本章目录

外部控制例程与实验验证

第六章 外部控制与轨迹规划

6.1 外部控制基础与控制分层
6.2 外部控制原理与控制模式
6.3 轨迹规划建模与生成
6.4 轨迹规划算法与避障
6.5 轨迹跟踪原理与高机动控制
6.6 前沿技术与控制方法
6.7 平台框架与通信接口
6.8 外部控制例程与实验验证
6.9 习题与课堂讨论

本节 5 个教学单元

6.8.1 遥控与任务模式实验
教材对应：第6.1.2.1–6.1.2.2、6.3.1节

6.8.2 轨迹运行与结果验证
教材对应：第6.2.2.5、6.3.1节

6.8.3 学习与视觉控制实验
教材对应：第6.1.4.2、6.3.1节

6.8.4 大模型控制实验
教材对应：第6.1.4.3、6.3.1节

6.8.5 高阶应用与真机迁移
教材对应：第6.3.2、6.2.2.6节

6.8.1 遥控与任务模式实验：仿真例程运行

按启动、运行、观察、结束四步完成例程

启动：以管理员方式运行 PX4RcCtrlAPITest.bat；它打开 QGC 与 RflySim3D，并先结束已运行的 CopterSim 再重新启动。

运行：CopterSim 日志栏出现 GPS 3D fixed & EKF initialization finished 后，双击 Python38Run.bat，输入 python PX4RcCtrlAPITest.py。

观察：RflySim3D 中飞机解锁后持续上升约 60 s；
判据是通道值、实际模式与高度变化一致。

结束：60 s 后程序停发遥控覆盖，随即调用 stopRun，空中强制上锁，仅限仿真，语义见课件6.7「结束与异常处理」页；
在软件在环（SITL）窗口按任意键，bat 关闭 CopterSim、QGC 与 RflySim3D。

常见失败：无法解锁时查 CopterSim 初始化与 QGC 地理围栏；
通信中断时查端口是否被其他程序占用。

6.8.1 遥控与任务模式实验：航线规划例程

在 QGC 中画航线、上传并执行

[安装目录]/RflySimAPIs/2.RflySimUsage/1.BasicExps/e16_RoutePlanning/：Readme.pdf（硬件在环 HITL，需 Pixhawk 6C 与遥控器）

准备：上传编译好的固件，机架选 HIL Quadcopter X，启用 HITL。

启动：运行 HITLRun，输入飞控串口号，等 CopterSim 显示初始化完成。

规划：Plan 中依次设起飞（如 50 m）、航点和返航，再点“上传任务”。

预期：Fly 界面滑动解锁后起飞，沿所画航线飞行，最后返航降落。

判据：实际模式为 Mission，航迹与所画航线一致；落地后确认已上锁。

常见失败：上传后不执行，核对起飞点、航点与 Mission 模式。

副作用：飞控被刷入固件并设为 HITL；实飞前关闭 HITL 并核对机架。

本章目录

外部控制例程与实验验证

第六章 外部控制与轨迹规划

6.1 外部控制基础与控制分层
6.2 外部控制原理与控制模式
6.3 轨迹规划建模与生成
6.4 轨迹规划算法与避障
6.5 轨迹跟踪原理与高机动控制
6.6 前沿技术与控制方法
6.7 平台框架与通信接口
6.8 外部控制例程与实验验证
6.9 习题与课堂讨论

本节 5 个教学单元

6.8.1 遥控与任务模式实验
教材对应：第6.1.2.1–6.1.2.2、6.3.1节

6.8.2 轨迹运行与结果验证
教材对应：第6.2.2.5、6.3.1节

6.8.3 学习与视觉控制实验
教材对应：第6.1.4.2、6.3.1节

6.8.4 大模型控制实验
教材对应：第6.1.4.3、6.3.1节

6.8.5 高阶应用与真机迁移
教材对应：第6.3.2、6.2.2.6节

6.8.2 轨迹运行与结果验证：例程运行与判据

直线例程两步启动，完成打印不等于实际到达

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/6.RflySimExtCtrl/2.AdvExps/e4.TrajPlanExps/1.LineTrajMotion/

入口：Readme.pdf（步骤与常见问题）、SITLRun.bat、Python38Run.bat、LineWPCtrl.py

启动：双击SITLRun.bat（会提权，并结束已有CopterSim），待CopterSim日志出现“GPS 3D fixed & EKF initialization finished”。

运行：在Python38Run.bat窗口输入python LineWPCtrl.py；其中initOffboard()会自动解锁（arm）并修改失联参数，见课件6.7「SDK副作用」页。

现象：约3.3 s后打印“轨迹完成！”，再等3 s调用endOffboard；D、T可看状态与轨迹。打印只表明参考循环结束；到达另查新鲜位置误差与保持时间（课件6.7）。

常见失败：无反应时，查CopterSim初始化日志及QGC地面站是否为OFFBOARD模式；偏离预设轨迹时，重启仿真并待EKF收敛后再运行。

结束：endOffboard只停止发送，终态判断见课件6.7「结束与异常处理」页；实验后在SITLRun窗口按任意键，会关闭CopterSim、QGC与RflySim3D。

6.8.2 轨迹运行与结果验证：Basic e9入口

轨迹跟踪基础实验比较两类模型的响应

[安装目录]/RflySimAPIs/6.RflySimExtCtrl/
1.BasicExps/e9_TrajectoireFollowing_Segment/e3.1/

入口	操作与输出
Readme.pdf **startSimulation.m**	阅读依赖；分别进入sim1.0、sim2.0并初始化。
sim1.0/（TF） **传递函数模型**	打开e3_1_TF_TrajectoireFollowing_Segment.slx。
sim2.0/（Model） **非线性机理模型**	打开e3_1_Model_TrajectoireFollowing_Segment.slx。

运行：Control Input接T=10 s圆轨迹后运行；记录处理见保存与比较页。
快速复现：在sim2.0直接运行Plot_Compare_cercle.m，见课件6.1「例程运行」页。

6.8 外部控制例程与实验验证

6.8.2 轨迹运行与结果验证：保存与比较

两种模型的记录换入同一目录后同图对照

1 备份旧MAT → 2 各自运行 Save_Cercle.m → 3 新TF MAT 复制到sim2.0 → 4 运行 Plot_Compare_cercle.m

文件： sim1.0保存TF记录N4_Step1_cercle_comparaison_T10tf.mat；sim2.0的绘图脚本只读本目录的两份MAT。

预期： 两条XY响应形状接近；历史记录中Model、TF幅值均大于参考，见同刻误差结果页、时序对照页。

常见失败： 漏做第3步会误用安装包自带的旧TF MAT；说明文件中带_2017b的模型名已不存在，改开Basic e9入口页列出的.slx文件。

6.8.2 轨迹运行与结果验证：评价指标

跟踪误差先配对同一时刻的参考与反馈

$$\mathbf{e}_k = \mathbf{p}_{d,k} - \mathbf{p}_k, \quad E_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \|\mathbf{e}_k\|^2}, \quad E_{\max} = \max_k \|\mathbf{e}_k\|$$

同刻配对：先对齐时钟与采样时刻，再插值参考；不能平移曲线美化误差。
N为统计样本数；$E_{\mathrm{RMS}}, E_{\max}$为均方根、峰值误差，单位均为m。

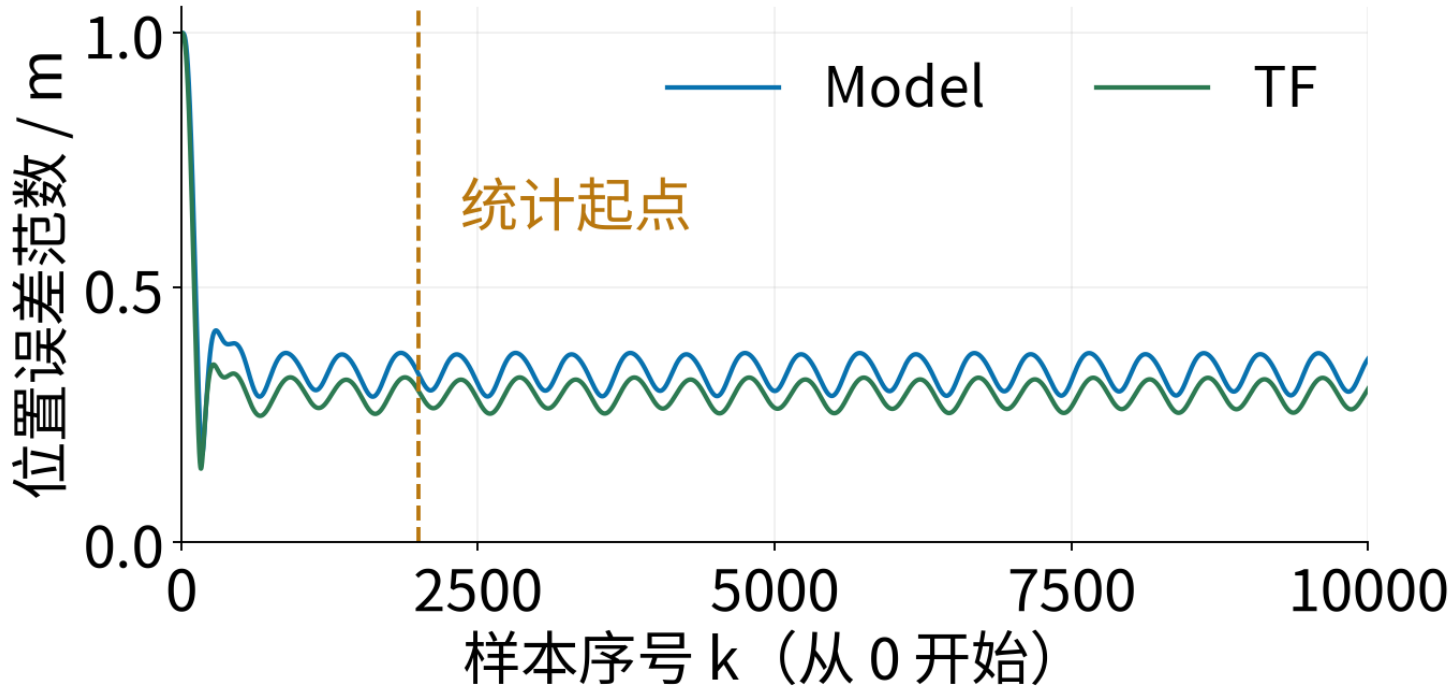
历史MAT：每份10001行，包含参考X/Y和输出X/Y；两份参考数组相同。

适用边界：无时间向量，按相同行号同采样假设配对，只统计二维位置误差。

新增记录：保存位置样本时间、参考时间、实际指令与模式，保留启动和结束段。

6.8.2 轨迹运行与结果验证：同刻误差结果

历史记录稳态误差约0.3 m，Model大于TF



序号2000–10000

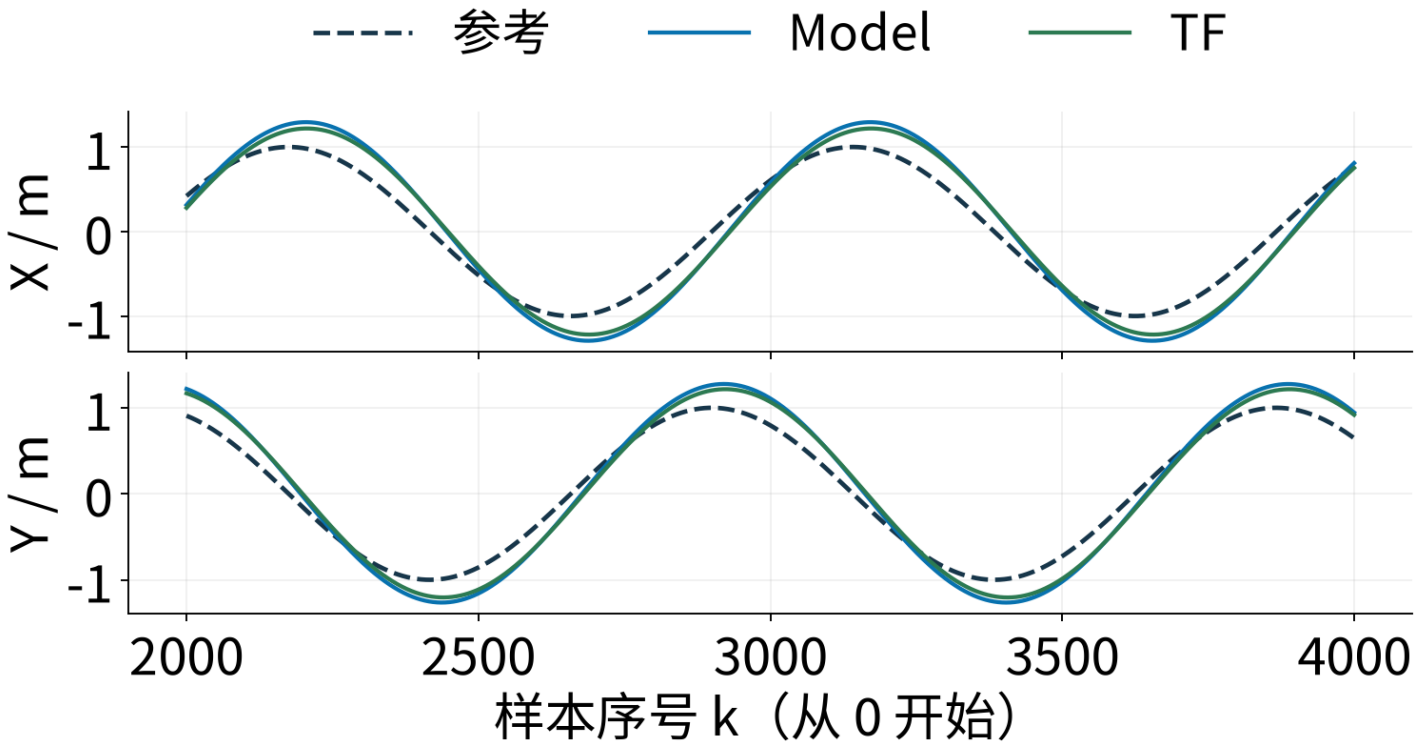
Model
均方根0.334 m
峰值0.371 m

TF
均方根0.290 m
峰值0.323 m

初始1 m误差来自输出从原点起步；按同一行代表同一时刻配对统计。

6.8.2 轨迹运行与结果验证：时序对照

幅值偏大和相位滞后可以同时出现



幅值： Model和TF都大于参考。

相位： 峰值晚到；两个轴滞后不同。

评价： 更小的位置误差并不必然表示更小延迟。

6.8.2 轨迹运行与结果验证：延迟估计边界

相位滞后可复算，秒数需要采样依据

记录 / 轴	幅值比	等效滞后 / 样本	按0.01 s换算
Model X	1.291	28.94	0.289 s
Model Y	1.269	20.04	0.200 s
TF X	1.219	31.05	0.311 s
TF Y	1.211	23.07	0.231 s

2000–10000号最小二乘：$s_k = A\sin(\Omega k) + B\cos(\Omega k) + C$

$\phi = atan2(B, A)$，　$n_{\text{lag}} = (\phi_{\text{ref}} - \phi_{\text{out}})/\Omega$；$\Omega = 0.0065$ rad/样本。

若采样0.01 s，滞后秒数$\tau = n_{\text{lag}} \times 0.01\,\text{s}$；周期9.666 s（966.64样本）。

A、B、C为拟合系数；相位滞后含闭环动态，不只是链路时延。

6.8.2 轨迹运行与结果验证：仿真操作步骤

Python例程先完成源码修正再进入仿真

[安装目录]/RflySimAPIs/6.RflySimExtCtrl/2.AdvExps/e4.TrajPlanExps/
3.CirularTrajMotion/ 或 4.SpiralTrajMotion/ （Readme.pdf、两个bat与UAVCtrl.py同目录）

1 准备副本：在UAVCtrl.py副本中统一相位导数（符号见课件6.5「圆形轨迹」），补记录、减速与起点判断。

2 初始化：双击同目录SITLRun.bat（提权、结束已有CopterSim、构建固件），等CopterSim日志出现GPS 3D fixed & EKF initialization finished。

3 运行：在同目录Python38Run.bat窗口输入python UAVCtrl.py。

4 结束：程序减速后调用endOffboard()退出；着陆与上锁（disarm）另行确认。

副作用：initOffboard()解锁（arm）、改失效保护参数，见课件6.7「SDK副作用」页。

6.8.2 轨迹运行与结果验证：预期与排查

运行结果按轨迹形状、日志和同刻误差判断

预期（圆）：解锁升至10 m，到起点(6,0,−10)后绕半径6 m的圆飞行约30 s。

预期（螺旋）：从(5,0,−10)起以半径5 m、0.6 rad/s螺旋上升40 s，Z由−10 m到−25 m。

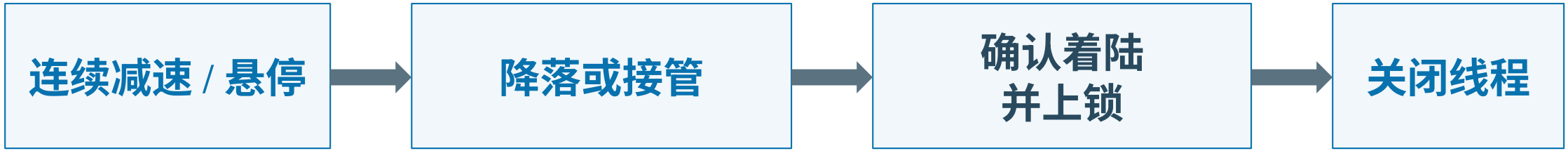
观察：在RflySim3D窗口依次按D、T，显示状态量与飞行轨迹。

判据：修正后反馈接近参考；按同刻配对统计均方根与峰值误差（见评价指标页）。

排查：无初始化日志→首次启动须联网下载地图，仍无则查日志与拦截记录，按说明放行可信组件；连不上→确认仿真已启动、查防火墙；轨迹异常→核对半径、角速度、高度与30 Hz循环。

6.8.2 轨迹运行与结果验证：结束与异常

结束过程以着陆和上锁（disarm）作为终态证据



正常结束： 参考平滑过渡到悬停，再执行已验证的降落或接管。

本例判据： 调用endOffboard()后仍须确认着陆与上锁。

清理前提： 已着陆并上锁，或未解锁的离线实验；之后才调用stopRun()。

异常： 进入预先验证的退出或接管策略；两个函数的完整语义见课件6.7「结束与异常处理」页。

6.8.2 轨迹运行与结果验证：记录与判据

位置消息时间和接收时间分别记录

飞控时钟

time_boot_ms：消息内位置时间戳，与位置、速度一并保存

主机时钟

接收单调时间：到达间隔、丢帧与调度；不直接等同飞控时钟

参考时钟

参考时刻：PVA、限幅前后值与发送时间，约30 Hz更新

终态与异常：记录模式、着陆和上锁状态，以及超时与回退事件。

验收：均方根与峰值误差、限幅比例、消息间隔和终态一起看，阈值按任务给定。
uavTimeStmp由ATTITUDE更新，只表示收到姿态；uavMsg只保存最新一条。

本章目录

外部控制例程与实验验证

第六章 外部控制与轨迹规划

6.1 外部控制基础与控制分层
6.2 外部控制原理与控制模式
6.3 轨迹规划建模与生成
6.4 轨迹规划算法与避障
6.5 轨迹跟踪原理与高机动控制
6.6 前沿技术与控制方法
6.7 平台框架与通信接口
6.8 外部控制例程与实验验证
6.9 习题与课堂讨论

本节 5 个教学单元

6.8.1 遥控与任务模式实验
教材对应：第6.1.2.1–6.1.2.2、6.3.1节

6.8.2 轨迹运行与结果验证
教材对应：第6.2.2.5、6.3.1节

6.8.3 学习与视觉控制实验
教材对应：第6.1.4.2、6.3.1节

6.8.4 大模型控制实验
教材对应：第6.1.4.3、6.3.1节

6.8.5 高阶应用与真机迁移
教材对应：第6.3.2、6.2.2.6节

6.8.3 学习与视觉控制实验：例程步骤

例程一：单轴 RL 选学，先读模型再看跟踪

[安装目录]/RflySimAPIs/6.RflySimExtCtrl/
2.AdvExps/e5.RLExps/1.Simulink/Readme.pdf

准备： MATLAB R2022b 及以上；Simulink、强化学习与深度学习相关工具箱。

权重： 初始化时自动载入同目录 UAVDPPG.mat；选做训练用 train/rluav_init.m。

启动： 运行 RflyUdpMavlinkRealSim.bat，等待 CopterSim 日志出现 GPS 3D fixed & EKF initialization finished，再运行 rlhighDynamicAcc.slx。

操作： 旋钮依次 Offboard → Arm → Takeoff → Flying，期望 X 滑杆拖到约 1 m。

预期： QGC 保持 Flying；RflySim3D 中飞机沿 X 较平滑地到达期望位置。

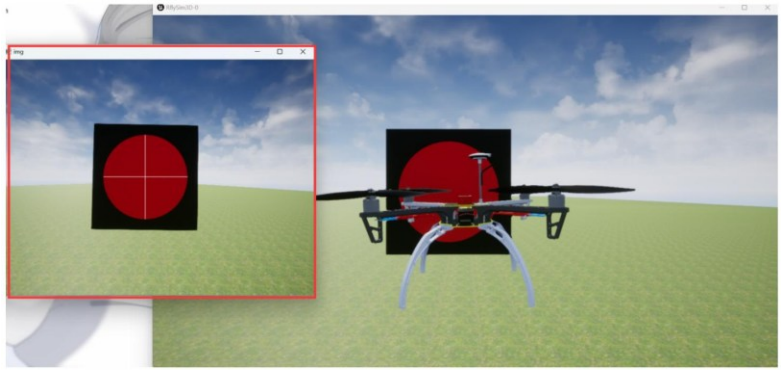
结束： 滑杆回中 → Land → 着陆后 Disarm（上锁）→ 停模型 → 退出仿真。

排查： 未起飞先查 GPS 就绪；缓存报错删 slprj；看不到飞机用滚轮调视角。

6.8.3 学习与视觉控制实验：HSV 跟随例程步骤

圆形案板跟随：先启动仿真，再运行脚本

[安装目录]/RflySimAPIs/6.RflySimExtCtrl/2.AdvExps/e6.IsaacSimExps/
RL_attctrl/：circle_follow.bat、Python38Run.bat、circle_follow.py



图：跟随场景（Readme 截图）

启动：运行 circle_follow.bat，等仿真初始化完成。

运行：在 Python38Run.bat 窗口执行 python circle_follow.py；脚本调用 initOffboard 并解锁，副作用见课件6.7「SDK副作用」页。

预期：方向键与 Ctrl+↑/↓ 移动案板，飞机随之跟随。

结束：bat 窗口按回车，关闭 CopterSim、QGC、RflySim3D，并强制结束本机全部 python.exe 与 cmd.exe；先保存其他 Python 工作。

排查：无图像先查 Config.json 中 SendProtocol 为 0（共享内存，仅 Windows）。

本章目录

外部控制例程与实验验证

第六章 外部控制与轨迹规划

6.1 外部控制基础与控制分层
6.2 外部控制原理与控制模式
6.3 轨迹规划建模与生成
6.4 轨迹规划算法与避障
6.5 轨迹跟踪原理与高机动控制
6.6 前沿技术与控制方法
6.7 平台框架与通信接口
6.8 外部控制例程与实验验证
6.9 习题与课堂讨论

本节 5 个教学单元

6.8.1 遥控与任务模式实验
教材对应：第6.1.2.1–6.1.2.2、6.3.1节

6.8.2 轨迹运行与结果验证
教材对应：第6.2.2.5、6.3.1节

6.8.3 学习与视觉控制实验
教材对应：第6.1.4.2、6.3.1节

6.8.4 大模型控制实验
教材对应：第6.1.4.3、6.3.1节

6.8.5 高阶应用与真机迁移
教材对应：第6.3.2、6.2.2.6节

6.8.4 大模型控制实验：实际例程

四个安装版入口对应四种产物

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/6.RflySimExtCtrl/
0.ApiExps/e20.LLMUsage/（各目录含 Readme.pdf）

目录与入口	实际产物	首先验证
1.CloudAPIinvocation **LLMDSApiTest.py**	模型的文本响应	服务配置与响应格式
2.LLMGenUAVCtrlCode **UAVCtrl.py**	控制程序	接口、坐标、单位 与退出分支
3.LLMDiretCtrlUAV **llmCtrluav.py**	解析列表后 调用位置接口	参数检查、结果与终态
4.LocalLLMUAVCtrl **smoothAvoid_LLM_sim.slx**	本地解析指令＋ 云端推理航路	WSL2-GPU 增量包 （约 50 GB）与 API 密钥

6.8.4 大模型控制实验：直控例程步骤

语言直控例程：先启动仿真，再运行界面

[安装目录]/RflySimAPIs/6.RflySimExtCtrl/0.ApiExps/e20.LLMUsage/3.LLMDiretCtrlUAV/：SITLRun.bat、Python38Run.bat、llmCtrluav.py

准备：在 文档/Ogre/.env 填入 DeepSeek 的密钥、接入点与模型名（格式见 1.CloudAPIinvocation）。

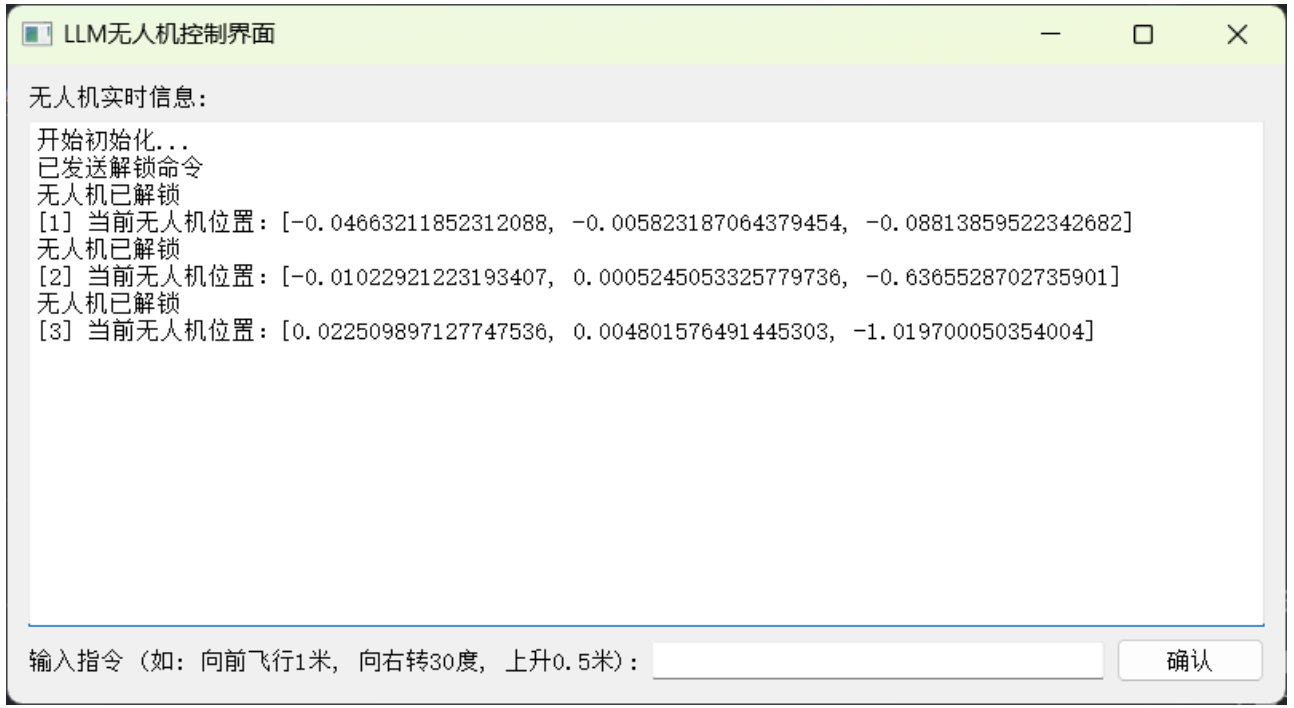
启动：运行 SITLRun.bat，打开 QGC、CopterSim、RflySim3D；等日志出现 GPS 3D fixed & EKF initialization finished。

运行：在 Python38Run.bat 窗口执行 python llmCtrluav.py；界面初始化后飞机自动升到 1.7 m 悬停，等待指令（initOffboard 副作用见课件6.7「SDK副作用」页）。

结束：关闭界面会依次调用 endOffboard 与 stopRun，飞行中关闭即强制上锁；软件在环（SITL）窗口按任意键后结束三个软件。

6.8.4 大模型控制实验：直控例程现象

界面回显解析结果，遥测判断是否完成



图：直控界面输出（Readme 截图）

预期：输入“向前飞行10米”等指令，界面打印解析结果、位置与执行状态。

判据：以位置与遥测为准；回复文本不算完成。

排查：不起飞先查初始化日志与 API Key；指令不执行查 .env 中的模型配置。

6.8.4 大模型控制实验：其余例程

其余三个例程的运行、现象与排查

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/6.RflySimExtCtrl/
0.ApiExps/e20.LLMUsage/（各目录含 Readme.pdf）

目录与入口	运行与预期	常见问题
1.CloudAPIinvocation LLMDSApiTest.py	Python38Run.bat 中运行脚本； 终端打印模型回复	认证错误：查 .env 密钥、额度与模型名
2.LLMGenUAVCtrlCode UAVCtrlSILRun.bat	模板＋提示词生成代码， 仿真中起飞后画圆	不响应：查 EKF 日志； 画圆错：查 NED 与弧度
4.LocalLLMUAVCtrl smoothAvoid_LLM_sim.slx ServerFile/WinWSL2.bat	输入“所有飞机起飞”， 六机起飞后测两种模式	需 WSL2-GPU 与密钥； 无 Ack 查 UDP 端口

运行顺序：先启动仿真或模型，再运行 Python 程序；逐步截图见各目录 Readme.pdf。

6.8.4 大模型控制实验：结束与清理

控制结束与资源清理有明确先后

副作用：见课件6.7「SDK副作用」页；initOffboard 会改失效保护参数并自动解锁。

结束顺序：见课件6.7「结束与异常处理」页；endOffboard 只停目标流，不降落。

本场景判据：工具成功只说明到达；结束以新鲜状态的“已着陆、已上锁”为准。

异常分支：stopRun 在已解锁时强制上锁，关闭窗口或异常处理不能无条件调用它。

请求着陆 → 确认着陆 → 确认上锁 → 资源清理

本章目录

外部控制例程与实验验证

第六章 外部控制与轨迹规划

6.1 外部控制基础与控制分层
6.2 外部控制原理与控制模式
6.3 轨迹规划建模与生成
6.4 轨迹规划算法与避障
6.5 轨迹跟踪原理与高机动控制
6.6 前沿技术与控制方法
6.7 平台框架与通信接口
6.8 外部控制例程与实验验证
6.9 习题与课堂讨论

本节 5 个教学单元

6.8.1 遥控与任务模式实验
教材对应：第6.1.2.1–6.1.2.2、6.3.1节

6.8.2 轨迹运行与结果验证
教材对应：第6.2.2.5、6.3.1节

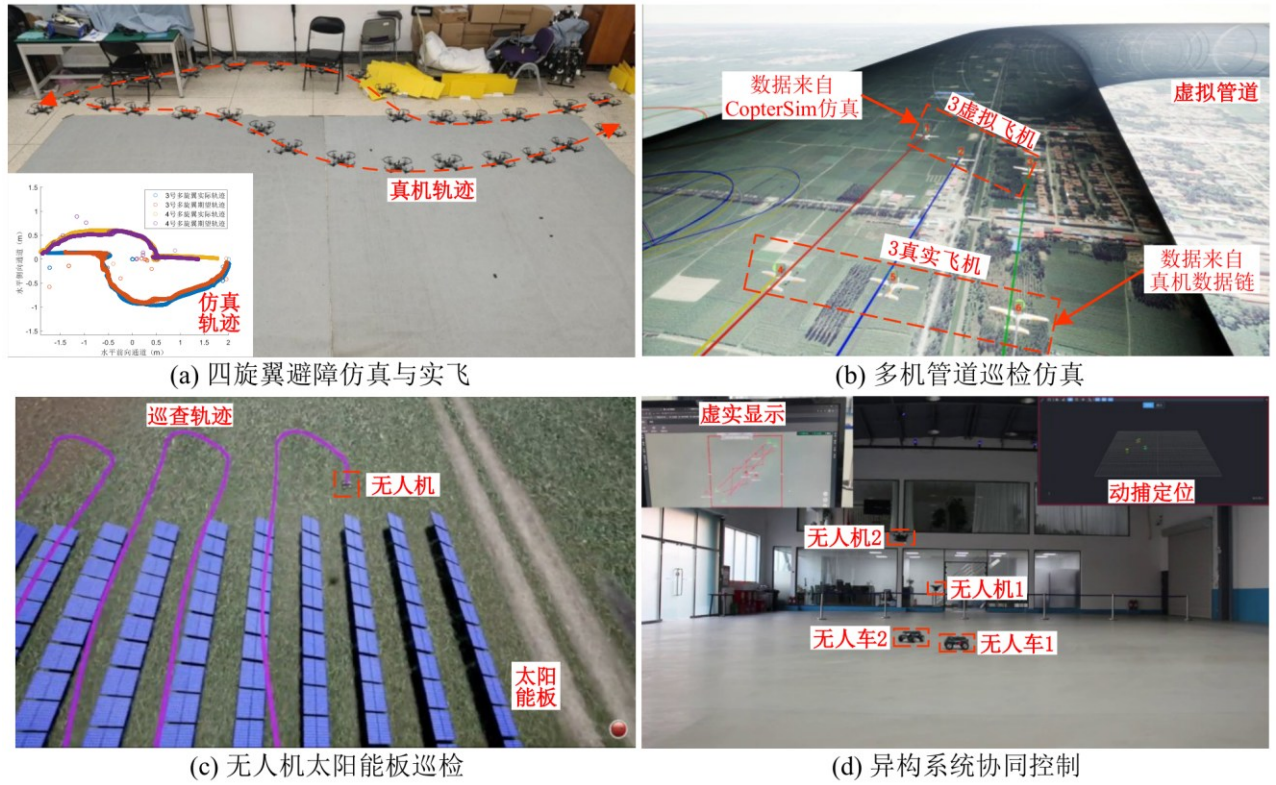
6.8.3 学习与视觉控制实验
教材对应：第6.1.4.2、6.3.1节

6.8.4 大模型控制实验
教材对应：第6.1.4.3、6.3.1节

6.8.5 高阶应用与真机迁移
教材对应：第6.3.2、6.2.2.6节

6.8.5 高阶应用与真机迁移：高阶案例总览

高阶案例把感知、规划与控制组合起来



(a) 四旋翼避障仿真与实飞　(b) 多机管道巡检仿真

(c) 无人机太阳能板巡检　(d) 异构系统协同控制

图6.12 高阶案例展示

避障： 重规划与跟踪响应。

多机： 时空分离、任务协调。

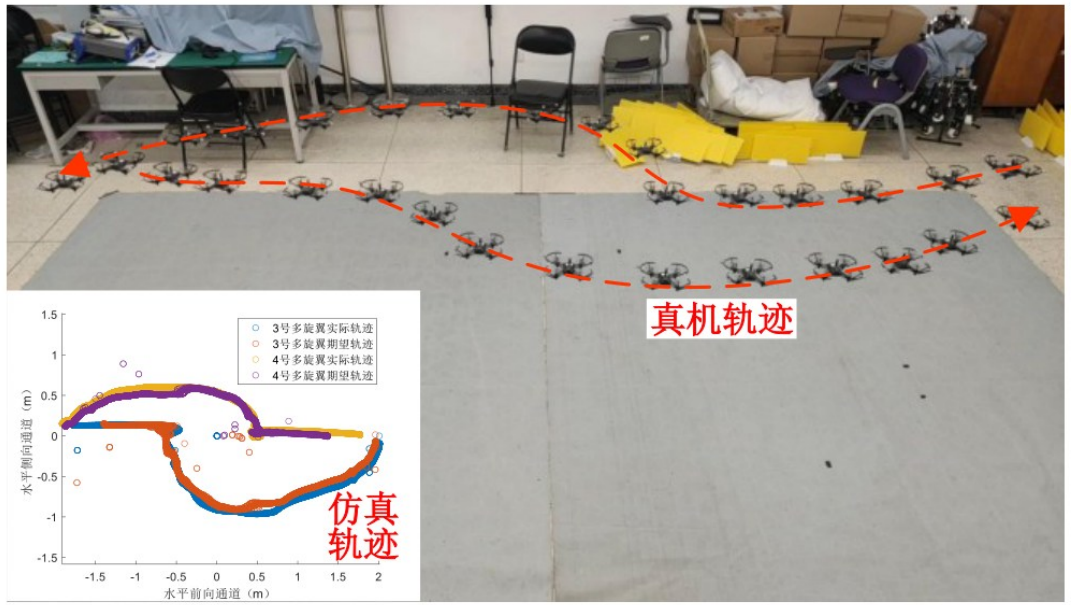
巡检： 区域识别、覆盖轨迹。

空地协同： 共享坐标与状态。

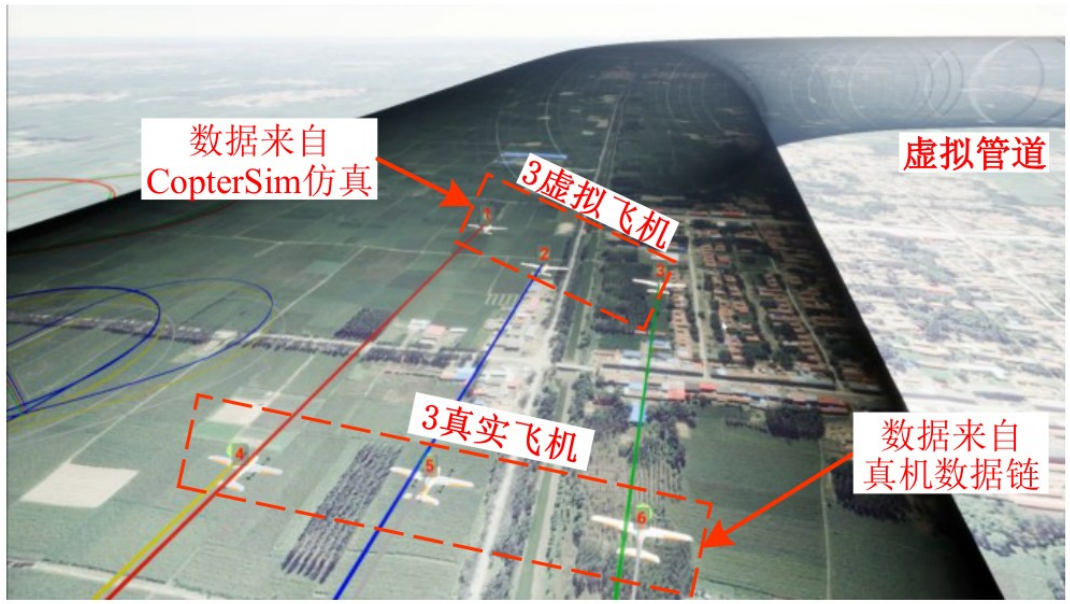
回到教材第6.3.2节：这些平台案例不限定某种学习方法，用来检验前面各单元的闭环、接口与证据要求。

6.8.5 高阶应用与真机迁移：案例局部一

避障与多机巡检关注不同约束



(a) 四旋翼避障仿真与实飞



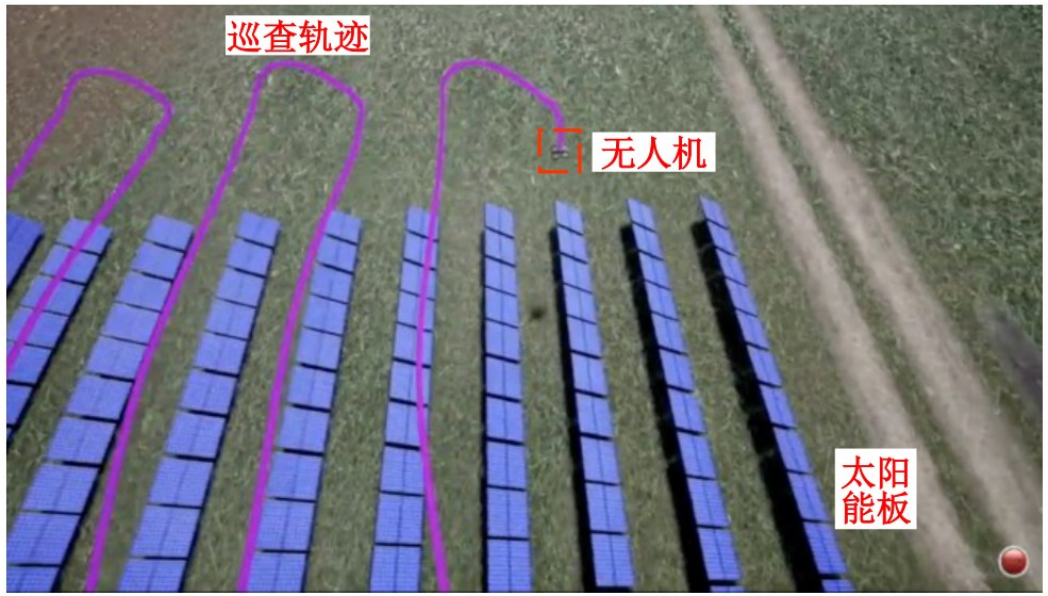
(b) 多机管道巡检仿真

图6.12(a) 避障：
检查障碍间距、轨迹重构与跟踪误差。

图6.12(b) 多机巡检：
检查时序、机间距与集中规划的反馈。

6.8.5 高阶应用与真机迁移：案例局部二

巡检与异构协同需要共同任务语义



(c) 无人机太阳能板巡检



(d) 异构系统协同控制

图6.12(c) 感知区域 → 覆盖轨迹；
记录遗漏、重叠和成像质量。

图6.12(d) 共享坐标与任务状态；
教材写激光建图定位，此图为动捕定位。

6.8.5 高阶应用与真机迁移：结果读图

轨迹局部图能支持什么结论

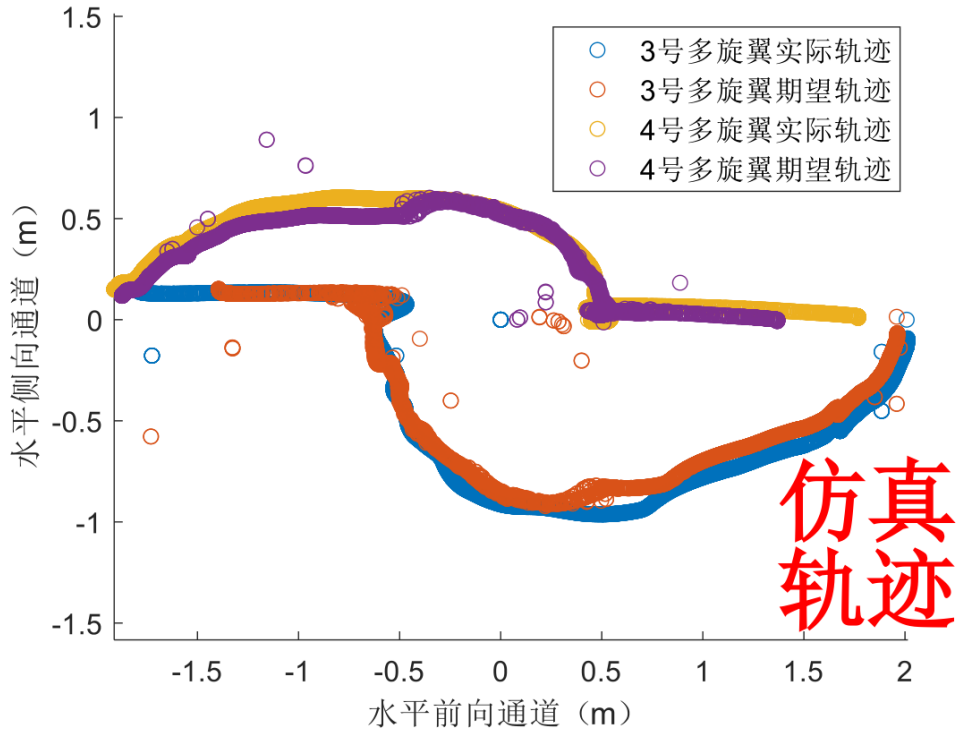


图6.12(a) 仿真轨迹局部放大

3号实际（蓝）　　3号期望（橙）

4号实际（黄）　　4号期望（紫）

可读：两架载具各有期望与实际轨迹；坐标单位为米。

缺少时间：几何曲线接近，不说明每个时刻都已按时到达。

完整评价：对齐参考与反馈时刻；再检查误差、约束与终态。

6.8.5 高阶应用与真机迁移：真机实验方法

模型部署到真机要重新验证时序与退出

逐级扩大验证范围：每一级沿用同一记录格式与误差统计。

数值计算
固定参考、控制律与限幅，保存误差基线。

模型在环
降阶模型换成六自由度模型，记录格式不变；核对Coder授权（代码生成许可）。

SITL／HITL
经MAVROS、CopterSim中转连接PX4，先软件在环再硬件在环；核对消息更新与时间同步。

真机
机载或地面部署；网络经MAVLink Router（消息转发）连接，串口设57600/115200等波特率；重标定拉力映射，验证接管、着陆与参数恢复。

多机时间同步与协同机制见第10章；单机验证先保留完整误差和退出记录。

课堂练习

用计算、源码和记录共同判断跟踪效果

问题	参考要点
半径3 m的圆要求速度5 m/s，倾角限幅35°时可行吗?	向心加速度8.33 m/s²，需倾角40.3°；超过35°，不可行；速度须≤4.54 m/s。
负方向圆例程怎样核对?程序退出能否证明已降落?	对位置逐项求导；原X速度多乘方向因子。endOffboard不降落，确认着陆和上锁。
半径5 m圆，幅值比A=1.2、滞后φ=0.1 rad，误差多大?哪项为主?	$\|e\|=R\sqrt{(1+A^2-2A\cos\varphi)}\approx 1.14$ m；仅幅值1.0 m，仅滞后0.5 m；幅值为主。

课堂练习

停车留量与读图结论

问题	参考要点
教学小车初速 2 m/s、减速度 1 m/s²，感知与执行总延迟 0.3 s，至少要留多少停车距离？	延迟行程 $2 \times 0.3 = 0.6$ m，制动 2 m；合计 2.6 m，再加定位误差余量。
图6.12(a) 期望与实际轨迹几何上接近，能否说明跟踪误差小？	还不能下结论：图中没有时间戳；需按同一时刻对齐参考与反馈再算误差。

本节小结

外部控制完成于闭环与终态，而非指令发送

参考一致：位置、速度、加速度由同一轨迹求导，统一坐标、时间和单位。

闭环有效：前馈提供已知运动需求，反馈修正剩余误差；保留执行余量。

接口适配：姿态与拉力相互耦合，归一化指令经标定；算法效果按条件比较。

结果可信：误差、幅值、相位与终态共同评价；参考打印和退出语句不能替代反馈。

易错点：方向因子重复相乘；负竖直速度表示上升；退出程序不等于着陆。

带时间的参考、可执行的控制和可核验的结果共同闭合任务。