

速度控制模式下的图像伺服控制器设计实验

1. 实验目的

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
2. 在RflySimAAR仿真平台中完成软件仿真对接控制验证

2. 实验要求

- 软件要求：Windows 10及以上版本；MATLAB R2022b及以上版本；RflySim工具链^[1]。
- 硬件要求：笔记本/台式电脑1台^[2]。

3. 实验地址

例程目录：

[\[安装目录\]\RflySimAPIs\5.RflySimFlyCtrl\1.BasicExps\e10-FixedWingCtrl\code_9\e7-3](#)

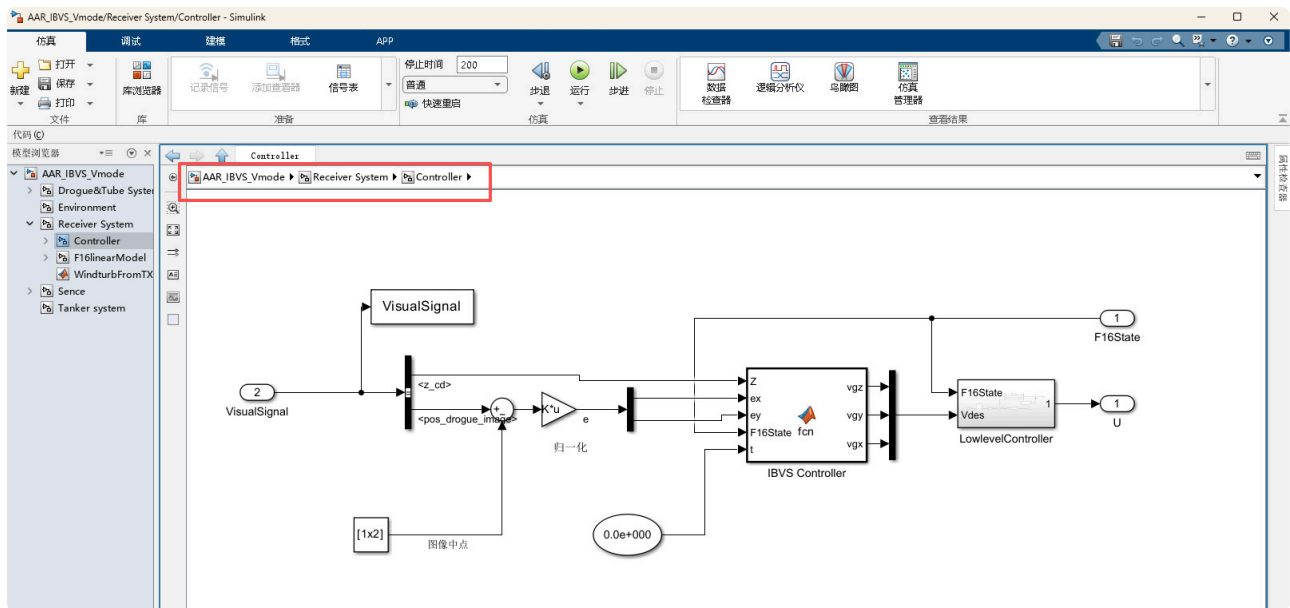
- AAR_IBVS_Vmode.slx：基于图像伺服的固定翼无人机对接平台(速度控制模式)
- F16_Init_new.m：初始化文件

4. 实验内容或步骤

5.1 步骤1:实现速度控制模式下的图像伺服控制器

进入e7-3文件夹，双击打开"AAR_IBVS_Vmode.slx"模型在“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。



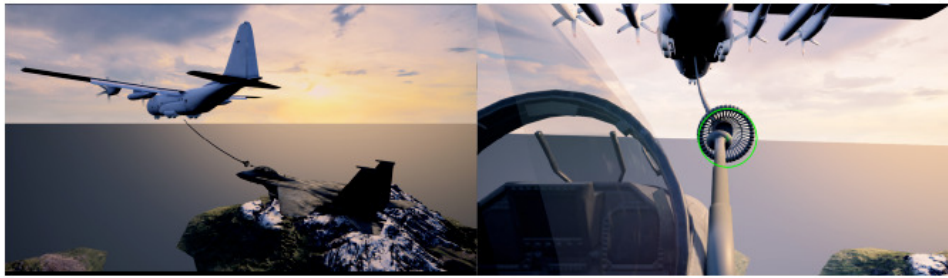
与式对应，关键代码如下。其中第2行为将轴方向的图像误差进行反向；第3行为设置深度误差的补偿值，用于控制插入锥套的深度；第4-8行为设置控制参数；第9-11行为计算期望的相机相对于锥套的距离。需要说明的是，由于平台建模的方式是先计算受油机相对加油机的速度和位置，再叠加加油机的速度和位置之后进行显示。因此，这里的图像伺服控制器中的前向速度期望并没有加上加油机的速度。

```

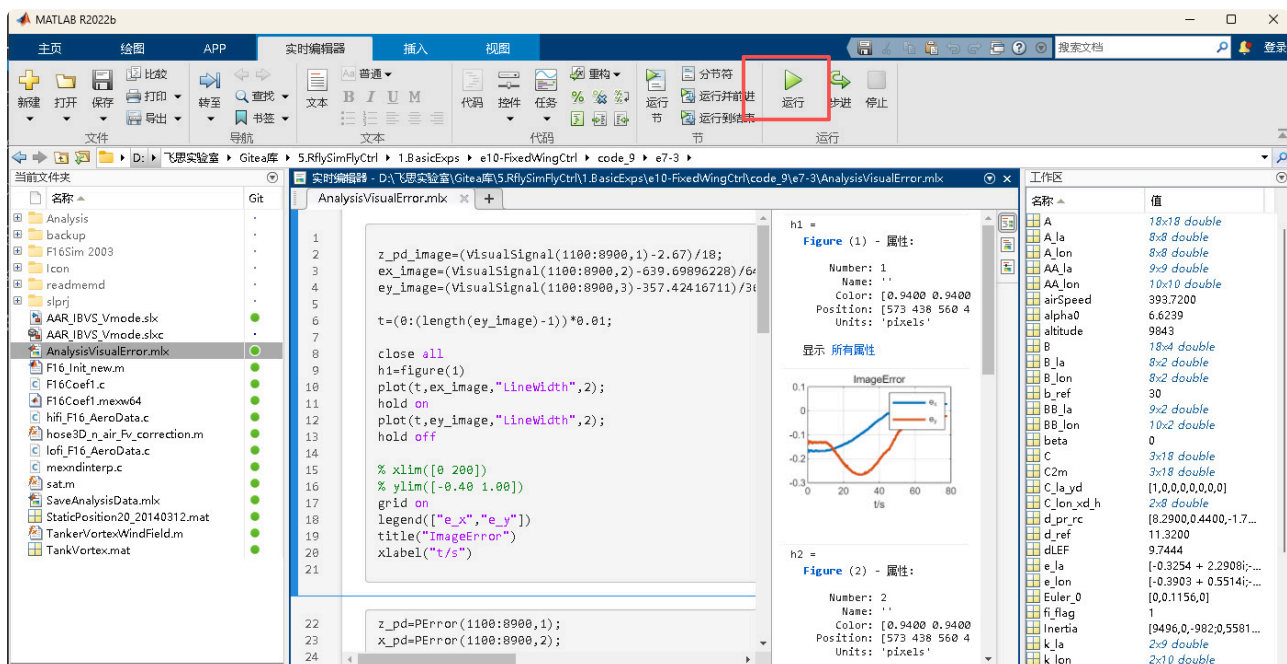
1 | d_pr_rc = [6.06;0.54;-0.86]; % the distance between the camera and the receiver
2 | ey = -ey; % reverse ey
3 | Z_d = 1.0; % compensation Z
4 | kz = 0.5; % set control parameters
5 | ky = 3;
6 | kx = 1;
7 | k1 = 3;
8 | k2 = 1;
9 | vgz = kz*(Z-Z_d) - k1*(abs(ex)) - k2*(abs(ey)) - d_pr_rc(3)*q + d_pr_rc(2)*r;
10 | %calculate desired velocity of receiver
11 | 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;

```

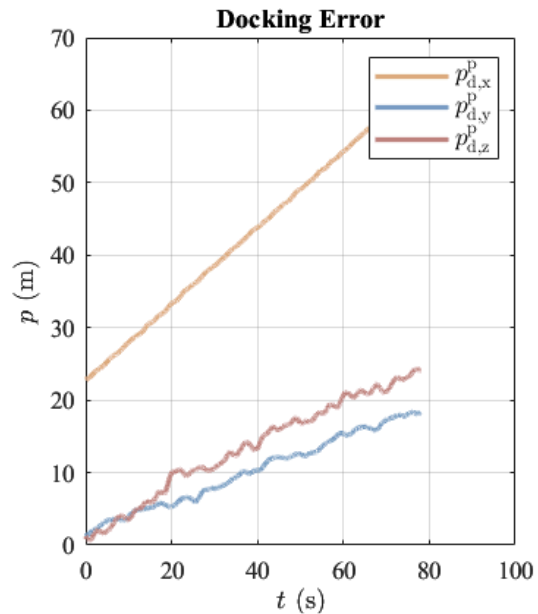
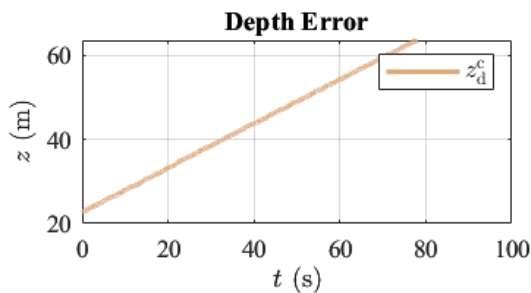
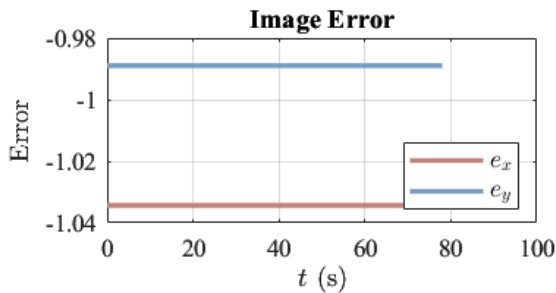
底层控制器采用 LQR 方法实现速度控制模式，与基础实验中的 LQR 控制器的区别在于：不需要对系统进行关于视觉跟踪误差的增广，而将受油机在地面坐标系下的速度直接作为控制目标。



等待模型运行结束后，运行“./AnalysisVisualError.mlx”文件，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 Z_d^c ”和“对接误差 P_d^D ”。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。



5. 关键知识点

关键知识点1：速度控制模式下的图像伺服控制器实现

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。第2行为将 y_i 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6-10行为设置控制参数；第13-15行为计算期望的相机相对于锥套的距离。关键代码实现：

```

1  d_pr_rc = [6.06;0.54;-0.86]; % 相机与受油机之间的距离
2  ey = -ey; % 将y轴方向的图像误差进行反向
3  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
4
5  % 设置控制参数
6  kz = 0.5;
7  ky = 3;
8  kx = 1;
9  k1 = 3;
10 k2 = 1;
11
12 % 计算期望的受油机在地面坐标系下的速度
13 vgz = kz*(Z-Z_d)-k1*(abs(ex))-k2*(abs(ey))-d_pr_rc(3)*q+d_pr_rc(2)*r;
14 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;
15 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;

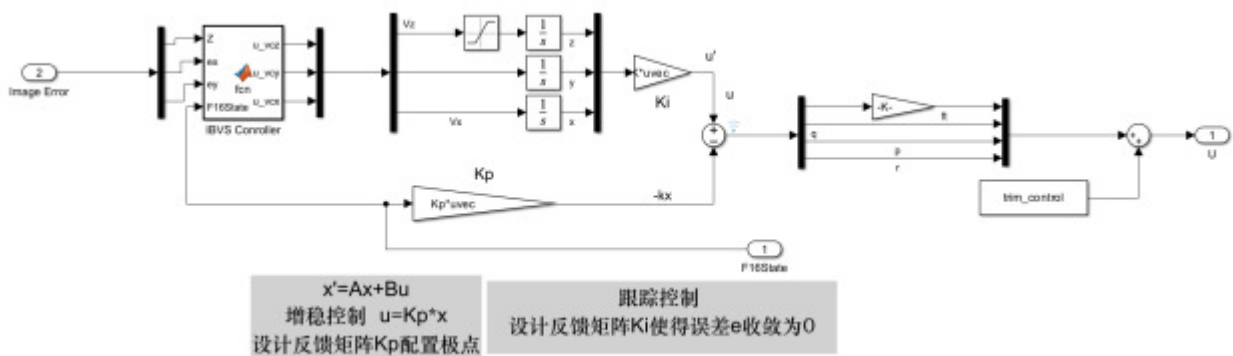
```

关键知识点2：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,关键代码如下。

```
1 % LQR控制器设计, 不进行视觉跟踪误差增广
2 A_lon=A([1,3,5,7,8,11,13,14],[1,3,5,7,8,11,13,14]);
3 B_lon=B([1,3,5,7,8,11,13,14],1:2);
4 C_lon_xd_h=[1 zeros(1,7);0 1 zeros(1,6)];
5 % 设置权重矩阵
6 Q_lon=diag([4 10 10 1 10 10 0 0]);
7 R_lon=diag([50 50]);
8 % 求解LQR问题
9 [k_lon,p_lon,e_lon]=lqr(A_lon,B_lon,Q_lon,R_lon);
10 Kp_lon=k_lon(:,1:8);
11 Ki_lon=-k_lon(:,9:10);
```

计算得到 "Ki" 和 "Kp", 在 Simunlink 中搭建实现, 如图所示。



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. 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
3. [MATLAB官方文档](#)

7. 常见问题

Q1: 控制器参数调节对系统性能有何影响?

A1: 控制器参数 (k_z , k_y , k_x , k_1 , k_2 等) 的调节直接影响系统的收敛速度和稳定性。参数过大可能导致系统响应过快, 产生振荡; 参数过小则收敛速度慢。在实际调节中, 建议逐步增加参数值, 并观察系统响应, 找到合适的平衡点。

Q2: 如何处理在不同干扰条件下的对接效果?

A2: 在不同干扰条件下 (如级紊流、头波效应、加油机尾流、离散阵风等), 控制器表现出良好的鲁棒性。实验表明, 虽然干扰会增加对接过程中的波动, 但最终仍能成功完成对接。这说明本实验设计的图像伺服控制器具有较好的抗扰能力。

Q3: 如何验证控制器的性能?

A3: 控制器性能可以通过观察图像误差收敛时间、对接误差曲线、深度误差变化等指标来验证。在无扰动情况下, 图像误差应在规定时间内 (如67秒) 收敛至零; 在有干扰情况下, 系统应仍能保持稳定并最终完成对接任务。

1. <https://rflysim.com/> ↩

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