

路径跟随控制器设计实验(实飞实验)

1. 实验目的

(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. 实验要求

- 软件要求：Windows 10及以上版本；RflySim工具链^[1]；MATLAB 2022b 及以上。
- 硬件要求：笔记本/台式电脑1台^[2]；Pixhawk 6C 1台；遥控器 1台；遥控器接收器 1台；数据线、杜邦线等 若干台。

①：若使用Pixhawk 6X飞控，平台安装时的编译命令为：px4_fmuv6x_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>

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：<https://rflysim.com/doc/zh/B/2.3Pixhawk6X.html>

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：<https://rflysim.com/doc/zh/B/3.1ET10.html>

3. 实验地址

例程目录：

[安装目录]\RflySimAPIs\6.RflySimExtCtrl\1.BasicExps\e10_TrajectoirePlanning\e4.4

- [Rfly/start_tello.m](#)：Tello无人机实飞实验初始化参数文件，用于启动ROS环境并加载实飞控制程序
- [sim1.0/Compare_Cercle.m](#)：圆轨迹仿真数据保存文件，用于保存不同周期下的PID调节前后对比数据

- [sim1.0/Plot_Compare_cercle.m](#)：圆轨迹仿真结果绘图文件，用于加载并绘制不同周期下的轨迹对比图
- [sim1.0/readme.m](#)：仿真1.0实验文件夹说明文件
- [sim1.0/satgd.m](#)：饱和函数实现文件，用于限制控制信号的幅值
- [sim1.0/start.m](#)：仿真1.0实验初始化参数文件，设置仿真参数并启动仿真模型
- [sim1.0/e4_4_trajecoire_following_2017b.slx](#)：多旋翼路径跟随控制器仿真1.0文件
- [sim1.0/e4_3_trajecoire_planning_2017b.slx](#)：多旋翼路径跟随控制器实飞文件

4. 实验内容或步骤

4.1 仿真1.0

运行"`e4\sim1.0\start.m`", "`e4_4_trajecoire_following_2017b.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。

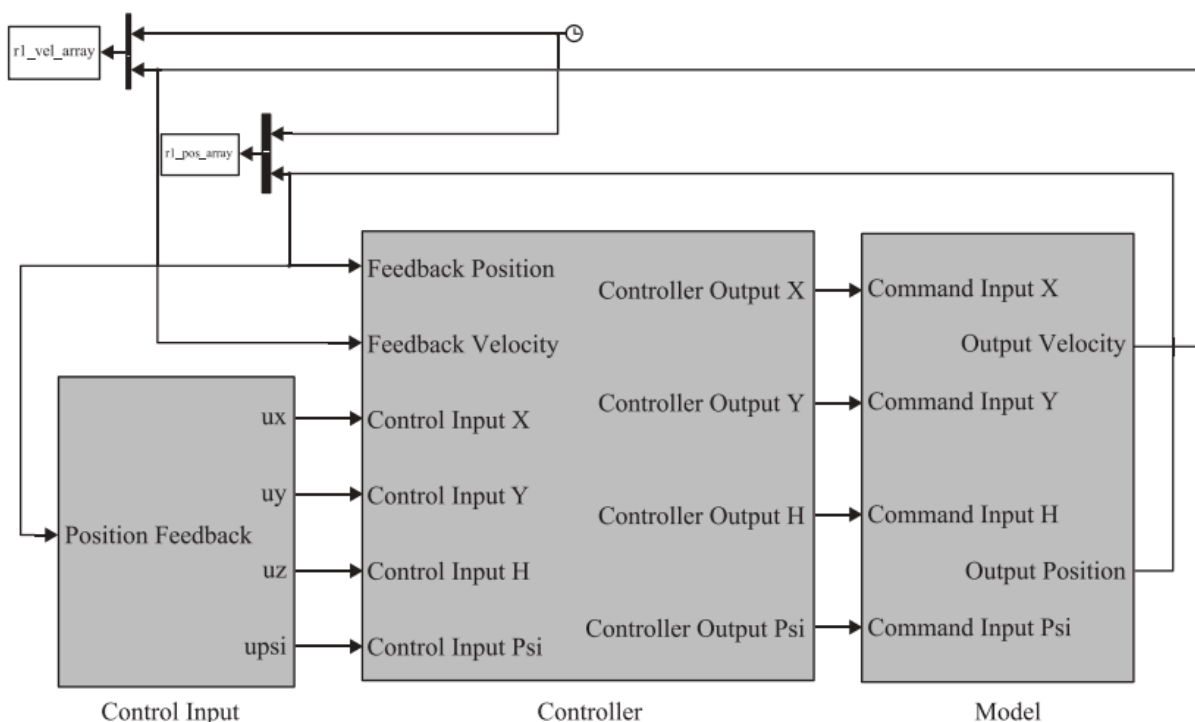


图 7.27 整体模型

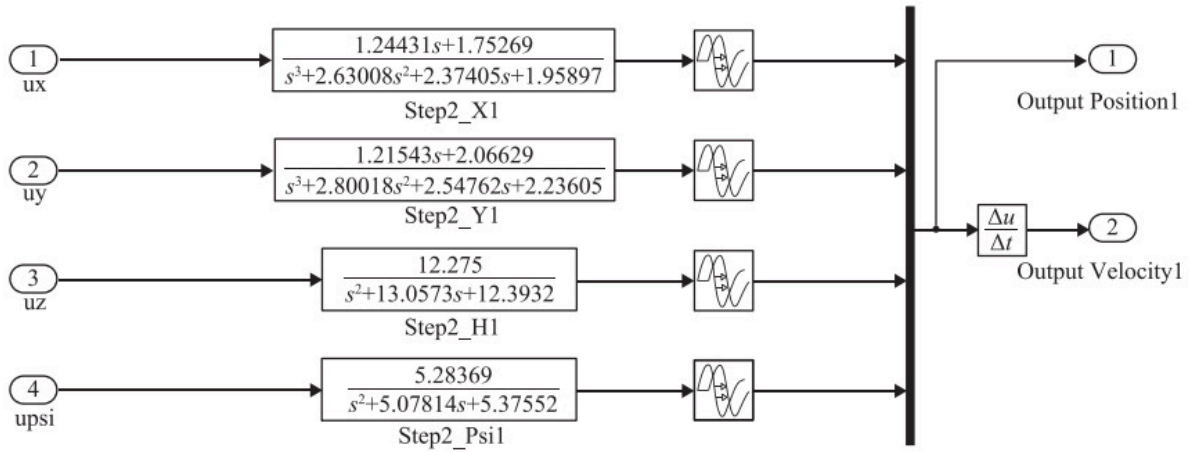


图 7.28 传递函数模型

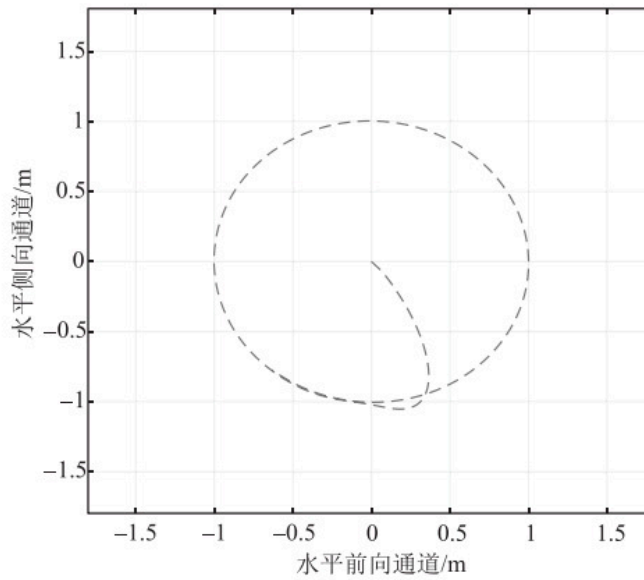


图 7.29 圆轨迹输出

4.2 步骤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。

4.4 步骤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。

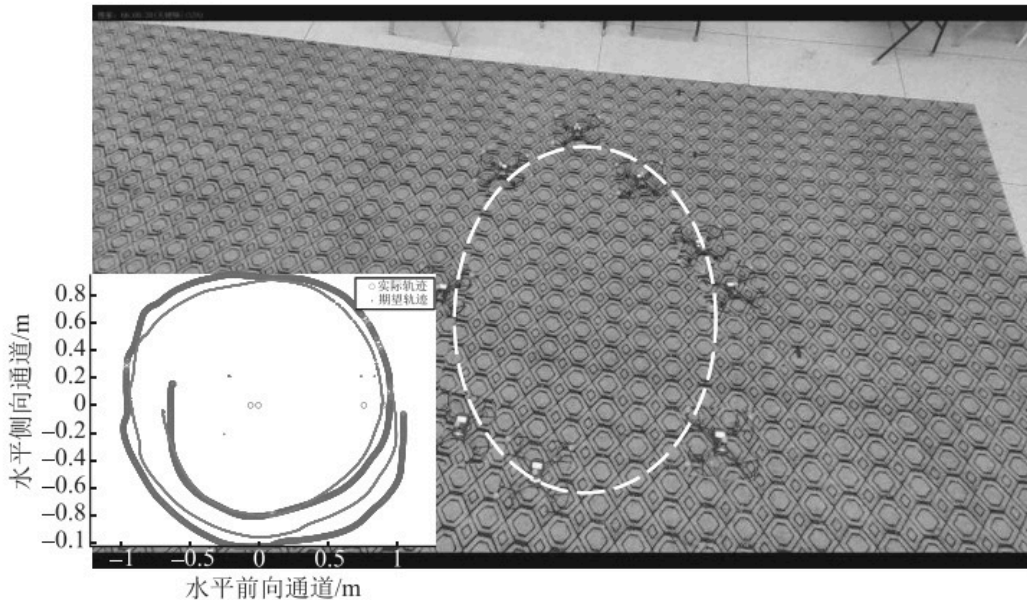


图 7.31 实飞结果（影像进行了叠加）

（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。）

5. 关键知识点

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

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

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。

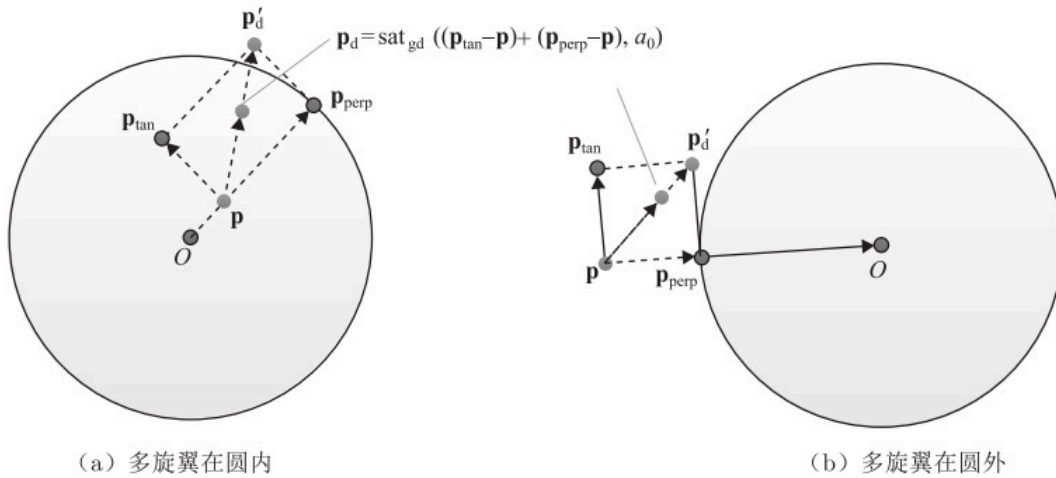


图 7.18 圆轨迹路径跟随过程中实时航路点的物理意义

6.参考资料

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.

7.常见问题

Q1: *****

A1: *****

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