

- 1.实验名称及目的
 - 1.1实验名称
 - 1.2实验目的
 - 1.3关键知识点
 - 关键知识点1: 期望轨迹输入模块设计
 - 关键知识点2: 微分平坦控制模块实现
- 2.实验效果
- 3.文件目录
- 4.运行环境
 - 4.1 软件要求
 - 4.2 硬件要求
- 5.实验步骤
 - 5.1 模型初始化
 - 5.2 模型搭建
 - 5.3 仿真运行
- 6.参考资料
- 7.常见问题
 - Q1: 仿真过程中出现NaN或Inf值怎么办?
 - Q2: 轨迹跟踪误差较大怎么办?

1.实验名称及目的

1.1实验名称

微分平坦控制实验

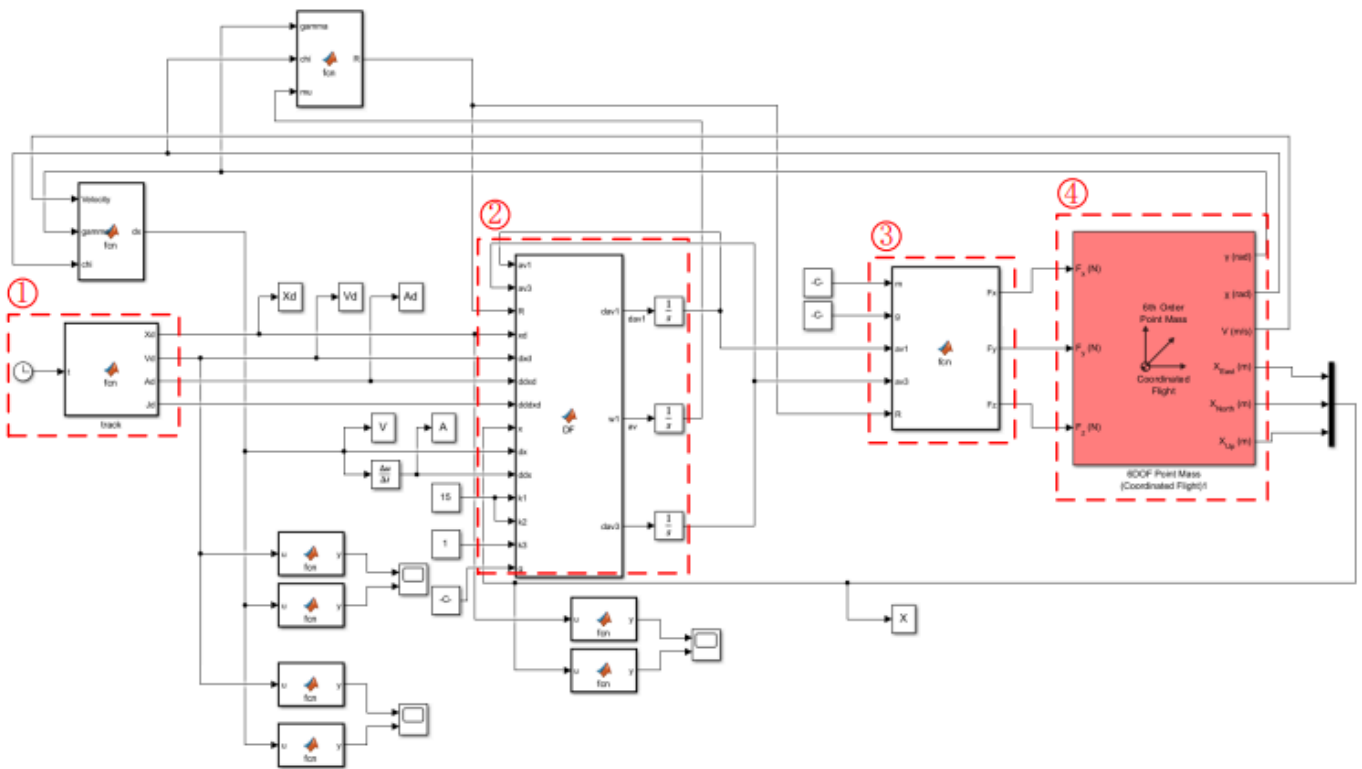
1.2实验目的

1. 理解微分平坦控制原理，掌握期望轨迹与控制输入之间的关系
2. 学会在Simulink中搭建基于协调飞行模型的微分平坦控制模块
3. 编写微分平坦控制代码并进行软件在环仿真
4. 分析ENU坐标系下简单轨迹的微分平坦控制效果

1.3关键知识点

关键知识点1：期望轨迹输入模块设计

在文件夹“e7-1”中打开“SmallFixedWingUAVdf.slx”模型文件，该模型主要包含四个模块，分别为：虚线框①“track”，期望轨迹输入模块，用于随时间输出期望轨迹，对应代码段8.1；虚线框②“DF”，微分平坦控制模块，用于根据期望轨迹前馈获得微分平坦控制量，对应代码段8.2；虚线框③控制转换模块，该模块将微分平坦控制模块输出的控制量转换为模型输入；虚线框④协调飞行模块，使用MATLAB中“Aerospace Blockset/Equations of Motion/Point Mas”中的“6th Order Point Mass(Coordinated Flight)”模块。



在后续的实验中，该模块用于参考轨迹跟踪的验证，在本节的基础实验中，为验证微分平坦控制的有效性，首先设计简单的时变跟踪轨迹，如代码段所示。模块的输入是时间t (“t”)，模块的输出为时变的期望位置 (“Xd”)、速度 (“Vd”)、加速度 (“Ad”) 和加加速度 (“Jd”)，分别对应代码段中示例代码如下：

```
function [Xd,Vd,Ad,Jd] = fcn(t)
Xd=[4*t-cos(t),-0.5*cos(2*t),10+sin(t)]';
Vd=[4+sin(t),sin(2*t),cos(t)]';
Ad=[cos(t),2*cos(2*t),-sin(t)]';
Jd=[-sin(t),-4*sin(2*t),-cos(t)]';
end
```

关键知识点2：微分平坦控制模块实现

在MATLAB Function中设计并搭建微分平坦控制模块 (ENU坐标系)。核心控制算法如下：

```

function [dav1,w1,dav3] = DF(av1,av3,R,xd,dxd,ddxd,dddxd,x,dx,ddx,k1,k2,k3,g)
    dav1=zeros(1,1);
    w1=zeros(1,1);
    dav3=zeros(1,1);

    V = norm(dx,2);
    gv = R'*[0;0;-g];
    w2=-(av3+gv(3))/V;
    w3=gv(2)/V;
    u = ddddxd + k1*(ddxd-ddx) + k2*(dxd-dx) + k3*(xd-x);
    a = [-w2*av3;w3*av1/av3;w2*av1];
    B = [1,0,0;0,-1/av3,0;0,0,1];
    out = a + B*R'*u;
    dav1=out(1); w1=out(2); dav3=out(3);

    if isnan(dav1)
        dav1=0;
    end
    if isnan(w1)
        w1=0;
    end
    if isnan(dav3)
        dav3=0;
    end
end

```

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

2. 实验效果

通过Simulink软件在环仿真，完成ENU坐标系下简单轨迹的微分平坦控制实验。通过对比期望轨迹和实际轨迹，验证微分平坦控制的有效性。在仿真初期，由于初始条件的差异，跟踪误差可能较大，但随着时间推移，误差会逐渐减小。

3. 文件目录

例程目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\5.RflySimFlyCtrl\1.BasicExps\10-FixedWingCtrl\code_8\6-1](#)

文件名	说明
SmallFixedWingUAVdf.slx	固定翼无人机微分平坦控制Simulink模型
InitDatactrl.m	模型初始化脚本，设置初始条件和参数
DF_plot.m	仿真结果绘图脚本
ROTX.m, ROTY.m, ROTZ.m	旋转矩阵计算函数

4.运行环境

4.1 软件要求

Windows 10及以上版本；MATLAB R2022b及以上版本；

4.2 硬件要求

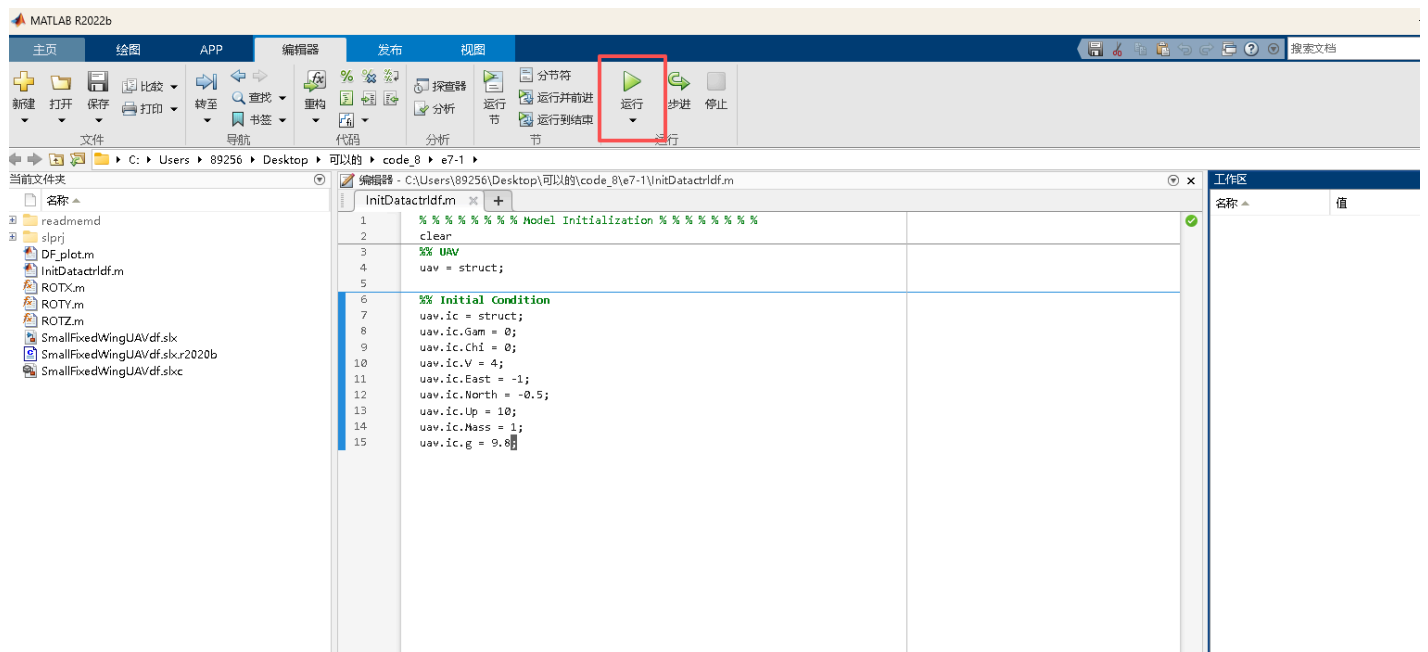
笔记本/台式电脑1台

①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

5.实验步骤

5.1 模型初始化

在e7-1文件夹下，找到并运行“InitDatactrldf.m”脚本，初始化模型参数，配置固定翼无人机初始状态。



```

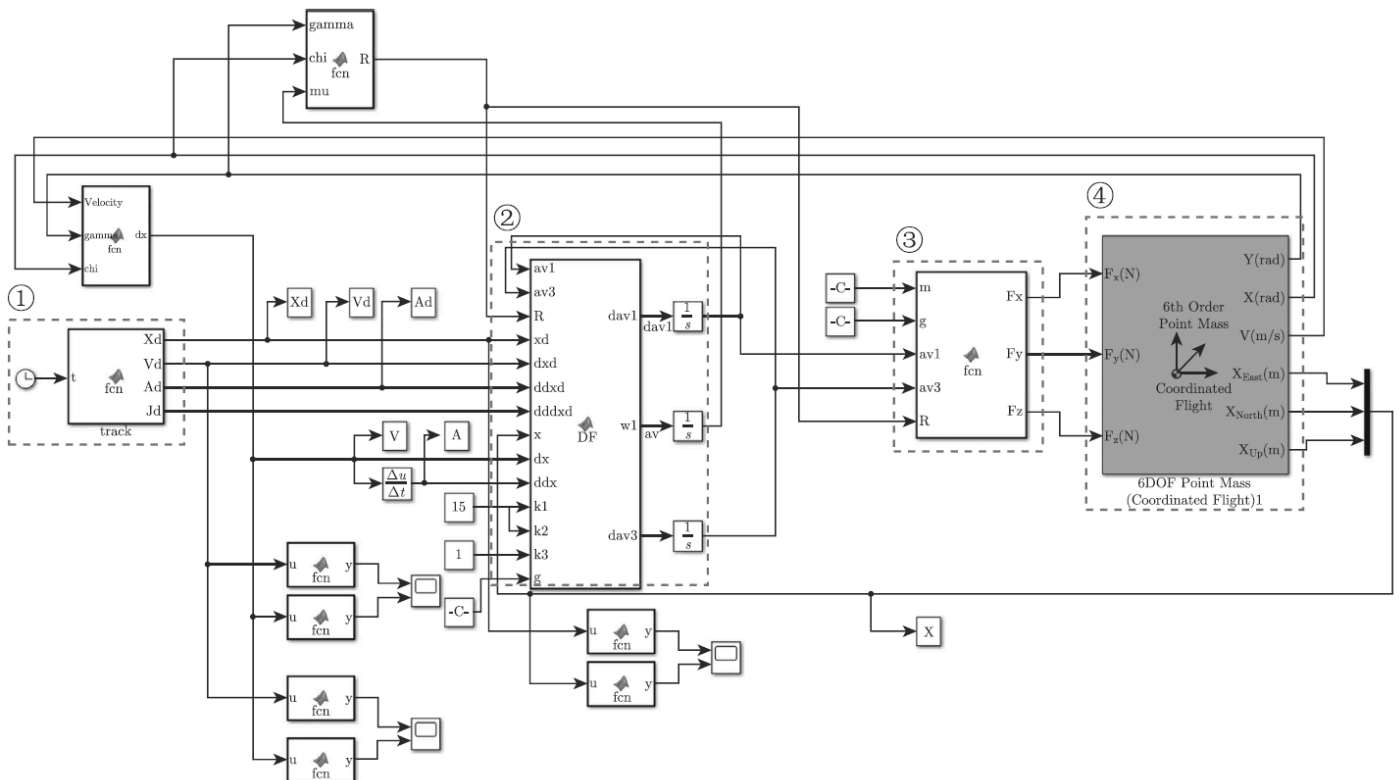
%% UAV
uav = struct;
%% Initial Condition
uav.ic = struct;
uav.ic.Gam = 0;
uav.ic.Chi = 0;
uav.ic.V = 4;
uav.ic.East = -1;
uav.ic.North = -0.5;
uav.ic.Up = 10;
uav.ic.Mass = 1;
uav.ic.g = 9.8;

```

代码中主要定义了 在 ENU 坐标系下的位置、质量、速度和姿态参数。配置固定翼无人机初始状态，创建参数结构体“uav.ic”，其中“uav.ic.Gam”和“uav.ic.Chi”为初始俯仰角与偏航角，“uav.ic.V”为初始空速，“uav.ic.East”、“uav.ic.North”和“uav.ic.Up”为 ENU 坐标系下的位置，“uav.ic.Mass”为质量，“uav.ic.g”为重力加速度。

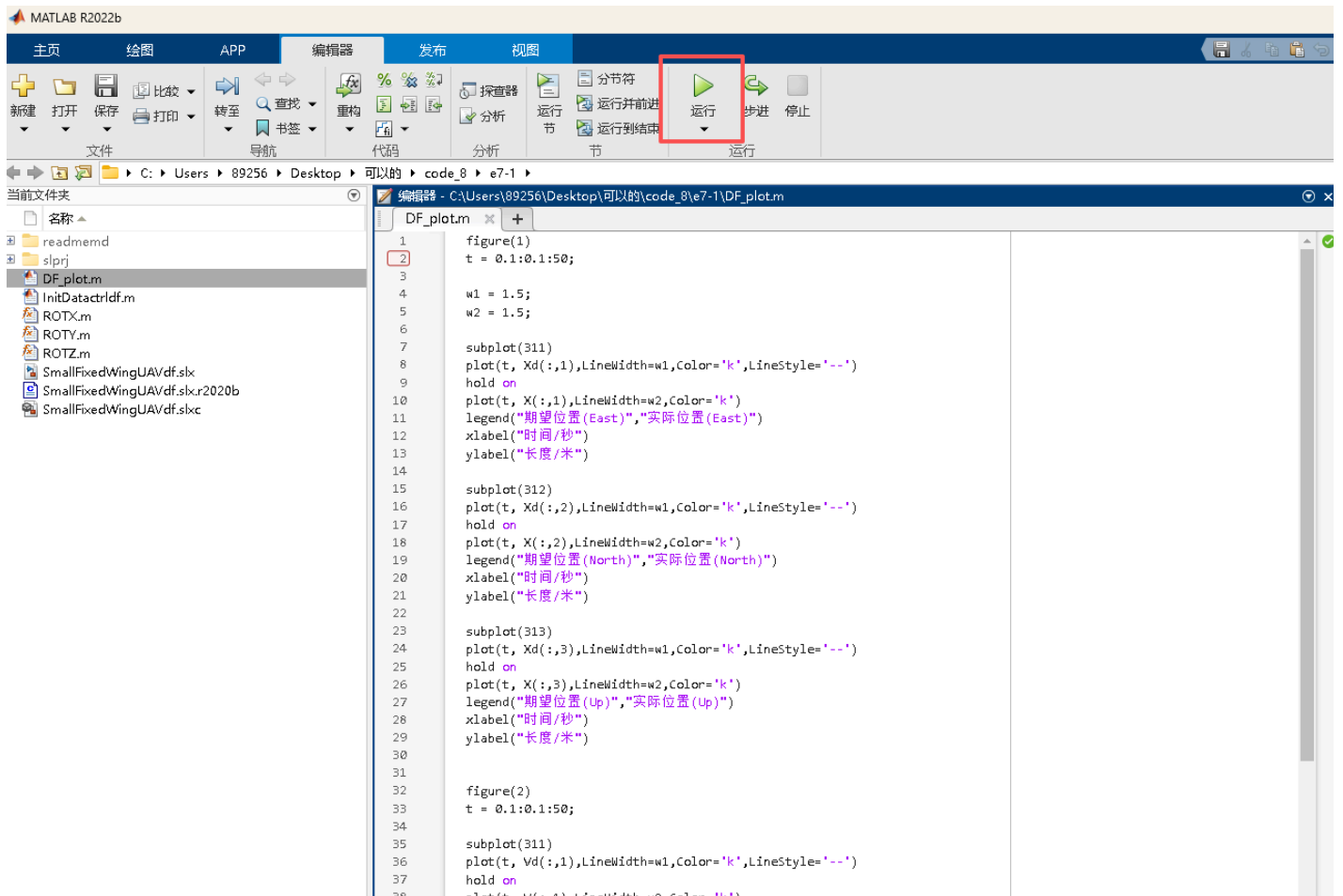
5.2 模型搭建

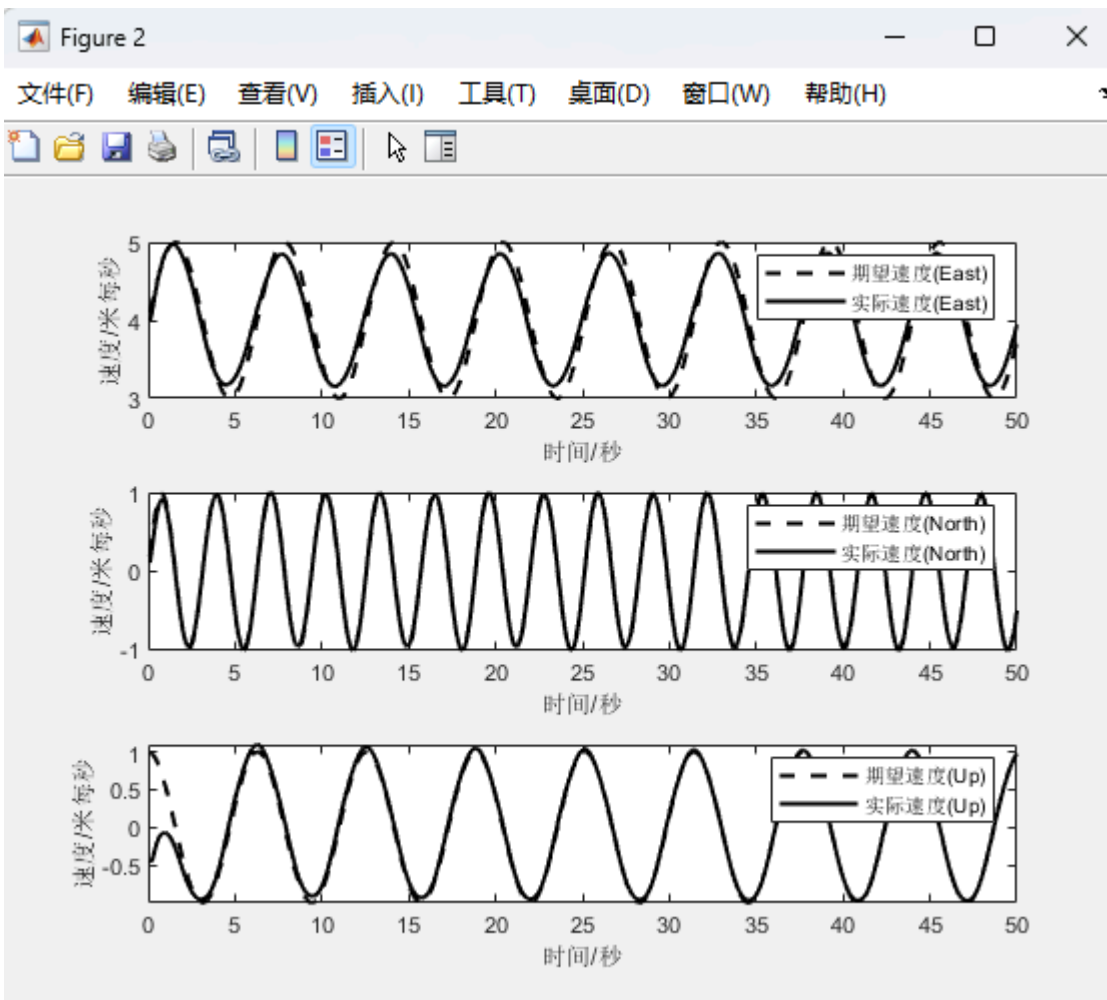
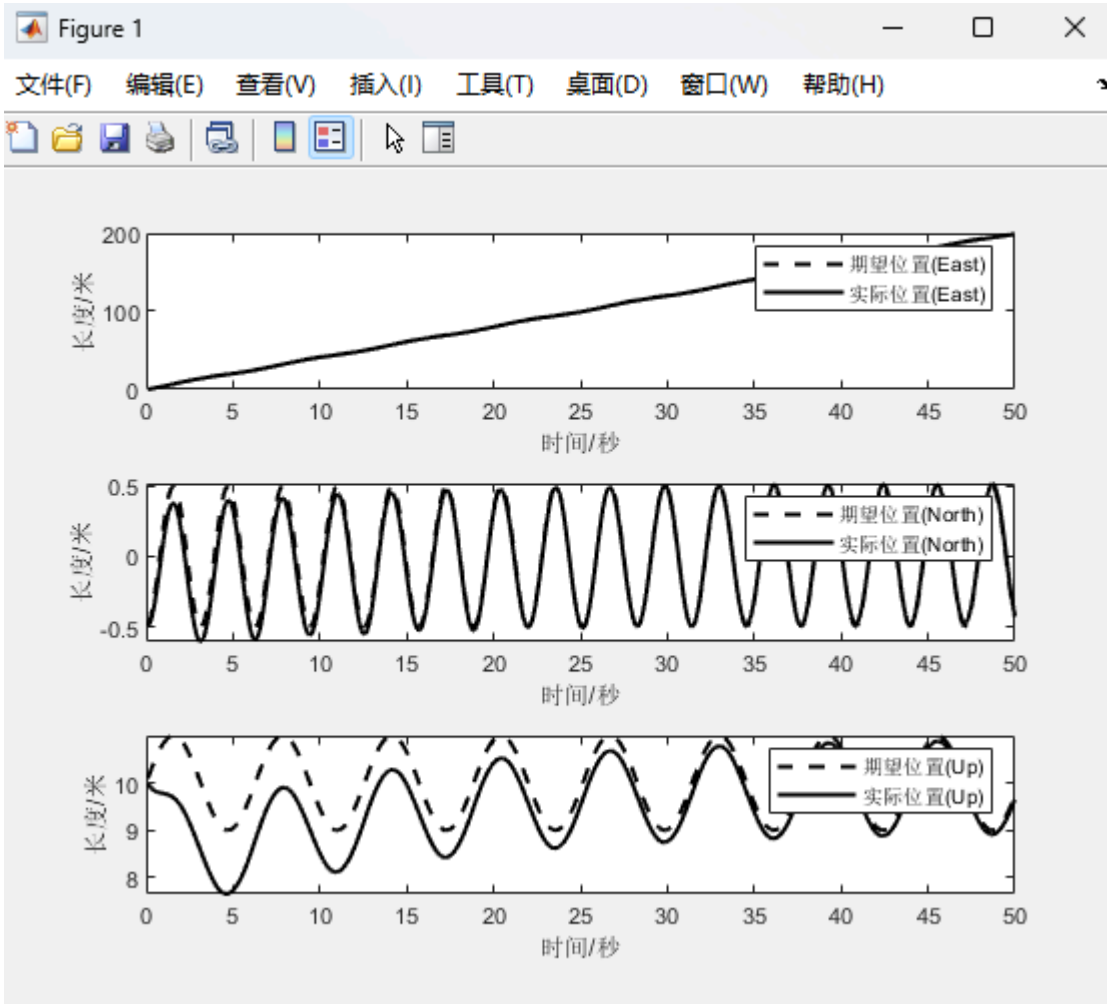
在 e7-1 文件夹下，双击进入并运行 Simulink 模型文件“SmallFixedWingUAVdf.slx”，该模型主要包含四个模块，分别为：虚线框①“track”，期望轨迹输入模块，用于随时间输出期望轨迹，对应代码段 8.1；虚线框②“DF”，微分平坦控制模块，用于根据期望轨迹前馈获得微分平坦控制量，对应代码段 8.2；虚线框③控制转换模块，该模块将微分平坦控制模块输出的控制量转换为模型输入；虚线框④协调飞行模块，使用 MATLAB 中“Aerospace Blockset/Equations of Motion/Point Mas”中的“6th Order Point Mass(Coordinated Flight)”模块。

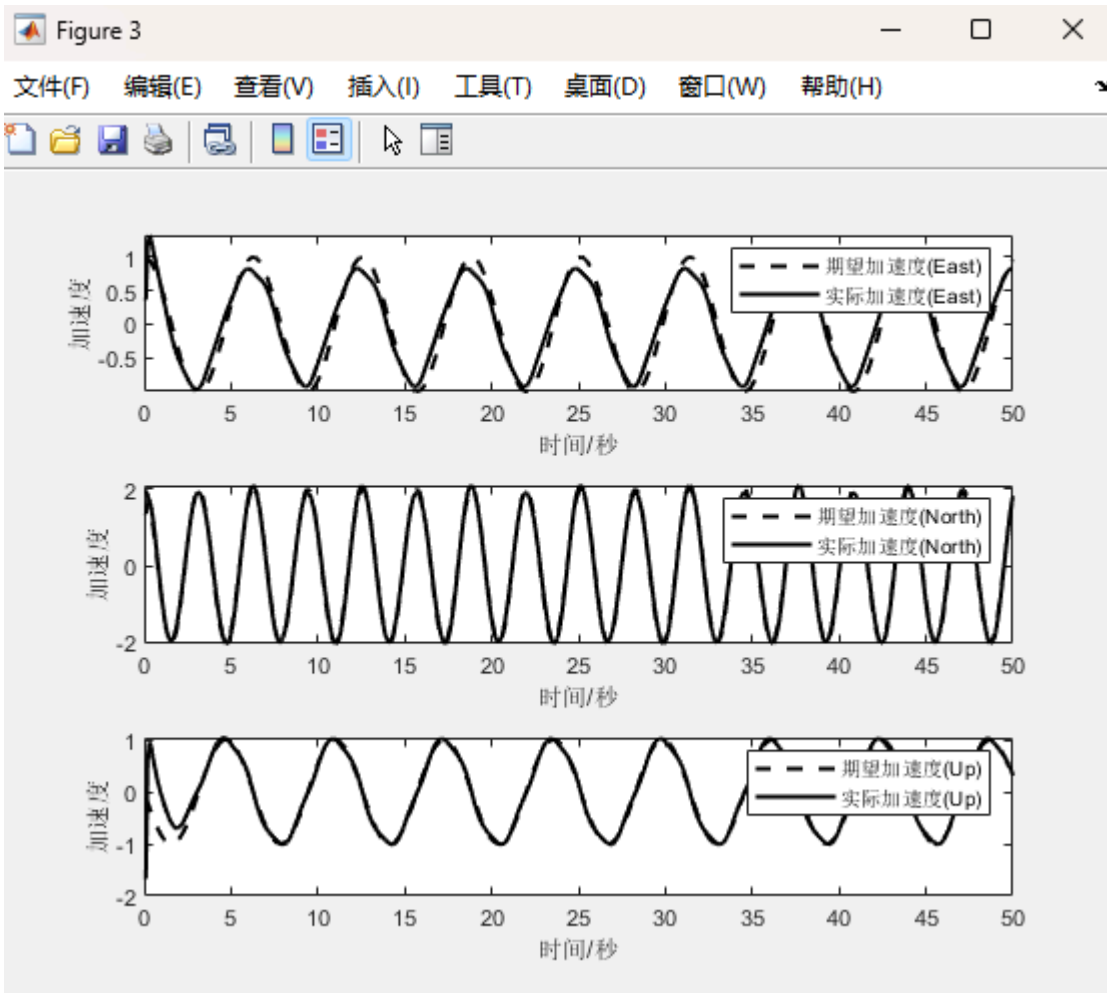


5.3 仿真运行

运行模型文件“SmallFixedWingUAVdf.slx”后，运行绘图文件“DF_plot.m”，绘制位置、速度和加速度跟踪仿真结果分别如图所示。







可以看出虽然在刚开始位置跟踪误差较大，但经过一段时间后，位置跟踪误差逐渐减小。速度和加速度的期望初值和当前机体状态初值存在误差，但随着时间增加，速度和加速度的跟踪效果同样逐渐加强，也即跟踪误差逐渐减小。

综上，完成了对轨迹的跟踪。可见由于加速度和速度的初值条件不完全相同，所以在仿真前段跟踪误差较大，后续逐渐收敛。在曲线的曲率变化较为急促的段，由于固定翼动态受限，可能会存在误差，因此合适的路径规划与轨迹优化对于固定翼的通行有意义。

6. 参考资料

1. RflySim官方文档：<https://rflysim.com/doc/zh/>
2. PX4飞控固件官方文档：<https://docs.px4.io/>
3. 飞思实验室官网：<http://www.feisilab.com/>
4. 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.

7.常见问题

Q1: 仿真过程中出现NaN或Inf值怎么办?

A1: 这通常是因为除零错误或数值不稳定导致的。检查控制算法中是否有除法运算，确保分母不为零。在代码中添加对NaN和Inf的检测和处理逻辑。

Q2: 轨迹跟踪误差较大怎么办?

A2: 可以尝试调整控制器参数 k_1 , k_2 , k_3 ，这些参数需要满足Hurwitz条件。同时检查期望轨迹是否过于剧烈，超出了无人机的动态能力范围。