

文章编号:1000-582X(2004)08-0132-04

基于蚁群算法的三维空间机器人路径规划*

胡小兵^{1,2}, 黄席樾²

(1. 重庆大学 数理学院, 重庆 400030; 2. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400030)

摘 要:将蚁群算法应用于三维空间机器人路径规划问题。首先将机器人所在位置(原点)与目的点之间的空间划分成立体网格,同时定义原点与目的点之间的有效路径。蚁群从原点出发,独立地选择有效路径,最终到达目的点,从而求出从原点到目的点之间的最优路径。实验结果表明,该算法不仅有效,而且具有较快的速度。

关键词:蚁群算法;机器人路径规划;启发式算法

中图分类号:TP24

文献标识码:A

三维空间机器人路径规划的任务是在具有障碍物的环境中,按照一定的评价标准,寻找一条从起始位置到目的位置的无碰路径。解决该问题的常规方法由 2 部分组成:1) 建立一个数据结构来代表工作空间的几何结构;2) 搜索该数据结构以找到一条无碰路径^[1],如可视顶点图法(visibility graphic)和 voronoi 图法等。但这些方法需要大量的计算时间来建立和搜索数据结构,因此不适用于存在运动障碍物的在线路径规划。笔者将蚁群算法应用于该问题,实验取得了较好的结果。

从蚁群觅食行为中受到启发,意大利学者 M. Dorigo 等人在 20 世纪 90 年代初首次提出了蚁群算法^[2]。蚁群算法是继模拟退火、遗传算法和人工神经网络等启发式搜索算法后的又一种应用于优化问题的启发式搜索算法。该算法已先后应用于旅行商问题(Traveling Salesman Problem, TSP)、二次分配问题(Quadratic Assignment Problem, QAP)、工件调度问题(Job-shop Scheduling Problem, JSP)、车辆路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP)、图着色问题(Graph Coloring Problem, GCP)和网络路由(Network Routing Problem, NRP)、机器人路径规划(Path Planning of Robot, PPR)^[3-5]问题等,实验结果表明该算法具有极强的鲁棒性和搜索较好解的能力。

1 三维空间有效路径的表示

如图 1 所示,在笛卡儿坐标系 $O-XYZ$ 下,设机器人所在的位置为 S ,要到达的目的点为 D (S 到 D 的长度为 h),障碍物 O_1, O_2, \dots, O_k 在 S 与 D 之间,则路径规划的目的就是要在 S 和 D 之间找到一条既短又安全的路径。

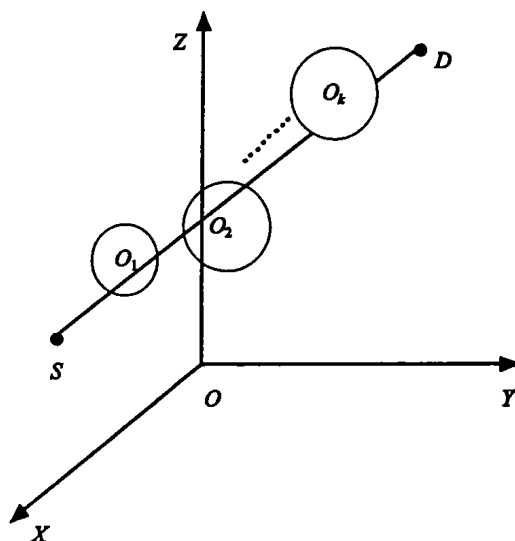


图 1 空间障碍物在笛卡儿坐标系 $O-XYZ$ 中

不妨设障碍物为球形,则可将其表示为 $\{(o_i, r_i) | i=1, 2, \dots, k\}$, 其中 o_i, r_i 分别表示第 i 个障碍物的球心位置和半径长度。

* 收稿日期:2004-03-05

作者简介:胡小兵(1975-),男,湖北京山人,重庆大学讲师,博士研究生,主要研究方向:现代优化算法,机器人控制技术,计算机软件设计。

为了研究的方便,建立图2所示的笛卡儿坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 。其中 S 点为新坐标系的原点, SD 方向为 Z' 轴的正方向, X' 轴和 Y' 轴可适当选择。

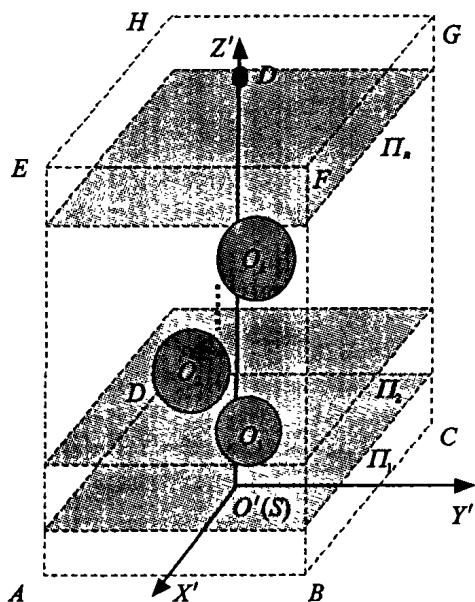


图2 空间障碍物在坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 中

坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 与 $O-XYZ$ 之间的变换关系为:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha_x & \cos\alpha_y & \cos\alpha_z \\ \cos\beta_x & \cos\beta_y & \cos\beta_z \\ \cos\gamma_x & \cos\gamma_y & \cos\gamma_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中 $\alpha_x, \beta_x, \gamma_x$ 分别为 X 轴与 X', Y', Z' 轴的夹角; $\alpha_y, \beta_y, \gamma_y$ 分别为 Y 轴与 X', Y', Z' 轴夹角; $\alpha_z, \beta_z, \gamma_z$ 分别为 Z 轴与 X', Y', Z' 轴夹角。

由公式(1)可计算出障碍物 $\{(o_i, r_i) | i=1, 2, \dots, k\}$ 在坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 下的坐标, 设为 $\{(o'_i, r'_i) | i=1, 2, \dots, k\}$ 。由 SD 的长度为 h , 知 D 在坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 下的坐标为 $(0, 0, h)$ 。

如图2所示, 在坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 中作立方体 $ABCDEFGH$, 其中立方体的 $ABCD$ 面在 $X'Y'$ 平面上, 且为边长为 $2L$ 的正方形平面。边 AB 平行于 Y' 轴, BC 平行于 X' 轴, 且原点 O' 在正方形平面 $ABCD$ 的中心上, 立方体的高 $AE = h$, 点 D 的坐标为 $(-L, -L, 0)$ 。

将 $O'D$ 进行 $(n+1)$ 等分, 过每个等分点, 作垂直于 Z' 轴的 n 个平面 $\Pi_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。平面 Π_i 与立方体 $ABCDEFGH$ 相交为图3所示的正方形平面(为方便起见, 记为 Π_i), 将正方形平面 $\Pi_i (i=1, 2, \dots, n)$ 平均分成 $m \times m$ 个小正方形。则对于正方形平面 Π_i 上小正方形顶点 $P^i(u, v) (u, v=0, 1, \dots, m)$ 在坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 中的实际坐标为 $\left(-L + \frac{u*2*L}{m}, -L + \frac{v*2*L}{m}, \frac{i*h}{n}\right)$ 。

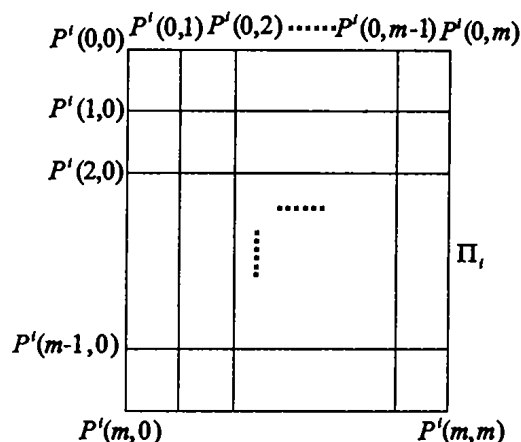


图3 平面 Π_i 上网格坐标表示

2 基于蚁群算法的路径规划

有效路径的生成: 在坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 中, 蚁群从 S (原点) 出发, 首先到达平面 Π_1 上的某点 $p^1(i_1, j_1)$, 其中 $i_1, j_1 \in \{0, 1, \dots, m\}$, 然后再从 $p^1(i_1, j_1)$ 点出发到达平面 Π_2 上的某点 $p^2(i_2, j_2)$, 其中 $i_2, j_2 \in \{0, 1, \dots, m\}$, ..., 最后到达平面 Π_n 上的 $p^n(i_n, j_n)$ 点, 其中 $i_n, j_n \in \{0, 1, \dots, m\}$ 。连接 $p^n(i_n, j_n)$ 与 D 点, 便构成了一条从 S 到 D 的路径 $S \rightarrow p^1(i_1, j_1) \rightarrow \dots \rightarrow p^n(i_n, j_n) \rightarrow D$ 。由于 S 与 D 之间存在障碍物, 因此某些路径可能是无效的。为了让蚂蚁尽量生成有效路径, 此处为平面 $\Pi_i (i=1, 2, \dots, n-1)$ 上的点 $p^i(u, v)$ 引入一个允许列表 $allowed^i(u, v)$ 。 $allowed^i(u, v)$ 为平面 Π_{i+1} 上点集的子集, 且连接 $p^i(u, v)$ 与 $allowed^i(u, v)$ 中的任何点都不会穿过障碍物。

允许列表 $allowed^i(u, v)$ 的计算方法: 设 $p^i(u, v)$ 为平面 $\Pi_i (i=1, 2, \dots, n-1)$ 上的某一点, 对平面 Π_{i+1} 上的任意点 $p^{i+1}(k, l) (k, l=0, 1, \dots, m)$, 如果线段 $p^i(u, v)p^{i+1}(k, l)$ 不与任何障碍物相交, 则将 $p^{i+1}(k, l)$ 点加入到 $allowed^i(u, v)$ 中。按照此方法, 可以计算出点 $p^i(u, v)$ 的所有允许到达的点, 并将其存于 $allowed^i(u, v)$ 中。

信息素列表: 对于平面上的任意点 $p^i(u, v)$, 有一个信息素列表与之相对应。信息素列表是一个数组, 其中表示点 $p^i(u, v)$ 与点 $p^{i+1}(k, l)$ 之间的信息素连接强度。

选择概率: 对处于平面 $\Pi_i (i=1, 2, \dots, n-1)$ 上的任意点 $p^i(u, v)$ 的蚂蚁, 选择平面 Π_{i+1} 上的 $p^{i+1}(k, l)$ 的概率为

$$P = \frac{[\tau_{uv}^i(k, l)]^\alpha}{\sum_{p^{i+1}(x, y) \in allowed^i(u, v)} [\tau_{uv}^i(x, y)]^\alpha} \quad (2)$$

其中 α 表示信息素的重要程度。

信息素更新: 对于到达目的点 D 的蚂蚁, 最优解蚂蚁所经过的路径上的信息素将会按公式(3)进行

更新

$$\tau_{uw}^i(k,l) = (1 - \rho) * \tau_{uw}^i(k,l) + \Delta\tau_{uw}^i(k,l) \quad \rho \in (0,1) \quad (3)$$

其中 ρ 表示信息素的蒸发系数。

$$\Delta\tau_{uw}^i(k,l) = \frac{Q}{L} \quad (4)$$

其中 Q 为常数, L 为最优解蚂蚁经过路径的长度。

求解三维空间机器人路径规划的蚁群算法的流程描述为:

步骤 1 初始化。

1) 按公式(1)计算出各障碍物在坐标系 $O' - X'Y'Z'$ 中的坐标;

2) 作立方体 $ABCDEFGH$ 和平面 $\Pi_i (i=1,2,\dots,n)$, 并将每个平面划分成 $m \times m$ 个小方格, 计算所有小方格顶点处的坐标;

3) 计算平面 $\Pi_i (i=1,2,\dots,n-1)$ 上所有点的允许列表 $allowed^i(u,v) (u,v=0,1,\dots,m)$;

4) 初始化平面 $\Pi_i (i=1,2,\dots,n-1)$ 上所有点 $p^i(u,v) (u,v=0,1,\dots,m)$ 的信息素列表 τ_{uw}^i 。

步骤 2 将 m 只蚂蚁放到 $O' - X'Y'Z'$ 的坐标原点, 置 $NC=0$ 。

步骤 3 对蚂蚁 $i (i=1,2,\dots,m)$, 检查其是否到达目的点 D , 如果没有到达, 则检查蚂蚁 i 所在点的允许列表 $allowed^i(u,v) (u,v=0,1,\dots,m)$, 如果允许列表不为空, 则按公式(2)独立地选择下一个平面上的点, 否则该蚂蚁死亡。

步骤 4 找出本次迭代中的最优路径, 如果其优于当前最优路径, 则用其替换当前最优路径。

步骤 5 按公式(3)更新信息素。

步骤 6 如果停机条件满足, 则输出最优解; 否则转步骤 2。

3 仿真实验结果

考虑到坐标系 $O - XYZ$ 与 $O' - X'Y'Z'$ 可以通过公式(1)相互转换, 实验直接考虑坐标系 $O' - X'Y'Z'$ 中的情形。设有 3 个障碍物 O_1, O_2, O_3 的球心坐标和半径分别为: $\{(20,25,60):30\}$ 、 $\{(30,25,95):40\}$ 、 $\{(46,50,260):86\}$, 目的点 D 的坐标为 $(0,0,400)$ 。蚁群算法的参数设置如表 1。

表 1 蚁群算法的参数设置
(算法中的蚂蚁数为 40, 算法迭代的次数为 1 200)

α	ρ	n	m	L
2.0	0.5	15	20	150

用 Matlab 6.1 对实验进行仿真, 算法迭代 1 200 次以后得最优解长度为 489.39, 其路径为图 4 所示。

同时还对该算法中的 m, n 进行了测试, 发现当 m 和 n 增大时, 算法可以得出更优的最优解, 但所需的计算时间将会增大。

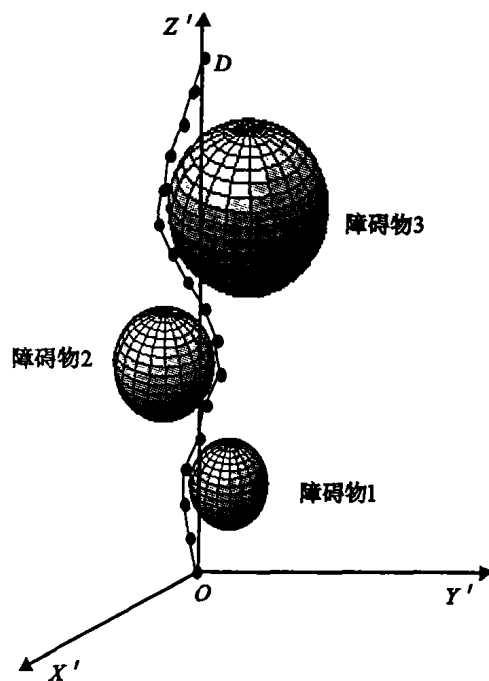


图 4 蚁群算法规划出的路径

4 结束语

将蚁群算法应用于三维空间机器人路径规划问题取得了较好的结果, 说明蚁群算法具有较强的鲁棒性。采用将机器人所在位置与目的位置之间的空间按一定的规律划分成离散的点, 因此, 划分点的稠密程度决定了算法的精度。离散点越稠密, 算法的精度越高, 所需时间也越多; 反之则越低, 所花时间越少。在实际应用中, 可根据对精度的要求, 决定离散点的稠密程度。

参考文献:

- [1] LEE S, PARK J. Neural computation for collision-free path planning[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1991, (2): 315-326.
- [2] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B, 1996, 26(1): 29-41.
- [3] DORIGO M, DI CARO G, GAMBARDELLA L M. Ant algorithms for discrete optimization[J]. Artificial Life, 1999, 5(2): 137-172.
- [4] NAVARRO VARELA G, SINCLAIR M C. Ant colony optimization for virtual wave length path routing and wavelength allocation[A]. In Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation[C]. Piscataway, N J: IEEE Press, 1999. 1 809-1816.
- [5] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computations, 1997, 1(1): 53-66.
- [6] 董玉成, 陈义华. 基于蚂蚁算法的移动机器人路径规划[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2003, 26(3): 49-51.

Path planning in 3-D space for robot based on ant colony algorithm

HU Xiao-bing^{1,2}, HUANG Xi-yue¹

(1. College of Mathematics and Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: In this paper the ant colony algorithm is applied to path planning problem in 3-D space for robot. First of all, the space between the origin where the robot is located and destination was divided into a three dimensional grid, at the same time the valid path from origin to destination is defined, then all the ants will leave from the origin, selecting next vertex independently in three dimensional grid, to the destination on a valid path. The simulated experiment shows that the algorithm is efficient and has a great convergence rate.

Key words: ant colony algorithm; path planning for robot; heuristic algorithm

(编辑 张 革)

(上接第 131 页)

Laboratory similar model test investigation of prestressed anchor rope strengthened slope fractured rock mass

ZENG Xiang-yong¹, TANG Shu-ming^{1,2}, DENG An-fu¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Chongqing Communications Research & Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: Now in the highway construction of the mountain area, fractured rock mass slope always strengthened by the anchor rope. In order to investigate the strengthen effect of the slope fractured rock mass strengthened by the prestressed anchor rope, laboratory similar model test was designed and preceded. By the self-made facilities, a new method of modeling prestressed anchor rope was used in the test. Nylon ropes and the aluminum flakes were used to model the anchor rope and discrete rock mass joints. Gypsum based mix material was used to model rock. According to the real slope engineering site circumstances, six sorts of different disposed prestressed nylon rope strengthened model specimens and the specimens without prestressed nylon rope were made by the similar theory. With the test results, the strength and deformation properties of different model specimens were investigated. Comparison to different anchor effects of the different model specimens was made. The final analysis shows that in order to make full use of the anchor rope's strengthen ability, anchor rope should be disposed perpendicularly to the fracture structure rock mass's main joint direction and should be placed in the upper or top area of the fractured rock mass slope.

Key words: model test; slope; fractured rock mass; prestressed anchor rope; disposal of anchor rope

(编辑 姚 飞)