

# 基于 AI 技术的固定翼无人机集群分布式 规避控制系统研究与设计

刘胜久

(重庆工程职业技术学院 大数据与物联网学院, 重庆 402260)

**摘要:** 固定翼无人机集群是由多个固定翼无人机组成的群体, 在飞行任务中协同工作; 相比于单个无人机, 固定翼无人机集群具有更高的综合性能和更广阔的应用前景; 但由于固定翼无人机在恶劣环境作业过程中存在着很多风险, 例如障碍物撞击、相邻无人机碰撞等, 威胁无人机的安全性; 故设计了基于 AI 技术的固定翼无人机集群分布式规避控制系统; 系统硬件单元主要包括 AI 视觉传感器设计单元、激光雷达传感器设计单元、控制器设计单元与无线通信网络设计单元, 通过上述硬件设备提供实时的环境信息, 控制无人机飞行姿态, 实现信息共享; 软件模块基于 AI 技术解算无人机位置和姿态, 计算障碍物位置实现形状感知, 完成无人机集群分布式规避控制; 通过硬件与软件的协同作业, 实现了固定翼无人机集群的分布式规避控制; 实验结果显示: 应用设计系统获得的无人机位置感知结果、障碍物位置感知结果与实际位置相同, 路径总偏离量数值为 4 m, 充分证实了设计系统控制性能较佳。

**关键词:** 分布式; 控制器; 规避控制; AI 技术; 固定翼无人机集群

## Research and Design of Distributed Avoidance Control System for Fixed Wing Drone Cluster Based on AI Technology

LIU Shengjiu

(School of Big Data and Internet of Things, Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, China)

**Abstract:** A fixed wing drone cluster is composed of multiple fixed wing drones that work together during flight missions. Compared to single drone, the fixed wing drone cluster has higher comprehensive performance and broader application prospects. However, there are many operational risks for fixed wing drones in harsh environments, such as obstacle collisions, adjacent drone collisions, etc., the safety of drones is threatened. Therefore, a distributed avoidance control system for fixed wing unmanned aerial vehicle clusters based on AI technology is designed. The system hardware unit mainly includes the design units of AI visual sensor, LiDAR sensor, controller, and wireless communication network. The above hardware devices provide the real-time environmental information to control the drone's flight attitude and achieve the information sharing. Based on AI technology, the software module is used to calculate the position and attitude of drones, calculate the position of obstacles to achieve the shape perception, and complete the distributed avoidance control of the drone cluster. Through the collaborative operation of hardware and software, the distributed avoidance control of the fixed wing drone cluster is achieved. Experimental results show that by applying the design system, the obtained perception positions of the drones and obstacle are consistent with the actual positions, with a total path deviation of 4m, it is fully verified that the design system has better control performance.

**Keywords:** distributed; controller; avoidance control; AI technology; fixed wing drone cluster

### 0 引言

无人机是一种没有驾驶员搭乘, 通过预先设定的航线或者自主决策进行飞行任务的航空器。固定翼无人机主要采用类似传统飞机的固定翼结构, 可以实现长时间飞行和高速飞行。在固定翼无人机集群中, 各无人机之间相互协作, 共享数据和信息, 通过协同处理和分析, 实现对所获

取数据的高效利用, 共同完成复杂的任务。现今, 应用最为广泛的无人机类型为固定翼无人机, 该无人机具有独特优势的飞行器, 由多个部分组成, 主要包括机体结构、航电系统、动力系统、起降系统和地面控制站。固定翼无人机具有续航时间长、高空飞行的特点, 已经被广泛应用在测绘、地质、石油、农林等行业。与传统的无人机相比, 固定翼无人机具有更高的飞行速度和更长的续航时间, 可

收稿日期: 2024-01-23; 修回日期: 2024-03-19。

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究计划青年项目(KJQN202103404, KJQN202303419); 重庆工程职业技术学院校级科研课题(KJA202313)。

作者简介: 刘胜久(1988-), 男, 博士, 博士后, 讲师。

引用格式: 刘胜久. 基于 AI 技术的固定翼无人机集群分布式规避控制系统研究与设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 85-91, 97.

以更快地完成任务并减少对电池的依赖。此外,固定翼无人机还具有更强的抗风能力和更高的飞行高度,可以在更复杂的环境下进行飞行和作业。由此可见,固定翼无人机具有多种优势,在无人机集群中具有至关重要的作用。但是,相对其他飞行器来看,固定翼无人机的飞行轨迹较为复杂,其面对的环境也更加恶劣,为其规避控制性能提出了更高的要求。且随着无人机数量的增多,如何实现多无人机之间的协作与控制成为了亟待解决的问题之一。在实际运行中,无人机集群可能会遇到各种突发情况,如无人机之间的碰撞、障碍物的出现等。为了确保任务的成功完成和无人机的安全,需要研究一种规避控制策略,使无人机之间能够自主协作,实时感知周围环境,并采取相应的规避措施。

就现有研究成果来看,文献[1]针对动态环境下无人机集群躲避障碍物的队形控制问题进行了深入的研究。基于碰撞预判机制对障碍物是否在无人机飞行路径中进行判定,如果障碍物未在无人机飞行路径中,则继续按照当前队形进行飞行;如果障碍物在无人机飞行路径中,构造障碍物与无人机之间的斥力场,联合一致性理论制定控制律,对无人机集群飞行队形进行改变与控制,从而成功地躲避动态障碍物。文献[2]设计了一种分层分组控制方案,以此来解决固定翼无人机集群编队控制问题。构建分布式分层分组控制架构,以此为基础,将无人机划分为“长机层”和“僚机层”,制定协同路径跟随控制律,使长机与僚机收敛到各自期望路径上的虚拟目标点,从而实现了无人机集群的有效控制。文献[3]在 Onboard SDK 的应用下设计了一个分布式无人机集群控制系统。系统以模块化思想进行设计,主要包括控制模块、执行模块与监控模块。OSDK 应用后有效降低了系统模块之间的耦合度,并加强了控制模块与执行模块之间的交互力度,为设计系统稳定运行提供了有效的帮助。但上述 3 种系统的研究对象存在着一定的差异性,并且由于各自应用方法的自身缺陷,存在着实际环境适应性差、控制方法稳定度低和鲁棒性不足等问题,无法获得较好的无人机控制效果。

故设计基于 AI 技术的固定翼无人机集群分布式规避控制系统。希望通过 AI 技术的应用,实现多固定翼无人机之间的自主协作和避障,提升无人机集群的整体性能和任务成功率,为固定翼无人机的进一步推广及其应用奠定基础。

## 1 固定翼无人机集群分布式规避控制系统硬件设计

### 1.1 AI 视觉传感器设计单元

视觉传感器主要由镜头、感光元件、图像处理电路等部分组成。镜头负责将光线聚焦到感光元件上,感光元件负责将光线转化为电子信号,图像处理电路则负责将电子信号转换为图像信息<sup>[4]</sup>。依据设计系统需求,选取 IS7400-C11 作为视觉传感器,其图像处理电路设计结果如图 1 所示。

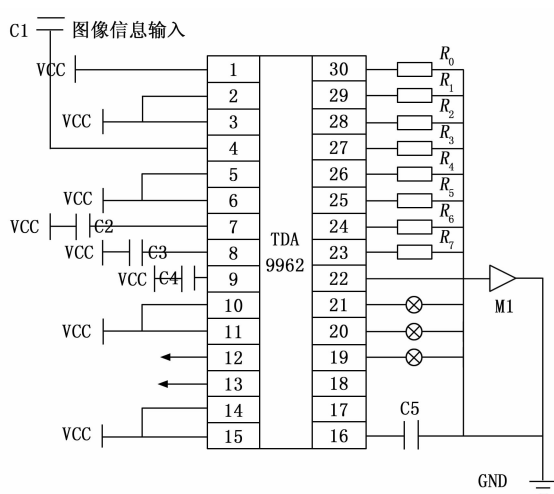


图 1 图像处理电路设计结果示意图

如图 1 所示, TDA9962 为图像处理核心芯片, 周围遍布着多功能引脚, 通过共同协作完成固定翼无人机的位置与姿态感知任务。IS7400-C11 视觉传感器具有多种优势, 主要体现在以下几个方面。

1) 高分辨率: IS7400-C11 视觉传感器具有高分辨率的特点, 能够提供更加清晰、细腻的图像信息, 有助于更精确的感知无人机的位置与姿态。

2) 高速处理能力: IS7400-C11 视觉传感器采用高性能的图像处理芯片<sup>[5]</sup>, 具有高速处理能力, 能够快速处理大量的图像信息, 实现实时监测和反馈。

3) 宽动态范围: IS7400-C11 视觉传感器具有宽动态范围的特点, 能够适应不同的光照条件, 从低光照到高光照环境都能实现良好的图像质量。

4) 抗干扰能力强: IS7400-C11 视觉传感器采用特殊的抗干扰设计和电路优化, 能够有效地减少外部干扰对传感器性能的影响, 提高设备的稳定性和可靠性。

5) 易于集成: IS7400-C11 视觉传感器设计紧凑, 体积小, 易于集成到各种设备和系统中, 方便用户的使用和安装。

6) 可定制性强: IS7400-C11 视觉传感器支持多种接口和协议, 可以根据用户的需求进行定制和扩展, 满足不同应用场景的需求。

感光元件也是决定 IS7400-C11 视觉传感器功能的主要器件之一。一般情况下, 选择感光元件时需要考虑多种因素, 主要包括分辨率、动态范围、色彩还原能力、灵敏度、噪声性能、尺寸和封装等。其中, 分辨率决定着图像的清晰度。高分辨率的感光元件能够捕捉到更多的细节, 提供更清晰的图像; 动态范围是指感光元件能够感知的光线范围<sup>[6]</sup>。宽动态范围的感光元件能够在不同的光照条件下都能获得良好的图像质量; 感光元件的色彩还原能力对于图像的准确性和真实性至关重要。选择具有高色彩还原能力的感光元件能够提供更真实、更准确的颜色信息; 感光元

件的灵敏度决定了其对光线的敏感程度。高灵敏度的感光元件能够在低光照条件下获得更好的图像质量；感光元件的噪声性能对于图像的质量和稳定性也有影响。选择具有低噪声性能的感光元件能够提高图像的信噪比，提高识别和定位的准确性；感光元件的尺寸和封装方式也需要考虑。对于特定的应用场景，可能需要选择不同尺寸和封装的感光元件，以满足安装和集成需求。

依据上述所述因素，选取 CCD（电荷耦合）作为 IS7400-C11 视觉传感器的感光元件，其分辨率、色彩还原能力、抗干扰性能等均能够满足 S7400-C11 视觉传感器的需求，并能和镜头、图像处理电路进行直接连接，减少了 IS7400-C11 视觉传感器内部线路交错，为 IS7400-C11 视觉传感器的稳定运行提供助力。CCD（电荷耦合）感光元件基本结构如图 2 所示。

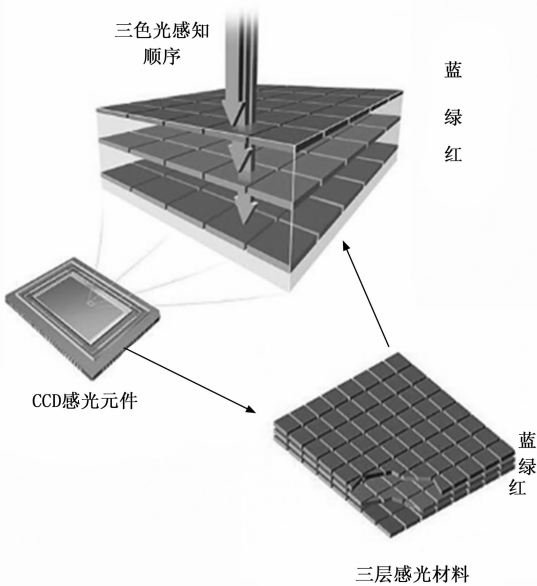


图 2 CCD（电荷耦合）感光元件基本结构示意图

如图 2 所示，CCD（电荷耦合）感光元件在不同深度对红、绿、蓝三色光进行感知与转化，由于应用三层感光材料，可以保障每个像素均能够感应到红、绿、蓝三色光。因此，CCD（电荷耦合）感光元件具备较强的颜色感知与还原性能，获得的图像质量更好。

上述过程完成了视觉传感器的选取及其配置，在实际应用过程中，将 IS7400-C11 视觉传感器安装在固定翼无人机的底部，为集群中全部固定翼无人机的位置与姿态感知提供有力的硬件支撑。

1.2 激光雷达传感器设计单元

激光雷达传感器是设计系统规避对象——障碍物感知的关键硬件设备，主要由激光发射器与激光接收器构成。为了保障障碍物位置及其形状感知的精准性<sup>[7]</sup>，设计系统选取 LA2-MB010N 作为激光雷达传感器，其基本性能参数如表 1 所示。

表 1 LA2-MB010N 激光雷达传感器基本性能参数表

参数名称	参数数值	单位描述
类型	回归反射型	—
输出类型	NPN	—
检测距离	0~50	m
光点大小	15	mm
检测盲区	100	mm
最小检测物体	1	mm
光源	大功率红色激光	—
电源电压	12~24	VDC
电流消耗	<30	mA
反应时间	1	ms
防护等级	IP66	—
环境光度	0~20 000	lux
环境温度	-20~+55	℃
环境湿度	35~85	%RH

LA2-MB010N 激光雷达传感器具有非常高的测量精度，可以在各种环境下实现精确的障碍物感知和距离测量，并且其分辨率较高，能够提供精确的三维图像和地形数据，这对于避障、导航和环境感知等任务非常重要。另外，由于 LA2-MB010N 激光雷达传感器采用激光作为信号源，相对于其他类型的传感器，具有更强的抗干扰能力和稳定性<sup>[8]</sup>。LA2-MB010N 激光雷达传感器的测量范围非常广，可以在很大的范围内进行障碍物感知和距离测量，并且体积较小，易于集成到设计系统中。在实际应用过程中，将 LA2-MB010N 激光雷达传感器安装在固定翼无人机的正前方，方便障碍物的有效感知，为其后续分布式规避控制提供助力。

1.3 控制器设计单元

控制器是固定翼无人机集群分布式规避控制目标实现的核心硬件，其性能好坏直接影响着设计系统能否正常运行。在控制器选取的过程中，需要遵循稳定性、精确性、实时性和安全性的原则。由此选取 Ardupilot 作为设计系统控制器，其是一种广泛用于无人机领域的开源飞控装置。

Ardupilot 控制器采用开源设计，允许用户根据需要进行二次开发和扩展<sup>[9]</sup>。该特点表明用户可以根据自己的需求定制和优化飞控装置，提高控制器的性能和功能。与此同时，Ardupilot 控制器内部包含着先进的控制算法和数据处理技术，能够确保无人机的稳定性和可靠性。无论是在稳定的飞行环境中，还是在复杂多变的飞行条件下，Ardupilot 控制器都能提供准确的控制指令，使无人机保持稳定的飞行状态。除此之外，Ardupilot 控制器提供了友好的用户界面和开发工具，方便用户进行配置和调试。用户可以通过直观的界面轻松地设置无人机参数、配置飞行计划等，提高固定翼无人机的易用性与可操作性。在设计系统集成过程中，Ardupilot 控制器与其他的硬件兼容，有效地降低了设计系统的开发时间与成本。依据设计系统的实际需求，对 Ardupilot 控制器引脚进行自定义，具体如表 2

所示。

表 2    Ardupilot 控制器引脚自定义表

引脚编号	引脚代码	引脚定义
3	GND	闭合电路回路
5	RESET	复位
7	IOREF	输入/输出参考
10	ADC0	模拟输入 0
11	ADC1	模拟输入 1
12	ADC2	模拟输入 2
13	ADC3	模拟输入 3
14	ADC4	模拟输入 4
15	ADC5	模拟输入 5
16	ADC6	模拟输入 6
19	SCK	SPI 通信专用引脚
20	MISO	主从输出
21	MOSI	从机输入
23	SCL	I2C 通信专用引脚
24	SDA	传输数据通讯线
25	Aref	模拟输出
30	INT0	外部中断 0
31	INT1	外部中断 1
35	SS	从机选择

依据表 2 所示定义对 Ardupilot 控制器引脚进行配置与调试,保障 Ardupilot 控制器功能的稳定发挥,为设计系统研究目标实现提供核心硬件支撑。

1.4    无线通信网络设计单元

无线通信网络是设计系统数据传输与交互的主要支撑单元,其主要由主控芯片 STM32F411 与芯片 NRF2401+ 构成<sup>[10]</sup>。为了提升无线通信网络的整体通信质量,STM32F411 主控芯片管脚 GPIO 与 NRF2401+ 芯片管脚 INT 相连,设计系统内部数据接收或者发送通过中断模式来调节,具体的规则如下所示:

- 1) 当配置管脚 (CE) 为低电平时,通信芯片表现为发送模式,利用 SPI 总线将待发送数据写入到通信芯片。数据发送完成后,自动触发 IRQ 中断,并清空通信芯片内部数据;
- 2) 当配置管脚 (CE) 为高电平时,通信芯片表现为接收模式,利用 SPI 总线将发送数据读取至通信芯片中。数据接收完成后,自动触发 IRQ 中断<sup>[11]</sup>,并清空状态寄存器。

通信芯片发送或读取数据程序如图 3 所示。

上述过程完成了系统硬件的设计与配置,主要包括 AI 视觉传感器设计单元、激光雷达传感器设计单元、控制器设计单元与无线通信网络设计单元,为了进一步提高无人机的自主控制能力,故继续设计与开发系统<sup>[12]</sup>软件模块。

2    固定翼无人机集群分布式规避控制系统软件设计

2.1    基于 AI 技术的无人机位置和姿态解算模块

以 1.1 节设计的 AI 视觉传感器为工具,获取固定翼无

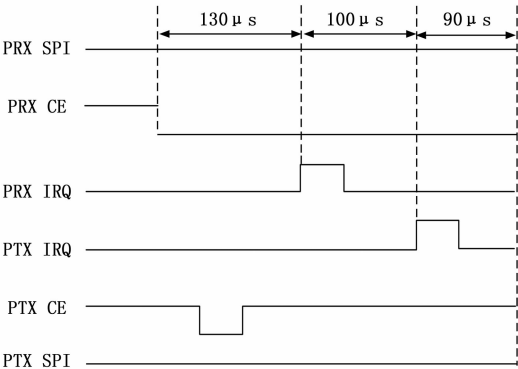


图 3    通信芯片发送或读取数据程序图

人机的实时 AI 视觉图像,以此为基础,解算固定翼无人机当前时刻的位置与姿态信息,为最终分布式规避控制目标实现提供依据。

无人机位置和姿态解算是设计系统的核心环节,其准确性和实时性对于无人机飞行安全和任务执行至关重要。基于 AI 视觉图像的解算方法利用先进的计算机视觉技术 (AI 技术) 和深度学习算法,通过对 AI 视觉传感器采集的图像进行处理和分析<sup>[13]</sup>,实现对无人机位置和姿态的高精度解算。

基于 AI 视觉图像的固定翼无人机位置与姿态解算具体步骤如下所示:

步骤一: AI 视觉图像处理。

设置当前时刻第  $i$  个固定翼无人机对应 AI 视觉图像为  $f_i^t(x,y)$ ,对其进行去噪、增强操作,以提高 AI 视觉图像质量,为后续无人机位置与姿态解算提供精确的依据<sup>[14]</sup>。AI 视觉图像处理公式为:

$$\begin{cases} \tilde{f}_i^t(x,y) = \zeta[f_i^t(x,y)] \pm \epsilon(x,y) \\ g_i^t(x,y) = \frac{\alpha[\tilde{f}_i^t(x,y)]}{\chi \times \alpha^o} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\tilde{f}_i^t(x,y)$  表示的是去噪操作后的 AI 视觉图像;  $\zeta[\cdot]$  表示的是图像去噪函数;  $\epsilon(x,y)$  表示的是图像去噪误差调整项;  $g_i^t(x,y)$  表示的是增强操作后的 AI 视觉图像;  $\alpha[\cdot]$  表示的是图像增强函数;  $\chi$  表示的是辅助计算常数,取值范围为  $0 \sim 1$ ;  $\alpha^o$  表示的是图像增强函数标准因子。

步骤二: AI 视觉图像特征点提取。

以步骤一输出 AI 视觉图像  $g_i^t(x,y)$  为依据,利用深度学习算法对 AI 视觉图像特征进行提取。通过训练好的神经网络模型,可以提取出 AI 视觉图像中的关键特征点,如角点、边缘等,表达式为:

$$\tilde{g}_{i,j}^t(x,y) = \frac{\beta_1 \times \beta_2 \times \beta_3 \times \xi[g_i^t(x,y)]}{\beta^o} \quad (2)$$

式中,  $\tilde{g}_{i,j}^t(x,y)$  表示的是 AI 视觉图像  $g_i^t(x,y)$  中第  $j$  个特征点;  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  与  $\beta_3$  表示的是神经网络模型中隐含层、卷积层、池化层对应的阈值;  $\xi[\cdot]$  表示的是特征点提取函数;  $\beta^o$  表示的是特征点归一化因子,其取值范围为  $[0, 5]$ 。

步骤三: 特征点匹配。

以提取的 AI 视觉图像特征点  $\tilde{g}_{i,j}^l(x,y)$  为基础, 对当前 AI 视觉图像与已知三维地图进行匹配, 确定固定翼无人机所在的位置区域, 表达式:

$$D_n = \{\delta[\tilde{g}_{i,j}^l(x,y), D_c] > \delta^*\} \quad (3)$$

式中,  $D_n$  表示的是固定翼无人机所在的位置区域;  $\delta[\tilde{g}_{i,j}^l(x,y), D_c]$  表示的是 AI 视觉图像特征点  $\tilde{g}_{i,j}^l(x,y)$  与已知三维地图特征点  $D_c$  之间的相关系数;  $\delta^*$  表示的是特征点匹配阈值。

步骤四: 固定翼无人机位置解算。

标定 AI 视觉传感器内部参数, 确定其与实际场景之间的映射关系, 将步骤二提取的 AI 视觉图像特征点  $\tilde{g}_{i,j}^l(x,y)$  从图像坐标系转换到世界坐标系中, 结合已知的三维地图, 解算出固定翼无人机的位置信息<sup>[15]</sup>, 计算公式为:

$$\begin{cases} A_i^l(x,y) = \left[ \frac{\sum_x \tilde{g}_{i,j}^l(X,Y)}{D_{n,x}}, \frac{\sum_y \tilde{g}_{i,j}^l(X,Y)}{D_{n,y}} \right] \\ \tilde{g}_{i,j}^l(X,Y) = \gamma_0 \times \tilde{g}_{i,j}^l(x,y) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $A_i^l(x,y)$  表示的是固定翼无人机的位置信息;  $\tilde{g}_{i,j}^l(X,Y)$  表示的是世界坐标系下的特征点;  $D_{n,x}$  与  $D_{n,y}$  表示的是固定翼无人机所在位置区域对应的  $x$ 、 $y$  方向距离;  $\gamma_0$  表示的是图像坐标系与世界坐标系的转换因子。

步骤五: 固定翼无人机姿态解算。

通过分析图像中的特征点, 提取出固定翼无人机的姿态信息, 主要为俯仰角, 表达式为:

$$\theta_i = \frac{\prod \omega_j \times A_i^l(x,y)}{\psi^1} \quad (5)$$

式中,  $\theta_i$  表示的是固定翼无人机的姿态信息 (俯仰角);  $\omega_j$  表示的是特征点  $\tilde{g}_{i,j}^l(X,Y)$  的权重系数;  $\psi^1$  表示的是数据与俯仰角之间的转换因子, 取值为 0~1。

依据上述步骤即可实现固定翼无人机当前时刻的位置与姿态信息的解算, 为无人机控制提供助力。

## 2.2 障碍物位置与形状感知模块

在无人机位置和姿态解算过程中, 利用 AI 视觉传感器获取固定翼无人机的实时图像, 并结合计算机视觉技术和深度学习算法对图像进行处理和分析, 精准感知障碍物位置与形状, 提高无人机在飞行过程中的感知精度。

障碍物位置感知是通过对激光雷达传感器获取的点云数据进行处理和分析实现的。首先, 通过对点云数据进行滤波和降噪, 去除其中的噪声和干扰数据。然后, 利用分割算法将障碍物与背景分离<sup>[16]</sup>。常用的分割算法包括基于聚类的方法、基于边缘的方法等。最后, 通过对分割出的障碍物进行特征提取和分类, 确定障碍物的位置信息。由于研究篇幅限制, 不对点云数据处理过程进行过多赘述。设计系统主要应用聚类方法分离障碍物与背景, 提取障碍物的边缘特征点, 记为  $B_i^l(x,y)$ , 则障碍物位置解算公式为:

$$\hat{B}_i^l(x,y) = \theta_i \left[ \frac{\sum_x B_i^l(x,y)}{x_{\max} - x_{\min}}, \frac{\sum_y B_i^l(x,y)}{y_{\max} - y_{\min}} \right] \quad (6)$$

式中,  $\hat{B}_i^l(x,y)$  表示的是障碍物位置信息; 下角标  $\max$  与  $\min$  表示的是最大值与最小值。

障碍物形状感知是对障碍物的轮廓和表面特征进行提取和分析的过程。通过对点云数据进行表面重建和模型拟合, 可以得到障碍物的表面模型。常用的表面重建方法包括三角网格重建、平面拟合等。然后, 利用形态学分析和边缘检测等算法, 对表面模型进行细化处理, 得到更加精确的障碍物形状信息<sup>[17]</sup>。设计系统应用平面拟合方法对障碍物表面模型进行重建, 以边缘检测算子为工具, 提取障碍物表面模型的边缘信息, 并对其进行增强细化处理, 即可确定障碍物形状, 具体如图 4 所示。

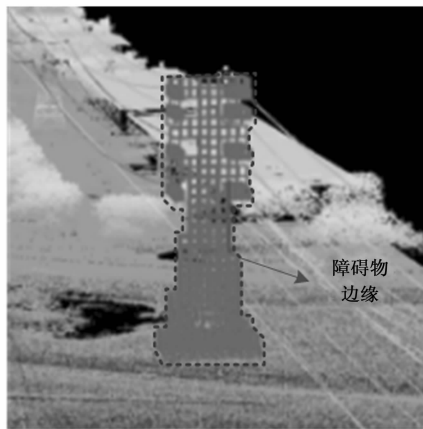


图 4 障碍物形状示意图

上述过程完成了障碍物位置与形状的感知, 为无人机控制提供助力。

## 2.3 无人机集群分布式规避控制模块

在障碍物位置与形状感知过程中, 通过激光雷达传感器获取点云数据, 并通过滤波、分割、特征提取等算法对障碍物位置和形状信息进行感知和提取, 提高系统的快速响应能力, 使无人机能够自主地进行规避飞行, 减少对外部指令和人工干预的依赖, 提高飞行效率和自主决策能力。基于此, 以固定翼无人机期望飞行路径为参考, 以规避风险为条件 (防撞), 以路径总偏离量最小、机动能耗最小为目标, 构建固定翼无人机集群分布式规避控制问题模型, 通过优化求解获取最佳的固定翼无人机集群分布式规避控制律, 应用 1.4 节设计无线通信网络将其传输给 1.3 节设计的控制器, 开启控制器即可实现固定翼无人机集群的分布式规避控制, 为固定翼无人机集群的后续发展提供帮助。

设置当前时刻第  $i$  个固定翼无人机的飞行路径偏离量为  $\eta_i^l$  (其主要是因为躲避障碍物或者无人机产生的), 机动能耗为  $\lambda_i^l$ , 将与其发生规避行为的固定翼无人机认定为相邻集合, 记为  $\varphi_i^l$ 。常规情况下, 若是第  $i$  个固定翼无人机与障碍物或者相邻无人机距离过小, 其碰撞风险就越高, 需要进行规避行为<sup>[18]</sup>。因此, 固定翼无人机集群分布式规避控制问题模型定义为:

$$\min J_i' = \hat{B}_i'(x, y) \min(\eta_i' + \lambda_i' + C_i') \quad (7)$$

式中,  $J_i'$  表示的是当前时刻第  $i$  个固定翼无人机的分布式规避控制指标函数;  $C_i'$  表示的是当前时刻第  $i$  个固定翼无人机的防撞成本。

为了方便式 (7) 的求解, 对其约束条件进行确定, 表达式为:

$$\begin{cases} \min J_i' d[A_i'(x, y), \hat{B}_i'(x, y)] \geq d^0 \\ \min J_i' d[A_i'(x, y), A_j'(x, y)] \geq d^0, j \in \varphi_i' \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $d[A_i'(x, y), \hat{B}_i'(x, y)]$  表示的是固定翼无人机与障碍物之间的距离;  $d[A_i'(x, y), A_j'(x, y)]$  表示的是相邻无人机之间的距离;  $d^0$  表示的是标准安全距离。基于 AI 技术—遗传算法对固定翼无人机集群分布式规避控制问题模型进行求解, 具体流程如图 5 所示。

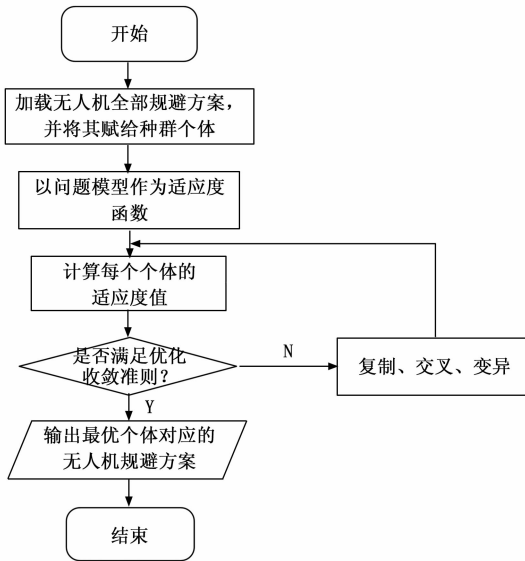


图 5 分布式规避控制问题模型求解程序图

按照图 5 所示即可获得各固定翼无人机的规避方案, 即分布式规避控制律, 将其输送给控制器, 即可实现固定翼无人机集群的分布式规避控制, 为无人机集群的安全作业提供保障。

### 3 设计系统性能测试

#### 3.1 飞行环境搭建

固定翼无人机集群飞行环境搭建是进行无人机集群飞行规避控制实验的重要环节。为了模拟真实的飞行环境, 需要搭建一个与实际环境相似的实验平台, 以便对无人机集群的协同飞行、规避控制等问题进行研究。飞行环境搭建过程如下所示。

步骤一: 场地选择。

选择一个宽敞、无障碍物的室外场地作为实验平台, 确保无人机能够在场地内自由飞行。(需要注意的是, 障碍物后期实验配置)

步骤二: 硬件设备。

根据实验需求, 准备相应的硬件设备, 如无人机、传

感器、通信设备等。确保设备的性能和稳定性满足实验要求。

步骤三: 通信网络。

建立稳定的无线通信网络, 确保无人机之间能够实时传输数据和控制指令。

步骤四: 安全措施。

在实验场地周围设置安全警示标志, 确保人员和设备的安全。

为了增加实验的复杂程度, 提升实验结论的精度, 对飞行环境中的障碍物、风速及其光照条件进行适当的配置, 具体如下所示。

1) 障碍物: 根据实验需求, 设置不同形状、大小和位置的障碍物, 模拟真实的飞行环境。

2) 风速: 通过风速模拟设备, 模拟不同风速下的飞行环境, 以测试无人机的抗风能力和协同规避能力。

3) 光照条件: 依据实际飞行环境的光照条件, 调整实验场地的光照强度和方向。依据上述需求, 搭建飞行环境, 具体如图 6 所示。

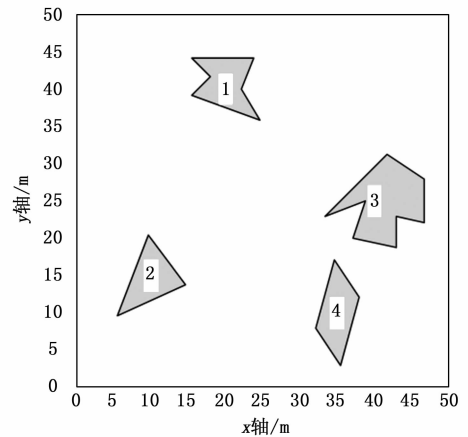


图 6 飞行环境搭建示意图

如图 6 所示, 障碍物数量为 4 个, 并且分布随机, 需要注意的是, 障碍物并不是同时出现的, 应根据实验需求确定具体的配置时间。

#### 3.2 实验结果分析

设置文献 [1]、文献 [2] 与文献 [3] 为对比系统 1、对比系统 2 与对比系统 3, 联合设计系统共同在搭建的飞行环境下进行固定翼无人机集群分布式规避控制实验, 以此来验证设计系统的应用性能。其中, 对比系统 1 设置飞机的最大飞行速度为 60 m/s, 最大加速度为 10 m/s<sup>2</sup>, 无人机之间的通信半径为 300 m; 对比系统 2 设置无人机的最大飞行速度为 50 m/s, 最小飞行速度为 20 m/s, 仿真步长为 10 ms; 对比系统 3 设置通信频率为 1.4 GHz, 飞行时长为 200 s, 最大加速度为 5 m/s<sup>2</sup>。

##### 3.2.1 系统感知性能分析

以某架无人机与障碍物作为研究对象, 研究系统感知性能, 具体结果如表 3 所示。

表 3 系统感知数据表  
(1) 无人机位置感知数据

飞行时间/min	应用系统	位置
1	实际位置	(1,10)
	设计系统	(1,10)
	对比系统 1	(3,8)
	对比系统 2	(1,7)
	对比系统 3	(2,13)
3	实际位置	(3,25)
	设计系统	(3,25)
	对比系统 1	(6,20)
	对比系统 2	(4,15)
	对比系统 3	(3,20)
8	实际位置	(12,23)
	设计系统	(12,23)
	对比系统 1	(10,23)
	对比系统 2	(12,36)
	对比系统 3	(9,13)
15	实际位置	(40,35)
	设计系统	(40,35)
	对比系统 1	(20,35)
	对比系统 2	(10,35)
	对比系统 3	(40,30)

(2) 障碍物位置感知数据

障碍物编号	应用系统	位置
1	实际位置	(20,40)
	设计系统	(20,40)
	对比系统 1	(15,18)
	对比系统 2	(20,39)
	对比系统 3	(19,35)
2	实际位置	(10,15)
	设计系统	(10,15)
	对比系统 1	(12,15)
	对比系统 2	(10,18)
	对比系统 3	(10,20)
3	实际位置	(40,25)
	设计系统	(40,25)
	对比系统 1	(39,25)
	对比系统 2	(40,20)
	对比系统 3	(36,25)
4	实际位置	(35,10)
	设计系统	(35,10)
	对比系统 1	(35,18)
	对比系统 2	(20,23)
	对比系统 3	(33,9)

如表 3 数据所示，应用设计系统获得的无人机位置感知结果、障碍物位置感知结果与实际位置相同，而对比系统 1、对比系统 2 与对比系统 3 应用后获得的无人机位置感知结果、障碍物位置感知结果与实际位置存在着一定的偏差，表明设计系统感知性能更好。

3.2.2 无人机规避控制性能分析

设计系统、对比系统 1、对比系统 2 与对比系统 3 均能

够实现固定翼无人机集群分布式规避控制功能，但其控制效果的好坏无法确定。此研究以路径总偏离量为指标，侧面反映系统的规避控制性能，具体如图 7 所示。

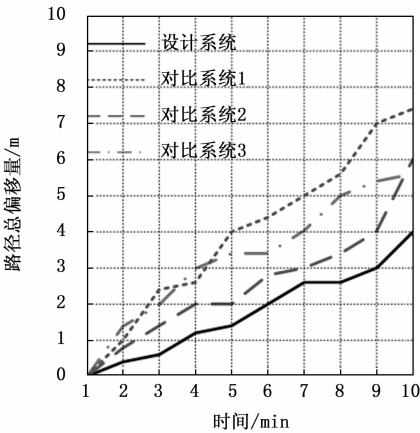


图 7 路径总偏离量示意图

如图 7 所示，随着时间的增加，设计系统、对比系统 1、对比系统 2 与对比系统 3 应用后的路径总偏离量均呈现着逐渐上升的趋势。但是，通过对比发现，无论在任何时间背景下，设计系统应用后的路径总偏离量均小于对比系统 1、对比系统 2 与对比系统 3，最终路径总偏离量数值为 4 m。

4 结束语

固定翼无人机集群是现今无人机应用的主要形式，其具有高效性、灵活性、可靠性与经济性等多重优势。在执行任务时，固定翼无人机集群也需要面对一些挑战，其中之一就是障碍物的规避。由于任务区域中可能存在各种不同的障碍物，如山峰、建筑物、高压线等，无人机集群需要能够有效地规避这些障碍物，以确保安全、顺利地完成任务。现有固定翼无人机集群规避控制系统性能较差，无法满足固定翼无人机集群的后续发展需求，故设计基于 AI 技术的固定翼无人机集群分布式规避控制系统。实验结果显示：设计系统极大地提升了无人机及其障碍物的位置感知性能，并大幅度降低了路径总偏离量，为固定翼无人机集群后续应用提供助力。

参考文献：

[1] 符小卫, 潘 静. 无人机集群规避动态障碍物的分布式队形控制 [J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44 (2): 529-537.  
[2] 王祥科, 陈 浩, 赵述龙. 大规模固定翼无人机集群编队控制方法研究 [J]. 控制与决策, 2021, 36 (9): 2063-2073.  
[3] 董广胜, 李大鹏, 田 峰, 等. 基于 OSDK 的分布式无人机集群控制系统设计与验证 [J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2023, 43 (1): 44-51.  
[4] 李瑞琳, 崔 巍, 冯彦翔, 等. 时间窗约束下的无人集群分布式任务分配算法 [J]. 弹箭与制导学报, 2023, 43 (3): 16-25.

(下转第 97 页)