本章目录

集群关键技术与挑战

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

10.6.1 定位融合与统一坐标

教材对应：第10.1.4节 · 定位方式与统一坐标

10.6.2 时钟同步与运动预测

教材对应：第10.1.4节 · 时钟同步与运动预测

10.6.3 碰撞检测与避碰

教材对应：第10.1.4节 · 碰撞检测与避碰机制

10.6.4 故障重构与交互性能

教材对应：第10.1.4节 · 故障重构与规模性能

10.6.1 定位融合与统一坐标：工程问题总览

信息误差会变成群体控制误差



状态偏差：错坐标、旧数据或漂移，会进入相对距离和速度误差。

控制后果：错误修正可能扩大队形误差、消耗控制余量，甚至压缩避碰空间。

系统约束：第7章健康状态、第8章感知质量、第9章消息时效共同决定输入是否可用。

10.6.1 定位融合与统一坐标：定位方式

定位来源决定误差与失效方式

定位来源	提供的信息	主要条件与失效方式
动捕	外部参考下的位姿	标定、通视与刚体识别；遮挡会失锁
GNSS / RTK / DGPS	地理坐标；差分改善精度	卫星几何、差分链路与解状态
UWB超宽带测距	基站距离及解算位置	基站布局、非视距偏差与时延
VIO / 视觉SLAM	本地轨迹与地图定位	纹理、光照、惯性标定及漂移
邻机相对定位	相对位置、姿态或距离	标记、深度或点云；检查可观性

VIO为视觉惯性里程计；SLAM为同步定位与建图。感知方法详见第8章。

10.6.1 定位融合与统一坐标：坐标对齐

统一坐标需要旋转与平移

$$\mathbf{p}^W = R_{WB}\mathbf{p}^B + \mathbf{t}_{WB}$$

$$R_{WB} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p}^B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{t}_{WB} = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{p}^W = \begin{bmatrix} 10 \\ 1 \end{bmatrix} \text{m}$$

教学假设：二维刚体变换。公共系为W，B为本地系；所有节点必须共享轴向、原点、单位与变换版本。

10.6.1 定位融合与统一坐标：两源融合算例

融合降低随机误差，不能消除共同偏差

$$\hat{p} = \frac{z_1/\sigma_1^2 + z_2/\sigma_2^2}{1/\sigma_1^2 + 1/\sigma_2^2}, \quad \sigma_f^2 = \frac{1}{1/\sigma_1^2 + 1/\sigma_2^2}$$

教学输入	位置 / m	标准差 / m	归一化权重
来源1	10.0	0.2	0.2
来源2	10.3	0.1	0.8
融合输出	10.24	0.0894	1.0

条件：同坐标、同时间、独立且无偏。实际可用扩展卡尔曼滤波、因子图或滑动窗口处理连续多源信息。

10.6.1 定位融合与统一坐标：融合与切换

定位源切换要保持公共参考连续

阶段	状态处理	集群控制动作
双源重叠	估计坐标变换，核对时间与偏差	确认相对位置连续后增加新源权重
旧源退化	降低旧源权重，保留不确定度	增大安全余量，限制高动态动作
新源跳变或失锁	隔离异常，回退预测或有效来源	保持、减速或退出队形，由可用能力决定

统一坐标解决含义一致，多源融合改善估计质量，两者缺一不可。

本章目录

集群关键技术与挑战

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

10.6.1 定位融合与统一坐标

教材对应：第10.1.4节 · 定位方式与统一坐标

10.6.2 时钟同步与运动预测

教材对应：第10.1.4节 · 时钟同步与运动预测

10.6.3 碰撞检测与避碰

教材对应：第10.1.4节 · 碰撞检测与避碰机制

10.6.4 故障重构与交互性能

教材对应：第10.1.4节 · 故障重构与规模性能

10.6.2 时钟同步与运动预测：时间对齐

状态年龄包含发送间隔与传输等待

$$\Delta t = t_{\text{now}} - t_{\text{sample}}, \quad |e_p| \approx |v|\,|e_t|$$

误差来源	为什么影响邻机状态
采样与发布间隔	低频消息使两次更新之间的状态变旧
排队、传输与丢包	状态年龄继续增长，不能只使用名义发送周期
时钟偏差与漂移	年龄计算有系统误差，预测可能过补或欠补

教学数值：$5\ \text{m/s} \times 0.020\ \text{s} = 0.10\ \text{m}$；时间戳与链路指标回指第9章。

10.6.2 时钟同步与运动预测：时钟同步机制

同步方法要匹配时间误差预算

同步方式	机制与支持条件	需要观察的误差
GNSS授时	卫星公共时间；秒脉冲PPS与硬件捕获	遮挡、接收机误差及本地时间传递
NTP网络时间协议	网络时间戳交换与软件时钟校准	网络不对称、调度抖动与漂移
PTP精确时间协议	精确时间戳交换；可配硬件时间戳	网卡交换机能力、路径与时钟配置

先由速度和允许误差确定时间预算，再实测同步与失锁保持效果；名义协议不等于精度保证。

10.6.2 时钟同步与运动预测：运动预测模型

由旧状态预测当前的位置

$$\hat{\mathbf{p}}(t+\Delta t) \approx \mathbf{p}(t) + \mathbf{v}(t)\Delta t + \frac{1}{2}\mathbf{a}(t)\Delta t^2 \tag{10.46}$$

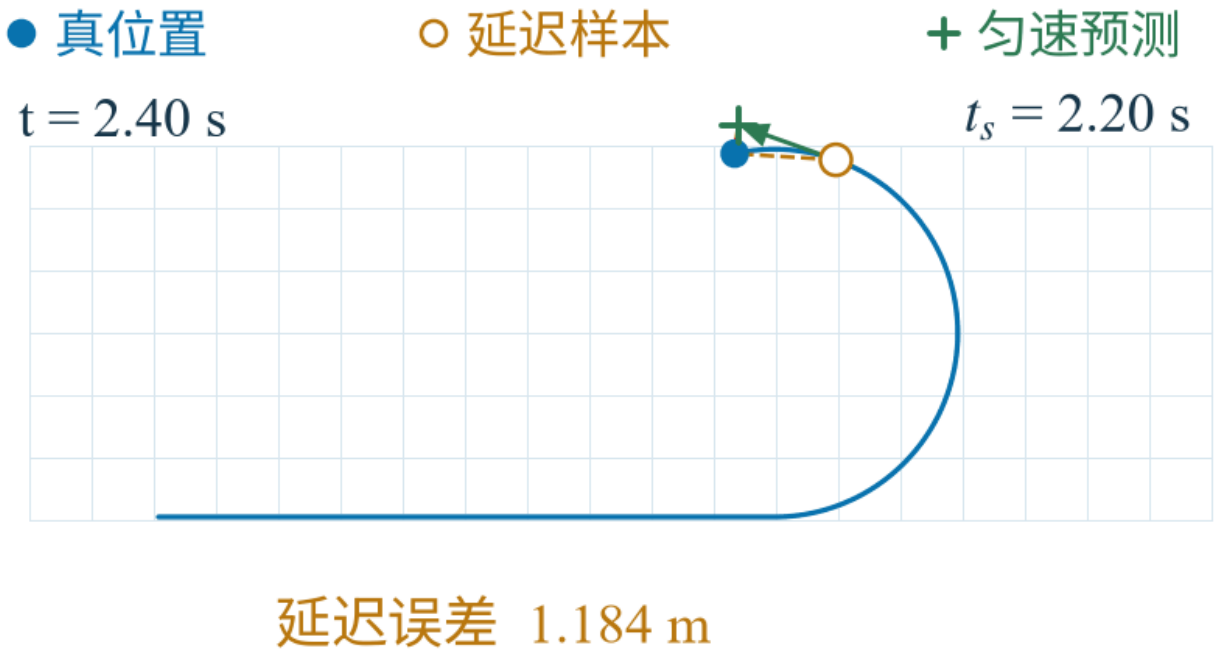
位置单位m，速度m/s，加速度m/s²，时间s；全部向量使用同一公共坐标系。

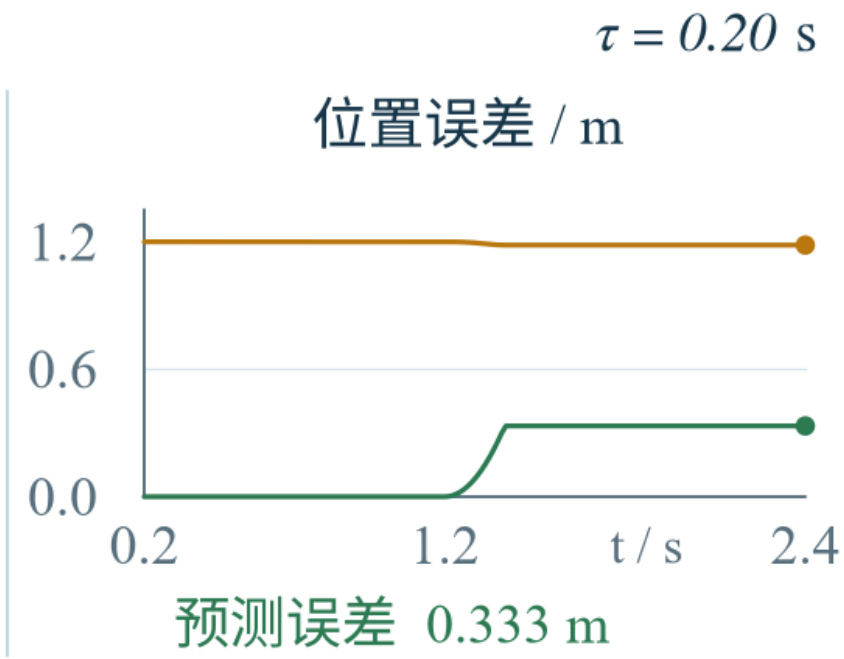
$$p = 10, \quad v = 2, \quad a = 1, \quad \Delta t = 0.2 \quad \Rightarrow \quad \hat{p} = 10.42\ \text{m}$$

适用条件：短时运动可由常速度或常加速度近似，时间戳可信。预测弥补信息滞后，同时引入模型误差。

10.6.2 时钟同步与运动预测：可复算预测实验

同一运动下比较旧位置与预测位置





图：式10.46的匀速特例（预测加速度项设为0），转弯仍有残差

动画：6 m/s、延时0.2 s、匀速预测；前页为2 m/s常加速度算例。

10.6.2 时钟同步与运动预测：误差边界与缓存

预测的有效期由不确定度限定

匀速外推假设：初始位置、速度及时间年龄准确；区间内$\|\mathbf{a}(t)\| \le a_{\max}$。

$$|e_{\text{model}}| \le \frac{1}{2} a_{\max} \Delta t^2, \quad a_{\max} = 2, \quad \Delta t = 0.5 \quad \Rightarrow \quad |e_{\text{model}}| \le 0.25 \text{ m}$$

缓存与插值：两次采样间可插值对齐历史状态；当前时刻超过最新消息时仍属外推。

误差对象：e_{model}仅为模型截断误差；总误差还须计入初始估计与时钟误差。

失效处理：超过年龄或误差阈值，改用本地感知并减速、增距或退出协同任务。

模型扩展：滤波器或时空学习模型可利用历史与邻机交互，需用未见机动检验泛化。

本章目录

集群关键技术与挑战

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

10.6.1 定位融合与统一坐标

教材对应：第10.1.4节 · 定位方式与统一坐标

10.6.2 时钟同步与运动预测

教材对应：第10.1.4节 · 时钟同步与运动预测

10.6.3 碰撞检测与避碰

教材对应：第10.1.4节 · 碰撞检测与避碰机制

10.6.4 故障重构与交互性能

教材对应：第10.1.4节 · 故障重构与规模性能

10.6.3 碰撞检测与避碰：检测与控制

碰撞检测与避碰控制处在不同环节



接触检测： 记录已经发生的碰撞、对象ID和位置，适合仿真故障分析。

预测检测： 估计将来的最近距离，提前识别风险，需要时效与模型条件。

避碰闭环： 改变指令后继续检查实际距离、饱和与队形恢复，不能只看目标点间距。

10.6.3 碰撞检测与避碰：速度障碍直觉

相对运动给出最近接距离

$$\mathbf{r}(\tau) = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_{\mathrm{rel}}\tau, \quad \tau_* = \mathrm{clip}\left(-\frac{\mathbf{r}_0^T \mathbf{v}_{\mathrm{rel}}}{\|\mathbf{v}_{\mathrm{rel}}\|^2}, 0, T\right)$$

$$\mathbf{r}_0 = (4,1)\ \mathrm{m}, \quad \mathbf{v}_{\mathrm{rel}} = (-2,0)\ \mathrm{m/s}, \quad T = 3\ \mathrm{s}$$

$$\tau_* = 2\ \mathrm{s}, \quad d_{\min} = \|(0,1)\| = 1\ \mathrm{m} < 1.5\ \mathrm{m}$$

clip将计算时刻限制在预测时间窗内；1.5 m为本例安全阈值。

条件：短时恒速，位置和速度已对齐；相对速度为零时距离不变，不能使用分母为零的公式。

10.6.3 碰撞检测与避碰：执行能力约束

安全间距还要覆盖反应与制动过程

模型假设：一维相向；反应段闭合速度不超过v_c。
此后沿接近方向的相对减速度下界为$a_c > 0$，直至闭合速度为0。

$$d_{\mathrm{req}} = R + \epsilon + v_c T_r + \frac{v_c^2}{2a_c}$$

$$R = 1,\ \epsilon = 0.4,\ v_c = 4,\ T_r = 0.15,\ a_c = 4$$

$$d_{\mathrm{req}} = 1 + 0.4 + 4 \cdot 0.15 + \frac{4^2}{2 \cdot 4} = 4.0\ \mathrm{m}$$

R与ϵ分别为合计保护半径和相关状态余量，单位m；时间s。
本例4 m不是通用真机安全距离。

10.6.3 碰撞检测与避碰：算法机制

避碰方法解决的约束各不相同

方法	因果机制	主要条件与局限
人工势场	目标吸引与邻机排斥合成控制	可能停滞；限幅和离散执行改变效果
速度障碍	排除会进入危险范围的相对速度	依赖运动预测与邻机响应假设
模型预测控制（MPC）	优化未来轨迹并加入约束	模型、可行性与实时解算预算
感知融合 / 端到端策略	改善障碍信息 / 直接映射到动作	感知误差、训练分布与动作可行性

10.6.3 碰撞检测与避碰：系统集成

安全模块仲裁任务指令并验证恢复

状态	控制权限与动作	可观察的退出条件
正常任务	主控制器输出，安全模块持续监测	预测距离或误差余量触发风险
风险响应	安全模块修改指令，满足执行器限制	距离恢复且风险指标连续低于退出阈值
恢复任务	从当前状态重规划，不瞬时跳回旧目标	跟踪误差与队形误差重新进入允许范围

避碰验收同时检查最小距离、动作可行性和任务恢复，不能只看终点。

本章目录

集群关键技术与挑战

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

10.6.1 定位融合与统一坐标

教材对应：第10.1.4节 · 定位方式与统一坐标

10.6.2 时钟同步与运动预测

教材对应：第10.1.4节 · 时钟同步与运动预测

10.6.3 碰撞检测与避碰

教材对应：第10.1.4节 · 碰撞检测与避碰机制

10.6.4 故障重构与交互性能

教材对应：第10.1.4节 · 故障重构与规模性能

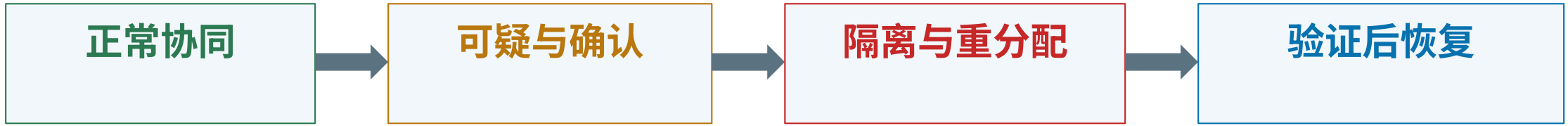
10.6.4 故障重构与交互性能：故障诊断

单机故障、断链与任务失效要区分

异常范围	证据来源	群体影响与处理
单节点健康异常	电量、传感器残差、飞控状态	能力下降；限制任务并安排接替
通信失联	消息年龄、心跳、邻机感知	先隔离旧状态；区分节点故障与断链
定位不可信	跳变、协方差、源切换状态	增大间距或降级，避免使用错误相对位置
任务无法继续	剩余资源、通路与目标变化	重新分配角色、区域或队形拓扑

10.6.4 故障重构与交互性能：状态机与恢复

诊断结果触发隔离与任务重构



判断条件：结合持续时间、独立证据和任务风险，避免单次丢包触发全群重构。

重构对象：领导者、通信拓扑、任务区域与角色；剩余资源不足时降低任务目标。

恢复条件：校验坐标、时钟、健康与任务版本，再重新进入协同；防止双重分配。

10.6.4 故障重构与交互性能：重分配算例

任务接替需要同时满足时间与容量

教学假设：两机各接替1个巡检点，同时出发，路径互不冲突，代价为预计飞行时间。

候选载具	巡检点P	巡检点Q
A	3 s	7 s
B	4 s	4 s

分配方案	全部完成时间	总飞行时间
A去P，B去Q	$\max(3,4) = 4$ s	$3 + 4 = 7$ s
A去Q，B去P	$\max(7,4) = 7$ s	$7 + 4 = 11$ s

10.6.4 故障重构与交互性能：算力与通信

规模负担由交互结构与截止时间决定

$$E_{\text{all}} = N(N-1), \quad E_{\text{local}} = Nk, \quad T_{\text{calc}} = 5 + 0.01E \text{ ms}$$

50节点教学配置	有向交互数	串行计算时间	20 ms预算
全对全	2450	29.5 ms	超时
每节点6邻居	300	8.0 ms	满足本例计算预算

假设单次交互耗时固定；实际还要测消息时效、感知与执行耗时。稀疏化、分组与并行需保留任务所需信息。

10.6.4 故障重构与交互性能：交互与协同结构

分组和角色管理减少人工干预负担

管理对象	显示和控制内容	减少的冲突
任务组	区域覆盖、完成度、组内资源余量	减少逐机反复下发相同目标
异常节点	健康、状态年龄、定位质量与接替进度	帮助区分根因和后果
异构角色	能力、载荷、控制权限与任务版本	防止错误替代、重复执行与越权指令

教学工作量：$50 \times 2 = 100$ s；10组与3个异常：$10 \times 2 + 3 \times 5 = 35$ s。汇总必须保留可下钻的异常证据。

10.6.4 故障重构与交互性能：综合案例

室内外协同任务的状态处理链

场景变化	系统动作	验收量
室外进入室内	对齐GNSS与本地地图，融合权重渐变	公共位置跳变与相对误差
5 Hz邻机消息	按真实年龄预测到控制时刻	预测误差与最大消息年龄
狭窄区域交汇	按误差余量与执行能力修改轨迹	最小距离、动作饱和比例
节点持续定位失锁	降级、隔离、接替并更新任务版本	恢复耗时、任务完成率

练习与讨论

课堂讨论：预测补偿后仍要保留什么

问题	可见参考答案
旧位置5 m，速度3 m/s，加速度-1 m/s²，年龄0.2 s，预测位置？	$5 + 3 \cdot 0.2 - 0.5 \cdot 1 \cdot 0.2^2 = 5.58\ \mathrm{m}$
预测后邻机又连续丢包，继续原速飞行是否合理？	先检查年龄、误差边界和本地感知，再按能力减速、增距或退出。
失效节点的任务交给最近一架是否总最优？	还受容量、载荷、路径冲突和已有任务限制，应比较可行分配。

本节小结

本节小结：可信状态与可执行协同

空间：坐标变换、标定与地图版本保持统一；融合需要合理噪声和相关性假设。

时间：同步使时间戳可比，预测缓解状态滞后；模型误差决定外推的有效期。

安全与故障：检测触发可执行避让；健康诊断、隔离和任务接替共同实现恢复。

易错点：检测不保证避碰；预测不消除时延；节点数不是算力或通信的唯一指标。