本章目录

关键工具与框架接口

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 5 个教学单元

8.7.1 核心开发工具
教材对应：第8.1.3.1节

8.7.2 MATLAB/Simulink算法库
教材对应：第8.1.3.2节

8.7.3 常用开源算法库
教材对应：第8.1.3.3节

8.7.4 仿真开发框架
教材对应：第8.2.1节

8.7.5 常用接口及二次开发
教材对应：第8.2.3节

8.7.1 核心开发工具：工具分工

同一个任务需要不同层次的工具

层次	负责什么	可检查的产物
运行与通信	Ubuntu/Linux、ROS 提供进程环境和消息传递	运行中的节点、话题 及数据时间戳
算法实现	Python/C++、OpenCV 与深度学习框架	图像特征、目标信息 模型权重及推理输出
计算与复现	数值库、Ceres、Git 支持求解、分析和版本记录	最优参数、结果曲线 可追溯的实验配置

8.7.1 核心开发工具：Ubuntu与ROS

操作系统运行程序，中间件连接模块

相机节点
发布图像
→
感知节点
输出目标
→
决策节点
产生动作

Ubuntu/Linux：提供运行进程、设备驱动、文件和网络；系统版本与算法依赖匹配。

机器人操作系统（ROS）：以节点、话题和消息连接模块；TF表示坐标变换，消息携带采样时间。

Python接口：rospy对应ROS1，rclpy对应ROS2；跨版本接入需要对应的节点与消息支持。

8.7.1 核心开发工具：语言与OpenCV

用同一套数据约定衔接原型和部署

工具	典型输入与输出	接入方式
Python	图像、数组、模型 →算法原型与训练结果	平台Python接口 快速试验和集成
C/C++	同一物理数据与参数 →目标平台在线程序	编译链接库与ROS节点 控制内存和并发
OpenCV	图像→滤波、特征、 目标框或光流	Python/C++调用 检查尺寸和BGR通道

运行时延由算法、后端和数据传递共同决定。

8.7.1 核心开发工具：深度学习框架

训练得到权重，推理得到任务输出



PyTorch / TensorFlow：支持网络建模、自动求导和设备运算；训练与在线推理采用不同的数据流。

最小例子：用标注圆环图训练检测器，再把新帧送入固定权重模型，输出框、类别与置信度。

8.7.1 核心开发工具：数值计算

数组、求解与曲线分别回答什么

工具	输入	输出示例
NumPy	像素、状态或轨迹数组	矩阵运算与统计量
SciPy	观测、目标函数或信号	最优参数、滤波结果
Matplotlib	时间和数值序列	误差曲线、轨迹、热力图

教学算例：三次水平误差为3、−4、0像素，均方根保留偏差大小。

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{3^2 + (-4)^2 + 0^2}{3}} \approx 2.89\ \mathrm{px}$$

8.7.1 核心开发工具：Ceres Solver

用观测残差求最佳参数

Ceres Solver：非线性最小二乘求解库，调节参数以减小残差代价。
残差是预测值减观测值；本例 x 为位置，观测为2米、4米。
用途包括束调整、位姿图优化、传感器标定和轨迹平滑。

$$J(x) = (x-2)^2 + (x-4)^2, \qquad x \text{ in m}$$

$$\frac{\mathrm{d}J}{\mathrm{d}x} = 4x - 12 = 0 \quad \Rightarrow \quad x^* = 3 \text{ m}$$

教学结果：初值1米时平方残差和为10平方米，最优点3米时为2平方米。
优化减小了两次观测的冲突；测量质量仍决定结果可信度。

Ceres残差、参数块与束调整示例
https://ceres-solver.readthedocs.io/latest/nnls_tutorial.html

8.7.1 核心开发工具：Git与GitHub

把一次实验还原为可重复的配置

记录对象	具体内容	复现时回答的问题
代码与依赖	Git提交、库版本 Python/ROS与目标架构	能否建立同一运行环境
数据与模型	数据划分、随机种子 权重文件及哈希	使用的训练产物是否相同
任务与结果	Config、任务输入 时间戳、指标与日志	是否在同样工况下比较

Git记录代码版本；GitHub托管仓库并支持协作。
哈希是文件内容的摘要，用于核对权重与数据是否一致。

8.7.1 核心开发工具：时延算例

一帧的总耗时决定能否及时控制

环节	给定耗时	输出
取图与预处理	6 + 4 ms	当前帧与图像张量
推理与规划	18 + 7 ms	目标信息与轨迹
发送控制	2 ms	控制指令

$$T_{\text{total}} = 37\ \text{ms} > T_{30\text{Hz}} = \frac{1000}{30} \approx 33.3\ \text{ms}$$

结果解释：串行链路约能处理27帧/秒；持续接收30帧/秒会产生等待。

本章目录

关键工具与框架接口

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 5 个教学单元

8.7.1 核心开发工具
教材对应：第8.1.3.1节

8.7.2 MATLAB/Simulink算法库
教材对应：第8.1.3.2节

8.7.3 常用开源算法库
教材对应：第8.1.3.3节

8.7.4 仿真开发框架
教材对应：第8.2.1节

8.7.5 常用接口及二次开发
教材对应：第8.2.3节

8.7.2 MATLAB/Simulink算法库：视觉与机器人接口

前端提取观测，接口把观测传给系统

工具箱	职责	最小输入→输出
Computer Vision	检测、特征、图像几何 与对象跟踪	图像→目标框、特征 或跟踪结果
Robotics System	机器人模型、运动学 及机器人算法	模型和关节状态 →位姿与运动结果
ROS Toolbox	消息收发、ROS节点 与模型集成	算法结果→ROS消息 订阅消息→模型输入

8.7.2 MATLAB/Simulink算法库：无人机与导航

飞行任务和地图规划如何配合

飞行任务
指定目标环 → **导航地图**
限制可行空间 → **轨迹与航点**
送入控制器

UAV Toolbox：面向无人机任务、飞行场景与仿真；组织载具、航点和任务参考。

Navigation Toolbox：面向地图表示、路径搜索、轨迹优化及代价评估；输出可行路径或轨迹。

接入例子：以障碍地图、当前位姿和目标环为输入，规划绕障轨迹，再由飞行控制器跟踪。

8.7.2 MATLAB/Simulink算法库：融合与Stateflow

连续状态估计与离散任务切换

相机、IMU
和雷达观测 → 融合与跟踪
估计连续状态 → Stateflow
选择任务动作

融合与跟踪工具箱：把多源观测、关联关系与运动模型用于定位和目标状态估计。

Stateflow：用状态、事件、条件和动作描述时序，管理起飞、探索、避障和降落。

例子：障碍距离小于2米时由前进切换到避障；距离恢复且路径可行时再回到前进。

8.7.2 MATLAB/Simulink算法库：Embedded Coder

从模型生成代码还要适配目标环境

可生成代码的Simulink模型 → C/C++代码编译与链接 → ROS节点或目标可执行程序

Embedded Coder：支持的模型生成C/C++；需匹配目标编译器、库和接口。

动态链接库（DLL）：保存可由主程序在运行时调用的函数；运动模型DLL可接入CopterSim。

板上结果：取得新数据、输出动作并满足时限，才构成可检验的部署结果。

生成代码缩短实现过程，接口语义仍需保持一致。

8.7.2 MATLAB/Simulink算法库：强化学习与MPC

学习策略和在线优化怎样输出动作

方法	输入与动作产生方式	重点检查
强化学习工具箱	观测、动作与奖励 训练策略后在线推理	奖励设计、训练覆盖 与新工况表现
MPC工具箱	状态、参考、预测模型 在线优化约束动作序列	模型误差、可行约束 与每次求解耗时

模型预测控制（MPC）：利用未来状态预测选择当前动作。
强化学习（RL）：通过与环境交互的奖励学习动作策略。

8.7.2 MATLAB/Simulink算法库：模型闭环算例

条件切换后仍由控制器计算速度

教学条件：障碍距离1.6米，切换阈值2米，进入避障状态。
当前位置0米，1秒后参考位置1米；避障速度上限0.5米/秒。

$$J(v) = (v\Delta t - 1)^2 + 0.2v^2, \qquad \Delta t = 1\ \mathrm{s}$$

候选速度	代价	约束与结果
0.5米/秒	0.30	满足限速，可执行
1.0米/秒	0.20	超过限速，排除

结果解释：任务逻辑决定控制目标和约束，优化器在可行范围内选择动作。

本章目录

关键工具与框架接口

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 5 个教学单元

8.7.1 核心开发工具
教材对应：第8.1.3.1节

8.7.2 MATLAB/Simulink算法库
教材对应：第8.1.3.2节

8.7.3 常用开源算法库
教材对应：第8.1.3.3节

8.7.4 仿真开发框架
教材对应：第8.2.1节

8.7.5 常用接口及二次开发
教材对应：第8.2.3节

8.7.3 常用开源算法库：算法职责

检测、跟踪、定位和规划各产出什么

任务	教材算法	关键输出
检测与身份	YOLO / YOLOE DeepSORT	框、类别、掩膜 跨帧目标身份
自定位与地图	VINS-Fusion、ORB-SLAM FAST-LIO系列	载具位姿、轨迹 及不同形式的地图
运动规划	FASTER、EGO-Planner EGO-Swarm	可行轨迹与时间安排 邻机避碰参考

8.7.3 常用开源算法库：YOLO与YOLOE

类别约定决定检测器如何使用

模型路线	输入约定	输出与用途
YOLOv5 / YOLOv8 YOLO11	图像＋固定权重 类别由训练任务规定	类别、置信度和目标框 可选掩膜或关键点任务
YOLOE	图像＋文本或视觉提示 也有无提示路线	开放词汇检测与分割 目标范围由模型和提示限定

最小例子：用“圆环”提示寻找目标，检查框是否对应任务所需的通行环。

YOLOE三种提示模式与训练示例

https://github.com/THU-MIG/yoloe

8.7.3 常用开源算法库：DeepSORT

给检测结果保持跨帧身份

目标检测框 → 运动与外观计算关联代价 → 分配与轨迹管理输出持续身份

$$C = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.9 \\ 0.8 & 0.1 \end{bmatrix}$$

教学关联代价：
行对应已有轨迹，列对应新检测；数值越小越匹配。

$$J_{\text{direct}} = 0.2 + 0.1 = 0.3 < 1.7 = 0.9 + 0.8 = J_{\text{cross}}$$

结果解释：保持两对象身份；遮挡时利用预测和外观再次关联。
若两种分配都不合理，应保留丢失状态，而非强行交换身份。

8.7.3 常用开源算法库：VINS-Fusion

相机和IMU约束同一个载具状态

单目＋IMU 双目＋IMU / 双目	→	局部优化 估计运动状态	→	位姿与轨迹 可接回环修正

主要输入：图像与可选IMU；相机内参、相机—IMU外参、时间差和噪声参数。

估计输出：载具自身的位置、姿态与运动状态；可选回环帮助抑制长期漂移。

全球导航卫星系统（GNSS）：可通过独立全局融合模块与局部估计结合，提供全局坐标约束。

VINS-Fusion传感器配置与global_fusion
https://github.com/HKUST-Aerial-Robotics/VINS-Fusion

8.7.3 常用开源算法库：ORB-SLAM系列

特征重投影把轨迹和地图联系起来

系统	输入与能力	使用条件
ORB-SLAM2	单目、双目、RGB-D 稀疏地图与定位	标定、纹理、视差影响关联 纯单目无绝对米制尺度
ORB-SLAM3	视觉或视觉惯性 多地图与回环	IMU时序及相机外参 影响融合估计

最小接入：仿真图像＋相机标定→相机位姿与稀疏地图；纹理和运动影响关联。

ORB-SLAM3支持的传感器与运行配置

https://github.com/UZ-SLAMLab/ORB_SLAM3

8.7.3 常用开源算法库：激光惯性里程计

点云配准与IMU传播怎样互补

算法	主要机制	共同接口需求
FAST-LIO	迭代扩展卡尔曼滤波 融合雷达与惯性	点云、IMU、安装外参 与采样时间
FAST-LIO2	直接原始点云配准 增量点云地图	点内时间与去畸变 影响快速运动结果
Faster-LIO	稀疏增量体素 加速地图查询和更新	输出位姿与地图 后接规划或控制

激光惯性里程计（LIO）：用激光雷达和IMU估计自身运动。
先核传感器约定，再用轨迹连续性、地图一致性与时延评价实现。

8.7.3 常用开源算法库：FASTER与EGO-Planner

未知空间和局部障碍如何进入规划

规划器	处理的关键问题	输入与产物
FASTER	未知空间中的快速前进 与已知自由空间备份	状态、地图、目标 →主轨迹与停止备份
EGO-Planner	局部碰撞约束与 B样条梯度优化	状态、局部地图、目标 →可行局部轨迹

欧氏符号距离场（ESDF）：按位置表示到障碍边界的距离及内外关系。
EGO-Planner采用无需构建ESDF的局部优化路线。

8.7.3 常用开源算法库：EGO-Swarm

共享未来轨迹帮助分布式避碰

EGO-Swarm：各机基于自身观测与邻机轨迹进行局部优化。
输入包括自身位姿、障碍、任务目标和邻机带时间的计划轨迹。
p_1, p_2 是位置（米），t 是时间（秒）；最小间距1米。

$$p_1(t) = t, \quad p_2(t) = 4 - t, \quad d(t) = |4 - 2t| \text{ m}$$

预测时刻	一维间距	结果解释
1秒	2米	大于1米，暂满足间距
2秒	0米	将交会，提前改轨迹

邻机轨迹只有带着正确时刻和坐标才有避碰价值。

本章目录

关键工具与框架接口

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 5 个教学单元

8.7.1 核心开发工具
教材对应：第8.1.3.1节

8.7.2 MATLAB/Simulink算法库
教材对应：第8.1.3.2节

8.7.3 常用开源算法库
教材对应：第8.1.3.3节

8.7.4 仿真开发框架
教材对应：第8.2.1节

8.7.5 常用接口及二次开发
教材对应：第8.2.3节

8.7 关键工具与框架接口

8.7.4 仿真开发框架：总体框架

沿图中数据流找到四类核心模块

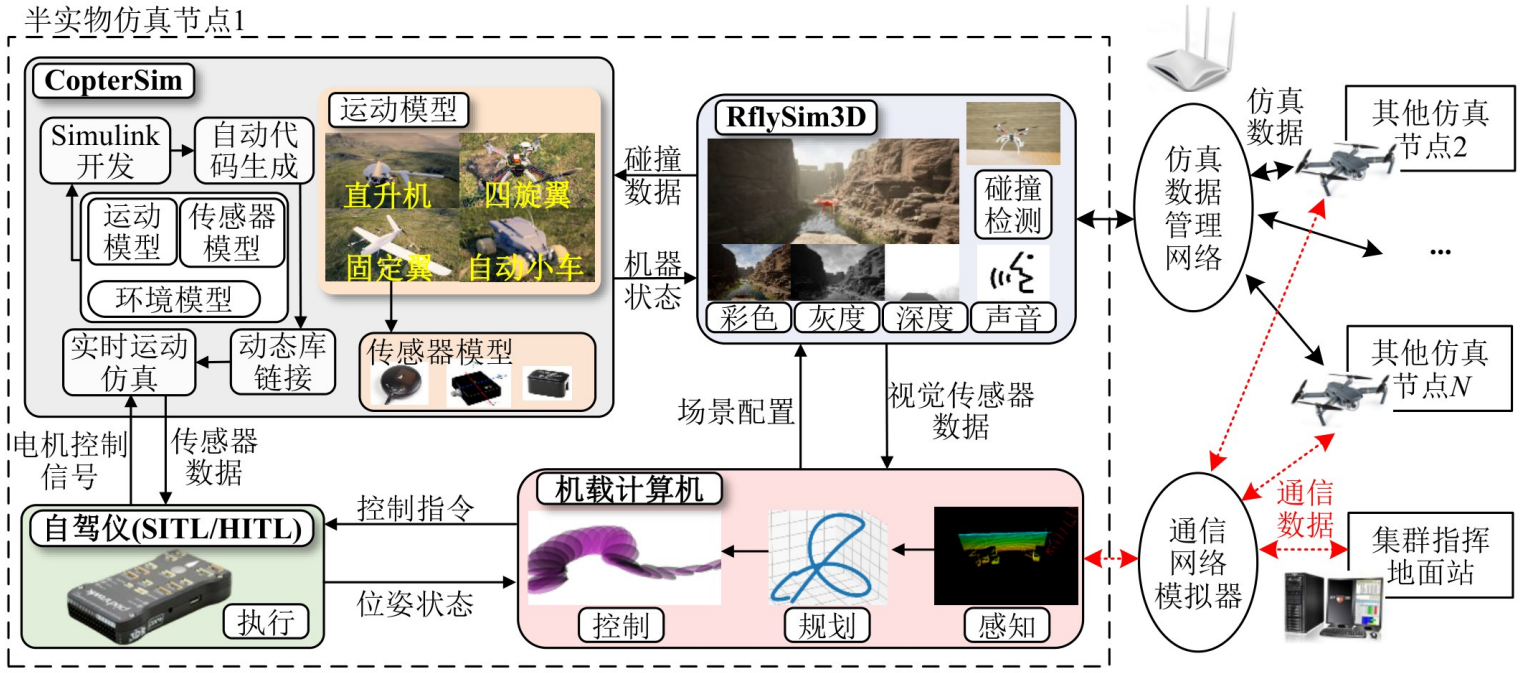


图8.8 感知决策仿真总体框架

读图：电机—运动—传感器构成底层回路；图像—算法—外部指令构成上层回路。

8.7.4 仿真开发框架：图8.8上部放大

运动模型和场景渲染分别输出什么

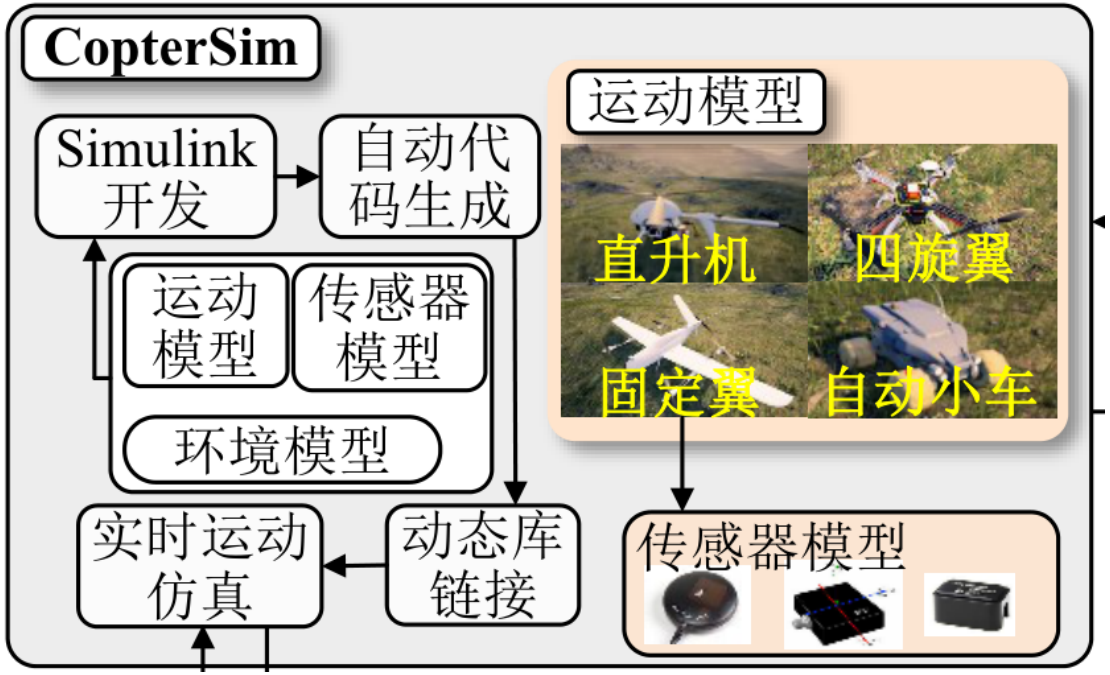


图8.8局部：CopterSim运动与传感器模型



图8.8局部：场景、观测和碰撞检测

读图：运动状态送往RflySim3D；场景碰撞信息反馈给CopterSim。

8.7.4 仿真开发框架：图8.8下部放大

机载算法与自驾仪形成指令和状态回路



图8.8局部：自驾仪执行

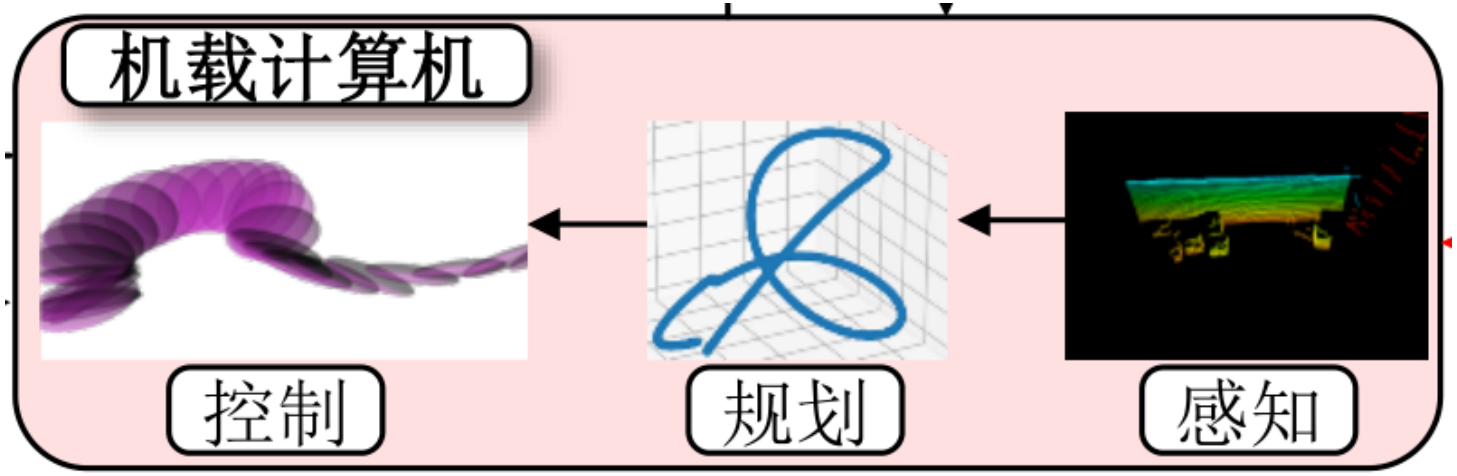


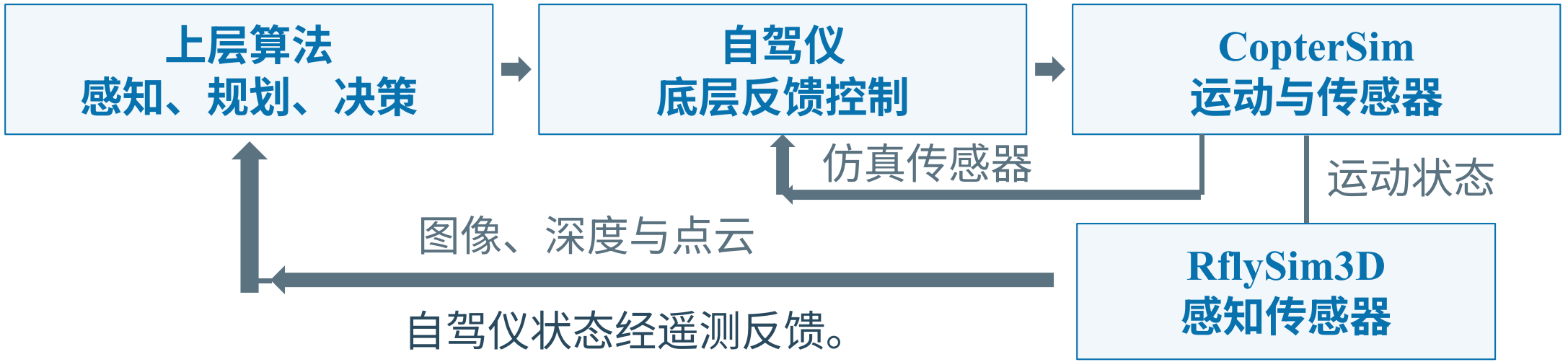
图8.8局部：机载感知、规划、控制

指令链：机载算法→自驾仪→电机控制；CopterSim更新运动。

状态链：传感器→自驾仪→位姿状态；机载算法依据新状态更新决策。

8.7.4 仿真开发框架：模块与开发路径

动力学、感知与控制在两个闭环中协作



Python：SDK取数与原型处理；单机可用共享内存。

Simulink / ROS：模型接入数据与控制接口；ROS消息连接算法和外控。

8.7.4 仿真开发框架：SITL与HITL

真实硬件加入后检验了什么

比较项	软件在环（SITL）	硬件在环（HITL）
自驾仪	PX4软件在环境中运行	真实自驾仪运行固件
上层算法	Windows/Python 或WinWSL/ROS	真实机载计算机 目标架构与设备库
运动与观测	CopterSim和RflySim3D	仍由仿真模型与场景提供
验收重点	逻辑、接口和算法产物	板上时延、资源与通信

8.7.4 仿真开发框架：分布式仿真

多机共享图像先计算带宽需求

教学条件：4路640×480、3通道图像，各30帧/秒；uint8每通道1字节。
每个节点独立配置载具编号、传感器编号、IP、端口和时基。

$$B = 4 \times 640 \times 480 \times 3 \times 30 = 110592000 \text{ byte/s}$$

$$R = 8B = 884.736 \text{ Mbit/s}$$

结果解释：这是净图像负载，还没有包头、点云和控制消息；标称链路速率不能全用于图像。

系统选择：按任务发送观测或结果；权衡压缩、解码、丢包与时效。

8.7.4 仿真开发框架：ROS兼容

数据转发与运动控制是两条接口链

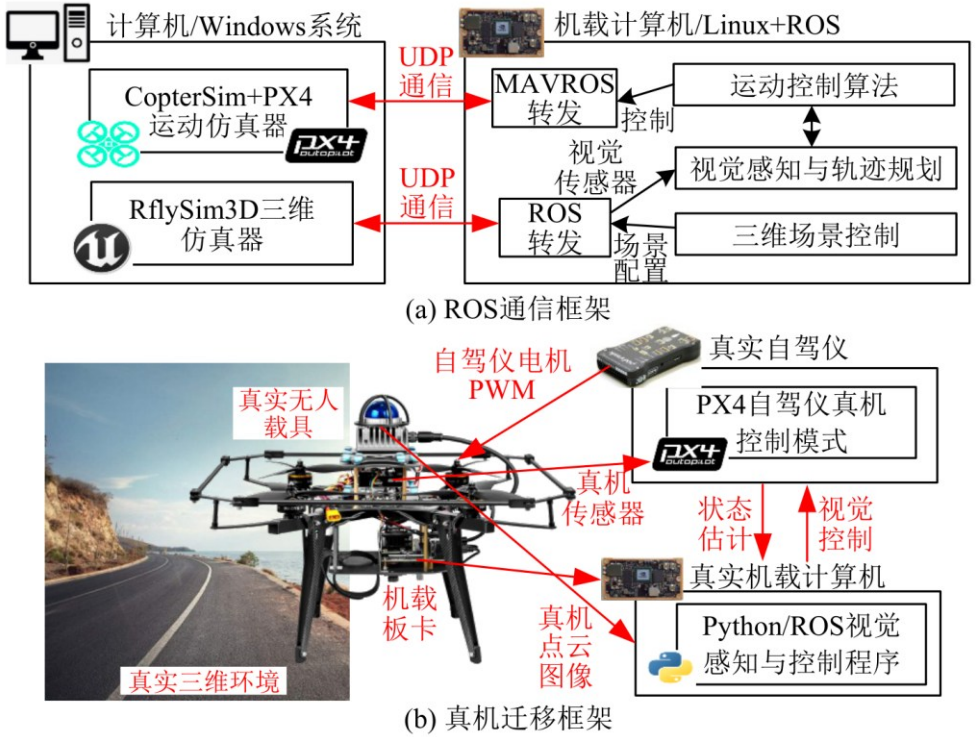


图8.9 ROS仿真兼容与真机迁移

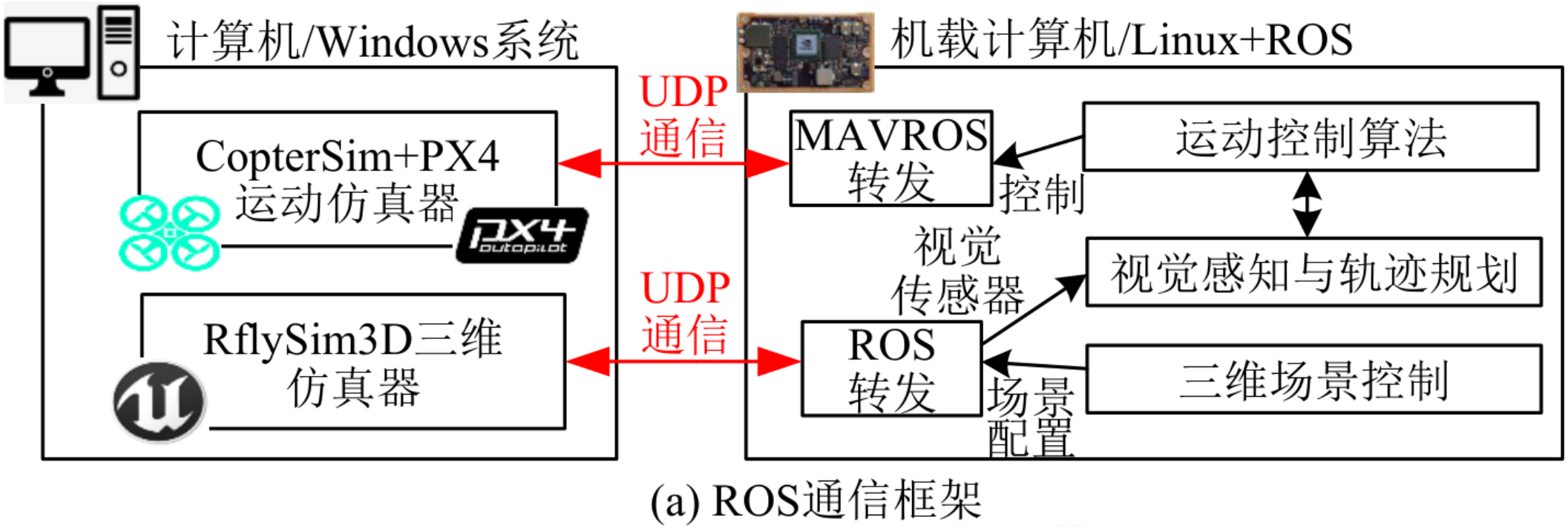
视觉数据链： RflySim3D→网络接收→ROS消息→感知与规划。

运动控制链： 自驾仪状态→MAVROS；规划目标→MAVROS→PX4。

迁移边界： 真实传感器替换观测源；真实载具替换运动仿真。

8.7.4 仿真开发框架：图8.9(a)放大

仿真图像进入ROS，外部目标进入PX4



(a) ROS通信框架

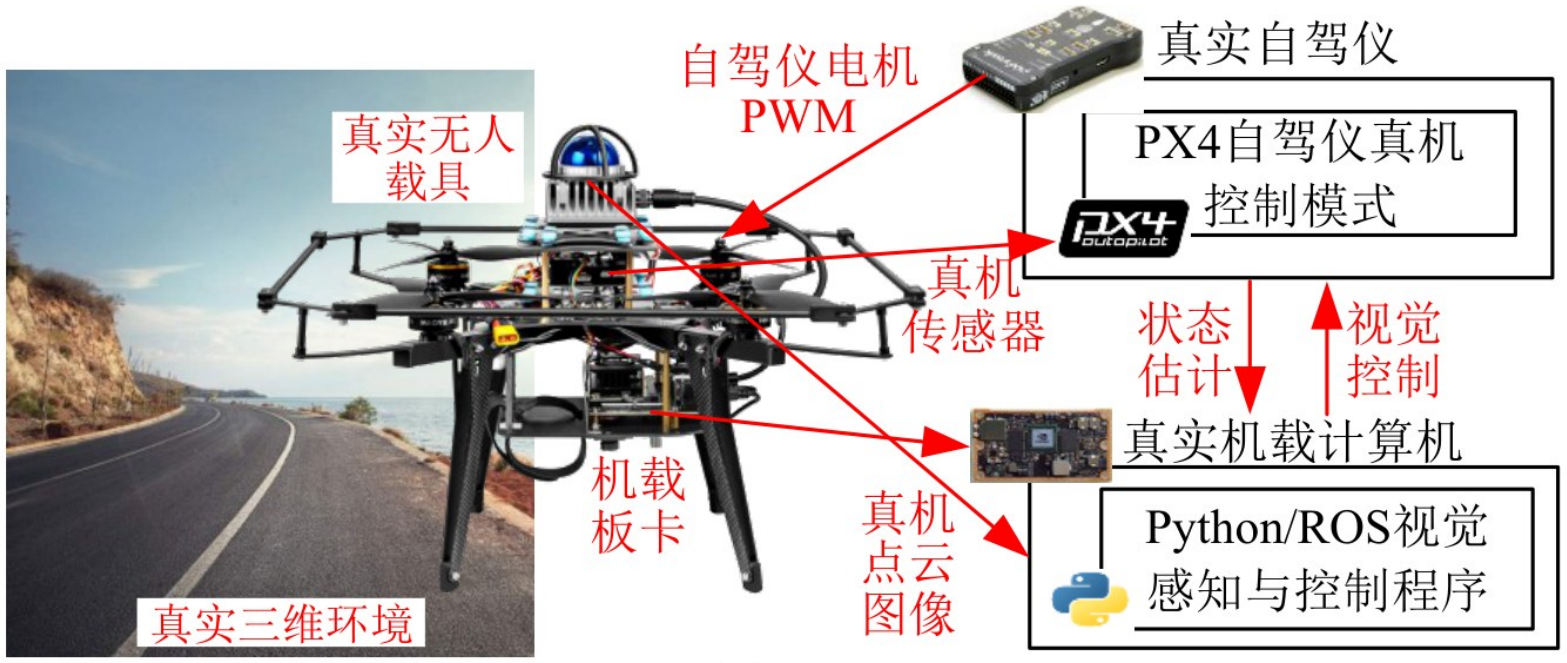
图8.9(a) 原图：仿真运动、观测与上层程序

读图：观测到达不等于控制已生效，必须同时检查数据链与目标执行链。

8.7 关键工具与框架接口

8.7.4 仿真开发框架：图8.9(b)放大

保留算法约定，替换真实观测和执行平台



(b) 真机迁移框架

图8.9(b) 原图：真实传感器、载具与机载板

迁移路线：扫描→建模→虚实增强→在环→真机（图8.10见课件8.8.4）。

8.7.4 仿真开发框架：开发流程

用数据、决策和响应判断闭环是否有效

给定现象	已通的环节	继续检查的对象
图像刷新，目标框不变	传感器接收	算法是否读新帧 权重与目标类别
轨迹更新，载具不响应	感知与规划	外控模式、目标坐标 发布频率与控制链
载具飞行但仍穿障碍	运动控制	障碍坐标、规划约束 跟踪误差与采样时刻

本章目录

关键工具与框架接口

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 5 个教学单元

8.7.1 核心开发工具
教材对应：第8.1.3.1节

8.7.2 MATLAB/Simulink算法库
教材对应：第8.1.3.2节

8.7.3 常用开源算法库
教材对应：第8.1.3.3节

8.7.4 仿真开发框架
教材对应：第8.2.1节

8.7.5 常用接口及二次开发
教材对应：第8.2.3节

8.7.5 常用接口及二次开发：环境与文档

参数协议和Python方法分开查找

环境选择： Windows/Python先验证本机取图；WinWSL、虚拟机、Linux或机载板按ROS及硬件依赖选择。

学生资料根： [安装目录]/RflySimAPIs/8.RflySimVision/
API.pdf与VisionSensorAPI.pdf分别用于开发说明和参数协议。

SDK方法文档： [安装目录]/RflySimAPIs/RflySimSDK/html/index.html
下钻4.DevRef/pysdk/vision/viscap.html核对实际方法。

8.7.5 常用接口及二次开发：Config.json

传感器编号与列表下标承担不同角色

字段	意义	入门设置或读法
SeqID / TargetCopter	传感器编号 / 载具编号	0 / 1；编号不是列表下标
TypeID	决定数据类型与解码	1为彩色图，2为深度图
DataWidth / DataHeight	输出分辨率，单位像素	640 / 480
DataCheckFreq / 协议	检查更新频率 / 传输方式	30Hz；SendProtocol[0]=0（共享内存）

例：配置列表仅一项SeqID=7时，读Img[0]；用VisSensor[0].SeqID核对编号。

8.7.5 常用接口及二次开发：安装外参

固定机体安装先声明单位和参考系



TargetMountType=0：固定在载具参考点。
SensorPosXYZ=[0.3,0,0]：单位米，沿机体前向偏移。
SensorAngEular=[0,0,0]：单位度，以当前安装方式解释姿态。

EularOrQuat：选择欧拉角或四元数配置；保留实际键名。
相机光学轴、机体FRD和地面坐标的转换见课件8.5。

8.7.5 常用接口及二次开发：接口生命周期

请求成功之后还要等首帧

```
import VisionCaptureApi
vis = VisionCaptureApi.VisionCaptureApi()
if not vis.jsonLoad():
    raise RuntimeError("Config load failed")
if not vis.sendReqToUE4():
    raise RuntimeError("Request failed")
vis.startImgCap()
```

配置： jsonLoad()按入口脚本位置读取Config.json。

首帧： 等待hasData[0]，设超时；再检查数组尺寸与类型。

生命周期：配置→请求→启动接收→首帧超时检查→循环处理→finally清理。
请求返回True仅覆盖请求阶段，首帧有效由接收数据判断。

8.7.5 常用接口及二次开发：读取新帧

处理循环必须辨别时间戳变化

```
import numpy as np
if vis.hasData[0]:
    with vis.Img_lock[0]:
        frame = vis.Img[0].copy()
        stamp = np.asarray(vis.timeStmp[0]).item()
    if stamp != last_stamp:
        last_stamp = stamp
        process(frame)
```

图像锁：保护图像副本；时刻另行更新，融合需成对消息。

timeStmp[0]：仅过滤重复时刻，不保证图像与时刻成对。

last_stamp在循环前初始化为None；process是自定义的感知函数。
完整外层循环还要处理超时、结束信号和finally中的资源清理。

8.7.5 常用接口及二次开发：彩色图像

RGB类型返回BGR数组

数据层	当前返回或约定	具体例子
传感器类型	TypeID=1，彩色图	类型名RGB不决定数组通道
Python数组	uint8；H×W×3；BGR	纯红像素=[0,0,255]
算法输入	按模型要求转换通道	cv2.COLOR_BGR2RGB 或cv2.COLOR_BGR2HSV

8.7.5 常用接口及二次开发：深度数据

先屏蔽无效值，再换成米

TypeID=2：uint16单通道；传输方式影响数组是H×W还是H×W×1。
深度刻度 u_{m} 为otherParams[2]，默认每计数0.001米；65535先屏蔽。

$$d_{\mathrm{m}} = d_{\mathrm{raw}} u_{\mathrm{m}} = 2370 \times 0.001 = 2.370\ \mathrm{m}$$

原始整数	处理结果	距离判断
2370	有效深度2.370米	与米制阈值比较
65535	无效观测，掩码排除	保留未知，另取有效观测

结果解释：未知值不提供可通行距离；单位和有效性都在进入算法前确定。

8.7.5 常用接口及二次开发：分割与点云

渲染标签和算法估计有不同来源

数据	当前接口含义	接入注意
分割图 Type4	uint8，BGR标签渲染图	标签是真值来源 模型输出另行评价
点云 Type7/20等	N×4浮点数组 XYZ已解码为米	第4列语义或零 不再整体缩放
测距 / 光流	Img[i]内测距对象 vis.OpticalFlowSensor	按结构字段读取 不是通用图像数组

点云Type7、吊舱与红外等功能按安装授权使用；入门先核RGB与深度。

8.7.5 常用接口及二次开发：时间与融合

同时读取不代表同一采样时刻

图像：timeStmp为相对时刻，imgStmp为映射后时刻。
IMU：sendImuReqCopterSim()请求数据；按同一时基缓存并配对。

$$\Delta t = |t_{\text{imu}} - t_{\text{cam}}|, \qquad t_{\text{cam}} = 1.000\ \text{s}$$

给定IMU时刻	与相机偏差	教学10ms门限结果
1.005秒	5毫秒	进入配对候选
1.025秒	25毫秒	丢弃或按模型插值处理

AlignTime()更新时刻字段；融合器仍需确定配对、插值和有效性规则。

8.7.5 常用接口及二次开发：ROS与二次开发

消息约定把仿真数据接到算法

仿真SDK
或真实传感器 → 输入适配器
单位、轴、时标 → 算法节点
定位、规划、决策

图像与点云：核对encoding、shape、单位、frame_id和TF；消息名不代替坐标转换。

ROS路线：视觉数据经消息输入算法；自驾仪状态与位置、速度、姿态目标经MAVROS连接。

Simulink路线：以数据采集和外部控制模块接入算法模型；代码生成与目标支持按具体模块核对。

8.7.5 常用接口及二次开发：控制与退出

感知停更时控制状态也要有去向

```
try:
    run_perception_loop()
finally:
    vis.stopRun()
    cv2.destroyAllWindows()
```

run_perception_loop是自定义外层循环；
先决定载具结束动作，再释放接收资源。

接口分工： VisionCaptureApi取数；PX4MavCtrl发布外控；场景接口管理对象，评估程序计算指标。

退出： stopRun关闭CopterSim IMU/里程计接收并等待共享内存线程；图像UDP另核。载具按控制策略退出。

资源结束与载具结束动作都要在控制流程中明确。

练习与讨论

诊断一个双相机避障系统

1. 编号与新帧：SeqID为7、9，两项按此顺序配置，应访问哪两个Img下标？怎样避免重复处理？

2. 物理量：深度刻度0.001米，中心整数2370与无效值65535分别如何进入避障算法？

3. 执行与迁移：输入30Hz，推理100ms。系统会发生什么？移到ARM机载板要取得哪些验证产物？

参考要点

从数据语义追到系统响应

编号与新帧：读Img[0]和Img[1]；用VisSensor[i].SeqID确认编号，比较采样时间戳后处理新帧。

深度：$2370 \times 0.001 = 2.370$ m；65535进入无效掩码，不能当作远处自由空间。

时延与目标板：100ms推理约10Hz；核对缓存策略并优化整条链。目标板检查构建、依赖、新数据、时延与响应。

本节小结

工具选择必须服从任务和接口

工具与模型：核心工具、MATLAB工具箱与开源算法各有职责；按输入输出确定连接方式。

系统与证据：SITL检查逻辑，HITL加入真实机载板与飞控；
分布式增加网络和多机时序。

接口与易错点：下标不是SeqID，BGR不是RGB；深度先屏蔽无效值再换米。
同轮读取不等于同步；关窗不等于载具结束动作。

下一步：课件8.8按教材实验选择任务，用观察量、结果判据与真机差异检验实现。