本章目录

实验案例与真机迁移

第八章 多模态感知与智能决策

8.1 背景意义与图像处理基础

8.2 目标识别、跟踪与光流估计

8.3 定位建图与预测规划

8.4 常用感知传感器

8.5 多模态感知坐标转换

8.6 多模融合与控制决策

8.7 关键工具与框架接口

8.8 实验案例与真机迁移

8.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

8.8.1 本章实验列表
教材对应：第8.3.1节

8.8.2 基础及综合实验
教材对应：第8.3.1节及配套例程

8.8.3 高阶案例概览
教材对应：第8.3.2节

8.8.4 算法真机迁移
教材对应：第8.2.2节

8.8 实验案例与真机迁移

8.8.1 本章实验列表：实验分类

用Index定位任务，用Readme进入实验

[安装目录]/RflySimAPIs/8.RflySimVision/
Index.pdf；各实验目录内Readme.pdf

资料目录	教学归属	实验产物
0.ApiExps	接口学习与配置	有效图像、点云、消息和控制请求
1.BasicExps	基本使用与任务闭环	目标响应、阶段切换和任务执行
2.AdvExps	感知、规划与多机综合	地图、位姿、轨迹和控制结果
3.CustExps	自定义高级任务	行为结构与多模态任务执行

8.8 实验案例与真机迁移

8.8.1 本章实验列表：接口学习

环境、取图和传输先解决什么

[安装目录]/RflySimAPIs/8.RflySimVision/
0.ApiExps/；下列目录内Readme.pdf

真实目录	要建立的连接	结果判据
0.Preparation	环境与平台进程	配套程序和依赖可用
1-UsageAPI	配置→首帧→持续接收	尺寸、单位与时刻正确
2-DistributedSimAPI	跨节点观测与控制	载具、IP、端口、时基对应

配置、深度、时间分别查0.ConfigJsonAPI、3.DepthCameraDemo、10.ReadTimeStmp。

8.8.1 本章实验列表：数据集与点云

同一场景可以生成不同算法输入

[安装目录]/RflySimAPIs/8.RflySimVision/
0.ApiExps/；下列目录内Readme.pdf

真实目录	输入→产物	学习重点
3-VisionAIAPI	场景与目标→图像和标签	采集、标签和数据组织
4.Point-CloudVisualize	点云→三维显示	XYZ单位、范围与轴向
7.LidarLivoxDemo	Livox式配置→点云	扫描分布、采样与时序
8.LidarAPIDemo	雷达参数→空间观测	配置、解码和算法输入

8.8.1 本章实验列表：ROS与云台

发布、坐标树和相机控制分工明确

[安装目录]/RflySimAPIs/8.RflySimVision/
0.ApiExps/；下列目录内Readme.pdf

真实目录	职责	要检查的产物
5.VisCaptureMergeROSAPI	包装并发布传感器消息	encoding、stamp与更新率
6.ConfigROSTFAPIDemo	配置参考系和TF树	坐标名与安装变换
9.CameraInfo	相机参数与图像解释	内参、畸变及视场
12.UAV_PodSimUI	相机及吊舱操作	云台角、视场和目标读数

8.8.1 本章实验列表：基本使用

从图像处理发展到目标响应

[安装目录]/RflySimAPIs/8.RflySimVision/
1.BasicExps/1-VisionCtrlDemos/；下列目录内Readme.pdf

真实目录	教材实验	教学产物
e1_CrossRingNoPX4	穿环任务	位置选阶段，视觉引导运动
e3_ShootBall	运动球目标跟随	目标位置随时间变化及响应
e6_Circle-follow	圆板视觉跟随	中心、框高、像素误差和速度
e7_ManDetect	人脸识别	人脸区域框，不识别身份

8.8.1 本章实验列表：系统综合

定位、任务逻辑和控制一起接受检验

[安装目录]/RflySimAPIs/8.RflySimVision/
1.BasicExps/；下列目录内Readme.pdf

真实目录	任务层次	主要检查
2-BaseDemoAuto	自动任务指令	任务顺序与执行状态
3-BaseDemoManu	交互或手动指令	输入动作与载具响应
4_CompSlamNav	SLAM室内探索比赛	地图、位姿与任务评分
5.LLMUavComp	大模型组织任务	语言到任务结构与反馈
6.LLMUavCompSLAM	语言任务结合定位规划	结构、位姿、轨迹与执行

8.8 实验案例与真机迁移

8.8.1 本章实验列表：进阶感知

吊舱、SLAM和跟踪有不同输出

入口：学生资料根下2.AdvExps/，各目录内Readme.pdf。

真实目录	教材主题	输出与区别
e1_CameraKeyDemoOnUbuntu e2_CameraKeyDemoOnWindows e3_CamerKeyROSDemo	云台控制 与图像传输	安装角、视场与图像 Ubuntu / Windows / ROS
e4_RflySimPlatform_SLAM e6_LaserSLAMdemo	视觉 / 激光SLAM	载具位姿、轨迹与地图 输入传感器不同
e7_ObjDetectYolo e8_SingleObjTracking e9_Object-Follow	检测、跟踪与视觉伺服	检测框 / 跨帧跟踪 / 控制 真值框与检测输出分开

8.8.1 本章实验列表：规划与任务

路径、群体和行为决策分别验证

规划、KCF与群体：2.AdvExps/；行为树与语言任务：3.CustExps/。

真实目录	教材主题	主要产物
e10_Planner	A*路径搜索	地图中的可行路径
e11_KCFdemo	KCF穿环及编队跟踪	目标跟踪与连续任务响应
e13_EGOPlannerSwarm	EGO-Swarm群体规划	各机带时间的避碰轨迹
e7_BT_control e10.LLM-BehaviorTreeUAVCtrl	行为树 / 大模型任务	条件、动作与失败分支

8.8.1 本章实验列表：选题算例

按输入、任务和产物选择三条路线

给定任务	选择入口	必须得到的结果
RGB红圆板跟随	e6_Circle-follow	中心、框高、速度与运动响应
激光观测＋未知室内	e6_LaserSLAMdemo	地图、连续估计位姿和轨迹
已有地图＋两个目标	e16_ESDFPathPlan	当前规划文件与对应飞行轨迹

输入条件决定实验路线，任务产物决定验收方法。

本章目录

实验案例与真机迁移

第八章 多模态感知与智能决策

8.1 背景意义与图像处理基础

8.2 目标识别、跟踪与光流估计

8.3 定位建图与预测规划

8.4 常用感知传感器

8.5 多模态感知坐标转换

8.6 多模融合与控制决策

8.7 关键工具与框架接口

8.8 实验案例与真机迁移

8.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

8.8.1 本章实验列表
教材对应：第8.3.1节

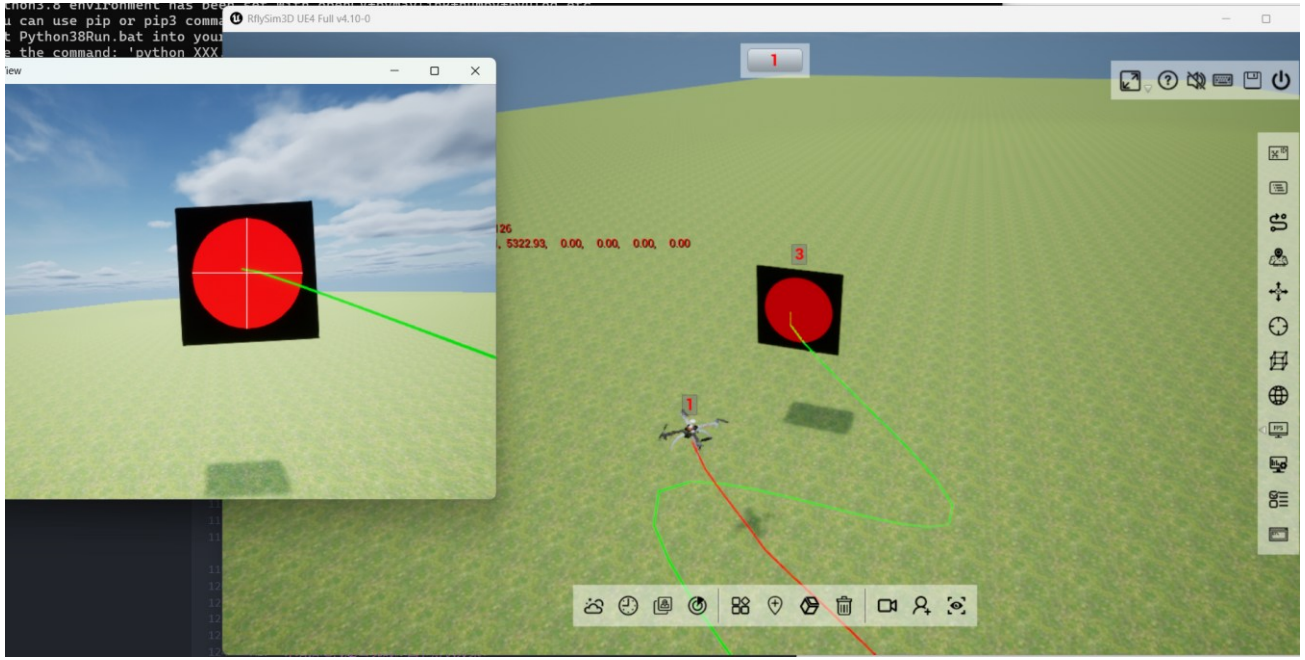
8.8.2 基础及综合实验
教材对应：第8.3.1节及配套例程

8.8.3 高阶案例概览
教材对应：第8.3.2节

8.8.4 算法真机迁移
教材对应：第8.2.2节

8.8.2 基础及综合实验：圆板跟随

颜色掩膜把目标转成中心和尺寸



例程说明图：圆板与Drone View

图像与掩膜：640×480，红色HSV双区间。

目标信息：包围范围的中心、框高。

控制输入：中心偏差控制横向和垂向；框高差控制远近。

8.8.2 基础及综合实验：控制算例

图像偏差怎样变成速度

给定：图像640×480；目标中心(360,260)；初始/当前框高100/80像素。
P（比例）控制使速度与误差成比例；本例三个误差均超出15像素死区。

$$v_x = 0.015(100 - 80) = 0.30 \ \mathrm{m/s}$$

$$v_y = 0.009(360 - 320) = 0.36 \ \mathrm{m/s}$$

$$v_z = 0.005(260 - 240) = 0.10 \ \mathrm{m/s}$$

SendVelFRD(0.30,0.36,0.10,0)：水平随航向，竖直按NED，偏航速率为0。
前视对齐、近水平时：框变小→前进，中心偏右下→向右、向下调整。

8.8.2 基础及综合实验：运行步骤

启动、锁定与结束分别看什么

[安装目录]/RflySimAPIs/8.RflySimVision/
1.BasicExps/1-VisionCtrlDemos/e6_Circle-follow/Readme.pdf

启动：运行circle_follow.bat；等待GPS 3D fixed与EKF初始化完成。

控制：配套Python运行circle_follow_autoCtrl.py；
逐轴试验用circle_follow_kbCtrl.py。

观察与结束：看锁定、图像误差和载具响应；Esc停显示，再执行载具结束策略。

BAT清理会按进程名结束Python/CMD等；避免影响同机其他任务。

8.8.2 基础及综合实验：结果解释

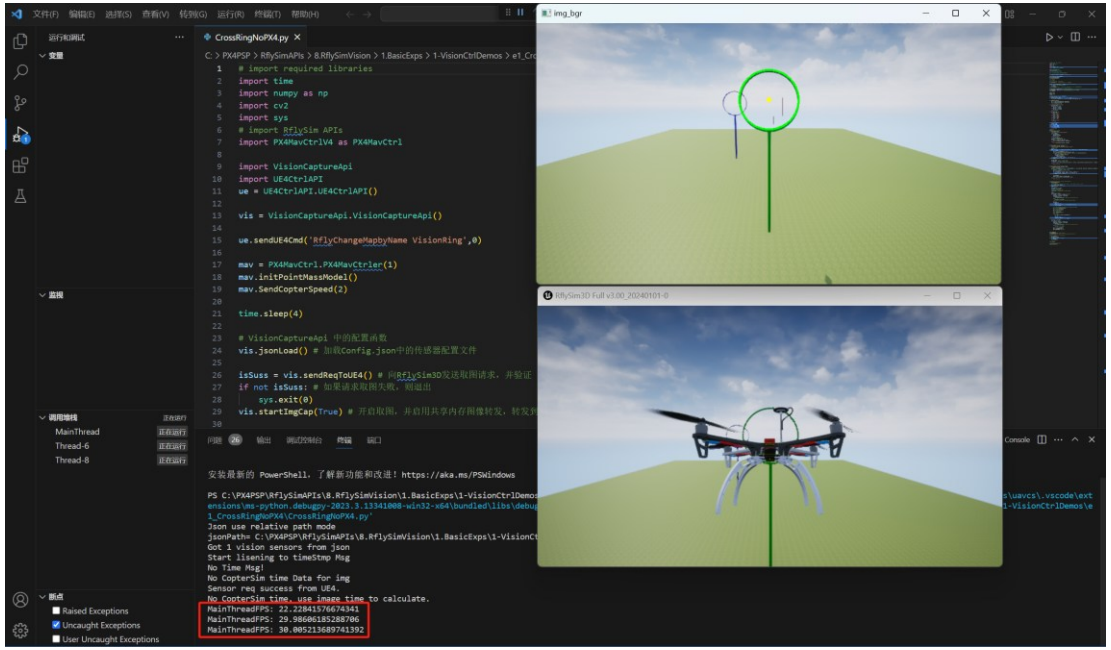
图像误差和机体响应要同时对应

给定变化	按源码预期	结果解释
中心向右 / 向下	右向 / 下向速度为正	前视对齐、近水平时 像素方向可直接对应
框高小于初始值	前向速度为正	尺寸表示远近，不是米制位置
偏差进入15px死区	对应比例调节停止	阈值是条件，不是实测精度
丢失目标 / Esc结束	跳过发送 / 停显示线程	另定保持、切换模式或降落

8.8 实验案例与真机迁移

8.8.2 基础及综合实验：穿环任务

前向位置选择阶段，视觉完成目标对准



例程说明图：绿色圆环与机载视角

入口： e1_CrossRingNoPX4/CrossRingNoPX4.bat与.py

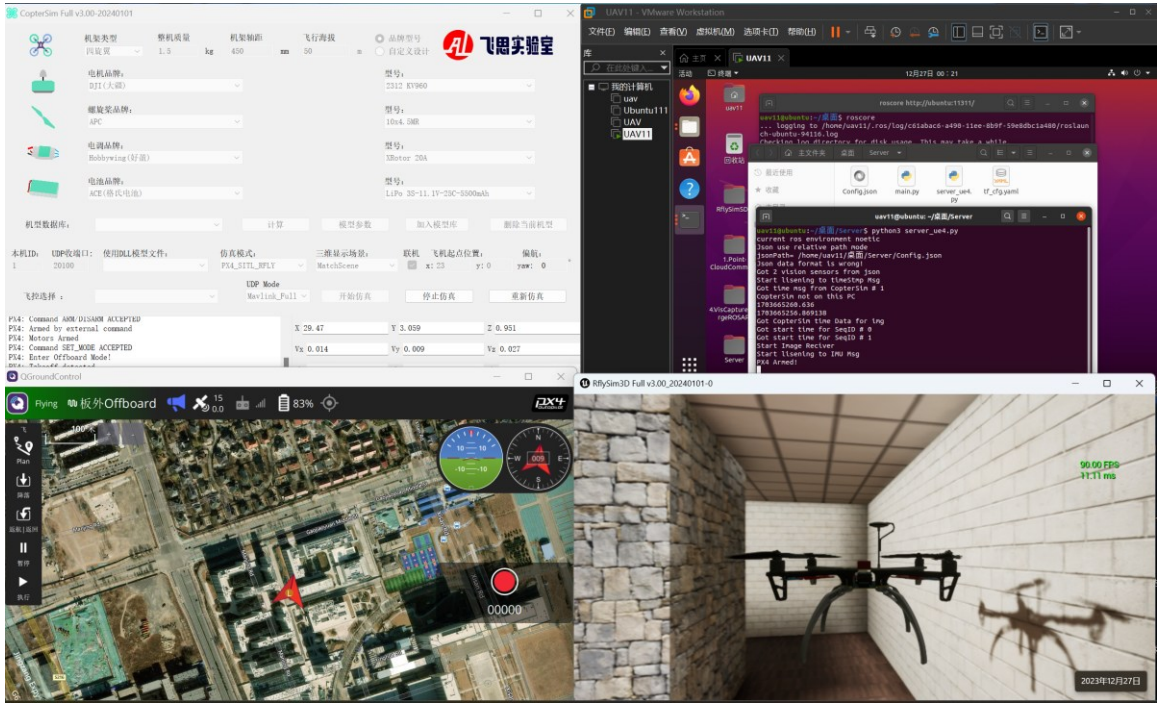
数据与任务： 前向位置选阶段与检测器；图像误差驱动垂向与偏航。

结果判据： 图像、阶段、位姿对应；下降与退出条件分开。

前向位置选择阶段 → **阶段决定目标检测** → **图像误差控制与位置反馈**

8.8.2 基础及综合实验：激光SLAM

移动提供观测，SLAM输出位姿和地图



例程说明图：室内场景与接收程序

目标链（需集成）：激光点云→兼容扫描→Cartographer。

建图与定位：先建图保存，再在已有地图内更新位姿。

结果判据：地图、估计位姿连续；航点运动不单独证明SLAM有效。

8.8.2 基础及综合实验：SLAM启动与验收

话题、TF和算法节点接成一条链

[安装目录]/RflySimAPIs/8.RflySimVision/
2.AdvExps/e6_LaserSLAMdemo/Readme.pdf

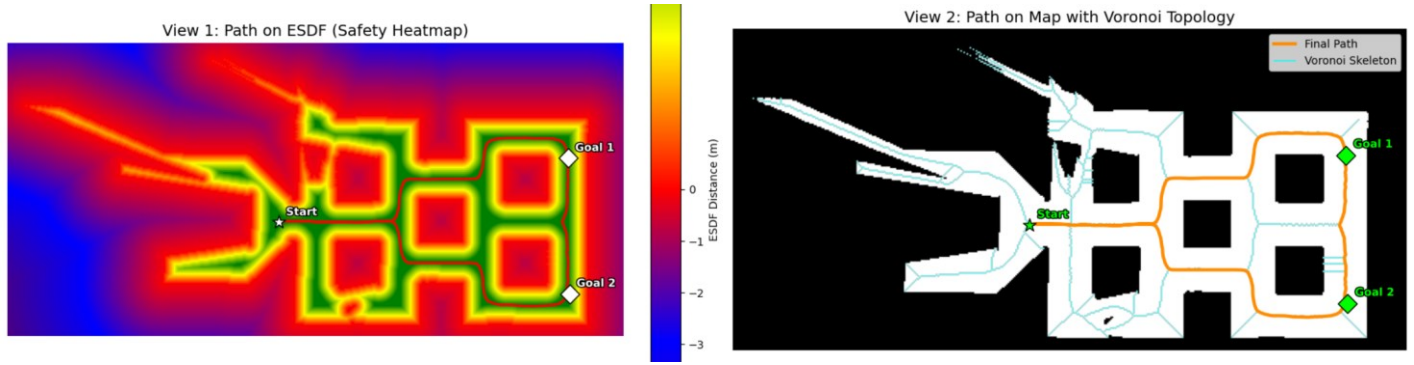
平台与发布：RflySimPlatform/Client/VisionCapAPIDemo.bat；ROS1端运行RflySimPlatform/Server/server_ue4.py。

算法连接：先选择LiDAR输入，匹配扫描话题、LaserScan/MultiEchoLaserScan类型和TF，再启动Cartographer。

模式：加载rflysim_mapping.lua或rflysim_localization.lua配置；另行保存/加载pbstream，退出时明确载具动作。

8.8.2 基础及综合实验：ESDF与Voronoi

从占据图得到障碍距离和候选路径



例程说明图：距离场、骨架与规划路径

占据图：区分障碍与可通行区域。

距离场和骨架：表达离障碍远近，组织候选通道。

规划产物：planned_path.npy；转换坐标后再执行。

8.8.2 基础及综合实验：路径坐标算例

行列错误会把航点转到另一方向

本例：分辨率0.05米/像素；起点(行100,列200)，路径点(行120,列260)。
按当前代码将行列差转为北东地（NED）航点；取Down=-1米。

$$N = (260 - 200) \times 0.05 = 3.0\ \mathrm{m}$$

$$E = (120 - 100) \times 0.05 = 1.0\ \mathrm{m}, \qquad D = -1.0\ \mathrm{m}$$

错法对照：转置得到North=1、East=3米；误反行方向得到East=−1米。

实测核对：用两个已知标志点核对地图原点、尺度与轴向。

8.8.2 基础及综合实验：路径验收

当次路径文件要对应当次飞行轨迹

[安装目录]/RflySimAPIs/8.RflySimVision/
2.AdvExps/e16_ESDFPathPlan/Readme.pdf

生成与传递：maps/WinWSL.bat内运行python3 OGM2ESDF.py；选点后复制planned_path.npy到Server。

启动与核对：Client/VisionCapAPIDemo.bat；Server/WinWSL.bat内运行python3 esdf_planner.py。

结果与结束：核对起点、两个目标、避障路线及执行轨迹；停控制后明确载具退出并保存当次产物。

8.8.2 基础及综合实验：YOLO跟随

训练产物把数据采集接到检测跟随

[安装目录]/RflySimAPIs/8.RflySimVision/
2.AdvExps/e17_YoloDroneFollow/Readme.pdf

采集图像与标签 → 划分数据 → 训练并保存权重 → 检测与跟随

脚本顺序： get_drone_dataset.py→split_dataset.py→train_yolo.py→DroneFollow.py。

配套产物： Ultralytics/PyTorch＋无人机数据、类别表和权重；
验证模型后再查闭环响应。
验收与结束： 新帧检测、目标关联、控制响应；保留同次记录，丢失和退出时明确载具动作。

8.8.2 基础及综合实验：综合结果

用不同证据回答不同实验问题

任务层	要看到的证据	不能替代它的现象
目标检测	框、类别、匹配标注与统计指标	只有原图或平台真值框
持续跟踪	目标身份、丢失与再次关联	一帧有目标框
SLAM定位	地图、估计位姿和连续轨迹	按预置航点飞行
规划与控制	同次规划、指令与运动对应	起飞或无报错退出

本章目录

实验案例与真机迁移

第八章 多模态感知与智能决策

8.1 背景意义与图像处理基础

8.2 目标识别、跟踪与光流估计

8.3 定位建图与预测规划

8.4 常用感知传感器

8.5 多模态感知坐标转换

8.6 多模融合与控制决策

8.7 关键工具与框架接口

8.8 实验案例与真机迁移

8.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

8.8.1 本章实验列表
教材对应：第8.3.1节

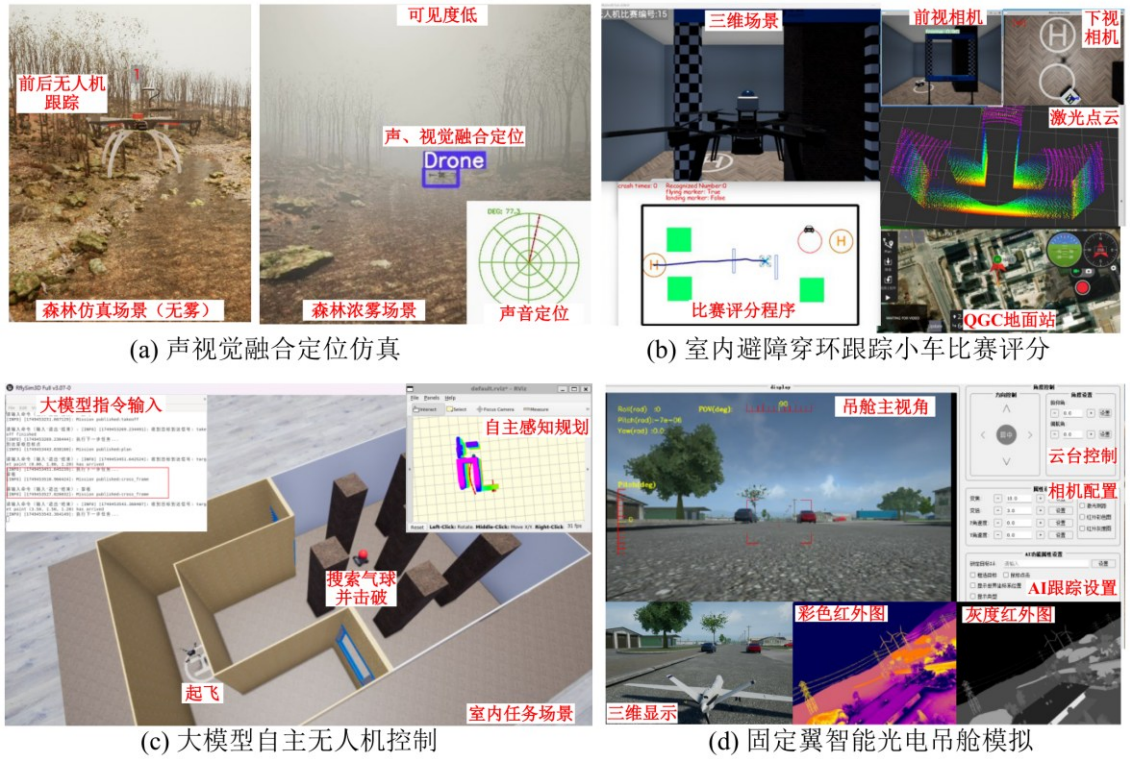
8.8.2 基础及综合实验
教材对应：第8.3.1节及配套例程

8.8.3 高阶案例概览
教材对应：第8.3.2节

8.8.4 算法真机迁移
教材对应：第8.2.2节

8.8.3 高阶案例概览：高阶任务

四个案例扩展了不同的系统能力



(a) 声视觉融合定位仿真　(b) 室内避障穿环跟踪小车比赛评分

(c) 大模型自主无人机控制　(d) 固定翼智能光电吊舱模拟

图8.12 其他高阶感知决策案例

(a) 声视觉：两种模态补充目标方位。

(b) 室内综合：避障、穿环与跟车评分。

(c) 大模型：视觉语义、代码和任务结构。

(d) 固定翼吊舱：三轴指向与多类成像观测。

8.8.3 高阶案例概览：声视觉融合

视觉受遮挡时声音提供目标方向



(a) 声视觉融合定位仿真

视觉观测：图像→检测框、类别和关联目标。

声音观测：GCC时延→方位与有效性；噪声和反射影响判断。

接入例子：3.CustExps/e12_ObjDetectaudio-visual/quadrotor_follow.py

图8.12(a) 声视觉融合定位仿真

配套条件：UE音频工程、模型代码与权重；按完整版及以上授权使用。

8.8.3 高阶案例概览：声音定位算例

两路声音的时延怎样约束方位

远场教学模型：双麦间距0.20米，声速343米/秒，到达时差0.30毫秒。
角度相对基线的正侧向定义；先算路径差，再算方位约束。

$$\Delta r = c\Delta t = 343 \times 0.00030 = 0.1029\ \mathrm{m}$$

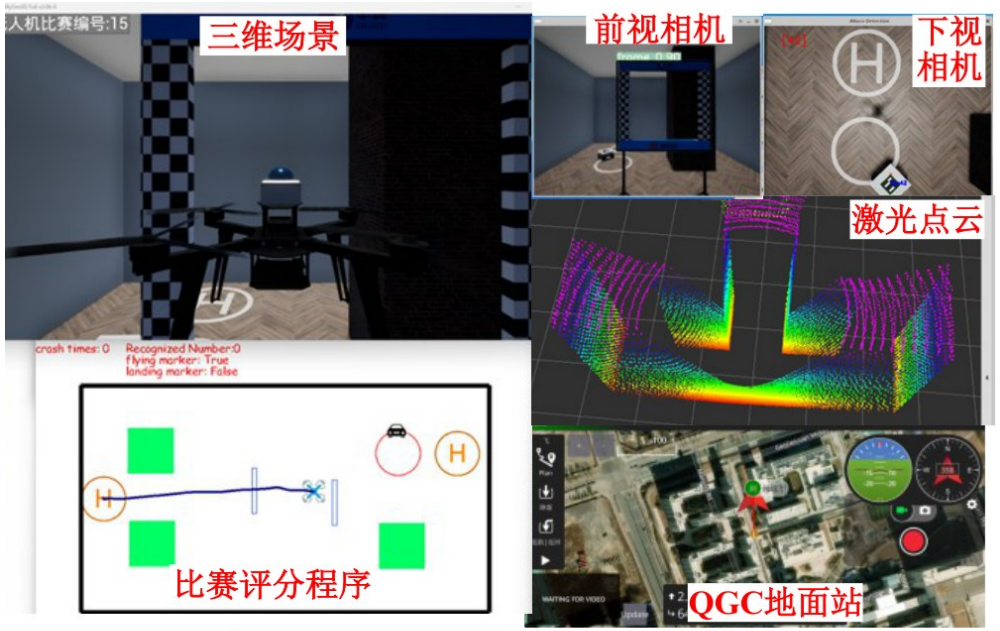
$$\theta = \arcsin\frac{\Delta r}{d} = \arcsin(0.5145) \approx 31.0^\circ$$

$$|\Delta t| \le \frac{d}{c} = \frac{0.20}{343} \approx 0.583\ \mathrm{ms}$$

结果解释：0.30ms满足几何范围；31.0°是单基线方位约束，仍有方向歧义。
多麦几何与视觉关联补充方向信息；反射、噪声和近场需另建模。

8.8.3 高阶案例概览：室内综合与评分

感知和评分读取的是不同的数据



(b) 室内避障穿环跟踪小车比赛评分

图8.12(b) 室内综合任务及评分

感知输入：前视＋下视＋激光；输出位姿、地图、目标信息。

任务执行：避障、穿环、跟踪小车；指令产生后由控制器跟踪。

评分入口：4_CompSlamNav与e11_KCFdemo；评分订阅状态，真值与算法输入分开。

8.8.3 高阶案例概览：评分算例

相同任务要用相同口径比较

教学评分：4个环，记录通过数量与碰撞次数；此例不是比赛官方规则。
安全约束单独判断；总分不替代无碰撞要求、跟踪误差和耗时。

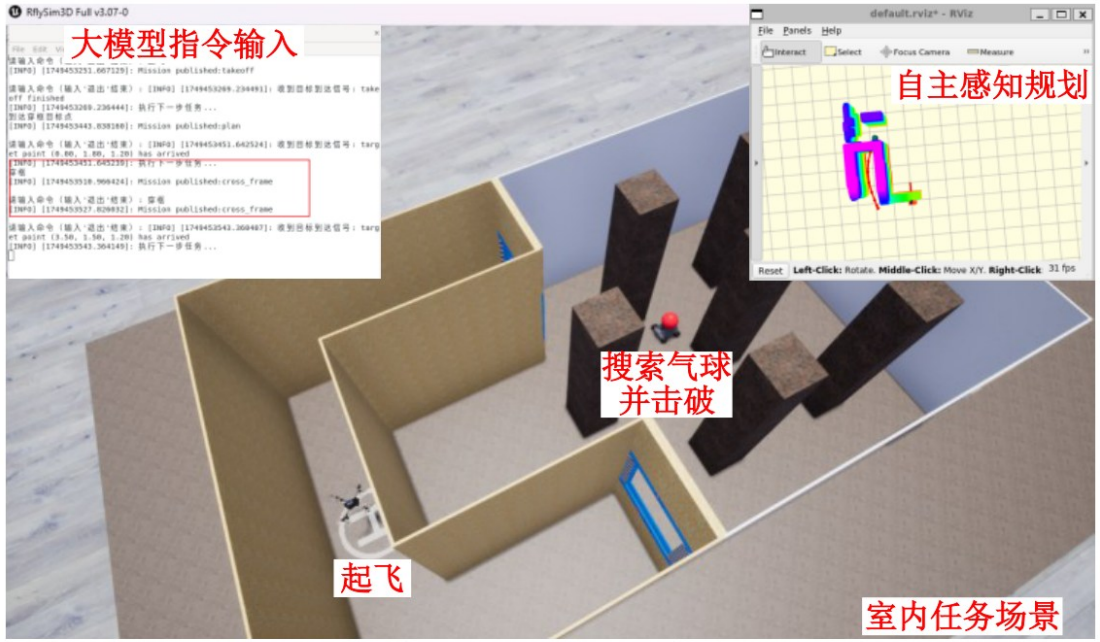
$$S = 100\frac{n_{\text{pass}}}{4} - 20n_{\text{collision}}$$

给定方案	教学分数	结果解释
甲：4/4通过，1次碰撞	100−20=80	通过率高，但未满足无碰撞要求
乙：3/4通过，0次碰撞	75−0=75	无碰撞，仍有未完成的环

比较结论只对已声明指标成立；还应独立报告任务耗时与轨迹或目标跟踪误差。

8.8.3 高阶案例概览：大模型任务

语言先变为任务结构，再调用执行技能



(c) 大模型自主无人机控制

图8.12(c) 大模型自主任务示例

三种用途：视觉语义；生成代码；生成任务指令或行为树。

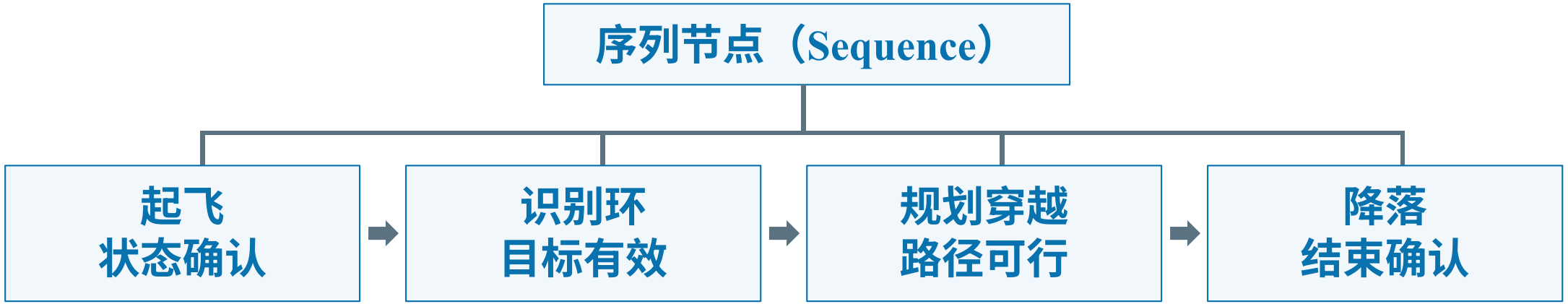
执行接口：结构校验→调用既有技能→读取反馈；快速控制保持独立。

1.BasicExps/
5.LLMUavComp/
6.LLMUavCompSLAM/
各目录内Readme.pdf

两个入口位于1.BasicExps/；按Readme配套运行环境、模型服务及容器。

8.8.3 高阶案例概览：行为执行

结构化任务保留条件、动作和失败分支



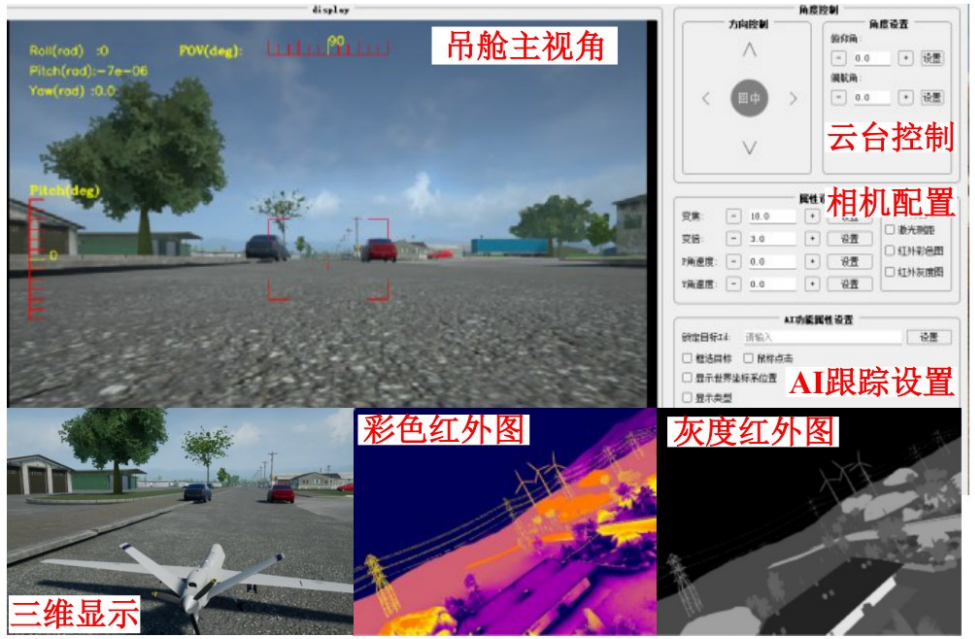
从左到右执行：成功才进入下一项，运行中则等待，失败立即返回。
生成任务先检查字段、技能名、参数与边界；执行时读取真实反馈。

外层恢复：重观测或终止

语言生成任务，反馈决定任务是否继续。

8.8.3 高阶案例概览：固定翼吊舱

云台姿态与载具姿态分别改变视线



(d) 固定翼智能光电吊舱模拟

图8.12(d) 固定翼智能光电吊舱

三个观测：可见光、红外、测距；成像类型与距离分开。

两类角度：载具姿态、云台三轴；变焦改变视场。

0.ApiExps/12.UAV_PodSimUI/AircraftMathworksSITLRun.bat；Python38Run.bat→main.py。

8.8.3 高阶案例概览：吊舱读数算例

目标像素偏移对应多大的视线角误差

针孔教学模型：图像宽640像素，目标水平偏移40像素。
水平视场从90°变为60°；像素偏移相同，视线角误差不同。

$$f_x = \frac{W}{2\tan(\mathrm{FOV}_x/2)}, \qquad \delta = \arctan\frac{40}{f_x}$$

水平视场	焦距（像素）	40px偏移对应角度
90°	320.0	7.13°
60°	554.3	4.13°

结果解释：变焦后更新成像参数；控制角误差，不能把像素框尺寸直接当作米。

本章目录

实验案例与真机迁移

第八章 多模态感知与智能决策

8.1 背景意义与图像处理基础

8.2 目标识别、跟踪与光流估计

8.3 定位建图与预测规划

8.4 常用感知传感器

8.5 多模态感知坐标转换

8.6 多模融合与控制决策

8.7 关键工具与框架接口

8.8 实验案例与真机迁移

8.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

8.8.1 本章实验列表
教材对应：第8.3.1节

8.8.2 基础及综合实验
教材对应：第8.3.1节及配套例程

8.8.3 高阶案例概览
教材对应：第8.3.2节

8.8.4 算法真机迁移
教材对应：第8.2.2节

8.8.4 算法真机迁移：迁移框架

五个阶段连接数据、模型和系统验证

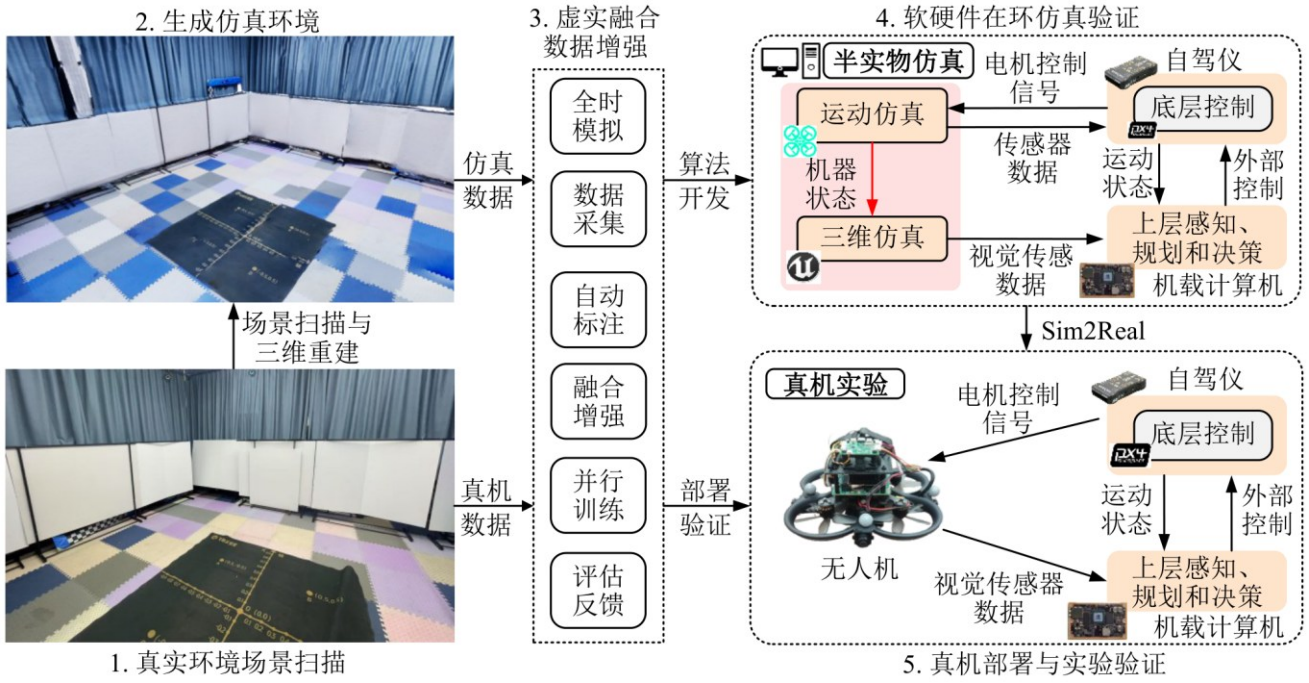


图8.10 仿真到真机开发框架

回顾：扫描→建模→数据增强→在环测试→真实部署；按验证结果反馈修正。

8.8.4 算法真机迁移：图8.10左半部放大

扫描和增强把真实场景接到算法训练

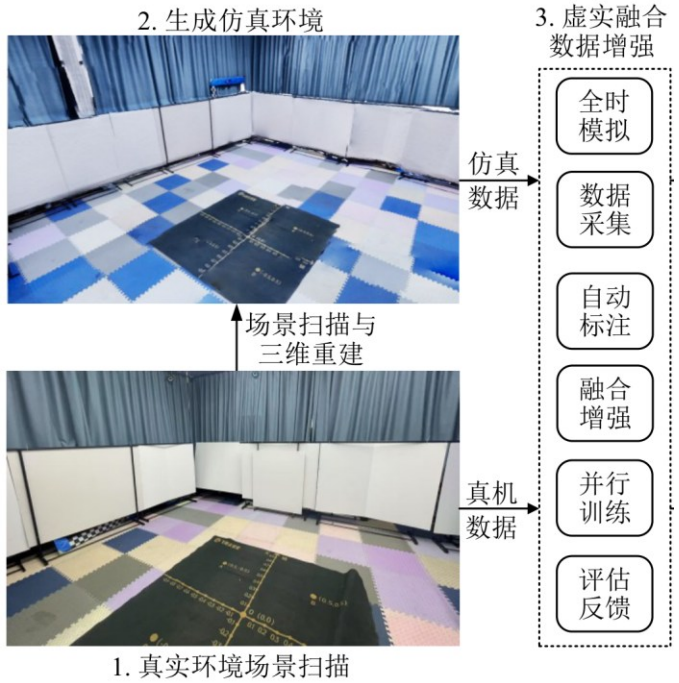


图8.10局部：真实扫描、仿真场景与数据增强

1. 真实扫描：采集场景几何与外观，保留尺度和参考系。

2. 仿真环境：重建障碍、网格与纹理；生成可控工况。

3. 虚实增强：采集、标注、融合、训练；评估结果反馈修正。

读图：两路数据在统一格式下进入训练；独立真实测试集衡量迁移表现。

8.8.4 算法真机迁移：图8.10右半部放大

同一上层算法从在环走向真实执行

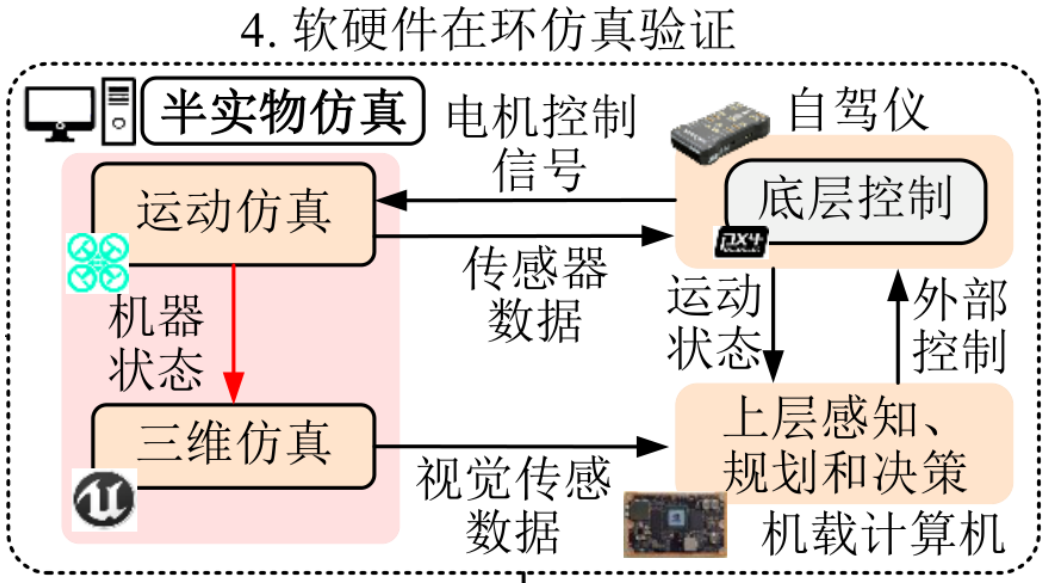


图8.10阶段4：软硬件在环验证

在环：真实机载板与飞控。

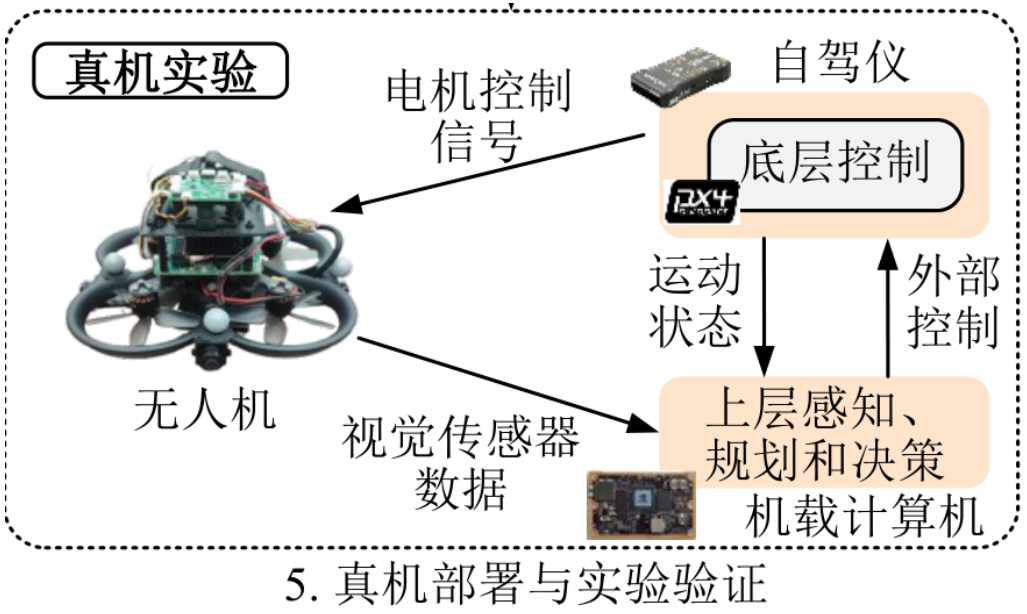
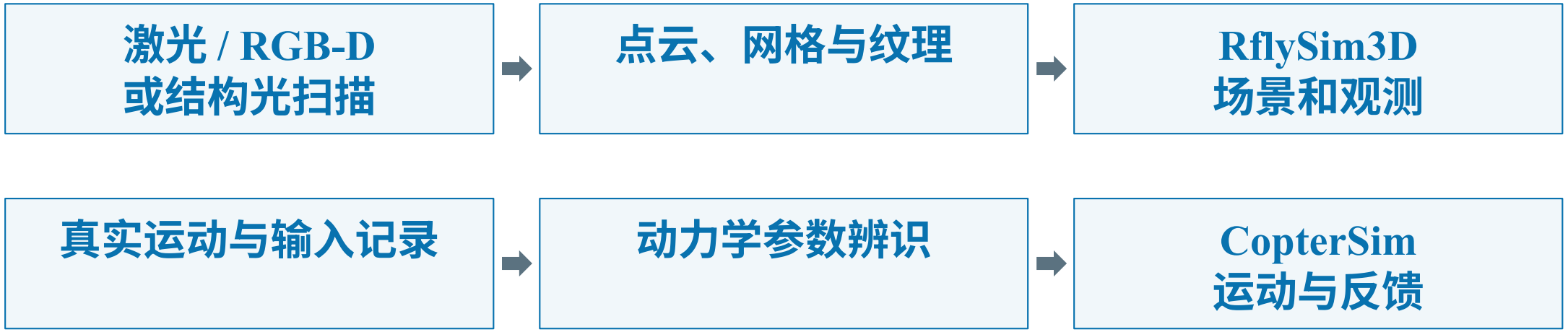


图8.10阶段5：真机部署与实验验证

真机：真实载具、观测与运动响应。

8.8.4 算法真机迁移：扫描与重建

几何孪生和动力学模型解决不同问题



几何验收：障碍位置、尺度、碰撞边界与观测视角相符。

动力学验收：同类输入的姿态、速度和位置响应相符；外观相似不能替代运动校核。

8.8.4 算法真机迁移：虚实数据增强

多工况样本扩大覆盖，真实数据衡量迁移

多工况仿真
自动生成标签 → 统一数据与标注格式 → 训练与验证
固定真实测试集

扩大覆盖：昼夜、天气、目标姿态、遮挡和材质；对应任务类别与标注。

融合数据：加入真实难例与噪声；统一图像尺寸、类别表、标注和预处理。

评估迁移：按场景拆分训练与测试，真实测试集保持独立；报告命中、漏检及误检。

8.8.4 算法真机迁移：软硬件在环

分阶段定位算法与硬件的瓶颈

阶段	保留与替换	可定位的问题
SITL	算法与自驾仪软件 仿真运动和观测	逻辑、配置、接口与任务产物
HITL	真实机载板与飞控 连接仿真环境	ARM构建、设备库、 时延与通信
真实部署	真实传感器与载具 连接已检验算法	实际噪声、标定、动作和任务 结果

8.8.4 算法真机迁移：传感器与标定

相同消息结构还要保持同一物理意义

仿真数据源
或真实设备 → 输入适配器
标定、单位、轴、时标 → 原有感知与规划算法

相机：内参、畸变、相机安装外参；分辨率与BGR/RGB通道对应模型。

深度与点云：把有效原始量换成米；无效值保持未知；轴向、原点和扫描时序明确。

惯性与控制：核IMU单位、轴与相机时间；输出适配器转换目标坐标和飞控接口。

8.8.4 算法真机迁移：算力预算

单环节够快，串行总耗时仍可能超期

教学条件：相机20Hz；要求每帧50ms内完成以下串行环节。

环节	给定耗时	影响对象
取图与预处理	8 + 5 ms	帧传递与张量准备
推理与规划	26 + 12 ms	目标信息与轨迹计算
发送控制	6 ms	动作进入执行接口

$$T = 8 + 5 + 26 + 12 + 6 = 57\ \text{ms} > 50\ \text{ms}$$

8.8.4 算法真机迁移：时间通信与控制

时基和坐标一致后才比较动作

同一时基观测
缓存、配对、有效性 → SLAM＋GNSS
局部与全局坐标 → 飞控模式与发布
真实动作反馈

时间与网络：核对stamp是否为采样时刻并统一时基；统计延迟、丢包与排队。

地图与位置：SLAM局部坐标与GNSS全局约束要有变换；ENU与NED的轴、原点和单位分别确认。

执行与退出：按接口发送setpoint，维持外控时序；失效和结束时执行模式切换或降落策略。

8.8.4 算法真机迁移：虚实对比

从硬件、检测和轨迹三个层次看迁移

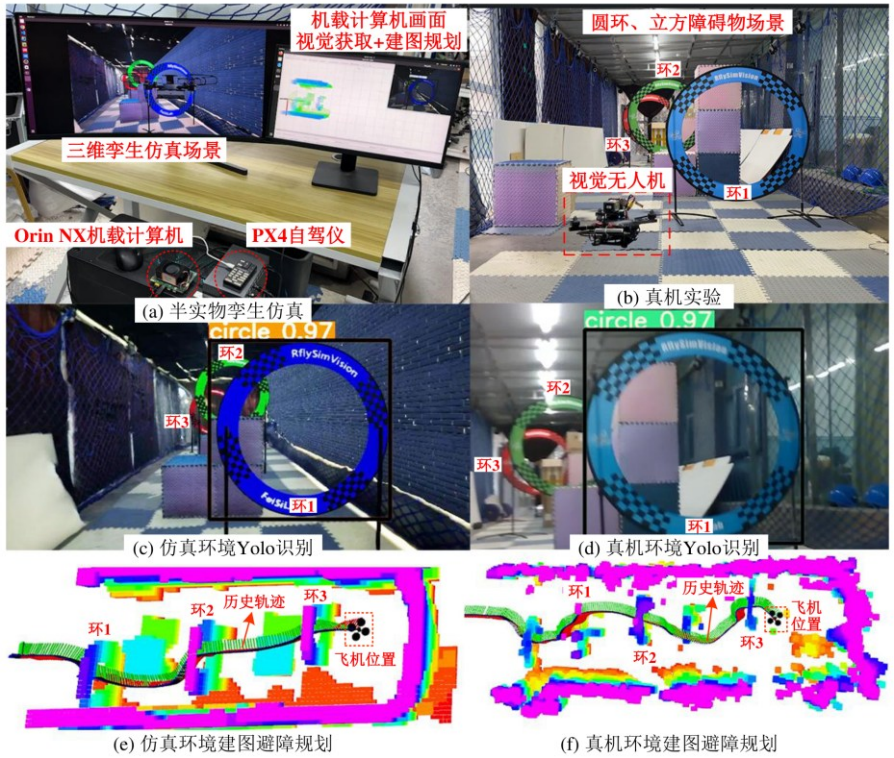


图8.11 仿真到真机同步对比

(a,b) 系统：机载板、PX4与载具。

(c,d) 检测：相同目标的仿真与真实图像。

(e,f) 地图与轨迹：估计、规划和响应。

8.8.4 算法真机迁移：系统对比

在环硬件保留到真实无人机上

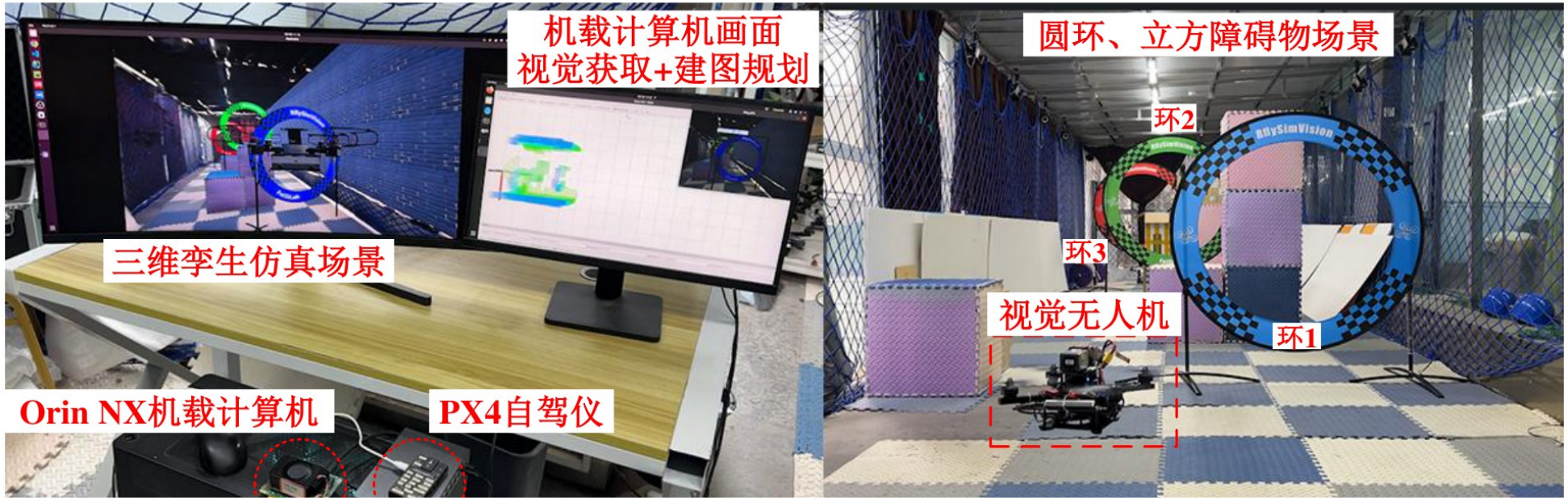


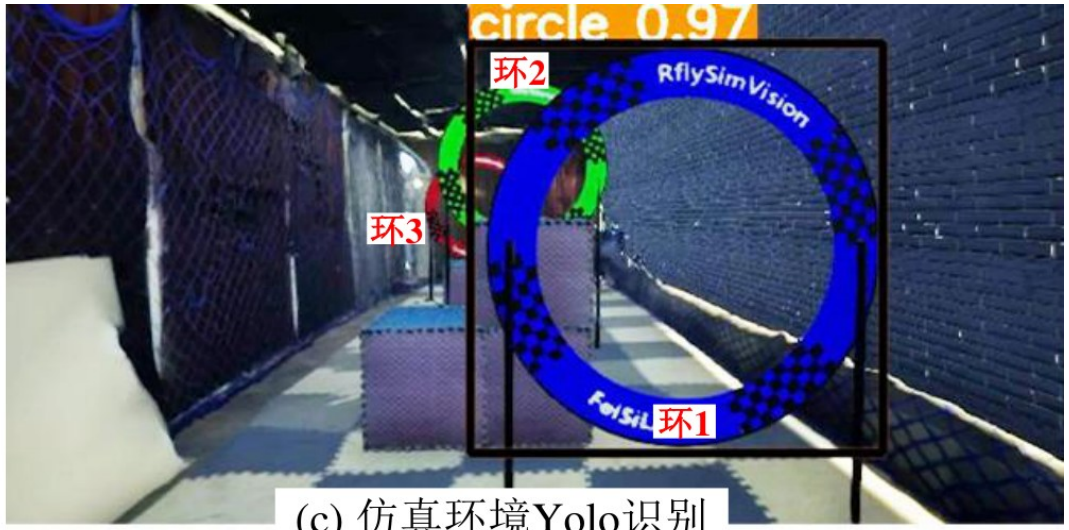
图8.11(a,b) 在环系统与真实无人机

共同硬件： Orin NX承担上层计算，PX4承担底层控制；按目标架构构建程序。

替换边界： 运动与观测改由真实载具、传感器产生；重新检查标定、通信与时限。

8.8.4 算法真机迁移：检测对比

两张图的框不能替代数据集指标



(c) 仿真环境Yolo识别



(d) 真机环境Yolo识别

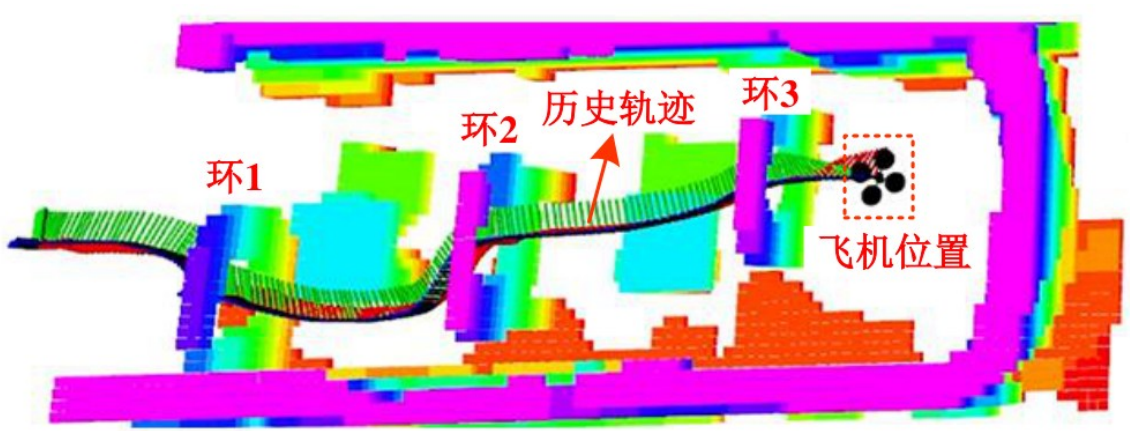
图8.11(c,d) 仿真与真实圆环检测

逐图检查：框、类别与对应标注匹配；0.97一类读数是置信度。

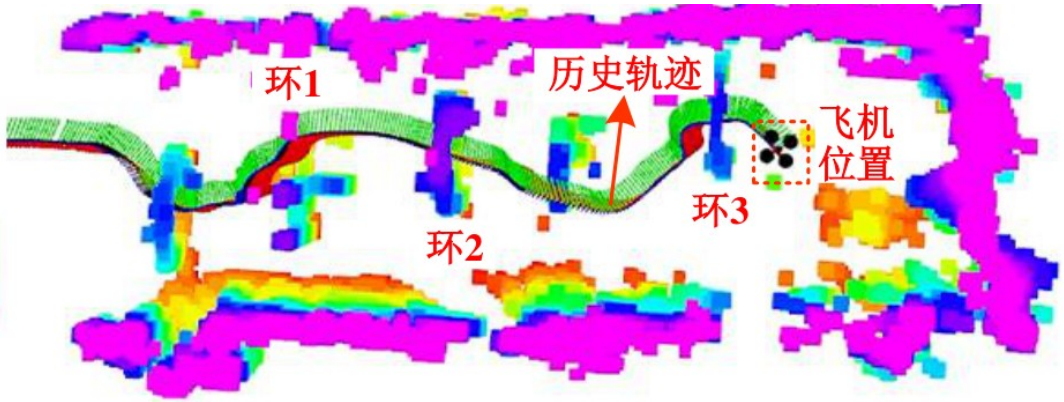
整体评价：固定数据集统计命中、误检和漏检；按真实光照、背景及模糊条件分组。

8.8.4 算法真机迁移：建图规划对比

路径外观相似还要量化任务结果



(e) 仿真环境建图避障规划



(f) 真机环境建图避障规划

图8.11(e,f) 地图、规划和轨迹对比

读图对象： 空间地图、估计位姿、规划参考和历史轨迹分别辨认。

量化对象： 同起点、同目标、同障碍；统计成功率、碰撞、轨迹误差、耗时和时延。

8.8.4 算法真机迁移：验证算例

用统一测试条件报告迁移差异

教学给定：相同起点、目标和障碍各测试20次；成功包含任务完成且满足约束。
仿真19次成功，真实17次成功；另保留碰撞、时延与误差记录。

$$P_{\text{sim}} = \frac{19}{20} = 95\%, \qquad P_{\text{real}} = \frac{17}{20} = 85\%$$

统计对象	给定结果	能说明什么
成功率差	10个百分点	固定任务条件下的迁移表现差异
失败原因 / 时延 / 误差	逐次分组	定位数据、规划或执行问题

先检验单项接口，再比较完整任务，最后扩展工况。

练习与讨论

为室内穿环提出实验和迁移证据

1. 选题与证据：前视＋下视＋激光的室内避障穿环，应选哪些接口与任务入口？保存哪些算法和响应产物?

2. 时限：相机20Hz；取图8、预处理5、推理26、规划12、发送6ms。是否赶上周期？提出改进。

3. 评价与结束：虚实窗口均显示0.97，能否说准确率97%？需要什么证据？结束时控制层还做什么？

参考要点

从接口到任务逐项解释实验结果

入口与产物：0.ApiExps采集、ROS与TF；4_CompSlamNav综合任务。
保存观测、位姿、地图、路径、指令和响应。

时限：57ms超过50ms；优化主要耗时，减少复制或限制队列，再测端到端时延。

评价与退出：0.97是置信度；固定真实测试集统计检测表现。明确模式、零速或降落，再清理资源并留记录。

本节小结

实验产物和迁移能力有不同证据要求

实验体系：接口、基本使用、进阶综合与自定义拓展；输入输出和产物决定选题。

高级能力：声视觉补充方位；室内任务连接评分；语言组织技能；吊舱分离视线与载具姿态。

五阶段迁移：扫描→建模→数据增强→SITL/HITL→真实部署；比较同条件任务与多工况统计。

易错点与后续：真值不当预测，阈值不当精度，置信度不当准确率，关窗不当结束动作；进入8.9讨论。