

基于虚拟现实技术的下肢骨折手术应急训练系统设计

陈友志¹, 范晓志²

(1. 米兰理工大学, 米兰 20158; 2. 北京工商大学, 北京 100048)

摘要: **目的** 针对虚拟现实技术的优势及特点, 以下肢骨折手术中突发静脉出血为例, 探讨虚拟现实技术在手术应急训练领域的创新应用。 **方法** 首先以虚拟现实技术的理论和其在医学领域的应用现状为基础, 通过分析骨科手术中的风险因素及传统手术仿真训练方式在突发状况训练方面存在的缺陷, 提出虚拟现实技术应用手术应急训练领域的必要性。然后采用用户访谈及文献研究等方法建立手术相关的医疗数据库, 最后基于 Unreal Engine 4 软件开发出虚拟手术应急训练系统, 并且针对可穿戴的交互设备进行创新设计。 **结论** 虚拟现实技术在下肢骨折手术应急训练领域的应用是一个新的研究方向。基于虚拟现实技术的手术应急训练系统不仅可以实现传统的手术仿真模拟训练, 而且可以实现手术中的应急反应训练, 从而提高医生在手术中的操作技能和应急反应能力。它解决了传统手术训练方式难以实现应急反应训练的问题, 具有操作简单, 成本低及体验感强等特点。

关键词: VR 技术; 应急反应; 触觉反馈; 手术训练; 虚拟现实; 下肢骨折手术

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)02-0152-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.02.019

Design of Emergency Training System for Lower Limb Fracture Surgery Based on Virtual Reality Technology

CHEN You-zhi¹, FAN Xiao-zhi²

(1. Politecnico di Milano, Milan 20158, Italy; 2. Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

ABSTRACT: According to the advantages and characteristics of virtual reality technology, take the sudden venous he-morrhage in the operation of lower limb fracture as an example, this paper discusses the innovative application of virtual reality technology in surgery emergency training. Firstly, based on the theory of virtual reality technology and its application status in the medical field, by analyzing the risk factors in orthopaedic surgery and the defects of traditional surgical simulation training in emergency training, proposing the necessity of applying virtual reality technology to the field of surgical emergency training. Then, using the methods of user interview and literature research to establish surgery related medical databases. Finally, the virtual surgery emergency training system is developed based on Unreal Engine 4 software, and designing innovative wearable interactive devices. The application of virtual reality technology in emergency training of lower limb fracture surgery is a new research direction. The system of surgery emergency training based on virtual reality technology can not only realize the traditional operation simulation training, but also realize the emergency response training in operation. It can improve the operation skills and emergency response ability of doctors in operation. It solves the problem that traditional surgical training is difficult to achieve emergency response training, and has the characteristics of simple operation, low cost and strong experience.

KEY WORDS: VR technology; emergency response; tactile feedback; surgery training; virtual reality; surgery of lower limb fracture

收稿日期: 2021-10-24

作者简介: 陈友志 (1996—), 男, 山东人, 米兰理工大学硕士生, 主攻方向为产品设计及可持续设计。

通信作者: 范晓志 (1971—), 男, 河北人, 硕士, 北京工商大学讲师, 主要研究方向为智能控制。

随着社会的不断发展,虚拟现实技术的应用及价值越来越得以体现,被广泛应用于文物修复、游戏娱乐及医学领域,并取得了显著成效。虚拟现实技术在医学领域的应用更是推动了医学的快速发展,解决了手术仿真模拟和虚拟解剖教学等医学难题,打破了传统医学技术无法攻克的壁垒。本文在调研虚拟现实技术与医学结合现状的基础上,以下肢骨折手术中突发静脉出血为例,寻找虚拟现实技术在手术应急训练方面应用的可能性,推动虚拟现实技术与医学的共同发展。

1 虚拟现实技术概述

虚拟现实技术就是我们耳熟能详的 VR,它是 Virtual Reality 的缩写,中文的意思就是虚拟现实,主要以信息技术为核心,将人们的视觉、触觉及听觉等融为一体的沉浸交互式虚拟环境,用户可以通过 VR 眼镜和 VR 手柄等设备进入虚拟环境并与虚拟物体进行交互。虚拟现实技术还可以通过仿真的技术手段构建生活中难以实现的场景,给人身临其境的体验^[1]。近年来随着计算机技术的飞速发展,虚拟现实技术已经在众多领域展现了自身的价值,例如虚拟现实技术在数字化博物馆构建过程中的应用,可以让游客置身虚拟的博物馆中与博物馆及其展品之间进行虚拟的交互,产生共鸣,提升游客的参观体验感^[2]。还有基于虚拟现实技术构建的竹编产品展示平台解决了竹编产品设计过程中生产厂家与订购客户之间的设计沟通障碍,实现了竹编产品设计的虚拟展示与评估,该平台不仅缩短了竹编产品的设计周期而且推动了竹编产业的发展^[3]。虚拟现实技术已成为当下热门的技术之一,它正以独特的优势改变着我们的生活。

2 虚拟现实技术在医学领域的应用现状

在医学领域,虚拟现实技术的应用主要表现在医学解剖教学及手术仿真模拟两个方面。在医学解剖教学方面,VR 技术正在影响着传统的医学教育方式。传统的解剖教学模式主要为图谱解剖和尸体解剖,但随着学生数量的激增与人体图谱资源的匮乏让医学解剖教学领域陷入了尴尬的境地^[4],此外尸体数量有限且存在细菌感染的风险。虚拟现实技术可以构建出虚拟的人体及器官,医学生可以更加简单直观地认识人体器官,身临其境地感受人体器官的位置和功能,摆脱对传统图谱解剖资源的依赖和对尸体的恐惧^[5]。

在手术仿真模拟方面,虚拟现实技术由于不受尸体标本、场地等因素限制,相对之前的手术训练模式,在培训费用、培训流程及培训效果等方面具有明显的优势。例如基于 VR 外设的沉浸式手术训练仿真系统研究,该研究以髌关节置换手术为背景,在虚拟手术仿真系统的基础上,引入 VR 相关的交互外设并通过单通道大屏幕立体投影显示构建出一个沉浸式的虚

拟手术环境,最终可以利用 VR 外设完成虚拟髌关节置换手术的交互仿真训练^[6]。还有基于 VR 技术的胃镜模拟操作系统研究,将 VR 技术应用在了消化内镜治疗领域,通过一系列的精心设计,该系统可以在虚拟空间中还原胃镜检查的整个过程,给医生带来真实的操作体验,提升医生的操作技能^[7]。

综上所述,虚拟现实技术在医学解剖教学和手术仿真模拟领域已经取得了不错的成效,并且虚拟现实技术与医学的结合也促进了彼此的发展。随着科技水平的不断提高,虚拟现实技术在医学领域的进一步应用仍然值得我们去探索。

3 虚拟现实技术与手术应急训练结合的必要性

外科手术俗称开刀,泛指外科医师操作外科设备,进入人体或其他生物组织,以外力方式排除病变、改变构造或植入外来物的处理过程^[8]。从手术的定义中就可以看出它的专业性、复杂性及突发性。近年来随着社会的迅速发展,工作压力、环境污染和不规律饮食等因素严重影响着人们的身心健康,导致人们患病的几率越来越高,患病程度越来越严重。普通吃药打针的治疗方法已经不能满足患者的病症需求,越来越多的疾病需要通过手术治疗,然而由于手术过程中所存在的突发因素,导致手术的结果不一定成功。

黑龙江省七台河市七煤医疗中心新兴医院曾对骨科手术中存在的风险因素进行过研究^[9],该次研究选取了 2015 年 4 月至 2016 年 4 月期间在该院接受骨科手术的 60 例患者作为研究对象,采取回顾性分析的方式对 60 例患者的临床资料进行了分析。研究结果表明,30 例患者在手术过程中遇到过突发状况事件,占总研究人数的 50%,其中医务人员对医疗器械或材料使用不当引发风险事件的有 10 例,手术之前医护人员与患者及家属沟通不当引发风险事件的有 15 例,手术过程中医务人员处理不当引发风险事件的有 2 例,其他原因引发风险事件的有 3 例,见表 1。

通过上述案例可以看出骨科手术中引发风险事件的因素是多方面的,其中 40% 的风险因素来源医生在手术过程中的操作不当。此外手术过程中发生突发状况的案例还有很多,突发状况所造成的患者病症加重或者死亡的情况也时有发生,例如首都医科大学附属北京朝阳医院在给患者进行下肢骨折手术“驱血”

表 1 骨科手术风险因素分析
Tab.1 Analysis of risk types of orthopedic surgery

风险因素	例数	百分比/%
医疗器械及材料使用不当	10	33.30
医患沟通不当	15	50.00
手术处理不当	2	6.7%
其他因素	3	10.0%

时突发肺栓塞死亡一例^[10]。面对手术过程中的突发状况,医生在术前的训练和准备工作就显得尤为重要。

如果医生在进行手术之前可以进行各种突发状况的应急训练,增加自身的经历与体验,那么在实际手术过程中遇到类似或者相同的突发情况时,将会做出更加理性和正确的处理,保证手术顺利完成。因此对医生而言,手术中突发状况的应急训练是非常有必要的。

由于突发状况的多元性、复杂性及突发性等特点,传统的手术仿真训练方式对手术突发状况的训练仍然存在很多的缺陷。一是沉浸式交互环境的缺乏,传统的手术仿真训练主要是医护人员在现实环境中操作手术仿真设备来进行的,无法还原手术室、手术器械及病人等手术场景,医护人员无法全身心投入训练。二是手术交互操作的复杂性和局限性,通常手术仿真训练设备主要由人体局部模型,手术器械模拟装置,显示屏及鼠标等硬件组成,医护人员需要一边观察显示屏中的人体组织,一边控制鼠标或者手术器械模拟装置等设备在显示屏中的人体组织上进行手术操作,这种训练方式不仅非常不便,还会给医生带来错误的交互反馈,例如医护人员在训练过程中的直接交互对象是鼠标或手术器械模拟装置等设备,无法和病人及手术场景进行直接的交互,因此无法形成有效的触觉反馈和肌肉记忆。三是设备的专用性,目前市场上大部分的手术仿真设备仍然处于“一病一设备”的研发阶段,一台设备无法进行多种类型或不同疾病的手术训练,医护人员需要根据自身的需求选择相应的设备进行训练。然而手术中病人的突发状况并不一定是由某一种特定的疾病引起的,这和病人的既往病史、体质及手术环境等因素密切相关。此外,现有的手术仿真训练设备也存在体积较大、价格昂贵及多次训练容易引起硬件设备损坏等问题,所以目前的手术仿真训练方式无法为医护人员提供有效的手术突发状况训练。

基于虚拟现实技术的沉浸性、交互性及多感知性等优势,可以构建出虚拟的手术环境并通过VR外设为医护人员提供真实的交互反馈。一方面,虚拟现实技术主要通过计算机进行程序的编写和控制,可以随时根据需求对训练系统进行修改和完善,相比之前的手术仿真训练设备,它的应用更加灵活,不受硬件和场地的限制。另一方面,虚拟现实技术在应急训练领域的应用效果显著,例如基于VR技术的大学生宿舍

火灾应急演练系统设计,通过VR技术对火灾现场的情景进行虚拟展示,让学生能够真实感受到火灾的迅猛和危害,通过系统内置的火灾知识教育功能来提升学生在火灾面前的快速反应和处理能力^[11]。

针对上述挑战及虚拟现实技术在应急训练领域所独有的优势,利用虚拟现实技术构建一套虚拟的手术应急训练系统,对训练医生在手术中面对突发状况的应急反应能力,缓解上述问题非常有帮助。

4 虚拟手术应急训练系统的创新设计

虚拟手术应急训练系统的设计主要分为三个阶段,第一阶段是搭建手术相关的医疗数据库及虚拟场景,第二阶段是手术应急训练系统的使用流程设计,第三阶段是系统相关的交互设备创新设计,主要包括可穿戴的VR眼镜和VR手套,见图1。为了更有针对性地探讨虚拟现实技术在手术应急训练领域的应用,此次研究以下肢骨折手术中突发静脉出血作为案例,针对具体的手术突发状况进行详细的方案设计。

4.1 虚拟手术应急训练系统数据库及场景的建立

虚拟手术场景和突发状况的构建离不开标准化的医疗数据,为了保证设计方案的科学性及规范性,研究小组在前期调研的基础上,通过对当地医院的骨科专家进行用户访谈并结合文献研究等方法,获取了系统构建过程中所需要的医疗数据。其内容主要包括四大方面:一是关于下肢骨折手术方面的基本数据获取,例如手术所需要的医疗器械及场景布置,手术的基本操作流程及相关操作规范等。二是关于人体基本构造的数据获取,例如人体下肢骨架的形态、位置及周围组织等。三是关于下肢骨折手术中突发状况方面的数据获取,主要包括下肢骨折手术中突发静脉出血的相关信息,例如引发静脉出血的临床原因,不同类型静脉血管的出血状态及出血量对患者生理变化的影响等。四是关于突发状况处理规范的数据获取,例如针对不同临床原因引发的下肢骨折手术静脉出血的正确处理规范等。

通过调研得知,大静脉出血虽然看起来不如动脉出血剧烈,但是出血速度和出血量并不少,而且较大的静脉裂口,还可能发生致命的空气栓塞。一旦发生大静脉出血,医护人员可以先用纱布或者手指压迫控



图1 虚拟手术应急训练系统的设计思路

Fig.1 The design idea of virtual surgery emergency training system

表 2 出血量对患者生理数据的影响
Tab.2 Influence of blood loss on physiological data of patients

失血量 (ml)	占血容量 (%)	脉率 (beats/min)	血压	呼吸次数	中枢神经状态
≤750	≤15	<100	≈or↑	14~20	稍微焦虑
750~1 500	15~30	>100	↓	20~30	轻度焦虑
1 500~2 000	30~40	>120	↓	30~40	焦虑, 意识模糊
≥2 000	≥40	≥140	↓	>40	模糊, 嗜睡



图 2 虚拟的手术场景
Fig.2 Virtual surgical scenario

制出血, 迅速清除手术区的血液和凝血块, 待人员、器械及血源都准备就绪后, 慢慢自压迫边缘开始寻找破裂血管进行缝合或者修补治疗^[12]。针对中小静脉出血的处理, 可以直接对出血点进行结扎, 无法确定出血点的可以用干纱布压迫止血, 如果不影响其他操作可暂不进一步处理, 持续压迫 15-20 分钟, 绝大部分中小静脉出血可停止。此外出血量的不同也将直接影响患者生理数据的变化, 例如脉率、血压及呼吸等^[13], 具体情况见表 2。患者生理数据的变化也会对医生的处理方式产生一定的影响, 后期会将这部分数据转化为可视化的元素输入系统, 最大程度还原真实的手术突发状况, 更有利于医生的应急反应训练。

在前期医疗数据调研的基础上, 利用 Unreal Engine 4 软件制作了虚拟的手术室场景、手术器械、手术设备和病人等虚拟模型, 见图 2。中期通过软件将手术中突发状况方面的数据转化为代码输入到系统中, 例如静脉出血的状态及出血量对患者生理数据的影响等信息。后期该系统内设的突发状况可以与医

疗大数据保持同步, 确保突发状况数据库的真实性和时效性。

4.2 虚拟手术应急训练系统的使用流程设计

虚拟手术场景和突发状况数据库制作完成后, 根据前期用户访谈的专家意见开始构建系统的使用流程。目前系统中共包含手术技能训练和应急反应训练两种模式, 本文只针对后者展开研究。用户选择应急反应训练模式后, 可以继续根据科室、手术及突发状况的种类进行不同层级的选择, 确定具体的突发状况来进行应急反应训练, 见图 3。以下肢骨折手术中突发静脉出血为例, 用户首先需要根据科室选择骨科, 然后根据骨科相关的手术种类选择下肢骨折手术, 最后根据下肢骨折手术包含的突发状况种类选择静脉血管出血, 选择完成之后就可以开始进行相应的应急反应训练。

用户通过佩戴 VR 外设进入虚拟手术应急训练系统之后, 在手术训练场景的交互界面中可以自由选择手术所需的各种器械, 实时监测患者的生理数据变化。例如在下肢骨折手术中突发静脉出血, 患者的生理数据会随着失血量的变化而变化, 系统会尽可能还原患者在突发状况中的真实反映, 有利于用户更好地判断患者的生命状况, 从而进行针对性的处理。此外, 系统中的突发状况会在手术过程中随机选择适当的时间点自动发生, 符合真实突发状况的突发性等特点。以下肢骨折手术中大静脉血管突发出血为例, 当突发状况发生时, 用户可以凭借自己的经验和手术预案进行处理, 系统会对用户的处理结果进行自动评判, 用户也可以通过系统内置的指导视频学习正确的

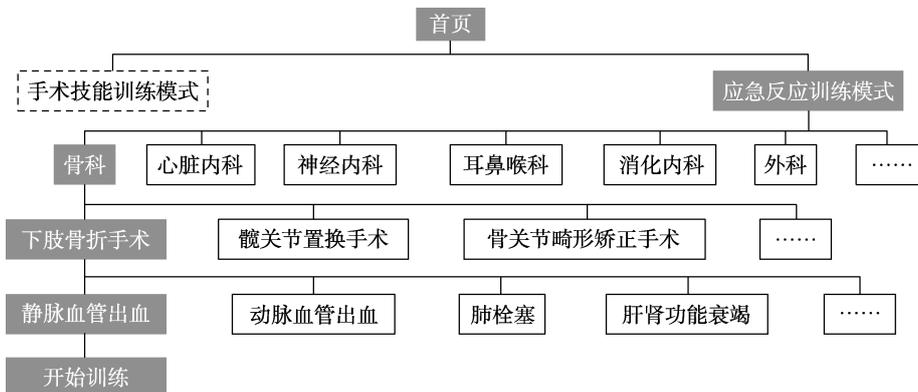


图 3 虚拟手术应急训练系统的运行流程
Fig.3 Operation flow of virtual surgery emergency training system



图4 下肢骨折手术中大静脉血管突发出血的训练过程

Fig.4 Training process of sudden bleeding of great vein in lower limb fracture surgery

处理方法，从而更好地提高在手术过程中的应急反应能力，见图4。

4.3 用户可穿戴交互设备设计

通过对上述案例的研发和分析发现虚拟手术应急训练系统对训练医生的应急反应能力和提高手术技能具有一定的帮助，但现阶段的系统仍然存在一定的缺陷。由于技术条件的限制，测试过程中所使用的VR外设均为普通的VR眼镜和手柄，虚拟场景中手部模型的点击、移动及拖拽等动作都是用户控制VR手柄来完成的。医生在进行手术训练的时候，手部是医生向患者做出决策的重要传递部位，如果医生通过VR手柄进行手术训练，无法获得有效且正确的力反馈和肌肉记忆。例如现阶段虚拟手部模型抓握手术刀及切开患者皮肤的操作是用户抓握VR手柄及按压手柄上的相关按键实现的，但现实中用户手部的触觉反馈来源于VR手柄而不是手术刀，所以这种触觉反馈就是错误的，医生不仅无法获得正确的肌肉记忆而且训练效果也大打折扣。因此开发一款具有触觉反馈功能的VR手套非常有必要，它可以更加真实地还原手术过程中医生的手部运动和触觉反馈，有利于医生更

好地记忆训练过程，从而应用到实际的手术中。

目前市场上的VR手套已经实现将现实中手部的运动传送到虚拟的空间中，主要依靠两个元器件，第一个元器件是惯性传感器，主要位于VR手套的手指关节处和掌心处，它可以将现实中手指的弯曲动作传送到虚拟空间中。第二个元器件是IMU运动追踪模块，它位于手套背部的手腕处，可以将现实中手部的移动动作传送到虚拟空间。这两个元器件的结合就将现实中手部的移动和手指的弯曲动作传送到虚拟的空间中，让虚拟空间中的手部模型完成现实中手部的动作。但是VR手套的触觉反馈技术目前仍处于研究阶段，例如具有力反馈的外骨骼手套设计研究，采用力矩电机通过钢丝绳带动手指关节处的固结点进行传动，当在虚拟空间中手部模型触碰到虚拟物体外围或对物体施加力时，系统会将触觉信息反馈给手套的控制模块，然后力矩电机带动钢丝绳卷起，对手指施加外力，产生力的反馈^[14]。首先，从造型方面来讲，这种外骨骼手套因为使用了机械连杆的机构，手套的使用和携带都非常笨重；其次，从触觉反馈方面来讲，只能提供手指弯曲时的束缚力，无法提供手掌面和手



图 5 新型 VR 眼镜和 VR 手套模型
Fig.5 Innovative VR glasses and VR glove models

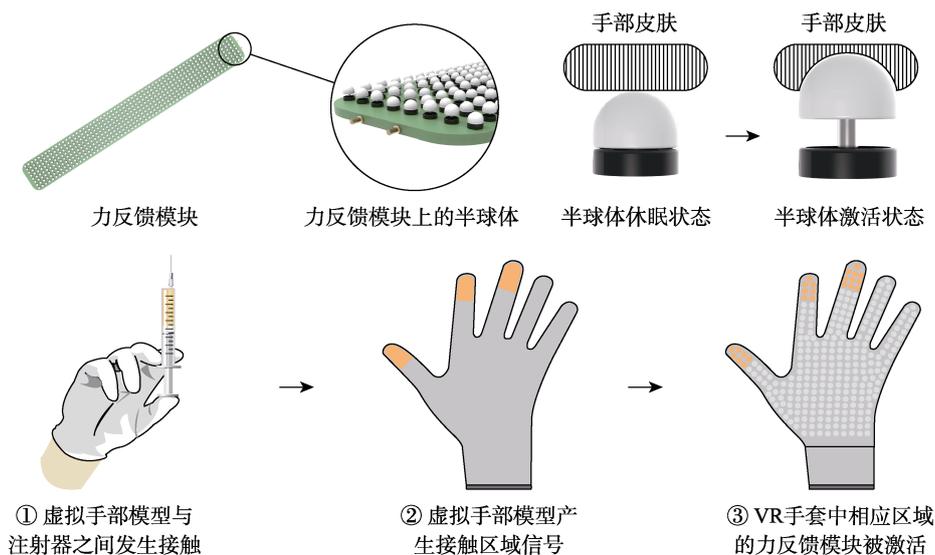


图 6 VR 手套力反馈技术的工作原理
Fig.6 Working principle of VR gloves force feedback technology

指面的触觉反馈。此外，传统的 VR 眼镜由于造型笨重，长时间佩戴会给使用者造成疲劳和不适。

针对上述问题，研究小组设计了新型的 VR 眼镜和 VR 手套来更好地配合虚拟手术应急训练系统的运行，见图 5。新型的 VR 眼镜造型简约轻便，使用无线连接方式，解决了传统 VR 眼镜的线缆束缚和佩戴疲劳感等问题，而且内置微型扬声器，可以近距离地让用户听到虚拟手术场景中产生的声音。此外针对现有 VR 手套在触觉反馈方面的不足，研究小组设计了一种新型的力反馈模块来实现 VR 手套的触觉反馈功能，力反馈模块主要设置在手套的五个手指和手掌部分，模块的表面有很多微小的半球体，这些半球体受系统的控制上下运动。当医生在现实环境中使用手术

器械时，医生的手部与手术器械之间会存在作用力与反作用力，正是由于力的作用，医生的手部才会感受到触觉反馈，所以 VR 手套中的力反馈模块就是通过对手部皮肤施加作用力来实现触觉反馈的。例如当用户在虚拟系统中使用注射器时，系统中的手部模型与注射器之间会先产生一定区域的接触信号，然后系统将手部模型接触区域的信号反馈给 VR 手套，VR 手套中的力反馈模块会控制相应区域的半球体上升，对用户的手部皮肤施加力的作用，产生触觉反馈，见图 6。

基于新型 VR 外设的优势，用户可以在虚拟手术应急训练系统中更加方便和高效地进行训练。例如新型的 VR 外设均采用无线连接方式，用户进入虚拟的手术场景后，可以任意移动和行走，从不同角度观察

病人和执行手术操作。当用户佩戴新型的VR手套执行拿放手术器械,按压病人静脉血管及缝合伤口等操作时,只需要通过手部的移动和手指弯曲等动作即可实现。例如在手术器械选择步骤,用户只需要通过手指的滑动和点击即可实现该操作,摆脱了传统VR手柄的操作局限性和复杂性,使训练更加灵活及真实。此外,新型的VR外设还可以给用户带来全方位的感官体验,以用纱布压迫血管控制出血的步骤为例,用户可以看到血液的出血状态,听到操作中产生的声音,感受到来自纱布及病人的力反馈,获得视觉、听觉及触觉等方面的感受。

5 结语

本文主要以下肢骨折手术中突发静脉出血为例,探讨了当下热门的虚拟现实技术与手术应急训练领域结合的可能性,在综合调研的基础上利用 Unreal Engine 4 引擎创建出了虚拟的手术环境及手术突发状况等医疗数据库,让医生可以在VR外设的辅助下进入虚拟的手术室进行应急反应能力的训练,以此来解决医生在手术中遇到突发状况时处理失误的问题。此外,针对现有VR外设存在的问题,此次研究设计了新型的VR眼镜和手套,尤其是一种力反馈模块的创新应用,可以让用户在训练过程中获得真实的力反馈体验,逐步实现在视觉、听觉及触觉等方面完美还原真实场景。目前,虚拟现实技术在手术应急训练领域的应用仍然处于探索阶段,虽然此次研究仍未涵盖所有的手术突发状况训练,但是为后期虚拟现实技术在医学及应急反应领域的应用提供了一种新的思路和参考。

参考文献:

- [1] 高鹏. 虚拟现实技术及其应用[J]. 电子技术与软件工程, 2019(22): 128-129.
GAO Peng. Virtual Reality Technology and Its Application[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(22): 128-129.
- [2] 吕屏, 杨鹏飞, 李旭. 基于VR技术的虚拟博物馆交互设计[J]. 包装工程, 2017(24): 137-141.
LYU Ping, YANG Peng-fei, LI Xu. Virtual Museum Interaction Design Research Based on VR Technology[J]. Packaging Engineering, 2017(24): 137-141.
- [3] 张文莉, 邹倩. VR在解决竹编产品设计沟通障碍上的应用[J]. 包装工程, 2018(18): 203-208.
ZHANG Wen-li, ZOU Qian. VR in Solving Communication for Bamboo Weaving Product's Design[J]. Packaging Engineering, 2018(18): 203-208.
- [4] 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.
PAN Chang-xue, WANG Xing-yu, ZHANG Wei-ru. Immersive Interactive Design of Medical Anatomy Teaching Based on Virtual Reality Technology[J]. Art&Design, 2020(3): 66-69.
- [5] 李玉彬, 牛倩. 3D虚拟解剖模型在解剖学教学中的应用探析[J]. 成才之路, 2020(3): 12-13.
LI Yu-bin, NIU Qian. Exploration of the Application of 3D Virtual Anatomy Model in Anatomy Teaching[J]. Chengcaizhilu, 2020(3): 12-13.
- [6] 宁康杰. 基于VR外设的沉浸式手术训练仿真系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
NING Kang-jie. Surgical Training Simulation System Based on Immersive VR Peripherals[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [7] 王茜濡, 李春佼, 江丰. VR动画仿真技术的开发与应用——以创建胃镜模拟系统为例[J]. 装饰, 2018(3): 136-137.
WANG Qian-ru, LI Chun-jiao, JIANG Feng. The Development and Application of VR Animation Simulation Technology: Case Study on Gastroscopy Simulation System[J]. Art & Design, 2018(3): 136-137.
- [8] 李长树. 面向虚拟手术系统离体股骨干钻削力学参数的测试与研究[D]. 广州: 南方医科大学, 2014.
LI Chang-shu. The Testing of Drilling Mechanics Parameters in Vitro Femoral Shaft for Virtual Surgery System[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2014.
- [9] 高天保. 骨科手术风险因素分析及其防范[J]. 中国卫生产业, 2016(18): 50-52.
GAO Tian-Bao. Analysis and Prevention of Risk Factors of Operation in the Department of Orthopaedics[J]. China Health Industry, 2016(18): 50-52.
- [10] 蒋嘉, 吴安石, 岳云. 下肢骨折手术“驱血”时突发肺栓塞死亡一例[J]. 临床麻醉学杂志, 2016(6): 622-623.
JIANG Jia, WU An-shi, YUE Yun. A Case of Sudden Death of Pulmonary Embolism During “Bloodletting” in Lower Limb Fracture Surgery[J]. Journal of Clinical Anesthesiology, 2016(6): 622-623.
- [11] 李兵川, 吴文灵. 基于VR技术的大学宿舍火灾应急演练系统设计[J]. 计算机产品与流通, 2020(9): 283.
LI Bing-chuan, WU Wen-ling. Design of University Dormitory Fire Emergency Drill System Based on VR technology[J]. Computer Products and Circulation, 2020(9): 283.
- [12] 李俊英, 杜随仙. 手术中大血管出血的预防和处理[J]. 菏泽医专学报, 1998(4): 59.
LI Jun-ying, DU Sui-xian. Prevention and Treatment of Massive Hemorrhage in Operation[J]. Journal of Heze Medical College, 1998(4): 59.
- [13] 金烈烈. 术中大出血病人的处理[C]. 杭州: 2005年浙江省麻醉学学术年会论文汇编, 2005.
JIN Lie-lie. Management of Patients With Massive Hemorrhage During Operation[C]. Hangzhou: Proceedings of Zhejiang Anesthesiology Academic Annual Conference in 2005, 2005.
- [14] 余世政, 杨冕清, 李德状, 等. 应用于VR场景的力反馈外骨骼手套设计[J]. 机电信息, 2019(8): 43-45.
YU Shi-zheng, YANG Mian-qing, LI De-zhuang, et al. The Design of Force Feedback Exoskeleton Glove Applied in VR Scene[J]. Mechanical and Electrical Information, 2019(8): 43-45.