

# 数字孪生趋势下机器人虚拟仿真实验建设

李 福, 吴益飞, 孔维一, 王海梅, 郭 毓

(南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

**摘 要:** 针对自动化类机器人实验教学中理论计算抽象、实体实验复杂、环境构建困难、系统设备昂贵等问题, 建设了复杂环境下智能机器人高危作业虚拟仿真实验教学平台。平台借助虚拟仿真技术, 把高危复杂场景和机器人高端装备搬进虚拟实验室, 在三维虚拟空间中再现智能机器人控制的核心要素, 构建电力运维的复杂环境, 动态呈现机器人的作业过程。实验还原度高, 底层数据和模型源于科研实际, 通过两个教学周期中的应用, 有效锻炼了学生的创新思维与解决复杂工程问题的能力。

**关键词:** 实验教学; 自动化; 虚拟仿真; 人工智能; 数字孪生

**中图分类号:** G642.0; N945.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-4956(2021)10-0265-04

## Construction of robot virtual simulation experiment under trend of digital twinning

LI Fu, WU Yifei, KONG Weiyi, WANG Haimei, GUO Yu

(School of Automation, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of abstract theoretical calculation, complex entity experiment, difficult environment construction and expensive system equipment in the experimental teaching of automatic robots, a virtual simulation experimental teaching platform for high-risk operations of intelligent robots in complex environments is constructed. With the help of virtual simulation technology, the platform moves high-risk complex scenes and high-end robot equipment into the virtual laboratory, reproduces the core elements of intelligent robot control in three-dimensional virtual space, constructs the complex environment of power operation and maintenance, and dynamically presents the operation process of the robot. The experimental reduction degree is high, and the underlying data and model are derived from scientific research practice. Through the application in two teaching cycles, students' innovative thinking and ability to solve complex engineering problems are effectively trained.

**Key words:** experimental teaching; automation; virtual simulation; artificial intelligence; digital twinning

我国经济从以低端制造业和资源、投资驱动的劳动密集型阶段, 转变为以人工智能、生物科技、高端制造等为代表的智力密集型阶段<sup>[1-2]</sup>, 高等教育作为我国科技创新人才培养的核心战场。实验教学是高校创新实践人才培养的重要组成, 过去十几年, 高校实验设施历经更迭, 已满足学生实验教学基本要求, 为学生提供了理论结合实践的基础教学环境。而随着智能

化、数字化教育的快速发展, 传统的实验教学很难灵活适应远程教育、分布式教育等全新教学形式。2018年, 教育部颁布《关于加快建设高水平本科教育全面提高人才培养能力的意见》中提出“建设 1000 项左右国家虚拟仿真实验教学项目, 提高实验教学质量 and 水平”, 强调信息技术与教育教学深度融合<sup>[3-5]</sup>。2020 年在疫情的影响下, 部分专业实验课程延迟进行, 存

收稿日期: 2021-02-24 修改日期: 2021-09-02

**基金项目:** 江苏省现代教育技术研究“十三五”规划重点课题项目(2018-R-66990); 江苏省重点研发计划项目(BE2017161); 江苏省高等教育教改研究立项研究课题(重点项目)(2017ISIG020); 江苏省现代教育技术研究 2020 年度智慧校园专项课题(2020-R-84370)

**作者简介:** 李福(1991—), 女, 江苏泰州, 硕士, 工程师, 主要从事实验室建设、信息化建设相关工作, lifu@njst.edu.cn。

**引文格式:** 李福, 吴益飞, 孔维一, 等. 数字孪生趋势下机器人虚拟仿真实验建设[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(10): 265-268.

**Cite this article:** LI F, WU Y F, KONG W Y, et al. Construction of robot virtual simulation experiment under trend of digital twinning[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(10): 265-268. (in Chinese)

在与理论课程脱节的现象,这要求线上线下融合的方式快速进入大学课堂,实验教学也开启了信息化探索之路。

截至 2020 年,虚拟仿真实验教学课程共享平台已上线 2079 项虚拟仿真实验,覆盖工、农、林、医学、文史等多个专业领域<sup>[3]</sup>,虚拟仿真实验开发越来越受到各高校的重视。本文以南京理工大学自动化学院“复杂环境下智能机器人高危作业虚拟仿真实验”为例,聚焦工科专业的实验教学现状,探索“数字孪生”与自动化类实验教学的结合,研究人工智能领域虚拟仿真实验的建设方案。

## 1 自动化专业实验教学的课程形式

在本科教育阶段,高校实验课程主要服务于专业基础理论课程,实验形式主要有专用实验箱、软硬结合、仿真软件等 3 种。

### 1.1 基于虚拟仪器的实验箱教学

经过十几年的发展与迭代,自动化类的课程大多配备有功能完善的教学实验箱,用于理论教学的验证与补充<sup>[6-7]</sup>。以往基于虚拟仪器的实验箱教学多采用图 1 所示连接方式,学生在上位机进行软件调试后,通过下载器(或无线网络)传输到实验箱进行验证。

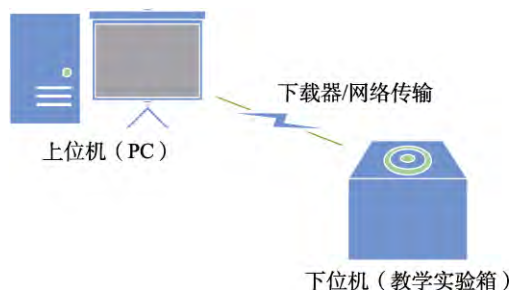


图 1 基于虚拟仪器的教学实验箱

实验箱教学作为最普遍的实验方式被工科类大学广泛采用,比如嵌入式系统综合实验,一般基于 STM32 或 Cortex 系列进行实验设计,这类实验发展比较成熟,学生可快速上手,上位机编程也较为灵活方便,完成软件调试后可直接下载到实验箱进行验证。缺点是实验箱扩展性有限,难以完全激发学生的创新性,受经费和场地限制,除规定的课程实践外,学生无法开展实验。

### 1.2 基于云服务(B/S 架构)的虚拟仿真实验教学

虚拟仿真教学实验的建设使得实验教学在空间和时间上得到了拓宽,仿真实验基于 B/S 架构进行开发<sup>[8]</sup>,学生可随时通过浏览器进入实验。目前虚拟仿真教学实验尚处于大规模建设推广阶段,自 2017 年起,虚拟仿真实验教学课程共享平台(www.ilab-

x.com)已陆续上线 2079 个虚拟仿真实验项目<sup>[9]</sup>,其中工学占 42%,说明虚拟仿真实验在工学类课程中可广泛推广。进一步统计发现,工学类课程中占据大多数的为机械类、化工类和土木类,截至 2020 年,尚无自动化类项目,但相近课程如电气类及电子信息类均已有的实验项目接入。

### 1.3 基于数字孪生的虚实交融实验教学

数字孪生的概念由 Michael Grieves 提出,美国航空航天局应用于航天设备的功能测试及故障预测<sup>[9]</sup>,它是通过数字化的手段构建一个在数字世界中一模一样的实体,借此来实现对物理实体的了解、分析和优化<sup>[9-10]</sup>,相比于虚拟仿真,数字孪生体系在虚实融合的基础上走向“以虚控实”。2018 年 7 月,工信部印发了《工业互联网平台建设及推广指南》,具备双向通路的工业互联网发展使数字孪生成为了有生命力的模型。

从底层的数据处理到顶层的用户交互可以看出,高性能传感器、多尺度融合建模、高速网络传输、高性能计算、虚拟现实等先进技术的发展决定了数字孪生的建设水平。

自“工业 4.0”提出以来<sup>[2]</sup>,企业都在积极寻求数字化转型的突破,数字孪生技术在产品智能制造的全生命周期监控及预测领域有所落地,真正与教学相融合还处于探索阶段。

比较虚拟仿真和数字孪生技术,我们可以将数字孪生视为虚拟仿真技术的升级,虚拟仿真技术强调“高仿真度”,而数字孪生技术则是要达到真正的虚实结合,甚至“以虚控实”。

## 2 复杂环境下智能机器人高危作业虚拟仿真实验设计

在“卓越工程师计划”实施背景下,自动化类专业正在进行教育改革,坚定地将人才培养目标瞄准国家和社会需求,注重学生创新实践能力和工程应用能力的提升。南京理工大学自动化学院复杂环境下智能机器人高危作业虚拟仿真实验(以下简称“机器人仿真实验”)以校企合作的重大科研项目为原型,以解决工程问题为导向,采用“基础原理+任务驱动”的模式进行实验设计,兼顾趣味性和知识性。

### 2.1 实验设计思路

仿真实验以工业机器人控制为核心,以高铁配电线路工作站点为工作场景,是为“机器人控制技术”“机器人控制技术创新创业实践”课程开发的教学案例,实验包含 4 个环节、10 个知识点,实验框架如图 2 所示。

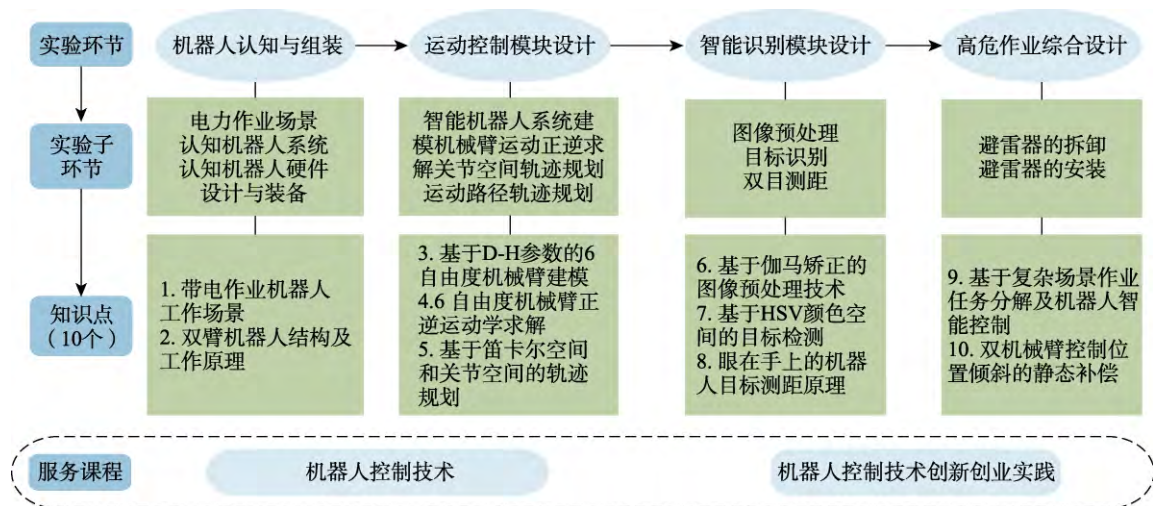


图2 机器人仿真实验框架

(1) 机器人认知与组装。紧扣自动化专业学生系统化思维培养的目标,按照自上而下的模块化组装方式,自由组装机器人动力模块、通信模块、视觉模块和末端执行模块,最终完成智能机器人作业系统的搭建。

(2) 运动控制模块设计。该模块与双机械臂运动控制算法紧密结合,学生在完全理解基于D-H参数的6自由度机械臂建模、正逆运动学求解、基于笛卡尔空间和关节空间轨迹规划的基础上进行参数调试,完成给定的控制目标,控制的稳定性、快速性、准确性是实验成绩的重要评定指标。

(3) 智能识别模块设计。融合基于伽马校正的图像预处理技术、基于HSV颜色空间的目标检测以及机器人手眼标定与测距原理,要求学生具备基本的数字图像处理能力,真实体会机器人如何“智能识别”目标。

(4) 高危作业综合实验<sup>[11]</sup>。本模块的实验设计来源于工程实际,在反复调试中设置了避雷器拆卸步骤,错误步骤将弹出动画,提示学生修改实验参数,弥补真实环境中禁止错误操作的不足。

## 2.2 实验关键技术

2020年,《虚拟仿真实验教学课程建设与共享应用规范(试用版)》印发,从模型建立、场景呈现、过程设计、实验考核、报告分析、用户体验等方面给出了详尽的规范说明,机器人仿真实验围绕教育部要求的“两性一度”进行内容设计与框架搭建<sup>[12]</sup>,在实验呈现方面主要包括3D建模及场景渲染、关键算法及运动规律植入、运行结果计算三个方面。

(1) 3D建模及场景渲染。虚拟仿真实验的“高仿真度”要求实验涉及的场景及相应的设备要高度还原真实环境。仿真实验选用基于模型的建模方法,需建模的内容包括工程作业场景及智能机器人系统。为

实现建模最佳效果,实验综合使用了三种软件。智能机器人(双机械臂)根据实物尺寸使用SolidWorks快速创建草图,导入3DS MAX进行模型材质、光线效果的设置,3DS MAX<sup>[13]</sup>可直接导出OpenFlight格式的场模型,利用Multigen Creator<sup>[14]</sup>的特征增强功能,将设备的节点按一定的逻辑分组,设置好父节点和子节点的关系,完成机械臂、机械臂手爪的自由度设置,方便视景渲染平台中对场景的运动控制,最终生成场模型的.flt文件。对于电力作业场景则依赖于3DS MAX和Multigen Creator的动画渲染功能,使场景更具有美观性、沉浸性和吸引力。通过Polygen Crunch减面工具简化模型,提高模型加载速度。机器人组件建模效果如图3所示。

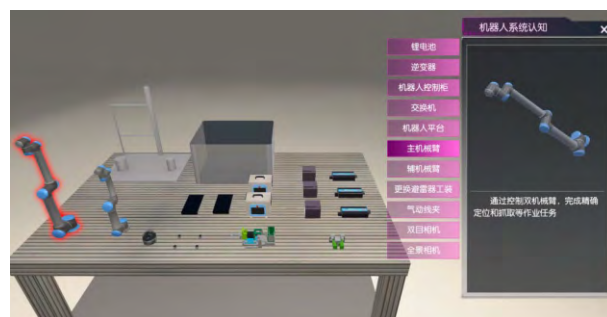


图3 机器人组件建模效果图

(2) 关键算法植入。机械臂运动学控制融合了“DH参数法建模”“正逆运动学求解”“基于关节空间和笛卡尔空间的路径规划”等多个复杂知识点,需要通过大量代码来实现算法植入,并结合Creator中对机械臂、电力物件和环境信息的各节的命名和重组完成代码与模型的绑定。综合考虑开发环境的开放性和三维渲染能力,选择OpenSceneGraph<sup>[15]</sup>(OSG)作为现场重构的软件库,在Microsoft Visual Studio 2010编译器



上运行。OSG 加载模型和场景后需要对各个部件的节点进行控制操作,首先根据 Creator 中的设置对节点进行遍历操作,通过更新、拣选、绘制三个步骤完成每个场景的重构和渲染,在这个过程中可以使用 OSG 的超级指针机制防止内存消耗过大。要在虚拟仿真环境中实现对机械臂的自由度控制,也是在节点遍历的基础上搜索目标自由度节点,并用 `osgSim::DOFTransform` 类实例化后,就可以运用 `DOFTransform` 类中的成员函数对节点进行操作。综合场景渲染和关节自由度控制,即可实现运算结果的可视化,为了便于学生理解运动控制规律,在机械臂画面增加齐次矩阵实时显示。图 4 所示为机械臂运动控制算法调试界面。

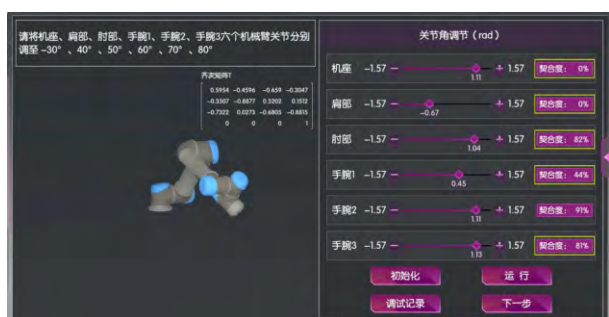


图 4 机械臂随参数变化的运动轨迹界面

(3) 运行结果计算。机械臂运动是以末端移动与关节旋转的形式实现的,本实验电力作业场景中使用 2 个 6 自由度机械臂,从建模、分析到轨迹规划需要不断进行矩阵相乘、求逆计算,为提升计算效率及资源利用率,虚拟仿真实验基于云平台建设,采用分布式、可调度的计算模式动态配置计算资源,按需提供给用户,系统可支持 300 名学生同时在线实验。

实验运行的计算量集中在机械臂运动学建模和路径规划。机械臂由连杆和相邻连杆之间的转动关节组成,对机械臂运动学分析时采用 DH 法描述相邻连杆间平移或转动的关系。机械臂的正运动学问题是已知机械臂连杆参数和关节变量,求解机械臂末端的位置和姿态,可直接使用位姿变化矩阵依次转换,学生通过调节 6 个关节角的弧度值在实验界面输出运动轨迹和契合度。逆运动学问题是已知机械臂末端的位置和姿态,求解各关节的角变量,选用代数解析法来实现,反向求解机械臂各关节角度的结果是多解的,学生需要加限制条件来求出最优值,在实验界面输入逆解值同样可实时查看机械臂运动状态。基于关节空间的路径规划采用五次多项式插值法实现,实验中关节角的初始状态为零状态,设置关节角终值,时间间隔取 1 s,运动时长默认为 5 s,学生在界面输入各时间点的角

度、角速度、角加速度,并绘制响应的曲线,查看曲线是否连续且处处可导,验证机械臂是否可完成指定的路径和响应的任务。图 5 所示为根据内置算法及参数设置在运行过程中的错误提示。



图 5 运行错误提示

### 2.3 实验创新点

机器人仿真实验以融合理论知识为目标,以教学为导向,旨在培养学生的系统性思维。相对于传统的仿真环境,1:1 还原真实工程场景给学生带来了更强烈的视觉冲击以及更直观的控制观感。与视频教学相比,实验打破了纯动画展示的界限,将真实算法植入到模型当中,让学生切实体会到多自由度机械臂各运动参数对运动结果带来的影响。同时,实验数据完全来自真实的科研项目,学生不用到作业现场,也能真实体会到智能机器人作业的全过程,对于高危作业而言,虚拟仿真环境为学生试错提供了可能,大大拓展了实验教学的广度和深度。

### 3 结语

复杂环境下智能机器人高危作业虚拟仿真实验建设历时一年,并在两轮教学中不断迭代完善,实现了将高端前沿科研成果向基础教学的反哺。在建设过程中,围绕本科教学大纲设计知识点,将科研成果合理降维到本科教学难度,突出教学重点,在充分激发学生兴趣的同时提供探究创新的空间。实际教学中,虚拟仿真实验的建设与推广不仅在于加强信息技术在教育教学中的应用与融合(通过优化人机交互和完善系统功能来提升实验体验),也要关注师生信息化素养的提升,通过加强培训,帮助师生转换思维,快速适应线上实验教学。

### 参考文献 (References)

- [1] 胡波,冯辉,韩伟力,等.加快新工科建设,推进工程教育改革创新:“综合性高校工程教育发展策略研讨会”综述[J].复旦教育论坛,2017,15(2):20-27.

(下转第 287 页)

## 参考文献 (References)

- [1] 董丽萍, 敖天其. “双一流”背景下高校教学实验室建设新思路与实践[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(11): 26–28.
- [2] 马远琼. 高校科研实验室安全管理解析[J]. 时代教育, 2014(9): 10–11.
- [3] 朱娟蓉. 强化高校实验室安全管理工作的对策[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(6): 430–433.
- [4] 阳富强, 谢程宇, 林晓航. HFACS 模型在高校实验室安全管理中的应用[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(10): 278–283.
- [5] ERIKSEN N J. Scenario methodology in natural hazards research[D]. Boulder: University of Colorado, 1975.
- [6] PIJNENBURG B, VAN D M J. The Zeebrugge ferry disaster: Elements of a communication and information processes scenario[J]. Contemporary Crises, 1990(14): 321–349.
- [7] YOKOYAMA I. A scenario of the 1883 Krakatoa tsunami[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1987(25): 157–174.
- [8] Federal Office of Civil Protection and Disaster Assistance. LÜKEX general information[R]. Berlin: Federal Office of Civil Protection and Disaster Assistance, 2013.
- [9] 戴文超. 非常规突发事件情景库推理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [10] 刘力玮. “情景-应对”型非常规突发事件应急方案与效果评估研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [11] 郑登峰, 付明福, 龚晓凤, 等. 基于情景构建的多地多场景应急演练[J]. 中国安全科学学报, 2019(6): 171–176.
- [12] 王永明. 重大突发事件情景构建理论框架与技术路线[J]. 中国应急管理, 2015(8): 53–57.
- [13] 宋志红, 耿秀丽. 基于 HFACS 的民机总装过程人为失误风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2019(6): 146–151.
- [14] 刘景凯. 情景构建技术与应急准备能力建设[J]. 劳动保护, 2019(10): 90–93.
- [15] 姚朋君, 范强锐, 马涛, 等. 高校安全生产突发事件应急预案体系构建[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(4): 282–285.

(上接第 268 页)

- [2] 李金华. 德国“工业 4.0”与“中国制造 2025”的比较及启示[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2015, 15(5): 71–79.
- [3] 李平, 毛昌杰, 徐进. 开展国家级虚拟仿真实验教学中心建设提高高校实验教学信息化水平[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(11): 5–8.
- [4] 高志强, 王晓敏, 闫晋文, 等. 我国虚拟仿真实验教学项目建设的现状与挑战[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(7): 5–9, 14.
- [5] 李小侠, 陈忠. 工科实验教学体系的建设与改革探索[J]. 科学咨询(科技·管理), 2019(12): 28.
- [6] 张加宏, 杨天民, 刘恒, 等. 一种嵌入式 PID 恒温控制的教学实验设计[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(10): 211–215, 219.
- [7] 田润泽, 罗飞, 丁炜超, 等. 嵌入式系统虚拟仿真平台及实验[J]. 软件导刊, 2020, 19(2): 240–243.
- [8] 官鑫, 刘建成. 虚拟仿真实验教学中心建设思考与建议[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)教育科学, 2016(12): 240.
- [9] 陶剑, 戴永长, 魏冉, 等. 基于数字线索和数字孪生的生产生命周期研究[J]. 航空制造技术, 2017(21): 26–31.
- [10] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1–18.
- [11] 林润泽, 王行健, 等. 基于数字孪生的智能装配机械臂实验系统[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(12): 83–88.
- [12] 李实, 刘波, 韩刚, 等. 一种基于增强现实(AR)的电力系统配电网带电作业机器人[J]. 自动化博览, 2018, 35(4): 62–64.
- [13] 阎晓东, 张永生. 基于 3DS MAX 环境的 3 维场景重建工具[J]. 测绘学院学报, 2002, 19(2): 109–112.
- [14] YANG Y Q, EASA S M, ZHENG X Y, et al. Evaluation effects of two types of freeway deceleration markings in China[J]. PLOS ONE, 2019, 14(8): e0220811.
- [15] ZHANG J, XUAN Z. Application of virtual reality techniques for simulation in nuclear power plant[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2013, 236: 971–976.