



多智能体群集运动

群集行为

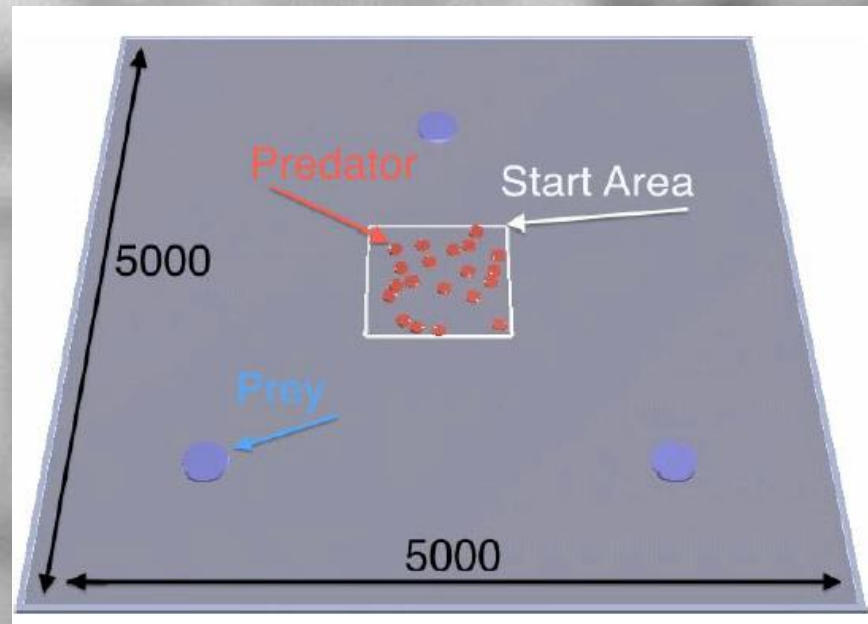
群集运动现象



多机器人追逃问题

由一定数量的追捕者协作追捕一定数量的逃跑者。这个问题有很多变种，通常从三个方面来划分：

- 开放世界和封闭世界
- 多追一逃，一追多逃和多追多逃
- 抓捕成功的判定规则



多智能体群集运动理解


系统中的个体按照自身的属性赋予其行为规则，并结合个体间的相互通信，进行相应运动，最后随着时间的演化，整体系统形成某种**规律性的场景**。

多智能体群集运动理解

群集行为理论是多智能体系统研究中的基础核心。

个体间的信息交互方式决定群集行为的类型，因此研究群集行为的本质是分析和设计相应的**信息交互方式**，即**分布式协议 (distributed protocol)**

典型的多智能体群集运动

- 
1. 多无人机系统;
 2. 工业环境下多机器人系统
 3. 城市交通网络

多智能体群集运动的研究意义

(1) 促进群集理论在实际工程中的应用

(2) 为社会网络中出现的复杂现象提供更为合理的理论解释，进而提高生产率。

多智能体群集运动的研究

建模

从系统控制论的角度出发，多智能体系统行为的研究首先要对其进行数学建模。

动力学方程刻画个体的自身属性，代数图论刻画通信拓扑结构。

个体内在动力学系统，个体间相互关系与个体间的信息交互共同决定个体状态轨线的演化。

多智能体群集运动的划分

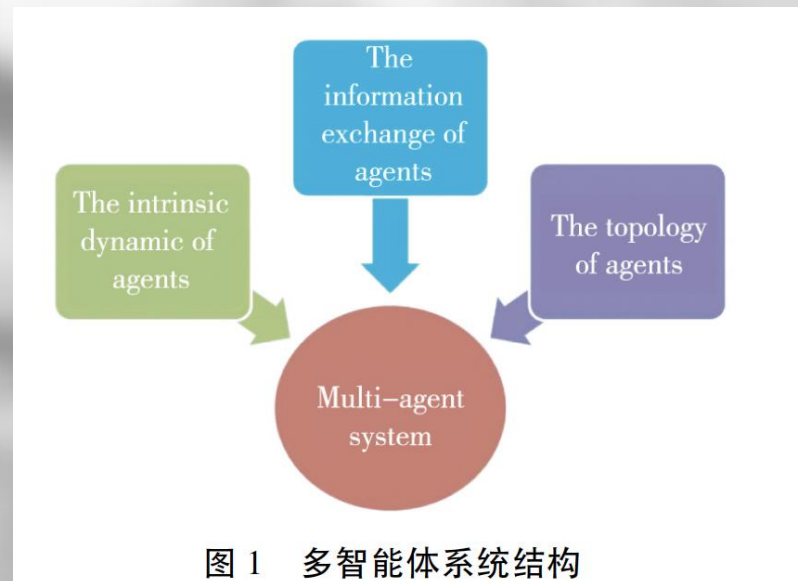
划分:

(1) 个体动力学方程角度

个体模型分为同质个体与异质个体。

(2) 个体相互关系角度

个体拓扑结构分为合作网络与合作竞争网络



同质个体在合作网络中的群集行为研究

目前同质个体合作网络下的主要研究：

一致性、群一致性，蜂拥现象，无人机编队控制，分布式优化，分布式跟踪控制。

一致性是核心

一致性(consensus) 是指多智能体系统中的个体在局部协作和相互通信下，调整更新自己的行为，最终使得每个个体均达到相同的状态。

同质个体在合作网络中的群集行为研究

一致性问题解决的关键：

设计仅利用有限邻居信息的分布式协议。

目前合作网络中的分布式协议的设计往往采用个体间相对状态的加权和形式，同时权重均取为正数。

同质个体在合作网络中的群集行为研究

一致性问题的研究:

为降低通信成本, Seyboth [1]等针对一阶积分器的个体模型, 在有无时滞两种情况下, 分别设计了**基于事件驱动的分布式协议**。

个体的状态最终吸引到一个球形区域内, 有效地避免 **Zeno(芝诺)** 现象的发生

Zeno 现象是指在有限时间内系统中事件触发的次数能够达到无限多次

同质个体在合作网络中的群集行为研究

一致性问题的研究:

实际物理中，个体运动采用牛顿第二定律来刻画——二阶积分器来刻画（位置，速度）

Xie 等 [2] 考虑二阶个体的一致性，首次设计了带有速度阻尼项的分布式协议，研究发现，在此协议下，随着时间的推移，所有的个体逐渐接近到某一固定的位置，同时每个个体的速度趋于 0，即实现了静态一致。

同质个体在合作网络中的群集行为研究

群一致性问题的研究:

作为一致性问题的深入和细化, 群一致性(**group consensus**) 现象在自然界中广泛存在, 如不同鱼群聚集而生、社会阶层的形成等。

群一致性:

多智能体系统中的个体根据某种规则被划分成若干个子群, 同一个子群中的个体趋于同一状态, 同时不同子群中的个体趋于不同的状态

同质个体在合作网络中的群集行为研究

群一致性问题的研究难点:

(1) 呈现出多个一致状态

(2) 个体不仅与群内部的邻居进行信息交换, 还和不同群的个体也有信息交互。

Yu等^[3]首次在固定拓扑无向图的情况下, 采用双树变换, 将原系统的群一致性问题转换为误差系统的零点稳定问题, 然后利用时滞系统的 Lyapunov 稳定性理论, 得到了一系列的充分条件。

异质多智能体系统的群集行为研究

异质:

异质多智能体系统是指系统中个体的自身属性不同, 在数学模型上用不同的动力学方程描述

研究难点:

需要设计带有异质特征的分布式协议

异质多智能体系统的群集行为研究

在异质个体的一致性中，所设计的分布式协议往往带有**补偿特征**，即补偿由个体异质性带来的不利影响，从而整体系统可实现一致性。同时，在异质系统的前提下，讨论整体系统的群一致性更具实际意义。

现有研究：

Cai等^[4]利用间歇性牵制控制(intermittent pinning control) 研究异质个体的群集行为，并利用自适应控制器对牵制控制增益进行优化，进而大大降低了控制代价。

多智能体系统 in 合作竞争网络中的群集行为研究

合作竞争网络:

合作竞争网络是对传统合作网络的进一步深入，在个体间合作关系的基础上，也关注到了个体间竞争因素。

研究途径:

合作竞争网络的**数学刻画**，特别是对个体间竞争关系的**理论描述**是解决相应群集行为的前提与基础。

多智能体系统 in 合作竞争网络中的群集行为研究

合作竞争网络:

合作竞争网络是对传统合作网络的进一步深入，在个体间合作关系的基础上，也关注到了个体间竞争因素。

研究途径:

合作竞争网络的**数学刻画**，特别是对个体间竞争关系的**理论描述**是解决相应群集行为的前提与基础。

多智能体系统与合作竞争网络中的群集行为研究

研究难点分析:

合作网络中的边权量为正，则竞争作为负。与合作网络相比，合作竞争网络中的权量有正有负，从而对拉普拉斯矩阵谱特征分析困难。

多智能体系统在合作竞争网络中的群集行为研究

给定一个有 n 个顶点的图 G ，它的拉普拉斯矩阵 $L := (l_{i,j})_{n \times n}$ 定义为:

$$L = D - A$$

其中 D 为图的度矩阵， A 为图的邻接矩阵。度矩阵在有向图中，只需要考虑出度或者入度中的一个。经过计算可以得

1、若 $i = j$, 则

$$l_{i,j} = \deg(v_i)$$

$\deg(v_i)$ 为顶点 v_i 的度。

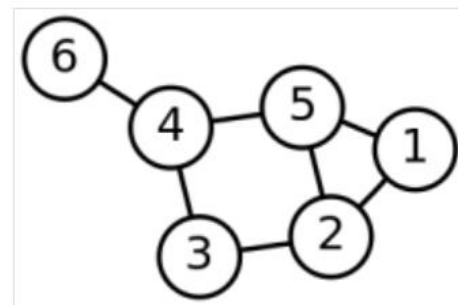
2、若 $i \neq j$, 但顶点 v_i 和顶点 v_j 相邻, 则

$$l_{i,j} = -1$$

3、其它情况

$$l_{i,j} = 0$$

也可以将这三种值通过除以 $\sqrt{\deg(v_i) \deg(v_j)}$ 进行标准化。



解决途径:

设计新的分布式协议或新的控制器。

多智能体系统 in 合作竞争网络中的群集行为研究

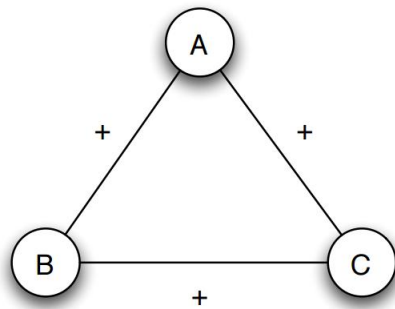
研究难点分析:

Altafini^[5]考虑了一阶线性积分器个体在合作竞争网络中的群集行为，重新设计了竞争个体间的信息交互，采用**镜像竞争的形式**，即邻居的相反状态与个体是合作关系，在此基础上，利用**规范变换**(gauge transformations)，提出了**网络结构平衡**(structurally balance)的概念，并理论上证明当网络拓扑结构是平衡的，整体系统能实现**两分一致性**。

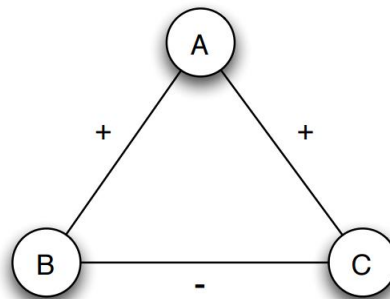
规范变换 (Gauge transformation) 是对称操作，
变换后所有物理量和物理规律保持不变

多智能体系统与合作竞争网络中的群集行为研究

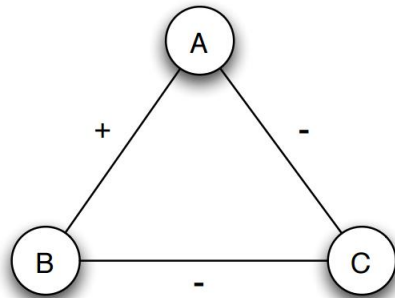
网络平衡的充要条件是网络中的所有三元组都是平衡的，该结论也可以陈述为一个符号网络平衡的充要条件是它所包含的所有回路都是平衡的。



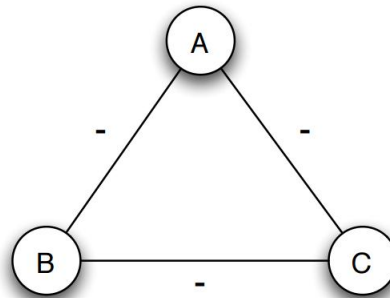
(a) *A, B, and C are mutual friends: balanced.*



(b) *A is friends with B and C, but they don't get along with each other: not balanced.*

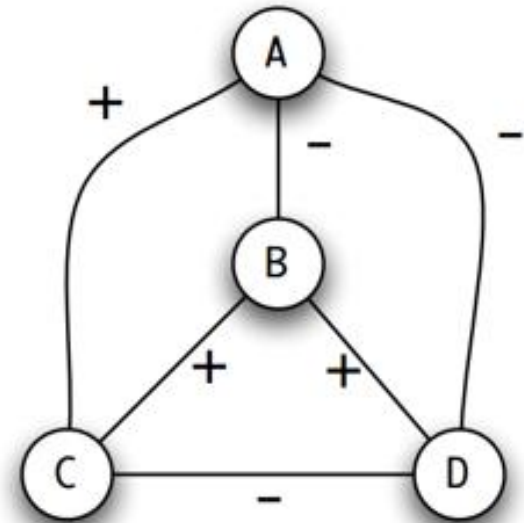
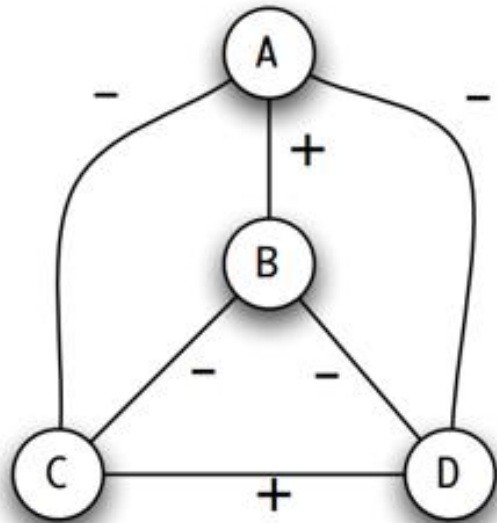


(c) *A and B are friends with C as a mutual enemy: balanced.*



(d) *A, B, and C are mutual enemies: not balanced.*

多智能体系统与合作竞争网络中的群集行为研究



多智能体系统与合作竞争网络中的群集行为研究

现有研究:

将整体网络图分为三大类: **交互平衡图**(interactively balanced Digraph)、**子平衡图**(sub-balanced digraph)、**非平衡图**(unbalanced digraph), 研究表明: 对于交互平衡图和子平衡图, 多智能体系统可实现群一致性; 对于非平衡图, 需施加额外的牵制控制器才能实现相应的群一致性。

研究展望

(1) 现有研究大多数假定在同质的前提下，在自然界中，个体的异质性普遍存在，同质这种理想化的假设往往难以准确现实的事物。

(2) 大多数情况下，未考虑个体间的竞争，对于竞争关系不可忽略。目前考虑竞争的主要研究集中在镜像竞争，在此基础上，考虑个体间具有两种竞争关系(即强弱竞争关系)的相应成果还不多见，相应矩阵的谱特征有待进一步的探索与研究。

(3) 社会网络中，群集行为还具有定性的表现，如选举过程中的赞成与反对无法进行具体量化，但可以从定性角度将选举过程抽象为某种符号一致性，进而定性描述该群集行为，因此这就需要寻找新工具、新方法来处理群集行为的定性特征，亟待深入研究



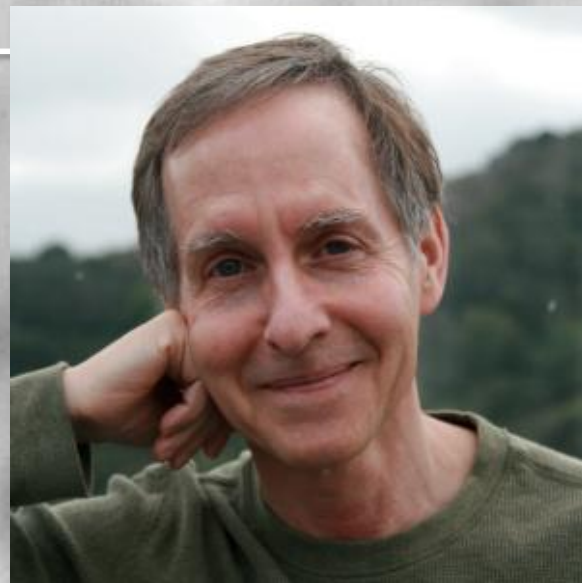
经典研究模型与方法

群集运动

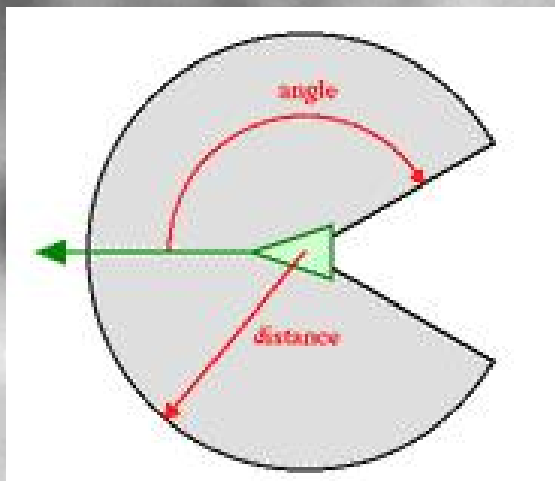
Boids 模型 (bird-oid)



1987年



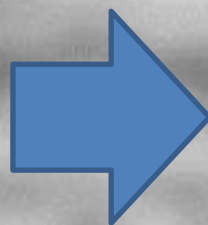
Boids模型 Boids是克雷格·雷诺兹 Craig Reynolds在1986年开发的一个用来模拟鸟类群体行为的计算机程序



Reynolds采用Boids模型对鸟群进行仿真模拟

群集运动

Boids (鸟群) 模型



具有良好的一致性：
方向、速度

?

- 没有中心控制系统-个体仅具有局部信息
- 个体间没有信息上的交互
- 初始状态随机

Boids 模型

智能体基本属性：

- 速度 v_i
- 移动方向 $\theta_i(t)$
- 当前位置 $p_i(t) = (x_i(t), y_i(t))$

智能体的移动方式如下：

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i \cos(\theta_i(t))$$

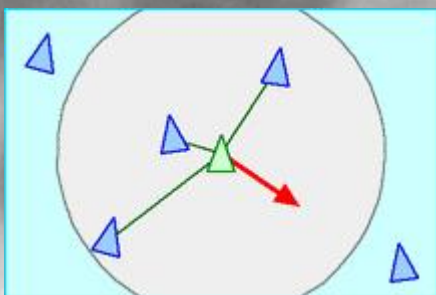
$$y_i(t + 1) = y_i(t) + v_i \sin(\theta_i(t))$$

群集运动

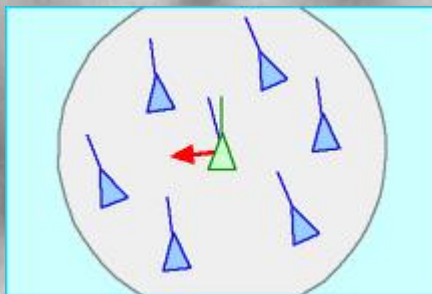
Boids 模型-三个基本规则

个体决策模型 - 个体与环境的交互

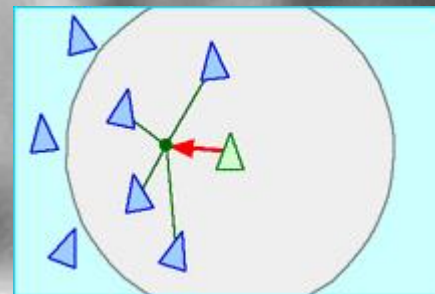
- 分离规则
Separation



- 对齐规则
Alignment



- 聚合规则
Cohesion

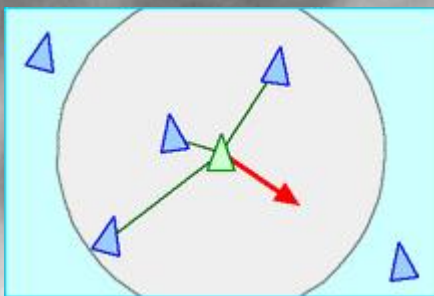


群集运动

Boids 模型-三个基本规则

个体决策模型 - 个体与环境的交互

类鸟检测某个范围内的所有类鸟的位置，计算出质心，然后产生一个远离质心的速度。



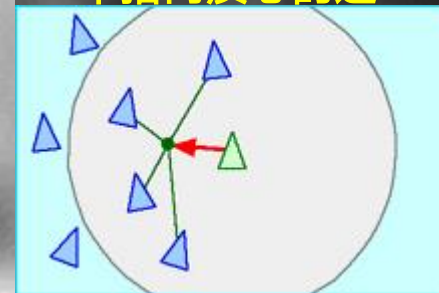
避免碰撞

类鸟检测某个范围内的所有类鸟的速度，计算出平均速度，然后产生一个与平均速度方向一致的速度。



方向统一

类鸟检测某个范围内（与分离规则的范围不同）的所有类鸟的位置，计算出质心，然后产生一个指向质心的速度。



群体聚合

群集运动

Boids 模型

质量中心简称质心，指物质系统上被认为质量集中于此的一个假想点。

质量中心的简称。质点系的质心是质点系质量分布的平均位置。设质点系由 n 个质点组成，它们的质量分别是 m_1, m_2, \dots, m_n 。若用 r_1, r_2, \dots, r_n 分别表示质点系中各质点相对于某一固定点 O 的矢径，用 r_σ 表示质心的矢径，则有

$$r_\sigma = \frac{\sum m_i r_i}{M},$$

式中

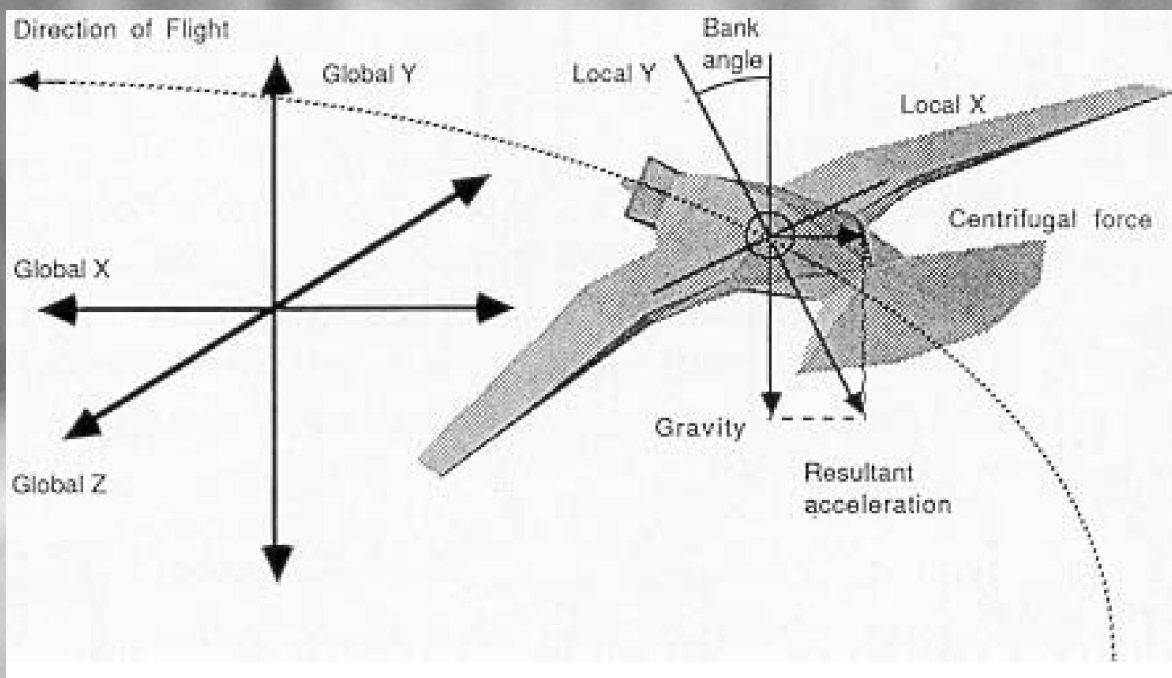
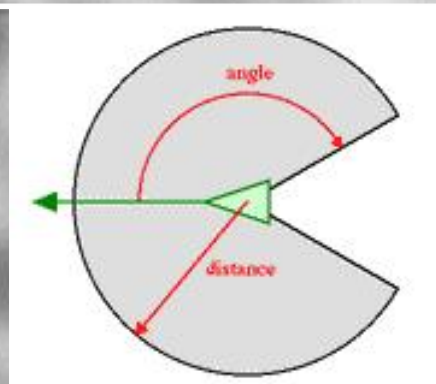
$$M = \sum_{i=1}^n m_i$$

表示质点系的总质量。若选择不同的坐标系，质心坐标的具体数值就会不同，但质心相对于质点系中各质点的相对位置与坐标系的选择无关。质点系的质心仅与各质点的质量大小和分布的相对位置有关。

群集运动

Boids 模型

个体视觉模型



群集运动

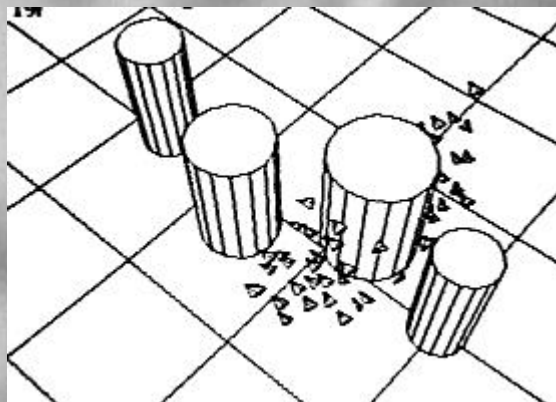
Boids 模型

个体决策模型

假如控制类鸟的数目一定 (N 一定), 那么通过改变空间的宽, 高就能改变类鸟的平均密度, 通过以前的研究可知, 密度是一个很重要的参数

障碍物?

- 规避规则



躲避障碍物

群集运动

如果分离的检测范围很小，那么类鸟只在小范围内远离其他类鸟，可以想象成有排斥势的球，分离的检测范围小，等于球的排斥区域小。

内聚的检测范围如果小，那可能就只会形成小团体而无法形成大团体。平行的范围如果很大，因为包含的速度太多，可能导致平均速度很小，导致受到随机影响很大，就不能有效的和周围的类鸟保持速度平行。

群集运动

Vicsek模型，1995

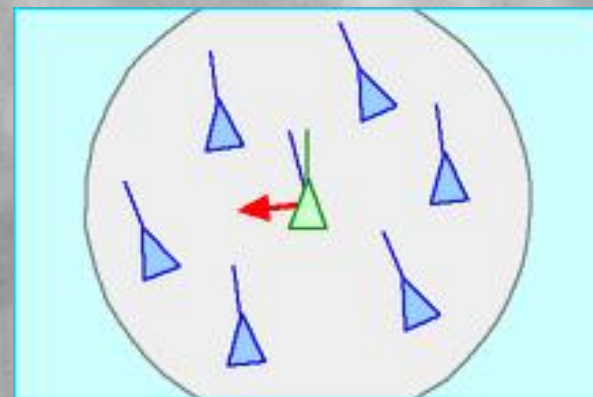
1995 年，匈牙利科学院院士 Vicsek 提出了著名的 Vicsek 模型，在这个模型可以重现许多自驱动粒子运动的统计特征。Vicsek 的想法非常简单，自驱动粒子们为了避免「碰撞」，其速度的方向是由其周围邻居运动的平均方向（加上一定的噪声等因素）决定的，因此在模型中先通过对邻居的指向角度进行平均，得到粒子的运动方向，再依据这一运动方向，更新系统的构象。

群集运动

Vicsek模型, 1995

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t)\Delta t$$

$$\theta(t+1) = \langle \theta(t) \rangle_r + \Delta\theta$$



1) 当设置很小的群体数量（密度）及扰动时，会形成多个集团分别具有不同的移动方向；

2) 当设置较高的群体数量（密度）及很小的扰动时，会发现群体的行为开始变得有序，基本上朝向相同的方向。

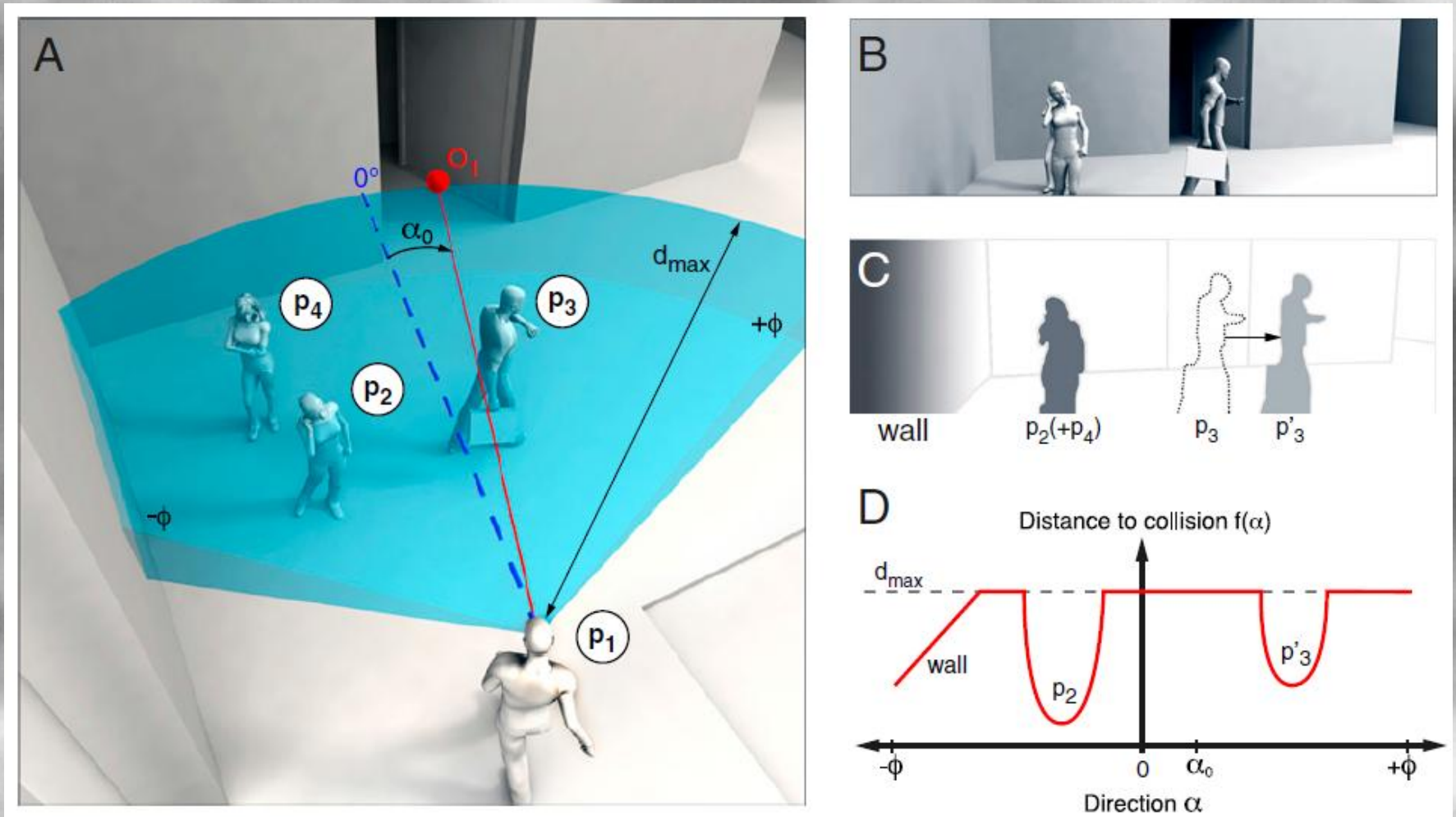
群集运动



BOIDS

群集运动

路人模型, Moussaïd, 2011



群集运动

路人模型, Moussaïd, 2011

- Agent i 有一个速度 v_i , 当前位置 $p_i(t) = (x_i(t), y_i(t))$ 。
- O_i 表示 Agent i 的移动目标点。
- Agent i 的眼睛观察范围为其正前方相对角度 $[-\phi, \phi]$ 的扇形范围。
- α 表示 $[-\phi, \phi]$ 范围内的可能方向。
- $f(\alpha)$ 表示考虑到自身速度, 其他路人速度的情况下, Agent i 到 α 方向上第一个障碍的距离。如果没有障碍, 则 $f(\alpha)$ 设为一个固定值 d_{max} 。

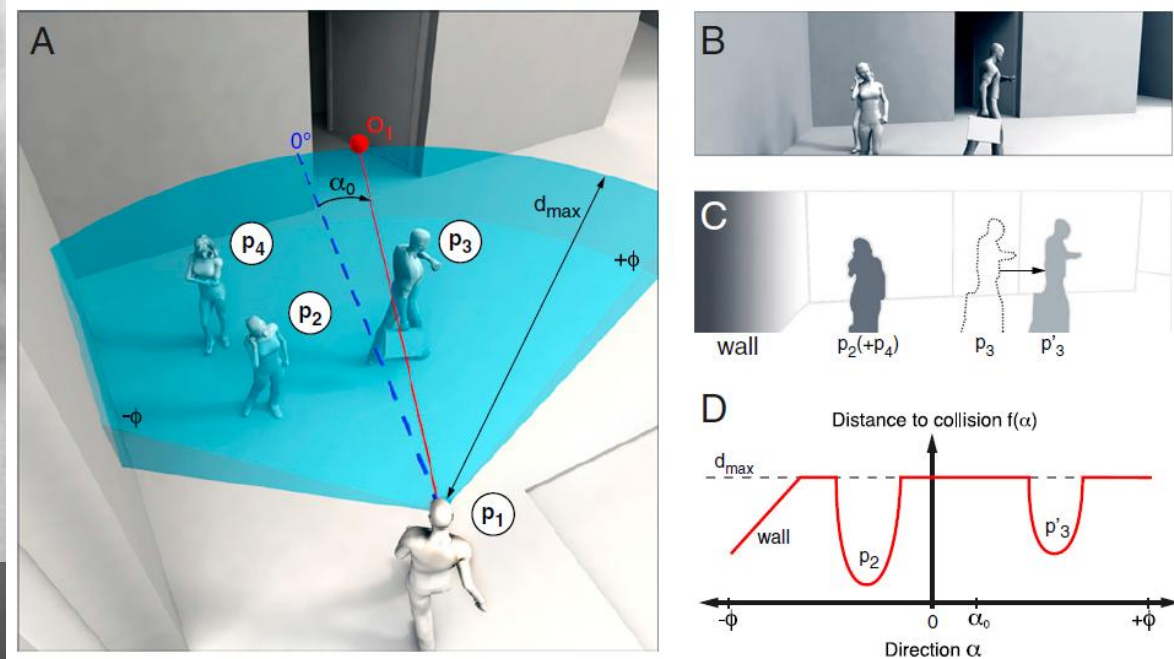
群集运动

路人模型, Moussaïd, 2011

Agent移动的决策:
移动方向通过最小的移动距离来决定

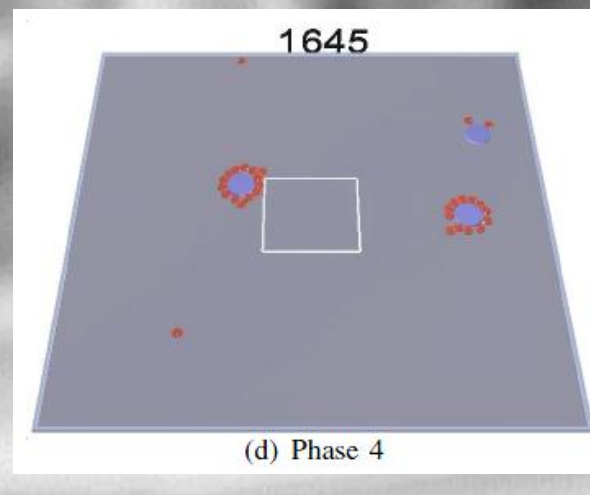
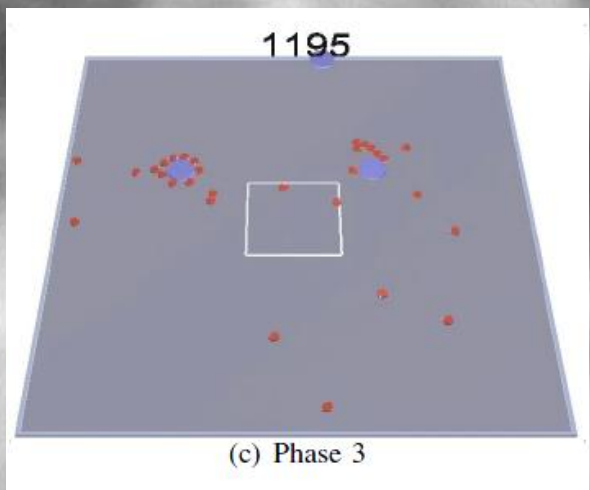
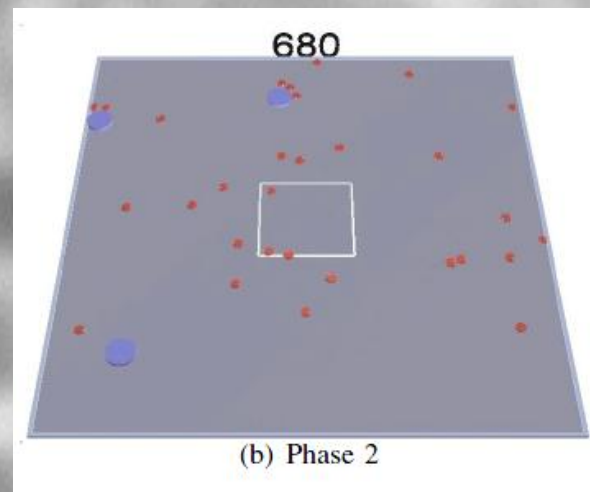
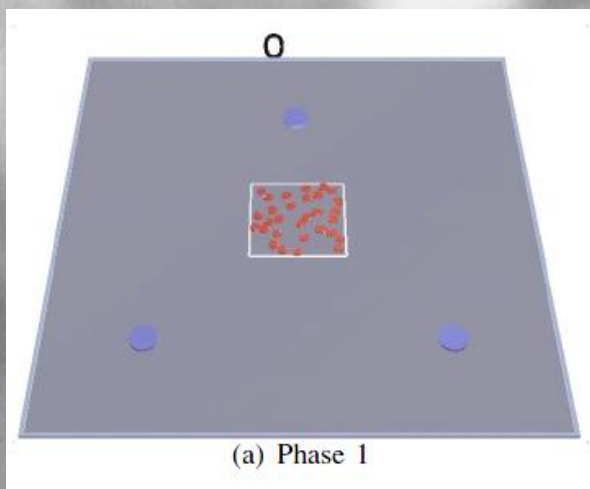
$$d(\alpha) = d_{max}^2 + f(\alpha)^2 - 2d_{max}f(\alpha)\cos(\alpha_0 - \alpha)$$

α_0 表示到目标位置的直线方向



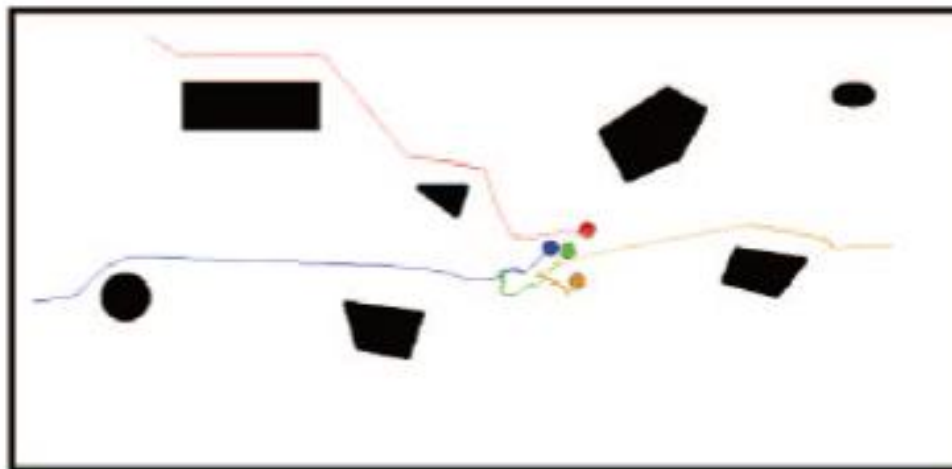
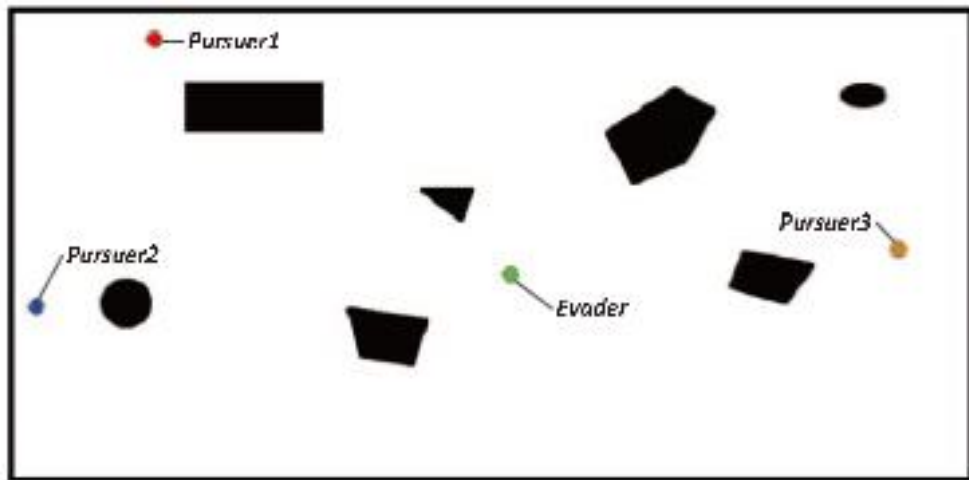
群集运动

多机器人追逃问题



群集运动

多机器人追逃问题



群集运动

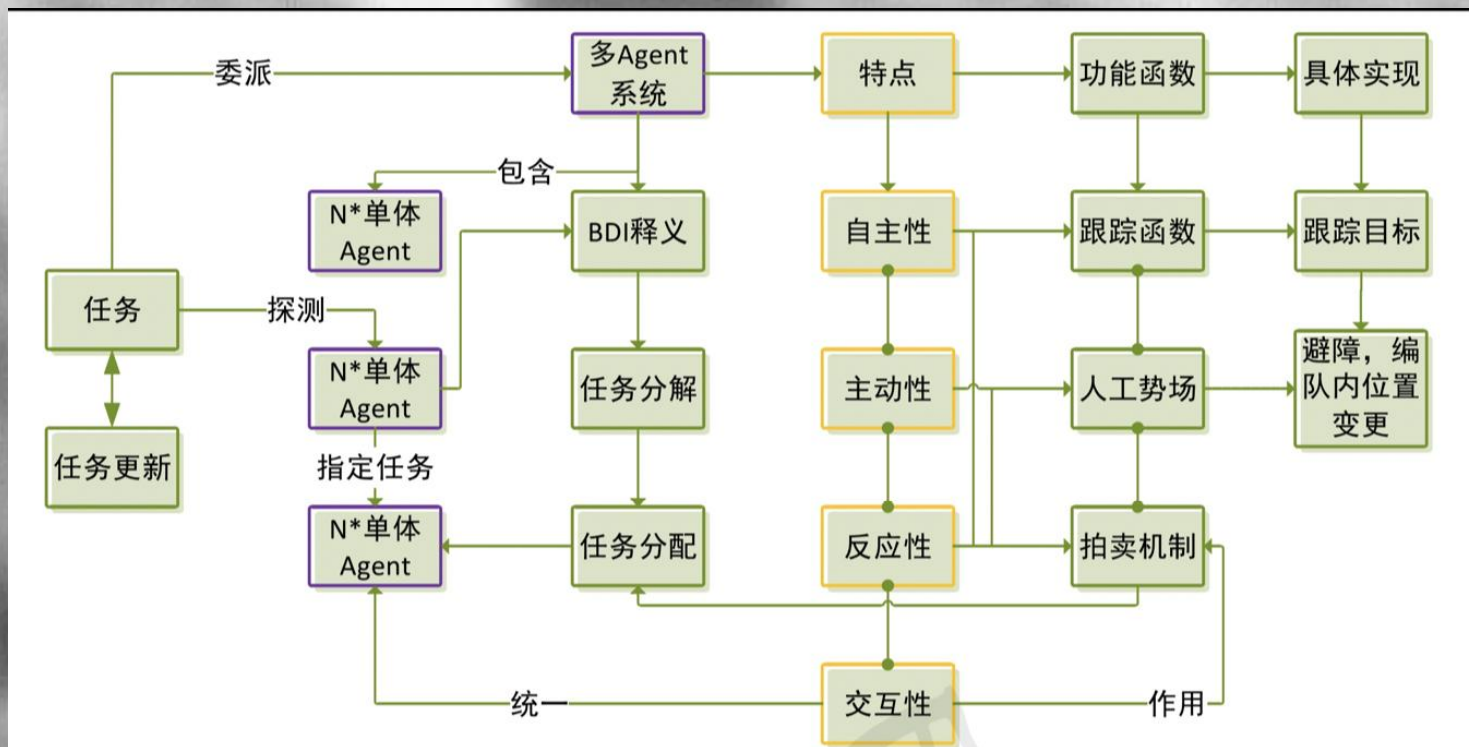
无人机协作问题

基于多 Agent 无人机协作控制是给每个无人机**注入智能算法**，无人机系统会根据自身状态和任务目标自主的计算出任务的解决方案同时指导无人机执行，并当需要时能够从其他 Agent 处获得对完成任务有利的信息，让无人机能够主动的、有效的、成功的完成既定任务。



群集运动

无人机协作问题



基于多 Agent 的无人机协作系统结构

无人机协作问题

任务的分配:

1. 集中式任务分配方法

1.1最优化方法

(1)穷举法; (2) 整数规划法; (3) 约束规划; (4) 图论方法

无人机协作问题

任务的分配:

整数规划法: 主要想法是在无视整数限制条件下求得的解为非整数时, 再导出整数解应满足的较强的不等式条件。依靠添加这样的约束条件删去前面已求得的解。再解一个新的子问题, 直至求得最优解。

约束规划: 约束优化或约束规划 (Constraint programming, CP) 是指从一组非常大的候选集合中找出可行的解决方案, 在这些候选集合中, 问题可以用任意约束来建模, 许多科学和工程学科中都存在CP问题。CP是基于可行性 (寻找一个可行的解决方案) 而不是最优化 (寻找一个最优的解决方案), 它关注的是约束和变量而不是目标函数

图论方法: 图论法是以图作为研究对象的方法称为图论法。图可以表示为由某些点及连接这些点的连线组成的图形, 也可抽象地定义为 $G = (V, E, \Phi)$, 其中 V , E 分别是图的顶点和边集合, Φ 表示 V, E 间的某种函数关系。这样, 凡和二元关系有关的系统都可用图来描述, 从而用图论法进行研究。

无人机协作问题

任务的分配:

1. 集中式任务分配方法

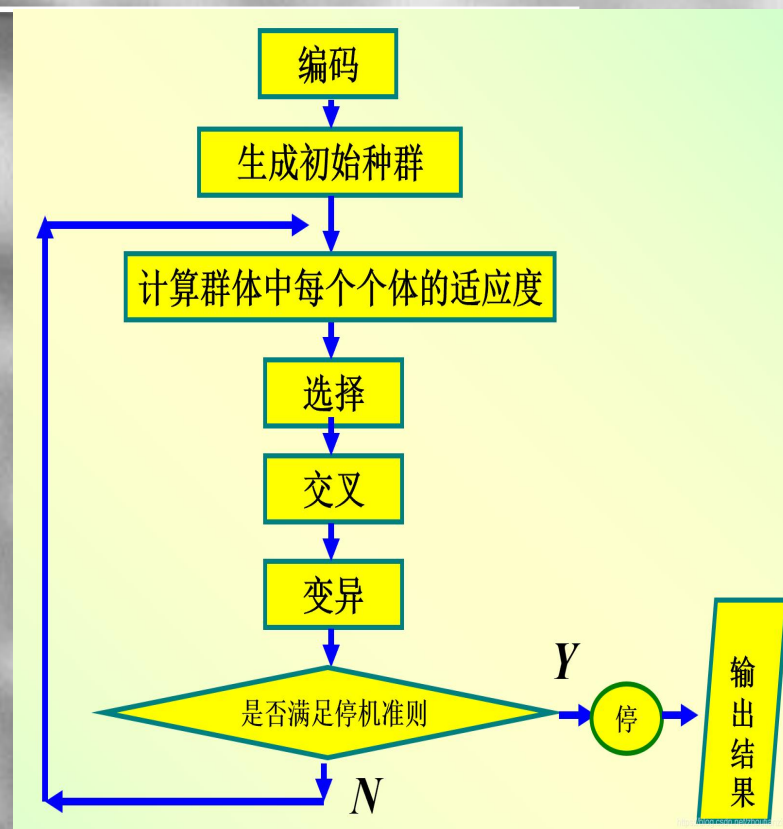
1.2 启发式算法

智能优化算法: 进化算法, 群智能算法, 禁忌搜索。

无人机协作问题

任务的分配:

进化算法:进化算法包括[遗传算法](#)、遗传规划、进化规划和[进化策略](#)等等。进化算法的基本框架还是简单遗传算法所描述的框架，但在进化的方式上有较大的差异，选择、交叉、变异、种群控制等有很多变化



无人机协作问题

```
 $P \leftarrow \text{GenerateInitialPopulation}()$   
 $\text{Evaluate}(P)$   
while termination conditions not met do  
     $P' \leftarrow \text{Recombine}(P)$   
     $P'' \leftarrow \text{Mutate}(P')$   
     $\text{Evaluate}(P'')$   
     $P \leftarrow \text{Select}(P'' \cup P)$   
endwhile
```

Fig. 13. Algorithm: Evolutionary Computation (EC).

无人机协作问题

```
InitializePheromoneValues( $T$ )  
while termination conditions not met do  
  for all ants  $a \in \mathcal{A}$  do  
     $s_a \leftarrow \text{ConstructSolution}(T, \mathcal{H})$   
  endfor  
  ApplyOnlineDelayedPheromoneUpdate( $T, \{s_a \mid a \in \mathcal{A}\}$ )  
endwhile
```

Fig. 16. Algorithm: Ant System (AS).

```
while termination conditions not met do  
  ScheduleActivities  
    AntBasedSolutionConstruction()  
    PheromoneUpdate()  
    DaemonActions() % optional  
  end ScheduleActivities  
endwhile
```

Fig. 17. Algorithm: Ant Colony Optimization (ACO).

无人机协作问题

```
 $s \leftarrow \text{GenerateInitialSolution}()$   
 $\text{InitializeTabuLists}(TL_1, \dots, TL_r)$   
 $k \leftarrow 0$   
while termination conditions not met do  
     $\text{AllowedSet}(s, k) \leftarrow \{s' \in \mathcal{N}(s) \mid s \text{ does not violate a tabu condition,}$   
                                     or it satisfies at least one aspiration condition} $\}$   
     $s \leftarrow \text{ChooseBestOf}(\text{AllowedSet}(s, k))$   
     $\text{UpdateTabuListsAndAspirationConditions}()$   
     $k \leftarrow k + 1$   
endwhile
```


无人机协作问题

任务的分配:

2. 分布式任务分配

2.1 合同网方法

合同网 (ContractNet) 是应用范围最广的一种分布式任务分配方法，它的核心是防止产生冲突，对每个问题的求解用通信的方式协商处理

2.2 拍卖方法

拍卖算法：具有很好的灵活性与稳定性，尤其适合处理具有不确定性多 Agent 系统中收益最大化问题，系统能够分布的通过个体收益最大化来实现总体系统的收益最大化。

参考文献

- [1] Seyboth G S, Dimarogonas D V, Johansson K H. Eventbased broadcasting for multi-agent average consensus [J] . Automatica, 2013, 49(1) : 245-252
- [2] Xie G M, Wang L. Consensus control for a class of networks of dynamic agents [J] . International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2007, 17(10) : 941-959
- [3] Yu W W, Chen G R, Cao M. Some necessary and sufficient conditions for second-order consensus in multiagent dynamical systems [J] . Automatica, 2010, 46(6) : 1089-1095
- [4] Cai S M, Zhou P P, Liu Z R. Intermittent pinning control for cluster synchronization of delayed heterogeneous dynamical networks [J] . Nonlinear Analysis (Hybrid Systems) , 2015, 18: 134-155
- [5] Altafini C. Consensus problems on networks with antagonistic interactions [J] . IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(4) : 935-946



谢谢