

张娅婕, 陈永当, 毛勃越. 基于VR的工业机器人运动控制实训系统设计[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(2): 96-102. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.24092303

# 基于VR的工业机器人运动控制实训系统设计

张娅婕<sup>1</sup>, 陈永当<sup>1</sup>, 毛勃越<sup>2</sup>

(1 西安工程大学 机电工程学院, 西安 710600; 2 西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

**摘要:** 针对工业机器人实训易受场地、设备成本、实训安全限制等问题, 本文以一个6自由度关节型工业机器人及其物料搬运场景为例, 结合逆向运动学和混合包围盒碰撞检测算法, 模拟真实的机器人运动特性和作业场景, 研究了虚拟现实和机器人之间的协同作用, 开发了一种基于Unity3D引擎的, 具有较高沉浸感和真实性的工业机器人运动控制实践培训系统。系统利用HTC Vive完成系统交互设计, 并实现工业机器人运动控制, 可作为培训解决方案, 在安全的环境中提供可重复和灵活的程序。

**关键词:** 虚拟现实; Unity3D; 工业机器人; 逆向运动学; 碰撞检测; 实践培训

中图分类号: TP391.9; TP399

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)02-0096-07

## Design of industrial robot motion control training system based on VR

ZHANG Yajie<sup>1</sup>, CHEN Yongdang<sup>1</sup>, MAO boyue<sup>2</sup>

(1 School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China;

2 School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Addressing the challenges of industrial robot training, such as limited space, equipment costs, and safety concerns, this study uses a 6-DOF articulated industrial robot and its material handling scenario as an example. By combining inverse kinematics and hybrid bounding box collision detection algorithms to simulate real robot motion characteristics and operational scenarios, the study explores the synergistic effects between virtual reality and robots. A practical training system for industrial robot motion control based on Unity3D engine with high immersion and realism was developed. The system utilizes HTC Vive to complete system interaction design and achieve industrial robot motion control, which can be used as a training solution to provide repeatable and flexible programs in a safe environment.

**Key words:** virtual reality; Unity3D; industrial robots; inverse kinematics; collision detection; practical training

## 0 引言

传统工业的生产效率和安全性受到手工流程的限制, 自动化和智能机器人推动了现代工业的工作条件走向更高效、更安全<sup>[1]</sup>。工业环境中对机器人高效、精准的控制和机器人周围的安全是智能自动化的核心。由于工业环境存在高速运动和巨大冲击力, 直接测试和实施人机协作是危险的, 在协作应用程序中的工作人员在操作机器人前有必要经过学习培训过程<sup>[2]</sup>。但受实训场地、设备成本、安全条件限制, 虚拟现实系统成为获得基本技术技能和工作场所布局设计的有效解决方案。周成等<sup>[3]</sup>将虚拟

现实与机械安全相结合, 提出了一套供机械安全防护学习与考核的虚拟现实系统总体设计方案; 冯李航等<sup>[4]</sup>将虚拟现实融入智慧工厂的生产中, 开发了虚拟工厂仿真系统。

过程模拟和交互的虚拟现实技术可以模拟真实情况, 提供身临其境的体验, 不会产生真正的风险。虚拟现实技术已扩展到教育、医疗、军事、制造业等各行各业<sup>[5]</sup>。孙建起等<sup>[6]</sup>利用WiFi通讯, 将虚拟现实与外部康复设备相结合, 模拟行走和骑行的康复训练; 黄海平<sup>[7]</sup>开发了一款先天性心脏病手术模拟器, 可对医生手术技能的有效性进行评估; 由于自动化与智能制造所需的跨学科、复合型人才培养

**作者简介:** 张娅婕(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 工业机器人虚拟实训系统开发; 毛勃越(2002—), 男, 本科生, 主要研究方向: 智能制造技术。

**通信作者:** 陈永当(1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 智能制造技术。Email: chenyd@xpu.edu.cn。

收稿日期: 2024-09-23

哈尔滨工业大学主办 ◆ 专题设计与应用

乏,因此教学型虚拟仿真系统对复合型人才培养非常关键,目前已经有不少学者进行了相关研究,贾晓琪等<sup>[8]</sup>开发了一个基于计算机组装与维护仿真教学平台;张钰等<sup>[9]</sup>将虚拟现实与机械加工教学实训结合,构建了 VR 机械加工虚拟仿真教学空间。高校也尝试将工业机器人教学与仿真结合,实现教学可视化操作,梁洸强等<sup>[10]</sup>在工业机器人拆装实训课中融入虚拟现实技术;韩宇<sup>[11]</sup>开发了一个虚拟教学平台,实现虚拟现实在工业机器人维护课程中的应用;雷珏<sup>[12]</sup>将虚拟现实与焊接操作相结合,开发了焊接操作模拟培训系统。

本文通过分析工业机器人的应用需求,以工业机器人及其物料搬运场景为研究对象,使用虚拟现实技术和 HTC Vive 头显设备将真实机器人及其控制软件集成为实训系统,用户可以在完全沉浸式的交互式环境中接受培训,还可以测试机器人控制程序和运动轨迹,从而避免风险,提高工业设施安全性。

## 1 系统总体设计

### 1.1 系统整体架构

虚拟实训系统包括应用程序如虚拟环境、用户界面、对象之间的逻辑连接等,外围设备如带有位置和方向跟踪系统的 VR 设备。

系统架构如图 1 所示,系统主要分为环境层、技术层、实现层和功能层 4 个层级。

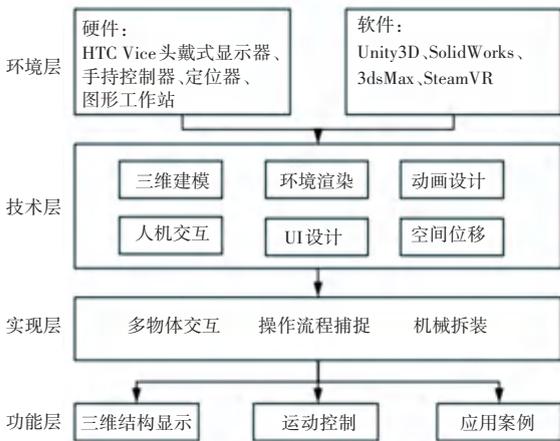


图 1 系统架构图

Fig. 1 System architecture diagram

### 1.2 系统开发平台

本系统以 Unity2021 为开发平台, Visual Studio2022 为辅助工具;采用 SolidWorks、3dsMax 等进行建模;为了提高虚拟实验真实性和沉浸感,在硬

件方面选择 HTC Vive 头显设备及控制手柄。

### 1.3 系统功能

实训系统主要包括工业机器人三维结构展示、运动控制和应用案例三大功能模块,如图 2 所示。三维结构展示和应用案例模块均连接基础知识库,通过场景中的提示就可以查看对应的知识。

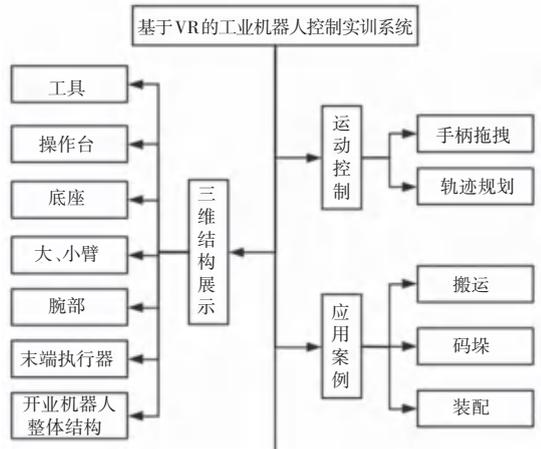


图 2 系统功能示意图

Fig. 2 System Function Diagram

## 2 三维模型建立

### 2.1 模型的建立

虚拟实训室的实训装置模型种类多且数量大,主要场景包括工具面板、工作台、照明、计算机和实训室入口等虽然不与用户交互,但可以帮助用户在场景中正确导航的模型要尽可能多地保留细节。本文利用 SolidWorks 建立精度要求较高的模型,如生产运输线、工业机器人零部件等;利用 3dsMax 建立精度要求不高的模型,如实训场地、安全围栏、货架等,或直接制作材质贴图模拟真实的表面材质和细节。

在 Unity 中开发系统时,模型保留了生产控制区域和生产区域的启示;动画直接添加到设备上,如经常用于产品运输和搬运的运输线和工业机器人。

### 2.2 模型的简化

场景中大量的三维模型和较高的网格密度,会导致模型数据量与有限的传输带宽和平滑的模型渲染之间的矛盾,尤其是基于实时数据的运动仿真会对硬件设备造成极大的运行负担。网格简化技术可以将高分辨率、精确的原始三维模型转化为更粗的近似网格模型,因此可以在模型导入 Unity 前进行网格数优化或减面处理<sup>[13]</sup>。

网格数优化前需要进行一些预处理:

(1) 遍历模型网格面,检测模型是否存在穿插部分、表面是否存在微小孔洞或存在螺钉、螺栓等机械紧固件;

(2) 若存在以上情况,则删除不可见区域、将孔洞替换为平面或删除机械紧固件;

(3) 若不存在,则使用基于二次误差度量(QEM)的边折叠网格简化算法对模型网格面进行优化,降低模型三角形面片数。

为了保障虚拟现实系统的流畅运行,本文使用基于QEM的边折叠网格简化算法,通过计算每个顶点对模型整体误差的影响,选择影响最小的顶点进行删除或合并,以达到减少面数的目的。如图3所示以边折叠操作为例,待折叠边为 $(v_1, v_2)$ ,折叠后新顶点的位置为 $\bar{v}$ ,删除这条边的原顶点 $v_1, v_2$ 及其相连的边,将与 $(v_1, v_2)$ 相邻的顶点与 $\bar{v}$ 重新连接成边,即完成一次边折叠操作。

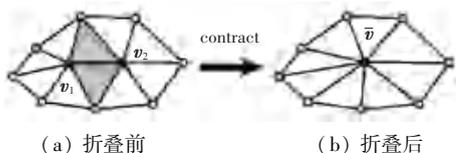


图3 边折叠操作

Fig. 3 Edge collapse operation

引入误差度量准则度量简化模型和原始模型之间的简化程度<sup>[14]</sup>。若 $p = (a, b, c)$ 是平面的一个单位法向量,那么平面也可以用单位法向量和任意一点 $v$ 表示为 $p^T v = 0$ 。在计算边折叠代价时,一个顶点的二次误差定义为该点与该点的所有一阶邻域三角形的距离的平方之和,公式如下:

$$\Delta(v) = \sum_{p \in \text{planes}(v)} (v^T p)^2 = v^T \left( \sum_{p \in \text{planes}(v)} K_p \right) v \quad (1)$$

其中,  $\text{planes}(v)$  代表顶点 $v$ 的一阶邻域三角形的平面集合; $p$ 为集合中任一平面; $K_p$ 为点 $v$ 的二次误差。

令 $Q_v$ 为点 $v$ 的二次误差矩阵,则

$$Q_v = \sum_{p \in \text{planes}(v)} K_p \quad (2)$$

$$K_p = pp^T = \begin{pmatrix} \hat{e}a^2 & ab & ac & ad \\ \hat{e}ab & b^2 & bc & bd \\ \hat{e}ac & bc & c^2 & q_{34} \\ \hat{e}ad & bd & bc & d^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

当边 $(v_i, v_j)$ 折叠到新顶点 $\bar{v}$ 时,新顶点 $\bar{v}$ 的误差矩阵,公式如下:

$$Q_{\bar{v}} = Q_{v_i} + Q_{v_j} \quad (4)$$

边 $(v_i, v_j)$ 的折叠代价表示如下:

$$\Delta(\bar{v}) = \bar{v}^T Q_{\bar{v}} \bar{v} = \bar{v}^T (Q_{v_i} + Q_{v_j}) \bar{v} = \sum_{p \in \text{planes}(v_i)} (p^T \bar{v})^2 + \sum_{p \in \text{planes}(v_j)} (p^T \bar{v})^2 \quad (5)$$

基于QEM的边折叠网格简化算法的实现通常包括以下几个步骤:

(1) 计算网格中所有顶点的初始化误差度量;

(2) 将所有顶点的误差度量放入优先队列中,根据误差的大小进行排序;

(3) 从优先队列中取出误差度量最小的顶点对 $v_i$ 和 $v_j$ 进行合并;

(4) 更新合并后的顶点的误差度量;

(5) 更新相邻顶点的误差度量,并在优先队列中调整;重复步骤(3)~(5)直到达到预设的简化目标(如最小面数、误差阈值等)。

实训场景中机械臂基座模型的简化前后对比图如图4所示,在经过简化处理前后的模型网格面数,处理前是443 503个面,处理后是个66 109面,简化率达到了85%,但是依旧保留了原模型的特征,且保证了场景中模型显示的质量;简化后的模型具有更少的网格面,渲染时所需的计算量大幅减少,从而提高帧率(FPS),场景运行时更加流畅、稳定性更高。



图4 机械臂基座简化前后对比

Fig. 4 Comparison before and after simplification of robotic arm base

## 2.3 场景的搭建

实训场景的示意图如图5所示,实训场景划分为A仓储区、B生产工作站、C运输循环形式的自动生产线(包含装配试验区)和D教学区四大区域。



图5 实训场景示意图

Fig. 5 Schematic diagram of training scenario

由于Unity中显示的模型属于面片模型,故SolidWorks构建的模型在导入Unity之前还需要借

助 3dsMax 将模型转换为 FBX 格式的面片模型,并保证模型坐标系中 Z 轴指向正上方,以减少不必要的的数据转换过程<sup>[15]</sup>。

为了复制实际情况的准确性,对于从 3dsMax 导出的模型即输送机、其他工具、机械臂、货架和自动导引小车等,需要最优地设置导入阶段提供的不同选项,例如材料、动画、光线和相机等数据,同时还需设置纹理(UV)映射、添加适当的材质,以获得更逼真的机器外观。

对于有运动控制要求的模型,在将装配所需的模型导入 Unity 时,需要考虑将各个子装配件组装成一个总装件时,子装配件上的所有部件都需要一起移动或旋转,因此要对模型进行结构处理,严格定义组件之间的父子关系。机械臂模型及其父子层级关系如图 6 所示。



图 6 机械臂模型及其父子层级关系

Fig. 6 Robot arm model and its parent-child hierarchical relationship

### 3 系统功能实现

#### 3.1 结构展示功能

模型结构展示模块主要用于展示工业机器人整体结构及其零部件,本文装配使用的机械臂是 KUKA KR6 sixx 系列六轴机械臂。KUKA KR6 sixx 系列六轴机械臂具有 6 个关节自由度,在各关节的协调协作下,可以让机械臂末端执行器以预定的角度移动或到达指定位置,并完成抓取等操作<sup>[16]</sup>。

Unity 中的对象是通过使用碰撞器等组件创建的,碰撞器可以为游戏中不可见的对象创建一个交互区域,并启用交互。为了提高物体碰撞检测的效率和准确性,系统采用不同类型的碰撞器以适应不同形状的对象,放置在实训场景中特定区域,对象中的碰撞器由用户(第一人称控制器)触发,与其交互后可能会显示信息屏幕或开始播放各种动画。

机械臂各部件展示如图 7 所示,通过手柄与碰撞器的交互,用户能够实现各部件的旋转,直观展示

机械臂的三维结构,促进用户对各个组成部分的空间认识。



图 7 结构展示界面

Fig. 7 Structure display interface

#### 3.2 运动控制功能

对于任何机械结构,从 2-连杆到  $n$ -连杆机械臂,通过手动编程的方法将末端执行器引导到特定位置可能是一项困难且耗时的任务,但可以通过使用逆向运动学(Inverse Kinematics,简称 IK)计算其关节角度以达到三维空间中的特定点。前期在建立模型时已经根据实际机器人中自由度链路的层次顺序,对每个游戏对象进行分层嵌入。本文在进行机械臂运动控制时采用两种模式,即使用 Unity 内置逆运动学求解器直接手柄拖拽或利用插值实现轨迹规划。

##### 1) 控制手柄直接拖拽机械臂

当控制手柄在数字环境中移动时,会为机器人手臂的运动生成一个位置值,这个位置值被馈送到 Unity 资产提供的 IK 求解器。IK 生成各个机器人关节的关节角度,以达到控制手柄定义的位置。

在虚拟环境中,控制手柄控制虚拟机器人的工具中心点(Tool Center Point, TCP)并引导其围绕感兴趣的组件/区域来生成新的位置;将更新后的位置数据发送给逆运动学算法,由逆运动学算法生成机器人关节对应的关节角度,以达到 TCP 更新后的位置。末端执行器将跟随 TCP 生成从初始位置到完整轨迹的整个过程。在虚拟环境中手持 VR 控制器对机械臂从初始位置到最终位置的轨迹控制如图 8 所示。



图 8 手柄拖拽示意图

Fig. 8 Diagram of dragging the handle

### 2) 采用曲线插值实现轨迹规划

本文选用贝塞尔曲线插值来实现机械臂的轨迹规划,根据给定的起始值和目标值,通过逐步改变中间值,在受关节限制约束的大范围运动中实现平滑插值,在创建的关键点和最终位置目标之间创建映射,从而指导关节链在向最终目标移动时进行插值,从而实现轨迹规划的效果。

通过为机器人添加 C#脚本实现轨迹规划,初始默认创建两个坐标轴模型,其坐标默认为原点和 (Of,0.1f,0f),也可自定义坐标,轨迹点创建流程如图 9 所示。

脚本中还定义了生成运动轨迹的协程函数,在实时更新轨迹时需要调用该协程函数,轨迹生成流程如图 10 所示。

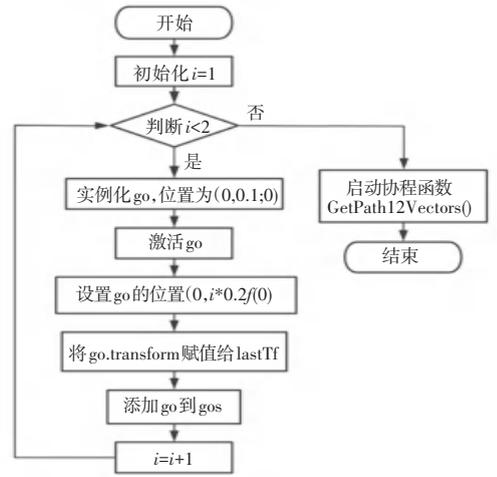


图 9 轨迹点创建的流程

Fig. 9 Process of creating trajectory points

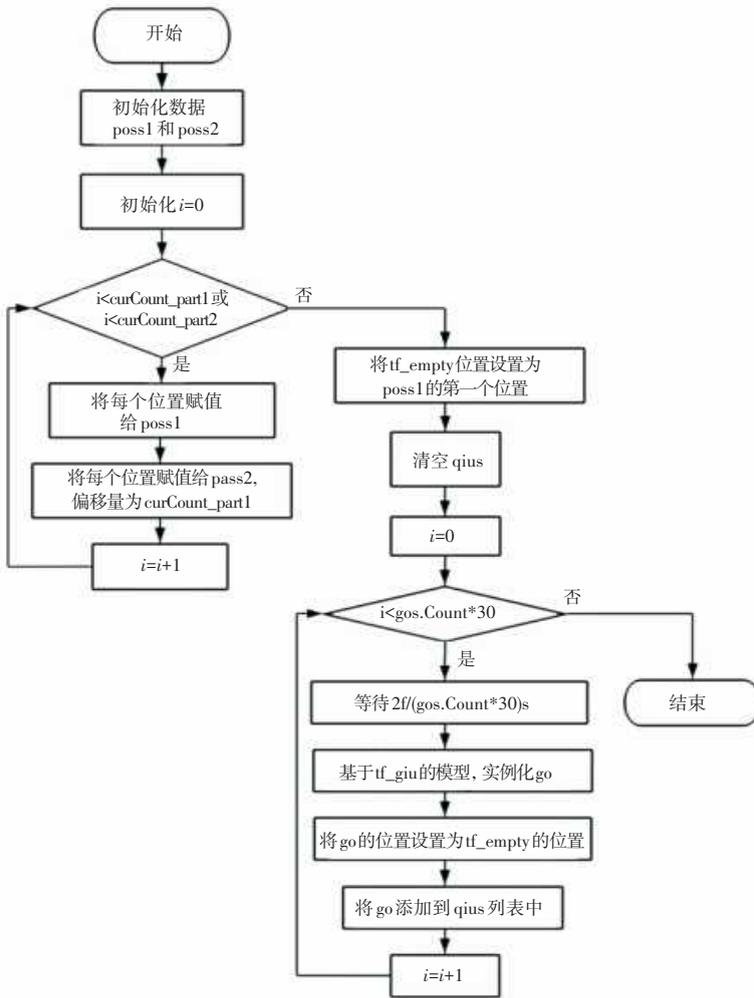


图 10 轨迹生成的流程

Fig. 10 Process of trajectory generation

另外还定义了创建关键点、切换轨迹形状、末端执行器移动等函数。轨迹规划的过程示意如图 11

所示。信息面板通过清晰的提示和灵活的控制选项,使用户能够更清晰地理解和掌握机械臂的控制

功能。



图 11 轨迹规划过程示意图

Fig. 11 Schematic diagram of trajectory planning process

### 4 应用案例

本系统以工业机器人典型应用场景——搬运、码垛为例,同时设置了环境中的导航,以验证实训系统的可行性和有效性。

#### 1) 生产线上的物料流动

生产线上的物料流动如图 12 所示。机械臂从生产站取出初步加工后的组件放至运输托盘,运输托盘在自动生产线上移动,另外生产站配备了流动架,允许存储零件和单元组装定制的材料;

当运输托盘经过机械臂装配工作区域时,可以选择暂停运输,开启装配任务或忽略任务,则托盘继续按原计划运输,进行任务时操作者首先识别产品,以便确定装配任务的范围,随后操作机械臂进行组件装配实训;

当生产线结束运输,产品停留在自动导引小车上并开始堆垛,物料在小车上达到一定数量后,小车沿预定轨迹进行运输,期间可完成随时停车。

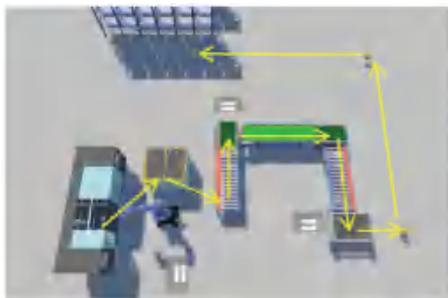


图 12 生产线上的物料流动

Fig. 12 Material flow on the production line

#### 2) 码垛过程中的货物集中管理

在码垛作业中,需要集中管理货物对象的生成与关闭,每当创建货物对象时,生成货物的位置不变,需要编写脚本规划控制货物的运动路线。所以本文设计了一个货物对象管理器,当机械臂抓取时调用此管理器,生成新的货物对象,当货物运输到指

定位置时,关闭货物对象,以此循环。

在进行码垛前需要先设置货物预制体,并初始化货物生成位置、目标位置和目标数量,货物对象管理器的工作流程如图 13 所示。

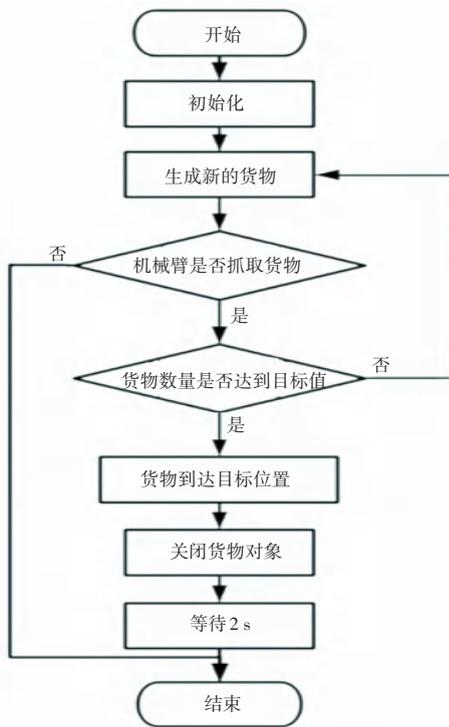


图 13 货物对象管理器的工作流程

Fig. 13 Workflow of Goods Object Manager

#### 3) 虚拟环境中的导航

在虚拟现实中,传送是一种易于使用的移动机制,使用户能够在瞬间到达目标,而不是直接走向目标。如图 14 所示,瞬移控制器“Teleporting”可以放置在场景内的任意位置,在可以移动的区域模型上添加“TeleportArea”脚本后,用户可以通过控制器导航到该区域中的每个点,也可以在特定位置添加“TeleportPoint”进行定点瞬间传送。



图 14 环境中的导航

Fig. 14 Navigation in the environment

### 5 系统界面设计及发布

人机交互设计对虚拟现实系统实现至关重要,

良好的图形用户界面(Graphical User Interface,简称GUI)设计,可以更好地引导和辅助用户使用系统<sup>[17]</sup>,本文使用Unity附带的GUI控件设计用户管理界面,其中包含很多适合创建人机交互界面的脚本,该界面基于预先设定的场景任务和用户的预期路径在每个场景中开发交互代码,以三维空间显示的GUI元素设计工作场景,部分交互场景示例如图15所示。



图15 交互场景示例

Fig. 15 Example of interaction scenarios

系统登录界面如图16所示,用户登录机制支持多用户管理和用户权限分配,教师在登录后会获得更高级别的管理权限,可以进行教学策略调整,学生能够访问其个人学习资料等,确保学生能够集中精力于学习内容。



图16 系统登录界面

Fig. 16 System login interface

## 6 结束语

本文开发的工业机器人运动控制虚拟实训系统可以在应用场景中进行第一人称视角漫游,实现机

械臂结构展示、运动控制等功能,解决复杂机械结构的认知教学和智能控制问题。将虚拟现实技术应用到工程技术教学中,提高了机械结构识别、运动控制等教学环节的教学效果和教学效率。如何更好的做到实验课程虚实融合,虚拟仿真实训与真实实训的深度融合将是下一步研究的重点。

## 参考文献

- [1] CHANG A A, KAZEMI E, ESMAEILI V, et al. The effectiveness of virtual reality training: A systematic review [J]. Journal of Organizational Behavior Management, 2024, 44(3): 214-232.
- [2] 严金凤,居里锴,周成. 新工科背景下机械安全虚拟仿真实验教学探索[J]. 实验技术与管理,2022,39(1):98-102.
- [3] 周成,居里锴. 机械安全防护虚拟现实教学系统的设计[J]. 工业和信息化教育,2019(8):77-85.
- [4] 冯李航,吴力帆,宋辉,等. 虚拟工厂规划仿真系统设计及其教学案例分析[J]. 实验技术与管理,2023,40(1):160-168.
- [5] 黄冠,曾靖盛. 虚拟现实技术的研究现状、热点与趋势[J]. 中国教育信息化,2022,28(10):49-57.
- [6] 孙建起,南玉涵,陈骏志,等. 基于Unity3D虚拟现实康复训练系统[J]. 自动化与仪器仪表,2024. 291(1):172-174.
- [7] 黄海平. 基于虚拟现实技术的先天性心脏病手术模拟器开发与评估[J]. 智能计算机与应用,2023,13(11):264-267.
- [8] 贾晓琪,芦国耀. 基于虚拟现实技术的仿真教学平台的建设:以《计算机组装与维护》为例[J]. 智能计算机与应用,2023,13(10):88-91.
- [9] 张钰,李玮,张利兵,等. VR技术在机械加工虚拟仿真教学中的应用[J]. 机械工程师,2022,367(1):74-77.
- [10] 梁洗强,廖容. 基于虚拟现实技术的工业机器人拆装实训教学改革探索[J]. 装备制造技术,2020,307(7):231-233.
- [11] 韩宇. 虚拟现实技术在工业机器人维护课程中的应用[J]. 湖北农机化,2020,246(9):104-105.
- [12] 雷珏. 基于虚拟现实的焊接操作模拟培训系统[J]. 信息与电脑(理论版),2022,34(14):139-141.
- [13] 张韵,王淑营,郑庆,等. 保持细节几何特征的三维网格模型轻量化算法[J]. 计算机应用,2023,43(4):1226-1232.
- [14] 付钰,陈永当,殷俊清. 面向工业机器人虚拟展示的三维模型简化技术[J]. 机械与电子,2020,38(6):13-18.
- [15] 曹文冠,姚启明,李贤钰,等. 基于Unity3D的驾驶仿真系统研究与实现[J]. 智能计算机与应用,2022,12(8):183-186.
- [16] 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2013.
- [17] 李瑞. 虚拟现实交互系统用户界面设计的研究与应用[J]. 科技风,2022,501(25):65-68.