

图像伺服对接控制基础实验

1. 实验目的

1. 了解掌握基于图像伺服的空中加油对接仿真平台的原理，熟悉各模块功能
2. 编写图像伺服控制代码，运行仿真完成空中加油对接实验
3. 分析实验结果，理解图像伺服控制的基本原理和实现方法

2. 实验要求

- 软件要求：Windows 10及以上版本；RflySim工具链;Visual Studio Code；MATLAB R2022b及以上版本^[1]。
- 硬件要求：笔记本/台式电脑1台；Pixhawk自驾仪1个；遥控器及接收机各1个^[2]。

3. 实验地址

例程目录：

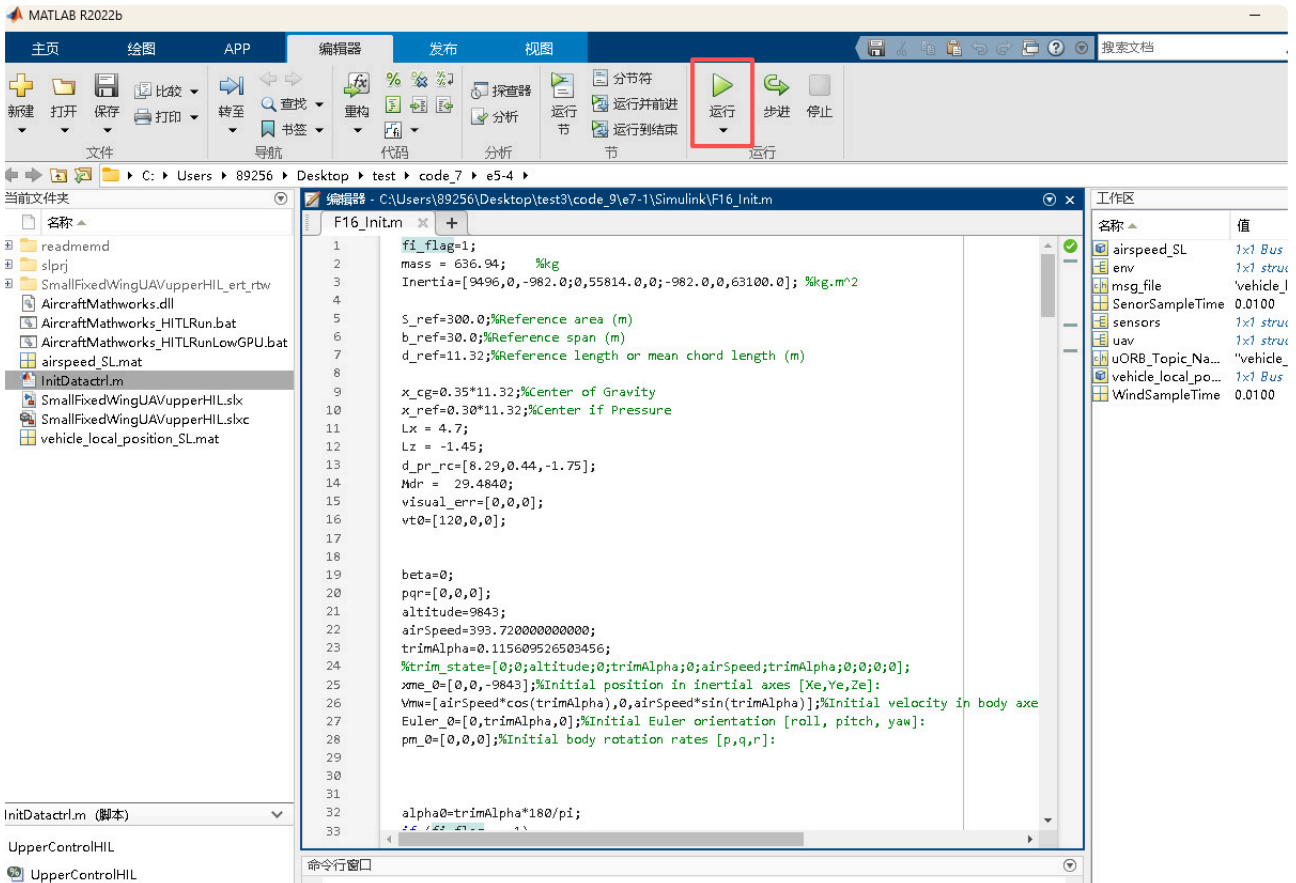
[\[安装目录\]\RflySimAPIs\5.RflySimFlyCtrl\1.BasicExps\e10-FixedWingCtrl\code_9\e7-1](#)

- [AAR_IBVS.slx](#)：基于图像伺服的固定翼无人机对接平台
- [F16_Init.m](#)：初始化文件
- [detect-realtime.py](#)：锥套识别脚本
- [function](#)：各种辅助函数模块
- [models](#)：YOLOv5模型定义文件
- [utils](#)：各种工具函数

4. 实验内容或步骤

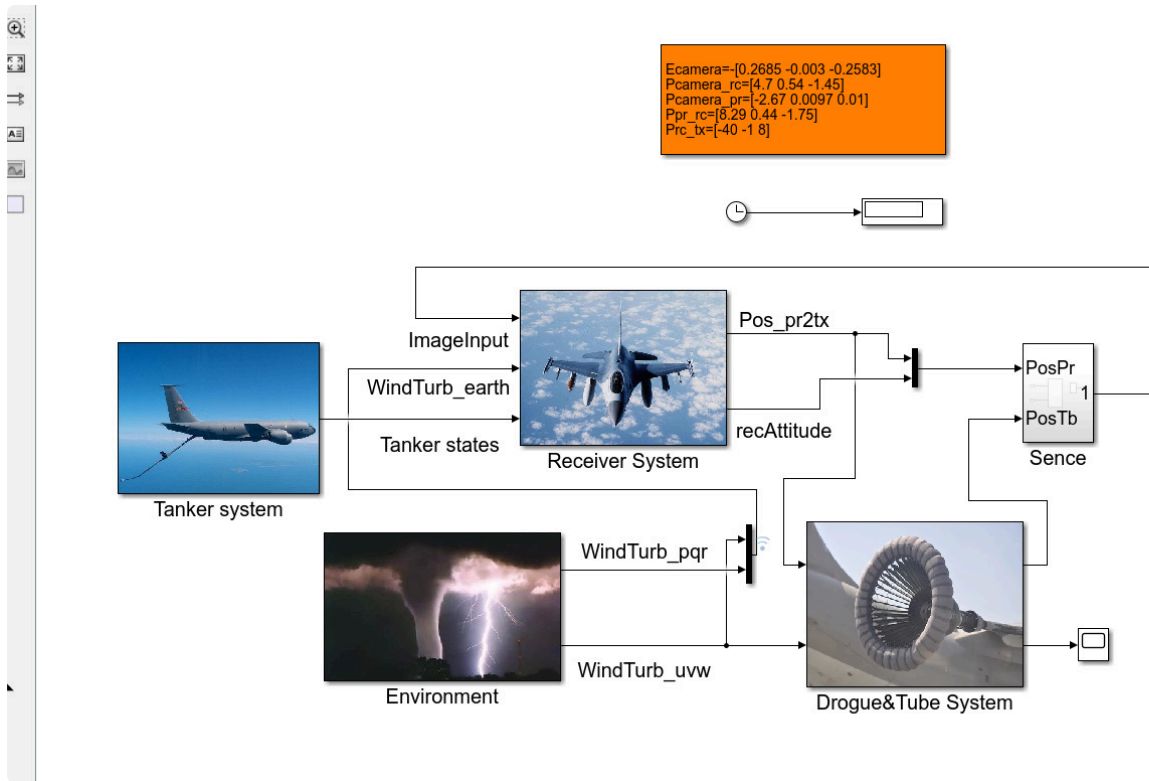
4.1 步骤1：初始化模型参数

首先运行模块初始化文件 "e7-1\Simulink\F16_Init.m" 对模型进行参数初始化。



4.2 步骤2：打开Simulink模型

在完成上述步骤后，双击进入文件 Simulink 模型文件 "e7-1\Simulink\AAR_IBVS.slx"。

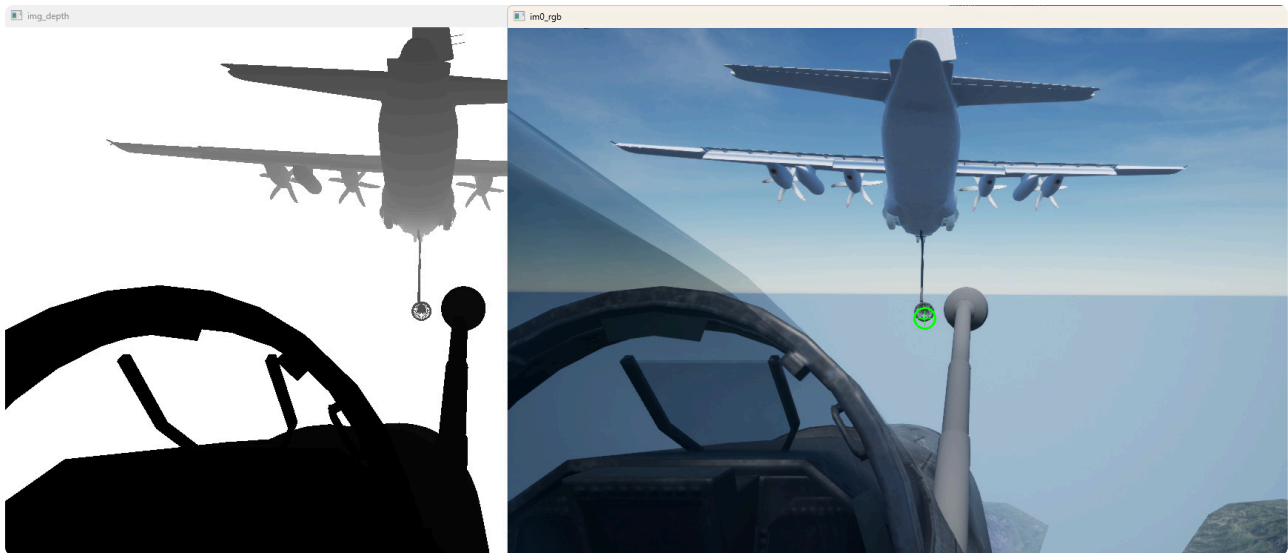


4.3 步骤3：运行仿真

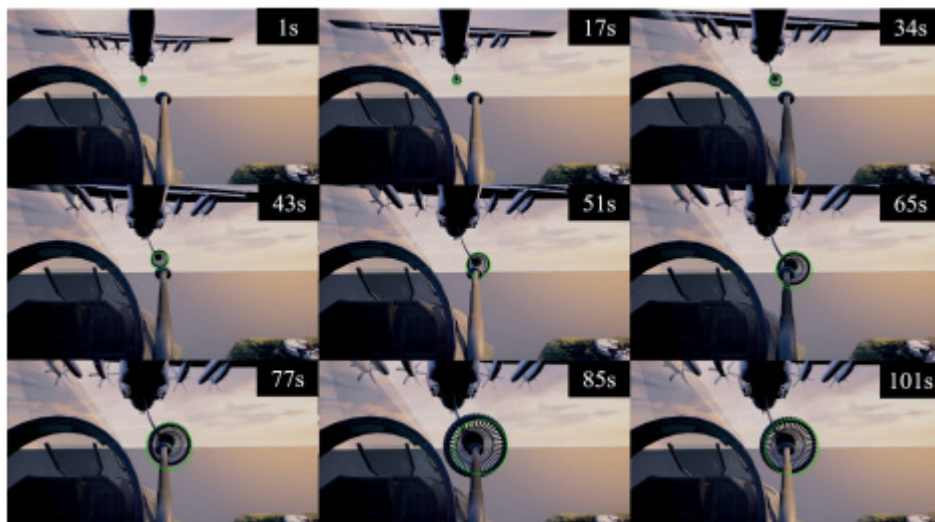
(1) 双击"[e7-1\Python\RflySim3DLoad.bat](#)"脚本，打开 RflySim3D，RflySim3DLoad.bat脚本将自动运行 [CreateAARScene.py](#) 脚本来加载空中加油场景。



RflySim3DLoad.bat脚本还会自动运行 [detect-realtime.py](#) 程序来请求取图、并 Yolo 识别，和锥套位姿估计。得到如下深度和RGB图像。



(2) 等待识别图窗弹出后再继续运行Simulink 文件。等待仿真运行完成，下图为对接过程视景显示，可以发现从对接视景中观察，图像伺服算法完成了对接任务。



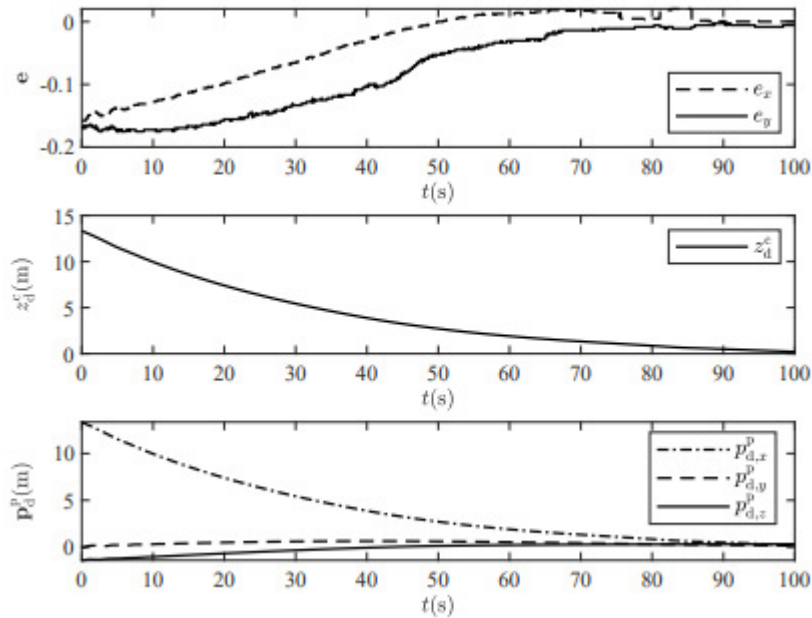
4.4 步骤4：分析实验结果

运行 "[e7-1\Simulink\AnalysisVisualError.mlx](#)"，计算得到对接过程中的对接误差并绘图，可以得到以下的对接实验结果。

下图中的" e "，即"图像误差"，为对接过程中图像误差曲线，表示在图像坐标系中，锥套中心点与图像坐标系原点的差。从曲线中可以发现，图像误差在100 秒内收敛至零。

下图中的 " Z_d^c "，即"深度误差"，为对接过程中深度误差曲线，锥管顶点与锥套平面的距离。从曲线中可以发现，深度误差越小，深度误差衰减速度越小，符合设计的相应通道的外环控制器式。

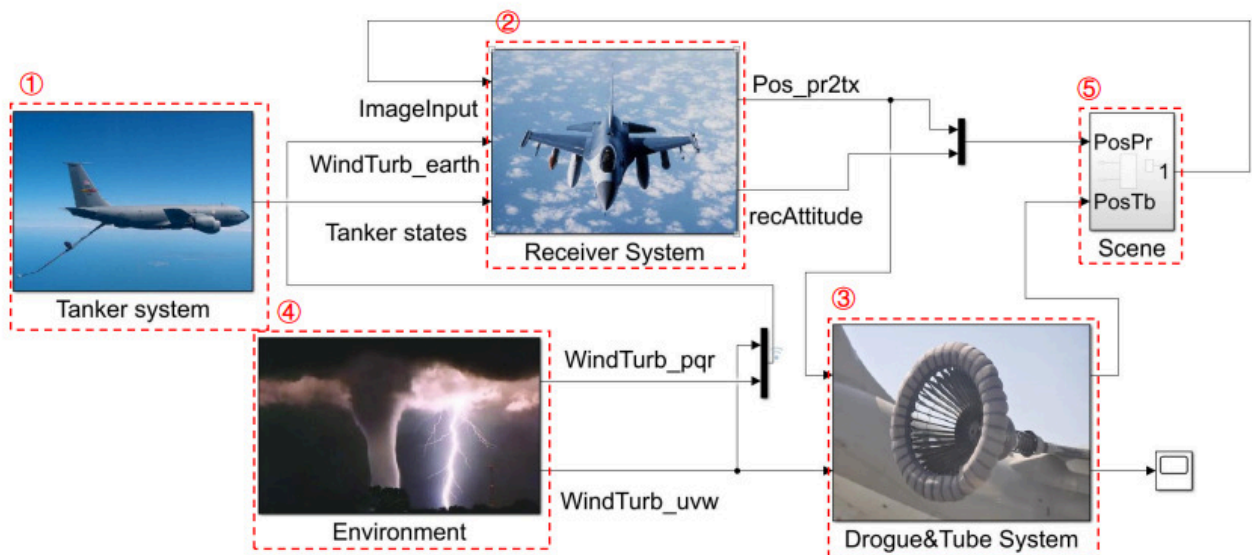
下图中的 " P_d^p "，即"对接位置误差"，为对接过程中相对坐标系下三轴对接误差，即锥管末端与锥套中心之间的位置差。从曲线中可以发现，在横侧向方向和纵向方向上锥管末端以较快的速度靠近锥套中心。在深度方向上，由于控制器设计，锥管末端靠近锥套中心的速度随着深度误差的衰减也逐渐减小。最终，三轴对接误差均收敛至零，对接成功。



5. 关键知识点

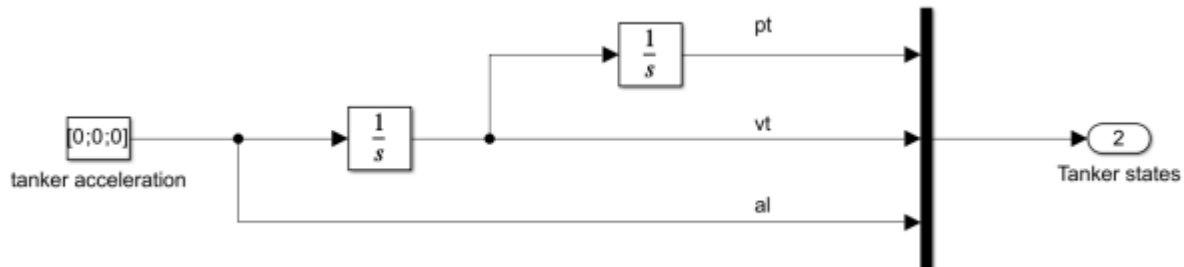
关键知识点1：了解空中加油对接仿真平台主要组成部分

空中加油对接仿真平台主要由五大部分组成：加油机 "Tanker System", 受油机 "Receiver System", 锥套锥管模块 "Drogue&Tube System", 环境模块 "Environment" 和 视景模块 "Scene"。



关键知识点2：了解图像伺服的空中加油对接仿真平台各模块功能

加油机 "Tanker System" 模块（对应关键知识点1中的虚线框①），设定加油机加速度为零，即等速平飞状态，其状态通过积分器来实现。该模块的输出是 "Tanker States"，表示加油机的状态。

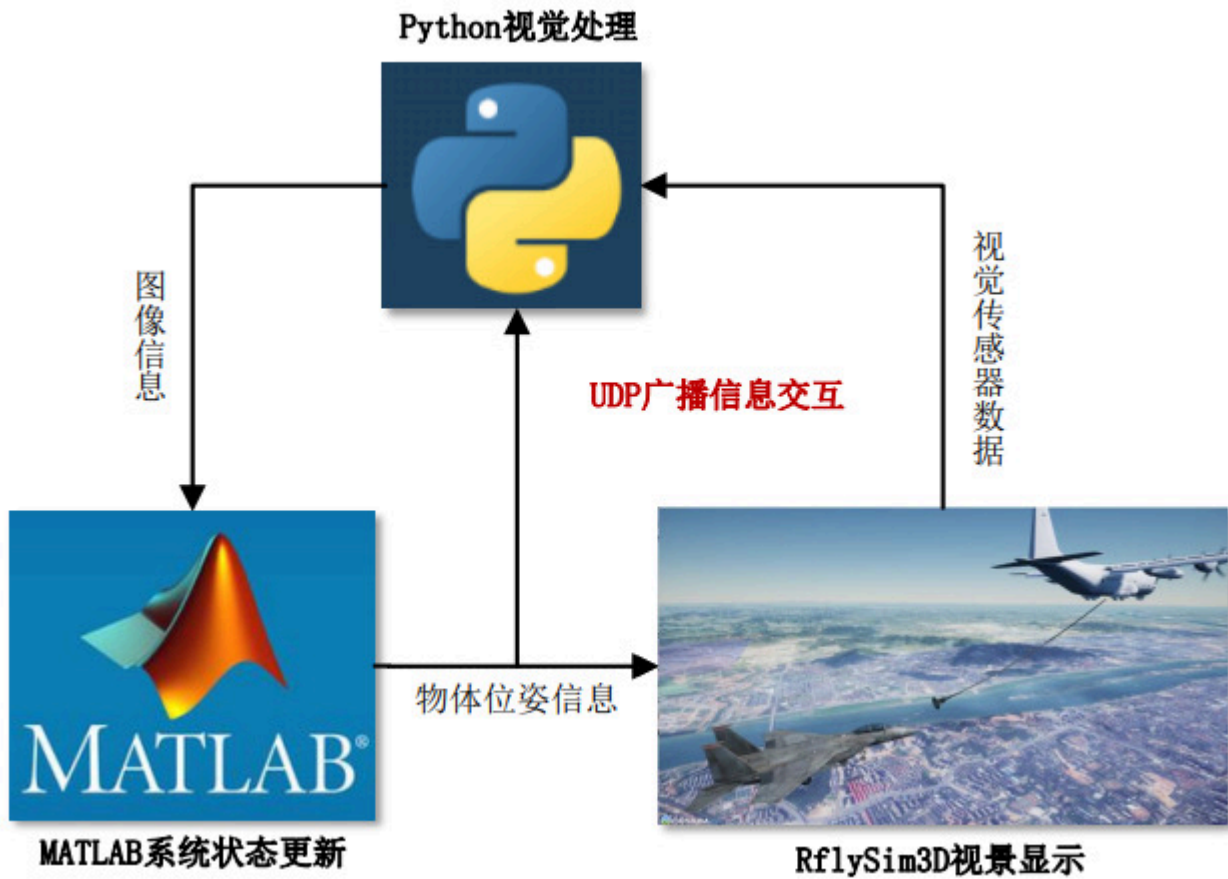


受油机 "Receiver System" 模块（对应关键知识点1中的虚线框②）的输入为："ImageInput" 表示图像信息输入，包括被估计出的锥套位置、图像误差和深度；"WindTurb_earth"，表示地面坐标系下的风扰动；"Tanker States"，表示加油机的状态。该模块的输出为："Pos_pr2tx"，表示锥管相对于加油机的位置；"recAttitude" 表示受油机的姿态。该模块中主要包括三部分，受油机模型、控制器和坐标转换模块。

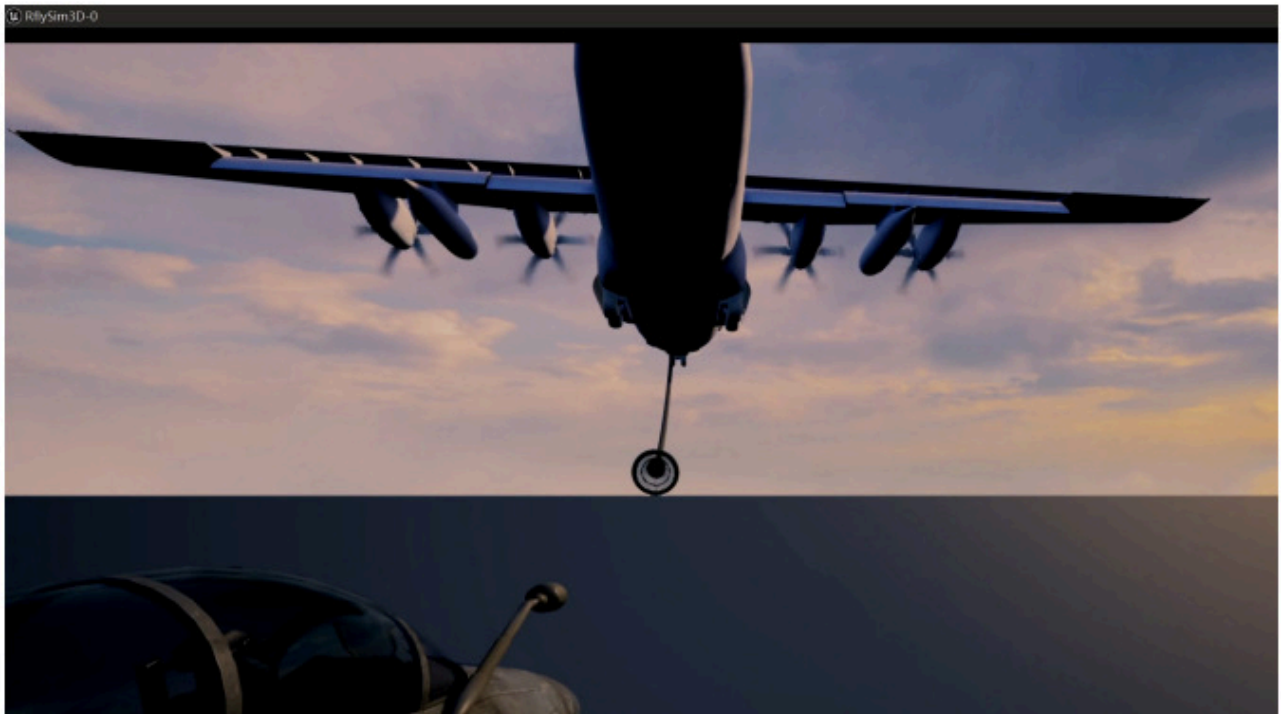
锥套锥管 "Drogue&Tube System" 模块（对应关键知识点1中的虚线框③）计算对接装置锥套的位姿，其输入为：锥管相对于加油机的位置 "Pos_pr2tx" 和风扰动的线速度 "WindTurb_uvw"。输出为各节软管和锥套的位姿 "PosTb"。

环境 "Environment" 模块（对应关键知识点1中的虚线框④）根据空速和高度计算风速等大气数据，其输出为风扰动的线速度 "WindTurb_uvw" 和风扰动的角速度 "WindTurb_pqr"。

视景 "Scene" 模块（对应关键知识点1中的虚线框⑥）完成对接场景的视景显示，其输入为各节软管和锥套的位姿 "PosTb" 和受油机的位姿 "PosPr"。该模块的实现原理为通过 UDP 广播与 RflySim 以及 Python 终端进行通讯，将各节软管、锥套、受油机和加油机的视景模块 "Scene"（对应关键知识点1中的虚线框⑤）完成对接场景的视景显示，其输入为各节软管和锥套的位姿 "PosTb" 和受油机的位姿 "PosPr"。在该模块的实现原理为通过 UDP 广播与 RflySim 以及 Python 终端进行通讯，将各节软管、锥套、受油机和加油机的位姿信息发送给 RflySim3D 进行显示，并接收来自 Python 返回的视觉处理结果，即被估计出的锥套位置、图像误差和深度，信息交互结构如图。



视景显示效果如图。



关键知识点3：实现图像伺服控制算法

在空中加油对接仿真平台的基础上，参考相关公式实现图像伺服控制控制算法。
在"AAR_IBVS\Receiver System\Controller\IBVS Controller" 路径下预留出了外环控制器

的 Matlab Function 模块，该模块的输入为图像误差、深度估计结果以及受油机的状态，输出为相对坐标系下相机的速度期望。关键代码如下：

```
1 ey = -ey; % 将 y 轴方向的图像误差进行反向
2 Z_d = 1.0; % 设置深度误差的补偿值，用于控制插入锥套的深度
3 % 设置控制参数
4 kz = 0.5;
5 ky = 3;
6 kx = 1;
7 k1 = 3;
8 k2 = 1;
9 % 计算期望的相机相对于锥套的速度
10 u_vcz = kz*(Z-Z_d)-k1*(abs(ex))-k2*(abs(ey));
11 u_vcy = ky*(ey-0);
12 u_vcx = kx*(ex-0);
```

内环控制器为 LQR 控制，以纵向通道为例，关键代码如下：

```
1 A_lon=A([1,3,5,7,8,11,13,14],[1,3,5,7,8,11,13,14]);
2 B_lon=B([1,3,5,7,8,11,13,14],1:2);
3 C_lon_xd_h=[1 zeros(1,7);0 1 zeros(1,6)];
4
5 % 增广系统矩阵，加入h和xd的误差积分项
6 AA_lon=[A_lon,zeros(8,2);-C_lon_xd_h,zeros(2,2)];
7 BB_lon=[B_lon;zeros(2,2)];
8
9 Q_lon=diag([4 10 10 1 10 10 0 0 1 3]);
10 R_lon=diag([50 50]);
11
12 [k_lon,p_lon,e_lon]=lqr(AA_lon,BB_lon,Q_lon,R_lon);
13 Kp_lon=k_lon(:,1:8);
14 Ki_lon=-k_lon(:,9:10);
```

更多详细实验原理可见：全权,高文瀚,刘润潇,陈鑫泉,戴训华,吕书礼,徐琳,李悦.微小型固定翼无人机飞行控制设计与实践. 北京, 2025

6. 参考资料

1. [RflySim官方文档](#)
2. [PX4飞控固件官方文档](#)
3. [飞思实验室官网](#)
4. 全权,高文瀚,刘润潇,陈鑫泉,戴训华,吕书礼,徐琳,李悦.微小型固定翼无人机飞行控制设计与实践. 北京, 2025.

| 7.常见问题

| Q1: Python报文件路径错误

A1: 需要把平台复制到C盘下再运行，或者检查文件路径设置是否正确。

| Q2: 无法连接到RflySim3D

A2: 请确保RflySim3D已经正确启动，并且与MATLAB在同一网络环境下运行。

1. <https://rflysim.com/> ↩

2. 推荐配置请见: <https://rflysim.com/doc/zh/HowToInstall.pdf> ↩