

螺旋轨迹规划与实时速度控制实验

1. 实验目的

本实验旨在通过控制无人机执行螺旋轨迹飞行任务，帮助用户掌握以下技能和知识：

1. 理解螺旋轨迹规划的基本原理，掌握三维空间中复杂连续曲线轨迹的参数化表示方法；
2. 掌握基于实时速度控制的无人机三维轨迹跟踪技术，学习如何通过速度指令实现垂直和水平方向的复合运动；
3. 学习螺旋轨迹中角速度、垂直速度和径向速度的协调控制方法，理解多维速度分量的合成原理；
4. 理解实时轨迹生成的概念，掌握在飞行过程中动态计算三维轨迹参数的方法；
5. 掌握Offboard模式下实现复杂三维连续轨迹控制的完整流程，理解多维运动控制的重要性。

2. 实验要求

- 软件要求：Windows 10及以上版本；RflySim工具链^[1]。
- 硬件要求：笔记本/台式电脑1台^[2]。

3. 文件介绍

例程路径：

[\[安装目录\]\RflySimAPIs\6.RflySimExtCtrl\2.AdvExps\4.TrajPlanExps\4.SpiralTrajMotion](#)

[Python38Run.bat](#)：Python环境运行脚本。

[SITLRun.bat](#)：仿真环境启动脚本。

[UAVCtrl.py](#)：主要控制代码，实现螺旋轨迹规划算法。

[index.html](#)：Web界面文件。

4. 实验内容或步骤

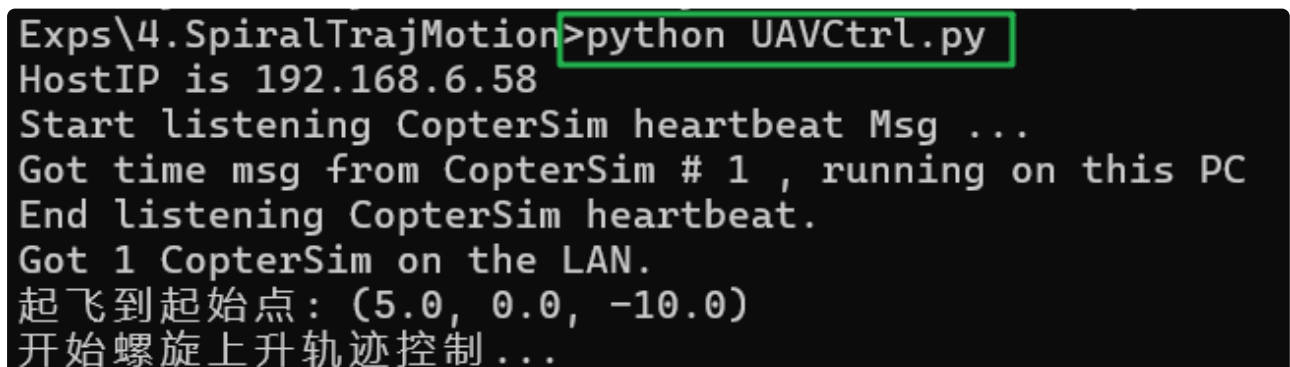
4.1 步骤1：初始化仿真环境

双击运行 `SITLRun.bat` 文件，等待仿真环境初始化完成。脚本将会启动 1 个 QGC 地面站，1 个 CopterSim、1 个 RflySim3D 软件，等待CopterSim软件下侧日志栏必须打印出 `GPS 3D fixed & EKF initialization finished` 字样代表初始化完成。如下图所示：



4.2 步骤2：运行控制程序

双击运行 `Python38Run.bat` 脚本，在弹出的对话框重视输入：`python UAVCtrl.py`。



4.3 步骤3：观察仿真

可以看到无人机开始解锁并上升到10米高度后，开始按照螺旋上升轨迹飞行，然后降落，

在RflySim3D界面下依次按下"D"、"T"将显示无人机飞行状态量和飞行轨迹。

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.  x  +  v  -  □  X

HostIP is 192.168.6.58
Start listening CopterSim heartbeat Msg ...
Got time msg from CopterSim # 1 , running on this PC
End listening CopterSim heartbeat.
Got 1 CopterSim on the LAN.
起飞到起始点：(5.0, 0.0, -10.0)
开始螺旋上升轨迹控制 ...
轨迹参数：
  半径：5.0m
  角速度：34.4°/s
  高度变化：-10.0m -> -25.0m
  持续时间：40.0s
时间：1.0s, 位置：(4.1, -2.9, -10.4)
速度：3.02m/s, 垂直速度：-0.38m/s
当前半径：5.0m, 圈数：0.1
时间：2.0s, 位置：(1.7, -4.7, -10.8)
速度：3.02m/s, 垂直速度：-0.38m/s
当前半径：5.0m 圈数：0.2
```



5. 关键知识点

5.1 关键知识点1：螺旋轨迹规划原理与参数化表示

在 `UAVCtrl.py` 程序中，通过 `[generate_spiral_trajectory_realtime()]` 函数实现螺旋轨迹的参数化表示。该函数定义了螺旋的半径(radius)、中心坐标(center_x, center_y)、起始高度(start_height)、结束高度(end_height)、角速度(angular_velocity)等关键参数。与简单的圆形轨迹不同，螺旋轨迹是一种在三维空间中的复杂曲线轨迹，同时包含水平面上的圆周运动和垂直方向的线性运动。程序将螺旋轨迹表示为时间的函数，通过角速度和时间计算当前角度，通过时间进度计算当前高度，进而得到无人机在任意时刻的期望位置和速度。

5.2 关键知识点2：实时速度控制策略实现

程序采用实时速度控制来实现轨迹跟踪，这是通过 `[mav.SendVelNEDNoYaw()]` 函数实现的。在每个控制周期内，程序调用 `[get_spiral_velocity_at_time()]` 函数计算当前时刻的速度指令。该函数根据角速度和半径计算切向速度大小，然后通过三角函数分解为北向和东向速度分量，同时计算垂直方向的速度分量。这种三维速度控制方法相比位置控制能够实现更平滑的轨迹跟踪，特别是在轨迹转换处避免了急停急启现象。

5.3 关键知识点3：切向速度与角速度关系及多维速度合成

程序基于物理学中的螺旋运动原理，利用切向速度公式 $v_{\text{tangent}} = \omega \times r$ 计算无人机的切向速度大小。同时，程序还计算垂直方向的速度 $v_z = (\text{end_height} - \text{start_height}) / \text{duration}$ 。通过这种方式，程序可以保持恒定的角速度飞行，同时在垂直方向上实现线性运动。程序将切向速度和径向速度(本实验中为0)进行合成，得到水平面上的总速度，再与垂直速度合成得到最终的三维速度指令。

5.4 关键知识点4：实时轨迹生成与控制频率管理

程序采用实时轨迹生成机制，不需要预先计算所有轨迹点，而是在每个控制周期内根据当前时间计算期望的速度指令。通过 `[time.time()]` 获取系统时间，并结合轨迹开始时间计算已用时间，进而确定当前应处的位置和速度。程序采用30Hz的控制频率，通过 `[time.sleep(1/control_freq)]` 实现精确的时间控制，保证了轨迹跟踪的精度和实时性。

5.5 关键知识点5：起始点定位与轨迹初始化

程序首先将无人机飞到螺旋轨迹的起始点，即螺旋线底部圆周上角度为 0° 的点，坐标为 $(center_x + radius, center_y, start_height)$ 。这一步骤确保了无人机从正确的初始位置开始执行螺旋轨迹。随后程序记录轨迹开始时间，并进入实时控制循环。这种初始化方式保证了轨迹执行的准确性和连续性。

6. 参考资料

1. [RflySim官方文档](#)
2. [PX4官方文档](#)
3. [MAVLink协议文档](#)

7. 常见问题

Q1：仿真环境初始化失败怎么办？

A1：如果运行 [SITLRun.bat](#) 后，CopterSim 软件下侧日志栏没有打印出 "GPS 3D fixed & EKF initialization finished" 字样，请检查电脑配置是否达到要求，关闭杀毒软件和 Windows Defender，重新运行脚本。同时确保 RflySim 工具链已正确安装。

Q2：无人机无法按照预期螺旋轨迹飞行怎么办？

A2：检查 [UAVCtrl.py](#) 文件中的螺旋轨迹参数设置，确保半径、角速度、高度等参数设置合理。同时确认控制频率为 30Hz，过低的控制频率会影响轨迹跟踪精度。还可以适当调整速度控制参数以获得更好的跟踪性能。

Q3：如何修改螺旋轨迹的参数以适应不同的实验需求？

A3：在 [UAVCtrl.py](#) 文件中，可以通过修改 `generate_spiral_trajectory_realtime()` 函数的参数来自定义螺旋轨迹，包括 `radius`（半径）、`center_x/y`（中心坐标）、`start/end_height`（起止高度）、`angular_velocity`（角速度）等参数，以满足不同实验场景的需求。

1. <https://rflysim.com/> ↩

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