

一种改进的 RRT 路径规划算法

宋金泽, 戴 斌, 单恩忠, 贺汉根

(国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 本文以自动驾驶车辆为实际应用背景, 提出了一种改进的 RRT(快速随机搜索树)路径规划算法. 该路径规划算法将非完整性约束条件与双向多步扩展 RRT 搜索算法相结合, 在提高搜索效率的同时保证了规划路径的可行性. 同时将路径点作为 B 样条基函数的控制点, 用三次 B 样条函数来拟合控制点生成平滑可跟踪的路径. 通过在平面障碍物环境下实验, 验证了该算法的有效性.

关键词: 路径规划; 快速随机搜索树(RRT); B 样条曲线

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2010)2A-225-04

An Improved RRT Path Planning Algorithm

SONG Jin-ze, DAI Bin, SHAN En-zhong, HE Han-gen

(School of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Aiming at the application of ALV (automatic land vehicle), an improved RRT (Rapidly Random-exploring Trees) path planning algorithm is proposed. The algorithm combines the nonholonomic constraints of vehicle with double extend RRTs, which not only improves the efficiency of searching but also guarantees the feasibility of the path at the same time. The path points are taken as reference points for the B-spline basic function, approach and create a new smooth route which suits for the vehicle to follow. The simulation outcomes and field tests verify the effectiveness of the method proposed.

Key words: path planning; Rapidly Random-exploring Trees (RRT); B-spline

1 引言

路径规划问题在机器人领域由来已久, 很难找到一个有效的路径规划方法来应对各种复杂环境, 有的时候往往是顾此失彼, 不得不在算法完整性和效率之间进行权衡. ALV(自主陆地车辆)是智能机器人领域的一个分支, 随着其技术的发展和对其研究的深入, 一些亟待解决的实际问题凸显出来, 比如规划的路径要满足车辆本身的动力学约束, 动态环境下规划算法效率要满足实时性要求等等.

一些研究者用神经网络^[1]、遗传算法^[2]等方法来解决 ALV 的路径规划问题, 由于算法在实时性、收敛速度等方面的一系列缺点, 使得在实际应用中不能满足效率的要求. D*^[3]、PRM(概率路图法)^[4]等算法在搜索路径时能满足最优性和实时性^[5]的要求, 但是未考虑车辆非完整性约束的限制, 对于自主车来说连通的路径不一定可跟踪.

近年来 RRT(Rapidly Random-exploring Trees)算法作为一种快速的搜索方法在路径规划领域得到了广泛的

研究, 由于其采用随机采样的规划方法, 不需要预处理, 而且搜索速度快, 尤其在高维空间中速度优势尤为明显, 因此这种算法得到了很多研究者的青睐. RRT 算法是基于树结构的典型算法, 同时又是基于采样的规划算法, 由于其两个路径点之间可以是经过运动学、动力学仿真生成的可执行曲线, 并不是两点间的任意几何曲线, 所以其适合被用来解决含有运动动力学(kinodynamic)约束的路径规划问题.

目前 RRT 搜索算法也产生了很多改进, 早期主要采用单棵 RRT 树进行搜索, 为了进一步提高搜索速度, 一些学者提出了偏向 RRT^[7]、双向 RRT^[8]搜索算法. 本文在考虑车辆自身非完整性约束的情况下, 将非完整性约束条件与双向多步扩展 RRT 搜索算法相结合, 在保证规划路径的可行性的同时提高了搜索效率.

但是 RRT 搜索连通路径后, 由于其算法本身的随机性, 产生的路径会存在绕远或者出现明显的拐角, 使生成的路径不平滑. 在此基础上, 本文进一步采用 B 样条基函数来拟合 RRT 生成的路径点, 从而生成曲率连续的平滑路径. 通过实验验证了该算法的有效性.

2 车体与环境模型

2.1 车体模型

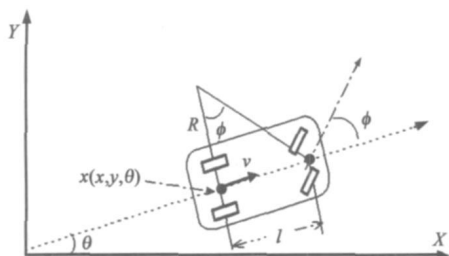


图1 车体简化模型

车体的简化结构模型如图1所示,在状态空间 X 中车体状态 $X = (x, y, \theta)$. 其中 x 和 y 是车后轮轴中间位置的横纵坐标, θ 为车体方向. 包含的非完整性约束可由微分方程 $\dot{x} = f(x, u)$ 表示, 状态转移方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ v(t) \rho(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R(t) = \frac{1}{\rho(t)} = \frac{L}{\tan \varphi} \quad (2)$$

输入控制 $U_i \in U$ 由 $(v, \varphi) \in \mathbb{R}^2$ 构成. U 为有限集, V 是纵向速度, φ 为前轮转向角且 $|\varphi| \leq \varphi_{\max}$, ρ 为路径曲率, R 为曲率半径, L 为前轮与后轮轴距.

2.2 环境模型

通过车载传感器(声纳、激光雷达、码盘等)来感知环境信息, 建立环境模型地图, 将整个环境空间划分为障碍物空间(X_{obs})和无障碍物空间(X_{free}), 障碍物以多边形来表示. 如图2所示, 空白处为无障碍物空间, 黑色多边形所处空间为障碍空间. 建立环境模型后为自主车设立局部目标点. 这里将车体避障因素考虑在环境建模之中, 即将障碍物(如图2中黑色多边形)面积向周边放大0.2米, 以保证避障要求.

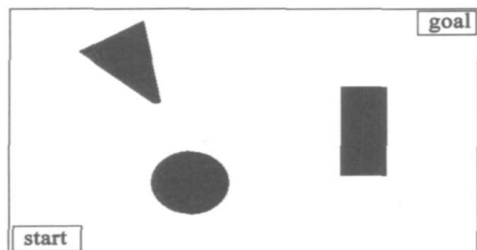


图2 环境模型示意图

3 考虑非完整约束的双向多步 RRT 算法

3.1 单棵 RRT 算法描述

快速随机搜索树能够迅速的搜索整个构型空间, 主要思想就是通过分裂环境地图来访问构型空间中未被扩展的部分. 算法基本结构如 Algorithm1 所示.

(a) X_{init} 被添加到树 G 上;

Algorithm 1 RRT

```
Function: RRT( $K \in N$ ,  $X_{init} \in X_{free}$ ,  $\Delta t \in R$ )
1:  $G.$  init( $X_{init}$ )
2: for  $i = 0$  to  $K$  do
3:    $X_{rand} \leftarrow \text{random-config}(X_{free})$ 
4:   Extend( $G, X_{rand}$ )
5: end for
6: return  $G$ 
Function: Extend( $G, X_{rand}$ )
1:  $X_{near} \leftarrow \text{nearest-neighbor}(G, X_{rand})$ 
2:  $u \leftarrow \text{select-input}(X_{near}, X_{new})$ 
3:  $X_{new} \leftarrow \text{new-state}(X_{near}, u, \Delta t)$ 
4: if collision-free-path( $X_{near}, X_{new}$ ) then
5:    $G.$  add-node( $X_{new}$ )
6:    $G.$  add-edge( $X_{near}, X_{new}, u$ )
7: end if
8: return  $G$ 
```

(b) 在 X_{free} 中随机选择一个构型空间 X_{rand} , 即使得 $X_{rand} \in X_{free}$;

(c) 函数 nearest_neighbor() 来搜索树上离 X_{rand} 最近的节点用来扩展, 这个节点被称为 X_{near} ;

(d) 随机或者是根据给定的标准, 选择一个输入, 使得 X_{near} 尽可能的接近 X_{rand} , 算法反复 extend() 函数, 直到检测到障碍物为止, 这时产生的一个新节点 X_{new} 被添加到树 G 上;

(e) 选择一个新的随机构型空间 X_{rand} , 重复算法直到 $X_{new} = X_{goal}$ 时, 或当 $X_{new} \in X_{goal} \in X_{free}$ (X_{goal} 为目标区域) 时连通路程产生, 给出连通路程点, 程序结束.

3.2 考虑非完整约束的双向多步 RRT 算法改进

上述单棵 RRT 算法随机搜索到目标点相对还是比较慢的, 本文通过将多步 RRT 与双向 RRT 搜索算法相结合, 提高算法搜索速度. 首先对单棵 RRT 算法进行多步扩展, 同时用两个 RRT 来加快路径规划速度, 即采用从 X_{init} 和 X_{goal} 同时开始扩展, 当两树相遇, 路径产生.

在下一步选择新的点 X_{new} 通过计算可以把非完整性约束直接考虑进去.

对自主车的实际情况, 其前轮摆角 $|\varphi| \leq \varphi_{\max}$, 若要使自主车能够跟踪规划出的路径, 必须使得路径的曲率半径大于自主车的最小转弯半径. 由 B 样条曲线的性质, 拟合后的路径的曲率可由控制点位置关系来确定, 而由 RRT 算法搜索得到的路径点作为 B 样条基函数拟合的控制点, 所以连通路程点即 X_{new} 的选择, 既要满足基本避障条件, 又要满足方向约束, 即要求 X_{new} 与 X_{near} 的连线到 X_{near} 与其父节点连线的夹角 $\varphi' < \varphi_{\max}$ (本文自主车前轮最大摆角 $\varphi_{\max} = \pi/6$), 通过加在连通路程点上的方向约束限制, 可使由 B 样条基函数拟合生成的平滑路径满足车辆非完整约束. 具体算法将 Extend()

函数中的第 4 步判断语句改为:

$\text{If}(\text{collision_free_path}(X_{\text{near}}, X_{\text{new}})) \&\&(\varphi' < \varphi_{\text{max}})$
对满足约束的节点 X_{new} , 添加到树上, 否则重新执行 $\text{extend}()$ 函数。

4 B 样条曲线拟合路径点

B 样条曲线的一些优点, 使其在路径规划中应用较为广泛^[9], 用 B 样条曲线^[9] 规划路径可以满足对局部路径进行修改而不需改变整个路径形状的要求. 本文正是利用 B 样条这些优点来完成路径点的后期拟合, 以生成平滑路径。

K 阶 B 样条曲线可以由输出形式来定义:

$$C(u)=\sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u) \quad 0 \leq u \leq u_{\text{max}} \quad (3)$$

系数 p_i 被称为控制点, B 样条基函数可由 Cox De Boor 递推式得到:

$$N_{i,0}(u)=\begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$
$$N_{i,k}(u)=\frac{u-u_i}{u_{i+k-1}-u_i}N_{i,k-1}(u)+\frac{u_{i+k}-u}{u_{i+k}-u_{i+1}}N_{i+1,k-1}(u) \quad (5)$$

一个非减的实数序列 $U=[u_0, \dots, u_{\text{max}}]$ 称为节点向量. B 样条基函数 $N_{i,k}$ 在区间 $[u_i, u_{i+k}]$ 之外为 0, 对所有 k, i 和 u 都为非负。

B 样条曲线可以通过一组特殊的节点向量形式使得曲线与控制多边形相切或经过某一控制点. 利用这个属性, 若使曲线经过起始点和目标点, 则需在起始点和目标点位置加入伪控制点. 即使得起始点和目标点为多重控制点. 本文采用的是三阶 B 样条曲线, 即将起始点和控制点都设为 3 重节点。

5 实验与分析

实验场地及自主车如图 5 所示, 实验环境为 12m×12m 的室外场地, 自主车辆为 SEEKUR 移动机器人, 通过车载摄像机、激光雷达等传感器感知环境信息, 检测障碍物。

实验 1: 首先通过计算机仿真实验, 和单步 RRT 算

法进行对比。

表 1 算法效率对比表		
10 次实验	单棵 RRT	双向多步 RRT
搜索成功次数	2 次	7 次
平均时间	3.57s	1.42s

表 1 为十次实验数据的平均值. 通过实验数据可以看出, 在所设定的静态障碍物环境下, 双向多步扩展 RRT 对比传统的 RRT 搜索算法的搜索速度明显快, 搜索成功率大大提高。

实验 2: 通过计算机仿真, 对路径平滑效果进行对比。

为了说明路径规划效果, 采用 Matlab 仿真环境, 生成所需要的规划路径, 实验结果如图 4 所示。

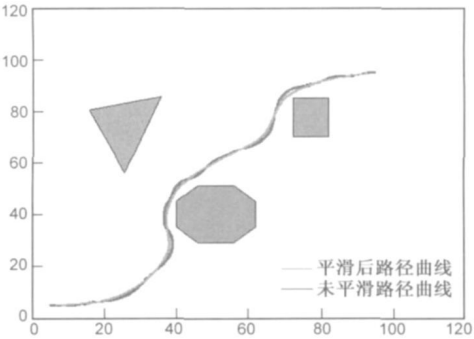
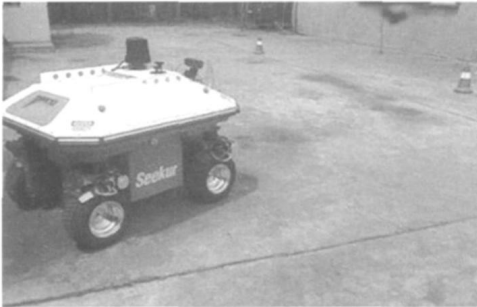


图4 平滑前后路径对比

实验 3: 实车测试。

如图 5 所示的实验测试环境, 设定起始点和目标点后, 控制 SEEKUR 自主车辆以恒定速度跟踪规划路径. 通过实验表明, 生成的可执行路径轨迹平滑, 可满足车

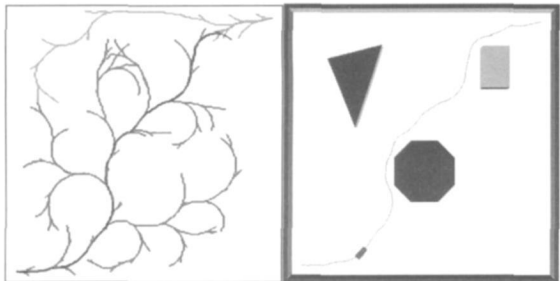


(a)



(b)

图5 轮式自主车辆室外环境实验



(a) 搜索树生成

(b) 连通路径

图3 考虑约束的双向多步扩展RRT

辆运动连续行要求,验证了该算法的可行性.

6 结论

本文结合了 RRT 算法和 B 样条曲线在路径规划中的优势,首先利用双向多步 RRT 算法的迅速性在结构空间中搜索出一条连接起始点和目标点的路径,将非完整性约束加在连通路径点的选取上,将路径点作为 B 样条基函数的控制点,用三次 B 样条函数来拟合控制点生成平滑可跟踪的路径,实验表明,该算法在提高搜索效率的同时,保证了路径的平滑性和可通行性.

参考文献:

- [1] 禹建丽, V Kroumov, 孙增圻, 成久洋之. 一种快速神经网络路径规划算法[J]. 机器人, 2001, 23(3): 201—205.
YU Jian-li, KROUMOV Valeri, SUN Zeng-qi et al. Fast algorithm for path planning based on neural network[J]. ROBOT, 2001, 23(3): 201—205. (in Chinese)
- [2] 陈刚, 沈林成. 复杂环境下路径规划问题的遗传路径规划方法[J]. 机器人, 2001, 23(1): 40—45.
Chen Gang Shen Lin-cheng. Genetic path planning algorithm for complex environment path planning[J]. ROBOT, 2001, 23(1): 40—45. (in Chinese)
- [3] 巩绪生. 基于三维地形的人机协同路径规划[D]. 长沙: 国防科学技术大学硕士学位论文, 2006, 12.
Gong Xu-sheng. Human-machine Cooperation Path Planning Based on Three Dimensional Terrain[D]. National University of Defense Technology, 2006, 12. (in Chinese)
- [4] L Kayraki, Svestka P, Latombe J et al. Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configurations spaces[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(4): 566—580.
- [5] B Milam M. Real-Time Optimal Trajectory Generation for

Constrained Dynamical Systems[D]. California Institute of Technology, 2003.

- [6] Emer Koyuncu, G I. A probabilistic B-spline motion planning algorithm for unmanned helicopters flying in dense 3D environment[A]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C], Nice, France, 2008, 815—821.
- [7] S LaValle, J Kuffner. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects[A]. Proceedings of Algorithmic and Computational Robotics: New Directions[C]. 2001, 293—308.
- [8] J Kuffner, S LaValle. An efficient approach to single-query path planning[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. IEEE Press, 2000, 995—1001.
- [9] M B Miliam. Real-Time Optimal Trajectory Generation for Constrained Dynamical Systems[D]. California Institute of Technology, 2003.

作者简介:



宋金泽 男, 1979 年 4 月出生于陕西西安. 1997 年进入国防科技大学学习, 现为该校自动化所博士研究生, 从事智能控制、无人驾驶车辆控制相关研究.
E-mail: mwsac97@gmail.com

戴 斌 男, 教授, 1970 年 1 月出生于陕西西安, 从事模式识别、图像处理相关研究.

单恩忠 男, 1984 年生于辽宁丹东, 硕士生, 主要研究领域为模式识别、机器人控制.

贺汉根 男, 1943 年生于浙江杭州, 教授、博士生导师, 主要研究领域为模式识别、智能控制.