
请勿外传引用

北京电影学院

电影学
数字电影技术
学术学位硕士研究生学位论文
(2017 届)

电影摄影仿真系统的研究与实现

研究生：贺一慧
导 师：刘戈三
陈 军
朱 梁
王春水
曾志刚

北京电影学院
2017 年 5 月

独创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，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：_____ 日期：_____

学位论文使用授权书

学位论文作者完全了解北京电影学院关于保存、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学位论文的复印件和电子版，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编学位论文。保密的学位论文在解密后遵守此规定。

保密论文注释：本学位论文属于保密在_____年解密后适用本授权书。

非保密论文注释：本学位论文不属于保密范围，适用本授权书。

学位论文全文电子版同意提交后：一年 二年在校园网上发布，供校内师生浏览。

本人签名：_____ 日期：_____

导师签名：_____ 日期：_____

电影摄影仿真系统的研究与实现

摘 要

本论文基于对现阶段电影制作前期预演与制作工作流程的分析，发现按照CG行业的传统流程，三维软件中的虚拟摄影机需要使用键盘、鼠标等标准输入设备操作，还要使用关键帧动画来控制虚拟摄影机的运动轨迹。这样的操作方式很不直观，并且需要大量的实践练习才能熟练掌握。这样的情况对导演、摄影师等人来说，一方面，无法充分发挥他们熟悉传统电影摄影器材的操作经验；另一方面，如果不抽出时间去特地练习熟悉软件操作，就只能将在三维软件中进行镜头设计的工作委托给专业的CG软件操作人员，而这样做的潜在风险在于，他们会面临与软件操作人员的沟通问题，如果双方在表达与理解上有障碍，镜头画面的设计就会难以按照导演、摄影师的想法进行，甚至还会拖累进度。

根据以上情况，本论文搭建了一套仿真硬件，这套仿真硬件的运动方式参照电影摄影器材进行设计，尽量还原电影摄影器材的运动方式，并使用一些电子、机械元器件对这套仿真硬件的运动数据进行采集。对采集到的数据进行处理、封装后，根据数据通信接口协议将数据发送给计算机，再进行相应软件插件方面的开发，从而使得计算机三维软件中的虚拟摄影机在现实中的仿真硬件驱动下进行相应的运动。

综上所述的硬件设计、软件插件开发以及数据通信接口设计构成了本论文主要研究与实现的内容，即电影摄影仿真系统。这套系统用操作起来更加直观的硬件，替代了传统的键盘、鼠标操作方式，导演、摄影师等人能够以这套仿真硬件作为人机交互界面，来操作三维软件中的虚拟摄影机，从而改进了传统的工作流程。

关键词：摄影仿真； 电影虚拟化制作； 虚拟预演； 人机交互界面； 游戏引擎； 虚幻引擎

THE RESEARCH AND IMPLEMENTATION OF CINEMATOGRAPHY SIMULATION SYSTEM

ABSTRACT

As the cinema VFX industry develops, CG technology is more and more required by movie production. The ratio of CG production in a movie production keeps going up. In the past time, CG production mainly takes place in the postproduction after the production finished. But now the trend is that CG technology gradually takes participant in production, involved in the filmmaking before the principle cinematography begins. The new workflow can save up time and money for the live shooting, meanwhile it can improve the efficiency of the CG production in postproduction. But the workflow brings up some new demands on filmmakers, they need some basic knowledge about CG technology. Sometime only by real practice, can filmmakers unleash the full potential of the new workflow.

Based on analysis of the current workflow, this thesis reveals that in the traditional CG workflow, the virtual camera in a 3D software application is operated by standard input devices like keyboard and mouse. Furthermore the movement trace of the virtual camera is controlled by key-frame animation. This traditional operation manner lacks intuitiveness, requiring much practice to get used to. For directors and DPs, on one side, they cannot fully use their experience on the familiar conventional cinematography equipment; on the other side, if they don't take time to practice operating the software, they will have to entrust the shot designing work to the professional CG software operator. But the potential risk here is: the difficulty to transfer ideas into CG software operator's mind. If the communication failed, the operator may not exactly follow the directors and DPs and design the shot as they have imagined.

According to the problem mentioned above, this thesis builds up a simulation hardware system, which has identical movement manner as the conventional cinematography equipments. The system can collect the movement data of the hardware by using some electronic and mechanical components. After processing the collected movement data, a corresponding application is developed to drive the movement of the virtual camera in 3D software with data from the simulation hardware

system.

Directors and DPs can use this simulation hardware system as the Human-Computer Interface with 3D software to operate the virtual camera, which could leading to an improved workflow.

KEY WORDS: Cinematography Simulation; Virtual Film; Making Previsualization; Human-Computer Interface; Game Engine; Unreal Engine

目 录

绪 论.....	1
第一节 研究背景及意义.....	1
第二节 国内外研究现状.....	2
一、 概述.....	2
二、 国外研究现状.....	2
三、 国内研究现状.....	3
第三节 本论文主要研究工作.....	3
第四节 论文结构.....	4
第一章 电影摄影.....	5
第一节 电影摄影简介.....	5
一、 概念.....	5
二、 电影摄影的特点.....	5
第二节 电影摄影器材.....	7
一、 数字电影摄影机（Digital Film Camera）.....	7
二、 电影摄影机械器材（Mechanical）.....	8
第二章 系统需求分析.....	15
第一节 概述.....	15
第二节 系统预期设计目标.....	15
一、 电影摄影器材的硬件模型模拟.....	15
二、 电影摄影在三维软件中的虚拟模拟.....	16
第三节 系统功能需求.....	18
一、 电影摄影硬件器材模型搭建.....	18
二、 传感器选取及电路设计.....	18
三、 嵌入式系统程序开发.....	18
四、 数据通信接口设计.....	18
五、 三维软件中插件开发实现.....	18
第四节 系统开发环境.....	19
一、 硬件环境.....	19
二、 软件环境.....	19
第三章 系统总体设计.....	20

第一节	概述.....	20
第二节	系统总体结构.....	20
一、	硬件部分.....	21
二、	数据通信接口部分.....	25
三、	软件部分.....	26
第四章	系统涉及的相关技术.....	27
第一节	概述.....	27
第二节	传感器.....	27
一、	旋转编码器.....	27
二、	直线位移传感器.....	29
三、	电位器.....	29
四、	操纵杆.....	30
第三节	串口通信.....	31
第四节	嵌入式系统.....	32
一、	单片机（Microcontroller）.....	32
二、	Arduino.....	33
第五节	三维图形引擎.....	33
一、	三维图形引擎介绍.....	33
二、	Unreal Engine.....	34
第五章	系统详细设计与功能实现.....	36
第一节	概述.....	36
第二节	硬件器材模型模块.....	36
一、	镜头.....	37
二、	液压云台.....	38
三、	齿轮云台.....	38
四、	遥控云台.....	38
五、	轨道车/滑轨.....	39
六、	摇臂/升降机.....	39
第三节	传感器及电路模块.....	40
一、	传感器.....	40
二、	电路.....	44
三、	硬件组装.....	45
第四节	数据通信接口模块.....	46
一、	数据通信内容分析.....	46

二、	数据包设计.....	47
三、	数据通信接口设计.....	48
第五节	嵌入式系统模块.....	48
一、	数据校验.....	49
二、	滤波.....	49
三、	预计算.....	50
四、	数据封装.....	51
第六节	三维软件插件模块.....	52
一、	插件结构设计.....	52
二、	用户界面实现.....	53
三、	串口数据的接收、解析与校验.....	54
四、	电影摄影器材虚拟模型资产导入.....	55
五、	传感器参数与虚拟摄影器材的绑定.....	56
六、	以第三人称视角与摄影机视角观察场景.....	56
结语	57
第一节	总结.....	57
第二节	展望.....	57
一、	目前的不足与改进设想.....	57
二、	未来的发展与应用.....	58
参考文献	59
致 谢	62
作者攻读学位期间发表的学术论文目录	63

绪 论

第一节 研究背景及意义

近年来，电影特效产业发展迅速，尤其在技术应用方面更加成熟。一方面，我们在电影中看到了比过去更多的计算机动画（CG）镜头；另一方面，十多年前略显陌生的电影虚拟化制作技术到了今天也逐渐为更多人所熟知。^[1]这两者在制作技术中，都对 CG 技术有着大量的需求，以及较高的要求。

CG 制作的主要过程，可以粗略归纳为几个步骤：

第一步，在计算机中制作出角色、场景的三维数字模型，这一步骤也是我们常说的“搭建虚拟环境”。

第二步，在虚拟环境中建立虚拟摄影机，以虚拟摄影机的位置为视点观察这个虚拟环境，可以得到一个能够显示在屏幕上的二维图像，从而方便我们观察虚拟环境。

第三步，类似于在真实物理世界中摄影师所做的镜头设计，在虚拟环境中移动摄影机，找到理想的角色、场景和摄影机的相对位置关系从而确定理想的画面内容。

第四步，记录摄影机在虚拟场景中的运动轨迹，从而得到整个摄影机运动过程中，也就是一个镜头内，在时间上连续的画面内容，也就是我们想要的镜头画面，而该摄影机的运动轨迹，则称作摄影机动画。

在后两个步骤中，我们现今常常面临的一个问题是，对三维虚拟环境中摄影机（以下简称虚拟摄影机）的操作存在很大的限制。限制的主要来源，在于常见的商用三维软件中，对虚拟摄影机的操作是通过鼠标、键盘和绘图板这样的标准输入设备来完成的。而操作的内容主要在于调整虚拟摄影机的坐标值、角度值等较为抽象的概念。专业的动画制作人员通常需要经过大量训练才能够熟悉其中的理念从而熟练的调整动画，并能够根据导演、摄影师的要求来制作摄影机动画。

这样的工作流程很难说是一个理想的工作流程，并且常常难以得到满意的结果。其中的原因在于，一方面，作为实际操作人员的动画制作人员很难具备导演、摄影师等人对于镜头画面以及镜头运动的敏锐感知力，因此很难完全依照导演、摄影师的意图来再现出虚拟摄影机动画；另一方面，导演、摄影师作为一部影片的核心创作人员，在片场实际参与真实拍摄中，常常会有一些即兴创作灵感迸发并表达在镜头画面与镜头运动上，而将虚拟摄影机动画的制作完全交给动画制作

人员，实际上限制了这些创意人群的创造力。

本论文的研究目标是，搭建一套与电影摄影器材具备相同运动方式的仿真硬件，其中使用一些电子、机械元器件使得该仿真硬件的运动数据能够被采集下来，搭配相应的三维软件插件开发，让导演、摄影师等人能够通过操作这套仿真硬件来操作三维软件中的虚拟摄影机，从而改进传统的工作流程。

第二节 国内外研究现状

一、 概述

虚拟摄影，是电影虚拟化制作的核心技术，它能够在真人实拍的片场，向导演或摄影师提供一个实时的监看画面，画面中能够显示实拍真人与虚拟角色、虚拟场景合成后的效果。

虚拟摄影系统的工作原理，可以简单描述为：

- 1) 捕捉用于拍摄真人的真实摄影机的位置和姿态，
- 2) 将捕捉到的位置和姿态传递给电脑，
- 3) 电脑根据真实摄影机的位置和姿态，计算得到匹配好的虚拟场景中相应虚拟摄影机的位置和姿态，
- 4) 电脑根据虚拟摄影机的位置和姿态，渲染出虚拟角色、场景画面，
- 5) 将真实摄影机拍摄到的实拍画面传递给电脑，
- 6) 电脑对实拍画面进行抠像，并将抠像画面与之前渲染出的虚拟角色、场景画面进行合成，
- 7) 将合成后的画面传递给安装在真实摄影机上的监视器。

由虚拟摄影系统的工作原理可以看出，其中的部分概念与本系统的设计概念相似，即，从真实世界中采集数据，获取一个虚拟摄影机姿态并对虚拟环境进行渲染从而给导演、摄影师提供观看画面。因此，本小节对虚拟摄影系统中捕捉部分的研究现状进行了介绍，也介绍了一些其他相关技术的研究现状。

二、 国外研究现状

在虚拟摄影方面，来自动作捕捉领域的技术，在采集真实空间中的位置、姿态方面应用广泛。

从基于跟踪点的被动光学式动作捕捉领域来讲，有美国的 NaturalPoint、英国 Oxford Metrics Limited 两家动作捕捉技术公司的成熟产品 Insight VCS 和 VICON。

在基于空间标记的主动光学式动作捕捉领域，有 Lightcraft 公司的 Intersense 产品。

而在基于图像识别的动作捕捉领域，有 NCam 技术公司研发的 NCam 产品。

这些虚拟摄影的产品，通过不同类型的运动捕捉技术，完成了数据采集步骤，配合之后的数据传输-画面渲染-抠像合成-画面显示等步骤，均实现了相应完整的虚拟摄影系统。

而除虚拟摄影之外，Robert.S.Huebel 曾研究实现了一种基于陀螺仪、加速度计与磁力计的摄影机姿态捕捉方案，通过将一个小号的数据采集单元安装在云台上或者直接采用手持的方式，可以向电脑传送该数据采集单元的当前姿态信息，从而达到控制虚拟摄影机姿态的目标。

Ali Mazalek 与 Michael Nitsche 则利用加速度计与摇杆搭建了一个能够从真实空间中采集姿态数据的木偶仿真系统，通过操纵一个物理的木偶仿真模型，来达到操作虚拟环境中虚拟木偶模型的效果，并且观察者可以从显示器上实时观看到虚拟木偶模型的渲染结果。

三、 国内研究现状

在国内的研究领域，有关摄影机姿态、位置捕获方面的研究也更多应用于虚拟摄影领域。葛江提出过一套完整的虚拟摄影设计与实现方案，其中摄影机数据采集方面使用了基于红外的被动式光学动作捕捉技术。

此外，在动作捕捉领域，基于 Kinect、惯性等方法的捕捉技术，也可以用于捕捉摄影机的姿态与位置。

第三节 本论文主要研究工作

本论文拟开发一套电影摄影仿真系统。系统的工作流程可以概括为：

首先对传统电影摄影技术进行研究与分析，从而充分了解电影摄影技术中有哪些具体的应用需求。

随后搭建一套符合传统电影摄影习惯的仿真硬件器材，这套器材即为电影摄影器材的硬件模型，它的运动结构符合传统电影摄影中的操作习惯。

使用传感器对硬件器材的运动数据进行采集，从而实时获取到器材各运动机构的当前运动情况。

使用嵌入式系统将传感器采集到的数据经过校验、封装完成后发送给计算机，由计算机来决定如何使用这些数据。

在计算机软件中接收数据，并将数据根据不同设置解释为虚拟环境中相应摄影器材的运动数据，从而也进一步得到了摄影机的运动数据。

将解释好的数据发送给三维软件中的虚拟摄影器材模型、摄影机，并根据观察者的需求返回相应的渲染画面。

综上所述，本论文的研究工作包括电影摄影硬件器材模型搭建、传感器选取及电路设计、嵌入式系统程序开发、数据通信接口设计以及在不同三维软件中插件的开发实现。

第四节 论文结构

本论文以如下所述方式组织：

- 绪论 包括本论文的研究背景及意义、国内外研究现状以及本论文的主要工作，并介绍了论文的结构。
- 第1章 电影摄影：对电影摄影进行了简单的介绍，并对电影摄影中涉及到有关摄影机运动的器材进行了针对性分析。
- 第2章 系统需求分析：根据上一章节对电影摄影的介绍，从功能的角度对整个系统进行需求分析。包括系统的预期设计目标、系统功能需求以及系统环境需求。
- 第3章 系统总体设计：完成上一章的系统需求分析后，对系统从逻辑抽象层面进行总体设计，包括系统结构设计以及功能模块划分设计。
- 第4章 系统涉及的相关技术：对系统中涉及到的相关技术进行分类介绍，并对相关技术进行横向比较，并说明系统最终选取该具体技术的原因。
- 第5章 系统详细设计与功能实现：详细阐述了各个模块的具体设计与实现。
- 结语 总结系统中的问题，并对未来改进的可能方向进行分析。

第一章 电影摄影

第一节 电影摄影简介

一、 概念

电影摄影（Cinematography）是一种动态影像摄影，动态影像摄影是用连续的静态影像拍摄场景，从而记录场景中物体的运动过程。狭义地说，电影摄影特指为拍摄电影、电视剧或电视电影等叙事性影视作品时所进行的动态影像创作，其特点在于在摄影过程中运用视听语言的艺术技法，并在影像质量上有较高的追求。自 19 世纪 90 年代以来，电影摄影已经经历了 100 多年的发展，无论是在艺术技法（Cinematographic Technique）上，还是在技术手段上，都产生了丰富的内涵。

二、 电影摄影的特点

1. 电影摄影的帧率（Framerate of Cinematography）

电影摄影使用连续的静态影像对物体的运动进行记录，每一张静态图像叫做一帧（Frame），在拍摄时每秒钟拍摄的静态影像的张数叫做帧率（Framerate），放映时，放映机以同样的帧率将静态影像顺序地投射到屏幕上，从而形成一种影像在运动的错觉。实践证明，当帧率达到每秒 24 帧时，影像的运动就可以达到可接受流畅感，综合考虑了声音保真度和胶片成本等因素，每秒 24 帧成为了世界范围内公认的标准帧率。值得一提的是，尽管电影摄影的拍摄帧率是每秒 24 帧，如果在放映时每秒只将每帧画面投射一次，屏幕上的影像会出现闪烁感，影像观看舒适度，而将每帧画面投射两次时，闪烁感会降低到可接受的程度，因此这种方法成为了标准的放映方法。

2. 电影摄影的艺术技法（Cinematographic Technique）

电影摄影的创作过程要对取景、构图、镜头选择、照明、色彩和摄影机运动等方面进行取舍，这些方面综合起来构成了电影摄影的艺术技法，对电影摄影艺术技法的选择是一个导演视觉风格的重要组成部分，本文将对摄影机运动进行分析，设计并实现完成摄影机所需的摄影器材的虚拟仿真系统。

3. 无摄影机运动的电影摄影 (Cinematography without Camera Movement)

电影诞生初期, 大部分的电影是使用无运动摄影机 (Zero Camera Movement) 的方法拍摄的, 即将摄影机用三脚架支撑住, 放在一个位置上, 拍摄时摄影机不发生转动, 众多的早期电影短片就是这样完成的。随后, 电影制作者们开始将这种在不同机位拍摄的无摄影机运动的镜头剪接在一起, 形成了剪辑 (Sequential Editing), 例如早期电影《火车大劫案》就使用了此种方法拍摄了大部分的镜头。

4. 摄影机运动 (Camera Movement)

除了剪辑, 拍摄时移动摄影机也作为一种技法得到了不断的发展。早期摄影师, 将摄影机架在火车或轮船上拍摄, 得到了机位移动的画面, 例如“幽灵行驶” (Phantom Ride) 类短片就是将摄影机放在行驶的火车头前, 拍摄沿途的风景, 由于其画面内容宛若通过一个在空中飞行的幽灵的双眼所见, 顾得此名。此外, 可以旋转的摄影机云台也被发明出来, 可以用来拍摄视角旋转的画面, 对跟随运动的被摄主体大有帮助, 还可以展示环境的全貌。其中水平方向的横向摇动被称为“pan”, 垂直方向的俯仰摇动被称为“tilt”, 这些简单的技术发明构成了日后电影技术进步的基础。

5. 摄影机运动的自由度分析 (DOF Analysis of Camera Movement)

本节将从刚体运动的角度来分析摄影机的运动, 实际的摄影机运动就是用不同原理的器材让一个刚体在六个自由度上运动。

当摄影机被视为一个刚体时, 其运动包括刚体位置的移动 (Translation) 和刚体姿态的旋转 (Rotation)。刚体的位置移动即机位的移动, 包括前后、左右和上下三个自由度上的运动; 刚体姿态的转动即摄影朝向的改变, 包括横摇 (Pan)、俯仰 (Tilt) 和横滚三个自由度上的运动。因此, 摄影机运动就是刚体在六个自由度 (Six Degrees of Freedom) 上运动的组合, 可谓千变万化。摄影机在六个自由度上的状态参数是对摄影机外部状态的描述, 因此叫做摄影机的外参 (Extrinsic Parameter)。

摄影机的视角变化也被视为一种运动, 通常通过镜头的焦距 (Focal Length) 变化来实现, 视角是一个摄影机的内部参数, 即内参 (Intrinsic Parameter)。

摄影机的运动是电影摄影中的重要技法, 造就了视听语言中的一种新元素——运动镜头 (Moving Shot), 以下列出了几种常见的运动摄影技法:

1) 横摇与俯仰 (Pan and Tilt)

横摇是保持摄影机机位不变, 让摄影机机身在水平方向上旋转。俯仰是保持摄影机机位不变, 让摄影机机身在垂直方向上旋转。横摇和俯仰是两种最基本的

运动摄影技法，用于保持对被摄物的跟随，揭示更多的场景信息的目的。通常使用的云台有横摇轴和抚养轴可以实现这两种运动，因此也叫横摇俯仰云台（Pan & Tilt Head）。

2) 推进和拉回（Push In and Pull Out）

推进是将摄影机机身向前移动，拉回是将摄影机机身向后移动。两者都在运动的过程中保持焦距不变，因此摄影机的视角大小也保持不变。推进与拉回通常是通过摄影机轨道车或斯坦尼康等机械设备实现的。

3) 变焦放大和变焦缩小（Zoom In and Zoom Out）

变焦放大是将镜头的焦距由小变大，即视角变小。变焦缩小是将镜头的焦距由大变小，即视角变大。这两种运动是镜头的光学性质的变化，摄影机的机位保持不动。

4) 平移

平移是指摄影机的朝向不发生转动，机身在左右方向上发生移动。

5) 升高与降低（Boom up and Boom Down）

升高与降低是在拍摄的同时改变摄影机的高度，引起视点的改变。此种摄影机运动通常是通过可升降的机械臂实现的，轨道车、摇臂和升降机上配有不同长度的机械臂。

以上列举的几种基本运动摄影技法也可以任意组合，对运动的节奏和速率变化也可以灵活选择。

最直接的摄影机运动可以用手来实现，即手持摄影（Handheld Camera）。和使用机械装置以稳定摄影运动的摄影技法不同，手持摄影追求一种抖动的、自由随意的摄影机运动（Shaky and Free Camera），手持摄影几乎可以实现以上列出的所有运动摄影技法。但传统上，更多的运动镜头是通过各式各样的机械和机电器材来实现的，以达到摄影机的运动轨迹流畅稳定，接下来的一节将对这些器材进行介绍。

第二节 电影摄影器材

一、 数字电影摄影机（Digital Film Camera）

数字电影摄影机是以电影摄影为使用目的而设计的动态影像拍摄设备，和传统的用于广播和录像的摄像机所不同的是，数字摄影机很大程度上模仿了胶片电影摄影机的成像特性和使用方式，具体体现在三点：

- a) 使用单片式大画幅影像传感器。

- b) 使用 PL、EF 等胶片摄影机使用的镜头安装系统。
- c) 以高画质作为首要条件设计考量，具备高分辨率，高动态范围，低压缩比和低噪波水平等特点。

截止到 2016 年，主要的几个数字电影摄影机品牌包括：ARRI、Red Digital Cinema、SONY、Panasonic、Canon、Black Magic Design、AJA 等。

二、 电影摄影机械器材（Mechanical）

电影摄影中用到的机械器材是为摄影机提供支撑、稳定和运动的机械装置，主要包括：云台（Head）、三脚架（Tripod）、移动车（Dolly）以及摇臂/升降机（Jib/Crane）这四大类。以下从这四大类型出发，对电影摄影机械器材进行简介。

1. 云台（Head）

摄影机通常不是直接装在三脚架、轨道车或摇臂上，而是装在一个中间装置，即云台上提供摄影机的转动的。按照转动的机械原理可将云台分为齿轮云台（Geared Head）、液压云台（Fluid Head）和遥控云台（Remote Controlled Head）。

1) 齿轮云台（Geared Head）

齿轮云台是电影诞生之初就开始广泛使用的一种支撑和旋转摄影机的机械设备，操作者转动手柄或手轮（Handle or Wheel）来带动齿轮，云台通过内部齿轮之间的传动来转动云台的横摇轴和俯仰轴，从而实现摄影机的横摇和俯仰。齿轮云台可以实现顺滑和精细的摄影机转动，可以让摄影机进行精确的重复转动，有些型号的齿轮云台可以承载很重的摄影机。



图 1 现代齿轮云台

2) 液压云台（Fluid Head）

液压云台内部不用齿轮而是用内部的粘稠液体（Viscous Liquid）来提供横摇轴和俯仰轴转动时所需的润滑摩擦阻尼（Lubricated Friction Drag），从而实现摄

影机稳定的转动，专业的液压云台的摩擦阻尼大小是可以调节的。液压云台的驱动装置是操作杆，通常安装一根即可，有时为了操作的舒适和快速的转动也会安装两根操作杆。液压云台通常使用球底（Ball Mount）或平底（Flat Base）与三脚架、轨道车升降臂等支撑设备进行连接。如图 2 所示。



图 2 液压云台

3) 遥控云台（Remote Controlled Head）

遥控云台是利用马达带动横摇轴和俯仰轴转动的云台，常用于三脚架、升降机和运动控制系统中，当升降机臂过长，不能承载摄影机操作员的重量时，可以使用遥控云台和遥控器来代替摄影机操作员来完成摄影机的横摇和俯仰。遥控云台通常配有遥控面板，面板通过电机操作杆（Joystick）、液压云台的横摇杆（Pan Bar）或是齿轮云台的手轮（Hand Wheel）来控制遥控云台的转动。



图 3 遥控云台

2. 三脚架（Tripod）

三脚架是最常用的摄影机械器材，通常用于拍摄固定机位（Stationary）的镜头，如图 4 所示。稳定地支撑摄影机，抬升摄影机的高度，常见的三脚架由三条架腿（Tripod Leg）和云台安装座（Head Mount）组成。每条架腿由一根或两根铝合金管或碳纤维管组成，腿管被设计成伸缩管结构（Telescoping），用来改变架腿的长度，从而抬升机身的高度。云台安装座用来安装云台，也可以安装和座口

相兼容的摇臂等其它设备。



图 4 三脚架

另外，架腿可以安装升高器（Riser）、钉脚（Spike Feet）、橡胶脚（Rubber Feet）、伸展器（Spreader）和脚轮（Tripod Dolly）等辅助装置。

升高器用于在三脚架的基础上额外抬升云台的高度，钉脚用于扎入沙地或泥土地面中增强三脚架的稳定性，橡胶脚用于增大三脚架和光滑地面之间的摩擦，从而增强稳定性，伸展器用于固定三条架腿的张开幅度，使脚架不易变形，更接近于刚体，增强稳定性。伸展器分为地面伸展器（Ground）和中段伸展器（Mid-level），脚轮可以让三脚架在光滑的地面上滑动，既可以拍摄机位运动的镜头，也可以使移动摄影机和脚架省时省力。



图 5 摄影机轨道车



图 6 摄影机滑轨

3. 摄影机轨道车 (Dolly)

摄影轨道车是一种轮式手推车，用于为摄影机提供平稳流畅的水平移动，见图 5。轨道车通常在铺好的轨道上移动，做出直线、曲线或是圆圈轨迹的运动。轨道车上有可以安装摄影机的平台，可以让摄影机操作员和摄影助理站在上面拍摄，最简单的轨道车平台只有一个放置三角架的平板，复杂的轨道车有液压升降臂来改变摄影机的高度。常见的几个轨道车品牌有 J.L.Fisher、Chapman 和 GFM 等。

轨道车的架设是由训练有素的技术人员，即轨道车场工 (Dolly Grip) 完成的。使用轨道车拍摄时，轨道车场工推动轨道车前进，并操作液压臂的升降，摄影机操作员负责摄影机的转动，因此，摄影机可以同时完成水平、垂直、横摇和俯仰多个自由度上的复合运动 (Compound Move)。

在轨道上运动可以在多次拍摄同一镜头时重复地做出相同的运动轨迹，这对后期剪辑具有重要作用。轨道车还可以更换不同的车轮，使之不必在轨道上运动，这样可以做出更加自由的运动轨迹，同时也增加了驾驶的难度。

4. 摄影机滑轨 (Slider)

滑轨是一种类似于轨道车的摄影机移动设备，见图 5，它与轨道车的区别一方面在于滑轨较小，只能承载摄影机和云台，不能承载操作员，另一方面滑轨较短，通常只有一段直轨，摄影机只能做一段小范围移动。

5. 摇臂 (Crane and Jib)

摇臂是一种杠杆式器材，由一根臂 (Arm) 和摇臂云台组成，摇臂云台可以安装在三脚架上，其安装接口和液压云台符合同样的标准。云台可以提供横摇和升降两个自由度的旋转摇臂云台在远离旋转点一端安装摄影机，另一端安装配重 (Counter Weight) 和摄影机控制器。摇臂是一种杠杆式器材，在旋转点一端安装摄影机，另一端安装配重 (Counter Weight) 和摄影机控制器，将支点安装在三脚架上，如图 7 所示。



图 7 小型摇臂

6. 电影摄影其他辅助设备

摄影机稳定器是在摄影机在运动过程中保持画面稳定,不发生画面抖动的器材,广义上看,前文提到的摄影器材都能为拍摄提供稳定性,但摄影机稳定器通常特指消除摄影机微小跳动(Jitter)的特殊摄影器材。

在没有摄影机稳定器的情况下,运动的摄影机会在刚体的几个自由度上发生抖动,不同的摄影机稳定器可以不同程度地补偿某几个自由度上的抖动,从而提高运动镜头的影像质量。常见的摄影机稳定器有:

1) 手持 / 肩扛支架 (Handheld / Shoulder Mount Rig)

手持和肩扛支架是在手持和肩扛摄影中使用的机械支架,主要用途是支撑摄影机,使其更适合手持和肩扛操作,如图 8 所示。此类支架通常在摄影机下面安装手柄,用于让摄影机操作员转动机身,同时还装有顶在操作者胸口的胸托或放在肩上的肩托(Shoulder Brace),来将整个支架系统变为三点接触(Three Point Contact),从而消除了二点接触时操作者双臂肌肉的紧张(Muscle Cramp),有些肩扛支架系统还在后部装有配重,将整个系统的重心压在操作者的肩上,增加系统的稳定性。此种支架系统无法将操作者身体的运动和摄影机隔绝开,因此摄影机会随着操作者手部和胸腔的运动发生浮动,被称为“带有呼吸的摄影机抖动”,这种抖动在操作者前进或后退时十分明显。



图 8 肩扛支架

2) 易事背 (Easy Rig)

易事背是一种穿在摄影机操作者身上的支撑和减震装置,使用时操作者身穿称重背心 (Support Vest), 背心上固定一个 L 型金属杆, 摄影机通过一根弹簧绳与金属杆相连, 如图 9 所示。



图 9 易事背

3) 斯坦尼康 / 小斯坦尼康 (Steadicam / Glidecam)

斯坦尼康是一种可以将摄影机和操作员的运动隔绝开的机械装置, 斯坦尼康使用弹簧作为减震装置, 使用它最显著的效果是当操作者前进或后退时, 摄影机不会随着操作者身体重心的起伏而发生上下抖动和俯仰, 从而实现了如同轨道车般平滑的运动, 如图 10 所示。



图 10 斯坦尼康

4) 三轴平衡环稳定器 (3-Axis Gimbal Stabilizer)

平衡环 (Gimbal) 是一种古老的机械装置，由一组机械环架组成，内测的机械环架安装在外侧机械环架的垂直轴上。平衡环能够使得安装在其最内侧环上的物体，与平衡环所安装依附的物体保持相互独立的旋转关系，由此来起到在运动中稳定物体旋转的功能。平衡环在船只上的陀螺仪、饮料杯架等用途上都有应用，如图 11 所示为一种三轴平衡环。



图 11 三轴平衡环

第二章 系统需求分析

第一节 概述

现今的电影制作流程中，在需要用到 CG 的环节，对虚拟摄影机的操作一直是由专业的动画制作人员通过鼠标、键盘和绘图板这样的标准输入设备来完成的。而本论文的研究目标则是，通过制作电影摄影器材的硬件仿真模型，将该模型作为虚拟摄影机的操作界面，让导演、摄影师等创意人群能够直接参与到虚拟摄影机镜头运动的设计环节，从而使得他们的即兴创造力能够更好的发挥。有关系统设计的动机，请参考第一章绪论的研究部分及意义。

第二节 系统预期设计目标

本论文设计的电影摄影仿真系统，目标在于让导演、摄影师等人能够以符合他们专业习惯的方式操作虚拟摄影机。因此本系统的设计目标主要分为两大部分，对电影摄影器材的硬件模型模拟部分，以及对电影摄影在三维软件中的虚拟模拟部分。前者是指有形的实物硬件模型，它作为本系统的操作界面，直接与导演、摄影师进行交互，获取数据输入。而后者是指无形的虚拟内容，它作为本系统的实质内容端，负责接收数据输入并将模拟结果渲染为画面显示给导演、摄影师等观察者。

一、 电影摄影器材的硬件模型模拟

硬件模型模拟包含两部分，一部分是硬件资产部分，即用于模拟摄影器材的硬件模型；另一部分则是控制部分，用于采集运动数据，以及接收并处理运动数据。

1. 硬件资产部分

硬件资产部分即对摄影机器材进行模拟的硬件模型，本系统主要进行模拟的部分包括摄影机、镜头、液压云台、齿轮云台、遥控云台、三脚架、轨道车/滑轨以及摇臂/升降机。

2. 控制部分

控制部分是模拟模型以外的硬件器材部分，主要包括以下部分：

1) 传感器

传感器用于进行各种实际物理量的测量,在本系统中使用的传感器主要是测量直线位移的传感器与测量旋转角度的传感器。

2) 电路

电路由电源、导线、开关、用电器等电子器件组成,将这些元器件按照一定的方式联接起来构成网络即为电路。本系统中电路的主要功能是将传感器与供电系统、嵌入式系统连接,从而形成了控制部分的框架。

3) 嵌入式系统

嵌入式系统即微型计算机系统,它具备基本的数据处理能力。它在本系统中的功能是接收传感器数据,控制并向计算机报告整个硬件资产部分的运行状态。

二、 电影摄影在三维软件中的虚拟模拟

虚拟模拟部分也包含两部分,一部分是虚拟资产部分,即用于模拟摄影器材的虚拟模型;另一部分是控制部分,负责对虚拟模拟的参数进行控制,以便得到符合预期的虚拟模拟结果。

1. 虚拟资产部分

1) 摄影机

本系统的摄影机虚拟资产部分包括三款不同的摄影机虚拟模型,用于在三维虚拟世界中给摄影机的位置更直观的显示。

2) 镜头

本系统的镜头虚拟资产部分包括两个定焦镜头虚拟模型和两个变焦镜头虚拟模型,用于对真实世界的镜头进行模拟。

3) 液压云台

本系统包含一个液压云台的虚拟模型,由于液压云台的工作原理相似,因此一个液压云台虚拟模型即可用于模拟大部分真实的液压云台。

4) 齿轮云台

本系统包含一个齿轮云台模型,与液压云台相同,齿轮云台之间的差异也较小,因此一个齿轮云台也可以用于模拟大部分真实的齿轮云台。

5) 遥控云台

本系统的遥控云台虚拟资产部分包括三种不同结构的遥控云台虚拟模型。遥控云台在使用中通常会被安装在一些不便于人直接进行操作的位置上,例如在航拍中遥控云台会被悬挂在飞行器的下方,在本系统中遥控云台的安装位置是摇臂/升降机的末端位置。

6) 三脚架

本系统的三脚架虚拟资产部分包括两个不同型号的三脚架虚拟模型，其中一个为固定式的三脚架，另一个下方装有脚轮。在实际的电影拍摄中，很少会直接使用装有脚轮的三脚架来移动摄影机进行运动镜头的拍摄，这种拍摄方法由于成本较低并且简便易行，在广播电视级别的拍摄中较为常见。而在电影拍摄中，对摄影机的移动往往是通过轨道车/滑轨等更稳定、运动更有规律并且轨迹设计感更强的方式实现。因此本系统不计划对摄影机通过三脚架脚轮运动的部分进行运动模拟。

7) 摄影机轨道车/滑轨

本系统的摄影机轨道车/滑轨虚拟资产部分包括两种轨道车的虚拟模型以及直线轨道虚拟模型，以及弯曲型轨道虚拟模型，其中弯轨有内圈半径从 3 米到 10 米的不同型号弯轨道 8 种（每一种弯轨之间半径的差距为 1 米）。这些直轨、弯轨的轨道间距均相同，因此它们之间可以自由衔接组合，形成不同的轨迹来模拟真实世界中的轨道情况。

8) 摇臂/升降机

本系统的摇臂/升降机虚拟资产部分包括一种摇臂的虚拟模型，以及三种升降机的虚拟模型。这些摇臂/升降机有些在末端悬挂摄影机遥控云台，有些较大的则具有足够的空间使得摄影机操作员可以坐在上面操作液压云台，有些具备臂长伸缩功能。不同功能的虚拟模型可以完成对现实世界中不同摇臂/升降机的模拟。

2. 控制部分

1) 摄影机参数

在使用三维软件对摄影机进行虚拟模拟时，同样需要对摄影机的一些参数也进行模拟，包括与镜头相关的参数：光圈、焦距、对焦距离，与摄影机相关的参数：画幅、摄影机安装偏移。

这些参数需要能够在虚拟环境中动态的调整。可以考虑直接在软件中调整，或通过接入外部传感器控制的方式使得用户能够进行实时调整。

2) 运动器材参数

除了对运动器材各自独立的运动情况进行模拟，系统还需要实现器材的不同组合方式。摄影器材的组合方式存在客观条件的限制，例如液压云台、齿轮云台可以安装在三脚架上，而遥控云台通常安装在摇臂/升降机上。

此外，系统还需要提供铺设轨道的功能，用户可以从轨道库里选择需要的轨道，铺设成合适的轨迹，而轨道车在铺设的轨道的约束下前进。

第三节 系统功能需求

为了实现系统预期设计目标，可以将其拆解为以下功能需求模块，通过各个功能模块的实现，再将各个模块组合即可实现系统预期设计目标。

一、 电影摄影硬件器材模型搭建

本系统将硬件器材模型作为用户的操作界面，用户通过操作硬件器材模型即可完成对虚拟摄影机的大部分操作。此部分需要综合考虑两个问题：第一，是摄影机具有哪些常见的运动方式，如何使用不同的硬件结构去模拟这些运动方式；第二，如何以更通用的形式使用一个硬件模型完成对许多不同摄影机运动的模拟，例如在实际拍摄中，可能会用到不同尺寸、型号的摇臂、伸缩臂等等，因此需要将这些运动抽象为不同维度的参数，找到适合进行模拟的参数维度，并将这些参数设计为数据采集设备的轴向来进行模拟。

二、 传感器选取及电路设计

在导演、摄影师操作电影摄影硬件器材模型时，我们需要能够实时获取硬件器材模型的当前运动数据，从而实现对计算机中虚拟设备的控制。因此我们需要对传感器进行调查研究，根据实际的需求情况选取符合要求的传感器，并进行相应的电路设计，从而采集硬件器材模型的运动数据并传递给嵌入式系统。

三、 嵌入式系统程序开发

在收到传感器采集到的运动数据后，需要对这些数据进行校验、前期计算并封装，以便发送给计算机。因此我们需要开发适合嵌入式系统的程序，来完成这些工作。

四、 数据通信接口设计

想要从嵌入式系统接受数据，需要对数据通信接口进行设计，以便确保通信双方能够实现可靠、有效率的通信。接口设计的内容包括数据的表示形式、校验方法等等。

五、 三维软件中插件开发实现

在本系统中，三维软件扮演的主要角色是加载虚拟场景、虚拟角色以及虚拟

摄影器材,并根据虚拟摄影机的位置和姿态进行渲染从而为操作者提供渲染画面。在此步骤中,计算机需要将嵌入式系统接收到的数据传递给三维软件中的摄影机,这样才能让三维软件的渲染模块渲染出系统需要的结果。为了在三维软件中将数据传递给摄影机,需要在相应三维软件中进行插件开发来实现这一需求。

第四节 系统开发环境

系统运行所需的环境需要满足一定的性能要求,这里给出本系统开发中使用的系统环境,如果低于以下配置要求,可能会因性能不足造成潜在系统工作异常。

一、 硬件环境

计算机配置基本信息如下:

内存: 16G

处理器: Intel® Core™ i7-2600 CPU @3.4GHz (8CPUs)

显卡: NVIDIA GeForce GTX 1070

操作系统: Windows 10 专业版 64 位

二、 软件环境

系统中所使用的软件主要是 Unreal Engine 4 和 Arduino IDE。

第三章 系统总体设计

第一节 概述

上一章对系统需求的分析,为本章对系统进行总体上的设计提供了现实依据。根据功能需求部分,可以得出系统的 5 个功能模块即可构成完整的系统。本章首先对系统总体结构做简单概述,再解释模块与模块之间的相互关系,最后分小节讨论各个模块的设计思路。

第二节 系统总体结构

系统从宏观层面上讲,6 个模块可以划分为 3 个部分:硬件部分、软件部分以及数据通信接口部分。如图 12 所示,硬件部分包括电影摄影硬件器材模型、传感器及电路以及嵌入式系统,软件部分主要的内容是插件的开发实现,而数据通信接口设计部分则是沟通两者的桥梁。

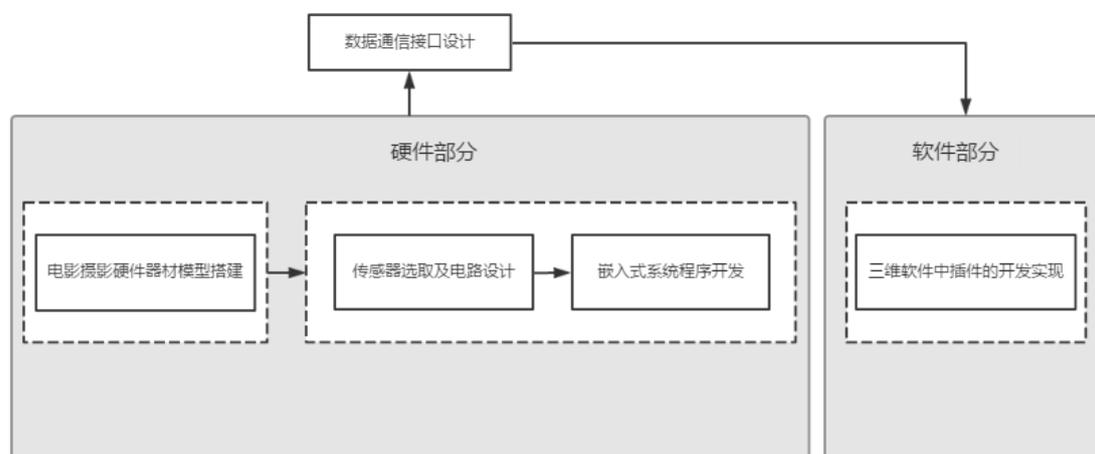


图 12 系统总体设计示意图

在详细解释每一部分的分工设计之前,需要先探讨一下这三大模块之间的关系,以及做出这样设计的原因。本系统中硬件部分担当了人与系统交互的接口功能,用户通过操作硬件来与系统交互。软件则担当了系统的计算和输出功能,通过显示器渲染图像向用户显示计算结果。为了将硬件和软件连接起来,需要设计合适的接口协议,硬件部分和软件部分都遵守这一协议,从而实现数据交流。

一、 硬件部分

系统的硬件部分由三大模块组成：电影摄影硬件器材模型、传感器及电路以及嵌入式系统。这三大模块的关系如果以人体来类比，模型模块可以比作人的身躯，它是整个硬件部分与外界交互的实体；传感器及电路模块则是人的神经系统，它负责从真实世界采集实体的运动信息并传送；嵌入式系统则相当于人的大脑，它接受到神经系统（传感器及电路模块）发送的信息后，进行运算、数据处理并做出决策。

1. 电影摄影硬件器材模型模块

图 13 为器材模型模块的结构图，模型模块由对以下部分的模拟组成：摄影机、镜头、液压云台、齿轮云台、遥控云台、三脚架、轨道车/滑轨以及摇臂/升降机。以下则是对各个部分的详细解析。

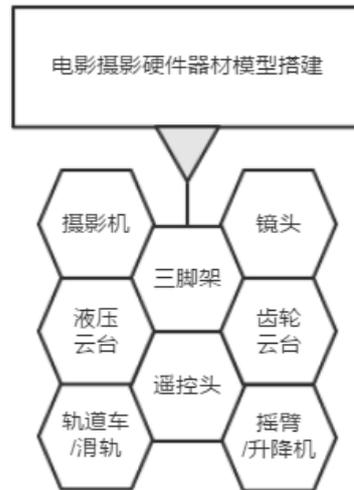


图 13 电影摄影硬件器材模型模块结构图

1) 摄影机

摄影机硬件模型本身并不具备任何功能，它是虚拟摄影机在现实世界中的一个对应的符号载体，用于辅助导演、摄影师等操作人员对整套硬件模型资产建立基础认知。

2) 镜头

镜头作为摄影机最重要的光学结构，它的可调参数分为三个：焦距、对焦距离与光圈。在通常的镜头上，这三个参数的调节方式是旋转镜头外的圆环来完成，因此本系统也应当采取旋转运动作为这三个参数的输入方式。在这里需要三个能够测量旋转角度的传感器来完成对镜头的模拟。

3) 液压云台

液压云台主要的功能是可以使得安装于其上的摄影机在 pan 和 tilt 两个轴向

上进行旋转，因此想要对液压云台进行模拟，只需要能够测出这两个轴向上的旋转量即可。本系统对液压云台的模拟通过改装真实的液压云台来完成。通过改装液压云台的旋转轴，在其中加入旋转传感器，从而可以获取云台的旋转数据。最后将改装后的云台可以直接安装到支撑系统三脚架上使用。

4) 齿轮云台

齿轮云台的功能与液压云台相同，都是控制安装于其上的摄影机在 pan 和 tilt 两个轴向上进行旋转，它们之间的区别在于控制的方式。不同于液压云台可以用手抓住手柄直接向想要的方向旋转，齿轮云台是通过转动手轮，手轮连接的对应齿轮控制云台上的相应齿轮，从而控制云台旋转的。想要对齿轮云台进行模拟，也需要测出这两个轴向上的旋转量。同时也需要有实际可以操作的手轮，让操作者能够以旋转手轮的方式进行旋转参数的输入。

5) 遥控云台

在摄影中，有时需要一种能够遥控摄影机旋转的方法，例如在航拍中，摄影机被悬挂于飞行器下方；或者在使用小型摇臂时，摄影机被悬挂在摇臂的末端。在这些需要遥控摄影机旋转姿态的情况中，摄影机首先被安装在遥控云台上，再被固定到对应的运动设备端。

遥控云台与液压云台、齿轮云台不同的地方在于，为了实现遥控，它的旋转轴部分是由马达来驱动的。由于机械结构较为简单，也不用考虑传动装置，往往能够实现灵活的摄影机姿态运动。遥控云台的操作方式通常是使用遥控面板进行遥控操作，因此有必要研究遥控面板的操作方式从而更好的符合操作人员的习惯。遥控面板上的功能通常较多，本系统只找出与摄影机运动关系最密切的参数进行模拟。通常遥控面板最基本的参数是，使用一个全方位操纵杆来控制摄影机 pan、tilt 这两个维度上的旋转，使用两个旋转按钮来分别控制旋转速度与 roll 这个维度上的旋转。为了对这些参数进行模拟，需要一个可以全方位运动的操纵杆，以及两个能够测量旋转角度的传感器。

6) 三脚架

三脚架的主要作用是为云台提供支撑系统，使得云台在一定位置处稳定工作。部分三脚架还具备一定的高度调节能力，甚至会在下方安装脚轮具备简单的运动能力。由于它主要起到支撑作用，本系统不需要对它进行模拟，但本系统的液压云台部分由真实的液压云台经过改造而来，因此安装在真实的三脚架上即可使用。

7) 摄影机轨道车/滑轨

轨道车与滑轨的共同特点是它们能够控制摄影机在单一方向上前后移动。因此对于轨道车与滑轨的模拟可以通过同样的硬件模拟设备来完成。利用能够测量直线位移的传感器，测出位移量即可实现模拟。

8) 摇臂/升降机

摇臂与升降机的运动方式基本相同，通常来说区别只在于型号的大小。有些升降机的升降臂具备伸缩的功能，从而使得摄影机在位置升降的同时走过的轨迹可以不必是弧形，而是垂直的升降运动。由于摇臂与升降机在旋转上的运动方式与云台相同，都是两个轴向上的旋转运动，本系统对摇臂与升降机的硬件模拟直接采用三脚架系统云台部分的硬件模拟设备。并且在使用摇臂/升降机的情况下摄影机自身的旋转运动往往会使用遥控云台等其他设备控制，因此一套云台部分的硬件模拟设备可以适应大部分需求。对于臂长伸缩方面的模拟，本系统使用小型的测量直线位移的传感器进行。

2. 传感器及电路模块



图 14 传感器及电路模块结构图

图 14 为模块的结构图，根据上一小节分析，系统中需要用到的传感器等元器件根据类型划分分别有：直线位移传感器、旋转编码器、旋转电位器、滑动电位器、操纵杆以及按钮。值得注意的是，这里列出的电子元器件并非系统中用到的所有元器件，而只是包含与系统功能高度相关、对系统功能实现有关键作用的元器件，有关其他由于电路设计需要而是用的电子元器件，将会在系统详细设计与功能实现部分提及。以下则是对各个部分的详细解析，这些元器件的工作原理将会在下一章详细描述，本小节的重点在于这些元器件在系统中承担的功能性作用。

1) 直线位移传感器

直线位移传感器的功能是测量直线位移，它在本系统中的功能是用来模拟轨道车/滑轨，通过传感器控制摄影机在直线上的运动。

2) 旋转编码器

旋转编码器的功能是测量角位移,它在本系统中的功能是用来模拟云台以及摇臂/升降机等以旋转为主要运动方式的硬件设备,通过传感器控制摄影机的旋转姿态。

3) 旋转电位器

旋转电位器的功能与旋转编码器相同,也是测量角位移,其中的区别在于旋转电位器的工作范围较为有限,并且精度相对较低,因此在系统中承担一些辅助参数的输入功能,例如当系统对齿轮云台、遥控云台等控制摄影机旋转的硬件设备进行模拟时,使用旋转电位器来决定旋转的速度参数,也可以理解为两者的转速比。例如旋转编码器转动一圈 360° 时,对应的虚拟摄影机旋转轴可以转动 720° (转速比 1:2),也可以转动 360° (转速比 1:1),还可以转动 90° (转速比 4:1)。

4) 滑动电位器

滑动电位器的功能与直线位移传感器相同,也是测量直线位移,区别在于本系统采用的滑动电位器行程较小,并且精度相对较低,在系统中与旋转电位器相似,也承担一些辅助参数的输入功能。

5) 操纵杆

操纵杆可以围绕着其底部转动,并能够自动复位。由于在通常操作遥控云台的面板上常常使用操纵杆来控制摄影机旋转,因此本系统中也使用操纵杆来控制虚拟遥控云台的旋转。

6) 按钮

按钮其实是一种微动开关,本系统中使用按钮来控制虚拟摄影机录制的暂停和开始。

3. 嵌入式系统模块

图 15 为嵌入式系统模块的结构图,这里的嵌入式系统的主要内容即搭载在单片机上的程序。嵌入式系统模块的主要功能为数据检验、预计算与数据封装。以下则是对各个部分的详细解析。

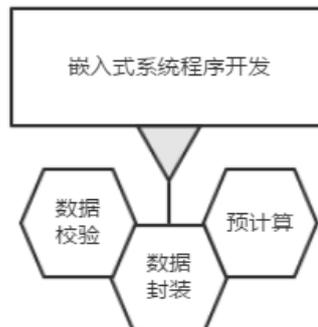


图 15 嵌入式系统模块结构图

1) 数据校验

传感器数据接入到嵌入式系统后，它需要对收到的数据进行检验，只有当有传感器的数据与前一帧数据相比有变化（即数据发生了更新）时才会通过串口向计算机发送数据包。并且对数据包中的有效数据部分利用校验算法生成校验数据，并将校验数据一并写入数据包中，以便接收方计算机能够在接收到数据包后检验收到数据是否可靠。

2) 滤波

接入到嵌入式系统的传感器可以根据其信号分为数字信号与模拟信号两类。其中模拟信号由于电路噪波会使得数据产生抖动。因此在嵌入式系统接收到模拟信号之后，需要对模拟信号进行滤波，从而保证发送给计算机的数据是稳定的。否则，在三维软件中被模拟信号控制的运动器材的相应轴向也会产生抖动。

3) 预计算

由于系统中使用了不同规格的传感器，它们所产生的数据规格不尽相同，因此在将数据封装发送给计算机之前，需要对数据进行预计算，将其统一参数化为特定形式。

进行预计算的优点主要有两个：

- a) 方便计算机程序端接收并使用数据，收到的数据解析后可以直接用于驱动虚拟模型，无需考虑转换等细节。
- b) 预计算可以封装底层的传感器技术参数细节，将较底层的硬件与抽象层次较高的软件隔离开，这样即使硬件实现发生了变化，只要保证数据包的接口不变，软件端所做的开发工作依旧可以使用，无需额外调整。

4) 数据封装

数据预计算处理完毕后，则根据系统定义好并且由软件、硬件部分共同遵守的数据通信接口将数据以规定格式封装起来，发送给计算机使用。

二、 数据通信接口部分

数据通信接口部分只包含一个模块：数据通信接口模块，它是本系统硬件部分与软件部分衔接的桥梁，承担着软、硬件部分的数据信息交换的任务。本模块的主要功能，是通过设计接口标准，达到让系统的硬件与软件部分顺利交换信息的目的。

接口是一种计算机中不同模块之间数据信息交换的方法，数据信息的交换可能发生在计算机软件之间、计算机与硬件设备之间、计算机与其外围设备之间以及外围设备与外围设备之间等。接口分为硬件接口与软件接口，硬件接口往往是

从物理意义上来讲，描述某个设备机械、电子、逻辑信号方面的特征。软件接口则是指计算机软件层面上的通信。本系统主要涉及并讨论的接口是软件接口，侧重于计算机软件之间的数据信息交换。

三、 软件部分

本系统的三维软件插件模块需要包含以下功能：

1. 接收并解析来自串口的数据流

单片机用将传感器各个轴的数据根据本系统设计的数据通信接口封装，通过串口发送给计算机，因此在三维软件中，系统插件需要能够进行串口数据的接收与解析。

2. 动态向场景中加载电影摄影器材虚拟模型

用户将虚拟场景模型、角色导入 Unreal 引擎，完成虚拟场景的搭建和设置之后，需要向场景中导入适当的摄影器材虚拟模型，从而开始进行镜头设计。本系统为用户准备了摄影器材虚拟模型资产库，为了方便用户进行导入，需要系统提供设备选择界面，用户从界面上选择需要使用的摄影器材，即可将其加载到当前虚拟场景中。

3. 支持用户指定传感器参数与虚拟摄影器材之间的控制关系

传感器参数接入到虚拟系统中后，并不能够直接用于控制虚拟摄影器材，还需要用户指定传感器与虚拟摄影器材之间的控制关系。这是因为在不同的应用场合中，用户会使用不同的硬件摄影器材模型，而同时使用所有硬件器材模型的情况很少。此外，系统还提供了一些自定义的输入参数，用户可以指定用这些参数控制一些额外的参数，例如用于控制轨道车/滑轨的运动速度，遥控云台的旋转速度等等。

4. 能够以摄影机主观视角观察虚拟场景

为了通过虚拟场景设计电影的镜头画面，操作者需要能够以虚拟摄影机的视角来观察虚拟场景，这样才能够直接从画面上感受到镜头设计是否合适。

5. 能够以第三人称视角观察虚拟场景、以及影摄影器材虚拟模型

除了考虑镜头画面的问题，操作者还需要考虑现场环境、硬件器材的运动限制等问题。如果设计了一条很满意的上升镜头，最后才发现现场的环境天花板太低，条件不允许拍摄这样的镜头，也是没有意义的。

第四章 系统涉及的相关技术

第一节 概述

本节的主要内容是对系统所使用的一些技术进行了介绍，并解释了相应技术的对应需求，并对相关技术进行了比较，进一步解释了采取具体某一项技术的综合原因。

第二节 传感器

为了对电影摄影进行仿真，我们首先需要能够获取到仿真硬件设备上的运动数据，例如，为了仿真摄影机的位移运动，我们需要采集它的移动数据，为了仿真摄影机的旋转运动，我们也需要采集对应的旋转数据。因此，我们需要根据需求选择一些传感器进行数据的采集。

传感器（transducer 或 sensor）通常由敏感元件与转换元件构成，它的主要功能是感知并检测某一形态的信息，并转换成为另一形态的信息。^[2]图 16 展示了一般传感器的组成部分。



图 16 一般传感器的组成

本章从电影摄影仿真的需求出发，逐个介绍系统中所选用的传感器及相关原理、优缺点等，并解释了选用这些类型传感器的原因。

一、 旋转编码器

在电影摄影中，与旋转有关的镜头运动非常多，例如横摇镜头（pan）与俯仰镜头（tilt），因此我们需要能够采集旋转运动数据的设备。

旋转编码器（rotary encoder），也称作轴角编码器（shaft encoder），是一种能够将相对于某一轴向上的角度位置（angular position）或角位移（angular motion）

转换为模拟或数字信号的机电设备。旋转编码器主要分为两种：绝对式与增量式，其中绝对式旋转编码器能够输出当前的旋转角度，而增量式旋转编码器输出的则是有关该轴向的运动信息，这些运动信息需要经过进一步处理从而得到速度，距离以及位置等信息。^[3]

增量式旋转编码器仅在旋转时提供周期性的输出信号，主要有机械式、光学式和磁性式。其中光学式是目前应用最广的一种，精度也较高。增量式旋转编码器通过 A、B 两条信号线来输出数据，A、B 两条信号线输出一组正交的方波信号，即 A、B 两信号的相位差是 90 度。单圈脉冲数（PPR）描述的是增量式旋转编码器旋转一周时输出的方波脉冲数，例如单圈脉冲数为 400 时，代表每旋转一周 A、B 均会输出 400 个方波，但这两个方波之间有 90 度的相位差，如图 17。

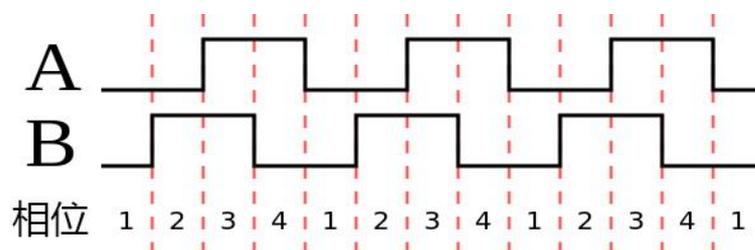


图 17 旋转编码器 A/B 信号的相位差示意

利用 A、B 两信号的相位差，在编码器进行逆时针/顺时针不同旋转方向的旋转时，两个信号的相序会有所不同，对两个信号进行解码即可得到编码器的旋转方向。例如在收到 A、B 两信号的数据为 00 时，下次再收到的数据如果是 01，即可判断编码器在进行顺时针旋转。当然，采集到正确数据的另一前提是采样频率要足够高到能够确保采集到了每一个数据，否则在丢失数据的情况下，会变得无法判断编码器当前的旋转情况。

本系统主要采用的是增量式旋转编码器，有三方面的考虑：

- a) 在同等精度的条件下，增量式旋转编码器比绝对式旋转编码器的成本低，由于本系统中有多个轴向的旋转数据需要采集，因此这样的选择能够对系统成本的降低起到作用。
- b) 由于增量式旋转编码器输出的是关于角位移的数据，因此可以采用机械传动装置获取更高的传动比，从而在同样精度设备的条件下采集到更高的旋转精度。
- c) 本系统重点关心的是摄影机的运动信息，而并非需要对摄影机的姿态进行准确的定位，因此采用增量式旋转编码器已经能够满足要求。

二、 直线位移传感器

在电影拍摄中，轨道车（dolly）是一种常用设备，它类似于火车与铁轨，即预先在地面上铺设好轨道，将轨道车在轨道上推动，从而得到更加稳定的运动镜头。为此我们需要一种能够采集直线运动数据的设备。

滑块式电子尺是一种直线位移传感器,通过操作其滑轨上的滑块可以改变输出端的电压，从而让系统得知滑块所在的位置。它的实现原理与电位器

本系统采用滑块式电子尺采集直线运动数据，原因是在电影摄影中，对 dolly 车的控制是一种推拉控制，因此比起其他类型的直线位移传感器（例如拉杆式电子尺，通过拉动传感器一侧的拉杆来测量位移,以及激光传感器等等），采用滑块式的操作方式，可以让使用者感觉操作起来更加直观、自然。

三、 电位器

对电影摄影进行仿真时，我们不只需要采集设备的运动数据，还需要一些额外的输入数据为系统增添某些功能，例如对于摄影机镜头焦距、对焦距离以及光圈的控制，对于摄影机位移速度的缩放控制等等，因此我们还需要一些采集这类数据的设备。

电位器（Potentiometer），有时也称作可变电阻器（Variable Resistor），据有三个端子，分为两个固定端子和一个移动端子，经由移动端子的移动，移动端子与两个固定端子间的电阻值会发生变化，因而可以作为分压器来使用，改变移动端的电位，移动方式可以是滑动或者旋转。电位器常用于控制电子设备例如作为音响设备的音量控制器来使用，用在机械装置上，则可以作为位置传感器使用，例如操纵杆（joystick）。

本系统选取单圈旋转式和直线滑动式电位器来方便用户对虚拟摄影机某些参数的控制，主要原因在于：

- a) 电位器相较于其他能够采集同类型数据的传感器，具备体积小、价格低的优点，在系统中集成多个电位器，可以增加用户输入参数的丰富性，并且不会因此导致系统变得庞大复杂丧失灵活性。
- b) 与前述旋转编码器、直线位移传感器这些需要直接用于获取摄影机运动数据的传感器相比，通过电位器来采集的一些额外参数对数据精度的要求 z 相对较低，使用电位器即可满足系统需求。

四、 操纵杆

操纵杆 (Joystick) 也称作控制杆, 它能够将手部运动的物理数据转换为电信号。通常由一个基座, 和一个底部固定于其上的控制杆组成。控制杆在外力作用下围绕着底部基座旋转时, 旋转角度或方向信号会被转换为电信输出。操纵杆的应用范围非常广, 例如控制飞机、起重机、卡车等, 也常常用作游戏输入设备。在电影摄影领域, 遥控云台的主控制器常常也是操纵杆, 通过操纵杆的水平转动来控制遥控云台的 pan 轴向, 而操纵杆的垂直转动可以控制遥控云台的 tilt 轴向。

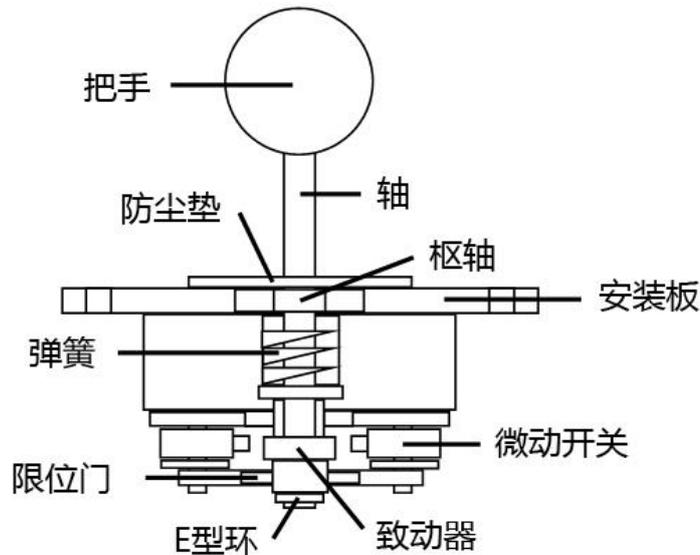


图 18 一般操纵杆的横截面图

操纵杆的结构并不复杂, 图 18 展示了一般操纵杆的横截面图。操纵杆可以通过使用不同的传感器, 根据多种原理来实现, 目前最常见的有电位器和霍尔式, 此外还有基于红外、基于电液比例控制等方式实现的操纵杆。电位器操纵杆的原理非常简单, 在相互垂直的两个轴向上分别装好电位器即可在操纵杆运动时测出两个轴向上的分量变化。霍尔操纵杆利用霍尔电磁感应原理来测量操纵杆的运动状况。其中电位器操纵杆因为是一种接触式测量方式, 在使用中磨损的情况比较严重, 并且操纵起来比较费力, 而霍尔操纵杆由于是感应式测量, 因此磨损较轻, 并且操纵起来手感较好。但是在同级别的操纵杆对比下, 霍尔操纵杆的稳定性以及可重复性相较于电位器操纵杆较差。

本系统采用的是电位器操纵杆, 主要原因在于本系统对于操纵杆的稳定性以及可重复性要求较高。经过实验, 在同等级别条件下的操纵杆, 使用霍尔操纵杆采集数据, 静止不动时的数据抖动比使用电位器操纵杆要剧烈许多。并且当移动过操纵杆等待操纵杆自动复位后, 在操纵杆标准位置 (也就是操纵杆静止并处于中心位置时), 使用霍尔操纵杆得到的数据与其运动前在标准位置时得到的数据,

两者之间的差距较大。因此当霍尔操纵杆被用于操作摄影机时，以上问题会造成在操纵杆静止不动或复位后，虚拟摄影机发生漂移，这样的漂移问题即使采用滤波的方法也很难改善。

第三节 串口通信

在本系统计算机中的软件部分与外围设备硬件部分之间，需要进行数据通信，从而能够让系统的这两部分协同工作。计算机与外围设备通信的方法有很多，例如以太网（Ethernet）、火线（FireWire）、并行端口（Parallel Port）、串行端口（Serial Port）以及通用串行总线（USB）等。

串行端口（以下简称串口）通信是一种诞生较早的数据通信技术，曾经是个人电脑与设备间通信的主流。因为它就简单、便宜、控制协议标准化程度较高并且应用较广，因此至今仍然在自动化系统、科学仪器、电子销售系统以及工业产品等许多领域使用。串口则是串口通信所使用的硬件接口，在现代电脑中串口已经逐渐变得不太常见，需要用户使用串口-USB 转换器（Serial-to-USB Converter）或串口-IDE 转换器（Serial-to-IDE Converter）等方式，将串口信息经过转换后接入计算机。本系统硬件部分使用的 Arduino 单片机也使用串口与计算机通信。

串行端口中的“串行”，意指在通信中信号每次以 1 位（bit）输入或输出，尽管很多其他的接口例如以太网、火线以及 USB 也使用串行数据流的方式收发数据，但术语“串行端口”更多的是指遵从 RS-232 标准的硬件接口。RS-232 是一个数据通信标准，用于串行通信，这里的 RS 代表 Recommend Standard，即推荐标准。它是最早也是最广泛使用的串口标准，对电气特性、逻辑电平以及信号线的功能都进行了规定。

在计算机中，串口以 COM 表示，并依据数字编号来表示不同的硬件接口，如 COM3、COM4 等，每一个 COM 接口只能够连接一个硬件设备。

RS-232 标准规定了完整的 25 个针脚端口，但大多数设备通信不需要用到这么多，所以实际中较为常见的是 9 个针脚端口的一种接口标准（简称 DB-9），如图 19 所示。在串口通信中，最重要的三个针脚端口是 Tx（Transmitter，数据发送）、Rx（Receiver，数据接收）和 GND（Ground，接地）。



图 19 常见的 9 针脚串口

为了能够在两台设备间通信，还需要对串口参数进行设置。这里只讨论常用的串口参数。波特率（Baud Rate）是指串口的传输速率，单位为位/秒，代表每秒钟传输多少位的信息，例如波特率 9600 即代表每秒钟传输 9600 位。两个通信设备的波特率必须一致才能够进行通信。一般波特率可以设置为两个设备所能够接受最高的波特率，串口一般波特率的选项有 300、600、1200、2400、4800、9600、14400、19200、28800、38400、57600、115200 等速率。

第四节 嵌入式系统

在系统中，我们需要一个独立的小型计算设备，能够与传感器相连接，对从传感器接受到的数据进行初步的检验、处理，并封装成一定的格式，再发送给计算机，供计算机进行进一步的处理与使用。

嵌入式系统是指一种小型的计算机系统，嵌入机械或电气系统内部，能够提供专属的功能，通常用于对设备进行实时控制，因此在实时计算方面性能要求较高。与我们日常使用的通用型计算机相比，嵌入式系统的显著优点包括耗能低，体积小等等，现代嵌入式系统通常基于单片机实现。

一、 单片机（Microcontroller）

单片机本质上是一种微型计算机，它在单个集成电路芯片上集成了微处理器、存储器、定时/计数器以及各种输入/输出接口，赋予了一个芯片以计算机的属性。它是嵌入式系统的硬件组成，在嵌入式微处理器的基础上，与一些典型应用和需求匹配，在芯片内部集成多种功能部件和外设而成。

单片机与我们通常使用的微型计算机相比，最大的便利之处在于体积小、功

耗小、成本低、运行速度快、抗干扰能力强、结构灵活，因此可以集成到系统硬件当中，承担一些较为轻量化的工作。单片机被广泛用于微控制技术，于各种智能系统的软硬件中均有涉猎，在工业自动化控制、测量仪器、办公自动化和家用电器等诸多领域都有极为广泛的应用。

二、 Arduino

Arduino 是一个开源的微控制器开发平台，是一块单板的微控制器和一整套开发工具。它基于一整套易用的软、硬件。

它的硬件由一块开发板和其他各种 I/O 板组成。开发板是一个嵌入式系统，其核心是一个 Atmel AVR 单片机，加上一个晶振或振荡器、一个 5V 的直流电源和其他输入/输出器件而组成。数字信号和模拟信号均可以输入/输出，这保证了它丰富的信号来源，实现了广泛的控制功能。其中单片机主要包括 SRAM、EEPROM、Flash 内存和寄存器这几个数据存储单元、运算和输入/输出端口。

Arduino 可以在项目中单独使用，联动现有的电子元件，如开关、传感器或其他控制器件，LED、步进马达以及其他输出装置，作为嵌入式系统完成一些交互工作。例如，根据湿度传感器对环境湿度的检测数据，控制与它连接的另一台空气加湿器的工作等等。它也可以与计算机相连接，作为计算机的外围设备提供一些功能。甚至它也可以与互联网连接，收发数据并依照指令做出动作。总的来说，它能将来自传感器的数据发送到网络，并能用图表来表现这些数据。Arduino 也可以与任何具备输出数据能力或能被控制的东西相连，包括各类传感器、LED、按钮、旋钮、GPS 接收机等等。

当前流行的嵌入式系统有很多，例如 Arduino、BeagleBone 和 Raspberry Pi 三款开源平台，本系统选用 Arduino 的原因，在于它对于小型项目非常合适，它的成本最低、功耗最低并且对于不同传感器的接入非常友好。

第五节 三维图形引擎

一、 三维图形引擎介绍

想要将三维虚拟环境显示在显示器上，需要使用计算机三维图形技术。



图 20 三维数据可视化流程

如图 20，在三维数据制作完成后，需要调用底层图形开发包来处理数据，而底层图形开发包负责与 GPU 交互完成图形处理任务，最后由 GPU 将生成的图像数据发送给显示器进行显示，从而使得观者能够在显示器上观察到虚拟的三维环境。

目前常见的底层图形开发包有微软公司的 DirectX，Khronos 工作组的 OpenGL 以及 Khronos 工作组的 Vulkan 等，对于从事图形开发工作的专业人员来说，直接使用底层图形技术的学习成本较高，也会导致开发效率的降低。因此“三维引擎”作为其中的中间件被开发出来，它封装了一系列三维图形算法和底层图形包的 API 函数，从而能够帮助图形开发人员快速的进行三维图形程序的开发。其中负责三维图形渲染的部分，我们称为“三维图形引擎”。^[6]

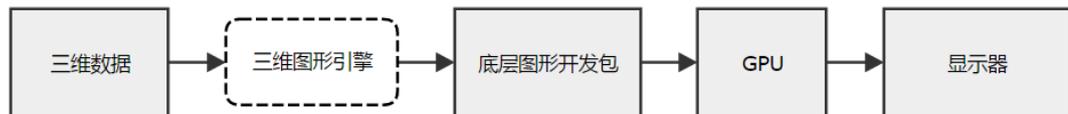


图 21 加入三维图形引擎后的三维数据可视化流程

如图 21，图形开发人员的主要交互对象从底层图形开发包变成了三维图形引擎，从而提高了开发效率。

对于本论文所开发的系统来说，也需要使用三维图形引擎来完成图形的渲染工作，从而将虚拟摄影机拍摄到的画面，以及能够观察整个三维虚拟环境的第三视角画面渲染到显示器上以便操作者观看。

三维图形引擎是很多大型三维软件的一个重要组成部分，这些大型三维软件往往有各自不同的功能，例如用于游戏开发的游戏引擎，用于三维资产制作的三维处理软件，以及用于仿真系统开发的仿真引擎等等。本系统针对不同的应用环境，使用了不同的大型三维软件。以下为了方便，我们将含有三维图形引擎模块的大型三维软件均称作三维引擎。

二、 Unreal Engine

Unreal Engine 即虚幻引擎，它是由 Epic Games 研发的一款游戏引擎，目前版本为虚幻 4，它同时支持 DirectX、GDM、OpenGL、Vulkan 等底层图形开发

包。^[7]虚幻引擎在欧洲和北美已经有了比较广泛的应用，在画面效果方面处于行业领先地位，虚幻 4 从 2014 年开始发布源代码，也为使用者带来了很大的便利。

本系统选用虚幻 4 作为进行三维虚拟环境的渲染引擎，主要原因是，在目前市场上能够免费提供个人/科研使用的三维引擎中，虚幻 4 拥有最好的画面渲染效果，能够为系统的画面观感带来很好的真实度。

第五章 系统详细设计与功能实现

第一节 概述

系统总体设计章节中，探讨了系统的整体架构，包括各部分间的关系以及每个部分包含哪些模块，以及模块间的关系与模块的组成部分。本章则深入剖析每一个模块的功能，详细的设计方案与具体的功能实现。图 22 为系统详细设计示意图，其中展示了系统的更多细节。

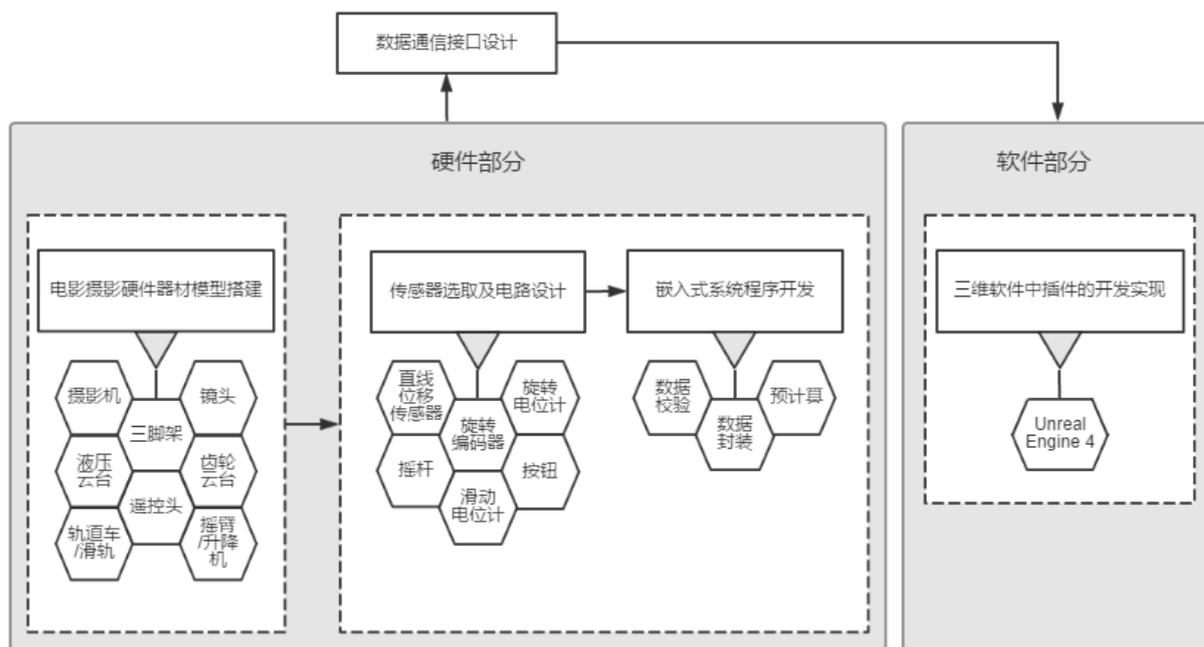


图 22 系统详细设计示意图

第二节 硬件器材模型模块

不同的电影摄影器材具备不同的运动方式,因此针对不同的电影摄影器材,需要对其运动方式进行分析,总体来说,其运动方式可以分为两类:直线运动与旋转运动,如图 23 所示。

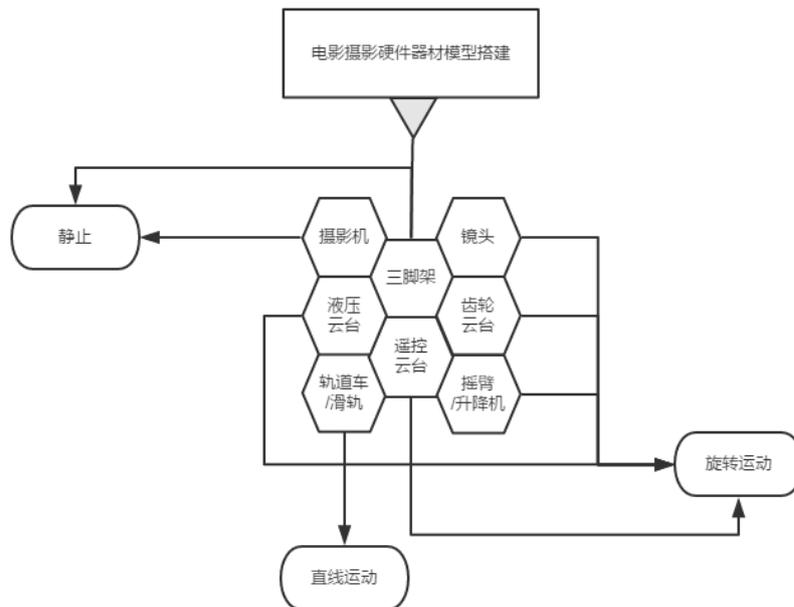


图 23 电影摄影器材的不同运动方式

本系统所模拟的电影摄影器材包括摄影机、镜头、液压云台、齿轮云台、遥控云台、三脚架、轨道车/滑轨以及摇臂/升降机。以下则是对各个部分运动方式的详细分析，由于摄影机与三脚架属于固定设备，因此并不包含在分析之内。

一、 镜头

如前所述，镜头分为定焦头与变焦头。其中，定焦头上面有两个可以旋转的环，分别可以用于调节光圈的大小，以及对焦距离。而变焦头上面有三个可以旋转的环，除了光圈、对焦距离以外，还可以调节该镜头的焦距。因此本系统在镜头数据的采集部分，需要具备采集三个旋转数据的能力，当用户选择使用定焦头时，在软件中忽略代表变焦的旋转数据即可。镜头的旋转运动如图 24 所示。

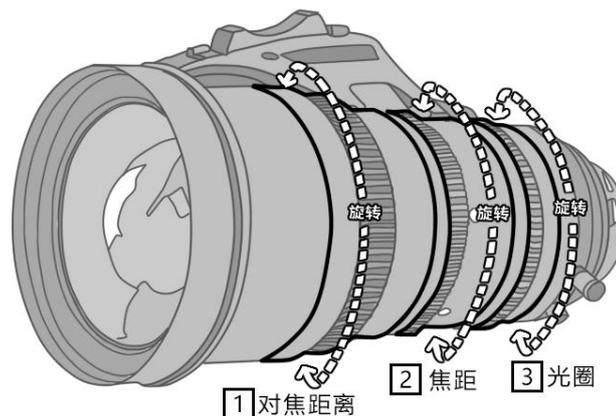


图 24 镜头的旋转运动

二、 液压云台

液压云台具有 Pan 和 Tilt 两个旋转轴向，因此需要具备采集两个旋转数据的能力。液压云台的旋转轴向示意如图 25 所示。

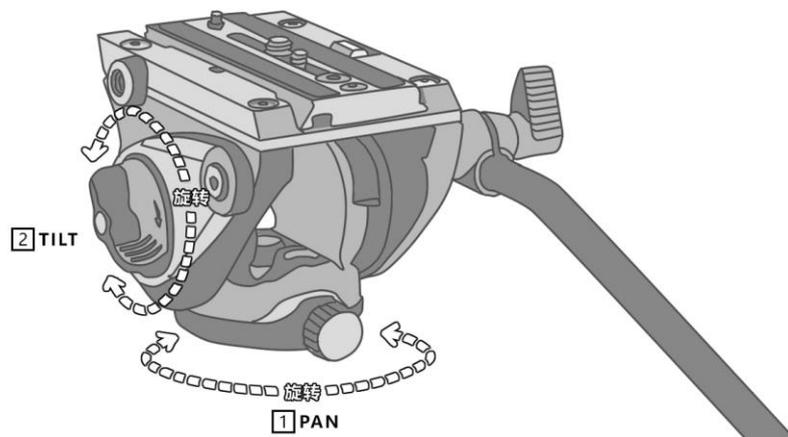


图 25 液压云台的旋转轴向

三、 齿轮云台

齿轮云台通过齿轮来控制 Pan 和 Tilt 两个旋转轴向，因此需要具备采集两个旋转数据的能力。齿轮云台的旋转轴向示意如图 26 所示。

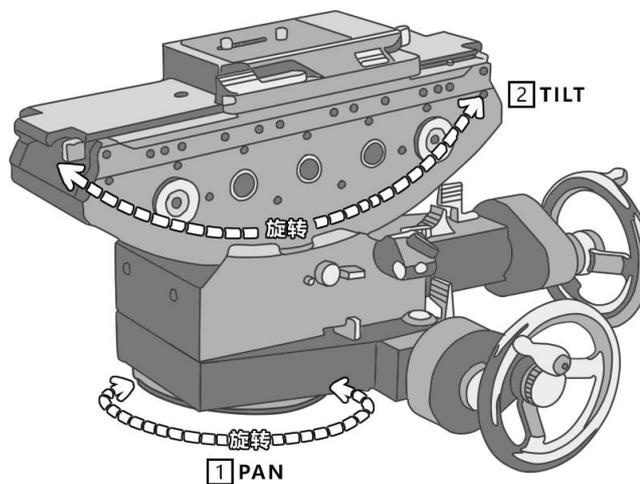


图 26 齿轮云台的旋转轴向

四、 遥控云台

遥控云台由电机驱动，具有 Pan、Tilt 和 Roll 三个旋转轴向，因此需要具备采集三个旋转数据的能力，遥控云台的旋转轴向示意如图 27 所示。

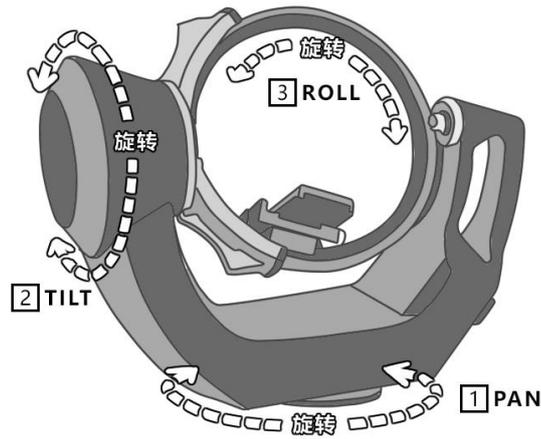


图 27 遥控云台的旋转轴向

五、 轨道车/滑轨

轨道车/滑轨沿着单一轴向直线运动，因此系统需要具备采集单轴直线运动数据的能力，轨道车/滑轨的运动轴向如图 28 所示。

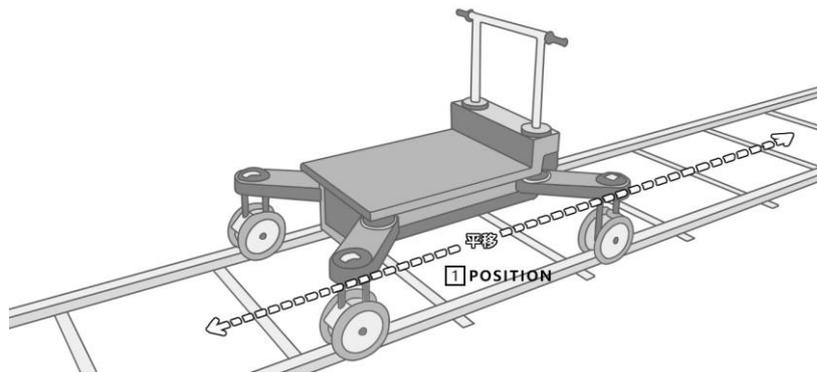


图 28 轨道车/滑轨的直线运动轴向

六、 摇臂/升降机

摇臂/升降机具有 Pan 和 Tilt 两个旋转轴向，以及某些摇臂/升降机具备伸缩臂长的功能，因此需要具备采集两个旋转数据，以及一个直线运动数据的能力。摇臂/升降机的旋转与伸缩轴向如图 29 所示。

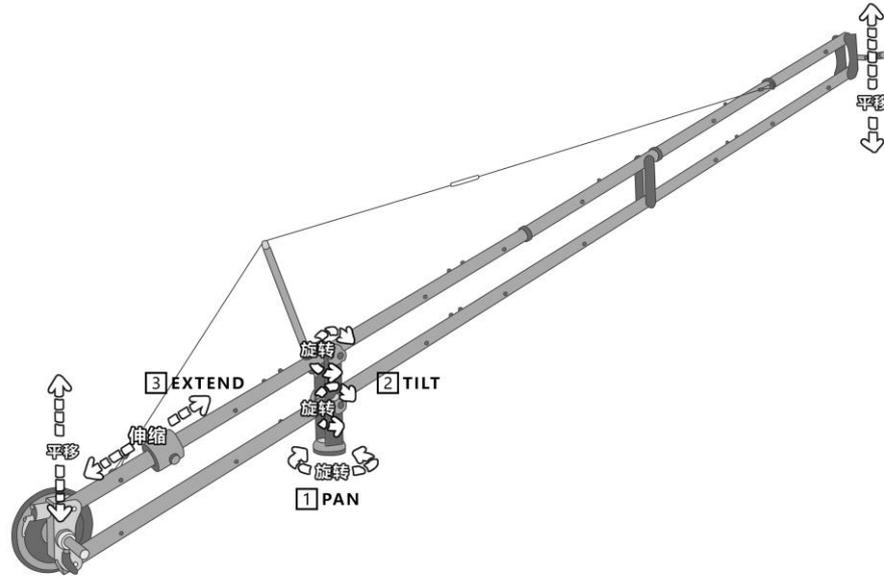


图 29 摇臂/升降机的旋转与伸缩轴向

第三节 传感器及电路模块

一、 传感器

本小节对系统中选用的传感器依次进行详细描述，包括传感器的用途、工作参数、接线方式等。

1. 旋转编码器

出于成本的考虑，本系统中采用了两种不同规格的旋转编码器，旋转编码器 A 每旋转一圈发出 400 脉冲，旋转编码器 B 每旋转一圈发出 20000 脉冲。在第五章中对于旋转编码器原理进行过分析，编码器输出 A、B 两个相位相差 90 度的信号电平，因此可以通过对比两个信号将脉冲信号细分为原先的四倍，从而得到四倍于编码器脉冲频率的精度。因而，使用 400 脉冲的选择编码器 A，可以在编码器每旋转一圈时得到 $400 \times 4 = 1600$ 的角度分辨率，及 $360^\circ / 1600 = 0.225^\circ$ 。使用 20000 脉冲的选择编码器 B，可以在编码器每旋转一圈时得到 $20000 \times 4 = 80000$ 的角度分辨率，及 $360^\circ / 80000 = 0.0045^\circ$ 。

1) 旋转编码器 A(400 PPR)

图 30 为本系统采用的旋转编码器 A，它的接线参数见表 1，工作电压为 DC5-24V。

表 1 旋转编码器 A 的接线参数表

绿	ChA+
白	ChB+
红	VCC
黑	0V



图 30 系统采用的旋转编码器 A

2) 旋转编码器 B(20000 PPR)

图 31 为本系统采用的旋转编码器 B，它的接线参数见表 2，工作电压为 DC5-24V。

表 2 旋转编码器 B 的接线参数表

绿	ChA+
白	ChB+
黄	ChZ+
红	VCC
黑	0V
钢网	GND
棕	ChA-
灰	ChB-
橙	ChZ-



图 31 系统采用的旋转编码器 B

2. 直线位移传感器

图 32 为本系统采用的直线位移传感器，它的工作电压为 5-24V。



图 32 系统使用的直线位移传感器

3. 滑动电位器

图 33 为本系统采用的滑动电位器，它的阻值为 10K，可调节的行程为 65mm。

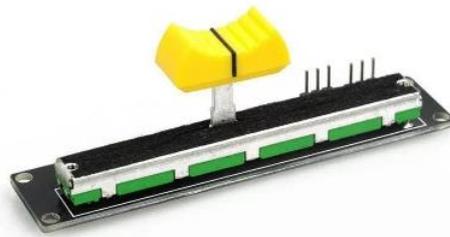


图 33 系统使用的滑动电位器

滑动电位器具备一组六个针脚，分别为:OTA、VCC、GND 一组，OTB、VCC、GND 为另一组,两组功能相同。根据滑动位置从 0~65mm 的变化，OTA/OTB 针脚会根据比例输出 VCC 端的电源电压。

4. 旋转电位器

图 34 为本系统采用的旋转电位器，可以旋转的范围为 315°。



图 34 系统使用的旋转电位器

旋转电位器的三个针脚分别为:OUT、VCC 以及 GND，根据旋转位置从 0~315° 的变化，OUT 针脚会根据比例输出 VCC 端的电源电压。

5. 按钮

图 35 为本系统采用的按钮，它的工作电压为 DC3.5V-5V。



图 35 系统使用的按钮

按钮的三个针脚分别为:OUT、VCC 以及 GND，在按钮按下时 OUT 针脚输出低电平，按钮释放时 OUT 针脚输出高电平。

6. 操纵杆

图 36 为本系统采用的操纵杆，它是基于电位器的操纵杆，工作电压为 5V。



图 36 系统使用的操纵杆

操纵杆可以在双轴全方位范围上运动，并将运动姿态分解为平面内相互垂直的两个轴向上的位置，并通过两个电压来输出这两个位置。

根据对电影摄影器材的运动分析，以及传感器的调研，可以总结出传感器与硬件器材模型的关系如表 3 所示：

表 3 传感器与硬件器材模型对应关系表

硬件器材	传感器	数量
摄影机	无	0
镜头	旋转编码器 A(1600 PPR)	3
液压云台/摇臂/升降机	旋转编码器 B(80000 PPR)	2
齿轮云台	旋转编码器 A(1600 PPR)	2
遥控云台	旋转编码器 A(1600 PPR)	1
	操纵杆	1
	按钮	1
轨道车/滑轨	直线位移传感器	1
	滑动电位器	1

二、 电路

1. 电压

系统中使用的传感器的工作电压存在着不一致的情况，例如旋转编码器的工作电压为 DC5-24V，而电位器例如滑动电位器与旋转电位器，则可以根据其阻值更灵活的决定工作电压。由于本系统采用的单片机为 Arduino Due(以下简称 Due)，它的工作电压为 3.3V。因此，如果旋转编码器使用 5V 的电源，输出的信号电平也为 5V。此时将旋转编码器的输出信号直接与 Due 相连，Due 会被损毁。因此我们需要使用电平转换器，将 5V 的信号电平转换为 3.3V 的信号电平，再接入 Due 读取信号内容。

图 37 为本系统使用的八通道电平转换模块，它能够转换的电平范围为 1.8V-6V，使用时在 VCCA 针脚与 VCCB 针脚分别接入想要转换的电源，例如在 VCCA 处接入 3.3V，在 VCCB 处接入 5V，再将两侧的 GND 接入到电源负极，两个电源共地，随后即可将需要转换的信号接入到对应侧的数字针脚上。例如将旋转编码器的 A、B 相信号分别接入到 B0、B1 针脚（5V），即可从 A0、A1 针脚读取到 3.3V 的对应信号。

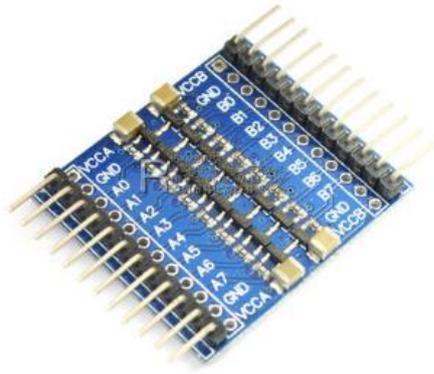


图 37 系统所使用的八通道电平转换器

2. 信号

本系统中使用的传感器输出信号中，有模拟信号也有数字信号，这就要求在设计电路时，需要考虑信号特征，将信号针脚与单片机连接。在本系统中，信号的连接主要分为两种情况：

1) 5V 数字信号

本系统中，使用的数字编码器最低工作电压均为 5V，因此这些数字编码器的工作电压为 5V，输出的数字信号电平也为 5V，需要通过电平转换器，转换为 3.3V 的电压，再接入到 Due 的数字针脚上。

2) 5V 模拟信号

本系统中，部分模拟传感器的最低工作电压为 5V，因此输出的模拟电压信号最高值也是 5V，也需要通过电平转换器，转换为 3.3V 的电压，再接入到 Due 的模拟针脚上。

3) 3.3V 模拟信号

本系统中，部分模拟传感器可以在 3.3V 下工作，此时它们输出的最高模拟电压信号为 3.3V，可以直接接入 Due 的模拟针脚。

3. 电路连接

如图 38 为系统的电路连接示意图，展示了电路中元器件的连接方式，以及接入单片机的方式。

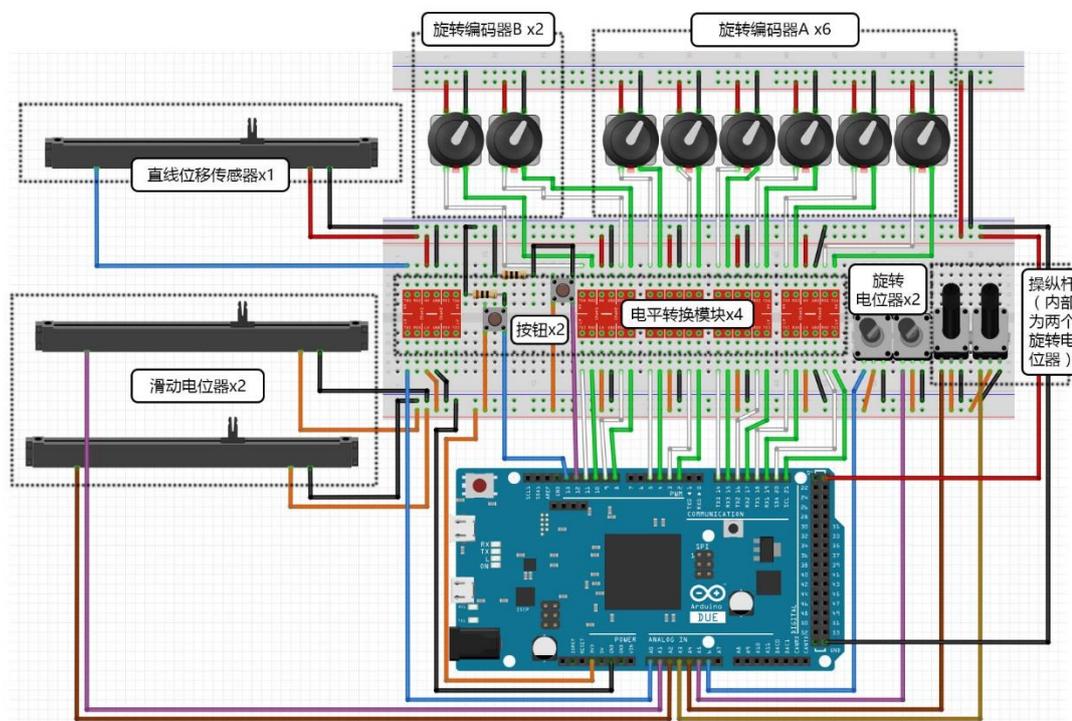


图 38 嵌入式系统模块电路连接示意图

三、 硬件组装

最终利用硬纸箱将所有硬件集成在一起，组装得到的结果如图 39、图 40 所示，其中直线滑轨部分较大，因画幅所限而没有包含在画面里。

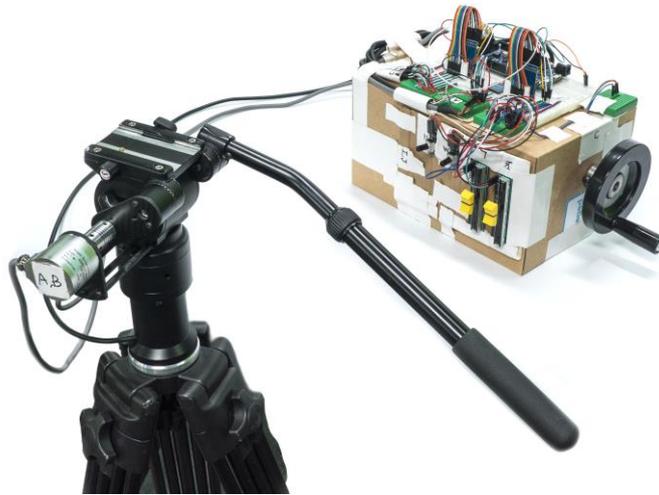


图 39 硬件组装实拍

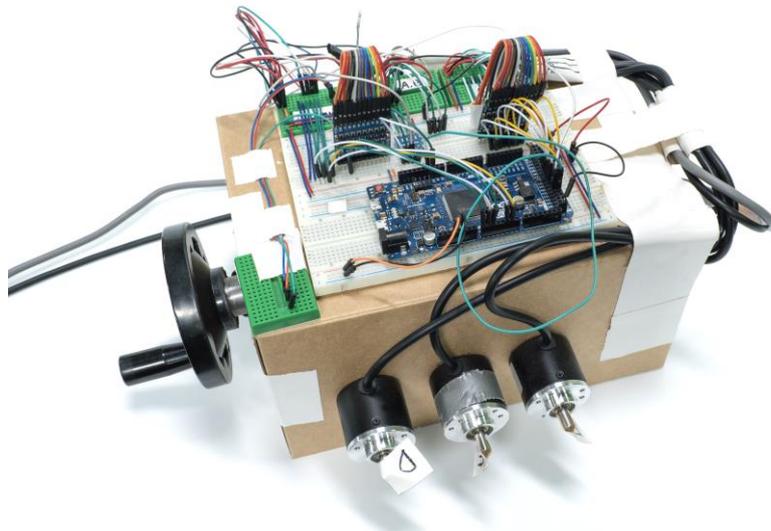


图 40 硬件组装实拍局部

第四节 数据通信接口模块

一、 数据通信内容分析

数据通信接口模块的主要是一个通信接口标准的设计,通过这个接口本系统的软件与硬件之间才能够实现稳定、高效的数据信息交换。为了设计数据通信接口,首先需要对系统中软硬件部分之间需要交互的数据内容进行分析,如表 4 所示。

表 4 数据通信内容分析表

硬件器材	传感器	数量	类型	取值范围	数据	编号	字节
液压云台/ 摇臂/升降机	旋转编码器 B(80000 PPR)	2	角度	[-360, 360]	float	A, B	8
齿轮云台	旋转编码器 A(1600 PPR)	2	角度	[-7200, 7200]	float	C, D	8
镜头	旋转编码器 A(1600 PPR)	3	角度	[0°, 360]	float	E, F, G	12
遥控云台	旋转编码器 A(1600 PPR)	1	角度	[-720, 720]	float	H	4
遥控云台	操纵杆(内置 2 个电位器)	1	长度	[0, 1]	float	I, J	8
自定义	滑动电位器	2	长度	[0, 1]	float	K, L	8
自定义	旋转电位器	2	长度	[0, 1]	float	M, N	8
轨道车/滑轨	直线位移传感器	1	长度	[0, 1]	float	O	4
自定义	按钮	2	布尔	0 1	float	P	4
数据总字节数							64

二、 数据包设计

为了是稳定、正确的利用串口来进行数据传输，需要设计一个良好的包传输机制，其中包括对于数据包内容的设计、数据包的封装与数据包的解析。一个数据包的标准结构应当包括：起始标志、数据、校验以及结束标志四个部分。

其中起始标志和结束标志的作用是标识包的起始与结束，需要注意不能够与数据部分包含的内容重复，由于本系统中数据部分都是数值内容，因此起始标志和结束标志部分用 ASCII 字符表示，各占 4 个字节(0x48494E45, 0x40524159)。

常用的校验方法有很多：奇偶校验、异或校验（Block Check Character）、循环冗余校验（Cyclic Redundancy Check）等。其中异或校验计算较为简单，因此多用于数据传输量较大、对某一具体数据的可靠性要求不是特别高的场合，例如传感器信息的不断发送等。而循环冗余校验计算较为复杂，可靠性高，因此较多用于数据传输量小、对某一具体数据的可靠性要求很高的场合，例如账号、卡号等关键信息的发送等。由于本系统的数据传输要求具备数据传输量较大、对于某一具体数据可靠性的要求一般的特征，因此本系统采用异或校验的方法校验数据。

在某些数据量以及数据内容性质会发生变化的通信中，还需要加上数据长度和命令两个结构，其中数据长度用于表示整个包中整体数据的总长，命令表示数据包中数据的用途。但本系统中数据的长度与用途是固定不变的，因此不需要这两部分。

根据以上情况设计系统的数据包，格式如表 5 所示。

表 5 系统的数据包格式

起始标志	数据	校验	结束标志
4byte	64byte	4byte	4byte

根据数据包格式，我们可以得出每个数据包中的数据为 $4+64+4+4=76\text{byte}$ ，即 $76*8=608\text{bit}$ 。为了保证系统反应的实时性，需要保证系统的刷新率为 120Hz ，即每秒至少发送 120 个 608bit 的数据包。因此每秒至少需要发送的数据量为 $608*120=72960\text{bit/s}$ ，也就是说串口通信的波特率不低于 72960。根据上一章串口通信小节的内容，常规串口通信的波特率中，大于 72960 的只有 115200，系统中的硬件可以负担 115200 的波特率，而更高的通信速率也可以为系统带来更好的效果，因此系统中选用的波特率为 115200bit/s 。

三、 数据通信接口设计

根据以上分析与设计，得出系统的串口数据通信接口设计为：

波特率： 115200bit/s

起始位： 1 位

数据位： 8 位

停止位： 1 位

数据包内容：

Byte0~3: 起始标志 ($0x48494E45$)

Byte4~67: 数据内容

Byte68~71: 校验字节

Byte72~75: 结束标志 ($0x40524159$)

第五节 嵌入式系统模块

如前所述，系统中使用到的元器件清单及其与单片机的接口连接见表 6，在 Arduino 的接口中，数字代表数字针脚，A+数字代表模拟针脚。

表 6 系统元器件清单及其在单片机接口上的连接

	数量	信号引脚数量	单片机接口
旋转编码器 B(80000 PPR)	2	4	46, 47, 10, 11
旋转编码器 A(1600 PPR)	6	12	36, 37, 32-35, 38, 39
操纵杆	1	2	A5, A6
直线位移传感器	1	1	A0
滑动电位器	2	2	A1, A2
旋转电位器	2	2	A3, A4
按钮	2	2	12, 13

一、 数据校验

如前所述，本系统采用异或校验的方法来进行校验，具体的做法就是对数据包内的 64byte 数据位逐一进行异或计算，并将得到的结果（4byte）存储在数据包内校验位，c 风格的示例代码如下：

unsigned long 是一个 32bit 的类型，也就是拥有存储 4byte 的空间，系统中使用的数据格式为每 4 个 byte 为一组，存储在一个 32bit 的数据类型内。

float data[16]; // 需要向 data 中填充 16 个数据

```

Union convert{
    float value;
    unsigned long bytes;
} c;
unsigned long computeCheckData(unsigned long data[]){
    unsigned long checksum = 0
    for (int i=0; i<sizeof(data)/sizeof(unsigned long); i++)
    {
        c.value = data[i];
        checksum = checksum ^ c.bytes;
    }
    return checksum;
}
    
```

二、 滤波

本系统在接收到来自传感器的模拟信号后，对模拟信号进行滤波。使用的滤波算法综合了算数平均滤波法与限幅滤波法。具体的做法为：

第一步 算数平均滤波法：首先建立一个长度为常数 N 的数组，在每次收到新数据时，将数组的所有数据向前移动 1（数组的第 1 个数据会被丢弃），并将新数据写入数组的最后 1 个数据，此时对数组所有数据求和再除以数组长度 N，返回得到的商即为滤波后的结果。算数平均滤波法可以克服围绕有效数据

随机产生的干扰。

第二步 限幅滤波法：为了防止偶然因素引起的较大干扰，需要对算数平均滤波法得到的结果再次进行限幅。具体做法是设定一个常数阈值并判断上一帧数据与本次算数平均滤波法得到的数据之差是否大于阈值，只有大于阈值的数据会被认为是有效数据，否则继续采用上一帧的旧数据。c 风格的示例代码如下：

```
const int bufferSize = 10; // 算数平均滤波所用数组大小
const int amplitudeLimit = 3; // 限幅滤波所用的幅度
int DataBuffer[bufferSize]; // 为算数平均滤波存储数据的数组
// Filter 函数即为算数平均滤波函数
int Filter(int fBuffer[], int value){
int i;
int fSum = 0;
for (i=0;i<bufferSize-1;i++)
{
    fBuffer[i] = fBuffer[i+1];
    fSum += fBuffer[i];
}
fBuffer[bufferSize-1] = value;
fSum += fBuffer[bufferSize-1];
return (int)(fSum/bufferSize);
}
int newValue = analogRead(A0); // 从单片机的 A0 针脚读取模拟信号
newValue = Filter(DataBuffer, newValue); // 对读取的新数据算数平均滤波
// 进行限幅滤波
if ( abs(oldValue - newValue) < amplitudeLimit ) newValue = oldValue;
... // 使用滤波后的 newValue 进行后续操作
```

三、 预计算

之前表 4 所表示的内容为各编码器在数据包中的表示方法，其中包括了数据的取值范围。预计算的目的是将收到的传感器输入参数数据转换为目标数据的参数形式（如角度、长度等），再封装到数据包内发送给计算机。统一化在数据包中的取值范围内，各传感器的输入与输出参数形式如表 7 所示。

表 7 系统中使用传感器的输入与输出参数形式

传感器	输入参数形式	输出参数形式
旋转编码器 B(80000 PPR)	long (有符号长整形) 80000 脉冲每 360°	角度
旋转编码器 A(1600 PPR)	long (有符号长整形) 80000 脉冲每 360°	角度
操纵杆	int (整形) 0~1024	长度 (归一化)
直线位移传感器	int (整形) 0~1024	长度 (归一化)
滑动/旋转电位器	int (整形) 0~1024	长度 (归一化)
按钮	int (整形) 0 1024	布尔 (0 1)

c 风格的示例代码如下:

```
// 数据变量声明
long dataRotaryB, dataRotaryA;
int dataPotentiometer;
// 数据获取... (此处略)
// 数据预计算
float readyRotaryB, readyRotaryA, readyPotentiometer;
readyRotaryB = dataRotaryB/(float)80000*360;
readyRotaryA = dataRotaryA/(float)1600*360;
readyPotentiometer = dataPotentiometer/(float)1024;
```

四、 数据封装

将数据写入串口的工作，由 Arduino 内置的 Serial 库完成。以下是一个数据包封装的过程：

```
// 数据包与起始于结束标志
unsigned long startID = 0x48494E45;
unsigned long endID = 0x40524159;
unsigned long checkData = 0;
// 写入起始标志
Serial.write( (byte*)& startID, sizeof(unsigned long));
// 写入数据
Serial.write( (byte*)& data, sizeof(data));
// 计算并写入校验数据
checkData = computeCheckData();
Serial.write( (byte*)& checkData, sizeof(unsigned long) );
// 写入结束标志
Serial.write( (byte*)& endID, sizeof(unsigned long) );
```

第六节 三维软件插件模块

根据第三章对本系统软件部分的设计,本小节描述了系统对各功能需求的具体实现。本插件是 Unreal 引擎的插件,因此代码由 Unreal 支持的 C++语言实现。

一、 插件结构设计

插件总共设计了 6 个类,它们之间的关系如图 41 所示。系统中 Unreal 插件的英文名暂定为 Camera Movement System,缩写为 CMS,因此使用 CMS 作为各个类命名的前缀,下面介绍每个类的功能。

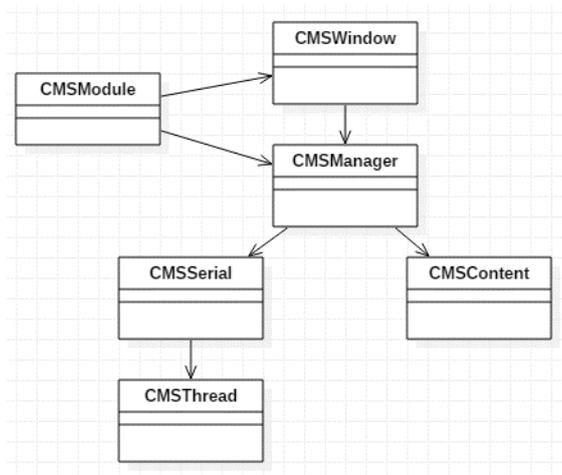


图 41 插件 UML 类图

1. CMSModule

CMSModule 是整个插件的入口,它负责向 Unreal 注册这个插件、向 Unreal Editor 添加打开用户界面 CMSWindow 的菜单项、以及启动新线程 CMSThread、初始化 CMS 管理模块 CMSManager。

2. CMSWindow

CMSWindow 负责插件的用户界面功能,包括创建窗口以及窗口功能控件、接收并处理用户操作。

3. CMSManager

CMSManager 是插件的核心功能类,负责记录存储插件的有关状态,响应来自用户界面的有关操作,管理串口模块 CMSSerial 以及资产内容模块 CMSContent。

4. CMSSerial

CMSSerial 负责插件中有关串口通信的功能,包括打开、关闭串口,从串口

读取数据流，解析、校验读取的数据并提供给其他类使用。其中打开、关闭、读取数据通过线程处理类 `CMSThread` 完成。

5. `CMSThread`

本系统对于数据的刷新频率、刷新稳定性有较高的要求，必须向用户提供尽量好的即时响应效果，试想如果导演、摄影师等用户在操作硬件云台之后，需要等待一段时间才能在屏幕上得到反馈，本系统的体验会非常差。

插件需要使用一个独立的线程来进行串口数据的接收与解析，而不是将数据刷新直接依附于引擎提供的游戏线程来完成（例如通过引擎提供的每帧调用的 `Tick` 函数）。因为，引擎渲染帧率并不稳定，在渲染较为复杂的场景、或机器配置较低的情况下渲染帧率会很低，此时数据刷新会收到很大影响，会出现例如数据接收卡死、延迟较大等等问题。

`CMSThread` 负责线程有关操作，包括启动、挂起、结束线程等等。

6. `CMSContent`

`CMSContent` 负责管理插件提供的摄影器材虚拟资产，包括资产的导入、驱动等等。

二、 用户界面实现

系统的用户界面由 `CMSWindow` 类负责，基于 Unreal 的 Slate 框架实现。主要分为三大区块：串口控制区、接收数据显示区与虚拟资产导入与绑定区。如图 42 所示。

串口控制区接收用户输入的串口端口号以及波特率，并负责打开与关闭串口，界面上的 `Open Serial` 按钮在串口打开后会变为 `Close Serial`。

接收数据显示区用于向用户显示当前接收到的串口数据，并在下方提示每个数据的字母编号，方便用户绑定给不同的虚拟资产。

虚拟资产导入与绑定区显示了当前系统包含的虚拟摄影器材种类，并提供 `Import` 按钮方便用户导入。在每种虚拟摄影器材旁也列有该虚拟摄影器材可操作的轴向，用户可以选择是否启用该运动轴向，以及根据字母编号选择每组运动轴向由哪个数据控制。界面所提供的默认值即为本系统推荐使用的参数设置。

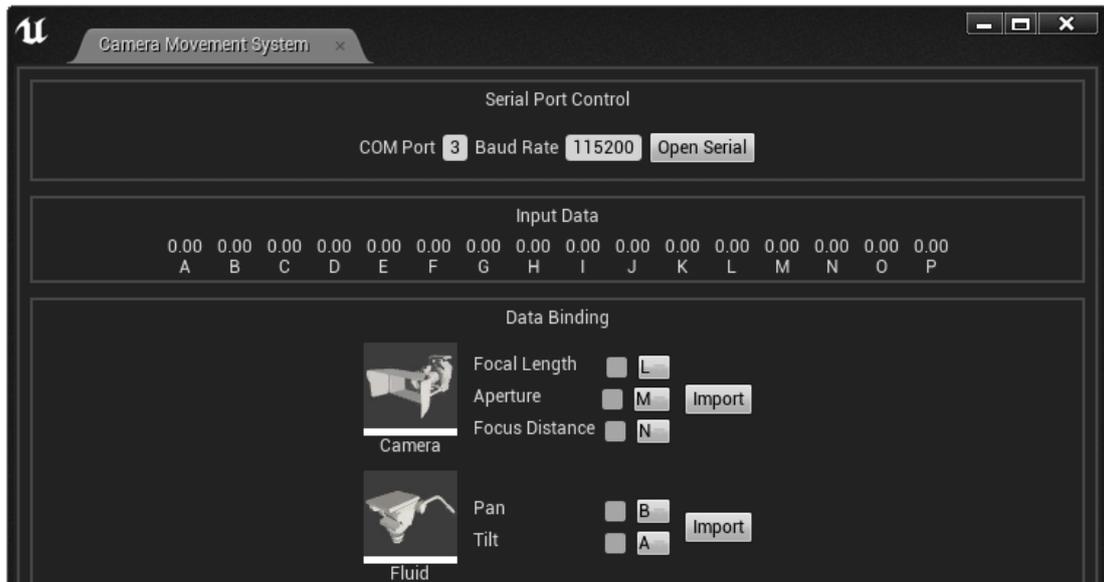


图 42 系统在 Unreal Engine 4 引擎中的插件界面

三、 串口数据的接收、解析与校验

CMSSerial 与 CMSThread 类负责实现串口数据的接收与解析功能，具体的数据接收、解析与校验流程如图 43 所示。

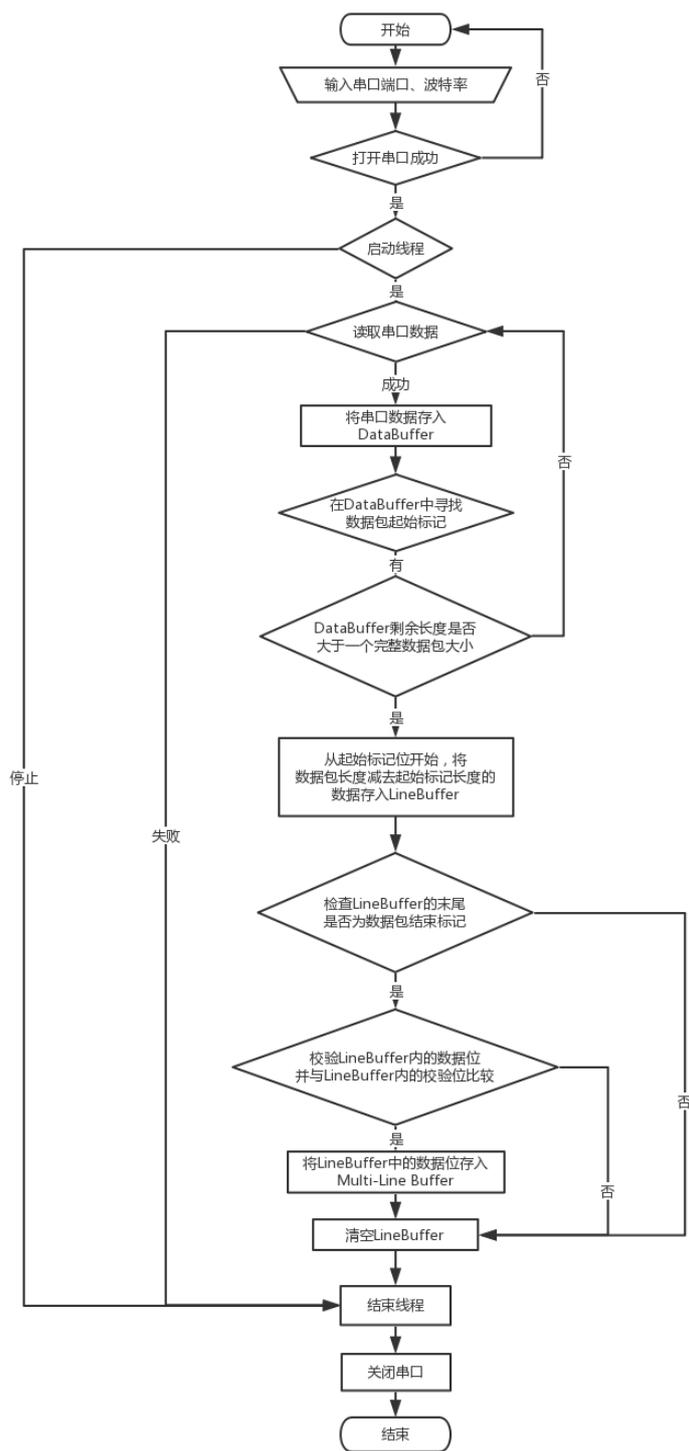


图 43 串口数据接收、解析与校验流程图

四、 电影摄影器材虚拟模型资产导入

虚拟资产导入由 CMSContent 类负责，导入后向 CMSManager 类注册当前导入的资产。每一种虚拟模型资产都是一个在 Unreal 进行过绑定的蓝图类，导入

后 CMSManager 即可通过该蓝图类提供的接口对虚拟模型资产的运动状态进行管理。

五、 传感器参数与虚拟摄影器材的绑定

传感器参数与虚拟摄影器材的绑定由 CMSManager 类负责。CMSWindow 为界面上不同按钮设置的回调函数由 CMSManager 响应，因此传感器参数与虚拟摄影器材的绑定关系由 CMSManager 存储并维护。每一个被导入的虚拟摄影器材的蓝图类会在自己的 Tick 函数中向 CMSManager 请求有关自身的运动数据情况，CMSManager 只需要根据虚拟摄影器材的蓝图类的注册数据、从 CMSWindow 界面处得到的绑定关系，以及从 CMSSerial 处获得的当前串口数据，为虚拟摄影器材的蓝图类返回对应的数据即可。

六、 以第三人称视角与摄影机视角观察场景

此功能的实现利用了 Unreal 引擎提供的多玩家功能，将分屏模式设置为水平分屏，并多创建一个玩家。其中一个玩家显示画面是用键盘鼠标操作的第三人称视角来观察场景，另一个玩家的显示画面为被虚拟摄影器材控制的相机视角。这样设置后，用户即可同时通过分屏看到第三人称视角以及摄影机视角观察到的场景。

结语

第一节 总结

本论文对电影摄影以及摄影器材仿真进行了研究，并设计实现了一个电影摄影仿真系统原型。用户可以通过操作本系统提供的硬件器材模型，以符合用户以往操作习惯的方式操作计算机虚拟环境下的虚拟摄影机以及其他虚拟摄影器材，在镜头运动设计阶段以更直观的方式探索理想的镜头运动轨迹，从而得到更好的拍摄画面。

本论文所做的主要工作有：

- 1) 对电影摄影器材的相关品牌、使用情况、运动方式进行了调研。
- 2) 对电影摄影仿真系统的相关需求进行分析、并设计系统总体结构。
- 3) 完成了硬件仿真设备的原型制作。
- 4) 进行了数据通信接口的设计。
- 5) 完成了 Unreal 引擎中插件的开发，实现了系统需要的基础功能。

第二节 展望

一、目前的不足与改进设想

目前本系统仍然处在原型阶段，硬件设备与软件插件方面还有很多需要改进的地方。

1. 在硬件设备方面

- 1) 采用更高精度的传感器会得到更好的效果，增加传感器的种类也可以丰富系统的操作形式。
- 2) 整体硬件设备的设计可以考虑使用金属、塑料等更稳定的结构取代现在的纸箱方案，使得硬件模块更完整。
- 3) 硬件设备与电脑的通信方式，目前只支持 USB 数据线的连接方式，可以考虑增加对蓝牙、wifi 等无线通信方式的支持。
- 4) 硬件设备目前缺乏能够量化的性能描述性指标，需要进行相关测试研究。

2. 在三维软件插件方面

- 1) 目前系统提供了一套虚拟摄影器材数字资产，考虑到用户的特殊性，

应该为用户导入自定义虚拟摄影器材数字资产提供支持。

- 2) 如果用户在界面上修改了不同虚拟资产与接入数据的绑定关系，以及串口的参数等等，在关闭 Unreal 并再次打开时这些数据会恢复默认值，应该提供用户偏好数据的保存功能。
- 3) 目前虚拟摄影器材数字资产每种只能向场景中导入一个实例，应当为用户提供导入多重实例的支持，并在插件界面上显示便于用户管理。
- 4) 为了管理用户设计的每一条镜头运动数据，应当设计数据库功能，用于数据存储与管理，以使用户在录制每一条镜头后可以添加元数据标记，随时回放查看，以及导出录制的元数据等等。
- 5) 目前本系统使用串口作为数据的通信方式，但是在操作系统中，串口端口只能同时被一个进程所使用。目前本系统只支持 Unreal 引擎这一个三维软件，如果想在未来添加对更多三维软件的支持，最好能够同时将数据发送给不同的三维软件。因此，最好将本系统的核心功能开发为独立的程序，独立的程序读入串口数据、解析校验完成后可以通过 Socket 将数据同时提供给不同的软件，此时根据需求再在不同三维软件例如 Unreal、Unity、Maya 中开发功能较为轻量级的数据接入以及资产驱动插件即可。

二、 未来的发展与应用

1. 发展

本系统的核心设计目标，是为三维软件中的虚拟摄影机提供更加用户友好的操作方式。为了更好的满足用户的需求，本系统扩展的主要方向即为，在硬件方面逐渐支持更多的电影摄影器材的操作方式，以及在软件方面逐渐支持更多的三维软件。

2. 应用

由于本系统的硬件设备具备与真实电影摄影器材相近的操作方式、较低的成本，因此本系统也可以作为电影摄影的教学工具使用，例如在实践操作中不易掌握的齿轮云台，就可以通过本系统设计专门的方案在虚拟三维世界中以低成本的方式练习。

参考文献

- [1] 邓琨. 电影的形象化预审视[J]. 影视技术, 2005(10): 9–12.
- [2] 黄贤武. 传感器原理与应用[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2004, 1–2.
- [3] Rotary encoder[J]. Wikipedia, 2017.
- [4] 魏新亮, 孙伟. 三维图形引擎综述[J]. 计算机科学与应用, 2015, 05: 297.
- [5] Unreal Engine[J]. Wikipedia, 2017.
- [6] Unity (game engine)[J]. Wikipedia, 2017.
- [7] Autodesk Maya[J]. Wikipedia, 2017.
- [8] 朱梁. 电影《阿凡达》的数字立体和虚拟摄影技术[J]. 现代电影技术, 2010(02): 34–37.
- [9] 郭蕴辉. 电影虚拟化制作和预演技术研究[D]. 北京电影学院, 2014.
- [10] 刘戈三, 王春水, 郭蕴辉. 电影虚拟化制作中预演技术的研究与应用探讨[J]. 现代电影技术, 2016(02): 19–27+51.
- [11] 师一鑫. 电影虚拟化制作中支持多平台的接口研究和开发[D]. 北京电影学院, 2016.
- [12] 方荣国. 电影虚拟拍摄技术发展探析[J]. 现代电影技术, 2015(07): 16–26.
- [13] 耿鹏飞. 三维游戏引擎技术在影视美术创作中的应用研究[J]. 艺术科技, 2015(07): 289+297.
- [14] 陈长虎. 摄影仿真实验系统的设计与开发[D]. 曲阜师范大学, 2007.
- [15] 王亦克. 同步高速摄影控制器的设计与仿真[D]. 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2002.
- [16] 刘进. 先进的摄影机运动控制系统[J]. 影视技术, 2004(05): 7–11.
- [17] 赵真. 虚拟摄影和虚拟摄影照相机[J]. 浙江工艺美术, 2000(Z1): 49–50.
- [18] HUEBEL R S. An Extensible System For Physically-based Virtual Camera Control Using Rotational Motion Capture[D]. Texas A&M University, 2014.
- [19] 米歇尔·麦克罗伯茨. Arduino 从基础到实践[M]. 杨继志, 译, 郭敬, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [20] Arduino - Home[EB/OL]. [2017-02-21]. <https://www.arduino.cc/>.
- [21] Autodesk, Lightstorm Entertainment and Weta Digital Drive Virtual Production Forward | Business Wire[EB/OL]. (2012-08-07)[2016-12-20]. <http://www.businesswire.com/news/home/20120807005518/en/Autodesk-Lightstorm-Entertainment-Weta-Digital-Drive-Virtual>.

-
- [22]TENMOKU R, SHIBATA F, TAMURA H. Constructing action scenes for mixed reality previsualization[C]//ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Sketches. ACM, 2009: 37.
- [23]NORTHAM L, KAPLAN S C. Designing a Real Time Visualization Tool for Previsualization and Virtual Production of Film and Games[J]. University of Waterloo, 2012.
- [24]NITSCHKE M. Experiments in the Use of Game Technology for Pre-visualization[C]//Proceedings of the 2008 Conference on Future Play: Research, Play, Share. New York, NY, USA: ACM, 2008: 160–165.
- [25]FrameForge 3D Studio[J]. Wikipedia, 2016.
- [26]Idea Editing: Previsualization for Feature Films[EB/OL]. [2017-01-11]. <http://www.stagetools.com/previs.htm>.
- [27]ICHIKARI R, KAWANO K, KIMURA A 等. Mixed reality pre-visualization and camera-work authoring in filmmaking[C]//2006 IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. 2006: 239–240.
- [28]ICHIKARI R, TENMOKU R, SHIBATA F 等. Mixed reality pre-visualization for filmmaking: On-set camera-work authoring and action rehearsal[J]. Int. J. Virtual Reality, 2008, 7(4): 25–32.
- [29]ncam | Ncam homepage[EB/OL]. [2017-01-11]. <http://www.ncam-tech.com/>.
- [30]PREVIS SOCIETY ASIA[EB/OL]. [2017-01-13]. <http://www.previsocietyasia.org>.
- [31]Previsualization[J]. Wikipedia, 2016.
- [32]NORTHAM L, ISTEAD J, KAPLAN C S. RTFX: On-set Previs with Unrealengine3[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Entertainment Computing. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011: 432–435.
- [33]GOUCHET X, QUITTARD R, SERIKOFF N. SCP camera.[C]//SIGGRAPH Emerging Technologies. 2007: 16.
- [34]Serial port[J]. Wikipedia, 2017.
- [35]MORI S, SHIBATA F, KIMURA A 等. Stereo Camera Tracking for Mixed Reality-Based PreViz of Stereoscopic 3D Cinema Using ICP Algorithm.[C]//MVA. 2013: 391–394.
- [36]AUTODESK. The New Art of Virtual Movie Making[J]. 2010.
- [37]VICON. Virtual Camera[EB/OL]. VICON, [2017-01-11]. <http://www.vicon.com/products/vicon-devices/virtual-camera>.

-
- [38]CHRISTIE M, MACHAP R, NORMAND J-M 等. Virtual camera planning: A survey[C]//International Symposium on Smart Graphics. Springer, 2005: 40–52.
- [39]孙略. VR、AR 与电影[J]. 北京电影学院学报, 2016(03): 13–21.

致 谢

三年的时光转瞬即逝，硕士研究生学习生涯即将结束。在这三年的美好时光中，跟随影视技术系的老师们参与课题、实践，学到了许多以前没有觉得我会掌握的知识。

首先特别感激我的导师刘戈三老师，您对我们的严格要求、鞭策与鼓励一直是我们前进的宝贵动力；您对学术与专业的严谨与热爱一直深深的激励着我们去努力做好自己的工作。这些都是我在今后的工作、学习中宝贵经验财富，将指导着我继续前进。

十分感陈军老师、朱梁老师、王春水老师和曾志刚老师，这几位老师在我研究生的学习阶段，对我的专业学习、生活提供了无私的帮助和悉心的教导。

感谢李铭老师、孙略老师、顾晓娟老师、李勃老师和赵建军老师在我研究生三年期间对我的指导与帮助，感谢刘健胜老师和晁凤刚老师三年来对我的学习和生活上的照顾，感谢季天奇老师、孔明敏老师、赵闪闪老师和李雪松老师在我毕设研究实践和论文期间的大力帮助。

感谢 14 级的同学们，感谢戴骏、张文军、秦芸茜、齐晴、王茜、周文、李雪君和徐志涛同学，感谢能够与你们一起度过这三年的学习时光。感谢影视技术系的师一鑫、仇飞、焦垚楠、吴嘉宝等师哥师姐、师弟师妹在平常的学习和生活上的互相帮助。

最后感谢家人对我学业和生活上的支持，感谢你们对我的理解和宽容。

作者攻读学位期间发表的学术论文目录

《欧拉滤波在摄影机运动控制系统轨迹规划中的应用研究》发表于《现代电影技术》杂志，2017，（2），33-38页，第一作者。