

# 基于改进人工势场法的无人驾驶 车辆局部路径规划的研究\*

修彩靖, 陈 慧

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

**[摘要]** 本文旨在研究在结构化道路上行驶的无人驾驶汽车的局部路径规划。基于人工势场法, 利用高斯组合隶属函数建立引力的目标点函数, 在引力点函数中考虑障碍物约束和车辆约束, 并引入调节因子, 建立了改进的无人驾驶汽车人工势场模型, 消除了传统人工势场法容易陷入局部极小的问题。硬件在环试验结果验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 无人驾驶汽车; 局部路径规划; 改进人工势场法; 目标点函数

## A Research on Local Path Planning for Autonomous Vehicles Based on Improved APF Method

Xiu Caijing &amp; Chen Hui

School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804

**[Abstract]** This paper aims to study the local path planning for an autonomous vehicle (AV) running on a structural road. Based on artificial potential field (APF) method and using Gaussian combination membership function, a target point function of attraction is established with consideration of the constraints of both obstacles and vehicle, and with an adjustment factor introduced, an improved APF model for AV is established so that the local minimum problem of traditional APF method is eliminated. The results of HIL test verify the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** autonomous vehicle; local path planning; improved APF method; target point function

### 前言

局部路径规划是无人驾驶汽车研究的关键技术之一。目前对局部路径规划方法的研究主要有: (1) 遗传算法, 可避免困难的理论推导, 直接获得最优解, 但运算时间长, 难以实现实时规划<sup>[1]</sup>; (2) 滚动窗口方法, 利用局部环境信息, 以滚动方式进行在线规划, 具有良好的避障能力, 但存在局部极值问题<sup>[2]</sup>; (3) 模糊方法, 无须建立完整的环境模型, 但模糊规则往往是人们通过经验预先制定的, 所以存在无法学习和灵活性差的缺点<sup>[3]</sup>; (4) 人工势场法<sup>[4]</sup>。

人工势场法是路径规划研究中比较成熟和实时

性较好的规划方法。它是将环境信息抽象为引力场函数和斥力场函数, 通过合力场函数来规划出一条从起始点到目标点的无碰撞路径。由于被控对象受引力和斥力合力的作用, 合力为零时, 被控对象将停止前进, 即陷入局部最小点<sup>[5]</sup>。为克服人工势场具有局部最小点的问题, 各研究者已经提出一些改进方法, 如通用势场法与虚拟力场法<sup>[6]</sup>、人工协调场<sup>[7]</sup>、随机逃走法<sup>[8]</sup>、启发式搜索与沿墙走<sup>[9]</sup>和 Tangent Bug 法<sup>[10]</sup>等, 这些方法的提出一般是对被控对象施加附加控制力, 被控对象一般是针对机器人, 通常无道路约束条件, 所以不适用于结构化道路条件下的路径规划。

车辆在道路上行驶首先受到道路边界的约束,

\* 上海市科学技术委员会科研计划项目(07dz05901)资助。

原稿收到日期为 2011 年 12 月 12 日, 修改稿收到日期为 2012 年 2 月 21 日。

而对于汽车则具有运动学和动力学约束:首先车辆运动须具有连续曲率的路径;二是车辆受转向角大小的限制,其转弯半径不能无限小,因此其行驶的路径曲率有界;三是车辆的转向轮只能以有限的速度进行转向操纵,因此其行驶路径的曲率导数也应有界。本文中考虑在以上约束下,以安全性为指标,提出改进的人工势场方法。仿真结果证明,所提出的方法在结构化道路环境下可行,解决了人工势场法陷入局部最小的问题,得到了基于安全最优路径,即为避免车辆发生侧撞,车辆轨迹与道路中心线保持在允许误差范围内。

## 1 无人驾驶车人工势场模型

### 1.1 Khatib 人工势场模型

Khatib 人工势场法是一种虚拟力方法,其基本思想是将被控对象在环境中的运动虚拟为在受力场中的运动,障碍物对被控对象产生斥力,目标对被控对象产生引力,引力和斥力构成的合力控制被控对象的运动方向。

本文中将控对象简化为一质点,其所在空间为二维欧氏空间。被控对象在空间中的位置为  $X = [x \ y]^T$ 。被控对象在  $X$  所受的引力场函数  $U_{att}(X)$  定义为与目标位置  $X_g = [x_g \ y_g]^T$  相关的函数:

$$U_{att}(X) = \frac{1}{2} \kappa (X - X_g)^2 \quad (1)$$

式中:  $\kappa$  为引力场增益。相应的引力  $F_{att}(X)$  为引力场的负梯度:

$$F_{att}(X) = -\nabla U_{att}(X) = -\rho_g a_g \quad (2)$$

式中:  $a_g$  为被控对象指向目标的单位向量;  $\rho_g$  为被控对象与目标点之间的距离,  $\rho_g = \|X - X_g\|$ 。

设障碍物在空间中的边界位置变量  $X_{ob} = [x_{ob} \ y_{ob}]^T$ , 则被控对象在  $X$  所受的斥力场函数为

$$U_{rep}(X) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{\rho_{ob}} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2, & \rho_{ob} \leq \rho_0 \\ 0, & \rho_{ob} > \rho_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\eta$  为斥力场函数增益;  $\rho_{ob}$  为被控对象与障碍物的最短距离,  $\rho_{ob} = \|X - X_{ob}\|$ ; 常数  $\rho_0$  为根据车速设定的障碍物的影响距离。

相应的斥力为斥力场的负梯度,即

$$F_{rep}(X) = -\nabla U_{rep}(X) = \begin{cases} \eta \left( \frac{1}{\rho_{ob}} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho_{ob}^2} a_o, & \rho_{ob} \leq \rho_0 \\ 0, & \rho_{ob} > \rho_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $a_o$  为障碍物指向被控对象的单位向量。

被控对象所受到的合力为

$$F_{sum} = F_{att} + \sum_{i=1}^m F_{rep(i)} \quad (5)$$

式中  $m$  为有效障碍物的个数。

合力即决定了被控对象的运动方向,见图1。

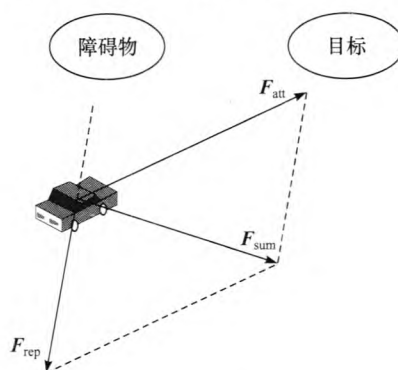


图1 人工势场法

利用 Khatib 人工势场模型进行局部路径规划时,仅考虑路径的可通过性,这对具有道路边界约束的无人驾驶车来说并不可行,故本文在传统人工势场的基础上考虑具有道路约束下的安全最优路径。

### 1.2 改进的无人驾驶车人工势场模型

无人驾驶车不同于机器人控制,除具有障碍物的空间轨迹约束之外,无人驾驶车的行驶环境还具有道路约束,以下统称为边界约束。

#### (1) 改进的人工势场模型

传统的人工势场法当斥力和引力在一条线上,且斥力大于引力时,将陷入局部极小点,目标不可达,或者将不能很好地绕开障碍物。为此,在传统模型斥力场中加入调节因子  $\rho_g^n$ ,使得被控对象在接近目标点引力增加的同时,斥力减少,直到被控对象达到目标点,引力达到最大,斥力减少到零,从而解决了在传统人工势场中,障碍物与目标点过近引起的陷入局部最小点的问题<sup>[8]</sup>。

改进的斥力场函数为

$$U_{rep}(X) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{\rho_{ob}} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \rho_g^n, & \rho_{ob} \leq \rho_0 \\ 0, & \rho_{ob} > \rho_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中  $n$  是一个大于零的任意实数。

当被控对象不在目标点,则相应的斥力为

$$F_{rep}(X) = \begin{cases} (F_{rep1} + F_{rep2}) a_o, & \rho_{ob} \leq \rho_0 \\ 0, & \rho_{ob} > \rho_0 \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} F_{\text{rep1}} = \eta \left( \frac{1}{\rho_{\text{ob}}} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{\rho_g^n}{\rho_{\text{ob}}^2} \\ F_{\text{rep2}} = \frac{n}{2} \eta \left( \frac{1}{\rho_{\text{ob}}} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \rho_g^{n-1} \end{cases} \quad (8)$$

## (2) 引力的目标点函数

当障碍物与目标点距离过近时,人工势场模型产生的轨迹将抖动,不光滑,对于车辆来说不满足安全指标。所以本文中提出边界约束模型。

当道路内无障碍物时,边界即为道路边界,通过视觉传感器给出的道路边界点,拟合道路边界线为三次曲线,则边界约束模型为

$$\begin{cases} y_1 = a_1 x^3 + b_1 x^2 + c_1 x + d_1 \\ y_2 = a_1 x^3 + b_1 x^2 + c_1 x + d_2 \end{cases} \quad (9)$$

则道路中心线即目标点函数为

$$y_{\text{goal}} = y_{\text{centre}} = a_1 x^3 + b_1 x^2 + c_1 x + (d_1 + d_2)/2 \quad (10)$$

当道路中有障碍物时,首先判断最宽可通过道路,选择与最宽可通过道路临界的障碍物边界点,可设为同一坐标系下的障碍物最危险边界点坐标  $(X_{\text{ob}}, Y_{\text{ob}})$ ,若

$$\left| y_{\text{ob}} - \left( a_1 x_{\text{ob}}^3 + b_1 x_{\text{ob}}^2 + c_1 x_{\text{ob}} + \frac{d_1 + d_2}{2} \right) \right| \leq \delta \quad (11)$$

则目标点与斥力点过近,路径将出现抖动,而且路径不会最优,所以采用变目标函数方式。例如障碍物和一边道路线组成道路边界,则目标函数所需最大偏移量为

$$\Delta s = |(a_1 x_{\text{ob}}^3 + b_1 x_{\text{ob}}^2 + c_1 x_{\text{ob}} + (d_1 + d_2)/2) - (y_{\text{ob}} + a_2 x_{\text{ob}}^3 + b_2 x_{\text{ob}}^2 + c_2 x_{\text{ob}} + d_2)/2| \quad (12)$$

即当车辆处于一边为障碍物边界的边界约束条件下的目标函数为

$$y_{\text{goal}} = a_1 x^3 + b_1 x^2 + c_1 x + (d_1 + d_2)/2 + \Delta s \quad (13)$$

但直接加一个偏移量会造成路径曲率的不连续,不满足车辆的运动学约束条件,综上分析并考虑车辆约束条件,采用高斯组合隶属函数来光滑过渡两个目标函数,因此修正目标函数为

$$y_{\text{goal}} = a_1 x^3 + b_1 x^2 + c_1 x + (d_1 + d_2)/2 + \Delta s \exp(-(x - x_{\text{ob}})^2 / 2\sigma^2) \quad (14)$$

式中  $\sigma$  是与高斯组合隶属函数曲线的曲率相关的系数,在引力的目标函数中,通过调节其值可满足车辆的动力学约束,即路径曲率有界和路径曲率导数有界。

当  $|x - x_{\text{ob}}| \geq \Delta l$ ,  $\Delta l$  为与车速和  $\sigma$  相关的量,则修正项  $\Delta s \exp(-(x - x_{\text{ob}})^2 / 2\sigma^2)$  趋近 0,即目标函数为原道路中心线;而当  $x - x_{\text{ob}} = 0$ ,修正项  $\Delta s \exp(-(x - x_{\text{ob}})^2 / 2\sigma^2)$  为最大偏移量  $\Delta s$ ,引力的目标函数为有

障碍物边界的新路径的中心线。

综上分析此目标函数即能满足路径最优的要求,又考虑到车辆动力学和运动学约束要求,并可消除抖动问题。

## 2 硬件在环试验

为验证所提出方法的有效性和相对其它方法的优越性,本文中利用上述改进的 APF 和环境适应性路径目标点函数在不同环境下进行了硬件在环试验。试验的车辆模型采用高精度的 veDYNA 车辆动力学模型。驾驶系统采用线控转向系统,控制器采用 dspace 公司的 AUTObox。控制系统各系数取值如下:  $\kappa = 6$ ,  $\rho_0 = 10$ ,  $\eta = 0.7$ ,  $n = 2$ ,  $\sigma = 4.5$ ,  $v = 5 \text{ m/s}$ 。硬件在环控制系统模型如图 2 所示。

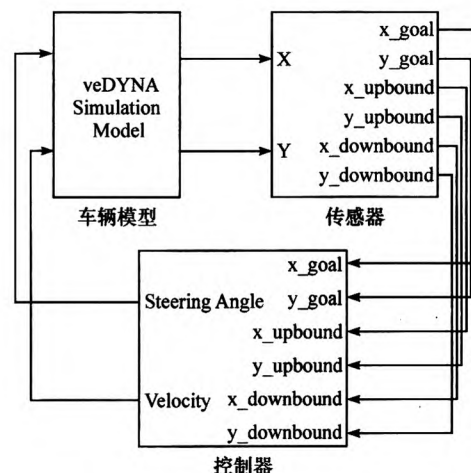


图 2 硬件在环控制系统模型

### 2.1 无障碍物的环境下

当道路内无障碍物或障碍物不在有效距离范围内,利用改进人工势场法以道路边界线作为斥力,以道路中心线作为引力,此时修正项为零。图 3 为无人驾驶汽车行驶轨迹。由图可见,无人驾驶汽车能很好地跟随道路中心线。图 4 为转向盘转角,从给出

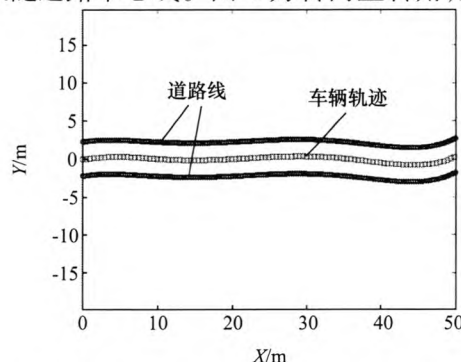


图 3 无人驾驶汽车行驶轨迹( $v = 5 \text{ m/s}$ )

的转向盘转角命令可以看出,期望转角最大 $230^{\circ}$ ,角速度小于 $200^{\circ}/s$ ,满足车辆的运动学和动力学约束。

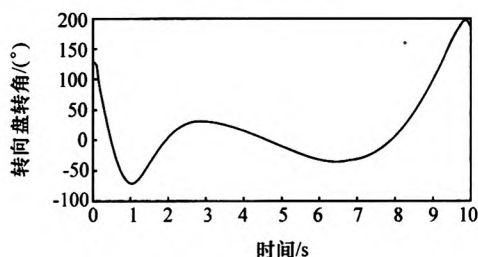


图4 转向盘转角

## 2.2 障碍物环境下

当前方道路内出现障碍物,且无人驾驶车与障碍物距离在有效范围内,以障碍物和一侧道路边界线作为斥力,此时修正项与最大偏移量有关,以障碍物边界线和下道路边界线的中心线为引力。图5为无人驾驶汽车行驶轨迹,从行驶轨迹可以看出,当道路内有障碍物时,无人驾驶汽车能够平滑地绕过障碍物,并在绕过障碍物后,平滑地回到道路中心线。图6为转向盘转角,期望转角最大 $110^{\circ}$ ,角速度小于 $180^{\circ}/s$ ,满足车辆动力学约束。

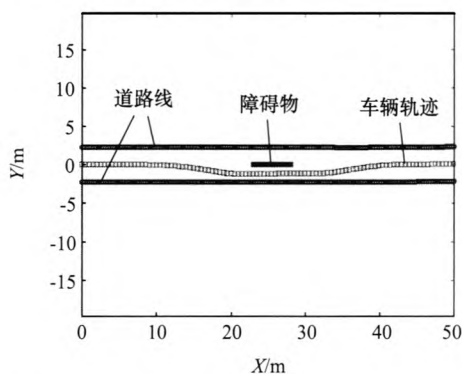


图5 无人驾驶汽车行驶轨迹( $v=5m/s$ )

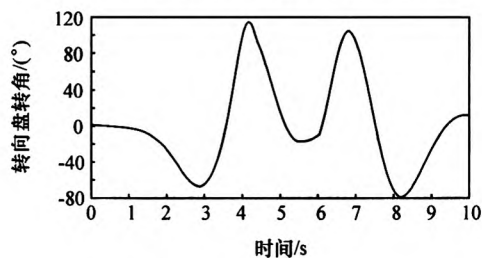


图6 转向盘转角

## 3 结论

将改进人工势场法应用于在结构化道路上行驶

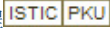
的无人驾驶汽车,针对无人驾驶汽车的道路障碍物约束和车辆动力学约束,建立了引力场的目标点函数,并利用高斯组合隶属函数将障碍物约束和车辆约束考虑到目标函数中。从试验结果看,这种方法既消除了抖动问题,又满足安全性最大指标。所采用的方法对传统人工势场法有一定的改进,而且建立了考虑道路约束和车辆约束的目标函数。

本文中所提出满足安全最优路径的引力目标函数,通过目标函数的参数设置来满足车辆的约束,但车辆随着工况不同其约束条件也不同,下一步研究将建立车辆实时约束与目标函数的参数的函数关系,并在实车试验研究中进一步验证。

## 参考文献

- [1] 卢瑾. 基于遗传算法的机器人路径规划研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2005.
- [2] 张纯刚. 基于滚动窗口的移动机器人路径规划[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(6): 63-68.
- [3] 成伟明. 移动机器人自主导航中的路径规划与跟踪控制技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [4] Khatib O. Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, Robotics and Automation Proceedings[C]. 1985 IEEE International Conference.
- [5] 张建英, 赵志萍. 基于人工势场法的机器人路径规划[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8): 1-2.
- [6] Koren Y, Borenstein J. Histogram Inmotion Mapping for Mobile Robot Obstacle Avoidance[J]. IF ~ F. E Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(4): 535-539.
- [7] 景兴建, 王越超. 人工协调场及其在动态不确定环境下机器人运动规划中的应用[J]. 中国科学 E 辑, 2004, 34(9): 1021-1036.
- [8] Barraquand J, Latombe J C. A Monte-Carlo Algorithm for Path Planning with Many Degrees of Freedom[C]. Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Cincinnati, OH, USA; IEEE, 1990: 1712-1717.
- [9] Yun X P, Tan K C. A Wall\_following Method for Escaping Local Minima in Potential Field Based Motion Planning[C]. Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Robotics. Monterey, CA; IEEE, 1997: 421-426.
- [10] Kamon I, Rivin E, Rimón E. A Newrange Sensor Based Globally Convergent Navigation Algorithm for Mobile Robots[C]. Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis, MN, USA; IEEE, 1996: 429-435.
- [11] Freund Y, Schapire R E. Experiment with a New Boosting Algorithm[C]. Proc of the 13th International Conference on Machine Learning, San Francisco, CA, 1996: 148-156.

# 基于改进人工势场法的无人驾驶车辆局部路径规划的研究

作者: [修彩靖](#), [陈慧](#), [Xiu Caijing](#), [Chen Hui](#)  
作者单位: [同济大学汽车学院, 上海, 201804](#)  
刊名: [汽车工程](#)   
英文刊名: [Automotive Engineering](#)  
年, 卷(期): 2013, 35 (9)  
被引用次数: 1次

## 参考文献(11条)

1. [卢瑾](#) [基于遗传算法的机器人路径规划研究](#)[学位论文] 2005
2. [张纯刚](#) [基于滚动窗口的移动机器人路径规划](#)[期刊论文]-[系统工程与电子技术](#) 2002(6)
3. [成伟明](#) [移动机器人自主导航中的路径规划与跟踪控制技术研究](#)[学位论文] 2007
4. [Khatib O](#) [Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots](#), [Robotics and Automation Proceedings](#)
5. [张建英](#), [赵志萍](#), [刘瞰](#) [基于人工势场法的机器人路径规划](#)[期刊论文]-[哈尔滨工业大学学报](#) 2006(8)
6. [Koren Y](#); [Borenstein J](#) [Histogram Inmotion Mapping for Mobile Robot Obstacle Avoidance](#) 1991(04)
7. [景兴建](#), [王越超](#), [谈大龙](#) [人工协调场及其在动态不确定环境下机器人运动规划中的应用](#)[期刊论文]-[中国科学E辑](#) 2004(9)
8. [Barraquand J](#); [Latombe J C](#) [A Monte-Carlo Algorithm for Path Planning with Many Degrees of Freedom](#) 1990
9. [Yun X P](#); [Tan K C](#) [A Wall\\_following Method for Escaping Local Minima in Potential Field Based Motion Planning](#) 1997
10. [Kamon I](#); [Rivin E](#); [Rimon E](#) [A Newrange Sensor Based Globally Convergent Navigation Algorithm for Mobile Robots](#) 1996
11. [Freund Y](#); [Schapire R E](#) [Experiment with a New Boosting Algorithm](#) 1996

引用本文格式: [修彩靖](#). [陈慧](#). [Xiu Caijing](#). [Chen Hui](#) [基于改进人工势场法的无人驾驶车辆局部路径规划的研究](#)[期刊论文]-[汽车工程](#) 2013(9)