

7-15-2020

## An Adaptable VR Software Framework for Collaborative Multimodal Haptic and Immersive Visual Display

Guo Yuan

*1. State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100191, China;;*

Qianqian Tong

*3. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, China;*

Yukai Zheng

*1. State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100191, China;;*

Ziqi Wang

*1. State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100191, China;;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# An Adaptable VR Software Framework for Collaborative Multi-modal Haptic and Immersive Visual Display

## Abstract

**Abstract:** The spatiotemporal consistency of multi-modal haptic and immersive visual feedback, as well as the integration of hardware devices in the existing VR software framework, restricts the rapid development of visuo-haptic fusion scenarios in different industries such as medical, business, and entertainment. In order to tackle this problem, *an adaptable VR software framework combining multi-modal haptic and immersive visual display is proposed. To meet the different requirements of visual rendering, haptic rendering and hardware control, the double-layer and three-layer architectures are devised according to the different precision requirements of visuo-haptic fusion feedback. Experimental results show that the framework has the characteristics of supporting the synchronous feedback of visuo-haptic fusion, the convenient integration of diverse haptic devices, the simplicity of scene development and the rapid replacement of interactive scene, and it can meet the requirements of different application fields.*

## Keywords

virtual reality, multi-modal haptic, human-machine interaction, visuo-haptic fusion, adaptable software framework

## Authors

Guo Yuan, Qianqian Tong, Yukai Zheng, Ziqi Wang, Yuru Zhang, and Dangxiao Wang

## Recommended Citation

Guo Yuan, Tong Qianqian, Zheng Yukai, Wang Ziqi, Zhang Yuru, Wang Dangxiao. An Adaptable VR Software Framework for Collaborative Multi-modal Haptic and Immersive Visual Display[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(7): 1385-1392.

## 融合多元触觉和沉浸式视觉的可移植 VR 软件框架

郭园<sup>1</sup>, 童倩倩<sup>3</sup>, 郑宇锐<sup>1</sup>, 王子琦<sup>1</sup>, 张玉茹<sup>1,2</sup>, 王党校<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 虚拟现实技术与系统国家重点实验室, 北京航空航天大学, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学生物医学工程高精尖创新中心, 北京 100191; 3. 鹏城实验室, 深圳 518055)

**摘要:** 多元触觉和沉浸式视觉反馈的时空一致性配准以及现有 VR 软件框架中硬件设备的接入便捷性问题, 制约了医疗、商务、娱乐等不同行业中视触觉融合场景的快速开发。为解决这一难题, 提出融合多元触觉和沉浸式视觉的可移植 VR 软件框架, 根据视触觉反馈精度要求的不同设计了双层和三层架构兼顾视觉渲染、触觉渲染、硬件控制的不同需求。实验结果表明该框架具有支持视-触融合同步反馈、硬件平台可移植、图形场景开发简便和交互场景可快速替换等特点, 能够满足不同领域的交互应用需求。

**关键词:** 虚拟现实; 多元触觉; 人机交互; 视触觉融合; 可移植软件框架

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 07-1385-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-VR0440

## An Adaptable VR Software Framework for Collaborative Multi-modal Haptic and Immersive Visual Display

Guo Yuan<sup>1</sup>, Tong Qianqian<sup>3</sup>, Zheng Yukai<sup>1</sup>, Wang Ziqi<sup>1</sup>, Zhang Yuru<sup>1,2</sup>, Wang Dangxiao<sup>1,2,3\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Beijing Advanced Innovation Center for Biomedical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** The spatiotemporal consistency of multi-modal haptic and immersive visual feedback, as well as the integration of hardware devices in the existing VR software framework, restricts the rapid development of visuo-haptic fusion scenarios in different industries such as medical, business, and entertainment. In order to tackle this problem, an adaptable VR software framework combining multi-modal haptic and immersive visual display is proposed. To meet the different requirements of visual rendering, haptic rendering and hardware control, the double-layer and three-layer architectures are devised according to the different precision requirements of visuo-haptic fusion feedback. Experimental results show that the framework has the characteristics of supporting the synchronous feedback of visuo-haptic fusion, the convenient integration of diverse haptic devices, the simplicity of scene development and the rapid replacement of interactive scene, and it can meet the requirements of different application fields.

**Keywords:** virtual reality; multi-modal haptic; human-machine interaction; visuo-haptic fusion; adaptable software framework

## 引言

轻量级高沉浸式头盔显示器(如 Oculus Rift 和



收稿日期: 2019-08-24 修回日期: 2019-11-14;  
基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB 1002803);  
作者简介: 郭园(1992-), 男, 山西, 博士生, 研究方向为人机交互、力反馈手套; 童倩倩(1989-), 女, 河南, 博士, 研究方向为人机交互、触觉反馈。

HTC Vive)的出现, 推动了虚拟现实交互系统的爆发式发展。相比于显示器、头盔、立体声耳机等设备呈现的逼真视觉和听觉体验, 用户在交互过程中能够获得的触觉体验极为贫乏, 现有商用触觉反馈装置仅能提供简单的振动触觉反馈<sup>[1-4]</sup>和力反馈<sup>[5-8]</sup>, 欠缺对于柔软度、摩擦、纹理、振动、温度等细腻触觉体验的模拟能力。

<http://www.china-simulation.com>

• 1385 •

相比于单一形式的触觉反馈装置,多元触觉反馈设备的设计与研制更具有挑战性<sup>[9]</sup>,在潜在市场需求与先进技术的驱动下,一些性能优异的多元触觉反馈设备相继面世。Nader 等<sup>[10]</sup>研制了一种多元触觉反馈阵列,该装置由上下两层形状记忆合金弹簧组成,通过改变电流的大小驱动两层记忆合金弹簧发生相变,可以分别模拟物体的表面形状和刚度特性。不同于采用变刚度材料(形状记忆合金的解决方案),Okamura 等<sup>[11]</sup>研制了基于软体驱动器的形状显示装置,通过 Particle jamming 阵列和气压控制软体材料相结合的方式,实现了物体形貌特征与刚度特性的模拟。然而,上述研究仅提供触觉反馈,没有与视觉反馈相融合,用户只能依靠自身的想象力在脑海中构造相应的交互场景,这极大地降低了交互的真实感。

为提升虚拟现实交互系统的沉浸感,Takaki 等<sup>[12]</sup>提出了一种轻质的指尖触觉反馈设备,利用两个直流电机、帕尔贴分别实现剪切力、法向力、振动触觉和温度的模拟,用户不仅能在虚拟环境中触摸具有不同纹理的方块,还能感受到蜡烛和冰块的温度。不同于传统的重力呈现触觉反馈装置,Grability 采用不接地固定方式极大地扩展了使用空间,通过在拇指与食指间产生的反向力以及皮肤的不对称牵引,用户可以感受到虚拟物体的惯性和重力<sup>[13]</sup>。Inrak 等<sup>[14]</sup>设计一种多功能手柄—CLAW,通过控制食指的位置和反馈力的大小,可以模拟抓握不同形状的物体、扣动手枪扳机等场景。上述研究通过将多元触觉和沉浸式视觉相融合的方式,显著增强了用户的交互沉浸感,但在虚拟化身与虚拟物体交互过程中,当两者的间距小于设定阈值时,Unity 自带的碰撞检测算法会将虚拟化身与虚拟物体绑定在一起,无法实现虚拟化身与虚拟物体的相对滑动、多点触碰等精细操作任务。此外,Unity 自带的碰撞检测算法精度低、响应速度慢,会导致交互过程虚拟化身与虚拟物体的相互穿透,难以实现视触觉融合反馈的时空一致配准,从而影响交互体验。

为应对上述问题,本文通过分析不同交互任务对视触觉融合反精度的不同需求,提出了一种融合多元触觉和沉浸式视觉的可移植 VR 软件框架,通过 Unity、动态链接库(Dynamic Link Library, DLL)、单片机控制程序的 3 层架构兼顾视觉渲染、触觉渲染、触觉硬件控制的不同需求,用于沉浸式虚拟现实交互系统的研发。

## 1 视-触融合 VR 软件框架的设计需求

在虚拟现实交互系统中,传感装置实时获取用户位置、姿势等信息为计算机提供输入信号,VR 软件对从传感装置获取的输入信号进行解析,随后对虚拟环境作相应的更新,三维可视化及其他反馈(如纹理、温度、反馈力等)信息通过相应的输出设备(头盔显示器、触觉手套、手柄等)反馈给用户,使其获得多种感官上的体验效果。作为虚拟现实系统中计算机系统、传感装置及输出设备的桥梁,VR 软件框架在搭建虚拟现实交互系统中扮演着重要角色。

虚拟现实技术的飞速发展促进了虚拟现实应用对沉浸式技术的需求,具体体现在对多元触觉、沉浸式视觉以及视触觉融合反馈的时空一致性匹配的迫切需求。多元触觉反馈旨在为用户提供柔软度、摩擦、纹理、振动、温度等多种类型的触觉体验,沉浸式视觉用于呈现逼真的虚拟交互场景,而多元触觉与沉浸式视觉的融合反馈需要实现二者在时间与空间上的同步,以提升交互体验。目前,随着虚拟现实硬件设备的应运而生,亟需便捷的 VR 软件框架支持不同的交互应用、不同交互设备,不仅需要满足精度要求不高的虚拟现实应用,还需要满足涉及精细操作的应用,例如虚拟手术,虚拟装配。

综上,为了加快沉浸式虚拟现实交互系统的研发与应用推广,视-触融合 VR 软件框架的设计需要满足以下需求:

(1) 多元触觉反馈:支持柔软度、摩擦、纹理、振动、温度等多种类型的触觉交互,为用户

提供多元触觉的融合反馈;

(2) 视-触融合呈现: 实现多元触觉反馈和 3D 沉浸式视觉反馈的时空一致性配准, 以支持视触觉融合同步反馈。在达到 60 Hz 视觉反馈以及 1 kHz 触觉反馈刷新频率的同时, 能够满足不同领域对视触觉融合反馈的精度需求;

(3) 硬件移植性好: 允许不同类型 VR 硬件设备(VR 头盔、不同触觉反馈设备)的便捷接入, 降低沉浸式虚拟现实交互系统的开发成本与难度;

(4) 跨应用领域: 便于用户快速开发医疗、商务、娱乐等不同应用领域的 3D 交互场景。

## 2 可移植视-触融合 VR 软件框架

虚拟现实交互系统作为一个多平台集成的复杂系统, 不仅需要兼顾各个子系统的接口兼容性问题, 还需考虑整个系统的应用场景以及用户需求。为了实现系统的预期目标, 提供良好的用户体验, 整个系统需要采用合理的设计思想。基于上述需求, 本文采用层次化设计思想构建了可移植 VR 软件框架, 针对不同虚拟现实交互应用对视触觉融合反馈精度的不同要求, 给出可移植 VR 软件框架的两种设计方案。

### 2.1 双层 VR 软件框架

支持视触觉融合反馈的沉浸式虚拟现实交互系统需要能为用户提供沉浸式视觉反馈和多元触觉反馈。为了实现虚拟现实系统开发的便捷性, 首先需要有一个扩展性与灵活性较强的 3D 可视化开发工具, 以便于用户开发多样的交互场景, 搭建不同的人机交互环境。Unity 是由 Unity Technologies 公司开发的一个集游戏开发、实时三维动画创建等功能的开发工具, 具有通用性强、画质逼真、支持跨平台开发以及使用成本低等特性, 本文选用 Unity 作为 3D 虚拟场景的开发工具。在此基础上, 为了支持多元触觉的融合反馈, 选用具有集成度高、可靠性强、功能完善的单片机实现多种类型触觉设备的接入。

在用户与虚拟场景的交互过程中, 根据虚拟化身(虚拟工具或虚拟手等)与虚拟物体的交互情况, 动态实现两者的碰撞检测、碰撞响应、力/触觉信息渲染是融合视触觉反馈最为关键的环节。

在 Unity 开发平台中, 实现这一过程的主要工具是 Unity 软件自带的碰撞检测器, 根据外形与节点数的不同, 碰撞器可分为盒子碰撞器(BoxCollider)、胶囊碰撞器(Capsule Collider)、网格碰撞器(Mesh Collider)等, 其中盒子碰撞器、胶囊碰撞器等是通过一些简单的立体形状实现的, 虽然实现方式相对简单但精度有限, 网格碰撞器是对 3D 模型表面进行三角面元剖分获得的, 相对于其它碰撞器更加精确, 但需要耗费的计算资源相对较多。

对于虚拟物体构形相对简单、视触觉融合反馈精度要求不高的虚拟现实交互应用, 例如小型游戏, 可采用 Unity 构建虚拟场景, 并通过其自带的碰撞检测器执行虚拟化身与虚拟物体之间的碰撞检测、计算虚拟场景更新信息以及所需提供的力/触觉信息, 单片机控制程序通过控制触觉设备提供相应的力/触觉反馈。如图 1 所示, 上述交互过程通过包含 Unity 与硬件控制程序的双层 VR 软件框架实现。

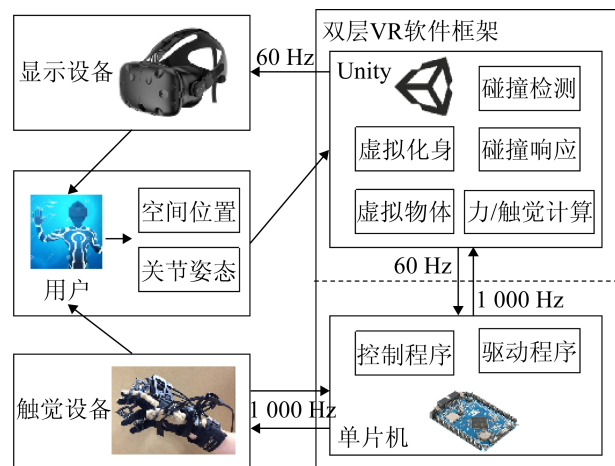


图 1 基于双层 VR 软件框架的视触融合反馈示意图  
Fig. 1 Diagram of visuo-haptic fusion feedback based on the double-layer VR software framework

采用上述双层 VR 软件框架实现虚拟现实人

机交互应用还需要实时获取用户的空间位置与关节姿态等信息, 这些信息可根据交互需求选取合适的采集设备, 例如数据手套、Leap Motion 等体感装置。同时, 需要选用通信接口(串口、高速 USB 接口等)实现触觉设备与计算机系统之间的数据通信。此外, Unity 更新的虚拟场景通过头盔(例如 HTC Vive、Oculus Rift)等显示设备为用户提供沉浸式视觉体验(60 Hz), 触觉设备(例如多元触觉手套)在单片机控制系统的调控下为用户提供多元触觉反馈。

## 2.2 三层 VR 软件框架

与娱乐、游戏等虚拟现实交互应用相比, 虚拟手术、虚拟装配等应用的交互场景更为复杂, 对视触觉融合反馈的精度要求更高, 在这些应用中需要通过精细操作才能完成目标任务, 而实施精细操作的交互过程相当复杂, 往往涉及多点碰撞, 数据计算量极大, 这对 VR 软件框架的实用性提出了更高的要求。在 Unity 建立的虚拟交互场景中, 当使用双层 VR 软件框架搭建交互系统时, 会发生穿透现象。这主要是由于 Unity 自带的碰撞检测器执行碰撞检测的精度低、响应速度慢, 在交互过程中用户的虚拟化身与虚拟物体无法实现视触觉的时空一致配准, 难以满足复杂场景/精细操作任务对高精度的需求。

为解决上述难题, 本文进一步提出三层 VR 软件框架的构建方案, 通过 Unity、动态链接库、硬件控制程序三层架构兼顾视觉渲染、触觉渲染、硬件控制的不同需求。如图 2 所示, 该三层 VR 软件框架中, Unity 主要用于虚拟场景的构建, 用户可根据需求进行自定义建模或者将其他类型的模型通过格式转换得到需要的模型。考虑到 Unity 自带的碰撞检测算法无法满足精细操作的交互需求, 三层 VR 软件框架中采用动态链接库的方式提高碰撞检测效率与精度, 具体体现在用户可根据交互需求编写碰撞检测算法、执行稳定的碰撞响应并实时计算出交互过程中所需的力/触觉信息。此外, 与

双层 VR 软件框架相同, 单片机控制程序通过控制触觉设备提供相应的多元力/触觉反馈。

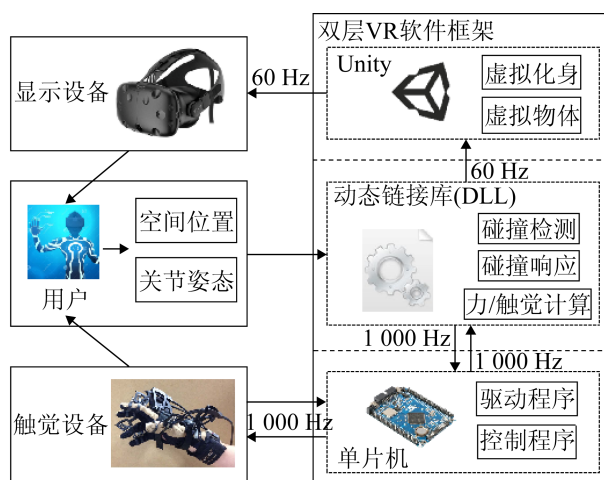


图 2 基于三层 VR 软件框架的视触觉融合反馈示意图  
Fig. 2 Diagram of visuo-haptic fusion feedback based on the three-layer VR software framework

从以上描述可以看出, 三层 VR 软件框架的提出主要是便于用户根据交互需求自定义触觉渲染算法, 以满足复杂、精细交互任务对视触觉融合反馈的精度要求。对于六自由度(6-DOF)力觉生成的复杂交互任务, 用户可借鉴现有先进方法采用三层 VR 软件框架实现稳定、高效的沉浸式视触觉融合反馈。例如基于多分辨模型的碰撞检测方法<sup>[15]</sup>可用于协调交互复杂度与碰撞检测效率的矛盾; 基于运动工具六维位姿变量优化的力觉合成方法<sup>[16]</sup>可用于复杂多点接触的稳定模拟; 基于弹簧阻尼骨架球树模型的模拟方法<sup>[17]</sup>可以 1 000 Hz 以上的计算效率稳定模拟多区域接触交互过程。而对于涉及更多自由度的交互任务(例如穿戴式交互)和多元触觉交互任务, 可使用提出的三层 VR 软件框架研究更为先进的力/触觉渲染算法。

## 3 虚拟现实视-触觉融合交互应用实例

### 3.1 实例 1—双层 VR 软件框架

为验证双层 VR 软件框架的交互效果, 基于 Unity 自带碰撞器搭建了图 3 所示交互系统, 设计了两种不同类型的交互场景。其中, 场景 1 中的

虚拟物体为简单的立方体, 场景 2 中的虚拟物体为较为复杂的火盆模型。虚拟现实系统主要包括触觉反馈设备(自研的三指温度-力反馈手套)、Noitom Hi5 VR 和 HTC VIVE 套件。

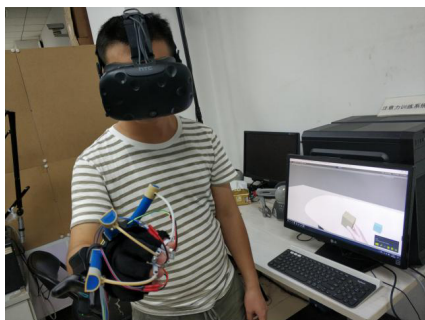


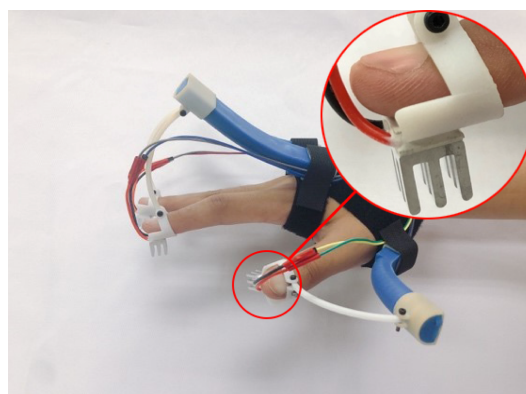
图 3 基于双层 VR 软件框架搭建的虚拟交互系统  
Fig. 3 Virtual interactive system based on double-layer VR software framework

如图 4(a)所示, 触觉反馈设备为三指温度-力反馈手套, 该力反馈手套采用 Polygerinos 的纤维丝增强软体驱动器提供反馈力; 在自由状态下, 用户的手指可以实现自由的弯曲与伸展, 运动阻力很小; 在约束状态下, 气泵向驱动器进行充气, 驱动器末端产生的反馈力通过刚性连杆传递至用户指尖。此外, 在手套指尖部位装有小型帕尔贴片, 通过控制电流的大小与电压的正负实现温度反馈。

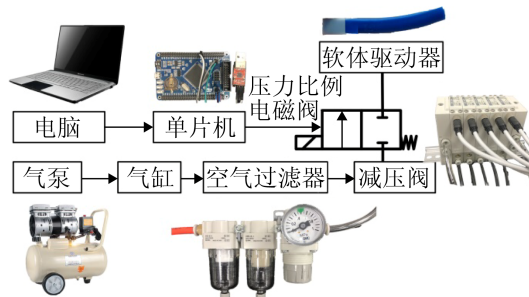
三指温度-力反馈手套的控制系统主要包括 PC、低位控制器系统和气动系统, 图 4(b)展示了该多元触觉反馈手套的控制系统工作流程。其中, 低电平控制器采用 STM32F103 单片机, 通过串行 USB 端口与 PC 通信, 驱动 3 个电磁阀及 3 个帕尔贴片工作; 气动系统主要由气泵、气缸、减压阀、空气过滤器、电磁阀构成, 气泵产生的压缩空气储存在气缸内, 当单片机控制电磁阀工作时, 压缩空气通过减压阀、空气过滤器、电磁阀进入纤维丝增强软体驱动器, 为用户指尖提供相应的反馈力; 帕尔贴片通过单片机控制其驱动电流的大小。

除了多元触觉反馈手套, 整个虚拟现实交互系统的硬件部分还包括由 HTC VIVE 套件(VIVE

头戴式设备、VIVE 定位器、VIVE 追踪器)和 Noitom Hi5 VR 动作捕捉手套两部分构成。VIVE 头盔显示器提供沉浸式视觉交互体验, VIVE 定位器与 VIVE 追踪器用于实现用户手部的空间定位; Noitom Hi5 VR 动作捕捉手套用于检测手指的关节位姿变化, 为交互系统中的虚拟手提供运动数据, 使得用户在虚拟环境中可以像真实物理世界一样感知自己手部的运动过程, 以显著提高系统的交互沉浸感。



(a) 温度-力反馈手套



(b) 控制流程示意图

图 4 三指温度-力反馈手套机械硬件与控制系统  
Fig. 4 Three-finger temperature-force feedback glove and control system

在虚拟交互场景 1 中, 用户可以捏 2 个形状大小相同、温度不同的立方体, 其中黄色立方体采用网格碰撞器, 粉色立方体采用立方体碰撞器。当用户触碰到黄色立方体时可以感觉到清凉和一定的反馈力; 相反, 当用户触碰到粉色立方体时可以感觉到温热的感觉和相等的反馈力。如图 5(a)和(b)所示, 当用户分别捏 2 个立方体时, 虚拟手与 2 个虚拟立方体均未发生穿透现象, 说

明当虚拟物体形状较为简单时, 无论采用 Unity 哪一种碰撞器, 都可以满足用户的交互需求。

在虚拟交互场景 2 中, 用户与两个形状大小相同、碰撞器不同的火盆进行交互, 其中黑色火盆采用胶囊体碰撞器, 棕色火盆采用网格碰撞器。当用户分别触碰 2 个火盆时, 图 5(c)棕色火盆未发生穿透现象, 而图 5(d)中手与黑色火盆有明显的穿透现象(红色箭头), 说明当虚拟物体形状较为复杂时, 网格碰撞器的交互效果明显优于胶囊体碰撞器, 这得益于网格碰撞器更加精确。然而, 如图 5(e)所示, 虚拟手与棕色火盆偶尔会发生轻微的穿透现象(红色箭头)。可见, 对于形状较为复杂的虚拟物体, 采用 Unity 自带的较为精确的网格碰撞器仍会出现穿透, 难以实现沉浸式视觉触觉融合反馈。

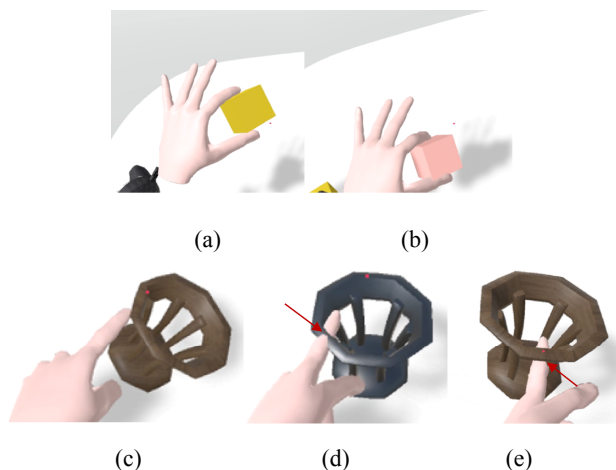


图 5 虚拟交互场景  
Fig. 5 Virtual interactive scenes

### 3.2 实例 2—三层 VR 软件框架

为了满足更为复杂问题的交互需求, 实现用户虚拟化身与虚拟物体的多点接触、相对滑动等精细操作运动, 如图 6 所示, 采用三层 VR 软件框架搭建兔子与触笔的交互系统。使用 Unity 3D 构建兔子和触笔的交互场景, 硬件交互设备为 PHANTOM Omni, 人手通过握持 PHANTOM Omni 手柄, 控制触笔在场景中与兔子进行交互, 同时触笔可以给人手提供力反馈。

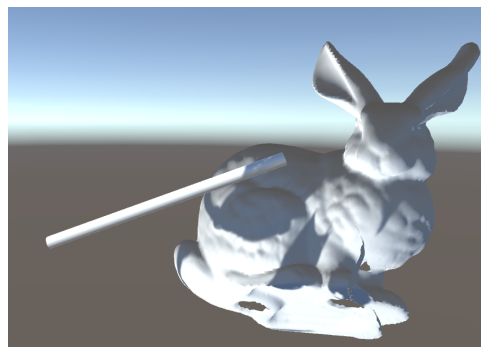


图 6 用户与虚拟兔子的交互过程  
Fig. 6 Interactive process between users and virtual rabbit

交互系统的力觉渲染算法采用 C++编写并封装成动态链接库, 即 DLL 文件, 在 Unity 3D 虚拟场景交互过程中实时调用 DLL。在位姿优化方面采用三角面片作为物理模型存在一定的局限性, 无法满足 1 kHz 的交互频率要求。本文选用适合位姿优化的物理模型—sphere-tree 模型, 该模型利用各向相同的性质, 既能够非常方便地进行碰撞检测, 又能在碰撞响应阶段建立有效简单的约束优化方程。

碰撞检测利用 sphere-tree 模型自带的层次化结构进行计算, 其算法流程如下:

输入: 2 个 sphere-tree 模型物体, 其根部的球分别为  $s_1$ ,  $s_2$

堆栈  $S \leftarrow 0$

$S_{\text{leaf}} \leftarrow 0$

if ( $s_1$  和  $s_2$  相交)

    将( $s_1$ ,  $s_2$ )压栈到  $S$

while( $S$  非空)

    从  $S$  中弹出( $s_1$ ,  $s_2$ )

$S_1 \leftarrow s_1$  的子节点集合

$S_2 \leftarrow s_2$  的子节点集合

    for 每个( $s'_1$ ,  $s'_2$ ),  $s'_1 \in S_1$ ,  $s'_2 \in S_2$

        if ( $s'_1$  和  $s'_2$  相交)

            if ( $s'_1$  和  $s'_2$  都为叶子结点)

                则将( $s'_1$ ,  $s'_2$ )压栈到  $S_{\text{leaf}}$

                否则将( $s'_1$ ,  $s'_2$ )压栈到  $S$

输出:  $S_{\text{leaf}}$



算法中描述的 2 个 sphere-trees, 其中一个代表工具, 另一个代表物体。首先, 检测根节点的 2 个球是否相交, 如果根节点的球相交, 那么算法按照相同的原理去寻找根节点的子节点相交关系, 一直到没有任何 2 个球相交或者算法达到了 sphere-tree 的叶子节点。算法的输出是叶子节点处相交球对, 如果没有相交球, 那么结果为空。

碰撞响应是通过基于位姿变量的约束优化算法完成, 一般的优化模型是由优化变量、优化目标以及约束条件 3 部分组成, 本文的优化变量是图形工具在三维空间的平移和旋转。

$$q_g^t = (x_g^t, y_g^t, z_g^t, \alpha_g^t, \beta_g^t, \lambda_g^t)^T \quad (1)$$

式中:  $q_g^t$  为图像工具的空间位姿;  $x_g^t, y_g^t, z_g^t$  分别为空间位置坐标;  $\alpha_g^t, \beta_g^t, \lambda_g^t$  分别为空间旋转坐标, 其优化目标运用最小二乘模型,  $Minimize: \frac{1}{2}(q_g^t - q_h^t)^T G_r(q_g^t - q_h^t)$ , 其中:  $q_h^t$  为物理工具, 即从 PHANTOM Omni 中读取的位姿数据。约束条件是图形工具中的球模型球心到物体的球模型球心距离大于 2 个球模型半径之和。

$$(x_T - x_O)^2 + (y_T - y_O)^2 + (z_T - z_O)^2 \geq (r_T + r_O)^2 \quad (2)$$

力的计算采用的是弹簧力模型, 通过对上述优化模型进行求解, 得到图形工具的位姿, 而物理工具的位姿是在每次仿真循环开始前从 PHANTOM Omni 设备上获取, 弹簧力即为图形工具和物理工具之间的作用力。

实验结果表明, 采用三层 VR 软件框架可以实现触笔与虚拟兔子的多点触碰、无穿透现象, 同时, 虚拟触笔可以与虚拟兔子实现相对滑动等精细操作且交互频率高于 1 000 Hz, 满足虚拟手术、虚拟装配等精细模拟的应用需求。

## 4 结论

本文面向虚拟现实交互过程中视触融合一致性配准、硬件平台可移植等需求, 提出了一种融合多元触觉和沉浸式视觉的可移植 VR 软件框

架。针对交互任务及用户对视触觉反馈精度需求的不同, 提出了 2 种设计方案。

方案一基于自研温度-力多元触觉设备构建了虚拟交互系统, 采用 Unity 自带碰撞器实现了虚拟物体与虚拟化身的碰撞检测、碰撞响应、化身驱动、力渲染等过程, 其优点是实现过程简单、可操作性较强, 其不足是交互精度不高、难以满足精细操作的需求。为了弥补上述不足, 第二种方案基于 PHANTOM Omni 构建可实现多点接触的复杂交互系统, 将编写的力渲染算法封装为动态链接库, 用于实现化身驱动、碰撞检测、碰撞响应、力渲染等过程, Unity 只提供视觉显示功能。

实验结果表明, Unity 自带的碰撞器可满足简单场景的交互需求, 当交互场景较为复杂时, Unity 自带的碰撞器会出现穿透现象, 而基于自编程动态链接库的方式, 可以实现虚拟化身与虚拟物体的相互滑动等精细操作任务, 满足 60 Hz 的视觉反馈、1 000 Hz 的触觉刷新频率以及触觉交互的精度需求。基于本文提出的视-触融合 VR 软件框架, 本文搭建的交互场景均用于模拟虚拟化身与刚性物体的交互过程, 未来工作将基于该 VR 软件框架开发虚拟购物验证实验平台, 用户通过触觉交互设备可以体验与沙发、布料、皮革、瓷砖等不同材质、不同刚度物体的交互过程, 获得更为逼真生动的视触觉体验。

## 参考文献:

- [1] Fukumoto M, Sugimura T. Active click: tactile feedback for touch panels[C]// CHI'01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. New York, USA: ACM, 2001: 121-122.
- [2] Yatani K, Truong K N. SemFeel: a user interface with semantic tactile feedback for mobile touch-screen devices[C]// Proceedings of the 22<sup>nd</sup> annual ACM symposium on User interface software and technology. New York, USA: ACM, 2009: 111-120.
- [3] Sawada H, Takeda Y. Tactile pen for presenting texture sensation from touch screen[C]// 2015 8th International Conference on Human System Interaction (HSI). Warsaw, Poland: IEEE, 2015: 334-339.

- [4] Yang G H, Jin M, Jin Y, et al. T-mobile: Vibrotactile display pad with spatial and directional information for hand-held device[C]// 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei, China: IEEE, 2010: 5245-5250.
- [5] Sun Z, Miao X, Li X. Design of a bidirectional force feedback dataglove based on pneumatic artificial muscles[C]// 2009 International Conference on Mechatronics and Automation. Changchun, China: IEEE, 2009: 1767-1771.
- [6] Cassar D J, Saliba M A. A force feedback glove based on magnetorheological fluid: preliminary design issues[C]// Melecon 2010-2010 15<sup>th</sup> IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Valletta, Malta: IEEE, 2010: 618-623.
- [7] Gu X, Zhang Y, Sun W, et al. Dexmo: An inexpensive and lightweight mechanical exoskeleton for motion capture and force feedback in VR[C]// Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, USA: ACM, 2016: 1991-1995.
- [8] Choi I, Hawkes E W, Christensen D L, et al. Wolverine: A wearable haptic interface for grasping in virtual reality[C]// 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Daejeon, South Korea: IEEE, 2016: 986-993.
- [9] Wang D, Ohnishi K, Xu W. Multimodal Haptic Display for Virtual Reality: A Survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2020, 67(1): 610-623.
- [10] Mansour N A, El-Bab A M R F, Abdellatif M. Design of a novel multi-modal tactile display device for biomedical applications[C]// 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). Rome, Italy: IEEE, 2012: 183-188.
- [11] Stanley A A, Okamura A M. Deformable model-based methods for shape control of a haptic jamming surface[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics (S1077-2626), 2016, 23(2): 1029-1041.
- [12] Murakami T, Person T, Fernando C L, et al. Altered touch: miniature haptic display with force, thermal and tactile feedback for augmented haptics[C]// ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies. New York, USA: ACM, 2017.
- [13] Choi I, Culbertson H, Miller M R, et al. Gravity: A wearable haptic interface for simulating weight and grasping in virtual reality[C]// Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. New York, USA: ACM, 2017: 119-130.
- [14] Choi I, Ofek E, Benko H, et al. Claw: A multifunctional handheld haptic controller for grasping, touching, and triggering in virtual reality[C]// Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, USA: ACM, 2018.
- [15] Otaduy M A, Lin M C. Sensation preserving simplification for haptic rendering[J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2003, 22(3): 543-553.
- [16] Wang D, Zhang X, Zhang Y, et al. Configuration-based optimization for six degree-of-freedom haptic rendering for fine manipulation[J]. IEEE Transactions on Haptics (S1939-1412), 2013, 6(2): 167-180.
- [17] Wang D, Shi Y, Liu S, et al. Haptic simulation of organ deformation and hybrid contacts in dental operations[J]. IEEE Transactions on Haptics (S1939-1412), 2014, 7(1): 48-60.