

文章编号: 1002-0446(2002)06-0526-04

基于蚁群算法的自由飞行空间机器人路径规划*

金飞虎 洪炳熔 高庆吉

(哈尔滨工业大学计算机学院智能机器人研究室 150001)

摘要: 本文采用蚁群算法实现了自由飞行空间机器人的避障路径规划. 蚁群算法是基于群体的一种仿生算法, 为求解复杂的组合优化方法问题提供了一种新思路. 本文对蚁群算法进行了适当的修改, 使之适用于自由飞行空间机器人的路径规划, 然后用计算机进行了仿真, 取得了较好的结果.

关键词: 自由飞行空间机器人; 蚁群算法; 路径规划; 障碍避碰

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

PATH PLANNING FOR FREE-FLYING SPACE ROBOT USING ANT ALGORITHM

JIN Feihu HONG Bing-rong GAO Qing-ji

(Department of Computer Science & Engineering, Harbin Institute of Technology 150001)

Abstract: Obstacle avoidance path planning for free-flying space robot is realized by the use of ant algorithm. The ant algorithm is a class of population based bionic algorithm, which provides new methods for complex combinatorial optimization problem. The ant algorithm is improved appropriately so that it is applicable to path planning for free-flying space robot. Then, the algorithm is implemented with computer simulation and preferable results are obtained.

Keywords: free-flying space robot, ant algorithm, path planning, obstacle avoidance

1 引言(Introduction)

在未来空间资源的开发利用中, 空间机器人将发挥着越来越举足轻重的作用. 自由飞行空间机器人(free flying space robot, 简称 FFSR)是一种新型的智能机器人, 它由机器人本体(卫星)和其搭载的机械手组成. 由于 FFSR 的本体内携带气体推进器, 它可以在空间微重力环境下自由飞行或浮游, 从而扩展了机器人的工作空间, 因此它将代替宇航员从事各种舱外作业, 成为今后空间机器人的主要研究方向之一. FFSR 的燃料有限, 为了提高 FFSR 的工作效率以及延长其在轨寿命, 对其飞行运动的研究具有重要意义, 路径规划对于 FFSR 来说是非常重要的.

传统优化方法在机器人路径规划这类复杂非线性优化问题中缺乏足够的鲁棒性. 本世纪 50 年代中期创立仿生学后, 人们从生物进化的机理中受到启

发, 提出了许多用以解决复杂优化问题的新方法, 如遗传算法、神经网络等, 并成功应用于实际问题. 蚁群算法(ant system)是最近几年才提出的一种新型的模拟进化算法, 它是由意大利学者 M. Dorigo 等人首先提出来的^[1], 称之为蚁群系统(ant colony system), 并成功应用于一些实际问题, 如 TSP 问题、分配问题、job-shop 调度问题, 取得了一系列较好的实验结果^[2,3].

本文描述了基于蚁群算法的寻优路径策略. 它将蚁群算法进行适当改进, 使之适用于 FFSR 的路径规划, 经过蚁群的协同工作, 找到一条优化路径.

2 路径的生成 (Building of path)

FFSR 所处的位置为 S, 目标点为 G, S、G 之间有一些障碍物挡着, 如图 1 所示. FFSR 寻求一条从 S 点到 G 点的既短又安全的一条路径.

* 基金项目: 航天 863 资助项目(863- 2- 4- 1- 2).

收稿日期: 2002- 04- 25

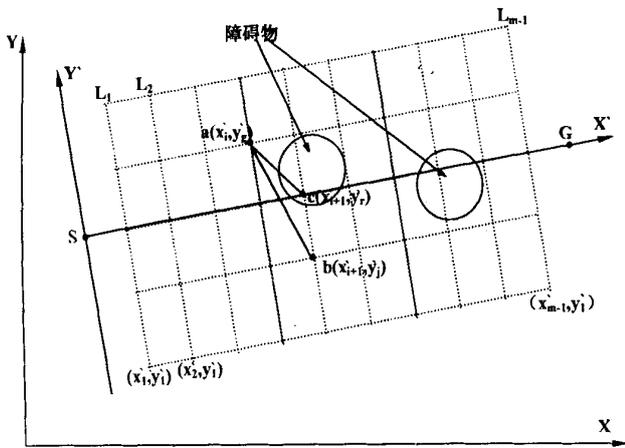


图 1 路径产生过程

Fig. 1 The process of path building

FFSR 起始点 S 在迪卡尔坐标系 $O-XY$ 下的坐标为 (x_s, y_s) . 以 S 点为坐标原点, SG 为 X' 轴, 垂直于 SG 的直线为 Y' 轴, 建立新的坐标系 $S-X'Y'$. 将线段 SG 进行 m 等分, 在每个等分点作 SG 的垂线, 就得到线段 L_1, L_2, \dots, L_{m-1} , 再以 X' 轴为中心, 将每条线段进行 $2n$ 等分, 每条垂线上就有 $(2n+1)$ 个点. 在避障区域内, 就有 $(m-1) \times (2n+1)$ 个路径点, 如图 1 所示即

$$L_1(x'_1, y'_1)L_1(x'_1, y'_2) \dots L_1(x_1, y'_{2n+1})$$

$$\dots \dots$$

$$L_{m-1}(x'_{m-1}, y'_1) L_{m-1}(x'_{m-1}, y'_2) \dots$$

$$L_{m-1}(x'_{m-1}, y'_{2n+1})$$

其中 $L_i(x'_i, y'_j)$ 表示第 i 条垂线上的第 j 点, 则从起始点 S 到终点 G 的路径可以表示为

$$\text{Path} = \{S, L_1(x'_1, y'_{k_1}), L_2(x'_2, y'_{k_2}), \dots,$$

$$L_{m-1}(x'_{m-1}, y'_{k(m-1)}), G\}$$

$$(k_i = 1, 2, \dots, 2n+1) \quad (1)$$

新坐标系 $S-X'Y'$ 到原坐标系 $O-XY$ 的转换公式为

$$\begin{vmatrix} x \\ y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x' \\ y' \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_s \\ y_s \end{vmatrix} \quad (2)$$

其中 α 表示 OX 与 SX' 的夹角.

垂线 L_i 上的路径点 $a(x'_i, y'_g)$ 到下一个垂线 L_{i+1} 上的路径点 $b(x'_{i+1}, y'_j)$ 的距离用 $d_{ab} =$

$\sqrt{\left(\frac{|SG|}{m}\right)^2 + (y'_j - y'_g)^2}$ ($j, g = 1, 2, \dots, 2n+1$) 来表示. 如果线段 ab 与障碍物相交或相切, 则令其距离为 ∞ , 如线段 ac .

第 k 只蚂蚁的路径长度为

$$L_k = \sqrt{\left(\frac{|SG|}{m}\right)^2 + (y'_{k_1} - 0)^2} +$$

$$\sum_{k_i=1}^{m-2} \sqrt{\left(\frac{|SG|}{m}\right)^2 + (y'_{k(i+1)} - y'_{k_i})^2} +$$

$$\sqrt{\left(\frac{|SG|}{m}\right)^2 + (y'_{k(m-1)} - 0)^2}$$

3 蚁群算法的实现 (Implementation of ant system)

由于 FFSR 避障路径规划问题与 TSP 问题(即旅行推销商问题)的差异, 本文的蚁群算法与文[1]中的蚁群算法既有相似之处, 也有不同之处. 相似之处在于: 在 TSP 问题中, 旅行推销商遍历各城市时要寻求最短总路径长, 而在 FFSR 路径规划中, FFSR 所走的路径也需为最短. 不同之处在于: ① TSP 问题中旅行推销商的旅行路线是一条闭合路径, 旅行推销商需要走完全部的城市, 而 FFSR 无需遍历全部节点, 只需从出发点出发到达目标点即可. ② TSP 问题中蚂蚁根据它的总路径长度来更新信息激素物质, FFSR 则根据目标函数来更新信息激素物质, 目标函数中不但包含蚂蚁走过的路径长度信息, 还包含避障安全信息. ③ TSP 问题中蚂蚁必须记住已走过的节点, 而 FFSR 路径规划中, FFSR 无需记忆, 只需选择下一条垂线上的节点即可.

3.1 目标函数的建立

假设共有 q 个障碍物, 每个障碍物的大小表示圆心为 (X'_j, Y'_j) , 半径为 r_j 的圆, 垂线 L_i 上的节点 (x'_i, y'_{k_i}) 到障碍物的距离可表示为 $d =$

$$\sqrt{(x'_i - X'_j)^2 + (y'_{k_i} - Y'_j)^2} - r_j.$$

由于蚁群算法中信息激素物质是根据目标函数的值来更新的, 目标函数的选择还应该考虑到具体问题的特征, 即路径最短并且能够安全避开障碍物. 从这两点出发, 用蚂蚁所走过的路径长度和路径上选定的离散点到最近障碍物的距离作为参数确定目标函数, 目标函数计算公式如下:

$$F = L_k + \delta \sum_{i=1}^{m-1} \frac{1}{d_{\min}} \quad (3)$$

其中, L_k 表示第 k 只蚂蚁所走过的路径长度, d_{\min} 表示节点到最近障碍物的距离, δ 为避障系数, δ 越大, FFSR 的安全系数就越高.

选定的节点 (x'_i, y'_{k_i}) 到最近障碍物距离的计算公式如下:

$$d_{\min} = \min \{ \sqrt{(x'_i - X'_1)^2 + (y'_{ki} - Y'_1)^2 - r_1}, \dots, \sqrt{(x'_i - X'_q)^2 + (y'_{ki} - Y'_q)^2 - r_q} \} \quad (4)$$

3.2 路径点的选择

假设蚂蚁从垂线段 L_i 上的节点 a 到下一个垂线段 L_{i+1} 上任意节点 b 的时间相等, 与距离无关, 那么全部蚂蚁将同时到达目标点, 同时完成一次循环.

如果在 t 时刻, 蚁群移动到垂线段 L_i 处, 设 $b_j (j = 1, 2, \dots, 2n+1)$ 为 t 时刻线段 L_i 上 j 节点处的蚂蚁数, 则蚂蚁总数 h 可以表示为 $h = \sum_{j=1}^{2n+1} b_j$.

设 $\tau_{ab}(t)$ 表示 t 时刻在路径线 ab 上残留的信息量. 在初始时刻, 各条线上的信息量相等, 设 $\tau_{ab}(0) = C (C$ 为常数), $\Delta\tau_{ab} = 0$. 蚂蚁 k 在运动过程中, 根据各条路径线上的信息量决定转移方向. $P_{ab}^k(t)$ 表示 t 时刻蚂蚁 k 由位置 $a(x'_i, y'_s)$ 转移到 $b(x'_{i+1}, y'_j)$ 的概率

$$p_{ab}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ab}^\alpha(t) \eta_{ab}^\beta(t)}{\sum_0 \tau_{ab}^\alpha(t) \eta_{ab}^\beta(t)} & b \in \text{allowed} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

其中 η_{ab} 表示线段 ab 上的能见度, α 表示信息激素物质的相对重要性 ($\alpha \geq 0$); β 表示能见度的相对重要性 ($\beta \geq 0$).

能见度 η_{ab} 为 a, b 点距离的倒数, 即 $\eta_{ab} = \frac{1}{|d_{ab}|}$.

3.3 信息激素物质的更新

随着时间的推移, 先前留下的信息激素物质逐渐消逝, 用参数 $\rho (0 \leq \rho < 1)$ 来表示信息激素物质的持久性, 则 $1 - \rho$ 表示信息激素物质的消逝程度. 经过 m 个时间单位, 蚂蚁从起始点 S 到达目标点 G , 各路径上的信息量要根据下式作调整.

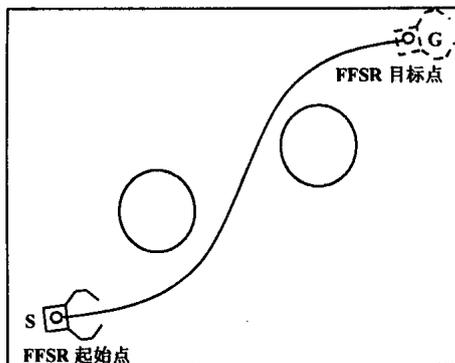


图 2 $\delta = 5$ 时的优化轨迹
Fig. 2 Optimum trajectory while $\delta = 5$

$$\tau_{ab}(t+m) = \rho\tau_{ab}(t) + \Delta\tau_{ab}$$

$$\Delta\tau_{ab} = \sum_{k=1}^h \Delta\tau_{ab}^k \quad (6)$$

$\Delta\tau_{ab}^k$ 表示第 k 只蚂蚁在本次循环在线段 ab 上留下的单位长度轨迹上的信息激素物质, 可用下式来计算.

$$\Delta\tau_{ab}^k = \begin{cases} \frac{Q}{F_k} & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在本次循环中经过 } ab \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (7)$$

其中, Q 是常数, F_k 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中的目标函数值.

本文蚁群算法的主要步骤:

STEP1: 令时间 t 和循环次数 NC 为零, 设置最大循环次数 NC_{max} , 令每个线段上的信息量 $\tau_{ab}(t) = C$, 且 $\Delta\tau_{ab} = 0$, 将全部蚂蚁置于起始点 S .

STEP2: 启动所有蚂蚁, 对每只蚂蚁 k , 根据 (5) 式计算的概率用轮盘转法选择下一条垂线上的节点并前进.

STEP3: 重复 STEP2, 直到蚁群到达目标点 G .

STEP4: 令 $t \leftarrow t + m$; $NC \leftarrow NC + 1$; 计算各蚂蚁走过的路径长度 L_k 和目标函数值 F_k , 记录当前最优

解. 根据公式 $\tau_{ab}(t+m) = \rho\tau_{ab}(t) + \Delta\tau_{ab}$, $\Delta\tau_{ab} = \sum_{k=1}^h \Delta\tau_{ab}^k$ 更新每个线段上的信息残留量.

STEP5: 如果蚂蚁群全部收敛到一条路径或循环次数 $NC \geq NC_{max}$, 则循环结束, 输出最佳路径. 否则 goto STEP2.

4 计算机仿真实验 (Computer simulation results)

为了验证上面的算法, 在 PC 机上用 Matlab6.0 进行了仿真.

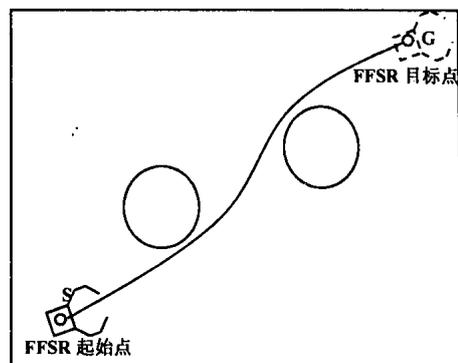


图 3 $\delta = 1$ 时的优化轨迹
Fig. 3 Optimum trajectory while $\delta = 1$

假设路径上有两个障碍物, 将障碍物区域简化为圆形, 将起始点 S 到目标点 G 进行 20 等分. 蚁群算法的参数经实验确定为 $\alpha=3, \beta=3, \rho=0.5, Q=100$. 这里启用了 20 只蚂蚁, 经过 192 次计算, 其实验结果如下. 图 2 为避障系数 $\delta=5$ 时的优化轨迹, 图 3 为 $\delta=1$ 时的优化轨迹.

5 结论(Conclusion)

本文利用蚁群算法对解决自由飞行空间机器人避障路径的问题进行了讨论, 仿真结果显示该算法可以有效地解决自由飞行空间机器人避障问题, 为机器人实时轨迹规划奠定了基础. 算法中通过调整避障系数, 可以得到不同的优化轨迹, 从而扩展了机器人对具体问题的适应性. 同时该算法也有利于并行执行和应用, 并且具有较强的鲁棒性. 蚁群算法的研究刚刚起步, 还有许多问题有待解决, 但仿真结果显示了蚁群算法在解决路径规划等优化问题方面有良好前景.

参考文献 (References)

- [1] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agent [J]. IEEE Transactions on

Systems, Man, and Cybernetics, 1996, 26(1): 29- 41

- [2] Colomi A. Heuristics from nature for hard combinatorial optimization problems. Int Trans in Opnl Res, 1996, 3(1): 1- 21
- [3] Dorigo M, Gambardella L M. A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53- 66
- [4] Dorigo M. And G. Di Caro (1999). The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic. In D. Corne, M. Dorigo and F. Glover(eds), New Ideas in Optimization. McGraw-Hill, 1999. (Also available as: Tech. Rep. IRIDIA/99-1, Universite Libre de Bruxelles, Belgium.)
- [5] 蔡自兴. 机器人原理及其应用. 中南工业大学出版社, 1988

作者简介:

金飞虎 (1973-), 男, 哈尔滨工业大学计算机应用专业博士研究生. 研究领域: 空间智能机器人, 神经网络控制, 计算机网络及通讯技术.

洪炳熔 (1937-), 男, 工学博士, 哈尔滨工业大学计算机应用专业教授, 博士生导师. 研究领域: 空间智能机器人、星载计算机和虚拟现实技术.

高庆吉 (1967-), 男, 哈尔滨工业大学计算机应用专业博士研究生. 研究领域: 为空间智能机器人及人工智能技术.

(上接第 520 页)

机器人处于倾覆临界状态时, 除了 C_1, C_2 点外, 其余支撑点处的壁面反力为零, 因此机器人受到的所有力对 t_{C12} 的力矩为: $m t(F) + m t(F)$. 球形壁面爬行机器人在球面上不发生绕 t_{C12} 倾覆的条件为: $m t(F) + m t(F) = 0$.

6 结论(Conclusion)

本研究得到国家自然科学基金项目的资助, 机器人达到了总体要求的性能指标, “球形移动机器人”已获实用新型发明专利. 下阶段除样机完善和现场试用外, 进一步的研究涉及到机器人本体的轻量化、移动速度提高和作业装置的试验, 满足全天候作业的性能要求等.

参考文献 (References)

- [1] Yoshikazu M, et al. JSME International Journal Series C, 1999, 42(1): 210
- [2] Hisao Kojima, Ryowei Toyama, Kengo Kobayashi. Development of Wall Cleaning Robot, 石川岛磨技报, 1992, 32(2): 123- 128
- [3] Kroczyński P, Wade B. The Skywasher: A Building Washing Robot. Proceedings of 17th Int Symp On Industrial Robots, 1987, 1: 11- 19
- [4] Kiichi Ikena, Taketonshi Nozaki, Saburo Shimada. Development of A Self-contained Wall-Climbing Robot. 机械技术研究所所报, 1992, 46(2): 56- 65
- [5] 黄建军. 多方位运动车辆及其车轮. 发明专利申请公开说明书 CN1073636A, 1992

作者简介:

谈士力 (1966-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 机器人技术与应用.