本章目录

RflySim集群框架与接口

第十章 集群协同与博弈对抗

10.1 集群协同基础与控制架构

10.2 一致性与编队控制

10.3 智能博弈与强化学习基础

10.4 单智能体强化学习经典算法

10.5 多智能体强化学习与规模扩展

10.6 集群关键技术与挑战

10.7 RflySim集群框架与接口

10.8 本章实验案例与综合验证

10.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

10.7.1 仿真框架与模型取舍

教材对应：第10.2.1节

10.7.2 接口与控制闭环

教材对应：第10.2.3节；第10.2.2节算法开发

10.7.3 部署与数据组织

教材对应：第10.2.1–10.2.2节

10.7.4 真机迁移

教材对应：第10.2.2–10.2.3节

10.7.1 仿真框架与模型取舍：总体组成

RflySim集群仿真框架

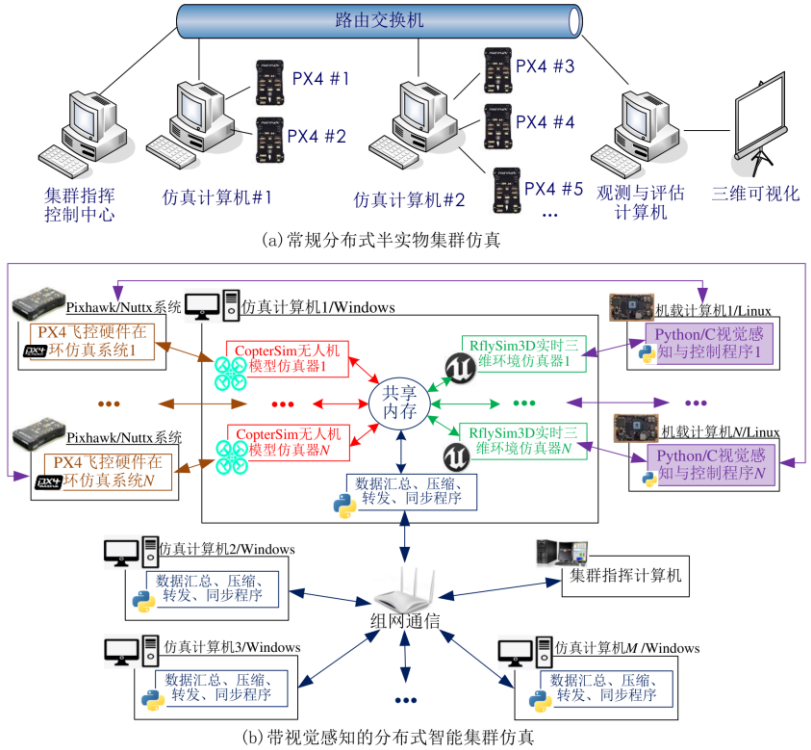


图10.8 RflySim集群仿真框架

共同：算法、状态与指令组成闭环。

差别：是否生成并处理原始图像和点云。

读图：显示画面与算法获得的观测要分开。

10.7 RflySim集群框架与接口

10.7.1 仿真框架与模型取舍：下部视觉链放大

沿图10.8(b)追踪感知与控制信号

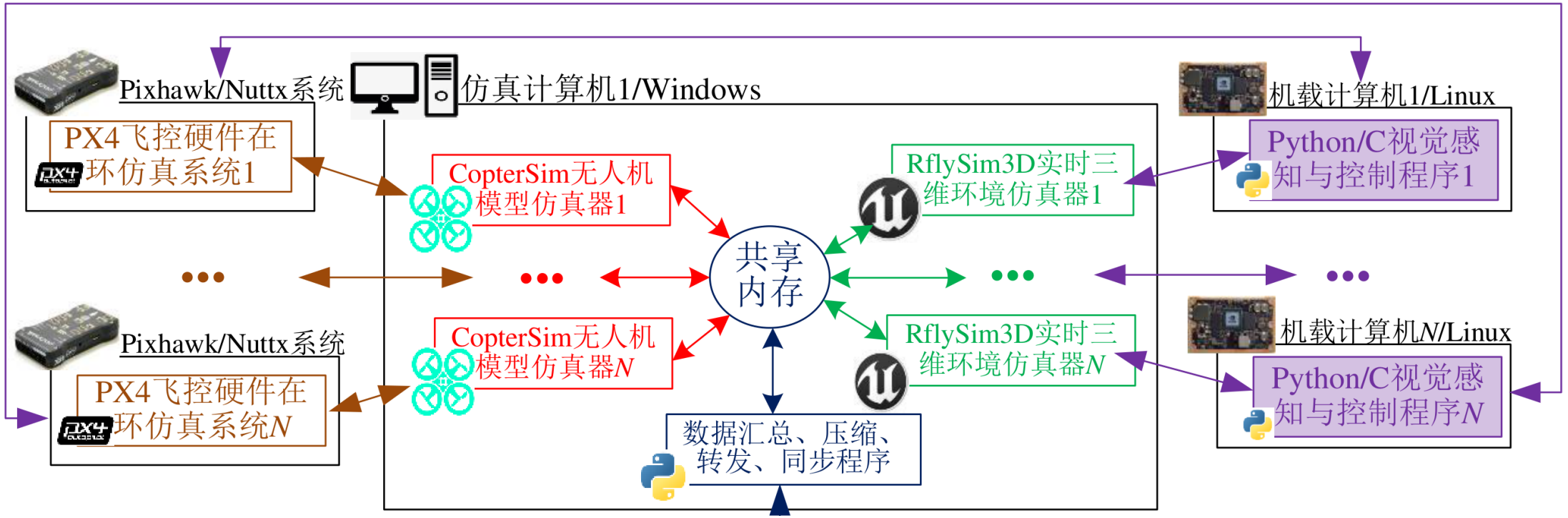


图10.8(b)（局部）单台主机视觉链（来源：教材图10.8）

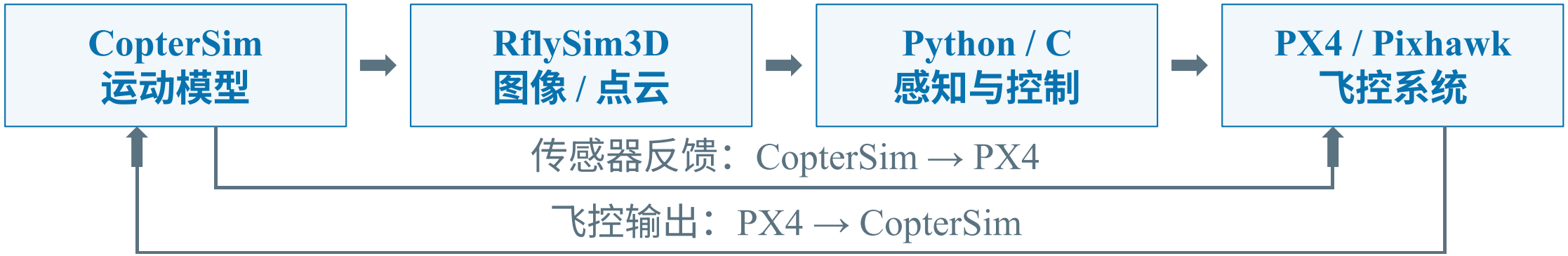
读图：CopterSim算运动，RflySim3D生成观测，Linux算法给目标，PX4执行。

10.7 RflySim集群框架与接口

10.7.1 仿真框架与模型取舍：关键部件与数据方向

图10.8的模型、感知与控制链

完整感知链：仿真模型与场景 → 机载感知控制 → 飞控闭环。



本机： CopterSim与RflySim3D经共享内存交换状态。

跨机： 汇总、压缩、转发和同步程序，经网络连接仿真主机及集群指挥。

简化： 直接使用位姿、地图和目标结果，省略原始图像 / 点云的感知处理。

10.7.1 仿真框架与模型取舍：模型取舍

感知配置与动力学精度分别选择

维度	选择与保留内容	适合回答的问题
感知链	直接给位姿；或图像/点云经感知算法	观测误差是否进入决策?
运动模型	质点 / 综合动力学 / PX4闭环	执行动态和飞控模式是否重要?
硬件在环	真实飞控或机载计算机参与闭环	时序、接口与负载是否达标?
计算规模	记录节点数、传感器数、频率与算力	给定配置下能否保持规定周期?

10.7.1 仿真框架与模型取舍：架构辨析

控制、部署与模型的三个维度

示例	部署与模型	控制关系
双电脑八机	两台主机各仿真4架	一个控制器计算8机指令：集中控制
四程序链式跟随	4个独立程序；可同机运行	各机按前机状态计算： 分布式控制
1架PX4 + 4个质点	不同节点采用不同模型精度	需再检查控制程序的信息依赖

分布式仿真不等于分布式控制；混合模型不等于混合式控制架构。

10.7.1 仿真框架与模型取舍：开发目标

先明确任务，再选择仿真配置

任务与成功判据 → 观测 / 指令契约 → 仿真配置 → 记录与对照

队形任务：输入公共参考与偏移，记录队形误差、最小间距和速度限幅。

感知任务：输入图像或点云，记录识别、定位误差及状态新鲜度。

资源任务：记录控制周期、超期比例与实时因子；节点容量由具体配置测得。

本章目录

RflySim集群框架与接口

第十章 集群协同与博弈对抗

10.1 集群协同基础与控制架构

10.2 一致性与编队控制

10.3 智能博弈与强化学习基础

10.4 单智能体强化学习经典算法

10.5 多智能体强化学习与规模扩展

10.6 集群关键技术与挑战

10.7 RflySim集群框架与接口

10.8 本章实验案例与综合验证

10.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

10.7.1 仿真框架与模型取舍

教材对应：第10.2.1节

10.7.2 接口与控制闭环

教材对应：第10.2.3节；第10.2.2节算法开发

10.7.3 部署与数据组织

教材对应：第10.2.1–10.2.2节

10.7.4 真机迁移

教材对应：第10.2.2–10.2.3节

10.7.2 接口与控制闭环：创建、监听与控制

Python生命周期与控制副作用

创建与监听 → 审查参数 确认就绪 → 模式与解锁 反馈确认 → 执行与监测 → 着陆上锁后 清理

初始化：本版本initOffboard含解锁请求及失效保护参数写入，须先审查。

收尾：stopRun在仍解锁时发送强制上锁请求，不是仅停止监听。

顺序：确认着陆与上锁，再endOffboard、stopRun；真机另核参数策略。

10.7.2 接口与控制闭环：真实代码片段

四机MAVLink示例的对象与目标

目录：0.ApiExps/e2.PyRflySwarmAPIExps/1.MAVLinkFull4Swarm/
控制文件：MAVLinkFull4Swarm.py

```
mav = PX4MavCtrl.PX4MavCtrler(1)
mav.InitMavLoop()
mav.initOffboard()
mav.SendPosNED(0, 0, -1.7, 0)
```

ID 1–4各有一个对象；负z表示向上。各机局部目标依次为(0,0,-1.7)、(2,2,-1.7)、(-2,-2,-1.7)、(0,0,-3) m。

initOffboard含解锁和失效保护参数改写；部署真机前须逐项审查。

10.7.2 接口与控制闭环：坐标契约

统一原点后才能比较相对位置

$$p_i^G = R_i p_i^L + o_i$$

共同位置、局部位置和原点偏移单位均为m；旋转矩阵无量纲。以下假设各局部坐标轴同向，旋转矩阵为单位阵。

载具	局部位置 / m	局部原点偏移 / m	共同位置 / m
1	(0,0,-2)	(0,0,0)	(0,0,-2)
2	(0,0,-2)	(4,0,0)	(4,0,-2)

教学计算：局部坐标相同，共同坐标下两机仍相距4 m。

10.7.2 接口与控制闭环：通信模块

Simulink模块与数据来源

模块	输入 / 输出	必须核对
RflyUdpFast	专用UDP结构体；载具状态与控制量	Full / Simple格式、ID与收发端口
RflyUdpMavlink	MAVLink状态流与控制目标	飞控模式、目标层级、字段与坐标
RflyVrpnRecv	刚体位姿及有效性等反馈	刚体名、服务器、时间与坐标

控制逻辑仍由模型实现；接口接通只说明数据链成立。

10.7.2 接口与控制闭环：就绪与退出

外部控制需要状态门控

状态就绪 → 参数审查 → 解锁 / 模式确认 → 任务执行

异常 / 超时 → 匹配飞控策略 → 着陆 / 上锁确认 → 最后清理

进入条件：参数与保护策略经审查，位姿、ID、控制模式和解锁反馈有效。

退出条件：先确认着陆与上锁，再清理；stopRun仍解锁时会请求强制上锁。

10.7.2 接口与控制闭环：命名空间与发布订阅

ROS 2与DDS组织多节点消息

各机状态主题 → 独立控制节点 → 模式与目标主题 → 飞控桥接

真实入口：0.ApiExps/e10.ROS2Swarm/
SITL4Run.bat；WinWSL_StartuXRCE.bat；控制包 px4_swarm_control.zip。

运行前保存其他仿真：SITL4Run.bat申请管理员权限并结束已有CopterSim；
收尾还会关闭QGroundControl与RflySim3D。

映射：每机命名空间、目标系统ID、坐标系和时间戳必须一致。

条件：匹配ROS 2、PX4消息与桥接版本；订阅匹配和模式反馈通过后再验证运动。

本章目录

RflySim集群框架与接口

第十章 集群协同与博弈对抗

10.1 集群协同基础与控制架构

10.2 一致性与编队控制

10.3 智能博弈与强化学习基础

10.4 单智能体强化学习经典算法

10.5 多智能体强化学习与规模扩展

10.6 集群关键技术与挑战

10.7 RflySim集群框架与接口

10.8 本章实验案例与综合验证

10.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

10.7.1 仿真框架与模型取舍

教材对应：第10.2.1节

10.7.2 接口与控制闭环

教材对应：第10.2.3节；第10.2.2节算法开发

10.7.3 部署与数据组织

教材对应：第10.2.1–10.2.2节

10.7.4 真机迁移

教材对应：第10.2.2–10.2.3节

10.7.3 部署与数据组织：分布式仿真

两台电脑仿真八机，一处计算指令



双向收发：局域网传递状态与指令；统一模型按ID分发8机目标。

部署位置：控制模型可运行在电脑A或B，无须另配第三台主机。

10.7.3 部署与数据组织：主机、ID与端口

八机局域网例程的配置与入口

根目录：[安装目录]/RflySimAPIs/10.RflySimSwarm/
子目录：2.AdvExps/e2.MatDISCtrlUAVsSim/1.BroadNetSwarm_Mat/

角色	真实入口	操作后检查
电脑A	SITLRunUdpSimple1_4.bat	ID 1–4状态各自更新
电脑B	SITLRunUdpSimple5_8.bat	ID 5–8无重复、无串线
控制端	RflyUdpUltraSimpleEight_Dist.slx	8路状态就绪后启用控制

先核对Readme.pdf、两端版本和端口映射，再按说明操作。

10.7.3 部署与数据组织：分布式控制对照

四程序链式跟随的控制信息

1号：参考运动 → 2号：读1号状态 → 3号：读2号状态 → 4号：读3号状态

仅限完整版及以上版本：
3.CustExps/e2.PyDISCtrlUAVsSim/e1_FourUAVSwarmTrack/

环境入口 SITLRun4MavlinkFull.bat；控制入口 UavPythonRunALL.bat；
独立程序 UAV1Ctrl.py 至 UAV4Ctrl.py。

观察：每级跟随误差、状态年龄和前机失联后的响应；多进程本身不是收敛证明。

10.7.3 部署与数据组织：混合模型

一架PX4领机与四个质点从机



入口：2.AdvExps/e4_PX4+MPSwarm/
UAVCtrlSILRun.bat → Python38Run.bat → HybridSwarmCtrl.py

原理：领机反馈状态驱动从机目标；跟随偏移3 m，初始布点间隔2 m。

验证：比较目标与实际相对位置，记录延迟、跟踪误差、最小间距及收尾过程。

10.7.3 部署与数据组织：身份、时间与有效性

跨主机部署的数据契约

信息	记录内容	出错时的表现
身份	载具ID、主机、收发端口、消息来源	状态串线、控制错机
空间	坐标轴、共同原点、单位与姿态约定	方向相反、队形平移或旋转
时间	生成 / 接收 / 使用时刻、时钟偏差界	使用陈旧状态，误判网络时延
有效性	定位标志、模式反馈、序号与超时策略	旧值持续参与控制

本章目录

RflySim集群框架与接口

第十章 集群协同与博弈对抗

10.1 集群协同基础与控制架构

10.2 一致性与编队控制

10.3 智能博弈与强化学习基础

10.4 单智能体强化学习经典算法

10.5 多智能体强化学习与规模扩展

10.6 集群关键技术与挑战

10.7 RflySim集群框架与接口

10.8 本章实验案例与综合验证

10.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

10.7.1 仿真框架与模型取舍

教材对应：第10.2.1节

10.7.2 接口与控制闭环

教材对应：第10.2.3节；第10.2.2节算法开发

10.7.3 部署与数据组织

教材对应：第10.2.1–10.2.2节

10.7.4 真机迁移

教材对应：第10.2.2–10.2.3节

10.7.4 真机迁移：定位链与控制链

室内动捕平台的网络拓扑

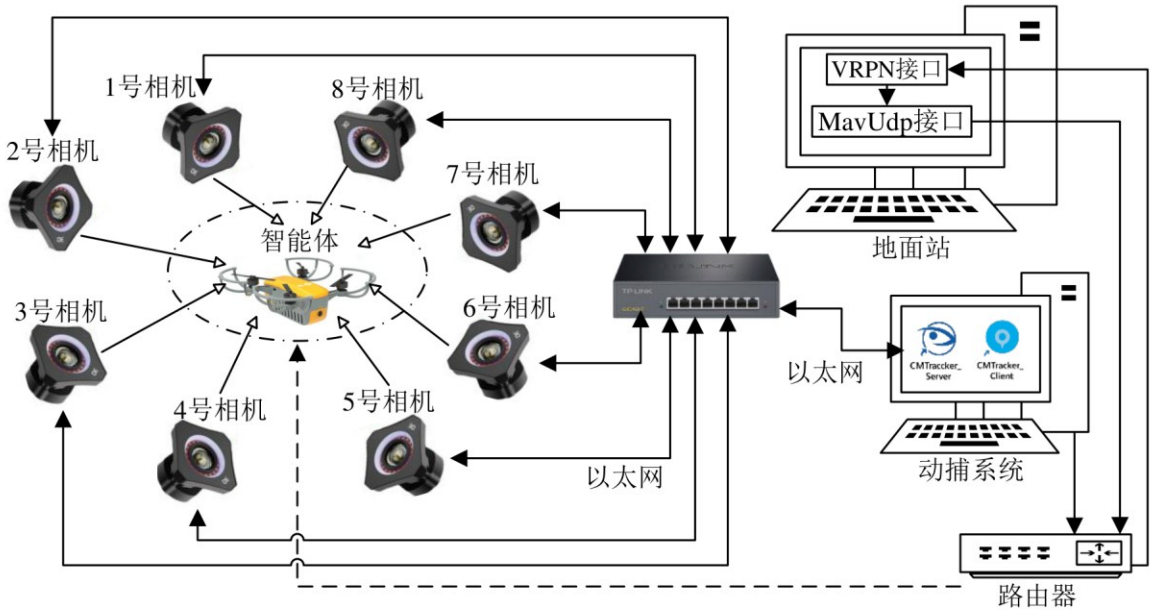


图10.9 室内动捕平台网络拓扑图

定位链：反光标记、相机、刚体位姿。

数据链：VRPN或NatNet发布位姿。

控制链：控制程序经飞控接口发送目标。

10.7.4 真机迁移：VRPN与MavUdp链路

图10.9：动捕定位到控制指令

相机与反光标记 → 以太网交换机 → 动捕系统 Server / Client → VRPN接收 刚体位姿

地面站将刚体位姿对齐身份、坐标与时间，再计算控制目标。

坐标与时间对齐 → 地面站控制 MavUdp接口 → 路由器 飞控链路 → 载具执行 状态反馈

核对刚体名与载具ID；用静态、单轴移动检查单位、方向、有效性与时戳。

入口：0.ApiExps/e1.MatRflySwarmAPIExps/5.RflyVrpnRecvAPIExps/RflyVrpnRecvAPIExp.slx；先读同目录Readme.pdf。

10.7.4 真机迁移：室内坐标与NED

坐标转换的一步计算

教学假设：动捕坐标为东-北-天（ENU），控制为北-东-地（NED）；原点重合。

$$p^{NED} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} p^{ENU}$$

$$p^{ENU} = (2,3,1)^T \text{ m} \quad \Rightarrow \quad p^{NED} = (3,2,-1)^T \text{ m}$$

读数含义：向东2 m、向北3 m、高于共同原点1 m。原点不同时再加平移；姿态和速度也须核对约定。

10.7.4 真机迁移：迁移路线

仿真到真机的逐级验证

阶段	替换或新增	进入下一阶段前证明
SITL	软件飞控与虚拟载具	坐标、模式、跟踪及异常分支正确
HITL	真实飞控 / 机载计算机	收发时序、计算周期及失联动作达标
室内真机	动捕或其他真实定位；真实执行器	静态对齐、单机与小规模闭环通过
室外扩展	GNSS融合位姿、真实链路与场地	定位退化、通信范围与规模变化可承受

10.7.4 真机迁移：观测与执行约束

迁移的是算法，重新验证的是接口

观测替换：真值改为动捕、GNSS融合或视觉估计；记录质量、更新率与有效性。

执行替换：核对控制目标层级，匹配飞控模式、控制权限和饱和限制。

运行替换：Simulink / Python → C++ / ROS 2部署时，检查周期、依赖、消息类型和退出处理。

等价检验：对同一输入序列比较目标输出，再以真实状态闭环检查误差和失败分支。

练习与讨论

讨论：六机动捕实验怎样接通

情境：6机先由2台电脑仿真、1个集中模型控制；迁移室内后，动捕提供ENU位姿。

问题1：这是哪种控制架构？仿真部署是否改变了控制信息关系？

问题2：怎样把刚体名称、ENU位姿与飞控ID、NED目标连起来？

问题3：全部起飞后，还需要哪些量才能判断编队与迁移是否成功？

参考要点

参考答案：逐项建立可验证关系

问题	参考答案	可检查的证据
1 架构	集中式控制； 仿真阶段分布式部署	谁获取全体状态、谁计算全部指令
2 接口	刚体名与ID一一对应； ENU转NED并对齐原点和时间	静态位置、单轴移动、 消息ID与模式反馈
3 验证	跟踪与编队达标； 过渡安全、超时可处理	位置轨迹、最小间距、 状态年龄与异常日志

本节小结

本节小结：闭环与迁移的四项判断

配置：简化 / 完整描述感知链；质点 / PX4描述模型层次。

接口：Python、Simulink、ROS 2都须维护身份、坐标、时间和模式的一致性。

部署：控制架构由信息依赖与计算关系决定，多电脑和混合模型是另外的维度。

迁移：逐级替换定位、执行和运行环境，用误差与异常响应证明闭环仍成立。