

陈宸. 基于 VR 技术的沉浸式化学虚拟仿真实验系统开发[J]. 智能计算机与应用, 2026, 16(4): 85-90. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.25082201

# 基于 VR 技术的沉浸式化学虚拟仿真实验系统开发

陈宸

(武汉生物工程学院 智能制造学院, 武汉 430415)

**摘要:** 针对传统化学实验中存在危险性高、反应时间长以及微观现象难以直接观察等问题, 提出基于虚拟现实技术的沉浸式化学虚拟仿真实验系统。系统基于 Unity 引擎开发, 使用 3ds Max 完成三维建模, 以 HTC Vive 作为硬件平台, 结合 VRTK 实现交互设计。学习者可通过手柄交互完成虚拟实验操作, 从而获得安全、直观的实验体验。研究通过调查问卷对评价指标进行统计分析, 比较手柄交互与手势交互在实验操作中的学习者体验差异。结果显示, 手柄交互实用性更强、持续使用意愿更高。系统为学习者提供灵活且生动的学习资源, 营造了体验式与探究式的学习情境。研究结论对沉浸式虚拟仿真实验交互方式的选择与优化具有参考价值。

**关键词:** 虚拟现实; 沉浸式; 虚拟仿真实验; 三维建模

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2026)04-0085-06

## Development of an immersive virtual chemistry experiment system based on VR technology

CHEN Chen

(School of Intelligent Manufacturing, Wuhan University of Bioengineering, Wuhan 430415, China)

**Abstract:** To address the problems of high risk, long reaction time, and the difficulty of directly observing microscopic phenomena in traditional chemistry experiments, this study proposes an immersive virtual chemistry simulation system based on virtual reality technology. The system is developed using the Unity engine, with 3ds Max for 3D modeling, HTC Vive as the hardware platform, and VRTK for interaction design. Learners can perform virtual experimental operations through controller-based interactions, thereby obtaining a safe and intuitive experimental experience. A questionnaire survey was conducted to statistically analyze evaluation indicators and to compare learners' experiences between controller interaction and gesture interaction. The results show that controller interaction demonstrates stronger practicality and higher willingness for continued use. The system provides learners with flexible and engaging learning resources, creating a learning environment that is both experiential and inquiry-based. The findings offer valuable insights for the selection and optimization of interaction methods in immersive virtual simulation experiments.

**Key words:** virtual reality; immersive; virtual simulation experiment; 3D modeling

## 0 引言

虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术通过计算机模拟三维空间, 结合视觉、听觉、触觉等多模态感知方式, 构建沉浸式虚拟环境, 使用户能够突破时间与空间的限制, 获得身临其境的体验<sup>[1]</sup>。近年来, VR 技术在教育、医疗、工业和文化等领域得到了广泛应用, 展现出巨大的发展潜力<sup>[2]</sup>。蒋希娜等<sup>[3]</sup>利用 VR 作品开展共情训练, 为心理健康和社会互动课程教学实践提供了创新路径。贾晓琪等<sup>[4]</sup>构建了

基于 VR 技术的计算机组装与维护仿真教学平台, 有效改善了实训教学效果, 提升了学生的学习兴趣与主动性。黄海平<sup>[5]</sup>开发了基于 VR 技术的先天性心脏手术模拟器, 并验证其在提升医生和医学生手术技能方面的有效性。张娅捷等<sup>[6]</sup>研发了工业机器人运动控制虚拟实训系统, 为安全环境下的可重复、灵活培训提供解决方案。徐锦宁等<sup>[7]</sup>搭建秦代百戏俑 VR 体验系统, 为年轻群体提供了传播文化遗产知识的新方式。孔勇等<sup>[8]</sup>开发了一款模拟古法造纸技艺的虚拟现实应用, 使用户能够直观地体

**基金项目:** 湖北省教育厅科学技术研究项目(B2023290); 武汉生物工程学院校级科研项目(24ZKY161)。

**作者简介:** 陈宸(1998—), 男, 硕士, 助教, 主要研究方向: 虚拟现实应用。Email: 626981211@qq.com。

**收稿日期:** 2025-08-22

验并探索传统造纸工艺。

虚拟仿真实验是VR技术的典型应用场景之一。通过综合运用VR、多媒体、人机交互和三维建模等技术,构建高度仿真的实验环境,为学习者提供沉浸式的实验操作平台,从而提升实验教学质量与学习效果<sup>[9]</sup>。在教育强国建设与教育数字化转型的背景下,虚拟仿真实验已成为关键的教育资源。其不仅突破了传统教学的限制,还为课堂教学、实验实训与自主学习提供了灵活高效的学习环境。传统实验教学安全性低、资源消耗大、操作不可逆,限制了实验教学的顺利开展。虚拟仿真实验依托VR技术拓展学习者的感知维度,营造高度真实的学习环境,使其对实验情境的理解由抽象想象转化为具体虚拟体验。沉浸式学习不仅提升了学习者获取信息的广度与深度,还强化了身体感知与认知的协同关系,激发学习动机,促进知识建构<sup>[10]</sup>。

本研究利用VR技术开发沉浸式化学虚拟仿真实验系统,提供安全可靠的实验操作平台,助力学习者直观理解科学概念并推进具身认知的形成。本研究设计对比实验,比较手柄交互与手势交互下学习者的体验差异,旨在为沉浸式虚拟仿真实验环境中交互方式的选择与优化提供理论与实践依据。

## 1 沉浸式化学虚拟仿真实验系统方案

### 1.1 开发工具

选择HTC Vive VR头盔显示器作为开发硬件,借助交互手柄与头显的全方位精确追踪技术,结合高清画质、立体声效与触觉反馈,为学习者提供高度沉浸的虚拟仿真实验体验。实验场景的三维建模由3ds Max制作。该软件界面直观、操作高效,且支持多种格式的导入与导出,可与Unity引擎进行协作。使用Unity作为系统开发引擎,开发者可以利用资源与脚本快速创建项目,并支持多平台发布。依托虚拟现实工具包(Virtual Reality Toolkit,VRTK)作为开发框架实现人机交互功能。VRTK提供了丰富的交互功能,能够高效完成交互设计与实现,提升VR项目的开发效率。

### 1.2 框架设计

化学实验是化学学科的重要基础,但部分实验因涉及有毒有害试剂、存在环境安全隐患及资源消耗等问题而难以顺利开展<sup>[11]</sup>。VR技术具有沉浸性、交互性、构想性、智能化特征,有助于激发学习动机并提高学习效果<sup>[12]</sup>,调动学习者的参与积极性,促进知识的应用与迁移<sup>[13]</sup>。本研究基于VR技术

开发沉浸式化学虚拟仿真实验系统,学习者能够了解并掌握金刚石、石墨和C<sub>60</sub>的微观结构与性质,并完成碳与氧气的反应和木炭还原氧化铜实验任务。

在软件方面,使用3ds Max进行三维建模,Unity引擎实现场景渲染,借助VRTK编写逻辑控制脚本实现人机交互。在硬件方面,交互手柄作为输入设备,HTC Vive头盔显示器作为输出设备。学习者可通过手柄进行虚拟仿真实验操作。系统框架如图1所示。

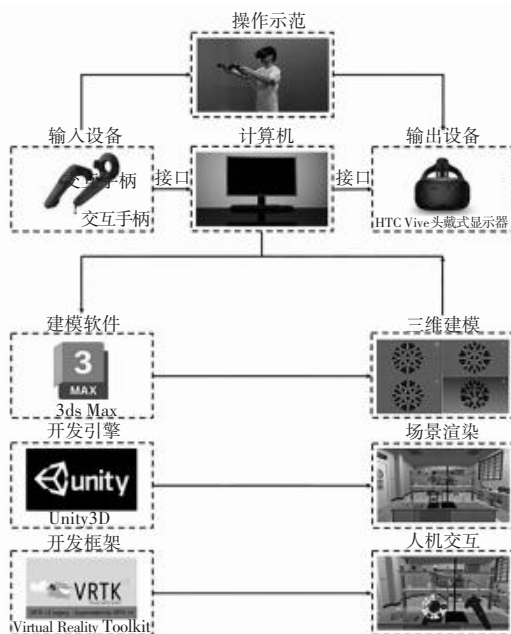


图1 系统框架

Fig. 1 System framework

### 1.3 技术路线

首先进行需求分析,以教科书实验内容为依据,参照真实实验的原理与步骤,明确实验内容及教学目标。采用3ds Max构建实验模型与搭建器材,使用Photoshop绘制贴图。将制作完成的资源以FBX格式导出。然后与SteamVR Plugin、VRTK、音效素材及粒子特效一起导入Unity中,使用Unity引擎进行场景设计与环境渲染。交互功能通过UGUI、动画系统、碰撞检测、交互脚本实现。最后将系统发布至Windows平台。系统开发流程如图2所示。

## 2 沉浸式化学虚拟仿真实验系统开发

### 2.1 场景搭建

系统参照真实实验室布局进行场景搭建,以3ds Max三维建模与Unity光照系统对实验环境进行仿真。在建模过程中,对实验器材进行高精度还原。基于Unity引擎的光照系统模拟实验室环境的自然光影效果。通过粒子系统与音频反馈功能,模

拟温度变化、气泡生成及火焰燃烧等现象,营造出更具真实感的多感官沉浸体验。通过还原真实实验室场景,增强学习者的临场感,促进对化学概念的可视化理解。搭建的微观结构三维模型如图3所示。

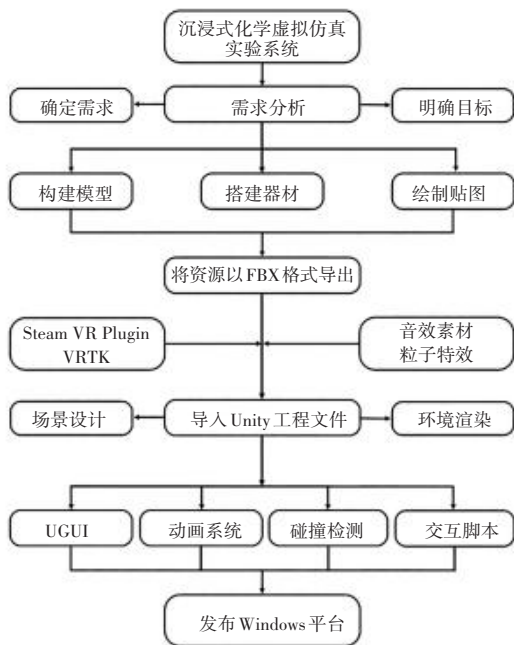


图2 系统开发流程

Fig. 2 System development process

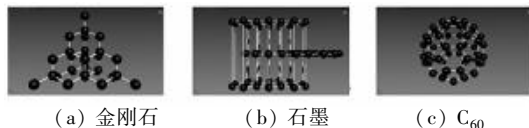
(a) 金刚石 (b) 石墨 (c) C<sub>60</sub>

图3 搭建的三维模型

Fig. 3 Constructed three-dimensional model

碳与氧气的反应虚拟实验场景如图4所示,木炭还原氧化铜的虚拟实验场景如图5所示。



图4 碳与氧气的反应

Fig. 4 Reaction of carbon and oxygen



图5 木炭还原氧化铜

Fig. 5 Charcoal reduction of copper oxide

## 2.2 功能实现

### 2.2.1 实验交互界面

为确保重要功能始终处于学习者操作范围内,系统将实验交互界面附加于交互手柄。当学习者触碰手柄触控板时,交互界面显示,学习者根据实验要求操作界面按钮,主要功能包括重置实验、返回上一步、查看帮助、返回主界面、查看实验结论与进行测验。学习者手指离开触控板后,交互界面关闭。实验交互界面如图6所示。

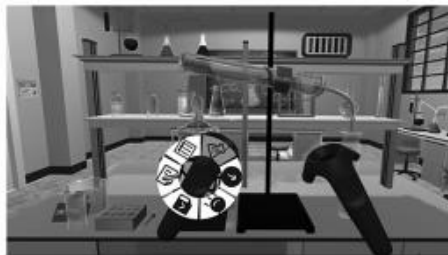


图6 实验交互界面

Fig. 6 Experimental interaction interface

### 2.2.2 选择实验任务

学习者通过交互手柄发射射线,点击切换按钮选择实验任务。在控制器对象上添加 VRTK\_UIPointer 组件,实现与 UICanvas 及其包含的 UI 元素的交互功能。在 UI 的 Canvas 中添加 VRTK\_UICanvas 组件,以支持 UIPointer 交互。将 Click On Pointer Collision 属性设置为 true,当手柄射线与 Canvas 发生碰撞时,触发 UI 点击事件。选择实验任务如图7所示。



图7 选择实验任务

Fig. 7 Selection of experimental tasks

### 2.2.3 实验物体交互

VRTK 提供配置接口,可在 Unity 的 Inspector 面板中配置属性、设置参数,实现攀爬、双手持握与缩放效果。VRTK 定义了 Touch、Grab 与 Use 等交互效果。VRTK\_InteractTouch 表示对象之间的触碰操作。VRTK\_InteractGrab 表示对触碰对象的抓取操作。VRTK\_InteractUse 表示对触碰对象的交互操作。在沉浸式虚拟仿真实验中,抓取动作应用较为广泛。使用 VRTK 与物体进行交互时,需要在目标

对象上添加碰撞体,其类型与大小会影响交互体验,因此应根据目标对象的形状与尺寸设置不同的碰撞体。同时,挂载标记为可交互对象的 `VRTK_InteractiveObject` 组件,以确定游戏对象是否可以交互。将预设脚本添加到交互手柄中以实现具体的交互效果。学习者使用交互手柄触碰  $C_{60}$  微观结构三维模型,双手扣动扳机并移动实现缩放效果。查看微观结构三维模型如图 8 所示。

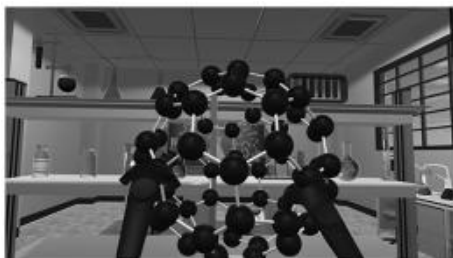


图 8 查看微观结构三维模型

Fig. 8 Viewing the three-dimensional model of microstructure

#### 2.2.4 组装实验器材

为实现组装实验器材功能,需要使用到 `VRTK` 的吸附功能。吸附通过缩短移动距离来优化交互性能,当物体靠近目标区域时,能够自动对齐至目标位置<sup>[14]</sup>。`VRTK` 的 `SnapDropZone` 提供预定义的交互区域,当可交互对象被释放至该区域时,其位置、旋转与大小属性会自动与目标区域对齐。`SnapDropZone` 以预制体形式保存在 `Unity` 的 `Project` 面板中。在实验过程中,当学习者抓取实验器材时,系统以高亮形式显示目标区域的位置;当实验器材接近目标区域时,触发自动吸附功能,实现实验器材的组装操作。组装实验器材如图 9 所示。



(a) 安装试管

(b) 安装酒精灯

图 9 组装实验器材

Fig. 9 Assembly of experimental apparatus

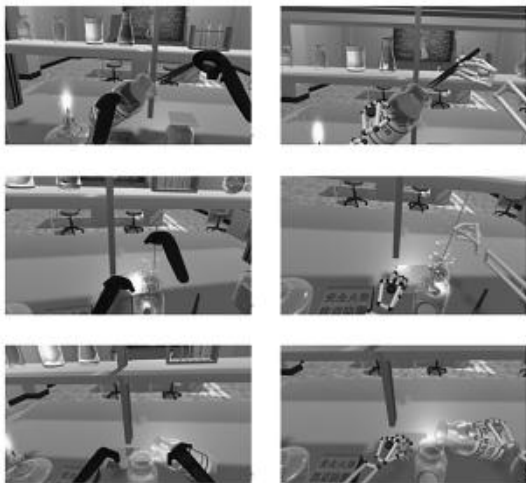
### 3 对比实验

为比较不同交互方式在实验操作中的学习者体验,本系统已适配手势交互功能。借助 `Leap Motion` 控制器及其配套的软件开发工具包 (`Software Development Kit, SDK`) 实现手势交互<sup>[15]</sup>。选择 Y 中学 54 名九年级学生作为实验对象,其中男生 24 人,女生 30 人。将学习者分为手柄交互组与手势交互

组,每组 27 人。

#### 3.1 实验流程

在实验过程中,两组学习者分别使用交互手柄与 `Leap Motion` 控制器体验虚拟仿真实验环境并完成实验任务。实验结束后,学习者填写问卷并进行半结构化访谈以收集反馈信息。手柄交互与手势交互实验操作如图 10 所示。



(a) 手柄交互

(b) 手势交互

图 10 实验操作示意

Fig. 10 Experimental operation diagram

#### 3.2 评价指标

技术接受模型认为,个体对新技术的采纳受到技术信念因素的影响,感知有用性和感知易用性是两个重要的维度<sup>[16]</sup>。感知有用性是学习者使用新技术时,对其提升工作或学习绩效的主观判断;感知易用性则是学习者对该技术是否容易掌握和操作的认知程度。本研究中,感知有用性、感知易用性、持续使用意愿的测量参考了 `Davis`<sup>[17]</sup> 设计的问卷。研究结果显示,相比感知易用性,感知有用性与持续使用意愿的关系更加密切,用户在接受新技术时,首先考虑系统功能与实际成效,其次才会关注操作的难易程度。有用性高于易用性在设计开发系统时不容忽视,以提升用户的持续使用意愿。

满意度是学习者在参与学习活动,个体需求得到满足时所产生的心理感受<sup>[18]</sup>。本研究中的满意度是指学习者使用手柄交互与手势交互进行实验操作后,对实验体验所作出的综合价值评判。满意度的测量参考了 `Mckinney` 等<sup>[19]</sup> 设计的问卷。

#### 3.3 实验结果

调查问卷结果显示,手柄交互在感知有用性、感知易用性、持续使用意愿与满意度上的评分均值分别为 4.27、3.85、4.27、4.11;手势交互在相应评价

指标上的评分均值分别为 3.91、4.16、3.93 和 4.23。手柄交互和手势交互评价指标得分如图 11 所示。

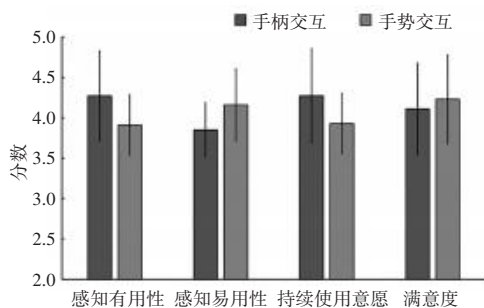


图 11 评价指标得分对比

Fig. 11 Comparison of evaluation index scores

实验结果显示,手柄交互组的感知有用性高于手势交互组,表明手柄交互在促进学习者掌握实验知识和提高实验操作效率方面具备显著优势。该优势主要来源于头戴式虚拟现实设备的灯塔定位系统,能够实现高精度的空间定位与稳定追踪,保障了虚拟实验中交互操作的准确性。Leap Motion 作为一种便捷的手势交互设备,受限于双目立体视觉的工作原理,其识别范围相对较小。在虚拟环境中,当虚拟手超出识别区域时,手势识别的准确性和效率会有所降低<sup>[20]</sup>。在实验环境中进行抓取操作时,由于虚拟手模型关节较多,与物体的碰撞检测匹配精度不足,常出现接触却未能触发交互的情况,导致抓取失败率较高。访谈结果也印证了上述问题,学习者普遍认为手势交互的识别精度不足,需要多次操作才能完成实验任务。

手柄交互组的感知易用性得分低于手势交互组。由于手势交互无须额外的硬件设备,学习者可直接通过裸手进行操作,相较于手柄交互更为便捷。学习者能够将现实世界中的操作经验迁移至虚拟环境,更容易掌握手势交互的使用方法。访谈结果表明,学习者认为手势交互的操作方法更直观,能够在短时间内掌握。

手柄交互组的持续使用意愿高于手势交互组,表明学习者更愿意长期采用并推荐手柄交互。尽管手柄交互的感知易用性不及手势交互,但其感知有用性更高,在实验操作中具有更强的实用性和任务完成效率,从而获得更高的持续使用意愿。可见在虚拟仿真实验领域,学习者体验不同交互方式时,更加关注其实用价值与操作成效。这一发现与技术接受模型的结论一致,即感知有用性是影响学习者持续使用意愿的主要因素。

在满意度方面,手柄交互组的满意度虽然略低于手势交互组,但两组均超过 4 分。整体上,学习者给出的综合价值评价接近,无论是手柄交互还是手势交互,都能为学习者提供良好的操作体验。

## 4 结束语

本文构建了基于 VR 技术的沉浸式化学虚拟仿真实验系统,学习者能够通过手柄交互完成虚拟实验操作,获得安全、直观的实验体验。手柄交互不仅能为学习者提供良好的操作体验,还具有更强的实用性和持续使用意愿,展现出较高的适用性与推广价值。随着 VR 技术的发展,交互方式正逐渐向更加真实与自然的方向演进。然而从现阶段来看,手柄交互凭借其稳定性与可靠性,能为学习者提供高效的虚拟仿真实验体验。后续可通过简化操作流程、优化交互隐喻等方法,进一步提高手柄交互的感知易用性,以提升学习者的交互体验。

## 参考文献

- [1] 张风军,戴国忠,彭晓兰. 虚拟现实的人机交互综述[J]. 中国科学:信息科学, 2016, 46(12):1711-1736.
- [2] 杨青,钟书华. 国外“虚拟现实技术发展及演化趋势”研究综述[J]. 自然辩证法通讯, 2021, 43(3):97-106.
- [3] 蒋希娜,纪文岩,李圣田,等. 培养共情能力的 VR 教育资源设计与评价[J]. 现代教育技术, 2025, 35(5):129-136.
- [4] 贾晓琪,芦国耀. 基于虚拟现实技术的仿真教学平台的建设——以《计算机组装与维护》为例[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(10):88-91.
- [5] 黄海平. 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[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(11):264-267.
- [6] 张娅婕,陈永当,毛勃越. 基于 VR 的工业机器人运动控制实训系统设计[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(2):96-102.
- [7] 徐锦宁,温超,耿国华,等. 面向文化遗产知识传播的百戏俑 VR 体验系统[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2025, 55(1):85-97.
- [8] 孔勇,杜晓月. 基于虚拟现实技术下的古法造纸技艺构建[J]. 中国造纸, 2025, 44(2):192.
- [9] 张慧琴,李中凯. 近十年我国高校虚拟仿真实验教学研究发展述评[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(8):77-82.
- [10] 吴昊桢,袁艺标. 从异化到回归:虚拟仿真实验教学中工具理性与价值理性的辩证重构[J]. 中国电化教育, 2025, 44(6):80-86.
- [11] 房川琳,李俊玲,熊庆. 化学虚拟仿真实验教学中心的建设与发展[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(11):155-159.
- [12] 李文昊,钱莉,王小寒. 沉浸式虚拟现实中加入触觉反馈对学习效果的影响:来自消防安全教育的证据[J]. 现代远程教育研究, 2024, 36(5):92-102.
- [13] 胡翰林,刘革平. 从多态表征到置身参与:虚拟现实技术助力学科教学的价值路径[J]. 电化教育研究, 2022, 43(1):79-85.
- [14] 牛亚峰,王以俨,黄炜驰,等. 基于设计工效学的眼控交互范式设计研究现状与进展[J]. 包装工程, 2025, 46(4):20-35.

- [15]倪栋. 基于 Leap Motion 手势交互技术的博物馆数字展示应用研究[J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2024, 8(4):37-45.
- [16]李佳, 姚翔翔. 基于扩展技术接受模型的博物馆 VR 展览用户体验研究[J]. 包装工程, 2025, 46(4):250-261.
- [17]DAVIS F D. Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology [J]. MIS Quarterly, 1989, 13(3): 319-340.
- [18]阮艳雯, 施雨荷, 顾力文, 等. 人机交互感知对虚拟试衣体验满意度的影响[J]. 丝绸, 2023, 60(5):87-96.
- [19]MCKINNEY V, YOON K, ZAHEDI F M. The measurement of web - customer satisfaction: an expectation and disconfirmation approach[J]. Information Systems Research, 2002, 13(3): 296-315.
- [20]CUI J, FELLNER D W, KUIJPER A, et al. Mid-air gestures for virtual modeling with leap motion [ C ]//Proceedings of the International Conference on Distributed, Ambient, and Pervasive Interactions. Cham: Springer , 2016:221-230.