

1. 实验名称及目的

1.1 实验名称

基于最小系统模板搭建的多旋翼模型介绍

1.2 实验目的

该例程以多旋翼模型为例对如何使用平台最小模板进行软/硬件在环仿真进行介绍，其中最小模版为平台满足仿真所需的最简化模型。

1.3 关键知识点

输入信号

最小模板必须的两个输入数据包括电机控制量和地形数据

电机控制信号inPWMs

输入接口inPWMs，16维执行器控制量输入，已归一化到-1到1尺度(通常电机是0-1，舵机是-1~1)，它的数据来自飞控回传的电机控制MAVLink消息mavlink_hil_actuator_controls_t的controls，具体定义如下：

```
typedef struct __mavlink_hil_actuator_controls_t {  
  
    uint64_t time_usec; //时间戳，从开机后的时间，单位ms  
  
    uint64_t flags; //标志位，用于显示当前的飞行状态  
  
    float controls[16]; //控制量，16维电机的控制量，发送到模型中，驱动飞机飞行  
  
    uint8_t mode; //模型，用于显示飞机当前的飞行模式和是否上锁等信息}  
mavlink_hil_actuator_controls_t;
```

软件在环仿真时，电机控制指令从PX4 SITL控制器通过TCP 4561系列端口以MAVLink协议发送到运动仿真模型的inPWMs接口，而硬件在环仿真时，该指令是从飞控通过串口以MAVLink协议发送到运动仿真模型的inPWMs接口。

地形数据TerrainIn15d的第一维

最小模板通过TerrainIn15d从CopterSim中读取当前地形高度数据（由\PX4PSP\CopterSim\external\map中地形高程文件png和txt提供），由于最小模板默认地面坡度值为0，故只能使用平坦地形仿真

输出信号

最小模型模版包含了三个输出信号，分别是HILSensor30d、MavHILGPS、VehileInfo60d。

HILSensor30d（传感器接口集合）

模型发送给飞控的各种传感器数据的集合，对应了MAVLink的mavlink_hil_sensor_t消息，本结构体包含了，加速度传感器的加速度值、陀螺仪传感器的角速度值、磁罗盘传感器的磁场值，气压和空速传感器的气压值等。这些传感器的值在仿真时由我们的模型提供，在真机飞行时由真实传感器芯片提供。

```
typedef struct __mavlink_hil_sensor_t {  
  
    uint64_t time_usec; /*时间戳，单位毫秒ms*/  
  
    float xacc; /*机体坐标系x方向加速度，单位m/s^2 */  
  
    float yacc; /*机体坐标系y方向加速度，单位m/s^2 */  
  
    float zacc; /*机体坐标系z方向加速度，单位m/s^2 */  
  
    float xgyro; /*机体坐标系x方向角速度，单位rad/s */  
  
    float ygyro; /*机体坐标系y方向角速度，单位rad/s */  
  
    float zgyro; /*机体坐标系z方向角速度，单位rad/s */  
  
    float xmag; /*机体坐标系x方向磁通量，单位Gauss =T/10000*/  
  
    float ymag; /*机体坐标系y方向磁通量，单位Gauss =T/10000*/  
  
    float zmag; /*机体坐标系z方向磁通量，单位Gauss =T/10000*/  
  
    float abs_pressure; /*绝对气压值，单位 millibar=100Pa*/  
  
    float diff_pressure; /*相气压值，单位 millibar=100Pa*/  
  
    float pressure_alt; /*气压解算高度值，单位m*/  
}
```

```
float temperature; /*温度, 单位摄氏度*/
```

```
uint32_t fields_updated; /*传感器参数初始化标志位, bit 0 = xacc, bit 12:  
temperature, bit 31:全部重新初始化 */
```

```
}) mavlink_hil_sensor_t;
```

■ MavHILGPS (GPS接口)

模型发送给飞控的GPS数据值, 它对应了MAVLink消息的mavlink_hil_gps_t结构体。输出信号中包含了经纬高、水平竖直精度、地速、北东地的速度、偏航角、定位状态和卫星数量等数据。

这些传感器的值在仿真时由我们的模型提供, 在真机飞行时由真实GPS模块提供。

```
typedef struct __mavlink_hil_gps_t {
```

```
uint64_t time_usec; /*时间戳, 单位毫秒ms*/
```

```
int32_t lat; /*纬度(WGS84地球模型), 单位度, 再乘以 1E7*/
```

```
int32_t lon; /*经度(WGS84地球模型), 单位度, 再乘以 1E7*/
```

```
int32_t alt; /*高度 (AMSL地球模型, 而不是 WGS84), 单位m, 再乘以1000  
(向上为正)*/
```

```
uint16_t eph; /*GPS水平方向定位精度, 单位cm, 如果不知道设为 65535*/
```

```
uint16_t epv; /*GPS竖直方向定位精度, 单位cm, 如果不知道设为 65535*/
```

```
uint16_t vel; /*GPS地速, 单位cm/s, 如果不知道设为 65535*/
```

```
int16_t vn; /*GPS地速朝北方向分量, 单位cm/s */
```

```
int16_t ve; /*GPS地速朝东方向分量, 单位cm/s */
```

```
int16_t vd; /*GPS地速朝下方向分量, 单位cm/s */
```

```
uint16_t cog; /*运动方向, 单位和范围0~359.99度, 再乘以100 degrees *  
100, 如果不知道设为 65535*/
```

```
uint8_t fix_type; /*定位类型 0-1: no fix, 2: 2D fix, 3: 3D fix. */
```

```
uint8_t satellites_visible; /*可见卫星数, 如果不知道设为255*/
```

```
}) mavlink_hil_gps_t;
```

注：GPS数据的发送频率与真实传感器硬件基本相同为10Hz，因此飞控的实时位置并不能靠GPS直接提供，需要与IMU等传感器进行融合滤波估计得到。

▀ VehileInfo60d（真实仿真数据输出）

模型发送给RflySim3D的真实仿真数据，是平滑的理想值，这些数据可用于Simulink下的飞控与模型进行软件仿真测试。

```
struct SOut2Simulator {  
  
int copterID; //飞机ID，用于区分局域网内不同飞机  
  
int vehicleType;  
//飞机样式，区分同种飞机（如四旋翼）下的不同样式（例如，大疆、AR.Drone）  
  
double runnedTime; //时间戳，当前时刻的时间，单位毫秒  
  
float VelE[3]; //速度向量，地球坐标系的xyz速度（z向下为正），单位m/s  
  
float PosE[3];  
//位置向量，地球坐标系下的xyz方向（z向下为正，单位m，以起飞点为坐标原点  
  
float AngEuler[3]; //姿态角，飞机的欧拉角，定义于机体坐标系，单位弧度  
  
float AngQuatern[4]; //四元数，飞机姿态的四元数，定义于机体坐标系  
  
float MotorRPMS[8]; //电机转速，飞机的各个旋翼转速，单位转每分  
  
float AccB[3]; //加速度，飞机的运动加速度，单位m/s^2  
  
float RateB[3]; //角速度，飞机的转动角速度，单位rad/s  
  
double PosGPS[3]; //GPS坐标，飞机的经纬高坐标，单位度、度、米  
  
};
```

▀ 载具模型的组成模块和参数

- 最小模板的组成模块和参数见：

[\[RflySim安装目录\]/RflySimAPIs/RflySimSDK/html/md_ctrl_2md_2MinModelTemp.html](#)

2. 实验效果

实现最小模型DLL模型文件生成，以及完成最小模型无人机软/硬件在环仿真。



3. 文件目录

例程目录：

[\[安装目录\]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\1.BasicExps\e1_MinModelTempLib](#)

文件夹/文件名称	说明
Exp1_MinModelTemp.slx	四旋翼机模型文件。
MavLinkStruct.mat	包含数据结构体。
Exp1_MinModelTemp_SITL.bat	软件在环仿真批处理文件。
Exp1_MinModelTemp_HITL.bat	硬件在环仿真批处理文件。
GenerateModelDLLFile.p	DLL格式转化文件。
Exp1_MinModelTemp_init.m	四旋翼动力模型相关参数。

4. 运行环境

4.1 软件要求

Windows 10及以上版本；RflySim工具链；MATLAB 2017b及以上③。

①：若使用Pixhawk 6X飞控，平台安装时的编译命令为：px4_fmu-v6x_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>

4.2 硬件要求

笔记本/台式电脑① 1台；Pixhawk 6X或其它飞控② 1台；数据线 1台。

①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

5. 实验步骤

5.1. 必做实验：DLL模型生成

Step 1: 编译模型

打开“Exp1_MinModelTemp.slx”文件，点击编译（“Build Model”）按钮。

编译配置可参考 [4.RflySimModel\0.ApiExps\2.UserDefinedC++\2.GenC++\Readme.pdf](#)

名称	修改日期	类型	大小
Exp1_MinModelTemp.slx	2023/10/25 16:26	Simulink Model	66 KB
Exp1_MinModelTemp_HITL.bat	2023/10/24 15:33	Windows 批处理...	6 KB
Exp1_MinModelTemp_init.m	2023/10/24 15:33	Objective C 源文件	3 KB
Exp1_MinModelTemp_SITL.bat	2023/10/24 15:33	Windows 批处理...	6 KB
GenerateModelDLLFile.p	2023/10/17 15:11	MATLAB.p.9.14.0	6 KB
MavLinkStruct.mat	2023/10/17 15:11	MATLAB Data	5 KB
Readme.docx	2023/10/17 15:11	Microsoft Word ...	3,848 KB
Readme.pdf	2023/10/24 15:33	Foxit PhantomP...	528 KB
MulticopterModel.zip	2023/10/25 16:26	压缩(zipped)文件...	100 KB
Exp1_MinModelTemp.dll	2023/10/25 16:26	应用程序扩展	226 KB

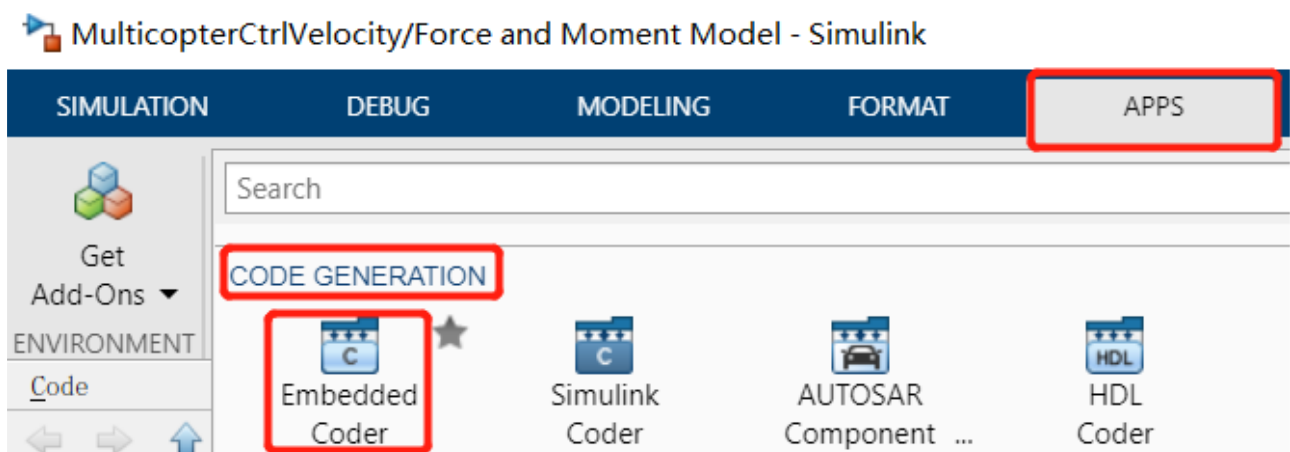
与常规载具模型先比，最小模型特点如下：

在Exp1_MinModelTemp.slx的Motor Model中，只有inPWMs与TerrainZ两个系统输入，HILSensor30d、HILGPS30d与MavVehile3DInfo三个系统输出；相较于其他模型特别是最大模型Exp2_MaxModelTemp.slx可实现功能较少。

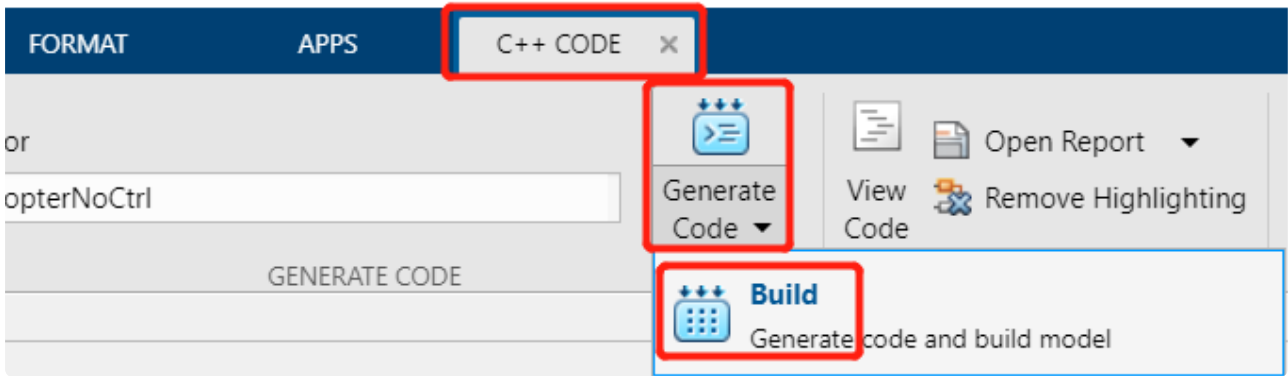
对于MATLAB 2019a及之前版本，工具栏样式见下图，直接点击它的编译按钮“Build”即可。



对于2019b及之后版本，点击APPS - CODE GENERATION - Embedded Coder才能弹出代码生成工具栏，在其中如下图所示点击“C++CODE” - “Generate Code” - “Build”按钮就能编译生成代码。

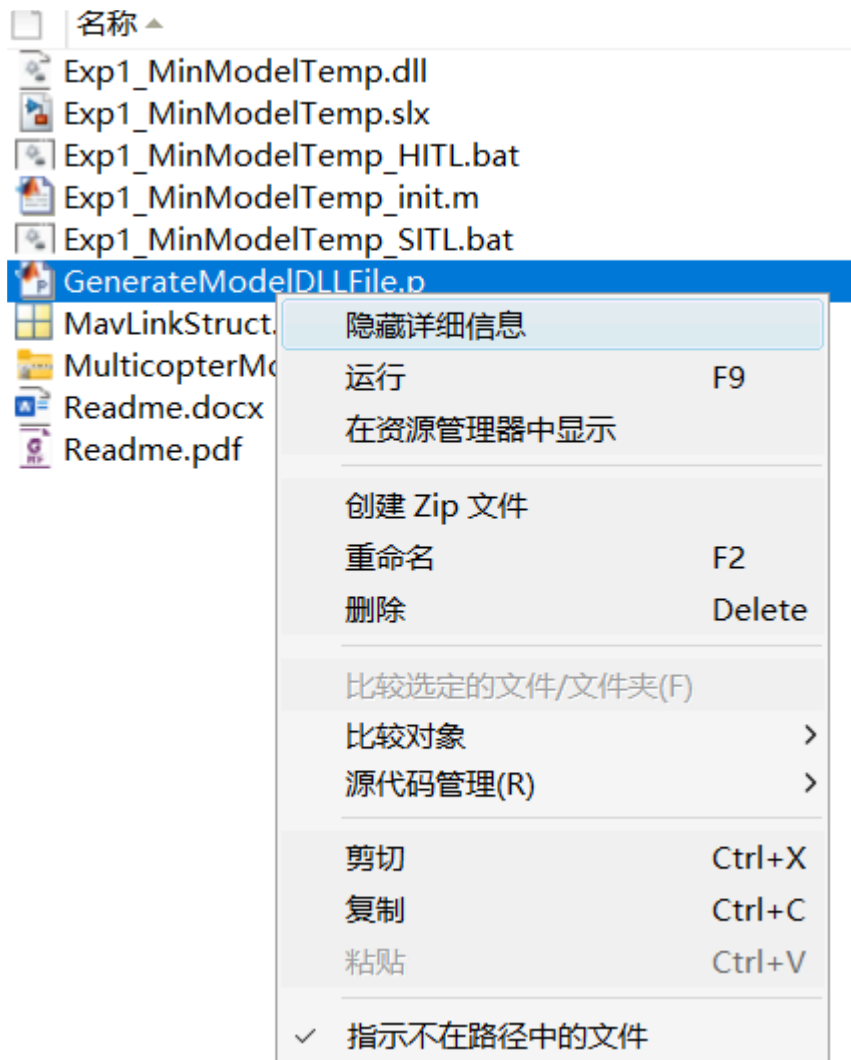


k



Step 2: 生成DLL文件

编译完成后，右键GenerateModelDLLFile.p并点击运行（或者在MATLAB的命令行窗口中输入GenerateModelDLLFile后回车），即可以得到“Exp1_MinModelTemp.dll”的DLL模型文件。



命令行窗口

```
fx >> GenerateModelDLLFile|
```

命令行窗口

用于 x64 的 Microsoft (R) C/C++ 优化编译器 19.16.27051 版
版权所有 (C) Microsoft Corporation。保留所有权利。

```
modeldllgen.cpp
```

```
cl modeldllgen.obj Expl_MinModelTemp.obj /link /DLL /out:Expl_MinModel1
```

用于 x64 的 Microsoft (R) C/C++ 优化编译器 19.16.27051 版
版权所有 (C) Microsoft Corporation。保留所有权利。

```
Microsoft (R) Incremental Linker Version 14.16.27051.0  
Copyright (C) Microsoft Corporation. All rights reserved.
```

```
|  
/out:modeldllgen.exe  
/DLL  
/out:Expl_MinModelTemp.dll  
modeldllgen.obj
```

```
Expl_MinModelTemp.obj
```

```
正在创建库 Expl_MinModelTemp.lib 和对象 Expl_MinModelTemp.exp
```

```
Compiling successfully, the Expl_MinModelTemp.dll has been generated.
```

```
fx >> |
```

5.2. 必做实验：软件在环仿真

Step 1: 启动仿真

以管理员身份运行“[Exp1_MinModelTemp_SITL.bat](#)”脚本，在提示框中输入“1”后并回车，系统将自动打开RflySim平台，并完成软件在环仿真所有需要配置。

```
C:\Windows\system32\cmd.e: X + v
已复制 1 个文件。
-----
Please input UAV swarm number:1
```

注：在“Exp1_MinModelTemp_SITL.bat”软件在环的脚本文件中，需要设置对应无人机的DLL名：

```
REM Set use DLL model name or not, use number index or name string
REM This option is useful for simulation with other types of vehicles instead of multicopters
set DLLModel=Exp1_MinModelTemp
```

在SimMode处选择CopterSim中对应的软件在环仿真模式：

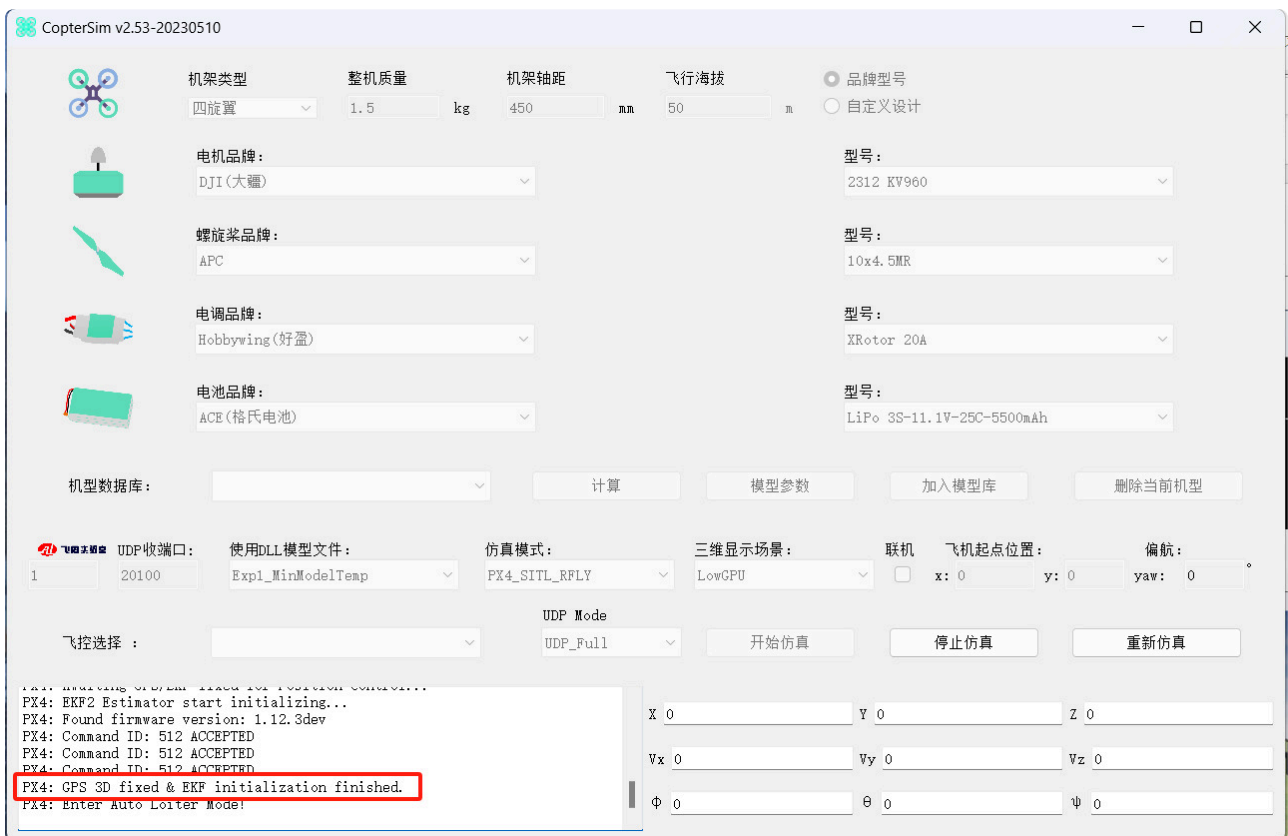
```
REM Set the simulation mode on CopterSim, use number index or name string
REM e.g., SimMode=2 equals to SimMode=PX4_SITL_RFLY
set SimMode=2
```

在机架设置处设置四旋翼的对应机架，若不设置对应机架则仿真的默认机架为四旋翼：

```
REM Set the vehicle-model (airframe) of PX4 SITL simulation, the default airframe is a quadcopter: iris
REM Check folder Firmware\ROMFS\px4fmu_common\init.d-posix (or init.d/airframes) for supported airframes (Note: You can also create your a
REM E.g., fixed-wing aircraft: PX4SITLFrame=plane; small cars: PX4SITLFrame=rover
set PX4SITLFrame=iris
```

Step 2: 等待初始化完成

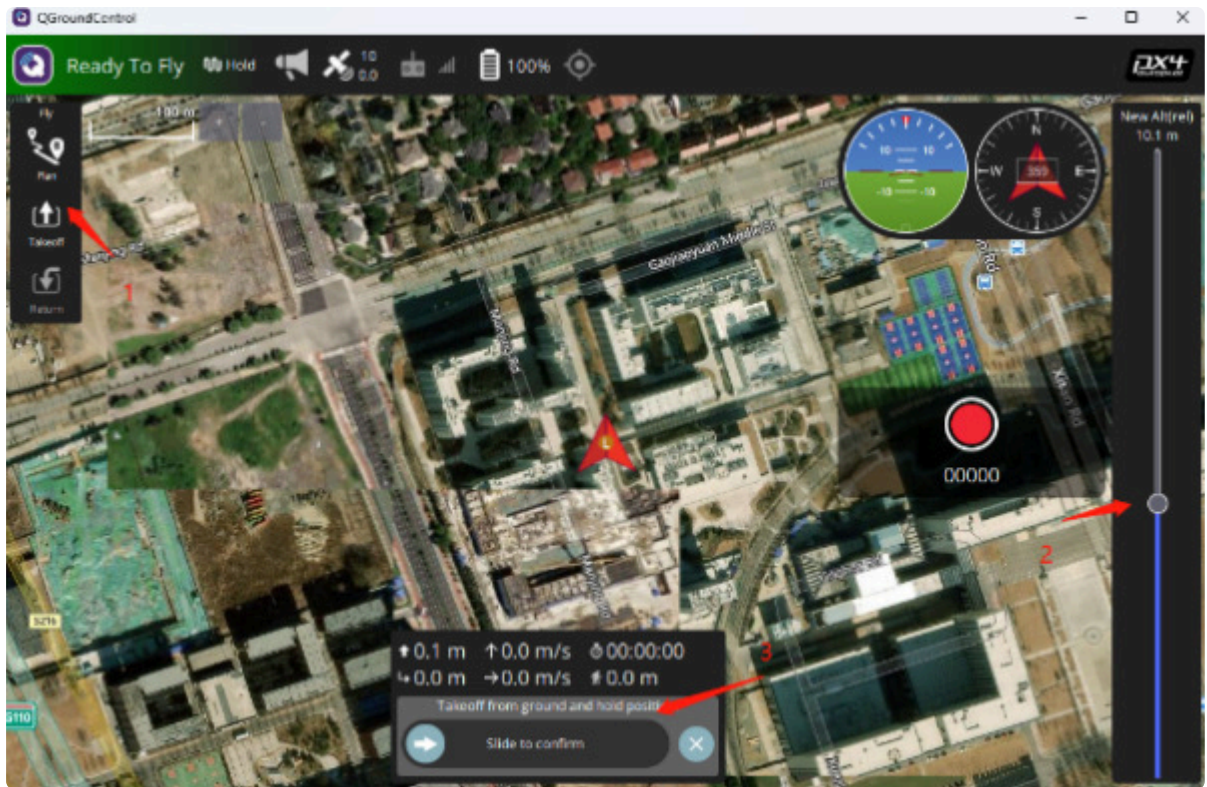
当RflySim3D显示“CopterSim/PX4 EKF 3D Fixed:1/1”，CopterSim显示“PX4: GPS 3D fixed & EKF initialization finished.”时，表明RflySim平台已完成初始化，可以进行软件在环仿真。



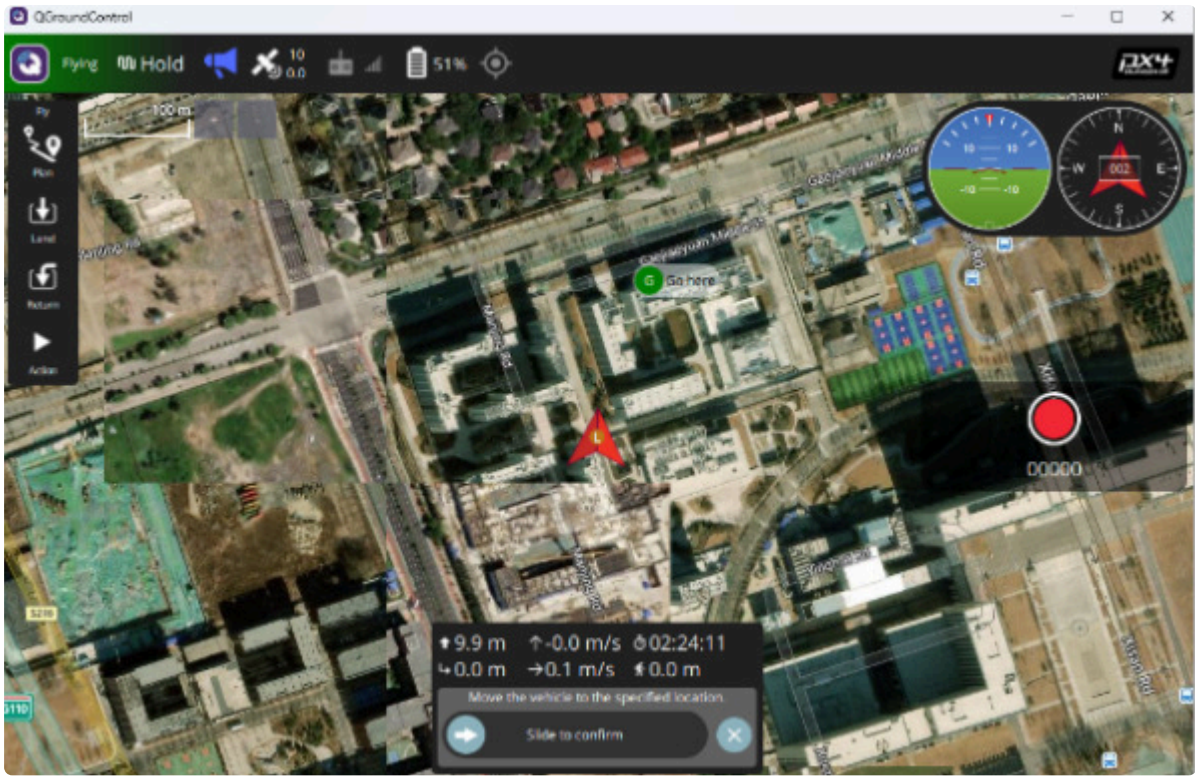
Step 3: 观测结果

在QGC中观察是否能正常控制飞机的起飞、降落、航路飞行等行为。

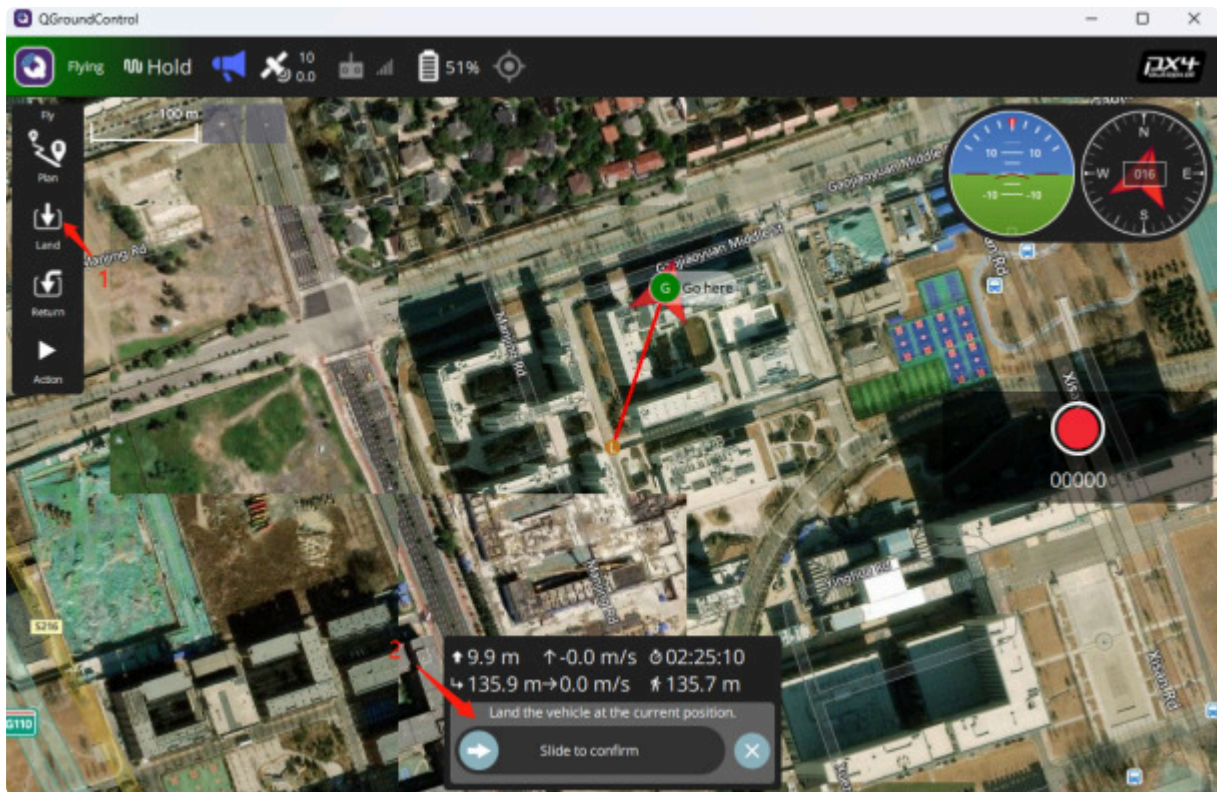
1. 起飞



2. 飞行



3. 着陆



注：由于本接口没有使用地形模块，地形高度始终为0，因此只能适用于平地场景不能使用Grassland等带地形的地图。

5.3. 选做实验：硬件在环仿真












Step 1: 连接飞控

如下图所示，将飞控通过USB线连接电脑，并确保完成硬件在环仿真配置。注意，本图使用Pixhawk6x飞控，其他飞控配置方法类似（推荐使用Pixhawk飞控）。

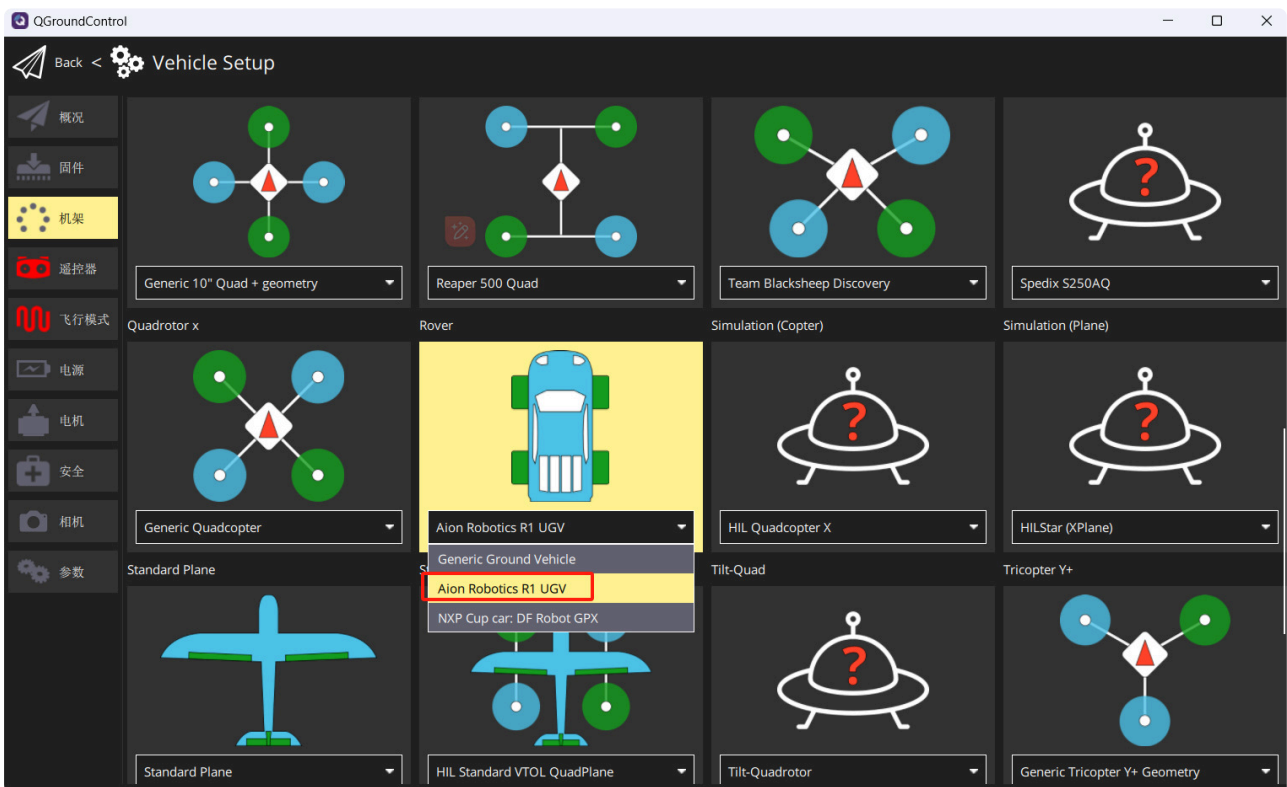


Step 2: 设置硬件在环机架

在 Rflytools 文件夹中打开 QGC 地面站。

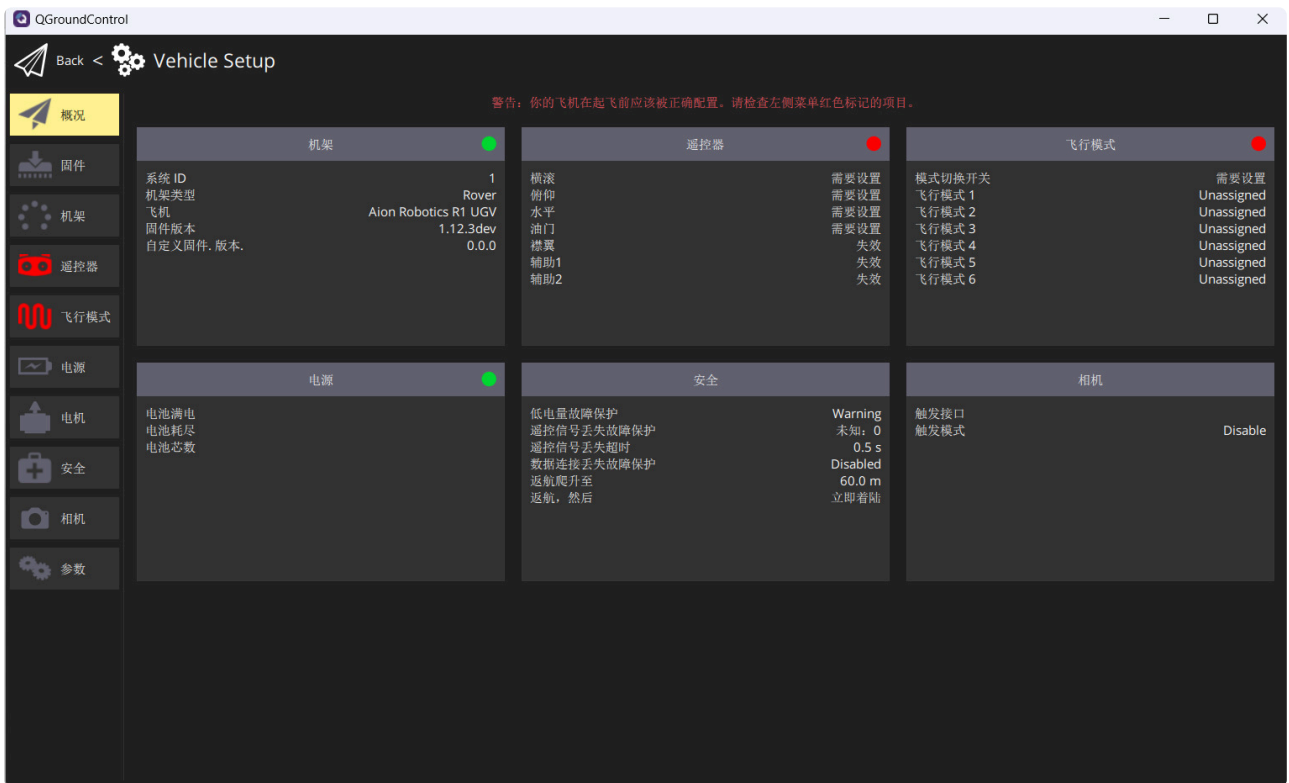
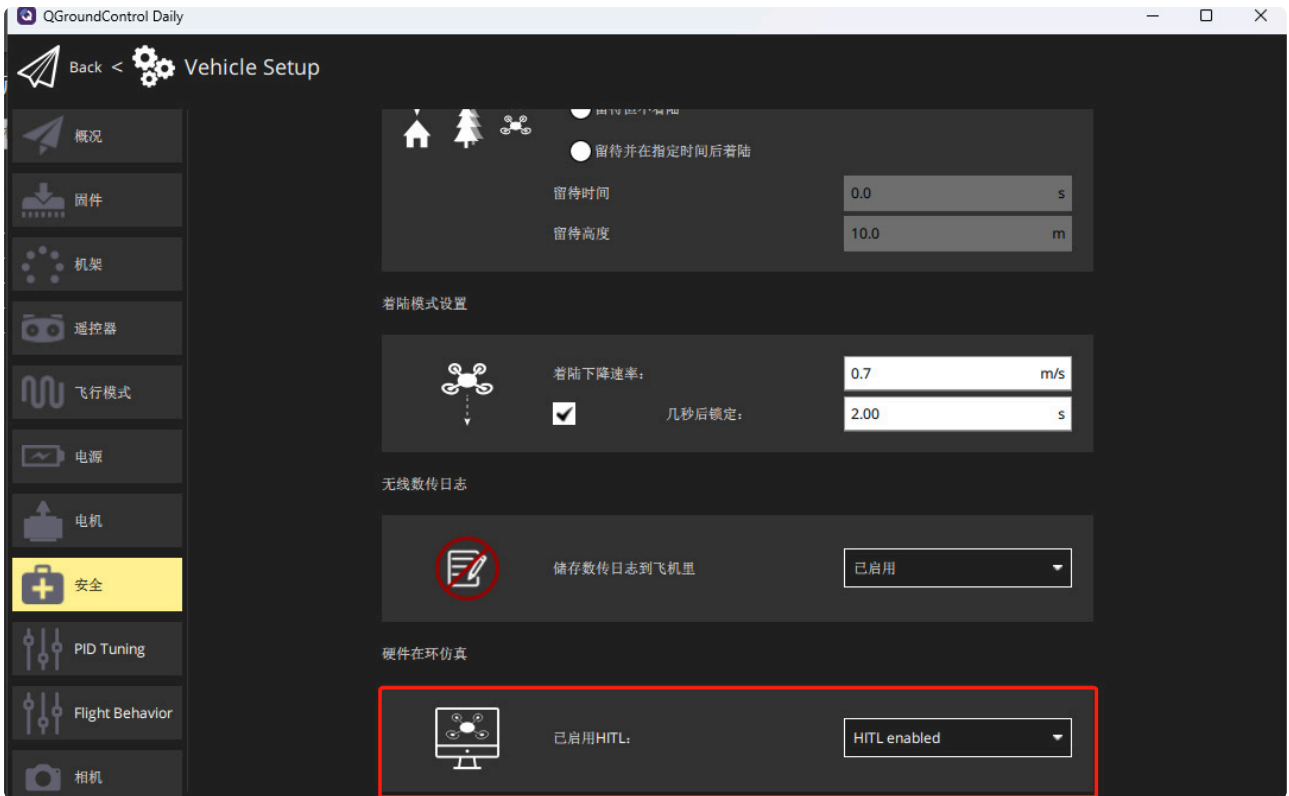
 3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 QGroundControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySimUE5	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 SITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 Win10WSL	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB

在机架界面设置机架型号为“HIL Quadcopter X”。，设置完毕后点击右侧“应用并重启”。



Step 3: 配置硬件在环参数

在“安全”界面，选择“HITL enabled”启动硬件在环仿真，之后在概况界面中确认配置完成后，重新插拔飞控完成设置。



Step 4: 启动仿真

完成配置后，以管理员身份运行 `Exp1_MinModelTemp_HITL.bat`，在光标处输入飞控和电脑连接的端口号后回车即可启动平台最小模型的硬件在环仿真。

```
C:\WINDOWS\System32\cmd.exe
已复制      1 个文件。

-----
Please, input the Pixhawk COM port list for HITL
Use ',' as the separator if more than one Pixhawk
E.g., input 3 for COM3 of Pixhawk on the computer
Input 3,6,7 for COM3, COM6 and COM7 of Pixhawks

Available COM ports on this computer are:
COM3: USB ???

Recommended COM list input is: 3

-----
My COM list for HITL simulation is:3_
```

注：在“[Exp1_MinModelTemp_HITL.bat](#)”硬件在环的脚本文件中，同样需要设置对应的DLL名：

```
REM Set use DLL model name or not, use number index or name string
REM This option is useful for simulation with other types of vehicles instead of multicopters
set DLLModel=Exp1_MinModelTemp
```

在SimMode处选择CopterSim中对应的硬件在环仿真模式：

```
REM Set the simulation mode on CopterSim, use number index or name string
REM e.g., SimMode=0 equals to SimMode=PX4_HITL
set SimMode=0
```

与软件在环仿真不同的是，在之前的配置准备环节中已经在QGC中设置了对应机架，所以在该脚本文件中不用设置机架。

Step 5: 仿真过程

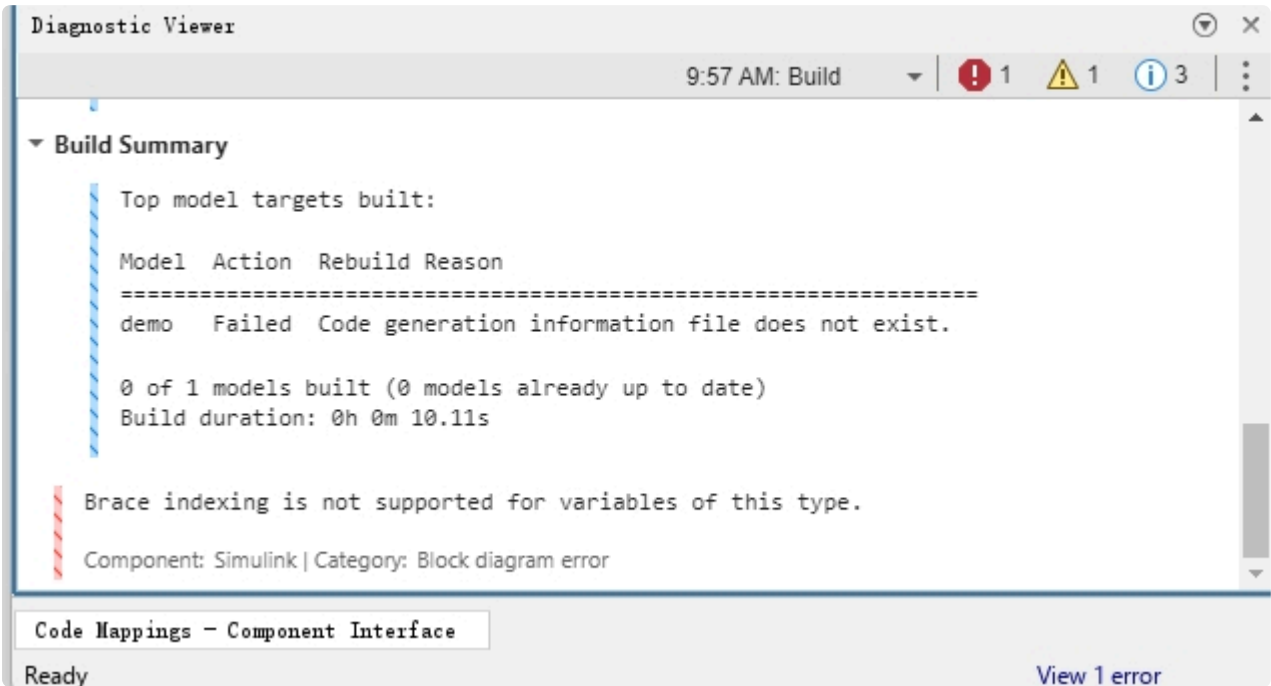
之后测试步骤与软件在环仿真的相同，仿真效果和软件在环一致。支持航点、航线、遥控器、Offboard等控制方式。

6. 参考资料

1. PX4PSP\RflySimAPIs\4.RflySimModel\API.pdf中DLL/SO模型与通信接口的重要参数部分。
2. [\[RflySim安装目录\]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/API.pdf](#)
3. [\[RflySim安装目录\]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/API.pdf](#)

7. 常见问题

Q1: 未正确安装visual studio c++编译环境并配置mex，导致Simulink文件编译失败



A1: 首先将低于当前MATLAB版本的Visual Studio C++编译环境安装到VS默认安装目录，然后在MATLAB的命令行窗口中输入指令“mex -setup”，一般来说会自动识别并安装上支持的编译器，命令行显示“MEX 配置使用 ‘Microsoft Visual C++ 2017’ 以进行编译”的字样说明安装正确。详细环境配置参考” [RflySim平台安装目录]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\API.pdf “中的环境配置



Q2: 编译报错，无法加载库文件



A2: 这可能是由于安装平台时PX4PSP工具箱未更新到最新版，更新RflySim安装包后按照如下配置重新安装平台即可

