



西北工业大学

本科毕业设计论文

题 目

集群无人机协同 SLAM

专业名称 飞行器控制与信息工程

学生姓名 刘昭宏

指导教师 布树辉

毕业时间 2022 年 6 月

摘 要

无人机因其续航能力强，成本低廉，无人员伤亡等载人飞行器不可比拟的优势，已成为目前的研究热点。本文通过 FlightGear 搭建飞行仿真平台，研究四旋翼无人机的飞行控制系统，从而提高飞行控制系统的鲁棒性。

首先，本文进行四旋翼无人机六自由度非线性飞行动力学建模。在建模过程中，本文分别从运动学角度与力学角度两方面进行考虑。在运动学方程推导过程中，基于坐标系变换的理论基础，采用四元数法对旋转矩阵进行转换，从而建立运动学方程。在力学方程推导过程中，基于四旋翼的力学特性，不考虑四旋翼的空气动力学特性，建立六自由度非线性方程组。在模型求解的过程中，基于小扰动假设，对非线性方程进行线性化，从而求解模型。

然后，本文进行仿真平台的搭建，基于 FlightGear 建立三维视景仿真系统，进行半物理仿真。本文利用 C++ 编程实现飞行摇杆 Joystick 数据读取，将读取数据通过 UDP 编程实现对 FlightGear 通信，从而进行飞行姿态的控制。在仿真平台搭建中，三维可视化的研究是非常重要的环节，可以对无人机的运动状态及总体结构进行直观显示，从而实现实时显示无人机的飞行位置及姿态变化的效果，增加飞行仿真的真实性。飞行仿真实验平台对飞行器测试研究工作有重要的作用，不仅可以总结飞机的飞行规律，而且能够对飞机的性能进行评估，从而降低试飞的风险和成本，提高飞行的安全性。

最后，本文在搭建的仿真平台上，进行飞行仿真效果的模拟。在模拟过程中，需要对 FlightGear 软件进行配置。要对飞行器模型及飞行环境等进行部署，完成飞行器模型部署后，便可以驱动模型进行模拟飞行。同时，本文还对四旋翼飞行控制模型进行改善，提出采取基于视觉的飞行控制思想的可行性，从而减弱人在整个控制系统中的角色，减弱人的干预，实现自主飞行。

关键词：六自由度飞控模型，四元数法，三维视景仿真系统，半物理仿真

ABSTRACT

Due to endurance UAV capability, low cost, no casualties incomparable advantages of manned spacecraft Potential, it has become a hot topic. By building FlightGear flight simulation platform to study four spin wing UAV flight control system, thereby improving the robustness of the flight control system.

First, this paper four-rotor UAV six degrees of freedom nonlinear flight dynamics modeling. In this paper are considered from the perspective of the kinematics and mechanical point of two ways. In the kinematic equations derivation, based on the theoretical basis of coordinate transformation, using quaternion rotation matrix conversion, in order to establish Kinematic equations. In mechanics equation derivation, based on the mechanical properties of four rotors, irrespective of four rotors Aerodynamic characteristics, the establishment of six degrees of freedom nonlinear equations. In the process of solving the model, based on the small disturbance Move assumptions, the nonlinear equation linearization, thereby solving the model.

Then, this paper build simulation platform, the establishment of three-dimensional visual simulation system based on FlightGear,Semi-physical simulation. In this paper, the use of C ++ programming Joystick Joystick data read. According to FlightGear programming through UDP communications, thereby performing flight attitude control. In the simulation platform To build the three-dimensional visualization of research is a very important part, you can exercise status and overall UAV Structure for visual display, enabling real-time display of UAV flight position and attitude change effects, increasing .Plus flight simulation authenticity. Flight simulation platform for vehicle test research has an important role,Not only the law can be summarized fly the aircraft, but also be able to assess the performance of the aircraft, reducing flight Risks and costs, improve flight safety.

Finally, on building simulation platform, simulated flight simulation effects. During the simulation,FlightGear software needs to be configured. Meanwhile, the paper also four-rotor flight. Improved control model is proposed to take feasibility flight control based on visual thinking, thus weakening people.The role of the entire control system,

reduced human intervention to achieve autonomous flight.

Key Words: Flight control model, Quaternion, Three-dimensional visual simulation system, Loop simulation

目录

第一章 绪论	4
1.1 研究背景	4
1.2 研究内容及论文结构	4
第二章 ROS 与 PX4 介绍	6
2.1 ROS 介绍	6
2.1.1 ROS 的消息机制	6
2.1.2 gazebo 仿真	7
2.1.2.1 惯性坐标系 R^i	7
2.1.2.2 速度坐标系 R^v	7
2.2 PX4 AutoPilot	8
2.2.1 FailSafe 机制	9
2.2.2 EKF 与飞行模式	9
2.2.3 联合 MAVROS 的 Offboard 模式	9
第三章 SLAM 系统设计	10
3.1 SLAM 系统	10
3.1.1 SLAM 的分类	10
3.1.2 相机参数及成像原理	10
3.1.3 视觉 SLAM 的基本步骤	10
3.2 ORB-SLAM2	10
3.2.1 ORB 特征点及描述子	10
3.2.2 ORB-SLAM2 的主要进程	10
3.3 CCM-SLAM	10
3.3.1 CCM-SLAM 的结构	10
3.3.2 Client 与 Server 机制	10
3.4 多机协同及地图融合方案	10
3.4.1 算法原理	10
3.4.2 编程实现	10
第四章 多无人机 SLAM 仿真	11
4.1 gazebo 仿真环境配置	11
4.1.1 场景	11
4.1.2 launch 文件	11
4.2 单机 SLAM 仿真	11
4.2.1 EKF 设置及启动仿真	11
4.2.2 视觉定位的坐标变换	11
4.3 多机 SLAM 仿真	11

第五章 实验与评估	12
第六章 总结与展望	13
6.1 全文总结	13
6.2 对未来工作的展望	14
参考文献	15
致谢	16
毕业设计小结	17

第一章 绪论

1.1 研究背景

无人驾驶飞机 (Unmanned Aerial Vehicle) 是无人飞行器的一种, 简称无人机 (UAV), 它是由机体内部的飞行控制系统自主控制飞行任务, 或者由飞机外控制器通过传送指令完成特定飞行任务的飞行器。飞行器内部无驾驶舱, 但是由飞行动力装置, 自动驾驶仪及程序控制装置组成。

随着科学技术的发展, 无人机也能够完成以往只能由载人飞行器完成的任务, 同时, 无人机因其续航能力强, 成本低廉, 无人员伤亡等具备的载人飞行器不可比拟的优势, 从而使无人机得到了广泛的应用。在军事方面, 无人机除了可以完成电子干扰, 对敌侦查, 无线电中继等常规任务外, 在危险恶劣的环境下, 无人机还可以携带武器, 例如: 无人直升机不仅具备了直升机的共同优势, 同时, 因其垂直起降, 自主悬停等独特的优点, 无人直升机更适合在狭小的空间内进行飞行任务, 在军事方面被广泛的应用在前沿阵地, 舰船等狭窄的场地内起降, 完成侦察敌情, 勘测等任务^[1]。

在民用方面, 无人机不仅可以应用到航拍技术, 地形勘测, 同时, 还可以被用于抢险救灾, 农业森林等方面。在很多载人飞行器无法直接操纵的环境中, 无人机基于自身独特的优势, 在地震抢险救灾, 室内勘测等方面, 常常担任空中机器人的角色。比如, 新型的小型无人机因其成本低廉, 结构简单, 形状新颖, 性能卓越以及独特的飞行控制方式^[2], 特别适合执行各种近地面环境的特殊任务。

1.2 研究内容及论文结构

本文研究目的是希望通过搭建飞行仿真平台, 研究四旋翼无人机和固定翼无人机的飞行运动状态与姿态, 从而提高飞行控制模型的鲁棒性。但是, 现有的飞行仿真平台一般基于数值形态的计算, 并不能够完全提供真实的三维视景仿真系统, 从而不能够全面的反映出飞行控制系统的缺陷, 具有一定的局限性。因此, 本文基于开源的 FlightGear 飞行模拟软件, 提供三维视景仿真系统, 对飞机的飞行参数进行实时显示, 同时, 结合 C++ 编程实现飞行摇杆设备对无人机飞行控制, 直观真实的模拟飞行过程, 有利于发现飞行控制系统的缺陷, 从而使飞行仿真更加逼近真实的飞行情况。

在仿真平台搭建中, 三维可视化的研究是非常重要的环节, 可以对无人机的运动状态及总体结构进行直观显示^[3], 从而实现实时显示无人机的飞行位置及姿态变化的效果, 增加飞行仿真的真实性。飞行仿真实验平台对飞行器测试研究工作有重要的作用, 不仅可以总结飞机的飞行规律, 而且能够对飞机的性能进行评估, 从而降低试飞的风险和成本, 提高飞行的安全性。

基于以上内容, 本文的论文结构主要由六部分组成, 如图1-1所示。



图 1-1 论文结构

第一章：主要介绍问题提出的研究背景，研究内容及研究目的，从宏观的角度对本文进行概括，对问题进行概述。

第二章：推导四旋翼无人机坐标系变换公式与介绍 FlightGear 软件基础，概述 FlightGear 软件的运作流程。

第六章：总结建模过程中的创新点与改进之处，提出进一步研究的方向与进度，对未来的研究工作提出展望。

第二章 ROS 与 PX4 介绍

2.1 ROS 介绍

本文这一节主要介绍用于描述飞机姿态位置的坐标系与坐标系之间的转换，用来推导四旋翼飞控建模过程中需要用的旋转矩阵与转换方程。飞机的姿态描述需要利用各种坐标系表示的原因如下：

1. 空气动力学的力和力矩是在机体坐标系下表示的。
2. 牛顿运动方程利用四元数法来表示，需要指明相关的坐标系。
3. 在机体坐标系下，飞机传感器读取飞机姿态参数信息，比如加速度；相反，飞机上 GPS 系统读取的飞机位置姿态参数需要在惯性坐标系下（即地面坐标系）。
4. 大多数情况下，需要在惯性坐标系下，对飞机的飞行轨迹进行描述。另外，地图所采用的位置坐标也是在惯性坐标系下表示的。

要想完成一个坐标系到另一个坐标系之间的转换，需要完成两个步骤，一个是旋转，另一个是转换。在本章的2.1.1节部分用来描述坐标旋转矩阵和旋转矩阵应用于坐标系变化；在本章的2.1.2节部分用来介绍在四旋翼无人机系统下所采用的特定坐标系，推导四旋翼旋转矩阵表达式；在本章的??节部分用来推导坐标系转换过程中转换关系，即 Corlios 方程。最终，推导完成坐标系转换过程的两个步骤：旋转和转换。

2.1.1 ROS 的消息机制

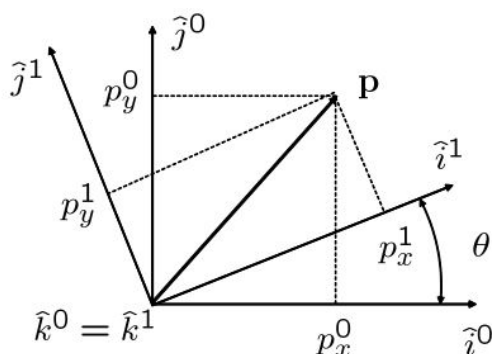


图 2-1 坐标系二维旋转

如图2-1所示，向量 \mathbf{p} 即在坐标系 R^0 下同时还在坐标系 R^1 下， R^0 坐标系与 R^1 坐标系的坐标原点相同，故向量 \mathbf{p} 从坐标系 R^0 到坐标系 R^1 的旋转，属于二维

空间的旋转。在坐标系 R^0 下, 单位向量用 $(\hat{i}^0, \hat{j}^0, \hat{k}^0)$ 表示, 在坐标系 R^1 下, 单位向量用 $(\hat{i}^1, \hat{j}^1, \hat{k}^1)$ 表示。在坐标系 R^0 下, 向量 \mathbf{p} 可以表示为:

$$\mathbf{p} = p_x^0 \hat{i}^0 + p_y^0 \hat{j}^0 + p_z^0 \hat{k}^0 \quad (2-1)$$

同样, 在坐标系 R^1 下, 向量 \mathbf{p} 可以表示为:

$$\mathbf{p} = p_x^1 \hat{i}^1 + p_y^1 \hat{j}^1 + p_z^1 \hat{k}^1 \quad (2-2)$$

联立上面两式, 可以得到如下的关系:

$$p_x^1 \hat{i}^1 + p_y^1 \hat{j}^1 + p_z^1 \hat{k}^1 = p_x^0 \hat{i}^0 + p_y^0 \hat{j}^0 + p_z^0 \hat{k}^0 \quad (2-3)$$

2.1.2 gazebo 仿真

在四旋翼飞行控制时, 需要实现不同坐标系之间的转换, 下面介绍常用的坐标系。

2.1.2.1 惯性坐标系 R^i

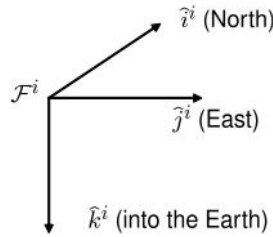


图 2-2 惯性坐标系

惯性坐标系是指坐标原点位于地心, 如图2-2所示, 向量 \hat{i} 指向北, 向量 \hat{j} 指向东, 向量 \hat{k} 指向地心。

2.1.2.2 速度坐标系 R^v

在这一节, 本文打算推导 Coriolis 数学关系式为后面飞控动力学关系作铺垫, Coriolis 公式在坐标系变换过程中, 起到非常重要的作用。假设, 我们有两个坐标系, 机体坐标系 R^b 和惯性坐标系 R^i , 如图?? 所示, 向量 \mathbf{p} 相对坐标系 R^i 的运动, 可以分解为两个运动, 即: 有向量 \mathbf{p} 随着机体坐标系 R^b 的平动, 和向量 \mathbf{p} 相对 R^i 坐标系转动。

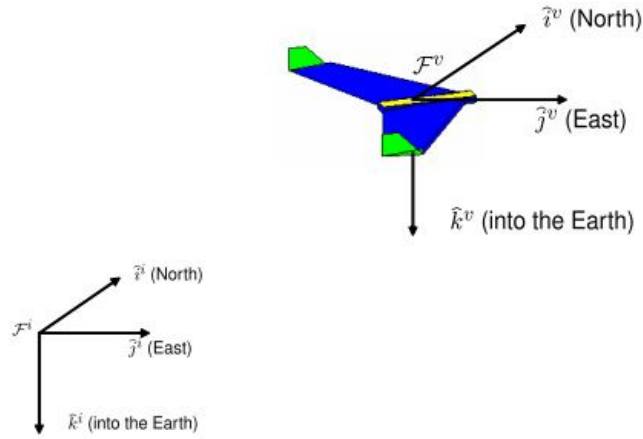


图 2-3 速度坐标系

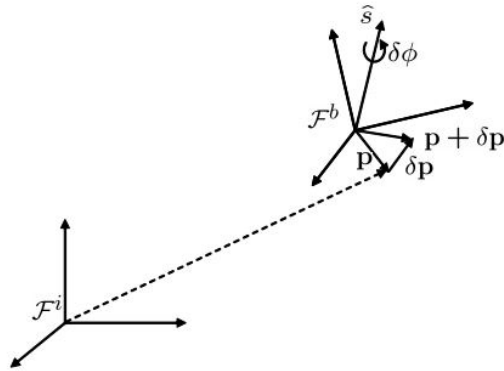


图 2-4 Coriolis 公式推导图

2.2 PX4 AutoPilot

本文将飞行摇杆 (Joystick) 数据读取作为四旋翼飞控模型的输入, Joystick 数据的数据主要是四旋翼的姿态角 (滚转角, 偏航角, 俯仰角) 和四旋翼的推力。因此, 本文通过 C++ 编程, 实现飞行摇杆数据的输入。由如下代码所示:

```
class HAL_JoyStick: public ZY::Thread {
public:
    HAL_JoyStick() {
        m_devID = -1;
    }
    HAL_JoyStick(int dev) {
        m_devID=dev;
    }
    virtual ~HAL_JoyStick() {}
```

```
int open(int devID);
void run();
int close(void);
int read(JS_Val *jsv)
{
    data_mutex.lock();
    *jsv= m_JSVal;
    m_JSVal.dataUpdated = 0;
    data_mutex.unlock();
    return 0;
}
public:
    int      m_devType;
    int      m_devID;
    int      m_devFD;
    char      number_of_axes;
    char      number_of_btns;
protected:
    ZY::Mutex data_mutex;
    JS_Val     m_JSVal;
}
```

2.2.1 FailSafe 机制

2.2.2 EKF 与飞行模式

2.2.3 联合 MAVROS 的 Offboard 模式

第三章 SLAM 系统设计

3.1 SLAM 系统

3.1.1 SLAM 的分类

3.1.2 相机参数及成像原理

3.1.3 视觉 SLAM 的基本步骤

3.2 ORB-SLAM2

3.2.1 ORB 特征点及描述子

3.2.2 ORB-SLAM2 的主要进程

3.3 CCM-SLAM

3.3.1 CCM-SLAM 的结构

3.3.2 Client 与 Server 机制

3.4 多机协同及地图融合方案

3.4.1 算法原理

3.4.2 编程实现

第四章 多无人机 SLAM 仿真

4.1 gazebo 仿真环境配置

4.1.1 场景

4.1.2 launch 文件

4.2 单机 SLAM 仿真

4.2.1 EKF 设置及启动仿真

4.2.2 视觉定位的坐标变换

4.3 多机 SLAM 仿真

第五章 实验与评估

第六章 总结与展望

6.1 全文总结

飞行控制是保证飞机安全飞行的核心部分，是衡量飞机飞行品质的重要指标。飞行控制技术的高低决定了无人机的飞行品质。本文主要研究了四旋翼无人机及固定翼无人机的飞行控制，基于 FlightGear 飞行模拟软件搭建飞行仿真平台，实现半物理仿真。本文主要做的工作如下：

1. 简述飞行控制过程中坐标系转换的原理以及坐标系旋转矩阵公式推导过程。
2. 推导四旋翼旋转矩阵，为六自由度四旋翼飞控模型铺垫。
3. 概述 FlightGear 软件组件，程序框架及软件优势。
4. 进行四旋翼无人机的飞控建模，分为三个方面。第一个方面，是实现飞行摇杆的数据传入过程，对于四旋翼而言，主要是飞行姿态角传入及油门数据读取。第二部分，是建立六自由度非线性的飞行动力学模型，实现 FlightGear 外部飞控模型的实时解算，达到实时控制四旋翼无人机效果。第三部分，是基于 FlightGear 搭建的三维视景仿真系统的介绍。
5. 基于 FlightGear 内部的飞行动力学模型 JSBSim，对固定翼无人机进行控制。其过程同样分为三部分，第一部分与第三部分分别于四旋翼无人机相同，主要是第二部分的飞行动力学模型。本文对 JSBSim 模型进行配置，实现 JSBSim 与飞行摇杆数据之间的接口通信编程。
6. 详细讲述 FlightGear 飞行器驱动的步骤以及系统实施的条件。以四旋翼为对象，从飞行器模型载入到 FlightGear 通信模块的实现最后到 FlightGear 三维视景系统的仿真效果展现。介绍了在 Linux 操作系统下，如何使用 FlightGear 进行半物理仿真的操作步骤。
7. 本文对无人机飞行控制的工作作出了一些展望，尤其是基于视觉的无人机飞行控制，结合 FlightGear 飞行仿真软件，实现功能更为强大的半物理仿真的飞行控制。

6.2 对未来工作的展望

根据本文的分析，可以发现无人机飞行控制技术已经非常成熟，但也存在不少可以改进的地方，基于视觉的无人机飞行控制，可以作为未来研究的重点，概括起来主要有如下几个方面：

1. 可行性。无人机内置水平和竖直两个摄像头，可以完成对无人机所处环境图像的采集，这满足了引入计算机视觉方法的前提条件；
2. 高效性。无人机采集的图像，能够通过无人机内部自建的 wifi 无线网络实时传送至计算机，从而可在计算机上运行视觉处理算法，充分发挥计算机强大的计算能力，实现对有用信息进行解算。这是非常关键的一点，解决了计算机视觉方法数据处理量大，难以利用无人机自带的处理器芯片进行求解的问题；
3. 自主飞行性。无人机在实际飞行时，必须由人实时发出控制信号才能保证其飞行。而我们希望无人机在需要很少的人为引导，甚至是没有人干预的情况下，同样可以安全平稳飞行，即减弱人在整个控制系统中所扮演的角色。利用计算机视觉技术取代人在控制系统中的作用，就显得尤为重要。
4. 通用性。摄像机善于捕捉运动信息，而传统的传感器则较吃力，从应用的角度来看，视觉信号的抗干扰性能很好。此外，视觉导航既适用于室内环境，也适用于室外环境，通用性好。
5. 合理性。无人机设计的完整合理性，使我们不需要考虑其电子元件级的实现、气动布局、力学建模以及电机转速的控制方法，可直接通过对俯仰角、滚转角、偏航角以及竖直方向速度的控制实现对无人机的各种控制，这大大简化了我们的工作，使我们可以专注于无人机与计算机视觉方法的结合。

参考文献

- [1] 于琰平. 基于 FlightGear 的四旋翼无人机三维可视仿真系统研究 [J]. 天津大学, 2010.
- [2] 刘鹏. 基于 FlightGear 的无人直升机飞行仿真技术研究 [J]. 南京航空航天大学, 2011.
- [3] 李海泉. 小型无人机飞行力学建模及虚拟训练平台的建立 [J]. 南京航空航天大学, 2011.

致 谢

首先要感谢我的导师布树辉老师。感谢布老师在整个毕设过程中的耐心指导，感谢布老师在整个论文进展过程中，提供的文献资料和实验平台，感谢布老师在整个毕设过程中的宝贵意见。与布老师交流过程中，不断的加深对问题的理解与认识，不断的提高自己解决问题的能力。对于很多女同学而言，并不会去选择编程方向作为自己的毕设，我只是因为一时的兴趣才去选择了它。回想起来，自己从一月份的一无所知到三月份的懵懵懂懂再到如今六月份的豁然开朗，从开始的压力山大到中途的排斥抵触再到现在的一往无前，在布老师的悉心教导下，让我懂得科研的路途毕竟是曲折而坎坷的，需要一份对待科研的严谨与热情，去迎风破浪，最终，必会柳岸花明。

同时要感谢教研室的赵勇师兄，在坐标系变换的编程实践中，赵勇师兄提供的四元数算法，让问题瞬间豁然开朗，感谢赵勇师兄的不吝赐教。感谢韩鹏程，程少光，王磊师兄，在我代码调试过程中，悉心的指导，在我压力很大的时候，热心的开导，分享他们的科研经历，感谢你们的鼓励与支持，让我可以一步一步慢慢的成长。

另外要感谢 Curt Olson 等飞行爱好者们，是他们创造了 FlightGear 这个功能强大的开源的飞行模拟软件；感谢为 Linux 贡献代码的程序员们，这个自由免费的平台为我完成毕设提供了不少便利；感谢清华大学王磊博士，他创作的 L^AT_EX 模板使我的论文的排版得以顺利完成。

最后感谢我的家人对我一如既往的关心和支持，感谢我的男朋友对我一如既往的支持与鼓励。

毕业设计小结

本次毕业设计不仅仅是对我大学四年来学习知识的一个总结，更是对我知识学习能力一次拓展与提高的过程。本次毕设主要以四旋翼无人机飞行控制为核心，学习了如何通过 C++ 编程实现坐标系的转换，旋转矩阵的运算。实践了通过编程实现半物理仿真的过程，以及提高了如何将数学公式转换为编程语言的能力。同时，了解了 FlightGear 飞行模拟软件的通信过程，学习如何实现 UDP 的通信编程。因为 FlightGear 是一款功能强大的开源软件，更适合在 Linux 操作系统下进行使用，所以，学习了如何在 Linux 操作系统下进行 FlightGear 软件的安装，启动及 Shell 文件的编写。在 Linux 系统下，更方便的使用 FlightGear 飞行模拟软件与 Joystick 摇杆结合，实现对四旋翼无人机的飞行控制。同时，本次毕设也对固定翼无人机的飞行控制进行了学习，通过 FlightGear 自带的 JSBSim 飞行动力学模型，结合 Joystick 飞行摇杆，通过 TCP/IP 编程实现对 FlightGear 的通信过程，完成对固定翼无人机的飞行控制。

本次毕业设计中印象比较深刻的有飞行控制过程中，坐标系转换的问题，必须保证坐标系选择的一致性，学习了如何通过 C++ 编程实现对向量矩阵的运算过程。同时，通过对 FlightGear 通信模块的学习，了解了 UDP, TCP/IP 协议，通过 C++ 编程实现 Joystick 飞行摇杆数据到 FlightGear 通信的过程。对六自由度非线性飞行动力学方程的推导过程，进行了十分深刻的了解。同时，对如何将数学公式变成编程语言的编程能力，有了一定提高。

经历了本次毕设，我对无人机飞行控制的过程有了一定了解，对 Linux 操作系统有了一定认识。在今后的学习过程中，会更加深入的学习飞行控制理论，提高自己的编程水平，熟练使用 FlightGear 飞行模拟软件，实现功能更强大的飞行仿真。