

1. 实验名称及目的

1.1 实验名称

多无人机虚拟结构编队控制实验

1.2 实验目的

本实验旨在通过Matlab/Simulink软件，实现基于虚拟结构法的多无人机编队控制。

1.3 关键知识点

核心技术原理

UDP通信机制与数据传输

本实验采用UDP（用户数据报协议）作为Matlab/Simulink控制系统与外部设备的通信桥梁。UDP协议具有传输速度快、实时性高的特点，适合无人机控制系统对低延迟的要求。

UDP通信架构：

- 发送端：** Matlab控制系统 → UDP发送模块 → 网络传输
- 接收端：** 外部设备状态 → UDP接收模块 → Matlab处理
- 端口配置：** 起始端口27000，每架无人机占用两个连续端口（发送端： $27000+2*(i-1)$ ，接收端： $27001+2*(i-1)$ ）

数据格式规范：

```

1  % 接收数据格式 (21个双精度浮点数)
2  struct ReceiveData {
3      double id;           // 飞机ID
4      double batV;        // 电池电压
5      double batLevel;    // 电量百分比
6      double locPos[3];   // 本地位置 [x,y,z]
7      double angle[3];    // 姿态角 [roll,pitch,yaw]
8      double gpsPos[3];   // GPS位置
9      double gpsHome[3];  // GPS原点
10     double locVel[3];   // 本地速度
11     double res;         // 保留字段
12     double cState;      // 连接状态
13     double sState;      // 系统状态
14 }
15
16 % 发送数据格式 (8个双精度浮点数)
17 struct SendData {
18     double id;           // 飞机ID
19     double param1;       // 控制参数1 (速度Vx或位置X)
20     double param2;       // 控制参数2 (速度Vy或位置Y)
21     double param3;       // 控制参数3 (速度Vz或位置Z)
22     double param4;       // 保留参数
23     double param5;       // 保留参数
24     double param6;       // 保留参数
25     double cmd;          // 控制指令
26 }

```

多旋翼飞行控制系统架构

多旋翼无人机控制系统采用分层控制架构，将复杂的六自由度控制问题分解为三个相对独立的控制通道：

控制通道分离原理：

1. **高度通道**：控制垂直方向运动，输入 u_T 控制输出 p_{Ze}
2. **偏航通道**：控制绕Z轴旋转，输入 u_{ω_z} 控制输出 ψ
3. **水平通道**：控制X-Y平面运动，输入 u_h 控制输出 p_h

坐标系转换机制：

- **惯性坐标系 (NED)**：北-东-地坐标系，用于全局定位
- **机体坐标系**：以无人机重心为原点的坐标系
- **转换矩阵**：
$$\mathbf{R}_\psi = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}$$

PID控制算法设计原理

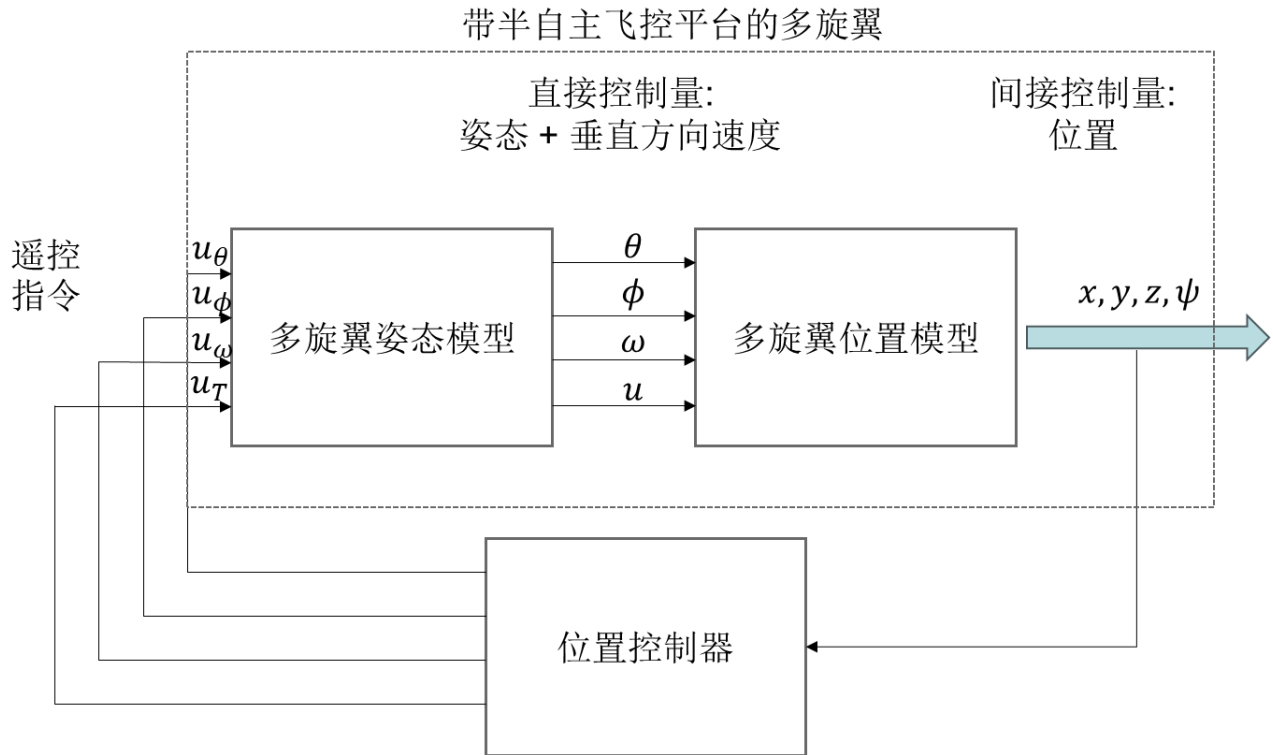


图1 多旋翼控制结构图

本系统采用经典PID控制器实现无人机的精确位置控制。

PID控制方程：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

其中：

- K_p ：比例增益，决定系统响应速度
- K_i ：积分增益，消除稳态误差
- K_d ：微分增益，提高系统稳定性

核心程序架构解析

文件依赖关系

主要执行流程：

1. `iniScript4Model.m` → 初始化系统参数 → `multiuav.slx`
2. `multiuav.slx` → 调用轨迹函数 → `UAVTrjExpect1.m`

3. UAVTrjExpect1.m → 根据运动模式调用 → duixing.m、Shape8_trj.m、Shape_circle_trj.m

核心架构特点：

- **模块化设计**：采用分层架构，实现控制逻辑与轨迹规划的解耦
- **虚拟结构法**：基于虚拟领机的编队控制策略，所有无人机跟踪虚拟轨迹加偏移
- **动态轨迹生成**：支持实时切换定点悬停、8字飞行和圆形轨迹模式

iniScript4Model.m程序解析

虚拟结构编队控制系统的参数初始化脚本，负责设置仿真环境和控制参数：

```
1  %% 初始运行文件，初始化各类飞行参数
2  close all; clear; clc; clf;
3
4  % 总组数设置
5  GropTotalNum = 30;
6  for i = 1:GropTotalNum
7      eval(['Grop', int2str(i), ' = i;']);
8  end
9
10 %% 仿真环境设置
11 fixed_step_size = 1/30; % 仿真步长30Hz
12 XMIN = -112.8; XMAX = 112.8; % X轴仿真空间边界
13 YMIN = -112.2; YMAX = 112.2; % Y轴仿真空间边界
14 ZMIN = -7; ZMAX = 290.0; % Z轴仿真空间边界
```

核心功能模块：

1. 工作空间管理

- 清理Matlab环境，确保实验的可重复性
- 动态生成组标识符，支持大规模编队扩展

2. 仿真参数配置

```
1  VelConst4UAVs = 1; % 无人机速度常数
2  EstThrs4VMP = 0.3; % 虚拟运动规划估计阈值
3  PointHoldTick = 10; % 到达目标点的保持时间
4  freq = 30; % 控制频率 (Hz)
```

3. 安全保护参数

```
1  battery_threshold = 0; % 电池电量保护阈值 (0表示禁用)
2  AUTOLAND = true; % 仿真结束自动降落
3  erro_wide = 0.05; % 位置误差容限
```

4. 轨迹生成参数

```
1 | R = 0.7;      % 圆形轨迹半径
2 | omega = 0.3; % 圆形轨迹角速度
3 | a = 1; b = 1.8; % 8字轨迹椭圆参数
```

设计特点:

- **参数化配置:** 所有关键参数集中管理, 便于系统调优
- **可扩展性:** 支持动态调整无人机数量和编队规模
- **安全机制:** 内置多重安全保护, 确保实验安全性

multiuav.slx架构解析

Simulink模型采用模块化设计, 主要包含三大子系统:

HandleCtrl子系统:

```
1 | % 控制模式切换逻辑
2 | switch control_mode
3 |     case 0: % ARM模式 - 解锁准备
4 |     case 1: % TAKEOFF模式 - 起飞悬停
5 |     case 2: % OFFBOARD_V模式 - 速度控制
6 |     case 3: % OFFBOARD_P模式 - 位置控制
7 |     case 4: % LAND模式 - 降落
8 | end
```

- **仿真/实飞切换:** 通过开关选择数据源和控制目标
- **安全保护机制:** 电量监控和紧急降落逻辑
- **控制模式管理:** 解锁、起飞、悬停、降落状态机

Communication子系统:

分析UDP通信的数据流向和处理逻辑:

- **UDP接收模块:** 解析外部设备发送的状态数据
- **数据预处理:** 坐标系转换和数据滤波
- **指令封装:** 将控制量打包为标准通信协议格式

UAVs子系统:

- **轨迹规划器:** 调用用户自定义函数生成期望轨迹
- **编队控制算法:** 多机协调和避障逻辑
- **安全监控:** 电量监控和异常保护机制

UAVTrjExpect1.m 程序说明

UAVTrjExpect1.m 是虚拟结构编队控制的核心轨迹规划函数，实现了多无人机协同飞行的轨迹生成逻辑。该函数基于虚拟领机概念，为每架无人机生成相对于虚拟轨迹的偏移位置。

函数接口设计

```
1 | function [x, y, z] = UAVTrjExpect1(timestamp, uavnum, cmdFlag, stat, Gmark, model)
```

输入参数详解

- timestamp (double): 当前仿真时间戳，用于轨迹的时间参数化
- uavnum (int): 无人机编号，决定在编队中的相对位置
- cmdFlag (int): 飞行模式标志
 - 2: 悬停模式 (Hover)
 - 4: 速度控制模式 (Offboard velocity)
 - 8: 位置控制模式 (Offboard position)
- stat (1x3 double): 当前无人机真实位置 [x, y, z]
- Gmark (int): 运动模式选择标志
 - 0: 编队定点悬停
 - 1: 编队8字轨迹飞行
 - 2: 编队圆形轨迹飞行
- model (int): 编队队形选择 (0-三角形, 1-正方形等)

输出结果说明

- x, y, z (double): 期望位置坐标 (NED坐标系, Z负值表示海拔高度)

核心算法实现

1. 持久变量管理:

```
1 | persistent x0 y0 indexUAV first_in time_now; % 状态保持变量
```

2. 模式切换逻辑:

- 悬停模式:** 返回初始记录位置，保持定点悬停
- 编队模式:** 调用 `duixing(uavnum, model)` 获取编队偏移
- 轨迹模式:** 调用轨迹生成函数计算动态轨迹

3. 虚拟结构法实现:

```

1 | % 实际轨迹 = 虚拟轨迹 + 编队偏移
2 | [offsetX, offsetY] = duixing(uavnum, model);
3 | x = virtualTrajectory_x + offsetX;
4 | y = virtualTrajectory_y + offsetY;

```

虚拟结构编队控制系统

duixing.m - 编队队形生成器

虚拟结构法的核心函数，负责计算每架无人机在编队中的相对位置偏移：

```

1 | function [x,y] = duixing(num, modle)

```

支持的编队队形：

1. 三角编队 (modle=0)：基于极坐标的几何分布

```

1 | % 1号机：r=1，角度=0°（正前方）
2 | % 2号机：r=1，角度=90°（右侧）
3 | % 3号机：r=1，角度=270°（左侧）

```

2. 正方形编队 (modle=1)：矩形网格布局

```

1 | % 规则的2x3网格分布，间距1米
2 | % 适合大编队和观赏性飞行

```

核心算法特点：

- 极坐标系：使用半径和角度精确定义相对位置
- 中心点可调：通过 `CentrePoint` 参数设置虚拟领机位置
- 角度旋转：预留 `w` 参数支持整体队形旋转

Shape8_trj.m - 8字轨迹生成器

实现编队保持队形的8字飞行轨迹：

```

1 | function [x,y] = Shape8_trj(t, num, modle)

```

轨迹参数设计：

```

1 | a = 0.75; % X轴振幅（米）
2 | b = 0.5; % Y轴振幅（米）
3 | w1 = 0.15; % X轴角频率（rad/s）
4 | w2 = 0.3; % Y轴角频率（rad/s）

```

数学模型：

$$x(t) = a \cos(w_1 t) + offset_x$$

$$y(t) = b \sin(w_2 t) + offset_y$$

其中频率比 $w_2/w_1 = 2$ ，确保形成标准8字轨迹。

Shape_circle_trj.m - 圆形轨迹生成器

实现编队保持队形的圆形飞行轨迹：

```
1 | function [x,y] = Shape_circle_trj(t, num, modle)
```

轨迹参数：

```
1 | a = 0.5; b = 0.5; % 圆的半径 (米)
2 | w1 = w2 = 0.3; % 统一角频率，形成标准圆
```

虚拟结构实现原理：

1. **轨迹分解**：虚拟轨迹 + 编队偏移
2. **同步飞行**：所有无人机跟踪相同时间参数的虚拟轨迹
3. **队形保持**：通过 `duixing()` 函数添加固定偏移量

bat脚本解析

批处理脚本用于启动RflySim仿真环境：

启动流程：

1. **环境变量设置**：配置软件路径和通信模式
2. **仿真软件启动**：启动CopterSim物理仿真引擎
3. **地面站连接**：启动QGroundControl监控界面
4. **通信建立**：建立UDP通信链路

2. 实验效果

可以切换不同轨迹和编队，不同轨迹下均可以保持编队队形

3. 文件目录

例程目录：

[安装目录]\RflySimAPIs\10.RflySimSwarm\2.AdvExps\e1.MatCentCtrlUAVsSim\7.RflyUdpSimpleVirStruct

序号	文件名	文件描述
1	multiuav.slx	主要控制系统模型，包含通信、控制和轨迹规划模块
2	iniScript4Model.m	系统初始化脚本，设置PID参数、仿真环境和系统变量
3	UAVTrjExpect1.m	虚拟结构轨迹期望生成主函数，根据模式调用相应轨迹函数
4	duixing.m	编队队形生成器，定义三角形和正方形等多种编队布局
5	Shape8_trj.m	8字轨迹生成器，实现编队保持队形的8字飞行轨迹
6	Shape_circle_trj.m	圆形轨迹生成器，实现编队保持队形的圆形飞行轨迹
7	SITLRun.bat	软件在环仿真环境一键启动脚本
8	HITLRunPX4Net.bat	硬件在环仿真启动脚本
9	view.py	Python可视化脚本，用于实时显示飞行轨迹和编队状态
10	unresolvedSymbols.txt	Simulink模型中未解析符号列表，用于调试参考

4. 运行环境

4.1 软件要求

Windows 10及以上版本；RflySim工具链；MATLAB 2022b及以上版本

①：若使用Pixhawk 6X飞控，平台安装时的编译命令为：px4_fmu-v6x_default，推荐PX4固件版本为：1.14.4。其他配套飞控及编译命令请见：<https://rflysim.com/doc/zh/1/Hardware.html>

4.2 硬件要求

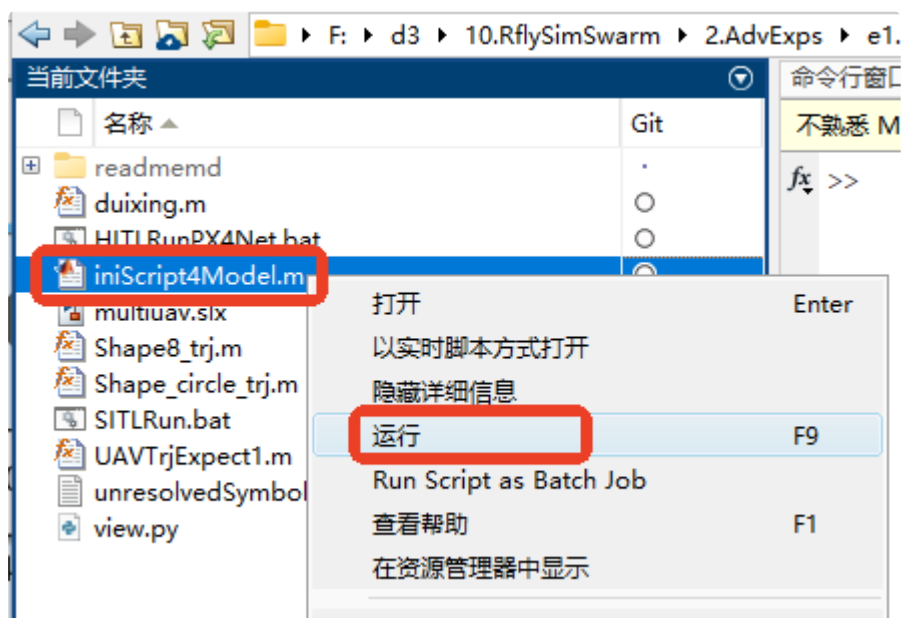
笔记本/台式电脑① 1台；集群控制仿真单元 1台。

①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

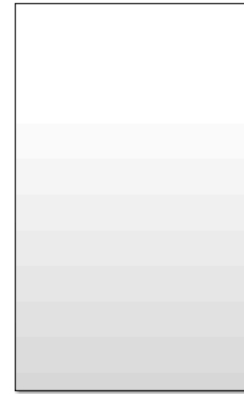
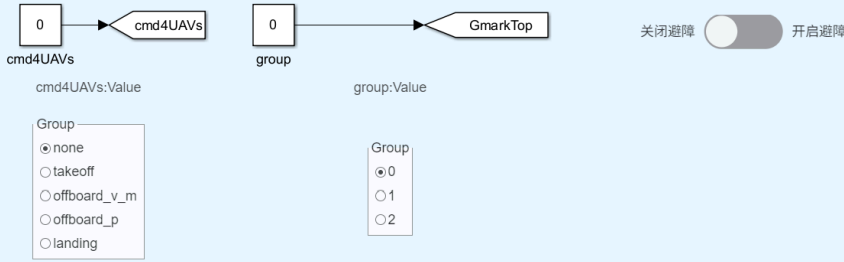
5. 实验步骤

5.1 步骤1：初始化Simulink控制主程序

使用matlab打开本例程目录，双击打开iniScript4Model.m文件和multiuav.slx文件。其中iniScript4Model.m文件是初始化参数文件，先运行初始化文件之后才可以运行.slx文件（如果matalb版本是2022b,运行iniScript4Model.m初始化文件后multiuav.slx自动弹出）。

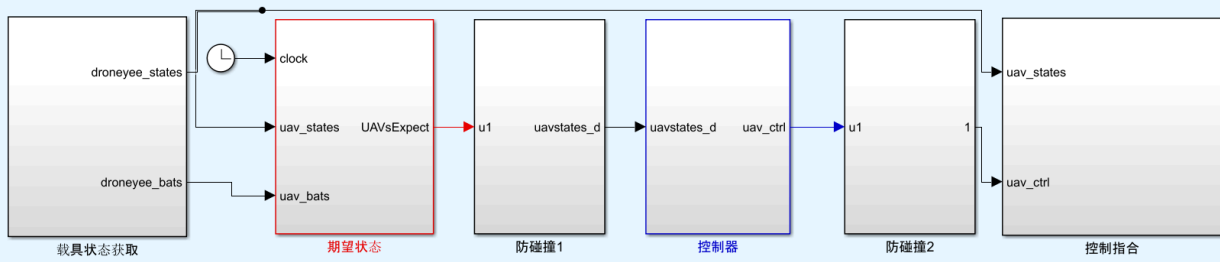


HandleCtrl

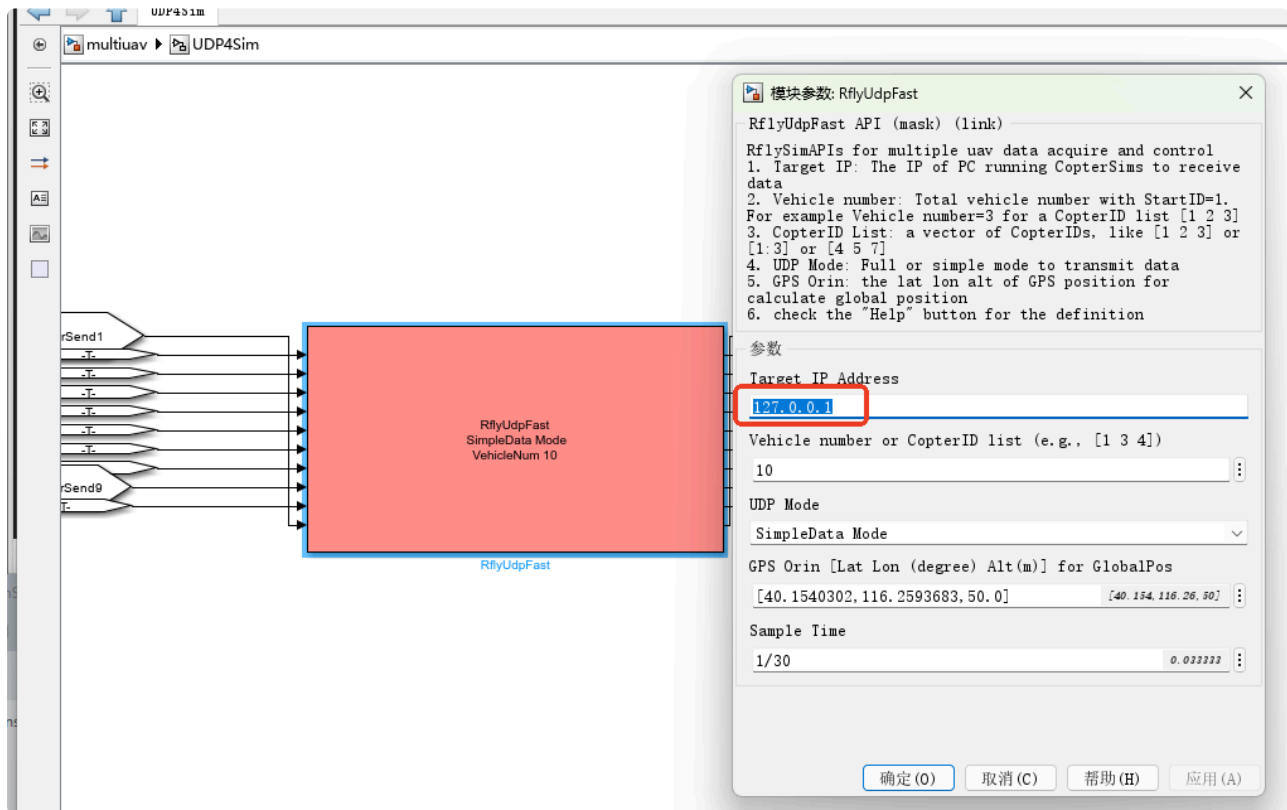


UDP转发

UAVs

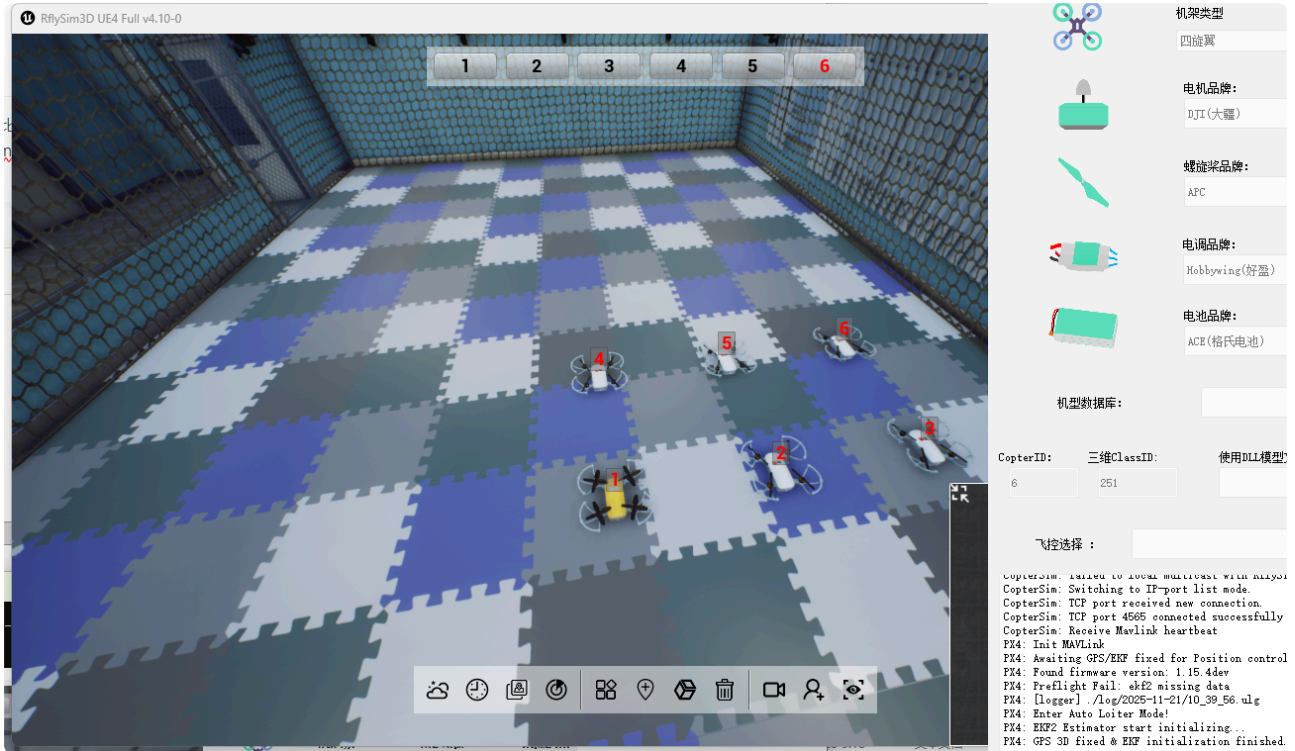


仿真实验前，点击UDP通信模块，设置UDP通信地址127.0.0.1，UDPmode设为Simpledata，保证与bat脚本中仿真软件通信配置保持一致



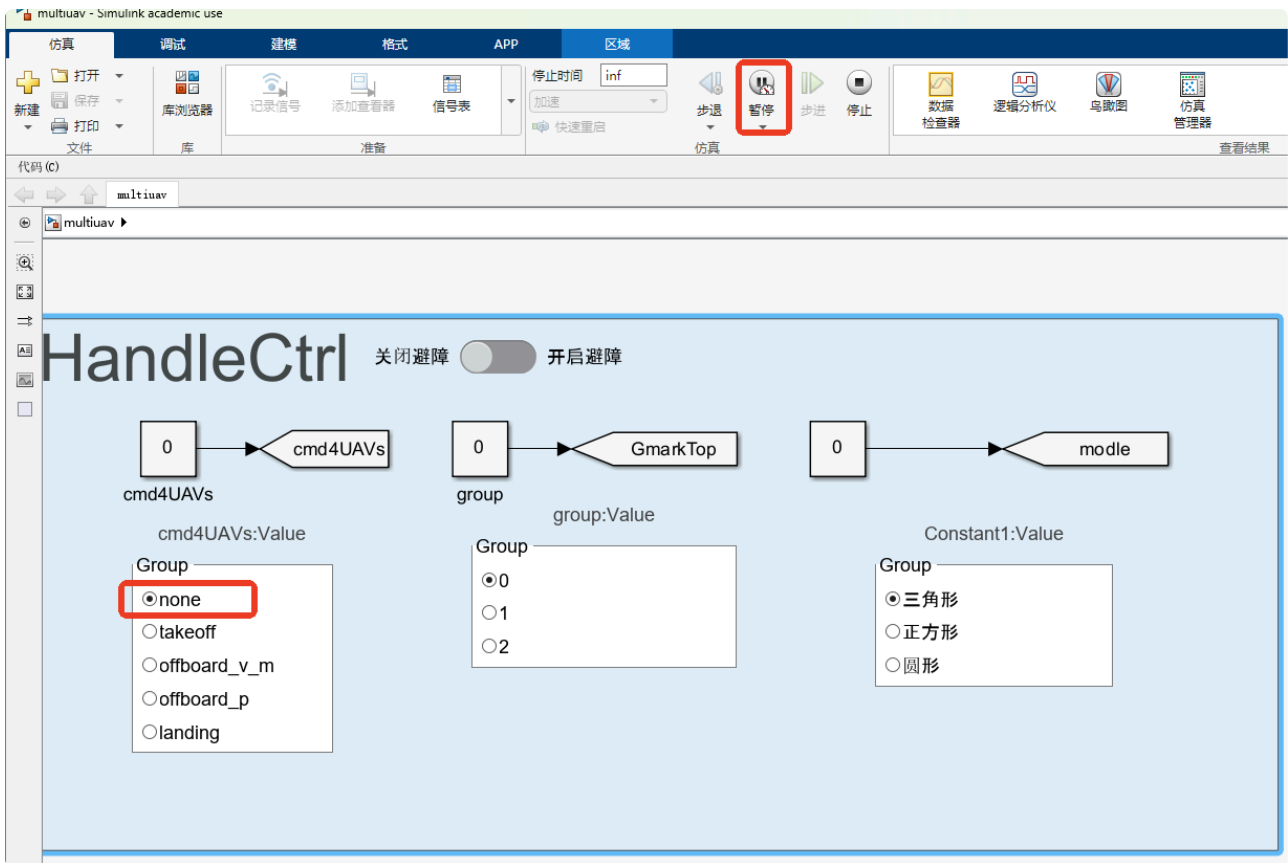
5.2步骤2：启动软件在环仿真

双击SITLRun6uavs.bat启动6架飞机的软件在环，会自动弹出CopterSim、QGroundControl、RflySim3D/RflySimUE5等软件终端界面，待CopterSim弹出PX4: GPS 3D fixed & EKF initialization finished.证明启动正常。



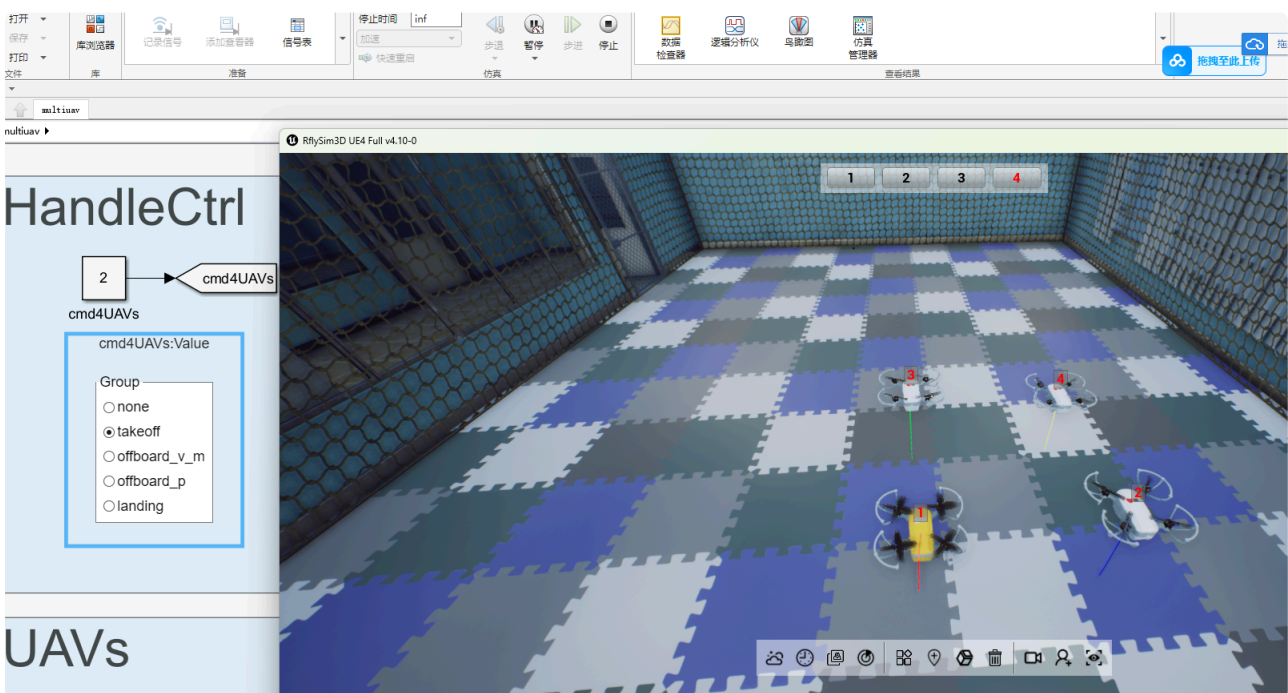
5.3步骤3：运行Simulink控制程序

在multiuav.slx中将初始飞行模式设为none，点击“运行”，如下图

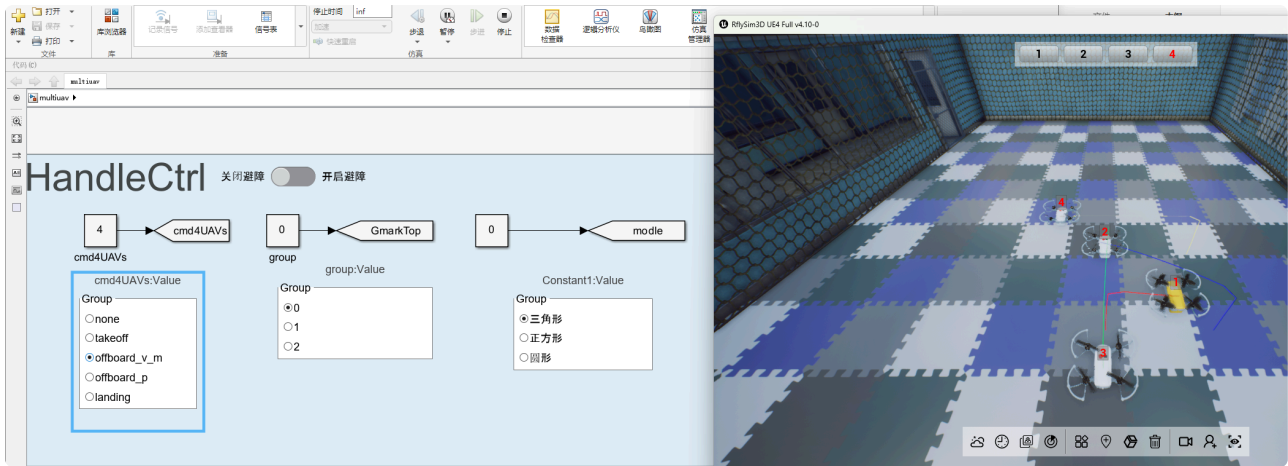


5.4步骤4：执行起飞并切换模式完成队形变换

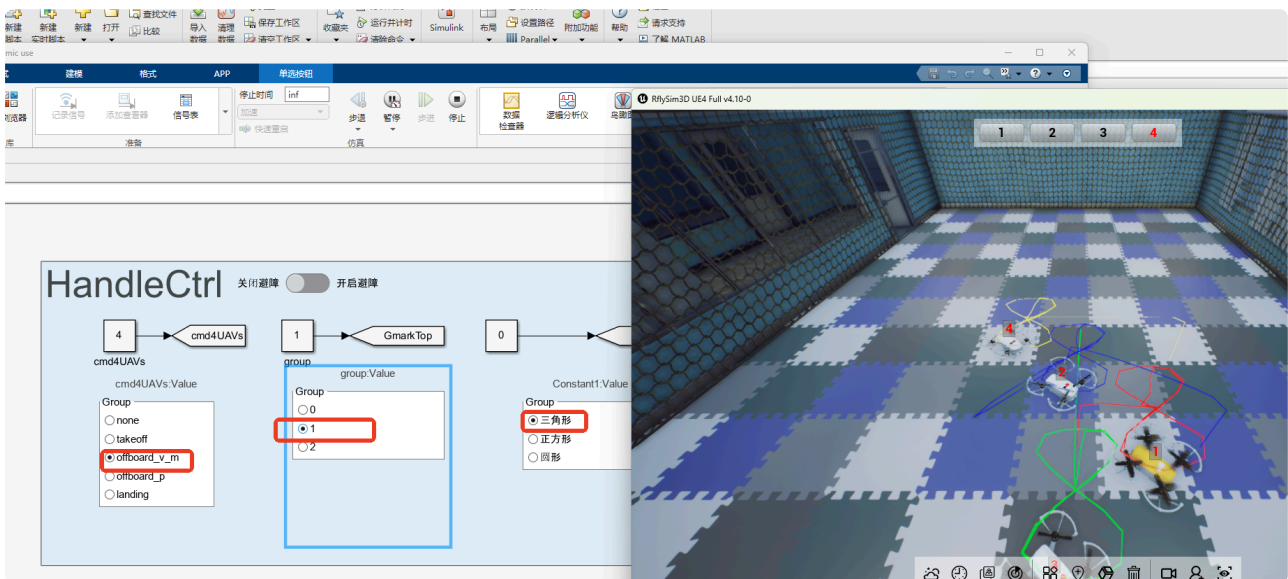
左侧按键先置于takeoff，待飞机平稳后，此时无人机按照UAVTrjExpect1.m的主函数设定的位置到达初始点。



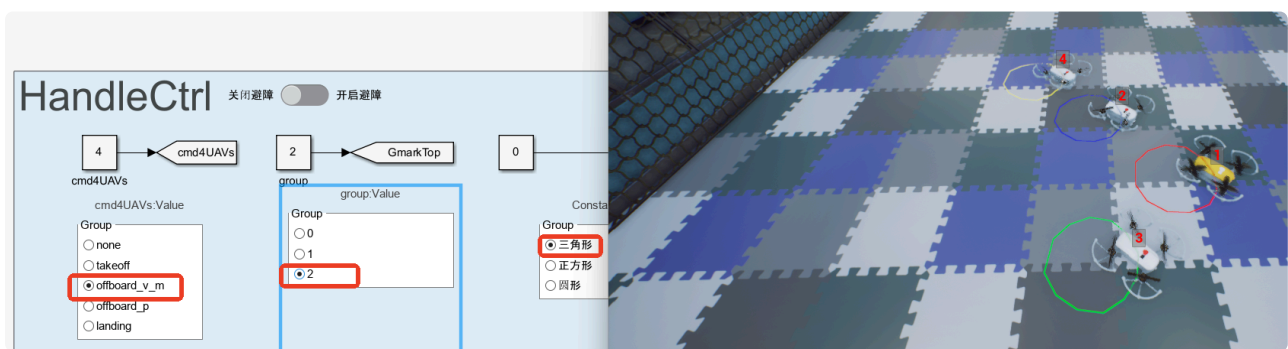
切换为offboard_v_m或者offboard_p，并且将中间按键置于0时会按照虚拟结构进行编队，最右侧按键可以切换队形。



中间按键置于1时，飞机保持队形飞8字



中间按键置于2时飞机保持队形飞圆



待程序飞完以后，左侧按键置于land无人机降落。

5.5 硬件在环仿真（选做）

首先参考例程

[【安装目录】\RflySimAPIs\1.RflySimIntro\2.AdvExps\e9.ConfigTools\2.FeisiSwarmBox_Config](#)

完成集群控制仿真单元的配置，使用本实验目录的HITLRunPX4Net.bat启动硬件在环仿真环境。其余仿真步骤与5.1软件在环仿真完全一致。

7. 常见问题

环境配置类问题

问题1: RflySim软件无法启动或无人机数量设置错误

- **现象:** 双击SITLRun.bat后，软件启动失败或显示无人机数量与预期不符
- **原因:** 软件路径配置错误或批处理脚本中的路径设置不正确
- **解决方案:**
 - i. 检查SITLRun.bat中的软件安装路径是否正确
 - ii. 确认CopterSim和QGroundControl软件已正确安装
 - iii. 以管理员权限运行批处理脚本
 - iv. 检查输入的无人机数量是否为5
- **预防措施:** 安装软件时记录安装路径，定期检查软件更新

问题2: Matlab与RflySim通信失败

- **现象:** Simulink模型运行后，UDP通信显示连接失败或数据传输异常
- **原因:** IP地址设置错误、端口被占用或防火墙阻止通信
- **解决方案:**
 - i. 确认UDP通信地址设置为127.0.0.1（仿真模式）
 - ii. 检查端口27000-27009是否被其他程序占用
 - iii. 临时关闭Windows防火墙测试连接
 - iv. 重启Matlab和RflySim软件重新建立连接
- **预防措施:** 使用专用的网络端口，避免与其他应用冲突

问题3: 动捕系统相机识别失败

- **现象:** CMTracker软件启动后看不到相机画面或反光球识别异常
- **原因:** 相机供电不足、网络连接问题或标定参数丢失
- **解决方案:**
 - i. 检查交换机和路由器是否正常供电
 - ii. 确认网线连接牢固，LED指示灯正常闪烁
 - iii. 重新启动CMTracker_Server和CMTracker_Client软件

iv. 如果问题持续，重新进行相机标定

- **预防措施：**定期备份标定参数，使用稳定的电源供应

I 运行状态类问题

问题4：无人机解锁失败或无法进入Offboard模式

- **现象：**Matlab控制界面显示解锁失败，或无人机无法响应位置控制指令
- **原因：**飞控状态异常、传感器未准备就绪或通信延迟过大
- **解决方案：**
 - i. 检查QGroundControl中飞控连接状态和传感器状态
 - ii. 使用遥控器手动解锁测试飞控是否正常
 - iii. 校准加速度计、陀螺仪和磁力计传感器
 - iv. 确认GPS信号状态显示为"3D fixed"
- **预防措施：**飞行前进行全面的传感器检查和校准

问题5：无人机起飞后位置漂移或震荡

- **现象：**无人机起飞后无法稳定悬停，出现位置漂移或高频震荡
- **原因：**PID参数不合适、定位系统精度不足或控制频率过低
- **解决方案：**
 - i. 调整iniScript4Model.m中的PID参数（降低P参数，增加D参数）
 - ii. 检查动捕系统的定位精度和更新频率
 - iii. 确认控制系统运行频率为30Hz
 - iv. 检查无人机质心与几何中心是否一致
- **预防措施：**使用标准的PID调参方法，逐步优化控制参数

问题6：编队飞行时无人机发生碰撞

- **现象：**多架无人机在编队切换过程中出现碰撞或接近碰撞
- **原因：**轨迹规划不合理、响应时间不一致或安全距离设置不足
- **解决方案：**
 - i. 增大编队间距，修改Dingdian.m和Dingdian1.m中的坐标值
 - ii. 添加轨迹平滑算法，避免急剧的位置变化
 - iii. 实现分时起飞，避免同时切换目标位置
 - iv. 启用防碰撞算法（如果available）
- **预防措施：**在仿真环境中充分测试编队参数，确保安全间距

配置参数类问题

问题7: Simulink模型编译错误或运行异常

- **现象:** 点击运行按钮后出现编译错误或模型停止响应
- **原因:** Matlab版本不兼容、缺少必要的工具箱或模型文件损坏
- **解决方案:**
 - i. 确认Matlab版本为R2022b或更新版本
 - ii. 检查是否安装Simulink和相关工具箱
 - iii. 重新加载iniScript4Model.m初始化参数
 - iv. 清除Matlab工作空间后重新运行
- **预防措施:** 使用推荐的Matlab版本, 定期备份项目文件

问题8: 动捕数据与Matlab坐标系不匹配

- **现象:** 无人机移动方向与预期相反, 或位置坐标数值异常
- **原因:** 坐标系定义不一致, 动捕系统使用东北天, Matlab使用北东地坐标系
- **解决方案:**
 - i. 确认动捕系统坐标系设置 (长轴为X轴正方向)
 - ii. 检查无人机摆放方向 (机头朝向X轴正方向)
 - iii. 在Matlab代码中添加坐标转换逻辑
 - iv. 验证Z轴方向 (负值表示地面以上高度)
- **预防措施:** 建立标准的坐标系设置流程, 制作参考标识

问题9: 电量监控异常或自动降落触发

- **现象:** 无人机在电量充足时意外触发低电量保护降落
- **原因:** 电量检测算法错误、电压阈值设置过高或通信数据异常
- **解决方案:**
 - i. 检查battery_threshold参数设置 (当前为0, 表示禁用)
 - ii. 验证电池电压读取是否正确 (单体>3.8V, 总电压>11.2V)
 - iii. 在QGroundControl中检查电池状态显示
 - iv. 调整电压阈值参数或禁用自动降落功能
- **预防措施:** 实验前检查电池电量, 设置合理的保护阈值

问题10: 网络通信延迟过大

- **现象:** 控制指令响应慢, 无人机跟踪轨迹出现明显延迟
- **原因:** 网络负载过重、路由器性能不足或UDP数据包丢失

- **解决方案:**
 - i. 使用有线网络连接代替WiFi
 - ii. 关闭其他占用网络的应用程序
 - iii. 检查网络设备性能和配置
 - iv. 增加UDP通信的重传机制
- **预防措施:** 使用专用网络环境，定期测试网络性能

6. 参考资料

1. [RflySim官方文档](#)
 2. [QGroundControl用户指南](#)
 3. [PX4开发指南](#)
 4. [Matlab/Simulink官方文档](#)
 5. [MAVLink通信协议规范](#)
 6. [UDP网络通信协议标准](#)
 7. [室内定位系统技术规范](#)
 8. 《多旋翼飞行器设计与控制》，全权，杜光勋，赵峙尧，戴训华，任锦瑞，邓恒译，电子工业出版社，2018
 9. 《多旋翼飞行器设计与控制实践》，全权，戴训华，王帅，电子工业出版社，2020
 10. 《多旋翼飞行器:从原理到实践》，全权，电子工业出版社，2023
 11. 《无人机集群控制理论与应用》，沈林成，电子工业出版社，2021
 12. 《室内定位技术与应用》，刘军发，清华大学出版社，2019
 13. [RflySim多机仿真教程系列](#)
 14. [Matlab/Simulink无人机控制入门](#)
-