

# 1. 实验名称及目的

## 1.1 实验名称

图像伺服对接控制实验

## 1.2 实验目的

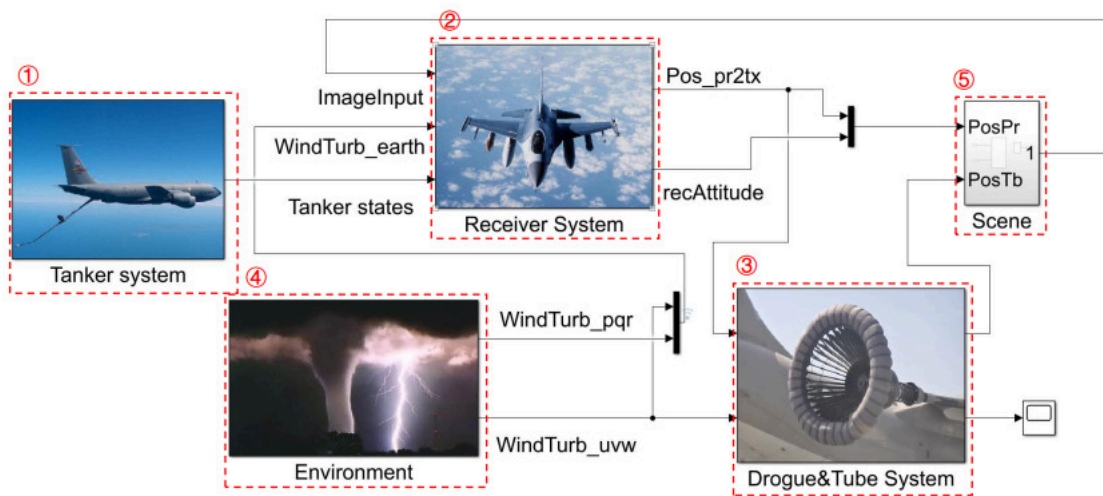
基础实验：了解掌握基于图像伺服的空中加油对接仿真平台的原理，熟悉各模块功能，编写图像伺服控制代码，运行仿真完成空中加油对接实验，分析实验结果。

分析实验：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，以及在不同紊流下不同的控制参数。并与基于位置伺服的空中加油对接算法进行对比，分析二者在相机安装误差上的抗扰能力的区别。

设计实验：1. 设计以“受油机相对地面的速度”作为顶层控制接口的图像伺服控制器，并在 RflySimAAR 仿真平台中完成软件仿真对接控制验证。2. 进一步，使用 CubePilot/Pixhawk 自驾仪，以“受油机的航点”作为控制接口，完成硬件在环仿真对接控制验证。

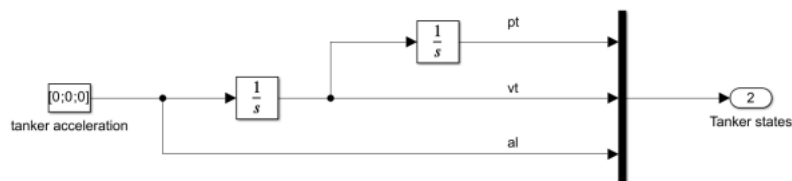
## 1.3 关键知识点

### 关键知识点1：了解图像伺服的空中加油对接仿真平台的构成



如上图所示，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”。

在加油机“Tanker System”模块中（对应虚线框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，如图所示。该模块的输出是“Tanker States”，表示加油机的状态。

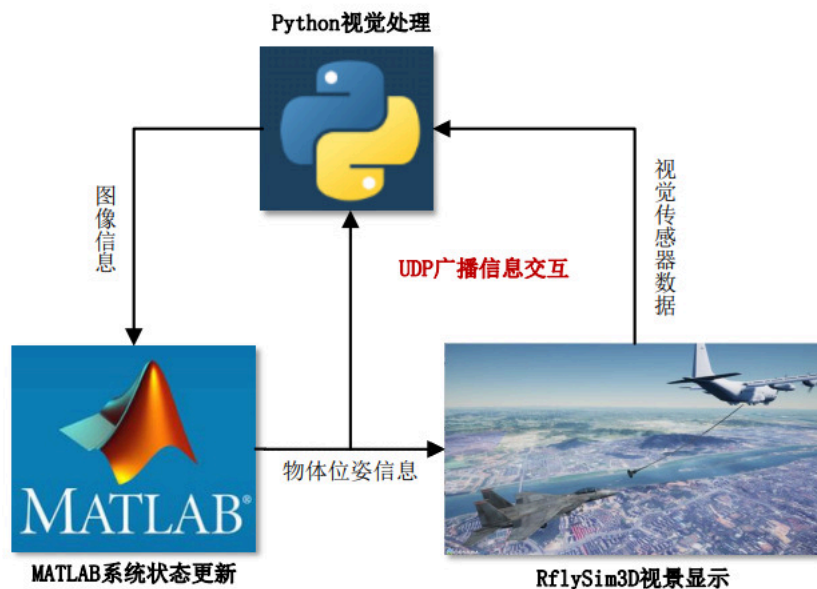


受油机“Receiver System”模块（对应虚线框②）的输入为：“ImageInput”表示图像信息输入，包括被估计出的锥套位置、图像误差和深度；“WindTurb\_earth”，表示地面坐标系下的风扰动；“Tanker States”，表示加油机的状态。该模块的输出为：“Pos\_pr2tx”，表示锥管相对于加油机的位置；“recAttitude”表示受油机的姿态。该模块中主要包括三部分，受油机模型、控制器和坐标转换模块。其中，受油机模型与本书第四章中微小型无人机的 Simulink 模型类似，为六自由度全状态模型，并在其基础上，进行了配平和一些数据转换来方便进行对接控制设计。而控制器模块则是利用视觉导航结果，实现基于图像伺服的对接控制，图像伺服控制代码实现即在这部分完成。坐标转换模块完成不同坐标系坐标之间转换的计算。

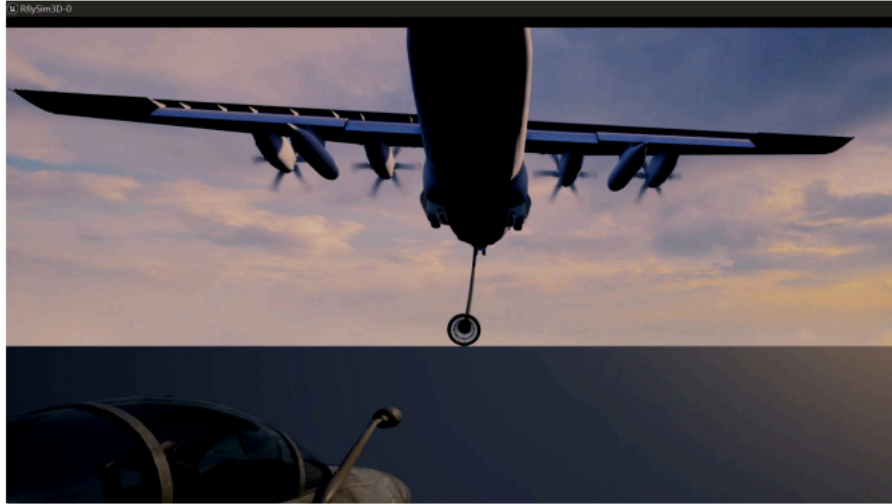
锥套锥管模块“Drogue&Tube System”（对应虚线框③）计算对接装置锥套的位姿，其输入为：锥管相对于加油机的位置“Pos\_pr2tx”和风扰动的线速度“WindTurb\_uvw”。输出为各节软管和锥套的位姿“PosTb”。

环境模块“Environment”（对应虚线框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”。

视景模块“Scene”（对应虚线框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2：实现图像伺服控制算法

(1)

在空中加油对接仿真平台的基础上，参考式 (1)，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。与式 (1) 对应，关键代码如下表，第

1 行为将 y 轴方向的图像误差进行反向；第 2

行为设置深度误差的补偿值，用于控制插入锥套的深度；第 3-6 行为设置控制参数；第

7-9 行为计算期望的相机相对于锥套的速度。

```
ey = -ey;
```

```
Z_d = 1.0;
```

```
kz = 0.5;
```

```
ky = 3;
```

```
kx = 1;
```

```
k1 = 3; k2 = 1;
```

```
u_vcz = kz*(Z-Z_d)-k1*(abs(ex))-k2*(abs(ey));
```

```
u_vcy = ky*(ey-0);
```

```
u_vcx = kx*(ex-0);
```

内环控制器为 LQR 控制，以纵向通道为例，关键代码如下表，其中第 1-4 行是设置式中的，第 6-7 行是进行系统增广，与上式相对应，将跟踪误差的积分引入到系统中，第 9-10 行为设定 LQR 的 Q 矩阵和 R 矩阵，第 12 行为使用 MATLAB 中的“lqr”函数求解 LQR 问题，第 13-14 行为将增广系统的反馈增益矩阵分为式中的。

```
A_lon=A([1,3,5,7,8,11,13,14],[1,3,5,7,8,11,13,14]);
```

```
B_lon=B([1,3,5,7,8,11,13,14],1:2);
```

```
C_lon_xd_h=[1 zeros(1,7);0 1 zeros(1,6)];
```

```
%增广系统矩阵，加入h和xd的误差积分项
```

```
AA_lon=[A_lon,zeros(8,2);-C_lon_xd_h,zeros(2,2)];
```

```
BB_lon=[B_lon;zeros(2,2)];
```

```
Q_lon=diag([4 10 10 1 10 10 0 0 1 3]);
```

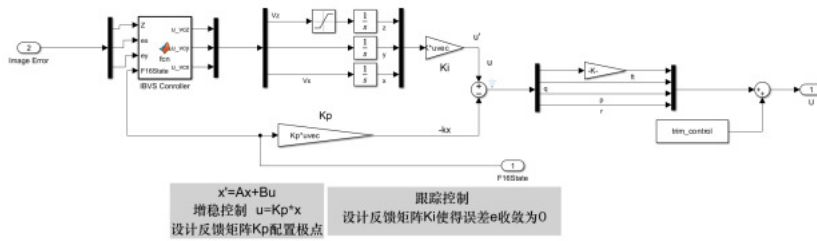
```
R_lon=diag([50 50]);
```

$[k\_lon, p\_lon, e\_lon] = \text{lqr}(AA\_lon, BB\_lon, Q\_lon, R\_lon);$

$Kp\_lon = k\_lon(:, 1:8);$

$Ki\_lon = -k\_lon(:, 9:10);$

计算得到“Ki”和“Kp”，在 Simulink 中搭建实现，如图所示。



## 2. 实验效果

基础实验：运行仿真完成固定翼无人机油门对接实验。。

分析实验：分析不同强度紊流对基于图像伺服的固定翼无人机自动回收对接算法影响，以及在不同紊流下不同的控制参数，分析有相机位置测量误差时位置伺服对接误差曲线。

设计实验：1.设计以“受油机相对地面的速度”

作为顶层控制接口的图像伺服控制器，并在RflySimAAR仿真平台中完成软件仿真对接控制验证。2.进一步，使用CubePilot/Pixhawk 自驾仪，以“受油机的航点”作为控制接口，完成硬件在环仿真对接控制验证。

## 3. 文件目录

文件夹/文件名称	说明			
e7-1	Simulink	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	
		.....	其他平台中调用的函数。	
	Python	detect-realtime.py	锥套识别脚本。	
		.....	其调用的其他函数。	
e7-2	IBVS	Simulink	AAR_IBVS.slx	基于图像伺
			F16_Init.m	初始化文件
			.....	其他平台中
		Python	detect-realtime.py	锥套识别脚
			.....	其调用的其
	PBVS	Simulink	AAR_IBVS.slx	基于图像伺
			F16_Init.m	初始化文件
			.....	其他平台中
		Python	detect-realtime.py	锥套识别脚
			.....	其调用的其
e7-3	AAR_IBVS_Vmode.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。		

文件夹/ 文件名称	说明		
	……	其他平台中调用的函数。	
	Python	锥套识别脚本使用基础实验中的即可。	

## 4. 运行环境

### 4.1 软件要求

Windows 10及以上版本；RflySim工具链；MATLAB R2022b及以上。

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：1.12.3。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；Pixhawk自驾仪 1台；遥控器 1台；遥控器接收机 1台。

①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

## 5. 实验步骤

### 基础实验

(1) 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。

(2) 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”。

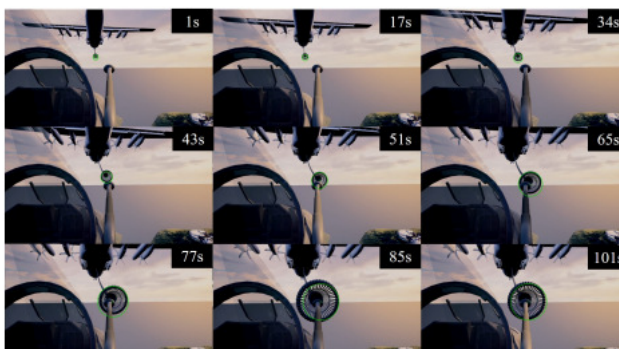
(3) 运行 Simulink 仿真。注意，首先需要打开 RflySim3D，然后启动 Simulink 文件并在 5s 内暂停，然后再运行

“detect-rttime.py”，等待识别图窗弹出后再继续运行

Simulink 文件（如果 Python 报文件路径错误，则需要把平台复制到 C 盘下再运行）。等待仿真运行完成，可以运行

“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。



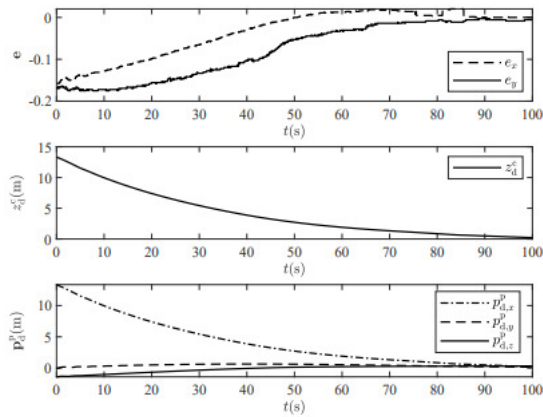
下图中的“e”，即

“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。图中的“”，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

“”，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。

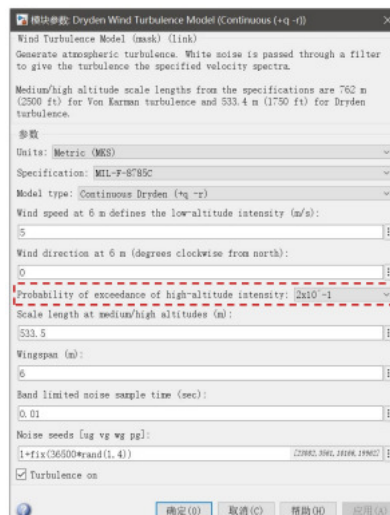
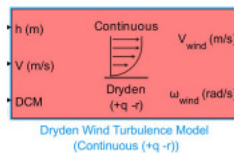


## 分析实验

### (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，超越强度概率为对应

“I级紊流”，超越强度概率为对应 “II级紊流”，超越强度概率为对应 “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，如图，修改下图的超越概率强度 “Probability of exceedance of high-altitude intensity” 即可修改紊流强度。

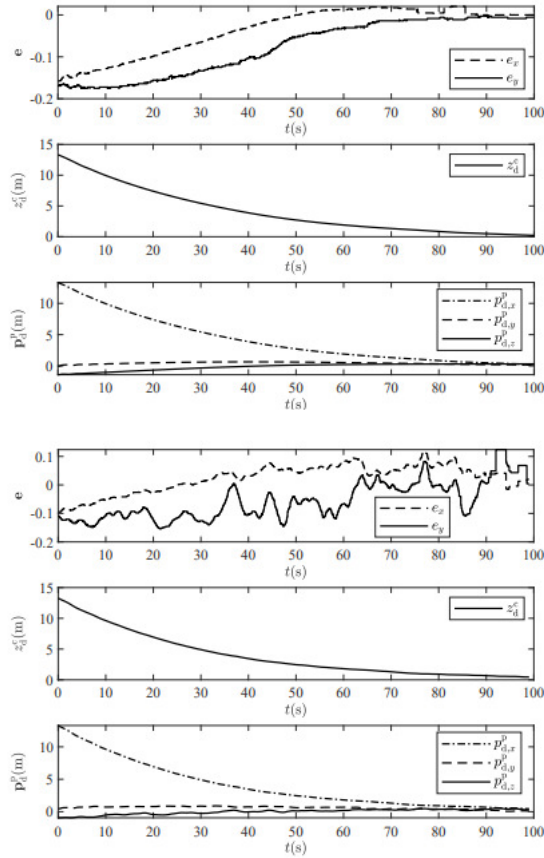


将紊流强度分别设置为 0、I、II 并运行仿真，且不改变控制参数，观察仿真结果，仿真结果如下。

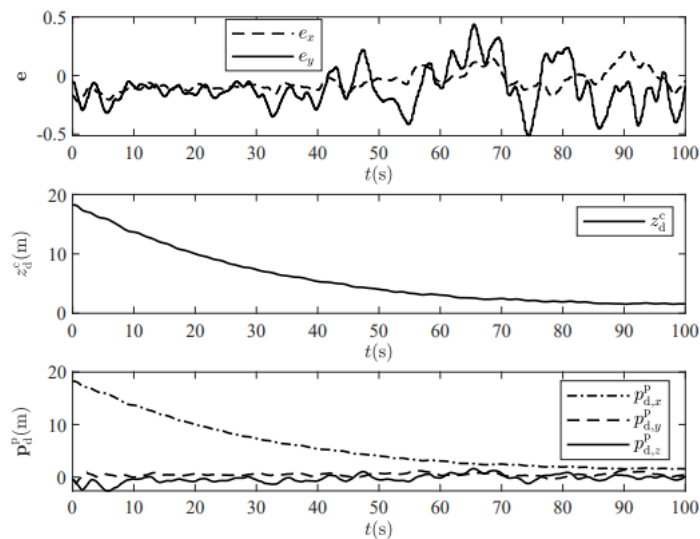
#### 1.

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  $e$ 、深度误差和对接误差依旧在 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。



2. 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，方向上的最终误差大约为 1m，和大约为 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。



(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 “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 4-5 行是加入了相机安装位置误差的情况。

```
%Without camera location error
```

```
% d_cam_rc = [4.7;0.54;-1.45];
```

```
%With camera location error
```

```
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

“F16\_Init.m”

中进行修改，如代码段9.4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。

```
%Without camera location error
```

```
% Lx = 4.7;
```

```
% Ly = 0.54;
```

```
% Lz = -1.45;
```

```
%With camera location error
```

```
Lx = 4.7+1;
```

```
Ly = 0.54;
```

```
Lz = -1.45-0.5;
```

分别运行基于图像伺服的空中加油对接平台 “AAR\_IBVS.slx” 和相应的

“detect-realtime.py” 与基于位置伺服的空中加油对接平台 “AAR\_PBVS.slx” 和相应的

“detect-realtime.py” 仿真（如果 Python 报文件路径错误，则需要把平台复制到 C

盘下再运行），可得下列两图的仿真结果。绘图脚本为

“AnalysisError.mlx”，运行完仿真后运行该脚本即可得到对接误差曲线。

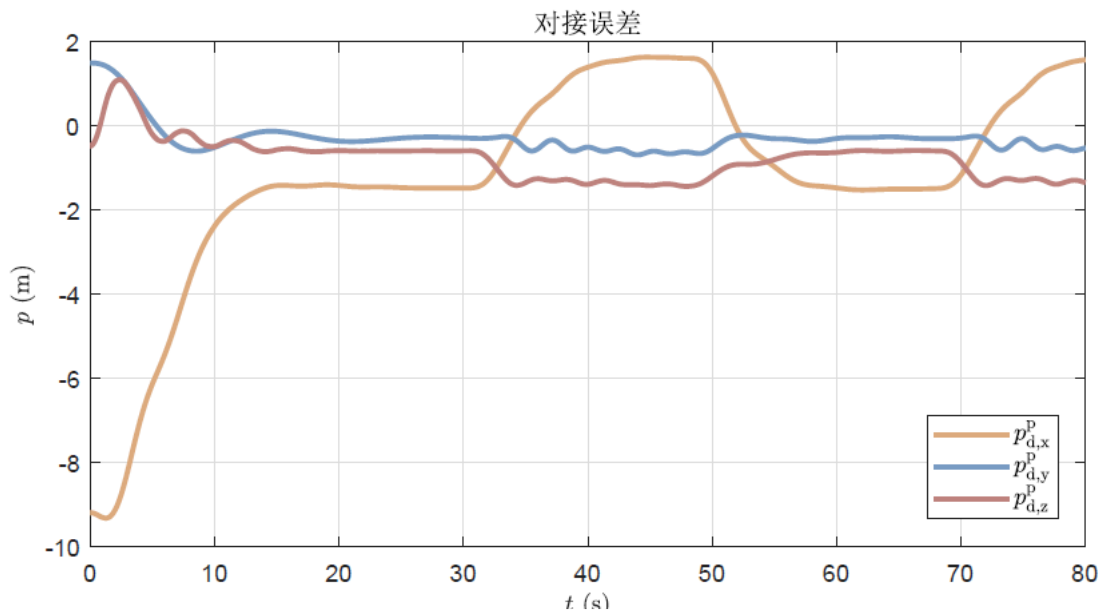


图 (1) 有相机位置测量误差时位置伺服对接误差

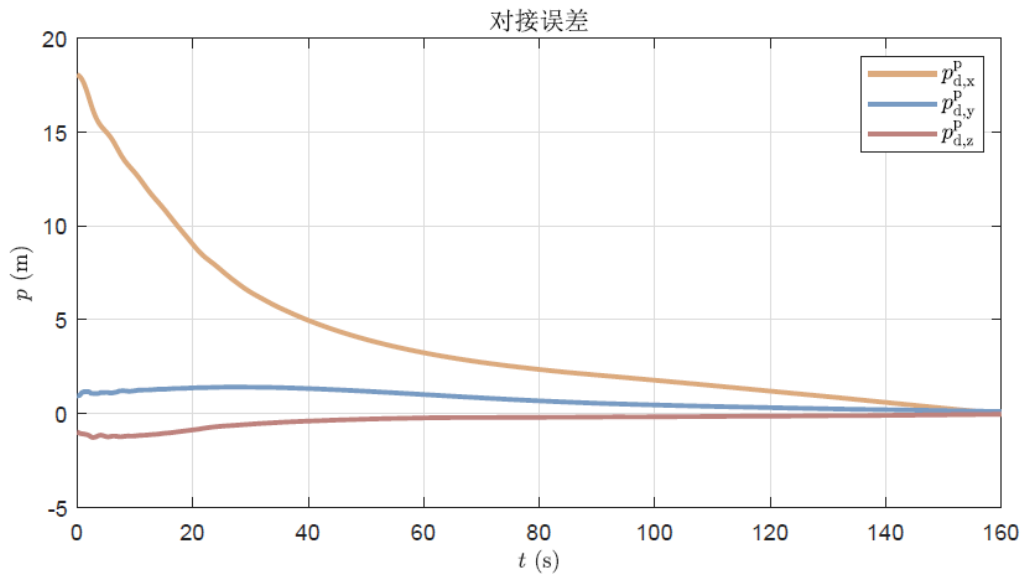


图 (2) 有相机位置测量误差时图像伺服对接误差

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。

## 设计实验

### (1) 实现速度控制模式下的图像伺服控制器

在“AAR\_IBVS\_Vmode\Receiver System\Controller”路径下用“Matlab Function”实现速度控制模式下的图像伺服控制器, 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, 输出为地面坐标系下受油机的速度期望。与式对应, 关键代码如下表。其中第2行为将轴方向的图像误差进行反向; 第3行为设置深度误差的补偿值, 用于控制插入锥套的深度; 第4-8行为设置控制参数; 第9-11行为计算期望的相机相对于锥套的距离。需要说明的是, 由于平台建模的方式是先计算受油机相对加油机的速度和位置, 再叠加油机的速度和位置之后进行显示。因此, 这里的图像伺服控制器中的前向速度期望并没有加上加油机的速度。

```
d_pr_rc = [6.06;0.54;-0.86]; % the distance between the camera and the receiver
```

```
ey = -ey; % reverse ey
```

```
Z_d = 1.0; % compensation Z
```

```
kz = 0.5; % set control parameters
```

```
ky = 3;
```

```
kx = 1;
```

```
k1 = 3;
```

```
k2 = 1;
```

```
vgz = kz*(Z-Z_d)-k1*(abs(ex))-k2*(abs(ey))-d_pr_rc(3)*q+d_pr_rc(2)*r; %  
calculate desired velocity of receiver
```

```
vgy = ky*(ey-0)+Z*ex*ey*q-Z*(1+ex^2)r+Z*ey*p-d_pr_rc(1)*r+d_pr_rc(3)*p;
```

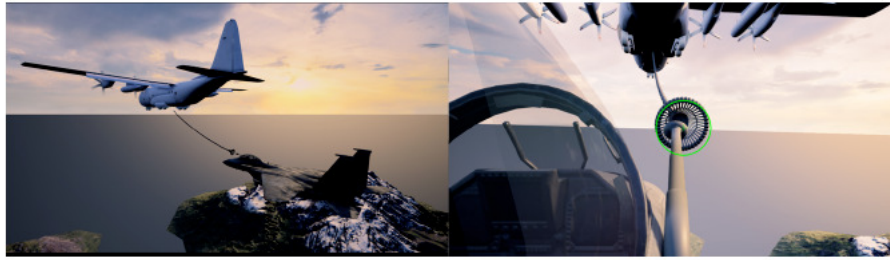
```
vgx = kx*(ex-0)-Z*ex*ey*r+Z*(1+ey^2)q-Z*ex*p-d_pr_rc(2)*p+d_pr_rc(1)*q;
```

底层控制器采用 LQR 方法实现速度控制模式, 与基础实验中的 LQR

控制器的区别在于: 不需要对系统进行关于视觉跟踪误差的增广, 而将受油机在地面坐标系下的速度直接作为控制目标。

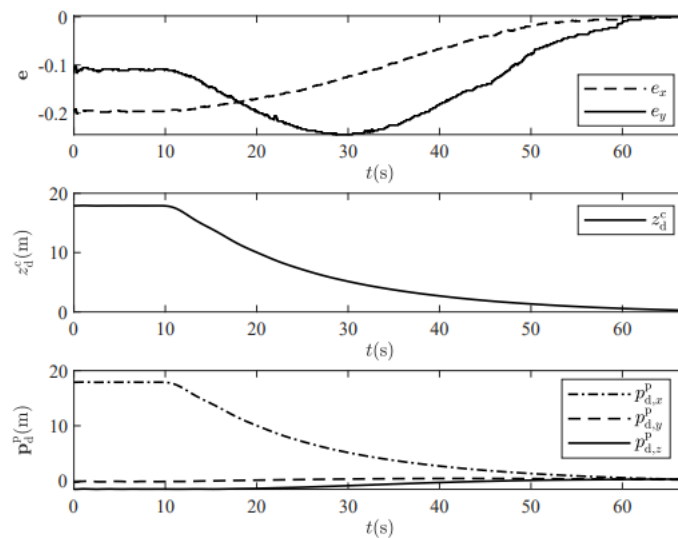
### (2) 运行仿真, 分析空中加油对接实验效果

打开RflySim3D软件, 在MATLAB中运行 e7-3\F16\_Init\_new.m 文件进行初始化参数后, 打开 e7-3\AAR\_IBVS\_Vmode.slx, 运行Simulink 仿真。下图为加油机受油机对接视景显示。



下图为无扰动情况下对接过程中误差曲线，包括“图像误差 $e$ ”、“深度误差”和“对接误差”。图像误差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67

秒内收敛至零。从深度曲线中可以发现，深度误差越小，深度误差衰减速度越小。从相对坐标系下三轴对接误差可见，横侧向方向和纵向方向相对距离以较快速度衰减，而深度方向由于控制器设计，深度误差衰减速度随着深度误差的减小而放缓。最终三轴对接误差均收敛至零，对接成功。



下图为对接过程的视景显示。

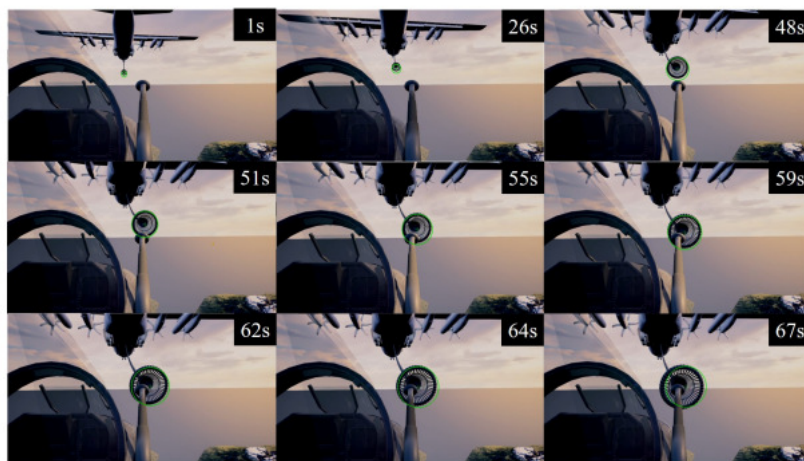


图 (3)、(4)、(5) 分别为 I 级紊流、头波效应和加油机尾流干扰下的误差曲线；I 级紊流、头波效应、加油机尾流和离散阵风干扰下的误差曲线；II 级紊流、头波效应、加油机尾流和离散阵风干扰下的误差曲线。

对比图 (3)、图 (4) 可以看出，离散阵风对于对接结果没有明显的影响。这说明本节设计的图像伺服控制器可以抵抗离散阵风的干扰。对比图 (4)、(5) 可以看出，虽然随着干扰的逐渐增加，对接过程中的图像误差和对接误差曲线的波动逐渐增大，但是最终均可以完成成功的对接。这说明本节设计的控制器具有较好的鲁棒性和抗扰能力。

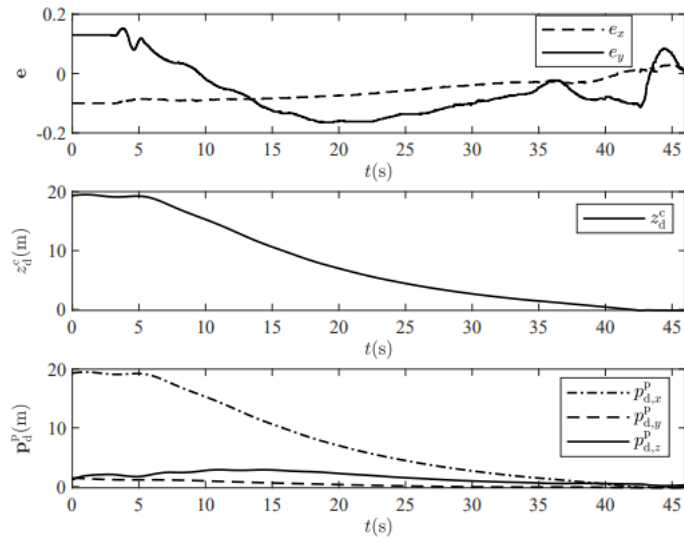


图 (3) I 级紊流、头波效应和加油机尾流干扰下的对接误差

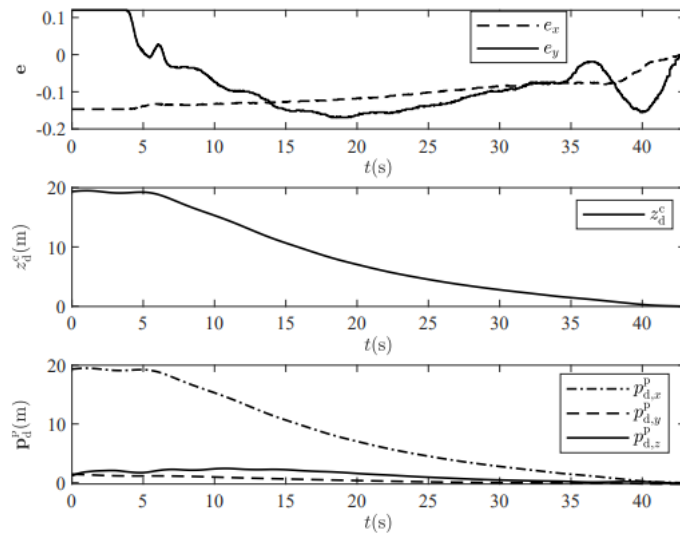


图 (4) I 级紊流、头波效应、加油机尾流和离散阵风干扰下的对接误差

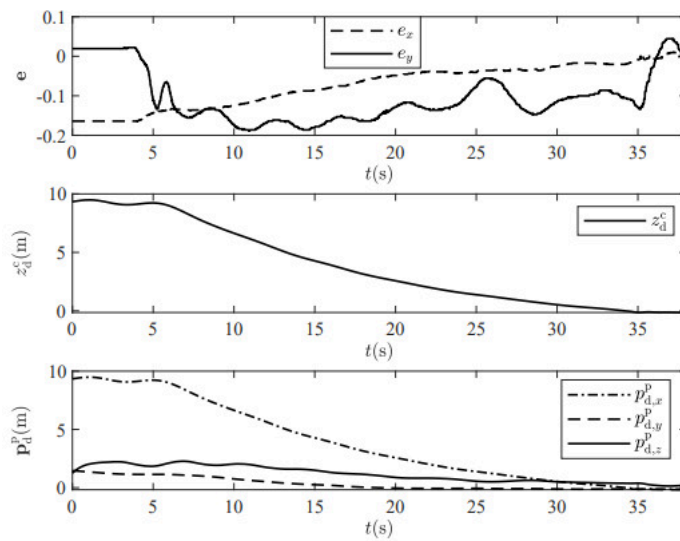


图 (5) II 级紊流、头波效应、加油机尾流和离散阵风干扰下的误差曲线

## 6.参考资料

1. 微小固定翼无人机飞行控制设计与实践

## 7.常见问题

Q1: ?

A1:。