

哈爾濱工業大學

本科毕业论文（设计）开题报告

题 目：基于 GPS 数据融合的开阔场景下
双目视觉里程计研究

专 业 机器人工程

学 生 李明谦

学 号 8200880133

指导教师 佟明斯

日 期 2023 年 10 月 21 日

哈尔滨工业大学教务处制

说 明

一、开题报告主要内容

1. 课题来源及研究的目的和意义
2. 国内外在该方向的研究现状及分析
3. 主要研究内容
4. 研究方案
5. 进度安排，预期达到的目标
6. 课题已具备和所需的条件、经费
7. 研究过程中可能遇到的困难和问题，解决的措施
8. 主要参考文献

二、开题报告要求

1. 开题报告的字数应在 3000 字以上。
2. 参考文献的要求：

（1）本科毕业论文（设计）的参考文献一般不少于 15 篇，外文文献不少于 3 篇（特殊专业可酌情确定明确要求），应有近两年的参考文献。产品说明书、未公开发表的研究报告不宜作为参考资料。

（2）参考文献按在开题报告中出现的次序列出。

（3）参考文献书写顺序：序号 作者. 文章名. 学术刊物名. 年, 卷(期): 引用起止页.

三、报告需用 A4 纸双面打印，左侧装订，统一交所在院（系）保存，以备检查。

四、此说明页不得删除。

目 录

1. 课题来源及研究的目的和意义	4
1.1 课题来源	4
1.2 研究的目的和意义	4
2. 国内外在该方向的研究现状及分析	5
2.1 视觉里程计国内研究现状	5
2.2 视觉里程计国外研究现状	6
2.3 对国内外研究现状的分析	6
3. 主要研究内容	7
3.1 基于 ORB 算法的特征点检测与跟踪的方法研究	7
3.2 基于滤波的双目视觉惯性里程计的实现方法研究	7
3.3 基于双目视觉惯性里程计和 GPS 数据融合的方法研究	8
3.4 研究内容过程图	8
4. 研究方案及可行性分析	8
4.1 研究方案	8
4.1.1 基于 ORB 算法的特征点检测与跟踪的研究方案	9
4.1.2 基于滤波的双目视觉惯性里程计的研究方案	9
4.1.3 基于双目视觉惯性里程计和 GPS 数据融合的研究方案	9
4.2 可行性分析	10
5. 进度安排预期达到的目标	10
5.1 进度安排	10
5.2 预期达到的目标	10
6. 课题已具备和所需的条件、经费	10
6.1 课题具备的条件	10
6.2 经费	11
7. 研究过程中可能遇到的困难和问题，解决的措施	11
7.1 可能存在的困难和问题	11
7.2 拟解决的措施	11
8. 主要参考文献	11

1. 课题来源及研究的目的和意义

1.1 课题来源

本课题来源于智能控制系统研究所在研横向项目，该项目对无人机在开阔场景下的自主定位精度和鲁棒性有较高的要求，本课题针对该问题开展基于 GPS 数据融合的双目视觉里程计研究。

1.2 研究的目的和意义

过去的几十年来，随着微型计算机和传感器技术的高速发展与计算机视觉和控制理论快速迭代，无人机(Unmanned Aerial Vehicles UAVs)理论和技术也日益成熟。按飞行方式分类，无人机可分为多旋翼无人机，固定翼无人机和混合型无人机。随着无人机技术的快速发展，凭借着体积小、成本低的特点，在军事领域和民用领域，无人机都展现出了巨大的发展潜力。如图 1-1 所示，无人机在军事上可用于侦察、目标追踪、情报搜集和战斗行动，以减少对军人的风险；在商业和农业上用于电力输电线路巡检、农田管理、监测农作物健康和灌溉需求；在紧急救援中用于搜索和救援任务，如寻找失踪人员或在自灾害后进行灾害评估；在环境监测中用于监测气象、空气质量、森林火灾和野生动植物迁徙等；在电影和媒体中用于航拍、电影制作和新闻报道，以获得独特的视角；在物流和运输中用于快递、货物配送和监测交通流量。



(a) 侦查/打击一体化无人机



(b) 输电线路巡检



(c) 地震救援



(d) 监测大气



(e) 航拍



(f) 物流运输

图 1-1 无人机的应用

虽然无人机在各领域中的应用已经十分广泛，但在电力输电线路巡检中，无人机的视觉定位仍存在以下 2 个难点：

1、由于户外场地的广阔性质，其中可供相机系统识别的对象数量相对较少，这导致相机视觉感知和目标检测的任务变得更具挑战性。在这种环境下，相机系统可能会受到遮挡、光照变化和视角问题的影响，这些因素都可能对目标的准确识别产生负面影响。因此，相机系统可能面临缺乏足够特定特征的挑战，相机识别精度较低，从而导致无人机自身定位精度下降。

2、无人机在运动时具有较高的速度，这意味着在极短的时间内它将覆盖大量的地理区域。然而，仅仅依赖相机数据进行自身定位存在一些显著的挑战。一方面，相机的快速位置采集可能导致在连续图像帧之间出现明显的位置变化，这可能会对无人机的自身定位精度造成不利影响。另一方面，无人机本身的运动和加速度也会增加相机定位的不稳定性，因为快速的运动可能导致图像模糊或失真，进而干扰了准确的目标识别和特征匹配，从而导致无人机自身定位准确度下降。

经文献调研，现有方法尚不足以解决上述问题。针对这些问题，本文将双目视觉里程计和 GPS 数据进行融合，利用 GPS 在开阔场景下的稳定性提升无人机在开阔场景下自身定位的精准性和鲁棒性，满足无人机户外电力巡检的自主作业需求。

2. 国内外在该方向的研究现状及分析

视觉里程计(Visual Odometry, 简称 VO)是一种用于机器视觉和机器人领域的技术，旨在通过分析连续的图像帧来确定移动相机或机器人的相对运动，从而估计其轨迹和定位信息。视觉里程计基于计算机视觉原理，通过识别并跟踪在连续图像帧中可见的特征点、边缘或区域，来测量相邻图像帧之间的相机位移。这些位移测量然后被积分或累积，以获得相机或机器人的运动轨迹和定位信息。

视觉里程计常用的有三种方法^[1]：基于特征点的方法，基于直接跟踪的方法和基于混合半直接跟踪的方法。按照相机的类型 VO 可以分为单目、立体和 RGB-D 三类；按照利用的图像信息 VO 可以分为特征法和直接法；按照减少漂移的方法 VO 可以分为采用滤波器和非线性优化法^[2]。

2.1 视觉里程计国内研究现状

清华大学石宗英等人提出了一种基于街景图像的无人机视觉定位的方法^[3]。利用 Google 街景图像作为先验信息，得出全球定位无人机(UAV)在城市场景中的位置。该方法仅使用单目相机和视觉里程计估计，并包括两个步骤：地点识别和度量定位。地点识别算法通过将航空图像与数据库中的地理标记图像进行匹配来确定 UAV 的位置。度量定位方法通过跟踪图像序列中的特征、绝对尺度估计和轨迹优化来实现 UAV 的精确定位。该方法可以纠正视觉里程计的尺度漂移，并将 UAV 的姿态估计在真实世界坐标系中进行。该技术在监视、制图和交付服务等领域具有潜在的应用价值。

杨绍武等人提出了无人机在未知复杂环境中整合多个摄像头的测量数据同时定位和地图构建(SLAM)进行自主导航，通过多摄像头视觉 SLAM 解决无人机稳健姿态跟踪和地图构建的挑战，实现鲁棒的姿态跟踪和地图优化^[4]。

王科，职恒辉，王文森等人提出了利用深度学习提高视觉惯性里程计的准确性和鲁棒性^[5-7]。

钟家跃研究了利用双目视觉里程计实现无人机在未知环境下实现自主导航的方法^[8]，并且用实验结果证明了在室外，基于 SIFT 算法的视觉里程计估计精度优于基于 ORB 算法的视觉里程计，而在室内，基于 ORB 算法的视觉里程计略优。

吕华龙提出了一种基于双目立体视觉与 IMU 和 GPS 相融合的无人机状态估计算法^[9], 用于提升无人机自主感知的稳定性, 实现更加鲁棒的无人机自主感知与导航系统。

2.2 视觉里程计国外研究现状

Cvišić 等人提出了一种针对无人机在 GPS 信号不可用环境下的计算机视觉定位与建图方法, 称为 SOFT-SLAM^[10]。该方法主要基于双目视觉, 通过特征跟踪获取场景深度信息, 实现了高效的定位和建图。该方法的优点在于可以在嵌入式计算机上实时运行, 同时保留足够的计算资源用于控制和导航算法。该方法在 KIT 数据集上的表现优于其他双目视觉 SLAM 方法。此外, 该方法还可以应用于无人机自主导航、环境监测等领域。

Giovanni Cioffi 等人提出了一种将全球定位信息与视觉和惯性测量融合在紧密耦合的非线性优化估计器中的方法^[11]。通过使用最近系统状态的滑动窗口, 最小化包括视觉重投影误差、惯性误差和全局位置残差的代价函数。该方法利用了 IMU 预积分方法来高效地推导全局位置误差项, 通过考虑所有传感器测量之间的相关性来扩展以往的研究, 从而得到准确且全球一致的估计结果, 而计算成本增加几乎可以忽略不计。

Mur-Artal 和 Tardos 提出了 ORB-SLAM 和 ORB-SLAM2 算法^[12-13], Carlos Campos 等人在 ORB-SLAM2 算法的基础上提出了 ORB-SLAM3 算法^[14]。这些算法是一种用于实时双目摄像头的视觉 SLAM 系统, 其使用 FAST (Features from Accelerated Segment Test) 特征检测器来快速提取图像中的关键点, 然后使用 BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features) 描述符来描述这些关键点, 这些描述符具有二进制形式, 使其计算速度较快。并且 ORB-SLAM2 具有闭环检测功能, 可以检测到相机返回到之前访问过的位置的情况, 这有助于纠正累积误差, 并提高 SLAM 系统的鲁棒性。

Khan 等人提出了一种改进无人机姿态估计的新方法^[15], 其单目系统采用半密集视觉里程计 (SDVO) 方法通过将惯性测量单元 (IMU) 的姿态信息注入单目深度估计过程中, 利用卡尔曼滤波将单目相机的数据和 IMU 数据融合, 减少姿态估计误差, 提高深度图的鲁棒性。

2.3 对国内外研究现状的分析

综合以上对国内外研究现状的分析, 基于街景图像的无人机视觉定位和 SOFT-SLAM 方法都是在无 GPS 环境下进行的定位, 对于无 GPS 环境有广泛的应用前景, 但由于缺乏 GPS 数据, 并且仅使用单目相机和视觉里程计有可能在复杂环境中会受到尺度漂移等问题的影响; 多摄像头的引入在于整合了多个摄像头的测量数据, 提高了无人机在位置复杂环境中的自主导航能力, 但是此种方法对硬件要求较高, 可能会增加系统成本和复杂性; 深度学习方法的引入以及多传感器数据的融合提高了视觉惯性里程计的准确性和鲁棒性, 但训练深度学习模型需要大量数据, 会占用更多的计算资源。

而上述论文中用到的多传感器数据的融合虽然是本课题参考的主要方向, 但以上论文中提到的方法均没有考虑到本课题中无人机工作环境的特殊性, 不能很好地解决因此需要在以上论文的方法上做出调整以适合本课题的研究目标; ORB-SLAM2 算法是本课题参考

的主要算法。通过在前人论文提出的多传感器数据融合的方向上进行研究，同时参考 ORB-SLAM2 算法，将双目视觉里程计和 GPS 数据进行融合，利用 GPS 在开阔场景下的稳定性提升无人机在开阔场景下自身定位的精准性和鲁棒性，满足无人机户外电力巡检的自主作业需求。

3. 主要研究内容

3.1 基于 ORB 算法的特征点检测与跟踪的方法研究

无人机在飞行过程中需要较高的定位精度，所以对于特征点的检测与跟踪直接关系到无人机飞行过程中定位结果的好坏。在本课题的研究中，由于开阔场景下无人机飞行姿态的变化，所以考虑在现有 ORB 算法的基础上，通过引入一些识别和优化算法，以帮助无人机飞行姿态变化中检测和描述在不同角度，不同方向和不同尺度上的特征点，同时 ORB 算法本身就对图像噪声和一定程度的遮挡具有较强的鲁棒性，这也能够帮助无人机在飞行过程中对不同视角的物体进行更好的识别和跟踪；此外，由于无人机在工作时飞行速度较快，会导致检测到的特征点出现尺度上的一些变化，描述子出现噪声过大等问题。本课题打算对 ORB 算法使用的 FAST 角点检测算法和 BRIEF 二进制描述子进行一些优化，例如在使用 FAST 角点检测时构建高斯金字塔使其具有尺度不变性，在使用 BRIEF 二进制描述子时可以使用高斯卷积核进行滤波降噪，再加之这些描述子本身计算效率高和空间紧凑的特性，我们可以极大地减少存储和匹配成本，有利于无人机在飞行过程中出色地计算实时定位，从而得到较高定位精度的视觉里程计。

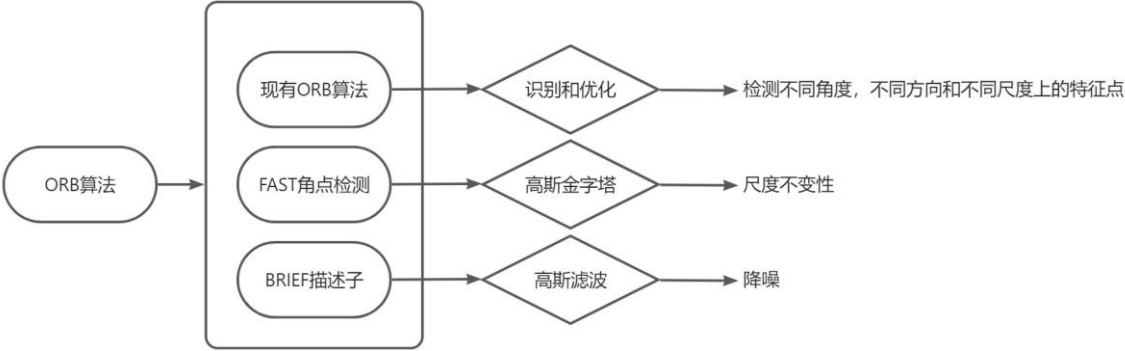


图 3-1 ORB 算法研究内容过程图

3.2 基于滤波的双目视觉惯性里程计的实现方法研究

无人机在开阔场景下的飞行过程中，由于飞行姿态会不断发生变化，仅依赖双目相机的数据是不足以实现对无人机自身位姿的准确估计的。这种情况可能导致无人机在自身定位方面出现偏差。然而，通过将无人机上搭载的 IMU（惯性测量单元）传感器的数据与双目相机获取的数据进行融合，采用基于扩展卡尔曼滤波方法，可以实现更为精确的自身位姿状态估计，从而获得更高的定位精度，实现了在无人机上应用双目视觉惯性里程计的目标。

在这个融合过程中，IMU 传感器提供了关于无人机三轴加速度和角速度的信息，视觉里程计则通过 3.1 中的研究已经达到了较高的定位精度。通过将这两种不同类型的数据结

合起来，在实际操作过程中则可以通过不断改变扩展卡尔曼滤波算法的参数，使其可以更好地校正由于飞行姿态变化引起的误差，从而提供更准确的位姿估计，帮助无人机更稳定地执行自主导航，避障，目标跟踪等任务，从而更好地完成电力输电巡检作业。

3.3 基于双目视觉惯性里程计和 GPS 数据融合的方法研究

在获取了搭载在无人机上的双目视觉惯性里程计数据之后，需要考虑到本研究所涉及的无人机操作环境的特殊性，即户外广阔环境。在这种环境下，仅仅依靠 3.2 研究中得到的双目视觉惯性里程计可能会带来一些挑战。这是因为无人机在户外环境中的飞行速度可能会非常快，而所覆盖的空间范围也相对较大，这导致双目相机所能够检测和跟踪的特征点数量相对较少。从而降低双目视觉惯性里程计的准确性。

因此，在这种情况下，我们可以考虑采用一种更综合的方法，将双目视觉惯性里程计数据与 GPS（全球定位系统）数据相结合，利用扩展卡尔曼滤波技术来融合这两种不同类型的数据源。这种数据融合的方式可以帮助我们实现更高精度的定位结果，特别是在户外环境中，其中 GPS 通常提供了相对准确的位置信息。通过将双目视觉惯性里程计和 GPS 数据结合起来，无人机可以更可靠地确定自身位置，克服了双目相机在特征点有限的情况下定位不精准的限制。这种融合方法可以提高无人机的导航精度，确保它可以在广阔的户外环境中完成电路巡检任务，而不会受到位置不确定性的干扰。

3.4 研究内容过程图

综合以上研究内容，可得到基于 GPS 数据融合的双目视觉里程计研究过程图，如图 3-2 所示：

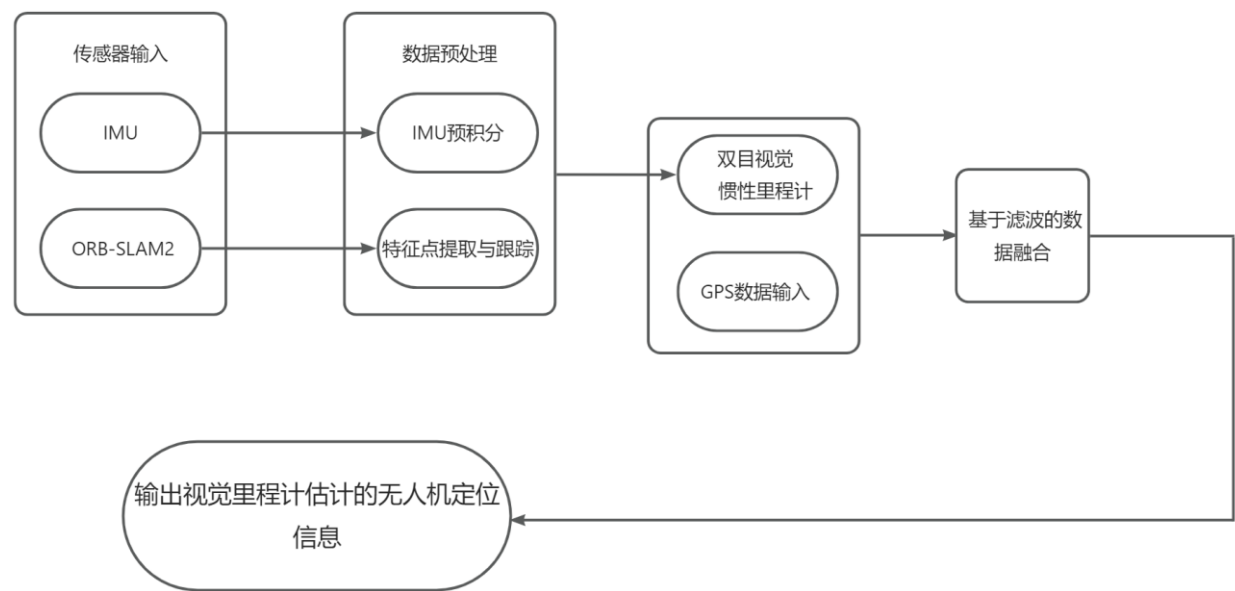


图 3-2 双目视觉里程计研究过程图

4. 研究方案及可行性分析

4.1 研究方案

4.1.1 基于 ORB 算法的特征点检测与跟踪的研究方案

该方案主要采用论文 13 中提到的 ORB-SLAM2 算法。

(1) **图像预处理** 通过对图像进行预处理，例如灰度化，去噪，以提高 ORB 算法的稳定性和准确性。

(2) **特征点检测** 利用 FAST (Features From Accelerated Segment Test) 算法检测特征点。首先选取合适的阈值 n ($n < 12$)，对无人机识别到场景的多张图像提取多个特征点，然后对提取的特征点集进行训练并建立决策树，利用决策树对类似场景进行特征点的检测与分类。对于临近位置存在多个特征点的情况，则需要进一步做非极大值抑制来排除不需要的特征点。

(3) **特征点描述** BRIEF 特征描述子是一种对已检测到的特征点进行表示和描述的特征描述方法，在进行过 FAST 特征点检测之后，我们可以利用 BRIEF 算法对邻域内的像素进行高斯平滑滤除噪声，最后在邻域窗口内随机选取 $n = 128 / 256 / 512$ 对像素点，根据灰度值大小编码成二进制串，生成 n bit 的特征描述子。因为 BRIEF 算法不具备尺度不变性和旋转不变性，并且对噪声敏感，所以在 ORB 算法中可以利用积分图像在 31×31 的窗口中选取随机点对，并以选取的随机点为中心，在 5×5 的窗口内计算灰度平均值，比较随机点对的邻域灰度均值，进行二进制编码，而不是仅仅由两个随机点对的像素值决定编码结果，可以有效地解决噪声问题。

4.1.2 基于滤波的双目视觉惯性里程计的研究方案

(1) **预处理阶段** 在这个阶段，主要是对 IMU 传感器数据进行预积分操作。这包括对从 IMU 传感器获取的加速度和角速度数据进行积分，以计算出无人机的姿态信息、速度和位移。同时，预积分操作可以在时间步骤之间进行插值，以更精确地估计无人机在连续时间内的运动。尤其对于高速运动的无人机而言，这有助于实现平滑的位姿估计。

(2) **初始化阶段** 在这个阶段中主要用于为状态估计系统提供一组起始状态信息。这些初始状态信息包括了 IMU 传感器坐标系和摄像头传感器坐标系之间的相对外参关系，以及初始窗口内每个图像帧的位姿、速度、IMU 传感器的测量偏置，以及特征点的深度等重要状态数据。这一阶段的目的在于建立状态估计系统的初始参考点，为后续的定位和导航任务提供一个可靠的起点。

(3) **数据融合阶段** 在这个阶段，主要通过扩展卡尔曼滤波的方法将预处理过得 IMU 数据和双目视觉里程计的数据进行融合，实现较高精度的双目视觉惯性里程计，为无人机的导航和定位提供可靠的信息。

4.1.3 基于双目视觉惯性里程计和 GPS 数据融合的研究方案

该研究方案主要参考论文 11 中苏黎世大学 (UZH) 的项目中用到的算法。将视觉惯性里程计通过与 GPS 数据通过紧耦合的方式融合在一起。

(1) **数据预处理** 对双目视觉惯性里程计的数据进行预处理，包括去除噪声、校准和对齐等操作，以确保数据的准确性和一致性。

(2) **状态估计** 使用非线性优化算法，例如扩展卡尔曼滤波器 (EKF) 或非线性

最小二乘法，来估计系统的状态，即相机和 IMU 的姿态和位置。

(3) **信息融合** 在状态估计的过程中，我们将全局位置测量与视觉和惯性测量进行融合。通过考虑全局位置信息，我们可以更好地约束系统的姿态和位置，从而提高姿态估计的准确性和稳定性。

(4) **优化求解** 使用优化算法对系统的状态进行迭代优化，以最小化视觉、惯性和全局位置测量之间的残差。通过迭代优化，我们可以得到更准确和一致的姿态估计结果。

总体来说，紧耦合方法通过直接融合全局位置信息与视觉和惯性测量，充分利用了所有测量之间的相关性，从而实现了更准确和稳定的姿态估计，得到了精度更高的无人机自主定位。

4.2 可行性分析

以上方案中用到的算法均经过学术论文和项目的检验，且可用于实验室的现有设备上，方案可行。

5. 进度安排预期达到的目标

5.1 进度安排

- (1) 2023.10—2023.12：收集资料，完成文献查阅；
- (2) 2023.12—2024.1：确定 ORB 算法的特征点检测与跟踪的实现方法，初步完成 ORB 特征点检测与跟踪的代码编写；
- (3) 2024.1—2024.2：确定双目视觉惯性里程计的实现方法，初步完成双目视觉惯性里程计的代码编写；
- (4) 2024.2—2024.3：确定双目视觉惯性里程计和 GPS 数据融合的方法，初步完成数据融合的代码编写；
- (5) 2024.3—2024.5：在无人机平台上运行相关算法和代码，并根据运行效果不断改善算法和代码，实现最终效果和各部分的优化
- (6) 2024.5—2024.6：整理结果，完成毕业论文。

5.2 预期达到的目标

实现相关算法和代码在无人机平台上的实时运行，并且使得无人机自身定位精度和稳定性满足系统实际作业需求。

6. 课题已具备和所需的条件、经费

6.1 课题具备的条件

课题组拥有面积 100 平方米的飞行器控制实验室，配备有 OptiTrack 室内定位系统、Quanser 飞行器控制系列实验平台以及多类型自研无人机等设备设施。建设有四旋翼无人机网络化协同控制平台，其由 4 架 QBall 四旋翼无人机、OptiTrack 红外定位系统以及地面控制站组成，用于无人机网络化协同控制理论与方法的研究及验证，支持多无人机与多个地面机器人的编队与协同控制算法研究，可实现控制器的快速搭建与验证，实现无人机队

形生成、保持与变换以及飞行任务的规划、组织与执行。同时实验室有自主研发的 MiniFly 小型无人机网络化协同控制平台，能实现多达 30 架小型无人机的协同控制实验；有自主开发完成的全自主高机动性空中机器人平台，由搭载了深度相机、激光雷达等多种传感器的无人机、视觉定位系统以及地面控制站组成，支持三维感知、SLAM、路径规划、机器学习等相关前沿领域的研究与实验，具备完善的实验条件。



(a) 飞行器控制实验室



(b) QBall 无人机编队



(c) MiniFly 无人机编队



(d) 全自主无人机



(e) 灵巧无人机



(f) 并联型飞行机械臂

图 6-1 实验室条件

6.2 经费

项目经费充足，能够保证课题的顺利进行。

7. 研究过程中可能遇到的困难和问题，解决的措施

7.1 可能存在的困难和问题

- (1) 使用 ORB-SLAM2 算法时可能会出现相关代码无法运行；
- (2) 在数据融合的过程中可能会出现数据处理错误导致结果异常；
- (3) 在无人机上操作时可能会由于缺乏经验而导致实验结果与预期结果偏差较大。

7.2 拟解决的措施

- (1) 与老师和学长充分交流经验，保持密切沟通；
- (2) 进一步熟悉代码编程方法；
- (3) 广泛参考现有的算法设计以及论文和项目中的代码，通过不断实验锻炼能力。

8. 主要参考文献

- [1] He, M., Zhu, C., Huang, Q. *et al.* A review of monocular visual odometry. *Vis Comput* **36**, 1053–1065 (2020).
- [2] 慈文彦, 黄影平, 胡兴. 视觉里程计算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2019,36(09):2561-2568.
- [3] X. Yan, Z. Shi and Y. Zhong, "Vision-based Global Localization of Unmanned Aerial Vehicles with Street View Images," *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, Wuhan, China, 2018, pp. 4672-4678.
- [4] Shaowu Yang, Sebastian A. Scherer, Xiaodong Yi, Andreas Zell, Multi-camera visual SLAM for autonomous navigation of micro aerial vehicles, *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 93, 2017, Pages 116-134, ISSN 0921-8890.
- [5] K. Wang, S. Ma, J. Chen, F. Ren and J. Lu, "Approaches, Challenges, and Applications for Deep Visual Odometry: Toward Complicated and Emerging Areas," in *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 35-49, March 2022.
- [6] 职恒辉, 尹晨阳, 李慧斌. 基于深度学习的视觉里程计方法综述[J]. 计算机工程与应用, 2022,58(20):1-15.
- [7] 王文森, 黄凤荣, 王旭等. 基于深度学习的视觉惯性里程计技术综述[J]. 计算机科学与探索, 2023,17(03):549-560.
- [8] 钟家跃. 未知环境下无人机的双目视觉 SLAM 方法研究[D]. 南京航空航天大学, 2020.
- [9] 吕华龙. 基于双目视觉的无人机自主感知与导航系统设计与实现[D]. 天津大学, 2022.
- [10] Cvišić, I, Ćesić, J, Marković, I, Petrović, I. SOFT-SLAM: Computationally efficient stereo visual simultaneous localization and mapping for autonomous unmanned aerial vehicles. *J Field Robotics*. 2018; 35: 578–595.
- [11] G. Cioffi and D. Scaramuzza, "Tightly-coupled Fusion of Global Positional Measurements in Optimization-based Visual-Inertial Odometry," *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Las Vegas, NV, USA, 2020, pp. 5089-5095.
- [12] R. Mur-Artal, J. M. M. Montiel and J. D. Tardós, "ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 5, pp. 1147-1163, Oct. 2015.
- [13] R. Mur-Artal and J. D. Tardós, "ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 5, pp. 1255-1262, Oct. 2017.
- [14] C. Campos, R. Elvira, J. J. G. Rodríguez, J. M. M. Montiel and J. D. Tardós, "ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual-Inertial, and Multimap SLAM," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 37, no. 6, pp. 1874-1890, Dec. 2021.
- [15] A. Khan and M. Hebert, "Multi modal pose fusion for monocular flight with unmanned aerial vehicles," *2018 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA, 2018, pp. 1-7, doi: 10.1109/AERO.2018.8396806.