

分类号 _____

学号 M201670706 _____

学校代码 10487 _____

密级 _____

華中科技大學

硕士学位论文

基于 Unity3D 的测控类虚拟仿真实验 技术研究

学位申请人： 阚研

学科专业： 机械工程

指导教师： 何岭松

答辩日期： 2019 年 5 月

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering**

**Research on Virtual Simulation Experiment
Technology of Measurement and Control Based on
Unity3D**

Candidate : Kanan

Major : Mechanical Engineering

Supervisor : Prof. He Lingsong

Huazhong University of Science & Technology

Wuhan 430074, P. R. China

May, 201

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：胡研

日期：2019年5月20日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本论文属于 ☐ 保密，☒ 不保密。在 _____ 年解密后适用本授权书。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：胡研

日期：2019年5月20日

指导教师签名：[Signature]

日期：2019年5月20日

摘 要

三维虚拟现实漫游仿真和虚拟仪器实验过程仿真是目前的两种主要仿真手段，前者能够很好的模拟真实的实验场景，后者则能更好的仿真实验的细节。本文针对测控类虚拟仿真实验的需求和特点，提出了一种 Unity3D+虚拟仪器的虚拟仿真实验方法，用 Unity3D 来展现大的虚拟实验场景和环境，用虚拟仪器来展现测控实验的细节和接入外部传感器等信息，实现虚实结合的虚拟仿真实验，论文的主要工作如下：

首先，本文基于 ECS 架构，提出了一种 Unity3D 下虚拟仪器的扩展方法，可以在 Unity3D 平台上对构件进行动态装配。

然后本文设计了虚拟仪器构件的显示方法，交互方法，通讯机制。虚拟仪器的显示部分，本文设计了一种多图层叠加的二维曲线绘制方法和基于树状节点结构的三维模型显示方法。虚拟仪器交互部分，本文设计了事件-监听-响应模型来实现用户和虚拟仪器交互。虚拟仪器通讯部分，本文提出一种基于事件中心的发布-订阅机制，实现虚拟仪器构件间的联动。并且在此基础上，本文设计了分析类、显示类、操作类、硬件类等多种不同功能的虚拟仪器构件。

此外，本文还搭建了虚拟现实环境，主要包括华中科技大学机械大楼和虚拟实验室内部环境。我们基于多重融合的纹理映射技术丰富虚拟现实场景的表面细节，并基于延迟渲染对传统的光照模型进行了优化，最终搭建了一个具有很强真实感、沉浸感的虚拟现实环境。并且在此基础上，添加了用户交互，实现了虚拟场景中的虚拟漫游功能。

最后，本文在 Unity3D 中对构件进行动态装配，搭建完整的虚拟仿真实验，并将根据实际需求将虚拟仿真实验发布在网页端或安卓端。

为了实际证明本文提出的方法的有效性，本文针对《机械工程技术》和《工程测试技术基础》这两门课程开发了一定数量且种类不同的虚拟仿真实验；同时也结合实际硬件，设计了基于 Arduino 的多传感器测量实验。最终的结果表明，和传统的虚拟

华中科技大学硕士学位论文

仿真实验相比，本文开发虚拟仿真实验具有很好的沉浸感，真实感，可扩展性。

关键词：Unity3D；虚拟仪器；虚拟现实；构件化；动态装配

Abstract

Three-dimensional virtual reality roaming simulation and virtual instrument experiment process simulation are two main simulation methods at present. The former can simulate the real experimental scene very well, while the latter can better simulate the details of the experiment. Aiming at the requirement and characteristics of virtual simulation experiment of measurement and control, this paper proposes a virtual simulation experiment method of Unity3D+virtual instrument. Unity3D is used to show the large virtual experiment scene and environment, virtual instrument is used to show the details of measurement and control experiment and to access the information of external sensors, so as to realize virtual simulation experiment of combining virtual with real. The main work of this paper is as follows.

Firstly, based on ECS architecture, this paper proposes an extension method of virtual instrument under Unity3D, which can dynamically assemble components on Unity3D platform.

Then this paper designs the display method, interaction method and communication mechanism of virtual instrument components. In the display part of virtual instrument, we propose a two-dimensional curve drawing method based on multi-layer overlay and a three-dimensional model display method based on tree node structure. In the interactive part of virtual instrument, we design an event-monitoring-response model to realize the interaction between users and virtual instrument. In the communication part of virtual instrument, we propose a publish-subscribe mechanism based on event center to realize the linkage between components of virtual instrument. On this basis, we design the virtual instrument components with different functions, such as analysis category, display category, operation category, hardware category and so on.

In addition, we have built a virtual reality environment, including the mechanical building of Huazhong University of Science and Technology and the internal environment of the virtual

laboratory. We enrich the surface details of virtual reality scene based on multi-fusion texture mapping technology, optimize the traditional lighting model based on delay rendering, and finally build a virtual reality environment with strong sense of reality and immersion. On this basis, we add user interaction to realize the virtual roaming function in the virtual scene.

Finally, we assemble the components dynamically in Unity3D, build a complete virtual simulation experiment, and publish the virtual simulation experiment on the web or Android side according to the actual needs.

In order to prove the validity of the proposed method, we have developed a number of different virtual simulation experiments for the two courses of Mechanical Engineering Control Technology and Engineering Testing Technology Basis. At the same time, we have designed a multi-sensor measurement experiment based on Arduino combined with the actual hardware. The final results show that, compared with the traditional virtual simulation experiment, the virtual simulation experiment developed in this paper has good immersion, reality and scalability.

Keywords: Unity3D; Virtual Instrument; Virtual Reality; Componentization; Dynamic Assembly

目 录

摘 要	I
Abstract.....	III
1 绪论	1
1.1 课题概述	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本文的主要研究工作及文章组织结构	8
2 基于 Unity3D 测控类虚拟仿真实验整体架构	10
2.1 测控类虚拟仿真实验需求分析	10
2.2 基于 Unity3D 的测控类虚拟仿真实验架构	12
2.3 Unity3D 下的虚拟仪器整体架构	14
2.4 本文需解决的主要技术问题	16
2.5 本章小结	17
3 Unity3D 下虚拟仪器的构件化设计	18
3.1 虚拟仪器构件模型	18
3.2 虚拟仪器构件显示设计	19
3.3 虚拟仪器构件交互设计	23
3.4 虚拟仪器构件间数据流和通信机制	29
3.5 虚拟仪器构件开发流程	32
3.6 本章小结	33
4 虚拟现实场景搭建及构件装配	34
4.1 虚拟现实场景搭建	34
4.2 虚拟仪器的图形化编程装配	41
4.3 本章小结	42
5 开发应用实例	44

华中科技大学硕士学位论文

5.1 虚拟仿真实验的发布	44
5.2 应用实例	46
5.3 本章小结	54
6 总结与展望	55
6.1 全文总结	55
6.2 工作展望	55
参考文献	57
致 谢	61
附录 1 攻读学位期间取得的科研成果	62
发表学术论文	62

1 绪论

1.1 课题概述

1.1.1 课题来源

课题来源于“国家级机械学科虚拟仿真中心项目”。

1.1.2 课题背景

(1) 实验教学的重要性及面临的问题

实验教学在现代高校教育中重要的一环，实验教育可以将书本上的理论知识和实践结合起来，不仅可以巩固学生对理论知识的理解，还可以培养学生的动手能力。实验教学和传统的理论教学相辅相成，如果说理论教学让学生形成了较为完备的知识体系，那么实验教学就是学生对理论成果的感性认识。这种认识不仅可以激发学生的学习兴趣，增强学生对知识的探索欲望，还可以培养学生观察能力、分析能力、归纳总结能力。实验教学教会学生以一种严谨态度、科学的体系来认识周围的世界，对培养学生的科研能力、创新能力都有着不可估量的影响。

但现如今高校的实验教学却存在一些不足，主要表现为（1）实验资源短缺，许多高校由于经费有限，没有能力购买、维护昂贵的实验设备，造成大量实验无法开展。（2）时间和空间限制，传统实验教学受时间、地点的制约，学生没法根据自己的意愿，自由地选择参与实验。（3）部分实验操作复杂，具有一定的危险性。一些实验由于操作步骤繁琐，但课堂时间有限，学生不能很好地参与其中。同时一些实验还具有一定的危险性，操作失误可能会引发学生受伤等危险后果。

(2) 传统虚拟仿真实验的不足

虚拟仿真实验的出现打破了传统实验教学时间和空间上的限制，能较好的解决传统实验教学的诸多不足。虚拟仿真实验是指利用计算机技术、多媒体技术将现实场景的实验设备和环境展示在电脑设备或移动设备上，让学生在计算机上操作实验仪器，观察实验现象，记录实验结果。传统的虚拟仿真实验大致分为两种，一种是虚拟漫游仿

真，侧重于对实验环境的展现，具有较强的沉浸感。另一种是实验过程仿真，侧重于对实验操作步骤的展现，可以较好地模拟实验细节。这两种方式都没法很好的还原真实实验的体验，前者缺乏实验细节，后者缺乏实验的沉浸感。因此我们迫切需要将这两种实验方式的优点结合起来，创建交互性更好，沉浸感更强的虚拟仿真实验。

同时传统的虚拟仿真实验往往是一个整体，当实验需求发生改变时，只能重新编写整个虚拟实验系统，实验开发周期长，难度大，难以维护和扩展。我们可以借鉴工业生产线上快速组装的概念，将实验仪器构件化、模块化。当实验需求发生改变时，我们只需要选择特定的虚拟仪器构件，再将其动态组装起来，就可以满足不同的实验内容。这种思想和传统的虚拟仿真实验技术相比，开发周期短，灵活性高。

1.1.3 课题的目的和意义

本课题主要是针对传统虚拟仿真实验的不足，将虚拟仪器和虚拟现实技术结合起来，在 Unity3D 平台上实现具有很强沉浸感、可动态重构的测控类虚拟仿真实验。

本文针对测控类虚拟仿真实验的需求和特点，提出了一种 Unity3D+虚拟仪器的虚拟仿真实验方法，用 Unity3D 来展现大的虚拟实验场景和环境，用虚拟仪器来展现测控实验的细节，同时结合传感器等硬件，实现了不同种类的测控类虚拟仿真实验。

1.2 国内外研究现状

本文主要工作是将虚拟现实和虚拟仪器技术结合起来，搭建具有很高交互性、沉浸感、扩展性的虚拟仿真实验。本文主要涉及到两大关键技术，一个是虚拟现实技术，另一个是虚拟仪器技术，下面我们简要介绍了虚拟现实技术、虚拟仪器技术的发展和国内外现状。

1.2.1 虚拟现实技术概述及发展

虚拟现实技术（Virtual Reality, VR）是利用计算机和多媒体技术产生逼真的视觉、听觉、触觉等三维感觉环境，模拟真实的周边环境^[1]。1989 年，Jams 教授首先提出 VR 这一概念，并指出了虚拟现实的关键元素^[2]。虚拟现实技术具有三大本质特征，沉浸感。

交互性、构想性^[3]。其中沉浸感是指“人”作为主体在虚拟现实场景中产生的“真实感”，交互性是只虚拟现实系统能够提供人和虚拟环境中的物体交互感知。构想性是指虚拟现实为参与者提供了广阔的想象空间。

美国是最早开展 VR 技术研究的国家，1980 年，NASA 的 Ames 实验室就开发了虚拟的环境工作展，遥控太空机器人进行精细作业^[4]。但虚拟现实的初期，人们往往只是利用计算机设备进行简单的环境模拟，桌面电脑只是承担了一个窗口的作用，这种 VR 系统称为桌面式 VR 系统。之后随着信息技术的发展，又涌现出沉浸式 VR 系统^[5]，沉浸式 VR 系统将第一次软件和硬件设备结合起来，用户通过佩戴数字手套、VR 眼镜模拟现实环境中的视觉、触觉等，构架了一个完全虚拟、生动逼真的虚拟环境。21 世纪后，增强现实式 VR 系统^[6]又突破性地将虚拟环境和现实环境叠加，进一步加强了虚拟现实环境的真实感。分布式 VR 系统^[7]将不同的用户利用互联网连接起来，共同参与一个虚拟现实环境，又将 VR 技术的发展上升到了一个新的高度。

虚拟现实技术在各个领域都有着非常广阔的应用。德国、美国最早将虚拟现实技术应用在军事、航空航天等专业领域^[8-10]。1994 年，英国皇家医院成立了第一个虚拟现实研发中心，将虚拟现实技术用于医学领域^[11]。Parong 等学者将沉浸式虚拟现实技术应用于大学课堂教学，取得了良好的效果^[12]。国内北京邮电大学，浙江大学，武汉大学都基于虚拟现实技术搭建了虚拟校园，用户可以远程访问网络，在虚拟现实场景中体验全景虚拟漫游^[13-14]。哈尔滨工业大学将虚拟现实技术和机器人技术结合，增强学生对机器人理论的认识^[15]。图 1-1 展示了浙江大学的三维虚拟校园。



图 1-1 浙江大学的三维虚拟校园

1.2.2 虚拟仪器技术概述及发展

20 世纪 80 年代初, NI (美国国家仪器) 率先提出了虚拟仪器的概念。虚拟仪器 (Virtual instrument) 是指通过应用程序将功能化模块和计算机结合起来, 使原来需要各种硬件完成的测量系统尽可能地软件化^[16]。计算机强大的图形环境和虚拟仪器功能模块可以帮助用户完成对仪器的控制、数据分析、存储、和显示。

目前虚拟仪器软件开发技术主要分为两类, 一类是基于图形化语言的软件开发环境, 典型的例子就是美国仪器公司的 LabVIEW。和传统的文本编程方式不同, LabVIEW 用可视化的框图来编写程序, 界面友好, 操作简单, 大大降低了开发难度, 缩短了开发周期。但缺点是开放性差, 基于 LabVIEW 开发的虚拟仪器具有很强的平台依赖性, 难以扩展。另一类虚拟仪器基于文本语言开发环境, 例如美国仪器公司的 Measurement Studio 和美国 Dundas 公司的 Gauge for.NET。其优点是可以充分发挥文本语言的优势, 将虚拟仪器部分作为扩展构件添加到开发环境中, 便于开发集虚拟仪器功能、数据库功能、网络功能为一体的综合系统。

2001 年, Waller 等人^[17]将虚拟仪器应用到实验教学中。他们针对了气相色谱 - 质谱仪开发了虚拟软件并发布在万维网上, 学生可以通过网络使用该软件, 进行相应的

实验并采集数据。同年, Salzamann 等人^[18]基于 Lab VIEW 开发了机械手的远程实时监控系 统, 系统采用 C/S (Client/server, 服务端/客户端) 架构, 用户可以在客户端的软件界面控制远端的机械手, 也可以采集机械手的实时运动数据。虚拟仪器技术打破了空间和时间地限制, 极大地方便了实验教学工作。

此外, 虚拟仪器还被应用于生物、医疗、语音合成、扫描成像等多个领域^[19-22]。

2005 年, 华中科技大学的何岭松教授^[23]提出了一种可重构的虚拟仪器系统 (Dynamic Reconfigurable Virtual Instrument, DRVI), 采用 COM (Component Object Model) 技术, 将虚拟仪器设计成一个个虚拟仪器构件, 用软总线将虚拟仪器装配起来, 从而满足不同的测试需求。2016 年, 田航^[24]在此基础上, 实现了一种手机虚拟仪器平台, 用户只需要安装一个虚拟仪器应用, 就可以在移动设备上实现各种测量实验。

此外众多国内的学者也为虚拟仪器的发展做出了巨大贡献: 重庆大学秦树人教授等提出了基于秦氏模型智能化虚拟仪器, 为新一代虚拟仪器发展提供了新思路^[25]。

1.2.3 虚拟仿真实验国内外现状

虚拟实验仿真作为一种新的实验教学方式, 受到越来越多的人的关注和探索。所谓虚拟实验, 是通过运用计算机仿真技术、多媒体技术以及网络技术, 在计算机或移动设备上搭建虚拟实验环境, 供学生参与实验过程^[26]。1988 年, 麻省理工大学开发了 Web Lab 远程虚拟实验室^[27], 从此人们对虚拟仿真实验展开了孜孜不倦的探索, 虚拟仿真实验的研究大概可以分为以下三类:

(1) 基于实验原理, 侧重实验过程的仿真

2013 年, 瑞典理工学院基于虚拟仪器开发了电子电路测量的远程实验室 (VISIR, Virtual Instrument Systems in Reality), 如图 1-2 所示, 该实验室集成了 12 种最常用的实验室仪器 (示波器、数字万用表、函数发生器、电源、动态信号分析仪、波特分析仪、二线和三线电流电压分析仪、任意波形发生器, 数字阅读器和阻抗分析。所有这些虚拟仪器都完全由 LabVIEW 软件控制, 用户可以在线搭建电路完成测量实验, 具有很强的实用性^[28]。Jensen 等基于 LabVIEW 开发一个电化学显微镜实验, 可以有效地模拟和分析扫描电学显微镜的探针接近曲线数据^[29]。浙江大学基于 C/S 框架, 建立了一个电

工电子网络虚拟实验室，学生可以通过该网络虚拟实验室学习相关电路原理^[30]。2018年，太原理工大学基于 HTML5 开发了物理化学实验室，设计了常用的物理化学类虚拟仪器功能，模拟了实际实验的操作流程，并配套了实验评测系统^[31]。

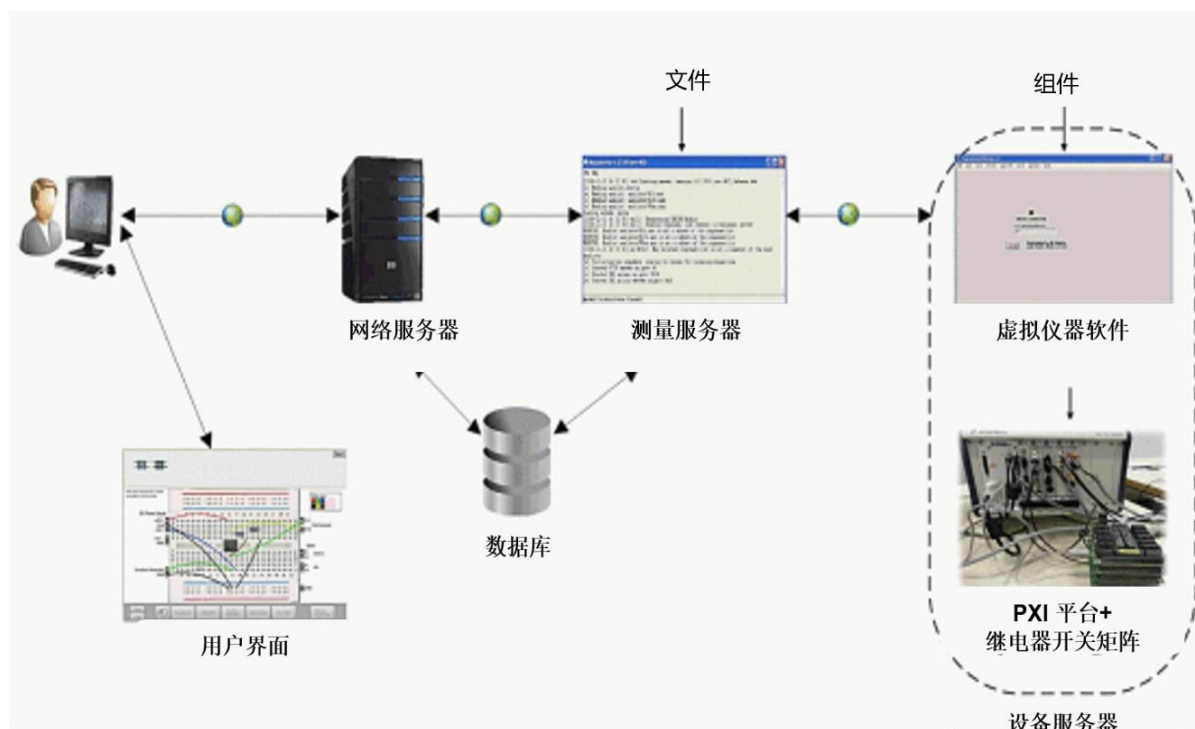


图 1-2 电子电路测量的远程实验室

这些实验虽然可以很好地帮助用户学习相关实验原理，但仍然存在交互性差的不足，缺少对实验环境的展示，用户难以获得虚拟情境带来的真实感和沉浸感。

（2） 基于虚拟现实场景，侧重于实验场景的真实感、沉浸感。

随着虚拟现实技术不断发展，越来越多的学者和研究人员也将虚拟现实引入到虚拟仿真领域。2001 年，kim 等人^[32]建立了一套虚拟现实物理模拟（VRPS）教育工具，它将实际设备的 3D 模型和物理情境的虚拟可视化以交互方式汇集在一起。VRPS 通过提供虚拟现实场景创造一个感官丰富的互动学习环境，帮助学生在高中或大学物理水平上学习物理概念，如波传播，射线光学，相对速度，电机等。2003 年，瑞典隆德大学利用 Flash 技术开发了虚拟生物化学实验室，引入了实验场景和虚拟人物。用户可以在虚拟的环境下完成实验过程^[33]。

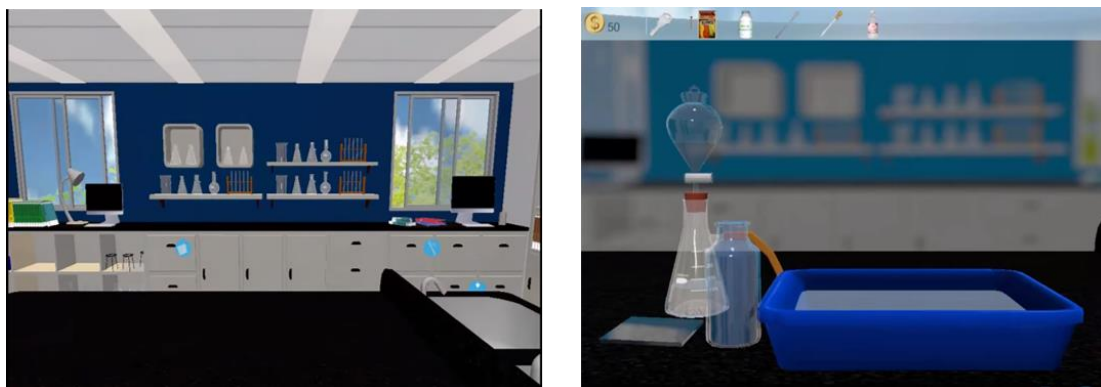


图 1-3 虚拟化学实验室布局及化学仪器

2017 年, Ouyang 等人^[33]开发了一个基于 Unity3D 的交互式化学工程三维虚拟仿真平台, 旨在帮助化学工程专业的学生进行生产实践。该系统在环境中重现了真实的化工厂部分, 并为用户提供两种演练模式, 演示了一些主要设备的结构和工作原理, 以及设置一些主要泵和阀门的操作功能, 以加强学生对危险的化工操作和训练的理解, 培养学生的实践能力。

国内也有很多高校基于虚拟现实场景建立了网络虚拟实验室, 如电子科技大学, 浙江大学, 华中科技大学等^[3-37]。

从以上描述不难看出, 这类实验通过搭建虚拟现实场景, 使虚拟仿真实验的真实性、沉浸感大大加强。但部分实验由于技术选择陈旧, 搭建的虚拟现实环境过于粗糙; 部分虚拟校园平台则忽视了实验细节, 仅仅是实现了三维虚拟校园的漫游效果和实验设备的静态展示, 没能很好的加入各类可交互的虚拟仿真实验。更重要的是, 这些虚拟实验室都是作为一个整体进行开发, 这无疑增加了后续维护和扩展的难度。

(3) 可重构的虚拟仿真实验

华中科技大学的何岭松教授提出了一种可重构的虚拟仪器技术, 并在 Windows 下系统下实现了 DRVI 虚拟实验平台, 应用于大学本科实验教学中。之后, 许多学者围绕可重构虚拟仪器技术又进行了进一步的拓展。主要包括, 2016 年田航开发的手机虚拟仪器浏览器平台, 在安卓平台, 将实验中的虚拟仪器构件化, 通过导入 XML 脚本搭建不同功能的虚拟实验; 2017 年杜建豪等^[38]基于 HTML5 开发无插件的机械类虚拟实验平台, 可以通过图形化装配、文本式装配、脚本语言装配三种方式搭建不同的虚拟仿真实验。

这些虚拟实验的最大特点就是随着需求的变化，开发者无需重新开发整个系统，而是根据已经开发好的虚拟仪器构件库，动态重构虚拟仿真实验。

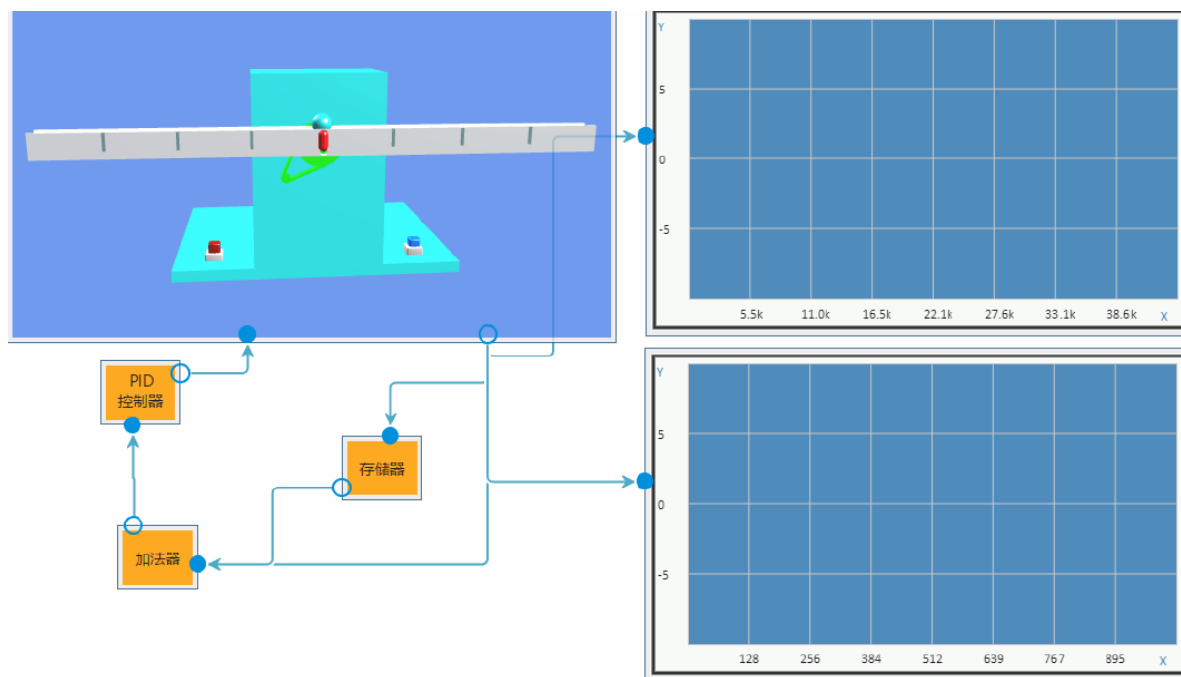


图 1-4 基于 HTML5 的可重构虚拟实验

此外，在基于 Unity3D 的虚拟仿真实验方面，国内外学者也进行了诸多探索。华中科技大学李先成等基于 Unity3D 进行了车间装配仿真^[39]；中南大学基于 Unity3D 开发了光谱分析实验，但仍然存在场景真实性差、功能单一等不足^[40]。

1.3 本文的主要研究工作及文章组织结构

本文总结了传统虚拟仿真实验的一些不足，结合虚拟现实技术和虚拟仪器技术，在 Unity3D 平台上，搭建了虚拟现实场景，设计并实现了构件化的虚拟仪器模型。最终我们将虚拟仪器构件引入了虚拟现实场景，搭建了种类丰富的虚拟实验。通过应用实例的展示，证明了本文方法的可行性，最终搭建的虚拟仿真实验具有很强的沉浸感。交互性。本文的主要工作包括：

- (1) 基于 ECS（实体-组件-系统）架构，提出了 Unity3D 下虚拟仪器的扩展方法，可以将传统的虚拟仪器构件化，并添加到虚拟现实场景中；
- (2) 基于事件-监听-响应模型，为虚拟仪器构件设计了统一的交互方法；

(3) 设计了虚拟仪器间的数据流动接口和通讯模式, 实现了虚拟仪器构件间的通信和联动。

(4) 在 Unity3D 平台上, 基于延迟渲染的光照模型和多重纹理融合的纹理映射技术, 搭建并渲染了华中科技大学机械大楼、虚拟实验室内部环境等场景;

(5) 在 Unity3D 平台上, 将虚拟仪器构件引入虚拟现实环境中, 基于已经开发好的虚拟仪器构件, 实现多个机械类的虚拟仿真实验, 验证了本文提出的方法的可行性。

根据以上研究内容, 本文的组织结构如下:

第一章: 叙述了本课题的研究背景, 探讨了课题的研究意义, 介绍了虚拟现实技术和虚拟仪器技术的发展概况和虚拟仿真实验的国内外研究现状;

第二章: 首先介绍了 Unity3D 开发平台, 然后介绍了基于 Unity3D 的虚拟仿真实验的整体架构和 Unity3D 下虚拟仪器整体架构。最后, 分析了实现过程中的主要技术难点;

第三章: 设计一种构件化的虚拟仪器模型, 设计并实现了了构件的显示、交互、事件通信机制, 并据此实现了众多不同功能的虚拟仪器构件;

第四章: 搭建了华中科技大学机械大楼以及虚拟仿真实验室模型, 并对光照模型和传统的纹理映射技术提出了优化方法, 并基于此渲染出具有强真实感的虚拟现实场景。最后将虚拟仪器引入虚拟现实场景并实现动态装配;

第五章: 介绍了虚拟实验发布到网页端和安卓端的具体方法, 针对《机械工程控制技术》和《工程测试技术基础》这两门课程开发了一定数量且种类不同的虚拟仿真实验, 同时结合硬件搭建了基于 Arduino 的多传感器测量试验。最终的结果表明, 和传统的虚拟仿真实验相比, 本文搭建的虚拟仿真实验具有很好的沉浸感, 真实感, 具有一定的通用性和专业性;

第六章: 对全文工作出了总结, 指出了当前工作的不足, 展望更进一步的研究方向。

2 基于 Unity3D 测控类虚拟仿真实验整体架构

本章主要提出了基于 Unity3D 的虚拟仿真实验的整体架构和 Unity3D 下虚拟仪器的整体架构。Unity3D 是一款优秀的游戏引擎，具有众多优秀的特性。我们在 Unity3D 的平台上实现虚拟仪器的扩展，并搭建虚拟现实场景中。虚拟仪器的开发的过程遵循了 ECS（实体-组件-系统）架构。

2.1 测控类虚拟仿真实验需求分析

2.1.1 测控类虚拟仿真实验特点

测控是测试测量与控制的简称。测控类系列课程涉及大量的学科交叉的知识，主要包括信号的分析 and 处理、传感器技术、自动控制技术、工程测试技术。

测控类的虚拟仿真实验主要从测控类课程的实际需求出发，根据经典的控制模型开发出各类可操作的仪器仪表。用户可以操作仪器仪表并调节控制参数维护系统的稳定性。仿真实验主要分为仪器设备和数据结果两部分，仪器设备通过三维建模显示在场景中，实验数据会动态展现在二维的图表上。整个实验过程主要包括传感器信号的采集、信号的处理和分析、系统的控制和反馈控制等一系列知识，具有很强的专业性。

图 2-1 展示了测控类系列课程。

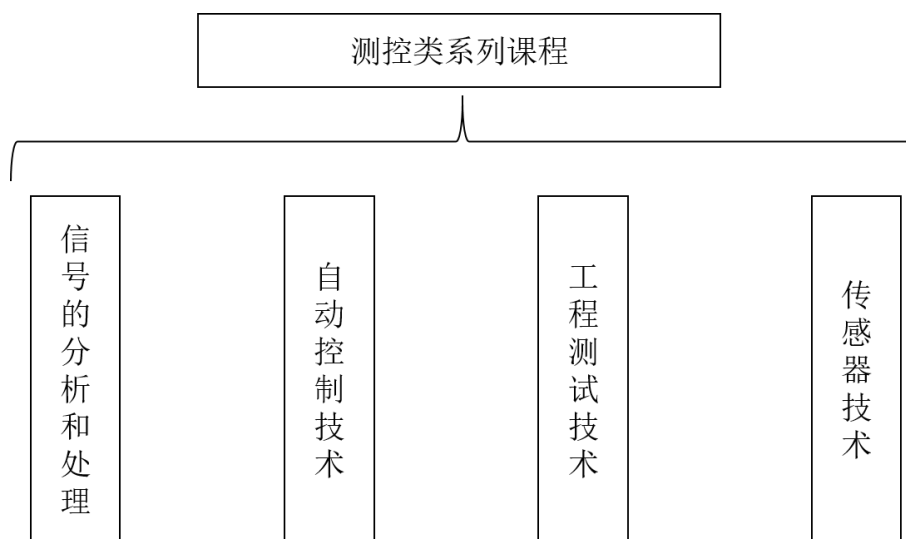


图 2-1 测控类系列课程

2.1.2 基于 Unity3D 的技术方案

Unity3D 是由一家丹麦公司开发的多集成平台 2D/3D 游戏引擎。除了可以用于开发电子游戏，它还可以轻松地实现模型可视化，实时三维动画和交互。Unity 作为一个游戏开发平台，具有层级化的综合开发环境，可视化的编辑页面。开发者可以直接拖动场景中的对象以及动态配置对象属性。同时，Unity3D 支持多种格式的 2D/3D 资源导入。主流的三维软件诸如 3Ds Max、Maya、SolidWorks 等都可以有效地创建项目所需的物理模型并直接导入 Unity3D。更重要的是，Unity3D 使用了 CIL（Common Intermediate Language 通用中间语言）的一种代码指令集，对代码的动态交叉编译使其具有跨平台开发的能力，用 Unity3D 开发的项目或游戏，不仅可以运行在传统的 Windows、MacOs 等平台，更可以用于 iOS、Android 等移动设备，同时也支持基于 WebGL 技术的 HTML5 网页平台。Unity3D 真正做到了打破平台和终端设备的限制，开发者可以根据项目需求，灵活方便地将项目发布在不同的平台上^[41-42]。

从上述描述可以看出，Unity3D 在开发虚拟仿真实验方面也具有巨大的优势。但对于测控类实验的开发来说，还需要满足以下几点需求：

- （1）专业适配性：测控类虚拟仿真实验既包括对专业设备的操作，也包括对实验结果的记录，和游戏的开发过程有较大的差异。开发过程中需要保证虚拟仿真实验的专业性，为用户提供一个专业的虚拟仿真实验平台。
- （2）开发效率：一般虚拟仿真实验都是作为一个整体开发，开发周期长，不利于后期的维护更新。
- （3）真实性和沉浸感：传统的虚拟仿真实验大多都存在沉浸感不足的缺陷，我们需要在 Unity3D 平台基础上，优化纹理和光照效果，开发出具有很强真实感和沉浸感的虚拟仿真实验。

如图 2-2 所示，为了满足测控类虚拟仿真实验的需求，我们在利用 Unity3D 优势的基础上，还需要在 Unity3D 环境下扩展专业的虚拟仪器构件，优化纹理、光照模型。从而提升开发效率，增强专业适配性以及虚拟仿真实验的真实感。

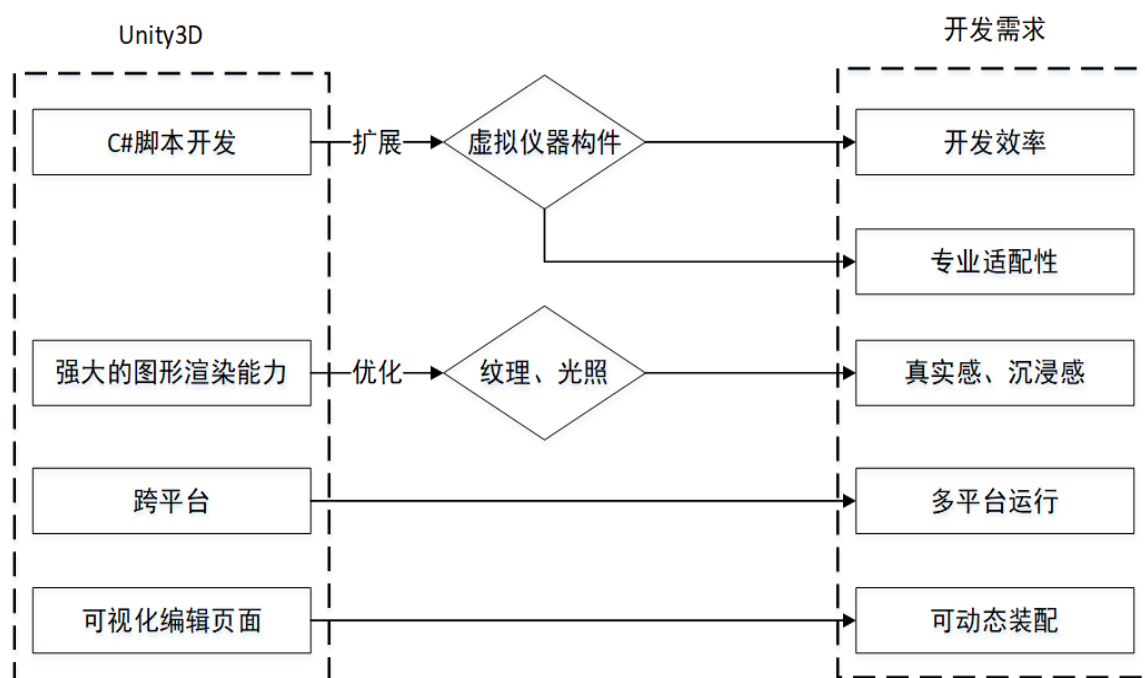


图 2-2 平台需求目标分析及解决方案

2.2 基于 Unity3D 的测控类虚拟仿真实验架构

虚拟仿真实验主要分为实验过程仿真和虚拟漫游仿真，前者可以模拟实验的操作过程，后者可以展现真实的实验场景。本文将这两种方法结合起来，通过在开发构件化的虚拟仪器模型，并将其引入虚拟现实场景中，从而开发出具有很强沉浸感、交互性、可扩展的网络虚拟仿真实验。

图 2-3 展示了本文设计的虚拟仿真实验的整体架构。主要分为三层，分别是应用层、仿真层、硬件层。应用层主要指发布后的完整的虚拟仿真实验项目，直接面向用户，用户可以进行虚拟现实场景漫游，操作各类虚拟仪器设备，得出并观察实验结果。仿真层是基于 Unity3D 平台搭建的，主要包括虚拟仪器和虚拟现实两部分。我们首先开发构件化的虚拟仪器库，再搭建虚拟现实场景，最后将二者结合起来，实现不同功能的虚拟仿真实验。其中虚拟仪器部分主要包括构件封装、构件通讯、构件装配。虚拟现实部分主要包括场景的构建和交互。硬件层主要是各类传感器通过蓝牙、串口等方式和仿真层中的虚拟设备进行通信，通过传感器采集数据并最终将数据发送到虚拟仪器构件中，构建虚实融合的虚拟仿真实验。

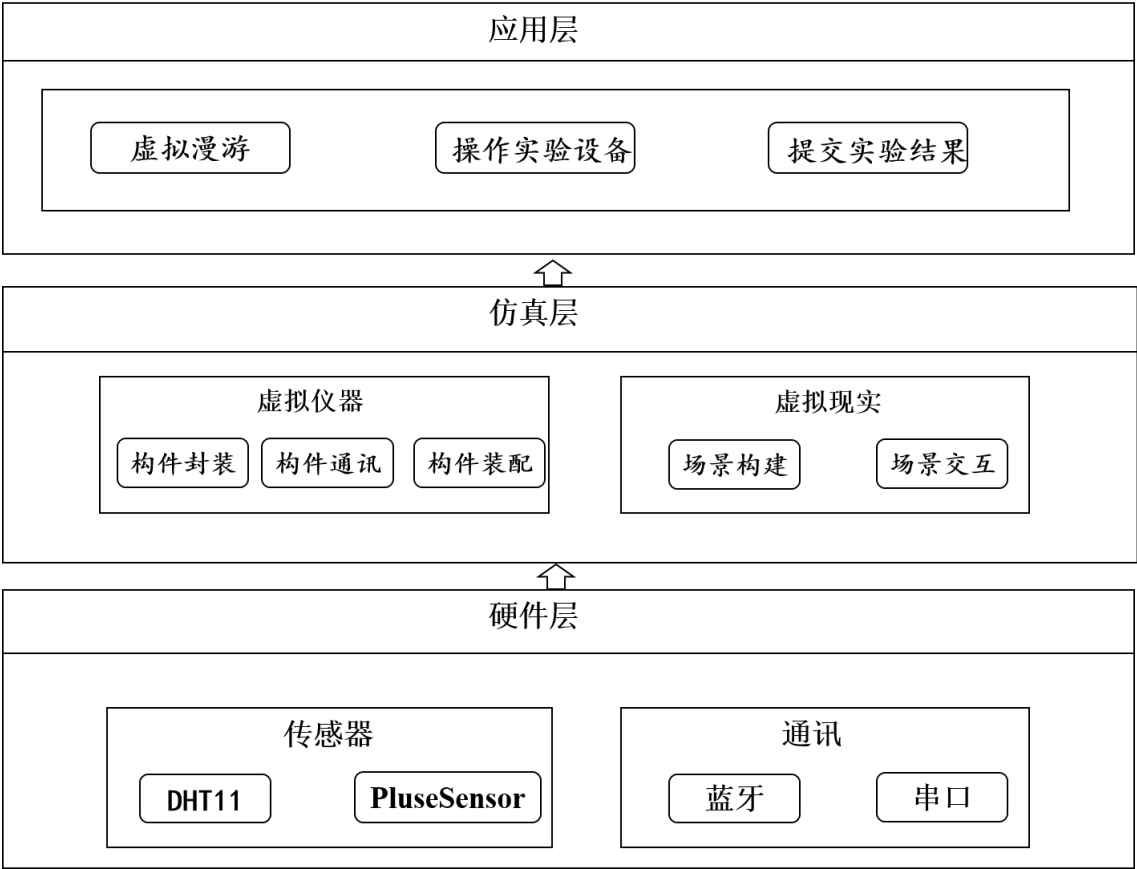


图 2-3 虚拟仿真实验整体架构

图 2-4 展示了在 Unity3D 环境下，将虚拟仪器构件引入虚拟现实场景的过程。我们把虚拟仪器构件封装成 Unity3D 下 Prefab（预制体），再将其保存在 Unity3D 的资源文件目录下。在开发过程中，我们只需要读取资源文件中的虚拟仪器构件，再将其实例化，就能将虚拟仪器构件引入到搭建好的虚拟现实环境中。

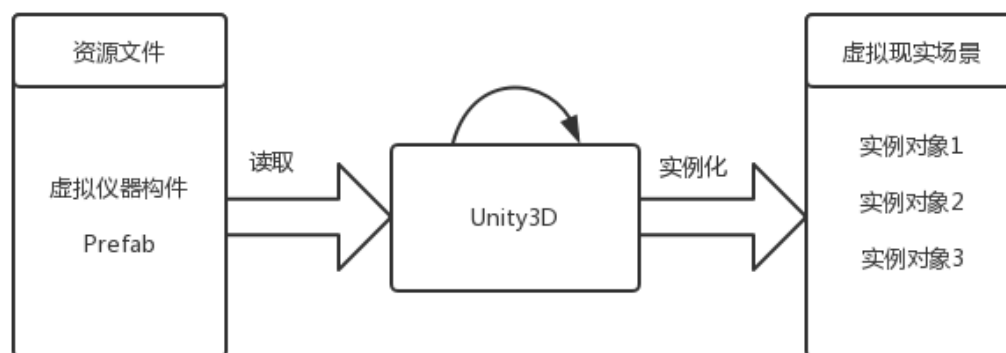
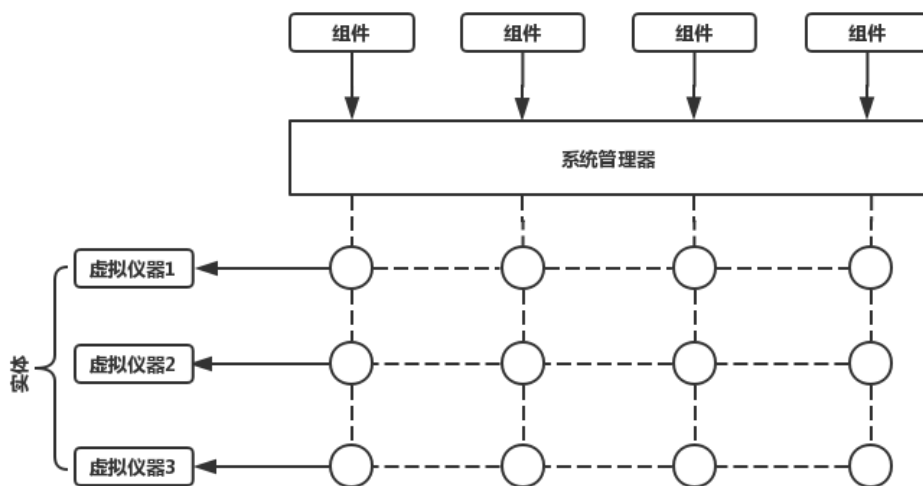


图 2-4 虚拟仪器引入虚拟现实场景

2.3 Unity3D 下的虚拟仪器整体架构

构件化的虚拟仪器本文工作的重要部分，本文针对机械类虚拟实验设计了一定数量不同功能的虚拟仪器构件。主要分为分析类构件、显示类构件、操作类构件、控制类构件。与传统的虚拟仪器不同，构件化的虚拟仪器是将虚拟仪器封装成标准的模块。每一个虚拟仪器提供特定的功能，封装一定的数据和方法，并提供给用户特定的调用接口。虚拟仪器就好像工业生产线上可复用的组装零件，以测量需求为组装蓝图，将所需要的虚拟仪器组装起来。这种思想可以有效提高软件的生产效率、缩短开发周期，降低开发难度。

在虚拟仪器开发过程中，我们使用了基于实体-组件-系统（Entiy-Component-System, ECS）的架构。和传统的面向对象的模型不同，ECS 架构是一种基于组件的开发方式^[43]。其中 Entity 是实例,作为承载组件的载体,也是可以被直接被控制的对象。Component 是实现具体功能的最小单元，可以被绑定到实体上；System 统筹整体架构的逻辑，处理对应的组件执行相关操作。图 2-5 展示了组件、系统、实体的关系。



2-5 Unity 中的 ECS 架构模型

ECS 模式遵循组合优于继承原则，虚拟仿真实验中的每一个虚拟仪器构件都是一个实体，每个实体又由一个或多个组件构成。组件（Component）是 Unity3D 中最核心的一个概念，它是一切编程的基础。在 Unity3D 中，每个组件都包含代表其特性的数据，也可以在组件中实现不同的方法。Unity3D 本身提供基本的引擎基础组件，例如渲染组件、物理组件、声音组件，这些组件实现了引擎提供的基本功能，但远远不能满足开发者的需要，因此我们还需要编写脚本组件，通过脚本实现的一些相对独立的通用模块功能的组件。这些组件都对应独立的类，代表着不同的作用和功能。例如 Transform 组件，就记录了每一个实体（虚拟仪器构件）的位置（Position）、旋转（Rotation）、大小（Scale）等数据。在本文中，虚拟仪器的功能和属性完全取决于其拥有哪些组件，通过动态添加和删除组件，可以改变虚拟仪器的状态和运行时的行为。

本文基于 ECS 架构开发了虚拟仪器构件，再将虚拟仪器构件添加到虚拟现实场景中，这种方式灵活方便，和传统的开发模式相比，具有以下优势：

- (1) 实体通过组合而非继承实现，为虚拟实验中复杂的功能提供了灵活性。
- (2) 数据驱动，在 ECS 模型中，组件储存数据、提供功能，不同的组件组合构成虚拟仪器。
- (3) 实体（即虚拟仪器构件）可以动态添加或者删除组件，便于降低代码的耦合，增强

功能模块的复用。

2.4 本文需解决的主要技术问题

本文主要是基于虚拟仪器和虚拟现实技术,在 Unity3D 平台下进行虚拟仿真实验的研究和探索,主要需要解决的问题如下:

(1) 虚拟仪器模型的显示与交互

要搭建虚拟仿真实验,首先要解决模型的显示和交互。如何建立实验设备模型,如何将模型导入 Unity3D,如何实现模型在场景中的可视化是实现虚拟仿真实验的前提条件。同时我们还要设计模型和用户的交互方法,便于用户能简单方便地操作虚拟仿真实验中的虚拟仪器。

(2) 虚拟仪器的构件化封装

虚拟仪器是虚拟仿真实验中的重要的一部分,是构成虚拟仿真实验的一个个“零件”。构件化的虚拟仪器是将虚拟仪器标准化、模块化,每一个虚拟仪器提供特定的功能,封装一定的数据和方法,并提供给用户特定的调用接口。虚拟仪器就好像工业生产线上可复用的组装零件,以实验功能为组装蓝图,将所需要的虚拟仪器组装起来。

(3) 虚拟仪器构件间的数据流动和通信

虚拟仪器构件需要组合和联动,才能完成复杂的实验需求。我们在定义了虚拟仪器的构件模型后,还需要定义数据传输模型,从而实现在不同构件间的数据传递。数据的传递是通过事件驱动的。我们对传统观察者模式进行了改进,通过建立事件中心将事件转发给不同的虚拟仪器构件,从而实现构件间的通讯。

(4) 虚拟现实场景的搭建

为了进一步增强虚拟仿真实验的沉浸感,我们引入了虚拟现实环境。虚拟现实环境主要包括模型、纹理、光照等基本要素,我们需要不断优化传统光照模型、纹理映射等技术,搭建一个细节生动,具有真实感的虚拟现实环境。最后我们还要在虚拟现实环境中添加交互,实现虚拟漫游功能。

(5) 虚拟仪器在虚拟现实场景中装配

为了将封装好的虚拟仪器构件添加到虚拟现实场景中,首先我们需要实例化封装

好的构件，然后我们需要定义装配的方法。只有确定好装配的规则，才能将一个个独立的虚拟仪器构件联动起来，搭建出种类丰富、交互良好、沉浸感强的虚拟仿真实验。

2.5 本章小结

本章首先介绍了虚拟仿真实验的整体架构，主要分为应用层、仿真层、硬件层。其中仿真层中的虚拟仪器和虚拟现实部分是本文的重点研究对象。本章介绍了将虚拟仪器引入虚拟现实环境中的主要方法。然后，我们提出了 Unity3D 下虚拟仪器的整体架构，主要分为实体、系统、组件三个部分。最后总结了本文主要解决的技术问题。

3 Unity3D 下虚拟仪器的构件化设计

Unity 强大的图形渲染、物理系统等特性使其在开发虚拟仿真实验方面有很大优势，但传统的虚拟仿真实验大多数都是作为一个整体，难以扩展和维护。为此，本文提出基于 Unity3D 下虚拟仪器的扩展方法，将虚拟仪器构件化、模块化，不仅可以实现虚拟仿真实验的动态重构，还可以复用虚拟仪器构件，降低开发难度，缩短开发周期。

3.1 虚拟仪器构件模型

本文基于 ECS 架构，在 Unity3D 中实现可复用的虚拟仪器。虚拟仪器构件被视为 Unity3D 中的一个实体模型，动态添加或者删除 Component 以实现不同的功能。

如图 3-1 所示，对于一个虚拟仪器而言，具有独立的构件属性、功能、端口，属性主要包括显示信息和行为信息，功能则是指虚拟仪器在实验过程中的作用，端口主要负责不同仪器间的数据流动。在 Unity3D 中，我们只需要用 C#编写特定的脚本组件，将这些脚本添加到虚拟仪器上，从而赋予虚拟仪器特定的属性和功能。

值得注意的是，最后我们需要将虚拟仪器构件封装成可复用的 Prefab（预制体）。其中，Prefab 是 Unity3D 中对象及其组件的容器，它作为一种特殊的资源，可以使同一个对象被反复使用^[44]。在本文中，相同的虚拟仪器构件可以通过一个预设体批量创建。

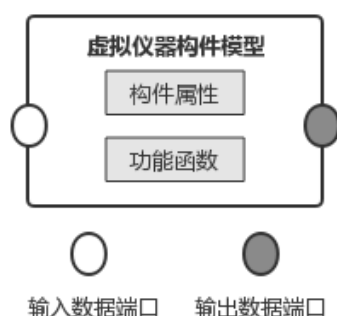


图 3-1 基于 Unity3D 的虚拟仪器模型

构件的设计遵循如下几个原则：

- (1) 可视化：所有虚拟仪器，都在 Unity3D 场景中出现，用户可以直接将虚拟仪器构件拖动到 unity3D 场景中，所见即所得。

- (2) 动态更新：我们为虚拟仪器构件设计了事件-监听-响应模型，虚拟仪器可以实时响应用户的操作并更新自身状态。
- (3) 输入输出接口设计：我们为虚拟仪器设计了数据输入/输出端口，通过数据端口来实现虚拟仪器间数据的流动。

虚拟仪器构件的设计主要需要解决以下几个问题，即虚拟仪器的显示设计、虚拟仪器的交互设计、虚拟仪器间的通信。下面将从这三个方面介绍 Unity3D 下虚拟仪器构件的实现方法，并给出虚拟仪器构件的开发流程。

3.2 虚拟仪器构件显示设计

在基于 Unity3D 的虚拟仿真实验中，为了实现将构件添加的虚拟现实场景中，首先解决的就是构件的显示设计。大部分的虚拟仿真实验主要由二维控件和三维控件组成，其中二维控件主要是用于实验功能控制和实验数据的显示，三维控件主要是用于对现实环境下实验仪器模型的仿真。

3.2.1 二维虚拟仪器构件的显示设计

二维虚拟仪器构件是虚拟仿真实验的重要组成部分，其主要作用有（1）系统控制：开关，滑动条等。（2）处理数据：FFT 构件、PID 构件等。（3）数据显示：曲线图，文本框等。它们在实验界面上以二维图形的形式展示。我们基于 Unity3D 的 UGUI (Unity Graphical User Interface, 图形用户界面) 开发了常用的二维构件，UGUI 是 Unity3D 官方推出的一套用户界面系统，UI 的根目录为 Canvas (画布)。Unity3D 本身提供了按钮、下拉框、文本框等构件，但这些构件本身过于简单，且缺乏和其他构件的交互。所以在此基础上，我们扩展了适用于各类虚拟仿真实验的二维构件。

对于本文中的二维虚拟仪器模型，我们主要分为简单二维控件和多重图层叠加的复杂二维控件。对于简单二维控件，我们首先创建 Canvas 画布，将图片文件转换为 Sprite2D 对象，在将此对象赋值给 Image 组件即可。绘制流程如下图 3-2 所示：

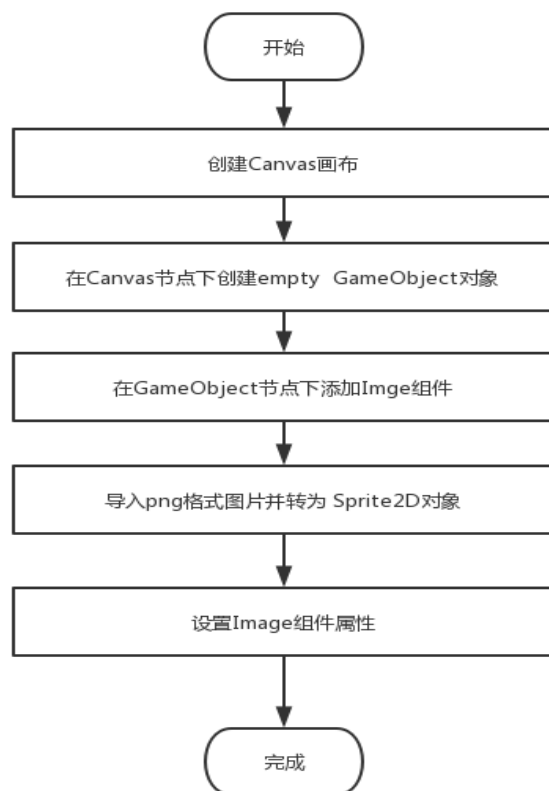


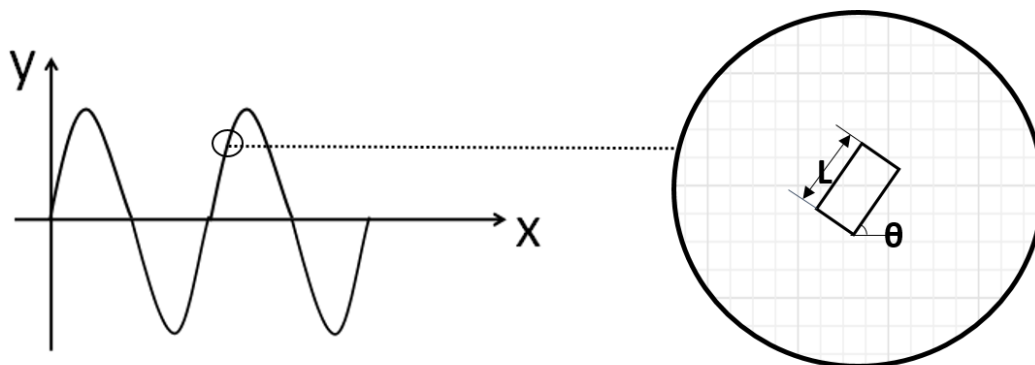
图 3-2 简单二维虚拟仪器构件绘制流程图

除了简单二维控件外，本文还提出了一种多重图层叠加的曲线绘制方法。我们都知道，记录实验数据是虚拟实验中的重要部分，对复杂的函数曲线，由于 Unity3D 本身没有提供相应的组件和绘图函数，本文在 Unity3D 平台下实现了多重图层叠加的曲线绘制方法，并封装成二维虚拟仪器控件直接调用。

我们把曲线图分成背景、坐标轴、曲线、文本四个独立的部分，每个部分都表示一个独立的图层。其中背景、坐标轴是曲线图静态显示部分，是构成曲线图的基础。曲线、文字是曲线图的动态显示部分，分别表示数据点阵和图表的描述信息。我们把各个图层相互叠加，封装成 Unity3D 中的 Prefab，从而可以作为二维虚拟仪器构件直接调用。

对于曲线层具体的函数曲线，是由一个个图元首尾连接而成，其中图元是构成函数曲线的最小单元，在 Unity3D 的 UI 系统中，三角面是最小的绘制单位，一个矩形图

元又由两个三角面组成。如图 3-3 所示，图元的位置表示了数据坐标 $Q(x, y)$ 。图元组成的函数公式如式 (3-1) 所示。其中图元组成最终的曲线为 $\varphi(x, y)$ ， θ 是每一段图元的倾角， L 是图元的模。



3-3 图元构成的函数曲线

$$\varphi(x, y) = \sum_{i=1}^{N-1} Q_i Q_{i+1} \text{ 且 } \theta, \quad (\text{式 3-1})$$

$$L = |Q_i Q_{i+1}| \quad (\text{式 3-2})$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}\right) \quad (\text{式 3-3})$$

图 3-4 展示了本文中部分常用的二维虚拟仪器构件，主要包括波形控件，旋钮控件，滑动条控件。

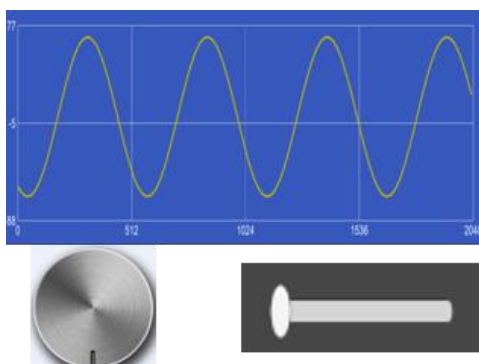


图 3-4 二维虚拟仪器构件

3.2.2 三维虚拟仪器的显示

在虚拟仿真实验中，三维虚拟仪器通常用于对实验设备的仿真，每一个三维虚拟仪器构件都有对应的三维模型。在 Unity3D 中，有两种方法可以引入三维模型，一种是利用 Unity3D 中内置的建模工具，另一种是外部导入模型，Unity3D 支持诸如 3ds Max、Maya、UG 等主流三维建模工具。前者通常只能建立简单的模型，而且操作繁琐、难度高，所以我们一般选用第二种方法引入三维模型，具体的步骤如下：

- (1) 首先我们借助 SolidWorks、3Ds Max 等软件，根据实际实验中仪器设备的比例尺寸件绘制出三维模型。
- (2) 导出 FBX 格式的模型文件，将模型文件放到工程文件的 Asset 文件下。
- (3) 将模型文件手动拖动到场景中，或者使用 Instantiate () 函数动态载入模型。

如图 3-5 所示，三维模型数据是一种基于树状节点结构的数据模型，整个三维模型信息保存在各个节点中，节点又包括节点属性和子节点，其中节点属性包含了三维模型的几何信息和位置信息等属性。我们在 Unity3D 中导入三维模型，同时也会保留节点间的父子关系，我们需要管理好节点间的依赖关系，从而更好的实现对三维模型的控制。

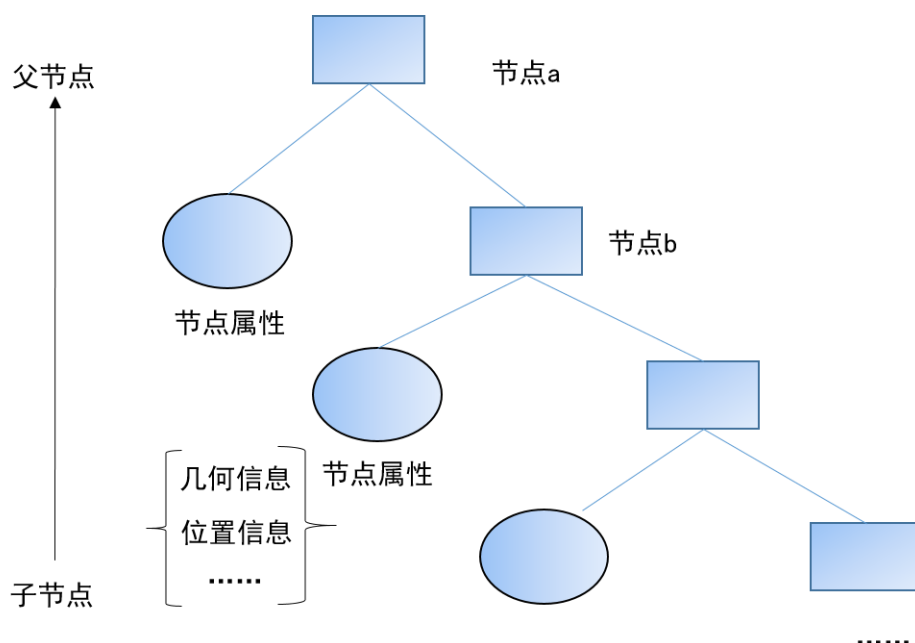


图 3-5 三维模型的树状节点结构

导入树状结构的三维模型文件后，还需要进一步的添加纹理、材质渲染以达到更加逼真的效果。

如下图 3-6 所示，我们在 Unity3D 中建立多种三维虚拟仪器模型，其中(a)是齿轮径向跳动测量仪，(b)是圆度仪，(c)是信号发生器，(d)是转子实验台，所有三维虚拟仪器都可以很好地在 Unity3D 平台中显示。

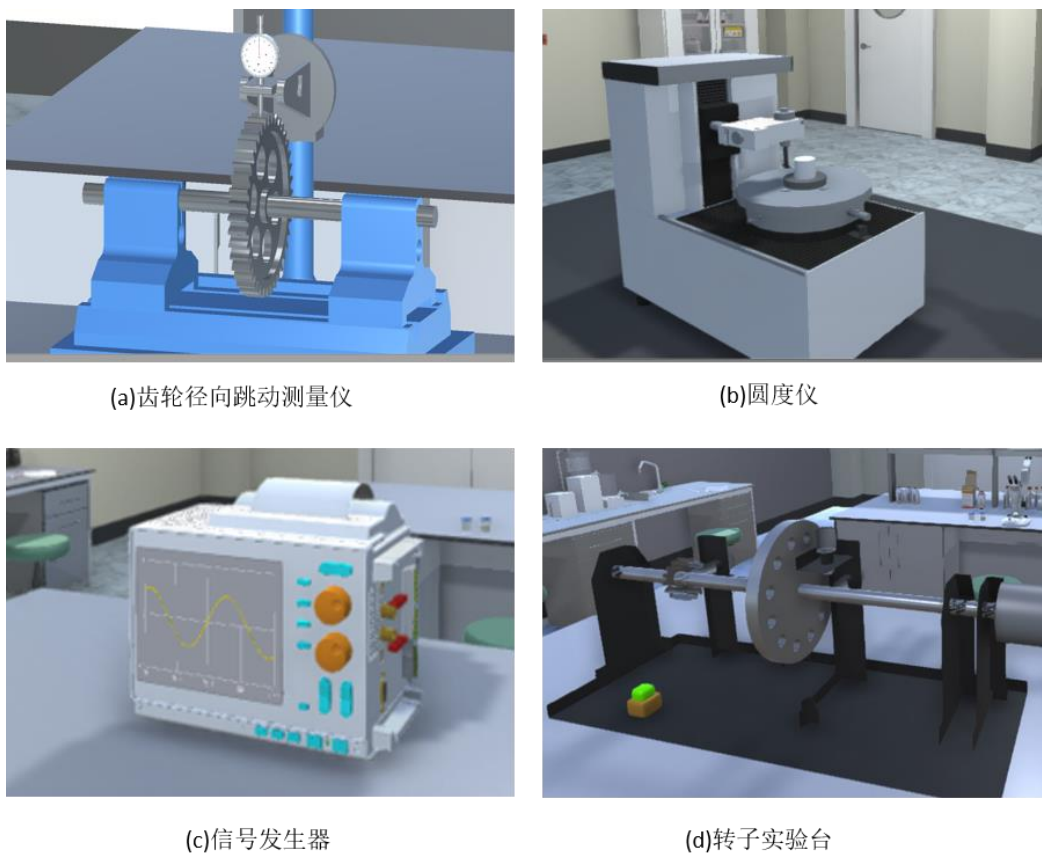


图 3-6 三维模型实例

3.3 虚拟仪器构件交互设计

如表 3-1 所示，本文根据上述虚拟仪器模型设计了常用的虚拟仪器构件，并根据虚拟仪器功能特点将其分为操作类、显示类、分析类和硬件类四类虚拟仪器。

表 3-1 虚拟仪器构件的功能和类别

虚拟仪器名称	虚拟仪器功能	类别
Switch	开关	操作类
Knob	旋钮	操作类
BallBeam	球杆模型系统	操作类
RoundTester	圆度仪	操作类
...
Curve	波形显示	显示类
TextBox	数据显示	显示类
...
FFT	快速傅里叶变换	分析类
PID	比例-积分-微分控制器	分析类
...
AudioVI	音频采集	硬件类
BluetoothVI	蓝牙传输数据采集	硬件类

虚拟仪器构件又可以分为主动构件和被动构件。主动构件主要包括用户操作类构件，可以为虚拟仿真实验提供事件激励，触发其他构件进入工作状态；被动构件主要包括处理类、硬件类、显示类，这些构件通常只是被动接受来自其他构件的事件消息，触发操作。当没有事件激励触发时，构件则处于静止状态。主动构件是参与用户交互的主要构件类型。

所谓用户交互，就是虚拟仪器构件根据特定的用户输入，产生响应，从而执行动作或行为。交互的方式主要是鼠标和键盘。本文主要从以下三个方面解决用户交互的问题，交互事件类型，交互事件监听，交互事件响应。其中交互事件类型主要是指对常用的用户输入事件的封装，交互事件监听主要是对用户输入事件的捕获，交互事件响应是根据用户输入做产生的模型节点的响应过程。

3.3.1 交互事件类型

定义交互事件类型，是实现用户和虚拟仪器构件间交互的第一步。在本文中，用户

操作虚拟仪器构件的主要方式为鼠标和键盘，为了减少开发过程中代码的无意义冗余，本文封装了常用的鼠标/键盘事件，开发者可以方便地调用这些事件接口。如表 3-2，表 3-3 所示，常用的鼠标事件有 OnMouseEnter, OnMouseOver, OnMouseExit, OnMouseDown, OnMouseUP, OnMouseDrag。常用的键盘事件有 GetKeyDown, GetKeyUp。

表 3-2 鼠标事件

事件名称	事件描述
OnMouseEnter	鼠标进入 Collider 时被触发，只触发一次
OnMouseOver	鼠标悬浮在 Collider 时被触发，每一帧触发一次
OnMouseExit	鼠标离开 Collider 时被触发，只触发一次
OnMouseDown	鼠标选中 Collider 上并点击时触发，只触发一次
OnMouseUP	鼠标在 Collider 上方释放时触发，只出触发一次
OnMouseDrag	鼠标拖曳 Collider 时触发，每一帧触发一次

表 3-3 键盘事件

事件名称	事件描述
GetKeyDown	键盘上按键被按下时触发，只触发一次
GetKeyUp	键盘上按键松开时触发，只触发一次

3.3.2 交互事件监听

定义好交互事件类型后，下一步需要解决的问题是监听交互事件。只有先捕获用户的输入操作，才可能根据交互事件类型的不同产生特定的响应。本文提出了一种节点监听器（EventListener）模型，可以为虚拟实验构件的每一个节点添加不同的监听器，从而捕获用户的输入。所谓模型节点，就是组成虚拟仪器构件的基本单元，例如虚拟仿真实验中的球杆模型，可以视为由基座、游标、小球、长杆、按钮等基本节点组成。我们根据实验需要，为每一个节点添加不同的事件监听器。

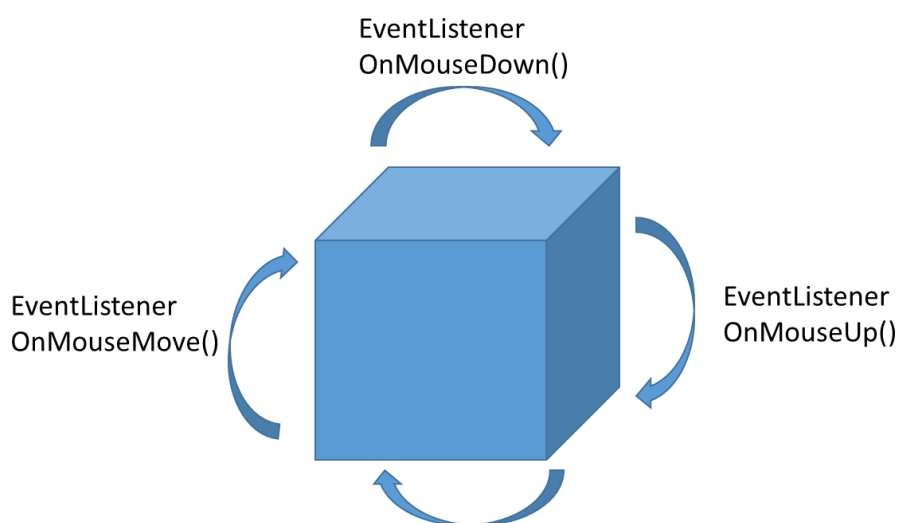


图 3-7 虚拟仪器构件监听器

如图 3-7 所示，每一个模型 Node（节点）都添加了 EventListener，节点监听器由系统层统一管理调度，我们利用了线程池机制，为所有的监听操作分配所需的线程。当监听器监听到交互事件后，首先会查找交互事件类型，然后在调用 EventBase 事件接口，将交互信息传递至 Unity3D 系统层进行处理。在处理的过程中，系统会遍历所有匹配的操作库，找到反馈函数，执行节点的行为。

监听器之所以可以监听用户输入，依赖于两个关键的部分：模型识别和触发器组件。

（1）模型识别

模型识别是指对场景中模型节点的辨识，即判断用户是否选中某一个模型节点。由于用户在屏幕上的触摸点是一个二维坐标（x，y），但场景中的模型又处于世界三维坐标系下，我们首先需要将屏幕坐标系转换为世界坐标。然后以摄像机为起点，发射一条射线，在射线的穿过的路径上，一旦检测到添加了 Collider 组件的模型，将停止发射。射线穿过的第一个三维模型节点，就是我们鼠标点击的对象。我们可以利用射线实现对三维模型节点的有效识别。关键函数如下所示。

```
1. using System.Collections;
2. using UnityEngine;
3. public class ModelRecognition : MonoBehaviour {
4.     void Update () {
5.         // 以摄像机所在位置为起点，发射一条穿过屏幕的射线
6.         Ray ray = new Ray(Vector3.zero, transform.position);
```

```
7. RaycastHit hit;
8. if(Physics.Raycast(ray, out hit, Mathf.Infinity))
9. {
10.     // 如果射线路径和添加了 Collider 组件的模型节点相撞，停止发射
11.     Debug.Log("获取到了模型节点");
12.     ...
13. }
14. }
15. }
```

(2) Collider 组件

实现模型识别的前提是为每一个模型添加 Collider 组件（碰撞体），Collider 组件是 Unity3D 自带的功能组件，可以简单有效地检测所有类型的物理碰撞，包括射线和物理节点碰撞。Collider 组件包含了很多种类，比如：Box Collider（盒碰撞体），Sphere Collider（球碰撞体），Mesh Collider（网格碰撞体）等。不同的盒模型限定了碰撞的检测范围，需要根据实际应用场景灵活地选择。例如球杆模型实验中的金属球，对应了 Sphere Collider（球碰撞体）。Collider 组件可以检测三种不同的触发信息：OnTriggerEnter, OnTriggerStay, OnTriggerExit。

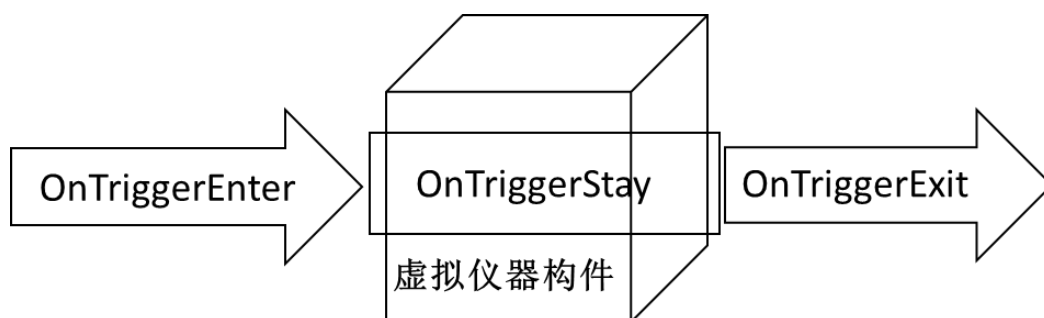


图 3-8 虚拟实验构件中 Collider 组件功能

如图 3-8 所示，当检测到射线或其他碰撞体接触到模型节点时，OnTriggerEnter() 函数会被调用，并会产生一个 Trigger 标识；当射线或者其他碰撞体进入模型节点时，会调用 OnTriggerStay() 函数，Trigger 标识的值一直为 True；当碰撞体离开虚拟仪器构件时，会调用 OnTriggerExit() 函数，同时 Trigger 标识为 False。

3.3.2 交互事件响应

用户交互设计的第三步是交互事件响应,所谓响应,就是根据交互事件类型的不同,改变模型节点的状态。为了进一步封装对复杂的模型、场景的控制,本文设计了响应事件模块,如图 3-9 所示,响应事件模块又可以分为三维模型控制,二维模型控制、相机管理三个子模块。

响应事件模块允许用户自定义不同的事件类,本文为了处理不同的事件类型,定义了一个响应事件基类,基类的作用是实现响应事件的公有部分,子类继承基类的公有函数,然后在此基础上定义虚函数实现不同的事件类型。图 3-9 是响应事件模块主要类以及函数图,其中 BaseEvent 是公共基类, CameraEvent, 3DmodelEvent, 2DmodelEvent 是分别在基类基础上实现的子类。当节点监听器模块将事件类型传递给响应事件模块后,响应事件模块会执行定义好的回调函数,这些函数会对模型节点的属性、状态做出动态地修改,最终反馈给用户,从而实现用户和虚拟仪器构件的交互。

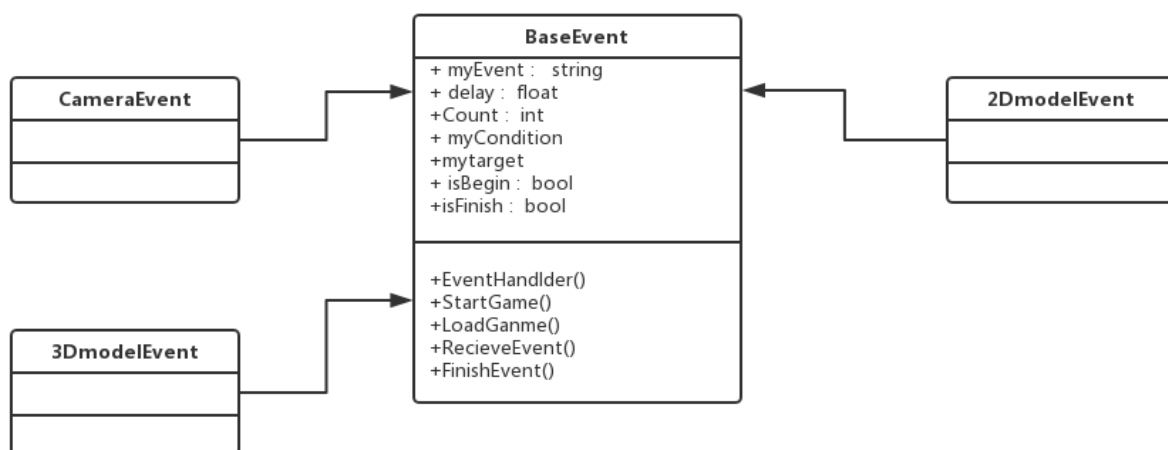


图 3-9 响应事件模块设计

其中 3DmodelEvent 是本文定义的三维模型操作函数,主要是用来对管理三维模型节点的状态,实现三维模型的旋转、平移、缩放等行为。2DmodelEvent 是控制二维虚拟仪器构件的状态和行为。CameraEvent 是管理场景中的多个照相机,在同一个场景下实现视图的切换。

我们以球杆模型实验为例，来说明用户和场景中的虚拟仪器构件的交互行为。当用户通过鼠标点击长杆上的游标时，节点监听器会捕捉鼠标的 `OnMouseDown` 事件，同时将事件类型传递给响应事件模块，此时游标此时处于被选中状态。当用户鼠标移动时，会进一步触发 `OnMouseDown` 事件，响应事件模块接收到事件信息时，执行 `3DmodelEvent` 中的回调函数，改变球杆系统中游标的位置。用户松开鼠标，`OnMouseDown` 事件被触发，取消对游标的选中状态。

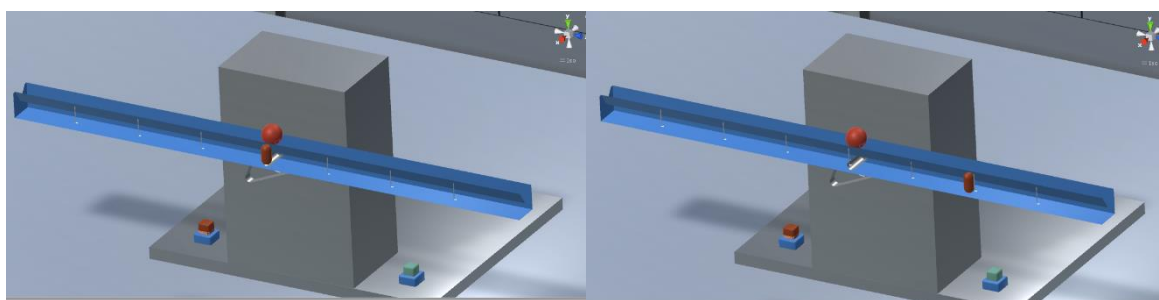


图 3-10 球杆模型中游标的移动事件

3.4 虚拟仪器构件间数据流和通信机制

虚拟仪器按照数据流的模式运行整个测量系统，每个虚拟仪器视为测量系统中独立的节点。节点两端有发送端口和输出端口，通过发送和接收数据实现虚拟仪器间的数据流动。系统中的节点只有在接收到所有必要输入端的数据后才会更新自身状态。节点执行后产生输出端数据，并将该数据传递给数据流路径中的下一个节点。根据在实验系统中任务的不同，不同的虚拟仪器在测量系统中承担不同的作用。有的是连接连个虚拟仪器的中间件，有的作为整个测量系统的显示终端。

如图 3-11 所示，为了保证虚拟仪器中数据流地有效处理和传递，采用了节点-管道模型。连接虚拟仪器的输入/输出端口，形成流动的数据管道。每个构件可以有效读取从管道中传来的数据，也可以将数据进行进一步处理，再将数据通过输出接口发送至管道中。总的来说，虚拟仪器构件的数据处理遵循以下原则：

- (1) 每个构件都有输入输出，构件完成对输入数据的处理产生输出。
- (2) 构件之间相对独立，没有连接的构件间不直接共享任何信息。

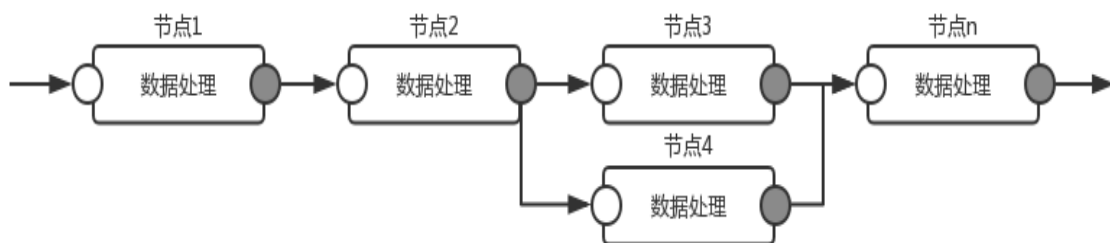


图 3-11 虚拟仪器间的数据传递

虚拟仪器构件内部的数据，根据仿真实验的不同，其数据类型也不一样。我们主要把虚拟仪器内部的数据类型分为单值类数据、一维数组类数据、矩阵类数据。其中单值类数据主要用于设置虚拟仪器的简单属性，数组类数据主要用于存储波形信号数据，矩阵类数据主要用于复杂的图像处理。我们为虚拟仪器间的数据绑定关系设计了专门的函数 `attachData(sourceVI, targetVI, outputType, inputType)`，其中参数分别为源虚拟仪器 ID，目标虚拟仪器 ID，输出端口数据类型，输入端口数据类型。

设计好虚拟仪器数据模型后，还需要驱动数据的传递。为了达到这一目的，我们有必要建立一套事件通信机制：当一个虚拟仪器的状态改变时，所有依赖于它的对象都能够得到通知并且动态更新。和前文的用户事件不同，这里的事件指的是系统事件，主要统筹整个系统的运行和状态维护。

我们在解决一对多的事件通信时，经常采用的是观察者模式^[45]，但这种模式观察者和被观察者之间是紧密耦合的，当系统有多个消息时，会给系统带来很大的负担。因此我们在观察者模式的基础上引入了 `EventCenter` (事件中心)来管理不同消息。`EventCenter` 对传统的观察者模式进行了改进，我们建立了事件中心来记录各种类型的消息。事件中心采用字典 (`Dictionary`) 的数据结构,字典的 `key` 记录了消息的观察者，`item` 记录了具体的事件内容。事件的传递是基于消息分发模式的，在选择虚拟仪构件时，程序会遍历事件中心找到需要发送事件的构件，然后进行消息的转发。观察者可以调用 (`Subscribe`) 方法订阅消息，也可以通过 (`unsubscribe`) 方法取消对事件的订阅。如图 3-12 所示，虚拟仪器 a 是发布者，虚拟仪器 1、2、3 是订阅者。虚拟仪器 a 监测到自身状态的变化，对事件中心发布事件，事件中心再向订阅者 (虚拟仪器对象) 发布消息通知，收到通知的虚拟仪器构件会更新自身的状态。

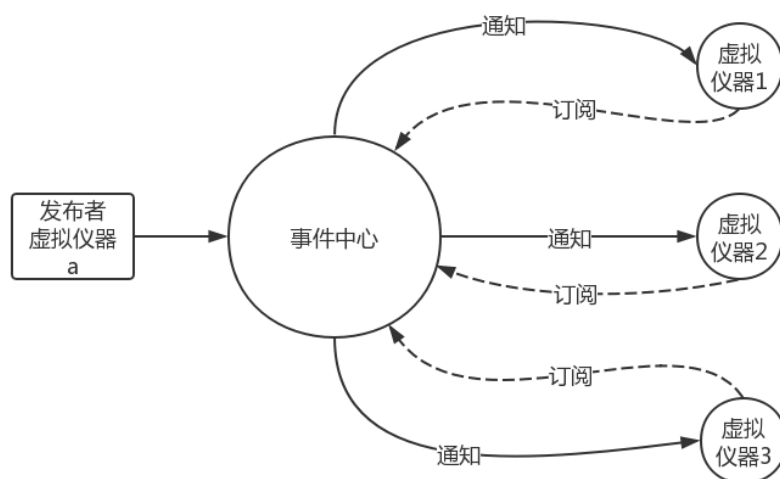


图 3-12 虚拟仪器构件的事件传递

构件间的联动的本质就是构件间事件的传递，图 3-13 展示了大多数情况下事件的传递路径。我们以麦克风声音的采集实验为例，来说明虚拟仪器构件的联动机制。整个虚拟仿真实验由开关、麦克风、FFT、波形显示构件组成。其中开关是操作类构件，麦克风是硬件类构件，FFT 是分析类构件，波形显示属于显示类构件。我们通过 `attachData()` 函数绑定了虚拟仪器构件的数据端口。当用户触发屏幕事件后，开关构件的状态发生后改变，并将自己的状态发送给事件中心，事件中心会调用 `broadcast()` 函数向所有订阅消息的构件广播消息，麦克风构件接受到消息后会调用 `OnDataChange()` 函数更新自身的状态，采集声音信号，并将自身状态的消息发送到事件中心。声音信号采集完成后，FFT 构件会对数据进行处理和分析。事件在每一级构件间的传递驱动着数据的流动，最终波形构件会显示经过傅里叶变换处理过的声音信号的频域波形。



图 3-13 虚拟仪器构件间的事件传递路径

3.5 虚拟仪器构件开发流程

3.5.1 虚拟仪器构件开发流程

虚拟实验构件的具体开发流程如下：

(1) 新建虚拟实验构件

创建 `GameObject`，编写脚本组件类 `newUnityVI`。脚本组件类 `newUnityVI` 是抽象基类 `BaseVI` 的子类，默认情况下，`NewUnityVI` 会直接继承 `BaseVI` 的通用属性和函数。开发者允许重新定义子类的属性，也通过虚函数重写子类的功能函数。

(2) 设置构件的属性

构件的主要静态参数包括位置 (`Position`)，大小 (`Scale`)，位姿 (`Rotation`)，通用属性等。我们在设置静态参数时，有两种方法，一种是文本式编程，在脚本文件中用 `set()` 函数重新定义构件的静态属性。另一种方法是图形式编程，直接将虚拟仪器构件拖动到 `Unity3D` 场景中，在属性面板中直接设置构件的参数。

(3) 添加功能函数

导入虚拟仪器模型，将脚本组件绑定至相应的模型上，根据不同的虚拟仪器类型添加功能函数，并进一步封装成可复用的 `Prefab`。

(4) 完善内部变量和接口对接，完成目标虚拟仪器的开发。

3.5.2 重要函数的封装

我们在开发虚拟仪器的过程中，为了进一步增加代码的可复用性，封装了一些重要的函数，下面对一些重要的变量和函数做出简要介绍。表 3-4 展示部分重要变量，主要包括输入端口、输出端口、事件中心等。表 3-5 展示了部分重要函数，主要包括系统事件通信函数，数据监听函数，数据更新函数。

华中科技大学硕士学位论文

表 3-4 部分重要变量

变量名	介绍
id	虚拟仪器构件的标识，每个虚拟仪器构件拥有不同的 ID
outputPortNum	虚拟仪器构件输入端口的数量
inputPortNum	虚拟仪器构件输出端口的数量
inputDtta	输入端口数据情况
outputData	输出端口数据情况
eventCenter	储存事件的字典，消息中心

表 3-5 部分重要函数

函数名	介绍
EventDispatcher	事件分发函数，用于节点间消息的分发和传递
AddEventListener	事件注册函数，用于向事件中心订阅消息
RemoveEventListener	事件移除函数，用于向事件中心取消消息订阅
IsDataChanged	数据监听函数，监听数据输入端口
OnDataChange	数据更新函数，更新节点数据和状态
AttachData	数据绑定函数，绑定节点间的数据关系

3.6 本章小结

本章主要提出了一种 Unity3D 下虚拟仪器的扩展方法，将虚拟仪器构件视为生产线上的“零件”，从而实现对构件的复用的动态装配。我们主要从虚拟仪器的显示、虚拟仪器的交互、虚拟仪器间的通信三个方面阐述虚拟仪器构件的封装过程。虚拟仪器的显示部分，我们提出了一种多图层叠加的二维曲线绘制方法和基于树状节点结构的三维模型显示方法。虚拟仪器交互部分，我们设计了事件-监听-响应模型来实现用户和虚拟仪器交互。虚拟仪器通讯部分，我们提出一种基于事件中心的发布-订阅机制，实现虚拟仪器构件间的联动。再次基础上，我们根据测控类实验的特点设计了不同功能的虚拟仪器，为最终的虚拟仿真实验的实现打下了坚实的基础。

4 虚拟现实场景搭建及构件装配

本章主要搭建了虚拟现实场景，提出了 Unity3D 下虚拟仪器构件的装配方法。虚拟现实场景主要包括华中科技大学机械大楼和虚拟实验室内环境。虚拟仪器构件采用图形化的装配方法在 Unity3D 中完成。

4.1 虚拟现实场景搭建

本文中的虚拟现实场景主要分为室内和室外两部分，场景为测控类虚拟仿真实验室。图 4-1 展示了虚拟实验场景的开发流程。

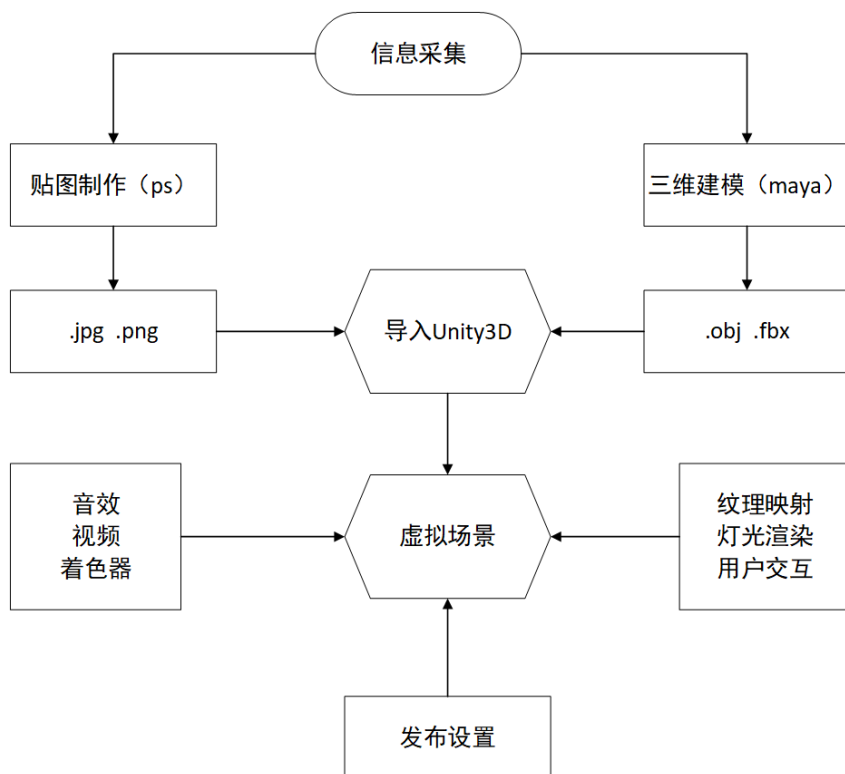


图 4-1 虚拟实验场景开发流程

首先实地采集照片和数据，根据获得的图片信息和机械大楼的实际参数构建整个虚拟的实验场景。采集数据图片的方式有两种：实地测量以及查询已有数据库。本课题采用两种方式结合的办法，先通过实地拍摄获取华中科技大学机械大楼的照片，再查询学校已有的数据库，获得机械学院大楼相关参数。这样既可以获得准确有效的信息，又大大提升了实际工作效率。本文主要建模的内容包括机械学院大楼以及虚拟实验室

内环境。基于第一步获得图片及数据，利用 Maya 绘制机械大楼及其周边景物的三维模型。完成虚拟实验室建筑以及内部环境的模型后，导出为.fbx 格式，并将其导入 Unity3D 中。导入后再将三维场景拖动到 Scene 视图中，同时添加光源（Directional Light）、天空盒（Sky Box）、相机（Camera）等组件。其中光源是为了模拟现实环境的光，增加场景亮度，天空盒是为了模拟真实天空的景象，相机相当于观察场景的眼睛。

4.1.1 基于多重纹理融合的纹理映射方法

为了进一步模拟真实物体的表面效果，我们应用了纹理映射技术^[43]。所谓纹理映射，就是将纹理空间中的纹理像素映射到屏幕空间中的像素的过程。为了模拟真实的实验环境，使虚拟现实环境中的物体更逼真，我们一方面可以增加模型的复杂度，建立更多的三角面，但这种方法会给系统带来很大的负荷，且工作量大。另一方面我们可以使用纹理让物体更生动。使用纹理，将像素包裹并映射到 3D 模型表面，这种方法不仅简单高效，也能展现更丰富的物体表面细节，达到很好的渲染效果。纹理映射本质上是一种图形的重定向技术，虚拟现实环境中的 3D 模型实质是由多边构成的，在程序中我们建立纹理坐标和物体表面像素的对应关系，就能在屏幕空间获得生动的物体表面效果。

如图 4-2 所示，传统的纹理映射方法是先将一张纹理贴图应用在几何模型表面上，主要步骤有三步：（1）纹理采样：采集现实中的物体的照片，制成纹理贴图。（2）纹理映射：建立合理的纹理映射函数，根据纹理映射函数将纹理空间上的纹理像素映射到虚拟现实空间中的几何模型上。（3）将纹理贴图绘制到几何模型表面。但这种方法只能实现较为简单的纹理效果，对于一些表面细节更加丰富的物体来说，单张纹理不能较为真实地反映出物体的表面形貌。

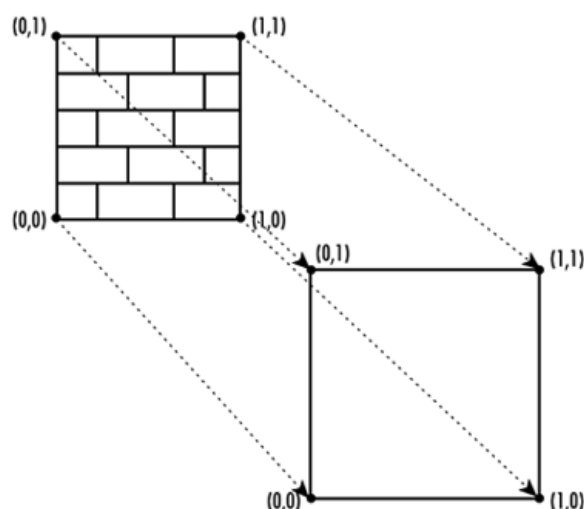


图 4-2 传统的纹理映射方法

因此我们基于 Unity3D 中的 Shader(着色器)，对传统的纹理映射技术进行了优化，使用了一种多重纹理映射技术：将多张纹理图片通过 Shader 编程融合起来，可以进一步增强物体表面的渲染效果，丰富模型的表面细节^[47]。下面，我们以大理石地板为例，详细讲解多重纹理映射技术的具体实现方法。

(1) 采集两张不同的纹理贴图，一张反映整体形貌，一张表现纹理细节。将纹理贴图导入 Unity3D 中。

(2) 确定混合函数，设置每一张贴图在混合函数中的混和因子，混合函数如下所示。其中 SrcFactor 和 DstFactor 为混合因子(系数)，S 是源颜色，D 是目的颜色，Color_{rgb} 是最终颜色。

$$\text{Color}_{rgb} = \text{SrcFactor} * S_{rgb} + \text{DstFactor} * D_{rgb} \quad (4-1)$$

(4) 获取两张贴图纹理单元 RGB 值，在着色器 (Shader) 中对两张纹理的颜色进行混合。最后根据实际效果调整混合比例，得到最终的纹理效果。

```
1.  Shader "Blend"
2.  {
3.      Properties
4.      {
5.          _MainTex ("FrontTex (RGB)", 2D) = "white" {}    //纹理图片 1
6.          _BackTex ("BackTex (RGB)", 2D) = "white" {}    //纹理图片 2
7.      }
```

```
8.  
9.     SetTexture [_BackTex] //混合纹理函数  
10.    {  
11.        constantColor [_Color]  
12.        Combine previous lerp(constant) texture  
13.    }  
14. }
```

多重纹理融合的伪代码如上图所示，图 4-3 是最后得到的纹理效果，从图中可以看出，多重纹理融合得到的表面纹理生动地展示了大理石地板的表面细节，和传统的纹理映射方法相比，渲染的效果更真实，更自然。

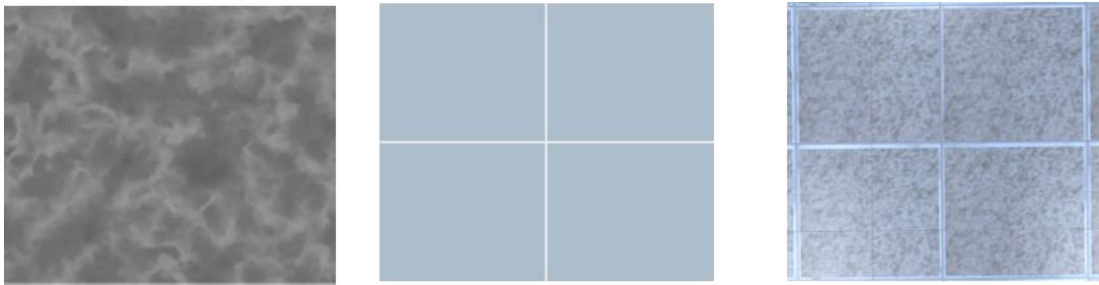


图 4-3 多重融合纹理映射效果

4.1.2 基于延迟渲染的光照模型优化

光是虚拟现实场景中的重要部分，合理地使用光照模型，能营造出真实的明暗、阴影、色泽效果。虚拟现实场景中的三维物体都是通过软件建模，在设置好材质后，为了保证场景中的物体有较好的观感，必须选择合适的光照渲染方法。

传统的全局光照模型根据光能实际的传播情况计算光照强度，计算过程主要考虑两个因素：（1）虚拟现实场景中所有光源的光照强度和方向。（2）场景中其他物体表面模拟现实场景中受光源影响产生的反射、折射等现象^[48]。全局光照模型能极大地增加虚拟现实场景的真实程度，但它也存在缺点，就是对于场景内的物体，需要实时为物体计算光照贴图。我们知道三维模型本质上是由顶点构成的多边形，三维模型各个面的在渲染的过程中都需要经过大量的计算，如果每一帧都重新计算光照对物体表面的影响，需要大量的时间，造成极大的性能上的损失，甚至会产生卡顿等不良影响。因此选择合适的渲染方法显得尤其重要。下面主要对 Unity3D 中的主要渲染方法做出简要介绍。

前向(forward)渲染是根据屏幕中的每个像素,映射到对应物体上,得到投影点,材质,法线等一系列的数据。然后对灯光进行遍历,计算灯光对该点作用的光照的数据,并对结果进行线性叠加,最后得到像素点的颜色。这种渲染方法的优势是简单,但算法复杂度高,会带来极大的系统负担。

延迟渲染(deferred)的核心思想是对场景的所用模型进行预处理^[49]。再把每个像素点对应的实体物体(opaque object)上的深度(depth),法线(normal),色彩(diffuse),亮度(specular)等光环境等系数进行预先计算,用漫反射模型,存放在若干张缓存图中。由于缓存图存放在计算机的高速寄存器中,因此这种方法节省了多次读取物体信息的时间,提高了灯光的渲染效率。此外,延迟渲染还会简化灯光的影响范围,把超过灯光影响范围的空间内的物体忽略掉。从而进一步减少灯光渲染带来的系统负担。

前向加(forward+)渲染是对前向渲染的优化^[50]。这种算法的基本思想是给像素点分组,对于再同一组的像素,算法统一进行一定范围的剔除。具体做法是将屏幕上的像素点切分成一系列的网格,对每一个大块的网格,分不透明和透明进行渲染深度的计算。这种算法牺牲了部分画面的细节,但换来了渲染性能的提升,大大提高灯光渲染的效率。

对于本文中场景的灯光渲染而言,由于场景中的物体大多是静态效果,提前对场景中的对象做预处理既能保证良好的灯光渲染效果,也能提高渲染效率。我们在场景中布置了数量众多的小光源,通过实际比较,我们发现,使用延迟渲染方法既能很好地模拟灯光效果,又能保证灯光渲染的效率,减少系统负担。图 4-4 展示了虚拟实验室的灯光渲染效果,从图中可以看出,窗外的阳光通过玻璃的折射落在地板上。虚拟实验场景很好地模拟了现实生活中的阳光、日光灯等光照情况,具有很强的真实感。



图 4-4 虚拟实验室的光照效果

4.1.3 虚拟漫游功能的实现

为了实现虚拟现实场景中的漫游操作，我们需要引入 Unity3D 中的第一视角控制器（First Person Controller）。Unity3D 中场景视图将 First Person Controller 拖动至 Hierarchy(层级视图区)，此时场景中会出现一个胶囊装的 GameObject，我们可以手动调节其高度参数，让游戏中的视图符合现实中的第一人视角。First Person Controller 主要分为三个脚本，MouseLook 监听鼠标操作，用户可以用鼠标变换观察的角度。CharacterMotor 监听用户键盘输入，用户可以使用键盘“W”“A”“S”“D”键控制人物“上”、“左”、“下”、“右”移动。

为了进一步模拟真实的实验环境，我们为场景中的模型提供了碰撞检测^[51]。用户在第一人称视角下行走时，遇到实验设备、墙壁等障碍物不会穿过。这里主要利用了 Unity3D 中的 Rigidbody（刚体）组件，为三维场景中的模型定义碰撞半径，可以有效地实现碰撞检测。图 4-5、4-6 展示了虚拟仿真实验室的渲染效果，图 4-5 展示虚拟实验室的内部环境，图 4-6 展示了虚拟仿真实验室内的部分虚拟仪器设备。图 4-7 展示了华中科技大学机械大楼渲染效果。



图 4-5 虚拟实验室内部场景

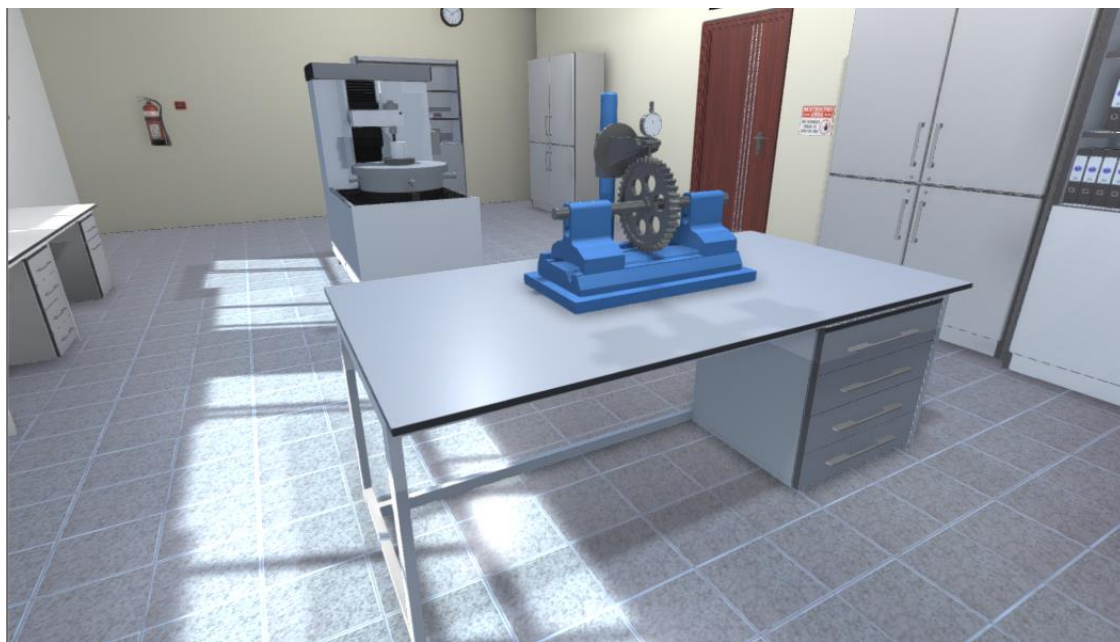


图 4-6 虚拟实验室中的仪器设备



图 4-7 华中科技大学机械大楼

4.2 虚拟仪器的图形化编程装配

4.2.1 图形化编程装配方法

本文以 Unity3D 作为构件装配平台，由于 Unity3D 自身支持图形化编程的方式，所以我们可以通过拖动构件的方式将虚拟仪器构件引入虚拟现实场景中。平台原理图如图 4-8 所示。为了满足用户的直接拖动装配，每一个构件的接口都直接暴露在 Unity3D 的 Inspector(检视面板)上。用户可以直接将虚拟仪器拖动到场景中，再根据实际虚拟仿真实验的需求，在 Inspector 面板上将接口通过赋值的形式连接起来。整个过程，只要用户合理定义的虚拟仪器间的联结关系，就可以自由装配成一个完整的虚拟实验系统。

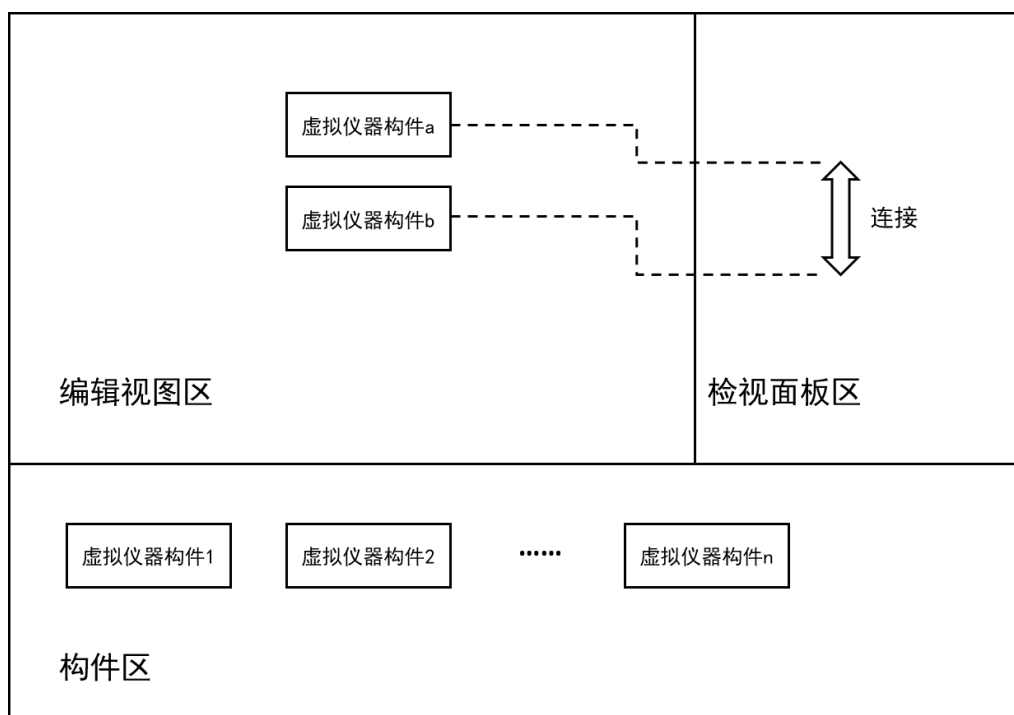


图 4-8 构件装配平台原理图

整个装配系统中，主要分为三个区域：编辑视图区（Scene）、构件区(Asset)、检视面板（Inspector）。

虚拟仪器从构件区直接拖动到 Unity3D 的场景中，再进一步调整其位置和相对布局。布局完成后，选中场景中的虚拟仪器，右侧的 Inspector 面板会动态显示每一个虚拟仪器构件的属性、接口等，我们只需要根据测试系统的需要拖动赋值，就实现了虚拟仪器数据接口的对接。

虚拟仪器构件在装配板区被拖曳连接，数据端口根据需要被绑定了起来，从而建立了构件间的联动。在装配界面中虚拟仪器构件接口拖拽连接完成的同时，后端形成了完整的数据流的传递。

4.3 本章小结

本章主要搭建虚拟现实环境，设计了虚拟现实环境中虚拟仪器构件的装配。我们通过专业的三维绘图软件搭建了华中科技大学机械大楼的虚拟场景和虚拟仿真实验室的内部场景。我们使用了基于延迟渲染的方法优化了全局光照模型，并且对传统的纹

理映射方法做出了优化，最终渲染出有着很强真实感的虚拟现实环境。最后，我们在 Unity3D 中实现了虚拟仪器构件的图形化装配。

5 开发应用实例

本章主要对整体系统功能进行测试，我们搭建了三种不同类别的实验，分别是《机械工程控制技术基础》、《工程测试技术基础》、基于 Arduino 的多传感器测量实验。我们根据实际需要将虚拟仿真实验发布在不同的平台上，和传统的虚拟实验相比，本文搭建的虚拟仿真实验具有沉浸感，同时也可以动态重构。

5.1 虚拟仿真实验的发布

基于 Unity3D 平台，我们对虚拟仪器构件进行动态装配，搭建了不同种类的虚拟仿真实验。为了进一步增强虚拟仿真实验的兼容性和易用性，需要将搭建好的虚拟仿真实验发布到 Web 端（网页）或者移动便携式设备，才能让用户更快捷方便地体验虚拟仿真实验。Unity3D 是一个多平台开发的游戏引擎，可以选择将项目发布在不同的系统和平台上。本文根据实际需要，主要选择将虚拟仿真实验发布在网页端或安卓端。

5.1.1 Web 端发布原理及流程

Unity3D 中的 C# 脚本不能直接在 Web 端运行，因为浏览器在解析网页时必须依赖于 JavaScript 这一种编程语言。因此我们将虚拟仿真实验发布到网页端时首先要将 C# 语言转换成 JavaScript，这样用户才可以通过浏览器访问虚拟实验项目。解决这一问题的关键技术是 Emscripten 项目^[52]。Emscripten 是一种基于 LLVM 高级语言编译器，他能将 Unity3D 下的 C# 脚本以 asm.js 的形式转换成 JavaScript。因此，利用 Unity3D 的发布功能，即可以将已经写好的工程文件转化成网页，这样用户就能通过浏览器访问虚拟实验室了。



图 5-1 C#转换成 JavaScript 的过程

5.1.2 安卓端发布原理及流程

Unity3D 中的虚拟实验发布到安卓端首先需要将 C#语言先转换成 IL 等中间语言，之后被虚拟机会执行，再通过即时编译技术编译成安卓原生代码，最终运行在安卓设备上^[53]。主要步骤如下：

- (1) 配置安卓手机开发环境。首先我们需要在 PC 端下载安装 Java Development Kit 和 Android SDK Tools，使 Unity 项目可以编译成被移动设备识别的机器码。
- (2) 在 Unity 中进行参数设置。首先在 Player Settings 中修改第一栏的 package name. 然后设置 Android SDK Tools 在 Unity3D 下的查找路径，建立 Unity3D 和 Android 的关联。
- (3) 将虚拟实验发布到移动设备。点击 Build and Run 按钮并设置文件保存路径，导出能再安卓设备上运行.apk 文件。

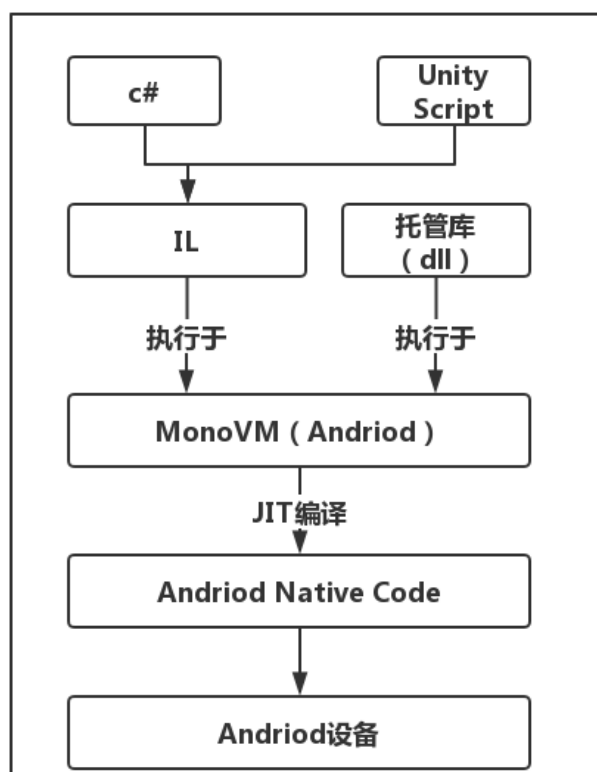


图 5-2 虚拟仿真实验安卓端发布的原理

5.2 应用实例

5.2.1 《机械工程控制技术基础》虚拟仿真系列实验

机械工程控制技术基础是一个理论与实验结合非常紧密的课程，主要包括控制、自动控制原理，其研究对象通常是一些经典的控制模型，通过模型的输入-反馈来学习相关控制理论。本文开发的虚拟仿真实验主要以球杆模型、双容水箱系统为研究对象，用户通过操作虚拟的仪器设备，加深并巩固 PID 控制原理等相关知识。

本文针对《机械工程控制技术基础》，设计并实现了一系列实际的虚拟仿真实验，帮助学生进一步巩固对理论知识的理解，实验内容主要包括：

- (1) PID 控制原理
- (2) 双容水箱液位的 PID 控制实验
- (3) 球杆模型系统的 PID 控制实验

下面简要介绍了部分实验的搭建过程和实验操作流程。

图 5-3、5-4 展示了双容水箱液位 PID 控制实验。整个虚拟实验由开关控件，PID 控件、波形控件、双容水箱控件组成。用户首先需要设置合适的 P、I、D 参数和目标水位，启动双容水箱开关后，可以观察双容水箱的液位变化。之后用户还可以打开波形面板，获得双容水箱的水位变化曲线。当控制效果不佳时，用户可以更改合适的 P、I、D 参数，分析 P、I、D 三种参数调节作用对实验结果的影响。

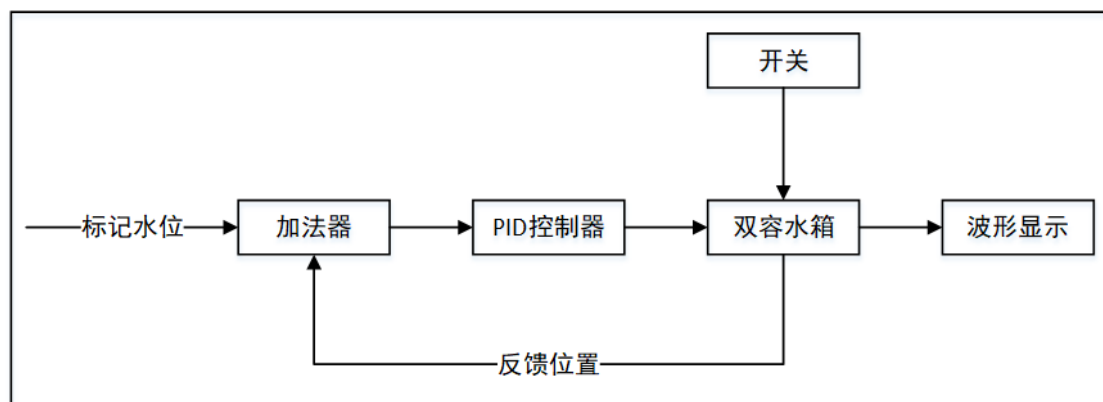


图 5-3 双容水箱液位 PID 控制实验原理图

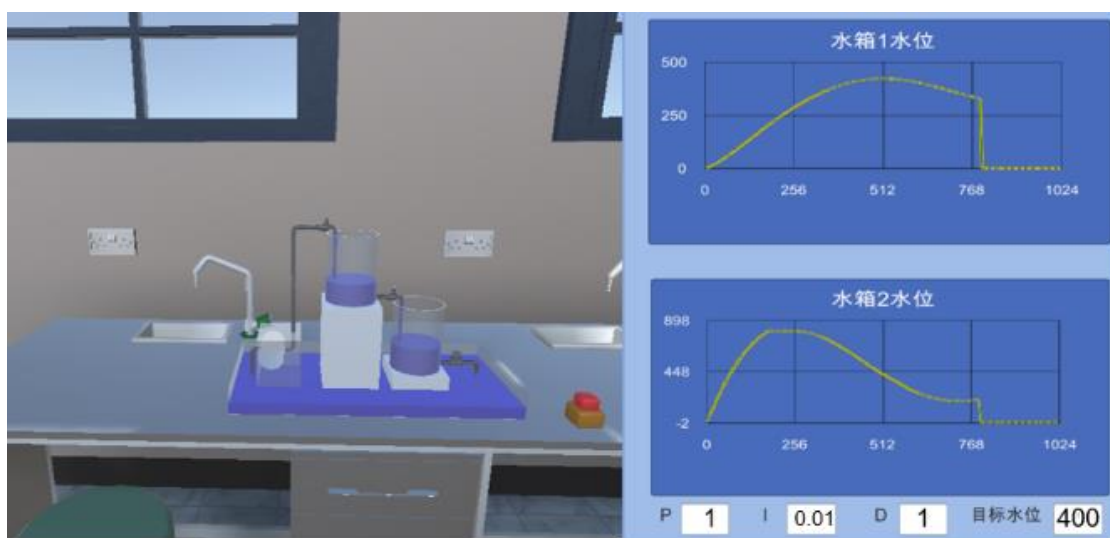


图 5-4 双容水箱液位 PID 控制实验

图 5-5、5-6 展示了球杆模型实验，球杆模型系统是一个典型的非线性开环不稳定系统。如图 8 所示，整个虚拟实验系统主要由球杆模型控件、加法器控件，PID 控制控件、波形显示控件组成。用户设置好 PID 参数后，将标记移动到特定位置后，点击球杆控件的开始按钮，就可以观察虚拟实验系统中小球位置参数的变化以及杆件的倾角的参数曲线变化。

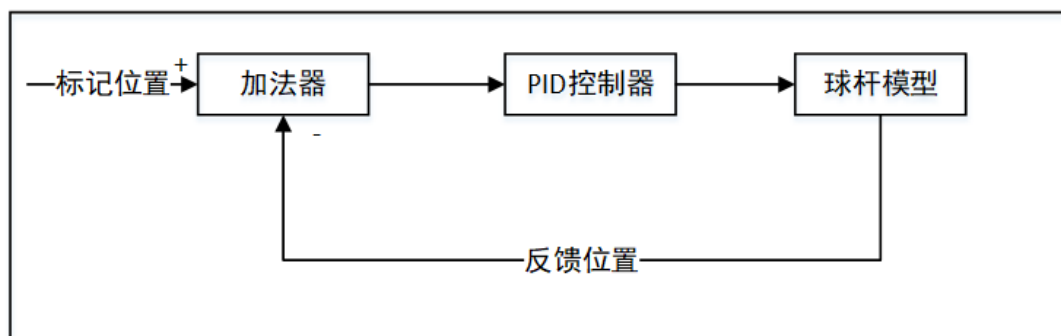


图 5-5 球杆模型实验原理

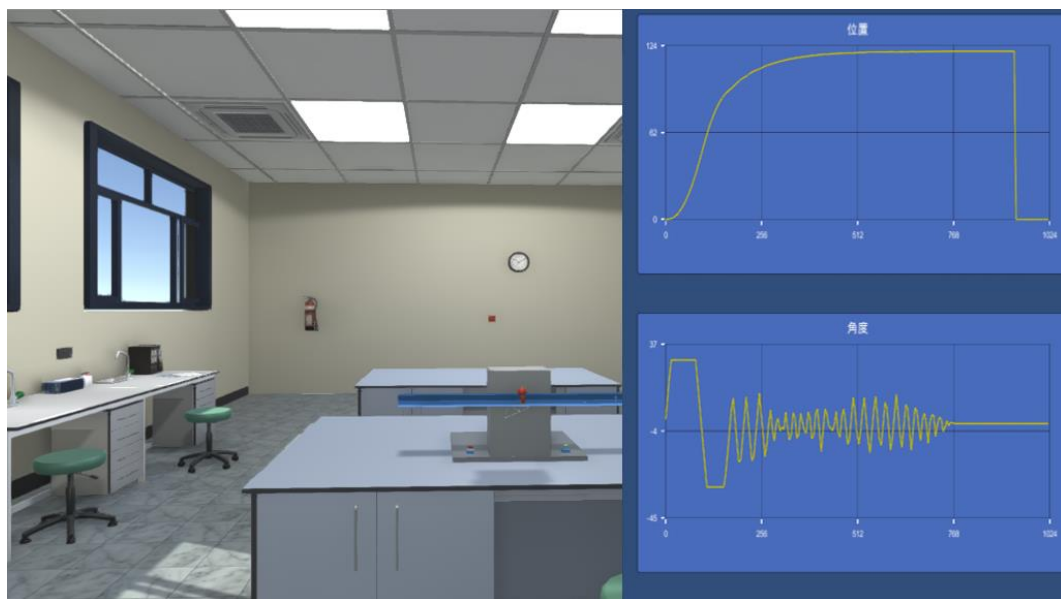


图 5-6 球杆模型 PID 控制原理实验

5.2.2 《工程测试技术基础》虚拟仿真系列实验

工程测试技术是工程院校机械类各专业本科生的一门重要的技术基础课，内容主要包括传感器、测试系统的特性，信号的分析 and 数据处理。通过本文设计的虚拟仿真实验，学生可以观察并分析典型信号的波形，了解信号调理等进一步的知识。

本文针对《工程测试技术基础》，设计并实现了一系列实际的虚拟仿真实验，帮助学生进一步巩固对理论知识的理解，实验主要包括：

- (1) 转子实验台的信号测量与处理
- (2) 典型信号的波形和频谱分析
- (3) 声音信号的采集和频谱分析

下面简要介绍这些虚拟实验的搭建过程和实际效果。

转子实验台测量实验是《机械工程测试技术》中的经典案例。图 5-7、5-8 展示了转子实验台测量实验的原理图和实验界面。整个虚拟实验主要由开关构件，转子实验台构件，波形显示构件组成。用户点击开关开始运行，并将开始信号传递给转子实验台构件。转子实验台的飞轮开始转动，同时模拟生成转速信号和轴心轨迹信号数据，

并将数据发送给波形显示构件，处理后的结果实时显示在前端面板上。之后，用户还可以改变转子的速度，观察振动信号以及轴心轨迹信号的变化。

用户在虚拟场景中，既可以以第一人称视角自由移动和观察实验仪器，也可以通过鼠标和虚拟仪器进行交互，用观察转子实验台的运动情况，记录振动信号的波形以及转子的轴心轨迹。

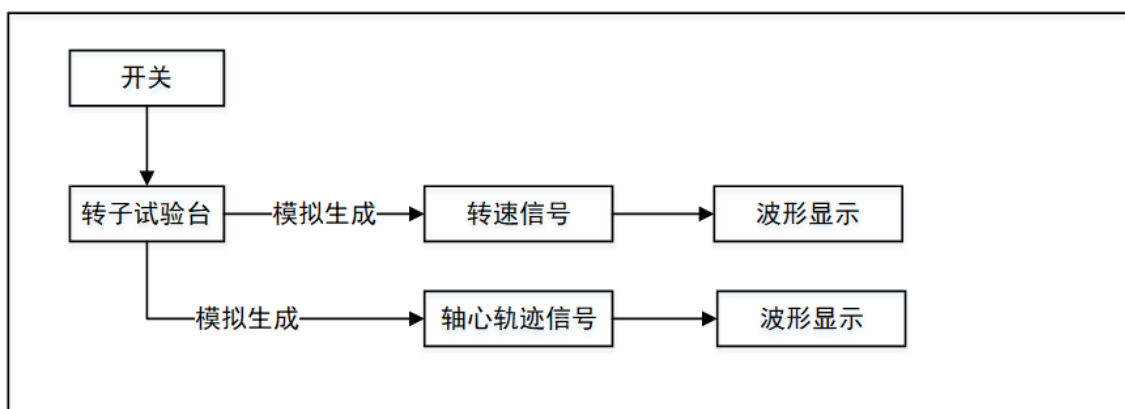


图 5-7 转子实验台测量实验原理图

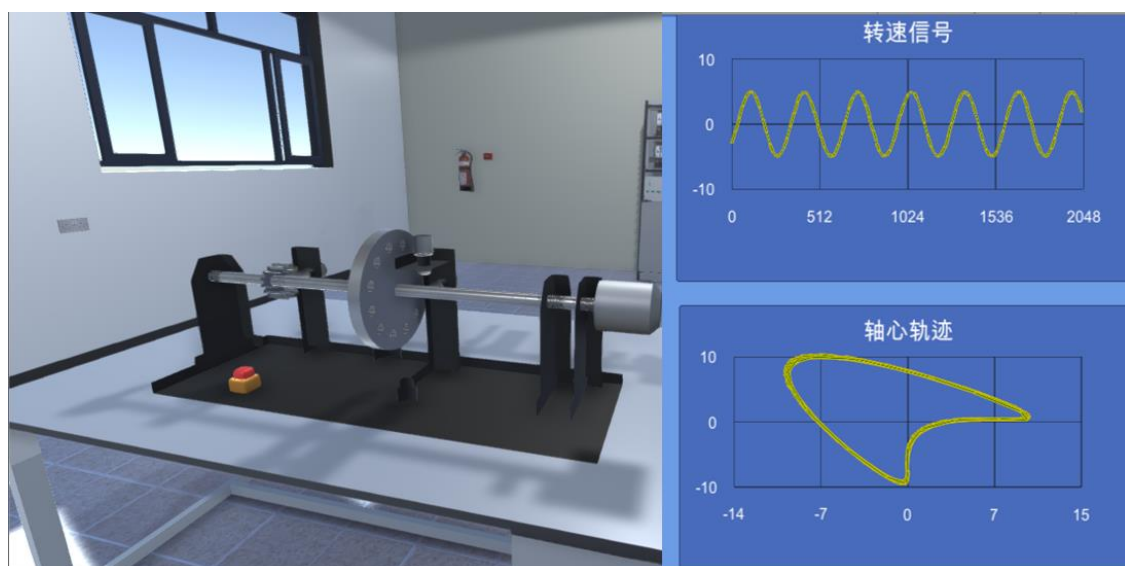


图 5-8 转子实验台转速和轴心轨迹分析

图 5-9 展示了常见信号的频谱分析实验，用户可以在实验环境中操控信号发生器面板。我们在示波器中内置了四种波形信号，方波、三角波、正弦波、白噪声。用户可以通过旋钮调节信号的幅值和频率，观察信号波形的变化。我们还在实验中加入了 FFT 控件，用户不仅可以观察信号的时域波形，还可以分析其频域波形，得出信号幅值和频

率对波形的影响。图 5-10 展示了声音信号的采集和频谱分析。

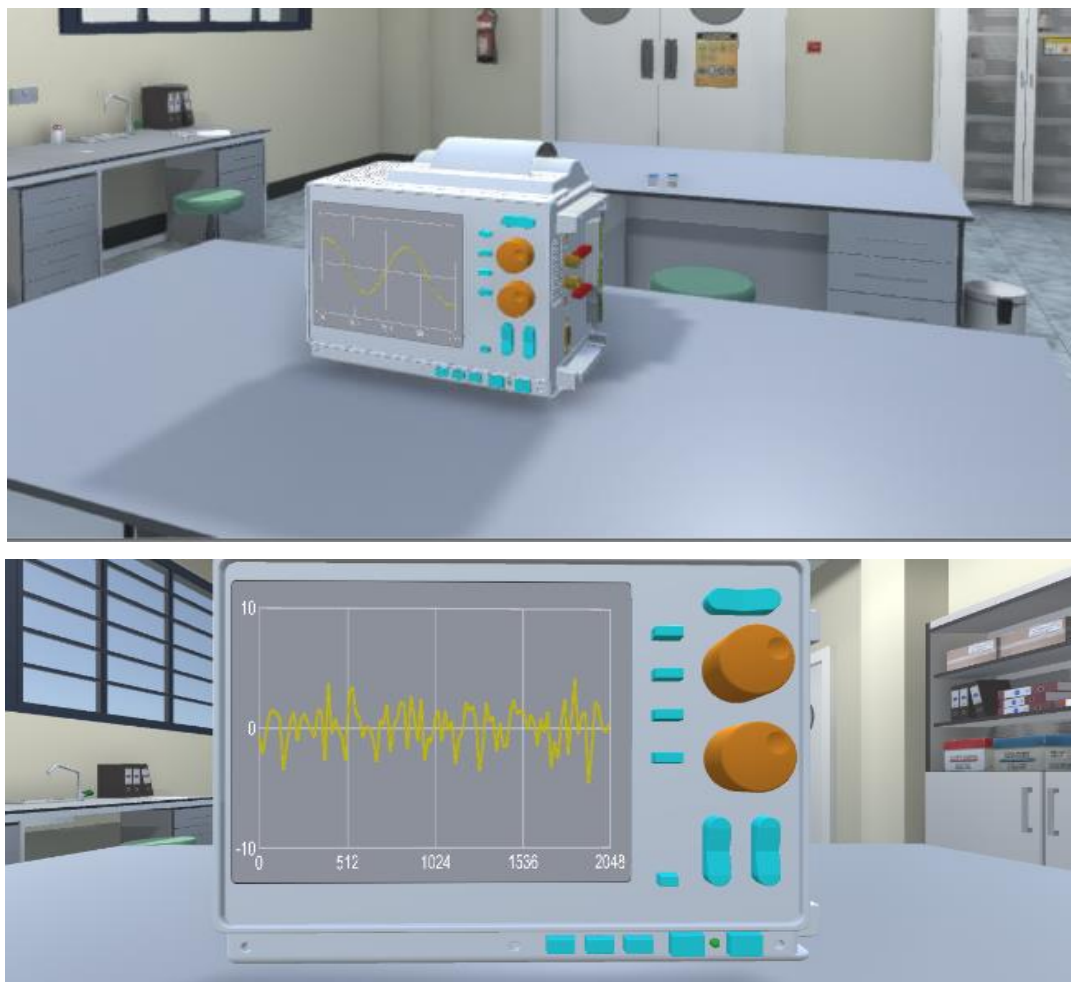


图 5-9 常见信号的波形与频谱分析实验

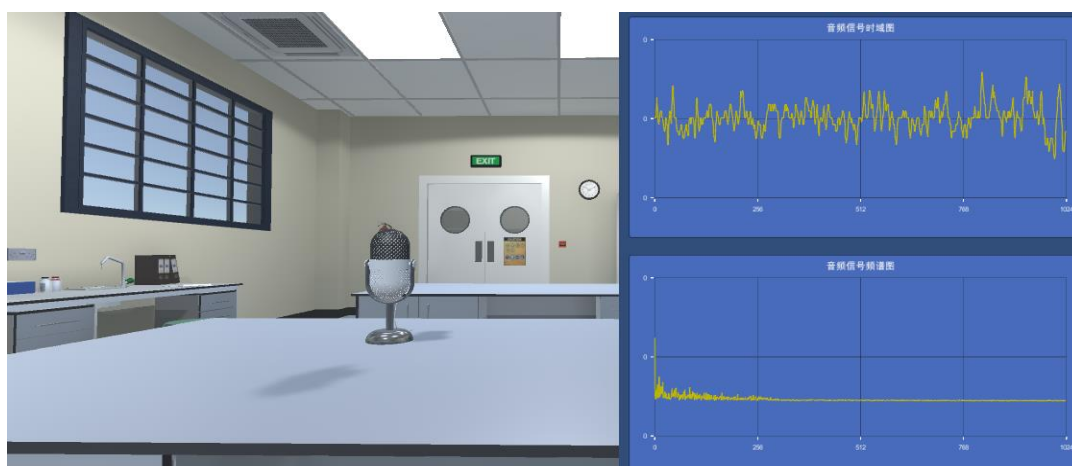


图 5-10 声音信号的采集和频谱分析

此外，本文还做了《互换性原理》中的齿轮径向跳动实验，机械手的控制实验。实验如图 5-11,5-12,5-13 所示。



图 5-11 齿圈径向跳动实验



图 5-12 工业机械手的控制与仿真

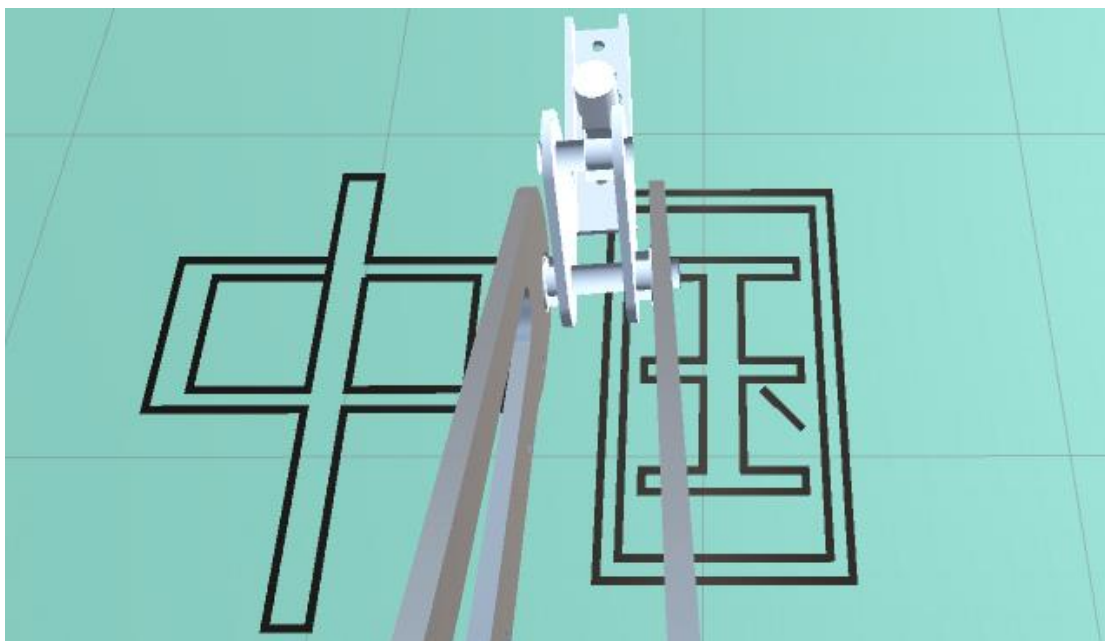


图 5-13 控制工业机械手末端写字

5.2.3 基于 Arduino 的多传感器测量实验

Arduino 是一款开源的电子原型平台，它既包括不同型号的 Arduino 板，也包括软件部分的 Arduino IDE。Arduino 不仅具有丰富的函数库，还具有很强的兼容性，可以和市面上的多种传感器兼容，非常适合测控类课程中的传感器测量实验。Arduino 和硬件良好的交互性得到很多人的青睐，简单方便，是初学者学习传感器知识的首选。

本文基于 Arduino Uno 板，结合温湿度传感器、心率传感器，通过蓝牙连接硬件和软件，设计了基于 Arduino 的多种传感器的测量实验，并最终将虚拟实验发布到合适的平台。

（1） 温湿度测量实验

温室度是人们感受外界环境的一个关键因素，无时无刻不影响人们的日常生活。测量周围环境的温湿度，可以让学生了解温湿度传感器的简单使用方法，激发学生的学习兴趣。本文采用了 DHT11 数字式温湿度传感器和蓝牙模块，设计并实现了一个测量环境温湿度的实验，实验的场景如图所示。

在温湿度测量实验中，软件面板主要由虚拟现实环境和虚拟仪器控件组成。虚拟仪器控件主要包括四个：分别是温度计控件、湿度计控件、蓝牙控件、开/关控件。其

中蓝牙控件主要用来连接硬件设备和虚拟实验场景，并将环境中的温湿度数据发送给虚拟仪器构件。如图 5-14 所示，实验时间是 2019 年 4 月 12 日中午，实验地点是华中科技大学机械大楼室内，测得温度是 27°C ，湿度为 49%。

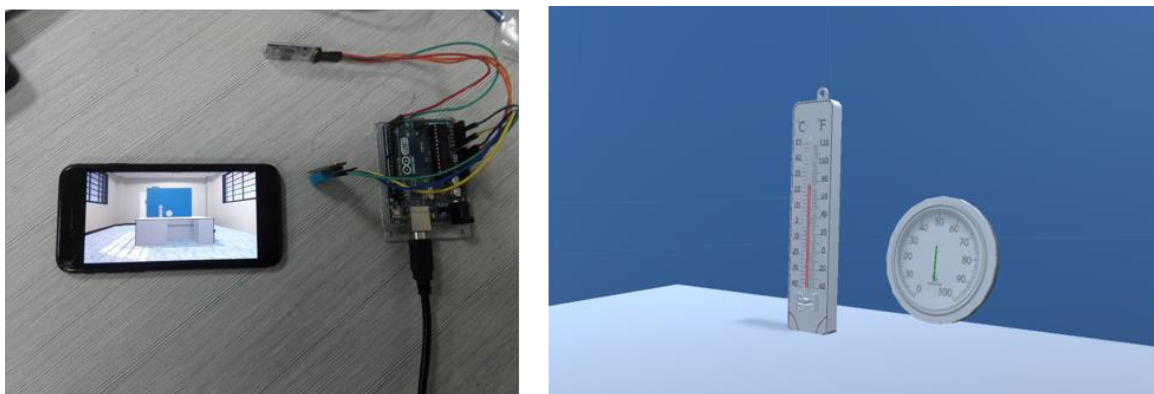


图 5-14 基于 Arduino 的温湿度测量实验

(2) 心率测量实验

心率是反映心脏健康的重要指标，和人们的身体健康息息相关。

心率测量的方法主要有两种：一种是电信号测量法，因为心肌每次收缩时会产生电信号，采用传感器测量电信号就可以检测使用者的心率情况。这种方法结果较为精确，但容易受到电磁干扰，而且对传感器的位置有很高的要求，操作繁琐，所以很难应用于日常的心率检测中。另一种方法是光电透射测量法。当一定波长的光照射到人皮肤表面时，由于心脏的收缩和舒张，皮肤对光的吸收量会发生变化。我们利用传感器检测反射光的强度，就可以确定心率情况。这种方法简单方便，市场上的各类手环等智能设备大多采用这种方法。但光电透射测量法也存在一定的缺点，就是容易受环境光的干扰。但总体来说，光电透射测量法更加方便，非常适合日常生活中对心率的检测。本文就是基于光电透射测量法，结合一款心率传感器 **PusleSensor**，设计并实现了一个心率测量实验。

图 5-15 展示了心率采集实验的效果，整个实验主要由蓝牙构件、心率处理构件、波形构件、开关构件组成。其中开关构件控制整个系统的启停。蓝牙构件控制硬件系统和软件的通信，心率处理构件负责处理从下位机接收到的原始信号，最终结果展示在波形控件上。实验测量时间是 2019 年 4 月 12 日，实际采集本人的心率，显示结果如图 5-15 所示。

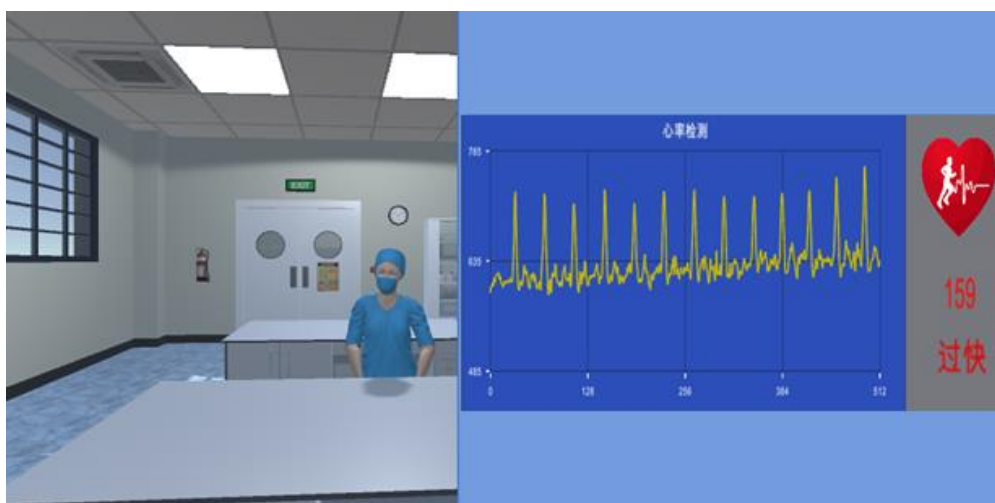


图 5-15 基于 Arduino 的心率信号采集实验

5.3 本章小结

本章介绍了虚拟仿真实验的发布方法，并针对《机械工程控制技术》和《工程测试技术基础》这两门课程开发了一定数量且种类不同的虚拟仿真实验。最终的结果表明，和传统的虚拟仿真实验相比，本文大基建虚拟仿真实验具有很好的沉浸感，真实感。最后又展示了基于 Arduino 的多传感器测量试验，表明本文中的虚拟仪器可以很好地和硬件结合，具有一定的通用性和专业性。

6 总结与展望

6.1 全文总结

传统的测控类虚拟仿真实验存在沉浸感不足、功能单一，难以扩展等不足之处，本文结合虚拟现实和构件化的虚拟仪器，在 Unity3D 平台上开发了具有很强沉浸感、可动态装配的虚拟实验。本文基于测控类实验的实际需求开发了多种类型的虚拟仪器构件，只要将构件引入虚拟现实场景中，再根据实验需求装配虚拟仪器构件，就能搭建出不同种类的虚拟仿真实验。本文的主要成果如下：

- （1）提出了一种 Unity3D 下虚拟仪器的扩展方法，在 Unity3D 平台上，将虚拟仪器封装成可复用的构件，用户可以在 Unity3D 平台实现对虚拟仿真实验的动态装配。
- （2）定义了二维和三维虚拟仪器的显示和交互方法。针对二维虚拟仪器显示部分，提出了一种多重图层叠加的曲线绘制方法；针对虚拟仪器交互部分，设计了一种事件-监听-响应模型，实现了用户和虚拟仪器间的交互。
- （3）为不同虚拟仪器构件设计了基于事件中心的通讯机制，实现虚拟仪器构件的联动。
- （4）对传统的光照模型和纹理映射技术进行了优化，基于延迟渲染的光照模型和多重纹理融合的纹理映射技术渲染了虚拟现实场景，使之具有很强的真实感和沉浸感。
- （5）在 Unity3D 平台上开发了多个测控类虚拟仿真实验，这些实验成功地证明了本文提出的方法的可行性。

6.2 工作展望

本文虽然已经初步实现了多个测控类的虚拟仿真实验，但仍然存在很多不足，需要进一步的完善：

- （1）目前开发的控件数量只有 20 个左右，控件的数量太少，只能满足机械学科部分实验的需求，未来需要进一步设计更多的虚拟仪器构件。
- （2）虚拟现实场景的部分细节仍然较为粗糙，需要进一步打磨细节。此外，虚拟现实场景有时会存在加载慢，卡顿等现象，对计算机的 CPU、内存、显卡有较高的要求，

未来需要进一步优化虚拟现实场景。

（3）随着虚拟现实技术的发展，市场出现了大量 VR 眼镜、数据手套等外部设备，未来可以将虚拟仿真实验和外部的 VR 设备结合，进一步加强虚拟仿真实验的沉浸感，真正做到“身临其境”。

（4）目前虚拟仿真实验和硬件的结合还较为简单，未来可以用虚拟仪器控制实际的机械手或机床等专业机械设备，实现对工业设备的仿真、监控。

参考文献

- [1] 赵沁平. 虚拟现实综述[J]. 中国科学:信息科学, 2009, 39(1):2.
- [2] D. Foley. Interfaces for Advanced Computing [J]. Scientific American, 1987, 257(4):127-135.
- [3] 邹湘军,孙健,何汉武,郑德涛,陈新.虚拟现实技术的演变发展与展望[J].系统仿真学报,2004(09):1905-1909.
- [4] Warren Robinett. Virtual Environment Workstation[EB/OL]. <http://www.warrenrobinett.com/>, 2003,05.
- [5] 刘崇进,吴应良,贺佐成,叶雯,张云霏.沉浸式虚拟现实的发展概况及发展趋势[J].计算机系统应用,2019,28(03):18-27.
- [6]朱淼良,姚远,蒋云良.增强现实综述[J].中国图象图形学报,2004(07):3-10.
- [7]潘志庚,cad.zju.edu.cn,姜晓红,张明敏,石教英.分布式虚拟环境综述[J].软件学报,2000(04):461-467.
- [8]梁炳成,王恒霖,郑燕红.军用仿真技术的发展动向和展望[J].系统仿真学报,2001(01):18-21.
- [9]栾悉道, 谢毓湘, 吴玲达等. 虚拟现实技术在军事中的新应用[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(14): 604-607.
- [10] Haritos T , Macchiarella N D . A mobile application of augmented reality for aerospace maintenance training[C]// Digital Avionics Systems Conference, 2005. DASC 2005. The 24th. IEEE, 2005.
- [11] Grigore C. Burdea, Philippe coiffet. virtual real technology[M]. USA: Publisher: Wiley, John & Sons, Incorporated, USA. 2003.6
- [12]Parong J , Mayer R E . Learning science in immersive virtual reality.[J]. Journal of Educational Psychology, 2018.
- [13]王芳,杨建思,柳应飞. 浅谈数码城市与数字校园演示系统的建立[J]. 武汉大学学报(工学版) , 2003, 36(s2):81-84.

- [14]方沁. 基于 Unity 和 3dmax 的虚拟实验室三维建模设计与实现[D].北京邮电大学,2015.
- [15] 王岩. 基于虚拟现实的空间站机械臂任务仿真研究[D].哈尔滨工业大学,2018.
- [16]胡生清, 幸国全. 虚拟仪器及其应用[J]. 中国仪器仪表, 1999, 19(6):9-10.
- [17] John C. Waller,Natalie Foster. Training via the web: a virtual instrument[J]. Computers & Education,2000,35(2):20-23.
- [18] SALZMANN C, GILLET, D.Introduction to Real-time Control using Lab VIEW (TM) with an Application to Distance Learning[J].Eng, Educ,2000,16: 255-272.
- [19] SINGLA S K Y R K. Optical character recognition based speech synthesis system using Lab VIEW[J].Journal of applied research and technology,2014,12(5):919-926.
- [20] GPSCAN F P.A general-purpose Lab VIEW program for scanning imaging or any application requiring synchronous analog voltage generation and data acquisition [J]. Computer Physics Communications,2015,192:342-347.
- [21] 李建国. 基于虚拟仪器的工业控制器温度测试系统[D].长安大学,2018.
- [22] GATAULLIN A M, OVCHINNIKOV A V. A Virtual Instrument for Analysis of the Parameters of Somatosensory Event-linked Potentials[J]. Biomedical Engineering, 2017, 51(4):300-302.
- [23] 何岭松,张登攀,赖红.可重构虚拟仪器系统[J].机械工程学报,2005(09):78-81.
- [24] 田航. 基于构件的手机开放式虚拟仪器浏览器研发[D].华中科技大学,2016.
- [25] 秦树人. 智能控件化虚拟仪器系统.原理与实现[M]. 科学出版社, 2004.
- [26]汪诗林,吴泉源.开展虚拟实验系统的研究和应用[J].计算机工程与科学,2000(02):33-35.
- [27] 单美贤. 虚拟实验教学的初步探索[C].北京: 全球华人计算机教育应用大会. 2002.
- [28] Virtual Instrument Systems in Reality (VISIR) for Remote Wiring and Measurement of Electronic Circuits on Breadboard[J]. IEEE Transactions on Learning Technologies, 2013, 6.
- [29] Jensen M B , Tallman D E . A LabVIEW-based virtual instrument for simulation and analysis of SECM approach curves[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2013,

17(12):2999-3003.

[30]何振磊. 基于虚实结合网络实验室的模拟电子技术实验[D]. 浙江大学, 2013.

[31] 郝立坤, 何小刚. 基于 HTML5 的虚拟实验建模及实现 [J]. 现代电子技术, 2018, 41(24):66-70.

[32] Shin Y S . Virtual experiment environments design for science education[C]// International Conference on Cyberworlds. IEEE, 2004.

[33] Grisham C M, Cheatham J K, Del Vecchio D A, et al. Lab3D - A virtual chemistry and biochemistry laboratory in three dimensions[C]. Experimental Biology. 2003:A10-A10.

[34] Ouyang S G , Wang G , Yao J Y , et al. A Unity3D-based interactive three-dimensional virtual practice platform for chemical engineering[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2017, 26(1):91-100.

[35]龚自成. 基于虚拟现实的焊接仿真应用与研究[D]. 电子科技大学, 2018.

[36]杨旭. 基于虚拟现实的注塑成型仿真系统的研究及开发[D]. 浙江大学, 2018.

[37]朱伟. 基于 Unity 3D 的注塑机虚拟仿真系统设计与开发[D]. 华中科技大学, 2014.

[38]杜建豪. 基于 HTML5 的机械类课程虚拟仿真实验技术研究[D]. 华中科技大学, 2017.

[39] 李先成. 虚拟现实环境下车间装配仿真关键技术研究[D]. 华中科技大学, 2017.

[40] 刘钊, 徐富新. 基于 Unity 3D 的光谱实验教学系统研究 [J]. 计算机技术与发展, 2019(06):1-7.

[41] INDRAPRASTHA A, SHINOZAKI M. The Investigation on Using Unity3D Game Engine in Urban Design Study[J]. Itb Journal of Information & Communication Technology, 2009, 3(1):1-18.

[42]耿强. 基于 Unity3D 的多平台虚拟仿真关键技术研究[D]. 天津工业大学, 2016.

[43]郭小艳. 基于组件的应用系统构造方法研究[D]. 东华大学, 2016.

[44] 何伟. Unity 虚拟现实开发圣典[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2016

[45] 陈波, 宁洪. 设计模式分析与应用[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(2):146-148.

[46]程飞. 基于三维纹理场的自然纹理模拟[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2019(01):70-72.

- [47] 申慧珍. 虚拟沙画实时绘制与渲染技术研究[D].中北大学,2018.
- [48] 汪浩文,张捷.全局光照下古建筑场景的仿真渲染研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2018,32(11):140-146.
- [49]Ma Z, Wang L, Zheng Y, et al. Shadow Rendering for Meso-structure Surface Based on Height Gradient Map[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(12):110-114.
- [50]Molnar S , Cox M , Ellsworth D , et al. A Sorting Classification of Parallel Rendering[J]. IEEE Comput.graph.appl, 1994, 14(4):23-32.
- [51] 杨浪. Unity 中的碰撞检测方法研究[J]. 软件导刊, 2014(7):24-25.
- [52] Zakai A . Emscripten: an LLVM-to-JavaScript compiler[C].Acm International Conference Companion on Object Oriented Programming Systems Languages & Applications Companion. ACM, 2011.
- [53] Krall A . Efficient JavaVM Just-in-Time Compilation[C]. International Conference on Parallel Architectures & Compilation Techniques. IEEE, 1998.
- [54]D'Ausilio A. Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment[J]. Behavior Research Methods, 2012, 44(2):305-313.

华中科技大学硕士学位论文

致 谢

逝者如斯夫，不舍昼夜。硕士三年的时光马上就要接近尾声了，还记得三年前带着憧憬踏入了求知的大门，如今这段旅程就要步入尾声，回忆过往，感慨颇多。

师者，传道受业解惑也。感谢何岭松老师对我的悉心教导。毕业论文从最初的选题，到技术方案的确定，从整体框架的把握到最后的完善，何老师都给我提供了很多帮助。何老师渊博的学识，严谨的态度，处事的智慧都深深地影响了我。师恩难忘，无论以后我去往何处，从事什么样的职业，但希望我能严格要求自己，认真做事，踏实做人。

还要衷心感谢机械学院唐立新、朱福龙老师。在这三年来，华中科技大学的很多老师也给了我很多帮助。无论是授课老师，还是陪伴我们三年的辅导员，还是教务科的老师们，在此衷心感谢。

岂曰无衣，与子同袍。感谢实验室的高志强博士，吴玉叶、韦文姬师姐，你们给了我很多生活和学习上的指导。感谢实验室的徐玉飞、谢道旺、李洁平、曹扬帆、王向阳、王宇顺、刘聪俊、侯慧杰、郑林，你们让我的生活丰富多彩。或许告别之后，就是各自匆匆，但这份记忆会永远留在五月的华中大，留在小小的 538。

最重要的是感谢我的父母，正是由于你们默默的付出，我才能在硕士三年生活中衣食无忧。感谢你们对我无条件的爱和包容，感谢你们每次电话那头“缺钱吗”的询问。或许你们不善言辞，或许你们没什么文化。但我始终明白，在成长的道路上，是你们在为我负重前行。父母恩，深似海，重如山。我每念于此，不知所言，无以为报。

华科梧桐仍依旧，人迹远，各西东。

别后悠悠君莫问，无限事，不言中。

阚研

2019 年 4 月于华中科技大学

附录 1 攻读学位期间取得的研究成果

发表学术论文

- [1] 阚研, 何岭松, 谢道旺, 徐玉飞. Unity3D 下虚拟仪器的实现[J]. 软件导刊, 2019.
- [2] Zhu Fulong, **Kan Yan**, Tang Kai, et al. Investigation of Thermal Properties of Ni-Coated Graphene Nanoribbons Based on Molecular Dynamics Methods[J]. Journal of Electronic Materials, 2017, 46(8):4733-4739. (**SCI, EI**).
- [3] Yongjun Pan, Fulong Zhu*, Jiajie Fan, Xinxin Lin, Fengren Wang, Lang Shi, **Yan Kan** and Sheng Liu, “Reliability prediction of LED packaging by fatigue behavior of bonding wire in power cycling accelerated test”, Electronics Packaging Technology Conference, EPTC 2017, p1-4, 2017. (**EI**).