



机器学习（第9讲）

主讲：张磊

E-mail: leizhang@cqu.edu.cn
Lab Website: <http://www.leizhang.tk>





第九章： 集群智能仿生

第九章：集群智能仿生

□ 群体智能（Swarm Intelligence）

- 群智能作为一种新兴的演化计算技术，已成为研究焦点，它与生命进化、昆虫集体行为、鸟群集体行为，有着极为特殊的关系。
- 所谓群体智能，即**本无智能**的个体，通过**合作**表现出智能行为的特性，在没有集中控制，而且不提供全局模型的前提下，为寻找最优方案或最优解提供了基础。
- 人们把群居昆虫或鸟类的集体行为称作“群智能”或“群体智能”或“集群智能”。
- 主要特点在于：个体的行为很简单，但当它们一起协同工作时，却能够突现出复杂的智能的行为特征。



第九章：集群智能仿生

□ 群体智能（Swarm Intelligence）

✓ 优点

灵活性：群体可以适应灵活变化的特性

稳健性：某个体失败，不影响整个群体的行为

自组织行为：不受外部因素的控制

✓ 典型算法

遗传算法（起源于生物进化过程，演化算法）：人类对大自然生物进化过程的计算模拟而抽象出的进化算法；

粒子群优化（启发于鸟群觅食）：基于社会系统中群体智能而产生的启发式仿生算法；

蚁群优化（启发于蚂蚁群体活动）

鱼群、蜂群算法、免疫算法、混沌搜索算法等



第九章：集群智能仿生

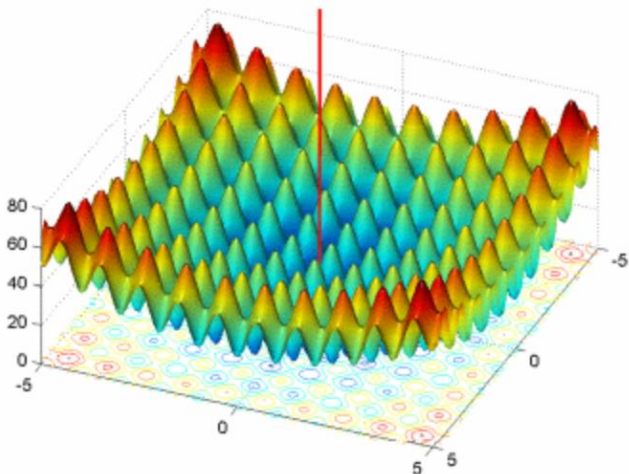
□ 应用

函数优化、神经网络学习

例：以Ras函数（Rastrigin's Function）为目标函数，求其在 $x_1, x_2 \in [-5, 5]$ 上的最小值。

$$Ras(x) = 20 + x_1^2 + x_2^2 - 10(\cos 2\pi x_1 + \cos 2\pi x_2).$$

Global minimum at [0 0]



从优化角度，该函数有太多局部解，很难利用极值理论去求解。

智能仿生算法！

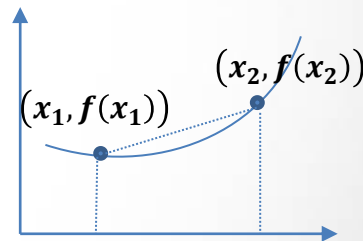
第九章：集群智能仿生

□ 基础概念：凸优化/非凸优化问题

凸优化的局部最优解即是全局最优解，容易求解。非凸优化难以求解。

凸函数定义：定义在某个向量空间的凸集 C 的实值函数 f ，在其定义域 C 内的任意两点 x_1, x_2 ， $0 \leq \lambda \leq 1$ 有：

$$f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \leq \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2)$$



凸集的定义：集合中的任意两点间 $x_1, x_2 \in C$ ，有 $\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2 \in C$ ，也就是任意两点间的线段都在 C 内，则 C 是凸集。

凸优化问题判定：是解决一类**凸函数**的**凸集**优化问题。





第九章：集群智能仿生

□ 群体智能（Swarm Intelligence）

➤ 遗传算法（GA, 起源于生物进化过程，演化算法）：人类对大自然生物进化过程的计算模拟而抽象出的进化算法。

基本思想：每一个物质个体的基本特征会被后代（子代）继承，但后代又会产生一些不同于父代的新特征，在进化过程中，最适应环境的个体特征会被保留（适者生存）。

个体表现形式：个体特征以基因的形式包含在染色体内，通过基因突变或基因杂交，可以产生更适合环境的后代（即更好的解）。

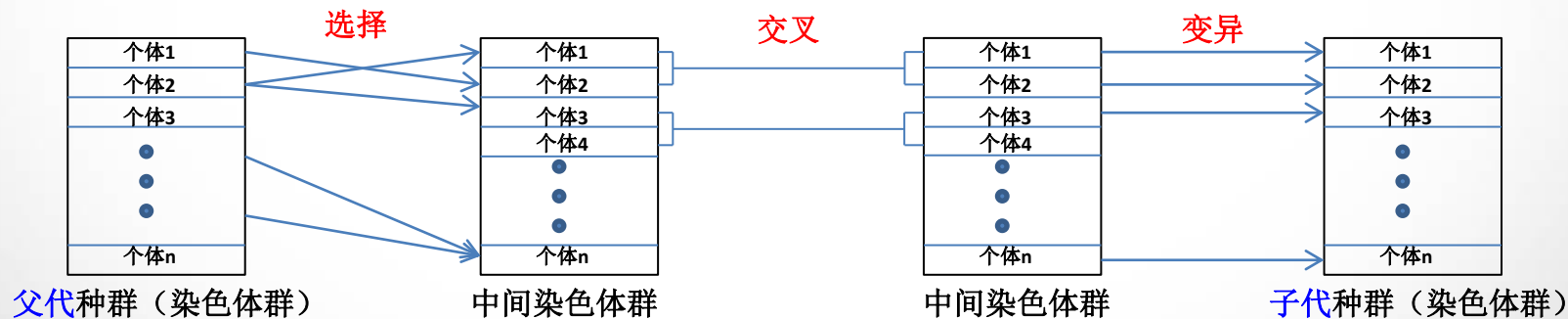
实现：基于种群的演化，这里种群是指一群染色体。通过设定某“**适应度函数**”，从中选择最适应环境的染色体，并进行**复制、交叉、变异**，产生新一代染色体种群，通过一代代进化，直到染色体不再发生变化，即可找到最优的染色体（最优解）。

第九章：集群智能仿生

□ 群体智能（Swarm Intelligence）

➤ 遗传算法（GA）

遗传算法主要由三个算子组成，即**选择算子**、**交叉算子**和**变异算子**，用于产生新的一群染色体。



遗传算法的一次进化过程

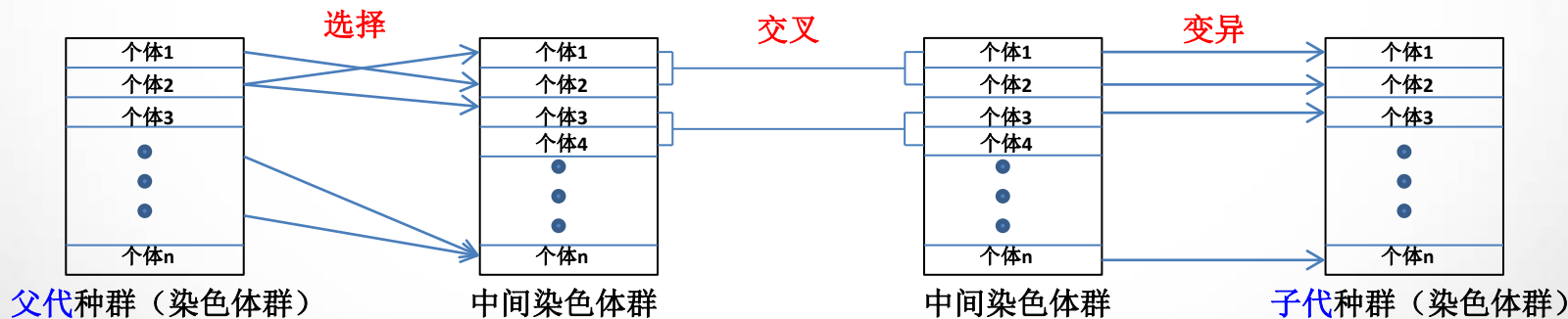
遗传算法如何多次进化呢？ 不断反馈、迭代！

第九章：集群智能仿生

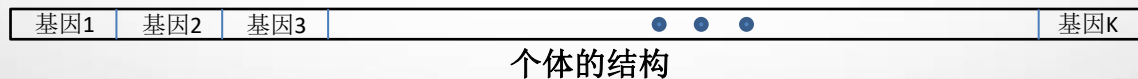
□ 群体智能（Swarm Intelligence）

➤ 遗传算法（GA）

遗传算法主要由三个算子组成，即选择算子、交叉算子和变异算子，用于产生新的一群染色体。



遗传算法的一次进化过程





第九章：集群智能仿生

□ 群体智能（Swarm Intelligence）

➤ 遗传算法（GA）

遗传算法主要由三个算子组成，即选择算子、交叉算子和变异算子，用于产生新的一群染色体。

遗传算法的解搜索过程：

1. **编码**：在演化前，先对问题的解空间表示成基因串结构数据（个体的编码）；
2. **生成初始种群**：随机产生 n 个基因串结构数据，每个基因串为一个个体； n 个个体组成一个群体，作为初始迭代点；（注：每个个体代表一个可行解）
3. **适应度评价**：根据适应度函数，计算每个个体的适应度，评估个体的优劣，即解的优劣；根据具体问题，定义能够客观反映染色体优劣的目标函数；
4. **选择**：从当前群体中选择优良的（适应度高的）个体，使它们有机会被选中，并进入到下一次迭代，舍弃适应度低的个体（**适者生存之原则**）；



第九章：集群智能仿生

□ 群体智能（Swarm Intelligence）

➤ 遗传算法（GA）

遗传算法主要由三个算子组成，即选择算子、交叉算子和变异算子，用于产生新的一群染色体。

遗传算法的解搜索过程：

5. **交叉**：遗传操作，信息的交换，交叉方法以某交叉概率 P_c 通过第 i 个个体和第 $i+1$ 个个体之间进行交叉，其中交叉算子为

$$\begin{cases} X_i^{t+1} = c_i \cdot X_i^t + (1 - c_i) \cdot X_{i+1}^t \\ X_{i+1}^{t+1} = (1 - c_i) \cdot X_i^t + c_i \cdot X_{i+1}^t \end{cases}$$

6. **变异**：遗传操作，以变异概率 P_m 进行基因变异，变异算子为

$$X_i^{t+1} = X_i^t + c_i$$

交叉和变异算子不唯一



第九章：集群智能仿生

□ 群体智能（Swarm Intelligence）

➤ 遗传算法（GA）

控制参数的选择：

（1）基因串长度 L （个体的长度）

个体的长度取决于特定问题，即需要的可行解的长度（精度）；

（2）群体规模 n

群体规模越大，找到全局最优解的可能性也越大，改善搜索效果。但增加了个体评价的计算，收敛速度较慢；

（3）交叉概率 P_c

交叉概率控制着交叉算子使用的频率，交叉概率越高，群体中个体更新速度越快，但会造成优良基因的丢失。但若交叉概率越小，可能导致搜索陷入局部最优解，从而早熟（收敛停滞）

（4）变异概率 P_m

变异是针对某个基因而发生的。如果变异概率较大，则基因变异的数量也较高，会导致随机搜索现象；若变异概率较小，会造成基因丢失而无法恢复。

第九章：集群智能仿生



□ 群体智能 (Swarm Intelligence)

➤ 粒子群算法(PSO)

最早由Eberhart和Kennedy于1995年提出，通过模拟鸟群的觅食行为，建立的一种全局优化方法，利用粒子间的合作与竞争，实现最优解的搜索。

基本思想：每个粒子会根据自身经验的积累和群体知识的积累，根据当前最佳的个体，更新每个粒子。搜索效率较高，不存在交叉、变异操作。

个体表现形式：每一只鸟被视为一个粒子，粒子的表现形式只有两个变量：速度和位置，即鸟飞行的速度和位置。

实现：基于种群的演化，这里种群是指一群鸟(粒子)。从随机的粒子群体出发，通过设定某“适应度函数”来评价每个粒子（解或个体）的优劣，通过速度和位置的不断更新，直到搜索结束。在搜索过程中，只有当前最佳的个体能提供信息给其他粒子（这与遗传算法不同）。

第九章：集群智能仿生



□ 群体智能（Swarm Intelligence）

➤ 粒子群算法(PSO)

PSO算法描述了大量的粒子通过模拟鸟群搜寻食物的运动方式，相互协作，完成最优解的搜索过程。每个粒子以一定的速度飞行，在迭代一定次数后，找到全局最优的位置，那么这个“位置”即为全局最优解。

定义一个**D**维的搜索空间（即解的长度为**D**），粒子的数量为**N**(种群大小)，第**i**个粒子的位置表达为 $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$

第**i**个粒子的速度表达为 $\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^T$

经过搜索后，第**i**个粒子的最佳位置为 $\mathbf{P}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$

整个粒子群的最佳位置为 $\mathbf{P}_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$

第九章：集群智能仿生

□ 群体智能（Swarm Intelligence）

➤ 粒子群算法(PSO)

粒子速度的直接更新（不需要交叉变异），因此收敛更快：

$$v_{id}(t+1) = w \cdot v_{id}(t) + c_1 \cdot r_{1i}(t) \cdot [p_{id}(t) - x_{id}(t)] + c_2 \cdot r_{2i}(t) \cdot [p_{gd}(t) - x_{id}(t)]$$

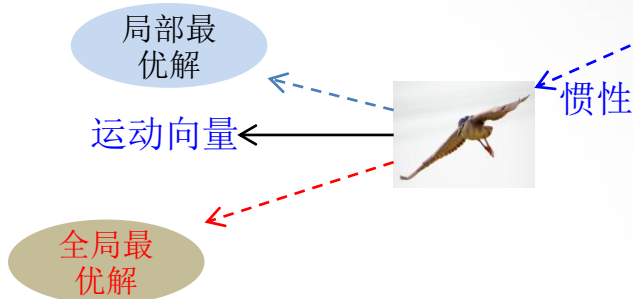
更新方程中涉及三个部分：

第一部分为粒子先前的速度（惯性）；

第二部分为“自我认知”部分，即第*i*个粒子**自身的思考**，可理解为第*i*个粒子当前位置与自己最好位置之间的距离；

第三部分为“社会经验”部分，表示粒子间的**信息共享与协作**，可理解为第*i*个粒子当前位置与群体中最好位置之间的距离；

位置更新： $x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1)$, $1 \leq i \leq N, 1 \leq d \leq D$



第九章：集群智能仿生

□ 群体智能 (Swarm Intelligence)

➤ 粒子群算法(PSO)

粒子速度的更新：

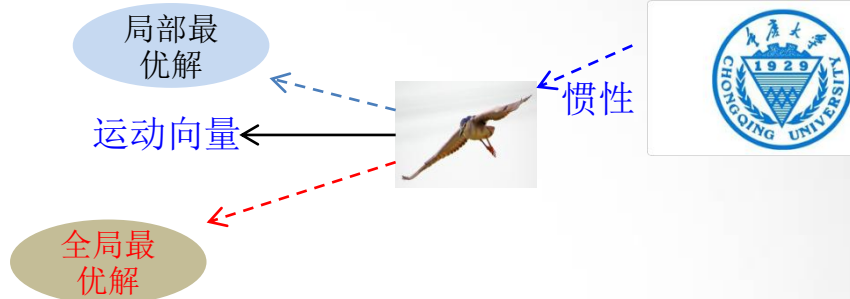
$$v_{id}(t+1) = w \cdot v_{id}(t) + c_1 \cdot r_{1i}(t) \cdot [p_{id}(t) - x_{id}(t)] + c_2 \cdot r_{2i}(t) \cdot [p_{gd}(t) - x_{id}(t)]$$

粒子位置更新：

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1), 1 \leq i \leq N, 1 \leq d \leq D$$

其中，**c1**和**c2**是正的加速常数，**w**为惯性权重因子，**r1,i**和**r2,i**为区间[0,1]内的随机数

➤ 在实际应用中，可以设计**w**的不同表达形式，产生不同的启发式算法。



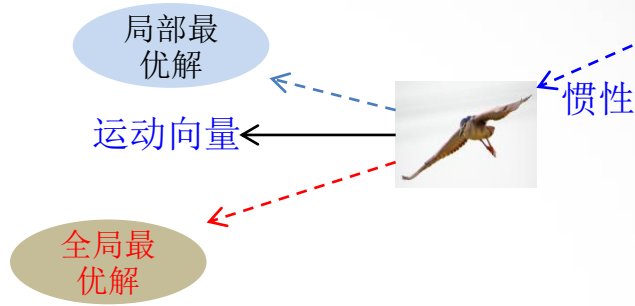
第九章：集群智能仿生

□ 群体智能 (Swarm Intelligence)

➤ 粒子群算法(PSO)

PSO实现过程：

- (1) 初始化粒子群体；规模为 n ，包括位置 $\mathbf{X}$ 和速度 $\mathbf{V}$ 。
- (2) 适应度评价；评价每个粒子的优劣。
- (3) 找每个粒子的最佳位置 $\mathbf{Pbest}$ 。对于每个粒子 $\mathbf{x}$ ，其当前适应度值如果高于其个体的历史最佳为 $\mathbf{pbest}$ ，则更新 $\mathbf{pbest}=\mathbf{x}$ ；
- (4) 找全局最佳位置 $\mathbf{Gbest}$ ；找出粒子群适应度最高的粒子位置 $\mathbf{x}$ ，如果该粒子适应度比当前全局最佳位置 $\mathbf{gbest}$ 高，那么更新当前全局最佳位置 $\mathbf{gbest}=\mathbf{x}$ ；
- (5) 利用公式更新粒子（即速度 $\mathbf{V}$ 和位置 $\mathbf{X}$ ）
- (6) 检验收敛条件是否满足。



第九章：集群智能仿生

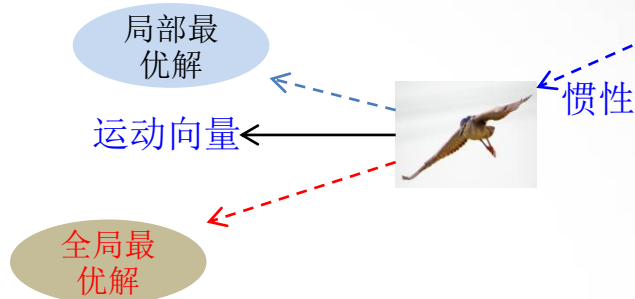
□ 群体智能（Swarm Intelligence）

➤ 参数控制与分析

如果 $w=0$, 则粒子没有记忆性;

如果 $c1=0$, 则粒子没有“认知”，只有社会经验，收敛速度会更快，但易陷入局部最优;

如果 $c2=0$, 则粒子只有“认知”能力，没有“社会”性，则粒子之间没有信息共享和合作，独立搜索，也就没有了群体智能，不可能达到最优解



$$v_{id}(t+1) = w \cdot v_{id}(t) + c_1 \cdot r_{1i}(t) \cdot [p_{id}(t) - x_{id}(t)] + c_2 \cdot r_{2i}(t) \cdot [p_{gd}(t) - x_{id}(t)]$$

粒子间信息共享的部分，仅利用最优的粒子信息



第九章：集群智能仿生

□ 群体智能（Swarm Intelligence）

➤ 蚁群算法(ACO)

蚂蚁是自然界中常见的一种生物，随着现代仿生学的发展，Dorigo等人首次将蚁群系统发展成了有用的优化和控制算法，即蚁群算法。

基本思想：虽然单个蚂蚁的行为极其简单，但群体行为具有自组织性，相互协作的蚂蚁群体能够通过自身释放的“**信息素**”传递信息，很容易找到巢穴到食物源的最短路径，当出现障碍物时，蚂蚁还能够根据对环境的自适应变化，找到最优路径。

实现：选择机制、信息素更新机制、协作机制。信息素越多的路径被选中的概率越大（选择机制）；路径越短，信息素增加越快（信息素更新机制）；个体间通过信息素进行交流（协作机制）。蚂蚁算法已成功应用于解决复杂的组合优化问题，如旅行运营商最优路径搜索问题（TSP问题）。

信息素

蚂蚁之间通信的媒介