

未知环境下基于快速搜索随机树的 机器人路径滚动规划

蔡文彬, 朱庆保

(南京师范大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 在未知环境下, 移动机器人没有全局信息, 一次只能规划出探测范围内的局部路径. 针对这一特点, 提出了一种全新的基于滚动窗口的快速搜索随机树算法. 该算法以机器人出发点为根节点, 充分利用机器人实时测得的局部环境信息, 以滚动方式进行在线扩展, 逐渐增加叶节点直至随机树的叶节点包括了目标节点, 从根节点到目标节点的随机树的边即为规划出的路径. 大量仿真实验表明, 即使在障碍物非常复杂的未知地理环境下, 该算法也能快速规划出一条全局优化路径, 且能安全避障.

[关键词] 移动机器人, 滚动规划, 快速搜索随机树, 未知环境

[中图分类号] TP 24 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2009) 02-0079-05

Rolling Path Planning of Robot Based on Rapidly Exploring Random Tree in an Unknown Environment

Cai Wenbin, Zhu Qingbao

(School of Computer Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract In a complex unknown environment, mobile robot doesn't own global information so that it can only make a plan about the local path which falls into its detectable area. In allusion to the feature, a new rapidly exploring random tree algorithm for path planning is put forward to plan an optimal path for mobile robot, which is based on rolling window. According to the algorithm, the start-point of the mobile robot is regarded to be the root node. Besides, full use is made of local environmental information detected by the robot to expand the space in a rolling on-line style and add a new node to a random tree until the leaf node of the tree contains the target node. The edges of the random tree composed of the route from the initial node to the target node are just the path where the robot walks by. The simulation results illustrate that the proposed algorithm can be used to solve the path planning for mobile robot even in the complex unknown environment, and the successful obstacle avoidance is also achieved.

Key words mobile robot, rolling plan, rapidly exploring random tree, unknown environment

移动机器人路径规划是指在有障碍物的工作环境中, 寻找一条从给定起点到终点较优的运动路径, 且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. 当机器人具备全局环境信息时, 可用一次性的全局规划来得到一条自起点到终点的安全路径, 并能对运动过程中的某些性能指标进行优化, 这方面的研究已有广泛的报道. 在大多数情况下, 机器人工作在未知环境, 没有先验知识, 这时不能离线作出一次性的全局规划. 在这类环境下, 机器人只能依靠实时探测到的局部环境信息, 规划出探测范围内的局部路径. 如何规划出全局路径且使得到的路径较优, 人们已经提出了不少解决方法和策略, 诸如滚动窗口规划方法^[1-3]、基于蚁群优化算法和遗传算法的规划方法等^[4-5], 取得了很多成果. 然而, 由于这类环境下的机器人路径规划属于 NP-Hard 问题, 因此, 不断寻求更佳的规划算法就成为国内外相关领域的一个研究热点. 特别是在障碍物的数目增加或障碍趋于复杂时, 如何避免振荡和死锁, 如何使机器人所走路径全局最优或较优, 仍是有待解决的问题.

快速搜索随机树 (Rapidly-Exploring Random Tree, RRT) 是一种数据结构和算法, 其独特的优点在于可

收稿日期: 2008-07-17

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.

通讯联系人: 朱庆保, 教授, 博士生导师, 研究方向: 人工智能与智能控制. E-mail: zhuqingbao@njnu.edu.cn

以直接应用于非完整性规划和运动力学规划中,因而用于机器人路径规划具有快速高效等特点.因此,已有不少学者提出了基于 RRT 的机器人路径规划方法^[6-9],并取得了显著的效果.然而,这些 RRT 算法必须在全局环境已知的条件下,以机器人的出发点为起点,通过扩展叶节点来获得一条自起点到终点的安全路径.在许多情况下,机器人不具备全局环境信息,已有的这些算法受到一定的局限性.因此,本文研究了一种全局未知环境下基于滚动窗口的快速搜索随机树算法.该算法以机器人的出发点为根节点,充分利用机器人实时测得的局部环境信息,以滚动方式进行在线扩展,即:随着机器人的前进,逐渐增加叶节点直至随机树的叶节点包括了目标节点为止.实验表明,该方法能满足机器人快速路径规划的要求,即使在复杂的未知环境下,只要客观上存在可行路径,就可以快速规划出一条从起点到终点的安全较优路径,且不会产生死锁现象.

1 环境描述

记 AS 为机器人 Rob 在二维平面上的有限运动区域,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 为步长对 X、Y 进行划分,从而形成栅格环境.则每行栅格数 $N_x = X_{max} / \delta$ 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:

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

式中, int 为舍余取整运算, mod 为求余运算.

机器人 Rob 无全局环境信息,在任一时刻,它只能实时探测到以其当前位置为中心, r 为半径区域内的环境信息. Rob 能向任意无障碍的方向行走.

对于任意二维地形, 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 基于快速搜索随机树的移动机器人滚动路径规划算法

2.1 相关定义

为了便于叙述, 给出如下定义:

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

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

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 $i \subseteq F$.

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 $i \subseteq F$.

定义 4 $NEB_i = \{g \mid g \in A, d(g_i, g) \leq \sqrt{2}\}$ 称为栅格 i 的邻域, i 为任意的栅格序号.

定义 5 $WSB_i = \{g \mid g \in A, d(g_i, g) \leq \sqrt{2r^2}\}$ 称为栅格 i 处的窗口或称为机器人的视野, i 为任意的

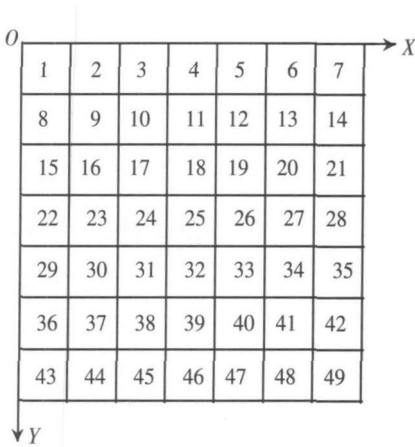


图 1 栅格坐标与序号关系
Fig.1 Relation between rating coordinate and serial numbers

栅格序号. 其中, r 称为机器人的视野半径.

图 2中的粗线框示出了取 $r = 2$ 时 R 处的窗口, 其中 R 为 R_{ob} 所在的位置, 该窗口表示 R_{ob} 可以探测的范围.

2.2 局部子目标点的确定

机器人在其窗口内的局部子目标用 $subgoal$ 表示, 是在滚动窗口中寻找一个全局目标 G_{end} 的映射.

设 R_{ob} 在栅格 i 位置, 其中 $i \in F$, R_{ob} 的滚动窗口为 WSB_i , 若 $G_{end} \in WSB_i$, 则取 $subgoal = G_{end}$, 否则, 利用距离启发函数, 取 $subgoal = \min(d(j, G_{end}))$, 其中 $j \in WSB_i \cap Q(RRT)$, 其中 $Q(RRT) = F - P(RRT)$.

2.3 算法步骤

传统 RRT 算法扩展节点时, 先确定一个扩展目标结点 G_{target} , 扩展过程是在 RRT的已有节点集中寻找一个离目标点 G_{target} 最近的节点 G_{near} , 然后在 G_{near} 的邻域内搜索扩展节点 G_{extend} 来扩展随机树. 但当障碍物变多, 环境复杂时, G_{near} 的邻域很可能没有扩展节点, 此时, 随机树无法扩展, 也就无法规划出路径.

为了让该算法有更好的适应性, 在有复杂障碍的环境下也能扩展出优化路径, 本文在滚动扩展时, 为 RRT中的每一个节点都设定一个标志, 用 $flag(G_i)$ 表示, 每个节点生成时均标记为可扩展节点. 扩展节点时, 选择距离 G_{target} 最近的可扩展的节点 G_{near} . 若 G_{near} 邻域无扩展节点 G_{extend} 时, 将 G_{near} 标记为不可扩展节点, 再重新选择距离 G_{target} 最近的可扩展节点.

根据以上的定义和约定, 基于快速搜索随机树的滚动路径规划算法描述如下:

- Step1 初始化起点 G_{begin} , 目标点 G_{end} , 机器人视野半径 r , 并以 G_{begin} 对应的栅格序号为 RRT的根节点 G_{root} , 加入 $P(RRT)$, 且置 $flag(G_{root}) = true$
- Step2 如果 $G_{end} \in P(RRT)$, 转到 Step6
- Step3 产生局部子目标点 $subgoal$
- Step4 根据式 (3) 确定扩展目标结点 G_{target} :

$$G_{target} = \begin{cases} subgoal & \text{if } p < p_0, \\ G_{blank} & \text{else} \end{cases} \tag{3}$$

式中, G_{blank} 是从集合 $WSB_i \cap Q(RRT)$ 中随机选择的一个任意空白栅格. 其中, i 是机器人所在的位置, $Q(RRT) = F - P(RRT)$. p 为区间 $[0, 1]$ 内的一个随机数, 且服从均匀分布, $0 < p_0 < 1$, 其值初始化时预先设定.

Step5 找一节点 $G_{near} \in P(RRT)$, $flag(G_{near}) = true$ 且 $\min(d(G_{near}, G_{target}))$, 再找一节点 G_{extend} 满足 $G_{extend} \in (NEB_{G_{near}} \cap F)$, $G_{extend} \notin P(RRT)$ 且 $\min(d(G_{extend}, G_{target}))$, 若存在 G_{extend} 则作为 G_{near} 的子节点加入 $P(RRT)$, 置 $flag(G_{extend}) = true$ 并将 R_{ob} 置于节点 G_{extend} 处, 重新获取窗口内的环境信息, 转到 Step2 否则, 置 $flag(G_{near}) = false$, 转到 Step5

Step6 返回形成的 RRT, 获得从起始点 G_{begin} 到终点 G_{end} 的路径.

3 仿真实验

为了验证该算法的效果, 作者进行了大量的仿真实验. 实验环境: Windows XP, AMD Athlon (tm) X2 Dual Core Processor 4000+ 2.11 GHz 512M 内存. 编译工具: VC++ 6.0.

图 3为用该算法在栅格规模为 30×30 随机生成 280个障碍栅格环境下规划出的路径. 其中 S 为机器人的起点, G 为终点. 可以看出, 规划出的路径属于最优路径. 为了进一步说明该算法在障碍物数目增加和复杂的情况下也能规划出优化路径, 又在随机生成了 400个障碍栅格的环境下对本算法进行了测试, 规划的路径如图 4所示, 结果展示了即使在非常复杂的未知障碍环境, 用本文算法也能得到优化路径.

为进一步分析本文算法能得到全局优化的路径的原理, 图 5给出了实验过程中分解的子过程, 其中,

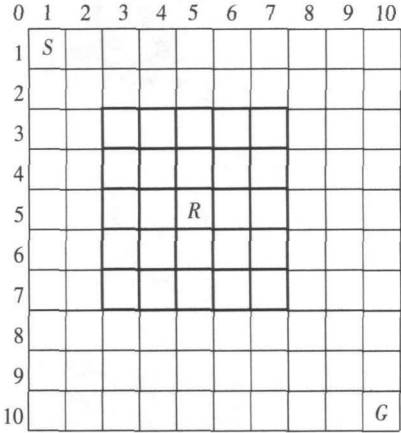


图 2 Rob 的窗口
Fig.2 Window of Robot

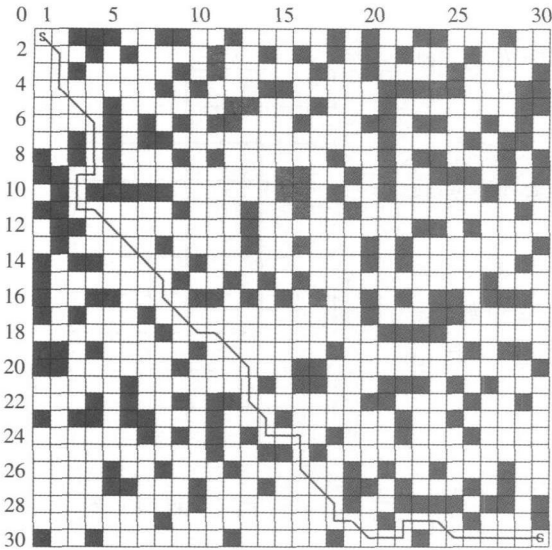


图 3 简单障碍环境获得的路径

Fig.3 Optimal path in simple environment

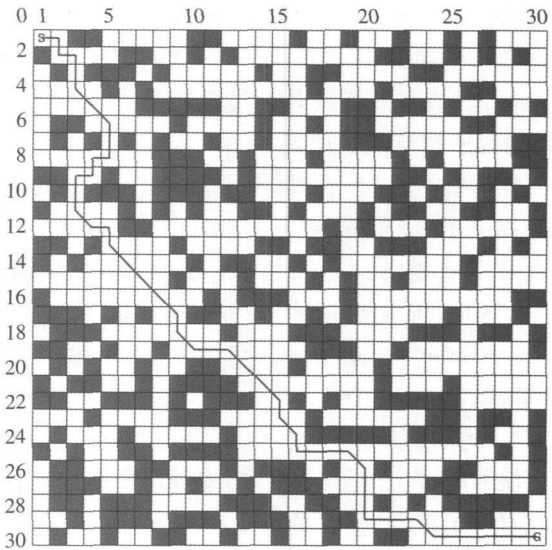


图 4 复杂障碍环境获得的路径

Fig.4 Optimal path in complex environment

粗线框表示 Rob 的探测范围, 图 5(a) ~ 图 5(e) 分别示出了 Rob 从起点分别扩展 1 步、2 步、3 步、4 步、17 步所得到的随机树. 由于局部子目标点 $subgoal$ 是 G_{end} 的一种映射, 所以该随机树是向着 $subgoal$ 的方向迅速扩展的, 如图 5(a), (b) 和 (c) 所示, 同时又因为机器人不具备全局环境信息, 仅依靠探测范围来前进, 所以当存在凹障碍的时候, 会存在机器人先进去, 然后原路返回再选另一条路的情况, 如图 5(d) 和 (e) 所示, 这是符合正常情况的.

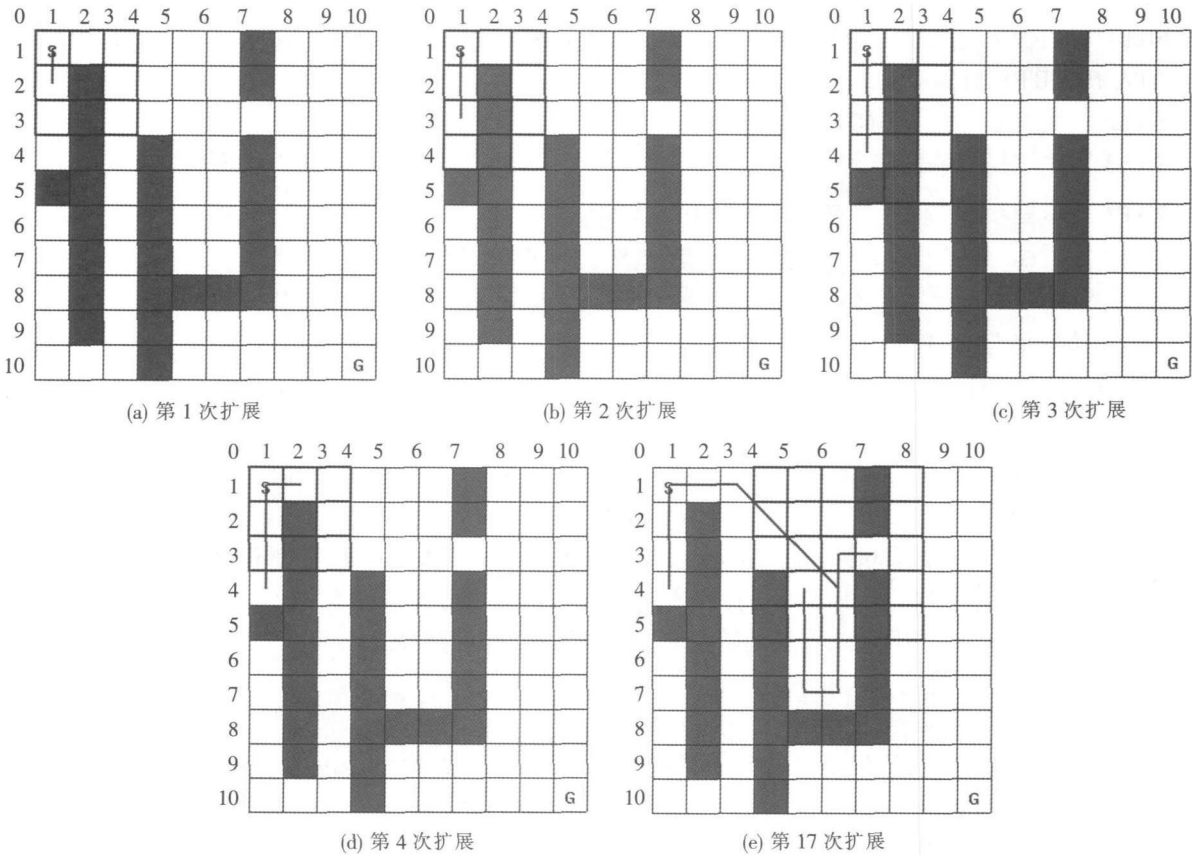


图 5 局部分解图

Fig.5 Local path resolving drawing

在全局未知情况下, 目前的相关算法大多局限于障碍较简单的环境, 因此, 在障碍复杂程度和本文相当的环境下, 没找到可比较的数据. 为了说明本文算法的优越性, 在文献 [6] 中给出的栅格规模为 30×30

的环境下, 作者用本文算法和在全局已知条件下经典的 A* 算法、GA 算法、ACO 算法以及文献 [6] 中的算法进行了对比, 性能对比结果如表 1 所示. 从表中可以看出, 无论是环境要求, 还是运行时间以及获得的路径长度, 本文的算法均能体现出较大的优越性.

表 1 算法性能对比表
Table 1 Algorithm performance reference table

	A*	GA	ACO	RRT-gird	本文算法
环境要求	全局已知	全局已知	全局已知	全局已知	部分已知
获得可行解比例	0	10%	90%	100%	100%
运行时间 /s	> 300	107. 1	41. 7	2. 992	0. 203
平均路径长度	N/A	85. 491	65. 0	61. 2	45. 0

4 结 语

全局环境未知下的移动机器人的路径规划是机器人领域的重要研究内容. 由于缺乏全局环境信息, 无法进行有效的离线规划, 只能依靠机器人传感器的探测范围进行局部规划, 很难保证机器人所走的路径全局最优或较优, 甚至易引起死锁和振荡等. 本文的算法在全局环境未知的情况下, 充分利用机器人实时探测到的局部环境信息, 在滚动窗口内局部扩展随机树, 取得了较好的效果. 实验结果表明, 本算法具有简单、速度快、效果好等特点, 对于环境有较强的适应性, 即使在复杂障碍环境下, 用本文的算法也能快速规划出一条全局优化路径.

[参考文献] (References)

[1] 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 Yugeng Zhang Chungang Rolling path planning of mobile robot in a kind of dynamic uncertain environment [J]. Acta Automatica Sinica 2002, 28(2): 161-174 (in Chinese)
[2] Zhang C G, Xi Y G. Mobile robot path planning based on rolling windows in the unknown environment [J]. Science in China (Series E), 2001, 31(1): 51-58 (in Chinese)
[3] Zhang C G, Xi Y G. Robot rolling path planning based on locally detected information [J]. ACTA Automatica Sinica 2003, 29 (1): 38-44
[4] 朱庆保. 全局未知环境下多机器人运动蚂蚁导航算法 [J]. 软件学报, 2006, 17(9): 1 890-1 898
Zhu Qingbao Ant algorithm for navigation of multi-robot movement in unknown environment [J]. Journal of Software 2006, 17 (9): 1 890-1 898 (in Chinese)
[5] 徐守江, 朱庆保. 基于遗传算法的移动机器人路径滚动规划 [J]. 计算机工程, 2007, 33(20): 207-209.
Xu Shoujiang Zhu Qingbao Rolling path plan of mobile robot based on genetic algorithm [J]. Computer Engineering 2007, 33(20): 207-209 (in Chinese)
[6] 国海涛, 朱庆保, 徐守江. 基于栅格法的机器人路径规划快速搜索随机树算法 [J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2007, 7(2): 58-61.
Guo Haitao Zhu Qingbao Xu Shoujiang Rapid-exploring random tree algorithm for path planning of robot based on grid method [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition 2007, 7(2): 58-61. (in Chinese)
[7] 王华, 赵臣, 王红宝, 等. 基于快速扫描随机树方法的路径规划器 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(7): 963-965
Wang Hua Zhao Chen Wang Hongbao et al A new path planning method based on RRT [J]. Journal of Harbin Institute of Technology 2004, 36(7): 963-965. (in Chinese)
[8] James J Kuffner Steven M Lavalley RRT-Connect An efficient approach to single-query path planning [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation San Francisco CA, 2000 995-1001.
[9] Steven M Lavalley James J Kuffner Randomized kinodynamic planning [C] // International Conference on Robotics and Automation Detroit Michigan, 1999. 473-479.

[责任编辑: 严海琳]