

虚拟现实技术在新医科人才培养中的作用及应用现状*

高 阳¹, 赵沁平^{1△}, 周学东², 郭全民³, 席 涛⁴

1. 北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室(北京 100191);

2. 口腔疾病研究国家重点实验室 国家口腔疾病临床医学研究中心 四川大学华西口腔医学院 牙体牙髓病科(成都 610041);

3. 新疆医科大学口腔医学院(乌鲁木齐 830011); 4. 宁夏医科大学口腔医学院(银川 750001)

【摘要】“健康中国”国家战略对高质量医学教育、高水平手术研究、精准临床诊疗提出了新的要求。面向国家新医科战略发展布局, 本文在概述虚拟现实概念、核心价值及其对行业支撑作用的基础上, 对虚拟现实技术在新医科人才培养中的作用进行了探讨, 并以典型案例的形式, 详细剖析了虚拟现实技术在口腔医学和临床医学相关的实操教学、技能考核、在线自主训练、临床思维实训等方面所发挥的重要作用, 以期为新医科人才培养的模式创新提供有益经验借鉴。

【关键词】 新医科 医学人才培养 虚拟现实技术 虚拟人体 虚拟手术

The Role of Virtual Reality Technology in Medical Education in the Context of Emerging Medical Discipline GAO Yang¹, ZHAO Qin-ping^{1△}, ZHOU Xue-dong², GUO Quan-min³, XI Tao⁴. 1. State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and System, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. State Key Laboratory of Oral Diseases, National Clinical Research Center for Oral Diseases, Department of Endodontology, West China Hospital of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 3. Xinjiang Medical University Stomatological College, Urumchi 830011, China; 4. School of Stomatology Ningxia Medical University, Yinchuan 750001, China

△ Corresponding author, E-mail: zhaoqp@vrlab.buaa.edu.cn

【Abstract】 According to Healthy China, a national strategy of the Government of China, new requirements were put forward for high-quality medical education, high-level surgical research, and precise clinical diagnosis and treatment. In the context of Emerging Medical Discipline, a strategic blueprint of medical education in China, this paper reviews the concept and core value of virtual reality (VR) and its significant role in the medical industry. On that basis, we explore the role of VR technology in medical training against the background of Emerging Medicine Discipline. Furthermore, typical cases are presented to help analyze and illustrate in detail the important role of VR technology in the teaching and training of stomatological and clinical procedures, skills assessment, online self-directed training, and clinical thinking skills training. We herein summarize useful information from past experience so as to help build innovative models of medical education in the context of Emerging Medical Discipline.

【Key words】 Medical education Emerging medicine disciplines Virtual reality (VR) technology
Virtual human body Virtual surgery

“健康中国2030”国家战略对新时代医学人才培养提出了新要求。虚拟现实、人工智能、大数据、5G等新一代信息技术与现代医学技术交叉融合并创新发展, 是提高医学人才培养质量和规模的有效路径, 也是信息文明社会背景下新型医学人才培养体系建设的重要支撑。

1 新医科战略概况

1.1 新医科的背景和内涵

2019年, 教育部、科技部等13个部委联合启动的“六

卓越一拔尖”计划2.0中明确指出, 要全面推进新工科、新医科、新文科、新农科的“四新”建设^[1]。2020年9月, 国务院办公厅印发了《关于加快医学教育创新发展的指导意见》, 确立了“以新医科统领医学教育创新”的基本原则^[2]。

新医科是在新时代科技进步、产业变革和高等教育改革发展背景下, 以培养符合时代需求的卓越医学人才为导向, 通过改造升级已有医学专业、新建医学相关专业, 以及加强医科内部和医文、医理、医工等多学科深度交叉融合等方式, 将人才培养的重点从临床诊疗扩展到预防、诊疗、康养, 使得医学人才具备服务于“生命全周期、健康全过程”的能力和水平。

1.2 医学类虚拟仿真一流课程概况

2019年至2021年, 教育部全面推动实施新医科建设计划, 在一流专业“双万计划”、一流课程“双万计划”、基

* 北京航空航天大学生物医学工程高精尖创新中心课题(No. ZF138G1714)、中国医学科学院虚拟人体和虚拟手术技术创新单元课题(No. 2019RU004)、国家自然科学基金青年项目(No. 62002010)、北京市自然科学基金青年项目(No. 4214066)和浙江省重点研发计划(No. 2020C03061)资助

△ 通信作者, E-mail: zhaoqp@vrlab.buaa.edu.cn

础学科拔尖学生培养一流基地建设计划中,布局新医科相关的“金专”“金课”和“高地”。其中,一流课程要求建设10 000门左右国家级一流课程和10 000门左右省级一流课程,包括具有高阶性、创新性、挑战度的线下、线上、线上线下混合式、虚拟仿真和社会实践五大类一流课程^[3]。

一流课程“双万计划”中的虚拟仿真一流课程建设,是推动计算机、仿真、基础医学、临床医学等学科深度交叉融合创新的重要举措。2019年,教育部发布《关于一流本科课程建设的实施意见》,将国家虚拟仿真实验教学项目纳入一流本科课程建设,计划到2021年建成1 500门左右国家虚拟仿真实验教学一流课程^[4]。2020年11月,根据教育部公布的首批国家级一流本科课程认定结果^[5],认定国家虚拟仿真实验教学项目728个,覆盖41个专业类,168个专业,732门课程^[6]。在新冠疫情期间,基于互联网、虚拟现实、先进仿真技术的线上虚拟仿真实验,为远程实验教学、训练、考核提供了先进技术手段,降低了疫情对人才培养过程和质量的影响,也有力地证明了新一代信息技术对新医科的支撑作用。

2 虚拟现实 (virtual reality, VR) 技术

2.1 VR技术

VR技术是计算机技术与应用衔接,向不同领域辐射,影响各行业运行质量和效率的基础研究方向,包括人机界面、人机交互、人机环境和增强现实等,具有较强的学科综合性和交叉性。目前已成为一个可以拉动多学科科学技术发展,不断产生新思想、新技术和新经济增长点的重要科学技术领域^[7]。虚拟现实在其产生和长期发展的过程中,内涵和外延不断演化,有专家认为,虚拟现实对于其他应用领域的作用,类似于数学对其他学科的作用^[8]。

通过多学科交叉融合,并以信息技术为核心生成和真实环境在视觉、听觉、触力觉等方面高度相似的数字虚拟环境,用户可利用显示设备与交互装备与虚拟环境中的物体进行沟通、交互,进而获得虚实难辨、身临其境的拟真感受和体验。虚拟现实作为新兴技术和产业发展方向,也是信息技术领域的重要科学问题^[9]。

2.2 VR技术的核心价值

VR技术的核心价值可以从其系统形态、应用方向和主要特点等方面加以概括,可概括为沉浸性、桌面型、增强型和分布型4类系统形态。

沉浸型VR系统主要面向高端应用,其典型特点是使用高端图形工作站(群)和高逼真感的视听触设备,以获

得更好的沉浸感;桌面型系统主要面向普及型应用,其典型特点是基于个人计算机和常规交互设备,在通用硬件上构造简易型的系统,为了使交互更为自然,一般会利用Kinect、Wiimote等便携装置获取用户的身体姿态和操控信息^[10];增强型主要面向增强现实类型的应用,其典型特点是在获取三维姿态基础上,进行三维注册,并利用视频透射或光学透射头盔显示器,在现实场景叠加虚拟物体,增加虚实融合的内容;分布型主要面向虚拟现实网络应用,构建共享一致的虚拟环境,进行协同交互、完成更复杂的功能。目前,基于5G移动互联网的分布型系统是研究和应用的重点^[11]。

上述4类系统也并非彼此独立,例如,沉浸型、桌面型和增强型系统都可以作为分布型系统的节点,通过网络互联;沉浸型或桌面型系统也可借鉴增强型系统的概念,增加虚实融合的功能。

2.3 VR技术对各行业的支撑作用

经过三十多年的发展,VR在许多行业领域取得了成功应用,已成为各行业发展的新的信息技术支撑平台^[12]。近年来,随着人工智能、大数据、云计算、物联网、传感器等信息技术的快速发展,各发达国家政府和各大行业巨头普遍开始结合“VR+”展开创新应用布局,对VR技术发展提出了新型应用需求^[13],下面重点对“VR+医疗”的应用支撑进行介绍。

世界卫生组织等权威机构发布的数据显示,不安全治疗导致的不良事件是全世界十大死亡和残疾的原因之一^[14],医疗过失在医疗水平很高的美国也已经成为第三大致死原因^[15]。因而,探究人体自身的奥秘,解密人体疾病的产生与演化,进而对人体疾病进行精准治疗,是关系人类生命与健康的重大问题,也是人类科学研究的一个终极目标^[16]。随着虚拟现实、医学、生命科学、高性能计算以及人工智能等技术的快速发展,如何利用信息技术赋能人体生命研究与疾病治疗,是21世纪的一项重大科学技术问题。2020年11月10日,世界经济论坛和《科学美国人》共同发布了“2020年十大新兴技术”报告,其中3项与虚拟人体孪生密切相关,包括:虚拟病人——代替真人临床试验,空间计算——下一代的“大事件”,数字医学——更好地诊断和治疗疾病^[7]。

现阶段,在健康中国建设战略背景和信息化、数字化技术高速发展的时代背景下,VR将成为医疗行业不可或缺的教学和培训手段,在新医科人才培养中必将发挥更广泛的应用。在医学教学、手术技能训练、个性化手术方案规划预演、康复治疗、远程诊疗等过程中,引入VR技术,可以显著提升医疗健康服务水平,提高疾病诊

疗效率^[17]。

3 VR技术在新医科人才培养中的作用与应用实例

3.1 VR在新医科人才培养中的作用

医科人才培养的方式随着时代的发展也在不断改进和创新。以动物标本、尸体和教学辅助器具为主的传统医科教育体系,在医科人才的培养过程中存在资源不足,对患者造成损害的风险较高等问题^[18]。VR技术能够替代传统的教学模式进行低成本、可重复、可量化评估的数字化教学,允许学员在可重复练习的环境中学习成长,提供案例丰富、科学规范的仿真素材,能够有效改善教学资源不足和考核难以量化评估的难题。模拟教学的新方式可以缩短学员临床实践学习曲线,同时可以保证学员在学习过程中的医疗安全性。通过VR技术可以拓展医疗教育信息化的维度,不断深化医疗教学内容,有助于催生新的人才培养模式和医科教学方法。具体来说,VR技术通过与3D建模、人机交互、大数据管理、物联网、云计算、人工智能等技术结合运用,可以在新医科人才培养中可发挥如下几方面重要作用^[19]。

3.1.1 推进以自主学习为导向的教学方式改革 传统医学授课以知识传授型为主,学生被动接受新知识,不利于发挥学生的主观能动性。随着5G技术、人工智能、云计算等技术的发展,VR将成为新医科教学的重要切入点,推进以自主学习为导向的医学教学方式改革。VR技术通过高沉浸感和交互特性强化用户体验,以多感知通道协同刺激和人机交互的方式增强用户记忆、提升用户学习体验^[20]。通过VR技术构建的智慧学习环境,学习者可以发挥主体作用,充分理解教学内容,体验交互环境,进而提高主观能动性和自主学习能力。

3.1.2 增加学生知识的深度和广度,激发创新思维 医学技能训练方式耗材损耗大、成本高,研究发现在临床实践教学中,57.38%的病种教学资源不足或缺乏,仅部分学生或极少学生有机会掌握^[21]。VR技术促使教学内容由传统静态、二维展示转变为互动、三维立体展示,评价方法也由主观观察转变为客观的数据参考,有助于加深学生的理解,拓宽认知范围;培养环境由传统单个实训样本对多个学习对象转变为多对多的互动式虚拟场景,培养方法由传统“以教促学”线性方法转变为情景探究式学习的非线性方法,激发学生的创造力和创新思维。

3.1.3 助力新医科终身学习体系和环境建设 建设终身学习体系和环境是我国的重大战略举措^[22],构建服务全民终身学习的现代化教育体系,加快建设学习型社会,已

成为服务终身学习、建设学习大国的迫切需要。VR虚拟仿真实验教学系统,可以打破时空限制,在任何时间和地点获取教学资源、观看教师授课视频,实现即时交流、互动以及数据共享^[23]。同时,学生还可以随时在线访问虚拟教学资源,进行虚拟实验操作,对促进高阶的探究式、自适应学习具有重要作用,有助于构建方式更加灵活、资源更加丰富、学习更加便捷的新医科终身学习体系。

3.1.4 有助于完善教学实践过程中监测、评估与反馈机制 在教学实践过程中,硬件环境建设,教学软件建设,质量监控与反馈改进应该形成一个闭环。其中,教学质量监控与反馈是重中之重,也是VR技术能够在新医科人才培养过程中扮演重要角色的关键核心。VR技术作为一种现代信息化手段,对教学过程指标可进行实时数据监测、图形化示教、量化指标评估。VR技术能够量化指标和客观数据,模拟培训学员的临床能力,促使学院发现问题并探索改进方案,从而提升教学质量,这也是目前国际上医学模拟教学研究的重点和热点。加强模拟教学质量评价体系建设,完善教育培训方法和评估反馈机制,对医学人才培养服务具有重要意义。

3.1.5 促进医学与理科、工科等多学科交叉共融 传统医科人才培养模式往往只关注于医科专业理论修养与技能训练。新医科建设立足于医学领域,强调理、工、医、用结合的高层次、全方位人才培养模式^[24]。虚拟手术教学和VR医学教育环节中,打通了信息平台、VR技术、医科人才多学科融合的培养链条,集成了多种信息化技术、传感器设备、力反馈技术,整合了信息科学、生物医学工程、机械工程等优质资源在医学教育培训领域的应用^[25-26]。虚拟手术和虚拟医疗的发展必将带动新医科人才培养模式的发展,有利于促进医学与理科、工科等多学科交叉融通,是我国抢占医工交叉技术制高点的新突破口之一。

3.2 VR对医学人才岗位胜任力的作用

人才岗位胜任力是人才培养质量的最直接体现。VR对医学人才岗位胜任力的作用主要体现在对医学理论和临床实践教学模式的迭代、更新和优化,强化医学生基本理论、基本知识、基本技能的培养。在医学理论理解深刻度、技能掌握熟练度及临床思维训练方面发挥有效作用。

3.2.1 提高医学理论理解深刻度 由于人体各部位结构层次不一、形态多样、毗邻关系复杂等特点,医学教学环节要占用大量的课上时间来灌输课本内容。但是,仅凭抽象文字内容和简单模型,难以在头脑中建立系统性的人体结构框架,授课达不到预期的效果^[27]。将VR技术应

用到解剖知识教学中,可以将其复杂的解剖结构生动立体地表现出来,使理论概念变得具象化、直观化、立体化。在大幅度降低教学成本、弥补了教学资源的不足的同时,给医学教学和研究带来了很大的灵活性,增加了趣味性和实用性,使学生的理解和记忆更为深刻。

3.2.2 增进医学生技能掌握熟练度 传统的医学临床操作技能训练模式,严重依赖动物、尸体以及物理模拟器械,存在成本高、风险大、针对性差、难以定量评价、效率低等问题。VR仿真医学实验通过构建虚实融合的实验环境和实物对象,可以使实验者像在真实的环境中一样运用各种手术器械和设备,对实验对象进行虚拟操作,完成各种预定的实验项目,起到学习训练的作用。该系统不受试验标本、试剂的制约,突破了传统实验教学模式的时空限制,提高了学生学习的积极性和主动性^[28]。虚拟手术通过即时交互、反复训练,过程监控的手段增进技巧和技能熟练度。

3.2.3 培养医学生临床思维能力 临床思维是医疗工作者在复杂的临床场景中,面对突发或紧急症状时进行诊疗处置和临床判断的思维过程。临床思维能力是医学生培养临床素质的重中之重,临床思维的培养目标是通过医学理论和临床实践有机结合,在大量的病史采集、动手实践和实验室检查得到初步临床资料的基础上,能够根据患者的症状等多方面信息进行综合分析和精准鉴别^[28]。利用虚拟现实技术构建的诊疗场景和标准化病人(standardized patients, SP),可以逼真还原患者病变情况,模拟临床检查阳性症状,学生可以在虚拟环境中通过人机交互进行全面病史采集、临床检查及各种实验室检查等诊疗全程关键环节练习。南京大学医学院附属口腔医院(南京市口腔医院)在2020年7月举行的江苏省住院医师规范化培训(口腔)临床技能考试中,首次采用了虚拟仿真SP并取得了良好的效果^[29],证明VR技术对于培养医学生临床思维能力具有显著促进作用。

3.3 VR在国内医学教育中的典型应用

VR技术与医疗融合的应用方向十分广阔,在模拟手术领域,经验丰富的外科医生可以利用虚拟手术室学习和探索新技术,或者进一步深化掌握具体手术操作步骤。在培训领域,学生能够以身临其境的方式学习人体解剖、临床等相关知识^[13]。具体到虚拟手术培训、强化临床诊断、远程医疗、心理疾病治疗、护理学和康复训练、产品研发等等方面,VR技术已经取得了广泛应用,并收获了良好的实践效果^[30]。

3.3.1 口腔医学牙周操作实验教学系统 北京大学口腔医学院根据学生牙周临床技能训练的需求,以自主研究

带动教学方式的创新,将基于VR技术的口腔医学牙周操作实验教学系统用于牙周操作技能的教学培训和考核。系统通过建立一个虚拟仿真的牙周基本技能操作环境,进行牙周诊疗全程关键操作步骤的练习,包含牙周探诊、龈上洁治、龈下刮治3个训练单元。使参训人员通过力反馈设备体验牙周操作所需的力量、方向、幅度、角度和运动轨迹等精细的动作技能,同时系统可对操作数据进行记录和分析,实现客观量化的培训和考核。系统突出多学科交叉的前沿引领特色,具有较高的先进性和实用性,开创了口腔操作教学量化和规范化的新途径^[31]。

3.3.2 医学技术专业客观结构化实践技能教考系统 重庆医科大学口腔医学院紧密结合口腔医学技术专业教学中的实验需求,详细分析了口腔医学技术专业实验中学教学中材料准备困难、技能教学/考核困难、无法进行单一流程考核等教学痛点,应用虚拟仿真技术进行实验教学设计,将口腔医学技术实验室模拟搬到线上,通过医学技术专业客观结构化实践技能教考系统对设计类、流程类、判定类实验项目都进行了深入细致的仿真。系统包含铸造工艺、可摘局部义齿设计、口腔素描、口腔摄影、牙体雕刻、模型检查等仿真实验模块。通过将信息技术、智能技术与口腔医学专业技术的实验教学深度融合,破解高等学校口腔医学技术专业在原有实验、实习、实训中的难题,为我国口腔医学技术专业提供了宝贵的优质教学资源。同时项目为师生共建,学生直接参与系统设计,对系统提出创新性的构思和设想,与教师多年丰富的教学经验相结合,极大地提升了学生的创新能力,拓展了学生的眼界和思维^[32]。

3.3.3 口腔医学种植操作实验教学虚拟现实仿真项目 四川大学华西口腔医学院与北京航空航天大学、北京众绘虚拟现实研究院有限公司联合研制了我国首款视觉融合的多功能口腔种植手术模拟器,模拟器主要用于口腔基础教学、手术技能训练、手术操作考核。研究团队在手术三维场景实时逼真绘制,实时交互(刷新频率1 000 Hz)、精细力觉反馈(准确区分皮肤、舌头、牙齿刚度)等关键算法上掌握自主知识产权,并具有显著技术优势。项目团队利用虚拟现实仿真手术系统进行口腔种植基础理论和临床操作技能培训,开创并探索口腔种植学教学规范化和可量化新途径,为系统性造就素质优良,能适应当前临床需要,并可承担我国口腔种植学可持续发展的后继人才奠定重要基础,为我国其他院校及培训机构建设数字化口腔种植操作教学体系提供重要参考^[33]。

3.3.4 牙拔除术虚拟仿真-触反馈-多媒体实验教学系统 重庆医科大学口腔医学院通过建立口腔牙拔除术培训用

虚拟仿真系统,模拟真实感的牙拔除术技能操作环境,进行诊疗全程关键操作步骤真实感操作。通过身临其境的牙拔除术操作练习,使学生能够更加真实的进行操作训练。虚拟仿真系统具有逼真的力反馈手感、实时人机交互、标准规范流程、无耗材反复练习、自我评价和教师监控的优势。系统极大的调动了学生参与实验教学的积极性和主动性,从而提高教学效率,提升了教学效果^[34]。

3.3.5 虚拟仿真标准化病人(VSP) 南京大学医学院附属口腔医院2020年在江苏省住院医师规范化培训(口腔)临床技能考试中首次将VSP应用到考试当中。在医患沟通和临床检查考站中,首先由真人SP模拟典型症状、主诉,考生与SP演员进行对话,完成病史采集,考察学生在临床接诊、问诊时的仪容、态度、语言等医患沟通技巧。然后,在临床检查环节应用VSP,由学生进行自主口腔检查,识别疾病阳性症状。最后,由考生根据主诉,病史资料收集,结合自己的临床检查,提出可能的诊断、进一步的检查和治疗计划。与传统真人扮演的标准化病人相比,VSP可以逼真还原口腔病变,模拟临床检查阳性症状,学生可以在虚拟环境中通过鼠标交互进行全面口腔检查操作,包括视诊、探诊、叩诊、扪诊、松动度检查以及各种特殊检查等,自主收集临床资料。系统同时对学生操作过程进行实时记录,并对记录的信息进行分类统计^[29]。

3.3.6 智能多模态临床综合技能虚拟在线自主训练课程 四川大学华西临床医学院利用3D人体建模、情景化虚拟场景构建的在线虚拟训练软件结合翻转课堂教学方法,开展了智能多模态临床综合技能虚拟在线自主训练课程。课程以虚拟病人为操作对象进行自主在线虚拟训练,教师可针对学生课前自主练习暴露的问题开展针对性教学。实现了“学生自主学习”“以学生为中心”的实验教学方法的改革与创新,旨在培养医学生腰椎穿刺、胸腔穿刺、骨髓穿刺等20项临床基本技能操作能力,提高医学生岗位胜任力^[35]。

3.3.7 基于症状学的临床技能和临床思维虚拟实训教程 中南大学以常见症状为切入点,基于临床收集的典型病例,通过运用虚拟仿真技术构建临床情景,以及独特的临床鉴别诊断专家对比教学方法,将每个案例分为病史采集、体格检查、辅助检查、检查结果、鉴别诊断、治疗计划等多个功能模块,并通过大量的临床数据采集,将诊疗过程的资料以文字、声音、影像等多媒体互动的形式展示给学习者,并将虚拟的临床操作技术融合到案例中,进一步通过运用系统中在线考核和评价对比功能,综合提高医学生的临床技能和临床思维能力^[36]。

3.3.8 腹腔镜手术模拟系统在外科手术教学中的应用

哈尔滨医科大学采用基于虚拟手术的教学方式,有助于学生在腹腔镜下多种术式的学习及操作能力的培养。通过人体解剖视觉重现和力反馈技术,通过虚拟手术可模拟清晰逼真的脏器画面及真实器械操作手感,可按要求设置不同腹腔镜下手术术式。系统包括腹腔镜手术基本理论、基本功训练、分布操作、综合训练等模块,使学生通过模拟训练系统来学习腹腔镜下多种手术术式的操作流程,并进行临床手术技能训练,从而达到快速提高学生临床手术操作技能的实验目的^[37]。

在上述应用实例中,通过建立虚拟人体模型并开展虚拟手术、医疗仿真和虚拟教学研究,可实现人体从微观到宏观的结构和功能的数字化仿真,有效辅助手术方案的制定和复杂手术的模拟,提升新医科教学成效,VR技术已经成为理工医交叉的新一代医学研究、临床治疗和医疗人才培养的先进技术支持。

4 总结

医学教育是卫生健康事业发展的重要基石^[2]。随着第四次工业革命的兴起,特别是新一代信息技术如虚拟现实、人工智能、大数据、云计算、5G、互联网等的快速发展,医学研究、医学教育和医学实践的改革发展将面临重大机遇和挑战。在新医科总体战略部署下,每一所医学院校、每一个医科专业、每一门医学课程和每一位医学教师都要肩负起推动医学教育创新发展的责任和义务,主动掌握和有效运用虚拟现实等新技术,为医学人才培养增加或升级新手段、新路径、新工具和新方法,共同推动医学人才培养“上水平、提质量”,为推进健康中国建设、保障人民健康提供强有力的人才保障。

参 考 文 献

- [1] 中国青年报. 教育部等13单位联合启动“六卓越一拔尖”计划2.0.(2019-04-29)[2020-12-04]. http://www.moe.gov.cn/jyb_xwfb/xw_zt/moe_357/jyzt_2019n/2019_zt4/tjx/mtjj/201906/t20190619_386454.html.
- [2] 国务院办公厅. 关于加快医学教育创新发展的指导意见(国办发[2020]34号). 2020-09-23.
- [3] 吴岩. 谋大局、应变局、开新局——全面推进医学教育创新发展.(2020-10-14)[2020-12-05]. <http://medu.bjmu.edu.cn/cms/news/100000/000000016/2020/10/14/f0d7d830ced5495c9f1eef0a99c35466.shtml>.
- [4] 教育部. 关于一流本科课程建设的实施意见(教高[2019]8号). 2019-10-30.
- [5] 教育部. 关于公布首批国家级一流本科课程认定结果的通知(教高函[2020]8号). 2020-11-24.
- [6] 虚拟仿真实验教学创新联盟技术工作委员会. 虚拟仿真实验教学课程建设与共享应用规范(试用版).(2020-10-30)[2020-12-04]. <http://xfzgxpt>.

- cupl.edu.cn/info/1003/1044.htm.
- [7] 虚拟现实技术与产业发展战略研究项目组. 虚拟现实技术与产业发展战略研究(中国工程院咨询研究报告). 北京: 科学出版社, 2016.
- [8] 中国信息与电子工程科技发展研究中心. 中国电子信息工程科技发展研究. 虚拟现实和增强现实专题. 北京: 科学出版社, 2019.
- [9] Top 10 emerging technologies of 2020. *Scientific American*. (2020-11-10)[2020-12-04]. <https://www.scientificamerican.com/article/top-10-emerging-technologies-of-2020/>.
- [10] CHEN S, HU B, GAO Y, *et al*. Lower limb balance rehabilitation of post-stroke patients using an evaluating and training combined augmented reality system. 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct), 2020: 217-218. doi: 10.1109/ISMAR-Adjunct51615.2020.00064.
- [11] 中国通信标准化协会. 5G网络下的云化虚拟现实平台技术白皮书. (2020-01) [2020-12-04]. <https://www.vzkoo.com/doc/10502.html>.
- [12] 宋玉赵璧, 张华淇, 夏仕琳. VR产业整体发展趋势. *中国信息化*, 2019(11): 94-96.
- [13] 杨涵深, 朱亮, 冯雪峰, 等. 浅谈虚拟现实技术在医疗领域的应用. 世界最新医学信息文摘, 2019, 19(58): 25-26.
- [14] 世界卫生组织. 关于患者安全的10个事实. (2019-08)[2020-12-04]. https://www.who.int/features/factfiles/patient_safety/zh/.
- [15] MAKARY M A, DANIEL M. Medical error—the third leading cause of death in the US. *BMJ*, 2016: i2139[2020-12-04]. <https://www.bmj.com/content/353/bmj.i2139>.
- [16] IDC, 华为. 2019年Cloud XR医疗平台白皮书. (2019-05)[2020-12-04]. <http://www.weseecn.com/p-374099.html>.
- [17] GEOGRE M. What is virtual reality? (2018-04-26) [2020-12-04]. <http://www.arsvirtual.com/virtual-reality/what-is-virtual-reality.htm>.
- [18] 陈安林, 朱杰华, 向加林, 等. 浅谈虚拟现实技术在检验医学教学中的应用. *科教文汇(上旬刊)*, 2019, 454(4): 110-112.
- [19] 沈阳, 逮行, 曾海军. 虚拟现实: 教育技术发展的新篇章——访中国工程院院士赵沁平教授. *电化教育研究*, 2020, 41(1): 5-9.
- [20] 吴阶平医学基金会虚拟现实产业联盟, 赛迪智库电子信息研究所. 虚拟现实医疗应用白皮书(2019年). *中国计算机报*, 2019-12-09(8).
- [21] 高绥之, 陈涛, 徐茂云, 等. 医学生内科临床实践教学资源现状与对策. *解放军医院管理杂志*, 2015, 22(7): 643-644.
- [22] 人民网. 构建国家终身学习体系的战略举措. (2012-07-30)[2020-12-04]. <http://edu.people.com.cn/n/2012/0730/c1053-18627065.html>.
- [23] LANGE B, KOENIG S, CHANG C Y, *et al*. Designing informed game-based rehabilitation tasks leveraging advances in virtual reality. *Disabil Rehabil*, 2012, 34(22): 1863.
- [24] 赵沁平, 王涌天, 梁晓辉, 等. 虚拟现实技术与产业发展战略研究. 北京: 科学出版社, 2016.
- [25] SYLLEBRANQUE C, DURIEZ C. Six degree-of-freedom haptic rendering for dental implantology simulation, international symposium on bioinspired macromolecular systems (ISBMS), 2010: 139-149. doi: 10.1007/978-3-642-11615-5_15.
- [26] WANG D, LI T, ZHANG Y, *et al*. Survey on multi-sensory feedback virtual reality dental training systems. *Eur J Dent Educ*, 2016, 20(4): 248-260.
- [27] 姜冠潮. 中国医学模拟教学现状与未来发展思考. *高校医学教学研究*, 2017, 7(1): 18-22.
- [28] 杨光燃, 姜立萍, 钱冬梅. 内科教学中以多种方式结合培养医学生临床思维能力的探索. *中国医学教育技术*, 2010, 25(1): 83-85.
- [29] 南京大学医学院附属口腔医院. 2020年江苏省住院医师规范化培训(口腔类)技能结业考试在南京大学医学院附属口腔医院举行. (2020-07-27)[2020-12-04]. http://218.94.27.82:8085/single_page/announcement_details?id=132.
- [30] 谭积斌, 罗俊, 唐孙茹, 等. 虚拟现实技术在医学教育中的研究现状和热点——基于CNKI的知识图谱可视化分析. *中国医学教育技术*, 2020, 34(2): 153-159.
- [31] 北京大学口腔医院. 牙周虚拟仿真实验教学平台. (2017-11-23)[2020-12-04]. <https://ss.bjmu.edu.cn/html/news/articles/1806.html>.
- [32] 重庆医科大学口腔医学实验教学中心. 口腔医学技术专业客观结构化实践技能教考系统. (2020-06-24)[2020-12-04]. <http://www.cqdent.com/html/4/content/20/06/6347.shtml>.
- [33] 四川大学华西口腔医院. 口腔种植手术操作实验教学虚拟仿真项目. (2018-12-05)[2020-12-04]. <https://www.hxkq.org/Html/News/Columns/277/Index.html>.
- [34] 重庆医科大学口腔教学实验中心. 牙拔除术虚拟仿真-触反馈-多媒体实验教学系统. (2020-06-28)[2020-12-04]. <http://www.cqdent.com/html/4/content/20/06/6359.shtml>.
- [35] 四川大学华西临床医学院. 智能化多模态临床综合技能虚拟在线自主训练课程. (2018-11-15)[2020-12-04]. <http://ydlcjn.cd120.com/pages/ostp/self-train.html>.
- [36] 何雨晨, 谢似平, 罗雄, 等. 虚拟仿真实验教学在临床思维训练中的应用. *高校医学教学研究*, 2019, 9(3): 3-6.
- [37] 哈尔滨医科大学. 腹腔镜手术模拟系统在外科手术教学中的应用. (2019-04-01)[2020-12-04]. <http://www.ilabx.com/details/v3?id=3042>.

(2020-12-06收稿, 2021-01-08修回)

编辑 姜恬