

实现机器人动态路径规划的仿真系统

杨姗姗, 戴学丰, 唱江华

YANG Shan-shan, DAI Xue-feng, CHANG Jiang-hua

齐齐哈尔大学 机器人研究所, 黑龙江 齐齐哈尔 161006

Robots Institute, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China

E-mail: lyangshanshan242@163.com

YANG Shan-shan, DAI Xue-feng, CHANG Jiang-hua. Robot dynamic path planning simulation system. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(32): 237-239.

Abstract: The paper presents a new approach to robot path planning under dynamic environment. The whole system includes two parts, the global path planning and the local planning for obstacle avoidance. In the global path planning, an optimal route to the goal is founded by RRT algorithm; in the local planning for obstacle avoidance, while following the global path, several collision-free strategies for different situations are used after the environment detection and collision prediction based on rolling windows in order that the robot reaches the goal safely. The results of the simulation experiment indicate that the proposed method is feasible.

Key words: robot path planning; dynamic obstacle avoidance; rapidly-exploring random tree algorithm; global path planning; local planning for obstacle avoidance; grid method

摘要: 针对机器人动态路径规划问题, 提出了在动态环境中移动机器人的一种路径规划方法, 适用于环境中同时存在已知和未知, 静止和运动障碍物的复杂情况。采用栅格法建立机器人空间模型, 整个系统由全局路径规划和局部避碰规划两部分组成。在全局路径规划中, 用快速搜索随机树算法规划出初步全局优化路径, 局部避碰规划是在全局优化路径的同时, 通过基于滚动窗口的环境探测和碰撞规则, 对动态障碍物实施有效的局部避碰策略, 从而使机器人安全顺利地到达目的地。仿真实验结果说明该方法具有可行性。

关键词: 机器人路径规划; 动态避障; 快速搜索随机树算法; 全局路径规划; 局部避碰规划; 栅格法

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.32.073 文章编号: 1002-8331(2009)32-0237-03 文献标识码: A 中图分类号: TP391

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地绕过所有的障碍物, 且所走的路径较短。目前, 对于静态环境下路径规划问题的研究已经取得较多成果, 主要是用一次性全局规划来得到一条自起点到终点的安全路径, 并且采用算法对路径进行优化, 如遗传算法、神经网络和蚂蚁算法等^[1-3], 这些算法都可以很好地实施路径规划, 但存在着搜索空间大、算法复杂、效率不高等问题。

针对环境中同时存在已知静态障碍物和未知动态障碍物的情况, 采用全局路径规划和局部避碰规划相结合的思想, 为动态环境下的机器人路径规划的研究方法提供一种新手段。

1 总体思路

总体解决思路包括全局路径规划和局部避碰规划两部分。全局路径规划根据全局感知模块提供的静态障碍物信息, 采用 RRT 算法, 确定出一条未考虑未知动态障碍物的初始全局化路径; 接着, 机器人按全局优化得到的路径行走, 并通过传感器不断探测滚动窗口内动态障碍物的运动信息, 根据对动态环境运动轨迹的预测, 判断是否会发生碰撞并采取相应的避障策略, 从

而到达目的地且保证路径较优。

2 环境描述

设机器人的工作空间为二维平面上的有限平面区域 AS, 其中分布着有限个已知静态障碍物 b_1, b_2, \dots, b_n (考虑 AS 为任意形状, 因此, 可在 AS 边界补以障碍物栅格, 将其补为正方形或长方形) 和有限个未知静态障碍物。路径规划的目的是使机器人由起点 G_{begin} 安全避障地沿一条较短路径到达终点 G_{end} 。为使问题简化, 该文所指的动态环境只是针对未知动态障碍物做匀速直线运动的简单情况, 更复杂的情况有待于今后进一步研究。

在 AS 中, 以 AS 的左上角为坐标原点 O, 以横向为 X 轴, 以纵向为 Y 轴, 建立系统直角坐标系。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 $N_x = X_{max}/\delta$ 。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 中的 g 集合, 记 $S = \{b_1, b_2, \dots, b_n\} \subseteq A$ 为静态障碍物集, $\forall g \in A$ 在坐标系中都有确定的坐标 (x, y) , 记做 $g(x, y)$, x 为所在的行号, y 为 g 所在的列号。令 $C =$

作者简介: 杨姗姗 (1984-), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能移动机器人路径规划与定位算法; 戴学丰 (1962-), 男, 博士后, 教授, 研究方向为机器人控制; 唱江华 (1947-), 男, 博士, 教授, 研究方向为基于 Lon Works 的电梯智能群控。

收稿日期: 2008-06-19 修回日期: 2008-10-13

$\{1, 2, \dots, M\}$ 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} , $g_i \in A$ 的坐标 (x_i, y_i) 与序号 $i \in C$ 构成互为映射关系, 序号 i 的坐标可以由式(1)确定:

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

式中, int 为求余运算。

对于任意凸多边形, 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 $G_{begin}, G_{end} \notin S$, 其他约束条件为 $begin, end \in C, begin \neq end$ 。

另有以下假设:

假设 1 考虑机器人和动态障碍物的尺寸, 在二维平面上将其均视为圆形, 直径分别为 AS_g 和 AS_0 (其中 $AS_g < 1/2, AS_0 < 1/2$)。

假设 2 机器人和动态障碍物只有 8 种运动方向。

假设 3 设所有动态障碍物的速率为 V_0 , 且运动轨迹均为直线; 机器人的速率为 V_g, V_0 和 V_g 恒定, 且 $V_0 \geq V_g$ 。

假设 4 机器人每走一步即走一个栅格的中心点, 任意时刻机器人能探测到以当前栅格中心点为中心, r 为半径区域内的环境信息。

假设 5 机器人的起始位置 G_{begin} 与任意动态障碍物的距离 $\geq r$ 。

3 基于栅格法的机器人路径规划快速搜索随机树算法

3.1 相关定义

为了叙述方便, 给出如下约束和定义:

定义 1 任何两栅格间的距离指两栅格间的连线长度, 记作 $d(g_i, g_h), i, h \in C$, 由式(2)计算:

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

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, 组成的集合称为 RRT 节点集, 记为 $P(\text{RRT})$, 其中 $i \in F$ 。

定义 4 序号为 i 的栅格的邻域记为:

$$NEIB_i = \{g | g \in A, d(g, i) \leq \sqrt{2}\}$$

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 $Q(\text{RRT})$ 。

3.2 快速搜索随机树简介及其算法步骤

快速搜索随机树^[4](Rapidly-Exploring Random Tree)是一种随机性搜索算法, 具有其他随机性算法(如概率路标)一样的优点, 有无启发函数都可运行, 对整个工作空间的搜索是概率均等的, 因而, 搜索能力很强。

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, 在随机数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, 快速随机搜索树的构建如图 1 所示。

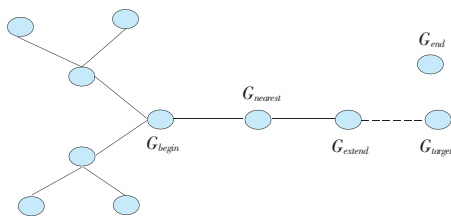


图 1 RRT 树的构建

根据以上定义和快速随机搜索树的原理, 机器人路径规划的快速随机搜索树算法步骤如下:

步骤 1 初始化起点 G_{begin} 和目标点 G_{end} , 并以 G_{begin} 点对应的栅格序号为 RRT 树的根节点;

步骤 2 令 $G_{nearest} = G_{root}$, 其中 $G_{nearest}$ 为 $P(\text{RRT})$ 中离目标点 G_{end} 距离最小的节点;

步骤 3 若 $G_{nearest} = G_{end}$, 则转步骤 6, 否则继续;

步骤 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 $Q(\text{RRT})$ 中随机产生一个空白栅格, 其中 $0 \leq p_g < 1$ 且预先给定;

步骤 5 找一节点 G_n, G_n 满足 $G_n \in P(\text{RRT})$ 且 $\min(d(G_{target}, G_n))$, 再找出一个节点 G_{extend}, G_{extend} 满足 $G_{extend} \in NEIB_{G_n}$ 且 $G_{extend} \notin P(\text{RRT})$ 且 $\min(d(G_{extend}, G_n))$ 。若存在 G_{extend} , 则作为新节点加到集合 $P(\text{RRT})$ 中, 若 $d(G_{extend}, G_{end}) < d(G_{nearest}, G_{end})$, 则 $G_{nearest} = G_{extend}$, 否则此次扩展失败。转步骤 3;

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

步骤 7 结束。

4 基于滚动窗口的局部避碰规划

机器人在第 3 章规划出的全局优化路径上行进的过程中, 会随机地遇到运动方向和速度未知的动态障碍物。因此, 机器人每进行一步, 都用传感器探测其感应范围内的环境信息, 若有动态障碍物, 则测出其方向、速度, 预测其运动轨迹, 据此进行动态局部避碰规划, 局部避碰规划的算法原理和方法如下所述:

4.1 基于滚动窗口的环境探测与碰撞预测

4.1.1 局部窗口内环境信息的探测

机器人每走一步, 只能通过传感器探知以当前位置为中心点, r 为半径区域内的环境信息: 一方面是全局静态环境信息向该区域的映射, 另一方面是未知动态障碍物的运动信息(包括当前位置、运动方向、速度)。

4.1.2 机器人与动态障碍物相碰的预测

设机器人从当前栅格到达下一个栅格所用的时间为 Δt , 先要对 Δt 内两者线段轨迹的相对位置进行预测, 再进一步判断两者是否有碰撞的可能性。机器人和动态障碍物轨迹的相交点的位置只可能包括栅格的中心点、栅格边界的中心点和栅格的顶点 3 种情况, 所以在保留两者运动轨迹时, 生成两个分别描述 Δt 内两者轨迹状态的点集, 除了起点和终点, 点集中的其他点只取在线段轨迹上属于上述 3 种情况的点。于是, 对两者线段相对位置的预测问题就转化为对 2 个轨迹点集是否有交集的判断, 具体判断过程如下:

(1) 若两者线段轨迹无交集, 则在 Δt 内机器人和动态障碍物不会发生碰撞;

(2) 若两者线段轨迹有交集, 则存在碰撞的可能性, 进一步判断两者的运动方向。

情况 1 若运动方向相反, 则机器人和动态障碍物不会发生正面碰撞;

情况 2 若运动方向相同, 再取出交集集中的每个特定点, 分别计算机器和动态障碍物到达该点的时间, 并将两个时间的差值 $t_R - t_0$ 和时间容限 T 进行比较(设机器人到达轨迹交点的时间为 t_R , 动态障碍物到达轨迹交点的时间为 t_0 , 令 $T = \max(AS_g/V_R, AS_0/V_0)$);

若 $t_R - t_0 < T$, 则必定发生动态障碍物后撞机器人的情况;

若 $|t_R - t_0| > T$,则两者不会发生碰撞。

情况 3 其余情况下,机器人动态障碍物的运动方向呈 45° 、 90° 或 135° 角,轨迹仅有一个交点,再将机器人和动态障碍物到达该点的时间差 $|t_R - t_0|$ 和规定时间容限 T 进行比较:

若 $|t_R - t_0| < T$,则机器人和动态障碍物必定发生正面碰撞;

若 $|t_R - t_0| > T$,则两者不会发生碰撞,且当 $t_R > t_0$ 时,动态障碍物先通过轨迹交点,当 $t_R < t_0$ 时,机器人先通过轨迹交点。

4.2 针对各种预测情况的局部避障策略

(1)若预测将要发生机器人后撞动态障碍物或两者正面相撞的情况时,机器人必须放弃原行进计划,及时生成局部子目标,并将碰撞点所在栅格设置为临时静态障碍物,然后采用快速搜索随机树算法在当前位置与局部子目标之间重新规划出一条局部避障路径,以取代原有路径。

①局部子目标的确定:若最终目标点定在滚动窗口之内,则最终目标点即为局部子目标点;若最终目标点不在滚动窗口之内,则在理论上利用启发式函数 $f(p) = g(p) + h(p)$ ^[5]来选取使 $f(p)$ 最小的窗口边界点 p 作为局部子目标,其中 $g(p)$ 为机器人当前位置行进到 p 的代价, $h(p)$ 为从 p 行进到最终目标点的代价。文中则选取原规划路径与滚动窗口边界的相交点作为局部子目标点。

②临时静态障碍物的设置:为保证重新规划的局部路径不会经过原先预测到的碰撞点,需要在重新规划路径之前将这些碰撞点所在的栅格设置为临时的静态障碍物,以使用快速搜索随机树算法寻径过程中能有效地避开这些碰撞点。

(2)若预测到将要发生机器人和动态障碍物侧面相撞的情况时,机器人只需在原地等待 Δt 后,再按照原规划路径行进。

(3)若预测到机器人与动态障碍物不会发生任何碰撞,则直接按原规划路径行进。



图 2(a) 机器人预测到障碍物

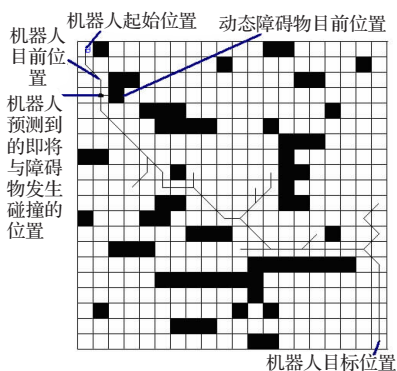


图 2(b) 机器人原地等待



图 2(c) 机器人再次原地等待



图 3(a) 机器人预测到障碍物

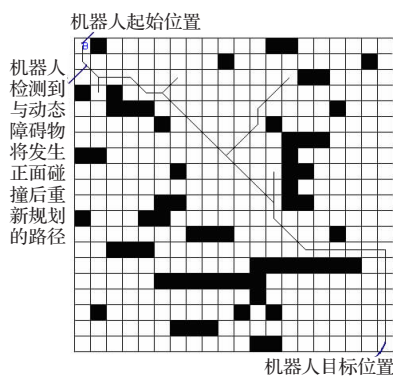


图 3(b) 机器人重新规划的路径

4.3 环境信息的反馈初始化

为确保机器人在每走一步之前都能够通过传感器获取正确的实时环境信息,必须在每一次局部规划结束之后(即滚动窗口前移之前),根据本次规划结果对动态环境信息进行反馈初始化。这一过程既是对已探测到的动态障碍物的运动信息的确认,也是对局部规划前临时静态障碍环境设置的还原,从而为下一次局部规划提供了最新、最实际的信息基础。

5 仿真实验结果分析

为了验证算法的效果,进行了大量的仿真实验,结果都令人十分满意。因动态避障最终都规划为静态局部规划,所以,先进行静态环境下的路径规划实验,再仿真动态障碍物的避障规划。

静态环境下的实验方法是取不同的栅格数,随机生成障碍物并随机生成起始点和终止点,用该文算法进行路径规划。实验表明,只要有客观存在的可行路径,该文算法能迅速规划出优化路径。而且所做的实验表明,即使栅格规模大幅增加,也不影响这一结论。

将机器人工作平面划分成 20×20 栅格,起点为 $(1, 1)$,终点为 $(20, 20)$ 。

仿真实例 1 假设机器人与动态障碍物同速。在局部避障规划中,图 2(a)表示机器人从起始栅格行至第 5 步时,预测到机器人的行进路线与动态障碍物运动轨迹有交点,但不会发生碰撞。图 2(b)表示机器人行至第 2 步预测到将与障碍物在下一步发生侧面碰撞,准备采取原地等待障碍物先通过的避障策略,图 2(c)表示机器人在第 5 步原处等候,再次预测将与预测到的动态障碍物发生侧撞,准备继续原地等待,局部避障规划结束后,原先确定的全局最优路径无需进行实时修正。

仿真实例 2 在此次局部避障规划中,图 3(a)表示机器人行至第 2 步时预测到将与预测的障碍物发生正面碰撞;图 3(b)