

2021 年全国大学生电子设计竞赛

G 题： 植保飞行器



2021 年 11 月 7 日

目 录

1.	设计任务与要求	1
2.	系统方案设计与论证	1
2.1.	室内定位系统	1
2.2.	图像识别方案	2
2.3.	系统整体方案	2
3.	理论分析与计算	3
3.1.	PID 姿态控制	3
3.2.	V-SLAM 建模设计	3
3.3.	播撒路线规划算法	5
4.	系统软硬件设计	5
4.1.	系统硬件设计	5
4.1.1.	主控制器及外围电路设计	5
4.1.2.	飞行控制器及外围电路设计	5
4.2.	系统软件设计	6
4.2.1.	主程序框图	6
5.	系统测试及结果	7
5.1.	测试仪器与测试环境	7
5.2.	测试方法与测试数据	7
5.3.	测试结果分析及性能指标	8
6.	总结	8
	参考文献	9
	附 件	9

植保飞行器

【摘 要】 根据题目要求，采用两块 TM4C123G 开发板分别作为飞行器核心与飞行控制核心，辅以电子调速器，直流电机等部件搭建飞行器平台。以 Jetson 图像计算平台作为传感器处理核心。收集光流传感器，TOF，双目深度相机，IMU 的数据并融合实现三维地图视觉重建（V-SLAM）全场定位。在室内环境下，V-SLAM 回环误差为 3%，能实现飞行器位置的精确定位。使用 MobileNet-ssd 神经网络对地面字母“A”进行识别，实测准确度大于 80%。对地面使用摄像头拍照，通过颜色区分播撒区域和非播撒区域。设置路径算法使得在遍历播撒区域的同时对杆识别和避障，飞行器最后降落时据目标落点误差不超过 10cm，并能够在少于 360 秒内完成工作。

【关键词】 四旋翼飞行器；V-SLAM；机器视觉；神经网络；路径规划

1. 设计任务与要求

通过对本次赛题的分析研究，根据题目要求设计以下的任务：

- 1) 题目要求地面为淡灰色和淡绿色，无可以明显的可用于校准的特征，同时需要进行比较精准的导航，所以需要室内定位系统。
- 2) 需要足以承载定位系统且能够平稳飞行的四旋翼飞行平台，基于此目的我们需要相应的稳定的飞行控制系统与飞行动力系统来支撑相应的控制精度。
- 3) 题目要求从特定的“A”点处开始播撒，需要对起始点标识字母“A”进行识别，故需要 MobileNet-ssd 神经网络识别系统。
- 4) 题目要求在规定时间内完成任务，故需要使用路径规划和控制算法尽量，运行时间。
- 5) 根据题目可以得到的要求有寻找带有条形码的杆，识别相应的条形码，对播撒区和非播撒区进行区分，故需要图像识别系统对目标进行识别或区分。
- 6) 为了实现飞行器与操作者的交互，设计了无线传输控制器。

2. 系统方案设计与论证

经过以上分析，综合各个任务的需求，一共需要六个基本模块，如下图所示：

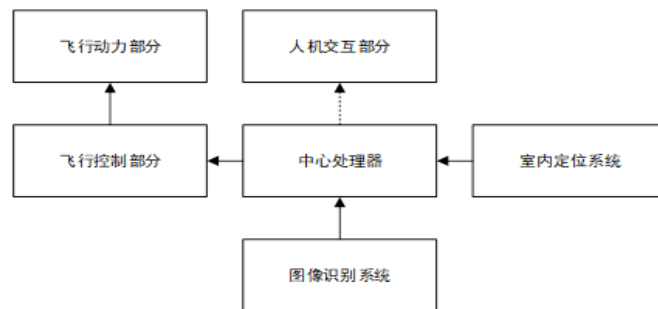


图 1：系统模块框图

2.1. 室内定位系统

在飞行过程中飞行器需要对自身位置进行定位，来确定是否进行播撒作业并决定下一步的方向。但是地面对各个播撒区域没有明显的标识图案，需要飞行器根据自身位置建立坐标进行导航，且需要满足植保飞行器完成任务的精度需求。

方案一：使用 IMU 进行惯性导航，加上光流辅助定位，使用 TOF 传感器获取高度反馈。该方案比较适合地面环境复杂的情况，而且整体重量轻可以提升飞行器的动力性能。

方案二：使用 V-SLAM 进行室内地图构建，绘制点云地图，进行室内定位，该方案鲁棒性强，可以应对复杂的周边环境，对地面条件以及场景光线条件要求很低。但是该方案传感器需要使用到深度相机与高算力图形计算平台，对于硬件的要求较高且整体质量较大。

题目要求的地面颜色单一，色彩饱和度低，不能够作为光流的输入，导致方案一的可

可靠性低。在将飞行器的动力系统电调规格替换为 40A、电机规格替换为 2216，螺旋桨规格替换为 9048 后，方案二所造成的飞行器升力不足的问题得以解决。且方案二中的算力要求较高，更加可靠，能够获得室内的三维地图与飞行器当前的绝对位置，结合成本，供电与算力综合考量之后选用方案二。使用 T265 双目深度相机、摄像头、光流传感器和具有 GPU 的 Jetson Nano 图像计算平台相结合来搭建机载 V-SLAM 系统。

2.2. 图像识别方案

对于起点处的标识字母“A”，需要起飞之后找到并定位，所以应当使用相应的方法在飞行过程中识别“A”，并确保识别结果快速准确。

方案一：特征点识别，适用于背景单一，目标比较复杂且图案边缘清晰的情况。

方案二：MobileNet-ssd 字符识别。使用神经网络，对算力需求高，且相对而言识别的错误率更高。但是由于导航方案选择基于 V-SLAM 导航，则无需添加设备降低开发难度。

方案一实现更简单，而且正确率更高，但是经测试后发现鲁棒性不高，在复杂光线条件下不能及时识别到“A”。因为飞行器上已经搭载了 Jetson 平台，故使用方案二提高实时性。

2.3. 系统整体方案

在本系统中有三个核心处理器，分别是飞行控制处理器，中央处理器，图像识别处理器。由于 TM4C123G 主频较高，硬件数量多可以与多个设备进行通信，可以满足系统中与多设备的通信需求和比较复杂的控制算法。所以选择此处理器作为飞行控制部分和中心处理器的 MCU。本系统使用 TM4C123G 作为中心控制器负责协调各个部分，进行控制调度，除此之外还有飞行控制部分用于控制飞行器的飞行姿态，执行中心控制器的移动指令。T265 双目深度相机采集室内全场的位置信息，Jetson 图像运算平台负责为整个系统进行 V-SLAM 处理，提供实时坐标和路径，对目标进行识别，系统整体框图如图 2 所示。

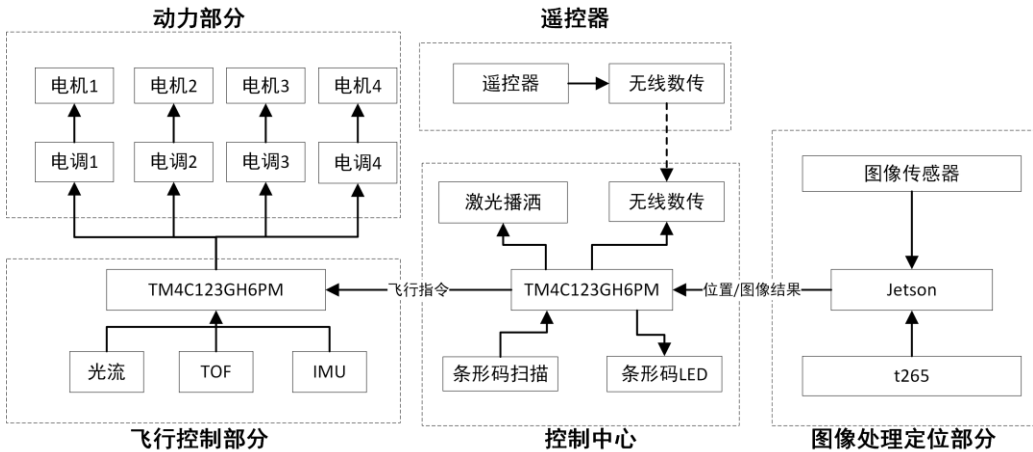


图 2：系统整体框图

3. 理论分析与计算

3.1. PID 姿态控制

四轴飞行器在飞行过程中，飞行姿态会动态变化，姿态控制算法能够使飞控系统自动控制四轴飞行器飞行姿态，飞行器仍能够按期望姿态平稳飞行。

该飞行器采用串级 PID 控制方法实现飞行器姿态控制。外环（角度环）以计算得到的飞行器姿态角 θ ， γ 和 ψ 为实际角度值，软件模拟遥控器各通道的遥控分量换算后作为期望角度值，控制频率为 200hz；内环（角速度环）以陀螺仪三轴角速度采样数据 w_x ， w_y 和 w_z 为实际角速度值，外环 PI 的输出量作为期望角速度值，控制频率为 500hz，姿态控制算法基本流程如图 2 所示。

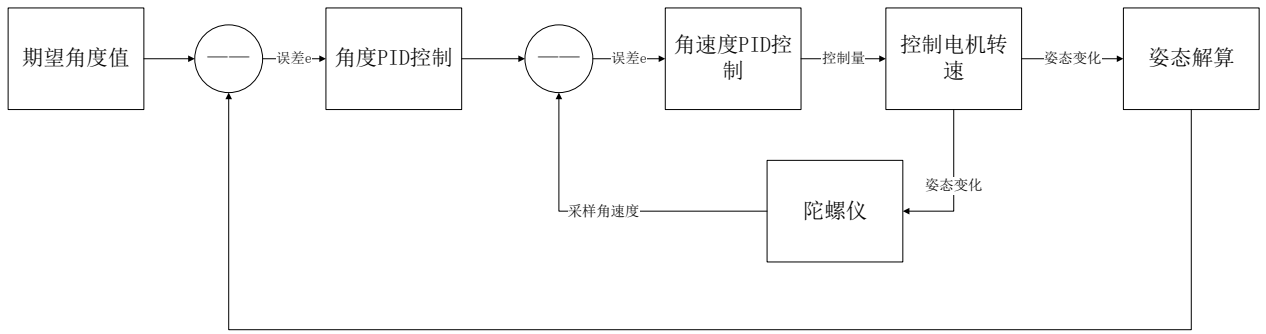


图 3：姿态控制算法基本流程[1]

外环（角度环）PID 控制计算公式如下：[2]

$$AnglePID_{out} = Kp \left[e(n) + \frac{1}{T_i} \sum_{j=1}^n e_j T_a + T_d \frac{e_n - e_{n-1}}{T_a} \right]$$

内环（角速度环）PID 控制计算公式如下：

$$VelocityPID_{out}(n) = k'_p \left[e(n)' + \frac{1}{T'_i} \sum_{j=1}^n e'_j T_v + T'_d \frac{e'_n - e'_{n-1}}{T_v} \right]$$

外环输入误差量： $e(n) = \text{期望角度} - \text{实际角度}$ ，内环输入误差量： $e(n)' = AnglePID_{out}(n)$ 。

3.2. V-SLAM 建模设计

V-SLAM 即 Visual Simultaneous Localization And Mapping（视觉同步定位与地图构建），通过机器视觉的方法，将整个飞行器运行的环境进行深度图像的提取与建模，通过解算形成的点云图，确定飞行器在整个环境中的位置。

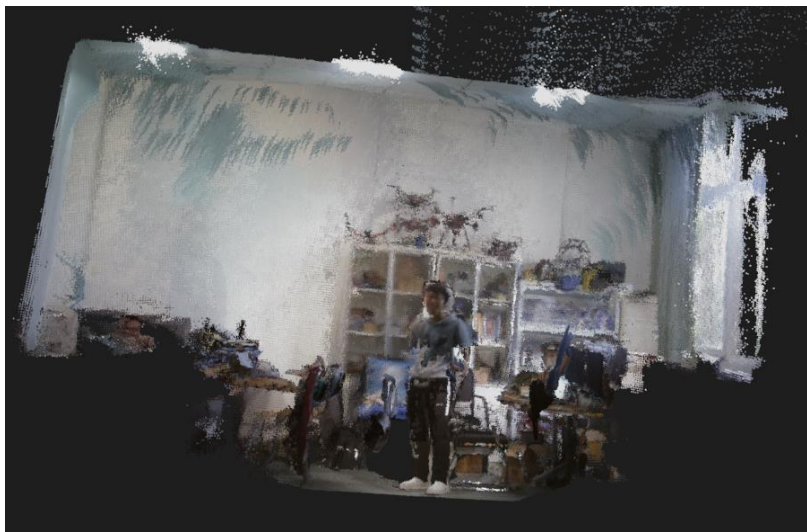


图 4：利用 ROS 回传飞行器 SLAM 数据渲染点云地图

经典的 V-SLAM 系统一般包含前端视觉里程计、后端优化、闭环检测和构图四个主要部分[3]。视觉传感器读取信息后，图像处理平台读取和预处理来自视觉传感器的信息。视觉里程计估算相邻图像间相机的运动，以及局部地图的模型。接下来后端接受不同时刻视觉里程计测量的相机位姿，以及回环检测的信息，对它们进行优化，得到全局一致的轨迹和地图。回环检测会判断机器人是否曾经到达过先前的位置。如果检测到回环，它会和信息提供给后端进行处理。根据估计的轨迹，建立与任务要求对应的地图。[4]

通过 CUDA 并行化特征点提取与匹配算法，减少建图运算压力，让 V-SLAM 能搭建在轻量化的 Jetson 图像计算平台上，为植保飞行器提供实时的环境三维地图，实现室内的实时精确定位。

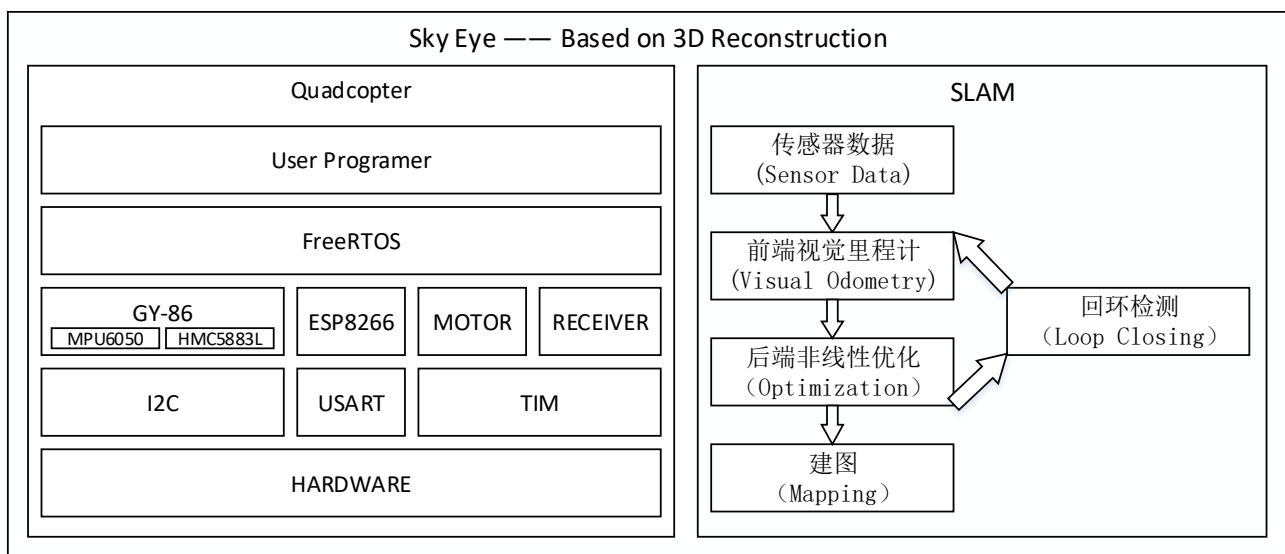


图 5：搭载在植保飞行器上的 V-SLAM

3.3. 播撒路线规划算法

根据题目的要求，需要在限定时间内完成到达起始作业地点、作业区域的遍历、对杆的扫描以及降落，同时还要兼顾飞行指令的简单化，这对路线的规划以及时间的分配提出了要求，于是提出以下的规划原则：

- 1) 每一格尽量少的经过的次数，减少重复遍历节约时间。
- 2) 减少转向和转弯，保持系统的稳定，减少因为移动造成的误差。

根据以上原则可以选择得到，应当以 S 型对地图进行遍历，如下图：

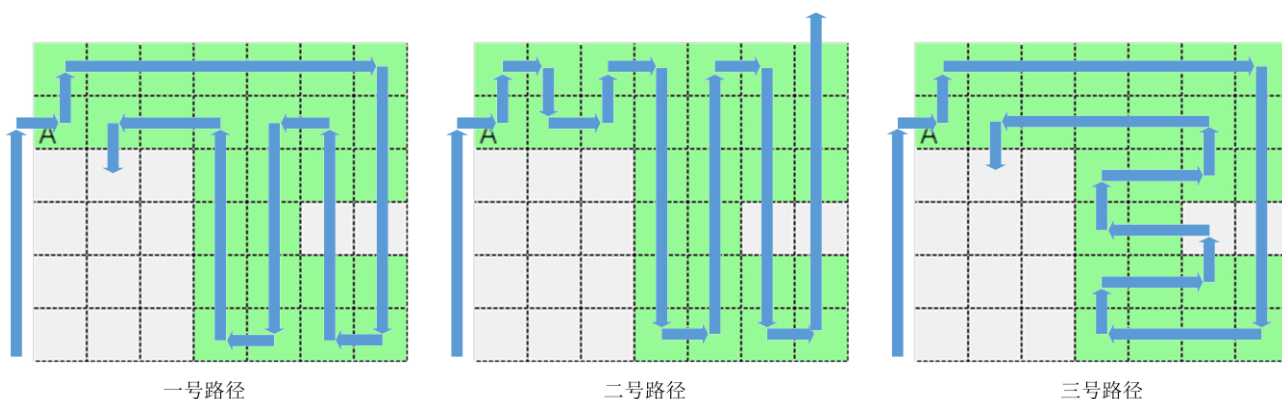


图 6：场地分析图

从图中可知，二号三号遍历路径均转弯 14 次，而一号路径一共转向 12 次，少进行了 2 次转向。且遍历的终点前者距离起点更近，所以采用左图所示的遍历方式更为高效。

从 A 点进入作业区开始，要遍历全图需要走过 30 格，回到终点需要经过 4 格，根据每格距离为 50cm，飞行器在任务完成过程中走过 39 格 1960cm，要求在 360s 内完成，由于系统正常续航大约为 300s，所以飞行器的平均飞行速度至少应大于 7cm/s

4. 系统软硬件设计

4.1. 系统硬件设计

4.1.1. 主控制器及外围电路设计

主控制器使用了 TI 公司 TM4C123 开发板，引出 6 个串口以连接飞行器的各个系统。还设计了五个由 IO 驱动的 LED 以及激光模块三极管开关电路，用以实现人机交互以及激光发射器的闪烁。具体电路原理图见附件一图 8。

4.1.2. 飞行控制器及外围电路设计

使用 TM4C123 结合惯性传感器 BMI088（加速度、陀螺仪）、磁力计 IST8310（罗盘）、气压传感器 SPL06 以及 IMU，实现飞行姿态的感知与控制。具体电路原理图见附一图 9。

4.2. 系统软件设计

4.2.1. 主程序框图

主程序流程图如下图所示：

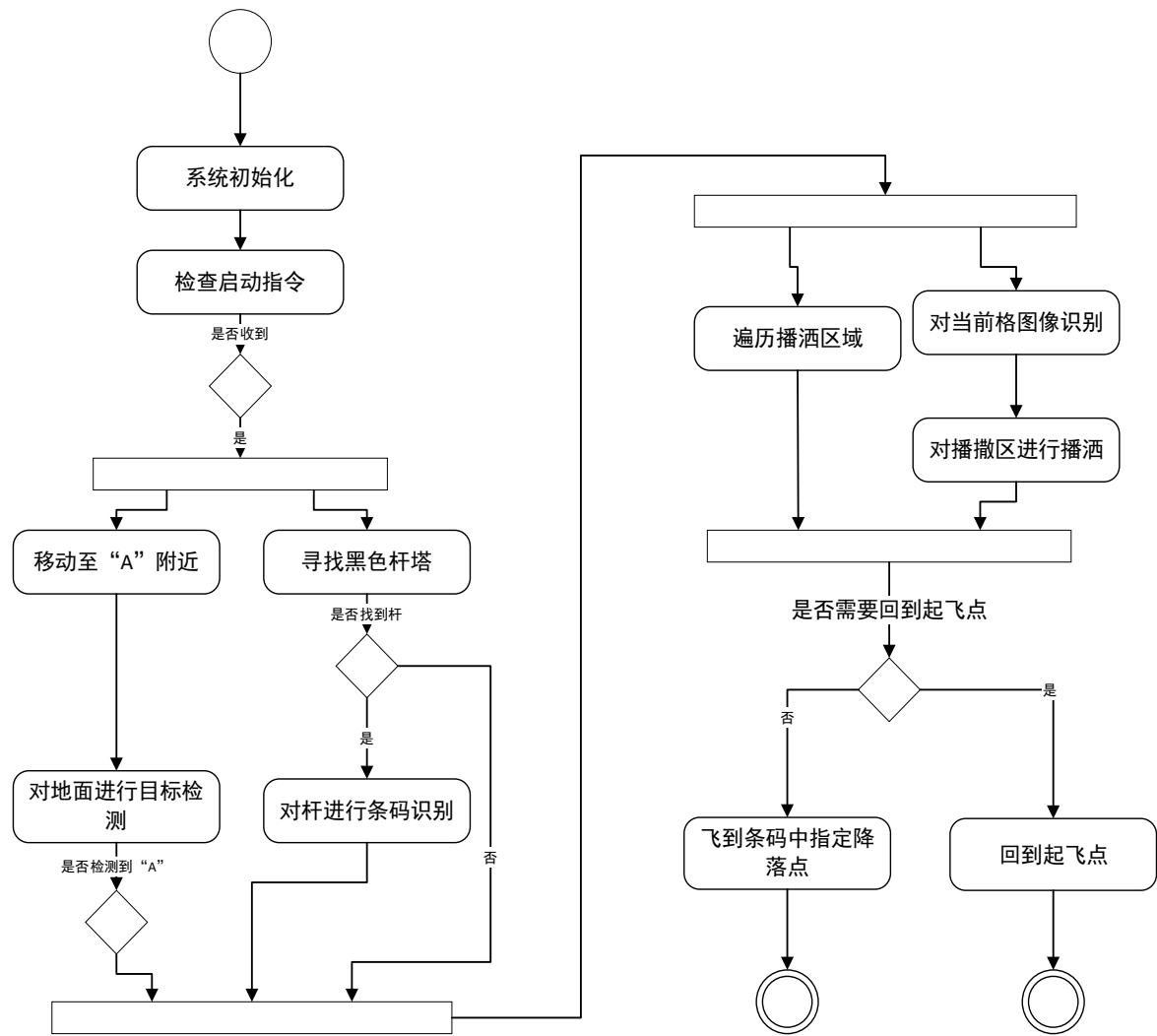


图 7：系统活动图

由于有多个处理器所以可以实现并行控制，相互之间通过串口进行交互，为了保证通信的准确度和实时性，使用和校验和累加和校验。在起飞过程中移动到“A”与对杆的识别和扫描并行运行且优先对杆进行扫描。在遍历播撒区过程中，采用固定路线，在移动的同时对区域进行判定，结合位置数据决定是否播撒。扫描到条码则飞到条码指定的落点，未扫描到条码则在起飞点降落。该软件架构耦合度低，运行效率高，适合嵌入式设备。

5. 系统测试及结果

5.1. 测试仪器与测试环境

测试仪器如表 1 所示，测试环境为无风人员移动较少的室内，室内光源为大功率白炽灯。

仪器名称	型号规格
二维码扫描器	SH-7500
卷尺	
秒表	20MHz 100Msa/s

表 1：测试仪器

5.2. 测试方法与测试数据

5.2.1. 基本要求

测试方法：人站在距离场地外且距离边缘一米处，以场地中高度为 150cm 的黑色塔杆作为参照，观察飞机的巡航高度。同时从起飞时开始计时，在播撒完所有绿色区域后停止计时，待飞行器降落后测量飞行器的几何中心与起降点中心的距离。

测试结果：如表 2 所示。

测试次数	是否在巡航高度内	是否从“A”所在区块开始播撒	是否在规定时间内完成播撒	播撒耗时 (s)	飞行器集合中心点点与起降点中心偏差 (cm)
1	是	是	是	246	14
2	是	是	是	327	6
3	是	是	是	281	7

表 2：基本要求测试表

5.2.2. 发挥部分

测试方法：一人站在距离场地外且距离边缘一米处，以场地中高度为 150cm 的黑色塔杆作为参照，观察飞机的巡航高度。同时从起飞时开始计时，在播撒完所有绿色区域后停止计时。另一人在飞行过程中根据 LED 灯光提示读取条形码数字，条码数字为 0004。待飞行器降落后测量飞行器的几何中心与起降点中心的距离。

测试结果：如表 3 所示

测试次数	是否在巡航高度内	是否从“A”所在区块开始播撒	是否在规定时间内完成播撒	播撒耗时 (s)	条形码显示数字	飞行器几何中心点与起降点中心距离 (cm)
1	是	是	是	271	4	45
2	是	是	是	291	4	49
3	是	是	是	278	4	48

表 3：发挥部分测试表

5.3. 测试结果分析

由以上测试结果可知，设计能够满足题目的要求，可以完成题目中给的任务，且能够在 5 分钟内完成指定任务，扫码功能正常运行。但是降落地点与目标地点有误差，是由于降落时飞行器抖动带来的。播撒闪烁与 LED 提示灯的闪烁均为 2hz。每次飞行时间差距较大，是因为每次 V-SLAM 构建的地图有差异，存在 3%的误差，会影响飞行器的运动过程。

6. 总结

在为期四天三夜的比赛过程中，队伍同心协力，使用了嵌入式开发、电子电路设计、自动化控制、机器学习、SLAM、机械加工等在内的知识技能，使得植保飞行器能够正常稳定运行，且流畅完成题目要求，满足各项指标。

参考文献

[1]四旋翼无人飞行器设计[M]. 清华大学出版社 , 冯新宇, 2017.

[2]基于 STM32 的四轴飞行器研究与设计[D]. 陈俊如. 华东师范大学 2018.

[3] 陈常, 朱华, 由韶泽. 基于视觉的同时定位与地图构建的研究进展 [J/OL]. 计算机应用研究, 2018, (03):1-9(2017-08-18).

[4] 高翔. 视觉 SLAM 十四讲 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.

附件

附件一：系统硬件设计原理图

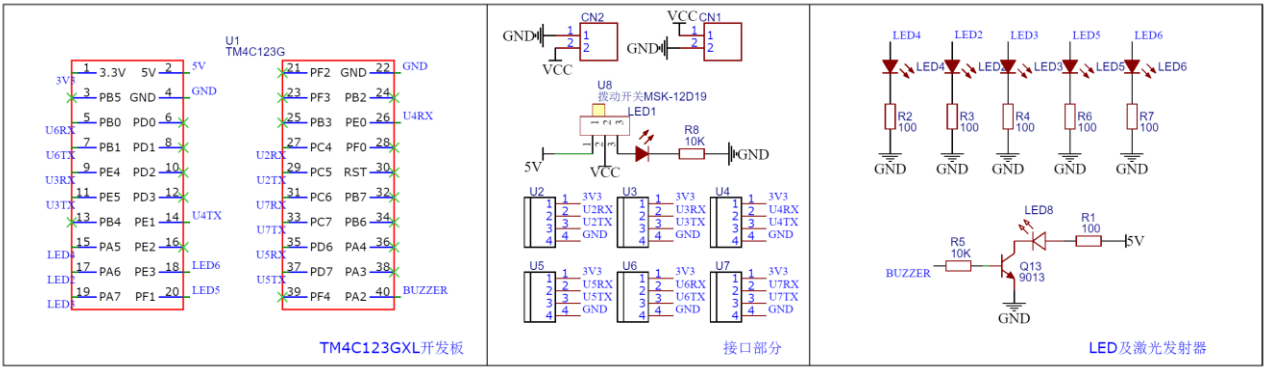


图 8：主控制器及外围电路

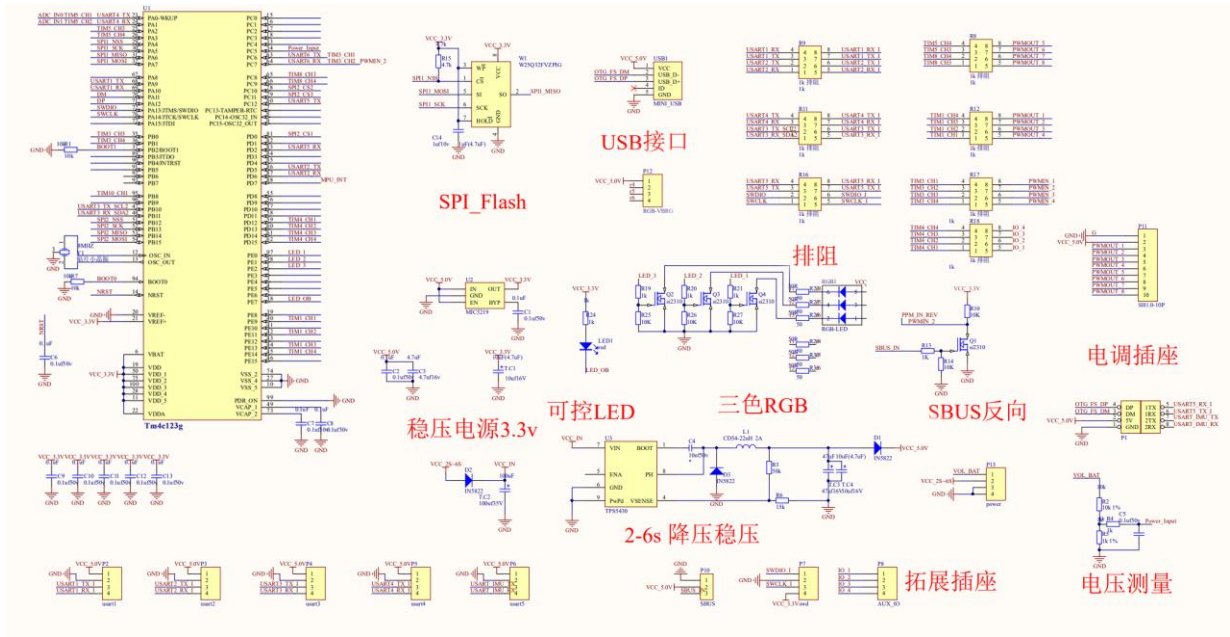


图 9：飞行控制器及外围电路原理图