本章目录

习题与课堂讨论

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

10.9.1 核心概念与方法辨析

教材对应：第10.4节第1–5题

10.9.2 编队设计与实验部署

教材对应：第10.4节第6–7题

10.9.3 学习策略与规模扩展

教材对应：第10.4节第8–9题

10.9.4 工程策略与综合复习

教材对应：第10.4节第10题及本章总结

练习与讨论

第1题：多个个体怎样构成协同系统

多智能体／无人集群系统的核心特性与研究重点是什么？

核心特性	表现	对应研究问题
多个自治个体	各自获取信息并产生行动	异构能力、控制与适应
局部交互与耦合	邻居信息影响本机决策	通信拓扑与协同规则
整体任务	分工、编队或共同覆盖	任务分配、容错与群体性能

协同主线：共同目标下的任务分配、编队一致性、感知通信与故障重构。

博弈主线：对手建模、策略互动与策略学习，考虑其他决策者怎样响应。

练习与讨论

第2题：同一任务的三种计算分工

比较集中式、分布式与混合式控制的特点及典型场景。

架构	计算与信息	典型场景与代价
集中式	中心汇集状态，统一计算各机指令	小范围统一编队；中心负载和链路依赖较大
分布式	各机依据自身及邻居信息计算	分散覆盖；局部信息下协调行动
混合式	上层分配任务，局部自主协调	多编组巡检；需处理层间指令与更新冲突

参考：课件10.1，教材第10.1.2.1节。

练习与讨论

第3题：一致性约束的是哪些变量

一致性协议怎样用于分布式编队？其数学基础是什么？

$$u_i = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}(x_j - x_i), \qquad \dot{x} = -Lx$$

数学条件：固定、无向、连通图，权重对称且非负，一阶积分模型。

收敛结果：零特征值对应共同状态，其余模态衰减，最终为初值平均。

编队改用 $z_i = p_i - \delta_i$ 求一致，保留期望相对位置。

参考要点

第3题算例：邻居差怎样变成一次更新



$$u = (2-0,\ (0-2)+(4-2),\ 2-4)^T = (2,0,-2)^T$$

$$x^+ = x + 0.1u = (0.2,2,3.8)^T\ \mathrm{m}$$

自查：两端逐渐靠近中间，初值平均保持2 m；更新方向不能写反。

练习与讨论

第4题：MADDPG怎样训练与执行

MADDPG属于哪类架构？核心思想是什么？

阶段	使用的信息	计算结果
集中训练	联合观测／状态与联合动作	各Critic评价动作，更新各Actor
分布执行	本机观测及允许的邻居消息	各Actor独立输出本机动作

关键解释：Critic是训练用的价值评估器，Actor是产生动作的策略。

练习与讨论

第5题：表格Q值与神经网络Q值

Q-Learning与DQN有哪些差异？DQN的关键技术解决什么问题？

比较项	Q-Learning	DQN
Q值存储	逐状态、逐动作存表	网络由状态估计各离散动作Q值
适合输入	可枚举的小规模状态	高维或难以逐项列举的状态
经验回放	逐条转移直接更新表格	抽样历史转移，降低样本相关性
目标网络	表格更新使用现有Q估计	延缓目标变化，提高训练稳定性

本章目录

习题与课堂讨论

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

10.9.1 核心概念与方法辨析

教材对应：第10.4节第1–5题

10.9.2 编队设计与实验部署

教材对应：第10.4节第6–7题

10.9.3 学习策略与规模扩展

教材对应：第10.4节第8–9题

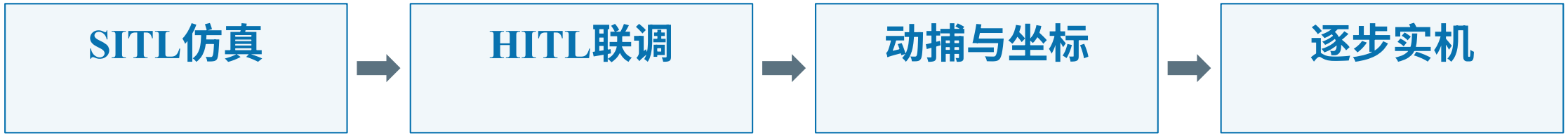
10.9.4 工程策略与综合复习

教材对应：第10.4节第10题及本章总结

练习与讨论

第6题：六机室内实验的验证阶段

为6架无人机的室内动捕集中式编队，设计完整实施步骤及各阶段意义。



SITL／HITL：先检验控制逻辑与异常策略，再核对真实硬件的接口和时序。

动捕／实机：建立统一定位基准，按单机、双机、六机分阶段核验。

参考要点

第6题参考：逐阶段检查，逐步降低风险

阶段	核心检查	通过后减少的风险
软件在环	队形误差、最小距离、失联响应	控制逻辑和角色分配错误
硬件在环	更新周期、限幅、模式切换与日志	真实接口与时序不匹配
动捕准备	相机标定、刚体ID 坐标变换与时间同步	位置方向和对象关联错误
单机至六机	围栏、间距、急停、人工接管演练	多机同时运行的交互风险

练习与讨论

第7题：一领四僚的二维队形控制律

为“1领机＋4僚机”设计控制律，并说明参数对稳定性的影响。

$$e_i = p_i - p_0 - \delta_i, \qquad \delta_i \in \{(-2,0),(0,-2),(2,0),(0,2)\}\ \mathrm{m}$$

$$u_i = v_0 - k_p e_i - k_c \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}(e_i - e_j)$$

模型与信息：二维一阶速度模型；各机可得领机状态，僚机邻居为权重1的链。

参数作用：正增益分别决定领机跟踪与邻居协调，速度指令单位m/s。

参考要点

第7题计算：目标在右侧，指令也应向右

给定 $p_0=(10,5)$, $p_1=(7,5)$, $\delta_1=(-2,0)$, $e_2=(0,0)$，位置单位m。

参数：$k_p=0.6$, $k_c=0.2$, $\Delta t=0.1\ \mathrm{s}$, $v_0=(0.5,0)\ \mathrm{m/s}$

$$e_1=(7,5)-(10,5)-(-2,0)=(-1,0)\ \mathrm{m}$$

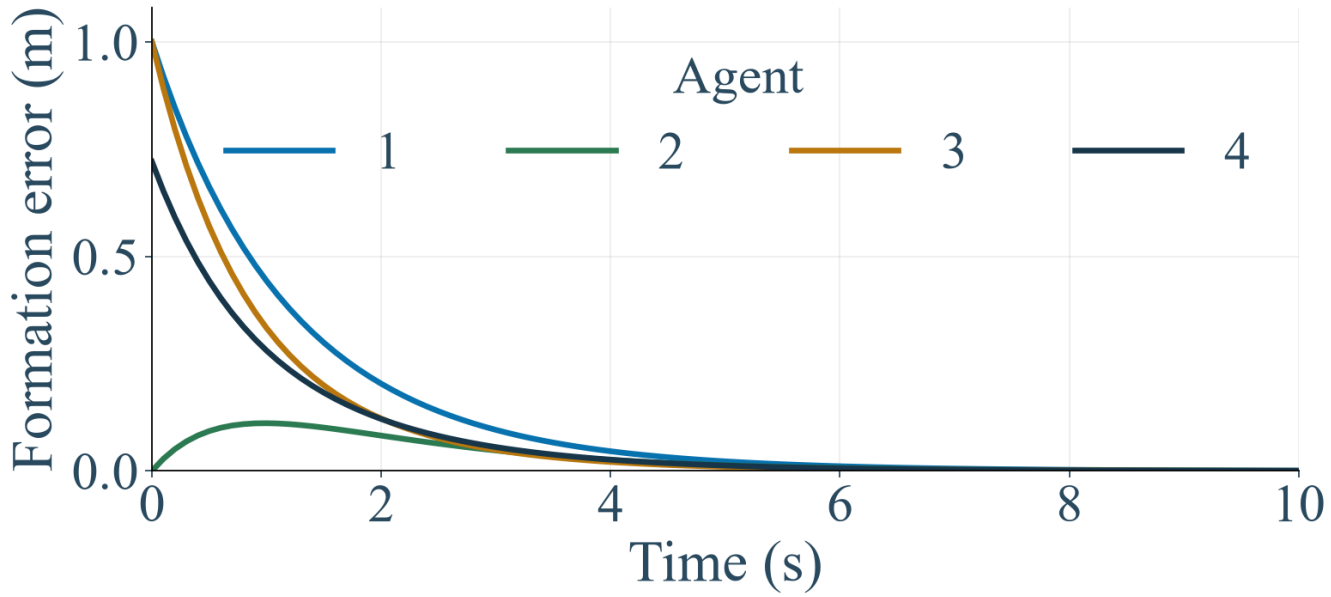
$$u_1=(0.5,0)-0.6(-1,0)-0.2[(-1,0)-(0,0)]=(1.3,0)\ \mathrm{m/s}$$

$$e_1^+=(-1,0)+0.1[(1.3,0)-(0.5,0)]=(-0.92,0)\ \mathrm{m}$$

完整运行初值：$e_1=(-1,0)$, $e_2=(0,0)$, $e_3=(0,1)$, $e_4=(0.6,-0.4)$ m。

10.9.2 编队设计与实验部署：完整数值更新

第7题结果：增益、步长与误差衰减



图：四僚机队形误差的数值计算

链式邻居，领机匀速；曲线为各机误差范数。

$$\dot{e} = -(k_p I + k_c L)e$$

$$0 < \Delta t \lambda_{\max}(k_p I + k_c L) < 2$$

离散稳定条件适用于本页理想模型，不含时延和饱和。

本章目录

习题与课堂讨论

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

10.9.1 核心概念与方法辨析
教材对应：第10.4节第1–5题

10.9.2 编队设计与实验部署
教材对应：第10.4节第6–7题

10.9.3 学习策略与规模扩展
教材对应：第10.4节第8–9题

10.9.4 工程策略与综合复习
教材对应：第10.4节第10题及本章总结

练习与讨论

第8题：十对十任务的高层学习问题

设计“10对10”的强化学习与仿真闭环：状态、动作、奖励和验证怎样组织？

设计项	抽象资源争夺任务中的定义
状态与观测	全局状态含全员位置及资源分布；各机只看局部可得信息
动作	受速度与边界约束的运动目标或离散移动选择
奖励	资源得分与团队任务进展，扣除碰撞、越界和过度耗能
终止与评价	到达时限或任务结束；统计得分、安全事件与完成时间

参考要点

第8题参考：训练闭环与独立评价

仿真生成转移 → 更新策略与价值 → 冻结策略评价

由简到难：小场景与规则基线先检查接口和奖励，再扩大队伍与环境随机性。

训练与评价分开：留出地图、初值和对手策略，比较任务得分及安全事件。

工具链分工：RflySim提供环境与接口，外部学习器采样、更新、保存和加载策略。

练习与讨论

第9题：共享策略怎样处理变化的邻居数

面向大规模集群，设计“参数共享＋GNN”的结构，并说明优势场景。

$$m_i = \frac{1}{|\mathcal{N}_i|}\sum_{j\in\mathcal{N}_i}\phi(o_j, p_j - p_i), \qquad a_i = \pi_\theta(o_i, m_i, c_i)$$

信息含义：邻居消息先编码并聚合，再与本机观测和角色／类型特征共同产生动作。

适用场景：同类个体多、邻居数变化的覆盖或编队；无邻居时置零并标记缺失。

保留差异：共享参数，输入不同；异构平台可使用类型特征或独立动作输出头。

参考要点

第9题参考：局部图减轻了多少交互量

结构	100节点每次更新的关系数	带来的取舍
全互联	$100 \times 99 = 9900$条有向关系	信息直接可达，收发与处理量较大
平均6个邻居	$100 \times 6 = 600$条有向关系	局部负载较小，远端信息需多跳传播

计算规模：消息聚合通常随图边数增长；不能把所有集群算法都概括为指数复杂度。

效果评价：同时观察计算时延、链路负载、图连通性和任务误差。

本章目录

习题与课堂讨论

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

10.9.1 核心概念与方法辨析

教材对应：第10.4节第1–5题

10.9.2 编队设计与实验部署

教材对应：第10.4节第6–7题

10.9.3 学习策略与规模扩展

教材对应：第10.4节第8–9题

10.9.4 工程策略与综合复习

教材对应：第10.4节第10题及本章总结

练习与讨论

第10题：位置融合、时间同步与预测

怎样组合定位融合、时钟同步与运动预测？至少举两个应用场景。

坐标与时间基准 → 带时标的融合状态 → 预测当前状态

$$\hat{p}(t) = p(t_s) + v(t_s)(t - t_s)$$

一步计算：消息龄期0.2 s，速度3 m/s，匀速外推位移为0.6 m。

有效边界：转弯和加速会带来残差；超过时效阈值时采取预设降级策略。

参考要点

第10题参考：两类场景怎样配置

场景	定位与坐标	时间与预测	可检查指标
室内多机编队	动捕＋惯性融合 场地统一坐标	采样时间戳 短时速度外推	刚体识别率 误差与最小间距
室外车机协同	GNSS＋惯性融合 共同地图原点	统一时间基准 预测车体运动	消息年龄 跟随误差与失锁响应

日志使用共同时间轴，才能判断偏差来自定位、通信还是控制。

练习与讨论

综合讨论：断开一条链路以后会怎样

某编队发生断链，怎样区分“还能飞”与“还能协同完成原任务”？

先画连接变化：指出断链影响哪些观测、指令与节点；判断剩余拓扑是否支持原任务。

再看个体与整体：个体可能依靠本机控制继续飞行，队形与任务分工却可能失效。

参考判据：同时记录控制模式、信息年龄、队形误差和任务完成情况。

本章小结

本章小结：信息条件决定协同方法的边界

主线	能够解决的问题	容易混淆的边界
控制架构	决定信息汇集与计算分工	多机部署仍可能集中计算指令
一致性与编队	把相对关系转化为反馈指令	安全队形需要偏移与距离约束
强化学习	从任务回报中改进动作策略	部署策略只能用实际可得观测
工程与平台	处理时空约定与接口约束	任务效果由全闭环共同决定

本章小结

本章小结：用同一任务比较方案

任务与信息条件 → 方法与参数 → 误差与任务表现

比较有共同基准：同一初值、任务、载具约束和评价指标，分别改变架构或算法。

证据覆盖异常：除正常运动外，还看时延、丢包、节点退出与定位质量变化。

协同能力来自方法与条件的匹配，可靠性来自可重复的验证。