

文章编号: 1001-0920(2006)12-1437-04

## 基于改进蚁群算法的星球探测机器人路径规划技术

岳富占, 崔平远, 崔祜涛

(哈尔滨工业大学 深空探测基础研究中心, 哈尔滨 150080)

**摘要:** 对蚁群算法中蚂蚁的个体行为进行改进, 解决了星球表面复杂环境下探测机器人的路径规划问题。在个体行为中加入目标导向行为、惯性行为和沿障碍行走行为, 并进行加权融合, 改进了传统的ACO算法, 提高了算法的智能, 保证了算法的全局收敛性。在蚁群算法规划的基础上提出一种紧绳算法, 对蚁群算法的最后结果进行处理, 最终给出了最优规划路径。最后通过仿真对该方法进行验证。

**关键词:** 星球探测机器人; 路径规划; 蚁群算法; 行为融合

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** A

## Planetary Rover Path-planning Based on Ant Colony Optimization Algorithm

YUE Fu-zhan, CUI Ping-yuan, CUI Hu-tao

(Deep Space Exploration Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China Correspondent: YUE Fu-zhan, E-mail: yuefzh@hit.edu.cn)

**Abstract:** In order to navigate through unstructured planetary environment autonomously, a path-planning algorithm based on ant colony optimization (ACO), goal-oriented behavior, inertial behavior and obstacle-following behavior are added to ant individual of ACO. By executing behavior weighted fusion, ACO planning algorithm is improved and used to resolve planning problem of planetary rover. Furthermore, a tight-line algorithm is presented, to give a shortest path from start point to the exploration site by processing the path-planning result of ACO. The simulation result shows of the path planning algorithm.

**Key words:** Lunar rover; Path-planning; ACO; Behavior fusion

### 1 引言

路径规划是星球探测机器人自主导航中的关键要素, 是星球探测机器人高效率探测的基础。路径规划的好坏, 直接影响到运动控制的效果和精度, 也是星球探测机器人自主技术的重要体现。星球探测机器人路径规划技术对于其进行安全巡游, 完成预定的科学探测任务具有重要的现实意义。但由于环境的特殊性, 使得星球探测机器人路径规划方法不能简单地借鉴地面移动机器人路径规划技术。

目前, 地面移动机器人常用的路径规划方法主要有: 多边形拟合法、遗传算法、栅格法、人工势场法、可视图法等<sup>[1]</sup>。以上规划算法除了部分算法具有计算量大、效率不高、容易陷入局部最小等缺陷外, 所

具有的共性是: 一般认为机器人所处环境是简单的障碍环境, 并且一般假设障碍是规则的。这对于星球表面环境复杂、障碍不规则的探测环境而言, 暴露出了其固有的缺陷, 从而不能满足复杂环境下星球探测机器人路径规划的需要。

为解决星球探测机器人路径规划这一难题, 本文引入蚁群算法(ACO)来解决星球探测机器人的路径规划问题。但由于传统的蚁群算法存在一定的不足, 如算法收敛速度慢, 不能解决复杂环境下尤其是具有凹型障碍环境的路径规划问题, 在机器人研究领域还刚刚起步。为此, 本文首先对传统蚁群个体进行行为解析, 为蚂蚁个体引入了目标导向行为、惯性行为、沿障碍行走行为, 从而改善了算法的性能,

收稿日期: 2005-09-19; 修回日期: 2006-02-26

作者简介: 岳富占(1978—), 男, 河南许昌人, 博士生, 从事月球探测机器人自主导航与运动控制等研究; 崔平远(1961—), 男, 山东青岛人, 教授, 博士生导师, 从事飞行器飞行动力学建模与控制等研究。

克服了传统蚁群算法不能应用于复杂环境的不足;然后提出一种紧绳算法,对蚁群算法得到的次优解进行优化处理,从而得到全局最优路径;最后通过仿真对该方法进行验证

## 2 星球探测机器人路径规划

星球表面环境的复杂性以及障碍的不规则性,使得星球探测机器人的路径规划变得十分困难.蚁群算法是一种本质并行分布式仿生类算法<sup>[2,3]</sup>,但由于传统的蚁群算法存在不能应用于复杂环境的不足,需要从蚂蚁个体行为本质上来分析,以提高算法的性能,解决星球探测机器人的路径规划问题

### 2.1 行为解析

从行为角度而言,传统的蚁群算法应用于路径规划,是蚂蚁个体行为的作用结果.传统蚁群算法中个体的行为主要有两种:避障行为和信息素支配行为.由于这种行为的单一性,使得蚁群算法只能处理简单环境的路径规划问题,对于复杂环境的路径规划问题则难以应对.因此需要对算法中蚂蚁个体赋予新的行为,使其具有更强的能力,提高整个蚁群的性能.针对星球探测机器人在复杂环境下路径规划所面临的不同问题,本文在传统算法中蚂蚁个体原有行为的基础上,引入了目标导向行为、惯性行为和沿障碍行走行为

#### 2.1.1 避障行为

蚁群算法中单个个体应有自主避开障碍的能力,即避障行为.避障行为是算法不脱离解空间的保障,在所有行为中避障行为级别最高.通过在算法中分析蚂蚁周围环境的可通过性来获得该行为.环境可通过时,蚂蚁移动的概率设为 1,否则设为 0

#### 2.1.2 信息素支配行为

信息素支配行为是蚂蚁个体向环境释放信息素,并依据环境信息素总量来导向自己的转移行为,是蚂蚁个体源于群体而又作用于群体的一种能力.在蚁群算法中,信息素支配行为是通过蚂蚁个体向周围环境释放信息素并设计信息素转移概率来实现的.转移概率的确定通过信息素调整来计算,用  $\rho$  表示信息素挥发率,经过时间  $\Delta t$  后,各点上的信息素按下式调整<sup>[4,5]</sup>:

$$\tau_{(i,j)}(t + \Delta t) = (1 - \rho)\tau_{(i,j)}(t) + \Delta\tau_{(i,j)} \quad (1)$$

其中:  $\tau_{(i,j)}(t)$  表示  $t$  时刻点  $(i, j)$  上信息素的存积量,  $\Delta\tau_{(i,j)}$  表示经过时间  $\Delta t$  路径点  $(i, j)$  上信息素的增量,可按下式计算:

$$\Delta\tau_{(i,j)} = \sum_{k=1}^n \Delta\tau_{(i,j)}^k \quad (2)$$

其中  $\Delta\tau_{(i,j)}^k$  表示第  $k$  只蚂蚁在搜索过程中释放在环境像素点  $(i, j)$  上的信息素,可表示为<sup>[6]</sup>

$$\Delta\tau_{(i,j)} = \begin{cases} Q, & \text{ant } k \text{ pass}(i, j); \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $Q$  为常数.初始化时各点上的信息素为

$$\tau_{(i,j)}(0) = \tau_0, \tau_0 \text{ 为常数} \quad (4)$$

蚂蚁  $k$  在运动过程中,会根据环境中各个路径点上信息素的浓度来决定其下一步的转移方向.在  $t$  时刻,蚂蚁  $k$  从位置点  $(i, j)$  向四邻域的哪个节点转移由  $p_{ij}^k$  决定,  $(i, j)$  四邻域点集  $\Theta(i, j)$  对应的转移概率按传统蚁群算法定义为

$$P_{\Theta(i,j)}^k = P_{\Theta(i,j)}^k(t) = \frac{[\tau_{\Theta(i,j)}(t)]^\alpha}{\sum_{l=1}^4 [\tau_{\Theta(i,j)^l}(t)]^\alpha} \quad (5)$$

其中:  $\Theta(i, j)$  为四邻域点集,该算法中规定其顺序为 [up, right, down, left];  $P_{\Theta(i,j)}^k(t)$  为  $t$  时刻蚂蚁  $k$  在当前点的四邻域转移概率集,为四维向量,且有

$P_{\Theta(i,j)}^k(t) = 1$ ;  $\alpha$  为权值参数,体现了信息素蚂蚁决策的影响

#### 2.1.3 目标导向行为

目标导向行为是蚂蚁个体向目标点逼近的动机和趋势,是蚁群算法快速性的体现.适时调整并有效利用目标导向行为,是提高蚁群算法效率的关键.在蚁群算法中,目标导向行为的数学描述就是给出一距离启发式概率<sup>[7]</sup>.距离启发式概率定义为

$$P_{\text{dis}} = P_{\Theta(i,j)}^k(t) = \frac{(\omega \text{Max}(\text{Dis2Goal}_{\Theta(i,j)}) - \sum_{l=1}^4 (\omega \text{Max}(\text{Dis2Goal}_{\Theta(i,j)^l}) - \text{Dis2Goal}_{\Theta(i,j)} + \mu)^\lambda)}{(\omega \text{Max}(\text{Dis2Goal}_{\Theta(i,j)^l}) - \text{Dis2Goal}_{\Theta(i,j)} + \mu)^\lambda} \quad (6)$$

其中:  $P_{\Theta(i,j)}^k(t)$  为  $t$  时刻蚂蚁  $k$  在当前点的四邻域距离启发概率集,为四维向量;  $\text{Dis2Goal}_{\Theta(i,j)}$  为当前四邻域中的 4 个点到目标点的距离向量.当蚂蚁  $k$  移动到点  $(i, j)$  时,为使目标导向行为满足启发效果,算法中引入了系数  $\omega$ ,  $\mu$  和  $\lambda$

#### 2.1.4 惯性行为

惯性行为是蚂蚁个体坚持自己原有运动方向的一种智能行为.惯性行为在蚁群算法运行的初期非常重要,可避免传统蚁群算法中兜圈或原地徘徊的现象,从而提高最优解的搜索速度

惯性行为在路径规划中需设定一个惯性概率  $P_{\text{inc}}$ ,蚂蚁个体会以较大的概率向前方运动,以较小的概率左转、右转,以微小的概率后退.惯性概率  $P_{\text{inc}}$  可凭经验给出,一般情况下,向前惯性概率  $P_{\text{inc}}^f > 90\%$ .

#### 2.1.5 沿障碍行走行为

沿障碍行走行为是防止蚂蚁陷入凹型障碍的一

种能力 由于星球表面环境的复杂性, 环境中可能存有凹型障碍, 蚁群在寻优过程中会陷入凹型区域 单纯依赖于以上行为, 部分蚂蚁很难逃脱凹型障碍, 过多的蚂蚁个体寻找目标的失效, 降低了算法的优化效率

本文在蚂蚁其他行为的基础上, 设计了沿障碍行走行为 当蚂蚁陷入凹型障碍时, 蚂蚁可根据其启发式信息, 随机判断向左沿障碍行走或向右沿障碍行走, 使蚂蚁个体能够摆脱凹型障碍, 提高算法的容错性能 一般情况下, 沿障碍行走行为的概率  $P_{fo1} > 95\%$ .

## 2.2 行为融合

由于避障行为级别最高, 其他行为都是在环境可通过的前提下才有效 在进行行为融合时, 需将环境信息进行处理, 表示成二进制的形式 (0 为障碍, 1 为可通过区域), 在可通过区域进行行为的融合 总的行为融合概率为

$$P = \lambda_1 P_{phe} + \lambda_2 P_{dis} + \lambda_3 P_{inc} + \lambda_4 P_{fo1} \quad (7)$$

其中  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  分别为加权系数, 并满足  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1$ .

沿障碍行走行为只有在蚂蚁陷入障碍时才激发, 其他情况下无效 本算法解决星球探测机器人路径规划问题时, 加权系数的确定采用模糊规则进行实时调整 模糊规则设置标准有算法运行时间、凹型障碍的有无、路径的收敛程度等 这样既可保证初期解在搜索空间的均匀分布性, 又能保证后期向最优解的逼近程度

算法是在四邻域范围内进行搜索转移, 无论是四邻域还是八邻域都是针对环境位图中的像素点 相同的环境, 如果分辨率高, 像素点就多, 算法就越精确, 但相应地也会以较大运算量为代价 因此需要设置适当的环境位图精度

基于以上分析可知, 蚁群算法这种基于四邻域选择的最终路径是由多个折线组成的路径, 因此蚁群算法得到的只能是次优路径 为得到最优路径, 在此引入紧绳算法对蚁群算法的结果进行处理

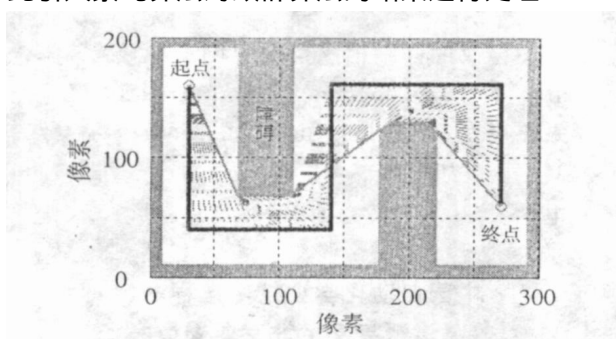


图 1 紧绳算法原理

紧绳算法是基于绳子在拉紧状态时绳端间距为最短的原理而设计的算法, 其原理如图 1 所示 图中粗实线为次优路径, 虚线代表绳子移动轨迹, 细实线代表最短路径 绳子一端固定在起点, 另一端在次优路径上移动, 碰到障碍时绳子会自然弯曲 移动到终点时, 如果绳子处于拉紧状态, 则绳端间距即为绕过障碍的最短距离

## 2.3 算法流程

Step 1: 初始化参数设定并预设最短路径为无穷大;

Step 2: 蚂蚁在可行区域判断障碍情况, 根据行为融合概率按轮盘赌法在四邻域确定下一步转移方向, 并记忆所走过的路径点;

Step 3: 按式 (1) 对环境中各点信息素进行调整;

Step 4: 当蚂蚁  $k$  到达目标点时, 将起点作为目标点按同样的行为融合方式返回, 同时计算此循环所产生的可行路径长度, 与系统预存最短路径进行比较, 更新最小值;

Step 5: 当  $n$  次路径最小值之差小于设定域值时, 循环终止; 否则转到 Step 1, 蚁群往返于起点和终点之间;

Step 6: 循环终止时, 用紧绳算法对次优路径进行处理

## 3 仿真研究

基于以上分析研究, 本文通过数学仿真软件平

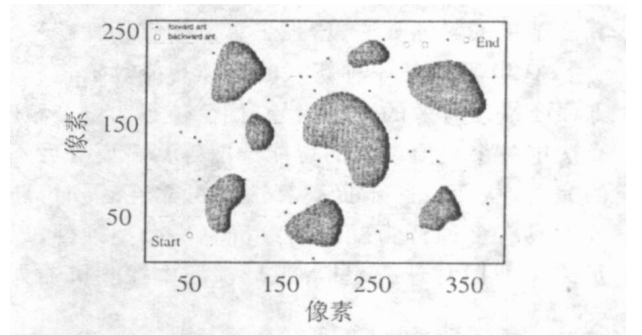


图 2 蚁群算法初期状态

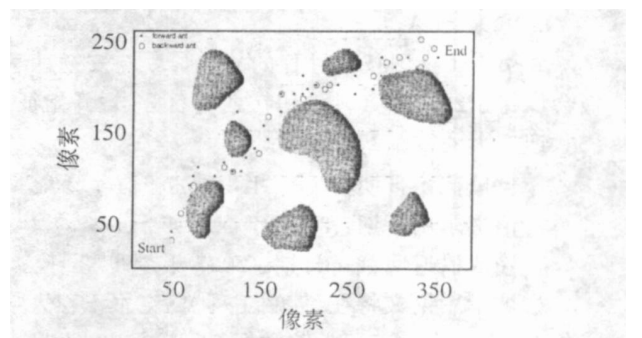


图 3 蚁群算法终止状态

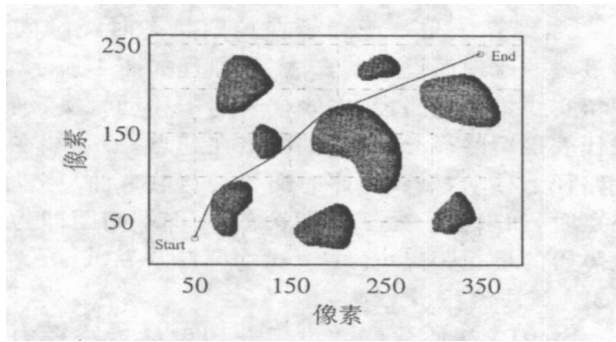


图4 路径规划结果

台Matlab对算法进行验证。设蚂蚁的数目为50,信息素挥发率为0.4,蚁群寻优环境为具有凹型和不规则障碍的地形图环境(390×260)。

图2为算法运行初期蚂蚁的分布,在算法运行初期,蚂蚁能够遍布整个搜索空间,从而提高了算法搜索的全局性。图3为蚁群算法循环终止状态,图4是用紧绳算法对蚁群算法寻优路径进行处理的结果,即路径规划的结果。

#### 4 结 语

蚁群算法是一种群体智能算法,具有良好的应用前景。将ACO应用于星球探测机器人的路径规划,体现了星球探测机器人路径规划的自主性和初步智能。本文针对星球探测机器人所面临的复杂星球表面环境,对ACO算法进行改进,通过分析蚁群中的个体行为,加入了能改善算法性能的目标导向行为、惯性行为和沿障碍行走行为,提高了算法的全局收敛性和收敛速度;然后提出一种改进蚁群算法结果的紧绳算法,增强了算法的实用性。

ACO算法是一种新兴的群体智能算法,在某些方面还缺乏有效的理论指导(如个体行为融合策略、算法中各个权值参数的智能选取等),需要今后不断的完善,从而进一步提高算法的可靠性。同时,还应开发具有多种行为融合的蚁群算法微型硬件,以满足未来我国月球、火星等星球探测中探测机器人路

径规划的需要。

#### 参考文献(References)

- [1] 居鹤华. 基于自主行为智能体的月球车运动规划与控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.  
(Ju H H. *An Autonomous Behavior Agent Based Lunar Rover Motion Planning and Control* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003.)
- [2] Dorigo M, Maniezzo V, Colnani A. Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents Systems [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics: Part B*, 1996, 26(1): 29-41.
- [3] Dorigo M, Gambardella L M. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 53-66.
- [4] 段海滨, 王道波, 朱家强, 等. 蚁群算法理论及应用研究的进展[J]. *控制与决策*, 2004, 19(12): 1321-1324.  
(Duan H B, Wang D B, Zhu J Q, et al. Development on Ant Colony Algorithm Theory and Its Application [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(12): 1321-1324.)
- [5] 胡小兵, 黄席樾. 基于混合行为蚁群算法的研究[J]. *控制与决策*, 2005, 20(1): 69-72.  
(Hu X B, Huang X Y. On Hybrid Behavior Based Ant Colony Algorithm [J]. *Control and Decision*, 2005, 20(1): 69-72.)
- [6] Ying-Tung Hsiao, Cheng-Long Chuang, Cheng-Chih Chien. Ant Colony Optimization for Best Path Planning [A]. *Int Symp on Communications and Information Technologies 2004* [C]. Japan, 2004: 109-113.
- [7] 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): 166-169.  
(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): 166-169.)

## 第5届全国技术过程的故障诊断与安全性学术会议征文

第5届全国技术过程的故障诊断与安全性学术会议将于2007年8月中旬在西安召开,现开始征文,欢迎广大同行踊跃投稿。

投稿截止日期: 2007年3月25日;

论文录用日期: 2007年4月15日;

修改稿返回截止日期: 2007年4月28日。

被录用论文将在《控制工程》、《空军工程大学学报》、《第二炮兵工程学院学报》正刊或增刊上发表。

有关会议的详细信息可查寻网址:

<http://www.epgc.net/meeting/fd2007/>

来稿可发送到: hch-302@163.com;

联系人: 胡昌华教授;

电话: 029-84743949, 029-84741949

中国自动化学会技术过程的  
故障诊断与安全性专业委员会