

# 送货无人机

## 摘 要

本系统目标是完成无人机对某些特定目标位置的送货和穿越呼啦圈的功能。系统底部搭载 T265 双目摄像头确定无人机的实时位置，采用 STM32F407 和飞行器 IMU，利用所生成的 PWM 数据，结合 PID 算法实现无人机运动的控制。视觉识别和学习采用 Intel 二代神经计算棒，用于目标点特征的学习和无人机送货位置的进一步校准。针对键盘输入目标地点坐标，我们使用矩阵键盘完成这一功能。对于目标位置的确定先由 T265 确定大致位置，而后利用视觉进一步校准；抵达目标位置后，定点降低巡航高度进行送货。在送货过程中，通过 PWM 驱动舵机完成吊舱（砝码）的升降。完成一次送货后，恢复原始巡航高度，寻找下一个目标位置。待全部位置均完成送货后，返回起飞点。当无人机需要穿越呼啦圈时，则由无人机的侧面摄像头搭配 PID 进行控制。

**关键词：**双目摄像头 集成 IMU PID 算法 视觉神经网络 PWM 控制

## 一、系统方案

### 1.1 技术路线与系统结构

技术路线主要分为两大部分：以凌霄 IMU 和 STM32F407 为中心的飞行控制模块，和以华硕 Tinkerboard 2s 和追踪摄像头 T265 为主要内容的视觉识别内容。

底部的双目立体视觉系统与光流传感器为无人机的主控系统，通过 STM32F407 串口驱动，配合凌霄 IMU 中的陀螺仪、加速度计等多种传感器进行数据采集，同时加以 PID 算法控制，可以得到飞行器的高度、加速度、速度等姿态信息以及飞机的补偿方向与角度。IMU 将这些数据转换为 PWM 数据发送至 STM32F407 中，而 STM32F407 则通过获得的 PWM 信息进行转换，并将得到的 PWM 波输出给电调实现飞行器的运动控制，从而完成定高飞行、定点飞行、悬停、巡点降落等要求。

T265 摄像头通过其内含的宽视场立体鱼镜头捕获空间内容，使用视觉惯性里程计计算其在 3D 空间中的方向和位置及六自由度，通过实时捕获图像信息，确定飞机的实时位置。同时，华硕 Tinkerboard 2s 开发板则通过 T265 获得的位置信息与 STM32F407 得到的信息数据进行不同线程之间的调度与调整从而完成飞行器的稳定飞行与任务执行。

### 1.2 系统方案的论证、比较和选择

#### 1.2.1 飞行控制模块

方案一：采用 STM32F407：STM32F4 是基于 ARM Cortex-M4F 内核的微型处理器，主要瞄准低成本预算的应用，但如果仅使用 STM32 完成包括图像处理、飞行器控制、飞行器定高、姿态检验等功能相对来说十分困难。

方案二：采用 Ti 的 TM4C123 芯片：TM4C123 在工作状态下的流耗只有 95 $\mu$ A/MHz，而在支持实时时钟情况下的待机状态流耗也仅为 850nA，同时还集成了针对超低功耗进行优化的外设，除此之外，TI 还将全新的高性能外设集成在内核周围，从而能够实现 3.41 $\mu$ A /MHz 的最高 CoreMark 得分。

综合对比两个方案，我们选择方案二的 TM4C123 芯片，并以方案一的 STM32F407 搭配飞控 IMU 进行总控。综合两方案优点，更能满足我们的需求。

#### 1.2.2 视觉模块

方案一：OpenMV：其具有低功耗，低成本的特点，方便实现机器视觉相关的应用。其主频为 480HZ，处理器采用 STM32H473VI，数据传输接口有 I2C、

UART、SPI。

方案二：Intel-T265 实感追踪摄像头：采用直接在设备上运行的高度优化的专有 V-SLAM 算法，运行功率仅为 1.5W，具有小功耗的特点。同时，经过性能测试和验证，在预期使用条件下，闭环偏移小于 1%。除此之外，该设备尺寸为  $108 \times 25 \times 13$  毫米，重量仅为 55 克，因此不会过度增加无人机的负担。

方案三：Intel 二代神经计算棒：具有多功能硬件处理能力，缩短了对神经网络进行原型设计或调整的时间。采用 16 核外加神经计算引擎、专用的深度神经网络加速器。利用深度神经网络推理实现性能提升高达 8 倍，加快了深度神经网络的应用速度。

综合对比三个方案，我们最终选择方案二和三并用，这样的方案功耗小，处理能力强，搭配 Tinkerboard 2s 计算板使用，作为最终的视觉处理模块。

## 二、设计与计算

### 2.1 控制方法描述及参数计算

#### 2.1.1 PID 控制

积分算法通过对前面若干次误差分量的积分项模拟实际系统中存在的惯性问题，从而逐渐消除了比例算法带来的稳态误差；微分控制则为了反映偏差信号的趋势，在偏差信号过大之前引入一个早期修正信号，减小了控制过程中可能发生的震荡现象。相比传统方法的比例控制、积分项与微分项的修正控制，我们还引入了前馈修正。并且，前馈调节属于开环控制，可以以目标值为核心基准进行调控，进一步提高系统响应速度，减小反馈控制压力。PID 控制的数学表达式见式。

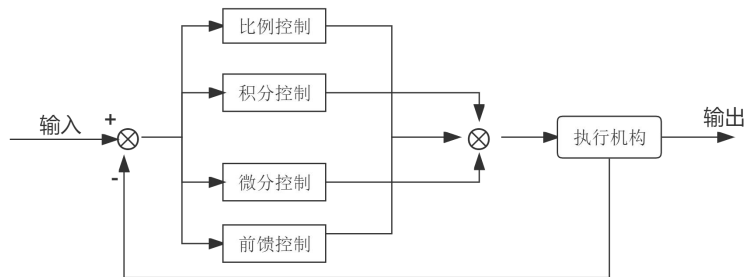


图 1: PID 控制流程图

$$u = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + k_f \cdot obj \quad (1)$$

其中， $e(t)$  为误差函数，其值等于目标值  $obj$  与当前值之差， $k_p, k_i, k_d$  和  $k_f$  分别表示比例系数、积分项系数、微分项系数和前馈系数。

### 2.1.2 飞行器运动参数计算

由于作用到飞行器上的合力和合力矩是四个螺旋桨所产生的力与力矩的矢量和，之间存在极大地交叉耦合特性。不考虑交叉耦合以及对单个螺旋桨的力与力矩的影响，把飞行器的受力模型建模为集总系统，在机体坐标系下推力  $F_B$  表示如式所示， $F_i$  为四个螺旋桨所受力。

$$F_B = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum_{i=1}^4 F_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

在地面坐标系下，机体的受力情况如式所示，其中  $\varphi, \theta, \psi$  分别表示绕  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴旋转的角度。

$$\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix} = R_{EB} \cdot F_B = \begin{bmatrix} \cos\psi \sin\theta \cos\varphi + \sin\psi \sin\varphi \\ \sin\psi \sin\theta \cos\varphi - \cos\psi \sin\varphi \\ \cos\theta \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据欧拉方程可以获得机体的角度运动方程，忽略空气阻力，自定义四旋翼无人机的四个输入量，联立上述两个方程可得无人机运动方程式

$$\begin{cases} \ddot{X} = (U(1)(\cos\psi \sin\theta \cos\varphi + \sin\psi \sin\varphi) - K_1 \cdot \dot{X})/m \\ \ddot{Y} = (U(1)(\sin\psi \sin\theta \cos\varphi - \cos\psi \sin\varphi) - K_2 \cdot \dot{Y})/m \\ \ddot{Z} = (U(1)\cos\theta \cos\varphi - K_3 \cdot \dot{Z})/m \\ \ddot{\varphi} = l(U(2) - K_4 \cdot \dot{\varphi})/I_x \\ \ddot{\theta} = l(U(3) - K_5 \cdot \dot{\theta})/I_y \\ \ddot{\psi} = l(U(4) - K_6 \cdot \dot{\psi})/I_z \end{cases} \quad (4)$$

根据动力学模型，设机体坐标系  $B\text{-}oxyz$  和地面坐标系  $E\text{-}OXYZ$ ，其中，机体坐标系原点  $o$  位于无人机中心上， $x$  轴在飞机对称平面内并平行于飞行器的纵轴线； $y$  轴垂直于飞机对称平面平行于左右旋翼的连线指向机身左方， $z$  轴分别与  $x$  轴  $y$  轴垂直并指向机身上方。地面坐标系原点在地面上选任意点  $O$ ，作四旋翼飞行器起飞位置。 $X$  轴是在水平面内指向某一方向， $Z$  轴垂直于地面指向空中， $Y$  轴在水平面内垂直于  $X$  轴，并满足右手定则。

通过转换绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴旋转到  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的欧拉角  $\varphi$ 、 $\theta$ 、 $\psi$ 。坐标转换采用右手定则，先绕  $z$  轴旋转得  $\psi$ ，再绕  $y$  轴旋转得  $\theta$ ，最后绕  $x$  轴旋转得  $\varphi$ ，每旋转一次，都有相应的转移矩阵，整理得机体坐标系  $B$  到地面坐标系  $E$  的转换矩阵，如式所示。

$$R(\varphi, \theta, \psi) = R(z, \psi) R(y, \theta) R(x, \varphi)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \varphi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi & \cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 三、电路与程序设计

#### 3.1 系统组成与原理框图

首先，针对要求 1 和要求 2，分别通过矩阵键盘和视觉识别确定目标位置的位置信息。矩阵键盘向单片机发送信息而后传到飞控板上，后续通过飞控与视觉结合到达目标点，完成送货任务。

控制系统硬件主要包含 MCU、IMU 及多个传感器。惯性测量单元 IMU 内含陀螺仪、加速度计等多个传感器可以较为轻松完成控制算法、姿态解算、传感器融合等多项任务。而此时只需要一个辅助单片机进行数据传输，将控制数据和由视觉模块根据识别结果给出的指令通过串口发送给 IMU，然后接收 IMU 输出的 PWM 数据转化为 PWM 波输出给电调，完成“语音播报”、“升降吊舱”等一系列送货任务。

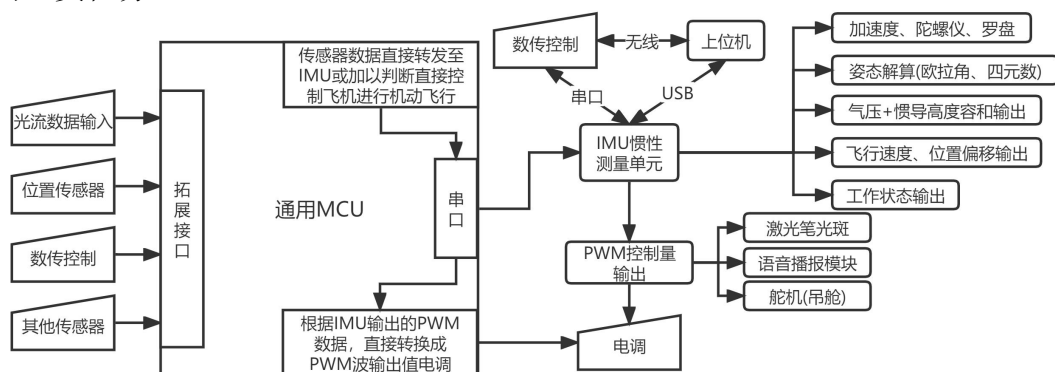


图 2：系统原理框图

#### 3.2 各部分电路图

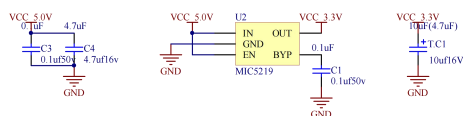


图 3：稳压电路图

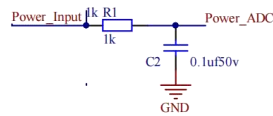


图 4：电压测量电路图

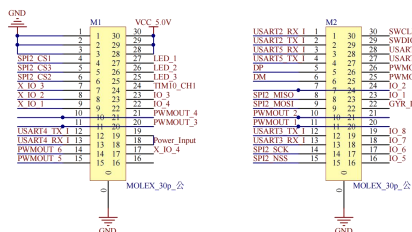


图 5：MCU CORE 接口电路图

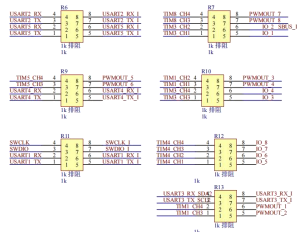


图 6：排阻电路图

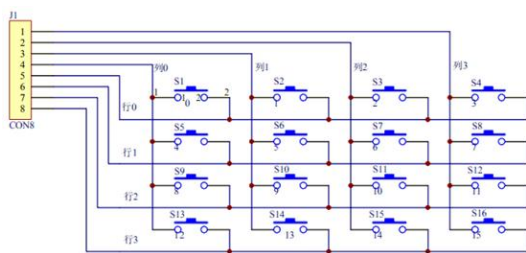


图 7: 矩阵键盘扫描电路图

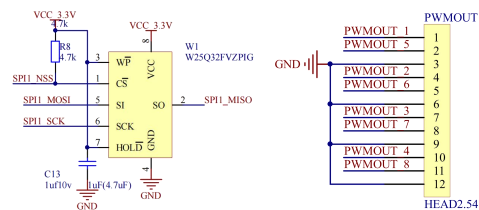


图 9: SPI Flash 电路

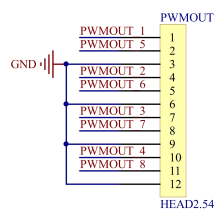


图 10: 电调电路

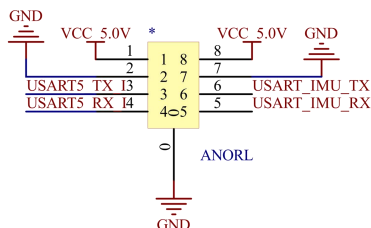


图 8: 数传封装电路图

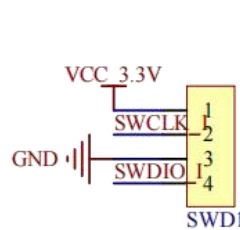


图 11: SWD 接口

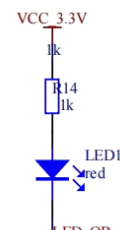


图 12: 可控 LED

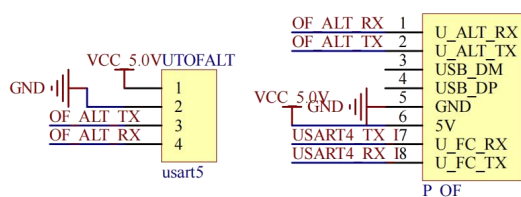


图 13: 光流封装电路图

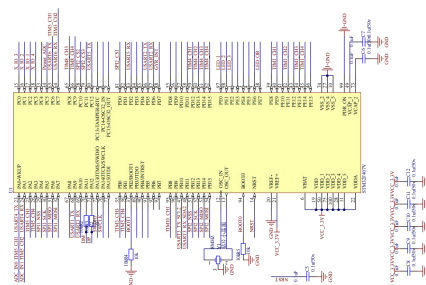


图 14: STM32 电路图

### 3.3 系统软件设计与流程图

系统软件的程序设计针对要求的三个任务分别设计，三个任务分为两大类，一是向目标点送货，二是穿越呼啦圈。向目标点送货的目标点确定方式又分为键盘坐标输入和视觉图像识别。详细的程序设计流程图如图 15 所示。

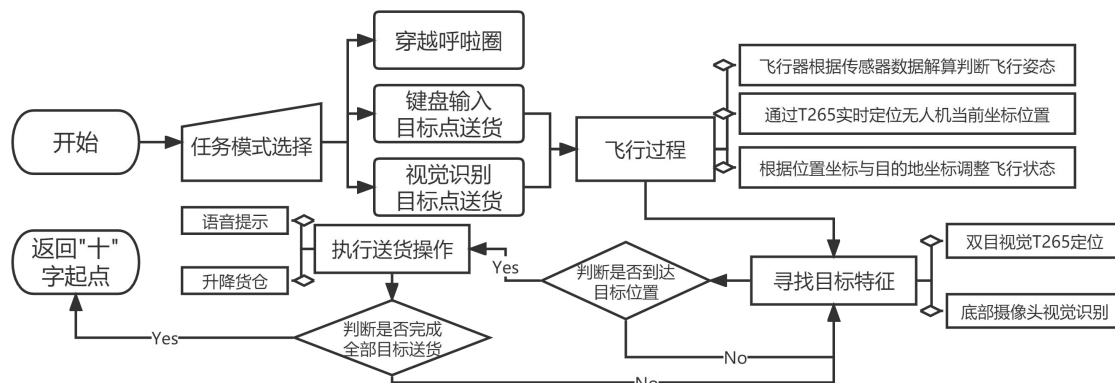


图 15: 程序设计流程图

## 四、测试方案与测试结果

### 4.1 测试方案及测试条件

#### 4.1.1 测试方案

##### （一）无人机送货

以起飞点为坐标原点。除了初始目标位置信息的输入不同以外，后续过程相同。无人机从起飞点起飞后维持巡航高度，先后到达两个目标位置。到达目标位置后，降低飞行高度并释放吊舱，同时响起语音提示。

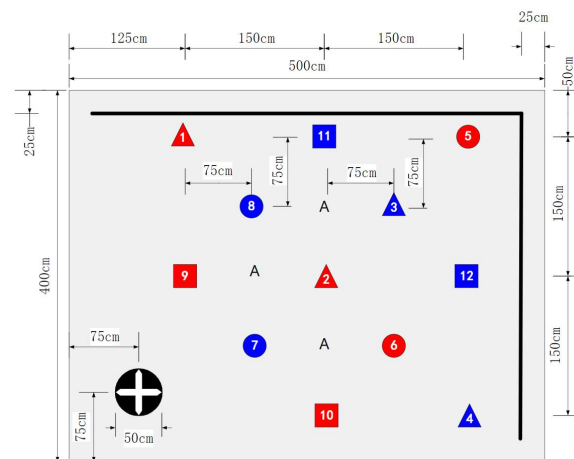


图 16: 送货无人机作业区示意图

##### （二）穿越呼啦圈

作业区域中标志“A”所在附近区域放置一个供无人机穿越的红色圆框（呼啦圈），其外径约 110cm，呼啦圈固定在地面支架上，圆心高度约 150cm，支架为黑色。无人机找到红色圆框，并从圆框中穿越而过。

#### 4.1.2 测试条件

- ①无人机首先从“十”字起降点垂直起飞，升空至  $150 \pm 10\text{cm}$  的巡航高度；
- ②根据矩阵键盘或视觉识别的送货目标，先后依次飞行抵达目标地点上方，无人机降低飞行高度到  $80 \pm 10\text{cm}$ ；
- ③释放吊舱降至距地面  $20 \pm 5\text{cm}$  高度，并保持稳定悬停 5 秒；
- ④送货期间，播放提醒目标点收货的语音；
- ⑤标识无人机位置的激光笔光斑落在以目标中心为圆心、半径 15cm 的圆内；
- ⑥送货完成即恢复巡航高度；
- ⑦作业完成后飞行到起降点稳定准确降落，无人机几何中心点与起降点中心距离偏差不大于  $\pm 10\text{cm}$ 。
- ⑧对于矩阵键盘键入坐标的信息输入方法（要求 1），送货过程必须要在 180

秒内完成，用时越少越好。对于视觉识别目标位置特征的信息输入方法（要求 2），送货过程用时越少越好，需在 270 秒内完成。

测试现场避免阳光直射，但不排除顶部照明灯及窗外环境光照射。

4.2 测试结果

表 1：“无人机送货”测试结果


目标地点 坐标输入方式	第一个 目标位置坐标	第二个 目标位置坐标	第一个 送货坐标	第二个 送货坐标
键盘输入	(125,200)(8 号)	(200,125)(3 号)	(123.8,198)	(195.4,122.3)
键盘输入	(50,125)(9 号)	(275,50)(6 号)	(48.5,124.8)	(271.3,46.2)
识别“  ”	(50,125)(9 号)	(200,-25)(10 号)	(48.4,124.4)	(196.2,-22.3)

表 2：“穿越呼啦圈”测试结果

选用的 A 点坐标	朝向角度	是否成功穿越
(125, 125)	平行 x 轴	是
(200, 200)	平行 x 轴	是
(200, 50)	平行 y 轴	是

4.3 测试结果分析

对于“无人机送货”，两种目标位置信息获取方式下，无人机均可以以较高的精度完成定位而后进行送货，这是因为仅由双目摄像头就可以较为精准地得到无人机当前坐标信息，再辅以视觉进行校准，定点会更准确。

对于“穿越呼啦圈”任务，先令无人机沿靠近边界处与呼啦圈圆心等高处飞行，在飞行过程中使用无人机侧面的摄像头拍摄画面，倘若拍摄到红色圆位于正中心，则向前飞行穿越呼啦圈。