本章目录

习题与课堂讨论

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

8.9.1 概念方法

教材对应：第8.4节，题1-5

8.9.2 几何计算

教材对应：第8.4节，题6

8.9.3 感知决策设计

教材对应：第8.4节，题7、9

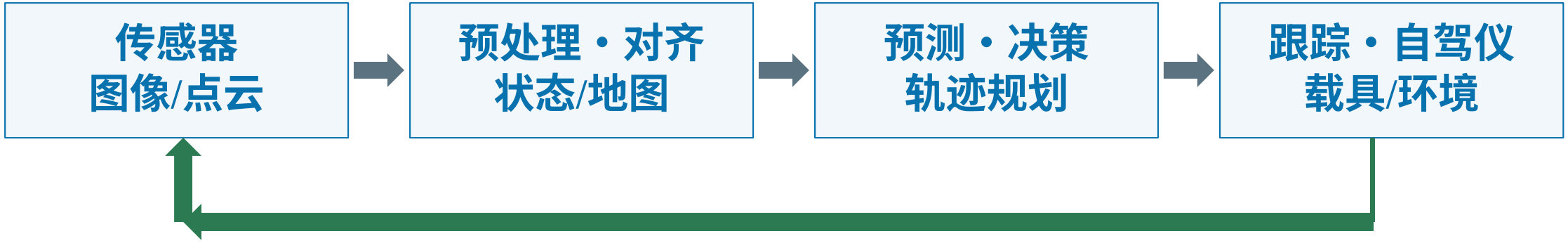
8.9.4 系统开发与迁移

教材对应：第8.4节，题8、10

8.9.1 概念方法：题1·闭环模块

观测、估计、规划和执行的数据闭环

教材第8.4节 · 题1： 说明多模态感知与智能决策闭环包含哪些关键模块及其数据流。



观测反馈携带时间戳。位姿、地图、目标与不确定性进入决策，参考轨迹进入跟踪控制。

参考要点：动作改变运动，运动改变观测，新的观测修正估计与后续动作。

8.9.1 概念方法：题1·延迟与动作

感知延迟怎样改变制动距离

教学条件：直线运动、静态障碍物，速度2 m/s，感知及执行延迟0.15 s。
可用减速度2 m/s²，额外余量0.30 m。

$$d_{\mathrm{req}} = v\tau + \frac{v^2}{2a} + m = 2 \times 0.15 + \frac{2^2}{2 \times 2} + 0.30 = 1.60\,\mathrm{m}$$

符号：速度和延迟给出反应段距离，速度平方与减速度给出制动段距离，余量覆盖额外误差。

$$d_{\mathrm{obs}} - d_{\mathrm{req}} = 3.00 - 1.60 = 1.40\,\mathrm{m}$$

参考判断：净空低于1.60 m前就应减速。每次新观测都更新净空、速度和延迟。

8.9.1 概念方法：题1·闭环判断

闭环运行的可观察判据

数据对象	可观察结果	参考判据
测量与时标	图像/点云/惯性数据随采集时刻更新	新数据进入缓存，陈旧数据标记失效
状态与地图	位姿、目标、地图及不确定性响应观测	坐标与时刻一致，创新残差可解释
轨迹与执行	带时间的参考和实际运动可分别记录	误差收敛，指令时序与动态限制满足
反馈与退化	扰动后重新观测并修正动作	传感器失联触发超时、制动或降级

真值支路用于评分。把真值直接作为估计输入，会改变正在检验的感知问题。

8.9 习题与课堂讨论

8.9.1 概念方法：题2·稠密与稀疏

光流覆盖范围与任务选择

教材第8.4节 · 题2： 简述稠密光流与稀疏光流的差异及适用场景。

类型	输出与典型机制	适用场景与条件
稠密光流	逐像素位移场。Horn-Schunck用全局平滑约束，Farnebäck用局部多项式近似。	场景运动分布、动态区域分析。纹理弱或遮挡区需先验，计算随像素规模增加。
稀疏光流	特征点及其位移。Lucas-Kanade在小邻域求局部运动，可配图像金字塔。	特征跟踪、里程计和实时控制。依赖稳定特征，未采样区域无直接输出。

参考要点：比较采样、输出、假设、计算条件和应用，不只列算法名。

8.9.1 概念方法：题2·速度换算

像素运动怎样换成米制运动

教学条件：静态场景、相机纯横向平移，无转动。每帧图像向右移动3 px，帧率30 Hz，轴向深度5 m，像素焦距320 px。

$$\dot{u} = \frac{\Delta u}{\Delta t} = 3 \times 30 = 90\ \text{px/s}$$

$$\dot{u} = -\frac{f_x}{Z} v_{c,x} \quad \Rightarrow \quad v_{c,x} = -\frac{5}{320} \times 90 = -1.40625\ \text{m/s}$$

这里$v_{c,x}$是相机向右为正的平移速度，Z是沿光轴的深度。图像向右移动，对应相机向左移动。

缺深度时保留像素速度；相机转动和目标自身运动需要另行建模。

8.9 习题与课堂讨论

8.9.1 概念方法：题3 · 地图语义

占据、表面与距离提供不同查询

教材第8.4节 · 题3：说明ESDF 与 TSDF、栅格地图的区别及在避障中的作用。

地图	存储量与查询	避障中的作用
占据栅格	每个单元的占据状态或概率，另保留未知标记。	碰撞检查与栅格搜索。最近距离通常需再做距离变换。
截断距离 TSDF	融合表面附近的有符号观测距离，常沿射线估计并截断。	表面重建、融合噪声。截断区外数值不能当完整净空。
欧氏距离 ESDF	到最近障碍边界的有符号欧氏距离，空闲侧在本例取正。	查询净空及局部距离梯度，用于连续轨迹优化与验证。

未知区按不可通行处理；允许探索时须给出感知距离和制动约束。

8.9.1 概念方法：题3·碰撞间距

载具半径改变安全距离判据

教学条件：载具用半径0.25 m的包络球近似，误差余量0.15 m。ESDF自由侧为正，当前中心到障碍边界0.35 m。

$$\rho = r_{\text{robot}} + m = 0.25 + 0.15 = 0.40\ \text{m}$$

障碍内	净空不足区	满足中心间距

0.35 m < 0.40 m，仍差0.05 m。改为0.50 m后，超过阈值0.10 m。

参考判断：安全半径还应吸收地图离散误差、定位误差和跟踪误差。

8.9.1 概念方法：题4 • 视觉伺服

三种方法采用什么控制误差

教材第8.4节 • 题4：比较PBVS、IBVS及端到端视觉伺服的区别、特点及适用场景。

方法	闭环依据与特点	适用场景与主要条件
基于位置 PBVS	从视觉估计目标相对位姿，以三维位姿误差控制。几何意义明确。	已知目标几何的对接、引导、定位。依赖标定和位姿估计质量。
基于图像 IBVS	用像素或图像特征误差及图像雅可比求指令，几何链较短。	对准、跟踪、末端接近。目标可见，雅可比及深度近似需合理。
端到端	图像与任务条件进入学习策略，直接输出动作或运动参考。	训练覆盖的任务环境。依赖数据分布、算力与独立闭环验证。

三类都可接入规划和保护逻辑，按控制依据区分方法。

8.9.1 概念方法：题4·控制路径

三条视觉到控制指令的路径

PBVS	图像 相对位姿	位姿误差 控制律	速度指令 飞控执行
IBVS	图像 特征误差	图像雅可比 控制律	速度指令 飞控执行
端到端	图像 任务条件	学习策略 动作输出	限幅/接口 飞控执行

运动产生新图像并反馈；自定位、地图和全局规划按任务需要接入PBVS。

8.9.1 概念方法：题4·一步控制

单轴图像误差怎样下降

教学条件：静止目标、相机只作横向平移，姿态固定，轴向深度5 m。目标相对期望位置向右偏32 px，焦距320 px，增益1/s，更新步长0.10 s。

$$e_x = \frac{u - u^*}{f_x} = \frac{32}{320} = 0.10, \qquad L_x = -\frac{1}{Z} = -0.20\ \mathrm{m}^{-1}$$

$$v_{c,x} = -\lambda L_x^{-1} e_x = -1 \times (-5) \times 0.10 = 0.50\ \mathrm{m/s}$$

$$e_{x,k+1} \approx e_{x,k} + L_x v_{c,x} \Delta t = 0.10 - 0.20 \times 0.50 \times 0.10 = 0.09$$

相机右移使目标投影左移；重新观测后更新误差，核对限幅与视野。

8.9 习题与课堂讨论

8.9.1 概念方法：题5·视觉与激光

视觉和激光怎样约束位姿与地图

教材第8.4节 · 题5：比较视觉SLAM、激光SLAM、视觉/激光惯性融合SLAM的区别、特点及适用场景。

类型	测量和特点	适用场景与边界
视觉SLAM	图像特征/像素匹配。颜色与纹理丰富，传感器轻。单目尺度需额外约束。	有纹理、曝光稳定的轻量平台。弱纹理、模糊和光照变化会削弱约束。
激光SLAM	测距点云与扫描匹配。直接提供米制几何，较少依赖可见光照明。	有可辨几何结构的导航建图。长直廊道、重复平面、反射和遮挡会退化。

SLAM：同步定位与建图。按尺度、退化条件和任务比较方案。

8.9 习题与课堂讨论

8.9.1 概念方法：题5·惯性融合

高频惯性怎样连接低频观测

组合	增加的约束与特点	任务条件及限制
视觉惯性里程计VIO	IMU高频传播，视觉校正位姿/偏置；激励充分时可恢复单目米制尺度。	快速机动、短时视觉缺失。要标定时空外参，长期漂移仍需额外约束。
激光惯性里程计LIO	IMU传播并补偿扫描运动，点云匹配校正惯性漂移。	低光照但几何丰富的建图。几何退化、时间误差和IMU偏置仍影响结果。
视觉·激光惯性融合	同时使用纹理、测距几何与惯性运动约束，适合互补环境。	复杂动态任务。需要联合测量建模，避免相关信息重复计权。

完整SLAM还需地图及全局一致性；GNSS可提供室外绝对位置约束。

8.9.1 概念方法：题5·选型判据

场景条件怎样决定融合方案

任务条件	参考选择	应检查的可观察结果
稳定纹理 载荷受限	视觉惯性方案，必要时双目补尺度	重投影残差、尺度、短时丢帧后的恢复
低光照 几何丰富	激光惯性方案，按逐点时刻补偿运动畸变	点云匹配残差、运动畸变、偏置稳定性
长廊重复 纹理稀少	增加可区分观测或绝对定位约束	退化方向、不确定性、回环后的地图一致性

按可用约束选择组合，核对尺度、时空标定及定位误差。

练习与讨论

相同任务条件下如何选择方法

情境与条件	参考解答及依据
需要整幅图像的运动场，纹理足够	选稠密光流，逐像素输出；遮挡和弱纹理区仍检查先验与误差
静止目标、姿态固定、横向平移 Z=5 m，偏右32 px 焦距320 px，增益1/s	归一化误差0.10，单轴交互矩阵为-0.20/m；IBVS使相机右移0.50 m/s
低光但几何丰富，系统未设置回环	可选激光惯性约束；里程计不自动保证完整SLAM的全局一致性

8.9.1 概念方法：单元小结

方法选择取决于测量和任务约束

闭环：区分测量、状态、参考和动作；环境变化通过新的观测修正后续动作。

光流：稠密与稀疏比较覆盖范围；像素运动换成米制运动还需要深度和运动模型。

地图：占据、表面与距离提供不同查询；净空阈值包含载具半径与误差余量。

伺服与定位：按误差类型及可用约束选方法，检验标定、视野、尺度、退化和全局一致性。

本章目录

习题与课堂讨论

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

8.9.1 概念方法
教材对应：第8.4节，题1-5

8.9.2 几何计算
教材对应：第8.4节，题6

8.9.3 感知决策设计
教材对应：第8.4节，题7、9

8.9.4 系统开发与迁移
教材对应：第8.4节，题8、10

8.9.2 几何计算：题6·完整链路

像素到纬经高需要哪些已知量

教材第8.4节 · 题6：从像素坐标到地理坐标的完整转换链路如何实现？



尺度条件：单像素只确定射线。轴向深度、斜距、双目或已知平面提供不同的尺度约束。

时空条件：外参方向、相机/机体轴向、观测时刻位姿、局部原点和高度基准必须一致。

回查：教材第8.1.5节，式8.7-8.12。NED表示北、东、地，地轴向下为正。

8.9.2 几何计算：题6·相机反投影

给定轴向深度恢复三维相机点

教学条件：理想无畸变相机，640×480，水平视场90度，方形像素，主点(320,240) px。目标像素(384,272) px，轴向深度5 m。

$$\mathbf{K}=\begin{bmatrix}320 & 0 & 320\\ 0 & 320 & 240\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix},\qquad \mathbf{q}=\mathbf{K}^{-1}\begin{bmatrix}384\\272\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.2\\0.1\\1\end{bmatrix}$$

$$^{c}\mathbf{p}=Z\mathbf{q}=5\begin{bmatrix}0.2\\0.1\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1.0\\0.5\\5.0\end{bmatrix}\ \mathrm{m}\qquad (式8.7)$$

参考解释：相机点向右1.0 m、向下0.5 m、向前5.0 m。这里给定的是轴向深度。

8.9.2 几何计算：题6·安装与载具位姿

非零偏移和偏航怎样作用于目标

相机右、下、前轴对齐机体同向轴；机体前、右、下（FRD）。
安装偏移(0.2,0,0.1) m（机体坐标）；机体水平，滚转/俯仰均为0。
载具偏航90度；NED位置(10,20,-10) m。

$$ {}^{b}\mathbf{p} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0.5 \\ 5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0 \\ 0.1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.2 \\ 1 \\ 0.6 \end{bmatrix} \text{m} $$

$$ {}^{e}\mathbf{p} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5.2 \\ 1 \\ 0.6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 \\ 20 \\ -10 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9 \\ 25.2 \\ -9.4 \end{bmatrix} \text{m} $$

参考解释：目标相对地面原点北9 m、东25.2 m、向上9.4 m。对应式8.8和式8.10。

8.9.2 几何计算：题6·大地坐标

局部NED经地心地固转换到纬经高

教学原点：WGS 84，纬度31度、经度121度、椭球高100 m。地心地固（ECEF）以地球质心为原点，坐标单位为米。

$$\mathbf{R}_e^f = \begin{bmatrix} -\sin\phi_0\cos\lambda_0 & -\sin\lambda_0 & -\cos\phi_0\cos\lambda_0 \\ -\sin\phi_0\sin\lambda_0 & \cos\lambda_0 & -\cos\phi_0\sin\lambda_0 \\ \cos\phi_0 & 0 & -\sin\phi_0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r}_f = \mathbf{r}_{f,0} + \mathbf{R}_e^f \ {}^e\mathbf{p}, \qquad (\phi, \lambda, h) = ECEF2LLA(\mathbf{r}_f)$$

ϕ_0, λ_0为原点纬经度，$\mathbf{r}_{f,0}$为原点ECEF位置。h为目标椭球高。三角函数输入按弧度换算。

8.9.2 几何计算：题6·全链核验

全链数值结果与反向检查

输出量	全链计算结果	结果含义
纬度/经度	31.000081175度 121.000263858度	相对原点主要向东25.2 m，向北9.0 m
椭球高	109.400056 m	地轴为负，目标高于原点约9.4 m
反向投影	(384.000,272.000) px	用逆旋转、逆平移和内参返回原像素

参考判断：纬经高不能直接加米。分别核对相机/机体轴向、NED高度符号、观测时刻和高度基准。

练习与讨论

5 m测量是斜距还是轴向深度

练习条件：保持内参K和像素(384,272) px不变，测得斜距5 m。求相机三维点，并判断东25.2 m能否直接加到原点经度121度。

$$r = 5\,\mathrm{m} \quad \Rightarrow \quad {}^{c}\mathbf{p} = 5\,\frac{[0.2,\ 0.1,\ 1]^{\top}}{\sqrt{1.05}} \approx [0.976,\ 0.488,\ 4.880]^{\top}\,\mathrm{m}$$

参考结果：这里轴向深度约4.880 m。斜距5 m与轴向深度5 m给出不同三维点，后续变换应使用正确点。

坐标判据：东25.2 m先经NED→ECEF变换，再求目标经度；纬经度用角度，不能直接加米。

8.9.2 几何计算：单元小结

尺度、变换方向和基准共同决定坐标

射线与尺度：像素先去畸变并反投影；轴向深度、斜距或几何约束补足三维尺度。

链式变换：相机→机体→局部NED→ECEF→纬经高；旋转方向、平移坐标系和观测时刻一致。

高度基准：NED向下为正；椭球高与海拔不是同一基准，使用GNSS/地图高度前应核对。

逆检查：非对称姿态和非零平移检验轴向；逆变换与投影应返回同一个原始像素。

本章目录

习题与课堂讨论

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

8.9.1 概念方法
教材对应：第8.4节，题1-5

8.9.2 几何计算
教材对应：第8.4节，题6

8.9.3 感知决策设计
教材对应：第8.4节，题7、9

8.9.4 系统开发与迁移
教材对应：第8.4节，题8、10

8.9.3 感知决策设计：题7·频率条件

四类传感器的采样周期与职责

教材第8.4节 · 题7：基于RflySim中的“城市郊区（NeighborhoodPark）”地图场景，设计多传感器时间同步与融合方案（30 Hz 相机、10 Hz LiDAR、200 Hz IMU、5 Hz GNSS）。

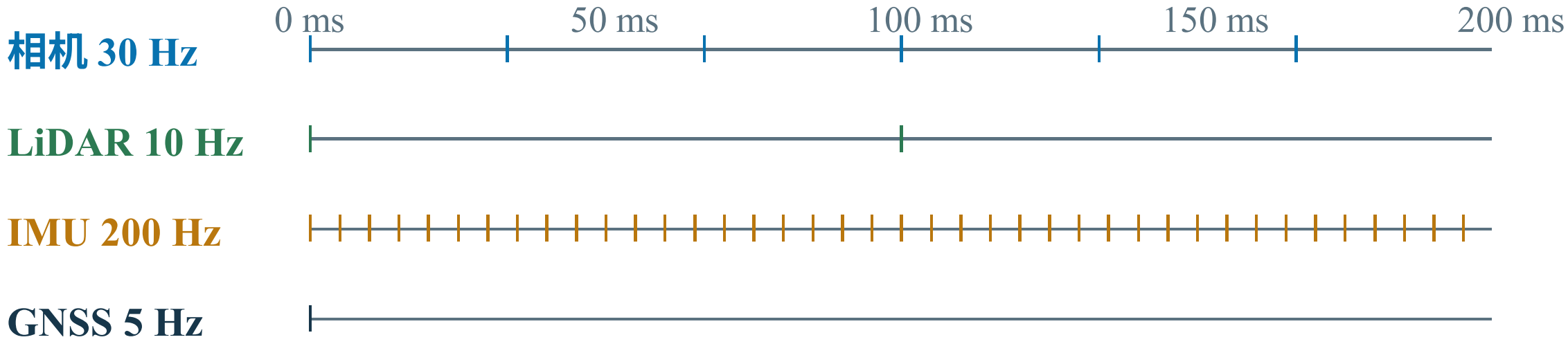
传感器	采样周期	200 ms内样本	融合职责
30 Hz相机	33.33 ms	6幅图	视觉运动、纹理和目标观测
10 Hz LiDAR	100 ms	2帧点云	测距几何与扫描匹配约束
200 Hz IMU	5 ms	40个样本	角速度/比力驱动高频传播
5 Hz GNSS	200 ms	1个样本	室外全局位置约束

LiDAR：激光雷达；IMU：惯性单元；GNSS：全球卫星导航系统。
计数条件：各路从t=0首采，统计[0,200) ms，不丢帧。

8.9.3 感知决策设计：题7·时间同步

同一时基保留四种采样节奏

采集时刻决定测量对应的运动状态。接收时刻用于统计传输延迟。统一仿真时基并保留每一路原始时标。

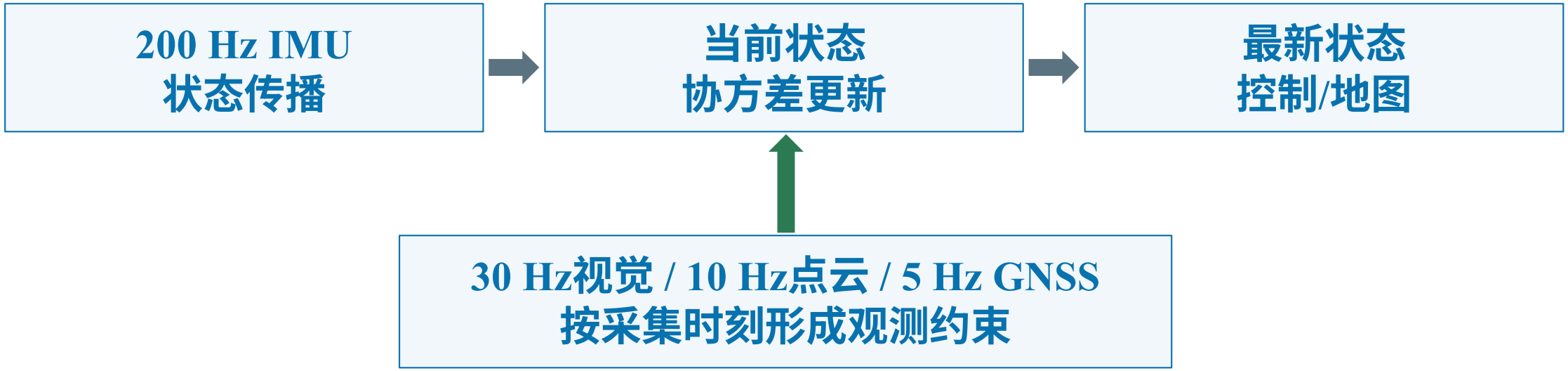


参考方案：硬件触发可用时优先同步采集。软件侧按采集时标缓存、插值或传播，点云逐点去畸变。

8.9.3 感知决策设计：题7·融合结构

惯性传播与异步观测更新

参考方案：误差状态滤波或滑动窗口。状态包含位置、速度、姿态和IMU偏置，输出带共同坐标系、时标与协方差。



$$\mathbf{r}_i = \mathbf{z}_i - h_i(\hat{\mathbf{x}}(t_i)),$$

迟到观测：历史更新后重传播至当前时刻

8.9.3 感知决策设计：题7·误差与门控

20 ms错配造成多大位置偏差

教学条件：直线速度3 m/s，传感器时标相差20 ms。若10 Hz扫描跨100 ms，扫描内运动也需补偿。

$$\Delta p \approx v\Delta t = 3 \times 0.020 = 0.060\ \mathrm{m}$$

扫描内最大位移约0.30 m。按逐点采集时刻，用IMU/状态轨迹去畸变。

$$\frac{|r|}{\sigma_r} = \frac{0.40}{0.10} = 4 > 3$$

参考处置：标量残差0.40 m，创新标准差0.10 m，门限取3倍标准差。异常观测拒绝或降权，保留失效原因。

8.9.3 感知决策设计：题7·结果与失效

融合方案的日志与退化判据

日志/事件	应交出的结果	参考判断
时空配置	频率、采集/接收时标、内外参、共同原点	实际时标匹配题设节奏，轴向和单位一致
融合输出	位置/速度/姿态、协方差、有效源、年龄	对新观测响应，估计不确定性与退化一致
失效与恢复	GNSS遮挡、黑帧、点云掉流的状态记录	暂停对应约束，超时控制生效，恢复可解释
独立评价	估计与真值对齐后的误差、时延和任务结果	真值进入评分支路，误差按相同基准统计

VisionCaptureApi可回传时标与IMU。按采集记录核对频率与时基。

8.9.3 感知决策设计：题9·一体化方案

检测框怎样形成持续身份

教材第8.4节 · 题9：设计一个基于 YOLO + DeepSORT（或 CenterTrack）的目标检测与多目标跟踪一体化方案。



检测框另带置信度。外观模型面向任务对象，IoU是框的交并比，参与剩余匹配。

8.9.3 感知决策设计：题9 · 数据关联

运动门控与外观代价共同匹配

先用预测协方差做运动门控，再对允许的候选比较外观。类别限制可作为本方案的附加门控。

$$d^2_{\text{motion}} = (\mathbf{z} - \hat{\mathbf{z}})^\top \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{z} - \hat{\mathbf{z}}), \qquad d_{\text{app}} = 1 - \mathbf{r}_i^\top \mathbf{r}_j$$

$\mathbf{S}$为创新协方差，$\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$为单位外观向量。下面两行对应轨迹，两列对应检测，所有候选通过运动门控。

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0.10 & 0.70 \\ 0.80 & 0.15 \end{bmatrix}, \qquad J_{\text{diag}} = 0.25 < J_{\text{cross}} = 1.50$$

参考判断：选对角关联。门控失败的候选先排除，不能用很相似的外观强行补成关联。

8.9.3 感知决策设计：题9·轨迹生命周期

目标丢失时怎样维持或结束身份

本方案示例参数：连续3次匹配后确认，已确认轨迹失联保留0.50 s。采用观测时标计时，输出明确区分观测与预测。

状态	状态更新规则	输出规则
待确认	连续匹配，早期漏检可删除	未确认时不用于闭环控制
已确认	新检测校正预测并更新外观	ID、类别、框和观测时标
暂失标记	只预测，按时标检查超时	ID、预测标记与观测年龄
已删除	超0.50 s删除，停止轨迹输出	重现建新轨迹或另作重识别

8.9.3 感知决策设计：题9 · CenterTrack路线

前后帧联合预测中心关联

联合路线：当前图像、前帧图像和历史检测热图输入CenterTrack，输出当前目标中心、框及回溯位移，再更新轨迹身份。

$$\tilde{\mathbf{c}}_{t-1} = \mathbf{c}_t + \Delta\mathbf{c} = \begin{bmatrix}130\\75\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}-8\\2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}122\\77\end{bmatrix}\ \text{px}$$

历史轨迹	历史中心/回溯距离	参考关联
ID17	(121,77) px，距离1 px	落在5 px门限内，关联ID17
另一个ID	(141,77) px，距离19 px	落在门限外，排除此候选

CenterTrack联合检测与跟踪。明确帧间隔，并另设长时遮挡管理。

8.9.3 感知决策设计：题9·平台接入

一体化输出与训练数据设计

接入环节	实现内容	参考检查
采集与预处理	新帧/时标，BGR转模型通道，缩放和填充	重复帧不重复更新，框坐标还原到原图
检测到跟踪	类别、框、置信度、外观向量和帧间隔	匹配排除无效框，运动模型使用实际间隔
训练与输出	任务数据划分，检测/外观模型，带ID输出	交叉/遮挡/重现测试，预测标记和年龄可见
几何与控制	需要米制目标时接深度、外参和估计位姿	二维框中心保留像素单位，失联触发任务降级

VisionCaptureApi取图；跟踪器管理关联与ID，模型权重按任务验证。

8.9.3 感知决策设计：题9·评价与时延

检测指标和身份指标回答不同问题

教学例：N_{GT}=20个真值目标帧，FN漏检2个、FP误检1个、IDSW身份切换1次。MOTA为综合跟踪准确率。

$$\mathrm{MOTA} = 1 - \frac{\mathrm{FN} + \mathrm{FP} + \mathrm{IDSW}}{N_{\mathrm{GT}}} = 1 - \frac{4}{20} = 80\%$$

吞吐教学例：30 Hz输入间隔33.33 ms。若每帧串行处理40 ms，计算吞吐最多25 Hz。

$$f_{\mathrm{serial}} = \frac{1000}{40} = 25\ \mathrm{Hz} < 30\ \mathrm{Hz}$$

参考判据：统计身份错误、帧年龄和更新率，覆盖交叉、遮挡、掉帧、重现。

练习与讨论

观测时刻和身份状态怎样用于决策

情境与条件	参考处置与理由
3 m/s运动；相机比IMU基准早20 ms	错配约0.06 m；按采集时刻同步、传播或历史更新，不修改坐标旋转来补时间
已确认轨迹0.60 s无新匹配；本方案保留阈值0.50 s	超过阈值，删除正常轨迹输出并触发任务退化；预测框不能标作新观测
30 Hz图像，每帧串行处理40 ms	吞吐最多25 Hz；采用有界缓存/最新帧，按真实间隔预测，统计帧年龄

参考判据：输出共同坐标、时标、有效性、身份和观测年龄。

8.9.3 感知决策设计：单元小结

时刻、身份和不确定性都有语义

时间：统一采集时基，保留30/10/200/5 Hz节奏；接收时刻另用于统计传输与处理延迟。

融合：IMU传播连接异步观测，迟到数据回溯更新；共同状态保留协方差和有效源。

身份：运动门控、外观或中心回溯支持关联；
确认、预测、失联和删除有明确输出规则。

验证：估计误差、身份错误、帧年龄分别统计；遮挡、掉流、交叉和重现都有可观察判据。

本章目录

习题与课堂讨论

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

8.9.1 概念方法
教材对应：第8.4节，题1-5

8.9.2 几何计算
教材对应：第8.4节，题6

8.9.3 感知决策设计
教材对应：第8.4节，题7、9

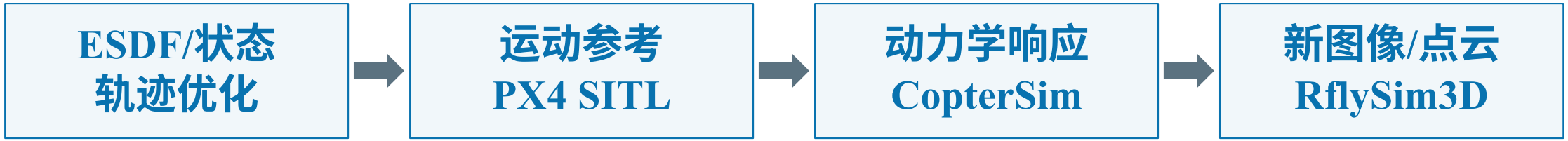
8.9.4 系统开发与迁移
教材对应：第8.4节，题8、10

8.9.4 系统开发与迁移：题8·开发目标

ESDF规划与SITL的完整接口

教材第8.4节 · 题8：开发基于 ESDF 的优化型避障轨迹规划模型，并基于RflySim工具链实现SITL仿真。

软件在环（SITL）：PX4自驾仪软件连接模拟载具、传感器和环境。规划输入为地图/状态/目标，输出为带时间的运动参考。



参考闭环：新观测进入地图与状态估计，更新规划。真值另外保存，用于比较净空和轨迹误差。

8.9.4 系统开发与迁移：题8·优化模型

三次B样条的平滑与避障代价

参考模型：已观测静态地图中的三维轨迹。优化三次B样条控制点及时间分配，ESDF自由侧为正。

$$\mathbf{p}(t)=\sum_i N_{i,3}(t)\mathbf{q}_i\,,\qquad 0\le t\le T$$

$$J=w_s\int_0^T\|\ddot{\mathbf{p}}(t)\|^2\,dt+w_c\sum_j[\max(0,\rho-d(\mathbf{p}(t_j)))]^2\Delta t+w_T T$$

$\mathbf{q}_i$为控制点（m），$N_{i,3}$为三次基函数，T为总时间（s），d为ESDF距离（m），ρ为安全半径（m）。

代价用于搜索；权重归一化，净空与动态约束仍须独立硬验收。

8.9.4 系统开发与迁移：题8 · 约束与边界

端点、动态限制和空间约束

参考约束：指定初末位置/速度，轨迹及速度、加速度连续；用载具可实现能力设置速度和加速度上限。未知区域按本方案不可通行。

$$\mathbf{p}(0) = \mathbf{p}_0, \quad \mathbf{p}(T) = \mathbf{p}_g, \quad \|\dot{\mathbf{p}}(t)\| \le v_{\max}, \quad \|\ddot{\mathbf{p}}(t)\| \le a_{\max}$$

$$d(\mathbf{p}(t)) \ge \rho, \qquad \mathbf{p}(t) \in \Omega_{\text{observed}}$$

$$\mathbf{q}^{(k+1)} = \mathbf{q}^{(k)} - \alpha \nabla_{\mathbf{q}} J, \qquad \alpha > 0$$

参考判断：搜索路径给初值。局部优化后再验收净空与动态可行性，不可行时重规划或制动。

8.9.4 系统开发与迁移：题8·段间碰撞

采样点安全怎样扩展到整段

教学条件：静态、准确ESDF，整段速度上界2 m/s，采样间隔0.10 s，安全半径0.40 m。最近采样点相差最多半个间隔。

$$d(\mathbf{p}(t)) \geq d(\mathbf{p}(t_j)) - v_{\max}\frac{\Delta t}{2}$$

$$d_{\text{lower}} = 0.60 - 2 \times \frac{0.10}{2} = 0.50\,\text{m} > 0.40\,\text{m}$$

$$d(t_j) = 0.45\,\text{m} \quad \Rightarrow \quad d_{\text{lower}} = 0.35\,\text{m} < 0.40\,\text{m}$$

参考判断：第二种情况需加密或整段检查。地图离散误差计入余量，动态障碍还需时变距离模型。

8.9.4 系统开发与迁移：题8 · 重规划循环

规划更新与控制发送独立运行

参考结构：规划线程生成候选，控制线程独立发送当前有效轨迹。以下为概念伪代码，变量时标和超时条件须实现。

1. state, map = latest_timestamped_inputs()
2. seed = search_initial_path(state, map, goal)
3. candidate = optimize_esdf_spline(seed, deadline)
4. if validate_whole_trajectory(candidate): atomic_swap(candidate)
5. else: keep_valid_safe_plan_or_brake()
6. control_thread: sample_active_plan(clock); send_setpoint()

参考判据：优化超时不打断指令流，过期输入不继续驱动新规划。停控与失联动作按任务预先定义。

8.9.4 系统开发与迁移：题8·地图与路径

安装版e16基线生成当次路径

安装版位置：RflySimAPIs/8.RflySimVision/2.AdvExps/e16_ESDFPathPlan

步骤	真实入口/产物	参考检查
1. 地图配置	maps/map_cropped.yaml 与对应PGM	分辨率和原点可追溯，示例为0.05 m/px
2. 生成路径	maps/WinWSL.bat 中执行 python3 OGM2ESDF.py	在地图选起点及两个目标
3. 保存结果	maps/planned_path.npy	当次结果非空，起终点和最小距离正确

扩展：在二维基线上加入时间分配、三维地图、动态约束和整段验证。

8.9.4 系统开发与迁移：题8 • SITL接入

路径文件怎样连接飞控和动力学

步骤	真实入口/信号	参考检查
1. 仿真初始化	Client/VisionCapAPIDemo.bat	等待定位与滤波初始化完成后启动外控
2. 同一结果	把maps/planned_path.npy复制到Server	两端使用当次相同文件，禁止默默回退点
3. 控制入口	Server/WinWSL.bat中执行 python3 esdf_planner.py	非对称路径核对轴向/模式保持SendPosNED发送
4. 开发闭合	估计位置反馈、日志、停止/失联处理	跟踪进度使用实际估计状态，结束动作明确

初始化日志：GPS 3D fixed & EKF initialization finished

8.9.4 系统开发与迁移：题8 · 运行判据

同时检查净空、动态约束和跟踪误差

工况/记录	交付数据	参考通过或拒绝判据
正常可达	参考/实际轨迹、最小净空、跟踪误差	目标到达，整段净空及跟踪余量满足
动态限制	速度/加速度、控制限幅、重规划耗时	载具能力上限满足，切换保持连续
过窄或无路	不可行原因、候选拒绝、制动轨迹	拒绝不满足半径和余量的候选
掉流/过期	输入年龄、状态不确定性、失联动作	按超时退化，不继续沿用无期限旧地图

交付模型、接口、配置和工况日志；参考、实际轨迹与评分真值分开记录。

8.9.4 系统开发与迁移：题10 · 迁移流程

教材五阶段组成迁移与反馈流程

教材第8.4节 · 题10：结合 RflySim 平台，设计一个“从仿真到真机”的多模态感知与智能决策系统 Sim2Real 迁移流程。



阶段产物：场景与校准、仿真配置、模型与数据版本、在环日志、真机任务记录分别保留。

参考反馈：按失败工况回到几何、传感器模型、数据覆盖、时间同步或控制实现，重新验证。

8.9.4 系统开发与迁移：题10·真实装置

同一穿环任务的虚实装置对照

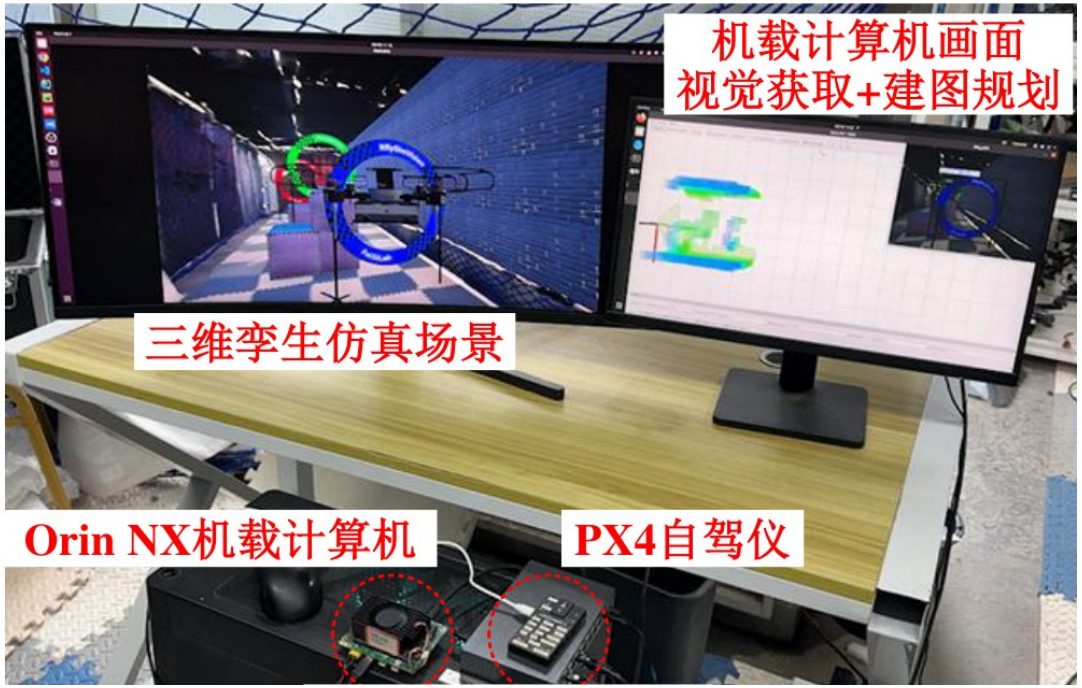


图8.11(a) 半实物孪生仿真

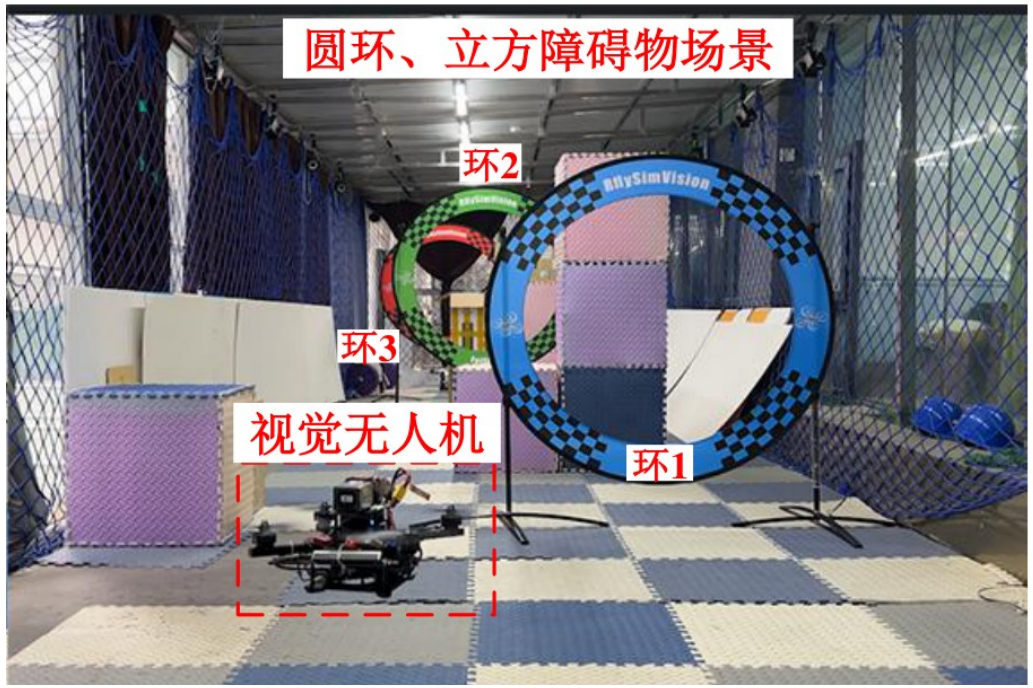


图8.11(b) 真机实验

装置图说明接口对应；虚实性能须用同条件的误差、净空和时延量化。

8.9.4 系统开发与迁移：题10 · 扫描与建模

传感器、几何和动力学的匹配

匹配对象	阶段1-2的具体工作	参考对照
场景/基准	扫描几何、尺度、障碍物与共同原点	已知长度与非对称位置，坐标一致
视觉/点云	相机内外参、扫描模型、采样与延迟	同一视点的投影、深度和点云几何
惯性/噪声	偏置、噪声、时标与观测失效工况	静止/运动数据的统计和时间对齐
载具/控制	质量、惯量、推力响应和控制带宽	相同参考下的跟踪误差与动态响应

按真实标定与辨识设参，覆盖任务工况，逐项定位虚实差异。

8.9.4 系统开发与迁移：题10·虚实数据增强

数据覆盖与独立测试差距

数据策略：随机化与真实工况有关的光照、材质、噪声和时延，统一标签，按场景或批次划分训练与测试。

独立检验：保留未用于调参的真机测试集，比较同任务、同指标和对应工况，防止相邻帧泄漏。

教学统计例：仿真100次任务成功80次，真机100次任务成功70次。

$$S_{\text{sim}} = 80\%, \quad S_{\text{real}} = 70\%, \quad \Delta S = 10\text{个百分点}$$

参考解释：按光照、遮挡、速度和目标类别分组查看差距，再把失败样本回流到对应环节。

8.9.4 系统开发与迁移：题10 · 软硬件在环

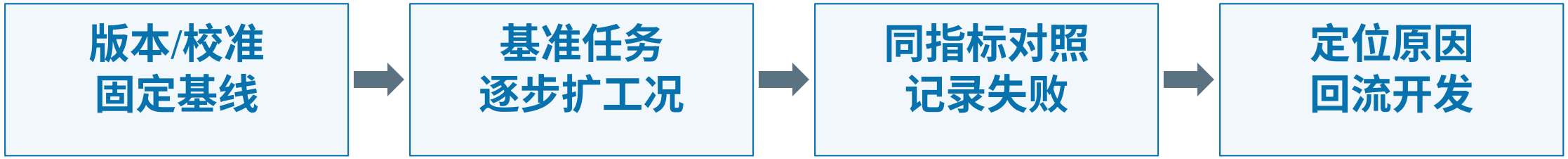
验证层级怎样逐步接近机载系统

验证层级	实际接入对象	参考验收重点
软件在环 SITL	算法与软件PX4连接模拟载具和环境	数据语义、闭环逻辑、坐标和失效工况
机载计算	算法运行在目标机载计算机，输入可回放	推理/融合/规划耗时、帧年龄和资源占用
硬件在环 HITL	真实自驾仪连接模拟动力学与传感器	传输接口、模式切换、持续发送和失联动作

仿真时刻用于运动对齐，墙钟用于实时性评估。
平均、尾部耗时与最大输入年龄都记录。

8.9.4 系统开发与迁移：题10 · 真机验证

真机任务与失败回流怎样闭合



任务记录：检测与身份、位姿与不确定性、参考/实际轨迹、净空、处理时延和接管原因按时标对齐。

迁移判断：同一指标按工况对照。真实留出任务中的失败，分别回到建模、数据、标定或控制环节。

参考交付：固定版本与配置、校准、在环日志、真机任务统计和失败回流记录共同组成迁移证据。

练习与讨论

一份综合方案怎样通过逐项检查

讨论情境	参考要点
30 Hz输入，但跟踪只有25 Hz	有界缓存/最新帧策略，按实际时差预测，记录帧年龄
两个传感器错配20 ms	按采集时标同步或传播；3 m/s下对应0.06 m位置偏差
ESDF距离0.35 m；安全阈值0.40 m	净空不足0.05 m，拒绝候选并增距或重规划
只有像素框，却要求地理目标位置	增加深度/几何约束、内外参、观测时刻位姿及共同原点

答题自查：条件、单位、坐标/时标、模型边界、结果与失败判据均可检查。

8.9.4 系统开发与迁移：单元小结

系统开发要有可复现的验证记录

模型：轨迹包含时间参数；软代价用于搜索，端点、净空及动态限制独立硬验收。

接入：同次地图与路径可追溯，核对NED变换；规划更新与控制发送独立连续运行。

验收：正常、无路和掉流均有判据，规划参考、实际估计轨迹与真值评价分别保存。

迁移：扫描→建模→虚实增强→在环→真机，
按同条件指标比较，失败回流到对应环节。

本章小结

感知与决策依靠可解释的时空状态

感知表达：像素、特征、目标与身份属于不同层次。光流描述图像运动，米制运动还需要深度与运动模型。

时空状态：坐标变换先统一轴向、尺度与原点，融合再处理时间、噪声和相关性，输出状态及不确定性。

规划与控制：地图提供可用空间，轨迹满足净空和动态约束，控制持续修正偏差；未知区、过期与失效有明确动作。

边界与易错点：像素不直接等于米，正距离不直接容纳载具，预测不等于新观测，真值与示意计算分属评价和教学。