

排爆作业机器人嵌入式半物理仿真系统

徐文福^{1,2}, 余 宇^{1,2}, 牟宗高^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 518055 深圳; 2. 深圳市数字化制造技术重点实验室, 518055 深圳)

摘 要: 针对排爆机器人的作业需求, 开发了一套由嵌入式系统及 3D 仿真平台组成的半物理仿真系统, 对排爆机器人的典型操作任务——危险物探测、爆炸物处理等任务进行仿真实验. 采用单片机开发排爆机器人的嵌入式控制系统, 运行实际的轨迹规划与控制算法, 并按真实的时序产生控制指令; 采用 VC 和 OSG 软件开发 3D 实时仿真平台, 该平台由动力学模型、系统 3D 几何模型、双目相机模型、传感器模型等组成, 在一台 PC 机上运行; 将嵌入式控制系统与 3D 仿真平台集成, 进行典型工况的闭环控制仿真. 仿真结果表明了该系统的有效性.

关键词: 排爆机器人; 半物理仿真; 路径规划; 嵌入式系统; 3D 仿真平台

中图分类号: TP24

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)07-0079-06

Embedded semi-physical simulation system of bomb-disposal robot

XU Wenfu^{1,2}, SHE Yu^{1,2}, MU Zonggao^{1,2}

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, 518055 Shenzhen, China;

2. Shenzhen Key Lab of Digital Manufacturing Technology, 518055 Shenzhen, China)

Abstract: For the operating needs of bomb-disposal robot, a set of semi-physical simulation system, which consists of a embedded control system and a 3D simulation system, is developed to simulate the typical operation tasks, such as hazardous materials detection, explosives handling, et al. Firstly, the embedded control system is developed based on a single-chip microcomputer, the actual trajectory planning and control algorithm is used, and the control instructions according to the true timing is generated. Secondly, using VC and OSG (Open Scene Graph) software, the 3D simulation system is programmed, which is composed of dynamic, geometry, binocular camera, sensor models, et al, and it can be run on a PC computer. Finally, by integrating the embedded control system and the 3D simulation system, the closed-loop control simulation of typical tasks is completed. The simulation results show the effectiveness of the system.

Key words: bomb-disposal robot; semi-physical simulation; path planning; embedded systems; 3D simulation system

排爆机器人通过检查、转移和排除危险物品来保护反恐防暴人员的安全^[1]. 目前, 英法美等国研制了高性能的排爆机器人^[2-3], 我国的中科院沈阳自动化研究所^[4]、上海交通大学^[5]、华南理工大学^[6]等对排爆机器人也做了大量研究工作. 为确保前线任务的成功执行, 需要进行充分的仿真实验以验证和评估排爆机器人的路径规划和控制算法^[7]. 仿真在系统分析与设计阶段十分重

要^[8]. 半物理仿真兼有数学仿真和物理仿真的优点, 是目前广泛采用的一种方式^[9-10].

本文针对排爆机器人的作业需求, 开发了一套由实际控制系统(物理对象)与 3D 实时仿真系统(数学模型)组成的半物理仿真系统, 能对排爆机器人的典型操作——路况巡查、视觉监测(探测危险物)、爆炸物抓取与排除等任务进行仿真验证. 其中, 控制系统运行实际的轨迹规划与控制算法, 按真实的时序和控制周期产生控制量; 3D 实时仿真系统用于代替真实的排爆机器人作为被控对象, 接受控制量并反馈状态数据, 以实现闭环控制的仿真验证. 另外, 3D 仿真系统还建立了相

收稿日期: 2012-07-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61175098).

作者简介: 徐文福(1979—), 男, 副教授, 博士生导师.

通信作者: 徐文福, wfxu@hit.edu.cn.

机的模型,模拟机器人所带相机的成像情况,并将监测图像传回到操作终端.

1 排爆机器人系统的组成

排爆机器人一般由行走机构、车体平台及导航设备(如双目立体相机)、机械手及手眼相机(如双目相机)、视觉导航与控制系统(主控设备)、操作终端等组成,其中,操作终端与主控设备之间通过无线或有线通信模块传输信号.操作终端是操作员与排爆机器人之间的人机接口,其接收主控设备发送的机器人状态数据及视频监测图像,经过处理后显示出来,作为操作员发送操作指令的依据;操作员则根据操作终端显示器上所显示的状态和视频数据,做出决策,产生机器人的运动指令,控制其执行期望的动作,完成指定的任务.系统的组成如图 1 所示.

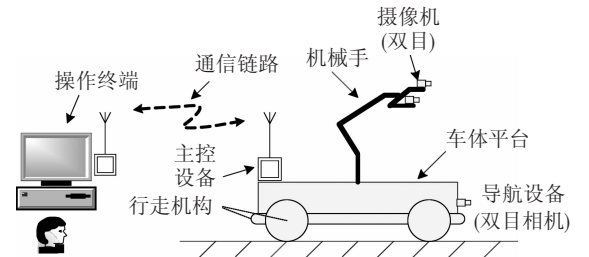


图 1 排爆机器人系统总体组成示意图

行走机构使机器人具有较大范围的运动能力,有轮式、履带式及混合式几种;车体平台位于行走机构之上,包括底盘、壳体和控制器、蓄电池安装架等,是排爆机器人的躯体;机械手作为排爆机器人的操作机构,是其主要组成部分,一般具有排除爆炸物、消防、搬运、摧毁、射击等功能;视觉

导航与控制系统是排爆机器人外部感知机构,用于增强机器人的智能.

2 排爆机器人半物理仿真系统的研制

2.1 半物理仿真系统组成

为了对整个排爆机器人系统进行闭环控制仿真,开发了一套半物理仿真系统,该系统基于“硬件在环(Hardware-in-Loop)”的思想开发^[11-12],由实际控制器——嵌入式控制系统(物理对象)、一体化仿真系统(数学对象)、操作终端计算机三大部分,这三部分之间通过串口进行通信,如图 2 所示.

嵌入式控制系统包括任务处理、轨迹规划与控制算法、串口通信模块(RS232 串口).“任务处理”主要对操作员的输入进行指令解析(如处理来自操作手柄、键盘、鼠标等输入设备生产的指令),形成机器人运动的数据(时序、轨迹点等);“轨迹规划”则根据指令解析后的结果(机器人运动的结点,可以是关节空间、也可是笛卡尔空间的数据),规划机器人各关节的运动轨迹(关节位置、速度、加速度),作为关节控制器的期望值;“控制算法”模块将规划的期望值与传感器(模型)检测的当前值进行比较,按一定的控制律(如 PD 控制律)产生关节控制力/力矩,然后通过串口输出到一体化仿真系统,驱动被控对象(用数学模型代替实物作为被控对象)运动.目前,嵌入式控制系统采用基于 ATmega128 单片机开发的小型系统,用于运行基本的轨迹规划与控制算法;未来将根据实际执行的任务,扩展为功能更加强大的多处理器控制系统.

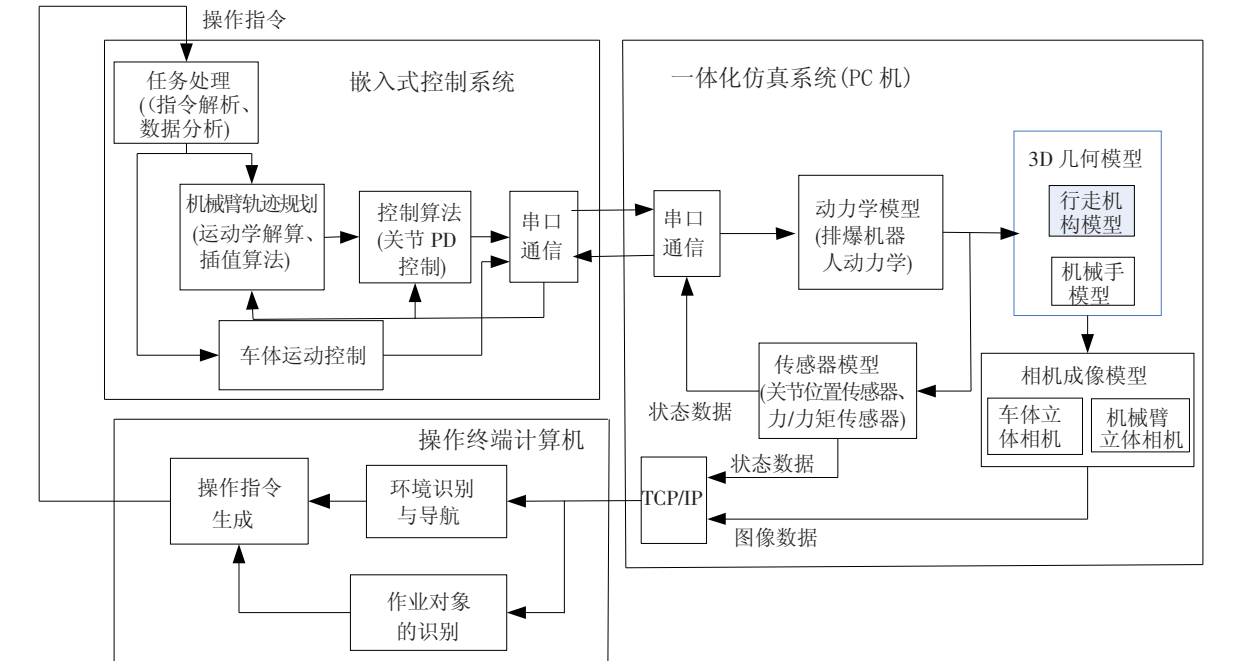


图 2 排爆机器人半物理仿真系统总体图

一体化仿真系统包括动力学模型、系统 3D 几何模型、双目相机模型、传感器模型等模块。其中,“动力学模型”建立排爆机器人系统的多体动力学,用于模拟真实对象的运动,其输入为各自由度的驱动力/力矩,输出为各自由度的状态变化;“系统 3D 几何模型”的功能是根据机械手、行走机构、危险目标(以及目标环境)几何参数和当前状态绘制并显示各部分的 3D 运动情况;“双目相机模型”根据实际相机的分辨率、视场角以及安装位置,产生实际相机所成的像;“传感器模型”用于模拟排爆机器人所携带的传感器,如关节位置传感器、力矩传感器等,作为控制器的反馈。一体化仿真系统的硬件为一 PC 机。

操作终端计算机用于对数学仿真系统传输的图像和数据进行处理,包括对环境的识别、移动车体的导航、作业对象的识别等,这些信息提供给操作员,由操作员产生操作指令;另外,这些信息也可用于自主模式下的导航,此时,指令的生成由计算机自动生成,操作员仅需对执行过程进行实时监控,并在必要时进行干预。

目前所开发的排爆机器人半物理仿真实验系统的实物如图 3 所示。

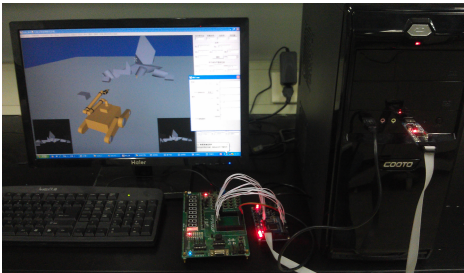


图 3 半物理仿真系统实物图

2.2 嵌入式控制系统

嵌入式控制系统的处理器采用 ATmega128 单片机,拥有大容量的存储器及各种接口,是一款基于 AVR 增强精简指令集 RISC 结构的 8 位低功耗 CMOS 微处理器,它采用 Harvard 结构,在前一条指令执行时就实现下一条指令取址,再以一个周期执行指令^[13],可以极大提高数据吞吐率。本文利用其全双工通用同步/异步串行收发模块 USART 实现与“一体化仿真系统”进行实时通信。USART 分为时钟发生、数据发送和接收 3 部分,如图 4 所示。

单片机命令分为任务级和指令级。其中任务级有单关节依次运动和多关节联动。单关节依次运动是每个关节依次运转,从初始点到达目的地,并调整姿态实现抓取;多关节联动是多个关节同时动作,从初始点出发到达目的地并实现抓取。指

令级命令是指通过外部输入设备(如键盘、按钮、Joystick 等)实时发送的命令,处理器接收到后将其转换为关节角运动数据。程序流程图如图 5。

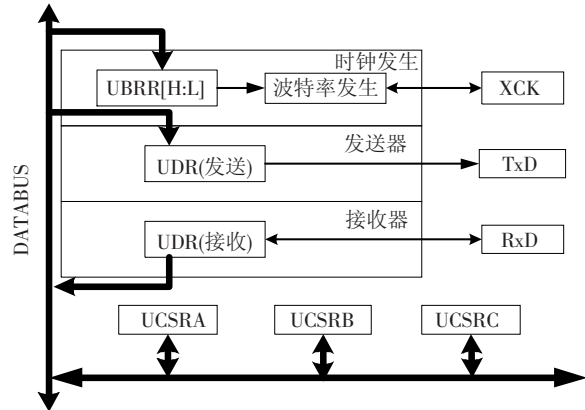


图 4 USART 硬件简图

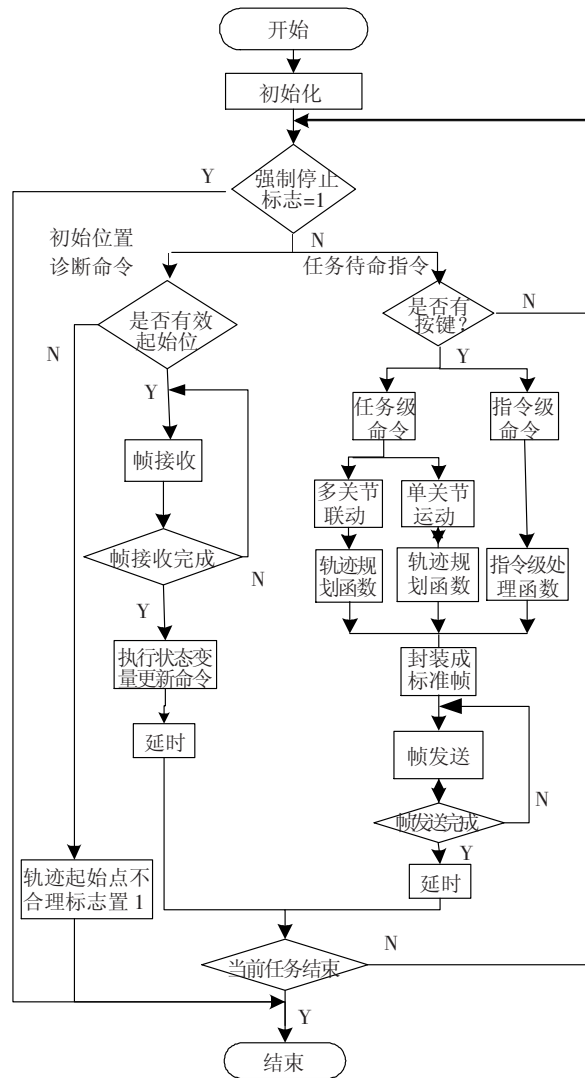


图 5 任务解析流程图

由于轨迹规划函数比较复杂,需要注意堆栈越界问题。生成代码使用两个堆栈,一个为用于子程序调用和中断操作的硬件堆栈,另一个为用于以堆栈结构传递的参数临时变量和局部变量的软

件堆栈。

根据不同的任务,可采用多种轨迹规划方法。若起始点 t_0 时刻的关节角 θ_0 及终止点关节角 t_f 时刻的关节角 θ_f 已知,通过增加起点和终点的速度约束,则可采用如下的三次多项式进行关节运动轨迹规划。轨迹规划函数给定期望关节角,由关节控制器将期望值与关节传感器检测的当前关节角进行比较,按比例-微分规律产生控制力矩,作用于动力学模型。

2.3 一体化3D仿真系统

假设某排爆机器人的操作臂为5DOF的串联机械臂,其DH坐标如图6,其中坐标系 $\{0\} \sim \{5\}$ 分别表示固连在刚体0~5上, Z_i 轴表示第*i*关节的旋转轴,基坐标系 $\{0\}$ 与移动小车固接。

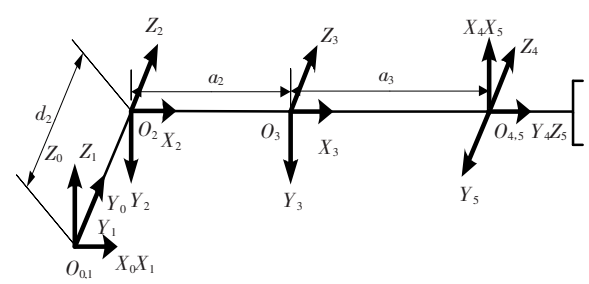


图6 机械手刚体坐标系

3D模型采用Open Scene Graph(简称OSG)建立。OSG的特点是对底层OpenGL的一个封装,使用OpenGL技术开发,是一种基于C++平台的API(应用程序接口)^[14]。

在OSG中整个场景是以场景图的形式架构的,包括环境模型和实体动态模型。环境模型包括地面、障碍物。动态模型是指在仿真中移动的模型,如排爆机器人、炸弹。首先,通过CAD软件建立排爆机器人的各个构件、场景中的障碍物以及场景平台的3D几何模型;然后,按统一的OBJ格式导入3dMax中,实现几何模型与相应虚拟体的关联;最后,根据各个模型之间的运动父子关系,搭建出整个场景树。3D建模过程如图7,所开发的排爆机器人全数学仿真系统界面如图8。

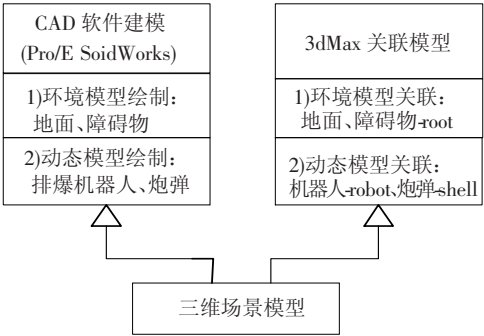


图7 三维几何建模过程

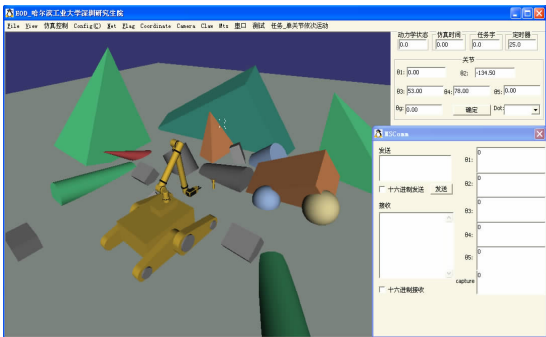


图8 排爆机器人一体化仿真系统的GUI界面

虚拟相机的成像主要由3个参数确定:(1)相机光心位置 p_0 ,为 3×1 的矢量,代表相机光心在参考坐标系中的位置;(2)镜头朝向 v_0 ,为 3×1 的矢量,代表相机光轴正向;(3)相机法向 p_n ,为 3×1 的矢量,代表相机放置的方向,进一步得到方向矢量 $v_n = p_n - p_0$ 。确定上述3个参数后,就可以通过 $setHomePosition(p_0, v_0, v_n)$ 构造相机的放置位置、指向(相机位姿),从而得到正确的成像模型。本文研究的排爆机器人,其上装载了两套立体相机:安装在车体上作为移动机器人导航用的双目相机,以及安装在机械臂末端作为对被抓物进行测量和识别的手眼相机,其图像显示效果见后面的仿真实验。

2.4 基于立体视觉的环境及作业对象识别

排爆机器人本质是移动机器人,其作业的难点有两部分:其一是移动载体如何到达作业目的地,即环境识别与控制的问题;其二是作业装置对作业对象的识别、作业动作规划等。本文重点在于开发半物理仿真系统,提供仿真实验的条件,以对环境识别、移动机器人导航、机械臂操作等各种关键算法进行验证。对于具体的算法,在此仅简单介绍。

2.4.1 环境识别与移动机器人导航

目前,移动机器人环境识别的视觉技术主要有基于图像特征、兴趣点、决策树等的环境识别方法。图像特征法是环境识别常用方法之一,它的基本思想是利用环境的边界特征^[15]或标线与草地、天空及其它图像背景在图像特征上的差异进行检测,这些特征包括形状、灰度、纹理、对比度和不连续性等,主要的计算集中于图像处理,以及如何进行特征值的感知分类。图像特征的提取有多种方法,Harris角点提取方法是一种常用的图像特征提取方法^[16]。

环境识别的结果作为移动机器人导航的输入条件。符合条件的路径有许多条,实际应用中往往要选择一条在一定准则下最优的路径,通常的准则有:路径最短或者时间最短等^[17-18]。

2.4.2 作业对象的识别

机械臂要对作业对象进行操作,需要利用安装在其末端的立体视觉对物体的形状、大小等进行识别.物体形状识别的方法可以归纳为如下两类:第一类是基于物体边界形状的识别,这种边界的特征主要有周长、角、弯曲、宽度、高度、直径等,其描述方法有链码、B 样条函数、傅里叶描述、自回归模型(AR)和 Hough 变换等;第二类是基于物体所覆盖区域的形状识别,这种区域的特征主要有面积、圆度、矩特征等,其描述方法主要有行程编码、四叉树、矩描述等.

2.5 串口通信模块

RS232 串口一次只能发送一个字节的有效数据,设置该数据帧为一共十位,一个起始位,8 位有效数据,一个停止位,无奇偶校验位.定义通讯协议如下:一帧数据由如下数据组成:(1)起始信号;(2)数据串头检验;(3)有效数据;(4)有效数据结束;(5)数据帧结束校验信号;(6)两个停止信号.采用控件 MSComm 实现,且采用事件驱动法,设置如下:

```
m_ctrlComm.SetSettings(_T("9600, n, 8, 1"));
m_ctrlComm.SetInputMode(1);
m_ctrlComm.SetRThreshold(60).
```

3 半物理仿真实验

3.1 典型任务 1——危险物的视觉探测

危险物探测是指通过机器人携带的传感器(如可见光相机、红外传感器等)实时、在线地对环境进行探测,以获取障碍物的位置、形状和尺寸等信息.假设排爆机器人前方石堆处有一炸弹,要求其探查处炸弹的位置.初始时刻的臂型如图 9 所示.

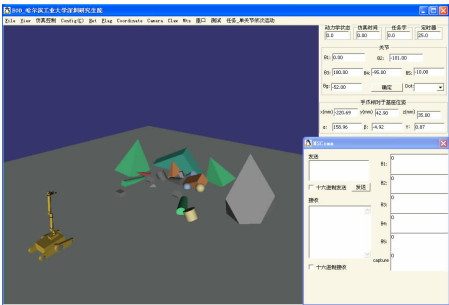
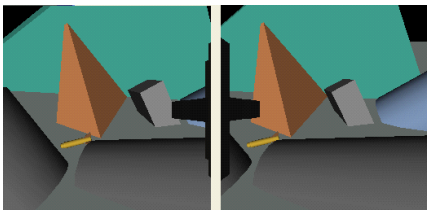


图 9 危险物探测机器人初始状态

操作人员控制小车前进,接近石堆后,根据左右相机实时反馈回来的图像数据遥控机械臂末端运动,以使相机从各个角度探查爆炸物的外形并测量其位和姿态(图像特征识别与位姿测量算法可在遥操作终端实现).左右相机所观测到的图

像如图 10 所示.



(a) 左相机图像 (b) 右相机图像

图 10 探测任务结束时左右相机的观测图像

3.2 典型任务 2——危险物抓取与排除

获得当前炸弹的位姿后,就可以规划机械臂各关节的运动轨迹,以抓取爆炸物.抓取时刻排爆机器人的臂型如图 11 所示.抓取炸弹之后,排爆机器人夹取目标撤离现场,将爆炸物转移到安全区域.机器人抓取和转移爆炸物过程中各关节的运动轨迹如图 12 所示(通过嵌入式控制系统规划各关节角的轨迹,并按 PD 控制律产生控制力矩,驱动一体化仿真系统中的数学模型运动).

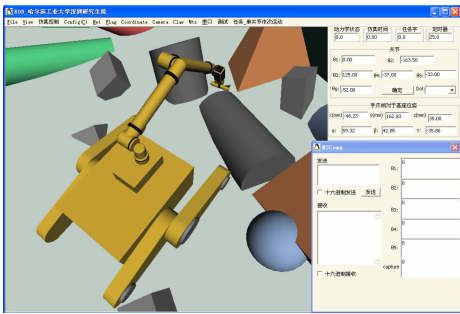


图 11 危险物抓取时刻机器人的臂型

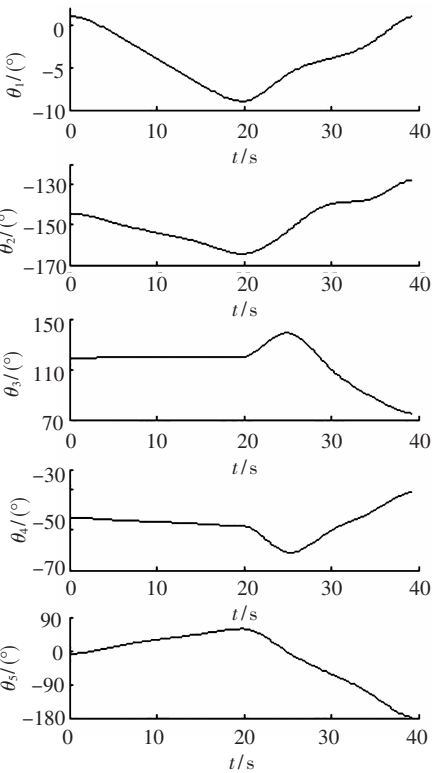


图 12 爆炸物排除和抓取过程的关节规划

4 结 论

1) 本文建立了排爆机器人半物理仿真实验系统, 主要包括嵌入式控制系统和一体化仿真系统。

2) 通过半物理仿真实验, 使研究人员能在有限的实验室条件下, 实现关键算法的验证和评估, 是经济有效、合理可行的方法, 特别适合于一般高校、实验室及研究所使用。

3) 该方法建模过程简单, 可视化强, 可以方便地用于检验排爆机器人的路径规划、控制算法等, 是一种有效的排爆机器人建模和仿真方法。

4) 对于复杂环境下的高保真度仿真需求, 需要对路况、作业对象、车体等进行更精细的建模, 包括表面粗糙程度、接触/碰撞动力学、摩擦等展开深入的分析与建模。

参考文献

- [1] ZHANG W, YUAN J, LI J, *et al.* The optimization scheme for EOD robot based on supervising control architecture [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Bangkok, Thailand: Robio, 2008: 1421 – 1426.
- [2] DAY B, BETHEL C, MURPHY R, *et al.* A depth sensing display for bomb disposal robots [C]//Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, Sendai, Japan: SSR, 2008: 146 – 151.
- [3] CAREY M W, KURZ E M, MATTE J D, *et al.* Novel EOD robot design with dexterous gripper and intuitive teleoperation [C]//Proceedings of World Automation Congress. Puerto Vallarta, Mexico: WAC, 2012: 1 – 6.
- [4] 申加刚, 董再励, 郝颖明, 等. 排爆作业机器人模拟训练系统研究[J]. 机器人, 2005, 27(5): 426 – 430.
- [5] 曾建军, 杨汝清, 张伟军. 有限人参与下的排爆机器人半自主抓取[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(8): 1238 – 1243.
- [6] 范路桥, 姚锡凡, 蒋梁中, 等. 半智能排爆机器人的单手双目手眼系统[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 40 – 44.
- [7] FU W, ZHOU C. The develop of the bomb-disposed robot control system base on stereo vision [C]//Proceedings of the 4th International Congress on Image and Signal Processing. Shanghai, China: CISP, 2011: 1996 – 2001.
- [8] 徐文福, 梁斌, 李成. 三轴稳定航天器多领域统一建模与仿真平台[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(9): 74 – 80.
- [9] GAN Y, SUN Y, MAO Y, *et al.* Design of semi physical motion simulation system of underwater robot [C]//Proceedings of Chinese Control Conference, Harbin: CCC, 2006: 1601 – 1604.
- [10] REN S, TAN L, LI Y, *et al.* A semi-physical simulation framework for multiple unmanned underwater vehicles [C]//Proceedings of Chinese Control and Decision Conference. Taiyuan, China: CCDC, 2010: 1798 – 1801.
- [11] AGHILI F, PIEDBOEUF J C. Contact dynamics emulation for hardware-in-loop simulation of robots interacting with environment [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington, DC: ICRA, 2002: 523 – 529.
- [12] HE J, ZHAO X, ZHANG D, *et al.* The Hardware-In-Loop simulation research on trajectory control and modeling parameter estimation of working device of hydraulic excavator [C]//Proceedings of the International Conference on Mechatronics and Automation. Xi'an, China: ICMA, 2010: 1214 – 1219.
- [13] LUO S G. An adaptive detecting method for harmonic and reactive current [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1995, 42(1): 85 – 89.
- [14] YUAN P, WANG S, ZHANG J, *et al.* Virtual reality platform based on open sourced graphics toolkit OpenSceneGraph [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer-aided Design and Computer Graphics. Beijing: IEEE, 2007: 361 – 364.
- [15] YOUCHUN X, RONGBEN W, SHOUWEN J. A vision navigation algorithm based on linear lane model [C]//Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Dearborn (MI), USA: IVS, 2000: 240 – 245.
- [16] 杨杰, MOHAMMED A R, 叶晨洲. 一种彩色图像的二维纹理识别方法[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(11): 1747 – 1750.
- [17] HOCAOGLU C, SANDERSON A C. Planning multi-paths using speciation in genetic algorithms [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Nagoya: ICEC, 1996: 378 – 383.
- [18] TOOGOOD R, HAO H, WONG C. Robot path planning using genetic algorithms [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Vancouver, BC: ICSMC, 1995: 489 – 494.

(编辑 杨 波)