

口腔虚拟仿真实验教学的现状与评价

涂 恒, 李梦欣, 陈俊宇, 杨 静

[摘要] 口腔医学是一门实践性很强的学科, 实践技能培训是口腔医学本科生培养计划中不可或缺的重要环节。传统的口腔实验教学存在学生实践机会不足和展示内容有限等缺点, 而虚拟仿真实验教学改变了传统的教学模式, 为口腔实验课程教学改革提供了前所未有的机遇。本文综述了口腔虚拟仿真系统的发展历程及其在口腔医学教育中的应用, 并讨论了口腔虚拟仿真教学的优势和当前面临的挑战, 旨在促进口腔实验教学的信息化和现代化改革, 提升口腔实验教学质量, 并提高口腔医学生的临床技能水平。

[关键词] 口腔虚拟仿真系统; 口腔实验教学; 口腔医学教育

[中图分类号] R78 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-9872(2026)03-0210-06

[doi] 10.13591/j.cnki.kqyx.2026.03.009

Current situation and evaluation of dental virtual simulation experiment teaching

TU Heng, LI Mengxin, CHEN Junyu, YANG Jing. (State Key Laboratory of Oral Diseases & National Center for Stomatology & National Clinical Research Center for Oral Diseases, Department of Cariology and Endodontics, West China Hospital of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, China)

Abstract: Stomatology is a highly practical subject, and the training of practical skills is an indispensable part of the training program for stomatology undergraduates. The traditional dental laboratory teaching has shortcomings such as insufficient practice opportunities and limited display content, but the virtual simulation experiment teaching changes the traditional teaching mode and provides an unprecedented opportunity for dental laboratory teaching reform. This paper reviews the development of dental virtual simulation system and its application in dental education, and discusses the advantages and current challenges of dental virtual simulation teaching, aiming at promoting the informatization and modernization reform of dental laboratory teaching, improving the quality of dental laboratory teaching and the clinical skills of dental students.

Key words: dental virtual simulation system; dental laboratory teaching; dental education

Stomatology, 2026, 46(3): 210-214, 235

口腔医学教育需要兼顾理论与实践, 因此口腔实验教学是口腔医学教育中的重要组成部分^[1]。传统口腔实验教学多依赖于仿真头模、离体牙、塑料牙等, 而离体牙获取较为困难, 预备塑料牙的感觉反馈与真实牙齿差异较大, 无法帮助学生更好地理解临床操作^[2]。为解决上述传统实验教学难题, 口腔虚拟仿真系统应运而生^[3]。口腔虚拟仿真系统可复制口腔软组织和硬组织, 通过虚拟现实(virtual reality, VR)技术提供临床诊断和治疗环境, 并通过力反馈技术模拟口腔操作器械与牙、口腔软组织之间的相互作用力, 尽可能逼真地再现口腔临床技能训练的全过程^[4]。本文总结了已应用于口腔医学

教育的口腔虚拟仿真系统, 阐明其优缺点, 旨在推动口腔实验教学的改革, 提高教学效果与学生的临床操作水平。

1 口腔虚拟仿真系统的发展历史

口腔实验教学有着悠久的发展历史。早在19世纪就有先驱者使用了离体牙进行口腔实验教学^[5]。Oswald Fergus于1894年发明了第一个仿头模, 用于口腔解剖生理学的教学^[5]。基于VR和计算机辅助等技术的发展, 20世纪90年代出现了最早的口腔虚拟仿真系统^[6]。DentSim是由以色列Image Navigation公司与美国多家口腔医学院校合作开发的口腔教学系统, 它被认为是首个能执行各种口腔实验教学模拟的系统之一^[7]。它主要包括电脑主机、红外光学追踪系统和仿头模三部分, 视觉追踪系统采集反馈信息后, 通过电脑软件计算分析,

基金项目: 四川大学高等教育教学改革工程研究项目(SCU10378)

作者单位: 口腔疾病防治全国重点实验室, 国家口腔医学中心, 口腔疾病国家临床医学研究中心, 四川大学华西口腔医院牙体牙髓科, 四川成都(610041)

通信作者: 杨 静 E-mail: yangj7@scu.edu.cn

对学生的操作过程进行实时记录,并与预先设置的标准化操作步骤进行比较^[8]。但最初的 DentSim 系统并未加载力反馈系统,在实操过程中仍需要塑料牙或离体牙的协助^[7]。

牙体修复非常依赖于触觉的反馈,车针钻磨牙釉质及牙本质的触觉反馈存在差异^[5]。触觉增强的增强现实(augmented reality, AR)模拟技术最早在 20 世纪 70 年代后期应用于飞行模拟^[9]。口腔学科基于此技术在 21 世纪初发明了第一台拥有触觉反馈的口腔虚拟仿真系统^[10]。目前针对不同的应用场景,包括牙体预备、牙周洁治和种植等,提出了几种不同的交互算法^[11]。

混合现实技术(mixed reality, MR)是现实技术的最新发展,是 AR 与 VR 的结合,将真实和虚拟的图像结合在一起,允许真实和虚拟环境交互并操作它们^[12]。基于 MR 技术和力反馈技术,北京大学口腔医学院与北京航空航天大学合作,于 2022 年开发了 UniDental 虚拟仿真系统^[13]。该系统虚拟部分可用于构建虚拟口腔环境,模拟口腔硬组织、软组织和牙科器械,可解决技能培训时的材料消耗问题;而真实世界中的仿头模可以模拟患者的头部,可与虚拟口腔环境保持一致,从而解决其他虚拟仿真系统在临床治疗场景中难以模仿调整患者定位的问题^[13]。

2 口腔虚拟仿真系统在口腔实验教学中的应用

2.1 牙体牙髓病学

虚拟仿真系统可用于牙体牙髓病学技能教学中多项实验操作步骤的教学和评分。例如复合树脂充填教学中去龋过程的模拟演示和练习,并对龋坏去除的完成情况进行实时检测和评分^[14]。基于 VR 技术开发龋坏识别系统,应用于口腔医学本科生临床前期教学可提高学生识别龋坏组织的能力^[15]。虚拟仿真系统也可评估根管治疗开髓步骤是否合理,并对其进行评分^[16]。对应的研究显示,系统评分不仅与多名牙体牙髓病学专家的评分高度一致,还可自动转换为学校使用的标准评分语言,有利于学生和教师进行交流和沟通^[16]。

对于牙髓切断术这一类在传统实验教学中难以开展的操作,虚拟仿真实验教学可作为重要补充。学生可以模拟乳牙和年轻恒牙的病例接受检查、诊断、牙髓切断等全过程,且不受时间和空间限制反复练习,能有效提高教学质量^[17]。

Carpegna 等^[18]将 VR 模拟系统用于显微根尖手术的教学练习,直观地展示并区分釉质、牙本质、牙骨质和牙槽骨,学生在经历 10 次的去骨、截根和

倒预备练习,并通过系统的实时反馈不断进行自我总结和反思后去骨的准确率从 40.9% 提高到 71.2%,截根的准确率从 19.4% 提高到 44.4%。

2.2 牙周病学

牙周探诊、龈上洁治、龈下刮治和根面平整等操作是本科生在牙周实验教学中需掌握的基本技能,传统牙周病学本科教育常采用猪的颌骨模型进行演示和训练,但往往花费大量时间也不能获得满意的教学效果^[19]。通过使用 VR 和力反馈技术,牙周虚拟仿真系统能使学生可视化三维虚拟口腔并感受真实的触觉,同时使用虚拟器械感知牙齿、牙龈和结石的表面,学习牙周病的诊断和治疗^[20]。仿真模拟系统还可在学生进行牙周袋探诊训练时记录探诊力量和每次重复练习时探诊的深度,以评估学生对这项操作的掌握程度^[21]。VR 技术与颌骨模型相结合的情境训练可提供牙周治疗过程中的良好触觉反馈,便于学生更好地掌握手感和合适的力度,同时,VR 可与学生有效互动,模拟临床诊疗过程,训练学生的临床诊疗思维^[22]。刮治和根面平整(scaling and root planning, SRP)是牙周病学教育的核心之一,SRP 虚拟仿真的应用显著提高了学生去除牙结石的熟练程度和去除率,尤其是在后牙和深牙周袋等困难区域,原因是虚拟仿真系统的力反馈能力和可视化可帮助学生准确定位和去除龈下牙结石,及时发现并纠正错误的操作,同时最大程度减少软组织的损伤^[23]。还有研究招募了一群从未接触过牙周器械的非口腔专业志愿者,使其通过 360° VR 自学牙周器械及相关操作,发现通过 1 周的自学,初学者们已经可以初步认识牙周器械并熟悉相关的技能操作,因此,360° VR 被证实是一种有效的自学方式,有望作为牙周器械训练的下一代自学工具^[24]。

2.3 口腔颌面外科学

在口腔颌面外科学,虚拟仿真系统常用于口腔局部麻醉操作的教学和培训。局部麻醉模型和虚拟仿真系统相结合进行下牙槽神经阻滞技术教学可使学生体会到触觉逼真的注射解剖标志点,在视觉上直观展示底层解剖结构(下牙槽神经和舌神经等),同时采用真正的抽吸注射器进行注射体验,这项技术可最大程度地缩小临床前教育和临床实践之间的差距^[25-26]。另外,基于触觉反馈的沉浸式虚拟仿真系统可记录学生局麻练习时的进针点、进针角度和深度以及注射时间等操作要点并进行评分,对于口腔局麻技术的提升具有积极作用^[27]。

头颈部解剖的学习是口腔本科生教育的重点,

对于提高口腔医生的临床实践和操作能力至关重要。虚拟仿真系统结合 CBCT 图像可有效帮助学生记忆头颈部重要解剖标志,加深对头颈部解剖理论知识的理解和掌握,并提升学生的学习参与度和体验感^[28]。

虚拟仿真实验平台还可用于口腔颌面外科学实验课程的预习,能明显提高学生的自主学习能力,提升实验学习效果^[29]。利用虚拟模型外科引导微创阻生牙拔除的实验教学方法,可增强口腔医学生对阻生牙拔除术基本操作和技术要点的理解和掌握,有利于提高教学质量^[30]。

2.4 口腔修复学

虚拟仿真系统可模拟修复教学中牙体预备的全过程。它可在计算机屏幕上显示牙体和牙科器械的高分辨率图像,通过虚拟的涡轮机和口镜可进行牙体的预备,虚拟涡轮机的速度由真实的踏板控制,并可发出逼真的声音使操作者身临其境^[31]。虚拟仿真系统也可用于全口义齿中性区设计和牙齿排列的教学,参与实验的所有师生均认为这项技术显著提高了教学效果^[32]。

2.5 口腔种植学

在种植手术中,选择合适的植入位置和深度对于手术的成功和避免损伤重要解剖结构至关重要,但口腔颌面部区域解剖复杂且常存在变异,给种植操作带来了许多困难和挑战^[33]。有学者提出一种基于 VR 的个性化钻孔模拟系统,用于种植手术中钻孔操作的模拟和训练,可有效提高操作者的手术技能和经验^[34]。通过虚拟仿真牙科教学系统进行

本科种植体植入术的实践练习,相比于传统的种植模型种植体植入术,可显著提高教学效果及学生的积极性和满意度^[35]。

2.6 口腔正畸学

近年来,在正畸教育中越来越多地使用技术增强的模拟学习,例如增强现实、虚拟现实、机器人、基于触觉和场景的模拟系统等^[36]。这些虚拟仿真系统可应用于正畸学习的多个领域,包括诊断和治疗计划、托槽的定位、正畸程序、面部标志、可摘矫治器和头影测量分析等^[37-38]。有学者对通过虚拟仿真系统进行正畸托槽粘接培训的可用性进行评价,大多数学生认为虚拟仿真系统可帮助他们认识器械精细结构,同时可重复体验,提升操作能力^[39]。

2.7 口腔黏膜病学

口腔黏膜病学传统教学模式存在内容抽象不易理解导致学生学习积极性低、现有教学资料展示内容有限和缺乏实操练习等缺陷。焦凯等^[40]提出了一种将 MR 技术与远程医疗教育平台相结合的教学模式,以提供一个安全、低成本、高仿真的教学环境。学生不仅可在理论学习时“直观”观察各种口腔黏膜病损特点,自行放大局部病损进行多角度观察,还可实时利用虚拟设备进行实践练习^[40]。VR 技术可扩展口腔黏膜病学的实习课程,例如通过 VR 模拟组织病理活检技术用于口腔黏膜病的确诊,学生可在虚拟环境下进行病损消毒、局麻、病损部位的选择、切取以及缝合等操作^[41]。

口腔虚拟仿真系统近 5 年在口腔学科中的应用与改进见表 1。

表 1 口腔虚拟仿真系统近 5 年在口腔学科中的应用与改进

Tab.1 Application and improvement of virtual simulation systems in stomatology in recent five years

学科	教学内容	虚拟仿真系统
牙体牙髓病学	去龋及检测评分	SIMtoCARE ^[14] ; UniDental ^[15]
	开髓及检测评分	VR dental simulator developed by Rhienmora <i>et al</i> ^[16]
	牙髓切断术	The Virtual Simulation Experimental Platform for Teaching Pulpotomy ^[17]
	显微根尖手术	Virteasy Dental ^[18]
牙周病学	洁刮治和根面平整	UniDental ^[23]
	认识牙周器械和相关技能操作的学习	360° VR screen and Google Cardboard ^[24]
口腔颌面外科学	口腔局部麻醉	基于 MR 的下牙槽神经阻滞模拟器 ^[25] ; The VIDA Odonto [®] ^[27]
	头颈部解剖	Immersive View and the Rift head mounted device ^[28]
	微创阻生牙拔除	ProPlan 虚拟软件 ^[30]
口腔修复学	牙体预备	Simodont Dental Trainer ^[31]
口腔种植学	全口义齿中性区设计和排牙的教学	基于 VR 的模拟器 ^[32]
	钻孔的实践练习	Dental implant surgery simulator ^[34]
	种植体植入术	Virteasy Dental ^[35]
口腔正畸学	正畸托槽粘接	VR-SENS VR Orthodontic Rectangular Software ^[39]
口腔黏膜病学	理论及实践学习	基于 MR 的远程教育 ^[40]
	组织病理活检	基于 VR 的教学模式 ^[41]

3 口腔虚拟仿真教学的优势

与基于仿头模的传统培训方法相比,口腔虚拟仿真系统具有许多优势,可为师生提供更优越的教学环境。除了牙科操作技能,学生还可以通过口腔虚拟仿真系统获得相关的理论知识^[42]。口腔虚拟仿真系统允许临床技能的可重复和可逆的临床前培训^[43],可给予学生更灵活的培训体验^[44]。它们还可以记录培训过程并进行客观评估和指导反馈^[7]。此外,由于口腔虚拟仿真系统尽可能还原了真实的临床环境,它们的培训更具有临床相关性^[45]。口腔虚拟仿真系统还可以消除治疗风险,提高患者的安全性^[46]。使用口腔虚拟仿真系统进行培训也允许学生随时重复练习,直到他们熟练掌握临床技能^[43]。同时,与传统教学方法相比,口腔虚拟仿真系统可以减少教学时间^[47]。因此,口腔虚拟仿真系统在教学中的应用可以弥补传统教学方法的不足,减轻教学负担,提高师生的便利性。

4 口腔虚拟仿真教学面临的挑战

口腔虚拟仿真系统目前仍存在一些需要攻克挑战。目前口腔虚拟仿真系统所采用的显示器相对落后,产生的立体视觉不够清晰。为了实现3D现实,大多数口腔虚拟仿真系统都使用了3D眼镜,它的使用可能会让使用者眩晕和恶心^[48]。同时3D眼镜的使用在一定程度上降低了图像分辨率,改变了图像质量^[49]。口腔操作需要精确识别不同类型组织之间的细微差异,因此图像分辨率的降低可能会导致操作的不准确。故在未来的发展中应当寻找分辨率更高的3D显示器以取代3D眼镜。

在真实的临床操作中,口腔医生可通过不同口腔组织的力反馈来对操作完成度进行判断^[50]。尽管力反馈技术已发展了近50年,但目前口腔虚拟仿真系统的力反馈主要基于力生成算法产生,这与口腔组织,尤其是软组织与口腔器械接触时产生的力反馈仍旧有所差异^[51]。因此口腔虚拟仿真系统的力反馈保真度仍有待提高。

此外软组织的变形模拟也是口腔虚拟仿真系统目前面临的难题。真实口腔环境模拟包括舌部和面部组织变形的模拟。当模拟手术器械与可变形物体碰撞时,物体需要相应地变形。变形模拟基于软组织的物理属性,例如密度和弹性。为了表达这些特性,必须建立物理模型。这些模型通常包括质量弹簧法和有限元法^[52]。质量弹簧法简单且常用,但难以保持组织体积信息和设置弹簧刚度^[53]。有限元

法的缺点是很难用于实时仿真^[52]。因此,需要建立一种计算效率更高、模拟更准确、更能代表口腔组织物理特性的物理模型。

5 总结

尽管口腔虚拟仿真系统目前在某些学科的技能培训方面还无法与传统的培训模式相媲美,但它们仍然具有一些优势,并且在某些情况下其有效性得到了验证。应进行更多的研究,以改善口腔虚拟仿真系统的视觉效果、力反馈和沉浸感,为学生提供更加个性化的学习帮助,使其功能更加多样化,更适用于临床前培训。口腔虚拟仿真系统的进步将进一步推动口腔实验教学的优化,为口腔医学人才建设提供扎实的基础。

[参 考 文 献]

- [1] Lu JZ, Zhang LL, Ye L. Construction and application of dental virtual reality simulation teaching system in China: Necessity and strategies[J]. *Eur J Dent Educ*, 2023; 1-6.
- [2] Hsu MH, Chang YC. Haptic and force feedback technology in dental education: A bibliometric analysis[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2023, 20(2): 1318.
- [3] Huang YD, Huang SH, Liu Y, *et al.* Application of virtual reality and haptics system Simodont in Chinese dental education: A scoping review[J]. *Eur J Dent Educ*, 2023; 1-9.
- [4] Li YN, Ye HQ, Ye F, *et al.* The current situation and future prospects of simulators in dental education[J]. *J Med Internet Res*, 2021, 23(4): e23635.
- [5] Perry S, Bridges SM, Burrow MF. A review of the use of simulation in dental education[J]. *Simul Healthc*, 2015, 10(1): 31-37.
- [6] Serrano CM, Wesselink PR, Vervoom JM. First experiences with patient-centered training in virtual reality[J]. *J Dent Educ*, 2020, 84(5): 607-614.
- [7] Welk A, Splieth C, Rosin M, *et al.* DentSim - a future teaching option for dentists[J]. *Int J Comput Dent*, 2004, 7(2): 123-130.
- [8] Baechle MA, Gottlieb R, Carrico CK, *et al.* Practice makes perfect? Association between students' performance measures in an advanced dental simulation course [J]. *J Dent Educ*, 2022, 86(11): 1535-1544.
- [9] Sun ZD, Zhu ML, Shan XC, *et al.* Augmented tactile-perception and haptic-feedback rings as human-machine interfaces aiming for immersive interactions[J]. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 5224.
- [10] Bandiaky ON, Lopez S, Hamon L, *et al.* Impact of haptic simulators in preclinical dental education: A systematic review[J]. *J Dent Educ*, 2024, 88(3): 366-379.
- [11] Zhao XH, Zhu ZL, Cong Y, *et al.* Haptic rendering of diverse tool-tissue contact constraints during dental implantation procedures[J]. *Front Robot AI*, 2020, 7: 35.
- [12] Verhey JT, Haglin JM, Verhey EM, *et al.* Virtual, augmented,

- and mixed reality applications in orthopedic surgery[J]. *Int J Med Robot*, 2020, 16(2): e2067.
- [13] Li YN, Ye HQ, Wu SY, *et al.* Mixed reality and haptic-based dental simulator for tooth preparation: Research, development, and preliminary evaluation[J]. *JMIR Serious Games*, 2022, 10(1): e30653.
- [14] Daud A, Matoug-Elwerfelli M, Daas H, *et al.* Enhancing learning experiences in pre-clinical restorative dentistry: The impact of virtual reality haptic simulators[J]. *BMC Med Educ*, 2023, 23(1): 948.
- [15] 赵思铭, 赵晓含, 张杰, 等. 虚拟现实技术用于龋坏识别教学[J]. *北京大学学报(医学版)*, 2021, 53(1): 139-142.
- [16] Yin MS, Haddawy P, Suebnukarn S, *et al.* Automated outcome scoring in a virtual reality simulator for endodontic surgery[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2018, 153: 53-59.
- [17] Lu JX, Yang X, Zhao W, *et al.* Effect analysis of a virtual simulation experimental platform in teaching pulpotomy[J]. *BMC Med Educ*, 2022, 22(1): 760.
- [18] Carpegna G, Scotti N, Alovisei M, *et al.* Endodontic microsurgery virtual reality simulation and digital workflow process in a teaching environment[J]. *Eur J Dent Educ*, 2023: 1-7.
- [19] Figuero E, Gürsoy M, Monnet-Corti V, *et al.* Domains, competences and learning outcomes for undergraduate education in periodontology[J]. *J Clin Periodontol*, 2024: 1-17.
- [20] Mallikarjun SA, Tiwari S, Sathyanarayana S, *et al.* Haptics in periodontics[J]. *J Indian Soc Periodontol*, 2014, 18(1): 112-113.
- [21] Yamaguchi S, Yoshida Y, Noborio H, *et al.* The usefulness of a haptic virtual reality simulator with repetitive training to teach caries removal and periodontal pocket probing skills[J]. *Dent Mater J*, 2013, 32(5): 847-852.
- [22] Zhang J, Xing JW, Zheng M, *et al.* Effectiveness of virtual simulation and jaw model for undergraduate periodontal teaching[J]. *BMC Med Educ*, 2021, 21(1): 616.
- [23] Wu SW, Gao L, Fu JR, *et al.* The application of virtual simulation technology in scaling and root planing teaching[J]. *Int Dent J*, 2024, 74(2): 303-309.
- [24] Tak NY, Lim HJ, Lim DS, *et al.* Effect of self-learning media based on 360° virtual reality for learning periodontal instrument skills[J]. *Eur J Dent Educ*, 2023, 27(1): 1-8.
- [25] Lamira JM, Wilson CS, Leppek NC, *et al.* A pilot study of local anesthesia training using a mixed-reality haptic fidelity model[J]. *J Dent Educ*, 2023, 87(4): 583-591.
- [26] Mladenovic R, Dakovic D, Pereira L, *et al.* Effect of augmented reality simulation on administration of local anaesthesia in paediatric patients[J]. *Eur J Dent Educ*, 2020, 24(3): 507-512.
- [27] Collaço E, Kira E, Sallaberry LH, *et al.* Immersion and haptic feedback impacts on dental anesthesia technical skills virtual reality training[J]. *J Dent Educ*, 2021, 85(4): 589-598.
- [28] Kim-Berman H, Bui D, Lee K, *et al.* Student learning of head and neck anatomy using cone beam computed tomography and immersive virtual reality[J]. *J Dent Educ*, 2023, 87(8): 1180-1187.
- [29] 贾晓宁, 孙维克, 王艳霞, 等. 口腔颌面外科学实验教学改革初探[J]. *中国继续医学教育*, 2021, 13(21): 1-5.
- [30] 吴焯, 刘欢欢, 陈嘉民, 等. 虚拟与仿真技术在下颌阻生牙拔除术实验教学中的应用[J]. *中国口腔颌面外科杂志*, 2022, 20(3): 303-306.
- [31] Slaidina A, Ozolins K, Berzina S, *et al.* Patient-specific virtual simulation in the clinical training for prosthetic dentistry[J]. *Eur J Dent Educ*, 2025, 29(3): 561-569.
- [32] Mansoori MS, Azizi SM, Mirhosseini F, *et al.* A study to investigate the effectiveness of the application of virtual reality technology in dental education[J]. *BMC Med Educ*, 2022, 22(1): 457.
- [33] Jayachandran S, Walmsley AD, Hill K. Challenges in dental implant provision and its management in general dental practice[J]. *J Dent*, 2020, 99: 103414.
- [34] Chen XJ, Sun PJ, Liao DH. A patient-specific haptic drilling simulator based on virtual reality for dental implant surgery[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2018, 13(11): 1861-1870.
- [35] 李晓静, 王艳辉, 徐昊, 等. Virteasy Dental 虚拟仿真牙科教学系统在种植体植入术本科教学中的应用效果评价[J]. *临床口腔医学杂志*, 2022, 38(3): 170-172.
- [36] Chen DR, Liu XQ, Liu YB, *et al.* Virtual reality used in undergraduate orthodontic education[J]. *Eur J Dent Educ*, 2023: 1-9.
- [37] Sytek L, Inglehart MR, Ramaswamy V, *et al.* Comparisons of orthodontic residents' performance and attitudes using 2D, 3D, and virtual reality surgical simulation methods[J]. *J Dent Educ*, 2021, 85(8): 1415-1426.
- [38] 陈雪婷, 陈玉萍, 赖颖真. 虚拟仿真技术在口腔正畸实验教学中的应用[J]. *中国继续医学教育*, 2021, 13(17): 49-52.
- [39] Huang Y, Cheng X, Chan U, *et al.* Virtual reality approach for orthodontic education at School of Stomatology, Jinan University[J]. *J Dent Educ*, 2022, 86(8): 1025-1035.
- [40] 焦凯, 马璋玉, 覃文聘, 等. 混合现实远程教育模式在口腔黏膜病学本科教学中的应用思考[J]. *临床口腔医学杂志*, 2023, 39(2): 114-116.
- [41] 汪苑苑, 朱婉立, 刘青, 等. 浅谈虚拟现实技术在口腔黏膜病学教学中的应用[J]. *医学教育研究与实践*, 2020, 28(3): 491-493, 509.
- [42] Liu LW, Zhou RY, Yuan SY, *et al.* Simulation training for ceramic crown preparation in the dental setting using a virtual educational system[J]. *Eur J Dent Educ*, 2020, 24(2): 199-206.
- [43] Nassar HM, Tekian A. Computer simulation and virtual reality in undergraduate operative and restorative dental education: A critical review[J]. *J Dent Educ*, 2020, 84(7): 812-829.
- [44] Escobar-Castillejos D, Noguez J, Neri L, *et al.* A review of simulators with haptic devices for medical training[J]. *J Med Syst*, 2016, 40(4): 104.
- [45] Dixon J, Towers A, Martin N, *et al.* Re-defining the virtual reality dental simulator: Demonstrating concurrent validity of clinically relevant assessment and feedback[J]. *Eur J Dent Educ*, 2021, 25(1): 108-116.
- [46] Abe S, Noguchi N, Matsuka Y, *et al.* Educational effects using a robot patient simulation system for development of clinical attitude[J]. *Eur J Dent Educ*, 2018, 22(3): e327-e336.

vascular response to dental plaque[J]. *Mol Oral Microbiol*, 2018, 33(4): 271-282.

- [36] Apatzidou DA. The role of cigarette smoking in periodontal disease and treatment outcomes of dental implant therapy[J]. *Periodontol* 2000, 2022, 90(1): 45-61.
- [37] Tatsumi M, Yanagita M, Yamashita M, *et al.* Long-term exposure to cigarette smoke influences characteristics in human gingival fibroblasts[J]. *J Periodontol Res*, 2021, 56(5): 951-963.
- [38] Xie GY, Huang C, Jiang SD, *et al.* Smoking and osteoimmunology: Understanding the interplay between bone metabolism and immune homeostasis[J]. *J Orthop Translat*, 2024, 46: 33-45.
- [39] Chang J, Meng HW, Lalla E, *et al.* The impact of smoking on non-surgical periodontal therapy: A systematic review and meta-analysis[J]. *J Clin Periodontol*, 2021, 48(1): 60-75.
- [40] Herbst CS, Schwendicke F, Krois J, *et al.* Association between patient-, tooth- and treatment-level factors and root canal treatment failure: A retrospective longitudinal and machine learning study [J]. *J Dent*, 2022, 117: 103937.
- [41] Avila G, Galindo-Moreno P, Soehren S, *et al.* A novel decision-making process for tooth retention or extraction[J]. *J Periodontol*, 2009, 80(3): 476-491.

- [42] Salvi GE, Mischler DC, Schmidlin K, *et al.* Risk factors associated with the longevity of multi-rooted teeth. Long-term outcomes after active and supportive periodontal therapy [J]. *J Clin Periodontol*, 2014, 41(7): 701-707.
- [43] 周伟, 汤雅, 李厚轩, 等. 牙周牙髓联合病变患牙预后观察的回顾性研究[J]. *口腔医学研究*, 2021, 37(9): 825-829.
- [44] Stueland H, Ørstavik D, Handal T. Treatment outcome of surgical and non-surgical endodontic retreatment of teeth with apical periodontitis[J]. *Int Endod J*, 2023, 56(6): 686-696.
- [45] 韩富蓉, 范伟. 复合树脂联合 iRoot BP Plus 治疗上颌前磨牙继发性牙根纵裂 1 例[J]. *口腔医学*, 2023, 43(8): 726-729.
- [46] Berglundh T, Giannobile WV, Lang NP, *et al.* Lindhe's clinical periodontology and implant dentistry[M]. Hoboken: Wiley, 2021.
- [47] Crum AJ, Leibowitz KA, Verghese A. Making mindset matter[J]. *Bmj*, 2017: j674.
- [48] Sayed ME, Jurado CA, Tsujimoto A. Factors affecting clinical decision-making and treatment planning strategies for tooth retention or extraction: An exploratory review [J]. *Niger J Clin Pract*, 2020, 23(12): 1629-1638.

(收稿日期:2025-05-12)

(本文编辑:孙 鑫)

(上接第 214 页) 涂 恒,等.口腔虚拟仿真实验教学的现状与评价

- [47] Jasinevicius TR, Landers M, Nelson S, *et al.* An evaluation of two dental simulation systems; Virtual reality *versus* contemporary non-computer-assisted[J]. *J Dent Educ*, 2004, 68(11): 1151-1162.
- [48] Eve EJ, Koo S, Alshihri AA, *et al.* Performance of dental students versus prosthodontics residents on a 3D immersive haptic simulator [J]. *J Dent Educ*, 2014, 78(4): 630-637.
- [49] Hattori A, Tonami KI, Tsuruta J, *et al.* Effect of the haptic 3D virtual reality dental training simulator on assessment of tooth preparation[J]. *J Dent Sci*, 2022, 17(1): 514-520.
- [50] Haluck RS, Webster RW, Snyder AJ, *et al.* A virtual reality surgical trainer for navigation in laparoscopic surgery[J]. *Stud Health Technol Inform*, 2001, 81: 171-176.

- [51] Corrêa CG, Nunes FLS, Ranzini E, *et al.* Haptic interaction for needle insertion training in medical applications; The state-of-the-art[J]. *Med Eng Phys*, 2019, 63: 6-25.
- [52] Zou YN, Liu PX, Cheng QQ, *et al.* A new deformation model of biological tissue for surgery simulation[J]. *IEEE Trans Cybern*, 2017, 47(11): 3494-3503.
- [53] Lutz JC, Hostettler A, Agnus V, *et al.* A new software suite in orthognathic surgery: Patient specific modeling, simulation and navigation[J]. *Surg Innov*, 2019, 26(1): 5-20.

(收稿日期:2024-05-06)

(本文编辑:田 慧,孙 鑫)