 4 所示。

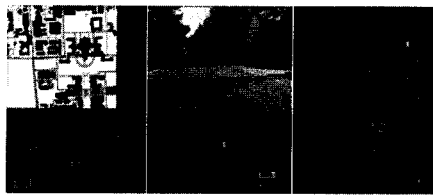


图4 监控界面

左图为电子地图界面,视频窗口用于电子地图显示,也可在前进、后退时切换到左前、左后摄像机,观察机器人左侧的环境信息。还包括遥控、人工、自主等驾驶状态切换按钮、电子地图缩放和平移按钮以及路径信息相关的操作按钮。

中图是主监控界面,显示车速、发动机转速、油门、刹车、档位、油温、水温等车体及发动机相关信息。主视频窗口可切换显示机器人正前、正后方的环境信息。

右图是辅助监控界面,显示来自移动机器人底盘各传感器的监测数据,如油压、发电机的电流和电压等。通过切换视频窗口可观察右前、右后摄像机提供的机器人右侧环境信息。

监控平台硬件设计中,因指挥车内空间有限、野外作业区域路面颠簸、温度和湿度条件恶劣等,所以综合考虑了速度、体积、温度、抗震、电源等多种因素。系统配置了三台 AEC-6910 型嵌入式计算机和触摸液晶屏,分别用于电子地图、主监控、辅助监控平台。操作员可以通过点击触摸屏直接下达车姿变换、状态调整以及视频切换等控制命令。此外,每台计算机中均安装有视频图像采集卡,用于处理摄像机捕捉到的环境视频信息。支持 100M 以太网可满足各监控模块之间以及与无线电台之间网络通信的要求。采用 CF 卡作为存储介质,提高了系统运行的抗震性及数据存取的可靠性。系统工作温度范围为  $-15^{\circ}\text{C}\sim 55^{\circ}\text{C}$ ,电压范围为 DC 9V~30V。

## 4 信息采集与传输系统

### 4.1 无线视频信息监控系统

无线视频监控系统感知移动机器人作业环境的视频信息,为遥操作提供实时的视觉图像信息。系统可完成在无人平台前进、后退、左、右转向行驶状况下各台摄像机之间的平滑切换,为遥控操作员提供前后两端各  $180^{\circ}$  的全景视野观察范围,满足指挥站对环境信息采集的要求。

该系统包括 CCD 摄像机、视频切换器、图像无线电台、天线云台等。图像无线通信以 TransVideo1200 车载式无线宽带图像电台为平台,其绕射性能较好,对普通障碍物的穿透力强,采用 COFDM 调制方式,能够在远距离、高速移动中保证图像传输的稳定可靠。

此外,系统配置了激光雷达,不仅可用于自动驾驶模式下对前方障碍物的检测及报警,还可弥补天气恶劣、夜晚行驶等条件下视频信息采集的缺陷,为操作员提供较为全面的环境预警信息。

### 4.2 天线云台控制系统

视频信息的无线传输是环境信息采集系统的关键环节。为了获取清晰图像,一方面要选取性能良好的图像无线电台,另一方面要尽量采取措施提高接收灵敏度,减少非通视因素的影响。除了提升天线高度以外,采用定向天线是解决这一问题的有效途径。全向天线的增益通常是 4dB 左右,而定向天线在方向对准时的增益可达 14dB 至 17dB。

图 5 是我们设计的定向天线云台控制系统,通过 GPS 数据生成指挥站和移动站的位置信息,确定移动站到指挥站之间的方向角  $\theta_1$ 。天线云台上安装了电子磁罗盘,指示定向天线的方向  $\theta_n$ ,通过数字 PI 调节器来完成误差信号调节,如图 5 中外环 A 所示。为了提高系统的动态响应性能,我们增加了速度反馈环节,如图 5 中内环 B 所示。实验表明,B 环的引入可显著提高系统的控制速度。PID 控制可使天线云台控制系统快速准确地完成移动过程中天线的自动对准,从而提高图像无线传输的性能。

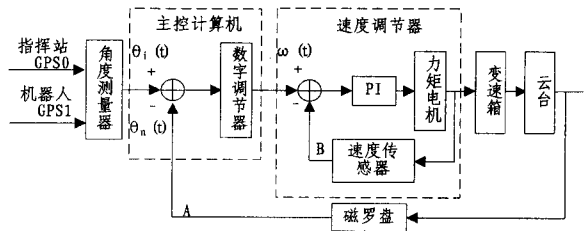


图5 定向天线云台控制系统框图

## 4.3 数据无线通信系统

数据无线通信系统负责控制信令、握手协议及状态参数等实时数据的收发任务,要求稳定可靠、抗干扰能力强、实时性和绕射性好、适合野外环境作业等。

我们利用 MDS iNET300 网络数据电台建立无线通信平台,该电台空中通信带宽最高可达 512kbps,传输距离最大 30km。针对移动图像传输系统网络中既有串口设备又有以太网设备的特点,利用电台提供的长距离、高速率、多协议的无线网络解决方案,我们很好地实现了遥控指挥系统所要求的基于 IP 无线组网、远距离无线通信以及大容量数据传输等指标。

## 5 系统性能测试

该系统在清华大学 THMR-V 型室外移动机器人等多种平台上进行了初步实验。在室内、野外等不同的环境中对移动控制状态进行性能测试,如图 6 所示。



图6 实验平台之一:清华大学 THMR-V 移动机器人

在野外环境下,图像无线通信系统在 6km 不通视范围内,90% 以上路线行程中图像连贯无马赛克,接收良好;在 10km 通视范围,最高车速 80 km/h 时,90% 以上路线行程中图像连贯无马赛克,接收良好。

数据无线通信在通信速率为 256kbps 时,接收数据的平均延时约为 8.2ms。在中等信号强度下 4km 的范围内,系统数据无线通信的可靠性能达到 99.5%,系统各项控制指令和监测数据收发正常,可以稳定可靠地实施操控;随着通信距离加大,信号强度减弱,数据无线通信的可靠性随之下降,有丢包现象,但没有误码产生;在通信距离超过 5.5km 时,通信

(下转第 274 页)

剩余点的凸组合来表示。

构造集合  $S' = \{s' \in S \mid \forall s \in S/S'', s \text{ 的第 } k_1, k_2, \dots, k_b (b < n) \text{ 个坐标分量之和小于 } s' \text{ 相应坐标分量之和}\}$

**命题 6**  $\forall s' \in S', s'$  为凸壳顶点当且仅当  $s'$  不能由  $S''$  中剩余点的凸组合来表示。

(注: 当将“小于”改成“大于”可以得到类似结论。)

高维凸壳与其低维子凸壳的关系

分别对  $S$  中每一个点的坐标向量取第  $k_1, k_2, \dots, k_b (b < n)$  位置上的坐标分量构成一个新的  $b$  维向量, 设集合  $F$  为以上  $b$  维向量在  $b$  维空间中的对应点所组成的集合。设凸壳  $\text{conv}(F)$  的顶点集为  $D(F)$ , 且设  $\xi \in D(F)$ 。构造集合  $S'' = \{s'' \in S \mid s'' \text{ 的第 } k_1, k_2, \dots, k_b (b < n) \text{ 位置上的坐标分量与点 } \xi \text{ 相应位置上的坐标分量相等}\}$ 。

**命题 7**  $\forall s'' \in S'', s''$  为凸壳顶点当且仅当  $s''$  不能由  $S''$  中剩余点的凸组合来表示。

在二维情况下我们常用如下凸壳顶点的定义 2: 能够将点集  $S$  中所有点都包围住的最小凸多边形的顶点称为凸壳  $\text{conv}(S)$  的顶点。下面证明在二维情况下定义 2 与定义 1 等价。

首先证明如下命题:

**命题 8** 设  $A$  为二维空间中的一个凸多边形,  $a$  为二维空间中的任意一点, 且记凸多边形  $A$  的顶点集为  $D(A)$ 。则点  $a$  包含在凸多边形  $A$  所围成的区域(包括边界)中当且仅当点  $a$  可以由  $D(A)$  中点的凸组合来表示。

证明:

不妨记凸多边形  $A$  所围成的区域(包括边界)为  $E$ 。

先证必要性。显然对  $E$  中的任意一点, 均可以构造一个由凸多边形  $A$  的三个顶点所构成的三角形, 此点包含在该三角形所围成的区域(包括边界)中。而三角形所围成的区域(包括边界)中的任意一点均可以由三角形三个顶点的凸组合来表示。故必要性成立。

再证充分性。显然包含在区域  $E$  中的所有的点构成一个凸集记为  $B$ , 而点  $a$  可以由  $D(A)$  中点的凸组合来表示, 故由凸集的定义可知点  $a$  属于  $B$ 。由此可推出点  $a$  包含在凸多边形  $A$  所围成的区域(包括边界)中。

故命题 8 成立。

证明:

设由定义 1 确定的凸壳顶点集为  $D(S)$ 。能将点集  $S$  包围住的最小凸多边形的顶点集为  $C$ , 显然  $C$  为  $S$  的子集。由命题 8 可知,  $S$  中的任意一点均可以由  $C$  中点的凸组合来表示, 又由定义 1 以及  $D(S)$  的唯一性可知  $D(S)$  为  $C$  的子集。

假设  $D(S) \subset C$ 。

因为  $D(S)$  为  $C$  的子集, 所以  $D(S)$  中的所有点必能构成一个凸多边形, 不妨记为  $H$ 。同时由于  $S$  中的每一个点均可以由  $D(S)$  中点的凸组合来表示, 因此由命题 8 可知:  $S$  中所有的点均包含在凸多边形  $H$  中。这与  $C$  为能将点集  $S$  包围住的最小凸多边形的顶点集相矛盾, 所以假设  $D(S) \subset C$  不成立, 又因为  $D(S) \subseteq C$ , 故  $D(S) = C$ 。这就说明了在二维情况下定义 2 与定义 1 等价。

**结束语** 迄今为止, 已有的二维凸壳算法基本上都是根据二维空间中凸多边形的一些特殊几何性质构造而来。但高维空间中的几何结构远比二维空间复杂, 这就造成了解决二维凸壳问题的传统算法思想在解决高维凸壳问题时常有较高难度。鉴此, 本文从代数学新视角来研究凸壳问题, 并对凸壳顶点的一些代数性质作了研究, 试图为探索从代数视度来设计和创新高维几何空间凸壳算法提供若干研究思路与方法支撑。

## 参考文献

- [1] 周启海, 黄涛, 吴红玉, 等. 基于最大基线倾角智能逼近的凸壳新算法[J]. 计算机科学, 2007(09): 206-208
- [2] 郑永果, 徐晓丹, 岳昊. 求平面点集凸壳的一个最优算法[J]. 福建电脑, 2005(07): 47-48
- [3] 黄涛, 周启海. 双域单向水平倾角最小化围绕凸壳新算法[J]. 计算机科学, 2007(11): 208-211
- [4] 刘丽娜, 唐振军, 张显全. 基于凸多边形的凸壳算法[J]. 计算机科学, 2006(9): 218-221
- [5] 马丽平, 杨炳儒, 樊广佳. 平面点集凸壳的一种快速算法[J]. 地理与地理信息科学, 2006(6): 38-41
- [6] 杨勋年, 汪国昭. 三维凸包的快速算法[J]. 浙江大学学报: 工学版) 1999(02): 111-115

(上接第 247 页)

可靠性较差, 甚至出现不通信状态。移动机器人在低于 80km/h 的速度内运行, 对数据通信的可靠性没有影响。

从测试结果可以看出: 系统各模块之间的接口、协议设计合理, 控制指令及数据能够快速准确地响应和传输, 机器人可以快速完成遥控、人工、自主 3 种驾驶状态的切换。在车速低于 80km/h、通信距离小于 5km 的范围内, 遥控操作系统可以在移动过程中很好地实现野外具有轻度起伏的地形区域内对移动机器人的灵活操控。

**结束语** 本文介绍了一种新型基于无线通信的室外移动机器人遥控操作系统。该系统提供了良好的人机交互界面和操作控制平台, 具有一定的临场感知能力。此外还设计了定向天线控制系统, 增强了移动过程中图像无线通信的效果; 指挥站可灵活移动, 利用电子地图和 GPS 信息寻找并接近移动机器人以缩短通信距离, 不但显著增强了操控效果, 而且提高了系统整体的指控灵活性和野外生存能力, 扩展了其在公共安防、社区巡逻、军事侦察等特殊领域的应用范围。

今后的工作将集中在移动指挥站对多台机器人的遥控方面。需要进一步研究和解决的关键技术包括改进无线通信的

性能、增强视觉导航以提高移动机器人自主驾驶能力、基于 GPS 的电子地图绘制与匹配以及基于电子地图的引导式遥控技术等。

## 参考文献

- [1] 欧青立, 何克忠. 室外智能移动机器人的发展及其关键技术研究. 机器人, 2000, 22(6): 519-526
- [2] 张鹏飞, 何克忠, 欧阳正柱, 等. 多功能室外智能移动机器人实验平台—THMR-V. 机器人, 2002, 24(6): 97-101
- [3] 丑武胜, 战强. 空间遥操作机器人系统控制参考模型. 宇航学报, 2003, 24(4): 378-383
- [4] 杨灿军, 陈鹰, 路雨祥. 人机一体化智能系统理论及应用研究探索. 机械工程学报, 2000, 36(6): 42-47
- [5] Maza M, Baselga S, Ortiz J. Vehicle Teleoperation with a Multi-sensory Driving Interface// Climbing and Walking Robots CLAWAR 2004 (Pablo Gonzalez De(EDT) Santos, Manuel Armada). 2005: 437-445
- [6] 于元隆, 樊铁银, 何克忠. 移动机器人 THMR-V 遥控系统的设计与实现. 计算机工程与应用, 2003, 25: 202-205