

建筑钢筋机器人焊接与绑扎虚实融合实验教学改革研究

费爱萍¹, 王妍^{1,*}, 田雨泽¹, 杨斌¹

1. 辽宁科技大学, 土木工程学院, 辽宁 鞍山, 114051

摘要: 针对智能建造专业在建筑机器人焊接、钢筋自动化绑扎实验教学中存在的设备台套数不足、实训安全风险较高、耗材成本较大、真实工程施工工况难以完整复现等问题。搭建集机器人三维建模、焊接工艺仿真、钢筋绑扎路径规划、施工工况模拟于一体的虚拟仿真实验平台, 构建“虚拟预演—离线编程—实体验证—数据闭环反馈”的一体化教学流程。教学实践表明, 该实验教学设计显著提升了实验教学的安全性与开放性, 降低实训成本, 增强学生工程实践与创新能力, 可为新工科背景下智能建造实验教学改革提供参考与借鉴。

关键词: 数字孪生; 机器人焊接; 钢筋绑扎; 智能建造; 虚实融合; 实验教学改革

Research on the Reform of Virtual-Real Integration Experimental Teaching for Robotic Welding and Tying of Construction Steel Bars

Aiping Fei¹, Yan Wang^{1,*}, Yuze Tian¹, Bin Yang¹

1. University of science and technology, School of civil engineering, Anshan, Liaoning, 114051, China

Abstract: In light of the numerous challenges existing in the experimental teaching of robotic welding and automated rebar tying for the intelligent construction major, for example insufficient equipments, high safety risks in training, high consumable costs and so on, a virtual simulation experiment is constructed in this paper. This experiment integrates robotic 3D modeling, welding process simulation, rebar tying path planning, and construction condition simulation into a unified platform. This virtual simulation experiment conducts teaching practice following the integrated teaching process consisting of "virtual pre-visualization, offline programming, physical verification, and data closed-loop feedback". Teaching practice demonstrates that this experimental teaching design significantly improves the safety and openness of experimental teaching, reduces training costs, and enhances students' engineering practice and innovation capabilities. It can serve as a reference for the reform of experimental teaching in intelligent construction under the context of New Engineering Education.

Keywords: Digital twin; Robotic welding; Rebar tying; Intelligent construction; Virtual-real integration; Experimental teaching reform

随着装配式建筑、智能建造技术的快速发展, 钢筋自动化绑扎和智能焊接已成为现代建筑施工的重要发展方向。机器人焊接与绑扎装备逐步在施工现场推广应用, 对土木工程类智能建造专业人才的工程实践能力提出了更高要求, 不仅需要掌握传统施工工艺知识, 还需具备机器人编程、智能感知、系统调试、施工数字化管控等综合技能。

实验教学是培养学生实践创新能力的核心环节。虚拟仿真实验教学是高校实验教学的有益补充,许多学者及高校教师针对虚拟仿真实验的建设和发展开展了深入的研究和实践^[1,2]。该类实验的开展对于学生兴趣和学习积极性的提高具有很大作用^[3]。积极开发和应用具有专业特征的虚拟仿真实验,在其评价体系、新技术融合等方面还具有很大的开发潜力^[4-9]。由于传统钢筋焊接与绑扎实验教学多以人工实操为主,机器人实训平台则存在设备昂贵、维护成本高、操作危险性大、单次实验耗时长等问题。同时,受限于场地与设备数量,学生难以实现反复调试与自主创新,工程场景单一,无法模拟复杂施工环境,导致学生理论与实践脱节,综合工程能力培养效果不佳。针对以上这些亟待解决的实践教学问题,开发建设了《建筑钢筋机器人智能焊接绑扎虚拟仿真实验》,在智能建造专业本科大三阶段课程中开展教学实施。

1 建筑机器人焊接与绑扎实验教学现状及问题

1.1 设备资源有限,实训效率偏低

焊接与绑扎机器人设备单价高、配套系统复杂,高校难以大批量配置,通常存在多人共用一台设备的情况。学生实操机会有限,大量时间用于排队等待,无法进行反复练习与参数调试,实践训练效率较低。

1.2 安全风险较高,实训存在局限

机器人焊接过程存在电弧光辐射、高温飞溅、触电隐患等安全风险,钢筋绑扎机器人运动过程存在机械碰撞风险。为保障安全,教学过程中往往限制学生自主调试,只能进行固定流程操作,抑制了学生的探索性与创新性。

1.3 工程场景单一,难以对接实际施工

传统实验教学多以基础操作为主,难以模拟真实施工现场的复杂工况,如异形构件钢筋绑扎、多位置姿态焊接、施工干扰环境下的路径规划等。学生完成实验后仍缺乏对工程实际问题的认知,岗位适应能力不足。

1.4 考核方式单一,过程评价缺失

现有实验考核多以实验报告和最终操作结果为依据,缺乏对学生编程思路、调试过程、故障排查、方案优化等全过程的跟踪记录,难以客观评价学生的实践能力与创新思维,不利于针对性教学改进。

2 实验设计及目的

该实验是为智能建造专业本科生设计的土木工程、机械工程、控制工程相融合的具有多学科交叉特征的虚拟仿真实验。主要的实验目的包含以下五点:

(1) 实验平台仪器设备认知,掌握建筑钢筋机器人焊接绑扎实验平台仪器设备组成及功能;学习智能机器人系统的基本控制原理,了解 PLC 控制柜与各类仪器设备之间的相互作用关系,掌握信号在系统中的传输机制,明确设备在整个实验系统中的作用。

(2) 机器人手臂结构认知,掌握机器人手臂的各个组成部分,每个部件的形状、位置和相互连接关系。机器人轴运动认知,掌握机器人手臂各轴运动模式,明确机器人控制指令对机器人运动路径及动作反馈的意义。

(3) 了解建筑钢筋网的工程应用,掌握钢筋原材料、布设方法、工艺流程、质量检测标准等专业知识。由任务驱动进行参数自定义和方案拟定,培养智能建造工程师设计能力和具备必要的职业伦理。

(4) 掌握机器人控制程序编码含义及编程规则,可根据设计方案进行原料准备、钢筋切割、更换手抓、钢筋搬运、钢筋绑扎、钢筋焊接、成品检测动作程序编制。熟练掌握机器人控制编程能力和解决复杂问题能力。

(5) 了解数字孪生原理,通过虚实结合深化建筑钢筋机器人智能焊接和绑扎的全施工工艺流程。同时也培养学生多学科交叉融合意识,提高工程素养,成为能够适应新工科发展的高素质复合型应用技术人才。

3 建筑钢筋机器人智能焊接绑扎虚拟仿真实验方法

3.1 虚拟实验教学架构

本实验项目综合了漫游建筑钢筋机器人智能加工实训室、目标驱动机器人智能钢筋焊接与绑扎任务、人机协同仿真建筑钢筋网加工流程、自主设计钢筋网布设形式等实验方法,通过沉浸认知,交互学习,自主探索与设计等学习方法,全面培养学生认识问题、分析问题、解决问题的能力,并促进学生积极思考、用于探索的精神以及大国工匠精神的培养。图1所示为建筑钢筋机器人智能焊接绑扎虚拟仿真实验教学方法架构。



图1 建筑钢筋机器人智能焊接绑扎虚拟仿真实验教学方法架构图

Fig. 1 Architecture diagram of the virtual simulation experimental teaching method for intelligent robotic welding and tying of construction steel bars

3.2 虚拟仿真实验操作功能

学生可在虚拟环境中完成机器人手动示教、坐标设定、焊接/绑扎路径规划、钢筋焊接/绑扎点位布置等基础操作,模拟设备启动、运行、急停、故障报警等全过程。真实地沉浸在预制构件工厂进行机器人操作建造构件。在建筑机器人智能钢筋焊接实验模块中,学生需按照焊接任务书的要求,依次完成钢筋的选型、切割、搬运、焊接、检测及入库等实验操作。根据需求确定钢筋规格并准备钢筋原料。启动焊接机器人示教器,输入与焊接任务相关的动作指令,模拟焊接过程。焊接结束后,利用检测相机对钢筋网片的焊缝外观、尺寸及焊接质量进行检测,合格后模拟成品入库。在建筑机器人智能钢筋绑扎实验模块中,学生根据实验绑扎任务书的要求,完成钢筋的选型、切割、搬运、

绑扎、检测和入库等实验操作。依据规范要求选定钢筋规格，开启绑扎机器人示教器，根据模拟任务输入指令，启动机器人，观察其抓取、搬运和绑扎钢筋的过程。在完成钢筋网绑扎后，利用检测相机对钢筋网进行外观、尺寸及绑扎紧实度检查，检测合格后模拟运输至“仓库”，结束实验。建筑钢筋机器人智能焊接绑扎虚拟仿真实验界面如图2所示。

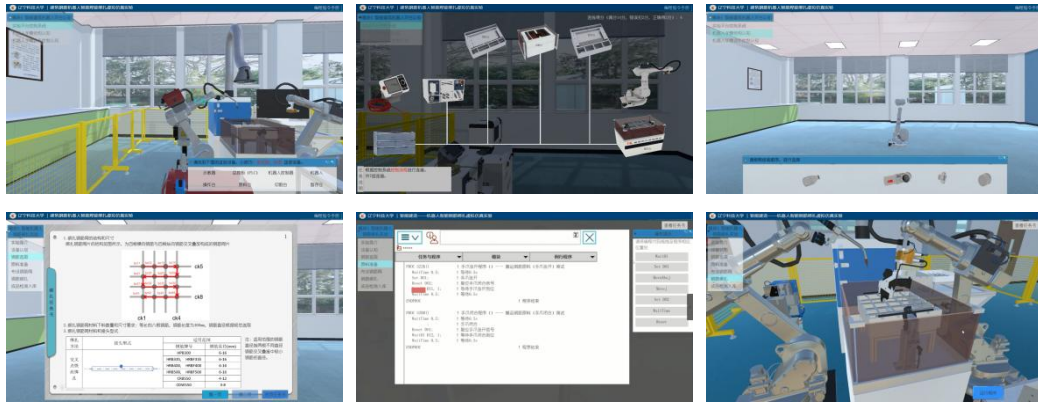


图2 建筑钢筋机器人智能焊接绑扎虚拟仿真实验界面

Fig. 2 Interface of the virtual simulation experiment for intelligent robotic welding and tying of construction steel bars

4 虚实融合实验教学体系构建

4.1 课程教学目标重构

以新工科人才培养为导向，确立知识、能力、素养三位一体的教学目标：知识目标包括掌握机器人焊接与绑扎工作原理、数字孪生技术应用、智能施工装备控制逻辑等知识；能力目标包括具备机器人示教编程、路径规划、工艺调试、故障诊断、工程方案优化等实践能力；素养目标为培养安全施工意识、工程质量意识、数字化思维与团队协作创新能力。

4.2 分层递进式教学内容设计

结合学生认知规律，将实验内容分为三个层次：

(1) 虚拟实验夯实理论。通过虚拟平台认识机器人结构、坐标系、焊接与绑扎工艺流程，学习安全规范与基础操作，完成虚拟示教与简单点位运动实验，夯实理论与操作基础。

(2) 虚实结合验证求实。在虚拟环境中完成离线编程与工艺参数调试，再通过实体机器人进行验证，对比虚拟与实际运行差异，分析误差来源，提升编程与调试能力。

(3) 工程综合任务创新，如装配式剪力墙钢筋骨架自动化绑扎、异形钢结构构件机器人焊接等，要求学生自主完成方案设计、路径规划、程序编写、工艺优化与成果评价，培养综合工程能力。

三个层次在应用型人才培养方面实现了递进式教学的合理体现，土木施工工艺、机械原理和控制编程的多知识点的融合中衔接自然，易于学生接受。建筑机器人智能焊接绑扎虚拟仿真实验为基础知识夯实的环节，在此基础上安排学生进行物理实验实操练习，进而结合复杂工程项目训练实践能力。结合四阶梯进式教学落实学生知识、素养、能力的实践培养，如图3所示。



图3 四阶递进式教学流程图

Fig. 3 Flowchart of the four-stage progressive teaching process

5 多元化考核评价体系构建

为客观评价教学效果，建立过程性评价与结果性评价相结合、虚拟成绩与实操成绩相结合的多元化评价体系。其中过程性评价占60%，包括虚拟平台操作完成度、实验过程数据记录、实验过程答题情况、小组协作表现等，由系统自动记录与教师综合评定。结果性评价占40%包括实验报告完整性、方案创新性等，通过现场验收与成果评审完成评价。通过多维度评价，全面反映学生实践能力与创新水平，实现以评促学、以评促改。

6 教学效果与实践反思

6.1 教学实施效果

本虚拟实验的教学提升了实验教学效率与安全性。虚拟操作大幅减少实体设备占用时间，降低安全风险，学生可在虚拟环境中反复练习，实操成功率显著提升。通过离线编程与虚拟预演，减少实际焊接与绑扎试错次数，节约焊丝、钢筋、电力等耗材，延长设备使用寿命。降低实训耗材与设备维护成本。复杂工程场景模拟有效提升了学生工程适应能力，开放性任务激发了学生创新思维，学生课程满意度与实践考核成绩明显提高。构建了可复制、可推广的智能建造装备实验教学模式，为同类专业实验教学改革提供示范。

6.2 存在问题与改进方向

在虚实融合的实验教学过程中发现，虚拟模型与物理实体的动态映射精度仍有提升空间，后续可进一步优化数据传输与算法精度；在现代智能技术的背景下可进一步引入人工智能技术，实现智能评分、智能指导与个性化学习推荐。

7 结论

本文构建的建筑机器人钢筋焊接绑扎虚实融合实验教学体系，实现了虚拟仿真与实体实操的有机结合，重构了教学流程与考核方式，显著提升了实验教学质量与学生综合实践能力。机器人技术与建筑钢筋施工的结合体现实验的前瞻应用性，视觉传感器检测钢筋等技术体现实验高阶性，机器人复杂运动控制编译具有挑战性，多任务人机协同操作训练和数字孪生技术的辅助教学对学生提升工程实践能力具有很好的促进作用。该模式符合智能建造行业发展需求，对新工科背景下土木工程专业实验教学改革、数字化实践教学平台建设具有重要的参考价值与推广意义。

参考文献

- [1] 蔡志昶, 蒋博雅, 崔小涵. 国内外高校土建类虚拟仿真教学现状与发展[J]. 华中建筑, 2026, 44(4): 161-166.

- [2] 胡健萍. 新技术视域下经管类跨专业虚拟仿真教学改革实践[J]. 科教导刊, 2026, (4): 55-58.
- [3] 温秀媛, 倪嘉, 陈良志. 虚拟仿真教学对学生学习兴趣与动机的影响研究[J]. 水上安全, 2025, (20): 13-15.
- [4] 李贺, 张敏, 文福安, 王世杰. 高校虚拟仿真教学实验室建设和应用评价指标体系研究[J]. 实验室研究与探索, 2026, 45(2): 194-200+234.
- [5] 唐晓鑫, 刘楚生, 丘宏岳. 以项目为导向的焊接实训课程教学模式改革探索[J]. 中国教育技术装备, 2026, (2): 160-163.
- [6] 黄緬, 宋春晓, 李丹. 虚拟仿真具身学习模型的构建与应用研究[J]. 浙江外国语学院学报, 2025, (6): 58-65.
- [7] 肖哲韬, 李龙, 刘建军. 数字化时代背景下虚拟仿真教学评价体系的构建与实践[J]. 数字通信世界, 2025, (1): 205-207+210.
- [8] 汪文才. 教育信息化背景下虚拟现实技术赋能教育教学策略研究[J]. 中国教育技术装备, 2024, (21): 36-38.
- [9] 张慧琴, 李中凯. 近十年我国高校虚拟仿真实验教学研究发展述评[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(8): 77-82+137.

基金项目: 辽宁科技大学 2025 年度实验教学改革项目“基于虚实融合的智能建造机器人实验教学模式探索与实践”（项目编号：PX-2125435）。

¹ **第 1 作者简介:** 费爱萍（1980-），女，博士研究生在读，副教授，研究方向：岩土工程、建筑材料。 E-mail: feiaiping@ustl.edu.cn。

* **通讯作者简介:** 王妍（1989-），女，博士，研究方向：土-结构动力相互作用研究、课程教学改革。 E-mail: wangyan123@ustl.edu.cn。