



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

摘要正文

关键词： 无人机集群，协同 SLAM

ABSTRACT

摘要正文-英文

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	7
2.1 ROS 介绍	7
2.1.1 ROS 的消息机制	7
2.1.2 gazebo 仿真	9
2.2 PX4 AutoPilot	10
2.2.1 FailSafe 机制	10
2.2.2 EKF 与飞行模式	11
2.2.3 联合 MAVROS 的 Offboard 模式	12
第三章 SLAM 系统设计	16
3.1 SLAM 系统	16
3.1.1 SLAM 的分类	16
3.1.2 成像原理及相机参数	17
3.1.3 视觉 SLAM 的基本步骤	18
3.1.4 对极几何约束与三角测量	20
3.2 ORB-SLAM2	20
3.2.1 ORB 特征点及描述子	20
3.2.2 ORB-SLAM2 的主要进程	21
3.2.3 ORB-SLAM2 的配置及使用	23
3.3 CCM-SLAM	24
3.3.1 CCM-SLAM 的结构	24
3.3.2 Client 与 Server 机制	24
3.4 多机协同及地图融合方案	24
3.4.1 算法原理	24
3.4.2 编程实现	24
第四章 多无人机 SLAM 仿真	25
4.1 gazebo 仿真环境配置	25
4.1.1 场景	25
4.1.2 launch 文件	25
4.2 单机 SLAM 仿真	25
4.2.1 EKF 设置及启动仿真	25
4.2.2 视觉定位的坐标变换	25
4.3 多机 SLAM 仿真	25

第五章 实验与评估	26
第六章 总结与展望	27
6.1 全文总结	27
6.2 对未来工作的展望	27
参考文献	28
致谢	29
毕业设计小结	30

第一章 绪论

1.1 研究背景

当今阶段，无人机（Unmanned Aerial Vehicle）技术迅速发展，在单架无人机上可以集成更多的系统，意味着对于单机更强大的功能。单架无人机也已经被广泛应用于灾害救援、监控巡查、环保监测、电力巡检、交通监视、农业植保等领域。但是，面对复杂的应用环境和多样化的需求，单架无人机受自身软硬件条件的限制，仍然具有一些局限性；为了弥补单架无人机的局限性，由多架相同或不同型号的无人机组成多无人机系统，即无人机集群，协同定位，共同完成任务；

通过集群的方式，能最大地发挥无人机的优势，又能避免由于单架无人机执行任务不佳或失败造成的不良后果，提高任务执行效率，扩展新的任务执行方式，从而达到提高系统可靠性，增强任务执行效果的目的。对于无人机的自主导航，能够在进入未知的环境时掌握无人机的位置和姿态是使其成功的关键。尽管 GPS 对于掌握无人机的位置有巨大的帮助，但仍存在普适性有限和准确度不高的问题；在一些特定场景下，比如室内狭小空间，对定位精度要求很高，GPS 定位的局限性就被显露出来。而 SLAM 技术则可以仅通过自身携带的传感器，来完成这一任务，同时达到一定的精度；

SLAM (simultaneous localization and mapping) 技术，即同时定位与建图，已有三十多年的研究；SLAM 最早由 Smith、Self 和 Cheeseman 于 1988 年提出。SLAM 指的是机器人在未知环境中从一个未知位置开始移动，在移动过程中根据位置和地图进行自身定位，同时在自身定位的基础上建造增量式地图，实现机器人的自主定位和导航。由于其重要的理论与应用价值，被很多学者认为是实现真正全自主移动机器人的关键 [1]。

但是单平台 SLAM 受到传感器性能的限制，存在两点不足：一是测量距离受限，单平台常用的传感器如激光雷达，其最远有效距离为 200 米，不能够满足大场景定位建图的需要，任务效率比较低；二是单平台构建出的三维点云相对稀疏，不能表现出足够的场景信息 [2]。

因此集群无人机协同 SLAM 方案有望解决单机存在的制约问题，主要表现在两个方面：一是多机意味着多传感器，能在大范围场景进行同时定位与建图；二是多机协同 SLAM 可以通过建图覆盖的检测，构建更加稠密和精细的点云地图。

目前单机同时定位与建图已经相对成熟，但是多机 SLAM 由于其控制复杂、数据传输量大、信息处理速度受限、关键数据融合效率低等问题，仍然需要大量的理论研究和实验。

1.2 研究内容及论文结构

本文研究目标旨在实现一套能够在室内高精度环境或 GPS 拒止环境下使用视觉进行多机定位和大范围建图的多无人机协同 SLAM 的方案；其中：

1. 在 SLAM 方面：掌握一些优秀的开源方案，选择各自优点做出一定的融合。并且有一套针对地图融合的方法。
2. 在仿真方面：在 ROS 的 gazebo 仿真平台中实现一定的集群控制方法，能够控制多个无人机协同完成同时定位与建图的任务。
3. 在真机方面：实现单机的视觉 SLAM；在安全的前提下实现双机协同 SLAM，将仿真环境下的协同 SLAM 算法在真机上完成验证，得到场景地图

本研究内容是多机协作进行定位与建图，多机协同 SLAM 能大大提高任务进行的效率，但由于无人机数量多，协同上存在一定困难；研究内容分为三个模块：SLAM 模块、仿真模块和真机模块。

SLAM 模块的主要内容是实现一套可协作的 SLAM 方案，实现的步骤有：

1. 研究传统的视觉 SLAM 的特征点提取、匹配、初始化、后端优化等技术，研究机器人的位姿估计技术；研究并了解 SLAM 技术的整体框架
2. 研究 CCM-SLAM 方案，重点研究其协同的机制和方法，服务端到子端的信息传递和接口设计等
3. 研究 VINS-Fusion 方案中的 VIO 方法，研究如何利用 IMU 与相机数据联合进行更加准确的位姿估计

仿真模块的主要内容是在 ROS 的 gazebo 中研究如何实现多机协同的同时定位与建图，实现的步骤有：

1. 首先研究 PX4 和 MAVROS 之间的通信方式，ROS 的话题发布和订阅方式，研究如何用程序解锁一架无人机、使其进入 Offboard 模式、起飞悬停并降落
2. 研究如何用程序发布话题，控制无人机按照航路点飞行
3. 研究如何构建多机的仿真环境，如何对多机进行控制，其控制策略的选择，即集中式或分布式的多机编队控制
4. 研究如何更改无人机的定位设置，将其从 GPS 定位改为视觉 SLAM 定位；并且完成单机的摄像头内容读取
5. 研究如何在 gazebo 中载入其他场景，在场景中控制无人机飞行，并且对拍摄到的画面进行建图，完成自身定位
6. 研究如何在 gazebo 中完成多机基于视觉的同时定位与建图，并且拼合地图，用第三方软件显示；研究多机的联合优化与协同方法

真机模块的主要内容是控制无人机的协同飞行及通信，实现的步骤有：

1. 研究无人机通过 MAVROS，MAVLINK 与地面站的通信方法，尤其是用于 SLAM 的关键数据的传输
2. 研究多无人机与地面站之间的、多无人机之间的数据传输

3. 研究多无人机之间的可变基线控制技术，如何设计一个详细的算法控制基线距离

基于研究内容的层级关系，本论文的结构主要由四层构成，如图1-1所示。

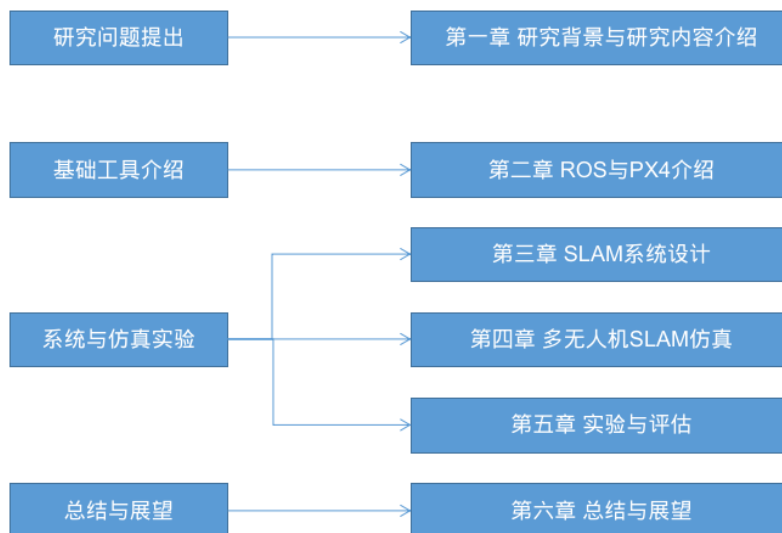


图 1-1 论文结构

第一章：主要介绍研究背景，进行问题的提出，从而引出本文的研究内容和研究目标；从宏观的角度概括本文的内容，并且对问题做出概述。

第二章：主要介绍研究中用到的 ROS（Robotics Operating System，机器人操作系统）和 PX4 AutoPilot 飞控软件系统。

第三章：主要介绍 SLAM 的原理和作用，SLAM 系统的基本流程，优秀的开源 SLAM 方案和地图融合的设计。

第四章：主要介绍仿真实验的情况，在 ROS 的 gazebo 环境中进行。

第五章：主要介绍真机实验的情况，并且做出相应的评估。

第六章：总结研究过程中的创新点和不足之处，提出进一步研究的大致方向，展望未来的研究工作。

第二章 ROS 与 PX4 介绍

2.1 ROS 介绍

本节主要对 ROS 平台进行介绍，包括 ROS 核心的消息机制和研究中要用到的 gazebo 仿真平台。

21 世纪开始，随着人工智能研究的发展，催生出了一批智能机器人的研究项目；ROS 诞生于 2007 年斯坦福大学 AI 实验室 Morgan Quigley 的 STAIR (Stanford Artificial Intelligence Robot) 项目，其期望构建一个基于移动机器人 + 机械臂的原型；该项目于 2008 年受到 Willow Garage 公司关注，其决定用商业化手段来推进机器人的发展，使机器人平台能够更快地走进人们的日常生活；Willow Garage 接手该项目后两年，2010 年第一代 ROS 即 ROS1.0 发布；2013 年，OSRF (Open Source Robotics Foundation) 接管了 ROS 的维护工作和版本的升级工作，随后至 2018 年间，ROS 的 Indigo、Kinetic 和 Melodic 版本相继发布。

ROS 即 Robotics Operating System，是一个针对机器人的开源、元级操作系统，在某些方面，ROS 更像是一种机器人框架 (robot framework)；它提供类似于操作系统的服务，包含底层的驱动程序管理、底层的硬件描述，随后上升到软件程序之间的消息传递、功能包的管理和发布、也提供用于获得、编译、编写和多设备跨计算机运行代码所需的库等。换言之，ROS 是由一套通信机制，开发工具，一系列应用功能和一个庞大的生态系统组成的集合，其目标为提高机器人研发中的软件复用率，不断完善他人的工作，进行更好的开发。

2.1.1 ROS 的消息机制

ROS 提供了一套松耦合分布式通信机制，这种分布式处理框架 (又名 Nodes)，是以多个节点及节点之间的通信组成的。其中，节点 (Node) 和节点管理器 (ROS Master) 是 ROS 的核心概念，若干个节点在节点管理器下构建起来，共同实现特定的功能。

每一个节点是一个独立的执行单元，由可执行文件构成，在程序中需要声明节点的名称；节点的名称必须唯一，否则 ROS 会舍弃掉时间节点靠前的节点；节点执行具体的任务进程，比如单目的 ORB-SLAM2 中，其节点为 Mono，SLAM 的任务仅靠一个节点完成。

节点管理器是节点的控制中心，其作用是辅助节点的查找，帮助节点之间建立通信连接；还能提供节点的命名和注册等服务，以及提供了能够存储全局变量的配置参数服务器。

如图2-1所示，节点在经过节点管理器注册后，可以建立节点之间的通信；常用的节点之间通信方式有两种，为话题 (Topic) 通信和服务 (Service) 通信：

1. 话题通信是异步通信机制，数据为单向传输；数据的流向为发布者 (Publisher) 到订阅者 (Subscriber)；完成话题通信需要定义一个话题 (Topic) 及其消息 (Message) 的内容，之后通过发布者 (Publisher) 发布该话题，并且订阅者

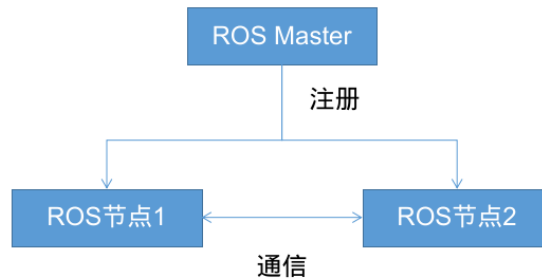


图 2-1 ROS 中的节点及通信

(Subscriber) 订阅该话题的操作，完成数据的传输，消息的数据结构由.msg 文件定义；话题通信可以完成多对多的信息传递。

2. 服务的通信机制则为同步，数据为双向传输；数据的流向为客户端 (Client) 与服务器 (Server) 之间的交互；完成服务的通信需要客户端向服务器发送请求，服务器完成任务处理后，向客户端返回应答数据，表示请求和应答的数据结构定义在.srv 文件中；服务通信一般用于逻辑判断，比如询问一项任务是否执行完毕，是一对多的节点处理关系。

发布和订阅话题的方法，发布者和订阅者类似，以发布者为例：先实例化一个发布者对象，定义发布的话题名称、数据类型和队列长度，最后对消息进行定义并发送，简单的逻辑代码如下：

```

ros::NodeHandle n; // define ros node handle
// define a publisher
ros::Publisher pub = n.advertise<'message type'>
    ("topic name", 'queue length');
// publish message
pub.publish(message);
    
```

需要注意的是，订阅者则需要声明并定义一个回调函数，在实例化 Subscriber 的对象后，通过 ROS 的 spin() 函数，循环等待回调函数获得话题消息。

客户端-服务器模型下的服务通信，则比话题的发布和订阅复杂；客户端的编程实现中，需要设置阻塞函数，其作用是直到发现对应的服务时才向下进行，否则程序被截止在该位置；如果对应的服务被发现，阻塞函数通过，之后创建客户端并且进行数据的设置，完成服务调用的请求，其代码实现如下：

```

// wait for right service
ros::service::waitForService("service name");
// create a client, connecting to service
ros::ServiceClient client = n.serviceClient
    <'data type'>("service name");
// call service
client.call(srv);
    
```

服务器的实现与订阅者类似，需要一个回调函数，如果收到了客户端发来的请求，则会触发回调函数，程序向下进行，否则将循环等待回调函数收到客户端发来的请求。

除此之外，ROS 中还有参数（Parameter）或参数服务器的概念，其作用类似全局共享字典，节点可以进行访问，适合存储一些和系统配置相关的静态非二进制的参数，以供节点读取。

2.1.2 gazebo 仿真

gazebo 是 ROS 自带的仿真软件，其功能有构建具有运动属性的机器人仿真模型，提供了一些针对 CAD 和 soildworks 等 2D、3D 设计软件的接口；gazebo 还具有构建现实世界的各种场景的仿真模型的功能，能够在 gazebo 环境中建立一个与现实十分相似的场景用于算法验证；在传感器的仿真上，gazebo 拥有一个强大的传感器模型库，比如单目相机、双目相机、深度相机等，还可以根据需求自行配置传感器的类型，实现多传感器融合；除此之外，gazebo 还引入了现实世界的物理性质，如重力的影响，使仿真环境更加贴近现实。

gazebo 的仿真环境中，其文件大致可以分为三种类型：model，world，launch 文件；同时，这三种文件也代表了不同的分级；

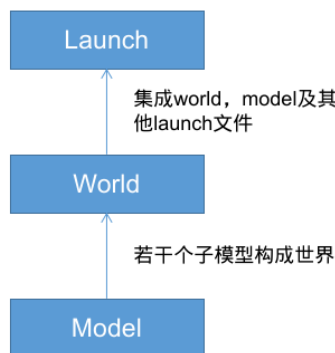


图 2-2 model，world，launch 层级关系

如图2-2所示：

1. model（模型）是 gazebo 环境中的元级元素，也就是最底层文件，比如环境中的树木、双目相机、无人机、墙壁、桌子等都是 model 级别的物体。model 由 sdf 文件和 config 文件构成；sdf 文件用 HTML 或 XML 标签语言描述了该模型的主要内容，包括模型的构建方法、模型中对其他模型的调用以及连接方式、模型的位姿等参数配置；而 config 文件中记录了模型的作者及联系方式、模型的版本、模型的命名和描述等信息。由于模型具有可拼接的属性，因此一个模型可以由若干个模型组成。
2. world（世界）文件将模型集成起来，包含模型和物理性质的设置，是 gazebo 环境中的中层文件。该层与 model 层相同，都无法完成代码对模型的控制。

3. launch 文件是集成了 model, world 以及其他 launch 文件的 gazebo 中最顶层的文件; launch 文件不同于 model 和 world 文件, 其可以通过代码完成对模型的控制; launch 文件在 ROS 中拥有定义, 其以 XML 标签语言书写, 可以在 launch 文件中完成嵌套其他 launch 文件、命名重映射、设置参数、启动 ROS 节点等任务; 在 ROS 中有与 launch 文件对应的指令 roslaunch, 用于启动该 launch 文件。

2.2 PX4 AutoPilot

PX4 是一款专业级开源飞控, 也可以称之为自动驾驶仪; 因其应用的平台不局限于飞行器, 在竞速和物流应用的地面车辆和潜水艇等载具上也可以用其进行控制。PX4 由来自学术界和业界的顶级开发商开发, 并且配套有活跃的全球论坛社区, 其 software 的源码在 github 上保持着 issue 和 pull request 的更新, 是应用十分广泛的一款飞控软件。需要注意, PX4 Software 和 Pixhawk4 并不是同一概念, 前者为飞控软件, 而后者为飞控硬件。PX4 软件的内部包含了针对不同机型 (包括多旋翼、固定翼和 VTOL 垂直起降固定翼等) 的控制律设计, 还包含了强大的飞行模式设计和安全设计。PX4 还可以作为核心应用在更广阔的平台, 比如使用了 QGroundControl 地面站、Pixhawk 硬件、基于计算机、相机等的使用 MAVLink 协议的 MAVSDK 融合等。

2.2.1 FailSafe 机制

FailSafe 机制, 即安全生效机制, 其含义为: 当错误发生时, 对飞机进行保护或恢复到安全的状态, 避免错误可能导致的不良后果。PX4 的 FailSafe 系统是可编辑的, 意味着开发者可以根据自身的需求设置对 FailSafe 的触发, 以保证在安全的情况下实验或完成任务。FailSafe 系统被触发后, 一般有自动着陆、保持位置或返回特定的航路点几种反馈措施。

安全生效机制监控的主要情况有:

1. 低电量; 该情况在仿真中影响较小, 但在真机实验中, 低电量可能意味着无法安全返航, 因此必须由安全生效机制介入;
2. 远程控制信号丢失, 如遥控器信号丢失;
3. 位置信息丢失, 比如 GPS 信号弱, 对位置的估计不够精确, 可能会影响任务的完成情况, 因此由安全生效机制介入;
4. 场外连接丢失; 是指进入到 Offboard 模式后, 丢失了与计算机之间的连接, 导致计算机无法通过 Offboard 程序对无人机进行控制;
5. 数据链丢失; 一般是指丢失了与 GCS (Ground Control Station, 地面站) 之间的数传连接;
6. 超出地理围栏; Geofence 即地理围栏, 是执行任务前设置的无人机可活动区域, 高度一般不设限;

7. 任务判断；防止在新的起飞位置上执行先前的任务；

PX4 版本更新后，如果直接输入 `commander takeoff` 指令，可能会遇到无法起飞的情况；同时在 PX4 终端中，会提示 `FailSafe activated`，即安全生效模式被激活；一般遇到这种情况，需要在 PX4 终端的字里行间和地面站 QGC 的信息提示中去分析问题原因。比如在仿真中遇到 No RC 的情况，RC 即 Remote Control，对于 SITL（软件在环仿真）是没有遥控器的信号输入的，因此需要在 QGC 中打开 `virtual joystick`（虚拟摇杆），否则 FailSafe 模式会由于没有 RC 保持给飞机上锁。

2.2.2 EKF 与飞行模式

一般 ECL 与 EKF 会同时出现，ECL 即 Estimation and Control Library，状态估计和控制库；EKF 即 Extended Kalman Filter，扩展卡尔曼滤波，是一种优化算法。两者的结合是使用扩展卡尔曼滤波方法的状态估计与控制库，其作用是加工传感器的数据，并对 IMU（惯性测量单元）加工的速度和位置、四元数表示的旋转矩阵、风速和磁罗盘得到的方向等信息进行加工处理和估计。EKF 使用 IMU、磁力计、高度计、GPS、测速仪等传感器。

为了将传统的气压计 +GPS 的高度与位置估计更改为使用视觉信息的高度与位置估计，需要修改 EKF 传感器的相关参数，这里指用于多旋翼和固定翼的基于扩展卡尔曼滤波的高度和位置估计。

1. `EKF2_AID_MASK` (Integer bitmask controlling data fusion and aiding methods)，该参数决定了 GPS 数据的融合方法；默认设置的参数为 0，其意为使用 GPS 数据作为定位；如果修改为视觉定位（vision position fusion），需要将该参数改为 3。
2. `EKF2_HGT_MODE` (Determines the primary source of height data used by the EKF)，该参数决定了 EKF 首选的高度信息传感器；默认参数设置为 0，使用气压计得到高度；如果修改为视觉定位，则需要将该参数改为 3。

在启动仿真之前，需要根据信息融合的类型更改以上两个参数，修改参数的方式有以下两种：

1. 更改 rcS 文件中的参数配置；rcS 文件属于脚本文件，用于配置系统，PX4 需要修改的 rcS 文件位于 `ROMFS/px4fmu_common/init.d-posix/rcS` 中，rcS 文件中的参数被修改后，需要删除 ROS 的 eeprom 中存储的参数文件（该文件用于快速预加载参数）；但该方法存在一些问题，需要在 launch 中特殊指明 PX4 使用的 rcS 文件地址，否则 PX4 会从默认的 build 文件夹中选择 rcS 文件进行参数配置。
2. 更改地面站中的参数配置；使用 QGC 地面站，直接在参数设置中更改位置和高度估计的传感器，这种方式免去了每次更改参数后需要删除 ROS 参数缓存文件的麻烦。

飞行模式决定了飞行器对 RC 远程控制输入的反应，以及在全自主的飞行过程中飞行器如何控制自身的运动；飞行模式为操作者主要提供了不同种类和程度的自动控制协助，飞行模式的切换可以由遥控器和地面站完成。下面介绍几种主要的飞行模式（对于多旋翼无人机）：

1. Manual/Stabilized Mode, 手动/增稳飞行模式; 是最常用的飞行模式, 手动模式即操纵手通过手中的遥控器 (RC) 控制飞机的滚转、俯仰、油门和前后左右的移动; 增稳模式也是由操纵手操纵, 但引入了内部控制律, 使得遥控器输入到飞机运动的表现更加平滑、易控, 这是由其内部的控制律决定的; 一般情况下为了防止飞机过于剧烈的运动, 都采用增稳模式进行飞行。
2. Position Mode, 定点模式; 其主要特点是当操纵杆释放或回归中心时, 飞机会保持在 3D 空间中的一个定点位置处, 并且自动解算出相应的力去补偿风和其他的干扰力。该模式是对于新手最安全的模式。
3. Altitude Mode, 定高模式; 其主要特点是当操纵杆释放或回归中心时, 飞机会保持固定高度, 但不会去平衡风等其他干扰所造成的水平位置的漂移。
4. Offboard Mode, 场外模式; 指通过电脑连接或地面站连接, 使飞机按照设定的位置、速度或高度等参数飞行, 该模式通过 MAVLink 与场外设备传递信息, 是仿真中使用的主要模式。
5. 其他模式, 如圆轨迹模式、起飞降落模式、跟随模式、返回模式等。

2.2.3 联合 MAVROS 的 Offboard 模式

本小节主要介绍在 Offboard 模式下, 使用 ROS 节点通过 MAVROS 向 PX4 发送信息, 使无人机起飞降落、按航路点移动等。

Offboard 模式下的无人机正常起飞, 需要首先解锁, 然后切换飞行模式 (默认手动模式) 到 Offboard 模式, 但是需要在切换模式前, 以不低于 $2Hz$ 的频率发布一些设定点 (setpoints), 具体实现起飞的步骤如下:

1. 连接 fcu (MAVROS), 判断的标准是 MAVROS 消息类中的 state 是否表示为连接; 如果连接上则可以继续执行, 未连接上则通过 spin() 函数循环等待。
2. 设定 setpoints 的坐标值, 并以不低于 $2Hz$ 的频率发送一些点。
3. 解锁, 解锁成功后切换到 Offboard 模式并起飞。

其程序的实现如下:

首先是需要的头文件定义, 其包括了 C++ 的基本库, MAVROS 的消息相关库, 和 ROS 库;

```
//
// Created by hazyparker on 2022/1/11.
// realize mode switching and auto takeoff and landing

#include <iostream>
#include <ros/ros.h>
#include <geometry_msgs/PoseStamped.h>
#include <mavros_msgs/SetMode.h>
#include <mavros_msgs/State.h>
#include <mavros_msgs/PositionTarget.h>
```

之后需要在 main 函数之前，声明定义回调函数，其中包括对当前状态和当前位置的回调函数和消息定义：

```
// record current state
mavros_msgs::State current_state; /* NOLINT */

// callback function for Subscriber stats_sub
void state_cb(const mavros_msgs::State::ConstPtr& msg){
    current_state = *msg;
}

// record current pose
geometry_msgs::PoseStamped current_pose; /* NOLINT */

// callback function for Subscriber for local_pos_sub
void local_cb(const geometry_msgs::PoseStamped::ConstPtr& msg){
    current_pose = *msg;
}
```

在 main 函数中，首先要定义 ROS 节点和句柄，实例化飞行模式和当前位置信息的订阅者和发布者，然后以一定的频率发送一些点，以便切换到 Offboard 模式：

```
// init ros node
ros::init(argc, argv, "offb_node");

// create node handle
ros::NodeHandle nh;

// define subscribers and clients
ros::Subscriber state_sub = nh.subscribe<mavros_msgs::State>
("mavros/state", 10, state_cb);
ros::Subscriber local_pos_sub = nh.subscribe<geometry_msgs::PoseStamped>
("mavros/local_position/pose", 10, local_cb);
ros::Publisher local_pos_pub = nh.advertise<geometry_msgs::PoseStamped>
("mavros/setpoint_position/local", 10);
ros::ServiceClient arming_client = nh.serviceClient<mavros_msgs::CommandBool>
("mavros/cmd/arming");
ros::ServiceClient set_mode_client = nh.serviceClient<mavros_msgs::SetMode>
("mavros/set_mode");

//the set-point publishing rate MUST be faster than 2Hz
ros::Rate rate(20.0);

// wait for FCU connection
while(ros::ok() && !current_state.connected){
    ros::spinOnce();
```



```

rate.sleep();
ROS_INFO("wait for fcu connecting...");
}
ROS_INFO("fcu connected successfully");

// set pose
geometry_msgs::PoseStamped pose;
pose.pose.position.x = 0;
pose.pose.position.y = 0;
pose.pose.position.z = 2;

//send a few set-points before starting
for(int i = 100; ros::ok() && i > 0; --i){
local_pos_pub.publish(pose);
ros::spinOnce();
rate.sleep();
}

```

最后首先发送指令，使无人机解锁，之后使其切换到 Offboard 模式，完成起飞并到达目标点的指令：

```

int main(int argc, char **argv){

mavros_msgs::SetMode offb_set_mode;
offb_set_mode.request.custom_mode = "OFFBOARD";

mavros_msgs::CommandBool arm_cmd;
arm_cmd.request.value = true;

ros::Time last_request = ros::Time::now();
ROS_INFO("Off boarding");
while(ros::ok()){
if( current_state.mode != "OFFBOARD" &&
(ros::Time::now() - last_request > ros::Duration(5.0))) {
if( set_mode_client.call(offb_set_mode) &&
offb_set_mode.response.mode_sent){
ROS_INFO("Off-board mode enabling...");
}
last_request = ros::Time::now();
} else {
if( !current_state.armed &&
(ros::Time::now() - last_request > ros::Duration(5.0))) {
if( current_state.mode != "OFFBOARD") ROS_INFO("Off board mode was shut
if( arming_client.call(arm_cmd) &&

```



```
arm_cmd.response.success){
ROS_INFO("Vehicle armed");
}
last_request = ros::Time::now();
}
}

local_pos_pub.publish(pose);

// wait until reach set point
ros::spinOnce();
// define Point: current position and set point position (expected)
geometry_msgs::Point curr, aim;
curr = current_pose.pose.position;
aim = pose.pose.position;
double dist = sqrt(pow((curr.x - aim.x), 2) +
pow((curr.y - aim.y), 2) + pow((curr.z - aim.z), 2));
if(dist < 0.1){
ROS_INFO("reached the goal...");
break;
}
rate.sleep();
}

}

return 0;
}
```

第三章 SLAM 系统设计

本章节主要介绍 SLAM 的概念和原理、一个基本 SLAM 系统的框架、两个优秀的开源 SLAM 框架和地图融合算法。

3.1 SLAM 系统

同时定位与建图 (SLAM, simultaneous localization and mapping) 技术, 其希望是机器人在对环境和自身所处环境中的位置未知的情况下, 在反复的运动过程中不断观测到的地图特征完成自身位置的定位和姿态的确定, 之后再根据自身位置对环境构建增量式的地图, 从而达到同时定位与建图的目的。

3.1.1 SLAM 的分类

SLAM 主要分为视觉 SLAM、激光 SLAM、融合 SLAM 和新颖 SLAM。

对于视觉 SLAM, 即用相机完成同时定位与建图的任务。由于相机造价相对较低、电量消耗相对较少、能够获取环境的大量信息, 因此相机成为了完成定位与建图任务常用的传感器。视觉 SLAM 主要有五个步骤, 传感器信息读取、视觉里程计 (Visual Odometry)、后端优化 (Optimization)、回环检测 (Loop Closing)、建图 (Mapping) [6]。对于静态、刚体、光照变化不明显、且没有过多人为干扰的场景, 视觉 SLAM 技术已经十分成熟。当前比较好的方案有 ORB-SLAM; 其在对特征点的描述上做了很大创新, 相比于 SIFT (尺度不变特征变换, Scale-invariant feature transform) 的大计算量和对 GPU 的特殊需求、FAST 关键点描述没有描述子的缺点, ORB 改进了 FAST 的检测子, 为其增加了方向性, 并且采用了二进制描述子 BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Feature) [5]。

对于激光 SLAM, 主要有两种传感器, 单线束激光雷达和多线束激光雷达; 单线束激光雷达即 2D 雷达, 2D 激光雷达的扫描范围比较单一, 角度有限, 因此比较适合仅平面运动的机器人的定位与建图, 对应的经典算法如 GMapping; 多线束雷达即 3D 雷达, 其获取的信息包含距离和角度, 能够还原出目标的三维点云, 且不受光照影响, 缺点是造价比较昂贵且易受不良天气影响 [7], 对应的经典算法如谷歌提出的 Cartographer。

对于融合 SLAM, 常见的有视觉和惯性的融合, 即相机 +IMU (inertial measurement unit, 惯性测量单元, 包含加速度计和角加速度计) 等的多传感器融合; IMU 的工作原理是对加速度的积分、初始速度和起始位置进行混合运算, 得到运动轨迹和位姿。但是其容易产生漂移 (Drift), 并且这种累积误差会随时间增加 [8]。

对于 VIO (视觉惯性里程计), 即上文提到的由相机和惯性测量单元组成的融合传感器, 根据融合的框架可以分为松耦合和紧耦合两种。松耦合中对相机关键帧数据的视觉运动估计和对 IMU 测量数据的运动估计是两个独立的模块, 计算时互不干涉; 计算完成后将其轨迹结果按一定的方法进行融合。紧耦合则是共同使

用相机视觉数据和惯导运动估计数据，共同完成对一组变量的估计；因此其算法更加复杂，且传感器之间的噪声也会相互影响，但是具有更好的效果，也是目前阶段研究的重点方向。这方向上好的方案有 VINS-fusion[9]。

对于新颖 SLAM，比如语义 SLAM；使用神经网络的语义分割、目标检测方法，从图像到位姿，使用其语义分割的结果来完成点云地图的建立和场景识别。语义 SLAM 能够探测出图像中的各个物体，并且能得到在图像中的位置，可以节省传统的人工标定物品的成本，方便机器人的自主理解能力和简便的人机交互 [11]。

3.1.2 成像原理及相机参数

在各种 SLAM 中，视觉 SLAM 由于其传感器（光学相机）造价较低的原因，成为了 SLAM 中最常用的方式，要了解使用相机的视觉 SLAM 的原理，首先需要了解相机的成像原理及其参数。

如图3-1，可以用小孔成像的原理简单地解释针孔相机的模型：

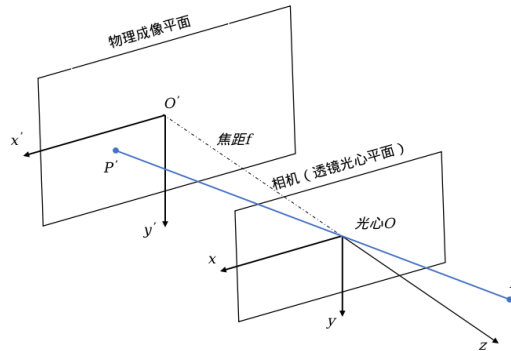


图 3-1 针孔相机模型

Oxy 平面为相机光心（垂直主光轴）所在的平面，称其为相机平面，对应的 $O - x - y - z$ 坐标系即为相机坐标系； $O'x'y'$ 平面为物理成像平面， $\overline{OO'}$ 的长度为焦距 f ；在现实世界中有一点 P ，设其在相机坐标系下的坐标为 $[X, Y, Z]^T$ ，其经过小孔 O 投影后，在相机坐标系下落在像素平面上的坐标为 $[X', Y', Z']^T$ 。

理论上，小孔成像为倒立的实像，但在实际的相机中，成像被人为旋转，成正立的像，因此不考虑坐标系正负号的影响，由相似三角形关系，有：

$$\frac{Z}{f} = \frac{X}{X'} = \frac{Y}{Y'}$$

在此基础上，定义像素坐标系。像素坐标系为二维坐标系，在物理成像平面上；像素坐标系的原点位于图像的左上角，横轴为 u 轴，向右与 x 轴平行，纵轴为 v 轴，向下与 y 轴平行，则可以得到像素坐标与 P' 坐标的关系为：

$$\begin{cases} u = \alpha X' + c_x = \alpha f \frac{X}{Z} + c_x \\ v = \beta Y' + c_y = \beta f \frac{Y}{Z} + c_y \end{cases}$$

其中， α 和 β 为横轴和纵轴的缩放倍数， c_x 为图像横向像素的一半， c_y 为图像纵向像素的一半。令 $f_x = \alpha f$ ， $f_y = \beta f$ ，将像素坐标系下的坐标转换为齐次坐标：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z} \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{Z} \mathbf{K} \mathbf{P}$$

则得到了相机的内参矩阵（Camera Intrinsics） \mathbf{K} 。通常情况下，对于焦距固定的相机（或定焦镜头），其出厂之后内参矩阵是固定的；如果无法从厂家得到相机的内参，可以使用标定的方法获得相机的内参矩阵，常见的标定算法有张正友标定法。

除相机的内参外，还有相机外参（Camera Extrinsics）的定义；相机的外参由其旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{t} 构成。对于 P 点而言，其在相机坐标系（像素坐标平面）下的坐标应为其在世界坐标系下的坐标根据相机相对于世界坐标系的位姿所变换得到的，相机的位姿即由其外参决定，则世界坐标系下 P 点的坐标 \mathbf{P}_w 在相机坐标系下的坐标为：

$$Z \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}(\mathbf{R}\mathbf{P}_w + \mathbf{t})$$

3.1.3 视觉 SLAM 的基本步骤

经典的视觉 SLAM 框架如图3-2所示：

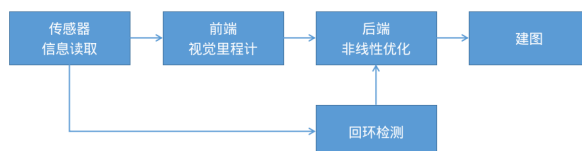


图 3-2 经典视觉 SLAM 框架

经典视觉 SLAM 流程包括以下基本步骤：

1. 传感器信息读取。主要为相机图像的读取以及一些预处理步骤，在不同的视觉 SLAM 算法中，可能还涉及惯性测量元件信息的读取和预处理。
2. 前端视觉里程计（Visual Odometry）。视觉里程计的功能是从相邻的几帧图像之中，根据几何约束，得到相机的运动；并且通过记录地图点（路标）与相机的相对位置，构建局部地图。
3. 后端（非线性）优化（Optimization）。后端主要涉及滤波与非线性优化算法，其目的是减少传感器的误差，完成对运动的相机和周围环境的不确定性的估计。

4. 回环检测 (Loop Closure Detection)。回环检测的作用是使机器人能够分辨出当前面临的场景是否曾经来到过，解决位置估计的误差随时间累计，发生漂移的问题；并且消除累计误差，最终得到全局一致的轨迹和地图。
5. 建图 (Mapping)。建图即根据前端里程计和后端优化得到的地图点（路标点），构建地图。

视觉里程计是 SLAM 的关键，其基本完成了同时定位与建图的任务。视觉里程计的实现主要有两种方法：特征点法和直接法。

特征点法作为很长时间以来视觉里程计的主要方法，其特点是比较稳定，在光照差异大和画面中有动态物体的情况下也能较好地完成任务。特征点法的核心在特征点的提取与匹配；提取即从每帧图像中找到可以代表图像特征的点，辨识度更高的点。

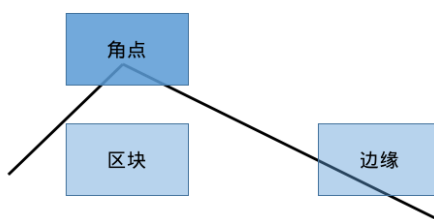


图 3-3 角点、边缘、区块

特征点的一种方法是使用角点。如图3-3，可以把一张图像中的内容分为角点、边缘、区块三种类型。可以发现，指出某两张图像中出现的统一区块是最难以实现的，因为存在大面积相同的色块，无法确定具体点的匹配；其次是边缘，其具有一定的特征，但沿边缘行进，仍可能出现相同的局部特征，造成误匹配；因此选择其中最具有特征角点作为特征。性能较好、比较稳定的角点有 SIFT、SURF、ORB 等。

在完成特征点提取与匹配后，根据不同的传感器类型，有不同的得到相机位姿的方法。对于传统的单目相机传感器，可以使用对极几何约束，得到相机的运动，并通过三角测量的方法恢复地图点相对于每时刻相机的位置。

前端视觉里程计的另一种方法是直接法，由光流法演变而来。光流法与特征点法不同，特征点法使用特征点的描述子来完成特征匹配，而光流法可以跟踪特征点的运动，这样就无需进行大量的描述子匹配运算。直接法可以弥补特征点法的一些缺陷。

后端优化主要有两种方法，滤波和非线性优化。拓展卡尔曼滤波 EKF 及其演变出的粒子滤波方法等，在早期的 SLAM 设计中应用十分广泛。但随着非线性优化方法的普及，现在的 SLAM 方案多用 BA 图优化及位姿图优化的方法，并且有可以使用的 ceres 和 g2o 库。

回环检测在判断场景是否曾经来过时，一般用的是词袋模型 (Bag of Words)，根据图像中是否存在同样的几种相似特征来判断是否在外观上相似。

建图根据地图的需求，可以分为用于定位的稀疏地图，用于导航、重建的稠密地图和用于交互的语义地图。按照地图的分类，可以分为拓扑地图和度量地图

两种；拓扑地图着重与图节点之间的连通性，而度量地图则能够精确地表示出地图点相对于相机的位置。

3.1.4 对极几何约束与三角测量

3.2 ORB-SLAM2

ORB-SLAM2 是由萨拉戈萨大学的 Raúl Mur-Artal 开发，可以用在单目、双目、RGB-D 深度相机的视觉 SLAM 系统。

3.2.1 ORB 特征点及描述子

ORB 特征点是上文3.1.3提到过的特征点的一种，它的全称是 Oriented FAST and Rotated BRIEF；其中，FAST 是角点的一种，BRIEF 是 Binary Robust Independent Elementary Feature，是一种二进制描述子；ORB 特征点即由改进的 FAST 关键点和带旋转的 BRIEF 描述子组成。

FAST 角点选取的核心思想是，选取的点和周边像素点亮度差别很大，则该点可能是 FAST 角点。如图3-4所示，对于可能被选取为 FAST 角点的像素点 p ，其亮度为 I_p ；设置亮度差异的阈值 T ，可以为 $0.3I_p$ ；选取半径为 3 的圆上的 16 个点，对应图中的 16 个深色点，记录各点的像素值 I_i ，如果 16 个点中有连续 N 个点满足 $|I_i - I_p| > T$ ，则像素点 p 可以被认为是 FAST 角点，该标准为 FAST-N， N 一般取 9、11、12。

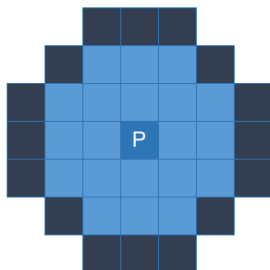


图 3-4 FAST 角点

单纯的 FAST 关键点是不带方向性的，为了准确性，ORB 的 Oriented FAST 关键点给 FAST 角点添加了方向和尺度的描述。其尺度的描述是由计算机视觉中构建金字塔模型的方法，在不同分辨率的图像下都能够提取到特征点，而旋转的描述则是由灰度质心法实现的，如图3-5所示：

设 O 为角点像素，取一个最小的图像块，只有四个像素构成，建立 $O - x - y$ 坐标系，原点的像素用 $I(0,0)$ 表示，则可以找到该图像块的质心为：

$$C = \left(\frac{I(1,0)}{I(0,0)}, \frac{I(0,1)}{I(0,0)} \right)$$

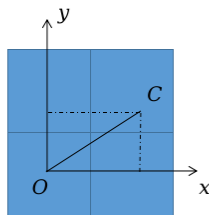


图 3-5 灰度质心法

则可以得到方向向量 \vec{OC} ，该关键点方向定义为：

$$\theta = \arctan \frac{I(0,1)}{I(1,0)}$$

BRIEF 描述子为二进制编码，反映了关键点附近 128 个像素对的大小关系，最终由 0 和 1 构成，其具有旋转不变性、选点速度快且易于存储。

3.2.2 ORB-SLAM2 的主要进程

ORB-SLAM2 是一套规范完整的视觉 SLAM 系统，其主要进程可以分为四个：跟踪进程、本地地图进程、回环检测进程、可视化进程。如图3-6所示，从以下五个主要函数中分析。

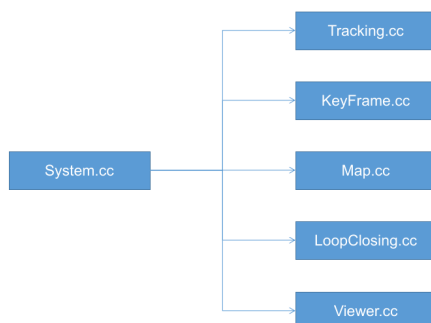


图 3-6 ORB-SLAM2 框架

System.cc，SLAM 系统顶端控制：

首先是读取 ORB 词典，该词典是配合 DoW2 库训练得到的，用于回环检测时判断图像的外观相似度。

其次是创建 ORB 特有的 KeyFrameDatabase，该类用于处理关键帧数据；创建地图，实例化 Map 对象；创建画笔，为可视化做准备。

```
// Create KeyFrame Database
mpKeyFrameDatabase = new KeyFrameDatabase(* mpVocabulary);
```



```
// Create the Map
mpMap = new Map();
```

```
// Create Drawers. These are used by the Viewer
mpFrameDrawer = new FrameDrawer(mpMap);
mpMapDrawer = new MapDrawer(mpMap, strSettingsFile);
```

之后是主要线程的初始化，跟踪线程、本地地图线程和回环检测线程：

```
// Initialize the Tracking thread
// (it will live in the main thread of execution, the one that called th
mpTracker = new Tracking(this, mpVocabulary, mpFrameDrawer, mpMapDrawer,
mpMap, mpKeyFrameDatabase, strSettingsFile, mSensor);
```

```
// Initialize the Local Mapping thread and launch
mpLocalMapper = new LocalMapping(mpMap, mSensor==MONOCULAR);
mptLocalMapping = new thread(&ORB_SLAM2::LocalMapping::Run, mpLocalMapper);
```

```
// Initialize the Loop Closing thread and launch
mpLoopCloser = new LoopClosing(mpMap, mpKeyFrameDatabase, mpVocabulary,
mptLoopClosing = new thread(&ORB_SLAM2::LoopClosing::Run, mpLoopCloser);
```

System 相当于工程中的 Main 函数，汇集了实现一个 SLAM 系统所需的全部流程，使用顶层的代码进行控制，具体功能则由底层的类及其中的函数去实现。

Tracking.cc，关键的跟踪进程，其主要函数为图像的转换函数和 Track 主函数：

1. 图像转换函数是针对不同传感器设置的，以弹幕相机为例；该函数需要判断图像是否为灰度图，判断图像为 RGB 或 BGR 编码，并最后将图像转为系统使用的灰度 3 通道图像，赋予其时间戳和 ORB 字典、相机的内参矩阵和畸变参数等信息，构成当前帧的对象。
2. Track 函数，该函数是 Tracking.cc 中的主要函数，或称之为顶端函数。该函数首先判断系统状态，之后根据状态选择使用运动模型或里程计模型得到当前位姿，以及是否需要重定位；如果得到相机位姿和正确匹配，则依次在建立的 Map 中跟踪路标、将路标更新到画笔中、判断是否将该帧加入关键帧、清除里程计的匹配和未跟踪的 MP。

KeyFrame.cc，该类的操作都基于关键帧进行：

1. 共视图；确定关键帧之间的共视关系，该内容将被用于优化及回环检测，最终建立一个关键帧之间的共视图关系。
2. 地图点；还包括 MP 地图点的添加与移除、跟踪与匹配等；
3. 位姿；包括获取位姿、旋转矩阵 \mathbf{R} ，平移向量 \mathbf{t} 等；

LoopClosing.cc，回环检测的主要函数：

1. 检测是否有新的关键帧；在此之前要给回环的队列加互斥锁，之后返回逻辑变量，表示是否有新的关键帧；
2. 检测是否有闭环；提取出一个关键帧，并用互斥锁加锁，防止被擦除；之后对地图进行判断，如果地图包含少于 10 个关键帧，则直接判定为没有闭环；使用具有共视关系的关键帧基于词袋模型进行评分，将共视关键帧得到的最高分作为最低分；最后删除其他的闭环候选帧，暂时找到与当前关键帧一致的关键帧。
3. 计算相似变换；Sim3 算法，其结果是得到两帧之间的相对位姿，只有 Sim3 求解器得到足够多的匹配点，才能接受该闭环帧。
4. 融合位姿图。

3.2.3 ORB-SLAM2 的配置及使用

ORB-SLAM2 是标准的 CMake 工程，这就意味着其可以使用 CMake 进行配置并且进行 make 编译；其虽然支持 ROS，但并不是 ROS 的 catkin 工程，使用的是 rosbuilt 相关命令，而不是 ROS 常见的 catkin make 编译指令。

ORB-SLAM2 的 github 主页上，详细介绍了其编译的方法，官方将编译代码集成到了 build.sh 文件中；正常情况下，可以通过 chmod +x 命令给该 sh 文件赋予可执行权限后，运行 sh 命令，直接编译。如图3-7所示，需要编译的内容为两个第三方库和 ORB-SLAM2 主要函数；需要注意的是，make -j 命令指的是只用全部线程进行编译，这样做可能会造成电脑资源锁死，可以根据电脑的配置自行修改所用线程数。

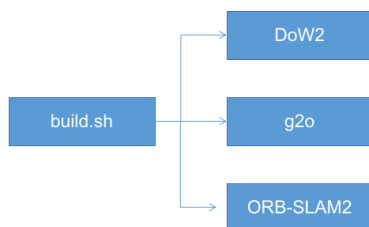


图 3-7 配置 ORB-SLAM2

ORB-SLAM2 在普通编译过程中，可能会遇到一些问题：

1. System.cc 中，usleep 未定义；这是由于 System.h 文件中缺少头文件unistd.h 导致的，加上该头文件即可。
2. 找不到 Eigen3 库；大概率是因为 Pangolin 版本为 0.6，但 ORB-SLAM2 使用的 Pangolin 版本为 0.5；一种方法是将 Pangolin 版本退回 0.5，另一种方法是将 CMakeList.txt 中的 Eigen3 REQUIRED 改为 REQUIRED NO_MODULE。如果仍然找不到 Eigen3 库，如果是用 Eigen3 源代码编译安装的非模板类 Eigen3 库，则可以通过 ln -s 建立软链接的方式，在 ORB 需要找到 Eigen3 的位置添加上 Eigen3 的库。

3. Eigen3 的问题，在 ros 编译的 CMakeList 中也需要修改。

普通编译完成后，使用 TUM 数据集进行测试，从 System.cc 中可以得出，在终端中需要三个参数：ORB 字典的路径、相机配置文件的路径、数据集的路径。

由于需要在 ROS 环境下使用，首先执行 build_ros.sh。之后需要添加环境变量给 ROS 工作空间，即在.bashrc 文件中，添加上 ROS 功能包的路径，指向 Examples/ROS 文件夹。至此，ORB-SLAM2 在普通环境和 ROS 环境下均配置完成。

3.3 CCM-SLAM

CCM-SLAM 是由苏黎世联邦理工大学

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

6.2 对未来工作的展望

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

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。

毕业设计小结