

1. 实验名称及目的

路径跟踪控制器设计实验 (基础实验):

给定多旋翼传递函数模型, 该模型已经包含第 6 章设计的跟踪控制器。设计路径跟随控制器让传递函数模型输出进行直线路径跟随。直线初始点为(5,-3), 终点为(5,10), 多旋翼初始位置随机, 可以定为(0,0)。此外, 偏航角通道需要始终保持为 0, 高度始终保持在 2m。

- (1) 学习并掌握路径跟随的理论基础及原理;
- (2) 实现多旋翼直线路径跟随控制。

2. 实验原理

在多旋翼执行喷洒药物或者电线巡线任务时, 会要求多旋翼能够严格压着航线进行飞行, 如图 7.1 所示。该问题可以描述为: 当前多旋翼水平位置为 $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^2$, 当前航路点为 $\mathbf{p}_{wp} \in \mathbb{R}^2$, 上一个航路点为 $\mathbf{p}_{wp,last} \in \mathbb{R}^2$, 点 $\mathbf{p}_{wp,last}$ 和点 \mathbf{p}_{wp} 可以构成一条直线; 设计出实时航路点 $\mathbf{p}_d \in \mathbb{R}^2$ 引导多旋翼到达该直线并沿直线飞行, 最终到达目标航路点 \mathbf{p}_{wp} 。

可以将多旋翼视为质点, 其满足牛顿第二定律:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{p}} &= \mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{u}\end{aligned}\quad (7.1)$$

其中, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^2$ 表示虚拟控制量。如图 7.1 所示, 多旋翼位置 \mathbf{p} 到这条航线的距离为 $\|\mathbf{p} - \mathbf{p}_{wp,perp}\|$, 其中 $\mathbf{p}_{wp,perp}$ 表示垂足, 为

$$\mathbf{p}_{wp,perp} = \mathbf{p}_{wp} + (\mathbf{p}_{wp,last} - \mathbf{p}_{wp}) \frac{(\mathbf{p} - \mathbf{p}_{wp})^T (\mathbf{p}_{wp,last} - \mathbf{p}_{wp})}{\|\mathbf{p}_{wp} - \mathbf{p}_{wp,last}\|^2} \quad (7.2)$$

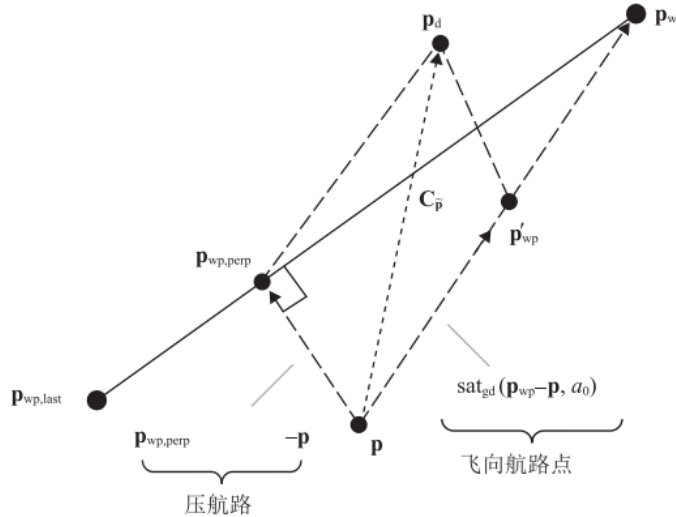


图 7.1 基于人工势场压航线的路径规划

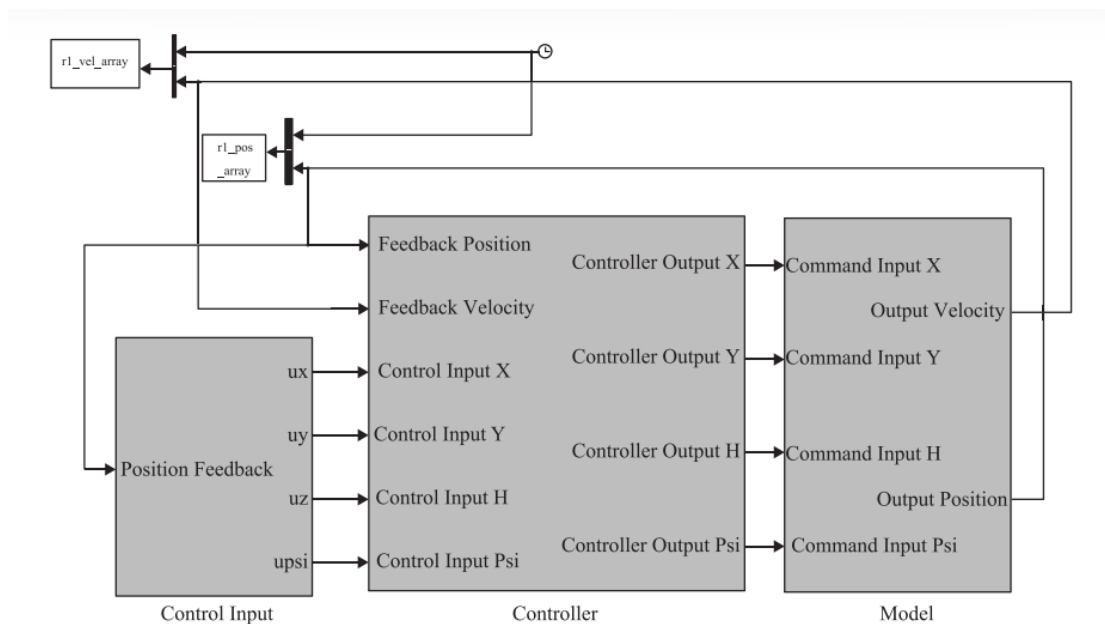


图 7.2 整体模型，Simulink 模型详见“e4\4.1\sim1.0\4_1_TF_TrajectoryPlanning_Segment.slx”

3. 实验效果

通过示波器显示出仿真模型路径跟随控制器响应时间的曲线，输出轨迹与期望轨迹的对比图。

4. 文件目录

文件夹/文件名称		说明
Sim1.0	e4_1_TF_TrajectoirePlanning_code.m	控制器参数文件
	satgd.m	饱和函数文件
	e4_1_TF_TrajectoirePlanning_Segment r2017b.slx	多旋翼路径跟踪 simulink 仿真 1.0 文件
	startSimulation.m	初始化参数文件
sim2.0	e4_1_Model_TrajectoirePlanning_code. m	控制器参数文件
	satgd.m	饱和函数文件
	e4_1_Model_TrajectoirePlanning_Segm entr2017b.slx	多旋翼路径跟踪 simulink 仿真 2.0 文件
	startSimulation.m	初始化参数文件

5. 运行环境

序号	软件要求	硬件要求	
		名称	数量

1	Windows 10 及以上版本	笔记本/台式电脑 ^①	1
2	RflySim 平台免费版		
3	MATLAB 2017B 及以上版本		

①：推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com>

6. 仿真 1.0(sim1.0)实验步骤

Step 1:

学习本书第 2 章的内容，对于 simulink 模型有一个初步的了解。

Step 2:

打开本章所附带文件夹中的“e4\4.1\sim1.0”文件夹，打开“e4\4.1\sim1.0\ startSimulation.m”文件，并单击“运行”按钮，初始化参数。

Step 3:

打开“e4\4.1\sim1.0\ e4_1_TF_TrajectoirePlanning_Segmentr2017b.slx”模型文件，将看到多旋翼路径跟踪 Simulink 仿真平台，如图 7.2 所示。



Step 4:

控制输入模块：打开控制输入模块，其内部结构如图 7.3 所示。进一步打开路径跟随控制器模块，可以看到如图 7.4 所示的内部结构。对于四通道中的每个通道，都设计了独立的路径跟随控制器。由于四个通道的设计几乎相同，这里仅以水平前向通道为例进行介绍。图 7.4 中加入了位置反馈，并且可以设置多旋翼需要跟随路径的初始坐标与终点坐标。设置完之后，将它们传入路径跟随控制器，产生位置期望，输出到路径跟踪控制器模块。此外这里还需要一些数据的保存与显示。关于路径跟随控制器的内部设计，可以单击该模块查看完整代码，其中的关键代码如表 7.1 所示，对应实验原理中的式(7.2)和式(7.15)。

表 7.1 路径跟随控制器关键代码

```

1 P_perp = P_final+(P_init-P_final)*((P_static-P_final) *(P_init-P_final))/(norm(P_
  final-P_init + 0.000001))^2;
2 temp = k1_x*satgd(((k0_x/k1_x)*(P_final - P_static)+(P_perp-P_static)),a0);
3 P_d = P_static + temp;

```

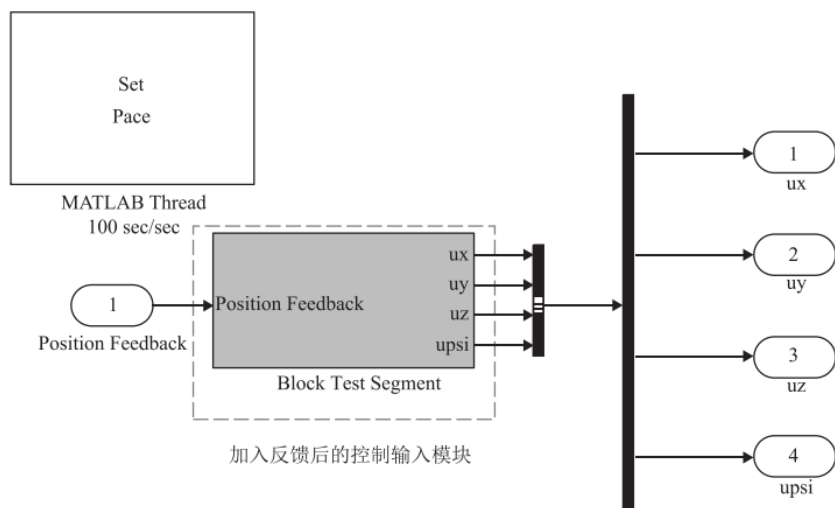


图 7.3 控制输入模块

Step 5:

单击 Simulink “开始仿真” 按钮进行仿真，水平前向通道以及水平侧向通道的路径跟随控制器响应时间曲线如图 7.5 所示。从图中可以看出，多旋翼水平两通道轨迹都是从初始位置开始，然后逐渐逼近期望的轨迹，最终到达目标终点。此外，路径跟随控制器输出轨迹与期望轨迹对比图如图 7.6 所示。从图中可以看到，从初始位置开始，多旋翼非常迅速地逼近了期望轨迹，可以认为路径跟随控制器的设计是可行的。

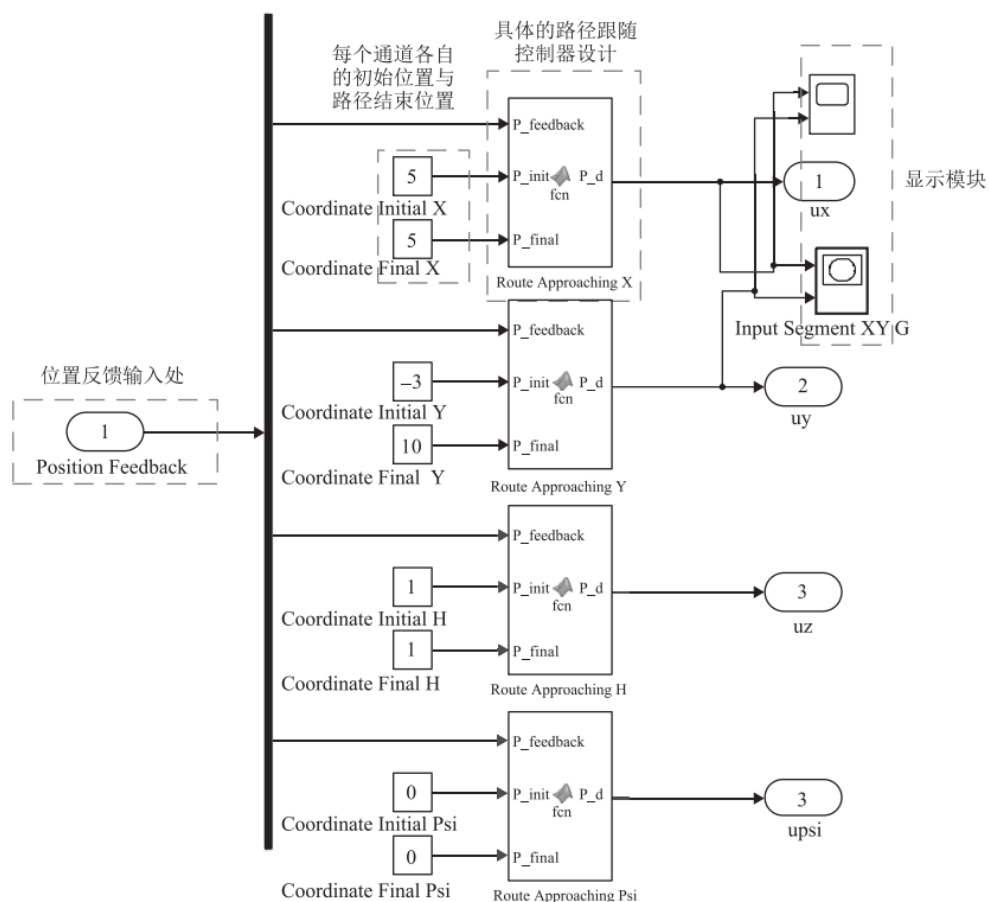


图 7.4 路径跟随控制器示意图

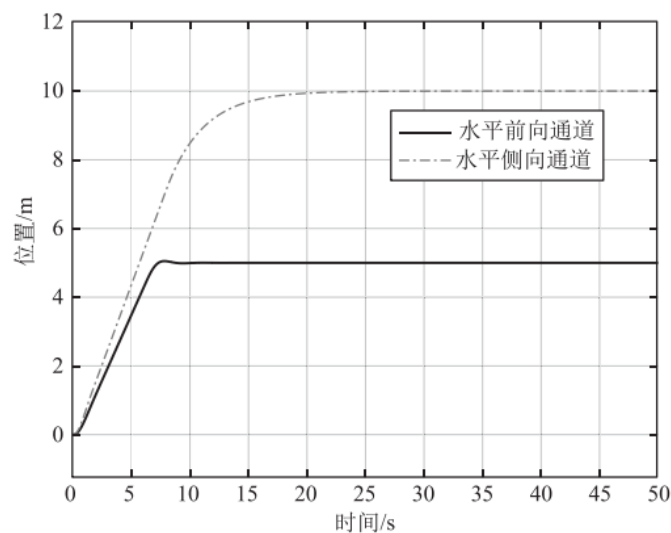


图 7.5 路径跟随控制器响应时间曲线

Step 6:

打开“e4\4.1\sim1.0\ Plot.m”文件，并单击“运行”按钮，开始画图。

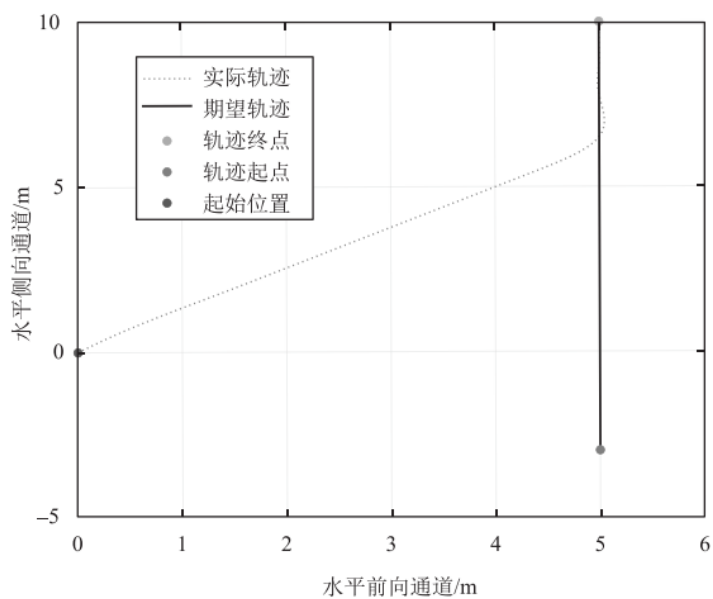


图 7.6 输出轨迹与期望轨迹对比图

7. 仿真 2.0(sim2.0)实验步骤

接下来，我们将进行仿真 1.0 和仿真 2.0 的对比。对于在传递函数模型中已经完成的实验过程，在这里需要进一步在非线性模型上进行验证，即在仿真 2.0 上验证卡尔曼滤波的效果。

Step 1:

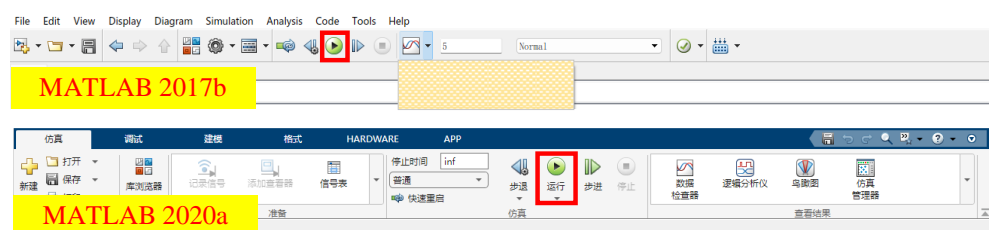
打开命名为“e4\4.1\sim2.0”的文件夹，其中的文件与上面的“e4\4.1\sim1.0”文件夹相同，而区别在于文件“e4\4.1\sim2.0”中的模型为非线性模型。

Step 2:

打开本章所附带文件夹中的“e4\4.1\sim2.0”文件夹，打开“e4\4.1\sim2.0\startSimulation.m”文件，并单击“运行”按钮，初始化参数。

Step 3:

打开“e4\4.1\sim1.0\ e4_1_Model_TrajectoirePlanning_Segmentr2017b.slx”模型文件，将看到多旋翼路径跟踪 Simulink 仿真平台，如图 7.2 所示。



Step 4:

打开“e4\4.1\sim2.0\Plot.m”文件，并单击“运行”按钮，开始画图。

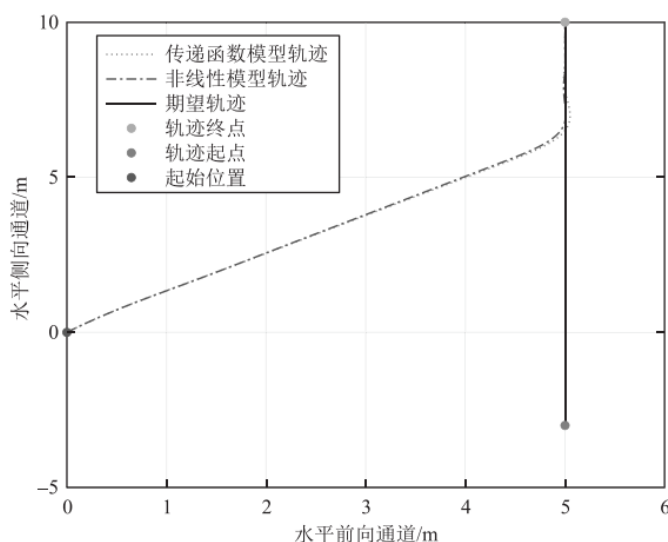


图 7.7 不同模型跟随轨迹对比图

8. 参考资料

[1]. Quan Quan. Introduction to Multicopter Design and Control. Springer, Singapore, 201

- [2]. 全权 杜光勋 赵峙尧 戴训华 任锦瑞 邓恒译 多旋翼飞行器设计与控制 [M] 电子工业出版社 2018.
- [3]. 全权 戴训华 王帅 多旋翼飞行器设计与控制 实践 [M] 电子工业出版社 2020.
- [4]. 全权 等.多旋翼无人机远程控制实践[M].电子工业出版社,2022.

9. 常见问题

Q1: ****

A1: ****