

基于混合现实的科学教育虚拟实验设计与开发

Design and Development of Virtual Experiments for Science Education Based on Mixed Reality

孙燕莲^{15*}, 徐佳慧², 刘勇³⁵, 张茹⁴⁵

¹ 北京邮电大学网络教育学院

² 北京邮电大学教务处

³ 北京邮电大学人文学院

⁴ 北京邮电大学集成电路学院

⁵ 北邮-润尼尔虚拟现实创新技术与应用联合实验室

* sunyl@bupt.edu.cn

【摘要】 为解决青少年科学教育中理解复杂空间结构与抽象原理的难点，本研究以混合现实（MR）和“鲁班锁”为载体，设计并开发了一套虚拟实验系统。该系统仿真了12种鲁班锁模型，通过手势交互与游戏化设计构建了沉浸式学习环境，实现了知识学习、虚拟拆装与闯关复习等功能。教学实践表明，该系统能有效提升学生的学习动机、空间认知能力与结构理解能力，为混合现实虚拟实验在小学科学教育中的应用提供了实践案例。

【关键词】 虚拟实验；混合现实；鲁班锁；手势交互；科学教育

Abstract: To address the difficulties adolescents face in understanding complex spatial structures and abstract principles in science education, this study designs and develops a virtual experiment system using mixed reality (MR) and the Chinese puzzle "Luban Lock" as carriers. The system simulates twelve types of Luban Lock models and creates an immersive learning environment through gesture-based interaction and gamification design, enabling functions such as knowledge acquisition, virtual assembly and disassembly, and level-based review. Teaching practice shows that the system effectively enhances students' learning motivation, spatial cognition, and structural understanding, providing a practical case for the application of mixed reality virtual experiments in elementary science education.

Keywords: virtual experiment; Mixed Reality (MR); Luban Lock; gesture interaction; science education

1.前言

科学教育是提升全民科学素养、培养创新人才、建设科技强国的基石。我国中小学科学教育已取得显著成就，但仍面临抽象原理难呈现、优质资源分布不均、传统实验受限于条件等挑战^{錯誤！找不到參照來源。}。如何做好科学教育，已成为教育工作者亟待探索的课题^{錯誤！找不到參照來源。}。《关于加强新时代中小学科学教育工作的意见》等文件提出，要充分利用信息技术优势，探索利用虚拟现实等技术改进和强化实验教学。学术界已开展了大量应用与研究，证实了虚拟实验在激发兴趣、提升理解等方面的积极作用（张慕华等人，2024；杨馨宇等人，2024）。混合现实构建的沉浸式学习环境，能够促进学生知识的深度吸收与技能的实际应用（Jun Hong, 2024）。混合现实（MR）技术能够实现虚拟信息和真实环境的无缝融合与实时交互（邱莹莹等人，2021），为科学教育中微观结构观察、宏观过程模拟及高危或高成本实验仿

真提供了前景广阔的解决方案。本研究以融合多学科智慧的中国古典益智玩具“鲁班锁”为载体，探索基于 MR 技术的科学教育虚拟实验设计与开发路径。

2.虚拟实验需求分析

从教学内容、交互方式、学习支持三个方面进行需求分析。系统需提供多样化的鲁班锁模型，以兼顾学习的层次性与趣味性。选取十字架、三通鲁班锁、六通鲁班锁、八角球等 12 种典型模型，如图 2-1 所示。为营造自然的操作体验，系统应支持手势交互与语音提示功能。学生在 MR 环境中可直接通过手部动作对鲁班锁模型进行移动、旋转、组装与拆解等操作，降低认知负荷，增强沉浸感。系统还应整合相关知识学习与复习模块，支持学生在动手实践的同时，帮助学生掌握结构原理、拆装技巧并形成跨学科的综合认知。



图 2-1 鲁班锁

3.虚拟实验设计

3.1. 功能模块设计

系统整体可以分为三个模块：知识学习、组装拆解和闯关复习，具体内容如图 3-1 所示。

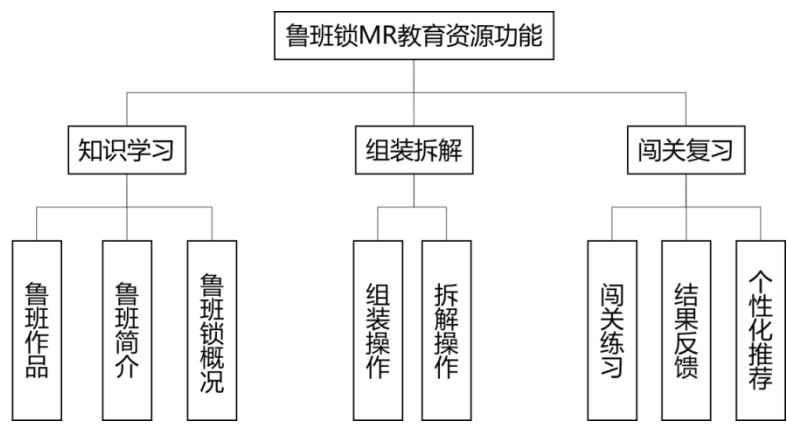


图 3-1 MR 资源功能设计

知识学习模块包括鲁班生平、鲁班作品、鲁班锁概述。鲁班生平主要通过图文结合形式呈现鲁班事迹与相关成语典故；鲁班作品展示锯子、墨斗等经典发明，学生可探究作品构造原理和使用途径；鲁班锁概况主要聚焦它的历史变迁、文化价值及机构原理。组装拆解模块支持学生对 12 种鲁班锁模型进行组装与拆卸的实操训练。每个模型均配备 3D 拆解动画与分步装配指南，并设有操作提示。闯关复习模块由闯关挑战、结果反馈、个性化推荐三部分组成。挑战任务基于 DOK 理论分设四层难度梯度，从知识复现、模型操作延伸至结构创新

设计。系统即时评分并授予星级奖励，同时依据学习表现与测评结果，智能推送个性化学习资源。

3.2. 界面设计

人机交互界面设计充分结合 MR 虚拟实验的特点。知识学习模块采用可翻开的书本形式，既增强了沉浸感，又保证了入口清晰、操作便捷。组装拆解模块以中心区域为操作空间，左侧设功能按钮组，界面布局清晰，交互便捷。整体设计风格简洁，视觉呈现古朴典雅，效果如图 3-2 所示。



图 3-2 UI 界面效果图

4. 系统实现

4.1. 软硬件选型

本研究选用 Unity 2023.2.20f1c1 作为核心开发引擎。作为跨平台实时 3D 引擎，Unity 广泛应用于交互式数字内容创作领域，在 MR 开发中颇具优势。采用 Visual Studio 2022 作为 Unity 项目脚本编辑工具。选定 3ds Max 作为核心建模工具，利用其复杂模型构建、材质编辑、动画制作及渲染等功能，完成 12 种鲁班锁模型的创建。硬件终端采用 PICO 4 Ultra Enterprise，该设备兼顾了轻便和舒适两方面特性，可调节头带与面部衬垫，同时成本也不高。

4.2. 手势交互

通过 Pico SDK 与 Unity 的整合应用，实现高精度手势交互。在 Unity 项目中安装 XR Hands 套件并导入 Hand Visualizer，利用 Pico SDK 的 PXR_Manager 组件启用手势追踪功能，通过 XR Interaction Toolkit 的输入配置，将 PICO 设备的骨骼数据绑定至 XRI Default Input Actions 中，确保手势动作（如捏合、张开）可映射为统一输入事件。Pico SDK 原生支持手部 21 关键点追踪，结合 XR Hands 的 Hand Skeleton 组件实时渲染虚拟手模型，并通过 PXR_Hand 脚本获取手势状态，为后续交互提供底层数据支持。通过 Pico SDK 的多分辨率渲染优化与 XR Interaction Toolkit 的跨平台抽象层，实现低延迟、高沉浸的手势与物体交互体验。

4.3. 关键实现代码

不同的场景间，通过对菜单按钮编写跳转代码触发事件，实现场景间的跳转。利用 Container With Fix Object 1.0 这一装配操作框架来定义、绑定和约束容器与对象之间的父子关系，从而建立起逻辑上的组合关系。核心代码如下图 4-1 所示。

```

/// <summary>
/// 设置父物体
/// </summary>
/// <param name="parent"></param>
private void DoSetContainer(Transform parent)
{
    //重置属性
    ResrtConstraint();
    //添加目标对象
    ConstraintSource constraintSource = new ConstraintSource() { sourceTransform = parent, weight = 1 };
    List<ConstraintSource> constraintSources = new List<ConstraintSource>() { constraintSource };
    parentConstraint.SetSources(constraintSources);
    parentConstraint.SetTranslationOffset(0, positionAtRest);
    parentConstraint.SetRotationOffset(0, rotationAtRest);
    fixPositionChange = positionAtRest;
    fixRotationChange = rotationAtRest;
}

/// <summary>
/// 取消设置父物体
/// </summary>
/// <param name="parent"></param>
private void UnDoSetContainer()
{
    if (parentConstraint != null && container != null)
    {
        container.Disassemble(this);
        container = null;
        parentConstraint.constraintActive = false;
    }
}

```

图 4-1 Fix Container With Fix Object 1.0 核心代码

5. 教学实践与效果分析

5.1. 教学实践与结果

对象：A 班（实验班，30 人）采用“MR 虚拟实验+实物操作”模式；B 班（对照班，28 人）采用“传统 PPT 讲解+实物操作”模式。两班由同一位教师授课，前测成绩无显著差异（ $p>0.05$ ）。

过程：实验班学生佩戴 PICO 设备，按照“情境导入（MR 工坊）→知识讲解（MR 模型透视）→实验探索（MR 虚拟拆装闯关）→合作探究（小组实物拼装比赛）→总结迁移”的流程学习。对照班则观看 PPT 和教师实物演示后，直接进行小组实物拼装。

教学结束后，对两班进行同一份后测试卷考核，对实验班进行学习体验问卷调查，对授课教师进行半结构化访谈。后测结果显示，实验班平均分（89.80 分）高于对照班（71.07 分）。

5.2. 实践结果分析

问卷调查显示：90.0%的学生认为 MR 课程“像游戏一样好玩”，88.3%的学生同意“MR 让我更容易理解鲁班锁的结构”，86.7%的学生认为“MR 拆装比看图片视频更清楚”。学生对游戏化奖励机制和操作的便利性给予了高度认可，平均分高于 4.0 分（满分 5 分）。开放性建议中，学生希望增加更多鲁班锁类型、历史故事和创意设计功能。

授课教师认为，MR 技术有效突破了空间认知难点，“学生可以‘穿透’木块看内部连接，这是实物和视频都无法实现的”。MR 虚拟环境提供了安全的试错空间和无限次练习机会，显著提升了学生操作的准确性和自信心。同时，教师也指出需平衡虚实时间、加强设备管理培训，并建议 MR 资源应具备更细致的错误反馈。

教学实践数据分析表明：系统有效激发学习动机，显著提升学习成效，培养了学生的科学思维、实践能力和对传统文化的积极态度，促进了多维素养的协同发展。

6. 结论

本研究提出了一个基于 MR 技术的虚拟实验设计开发方案，并以“鲁班锁”为例完成了从教学设计、资源开发到教学验证的全过程。实践表明，MR 虚拟实验模式能有效提升青少年的科学学习成效与综合素养，为 MR 技术在基础教育中的创新应用提供了实证案例。本研究的局限性体现在样本范围较小，实践周期较短，且 MR 系统功能尚有优化空间。展望未来，随着 MR 硬件性能的提升与成本的下降，其教育应用前景广阔。MR 不应仅仅被视为一种新颖的演示工具，其真正价值在于推动教学范式的转变。它使得“做中学”、“创中学”和“沉浸

学”得以在安全、低成本的虚拟空间中大规模实施，使以学生为中心的深度探究式学习成为可能。

参考文献

郑永和, 杨宣洋, 陶丹等 (2024)。中国科学教育研究: 历史沿革、发展逻辑与未来展望。

华东师范大学学报(教育科学版)。2024, 42(11):95-110。

教育部等 (2023)。关于加强新时代中小学科学教育工作的意见。

张慕华, 刘紫依, 李妍 (2024)。沉浸式虚拟现实赋能科学教育能有效提升学生的学习结果吗? ——基于 2011~2022 年国内外 44 篇实证论文的元分析。现代教育技术。2024, 34(06):71-80。

杨馨宇, 黄斌, 向磊 (2024)。混合现实(MR)能提高学习成效吗?——基于 23 项实验与准实验的元分析。数字教育。2024, 10(04):10-15。

邱莹莹, 郑小军, 黄伊庭华 (2021)。虚拟现实、混合现实与混合现实技术在教育教学中的应用: 现状、挑战与展望。广西职业技术学院学报。2021, 14(03):61-66。

Jun Hong (2024) .Design and Evaluation of a Mixed Reality-Based Education Model: Impacts on Learning Outcomes.*BDMIP '24: Proceedings of the 2024 International Conference on Big Data Mining and Information Processing*, 241–245.