

黑龙江省高等教育学会人工智能教育专业委员会

哈尔滨工程大学

北京大学群体机器人研究前沿在线学术会议

生物群体智能启发的无人系统规划与决策

黑龙江省多学科协同

认知人工智能技术与应用重点实验室

莫宏伟 教授 主任

2020年11月7日

目录

- 群体智能
- 群体机器人
- 鸽群启发的群体机器人控制规划策略
- 鸽群启发的群体无人机控制规划策略
- 群体机器人发展展望
- 总结

仅用于北京大学群体机器人研究前沿在线学习，请勿擅自传播

目录

- 群体智能
 - ✓ 介绍
 - ✓ 群的属性
 - ✓ 群体智能：应用
 - ✓ 经典算法
 - ✓ 研究发展
- 群体机器人
- 群体机器人发展
- 总结

仅用于北京大学群体机器人研究前沿在线学术会议学习，请勿擅自传播

群体智能

群的属性

- “群”这个词让人联想到一群小昆虫或鸟类，每个成员扮演一个简单的角色，但作为一个整体，这种个体行为会产生复杂的群体行为。

- 白蚁分工协作地筑巢
- 蚂蚁成群结队寻找食物
- 蜂群繁殖与觅食
- 飞鸟成群
 - 每只鸟都试图找到另一只一起飞翔
 - 飞得稍微高一点，以减少阻力，最终形成一个鸟群。

群属性的核心可理解为 $1+1>2$ 。

群体智能

定量分析：自然界的集群生物为何进行集群决策和行为规划？

因素1：外界刺激（食物，刺激源.....）

因素2：个体间协作（信息交互，个体间避障....）

因素3：个体自身的生物行为与生物学特征（运动行为，繁殖，分裂.....）



用于北京大学群体机器人研究前沿在线学术会议学习，请勿擅自传播

群体智能

- 为什么动物成群结队？

- 更好的觅食
- 种群迁移
- 对掠食者进行防御

} 生存！

群居昆虫已经生存了数亿年！

仅用于北京大学群体机器人研究前沿在线学术会议学习，请勿擅自传播

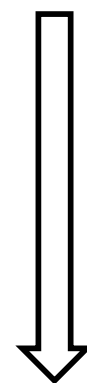
群体智能

群的结构

- 性能简单的个体通过彼此间的交互和与环境的局部交互可以涌现出非常复杂的集群行为，从而产生功能性的全局模式。

□ 集群行为

- 细菌集群迁移
- 昆虫集群觅食
- 鸟类集群飞行/导航
- 人类集群运动
- 人与计算机网络交互



低级生物

高级生物

群体智能



集群行为模式

● 分布式系统

没有为智能体做出统一决策的中央权威机构（中央处理器）。如昆虫集群觅食过程中路径选择和食物判断都是自主的和平行的。

- 智能体为实现其个体目标而做出的局部自主决策可能与其他智能体的目标相冲突。
- 智能体之间进行直接或间接交互，共享信息或向其他智能体提供服务。

● 自组织系统

在生物系统中，自组织是一个过程，在这个过程中，一个系统的全局层面的模式仅仅出现在系统的低层面个体之间的众多交互作用中。此外，系统个体之间交互一般依赖于局部信息，而不是全局的。

群体智能

集群行为分类



- 协调（Coordination）

- 个体之间的相互作用产生了个体朝着特定目标的同步和定向运动实现个体的运动规划。
- 在昆虫群落的大部分建筑活动中，协调起着重要作用。
- 典型：某些群居昆虫的筑巢行为。

群体智能



- 协作（Cooperation）
 - 当个体完成单个体无法完成的任务时发生。
 - 个体必须结合自身的努力，以成功地解决超出它们个体能力的问题。
 - 典型：多个个体协作把食物带回巢穴。
- 自然界群居生物的协作能力
 - 按复杂程度递增：
 - 细菌：通过明确的化学信号实现协作
 - 蚁群，蜜蜂，黄蜂等：通过动态改变环境进行通信与协作，如信息素
 - 鸽群，狼群等：可以感知一定范围内的其他个体（邻居）并进行交流。通过感知位姿、位置和直接通信的信息进行运动决策。
 - 灵长类
 - 人类

群体智能



● 决策（Decision）

- 决策是指当一个群体面临多个机会时所产生的机制。
- 该机制导致了对至少一种机会的集体选择。
 - 蚂蚁已经发现了几种不同质量或丰富程度的食物或几种通向食物的路径，它们通常只选择其中一种。
 - 决策是由导致每个机会选择相关的化学痕迹之间的竞争产生的。

群体智能

典型自然实例: 蚁群对两种食物的探索

- 一个远离巢穴的丰富食物和一个靠近巢穴的劣质食物，一些蚂蚁去了劣质食物，因为它离巢穴很近，但是另一些蚂蚁游荡，然后他们发现了丰富的食物。
- 它们沿着从巢穴到丰富食物的路径释放信息素，直到通往丰富食物的路径的信息素浓度比原来的路径更强。
- 最后，大多数蚂蚁会转移到更富裕的地方。因此，某些蚂蚁行为的随机性使得平行探索多种食物成为可能。

群体智能

- 合作（Collaboration）

- 合作意味着不同的活动由一组专门的个体同时执行。
 - 在巢中照料幼雏或巢外寻找猎物。

典型的自然实例：

蜜蜂群体内的个体一般分为3种蜜蜂：蜂王、工蜂和雄蜂。蜂王主要负责产卵。工蜂负责所有筑巢及贮存食物的工作。雄蜂的工作只有一个，就是负责与蜂王交尾。3种个体分工明确且相互合作延续种群。

群体智能

经典算法

● 蚁群优化算法（ACO）

- 一群智能体
- 随机性
- 基于信息素模型
 - 真实的蚂蚁用信息素来标记路径。蚂蚁沿着这些路径走(也就是跟踪行为)。
- 通过在图上移动逐步构建解决方案
- 问题的约束是建立在蚂蚁的启发式中
- 优化问题必须写成带权图的寻路问题
- 人工蚂蚁通过在图上移动来寻找“好的”解决方案
- 蚂蚁还可以建立不可行的解决方案——这可能有助于解决一些优化问题

群体智能

- 蚁群优化算法（ACO）

- 启发式是用三个步骤构建的

- 构建蚂蚁解决方案

- ✓ 管理蚁群移动到图的邻近节点
 - ✓ 移动由基于信息素轨迹和启发式信息的随机局部决策策略决定
 - ✓ 评估当前的局部决策策略，以确定蚂蚁在给定节点应存放多少信息素

- 更新信息素

- ✓ 修改信息素路径的过程
 - ✓ 增加信息素会增加使用路径的概率(即构建解决方案)
 - ✓ 减少信息素会降低路径被使用的概率(即遗忘)

- 守护进程动作

- ✓ 用于实现需要多个蚂蚁才能完成的“复杂”操作
 - ✓ 例子：执行局部搜索，收集全局信息等

群体智能

- 粒子群优化算法 (PSO)

- 基于PSO的群体搜索

$$v_{n+1} = wv_n + c_1 * rand * (pBest_n - p_n) + c_2 * rand * (gBest_n - p_n)$$

$$p_{n+1} = p_n + v_{n+1}$$

$$f = (x_i - x_{target})^2 + (y_i - y_{target})^2$$

其中， v 、 p 和 f 分别为机器人速度、位置和适应度函数值。

避障设计：

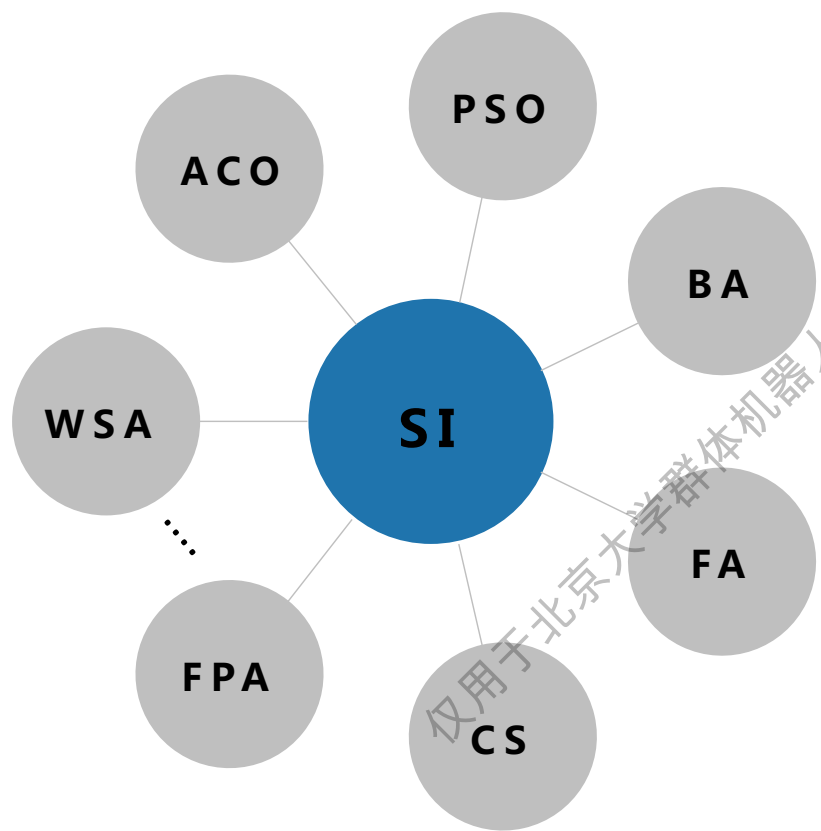
$$F_o = (x - r_{ox})^2 + (y - r_{oy})^2$$

然后定义一个Boolean函数

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } F_{o_{ij}} \leq \varepsilon \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases}$$

群体智能

当前主流发展的群体智能算法



表一：群体智能算法及其相关特征

算法	随机性	选择	进化机制
GA	均匀	精英	适者生存
PSO	均匀	g^* , x^*	蜂拥向 g^*
BA	均匀	x^*	蜂拥向 x^*
FA	高斯	最亮	吸引
CS	Levy飞行	最佳	类似/精英
ACO	概率	信息素	信息素变化
FPA	均匀&levy飞行	g^*	恒常性和相似性

群体智能-群体任务规划

● 基于DAM-BBOPSO算法的群体系统任务规划

结合分布式拍卖机制(Distributed Auction Mechanism, DAM)、生物地理优化算法(Biogeography-Based Optimization, BBO)与粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)相结合的DAM-BBOPSO方法展开在多约束多攻击目标任务规划问题上的研究。

DAM-BBOPSO算法共包括9个步骤，具体如下：

Step1初始化：设置迭代代数计数器 $T=0$ ，设置最大迭代次数 T_{max} 。

Step2招标：Multi-Robot集群控制终端将探测并获取到任务信息，并通过网络将信息发送给各个子集群（基地）。

Step3投标：空闲子集群当收到招标信息之后，首先计算自己是否有可行路径和能力执行此任务，子集群将根据自己的约束条件、资源以及攻击能力计算相应的代价函数值，并以代价函数值为参考返回一个投标值。

群体智能-群体任务规划

Step4中标：当收到所有子集群投标值或在指定的投标截止时间到达后，招标者对投标进行处理，随机生成 SN 个个体作为初始群体 $P(0)$ ，向提出此投标的移动机器人节点发出中标消息，并向其余投标失败的节点发出落标消息。

Step5执行：控制终端根据中标的结果，得到一个目前为止的全局最优解作为初始 $gbest$ 进行优化。

Step6个体评价：计算群体 $P(t)$ 中各个个体的适应度和种群数(越优秀的解对应的种群数越大)，计算每个个体迁入率 λ 和迁出率 μ 越优秀的个体对应的迁入率 λ 越低，而迁出率越高.并且将种群中每个个体存入到 $pbest(t)$ ，将其中最优秀的个体存入到 $gbest(t)$ 中。

Step7选择操作：当选择算子 $Rand > \lambda$ 时，进行迁移操作，否则进行粒子更新操作。在粒子更新操作中所涉及的粒子群算法均采用线性动态 ω 值调整，即

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{T_{\max}} \times T$$

群体智能-群体任务规划

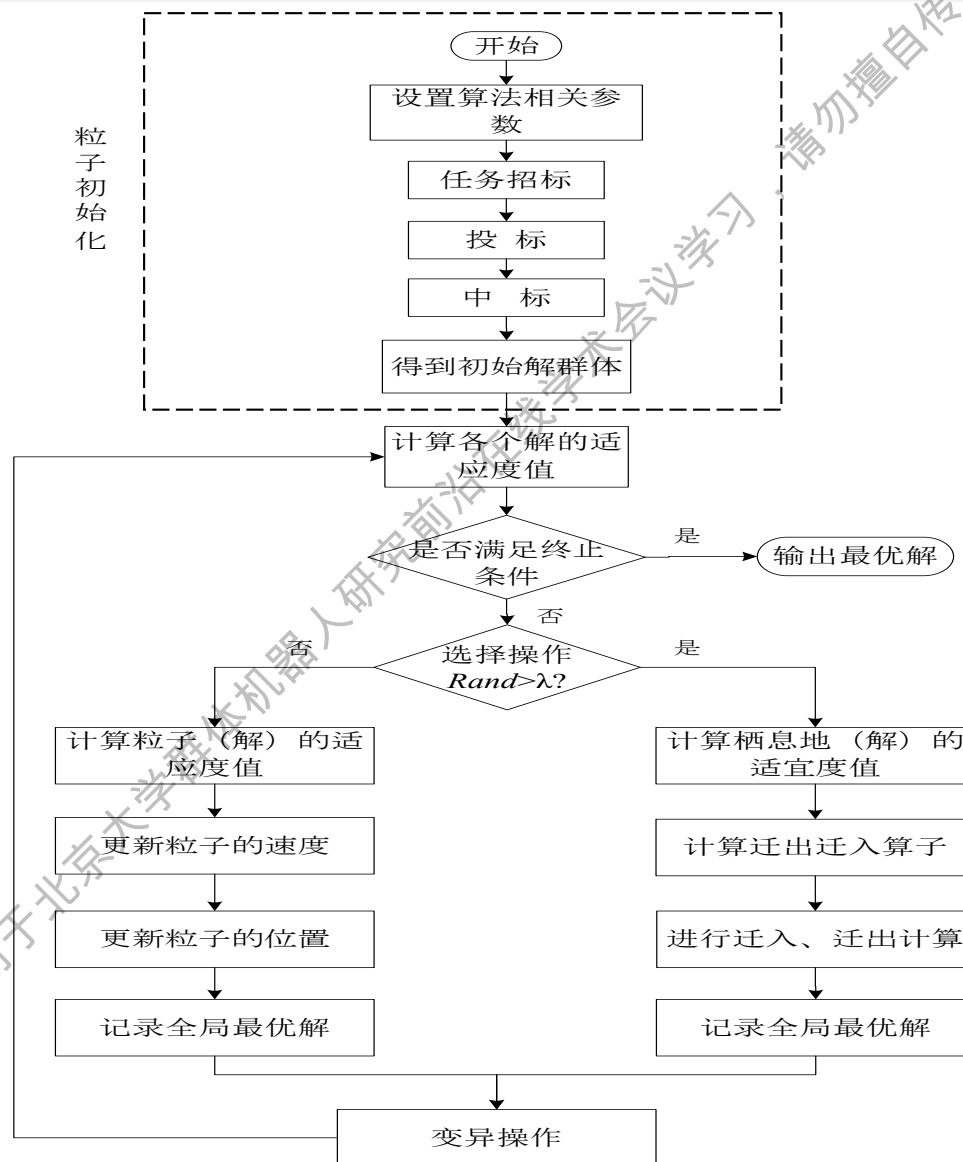
Step8迁出迁入算子运算：根据每个个体迁入率 λ 和迁出率 μ 对各个个体进行迁入迁出操作， λ 越大的个体越容易接受别的个体的信息（迁入）， μ 越大的个体越容易分享自己的信息（迁出）。

Step9变异算子：根据由种群数求出的变异概率对较差的一半个体进行变异，将获得的新解替换掉旧的解。

Step10结束：判断是否得到最优解或者迭代次数是否达到算法最大迭代次数，如果没有满足结束条件，更新粒子返回Step5。

DAM-BBOPSO算法流程图如图1所示：

群体智能-群体任务规划



群体智能-群体任务规划

□ 群体系统任务规划仿真

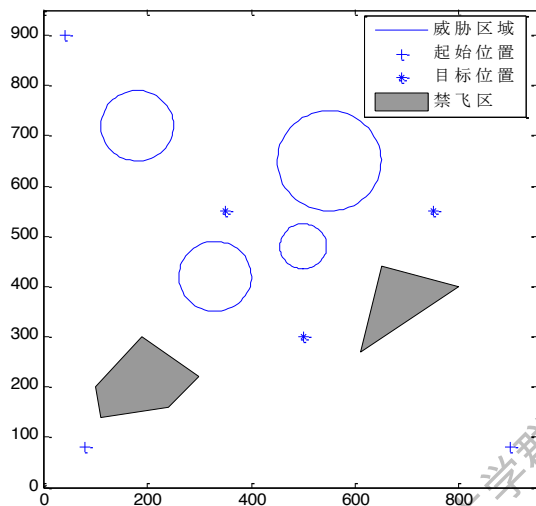


图2. 试验场景

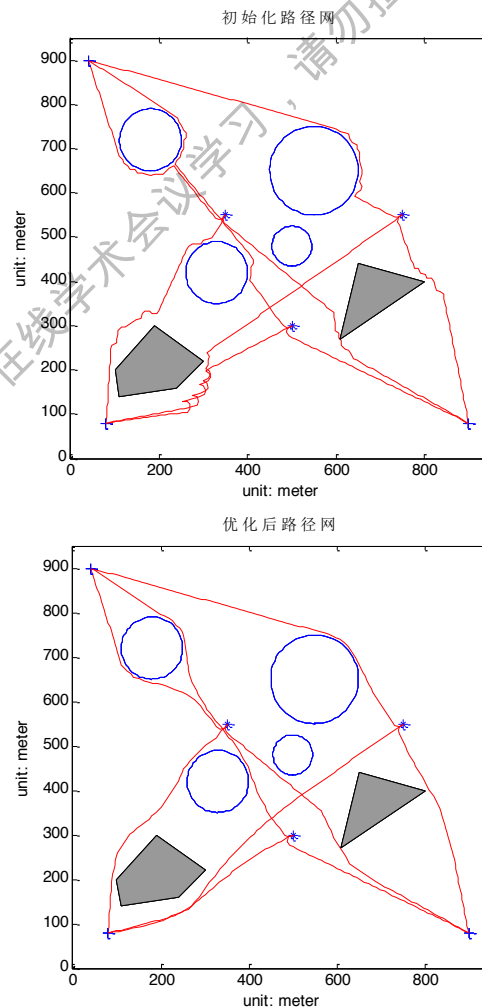


图3. 路径网优化结果

可以发现经过优化过程的路径网在路径长度、平滑度等方面明显优于初始路径网，使路径网更加贴合群体运动的实际需求。

群体智能-群体任务规划

图4为路径网代价值随迭代次数变化情况，图5为路径网适应度值随迭代次数变化情况，可以看出，算法在前100代得到的路径网的代价值和适应度值能够满足问题的需要。

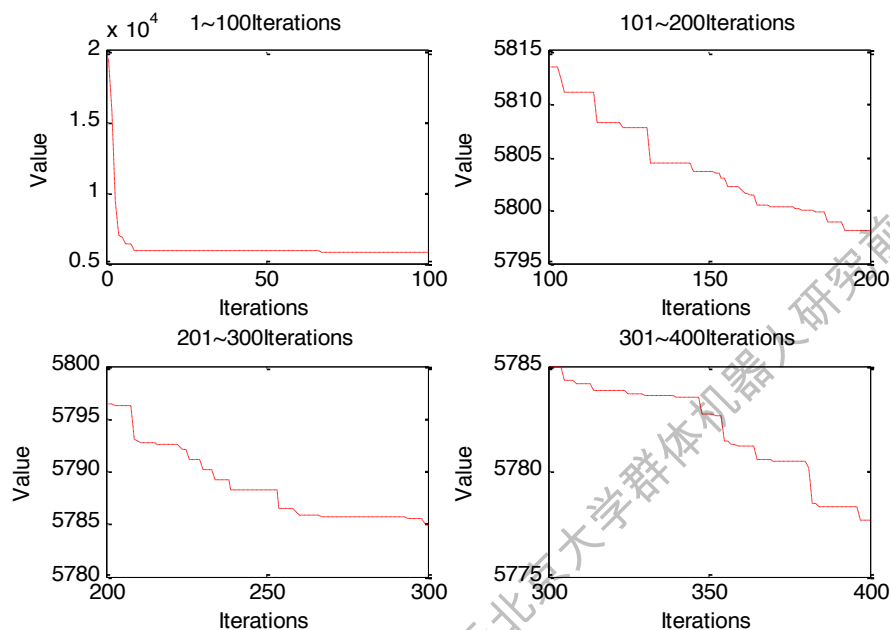


图4. 路径网代价值随迭代次数变化情况

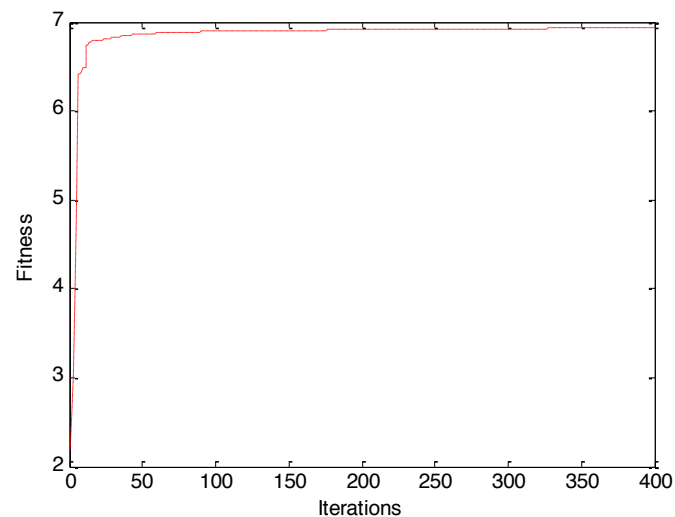


图5. 路径网适应度值随迭代次数变化情况

群体智能-群体任务规划

图6~7给出路径长度与路径平滑度的变化情况。路径网的最大转角小于机器人最大转角约束，表明优化得到的路径网满足机器人的运动约束。

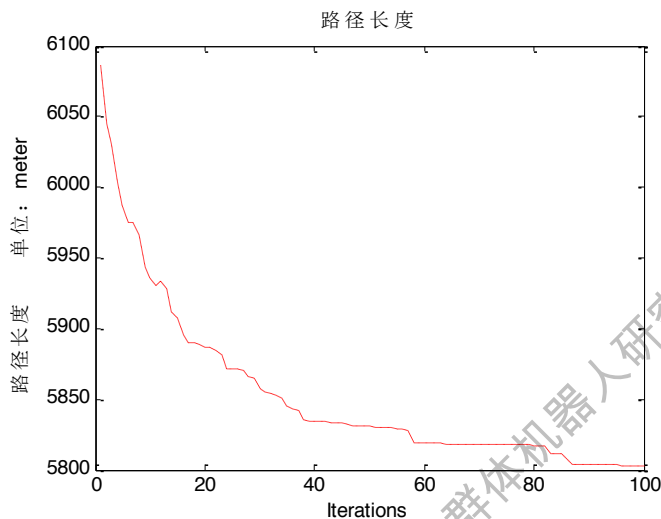


图6. 路径长度值随迭代次数变化情况

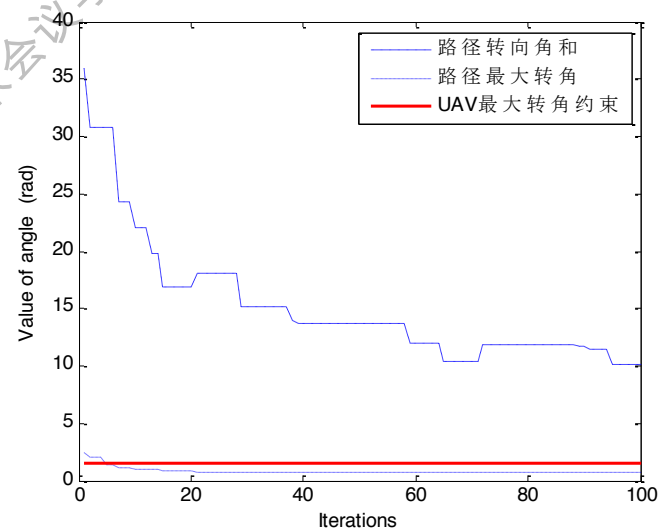


图7路径平滑度随迭代次数变化情况

群体智能

群体智能算法的挑战性问题：

- 参数整定和控制

参数整定和控制都可以看作是一个高水平的优化；这就是优化算法的优化。因此，迫切需要找到一种有效的方法来自动和自适应地调优参数。

- 平衡探索与开发

一种有效的算法应该能够平衡搜索空间的探索和局部信息的开发。探索可以增加多样性，从而增加找到全局最优解的概率，而开发利用局部信息来增强搜索过程。

- 大规模问题和算法可扩展性

与实际应用相比，测试的维度相对较低。然而，目前还不清楚这些算法是否可以直接应用于大规模问题。真正的可伸缩性还有待测试。

群体智能

- 数学框架

关于收敛性、收敛速度、稳定性、遍历性、可重复性和可扩展性，目前还没有一个统一的框架可以提供一个算法的更全面的描述。

在收敛速度控制问题方面，近年来在马尔可夫链理论、动态系统、随机游动和稳定性分析等算法分析方面取得了一些进展，它们开始为算法的内在机理提供一些见解。但是存在人工智能领域普遍的问题，尤其是内在机制的可解释性。

仅用于北京大学群体智能学术研讨，请勿擅自传播

群体智能

应对问题和挑战：

- 群体智能从智能模拟角度是对生物行为的模拟，行为智能与生物智能生成机制还有很大差距。

- 理论框架

理论分析可以对算法有更深入的了解，从而使我们能够确定需要解决的问题的最佳类型，并更有效地调整或控制参数。

- 自调整和自适应算法

理想情况下，一个真正有用的算法应该能够自调优和自适应，以适应不同类型的问题。对于给定的一组算法，在没有任何先验知识的情况下，如何使它们适应新的问题？

如何发展类似自动机器学习的群体智能算法？

目录

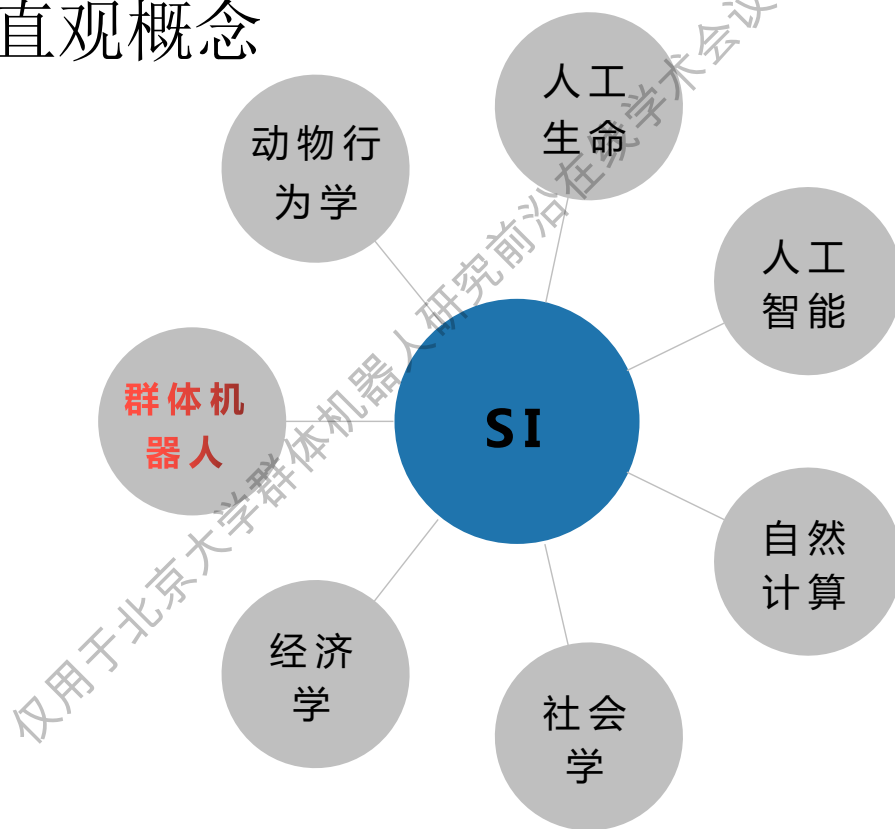
- 群体智能
- 群体机器人
 - ✓ 什么是群体机器人
 - ✓ 群体机器人模型
 - ✓ 群体机器人平台
 - ✓ 群体机器人的群行为
 - ✓ 群体机器人仿生算法
- 群体机器人发展
- 总结

仅用于北京大学群体机器人研究前沿在线学术会议学习，请勿擅自传播

群体智能

● 研究发展

在某种程度上，科学和技术的许多既定领域都涉及到群体智能(SI)的直观概念



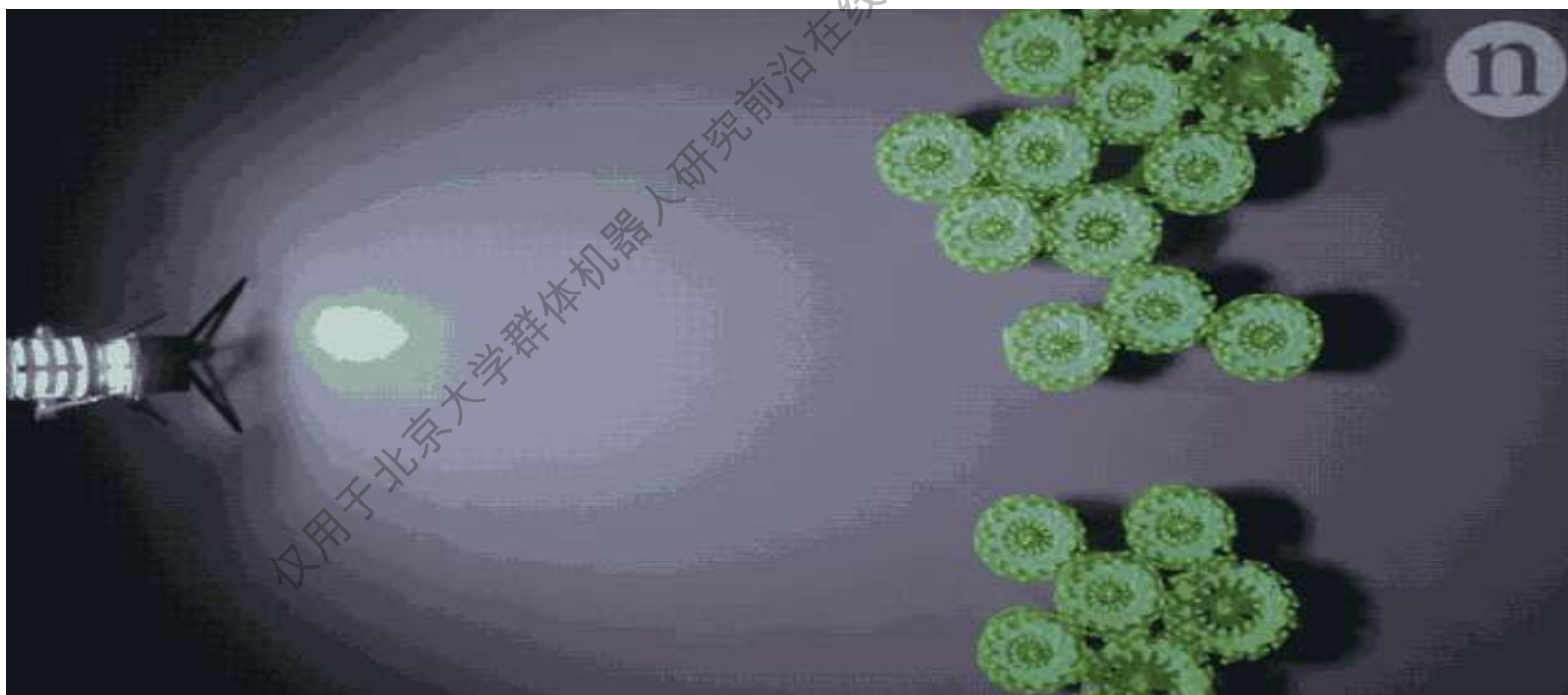
群体机器人

- 智能群体是基于个体的群体成员的聚集，这些群体成员也表现出独立的智能。
- 智能群体的成员可以是异质的，也可以是同质的。
 - 由于它们所处的环境不同，当它们学习不同的任务和发展不同的目标时，即使它们一开始是同质的，它们也可能成为“异质”群体。
 - 群体中的个体被称为智能体（Agent）。针对不同应用Agent可对应于不同的物理实体。
- 群体机器人（Swarm Robotics）
 - 群体机器人是指应用群智能技术对多个机器人行为进行设计与分析，其中agent是物理机器人设备，可以根据各种输入信息作出智能决策并影响其环境变化。
 - 机器人可以通过行走，轮子移动，水下潜行或飞行进行移动。针对不同的作业环境，设计具有特殊运动能力的群体机器人系统。

什么是群体机器人

群体机器人=多机器人+群体智能

由大量相对简单自主的智能体构成的系统，该系统通过智能体之间、智能体与环境之间的局部交互实现期望的群体涌现行为。



群体机器人

- 群体机器人的作用
 - 解决单机器人无法胜任或难以解决的复杂任务。
 - 群体机器人可以提高实施任务主体的性能。
 - 冗余性：可以更稳定解决地完成地完成任务。
 - 经济型：群体机器人内部个体会比单一复杂机器人的结构简单，造价成本低。
- 群体机器人控制
 - 远程控制
 - 中心控制
 - 分布式自主控制

群体机器人

● 群体机器人系统特性

- 可拓展性：系统规模可伸缩性，要求系统在个体数量发生变化时能够具有可控性。
- 自组织性：系统可以随着复杂度的改变自发调整组织结构，无需外部干预。
- 鲁棒性和冗余性：群内个体的故障不会影响整个系统的稳定性。
- 局部感知和通信能力：保证系统是分布式的。
 - 针对一些具体问题和应用，全局通信作为一种辅助的控制手段是可以接受的。

群体机器人

● 群体机器人系统特性

- 灵活性：能针对不同任务可共用一套群体机器人系统，产生模块化的解决方案。
- 自治性：自主行为能力。
- 同构性：个体结构基本相同，群体中角色分工相对较少。
 - 群体机器人允许出现在执行任务的某一时刻，几种结构相同的机器人同时侧重展现出不同行为规划和决策能力。

如：一组结构相同的机器人，在执行集群运动（导航）过程中，遇到移动障碍物或敌方机器人，某些机器人会临时充当**leader**向群内其他个体传播相关信息。

群体机器人模型

- 群体机器人个体的一般能力
 - 有限感知能力
 - 局部通信能力
 - 局部规划能力
 - 任务分配和分解能力
 - 简单的学习能力
 - 控制与决策能力
 - 短暂的记忆能力（必要时）
 - 等等

仅用于北京航空航天大学机器人研究前沿在线学术会议学习，请勿擅自传播

群体机器人模型

- 群体机器人模型构建
 - 群体机器人建模方法
 - 群体机器人通信方法
 - 群体机器人协同方式

仅用于北京大学群体机器人研究前沿在线学术会议学习，请勿擅自传播

群体机器人模型

- 群体机器人建模方法

- 模型是实际系统的数学抽象表达，通过模型研究有助于真实了解系统内部的运作机制与规律。
- 群体机器人系统特征需在其模型中得以体现。
- 群体机器人建模的重要性还体现在对系统规模伸缩性的研究上。

仅用于北京大学群体机器人研究前沿在线课程学习，请勿擅自传播

群体机器人模型

- 群体机器人建模方法

- 基于传感器-执行器的建模法

- 对传感器、执行器、地图、障碍物与目标、机器人与环境间的交互，机器人间的交互分别进行建模。

- 微观建模法

- 将机器人模拟为有限状态机。

- 宏观建模法

- 将系统行为抽象为差分方程。

群体机器人模型

- 群体机器人建模方法

- 拓展粒子群算法建模法

- 将粒子群算法模型作为机器人的行为控制模型。

- 宏观模型能够很快得到粗略的全局行为，微观模型得到的全局行为更为实际，但消耗时间长。

- 模型拓展，在构建模型中往往引入概率模型以模拟环境干扰。

群体机器人模型

- 群体机器人模型构建
 - 群体机器人建模方法
 - 群体机器人通信方法
 - 群体机器人协同方式

仅用于北京大学群体机器人研究前沿在线学术会议学习，请勿擅自传播

群体机器人模型

- 群体机器人通信方法

- 通信是群体机器人系统动态运行与执行任务的关键

- 按照个体的交互方式可以分为三类:

- 通过感知环境信息的间接交互

- 通过个体感知的交互

- 通过发送和接受明确信息的直接交互

仅用于北京人民大学群体机器人研究所在线学术学习，请勿擅自传播

群体机器人模型

- 通过感知环境信息的间接交互
 - 机器人通过向环境中释放类似“信息素”的物质来决策未来时刻的机器人运动行为，环境主要作为群体机器人系统中通信媒介。
 - 机器人直接没有明确的通信信道，没有直接交互。
 - 随着时间累积，机器人动态改变环境存储的信息量，进而促使任务完成。

群体机器人模型

- 通过个体感知的交互

- 当一机器人位于另一机器人传感器范围内时，可以被认为是彼此的邻居并可感知到对方的存在，得到其位置和位姿信息。
- 机器人仅能感知自身传感器范围内的机器人，机器人之间无明确的直接通信。
- 机器人具有障碍物，机器人和目标的基本识别与区分能力。

群体机器人模型

- 通过发送和接受明确信息的直接交互
 - 广播通信。
 - 网络通信也属于直接通信，但实时性差。
 - 当群体机器人个体数量基数大或随时间增加，直接通信相关计算会变得复杂且时间复杂度成指数增长，所以直接通信和间接通信相结合是一种群体机器人通信的解决方式。

群体机器人模型

- 群体机器人模型构建
 - 群体机器人建模方法
 - 群体机器人通信方法
 - 群体机器人协同方式

仅用于北京大学群体机器人研究前沿在线学术会议学习，请勿擅自传播

群体机器人模型

- 群体机器人协同方式

- 群体机器人内部个体之间的协作是系统的高级控制，是群体行为产生的核心。
- 群体机器人协同要求群内个体具有自治性、通信能力和协作性。
- 群体机器人行为是内部个体行为的集成与涌现。

仅用于北京大学群体机器人研究前沿在线学术研讨学习，请勿擅自传播

群体机器人模型

- 群体机器人体系框架

- 提供群体机器人的控制框架，决定系统中个体间的控制关系和通信方式。
- 体系结构是群体机器人一切行为的基础，决定机器人的协作能力与耦合关系。
- 根据具体实施的任务类型与个体能力等确定群内个体数量与作用关系。

群体机器人模型

- 群体机器人中个体定位

因为群体机器人行为是多个个体集体行为涌现，群体内机器人在进行局部感知与交互的同时，需要邻居的精准定位。

- 自组织

自组织由底层单元通过彼此交互发起，全局模式呈现。交互规则互依赖局部信息，不依赖于全局信息。

群体机器人模型

- 群体机器人系统中个体的物理连接

主要研究群体机器人需要改变整体物理结构才能完成任务，一般这项任务是单一机器人无法完成的，如攀爬和越障任务，机器人往往通过硬性连接耦合在一起共同完成任务。

仅用于北京大学群体机器人研究前沿在... 请勿擅自传播

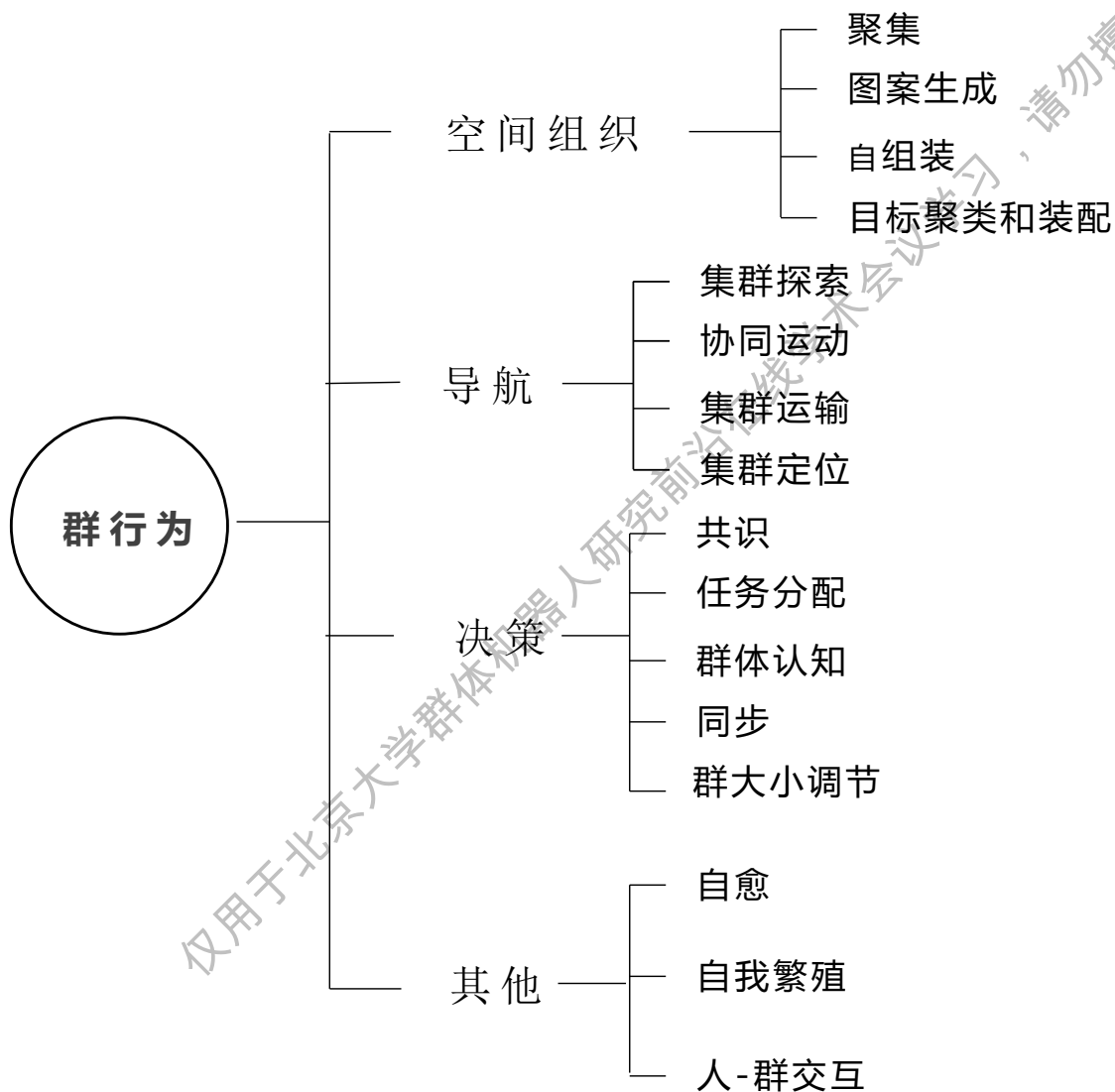
群体机器人平台

机器人平台	单价(美元/欧元)	规格(cm)	传感器	电池寿命	特征
Colias	25欧元	4	IR、碰撞、距离	4	远程红外组件
AMiR	65欧元	6.5	距离	2	传感器灵敏度高
Alice	30美元	2.2	距离、光	2	运动能力强, 调节电源
Kilobit	14美元	3.3	距离、光	3-24	全方位运动
R-one	220美元	10	光、IR、陀螺, 碰撞和wifi模块	6	自充电和对接机制
s-bot	450美元	15	相机、IR、力学、LED、光、声波	1	对接机制、自组装、全向相机

群体机器人平台

机器人平台	单价(美元/欧元)	规格(cm)	传感器	电池寿命	特征
Autobot	97美元	12	IR、无线通信	2	经济且易于复制
Pi swarm	165欧元	0.95	IR、陀螺仪、温度、光、发光二极管	2	低成本平台
Robomote	150欧元	75	IR、麦克风、相机、LED	3.5	主动跟踪
e-puck	1200美元	3.3	距离、光	2	模拟现有的webots和Enki
Sambot		80	Zigbee 通信		自组装能力
Droplet		0.1	距离、颜色	2	对接、自充电、全景相机、模块结构

群体机器人的群行为



群体机器人的群行为

- 空间组织
 - 聚集：环境中的机器人自主向某一区域移动开始聚集。
 - 图案生成：将机器人排列成特定形状。
 - 自组装：连接机器人以建立目标结构。
 - 目标聚类与装配：让机器人成群的操控空间分布的对象。

群体机器人的群行为

- 导航

- 集群探索：群体机器人协同导航以探索环境。它可用于获取环境概览、搜索对象、监控环境或建立通信网络等。
- 协同运动：成群的移动机器人以特定形状移动，如一条直线，也可以以任意的紧凑形状进行移动。
- 集群运输：一群机器人搬运大件物体（相较单一机器人）。
- 集群定位：通过在整个群体中建立局部坐标系，使得群体中的机器人能够找到自己相对于其他机器人的位置和方向。

群体机器人的群行为

- 决策

- 共识：使得群中的个体能够从多个备选方案中达成一致。
- 任务分配：动态地将任务分配给群体中的各个机器人。它的目标是最大化整个群系统的性能。如果机器人具有异构能力，则可以对任务进行相应的分配，进一步提高系统的性能。
- 集群错误检测：在群体机器人系统中进行集体故障检测，可以确定单个机器人的缺陷。它可以确定机器人偏离了期望的行为，例如，由于硬件故障。

群体机器人的群行为

● 决策

- 集群感知：将机器人局部感知到的数据组合成一幅大画面。它允许群体以一种知情的方式做出集体决策，例如，对物体进行可靠的分类，分配适当比例的机器人执行特定任务，或者为一个全局问题确定最优解决方案。
- 同步：对群体中机器人振荡器的频率和相位进行校准。因此，机器人对时间有一个共同的理解，这使得它们可以同步地执行动作。
- 群大小调节：允许群体中的机器人形成所需大小的群体。如果群的规模超过了预期规模，它就会分裂成多个群体。

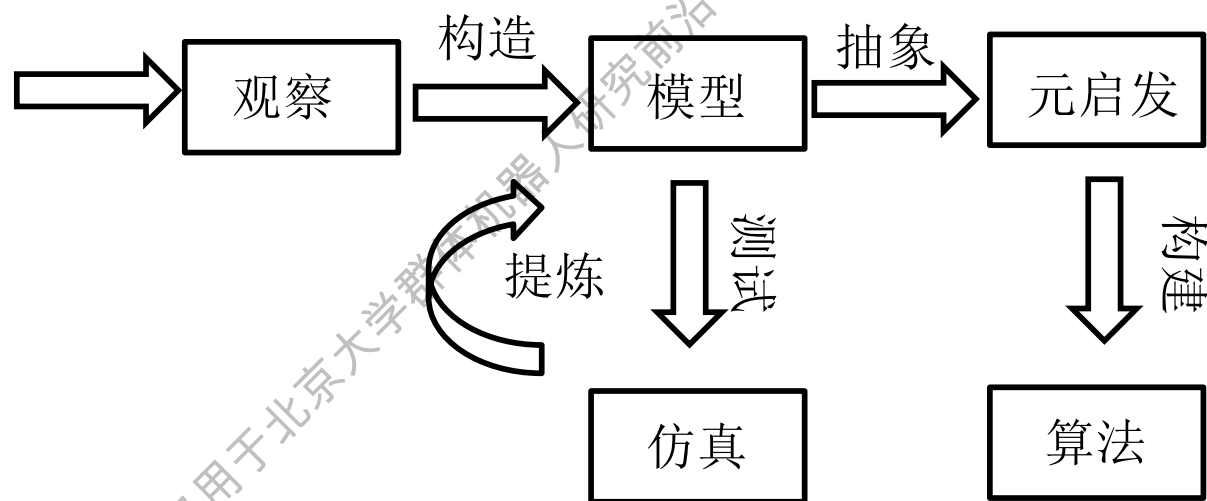
群体机器人的群行为

- 其他

- 自愈：使群体机器人系统能够从单个机器人缺陷引起的故障中恢复过来。这样做的目的是尽量减少机器人故障对集群其他部分的影响，以提高机器人的可靠性、鲁棒性和性能。
- 自我繁殖：允许一群机器人创建新的机器人或复制从许多个体创建的模式。其目标是通过消除人类工程师制造新机器人的需求，提高群体机器人的自主性。
- 人群交互：允许人类控制群体中的个体或接收来自它们的信息。互动可以发生在远程，例如，通过计算机终端或近距离共享环境，例如，通过视觉或声学线索。

群体机器人生物启发式算法

- 群体机器人通过对群居生物的集群行为的模拟与启发来完成特定的任务。生物界的群居生物的集群行为是群体机器人生物启发算法的主要灵感源泉。



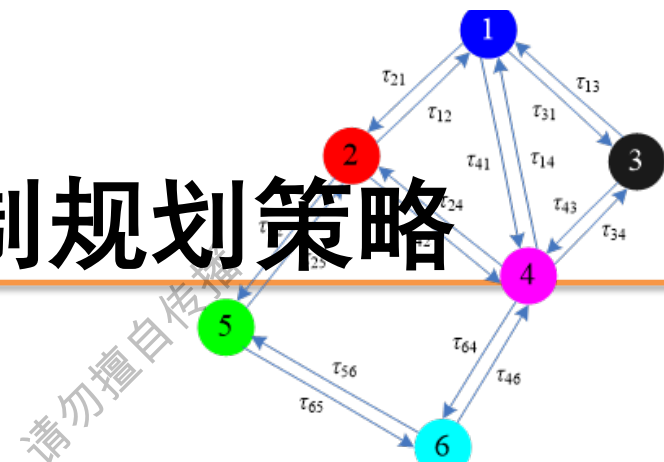
鸽群启发的群体机器人控制规划策略

鸽群在飞行中存在民主行为，群体中所有鸽子都可以参与决策，形成群体总决策，以此来协调群体行为，但鸽群中的每只鸽子的决策权重并不是绝对平等的，决策权重较大的鸽子通常在鸽群前端飞行，决策权较小的往往在群体的后部飞行，扮演跟随者的角色，但依然拥有决策权，同样可以影响群体的最终决策。



基于鸽群决策思想我们可以在四旋翼飞行器群体协同飞行中让每架四旋翼飞行器都能对群体行为做出某种形式的贡献，但所做的贡献并不是完全相等的，根据自身在群体中的权重决定其在群体中的贡献大小，借鉴鸽子短距离规划航线的思想，可在飞行器群体协同航迹规划设计中先设定初始航迹路线，并在实际飞行中对航迹规划结果进行细化和修正。

鸽群启发的群体机器人控制规划策略



□ 鸽群协同控制模型

模拟鸽群的构架机制，设计的机器人系统根据职责与功能的不同，在集群控制决策上采用鸽群算法，鸽群结构如图所示。定义多机器人系统为 $V=(v_1, \dots, v_n)$ ， V 代表群体系统集合， v_i 代表个体 i ； $N=(\eta_1, \dots, \eta_n)$ 代表机器人的等级系数，其中 $\eta_1 > \eta_2 > \dots > \eta_n$ ； v_i 在 t 时刻的状态为 $x_i(t)$ ；个体 i 与个体 j 之间的距离可以定义 $d_{ij}(t) = \|x_i(t) - x_j(t)\|$ ，式中 $\|\cdot\|$ 定义为二维空间的欧式距离。

在 $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻个体 j 对个体 i 的影响权重，当个体 i 与能够感知到个体 j 的存在则 $0 < \tau_{ij}(t) \leq 1$ ，否则 $\tau_{ij}(t) = 0$ 。

$$\tau_{ij}(t) = \frac{e^{-d_{ij}(t)/\beta_j}}{\sum_{k \in N_i} e^{-d_{ik}(t)/\beta_k}} \quad (1)$$

N_i 为个体 i 能够感知到的邻居个体的集合， β_j 为个体 j 对群体决策的权重， $d_{ij}(t)$ 为个体 i 与个体 j 的距离。

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

● 基于鸽群运动模型的控制策略

对于具有 n 个个体的机器人群体，每个个体的运动控制可以根据根据下式表示：

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_i(t) &= \mathbf{v}_i(t) \\ \dot{\mathbf{v}}_i(t) &= \boldsymbol{\mu}_i(t)\end{aligned} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中 $\dot{\mathbf{x}}_i \in R^N$ 表示个体 i 的位置信息, $\mathbf{v}_i \in R^N$ 表示个体 i 的速度信息, $\boldsymbol{\mu}_i \in R^N$ 表示个体 i 的控制变量。

群体系统协同控制包括两方面内容：系统协同一致性与群体避障。

(1) 群体系统协同一致性根据上一节的描述，要求个体之间具有稳定的矢量关系和相同的速度矢量，在静态系统中个体之间通过协同控制形成稳定的队形；在动态系统中个体之间保持稳定队形的同时并以相同的速度状态实现群体移动。考虑到以上因素的要求，群体系统控制需要包括速度协同、位置协同、速度期望三方面因素。

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

(2) 群体避障控制，机器人个体在形成或保持协同一致性的过程中需要躲避环境中的障碍物，实现群体系统的安全运行。假设有一机器人个体系统已经达到协同一致性，并保持相同的速度矢量运动。在接近障碍物区域范围时，群体系统一致性将会被打破，个体通过与障碍物的距离矢量关系达到对群体内个体的局部控制，使群体具有避障能力。

控制策略：

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_i(t) &= \mathbf{v}_i(t) \\ \mathbf{v}_i(t) &= -\omega_0 (\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_e(t)) + \omega_1 \sum_{j=1}^n a_{ij} [(\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t)) - (\mathbf{h}_j - \mathbf{h}_i)] + \\ &\quad \omega_2 \sum_{j=1}^n a_{ij} (\mathbf{v}_j(t) - \mathbf{v}_i(t)) + \omega_3 \boldsymbol{\mu}_{ri}(\mathbf{x}_i(t))\end{aligned}\quad (3)$$

式中， $\mathbf{v}_e(t)$ 为机器人群体的期望速度， $\mathbf{v}_i(t)$ 为个体*i*的当前速度， $\mathbf{v}_j(t)$ 为个体*j*的当前速度， $\mathbf{x}_i(t)$ 为个体*i*的当前位置， $\mathbf{x}_j(t)$ 为个体*j*的当前位置， \mathbf{h}_i 、 \mathbf{h}_j 分别为个体*i*与*j*在编队中的相对位置信息， a_{ij} 为个体*i*与个体*j*的通信状态，当个体*i*与个体*j*之间有通信网络链接则 $a_{ij} = \tau_{ij}$ 。否则 $a_{ij} = 0$ ， $\omega_0, \omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为大于0的控制参数， $\boldsymbol{\mu}_{ri}(\mathbf{x}_i(t))$ 为个体*i*的排斥加速度。在这一群体协同控制策略中共包括四方面内容：

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

- (1) $\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_e(t)$ 为期望速度控制模块，代表个体速度与群体一致期望速度的耦合，此项能够使个体速度趋近于群体一致期望速度；
- (2) $(\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t)) - (\mathbf{h}_j - \mathbf{h}_i)$ 为队形控制模块，代表个体与其邻居个体之间的相对位置耦合，此项能够促进机器人群体组成期望队形；
- (3) $\mathbf{v}_j(t) - \mathbf{v}_i(t)$ 为个体相互速度控制模块，代表个体与其邻居个体之间的速度耦合，此项能够使机器人群体中的各个个体趋向一致；
- (4) $\mu_{ri}(\mathbf{x}_i(t))$ 为群体避障控制模块，代表个体与障碍物之间的排斥作用，此项能够使机器人群体实现群体协同避障功能。

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

● 仿真实验

□ 实验1 群体系统协同控制

在模拟场景中对机器人群体协同控制策略进行仿真实验。假设机器人群体由5个个体组成，其工作环境中不存在障碍物，并且机器人群体中通信网络拓扑结构不随时间变化而变化，群体通信网络拓扑结构图 G 的标准邻接矩阵 A 定义如下：

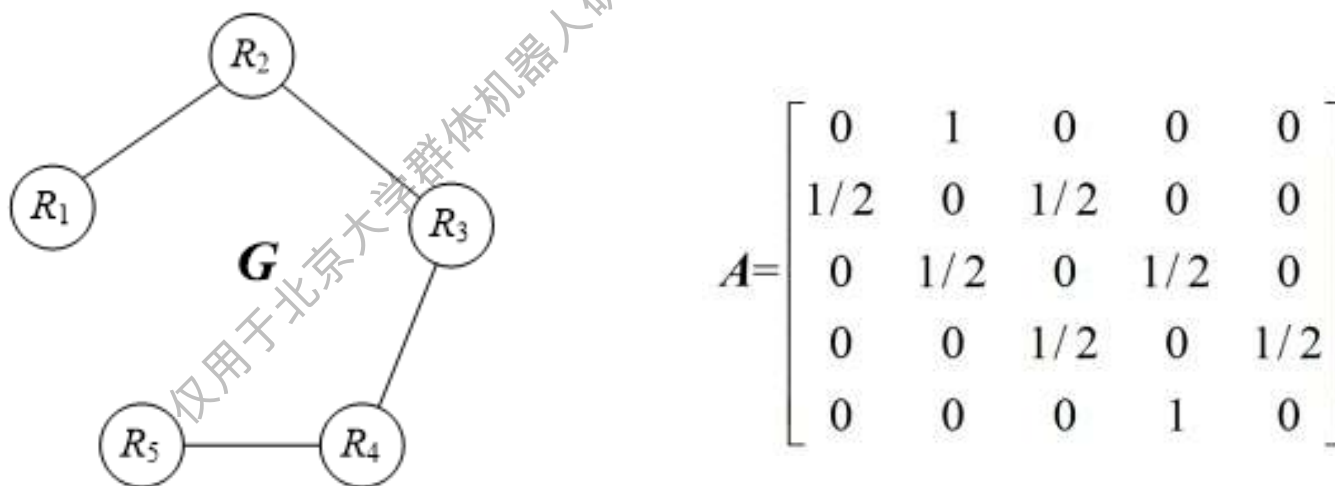


图2 鸽群群体通信网络拓扑

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

机器人的速度约束是为了满足机器人的动力学模型要求，个体机器人的速度约束可以用下式描述：

$$\mathbf{v}_i = \begin{cases} \mathbf{v}_i & |\mathbf{v}_i| \leq |\mathbf{v}_{\max}| \\ |\mathbf{v}_{\max}| \cdot \frac{\mathbf{v}_i}{|\mathbf{v}_i|} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

为了衡量提出的群体协同控制率的有效性，定义一个群体编队误差 E_h 如下式5和群体平均速度值 $\bar{\mathbf{v}}$ 如式6

$$E_h = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \|(x_i - x_j) - (h_i - h_j)\|}{2n} \quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{v}} = \sum_{i=1}^n \mathbf{v}_i / n \quad (6)$$

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

机器人群体系统按照鸽群协同控制规则，使系统内各个个体达到速度一致性并形成期望队形，个体协同控制轨迹如图3所示。各个个体在随机的初始位置、以随机的初始速度，按照鸽群协同控制策略，通过个体间的信息交互实现自身与其他个体的协同控制，达到群体的渐进一致性。

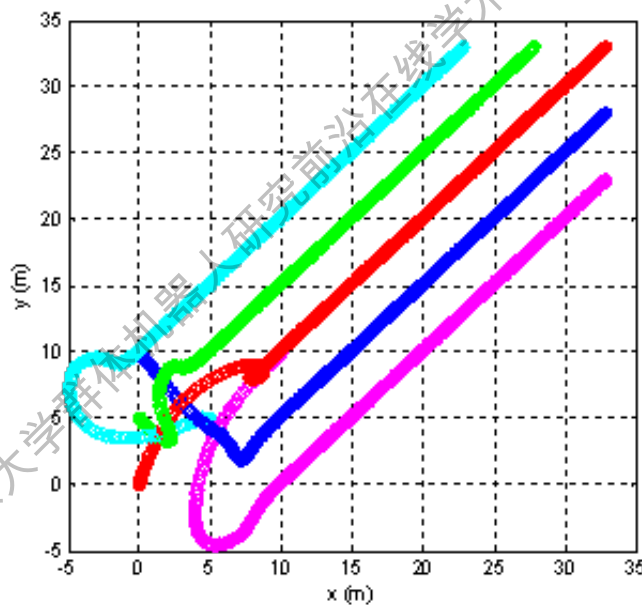


图3 鸽群算法群体协同控制轨迹

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

机器人群体中各个体的速度变化情况如图4所示，个体间通过控制策略的影响实现速度的渐进一致性，并且个体的速度控制量满足机器人个体的运动约束的要求。在图中可以发现每个个体的速度控制量通过各个协同控制模块的协同控制在前期进行一段时间的调整用于实现各个个体的速度一致性和群体编队队形的稳定，并且速度的变化幅度即个体的加速度控制量满足个体的运动约束。达到稳定编队后，整个群体保持相同的速度运动。

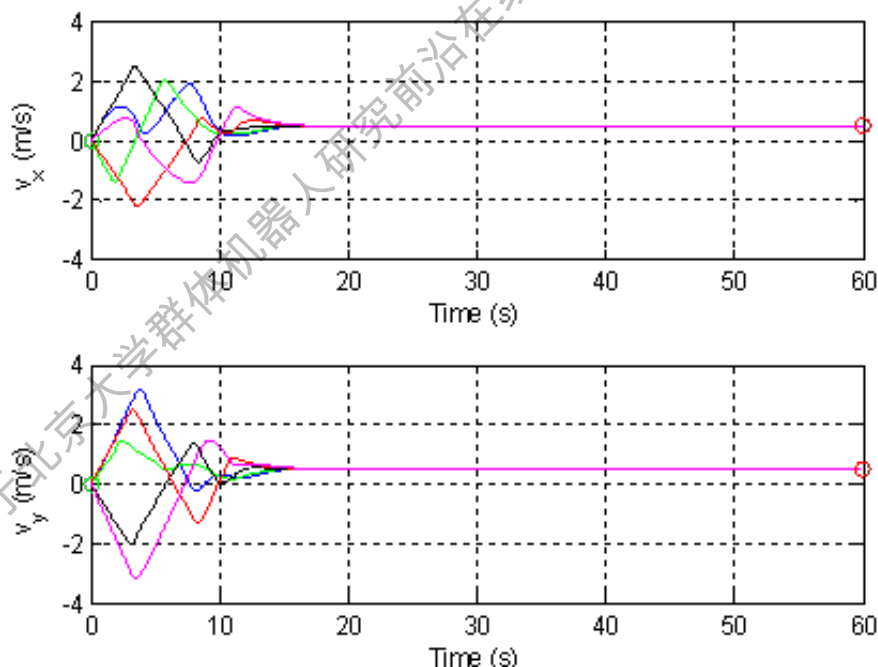


图4 群体速度控制收敛图

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

群体平均速度值 \bar{v} 变化情况见图5所示， \bar{v} 的物理意义为体现群体的速度稳定性，在图中可见，群体在形成稳定编队的过程中， \bar{v} 随时间出现了一定的震荡，其间群体各个体通过速度控制量实现状态的调整，所以群体的平均速度发生了加大的变化，随着整个群体的状态达到一致，群体的平均 \bar{v} 速度 也稳定在期望速度值，实现机器人群体速度的一致性。

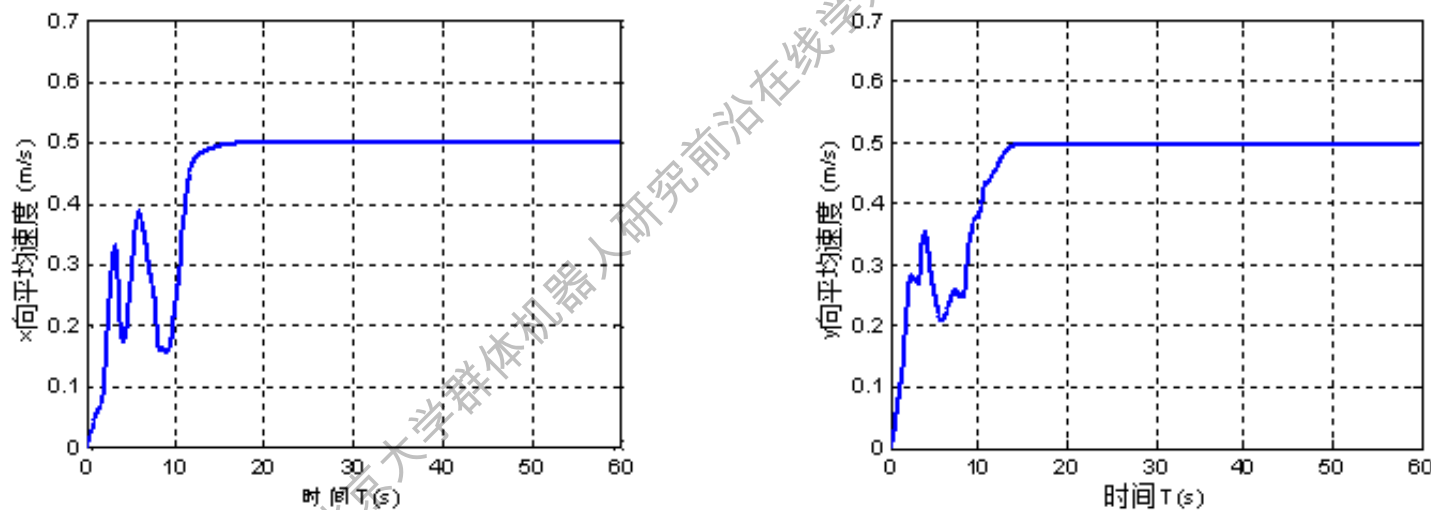


图5 群体平均速度值 \bar{v} 变化情况

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

机器人群体稳定性的另一个指标是群体编队误差 E_h ， E_h 代表的物理意义为群体编队队形的稳定性。如图6所示，通过协同控制策略的影响， E_h 在编队形成的前期会急剧下降；中期会出现较小的跳动，是因为个体间的协同控制与一定的耦合作用；在后期会逐渐趋于0，群体形成期望队形。

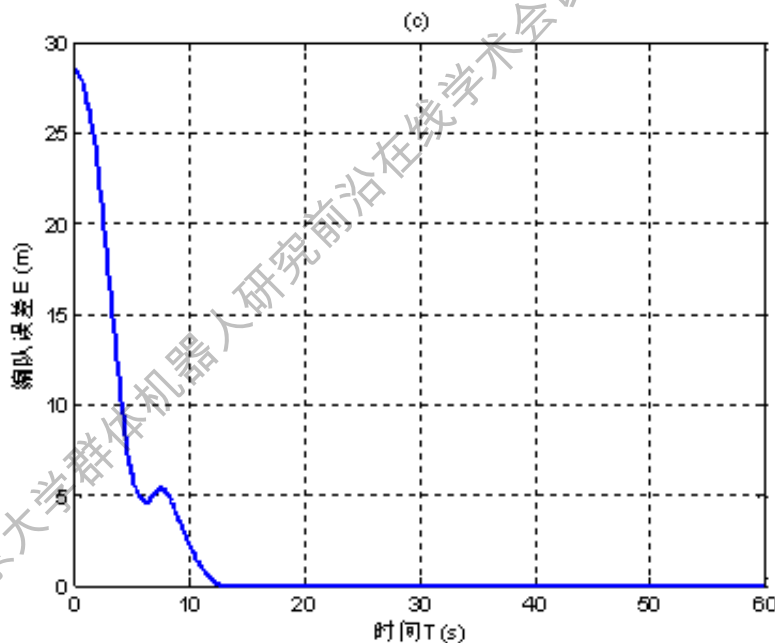


图6 群体编队误差 E_h 变化情况

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

□ 实验2 全连通条件下群体协同控制

机器人群体通信处于全连通条件下，通信拓扑结构的标准邻接矩阵如下：

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 \\ 1/4 & 0 & 1/4 & 1/4 & 1/4 \\ 1/4 & 1/4 & 0 & 1/4 & 1/4 \\ 1/4 & 1/4 & 1/4 & 0 & 1/4 \\ 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 0 \end{bmatrix}$$

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

为了能够直观的比较不同控制策略的结果，机器人群体的初始状态、期望速度、期望队形与运动约束与实验1一致。

图7、8分别为机器人群体通信处于全连通条件下的群体协同控制轨迹和速度控制收敛图，可以发现群体通过个体与其他所有个体的信息交互，也能实现群体的一致。

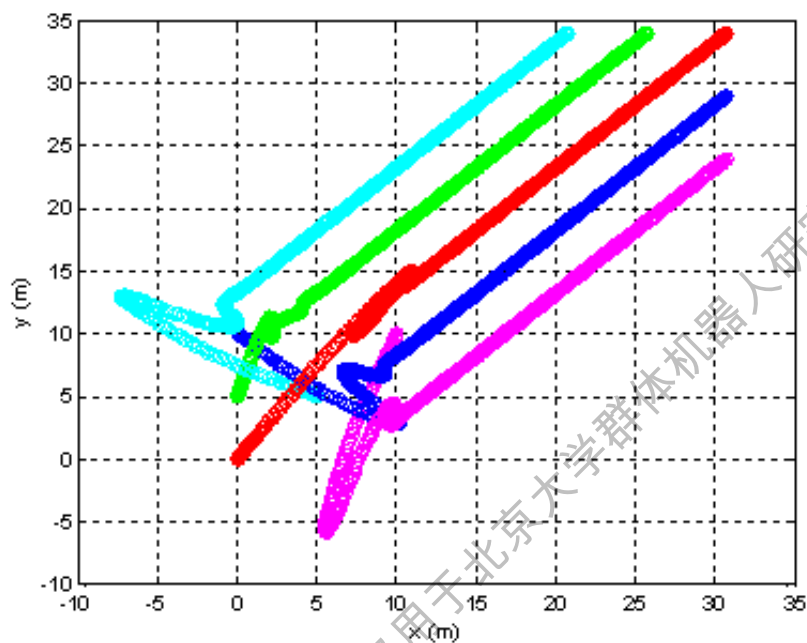


图7 鸽群算法群体协同控制轨迹

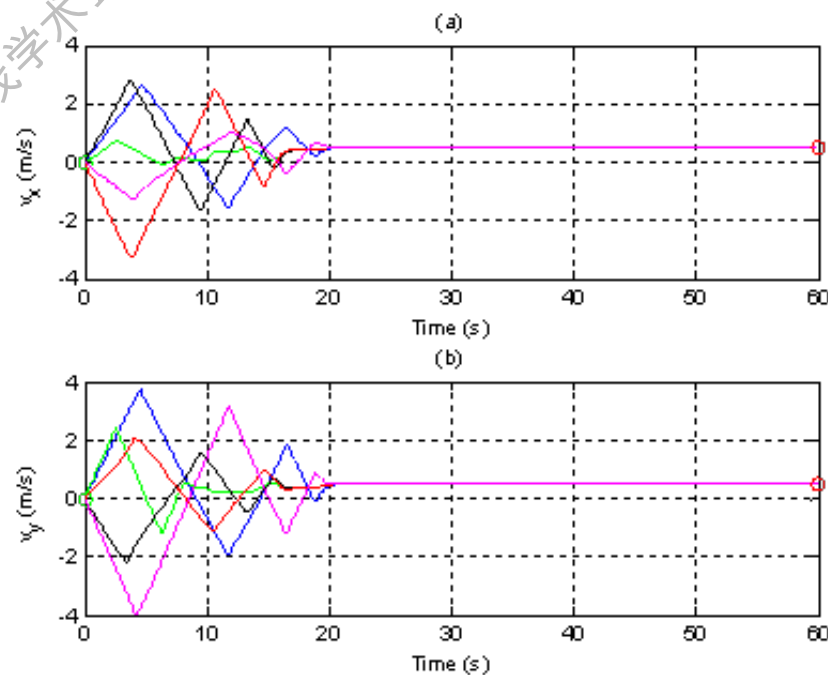


图8 群体速度控制收敛图

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

同样的结论也能够从群体平均速度值 \bar{v} 变化情况（如图9所示），编队的误差 E_h 变化情况（如图10所示）中得到。并且 \bar{v} ， E_h 的变化情况会产生剧烈的跳动，说明在机器人群体趋于一致的过程中，个体之间并不能实现较稳定的协同控制。由于在协同控制策略中，群体中的每个个体会受到其他所有个体的影响，在群体趋于一致的过程中个体之间的控制耦合作用过多反而导致群体的收敛速度过慢。

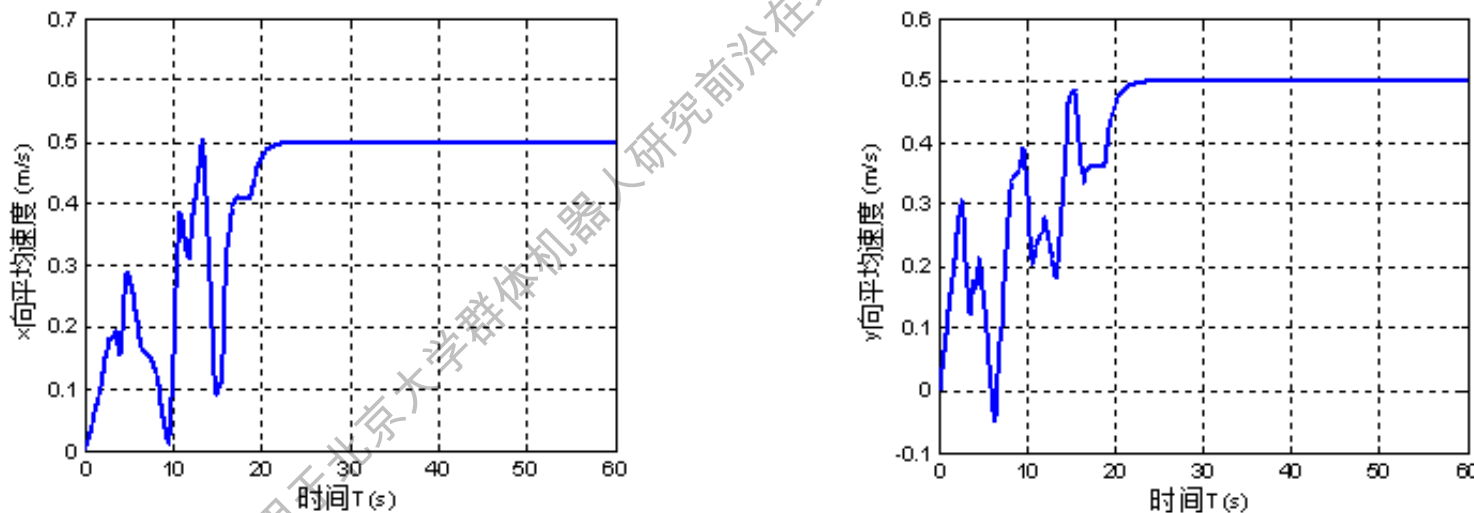


图9 群体平均速度值 \bar{v} 变化情况

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

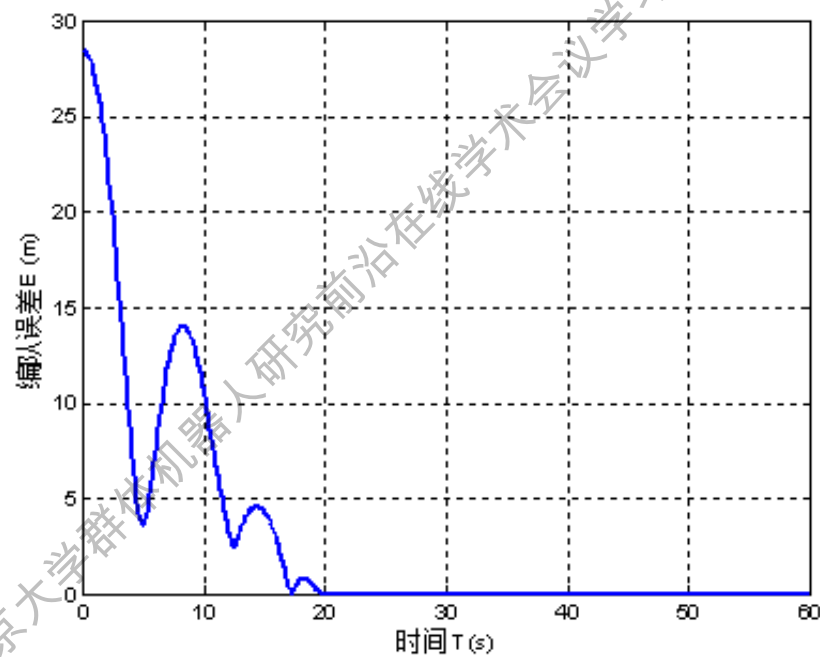


图10 群体编队误差 E_h 变化情况

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

□ 实验3 绑架实验

为了讨论提出的群体系统控制决策模型的稳定性，实验条件与前次实验一致，在 $t=60s$ 时，对群体内的#1个体进行绑架实验，将其Y方向位置加10m。绑架实验群体轨迹如图11所示，在某一时刻对任意个体进行绑架操作，群体通过协同控制在一定时间段后仍能实现整体的稳定性。绑架实验群体速度变化情况如图12所示，在某一个体突然遭到绑架后，个体之间通过协同控制策略，群体编队在短时间内能够实现编队的稳定性。在图13~14中也能够在个体被绑架后，群体经过调整会使群体的平均速度 \bar{v} ， E_h 的值会产生震荡，但是最终会达到一致。

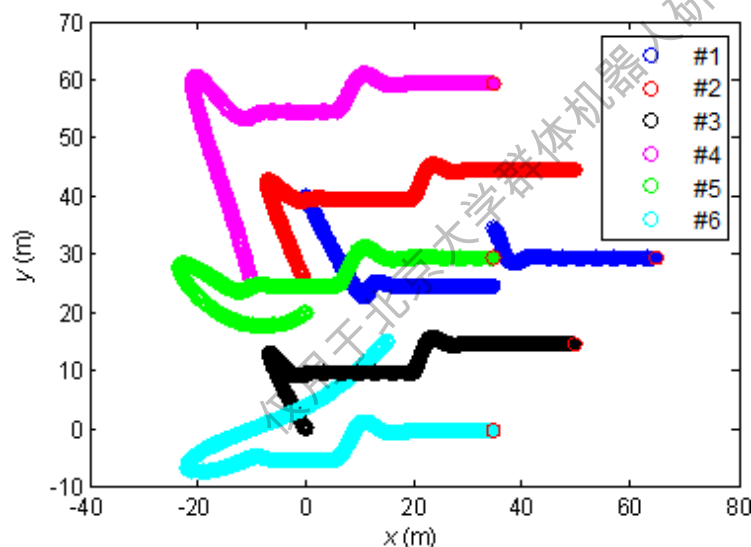


图11 绑架实验群体轨迹图

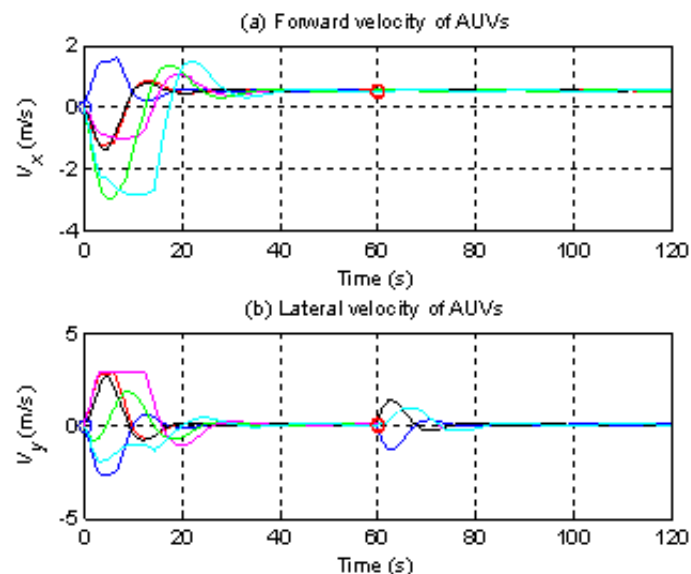


图12 绑架实验群体速度变化情况

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

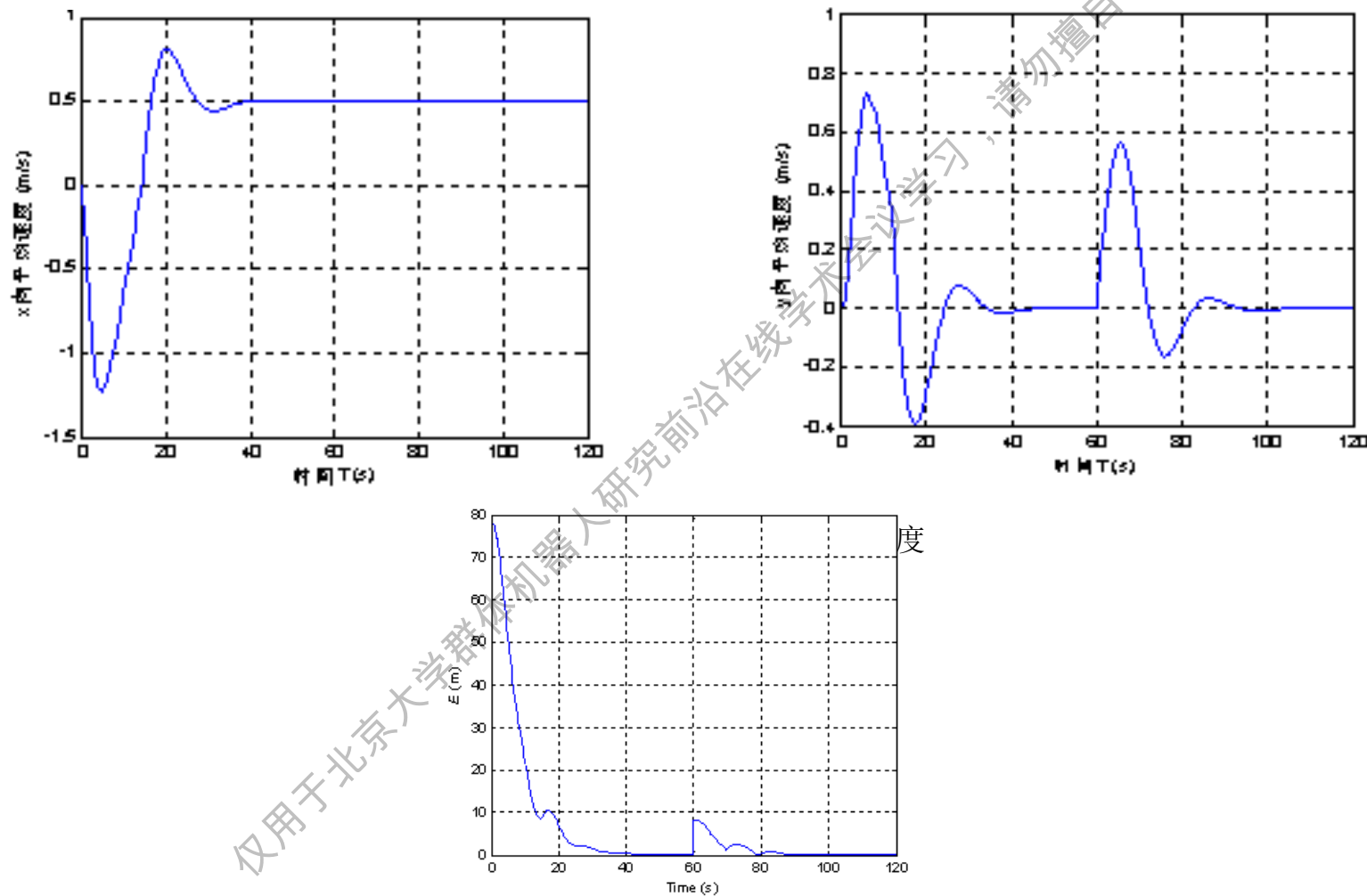


图14 绑架实验群体编队误差

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

- 复杂环境下鸽群协同控制策略

- 群体系统切换通信拓扑结构稳定性研究

考虑机器人群体系统在通信网络拓扑结构为随机切换状态下，系统的稳定性分析。因为系统的通信网络拓扑结构是随机切换的，我们假设存在一个有限的Markov链。

定义1：设 $\{X(t), t=1, 2, \dots\}$ 为离散时间随机变量序列， $X(t)$ 的可能取值为 $a_i, i=1, 2, \dots, n$ 代表时间，如果式1成立

$$\begin{aligned} P\{X(t) = a_i / X(t-1) = a_{i-1}, \dots, X(1) = a_1\} = \\ P\{X(t) = a_i / X(t-1) = a_{i-1}\} \end{aligned} \quad (1)$$

则称该随机序列 $\{X(t), t=1, 2, \dots\}$ 为Markov链。

定义2：设一随机变量 $X(t)$ 取值为 a_i 的概率为 $p_i(t)$ 可以表示为

$$p_i(t) = P\{X(t) = a_i\} \quad (2)$$

称 $p_i(t)$ 为Markov链的无条件概率，假设存在 $s < n$ ，当 $X(t)$ 取值为 a_i 条件下，

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

$X(n)$ 取值为 a_j 的概率为 $p_{ij}(s,n)$, 表示为

$$p_{ij}(s,n) = p\{X(n) = a_j / X(s) = a_i\}, n > s \quad (3)$$

$p_{ij}(s,n)$ 称为转移概率, 它只与 n 、 s 、 i 、 j 有关。

如果存在 $p_{ij}(s,n)$ 只与 $n-s$ 有关, 而与 i 、 j 无关, 有

$$p_{ij}(s,n) = p_{ij}(n-s) \quad (4)$$

则称 $\{X(t), t=1,2,\dots\}$ 为齐次Markov链。对于齐次Markov链的一步转移概率 $p_{ij}(s,s+1)$ 简记为 p_{ij} 。进一步, 称 $\mathbf{P}=(p_{ij})$, $i,j=1,2,\dots$ 为齐次Markov链一步转移概率矩阵。显然 \mathbf{P} 具有以下性质:

(1) $0 \leq p_{ij} \leq 1$

(2) $\sum_{j=1}^{\infty} p_{ij} = 1$

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

定义3: 设 $\{X(t), t=1, 2, \dots\}$ 是具有 s 个状态 a_1, a_2, \dots, a_s 的齐次Markov链, 又 $p_i(t)$ 表现系统在 t 时刻处于状态 a_i 的无条件概率, 如果对所有时刻 t 有

$$p_i(t) = p_i(1), i = 1, 2, \dots, s \quad (5)$$

则称该Markov链是平稳的。平稳性的物理描述是: 系统在任意时刻以相同的概率处于某同一状态。

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

□ 仿真实验

机器人群体的通信拓扑结构在复杂环境尤其是在具有强烈干扰的环境中，很难保持固定的通信拓扑结构，本仿真实验采用以下切换的通讯拓扑结构，个体之间的通信链接在拓扑结构图 G_1 、 G_2 、 G_3 之间随机切换如图1所示。

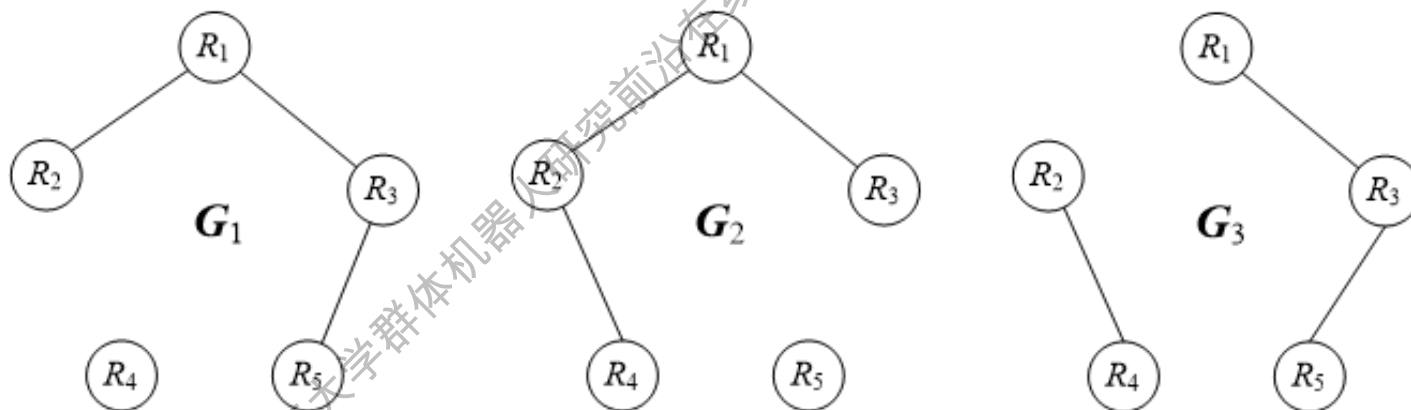


图1 机器人群体切换通信拓扑结构图

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

切换拓扑结构图 G_1 、 G_2 、 G_3 的邻接矩阵 A_1 、 A_2 、 A_3 分别为:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1/2 & 1/2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/2 & 0 & 0 & 0 & 1/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1/2 & 1/2 & 0 & 0 \\ 1/2 & 0 & 0 & 1/2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1/2 & 0 & 0 & 0 & 1/2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

图2为机器人群体在如图1所示的存在切换状态的通信拓扑结构条件下，采用鸽群算法群体协同控制的运动轨迹。通过群体的运动轨迹可以发现群体在切换通信拓扑结构下能够形成符合期望队形的稳定编队。图3为机器人群体速度控制收敛图，通过分析在协同控制过程中，个体速度随时间的变化趋势发现虽然每个单独的通信拓扑结构多不具有连通性但是通过协同控制策略群体的速度仍然能够达到一致性，只是群体达到一致性的时间代价有所增加。

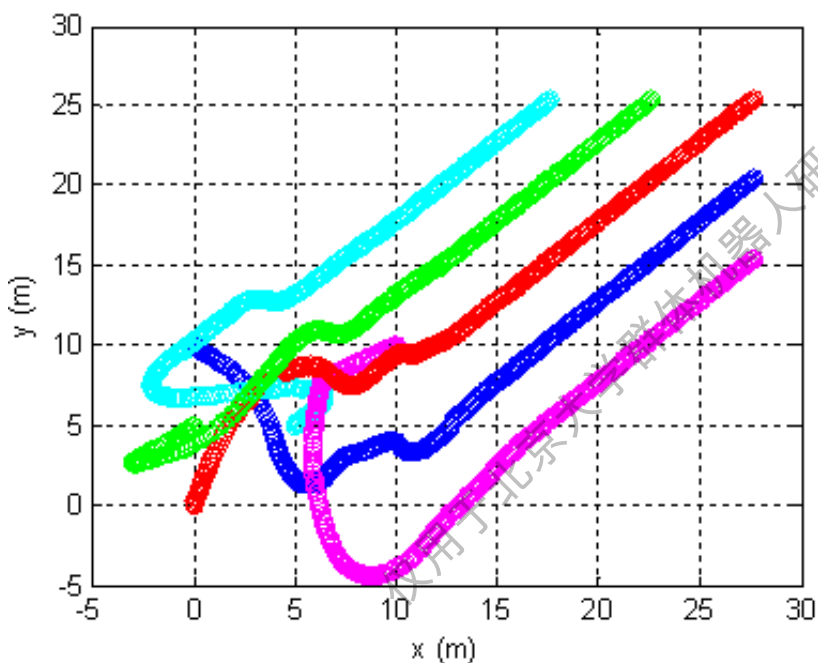


图2 鸽群算法群体协同控制轨迹

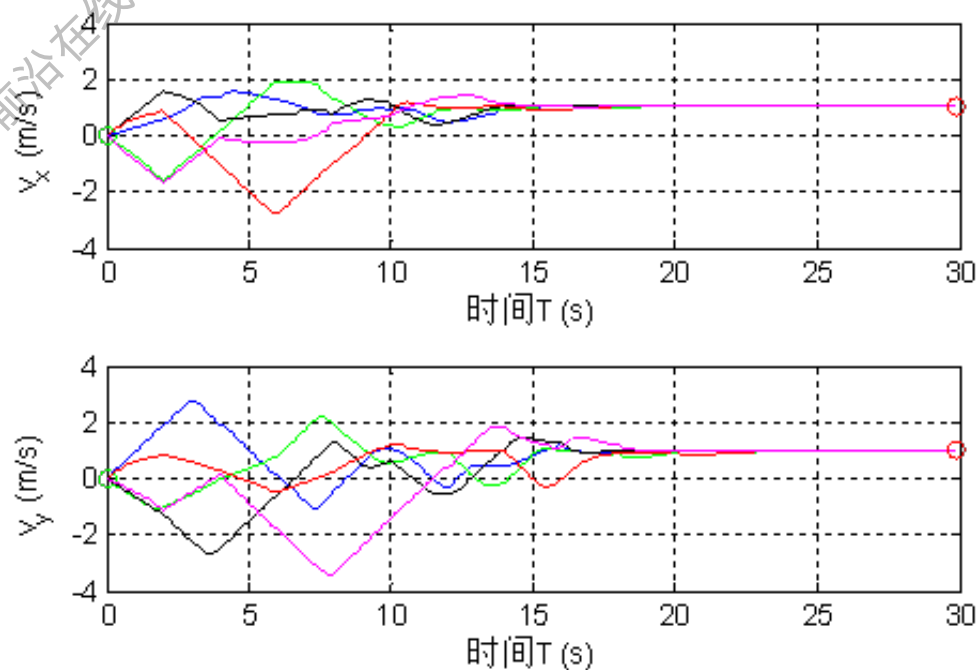


图3 群体速度控制收敛图

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

图4 为群体平均速度值 \bar{v} 变化情况，通过实验可以发现群体的平均速度 \bar{v} 经过一段时间的调整能够达到稳定的状态，并且与期望速度一致；图5为群体编队误差 E_h 变化情况，随着时间的增加个体之间经过协同控制使得群体的编队误差 E_h 逐渐趋于 0，证明机器人群体已经形成了稳定的编队队形。通过对此两项群体稳定性的评价指标的试验分析，证明了群体在不同时刻的通信拓扑结构图 G_1 、 G_2 、 G_3 都不具有生成树即都不是连通图的情况下，在一个有限时间段内，通信拓扑结构图 G_1 、 G_2 、 G_3 的联合生成图是连通图，群体仍然能够实现渐进一致性。

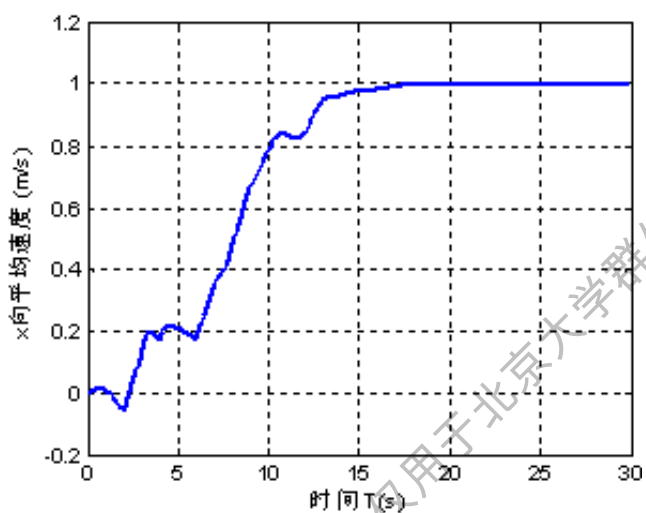


图4 群体平均速度值 \bar{v} 变化情况

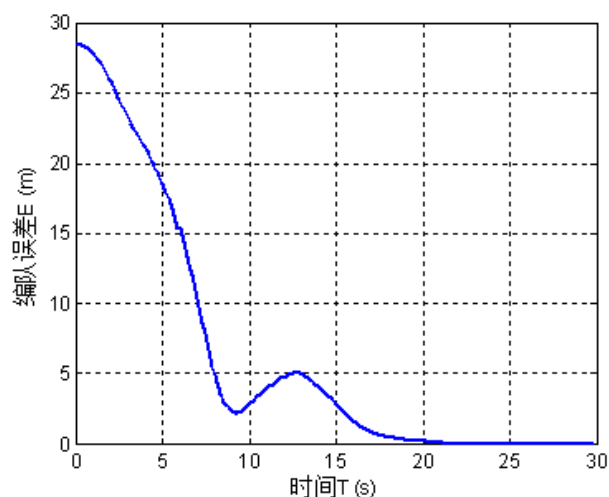
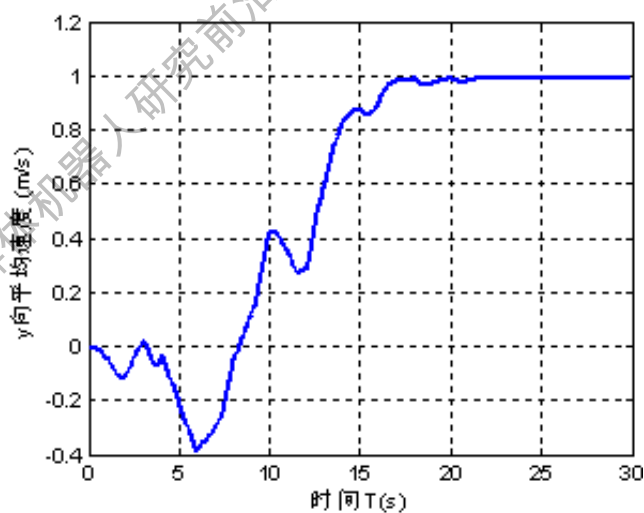


图5 群体编队误差变化情况

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

为了使群体协同控制策略具有通用性，在讨论群体系统避障规则之前，首先对于研究的群体系统进行相应的设定。

假设：在二维的欧式空间中，一个群体系统具有 M 个独立的个体，每个个体假想为一个质点，并且在个体的感知具有相互性，即个体 i 感知到个体 j 的同时个体 j 同样也能够感知到个体 i 。

定义4：个体 i 对障碍物的认知区域定义为 $\mathcal{Q}_i = \{p : \rho < \|x_i - x_p\| < r, \forall p \in \mathbf{O}\}$ ， \mathbf{O} 为环境中的障碍物集合， r 为个体 i 的最大认知半径，个体与障碍物 p 的欧氏距离大于 r 的时候，个体将忽略障碍物的存在， ρ 为个体的最小安全距离。

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

群体避障控制模块:能够使群体实现群体协同避障功能。

$$\mu_{ri}(x_i(t)) = \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_p}{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_p\|} \varphi\left(1 - \frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_p\|}{R}\right) \quad \varphi(t) = \begin{cases} t, & t \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

上式中 \mathbf{x}_i 表示个体 i 的位置, \mathbf{x}_p 表示障碍物 p 的位置, R 为群体的认知范围。
(•) 的物理意义为在个体 i 与障碍物 p 的欧式距离 $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_p\| < r$ 时, 个体才感知到障碍物的存在, 群体协同控制策略的避障控制模块将被激活, 群体系统将打破原稳定状态而是结合期望速度控制模块、队形控制模块、个体相互速度控制模块三个控制模块实现群体协同避障, 群体成功躲避障碍物并远离障碍物时, 当达到 $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_p\| < r$ 时避障控制模块将失去作用, 群体系统将继续形成稳定的编队队形。

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

□ 避障仿真分析

群体系统以图6的切换通信拓扑结构在存在多个障碍物的环境中，采用提出的模拟鸽群的群体协同控制策略形成稳定编队，并且在群体进入障碍物区域时运用认知模型的障碍物安全边界识别方法识别障碍物边界和认知安全区域。

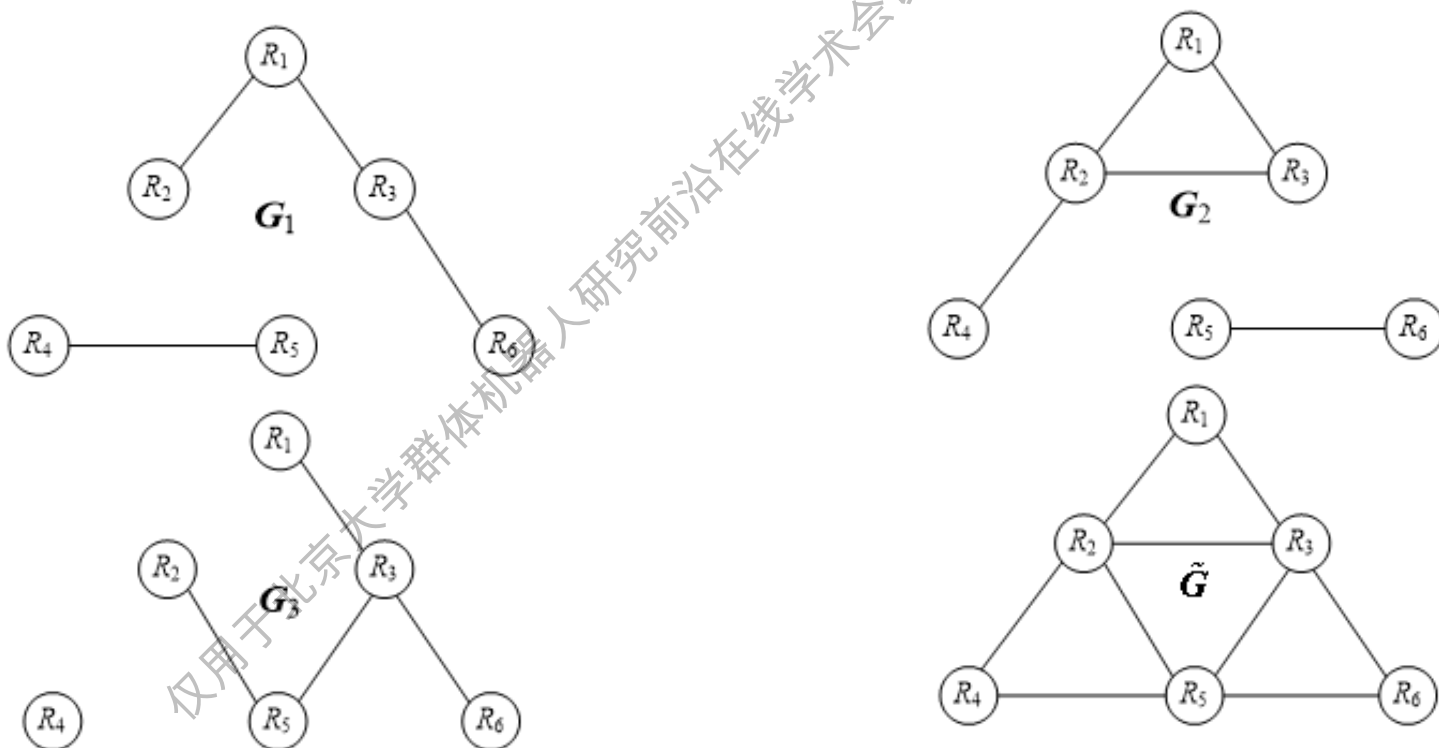
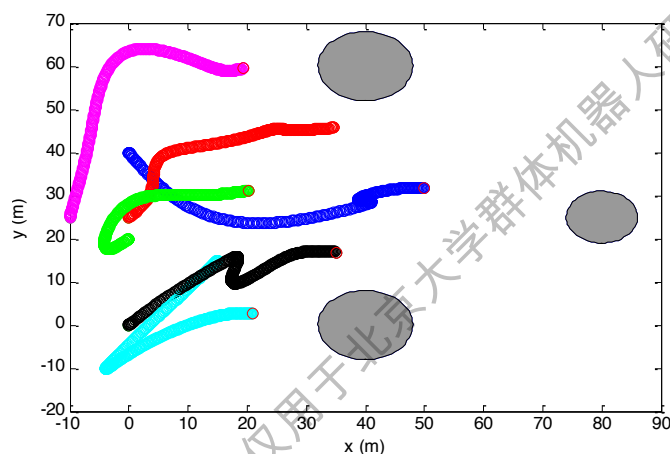


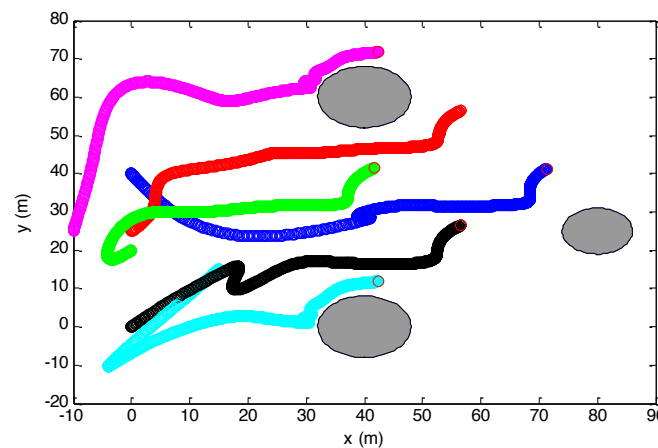
图6 机器人群体通信拓扑结构图

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

在群体协同避障过程中，群体在初始时刻没有感知到障碍物的存在，个体之间只是依据鸽群协同控制策略中的内部协同模块进行编队队形和速度的调整如图7(a)所示，在群体接近障碍区域的过程中，随着群体进入障碍物区域，个体感知到障碍物的存在，协同控制决策加入避障模块，通过个体间的不对称的通信机制和安全区域识别的边界极限机制使群体在存在对称障碍物的环境中仍能够实现避障功能如图7(b)、(c)所示，在群体系统脱离障碍物后，群体根据自身的认知模型将逐渐忽略障碍物对自身的影响再次实现渐进一致性如图7(d)所示。

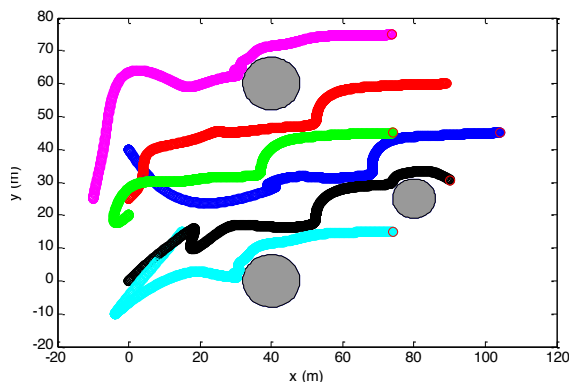


(a) $t=35s$

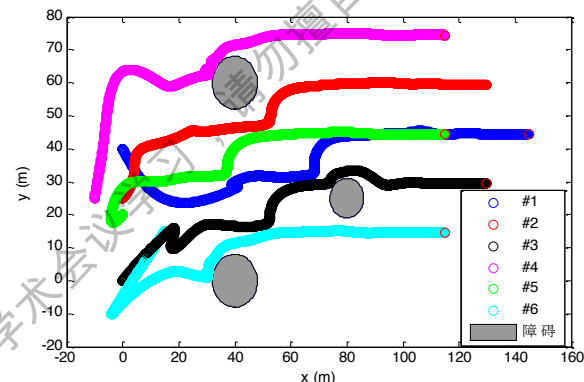


(b) $t=75s$

鸽群启发的群体机器人控制规划策略



(c) t=110s



(d) t=150s

图7. 避障实验群体轨迹图

通过图8、9的群体平均速度值 \bar{v} 、群体编队误差 E_h 的变化情况可以发现，群体系统在存在障碍区域的环境中并不是一直保持编队的稳定与速度的一致性，而是采用仿生学的自然界中群体运动的避障机制，提出的模拟鸽群的协同决策机制能够保证在群体避障过程中个体之间并不是相互独立存在进行单独的避障行为，而是在避障过程中加入个体的内部相互协同的控制因素，保持群体的相对稳定行，从而避免在群体在避障过程中产生混乱的“蜂拥”现象，使得个体在具有避障行为的同时保持相对的编队稳定性避免个体的相互碰撞。

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

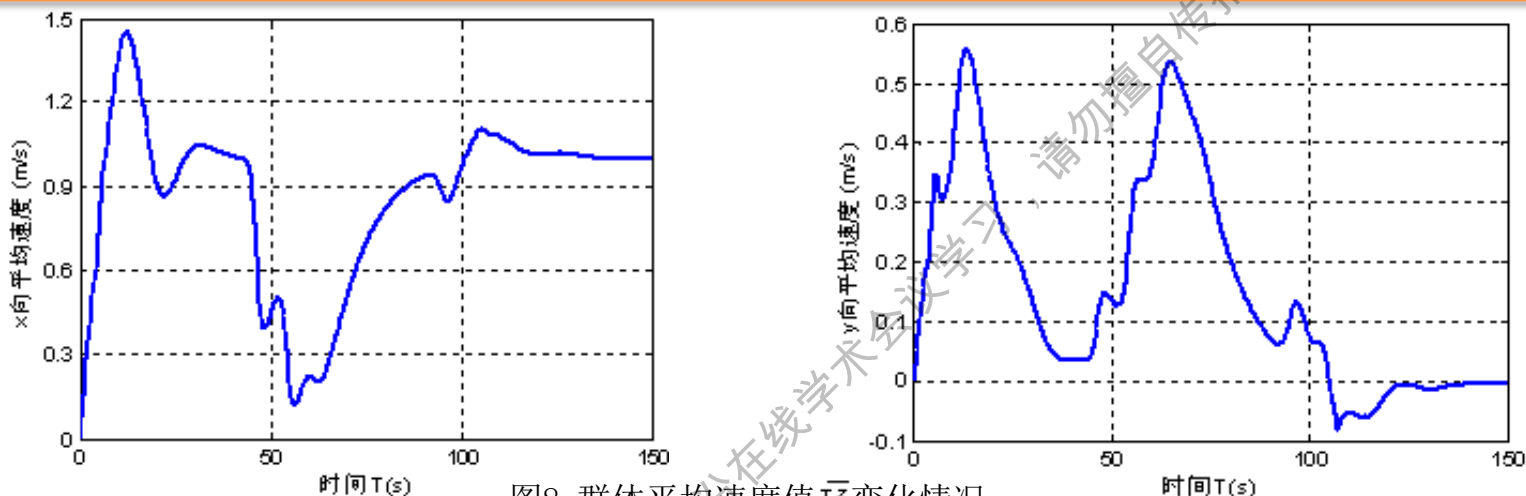


图8 群体平均速度值 \bar{v} 变化情况

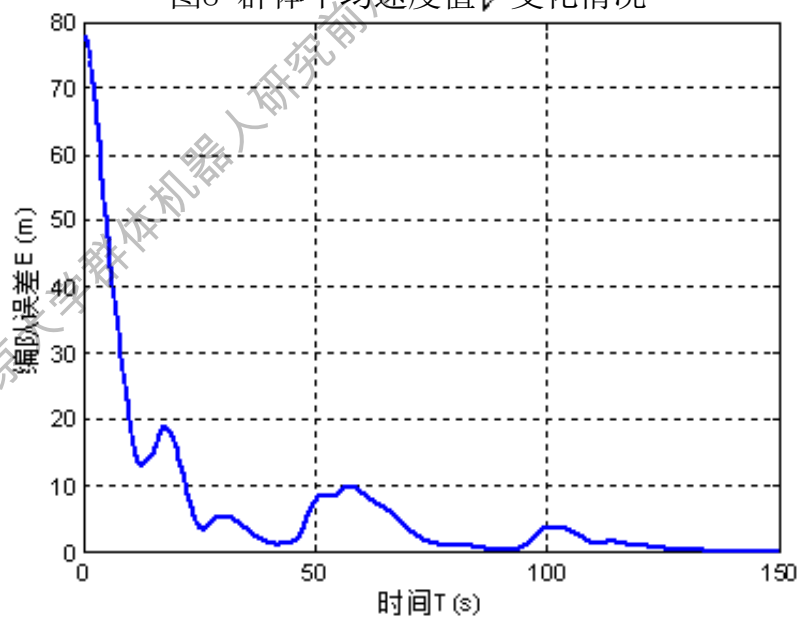


图9 群体编队误差 E_n 变化情况

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

● 基于鸽群协同控制策略的容错机制

$\tilde{N}_i(t)$ 为个体 i 的邻居集合，当 $T = \Delta t$ 时， $\tilde{N}_i(t) = \emptyset$ 代表个体 i 在时间间隔 $T = \Delta t$ 脱离群体。 $H = \{H_1, H_2, H_3\}$ ， H_1 代表正常工作状态， H_2 代表软故障状态，此状态具有可恢复性， H_3 为硬故障状态，此状态不可恢复。

□ 预测机制

预测机制可以具体描述如下，在时刻 t 以前群体处于连通状态，这种连通状态既包括固定通信拓扑结构的连通，也包括切换拓扑结构下定义的连通状态，在下一时间段 T 内，个体 i 将处于独立脱离群体的状态，在 $t \sim t+T$ 时间间隔内个体 i 与群体系统之间将无法获得相互的信息，因此个体 i 在前面所提出的协同控制决策中队形控制模块与个体相互速度控制模块将会暂时失去作用，在时间间隔 T 较长的情况下，将导致个体与群体的分离。个体的预测机制是根据前一时刻其邻居个体的信息作出预测，以保持与群体系统的相对一致性。设个体 R_i 在 $t-1$ 时刻处于正常工作 H_1 状态，那么 R_i 在 t 时刻的状态可以通过式6得到

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

$$x_i(t) = x_i(t-1) + v_i(t) \quad (6)$$

$$v_i(t) = v_i(t-1) + \mu_i(t)$$

在 $t \sim t+T$ 时间间隔内处于软故障状态，无法感知到其他个体的状态信息。为了能够在 $t+T$ 时刻排除故障后，更好地融入群体，必须在故障时间段 T 内加入容错机制以保障个体不会从群体内分离出去。 $t-1$ 时刻， R_i 处于无法感知到其他个体的软故障状态 H_2 ，此时 R_i 利用预测模型式7进行预测得到时刻 $t+k$ 的邻居个体的状态信息，

$$x_{n_i}(t+k) = x_{n_i}(t) + k * v_{n_i}(t) \quad k = 1, 2, \dots, T \quad (7)$$

式中， $x_{n_i}(t+k)$ 为预测得到的邻居个体在 $t+k$ 时刻的位置信息， $v_{n_i}(t)$ 为邻居个体在 t 时刻的速度信息， k 为时间步长。

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

□ 队形变换机制

在群体协同控制策略中，将故障个体剔除的情况包括以下两种：

- (1) 个体的故障状态为硬故障状态 H_3 ，个体将不具有恢复能力；
- (2) 个体的故障状态为软故障状态 H_2 ，虽然个体具有恢复能力，但是在时间 \tilde{t} 阈值内没有恢复。

在群体的编队形式上，将群体设定为可进行扩展和缩减的分层模式。以楔形编队为例在编队结构中，群体具有 n 层编队模式，每一层具有 m 个个体，群体中个体的编号具有两个元素 (p, q) 代表个体处在第 p 层第 q 个位置。在群体编队生成过程中不同层的间距与同一层个体的间距可以按照式8、9进行设定，这样每一个个体将具有自身特有的编号，并在群体内部对应不同的位置。

$$D_L = \frac{H}{n-1}, D_L > r \quad (8)$$

式中， H 为群体编队纵向的期望长度， n 为编队的层数， r 为个体的最小障碍物识别距离。

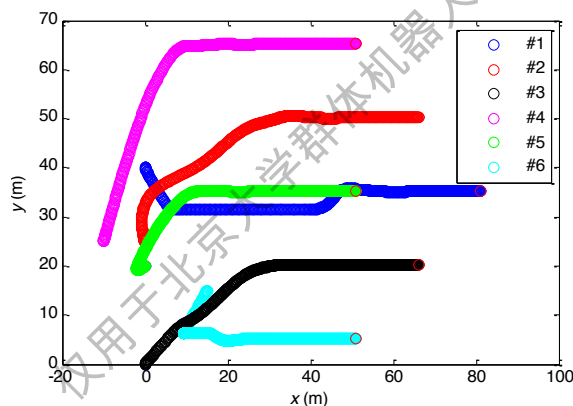
$$D_g = \frac{G}{m-1}, D_g > r \quad (9)$$

式中， G 为群体编队某层横向的期望长度， m 为此层所拥有的个体数量。

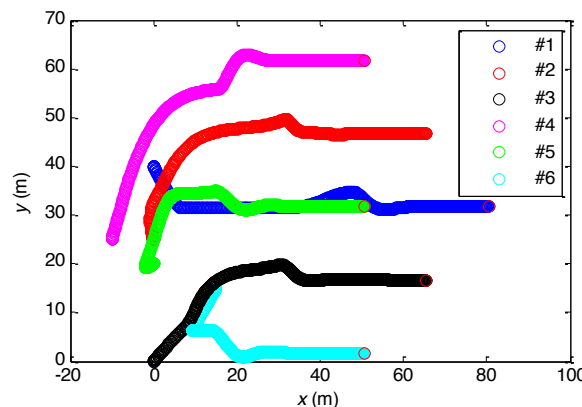
鸽群启发的群体机器人控制规划策略

□ 故障仿真实验

通过加入预测机制的控制策略与没有加入预测机制的控制策略的群体运动轨迹的比较如图10所示，可以发现尽管个体的故障时间较短，但是运用没有加入预测机制控制策略的群体系统当故障个体恢复后会给整个群体带来明显的震荡，这是由于故障个体在故障时间段内与群体的运动的偏差较大而引起的。在加入预测机制控制策略的群体系统中如图10(a)所示，个体4在故障时间段10s~20s之间完全与其他个体失去通信链接的情况下，采用预测机制以故障前一时刻邻居个体的运动状态为参考条件进行预测，可以发现在故障个体排除故障后，能够顺利融入群体而不会使群体产生明显的震荡。



(a) 加入预测机制的群体运动轨迹



(b) 没有加入预测机制的群体运动轨迹

图10 群体运动轨迹图

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

通过图11、图12可以发现加入预测机制的群体控制策略，出现个体故障的时候并不会使群体速度产生发散的现象，而且在故障个体在此回归到群体中时，能够避免因故障期间故障个体的通信丢失产生的个体偏离编队的期望位置过大或脱离群体的想象的发生。图13分别为是否加入预测机制的群体编队误差 E_n 变化的比较情况，可以明显地发现在个体出现故障期间加入预测机制的协同控制策略比没有加入预测机制的协同控制策略的编队误差得到了改善，并且具有较快的收敛速度。

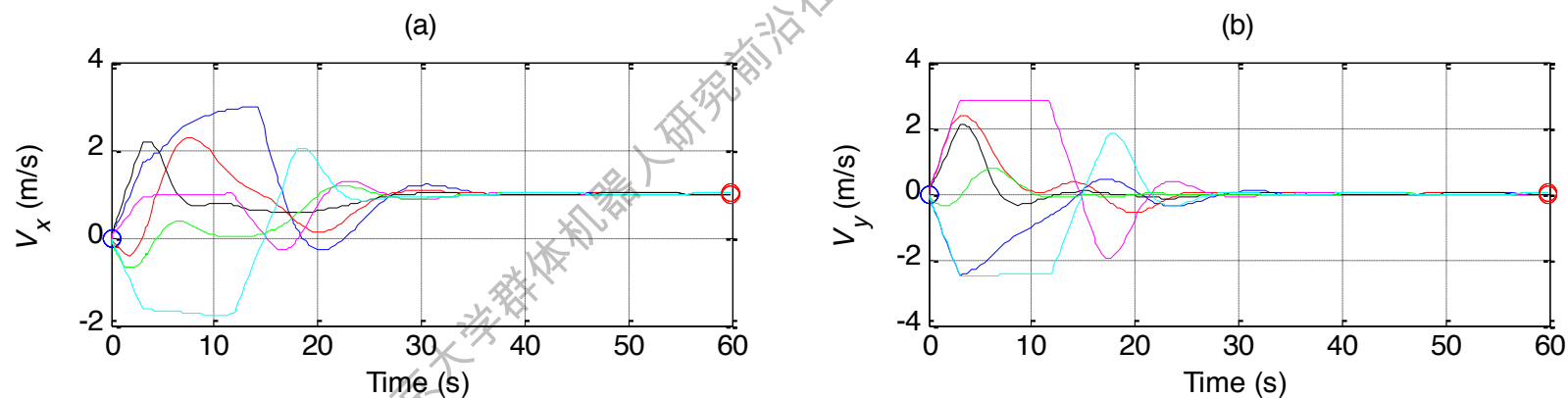


图11. 加入预测机制的群体速度控制收敛图

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

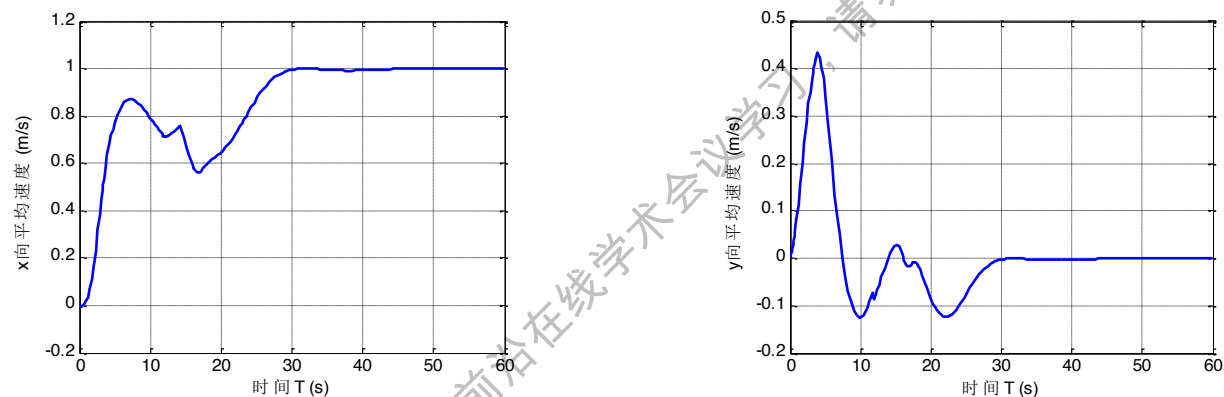


图12. 群体平均速度值 \bar{V} 变化情况

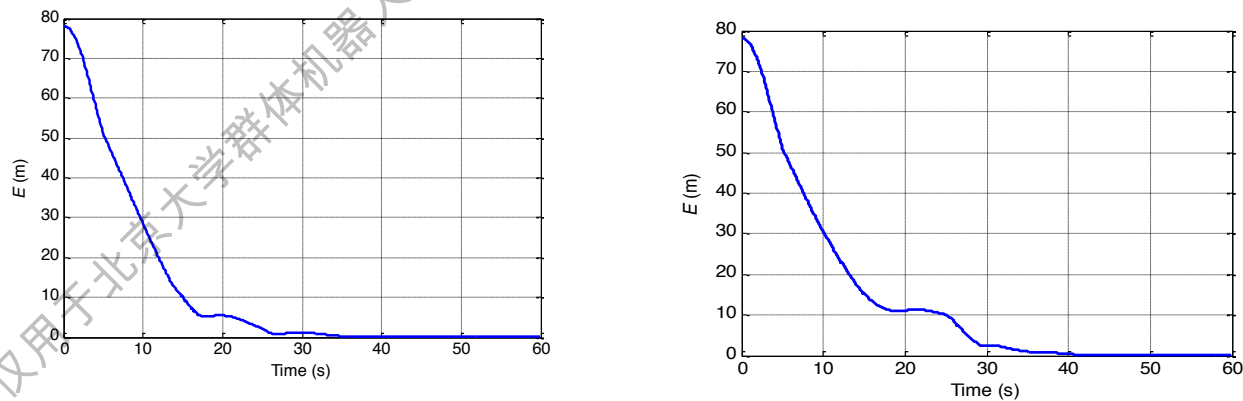


图13. 群体编队误差 E_h 变化情况比较

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

□ 丢失仿真实验

模拟个体丢失实验的群体轨迹如图14所示，在仿真实验中可以发现在群体系统在 $t=120s$ 以前已经通过协同控制策略达到了渐进的一致性，并且形成了稳定的编队。在 $t=120s$ 的时候由于#1、#4个体的丢失，而使群体系统的稳定性被打破，群体系统形成了新的编队结构并且通过协同控制策略与队形变换机制再次实现了编队的稳定。

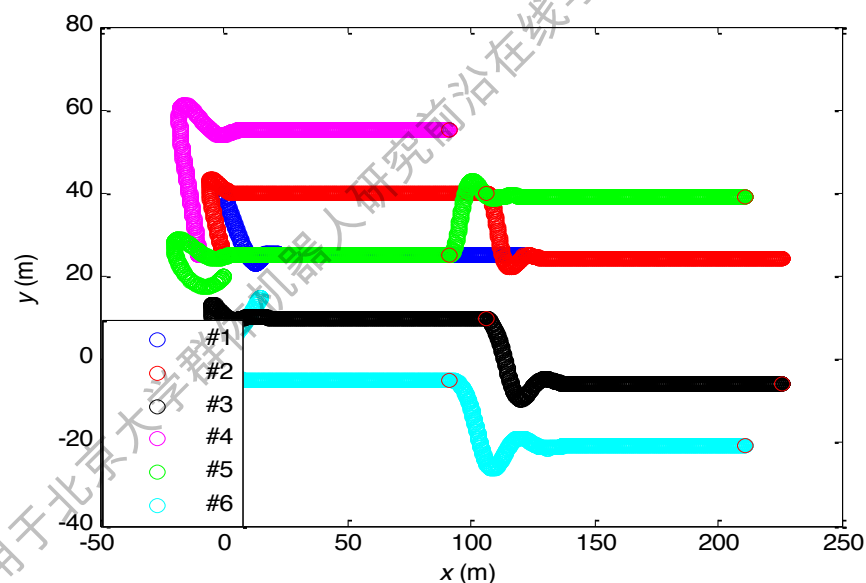


图14. 丢失实验群体运动轨迹图

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

图15为丢失实验群体速度变化情况，可以发现在#1与#4个体因故障脱离群体后，其它个体在失去最高决策权重的个体后，经过短暂的调整后仍能实现速度的一致性，证明了提出的加入队形变换机制的模仿鸽群决策机制的协同控制策略具有较强的适应能力。

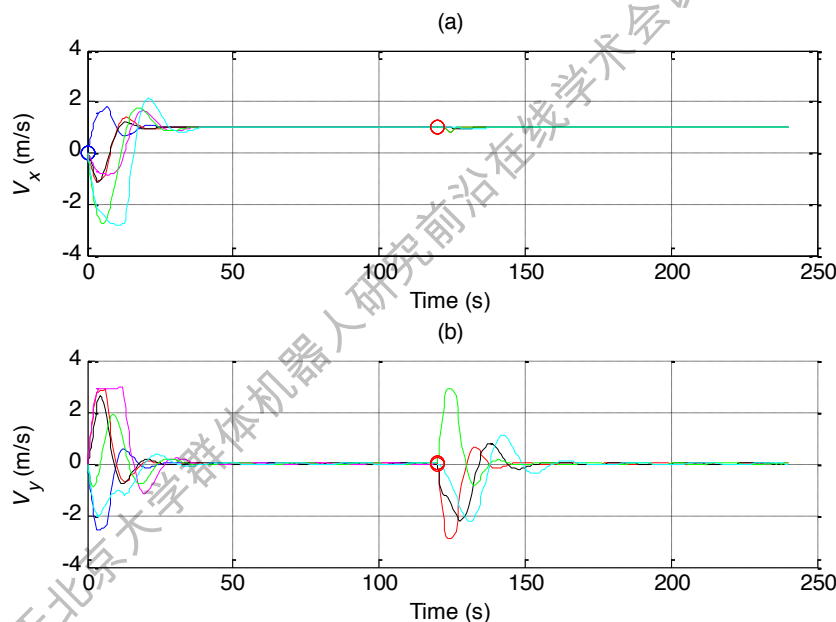


图15. 丢失实验群体速度变化情况

鸽群启发的群体机器人控制规划策略

图16、17分别为群体平均速度值 \bar{v} 变化曲线与群体编队误差 E_h 变化曲线，可以发现故障发生前后群体的速度趋于期望速度，编队误差趋于0。这再次证明了加入队形变换机制的鸽群协同控制策略可以保障群体在个体出现故障的时候仍然能够保持相对较为稳定的队形和期望速度继续运动为群体在复杂环境甚至是存在强对抗的环境下执行任务提供了保障。

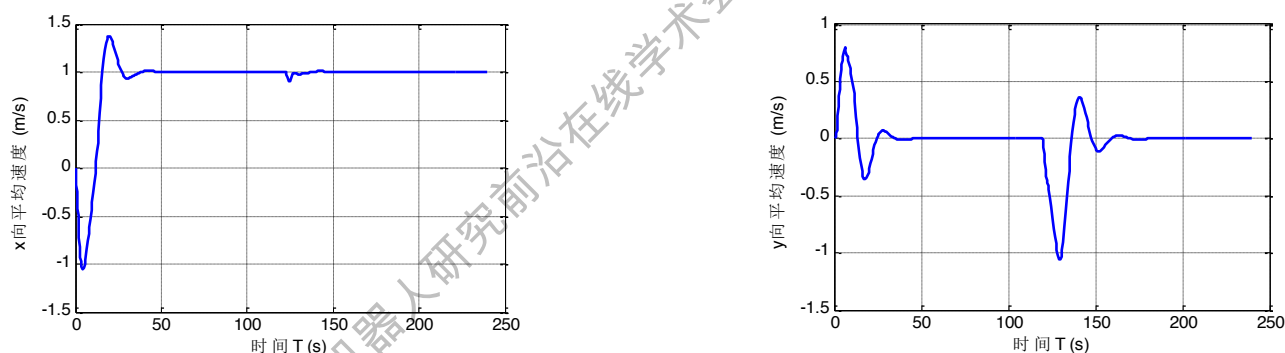


图16. 群体平均速度值 \bar{v} 变化情况

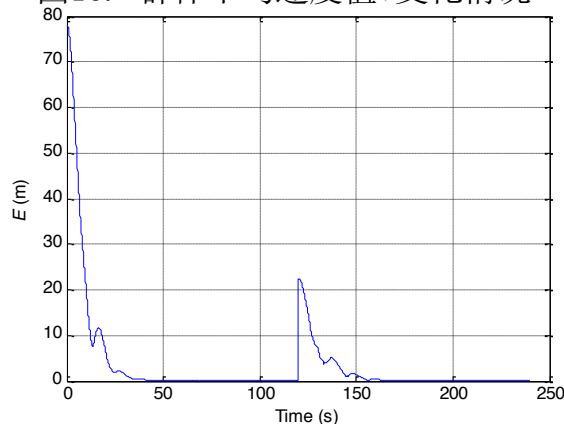
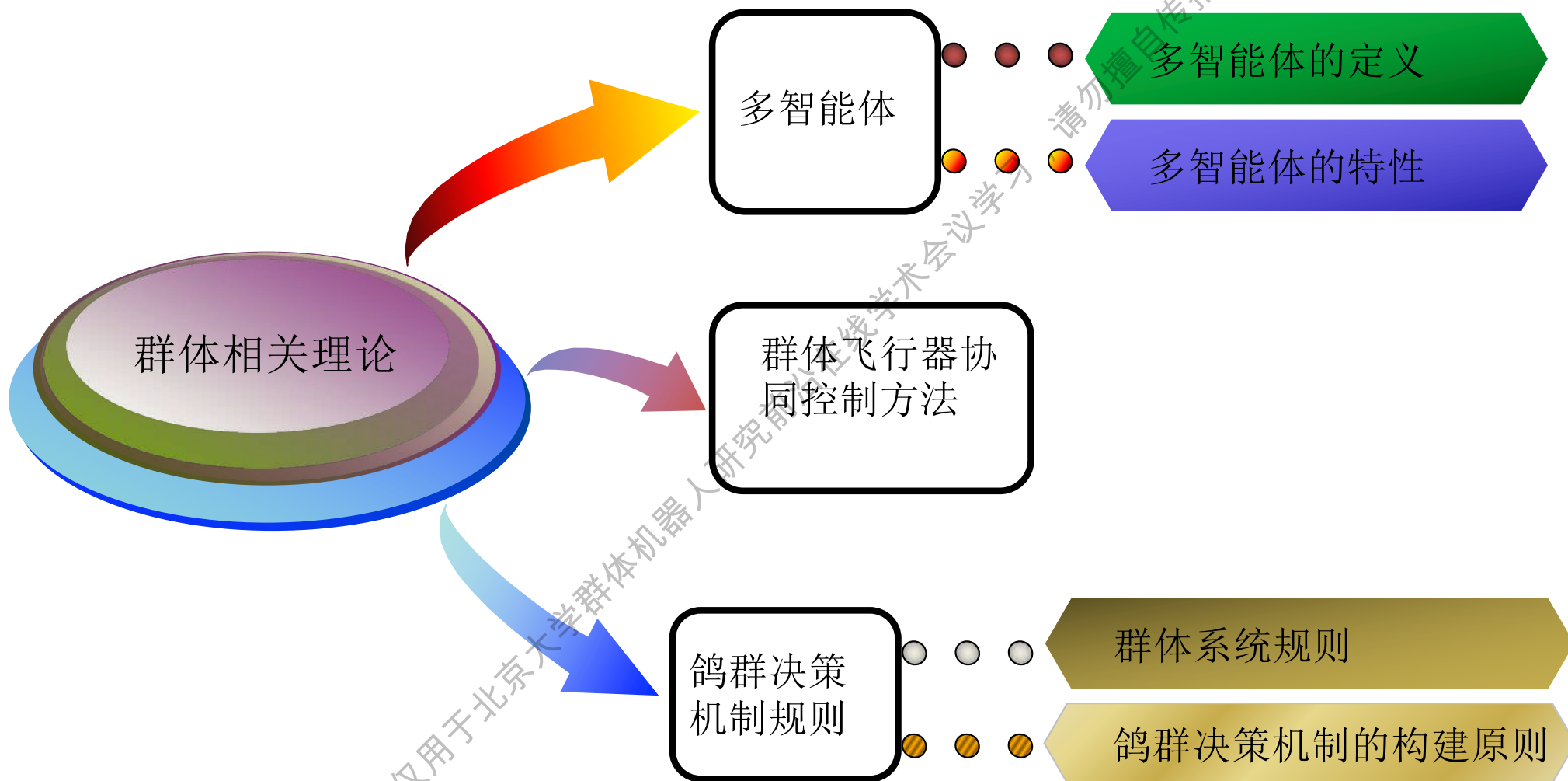


图17. 群体编队误差 E_h 变化情况比较

鸽群启发的群体无人机控制规划策略



智能体

多智能体系统是指将多个智能体集合在一起，目的是将大而复杂的系统建成彼此互相通信和协调的更小的集合，方便系统的管理

借鉴多智能体协调行动方法，运用智能体知识研究飞行器间协调合作、相互通信链路等方面。

感知能力

感知周围环境

行动及控制能力

做出行动决策，进行姿态、方向及速度的调整

通信能力

与其它个体之间的相互通信，以完成协调行动

推理能力

根据当前及过去的行为有效对下一时刻的行为做出估计和评价，为下一步的行为做出规划

协同控制

协同控制技术

广义

多机的航迹规划、
编队控制、任务
分配等

狭义

编队形成、编队保
持、编队重构等

主要解决的问题

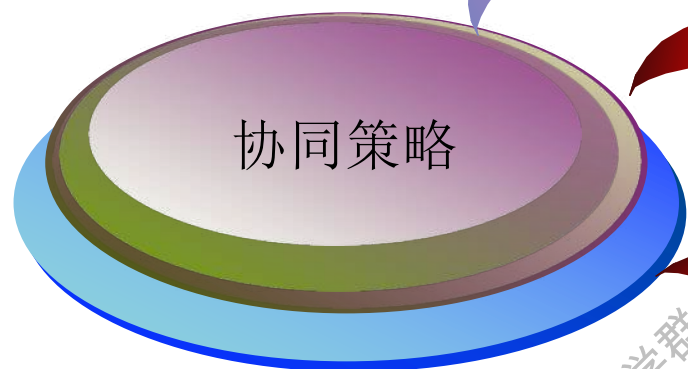
解决编队形成及编队重构问题，包括飞行编队的形成，遇到障碍时编队分散，越过障碍后编队重构，甚至是数量变化时的编队重构问题

编队保持问题，其中包括飞行过程中编队保持、编队切换、队形收缩、扩张、旋转等

仅用于北京大学智能机器人研究前沿在线学术会议学习，请勿擅自传播

群体飞行器协同控制方法

协同控制的方法主要有领航-跟随法、虚拟领航法、行为控制法、分层递阶法、自组织方法和多智能体一致性理论等

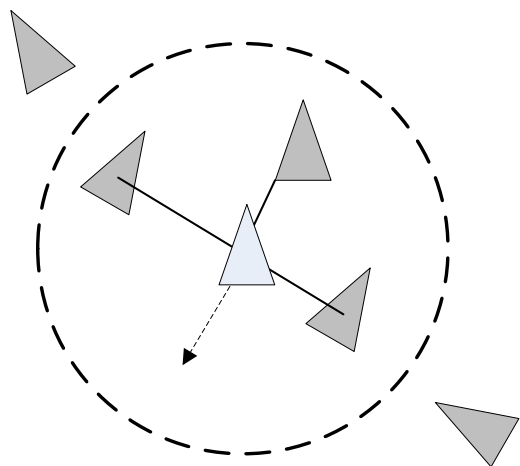


长机—僚机的协同控制策略：僚机实时获取长机的位置信息、高度信息、航向信息，并进行跟踪飞行即可实现协同控制的目的。但此种协同控制的结构受干扰影响较为明显：一架遇到紧急情况，每架都需要进行协调，显然增加了计算负担。

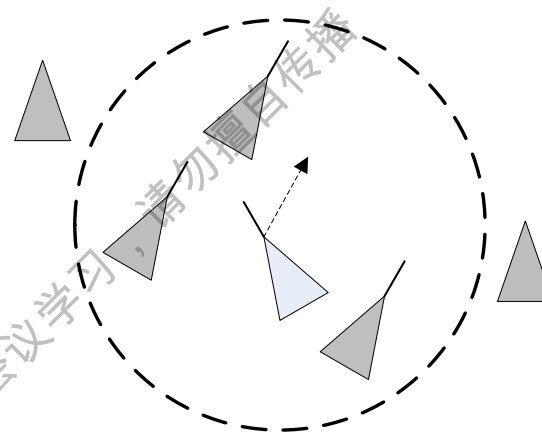
基于虚拟结构的协同控制策略：多采用虚拟长机来进行协同控制，避免了长机—僚机协同控制策略的干扰问题，但虚拟长机与僚机进行通信，传输虚拟长机位置至各僚机中对通信的质量及计算能力要求较高。

仿鸽群决策机制的协同控制策略：根据分层结构和多智能体一致性理论设计出分布式决策控制算法。

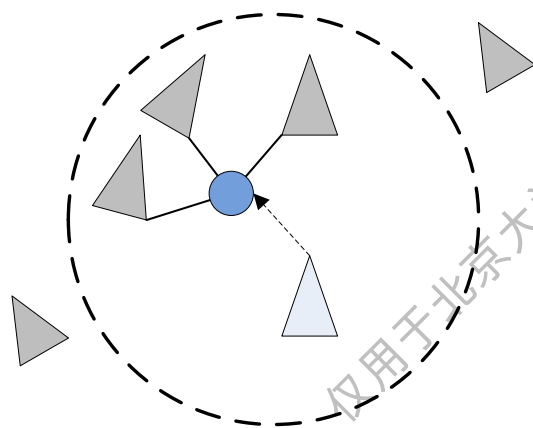
基于集群行为的协同控制策略：利用自身的传感器获取周围环境信息及自身姿态、高度等信息，防撞、避障、目标搜索、队形保持等。优点：根据自身的决策权重来影响群体的行为。



1.分离规则：避免个体间相互拥挤而发生碰撞



2.对齐规则：航向、相对位置一致，形成队列



3.聚集规则：与邻近个体靠近，使群体形成相对集中的趋势

4.遇到障碍时能有效避障

鸽群决策机制的构建原则

模拟鸽群的决策机制:

$$\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_e(t) \quad (1)$$

期望速度控制模块: 使个体速度趋近于群体一致期望速度。

$$\mathbf{v}_j(t) - \mathbf{v}_i(t) \quad (2)$$

个体间速度耦合控制模块: 能够使群体中的各个个体趋向一致。

$$(\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t)) - (\mathbf{h}_j - \mathbf{h}_i) \quad (3)$$

队形控制模块: 能够促进群体组成期望队形。

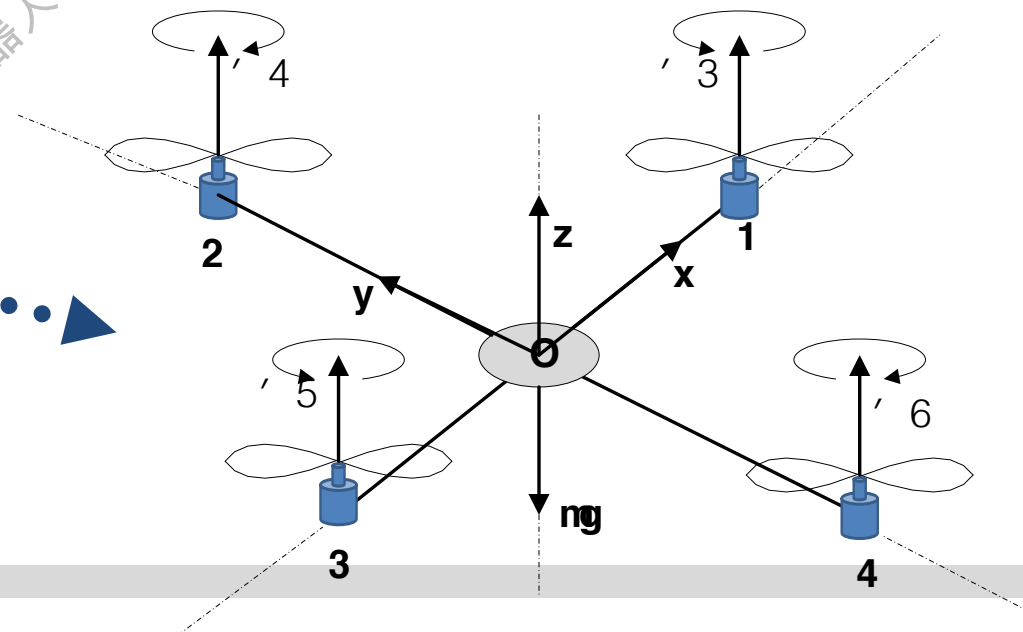
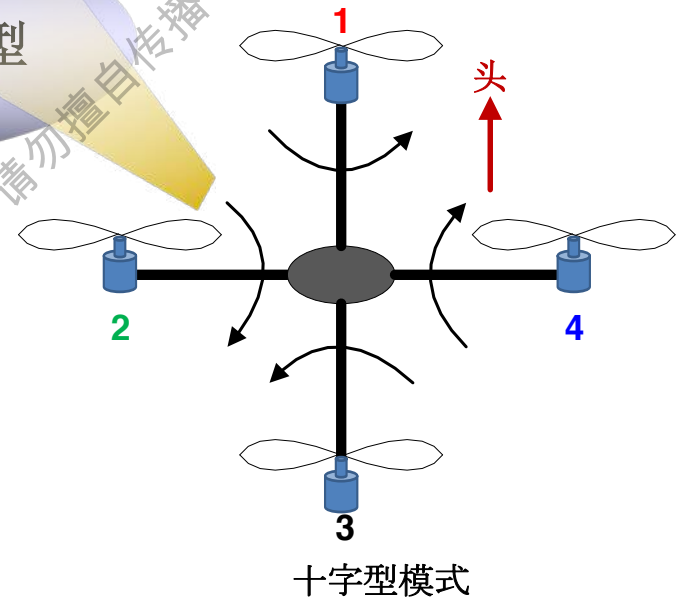
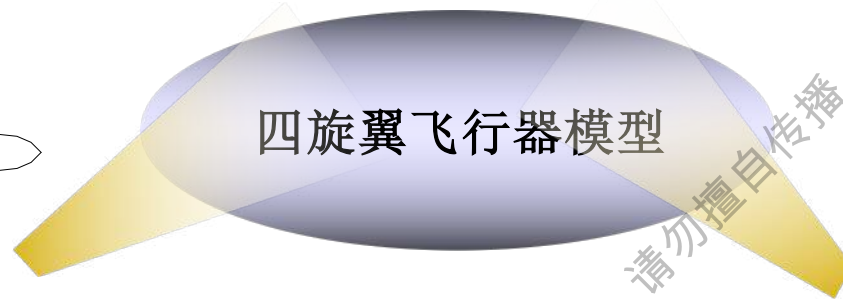
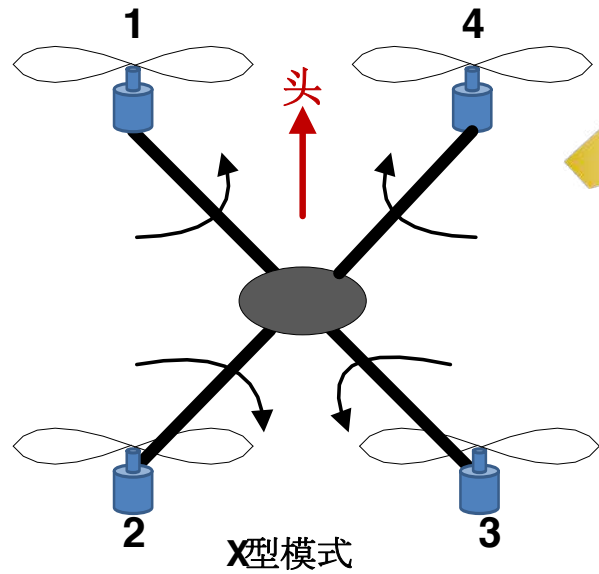
$$\mu_{ri}(\mathbf{x}_i(t)) \quad (4)$$

群体避障控制模块: 能够使群体实现群体协同避障功能。

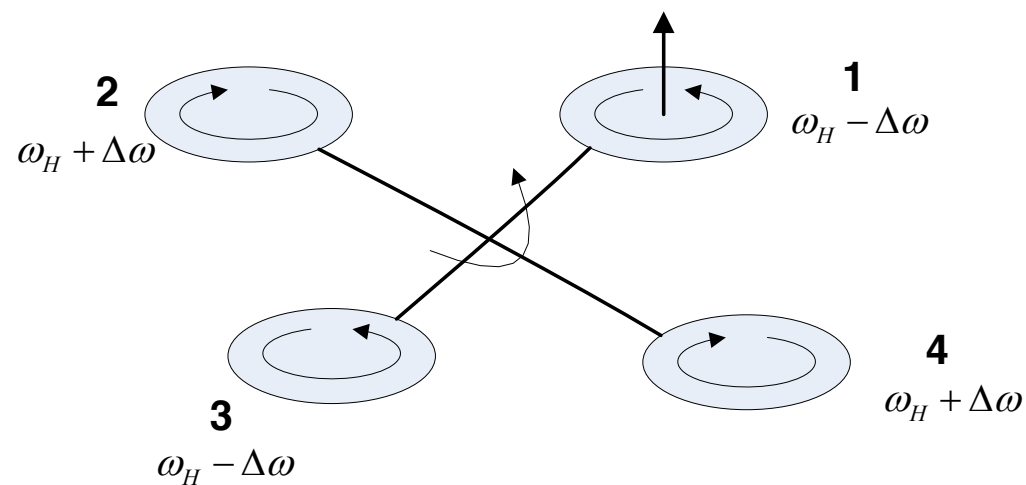
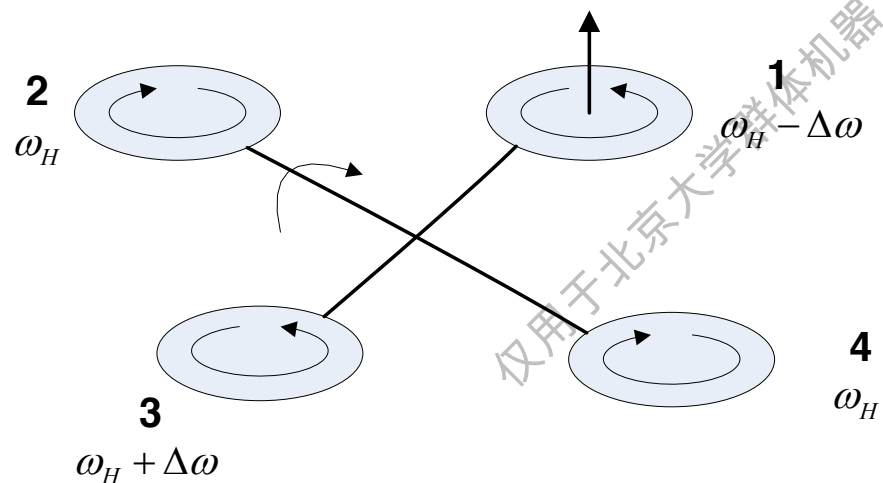
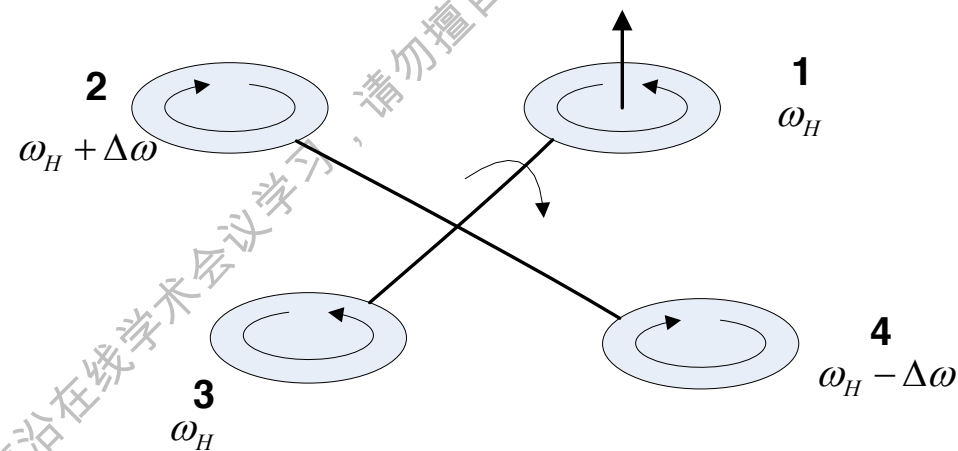
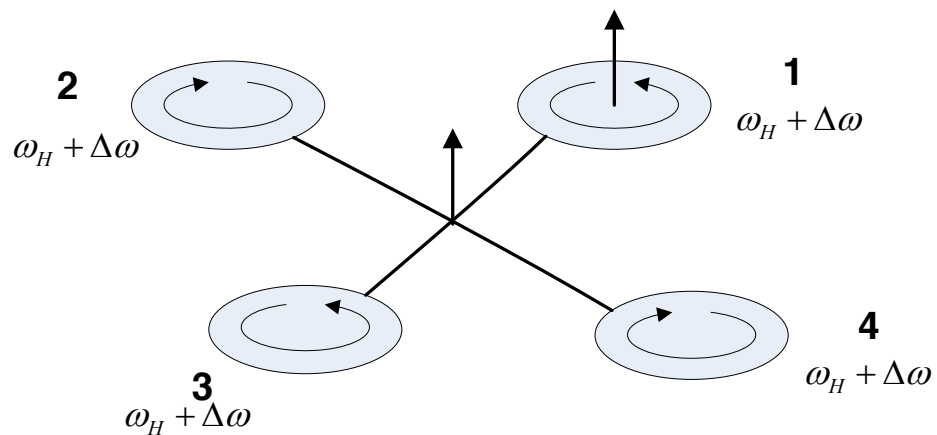
$$\mu_{ri}(\mathbf{x}_i(t)) = \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_p}{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_p\|} \varphi\left(1 - \frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_p\|}{R}\right) \quad \varphi(t) = \begin{cases} t, & t \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

上式中 \mathbf{x}_i 表示个体 i 的位置, \mathbf{x}_p 表示障碍物 p 的位置, R 为群体的认知范围。

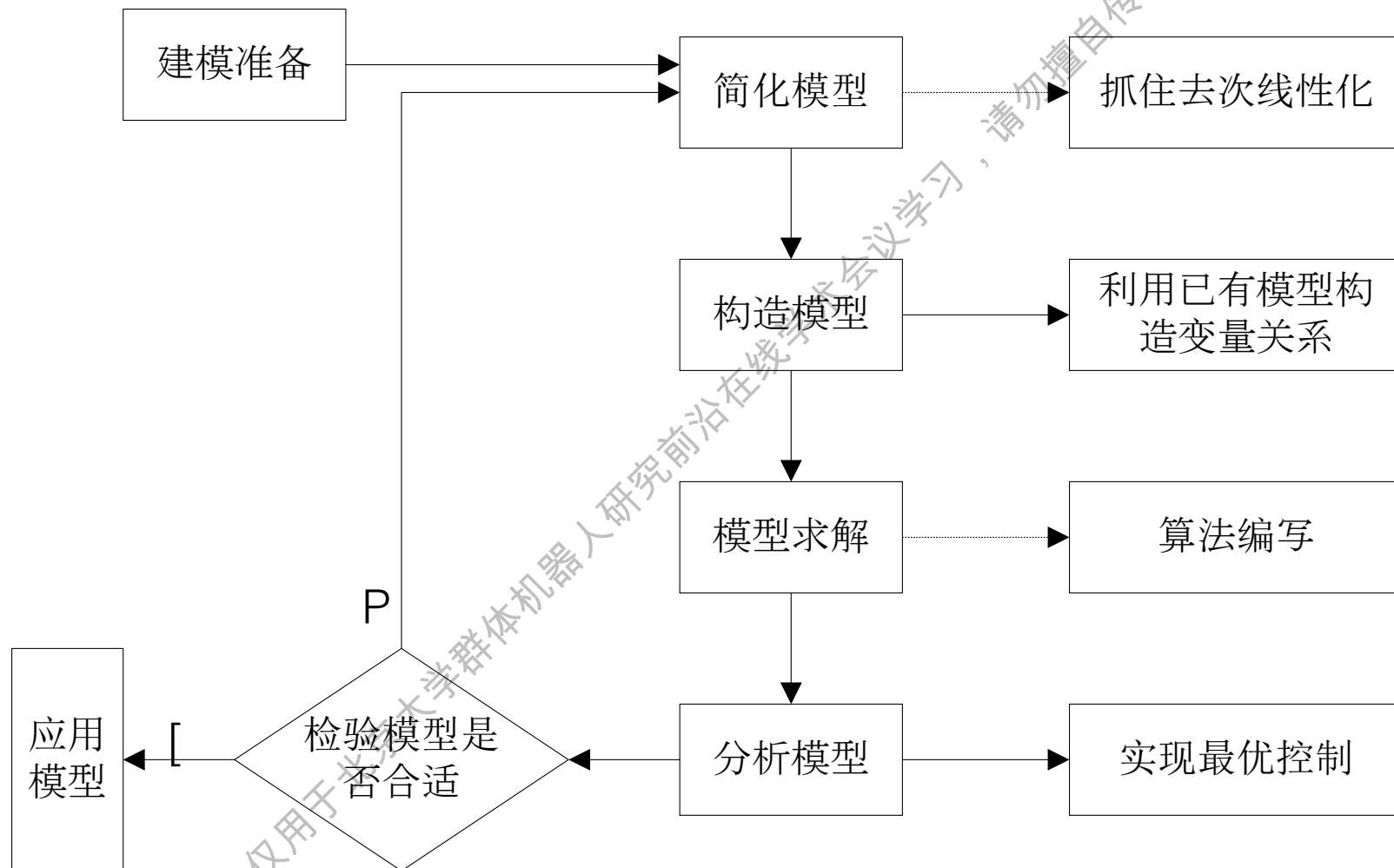
四旋翼飞行器运动模式



四旋翼飞行器运动模式



四旋翼飞行器建模流程



四旋翼飞行器运动模式

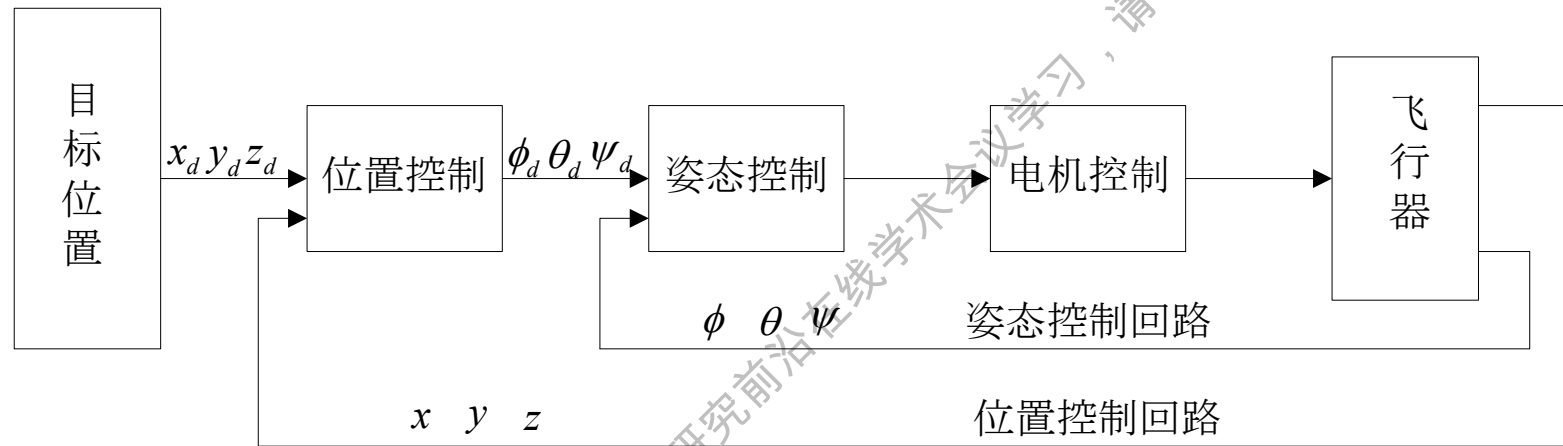
建立简化飞行器的模型，需假设：假设四旋翼飞行器为均匀对称的刚性物体，质量及其分布是基本不变的；假设地面坐标系的原点和四旋翼机体的几何中心和质心是重合的；假设飞行器所受的空气阻力和自身的重力不随高度变化而变化；假设机体坐标系中 oxz 平面和 oyz 平面都是对称的平面。

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ F_2 - F_4 \\ F_1 - F_3 \\ F_2 - F_1 + F_4 - F_3 \end{bmatrix}$$



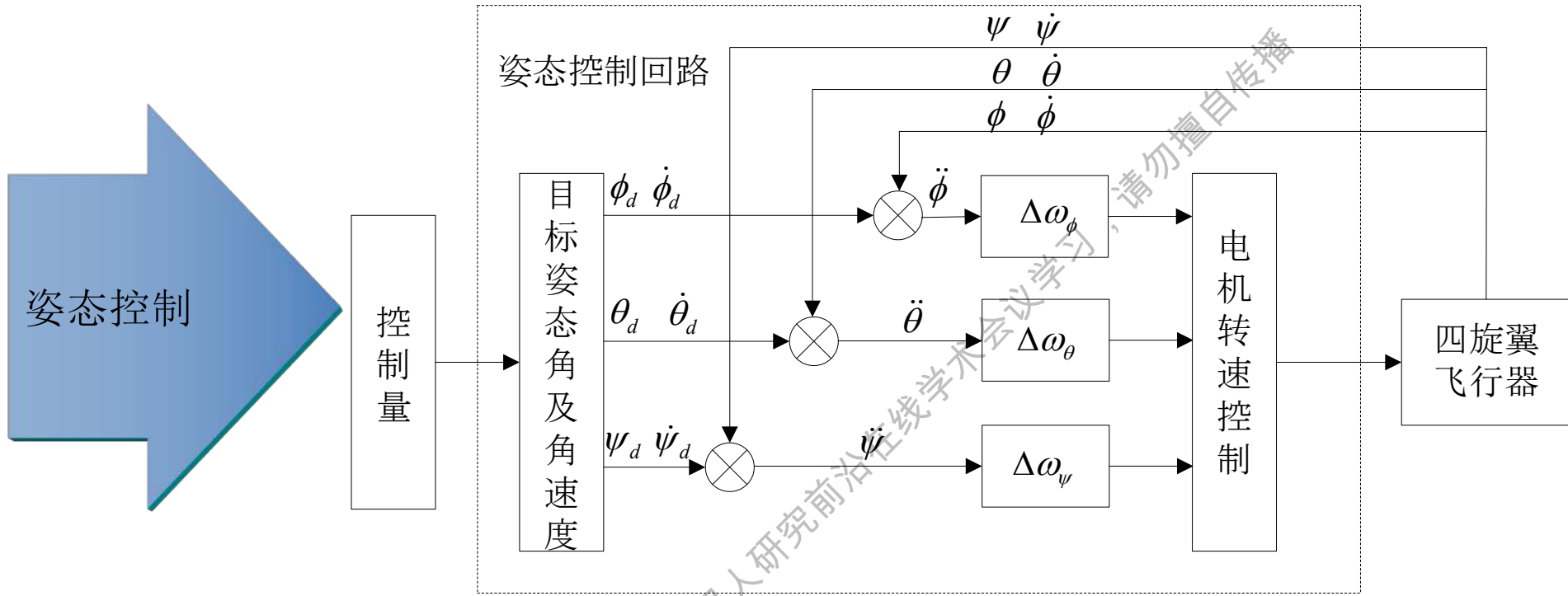
$$\begin{cases} \ddot{x} = (\sin \theta \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) U_1 / m \\ \ddot{y} = (\sin \theta \cos \phi \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) U_1 / m \\ \ddot{z} = (\cos \theta \cos \phi) U_1 / m - g \\ \ddot{\phi} = \frac{l U_2}{I_x} \\ \ddot{\theta} = \frac{l U_3}{I_y} \\ \ddot{\psi} = \frac{C U_4}{I_z} \end{cases}$$

四旋翼飞行器的控制系统



仅用于北京大学群体机器人研究前沿在线学术会议学习，请勿擅自传播

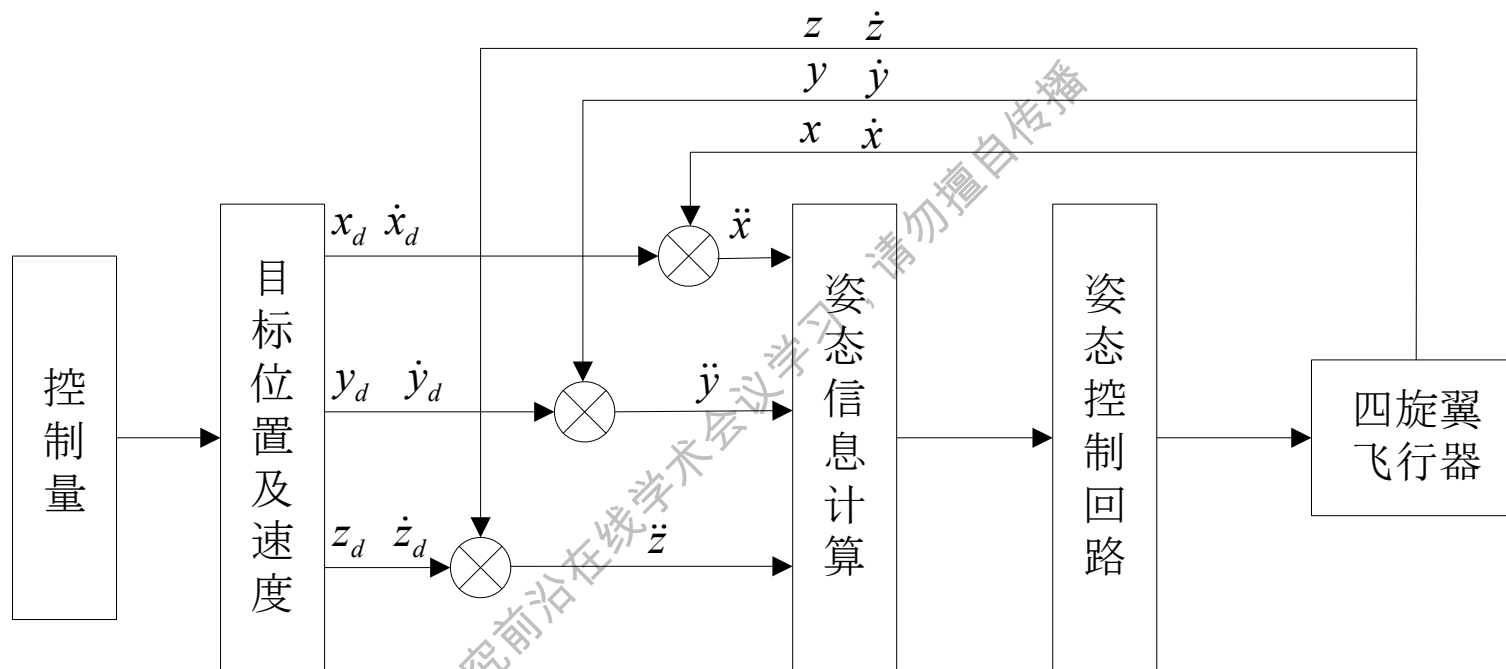
四旋翼飞行器的控制系统



$$\begin{cases} \Delta\omega_\phi = \ddot{\phi} - \ddot{\phi}_d \\ \Delta\omega_\theta = \ddot{\theta} - \ddot{\theta}_d \\ \Delta\omega_\psi = \ddot{\psi} - \ddot{\psi}_d \end{cases}$$

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = K_{p\phi}(\phi_d - \phi_c) + K_{d\phi}(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}_c) + \ddot{\phi}_d \\ \ddot{\theta} = K_{p\theta}(\theta_d - \theta_c) + K_{d\theta}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_c) + \ddot{\theta}_d \\ \ddot{\psi} = K_{p\psi}(\psi_d - \psi_c) + K_{d\psi}(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}_c) + \ddot{\psi}_d \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \Delta\omega_\phi = K_{p\phi}(\phi_d - \phi_c) + K_{d\phi}(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}_c) \\ \Delta\omega_\theta = K_{p\theta}(\theta_d - \theta_c) + K_{d\theta}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_c) \\ \Delta\omega_\psi = K_{p\psi}(\psi_d - \psi_c) + K_{d\psi}(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}_c) \end{cases}$$

四旋翼飞行器运动模式



$$\begin{cases} \ddot{x} = K_p (x - x_d) + K_d (\dot{x} - \dot{x}_d) + \ddot{x}_d \\ \ddot{y} = K_p (y - y_d) + K_d (\dot{y} - \dot{y}_d) + \ddot{y}_d \\ \ddot{z} = K_p (z - z_d) + K_d (\dot{z} - \dot{z}_d) + \ddot{z}_d \end{cases}$$

四旋翼飞行器群体协同控制系统的设计

四旋翼飞行器航迹规划

多四旋翼飞行器在复杂环境中飞行，除了有已知的障碍，甚至还有未知的障碍，同时还要避免邻近的个体间由于拥挤而发生碰撞，在群体协同航迹规划时要充分考虑四旋翼飞行器群体协同的空间约束条件

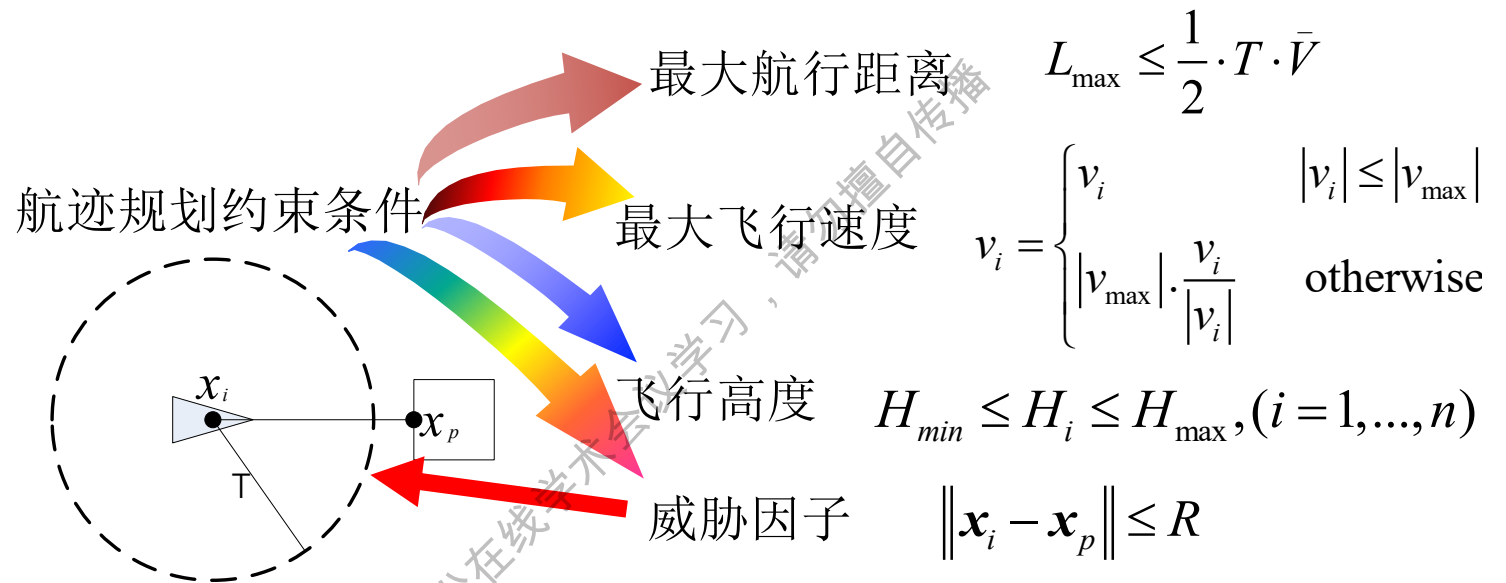
四旋翼飞行器群体协同控制

本文主要利用鸽群决策机制对四旋翼飞行器的群体协同进行研究

四旋翼飞行器群体协同飞行控制系统设计

四旋翼飞行器群体协同飞行控制试验平台硬件主要包括地面控制站、三架四旋翼飞行器、遥控器以及网络通信设备等部门

四旋翼飞行器航迹规划



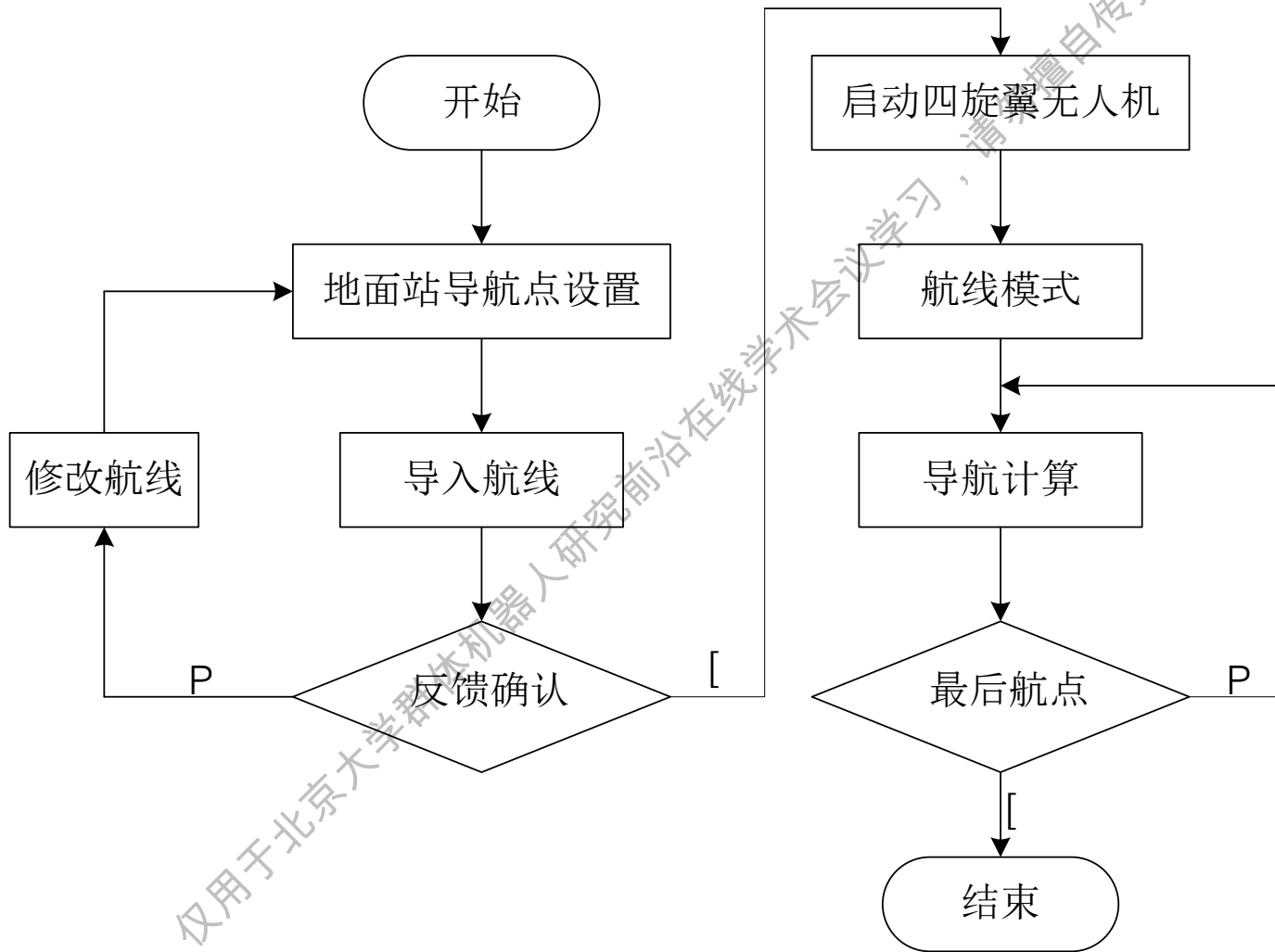
航迹的表示方法

一条航迹规划实际上就是有一些列的航迹点组成，设航迹点的集合为 $\{S, P_1, \dots, P_{N-1}, G\}$ ， S 为起始点， G 为目标点， P_1, \dots, P_{N-1} 为中间航迹点。

航迹规划任务流程

航迹规划是飞行器自主导航中不可分割的一个关键部分，它指导飞行器从一个三维空间坐标点至另一个三维空间坐标点。

四旋翼飞行器航迹规划



仅用于北京大学群体机器人研究前沿在线学术会议学习，请勿擅自传播

四旋翼飞行器群体协同控制

对于 n 个具有双积分动态的个体组成的群体系统，每个个体的运动控制：

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_i(t) &= \mathbf{v}_i(t) \\ \dot{\mathbf{v}}_i(t) &= \boldsymbol{\mu}_i(t)\end{aligned}\quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中 $\mathbf{x}_i \in R^N$ 表示 i 的位置信息， $\mathbf{v}_i \in R^N$ 表示 i 的速度信息， $\boldsymbol{\mu}_i \in R^N$ 表示 i 的控制变量。

模拟鸽群的决策机制：

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{v}_i(t)$$

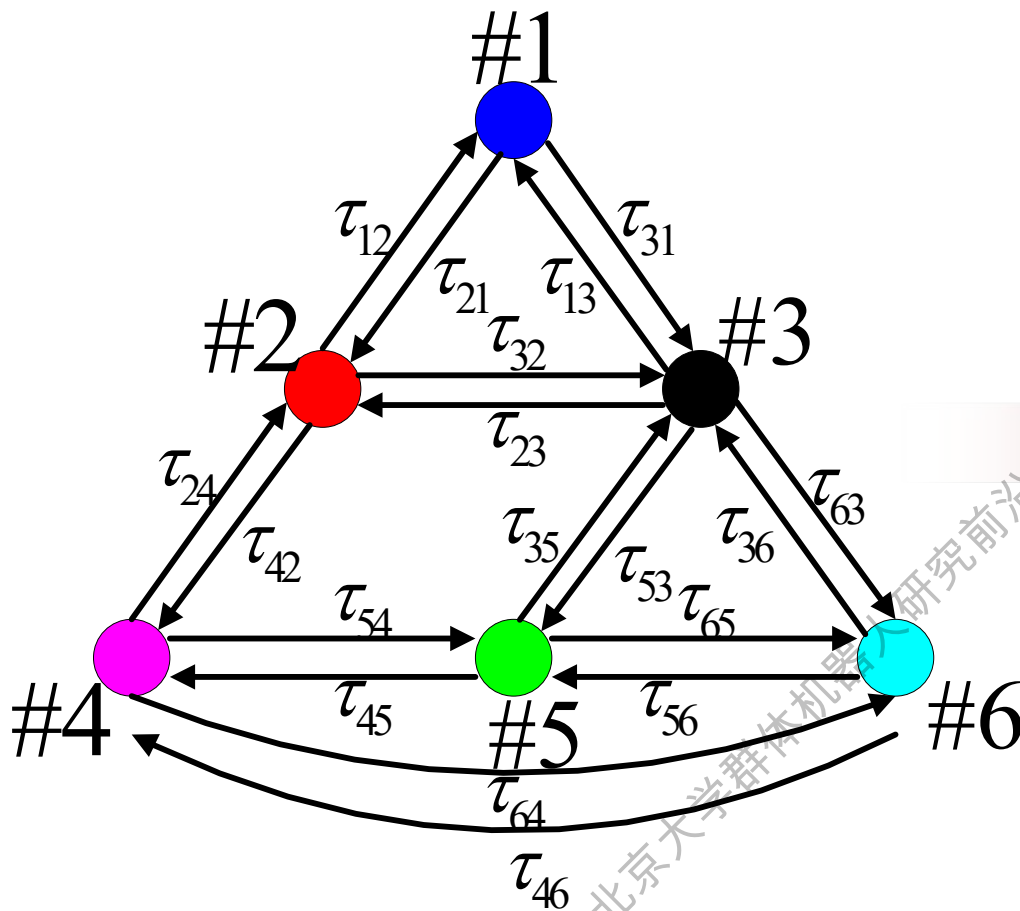
$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{v}}_i(t) &= -\omega_0 (\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_e(t)) + \omega_1 \sum_{j=1}^n \tau_{ij}(t) [(\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t)) \\ &\quad - (\mathbf{h}_j - \mathbf{h}_i)] + \omega_2 \sum_{j=1}^n \tau_{ij}(t) (\mathbf{v}_j(t) - \mathbf{v}_i(t)) + \omega_3 \boldsymbol{\mu}_i(\mathbf{x}_i(t))\end{aligned}$$

$$\tau_{ij}(t) = \frac{e^{-d_{ij}(t)/\beta_j}}{\sum_{k \in N_i} e^{-d_{ik}(t)/\beta_k}}$$

$\mathbf{v}_e(t)$ 为群体的期望速度， $\mathbf{v}_i(t), \mathbf{v}_j(t)$ 分别为个体 i 、 j 的当前速度， $\mathbf{x}_i(t), \mathbf{x}_j(t)$ 分别为个体 i 、 j 的当前位置， $\mathbf{h}_i, \mathbf{h}_j$ 分别为个体 i 、 j 在编队中的相对位置信息，大于0的控制参数， $\boldsymbol{\mu}_i(\mathbf{x}_i(t))$ 为个体 i 的排斥加速度。 $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻 i 对 j 影响的权重。 ω_i, β_j 为个体 j 对群体决策的权重， $d_{ij}(t)$ 为个体 i 与个体 j 的距离。

四旋翼飞行器群体协同控制

为了更好地理解影响权重因子，引入通信拓扑结构图：



$$A = (a_{ij})_{6 \times 6} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

从邻接矩阵A可以看出
#1与#2、#3相互通信，
即 $N_1 = \{2, 3\}$

四旋翼飞行器群体协同控制

以#1号四旋翼飞行器为例，其通信拓扑结构为

$$a_{1j} = [0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

四旋翼飞行器的影响权重因子的数学方程：

$$\tau_{1j}(t) = \frac{a_{1j} \cdot e^{-d_{1j}(t)/\beta_j}}{\sum_{k \in N_1} a_{1k} \cdot e^{-d_{1k}(t)/\beta_k}}$$

$$\tau_{ij}(t) = \frac{a_{ij} \cdot e^{-d_{ij}(t)/\beta_j}}{\sum_{k \in N_i} a_{ik} \cdot e^{-d_{ik}(t)/\beta_k}}$$

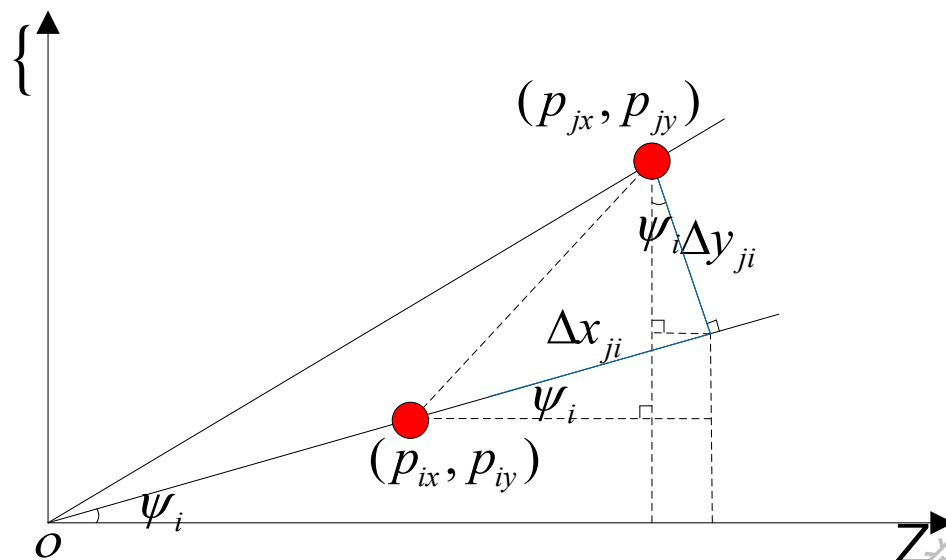
β_j 为在鸽群控制决策中在群体中的决策等级系数， $d_{ij}(t)$ 为 r_i 与 r_j 的距离

N_i 为 r_i 能够感知到的邻近其它四旋翼飞行器个体的集合。

影响权重因子意义：四旋翼飞行器 r_j 相对于群体影响四旋翼飞行器 r_i 的程度，由邻接矩阵、与邻近个体的距离和自身决策等级系数决定，它是鸽群协同控制策略的关键技术，也是群体分层结构的直接体现。

四旋翼飞行器相对位置坐标转换

四旋翼飞行器相对位置坐标转换：



对于高度的测量采用气压高度计进行测得，建模需假设所有飞行器处于同一高度，每架四旋翼飞行器需要获取邻近个体的位置信息，我们需要将机体坐标系转换为地面坐标系的位置信息才能对其位置和速度进行控制，机体间相对位置坐标转换如图所示。

在 t 时刻时，若四旋翼飞行器 r_i 在地面坐标系的位置为 $(p_{ix}(t), p_{iy}(t))$ ，通过下式的坐标转换公式可以得到 r_j 在地面坐标系下位置：

$$\begin{cases} p_{jx}(t) = p_{ix}(t) + \Delta x_{ji} \cos \psi - \Delta y_{ji} \sin \psi \\ p_{jy}(t) = p_{iy}(t) + \Delta x_{ji} \sin \psi + \Delta y_{ji} \cos \psi \end{cases} \longrightarrow \begin{bmatrix} p_{jx} \\ p_{jy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{ix} \\ p_{iy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{ji} \\ \Delta y_{ji} \end{bmatrix}$$

通过该坐标转换可以获取群体个体间的相对位置

即：

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta x_{ji} \\ \Delta y_{ji} \end{bmatrix}$$

$$p_j = p_i + J \cdot \Delta$$

群体中飞行器位置和姿态控制

r_i 在群体协同飞行中的控制方程:

$$\dot{Q}_i = B_1 Q_i + B_2 U_i$$

$$\dot{P}_i = J \cdot Q_i$$

↓ 求导

$$\ddot{P}_i = \dot{J} Q_i + J \dot{Q}_i$$

$$\dot{Q}_i = J^{-1} (\ddot{P}_i - \dot{J} Q_i)$$

令 $\ddot{P}_i = u_i$ 得到: $U_i = B_2^{-1} (J^{-1} (u_i - \dot{J} Q_i) - B_1 Q_i)$

u_i 即为输入控制量, 包括位置和姿态控制量

将位置和姿态控制量分别用 u_i^p 和 u_i^w 定义得: $u_i = [u_i^p \quad u_i^w]^T$

$$\text{则: } [\ddot{p}_{ix} \quad \ddot{p}_{iy} \quad \ddot{\psi}_i]^T = [u_i^p \quad u_i^w]^T$$

$$P_i = [p_{ix} \quad p_{iy} \quad \psi_i]^T$$
$$Q_i = [q_{ix} \quad q_{iy} \quad \dot{\psi}_i]^T$$
$$J = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

仅用于北京航空航天大学群体飞行器研究前沿在线学术会议学习, 请勿擅自传播

四旋翼飞行器协同控制

四旋翼飞行器*i*在机体坐标系下的速度： $q_i = [q_{ix} \quad q_{iy}]^T$

四旋翼飞行器*i*在地面坐标系下的速度： $v_i = J^\Lambda \cdot q_i$

四旋翼飞行器在地面坐标系中的期望速度： $v_e = J^\Lambda \cdot q_e$

则基于位置的协同策略为：

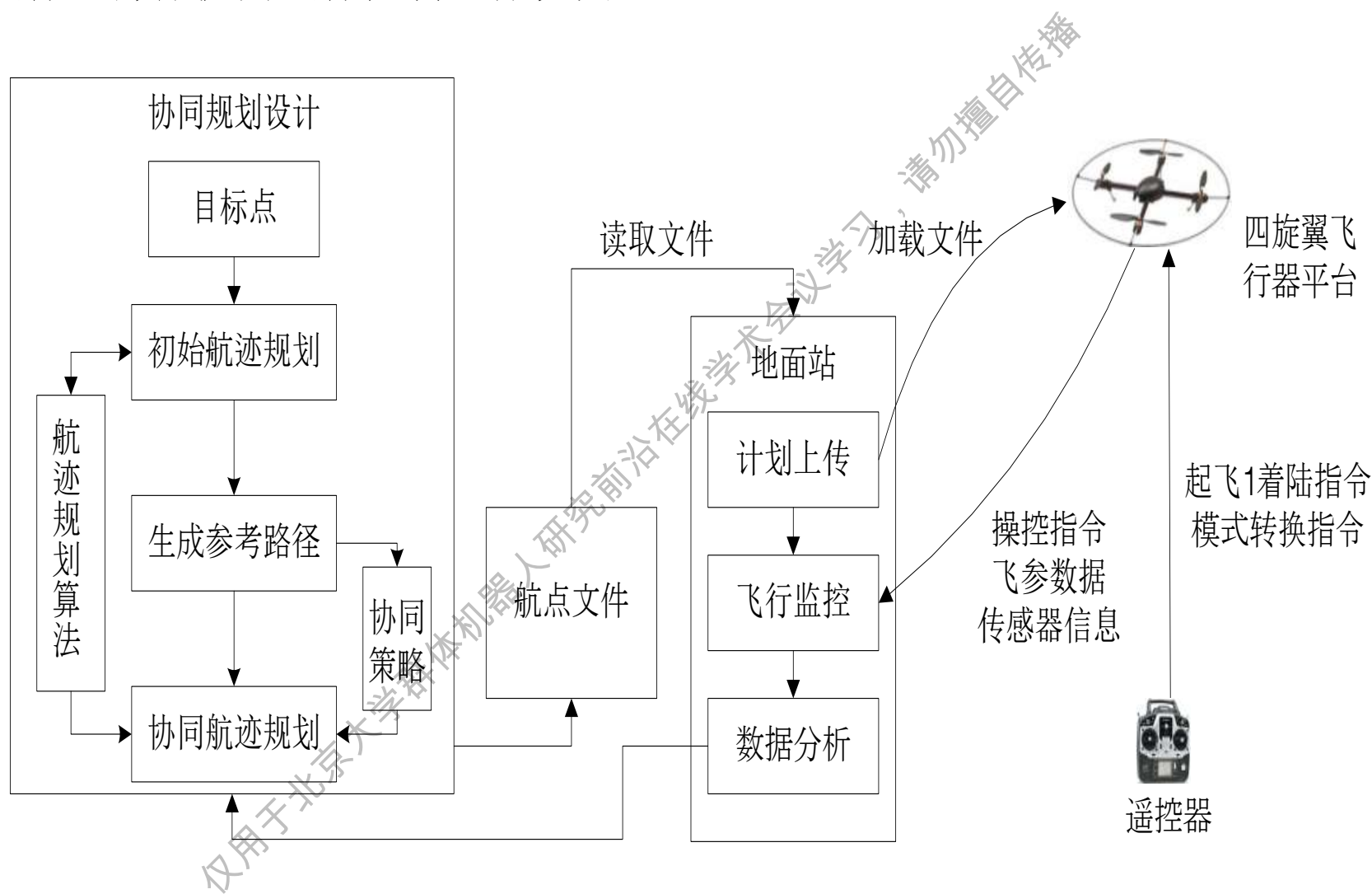
$$u_i^p(t) = \dot{v}_e(t) - \omega_0 (v_i(t) - v_e(t)) + \omega_1 \sum_{j=1}^n \tau_{ij}(t) [(p_j(t) - p_i(t)) - (h_j - h_i)] + \omega_2 \sum_{j=1}^n \tau_{ij}(t) (v_j(t) - v_i(t))$$

对于姿态控制，令 $\ddot{\psi}_i = u_i^w$ ，达到航向一致即 $\psi_i \rightarrow \psi_d$ 。令 $\psi_\sigma = \psi_i - \psi_d$

采用PD控制： $u_i^w = -2\rho\dot{\psi}_\sigma - \rho^2\psi_\sigma$ 其中 ρ 为正数。

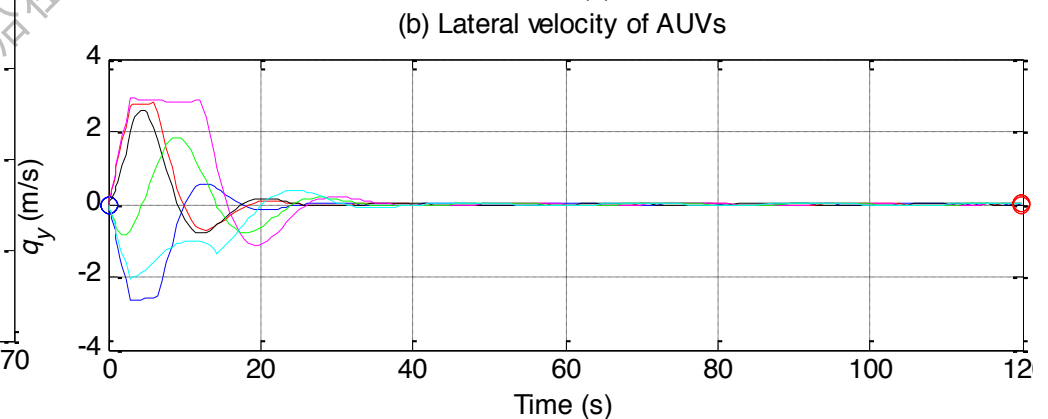
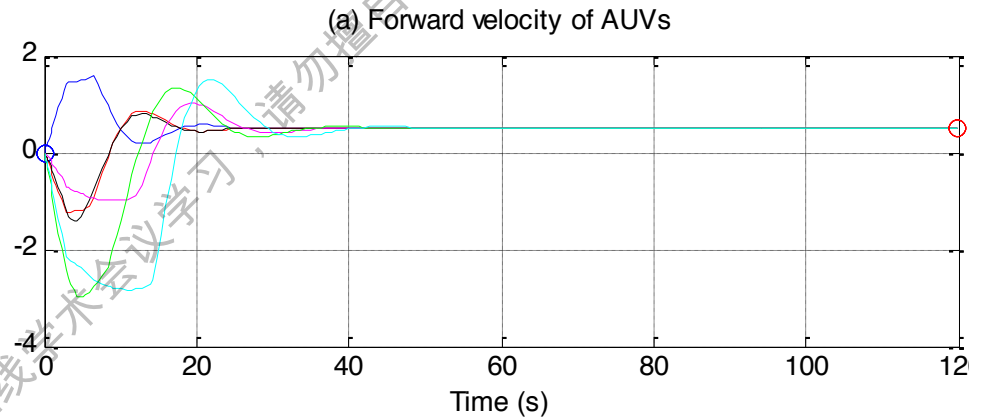
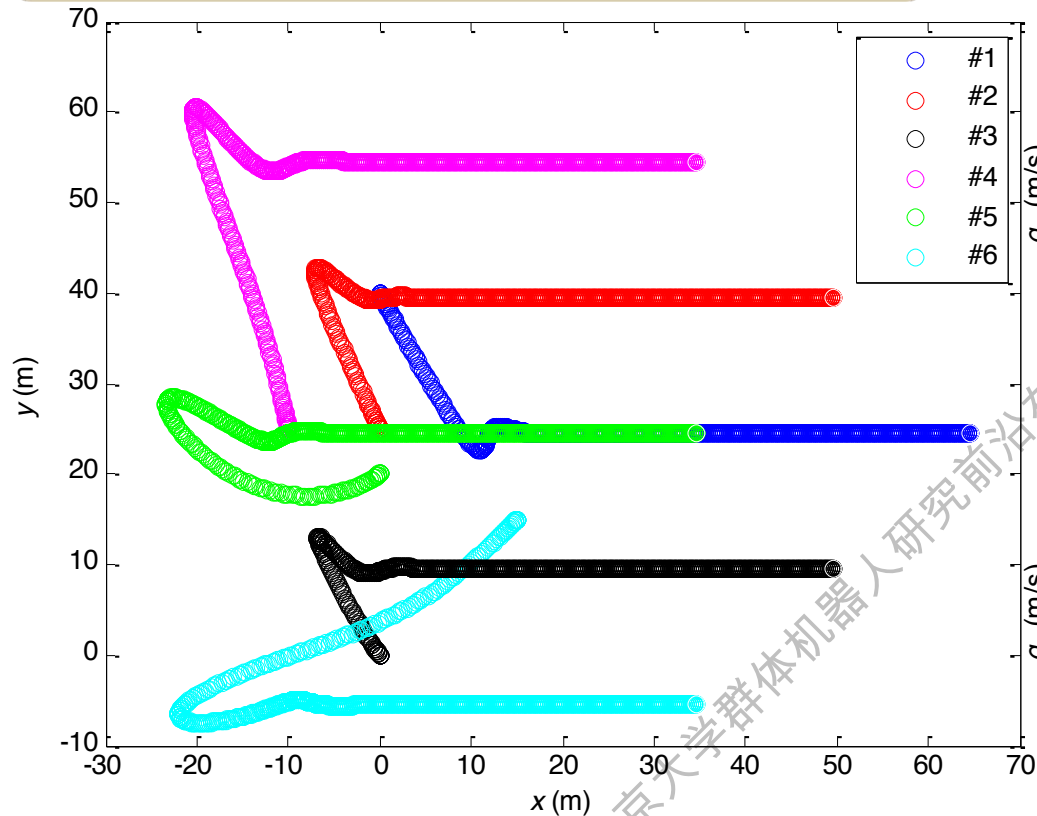
群体协同控制系统设计

四旋翼飞行器群体协同飞行控制总体框图：



仿真实验结果

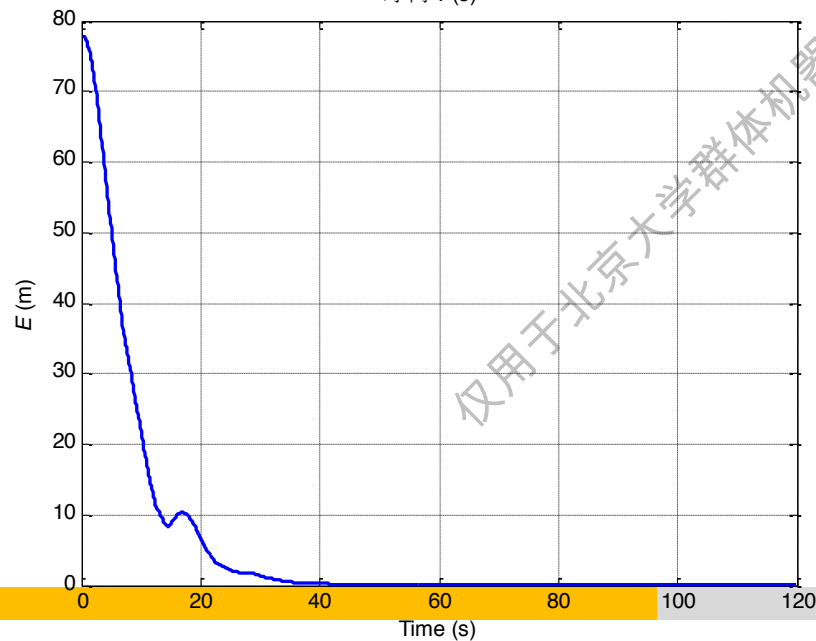
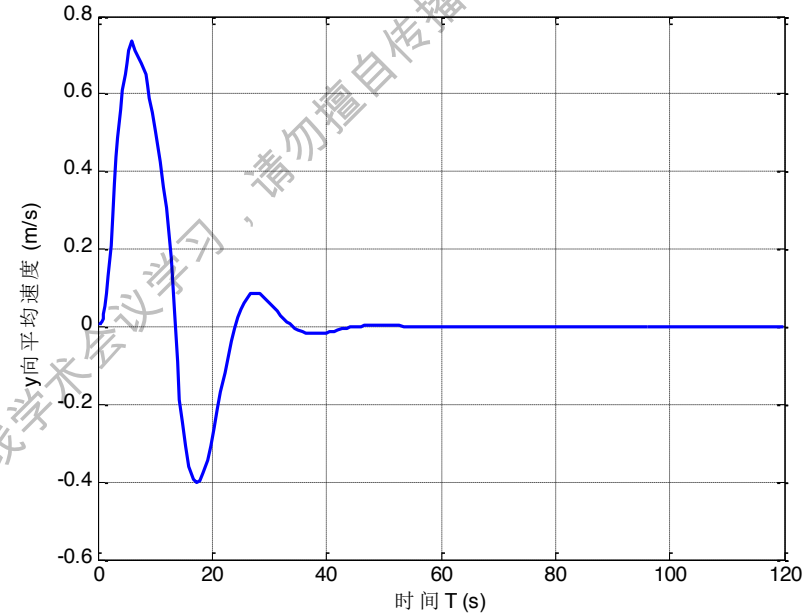
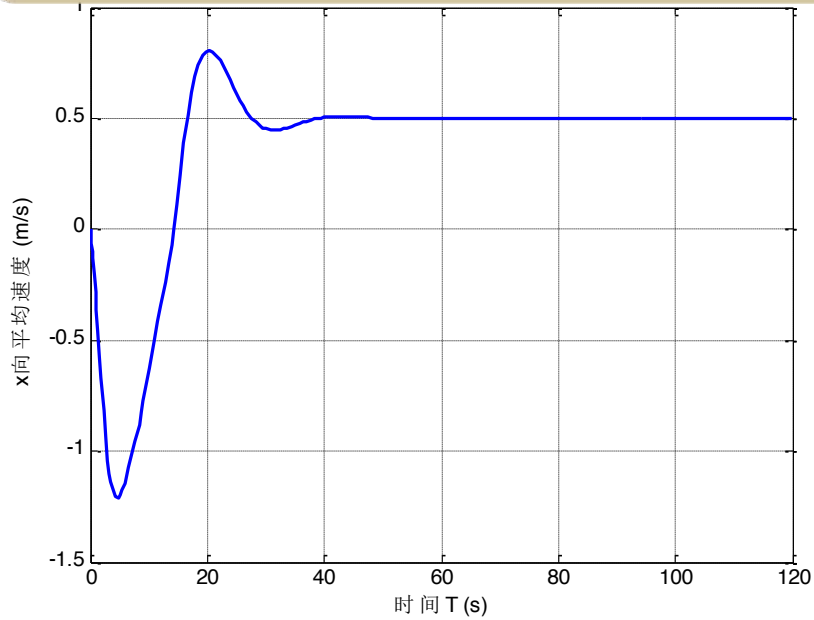
四旋翼飞行器常规协同仿真实验



群体系统按照鸽群协同控制规则，使系统内各个四旋翼飞行器达到速度一致性并形成期望队形，各个个体按照鸽群协同控制策略，通过个体间的信息交互实现自身与其他个体的协同控制，达到群体的渐进一致性。从运动轨迹来看，有6架四旋翼飞行器构成的群体在经过一段时间的调整，达到了个体间相对位置恒定的效果，形成了期望队形，很好的实现了群体编队飞行。

仿真实验结果

四旋翼飞行器常规协同仿真实验



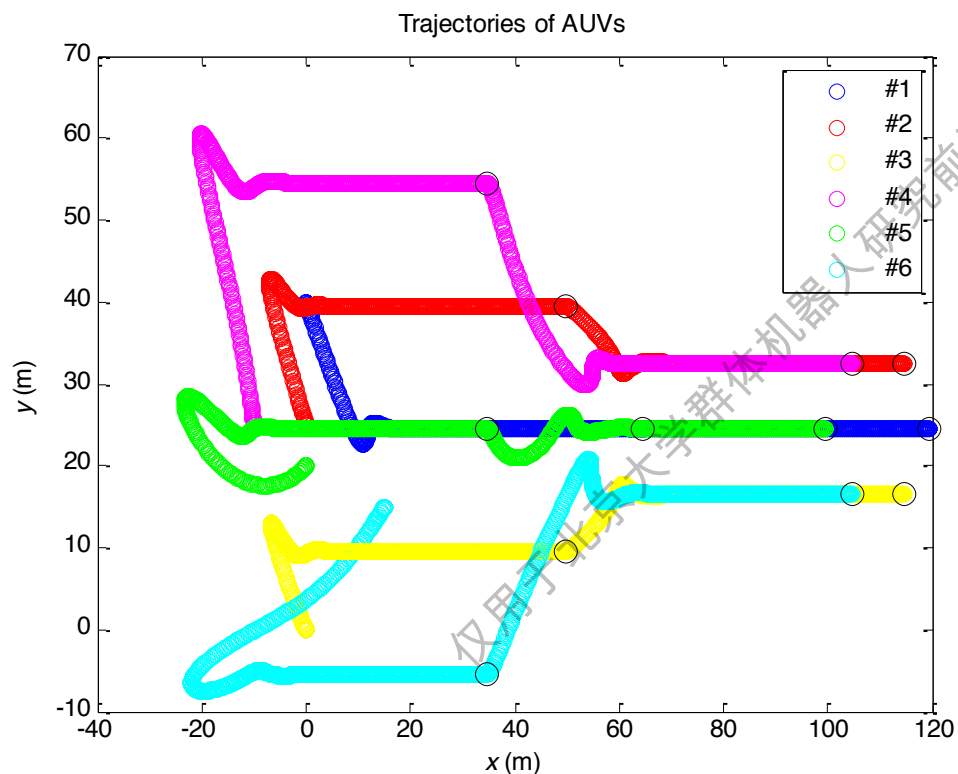
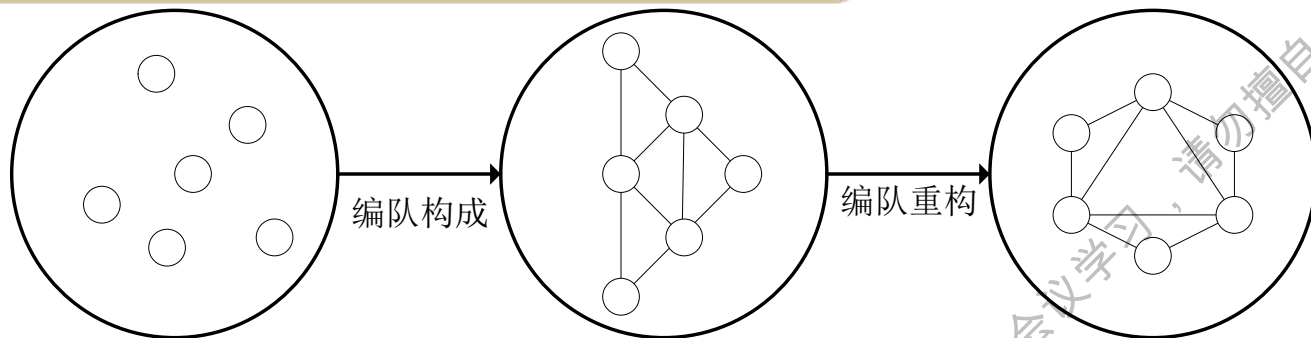
为衡量本文提出的群体协同控制率的有效性，定义了四旋翼飞行器群体系统稳定性评价指标：群体编队误差 和 群体平均速度值。

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \|(x_i - x_j) - (h_i - h_j)\|}{2n}$$

$$\bar{V} = \sum_{i=1}^n v_i / n$$

仿真实验结果

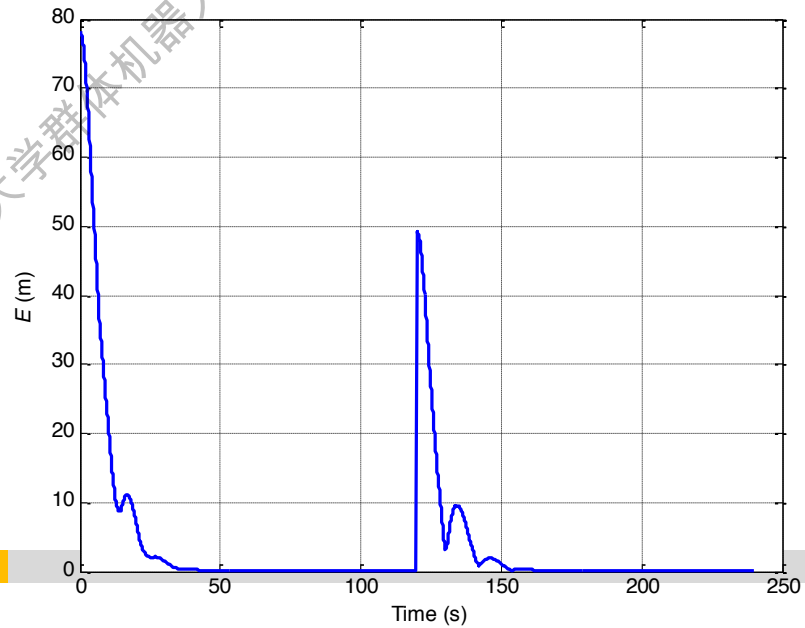
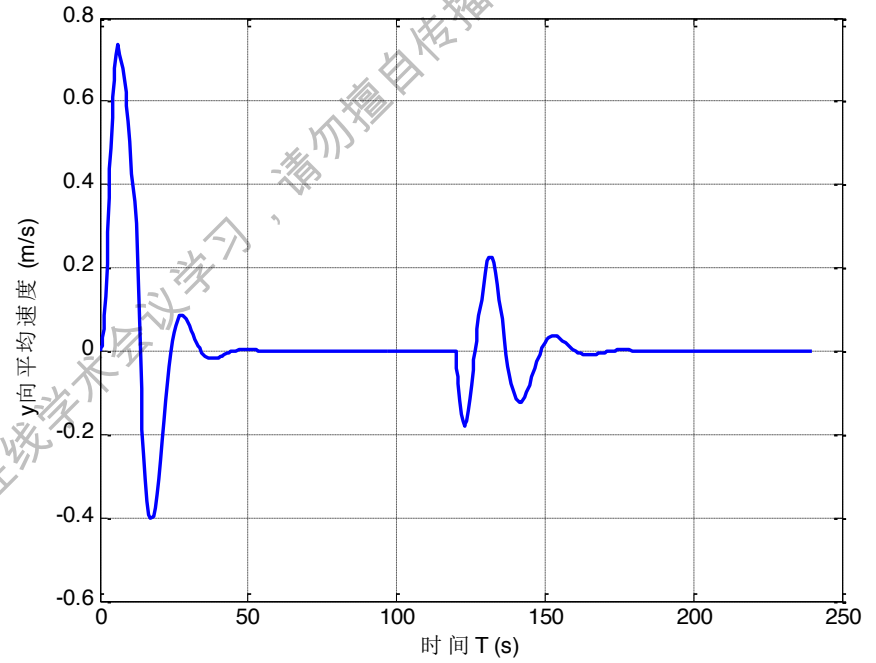
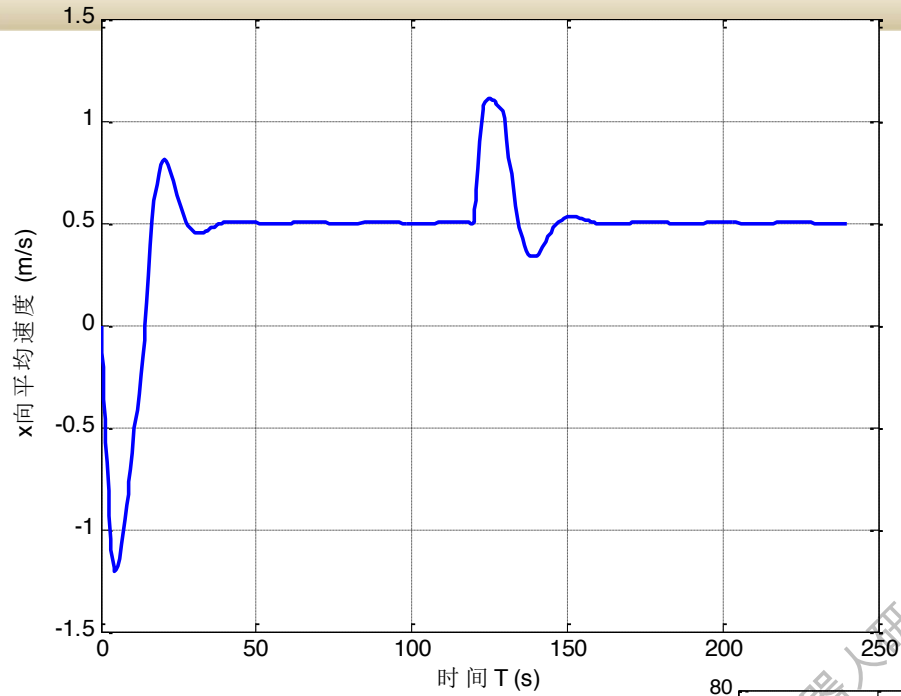
四旋翼飞行器编队重构仿真实验



从图所示的运动轨迹来看，四旋翼飞行器先经过一段时间的队形调整，构成了楔形结构，并保持楔形结构稳定运动一段时间后再次进行结构调整，形成正六边形结构，最终保持该结构进行稳定运动，很好的实现了群体编队的重构。

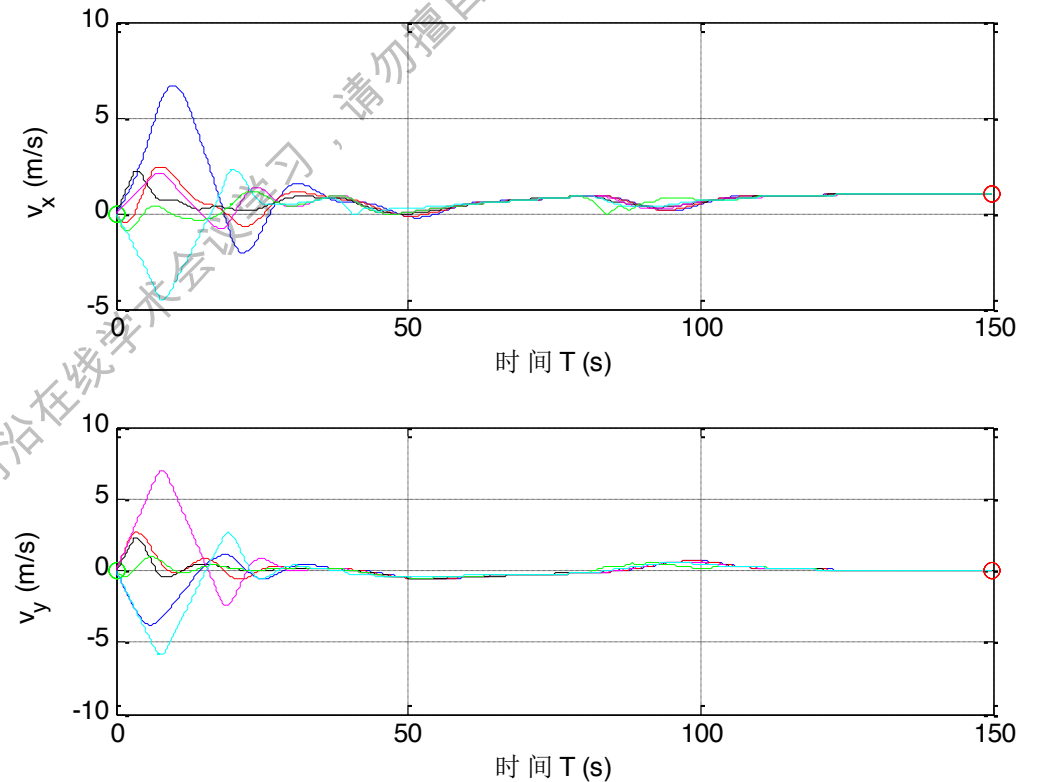
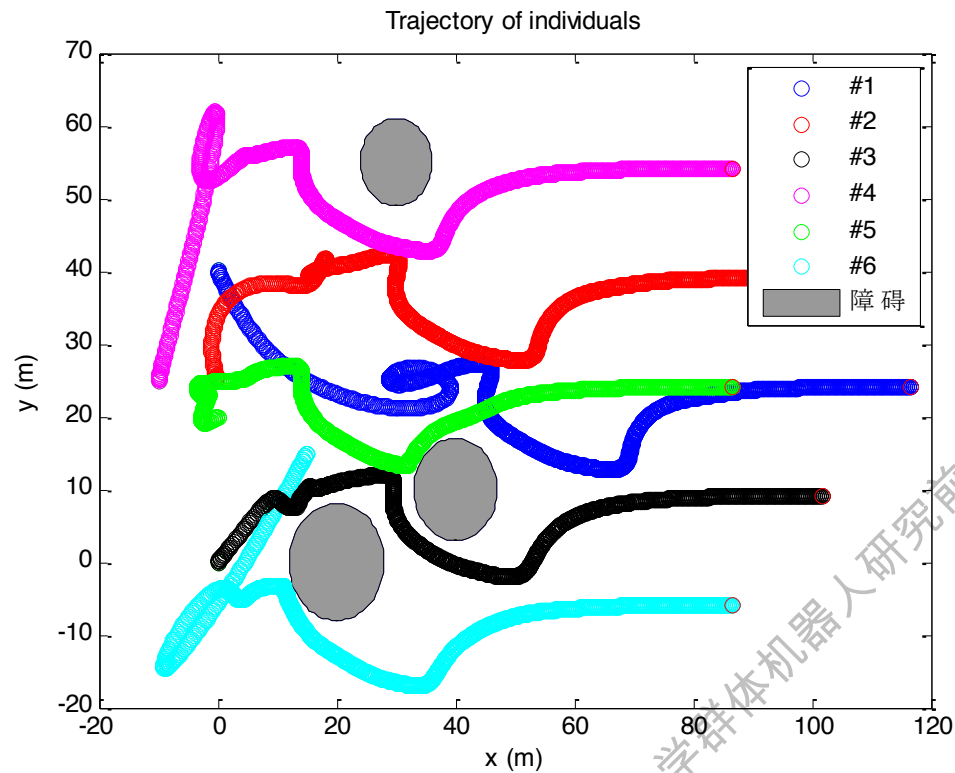
仿真实验结果

四旋翼飞行器编队重构仿真实验



仿真实验结果

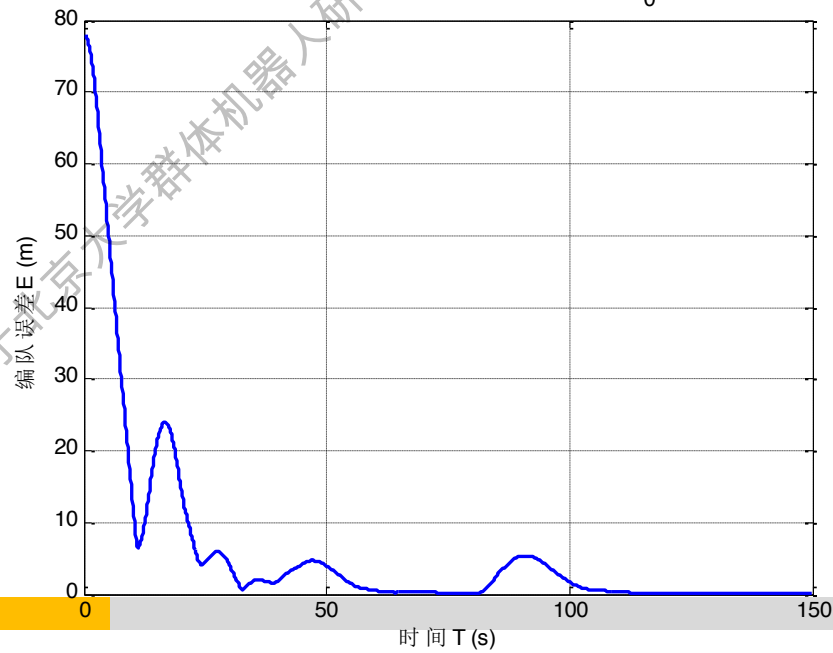
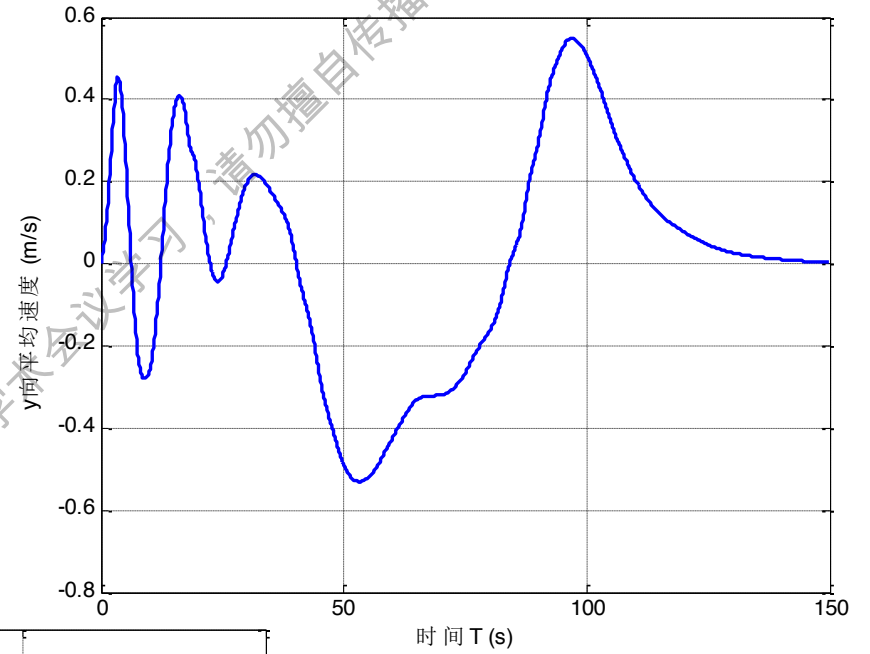
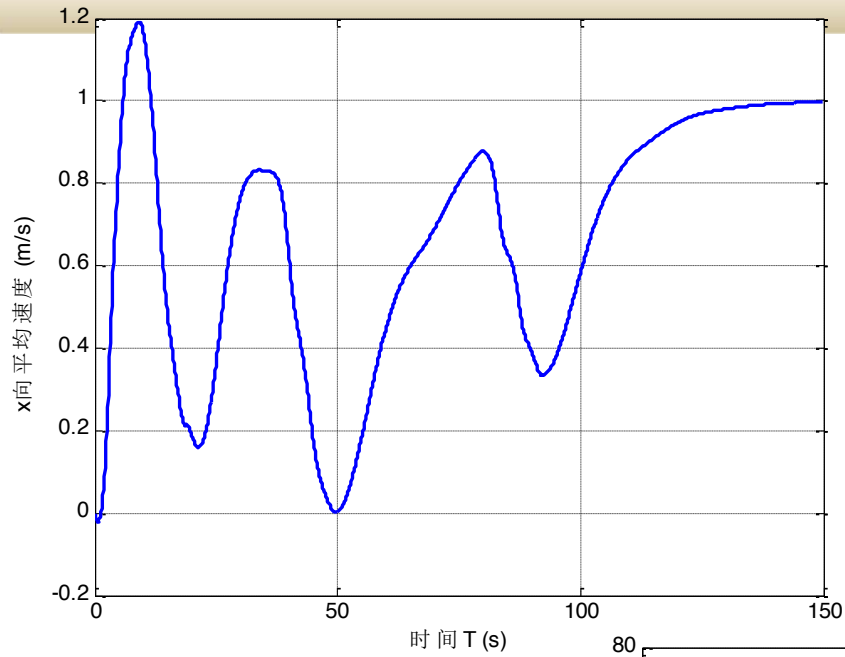
四旋翼飞行器避障协同飞行仿真实验



当四旋翼飞行器进入到障碍识别范围之内 $\|x_i - x_p\| \leq R$ 时，群体系统进入避障模式，在躲避障碍物的过程中，群体系统仍然考虑到自身的速度与编队控制使群体内的各个个体避免自身的碰撞，在群体远离障碍物时及时调整，经过一定时间调整后仍然实现了编队稳定性。基于鸽群协同控制策略的协同控制技术实现了时间和空间的协调，使得四旋翼飞行器群体能够适应在不确定的现实环境中安全飞行。

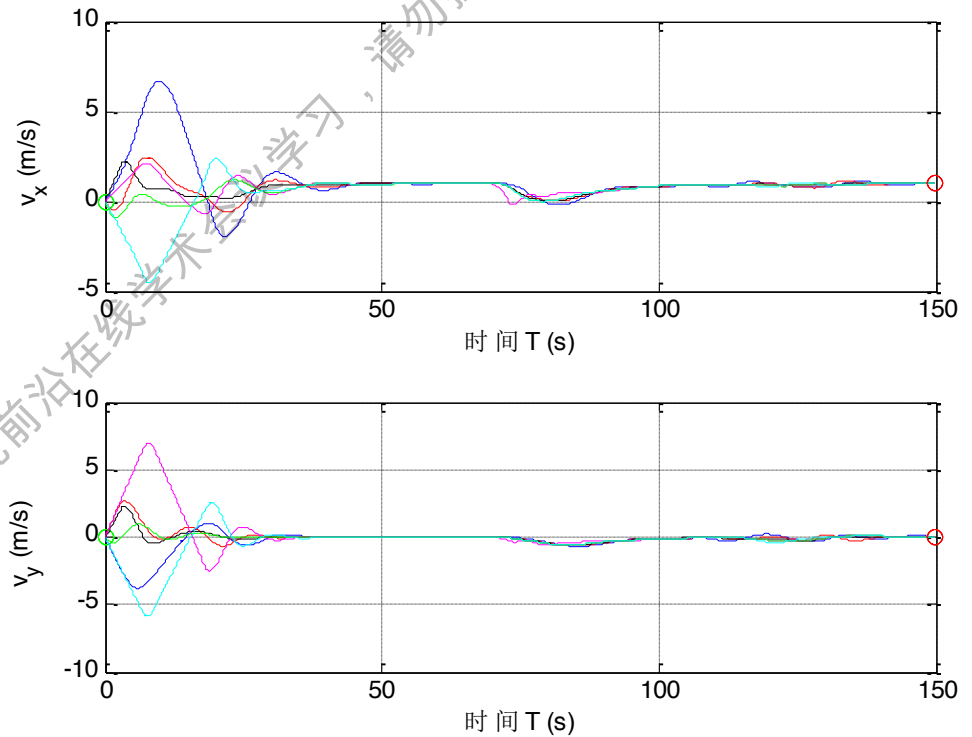
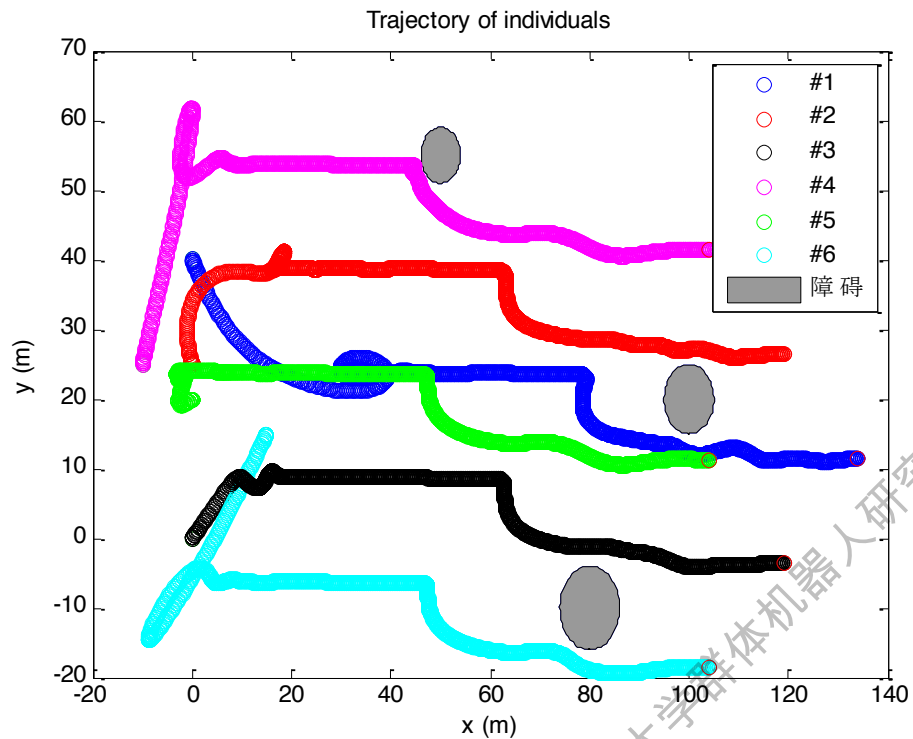
仿真实验结果

四旋翼飞行器避障协同飞行仿真实验



仿真实验结果

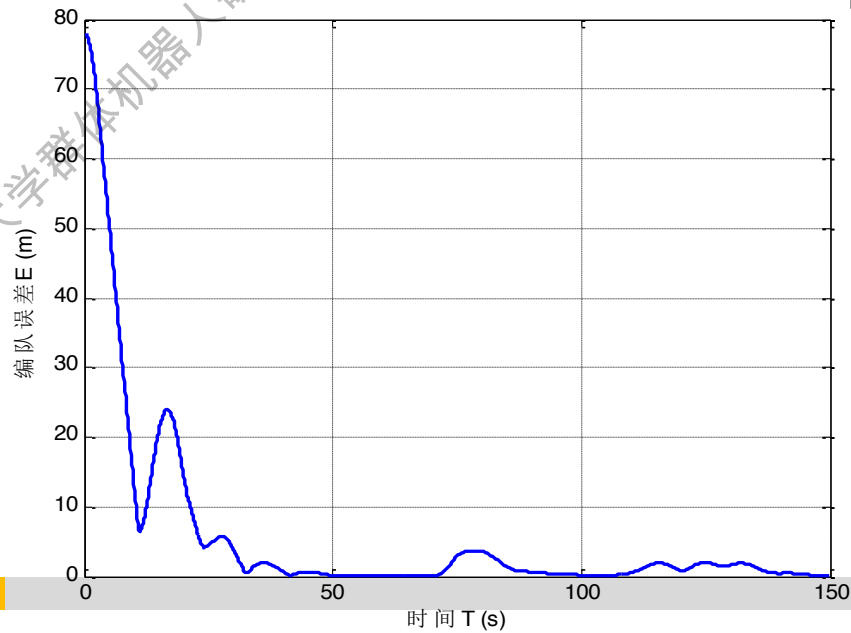
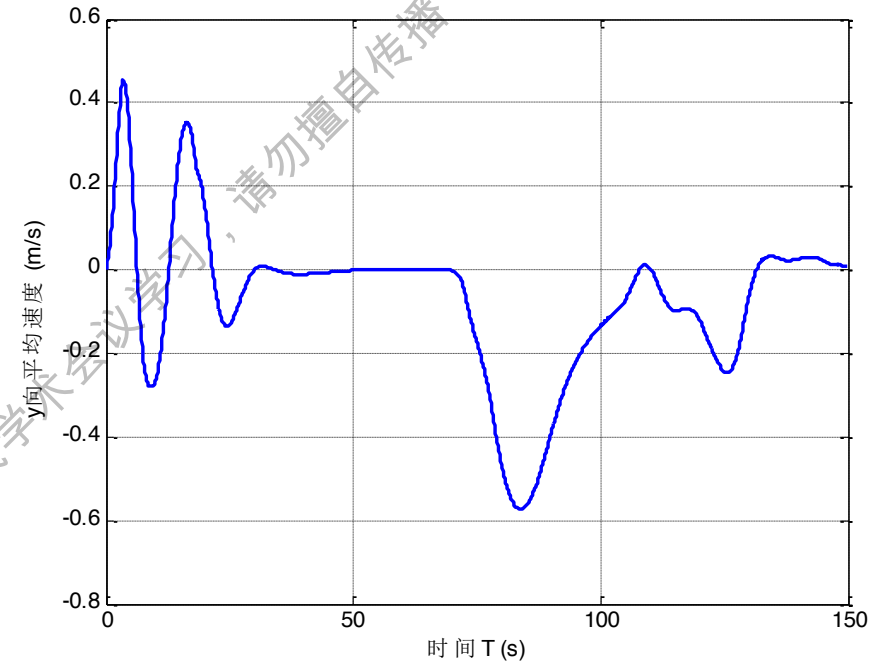
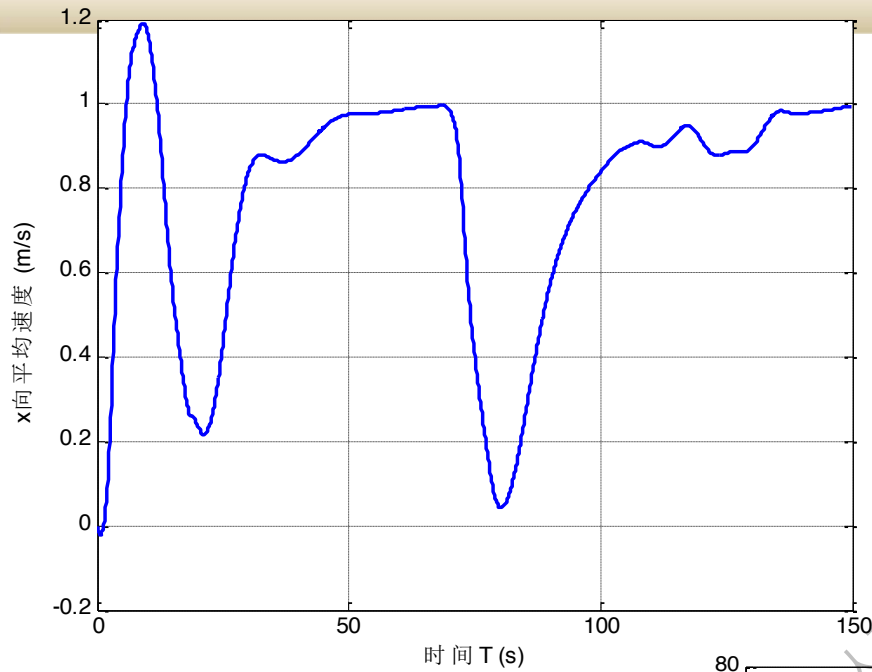
四旋翼飞行器避障协同飞行仿真实验



编队形成后遇到障碍，四旋翼飞行器群体避障运动轨迹如图所示，可以看出群体由初始位置经过一定时间的群体调整后形成编队，编队形成后遇到障碍，并且达到障碍认知范围，将进行避障运动，避障运动群体飞行轨迹图可以发现群体系统形成编队后在遇到障碍的环境中，根据鸽群协同控制策略调整队形及个体速度，群体同样可以在实现避障后经过一定时间的调整实现编队的渐进稳定性。

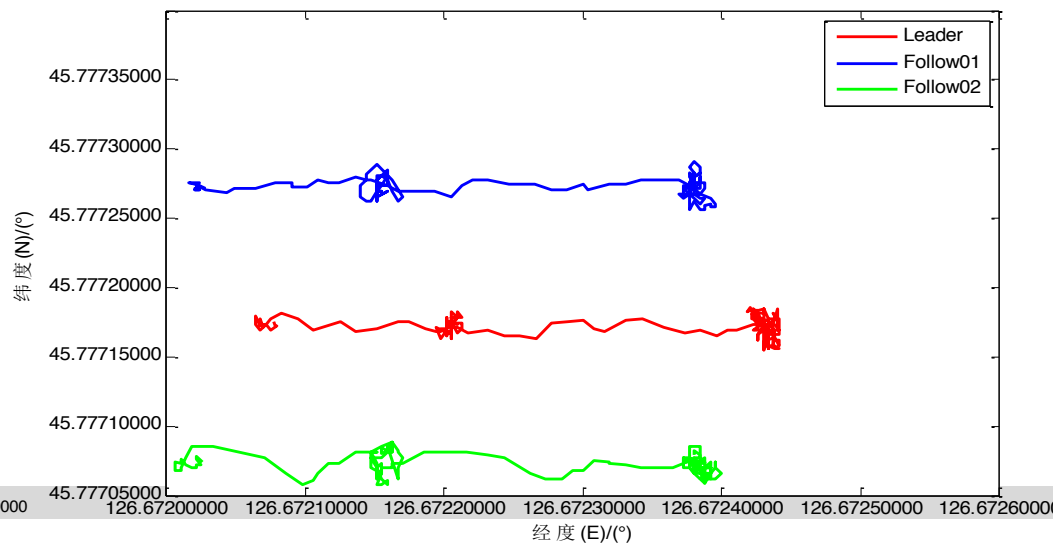
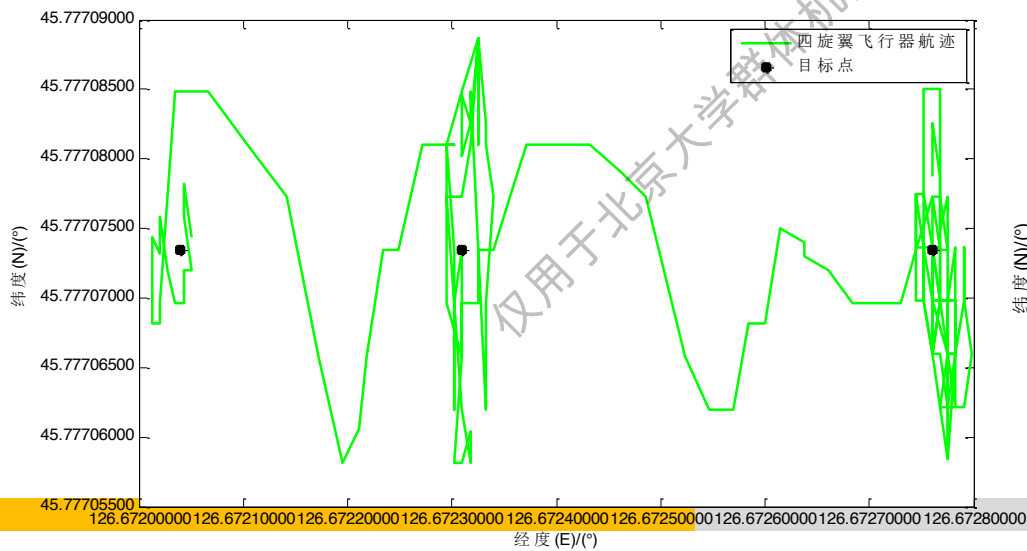
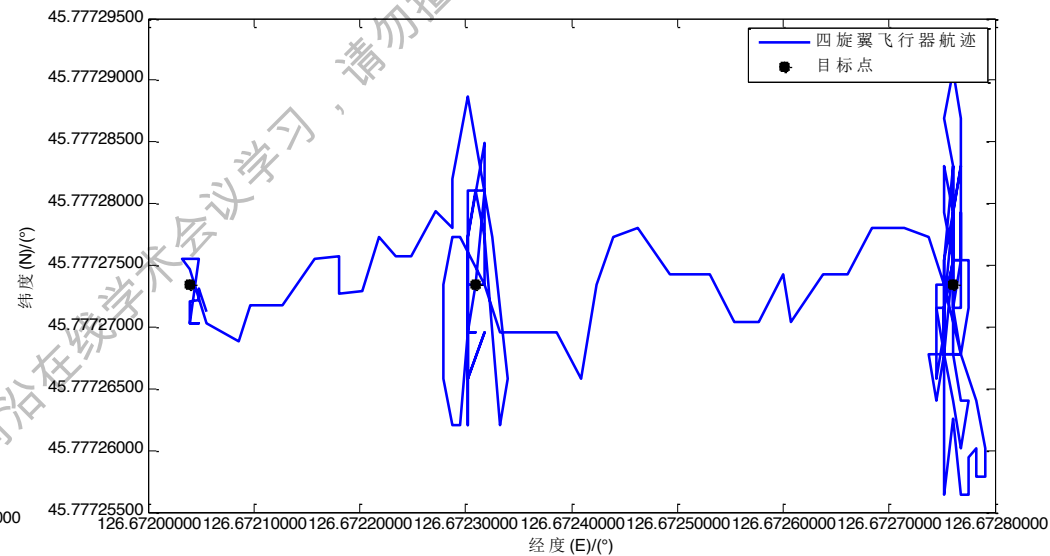
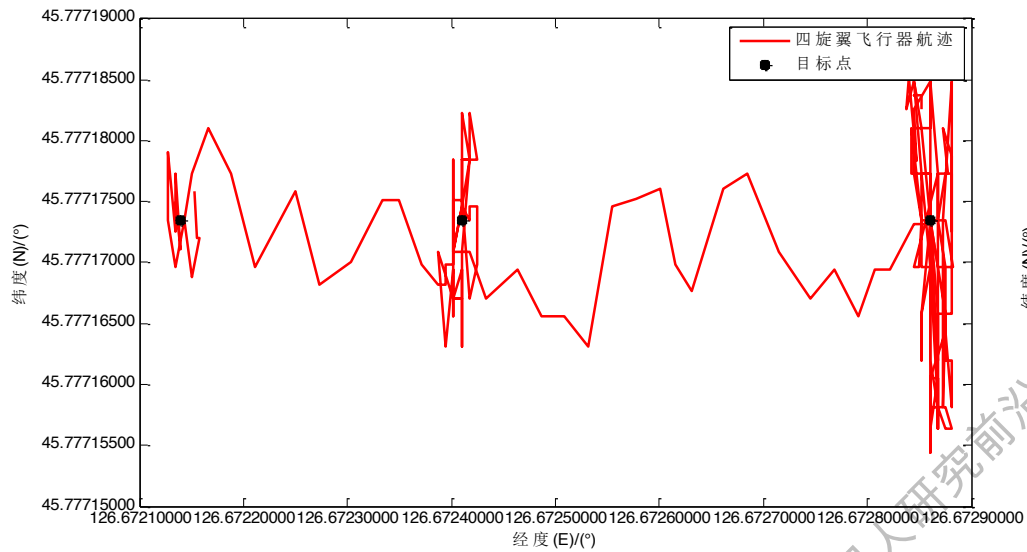
仿真实验结果

四旋翼飞行器避障协同飞行仿真实验



仿真实验结果

四旋翼飞行器群体协同实际飞行实验



四旋翼飞行器群体协同实际飞行实验

根据实验结果，鸽群协同控制策略所设计的群体系统中，两架决策权重相对较小的Follow01、Follow02四旋翼飞行器在时间和空间上很好的跟踪了决策权重较大的Leader，Follow01在编队协同飞行阶段很好的跟踪了规划航迹，Follow02的实际飞行航迹与规划航迹有一定的偏差。

Follow01与Follow02中所用的鸽群决策机制完全一致，产生此偏差主要是因为Follow02的机械差异。该群体航迹图反映了各个飞行器在时间和空间上很好的跟踪了规划航迹，同时也体现了构成设定队形结构的能力。

通过仿真实验可以看出无论是正常的编队飞行、编队重构还是避障情况下的编队飞行，鸽群协同控制策略都保障了群体的协同飞行，即使系统再次进入震荡状态，鸽群决策机制通过对决策权的重新调整最终依然实现了平均速度的渐进一致性，也重新实现了稳定的群体协同飞行。

三架四旋翼飞行器的实际环境测试，反映了各个飞行器在时间和空间上很好的跟踪了规划航迹，同时也体现了构成设定队形结构的能力，说明鸽群协同控制策略适应性较强。

群体机器人发展展望

- 当前存在的挑战：

- 如何设计一种混合分布式的方案，克服了纯集中式和分布式的缺点。
- 如何设计一个可以在抽象层次上进行监督的自组织群体机器人系统。
- 确定所设计的机制是可拓展和鲁棒的。
- 产生和维持效能高效率的连接结构以处理当前任务。
- 构建任一机器人能够有效的建图和定位机制。
- 整合路径规划和避障机制，不依赖于特定的领导者。
- 设计一种机制使群体机器人能够有效的操纵和传输目标。
- 采取相应措施以防止群体机器人系统因能源耗尽而过早关闭。

仅用于北京理工大学群体机器人研究前沿论坛，请勿擅自传播

群体机器人发展展望

到目前为止，机器人集群的仍然缺乏现实应用。虽然实验室实验可以让我们了解一个给定的机器人系统可以实现什么，但现实的大规模部署，将对影响群体运作的不同因素提供新的见解，并激发进一步的研究。

□ 将群体机器人转移到微纳米尺度是未来研究的一个有趣的课题。

- 纳米机器人研究的可能应用包括：利用纳米传感器网络的环境感知、空间探索、地下油矿勘探，以及最重要的医学应用：成群结队的纳米机器人可用于人体精确给药、最大限度地提高治疗效率和减少副作用、用于细胞修复、疾病的早期诊断或对抗肿瘤细胞等。

□ 更加可控且灵活的群体机器人系统

- 现实世界中部署的机器人可能需要能够处理不同类型的任务，根据不同的场景，相同的机器人将不得不从事各种任务，如聚集、分散、模式形成和协作对象操作等。

群体机器人发展展望

- 低功耗，多功能，小型化的个体组成的群体机器人系统。
 - 将目前的5G，光学传感器等技术整合到小型机器人中使其具备“高级功能”。“高级个体”与传统的群内个体的“极简主义”并不矛盾，因为“极简主义”是与当前科学技术水平是相关的。
- 许多研究将数学分析的缺乏或不足作为未来研究的主题
 - 为实证得到的结果提供坚实的理论基础，有助于理解一个系统的潜在能力以及其固有的局限性。
- 建造和部署大型群体机器人仍然是一个悬而未决的问题
 - 在未来，我们很可能会看到大量机器人部署在环境中的应用，例如覆盖大片区域或执行对人类来说不可行或危险的活动：扫雷、监测大型生产或分销工厂以探测泄漏或其他潜在危险、水下表面的环境监测、清理受石油泄漏影响的地区等。

总结

在群体机器人学科中，过去几十年发表的大量研究对各种任务进行了分析；其中一些研究启发于自然界生物的集体行为，例如蟑螂和蜜蜂的聚集，鸟类成群结队，蚂蚁觅食，还有一些是人工系统特有的。这些任务都有一个共同点，即它们可以由一组机器人使用分布式算法求解，其中每个机器人仅通过与环境的局部交互进行引导。

本次报告回顾了过去用群体智能算法分析和解决群体机器人问题的一些研究。在许多情况下，仅由于机器人与环境和其他个体之间局部交互的统计特性而出现了全局群动态，与单个功能相比，由群体执行的任務可能非常复杂。

通过鸽群飞行机制启发的群体机器人控制和规划策略，说明群体机器人中个体的运动规划和行为决策，会直接影响群体对目标任务的完成质量。

群体机器人相关研究还未能普遍的走向实际应用，未来关于群体机器人技术研究还有很长路要走！



Thank you

