

学习画像驱动下《机器人学》课程虚实融合项目化教学模式构建与实践

胡 峰

长江师范学院机器人工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年7月20日; 录用日期: 2026年8月21日; 发布日期: 2026年8月31日

摘 要

针对《机器人学》课程教学中理论内容抽象、实践环节碎片化、学生能力差异较大以及评价方式单一等问题, 本文提出学习画像驱动的虚实融合项目化教学模式。该模式以学习过程数据为基础, 从知识掌握、运动学建模、仿真实现、实物调试、项目协作和工程表达等维度构建学习画像, 并将画像结果用于学情诊断、任务设计、分层指导和能力评价。实践表明, 该模式有助于提升学生理论迁移、工程实践、团队协作和持续改进能力, 为《机器人学》课程教学改革提供了参考。

关键词

学习画像, 《机器人学》, 虚实融合, 项目化教学, 教学改革, 能力达成评价

Development and Implementation of a Learning Profile-Driven Virtual-Physical Integrated Project-Based Teaching Model for the *Robotics Course*

Feng Hu

School of Robotics Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing

Received: July 20, 2026; accepted: August 21, 2026; published: August 31, 2026

Abstract

To address the challenges of abstract theoretical content, fragmented practical training, hetero-

geneous student competencies, and limited evaluation approaches in the teaching of the *Robotics Course*, this study develops a learning profile-driven virtual-physical integrated project-based teaching model. Drawing on students' learning process data, the proposed model constructs multi-dimensional learning profiles covering knowledge mastery, kinematic modeling, simulation implementation, physical robot debugging, project collaboration, and engineering communication. The profiling results were then used for learning progress diagnosis, task design, differentiated instruction, and competency assessment. Practice has shown that this model helps improve students' abilities in theoretical transfer, engineering practice, teamwork, and continuous improvement, providing a reference for the teaching reform of the *Robotics Course*.

Keywords

Learning Profile, *Robotics Course*, Virtual-Physical Integration, Project-Based Teaching, Teaching Reform, Competency Attainment Evaluation

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、人工智能、工业互联网和机器人技术的深度融合，机器人系统正由传统自动化装备向集感知、建模、规划、控制和执行于一体的智能系统演进。相关岗位对人才能力的要求也由单一设备操作转向系统建模、算法实现、平台调试、工程集成和复杂任务解决。已有研究指出，未来工程人才培养应更加重视系统思维、实践能力和持续学习能力[1][2]。

《机器人学》是机器人工程、自动化、机械电子工程、智能制造工程和工业机器人技术等专业的核心课程，具有理论综合性强、数学抽象程度高和工程实践要求高等特点。课程内容涵盖位姿描述、坐标变换、运动学建模、轨迹规划、动力学分析和控制方法等知识。相关经典研究和教材普遍将建模、规划和控制作为机器人学课程的核心知识体系，强调机器人系统分析需要从数学模型、运动规划、动力学分析和控制实现等方面整体展开[3]-[5]。这说明《机器人学》课程并非单一理论课程，而是典型的多学科交叉、强实践导向和系统集成型课程。

国内关于机器人课程教学改革的研究表明，课程教学正在从单一课堂讲授转向线上线下融合、虚拟仿真支撑和实践能力导向。线上教学平台有助于突破教学时空、资源共享和自主学习方面的限制[6]；虚拟仿真实验能够提高实验教学的可重复性和安全性[7][8]。这些研究为《机器人学》课程改革提供了重要基础，但如何将学习诊断、虚实融合和项目任务有机贯通，仍需进一步探索。

然而，从实际教学情况看，《机器人学》课程仍存在理论内容抽象、知识应用困难、实践环节碎片化和评价方式单一等问题。部分学生在坐标变换、D-H 参数、雅可比矩阵和动力学方程等内容学习中，容易出现“概念能理解、模型不会建，公式能记忆、任务不会用”的情况。实践教学中，部分实验仍以验证性任务为主，难以形成完整工程训练；评价方式也偏重结果，缺少对学习过程和能力变化的持续诊断。

项目化教学为破解上述问题提供了有效路径。已有研究认为，项目化学习强调学生围绕真实问题开展持续探究，在完成项目任务过程中实现知识理解、问题解决和能力发展[9]。工程教育领域相关研究也表明，主动学习能够有效促进学生参与、理解和知识保持[10][11]。因此，将项目任务引入《机器人学》课程，有助于推动学生从知识接受转向任务实践。

体验式学习强调通过具体经验、反思观察、抽象概念化和主动实践促进知识内化，为《机器人学》

课程构建虚实衔接的实践教学路径提供了理论依据。机器人实物设备通常存在数量有限、维护成本高、调试风险大和课时受限等问题,仅依靠实物实验难以满足学生反复训练的需要。借助 ROS、Gazebo、RobotStudio 等平台,学生可以先在虚拟环境中完成模型验证和算法调试,再迁移到实物系统开展工程验证,从而降低学习门槛并提高实践效率[12] [13]。

与此同时,学习画像和学习分析为课程评价改革提供了新的方法支撑。已有研究指出,学习分析应关注学习过程数据、分析模型、技术工具和教育应用之间的关系[14]。基于课堂互动、在线学习、实验记录、项目文档和成果汇报等数据构建学习画像,有助于教师及时识别学生短板,开展分层指导和精准反馈[15]。

基于上述分析,本文以《机器人学》课程为研究对象,围绕学习画像驱动、虚实融合和项目化教学三个关键环节,构建面向工程能力培养的课程教学模式。该模式以典型机器人工程任务为载体,重构递进式教学内容,形成案例导入、理论支撑、虚拟仿真、实物调试、项目展示和评价反馈相衔接的教学过程。

2. 《机器人学》课程教学现状与问题分析

2.1. 理论内容抽象,知识理解与迁移应用存在断点

《机器人学》课程涵盖空间位姿描述、坐标变换、D-H 参数法、正逆运动学、雅可比矩阵、轨迹规划、动力学建模和控制方法等内容,具有较强的数学性、空间性和系统性。课程不仅要求学生掌握基本概念和计算方法,还要求学生能够将理论知识转化为机器人系统分析和工程任务实现能力。

但在实际教学中,部分学生对数学模型与机器人实际运动之间的对应关系理解不够深入,容易出现“公式会记忆、模型不会建,概念能理解、任务不会用”的问题。尤其在运动学建模、逆运动学求解和轨迹规划等环节,学生往往能够按示例完成计算,却难以面对新的机器人构型或实际任务独立分析,知识迁移和工程应用能力不足。

2.2. 实践教学环节分散,工程任务牵引作用不足

机器人学课程具有鲜明的工程实践属性,教学过程应引导学生经历任务分析、模型建立、算法设计、仿真验证、实物调试和结果评价的完整工程过程。但从当前课程实施情况看,部分实验项目仍以单一知识点验证为主,如坐标变换验证、运动学计算、轨迹曲线绘制和简单控制仿真等,学生按照实验指导书即可完成任务。

这类实验虽然有助于基础知识理解,但工程情境不足、任务链条不完整、系统集成训练不充分。由于实验项目之间缺少递进关系和任务主线,学生难以建立结构分析、数学建模、算法实现、控制调试和应用验证之间的整体联系,实践教学对工程能力培养的支撑仍需加强。

2.3. 虚拟仿真与实物实训衔接不紧,虚实融合深度不足

虚拟仿真能够降低学习门槛,提高实验教学的安全性和可重复性;实物实训则能够帮助学生理解真实设备运行中的机械误差、通信延迟、传感噪声、关节限位和安全规范。二者协同融合,是提升《机器人学》课程实践教学质量的重要路径。

但在实际教学中,虚拟仿真与实物实训之间仍存在衔接不足。一方面,仿真实验多侧重理想模型和算法验证,学生对仿真参数、物理约束和真实设备之间的映射关系理解不深;另一方面,实物实训受设备数量、场地条件、维护成本和课时限制,学生难以获得充分的反复调试机会。因此,课程亟需构建从虚拟建模到实物验证的递进式实践体系。

2.4. 项目化教学实施不深，综合能力培养支撑不足

项目化教学强调以真实问题或复杂任务为载体，引导学生在协作实践和成果生成过程中实现知识理解与能力发展。对于《机器人学》课程而言，可围绕机械臂搬运、机器人分拣、移动机器人避障、轨迹跟踪和多机器人协同等典型任务展开教学，使学生在项目实施中综合运用运动学建模、轨迹规划、控制算法、仿真分析和设备调试等知识。

然而，部分课程虽然设置了项目任务，但仍停留在任务布置和结果展示层面，对任务分解、过程指导、阶段检查和能力评价关注不足。学生容易重视最终演示效果，而忽视需求分析、方案设计、模型论证、参数调试、误差分析和技术总结等关键环节，综合能力培养效果有限。

2.5. 评价方式偏重结果，学习过程诊断与精准反馈不足

传统课程评价多以期末考试、实验报告、课堂考勤和项目成果为主要依据，能够反映学生的知识掌握和任务完成情况，但难以全面呈现学生在学习过程中的能力变化。《机器人学》课程的学习成效不仅体现在理论成绩上，还体现在建模能力、程序实现、仿真分析、实物调试、团队协作、工程表达和问题反思等多个方面。

若评价主要依赖终结性结果，就难以及时发现学生在学习阶段的能力短板，也不利于教师开展分层指导和持续改进。因此，有必要将课堂表现、在线学习、建模作业、仿真实验、实物调试、项目协作和成果汇报等过程性数据纳入评价体系，构建多维学习画像，使评价从结果判定转向过程诊断和能力促进。

综上，当前《机器人学》课程主要存在理论迁移不足、实践环节分散、虚实融合衔接不紧、项目化教学深度不足和评价方式单一等问题。其根本原因在于课程教学尚未形成以学生能力生成为中心的系统化闭环。因此，有必要以学习画像为诊断依据，以虚实融合为实践支撑，以项目化任务为教学载体，推动课程教学由知识传授转向能力生成。

3. 学习画像驱动的虚实融合项目化教学模式构建

针对《机器人学》课程教学中存在的理论抽象、实践分散、虚实衔接不足和评价方式单一等问题，本文构建学习画像驱动的虚实融合项目化教学模式。该模式以学生能力发展为中心，以典型机器人项目任务为载体，以虚拟仿真和实物实训为支撑，以学习画像为诊断与反馈依据，形成学情诊断、任务设计、虚实训练、项目实施、评价反馈、持续改进相衔接的教学闭环。整体教学模式框架如图1所示。

3.1. 构建多维学习画像，形成精准教学依据

学习画像是本教学模式的重要基础，主要通过采集课程学习全过程数据，动态刻画学生的知识掌握、实践表现和能力发展状态。结合《机器人学》课程特点，可从知识基础、建模能力、仿真实验、实物调试、项目协作、工程表达和职业素养等维度构建学习画像。

数据来源包括课堂互动、在线学习记录、随堂测试、建模作业、仿真实验、程序调试、实物操作、项目文档、团队互评和成果汇报等。通过数据分析，教师能够识别学生在理论理解、建模规范、程序实现、设备调试和工程表达等方面的短板，并据此开展分层指导、任务调整和个性化反馈。

3.2. 重构递进式课程内容，突出能力生成逻辑

围绕机器人系统认知、建模、规划、控制和应用的学习规律，课程内容可重构为五个递进模块。

一是基础认知模块。通过工业机器人、移动机器人、协作机器人和服务机器人等典型案例，引导学

生认识机器人系统组成、应用场景和工程价值，建立课程整体认知。

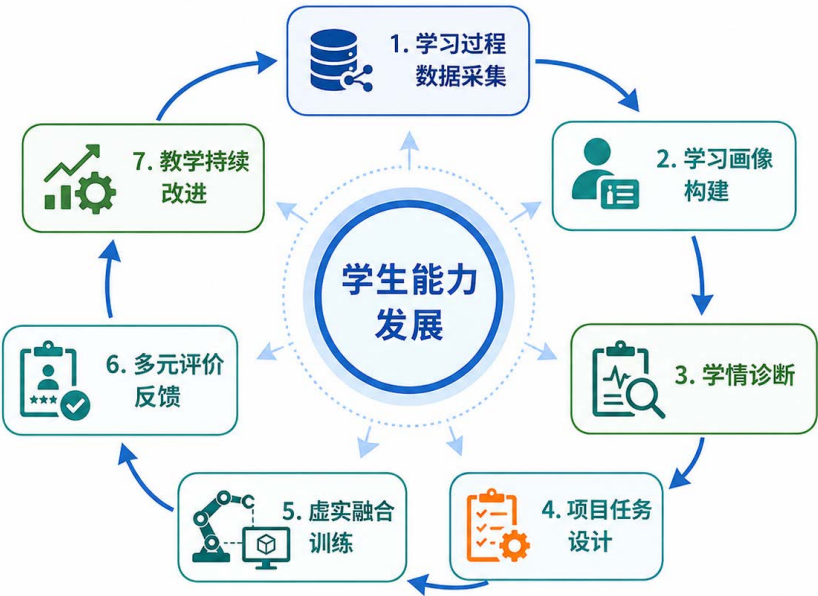


Figure 1. Learning profile-driven virtual-physical integrated project-based teaching model for the *Robotics Course*
图 1. 学习画像驱动的《机器人学》课程虚实融合项目化教学模式框架

二是运动学建模模块。围绕坐标变换、D-H 参数法、正运动学和逆运动学等内容，引导学生完成结构分析、坐标系建立、参数表构建和末端位姿求解。

三是轨迹规划模块。围绕关节空间规划、笛卡尔空间规划、速度约束和轨迹平滑等内容，引导学生完成机械臂搬运、移动机器人路径跟踪等任务。

四是动力学与控制模块。围绕动力学基础、误差分析、轨迹跟踪控制和基础控制算法，引导学生理解控制输入、运动响应和系统误差之间的关系。

五是综合应用模块。围绕机械臂分拣、移动机器人避障、机器人巡检和多机器人协同等项目任务，组织学生完成方案设计、模型建立、算法实现、仿真实验和成果展示。

通过递进式内容重构，课程由知识点线性讲授转向能力生成导向教学，使学生在连续任务训练中逐步完成从理论理解到工程应用的转化。

3.3. 设计虚实融合实践体系，强化工程训练过程

虚实融合是提升《机器人学》课程实践教学质量的重要支撑。课程可按照虚拟建模、仿真验证、实物调试和综合应用的路径构建递进式实践体系。在虚拟建模阶段，学生利用 MATLAB、Python 或机器人仿真平台完成坐标变换、运动学求解、轨迹规划和控制算法验证；在仿真验证阶段，借助 ROS、Gazebo、RobotStudio 等平台开展运动展示、误差分析和参数调整；在实物调试阶段，将仿真结果迁移到真实设备，完成任务验证和系统优化。

通过上述实践体系，学生能够先在低风险、可重复的虚拟环境中理解原理、验证算法，再在真实设备中开展工程调试和系统优化，从而提升实践教学的安全性、开放性和工程真实性。课程虚实融合实践体系如图 2 所示。

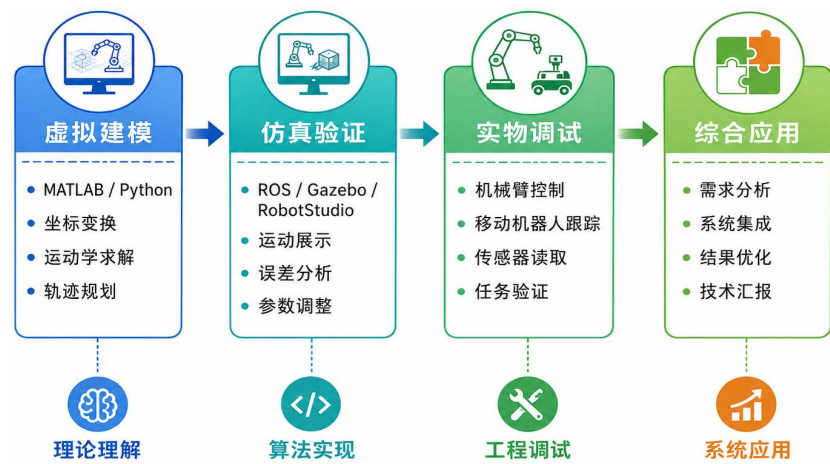


Figure 2. Virtual-physical integrated practice system for the Robotics Course
图 2. 《机器人学》课程虚实融合实践体系

3.4. 构建项目化教学任务链，贯通知识与应用

项目化教学是本模式的核心载体。课程项目应突出真实问题导向、能力目标导向和过程训练导向，避免停留在简单展示层面。结合《机器人学》课程内容，可构建基础项目、综合项目和创新项目递进衔接的三级任务链。

基础项目侧重单元知识理解，如机械臂 D-H 建模、正逆运动学求解、关节空间轨迹规划和移动机器人路径跟踪等；综合项目侧重多知识点融合，如机械臂搬运与分拣、移动机器人避障巡检和机器人轨迹跟踪控制等；创新项目侧重综合能力提升，如视觉引导抓取、多机器人协同搬运和智能巡检系统设计等。

项目实施可按照任务发布、需求分析、方案设计、模型建立、仿真实现、实物验证、成果展示和反思改进的流程推进。每个项目均设置阶段成果和评价标准，引导学生重视方案论证、参数调试、误差分析和过程总结，使学生在真实任务情境中理解理论知识的应用价值，逐步形成机器人系统分析与工程实现能力。

3.5. 建立多元评价机制，推动教学持续改进

学习画像驱动的教学模式需要配套多元评价机制，推动课程评价由单一终结性评价转向过程性评价、项目评价和能力达成评价相结合。评价内容不仅关注任务完成结果，还应关注学生在知识理解、建模规范、程序实现、工程调试、团队协作、成果表达和问题反思等方面的过程表现。

其中，过程性评价主要关注课堂参与、在线学习、随堂测试、阶段作业和实验记录；项目评价关注方案设计、模型建立、仿真结果、实物调试、任务完成度和成果展示；能力达成评价关注建模分析、算法实现、系统调试、团队协作和创新应用等综合表现。评价结果进一步反馈至学习画像，用于识别能力短板并改进教学。

教师可依据学习画像结果调整教学节奏、项目难度和实验指导。对基础薄弱学生，提供建模模板、基础仿真案例和补充训练任务；对能力较强学生，提供开放性项目和竞赛拓展任务；对实践能力不足学生，增加设备操作、调试记录和错误分析训练。由此形成数据采集、画像分析、教学调整、项目实践和评价反馈的持续改进机制。

综上，学习画像驱动的虚实融合项目化教学模式以学生能力生成为主线，将学习诊断、课程内容、实践平台、项目任务和评价反馈有机结合。该模式既能够增强《机器人学》课程的工程实践属性，又能

够提升教学过程的精准性和评价结果的诊断价值，为后续教学实施与实践验证奠定基础。

4. 教学实施路径与实践过程

4.1. 课前开展学情诊断，明确教学起点

课程实施前，教师通过基础测试、问卷调查、在线学习记录和前序课程成绩等方式，了解学生在数学基础、编程能力、控制基础、机械认知和实践经验等方面的差异，初步形成学生学习画像，为后续教学内容组织、项目任务设置和分层指导提供依据。

针对基础相对薄弱的学生，提前推送坐标变换、矩阵运算、MATLAB 基础和机器人结构认知等预习资源；针对基础较好的学生，提供拓展案例、仿真实例和开放性任务，引导其提前进入项目探究。通过课前诊断与资源推送，使学生在课程学习前具备必要的知识准备和任务意识。

4.2. 课中实施任务驱动，促进理论理解与方法应用

课堂教学以典型机器人任务为主线，将理论讲授嵌入任务分析和问题解决过程。教师可围绕机械臂搬运、移动机器人路径跟踪、机器人避障和轨迹规划等任务导入知识点，引导学生在真实问题情境中理解相关理论。

例如，在讲授 D-H 参数法时，以机械臂末端定位任务为载体，引导学生完成坐标系建立、参数表构建和正运动学求解；在讲授轨迹规划时，以机械臂平稳搬运任务为载体，引导学生完成轨迹生成、速度约束分析和运动效果验证。课堂按照任务提出、问题分析、理论讲解、仿真实现和结果讨论的流程展开，使理论学习与任务应用同步推进。

4.3. 课后推进项目实践，强化虚实融合与能力内化

课后实践以小组项目为主要形式，学生围绕课程任务完成方案设计、模型建立、程序实现、仿真验证、实物调试和结果分析。教师根据学习画像和项目进展开展差异化指导，对建模能力较弱的小组重点指导坐标系建立和参数规范，对程序实现困难的小组重点指导仿真流程和调试方法，对项目推进较快的小组提供开放拓展任务。

在项目推进过程中，要求学生保存调试记录、实验截图、误差分析和阶段总结，避免只关注最终演示效果。通过虚拟仿真与实物调试相结合，学生能够逐步完成从知识接受到任务实现、从单项操作到系统集成、从结果展示到工程反思的能力转化。

4.4. 开展成果评价与反馈改进，形成教学闭环

课程阶段性结束后，组织学生进行项目成果展示和技术汇报。汇报内容包括任务背景、总体方案、建模过程、仿真结果、实物验证、问题分析和改进思路。教师从技术规范、任务完成度、工程逻辑、团队协作和表达质量等方面进行评价，同时组织学生开展小组互评和自我反思。

评价结果进一步反馈至学习画像，用于分析学生在理论理解、建模分析、仿真实现、实物调试和工程表达等方面的能力达成情况。教师据此优化后续教学内容、调整项目难度、完善实验指导和改进评价标准，形成课前诊断、课中教学、课后实践、成果评价和持续改进相衔接的教学闭环。

在评价与反馈过程中，还应将工程规范和课程思政融入项目全过程。通过国产机器人发展、智能制造升级和高端装备自主可控等案例，引导学生增强专业认同和责任意识；通过设备操作规程、数据记录规范、程序调试规范和项目文档要求，培养学生严谨细致、规范操作、协同合作和精益求精的工程素养。具体教学实施闭环如图 3 所示。



Figure 3. Closed-loop teaching implementation process for the *Robotics Course*
图 3. 《机器人学》课程教学实施闭环

5. 教学成效与实践反思

5.1. 学习参与度和主动学习意识明显提升

学习画像驱动与项目化任务相结合，使学生由被动接受知识转向主动参与任务实践。课程将坐标变换、运动学建模、轨迹规划和控制方法等抽象知识融入机械臂搬运、移动机器人路径跟踪、机器人避障等具体任务中，使学生能够在问题情境中理解知识价值，增强学习目标感和参与意识。

5.2. 工程实践能力和系统思维有效增强

虚实融合实践体系为学生提供了由理论建模、仿真验证到实物调试的递进训练路径。学生先在虚拟环境中完成运动学建模、轨迹规划和控制算法验证，再在实物设备中感知机械误差、传感噪声、通信延迟、关节限位和安全规范等真实工程问题。通过连续项目训练，学生能够更清晰地理解结构、模型、算法、控制和应用之间的关系，工程实践能力和系统思维得到提升。

5.3. 团队协作能力与工程表达能力持续改善

项目化教学要求学生以小组形式完成任务分析、方案设计、模型建立、程序调试、结果分析和技术汇报。学生在项目推进中进行角色分工、方案讨论、问题协商和成果整合，有助于提升团队协作和沟通能力。同时，项目文档、调试记录、误差分析和汇报材料也促使学生从“完成任务”走向“表达过程”和“反思改进”。

5.4. 评价反馈机制逐步完善，但仍需持续优化

学习画像的引入使课程评价由单一结果评价转向过程诊断与能力促进。教师能够依据课堂表现、在线学习、建模作业、仿真实验、实物调试、项目协作和成果汇报等数据，动态了解学生在知识理解、建模能力、程序实现、工程调试和表达反思等方面的表现，并据此调整教学节奏、优化项目任务和开展分层指导。

同时，教学实践中仍存在改进空间。一是学习画像的数据采集和分析机制还需规范，过程性数据的自动化采集和可视化呈现有待加强；二是虚实融合教学对设备条件、平台资源和教师工程实践能力提出更高要求，设备开放、维护保障和分组轮换机制仍需完善；三是项目任务的层次性、挑战度和评价标准

还需持续优化。

总体来看,学习画像驱动的虚实融合项目化教学模式能够改善《机器人学》课程中理论抽象、实践分散和评价单一等问题,有助于促进学生知识理解、工程实践、系统思维、团队协作和创新应用能力提升。后续将继续完善课程资源、实验平台、画像分析工具和多元评价标准,推动课程教学改革持续深化。

6. 结论

本文围绕《机器人学》课程中理论抽象、实践分散、虚实衔接不足和评价方式单一等问题,构建了学习画像驱动的虚实融合项目化教学模式。该模式以学生能力生成为核心,以学习画像为诊断依据,以虚拟仿真和实物实训为实践支撑,以项目化任务为教学载体,形成课前学情诊断、课中任务驱动、课后项目实践、成果评价和持续改进的教学闭环。实践表明,该模式有助于提升学生知识迁移、工程实践、团队协作和反思改进能力,也为机器人课程教学改革提供了参考。

基金项目

长江师范学院 2026 年度课程思政示范课程建设项目“控制工程基础”、2026 年度项目式课程建设项目“控制工程基础”及 2026 年本科实验教学项目“控制工程基础综合实验”(PX-1926853)。

参考文献

- [1] National Academy of Engineering (2004) The Engineer of 2020: Visions of Engineering in the New Century. The National Academies Press.
- [2] Kolb, D.A. (1984) *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*. Prentice-Hall.
- [3] Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L. and Oriolo, G. (2009) *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer.
- [4] Craig, J.J. (2018) *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. 4th Edition, Pearson.
- [5] Corke, P., Jachimczyk, W. and Pillat, R. (2023) *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB*. 3rd Edition, Springer.
- [6] 冯仰刚, 张武翔. 基于线上教学平台的机器人学基础课程教学改革与探索[J]. 安徽工业大学学报(社会科学版), 2023, 40(3): 79-80, 111.
- [7] 陈光荣, 陈亚琼. “机器人技术基础”课程虚拟仿真实验教学研究[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(10): 159-164.
- [8] 戎新萍, 徐海璐, 季春天. 基于虚拟仿真实验的教学改革与实践——以机器人技术课程为例[J]. 教育进展, 2024, 14(10): 79-84.
- [9] Blumenfeld, P.C., Soloway, E., Marx, R.W., Krajcik, J.S., Guzdial, M. and Palincsar, A. (1991) Motivating Project-Based Learning: Sustaining the Doing, Supporting the Learning. *Educational Psychologist*, **26**, 369-398. <https://doi.org/10.1080/00461520.1991.9653139>
- [10] Prince, M. (2004) Does Active Learning Work? A Review of the Research. *Journal of Engineering Education*, **93**, 223-231. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2004.tb00809.x>
- [11] Freeman, S., Eddy, S.L., McDonough, M., Smith, M.K., Okoroafor, N., Jordt, H., et al. (2014) Active Learning Increases Student Performance in Science, Engineering, and Mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **111**, 8410-8415. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111>
- [12] Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R. and Ng, A.Y. (2009) ROS: An Open Source Robot Operating System. *ICRA Workshop on Open Source Software*, Kobe, 12-17 May 2009, 1-6.
- [13] Macenski, S., Foote, T., Gerkey, B., Lalancette, C. and Woodall, W. (2022) Robot Operating System 2: Design, Architecture, and Uses in the Wild. *Science Robotics*, **7**, eabm6074. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abm6074>
- [14] 韩锡斌, 黄月, 马婧, 程建钢. 学习分析的系统化综述: 回顾、辨析及前瞻[J]. 清华大学教育研究, 2017, 38(3): 41-51.
- [15] 肖君, 乔惠, 李雪娇. 基于 xAPI 的在线学习者画像的构建与实证研究[J]. 中国电化教育, 2019(1): 123-129.