

基于 NCSLab 3D 的虚拟远程实验系统设计与实现

周 洪,任正涛,胡文山,雷忠诚

(武汉大学 动力与机械学院,武汉 430072)

摘 要: 针对当前某些高校自动化专业实验教学设备资源不足与利用率低的问题,基于网络化控制系统实验室架构,将三维虚拟现实技术、远程控制技术等项技术结合,以双容水箱为对象,通过三维建模与渲染、数学建模、系统集成等步骤,设计并实现一套虚拟远程实验系统。双容水箱实验结果表明,该系统能实现实验教学设备共享,使学生具有强烈的沉浸感与现场感,并且虚拟和远程实验结果可以进行相互验证,个性化的监控界面能提供更好的用户体验。

关键词: 远程学习; 三维建模; 虚拟现实; 远程控制; 双容水箱系统

中文引用格式: 周 洪,任正涛,胡文山,等. 基于 NCSLab 3D 的虚拟远程实验系统设计与实现[J]. 计算机工程, 2016, 42(10): 20-25, 31.

英文引用格式: Zhou Hong, Ren Zhengtao, Hu Wenshan, et al. Design and Implementation of Virtual Remote Experiment System Based on NCSLab 3D[J]. Computer Engineering, 2016, 42(10): 20-25, 31.

Design and Implementation of Virtual Remote Experiment System Based on NCSLab 3D

ZHOU Hong, REN Zhengtao, HU Wenshan, LEI Zhongcheng

(School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

【Abstract】 To solve the shortage or low utilization of lack of experiment teaching equipment in some universities, this paper proposes a virtual/remote experiment system of double tank. It is based on Networked Control System Laboratory (NCSLab) architecture and accomplished by combining 3D virtual reality and remote control technology. 3D modeling and rendering, mathematic modeling and system integration are included in the process of designing the experiment system. Coupled-tank experiment result shows that the system is able to share experiment equipment and bring students a strong sense of immersion. Also, the results of virtual and remote experiments can be mutually verified and the personalized monitoring interface also brings a better user experience.

【Key words】 remote learning; 3D modeling; virtual reality; remote control; coupled-tank system

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.10.004

1 概述

由于远程学习的迅速发展^[1],远程实验设备的需求急剧增加,特别是电力系统、工业制造系统和工业电子应用等领域。远程设备为学生提供了将理论应用于实践的机会。传统实验室因其地域原因有较大限制,此外,对于工程专业的学生而言,实验设备昂贵且资源匮乏。随着计算机技术^[2]、通信技术、网络技术^[3-4]等技术的飞速发展,出现了远程实验室和虚拟实验室,在世界范围内实现实验资源共享。1989年美国弗吉尼亚大学的 William Wulf 教授提出虚拟仿真这一概念^[5],因其显著的应用优势,伴随着近几年 Internet、网络控制技术、虚拟仿真技术的成熟

发展与应用,虚拟仿真实验室^[6-8]也随之兴起,目前在 IT、电子工程、微电子制造、教育等诸多领域涌现出大量虚拟远程实验室^[9-11]。浙江大学的网络实验室(简称 Netlab)是一个提供工科电子类和控制类实验的综合远程实验室^[12],隶属于上海市电站自动化技术重点实验室,设计了远程测控系统,并以锅炉为对象,创建适用于工业远程监控的三维场景式交互界面。英国格拉摩根大学和中科院自动化所合作开发的网络化控制系统实验室(Networked Control System Laboratory, NCSLab)^[13-14]只需通过网页浏览器就能完成自动控制实验。武汉大学在 NCSLab 的基础上进行了更深入的研究,开发出 NCSLab 3D^[15-16]。基于 NCSLab 3D 的虚拟远程在线实验平

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61374064)。

作者简介: 周 洪(1962—),男,教授、博士,主研方向为虚拟现实、电网智能控制;任正涛,硕士;胡文山,副教授、博士;雷忠诚,硕士。

收稿日期: 2016-01-06 修回日期: 2016-02-23 E-mail: 1209953459@qq.com

台不仅能实现设备共享,而且具有强烈的沉浸感与现场感。此外,虚拟和远程实验结果可以相互验证。本文以双容水箱为研究对象,介绍整个实验系统的构建方法,并通过问卷调查的方式展示实验系统的使用情况。

2 NCSLab 3D 简介

NCSLab 3D 即三维网络化控制系统实验室,是以 NCSLab 为基础发展而来。NCSLab 从 2006 年建立以来,系统架构经历了 2 次变革,由 Web 浏览器-主服务器-子服务器-实验台到 Web 浏览器-中央服务器-区域服务器-子服务器-实验台,再到最新版本的 Web 浏览器-Matlab 服务器、中央 Web 服务器-区域服务器-实验台。NCSLab 3D 采用最新的架构,如图 1 所示。

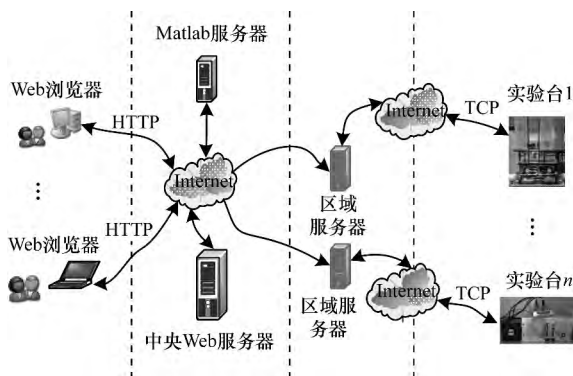


图 1 NCSLab 3D 系统总体架构

NCSLab 3D 为用户提供了一个完全基于 Web 的远程控制和网络化控制快速开发方案,仅通过 Web 浏览器即可完成真实实验室中的大部分工作,具有以下特点:

(1) 分布各异的实验台 NCSLab 3D 中的实验台可以分布在世界各地。各地实验台通过统一界面访问。

(2) 逻辑子实验室,所有的实验台按功能分类。例如所有的伺服控制实验台放于伺服控制子实验室,用户不需要知道实验台的所在地就能在相应的子实验室中进行选择。

(3) 可视化配置监控界面。允许用户自由地选择要观测的信号和调整的参数来设计监控界面。

(4) 基于网页的控制算法设计。鼓励用户设计自己的控制算法,可以用 Matlab/Simulink 设计算法然后上传到 NCSLab 3D 或者用 NCSLab 3D 提供的完全基于网页的 GUI WebconLink 在浏览器中设计算法。

鉴于网络化控制系统的设计需求,协调基本的硬件驱动,设计网络化控制工具箱(networked control toolbox)。网络化控制工具箱被嵌入到 Matlab 中,其中的众多模块成为硬件接口和网络应用的桥梁,例如 AD、DA 模块,这些模块的使用方法与 Simulink 中其他

模块相同,只需将模块拖入模型文件中即可,以上特点使得使用者可以快速进行网络化控制系统的分析、设计与搭建,这将大大降低整个系统的设计难度和缩短开发周期。

3 双容水箱虚拟远程实验平台设计

双容水箱远程实验平台基于 NCSLab 3D 架构,采用 Web 浏览器-Matlab 服务器、中央 Web 服务器-区域服务器-实验台的结构。

3.1 双容水箱系统

双容水箱是一种典型的被控对象,也是自动化专业教学中常用的实验设备,具有二阶动态特性,可以使用 PID、预测控制等多种算法进行控制,在实验教学中得到了广泛应用。图 2 为双容水箱系统的简化示意图,左右为 2 个单容水箱,水箱①和水箱②连接成一个双容水箱。2 个单容水箱经由阀门 K_2 连通,水由水箱 1 流向水箱 2,再由 K_3 流出。整个双容水箱系统的进水由水泵 Pump 控制,系统的输入为进水流量 Q_0 ,输出为水箱 2 的水位高度值 h_2 ,其中, A_1 、 A_2 分别为 2 个水箱的截面积。

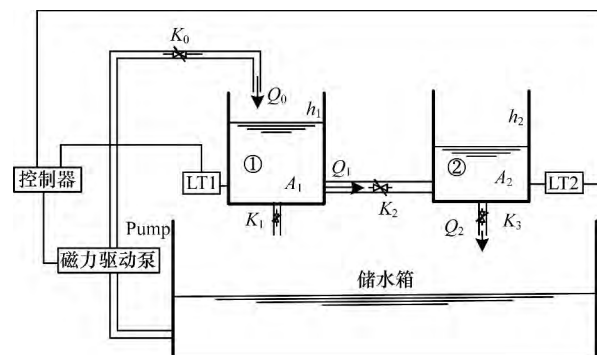


图 2 双容水箱系统简化示意图

武汉大学所用的双容水箱系统实物图如图 3 所示,该系统由 2 个串联水箱、变频器、水泵、液位传感器以及控制器等组成。控制器输出的模拟量作为变频器的输入,进而驱动水泵,调节进水流量。为了能将该水箱集成到 NCSLab 3D 中,对其进行改造。



图 3 双容水箱系统实物图

3.2 双容水箱三维建模与渲染

为建立虚拟实验能够使用的实时双容水箱系统,首先要建立水箱的三维模型,该系统由水箱、电机、变频器、网络控制器等组成,图4展示了3DS MAX中的水箱系统三维模型。建立好的模型以.obj格式导出。在构建三维模型时,必须充分考虑模型的复杂性,在显示质量和复杂度之间应该取得平衡。尽管当前最强大的三维Flash插件具有同时处理一万个三角形的能力,但太复杂的模型将导致.obj文件过大,下载速度很慢。

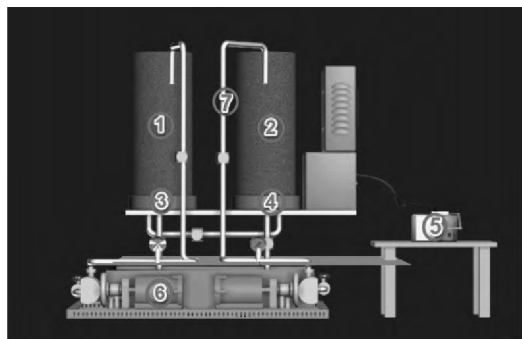


图4 3DS MAX中双容水箱系统三维模型

三维模型要嵌入到网页中必须先由Flash 3D引擎进行渲染,目前有许多三维引擎可供选择,如Sandy 3D, Paperversion 3D和Away 3D等。Away 3D完全开源并具备很强的渲染能力,主要特点是高效、快速和API清晰。使用ActionScript语言编程,将整个模型导入到Flash 3D引擎中,可以从任意角度观察,也可以放大、缩小、旋转模型,该代码还有通信功能,能接收仿真数据。水箱里的水柱由圆柱体模拟,根据算法产生的水位高度数据来改变圆柱体高度从而表现水位变化,渲染效果如图5所示。表1为模型索引表。

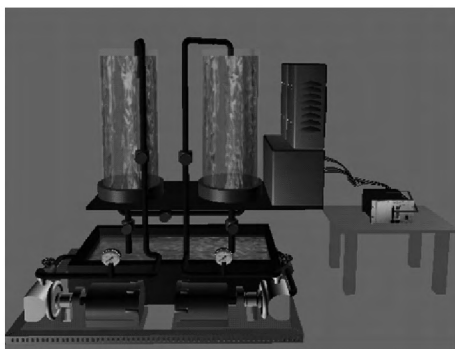


图5 Flash中三维模型渲染效果

表1 双容水箱系统三维模型的索引表

序号	零件 ID	说明
①	Cylinder01	左边水柱
②	Cylinder02	右边水柱
③	Box1	水箱底座外壁
④	Box2	水箱底座内壁
⑤	Controller	控制器
⑥	Water pump	水泵
⑦	Pipe01	水管

3.3 三维模型在网页中的嵌入过程

网页服务器Tomcat使用JSP/Servlet技术动态创建NCSLab页面。该页面下载到Web浏览器并生成基于Web的页面,其架构如图6所示。在用户浏览器端,HTML代码中嵌入的AJAX脚本语言在基于网页的界面中部署三维Flash控件。这些代码下载相应的控件并将其嵌入到Web浏览中。三维Flash控件能从Web服务器获得实时数据,并对模型动画进行控制,这使得三维模型和真实实验装置同步。

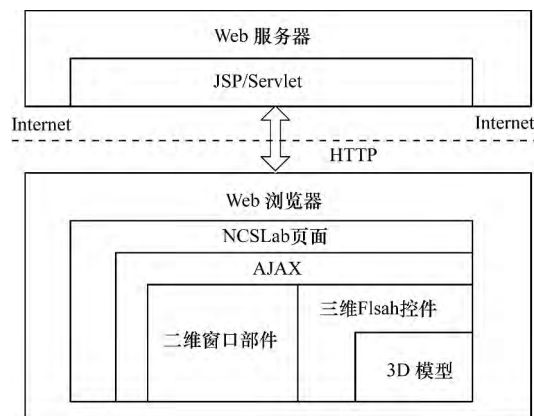


图6 基于Web网页的三维架构

4 虚拟远程实验控制算法实现

4.1 网络化控制器

网络化控制器NetController由中国科学院自动化研究所研发,实物如图7所示。该控制器运行具体控制算法,通过网络接口接收监控组态平台的控制参数与控制命令,并将控制对象的运行状态实时上传至监控组态平台。基于高性能、低功耗的32位ARM微处理器,运行嵌入式实时操作系统,采用工业级模块化设计,提供多路标准输入输出接口,如AD, DA, PWM, I/O等。与传统的前端控制器相比,网络化控制器具有更高的运行速度和更大的寻址能力,加上嵌入式操作系统的多任务和实时性特点,可以保证复杂控制算法的流畅运行。远程实验算法在网络化控制器中运行,而虚拟实验算法则不需要借助网络化控制器。



图7 网络化控制器

4.2 远程实验控制算法设计

在进行实时远程实验时,需要直接对硬件接

口进行操作,利用网络化控制工具箱中的硬件接口模块代替仿真模块。图 8 是真实水箱系统的控制算法框图,其中限幅模块值从 0 ~ inf 保证为正值。

在实验时输入的期望值是水箱的水位高度,而

实际水箱输入是电压值,因此,需要经过线性变换 Subsystem 将输入的期望高度值转换成期望值,再由 DA 模块转换成电压驱动水泵。液位传感器输出的是电压,通过 AD 模块转换成数字量,再经过 Subsystem1 和 Subsystem2 标度变换变成高度值。

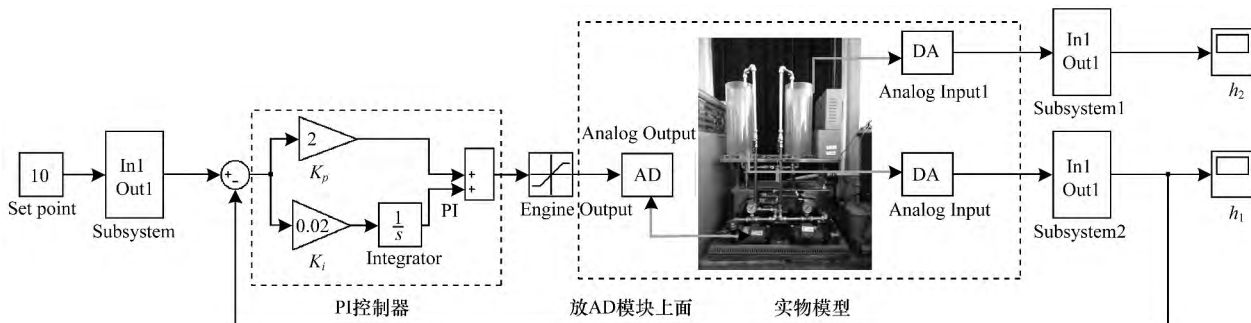


图 8 真实双容水箱系统的控制算法框图

4.3 虚拟实验控制算法设计

虚拟实验需要用双容水箱的数学模型来模拟其实际特性,双容水箱微分方程为:

$$\begin{cases} \frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{1}{A_1}(Q_0(t) - Q_1(t)) \\ \frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{1}{A_2}(Q_1(t) - Q_2(t)) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Q_1(t) = r_1 \sqrt{h_1(t) - h_2(t)} \\ Q_2(t) = r_2 \sqrt{h_2(t)} \end{cases} \quad (2)$$

由微分方程式 (1) 可以得出 Matlab/Simulink 模型如图 9 中数学模型所示。由实验数据可知,液位高度与出水流量不满足式 (2) 中的关系且不是一阶惯性环节,所以采用 Matlab/Simulink 中的 Look-Up Table 模块

表示两者的关系。Look-Up Table 为期望高度 h_2 到电机输入电压的变换; Look-Up Table1 是水泵输入电压 V 和进水管流量 Q_0 的关系; Look-Up Table2 是 K_2 处的流量 Q_1 与两水箱的液位高度差 $\Delta h(h_1 - h_2)$ 的关系; Look-Up Table3 为第 2 个水箱液位高度 h_2 和出水阀 K_3 的出水流量 Q_2 的关系。 Q_0 为水泵的进水量; $A_1 = A_2 = 0.89 \text{ dm}^2$ 为水箱截面积; Q_1 是经过水箱 1 流入水箱 2 的流量。通过实验法求得结构框图中的 4 个表,实验时需要大量采样点保证准确度。图 9 中采用 PI 控制器,此处 $P = 5$, $I = 0.02$,使用单位负反馈,构成完整的虚拟实验控制算法。虚拟实验控制算法结构与远程实验相同,只是用数学模型替代了实物模型。

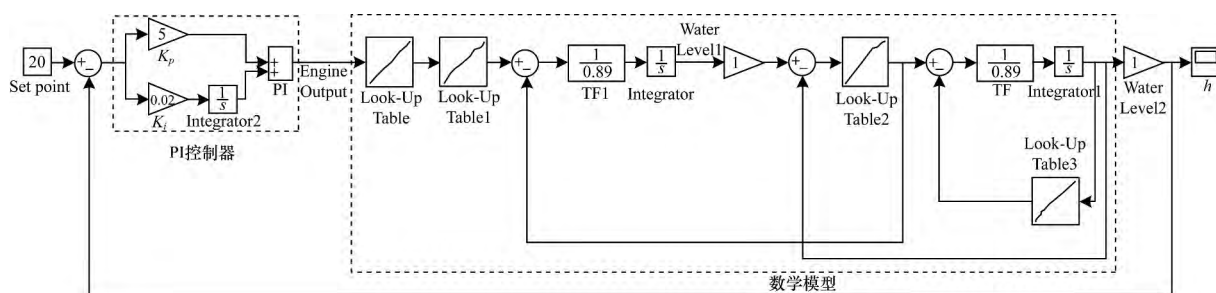


图 9 虚拟实验控制算法框图

5 虚拟远程双容水箱实验及问卷调查分析

虚拟远程双容水箱实验系统用到的硬件主要有网络化控制器和双容水箱,需要给网络化控制器分配一个固定的 IP 地址,以便能通过其控制水箱。开发用到的软件主要有 3DS MAX, Adobe Flash Builder, MyEclipse。在 3DS MAX 中完成水箱的三维建模,三维模型倒入到 Adobe Flash Builder 中进行渲染,MyEclipse 将整个系统发布

到网页。这些软件能很好地运行于当前流行的 Windows 操作系统中,减少了开发难度。用户不需要安装任何软件或者插件,只需通过常用的浏览器就可进行实验。

虚拟远程双容水箱实验已用于武汉大学自动化专业和能源与动力工程专业《自动控制原理》、自动化专业《控制系统仿真与辅助设计》实验课程教学。老师在课堂上详细介绍 NCSLab 3D 并采用 PID 控制算

法演示如何进行实验,这在以往的教学是无法实现的。经过精确建模,虚拟实验与远程实验效果几乎一致。此外,远程实验操作对双容水箱有一定的耗损,所以,学生课下可根据自己的情况合理安排时间进行实

验,尽量先完成虚拟实验,在对双容水箱系统及控制算法设计有了一定的认识后完成远程实验。登录 <http://www.powersim.whu.edu.cn/ncslab/> 进入实验系统首页,如图 10 所示,注册登录即可选择实验。

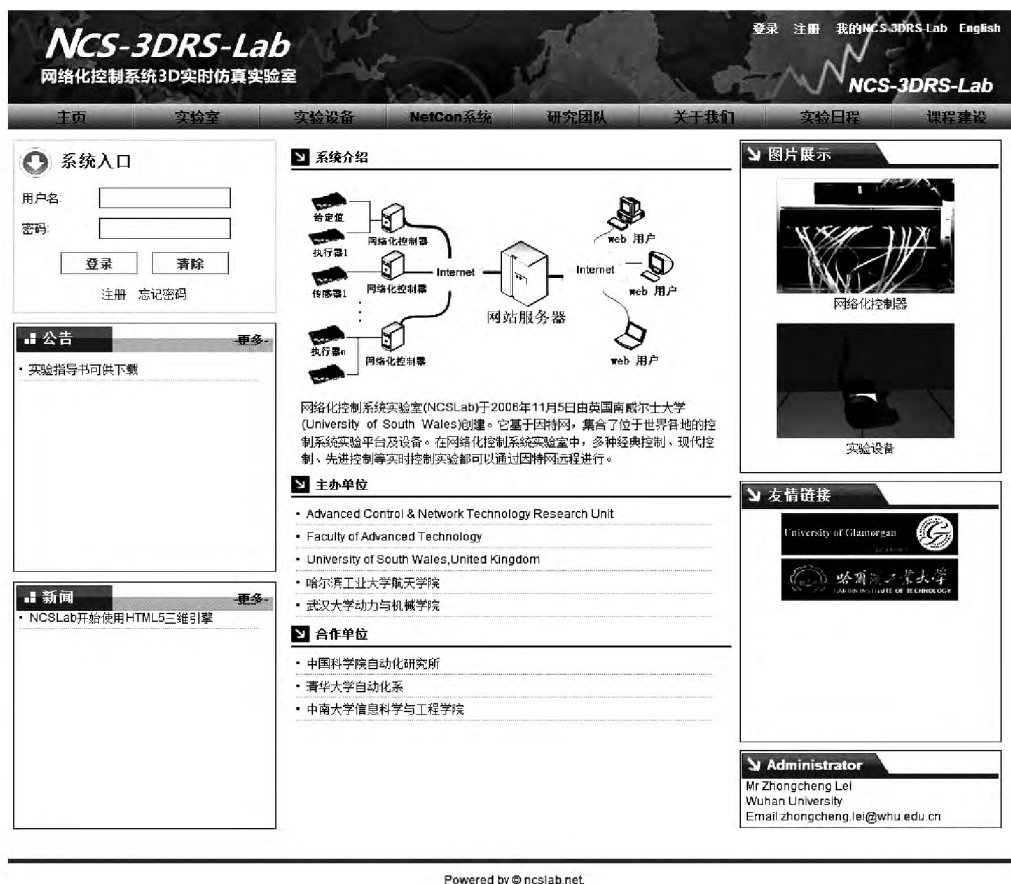


图 10 三维网络化控制系统实验室首页

实验系统包括设备文档、实验算法、监控组态等内容。学生可以使用提供的示例实验算法和监控组态进行实验,也可以自主设计算法和新建个性化监控界面进行实验。图 11 和图 12 分别是学生实验报告中选取的虚拟实验和远程实验的监控界面,采用 PI 算法进行控制,其中 $P=5$; $I=0.02$ 。在图 11 中,①为虚拟实验第 1 个水箱液位高度响应曲线;②,③分别为虚拟实验第 2 个水箱液位高度的给定值和响应曲线。图 12 中远程实验响应曲线①,②,③分别与图 11 中①,②,③对应。可以看出,虚拟实验与远程实验液位高度响应,在形状上基本一致,响应时间、稳定高度接近,控制效果较好。

为掌握学生的实验情况,验证实验效果以及进一步完善实验系统,对参与实验的 81 名能源与动力工程专业的学生进行初步问卷调查,其中有效问

卷 78 份。问卷包括预备知识、技术问题、教育层面、可用性、附加价值、畅所欲言 6 个部分,对排队等候时间、做实验的时间段、实验耗时等问题进行询问。图 13、图 14 是关于用户对实体实验和基于虚拟现实的虚拟远程实验的主观趣味性和倾向性问卷调查。了解用户对实体实验还是虚拟远程实验更感兴趣时,选择实体实验的有 42%,而选择虚拟远程实验的有 34%。但是当实体实验需要预约时,结果发生了很大变化,选择虚拟远程实验的人数上升到 68%,而选择实体实验的人数下降为 22%。在实体实验不需要考虑设备数量、时间、场所等约束条件时更多人选择实体实验,这是由实体实验的更强操作性和更真实的实验环境决定,但是现实生活中这些都是必须面临的问题,在这种情况下用户更愿意选择虚拟远程实验这种更加灵活、高效的实验方式。

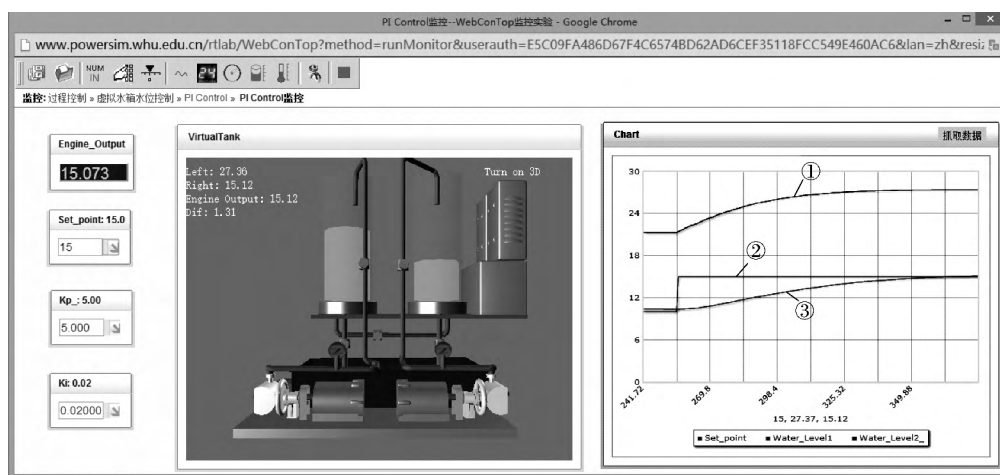


图 11 虚拟实验监控界面

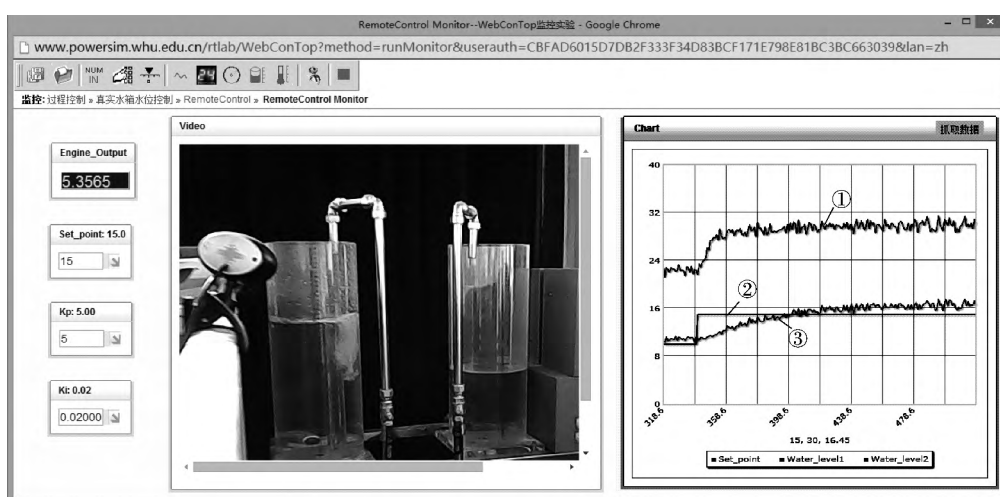


图 12 远程实验监控界面

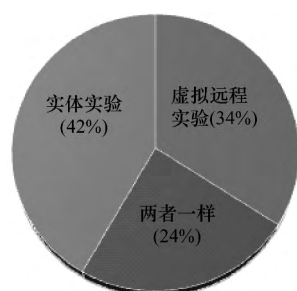


图 13 实验趣味性调查结果

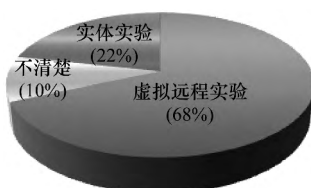


图 14 实验倾向性调查结果

6 结束语

本文以双容水箱为对象,采用虚拟现实技术,设计并实现了一套虚拟远程实验系统,利用其强大的网

络功能进行虚拟远程实验,能够实现实验的大范围共享和很好地解决实验资源不足以及实验设备闲置的问题。从问卷调查的结果来看,因虚拟远程实验不受实验时间与地点的限制,受到学生的青睐。虚拟远程实验中三维模型、场景表达及调查问卷的优化和调查对象的多元化是下一步要深入研究的问题。

参考文献

- [1] 王华忠,姚俊,程华.一种虚实结合温度控制远程实验系统的开发[J].华东理工大学学报:自然科学版,2012,38(2):205-209.
- [2] Palagin O, Romanov V, Sachenko A, et al. Virtual Laboratory for Computer-aided Design: Typical Virtual Laboratory Structure and Principles of Its Operation[C]//Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2007: 77-81.
- [3] 邱进冬,杨志雄,顾新建.基于 Web 的虚拟现实的开发与应用[J].计算机应用研究,2003,20(3):92-95.
- [4] 程一玮.基于异构 Web 服务的虚拟实验平台[J].计算机工程,2011,37(13):291-293.

(下转第 31 页)

- [9] Sivaraman S, Trivedi M. Active Learning Based Robust Monocular Vehicle Detection for On-road Safety Systems [C]//Proceedings of IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Saint Louis, USA: IEEE Press 2009: 399-404.
- [10] 刘 慧,李清泉. 利用低空视频检测道路车辆[J]. 武汉大学学报:信息科学版 2011 36(3): 317-320.
- [11] Baehring D, Simon S, Niehsen W, et al. Detection of Close Cut-in and Overtaking Vehicles for Driver Assistance Based on Planar Parallax [C]//Proceedings of IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Las Vegas, USA: IEEE Press 2005: 290-295.
- [12] Yamaguchi K, Kato T, Ninomiya Y. Vehicle Egomotion Estimation and Moving Object Detection Using a Monocular Camera [C]//Proceedings of International Conference on Pattern Recognition. Hong Kong, China: [s. n.] 2006: 610-613.
- [13] Broggi A, Cappalunga A, Cattani S, et al. Lateral Vehicles Detection Using Monocular High Resolution Cameras on Terramax [C]//Proceedings of IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Beijing, China: [s. n.] 2008: 1143-1148.
- [14] Sun R M Z, Bebis G. Monocular Precrash Vehicle Detection: Features and Classifiers [J]. IEEE Transactions on Image Processing 2006 15(7): 2019-2034.
- [15] Sivaraman S, Trivedi M M. Active Learning for On-road Vehicle Detection: A Comparative Study [J]. Machine Vision and Applications 2014 25(3): 599-611.
- [16] 刘珠妹,刘亚岚. 高分辨率卫星影像车辆检测研究进展[J]. 遥感技术与应用 2012 27(1): 9-14.
- [17] Ludwig O, Nunes U. Improving the Generalization Properties of Neural Networks: An Application to Vehicle Detection [C]//Proceedings of IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Beijing, China: [s. n.] 2008: 310-315.
- [18] 刘 洋,王海晖. 基于改进的 Adaboost 算法和帧差法的车辆检测方法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版 2013: 380-382.
- [19] Chang Wen-Chung, Cho Chih-Wei. Online Boosting for Vehicle Detection [J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2009, 40(3): 892-902.
- [20] 李 云,何克忠. 基于阴影特征和 Adaboost 的前向车辆检测系统[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2007, 47(10): 1713-1716.
- [21] Bensrhair A, Bertozzi M. Cooperative Approach to Vision-based Vehicle Detection [C]//Proceedings of IEEE Conferences on Intelligent Transportation Systems. Okalanda, USA: IEEE Press 2001: 207-212.
- [22] Felzenszwalb P, Girshick R, McAllester D, et al. Object Detection with Discriminatively Trained Part Based Models [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 2010 32(9): 1627-1645.
- [23] Felzenszwalb P, Girshick R, McAllester D. Cascade Object Detection with Deformable Part Models [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, USA: IEEE Press 2010: 2241-2248.
- [24] Elia D, Poqqi C, Scarpa G. A Tree-structured Markov Random Field Model for Bayesian Image Segmentation [J]. IEEE Transactions on Image Processing 2003, 12(10): 1259-1273.

编辑 索书志

(上接第 25 页)

- [5] Tawfik M, Sancristobal E, Martin S, et al. Virtual Instrument Systems in Reality (VISIR) for Remote Wiring and Measurement of Electronic Circuits on Breadboard [J]. IEEE Transactions on Learning Technologies 2013 6(1): 60-72.
- [6] Rodriguez F J, Giron C, Bueno E J, et al. Remote Laboratory for Experimentation with Multilevel Power Converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2009 56(7): 2450-2463.
- [7] Gomes L, Bogosyan S. Current Trends in Remote Laboratories [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2009 56(12): 4744-4756.
- [8] 费敏锐,王晓莉,李力雄,等. 基于虚拟现实的远程测控系统若干技术的研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2): 386-390.
- [9] Ko C C, Chen B M, Hu S, et al. A Web-based Virtual Laboratory on a Frequency Modulation Experiment [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews 2001 31(3): 295-303.
- [10] Shin D, Yoon E S, Lee K Y, et al. A Web-based, Interactive Virtual Laboratory System for Unit Operations and Process Systems Engineering Education: Issues, Design and Implementation [J]. Computers & Chemical Engineering 2002 26(2): 319-330.
- [11] 陆炜妮. 基于 ColdFusion 的虚拟实验室设计[J]. 计算机工程 2010 36(21): 291-293.
- [12] Ying S, Zhu S. Remote Laboratory Based on Client-server-controller Architecture [C]//Proceedings of Control Automation, Robotics & Vision Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press 2004: 2194-2198.
- [13] 庞中华,刘国平,乔宇亮. NCSLab: 完全基于 Web 的网络化控制系统实验室[J]. 中南大学学报 2011 42(4): 1005-1014.
- [14] Qiao Yuliang, Liu Guoping. NCSLab: A Web-based Global-scale Control Laboratory with Rich Interactive Features [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010 57(10): 3253-3265.
- [15] Hu Wenshan, Liu Guoping, Zhou Hong. Web-based 3D Control Laboratory for Remote Real Time Experimentation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013 60(10): 3211-3218.
- [16] 蒲 斌,崔梦天,赵海军. 基于二阶段的 3D 虚拟世界客户分配方法[J]. 计算机工程 2016 42(1): 109-115.

编辑 陆燕菲