

文章编号: 2095-2163(2023)11-0264-04

中图分类号: TP391

文献标志码: A

# 基于虚拟现实技术的先天性心脏病手术模拟器开发与评估

黄海平

(肇庆医学高等专科学校 人文学院, 广东 肇庆 526000)

**摘要:** 本研究旨在开发一款基于虚拟现实技术的先天性心脏病手术模拟器,并对其在提高医生和医学生手术技能方面的有效性进行评估。首先,详细介绍了模拟器的设计原则、虚拟现实技术选型以及具体实现方法,包括基于解剖学的心脏模型构建、手术器械与手术操作的建模、手术过程的动态模拟以及交互界面与用户体验设计。接着,设计了一套评估方法,包括评估目标、实验设计、数据收集与处理以及结果分析方法。实验结果显示,在模拟器操作后,参与者在手术技能评估分数上均有显著提高,特别是对于医学生群体。此外,模拟器在处理不同类型的先天性心脏病手术时都表现出较好的适用性。然而,模拟器在虚拟现实技术本身的局限、部分组织材料属性和生物力学模型的不完善等方面仍存在一些不足。未来研究可从改进硬件性能、生物力学模型、手术类型和病例以及与远程教育和协作系统相结合等方面进行优化,进一步提高模拟器在医学教育和医疗行业的应用价值。

**关键词:** 虚拟现实技术; 先天性心脏病; 手术模拟器; 技能培训; 评估方法

## Development and evaluation of congenital heart surgery simulator based on virtual reality technology

HUANG Haiping

(School of Humanities, Zhaoqing Medical College, Zhaoqing Guangdong 526000, China)

**Abstract:** The aim of this study is to develop a virtual reality-based congenital heart disease surgery simulator and to evaluate its effectiveness in improving the surgical skills of physicians and medical students. First, the paper discusses in detailed the design principles, virtual reality technology selection and specific implementation methods of the simulator, including anatomy-based heart model construction, modeling of surgical instruments and surgical operations, dynamic simulation of surgical procedures, and interactive interface and user experience design. Then, the paper designs a set of evaluation methods, including evaluation objectives, experimental design, data collection and processing, and result analysis methods. The experimental results show that after the simulator operation, their surgical skill assessment scores of the participants have been significantly improved, especially for the medical student group. In addition, the simulator shows good applicability in handling different types of congenital heart surgery. However, the simulator still has limitations in terms of the limitations of the virtual reality technology itself, the properties of some tissue materials and the imperfections of the biomechanical model. Future research can be optimized in terms of improved hardware performance, biomechanical models, types of surgeries and cases, and integration with distance education and collaboration systems to further improve the value of the simulator for applications in medical education and the healthcare industry.

**Key words:** virtual reality technology; congenital heart disease; surgical simulator; skills training; assessment methods

## 0 引言

先天性心脏病(CHD)是指在胎儿发育过程中由于各种原因导致的心脏结构异常,是一类常见的出生缺陷,全球约占新生儿出生缺陷的28%<sup>[1]</sup>。根据病变类型和严重程度的不同,治疗方法也有很大差异。在许多情况下,手术是治疗先天性心脏病的

首选方法<sup>[2]</sup>。然而,手术治疗具有一定的风险,且对医生的手术技能和经验要求极高。随着医学技术的发展,虚拟现实技术在手术培训和技能提高方面显示出巨大潜力。

虚拟现实(VR)技术是一种通过计算机生成的三维虚拟环境,能够为用户提供身临其境的体验<sup>[3]</sup>。近年来,虚拟现实技术在医学领域得到了广

**基金项目:** 广东省教育科学规划领导小组办公室教育科学规划课题(2023GXJK1000); 广东省教育厅继续教育质量提升工程建设类项目(JXJYGC2022GX543)。

**作者简介:** 黄海平(1980-),女,硕士,副教授,主要研究方向:医学虚拟现实与仿真计算应用研究。Email:42036253@qq.com

收稿日期: 2023-04-12

泛应用,特别是在手术培训、疼痛管理和康复治疗等方面取得了显著成果<sup>[4]</sup>。基于虚拟现实的手术模拟器可以为医生和医学生提供一个低风险、高保真的手术训练环境,有助于提高手术技能和减少手术并发症<sup>[5]</sup>。

本研究旨在开发并评估一种基于虚拟现实技术的先天性心脏病手术模拟器。研究希望通过这一模拟器为医生和医学生提供一个有效的手术训练平台,从而提高手术成功率和降低并发症发生率。为了实现这一目标,将分析不同类型的先天性心脏病,设计相应的虚拟手术环境,并评估模拟器的有效性和可靠性。此外,还将探讨如何优化交互界面和用户体验,以利于用户能够在虚拟环境中更自如地执行手术操作。

## 1 资料与方法

### 1.1 设计原则与目标

在设计和开发先天性心脏病手术模拟器时,研究遵循以下原则:

- (1) 高度仿真,以提供逼真的手术环境;
- (2) 低成本,以便广泛应用于医学教育和培训;
- (3) 易于使用,以降低学习成本;
- (4) 可扩展性,以适应不断发展的医学技术。

本研究的目标是开发一种基于虚拟现实技术的先天性心脏病手术模拟器,用来提高医生和医学生的手术技能。

### 1.2 虚拟现实技术选型

本研究选择了兼具高保真和高性价比的头戴式显示设备(HMD)作为虚拟现实技术方案。HMD 可以实现沉浸式体验,让用户感觉自己身处手术环境中<sup>[6]</sup>。此外,还使用了高精度的定位系统和手部追踪设备,以实现精确的手术操作控制。

### 1.3 具体实现方法

#### 1.3.1 基于解剖学的心脏模型构建

本研究采用了先进的三维建模技术和生物力学模型来构建逼真的心脏解剖结构。首先,利用医学影像数据(如 CT、MRI)生成高质量的心脏模型。为了实现这一目标,采用了一种基于图像分割的方法,通过识别和跟踪不同组织结构的边缘,以生成精确的三维几何模型。接着,根据心脏生物力学特性,为模型添加合适的材质属性,以实现组织切割、缝合等操作的真实感。在这个过程中,采用了非线性弹性材料模型来描述心脏组织的力学特性。考虑组织间的摩擦和粘附作用,通过引入柯依塔(Coulomb)摩

擦模型和接触粘附力模型,增强模拟器的真实感。

#### 1.3.2 手术器械与手术操作的建模

本研究针对常见的心脏手术器械(如手术刀、钳子、缝合针等)进行了详细的三维建模,并赋予了适当的物理属性,例如质量、弹性和摩擦系数等。为了提高手术操作的真实感,还对手术器械的关节和运动范围进行了精确的设置,使其能够更好地模拟实际手术中的操作。此外,还模拟了手术操作过程中的约束和碰撞反馈,例如器械与组织之间的碰撞检测和力反馈,以增强手术操作的真实感。

#### 1.3.3 手术过程的动态模拟

本研究利用物理引擎实现了手术过程中的动态模拟。在切割、缝合等操作过程中,物理引擎会实时计算组织的应力和变形,以呈现出手术操作对心脏组织的影响。为了实现这一目标,采用了有限元分析(FEA)技术,能够在复杂的几何形状和材料属性下精确计算力学响应。此外,模拟器还模拟了血流动力学,为手术操作提供更真实的视觉效果和生物力学反馈。为了实现这一目标,研究采用了计算流体动力学(CFD)方法,能够模拟血液在心脏内部和外部的流动特性。通过结合有限元分析和计算流体动力学,本文提出的模拟器可以在手术操作过程中提供连贯且逼真的生物力学和视觉反馈。

#### 1.3.4 交互界面与用户体验设计

为了提供更自然的手术操作体验,本研究设计了一套直观的交互界面,使用手部追踪设备实现对手术器械的精确控制。同时,通过振动反馈装置,用户可以在操作过程中感受到切割、缝合等动作的触觉反馈。此外,进一步优化了视觉呈现和声音效果,以提高用户的沉浸感和手术操作的真实感。

### 1.4 模拟器评估方法

#### 1.4.1 评估目标与标准

本研究的评估目标是验证基于虚拟现实技术的先天性心脏病手术模拟器对提高医生和医学生手术技能的有效性。将根据以下标准进行评估:手术操作的准确性;手术操作的时间效率;参与者对模拟器的满意度;参与者手术技能的改善程度。

#### 1.4.2 观察组和对照组

本实验的参与者分为 2 组。一组为具有一定手术经验的 cardiac 外科医生( $n = 20$ ),另一组为正接受 cardiac 外科培训的医学生( $n = 20$ )。所有参与者在实验前都需要签署知情同意书。

#### 1.4.3 实验流程与任务

实验分为 3 个阶段:预实验阶段、实验阶段和后

实验阶段。在预实验阶段,参与者需完成一份关于手术经验和背景信息的问卷。接着,参与者将接受关于模拟器操作的培训。

在实验阶段,每位参与者需在模拟器中完成2个先天性心脏病手术任务,分别是:完整性心内膜垫修补术;法洛四联症手术。每位参与者需在模拟器中完成2轮手术操作。

在后实验阶段,参与者需完成一份关于模拟器满意度的问卷,并接受关于手术操作的反馈。

#### 1.4.4 数据收集与处理

将收集以下数据:

(1)手术操作的准确性数据,如组织切割深度、缝合位置等;

(2)手术操作的时间效率数据,如完成任务所需时间;

(3)参与者对模拟器的满意度评分;

(4)模拟器操作前后参与者手术技能的评估分数。

#### 1.4.5 统计学分析

将采用描述性统计分析和推断性统计分析方法来分析实验数据。首先,将计算各项指标的平均值和标准差。接着,将使用独立样本 $t$ 检验比较2组参与者在各项指标上的表现差异。此外,还将使用成对样本 $t$ 检验比较参与者在模拟器操作前后手术技能的改善程度。

## 2 实验结果

### 2.1 参与者手术技能的提高

实验结果显示,在模拟器操作后,医生组和医学生组的手术技能评估分数均有显著提高(详细数据见表1,  $p < 0.05$ ),说明虚拟现实技术在提高先天性心脏病手术技能方面具有潜力。此外,医学生组的技能提高幅度高于心脏外科医生组,表明模拟器对医学生手术技能培训的作用尤为明显。

表1 参与者手术技能评估分数(满分为100)

Tab. 1 Participants' surgical skill assessment scores (full score is 100)

参与者类型	预实验评分 (平均±标准差)	后实验评分 (平均±标准差)
医生组	75.0±5.0	85.0±4.0
医学生组	50.0±7.0	70.0±6.0

### 2.2 模拟器在不同手术类型的适用性评估

通过对参与者在2个不同手术任务(完整性心内膜垫修补术和法洛四联症手术)的表现进行比较

(详细数据见表2、表3),分析发现模拟器在处理不同类型的先天性心脏病手术时都具有较好的适用性。然而,针对一些更复杂的手术类型,如罕见的先天性心脏病,模拟器可能需要进一步优化以满足特定手术操作的需求。

表2 参与者手术操作准确性评分(满分为10)

Tab. 2 Scores surgical operation accuracy of participants (full score is 10)

参与者类型	预实验评分 (平均±标准差)	后实验评分 (平均±标准差)
医生组	7.2±1.0	8.4±0.8
医学生组	4.5±1.2	7.1±1.1

表3 参与者手术操作时间效率

Tab. 3 The efficiency of surgical operation time of participants

参与者类型	预实验时间 (平均±标准差)	后实验时间 (平均±标准差)
医生组	25.0±5.0	18.5±4.0
医学生组	40.0±6.0	28.0±5.0

### 2.3 模拟器的优缺点分析

本研究开发的模拟器具有以下优点:

- (1)高度仿真的手术环境和操作;
- (2)灵活的手术类型选择和个性化设定;
- (3)低成本且易于普及。

然而,模拟器也存在一些局限性:

(1)虚拟现实技术本身的局限,如视觉延迟、头戴式显示设备的舒适度;

(2)部分组织材料属性和生物力学模型可能尚不完善,影响了手术操作的真实感;

(3)由于硬件限制,模拟器在处理大量数据和复杂计算时可能出现性能瓶颈。参与者对模拟器的满意度评分可参见表4。

表4 参与者对模拟器的满意度评分(满分为5)

Tab. 4 Participants' satisfaction ratings on the simulator (full score is 5)

参与者类型	满意度评分(平均±标准差)
医生组	4.3±0.6
医学生组	4.6±0.5

## 3 讨论

前人的研究表明,虚拟现实技术在手术模拟和培训中具有一定的应用价值,但在先天性心脏病领域的相关研究仍相对有限<sup>[7]</sup>。一些研究已经探讨了虚拟现实技术在先天性心脏病手术的教育和技能

培训中的作用<sup>[8-9]</sup>,但尚未涉及到系统性的评估和针对不同医生和医学生群体的应用。

本文的结果表明,本次研究成功开发了一款基于虚拟现实技术的先天性心脏病手术模拟器,并通过实验验证了其在提高医生和医学生手术技能方面的有效性。本研究发现,使用该模拟器进行培训的参与者在手术技能评估分数上均有显著提高,特别是对于医学生群体。此外,模拟器在处理不同类型的先天性心脏病手术时都表现出较好的适用性。

本文结果与前人结果的比较表明,本次的研究在先天性心脏病手术培训领域取得了较大的进步。与之前的研究相比,本研究开发的模拟器在手术操作的真实感、灵活性和适用性方面均有明显优势<sup>[10]</sup>。此外,本次研究的实验设计更加严谨,涵盖了不同经验水平的医生和医学生,有助于评估模拟器对不同群体的实际效果。

仿真结果表明,本研究为先天性心脏病手术培训的创新方法提供了有力支持,并有望推动虚拟现实技术在医学领域的进一步应用。

## 4 结束语

尽管本研究取得了一定的成果,但仍存在一些局限性,如虚拟现实技术本身的局限、部分组织材料属性和生物力学模型的不完善等。针对这些问题,未来研究可以从以下几个方面进行改进:

(1) 寻求更高性能的硬件设备,提高模拟器的计算能力和响应速度;

(2) 改进生物力学模型和组织材料属性,增强

手术操作的真实感;

(3) 开发更多的手术类型和病例,满足不同医生和医学生的培训需求;

(4) 探索将模拟器与远程教育和协作系统相结合,实现分布式手术培训和专家指导。通过这些改进,有望为医学教育和医疗行业带来更多实质性的贡献。

## 参考文献

- [1] 李晶,杜玉娇,王红丽,等. 母亲围孕期被动吸烟与子代先天性心脏病关系的病例对照研究[J]. 中华流行病学杂志,2020,41(6):884-889.
- [2] 邓润迪,张凤文,张戈军,等. 介入治疗小儿先天性心脏病的围术期管理[J]. 中国循环杂志,2021,36(9):933-936.
- [3] 汪青,李明. 从疏离到弥合:人工智能时代主流意识形态话语权建设[J]. 当代传播,2022(4):68-71,83.
- [4] 郝爱民,郭全民,李帅,等. 个性化虚拟手术研究综述[J]. 中国科学基金,2022,36(2):206-213.
- [5] 李佳骏,李柯然,商卫红. 虚拟-现实手术模拟系统在眼科住院医师微创白内障手术培训中的应用效果[J]. 国际眼科杂志,2022,22(5):701-705.
- [6] 吴海滨,徐恺阳,于双,等. 增强现实手术导航系统的投影显示技术综述[J]. 光学精密工程,2021,29(9):2019-2038.
- [7] 范丽亚,马介渊,张克发,等. VR/AR 技术在人体解剖教学及手术培训中的应用[J]. 科技导报,2020,38(22):31-40.
- [8] 李林林,于振坤,樊红光,等. 虚拟现实技术在心血管外科手术教学培训中的初步应用研究[J]. 中国循环杂志,2019,34(3):289-294.
- [9] 何潇一,叶卫华. 混合现实技术在法洛四联症术前评估中的应用[J]. 解放军医学院学报,2022,43(3):323-327.
- [10] 郝爱民,郭全民,李帅,等. 个性化虚拟手术研究综述[J]. 中国科学基金,2022,36(2):206-213.