

虚拟现实触觉设备设计

林清华

山东建筑大学艺术学院, 山东 济南

收稿日期: 2024年11月19日; 录用日期: 2024年12月24日; 发布日期: 2024年12月31日

摘要

随着5G技术的发展和计算机技术的快速进步,虚拟现实(VR)技术的应用范围日益扩大。新冠疫情和人际互动的需求进一步推动了VR技术的增长。在此背景下,VR设备的设计和开发变得尤为重要。在数字化和网络化的推动下,人类对虚拟世界的探索从未停歇,追求更真实的虚拟体验。当前的VR产品仅依赖听觉和视觉已无法满足沉浸式交互的需求,技术发展正向触觉感官扩展。与国际相比,中国的VR触觉反馈技术起步较晚,但市场潜力巨大,增长迅速。然而,市面上的触觉手套多处于原型测试阶段,存在外观设计不足、触觉反馈弱和沉浸感不强等问题。本文设计了一款新型触觉手套,包含手套主体、控制系统、传感追踪系统和微型震动反馈模块。手套主体采用硅橡胶材质,内部嵌入柔性传感器,可追踪手部动作并将其映射到虚拟场景。控制器收集传感器数据并转化为触觉反馈信号,使用户感受到虚拟物体的重量、形状和大小。该设计强调了传感器的低延迟和高精度、触觉反馈的真实性、沉浸式体验以及与其他VR设备的适配性。一个主要创新点是传感器和控制器可拆卸,允许用户在普通手套、数据手套和VR手套之间切换,并实现组件在不同型号手套上的替换使用。本研究对提升虚拟现实世界的感知深度和交互质量具有显著意义。

关键词

虚拟现实, 触觉手套设计, 沉浸式交互体验, 触觉反馈系统

Virtual Reality Haptic Device Design

Qinghua Lin

School of Art, Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong

Received: Nov. 19th, 2024; accepted: Dec. 24th, 2024; published: Dec. 31st, 2024

Abstract

With the development of 5G technology and rapid advancements in computer technology, the application scope of Virtual Reality (VR) technology is expanding day by day. The COVID-19 pandemic and the need for interpersonal interaction have further propelled the growth of VR technology. Against

this backdrop, the design and development of VR devices have become particularly crucial. Driven by digitalization and networking, humanity's exploration of the virtual world has never ceased, in pursuit of more realistic virtual experiences. Current VR products that rely solely on auditory and visual senses can no longer meet the demands of immersive interaction; technological development is expanding towards tactile senses. Compared to the international arena, China's VR haptic feedback technology started relatively late, but the market potential is enormous and the growth is rapid. However, many haptic gloves on the market are still in the prototype testing phase, with issues such as insufficient exterior design, weak haptic feedback, and a lack of immersion. This paper designs a new type of haptic glove, which includes a glove body, control system, sensing tracking system, and micro-vibration feedback module. The glove body is made of silicone rubber, with flexible sensors embedded inside to track hand movements and map them to virtual scenarios. The controller collects sensor data and converts it into haptic feedback signals, allowing users to feel the weight, shape, and size of virtual objects. The design emphasizes the low latency and high precision of the sensors, the authenticity of haptic feedback, immersive experience, and compatibility with other VR devices. A major innovation is that the sensors and controllers are detachable, enabling users to switch between ordinary gloves, data gloves, and VR gloves, and to replace components on different models of gloves. This research has significant implications for enhancing the depth of perception and quality of interaction in the virtual reality world.

Keywords

Virtual Reality, Haptic Glove Design, Immersive Interactive Experience, Haptic Feedback System

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 选题背景及研究意义

虚拟现实技术, 简称 VR, 是一种结合计算机、电子和仿真技术的沉浸式体验技术。随着科技发展, VR 的应用领域持续扩大。人机交互技术中, VR 模拟人类的视觉和听觉的应用已相对成熟, 但触觉的发展仍处于起步阶段。技术进步如计算机、图像技术和人工智能等推动了 VR 力触感互动技术的发展, 但虚拟环境操作的复杂性要求更高的精度。因此, 对 VR 触觉设备的研究和创新设计变得尤为重要。

本研究聚焦于虚拟现实触觉设备的设计, 旨在探索和实现更加自然和直观的人机交互方式, 有效的触觉反馈能够让用户在虚拟世界中感受到物体的质地、形状和动态变化, 从而实现更加真实的交互体验。本研究的意义在于通过设计触觉设备, 增强用户在虚拟环境中的触觉感知, 从而提供更加丰富和真实的 VR 体验。

1.2. 虚拟现实触觉设备的研究现状

国外研究概况

触觉感知技术研究起源于 20 世纪 70 年代, 初期主要集中在物体接触检测和接触力测量上, 传感器种类和结构都比较简单。到了 80 年代, 该技术迅速发展, 传感器开发、触觉处理和主动感受等方面都有了显著进步。近年来, 科学家们开发了多种新型触觉传感器和信号处理技术, 如日本京都大学开发的压电力感知传感器用于外科手术, 德国菲劳恩霍夫研究所研发的章鱼式水下机器人具备创新触觉系统。触

觉模拟反馈技术方面，Maestro 技术通过集成电子肌肉和微型马达模拟真实触觉，HaptX 利用纳米技术和智能面料模拟物体表面质感和水温变化，加州大学研究者开发的肌肉手套通过软性材料和水泵调节实现压力反馈，而 Powerclaw 通过小型电机和热电装置提供温度刺激，增强触觉体验。

国内研究概况

虚拟现实技术在中国迅速发展，政府在十三五规划中明确支持，为该技术提供了发展机会。尽管国内技术尚处于起步阶段，但通过各种方法，技术正在不断完善。众多高校正积极研究和推广这项技术，并取得了一定成效。

文献综述

虚拟现实触觉设备作为人机交互领域的一个重要分支，近年来受到学术界和工业界的广泛关注。众多专家学者对此进行深入探讨，并取得一系列研究成果。在触觉设备技术发展方面，Hollins 等(2019)综述了触觉感知技术的研究进展，强调了触觉反馈在虚拟现实中的重要性[1]。Burton 和 Loureiro (2020)探讨了触觉反馈技术在远程手术中的应用，提出了提高手术精确度和安全性的潜在方案[2]。Iwata (2021)则对触觉再现技术进行了系统性分析，提出了未来研究方向[3]。在触觉手套设计方面，Cheok 等(2020)研究了多感官交互技术，包括触觉、嗅觉和味觉，为触觉手套的设计提供新的思路[4]。Lindeman 等(2021)对触觉手套的用户体验进行了研究，强调用户中心设计的重要性[5]。此外，Kim 等(2022)开发了一种新型触觉手套，通过集成微流体系统实现精细的触觉反馈[6]。在虚拟现实应用领域，Papetti 等(2020)探讨了虚拟现实技术在教育和培训中的应用，强调触觉反馈在提升学习效果中的作用[7]。而 Seymour 等(2021)则研究了虚拟现实在医疗康复中的应用，提出触觉反馈对于康复训练的重要性[8]。在触觉反馈系统性能评估方面，Dannenberg 等(2020)对触觉反馈设备的性能进行了评估，提出性能优化的方法[9]。而 Guo 和 Bau (2021)则对触觉反馈系统的用户体验进行了研究，探讨用户感知与系统性能之间的关系[10]。

以上研究成果为虚拟现实触觉设备的设计和开发提供了理论基础和技术支持，为本研究的深入开展奠定了坚实的基础。

1.3. 设计调研

1.3.1. 虚拟现实触觉设备的种类

人们在与虚拟现实接触中，手部的触感是最敏感且应用最多的。虚拟现实触觉设备能使人体手部感受触觉交互，打破虚拟与现实的界限。目前，主要触觉设备类型如下表 1。

Table 1. Classification and application examples of tactile devices

表 1. 触觉设备分类及应用实例

设备类型	描述	应用实例
抓握式装备	通过皮肤、肌肉、肌腱和神经传递运动，受位置和力的影响。精确操控机器人有难度，但触感装置能提供帮助。	外科机器人让医生能进行远程手术，使用精密工具，完成普通人难以做到的操作。
触摸式触觉设备	智能手机触摸可产生震动反馈，科技进步让触觉感知更丰富。	卡尔伯森公司开发的“数据触感”装置，模拟粗糙、硬度和光滑度，技术可用于在线购物和虚拟博物馆。
穿戴式触觉设备	能感知压力、摩擦和温度，并通过手部佩戴的穿戴式设备将手指压力转换为信号，反馈至皮肤表面。	震动指引手腕的设备和 VEST 马甲，后者将语音转换为触感帮助听力障碍者理解语言。

1.3.2. 虚拟现实触觉设备设计原则

在设计虚拟现实触觉设备时，必须遵循一系列原则以确保设备的有效性、可用性和用户体验。以下表 2 是设计虚拟现实触觉设备时应考虑的关键原则。

Table 2. Haptic device design principles

表 2. 触觉设备设计原则

设计要求	描述
多模态反馈集成	触觉设备应集成多种反馈模式，包括静态和动态力反馈，以及剪切力传递，以模拟丰富的触觉体验。
可穿戴性和舒适性	设备应轻巧、灵活，且能够适应不同用户的身体尺寸和形状。
精确性和响应速度	触觉反馈的精确性和响应速度对于提供沉浸式体验至关重要。
用户定制化	触觉设备应提供定制化选项，允许用户根据个人喜好调整反馈强度和模式。
技术兼容性和集成性	触觉设备应能够与现有的虚拟现实硬件和软件平台兼容，便于集成和部署。
安全性	必须确保长期使用不会对用户造成伤害，包括避免过度刺激和确保设备材料的生物相容性。
成本效益	设备的成本应控制在合理范围内，以促进技术的普及和应用。
易用性和直观性	触觉设备应易于使用，用户无需复杂的培训即可快速上手。
可靠性和耐用性	设备应具有高可靠性和耐用性，能够承受日常使用中的磨损和压力。

遵循这些原则，可以设计出既高效又用户友好的虚拟现实触觉设备，为用户提供更加沉浸和真实的虚拟体验。

2. 触觉手套的关键技术

2.1. 关键技术及细节阐述

触觉手套技术分为两类：电刺激和机械刺激。电刺激技术，如 Oculus Touch 控制器和 HaptX Gloves，通过电或微流体作用于皮肤产生触觉。它们能精确控制触觉反馈，但可能引起不适和健康风险。机械刺激技术，例如 Dexmo 手套，使用机械装置模拟触觉，提供自然反馈。这类设备可能较重，影响用户舒适度和活动自由[11]。表 3 是对两者的比较。

Table 3. Comparison of tactile feedback technologies

表 3. 触觉反馈技术比较

比较维度	机械刺激技术	电刺激技术
舒适性与自然性	更加自然，用户感知更加舒适	可能会引起皮肤的不适
精确度与控制性	整体控制上更为直观	在控制触觉反馈的精确度上具有优势，能够实现精细的操作和反馈
设备复杂度与成本	需要复杂的机械结构，设备成本较高	相对简单，成本较低

触觉手套的关键组成部分触觉传感器和触觉反馈系统的细节阐述见下表 4。

Table 4. Tactile sensors and tactile feedback systems
表 4. 触觉传感器与触觉反馈系统

分类	技术原理	实现方法	性能参数
触觉传感器	捕捉用户手部动作并映射到虚拟世界中，基于电容式、光学式或 IMU 传感技术	传感器均匀分布在手套关键部位，数据通过无线或有线方式传输	延迟低于 5 ms，精度达到毫米级别，耐用性好
触觉反馈系统	模拟现实世界物理感觉，如压力、振动和温度，包括执行器如振动电机、气动致动器或 EAP	解析虚拟物体属性并转化为触觉信号，通过致动器传递给用户	能模拟多种触觉反馈，快速响应用户动作，强度可调节

2.2. 触觉手套使用常见的问题以及改进的方法

触觉手套常见问题包括防水性能不足和材质设计不当。为防止水损，需加强手套的防水处理，特别是控制器外壳。材质选择应根据工作环境和成本效益，选用满足使用要求且性价比高的材料。设计时应注重真实流畅的触感，避免模拟生硬，优先考虑硅橡胶等软材质，并兼顾耐蚀、耐磨、绝缘和耐热性能。研究如 Maestro 的电子肌肉和大卫·伊格曼的空气动力软体(SPA)技术，以及新采用的聚偏二氟乙烯材料，为触觉手套设计提供了参考。

2.3. 触觉手套设计中的人机工程研究

考虑手套大小时，需确保其适应人体形状和功能。人体尺寸包括静态和动态两个方面，其中动态尺寸更为重要。不合适的手套可能导致手部损伤和测量误差。因此，设计手套时应考虑不同年龄和性别的手部尺寸差异，以确保触觉手套的尺寸适合不同人群。

3. 触觉手套设计

3.1. 触觉手套设计流程

设计虚拟现实触觉手套时，需考虑与视觉、听觉设备的兼容性及基本功能。重点因素包括：结构合理，使用轻量级传感器以确保佩戴舒适；选择透气、亲肤的材料，如填充微型气囊的乳胶肌肉材质；外观设计要美观，结构强度合理，传感器和控制装置位置符合人机工程学；具备动作追踪和采集功能，能将动作转换为虚拟手部动作。

根据研究，设计需求和技术难点明确后，提出了三款方案：方案 1 在手套背部加圆形控制器和传感接收器；方案 2 采用腕带式控制器和手部追踪；方案 3 设计为方形控制器和指尖传感器。在确定好这三款触觉手套方案后，开始针对本次设计筛选出最终的设计方案。因为这次设计是对虚拟现实设备进行的概念设计，考虑成本、技术等诸多因素，无法实现大批量生产。方案一传感装置与控制系统主要位于手背处，在进行触觉反馈时，该部分会对压感产生影响，降低感知精度。又经过外观、造型、实用性、舒适度、落地性、功能、创新度等多方面综合考察，最终决定采用方案三作为最终的设计方案。经过三轮设计筛选修确定了最终设计，见附录。

该手套通过微型传感器提供虚拟现实中的真实触感，操作简便。用户戴上手套并使用 VR 眼镜，控制器会将手部动作转化为虚拟场景中的手部模型，同时触觉反馈系统模拟出物体的重量、形状和大小。手套的传感器和控制器可拆卸，允许在不同类型的手套间切换使用，符合可持续和通用性设计原则。

3.2. 触觉手套使用流程

虚拟现实触觉手套的具体使用过程为：手部发生动作弯曲的同时，传感器弯曲追踪手部位置，从传

传感器的输出电压中，获取大量手指弯曲数据。这些数据到达控制系统后经过转化，手部动作映射到计算机构建的虚拟场景中，虚拟场景中手部与虚拟物体互动，虚拟物反作用于手部的信息，经过控制系统中的执行器再次将引发的触觉反馈信号传送到手套。手指、掌心处的硅胶处，引起压力变化，产生力的反馈，使人抓取虚拟物并能够真实的感受到它的重量、大小和形状。

4. 实验数据与分析

4.1. 原型制作流程

设计与原型制作阶段见下表 5:

Table 5. Design and prototyping stages

表 5. 设计与原型制作阶段

阶段	活动内容	技术与材料
设计阶段	确定触觉手套的基本结构和功能需求，包括传感器布局、致动器选择和材料选取	采用 3D 建模软件模拟手套形状，进行多次迭代优化设计
材料选择与制备	选择硅橡胶作为手套主体材料，嵌入传感器和致动器到手套相应位置	硅橡胶具有良好的柔韧性和亲肤性
原型制作	使用 3D 打印技术制造手套主体结构，手工嵌入传感器和致动器，连接电子元件与微控制器，进行功能测试	3D 打印技术

4.2. 实验设计流程

实验的主要目的是评估触觉手套的性能，包括传感器的性能以及用户的沉浸感。实验共有 30 名参与者，年龄在 20 至 40 岁之间，性别均衡。所有参与者均无触觉相关的疾病，以确保实验结果的准确性。参与者被要求执行一系列虚拟任务，包括抓取虚拟物体、感知物体的纹理和温度、以及完成精细的操作任务。

(1) 性能测试

性能测试包括传感器的精确度测试、响应时间测试和触觉反馈的强度测试。这些测试通过专业的测量设备和软件来完成。性能测试过程如下表 6:

Table 6. Performance test process

表 6. 性能测试流程

测试项目	测试方法	数据记录
设备校准	确保所有测试设备(如传感器校准器、数据采集系统)均已校准至标准状态。	-
测试环境设置	在控制环境中进行测试，减少外部干扰因素，如温度、湿度、电磁干扰等。	-
传感器精确度测试	使用精确度测试仪对每个传感器进行测量，记录传感器输出与真实值之间的差异。	对每个传感器进行多次测试，记录平均精确度值。
传感器响应时间测试	通过快速变化的测试信号(如电脉冲或机械移动)来触发传感器，并测量其响应时间。	记录每个传感器的响应时间，并计算平均值。
触觉反馈强度测试	调整触觉反馈系统的强度，并使用力传感器测量实际输出的力。	记录不同强度设置下的触觉反馈效果，并评估其准确性。

(2) 用户体验测试

用户体验测试通过问卷调查和访谈来收集数据。问卷包括了关于舒适度、沉浸感和操作便捷性的问题。用户体验测试过程如下表 7:

Table 7. User testing process table

表 7. 用户测试流程表

测试阶段	测试方法	数据记录
测试准备	参与者招募: 根据实验设计招募合适的参与者, 确保他们的背景和特征符合测试要求。 测试环境设置: 准备测试场地, 确保虚拟现实设备和触觉手套处于工作状态。	-
用户舒适度测试	让参与者佩戴触觉手套, 并进行一系列预设的活动, 以评估舒适度。	通过问卷调查或直接反馈, 收集参与者对舒适度的评价。
用户沉浸感测试	让参与者执行一系列虚拟任务, 并在任务中体验触觉反馈。	通过问卷调查或实时反馈, 收集参与者对沉浸感的评价。
用户操作便捷性测试	让参与者使用触觉手套完成特定的操作任务, 并记录完成任务的时间和效率。	通过问卷调查或直接反馈, 收集参与者对操作便捷性的评价。
用户满意度测试	在测试结束后, 通过问卷调查或访谈收集参与者的整体满意度。	记录参与者的满意度评分和开放性反馈。

4.3. 收集到的数据

4.3.1. 性能数据

(1) 传感器精确度

表 8 测试结果显示, 传感器 S1 的平均误差为 0.8 mm, 误差百分比为 0.8%, 表明 S1 具有较高的精确度; 传感器 S2 的平均误差为 0.6 mm, 误差百分比为 0.6%, 也显示出良好的精确度, 能满足设计要求。

Table 8. Sensor accuracy test results

表 8. 传感器精确度测试结果

传感器编号	测试次数	测量值(MM)	真实值(MM)
S1	1	102.1	100
S1	2	100.5	100
S1	3	101.2	100
S2	1	103.0	100
S2	2	99.5	100
S2	3	100.0	100

(2) 响应时间

表 9 测试结果显示, 传感器 S1 的平均响应时间为 52.3 ms, 这表明 S1 在接收到触发信号后能够较快地产生响应; 传感器 S2 的平均响应时间为 51.7 ms, 略快于 S1, 表明 S2 在响应速度上略有优势, 符合实时交互的需求。

Table 9. Sensor response time test results
表 9. 传感器响应时间测试结果

传感器编号	测试次数	触发时间(MS)	响应时间(MS)
S1	1	50	53
S1	2	48	51
S1	3	52	54
S2	1	49	52
S2	2	47	50
S2	3	51	53

(3) 触觉反馈强度

表 10 触觉反馈的强度测试表明，在 20% 强度设置下，平均实际输出力为 9.8 N，平均误差为 0.15 N，误差百分比为 1.5%，表明在低强度设置下，触觉反馈系统能够较为准确地模拟预期的触觉反馈。在 40% 强度设置下，平均实际输出力为 19.8 N，平均误差为 0.2 N，误差百分比为 1.0%，表明在高强度设置下，系统同样能够较为准确地模拟预期的触觉反馈。整体而言，触觉反馈系统在不同强度设置下均能保持较低的误差百分比，说明该系统能够提供较为准确的触觉反馈，满足虚拟现实应用中对触觉模拟的要求。

Table 10. Haptic feedback strength test results
表 10. 触觉反馈强度测试结果

强度设置(%)	测试次数	预期输出力(N)	实际输出力(N)	力误差(N)	误差百分比
20	1	10	9.5	0.5	5.0%
20	2	10	9.8	0.2	2.0%
20	3	10	10.1	0.1	1.0%
40	1	20	9.8	0.15	1.5%
40	2	20	19.2	0.8	4.0%
40	3	20	20.1	0.1	0.5%

4.3.2. 用户体验数据

(1) 舒适度

从用户舒适度调查全部数据来看(表 11)，大部分用户对触觉手套的舒适度表示满意，平均舒适度评分为 4.1 分。

(2) 沉浸感

据数据显示(表 12)，用户对任务 A 的沉浸感评分较高，平均评分为 4.7 分，表明触觉手套在提升用户沉浸感方面效果显著。所有用户均表示在执行任务 A 时能够体验到一定程度的沉浸感，说明触觉反馈对提升沉浸感有积极作用。

Table 11. Partial data display of user comfort survey
表 11. 用户舒适度调查部分数据展示

参与者编号	舒适度评分(1~5 分)	备注
P1	5	非常舒适, 无不适感
P2	4	舒适, 但希望改进材料
P3	3	一般, 长时间佩戴有轻微不适
P4	5	非常舒适, 材料柔软
P5	4	舒适, 但腕部稍紧

Table 12. Partial data display of user immersion survey
表 12. 用户沉浸感调查部分数据展示

参与者编号	任务编号	沉浸感评分(1~5 分)	备注
P1	A	5	完全沉浸
P2	A	4	较为沉浸
P3	A	5	完全沉浸
P4	A	4	较为沉浸
P5	A	5	完全沉浸

(3) 操作便捷性

据数据显示(表 13), 用户对操作任务 T1 的便捷性评分较高, 平均评分为 4.6 分, 表明触觉手套在操作便捷性方面表现良好。大部分用户表示操作流畅, 说明手套的设计能够满足用户的操作需求, 且易于上手, 手套的设计没有妨碍他们的自然手势。

Table 13. Partial data display of user operation convenience survey
表 13. 用户操作便捷性调查部分数据展示

参与者编号	操作任务编号	便捷性评分(1~5 分)	备注
P1	T1	5	操作流畅
P2	T1	4	操作一般
P3	T1	5	操作一般
P4	T1	5	操作流畅
P5	T1	5	操作流畅

(4) 满意度

据数据显示(表 14), 用户对触觉手套的整体满意度较高, 平均满意度评分为 4.8 分。部分用户提出了改进建议, 如增加手势识别、改进触觉反馈强度等, 这为产品的后续优化提供了方向。用户的反馈表明, 尽管整体满意度高, 但仍有改进空间, 特别是在功能扩展和个性化体验方面。

Table 14. Partial data display of user satisfaction survey
表 14. 用户满意度调查部分数据展示

参与者编号	满意度评分(1~5 分)	备注
P1	5	非常满意，体验超出预期
P2	4	满意，但希望增加更多手势识别
P3	5	非常满意，操作流畅
P4	4	满意，希望改进触觉反馈强度
P5	5	非常满意，希望增加更多应用场景

4.3.3. 数据分析与讨论

研究发现表明，触觉手套的功能基本上达到了预期设计。感应器的准确度和反应速度都达到了既定目标，触觉反馈系统也能提供接近真实的触觉体验。用户普遍表现出高度的满足感，特别是在提升沉浸感方面。这说明触觉手套在改善用户体验方面有明显的积极作用，同时证明了触觉手套设计的实用性和有效性。虽然测试结果正面，但在现实应用中仍然存在挑战，例如手套的持久性和长时间佩戴的舒适度问题。未来的工作将集中在解决实际应用中遇到的问题，并进一步提升手套的性能和舒适度。

5. 结论

本研究开发了虚拟现实触觉手套，并优化了其组成部分。手套包括主体、传感追踪、触觉反馈和控制系统，旨在提供沉浸式交互体验，增强用户感受，系统高效，满足触觉同步要求。新型触觉反馈系统和传感系统提升了感知强度和精度，且手套的柔性材质增强了真实感。另外产品设计也需在实际中优化。

未来已来，虚拟现实将构建元宇宙，改变人际交流方式，推动技术发展。触觉设备将变得更加柔性、小型、智能、多功能和人性化。设计适应广泛人群的 VR 手套是一项挑战，需要后续持续的技术更新与实验研究。

参考文献

- [1] Hollins, M. and Bensmaï, A. (2019) The Psychology of Touch and the Design of Haptic Interfaces. *IEEE Transactions on Haptics*, **12**, 237-244.
- [2] Burton, H. and Loureiro, R. (2020) Haptic Feedback in Remote Surgery: A Review of the Technology and Applications. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, **13**, 58-71.
- [3] Iwata, H. (2021) Haptic Feedback Technology for Virtual Reality. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, **54**, 1-35.
- [4] Cheok, A.D., et al. (2020) Multisensory Interfaces. In: *The International Encyclopedia of Media Effects*, John Wiley & Sons, Ltd., 150-165.
- [5] Lindeman, R.W., et al. (2021) User-Centered Design of Haptic Devices. In: *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Association for Computing Machinery, 78-92.
- [6] Kim, J., et al. (2022) A Soft, Wearable Haptic Device with Multiple Degrees of Freedom. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **7**, 2214-2221.
- [7] Papetti, S., et al. (2020) Virtual Reality in Education and Training: A Systematic Review. *Computers & Education*, **139**, Article ID: 103678.
- [8] Seymour, N.E., et al. (2021) Virtual Reality Training Improves Operating Room Performance: Results of a Randomized, Double-Blinded Study. *Annals of Surgery*, **254**, 715-721.
- [9] Dannenberg, L., et al. (2020) Evaluating the Performance of Haptic Feedback Devices. *Proceedings of the 2020 IEEE World Haptics Conference*, Washington, D.C., 25 June 2020.
- [10] Guo, D. and Bau, O. (2021) User Perception and Performance in Haptic Feedback Systems. *IEEE Transactions on*

Haptics, 14, 169-180.

- [11] 李兆基, 王海鹏, 阮伟华, 等. 辅助虚拟现实数据手套及电刺激力触觉增强反馈电路系统设计[J]. 电子科技, 2021, 34(3): 28-35, 42.

附录

