

文章编号: 1001-0920(2008)09-1060-05

## 基于移动机器人路径规划的鼠群算法

刘徐迅<sup>1a</sup>, 曹 阳<sup>1a,1b</sup>, 陈晓伟<sup>2</sup>

(1. 武汉大学 a. 电子信息学院, b. 软件工程国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510641)

**摘 要:** 研究静态环境下机器人路径规划问题, 并根据老鼠觅食行为提出一种鼠群算法. 该算法引入环境因子和经验因子, 每次搜索后对路径进行经验因子更新, 通过迭代的方式寻找静态环境下机器人最佳路径. 同时提出一种禁忌策略, 有效地避免了路径死锁问题. 理论分析和实验结果表明, 该算法能使机器人在有较多障碍的环境下迅速找到一条优化路径, 而且安全避碰, 与同类算法相比具有一定的优越性.

**关键词:** 移动机器人; 路径规划; 鼠群算法; 蚁群算法

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** A

## Mouse colony optimization algorithm for mobile robot path planning

LIU Xu-xun<sup>1a</sup>, CAO Yang<sup>1a,1b</sup>, CHEN Xiao-wei<sup>2</sup>

(1a. School of Electronic Information, 1b. State Key Laboratory of Software Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China. Correspondent: LIU Xu-xun, E-mail: liuxuxun@21cn.com)

**Abstract:** Robot path planning in a static environment is studied and mouse colony optimization is proposed after studying the mice' behavior of searching for food. Environment factor and experience factor are introduced. By using iterative method, the experience factor is updated after each search to find the best robot path in a static environment. Prohibition strategies are developed and thus path deadlocks are effectively avoided. Theoretic analysis and experimental results show that this algorithm enables the robot to rapidly find the optimal path and safely avoid collisions and it has advantages over other algorithms of the kind.

**Key words:** Mobile robot; Path planning; Mouse colony optimization; Ant colony optimization

### 1 引 言

移动机器人路径规划是机器人学的一个重要领域, 其目标是在有障碍物的未知环境下, 移动机器人能寻找一条从给定起点到终点的最短路径, 且要求安全无碰撞地绕过所有障碍物. 国内外已有不少学者对移动机器人路径规划问题作了深入研究, 并提出了多种解决未知环境下机器人路径规划方法, 例如基于滚动窗口<sup>[1,2]</sup>、采用遗传算法<sup>[3,4]</sup>和蚂蚁导航<sup>[5,6]</sup>等. 然而, 已有的路径规划方法要么属于 NP-hard 问题, 要么搜索空间过大, 或者没有完全避免路径死锁问题.

针对目前研究现状存在的不足, 本文根据老鼠觅食行为提出一种鼠群算法(MCO). 该算法引入环

境因子和经验因子, 通过迭代的方式寻找静态环境下机器人最佳路径; 同时针对路径死锁问题提出一种禁忌策略, 将部分栅格归入禁忌栅格, 从而有效地避免了路径死锁.

### 2 相关工作

在机器人路径规划领域, 文献[1,2]借鉴预测控制滚动优化原理, 提出一种基于滚动窗口的优化与反馈相结合的方法; [7]利用路径缓存和代价惩罚搜索策略, 提出一种实时随机路径规划方法. [8]提出一种基于最邻近目标模式, 估测机器人导航状态的协同定位和导航方法. 以上方法均属于 NP-hard 问题.

人工智能是机器人路径规划的发展方向. 文献

收稿日期: 2007-06-27; 修回日期: 2007-09-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60132030); 教育部博士点基金项目(20040486049).

作者简介: 刘徐迅(1977—), 男, 湖南常德人, 博士生, 从事人工智能、计算机网络的研究; 曹阳(1943—), 男, 武汉人, 教授, 博士生导师, 从事网络管理、网络性能评价等研究.

[3]提出一种协同进化的自适应遗传算法,用于求解多机器人协同路径规划问题.[4]提出一种分层次的遗传算法;[9]提出一种粗糙集与遗传算法相结合的混合方法;[10]提出一种利用模糊控制的方法;[11]提出一种自组织的神经网络模型,能使机器人在未知环境下安全避碰地规划路径;[12]采用局部连接 Hopfield 神经网络表示机器人的工作空间,使机器人在动态数值势场上爬山搜索来规划路径.以上方法或者搜索空间较大,算法较为复杂;或者没有充分考虑和避免路径死锁问题.

Dorigo 等提出的蚁群算法(ACO)<sup>[13]</sup>,在旅行商问题(TSP)等诸多寻路领域取得了较好的效果.[5]将蚁群优化算法引入机器人的路径规划,解决了带约束条件的连续函数优化问题;[6]采用两组蚁群相互协作,完成机器人视野域内局部最优路径的搜索,在此基础上与其他机器人进行碰撞预测和避碰规划.然而,蚁群算法易受初期较好解的影响而陷入局部最优,出现早熟现象.本文的鼠群算法正是为了克服蚁群算法的局限性而提出的,并充分考虑和避免了路径死锁问题.

### 3 环境描述

移动机器人路径规划首先要建立工作环境.本文讨论的是二维工作空间环境,并采用栅格法.在机器人运动空间建模时,作如下假设:

**假设 1** 移动机器人只在二维有限空间中运动,运动空间中分布着有限个静态障碍物,障碍物由多个栅格描述.

**假设 2** 机器人每次移动只在相邻栅格之间进行,任意栅格有 8 个相邻栅格,即上、下、左、右和左上、左下、右上、右下.

**假设 3** 机器人每走一步即走一个栅格的中心点,任意时刻机器人能探测到以当前栅格中心点为中心,以  $r$  为半径的区域内环境信息.

设机器人在二维平面上的凸多边形有限区域内运动,该区域内分布着有限个不同大小的障碍物,在该区域内建立直角坐标系.机器人以一定的步长  $R$  运动,则  $x$  轴和  $y$  轴分别以  $R$  为单位来划分栅格.每行的栅格数  $N_x = x_{max}/R$ , 每列的栅格数  $N_y = y_{max}/R$ . 如果区域为不规则形,则在边界处补以障碍栅格,将其补为正方形或长方形,其中障碍物占一个或多个栅格.若不满一个栅格,则以一个栅格计算.每个栅格都有对应的坐标和序列号,且序列号与坐标之间一一对应.

图 1 给出了栅格坐标与序列号之间的关系.定义左上角第一个栅格的坐标为  $(1, 1)$ , 记为  $S(1, 1)$ , 对应的序列号为 1; 栅格坐标  $S(2, 1)$  对应的序列号

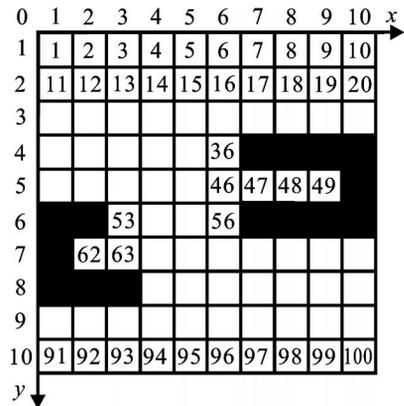


图 1 栅格坐标与序号的关系

为 2; 栅格坐标  $S(1, 2)$  对应的序列号为  $(N_x + 1)$ ; 其他依次类推.

坐标  $(x_i, y_i)$  与序列号  $i$  之间的映射关系可由下式确定:

$$\begin{cases} x_i = [(i - 1) \bmod N_x] + 1, \\ y_i = \text{int}[(i - 1) / N_x] + 1. \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\text{int}$  为舍余取整运算,  $\bmod$  为求余运算.

## 4 机器人路径规划的鼠群算法

### 4.1 蚁群算法分析

蚁群算法是一种利用正反馈原理的启发式算法.虽然该算法在旅行商等诸多领域取得了较好的效果,但其单一的正反馈原理使得寻优过程存在不合理情形.即无论搜索到的解如何,该路径上的信息素都会得到加强,而没有搜索到的较好解,不但信息素没有增加,反而会随着时间的流逝而蒸发,以后就更难搜索到.此外,该算法的结果易受初期较好解的影响而陷入局部最优,出现早熟现象.由于局部更新,除了最优路径外,其他路径上的信息素相差较小,而最优路径与其他路径上的信息素浓度相差太大(甚至相差一个数量级),这样便易陷入重复搜索和局部最优.由此看出,蚁群算法存在一定的局限性.

### 4.2 鼠群算法描述

老鼠在觅食过程中,路径选择会受到两方面的影响:一是该路径的环境吸引程度,例如亮度、舒适度等;二是老鼠的个体经验,例如老鼠上次在该路径上遇到美食,就会增加下次到达的概率,而受到毒药、人为袭击或其他不良干扰后,则会降低下次到达的概率.老鼠就是这样在环境吸引程度和个体经验的影响下进行觅食的.

本文通过模拟老鼠的觅食行为,提出一种鼠群算法,用于求解机器人路径规划问题.该问题的求解过程就是移动机器人在有障碍物的未知环境下,寻找一条从给定起点到终点的最短路径,且要求安全

无碰撞地绕过所有障碍物. 老鼠从给定起点安全避碰地到达终点的过程,即为老鼠的一次旅行. 老鼠每经历一次旅行,就对经过的路径好坏进行经验总结,这样会对以后选择觅食路径产生影响. 老鼠经过多次旅行后,迭代过程所求得的最优解即为该算法的解. 在鼠群算法中,  $t$  表示时间变量,并引入以下符号:

- $\bar{ij}$ : 路径  $(i, j)$  上的环境因子;
- $\hat{ij}$ : 路径  $(i, j)$  上的经验因子;
- $X$ : 问题的一个解;
- $X^*$ : 问题的最优解;
- $f(X)$ : 求解问题的目标函数;
- $f(X^*)$ : 最优解的目标函数值.

**定义 1** 机器人运动的任意相邻栅格  $i$  与  $j$  之间的距离为

$$d(i, j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (2)$$

其中  $x$  和  $y$  为栅格坐标信息. 如果栅格为单位长度,则根据假设 3, 式(2) 的值为 1 或  $\sqrt{2}$ .

**定义 2** 机器人路径规划问题的目标函数为

$$f(X) = \sum_{(i,j) \in X} d(i, j). \quad (3)$$

**定义 3** 任意栅格  $j$  与终点  $E$  之间的距离为

$$D(j, E) = \sqrt{(x_j - x_E)^2 + (y_j - y_E)^2}, \quad (4)$$

其中  $x$  和  $y$  为栅格坐标信息.

**定义 4** 对于任意路径  $(i, j)$ , 其环境因子表示为

$$\bar{ij}(t) = \left[ \frac{1}{d(i, j)} \right]^{k_1} \left[ \frac{1}{D(j, E)} \right]^{k_2}, \quad (5)$$

其中  $k_1$  和  $k_2$  分别表示两种距离的权重.

在环境因子中加入  $D(j, E)$ , 是为了避免路径偏离目标方向, 加快算法的收敛速度.

**定义 5** 每次求得的解  $X$ , 对应于一个经验增量, 表示为

$$\hat{X} = \mu \frac{f(X^*) - f(X)}{f(X^*)}. \quad (6)$$

式(6) 将对老鼠觅食的路径起着促进或阻碍作用.

**定义 6** 设最优解  $X^*$  对应于时间变量  $t^*$ , 解  $X$  对应于时间变量  $t$ . 当  $f(X) > f(X^*)$ , 且  $t > t^*$  时, 定义  $T = t - t^*$  为无效搜索次数,  $T_0$  为无效搜索次数的阈值.

**规则 1** 在任意时刻  $t$ , 老鼠按概率选择下一个到达的节点, 从栅格  $i$  到栅格  $j$  的转移概率之一为

$$p_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{[\hat{ij}(t)] [ \bar{ij}(t) ]}{\sum_{s \in J_i} [ \hat{is}(t) ] [ \bar{is}(t) ]}, & j \in J_i; \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (7)$$

转移概率之二为随机选择. 其中  $J_i$  是栅格  $i$  的邻居

栅格中, 除去老鼠刚刚走过的栅格和禁忌栅格的集合; 和 分别为经验因子和环境因子的权重.

**规则 2** 当老鼠从起点到终点完成一次旅行, 即求得机器人路径规划问题的一个解  $X$  时, 路径的经验因子需要更新, 更新方式如下:

$$\bar{ij}(t+1) = \begin{cases} \bar{ij}(t) + \hat{ij}(t), & (i, j) \in X; \\ \bar{ij}(t), & \text{否则.} \end{cases} \quad (8)$$

其中  $\hat{ij}(t) = \hat{X}(t)$ .

**规则 3** 每当求得机器人路径规划问题的一个解  $X$  时, 最优解  $X^*$ , 对应的时间变量  $t^*$  和目标函数值  $f(X^*)$  都需要更新, 更新方式如下:

$$X^* = \begin{cases} X, & f(X) < f(X^*); \\ X^*, & \text{否则.} \end{cases} \quad (9)$$

$$t^* = \begin{cases} t, & f(X) < f(X^*); \\ t^*, & \text{否则.} \end{cases} \quad (10)$$

$$f(X^*) = \begin{cases} f(X), & f(X) < f(X^*); \\ f(X^*), & \text{否则.} \end{cases} \quad (11)$$

**规则 4** 如果栅格  $i$  只有唯一邻居栅格  $j$  可达, 则栅格  $i$  为路径死锁, 并将其归入禁忌栅格, 视为障碍物.

例如图 1, 黑色栅格表示障碍物, 栅格 49 只有栅格 48 可达, 则将栅格 49 归入禁忌栅格; 以此类推, 将栅格 48 归入禁忌栅格.

**规则 5** 如果栅格  $i$  是禁忌栅格  $j$  的唯一可达邻居栅格, 则将栅格  $i$  归入禁忌栅格, 视为障碍物.

例如图 1, 栅格 47 是禁忌栅格 48 的唯一达到邻居栅格(栅格 49 已归入禁忌栅格, 视为障碍物), 则将栅格 47 归入禁忌栅格.

**规则 6** 当栅格  $i$  只有两个可达邻居栅格  $j$  和  $k$  时, 设路径  $(i, j)$  与  $(i, k)$  之间的夹角为  $\theta$ , 如果  $\theta = 45^\circ$ , 则将栅格  $i$  归入禁忌栅格, 视为障碍物.

例如图 1, 栅格 62 便可归入禁忌栅格.

规则 1 引入随机选择, 是为增加解的多样性, 这样有利于防止陷入局部最优. 规则 2 中没有蚁群算

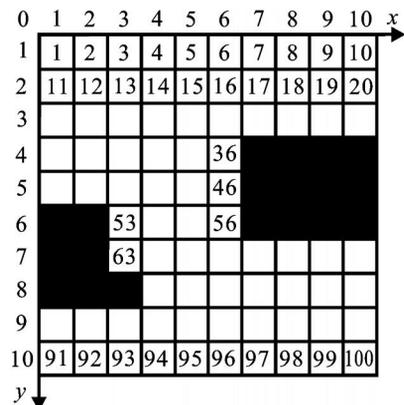


图 2 经过改进的等价环境

法的信息素挥发,经验因子更新是一种奖惩分明的策略,体现了算法的公平性.规则 4 和规则 5 引入禁忌栅格,并将其视为障碍物,这样就不会到达该栅格,从而解决了路径死锁问题.规则 6 也引入禁忌栅格,是为使搜索过程远离最不可能产生较优解的空间,减少劣质解的产生.

根据规则 4 ~ 规则 6,图 1 等价于图 2,显然图 2 更容易求解.

### 4.3 鼠群算法的实现步骤

根据鼠群算法的各项定义及规则,移动机器人路径规划问题的求解步骤描述如下:

Step1: 随机产生机器人工作环境,并随机产生机器人运动的起点和终点.

Step2: 初始化各路径的环境因子和经验因子,并令  $f(X) = f(X^*) = f(0)$ .

Step3: 根据规则 4 ~ 规则 6,改进机器人工作环境,增加禁忌栅格.

Step4: 初始化搜索次数  $t = 0$ .

Step5: 将老鼠置于机器人运动的起点.

Step6: 根据定义 6 及规则 1 和规则 2,将老鼠移动到下一栅格.

Step7: 如果老鼠还未到达终点,则返回 Step6;否则,令  $t = t + 1$ ,求得  $X$ .

Step8: 根据定义 5 计算经验增量,根据规则 3 更新经验因子,根据规则 4 更新  $X^*, t^*$  和  $f(X^*)$ .

Step9: 如果  $t$  小于规定迭代次数,则返回 Step5;否则,输出  $X^*$ .

## 5 实验与分析

为验证算法的有效性,本文作了实验仿真,仿真环境为 Visual C++. 随机生成一个  $20 \times 20$  的栅格区域,作为机器人工作环境,障碍物也随机生成.机器人的目标是寻找一条从起点 A 到终点 B 的最佳路径(见图 4 和图 5).

将本文提出的鼠群算法与蚁群算法进行比较.两种算法的收敛性如图 3 所示.由图可以看出,ACO 收敛速度较快,迭代 30 次左右便接近收敛,而 MCO 迭代 50 次左右才接近收敛.但 MCO 的目标函数值

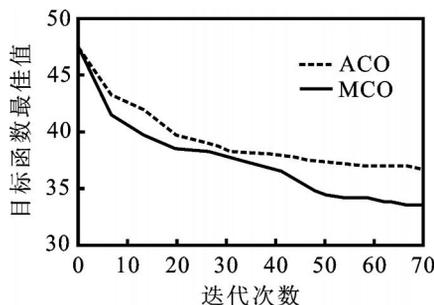


图 3 MCO 与 ACO 的收敛性比较

低于 ACO,可见 ACO 易陷入局部最优,发生早熟现象.

将本文提出的鼠群算法与文献[5]中的蚁群优化算法进行比较,在图 4 和图 5 的环境下寻求最佳路由,并令蚁群优化算法中机器人移动方向为假设 2 中的 8 个方向.取参数  $\alpha = 1.0, \beta = 0.6, \rho = 0.95$ .

在时刻 10,鼠群算法与蚁群优化算法的最佳路径比较如图 4 所示.由图可以看出,蚁群优化算法( )没有到达目的,而鼠群算法( )则可到达目的.显然,蚁群优化算法没有很好地解决死锁问题.

在时刻 50,鼠群算法与蚁群优化算法的最佳路径比较如图 5 所示.由图可以看出,鼠群算法的路径( )优于蚁群优化算法的路径( ),即鼠群算法具有更好的全局搜索能力.

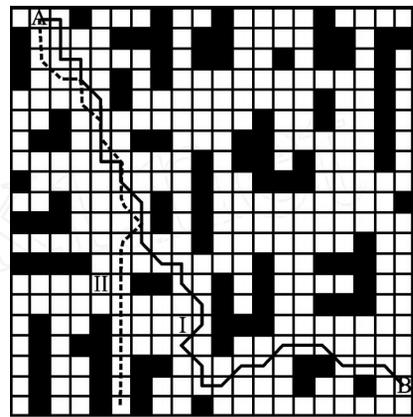


图 4 时刻 10 两种算法的路径比较

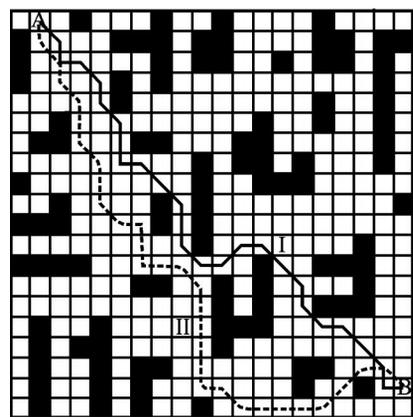


图 5 时刻 50 两种算法的路径比较

## 6 结 论

本文分析了静态环境下机器人路径规划问题,并根据老鼠觅食行为提出一种鼠群算法.该算法克服了蚁群算法单一正反馈的不公平机制,其复杂度与蚁群算法相差不大,并能克服搜索不合理的现象,有效地避免了陷入局部最优.同时提出一种禁忌策略,有效地解决了路径死锁问题.理论分析和实验结果表明,该算法能使机器人在有障碍的环境下,迅速找到一条优化路径,并且安全避碰.与同类算法相

比,鼠群算法具有一定的优越性.

### 参考文献(References)

- [1] 张纯刚, 席裕庚. 全局环境未知时基于滚动窗口的机器人路径规划[J]. 中国科学(E辑), 2001, 31(1): 51-58. (Zhang C G, Xi Y G. Robot path planning based on rolling window in global unknown environment [J]. Science in China (Series E), 2001, 31(1): 51-58.)
- [2] 席裕庚, 张纯刚. 一类动态不确定环境下机器人的滚动路径规划[J]. 自动化学报, 2002, 28(2): 161-174. (Xi Y G, Zhang C G. Rolling path planning of mobile robot in a kind of dynamic uncertain environment [J]. Acta Automatica Sinica, 2002, 28(2): 161-174.)
- [3] Cai Z X, Peng Z H. Cooperative coevolutionary adaptive genetic algorithm in path planning of cooperative multi-mobile robot systems[J]. J of Intelligent and Robotic Systems, 2002, 33(4): 61-71.
- [4] Wang C M, Soh Y C, Wang H, et al. A hierarchical genetic algorithm for path planning in a static environment with obstacles[C]. IEEE CCECE Canadian Conf on Electrical and Computer Engineering. Manitoba, 2002, 3: 1652-1657.
- [5] 樊晓平, 罗熊, 易晟, 等. 复杂环境下基于蚁群优化算法的机器人路径规划[J]. 控制与决策, 2004, 19(2): 166-170. (Fan X P, Luo X, Yi S, et al. Path planning for robots based on ant colony optimization algorithm under complex environment [J]. Control and Decision, 2004, 19(2): 166-170.)
- [6] 朱庆保. 复杂环境下机器人路径规划蚂蚁算法[J]. 自动化学报, 2006, 32(4): 586-593. (Zhu Q B. Ant algorithm for path planning of mobile robot in a complex environment [J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32(4): 586-593.)
- [7] Bruce J, Veloso M. Real-time randomized path planning for robot navigation[C]. Proc of IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and System. Lausanne, 2002, 3: 2383-2388.
- [8] Yi X, He Y, Guan X. Cooperative location model under the nearest neighbor criterion position location and navigation[C]. Proc of PLANS 2004. Monterey, 2004: 658-661.
- [9] Chengdong W, Ying Z, Mengxin L, et al. A rough set GA-based hybrid method for robot path planning[J]. Int J of Automation and Computing, 2006, 3(1): 29-34.
- [10] Hartmut S, Jrg H, Jens W. Path planning for a fuzzy controlled autonomous mobile robot [C]. Proc of 5th IEEE Int Conf on Fuzzy Systems. Augustin: IEEE Press, 1996, 8-11: 1660-1665.
- [11] Ni B, Chen X, Zhang L M, et al. Recurrent neural network for robot path planning[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 188-191.
- [12] 樊长虹, 陈卫东, 席裕庚. 动态未知环境下一种Hopfield神经网络路径规划方法[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(3): 345-350. (Fan C H, Chen W D, Xi Y G. Hopfield neural networks for path planning in dynamic and unknown environments [J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(3): 345-350.)
- [13] Dorigo M, Stutzle T. Ant colony optimization [M]. Cabridge: MIT Press, 2004.

(上接第 1059 页)

- [10] Albert A. Conditions for positive and non-negative definiteness in terms of pseudoinverses[J]. SIAM J on Applied Mathematics, 1969, 17(2): 434-40.
- [11] Barmish B R. Necessary and sufficient conditions for quadratic stabilizability of an uncertain system[J]. J of Optimization Theory and Applications, 1985, 46(4): 399-408.