·数智医学教育·

数字仿真技术VR和AR在临床医学教育中的应用研究

余群[1]　周炜杰[2]

[1]上海市健康促进中心，上海　200040；[2]中国初级卫生保健基金会，北京　100011

通信作者：周炜杰，Email：wjzhou@metamediai.com

【摘要】 本文探讨了数字仿真技术中虚拟现实（virtual reality，VR）和增强现实（augmented reality，AR）技术在外科临床教学中的革命性作用。这些技术可以提供安全、可控的学习环境，促进学生的个性化学习和远程教学，使外科临床教学更加高效和安全。还讨论了成为一款有效的AR/VR外科临床教学软件应具备的要素和标准，包括真实的模拟环境、互动性、教学内容的广度与深度、用户友好的界面设计、个性化学习计划、多用户交互功能、数据驱动的分析、技术的前瞻性和兼容性、符合医学教学标准以及安全性和隐私保护等。尽管存在着高昂成本和技术复杂度的挑战，数字仿真技术预计将持续扩大和深化其在外科临床教学领域的应用，改变教学方式，并提高教学质量和手术安全性。

【关键词】 数字仿真技术；　医学外科临床教学；　虚拟现实；　增强现实

【中图分类号】 R-05

DOI：10.3760/cma.j.cn116021-20240411-01959

A brief analysis of the applications of digital simulation technologies VR and AR in clinical medical education

Yu Qun[1], Zhou Weijie[2]

[1]Shanghai Health Promotion Center, Shanghai 200040, China; [2]China Primary Health Care Foundation, Beijing 100011, China

Corresponding author: Zhou Weijie, Email: wjzhou@metamediai.com

【Abstract】 This article explores the revolutionary role of digital simulation technologies virtual reality (VR) and augmented reality (AR) in surgical clinical teaching. These technologies can provide a safe and controllable learning environment, promote personalized learning and remote teaching for students, and enhance the efficiency and safety of surgical clinical teaching. We also discussed the elements and standards required for an effective AR/VR surgical clinical teaching software. These include a realistic simulation environment, interactivity, breadth and depth of teaching content, user-friendly interface design, personalized learning plans, multi-user interaction functions, data-driven analysis, technological foresight and compatibility, compliance with medical teaching standards, and security and privacy protection. Despite challenges such as high cost and technological complexity, digital simulation technologies are expected to continue expanding and deepening their applications in surgical clinical teaching, changing teaching methods and improving teaching quality and surgical safety.

【Key words】 Digital simulation technology;　Surgical clinical teaching;　Virtual reality;　Augmented reality

DOI：10.3760/cma.j.cn116021-20240411-01959

外科临床教学一直是临床教学的重要组成部分，除了包含医学理论知识的传授，更重要的是手术技能的培养。传统的外科临床教学主要依赖“看一看，做一做，教一教”的模式[1]。这种方法首先要求学生通过观摩有经验的外科医生的手术过程，然后在医生的监督下具体操作，从而达到能够独立进行手术的水平。随着医学的快速发展，外科临床教学正面临着各种挑战，比如如何帮助学生快速高效地培养手术技术技能等。此外，外科临床教学亟须应对包括预算限制、疾病的复杂性、伦理限制[2]和对手术环境中的患者安全的关注等多方面挑战。

随着科技的发展，尤其是高分辨率屏幕、移动图形处理单元（mGPUs）和定位感应等技术的应用，数字仿真技术在外科临床教学中的应用日益增多。这些技术包括虚拟现实（virtual reality，VR）、增强现实（augmented reality，AR）以及其他数字技术和软件应用平台，这些新技术的出现为外科临床教学提供了前所未有的机遇[3]。

应用数字仿真技术可以加强理论与实践的结合，调动学生的主观能动性并拓展学生的前瞻视野[4]。例如：沉浸式虚拟现实（immersive virtual reality，IVR）模拟器可以为功能有限的系统提供可访问、低成本、现实感强的训练辅助工具[5]。通过VR/AR技术，学生可以通过临床和模拟训练来掌握技术技能，并通过基于视频的回溯来评估自己的表现，并针对性地改善自己不足的地方[2]。王萌等[6]研究发现，95%的学生认为VR教学方式具有新颖性，总体满意度高，学生易于接受授课内容，并且VR具有伦理学优势，契合当前国际医学教学的主流趋势。

本研究深入探讨数字仿真技术中AR和VR技术应用在外科临床教学中的优势[2]，并结合外科临床教学研究实例来展示数字仿真技术的应用前景，之后探讨一款有效的AR或者VR的外科临床教学软件应具备的要素和标准，并讨论未来外科临床教学应用这些技术时所面临的挑战和机遇。

1　数字仿真技术中的VR和AR技术

1.1　VR

VR是一种可以创建并提供虚拟世界体验的计算机仿真系统技术，它利用计算机系统创造一个虚拟环境，并将用户置于这样一个模拟的3D环境中，用户可以沉浸在这个环境中并与之进行交互。VR技术的实现主要是通过头戴显示设备[7]，也可以配套使用手持设备，如控制器或手套等，这些设备可以模拟手术工具的使用。这些特点使VR系统与传统的医学外科临床教学方法有所不同。现在已经有一些商业上可用的VR头戴硬件设备比如Oculus（Facebook）、HTC-Vive系列和Valve Index（Steam）[7]等，这些VR硬件的问世为VR技术在外科临床教学领域的应用提供了硬件基础。VR技术可以提供传统教学方式无法实现的沉浸式数字体验，使学生能够更好地参与到复杂的学习过程中，而不仅仅依靠传统讲座和教科书。VR的环境也是一个无风险的学习平台，学生可以在虚拟世界中反复练习复杂的手术程序而不必担心对患者造成实际伤害。

1.2　AR

AR技术是一种混合现实的呈现，是一种将真实世界元素与计算机生成的图像、声音或其他虚拟信息叠加或补充的技术[8]，AR技术可以通过智能眼镜或透明显示屏实现。AR在教学领域的作用尤其是辅助学生的学术研究方面已经被广泛研究和实施[9]。比如将AR用于历史、科学和艺术等领域，为学生提供更多的知识。AR可以将人体的生理信息数字化，随后通过AR眼镜叠加映射在真人身上，让学生能够以传统教科书无法实现的方式观摩人体并交互学习[10]。

这两种技术的结合使用，为外科临床教学提供了一个前所未有的教学和训练平台。借助VR，学生可以在完全模拟的环境中练习手术技巧，而AR则在真实的手术过程中提供辅助信息和指导。这些技术不仅提高了手术训练的效果，也增加了安全性和效率。

2　AR、VR技术赋能外科临床教学

2.1　模拟复杂的手术过程

VR/AR可以提供一个安全、可控的环境，供学生练习各种复杂手术。这种环境下的训练可以帮助新手外科医生在处理真实患者之前积累宝贵的经验。McKnight等[11]认为，虚拟和增强现实在外科临床教学和外科护理中发挥着越来越重要的作用。

在目前的研究案例中，Seetohul等[12]将触觉反

馈、感官刺激和人机协作等特定控制功能与AR技术相关联来执行复杂的手术干预。他们认为未来可以应用AR技术来进行手术。

Arroyo等[13]评估了VR模拟在学习应用"转子股骨钉"这样复杂手术的技术方面的效用。他们的研究显示VR组相对于对照组,具有完成更多操作步数和更早完成手术的趋势。他们认为IVR可以提供一个安全的环境,能够成为一种更加无障碍的学习路径,让学生可以学习新的手术技术。曾宁等[14]将VR及3D打印模型等技术融入数字智能化教学,结果表明数字智能化诊疗技术教学模式可以显著提高医学生的专业理论水平,并培养良好的临床思维能力和肝胆外科的教学效果。

2.2 实时反馈和评估

在VR和AR环境中,学生的手术操作可以被实时跟踪并做出相应的评估,并可以立即获得关于手术技巧、精确度和时间管理的反馈。这样的实时反馈对于技能的快速提升至关重要。Chan等[15]研究表明,VR已被用来评估外科医生在各个领域的表现,VR环境可用于量化外科医生的表现,评估外科医生的熟练程度并跟踪培训进度。

Gandsas等[16]测试了在沉浸式虚拟现实中实时直播手术的可行性,他们在3周时间对10个腹腔镜手术以360度沉浸式VR的格式进行直播,并提供给远程医师头戴式显示器以实时观看。该研究监测了数据流质量、稳定性和延迟。他们认为这种新颖的直播配置能够直接向VR平台提供高质量、低延迟的视频,让远程学习者完全沉浸在学习环境中。这说明沉浸式VR格式的直播手术过程提供了一种高效、经济且可重复的方式,可以将远程教学通过VR技术从任何位置直接传送到手术室中。

2.3 提高手眼协调能力

VR和AR的训练有助于提高学生的手眼协调能力。VR环境可以与现实手术环境非常相似,学生可以依靠视觉提示来指导其手动操作。AR可以在实际手术训练的过程中通过叠加图像信息进一步辅助学生的手眼协调能力。Rutkowski等[17]研究表明,VR系统与沉浸式音乐游戏搭配在一起,拥有改善年轻音乐家手眼协调能力和反应时间的潜力,从而帮助他们更快地掌握乐器。尽管这个实验是艺术领域的,但对于数字仿真技术应用在外科临床教学中具有同样的参考价值。Sheik-Ali等[3]研究表明,在手术教学中使用VR/AR技术与学生提高手术技能之间呈正相关,这些正相关的关系包括提高手术技能的获取速度、多任务处理能力、准确执行手术的能力等。在现实应用上,Boedecker等[18]开发了一种IVR应用程序,它可以呈现术前3D模型,支持单用户或多用户使用,支持"OpenVR"的VR耳机,并可以应用VR控制器提供3D肝脏模型的交互。这个程序在手眼协调的基础上进一步融入了听觉。研究者邀请了5位之前没有任何VR技术经验但拥有丰富经验的HPB外科医生首次使用该应用程序,并对其进行评估。结果显示,5名外科医生均认为使用该系统的学习难度较低,这凸显了该系统的易用性。

2.4 多学科团队协作

VR和AR技术可以训练不同专业的学生通过虚拟环境一同学习并锻炼自己的专业技能,比如让外科学生、麻醉师和护理学生在模拟的手术中进行合作。这种多学科的合作训练对于提高手术团队的整体效率和沟通非常重要。Stefan等[19]在手术协作性方面做了尝试,他们的项目旨在开发一个沉浸式的模拟手术室环境,用于训练和评估多学科外科团队在各种条件下的表现。他们使用混合现实(AR和VR的结合)方法,通过合成病人模型、真实的外科器械和无辐射的虚拟X线成像来模拟脊柱手术,随后观察模拟手术室中的多学科外科团队进行微创脊柱手术,并客观评估个别团队成员和整个团队的表现。

2.5 应对罕见或紧急情况

通过VR和AR技术,学生可以练习处理罕见或紧急的医疗情况,如意外出血或其他紧急情况。这种训练可以确保学生在面对真实紧急情况时能够更加从容和有效。Brown等[20]对灾难医学中的应用做了文献回顾,他们认为VR和AR技术非常适合灾难紧急情况下的应急训练,因为它们能够提供安全、社交距离远并具有很高现实度的灾难模拟环境,将VR或AR技术用于灾难训练是对传统训练方法的很好补充。

张伟东等[21]将虚拟现实技术应用到急救心肺复苏的培训中,他们发现在教学质量上,运用VR技术模式进行心肺复苏组教学的学生比接受传统模式

心肺复苏组教学的学生的心肺复苏教学效果更好。用VR技术模式进行心肺复苏在心肺复苏教学上的应用相较于传统教学培训而言有更好的指导与矫正作用。

2.6　个性化临床教学

VR和AR技术可以根据学生的技能水平和学习速度调整训练难度。这种个性化的训练方法使每位学生都能根据自己的需要和节奏进行学习，从而优化自己的学习效果。Mayer等[22]的研究中介绍了一款名为OMS Medical的可以用于个性化医疗培训的软件。这款软件应用VR技术为学生提供个性化的学习服务。学生可以像在现实中一样进行交流、评估、诊断和治疗，随后他们会收到个体化的学习反馈。在这款软件中，教学者和学习者可以一起使用这些反馈来指导学习。

Mishra等[23]的研究应用了一款名为PERC Mentor的专为经皮肾穿刺训练而开发的VR模拟器。经过PERC软件培训后，他们在总手术时间减少方面显著改善[24]。Matsumoto等[25]研究发现，Symbionix的Uro Mentor VR输尿管镜模拟器可以有效地评估每个住院医师的腔内泌尿外科技能。在VR模拟器上接受培训的高级住院医师在总体评分量表、清单、通过/失败评分方面显著较高，并且完成任务所需的时间明显较短。

Zhang等[26]也应用PERC Mentor™来培训不同技术水平的学生进行经皮肾集合系统穿刺。经过短期培训，所有学生均能独立完成手术流程，VR模拟器可以提供高培训质量并能准确评估学员的能力[26]。

2.7　持续教育

医学是一个不断发展的领域，学生和医生都需要持续地学习并训练他们的技能。VR和AR技术可以作为一个有效的持续教育工具，帮助学生保持与最新医疗实践同步。

Bruno等[27]认为AR可以成为重症监护医务工作者继续教育的有效工具，它是对传统学习方法的补充，重症监护医务工作者可以通过AR技术提供的继续教育来获得关键的实践能力，例如中心静脉导管放置、心肺复苏、体外膜肺氧合装置管理或气管插管等。

张东等[28]认为将虚拟仿真技术应用到临床麻醉技能教学中具有明显优势，比如虚拟仿真技术可以打造该专业的临床技能教学资源库，提高学生学习的兴趣和积极性，并提高临床麻醉技能教学的质量与效率等。

总而言之，VR和AR技术通过提供逼真的模拟环境、实时反馈、手眼协调训练、团队合作机会、应对紧急情况的能力以及持续教育等方面的支持，大大增强外科手术技能的训练和学习效果。这些数字技术正在逐渐被广泛地探索和应用，从而对外科临床教学的未来产生深远影响。

3　外科临床教学的AR或VR软件要素探讨

为了充分发挥AR和VR技术在外科教学中的潜力，需要细致探讨和深入理解构成有效外科临床教学软件的关键要素。朱坚轶等[29]研究发现，在推行医学虚拟仿真实验课程的过程中，存在对于虚拟仿真技术理解不够充分、实验课程开发过于追求形式，以及缺乏有效监管、系统反馈模糊等一系列问题。本研究从软件需求分析的角度，认为一款优秀、全面地应用数字仿真技术的教学软件，应该拥有以下的几个参考标准。

3.1　高度真实的模拟环境

一个高度真实的模拟环境可以为学生提供逼真的手术体验。这意味着需要精确模拟外科手术的环境，包括手术室的布局、器械的种类和功能，以及患者的解剖结构等。此外，软件应能模拟患者的生理反应，比如出血量、心跳速率和血压的变化等，以提供更全面的手术实践体验。

3.2　互动性与实时反馈

软件应支持复杂的交互操作，例如手势控制、语音输入和触觉反馈，使学生能够以更自然的方式与模拟环境互动。同时，软件应能提供即时的技能评估和反馈，帮助学生及时了解他们的操作是否正确，并获得改进意见。

3.3　教学内容的广度与深度

软件需要覆盖从简单到复杂的手术技能，包括不同类型的手术程序和技术。这可能会需要不同专业的医务工作者协同合作。同时，软件应提供相关的解剖学、病理学和手术流程的知识，帮助学生全面理解手术的每一个环节。

3.4　用户友好的界面设计

软件的界面设计应直观易用，降低学生的学习

难度。面向用户的界面应清晰展示可用的功能和操作步骤，确保学生和医生能够快速上手并有效地进行学习。在设计理念上，可以先从基于工业应用的VR/AR友好设计界面作为参考。

3.5 个性化学习计划

不同的学生在各自的技能、知识水平和学习风格上存在差异。软件应能根据每个学生的技能水平和学习需求提供个性化的学习计划。通过为学生提供与其能力和进度相匹配的教学内容来提高学习效率，减少不必要的重复和时间浪费。VR和AR的技术特点可以提供实时反馈和指导，帮助学生了解他们的强项和改进领域；VR和AR也可以为学生提供广泛的学习经验，从基础知识到高级技能，以满足不同学生的需求。

3.6 多用户交互功能

外科手术通常需要团队合作，因此支持多用户在线协作的功能非常重要，多用户交互功能可以允许模拟真实的手术团队环境，并且可以为不同的学生分配特定的角色和任务，如主刀医生、助手或观察者等。通过软件，学生不仅可以练习手术技能，还能学习如何在团队中有效沟通和协作。

3.7 数据驱动的AI分析

在使用过程中，VR和AR软件应当具备收集各种数据并进行分析的功能，这些功能包括手术操作的精确度、时间效率、错误率和学生的眼球追踪等。软件应该内置机器学习和数据挖掘技术，在数据中提取有用的信息，并以此来指导教学的决策，进而达到为学生提供个性化的能力评估和改进建议。

3.8 技术的前瞻性和兼容性

外科技术和医疗设备在不断进步。AR和VR软件需要具有前瞻性，以便能够适应新的技术和手术方法，确保培训内容始终保持最新。软件应兼容当前及未来的AR/VR硬件，无论学生使用的是哪种头戴设备或操作系统，软件都需要确保所有学生无缝使用。

3.9 符合医学教学标准

培训软件的所有内容和操作应符合专业医学教学的标准和实践指南，应用的医学知识和技术应当保持持续更新来确保学生获得最新的知识。软件提供的培训内容必须是准确、可靠且与当前医学实践相一致，这对于培养合格、知识渊博的医疗专业人员至关重要。应用软件在教学质量上也应当符合行业标准，从而确保学生的技能和知识能够得到专业认可。

4 结语

本研究结合案例从模拟复杂手术程序、实时反馈和评估、提高手眼协调能力、多学科团队协作、应对罕见或紧急情况、个性化临床教学和持续教学等多方面讨论了数字仿真技术在提高外科手术教学上的效果，显示了VR和AR技术在外科临床教学中所表现出的巨大潜力。并从软件需求分析的角度，探讨了一款合格的AR/VR的外科临床教学软件应该具备的基本要素。这些要素可以为将来该领域的软件应用提供一个参考的依据。但在重现真实人体反应和复杂医疗程序上也存在技术和教学流程上的难题，涉及各个不同专业领域和学科间的交叉合作。例如，一个基本的VR外科手术训练系统可能包括3D虚拟患者模型、实时物理模拟、触觉反馈设备和高性能计算平台等。同样，技术的实现意味着高昂的成本，包括硬件设备、软件开发、内容创作和系统维护的费用。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 余群：论文构思、撰写论文、项目负责人、审订论文；周炜杰：论文构思、撰写论文、项目实施、技术指导

参考文献

[1] Ayub SM. “See one, do one, teach one”: balancing patient care and surgical training in an emergency trauma department [J]. J Glob Health, 2022(12): 03051. DOI: 10.7189/jogh.12.03051.

[2] Rawlings A, Brandt L , Ferreres A ,et al. Ethical considerations for allocation of scarce resources and alterations in surgical care during a pandemic [J]. Surgical Endoscopy, 2021, 35(5):1128-1134. DOI: 10.1007/s00464-020-07629-x.

[3] Sheik-Ali S, Edgcombe H, Paton C. Next-generation virtual and augmented reality in surgical education: a narrative review [J]. Surg Technol Int, 2019(35): 27-35.

[4] 屈依丽，雒琪玥，张歆缘，等. 数字化技术在上颌窦底提升术领域临床教学改革中的应用现状与展望[J]. 中国临床新医学，2020, 13(4)：323-326. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3806.2020.04.01.

[5] Mao R, Lan L, Kay J, et al. Immersive virtual reality for surgical training: a systematic review [J]. Journal of Surgical Research, 2021(268): 40-58. DOI: 10.1016/j.jss.2021.06.045.

[6] 王萌，沈艳，何宁宁，等. 基于虚拟现实技术的外科教学系统在外科手术器械教学中的应用[J]. 中国医学教育技术，2022，

36(1)：60-64. DOI: 10.13566/j.cnki.cmet.cn61-1317/g4.202201013.

[7] Kohli V, Tripathi U, Chamola V, et al. A review on virtual reality and augmented reality use-cases of brain computer interface based applications for smart cities [J]. Microprocessors and microsystems, 2022(2): 88. DOI: 10.1016/j.micpro.2021.104392.

[8] Xiong J, Hsiang EL, He Z, et al. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives [J]. Light Sci Appl, 2021, 10(1): 216. DOI: 10.1038/s41377-021-00658-8.

[9] Svetlana Olbina,Scott Glick. Using integrated hands-on and virtual reality (VR) or augmented reality (AR) approaches in construction management education [J]. International Journal of Construction Education and Research, 2023, 19(3): 341-360.

[10] Morimoto T, Kobayashi T, Hirata H, et al. XR (extended reality: virtual reality, augmented reality, mixed reality) technology in spine medicine: status quo and quo vadis [J]. J Clin Med, 2022, 11(2): 470. DOI: 10.3390/jcm11020470.

[11] McKnight RR, Pean CA, Buck SJ, et al. Virtual reality and augmented reality: translating surgical training into surgical technique [J]. Current Reviews in Musculoskeletal Medicine, 2020, 13(6): 663-674.

[12] Seetohul J, Shafiee M, Sirlantzis K. Augmented reality (AR) for surgical robotic and autonomous systems: state of the art, challenges, and solutions [J]. Sensors, 2023, 23(13): 6202. DOI: 10.3390/s23136202.

[13] Arroyo C, Jorba-Elguero P, Altamirano-Cruz M, et al. Usefulness of immersive virtual reality simulation during femoral nail application in an orthopedic fracture skills course [J]. Journal of Musculoskeletal Surgery and Research, 2019, 3(4): 326. DOI: 10.4103/jmsr.jmsr_78_19.

[14] 曾宁，车晨昊，杨静，等. 数字智能化诊疗技术在肝胆外科教学中的应用[J]. 中国继续医学教育，2021，13(9)：38-42. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9308.2021.09.011.

[15] Chan J, Pangal DJ, Cardinal T, et al. A systematic review of virtual reality for the assessment of technical skills in neurosurgery [J]. Neurosurgical Focus, 2021, 51(2): 1-10.

[16] Gandsas A, Dorey T, Park A. Immersive live streaming of surgery using 360-degree video to head-mounted virtual reality devices: a new paradigm in surgical education [J]. Surg Innov, 2023, 30(4): 486-492. DOI: 10.1177/15533506231165828.

[17] Rutkowski S, Adamczyk M, Pastuła A, et al. Training using a commercial immersive virtual reality system on hand-eye coordination and reaction time in young musicians: a pilot study [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(3): 1297.

[18] Boedecker C, Huettl F, Saalfeld P, et al. Using virtual 3D-models in surgical planning: workflow of an immersive virtual reality application in liver surgery [J]. Langenbeck's Arch Surg, 2021, 406(3): 911-915. DOI: 10.1007/s00423-021-02127-7.

[19] Stefan R, Pfandler M, Wucherer R, et al. Teamtraining und Assessment im Mixed-reality-basierten simulierten OP. Aktueller Stand der Forschung im Bereich Simulation in der Wirbelsäulenchirurgie am Beispiel des Projekts ATMEOS [J]. Unfallchirurg, 2018(4): 271-277.

[20] Brown N, Margus C, Hart A, et al. Virtual reality training in disaster medicine: a systematic review of the literature [J]. Simulation in Healthcare, 2023, 18(4): 255-261.

[21] 张伟东，倪培峰，刘伟，等. 虚拟现实技术在留学生心肺复苏技能培训中的应用[J]. 中国急救复苏与灾害医学杂志，2023，18(12)：1546-1550. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6966.2023.12.002.

[22] Mayer RE, Makransky G, Parong J. The promise and pitfalls of learning in immersive virtual reality [J]. International Journal of Human-computer Interaction, 2023, 39(15): 2229-2238.

[23] Mishra S, Kurien A, Patel R, et al. Validation of virtual reality simulation for percutaneous renal access training [J]. J Endourol, 2010, 24(4): 635-640. DOI: 10.1089/end.2009.0166.

[24] Zeeshan Hameed BM, Somani S, Keller EX, et al. Application of virtual reality, augmented reality, and mixed reality in endourology and urolithiasis: an update by YAU endourology and urolithiasis working group [J]. Front Surg, 2022, 9: 866946. DOI: 10.3389/fsurg.2022.866946.

[25] Matsumoto ED, Pace KT, D'A Honey RJ. Virtual reality ureteroscopy simulator as a valid tool for assessing endourological skills [J]. Int J Urol, 2006, 13(7): 896-901. DOI: 10.1111/j.1442-2042.2006.01436.x.

[26] Zhang Y, Yu CF, Liu JS, et al. Training for percutaneous renal access on a virtual reality simulator [J]. Chinese Medical Journal, 2013, 126(8): 1528-1531.

[27] Bruno RR, Wolff G, Wernly B, et al. Virtual and augmented reality in critical care medicine: the patient's, clinician's, and researcher's perspective [J]. Crit Care, 2022, 26(1): 326. DOI: 10.1186/s13054-022-04202-x.

[28] 张东，律峰，闵苏，等. 虚拟仿真技术在临床麻醉技能教学中的应用[J]. 检验医学与临床，2024，21(7)：1013-1016. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9455.2024.07.033.

[29] 朱坚轶，吴峥，张旻，等. 医学虚拟仿真实验课程的建设现状与实践[J]. 中国医药导报，2023，20(9)：186-189. DOI: 10.20047/j.issn1673-7210.2023.09.41.

（收稿日期：2024-04-11）
（本文编辑：唐宗顺）