

## Lab3 四旋翼无人机集群系统围捕未知机动目标

北京航空航天大学人工智能学院

### 1 实验目标

设计并实现无人机集群系统围捕未知机动目标算法，在仿真平台上进行验证。具体要求如下：

- 了解无人机集群系统围捕未知机动目标场景，可以应用 Lab2 中的编队跟踪控制算法也可以自行设计算法，满足任务要求。
- 进行目标分配，实现集群系统分组围捕多个机动目标。
- 设计时变编队与控制方法，实现编队跟踪过程中的防碰撞，确保围捕打击时具有时间一致性。

### 2 实验内容

#### 2.1 四旋翼无人机模型

同 Lab2。

#### 2.2 无人车模型

无人车使用四个麦克纳姆轮，可以实现全向运动。麦克纳姆轮无人车的模型如图 1 所示。

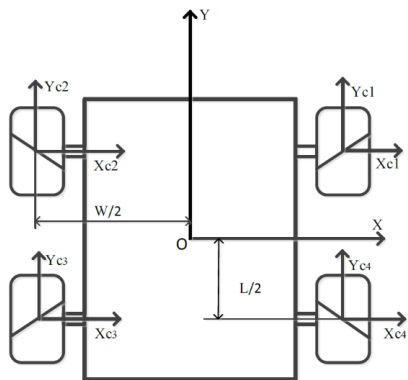
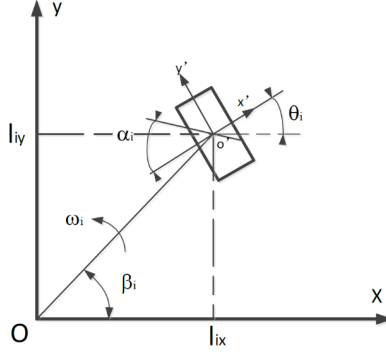


图 1: 麦克纳姆轮无人车模型

每个轮子和系统中心的运动关系如图 2 所示

图 2: 第  $i$  轮和系统中心的运动关系

根据麦克纳姆轮无人车的结构和力学限制, 可以得到运动学模型如下:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{-1}{r} \begin{bmatrix} \frac{\cos(\theta_1 - \alpha_1)}{\sin \alpha_1} & \frac{\sin(\theta_1 - \alpha_1)}{\sin \alpha_1} & \frac{l_1 \sin(\theta_1 - \alpha_1 - \beta_1)}{\sin \alpha_1} \\ \frac{\cos(\theta_2 - \alpha_2)}{\sin \alpha_2} & \frac{\sin(\theta_2 - \alpha_2)}{\sin \alpha_2} & \frac{l_2 \sin(\theta_2 - \alpha_2 - \beta_2)}{\sin \alpha_2} \\ \frac{\cos(\theta_3 - \alpha_3)}{\sin \alpha_3} & \frac{\sin(\theta_3 - \alpha_3)}{\sin \alpha_3} & \frac{l_3 \sin(\theta_3 - \alpha_3 - \beta_3)}{\sin \alpha_3} \\ \frac{\cos(\theta_4 - \alpha_4)}{\sin \alpha_4} & \frac{\sin(\theta_4 - \alpha_4)}{\sin \alpha_4} & \frac{l_4 \sin(\theta_4 - \alpha_4 - \beta_4)}{\sin \alpha_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \\ \omega_c \end{bmatrix}$$

其中,  $r$  是麦克纳姆轮无人车车轮半径长度。 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  分别是四个麦克纳姆轮的转速。 $v_{cx}$  是无人车质心在全局坐标系  $X$  方向的速度,  $v_{cy}$  是无人车质心在全局坐标系  $Y$  方向的速度,  $\omega_c$  是无人车沿全局坐标系  $Z$  轴方向的角速度。一般取  $\alpha_1 = 45^\circ, \alpha_2 = -45^\circ, \alpha_3 = 45^\circ, \alpha_4 = -45^\circ$ 。这样可以保证无人车逆运动学矩阵满秩, 因此可以实现麦克纳姆轮无人车沿  $X$ 、沿  $Y$  方向的线速度以及沿  $Z$  轴方向的角速度的单独控制。正向运动学和逆向运动学分析可以参考 [1]。

设无人车的车头方向航向角为  $\theta$ , 质心全局坐标为  $x, y$ , 那么无人车运动学模型可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{x} = v_x \cos \theta - v_y \sin \theta \\ \dot{y} = v_x \sin \theta + v_y \cos \theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases}$$

其中,  $v_x$  表示无人车沿车体  $X$  轴方向的线速度,  $v_y$  表示无人车沿车体  $Y$  轴方向的线速度,  $\omega$  表示无人车沿车身  $Z$  轴方向的角速度。假定无人车只在水平面内移动, 不存在竖直方向上的运动。选取车头朝向角  $\theta$  为定值, 即  $\omega = 0$ , 定义无人车  $i$  的输入为:

$$\begin{cases} u_{ix} = v_x \cos \theta - v_y \sin \theta \\ u_{iy} = v_x \sin \theta + v_y \cos \theta \end{cases}$$

选取无人车水平面内的位置为状态变量, 则无人车  $i$  可以建模为一阶积分器:

$$\dot{\mathbf{p}}_i = \mathbf{u}_i$$

其中,  $\mathbf{p}_i = [x_{iX}, x_{iY}]^T$  是无人车  $XY$  水平面内的位置,  $\mathbf{u}_i$  是水平面内速度指令。

## 2.3 场景介绍与任务要求

四旋翼无人机集群系统围捕无人车目标如下图所示, 在编队跟踪阶段, 多架无人机起飞并形成初始编队, 跟踪具有未知机动的无人车, 这一阶段需要避免机间以及与障碍物的碰撞。在接近无人车时, 无人机形成收缩的扇形编队围捕打击无人车, 这一阶段需要保证时间一致性, 尽可能同一时间进行打击。

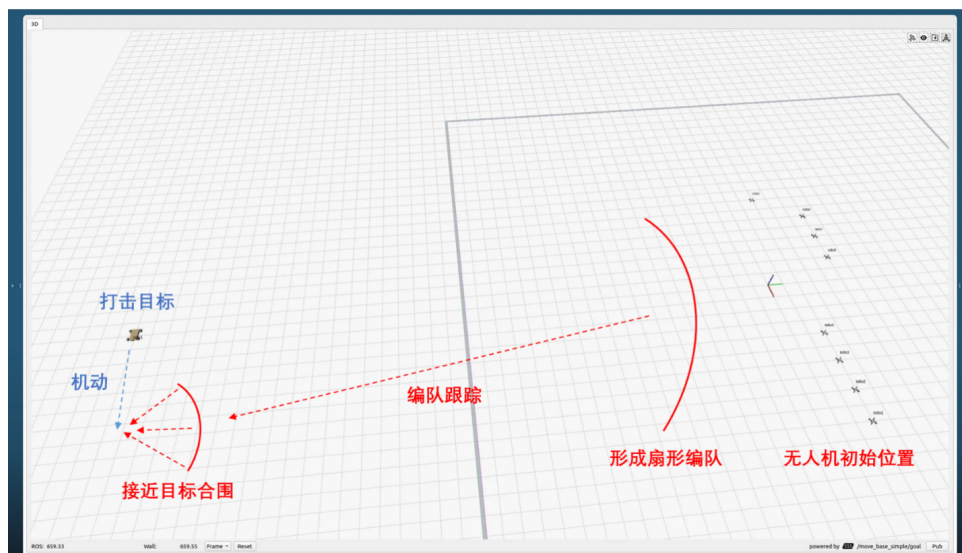


图 3: 围捕示意图

完整场景如图 4 所示，场景中有两个无人车目标进行机动，有 8 架四旋翼无人机需要同学们控制，分两组对无人车目标进行围捕。无人机起飞区域到无人车运动区域之间有障碍区域。任务要求如下：

- 两个无人车 `ugv1` 与 `ugv2` 分别需要 3 架与 5 架无人机进行围捕。无人机需要在起飞前或者任务过程中进行目标分配（例如根据初始位置进行分配），分为两组执行编队跟踪任务。
- 每架无人机在  $Z$  轴方向定高 1 m 飞行，无法从障碍上方绕行，只需要在水平方向上实现围捕。在围捕之前需要与障碍和其他无人机保持 0.5 m 安全距离。
- 每组无人机需要设计时变编队与控制算法，尽可能同时到达无人车目标的周围。

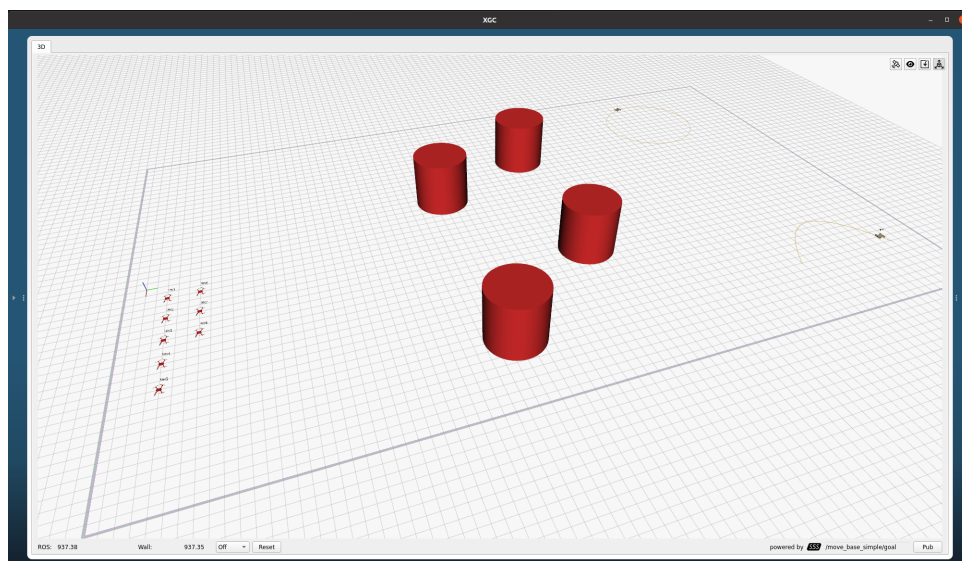


图 4: 场景示意图

## 3 实验步骤

### 3.1 运行场景代码

在仿真平台中导入/home/xgc\_documents/XGC/Config/lab3.xconfig 文件（默认路径下应该能看到该文件）。

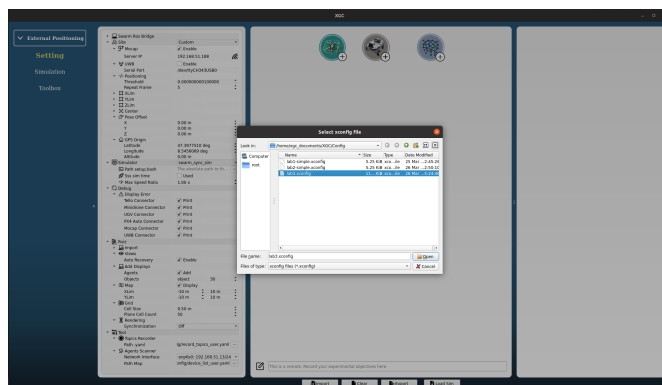


图 5: 导入场景配置

成功导入后，可以看到 8 架无人机与 2 个无人车目标的配置，同时在右侧可以看到名为 lab3 的算法。该算法负责控制无人车运动与障碍生成与显示。之后可以在此基础上继续添加自己的算法，保存到另外的配置文件中。

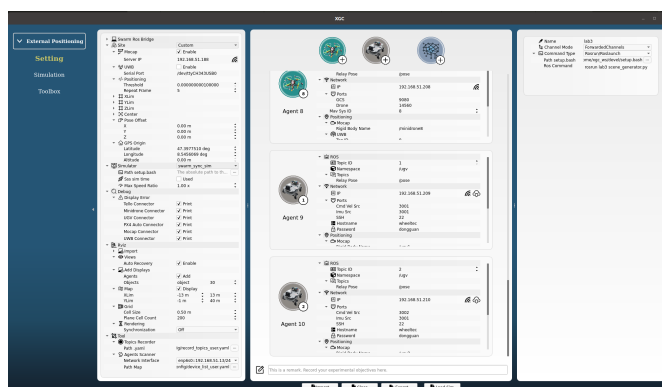


图 6: 成功导入效果

点击 Load Sim 加载仿真按钮，会自动跳转到主界面，并启动仿真器。点击右侧 lab3 算法按钮，可以生成障碍物并显示（红色圆柱表示障碍物），无人机开始运动。

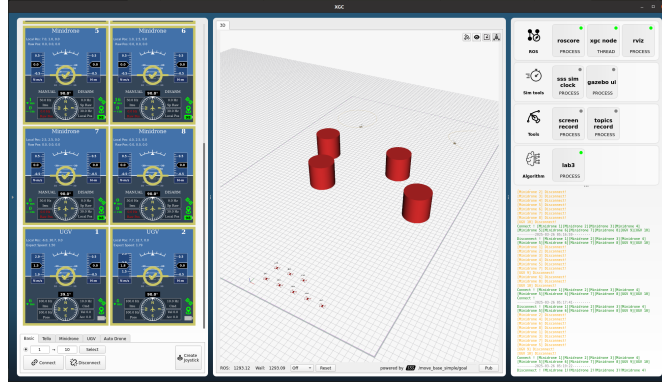


图 7: 生成场景

### 3.2 实现编队控制器

设计无人机的控制算法实现 2.3 中的任务要求，方法不限。可以使用无人车当前 XY 位置，通过 `/ugvi/pose` 话题来获取，`i` 是无人车编号。假设障碍物位置已知，由下表给出。

障碍物编号	x 坐标	y 坐标	半径
1	-6.0	22.0	1.5
2	-3.0	16.0	1.5
3	4.0	22.0	1.5
4	9.0	16.0	1.5

表 1: 障碍物位置和半径，单位 m

在编队跟踪阶段，需要计算无人机与每个障碍物及其他无人机之间的距离，并发布 ROS 话题。推荐使用 `std_msgs/Float64MultiArray` 消息类型。在围捕阶段，需要计算每组无人机中最先到达无人车 1 m 范围内的时间以及最后进入该范围的时间。

### 3.3 数据记录与分析

分析是否成功防止碰撞，要求无人机在围捕之前，与其他无人机和障碍物之间保持至少 0.5 m 的安全距离。同时，分析每组无人机围捕的时间一致性。对于同一组无人机，最先和最后进入目标 1 m 范围内的时间间隔应不超过 1 s。

## 4 作业要求

在仿真平台上，运行 `lab3` 的场景生成算法，编写算法控制无人机，实现 3.2 中任务要求，并分析算法性能，具体控制要求如下：

- 编队跟踪阶段，每架无人机与其他无人机和障碍物之间保持至少 0.5 m 的安全距离。
- 围捕阶段，对于同一组无人机，最先和最后进入目标 1 m 范围内的时间间隔应不超过 1 s。

作业提交要求如下：

- 以小组为单位撰写实验报告，内容包括但不限于集群系统建模、场景及控制问题描述、控制算法设计与实现代码介绍、编队过程仿真平台截图、仿真结果分析等。报告文件命名，例如：实验三报告-组员姓名.pdf(.docx)。
- 将 lab3 的 ROS 功能包与实验报告打包成压缩文件，需要包含算法源码所在 src 或 scripts 文件夹。压缩文件命名格式，例如实验三-组员姓名.zip(.rar)。

## 参考文献

- [1] Hamid Taheri, Bing Qiao, and Nurallah Ghaeminezhad. Kinematic model of a four mecanum wheeled mobile robot. *International journal of computer applications*, 113(3), 2015.