

国外新型智能优化算法

——松鼠觅食算法

韩 毅¹ 徐梓斌¹ 张 亮²

(1. 浙江树人大学基础学院 浙江 绍兴 312028; 2. 浙江工业大学管理学院 浙江 杭州 310023)

摘 要:工程优化和人工智能领域的研究中,存在着无免费午餐(No-Free-Lunch)理论。这就意味着,没有一种算法可以在所有的优化领域都具有显著优势。有鉴于此,文献提出了一种受自然界的一种飞行松鼠的启发,提出了一种新颖的全局优化算法——松鼠觅食算法。松鼠觅食算法(Squirrel Search Algorithm, SSA)模仿东南亚南部的飞行松鼠的觅食行为和它们被称为滑翔(Gliding)的运动方式,这种方式是小型哺乳动物进行长距离移动的最有效方式。

关键词:智能优化; 飞行松鼠; 无免费午餐理论; 滑翔

基金项目:国家自然科学基金青年基金,71301147。

飞行松鼠是一类栖息在树上并在夜间进行活动的啮齿动物,它们特别适合滑翔运动。目前,飞行松鼠共有15属44种,其中大部分分布在欧洲和亚洲的落叶林区(特别是东南亚)。在欧亚大陆以外发现的、研究最多的是南部飞行松鼠。飞行松鼠被认为是空气动力学上最复杂的物种,它有一个类似降落伞的膜,可以帮助松鼠改变升力和阻力,在高空中从一棵树滑翔到另一棵树。飞行松鼠不会飞行,而是采用滑翔方式快速和有效地跨越很长的距离。松鼠之所以要滑翔,是为了躲避捕食者、寻找捕食的最佳地点和以较小的代价进行捕食。图1a给出了飞行松鼠滑翔时的真实图像,图1b展示了飞行松鼠着陆于树之前的慢动作。

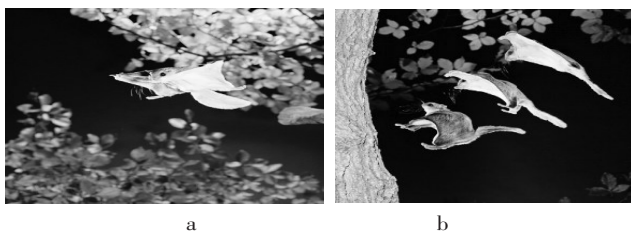


图1 飞行松鼠自然环境下飞行实景图

飞行松鼠的觅食策略灵活多变,这可以帮助飞行松鼠以最佳的方式应对食物资源。比如,松鼠为了满足秋季的营养需求,它们选择吃掉可以大量获取的橡树籽,将山核桃存储在巢穴里,其他洞穴中或者地底下。由于冬季温度低且营养需求较高,飞行松鼠在觅食时如发现山核桃就立刻觅食,如果没有山核桃,飞行松鼠会从储存的备用食物中吃山核桃。因此,飞行松鼠根据营养需求,有选择地吃一些坚果和储存其他坚果。

松鼠觅食算法(SSA)

当飞行松鼠开始觅食时,搜寻过程就开始了。在温暖的天气(秋天),飞行松鼠通过从一棵树滑翔到另一棵树来寻找食物资源。飞行松鼠通过改变位置,探索不同的森林区域。由于气候条件足够温暖,它们可以通过食用随处可见的橡树籽来快速满足日常能量需求,因此它们一找到橡树籽就立即吃掉。在满足了他们每天的能量需求后,他们开始寻找山核桃。山核桃的储存将有助于它们在极端恶劣的天气中保持能量需求,减少充满风险的觅食旅行,从而增加生存的可能性。在冬季,森林中树叶掉落增加了觅食活动的风险,因此松鼠变得不太活跃,但并未冬眠。冬季结束时,飞行松鼠再次活跃起来。松鼠在一生中不断重复上述过程,直到松鼠的生命终结为止。

为了简化数学模型,考虑以下假设。落叶森林中有 n 只松鼠,每只松鼠停留在一棵树上。每只松鼠都单独寻找食物,并通过动态觅食行为来优化利用食物资源。在森林中,只有三种类型的树——普通树、橡树和山核桃树。假设森林中包含三棵橡树和一棵山核桃树,松鼠的数为50只。1棵山核桃树和3棵橡树是4个食物资源,其他46棵普通树没有食物资源。

源。也就是说,松鼠总数的92%生活在普通树上,其余的8%生活在有食物资源的树上。然而,食物资源的数量(Number of Food, NFS)可以根据约束 $1 < NFS < n$ 而变化。

飞行松鼠的位置在SSA算法中由向量表示,每个向量有多个维度。因此,飞行松鼠可以在一维、二维、三维或超维搜索空间中滑翔来改变它们自身的位置。

随机初始化

森林中有 n 只飞鼠,第 i 只松鼠的位置可以通过一个矢量来确定。所有松鼠的位置可以用下面的矩阵表示:

$$FS = \begin{bmatrix} FS_{1,1} & FS_{1,2} & \cdots & \cdots & FS_{1,d} \\ FS_{2,1} & FS_{2,2} & \cdots & \cdots & FS_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ FS_{n,1} & FS_{n,2} & \cdots & \cdots & FS_{n,d} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$FS_{i,j}$ 是第 i 只松鼠第 j 维上的值,该值根据公式(2)来随机确定。

$$FS_{i,j} = FS_{i,L} + U(0,1) \times (FS_{i,U} - FS_{i,L}) \quad (2)$$

$FS_{i,U}$ 和 $FS_{i,L}$ 是第 j 维的上界和下界, $U(0,1)$ 是在0和1之间的均匀分布值。

适应值评价

每只松鼠位置的适应值描述了食物源的等级,即最佳食物源(山核桃树)、正常食物源(橡树)和无食物来源(普通树)。

$$f = \begin{bmatrix} f_1([FS_{1,1}, FS_{1,2}, \cdots, FS_{1,d}]) \\ f_2([FS_{2,1}, FS_{2,2}, \cdots, FS_{2,d}]) \\ \vdots \\ f_n([FS_{n,1}, FS_{n,2}, \cdots, FS_{n,d}]) \end{bmatrix} \quad (3)$$

排序、声明和随机选择

在存储了每只松鼠的位置的适应值后,数组按升序排序。最小适应值的松鼠停留在山核桃树上,接下来的三只松鼠停留在橡树上,它们可以向山核桃树飞行,其余的松鼠停留在普通树上。通过随机选择方式,选择已经满足每日所需能量的松鼠朝着山核桃树移动,剩余的松鼠将朝着橡树移动以获取每日所需能量。松鼠的觅食行为会受到天敌的影响,松鼠具体采用哪种移动策略也要根据天敌的出现概率(P_{dp})而定。

生成新位置

在飞行松鼠的觅食过程中,可能会出现三种情况。在每种情况下,假设在没有天敌的情况下,松鼠在整个森林中滑翔并高效地搜寻它最喜欢的食物,而天敌的存在使它变得谨慎,松鼠被迫在小范围内随机行走,来搜寻附近的躲藏地点。

①第一种情况,在橡树上的松鼠会向山核桃树移动。

$$FS_{at}^{t+1} = \begin{cases} FS_{at}^t + d_g \times G_e \times (FS_{ht}^t - FS_{at}^t) & R_1 \geq P_{dp} \\ \text{Random Location} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

其中 d_g 是随机滑翔距离, R_1 是 $[0,1]$ 范围内的随机数, FS_{ht}^t 是山核桃树的位置, t 表示当前迭代。滑动常数 G_e 实现全局与

局部搜索之间的平衡,经过大量分析论证, G_c 的值设为1.9。

②第二种情况,在普通树上的松鼠会向橡树移动。

$$FS_{nt}^{i+1} = \begin{cases} FS_{nt}^i + d_g \times G_c \times (FS_{nt}^i - FS_{nt}^i) & R_2 \geq P_{dp} \\ \text{Random Location} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

其中 R_2 是[0,1]范围内的随机数。

③第三种情况,一些在普通树上的松鼠已经吃了橡果,它们可能会向山核桃树移动以便储存山核桃来应对食物短缺。

$$FS_{nt}^{i+1} = \begin{cases} FS_{nt}^i + d_g \times G_c \times (FS_{nt}^i - FS_{nt}^i) & R_3 \geq P_{dp} \\ \text{Random Location} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

其中 R_3 是[0,1]范围内的随机数。

所有情况下,天敌出现的概率都为0.1。图2显示了飞行松鼠的滑行动作,通过调整升力和阻力,松鼠可以到达不同的树上。

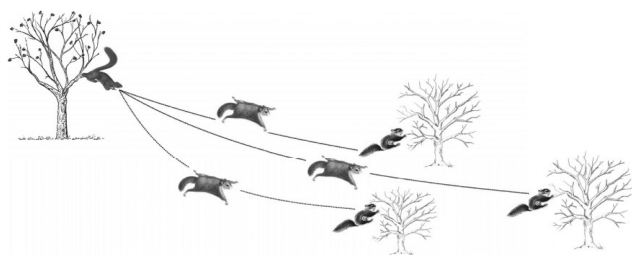


图2 飞行松鼠移动方式图
滑翔的空气动力学

松鼠的滑翔机制是通过平衡滑翔来描述的,升力(L)和阻力(D)之和产生一个合力(R),该合力与松鼠的重力大小相等且方向相反。因此,R以恒定速度(V)保证松鼠能够在直线上与水平面成一定角度 φ 下降滑翔。升阻比或滑翔比定义如下:

$$L/D = 1/\tan\varphi \quad (7)$$

松鼠可以通过减小下滑角来增加滑翔路径长度,从而提高升阻比。升力是空气撞击膜产生了向下的偏转而产生的反推力的结果,定义为

$$L = 1/2\rho C_L V^2 S \quad (8)$$

其中 $\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$ 为空气密度, C_L 称为升力系数, $V = 5.25 \text{ m/s}$ 为速度, $S = 0.0154 \text{ m}^2$ 为松鼠膜表面积。

$$D = 1/2\rho V^2 SC_D \quad (9)$$

C_D 为摩擦阻力系数,低速移动时松鼠增加阻力,高速移动时松鼠减小阻力。

$$\varphi = \arctan(L/D) \quad (10)$$

$$d_g = \left(\frac{h_g}{\tan\varphi} \right) \quad (11)$$

其中 $h_g = 8\text{m}$ 是滑翔后发生的高度减少量,计算 d_g 所需的所有参数值,包括 C_L 和 C_D ,都是来自于自然界的真实测量值。因此,松鼠可以根据着陆位置,简单地改变升阻比来改变其滑翔路径长度或 d_g 。 C_L 的取值为[0.675,1.5]之间的某个值, C_D 的值为0.6。

飞行松鼠通常在一次滑翔中行进5到25米的水平距离,在SSA算法模型中,滑翔距离在9~20米的范围内。 d_g 的值过大会引起大的扰动,可能导致算法的性能不能令人满意。因此将 d_g 除以一个称为比例因子(sf)的非零值, $\text{sf} = 18$ 使得 d_g 在[0.5,1.11]区间内浮动。因此,sf有助于实现全局搜索和局部寻优之间的均衡状态。

季节变化条件

季节变化会显著影响飞行松鼠的觅食活动,松鼠在低温条件下会损失大量热量。因为它们的体温高、体型小,导致觅食过程的代价很大,并且由于天敌的存在而具有风险。与秋天相比,气候条件迫使它们在冬天不太活跃。在SSA算法中通过检查季节变化条件,防止算法陷入局部最优。

①计算季节常量 S_c

$$S_c = \sqrt{\sum_{z=1}^3 \sum_{k=1}^d (FS_{at,k}^{i,z} - FS_{ht,k}^i)^2} \quad (12)$$

②计算季节变化条件 $S_c' < S_{\min}$

$$S_{\min} = \frac{10E^{-6}}{(365)^{2.5/t_m}} \quad (13)$$

其中 t 和 t_m 分别是当前和最大迭代值, S_{\min} 值影响算法的全局和局部搜索能力。 S_{\min} 的值较大会利于全局搜索,而 S_{\min} 的较小值有利于算法的局部搜索。对于任何启发式算法,全局和局部搜索过程需要进行有效的平衡。这种平衡可以通过滑动常数 G_c 来维持的,也可以通过在迭代过程中自适应地改变 S_{\min} 的值来实现。

③如果季节变化条件得到满足(冬天结束),则随机改变普通树上松鼠的位置。

$$FS_{nt,i}^{i+1} = FS_{nt,i} + \text{Levy} \times (FS_{nt,i} - FS_{nt,i}) \quad (14)$$

列维分布(Levy distribution)能够帮助算法以更好和更有效的方式进行全局搜索,列维飞行(Levy flight)帮助算法寻找远离当前最佳位置的新位置。列维飞行是一种随机改变步长的方法,其中步长是从列维分布中得出的。

$$\text{Levy} = 0.01 \times \frac{r_a \times \sigma}{|r_b|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (15)$$

其中 r_a 和 r_b 是[0,1]区间上的两个正态分布随机数, $\beta=1.5$, σ 计算如下:

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \times \sin(\frac{\pi\beta}{2})}{\Gamma(\frac{1+\beta}{2}) \times \beta \times 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right)^{1/\beta} \quad (16)$$

其中 $\Gamma(x) = (x-1)!$ 。算法停止准则为最大迭代次数 t_m 。

算法步骤

- 1)定义输入参数
- 2)为 n 只松鼠生成随机位置
- 3)评估每只松鼠位置的适应值
- 4)根据飞行松鼠的适应值,按升序排列它们的位置
- 5)将飞行松鼠分配到山核桃树、橡子树和普通树
- 6)While(不满足停止准则)
- 8)for $z=1$ to $n1$ (橡树上向山核桃树移动的松鼠数量)
- 9)利用公式(4)更新松鼠位置
- 10) for $u=1$ to $n2$ (普通树上向橡树移动的松鼠数量)
- 11)利用公式(5)更新松鼠位置
- 12)for $e=1$ to $n3$ (普通树上向山核桃树移动的松鼠数量)
- 13)利用公式(6)更新松鼠位置
- 14)计算松鼠适应值,升序排列位置,将飞行松鼠分配到山核桃树、橡子树和普通树
- 15)判断季节变化条件是否满足,满足则根据公式(14-16)更新普通树上松鼠位置
- 16)根据公式(13)更新 S_{\min} 的值
- 17)计算松鼠适应值,升序排列位置,将飞行松鼠分配到山核桃树、橡子树和普通树
- 18)程序 While 循环结束,输出山核桃树上松鼠的位置和适应值

结语:

本文还原了国外学者最新提出的新颖智能优化算法——松鼠觅食算法,再现了算法背景,算法的基本模型和算法的具体执行步骤。本文旨在为其他工程优化和人工智能领域的学者提供参考和借鉴,为算法的进一步完善和混合算法的研究起到一定的启发作用。

参考文献:

- [1] Jain M, Singh V, Rani A. A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm [J]. 2019, 44(2): 148-175.
- [2] Arbogast B S. A brief history of the new world flying squirrels: Phylogeny, biogeography, and conservation genetics [J]. Journal of Mammalogy, 2007, 88(4): 840-849.