本章目录

多模融合与控制决策

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

8.6.1 多模态感知建模
教材对应：第8.1.6.1节

8.6.2 多模态信息融合
教材对应：第8.1.6.2节

8.6.3 轨迹生成与避障规划
教材对应：第8.1.6.3节

8.6.4 轨迹跟踪与外部控制
教材对应：第8.1.6.4节

8.6.5 智能规划决策
教材对应：第8.1.6.5节

8.6.1 多模态感知建模：系统框架

测量、估计、规划与执行形成反馈回路

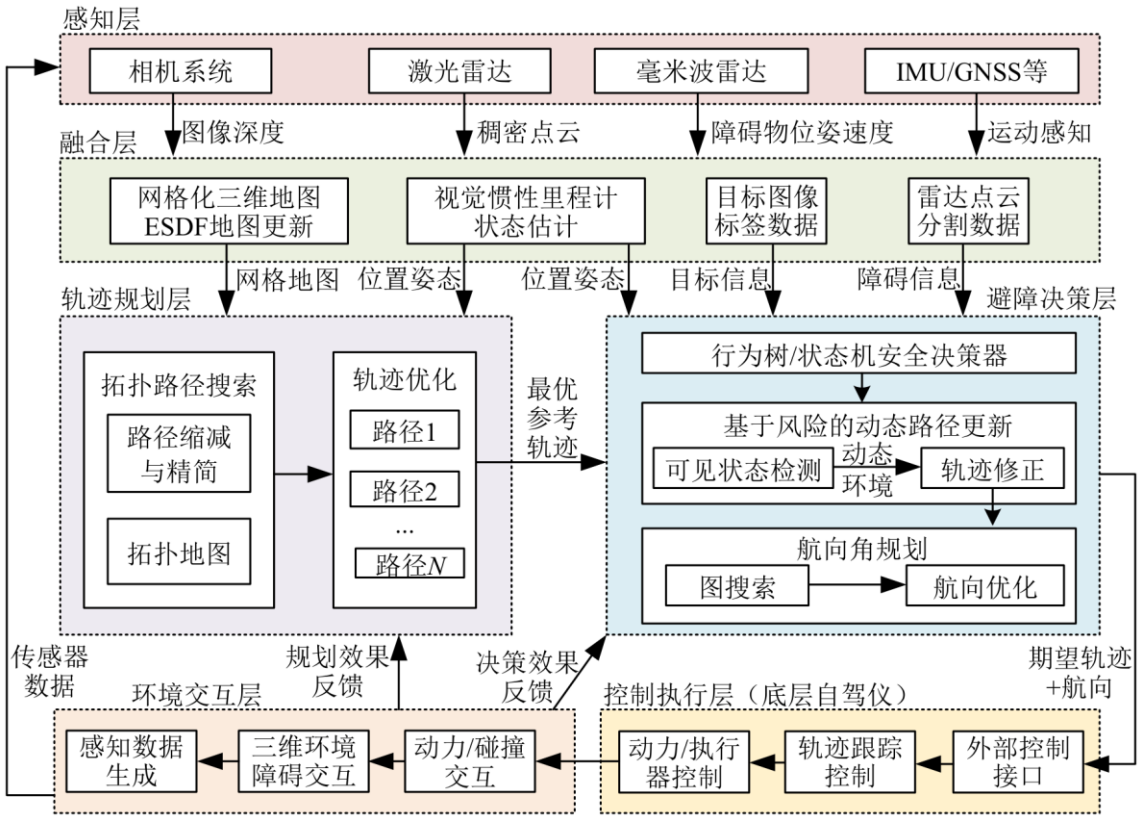


图8.7 多模态感知与智能决策系统框架

实时反馈：动作改变状态，传感器再次观测，估计和计划持续更新。

并行支路：地图、位姿和目标信息进入不同的规划与决策模块。

评估与优化：效果记录用于评价和训练，和实时控制采用不同时间尺度。

8.6.1 多模态感知建模：系统框架·感知与融合

感知与融合层提供互补观测

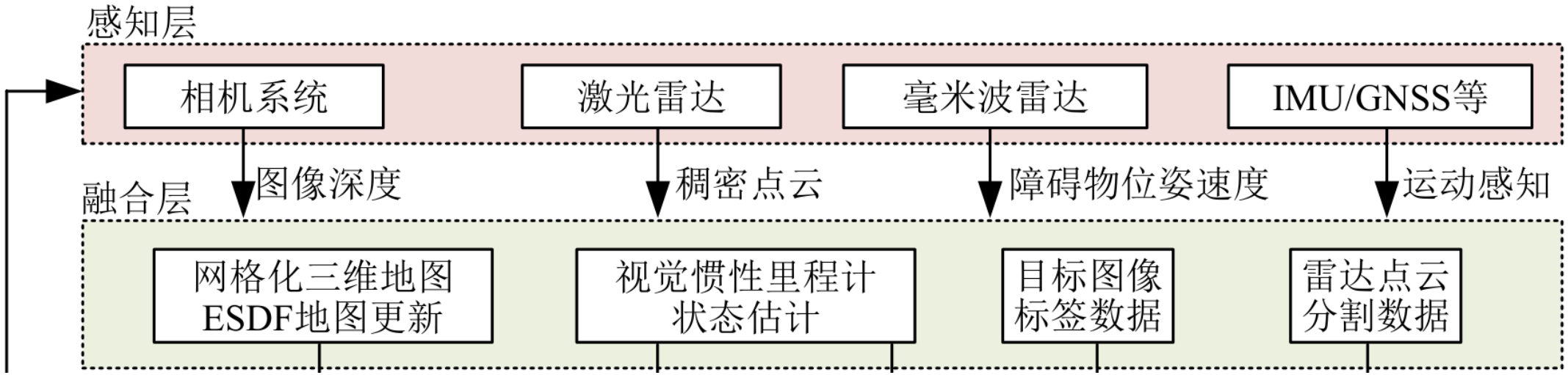


图8.7（上部）感知与融合层

图像深度、点云、雷达观测与惯性定位互补；地图、位姿、目标和障碍信息并行输出。

8.6.1 多模态感知建模：系统框架·规划与决策

候选轨迹与风险决策共同形成计划

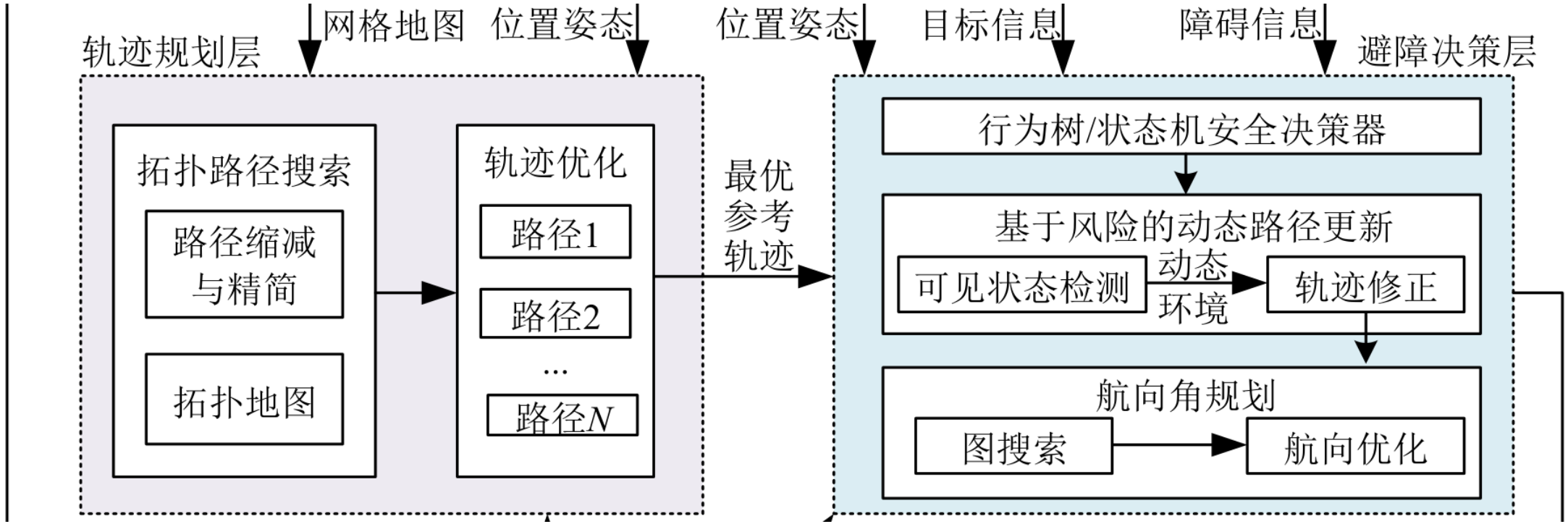


图8.7（中部）轨迹规划与避障决策层

路径搜索形成候选，轨迹优化细化位置序列，风险决策与航向规划共同约束输出。

8.6.1 多模态感知建模：系统框架·环境与控制

执行结果经环境交互重新成为观测

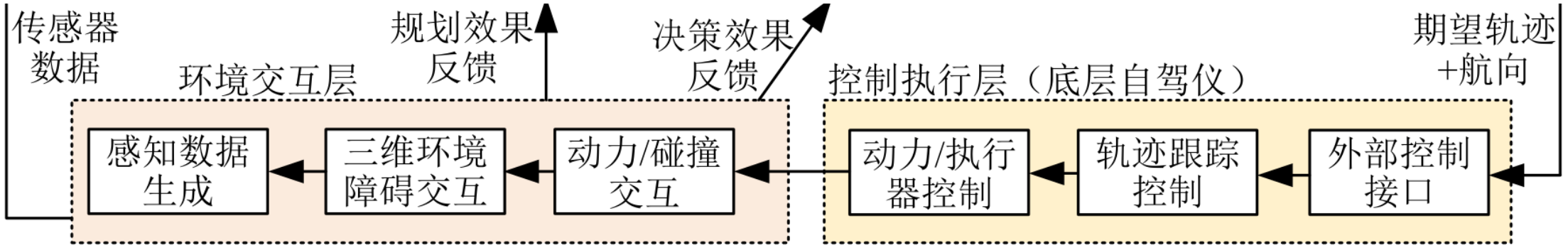


图8.7（下部）环境交互与控制执行层

期望轨迹与航向经底层控制形成动作。

动力/碰撞和环境交互改变状态，传感器继续观测。

8.6.1 多模态感知建模：数据输入

多模观测集保留各自的数据结构

$$\mathcal{Z}_t = \left\{ \mathcal{I}_t^{\text{cam}},\ \mathcal{P}_t^{\text{lidar}},\ \mathcal{R}_t^{\text{radar}},\ \boldsymbol{\zeta}_t^{\text{imu}},\ \mathbf{p}_t^{\text{gnss}},\ \cdots \right\} \tag{8.13}$$

观测	数学结构	处理后用于
相机RGB	$\mathcal{I}_t^{\text{cam}} \in \mathbb{R}^{H\times W\times 3}$	特征、目标、深度
激光点云	$\{ {}^{c}\mathbf{p}_i \} \subset \mathbb{R}^3$；点阵$\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{3\times N}$	地图、几何目标
毫米波雷达	$\mathcal{R}_t^{\text{radar}} \in \mathbb{R}^k$	距离、角度、径向速度

原始图像、点云和雷达量测先经各自模型处理，再统一到共同状态。

8.6.1 多模态感知建模：惯性与卫星输入

融合输出与原始传感器读数有不同语义

$$\zeta_t^{\text{imu}} = [({}^{b}\mathbf{a}_t)^{\mathsf{T}}, ({}^{b}\boldsymbol{\omega}_t)^{\mathsf{T}}, \mathbf{q}_t^{\mathsf{T}}]^{\mathsf{T}} \in \mathbb{R}^{10}$$

九轴原始读数为3+3+3；姿态估计后的10维记录为3+3+4。

量	维数与单位	物理含义
运动加速度	3，m/s^2	去偏置与重力补偿后的机体分量
角速度/四元数	3，rad/s；4，无量纲	去偏置角速度； $\mathbf{q}$为FRD→NED姿态
GNSS纬经高	3，度/度/m	地理位置，转换到共同局部NED

8.6.1 多模态感知建模：时空对齐

相同时间戳和坐标基准构成融合前提

采样时间戳 → 插值/运动补偿 → 安装与位姿变换 → 共同状态

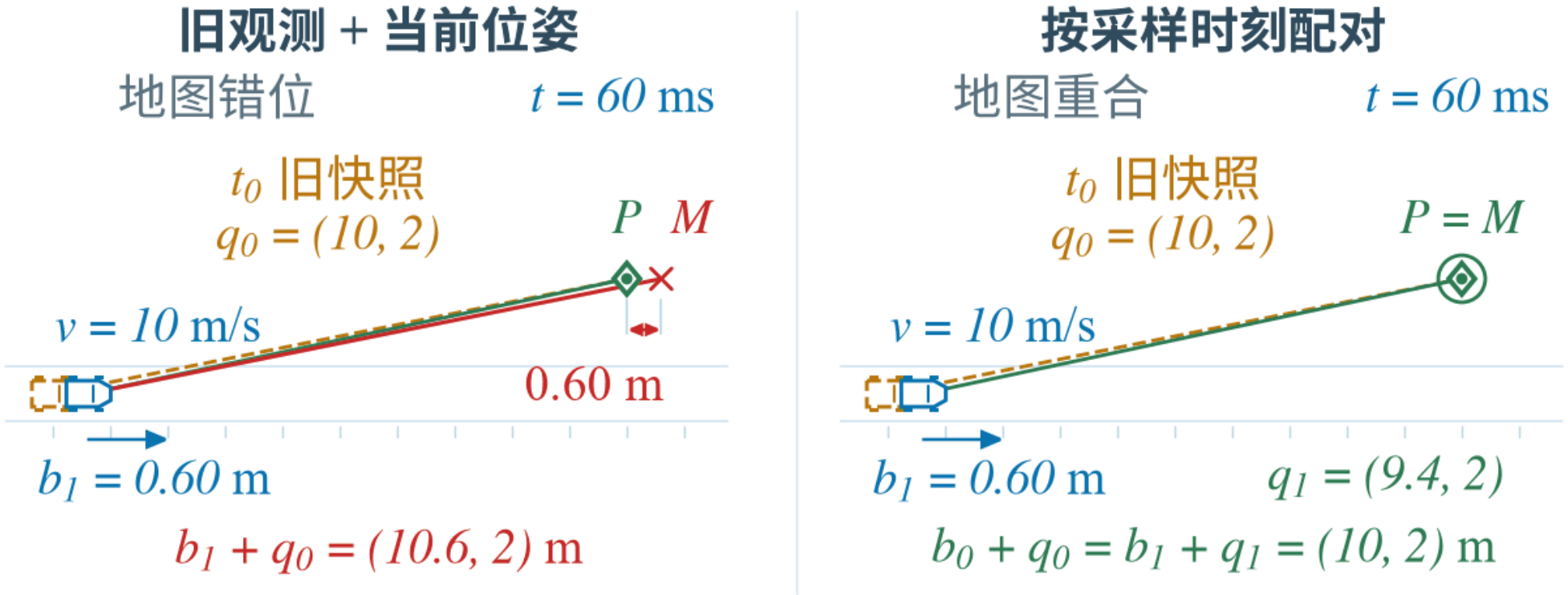
$$\Delta p \approx v\Delta t = 10\ \mathrm{m/s} \times 0.060\ \mathrm{s} = 0.60\ \mathrm{m}$$

时间对齐：按同一时基配对观测，必要时用状态插值或预测补偿。
空间对齐：传感器外参与同一观测时刻的载具位姿确定共同坐标。

同一循环读数据不代表同步；标成map也不代表数据已完成坐标变换。

8.6.1 多模态感知建模：观测与位姿配准

旧观测配错位姿，静止地标也会“移动”



图：同一静止地标，旧观测配当前位姿会错位0.60米。

8.6.1 多模态感知建模：相机系统

目标像素与有效深度给出目标位置

尺度来源	测量/估计机制	关键条件
立体/结构光/测距	视差、编码光或视线距离	标定和有效深度区域
单目已知尺寸	尺寸与像素大小的相似三角	真实尺寸与姿态可用
单目学习深度	从图像特征估计深度	尺度/误差与训练分布

本例焦距$f_x = f_y = 320\,\mathrm{px}$；主点$(c_x, c_y) = (320,240)\,\mathrm{px}$。

$$(u, v) = (480,320), \quad z_c = 4\,\mathrm{m} \implies {}^{c}\mathbf{p} = [2,1,4]^{\mathrm{T}}\,\mathrm{m}$$

一个像素中心加深度得到位置；目标朝向需要更多几何或姿态观测。

8.6.1 多模态感知建模：激光雷达

多传感器点云通过外参组成共同地图

各雷达3D点 → 机体点云融合 → 分割/标签/预测 → 共同地面地图

$$^{b}\mathbf{p} = [2,1,0]^{\mathrm{T}} + [0.1,0,0]^{\mathrm{T}} = [2.1,1,0]^{\mathrm{T}}\ \mathrm{m}$$

$$^{e}\mathbf{p} = [-1,2.1,0]^{\mathrm{T}} + [10,20,-30]^{\mathrm{T}} = [9,22.1,-30]^{\mathrm{T}}\ \mathrm{m}$$

本例激光轴与机体平行，载具水平且偏航90°。
实际点云按当前SDK输出单位和轴向解释。

8.6.1 多模态感知建模：毫米波雷达

多普勒速度给出相对视线分量

$$ {}^{c}\mathbf{p}^{\text{radar}} = [r\cos\theta\,, r\sin\theta]^{\mathsf{T}} \tag{8.14} $$

$$ {}^{c}\mathbf{v}^{\text{radar}} = v_r \frac{{}^{c}\mathbf{p}^{\text{radar}}}{\| \quad {}^{c}\mathbf{p}^{\text{radar}} \|} $$

$$ r = 10\ \text{m},\ \theta = 30^\circ,\ v_r = 2\ \text{m/s} \implies \mathbf{p} = [8.6603,5]^{\mathsf{T}}\ \text{m} $$

径向分量为$[1.7321,1]^{\mathsf{T}}$ m/s，本例正速度为远离传感器。
切向速度尚未观测；本式采用二维平面模型，三维位置还需仰角或其他约束。

8.6.1 多模态感知建模：惯性传播

位置、速度与姿态按状态方程更新

$$
\begin{aligned}
{}^{e}\dot{\mathbf{p}}_t &= {}^{e}\mathbf{v}_t \\
{}^{e}\dot{\mathbf{v}}_t &= \mathbf{R}_b^e(\mathbf{q}_t)\ {}^{b}\mathbf{a}_t \\
\dot{\mathbf{q}}_t &= \frac{1}{2}\mathbf{q}_t \otimes [0, ({}^{b}\boldsymbol{\omega}_t)^{\mathsf{T}}]^{\mathsf{T}}
\end{aligned}
\tag{8.15}
$$

${}^{b}\mathbf{a}_t$为已去偏置、补偿重力的运动加速度（m/s²）。

$\mathbf{q} = [q_w, q_x, q_y, q_z]^{\mathsf{T}}$为单位四元数；$\otimes$为Hamilton四元数乘法；$\boldsymbol{\omega}$已去偏置（rad/s）。

8.6.1 多模态感知建模：比力与重力补偿

静止IMU算例确定加速度的物理含义

$$ {}^{e}\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{R}_b^e(\mathbf{q})(\quad {}^{b}\mathbf{f} - \mathbf{b}_a) + \quad {}^{e}\mathbf{g} $$

${}^{b}\mathbf{f}$为加速度计比力，$\mathbf{b}_a$为其偏置，${}^{e}\mathbf{g}$为重力加速度。

$$ {}^{e}\mathbf{g} = [0,0,9.81]^{\mathrm{T}}\ \mathrm{m/s^2}, \qquad {}^{b}\mathbf{f} = [0,0,-9.81]^{\mathrm{T}}\ \mathrm{m/s^2} $$

$$ \mathbf{R}_b^e = \mathbf{I},\ \mathbf{b}_a = \mathbf{0} \implies \quad {}^{e}\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{0} $$

错误直接积分原始比力：静止1s也得到垂直速度-9.81m/s、位移-4.905m。

比力经过旋转和重力补偿才用于积分。

8.6.1 多模态感知建模：惯性积分算例

0.1秒一步与连续三步的状态结果

$$p_{k+1} = p_k + v_k \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2, \quad v_{k+1} = v_k + a \Delta t$$

北向初值$p_0 = 0\ \mathrm{m}$, $v_0 = 2\ \mathrm{m/s}$, $a = 1\ \mathrm{m/s^2}$, $\Delta t = 0.1\ \mathrm{s}$。

时刻/s	位置/m	速度/(m/s)
0.0	0.000	2.0
0.1	0.205	2.1
0.2	0.420	2.2
0.3	0.645	2.3

偏置0.1m/s²持续10s可引入约5m位置误差，融合校正用于抑制这类漂移。

8.6.1 多模态感知建模：卫星定位系统

低频绝对定位校正高频惯性传播

GNSS纬经高 → 共同原点NED → 按观测时刻校正 → 传播至当前时刻

时序示例：IMU100Hz、GNSS10Hz。每0.1s包含10次惯性传播。

数据可用性	估计动作	结果含义
GNSS有效	传播并按位置观测校正	保持连续输出并约束漂移
短时GNSS缺失	保留运动模型预测	输出不确定度随时间增长
GNSS遮挡/多路径	结合质量与残差判断观测	低置信观测降低权重或拒收

8.6.1 多模态感知建模：结果输出

地图、自身状态与动态障碍物承担不同职责

输出	表示与关键字段	使用者
三维环境地图	OctoMap占用；ESDF距离；TSDF表面距离融合	建图、空间查询与碰撞检测
自身状态	位置、姿态、速度及协方差；VIO/LIO或GNSS-IMU	导航与轨迹跟踪控制
动态障碍物集	ID、位置、速度、语义、不确定度和未来轨迹	避障与多机协同

地图、位姿与障碍信息对应图8.7中的并行融合输出。

本章目录

多模融合与控制决策

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

8.6.1 多模态感知建模
教材对应：第8.1.6.1节

8.6.2 多模态信息融合
教材对应：第8.1.6.2节

8.6.3 轨迹生成与避障规划
教材对应：第8.1.6.3节

8.6.4 轨迹跟踪与外部控制
教材对应：第8.1.6.4节

8.6.5 智能规划决策
教材对应：第8.1.6.5节

8.6.2 多模态信息融合：融合任务

同一个状态才能建立共同融合问题

可融合对象	共同约定	置信依据
目标位置/速度	同目标、同时间、同坐标和单位	方差、预测残差
类别概率向量	同一类别顺序与归一化定义	熵、概率校准
场景特征编码	同维或经学习映射到共同表示	特征质量和训练条件

几何一致性回答“能否比较”，置信模型回答“怎样权衡”。

8.6.2 多模态信息融合：最优切换法

置信度选择与迟滞决定传感器切换

时刻	相机估计/置信	激光估计/置信	切换输出
t0	10.4m / 0.90	9.8m / 0.70	相机10.4m
t1遮挡	10.8m / 0.20	10.1m / 0.85	激光10.1m
t2均无效	无效	无效	缺测， 使用状态预测

评价机制决定可靠性排序；切换迟滞减少抖动，缺测时保留预测及其不确定度。

8.6.2 多模态信息融合：加权平均法

归一化权重产生共同位置估计

$$\sum_s \lambda^{(s)} = 1, \quad 0 \le \lambda^{(s)} \le 1 \tag{8.16}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \sum_s \lambda^{(s)} \mathbf{z}_t^{(s)}, \quad \mathbf{z}_t^{(s)} \in \mathbb{R}^n \tag{8.17}$$

同刻北向位置：相机$z_{\text{cam}} = 10.4\ \text{m},\ \sigma_{\text{cam}}^2 = 0.16\ \text{m}^2$；
激光$z_{\text{lidar}} = 9.8\ \text{m},\ \sigma_{\text{lidar}}^2 = 0.04\ \text{m}^2$。

$$\lambda_s = \frac{1/\sigma_s^2}{\sum_j 1/\sigma_j^2} \implies \lambda_{\text{cam}} = 0.2,\ \lambda_{\text{lidar}} = 0.8$$

$$\hat{x} = 0.2(10.4) + 0.8(9.8) = 9.92\ \text{m}, \quad \sigma^2 = 0.032\ \text{m}^2$$

权重无量纲；同维位置观测须独立、无偏。共同误差或相关性改变方差结论。

8.6.2 多模态信息融合：融合滤波法

动态模型把历史与当前观测结合

方法	非线性/分布处理	计算与适用条件
EKF扩展卡尔曼	一阶线性化，近似高斯	低计算量，依赖线性化与模型质量
UKF无迹卡尔曼	确定性采样点传播均值协方差	减少显式雅可比，仍采用高斯近似
PF粒子滤波	带权样本近似分布	可表示多峰，需要足够粒子及有效采样

共同流程是预测与校正；观测缺失时预测继续，不确定度通常增长。

8.6.2 多模态信息融合：一步滤波计算

残差与增益修正状态和协方差

初值$\hat{x}_0 = 10\ \mathrm{m},\ P_0 = 0.25\ \mathrm{m}^2$；每1s前进1m；$Q = 0.04,\ R = 0.09\ \mathrm{m}^2$。

P为方差；$-/+$为先验/后验；K为增益，ν为观测残差。

$$\hat{x}_1^- = 10 + 1 = 11\ \mathrm{m}, \quad P_1^- = 0.25 + 0.04 = 0.29\ \mathrm{m}^2$$

$$K_1 = \frac{P_1^-}{P_1^- + R} = \frac{0.29}{0.38} = 0.763158, \quad \nu_1 = 10.8 - 11 = -0.2\ \mathrm{m}$$

$$\hat{x}_1^+ = \hat{x}_1^- + K_1\nu_1 = 10.847368\ \mathrm{m}$$

$$P_1^+ = (1 - K_1)P_1^- = 0.068684\ \mathrm{m}^2$$

8.6.2 多模态信息融合：完整递推结果

三次预测与校正的误差如何变化

步	观测/m	先验/m	增益	后验/m	方差/m²
1	10.8	11.00000	0.76316	10.84737	0.06868
2	12.2	11.84737	0.54702	12.04026	0.04923
3	12.9	13.04026	0.49786	12.97043	0.04481

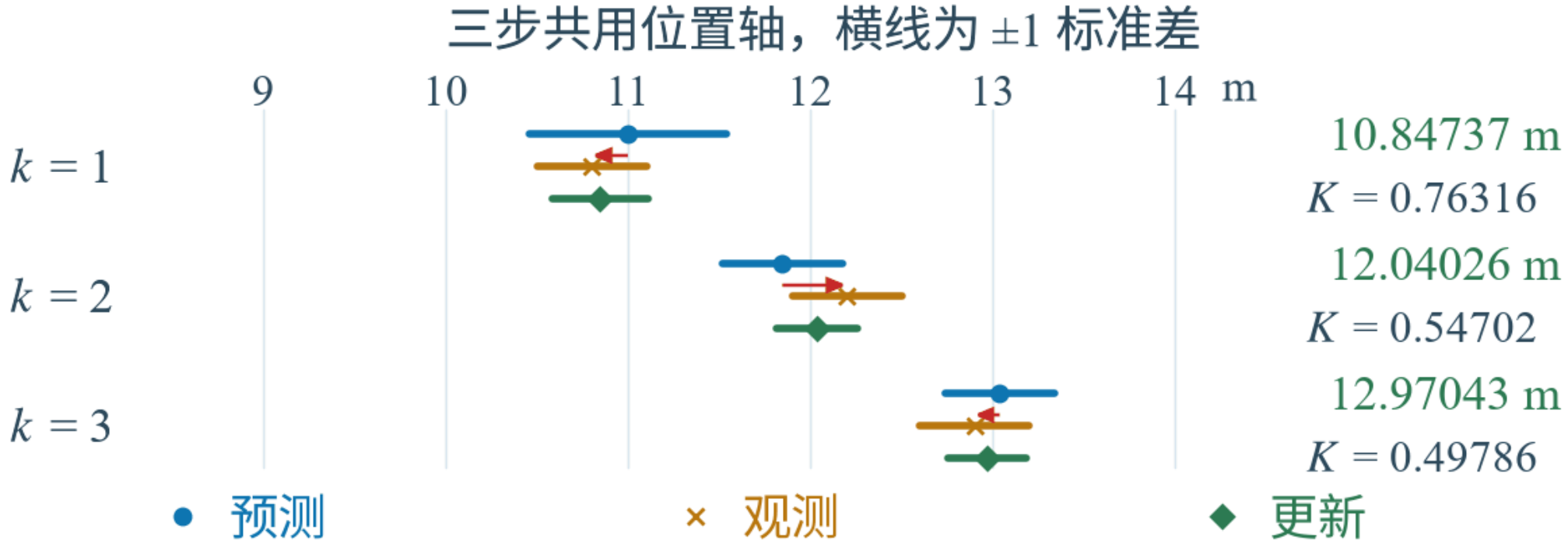
预设真值11、12、13m，后验误差分别-0.15263、+0.04026、-0.02957m。

给定模型和观测的离线递推算例。

8.6.2 多模态信息融合：位置递推过程

三次预测与更新落实到同一位置轴

每步从上一后验前进1 m；红箭头表示观测相对预测的残差方向。



图：三次位置递推与不确定度变化（离线计算）。

8.6.2 多模态信息融合：置信与相关性

共同误差会限制多源融合的收益

共同GNSS原点偏差 → 相机/激光同时偏移 → 平均后偏差保留

$$z_1 = x + b + \epsilon_1, \quad z_2 = x + b + \epsilon_2$$

x为真值，b为共同偏差，ϵ_1, ϵ_2为各传感器随机误差。

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1 \implies \hat{x} = x + b + \lambda_1\epsilon_1 + \lambda_2\epsilon_2$$

置信校准： 按残差与质量估计误差尺度，检查相关协方差。
来源管理： 重复信息去重，缺测使用预测，不把相关观测当独立量测。

多传感器数量不能替代独立信息。

本章目录

多模融合与控制决策

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

8.6.1 多模态感知建模
教材对应：第8.1.6.1节

8.6.2 多模态信息融合
教材对应：第8.1.6.2节

8.6.3 轨迹生成与避障规划
教材对应：第8.1.6.3节

8.6.4 轨迹跟踪与外部控制
教材对应：第8.1.6.4节

8.6.5 智能规划决策
教材对应：第8.1.6.5节

8.6.3 轨迹生成与避障规划：动态障碍物预测

预测窗口保留多个未来时刻的位置

$$\hat{\mathbf{p}}_{t+1:t+H}^{(i)} = \mathrm{Predict}(\{\mathbf{p}_{t-k}^{(i)}\}_{k=0}^{K}) \tag{8.18}$$

输入：目标i的$K+1$个历史位置及时间戳。输出：未来H步位置序列与预测时刻。

预测路线	模型或数据条件	需要关注
恒速度 / KF	短时运动模型与状态噪声	机动误差与协方差增长
RNN / LSTM / Transformer	训练数据中的时序模式	分布变化与预测不确定度

8.6.3 轨迹生成与避障规划：预测算例

一秒步长得到三秒位置序列

$$\mathbf{p}_{t+j} = \mathbf{p}_t + j\Delta t\mathbf{v}_t, \quad \mathbf{p}_t = [3,-1]^{\mathrm{T}}\ \mathrm{m},\ \mathbf{v}_t = [0,1]^{\mathrm{T}}\ \mathrm{m/s}$$

未来时间/s	障碍预测(N,E)/m	自机计划(N,E)/m	同刻几何关系
1	(3,0)	(2,0)	中心间距1m
2	(3,1)	(3,1)	重合，拒绝计划
3	(3,2)	(4,2)	中心间距1m

动态避障比较同一未来时刻的位置，并加入尺寸和不确定度的安全余量。

8.6.3 轨迹生成与避障规划：避障目标函数

相邻位置差与障碍代价承担不同角色

$$\min_{\mathbf{x}_{0:T}} \mathcal{J} = \sum_{t=0}^{T-1} \|\mathbf{x}_{t+1} - \mathbf{x}_t\|^2 + \lambda \sum_{t=0}^{T} C(\mathbf{x}_t) \tag{8.19}$$

边界条件： $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_{\text{start}}$, $\mathbf{x}_T = \mathbf{x}_{\text{goal}}$；本页$\mathbf{x}_t \in \mathbb{R}^3$，单位m。

项	作用	本例量纲
相邻位置差平方	限制位移，不保证加速度连续	m^2
障碍惩罚C	靠近障碍时增大的非负惩罚	m^2；λ无量纲

8.6.3 轨迹生成与避障规划：障碍代价

安全距离经惩罚函数转成障碍代价

起终点(0,0)/(4,0)m；障碍中心(2,0)m、半径0.5m；安全净距0.5m。
表面有符号净距$d(\mathbf{x}_1) = y - 0.5\ \mathrm{m}$；$\lambda = 10$；代价单位m²。

$$C(\mathbf{x}) = \max(d_{\mathrm{safe}} - d(\mathbf{x}), 0)^2, \quad d_{\mathrm{safe}} = 0.5\ \mathrm{m}$$

$$\mathbf{x}_1 = [2\ \mathrm{m}, y]^{\mathrm{T}},\ y \geq 0: \quad C(\mathbf{x}_1) = \max(1\ \mathrm{m} - y, 0)^2$$

中间点y/m	位移代价/m²	障碍代价/m²	总J/m²
0	8	1	8+10×1=18
1.5	12.5	0	12.5

8.6.3 轨迹生成与避障规划：完整优化结果

软代价最小点仍违反安全净距

$$J(y) = 8\ \mathrm{m}^2 + 2y^2 + 10\max(1\ \mathrm{m} - y, 0)^2$$

区间$0 \le y \le 1\ \mathrm{m}$内，$J'(y) = 24y - 20\ \mathrm{m}$；令导数为零得：

$$y^* = 5/6\ \mathrm{m}, \quad J(y^*) = (29/3)\ \mathrm{m}^2 \approx 9.6667\ \mathrm{m}^2$$

$$d_{\mathrm{segment}} = \frac{(2\ \mathrm{m})y}{\sqrt{4\ \mathrm{m}^2 + y^2}} \implies d_{\mathrm{segment}}(5/6\ \mathrm{m}) = 10/13\ \mathrm{m}$$

候选	线段到表面净距/m	安全净距要求0.5m
软最小y=5/6	0.26923	未满足
绕行y=1.5	0.70000	净距满足；另验动力学

8.6.3 轨迹生成与避障规划：求解与重规划

静态局部优化与动态重规划分工

求解路线	核心机制	共同边界
梯度下降	负梯度迭代	步长、初始化和局部极小
TrajOpt / CHOMP	连续凸化 / 协变梯度	非凸约束与碰撞核验
GPMP2	高斯过程与稀疏因子图	模型、初始化和约束建模

动态环境需要滚动预测和重规划；交付前验连续净距及PVA/执行器约束。

较低的软代价不代表轨迹可执行。

本章目录

多模融合与控制决策

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

8.6.1 多模态感知建模
教材对应：第8.1.6.1节

8.6.2 多模态信息融合
教材对应：第8.1.6.2节

8.6.3 轨迹生成与避障规划
教材对应：第8.1.6.3节

8.6.4 轨迹跟踪与外部控制
教材对应：第8.1.6.4节

8.6.5 智能规划决策
教材对应：第8.1.6.5节

8.6.4 轨迹跟踪与外部控制：位置速度加速度

五次时间函数生成连续PVA

单轴位移4m、总时长4s；归一化时间$\tau = t/(4\ \mathrm{s}),\quad 0 \le t \le 4\ \mathrm{s}$。

$$p(t) = 4(10\tau^3 - 15\tau^4 + 6\tau^5)\ \mathrm{m},\quad \tau = t/(4\ \mathrm{s})$$

$$v(t) = (30\tau^2 - 60\tau^3 + 30\tau^4)\ \mathrm{m/s}$$

$$a(t) = (60\tau - 180\tau^2 + 120\tau^3)/4\ \mathrm{m/s^2}$$

t=1s：P=0.4140625m，V=1.0546875m/s，A=1.40625m/s²。

8.6.4 轨迹跟踪与外部控制：轨迹采样结果

同一时间函数的全部整秒参考量

时刻/s	P/m	V/(m/s)	A/(m/s²)
0	0.0000000	0.0000000	0.00000
1	0.4140625	1.0546875	1.40625
2	2.0000000	1.8750000	0.00000
3	3.5859375	1.0546875	-1.40625
4	4.0000000	0.0000000	0.00000

速度中点达到1.875m/s；加速度前正后负。整秒采样不代替连续限幅检查。

8.6.4 轨迹跟踪与外部控制：控制量选择

接口层级决定保留的底层闭环

参考量	典型任务	外部侧承担
位置P	导航、定点、轨迹航点	时间化参考与速度/加速度前馈
速度V / 加速度A	视觉伺服、避障、前馈	闭环误差处理与限幅
姿态 / 推力	大机动、平台视线约束	平动稳定与推力约束
角速度 / 推力	高动态底层控制	姿态稳定与更多安全责任

控制层级、反馈状态和飞控内环共同决定可执行性。

8.6.4 轨迹跟踪与外部控制：外部控制接口

Offboard参考约定坐标、单位和持续数据流

消息语义	参考坐标与单位
位置 / 速度 / 加速度	局部NED；m / m·s^{-1} / m·s^{-2}
姿态 / 角速度	FRD→NED四元数；机体角速度rad/s
模式保活	>2Hz；进入前持续发送>1s；检查失联动作

PX4 v1.16的MAVLink BODY_NED速度参考只按航向旋转；
这与包含滚转、俯仰的完整FRD变换不同。

接口条件限定为PX4 v1.16，按实际固件和SDK核对：
https://docs.px4.io/v1.16/en/flight_modes/offboard

8.6.4 轨迹跟踪与外部控制：视觉反馈控制

像素误差经尺度换算得到速度参考

理想静止目标：$Z = 4\ \mathrm{m},\ f_x = 320\ \mathrm{px},\ e_{u,0} = 160\ \mathrm{px},\ K_p = 0.5\ \mathrm{s}^{-1}$。

$$X = \frac{Z}{f_x} e_u = \frac{4}{320}(160) = 2\ \mathrm{m}, \quad v_{\mathrm{right}} = K_p X = 0.5(2) = 1\ \mathrm{m/s}$$

$$e_{u,k+1} = (1 - K_p \Delta t) e_{u,k} = 0.95 e_{u,k}, \quad \Delta t = 0.1\ \mathrm{s}$$

理想量/步	k0	k1	k2	k3
像素误差/px	160.00	152.00	144.40	137.18
右向误差/m	2.00000	1.90000	1.80500	1.71475
右向速度/(m/s)	1.000000	0.950000	0.902500	0.857375

8.6.4 轨迹跟踪与外部控制：位置与姿态联合控制

运动轨迹与视线要求共同约束动作

位置/PVA任务 → 姿态/视线约束 → 联合预测优化 → 底层跟踪执行

约束类别	本例目标或限制	执行前核验
位置和航向	向北运动；相机向东，yaw=90°	平移轨迹与朝向分别定义
姿态和输入	倾角、推力、角速度均限幅	模型与控制接口一致
MPC预测时域	预测状态并选择满足约束的控制序列	在线计算时间与失效策略

本章目录

多模融合与控制决策

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

8.6.1 多模态感知建模
教材对应：第8.1.6.1节

8.6.2 多模态信息融合
教材对应：第8.1.6.2节

8.6.3 轨迹生成与避障规划
教材对应：第8.1.6.3节

8.6.4 轨迹跟踪与外部控制
教材对应：第8.1.6.4节

8.6.5 智能规划决策
教材对应：第8.1.6.5节

8.6.5 智能规划决策：决策方法

决策模型与实现架构可以组合

FSM：有限状态机；HFSM：分层有限状态机；DRL：深度强化学习。

路线	输入到输出	适用条件与限制
行为树 BT	条件和动作状态→执行节点	模块复用；明确返回状态
FSM / HFSM	事件/守卫→任务状态	结构清楚；大规模转移复杂
DRL	状态/奖励→动作策略	需训练和泛化/安全检查
端到端	图像/点云等原始感知→动作	整体优化；解释与诊断更难
大模型	语言/状态→符号流程	语义能力；计算、时延和验证

显式任务逻辑、学习局部策略和稳定控制可分层组合。

8.6.5 智能规划决策：行为树

行为树根据成功、失败或运行状态推进



Sequence：遇Failure/Running即返回；全部Success才成功。
Fallback：遇Success/Running即返回；全部Failure才失败。
Parallel：并行触发；成功/失败阈值按任务配置。
反应式节点：每次tick重检条件，必要时中断当前动作。

8.6.5 智能规划决策：状态机与层次状态机

状态与守卫条件决定行为切换

输入事件/守卫	状态变化	动作
目标有效、道路可用	搜索→跟踪	生成目标跟踪参考
预测存在冲突	跟踪→绕行	生成经检查的绕行轨迹
观测不确定度过大	绕行→等待	制动并等待有效信息
任务完成/返航条件	任意允许状态→返回	规划返回并持续闭环

预设事件序列：搜索→跟踪→绕行→等待→返回。
HFSM可把跟踪再分为接近/对齐/拍摄。

8.6.5 智能规划决策：学习型决策

强化学习策略与端到端架构可以交叉

状态s
感知/目标 → Q值：动作价值
Actor策略网络 → 动作a
运动参考 → 奖励与新状态

$$r = \text{progress} - 0.1 - 100\,\mathbf{1}_{\text{collision}}$$

progress：前进米数收益。

$\mathbf{1}_{\text{collision}}$：碰撞1，否则0。

动作与结果	一步奖励	解释
前进1m、无碰撞	0.9	收益1减动作成本0.1
前进1m、碰撞	-99.1	再减碰撞惩罚100
等待、无碰撞	-0.1	没有前进收益，仍有动作成本

端到端是原始感知到动作的架构；学习奖励不等于硬安全约束。

8.6.5 智能规划决策：大模型决策逻辑

语言任务转为可检查的符号流程

自然语言任务 → 符号流程/代码 → 约束与失败分支检查 → 运行时执行监督

任务：巡检A→巡检B→返回；每站确认完成后再推进。
异常分支：目标无效、风险过高或能源不足时等待、重规划或返回。
部署条件：核验逻辑、计算时延与模型压缩效果；高频稳定控制保持独立。

语言模型可辅助初始任务逻辑；观测反馈与安全约束在运行时持续生效。

8.6.5 智能规划决策：完整决策链实例

预设观测沿全链形成可核验动作

时刻	感知/融合/预测输入	决策	规划与控制输出
t0	同轴估计9.92m；通道自由	跟踪	经过净距/PVA检查的参考
t1	2s预测冲突；地图有效	绕行	拒绝冲突，求解并验绕行
t2	遮挡；不确定度超过门限	等待	限幅制动，保持安全反馈
t3	观测恢复；绕行通道可用	跟踪	重规划并继续闭环纠偏
t4	完成巡检；返回条件满足	返回	返回轨迹及失联/能源检查

离线教学输入；BT/FSM组织任务，局部学习候选动作与实时控制分工。

练习与讨论

测量、融合、规划和控制的四个判断

1. 静止惯性： FRD水平静止，$\mathbf{f} = [0,0,-9.81]^{\mathrm{T}}\ \mathrm{m/s^2}$，无偏置；NED运动加速度?

2. 雷达与融合： 径向能否确定切向速度?
独立无偏位置10.4/9.8m、方差0.16/0.04m²如何融合?

3. 软代价路径： $y = 5/6$ m时线段到圆中心10/13m，半径0.5m。安全净距0.5m满足吗?

4. 控制与决策： $e_u = 160\ \mathrm{px},\ Z = 4\ \mathrm{m},\ f_x = 320\ \mathrm{px},\ K_p = 0.5\ \mathrm{s^{-1}}$；右向速度多少?
任务切换由谁组织?

参考要点

物理语义与执行约束决定答案

1. **运动加速度：** $\mathbf{R}(\mathbf{f}-\mathbf{b}_a)+\mathbf{g}=\mathbf{0}\ \mathrm{m/s^2}$；不能直接积分原始比力。

2. **可观与加权：** 切向速度不可确定；权重0.2/0.8，估计9.92m、方差0.032m²。

3. **连续安全：** 净距0.26923m<0.5m；拒绝该路径，另加连续净距和动力学约束。

4. **接口职责：** 右向速度1m/s；任务逻辑选择跟踪/等待等状态，稳定闭环负责执行。

本节小结

可靠估计、可行轨迹与任务决策相互配合

测量与融合： 先统一物理量、时间、坐标和对象；置信与相关性决定有效信息。

预测与规划： 未来同刻比较；验证连续安全净距、速度、加速度和输入约束。

控制与决策： PVA及接口约定决定执行，显式逻辑和学习策略组织任务切换。

边界与衔接： 比力≠运动加速度，径向≠全速度，软代价≠安全保证；8.7工具框架。