

基于栅格法的机器人路径规划快速搜索随机树算法

国海涛, 朱庆保, 徐守江

(南京师范大学 数学与计算机科学学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 针对复杂环境下的机器人路径规划问题, 提出了一种全新的基于栅格法的机器人路径规划快速搜索随机树算法。以机器人出发点为随机树的根节点, 通过扩展, 逐渐增加叶节点直至随机树的叶节点中包含了目标点。从出发点为目标点之间的一条以随机树的边组成的路径就是目标路径。研究表明在同样的环境下与遗传算法、A* 算法相比该方法能在更短的时间内找到更优的路径。仿真实验也表明, 即使在随机生成的复杂环境下, 利用该算法也可以快速规划出一条全局优化路径, 且能安全避障。

[关键词] 机器人, 路径规划, 快速搜索随机树, 栅格法

[中图分类号] TP24 [文献标识码] B [文章编号] 1672-1292(2007)02-0058-04

Rapid-Exploring Random Tree Algorithm for Path Planning of Robot Based on Grid Method

Guo Haitao, Zhu Qingbao, Xu Shoujiang

(School of Mathematics and Computer Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract A new rapid-exploring random tree algorithm for path planning of robot based on grid method is proposed to plan an optimal path for mobile robot in complex environment. The algorithm explores the space and add a new node to a random tree in which that root node is the position of robot until the leaf node of the tree contains the goal node. The path composed from the edges of the initial node to the goal node is where the robot walk by. It is tested that the proposed algorithm is more effective than GA and A* under the same environment. The simulation results illustrate that the proposed algorithm can be used to solve the path planning for mobile robot even in the random complex environment the robot can avoid the obstacles safely by the path gained by the new algorithm.

Key words robot, path planning, rapidly-exploring random tree, grid method

0 引言

移动机器人路径规划是指在有障碍物的工作环境中, 寻找一条从给定起始点到终止点的较优的运动路径, 使机器人在运动过程中能安全、无碰撞地绕过所有的障碍物, 且所走路径较短。这方面的研究已有广泛的报道, 例如用遗传算法^[1-3]、神经网络^[4-6]、A*^[7]等方法对机器人路径进行规划, 这些算法使问题的求解速度和规模有不同程度的提高。但是, 其共同的缺陷在于求解时间过长, 存在着搜索空间大、算法复杂、效率不高等问题, 特别是当障碍物的数目增加或地形障碍趋于复杂时, 这些路径规划算法的复杂度将会大大增加, 甚至无法求解。例如遗传算法在求解最短路径时, 由于编码长度变化范围很大, 尤其在问题规模较大、地形复杂时, 产生的无效路径较多, 求解效率很低, 故能有效求解的问题的规模也比较小^[2]。

快速搜索随机树 (Rapidly-Exploring Random Tree, RRT)^[8,9] 是一种数据结构和算法, 其独特的优点在于可以直接应用于非完整性规划和运动动力学规划中; 同时又是一种模型, 该方法起初被用于连续空间中非完整性规划和运动动力学规划, 并取得了一定的成绩。

基于对已有成果的研究并针对已有算法的不足, 本文提出了一种用于机器人路径规划的、在离散空间

收稿日期: 2006-10-10

基金项目: 国家自然科学基金 (60673102) 和江苏省自然科学基金 (BK2006218) 资助项目。

作者简介: 国海涛 (1981-), 硕士研究生, 主要从事人工智能与智能控制的学习与研究。E-mail: guohaitao2005@163.com

通讯联系人: 朱庆保 (1955-), 教授, 主要从事人工智能与智能控制的教学与研究。E-mail: zhuqingbao@njnu.edu.cn

中的快速搜索随机树算法. 该方法首先用栅格法将机器人工作环境离散化, 再以机器人的起始栅格为随机树的根节点, 然后在剩余的无障碍的空白栅格集中选取扩展点, 直到随机树的叶节点中包括目标点为止. 实验表明, 该方法能满足机器人快速路径规划的要求, 并且在复杂的环境下也可以快速地规划出一条从起始点到目标点的优化路径, 效果十分令人满意.

1 环境描述

记 AS 为机器人 Rob 在二维平面上的凸多边形有限运动区域, 其内部分布着有限个静态障碍物 b_1, b_2, \dots, b_n . (考虑 AS 为任意形状, 因此, 可在 AS 边界补以障碍栅格, 将其补为正方形或长方形.) 在 AS 中以 AS 的左上角为坐标原点 O , 以横向为 X 轴, 纵向为 Y 轴建立系统直角坐标系, 如图 1 所示. 假设机器人在水平方向上的行走步长为 δ 并且 AS 在 X, Y 方向的最大值分别为 X_{max} 和 Y_{max} . 以 δ 为步长形成一个栅格, 则每行的栅格数 $N_x = X_{max} / \delta$ 每列的栅格数 $N_y = Y_{max} / \delta$ 其中 $b_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 占一个或多个栅格, 当不满一个栅格时算一个栅格.

记 $g \in AS$ 为任意栅格, A 为 AS 中 g 的集合, 记 $S = \{b_1, b_2, \dots, b_n\} \subseteq A$ 为静态障碍集. $\forall g \in A$ 在坐标系中都有确定的坐标 (x, y) , 记做 $g(x, y)$, x 为 g 所在的行号, y 为 g 所在的列号. 令 $C = \{1, 2, 3, \dots, M\}$ 为栅格序号集, $g(1, 1)$ 的序号为 1, $g(1, 2)$ 序号为 2, $g(2, 1)$ 序号为 $N_x + 1, \dots$, 如图 1 所示. $g_i \in A$ 的坐标 (x_i, y_i) 与序号 $i \in C$ 构成互为映射关系, 序号 i 的坐标可由式 (1) 确定:

$$\begin{aligned} x_i &= ((i - 1) \bmod N_x) + 1, \\ y_i &= (\text{int})((i - 1) / N_x) + 1 \end{aligned} \tag{1}$$

式中, int 为舍余取整运算, \bmod 为求余运算.

对于任意二维凸多边形, 规划的目的是使机器人由任意起点 G_{begin} , 安全地沿一条较短路径到达任意终点 G_{end} . 且 $G_{begin}, G_{end} \notin S$, 其它约束条件为: $begin, end \in C, begin \neq end$

2 基于栅格法的机器人路径规划快速搜索随机树算法

2.1 相关定义

为了叙述方便, 给出如下约束和定义:

定义 1 任意两栅格间的距离指两栅格间的连线长度, 记作 $d(g_b, g_h), i, h \in C$, 由式 (2) 计算:

$$d(g_b, g_h) = \sqrt{(x_i - x_h)^2 + (y_i - y_h)^2} \tag{2}$$

定义 2 环境中所有空白栅格对应的序号 i 所组成的集合记为 F , 显然 $F \cup S = A$, 其中 $i \in F$.

定义 3 对于 RRT 中所有节点对应的栅格序号 i 组成的集合称为 RRT 节点集, 记为 $P(RRT)$, 其中 $i \in F$.

定义 4 序号为 i 的栅格的邻域记为 $NEIB_i$, 其中 $NEIB_i = \{g \mid g \in A, d(g_i, g) \leq \sqrt{2}\}$.

图 1 中的粗框给出了按本定义算出的 $g(4, 4)$ 的邻域.

定义 5 环境中机器人未搜索过的栅格对应的序号所组成的集合记为 $Q(RRT)$.

2.2 快速搜索随机树及算法步骤

快速搜索随机树采用一种特殊的增量方式进行构造. 首先选择一个根节点 G_{begin} 出发, 在随机树中找一个离目标节点距离最小的节点 $G_{nearest}$, 再在 $G_{nearest}$ 的邻域内搜索扩展节点 G_{extend} , 直至目标节点 G_{end} 成为随机树的某一个叶节点而结束. 快速搜索随机树的构建如图 2 所示.

根据以上定义和快速搜索随机树的原理, 机器人路径规划的快速搜索随机树算法步骤描述如下:

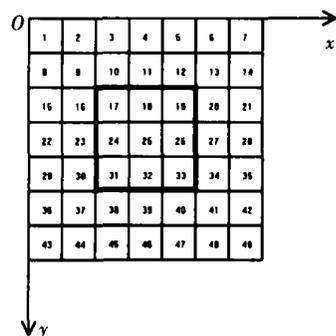


图 1 栅格坐标与序号关系

Fig.1 Relation between rating coordinate and serial numbers

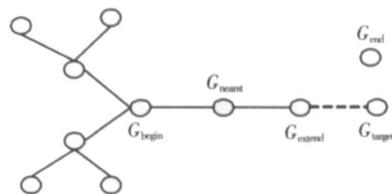


图 2 快速搜索随机树构建

Fig.2 Construction of rapidly-exploring random trees

Step 1 初始化起始点 G_{begin} 和目标点 G_{end} , 并以 G_{begin} 点对应的栅格序号为 RRT 的根节点 G_{root} ,

Step 2 令 $G_{nearest} = G_{root}$ 其中 $G_{nearest}$ 为 $P(RRT)$ 中离目标点 G_{end} 距离最小的节点.

Step 3 若 $G_{nearest} = G_{end}$, 则转 Step 6 否则继续.

Step 4 在区间 $[0, 1]$ 内随机产生一个数 p 服从均匀分布, 若 $p < p_g$, 则 $G_{target} = G_{end}$, 否则 G_{target} 从集合 $Q(RRT)$ 中随机产生一个空白栅格, 其中 $0 \leq p_g < 1$ 且预先给定.

Step 5 找一节点 $G_n, G_n \in P(RRT)$ 且 $\min(d(G_{target}, G_n))$, 再找出一个节点 $G_{extend}, G_{extend} \in NEB_{G_n}$ 且 $G_{extend} \in P(RRT)$ 且 $\min(d(G_{extend}, G_n))$. 若存在 G_{extend} 则作为新节点加到集合 $P(RRT)$ 中, 若 $d(G_{extend}, G_{end}) < d(G_{nearest}, G_{end})$, 则令 $G_{nearest} = G_{extend}$, 否则此次扩展失败. 转 Step 3

Step 6 返回形成的 RRT, 获得从起始点 G_{begin} 到 G_{end} 的路径.

Step 7 结束.

本文算法的计算机实现程序流程图如图 3 所示.

3 仿真实验

实验环境为: CPU 赛扬 2.66 G, 内存 256 M, 编译工具 VC++ 6.0 为不失一般性, 假设环境栅格规模为 30×30 图 4 为用该算法在复杂环境下获得的路径, 用时为 2.203 s 为了进一步说明该算法的有效性, 又用随机生成的环境对本算法进行了测试, 获得的优化路径如图 5 所示, 用时 1.02 s

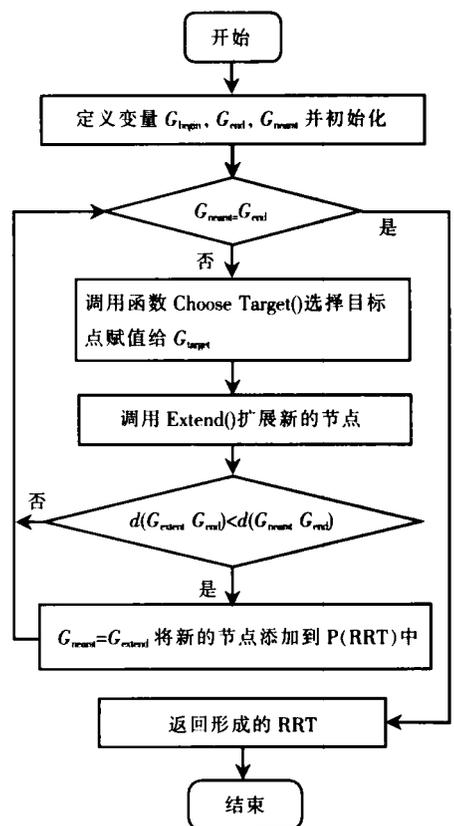


图 3 主程序流程图

Fig.3 Main programme flow chart

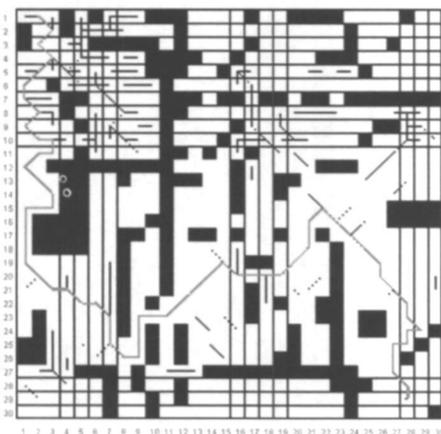


图 4 复杂环境下获得的路径

Fig.4 Optimal path is from our algorithm in complex environment

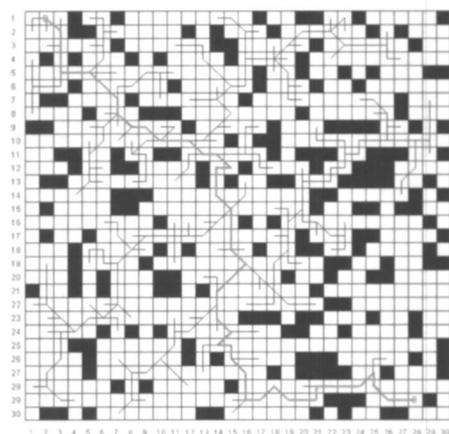


图 5 环境随机生成时获得的路径

Fig.5 Optimal path is from our algorithm in random complex environment

为了说明该算法的优越性, 在文献 [10] 中的栅格规模为 30×30 的环境下进行了测试, 并与经典的 A^* 的算法、遗传算法以及文献 [10] 中的算法进行了对比. 性能对比如表 1 所示. 路径对比如图 6 其中细线为使用该算法得到的路径, 粗线为文献 [10] 中的算法所得到的路径.

由以上试验可以看出, 无论是在随机生成的环境下, 还是特别复杂的环境下, 用本文算法都能找到一条优化路径. 与其它算法相比, 本文算法的收敛速度有大幅提高. 大量的仿真试验证明, 本文算法对未搜索过的状态空间有强烈的搜索倾向, 一棵 RRT 在节点不断增多构建树的过程中倾向于布满整个无障碍状态空间, 而不是作局部扩展. 在理论上, 由于 RRT 的扩展仅在无障碍物区进行, 因此, 地形越复杂, 障碍越多, 算法复杂度越低, 收敛越快. 本文实验也与这一理论结论相吻合.

表 1 算法性能对比表

Table 1 Algorithm performance reference table

| 算法 | A* | GA | ACO-gril | 本文的算法 |
|-----------|--------|--------|----------|-------|
| 可行解平均长度 | N/A | 85.491 | 65.0 | 61.2 |
| 获得可行解比例 | 0 | 10% | 90% | 100% |
| 平均消耗时间 /s | 大于 300 | 107.1 | 41.7 | 2.992 |

从算法步骤 Step 4中可以看出 RRT以概率 p_g 朝目标点扩张; 以概率 $1 - p_g$ 随机探索还没有被探索过的区域. 这样就保证了对搜索空间的高覆盖率的搜索, 从而提高了搜索可行路径的概率. 在复杂的环境中虽然有回退的情况, 但由于本算法是对空白空间进行完全搜索的, 因此只要客观上存在一条可行路径, 本文算法就能够找到相应的路径.

另外在本文算法中是用机器人的步长来划分栅格的, 以栅格为计算粒度. 步长大, 计算粒度大, 计算时间短, 但分辨率低; 步长小则相反. 因此找到一种针对障碍物选择步长的机制是以后的研究方向之一.

4 结论

本文采用栅格法建模, 使得建模容易并且使算法简单易实现. 在此基础上, 给出的算法以机器人起始点为随机树的根节点, 通过扩展, 逐渐增加叶节点直至随机树的叶节点中包含了目标点. 从起始点到目标点之间的一条以随机树的边组成的路径就是目标路径. 该方法即使在复杂的环境下, 也可以快速规划出一条全局避障优化路径. 与其它算法相比, 该算法具有简单、快速且不会陷入局部最优等优点, 可适于复杂环境下的机器人路径规划.

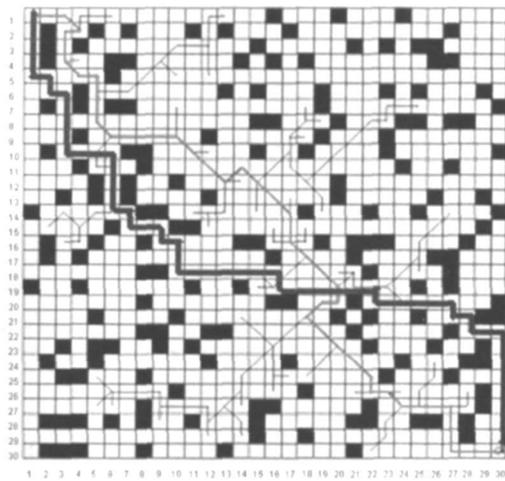


图 6 文献[10]中的环境

Fig.6 The environment of the tenth reference

[参考文献] (References)

[1] Nearchou A C. Path planning of a mobile robot using genetic heuristics [J]. Robotica 1998, 16(5): 575- 588

[2] 罗熊, 樊晓平, 易晟, 等. 具有大量不规则障碍物的环境下机器人路径规划的一种新型遗传算法 [J]. 机器人, 2004 26(1): 11- 16
Luo Xiong Fan Xiaoping Yi Sheng A novel genetic algorithm for robot path planning in environment containing large numbers of Irregular obstacles[J]. Robot 2004, 26(1): 11- 16 (in Chinese)

[3] 孙树栋, 林茂. 基于遗传算法的多移动机器人协调路径规划 [J]. 自动化学报, 2000, 26(5): 673- 676
Sun Shudong Lin Mao Path planning of multi mobile robots using genetic algorithms[J]. Acta Automatica Sinica 2000 26(5): 673- 676 (in Chinese)

[4] D Amico A, Ippoliti G, Longhi S. A radial basis function networks approach for the tracking problem of mobile robots [C] // Proceedings of the IEEE / ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Comq Italy 2001, 1: 498- 503

[5] Alkan R Wilms, Simon X. Neural network approaches to dynamic collision free robot trajectory generation [J]. IEEE Trans Syst Man, Cybern, 2001, 31(3): 302- 318

[6] Yang SX, Max M. An efficient neural network approach to dynamic robot motion planning [J]. Neural Networks 2000, 13(2): 143- 148

[7] Karen I Trovati, Leo Dorst. Differential A* [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering 2002 14(6): 1218 - 1229

[8] Bruce J Veloso M. Real time randomized path planning for robot navigation [C] // Proceedings for the IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and System. EPFL, Lausanne, Switzerland 2002 3 2 383- 2 388

[9] Peng Cheng Steven M LaValle. Resolution complete rapidly exploring random trees [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation Washington, 2002 267- 272

[10] 张美玉, 黄翰, 郝志峰, 等. 基于蚁群算法的机器人路径规划 [J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(9): 34- 37.
Zhang Meiyu Huang Han Hao Zhifeng et al Motion planning of autonomous mobile robot based on ant colony algorithm [J]. Computer Engineering and Applications 2005, 41(9): 34- 37. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]