

## Lab2 四旋翼无人机集群系统时变编队跟踪控制

北京航空航天大学人工智能学院

### 1 实验目标

设计并实现四旋翼无人机集群的编队跟踪控制算法，在仿真平台上进行验证。具体要求如下：

- 在 Lab1 基础上，进一步实现无人机集群系统保持时变编队，同时跟踪匀速直线运动与加速度非零的目标。掌握集群系统的时变编队跟踪控制问题的数学描述方法。
- 示例提供了一种分布式时变编队跟踪控制算法的设计与代码实现，在仿真平台中可以实现 3 架无人机的时变编队，同时跟踪匀速直线运动的目标。
- 需要设计与实现编队控制算法，在仿真平台上进行验证并分析控制误差。控制方法与编程语言不限，可以使用示例中的控制算法，或进一步优化扩展。

### 2 实验内容

#### 2.1 四旋翼无人机集群系统模型

考虑集群系统包含了  $N$  架跟随者四旋翼无人机与一个领导者。跟随者四旋翼无人机模型同 Lab1，需要组成编队，并跟踪领导者。领导者具有如下动态：

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{p}}_0 = \mathbf{v}_0 \\ \dot{\mathbf{v}}_0 = \mathbf{a}_0 \end{cases}$$

其中， $\mathbf{a}_j$  是领导者的加速度控制输入，如果  $\mathbf{a}_j = 0$  且  $\mathbf{v}_0(0) \neq 0$ ，则领导者保持匀速直线运动。领导者状态可以记为  $x_0 = [\mathbf{p}_0, \mathbf{v}_0]^T$ 。

#### 2.2 控制目标

假设无人机在 XY 水平面上保持编队跟踪，在 Z 轴上定高飞行，使用分段连续可微的向量  $h(t) = [h_1^T(t), h_2^T(t), \dots, h_N^T(t)]^T \in \mathbf{R}^{4N}$  对期望的时变编队进行描述。如果

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_i(t) - h_i(t) - x_0(t)) = 0, i = 1, 2, \dots, N,$$

则称集群系统实现了期望的时变编队跟踪， $h_i(t) = [h_{ip}(t), h_{iv}(t)]^T$  是无人机  $i$  的状态  $x_i(t)$  与领导者状态  $x_0(t)$  需要保持的状态偏移向量，包含沿 XY 两个轴的位置偏移向量  $h_{ip}(t) \in \mathbf{R}^2$  和速度偏移向量  $h_{iv}(t) \in \mathbf{R}^2$ 。定义  $\zeta_i = x_i(t) - h_i(t) - x_0(t)$  是无人机  $i$  的编队跟踪控制误差，可以用来评估控制算法的有效性。

下图给出了由四个无人机组成的集群系统在二维平面实现编队跟踪的示意图，通过  $h(t) = [h_1^T(t), h_2^T(t), h_3^T(t), h_4^T(t)]^T$  刻画期望的正方形编队构型。

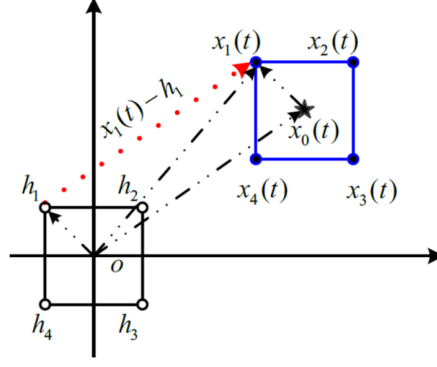


图 1: 无人机集群时变编队跟踪示意

### 2.3 分布式控制协议设计

根据 [1], 对于无人机  $i$ , 一种典型的编队跟踪邻居误差可以设计为

$$\delta_i(t) = (x_i(t) - h_i(t) - x_0(t)) + \sum_{j=1}^N w_{ij} ((x_i(t) - h_i(t)) - (x_j(t) - h_j(t)))$$

基于以上编队跟踪邻居误差, 设计分布式编队跟踪控制协议如下

$$u_i(t) = -v_i(t) - (c + \varphi_i(t)) K \delta_i(t)$$

其中,  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $K \in \mathbb{R}^{2 \times 4}$  是增益矩阵,  $v_i(t) \in \mathbb{R}^2$  是时变编队补偿控制输入,  $c > 0$  是常数,  $\varphi_i(t) = \frac{b}{\|K\delta_i(t)\| + \sigma}$  是非线性函数, 用于消除领导者非零加速度控制输入的影响, 其中  $b > 0$  是常数,  $\sigma > 0$  是一个足够小的常数。

## 3 实验步骤

### 3.1 运行示例代码

如图2所示, 在仿真平台中导入/home/xgc\_documents/XGC/Config/lab2-simple.xconfig 文件 (默认路径下应该能看到该文件)。

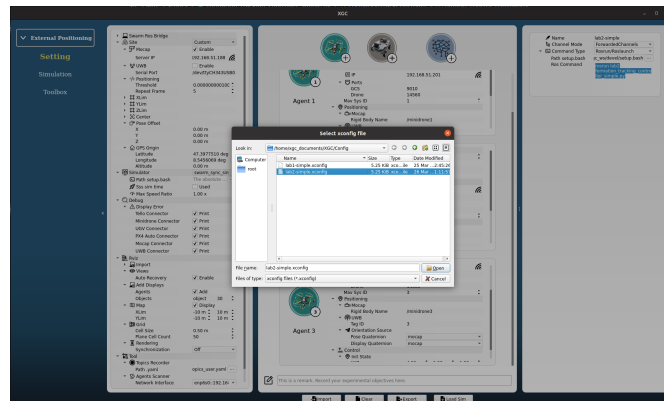


图 2: 导入示例配置

成功导入后，可以看到三架无人机的配置，同时在右侧可以看到名为 lab2-simple 的示例算法。该算法启动前会由仿真平台自动执行 `source /home/xgc_ws/devel/setup.bash`（该路径是容器下的路径），确保执行 `roslaunch` 时可以找到功能包 `lab2`。之后自己编写的算法推荐存放在 `lab2` 功能包中，也可以参照这个算法进行配置。除了 `py` 脚本名需要修改，算法的其余配置都相同，算法的命名可以随意更改。

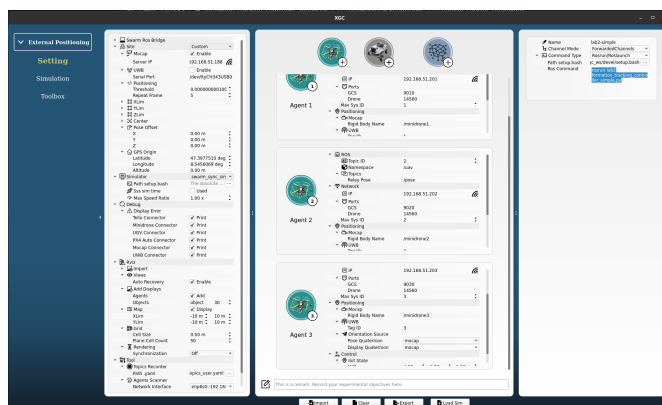


图 3: 成功导入效果

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。3D 可视化区域可以看到三架无人机，在右侧可以看到一个 `lab2-simple` 算法按钮，点击该按钮，等同于依次执行以下命令

```
# 进入容器，执行 source 刷新环境变量，roslaunch 启动示例算法
docker exec -it xgc "/bin/bash"
source /home/xgc_ws/devel/setup.bash
roslaunch lab2 formation_tracking_controller_simple.py
```

点击右侧 `lab2-simple` 算法按钮，运行三架无人机编队跟踪算法（右上角指示灯常绿表示算法正在运行，点击按钮可以结束或者启动算法）。之后参照指南中起飞的步骤，切换无人机状态机，三架无人机将起飞并形成固定三角形编队，同时跟踪匀速直线运动的目标，效果如下。

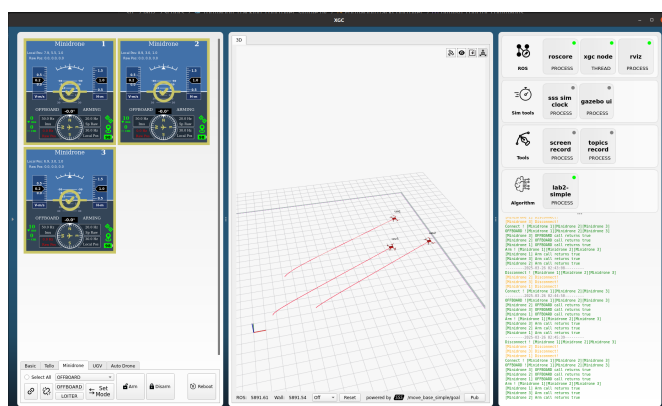


图 4: 三架无人机编队跟踪效果

与 Lab1 相同，示例代码中已经将 `XY` 轴的位置与速度误差发布到 `/uavi/alg/error` 话题中，`i` 是无人机编号。注意编队跟踪控制问题中，控制误差的计算方式与 Lab1 中计算方式略有不同。

### 3.2 实现时变编队跟踪控制目标

参考示例代码，设计控制算法实现 5 架四旋翼无人机的时变编队跟踪，编队在 XY 平面内进行。5 架跟随者四旋翼无人机与领导者之间的通信拓扑不限，可以选择与下图类似的交互关系。

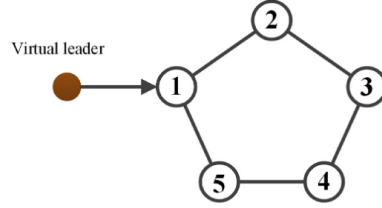


图 5: 通信拓扑

5 个跟随者无人机需要保持如下的旋转圆形编队

$$h_i(t) = \begin{bmatrix} r \cos\left(\omega t + \frac{2\pi(i-1)}{5}\right) \\ r \sin\left(\omega t + \frac{2\pi(i-1)}{5}\right) \\ -\omega r \sin\left(\omega t + \frac{2\pi(i-1)}{5}\right) \\ \omega r \cos\left(\omega t + \frac{2\pi(i-1)}{5}\right) \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, 5)$$

其中，编队半径  $r = 2$  m 和旋转角速度  $\omega = 0.05$  rad/s。需要跟踪领导者的 XY 水平面上位置轨迹为  $[5 * \cos(0.1t), 5 * \sin(0.1t)]^T$ ，其中  $t$  是算法运行的时间。注意，在这个任务中领导者的加速度控制输入不为 0，更加接近实际场景，其可能是规划的结果，也可能是一个真实的非合作目标。如果需要做全状态反馈，可以求导或者微分器获得速度信息。

### 3.3 数据记录与分析

参考示例代码，实现 5 架无人机编队跟踪控制误差的发布。并根据指南，在 PlotJuggler 工具中对 5 架无人机的误差进行实时可视化并分析。也可以在容器中使用 rosbag 录制话题数据，使用绘图工具进行分析。

## 4 作业要求

在仿真平台上，添加 5 架四旋翼无人机，实现 3.2 中编队跟踪任务，并分析控制误差，具体控制要求如下：

- 每架无人机编队控制误差在 15 s 内收敛，XY 轴位置的稳态误差小于 4 cm。

作业提交要求如下：

- 以小组为单位撰写实验报告，内容包括但不限于四旋翼无人机集群建模、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、编队控制误差时间曲线图与分析等。报告文件命名，例如：实验二报告-组员姓名.pdf(.docx)。
- 将 lab2 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，例如实验二-组员姓名.zip(.rar)。

## 参考文献

- [1] Yongzhao Hua, Xiwang Dong, Qingdong Li, and Zhang Ren. Distributed time-varying formation robust tracking for general linear multiagent systems with parameter uncertainties and external disturbances. *IEEE transactions on cybernetics*, 47(8):1959–1969, 2017.