

# 本科毕业设计（论文）开题报告

专业： 飞行器控制与信息工程

班级： 01081802

学号	2018300485	姓名	刘昭宏	指导教师	布树辉
报告题目	集群无人机协同 SLAM				
题目来源（划 √）	科研 <input checked="" type="checkbox"/> 生产 <input type="checkbox"/> 实验室 <input type="checkbox"/> 专题研究 <input type="checkbox"/> 企业联合 <input type="checkbox"/>				
论文类型（划 √）	工程设计类 <input checked="" type="checkbox"/> 实验研究类 <input type="checkbox"/> 软件开发类 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>				
报告日期	2022 年 3 月 9 日		报告地点	线上	

开题报告（不少于 1000 字）

## 一、选题背景、意义及依据

当今阶段，无人机技术迅速发展，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

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<sup>[1]</sup>。

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<sup>[2]</sup>。

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。

## 二、国内外研究现状

### 2.1 SLAM

同时定位与建图（SLAM, simultaneous localization and mapping）技术在国内外机器人、无人驾驶等领域趋于成熟。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）<sup>[6]</sup>。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）<sup>[5]</sup>。

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<sup>[7]</sup>，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<sup>[8]</sup>。

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<sup>[9]</sup>。

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<sup>[11]</sup>。

## 2.2 集群无人机的 SLAM

而在无人机上配备 SLAM 技术进行定位与建图已经发展地十分完善。以四旋翼无人机为例，其良好的空中悬停能力，能够传输中近距离稳定的图像传输；且无人机在空中飞行，地形和地面的障碍物对其限制较少，障碍物之间遮挡较少，能够较简单地建图。

无人机上本身配备 IMU 单元，是使用 VIO 方法进行定位与建图的可选平台。来自苏黎世联邦理工大学的机器人视觉实验室在近期的研究中，就涉及了多无人机

协同定位与建图的内容。他们认为在场景与相机的距离较远时，比如说无人机搭载的相机的距地面较远，VIO 方法的准确度会有较大下降；因为更小的夹角意味着更不准确的深度估计。因此他们在协同 SLAM 过程中，引入了可变基线的方法，基线的大小应该根据场景深度和任务要求的精确度来确定。

ETH 的研究是在两架无人机上运行分布式协作 SLAM，无人机之间用 WIFI 进行通信。系统分为三个主要部分，跟踪（tracking）、建图（mapping）、优化（optimization）。在跟踪进程中，图片数据和惯导的数据结合来完成 3D 地图点的定位；由扩展卡尔曼滤波方法完成信息融合，保证计算效率和低延迟；在建图进程中，通过完成对最新的关键帧与一个从 KFs 选择的 KF 的三角测量建立 3D Map Points；还需要更新地图点的不确定估计，建立现有的地图点与非原始 KFs 的联系；当建图进程完成对地图点的初始化之后，用非线性优化更新地图点，同时将 UWB 的测距信息引入到位姿估计中；在优化进程中，用 ADMM 算法确保两架无人机估计轨迹相同；使用基于 EKF（扩展卡尔曼滤波）的位姿估计，新的地图点 MP（Map Points）产生源于已有的关键帧和新产生的关键帧之间的三角测量，并且对新产生地图点的不确定性进行估计；其后端使用分布式优化，在这一部分引入了 UWB<sup>[4]</sup>，负责获得无人机之间的距离，并且在优化中完成 UWB 距离测量信息和视觉测量信息的融合，使多架无人机之间保持一致的估计。在无人机之间的通信方面，摒弃了大量图片信息的传输，取而代之传输关键帧的时间戳和 ID 信息、2D 关键点的位置、关键点的描述子、跟踪的位姿等信息，这样加快了信息处理的速度<sup>[3]</sup>。

关于集群无人机的 SLAM 方案，Patrik Schmuck 和 Margarita Chli 的研究 CCM-SLAM 就是一种多机器人协同 SLAM，能够在未知环境中进行多机器人的协同建图。该系统一大创新点是使用了服务器和终端的设计，系统包括一个中央服务端和各机器人的子端；每个机器人子端可以完成 SLAM 的前端内容，并将关键数据传给终端；终端则具有更强的处理信息能力，完成合并和优化地图的任务，并且向各子端发布协作信息。

关于多机建图的拼合问题，Christian Forster, Simon Lynen 等人在研究中指出，无人机将作为分布式的预处理器，只把关键帧的特征描述和位姿估计传给

地面站，地面站会给每架无人机建立单独的地图，并且在检测到重叠的时候完成对地图的拼接。其开发了自己的 CSfM 系统，该系统的一个基本特性就是能够判断无人机是否进入了一个其他无人机及本机已经扫描过的环境，重叠的判断主要是根据关键帧的特征描述，但仍然需要进行几何验证。在外观的重叠检测时，使用了基于 BRISK 特征的地点识别器，之后用三点（P3P）算法进行几何验证，将 P3P 的结果整合到 RANSAC 中进行去除异常值的操作，最后完成地图合并<sup>[10]</sup>。

## 2.3 研究现状分析

现有的研究在特定方面已经比较成熟，比如香港科技大学的开源 SLAM 方案 VINS-Fusion 在 IMU 和相机数据的融合上，苏黎世联邦理工大学的机器人视觉实验室在基于 UWB 的双机协同 SLAM 上，和 Patrik Schmuck 等人的优秀协同 SLAM 方案 CCM-SLAM 上。但是现有研究在工程上的实践较少，不同方案之间的融合比较困难，没有一个整体的多传感器融合和多机协同 SLAM 的实践。

## 四、课题研究目标、研究内容、研究方法及关键技术

### 3.1 研究目标

本研究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：

- 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。
- 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。
- 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。

### 3.2 研究内容

多机协同 SLAM 能大大提高任务进行的效率，但同时由于无人机数量较多，协同上存在一定困难；UWB 的引入可以提高定位精度。因此，本次研究内容是多机协作进行定位与建图，并且可以引入 UWB 提高精度。

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

### 3.3 关键技术

实现研究内容需要以下关键技术：

1. ROS 和 PX4 的使用：ROS (Robotics Operating System) 作为最完善的开

源机器人操作系统，通过其 MAVROS 发布和订阅的话题机制，能够 and PX4 软件建立起通信，进而控制无人机；ROS 可以管理各种功能包，而 SLAM 的实现正需要借助大量的功能包，无人机的控制也需要功能包中的具体程序；ROS 中的 gazebo 为算法和控制方法提供了一个很好的仿真平台。

2. 多终端的同时定位与建图：要获得最终的场景地图和各终端的定位信息，必须有一套能够根据各个终端不同的视觉数据信息、各自构建的地图进行重叠检测、局部剔除与增强，进而才能获得完整的拼合后的地图以及各终端的具体位置。
3. 多无人机协作的框架和信息传递：多无人机完成协作任务必须基于一个具体的框架，该框架需要分配各机在任务中的工作，需要制定各机与地面站的通信方法、各机传输数据的内容；由于多机同时图传对带宽的占用较大，可以协调传输或在各机上做一定处理后传输，传输的内容可以是关键帧、建立的地图点等数据。
4. 真机的实验：最终的实验需要使用真机完成，因此必须掌握真机的操作、与地面站之间的通信方法、使用 ROS 功能包中的 SLAM 程序的方法，进而完成真机飞行中各机图像的采集、处理，各机的定位和地图的构建。

### 3.4 研究方法

1. 首先对参考文献进行略读和精读，略读了解文章的大致内容，查找兴趣点，决定需不需要仔细研究。对挑选出来的文章进行精读，做好翻译，建立对其研究问题的认识，了解解决问题的方法。
2. 学习 SLAM 的基础知识，明白 SLAM 技术的内部原理，比如通过特征点估算运动和一些先进的后端优化方法，能够手动实现一些 SLAM 工程。最好找到一个开源的优秀的 SLAM 框架，加以理解和运用。用无人机拍摄的照片进行 SLAM，并且后续生成点图。
3. 学习 OpenCV 和多视图几何的基本知识，熟练运用 OpenCV 内部函数，最终完成地图的构建。
4. 学习使用 ROS 环境，和地面站如 QGC 和 Fast Planner 的配置，明白 ROS 的信息通信，话题的发布和接收，学会写自己的软件包并且在 catkin 工程

中调用。

## 五、论文所遇到的困难和问题、拟采取的解决措施及预期达到的目标

论文中遇到的主要困难和问题主要有：基础知识上的困难有：SLAM 基础的学习，对其中数学知识了解较少，编程能力不强，对于 OpenCV 和 ROS，MAVROS，PX4 的应用不熟练；技术上的困难有，图像重叠的判断策略及算法较难，地图融合的策略较难，多机的通信机制十分复杂等。

解决措施为努力学习 SLAM 基础知识，学会有的放矢，抓住主要矛盾，先从整体上完成工程，再对其内部的细节和创新点进行探索、学习和研究。要多查官网，找寻获取信息的渠道和解决问题的方法。

预期目标为，掌握 SLAM 基本知识，在仿真中自建场景，完成多机 UWB 定位与建图；在真机上完成单机 SLAM，并且在电脑上完成建图。

## 六、论文进度安排

2022/1/15-2021/1/31：学习 SLAM 算法，了解其基本原理

2022/1/31-2022/2/14：跑通无人机上的 SLAM 代码，能够使用无人机建图

2022/2/14-2022/2/28：详细学习 OpenCV 的成员函数

2022/3/1-2022/3/21：研究掌握拼接地图的策略和方法

2022/3/21-2022/4/7：研究多机 SLAM，并且引入地图拼接

2022/4/7-2022/5/1：整合代码，真机实验

2022/5/1-2022/6/1：论文撰写，准备答辩

## 七、参考文献

- [1] 王晨捷, 罗斌, 李成源, 等. 无人机视觉 SLAM 协同建图与导航. 测绘学报, 2020, 49(6): 767-776. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2020. 20190145
- [2] 高家隆. 多无人机协同定位与建图技术研究 [D]. 国防科技大学, 2019. DOI:10. 27052/d. cnki. gzjgu. 2019. 000499.
- [3] M. Karrer and M. Chli, "Distributed Variable-Baseline Stereo SLAM from two UAVs," 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2021, pp. 82-88, doi: 10.1109/ICRA48506. 2021. 9560944.



- [4] 熊茂华, 熊昕编著. 物联网技术与应用开发[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012. 08
- [5] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige and G. Bradski, "ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF," 2011 International Conference on Computer Vision, 2011, pp. 2564-2571, doi: 10.1109/ICCV.2011.6126544.
- [6] 高翔, 张涛, 颜沁睿, 刘毅, 视觉 SLAM 十四讲: 从理论到实践, 电子工业出版社, 2017
- [7] 杨明, 王宏, 何克忠, 张钺. 基于激光雷达的移动机器人环境建模与避障 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2000(07):112-116. DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2000.07.030.
- [8] Avrutov, V.V., Sapegin, A.N., Stefanishin, Z.S. *et al.* Calibration of an Inertial Measurement Unit. *Int Appl Mech* **53**, 228 - 236 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10778-017-0808-4>
- [9] T. Qin, P. Li and S. Shen, "VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator," in IEEE Transactions on Robotics, vol. 34, no. 4, pp. 1004-1020, Aug. 2018, doi: 10.1109/TR0.2018.2853729.
- [10] C. Forster, S. Lynen, L. Kneip and D. Scaramuzza, "Collaborative monocular SLAM with multiple Micro Aerial Vehicles," 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013, pp. 3962-3970, doi: 10.1109/IROS.2013.6696923.
- [11] 任伟建, 高强, 康朝海, 霍凤财, 张志强. 移动机器人同步定位与建图技术综述 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(02):1-10+37. DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2022.02.001.

指导教师意见:

论文可行, 在研究中应着重注意协同的具体方案

签名: 

2022 年 3 月 9 日

开题评议小组成员:



开题评议小组意见: (包括对论文的选题、难度、进度、工作量、论文形式意见):

1. 论文选题: ☐ 有理论意义; ☐ 有实用价值; ☒ 有理论意义与实用价值;  
☐ 意义不大。
2. 论文的难度: ☐ 偏高; ☒ 适当; ☐ 偏低。
3. 论文的工作量: ☐ 偏大; ☒ 适当; ☐ 偏小。
4. 进度: ☒ 可行; ☐ 不可行;
5. 学生开题报告中反映出的综合能力和表达能力: ☒ 好; ☐ 较好; 一般; ☐ 较差。
6. 论文形式意见: ☒ 可行; ☐ 不可行;
7. 对论文选题报告的总体评价: ☐ 好; ☒ 较好; ☐ 一般; ☐ 较差。

(在相应的方块内作记号“√”)

评  
议  
结  
论

是否同意论文选题报告: ☒ 同意; ☐ 需重做  
(在相应的方块内作记号“√”)

评议小组组长签名:



2022 年 3 月 9 日