



多旋翼飞行器设计与控制 系列实验

附录A: RflySim平台高级功能

戴训华 博士

自动化科学与电气工程学院

北京航空航天大学



大纲

1. RflySim平台理念与目标
2. 单机控制与测试解决方案
3. 集群控制与测试解决方案
4. 视觉/AI控制算法与测试解决方案
5. 总结

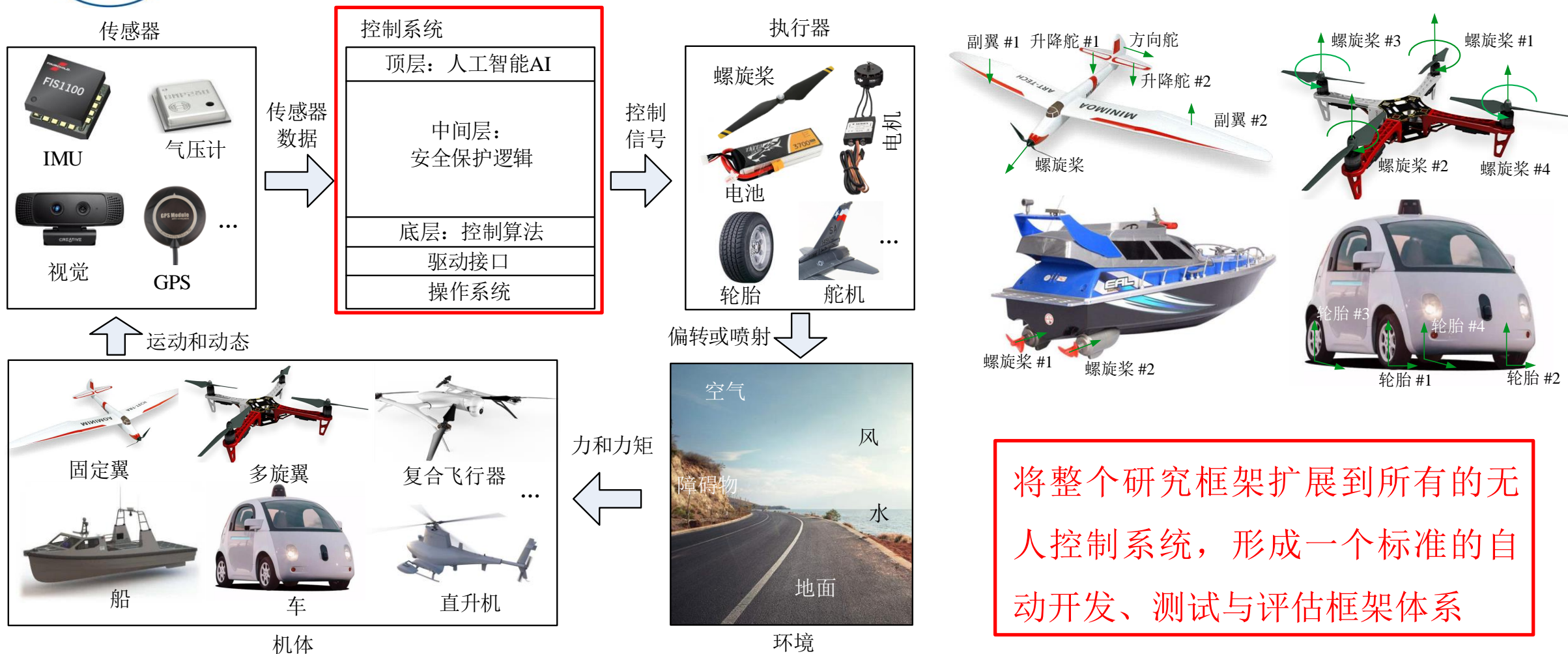


1.1 目标

RflySim: 高可信度的无人控制系统
统一开发、测试与评估平台



1.2 统一性





1.3 基于模型

实验测试方法

- 通常需要室外
- 飞行场地、测试人员、时间、金钱、空域许可...
- 大多数故障难以在少量的实验中出现
- 故障注入后，可能因传感器数据问题无法获取真值
- 需要等待系统开发完具备试飞能力才能进行
- 测试结果更加真实可信

仿真（硬件在环等）方法

- 室内进行
- 只需要电脑等设备，成本低，场地受限小...
- 可以仿真任何故障，并在期望的飞行环境中自动注入
- 所有状态、输入、输出均可以获取，可以随时获取真值
- 可以在实验开发阶段随时进行
- 结果可信度难以保证，通常仅用于开发和功能测试

关键问题：如何让人们（开发者、用户、授权认证机构）相信仿真结果具有同等或超过实验测试的可信度？



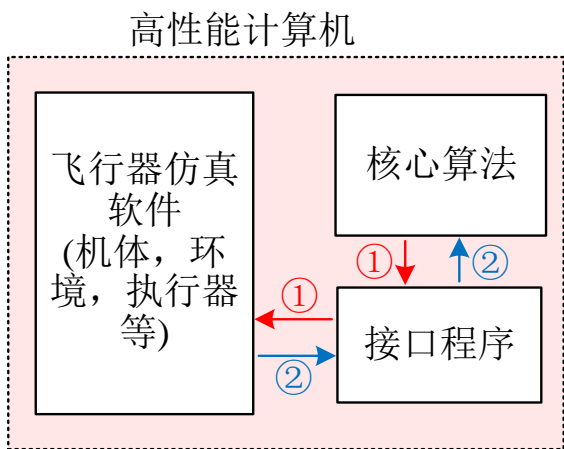
1.4 基于仿真

① 执行器控制输出

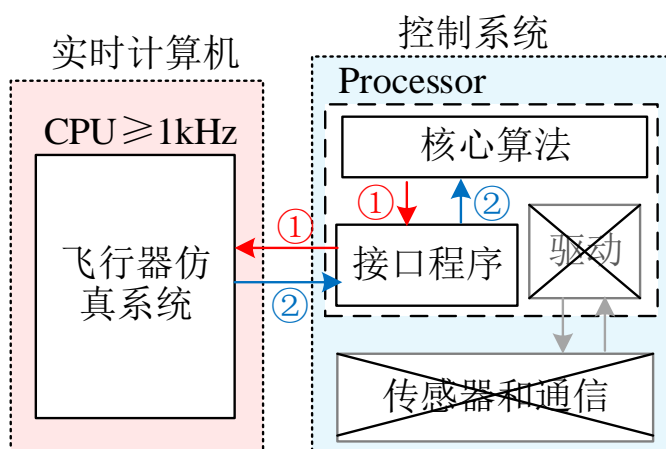
② 机体运动状态

③ 控制量传输电信号

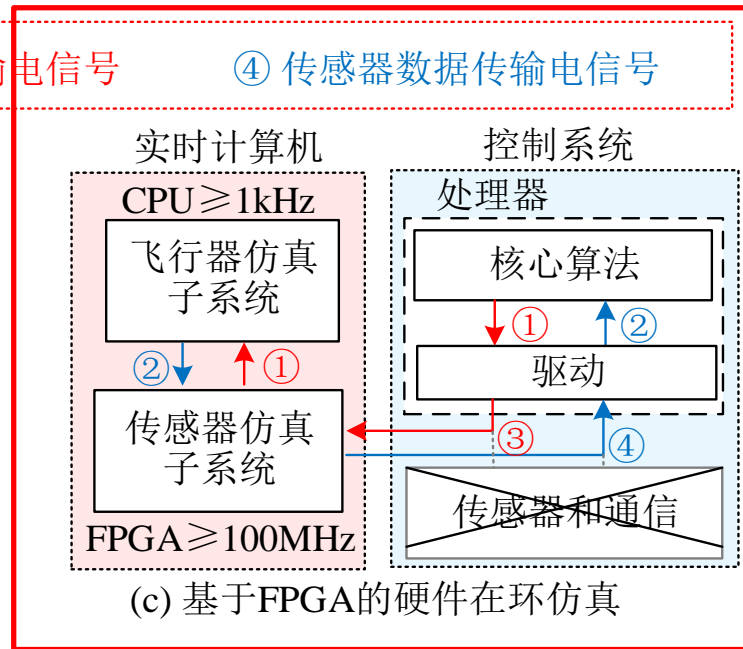
④ 传感器数据传输电信号



(a) 软件在环仿真



(b) 硬件在环仿真



(c) 基于FPGA的硬件在环仿真

Gazebo + ROS

- 三维不够逼真
- 侧重软件在环，结果不够可靠，难以真机

- 微软2018年发布 Airsim (基于 Unreal Engine 4引擎)
- 谷歌2019年发布FlightGoggles (基于Unreal Engine 4引擎)
- RflySim教育版平台

- RflySim商业版平台
- 即插即用，更换传感器芯片模型即可，不需要接触源代码，全自动的黑盒测试。
- 室外实验后，直接室内仿真复现
- 可信度高、可标准化、全面性好

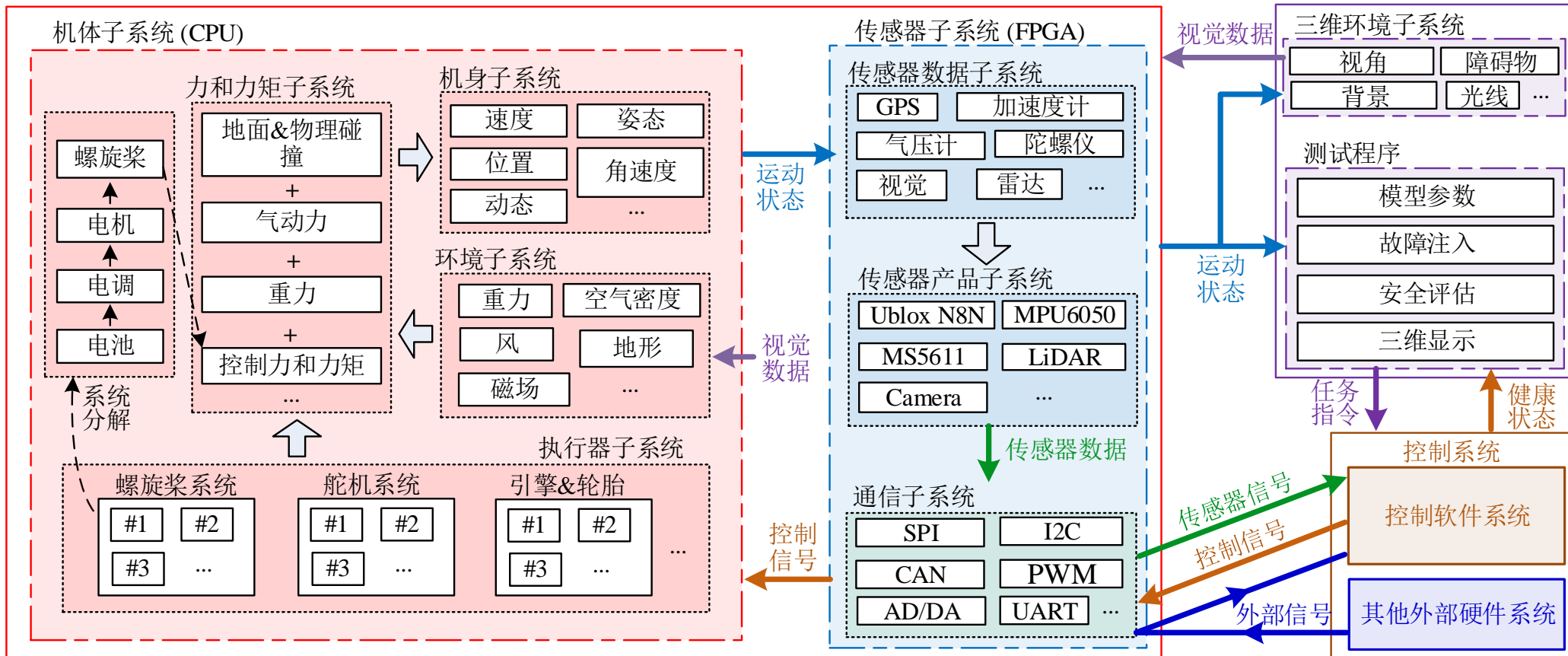
从运动动态仿真 → 传感器数据仿真 → 传感器芯片仿真

从单纯的算法软件测试 → 整个系统的软硬件测试



1.5 标准化

实时仿真计算机

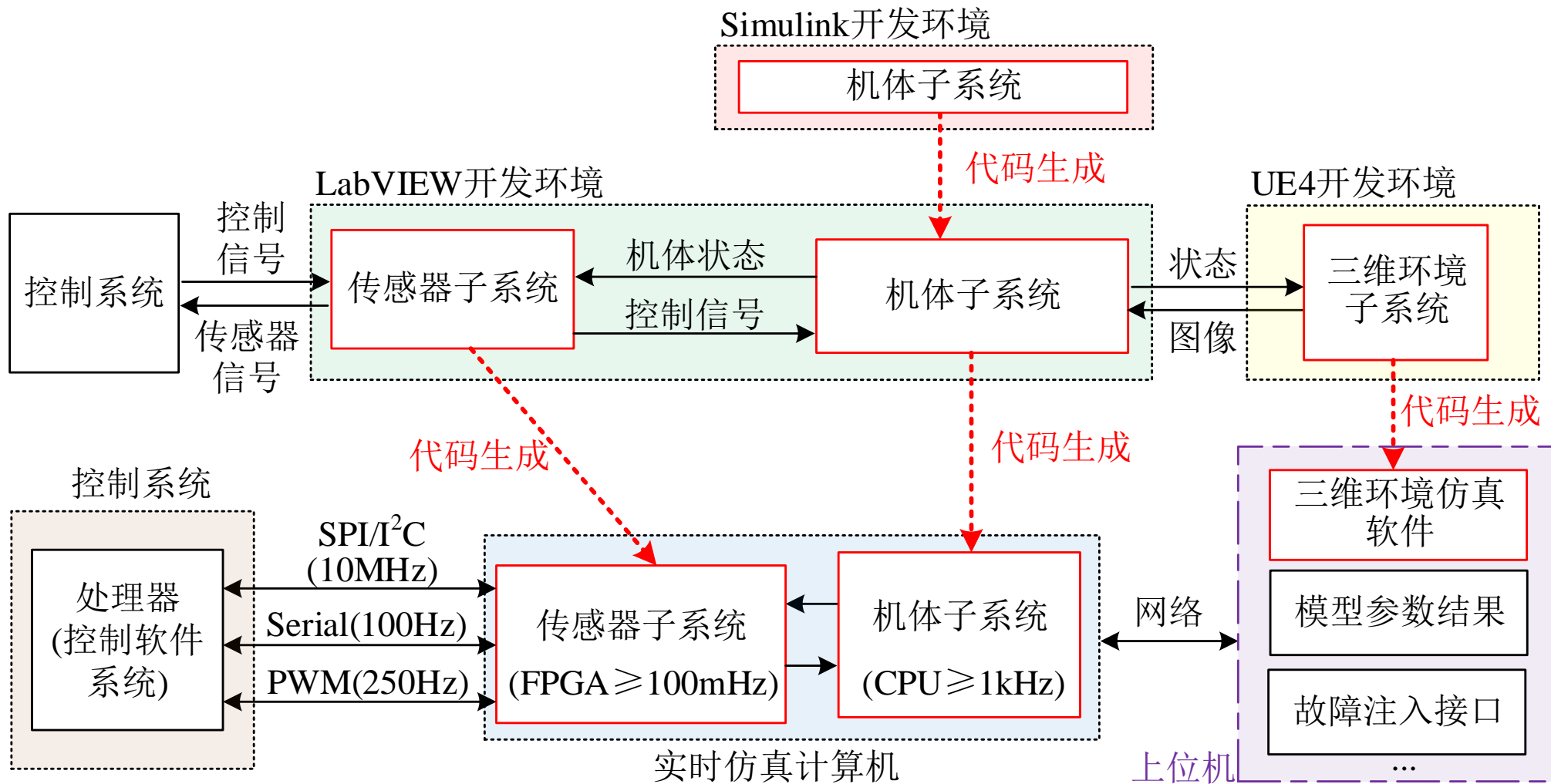


利用标准化的建模框架，实现机体、运动、故障模型的搭建，最后在Simulink等图形模块化仿真编程软件中实现



1.6 自动化

模块化编程+全自动代码生成

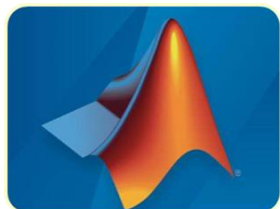




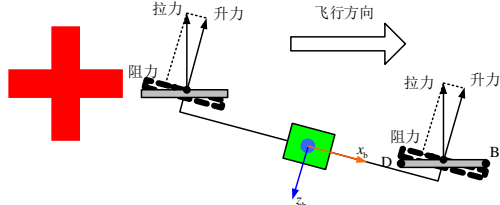
1.7 可信性



可信硬件平台



可信软件平台



可信仿真模型

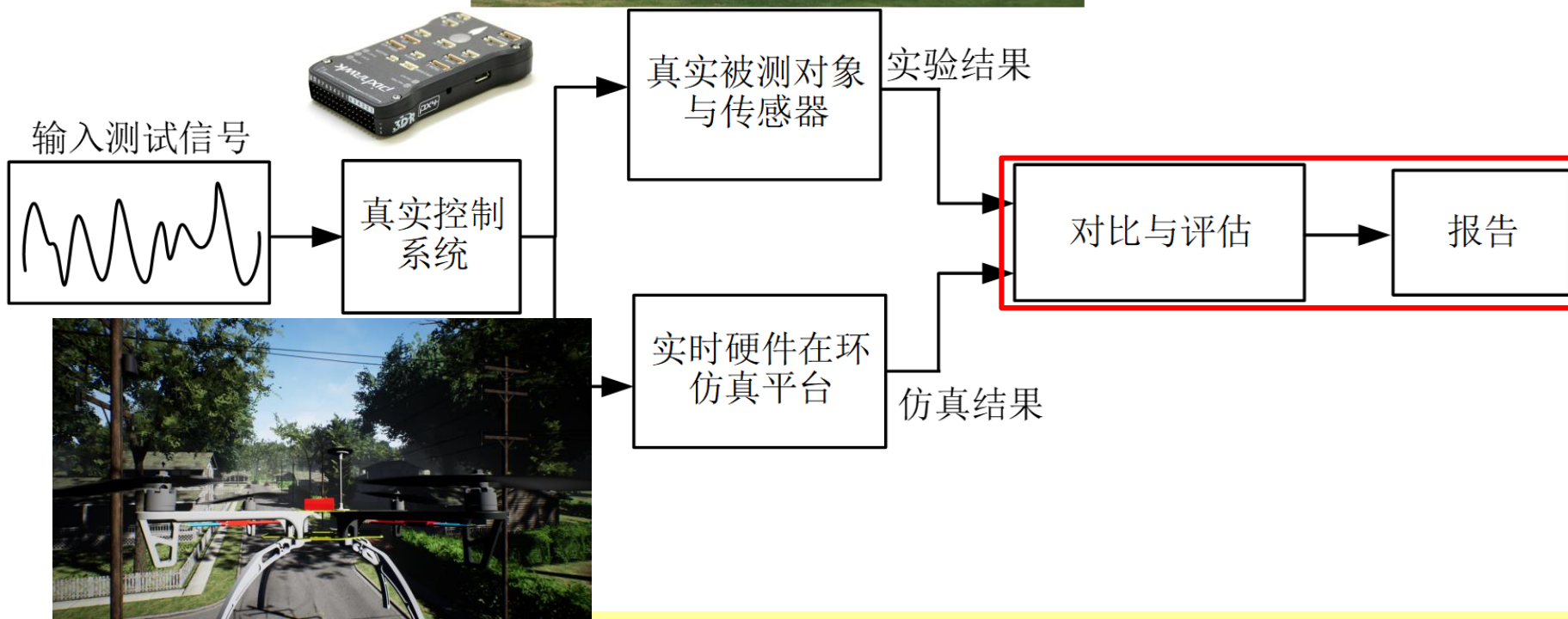
仿真可信度保证:

1. 仿真平台本身需要具备足够的可信度。
 - 硬件层面：硬件结构需要尽量接近真实系统。
 - 软件层面：仿真程序的开发流程需要足够标准可信。
2. 数学仿真模型需要足够精确、可信。





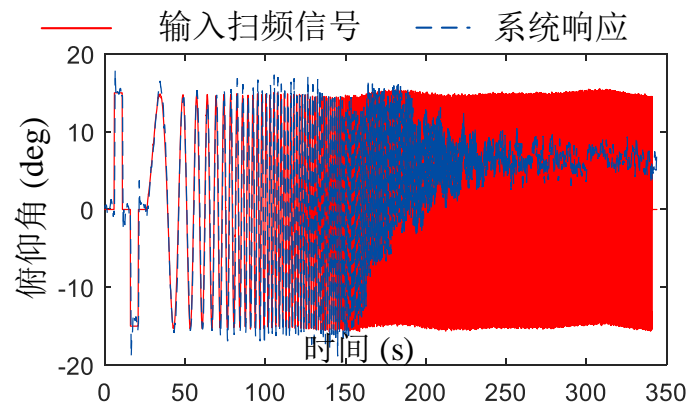
1.8 可评估性



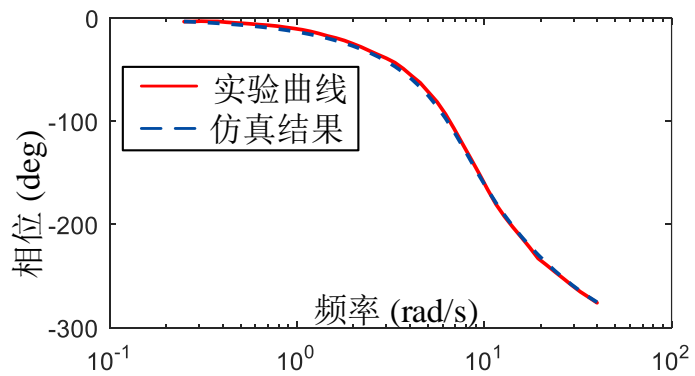
平台可信度满足之后，将同样测试信号输入到使用同样的控制系统用于仿真与实验，对两者的输出结果进行定量地对比，得到仿真可信度。



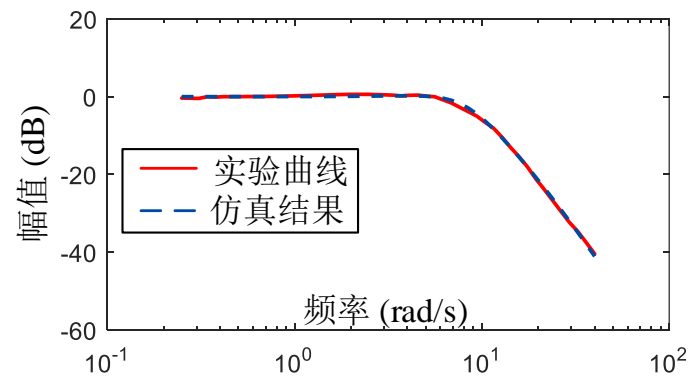
扫频实验评估模型可信度



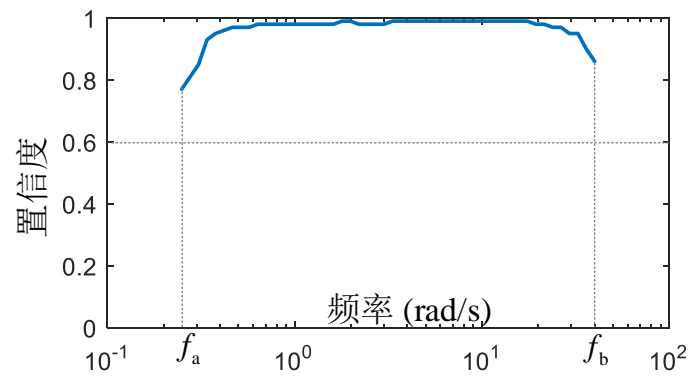
(a) 俯仰通道频域响应测试



(c) 波特图相位曲线



(b) 波特图幅值曲线

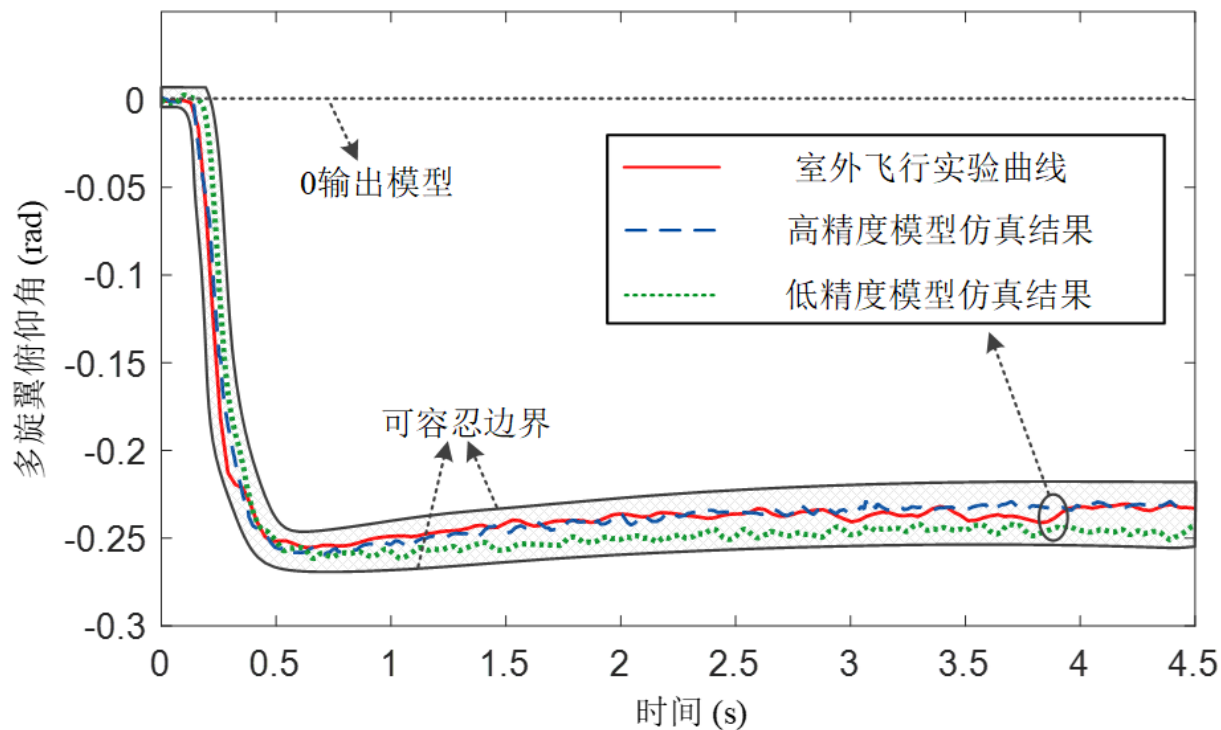


(d) 频域辨识的置信度曲线

使用频域系统辨识的方法来进行扫频实验，通过对比仿真曲线与实际实验曲线来评估模型的频域可信度。时域、静态参数、功率性能等可信度可用同样方法验证。



与实验对比定量评估仿真可信度



[1] **Xunhua Dai**, Chenxu Ke, Quan Quan, and Kai-Yuan Cai. Simulation credibility assessment methodology with FPGA-based hardware-in-the-loop platform. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Published Online, 2020.03. DOI:10.1109/TIE.2020.2982122.

One Motor Failed.

RflySim: 0. 基于FPGA硬件在环仿真的无人控制系统统一安全测试框架

本视频观看地址:

优酷: https://v.youku.com/v_show/id_XNDU4MjE2ODA4MA==.html

YouTube: <https://youtu.be/GIb7JcGcXig>





大纲

1. RflySim平台理念与目标
- 2. 单机控制与测试解决方案**
3. 集群控制与测试解决方案
4. 视觉/AI控制算法与测试解决方案
5. 总结

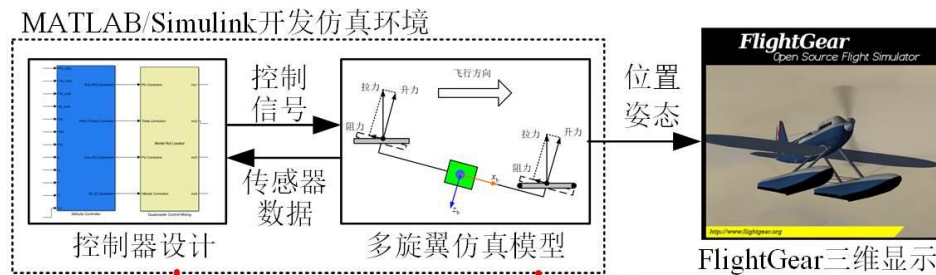


2.1 实验流程

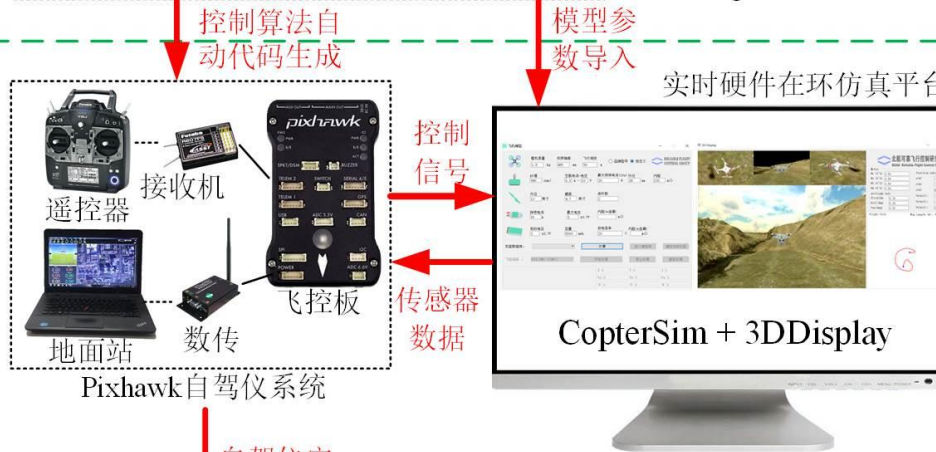
RflySim教育版：实现快速机体设计后，给定控制需求，如何快速地在真机上实现控制算法？

1. 只需要在Simulink/Python完成控制器设计
2. 通过软件在环仿真、自动代码生、硬件在环仿真、室内测试和室外实飞，快速实现算法的验证与部署。
3. 对学生而言大大降低了无人机控制的学习门槛，对工程师而言提高了无人机算法的开发效率。

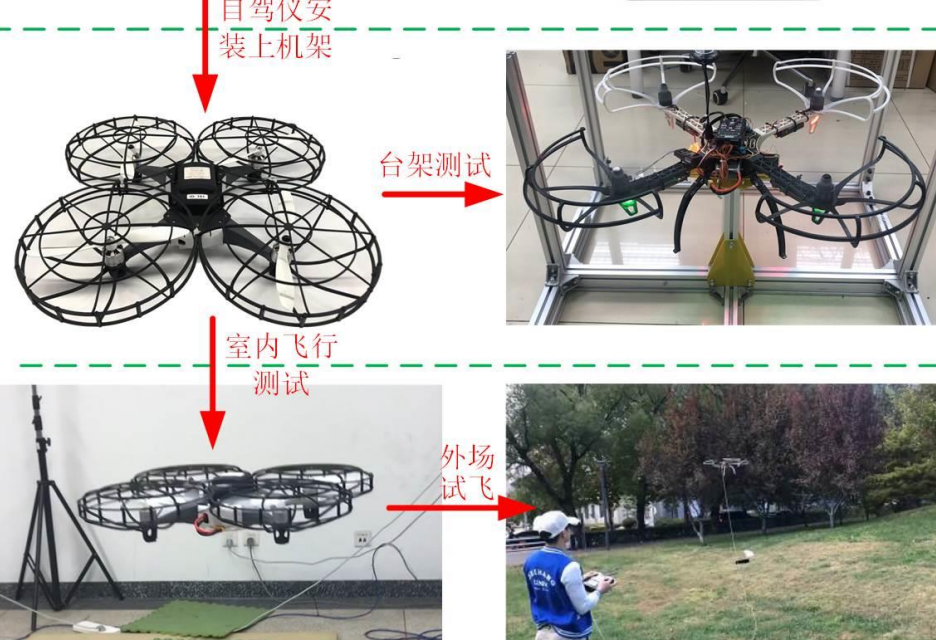
软件在环仿真



硬件在环仿真



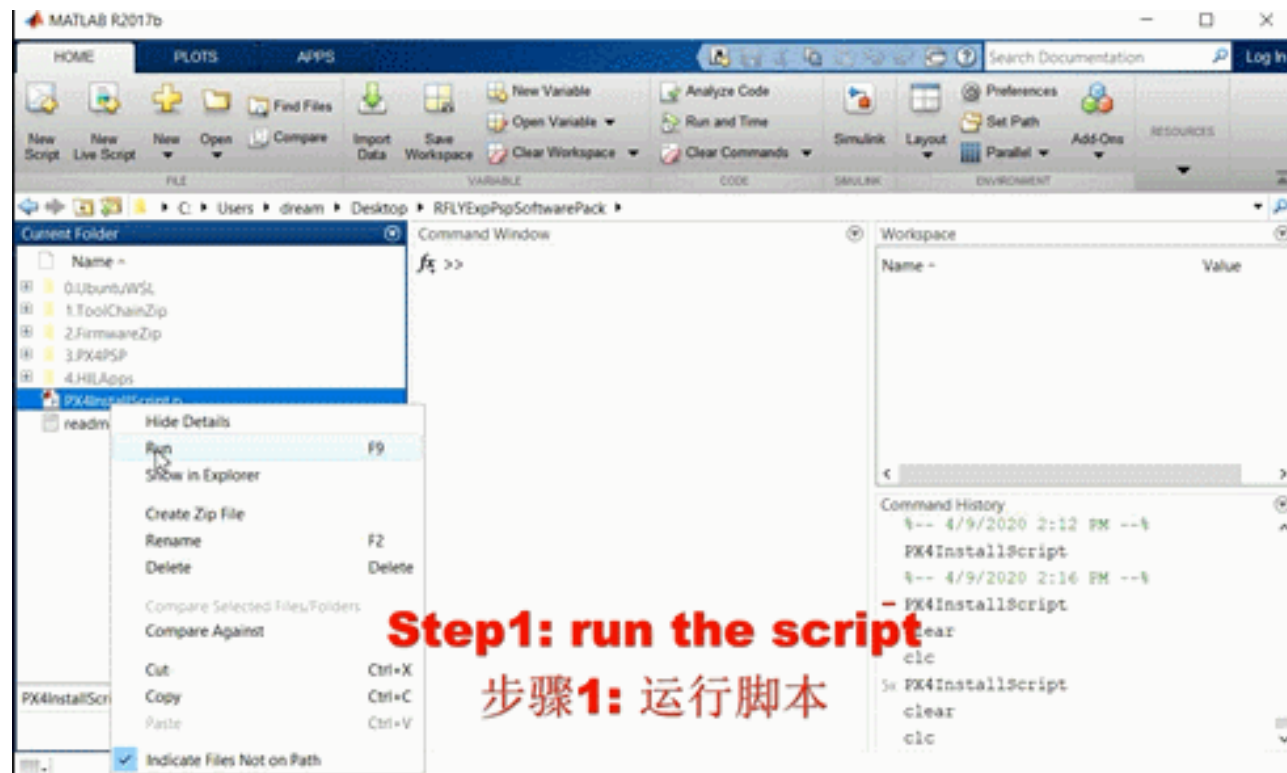
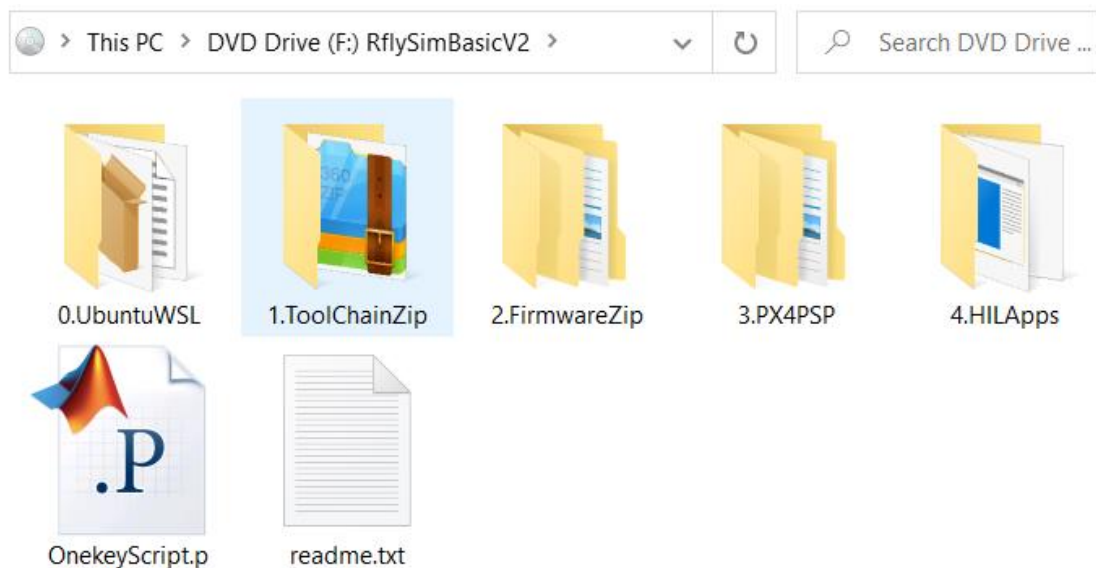
飞行测试





2.2 获取途径与安装方法

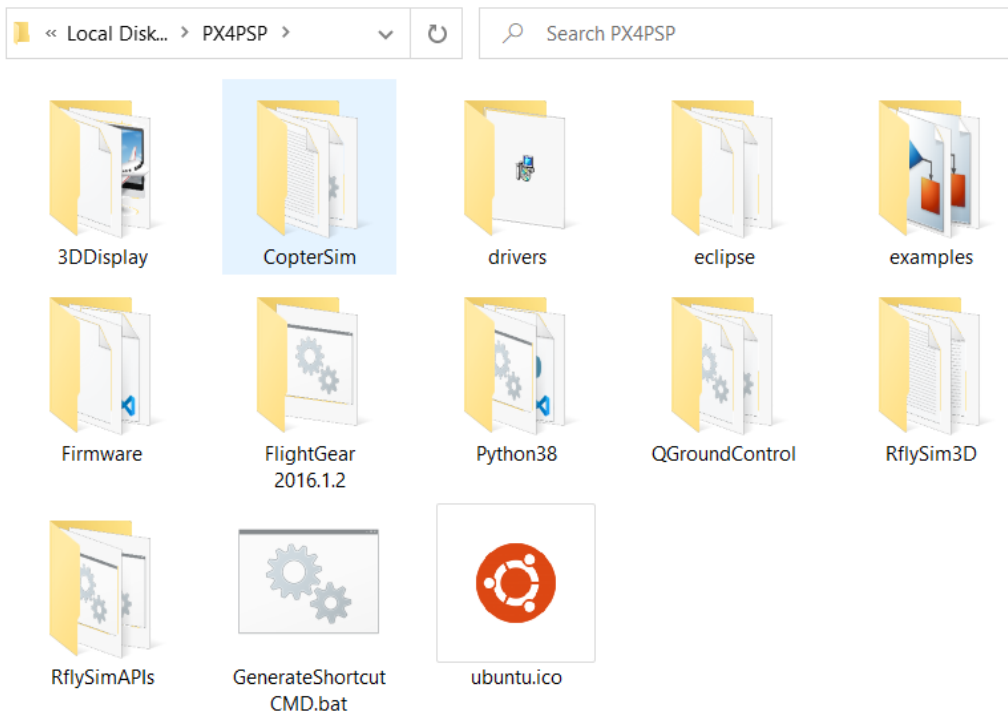
访问 rflsim.com 获取基础版本，使用正常可以咨询获取高级版本
高级版和基础版的安装方法一样，用脚本实现一键安装、部署



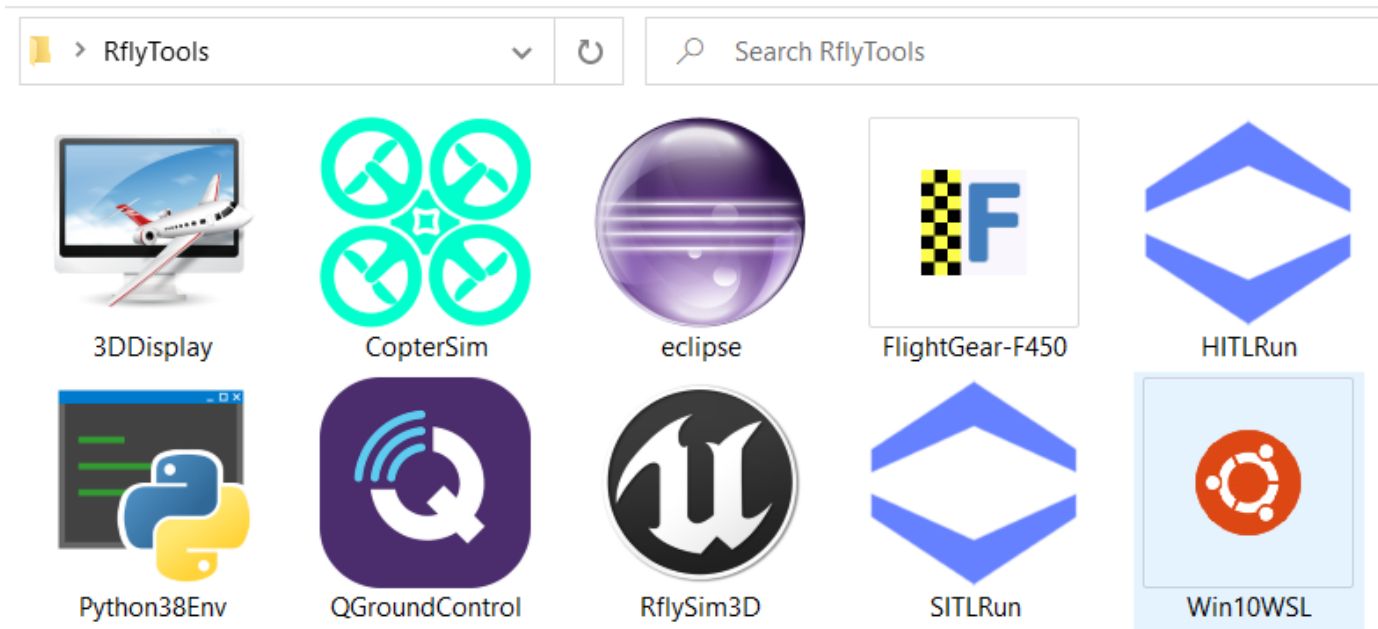
注：允许使用PX4官方代码或二次开发代码，
将Firmware文件夹压缩放到安装包即可



2.3 基本功能预览



安装目录

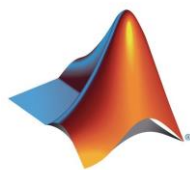


桌面快捷方式



2.3 基本功能预览

控制器设计与仿真



MATLAB/
Simulink



Python/
OpenCV



Flight
Gear

软硬件平台与开发流程:

1. 控制器设计与仿真
2. Simulink代码生成
/Python编程
3. 软件/硬件在环仿真
4. 室外实验

代码自动生成与固件编译



pixhawk

Simulink PSP
工具箱

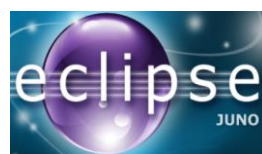


PX4 Firmware
源代码



WSL/Msys2/Cy
gwin编译环境

代码阅读与修改



Eclipse



VS Code

硬件在环仿真



CopterSim



3DDisplay



RflySim3D



QGC



Pixhawk自
驾仪系统



地面计算机



遥控器系统

室内外飞行实验



QGC



地面计算机



机架系统



动力系统



Pixhawk自
驾仪系统



遥控器系统

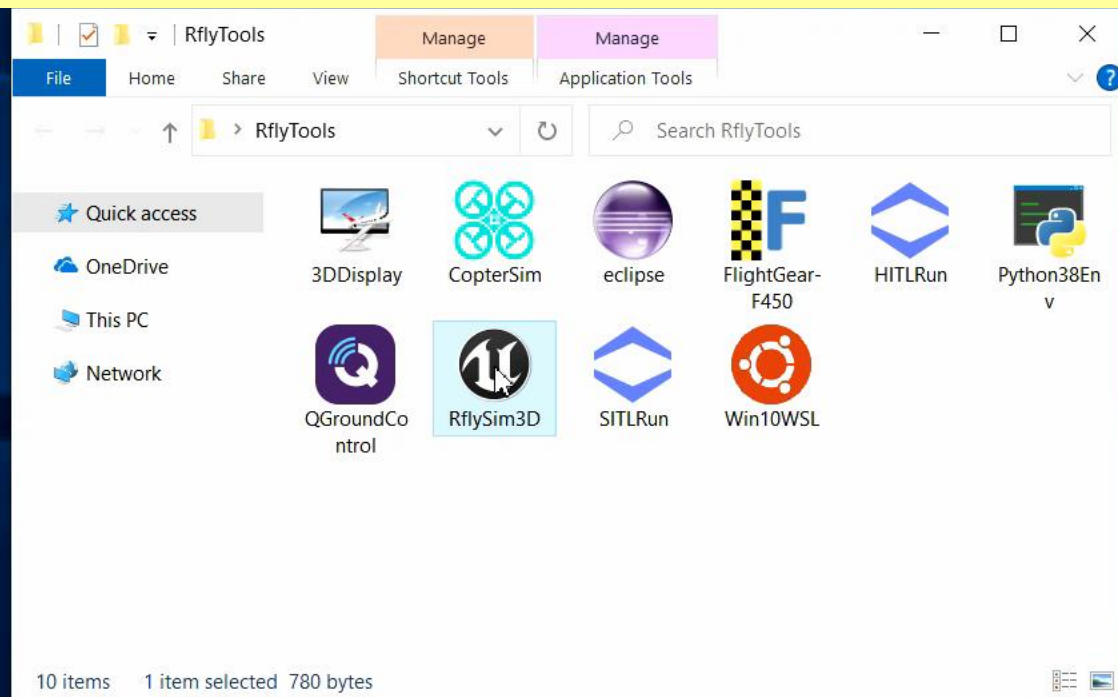


RflySim: 1.平台简介+如何启动单无人机的硬件在环仿真

本视频观看地址:

优酷: https://v.youku.com/v_show/id_XNDcwNjA4MjEwNA==.html

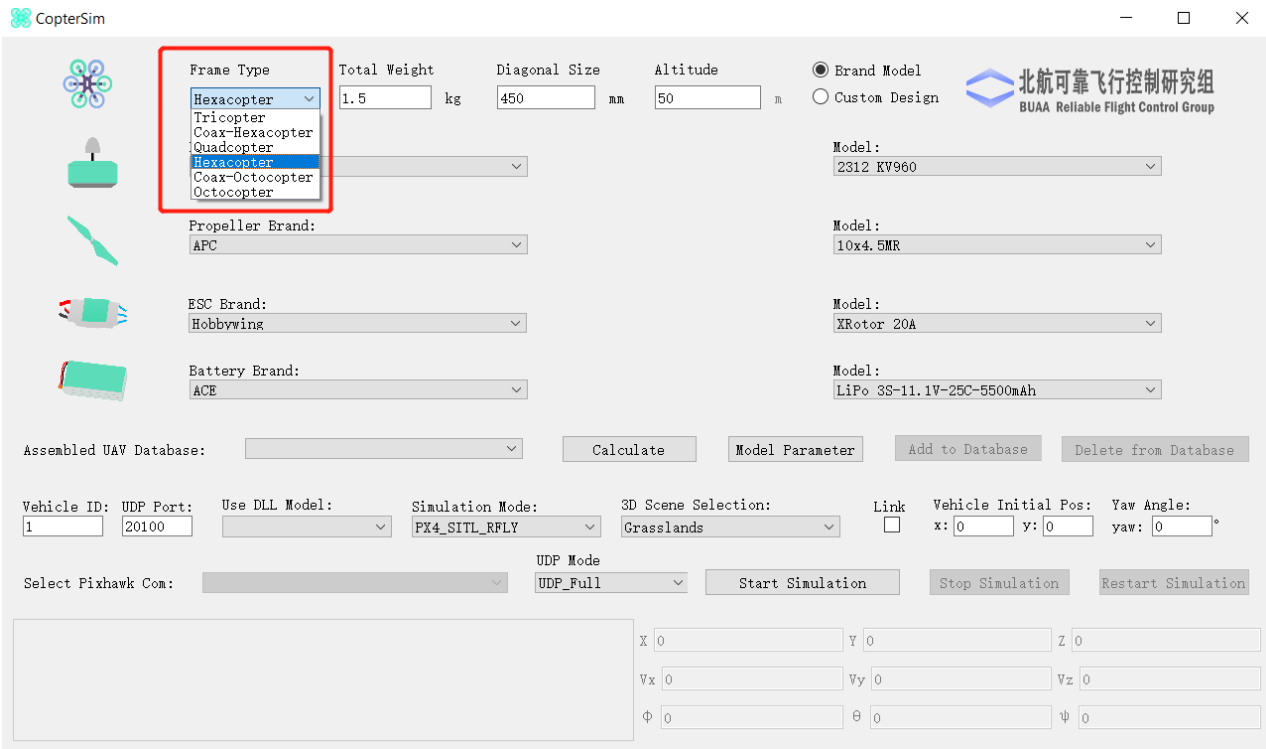
YouTube: <https://youtu.be/3ytbk63Og5k>



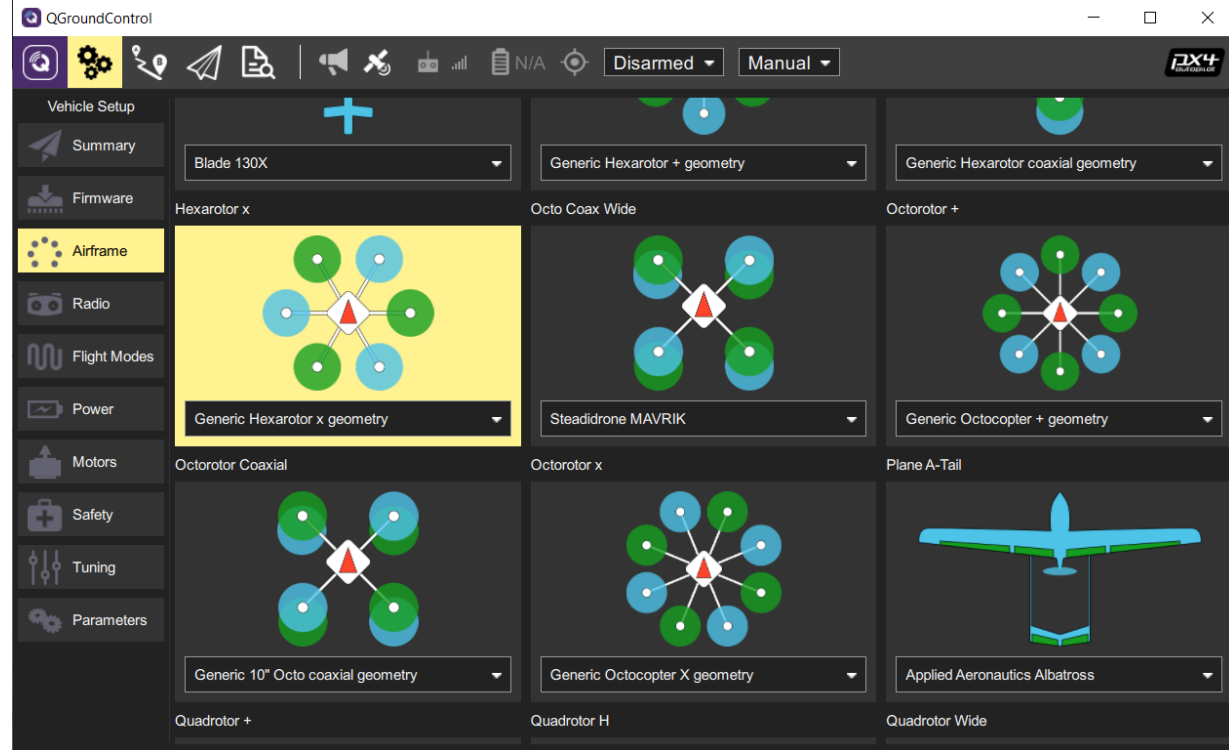
点击桌面快捷方式来启动**RflySim3D**三维显示程序



2.4 如何仿真其他多旋翼机型？



模型端改为六旋翼，并选择合适配置



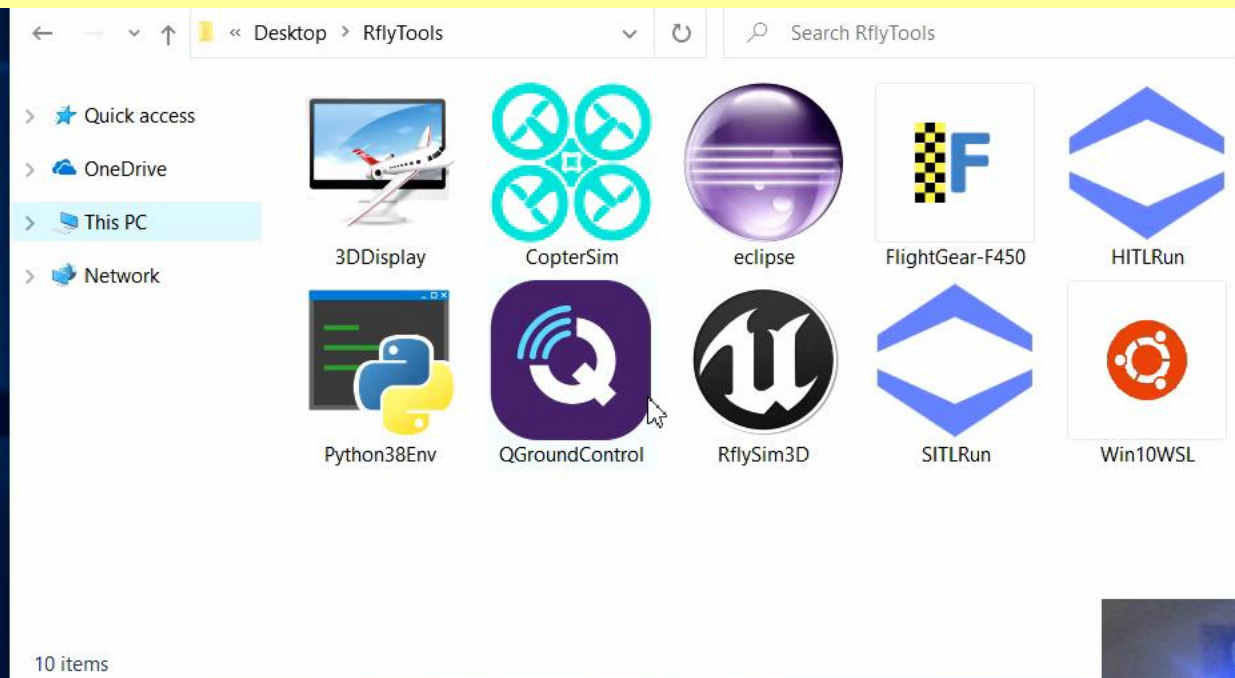
飞控端选择六旋翼机架，并开启HITL

RflySim: 2. 如何仿真其他的多旋翼机型, 例如六旋翼

本视频观看地址:

优酷: https://v.youku.com/v_show/id_XNDcwNjA4MDY2MA==.html

YouTube: <https://youtu.be/bryZXxaJE5M>

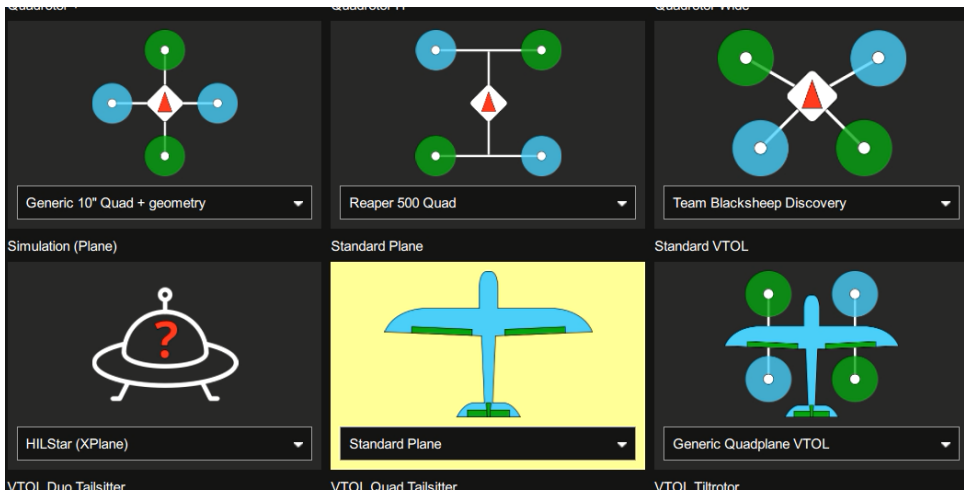


连接**Pixhawk**自驾仪与**QGroundControl**地面站

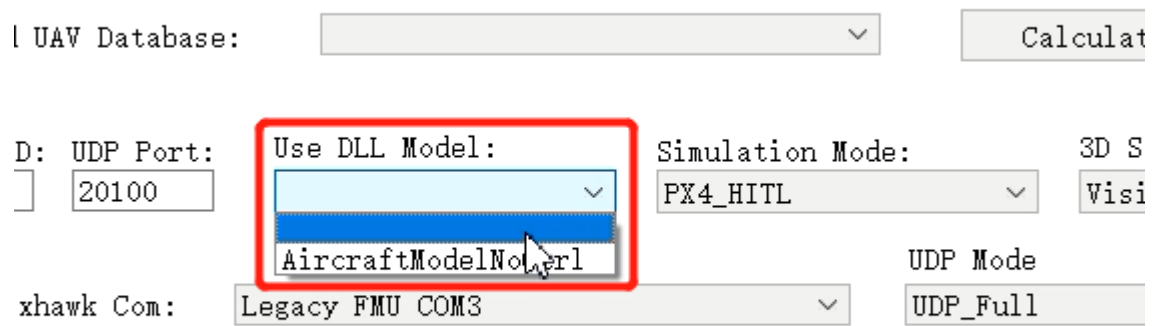




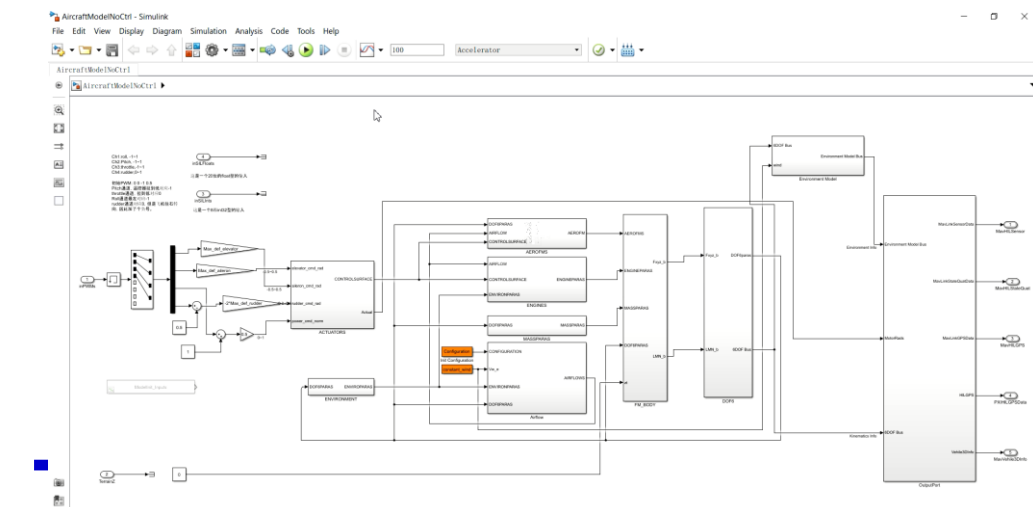
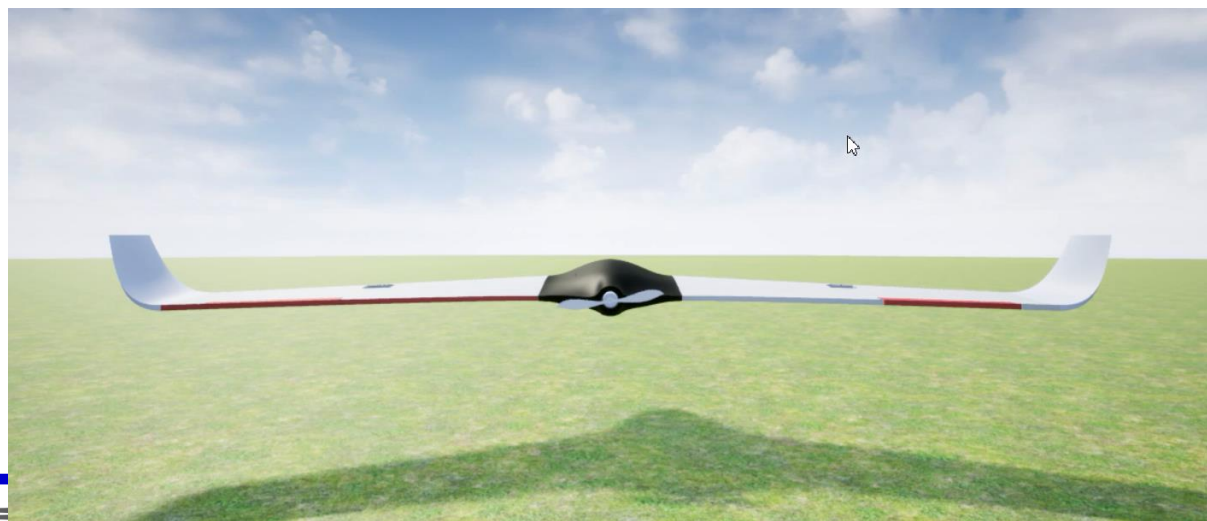
2.5 如何仿真固定翼、无人车等其他机型



1. QGC改Pixhawk为固定翼模式



3. CopterSim使用固定翼DLL文件进行仿真



2. Simulink模型固定翼模型代码生成DLL文件

可靠飞行控制
Reliable Flight Control

4. RflySim3D自动切换固定翼三维

RflySim: 3. 如何仿真其他机型，例如固定翼飞行器
 本视频观看地址：
优酷： https://v.youku.com/v_show/id_XNDcwNjA4MTQxMg==.html
YouTube： <https://youtu.be/gt7IIUx7JRe>

- Vehicle Setup
- Summary
- Firmware
- Airframe**
- Radio
- Flight Modes
- Power
- Motors
- Safety
- Tuning
- Camera
- Parameters

Hexarotor Coaxial Generic Hexarotor coaxial geometry	Generic Hexarotor x geometry	Steadidrone MAVRIK	Generic Octocopter + geometry	Octorotor Coaxial Generic 10" Octo coaxial geometry
Octorotor x Generic Octocopter X geometry	Plane A-Tail Applied Aeronautics Albatross	Quadrotor + Generic 10" Quad + geometry	Quadrotor H Reaper 500 Quad	Quadrotor Wide Team Blacksheep Discovery
Quadrotor x 	Simulation (Copter) 	Simulation (Plane) HILStar (XPlane)	Standard Plane Standard Plane	Standard VTOL Generic Quadplane VTOL
		VTOL Duo Tailsitter 	VTOL Quad Tailsitter 	VTOL Tiltrotor

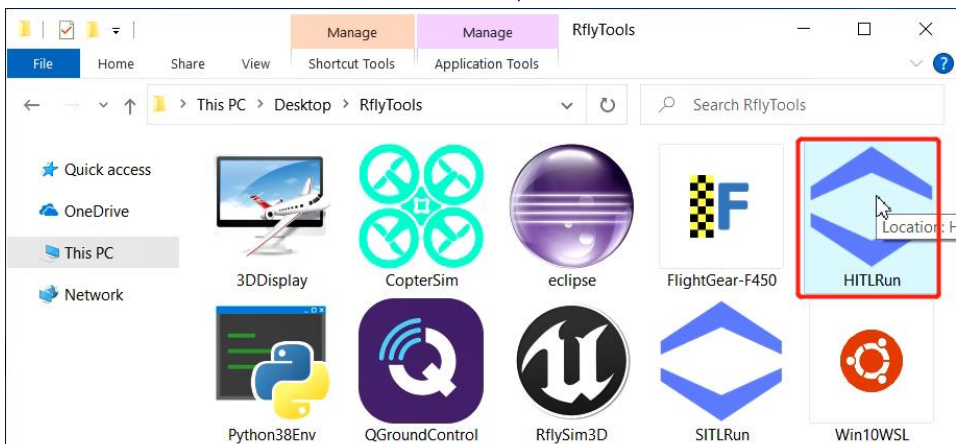




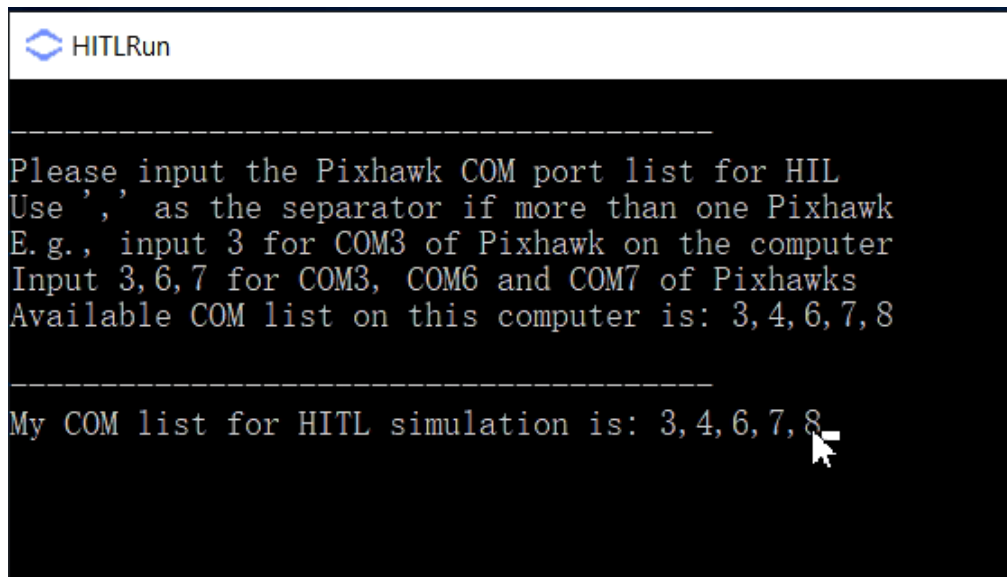
2.6 如何同时连多个Pixhawk进行仿真？



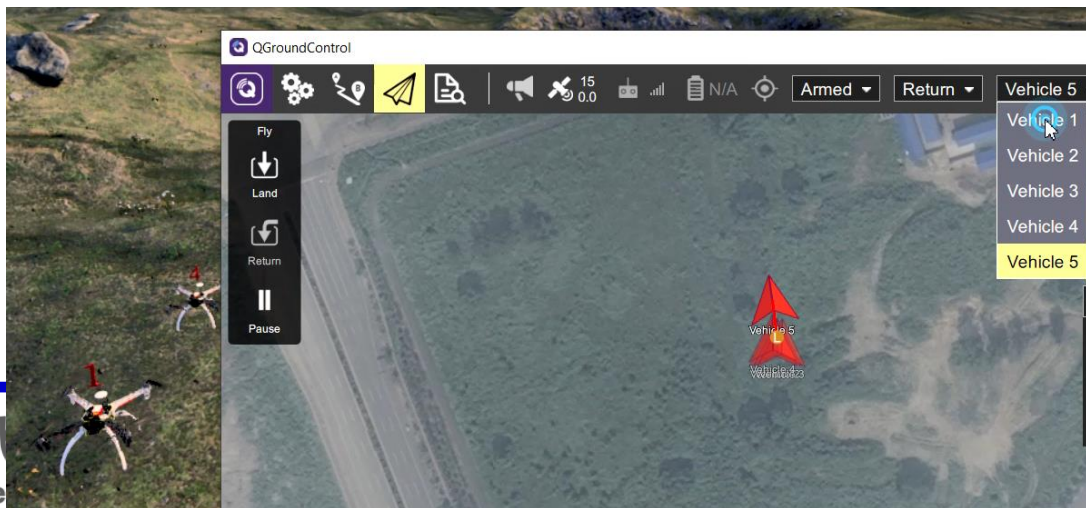
1. 插入任意个Pixhawk飞控



2. 运行HITLRun一键启动命令



3. 输入Pixhawk串口号序列

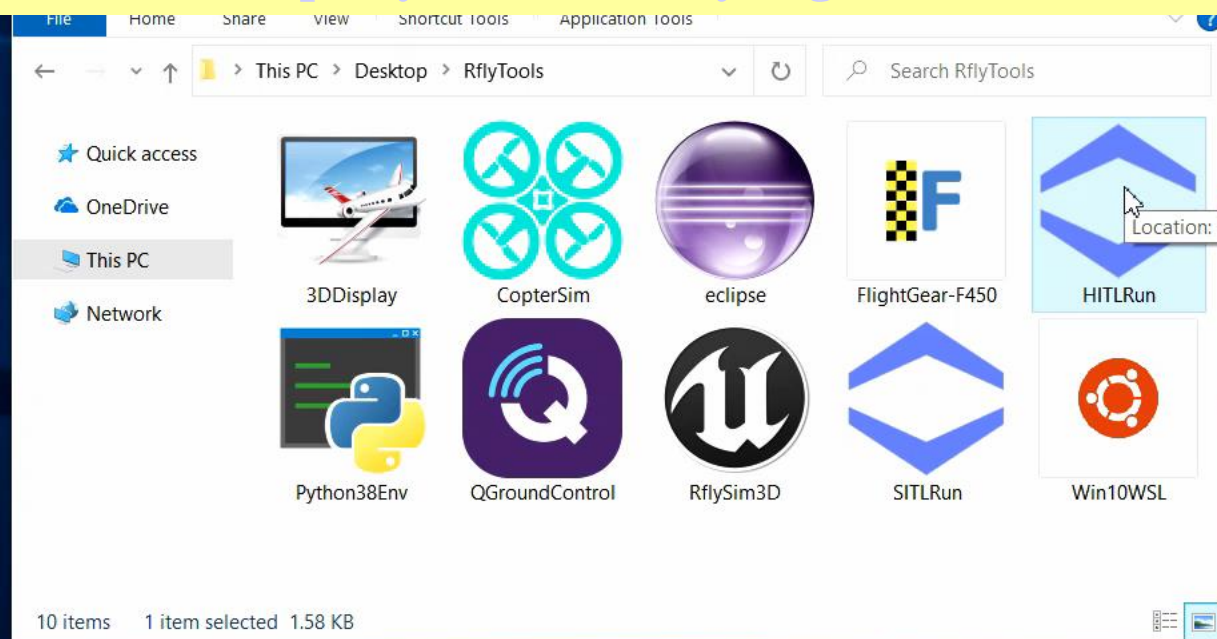


RflySim: 4. 如何快速启动多机的硬件在环编队仿真

本视频观看地址:

优酷: https://v.youku.com/v_show/id_XNDcwnjA3OTQ0MA==.html

YouTube: https://youtu.be/oZ_-yhEgebA

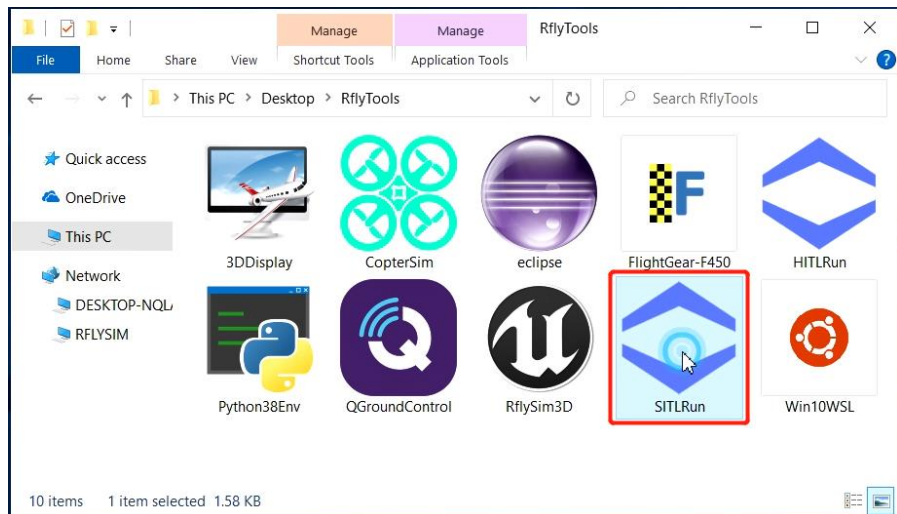


用**USB**线将所有**Pixhawk**与计算机相连





2.7 不用Pixhawk硬件只做软件仿真

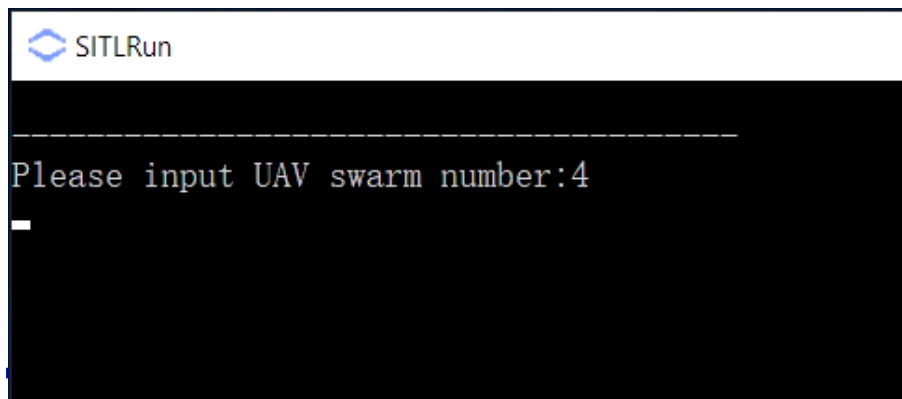


双击SITLRun一键启动脚本

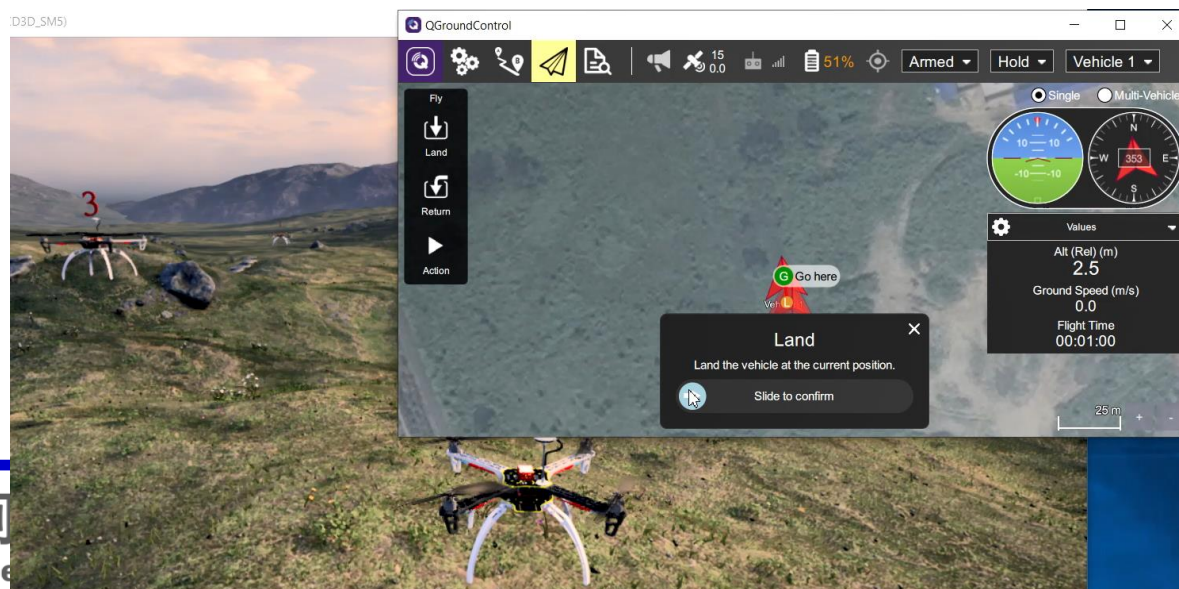
```
SITLRun

-----
Please input UAV swarm number:4
Start QGroundControl
Kill all CopterSims
Starting PX4 Build
[1/1] Generating ../../logs
killing running instances
starting instance 1 in /mnt/c/PX4PSP/Firmware/build/px4_sitl_default/instance_1
starting instance 2 in /mnt/c/PX4PSP/Firmware/build/px4_sitl_default/instance_2
starting instance 3 in /mnt/c/PX4PSP/Firmware/build/px4_sitl_default/instance_3
starting instance 4 in /mnt/c/PX4PSP/Firmware/build/px4_sitl_default/instance_4
PX4 instances start finished
Press any key to exit
```

自动运行N个PX4 SITL控制器



输入飞机数量

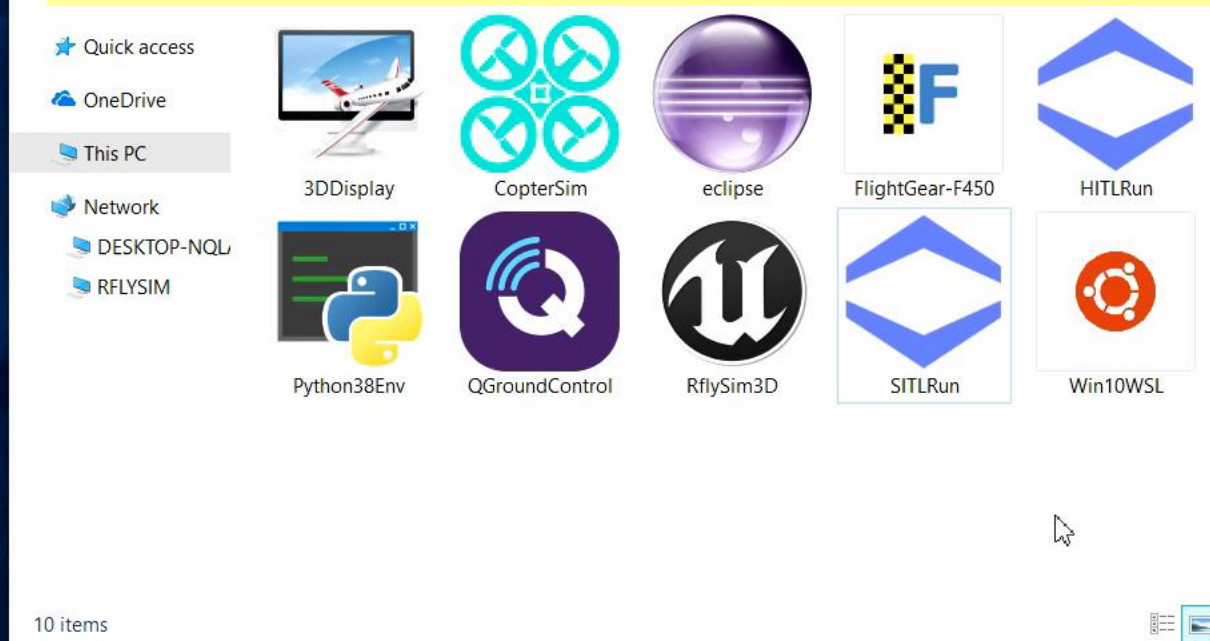


RflySim: 5. 如何快速启动单无人机的软件在环仿真模式

本视频观看地址:

优酷: https://v.youku.com/v_show/id_XNDcwNjA4MzUxNg==.html

YouTube: <https://youtu.be/QxNGOwANy-o>



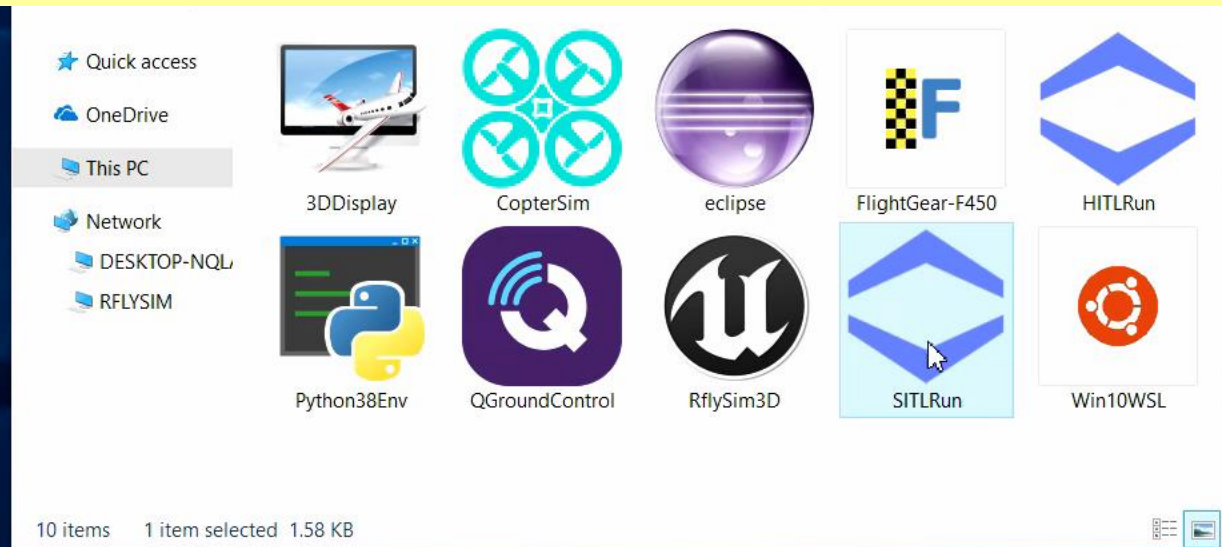
点击**SIL**软件在环一键启动脚本并输入飞机数量**1**

RflySim: 6. 如何快速启动多无人机集群的软件在环仿真

本视频观看地址:

优酷: https://v.youku.com/v_show/id_XNDcwNjA4MzA0NA==.html

YouTube: <https://youtu.be/88dGpErXPJ8>

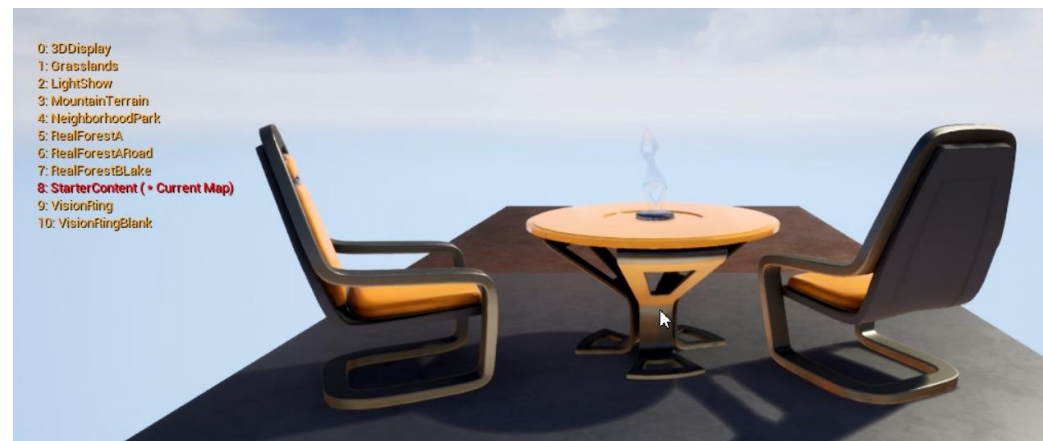
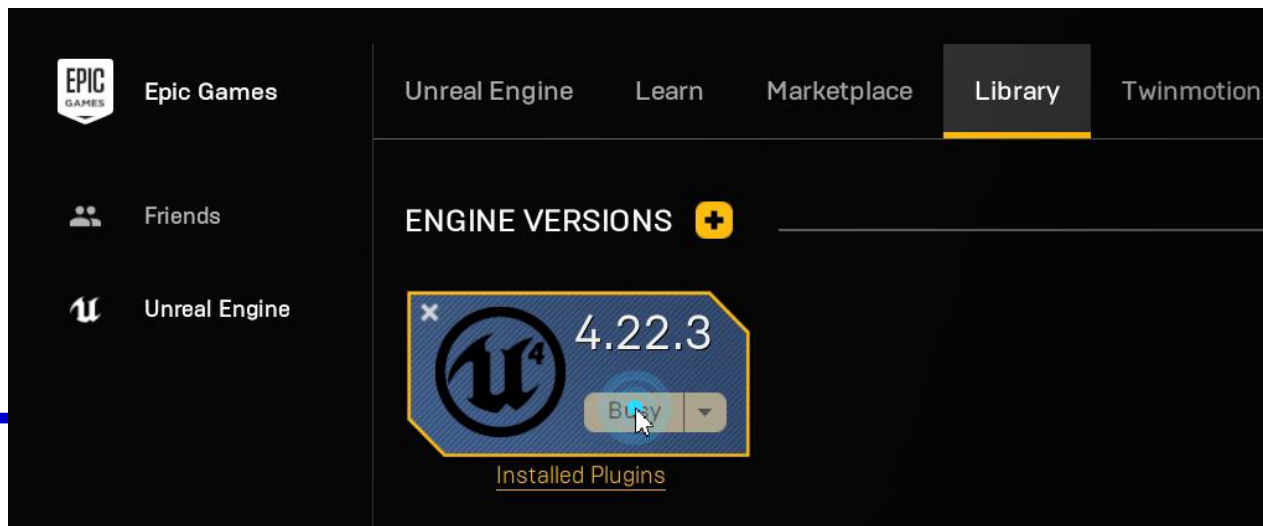
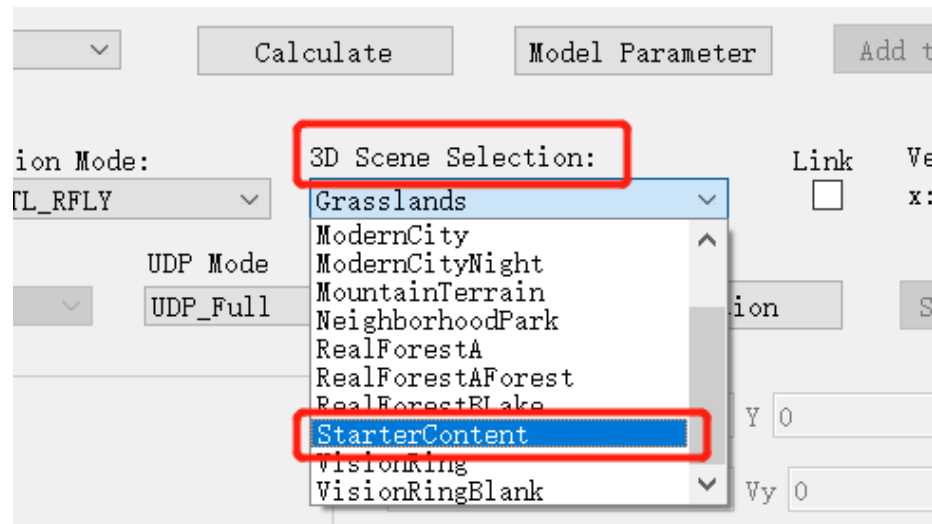


点击**SIL**软件在环一键启动脚本并输入飞机数量**4**



2.8 如何新建或导入自己的场景

- 支持导入所有UE4场景 → RflySim3D会自动识别并导入UE4的场景地图文件
- 三维场景制作3Ds Max → UE4 → RflySim3D
- 其他现成三维场景导入(AutoCAD, SketchUp等) → fbx模型文件 → UE4 → RflySim3D
- 基本步骤: UE4生成场景打包文件 → 拷贝到 RflySim3D文件夹 → 地形文件拷贝 CopterSim





Epic Games



Friends



Unreal Engine

Launch
Unreal Engine 4.22.3

RflySim: 7. 如何将你自己在UE4中搭建的三维场景导入到RflySim3D程序中用于视景仿真

本视频观看地址:

优酷: https://v.youku.com/v_show/id_XNDcwNjA4NjY2NA==.html

YouTube: <https://youtu.be/W9kKZpLZ04U>

MY PROJECTS

Search Projects



Mypoj



RflySim3D



StreetBocks



Downloads



Settings

VAULT

从Epic Games中安装并打开需要的Unreal Engine 4 (UE4)引擎



Advanced Glass Material Pac



Advanced Village Pack



Animation Starter Pack



Brushify - Environment Shade





RflySim: 8. 如何利用RflySim3D来仿真夜空都市下的灯光秀场景

本视频观看地址:

优酷: https://v.youku.com/v_show/id_XNDcwNjA4NjE1Ng==.html

YouTube: <https://youtu.be/Chpx1uwFVkU>

- 0: 3DDisplay
- 1: Grasslands
- 2: LightShow
- 3: ModernCity (* 4)
- 4: ModernCityNight
- 5: MountainTerrain
- 6: NeighborhoodPark
- 7: RealForestA
- 8: RealForestARoad
- 9: RealForestBLake
- 10: VisionRing
- 11: VisionRingBlank

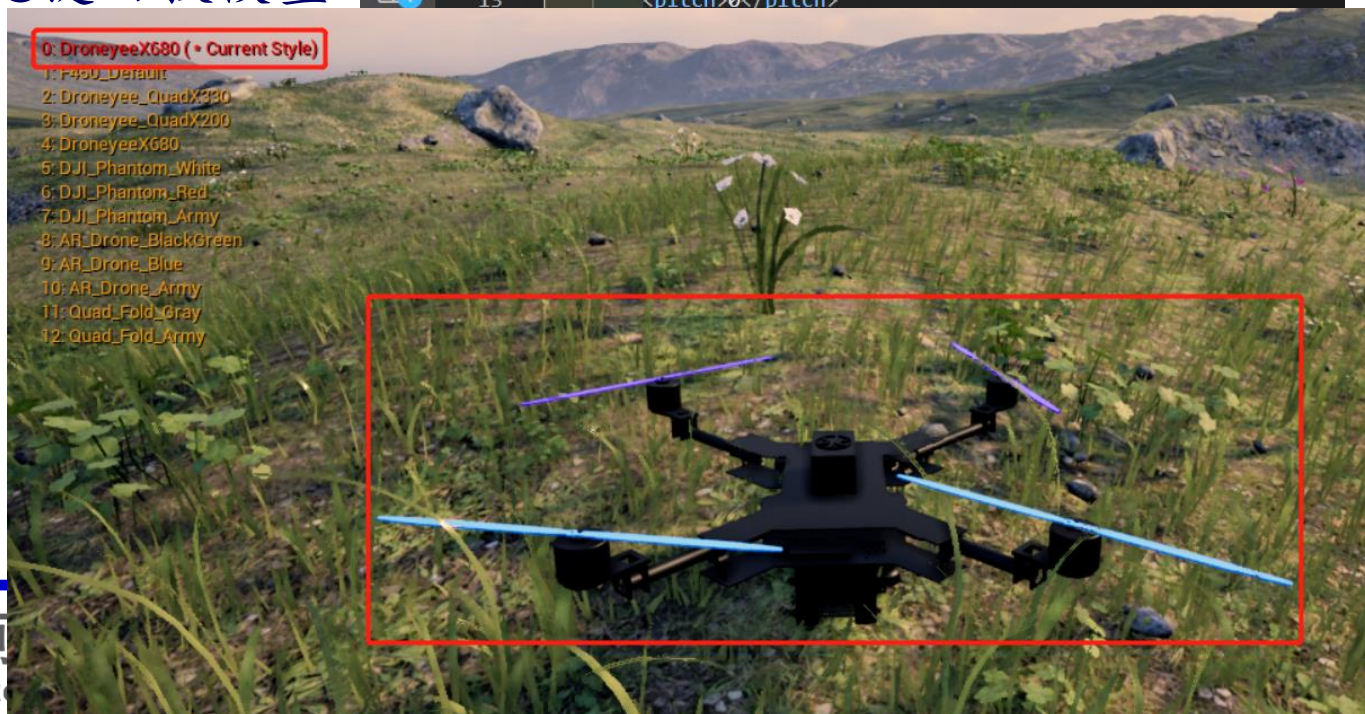
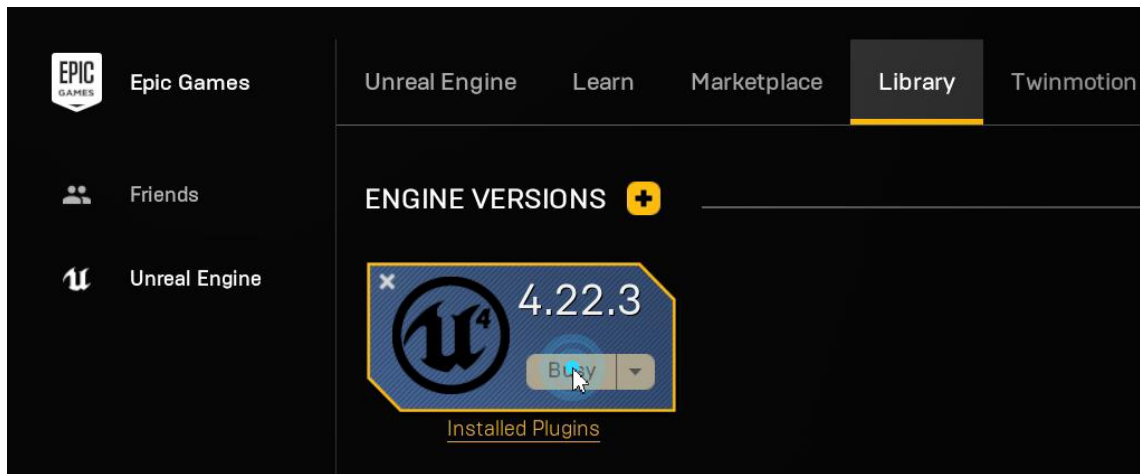




2.9 如何新建或导入自己的飞机三维模型

- 支持导入所有UE4三维模型 → RflySim3D自动识别
- 飞机三维模型制作3Ds Max → UE4 → RflySim3D
- 其他现成飞机三维模型导入(AutoCAD, SketchUp等) → fbx模型文件 → UE4 → 编写XML文件 → RflySim3D
- 基本方法: UE4导出模型文件+XML配置文件 → 拷贝到 RflySim3D安装目录 → 打开RflySim3D按下C键切换模型

```
文件(F) 编辑(E) 选择(S) 查看(V) 转到(G) 运行(R) 终端(T) 帮助(H)
DroneyeeX680.xml X
C: > PX4PSP > RflySimAPIs > UE4MapSceneAPI > VehicleModel > X680 > DroneyeeX680.xml
1 <?xml version="1.0"?>
2 <vehicle>
3   <ClassID>3</ClassID>
4   <DisplayOrder>0</DisplayOrder>
5   <Name>DroneyeeX680</Name>
6   <Scale>
7     <x>1</x>
8     <y>1</y>
9     <z>1</z>
10  </Scale>
11  <AngEulerDeg>
12    <roll>0</roll>
13    <pitch>0</pitch>
```





RflySim: 9. 如何将你的飞机三维模型导入到基于UE4的RflySim3D程序中并用于视景仿真

本视频观看地址:

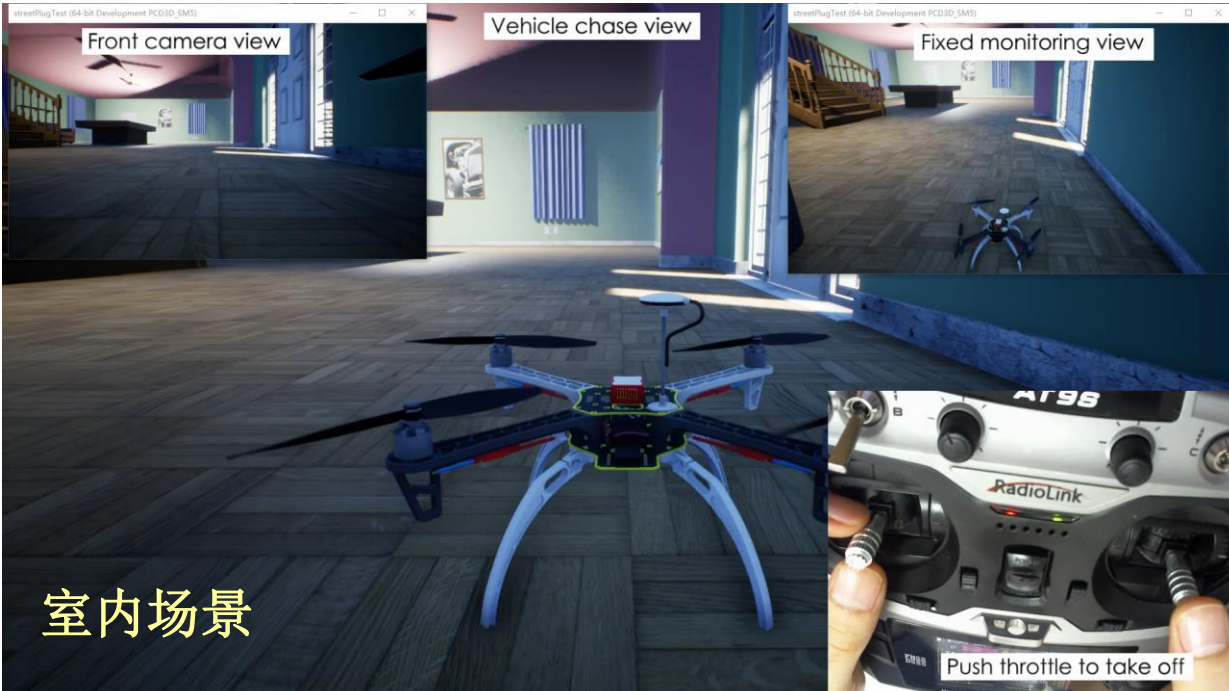
优酷: https://v.youku.com/v_show/id_XNDcwNjA4NzIxMg==.html

YouTube: <https://youtu.be/mKUehJwqqsU>

用3Ds Max软件打开一个飞机三维模型文件









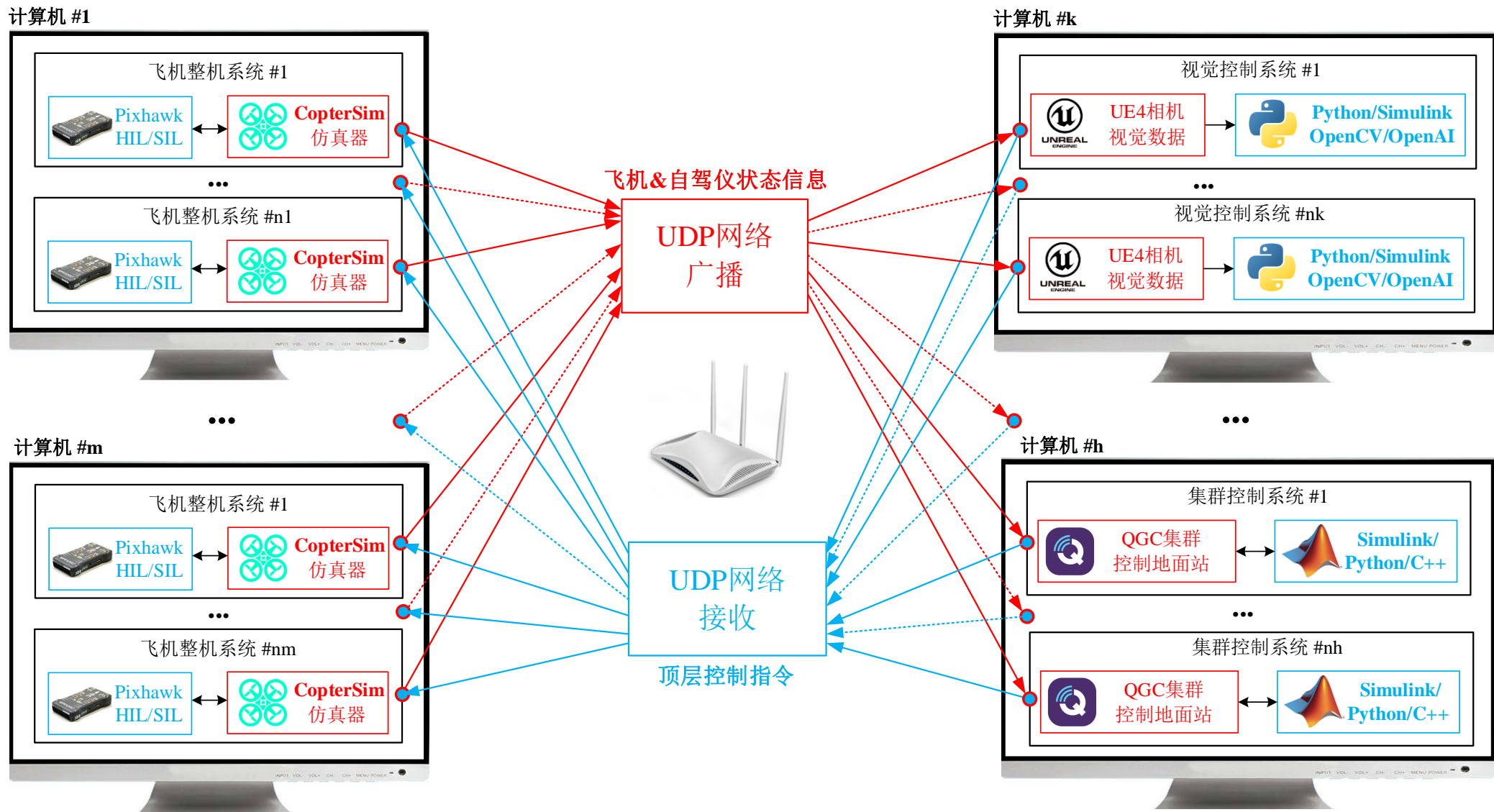
大纲

1. RflySim平台理念与目标
2. 单机控制与测试解决方案
- 3. 集群控制与测试解决方案**
4. 视觉/AI控制算法与测试解决方案
5. 总结



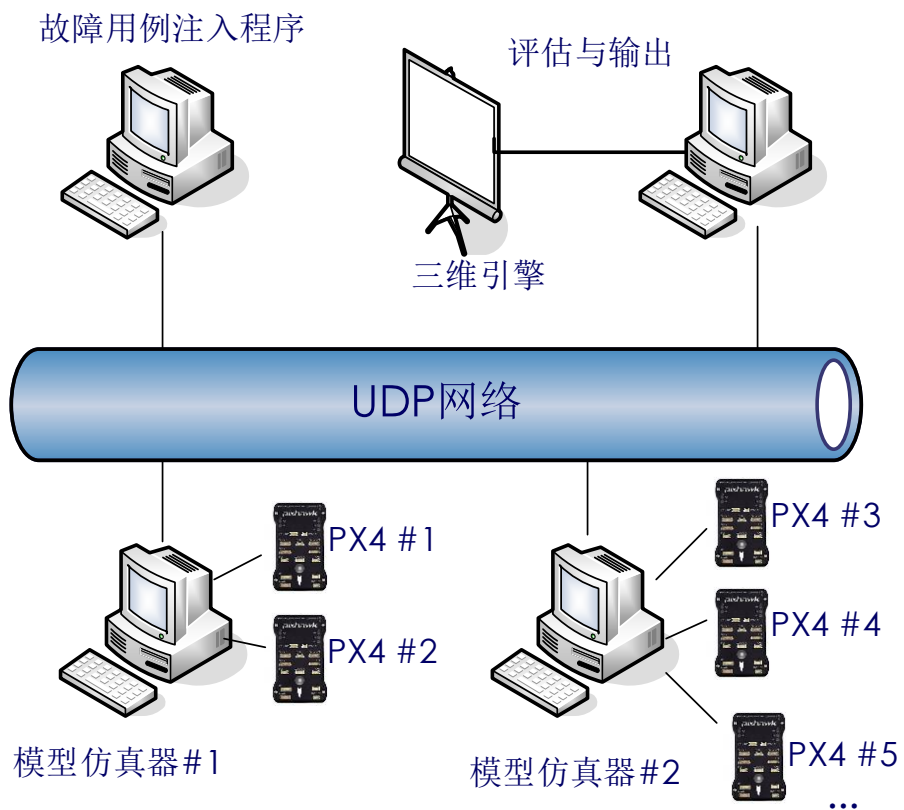
整体框架

完全分布式框架，可扩展任意电脑、任意多机、任意视角、任意集群控制节点





分布式构架



局域网分布式构架



真实集群飞机



集群仿真问题与解决方案

- **问题一：启动N个飞机进行仿真太麻烦？**

解决方案：一键脚本启动所有程序并完成参数配置

- **问题二：多个飞机同时同一场景显示？**

解决方案：UDP广播方式，RflySim3D根据接收飞机数据自动新建飞机，理论上可以扩展任意多个飞机，也支持新建障碍物、行人等辅助对象

- **问题三：飞机太多网络拥堵？**

解决方案：提供多种数据协议，大规模集群时可选用最精简数据模式，确保网络通畅

- **问题四：多机集群使用硬件在环的话成本高操作复杂？**

解决方案：支持PX4 SITL软件在环仿真，直接在电脑上新建并运行N个完整PX4控制器，且可访问每个控制器的log日志、飞行参数等

- **问题五：仿真平台性能如何？**

回答：主要是QGC和RflySim3D占用计算资源，模型和控制器占用资源较小。初步测试：配置较好的电脑软件在环仿真能稳定15架次以上，不运行QGC和RflySim3D数量增加，使用Pixhawk硬件在环仿真可再翻倍。

RflySim: 10. 如何通过Simulink控制软件在环仿真模式下的多无人机集群

本视频观看地址:

优酷: https://v.youku.com/v_show/id_XNDcwNjA4NTEwOA==.html

YouTube: <https://youtu.be/AMZNuAtRp2w>

The screenshot displays the RflySim configuration window. It features several dropdown menus for selecting drone components: DJI (2312 KV900), Propeller Brand (APC, Model: 10x4.5MR), ESC Brand (Hobbywing, Model: XRotor 20A), and Battery Brand (ACE, Model: LiPo 3S-11.1V-25C-5500mAh). Below these are buttons for 'Calculate', 'Model Parameter', 'Add to Database', and 'Delete from Database'. A section for 'Assembled UAV Database' includes fields for 'Vehicle ID' (2), 'UDP Port' (20102), 'Use DLL Model', 'Simulation Mode' (PX4_SITL_RFLY), '3D Scene Selection' (Grasslands), and 'Link'. The 'Vehicle Initial Pos' section has fields for x (0), y (2), and yaw angle (0). At the bottom, there are 'Start Simulation', 'Stop Simulation', and 'Restart Simulation' buttons, along with a 'UDP Mode' dropdown set to 'UDP_Full'. A large empty text area is present for notes or logs.



Values	
Alt (Rel) (m)	0.0
Ground Speed (m/s)	0.0
Flight Time	00:00:00

10m + -

QGroundControl

Tools Help

Vehicle 3

Vehicle 1

Vehicle 2

Vehicle 3

Vehicle 4

Single

Alt (Rel) (m)
10.0

Ground Speed (m/s)
4.4

Flight Time
00:00:10

Values

51%

Armed

Offboard

15 0.0

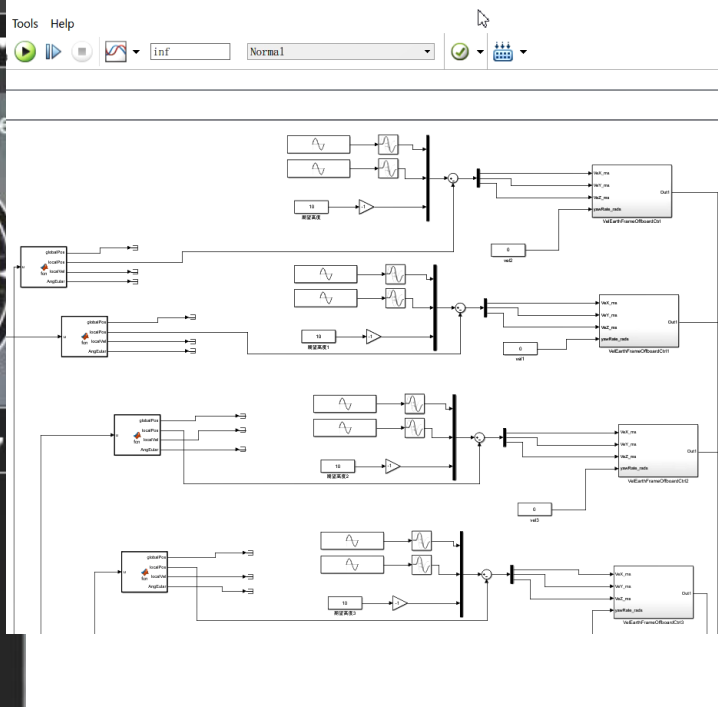
Fly

Land

Return

Pause

Action



```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe

-----
Please input UAV swarm number:4
Start QGroundControl
Kill all CopterSims
Starting PX4 Build
[1/1] Generating ../../logs
killing running instances
starting instance 1 in /mnt/c/PX4PSP/Firmware/build/px4_sitl_default/instance_1
starting instance 2 in /mnt/c/PX4PSP/Firmware/build/px4_sitl_default/instance_2
starting instance 3 in /mnt/c/PX4PSP/Firmware/build/px4_sitl_default/instance_3
starting instance 4 in /mnt/c/PX4PSP/Firmware/build/px4_sitl_default/instance_4
PX4 instances start finished
Press any key to exit
```





集群仿真问题与解决方案

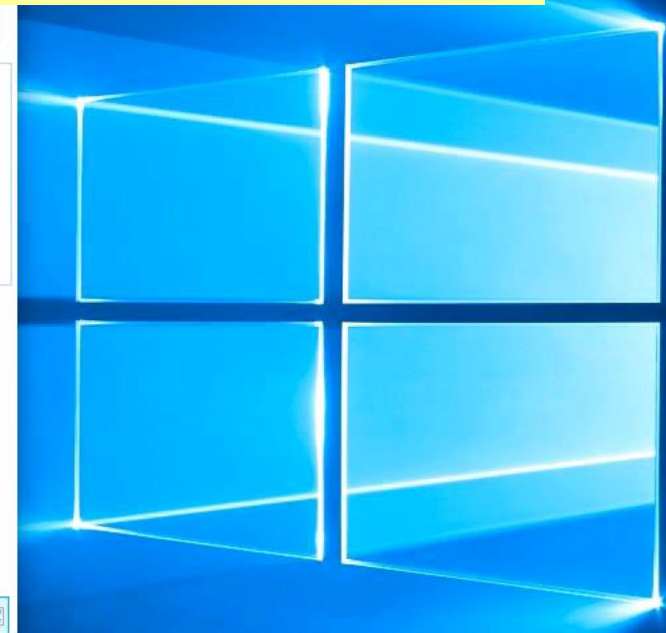
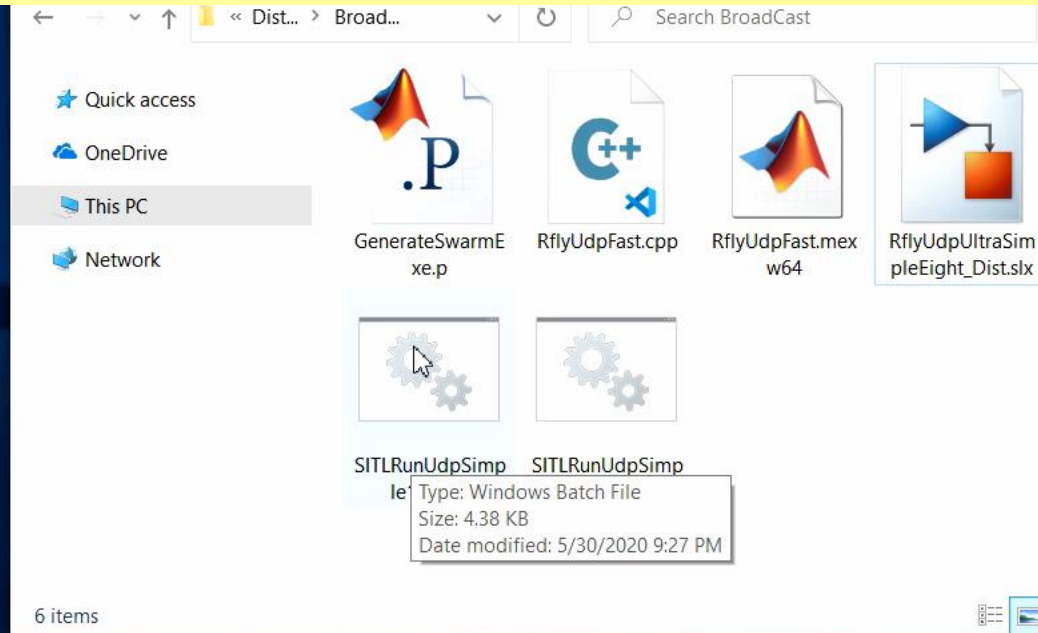
- **问题六：Simulink随着控制飞机的增加速度变慢，无法实时控制？**
解决方案：支持Simulink自动代码生成exe可执行文件，电脑性能占用趋近于0
- **问题七：单电脑性能有限，只能仿真特定数量的飞机？**
解决方案：支持局域网内集群联机仿真，确保大规模集群顺利进行，支持局域网广播与指定IP方式，减小通信延迟
- **问题八：集群仿真如何与实际飞行尽量接近？**
解决方案1：Simulink集群接口接收的是Pixhawk通过Mavlink发送的内部估计状态而非仿真理想值，且发送控制指令也是Mavlink控制格式，因此集群控制器可直接用于真机实飞。
解决方案2：Simulink控制器支持生成C/C++代码嵌入到原有集群系统中，也支持实飞时直接用Simulink接收局域网Pixhawk内发送的Mavlink消息进行集群控制。即：仿真完不需要修改可直接用于实飞。

RflySim: 11. 如何在局域网多台电脑上快速启动分布式的无人机集群软件在环仿真

本视频观看地址:

优酷: https://v.youku.com/v_show/id_XNDcwNjA4NDE2OA==.html

YouTube: <https://youtu.be/fmzYADSQyj0>

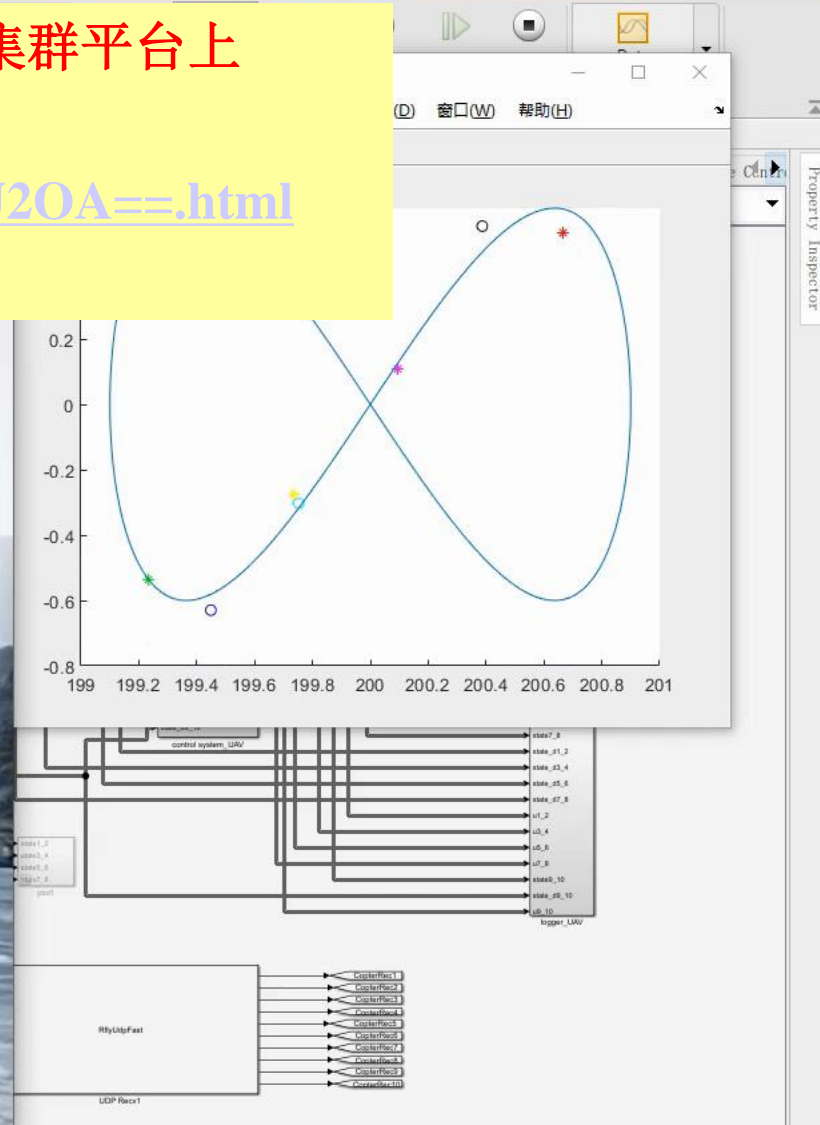


RflySim: 12. 如何快速将集群仿真算法部署到室内真机集群平台上

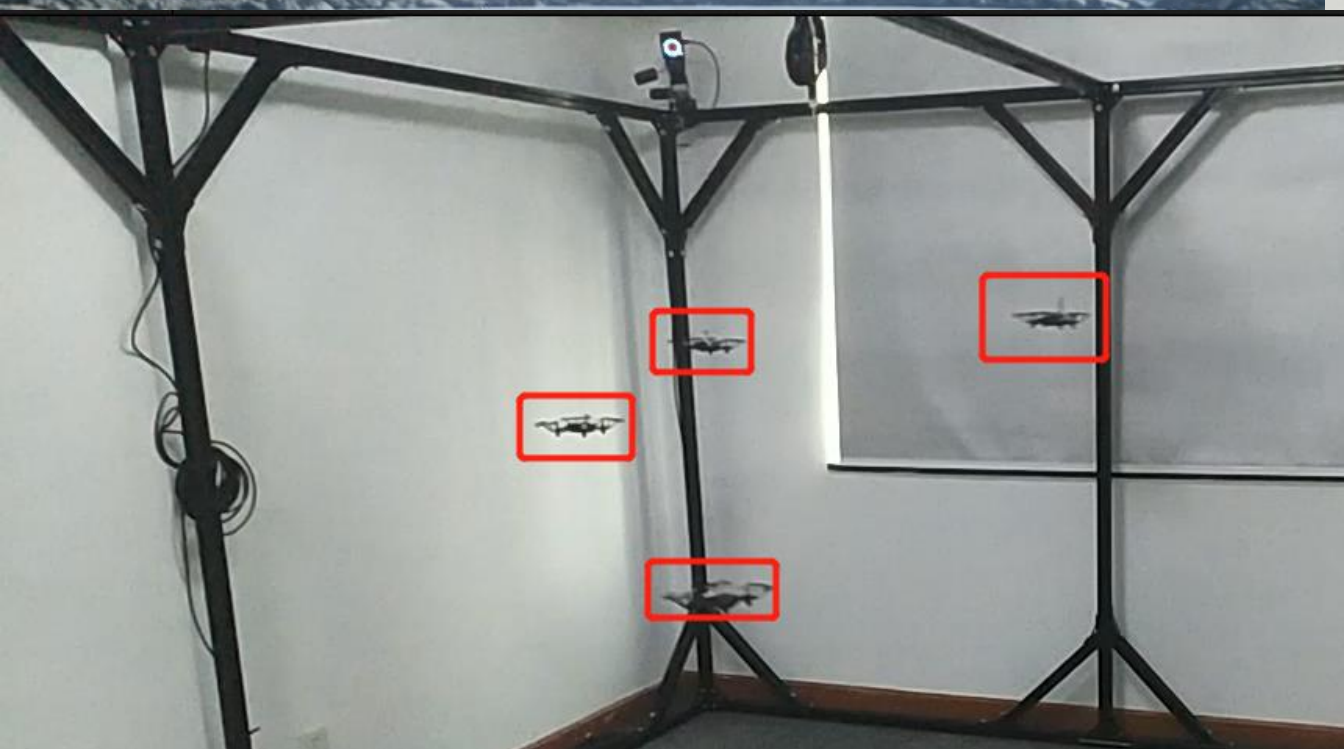
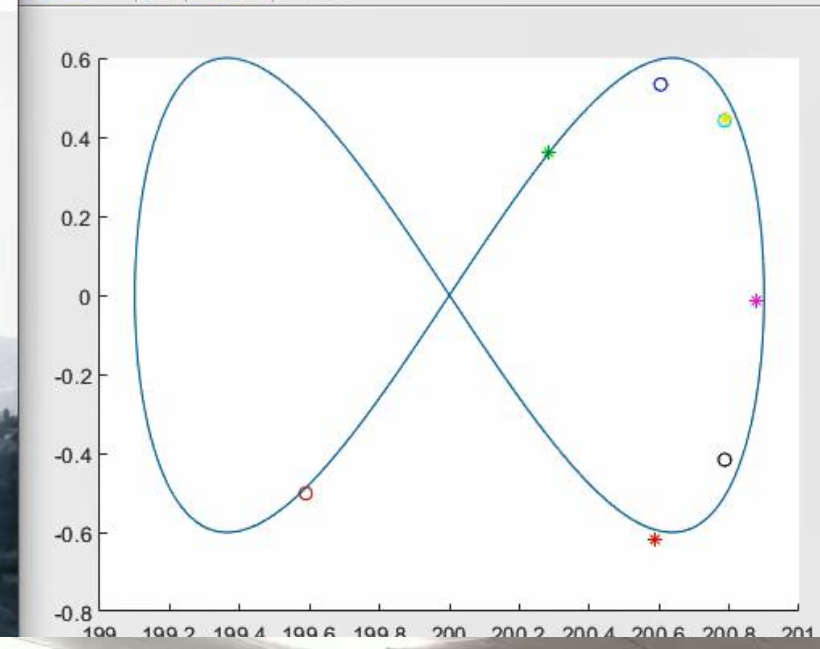
本视频观看地址:

优酷: https://v.youku.com/v_show/id_XNDcwNjA4NDU2OA==.html

YouTube: <https://youtu.be/sLiAtdHL6FY>



在RflySim仿真平台中利用软件/硬件在环实现八个飞机8字编队验证





大纲

1. RflySim平台理念与目标
2. 单机控制与测试解决方案
3. 集群控制与测试解决方案
4. 视觉/AI控制算法与测试解决方案
5. 总结



视觉仿真问题与解决方案

- **问题一：如何实现高速取图？**

解决方案：不在UE4程序内部取图（Airsim采用此方式，开启图像采集会严重掉帧），采用Python/C/Simulink直接读取RflySim3D的图像，减少中间环节，720P多窗口图像读取消耗用时间在5ms以内（200Hz以上），且不会干扰UE4渲染效率

- **问题二：如何实现多目相机的获取**

解决方案：支持开启任意个RflySim3D窗口，每个窗口可以独立配置显示视角（机载相机或者地面观察视角等）

- **问题三：如何配置分辨率、相机位置、几号飞机取图？**

解决方案：支持通过键盘快捷键调整，也支持通过UDP发送指令来控制RflySim3D的视角显示参数。

- **问题四：如何保证仿真结果可直接用于真机？**

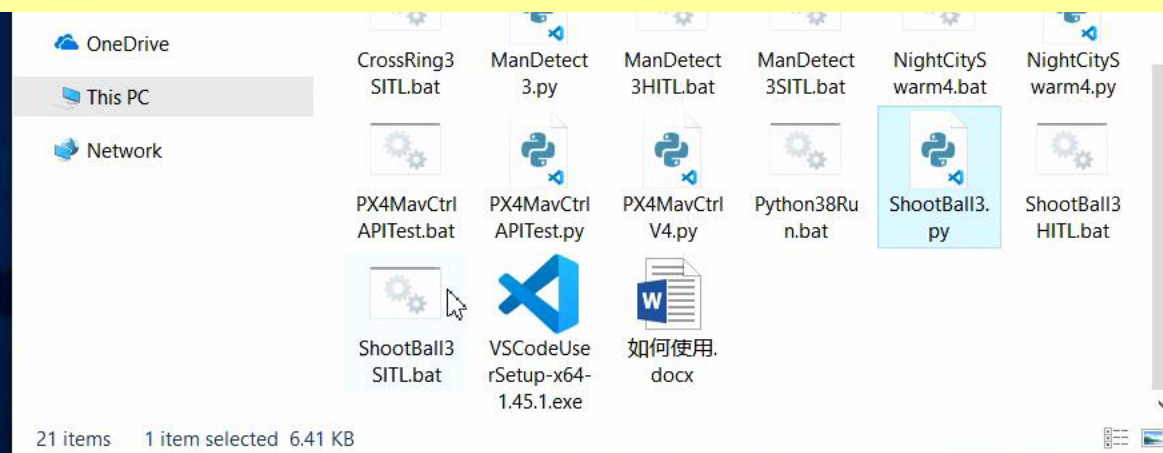
解决方案：我们提供的控制接口底层直接收发Mavlink数据，由于使用跨平台的Python语言，直接拷贝机载计算机就能使用。（后续会提供Simulink视觉接口，支持代码生成）

RflySim: 13. 如何利用Python/OpenCV来对多旋翼无人机进行视觉导航控制

本视频观看地址:

优酷: https://v.youku.com/v_show/id_XNDcwNjA4NTYwNA==.html

YouTube: <https://youtu.be/PvxEfY7oMq4>



双击例程提供的**bat**脚本可以快速启动软/硬在环软件和期望数量的三维程序

RflySim: 14. 如何获取双目图像并用于无人机控制，并将算法部署到真机上

本视频观看地址：

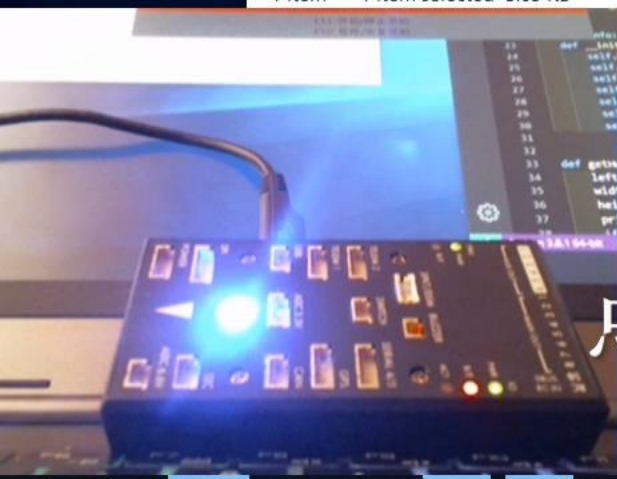
优酷：https://v.youku.com/v_show/id_XNDcwNjA4NzgxMg==.html

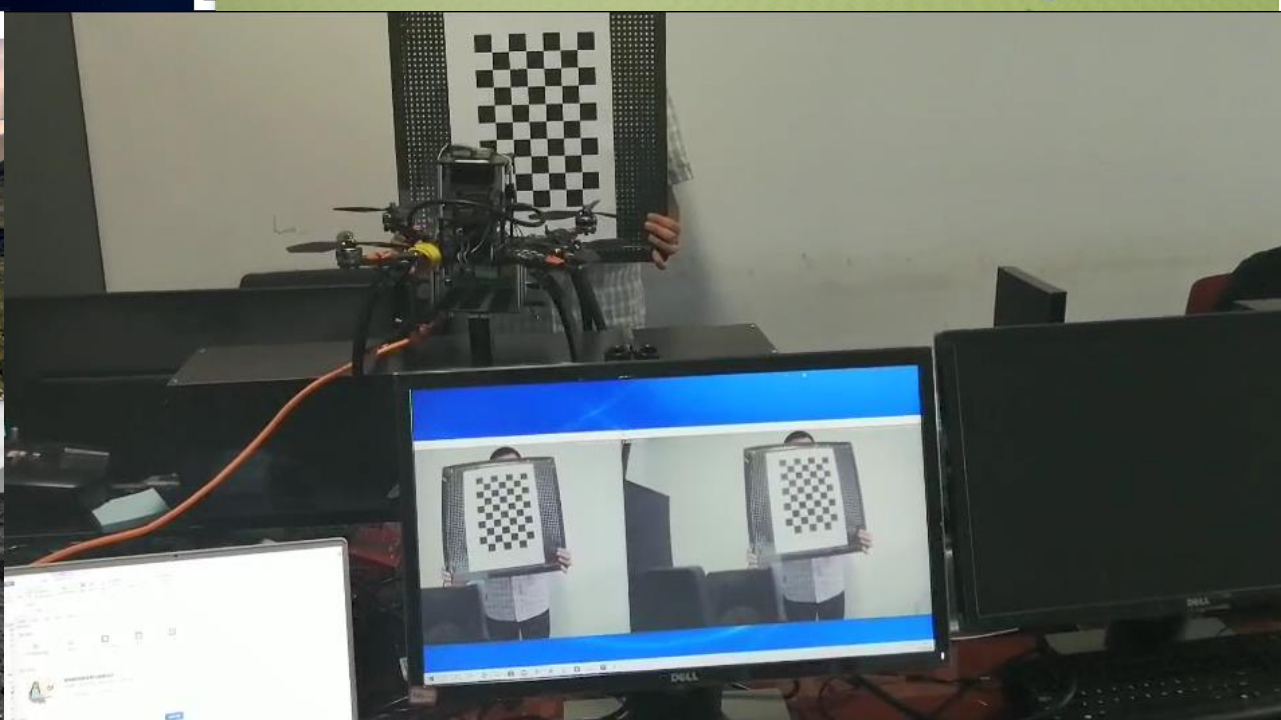
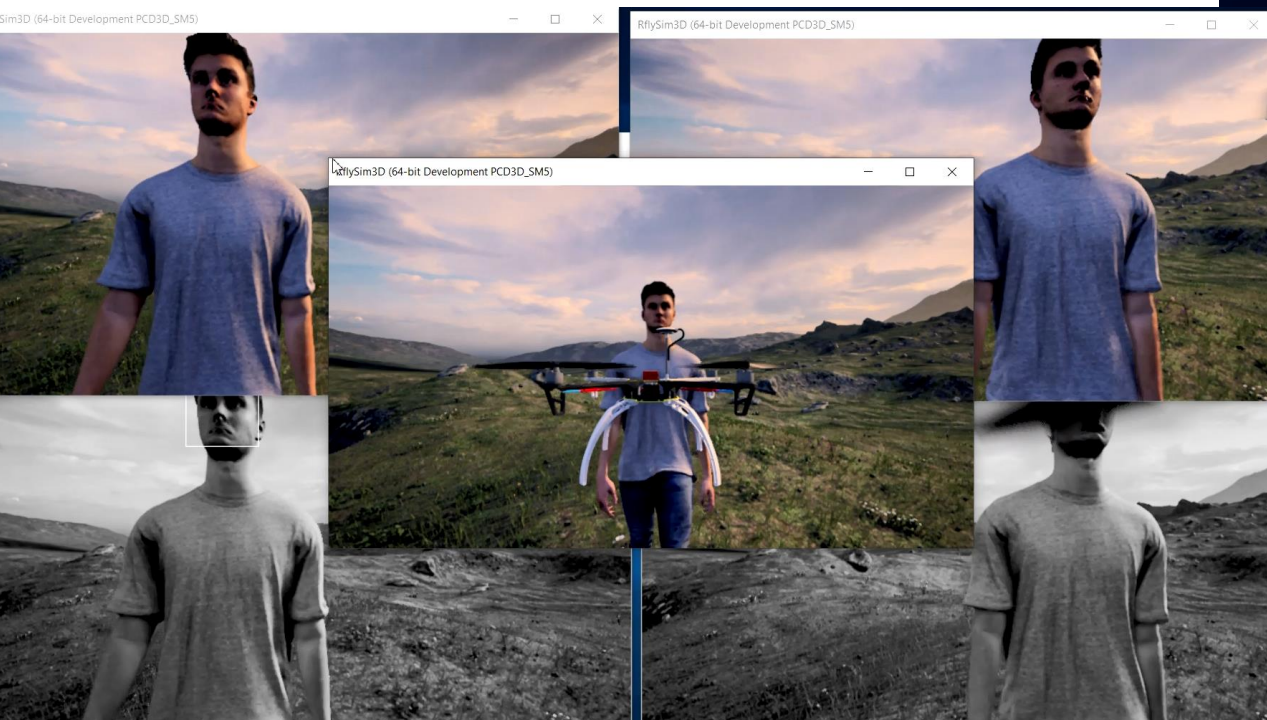
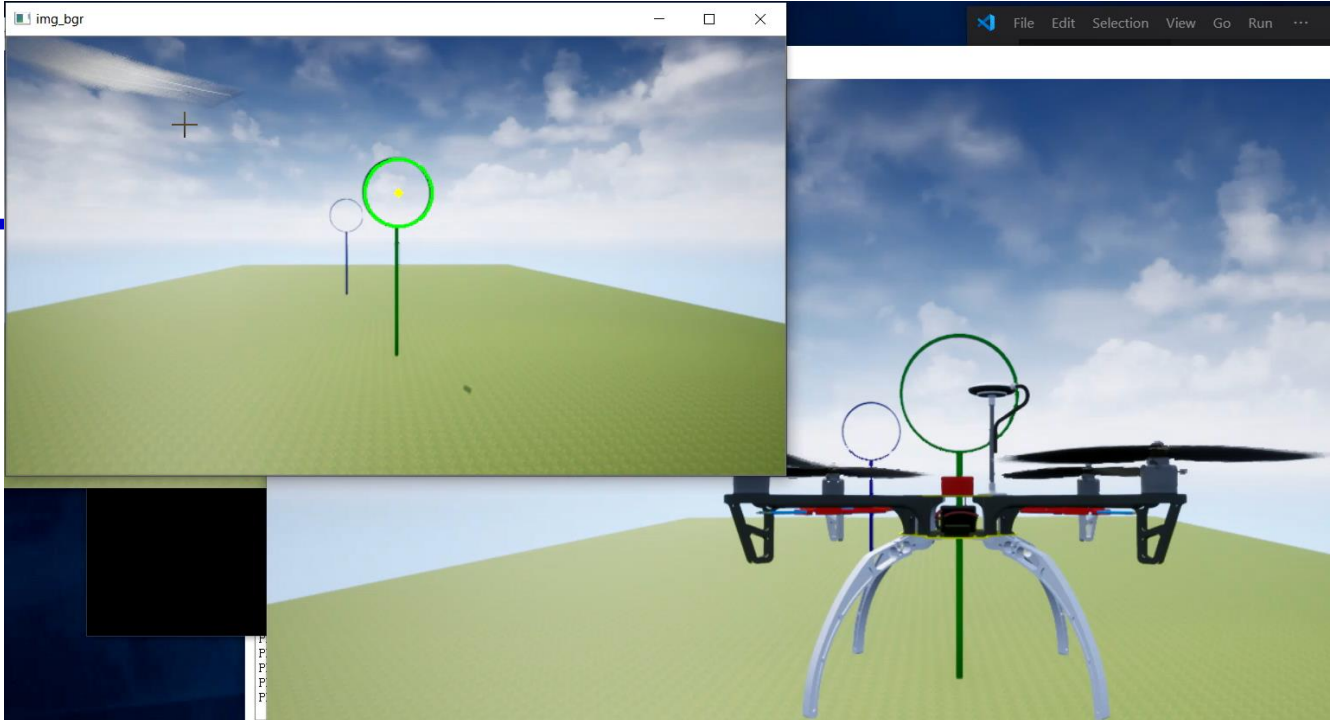
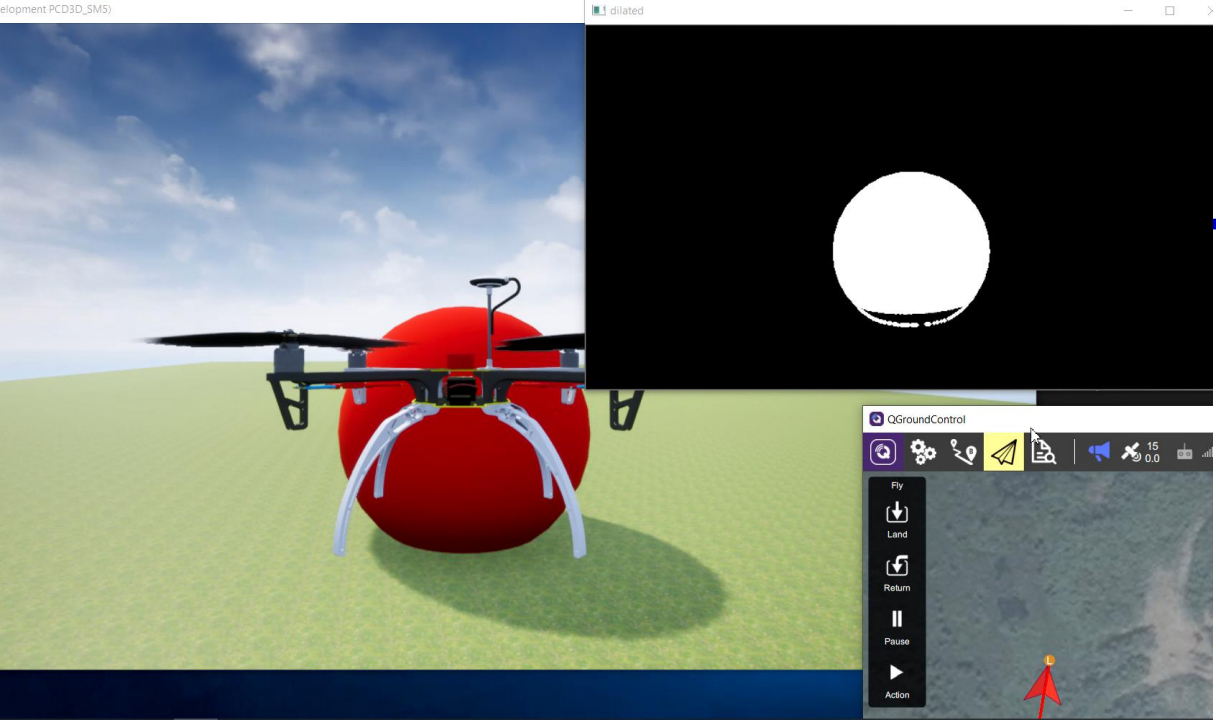
YouTube：<https://youtu.be/hm6i6UCQjCI>



```
11 import cv2
12 import numpy
13 import sys
14 import time
15 import math
16
17 def window_enumeration_handler(hwnd, window_hwnds):
18     if win32gui.GetClassName(hwnd) == "Unrealwindow":
19         window_hwnds.append(hwnd)
20
21
22 class WinInfo:
23     def __init__(self, hwnd, width, height, saveDC, saveBitMap,
24                 self.hwnd = hwnd
25                 self.width = width
26                 self.height = height
27                 self.saveDC = saveDC
28                 self.saveBitMap = saveBitMap
29                 self.mfcDC = mfcDC
30                 self.hwndDC = hwndDC
31
32
33 def getHwndInfo(hwnd):
34     left, top, right, bot = win32gui.GetClientRect(hwnd)
35     width = right - left
36     height = bot - top
37     print(width,height)
38     if hwnd and width == 0 and height == 0:
```

点击HIL硬件在环一键启动脚本







F450机架





大纲

1. RflySim平台理念与目标
2. 单机控制与测试解决方案
3. 集群控制与测试解决方案
4. 视觉/AI控制算法与测试解决方案
5. 总结



总结

RflySim为无人控制系统开发、测试与评估提供了一整套的解决方案，后续也会不断更新。

1. 更多的定制化的三维场景和demo可在官网下载
2. 更多视觉传感器的支持（激光雷达、点云等）
3. Simulink的视觉与机器学习接口的打通，让AI算法快速应用于真机
4. 更多机型模型的支持，无人车、固定翼、VTOL、无人船等
5. 标准化的模型库，使得模型可信度大大提高
6. 商业版的自动化安全测试、评估功能逐步上线
7. 在此平台上开发更多的课程，让AI无人系统入门与实验更简单



如何获取？如何使用？

访问我们的网站：<https://rflysim.com>

联系我们的邮箱：rflysim@163.com



谢谢!