

垂直起降(VTOL)飞行器模式切换实验

1. 实验概述

1.1 实验名称

垂直起降(VTOL)飞行器模式切换实验

1.2 实验目的

深入研究垂直起降(VTOL)飞行器的复杂飞行控制技术，重点探讨多旋翼模式与固定翼模式间的平滑切换机制，并展示基于MAVLink协议的精确飞行轨迹控制方法。

1.3 理论背景

1.3.1 VTOL飞行器概述

垂直起降(Vertical Take-Off and Landing, VTOL)飞行器是一种兼具多旋翼无人机垂直起降能力和固定翼飞机长航时、高效率飞行特点的先进航空器。其核心优势在于：

- 无需跑道，可在狭小空间起降
- 具备悬停和定点飞行能力
- 可实现长距离、高效率巡航

1.3.2 飞行模式转换原理

VTOL飞行器的模式转换涉及复杂的飞行动力学和控制系统：

1. 多旋翼模式（垂直起降）

- 依靠多个旋翼提供升力
- 适用于悬停、起降和低速飞行
- 控制自由度高，机动性强

2. 固定翼模式（巡航）

- 利用机翼产生升力
- 适用于长距离、高效率飞行
- 能耗显著低于多旋翼模式

3. 模式转换关键技术

- 姿态快速调整
- 推进系统协同
- 控制参数平滑切换

1.4 关键技术解析

1.4.1 MAVLink通信协议

```
1 | # MAVLink命令发送示例  
2 | mav.SendMavCmdLong(mavlink2.MAV_CMD_DO_VTOL_TRANSITION, 4, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
```

MAVLink是一种轻量级、头对头的通信协议，专为无人机系统设计，支持：

- 命令传输
- 遥测数据交换
- 参数配置
- 状态监控

1.4.2 飞行状态检测机制

```
1 | def get_vtol_state(mav):  
2 |     cur_vel = mav.uavVelNED # 当前速度  
3 |     cur_att = mav.uavAngEular # 当前姿态  
4 |  
5 |     if abs(cur_vel[0]) < 5 and abs(cur_vel[1]) < 5: # 低速  
6 |         return "多旋翼模式"  
7 |     elif abs(cur_vel[0]) > 10 or abs(cur_vel[1]) > 10: # 高速  
8 |         return "固定翼模式"
```

状态检测算法通过分析：

- 速度矢量
- 姿态角度
- 加速度变化

实现对飞行器当前模式的动态识别

1.4.3 飞行流程详细解析

本实验的飞行流程包括以下关键阶段：

1. 多旋翼模式起飞

```
1 | if flag == 1 and vtol_state == "多旋翼模式":
2 |     mav.SendPosNED(tarPos1[0], tarPos1[1], tarPos1[2], tarPos1[3])
```

2. 模式转换到固定翼

```
1 | elif flag == 2 and vtol_state != "固定翼模式":
2 |     mav.SendMavCmdLong(mavlink2.MAV_CMD_DO_VTOL_TRANSITION, 4, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
```

3. 固定翼模式巡航与盘旋

```
1 | elif flag == 3 and vtol_state == "固定翼模式":
2 |     # 飞往目标点
3 |     mav.SendPosNED(tarPos2[0], tarPos2[1], tarPos2[2])
4 |     # 盘旋
5 |     mav.SendPosNEDExt(tarPos2[0], tarPos2[1], tarPos2[2], mode=3)
```

4. 盘旋15秒后切换回多旋翼模式

```
1 | elif flag == 4:
2 |     if current_time - loiter_start_time >= 15:
3 |         # 切换回多旋翼模式
4 |         mav.SendMavCmdLong(mavlink2.MAV_CMD_DO_VTOL_TRANSITION, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
```

5. 降落

```
1 | elif flag == 5:
2 |     # 降落到指定位置
3 |     mav.sendMavLand(tarPos2[0], tarPos2[1], 0)
```

1.4.4 关键控制技术

- 基于坐标系的精确位置控制
- 动态模式切换
- 实时飞行状态监测
- 多阶段飞行任务管理

2. 实验效果

- 成功实现多旋翼模式到固定翼模式的平滑切换
- 固定翼模式下精确盘旋15秒
- 平滑切换回多旋翼模式

- 精确降落到指定位置

3. 文件目录

例程目录：

[安装目录]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\2.AdvExps\e4_VTOLModelCtrl\3.VTOLModeSwitch

```
1 | 3.VTOLModeSwitch/  
2 | |— ModeSwitchdemo.py      # 主要实验脚本  
3 | |— Readme.pdf            # 实验说明文档  
4 | |— StandardVtolModel_HITL.bat  #一键启动硬件在环仿真脚本  
5 | |— StandardVtolModel_SITL.bat  #一键启动软件在环仿真脚本  
6 | |— StandardVtolModel.dll  # 标准垂起无人机动态模型
```

4. 运行环境

4.1 软件要求

Windows 10及以上版本；RflySim工具链；

② 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：1.13.2。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 台；Pixhawk 6X或其它飞控1 个，数据线1个。

① 推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

5. 实验步骤

Step 1: 启动仿真

双击“[StandardVtolModel_SITL.bat](#)”批处理文件，在弹出的终端窗口中输入1，启动一架垂直起降飞机的软件在环仿真。等待编译完成，不报错，且CopterSim能正确3D Fixed说明配置正确。

 Readme.pdf	2024/8/16 0:14	WPS PDF 文档	2,520 KB
 Readme_en.docx	2024/7/25 13:25	Microsoft Word ...	11,060 KB
 Readme_en.pdf	2024/7/25 13:25	WPS PDF 文档	1,991 KB
 StandardVtolModel.dll	2024/7/25 13:25	应用程序扩展	317 KB
 StandardVtolModel_HITL.bat	2024/8/16 0:14	Windows 批处理...	6 KB
 StandardVtolModel_SITL.bat	2024/8/16 0:14	Windows 批处理...	6 KB

Step 2: 等待初始化完成

等待 CopterSim 中显示连接上 RflySim3D。



Step 3: 运行切换脚本

双击运行 [Python38Run.bat](#) 脚本，启动RflySim内置的Python 3.8环境，在弹出的对话框中输入 `python ModeSwitchdemo.py`，即可开始运行该文件。可以看到飞行器首先在多旋翼模式下从(0, 0, -10)米起始位置垂直起飞，平稳飞行至(0, 0, -30)米的目标高度。随后，飞行器通过MAVLink指令平滑切换到固定翼模式，姿态逐渐调整为水平飞行状态。在固定翼模式下，飞行器以较高效率飞往(350, 0, -30)米的目标点，期间保持稳定的巡航速度约15m/s。



到达目标点后，飞行器进入50米半径的盘旋状态，精确地绕目标点环形飞行15秒。15秒盘旋结束后，飞行器再次通过MAVLink指令切换回多旋翼模式，姿态迅速调整为垂直起降构型。最后，飞行器缓慢下降随后发送降落指令，完成整个飞行任务。



Step 4: 硬件在环仿真

硬件在环仿真需要准备一个飞控，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）。



仿真开始之前，请确认飞控已还原并具备硬件在环仿真环境，还原可参考：[\[RflySim安装路径\]\RflySimAPIs\1.RflySimIntro\2.AdvExps\e2.FCUIntro](#)。

Step 5: 启动HIL仿真

双击“[StandardVtolModel_HITL.bat](#)”批处理文件，在弹出的终端窗口中输入串口号，启动一架飞机的硬件在环仿真。

```
C:\Windows\system32\cmd.e  X  +  v
已复制      1 个文件。

-----
Please input the Pixhawk COM port list for HIL
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: ??????????
COM4: ??????????
COM5: USB ????.

Recommended COM list input is: 3,4,5

-----
My COM list for HITL simulation is:5
```

Step 6: 仿真过程

之后测试步骤与软件在环仿真的步骤相同，初始化完成后，双击运行 [Python38Run.bat](#) 脚本，启动RflySim内置的Python 3.8环境，在弹出的对话框中输

入 `python ModeSwitchdemo.py` ，即可开始运行该文件。现象与 [Step 3: 运行切换脚本] (Step 3: 运行切换脚本)相同。

7. 常见问题与解答

Q1: 在VTOL飞行器模式切换过程中，CopterSim出现"Invalid offboard setpoint"警告信息

A1: 这是PX4飞控系统的一种常见提示，通常不会影响飞行器的实际飞行性能。VTOL飞行器在多旋翼模式和固定翼模式间切换时，飞控暂时无法接受某些外部控制指令