

工学硕士学位论文

基于 Kinect 多人在线  
虚拟实验系统的研究

哈尔滨理工大学

2016 年 3 月

国内图书分类号：TP391.9

工学硕士学位论文

# 基于 Kinect 多人在线 虚拟仿真实验的研究

硕士研究生： 张佳梁

导 师： 郭文兰

申请学位级别： 工学硕士

学 科、专 业： 计算机科学与技术

所 在 单 位： 计算机科学与技术学院

答 辩 日 期： 2016 年 3 月

授予学位单位： 哈尔滨理工大学

Classified Index: TP391.1

Dissertation for the Master Degree in Engineering

# **Research on Multiplayer Online Virtual Experiment System Based on Kinect**

<b>Candidate:</b>	ZhangJialiang
<b>Supervisor:</b>	GuoWenlan
<b>Academic Degree Applied for:</b>	Master of Engineering
<b>Specialty:</b>	Computer Science and Technology
<b>Date of Oral Examination:</b>	March, 2016
<b>University:</b>	Harbin University of Science and Technology

## 哈尔滨理工大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《基于 Kinect 多人在线虚拟实验系统的研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文研究工作做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：张佳梁      日期：      2016 年 3 月 19 日

## 哈尔滨理工大学硕士学位论文使用授权书

《基于 Kinect 多人在线虚拟实验系统的研究》系本人在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨理工大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨理工大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门提交论文和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权哈尔滨理工大学可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于

保密 ☐ 在      年解密后适用授权书。

不保密 ☒。

（请在以上相应方框内打√）

作者签名： 张佳梁

日期：2016 年    3 月 19 日

导师签名： 郭文兰

日期：2016 年    3 月 19 日

# 基于 Kinect 的多人在线虚拟实验系统的研究

## 摘 要

传统的虚拟仿真实验大多依赖于鼠标键盘的交互方式，并且大部分只允许单人操作。如何开发一款高沉浸感，以体感交互的方式进行操作，允许多人同时操作，实现团队协作的虚拟仿真实验成为热点问题。

本文研究了机器学习领域的 Kinect 体感交互技术，该技术可以获取空间深度图像、分离人体图像、确定人体骨骼信息，最终捕捉人体动作。在由 Unity 3D 搭建的虚拟环境中调用并处理这些信息后，用户可以通过体感的方式对虚拟实验进行操作。这种自然人机交互方式给用户带来更高的真实感和沉浸感。同时，本文在虚拟仿真实验中引入远程过程调用（Remote Process Call, RPC）技术，实现了虚拟实验系统在局域网范围内的服务器与客户端相连接功能，实验者将自己的操作实时同步到其他实验者的实验环境中。弥补了体感虚拟实验在多人协作方面的空缺。本文的研究内容包括：分析 Kinect 体感技术基本原理及其相关应用，以及体感虚拟实验中网络技术的比较与选择，体感多人虚拟实验基本框架，具体工程应用评测四个方面：

首先，详细分析了 Kinect 人体姿势识别的技术原理，包括基于 Light Coding 技术的深度图像采集和生成、基于随机决策森林的人体部位分类方案，以及骨骼关节定位方案。扼要介绍了如何调用 Kinect SDK for Windows。调研了海内外开发者在基于 Kinect 的各行业的应用研究情况。

其次，分析研究了能够适用于虚拟实验的网络技术，包括 Socket 和 RPC 技术。分别分析了它们的优缺点及应用场合。结合体感虚拟实验对于网络通信的实际需要，确定应用 RPC 技术作为体感虚拟实验多人通信模块的核心技术。并阐述了基于 Unity 3D 引擎的远程过程调用的具体实现。

再次，详细阐述了基于 Kinect 体感技术多人在线虚拟实验的系统框架及各模块的功能作用。

最后，为验证本文构想的可行性，设计并实现了一款基于 Kinect 体感技术多人在线的虚拟化学实验。经过评测，该虚拟实验具有效果逼真、可自然人机交互以及支持多人在线同时操作的特点，具有良好的实际使用价值。

**关键词** 多人在线；虚拟实验；Kinect；体感交互；Unity 3D

# **Research on the Multiplayer Online Virtual Experiment System Based on Kinect Somatosensory Interaction**

## **Abstract**

Since the Virtual Reality technology is increasingly mature, people begin to value the Virtual Experiment based on Virtual Reality technology. But the interface of traditional virtual experiment were mostly 2D ones, and the interaction pattern relied on mouse and keyboard, and most of them only allowed one user operating at a single time. So it is a hot issue that how to develop a kind of 3D virtual environment with high immersion, can be operated by somatosensory interaction and in which multiple users can conduct together at the same time.

This paper studies the Kinect somatosensory technology of the computer learning field. The Kinect can obtain the depth image of the space, separate human image from background, determine user's skeleton joints information, and catch human gesture data in the end. User's skeleton data is processed in the virtual environment built by Unity 3D engine, then user can conduct a virtual experiment by somatosensory interaction. Compared with traditional mouse and keyboard interaction pattern, this kind of natural interaction pattern brings more sense of reality and immersion to customers. At the same time, this paper introduces Remote Process Call technology to virtual experiment, realizes the goal of connecting the virtual experiment system between server-side and client-side to update one's operation within all the users' virtual environment. This proposal fills in gaps in multiplayer online in virtual experiment. Research contents of this paper includes: analyzing Kinect somatosensory technology principles and researching the applications of Kinect in related fields, comparison and selection of network technology for virtual experiment communication function, basic framework of somatosensory multiplayer virtual

experiment, specific project and evaluating.

Firstly, introducing Kinect somatosensory technology in detail, including four parts: capturing and generating depth images based on Light Coding technology, proposing a solution to classify human parts based on random decision forests, and locating human skeleton joints positions. Introducing briefly the Kinect for Windows SDK and investigating the cases of Kinect application in related area.

Secondly, listing and analyzing the network communication technology can be used in somatosensory virtual experiment. There are Socket and RPC technique. The paper compares their advantages and disadvantages also their suitable applications. We determine to choose the Remote Process Call technique as the core technique for network communication of virtual experiment in consideration of actual requirement. And we illustrate the actual realization of Remote Process Call in Unity 3D project.

Thirdly, expounding the structure of the multiplayer online virtual experiment based Kinect somatosensory technology; and we talk over the functions of each module of the system.

Finally, testing and verifying the possibility of the techniques referenced above, and we designed and developed a set of multiplayer online Kinect somatosensory virtual experiment for chemistry. The application has the advantages of lifelike experimental effect and nature human-computer interaction, also supports multiplayer online.

**Keywords** multiplayer online, virtual experiment, Kinect, somatosensory interaction, Unity 3D

# 目 录

摘 要.....	I
Abstract .....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究的背景和意义.....	1
1.2 虚拟实验及体感技术研究现状.....	2
1.2.1 虚拟实验研究与发展现状.....	2
1.2.2 体感技术及其在虚拟仿真实验中的研究现状.....	4
1.3 网络虚拟实验的研究现状.....	6
1.4 本课题研究的主要内容.....	7
1.5 本文的组织结构.....	8
第 2 章 Kinect 体感技术原理概述 .....	9
2.1 Kinect 硬件组成 .....	9
2.2 深度图像成像原理.....	10
2.2.1 结构光测量和激光散斑原理.....	10
2.2.2 光源标定 .....	11
2.2.3 Light Coding 技术 .....	12
2.2.4 ToF 光学测距 .....	13
2.2.5 生成深度图像.....	13
2.3 骨骼信息提取.....	14
2.3.1 人体部位标签法.....	15
2.3.2 基于随机决策森林的人体部位分类.....	15
2.3.3 人体骨骼关节定位方案.....	17
2.4 Kinect for Windows SDK 介绍 .....	18
2.5 Kinect 应用现状 .....	18
2.6 本章小结 .....	19
第 3 章 体感虚拟实验的网络通信模块.....	20
3.1 体感虚拟实验传输的数据类型.....	20
3.2 常用网络技术优缺点分析.....	21
3.2.1 Socket 套接字 .....	21
3.2.2 RPC 协议 .....	22



3.3 基于 Unity 3D 的 RPC 技术 .....	24
3.3.1 Unity 3D 中的网络协议 .....	24
3.3.2 Unity 3D 中的 RPC 功能的实现 .....	25
3.4 本章小结 .....	26
第 4 章 基于 Kinect 体感交互的多人虚拟实验设计 .....	27
4.1 环境介绍 .....	27
4.2 虚拟实验系统架构 .....	28
4.2.1 Kinect 体感信息采集模块 .....	29
4.2.2 实验操作控制模块 .....	30
4.2.3 网络通信模块 .....	32
4.3 本章小结 .....	33
第 5 章 体感虚拟化学实验的评测与优化 .....	35
5.1 体感虚拟化学实验介绍 .....	35
5.2 性能评测与优化 .....	37
5.3 本章小结 .....	42
结论 .....	44
参考文献 .....	46
攻读硕士学位期间发表的学术论文 .....	50
致谢 .....	51

# 第1章 绪论

## 1.1 课题研究的背景和意义

虚拟现实（Virtual Reality，VR）的核心是计算机技术，联合其他科学技术，在一定程度上模拟出与真实环境高度近似的数字化环境。使用者通过使用特殊的设备来与虚拟场景进行交互沟通，从而激发使用者“身临其境”的感官体会<sup>[1]</sup>。

近年来，随着虚拟现实技术的不断发展进步，基于虚拟现实技术的虚拟仿真实验也逐渐在诸多领域被认可，比如学校实验教学、灾难逃生演练、军队战术演习以及外科手术培训等。其中，虚拟实验是以虚拟现实技术为基础，辅以多媒体仿真技术，基于计算机硬件平台搭建的能够协助乃至代替真实实验的虚拟环境。用户通过与实际实验十分接近的方式进行虚拟实验操作，最终获得的实验结果不差于甚至优于实际实验结果<sup>[2]</sup>。而国家相关政策提倡用虚拟实验教学弥补真实实验、训练中所存在的高危险、高污染、高损耗、长周期等诸多问题，所以很多学校已经开始借助虚拟仿真实验进行各类教学课题。

传统的虚拟仿真实验基于虚拟现实技术，借助计算机硬件平台和相应的软件程序对现实境界进行模拟仿真，但交互方式大多基于鼠标键盘，实验界面也以 2D 交互界面为主<sup>[3]</sup>。对于这样的操作方式，学生在使用时缺乏沉浸感，无法切身融入实验操作中，久而久之虚拟实验操作也变成一种机械式的拖拽、点击的任务。只借助普通的虚拟显示技术，虚拟实验对于真实实验的替代还是十分有限的。经调查以体感交互替代传统桌面式交互是个不错的选择。现如今各种体感设备不断涌现，比如能够采集人体头部位置的 OculusRift、能够捕捉双手位置动作的 LeapMotion 和数据手套等等。它们都能够在硬件层面采集人体的部分动作信息，然后将这些数据传递到相应的 SDK 中供开发人员调用处理。然而这些体感设备通常价格比较昂贵或专用于某些目的，导致它们难以在普通院校和开发者之间推广。微软推出的 Kinect 传感器不仅价位比较适中，并且能够环境深度信息和用户骨骼信息，这使得它被广泛应用于三维重建、手势识别、虚拟试衣等各种领域。在人体动作采集方面，Kinect 为虚拟实验的体感操作的开发提供了极大的自由度。

开发人员可以将 Kinect 采集的人体动作信息与虚拟场景中的第一人称角色绑定。虚拟场景中的人物会随着用户的动作而动作，这显著提升了虚拟实验的沉浸感。

此外，传统的虚拟实验大多只能允许单次单人进行操作，这既不符合真实实验的协作方式，又降低了虚拟实验的教学效率，影响教学效果。开发支持多人在线操作的虚拟实验，既能够满足部分实验对于团队协作的要求，又能够提高教学效率，同时为虚拟实验的发展开辟了新的方向。

该项目的研究成果，可以用在各级各类学校的实验教学活动中，激发学生对于实验操作的兴趣，帮助学生理解实验原理，培养学生团队协作能力，互相增进了解，同时有效的避免了真实实验可能造成的伤害。减少了真实实验投入和设备保养花销。

## 1.2 虚拟实验及体感技术研究现状

### 1.2.1 虚拟实验研究与发展现状

在虚拟现实技术诞生之初，它不可估量的发展前景已经被人们察觉。以发达国家为首的，世界各地均对其进行了深入研究。作为发源地的美国对于 Virtual Reality 技术的研究水准同时也引领着世界范围内的科研水准。最先对 Virtual Reality 进行研究的机构当属北卡罗莱纳大学（UNC），其研究重点为粒子形态重建、航天设备模拟操作、外科处置模拟、工程模拟等。而麻省理工学院着重钻研作为 Virtual Reality 基础理论的人工智能、图形处理和动态画面处理等学科。随后组建了媒体实验室进行虚拟场景的研究；人机界面技术实验室（HIT Lab）是华盛顿大学华盛顿技术中心为将 Virtual Reality 研究与教学、规划、文娱和工程等方面进行融合而成立的。美国在二十世纪初在国防事业的 VR 技术应用就已经处于领先地位，应用于四个方面：战地场景模拟、列兵培训、多军种组合演练、指挥员培训。日本也曾引领过虚拟现实技术的研发，其贡献重点在于，Virtual Reality 理论库的探究。此外在虚拟现实的游戏方面，NEC 公司搭建了一种系统，借助数据手套将操作人员手部动作与模型加工联系起来，它允许用户使用“代用手”来对三维 CAD 进行操作<sup>[4]</sup>。

虽然我国起步稍有落后，但在 VR 方面的发展有着不俗的速度，并且科学家们在政府相关部门的支持下，对这一方向开始逐渐深入的研究。在国际

新技术的推动和基本国情的大背景下，相当一批的国内院校已经展开了这个范围的研究开发。西安 VR 工程技术研究中心所属于西北工业大学，他们是国内首先进行 VR 技术研究实验的机构。这个中心的建立，积极推动了学校相关院系和研发中心在虚拟现实等领域的研究。

来自美国弗吉尼亚大学的威廉·沃尔夫（William Wolf）在 1989 年率先给出了“虚拟实验”这一观点，核心在于在计算机硬件平台上基于多媒体仿真、虚拟现实等技术进行传统实验各操作步骤的模拟仿真。拥有虚拟性、沉浸性、交互性和多通道感官性等特征的虚拟实验，解决了当前课堂实验的难题。它竭力于虚拟化模仿真实实验平台，为师生提供看、听、摸等刺激，并为师生创造了全方位体验的学习氛围。

各类技术的进步催生了西方国家高校里公开式网络虚拟实验平台的搭建，这类平台提供了模拟化和数码化的实验平台和公开式的实验室管理系统。基于此类平台，师生可以对经典实验进行自由设计搭建，设置、连接、调节和使用相应设备。这种方法可以为经费、场地、设备、材料等方面遇到的问题提供解决方案，同时学生进行实验也不再受到“时间、空间、经费、老师和学生数量”的束缚。老师和学生可以任何时候登陆虚拟实验室进行操作或评分，此举大大提高了教学效率和质量。比如，就读于美国俄勒冈大学学习生物学的学生可以参与由学校与工厂合作举办的工厂操作间仿真实验。学校依据工厂供给的车间详细技术数据和视频，进行计算机模拟。最初，以小组为单位的学生要观看车间视频，在有教师参与答疑的条件下撰写实验计划，内容含有费用，人力，材料，设备损耗等。随后，为保证计算机模拟操作周期最短，学生要始终查看真实实验进度。实验结束时，学生要完成一个包括实验视频、仿真数据和结果阐述在内的 15 分钟的口头报告。然后教师给小组的实验结果打分。另外，学生要完成一个内容包括真实生产中遇到的问题、解决方案、设备改进建议等方面的实验备忘录来提交给工厂。由于真实实验中的实验操作和药品作用时间可以被计算机程序简化，所以学生可以在短时间内完成全套实验步骤，缩短了实验周期<sup>[5]</sup>。

从欧美国家高校为学生开展仿真实验的多年经验来看，虚拟实验与真实实验相比的强大吸引力表现在以下几点：

1. **经济** 材料的反复利用，降低了成本消耗。
2. **安全** 虚拟实验中，学生接触不到危险药品，实验也不会产生有毒反应物。
3. **真实性** 学生事先做好了与真实工厂作业十分接近的时间和成本预

算。

#### 4. 灵活性 高阶实验室可以被推广至其他课程。

从 1999 年“21 世纪教育振兴规划”指出“现代远程教育工程”。到 2012 年教育部颁布的《教育规划纲要》中再次指出要健全现代远程教育服务体系，构建服务社会的终身学习的信息化环境和服务。现如今我国已在各级各类教育体系中推广了教程教育，远程教育逐渐成为十分重要的教育形式<sup>[6]</sup>；汉口大学的 He Liu 等人以虚拟机为基础搭建了虚拟实验网络教学平台<sup>[7]</sup>；张学军等人借助 Flash3D 开发了化学虚拟实验系统<sup>[8]</sup>；奉强及其团队将虚拟实验应用到了化学物理教学中<sup>[9]</sup>；李倩深入调研了职业教育中公开式虚拟实验平台的应用情况<sup>[10]</sup>；王鑫海团队针对现今虚拟化学实验凸显出来的弊端，研发了一套测试方案来对考察分析虚拟实验的教学效果，结果证明：引入虚拟实验可以大大改善学生学习兴趣，同时也能够整体改善学生的知识水平<sup>[11]</sup>；杨小勇立足虚拟实验的实用性、可操作性的角度，深入研究了高中化学教学中虚拟实验的作用和意义<sup>[12]</sup>。

近年来，该领域的发展说明，虚拟仿真实验系统从系统底层架构建设、前端画面显示到人机交互方式等诸方面都得到了长足进步，但还存在以下几点问题：

1. **操作界面方面** 大部分虚拟实验还是以 Flash 动画为主的二维操作界面，没有纵深的空间感。借助鼠标对实验仪器进行拖拽无法带给实验人员真实的模拟效果。这种基于二维的虚拟实验操作界面，如同在课堂上教师将教学挂画挂在墙壁上，让学生将相应的器材纸板放在相应的位置上，毫无沉浸感可言。所以设计开发带有三维纵深效果的虚拟实验场景具有重要意义；

2. **人机交互方面** 除了沉浸式的虚拟仿真系统外，都是通过鼠标与键盘，以传统的图形用户界面（Graphical User Interface, GUI）与系统进行对话交互，所以摆脱键盘鼠标的自然人机交互（Natural User Interaction, NUI）是值得开发人员深入研究的方向；

3. **多人协作方面** 很多实验支持两人及以上协同操作。既能培养团队协作能力，又能增进互相了解，促进同学之间团结。另外，多人合作实验可以压缩实验周期，提高教学质量。

### 1.2.2 体感技术及其在虚拟仿真实验中的研究现状

体感技术的主要用途就是在用户不被其他控制设备束缚的前提下，允

许使用者通过日常行为动作与虚拟场景交互，从而产生置身其中的感觉。体感技术的应用融合了认知和文化层面因素：基于手势的沟通方式，鼓励用户去触摸、移动或者以其他的方式操纵设备。若在教学中应用体感技术，那么学习者的手眼协调能力、合作及创新意识都能得到提高<sup>[13]</sup>。这种应用的意义在于无需用户花费精力学习额外技能，只凭借现实生活中常用的姿势、手势、语音等常规技能就可以进行交互操作<sup>[14]</sup>。

在科研领域，人们也在不断探索如何将体感技术应用于虚拟仿真系统中。根据技术原理与检测参数的不同分为：惯性感测、光学感测以及惯性及光学联合感测。

**惯性感测：**是指基于重力传感器，陀螺仪或者磁传感器等硬件设备对用户身体动作的物理数据进行感测，主要有五种运动感测模式。这五种模式分别是加速（包括平移运动，如位置和方向的改变）、震动、冲击、倾斜、旋转<sup>[15]</sup>。惯性感测除了在运动感测和手势识别领域以外还有很多应用。这也是现在很多只智能电视体感操作的技术基础。

**光学感测：**是基于光电器件以光学原理为基础来对物体间相对运动参数进行检测的技术<sup>[16]</sup>。主要代表厂商为 Sony 及 Microsoft。EyeToy 是 2005 年 Sony 公司发布的光学感应设备，其功能是基于光学传感设备获得人体图像，通过此人体图像与游戏情节进行互动，内容多为简易的互动小游戏。而 Kinect 传感器是 Microsoft 公司于 2010 推出的划时代的体感外设，公司宣传其无需手柄即可实现体感效果，Kinect 采用激光与 RGB 摄像头采集用户 3D 肢体动作，它能够不受背景光照条件影响来获取比 EyeToy 精度更高的深度数据。

**联合感测：**主要代表厂商为 Nintendo 及 Sony。面世于 2006 年的 Wii，借助手柄中的重力传感器计算用户手部三轴向加速度，通过红外传感器接收主机发出的红外信号，来计算手部水平和垂直方向上的移动，来操控一个空间鼠标。这样的配置往往只能感知一些较为简单的动作，因此 Nintendo 随后推出了增强版的 Wii 手柄——Wii Motion Plus，增强之处在于添加了三轴陀螺仪，从而能够更精准对用户手部转动进行感知。强化了在体感方面的体验。为了不落后于竞争对手，Sony 公司又在 2010 年发布 Move 游戏手持设备，它将摄像头与传感器相结合来计算用户手部在场景中的旋转和位移。

调研了以上著名科技公司在各领域的体感产品，发现体感技术在虚拟仿真系统中的运用已经成为近年来的研究热点，在其日臻成熟的同时，也为

VR 领域开辟了新的科研方向。借助体感技术，用户可以在现实空间中进行虚拟实验，那么，若要将现实中人的动作信息准确地采集到虚拟场景中，首先要解决的问题就是如何在图像中将人体与背景分离开，即如何精确地进行“抠像”。

数字抠像（Digital matting）是指将图像或视频的前景与背景分离，它作为处理图像和制作电影中的热门技术，已经被广泛应用和深入研究<sup>[17]</sup>。初期的影视拍摄中，抠像对于设备和拍摄背景都有严格的要求，除需要在固定颜色背景下取景外，还需要有稳定的满足条件的光照。从处理图像的先后顺序上分，人像分离技术可大致分为后期图像处理和前期分离。

1. 后期图像处理 计算机的发展为整个图像处理创造了条件，在软件硬件都飞速发展的前提下，图像处理技术也被应用与诸多领域中。不仅具有美化的作用，还能使人类的生活更加丰富有趣<sup>[18]</sup>。现在，很多基于非线性算法的视频编辑器都具备抠像功能，比如 After Effects, VJDirector 等软件对于背景颜色要求不高，而 Premiere 软件在进行非线性编辑时，能够将各种特殊技术很好融合，最终实现较高的抠像质量；相比 VJDirector2 支持广播级抠像和颜色调整，支持蓝、红、绿 3 色背景抠像，完美实现虚拟演播室效果。这些软件大多基于颜色采样或像素相似性算法来实现图像分离。

2. 前期图像分离 是指将小波变换技术和稀疏成分分析算法应用于图像采集环节<sup>[19]</sup>；或者根据人体图像的某些特征信息，比如身穿带有特定标识的服饰、手套等；或者基于硬件层面对空间深度信息进行采集，以实现人体与背景图像的分离，比如结构光技术和 TOF 技术。结构光技术是指借助特定设备从固定角度采集被投射到物体表面载频条纹，将采集结果与源条纹对比计算，经过数字解调，最终得出待测物的三维数字影像；TOF 即为飞行时间技术（Time of Flight），原理是计算载波近红外光线发出和被遮挡后返回的相位时刻差，从而得出遮挡物的深度距离，最后在遮挡物的彩色图像上用与深度相关的色彩标明遮挡物的边缘轮廓。

### 1.3 网络虚拟实验的研究现状

随在数字信息全球化的大背景下，远程教育的理念逐渐深入人心，也就有越来越多的开发人员开始尝试开发网上虚拟实验系统，以满足学生对于自由上网进行实验操作的需要。除了能够解决实际实验教学在经费、设备和人员上投入过多的弊端，网上虚拟实验还能够为异地远程学习给予帮助，以保

障远程教学能够有效进行<sup>[20]</sup>。然而现如今的远程教育更多的是为学生提供阅读观看既定内容的实验课程，学生缺乏自主动手的机会，所以如何丰富网络虚拟实验的功能，为学生提供动手操作的平台成为了热点问题<sup>[21]</sup>。

## 1.4 本课题研究的主要内容

本文对基于 Kinect 体感技术的多人在线虚拟实验进行了分析，详细说明如下：

1. **调研虚拟实验发展现状及可用于虚拟实验的体感技术** 本文首先调研了海内外对虚拟实验产品的研究情况，分析总结其特点及可创新之处，从用户沉浸感体验与自然人机交互方式出发以及网络通讯技术，研究了可用于虚拟实验的体感技术，主要包括人体深度图像采集，人体部位识别与骨骼提取、自然人机交互技术和可用于虚拟实验的通信技术，作为研发和实现基于体感技术的多人在线虚拟实验系统的理论基础。

2. **研究 Kinect 体感技术原理与底层算法** 在这个阶段，仔细研究了 Kinect 人体识别的底层算法。Kinect 用户动作判别功能包含几个环节：基于编码光的人体深度图像采集，基于随机决策树的人体部位识别，人体关节定位及骨骼生成。这部分集中研究了这几个环节的底层算法。

3. **研究并实现虚拟实验中的多人在线功能** 在此部分中，研究实现了虚拟实验的网络通信功能。虚拟实验的网络通信功能与即时聊天软件不同，与大型多人在线游戏 MMO 的通信功能类似，但虚拟实验所需传输的数据比游戏中传输的数据简单一些。根据虚拟实验对于通信功能的要求，对比了几种常用的网络通信协议，选出了适合虚拟实验的通信技术。并且在 Unity 3D 引擎中实现了网络通信模块的设计。

4. **将体感技术与网络通信技术融入虚拟实验** 首先，在该阶段，我们重点研究并实现了如何将 Kinect 采集的人体动作信息读取到 Unity 3D 引擎中，并且实现了用户身体姿势对虚拟人物的控制功能；其次，为满足多人协作功能，在 Unity 3D 项目中引入并完成了虚拟实验的通信功能。

5. **设计与实现基于体感技术的多人在线虚拟化学实验** 该阶段我们设计实现了一款具体的体感多人在线虚拟实验。在各个单独系统功能模块研发完成后，为了验证其体感动作和网络通信功能的可行性，本文选取高中化学实验为原型，联合体感虚拟实验的各个功能模块，设计并开发了一款基于 Kinect 体感交互的多人在线虚拟化学实验，并将其发布到 PC 设备，对其性能进行了评测与优化。



## 1.5 本文的组织结构

第一章阐述了本课题的研究背景和前景，同时对虚拟实验、体感技术和多人远程虚拟实验在海内外的研究现状进行了调研。

第二章分析了 Kinect 传感器的工作原理，其中包括结构光的发射与捕捉，深度图像的生成与数据分析，人体部位识别以及人体骨骼关节节点的提取。

第三章分析比较了几种网络通信技术，分别阐述了优缺点，并根据多人在线虚拟实验的实际需要，选择了相应合适的技术实现了多人在线功能。

第四章对本文要实现的基于 Kinect 体感技术的多人在线虚拟实验整体框架进行了阐述，并对其两个核心部分，人体动作捕捉与实验数据的网络同步进行了介绍分析，同时，分析了实现过程中涉及到的核心技术。

第五章实现与测试了一款具体的 Kinect 体感技术多人在线虚拟实验，验证了虚拟实验中 Kinect 技术和多人在线技术的可行性与稳定性。

## 第2章 Kinect 体感技术原理概述

微软公司在 2010 年正式公布了 XBOX360 的体感传感器 Kinect。它是一种具有动态影像采集分析、语音辨别、人体动作感测摄像机。微软高层认为 Kinect 体感技术在战略上既节省了开发新主机的成本，又在开辟了主机游戏的新纪元，同时也确立了微软在体感游戏市场的主导地位。Kinect 的摄像头在工程师的设计下能够捕捉人体姿势，然后进行识别记忆、分析处理姿势。而 Kinect 又不只是一个摄像机，它还有负责采集声音的麦克风阵列，在消除噪音的基础上对音源位置进行判断。

### 2.1 Kinect 硬件组成

Kinect 的主要任务是实现 XBOX 360 游戏主机的自然人机交互控制，这其中 PrimeSense 的技术功不可没。Kinect 的硬件包括一组红外线收发摄像头、一个彩色摄像头、一个倾角控制马达及齿轮机构、一组麦克风阵列以及其他相关电路及散热装置。

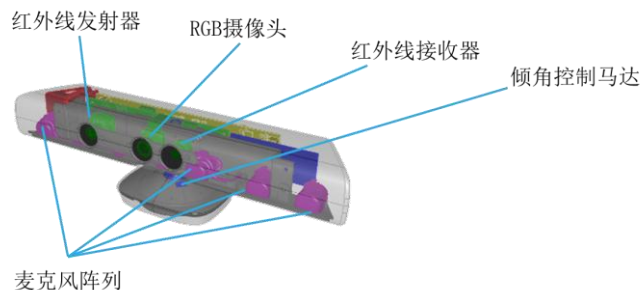


图2-1 Kinect传感器硬件结构图

Fig. 2-1 Hardware structure of kinect sensor

红外线投影器：主要任务是主动投射近红外光斑，光斑在遮挡体表面产生随机形变，最后被红外摄像头采集。

红外摄像头：采集物体上的随机散斑，为系统芯片提供数据信息。

彩色摄像头：能够自动对焦，捕捉空间视频影响，供核心芯片调用。

倾角控制马达及齿轮机构：可以根据实际需要编写代码控制传感器的仰角。

麦克风阵列：由四个麦克风组成，主要功能是过滤无关声波，采集用户

声音信息，确定音源位置。

PS1080 系统级芯片是 Kinect 的核心。该芯片以强大的并行处理能力著称，可以控制并投射近红外光谱和编码图像<sup>[22]</sup>。PS1080 对反射的编码斑点进行计算分析，接着产生外界场景的深度图像。一般情况下图像处理算法开销很大，会影响系统运行效率，为了不影响到用户主机的运行稳定性，Kinect 将全部图像计算任务都放在 PS1080 中进行，主机仅需要保证 USB 通信层的可靠运行即可。由于考虑到 Kinect 的放置平面未必绝对水平，或者有不固定的运动的应用场景，Kinect 的硬件设计包含了 Kionix KXSD9 三轴加速计。三轴加速计的引入是为了进行倾斜偏移补偿计算。迄今为止，微软一共发布了两款 Kinect：Kinect 1.0 和 Kinect 2.0，如图 2-2 所示。



图2-2 Kinect 1.0与Kinect 2.0

Fig. 2-2 Kinect 1.0 and Kinect 2.0

表 2-1 两代 Kinect 参数对比

Table 2-1 Comparison of parameters

Kinect	彩色图像分辨率	深度图像分辨率	通信协议
Kinect 1.0	640*480	320*240	USB 2.0
Kinect 2.0	1080P	512*424	USB 3.0

## 2.2 深度图像成像原理

### 2.2.1 结构光测量和激光散斑原理

结构光是由激光器产生，被透镜汇聚成的窄宽度的光带。激光器能够将光栅、光缝或光点投射至被测体表面上。而结构光三维成像技术能够将三维

形貌、灰度和颜色等三维空间信息采集下来，并进行三维重建<sup>[23]</sup>。常规的结构光方法以三角测距为基础理论。它能够快速精准的进行三维测定，以至于在诸多领域都有广泛的使用。结构光测算中的核心算法之一是相角测算，它能够给出空间的 3D 点云。激光在发生漫反射或穿过毛玻璃时，会生成随机散布的明暗光斑，这种光斑叫做激光散斑（Laser Speckles）。这些激光散斑在具有一定粗糙程度的物体表面上会产生特殊并且美丽的图案，如图 2-3 所示。

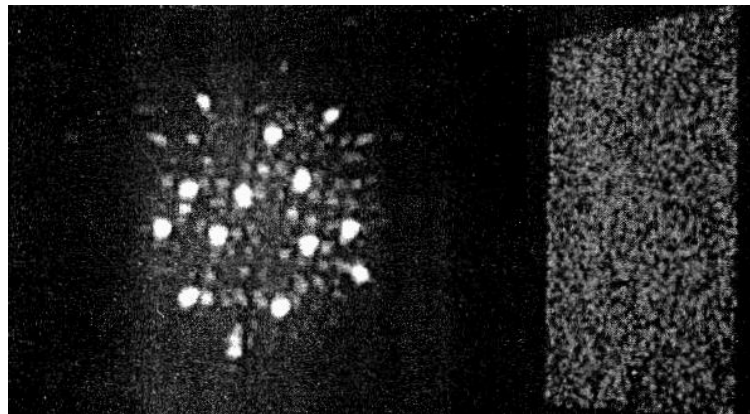


图2-3 激光散斑图案

Fig. 2-3 Laser speckles patterns

相干光投射至不规则散射物体时，会产生随机的激光散斑。借助概率统计相关的算法对这一随机过程进行分析，能够深入了解散斑的运动规律、强度与对比度分布情况。而这种散斑因为它具有较高的随机度，使得它自身的图样随距离而变化，即场景中随意挑选两点的散斑图样都是相异的。基于激光散斑这一特点，可以将空间中用结构光做标定，存储空间中散斑图案信息，当物体进入空间后，根据物体表面散斑图样形状就能推算出物体在空间中的坐标。

### 2.2.2 光源标定

PrimeSense 在其发表的论文中阐述了他们的标定算法：在空间中以固定间隔选取参考平面，并保存平面上的散斑图样信息。假如传感器有效使用距离为 1~4m，沿红外摄像头光轴方向以 1cm 为间隔选取平面，则可以获取 300 幅散斑图案，如图 2-4 所示。精度与间隔成反比。在估算物体距离时，

将物体表面散斑图案与已知的所有参考图案进行比对计算出具有最高相关度的参考图案。从而采集到的散斑图案所在的位置与这幅参考图像的已知深度值近似相等，以此确定物体在空间中相对于传感器的位置<sup>[24]</sup>。

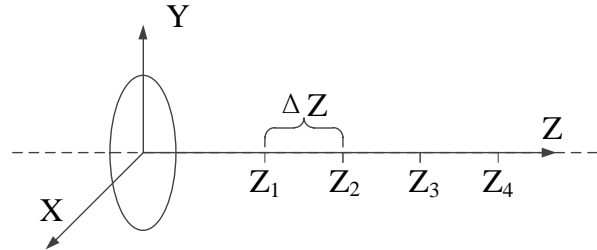


图2-4 红外摄像头光轴示意图

Fig. 2-4 Optical axis of infrared camera

实际应用中，采集被测表面的散斑图样，将其与经过学习的 300 个比照图样进行互相关计算，从而获得 300 个相关度计算结果。如图 2-5 所示。相关图像上的峰值点即为物体所处的位置，将峰值叠加并进行差值处理，即可还原三维场景。

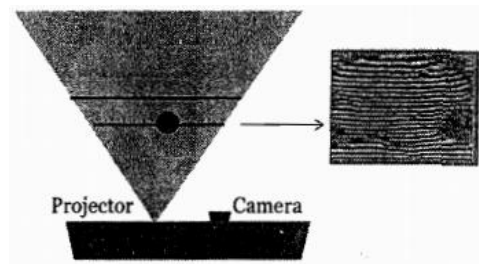


图2-5 光源标定

Fig. 2-5 Light source calibration

### 2.2.3 Light Coding 技术

PrimeSense 将其深度测量技术命名为 Light Coding，这项技术是用光源照明给需要测量的空间编上码，属于结构光技术的一种，只是深度计算方式不一样。

Light Coding 是 PrimeSense 研发的深度检测算法，是一种采用特殊深度计算方法的结构光技术。Light Coding 算法与常规结构光算法相比，光源为激光通过毛玻璃随机产生的衍射光斑。该散斑随机性很高，且图样和距离相关。当然，事先的光源标定过程不能省略。Light Coding 算法与传统的结构

光算法相比,标定光源是由 PrimeSense 的芯片产品 PS1080 操控发出的激光散斑,属于一种三维编码。并且测量精度只受标定参考平面的疏密情况影响,与空间几何位置无关。Kinect 1.0 采用 Light Coding 技术采集三维空间的深度信息,通过与事先保存的散斑参考图案做比对,从而得出场景中的物体与 Kinect 摄像头的距离,如图 2-6 所示。然而,根据 K.Khoshelham 的关于 Kinect 深度数据准确性分析的论文观点:随着物体与传感器距离的增加,深度测量的随机误差也会增加,并且从几毫米增加到 4 厘米(达到传感器最大范围时)<sup>[25]</sup>。而对于提高这种准确度,Kourosh Khoshelham 和 Sander Oude Elberink 又提出了一种理论错误分析,这个分析可以阐明有哪些因素影响数据的准确性<sup>[26]</sup>。



图2-6 Kinect投射的激光散斑

Fig. 2-6 Laser speckles projected by Kinect

#### 2.2.4 ToF 光学测距

飞行时间 ToF 理论是指,借助记录脉冲光发出时刻和脉冲光被物体遮挡反射回来的时刻,再做差计算得出这档物体所处位置<sup>[27]</sup>。由于材料稀有,所以此类摄像头价格不菲。在 Kinect 2.0 中采用了 ToF 技术,由于 Kinect 1.0 与 Kinect 2.0 的开发过程基本一致,所以本文以 Kinect 1.0 为主,对于 Kinect 2.0 只做了解。

#### 2.2.5 生成深度图像

Kinect 1.0 借助 Light Coding 技术来获取三维空间中物体以及人体的深度图像,如图 2-7 所示。然后应用相关技术对深度图像进行处理,对人体图像进行分离,从而追踪人体动作。



图 2-7 Kinect采集的彩色图像和深度图像

Fig. 2-7 Color and depth image captured by Kinect

深度图像是由代表一个 16 位短整型数值的像素点组成。如图 2-8 所示。其中，前 13 位表示使用者与 Kinect 传感器的间隔，单位为毫米，后 3 位代表用户序号：“000”表示该像素点中没有任何用户的信息；“001”表示该像素点属于用户 1；“010”表示该像素点属于用户 2，以此类推，所以 Kinect 理论上能够同时跟踪识别 7 位用户。

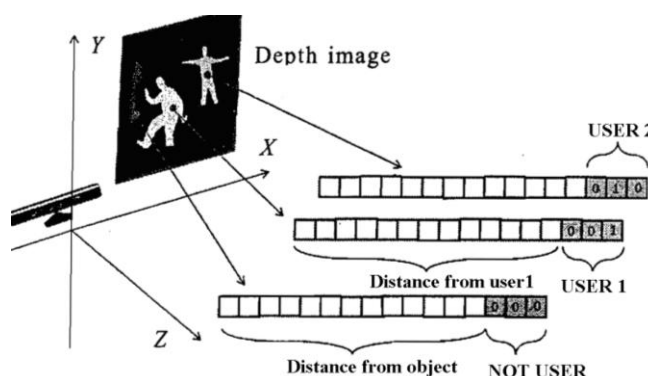


图 2-8 Kinect深度图像像素点是短整型数值

Fig. 2-8 Pixel value of depth image is short integer type

## 2.3 骨骼信息提取

要想对用户的身體動作進行追蹤判斷，需要將人體從空間深度圖像中分離出來，也就是人們常說的“抠像”。Kinect 實現的“抠像”與電影拍攝中使用的綠幕或藍幕技術有本質區別。Kinect 是对其采集的深度图像进行“像素级”的评估，从噪声环境中提炼有用信息。因为基于这种技术的深度图像不受日常光线影响，所以采集到的噪声比彩色图像更少。这种评估方法是基于机器学习技术实现的，微软事先对 Kinect 进行了大量的训练，使得其在识别人

体方面有着很高的精度和准确性。

### 2.3.1 人体部位标签法

首先，根据微软剑桥研究院微软 Jamie Shotton 等人发表的论文，他们对人体深度图像进行部位用不同的颜色标识。如图 2-9 所示。

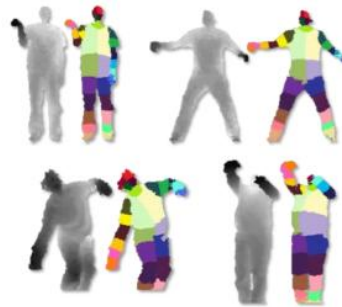


图 2-9 在深度图像上进行人体部位标记

Fig. 2-9 Paris of depth image and body parts

在这些人体部位中，其中一部分能够被直接用来对特定的兴趣关节点进行局部化，而其他的部位则用来弥补预测其他关节点时产生的不足，或者组合起来预测其他关节点。考虑到在人体的各种动作中，有相当一大部分动作中会存在遮挡的问题，所以还应该对人体的侧面进行部位标记。这种人体部位表示法将人体姿势识别的难题转换成了能够被分类算法有效解决的问题。下面将要讲述的分类器就是用图 2-8 中所示的成对的带有人体部位标签的图像作为训练数据进行训练的。

### 2.3.2 基于随机决策森林的人体部位分类

首先定义一个公式对深度图像上的每一个像素点进行特征值计算，如公式 2-1 所示，

$$f_{\theta}(I, x) = d_I \left( x + \frac{u}{d_I(x)} \right) - d_I \left( x + \frac{v}{d_I(x)} \right) \quad (2-1)$$

其中  $d_I(x)$  是  $x$  作为像素在图像  $I$  中包含的深度数值，偏移量  $u$  和  $v$  由参数  $\theta = (u, v)$  给出。偏移量的标准化  $\frac{1}{d_I(x)}$  保证了深度不变性。通过确定的



世界空间坐标偏移量，我们就可以判断出人体表面上某一点与 Kinect 传感器之间的距离是近还是远。

这些特征值计算出来以后，它们作为个体对于判断该像素属于人体哪个部位的作用不大，但是在随机决策森林中将这此特征值组合起来以后，可以为机器学习的训练提供足够高的准确度。

基于随机决策森林的多级分类器在诸多领域内都已经被证明有较高的效率和准确度。分类从根节点开始，每一个分支包含一个特征值  $f_\theta$  和一个阈值  $\tau$ 。为了对图像  $I$  中的像素点  $x$  进行分类，分类器从根节点开始在每一个分支处都反复的对公式 2-1 进行计算，将公式结果与阈值进行比较，从而决定是剪掉左子树还是右子树<sup>[28]</sup>。在决策树  $T$  的叶节点处，我们得出了图像  $I$  中人体部位  $c$  上像素  $x$  的分布概率  $P_i(c|I, x)$ 。最终分类结果由决策森林中的所有树的平均分布概率得出，如公式 2-2 所示。

$$P(c|I, x) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T P_i(c|I, x) \quad (2-2)$$

在每一帧深度图像的 2000 个样本像素点中随机选择一个子集，用这个子集来保证人体各部位的概率分布尽量一致。训练随机决策树时采用以下方法：

1. 随机选出一套剪枝候选参数  $\Phi = (\theta, \tau)$  ( $f_\theta$  为特征值， $\tau$  为阈值)。
2. 通过每个  $\Phi$  来决定样本  $Q = \{(I, x)\}$  属于左子集还是右子集，如公式 2-3，2-4 所示：

$$Q_l(\Phi) = \{(I, x) | f_\theta(I, x) < \tau\} \quad (2-3)$$

$$Q_r(\Phi) = Q \setminus Q_l(\Phi) \quad (2-4)$$

3. 根据公式 2-5，2-6 得出最大增益

$$\Phi^* = \arg \max G(\Phi) \quad (2-5)$$

$$G(\Phi) = H(Q) - \sum_{s \in \{l, r\}} \frac{|Q_s(\Phi)|}{|Q|} H(Q_s(\Phi)) \quad (2-6)$$

其中香农熵  $H(Q)$  是由身体部位标签  $l_i(x)$  的标准化直方图计算得到的。

4.如果最大增益  $G(\Phi^*)$  足够大, 并且决策树的深度低于最大值, 那么就递归左子集  $Q_l(\Phi^*)$  和右子集  $Q_r(\Phi^*)$ 。

$V_{brighter}$ 、 $V_{darker}$  表征两个点集, 分别包含比  $p$  点灰度值高的点与灰度值比  $p$  点低的点。在分割测试算法提取的点集  $V$  中, 假设某点  $c$ , 其得分函数响应值为  $S_c$ , 在以点  $c$  为中心的  $s \times s$  ( $s$  通常为 3) 邻域内存在任意一点  $l, l \in V$ , 当  $S_c \geq S_l$  时,  $l$  就被过滤掉, 以此方法迭代求出点集  $V$  中其余的特征点<sup>[14]7</sup>。

### 2.3.3 人体骨骼关节定位方案

经过上述算法处理, 就能够得到深度图像中各像素点的信息。为了生成准确可靠的 3D 关节位置, 必须将所有像素合并起来进行信息分析。通常的方法是使用已知的矫正深度, 对每个部位进行概率累加从而得到该部位的 3D 中心。然而, 像素点与 3D 中心之间距离的增大使得累加结果的准确性降低。因此, 为了避免上述情况, 采用一种基于具有高斯核的均值漂移的查找方法来代替上述过程。首先将用户部位的密度估算器定义如公式 2-7 所示。

$$f_c(\hat{x}) \propto \sum_{i=1}^N \omega_{ic} \exp \left( -\frac{\|\hat{x} - \hat{x}_i\|^2}{b_c} \right) \quad (2-7)$$

其中  $\hat{x}$  是 3D 世界空间中的坐标,  $N$  是图像像素的个数,  $\omega_{ic}$  是像素的权重,  $\hat{x}_i$  是图像像素  $x_i$  根据深度值  $d_i(x_i)$  向世界空间中的二次投影,  $b_c$  是通过学习得到的每个部位的带宽。像素点权重  $\omega_{ic}$  由公式 2-8 得出。它代表在像素点上推断得出的人体部位概率。

$$\omega_{ic} = P(c | I, x_i) \cdot d_i(x_i)^2 \quad (2-8)$$

借助公式 2-7 计算得出的人体各部位密度, Kinect 能够在它捕捉的每一帧深度图像中确定每个关节的最可能的位置。最终 Kinect 基于机器学习对 32 个部位进行分类, 从而识别出人体的 20 个骨骼关节点, 由这 20 个骨

骼关节点生成一副骨架系统<sup>[29]</sup>。

## 2.4 Kinect for Windows SDK 介绍

为了广大开发人员和发烧爱好者能够编写代码对 Kinect 进行各种各样的应用开发，微软在 Kinect for Windows SDK 中提供了许多 Kinect 的 API 接口。其中包括 NUI API（彩色和深度图像信息流、骨骼跟踪信息流、空间坐标信息流）以及语音等相关的 API。

Kinect 是一种基于“管道”的体系架构。Kinect 设备为 SDK 提供最初信息流（Raw Sensor Streams），其中包含深度信息、RGB 图像信息和声音信息流。借助底层 API，开发人员可以自己编写代码，定义相关的姿势识别功能。

## 2.5 Kinect 应用现状

国内外众多学者都在尝试使用 Kinect SDK 及其他的相关技术来开发一些应用。如：鉴于现存的非接触式交互操作存在手势定义复杂、识别效率低等问题，曾繁江等人设计了一种非接触式 GUI 操控方式，基于 Kinect 传感器并辅以机器学习技术，重新定义了抓放手势，并命名为 RemoteControl<sup>[30]</sup>；张仲一等人利用 Kinect，结合深度图像和彩色图像，对用户手型进行分割，根据指尖点、凹陷点和掌心点对用户的输入手势进行判别，他们称呼这套系统为 Kinect 空中手势输入系统<sup>[31]</sup>；张毅等人提出了基于隐马尔科夫模型的手部轨迹判别算法，从而实现了借助 Kinect 提供的深度数据来识别用户手势轨迹<sup>[32]</sup>；吕维及其团队设计了一种能够实现模型自动拼接的方法，该方法将 Kinect 提供的场景深度信息进行数据融合处理。测试表明该方案能够给出较高的拼接结果<sup>[33]</sup>；孙树森等人调研了 Kinect 互动应用在社会应用和推动技术进步的方面的前景，探索了基于 Kinect 的《互动应用开发》课程的具体理论内容和教学方案<sup>[34]</sup>。现如今人体上半身肢体运动程度的检测步骤较为复杂，针对这一问题瞿畅借助 Kinect 传感器设计了测算方案。该方案实现准确的自动测算，测算效率较高<sup>[35]</sup>。W.-M.Hsieh 等人设计开发了一套基于 Kinect 监护老年人防摔倒虚拟现实系统<sup>[36]</sup>；而 John Stowers 等人使用 Kinect 的深度信息来控制四旋翼直升机的高度<sup>[37]</sup>；Hong Jianliao 等人开发了基于 Kinect 的虚拟组装系统，便于使用者在进行实际操作之前进行模拟操

作<sup>[38]</sup>，同时他们还设计了基于 Kinect 技术的电学虚拟实验<sup>[39]</sup>；Yi-Zeng Hsieh 等人利用 Kinect 的手势分割算法开发了虚拟物理实验室<sup>[40]</sup>。

根据查阅的论文，笔者认为可以基于 Kinect 传感器，利用 Kinect SDK 开发一套虚拟仿真实验系统，填补虚拟仿真实验在体感方面的空白。

## 2.6 本章小结

本章主要介绍了 Kinect 的硬件组成，其中主要由 PS1080 负责控制红外线主动投射摄像头和红外接收摄像头获取空间深度信息。这项名为 Light Coding 的算法与传统的结构光算法相比，标定光源不同，计算算法也不同。在获取了空间深度图像之后，根据深度值不同，可以将用户图像分离出来。基于随机决策森林，可以判断人体的每个部分。由于在训练的过程中对人体正面和侧面图像都进行了训练，所以实际使用中 Kinect 对于人体部位出现的遮挡也能够很好的处理。人体部位被确定以后，它们各自的骨骼中心就能够被相关的算法提取出来。最后所有深度信息、彩色图像信息以及骨骼关节点信息被输送到 Kinect SDK 供开发人员调用处理。本章扼要阐明了 Kinect 的技术理论，为下面的行文打好基础。

## 第3章 体感虚拟实验的网络通信模块

随互联网大数据的来临,使得人类的活动越来越离不开计算机网络。计算机网络以其数字化、多元化、全球化、交互性和即时性的特点影响着人们的工作和学习。而网络虚拟实验的出现也助推了学校实验讲授方式的革新和远程教育的进步<sup>[41]</sup>。但是,通常意义上的在线虚拟实验,是指借助某一实验数据管理平台和特定服务器,对所有学生和教师的账户进行管理。当多名同学进行虚拟实验操作时,也只是各自从服务器端缓存下来实验场景,单独进行实验。实验结束后,同学们各自选择“保存实验结果”或“提交实验报告”,将自己的实验操作过程和相应结果上传到服务器。当指导教师登陆管理系统时,即可对同学的操作和结果进行点评和指导,以此来实现师生互动的功能。可以看出这种情形并没有能够训练同学协同合作的能力。对此,我们分析了多人在线体感虚拟实验中所需要传输的数据类型,对各种网络通信技术分别加以分析并筛选出最适合的技术,将这种技术整合到基于 Unity 3D 引擎的虚拟实验控制中,最终实现真正意义上的多人在线,即每个同学都可以在自己的终端上看到别人的实时操作且可以参与其中,从而实现团队协作功能。

### 3.1 体感虚拟实验传输的数据类型

本课题要实现的虚拟实验的网络功能的主要任务是,将任意实验者在虚拟空间中的各种操作动作传递给所有联入统一局域网的其他的在线实验者,即将当前用户在当前终端设备上的操作同步给其他所有联网的终端设备。通过对体感操作进行分析,网络通信模块的具体功能是传递用户的双手实时位置、用户是否握拳和用户对实验器材和药品的抓取情况、以及是否进行抓取物体和物体的摆放和移动。从项目开发代码编写阶段分析来看,网络功能传递的是 Vector3 类型的手部位置坐标、bool 类型的握拳检测标记、bool 类型的物体抓取标记、Vector3 类型的物体移动坐标,此外,为了防止用户在漫游阶段的体感操作对实验设备的误操作,需要在用户落座之后,才能进行实验的操作,所以需要在网络中传递一个 bool 类型的用户落座标记 sitFlag。针对以上数据类型及虚拟实验项目的具体需要,我们对常用网络通信技术进行分析与筛选。

## 3.2 常用网络技术优缺点分析

### 3.2.1 Socket 套接字

Socket 是指网络上通过双向通信连接实现信息交换的两个程序体中的一端。Socket 被称为“套接字”，是一个用作端口和 IP 地址描述的通讯链句柄，可以用来实现不同虚拟机或不同计算机之间的数据交换。联入 Internet 的主机一般运行了多个软件，同时提供多种服务。每条服务都创建一个 Socket 并与一个空闲的端口捆绑，因此每条服务的端口各不相同。网络程序的开发绝大部分依赖于套接字进行双边通信<sup>[42]</sup>。Socket 类似于日常生活中的电话线缆和电话机之间的物理接口。如图 3-1 所示。

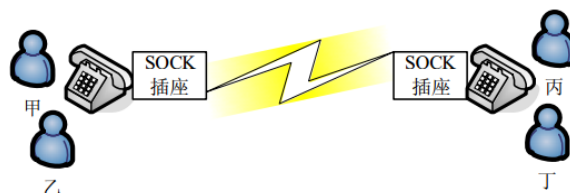


图 3-1 Socket 通信示意图

Fig. 3-1 Sketch map of socket communication

图 3-1 为使用 Socket 进行通信的示意图。Socket 通信的过程也与电话拨打的过程十分相似，电话两端的用户可以看作是有通信需求的两个进程；甲能够给丁拨打电话的前提是，甲需要一个电话实体，这个实体就相当于进程甲的 Socket；而与此同时，丁也需要有一部电话（Socket）。当甲给丁拨出电话时，即为提出连接申请。此时用户丁的电话线路没有被占用，即意味着对方进程已联入网络并处于空闲状态，丁接起电话，即为连接成功。两人在电话中倾听对方讲话和自己讲话的过程，即为 Socket 接收和发送数据。沟通完毕，其中一人放下电话，类似于停止 Socket，切断连接。

Socket 虽然是借助网络通信设备完成进程间数据传输，但却可以忽略通信设备的具体搭建过程，它采用 Client/Server 方式避免了进程间搭建连接的各种问题。工作流程如图 3-2 所示。为了能让 Server 与 Client 完成数据传输，两者必须创建 Socket。Server 在创建 Socket 之后，需要监听固定端口等候 Client 的连接申请。在收到 Client 的链接申请后，Server 将调用 Accept 功能建立与 Client 的数据连接。连接成功后，调用 Read 方法或 Write 方法进行信息交换。而 Client 在创建 Socket 之后，调用 Connect 方法

根据参数申请链接 Server 端相应的端口。在得到 Server 的连接允许后，Client 和 Server 端就能够调用 Write 方法和 Read 方法继续进行网络传输了。

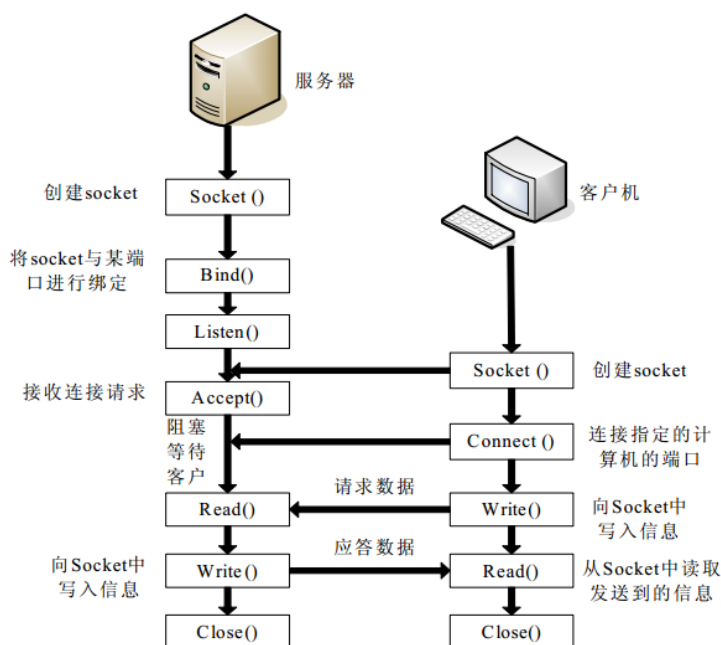


图 3-2 Socket 通信流程图

Fig. 3-2 Socket communication flow chart

在 Unity 3D 引擎中，Socket 通信功能模块通常由四个部分组成：接收发送数据模块、本地数据转换模块、接收数据转换模块和监听模块。Socket 通信适用于大量文件数据的传送情况，需要将数据打包发送，接收后解包再转换为原类型。从代码设计上来看 Socket 通信的实现代码也较为冗长复杂。

### 3.2.2 RPC 协议

远程过程调用协议（RPC）：RPC 是一种允许开发者忽略网络通信底层技术的远程终端服务请求协议。RPC 假设存在某种协议，比如 UDP 或 TCP，在这种假设下在通信代码之间传递信息。RPC 采用的是客户端（Client）/服务器（Server）模式。程序的请求者是 Client，而程序的提供者是 Server。

RPC 是建立在 Socket 之上的，它作为常用的 C/S 开发模式，稳定而高效。然而，RPC 是无需考虑详细实现过程的模块级调用，开发者可以将开发重点放在上层网络功能上，而无需纠结于协议的原理。所以 RPC 无法对

所有应用程序都给出最合适的处理方案，在交换同样的信息时，RPC 也比 Socket 消耗更多的网路资源。它比 Socket 需要更多的网络和系统资源。此外，开发人员在优化代码时，即便可以较为容易的改写 rpcgen 生成的源代码，然而若想获取为高效而生的 RPC 代码，则难度较大。

在计算机网络中，信息的放置和分析位置未必处于相同终端上。通常情况下，是信息从放置终端被传送至计算分析终端，再由分析端返回处理结果。但若信息量较大，该方案既占用网络带宽又保证不了可靠性。而 RPC 执行过程是：若 A 要调用 B 中的 c，则 A 暂停运行，将相关调用信息传送到 B 中的 c，c 运行结束后将结果返回给 A，A 继续运行。

具体调用过程是，当一个局域网建立起来之后，RPC 协议将会根据程序代码在整个局域网中查找调用被[RPC]标记的函数。这个标记的存在是为了引导如何能找到远程过程，根据 ONC RPC 标准：在设备上运行的远程代码必须获得一个固定的 32bit 整数，这个数值被用来标记当前的远程代码。在某一时刻，可能有多个远程代码在某台终端上运行，为防止通讯紊乱，终端为这些远程代码提供不同的传输层端口。由于传输层资源有限，所以不能将远程代码与传输层端口唯一绑定，一旦传输层资源占满，后续代码将无端口可用，即便能实现唯一绑定，也将导致传输层资源的无意义消耗。所以远程程序的端口是由操作环境依据传输层资源的占用比例实时变化的。在调用远程程序之前，应用程序事先向端口映射器提出申请，以确定将要执行的远程代码所捆绑的端口序号。端口映射器维护一个 List，其中保存着当前设备的远程代码执行对应的端口号。应用程序根据映射器查表得出的端口信息向具体的远程程序发起调用请求。如图 3-3 所示。

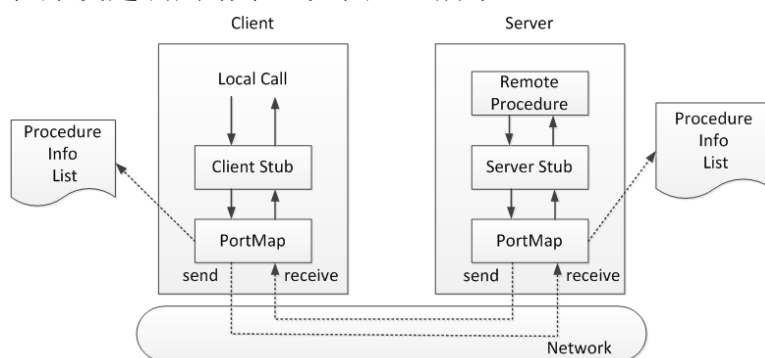


图 3-3 RPC 通信示意图

Fig. 3-3 Socket communication sketch map

报文传送原语是 RPC 原语的基础，它使用 XDR 语言来定义报文。使用



XDR 定义的 RPC 报文类型如下：

```
enum msg_type
{ /* RPC 报文类型*/
    CALL = 0;
    REPLY = 1;
};
```

RPC 报文的类型只有两种：RPC CALL 和 RPC REPLY，分别用于 RPC 和 RPC 信息的返回。RPC CALL 是将 SEND 与 RECEICE 两种阻塞原语组合起来形成 SEND-GET，它的作用是 Client 进程申请并等候 Server 进程的回复。而 Server 端想要获得一个告知执行内容的报文，需要用到 GET-REQUEST。SEND-REPLY 是用于 Server 完成执行任务时 RPC REPLY 返回的应答报文。以上原语组成了 RPC 的基本实现过程。远程过程调用为客户应用透明地访问服务器方的过程提供了有效的手段和支持机制<sup>[43]</sup>。与报文传递方式相比 RPC 有许多优点：语义清楚、易用；简化了通信，效率高。

### 3.3 基于 Unity 3D 的 RPC 技术

基于以上分析对比以及对体感虚拟实验所需要传输的数据类型来看，体感虚拟实验的多人在线功能可以借助 RPC 功能来实现。

#### 3.3.1 Unity 3D 中的网络协议

网络协议指的是，通过约定一定数据格式，客户端和服务端按照信息格式对需要传递的信息进行封装，再通过网络协议发送给对方，接收到信息包之后，再遵照约定规则实行解码，还原出需要传输的内容。完成 Client 端和 Server 端之间的业务通讯，保证项目的正常运行<sup>[44]</sup>。Unity 3D 的网络协议属于高级网络协议，它是和游戏对象紧密联系而非各自独立的。它能够实现运行于台式机、安卓设备和 IOS 设备上的游戏的网络通信功能。Unity 3D 的网络协议由游戏元素管控、游戏信息更新和远程过程调用组成，这些是使用 Unity 3D 开发网络游戏的基础<sup>[45]</sup>。

网络游戏对象管理：在代码控制中使用 Network.Instantiate()函数创建游戏对象个体。这个函数在本地生成一个游戏元素个体的同时，也在其他联网的终端上也生成具备同样 NetworkView ID 的游戏元素个体，同时这些游戏对象之间的通信关系也被建立起来，NetworkView ID 就是对象之间通信所

用的身份标识。**NetworkView.isMine** 属性是用来表示该物体在当前环境中的归属情况。若 **isMine** 的值为 **true**，则证明是本机生成的这个游戏元素；**false** 则表示是其他主机创建，并同步到本机的。网络通信层面的服务器或客户端角色不会影响到游戏元素的 **isMine** 身份，两种角色的主机上也不限制游戏元素的 **isMine** 身份。最后调用 **Network.Destroy()**对所有主机上的该对象进行销毁。

**状态同步**：当网络中某个对象的属性发生变化，所有具有相同 **NetworkView ID** 的对象状态都会随之更新，更新方向是从当前终端上 **isMine** 为 **true** 的对象到其他终端上 **isMine** 为 **false** 的对象。

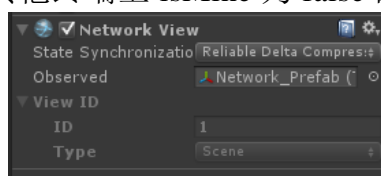


图 3-4 NetworkView ID

Fig. 3-4 NetworkView ID

### 3.3.2 Unity 3D 中的 RPC 功能的实现

在虚拟实验系统的网络通信模块实际搭建过程中，需要创建网络通信控制脚本，用 C#脚本语言编写代码，并在脚本顶端引用 .NET Framework 类库中的命名空间来获得本地 IP 地址，代码如下：

```
using System.Net;
using System.Net.NetworkInformation;
...
IPHostEntry iep = Dns.GetHostEntry(Dns.GetHostName());
IPAddress ip = iep.AddressList[0];
```

当局域网内有一台设备以特定密钥，以“HUSTVRlabServer”为例创建服务器时，其他终端按照密钥搜索并连接服务器：

```
MasterServer.RegisterHost(HUSTVRlabServer, name);
...
MasterServer.RequestHostList(HUSTVRlabServer);
```

之后，在需要状态同步的相应代码中编写 RPC 函数供远程调用：

```
[RPC]
void Transmit(Vector3 leftPos, Vector3 rightPos, int leftEvent, int rightEvent)
{
    otherPosArray[0] = leftPos;
```

```
        otherEventArray[0] = leftEvent;  
    }
```

在进行网络通信时，使用 `Network View` 组件执行远程调用，发送用户手部坐标和握拳信息：

```
networkView.RPC("Transmit", RPCMode.Others, tempPos[0], tempPos[1],  
tempEvent[0], tempEvent[1]);
```

在 `Unity 3D` 中的 `RPC` 调用，是对所有具有相同 `NetworkView ID` 的对象进行状态更新，更新方向是从当前终端上 `isMine` 为 `true` 的对象到其他终端上 `isMine` 为 `false` 的对象。以此为基础，用户对于虚拟实验的操作可以实时共享给连接同一个服务器的其他用户终端。

### 3.4 本章小结

本章主要分析了现有网络在线虚拟实验的弊端，并针对问题提出了一种解决方案。然后对方案中所应用的技术：`Socket` 和 `RPC` 技术进行分别分析。分析结果得出，虽然 `Socket` 技术更系统完善，而且支持大量数据传输，但是从体感虚拟实验对于网络通信功能的要求来看，`RPC` 技术更符合代码量低、效率高的要求。随后，本章又主要讨论了如何在 `Unity 3D` 项目中编写代码应用 `RPC` 技术。

## 第4章 基于 Kinect 体感交互的多人虚拟实验设计

体感交互技术的优势在于使用户与设备之间的交互不再被传统的鼠标键盘所限制，使用者可以借助日常的习惯行为动作来实现相应的控制。而微软推出的 Kinect 人体动作传感器基于深度信息进行人体动作捕捉，与其他基于视觉图像处理的体感技术相比基本不受外界光照和复杂背景的干扰。所以采用 Kinect 摄像头进行体感虚拟实验的开发是合理的选择。而多人在线功能是虚拟实验亟待解决的一个问题，经过上一章的讨论，我们认为将远程过程调用技术应用于体感虚拟实验是合理并且高效的。它能够在保证传输速度和准确性的基础上降低系统代码量和复杂程度。本章介绍 Kinect 体感交互多人在线虚拟实验的基本框架，以及如何将 Kinect 传感器硬件、远程过程调用技术和基于 Unity 3D 搭建的虚拟实验场景有机融合，实现虚拟实验的各项功能。

### 4.1 环境介绍

Kinect 传感器与其他众多体感采集设备相比，体积小巧并且对人体没有束缚，只要摆放位置合适即可。而体感手柄等设备，都在一定程度上需要与人体部位绑定，除了令用户感到不适外，接线过多也较为复杂。Kinect 传感器只需要一根电源线接电和一根 USB 数据线接入 PC 机即可运行工作。

首先介绍一下基于 Kinect 体感交互的多人在线虚拟实验系统的开发及运行环境。需要指出本文是对于 Kinect 1.0 进行开发，而如果选用 Kinect 2.0 传感器，需要基于 Windows 8 及以上系统。开发环境配置如表 4-1 所示。

表 4-1 系统开发环境配置

Table 4-1 Developing environment configurations

项目	名称	说明
集成开发环境	Visual Studio 2015	微软的可视化集成开发环境
虚拟场景搭建环境	Unity 3D	专业的游戏开发引擎
开发语言	C# Script	Unity 3D 支持的 C#脚本语言
软件开发包	Kinect SDK for Windows	微软发布的 v1.8 版本
辅助软件	3D Studio MAX 2014	3D 模型的建模与处理
	Photoshop CS6	2D 纹理贴图处理

此外，本文的程序所运行的系统配置情况如表 4-2 所示。

表 4-2 系统运行环境配置

Table 4-2 System operation environment configurations

项目	型号
操作系统	Microsoft Windows 7 Ultimate SP1
CPU 处理器	Intel(R) Core(TM) i7-4790K CPU @4.00GHz
内存大小	8GB
显卡	NVIDIA GeForce GTX 980
体感设备	Microsoft Kinect for Xbox 360

本文的主要开发和测试均采用上述配置，在这个配置下可以实现很好的即时交互效果。该配置目前属于相对主流的配置，使得本文提出的实验系统具有很好的可推广性。

## 4.2 虚拟实验系统架构

虚拟实验系统主要由三个模块组成：实验操作管控模块、Kinect 体感数据采集模块、网络通讯模块。系统架构如图 4-1 所示。

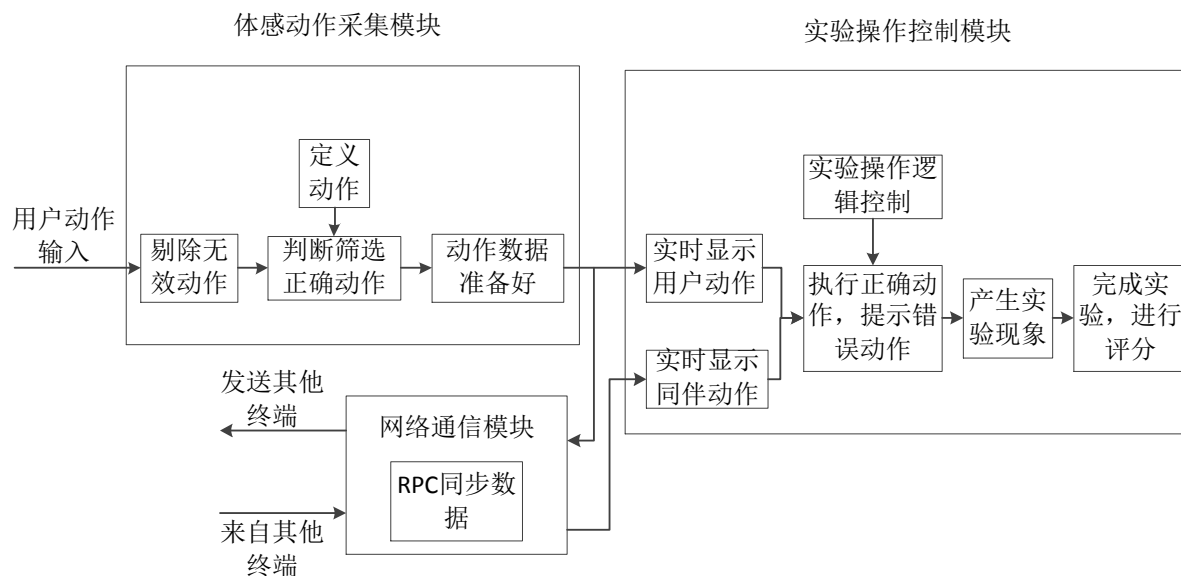


图 4-1 虚拟实验系统架构

Fig. 4-1 Virtual experiment system structure

下面详细阐述各个部分的原理。

### 4.2.1 Kinect 体感信息采集模块

体感信息采集模块的主要功能包括：借助 Kinect SDK 采集用户肢体动作、根据算法剔除或为用户无意动作或为传感器不稳定采集的错误动作、根据预先的定义动作判断是否属于实验动作、将正确动作数据做好传输准备。

首先需要在 Unity 3D 项目中调用 Kinect SDK 相关文件。Kinect SDK 支持 WPF/Windows Form/Console Application 程序，但这三者属于二维平面图形，不能满足虚拟实验对于真实性和沉浸感的要求。所以使用游戏开发者熟知的 Unity 3D 引擎进行虚拟实验场景的开发。Kinect SDK 对开发者开放的接口调用方法有两种，其一是基于 C++ 的头文件和静态链接库的方法，其二是程序集的方法。而 Unity 3D 引擎中内置的 MonoDevelop 开发环境无法直接调用微软的托管 SDK，但它支持调用非托管动态链接库的接口方式，以实现数据的调用处理。在项目中导入 Dll 文件后自定义数据结构和算法，能够实现对 Kinect 中获得的数据重新组织，就可在 Unity 3D 中使用。

在使用 Unity 3D 引擎开发 Kinect 相关应用时，应单独创建一个 Kinect 控制脚本，其功能包括：

启动 Kinect 设备及设备初始化 ("NuiInitialize")、读入彩色图像流 ("CopyKinectColorStream")、读入深度图像流 ("CopyKinectDepthStream") 和读入骨骼信息流 ("CopyKinectSkeletonStream")、获取用户握拳信息 ("CopyKinectHandEventResult")、关闭设备 ("NuiShutdown")。

在 Unity 3D 中借助调用非托管函数的 DllImportAttribute 属性对 Kinect10.dll 进行调用，举例如下：

```
[DllImportAttribute (@ "Kinect10.dll", EntryPoint = "NuiInitialize")]
public static extern int NuiInitialize (NuiInitializeFlags dwFlags);
```

经分析虚拟实验中需要用到手部姿势有以下几种：选择，抓取，移动和释放。如图 4-2 所示。



图 4-2 默认手势图标、选择手势图标、抓取手势图标、左右手图标

Fig. 4-2 Default gesture icon/selecting icon/gripping icon/right hand vs. left hand icon

该系统借助微软发布的 Kinect 软件开发程序包 (Kinect SDK for Windows), 在 Windows 7 环境下对 Kinect 采集的数据进行调用整理。借助该 SDK 提供的人体 20 个关节点 (Kinect 2.0 可以提供 25 个关节点, 如图 4-3 所示) 空间位置坐标, 并且根据上面分析的虚拟实验中需要用到的人体姿势动作, 我们定义了几种肢体动作来驱动虚拟实验系统中的虚拟人物角色的移动。并且这个 SDK 也给出了对于用户握拳情况的检测结果。在后面的实验界面操控部分, 会介绍经过定义的几种动作姿势。

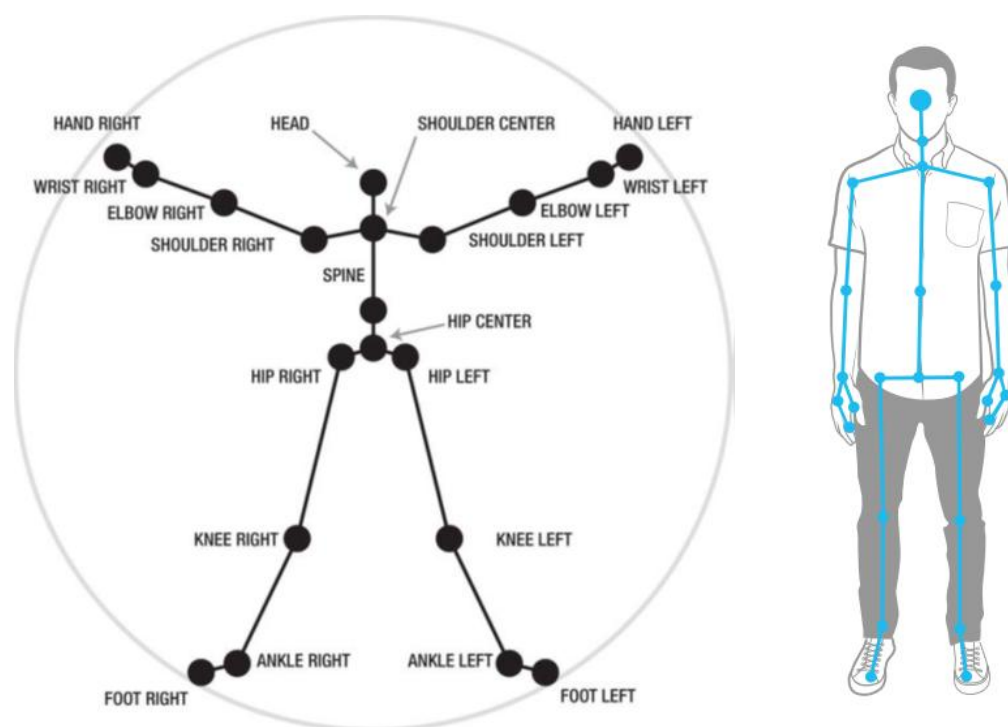


图 4-3 两代 Kinect 采集骨骼关节点数量不同

Fig. 4-3 Differences of joint number between two generations of Kinect sensors

#### 4.2.2 实验操作控制模块

本模块由虚拟场景、UI、实验逻辑控制、操作逻辑控制、评分机制和课后练习等几部分组成。

虚拟实验场景。在该环境中, 实验者可以采用肢体动作操纵虚拟角色进行自由行走。实验者可以控制角色移动到黑板前, 查看幻灯片上的实验步骤及安全须知。如图 4-4 所示。



图 4-4 虚拟实验场景

Fig. 4-4 Virtual experiment scene

UI 用户界面主要包括：欢迎界面、实验类型及实验题目选择菜单、设置菜单、关于界面。如图 4-5 所示。在各个界面中，用户可以站在 Kinect 传感器前，抬起手臂在相应的按钮上做握拳动作，即可实现对按钮的选择点击功能。



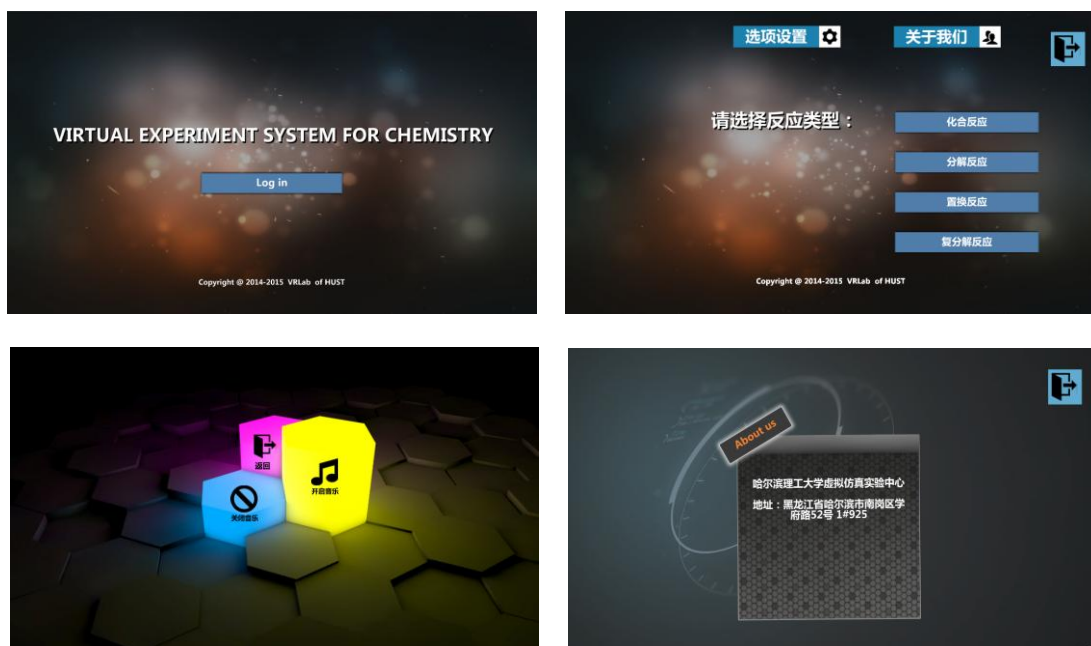


图 4-5 UI 界面

Fig. 4-5 User interfaces

实验逻辑控制完全遵照真实实验步骤逻辑编写，并在可能发生危险的环节添加提示，以加深实验者的印象；操作逻辑控制部分是对 Kinect 体感信息采集及动作定义模块提交信息进行筛选，剔除无效动作保证系统运行效率；而评分机制是通过在实验操作的关键步骤上添加检测变量，从而计算实验者的操作准确性。

### 4.2.3 网络通信模块

本系统的开发原则是，不区分设置 Server 版本和 Client 版本。最终发布成功后的软件可以运行与任何一个终端，运行时由用户自己选择创建服务器还是加入服务器。所以本系统的网络通信模块的功能大体分为两种：当用户操作时，传输操作信息（如抓放物体的动作等）到其他终端，以实现操作过程的共享；当用户没有进行操作时，传输用户的双手位置到其他终端，以实现用户操作意图的共享。

运行系统。在欢迎菜单点按登陆键后，进入菜单选取场景。在该场景中选择可以根据需要选择单人模式或多人模式。若选择多人模式，则出现服务器操作菜单，如图 4-6 所示。

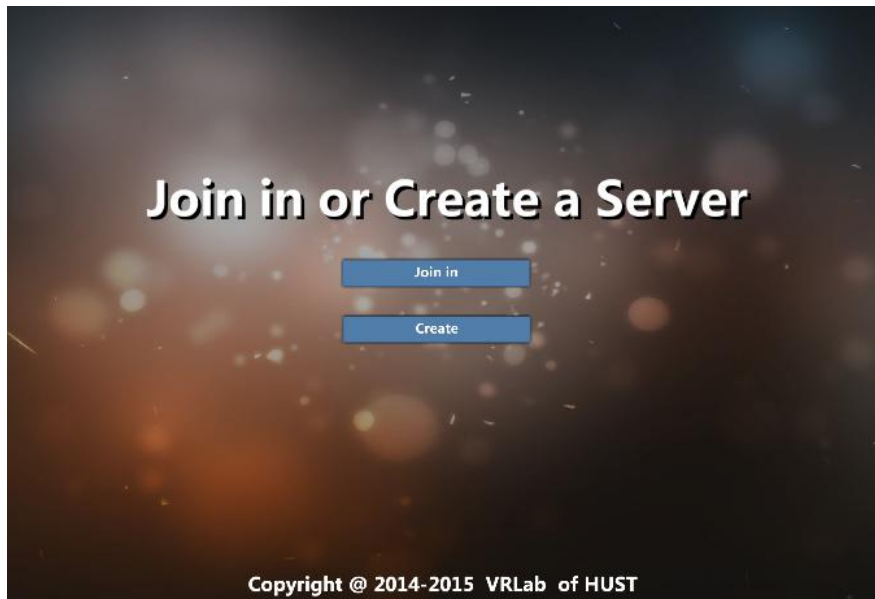


图 4-6 实验模式选择界面

Fig. 4-6 User interface of experiment mode selecting

进行多人模式的前提是，各终端需要联入同一局域网。当用户在设备 A 上选择创建服务器时，系统会在局域网中以程序写好的密匙创建一个服务器。当其他用户点击创建服务器时，操作被禁止，并显示“Server 已存在，请选择并加入”；若点击加入服务器时，程序会在局域网内查找密匙匹配的服务器并进行连接。连接成功后，任一用户的操作会显示在所有联网用户的设备上。当用户加入局域网的时候，会在全网内的虚拟场景创建具有特定 NetworkView ID 的手部模型，用颜色区分该模型是属于用户的（绿色）还是属于其他同伴的（黄色）。当用户移动手臂的时候，根据 Kinect SDK 提供的骨骼数据，当前场景中的绿色模型会相应移动，同时在局域网中其他设备上具有与这个小球相同 NetworkView ID 的黄色模型也会相应移动。当用户抓取某个物体时，被抓取的物体会调用其他用户场景中该物体上的 RPC 函数，使该物体跟随抓取模型一同移动，从而保证了所有参与者可以在屏幕上同时看到自己和别人的操作。

### 4.3 本章小结

本章系统的介绍了基于 Kinect 体感交互的多人在线虚拟实验的开发环境、运行环境以及系统基本框架。该虚拟实验系统的创新性在于同时将体感

操作和多人在线功能融入 Unity 3D 项目中，一定程度上填补了虚拟实验在这两个方面的空白。同时也阐述了虚拟实验系统中各个模块的功能及实现方式。其中着重介绍了体感信息采集模块的工作原理和实现方法，以及网络通信模块的技术要点和使用方法。

## 第5章 体感虚拟化学实验的评测与优化

由于有些化学实验比较危险，如果对于实验步骤不够熟悉或者对实验中可能出现的危险了解不够而未进行有效保护的话，实验者可能会受到伤害；另一方面，由于有些实验药品和器材比较昂贵，进行虚拟实验可以帮助降低实验成本；另外，有些化学实验会造成污染。所以该系统目前以开发虚拟化学实验为主，系统可以允许实验者进行多次练习以熟悉实验步骤，并帮助实验者避免发生危险和人为失误最终完成实验。此外，化学实验的操作影响到实验现象和结果。对实验进行多次模拟练习可使实验者熟练操作过程，保证实验结果的相对准确性。本文以“分别在空气和氧气中点燃镁条”这个实验为例，介绍了基于 Kinect 体感技术的虚拟化学实验的解决办法。

### 5.1 体感虚拟化学实验介绍

虚拟化学实验系统的操作流程分支图，如图 5-1 所示。连接硬件，运行由 Unity 3D 发布的虚拟实验系统软件。最先进入初始化场景，该场景没有渲染任何贴图与物体，持续时间目前设置为 2s，该场景的目的在于系统自行查看 Kinect 设备是否已经正确连接，并且实验系统所需要的其他组件是否初始化完毕，体感信息采集模块是否正常读取 Kinect 数据，管理控制器是否已经将相应全局变量赋好初值，背景音效是否准备完毕。若有问题则弹出提示；若无问题自动跳转到欢迎界面。用户在欢迎界面可以举起手臂代替鼠标在登陆按键上“抓握”，以实现鼠标的点击功能。随后进入基本反应类型的选择界面，包括：化合反应、分解反应、置换反应和复分解反应类型。在该界面中，用户可以“点击”进入设置界面进行背景音乐的设置，也可以进入关于界面，了解开发团队的相关信息。在选定某一反应类型之后，用户需要继续选择该类型中的某一具体的实验题目。同时也可以对实验模式进行选择：默认状态下为单人实验模式，进入实验模式选择界面后，用户可以选择创建服务器，或是搜索并连接服务器。若选择创建服务器，则界面上会显示当前设备状态为 Server，若选择搜索并连接服务器，连接成功后，当前设备状态为 Client。设置完成后，返回上一级菜单，选择实验题目，进入实验场景开始实验。多人模式下，用户可以看到其他实验者的手部位置和握拳状态。

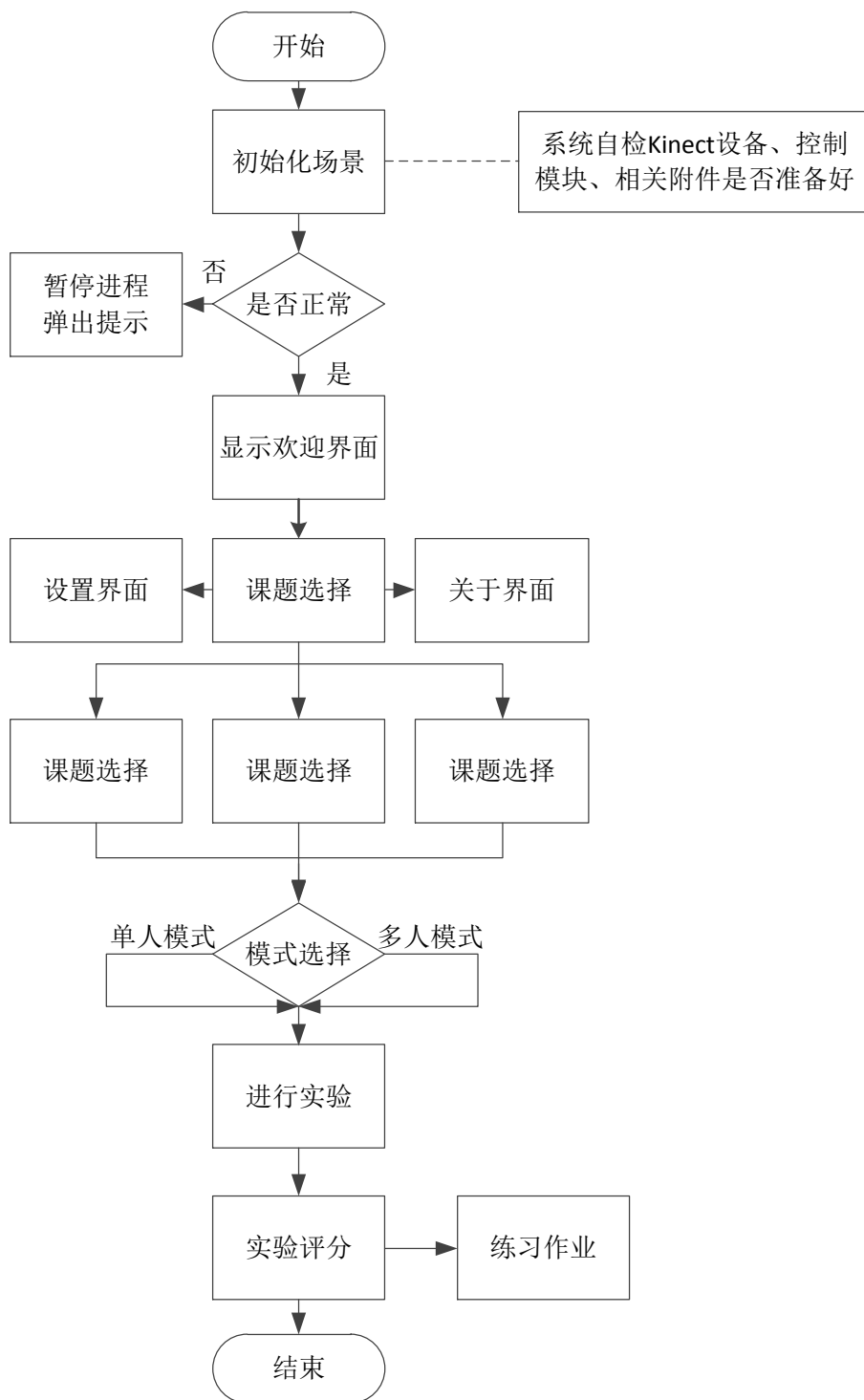


图 5-1 虚拟实验系统操作流程

Fig. 5-1 Flow chart of virtual experiment system operation

## 5.2 性能评测与优化

1. **人体动作跟踪稳定性优化** 在实验系统的实际操作使用中，我们发现系统界面和虚拟实验场景中代表手部位置的 3d Max 模型的位置存在不稳定的现象，即用户抬起手臂保持不动的情况下，模型依然会出现可见的抖动。经过对 Kinect 人体信息采集各个环节的分析，我们认为问题出现的原因是 Kinect 传感器采集并提供的数据单位是毫米。在实际使用中，用户抬手不动并非是绝对静止的，都会有或多或少的毫米级别的抖动。这是 Kinect 将当前帧与上一帧数据进行比对，发现人体位置发生了改变，所以也就实时同步了人体骨骼关节位置，再经过 Unity 3D 中控制脚本的处理，反应到模拟环境中，就出现了手部模型抖动的现象。

针对上述问题，我们在 Unity 3D 项目中的“Kinect 体感信息采集模块”的输入端对 Kinect 相关数据进行了截位，将精度级别从毫米级降低为厘米级，从而一定程度上减少了模型的抖动现象，保障了操作的流畅性，提高了用户体验。测试结果如表 5-1 所示。

表 5-1 体感数据处理前后的抖动情况

Table 5-1 Shaking situations before and after data processing

操作	截位前（单位：次）			截位后（单位：次）		
	抖动	测试次数	抖动概率	抖动	测试次数	抖动概率
菜单操作	87	100	87%	26	100	26%
实验操作	71	100	71%	47	100	47%

从表 5-1 可知，数据截位处理后的抖动情况较处理之前好了很多，而截位后的实验操作抖动依然较高，是因为实验操作始终处于运动的状态，用户的肢体难免会出现轻微抖动，所以模型的抖动也算是正常现象。

2. **物体抓取跟随运行稳定性优化** 对于体感虚拟实验来说，能否做到准确的抓取物体，并将物体移动到相应位置，既标志着该系统是否能够准确模拟真实实验，又真切地影响到用户的使用操作体验。所以对于抓取物体的这一细节，我们进行了分析，并做了大量研究，最终针对 Kinect 传感器提供的的数据，选择了最合适的优化方案进行物体跟随运动的稳定性优化。

在最初的测试版本中，我们发现，当用户抓取某一个实验仪器并进行移动时，会出现物体起初还能够跟随手部模型进行移动，在跟随的过程中，物

体突然停止在某处不再继续跟随。如图 5-2 所示。

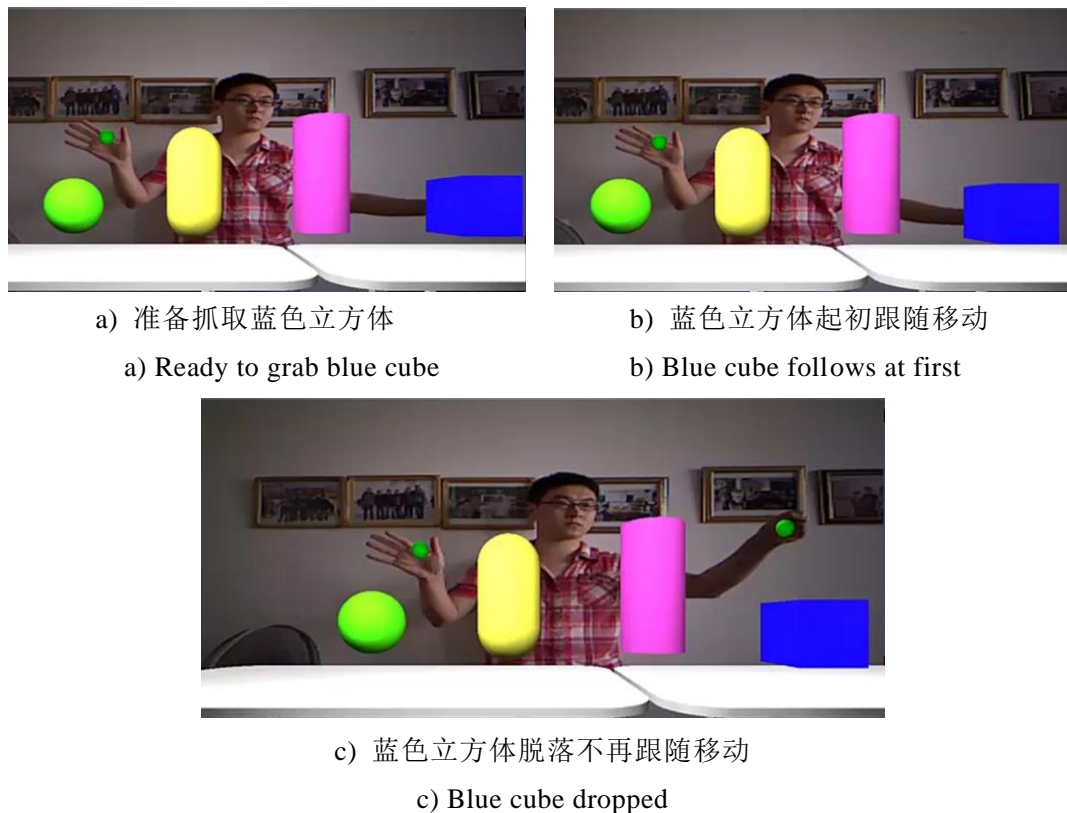


图 5-2 物体不跟随运动现象

Fig. 5-2 Object do not follow user's hand

结合 Unity 3D 引擎内部运行机制进行分析，我们认为问题的根源在于 Kinect 传感器对于握拳检测的刷新帧率与 Unity 3D 项目中的帧率不匹配导致项目在运行过程中出现丢帧现象。

Kinect 1.0 传感器提供的彩色图像和深度图像的帧率为 30FPS，即每秒 30 帧，因此可以得出传感器对于人体握拳的检测也是按照固定频率每秒检测 30 次，即大约每隔 0.03s 刷新一次握拳信息。

Unity 3D 引擎的运行机制并没有规定固定帧率，而是当前画面中需要 GPU 绘制的三角形个数（Tirs）和顶点个数（Verts）以及所需要渲染的贴图数量（Render Textures）等其他参数来决定渲染每一帧所需要的时间。如图 5-3 所示，在菜单选择场景中的三角形和顶点参数信息和每帧间隔时间（Deltatime）。

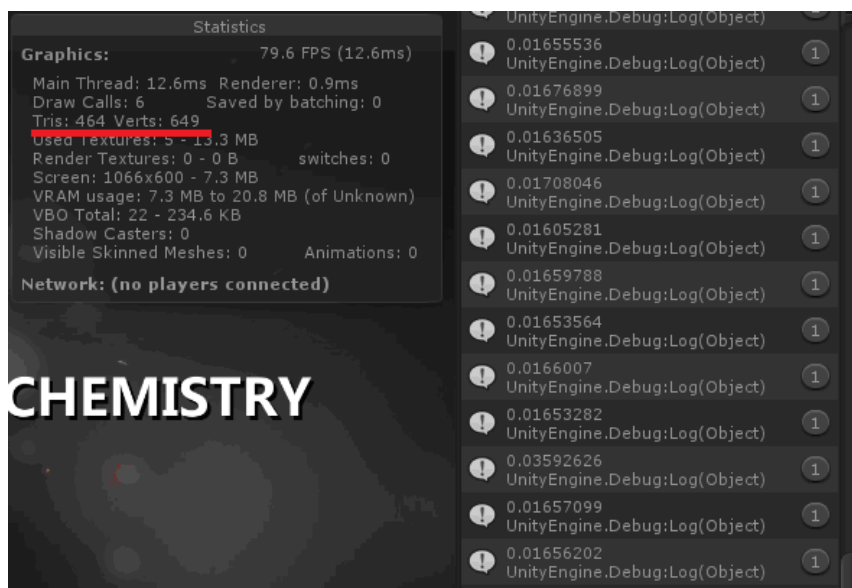


图 5-3 菜单选择场景中的渲染参数和帧间隔时间

Fig. 5-3 Render params and frame deltatime in menu selecting scene

由图 5-3 可知，在当前菜单选择界面，Unity 3D 的帧间隔时间大约为 0.017s。这个时间间隔大约是 Kinect 刷新时间的 1/2。而进入实验操作场景时，渲染参数与帧间隔时间如图 5-4 所示。

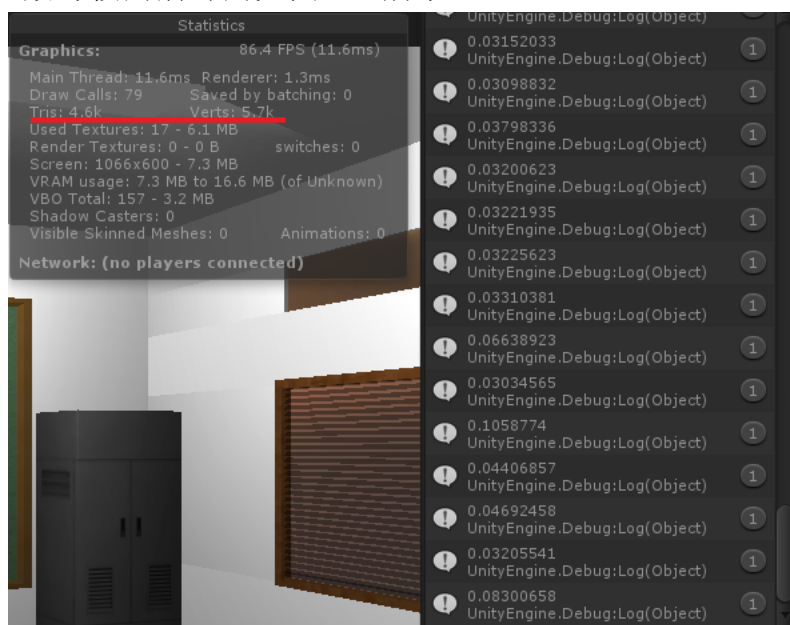


图 5-4 实验操作场景中的渲染参数和帧间隔时间

Fig. 5-4 Render params and frame deltatime in experiment operation scene



由图 5-4 可知，当进入实验操作场景以后，由于所需要渲染的三角形数和顶点数与菜单场景相比急剧增加，所以使得帧间隔时间延长，即每帧渲染所需的时间延长，由图可知帧间隔时间一度达到了 0.083s，这个时间是 Kinect 传感器刷新时间的 2 倍，这使得在 Unity 3D 还没有渲染完当前帧，Kinect 就已经更新了握拳信息。最终就导致了在用户抓取移动物体的某一帧起始点，Kinect 刷新握拳信息的周期还未开始，不能提供握拳信息，Unity 3D 认为用户没有握拳，呈现的现象就是物体不再随手部移动出现掉落。问题的根源在于，Unity 3D 项目每帧渲染时间不固定，握拳信息检测点和 Kinect 握拳信息提供点无法保持同步。图如图 5-5 所示。

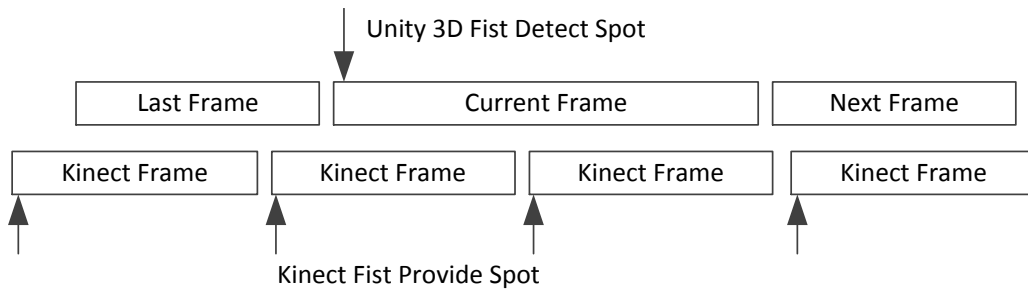


图 5-4 实验操作场景中的渲染参数和帧间隔时间

Fig. 5-4 Render params and frame deltatime in experiment operation scene

针对上诉问题，经过仔细分析，我们决定在 Kinect 握拳信息提供模块与 Unity 3D 握拳信息检测模块之间加入第三者控制模块。该模块的核心代码如图 5-6 所示。

```
//右手
if (f2 && !handState[1]) //f2为上一帧握拳状态, handState[1]为当前帧握拳状态
{
    fistState[1] = 0; //若上一帧握拳, 当前帧释放
    f2 = false; //则握拳状态fistState为单次握拳
} //最后, 清除上一帧握拳状态。
else if (handState[1]) //若上一帧握拳, 当前帧也处于握拳状态
{
    f2 = handState[1]; //则上一帧握拳状态修改为当前帧握拳状态
    count += Time.deltaTime; //开始计时
}
else
{
    count = 0; //若上一帧释放, 当前帧未握拳
    fistState[1] = 2; //则握拳状态fistState为未握拳
}
if (count >= 1f) //若计时满, 则握拳状态fistState为长握状态
{
    fistState[1] = 1;
}
```

图 5-6 信息同步模块核心代码

Fig. 5-6 Data dynchronizaton module core codes

经过测试，应用上述代码后，抓取物体时，物体脱落的频率会大大降低。测试结果如表 5-2 所示。

表 5-2 数据处理前后抖动情况对比

Table 5-2 Shaking situations before and after data processing

	修正前（单位：次）			修正后（单位：次）		
	脱落	测试次数	脱落概率	脱落	测试次数	脱落概率
实验操作	68	100	68%	21	100	21%

### 3. 网络通信稳定性

Server 与 Client 是以固定密匙的方式查找连接，并且二者的软件系统完全一致。在稳定的局域网状态下进行测试，两端几乎没有出现无法连接的情况。而且在连接状态下，基于 RPC 的用户操作数据传送也十分稳定准确。同步准确率接近 100%，测试情况如表 5-3 所示。

表 5-3 RPC 同步情况

Table 5-2 RPC synchronization situation

	成功次数	测试次数	成功概率
同步操作	98	100	98%

经测试，当系统处于多人操作状态时，用户双方的操作都能实时显示在对方的屏幕上，手部模型对实验设备和药品的抓取移动准确无误。如图 5-7 所示，这是在多人状态下的其中一位用户的操作界面，其中绿色手形图片代表当前用户，黄色代表联网用户。当联网用户（黄色）准备抓取铁架台时，当前用户可以看到对方的手在铁架台附近。当联网用户抓起铁架台并进行移动时，当前用户可以清楚地看到联网用户对铁架台的操作。当联网用户在指定位置释放铁架台时，当前用户场景中的铁架台也相应地准确落入指定位置。

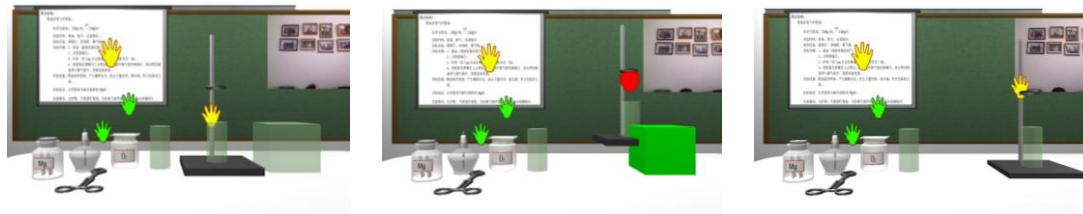


图 5-7 实验操作传输

Fig. 5-7 Experiment operation transmission

#### 4. 其他测试

由于 Kinect 采集人体动作的技术原理是经过红外线采集到的深度图像技术，而非基于可见光的彩色图像处理技术。所以该系统在使用过程中基本不受外界光照和背景环境的影响。此外，只要使用者不穿着厚重的大衣和帽子，仅着日常室内服装，就可以保证任何用户都可以对该系统进行操作。如图 5-8 所示，白天与夜晚不同光照情况下均可操作该系统。图 5-9 所示，不同用户均可操作该系统。

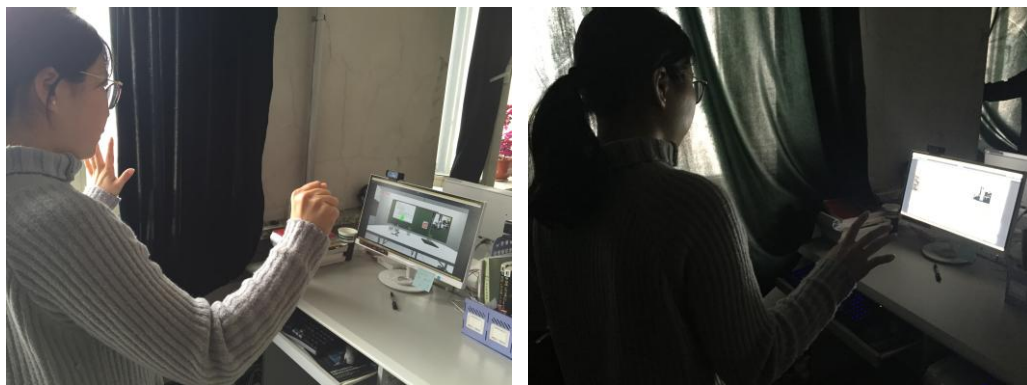


图 5-8 不同光照情况下的实验操作

Fig. 5-8 Operations under different lighting conditions



图 5-9 不同用户的实验操作

Fig. 5-9 Operations by different users

### 5.3 本章小结

本章以虚拟化学实验为样例，结合上述章节研究的 Kinect 技术和 RPC 远程调用技术，设计与实现了一款具体的基于 Kinect 体感交互的多人在线虚拟实验。首先描述了虚拟化学实验的系统流程，以及系统的使用方法。然

后，着重介绍了在测试版本中系统存在的问题及其相应的解决方案，包括：人体动作跟踪的抖动问题及其优化，物体跟随脱落问题及其优化。并给出了相应的处理前后的参数比照，表明处理方案是准确无误的。从而验证了本文将 Kinect 体感交互技术和 RPC 远程过程调用技术运用于传统虚拟实验的可行性。

## 结论

本文研究了可用于虚拟实验的 Kinect 体感交互技术和 RPC 远程过程调用的网络技术，并分别从 Kinect 人体姿势识别原理、网络通信技术优缺点分析、可自然人机交互等方面进行了深入的研究。本文的研究在实际应用上取得了较为良好的效果，对于基于体感的多人在线虚拟实验项目具有一定的借鉴意义，一定程度上填补了虚拟实验在体感操作和多人在线操作方面的空白。

首先，为了能够找到低成本的能够被广大用户和开发者接受的体感虚拟实验解决方案，本文简要分析了诸多体感设备的优缺点。经过比较微软发布的 Kinect 摄像头是合适的选择。所以着重分析了 Kinect 人体动作判别的技术理论。从基于 Light Coding 技术的深度图像成像技术，到以随机决策森林为核心的用户人体骨骼信息提取，再到人体骨骼关节定位方案。这其中微软独创的人体部位标签法为 Kinect 的机器学习成果做出了重要贡献。而微软将这一技术整合到 Kinect 传感器内部系统中，使得 Kinect 在读取外部场景，分析计算用户信息的时候可以完全在 Kinect 内部的 GPU 上运算，而不会占用用户 PC 机的资源。这就使得 Kinect 能够与绝大多数配置的 PC 机搭配运行，基本不受用户设备的限制。最后简要分析了 Kinect for Windows SDK 的原理以及基本用法。

其次，为了实现虚拟实验的多人在线功能，本文引入了网络通信技术，根据虚拟实验对于网络同步的功能需要，分析了 Socket 技术原理和 RPC 技术原理，分别对比了它们之间的优缺点以及各自应用场合。最终确定选用 RPC 技术作为虚拟实验的网络通信模块的后台技术。接着分析了 Unity 3D 引擎中的网络协议，以及引擎对 RPC 技术的支持。着重介绍了借助 C# 脚本语言的 RPC 技术的程序实现。

最后，通过开发与运行基于 Kinect 体感交互的多人在线虚拟化学实验，印证了基于 Kinect 体感技术与 RPC 远程过程调用技术在虚拟实验开发中的可行性。

本文的研究虽然取得了一定实际效果，但基于 Kinect 体感技术的多人在线虚拟实验依然存在不足：

1. 体感操作缺乏有效反馈 尽管 Kinect 体感交互技术开拓了人机交互的领域，识别跟踪的速度与准确度也能够满足虚拟实验的需要，但 Kinect

体感设备无法提供相应的力学反馈效果，比如抓握时的阻力感，提起物体时的负重感等，这使得用户的体验过于虚拟，实际开发过程中，测试人员由于没有感受到有效反馈，时常怀疑自己是否已经“抓握”到物体，从而进行重复抓握，使得操作效率低下，甚至出现误操作。（被抓到后高亮，作为提示）

**2. 目前仅支持局域网内部的多人通信** 虽然本文选择了远程过程调用技术实现了实验者能够进行多人在线操作，但目前版本的 Unity 3D 引擎对于远程过程调用技术仅支持局域网内的网络通信，使得该系统的多人在线功能在使用范围上受到一定限制。

## 参考文献

- [1] 赵沁平. 虚拟现实综述[J]. 中国科学, 2009, 39(1): 2-46.
- [2] 卢苗. 虚拟实验在教学中的应用限度研究[J]. 中国教育信息化, 2014, 12: 79-80.
- [3] 周雪松, 丰美丽. 虚拟实验技术的研究现状及发展趋势[J]. 自动化仪表, 2008, 29(4): 1-4.
- [4] 姜学智, 李忠华. 国内外虚拟现实技术的研究现状[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 2: 238-240.
- [5] 范蕾. 发达国家在大学开展虚拟生物学实验教学的经验及启示[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(1): 20-23.
- [6] 李凌云, 王佳, 王海军. 我国虚拟现实研究现状的实证分析[J]. 现代教育技术, 2009, 19: 111-114.
- [7] He Liu, Runze Wan. Building Virtual Experiment Platform in the Curriculum of Network Operating System Using Virtual Machines[C]. International Conference on Advanced Information and Communication Technology for Education (ICAICTE 2014). 2014, 28-31.
- [8] 张学军, 唐久磊, 魏江明. 基于 Flash3D 的中学化学虚拟实验平台的设计与实现[J]. 环境建设与资源开发, 2014, 1: 79-84.
- [9] 奉强, 常波, 何冰, 张小玲, 李仲辉. 虚拟实验在物理化学教学中的应用研究[J]. 成都师范学院学报, 2014, 30(1): 114-117.
- [10] 李倩. 开放式虚拟实验平台在高职教育中的应用研究[J]. 文理导航, 2014: 55.
- [11] 王新海, 李伟光, 许英. 虚拟现实技术在化学实验教学中的应用[J]. 广州化工, 2014, 42(13): 214-235.
- [12] 杨小勇. 虚拟实验在中学化学教学中的应用研究[J]. 广西教育, 2014, 63-64.
- [13] 李青, 王青. 体感交互技术在教育中的应用现状述评[J]. 远程教育杂志, 2015, 48-49.
- [14] 肖文显, 杨王俊, 马孝琴. 自适应调整差分进化算法在优化问题中的应用[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2015, 20(1): 71-74.

- [15] Wu Stephen. 利用 MEMS 惯性感测技术实现应用变革[J]. 中国电子商情, 2009, 44-46.
- [16] 吕刚, 施光林. HDNS2000 光学感测芯片在运动检测中的应用[J]. 新器件新技术, 2003, 43-52.
- [17] 张展鹏, 朱青松, 谢耀钦. 数字抠像的最新研究进展[J]. 自动化学报, 2012, 38(10): 1571-1584.
- [18] 过嘉芹. 计算机图形图像后期处理中的图像美化操作技巧[J]. 无线互联科技, 2015, 74-75.
- [19] 余先川, 曹婷婷, 胡丹, 张立保, 代莎. 基于小波变换和稀疏成分分析的盲图像分离法[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(2): 58-63.
- [20] 项慨. 基于网络的虚拟实验系统的研究[D]. 华中师范大学硕士学位论文, 2006: 35-47.
- [21] 苗晓峰. 远程教育网络虚拟实验系统的研究与设计[D]. 西安电子科技大学工程硕士学位论文, 2008: 14-22.
- [22] 余涛. Kinect 应用开发实战[M]. 北京: 机械工业出版社. 2012: 30-31.
- [23] 宋清昆, 刘一. 免疫遗传算法小波神经网络控制器设计[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2015, 20(4): 55-59.
- [24] Range Mapping Using Speckle Decorrelation: US 7, 433, 024 B2[P], Oct. 7, 2008.
- [25] K . Khoshelham . Accuracy Analysis of Kinect Depth Data[C]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2011: 133.
- [26] Kourosh Khoshelham, Sander Oude Elberink. Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications[J]. Sensors, 2012, 12: 1437-1454.
- [27] 丁津津. TOF 三维摄像机的误差分析及补偿方法研究[D]. 合肥工业大学硕士学位论文, 2011: 23-36.
- [28] Jamie Shotton, Andrew Fitzgibbon. Real-Time Human Pose Recognition in Parts from Single Depth Images[J]. Microsoft Research Cambridge & Xbox Incubation.
- [29] Michalis Raptis, Darko Kirovski. Real-Time Classification of Dance Gestures from Skeleton Animation[J]. Eurographics/ACM SIGGRAPH



Symposium on Computer Animation. 2011, 147-156.

- [30] 曾繁江, 李涛, 黎铭. Kinect 平台上使用机器学习的非接触式 GUI 操控方式[J]. 计算机科学与探索, 2014, 8(2): 171-178.
- [31] 张仲一, 杨成, 吴晓雨. 基于 Kinect 的隔空人手键盘输入[J]. 中国传媒大学学报自然科学版, 2013, 20(3): 68-71.
- [32] 张毅, 张烁, 罗元, 徐晓东. 基于 Kinect 深度图像信息的手势轨迹识别及应用[J]. 计算机应用研究. 2012, 29(9): 3547-3550.
- [33] 芮维, 胡涛, 朱欣焰. 基于 Kinect 的深度数据融合方法[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(1): 285-288.
- [34] 孙树森, 马文娟, 桂江生, 宋瑾钰. 基于 Kinect 的《互动应用开发》课程开发探究[J]. 中国校外教育, 2012, 161-165.
- [35] 瞿畅, 丁晨, 王君泽, 高瞻. 基于 Kinect 体感交互技术的上肢关节活动度测量方法[J]. 中国生物医学工程学报, 2014, 33(1): 16-21.
- [36] W. M. Hsieh, C. -C. Chen. Virtual reality system based on Kinect for the elderly in fall prevention[J]. Technology and HealthCare. 2014, 27-36.
- [37] John Stowers, Michael Hayes. Altitude Control of a Quadrotor Helicopter Using Depth Map from Microsoft Kinect Sensor[C]. IEEE, 2011: 358-362.
- [38] Liao Hongjian, Long Xiaoli. Study on Virtual Assembly System Based on Kinect Somatosensory Interaction[C]. International Conference on Information Science and Cloud Computing, 2013: 55-60.
- [39] Liao Hongjian, Long Xiaoli. Virtual Experiment System for Electrician Training based on Kinect and Unity3D[C]. International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC), 2013: 2659-2662.
- [40] Yi-Zeng Hsieh, Mu-Chun Su. To Develop the Virtual Physics Laboratory by Integrating Kinect with Gesture Classification Algorithm[C]. International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems, 2013: 1017-1019.
- [41] 李凌云, 王海军. 网络虚拟实验系统研究现状与发展趋势[J]. 现代教育技术, 2008, 18(4): 111-114.
- [42] 欧军, 吴清秀, 裴云, 张洪. 基于 Socket 的网络通信技术研究[J]. 网

络安全，2011，19-21.

- [43] 赵小建，方康玲. 基于流套接字的 RPC 技术研究与应用[J]. 武汉科技大学学报（自然科学版），2007，30(1): 68-70.
- [44] 陈俊锋. 基于 Unity3D 的跨平台手机网络游戏的研究与实现[D]. 中山大学硕士学位论文，2013: 77-81.
- [45] 上官大堰，黄心渊，孙望舒，李欣桐. 基于 Android 平台的 Unity 3D 网络功能的开发[J]. 计算机应用与软件，2015，32(8): 72-75.

## 攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] 郭文兰, 张佳梁, 蔡亚飞, 孙博文. 基于 Kinect 体感交互的多人在线虚拟实验系统[J]. 计算机科学, 2016, (9).
- [2] Guo Wenlan, Zhang Jialiang, Cai Yafei, Sun Bowen. Research on the Multiplayer Online Virtual Experiment System Based on Kinect Somatosensory Interaction[C]. 2015 2nd International Forum on Electrical Engineering and Automation. 2015, 83-87.

## 致谢

在完成这篇论文时，我已经在哈尔滨理工大学度过了两年半的研究生时期，虽然时间不算长，却着实令我收获不小，感慨颇多。在此，首先要诚挚感谢我的导师，老师治学严谨，待人真诚，与学生的关系可说是亦师亦友，给我留下非常深刻的印象。其次要感谢老师，老师为我的人生发展指出了一条崭新的道路，让我有了更多的选择，参与的多个项目，也让自己更加深刻的认识了自己，从中获益匪浅。

感谢实验室的师兄，和情同手足的两位同学，以及师弟师妹，有你们的鼎力帮助，使我在科研项目与求职的道路上少走了很多弯路，在此一并表示感谢！

特别感谢我的父母，在过去的二十多年里，可谓是含辛茹苦，在我求学的道路上，一直对我倾心支持。

最后，感谢有参与我论文评审与答辩的各位老师，谢谢你们的认真负责，祝各位老师平安健康，工作顺利！