



基于 WebGL 的森林作业技术与装备虚拟仿真 实验系统

周成军, 邱仁辉, 巫志龙*, 胡喜生, 郑丽凤, 周新年

(福建农林大学 交通与土木工程学院, 福州 350002)

摘要: 针对伐区木材生产作业受高难度、高危险、高成本、不可逆和生态破坏等诸多因素的制约, 整合 WebGL 技术、网络技术和 3D 仿真技术, 开发了森林作业技术与装备虚拟仿真实验系统。设计了伐区创建与主伐分析、采伐作业技术与装备、集材作业技术与装备虚拟仿真实验内容。学生通过参数变量控制、作业过程观察和关键技术实操, 按操作步骤开展技能实训。开发的虚拟仿真实验系统具有实践性和交互性, 教学效果好, 有助于提升学生的实践能力和创新思维能力, 可为森林工程及相关专业的实验教学提供参考。

关键词: 森林工程; 实验教学; 虚拟仿真; 实验设计

中图分类号: G482、TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230598

Virtual Simulation Experiment System of the Forest Operation Technology and Equipment Based on WebGL

ZHOU Chengjun, QIU Renhui, WU Zhilong*, HU Xisheng, ZHENG Lifeng, ZHOU Xinnian

(College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Considering the constraints of many factors such as high difficulty, high risk, high cost, irreversibility and ecological damage of timber production in logging area, the virtual simulation experiment system of forest operation technology and equipment is developed with the integration of Web graphics library (WebGL) technology, network technology and 3D simulation technology. The virtual simulation experiment including cutting area creation and main cutting analysis, logging operation technology and equipment, skidding operation technology and equipment is designed. Through the parameter variable control, operation process observation and key technology practice, students carry out skill training according to the operation procedures. The virtual simulation experiment system has good practicality, interactivity and teaching effect, which is helpful to improve students' practical ability and innovative thinking ability. It can provide reference for experimental teaching of forest engineering and related majors.

Key words: forest engineering; experimental teaching; virtual simulation; experimental design

虚拟仿真实验教学将现代信息技术融入于实验教学, 是我国实现教育信息化过程的一个重要举措^[1-3]。虚拟仿真实验教学有效拓展了实验教学内容的广度和深度, 延伸了实验教学的时间和空间^[1,4], 以其沉浸性、交互性、逼真性和安全性等优势^[4-6], 顺应了教育信息化的发展趋势和现实需

求, 对深化高等教育实验教学改革和提升实验教学质量具有重要意义^[7-9]。近年来, 许多高校基于虚拟仿真技术在众多专业领域的实验教学中进行了广泛的实践, 取得了良好的教学效果^[9-11]。以往因受场地、时间、相关条件(高危或极端条件)等制约而“做不好”或“难做到”的实验内

收稿日期: 2023-12-14; 修回日期: 2024-04-15

基金项目: 国家教育部“工程索道”国家精品在线开放课程资助项目(教高函[2019]1号); 福建省本科高校“木材生产技术与装备”线下一流课程资助项目(闽教高[2019]23号); 中央引导地方科技发展专项(2022L3007); 福建省高等教育学会 2022 年度高等教育科学研究实验室研究专项重大项目(22FJSYZD005)。

作者简介: 周成军(1987-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事森林工程和工程索道装备方面的研究。

* **通信作者:** 巫志龙(1982-), 男, 博士, 正高级实验师, 主要从事森林工程和工程索道方面的研究。E-mail:

wuzhilong25@163.com

容,通过基于虚拟仿真技术的实验设计得以实现^[12-14],从而使实验教学覆盖全部的教学内容体系,有助于提升学生的专业实践技能,提高实验教学质量^[7]。

“木材生产技术与装备”课程实验教学中涉及的采伐和集材技术与装备运用实训,是森林工程专业人才创新实践能力培养的核心内容^[15]。然而,因受作业环境复杂、高成本、高危险和不可逆等诸多因素的制约,造成学生难以获得伐区木材生产实训的机会,甚至连实地参观都极为困难^[16-17]。森林作业技术与装备虚拟仿真实验系统通过利用虚拟仿真技术的在线实验方式,将生产流程复杂、操作危险系数高的伐区木材生产综合实训在虚拟仿真系统中实现,具有高效、逼真的线上交互式操作过程,有助于提高学生对课堂理论知识的掌握和解决实际问题的能力。这为森林工程专业实验教学提供了新途径,也为相关专业实验教学提供参考。

1 系统建设背景

采伐是森林经营的主要方式与重要环节之一,生态性的采伐既是收获林产品,也是森林抚育的重要内容^[15]。“木材生产技术与装备”是森林工程专业的专业核心课程之一^[15-17]。学校“木材生产技术与装备”是福建省本科高校一流线下课程,采用双语教学。该课程的伐区生产实践是综合性实训,为期2周。传统实践教学只能开展森林资源调查和统计、伐区规划设计、油锯实物结构认识和拆装等基本内容。由于南方山地林区地形地势条件极其复杂,存在木材生产作业难度大、劳动强度大、高危险和高投入等难题,而且森林采运作业具有周期长、分散、季节性强、不可逆、采伐和集材等作业对生态环境具有一定破坏性等特点^[16]。另外,现有的木材生产已由采伐天然林为主转向采伐人工林为主,高自动化与智能化的木材生产装备(如联合采伐机)已应用于我国桉树人工林的采伐作业中,但这些装备价格高昂,需要严格且昂贵的培训获得上岗证。因此,造成该专业学生难以获得采伐和集材作业关键技术及装备运用的实训机会。这严重影响了课程实践教学的完整性和学生对关键技术及装备的熟练掌握,无法达到理想的实践教学效果。

福建农林大学于2008年建成了森林作业与规

划动态仿真实验室,包括电控动态仿真沙盘模型和配套的影音教学系统;2017年建成了基于VR技术的森林工程虚拟仿真实验室,包括“森林作业技术与装备”和“工程索道”2个VR虚拟仿真实验项目,在培养学生的创新实践能力方面发挥了重要作用^[16],但不足之处在于尚无法满足线上教学需求,且缺乏先进的采伐和集材技术装备运用的虚拟仿真实验内容。2021年进一步整合WebGL技术、网络技术和3D仿真技术,开发了网络版“森林作业技术与装备虚拟仿真实验系统”,以满足线上教学需求和扩大共享范围,同时还新增了伐区不同林班创建、3种主伐方式分析、联合采伐机和集材机等先进技术装备运用的虚拟仿真实验内容,填补了学校森林工程虚拟仿真实验线上教学途径的空缺。现已形成森林作业技术与装备线上线下混合式虚拟仿真,全方位服务于森林工程专业的实验教学。

2 系统建设内容

2.1 系统开发技术与工具

该系统基于B/S架构开发^[12-13],主要由服务端和Web客户端组成。服务端主要负责森林作业技术与装备仿真数据和虚拟场景管理;Web客户端用于仿真实训操作。系统开发运用了3D仿真、3D建模、WebGL、多层次细节(levels of detail, LOD)等技术,以及Unity 3D、3ds Max、Maya、Visual Studio、Eclipse等工具,实现森林场景和对象的三维建模与动画制作、场景实时变化和优化渲染等,确保了仿真系统良好的视觉效果和操作体验。

2.2 实验思路与方案设计

1) 实验设计总体思路

以实际案例为原型,通过三维仿真技术,再现森林采伐和集材作业的真实场景,还原现代油锯伐木、联合采伐机伐木、轻型索道集材、集材机集材的作业过程。在学生了解森林采伐和不同主伐方式的基础上,重点展示现代油锯伐木和轻型索道集材关键技术、工艺流程与装备运用的实践性和交互操作;其次通过动画演示,直观认识联合采伐机和集材机的作业过程。学生通过实验,不仅对森林采伐和集材作业过程有了全面地了解,而且还能熟练掌握其关键技术、工艺装备和安全注意事项等,以提升专业实践技能和综合

素质能力。

2) 实验考核要求

每个考核项操作后，无论正确与否，系统都会自动记录，并以弹框提示判定的依据(采伐和集材相关理论知识、技术规程或要求)。为了使后续步骤不受影响，当某一考核项操作有误时，系统仅记录和提示，但在后续步骤中将以正确结果呈现，以便实验继续进行。实验完成后，所有考核项正确操作才能通过；否则为不通过，需重新进行考核。

3) 人机交互操作界面

该界面简洁直观，支持鼠标和键盘操作。界面呈现操作引导，学生通过鼠标左键点击相关按钮，实现交互操作体验感。通过按住键盘上的 W、A、S、D 键来控制人物在场景中的漫游或控制装备的前、后、左、右移动，同时按下“Shift”

键，可实现加速移动。通过按住鼠标左键拖动，可实现旋转场景视角。

3 实验项目建设

3.1 伐区创建与主伐分析虚拟仿真实验

根据我国南方山地林区地形地势特点，以邵武市二都林业采育场黄家山下坡石工区(课程组于 2012 年开展了邵武轻型索道集材试验研究，地形为两坡夹一沟，坡度 25°~30°，沟底有一条运材道路，道路两旁设有卸材场地)为原型，创建伐区地形虚拟场景。通过设置“伐区林班信息”创建林班，设置选项均为单选，如图 1 所示。学生可在虚拟森林场景中漫游，自主查看林木分布情况；点击单株林木树干时，在相应单木上距离地面 1.3 m 处会显示光标标记，同时在页面呈现单木信息(树种、胸径和树高)。



图 1 伐区林班信息设置界面

通过设置不同采伐方案进行主伐方式分析，设置选项均为单选，如图 2 所示。学生可自主设置某一种主伐方式和相关参数，执行该采伐方案后，学生可在采伐后的场景中漫游，自主查看采伐木或保留木的信息，以及在页面呈现采伐前后林分信息对比；还可通过“鸟瞰图”的视角观看采伐后的伐区全景。

3.2 采伐作业技术与装备虚拟仿真实验

3.2.1 现代油锯伐木虚拟仿真实验

由于森林场景复杂多样，为便于考核学生对现代油锯伐木技术知识点的运用情况，简化了伐木场景，软件开发层预设可漫游范围及其范围内的 10 棵活立木、伐区边界；边界内外各有 1 棵活立木，其中距边界内此棵活立

木周围 1~2 m 范围内预设了 2 棵枯立木、杂草和藤条等，距其 3~5 m 范围内 4 个不同方向分别预设了幼树幼苗、陡坎、伐根和空旷地，这些将为后续实验操作做准备。学生需运用所学的理论知识和技术规程，按界面提示进行交互操作，熟练掌握伐木作业关键技术和安全要求等。

1) 伐木前观察现场

进入场景后，为确保作业安全，根据界面提示“先伐除枯立木”，通过漫游和旋转视角，认真观察采伐现场情况，识别枯立木；点击枯立木树干，出现红色标记进行伐除，直至弹出提示框“已先将枯立木采伐”，点击“确定”，进入下一步骤，如图 3 所示。

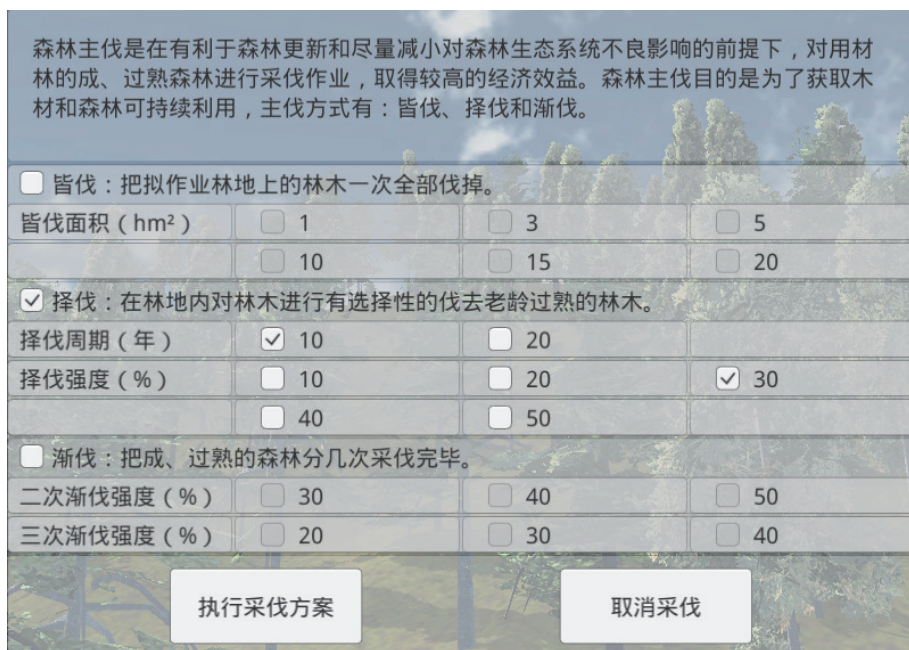


图2 主伐采伐方案设置界面



图3 伐木前观察现场场景图

2) 选择采伐木

为便于伐木操作示范, 仅以选择 1 棵带绿色光标的活立木为例。根据界面提示, 当点击活立木树干时出现绿色光标, 并提示已选定采伐木, 点击“确定”, 进入下一步骤, 如图 4 所示。

3) 判定树倒方向

操作到此步骤时, 在待采伐木的地面上会出现 4 个浅绿色箭头指示可能的树倒方向(软件开发层按技术要求预设), 当鼠标移动到箭头时变为深绿色, 点击鼠标左键, 按照提示判定适宜的树倒方向(选定后, 直至立木伐倒后才

消失); 点击“确定”, 进入下一步骤, 如图 5 所示。

4) 开安全通道

在待采伐木地面上会呈现 5 块供选区域(软件开发层按技术要求预设), 当鼠标移动到某块区域时变为深绿色, 点击鼠标左键, 按照提示选择适宜开设安全通道的区域; 点击“确定”, 进入下一步骤, 如图 6 所示。

5) 清理采伐木周围障碍

点击右上角“清除障碍”, 直至提示“已清除采伐木周围 1~2 m 范围内障碍物”; 点击“确定”, 进入下一步骤, 如图 7 所示。

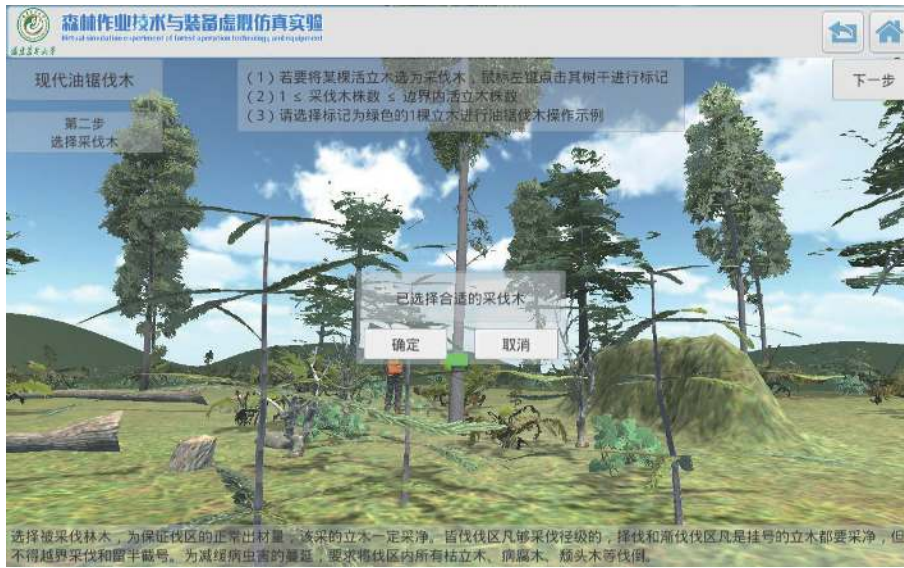


图 4 选择采伐木场景图



图 5 判定树倒方向场景图



图 6 开安全通道场景图



图 7 清理采伐木周围障碍场景图

6) 锯下口

在树倒方向箭头指向上, 待采伐木树干呈现 2 个白色箭头(软件开发层按技术要求预设), 当鼠

标移动到箭头时变为深绿色, 点击左键, 按照提示选择一个适宜的下口位置, 锯下口完成后, 进入下一步骤, 如图 8 所示。



图 8 锯下口场景图

7) 锯上口

在树倒方向箭头指向的反方向上, 待采伐木树干呈现 2 个白色箭头(软件开发层按技术要求预设), 当鼠标移到箭头时变为深绿色, 点击左键, 选择一个适宜的上口位置, 锯上口完成后, 进入下一步骤, 如图 9 所示。

8) 推树

在树倒方向箭头指向上, 采伐木附近存在安全隐患(软件开发层按技术要求预设), 按照提示

判断采伐木周围是否存在安全隐患, 若存在, 点击安全隐患处即可消除; 点击右上角“推树”按钮, 提示“检查安全隐患, 是否现在推树?”; 点击“是”, 进入下一步骤, 如图 10 所示。

9) 油锯打枝

选择打枝人数; 软件开发层预设以第一个枝桠为例, 选择打枝位置; 点击右上角“继续打枝”按钮, 逐步打枝直至提示“打枝完成”; 点击“确定”, 进入下一步骤, 如图 11 所示。



图 9 锯上口场景图



图 10 推树场景图

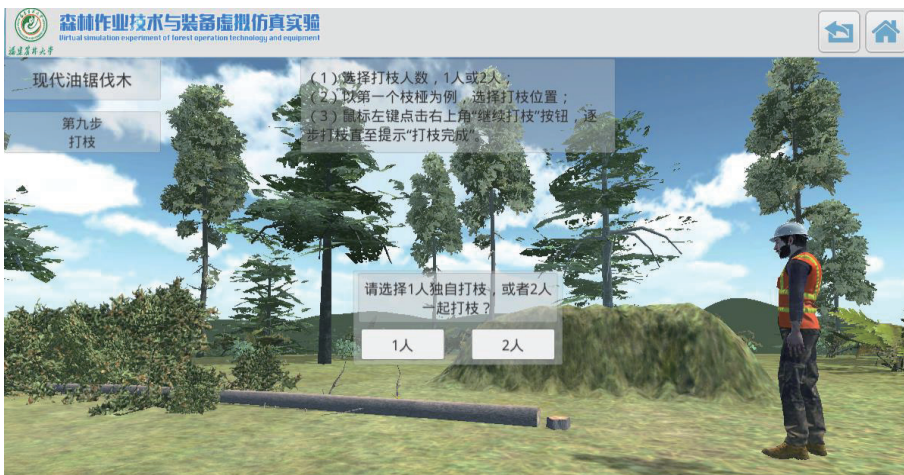


图 11 油锯打枝场景图

10) 山场造材

根据弹框提示, 选择正确的量材及造材技术要求, 原条量材后出现绿色光标标记, 鼠标移动到绿色光标位置时, 出现油锯, 点击鼠标左键进

行造材, 如图 12 所示。

11) 考核结果

造材完成后, 点击右上角“完成”, 得出考核结果, 如图 13 所示。若考核不通过, 需重新考核。

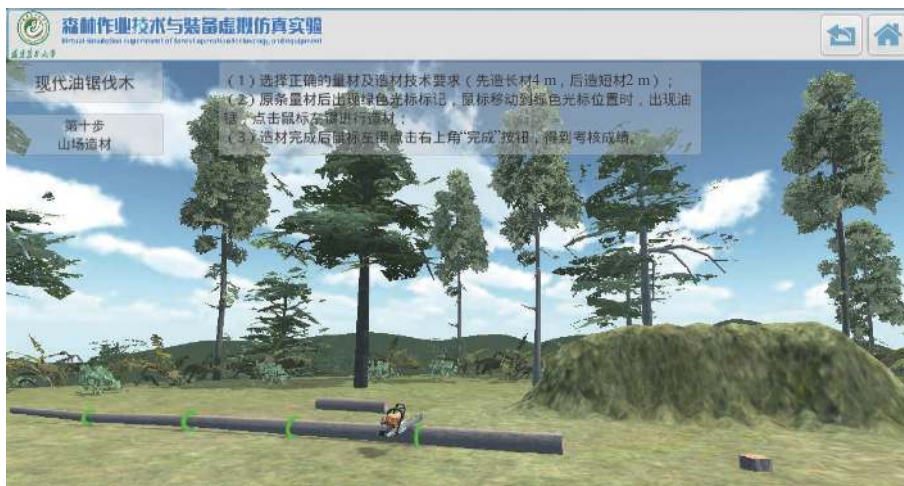


图 12 山场造材场景图

现代油锯伐木：考核成绩		
作业步骤	考察点	结果
第一步：伐木前察看现场	采伐前先伐除枯立木或病腐木	✓
第二步：选择采伐木	选择采伐木	✓
第三步：判定树倒方向	选择树倒方向	✓
第四步：开安全通道	选择安全通道位置	✓
第五步：清理采伐木周围障碍	清理采伐木周围1-2米范围内障碍物	✓
第六步：锯下口	选择锯下口位置	✓
第七步：锯上口	选择锯上口位置	✓
第八步：推树	推树时防止发生安全事故	✓
第九步：打枝	选择1人打枝或2人打枝	✓
	选择打枝位置	✓
第十步：山场造材	选择正确的量材及造材技术要求	✓
考核结论：通过		

图 13 现代油锯伐木考核结果图

3.2.2 联合采伐机伐木虚拟仿真实验

该实验以动画演示的形式, 让学生了解联合采伐机进行伐木、打枝和造材一体化作业的过程。将联

合采伐机移动至待采伐木处; 将采伐机的采伐头抱紧采伐木树干的根部; 锯切并将立木伐倒; 进行打枝和造材。联合采伐机打枝和造材作业场景如图 14 所示。



图 14 联合采伐机打枝和造材作业场景图

3.3 集材作业技术与装备虚拟仿真实验

3.3.1 轻型索道安装与集材虚拟仿真实验

在轻型索道安装与集材虚拟场景中，以福建省邵武市二都林业采育场下坡石伐区全悬增力式轻型索道集材为例，了解轻型索道安装架设前期准备工作和制定索道安装架设施工计划，包括开设人行道、清除索道线路上的障碍物、清点设备及材料、平整绞盘机安装场地等。熟练掌握轻型

索道安装架设关键技术和安全注意事项，包括索道绞盘机安装、导向滑轮锚固、钢丝绳铺设、承载索锚固，安装复式滑车组、绳夹板、跑车，以及承载索张紧、试运行等。安装复式滑车组场景如图 15 所示。索道试运行后，投入集材生产作业，熟悉索道集材一个工作循环流程和安全作业要求。索道集材完毕后，拆除索道，熟练掌握拆除关键技术和安全要求。



图 15 安装复式滑车组场景图

轻型索道安装与集材虚拟实验中，对索道安装架设关键技术设置了技能考核项，分别为选择适宜绞盘机前绷索和后绷索与其伐根安装角度，选择适宜绞盘机卷筒前方第一个转向滑轮锚固的伐根，选择钢丝绳在伐根上的锚固方法，以及选

择承载索锚固卡子数和卡子间距。若考核结论为不通过，需重新考核，如图 16 所示。

3.3.2 集材机集材虚拟仿真实验

该实验以动画演示的形式，让学生了解集材机进行伐倒木集材的作业过程。首先将集材机

移动至待集的伐倒木位置, 抓钩抓取伐倒木根部, 拖集伐倒木至楞场, 最后将伐倒木归堆,

完成集材作业。集材机拖集伐倒木场景如图 17 所示。

轻型索道安装与集材：考核成绩		
作业步骤	考察点	结果
安装绞盘机前缆索	选择适宜绞盘机前缆索安装的伐根	✓
安装绞盘机后缆索	选择适宜绞盘机后缆索安装的伐根	✓
安装绞盘机转向滑轮	选择适宜锚固绞盘机卷筒前方第一个转向滑轮的伐根	✗
导向滑轮固结	选择滑轮在伐根上捆挂的锚固方法	✓
承载索固结(一)	选择锚固所需卡子数	✓
承载索固结(二)	选择正确的卡子间距	✓
承载索固结(三)	选择承载索卡接方法	✗
考核结论：不通过，重新考核		

图 16 轻型索道安装与集材考核结果图



图 17 集材机拖集伐倒木场景图

4 实验项目特色及教学应用

4.1 实验项目特色

1) 实验难题有效解决

山地林区地形地势极其复杂, 木材生产作业实验的难度大、危险高、投入高、不可逆。该虚拟仿真实验教学系统以学生需求为导向, 以虚补实, 使实验教学突破时空、复杂地形、作业危险和生态破坏等的限制, 虚实结合构建了更完善的

知识体系, 提高人才培养质量。

2) 实验内容精心设计

紧扣伐区木材生产特点, 创建伐区场景与主伐方式分析, 抓住“采伐-集材”关键环节, 精心设计了现代油锯伐木、联合采伐机伐木、轻型索道集材和集材机集材虚拟仿真实验, 使课程实验内容更加丰富和完整, 增强了学习的趣味性和吸引力, 满足了学生熟练掌握木材生产关键技术、工艺流程和装备运用的需求, 有助于培养学

生的生态文明和绿色工程意识,提升实践创新能力。

3) 技术手段丰富多样

构建了 3D 实验场景、网页版交互虚拟仿真、沉浸式 VR 虚拟仿真^[16]等实验教学资源,通过线上交互操作和线下 VR 体验等多样化形式,让学生融入身临其境的森林作业环境及人机交互环节,融合动画体验启发式与交互操作探究式教学方法,引导学生思考和研究,掌握实验的关键知识点和操作技能,提高了实验教学质量。

4.2 教学运行情况

从 2022 年起,基于 WebGL 的森林作业技术与装备虚拟仿真实验系统已成功应用于学校森林工程专业本科生“木材生产技术与装备”专业核心课程的实验教学中,同时还纳入学校仪器设备共享,可为学校林学、森林保护、生态学等相关专业相关课程提供在线实验教学服务。实践表明,基于 WebGL 的虚拟仿真线上实验教学与线下 VR 虚拟仿真体验^[16]相结合,多样化的虚拟仿真体验,极大地激发了学生的学习兴趣,使学生能综合运用森林采伐和集材的技术、工艺与装备等相关理论知识,熟练掌握了伐区木材生产的工程实践技能,提升了解决实际问题的能力和创新思维能力,取得了良好的教学效果。

5 结束语

开发了基于 WebGL 的林作业技术与装备虚拟仿真实验系统,不受实验场地和时空限制,安全性高,有效解决了伐区木材生产实训难以开设的问题。

该系统已成功应用于本校森林工程专业“木材生产技术与装备”专业核心课程的实验教学,有助于学生深入了解伐区木材生产中“采伐-集材”作业过程,从而熟练掌握伐区木材采伐和集材关键技术、工艺流程和装备运用,实现专业实践技能和综合素质能力的提升。可为全国农林高等院校森林工程专业以及相关专业的实验教学提供有益参考。

参考文献

- [1] 尉小荣. 高校虚拟仿真实验课程应用评价研究[J]. 实验室科学, 2024, 27(1): 90-94.
- [2] 陈彬, 郜振华, 徐宏, 等. 我国虚拟仿真实验教学的

研究现状分析及对策建议[J]. 中国现代教育装备, 2023(15): 30-32.

- [3] 朱辰, 金心宇, 魏兵, 等. 5G 移动通信虚拟仿真教学实验平台的构建与应用[J]. 实验科学与技术, 2023, 21(6): 55-60.
- [4] 马登成, 胡永彪, 张新荣. 盾构机施工原理与过程虚拟仿真实验设计[J]. 实验科学与技术, 2022, 20(4): 18-22.
- [5] 周越, 杨宗浩, 解宇. 基于视觉的智能驾驶虚拟仿真平台与课程教学实践[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(5): 255-259.
- [6] 彭志斌, 何利明, 况立群, 等. 基于 WebGL 的火药燃烧虚拟仿真实验系统[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(4): 204-209.
- [7] 张金菊, 孙士国, 龚思颖, 等. 虚拟仿真实验教学一流课程持续改进[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(1): 125-129.
- [8] 任晓辰, 邱春婷. 三维交互式场景虚拟现实建模仿真研究[J]. 计算机仿真, 2024, 41(1): 217-221.
- [9] 高志强, 王晓敏, 闫晋文, 等. 我国虚拟仿真实验教学项目建设的现状与挑战[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(7): 5-9.
- [10] ZAED I, CHIBBARO S, GANAU M, et al. Simulation and virtual reality in intracranial aneurysms neurosurgical training: A systematic review[J]. Journal of Neurosurgical Sciences, 2022, 66(6): 494-500.
- [11] CHEN D W, KONG X D, WEI Q. Design and development of psychological virtual simulation experiment teaching system[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2021, 29(2): 481-490.
- [12] 吕建军, 徐仁桐, 郑菊艳. 基于 Unity WebGL 的海洋平台建造虚拟仿真系统[J]. 中国海洋平台, 2021, 36(3): 72-77.
- [13] 郭神福, 赵孔阳, 王孝龙, 等. 基于 WebGL 的高速列车在线运行及沿线虚拟地理环境仿真[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(3): 573-581.
- [14] 綦志刚, 杨帆, 李冰. 基于动力定位平台的虚拟仿真系统[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(1): 87-90.
- [15] 孙小添, 郭根胜, 岳海军, 等. 森林工程专业复合应用型人才培养实践教学体系构建: 以内蒙古农业大学为例[J]. 教育教学论坛, 2020(20): 141-143.
- [16] 巫志龙, 周成军, 邱仁辉, 等. 基于 VR 技术的森林工程虚拟仿真实验室建设[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(4): 282-284.
- [17] 李耀翔, 狄海廷, 杨德岭. 木材生产虚拟仿真实验项目的建设与实践研究[J]. 科技创新与生产力, 2021(2): 88-90.