

本科生毕业设计

|  |
| --- |
| 三自由度VR运动平台设计与仿真 |

|  |  |
| --- | --- |
| 院 系 | 计算机科学与技术 |
| 专业班级 | 卓越1601 |
| 姓 名 | 陈新宇 |
| 学 号 | U201614921 |
| 指导教师 | 管涛老师 |

2020年06月10日

**学位论文原创性声明**

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包括任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名： 年 月 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障、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关学位论文管理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。本人授权省级优秀学士论文评选机构将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据进行检索，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。

本学位论文属于 1、保密囗，在 年解密后适用本授权书

2、不保密囗 。

（请在以上相应方框内打“√”）

作者签名： 年 月 日

导师签名： 年 月 日

摘 要

体感模拟系统里，体感模拟的核心算法就是洗出算法，该算法的调参调试需要和硬件平台联调，调试成本较大。因此引入三自由度运动平台的设计与仿真，从软件层面上来完成算法的调参调试，算法开发完成后可以从仿真结果里直接看出算法的效果如何，降低算法开发的调试成本。

设计了一个三自由度运动平台的体感模拟系统，系统能够对输入的运动数据进行体感模拟，使用体感模拟得到的数据来进行运动平台的可视化仿真。

体感模拟采用经典洗出算法，通过运动学反解获得各个运动平台各个部件的运动量，利用了three.js技术实现可视化仿真。运用了一些人为构造的运动数据验证该系统的可用性，实验结果表明能够系统能够正确的将运动数据反映到运动平台可视化仿真里。

**关键词**：体感模拟，洗出算法，三自由度运动平台，可视化仿真

Abstract

In a motion cueing system, the core algorithm of the system is washout algorithm. For the debugging and parameter adjustment of this algorithm, the hardware motion platform is necessary, that cause a large cost. Therefore, the design and simulation of the 3DoF(three-degree-of-freedom) motion platform is introduced to complete the parameter adjustment and debugging of the algorithm only from the software level. After the development of the algorithm, the effect of the algorithm can be directly seen from the simulation results, by achieving this the reduce of the debugging cost of the algorithm is implemented.

A motion cueing system based on the 3DoF moiton platform is designed. The system can simulate the moiton sesing of the inputed moiton data, and user the data obtained from the motion cueing process to carry out visual simulation of the motion platform.

The motion cueing adopts the classical washing out algorithm. The motion data of each part of the motion platform is obtained from the inverse kinematics solution. The viusal simulation is implemented by using three.js technology. Some artificial motion data are used to verify the usability of the system.The experimental results show that the system can correctly reflect the motion data into the visual simulation of moiton platform.

**Keywords:** motion cueing, washout algorithm, 3DoF moiton platform, viusal simulation

目 录

[摘 要 I](#_Toc39578692)

[Abstract II](#_Toc39578693)

[1 绪 论 1](#_Toc39578694)

[1.1 课题背景 1](#_Toc39578695)

[1.2 国内外研究现状 1](#_Toc39578696)

[1.3 研究目的和主要内容 2](#_Toc39578697)

[1.4 论文结构 3](#_Toc39578698)

[1.5 课题来源 3](#_Toc39578699)

[2 基础理论概述 4](#_Toc39578700)

[2.1 运动平台简介 4](#_Toc39578701)

[2.2 人体运动感知理论 5](#_Toc39578702)

[2.3 体感模拟理论 7](#_Toc39578703)

[2.4 体感模拟算法 9](#_Toc39578704)

[2.5 运动学反解正解 14](#_Toc39578705)

[2.6 开发工具分析及选择 16](#_Toc39578706)

[2.7 关键技术分析 16](#_Toc39578707)

[2.8 基本方案制定 16](#_Toc39578708)

[2.9 本章小结 16](#_Toc39578709)

[3 XXX系统设计 17](#_Toc39578710)

[3.1 功能需求 17](#_Toc39578711)

[3.2 系统总体设计 18](#_Toc39578712)

[3.3 功能模块设计 22](#_Toc39578713)

[3.4 本章小结 25](#_Toc39578714)

[4 XXX系统实现 26](#_Toc39578715)

[4.1 过滤器实现 26](#_Toc39578716)

[4.2 属性管理模块实现 27](#_Toc39578717)

[4.3 数据迁移模块实现 28](#_Toc39578718)

[4.4 本章小结 31](#_Toc39578719)

[5 性能测试与分析 32](#_Toc39578720)

[5.1 测试环境 32](#_Toc39578721)

[5.2 功能测试 32](#_Toc39578722)

[5.3 系统界面 32](#_Toc39578723)

[5.4 性能测试 32](#_Toc39578724)

[5.5 本章小结 34](#_Toc39578725)

[6 总结与展望 35](#_Toc39578726)

[致 谢 36](#_Toc39578727)

[7 毕业设计模板基本框架 37](#_Toc39578728)

[7.1 封面 37](#_Toc39578729)

[7.2 原创性声明页 38](#_Toc39578730)

[7.3 摘要 38](#_Toc39578731)

[7.4 目录 38](#_Toc39578732)

[7.5 参考文献 39](#_Toc39578733)

[7.6 附录 39](#_Toc39578734)

[7.7 毕业设计任务书 39](#_Toc39578735)

[7.8 成绩评定页 40](#_Toc39578736)

[8 毕业设计撰写要求 41](#_Toc39578737)

[8.1 图的格式 41](#_Toc39578738)

[8.2 表的格式要求 45](#_Toc39578739)

[8.3 公式 47](#_Toc39578740)

[8.4 流程图 48](#_Toc39578741)

[8.5 常见格式问题 48](#_Toc39578742)

[参考文献 50](#_Toc39578743)

[附录：大学期间发表或提交的论文 52](#_Toc39578744)

# 绪 论

## 课题背景

早在1910年，第一个飞行模拟器Sanders Teacher诞生[1]。1960年代起，在阿波罗计划背景下，美国 NASA机构进行了大量关于体感模拟的研究[2]，发布了几个具有重要意义的体感模拟算法和模型。之后，诸如汽车驾驶模拟器、摩托车驾驶模拟器、坦克驾驶模拟器、舰船体感模拟器、列车驾驶模拟器等相继被开发出来[3]

## 国内外研究现状

运动平台是体感模拟的硬件基础，一般由定平台（Fixed Platform）和动平台（Payload Platform）两部分组成。自由度最高为6自由度，包括三个方向的平动（forward/back, right/left, up/down）和三个方向的转动（纵摇：pitch，艏摇： yaw， 横摇：roll）。1965年，D Stewart[4]提出stewart平台，由于其结构紧凑、承载能力强、运动学反解容易等优点被广泛使用。尽管运动平台历史已久，但是新的运动平台依然在发展着，张金迪等人[5]提出了一种新型宏微运动平台，该平台采用直线电动机与压电陶瓷进行宏微双重驱动，采用直线光栅与平面光栅实现双闭环位置反馈与控制。S. Lee等人[6]提出了一种新的六自由度运动平台的设计，该运动平台使用开环控制机制在横摇、纵摇、艏摇三个方向进行分析和验证，结果显示该运动平台拥有独立和无限的平移和旋转的运动能力。

由于大多数运动平台的运动范围有限，真实情况下载具的活动范围远远超出运动平台，同时又需使用户在运动平台中有贴近处于真实载具中的体验，使用体感模拟算法达到预期的体感模拟效果是必要的。体感模拟算法利用人体感知缺陷，在运动平台的物理限制之下，尽可能模拟出人体感知运动所需的因素，“欺骗”人体使得人体拥有相似的运动感觉[7]。主流的体感模拟算法为洗出算法，其研究历程经过经典洗出算法、自适应洗出算法和最优控制洗出算法３个阶段[8]。随着体感模拟进入公众视野，各种各样的基于这三种算法进行的改进层出不穷。ZHU Daoyang等人[9]在经典洗出算法的基础上提出了采用“闭环”控制结构的新思路，与经典洗出算法做对比，提高了运动平台空间利用率和，降低了错误体感模拟，提高了算法可靠性。洪振宇等人[10]提出了新的洗出算法，利用 3-PRS 并联机构的牵连运动和人体感知系统的特点，在三自由度运动平台达到了良好的体感模拟效果。M. R. Chalak Qazani等人[11]提出了基于解耦线性模型预测控制的体感模拟算法，对比现存的基于耦合线性模型预测控制的体感模拟算法，减少了在真实车辆和SBMP（基于模拟的运动平台）驱动器里的运动感知错误，同时提高了有限线性运动平台的空间利用率。Marco Grottoli[12]等人提出了一种基于优化的体感模拟算法的客观评价预测策略，实现了在提供可靠的体感模拟质量的同时，减少未来车辆轨迹的延迟，提高了与参考轨迹的相关性，且允许不同的体感模拟机制的组合使用，增加了空间利用率。

## 研究目的和主要内容

课题目的是在一个三自由度运动平台上实现一个体感模拟系统，该系统主要包含两部分硬件平台，其一是三自由度运动平台，其二是VR眼镜；软件方面主要包含输入数据模块，体感模拟[13][14]（Motion Cueing Algorithm, MCA）模块，数据输出模块，平台驱动模块，可视化仿真模块。该系统能够对输入的运动数据进行体感模拟，使用体感模拟得到的数据驱动三自由度运动平台和VR眼镜，实现较好的体感模拟效果，还可以根据输入的运动数据实现三自由度运动平台的可视化仿真。

课题的意义在于，较好的体感模拟将会在相关的娱乐项目中带来更加逼真的体验，如VR座椅。该项目完成的三自由度运动平台的可视化仿真可以直观的看到体感模拟效果的好坏，而不需要链接真实硬件进行调试，为程序调试、算法调参带来便利。

需要达到的目标：根据用户输入三自由度的运动数据（线加速度和角速度），驱动三自由度平台上和VR眼镜进行正确的体感模拟；根据输入数据实现该三自由度运动平台的可视化仿真。

## 论文结构

本文的主要内容如下：

第一章介绍了当前体感模拟的产生和体感模拟算法的发展现状。

第二章介绍体感模拟运动平台涉及的一些基础知识，包括人体感知系统，体感模拟算法的核心原理，滤波器的数学构造，运动学反解的数学实现等。

第三章介绍整个系统的设计，包括模块划分，项目架构，采用的技术，可行性分析等。

第四章比较详细的描述系统的具体实现，包括关键模块的详细设计流程，实现方法等。

第五章对系统的效果做简单的分析。

第六章总结了所做的工作，并计划了下一步的工作以及展望该系统可以做出的改进。

## 课题来源

结合实验室工程项目开展。

# 基础理论概述

体感模拟的硬件基础是运动平台，体感模拟建立在对于人体运动感知方法了解的基础上进行的，人体的运动感觉主要来自于视觉和前庭系统，在了解了这些的情况下，介绍体感模拟算法的具体实现和数学意义，最主要的就是滤波器的实现，然后介绍运动学反解的理论，和具体的数学实现。

## 运动平台简介

体感模拟是在运动平台（Motion Platform）上完成的。运动平台一般分为两部分，其中一部分是固定在地面上的，称之为定平台（Fixed Platform），另一部分是基于定平台可以进行一定范围内的活动，称之为（动平台）。运动平台的分类一般按照自由度来分，一般而言最高的自由度即为6自由度，分别为绕x，y，z三轴的翻滚（roll），俯仰（pitch），艏摇（yaw）运动，和沿x，y，z三轴的平移运动（分别定义为back-forward, left-right, up-down）。在1965年D Stewart提出了经典的Stewart平台，如图 2‑1即为一个典型的Stewart平台。



图 2‑1 一种典型的stewart运动平台

运动平台还可以按照串联结构（Serial Manipulator）和并联结构（Parallel Manipulator）来分类。串联结构就是说动平台和定平台是由若干运动链串联组成，而并联结构则是指动平台和定平台间由若干运动链并联组成，Stewart平台则为典型的并联结构，并联结构具有负载能力强，并且在受限空间内运动效果良好的特点。而串联结构一般用于工业机器人，类似于机械手臂，其相比于并联结构则活动范围更广。 本次我们主要采用3自由度运动平台，显然也是并联机构构成，例图如图 2‑2：

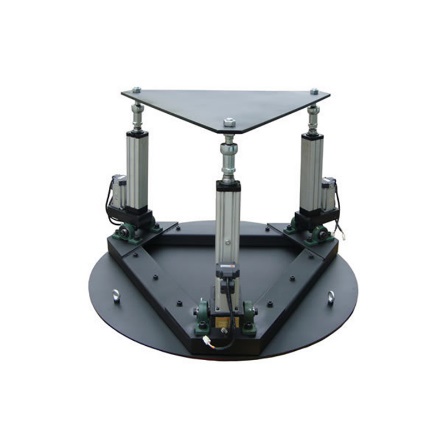


图 2‑2 一种3自由度运动平台[21]

## 人体运动感知理论

### 前庭系统

人体前庭感知系统提供了对加速度和角速度的感觉，其系统结构图如图 2‑3：

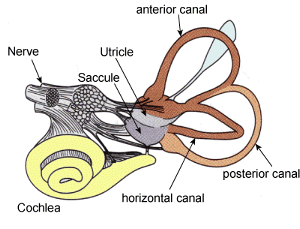


图 2‑3 前庭系统结构图[15]

图中的horizontal canal，anterior canal，posterior canal分别为水平管，前垂直管和后垂直管，三管互相垂直且装有淋巴液，人体运动后会导致其中的液体在管内移动，从而带动管内壁的毛囊移动，从而感知到角速度，当一个方向的加速度持续10~20s后，毛囊复位，导致感知停止[16]。图中的Saccule和Utricle分别为椭圆囊和球囊，构成了耳石。耳石感知的线性加速度是相对于重力加速度的，也就是说在仅有耳石作为感受器的时候，人体感知倾斜和线性加速度石没有区别的[17]。对此引入了比力的概念：

(2‑1)

其中：

f表示比力，单位为：m/s^2

g表示重力加速度，单位为：m/s^2

a表示人体的加速度，单位为：m/s^2

人体对于旋转运动的感知能力是有限的，感知能力的阈值和运动刺激的大小，持续时长等等都有关联，根据Lone M等人的研究[18]，人体对三个方向的旋转运动的感知阈值如表格 2‑1：

表格 2‑1 人体对旋转运动的感知阈值

| 运动方式 | 角速度（deg/s） | 角加速度(deg/s^2) |
| --- | --- | --- |
| 翻滚（roll） | 3.2 | 0.5 |
| 俯仰（pitch） | 2.6 | 0.5 |
| 偏航（yaw） | 1.1 | 0.14 |

耳石主要感知垂直面，当垂直面和重力加速度之间的角度超过约为2%，人体才可以感知到。根据Reid等人的研究[19]，人体对三个方向的线性加速度感知如下表：

表格 2‑2 人体对线性加速度运动的感知阈值（m/s^2）

| x轴 | y轴 | z轴 |
| --- | --- | --- |
| 0.17 | 0.17 | 0.28 |

### 本体感受系统

本体感受系统是指人体对自己身体的各种各样的感觉组成的系统，例如肌肉的伸展收缩、肢体相对于本体的位置、触觉和痛觉等。例如刚刚当人坐在起步的汽车里，会感到背部具有压力，这时该乘客会知道汽车在持续地加速，体感模拟中，类似地可以通过后仰动平台，使得在动平台上的用户产生背部受到挤压感，以此模拟持续的线性加速度。

### 视觉系统

视觉系统是我们获取我们运动状态的重要渠道。当人体运动状态小于表格 2‑1和表格 2‑2中所界定的阈值时，人体通过前庭感知系统和本体感受器将无法获知我们是否处于运动当中。当一位乘客处于平稳运行的高速列车时，当他闭目养神，他不会觉得自己在运动，随着他看到了窗外飞速向后移动的景物时，他可以通过视觉获知自己正在高速前进。人体可以通过周围环境大小变化和方向变化来确定自己位于空间的位置和方向，这是大脑通过视觉系统所能获取的信息。

## 体感模拟理论

运动平台的运动能力和空间都是有限的，所以需要体感模拟算法来利用运动平台有限的运动空间和运动能力来模拟尽可能真实的运动感觉。体感模拟主要需要的模拟流程分为两步：

第一步：根据采集的（或输入的）需要模拟的运动数据，采用洗出算法进行计算，得到动平台应有的位置姿态。

第二步：将得到的动平台的位置姿态，经过运动学反解获得运动平台各个运动部件的运动量，根据这些部件的运动量去驱动运动平台，可以实现体感模拟。

体感模拟需要模拟的内容可以细分为一下几类:

### 位移模拟

由于人体的本体感系统和前庭系统能感受到的都是速度上的改变，即加速度，无法感知速度大小，因此人体的速度大小和位置方位均通过视觉系统获取。故位移模拟通过视觉仿真完成。

### 突发线性加速度模拟

突发的线性加速度也就是人体的位置在空间上突然发生变动，这个可以直接通过驱动运动平台来实现，但是由于运动平台的运动能力有限，所以突发线性加速度的模拟在平台复位到能够进行下一次模拟之前，该期间的突发线性加速度可能发生丢失。

### 持续线性加速度模拟

运动平台的运动范围终归有限，无法直接驱动动平台来模拟持续的线性加速度，但是我们可以通过倾斜动平台，利用重力的分量来模拟持续的线性加速度，而且在倾斜动平台的过程中人体背部所受到的压力也会随之改变，这进一步提升了体感模拟质量。这种方法称作倾斜协调（Tilt Coordination），从英文名“倾斜坐标系”也可以直观看出来倾斜的便是人体坐标系。在这里给出一个具体例子，需要模拟一个向前（x轴向前，y轴向左）的持续加速度，记作a = 1 m/s^2，假定重力加速度g = 10 m/s^2，则动平台绕y轴正向旋转角度记作β，则有如下计算：

(2‑2)

由公式（2-2）可以计算得出β=5.7°，则动平台绕y轴正向旋转5.7°即可模拟向前的大小为1 m/s^2 的加速度。

倾斜协调方法具有以下几点缺陷：

1. 无法模拟很大的持续加速度，否则由于倾斜过度会被察觉。
2. 无法模拟z轴方向的持续加速度，只能模拟x,y轴的。
3. 受限于表格 2‑1和表格 2‑2所规定的各种阈值，否则会被察觉。

### 模拟角速度

无法模拟角速度，在视觉仿真上给予旋转感。

### 模拟角加速度

持续的角加速度目前无法模拟，突发角加速度可以通过驱动动平台直接模拟，同样的，在模拟玩突发角速度后也需要在表格 2‑1和表格 2‑2所规定的各种阈值之内复位动平台。

需要注意的是，突发角加速度的模拟也需要倾斜协调方法，这会和持续线性加速度模拟产生冲突，造成体感模拟质量降低。例如，当动平台处于持续向前的加速度模拟中，此时动平台会绕着y轴正向旋转，而此时同时需要模拟一个绕着y轴正方向的突发角加速度时，便和持续线性加速度模拟产生冲突，造成体感模拟质量降低。

## 体感模拟算法

### 经典洗出算法流程

主要介绍经典洗出算法。经典洗出算法的流程图：

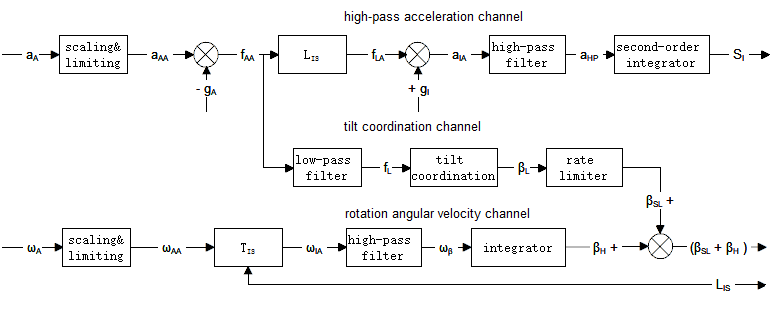


图 2‑4 ­经典洗出算法流程图

图 2‑4中各个参数说明，aA: 输入的加速度，包含x，y，z三个方向; aAA: 经过缩放和限制的加速度; ωA: 输入的角速度，包含x，y，z三个方向; fAA: 比力; aHP: 高通滤波器洗出加速度; ωβ: 洗出角速度; ωAA: 经过缩放和限制的角速度; LIS: 平动转化矩阵（这个和参考系的选取有关，其作用就是将fAA向量转化到动平台的参考系里）; TIS: 转动转化矩阵（和LIS作用类似）; SI: 洗出算法输出的动平台的位移; fL: 低通比力; βS: 洗出的动平台的旋转角的总和; βH: 旋转通道角位移; βL: 倾斜坐标系后的比例; gA: 上平台坐标系重力加速度; gI: 参考坐标系中立加速度; fIA: 经过LIS 后的相对高通加速度; aIA: 经过LIS 后的绝对高通加速度;βSL: 倾斜坐标系通道的角位移;ωIA: 经过TIS 后的角速度;

体感模拟的流程为，平动加速度信号采集输入后，首先经过缩放得到合适大小，然后算出比力，这是我们需要模拟的量。再经过高低通滤波，分别得到时域上的高频信号和低频信号，这两种信号分别对应着突发线性加速度和持续线性加速度，其中突发线性加速度直接通过在时间上的2次积分得到的位移，也就是动平台需要移动的位移来模拟；而持续线性加速度则通过倾斜协调方法来获得动平台正确的倾斜角βSL，这是动平台的角位移的一部分。另一部分通过角速度通道获得，输入的角速度，由于时域上的低频角速度就是持续的角速度，这个无法模拟，所以通过高通只取其中高频，这代表着突发的角速度，然后在时间上的1次积分即可获得动平台的另一部分角位移βH。两部分角位移之和（βH + βSL）则构成了最终的动平台的角位移。

### 低通滤波器的数学实现

低通滤波器滤出来的信号在时域上是低频的，也就是说信号发生变化的频率低，所以在倾斜协调通道里使用的是低通滤波器。注意低通滤波器的传递函数是s域，而s域是连续的，我们采集的数据是离散的，故需要做双线性变化将其变化到z域。

双线性变换的推导如下：

(2‑3)

其中z为离散的，s为连续的信号，T为采样间隔。

由（2-3）可得：

(2‑4)

对（2-4）采用泰勒展开可得：

(2‑5)

假定s域的传递函数为：H(s)，则z域的传递函数H(z)由（2-5）带入可得:

(2‑6)

一般来说，二阶低通滤波器的传递函数为：

(2‑7)

其中ωn为截至频率，ξ为阻尼比。

根据NAHON[22]等人的研究，该滤波器建议参数如表格 2‑3：

表格 2‑3 倾斜协调二阶低通滤波器建议参数

| 滤波器类型 | ωn | ξ |
| --- | --- | --- |
| x方向 | 5.0 | 1.0 |
| y方向 | 8.0 | 1.0 |

根据传递函数，详细推导其滤波流程如下：

记滤波前的输入为x(s)，注意其任然为s域的，记输入后的为y(s)，则他们和传递函数间满足如下关系：

将（2-5）带入（2-7）式，可以得到：

(2‑8)

进而由y(s) \* z-1­= y(z)­n-1，y(s) \* z-2­= y(z)­n-2（对x同样适用）可以将s域转换到z域，得到如下式子（下式中的y，x均为z域的）：

(2‑9)

其中的x­n为第n次采集到的输入数据，yn则是根据xn-2，xn-1，xn，以及相对于yn前两次输出的数据yn-1和yn-2经过（2-9）计算得到的数据。

根据（2-9）我们可以编码实现低通过滤波器，低通滤波器对脉冲信号的相应结果如下图所示（仅仅演示低通滤波器功能而已）：

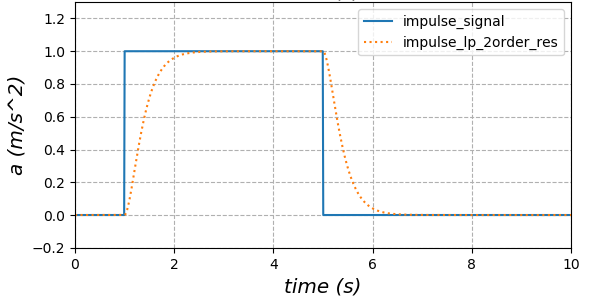


图 2‑5 二阶低通滤波器的输入输出

如图 2‑5，实线系列（impulse\_signal）为输入的脉冲信号，虚线系列（impulse\_lp\_2order\_res）为经过2阶低通滤波器得到的输出信号。

### 高通滤波器的数学实现

高通滤波器就是将时域上的高频信号过滤出来，时域上的高频可以理解为短时间内变化很大，故滤出的信号为突发信号。高通滤波器主要用于突发角速度模拟和突发线性加速度模拟。

在经典洗出算法中，突发角速度模拟采用的即为一阶高通滤波器，其传递函数如下：

(2‑10)

其中ωn为截止频率，根据NAHON[22]等人的研究，该滤波器建议参数如表格 2‑4：

表格 2‑4 角速度一阶高通滤波器建议参数

| 滤波器 | ωn |
| --- | --- |
| 所有方向 | 1.0 |

利用（2-5）将s域转为z域可以得到：

(2‑11)

其中y（s）为从滤波器输出的数据，x（s）为输入滤波器的数据，进而由y(s) \* z-1­= y(z)­n-1，y(s) \* z-2­= y(z)­n-2（对x同样适用）可以将s域转换到z域，得到如下式子（下式中的y，x均为z域的）：

(2‑12)

一阶高通滤波器输出的信号无法使动平台回到原点（这个稍后会做比较），可以使用二阶滤波器对其进行改进。

经典洗出算法中，二阶高通滤波器应用于突发线性加速度通道，其传递函数如下：

(2‑13)

其中ωn为截止频率，ξ为阻尼比。类似低通滤波器的，利用（2-6）即可将s域的转为z域的，得到新的传递函数为：

(2‑14)

其中y（s）为从滤波器输出的数据，x（s）为输入滤波器的数据，进而由y(s) \* z-1­= y(z)­n-1，y(s) \* z-2­= y(z)­n-2（对x同样适用）可以将s域转换到z域，得到如下式子（下式中的y，x均为z域的）：

(2‑15)

根据NAHON[22]等人的研究，该滤波器建议参数如表格 2‑5：

表格 2‑5 线性加速度二阶高通滤波器建议参数

| 滤波器类型 | ωn | ξ |
| --- | --- | --- |
| x方向 | 2.5 | 1.0 |
| y方向 | 4.0 | 1.0 |
| z方向 | 4.0 | 1.0 |

接下来对比一阶和二阶高通滤波器在角速度通道中的实际对比：

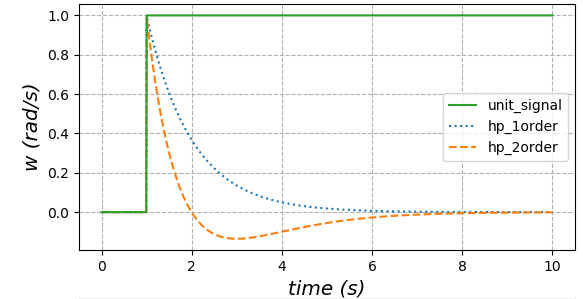


图 2‑6 角速度通道中一阶和二阶高通滤波对阶跃信号的对比

如图 2‑6，其中实线系列（unit\_signal）为输入的阶跃信号，由点构成的虚线系列（hp\_1order）为阶跃信号经过一阶高通滤波器的输出信号，由短线构成的虚线系列（hp\_2order）为阶跃信号经过二阶高通滤波器的输出信号。从图中我们可以看到，一阶高通滤波器的输出的角速度记为函数fhp\_1order，那么在这段时间内（0-10s）的积分s得到的角度也就是动平台的角位移的计算为：

(2‑16)

由于（2-16）中的fhp\_1order > 0，则θ> 0，也就是说一阶高通滤波器的输出无法使动平台的角位移回归到0。然而二阶高通滤波器则不然，不难验证，hp\_2order系列在0-10s的时间内的积分为0。

对于线性加速度通道采用的是二阶高通滤波器是类似的，不难发现线性加速度通道的二阶高通滤波对于阶跃信号的输出信号，其在时间上的二次积分（也就是加速度在时间上的二次积分）即为动平台的位移也不为0。阶跃信号代表的是持续的加速度，所以如果有可能出现这种突然有了加速度，并且会持续的情况，这时任然在线性加速度通道上使用二阶高通滤波器则会导致动平台位移无法复原，则考虑将二阶高通滤波器升入为三阶高通滤波器即可，对于角速度通道当然也是类似的。

## 运动学反解正解

### 运动学反解

当输入的运动数据经过洗出算法后，则可以获得动平台的位移和角位移，根据动平台的这些数据，还有运动平台本身存在的约束，来求解运动平台各个部件的真实运动量，这个过程即称为反解。反解的目的，则是通过得到的运动平台各个部件的运动量来驱动运动平台硬件，达到体感模拟效果。

为方便解析三自由度运动平台的运动学反解，其构造简图如下：

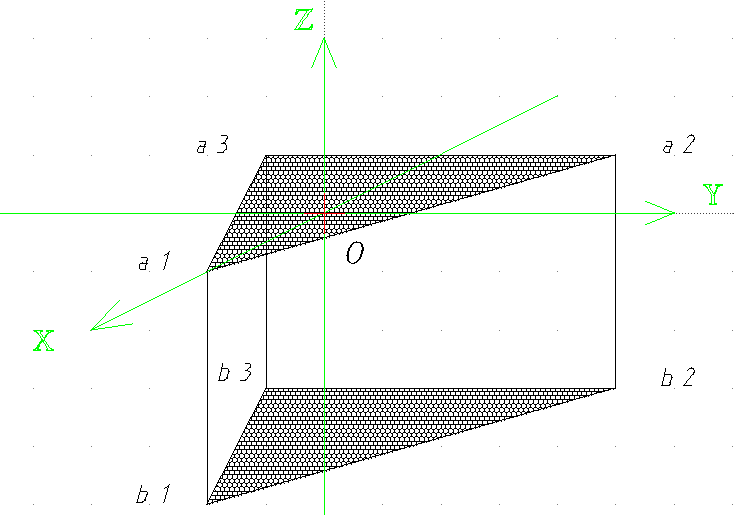


图 2‑7 三自由度运动平台构造简图

如图 2‑7，定平台为b1，b2，b3组成的三角面，动平台为a1，a2，a3组成的三角面，a1b1为前端的电动缸，a2b2为右后端的电动缸，a3b3为左后端的电动缸。

坐标系建立动平台上，其原点O位于a2，a3为底的高的中点处，初始状态下，动平台平行于定平台，电动缸处于其行程的一半。对于运动平台的各个长度有如下定义：

# 3 dof运动平台的各种参数，单位 mm  
CYLIDER\_HEIGHT = 400.0 # 电动缸本身长度  
MAX\_CYLIDER\_LENGTH = 35.0 # 电动缸总行程的一半  
FB\_LENGTH = 560.0 # 动平台三角形底部的高的长度  
LR\_LENGTH = 560.0 # 动平台三角形左右的长度

根据以上长度定义，我们可以得知|a1b1| = |a2b2| = |a3b3| = CYLINDER\_HEIGHT + MAX\_CYLINDER\_LENGTH；|a1a2| = |a1a3| = |b1b2| = |b1b3| = FB\_LENGTH；|a2a3| = |b2b3| = LR\_LENGTH；

初始状态下，a1，a2，a3，b1，b2，b3的坐标分别为：

a1：（FB\_LENGTH/2, 0, 0）

a2：（-FB\_LENGTH/2, LR\_LENGTH/2, 0）

a3：（-FB\_LENGTH/2, -LR\_LENGTH/2, 0）

b1：（FB\_LENGTH/2, 0, -CYLINDER\_HEIGHT + MAX\_CYLINDER\_LENGTH））

b2：（-FB\_LENGTH/2, LR\_LENGTH/2, -CYLINDER\_HEIGHT + MAX\_CYLINDER\_LENGTH））

b3：（-FB\_LENGTH/2, -LR\_LENGTH/2, -CYLINDER\_HEIGHT + MAX\_CYLINDER\_LENGTH））

当一个点（三维坐标系里）绕着x轴旋转θ角时，旋转矩阵为：

(2‑17)

同理，绕y轴的旋转矩阵为：

(2‑18)

由于三自由度运动平台无法绕z轴旋转，则丢弃不模拟。假设洗出算法得到的动平台的角位移在x，y，z方向大小分别为α，β，γ（无法模拟），动平台z在z方向的平移为t，由于x，y方向的平移无法模拟，故丢弃不模拟。则根据（2-17）和（2-18），则坐标经过α，β的旋转和z轴的t的平移后，其转换矩阵（增广后的）为：

(2‑19)

这里以求解a1b1电动缸伸缩量作为例子，a1b1坐标分别为：Pa1 = [x1，y1，z1，1]，Pb1 = [x2，y2，z2，1]，则经过T的转化后，a1的坐标为：Pnewa1 = T\*Pa1，计算出来记为Pnewa1 = [x1\_T, x2\_T, x3\_T, 1]，则根据两点坐标公式，得到伸缩量记为h1，计算方式：

– (CYLINDER\_HEIGHT + MAX\_CYLINDER\_LENGTH) (2‑20)

h1通过反解计算出来的伸缩量。

### 运动学正解

运动学正解则是通过运动平台各个部件的伸缩量，求解动平台的位置。三自由度运动平台动平台的位置求解即为求解动平台的三个顶点的坐标。

如图 2‑2和图 2‑7，由于机械限制，其中的a1，a2，a3三个点均活动在固定的平面上，于是需要求解的3个坐标的9个变量就可以简化为6个，具体的简化为，a1的y轴分量总是为零，a2的y轴分量总是等于负的x轴分量，a3的x轴和y轴分量总是相等。

则设a1，a2，a3的坐标分别为：（xa1, 0, za1），（xa2, -xa2, za2）和（xa3, xa3, za3）。根据|a1a2|, |a2a3|, |a1a3|均为已知定值为3个方程，然后|a1b1|，|a2b2|，|a3b3|，的值根据电动缸的三个伸缩量均为已知，又可以列3个方程。记dfb = FB\_LENGTH, dlr = LR\_LENGTH, ct = CYLINDER\_HEIGHT + MAX\_CYLINDER\_LENGTH，则可以得到如下方程组：

(2‑21)

该方程组采用牛顿迭代法求解即可，将上述方程组记为F(x) = 0，其中x即为一个6维向量: [xa1, za1, xa2, za2, xa3, za3]。牛顿迭代法的迭代公式如下：

(2‑22)

上面的迭代的具体解释为，x(k+1)为迭代的k+1次的解，F’为雅克比矩阵，就是F(x)的一阶导，迭代多次以后当x(k+1) 和x(k)的差值足够小时，则认为找到了近似解。

## 开发工具分析及选择

开发操作系统选择linux系统；

开发语言采用python，其跨平台性强大，且对于科学计算支持良好；

开发的后端IDE采用pycharm，选择的原因：其功能丰富，语法高亮检测，单步调试，集成git，远程调试，python控制台集成等等；开发的前端IDE选择vscode，有linux版，且通过各种插件可以完善地开发前端。

后端测试工具：采用swagger tool，gui风格调用接口，测试后端逻辑是否正确。

## 关键技术分析

1. 经典洗出算法

主要实现重要部件滤波器。

1. 姿态反解

主要了解坐标系的确定以及坐标转换，以位姿获得平台真实运动数据。

1. python网络编程框架flask

采用该flask框架的原由在于其高扩展性以及该课题对应的项目为轻量级的特性。

1. WebGL技术

主要涉及openGL库和Three.js框架（是一个流行的跨浏览器JavaScript 3D框架），以此完成可视化仿真。

1. Vue前端框架

vue是流行的前端开发框架，主要涉及vue的组成，包括路由概念，组件概念等，当然包括了对于css，js，html等相关语言的了解。

## 基本方案制定

1. 划分好模块，控制好项目结构。
2. 初步完成前后端框架，前端后端同时进行。
3. 按照模块填鸭式完成项目，边集成功能边进行测试。
4. 完成项目后联合测试通过即可。

## 本章小结

本章主要介绍了体感模拟所涉及到的基本理论。人体感知系统的相关理论是体感模拟的基础，前庭系统，本体感受系统，视觉系统构成了人体的感知。体感模拟则是利用人体感知系统的特点，在运动平台上进行运动感觉的模拟，需要模拟的种类包括线性加速度，位移，角速度，突发角速度等等，每一部分又分别作了 详细介绍。接下来介绍了运动平台的种类，以及他们的特点。接着，详细的展示了经典洗出算法的流程，包括线性加速度通道、倾斜协调通道、角速度通道，同时介绍了在每一个通道对应的滤波器的具体数学实现，包括参数的选取和滤波器阶数的对比等。接下来介绍的是洗出算法输出的数据被应用的地方——运动学反解。运动学反解可以得到驱动运动硬件平台的数据，利用这些数据便可以在运动平台上实现体感模拟。介绍的运动学正解是用来验证运动学反解是否符合要求的。在本章末尾简单的介绍了整个项目采用的开发工具和相关关键技术以及基本开发方案。

# 三自由度运动平台的系统设计

前面论述了体感模拟所涉及的基本理论以及相关概念，理论准备好了以后，则开始系统的分析设计，主要从需求分析、总体设计、功能模块划分详细阐述该系统组成。

## 功能需求

1. 能够读取文件作为运动数据的输入

由于设备限制，无法采集到需要模拟的运动数据，于是需要人为构造数据到文件里，然后程序读取数据文件，将这些数据作为输入。

1. 能够正确的执行洗出算法和运动学反解

读取完数据文件后，则将读取的数据放入洗出算法中进行计算，将洗出算法得到的动平台的姿态进行反解，获得运动部件的运动量。

1. 前端界面显示输入数据和反解输出的数据

能够实时地从前端获取输入的数据和反解输出的数据，且以表格形式呈现。

1. 前端界面能够对三自由度运动平台进行仿真

能够在前端根据输入的数据实时动态正确的刷新运动平台的状态。

## 系统总体设计

### 系统数据流

根据功能需求，可以得到系统的数据流图如图 3‑1：



图 3‑1 系统数据流图

### 系统架构

如图 3‑1，从系统的数据流图可知，该系统最基本的架构可以划分为前后端架构。

后端实现上，采用flask架构，该架构为流行的网络编程框架，特点在于轻量级，容易集成。

前端实现上，采用vue框架，界面则采用流行的ui库element-ui[23]，设计三维的运动平台仿真时，则采用three.js库即可。

### 功能模块划分

如图 3‑1，从系统的数据流图可知，该系统的主要处理流程有六个，所以按照功能模块划分具体如下：

1. 数据输入模块：

输入数据支持三个方向加速度，三个方向角速度，支持缺省配置和文件作为数据源，该模块将数据整理为便于运算的格式然后输入到体感模拟模块中。

1. 体感模拟模块：

采用洗出算法作为体感模拟模块的核心算法，将来自数据输入模块的运动数据（角速度和平动加速度）运用信号滤波器洗出得到运动平台的应有的位姿，输出给数据输出模块。

1. 运动学反解数据输出模块：

该模块主要完成将上一级得到的运动平台的姿态反解。首先将该运动平台进行坐标系的设定，得到在该坐标系下各部件的坐标，再根据约束条件求解该运动平台各个部件的真实运动数据，将反解后的数据和之前的姿态从该模块中输出。

1. 平台驱动模块：

该模块将得到的真实运动数据输入到相应的硬件平台，正确的驱动硬件平台，计算机上得到的相关数据可以使用串口通信，将相应的数据传输到三自由度运动平台和VR眼镜中。

1. 可视化仿真模块：

实现一个三自由度平台的可视化仿真，能够模拟横摇，纵摇，艏摇三种运动行为，该仿真模型会根据输入的运动数据实时改变。

1. 输入输出数据可视化模块：

将数据输入模块读取形成的结构化数据和运动学反解数据输出模块输出的数据实时的显示在前端。

### 开发环境

操作系统：linux

CPU：i5-6200u@2.3Hz

位数：64

python版本：3.7.4

## 本章小结

本章主要描述系统的总体设计，论述了系统的数据流向，以及需要经过的处理步骤。对整个系统进行了功能模块划分，包括数据输入，洗出算法，运动学反解输出，运动平台可视化，平台驱动和输入输出数据可视化模块，同时介绍了系统的基本架构以及系统的开发环境。

# 三自由度运动平台的详细设计与实现

在系统模块划分好以后，详细介绍每个模块实现步骤和方法。

## 数据输入模块详细设计与实现

从文件里读取的数据（按行读取）需要的内容为：俯仰角速度，翻滚角速度，x方向平动加速度，y方向平动加速度，z方向平动加速度，（也就是每一行都是这5个数据）于是设计数据结构DataItem如下：

class DataItem:  
 def \_\_init\_\_(self, pitchVelocity, rollVelocity, xAcc, yAcc, zAcc):  
 """  
 输入数据单元的结构体,取右手系，x轴向前，y轴向左，z轴向上,这也是传给洗出算法的基本数据单元  
 :param pitchVelocity: 俯仰角速度, 单位为：degree/s  
 :param rollVelocity: 翻滚角速度  
 :param xAcc: x方向的平动加速度,单位为：m/s^2  
 :param yAcc: y方向的平动加速度  
 :param zAcc: z方向的平动加速度  
 """  
 self.wPitch = deg2rad(pitchVelocity) # 洗出算法里使用的均为弧度，这里作转换  
 self.wRoll = deg2rad(rollVelocity)  
 self.xAcc = xAcc  
 self.yAcc = yAcc  
 self.zAcc = zAcc

python中使用class类来实现该数据结构，读取文件的逻辑如下流程图：



图 4‑1 数据输入模块流程图

## 体感模拟模块详细设计与实现

体感模拟模块的核心是滤波器，滤波器采用类来实现。基类中定义了滤波器的一些基本参数，其实现如下：

class BaseFilter:  
 def \_\_init\_\_(self, getSampleInterval):  
 """  
 :param getSampleInterval: 获取样本的间隔时间：单位为s  
 """  
 if getSampleInterval <= 0:  
 LOG.error("get sample interval is not a positive number")  
 else:  
 self.\_\_getSampleInterval = getSampleInterval  
 self.\_\_cutoffFreq = 0  
 self.\_\_damping = 0  
  
 def setCutoffFreq(self, cutoffFreq):  
 self.\_\_cutoffFreq = cutoffFreq  
  
 def getCutoffFreq(self):  
 return self.\_\_cutoffFreq  
  
 def setGetSampleInterval(self, getSampleInterval):  
 self.\_\_getSampleInterval = getSampleInterval  
  
 def getGetSampleInterval(self):  
 return self.\_\_getSampleInterval  
  
 def setDamping(self, damping):  
 self.\_\_damping = damping  
  
 def getDamping(self):  
 return self.\_\_damping

在python类的继承当中，子类的构造函数并不会自动调用父类的构造函数，所以需要显式调用父类的构造函数，采用super().\_\_init\_\_(args)即可。以下介绍几种前面提到过的滤波器的实现。

根据式（2-9）可以实现二阶低通滤波器，用在倾斜协调通道来模拟持续线性加速度。具体实现如下：

class TransLPFilter(BaseFilter):  
 def \_\_init\_\_(self, getSampleInterval):  
 super().\_\_init\_\_(getSampleInterval)  
 self.\_\_inputSrc\_2order = [0, 0, 0]  
 self.\_\_outputSrc\_2order = [0, 0, 0]  
  
 def filter(self, trans\_input):  
 """  
 低通滤波：  
 :param trans\_input:输入的平动数据  
 :return: 返回滤波后的值  
 """  
 A = self.getCutoffFreq() \*\* 2 \* self.getGetSampleInterval() \*\* 2  
 B = 4 \* self.getCutoffFreq() \* self.getDamping() \* self.getGetSampleInterval()  
 self.\_\_inputSrc\_2order[0] = trans\_input  
 self.\_\_outputSrc\_2order[0] = (A \* (  
 self.\_\_inputSrc\_2order[0] + 2 \* self.\_\_inputSrc\_2order[1] + self.\_\_inputSrc\_2order[2]) -  
 (2 \* A - 8) \* self.\_\_outputSrc\_2order[1] -  
 (A - B + 4) \* self.\_\_outputSrc\_2order[2]) / (A + B + 4)  
  
 self.\_\_inputSrc\_2order[2] = self.\_\_inputSrc\_2order[1]  
 self.\_\_inputSrc\_2order[1] = self.\_\_inputSrc\_2order[0]  
 self.\_\_outputSrc\_2order[2] = self.\_\_outputSrc\_2order[1]  
 self.\_\_outputSrc\_2order[1] = self.\_\_outputSrc\_2order[0]  
  
 return self.\_\_outputSrc\_2order[0]

参照以上的代码，类似地，可以根据（2-12）实现角速度通道的一阶高通滤波器，根据（2-15）实现平动加速度通道的二阶高通滤波器。

洗出算法采用类实现，其包含了3个通道需要的三个滤波器，也包含了需要输出的数据的结构题，其涉及的基本数据项如下代码：

class WashOut:  
 def \_\_init\_\_(self, getSampleInterval):  
 """  
 初始化洗出流程类，包括各个方向的滤波器  
 :param getSampleInterval:获取样本的时间间隔  
 """  
 # 洗出算法的结果，由于三自由度运动平台的限制，得到的数据只有，pitch，roll，updown为有效值  
 self.\_\_washOutData = {  
 "pitch": 0, # 俯仰  
 "roll": 0, # 翻滚  
 "yaw": 0, # 艏摇  
 "updown": 0, # 上下平移  
 "leftright": 0, # 左右平移  
 "forwardback": 0 # 前后平移  
 }  
 # x low pass filter settings  
 self.xLP = TransLPFilter(getSampleInterval)  
 self.xLP.setCutoffFreq(5.0)  
 self.xLP.setDamping(1.0)  
 # y low pass filter settings  
 self.yLP = TransLPFilter(getSampleInterval)  
 self.yLP.setCutoffFreq(8.0)  
 self.yLP.setDamping(1.0)  
 # z high pass filter settings  
 self.zHP = TransHPFilter(getSampleInterval)  
 self.zHP.setCutoffFreq(4.0)  
 self.zHP.setDamping(1.0)  
 # pitch high pass filter settings  
 self.pitchHP = RotatHPFilter(getSampleInterval)  
 self.pitchHP.setCutoffFreq(1.0)  
 # roll high pass filter settings  
 self.rollHP = RotatHPFilter(getSampleInterval)  
 self.rollHP.setCutoffFreq(1.0)

通过以上代码则知晓洗出算法整个过程所涉及到的主体内容。洗出算法的洗出流程如下流程图：



图 4‑2 洗出算法流程图

## 运动学反解数据输出模块

运动学反解中最为关键的就是转换矩阵，其转换矩阵见式（2-20），这里采用numpy的array来构造，具体如下：

T = np.array([  
 [cosb, sina \* sinb, sinb \* cosa, 0],  
 [0, cosa, -sina, 0],  
 [-sinb, sina \* cosb, cosa \* cosb, z],  
 [0, 0, 0, 1]  
])

反解模块的输出数据采用字典构造，如下：

self.\_\_inverseKinematicsData = {  
 "xa1": 0,  
 "ya1": 0,  
 "za1": 0,  
 "xa2": 0,  
 "ya2": 0,  
 "za2": 0,  
 "xa3": 0,  
 "ya3": 0,  
 "za3": 0,  
 "h1": 0,  
 "h2": 0,  
 "h3": 0,

"normalVector": []  
}

其中的xa1到za3等为动平台经过洗出算法得到的动平台姿态的调整后的三个顶点的坐标，h1到h3分别为前电动缸，左后电动缸和右后电动缸的伸缩量。normalVector则为调整后的动平台的法向量。法向量的求解方式为一个平面中两个不平行的向量的叉乘，具体计算如下代码：

# 计算法向量方法： a(x1, y1, z1)和b(x2, y2, z2)为平面中两个不平行的向量，其外积就是法向量,i,j,k为三个轴的单位向量  
# a \* b = (y1z2 - y2z1)i - (x1z2-x2z1)j + (x1y2 - x2y1)k  
# 这里我们用 a1a2 \* a1a3得到法向量

a1a2 = [a2\_T[0][0] - a1\_T[0][0], a2\_T[1][0] - a1\_T[1][0], a2\_T[2][0] - a1\_T[2][0]]  
a1a3 = [a3\_T[0][0] - a1\_T[0][0], a3\_T[1][0] - a1\_T[1][0], a3\_T[2][0] - a1\_T[2][0]]  
normolVector = [(a1a2[1] \* a1a3[2] - a1a3[1] \* a1a2[2]),  
 -(a1a2[0] \* a1a3[2] - a1a3[0] \* a1a2[2]),  
 (a1a2[0] \* a1a3[1] - a1a3[0] \* a1a2[1])]

self.\_\_inverseKinematicsData [**"normalVector"**] = normolVector

运动学反解流程如下图 4‑3：



图 4‑3 运动学反解的过程

## 平台驱动模块

平台驱动模块是根据运动学反解输出的各个部件的运动量来驱动运动平台的模块，由于设备限制，该模块无法开发调试，故省略说明。

## 输入输出数据可视化模块

输入输出数据可视化，主要为前端所做之事，其处理流程如下：



图 4‑4 输入输出数据可视化模块

获取后端数据使用js的axios模块，入戏下代码：

getIOData(){

        const path = 'http://localhost:5000/io'

        axios.get(path)

          .then((res) => {

            this.msg = res.data

          })

          .catch((error) => {

            // eslint-disable-next-line

            console.error(error)

          })

      }

定时获取的方法，则采用js的setInterval函数，代码如下：

const getIODataTimer = setInterval(() => {

        //于此定期执行函数

      }, 1000);

## 可视化仿真模块

可视化方正模块主要涉及到三维物体的构建，位置的姿态的改变两大关键。

这里以定平台的构建为例子，展示three.js库的extrueGeometry函数的使用方法：

//扩展配置

      var extrudeSettings = {

        steps: 1,

        depth: 0.01,

        bevelEnabled: false,

        bevelThickness: 1,

        bevelSize: 0,

        bevelOffset: 0,

        bevelSegments: 1

      };

      //构建三角形的动平台和定平台

      this.LR\_LENGTH = 0.28

      this.FB\_LENGTH = 0.28

      this.CT = 0.2175

      var trianglePoints = new Array(

        new THREE.Vector2(0, this.FB\_LENGTH/2),

        new THREE.Vector2(- this.LR\_LENGTH/2, - this.FB\_LENGTH/2),

        new THREE.Vector2(this.LR\_LENGTH/2, - this.FB\_LENGTH/2),

        new THREE.Vector2(0, this.FB\_LENGTH/2)

      )

      var shape3 = new THREE.Shape(trianglePoints)

      let geometry3 = new THREE.ExtrudeGeometry( shape3, extrudeSettings );

      let material3 = new THREE.MeshNormalMaterial();

      this.fixedPlatform = new THREE.Mesh( geometry3, material3);

接下来通过一段代码介绍三维物体的位置和旋转的更新：

    //根据后端给出的pitch和roll来更新动平台, 由于构建运动平台，动平台的绕x轴的初始旋转值为Math.PI / 2

      this.motionPlatform.rotation.x = this.motionPlatformInfo.pitch[dataNum - 1] + Math.PI / 2

      this.motionPlatform.rotation.z = this.motionPlatformInfo.roll[dataNum - 1]

      this.motionPlatform.y = this.motionPlatformInfo.updown[dataNum - 1] + this.CT

更多的形状以及属性参见three.js官方文档[24]，可视化仿真模块的处理流程如下：



图 4‑5 可视化仿真模块处理流程

## 本章小结

本章详细描述了各个模块的处理流程以及关键部分的实现代码。

# 性能测试与分析

## 测试环境

## 功能测试

## 系统界面

不是必须

## 性能测试

## 本章小结

# 总结与展望

基于对象的存储是为了克服当前基于块的存储存在的诸多难题，在存储接口和结构层次的重要发展。基于对象的存储设备可以具有更多智能性，可以根据应用负载选择优化的存储策略。实现属性控制的存储策略，关键需要解决两个方面的问题：第一，属性表达什么信息，怎样影响存储策略？第二，属性怎样从用户应用传递给存储设备？围绕这两个问题，作了如下几点研究和工作：

1. 提出了对象属性控制存储策略的模型。OSD协议作为SCSI的扩展集，可以在TCP/IP网络和iSCSI协议之上来传输，基于对象的存储设备接收OSD命令并进行处理。
2. 结合对应用负载特征的分析，提出根据对象属性描述的负载特征动态选择RAID级别和分条单元大小的数据放置策略。I/O请求较小的对象放在RAID-10中，同时分条单元尺寸较小；反之则放在RAID-5中。
3. 建立了属性的传递机制，一种是应用程序接口静态传递；另一种是动态机制，即根据属性当中包含的文件系统信息预测文件的分类，并根据分类做出进一步的存储策略选择。
4. 论文总结必须用这样的条目的形式给出，总结是对全文的总结，不是对毕业设计的心得，心得部分不要写。

本文为更好地认识基于对象的存储以及OSD的实现进行了有益的探索。该领域还有很多研究工作有待完成，包括：

* 以OSD为节点构建大规模（PB级）存储系统
* 属性控制的caching/prefetching策略
* 实现Device-aware（表达设备能力，按需分配资源）
* 设备的学习能力，以文件系统和历史访问信息等为提示进行预测

随着存储需求的爆炸性增长，下一代互联网络必须有新的存储结构来应对构建和管理更大规模存储系统的挑战。基于对象的存储是最有希望的突破点之一。相信存储技术的发展一定能够满足人们不断增长的存储需求。

致 谢

论文完成之际，首先要感谢我的导师管涛老师教授。他站在学科发展的前沿，从论文的选题，研究工作逐步深入，到论文的撰写，都给我以细致的指导和建设性的意见，使我得以圆满而顺利地完成……。XXX严谨的治学态度、诲人不倦的师德和一丝不苟的工作作风将会给我留下不可磨灭的记忆……。

在…… 四年里，得到了许多老师和同学的大力帮助和支持，在此表示深深的谢意。感谢XXX等老师对我的关心和帮助。在课题研究和项目开发过程中，我与很多同学一起度过了一段段难忘的时光，值得怀念。我们大家共同创造的良好的学术氛围，将给我以永远而美好的回忆。

……

最后，我要深深地感谢我的父母，他们给予我无尽的关怀和无止境的爱，….

致谢属于论文的辅文部分。使用第一人称，采用散文体，对指导教师以及协助完成设计的有关人员表示谢意，并可简述自己通过本次毕业设计的体会，注意只写是查重最容易出问题的地方，请千万不要看别人写的，照搬。

# 毕业设计模板基本框架

2015年3月华中科技大学教务处发布了的《关于进一步加强本科生毕业设计（论文）规范化的通知》，该文对毕业设计开题报告，译文翻译，毕业设计论文的撰写提出了具体的规范化要求，该规范全部采用文字描述，实际操作有些困难，为方便计算机科学与技术学院全体学生撰写毕业设计论文，特开发此计算机科学与技术学院毕业设计标准模板供大家使用，本模板是对学校教务处标准的实例化，整体基本遵循学校标准，但也适当进行美化，如与学校教务处标准有冲突，请以此模板为主。

## 封面

本模板中封面中所有需要用户填写部分全部采用插入文档部件中的文档属性完成，如图7‑1中的姓名显示为作者，在开题报告中、成绩评定页中均包括学生姓名，采用文档属性的方式可以做到一次修改多处同时变化，避免数据重复输入和不一致性，注意不要删除文档属性框另外输入，日期部分不需要修改，会自动更新为正确时间。



图7‑1 封面模板中的文档属性

## 原创性声明页

最终定稿的毕业设计论文需要提交正式胶印版一份，双面黑白打印，这个版本需要将所有签字完成，其他未定稿的版本均不需要签字。学位论文原创声明页需要作者本人签名两次，提交导师签字之前请学生本人将自己的签名完成，再找导师签字，否则非常不礼貌。

## 摘要

中文摘要是对论文内容的高度概括，应用精练的语言概述论文的主要研究内容、目的意义、设计过程、实验手段及取得的成果等。摘要一般分为2~3段，第一段简要介绍背景知识，尽量简洁，切中要害，不要说些任何人都知道的无信息量的语句；后面可以用一到两段介绍毕业设计工作，主要体现自己的工作，摘要不要太长，但主要工作部分应该比第一段背景知识长，不要本末倒置。

摘要中不得出现“本文共有X章，第一章…，第二章…”之类的表述。摘要严禁出现“本文”，“我”，“我们”这样的第一人称主语，尽量采用动宾结构，比如设计了….实现了…利用了….技术…..进行了….实验…..实验结果表明……，如果需要设置主语可以用文中涉及的系统或研究机制等。

摘要不要超过一页，关键词与摘要在同一页，数量3～7个。中文关键词须用汉字，尽量不使用英文单词或其缩写，例如“DBMS”不能作为中文关键词，必须用对应的中文表述：“数据库管理系统”。关键词之间用逗号分隔，最后一个关键词后不用标点。关键词应该具体，不得用过于泛化的词做关键词，如“音乐、视频”，形容词不能作关键词。

## 目录

目录不会自动更新，排版变动后必须更新目录，更新目录方式：鼠标点击目录，按F9键或者右键更新域，选择更新整个目录即可。

目录仅包含一级标题和二级标题和标题样式，目录是全论文的纲要。中文摘要、Abstract、论文正文的各级标题（不包括第三级）、致谢、参考文献、附录等都应编入目录，标注其页码对照关系，但目录本身不出现在其中。中文摘要、Abstract、目录等使用希腊数字“I、II、…”编连续页码；论文正文、致谢、参考文献、附录等使用“1，2，3，… ”编连续页码。

## 参考文献

参考文献必须25篇论文以上，尽量避免网页链接引用。英文10篇以上。

## 附录

附录部分非必须内容，如果有一些需要特别交代的内容可以在这里列出，如本人参加的项目，提交的论文等，如没有特别闪光的地方建议删除本章。

## 毕业设计任务书

### 任务书封面

毕业设计任务书封面内容均可根据本模板封面数据自动生成，无需没写，但如果题目超过两行，请自行输入题目到两行中，避免出现图7‑2中尴尬的情况，该封面中所有时间都已经固定好，不需要修改。



图7‑2 任务书封面标题过长

### 任务书内容

课题内容和要求请按毕业设计互选系统中的内容酌情修改完善后填充，内容尽可能丰满完善一点，尽可能的细化，不要干瘪的一句话，参考文献部分应列出最终论文中最重要的5~6篇参考文献，尽可能的将表格充满，注意列表格式应与原格式一致。如有同组设计者请填写姓名，没有填无。

### 任务书签字流程

任务书封面部分需要指导老师所在单位教学负责人签字审查，并经教学院长批准，请各班集中收集任务书封面单页后，到教务科集中签字盖章审核，为减少学生和相关负责人工作量，原则上不针对单个学生进行该项业务。

计算科学理论研究所： 石柯 并行分布式计算研究所： 陆枫

信息安全研究所： 付才 数字媒体研究所： 李丹

数据存储研究所： 谭志虎 数据工程研究所： 潘鹏

## 成绩评定页

成绩评定页需要导师和答辩组就论文和答辩情况进行综合评定，参照硕士论文答辩流程，请学生**事先草拟导师意见**，提交导师参考手写到评定页，评分并签字。**答辩时请携带答辩评审意见空白页**（含姓名，班级，打印论文时单独取出，不要装订）请**答辩评议组当场给出评审意见**并签字打分。

# 毕业设计撰写要求

## 图的格式



图8‑1 图注必须在图的正下方

正文中所有插图要求图面整洁，布局合理，线条粗细均匀，大小适中。插图必须是矢量图，不能是从他处直接拷贝位图，所有曲线、图表、线路图、流程图、程序框图、示意图必须按国家规定标准或工程要求采用visio等工具绘图后复制到word。插图在论文中采用的是正文样式，所以会自动缩进，请调整标尺取消缩进，让插图严格居中，图表中的文字大小必须小于正文字号。

### 图的题注

所有插图均应有图号和图名（office中称题注，图注），图注出现在插图的正下方，小四黑体居中，在本模板中可以直接使用样式库中的题注样式即可规范格式，图号和图名后面不加标点符号，也不得加参考文献引用。

图号按章编编号，如第2章的图为图2-1、图2-2、…，第3章的图为图3-1、图3-2、…等，第一个编号是章号，第二个编号是本章的图的序号，常见错误是出现二级编号如：图2-1-1；第二个图名是插图的名称，扼要概括图的内容，字数不宜太多。

图的题注可在引用菜单栏通过插入题注的方式插入**（最简单的方法是复制其他图的图注然后更新域即可）**，引用时采用交叉引用引用，注意题注，交叉引用是word很重要的概念，是office排版的高级技巧，撰写毕业设计论文时应研究学习一下此功能，如果插入题注没有对应的图题注，只有figure等，可以自己创建，具体流程如图 8‑2，图 8‑3所示，需要注意的是，由于office不是为中文排版设计，图编号前面会增加一个空格，建议手工删除。

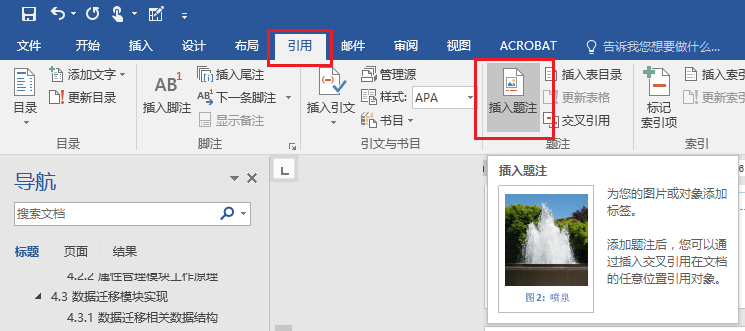


图 8‑2 插入图的题注

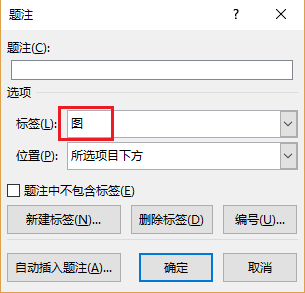


图 8‑3 插入题注对话框

### 图的引用

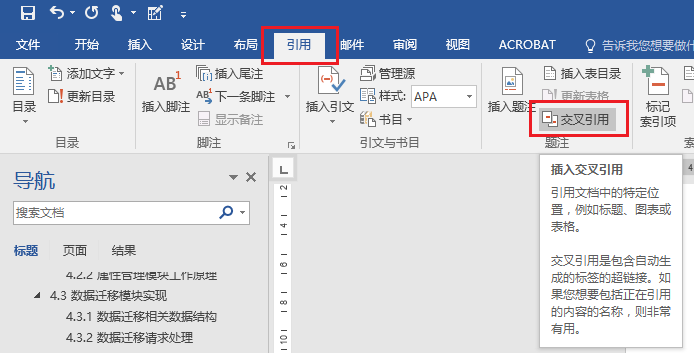


图8‑4 交叉引用

所有插图均应在正文中予以引用。引用某插图时，一般写为“…如图2-1”或“图3-2是…”。正文中的插图均须安排在文中第一次引用到该图的正文下面，一般要求先见文，后见插图，且图一般不跨页绘制。

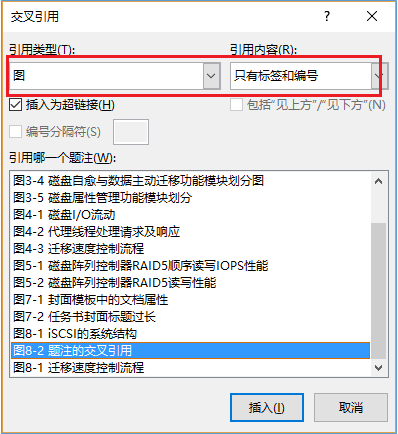


图8‑5 插入交叉引用对话框

手工输入图引用的方式非常不方便，如果图编号发生更改要全文修改编号，Office中提供交叉引用的功能进行题注的自动引用，方便编号自动更新，如图8‑4所示，点击交叉引用后得到图8‑5所示对话框，选择合适的图编号即可，注意引用内容选择只有标签和编号。

### 错误的插图格式

图8‑6所示图的排版中插入时未取消左侧的格式缩进，右侧超出了页边距，专业术语称之为“出血”现象，请一定要仔细核对插图以及图注的缩进问题，插图和图注应该严格居中，插图不得超出页边距。另外文章红色字体过大，一般也是有问题，建议所有图标中的文字字体均小于正文字体。

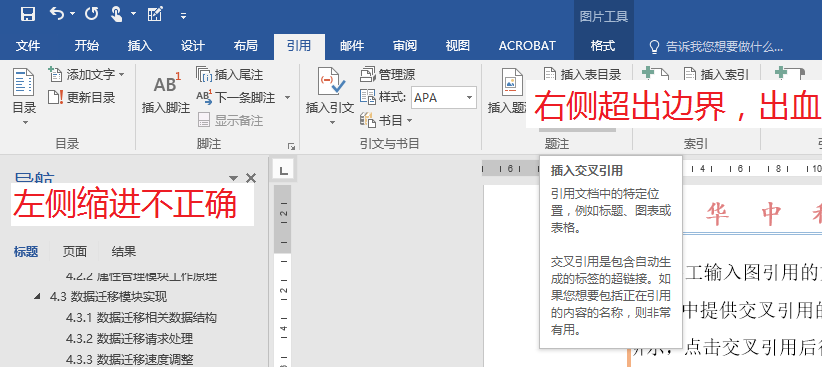


图8‑6 缩进错误，出血错误实例

不得出现下面这样大段的空行或留白现象，每章最后一节除外。

## 表的格式要求

表的格式要求基本和图一致，注意图表中的文字均需要小于正文字体大小，与图注位置相反，表的题注必须在表的正上方。

表8‑1 表头必须在表的正上方

|  | Type 0 | Type 1 | Type 5 | Type 7 |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| RAID级别 | 0 | 10 | 5 | N/A |
| 磁盘个数 | 8 | 8 | 8 | N/A |
| 数据块大小 | 512KB | 16KB | 64KB | 1KB |
| 数据块个数 | 8K | 8K | 8K | 8K |

所有表均应有表号和表名（office中称题注，表注），表注出现在表的正上方，小四黑体居中，在本模板中可以直接使用样式库中的题注样式即可规范格式，表号和表名后面不加标点符号，也不得加参考文献引用。

表格由表号、表名、表头、表身等组成。表号按章编，如第2章的表为表2-1、表2-2、…，第3章的表为表3-1、表3-2、…等。表名是表格的名称，扼要概括表的内容，字数不宜太多。

表头包括栏头、行头，与表身一起构成表格的主体。表中的竖称为栏，横格称为行。表身的内容，一般包括：数据、文字、公式和表图等。表内的数据对应位要对齐。少数表有表注，表注写在表下面且字号应比表号、表名的字小一号。

所有表格均应在正文中予以引用，具体引用方式和图的引用方式类似，如图8‑7所示。引用某表格时，一般写为“…见表1-2”或“表3-1是…”。表格应尽量靠近正文的叙述，一般应先见文，后见表，表不跨节。表格允许转页。表格转页部分可以不写表号和表名，但要重复书写表头，具体设置如图8‑8所示。

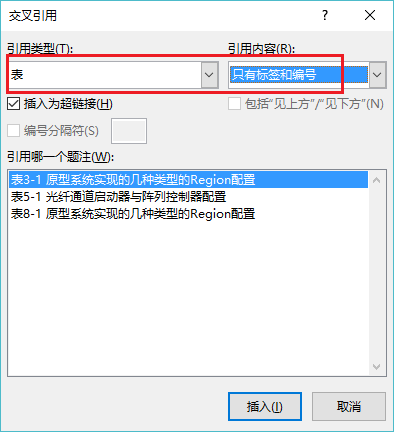


图8‑7 插入表注对话框

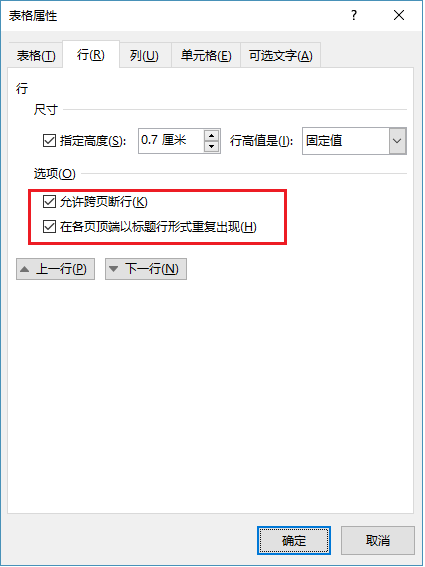


图8‑8 表格跨行设置

## 公式

常见公式排版格式如下：

(8‑1)

公式必须进行标注，公式中的变量必须用斜体，标注要居右，公式居中，要做到这一点可以在标号前面加空格进行调整。

公式一般另行居中写，公式末不加标点。若公式前有文字，如例、解、证、假定等，文字顶格写，公式仍居中写。一行写不下时，公式允许转行。公式转行需处理得当，做到既意义正确，又使版面美观匀称。

公式要有编号，公式编号按章编，如第2章的公式为(2-1)、(2-2)、…，第3章的公式为(3-1)、(3-2)、…等。公式编号写在公式右侧行末顶边线，并加圆括号。模板中公式编号已经按照图题注的方式给出，可以直接复制然后更新域自动排序。。

公式一般应在正文中予以引用，引用时以公式编号指示公式。正文中常有公式中表示量的符号说明，采用“式中”二字作为标志。一般可写成接排形式，如“式中，A指……；B指……”。

## 流程图



图8‑9 迁移速度控制流程

（标准的流程图一定要有开始和结束当然有些程序没有结束，请注意流程图的画法，Yes/No分支应该清晰的标注在菱形分支附近，而不是很远。

## 常见格式问题

|  |
| --- |
| 未定义标签 |
| 各章之间未分页 |
| 标题格式不正确 |
| 章节标题不合适 |
| 缩进不规范 |
| 行距不统一 |
|  |
|  |
| 不必要的留白和空行 |
| 图表中字体明显大于正文 |
| 图表比例失调，甚至有出血现象 |
| 表注不规范 |
| 表格排版欠美观 |

参考文献

1. [Amanda Henry](https://www.iti.com/blog/author/amanda-henry).A Brief History of Simulation Training.2018-01-18.https://www.iti.com/blog/a-brief-history-of-simulation-training-
2. PAGE R L. Brief history of flight simulation[J]. SimTecT 2000 Proceedings, 2000:11-17.
3. 肖慧琼. 六自由度平台体感算法研究[D]. 北京交通大学, 2014.
4. STEWART D. A platform with six degrees of freedom[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 1965,180(1):371-386.
5. 张金迪,高健,钟耿君,张揽宇,王晓亮,王佳印.新型三自由度宏微运动平台设计与仿真分析[J].现代制造工程,2019(08):125-129.
6. S. Lee, S. Park and H. Son, "Multi-DOFs motion platform based on spherical wheels for unmanned systems" 2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), Xi'an, 2016, pp. 35-37.
7. NAHON M A, REID L D. Simulator motion-drive algorithms-A designer's perspective[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1990,13(2):356-362.
8. 王辉,张保峰.飞行模拟器新型倾斜协调体感算法应用分析[J].重庆大学学报,2019,42(05):19-26.
9. ZHU Daoyang,DUAN Shaoli,FANG Da.Development of Cueing Algorithm Based on “Closed-Loop” Control for Flight Simulator Motion System[J].Wuhan University Journal of Natural Sciences,2019,24(05):376-382.
10. 洪振宇,杨勇,张亚伟,许致华,张志旭.三自由度模拟运动平台洗出算法研究[J].机械科学与技术,2018,37(03):481-486.
11. M. R. Chalak Qazani, H. Asadi and S. Nahavandi, "A Decoupled Linear Model Predictive Control-based Motion Cueing Algorithm for Simulation-based Motion Platform with Limitted Workspace" 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Melbourne, Australia, 2019, pp. 35-41.
12. Marco Grottoli, Diane Cleij, Paolo Pretto, et al. Objective evaluation of prediction strategies for optimization-based motion cueing. 2019, 95(8):707-724.
13. Motion Cueing Algorithms[EB/OL]. (2017-03-24)[2017-05-10]. <http://www.kyb.tuebingen.mpg.de/research/dep/bu/motion-perception-and-simulation/motion-cueing-algorithms.html.>
14. FISCHER M, SEHAMMER H, PALMKVIST G. Motion cueing for 3-, 6-and 8-degrees-of-freedom motion systems[J]. DSC Europe, 2010
15. https://www.extremetech.com/wp-content/uploads/2013/09/VestibularSystem.gif
16. LEIGH R J, ROBINSON D A, ZEE D S. A Hypothetical Explanation for Periodic Alternating Nystagmus: Instability in the Optokinetic-Vestibular System[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 1981,374(1):619-635.
17. 刘江. 飞行环境下人体运动感知初步研究[D].南京航空航天大学,2018.
18. Lone M, Cooke A. Review of Pilot Models Used in Aircraft Flight Dynamics [J]. Aerospace Science & Technology, 2014, 34(1):55-74.
19. Reid, L. D, Nahon M. A. Flight Simulator Motion-Base Drive Algorithms: Part 1-Developing and Testing the Equations (UTIAS Report No.296, CN ISSN 0082-5255).Toronto, Canada: Institute for Aerospace Studies, University of Toronto, 1985.
20. <https://cn.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=Hl2Z%2bDZD&id=656A8154B70045D40C7F76EB161C0300333642D2&thid=OIP.Hl2Z-DZD-AgAfDl7truyHgHaFj&mediaurl=https%3a%2f%2fderui-tech.com%2fmedia%2fuploads%2f2016%2f05%2f72.jpg&exph=540&expw=720&q=stewart+%e5%b9%b3%e5%8f%b0&simid=607997494265120243&selectedIndex=13&ajaxhist=0>
21. <http://image.eostatic.com/l/5479/201906265d132e9ebaf2d.jpg>
22. NAHON M A, REID L D. Simulator motion-drive algorithms-A designer's perspective[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1990,13(2):356-362.
23. <https://element.eleme.cn/#/en-US>
24. <https://threejs.org/docs/index.html#manual/en/introduction/Creating-a-scene>

附录：大学期间发表或提交的论文

1. A. Gember, R. Grandl, A. Anand, T. Benson, and A. Akella. Stratos: Virtual Middleboxes as First-class Entities[R]. Technical report, UW-Madison 2012.
2. Palkar S, Lan C, Han S, et al. E2: a framework for NFV applications[C]. Symposium on Operating Systems Principles. ACM, 2015:121-136.

此页以后的内容为装订材料！先仔细阅读！

撰写论文时此页以后的内容全部删掉！

装订毕业论文时应将任务书原件装订到最后



**本科生毕业设计任务书**

|  |  |
| --- | --- |
| 题 目 | 三自由度VR运动平台设计与仿真 |
|  |  |

（任务起止日期：2020年1月1日～2020年6月10日）

|  |  |
| --- | --- |
| 院 系 | 计算机科学与技术 |
| 专业班级 | 卓越1601 |
| 姓 名 | 陈新宇 |
| 学 号 | U201614921 |
| 指导教师 | 管涛老师 |

教研室（系、所）负责人 2020年1月6日 审查

院（系）负责人 2020年1月9日 批准

|  |
| --- |
| 课题内容 |
| 实现一个简单的分布式网络系统，实现文件的分布式网络化存储。，实现文件的分布式网络化存储。，实现文件的分布式网络化存储。，实现文件的分布式网络化存储。，实现文件的分布式网络化存储。，实现文件的分布式网络化存储。，实现文件的分布式网络化存储。，实现文件的分布式网络化存储。 |
| 课题任务要求 |
| 研究学习文件系统的相关原理及实现研究分布式系统概念及应用研究网络文件系统的原理、架构及实现。研究学习文件系统的相关原理及实现研究分布式系统概念及应用研究网络文件系统的原理、架构及实现。研究学习文件系统的相关原理及实现研究分布式系统概念及应用研究网络文件系统的原理、架构及实现。 |
| 主要参考文献 |
| 1. 董晓明，谢长生．基于对象的进化存储系统研究．计算机科学，2005，32(11): 223~226 2. 庞丽萍编．操作系统原理（第二版）．武汉：华中理工大学出版社，1994.9．225~270 3. （美）Nils J. Nilsson著；郑扣根等译．人工智能（Artificial Intelligence）．北京：机械工业出版社，2000.9．177~194 4. （美）Tom Mitchell著；曾华军等译．机器学习（Machine Learning）．北京：机械工业出版社，2003.1．38~56 5. 谢长生，董晓明，万继光，谭志虎，刘瑞芳．磁盘阵列控制器的设计与原型实现．小型微型计算机系统，2006, 27(1): 173~176 6. （美）Nils J. Nilsson著；郑扣根等译．人工智能（Artificial Intelligence）．北京：机械工业出版社，2000.9．177~194 |
| 同组设计者 |
| 无 |

**成 绩 评 定**

**指导教师评定意见**

装订论文时应将成绩评定页放最后，导师评语放前面！

一、对毕业设计（论文）的学术评语（应具体、确切、实事求是）

|  |
| --- |
|  |

二、对毕业设计评分

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 评分项目  (分值) | 调研论证  (10分) | 外文翻译  (5分) | 设计(论文)撰写质量  (10分) | 学习态度  (10分) | 基本理论和基本技能  (50分) | 创 新  (15分) | 合 计  (100分) |
| 得分 | **8** | **4** | **8** | **8** | **40** | **12** | **80** |

指导教师签字：**管涛老师** \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 年 月 日

**答辩小组评定意见**

答辩小组意见和综合评定页放最后，双面！

一、评语（根据学生答辩情况及其设计（论文）质量综合评价）

|  |
| --- |
|  |

二、评分

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 评分项目  (分值) | 答 辩 情 况 | | 论 文 质 量 | | 合 计  (100分) |
| 答辩情况  (15分) | 回答问题情况  (25分) | 规范要求与文字表达  (20分) | 学术水平  (40分) |
| 得分 |  |  |  |  |  |

答辩小组长签字：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 年 月 日

**毕业答辩及成绩评定说明**

1. 毕业答辩
2. 答辩前，答辩小组应详细审阅每个学生的毕业设计（论文），为答辩做好准备。
3. 严肃认真组织答辩，开好答辩会。
4. 指导教师应参加所指导学生的答辩会，但评定其成绩时宜回避。
5. 答辩中要做好记录以供成绩评定时参考。
6. 成绩评定
7. 答辩前每个学生都要将自己的毕业设计（论文）在指定时间内交给指导教师，由指导教师审阅，写出评语并预评分。
8. 答辩工作结束后，答辩小组应举行专门会议进行讨论，在参考指导教师预评结果的基础上，结合学生毕业设计（论文）质量和学生答辩情况，综合评定每个学生的成绩。
9. 院（系）对专业答辩小组提出的优秀和不及格的毕业设计（论文），要组织院（系）级答辩，最终确定成绩，并向学生公布。
10. 各专业学生的最后成绩应符合正态分布规律。
11. 请用蓝、黑钢笔手写或五号宋体字编辑，签名须手写，A4纸双面打印。

**毕业设计（论文）成绩评定**

|  |
| --- |
| 班号：**卓越1601** 学生姓名：**陈新宇**  综合成绩：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_分（折合等级\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_）  答辩小组长（签名）：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 年 月 日 |