

1. 实验名称及目的

路径跟随控制器设计实验(实飞实验):

(1) 基于第 4 章中实飞实验辨识出来的传递函数模型, 使用设计实验中设计出的圆轨迹路径跟随控制器, 查看仿真效果。

(2) 将 (1) 中设计出的圆轨迹路径跟随控制器应用于真机, 查看实验效果。

2. 实验原理

该问题可以描述为: 当前多旋翼位置为 $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^2$, 航路轨迹为圆, 圆心为 $\mathbf{o} \in \mathbb{R}^2$, 半径为 R ; 设计虚拟控制 $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^2$ 使得多旋翼最终能够绕圆周进行逆时针飞行。前两个实验实现了直线的路径跟随, 对于圆轨迹路径跟随, 也可以采用相同的思路。如图 7.18 所示, $\mathbf{p}_{\text{perp}} \in \mathbb{R}^2$ 表示多旋翼与圆的最近距离点, 可以表示为

$$\mathbf{p}_{\text{perp}} = \mathbf{o} + (\mathbf{p} - \mathbf{o}) \frac{R}{\|\mathbf{p} - \mathbf{o}\|} \quad (7.16)$$

那么

$$\mathbf{p} - \mathbf{p}_{\text{perp}} = \lambda (\mathbf{p} - \mathbf{o}) \quad (7.17)$$

其中

$$\lambda = 1 - \frac{R}{\|\mathbf{p} - \mathbf{o}\|} \quad (7.18)$$

令 \mathbf{p}_{perp} 能够产生吸引多旋翼的引力, 这样多旋翼的飞行轨迹就会趋近圆。另外, 我们希望多旋翼能够绕圆周进行逆时针飞行, 这就需要设计多旋翼绕圆周进行逆时针切向方向的吸引力, 同时切向方向引导点 \mathbf{p}_{tan} 到当前多旋翼的位置具有单位长度, 可以得到

$$\mathbf{p}_{\text{tan}} - \mathbf{p} = \mathbf{R}_{\alpha=90^\circ} \frac{\mathbf{p}_{\text{perp}} - \mathbf{o}}{\|\mathbf{p}_{\text{perp}} - \mathbf{o}\|} \quad (7.19)$$

这里, \mathbf{R}_α 表示旋转矩阵, 定义为

$$\mathbf{R}_\alpha = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (7.20)$$

其意义为, 一个向量与其相乘后, 向量可以逆时针旋转 α 角度。综上所述, 设计圆轨迹路径跟随控制器为

$$\mathbf{u} = -\frac{1}{k_2} (\mathbf{p} - \mathbf{p}_d) - \frac{1}{k_2} \mathbf{v} \quad (7.21)$$

其中, $\mathbf{p}_d = \text{sat}_{\text{gd}}(k_0 (\mathbf{p}_{\text{tan}} - \mathbf{p}) + k_1 (\mathbf{p}_{\text{perp}} - \mathbf{p}), a_0)$ 。参数 $k_0, k_1 > 0$ 分别表示趋向 \mathbf{p}_{tan} 和 \mathbf{p}_{perp} 的增益大小, 饱和的作用在于限制 \mathbf{p}_d 大小。

(1) 若多旋翼离圆很远, 那么

$$\mathbf{p}_d \approx \text{sat}_{\text{gd}}(k_1 (\mathbf{p}_{\text{perp}} - \mathbf{p}), a_0)$$

(2) 若多旋翼已经在圆上, 那么

$$\mathbf{p}_d = \text{sat}_{\text{gd}}(k_0 (\mathbf{p}_{\text{tan}} - \mathbf{p}), a_0)$$

此时多旋翼的绝大部分控制是绕圆飞行。为了更好地理解 \mathbf{p}_d 的物理意义，令 $k_0 = k_1 = 1$ ，那么

$$\mathbf{p}_d = \text{sat}_{\text{gd}} \left((\mathbf{p}_{\text{tan}} - \mathbf{p}) + (\mathbf{p}_{\text{perp}} - \mathbf{p}), a_0 \right) \tag{7.22}$$

其中， \mathbf{p}_d 的物理意义如图 7.18 所示。由图可见，无论多旋翼在给定的圆内还是圆外，都有趋向圆的趋势。

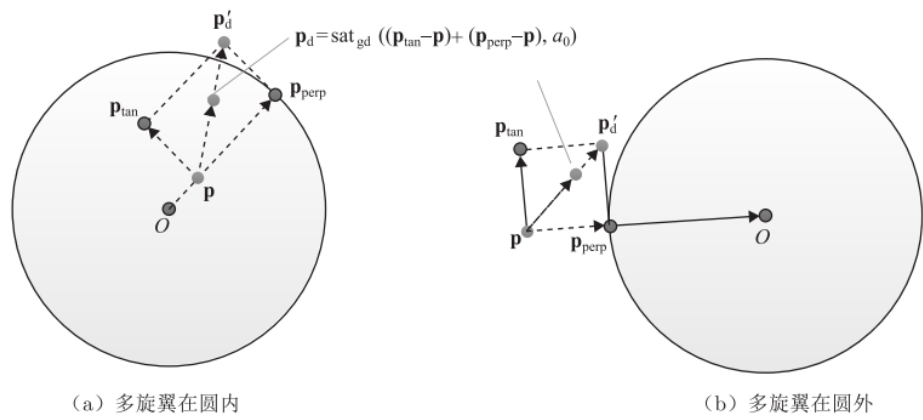


图 7.18 圆轨迹路径跟随过程中实时航路点的物理意义

3. 实验效果

在 Simulink 中实现在实飞过程中圆轨迹输出效果图。

4. 文件目录

文件夹/文件名称		说明
Sim1.0	Plot_Compare_cercle.m	绘图文件
	Compare_Cercle.m	保存数据文件
	e4_4_trajectoire_following_2017b.slx	多旋翼路径跟随控制器仿真 1.0 文件
	start.m	初始化参数文件
sim2.0	e4_3_trajectoire_planning_2017b.slx	多旋翼路径跟随控制器实飞文件
	start_tello.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 平台个人版	Pixhawk 6C ^②	1
3	MATLAB2017B 及以上	遥控器 ^③	1
		遥控器接收器	1
		数据线、杜邦线等	若干

- ①：推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com>
- ②：须保证平台安装时的编译命令为：px4_fmuv6c_default，固件版本为：1.13.3。其他配套飞控请见：<http://doc.rflysim.com>
- ③：本实验演示所使用的遥控器为：天地飞 ET10、配套接收器为：WFLY RF209S。遥控器相关配置见：..\e11_RC-Config\Readme.pdf

6. 仿真 1.0

运行“e4\4.4\sim1.0\start.m”，“e4_4_trajecoire_following.slx”模型文件会自动打开。其整体模块如图 7.27 所示，其中传递函数模型为第 4 章 4.5 节辨识出来的传递函数模型，如图 7.28 所示。以基础实验中相同的步骤调节 PID 控制器得到较好的控制效果。获得相应的圆轨迹如图 7.29 所示。

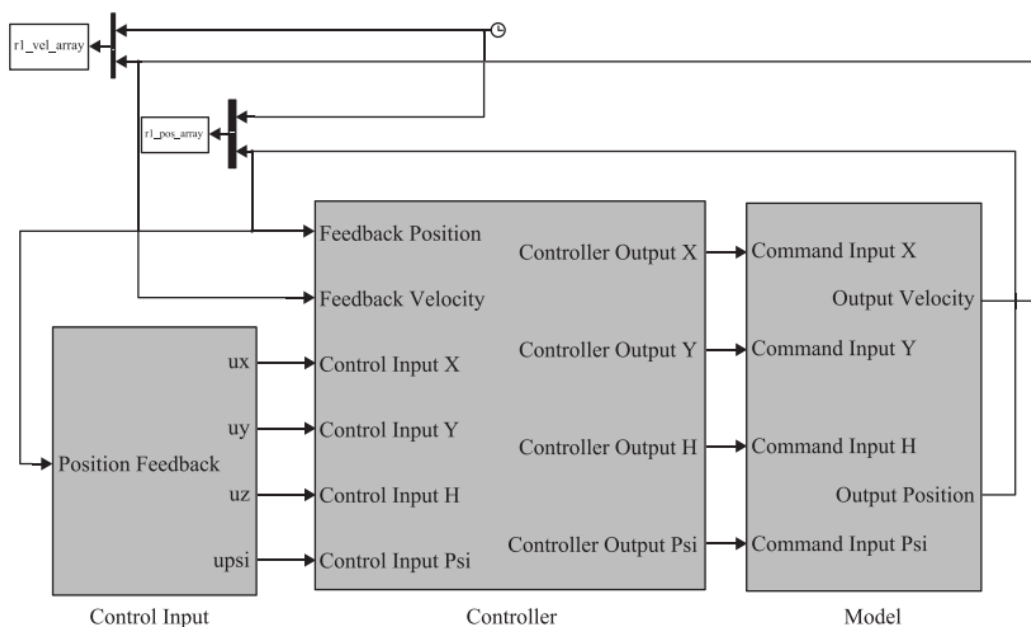


图 7.27 整体模型

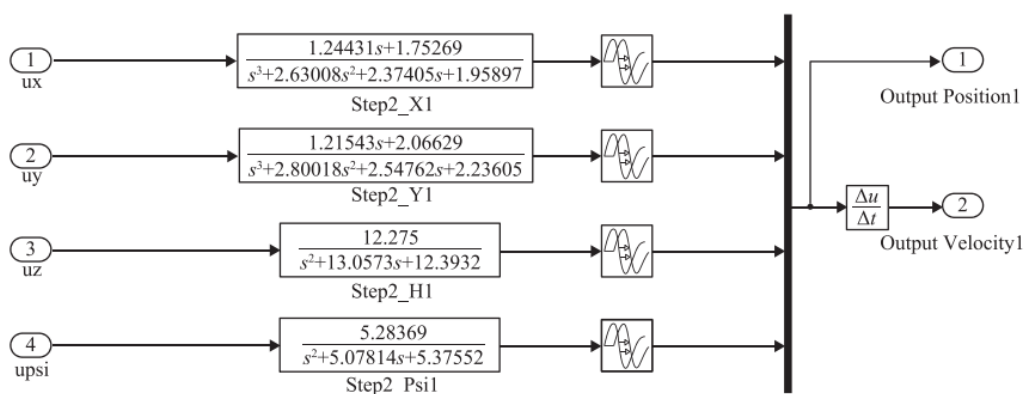


图 7.28 传递函数模型

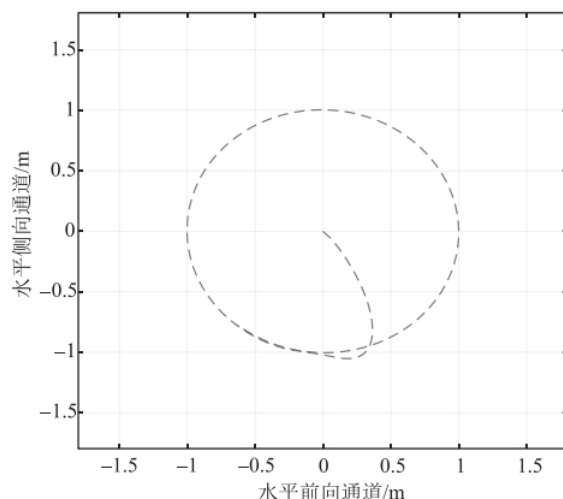


图 7.29 圆轨迹输出

7. 实飞(Rfly)实验步骤

以 Tello 飞行器和 OptiTrack 室内定位系统为例，这里我们给出一个设计好的例子，见文件“e4\4.4\Rfly\4_4_trajectory_planning.slx”。

Step 1:

在 MATLAB 中单击运行“start_tello.m”文件，进行初始化以及启动相应的 Simulink 程序“e4_4_trajectory_planning.slx”文件，模型如图 7.30 所示。控制模型由七部分组成，每个模块具体作用可参考第 2 章 2.3 节。

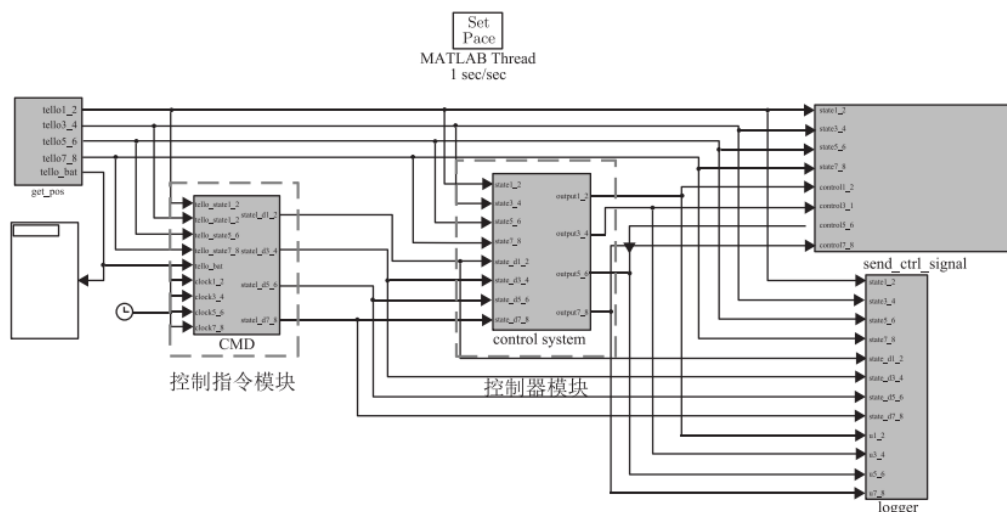


图 7.30 整体模块示意图

Step 2:

(1) 启动 OptiTrack

打开一个新终端，运行命令“roslaunch mocap_optitrack multi_rigidbody8.launch”。(2)

(2) 启动 `tello_driver`

打开一个新终端，运行命令 “`roslaunch tello_driver tello_node.launch`”。

(3) 起飞 Tello

打开一个新终端，运行命令 “`roslaunch tello Tello_takeoff_all`”，可以看到两架多旋翼起飞并保持悬停在正上方高度为 1m 位置。

(4) 运行 MATLAB 控制程序

运行 “`e4_4_trajectory_planning.slx`” 文件。

(5) 降落 Tello

打开一个新终端，运行命令 “`roslaunch tello Tello_land_all`”，在多旋翼降落后，结束所有终端。

Step 3:

“`e4_4_trajectory_planning.slx`” 文件中包含数据存储模块用于记录结果，见工作区变量。“`tello3_states`” 和 “`tello3_states_d`” 代表四旋翼飞行过程的期望指令和实际反馈结果。运行 “`tello_plot.m`” 模型文件，即可得到如图 7.31 所示的实飞结果。

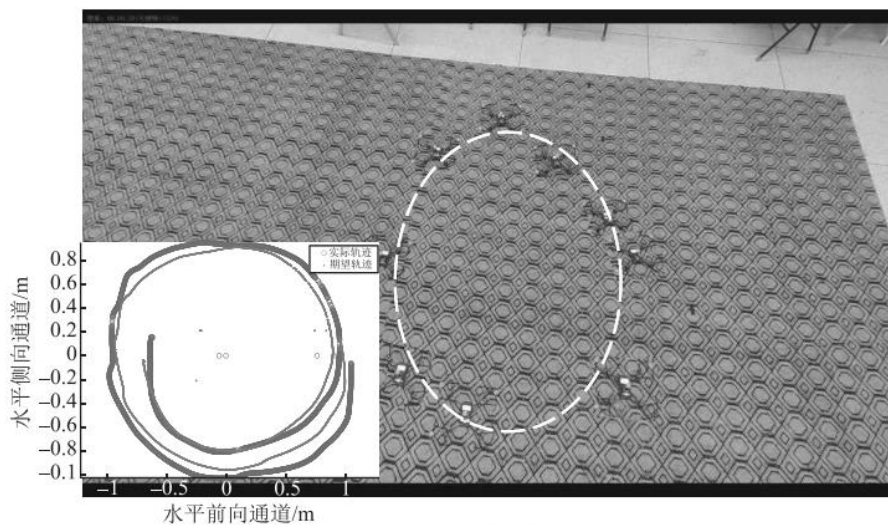


图 7.31 实飞结果（影像进行了叠加）

（具体操作步骤可以观看每章相对应的 PPT，其中由各个实验相对应的演示视频。）

8. 参考资料

- [1]. Quan Quan. Introduction to Multicopter Design and Control. Springer, Singapore, 2017
- [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: ****