

面向出水瓷器修复的虚拟清洁训练设计研究

颜洪, 钟烨, 李秋霞
(海南大学, 海口 570228)

摘要: **目的** 传统出水瓷器的清洁训练存在高成本、高消耗、不可逆操作等问题, 利用计算机虚拟现实技术, 设计开发一套海洋出水瓷器清洁工作的数字仿真训练平台。**方法** 对清洁修复训练进行实例调研和理论分析, 构建清洁修复任务分解策略, 并提出基本清洁作业分类的虚拟手动动作仿真方法, 对清洁训练中的空间环境、使用工具、人物等要素进行3D建模, 利用Unity 3D技术实现作业处理以及数据分析处理, 从而构建整个出水瓷器清洗的训练系统。**结论** 该方法将虚拟现实技术与出水文物的修复结合起来, 使训练者在沉浸性、构想感的学习环境中掌握清洁过程中行之有效的方法和使用材料, 为下一步的瓷器修复奠定基础。

关键词: 出水瓷器修复; 清洁虚拟训练; 虚拟现实

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)22-0014-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.22.003

Virtual Cleaning Training Design for Underwater Porcelain Repairing

YAN Hong, ZHONG Ye, LI Qiu-xia
(Hainan University, Haikou 570228, China)

ABSTRACT: Traditional cleaning training of underwater porcelain has problems such as high cost, high consumption and irreversible operation. This paper uses computer virtual reality technology to design and develop a digital simulation training platform for underwater porcelain cleaning. The paper carried out case investigation and theoretical analysis of cleaning and restoration training, constructed cleaning and restoration task decomposition strategies, and proposed a virtual hand movement simulation method for basic cleaning task classification, carried out 3D model of the space environment, tools, characters and other elements in cleaning training, and uses Unity3D to realize job processing and data analysis and processing, so as to construct the entire training system for underwater porcelain cleaning. This method combines virtual reality technology with the restoration of underwater cultural relics, enabling the trainer to master the effective methods and materials used in the cleaning process in an immersive and conceptual learning environment, laying the foundation for the next step of porcelain restoration.

KEY WORDS: underwater porcelain repair; virtual cleaning training; virtual reality

我国南海拥有210多万平方公里的管辖海域, 是海上丝绸之路极其重要的区段, 对外贸易往来频繁, 从古至今大量过往的船舶在南海海域沉没。据国家文物局水下文化遗产保护中心推测, 南海海域遗存的古代沉船至少在2000艘, 且出水文物中以瓷器为大宗^[1]。这些出水文物是我国文化遗产的重要组成部分, 具有

非常重要的艺术、文化和科研价值。然而, 我国文物修复专业人才严重缺乏, 出水瓷器文物修复人才更是凤毛麟角。而南海水下文化遗产数量大, 仅急需修复的馆藏文物就有十余万件, 文物修复工作远远不能满足文化遗产保护的需要。在文物修复实践中, 每件器物都有不同的损坏程度和损坏部位, 根据瓷器不同

收稿日期: 2021-06-09

基金项目: 海南省重点研发计划(ZDYF2020026); 海南省高等学校科学研究项目重点项目(HNKY2021ZD-7)

作者简介: 颜洪(1984—), 男, 吉林人, 博士, 海南大学副教授, 主要从事个性化推荐、人机交互研究。

通信作者: 李秋霞(1995—), 女, 四川人, 硕士, 海南大学研究生, 主要从事交互设计。

情况需采取不同的修复措施,大致可分为 5 个部分——清洁、粘接、补配、作色和仿釉。出水瓷器的清洁,作为修复过程中的第一步,对于后续修复起到重要作用^[2]。在训练课程中,通过对出水瓷器清洁的学习,使训练者了解到出水瓷器表面清洁的一般方法、清洁的重要性以及在清洁过程中行之有效的方法和使用材料,为下一步瓷器的修复奠定基础。

然而,面向出水瓷器清洁的训练,具有训练成本高、场地空间需求大、实验环境要求严格、不可逆操作等诸多问题。相比于传统的清洁训练方法,利用虚拟现实技术开发了一套交互式出水瓷器清洁训练系统,采用 C4D 软件完成各要素——文物瓷器、清洁工具、操作人物等逼真化建模,利用 Unity 3D 基本实现了各系统要素的整合,其中包括:物理属性、3D 模型融合、界面设计、交互设计,以及综合训练评价。系统能够克服传统瓷器修复训练场的束缚,具有较强的灵活性,可以辅助训练者反复多次实训演练,有效地降低了清洁工作的成本且保证了训练的高效性。此外,将出水瓷器修复与虚拟仿真教学相结合,有利于实现文物修复技术人员岗位培训的高效化、现代化,从而解决传统理论教学与人才培养实践性之间的矛盾,拓展技能训练的深度与广度。

1 关联研究

近年来,很多国内外学者利用虚拟现实技术开展了广泛的实践教学和文物修复的相关研究^[3-8]。例如,中国航海博物馆的古船修复考古项目^[9],可有效提高确定文物古船修复方案的效率并对施工过程中可能发生的二次破坏进行预防。通过对古灯船“牛庄灯船”进行三维激光测绘获取详细的几何数据并建立模型,并利用基于虚拟现实技术创建的仿真平台进行修复方案的选择,帮助文物古船修复工程的顺利进行。北京大学与北京地质博物馆联合设计的“万龙离巢”互动视频教学系统^[10],通过利用虚拟仿真技术重建了古生态场景,打造的体验式教学克服了传统的古生物学教学方式过于枯燥单一的缺点,用逼真的场景和音效给学生带来身临其境的体验。北京林业大学研发了一款以北京地区珍稀野生动物为展现内容的虚拟仿真实验教学系统^[11]。针对珍稀野生动物数量稀少实地教学困难等问题,该交互系统增加了互动游戏环节,丰富了教学内容,提升了学生学习的兴趣。虚拟现实技术的沉浸式、交互式的教学体验模式,打破了空间的局限,通过心理研究领域促进了教学方法的改革与发展。荷兰格罗宁根大学开发了针对社会环境下的虚拟现实人脸情感识别系统^[12]。该虚拟现实系统可以在社会环境中用于评估和训练情绪识别,个体通过完成 3 个情绪识别任务,系统会对虚拟现实任务中的人物情绪进行评分并在其中记录眼动,该系统可以识别厌恶、恐惧、悲伤、惊喜和快乐等情绪,准确率总体高

达 75%。沉浸式虚拟现实任务可以用于情感识别的训练和评估,这些通过验证识别的情感表达和任务将对临床心理领域有一定推动作用,有现实性的进步意义。

另一方面,针对出水瓷器清洁的训练,需要考虑到培养学习者在修复工作中的手眼协调,这就要求系统要有更加真实的人机交互体验^[13-15]。有多种方法可以有效地增加用户的虚拟体验^[16],例如江苏师范大学设计研发了高铁列车检修虚拟仿真实验教学系统^[17]。针对高铁列车的检修,传统实验教学存在效率低下、成本高昂、异常工况无法再现等问题,通过脚本设计和系列动画等技术,增加虚拟检修实验的人机交互体验。英国谢菲尔德大学的虚拟仿真项目^[18]首次为真实病人操作复杂牙科手术之前的准备工作,主要过程是使用 3D 打印机仿制出真实病人的面部口腔模型,利用虚拟现实仪器模拟手术过程,从而提高医学生的信心以及手术操作能力,使医学生在首次面对临床手术时可以预先练习提高手术效率,也提高了被治疗患者的手术成功率和治愈率,该项目对医疗教育领域有着一定的价值,在为真实病人治疗前,前期的模拟准备对医学生来说是一种积极的体验。美国威斯康辛大学斯托特分校的研究项目^[19],针对解决阿尔茨海默或痴呆患者认知能力受损的运动问题项目,利用传感器和电机使患者能够进行有效的人机交互,基于虚拟现实游戏提供的带有触觉振动的刺激反馈,可触发腿部肌肉收缩,并通过实施新的干预策略,从而提高患者的平衡感和步行能力。这些创新性的实践不仅达到了良好的交互效果,也从侧面证明了虚拟仿真技术在实践探索中的通用性和可拓展性^[20-23]。

2 清洁修复任务设计

针对不同损害的瓷器,其清洗任务具有不同的特点,清洁修复方法通常是依据文物修复工作准则执行。针对不同类型的瓷器应该采取不同反馈措施,例如:釉上彩经过长年的盐水浸泡非常容易剥落;有的瓷器对酸液敏感,容易腐蚀掉色;遇到海水侵蚀情况严重的陶器,在采用酸液除垢时注意要用低浓度的酸液,避免进一步破坏。因此在强调清洁方法的正确运用时,对器物状态的准确把握有利于方法有效无误地实施。出水瓷器清洁训练任务设计见图 1,可以分为模拟观察、清洗方案的实施。

2.1 器物观察的模拟

模拟观察时训练者可以通过多视角作业和动态手势对瓷器表面进行全方位观察,训练者可以将观察所得结果在系统中进行记录,系统也会根据记录结果生成观察报告。模拟观察主要包括以下几个内容:(1)模拟观察确认瓷胎的性质,例如,是瓷胎还是陶胎;注重观察其胎体的风化、粉化程度,以及是否有酸咬碱蚀等现象。(2)模拟观察釉面的情况,例如

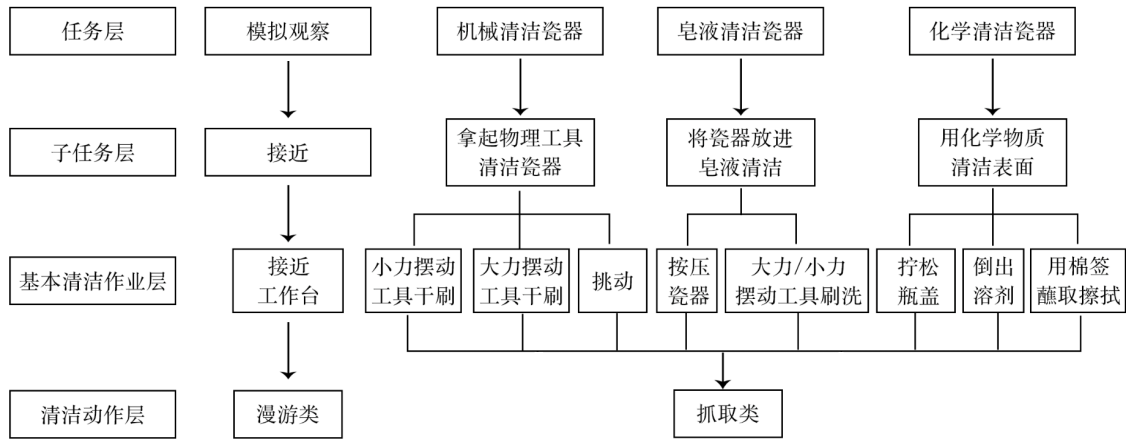


图1 出水瓷器清洁训练任务设计

Fig.1 The task design for underwater porcelain cleaning training simulation

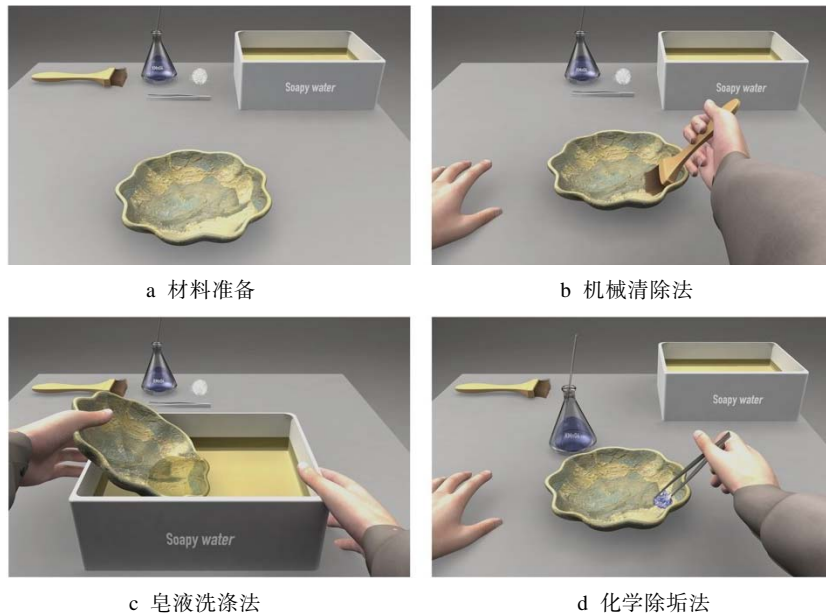


图2 清洁方法的模拟

Fig.2 Simulation of cleaning methods

表面龟裂程度、釉面光滑程度、釉层附荷力程度，以及其剥落情况等性质。(3) 模拟观察确认器物表面及断面污染情况，明确器物上泥土、杂质和污垢的种类、性质、附着力大小以及对器物本身的侵蚀情况。如果发现器物表面附有重要历史遗迹，在清洁修复过程中就要着重对表面进行保护。通过以上的观察和分析后，可制定出下一步正确有效的清洗方案。

2.2 清洁方式的模拟

清洁方法的模拟见图2，出水瓷器文物的清洁处理操作方法大体有机械清除法、皂液洗涤法和化学除垢法3种不同的清洁处理方法。每种方法的清洁侧重点、力度都不尽相同，通常一款瓷器的清洁并不是一种方法就能完成，而是需要多种方法协调搭配完成，清洁工具或清洁剂量的不慎使用还可能会对瓷器造成进一步伤害。清洁方法的选择、清洁工具的使用方

法、溶剂的使用剂量等这些都是重点训练并进行考核的内容。(1) 机械清除法。机械清除法主要是通过毛刷、刀锥、小型超声波清洗机等工具对瓷器表面进行清洁，对于易清理的杂质常采用细铜刷或硬毛刷对器物表面进行干刷。此方法主要应用于不宜水洗、酸洗的器物上。(2) 皂液洗涤法。皂液洗涤法是一种最常用的清洁方法，主要是用肥皂水或洗涤剂对瓷器表面进行浸泡刷洗，去除污垢和杂质。但对于一些低温烧制的瓷器、粉化严重的瓷器使用此方法，会对瓷器造成酥解和纹样破坏。(3) 化学除垢法。化学除垢法主要利用化学药品来清除出水瓷器物表面上的铁碱或氧化类的污染物。常用的化学药剂有：柠檬酸、酸液除垢、高锰酸钾、过氧化氢等。化学除垢需要严格把握溶剂的剂量和使用方法，操作时需用棉签蘸取适度溶剂或水稀释过的溶剂在污垢处缓缓擦拭。

2.3 清洁手部操作的模拟

不同清洁任务均有各自的操作特点，出水瓷器清洁作业中主要是强调虚拟手的操作要素，虚拟手的操作主要分为漫游、抓取操作 2 个部分。漫游主要实现观察训练环境、修复对象、修复工具及材料，同时利用虚拟手在空间的平移和旋转动作配合抓取手形完成清洁操作动作；抓取类主要针对出水瓷器清洁时所使用的根本手部动作，针对出水瓷器或清洁工具的固定手势，体现在各种抓握手形上，徒手操作（如翻转、移动、抓、抱、释放等）和利用工具时的清洁操作（如挑、扫、倒、捏等）。

2.4 清洁训练结果的评价

训练完成后，系统将自动储存训练者演练的清洁作业路径、完成作业时间值、达成的清洁率以及操作错误造成的受损值等作业结果的相关数据，对比标准清洁作业结果，对训练者演练的清洁作业结果进行方差分析和校正，实现对训练者实验操作的系统评价。训练者清洁作业结果越接近标准作业结果，系统综合评价越高。但在实际的修复过程中，清洁客体存在超越系统阈值的复杂性，加入主观评价可以保留一定空间的训练内容灵活性。例如：出水瓷器并非清洗得越彻底对其留存越有利，对于一些有时代特征的，能反应一定品种特点或能体现出一定美感的杂质、锈蚀也可以给予适当保留。通过系统评价并结合指导老师专业经验和修复器物的特殊性最终实现训练结果综合评价。

3 清洁训练系统的实现

出水瓷器清洁训练是一项复杂的系统工程，复杂主要体现在清洁样本的多样性、特殊性。在实验前期工作中，对南海博物馆出水瓷器清洁实训案例进行大

量调研分析，对各类待清洁出水瓷实物进行模型数据采集，构建虚拟出水瓷器库，参考已有的修复训练环境，规划合理的清洁作业方案，并有针对性地进行清洁训练，保证高效的训练效果。系统建模是平台搭建的基础，其中瓷器文物库的建模是系统建模的重点，高逼真化的建模实现训练者视觉体验上最大程度的沉浸感。通过三维模型融合构建要素齐全的文物修复环境，系统仿真是核心和难点内容，通过分析数据对训练结果进行主客观评价，以实现虚拟实训的目的。在系统仿真模块中重点突出虚拟手运动仿真和作业处理仿真，虚拟手的运动仿真是实现人机交互良好体验和保证训练作业真实高效的重要模块，作业处置仿真是手部运动反馈机制，直接反映了清洁训练的成果。同时，系统主要以“清洁度最高”“受损程度最低”“清洁顺序正确”“作业时间”等原则进行客观评价，系统外结合指导老师专业经验和器物的特殊性进行主观评价。在完成最终测试后，可以跨平台将系统发布于各类主流操作系统平台上。出水瓷器清洁训练平台总体结构设计见图 3。

在构建训练系统的过程中，考虑到用户存在对于流程还不熟练和注意力不够集中的现象，为了使用户最有效率地掌握操作流程和注意力最大限度地保持在沉浸式 VR 场景中的目标对象上，使用了 2 种基于视觉的注意力引导方式^[24]：使用聚光灯，亮化目标区域，暗化周围场景；对目标对象进行框选。注意力的引导见图 4。除了视觉引导以外，也可以通过在场景中设置立体声源，对用户行为进行引导。通过实践可以发现，不同的引导方式的有效性具有差异性，其中声音引导是沉浸式体验最好的方式，且可以对用户行为进行有效地引导；框选对象次之，可以让用户最快地选择目标；聚光灯存在感稍弱，但可以无意识地影响用户的注意力，有效地排除了周围环境的干扰。

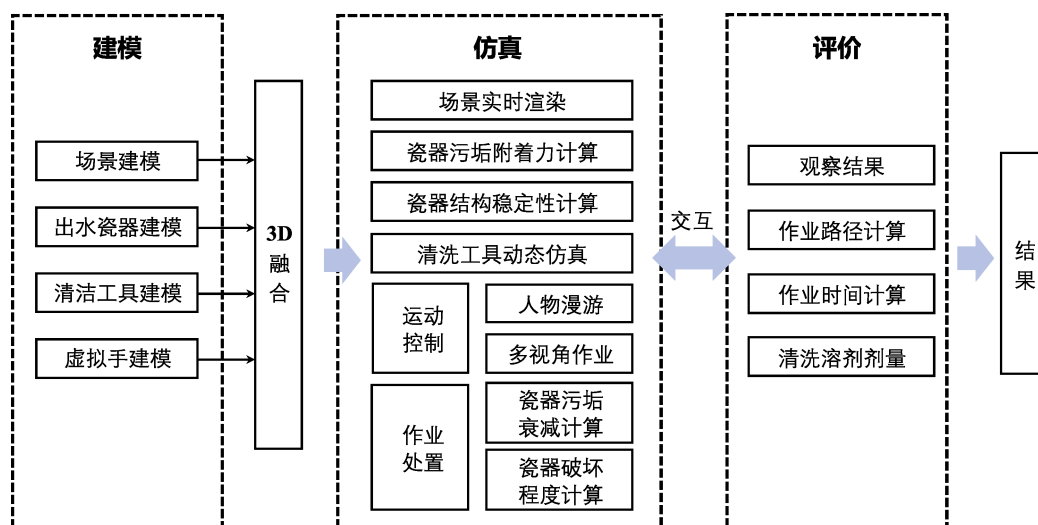
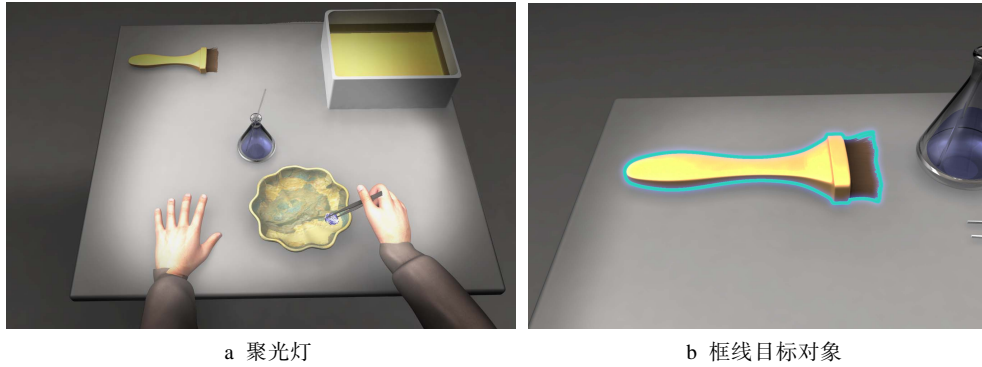


图 3 出水瓷器清洁训练平台总体结构设计

Fig.3 The overall structure design of the underwater porcelain cleaning training platform



a 聚光灯

b 框线目标对象

图4 注意力的引导

Fig.4 The guidance of user's attention

为了创建高质量、高逼真的3D模型仿真环境,利用C4D软件对一系列作业场景进行建模,如实验环境、出水文物等;对工具进行建模,清洁刷、竹签、棉签、超声波清洗机等一系列3D模型,烘焙贴图以及动画设计。

4 结语

本文针对南海出水瓷器文物修复过程中实际面临的高成本、高消耗、不可逆操作训练等问题,研究了适应于瓷器清洁训练领域的虚拟仿真方法。该方法从形式上,改变了以往传授知识的呈现方式和学习交互方式,将传统固化的、僵硬的学习内容用人机交互方式更加灵活生动地呈现出来,增加了用户在学习过程中的沉浸感、构想感和交互性^[24],有利于提高用户的学习兴趣和效率,培养了相关的职业技能,是对传统实训教育的补充和创新。从内容上,让训练者直观明了地学习到了海洋出水瓷器文物清洁的相关理论知识与操作知识,并切身参与训练,熟练地掌握了整个清洁流程,理论与操作技艺都得到了提升。

参考文献:

- [1] 国家文物局考古研究中心. 国家文物局水下文化遗产保护中心[EB/OL]. (2014-10-10)[2021-04-10]. <http://www.uch-china.com/>.
Archaeological Research Center of the State Administration of Cultural Relics. Underwater Cultural Heritage Protection Center of the State Administration of Cultural Relics[EB/OL]. (2014-10-10)[2021-04-10]. <http://www.uch-china.com/>.
- [2] 吴启昌. “南海1号”两件出水瓷器文物的保护与修复[J]. 文物保护与考古科学, 2016, 28(1): 93-100.
WU Qi-chang. Protection and Restoration of Two Water-out Porcelain Cultural Relics in “Nanhai No.1”[J]. Cultural Relics Conservation and Archaeological Sciences, 2016, 28(1): 93-100.
- [3] 潘长学, 王兴宇, 张蔚茹. 基于虚拟现实技术的医学解剖教学沉浸式交互设计研究[J]. 装饰, 2020(3): 66-69.
- [4] PAN Chang-xue, WANG Xing-yu, ZHANG Wei-ru. Research on Immersive Interactive Design of Medical Anatomy Teaching Based on Virtual Reality Technology[J]. ZHUANGSHI, 2020(3): 66-69.
- [4] 耿宏, 文飞. 面向机务虚拟维修训练的虚拟手操作设计[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(7): 1279-1284.
GENG Hong, WEN Fei. Virtual Hand Operation Design for Locomotive Virtual Maintenance Training[J]. Computer Engineering and Science, 2019, 41(7): 1279-1284.
- [5] 洗枫. 虚拟博物馆[J]. 装饰, 2007(9): 60-62.
XIAN Feng. Virtual Museum[J]. ZHUANGSHI, 2007(9): 60-62.
- [6] 孙志伟, 李小平, 张琳, 等. 虚拟现实技术下的学习空间扩展研究[J]. 电化教育研究, 2019, 40(7): 76-83.
SUN Zhi-wei, LI Xiao-ping, ZHANG Lin, et al. Research on the Expansion of Learning Space under Virtual Reality Technology[J]. Research in Audio-visual Education, 2019, 40(7): 76-83.
- [7] 吴南妮. 沉浸式虚拟现实交互艺术设计研究[D]. 北京: 中央美术学院, 2019.
WU Nan-ni. Immersive Virtual Reality Interactive Art Design Research[D]. Beijing: Central Academy of Fine Arts, 2019.
- [8] 邓成龙. 虚拟现实远距离放置任务的人类操作特性与模型[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
DENG Cheng-long. Human Operation Characteristics and Models of Long-distance Placement Tasks in Virtual Reality[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [9] 张思航, 窦晓亮, 王军, 等. 虚拟现实在古船修复中的应用[J]. 计算机应用, 2020, 40(2): 126-129.
ZHANG Si-hang, DOU Xiao-liang, WANG Jun, et al. Application of Virtual Reality in Ancient Ship Repair[J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(2): 126-129.
- [10] 周敏, 郭艳军, 崔莹. 虚拟仿真技术在古生态场景重建中应用的探索[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(6): 142-146.
ZHOU M, GUO Y J, CUI Y, et al. Exploration on Application of Virtual Reality Technology in Reconstruction of Paleocology Scene[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(6): 142-146.
- [11] 上官大堰. 基于AR技术的珍稀野生动物虚拟仿真系

- 统设计[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(8): 134-138.
SHANGGUAN D Y. Design of Rare Wildlife Virtual Simulation System Based on AR Technology[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(8): 134-138.
- [12] Geraets C N W et al. Virtual reality facial emotion recognition in social environments: An eye-tracking study[J]. Internet interventions, 2021, 25: 100432-100432.
- [13] 胡珉, 刘婓雯. 基于 VR 的隧道火灾疏散指挥训练系统[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(5): 185-190.
HU Min, LIU Bi-wen. Tunnel Fire Evacuation Command Training System Based on VR[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(5): 185-190.
- [14] 朱安庆, 胡安超. 基于 Unity 3D 的船舶制造虚拟仿真教学系统构建[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(6): 117-120.
ZHU An-qing, HU An-chao. Construction of a Shipbuilding Virtual Simulation Teaching System Based on Unity 3D[J]. Laboratory Research and Exploration, 2018, 37(6): 117-120.
- [15] 闫文珠, 刘成, 李磊民, 等. 基于 VR 技术的机器人核事故训练平台研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(9): 395-399.
YAN Wen-zhu, LIU Cheng, LI Lei-min, et al. Research on Robot Nuclear Accident Training Platform Based on VR Technology[J]. Computer Simulation, 2015, 32(9): 395-399.
- [16] 张烈. 虚拟体验设计的基本原则[J]. 装饰, 2008(9): 86-88.
ZHANG Lie. The Basic Principles of Virtual Experience Design[J]. ZHUANGSHI, 2008(9): 86-88.
- [17] 张嘉鹭, 邢邦圣, 李晓鹏. 高铁列车一级检修虚拟仿真实验教学系统设计与开发[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(8): 123-126.
ZHANG J L, XING B S, LI X P, et al. Design and Development of Virtual Simulation Experiment Teaching System for First-level Maintenance of High-speed EMUs[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(8): 123-126.
- [18] Towers Ashley et al. Combining Virtual Reality and 3D Printed Models to Simulate Patient-Specific Dental Operative Procedures - A Study Exploring Student Perceptions[J]. European journal of dental education: official journal of the Association for Dental Education in Europe, 2021.
- [19] Lahti William et al. Virtual Reality Exercises for Alzheimer's or Dementia[J]. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 2021, 102(10): e80-e80.
- [20] Kamphuis C, Barsom E, Schijven M, et al. Augmented Reality in Medical Education[J]. Perspect Med Educ, 2014, 3(4): 300-311.
- [21] Stiles R N. Mechanical and Nfeedback Factors in Postural Hand Tremor of Normal Subjects[J]. Journal of Neurophysiology, 1980, 44(1): 40-59.
- [22] 邹俞, 晁建刚, 林万洪. 航天员虚拟训练中运动物体抓持规则研究[J]. 航天医学与医学工程, 2019, 32(1): 48-55.
ZOU Yu, CHAO Jian-gang, LIN Wan-hong. Research on Gripping Rules of Moving Objects in Astronaut Virtual Training[J]. Aerospace Medicine and Medical Engineering, 2019, 32(1): 48-55.
- [23] Wang A A, Becker I A, Jones A T, et al. A Virtual Reality Surgery Simulation of Cutting and Retraction in Neurosurgery with Force-feedback[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2006(1): 10.
- [24] 张婷婷, 侯晓菲, 田丰, 等. 沉浸式 VR 电力训练中的注意力引导[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2018, 24(4): 553-563.
ZHANG Ting-ting, HOU Xiao-fei, TIAN Feng, et al. Attention Guidance in Immersive VR Power Training[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2018, 24(4): 553-563.