

虚拟现实辅助除冰机器人遥操作系统^①

赵国瑞, 孙 炜, 谢 岚

(湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 以高压输电线路除冰机器人为背景, 提出并实现了基于虚拟现实技术的除冰机器人的遥操作系统。介绍了系统的基本框架和功能结构, 然后对系统设计的关键技术进行了研究。在这个系统里, 操作人员可以利用所生成的虚拟环境实时、动态地进行作业观测与机器人遥操作, 为先进机器人遥操作系统的实现提供经验和关键技术。

关键词: 虚拟现实; 除冰机器人; 遥操作; 人机交互; 运动学模型

Virtual Reality Aided Teleoperation System for Deicing Robot

ZHAO Guo-Rui, SUN Wei, XIE Lan

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A teleoperation system based on virtual reality is presented in this paper for transmission line deicing robot. The framework and function structure of the system are given and key techniques of the system are studied. With the help of virtual environment, operators can monitor and operate the robot real-time and dynamic. The completion of the system will provide a lot of experiences and key techniques on creating advanced teleoperation system.

Keywords: virtual reality; deicing robot; teleoperation; human-computer interaction; kinematic model

1 引言

当前, 机器人遥操作技术的研究已经成为一个重要的机器人研究课题。但是相对较少关心在操作过程中虚拟环境的影响和人机交互合作的问题^[1]。随着计算机科学和现代网络技术的发展, 图形仿真、虚拟现实等技术为机器人学研究、尤其对提高在恶劣环境中工作的机器人的遥作业能力提供了新的思想和思。虚拟现实(VR)^[2-4]是一种可以创建和体验虚拟世界的多传感器融合与多媒体集成的计算机系统。在基于虚拟现实的机器人监控系统中, 由于虚拟机器人是真实机器人在虚拟环境中的映射, 操作者与虚拟系统之间基本没有时延, 真实的机器人在随后的时间里按照虚拟机器人的动作执行相应的任务, 从而实现本地控制对远程机器人的遥操作。这种基于虚拟现实的遥操作系统, 由于操作者直接的操作对象是虚拟机器人, 因此

通信延迟对控制回路的影响较小, 且操作人员会有更强的沉浸感, 不会由于信息传输的延迟而产生不适感。

2 基于虚拟现实的遥操作系统

基于虚拟现实技术的遥操作系统的主要思想就是通过操作现场虚拟的机器人来实现对远方机器人的控制^[5]。系统结构如图 1 所示, 该系统由除冰机器人系统、3D 虚拟环境和信息传输系统 3 部分组成。因虚拟环境与真实环境难免存在误差, 在遥操作系统中引入传统的视频监控系统。1)除冰机器人系统: 本文的研究对象-除冰机器人总体结构采用三臂结构, 如图 2 所示, 整台机器人由前臂、中臂、后臂、控制箱等四部分组成, 如图 2 所示。2)3D 虚拟环境: 一方面, 系统根据已知的环境信息和机器人的位姿、状态等信息, 首先在系统中建立一个与真实环境相近的虚拟环境和

① 基金项目:国家科技支撑计划(2008BAF36B01);国家自然科学基金(60905050)

收稿时间:2010-08-30;收到修改稿时间:2010-11-29

与真实机器人结构相同的虚拟机器人，并根据采集到的信息实时更新事先建立的虚拟模型，提供可视化的图形界面。另一方面，虚拟系统还可以接受来自操作员的监控指令，实现虚拟监控或执行任务前的仿真操作。3)信息传输系统：信息传输系统主要负责机器人各传感器信息和操作指令的传送，系统采用无线网络通信的方式实现。4)视频监控系统：系统通过视频采集卡采集摄像机的图像，并经过压缩、传输、接受、解压缩，最后显示在监控端，用户可以直接监视工作现场的情况以及机器人的运行情况，避免了由于虚拟环境与真实环境的误差造成误操作。

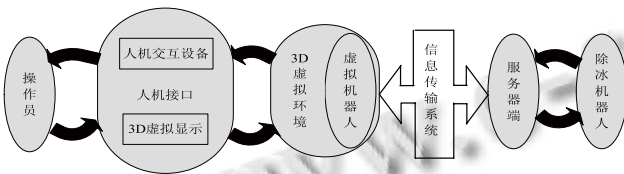


图 1 遥操作系统结构框图



图 2 实验室研制的除冰机器人本体

3 系统关键技术研究

3.1 机器人的运动学模型

运动学模型：根据相关移动机器人运动学^[6]内容可知,假设机器人的关节坐标系为 $(\bar{n}, \bar{o}, \bar{a})$ ，(其中， $\bar{n}, \bar{o}, \bar{a}$ 分别为该动坐标系的坐标轴向量)，那么它相对于参考坐标系 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 的位姿矩阵可以描述为：

$$T = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中， $\begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{pmatrix}$ 表示关节坐标系与参考坐标系的

位姿关系， $p = [p_x, p_y, p_z]^T$ 表示关节坐标系原点在参考坐标系中的位置。

如果机器人三臂中某一手臂关节从操作命令中得到的解释运动参数为 $(\bar{n}, \Delta d), (\bar{o}, \Delta \theta)$ ，则有关系式(2)成立：

$$T_{new} = Rot(\bar{o}, \Delta \theta) \times Tran(\bar{n}, \Delta d) \times T_{old} \quad (2)$$

其中， T_{new} 、 T_{old} 分别为变换后和变换前的位姿矩阵， $Tran(\bar{n}, \Delta d)$ 为平移矩阵， $Rot(\bar{o}, \Delta \theta)$ 为旋转矩阵。

动力学模型 本文所研究的除冰机器人机械结构复杂，其动力学模型比较复杂，特别是在比较恶劣的工作环境下难以给出准确描述的行为和状态。因此，在忽略机器人的三个机械臂相对于机械本体的运动的情况下，可以将机器人视作一个刚体。机器人的运动可以描述为：

机器人爬坡时

$$\begin{cases} m\ddot{a} = F - (\mu \cos \theta + \sin \theta)G \\ m\ddot{a} = F - (\mu \cos \theta - \sin \theta)G \end{cases}$$

机器人下坡时

其中， m 表示机器人的质量， \ddot{a} 表示机器人前进的加速度， F 表示电机的牵引力， μ 表示输电线的阻尼系数， θ 表示输电线与地面之间的倾角， G 表示机器人的重力。

3.2 虚拟环境建模

利用 CAD 提供的功能，根据实体的物理性质定义它们的基本属性及其坐标系形成构件。在构件的基础上定义其运动学特性，形成可以对其编程控制的设备^[7]。图 3 为构建的虚拟除冰机器人。

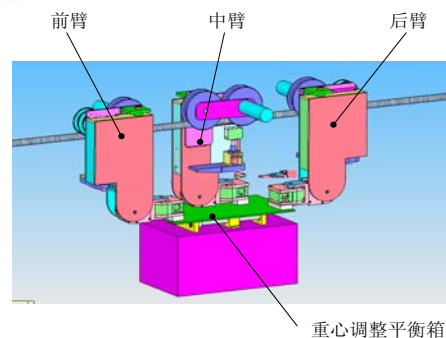


图 3 除冰机器人模型

3.3 摄像机定标和图形图像叠加技术

对于径向畸变较小的摄像头，空间任意一点与其在图像上的位置关系可以近似为透视投影，理论上，

只要准确的标定出摄像机的内外参数, 就可以使成像物体的仿真模型和视频图像完全叠加到一起^[8]。在齐次坐标系中, 以世界坐标系表示的 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 点坐标与其投影点 p 点坐标 (u, v) 的关系为^[9]:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = MP_w = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

上式中, M 矩阵由摄像机的内外参数唯一确定, 通过多次标定可得到多个特征点的图像坐标及对应的空间坐标。进而得到摄像机所对应的投影矩阵 M 。

在实际的虚拟操作系统中, 由于各种误差因素的综合影响会使虚拟环境与真实环境并不一致, 甚至会在很大的误差, 严重影响了虚拟环境的可靠性, 为了解决这一问题, JPL 实验室首先提出了图形图像叠加的技术^[10]。由于除冰机器人在跨越障碍时, 我们只关心末端关节的位置的可信性, 而不关心其他关节的位置, 因此, 我们以机器人前臂末端关节的图形图像叠加情况。

设 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 分别为末端关节的两个端点, 是通过计算所得到的机械臂末端位置, 而在机器视觉中像机所得到的图像反应的是机械手按照指令实际到达的位置。这样, 将机械臂的两个端点投影到图像上, 如果两者不重合, 则说明出现了误差。设为机器视觉系统中摄像机所对应的投影矩阵, 则将 P_1 和 P_2 向图像投影得到

$$\begin{aligned} u_i &= \frac{m_{11}x_i + m_{12}y_i + m_{13}z_i + m_{14}}{m_{31}x_i + m_{32}y_i + m_{33}z_i + m_{34}} \\ v_i &= \frac{m_{21}x_i + m_{22}y_i + m_{23}z_i + m_{24}}{m_{31}x_i + m_{32}y_i + m_{33}z_i + m_{34}} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $(x_i, y_i, z_i)(i=1, 2)$ 分别为机械臂末关节的两个端点坐标, $(u_i, v_i)(i=1, 2)$ 为其在图像上的投影。连接 (u_1, v_1) 和 (u_2, v_2) 在图像上画出, 就可判断出在虚拟环境的可靠性, 同时也可根据其偏差程度对监控操作进行修正。

4 系统实验

4.1 系统硬件结构

系统的人机接口系统是基于微机平台实现的, 由微机生成虚拟环境; 由鼠标和键盘作为手控器, 输入控制信号。除冰机器人控制系统选择 PC+IPC+

PMAC/PLC 的控制方案。这种方案可以充分利用 PC 模块的扩展性好、软件资源丰富的特点, 方便下一步的开发和功能扩展。同时下位机系统采用运动控制卡和 PLC 模块相配合的方案也可以实现对执行电机的可靠控制。

4.2 实验描述

在实验室环境下, 采用上述方法建立了一套高压线除冰机器人的遥操作系统。并且基于该遥操作系统, 进行了除冰机器人的跨越防震锤的实验。实验内容主要由如下 3 个方面:

1) 构造虚拟环境 虚拟环境是基于机器人实验室中的实验环境构造的, 可以预先建模。虚拟环境主要由输电线路、机器人本体和输电线路路上各种防震锤、悬垂线夹、耐张线夹等障碍物组成。

2) 通信系统测试 为了模拟大时延, 在通信线路中人为设置了 3 秒的时间延迟, 上行通路和下行通路各有 3 秒的延迟, 通信内容为操作员发给机器人的要操作指令和机器人传回的除视频信息之外的传感器信息。测试的内容是通信所需带宽。

3) 遥操作实验 在以上实验的基础上, 我们进行了实验室环境下的有时延的遥操作, 实验内容是机器人的跨越绝缘子的实验。其中, 系统的主操作界面见图 4。中间部分为虚拟机器人; 右上角为机器人传回的视频信息, 机器人本身安装了 4 个摄像头传感器, 在监控时可通过键盘在 4 路视频中切换; 左上角为机器人前臂、中臂、后臂的控制方式和控制模式的设置界面。界面的下半部分为机器人的状态信息的显示。操作员对机器人进行离线编程, 经过程序的验证和修改等过程, 确认后发送给机器人执行, 同时机器人反馈工况信息回来。在多次试验中, 机器人成功的完成了跨越绝缘子的实验任务, 并且虚拟机器人能很好的跟随远方机器人的状态, 为操作人员提供了逼真的远方机器人的状态。

5 结语

本文针对在恶劣环境下进行远程作业的除冰机器人, 将虚拟现实技术运用到机器人的监控系统中, 研究了除冰机器人的几何建模和运动学建模、虚拟环境的建立、摄像机内外参数的标定和图形图像叠加等关键技术, 构建了除冰机器人的遥操作系统并开发了遥操作系统的客户端操作环境。操作人员可以通过客户端

(下转第 166 页)

精度提高了将近 40%。虽然该试验具有一定的局限性,但是也可以从一侧面体现出本文算法的优越性。

6 结论

本文提出了一种结合区域 RGB 权值和自适应阈值的人体检测算法,该算法通过普通的背景差分法对兴趣目标进行粗略检测,确定目标范围,然后再对范围内的目标进行二次精检测,由于只对区域内的目标进行精检测,使得算法的计算量大大减小,同时由于算法采用了自适应阈值,使得算法具有良好的适应性。

参考文献

- 1 裴巧娜.基于光流法的运动目标检测与跟踪技术[硕士学位论文].北京:北方工业大学,2007.
- 2 崔星,闫清东.基于帧间差分法的道路车辆检测系统.微计算机信息,2007,23(4-1):117-119.
- 3 陈燕萍.基于背景减除的运动目标检测算法研究[硕士学位论文].厦门:厦门大学,2008.
- 4 薛陈,朱明,陈爱华,鲁棒的基于改进 Mean-shift 的目标跟踪.

光学精密工程,2010,18(1):234-239..

- 5 陈爱华,孟勃,朱明,王艳华.多模式融合的目标跟踪算法.光学精密工程,2009,17(1):185-190.
- 6 丁雪梅,王维雅,黄向东.基于差分和特征不变量的运动目标检测与跟踪.光学精密工程,2007,15(4):570-576.
- 7 Yang J, Lu W, Waibel A. Skin color modeling and adaptation. Proc. of the 3rd Asian Conference on Computer Vision, 1998:687-694.
- 8 戈开祥,李继云.基于 HSV 颜色空间的运动人体检测.科技创新导报,2007,31:188-190.
- 9 吴瑜,郭建东,刘乃琦.一种基于 HIS 模型的彩色图像背景减除快速算法.微计算机应用,2005,26(3):306-308.
- 10 吴天爱,黄襄念,杨玲.基于彩色视频图像的运动人体检测方法.计算机仿真,2008,25(4):218-220.
- 11 阎启文,沈涛.浅谈反映人体测量学来源的人体比例理论.艺术与设计,2009,1:23-25.
- 12 徐庆,石跃祥,谢文兰,张争珍.基于改进 YUV 空间的人脸检测方法.计算机工程与应用,2008,44(34):158-162.

(上接第 176 页)

软件遥控机器人,远端的任务能够以图形和图像的形式直观地显示给操作人员。实验系统成功完成了除冰机器人的跨越高压线绝缘子的操作,为进一步进行恶劣环境下作业机器人的研究提供了研究的实验平台。

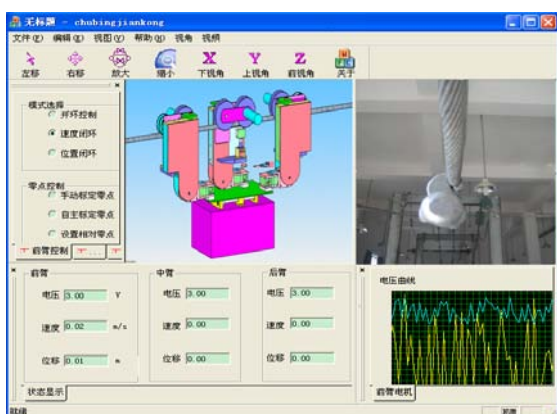


图 4 除冰机器人的遥控操作界面

参考文献

- 1 Bowman DA, Johnson DB, Hodges LF. Test bed Evaluation of Virtual Environment Interaction Techniques. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 2001,10(1):75-95.

- 2 汪成为,高文,王行仁.灵境(虚拟现实)技术理论、实现及其应用.北京:清华大学出版社,1996.40-56.
- 3 黄小虎,李维,郑南宁.面向机器人应用的桌面虚拟环境生成与演示技术.机器人,1998,20(3):198-206.
- 4 杨磊,何克忠,郭木河,等.虚拟现实技术在机器人技术中的应用与展望.机器人,1998,20(1):76-80.
- 5 Ding CJ, Duan P, Zhang ML. Design of Mobile Robot Teleoperation System Based on Virtual Reality. Proc. of the IEEE International Conference on Automation and Logistics Shenyang, 2009,2024-2029.
- 6 Niku SB. Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Applications. Edinburgh Gate: Prentice Hall, 2001.
- 7 和永智,刘伟军,周船,常勇,谈大龙.轮式移动机器人与地形交互运动仿真研究.机器人,2007,29(5):498-502.
- 8 李会军,吴涓,刘威,宋爱国.单自由度遥操作系统的虚拟现实环境建模研究.测控技术,2005,24(2):62-64.
- 9 石教英.虚拟现实基础实用算法.北京:科学出版社,2002.32-40.
- 10 刘伟军,朱枫,董再励.虚拟现实辅助机器人遥控技术研究.机器人,2001,23(5):385-390.