

基于3D打印的机械臂数字孪生教学系统开发

苏晓雅, 曹志隆, 唐 铄, 赵雨欣, 吴登宇, 张 俊*

浙大城市学院工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2026年7月7日; 录用日期: 2026年8月19日; 发布日期: 2026年8月31日

摘 要

在制造业数字化转型和智能制造课程建设背景下, 机械臂作为智能制造核心设备, 其教学实践面临实体设备成本高、维护难、抽象机理难以直观呈现等问题。本文基于数字孪生、增强现实(AR)、机器学习等技术, 开发了一套机械臂虚实交互实验教学系统。系统以四自由度机械臂为载体, 采用SolidWorks完成三维建模与模型轻量化, 基于Unity构建虚拟仿真与交互界面, 结合STM32主控、HTS-20L总线舵机、HC-05蓝牙通信和串口协议, 实现虚拟模型、移动端控制界面与实体机械臂之间的双向同步。在教学设计上, 系统围绕结构认知、运动学理解、控制调试和工程反思四类目标, 形成“结构认知-虚拟预演-实体验证-数据反馈”的实践教学流程, 将D-H运动学建模、正逆解计算、舵机控制和故障保护等内容转化为可观察、可操作、可复盘的学习任务。平台测试结果表明, 系统虚实同步延时为185 ms, 角度同步误差为1.5°, 舵机定位精度为 $\pm 0.1^\circ$, 故障保护响应时间小于50 ms, 能够满足机械臂基础实验教学需求。教学应用分析表明, 该系统可支持学生按照“观察模型-预测运动-虚拟调参-实体验证-误差分析”的路径完成实践任务, 对降低实体设备依赖和课堂操作风险具有一定应用价值, 可为智能制造相关课程的虚实融合实践教学提供参考。

关键词

机械臂, 数字孪生, 虚实交互, 3D打印, 实验教学系统, Unity3D

Development of a Robotic Arm Digital Twin Teaching System Based on 3D Printing

Xiaoya Su, Zhilong Cao, Shuo Tang, Yuxin Zhao, Dengyu Wu, Jun Zhang*

School of Engineering, Hangzhou City University, Hangzhou Zhejiang

Received: July 7, 2026; accepted: August 19, 2026; published: August 31, 2026

Abstract

Against the background of manufacturing digital transformation and smart manufacturing curriculum

*通讯作者。

文章引用: 苏晓雅, 曹志隆, 唐铄, 赵雨欣, 吴登宇, 张俊. 基于3D打印的机械臂数字孪生教学系统开发[J]. 创新教育研究, 2026, 14(8): 581-595. DOI: 10.12677/ces.2026.148640

development, robotic arms, as core equipment in intelligent manufacturing, face several teaching challenges, including high equipment costs, difficult maintenance, and limited visualization of abstract mechanisms. This paper describes the development of a virtual-physical interactive experimental teaching system for robotic arms, based on technologies such as digital twins, augmented reality (AR) and machine learning. The system utilizes a four-degree-of-freedom robotic arm as its platform. Three-dimensional modelling and model lightweighting were carried out using Solid-Works, whilst the virtual simulation and interactive interface were built using Unity. By integrating an STM32 microcontroller, HTS-20L bus servos, HC-05 Bluetooth communication and serial communication protocols, the system achieves bidirectional synchronisation between the virtual model, the mobile control interface and the physical robotic arm. In terms of instructional design, the system centres on four learning objectives: structural cognition, understanding of kinematics, control debugging and engineering reflection. It establishes a practical teaching workflow of “structural cognition-virtual simulation-physical verification-data feedback”, transforming concepts such as D-H kinematic modelling, forward and inverse solution calculations, servo control and fault protection into observable, operable and reviewable learning tasks. Platform testing results indicate that the system’s virtual-physical synchronisation latency is 185 ms, the angular synchronisation error is 1.5° , the servo positioning accuracy is $\pm 0.1^\circ$, and the fault protection response time is less than 50 ms, thereby meeting the requirements for basic robotic arm experimental teaching. An analysis of its educational application indicates that the system enables students to complete practical tasks by following the pathway of “observing the model-predicting motion-virtual parameter tuning-physical verification-error analysis”. It offers practical value in reducing reliance on physical equipment and mitigating operational risks in the classroom, and can serve as a reference for virtual-physical integrated practical teaching in courses related to intelligent manufacturing.

Keywords

Robotic Arm, Digital Twin, Virtual-Physical Interaction, 3D Printing, Experimental Teaching System, Unity3D

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着智能制造和新工科建设的推进，机械臂已成为机械工程、自动化和智能制造课程中连接理论知识与工程实践的重要载体[1]。机械臂实验通常涉及机构结构[2]、坐标变换、运动学求解、舵机控制和任务调试等综合内容，能够训练学生的系统思维和工程实践能力。然而，在实际教学中，实体机械臂数量有限、维护成本较高，初学者在参数整定和轨迹试错阶段容易造成机构碰撞、舵机过载或零部件磨损，导致教师在实验开放度和课堂安全之间难以平衡。

数字孪生技术通过构建物理对象在虚拟空间中的动态映射，为上述教学矛盾提供了新的解决思路[3]。若能够将机械臂的结构模型、关节变量、控制指令和反馈数据统一映射到虚拟端，学生即可先在虚拟环境中完成结构认知、路径预演、参数修正和风险排查，再由实体机械臂进行最终验证。该教学组织方式保留了实体实验的工程真实性，降低了试错阶段的硬件风险，并使抽象的运动学关系以可视化方式呈现。

围绕数字孪生与机器人实践教学，已有研究主要形成四类路径。第一类侧重机器人运动仿真和虚实同步映射，强调模型状态与实体状态的一致更新，为机械臂控制验证提供了技术基础[4]；第二类面向智

能装配或智能制造实践平台，关注产线、装配单元和多设备协同，能够增强工程真实性，但对单个教学型机械臂的低成本复现和课堂分组使用考虑不足[5] [6]；第三类面向工业机器人训练中心或远程多平台系统，通过 Unreal Engine、Unity、OPC UA 等技术构建工业机器人训练或远程操作环境，适合工业动作编程和产线训练，但系统成本、部署复杂度和课堂安全边界较高[7] [8]；第四类将 VR、Wi-Fi/UDP 或强化学习引入机械臂数字孪生，实现沉浸式遥操作、低延时同步或自适应控制，为前沿教学提供了新的技术方向[9]-[13]。这些研究表明，数字孪生技术已经能够支持机器人建模、同步、控制和训练，但在基础课程场景中，仍需要一种兼顾低成本实体、可解释运动学、移动端/AR 交互、安全保护和教学评价记录的轻量化平台。

Table 1. Comparison of functional focuses between related studies and this study

表 1. 相关研究与本研究的功能侧重点对比

研究类型	主要对象与实现	教学支撑重点	与本文的差异
机器人运动仿真与虚实同步 [4]	运动仿真、状态映射、同步控制	控制过程可视化与状态验证	偏重同步算法与运动仿真，课程任务和安全反馈设计较少
智能制造/装配教学平台 [5] [6]	装配单元、制造流程或机械臂	综合工程训练与产线认知	系统规模大，低成本分组复现和单臂运动学解释不够突出
工业机器人训练中心与远程平台 [7] [8]	6 轴工业机器人、远程多平台通信	工业动作编程、训练和产线应用	工业属性强，硬件门槛和部署复杂度较高
VR/低成本/智能控制平台 [9]-[11]	VR 遥操作、UDP/Wi-Fi 同步	沉浸交互、自适应控制	单项技术性能突出，但未系统覆盖 AR、保护、过程性评价
本文系统	增材制造、Unity、AR、蓝牙/串口反馈	结构与运动学认知、实体验证与数据复盘	面向基础实验教学整合低成本实体、双向同步、安全保护和评价记录

由表 1 可见，既有研究在工业动作训练、遥操作沉浸感或实时控制方面各有侧重，但往往难以同时满足基础课程所需的低成本复现、运动学可解释、安全试错和过程性评价。本文的研究定位不是替代高性能工业机器人数字孪生系统，而是在本科实验教学条件下构建一个可装配、可观察、可调试、可记录的轻量化数字孪生平台，使学生能够在低风险环境中完成从结构认知到任务复盘的完整学习链条。

基于上述目标，本文设计并应用了一套基于数字孪生的机械臂虚实同步实践教学系统。系统以四自由度机械臂为对象，构建实体机械臂、Unity 虚拟仿真界面、移动端交互和 AR 展示相结合的平台；在控制层面集成 D-H 运动学建模、正逆解计算、S 型加减速、PI 闭环校准和蓝牙/串口通信；在教学层面形成“结构认知 - 虚拟预演 - 实体验证 - 数据反馈”的任务流程。本文的贡献主要包括：1) 提出面向基础实验教学的低成本虚实同步架构，使 3D 打印实体、虚拟模型和移动端控制围绕同一组关节变量闭环运行；2) 将 D-H 参数、关节角、目标位姿和反馈误差嵌入交互过程，把抽象运动学和嵌入式控制内容转化为学生可观察、可调试的任务；3) 从同步精度、通信实时性、故障保护和抓取搬运任务四个方面验证系统的教学适用性，并提出可与传统教学对照的评价指标体系。

2. 系统总体框架设计

2.1. 总体架构设计

系统采用“实体机械臂 - 数字孪生模型 - 交互控制端 - 数据反馈端”的总体架构。实体端负责关节执行、状态采集和安全保护；虚拟端负责三维模型显示、运动预演和碰撞检查；交互端提供滑块控制、

蓝牙/串口通信和 AR 展示；数据反馈端记录关节角度、响应时间和运行状态。各模块围绕同一组关节变量进行映射，使学生能够在虚拟空间中观察运动趋势，并在实体平台上验证控制结果。

系统总体架构具体设计如图 1 所示。

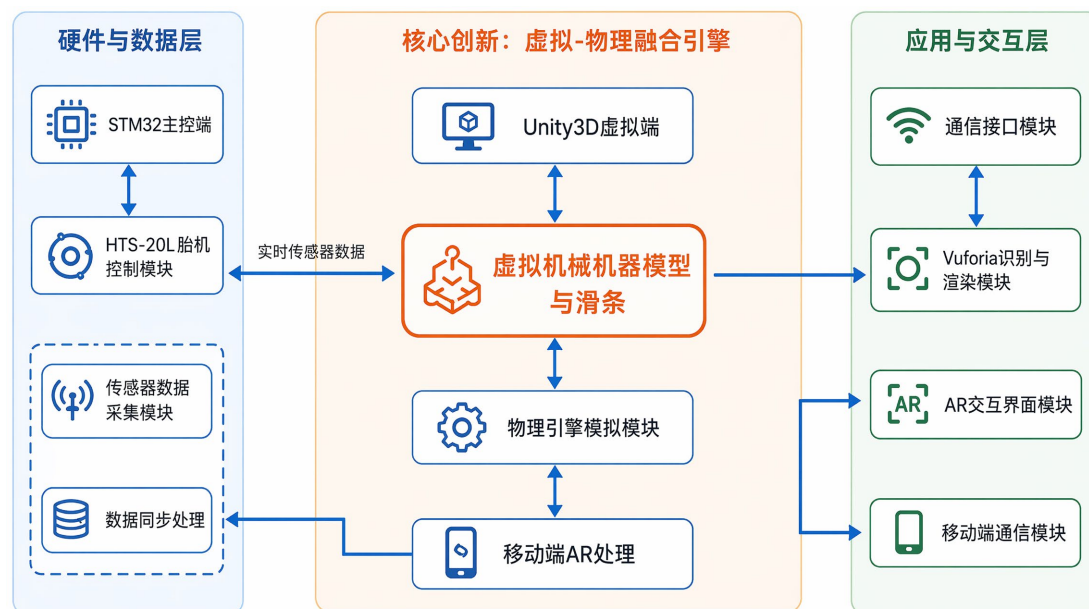


Figure 1. Overall system architecture

图 1. 系统总体架构

该架构的核心是把实体操作前的参数整定、轨迹规划和异常排查转移到虚拟端完成。学生首先在界面中设置目标关节角或末端位姿，系统根据 D-H 模型计算运动结果并进行可视化预演；确认路径可行后，控制指令经串口或蓝牙链路发送至主控板，驱动实体机械臂同步运动；实体端再将关节位置和运行状态反馈给虚拟端，用于界面更新和误差分析。该流程能够降低初始调试阶段的硬件风险，并增强抽象运动学知识的可观察性。

系统同步机制采用“指令下发 - 实体执行 - 状态回传 - 虚拟校正”的闭环流程。Unity 端/网页端首先根据用户输入或运动学求解结果生成目标指令；STM32 端完成 CRC 校验后执行速度规划与舵机驱动；实体端按固定周期回传当前状态；Unity 端/网页端根据反馈更新模型姿态并记录误差。该机制使虚拟模型不是单向动画，而是由实体状态持续修正的教学型数字孪生体。

围绕实践教学目标，系统将实验任务划分为四个层次：第一层为结构认知，学生通过三维模型和 AR 展示识别底座、连杆、关节和末端执行器的功能；第二层为运动学理解，学生调节关节角并观察末端位姿变化，建立关节空间与操作空间之间的联系；第三层为控制调试，学生通过虚拟端设置目标角度和运动路径，再观察实体机械臂反馈；第四层为综合应用，学生完成抓取搬运任务，并依据误差和延时数据分析系统性能。这种分层任务设计使系统不仅是演示工具，也成为连接理论讲授、虚拟实验和实体操作的教学载体。学生可以在低风险环境中先形成操作方案，再进入实体实验环节，从而把课堂时间更多用于问题分析、方案修正和工程反思。

2.2. 硬件架构设计

硬件设计遵循“结构清晰、成本可控、便于观察和维护”的原则。本体采用四自由度教学型机械臂

结构，底座负责水平旋转，两级连杆负责前后与上下运动，末端夹持机构用于完成抓取搬运任务。其硬件结构示意图如图 2 所示。连杆与底座采用 ABS 塑料 3D 打印，既能降低实验平台成本，又便于学生观察机构组成、装配关系和运动边界。与复杂工业机械臂相比，该结构牺牲了高负载和高精度工业性能，但更适合机械臂基础课程中的结构认知、运动学分析和控制调试训练。

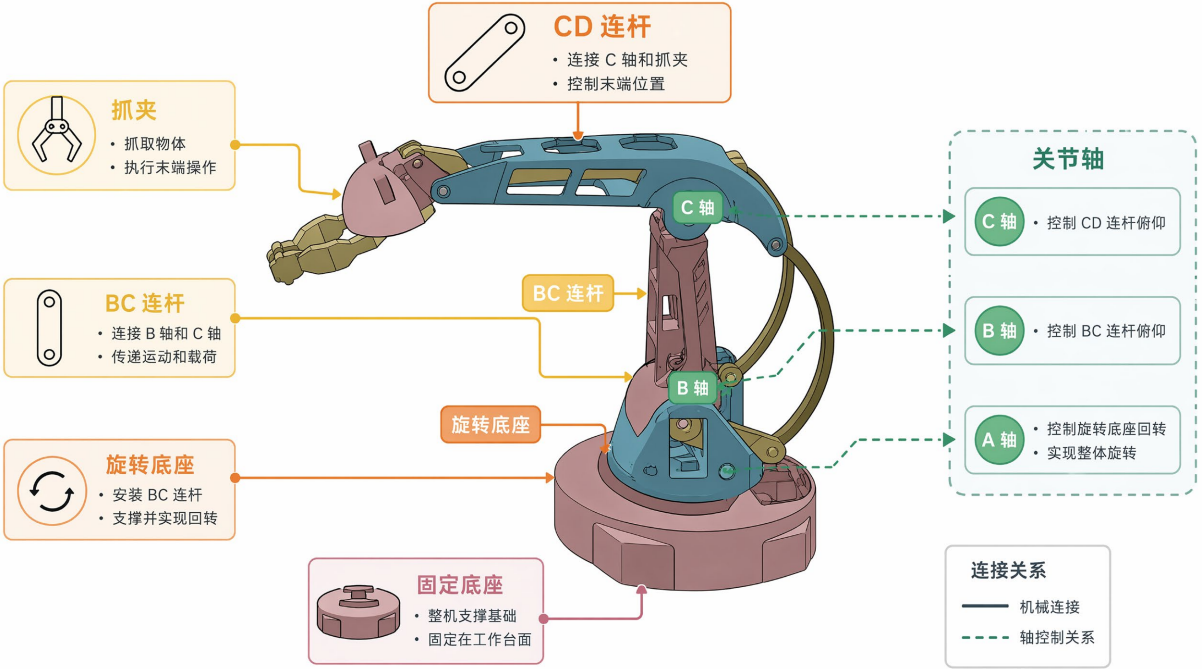


Figure 2. Schematic diagram of the hardware architecture
图 2. 硬件结构示意图

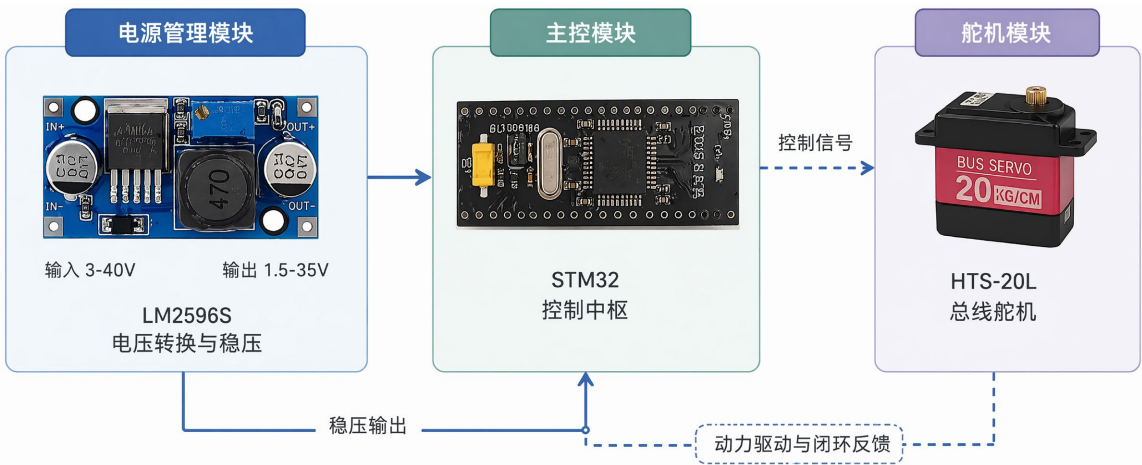


Figure 3. Control system module
图 3. 控制系统模块

控制核心选用 STM32 单片机模组，主要考虑其接口资源丰富、在线调试方便、课程迁移性较好，能够支撑学生理解嵌入式控制、舵机驱动和通信协议之间的关系。执行机构采用 HTS-20L 总线舵机，支持

角度反馈、半双工 UART 通信以及温度、过流保护，便于构建多关节同步控制和运行状态回传机制。电源模块采用 LM2596S-ADJ 稳压方案，为舵机和控制/传感模块分别提供稳定电压，并通过过流和热保护降低课堂实验中的硬件损坏风险。3D 打印结构件便于替换和二次设计，STM32、蓝牙/串口通信和总线舵机均属于常见教学硬件，有利于平台维护、分组复现和课程扩展。控制系统模块如图 3 所示。

2.3. 软件架构设计

软件系统围绕“实时控制、安全保护和过程可观察”展开。STM32 端基于 FreeRTOS 实现通信解析、运动控制、状态采集、保护和日志记录等任务的并行运行：通信任务负责接收虚拟端指令并完成帧校验；运动控制任务根据目标角度生成平滑速度曲线；状态采集任务周期性读取关节位置、电源参数和故障状态；安全保护任务在欠压、过流、过温或通信超时触发急停；日志记录任务保存关键指令与执行结果。

Unity 端/网页端承担虚拟模型驱动、交互界面显示和串口/蓝牙通信适配功能。通过控制帧和状态帧，虚拟端能够下发目标角度、速度和任务模式，实体端则回传电压、电流、故障信息和关节状态。该通信机制使虚拟模型避免停留在预设动画层面，而是能够根据实体反馈持续更新，从而支撑虚实同步教学。

2.4. 建模与开发工具

建模与开发工具的选择服务于三维建模、交互仿真、移动端发布和虚实通信四类需求。SolidWorks 用于机械臂零部件建模和装配检查，3ds Max 用于模型轻量化与格式转换，Unity 用于构建虚拟仿真界面和交互逻辑，Vuforia 用于实现 AR 展示，C#脚本负责滑块控制、数据解析和通信接口，STM32 与 HC-05 模块分别承担实体控制和无线通信功能。具体开发平台及工具功能如表 2 所示。

Table 2. Development platforms and tools
表 2. 开发平台及工具

开发平台及工具	功能
Unity	搭建虚拟仿真界面
Vuforia	实现 AR 模型展示与交互
Solidworks	机械臂三维建模、装配
3ds Max	模型优化、格式转换
C#	编写脚本，实现控制
Android NDK	搭建数据通信链路
STM32	实现舵机控制、数据采集
HC-05 蓝牙模块	无线通信

3. 系统开发与实现

3.1. 开发流程

系统开发遵循“模型构建 - 虚拟交互 - 通信控制 - 教学验证”的流程，开发流程架构如图 4 所示。模型构建阶段完成机械臂零件建模、装配关系检查和模型轻量化；虚拟交互阶段在 Unity 中建立关节层级、碰撞体、滑块控件和 AR 显示；通信控制阶段完成 C#脚本、串口协议、STM32 舵机驱动和状态反馈程序；教学验证阶段则通过单关节、多关节和抓取搬运任务检验系统对课程实验的支撑能力。这一开发流程与课程学习路径相对应。

在系统联调阶段，虚拟端和实体端采用统一的关节角度定义与通信帧格式。虚拟端负责下发目标角度、速度和任务模式，STM32 端完成 CRC 校验、运动规划和舵机执行，并按固定周期返回当前角度、电源状态和故障标志。通过这种双向数据流，系统可以实现模型显示、实体运动和教学反馈的一致更新。

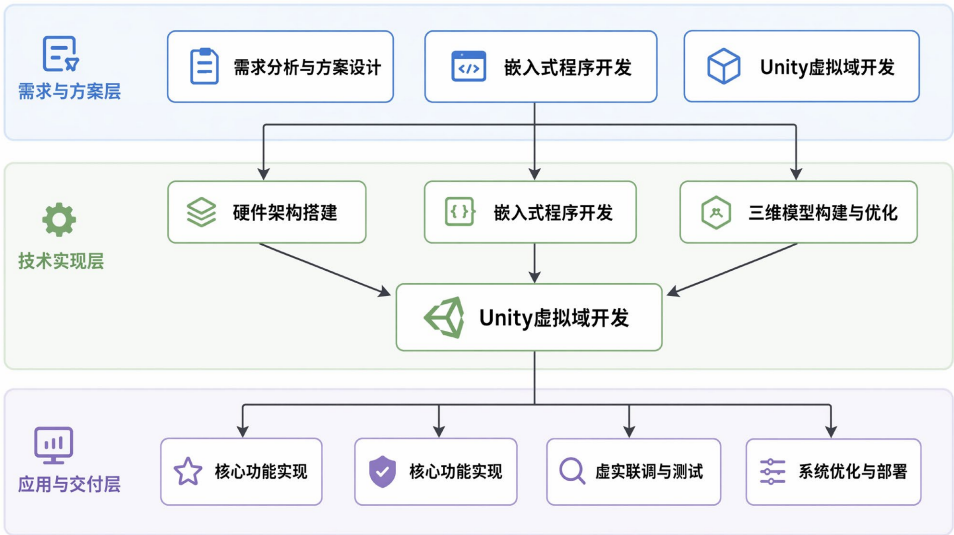


Figure 4. Development process architecture
图 4. 开发流程架构

3.2. 机械臂建模与算法实现

3.2.1. 三维建模与模型优化

机械臂三维模型的搭建从零件图开始，包括固定底座、旋转底座、两根连杆、末端执行器、连杆连接件以及小型连接件。建模过程中先完成单个零件绘制，再依次组装并检查各部分相对运动，最后测试整体稳定性与运动流畅性。三维建模及装配如图 5 所示。

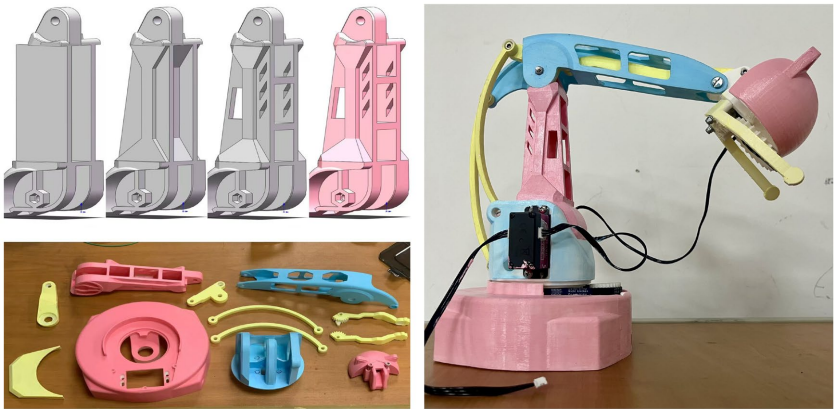


Figure 5. 3D modelling and assembly
图 5. 三维建模与实物装配

3.2.2. 正逆解算法实现

正运动学计算以各关节转角为输入，通过 D-H 建模与齐次变换获得末端执行器在基坐标系下的位置

和姿态；逆运动学计算则以目标位姿为输入，在关节极限范围内搜索可执行的关节角组合。为便于学生复现实验，系统在界面和实验记录中统一使用底座、主臂、前臂和末端夹爪四个关节变量，并将目标角、反馈角、执行时间和异常标志作为每次任务的基本记录项。

Table 3. D-H parameter table
表 3. D-H 参数表

关节	θ_i	d_i	a_i	变量范围
底座旋转关节	θ_1	L_1	0	$0^\circ \sim 180^\circ$
主臂俯仰关节	θ_2	0	L_2	$0^\circ \sim 80^\circ$
前臂俯仰关节	θ_3	0	L_3	$99.9^\circ \sim 155.9^\circ$
末端夹爪/执行器	θ_4	0	L_4	$0^\circ \sim 37.5^\circ$

如表 3 所示， θ_i 为第 i 个关节转角， d_i 为沿 z_i 轴的偏距， a_i 为沿 x_i 轴的连杆长度。系统根据表中参数建立齐次变换矩阵，并计算末端执行器相对于基坐标系的位置与姿态。

在教学实现中，D-H 模型不仅承担计算功能，也承担解释功能。具体流程如图 6 所示，系统将各关节坐标系、连杆长度和关节转角对应到 Unity 模型节点，使学生在调节单个关节时能够同步观察坐标变换结果，并理解关节空间与操作空间之间的映射关系。当逆解结果超出机械结构约束时，系统不直接下发控制指令，而是引导学生回到虚拟端修正目标位姿，从而把算法约束转化为可讨论的教学问题。

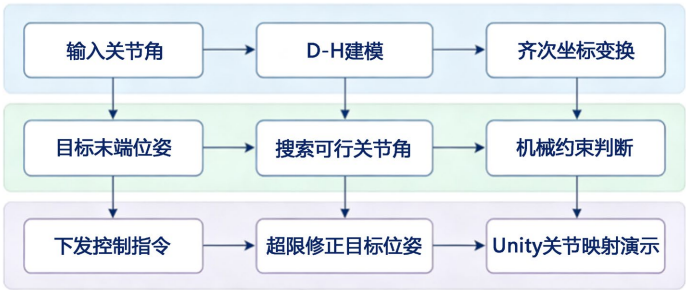


Figure 6. Implementation process of forward and inverse solution algorithm
图 6. 正逆解算法实现

3.2.3. 舵机控制算法实现

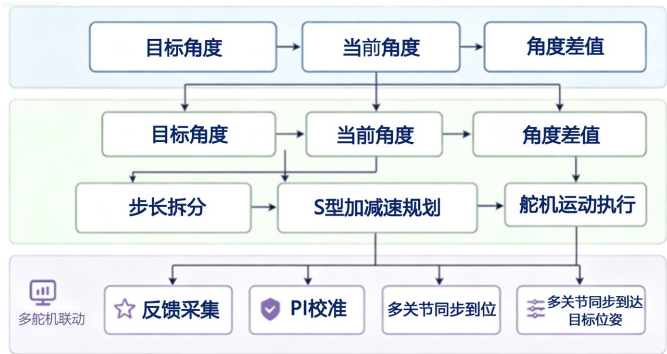


Figure 7. Implementation process of servo control algorithm
图 7. 舵机控制算法实现

舵机控制算法的重点在于降低突变指令带来的机械冲击并保证多关节运动的协调性。根据图7，系统先将目标角度与当前角度之间的差值分解为若干小步，再按照S型加减速曲线完成加速、匀速和减速控制。

S型加减速通过设初始角为 θ_0 ，目标角为 θ_t ，规划总时间为 T ，归一化时间 $s=t/T$ 。为使关节运动在起点和终点处速度、加速度平滑变化，采用五次多项式S型插值函数：

$$f(s) = 10s^3 - 15s^4 + 6s^5 \quad 0 \leq s \leq 1 \quad (1)$$

根据初始关节角和目标关节角，可得到任意时刻的期望关节角：

$$\theta_d(t) = \theta_0 + (\theta_t - \theta_0)f(s) \quad (2)$$

对期望关节角进行一阶求导，可得到期望角速度：

$$\omega_d(t) = \frac{d\theta_d(t)}{dt} = \frac{\theta_t - \theta_0}{T} (30s^2 - 60s^3 + 30s^4) \quad (3)$$

其中， θ_0 为初始关节角， θ_t 为目标关节角， T 为规划总时间， $\theta_d(t)$ 、 $\omega_d(t)$ 分别为期望角度、期望角速度。

当反馈角度与目标角度存在偏差时，PI校准模块根据误差大小动态调整速度或补偿量。在闭环控制中，首先根据期望角度与舵机反馈角度计算当前控制误差：

$$e(k) = \theta_d(k) - \theta_f(k) \quad (4)$$

为消除长期存在的稳态偏差，对误差进行离散积分：

$$I(k) = I(k-1) + e(k)\Delta t \quad (5)$$

PI控制器根据比例项和积分项计算角度补偿量：

$$u(k) = K_p e(k) + K_i I(k) \quad (6)$$

最终将补偿量叠加到期望角度上，得到下发给舵机的控制角度：

$$\theta_c(k) = \theta_d(k) + u(k) \quad (7)$$

其中， $\theta_f(k)$ 为第 k 个控制周期读取到的舵机反馈角， $e(k)$ 为角度误差， $I(k)$ 为误差积分项， Δt 为控制周期， K_p 和 K_i 分别为比例系数和积分系数， $u(k)$ 为控制补偿量， $\theta_c(k)$ 为最终下发给舵机的控制角度。

多舵机联动时，系统以最长运动轴为时间基准，对其他关节速度进行归一化处理，使各关节尽量同步到位。通过这些控制策略，学生能够观察速度规划、反馈校准和协同运动对机械臂动作平稳性的影响。

3.2.4. 蓝牙通信与远程控制

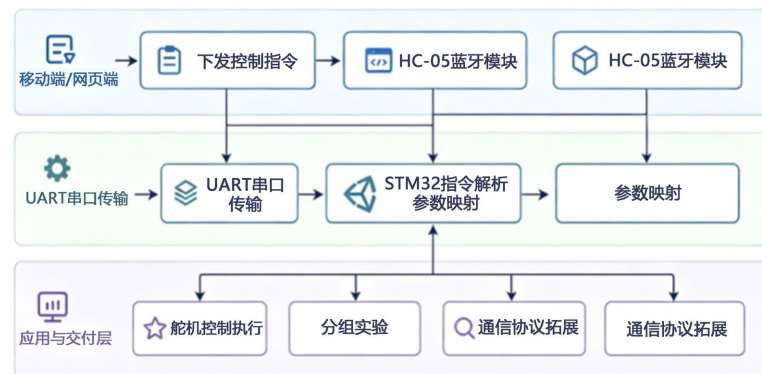


Figure 8. Bluetooth remote control

图8. 蓝牙通信远程控制

蓝牙通信模块用于支持移动端远程控制和课堂分组实验。由图 8 可见，系统采用 HC-05 模块通过 UART 与 STM32 连接，移动端或网页端发送的关节控制指令经串口解析后映射为目标角度和速度参数。

具体通信协议帧格式如表 4 所示。控制端发送目标关节角、速度和任务模式，STM32 端完成帧头识别、长度判断和校验后执行控制指令；实体端按固定周期回传当前关节角、电源状态和故障标志。该帧格式便于学生理解串口通信中“指令-执行-反馈”的闭环关系。该设计降低学生接触底层硬件接线和串口调试的门槛，并保留通信协议、数据帧和异常处理等可供拓展学习的内容。

Table 4. Frame format for robotic arm communication protocols
表 4. 机械臂通信协议帧格式

字段	字节数	示例值	含义
帧头	2	170 (0xAA)	标识一帧数据开始
命令字	1	1 (0x01)	控制类型，如角度控制、状态读取、急停等
数据长度	1	N	数据区字节数
数据区	N	$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, v, mode$	目标角度、速度、模式或状态反馈数据
帧尾	1	13/10 (0x0D/0x0A)	标识一帧数据结束

3.3. VR 与 AR 功能实现

3.3.1. VR 虚拟场景搭建

机械臂模型由 3ds Max 导出为 FBX 格式，导入 Unity 后调整材质、缩放与光照设置，并验证关节运动与碰撞体。控制界面采用灰色背景，滑块映射 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 关节角度，支持动态反馈；登录系统通过账号密码验证保障操作安全。系统登录界面如图 9 所示。

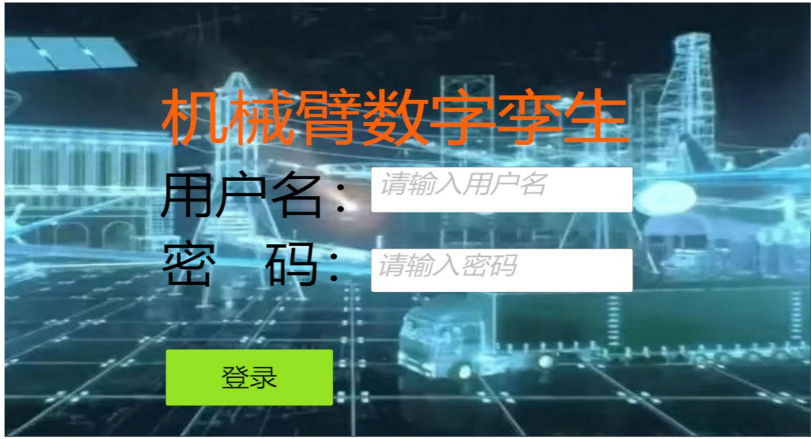


Figure 9. System login screen
图 9. 系统登录界面

3.3.2. AR 功能实现

通过集成 Vuforia 插件，配置 AR Camera 并绑定许可证，可实现对图像目标的识别与跟踪。将 3D 模型挂载至识别图下，发布为 Android 应用后，可在手机端实时叠加显示虚拟机械臂模型。AR 功能实现及效果如图 10 所示。



Figure 10. Implementation and effects of AR features
图 10. AR 功能实现及效果

3.4. 移动端界面与系统发布

移动端界面设置开始、退出、关节调节和状态显示等功能入口，便于学生在实验过程中快速完成任务选择和参数调整。系统开发完成后，可在 Unity 中配置 SDK、NDK 和 JDK 路径并生成 Android 安装包，实现移动端部署。该界面主要承担教学操作入口和运行状态提示功能，避免学生直接接触底层通信指令。

教学系统界面及参数控制如图 11 所示。在课程实施时，教师可将平台嵌入“课前预习 - 课堂实验 - 课后复盘”的教学流程。课前，学生通过模型截图、关节示意图或简短视频了解机械臂结构和坐标系；课堂中，学生分组完成单关节调节、多关节联动、路径预演和抓取搬运任务，并在每一步记录目标角、反馈角、动作现象和异常提示；课后，学生依据系统日志和实验记录撰写误差分析，说明虚拟预演与实体验证之间的差异。该流程能够把有限课堂时间从重复试错转向问题解释和方案修正。

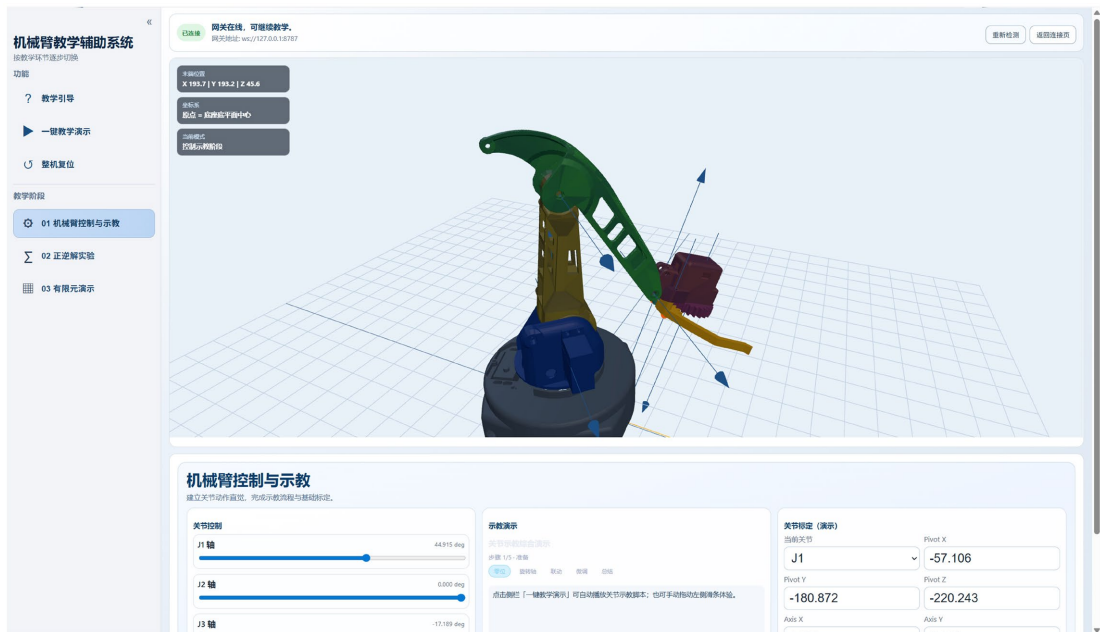


Figure 11. Teaching system interface and parameter control
图 11. 教学系统界面及参数控制

4. 系统测试与结果分析

为验证系统的虚实同步能力和实践教学适用性,从单关节控制、多关节联动、抓取搬运、通信实时性、故障保护和教学任务支撑六个方面开展测试。测试过程中,虚拟端下发目标关节角或任务序列,实体端执行相应动作,并记录关节反馈、响应时间和任务完成情况。测试重点不在于追求工业级极限性能,而在于判断系统能否支撑学生完成结构认知、运动学分析、控制调试和综合任务验证。

测试指标分为技术性能、任务完成和教学反馈三个层面。技术性能指标包括同步精度、虚实同步延时、舵机定位精度和故障保护响应时间,用于判断系统是否具备课堂操作的稳定基础;任务完成指标包括单关节目标角跟随、多关节协同到位、抓取搬运完成情况和异常状态记录,用于判断平台能否支撑学生完成由易到难的实践任务;教学反馈指标包括结构识别、D-H 参数理解、路径预演质量、误差解释和实验报告反思,用于判断系统是否能够将操作过程转化为可评价的学习证据。上述指标共同对应“看得懂、调得动、能验证、可复盘”的教学需求。

在已有条件下,本文首先验证平台可用性和任务支撑性。后续课堂应用中,可采用实验对照方式进一步验证教学效果:对照组采用传统“理论讲授-实体操作-实验报告”流程,实验组在相同实体任务前增加数字孪生预演、碰撞/超限排查和数据反馈复盘;评价内容可包括结构识别前后测、D-H 运动学计算题、路径规划任务评分、抓取搬运完成率、故障排查记录与自我效能感问卷。通过对照有效区分系统技术性能、教学过程改进和学生学习结果之间的关系,避免把设备功能达标直接等同于学习效果提升。

实验流程分为三步。首先,将虚拟模型与实体机械臂置于相同初始姿态,并校准关节零点;其次,分别进行单关节目标角测试、多关节协调测试和抓取搬运测试,每类任务重复执行多次;最后,记录虚拟端目标值、实体端反馈值、动作开始时间、动作完成时间和异常状态,据此分析同步误差与响应延时。

4.1. 单关节与多关节同步测试

单关节测试主要考察目标角度跟随能力。实验分别选取底座、主臂、前臂和末端夹爪作为测试对象,设置若干典型目标角,并在虚拟模型与实体机械臂零点校准后记录虚拟端显示角度、实体端反馈角度和动作完成时间。每个关节分别设置若干典型目标角,系统记录虚拟端目标角、实体端反馈角和动作完成时间。角度同步误差按 $|\theta_{\text{target}} - \theta_{\text{feedback}}|$ 计算,取多次测试中的最大值或平均值作为评价结果。舵机定位精度依据舵机反馈角在稳定状态下的最小可分辨变化量和重复定位偏差进行判断。结果表明,各关节均能稳定到达目标位置,角度同步误差为 1.5° ,满足小于 2° 的设计指标;在闭环校准条件下,舵机最终定位精度达到 $\pm 0.1^\circ$ 。其中, 1.5° 反映虚拟端目标角与实体端反馈角之间的同步偏差, $\pm 0.1^\circ$ 反映舵机在校准条件下的最终定位分辨能力,两者对应的测试口径不同。误差主要来自机械间隙、舵机个体差异和低成本结构件的装配误差。由于误差量级低于课堂观察和基础轨迹训练所需精度,系统能够满足教学演示和基础控制实验需求。

多关节联动测试进一步检验了同步到位策略。实验中,系统根据各关节目标角差值计算运动时间,并以最长运动轴作为基准调整其他舵机速度。与各关节独立控制相比,该策略能够减少关节先后到位导致的末端姿态突变,使机械臂在抬升、旋转和夹取过程中保持较连贯的运动轨迹。

4.2. 实时性与通信稳定性测试

实时性测试包括虚实同步延时和故障保护响应时间两类指标。

测试结果显示,系统虚实同步延时为 185 ms ,低于 200 ms 设计指标;故障保护响应时间小于 50 ms ,能够在欠压、过流、过温及无法通信等异常情况下及时进入保护状态。该延时水平虽不追求工业级高速闭环控制,但足以支撑课堂中的关节调节、路径预演和基础抓取任务。与需要头戴式 VR 设备或复杂工

业通信环境的同类平台相比，本系统采用移动端、蓝牙/串口和 STM32 控制链路，部署门槛较低，更适合分组实验和设备重复使用场景。

4.3. 抓取搬运与教学应用验证

抓取搬运测试用于验证系统在综合实践任务中的可用性。实验对象选择橡皮等小型物体，以增大接触摩擦并降低掉落风险。学生先在虚拟端设置目标位姿和运动路径，观察末端执行器是否能够到达目标区域，再将确认后的控制指令发送至实体机械臂。测试结果显示，系统能够完成夹持、抬升、转移和释放等动作。该任务把机构认知、关节控制、路径规划和误差分析整合到同一实验过程中，有助于学生从单一操作训练过渡到完整工程任务。

从教学实施角度看，抓取搬运任务可进一步拆分为四个评价点：目标位姿是否设定合理，虚拟预演是否发现潜在碰撞或超限问题，实体执行是否完成夹持和转移动作，实验记录是否能够解释目标值与反馈值之间的偏差。该评价方式把“能否完成动作”扩展为“能否解释动作”，更符合实践教学对过程性学习的要求。

4.4. 测试结果小结

Table 5. Key system performance test results
表 5. 系统关键性能测试结果

测试项目	设计指标	测试结果	评价
虚实同步延时	$\leq 200\text{ ms}$	185 ms	达标
角度同步误差	$< 2^\circ$	1.5°	达标
舵机定位精度	$\pm 0.1^\circ$	$\pm 0.1^\circ$	达标
故障保护响应时间	$< 50\text{ ms}$	$< 50\text{ ms}$	达标
课堂部署与维护适用性	低成本、易复现	3D 打印结构、STM32 控制和蓝牙/串口通信	适合基础实验教学

综合测试结果表明，系统能够在低成本硬件条件下实现较稳定的虚实同步和教学交互。表 5 中的关键指标均达到教学实验设计要求，说明系统不仅可用于结构展示和课堂演示，也可支撑基础运动控制、轨迹规划和综合抓取实验。该结果进一步从性能达标和功能覆盖两个角度呈现系统证据：在技术性能上，185 ms 同步延时、 1.5° 角度同步误差和小于 50 ms 故障保护响应均满足设计阈值；在教学功能上，系统同时覆盖低成本实体、双向同步、AR/移动交互、运动学可解释、安全保护和任务评价。与传统实体优先的调试方式相比，该系统能够把部分高频试错、碰撞风险和参数修正转移到虚拟端，并把目标角、反馈角、延时和异常状态转化为可记录的学习证据。此测试结果主要验证平台性能和课堂适用性，教育效果仍需结合后续班级对照数据进行判断。

5. 讨论

系统的教育价值在于把机械臂实践教学中的“看不见、试错多、风险高”问题转化为“可观察、可预演、可验证”的学习过程。不同于单纯的三维动画演示，系统通过共享关节变量、通信协议和反馈数据，使虚拟模型与实体机械臂形成可操作的教学闭环。从学习活动看，学生不再只是按照教师给出的固定步骤操作设备，而是需要先在虚拟端预测运动结果、修正参数，再在实体端验证方案并解释误差。这种任务结构接近工程实践中的“建模 - 仿真 - 验证 - 改进”过程，有助于引导学生开展问题分析和系统调试；教师则可以把有限的实体设备更多用于关键验证环节，提高实验组织的灵活性。

与工业级数字孪生系统相比,平台更强调低成本、易部署和教学可解释性。因此,系统评价并不以高负载、高速度或复杂扰动下的工业控制性能为主要目标,而是关注其能否支撑机械臂课程中的结构认知、运动学理解、控制调试和综合实践任务。同步延时、角度误差和故障保护响应时间说明系统具备课堂应用的技术基础;分层任务流程则说明其能够服务于机械臂课程的教学组织。该边界设定有助于避免把教学型平台与工业级控制系统进行不恰当比较,也为后续围绕学习效果开展实证研究留下空间。

为增强后续研究的教育实证性,可从过程性评价和结果性评价两方面完善证据链。过程性评价可记录学生在虚拟预演、参数修正、实体执行和误差分析中的操作过程,例如碰撞预警次数、参数修改次数、任务完成时间和故障触发情况;结果性评价可采用实验报告、任务评分量表、前后测题目和学习体验问卷,分别考察学生的结构识别能力、运动学理解、控制调试能力和工程反思能力。当教学数据与系统日志相互印证时,可以更有力地说明平台对学习成效的影响。

6. 面向工业机器人课程的衔接路径与局限

从课程体系看,本系统可作为工业机器人课程的前置训练平台。基础阶段可用于讲解机械臂结构、关节坐标系、D-H 参数和正逆运动学,使学生在低成本实体上建立“模型-参数-运动”的基本认识;进阶阶段可将系统任务扩展为轨迹规划、速度曲线设计、串口/总线通信和故障保护,使学生理解控制指令如何从虚拟端转化为实体动作;综合阶段可衔接 ABB、FANUC 或 KUKA 等工业机器人实训,把本系统中的关节空间、坐标变换、点位示教和安全边界概念迁移到工业机器人离线编程与现场调试中。

具体实施时,可采用“教学型平台-工业仿真软件-真实工业机器人”三级衔接路径。首先,学生在 3D 打印机械臂平台上完成结构拆装、零点校准和基础抓取任务;其次,在 RobotStudio、RoboDK 或企业虚拟仿真平台中完成工业机器人点位示教、轨迹规划和工作站布局;最后,在真实工业机器人设备上进行低频、安全边界明确的验证操作。该路径能够把高风险、高成本的工业机器人训练拆解为可重复、可观察和可评价的学习活动,降低学生首次接触工业设备时的认知负荷和操作风险。

同时,本系统与工业机器人课程之间仍存在明显差距。其一,四自由度教学臂无法覆盖六轴工业机器人的完整姿态控制、奇异位形分析和复杂轨迹规划;其二,3D 打印结构和总线舵机的负载、刚度、重复定位精度与工业机器人存在数量级差异,不能用于工业性能评价;其三,当前平台尚未接入工业现场常见的 PLC、现场总线、视觉检测和安全围栏等要素。因此,本文系统更适合作为工业机器人学习的入门桥梁和低风险预训练平台,后续仍需通过工业协议接口、多传感器数据、离线编程软件互联和真实课堂对照研究来提升其课程衔接深度。

7. 结论

面向机械臂实践教学中的设备成本、操作风险和机理可视化不足等问题,本文设计并应用了一套基于数字孪生的机械臂虚实同步实践教学系统。研究围绕平台设计、教学活动组织和应用验证三个问题展开。在平台设计方面,系统以四自由度 3D 打印机械臂为实体对象,集成三维建模、Unity 虚拟仿真、STM32 嵌入式控制、蓝牙/串口通信、AR 展示和运动学算法,实现虚拟模型、控制端和实体机械臂之间的双向同步。在教学活动组织方面,系统形成了“结构认知-虚拟预演-实体验证-数据反馈”的教学流程,支持学生完成模型观察、运动预测、虚拟调参、实体验证和误差分析等实践活动。在应用验证方面,测试结果表明,系统虚实同步延时为 185 ms,角度同步误差为 1.5°,舵机定位精度为 $\pm 0.1^\circ$,故障保护响应时间小于 50 ms,均达到教学实验设计指标。与既有研究相比,本文的价值不在于单一工业性能指标最优,而在于面向基础实验教学整合低成本实体、运动学可解释、AR/移动交互、安全保护和过程性评价记录,为学生进入工业机器人课程和智能制造实践训练提供了可迁移的入门平台。由于当前研究尚未

开展班级规模学习成效对照实验, 结论主要限于平台设计、系统性能、部署适用性和课程任务支撑能力, 后续可结合课堂样本、量表和学习过程数据进一步验证其教学效果。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目(202513021021, 202613021020); 浙江省高校实验室工作研究项目(YB202644); 工程学院八期本科教育教学改革项目(GC8-07)。

参考文献

- [1] 刘振宇, 孙嘉诚, 裘迪, 等. 面向产品设计的数字孪生技术研究综述与展望[J/OL]. 机械工程学报: 1-13. <https://link.cnki.net/urlid/11.2187.TH.20260331.1642.030>, 2026-07-22.
- [2] 张恒端. 数字孪生技术在机械装备设计中的轻量化应用策略探讨[J]. 中国设备工程, 2025(23): 69-71.
- [3] 冯毅萍, 赵久强, 潘戈. 智能制造基础理论与创新实践案例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2024.
- [4] 牛进鑫, 孙文磊, 刘国良, 等. 基于数字孪生驱动的机器人运动仿真与状态虚实同步映射研究[J]. 现代制造工程, 2024(5): 48-55.
- [5] 李其朋, 黄鹏举, 徐弼军, 等. 基于数字孪生的智能制造实践教学平台设计与开发[J]. 实验室研究与探索, 2025, 44(12): 105-112, 123.
- [6] 林润泽, 王行健, 冯毅萍, 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.
- [7] Erdei, T.I., Krakó, R. and Husi, G. (2022) Design of a Digital Twin Training Centre for an Industrial Robot Arm. *Applied Sciences*, **12**, Article 8862. <https://doi.org/10.3390/app12178862>
- [8] Lu, D., He, Y., Wang, Y. and Yang, L. (2024) Remote Multiplatform Robot Arm Digital Twin System Based on OPC UA and Unity Engine. *Ninth International Symposium on Sensors, Mechatronics, and Automation System (ISSMAS 2023)*, Nanjing, 11-13 August 2023, 764-770. <https://doi.org/10.1117/12.3014896>
- [9] Gallego, J. and Vallverdú, F. (2025) Low-Cost Digital-Twin VR Teleoperation of a 3D-Printed Robotic Arm for STEM Education. *2025 11th International Conference on Virtual Reality (ICVR)*, Wageningen, 9-11 July 2025, 351-356. <https://doi.org/10.1109/icvr66534.2025.11172534>
- [10] Sheshu, P.S.A., Tejash, N., Nishok, N.D. and Nareshbabu, G. (2026) Digital Twin-Based Interactive Robotic Arm System for Skill Training New Joinees. *International Conference on Intelligent Systems for a Sustainable Future (ISSF 2026)*, 12-13 March 2026, 472-485. https://doi.org/10.2991/978-94-6239-693-7_46
- [11] Ali, M., Giri, S., Yang, Q. and Liu, S. (2025) Digital Twin-Enabled Real-Time Control for Robot Arm-Based Manufacturing via Reinforcement Learning. *Journal of Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s10845-025-02728-9>
- [12] Pavalkis, S. and Otte, M. (2025) Accelerating Digital Engineering Adoption: A Comprehensive Example Using MBSE and Digital Twin with a Portable Robotic Arm. *INSIGHT*, **28**, 67-71. <https://doi.org/10.1002/inst.70007>
- [13] 淮文博. 面向机械臂设计与制造的基础工程训练教学模式研究与实践[J]. 黑龙江教育(理论与实践), 2025(4): 61-65.