

文章编号: 1002-0446(2000)06-0519-08

室外智能移动机器人的发展及其关键技术研究*

欧青立¹ 何克忠²

(1. 湘潭工学院信息与电气工程系 湖南湘潭 411201 清华大学计算机系智能技术与系统国家重点实验室访问学者;
2. 清华大学计算机系智能技术与系统国家重点实验室 北京 100084)

摘 要: 室外智能移动机器人有着广泛的应用前景, 是机器人研究中的热点之一. 本文分析了在室外移动机器人发展中有代表意义的几个典型系统, 进而论述了室外移动机器人研究中的若干关键技术的研究现状及发展水平. 这些关键技术包括移动机器人的控制体系结构、机器人视觉信息的实时处理技术、车体的定位系统、多传感器信息的集成与融合技术以及路径规划技术与车体控制技术等.

关键词: 室外智能移动机器人; 控制体系结构; 机器人视觉; 路径规划; 导航与控制

中图分类号: TP24

文献标识码: B

1 引言

智能移动机器人是机器人研究领域中的一个重要分支. 智能移动机器人集人工智能、智能控制、信息处理、图像处理、检测与转换等专业技术为一体, 跨计算机、自动控制、机械、电子等多学科, 成为当前智能机器人研究的热点之一.

智能移动机器人可分为室外智能移动机器人(Outdoor Intelligent Mobile Robot)和室内移动机器人(Indoor Mobile Robot). 室外智能移动机器人, 又称自主陆地车辆(Autonomous Land Vehicle)或无人驾驶车辆与智能机器人(Unmanned Vehicle and Intelligent Robot).

本文简要介绍室外移动机器人的发展状况及几个典型系统, 进而论述智能移动机器人研究中的若干关键技术的研究方法及发展水平.

2 智能移动机器人的发展及典型系统

由于室外移动机器人不但在军事上存在特殊的应用价值, 而且在公路交通运输中有着广泛的应用前景, 因此引起世界各国的普遍重视. 在这方面, 美、德、法、日等国走在世界的前列. 80 年代初期, 在美国 DARPA 的支持下, CMU、Stanford 和 MIT 等单位开展了 ALV 的研究, 试图研制在非结构化环境中能够自主移动的车辆^[1-3]. NASA 下属的 Jet Propulsion Laboratory (JPL) 也进行了这方面的研究. 国内从八·五期间开始了这方面的研究, 有多所高校联合研制的军用室外移动机器人 7B. 8, 其某些关键技术达到了国际先进水平. 清华大学计算机系自主开发了 THMR-III 型机器人^[4-6], 行动决策与规划技术达到了国际先进水平.

根据室外智能移动机器人的应用领域及道路环境的不同, 目前室外移动机器人的研究的侧重点可分为两方面: 一是结构化道路(高速公路、高等级公路)上的车辆自动驾驶或辅助驾驶, 其目标应用领域为民用运输部门或公路安全部门, 代表成果有 CMU 的 NavLab-5 系统、

* 收稿日期: 1999-12-08

德国联邦国防大学的 VaMoRs-P 系统、德国大众汽车公司的 Caravelle 系统^[7,8]; 二是移动机器人在非结构化道路(一般道路、土路、校园网道路)上的机动性、灵活性与自然地理环境下的越野性, 其目标应用领域主要是军事, 代表成果有 CMU 的 NavLab 系统、FastNav 系统和 RANGER 系统等^[9]. 我国的 7B.8 系统、THMR-III 系统属于面向非结构化道路的智能移动机器人.

2.1 CMU 的 NavLab 系列移动机器人系统

美国卡内基·梅隆大学(Carnegie Mellon University, CMU) 机器人研究所研制的 NavLab 系列机器人代表了室外移动机器人的发展方向. 其典型代表有 NavLab-1 系统和 NavLab-5 系统.

NavLab-1 系统由 CMU 机器人研究所于 80 年代建成. 其计算机系统由 Warp、Sun3、Sun4 组成, 它完成图像处理、图像理解、传感器信息融合、路径规划和车体控制. NavLab-1 系统的传感器包括彩色摄像机、ERIM 激光雷达、超声、陀螺、光码盘、GPS 等. 其在 CMU 校园网道路实验速度为 12km/h, 一般非结构化道路为 10km/h. 在典型结构化道路情况下运行速度为 28km/h, 使用神经网络控制器 ALVINN 控制车体的最高速度为 88km/h. CMU 还以吉普车为平台, 开发出面向越野的系统 NavLab-2(HMMWV).

NavLab-5 系统由 CMU 于 1995 年建成. 车体采用 Pontiac 运动跑车. CMU 与 AssistWare 技术公司合作开发了便携式高级导航支撑平台 PANS(Portable Advanced Navigation Support). 其传感器系统包括: 1) 视觉传感器 Sony DXC-151A 彩色摄像机一台; 2) 差分 GPS 系统一套, 差分模式下定位精度为 2m ~ 5m; 3) 光纤阻尼陀螺; 4) 光码盘. 计算机系统包括一台 Sparc Lx 便携式工作站和一台 HC11 微控制器. 工作站完成传感器信息处理与融合、全局与局部路径规划; HC11 完成底层车体控制与安全监控. NavLab-5 在实验场环境道路上自动驾驶的平均速度为 88.5km/h. 公路实验时首次进行了横穿美国大陆的长途自动驾驶实验, 其自动驾驶的行程为 4496km, 占总行程的 98.1%. 虽然计算机仅控制方向, 油门和刹车由人工控制, 这个结果仍相当令人鼓舞. NavLab-5 系统的雄姿见图 1 所示.



图1 CMU 的 NavLab-5 移动机器人系统

2.2 德国的 VaMoRs-P 和 Caravelle 系统

VaMoRs-P 系统由德国联邦国防大学和奔驰汽车公司于 90 年代初期制成. 车体采用奔驰

500 轿车. 传感器系统包括: 1) 4 个小型彩色 CCD 摄像机, 构成两组主动式双目视觉系统; 2) 3 个惯性线性加速度计和角度变化传感器; 3) 测速表及发动机状态测量仪. 执行机构包括方向力矩电机、电子油门和液压制动器等. 计算机系统由基于 Transputer 的并行处理单元和两台 PC-486 组成. Transputer 并行处理单元由大约 60 个 Transputer 构成, 用于图像特征抽取、物体识别、对象状态估计、行为决策、控制计算、方向控制和信息通信、I/O 操作、数据库操作、图形显示. 两台 PC-486 主要用于软件开发和人机交互、数据登录等. Vamors-P 系统已在高速公路上进行了大量的实验, 实验内容有跟踪车道白线、避障和自动超车等. 1995 年公布的最高速度为 130km/h.

Caravelle 系统由德国研究与技术部门与大众汽车公司合作于 1992 年制成. 车体采用大众公司的 Caravelle 旅行车. 它的研究主要内容是高速公路下的视觉导航, 因此其传感器和计算机系统都是以视觉为主. 传感器系统除两台摄像机外, 仅安装了一个速度传感器和一个测量驾驶角的传感器. 两台摄像机中一台装有摄远镜头的用来检测障碍, 另一台装有广角镜头的用来检测行车道. 执行机构为方向力矩电机和电子油门. 计算机系统也是由 Transputer 构成的并行处理单元构成, 完成图像处理、卡尔曼动态滤波、车体控制. 另一台 PC 完成系统自举、监控等功能. 1992 年公布的材料显示系统从识别一帧图像到完成控制的周期为 70ms. Caravelle 在典型的高速公路环境下的最高速度为 120km/h.

2.3 我国的 7B.8 系统、THMR-III 系统和 THMR-V 系统

7B.8 系统是由南京理工大学、北京理工大学、浙江大学、国防科技大学、清华大学等多所院校联合研制的军用室外移动机器人, 于 1995 年 12 月通过验收. 7B.8 系统的车体选用国产跃进客货车改制. 车上集成了二维彩色摄像机、三维激光雷达、陀螺惯导定位、超声等传感器. 计算机系统采用两台 Sun10 完成信息融合、黑板调度、全局、局部路径规划, 两台 PC486 完成路边抽取识别和激光信息处理, 8098 单片机完成定位计算和车辆自动驾驶. 其体系结构以水平式结构为主, 采用传统的“感知-建模-规划-执行”算法, 其直线跟踪速度达到 20km/h. 避障速度达到 5~10km/h.

在国家科工委和国家 863 计划的资助下, 清华大学计算机系智能技术与系统国家重点实验室自 1988 年开始研制 THMR(Tsinghua Mobile Robot) 系列移动机器人系统. 在移动机器人的自主式系统、体系结构、传感器信息的获取与处理、路径规划与立体视觉、感知动作、多行为控制、通讯与临场感技术上进行了较为深入的研究.

清华大学的 THMR-III 系统的车体选用 BJ1022 面包车改制. THMR-III 上集成了二维彩色摄像机、磁罗盘光码盘定位、GPS、超声等传感器. 计算机系统采用 Sun Spark 10 一台、PC-486 二台和 8098 单片机数台. Sun 完成任务规划, 根据地图数据库信息进行全局规划, 一台 PC 机完成视觉信息处理, 另一台 PC 完成局部规划、反射控制及系统监控, 数台 8098 完成超声测量、位置测量、车体方向速度的控制. 它的体系结构以垂直式为主, 采用多层次“感知-动作”行为控制及基于模糊控制的局部路径规划及导航控制. 利用 THMR-III 研究了直线跟踪算法、白线跟踪算法、连续障碍物跟踪算法、漫游避障、路标识别、视觉神经网络道路识别、道路模糊识别等多种导航算法, 完成了主楼前穿越松墙路、路口进入、主楼前绕“∞”字等整体实验. THMR-III 在自主道路跟踪时达到 5~10km/h, 避障达 5km/h.

THMR-V 系统是清华大学计算机系正在研制的新一代智能移动机器人, 兼有面向高速公路和一般道路的功能. 车体采用道奇 7 座厢式车改装, 装备有彩色摄像机、GPS、磁罗盘光码盘

定位系统、激光测距仪 LMS220 等。计算机系统采用 Pentium II 计算机两台, 其中一台进行视觉信息处理, 另一台完成信息融合、路径规划、行为控制、决策控制等功能。4 台 IPC 工控机分别完成激光测距信息处理、定位信息处理、通讯管理、驾驶控制等功能。THMR-V 系统的 GPS 采用加拿大 Novatel 公司生产的 3111R 单频 12 通道实时差分 GPS 系统。该系统由两台 3111R GPS 接收机、FRM96S-35(W) 电台及 MODEM 组成。THMR-V 智能车测控系统框图如图 2 所示^[10]。该智能车设计车速高速公路为 80km/h, 一般道路为 20km/h。其外形如图 3 所示。

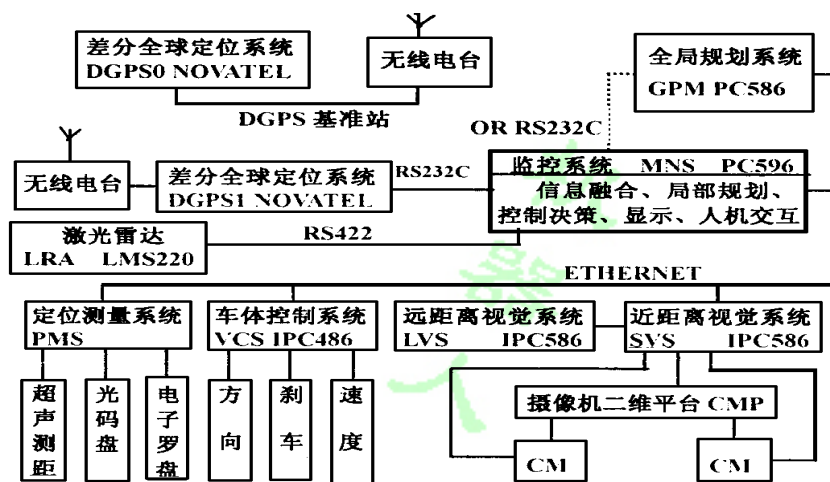


图 2 THMR-V 机器人测控系统框图



图 3 正在研制中的清华大学 THMR-V 机器人

除上面介绍的几种机器人系统外, 我国还有很多机构开展了这方面的研究, 并且有不少样机原型问世。如国防科技大学研制的室外移动机器人等。

3 室外智能移动机器人研究中的关键技术

室外移动机器人是一个组成结构非常复杂的系统, 它不仅具有加速、减速、前进、后退以及转弯等常规的汽车功能, 而且还具有任务分析、路径规划、路径跟踪、信息感知、自主决策等类

似人类智能行为的人工智能。因此,按其功能划分,室外移动机器人可以看作是由机械装置、行为控制器、知识库及传感器系统组成的相互联系、相互作用的复杂动态系统。室外移动机器人的研究涉及机械、控制、传感器、人工智能等技术,但主要集中在若干关键技术的研究与突破。这些关键技术主要包括机器人控制体系结构、路径规划与车体控制技术、车体的定位系统、机器人视觉信息的实时处理技术以及多传感器信息的集成与融合等。

3.1 移动机器人控制体系结构的研究

移动机器人控制体系结构是实施控制的策略与方法。目前采用的体系结构主要有功能式(水平式)结构和行为式(垂直式)结构以及混合式结构。功能式和行为式结构如图 4 所示。功能式结构以 CMU 的 NavLab 系统和 Rover 系统为典型代表^[1]。它根据信息的流向及行为功能,将机器人的控制过程分解成不同的功能模块,这些功能模块组成了一条闭环链,信息流由环境经由传感器进入,经规划决策处理后再经由执行机构返回环境,从而实施控制行为。功能式结构的优点是系统构造层次清晰、模块功能易执行,并且较易实现高层次的智能行为。缺点是在系统的每一控制行为都必须经过感知-建模-规划-执行等各模块,延时长,实时性差;另外,由于各模块串行连接,其中任一模块的故障直接影响整个系统的功能。

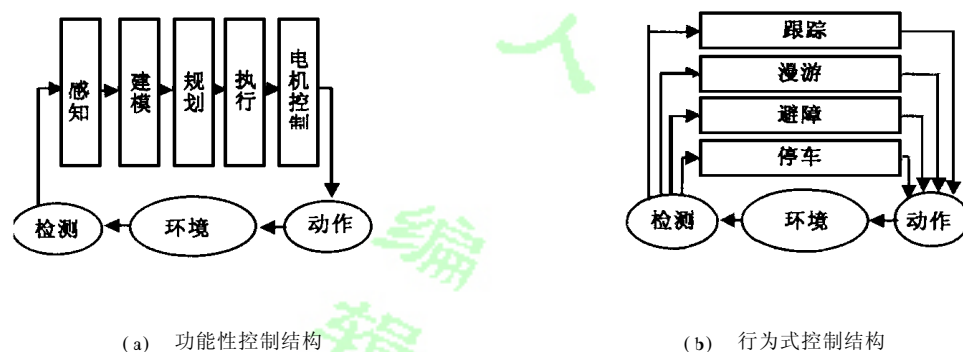


图 4 智能移动机器人的控制体系结构

根据移动机器人的行为功能构造控制体系结构,称为行为式结构。它将机器人行为的感知、规划、任务执行等过程封装成一个行为模块,例如将机器人的行为分为停车、跟踪、漫游、避障等行为功能模块,每一行为实现传感器信息与机器人动作间的一种映射。某一时刻,只有一种行为控制车体。机器人的最终行为由各行模块之间的竞争实现。这种控制结构的优点是易于实现实时控制,系统可靠性比较高;但由于各行模块之间是松散连接,难于实现高层次的智能控制。这种控制方法的典型代表是 Brooks 的包容式结构。清华大学 THMR-III 的控制即采用此结构。

针对上述两种体系结构的特点,研究人员提出了不少改进措施。较典型的是 Oxford 的 H. S. Hu 提出的混合结构^[11]。它主要由低层反馈控制级和高层智能级构成。高层的命令可以传往下层,车体信息也可由下层传往上层。这种方法既保证了系统的实时性又具有较高的智能级。

3.2 机器人视觉信息的实时处理技术

机器人视觉系统正如人的眼睛一样,是机器人感知局部环境的重要“器官”,同时依此感知的环境信息实现对机器人的导航。机器人视觉信息主要指二维彩色 CCD 摄像机信息,在有些系统中还包括三维激光雷达采集的信息。视觉信息能否正确、实时地处理直接关系到车体行驶

速度、路径跟踪以及对障碍物的避碰,对车体的实时性和鲁棒性具有决定性的作用.视觉信息的处理技术是室外移动机器人研究中最关键的技术之一.目前视觉信息处理的内容主要包括:视觉信息的压缩和滤波、道路检测和障碍物检测、特定交通道路标志的识别、三维信息感知与处理.其中道路检测和障碍物检测是视觉信息处理中最重要的过程,也是最困难的过程.视觉信息的获取是局部路径规划和导航的基础,道路检测的成功与否决定了机器人能否正确识别当前的道路环境,能否正确作出局部路径规划并执行路径跟踪.为了简化视觉信息处理,降低开发难度,通常把室外移动机器人的工作环境分为结构化道路环境和非结构化道路环境.结构化道路的检测相对来说较易实现,其检测技术一般都以边缘检测为基础,辅以 Hough 变换、模式匹配等,并利用最小二乘法处理对应于道路边界的线条,得出道路的几何描述.由于非结构化道路的环境复杂、特征描述困难,使得非结构化道路的检测及信息处理复杂化.目前对非结构化道路的检测主要采用三种方法:边缘抽取法、阈值法和分类法.障碍物检测原理与道路检测原理差不多,但其重点是对障碍物位置和大小的描述.

3.3 车体的定位系统

移动机器人的准确定位是保证其正确完成导航、控制任务的关键之一.目前室外移动机器人常用的定位方法有 GPS、光码盘、惯性陀螺、磁罗盘、路标匹配、广义路标匹配等.上述每一种方法均各有优点及局限性,因而移动机器人实际采用几种方法结合使用,以充分发挥各自优点而避免各自的缺陷,从而提高定位系统的精度和可靠性.如 CMU 的 RANGER 系统中使用了光码盘、惯性陀螺和 GPS 等定位技术.清华机器人 THMR-V 采用了 GPS、光码盘和磁罗盘等定位技术,在进行局部路径规划和导航时,以光码盘和磁罗盘定位为主,在全局路径规划和导航时,利用 GPS 定位对光码盘、磁罗盘定位所产生的累积误差进行修正,从而保证了 THMR-V 的定位系统精度和可靠性.

3.4 基于多传感器的信息融合技术

室外移动机器人在行驶时,必须持续不断地感知周围环境信息及自身状态信息,由于室外移动机器人工作环境的复杂性、机器人自身状态的不确定性和单一传感器的局限性,只靠一种传感器难以完成对外部环境的感知.为完成在复杂、动态及不确定性环境下的自主性,机器人通常装有多种传感器.如 CMU 的 NavLab 和 7B.8 机器人上都装有彩色摄像机、超声、激光雷达、定位等多种传感器,在 THMR-V 上集成了彩色摄像机、超声、定位传感器.多传感器信息融合是指将多个或多种传感器所提供的环境信息进行集成处理,形成对外部环境特征的统一表示.经过集成处理的多传感器信息融合了信息的互补性、信息的冗余性、信息的实时性和信息的低成本性,因而能比较完整地、精确地反映环境特征.多传感器信息融合的常用方法有:加权平均、贝叶斯估计、卡尔曼滤波、Dempster-Shafer 证据推理、模糊推理以及人工神经网络等等.

3.5 路径规划技术与车体控制技术

车体控制是室外移动机器人的根本目的与核心技术,而路径规划是移动机器人导航与控制的基础.室外移动机器人的行为控制系统必须根据给定的任务和变化的环境实施对车体的控制.首先,它要理解给定的任务,作出全局路径规划,并在机器人行驶过程中,通过传感器系统不断感知周围环境信息和自身状态信息,对这些进行融合处理,作出局部路径规划,为移动机器人规划出一条无障碍物、可通行的路径,然后生成驾驶命令控制车体沿着该路径行驶.

全局路径规划的任务是根据全局地图数据库信息规划出自起始点至目标点的一条无碰

撞、可通过的路径。目前正在研究的有准结构化道路环境多种约束条件下的路径规划技术, 自然地形环境下的路径规划技术, 以及机器人在行驶过程中遇到突发事件时的重规划技术等。由于全局路径规划所生成的路径只能是从起始点到目标点的粗略路径, 并没有考虑路径的方向、宽度、曲率、道路交叉以及路障等细节信息, 加之移动机器人在行驶过程受局部环境和自身状态的不确定性的影响, 会遇到各种各样不可预测的情况。因此, 在移动机器人的行驶过程中, 必须以局部环境信息和机器人自身状态信息为基础, 规划出短程内一段无碰撞的理想局部路径。这就是局部路径规划。通常的方法有空间搜索法、基于融合数据的直接规划法、层次性感知-动作行为法、势场域法、占据栅格图法、模糊逻辑法和神经网络法等。车体控制的任务是根据局部规划的结果和当前的车体位置、姿态、车速等信息等作出自主决策, 并向机械装置发出驾驶命令。目前研究的内容主要集中在车体模型和车体控制算法。常用的控制算法有最优控制算法、PID 路径跟踪算法、预瞄控制算法、预测控制算法、模糊控制算法和神经网络控制算法等等。实际控制时, 通常是采用多种算法综合, 以达到最佳控制效果。

4 结语

综上所述, 尽管室外移动机器人所能达到的智能化水平和自主化水平还比较低, 还远未达到实用化程度。但目前所取得研究成果仍就是令人兴奋的。随着人工智能、智能控制技术和计算机技术的不断发展和前述各项关键技术的提高与突破, 室外智能移动机器人的研究与应用呈现出广阔的美好前景。

参 考 文 献

- 1 Thorpe C, Hebert M, Kanade T, Shafer S. Toward Autonomous Driving: The CMU NavLab Part I-Perception. IEEE Expert, 1991: 31- 42
- 2 Thorpe C, Hebert M, Kanade T, Shafer S. Toward Autonomous Driving: The CMU NavLab Part II-Architecture and Systems. IEEE Expert, 1991: 43- 52
- 3 Thorpe C, Kanade T. Third Annual Report for Perception for Outdoor Navigation. CMU Technical Report. 1992, CMU-RI-TR-92-16
- 4 何克忠, 郭木河, 王宏, 孙海航. 智能移动机器人技术研究. 机器人技术与应用, 1996, 2: 11- 13
- 5 He K Z, Sun H H, Guo M H, Wang H. Research of Intelligent Mobile Robot. In: Proc of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT'96), Shanghai, China: 1996, 503- 507
- 6 Yang X, He K, Guo M, Zhang B. A Prototype Toward Autonomous Navigation: The THMR-III, In: Proceedings of 1998 International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety-AVCS'98. Amiens, France: 1998
- 7 Mangel J, Leonhard W. Vehicle Control by Computer Vision. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1992, 39(3): 181 - 188
- 8 王宏, 何克忠, 张钺. 智能车辆的自动驾驶与辅助导航. 机器人, 1997, 19(2): 155- 160
- 9 Kelly A J. A Feedforward Control Approach to the Local Navigation Problem for Autonomous Vehicles. CMU Robotics Institute Technical Report, 1994, CMU-RI-TR-94-17
- 10 国防科技预研重点项目《临场感遥控系统技术报告》, 清华大学计算机系智能技术与系统国家重点实验室 1998 年 9 月
- 11 Hu H, Brady M. A Parallel Processing Architecture for Sensor-based Control of Intelligent Mobile Robots. Robotics and Autonomous Systems, 1996, 17: 235- 257

RESEARCH ON KEY TECHNIQUES AND DEVELOPMENT OF OUTDOOR INTELLIGENT AUTONOMOUS MOBILE ROBOT

OU Qing-li¹ HE Ke-zhong²

(1. Dept. of Communication and Electric Engineering, Xiangtan Technology Institute, Hunan Xiangtan, 411201;

2. State Key Lab of Intelligent Technology and System, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: Outdoor intelligent autonomous mobile robot that will be applied widely is one of hotspots in the research of the robot. This paper analyzes some representative outdoor mobile robots, and surveys the study status and the development of the key techniques in the research of the outdoor autonomous mobile robots. The key techniques include the control architecture of mobile robots, the real-time processing of robot visual informations, the position system of the vehicle, the integration and fusion of multisensor informations, the path planning and the vehicle control.

Keywords: outdoor intelligent mobile robot, control architecture, robot vision, path planning, navigation and vehicle control

作者简介:

欧青立 (1962-), 男, 硕士. 研究领域: 自动化技术, 计算机应用.

何克忠 (1938-), 男, 教授. 研究领域: 机器人技术, 自动化技术.

(上接第 518 页)

RESEARCH TENDENCY ON TELEPRESENCE TELEOPERATION SYSTEM BASED ON VIRTUAL REALITY

CHEN Jun-jie SONG Aiguo HUANG Weiyi

(Department of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: In this paper, the background, state and content of the research and application of virtual reality technology in telepresence teleoperation system are elaborated. The latest progress about virtual reality technology in telepresence teleoperation system is surveyed. The research tendency about supervisory and collaborative control, teleoperation with poor visual feedback and teleoperation with communication time delays is especially introduced. It is pointed out that virtual reality technology in telepresence teleoperation system is future main trend of the research and development on telepresence technology. And the suggestions, which is that the fundamental principle of our research on this aspect should be followed, is put forward.

Keywords: Robot, Virtual reality Telepresence, Teleoperation, Human-computer interaction

作者简介:

陈俊杰 (1958-), 博士研究生, 副教授. 研究领域: 测控技术及智能系统, 临场感技术.

黄惟一 (1933-), 博导, 教授. 研究领域: 测试理论及其应用.

宋爱国 (1968-), 博士, 教授. 研究领域: 机器人传感及控制技术.