

图像伺服与位置伺服对接控制对比实验

1. 实验目的

1. 对比分析不同强度紊流对基于图像伺服的空中加油对接算法的影响
2. 分析在不同紊流下不同的控制参数对对接效果的影响
3. 对比基于图像伺服(IBVS)和基于位置伺服(PBVS)的空中加油对接算法在相机安装误差上的抗扰能力区别

2. 实验要求

- 软件要求：Windows 10及以上版本；MATLAB R2022b及以上版本。
- 硬件要求：笔记本/台式电脑1台。

3. 实验地址

例程目录：

[\[安装目录\]\RflySimAPIs\5.RflySimFlyCtrl\1.BasicExps\10-FixedWingCtrl\code_9\10-2](#)

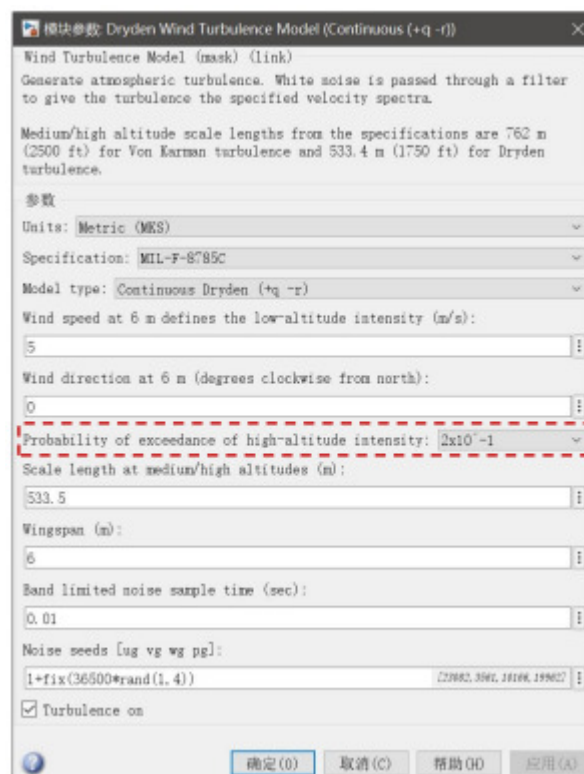
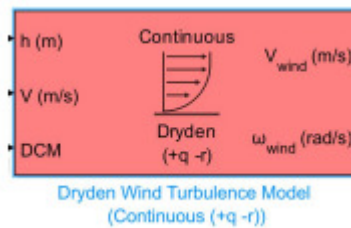
- AAR_IBVS.slx：图像伺服的固定翼无人机对接平台
- F16_Init.m：初始化文件
- [detect-realtime.py](#)：锥套识别脚本

4. 实验内容或步骤

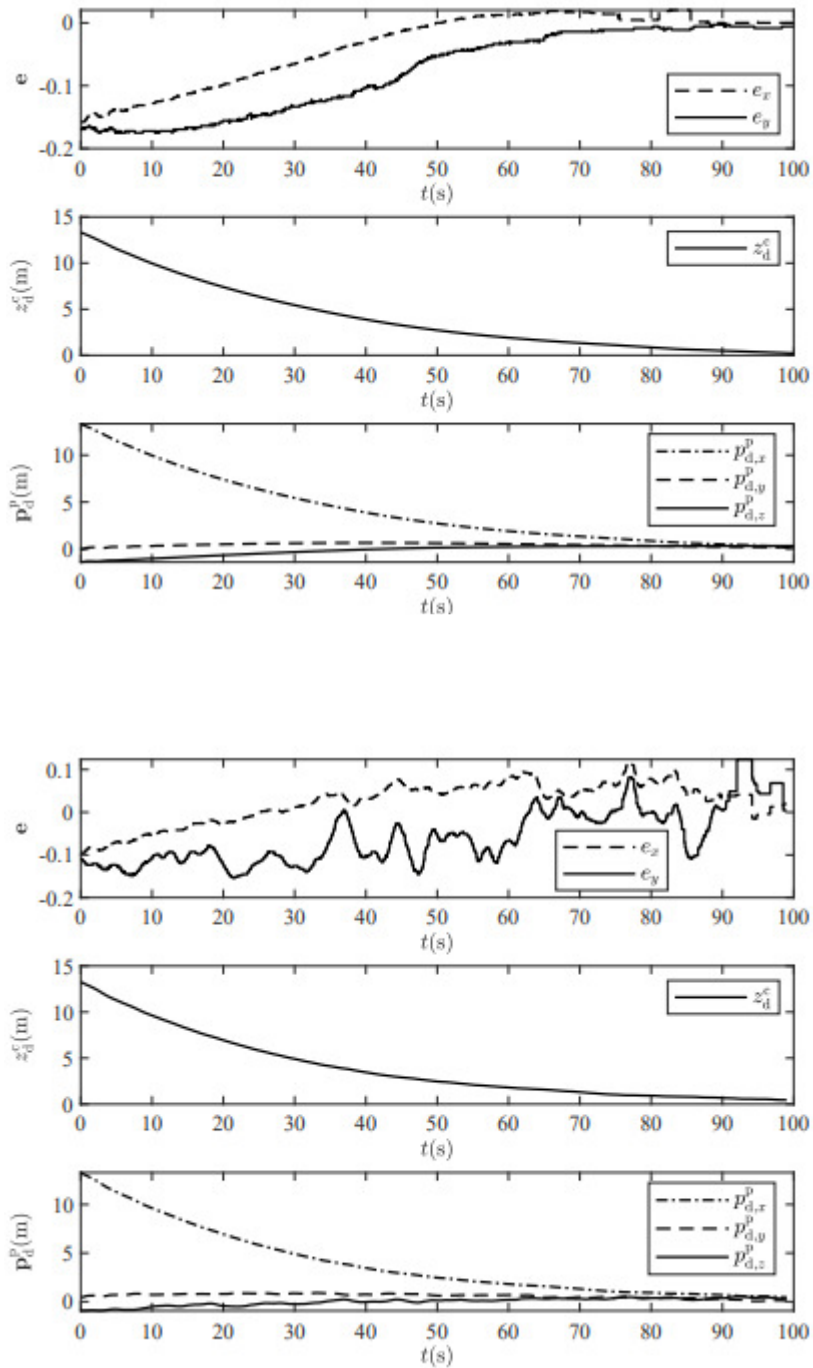
4.1 步骤1：对比不同紊流强度下对接效果

紊流强度是高度和超越强度概率的函数，在高度一定的前提下，紊流强度与超越强度概率是负相关的。在Simulink的Aerospace工具箱中有名为"Dryden Wind Turbulence Model"的相应模块，在"Probability of exceedance of high-altitude intensity"选项中可

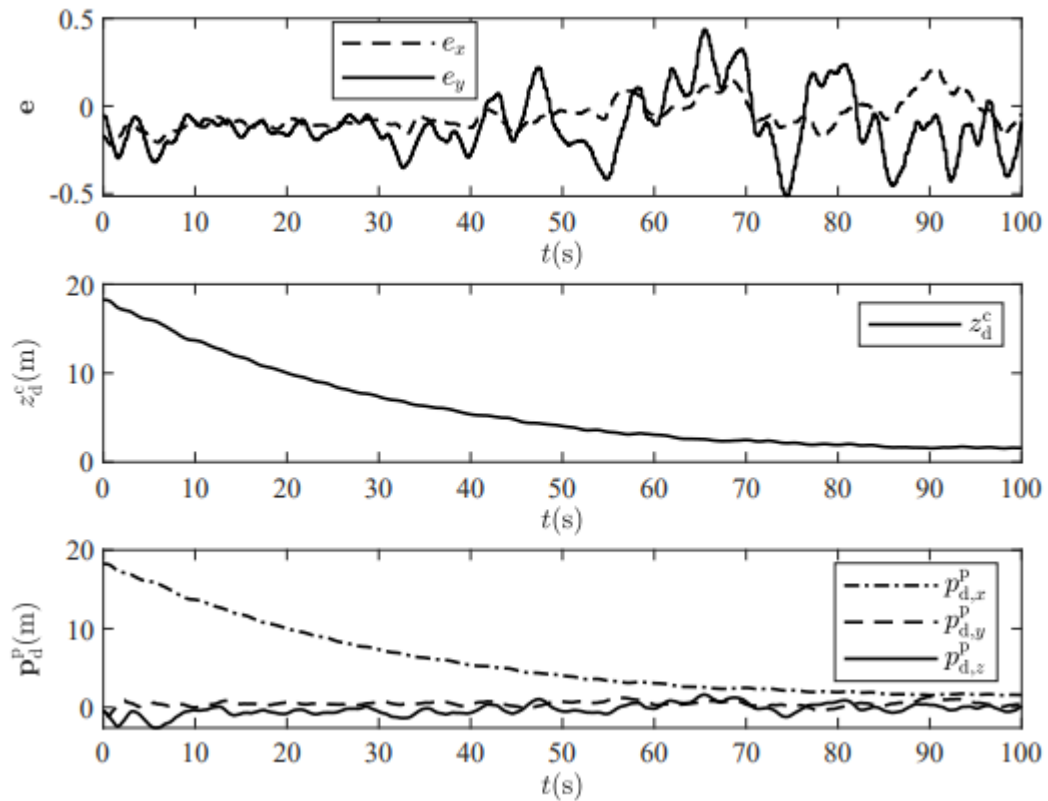
设置超越强度概率，一般情况下，超越强度概率为0.01对应"I级紊流"，超越强度概率为0.001对应"II级紊流"，超越强度概率为0.0001对应"III级紊流"。在空中加油对接仿真平台中，"Dryden Wind Turbulence Model"模块在环境模块中可以找到，修改"Probability of exceedance of high-altitude intensity"即可修改紊流强度。



将紊流强度分别设置为 0、I、II 并运行仿真，且不改变控制参数，观察仿真结果，对比以下两图，可以看出，随着风扰动强度的增加，虽然在对接过程中，受油机的运动轨迹出现了一些波动，但是图像误差 e 、深度误差 Z_d^c 和对接误差 P_d^p 依旧在 100s 内基本收敛为 0。这说明在 I 级紊流下对接仍然是成功的，并且对接误差曲线依然比较平滑，这说明控制器对于风扰动具有一定的抑制功能，在较小的风扰动下具有良好的对接鲁棒性。



从下图可以看出：在 II 级紊流下，图像误差曲线波动更加剧烈，特别是 40s 以后。这是由于当相机距离锥套越近时，锥套在加油机坐标系的移动单位距离反映在图像中的移动距离越大。深度误差曲线相对于上图也有了较为明显的波动。而对接误差曲线经过 110s 也未能同时收敛至 0 附近， $P_{d,x}^p$ 方向上的最终误差大约为 1m， $P_{d,y}^p$ 和 $P_{d,z}^p$ 大约为 0.5m。这说明锥管未能插入锥套，因此对接是失败的。然而这也是正常的现象，因为在较强的风扰动作用下，受油机自身的稳定性也会受到较大的干扰，更不要说对于精度要求更高的空中加油对接控制。实际上在当前的无人机空中加油对接中，对于大气情况也有规定，当风扰动超过一定限度之后，对接任务就因安全原因不允许被执行了。



4.2 步骤2：对比图像伺服与位置伺服对接效果

假设标定出现问题等，导致了相机安装位置出现了一定的偏差。在 RflySimAAR 平台的 PBVS 仿真初始化文件 `./PBVS/Simulink/F16_Init.m` 中进行修改，如代码段所示，其中第 1-2 行是修改之前即没有相机安装位置测量误差的情况，此处注释掉，而第 4 行是加入了相机安装位置误差的情况。

```

1 | %Without camera location error
2 | % d_cam_rc = [4.7;0.54;-1.45];
3 | %With camera location error
4 | d_cam_rc = [4.7+1;0.54;-1.45-0.5]

```

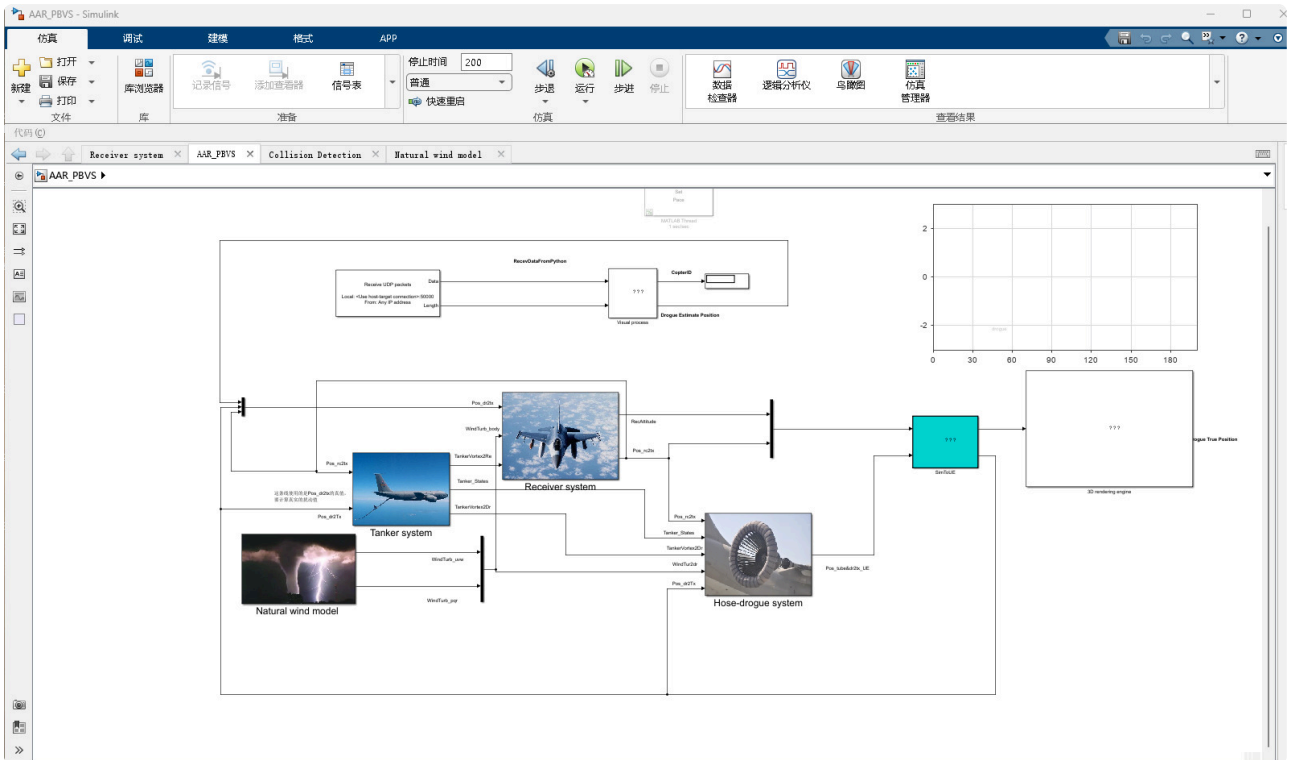
在 RflySimAAR 平台的 IBVS 仿真初始化文件 `./IBVS/Simulink/F16_Init.m` 中进行修改，如代码段所示。其中第 1-4 行是修改之前即没有相机安装位置测量误差的情况，此处进行了注释。第 6-8 行是加入了相机安装位置误差的情况。

```

1 | %Without camera location error
2 | % Lx = 4.7;
3 | % Ly = 0.54;
4 | % Lz = -1.45;
5 | %With camera location error
6 | Lx = 4.7+1;
7 | Ly = 0.54;
8 | Lz = -1.45-0.5;

```

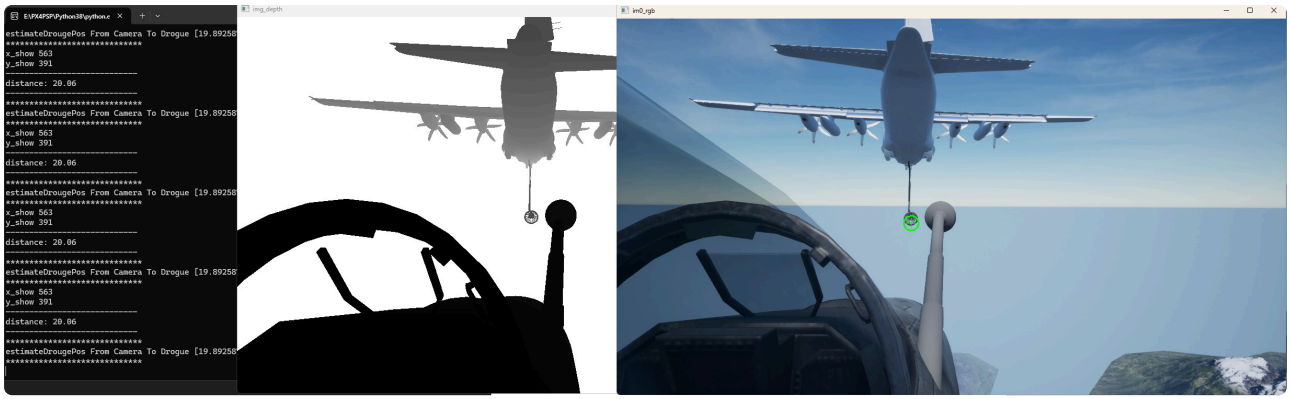
双击打开基于位置伺服的空中加油对接平台(PBVS) "./PBVS/Simulink/AAR_PBVS.slx" 模型文件（先不运行）。



然后双击运行 [./PBVS/Python/RflySim3DLoad.bat](#) 脚本，如下图所示。

名称	修改日期	类型	大小
function	2025/9/30 10:28	文件夹	
models	2025/11/12 14:08	文件夹	
runs	2025/11/12 14:08	文件夹	
utils	2025/11/12 14:08	文件夹	
best.pt	2025/9/28 11:52	PT 文件	14,031 KB
Config.json	2025/9/28 11:52	JSON 源文件	2 KB
CreateAARScene.py	2025/9/28 11:52	Python 源文件	4 KB
detect-realtime.py	2025/11/12 16:24	Python 源文件	25 KB
Python38Run.bat	2025/9/28 11:52	Windows 批处理...	1 KB
RflySim3DLoad.bat	2025/9/28 11:52	Windows 批处理...	1 KB
RflySim3DLoadLowGPU.bat	2025/9/28 11:52	Windows 批处理...	1 KB

等待识别图窗弹出后再继续运行 "./PBVS/Simulink/AAR_PBVS.slx" 文件，等待仿真运行完成。



运行完仿真后双击运行绘图脚本"./PBVS/Simulink/AnalysisError.mlx", 可得出有相机位置测量误差时图像伺服对接误差:

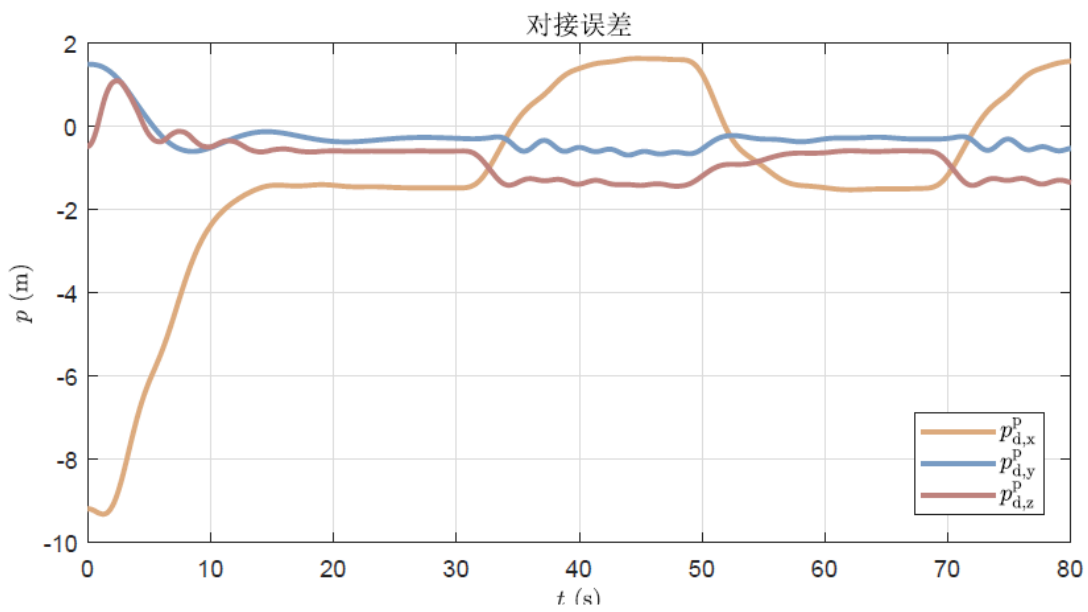
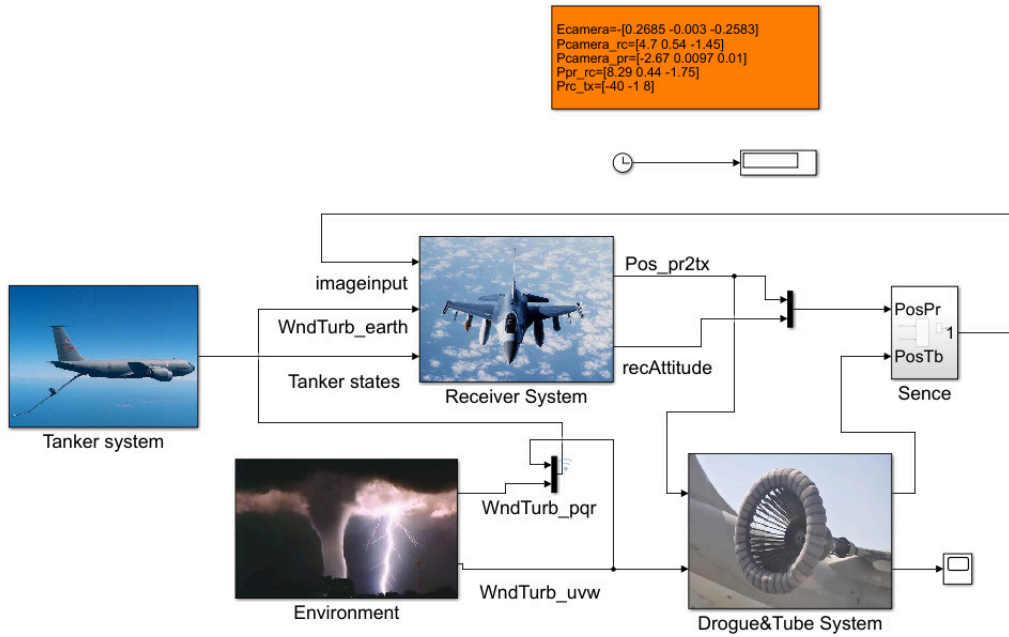


图 (1) 有相机位置测量误差时位置伺服对接误差

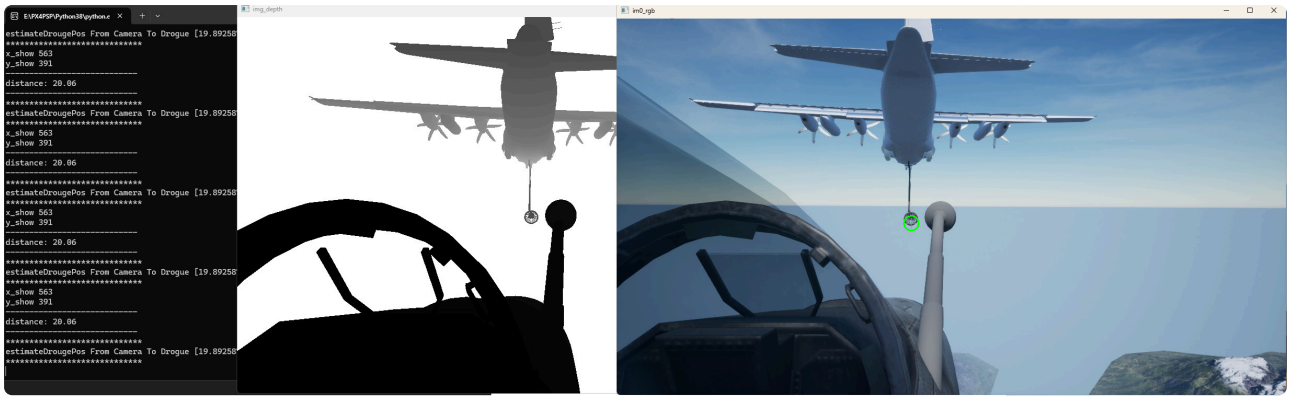
等待上述运行完成后, 双击打开基于图像伺服的空中加油对接平台(IBVS) "./IBVS/Simulink/AAR_IBVS.slx" 模型文件 (先不运行)。



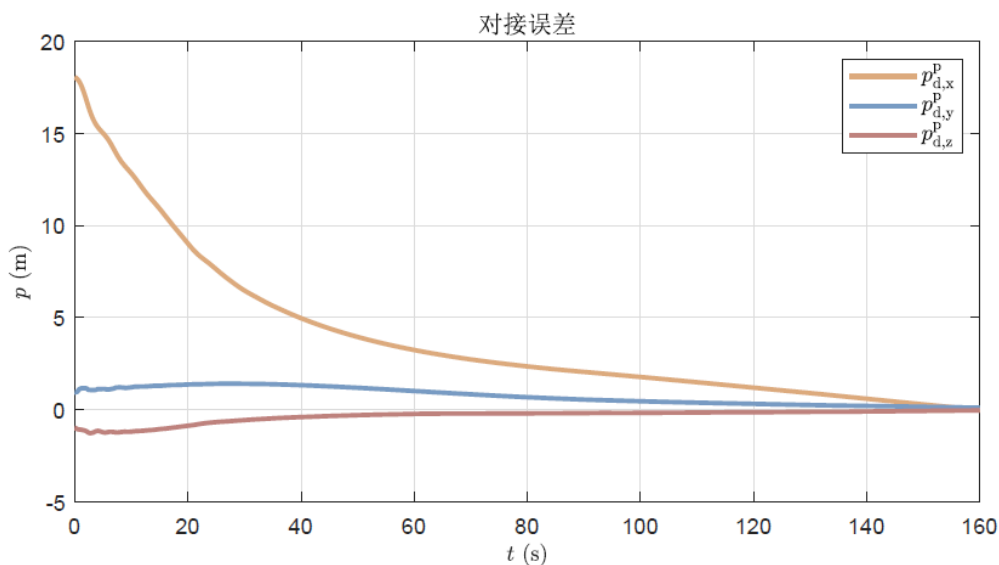
然后双击运行 `./IBVS/Python/RflySim3DLoad.bat` 脚本，如下图所示。

名称	修改日期	类型	大小
function	2025/9/30 10:28	文件夹	
models	2025/11/12 14:00	文件夹	
runs	2025/9/30 10:28	文件夹	
utils	2025/11/12 14:00	文件夹	
best.pt	2025/9/28 11:52	PT 文件	14,031 KB
Config.json	2025/9/28 11:52	JSON 源文件	2 KB
CreateAARScene.py	2025/9/28 11:52	Python 源文件	4 KB
detect-realtime.py	2025/9/28 11:52	Python 源文件	25 KB
Python38Run.bat	2025/9/28 11:52	Windows 批处理...	1 KB
RflySim3DLoad.bat	2025/9/28 11:52	Windows 批处理...	1 KB
RflySim3DLoadLowGPU.bat	2025/9/28 11:52	Windows 批处理...	1 KB

等待识别图窗弹出后再继续运行 `./IBVS/Simulink/AAR_IBVS.slx` 文件，等待仿真运行完成。



运行完仿真后双击运行绘图脚本"./IBVS/Simulink/AnalysisVisualError.mlx"，可得出有相机位置测量误差时图像伺服对接误差：



图（2）有相机位置测量误差时图像伺服对接误差

在图（1）中，0-15s为靠近阶段，锥套与锥管的距离大概在2m左右；15-30s为位置保持并估计锥套位置的过程；30-50s为第一次尝试对接，显然由于相机位置测量误差，对接误差并未收敛至0并且相差很远，特别是方向；50-70s为对接失败后退回等待位置重新估计锥套位置；70-80s为第二次尝试，但是依旧失败。在图（2）中，对接误差在160s内平稳地收敛至0，虽然用时较长，但是对接是成功的。

5. 关键知识点

实验指导包中主要有基于图像伺服的对接控制程序"IBVS"文件夹和基于位置伺服的对接控制程序"PBVS"文件夹。以"IBVS"文件夹为例，其中主要有"Simulink"和"Python"两个文件夹。"Simulink"文件夹中主要有：基于图像伺服的空中加油对接仿真程序"AAR IBVS.slx",初

始化文件"F16Init.m"以及其他平台中调用的函数等。"Python"文件夹中主要包含锥套识别脚本"detect-realttime.py"以及其调用的其他函数等。注意"IBVS"文件夹和"PBVS"文件夹中的"detect-.realttime.py"并不完全一样，区别在于前者返回的是锥套中心在图像坐标系中的像素位置和深度，后者返回的是估计出的锥套的三维位置。

关键知识点1：不同强度紊流对对接效果的影响

紊流强度是高度和超越强度概率的函数，在高度一定的前提下，紊流强度与超越强度概率是负相关的。在Simulink的Aerospace工具箱中有名为"Dryden Wind Turbulence Model"的相应模块，在"Probability of exceedance of high-altitude intensity"选项中可设置超越强度概率。一般情况下：

- 超越强度概率为0.01对应"I级紊流"
- 超越强度概率为0.001对应"II级紊流"
- 超越强度概率为0.0001对应"III级紊流"

在空中加油对接仿真平台中，"Dryden Wind Turbulence Model"模块在环境模块中可以找到，修改"Probability of exceedance of high-altitude intensity"即可修改紊流强度。

关键知识点2：图像伺服与位置伺服对接效果对比

在实际应用中，由于标定等问题，可能导致相机安装位置出现一定的偏差。通过在初始化文件中修改相机安装位置参数，可以模拟这种误差并对比两种控制方法的抗扰能力。在PBVS仿真初始化文件"F16_Init.m"中修改相机安装位置误差：

```
1 | %Without camera location error
2 | % d_cam_rc = [4.7;0.54;-1.45];
3 |
4 | %With camera location error
5 | d_cam_rc = [4.7+1;0.54;-1.45-0.5]
```

在IBVS仿真初始化文件"F16_Init.m"中修改相机安装位置误差：

```
1 | %Without camera location error
2 | % Lx = 4.7;
3 | % Ly = 0.54;
4 | % Lz = -1.45;
5 |
6 | %With camera location error
7 | Lx = 4.7+1;
8 | Ly = 0.54;
9 | Lz = -1.45-0.5;
```

6. 参考资料

1. RflySim官方文档
2. PX4飞控固件官方文档: <https://docs.px4.io/>
3. 飞思实验室官网: <http://www.feisilab.com/>
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: 暂无

A1: 暂无