

智能汽车路径规划与跟踪技术研究现状

Research Status of Intelligent Vehicle Path Planning and Tracking Technology

夏博 王关明 袁明哲

Bo Xia Guanming Wang Mingzhe Yuan

湖北文理学院 中国·湖北 襄阳 441053

Hubei University of Arts and Sciences, Xiangyang, Hubei, 441053, China

摘要: 随着科技与互联网的高速发展, 汽车的自动化、智能化、网联化愈来愈成为汽车产业发展的重头戏, 智能汽车已经成为汽车领域的前沿技术。其中, 智能汽车的路径规划与跟踪技术是智能汽车能否实现无人驾驶的重要影响因素, 而规划路径的优劣品质和跟踪技术的精确性成为衡量汽车是否具备智能化的重要标准。因此, 就最新改进的快速随机树算法的智能汽车路径规划与基于比例—积分—微分法和模型预测控制的路径跟踪技术展开研究。

Abstract: With the rapid development of science and technology and the Internet, the automation, intelligence and networking of automobiles are becoming more and more important in the development of the automobile industry, and intelligent automobiles have become the cutting-edge technology in the automobile field. Among them, the path planning and tracking technology of intelligent vehicles is an important factor affecting whether intelligent vehicles can achieve driverless driving, and the quality of the planned path and the accuracy of the tracking technology become important criteria to measure whether the vehicles are intelligent. Therefore, the intelligent vehicle path planning based on the latest improved fast random tree algorithm and the path tracking technology based on proportional integral differential method and model predictive control are studied.

关键词: 智能汽车; 路径规划; RRT 算法; 路径跟踪技术; PID 算法; 模型预测控制

Keywords: intelligent car; path planning; RRT algorithm; path tracking technology; PID algorithm; mode predictive control

DOI: 10.12346/etr.v4i9.7092

1 国际智能汽车的路径规划研究现状

近年来针传统算法继续被不断改进。2011 年麻省理工学院 Karaman 在概率路线地图算法基础之上提出 PRM* 算法, 逐渐使路径方案收敛性达到最优; 2018 年, 同济大学的余卓平教授对 RRT 算法的路径进行重构, 极大程度上减少了规划路径的时间、长度与波动折点; 而后 2021 年长安大学赵港提出一种改进的 RRT* 算法, 达到限制最小路径的长度并且减少了路径曲率变化。目前, 许多学者仍投身于优化路径算法的研究之中, 最新的 RRT* 算法、蚁群优化算法、优化的遗传算法、改进的人工势场法等都在不断改进和相互补充, 规划路径的质量正一步步被提高。

2 RRT 算法及其最新改进方案

2.1 传统 RRT 算法

传统 RRT 算法是一种对状态空间进行随机采样的算法, 通过对采样点进行碰撞检测生成随机树, 类似于树的根茎一样铺满大部分状态空间并进行探索, 根据空间状态信息得到障碍物的位置, 从而找到可行的路径, 此方法被广泛应用于智能汽车的路径规划之中, 如图 1、图 2 所示。

以 q_{init} 和 q_{goal} 作为该状态空间随机树的对象出发点 (根节点) 和目标点, 从 q_{init} 在随机树上搜索距某随机点 q_{rand} 最近的节点 q_{near} , 连接 q_{near} 和 q_{rand} 之后从 q_{near} 取距离固定步长为 ρ 的 q_{new} 。若此过程中没有碰撞障碍物, 则将 q_{new} 加入到随机树中; 若碰撞到障碍物, 则舍弃此次扩展, 如此往复

【作者简介】夏博 (2002-), 男, 中国湖北武汉人, 本科, 从事车辆工程专业研究。

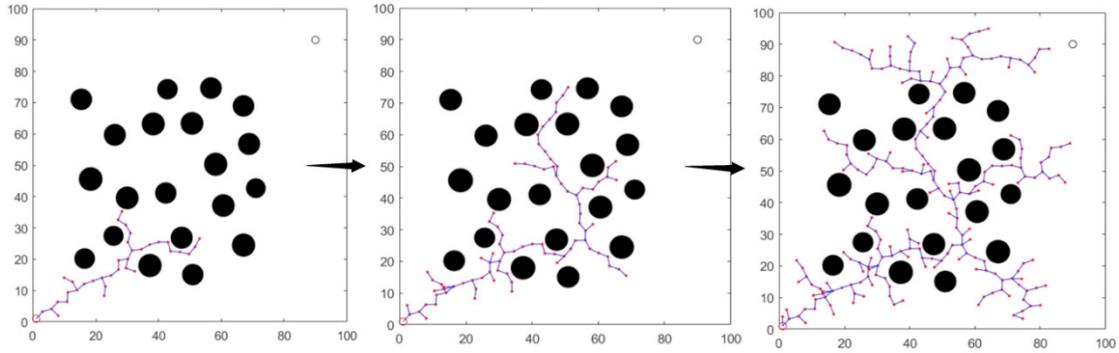


图 1 随机树法扩展示意图

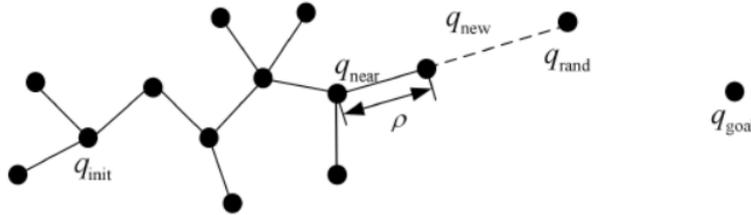


图 2 随机树法扩展方式

直到搜索到子节点中有目标点 q_{goal} ，即寻找到一条没有障碍物碰撞的路径，传统 RRT 的优点就是“快”，因为程序执行时，RRT 不需要对环境具体建模，有很强的空间搜索能力。

2.2 偏向目标点新节点扩展策略

2021 年江苏大学蒋潇杰提出了一种新的基于 RRT 的偏向目标结点的新节点扩展策略。他不仅将 q_{goal} 的引力和障碍物的斥力纳入考虑，而且设计了自适应函数 $F(q)$ 调节 q_{rand} 引力与 q_{goal} 引力在 q_{new} 扩展过程之中的占比，使 q_{new} 的步长进行自适应变化，提高了在路径规划之中 RRT 算法的搜索质量和避障能力。

其具体策略为：传统 RRT 算法中得到 q_{rand} 、 q_{near} 和 q_{goal} 后，使 q_{rand} 对 q_{near} 产生引力 $R(q)$ ， q_{goal} 对 q_{near} 产生引力 $G(q)$ ，障碍物 h_{ob} 对 q_{near} 产生碰撞斥力 $H(q)$ ， $F(q)$ 即为 $R(q)$ 、 $G(q)$ 、 $H(q)$ 三者的合力，其大小亦为 q_{new} 的步长大小，合力方向指向 q_{new} 的生长方向。在 $F(q)$ 函数中蒋潇杰引入了自适应引力系数 λ ，使得 q_{rand} 引力与 q_{goal} 引力在 q_{new} 扩展过程之中的占比可以根据距离障碍物的远近进行调节。 $F(q)$ 合力表达式为：

$$F(q) = R(q) + G(q) + H(q) \quad (1)$$

$$R(q) = (1 - \lambda) \|q_{rand} - q_{near}\| \cdot \frac{(q_{rand} - q_{near})}{\|q_{rand} - q_{near}\|} \quad (2)$$

$$G(q) = \lambda \|q_{goal} - q_{near}\| \cdot \frac{(q_{goal} - q_{near})}{\|q_{goal} - q_{near}\|} \quad (3)$$

$$\lambda = \begin{cases} \frac{p_{obi}}{p_o}, & p_{obi} < p_o \quad \# \\ 1, & p_{obi} \geq p_o \end{cases} \quad (4)$$

$$H(q) = h \cdot \frac{(q_{near} - q_{ob})}{\|q_{near} - q_{ob}\|} \quad (5)$$

$$h = \begin{cases} \frac{1}{2} \mu \left(\frac{1}{p_{ob}} - \frac{1}{p_o} \right)^2, & p_{ob} < p_o \quad \# \\ 0, & p_{ob} > p_o \end{cases} \quad (6)$$

根据以上六式得到新节点 q_{new} 的扩展表达式为：

$$q_{new} = q_{near} + \|F(q)\| \frac{F(q)}{\|F(q)\|} \quad (7)$$

公式注释：

$\|q_{rand} - q_{near}\|$ ： q_{near} 到 q_{rand} 引力模长； $\frac{(q_{rand} - q_{near})}{\|q_{rand} - q_{near}\|}$ ： q_{rand} 引力方向； $\|q_{goal} - q_{near}\|$ ： q_{near} 到 q_{goal} 引力模长； $\frac{(q_{goal} - q_{near})}{\|q_{goal} - q_{near}\|}$ ： q_{goal} 引力方向； p_{obi} ： q_{near} 到最近障碍物 i 的距离； p_o ：设定的障碍物影响距离； h ：障碍物斥力大小； $\frac{(q_{near} - q_{ob})}{\|q_{near} - q_{ob}\|}$ ：障碍物斥力方向； μ ：斥力函数增益； p_o ：设定的障碍物影响距离； $\frac{F(q)}{\|F(q)\|}$ 为 q_{new} 生长方向（见图 3）^[1]。

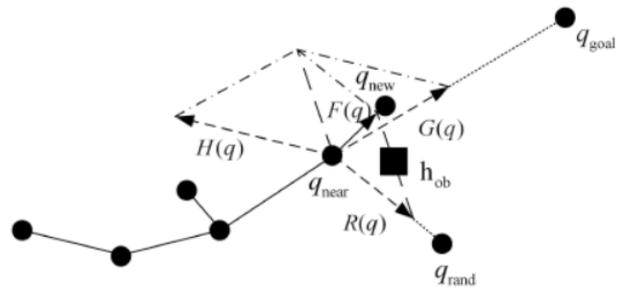


图 3 新节点扩展方式

蒋潇杰提出的这种新节点扩展策略，通过引入 $R(q)$ 、 $G(q)$ 、 $H(q)$ 并找到三者的合力，建立与障碍物影响相关的自适应函数方程，调节 $R(q)$ 、 $G(q)$ 在随机树新节点向目标节点搜索、扩展过程中的占比，使得随机树新节点即使在三维空间甚至是运动学模型中都能够准确避障并且快速向无障碍区扩展进行搜索，在减少采样点的数目的同时也降低了路径规划时间。

2.3 改进的 RRT* 算法

RRT* 算法是对 RRT 算法的优化，像前文所提到的，

RRT 算法存在找到的路径不是最优路径的缺陷，而 RRT* 算法的改进之处就是在每次生成 q_{new} 准备进行下次迭代时，RRT* 都会在局部进行更新搜索以优化路径。但 RRT* 在智能汽车路径规划仍存在路径中转折点多、曲率波动较大的问题。

2021 年，长安大学赵港针对这些缺陷提出了一种改进的 RRT* 算法。为了减少转折点数目和曲率波动范围，他在选取次级节点的加入距离公式进行计算，并对路径转折点角度进行约束。

2.3.1 基于欧式距离公式的次级节点选择

与传统 RRT 类似的，RRT* 在选取新节点 q_{new} 时，都会先在随机树上选取一个距离随机点 q_{rand} 最近的次级节点 q_{near} ，但在步长被固定且 q_{near} 与 q_{rand} 的距离过短时，随机树生成的规划路径则会波动较大。因此，赵港对当前节点 q_{cur} 到随机点 q_{rand} 之间的距离进行约束，引入欧式公式规定两者的最小距离不能小于设定的步长 step length，若满足此条件，则生成的新节点 q_{new} 将会被添加到随机树上；若不满足此条件，则重新生成新节点 q_{new} 进行判断。图 4 为在 MARLAB 软件上面基于欧式公式对次级节点进行选择的部分程序。

```
function Selection( )
qrand=Sample_point( );
distance=(qcur,qrand);
if(dirtance>step length)
return qnear=qrand;
end;
else
return 2;
```

图 4 选择新节点 q_{new} 的伪代码

2.3.2 转折点角度约束

对智能汽车进行路径规划的同时，应重点考虑汽车在运动学模型中会受到的动力学约束和最小转弯半径 r_{min} 等因素。随机树法生成的节点具有随机性、全局性，因此最终得到的规划路径曲率波动可能会比较大，在考虑到刚刚所提到的因素的同时也应尽可能控制规划路径的曲率波动范围。对此，赵港的想法就是对转折点角度进行约束。

图 5 为路径转折角度示意图， q_{cur} 为当前节点， q_{rand} 为随机点， q^2 为 q_{cur} 的父节点（即前一个 q_{new} 结点），线段 $q_{cur}q_{rand}$ 与线段 $q_{cur}q^2$ 所夹的角为 α ，我们知道，只有当 $\angle \alpha$ 越大，节点的转折角度才会越小，生成的曲线越平滑，规划路径的曲率波动越小，生成的曲线就会越平滑。

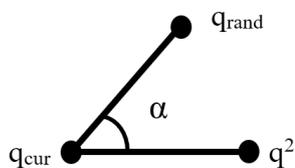


图 5 路径转折角度示意图

在 RRT* 算法中加入以上角度计量函数，设定只有当 α 的大于 90° 时，才会将 q_{rand} 纳入到随机树中，并进行下次判别迭代。在 MATLAB 仿真平台上面进行实验之后，发现相比于传统 RRT* 算法，改进的 RRT* 算法得到的路径曲率相对较为平缓，路径长度也进一步缩短，在考虑到智能汽车行驶运动学和轨迹特征的同时，改进的 RRT* 算法确实能规划出更为合理、质量更高的行驶路径。

3 国际智能汽车路径跟踪研究现状

路径规划、路径跟踪控制还有环境数据采是智能汽车三个最为关键性的技术，其中，路径跟踪控制是智能汽车能否按照规划好的理想路径行驶重要技术节点。路径跟踪实质上是通过控制车辆的横向和纵向运动来跟踪所计划的路径或轨迹并减少车辆与参考轨迹之间的误差，最后将其误差反馈给车辆的执行机构来完成高效且平稳的行驶过程，而轨迹跟踪算法是实现这一技术关键节点，使汽车工业与计算机算法有机结合，从而实现自动驾驶无人汽车的智能化^[2]。

历年来，国内外都在路径跟踪技术领域投入了大量的研究。国外对轨迹跟踪算法的研究起步早，从 20 世纪 30 年代，国外科学家就开始了汽车轨迹跟踪算法的研究。20 世纪 30 至 40 年代出现的最早的跟踪控制方法：比例—积分—微分法（Proportional Integral Differential, PID）；线性二次型控制算法（Linear Quadratic Regulator, LQR）和模型预测控制（Mode Predictive Control, MPC）；还有中国工程院院士郭孔辉中国工程院院士于 1982 年提出的“预瞄—跟随”理论。

4 基于模型预测控制的路径跟踪研究

对于智能汽车路径跟踪控制来说，动力学建模是非常重要的环节。2020 年江苏大学柳亚子对车辆系统从运动学建模和动力学建模来用于模型预测控制器的设计^[3]。综合考虑各方面问题，她选择了三自由度模型车辆动力学模型，它可以准确的估计出车辆的横摆角速度、质心偏侧角、纵向车速。在研究车辆运动控制时，为简化计算，特做出以下假设：

- ①考虑前轮转向车辆模型直接以前轮转角作为输入；
- ②忽略悬架的作用，考虑车辆只做平行于地面的平面运动；
- ③忽略空气阻力的作用与载荷转移；
- ④忽略车身倾侧，俯仰等问题的影响。

经过假设后，智能车辆被简化为只有横向、纵向、横摆的模型，如图 6 所示。

根据牛顿第二定律可得 x 轴、y 轴、z 轴的受力平衡方程：

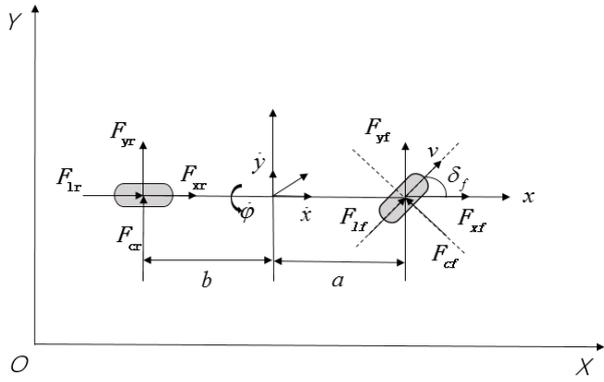


图 6 智能车动力学模型

$$\begin{cases} m\ddot{x}=2F_{xf}+2F_{xr}+m\dot{\varphi} \\ m\ddot{y}=2F_{yf}+2F_{yr}-m\dot{x}\dot{\varphi} \\ I_z\ddot{\varphi}=2aF_{yf}-2bF_{yr} \end{cases} \quad (8)$$

其中, F_{xf} 、 F_{xr} 为车辆前后轮在 x 轴上所受到的力; F_{yf} 、 F_{yr} 为车辆前后轮在 y 轴上所受的力; φ 为表示横摆角速度; I_z 为车辆绕 z 轴所形成的转动惯量; a、b 为车辆的质心到前后轴的距离。

根据上述图中我们看到, F_{xf} 、 F_{xr} 、 F_{yf} 、 F_{yr} 被我们简化了, 车辆前后轮在 x、y 轴的合力与轮胎纵向力、侧偏力的关系如下:

$$F_{xf}=F_{lf}\cos\delta_f-F_{cf}\sin\delta_f \quad (9)$$

$$F_{xr}=F_{lr}\cos\delta_r+F_{cr}\sin\delta_r \quad (10)$$

$$F_{yf}=F_{lf}\sin\delta_f+F_{cf}\cos\delta_f \quad (11)$$

$$F_{yr}=F_{cr}\cos\delta_r-F_{lr}\sin\delta_r \quad (11)$$

纵向力、侧偏力与路面摩擦系数 μ 、轮胎侧偏角 α 、轮胎垂直载荷 F_z 、轮胎的滑动率 S 等参数的关系密不可分, 他们的关系为:

$$F_l=f_l(\mu, \alpha, F_z, S) \quad (5-6) \quad F_c=f_c(\mu, \alpha, F_z, S) \quad (12)$$

①路面摩擦系数 μ 根据我们所确定的道路条件信息来设定, 属于已知条件;

②轮胎侧偏角 α 为在车辆行驶过程中, 轮胎受到侧向力的阻碍, 车轮行驶方向偏离车轮中心平面的夹角, 它的公式为:

$$\alpha = \arctan \frac{V_c}{V_l} \quad (13)$$

上式中的 v_c 、 v_l 分布表示轮胎在横向、纵向时的速度, 他们在车辆坐标系用沿 x 轴速度 V_x 、y 轴速度 V_y 可表示为:

$$V_l = V_y \sin\delta + V_x \cos\delta \quad (14)$$

$$V_c = V_y \cos\delta - V_x \sin\delta \quad (15)$$

车辆坐标系中沿 x、y 轴方向速度难以测得, 所以我们可以将它转化为车辆坐标系中质心沿 x、y 轴方向速度, 我

们可以得到:

$$V_{yf} = \dot{y} + \alpha\dot{\varphi} \quad (16)$$

$$V_{yr} = \dot{y} - b\dot{\varphi} \quad (17)$$

$$V_{xf} = \dot{x} \quad (18)$$

$$V_{xr} = \dot{x} \quad (19)$$

其中, \dot{x} 、 \dot{y} 、 $\dot{\varphi}$ 为车辆横向速度、纵向速度、车辆绕 z 轴的角速度。

由上面的式子 (13) 到 (15) 可以得到:

$$\alpha_f = \frac{\dot{y} + \alpha\dot{\varphi}}{\dot{x}} \quad (5-15) \quad \alpha_r = \frac{\dot{y} - b\dot{\varphi}}{\dot{x}} \quad (20)$$

③轮胎垂直载荷 F_z : 根据上面的第五条假设, 忽略车辆在运动过程中的载荷转移问题, 即可得到前后轮胎的垂直载荷:

$$F_{zf} = \frac{l_r m g}{2(l_f + l_r)} \quad (21)$$

$$F_{zr} = \frac{l_f m g}{2(l_f + l_r)} \quad (22)$$

④轮胎的滑动率 S : 可由轮胎角速度 W_t 、轮胎滚动半径 r 、轮胎中心速度 v 来计算:

$$\begin{cases} S = \frac{rW_t}{v} - 1 (rW_t > v, v \neq 0) \\ S = 1 - \frac{v}{rW_t} (rW_t < v, v \neq 0) \end{cases} \quad (23)$$

考虑大地坐标系和车辆坐标系之间的转化关系:

$$\dot{Y} = \dot{x} \sin\varphi + \dot{y} \cos\varphi \quad (24)$$

$$\dot{x} \cos\varphi - \dot{y} \sin\varphi \quad (25)$$

可知, 轮胎的纵向力和侧向力在一定的范围内与滑移率、侧偏角可近似看成成正比的关系:

轮胎的纵向力、轮胎的侧向力:

$$F_l = C_l S \quad (26)$$

$$F_c = C_c \alpha \quad (27)$$

根据式 (17)、(22)、(23) 可得:

$$F_{cf} = C_{cf} \left(\delta_f - \frac{\dot{y} + \alpha\dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) \quad (5-24) \quad F_{cr} = C_{cr} \frac{\dot{y} - b\dot{\varphi}}{\dot{x}} \quad (28)$$

前、后轮胎的纵向力为:

$$F_{lf} = C_{lf} S_f \quad (29)$$

$$F_{lr} = C_{lr} S_r \quad (30)$$

根据上面公式即可得到车辆的非线性动力学模型。

参考文献

[1] 蒋潇杰.基于RRT与LQR的智能汽车路径规划与跟踪控制[D].苏州:江苏大学, 2021.
 [2] 赵颖,俞庭,张琪,等.路径跟踪控制算法仿真分析与试验验证[J].汽车技术,2022(7):15-24.
 [3] 柳亚子,江洪,于文浩,等.高速转向工况下的无人驾驶车辆路径跟踪[J].计算机应用与软件,2022,39(3):68-74.