1. 实验名称及目的

1.1. 实验名称

外部定点控制器设计和验证实验(simulink)

1.2. 实验目的

了解给定的三通道多旋翼线性化传递函数仿真模型和相应的定点控制器，进行定点控制。

1.3. 关键知识点

关键知识点 1：实验整体流程

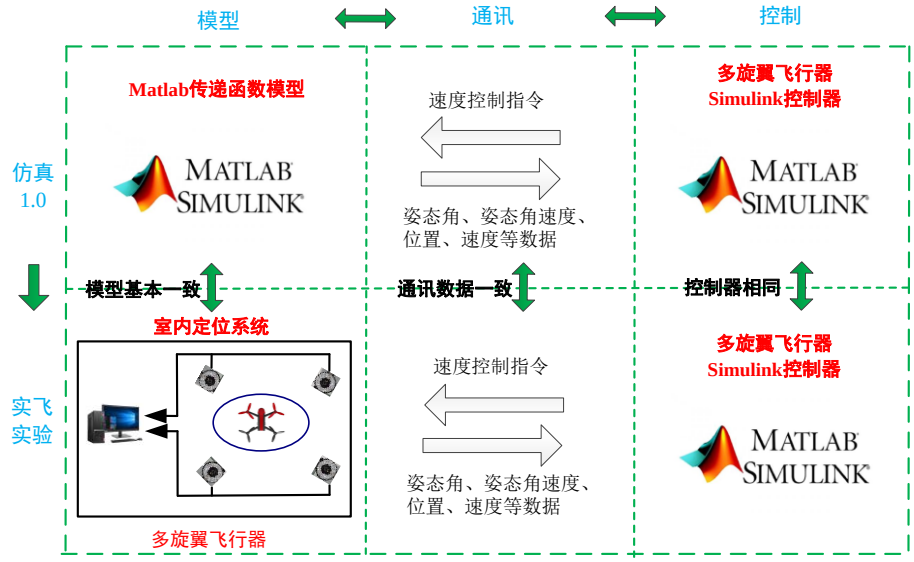


图 实飞阶段流程

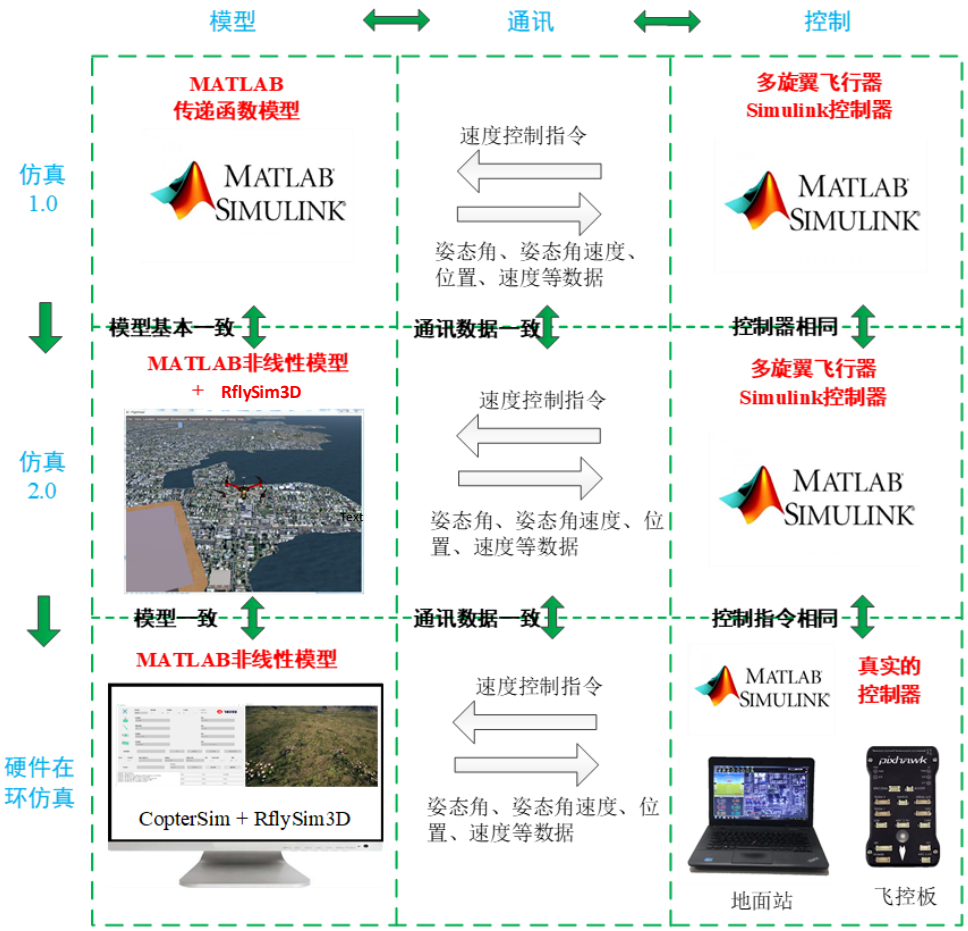
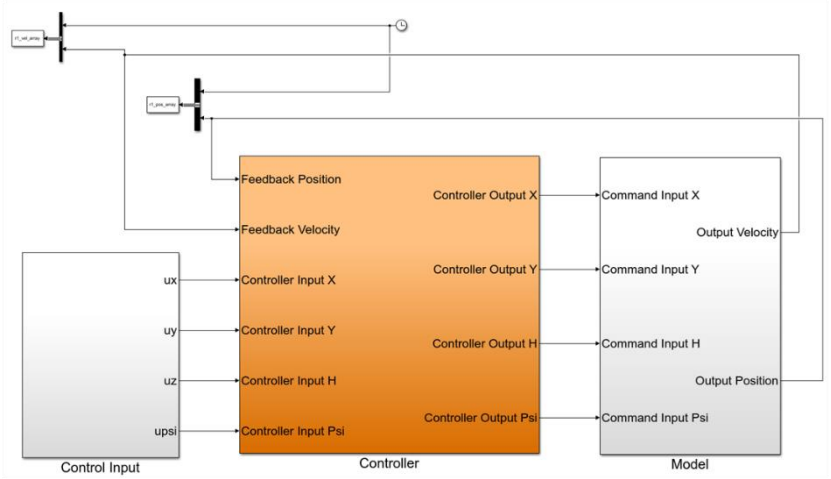


图 仿真阶段流程

针对设计所需要的仿真实验平台，如下图所示。仿真 1.0、仿真 2.0 和硬件在环仿真三者的区别在于多旋翼模型模块不一样：仿真 1.0 的多旋翼模型模块内部主要包含通过“系统辨识”实验得到的传递函数模型，即设计模型：仿真 2.0 的多旋翼模型模块内部包含一个给定的非线性模型和 RflySim3D 显示模块；硬件在环仿真的多旋翼模型模块内部包含了与 CopterSim 联合仿真的通信接口。

关键知识点 2：Simulink 模型整体框架



期望输入模块—Control Input：用于输入期望的飞行器位置信息；

控制器模块—Controller：用于设计控制器，实现飞行器的有效位置控制；

多旋翼模型模块—Model：飞行器仿真模型模块，用于接收控制器输出的控制量，并输出飞行器的运动状态（这里是位置信息和速度信息；）

飞行器状态数据收集：这里拥有两个变量——“r1_pos_array”与“r1_vel_array”，分别用于收集单次仿真过程中飞行器的位置信息与速度反馈，并以矩阵的形式保存在 MATLAB 工作空间。矩阵的每一行信息均是以“时间，水平前向通道位置/速度，水平侧向通道位置/速度，高度通道位置/速度，偏航通道角度/偏航角速度”方式自左而右排列的一组值，矩阵的列按时间顺序自上而下排列。

关键知识点 3：模型模块详解

期望输入模块

控制器模块

三通道模型

	控制器	**期望**
高度通道	$u_T(t) = -k_{p_z p}\left(p_{z_e}(t) - p_{z_e d}(t)\right) - k_{p_z d}\left(\dot{p}_{z_e}(t) - \dot{p}_{z_e d}(t)\right) - k_{p_z i}\int_0^t \left(p_{z_e}(\tau) - p_{z_e d}(\tau)\right) \mathrm{d}\tau$	$p_{z_e d} \in \mathbb{R}$
偏航通道	$u_{\omega_z}(t) = -k_{\psi p}(\psi(t) - \psi_d(t)) - k_{\psi d}\left(\omega_z(t) - \dot{\psi}_d(t)\right) - k_{\psi i}\int_0^t (\psi(\tau) - \psi_d(\tau)) \mathrm{d}\tau$	$\psi_d \in \mathbb{R}$
水平通道	$\boldsymbol{u}_h(t) = -\boldsymbol{K}_{\mathrm{hp}}\boldsymbol{R}_\psi^T(\boldsymbol{p}_h(t) - \boldsymbol{p}_{\mathrm{hd}}(t)) - \boldsymbol{K}_{\mathrm{hd}}\boldsymbol{R}_\psi^T(\dot{\boldsymbol{p}}_h(t) - \dot{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{hd}}(t)) - \boldsymbol{K}_{\mathrm{hi}}\int_0^t \boldsymbol{R}_\psi^T(\boldsymbol{p}_h(\tau) - \boldsymbol{p}_{\mathrm{hd}}(\tau)) \mathrm{d}\tau$	$\boldsymbol{p}_{\mathrm{hd}} \in \mathbb{R}^{2\times 2}$

多旋翼模型模块

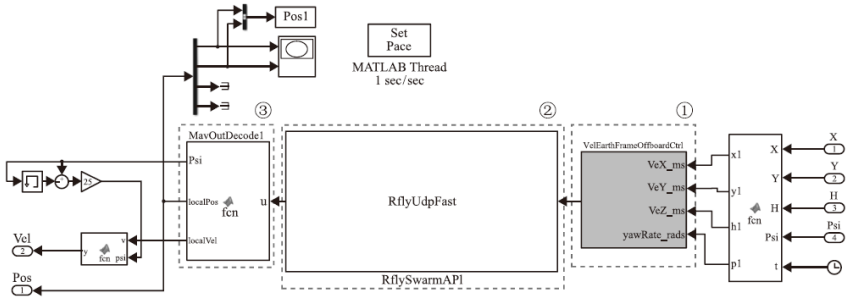
Sim1.0（系统辨识得到的各通道传递函数模型）

Sim2.0（使用辨识参数的多旋翼机理模型）

HIL（硬件在环通信模块——相当于使用 CopterSim 内的 dll 模型）

硬件在环模块内部如图所示，该模块是 Simulink 模型和 RflySim 平台（CopterSim)之间的通信桥梁，接收 Simulink 模型中发出的控制指令并返回硬件在环仿真过程中多旋翼的位置、速度和欧拉角等数据。图中虚线框①用于将需要发送的数据打包成统一的数据结构作为虚线框②的输入。虚线框②是 simulink 和 CopterSim 通信的核心模块，包含两个作用，一

是将硬件在环仿真需要的数据发送给 CopterSim，一是从 CopterSim 中接收反馈信息。硬件在环仿真的 Simulink 文件保存在每一章的设计实验文件夹中，与软件仿真使用的文件区别在于用硬件在环模块替换了多旋翼模型模块。这是因为硬件在环仿真的多旋翼模型在 CopterSim 中。



2. 实验效果

实现在 Simulink 中直接控制四旋翼无人机飞行，在 RflySim3D 中显示飞行效果。

3. 文件目录

例程目录：[安装目录]\RflySimAPIs\6.RflySimExtCtrl\1.BasicExps\e7_MutUAVRemoteCtrl\0.SoftwareSimExps\

文件夹/文件名称		说明
sim1.0	Ch0F1.fig	水平前、侧及高度通道幅值图
	e0_plot.m	水平前、侧及高度通道幅值图绘制文件
	New_Export.mat	Simulink 仿真输出数据文件
	sample0_2017b.slx	期望轨迹(直线与圆)输入的仿真 1.0 文件（使用硬件在环仿真时监听飞控数据辨识得到的多旋翼各通道模型）
	sample1_2017b.slx	输入为(1,1,1,0)的仿真 1.0 文件（使用硬件在环仿真时监听飞控数据辨识得到的多旋翼各通道模型）
	sample2_2017b.slx	实飞试验的仿真 1.0 文件（使用真机飞行辨识得到的多旋翼各通道模型）
	startSimulation.m	初始化参数文件
sim2.0	icon	图标及模型参数文件夹
	Ch0F1.fig	水平前、侧及高度通道幅值图
	Ch0F2.fig	水平前、侧及高度通道幅值图
	e0_plot.m	水平前、侧及高度通道幅值图绘制文件
	sample0_2017b.slx	非线性模型的仿真 2.0 文件
	sample1_2017b.slx	非线性模型的仿真 2.0 文件
	startSimulation.m	初始化参数文件
HIL	sample0_2017b.slx	HIL 期望轨迹(直线与圆)输入的仿真 1.0 文件

	sample1_2017b.slx	HIL 输入为(1,1,1,0)的仿真 1.0 文件
	satgd.m	保方向的饱和函数
	startSimulation.m	初始化参数文件
	RflyUdpFast.mexw64	MATLAB 中通过 MEX 编译生成的 S 函数模块文件
	HITLRun.bat	一键启动硬件在环仿真脚本
Rfly	RflyData	飞行日志数据文件
	e0_plot.m	图像绘制程序
	start_tello.m	初始化文件，会自动运行 start.m 文件
	start.m	初始化文件
	satgd.m	保方向的饱和函数
	satgd_planning.m	
	build_ros_model.sh	MATLAB 自动生成的 ROS 代码
	sample1_2017b.slx	Simulink 程序文件

4. 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 工具链	Pixhawk 6X 或其它飞控②	1
3	MATLAB 2022b 及以上	遥控器③	1
		遥控器接收器	1
		数据线、杜邦线等	若干

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

②：**若使用** Pixhawk6X 飞控，须保证平台安装时的编译命令为：px4_fmu-v6x_default，固件版本推荐：1.13.3。其他配套飞控请见：https://rflysim.com/doc/zh/B/2.3Pixhawk6X.html

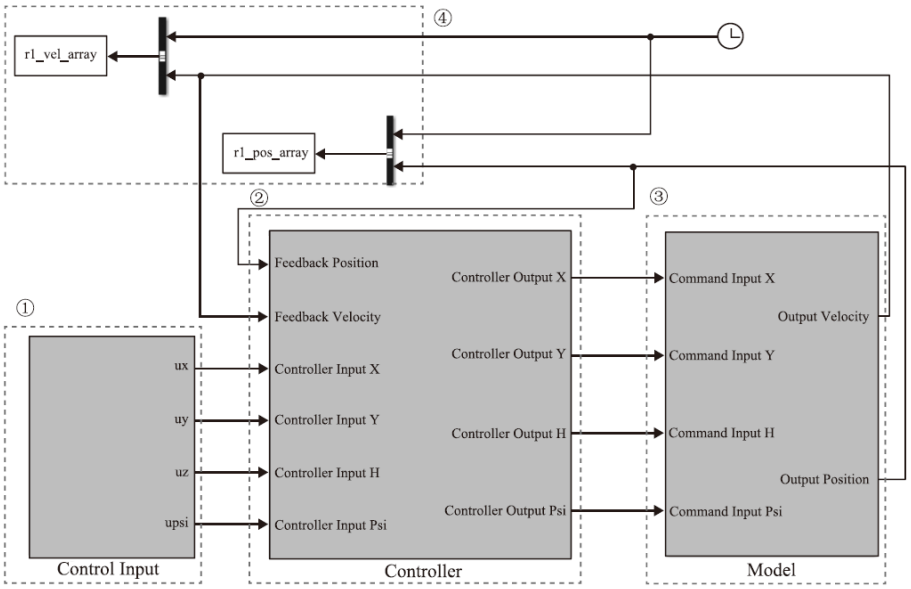
③：本实验演示所使用的遥控器为：天地飞 ET10、配套接收器为：WFLY RF209S。遥控器相关配置见：https://rflysim.com/doc/zh/B/3.1ET10.html

5. 实验步骤

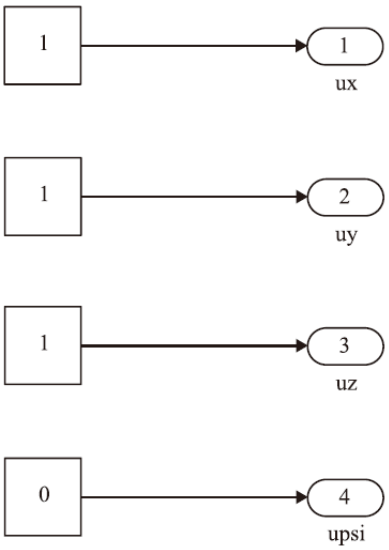
5.1. 必做实验：基于多旋翼线性模型的数值仿真 1.0(sim1.0)

Step 1：设置期望位置

这里我们给出一个设计好的例子，见文件打开 sim1.0\sample1_2017b.slx 该文件，该模型中“Model”模块采用的是设计模型（线性模型）。请仔细观察和分析其中的子模块的实现方法，并进行功能完善。

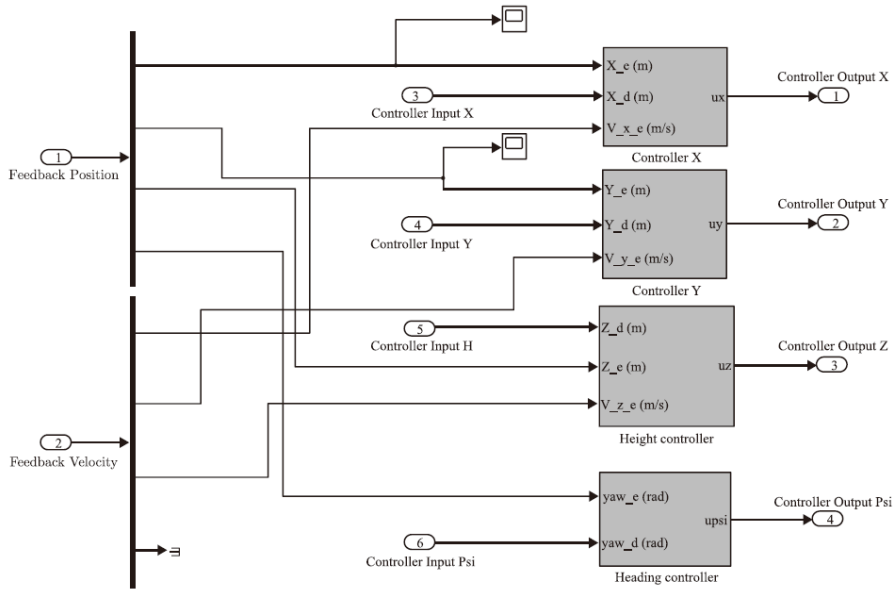


打开上图中的“Controll Input”模块，设定相应的定点期望。



Step 2：确认控制器子模块

设置完定点期望后，打开上图中的“Controller”模块，查看各个通道的定点控制器形式和内容。如下图所示是控制器的内部形式。具体原理请见文献**错误!未找到引用源。**第 2.2.2 节的控制器模块部分。

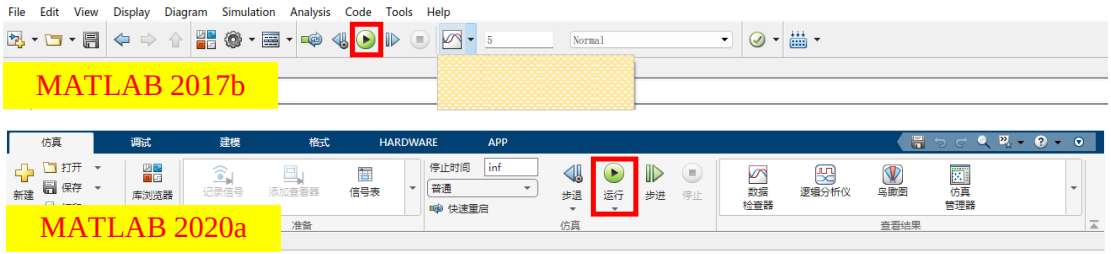


Step 3：初始化参数

双击 MATLAB 文件 sim1.0\startSimulation.m，并单击工作界面中的“运行”(Run)按钮。

Step 4：运行仿真观察三通道响应

单击 Simulink 的 sim1.0\sample1_2017b.slx，工具栏“开始仿真”按钮开始仿真。



水平前向通道、水平侧向通道和高度通道的仿真结果可以通过运行文件 sim1.0\e0_plot.m 得到，如下图所示，这三个变量从起点位置迅速到达（1，1，1)位置，达到了预期效果。

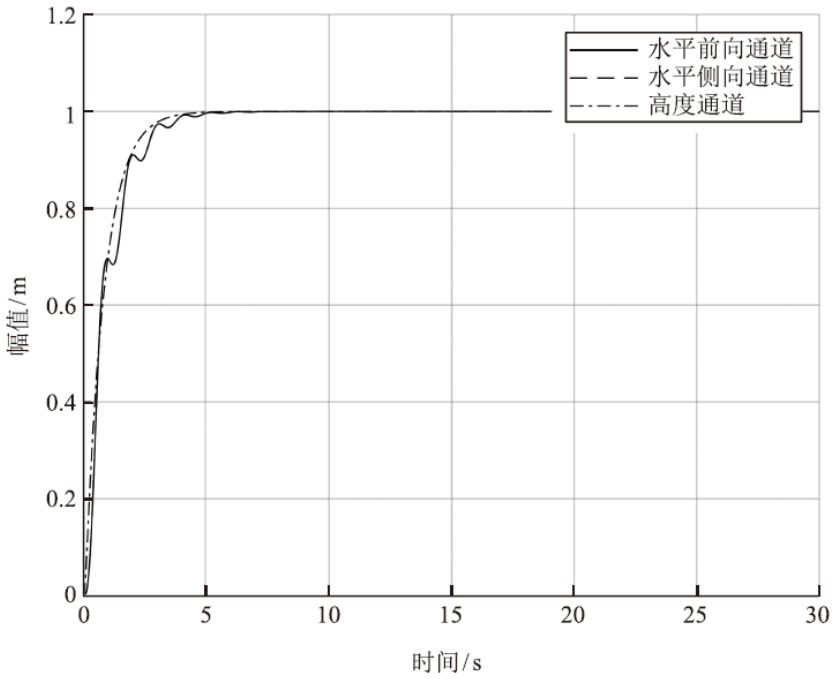


图 3.4　各通道位置响应曲线

5.2. 必做实验：基于多旋翼六自由度模型的仿真 2.0(sim2.0)

基于设计模型，已经完成了仿真 1.0，下一步需要在非线性模型上进行验证，即仿真 2.0。

Step 1：使用与 sim1.0 相同的控制器和期望输入

与仿真 1.0 实验步骤中的 step1~step2 相同。

Step 2：替换多旋翼模型为非线性

打开 sim1.0\sample1_2017b.slx，将“Model”模块里的传递函数模型替换成非线性模型，然后按要求设置期望输入。这里我们给出一个设计好的例子，见文件 sim2.0\sample1_2017b.slx，其与 sim1.0\sample1_2017b.slx 的区别在于此处的多旋翼模型为非线性模型。

Step 4：参数初始化

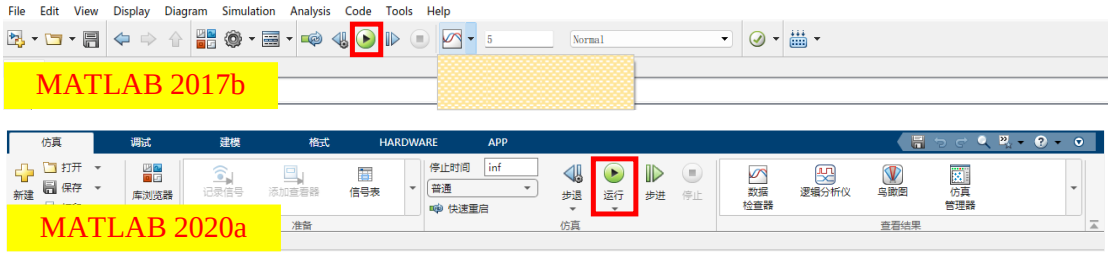
双击 MATLAB 文件 sim2.0\startSimulation.m，并单击工作界面中的“运行”(Run)按钮。

Step 3：启动三维软件

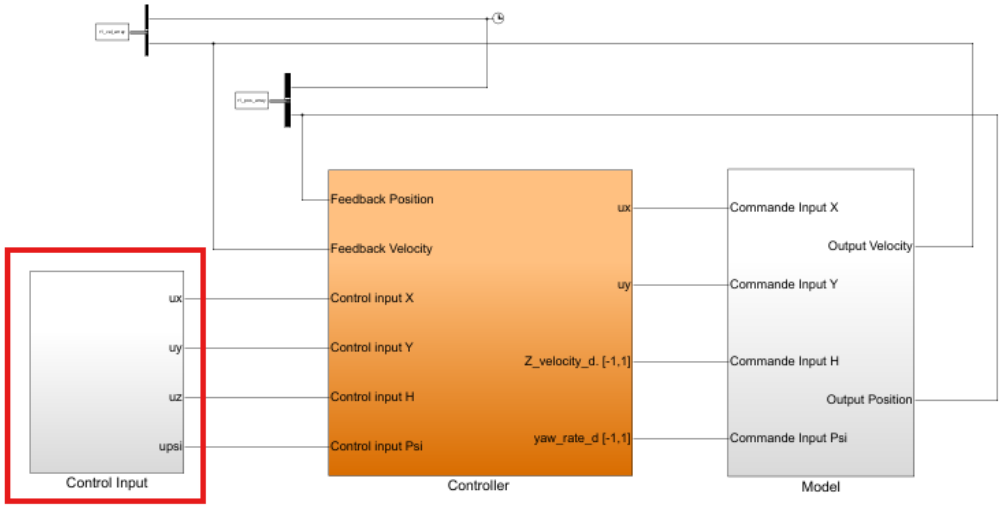
在桌面“*\桌面\RflyTools\RflySim3D.lnk”打开 RflySim3D 软件。

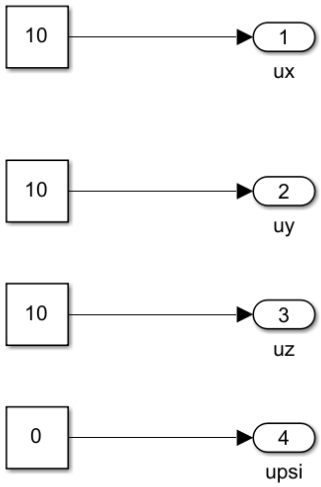
Step 5：运行仿真并观察 RflySim3D

单击 Simulinksim2.0\sample1_2017b.slx，工具栏“开始仿真”按钮开始仿真。

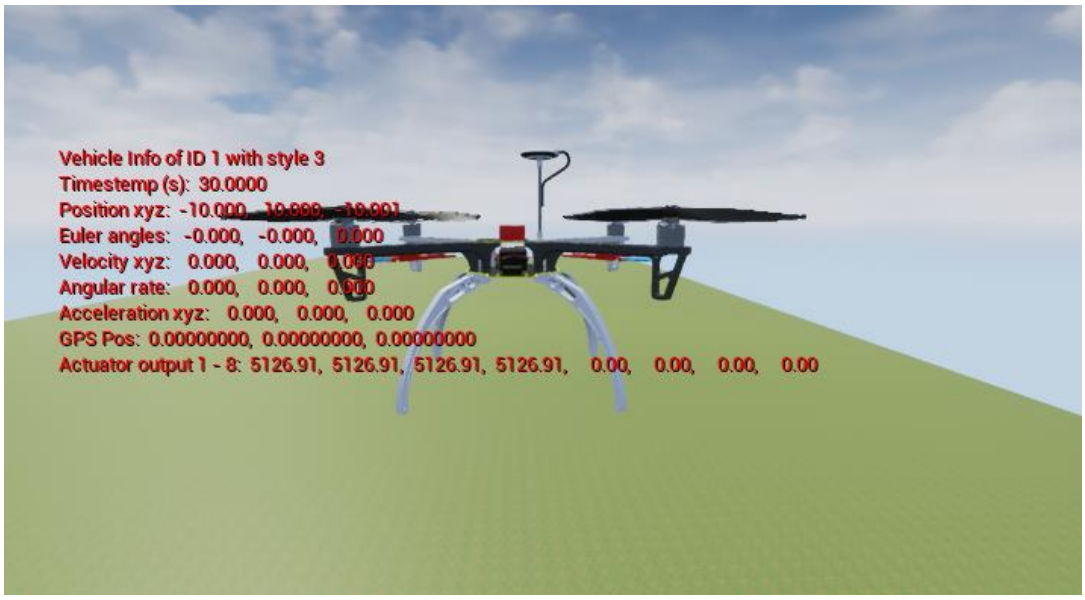


对输入进行修改：



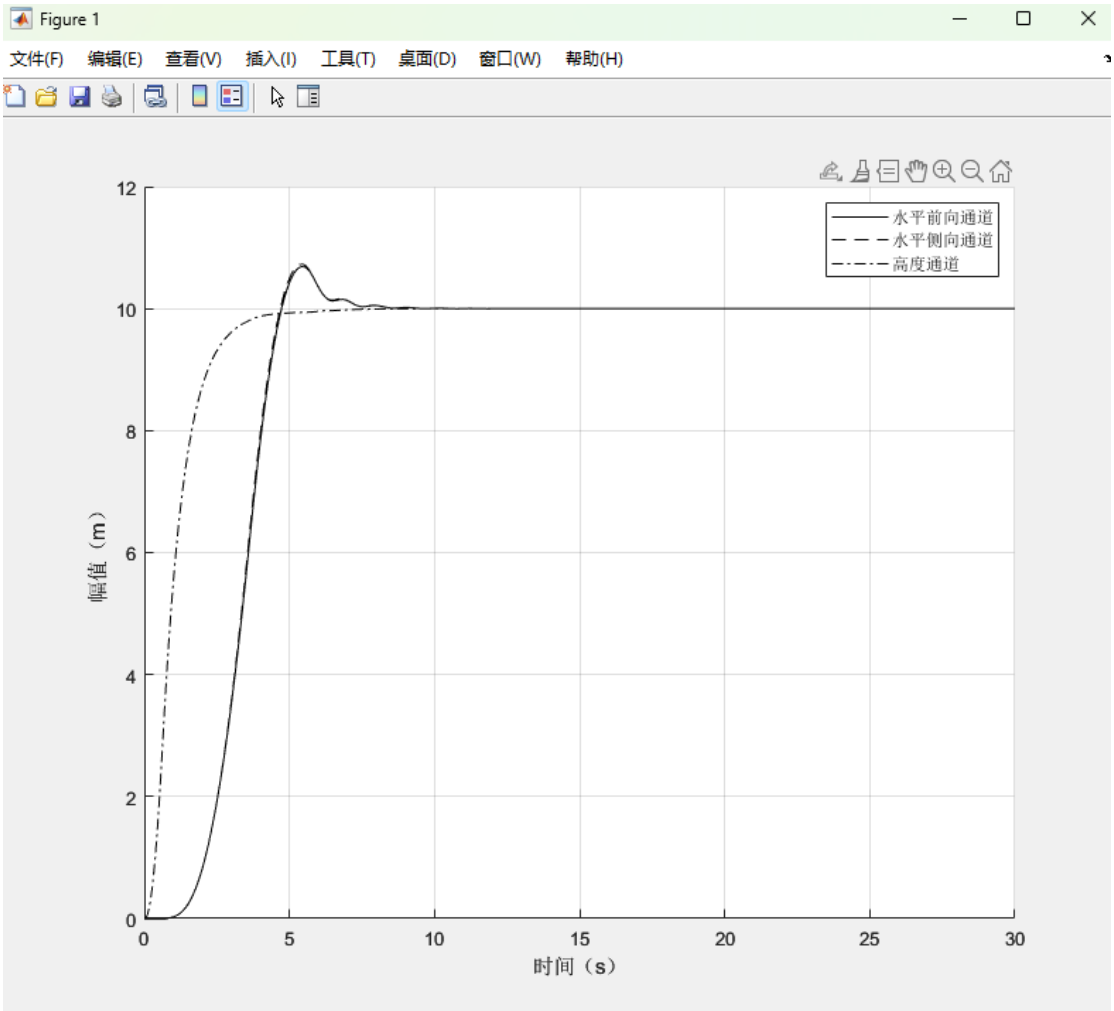


此时，可以在 RflySim3D 中观察到：多旋翼到达指定定点。这说明控制器实现了预期要求。



Step 6：观察三通道响应

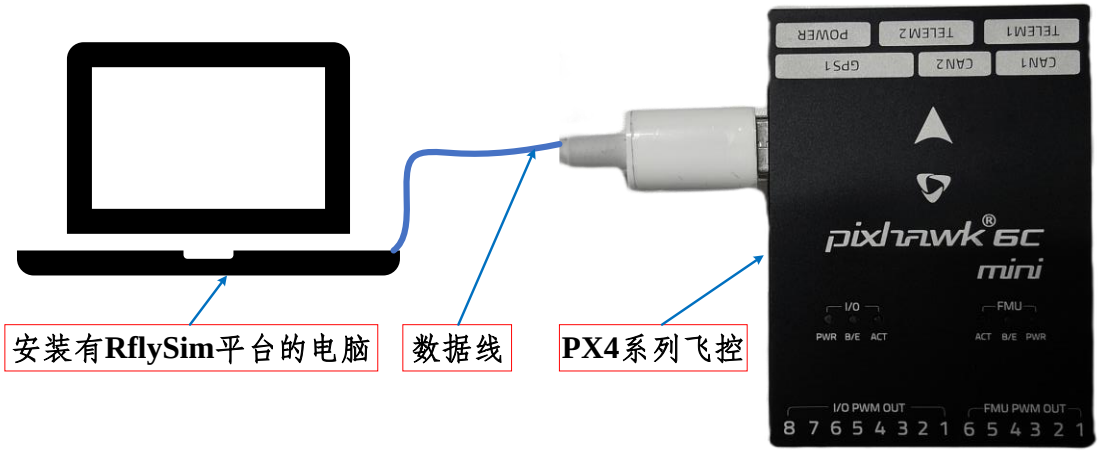
双击打开 sim2.0\e0_plot.m，并单击工作界面中的“运行”(Run)按钮。



5.3. 硬件在环仿真(HIL)实验步骤（选做）

Step 1：连接硬件

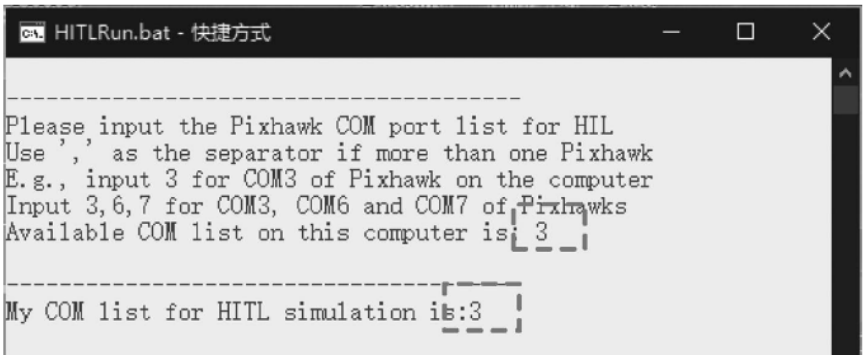
将 Pixhawk 自驾仪与计算机通过 USB 数据线连接。



Step 2：启动硬件在环仿真

选择 HIL 脚本：打开 HIL\HITLRun.bat 一键启动硬件在环仿真脚本，在弹出的命令行中。输入 PX4 系列自驾仪显示的串口号，如这里是“3”，只需把该串口号输入下方即可。

注：本脚本也可支持多机仿真，多机硬件在环仿真时，需要插入多个飞控到电脑中，双击“*\桌面\RflyTools\HITLRun.lnk”后弹出的命令行中提示的串口号个数应与连接的自驾仪个数一致，需要在下方输入所有给出的串口号，每个串口号用逗号分隔开。



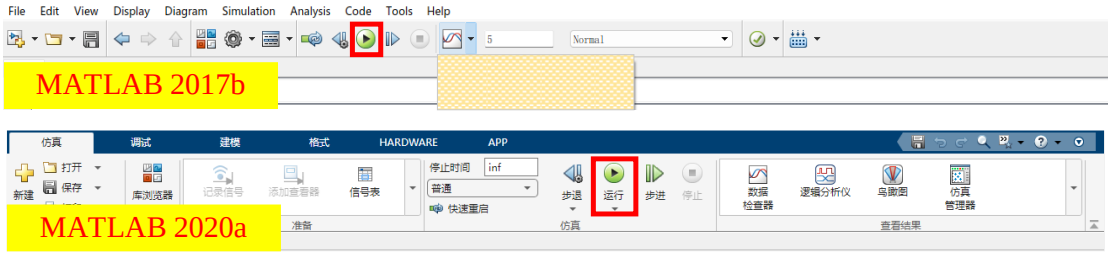
在填写完串口号后，按下回车键，系统会自动打开所有与硬件在环仿真相关的 RflySim 3D、CopterSim 和 QGC 地面站。等待 CopterSim 的左下角状态框中显示：PX4: GPS 3D fixed & EKF initialization finished。

Step 3：参数初始化

双击 MATLAB 文件 HIL\startSimulation.m，并单击工作界面中的“运行”(Run)按钮。

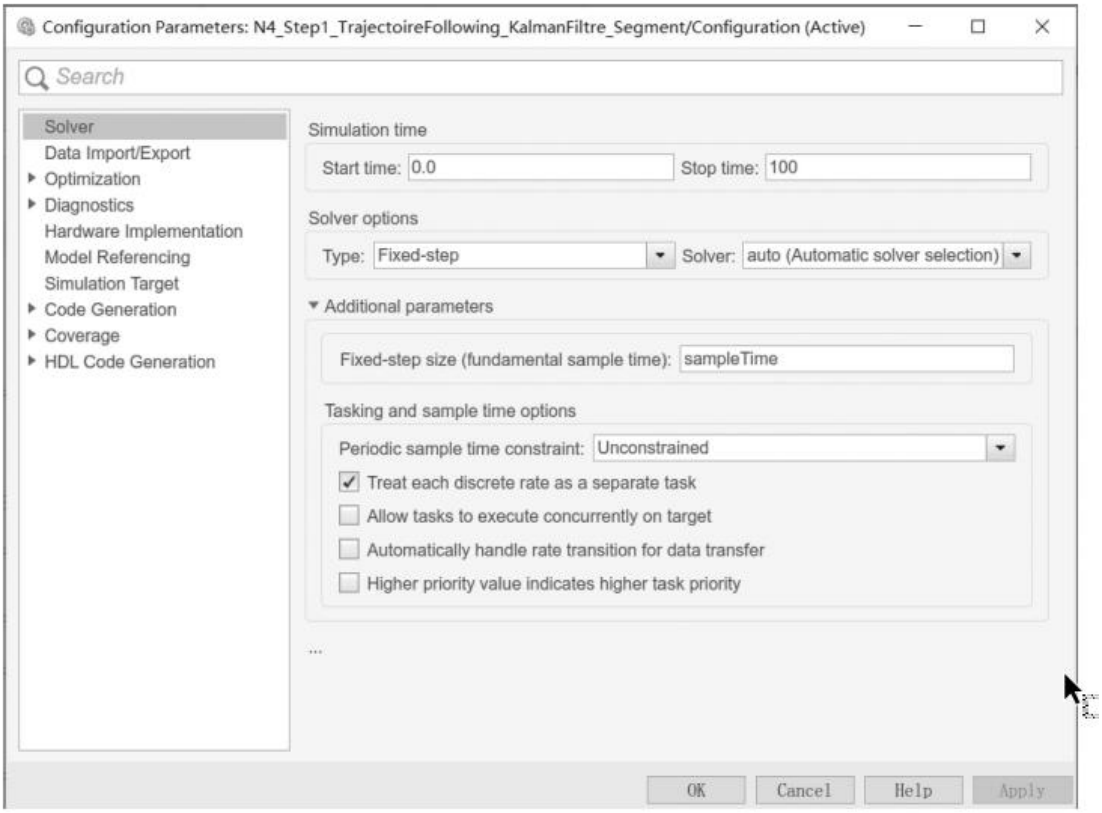
Step 4：运行仿真

在 Simulink 中打开 HIL\sample1_2017b.slx 程序，单机“运行”。



可以实现自驾仪硬件在环仿真，仿真结果通过 RflySim3D 软件实时显示。

注意：1）本实验中的仿真模型均在 R2017b 版本中运行，所以需要计算机中的版本为 R2017b 及以上。2）所有的仿真模型均需要设定固定的仿真步长。在 Simulink 界面的上方菜单栏中单击“Model Configuration Parameters”进入如下图所示的界面，在其中单击“Solver”“Slover options”“Type”，在下拉菜单中选择“Fixed-Step”选项。单击其下方的"Additional Parameters”，在“Fixed-Stepsize”一栏中填入变量名“sample-Time”。这样就规定好了仿真模型的固定仿真步长，而变量“sampleTime"值设置在“startSimulation.m”文件中。

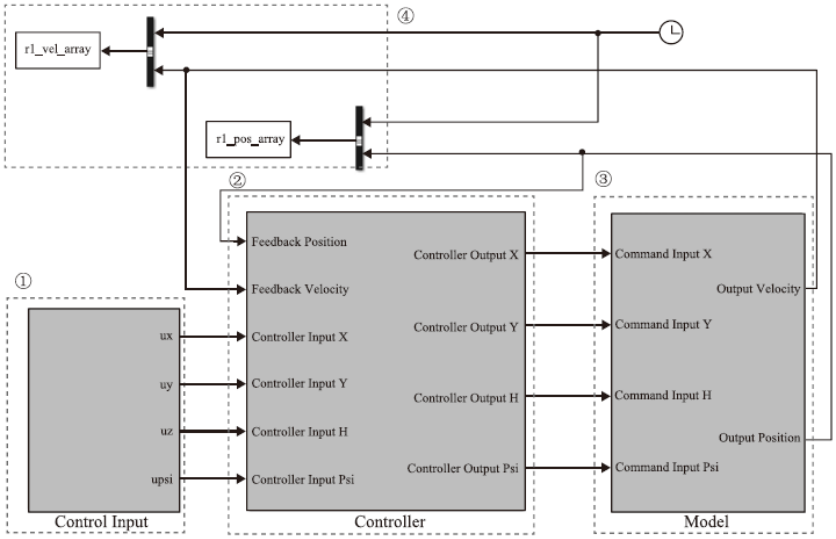


5.4. 实飞(Rfly)实验步骤（选做）

由于设计的控制器最终需要运用于真实的多旋翼上，因此，在实飞之前，进行基于真实的多旋翼模型的仿真实验非常必要。实飞实验的仿真 1.0 与仿真实验的仿真 1.0 区别就在于多旋翼模型，此处的模型是通过对真实的多旋翼通道辨识获得的（仿真实验的仿真 1.0 是通过硬件在环仿真记录飞控滤波估计后的数据辨识得到），其他模块与仿真实验一样。

Step 1：设计控制器并仿真验证（可选）

新建一个 Simulink 文件，在其中设计多旋翼的定点控制器，设计要求与仿真阶段的要求一致。这里我们给出一个设计好的例子，见文件 sim1.0\sample2_2017b.slx，打开该文件后的 Simulink 框图如下图所示。请仔细阅读其中的子模块的实现方法，并进行功能的完善。

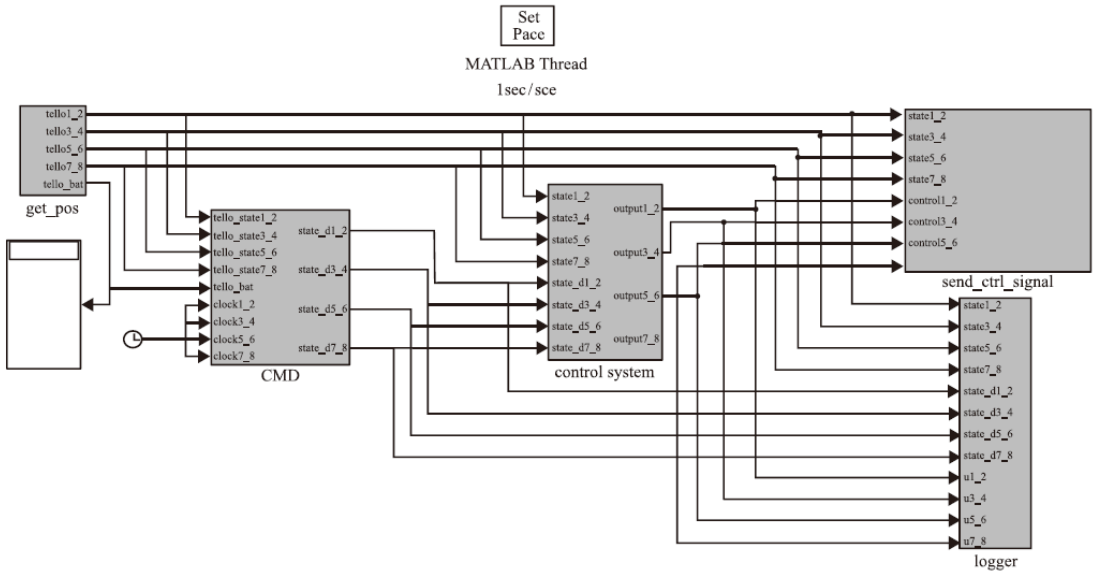


其余步骤请见仿真 1.0 实验步骤中的 Step 2：、Step 3：、Step 4：。开始仿真。水平前向通道、水平侧向通道和高度通道的仿真结果，这三个变量从（0，0，0）迅速到达（1，1，1)位置，达到了预期效果。

Step 2：迁移设计好的控制器到真机控制程序中（可选）

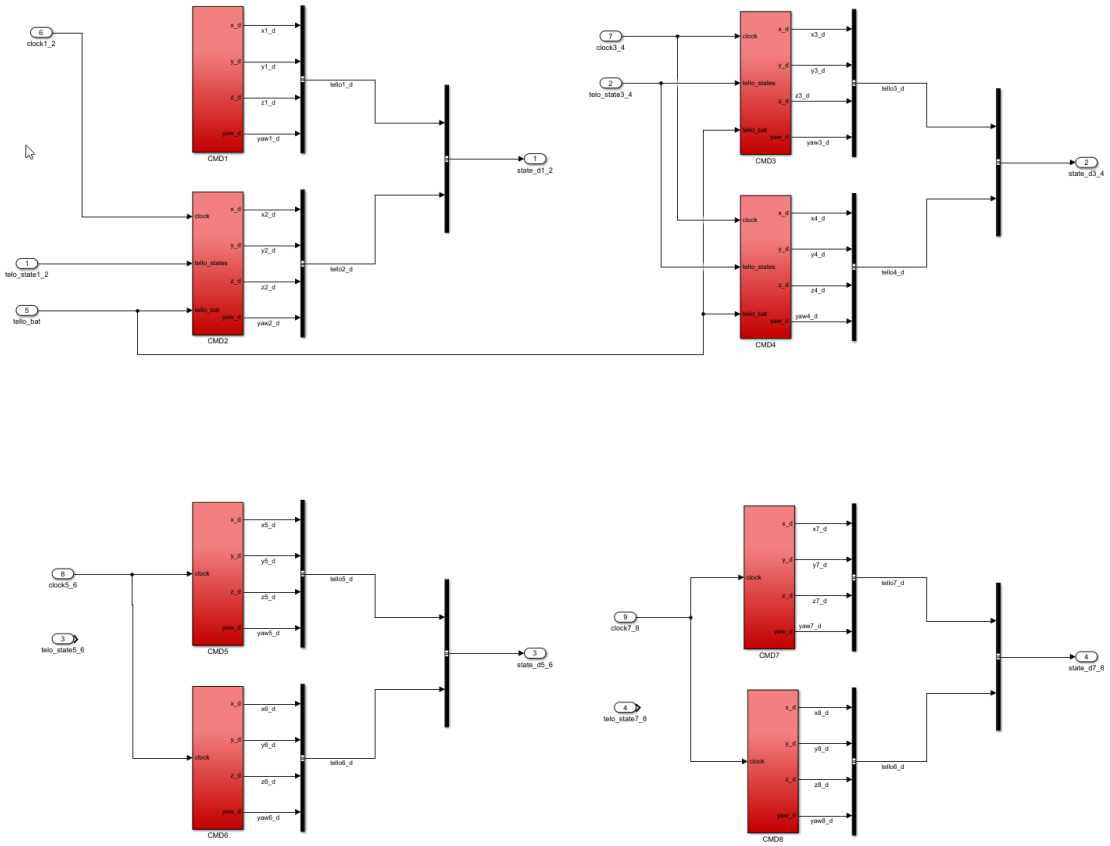
此处将通过仿真测试的控制器用于真实的多旋翼上验证。

控制器与仿真 1.0 控制器相同，实飞实验相对复杂，可根据需要对控制参数进行微调。这里我们给出一个设计好的例子，见文件 Rfly\sample1_2017b.slx，打开该文件后的 Simulink 框图见下图。



Step 3：设置期望输入

打开 Rfly\sample1_2017b.slx 的“CMD”模块，在该模块中打开“CMD1”子模块，该模块用于设定相应的定点期望。设置完定点期望后，打开图 3，15 中的“controlsystem”模块内的“Baseline Controller Basic”子模块，查看各个通道的定点控制器形式和内容。



Step 5：实飞准备

实飞环境如下图所示，按照以下步骤进行实验。1）首先启动实飞实验所需要的各个设备，分别为：①用于进行数据通信的路由器；②用于实时获得多旋翼运动状态的室内定位系统；③用于作为 Simulink 模型控制载体的计算机；④用于飞行实验的多旋翼。

2）在启动设备之后需要将所有设备连接到路由器提供的局域网内，实现设备之间的通信。

3）为了实现多旋翼运动状态的实时反馈，需要在室内定位系统中建立多旋翼的模型。

4）在完成上述准备工作后，可以开始进行多旋翼的实飞实验。

Step 6：配置多旋翼 IP 地址并启动实飞实验

1.查找多旋翼的 IP 地址：

在当前的局域网中找到多旋翼设备分配的 IP 地址。这通常可以通过路由器的管理界面查看，或者使用网络扫描工具（如 nmap）来查找设备的 IP 地址。

2.修改 ROS 功能包中的 IP 地址：

在 Tello 飞机配套的 ROS 功能包中找到相应的“launch”文件（通常位于 ROS 工作区中的 launch 文件夹内）。

在这个文件中，找到用于配置多旋翼 IP 地址的部分，并将其修改为在局域网中查找到的多旋翼 IP 地址。

Step 7：启动室内定位系统

在打开的系统“Terminal”中输入

```
ros launch mocap_optitrack multirigidb0dy8.launch
```

这个命令启动了一个 ROS launch 文件，该文件配置并启动了用于室内定位的系统（如 OptiTrack）。multirigidbody8.launch 是该定位系统的一个特定 launch 文件，负责初始化和配置多刚体跟踪。

Step 8：连接多旋翼

在系统终端中输入以下命令并运行：

```
ros launch tell_driver tell_node.launch
```

这个命令启动了与 Tello 多旋翼相关的 ROS 节点。tello_driver 是控制 Tello 飞机的 ROS 包，tello_node.launch 是用来初始化和配置多旋翼与 ROS 系统连接的 launch 文件。

Step 9：起飞多旋翼

在系统终端中输入以下命令并运行：

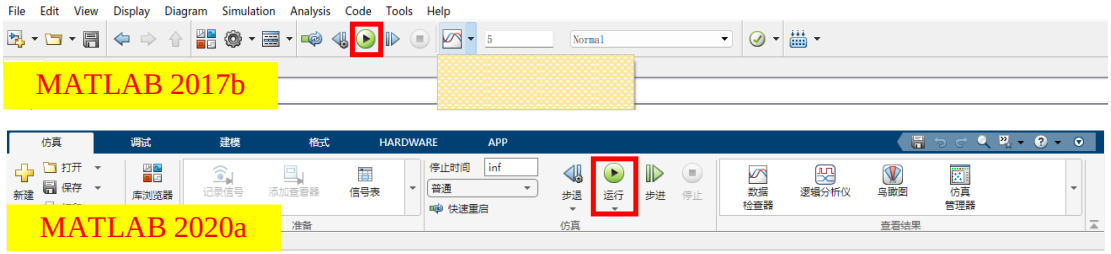
```
rosrun tello Tell_takeoff_all
```

这个命令使用 rosrun 命令来运行 Tello 飞机的起飞脚本，通常是用 Python 或 C++ 编写的。tello_takeoff_all 表示让所有连接的 Tello 飞机执行起飞操作。执行这个命令后，多旋翼将会起飞并进入飞行状态。

Step 10：进行定点控制

首先打开 MATLAB，运行“Rfly\start_tello.m”,启动文件加载相应数据，打开控制模型 Rfly\sample1_2017b.slx。

一切准备就绪后，单击 Rfly\sample1_2017b.slx 控制模型中 Simulink 工具栏“开始仿真”按钮开始仿真。



此时可以在飞行场地内观察到，多旋翼爬升一段时间后向左飞行，说明控制器实现预期要求。

Step 12：退出实验

单击 Simulink 中的“停止仿真”，然后在系统“Terminal”中输入：

```
rosrun tello Tello_land_all
```

并运行，则多旋翼断电。

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：