



## 面向自动驾驶的动态路径规划避障算法

周慧子<sup>1</sup>, 胡学敏<sup>1\*</sup>, 陈 龙<sup>2</sup>, 田 梅<sup>1</sup>, 熊 豆<sup>1</sup>

(1. 湖北大学 计算机与信息工程学院, 武汉 430062; 2. 中山大学 数据科学与计算机学院, 广州 510006)

(\* 通信作者电子邮箱 huxuemin2003@163.com)

**摘 要:** 针对自动驾驶中避障的动态路径规划问题, 提出一种在已知车辆的初始位置、速度、方向和障碍物位置情况下, 实时避开障碍物的动态规划算法。首先, 利用三次样条曲线的二阶连续性, 结合已知的车道信息产生道路基准线; 其次, 以车辆的位置方向和道路的曲率构建  $s-q$  坐标系, 并在  $s-q$  坐标系内产生从车辆当前位置到目的位置的一簇平滑曲线, 作为候选路径; 最后, 综合考虑车辆行驶的安全性、平滑性和连贯性准则, 设计一种新的代价函数, 并且通过使代价函数最小化的方法从候选路径中选择最佳路径。在实验过程中, 通过设计多种不同的模拟道路来检验算法的性能。实验结果表明, 该方法在多种地形的单车道和多车道道路上都能够规划出安全、平滑的路径, 有效避开障碍物, 并且具有较好的实时性。

**关键词:** 自动驾驶; 动态路径规划; 候选路径; 路径选择; 代价函数

**中图分类号:** TP391.7 **文献标志码:** A

### Dynamic path planning for autonomous driving with avoidance of obstacles

ZHOU Huizi<sup>1</sup>, HU Xuemin<sup>1\*</sup>, CHEN Long<sup>2</sup>, TIAN Mei<sup>1</sup>, XIONG Dou<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science and Information Engineering, Hubei University, Wuhan Hubei 430062, China;

2. School of Data and Computer Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong 510006, China)

**Abstract:** To deal with the problem of dynamic path planning for autonomous driving with avoidance of obstacles, a real-time dynamic path planning approach was proposed to avoid obstacles in real-time under the condition of knowing initial vehicle position, speed, orientation and the obstacle positions. Firstly, a base frame of the road was constructed using the continuity of the second derivative for cubic spline curves combined with the information of the road edges and lanes. Secondly, the  $s-q$  coordinate system was established using the position and orientation of the vehicle and the curvature of the road. Then a set of smooth curves from the current position to the destination were generated as the path candidates in the  $s-q$  coordinate system. Finally, considering the factors of safety, smoothness and continuity, a novel cost function was designed, and the optimal path was selected by minimizing the cost function. Various simulative roads were designed to test the proposed method in the experiments. The experimental results show that the proposed approach has the ability of planning a safe and smooth path for avoiding the obstacles on both single-lane roads and multi-lane roads with good real-time performance.

**Key words:** autonomous driving; dynamic path planning; path candidate; path selection; cost function

## 0 引言

自动驾驶技术作为当今智能交通科技的重要发展方向, 可以有效地减少因酒驾、疲劳驾驶、超速等人为操作不当造成的交通事故, 还可以改善交通堵塞、提高交通系统总性能<sup>[1-3]</sup>。动态路径规划是自动驾驶汽车信息感知和智能控制的桥梁, 也是实现自动驾驶的基础<sup>[4]</sup>。动态路径规划是按照某一性能指标在其行驶区域内搜索一条从起点到终点的无碰撞的最优或近似最优路径, 其本质是一个具有约束的复杂系统优化问题, 在多智能体集群、避障和目标跟踪控制中都会涉及到, 是一个关键的基础共性问题<sup>[5-7]</sup>, 因此, 动态路径规划和避障对于设计合理的驾驶路径具有重要意义, 不仅规划结果的优劣影响着自动驾驶汽车的准确性和安全性, 规划算法的复杂度、稳定性也间接影响着汽车的工作效率。

动态路径规划技术主要分为两大类: 第一类是全局路径规划<sup>[6]</sup>, 它是根据先验环境模型找出从起点到终点中符合条件的最优或次优路径, 涉及的根本问题是环境模型的表达和路径搜寻策略; 第二类是局部路径规划<sup>[8-9]</sup>, 是指在未知或部分未知的环境下通过传感器获取周围环境信息, 并使自动驾驶汽车自主获得一条无碰撞最优规划的路径, 它侧重于考虑车辆当前局部环境信息。本文研究的是局部路径规划问题。

目前, 局部路径规划方法主要有: 人工势场法、启发式搜索算法和基于离散优化的方法。人工势场法是将车辆在周围环境中的运动设计成一种抽象的人造引力场中的运动, 目标点对车辆产生“引力”, 障碍物对车辆产生“斥力”, 最后通过求合力来控制车辆的运动<sup>[10]</sup>。该方法在数学描述上简洁、结构简单、计算量小, 但是容易产生局部最优解。启发式搜索算法主要是 A\* 算法和 D\* 算法<sup>[11-12]</sup>。A\* 算法是一种静态路网

**收稿日期:** 2016-07-18; **修回日期:** 2016-08-22。 **基金项目:** 国家自然科学基金青年基金资助项目(41401525); 广东省自然科学基金资助项目(2014A030313209); 湖北省大学生创新创业训练计划基金资助项目(201410512030)。

**作者简介:** 周慧子(1995—), 女, 辽宁沈阳人, 主要研究方向: 动态路径规划; 胡学敏(1985—), 男, 湖南岳阳人, 讲师, 博士, 主要研究方向: 计算机视觉、动态路径规划; 陈龙(1985—), 男, 湖北襄阳人, 讲师, 博士, 主要研究方向: 立体视觉、无人驾驶; 田梅(1995—), 女, 湖北武汉人, 主要研究方向: 动态路径规划; 熊豆(1995—), 女, 湖北武汉人, 主要研究方向: 自动控制。



中求解最短路径最有效的直接搜索方法,需要建立环境模型地图,地图本身充当了人与车辆互相交流的媒介,这使得操作方便可靠,但是计算量大、耗时长;D\*算法是对A\*算法的扩充,适合动态环境下的路径规划,在动态环境中寻路非常有效,但是它比较复杂,应用范围有限。基于离散优化的路径规划方法是用数值积分和微分等方程来描述车辆的运动,从而产生数量有限的候选路径,并通过设计代价函数,从候选路径中选择最优路径<sup>[13-14]</sup>。该方法计算量小,实时性好。文献[14]提出了一种基于此方法的自动驾驶车辆路径规划避障算法,可以为车辆提供最优路径,但只针对单车道公路或乡间小路,未考虑城市中的多车道情况。

针对现有局部路径规划算法中的容易陷入局部最优、计算量大、未考虑多车道等问题,本文基于离散优化方法,提出了一种新的面向自动驾驶的动态路径规划避障算法。该算法能够在不进行迭代的前提下产生多条候选路径,并且综合考虑驾驶的安全性、平滑性和连贯性来设计代价函数,选择一条最优路径。实验结果表明,本文提出的算法不管是对于单车道还是多车道道路,都能够产生一条最优的路径,使规划车辆能够安全、舒适地绕过障碍物,从起点到达终点,完成路径的规划。

## 1 动态路径规划避障算法

本文提出的动态路径规划方法是在已知车辆初始状态信息(包括车辆的位置、车头方向等)的基础上,产生一条安全又舒适的行驶路线。本文是在已知全局路线的情况下进行局部规划,全局路线通过车道级的高精度导航系统获取。本文中,全局路线由一组道路边缘的有序点组成。如图1所示,本文的方法包括三个部分:基准线生成、候选路径生成和最优路径选择。

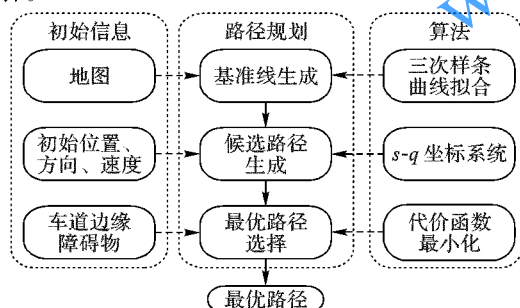


图1 动态路径规划算法流程

Fig. 1 Flow of dynamic path planning algorithm

### 1.1 基准线的生成

路径规划算法中常用参数曲线来建立道路的集合模型。由于全局路线是一组道路边缘的有序点,并且考虑到计算曲率时曲线二阶导数的连续性,本文采用三次样条曲线来拟合道路基准线。弧长是最常用的曲线参数,因此采用正交数值法<sup>[15]</sup>对由道路点拟合成的参数样条曲线弧长作参数化计算,如式(1)所示:

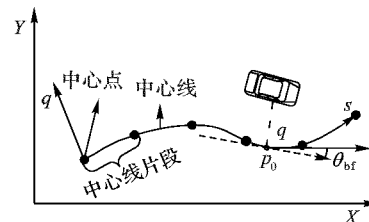
$$\begin{cases} x_{bf}(s) = a_{x,i}(s-s_i)^3 + b_{x,i}(s-s_i)^2 + c_{x,i}(s-s_i) + d_{x,i} \\ y_{bf}(s) = a_{y,i}(s-s_i)^3 + b_{y,i}(s-s_i)^2 + c_{y,i}(s-s_i) + d_{y,i} \end{cases} \quad (1)$$

如图2(a)所示, $s$ 为车辆当前位置映射在基准线上的弧长,该弧长计算的起点为第 $i$ 个道路片段的起点 $s_i$ 。曲线上的点在笛卡尔坐标系中的坐标 $a_{x,i}$ 、 $b_{x,i}$ 、 $c_{x,i}$ 、 $d_{x,i}$ 、 $a_{y,i}$ 、 $b_{y,i}$ 、 $c_{y,i}$ 、 $d_{y,i}$ 是参数样条曲线的参数。假设车辆当前位置

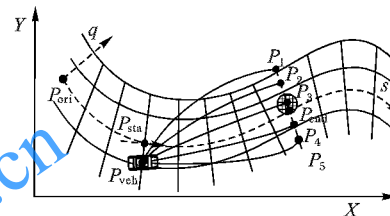
到基准线上最近的点的距离,即横向偏移量为 $q$ ,则车辆当前坐标可以用车辆行驶的弧长 $s$ 和横向偏移量 $q$ 来表示。本文将 $s$ 和 $q$ 表示车辆位置的坐标称为“ $s$ - $q$ 坐标”。在 $s$ - $q$ 坐标中,基准线上每个点的切角 $\theta_{bf}$ 和曲率 $\kappa_{bf}$ 可以用 $x_{bf}(s)$ 和 $y_{bf}(s)$ 对 $s$ 的一阶导数和二阶导数计算求得,如式(2)所示<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} \theta_{bf} = \arctan \frac{dy_{bf}}{dx_{bf}} \\ \kappa_{bf} = \frac{x_{bf}'y_{bf}'' - x_{bf}''y_{bf}'}{(x_{bf}'^2 + y_{bf}'^2)^{3/2}} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $x_{bf}'$ 、 $y_{bf}'$ 、 $x_{bf}''$ 和 $y_{bf}''$ 分别为 $x_{bf}(s)$ 和 $y_{bf}(s)$ 对 $s$ 的一阶导数和二阶导数。



(a)  $s$ - $q$  坐标系示意图



(b) 候选路径示意图

图2  $s$ - $q$  坐标系与候选路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of  $s$ - $q$  coordinate system and candidate path

### 1.2 候选路径的产生

为使用基准线上点的方向角和曲率,有必要找到车辆在基准线上的位置,如图2(a)所示的 $p_0$ 点。本文利用牛顿拉夫森二次极小化方法找到曲线上最接近车辆位置的点坐标<sup>[16]</sup>。

如图2(b)所示,车辆在绕过障碍物时,是否与障碍物碰撞可以用偏移量 $q$ 来表示。由于车辆行驶的距离是用弧长 $s$ 表示,因此车辆绕过障碍物的候选路径可以用横向偏移量 $q$ 和弧长 $s$ 来表示。在 $s$ - $q$ 坐标系中,假设候选路径也满足三次样条曲线方程,则候选路径可以用式(3)来表示:

$$q(s) = \begin{cases} a(s-s_{start})^3 + b(s-s_{start})^2 + c(s-s_{start}) + q_{start}, & s \in (s_{start}, s_{end}) \\ q_{end}, & s \in (s_{end}, \infty) \end{cases} \quad (3)$$

其中: $q_{start}$ 、 $q_{end}$ 、 $s_{start}$ 和 $s_{end}$ 分别代表本次规划中候选路径起点的横向偏移量、终点的横向偏移量、起点对应的弧长和终点对应的弧长。为了求解式(3)中的系数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ ,本文采用文献[14]中的边界条件的方法进行计算。如图2(b)所示,不同的候选路径,对应的 $q_{end}$ 不同,因此,为了获取多条候选路径,本文设置 $N$ 个不同的 $q_{end}$ 值,分别计算得到 $N$ 组 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 的系数,以此构造出 $N$ 个式(3)的方程式。由于一个式(3)的方程式表示一条候选路径,则通过不同 $q_{end}$ 值可以计算出多条候选路径。因为候选路径是在 $s$ - $q$ 坐标系中计算得到的,而道路和障碍物信息一般都是基于笛卡尔坐标,因此本文采用文献[14]和[17]描述的坐标转换方法,并结合四阶龙格库塔法求解微分方程<sup>[18]</sup>,实现将候选路径上的点从 $s$ - $q$ 坐标系到笛卡尔坐标系的转换。



### 1.3 最优路径的选择

在获取多条候选路径之后,需要从多条路径中选出一条最优路径,使规划车辆能够安全、平滑地绕过障碍物。本文提出一种新的代价函数法,通过代价函数的最小化来实现最优路径的选择。考虑到驾驶时的安全性和舒适性,本文从安全、平滑和连续这三个方面来设计代价函数,因此,本文提出的代价函数 $f(i)$ 包含三个部分,如式(4)所示:

$$f(i) = w_{\text{saf}} f_{\text{saf}}(i) + w_{\text{smo}} f_{\text{smo}}(i) + w_{\text{coh}} f_{\text{coh}}(i) \quad (4)$$

其中: $i$ 是候选路径标号, $f_{\text{saf}}$ 、 $f_{\text{smo}}$ 和 $f_{\text{coh}}$ 分别是安全性代价函数、平滑性代价函数和连贯性代价函数; $w_{\text{saf}}$ 、 $w_{\text{smo}}$ 、 $w_{\text{coh}}$ 分别是这三个代价函数所占的权重,这三个权重决定车辆的驾驶风格。本文中这3个权重依据经验分别取0.6、0.2和0.2。

#### 1.3.1 路径安全性代价函数

安全性是自动驾驶的最重要的因素。障碍物、车道线、道路边缘是安全性的潜在影响因素。由于任何平面几何形状都能被其外接圆包围,因此本文用外接圆作为描述障碍物的数学模型。

为了避开障碍物和道路边缘,必须找到并舍弃与障碍物或车道边缘交叉的候选路径。本文将圆心到候选路径的最小距离与圆半径进行比较来确定该候选路径是否与障碍物碰撞。图3(a)给出了一种在单车道上碰撞检测的示例图,其碰撞检测结果用 $R$ 来表示,候选路径用 $r_i$ 表示,其中 $i$ 为序号。如果路径跨越障碍物或车道边缘, $R = 1$ ;否则 $R = 0$ 。

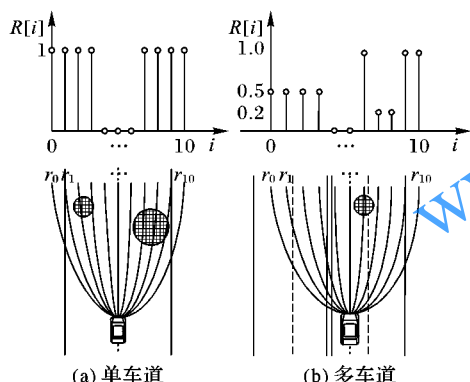


Fig. 3 Schematic diagram of collision detection result

在单车道的碰撞检测中,本文提出了一种加权碰撞检测的方法,如图3(b)所示。如果某候选路径穿过障碍物或道路边缘,则 $R = 1$ ;越过对向车道线,则 $R = 0.5$ ;穿过同向车道线,则 $R = 0.2$ ;在本车道上不穿越任何障碍物,则 $R = 0$ ;如果某候选路径穿过多个种类的车道、道路边缘或障碍物,则 $R$ 为它所涉及到的碰撞检测中的最高值。

如果只考虑碰撞检测,图3(a)中 $r_6$ 和图3(b)中 $r_5$ 都是非碰撞路径,然而这两条候选路径离障碍物的距离太近,如果选择这两条路径,驾驶时稍有不慎车辆就会与障碍物相撞。所以只依靠碰撞检测来选择最优路径无法保证行车的安全性。候选路径和障碍物之间的距离是评估一条路径是否安全的有效方法,但是当障碍物或者候选路径很多时计算量会很大,实时性不高。为了保证安全性和实时性,本文用离散的高斯卷积结合碰撞检测的方法来定义每条候选路径的碰撞风险,如式(5)所示:

$$f_{\text{saf}}(i) = \sum_{k=-N}^N g_i[k] R[k+i] \quad (5)$$

其中: $f_{\text{saf}}(i)$ 定义为候选路径 $r_i$ 的安全性代价函数; $g_i[k]$ 是

离散高斯函数,如式(6)所示。

$$g_i[k] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(k-i)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

其中: $\sigma$ 是碰撞风险标准差,决定碰撞检测的有效范围,本文实验中 $\sigma = 2$ 。

候选路径的离散高斯卷积过程如图4(a)、(c)所示。如果 $i$ 超出候选路径索引标号的范围则定义碰撞检测结果 $R[i] = 1$ 。图4(b)、(d)分别代表单车道和多车道的碰撞风险值结果。图4(a)表明 $r_6$ 是一条碰撞检测最小的路径,但碰撞风险分布即图4(b)却说明 $r_6$ 的风险值不是最低的,即 $r_6$ 不是最安全的路径,因为它过于接近障碍物。同理,对于多车道,路径的碰撞风险分布如图4(d)所示,它说明虽然 $r_5$ 是碰撞检测最小的路径,但同时它离障碍物距离过近,最优路径是 $r_8$ 。

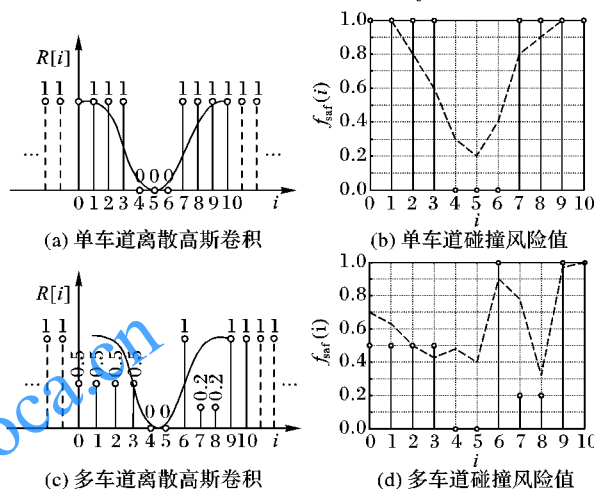


图4 单车道与多车道碰撞风险示意图

Fig. 4 Collision risk of single lane and multiple lanes

#### 1.3.2 路径平滑性代价函数

行驶过程中,不平滑的路径可能会引起车轮打滑,影响驾驶的安全性和舒适性,因此平滑性也是路径选择中必须要考虑的一个因素。由于路径的平滑性与路径的曲率直接相关,所以本文利用曲率的平方在路径上的积分作为平滑性代价函数,如式(7)所示。其中 $f_{\text{smo}}(i)$ 代表第 $i$ 条路径的平滑性代价函数, $K_i(s)$ 是第 $i$ 条路径上弧长为 $s$ 位置的点的曲率,积分的上下限为该候选路径的弧长 $s$ 的起点和终点。

$$f_{\text{smo}}(i) = \int K_i^2(s) ds \quad (7)$$

图5为考虑安全性和平滑性的代价函数曲线图。图5(a)是只考虑安全性的代价函数曲线图,其代价最小值出现在 $i = 10$ 的地方,该路径的弯度较大,平滑性较差,如图5(d)中 $r_{10}$ 所示。图5(b)是只考虑平滑性的代价函数曲线图,其代价最小值出现在 $i = 13$ 的地方,该路径较 $r_{10}$ 平滑,但是相对远离车道中心线,如图5(d)中 $r_{13}$ 所示。图5(c)为综合考虑安全性和平滑性的代价函数曲线图,其代价最小值为候选路径 $r_{11}$ ,如图5(d)中所示。很明显, $r_{11}$ 相比 $r_{10}$ 和 $r_{13}$ ,权衡了安全性和平滑性因素,更合适作为最优路径。

#### 1.3.3 路径连贯性代价函数

安全性和平滑性只考虑了本次规划所涉及到的信息,但是没有考虑多次规划的连续性问题,无法保证本次规划的路径与上次规划的路径没有出现突变。如果本次规划路径与上次规划路径的距离太远,则会出现路径的突然转向,不仅影响驾驶的舒适度,严重情况下甚至会使车身出现较大的侧倾,存





在安全隐患。为了解决这个问题,必须考虑上次选择的最优路径对本次路径选择的影响,因此,本文利用当前候选路径与上次选择路径之间的距离的积分来计算路径的连贯性代价函数,如式(8)所示:

$$f_{\text{coh}}(i) = \frac{1}{s_2 - s_1} \int_{s_1}^{s_2} d_i \, ds \quad (8)$$

其中: $s_1$  和  $s_2$  分别是当前候选路径与上次选择路径在基准线重叠部分的起点和终点; $d_i$  是本次规划的第  $i$  条候选路径上的点到上次选择路径上相同弧长的点的欧氏距离<sup>[19]</sup>。

图6为连贯性代价函数对路径选择的影响。图6(a)和图6(d)中 $r_6$ 显示了不考虑连贯性的代价函数和路径选择结果,其选择的路径偏离了上次规划的最优路径 $r_6$ ;图6(b)是仅考虑连贯性的代价函数;图6(c)为综合考虑安全性、平滑性和连贯性的代价函数,其选择结果如图6(d)中的 $r_7$ 所示。可以看出,考虑了连贯性的本次规划的选择路径 $r_7$ 相对未考虑连贯性的选择路径 $r_6$ 更接近上次规划的最优路径 $r_6$ ,因此考虑连贯性因素后,车辆行驶过程中没有了路径的突然改变,加强了行驶的安全性和舒适性。

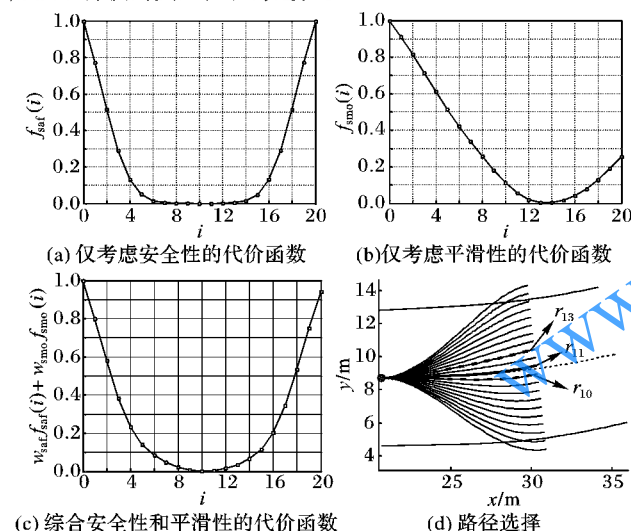


图5 考虑安全性和平滑性的代价函数和路径选择示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of cost function and path selection with considering security and smoothness

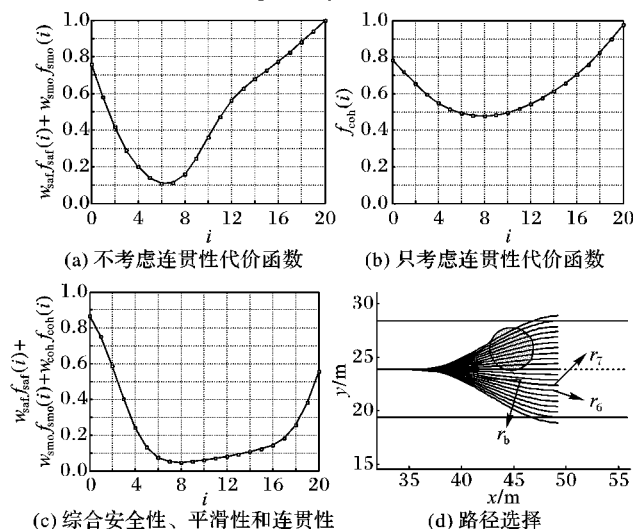


图6 考虑连贯性的代价函数和路径选择示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of cost function and path selection with considering coherence

## 2 实验结果和分析

为了验证本文算法的有效性,本文分别在单车道和多车道上进行避障实验。本文实验分为两部分:第一部分采用多种复杂地形的单车道来验证算法的性能;第二部分通过模拟与单车道相同路段的多车道,对比测试算法在多车道上的性能。由于实际复杂地形场景地图较难获取,因此本文通过Matlab软件仿真进行实验,其中地图数据人工预先定义。图7和图8为实验结果,两边黑色实线、黑色长虚线、黑色点虚线和黑色均匀曲线分别表示车道边界、同方向车道线、基准线以及候选路径,路中黑色粗实线表示车辆行驶轨迹,空心圆表示障碍物,黑色实心圆表示车辆当前位置。

### 2.1 复杂地形的单车道避障

有连续多个障碍物的直道、“S”弯道和环岛是生活中常见且具有挑战性的几种车道类型,即使是人类驾驶员也不能大意,因此本文将这几类车道作为实验对象进行测试。

#### 2.1.1 有连续多个障碍物的单车道直道

图7(a)(d)为本文方法在有连续多个障碍物的直道上测试的结果:图7(a)为车辆在绕过第一个障碍物的时刻,从图7(a)中可以看出,车辆选择了障碍物上边的一条安全且又平滑的路径;图7(d)为车辆通过整段模拟道路的轨迹。从轨迹中可以看出,本文算法能够规划出一条有效的路径,安全地绕过连续多个障碍物并回到基准线上,而且路径平滑连续,车辆不需要急转向,满足驾驶安全和舒适的要求。

#### 2.1.2 有多个障碍物的单车道“S”弯道

图7(b)(e)为本文方法在“S”弯道路段的测试结果:其中:图7(b)为规划车辆在避开第一个弯道上两个连续障碍物的时刻,车辆选择了一条居中的较平滑的路径;图7(e)为通过包含一个障碍物的第二个弯道的时刻。障碍物在道路正中间,车辆可以选择从障碍物两侧通过,但是由于平滑性的限制,选择下方的路径需要车辆更多的转向控制,因此本文方法选择了靠上的路径作为最优路径,此路径安全且平滑。

#### 2.1.3 有多个障碍物的单车道环岛路

图7(c)(f)是车辆在单车道环岛路上行驶的实验结果。图7(c)表明,当车辆开始进入环状路时(此时无障碍物),它没有选择车道基准线而是选择距基准线不远的偏环状路内侧的路径作为最优路径,这是因为靠内侧的路径相比基准线更平滑且足够安全供车辆行驶;图7(f)显示了车辆在环状路内避开两个连续障碍物的情况,如图所示,虽然两个障碍物相距很近,但是本文的算法可以产生一条平滑且安全的路线使车辆能成功绕过障碍物。

### 2.2 复杂地形的多车道避障

乡村和郊区的道路以单车道道路为主,但是城市里和高速上道路主要是多车道道路,因此,本文采用具有与单车道相同路况(障碍物位置相同)的多车道(两条同向车道和两条对向车道)来验证本文方法的有效性。

#### 2.2.1 有连续多个障碍物的多车道直道

图8(a)(d)为在有多连续障碍物的多车道直道上的规划结果。从图8(a)可以看出,当车辆遇到障碍物时,基于多车道安全性的代价函数规则,会优先选择当前车道内的最优路径,但是当前车道有危险时,算法优先选择了同向车道的一条最优路径,这与图7(a)选择的最优路径有区别,这是因为应用于多车道的碰撞检测规则不同;图8(d)为车辆绕过最后



障碍物时刻结果图,由于障碍物占据了同向两条车道,所以算法选择一条跨越对向车道路径作为最优路径。当遇到障碍物时,车辆能够成功避开障碍物。基于平滑性规则,车辆会逐渐回到原车道中,没有急转向的突变轨迹。

### 2.2.2 有多个障碍物的多车道“S”弯道

如图8(b)(e)为多车道“S”弯道的测试结果,其中图8(b)与图7(b)类似,车辆为避开两个相距很近的障碍物选择了一条居中的平滑路径。图8(e)与图7(e)显示了两种不同的选择结果,虽然图8(e)中障碍物上边的候选路径有较小的平滑性代价函数,但是如果从上边避开障碍物,车辆将越过对向车道线。由于对向车道线的代价比同向车道线高,此时总的代价函数是由安全性代价函数主导,所以最终选择了障碍物下边的一条安全且平滑的路径。虽然多车道与单车道规

划结果不同,但是本文的算法都能根据实际情况很好地应用在各种不同车道上。

### 2.2.3 有多个障碍物的多车道环岛路

图8(c)(f)是本文算法在多车道环岛路上的实验结果。其中图8(c)结果与7(c)类似,当车辆开始进入环岛路时,它选择了偏环岛路内侧更平滑的、且属于当前车道的路径作为最优路径;图8(f)为车辆在多车道环状路内避开两个连续障碍物的时刻,可以看出,此次规划与图7(f)不同,这是因为在多条候选路径中,考虑到不同车道线的代价因素,算法优先选择了同向安全的车道。

由以上对比实验结果可见,本文方法不管是对于乡村中单车道道路还是城市中多车道道路,以及各种复杂地形的道路,都能规划出一条安全、平滑的路径,有效地避开障碍物。

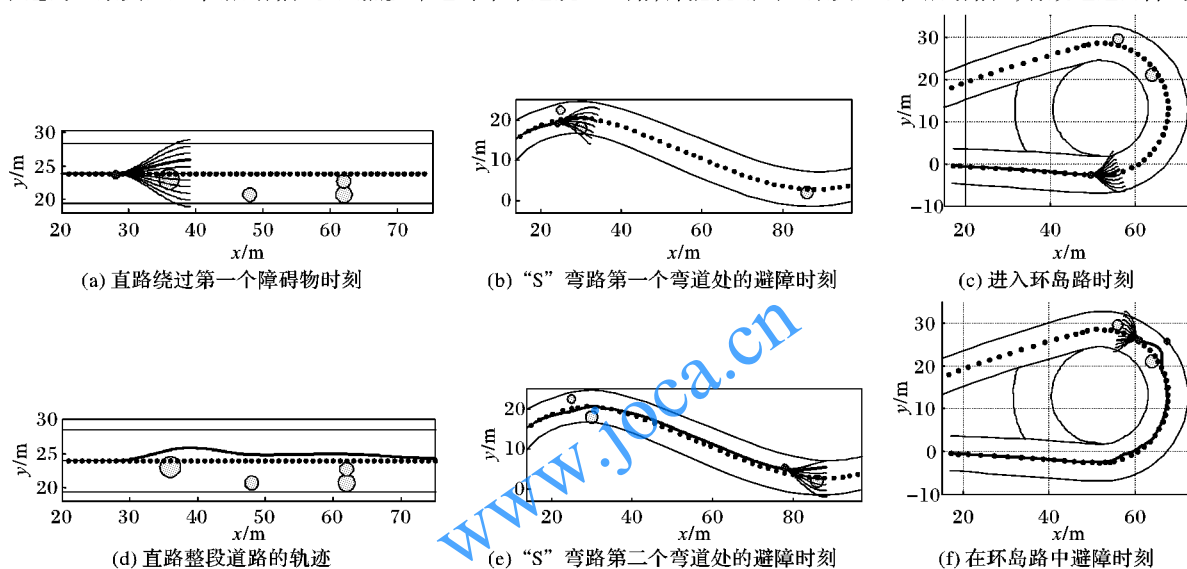


图7 复杂地形的单车道避障规划结果

Fig. 7 Results of single-lane obstacle avoidance planning under complex terrain

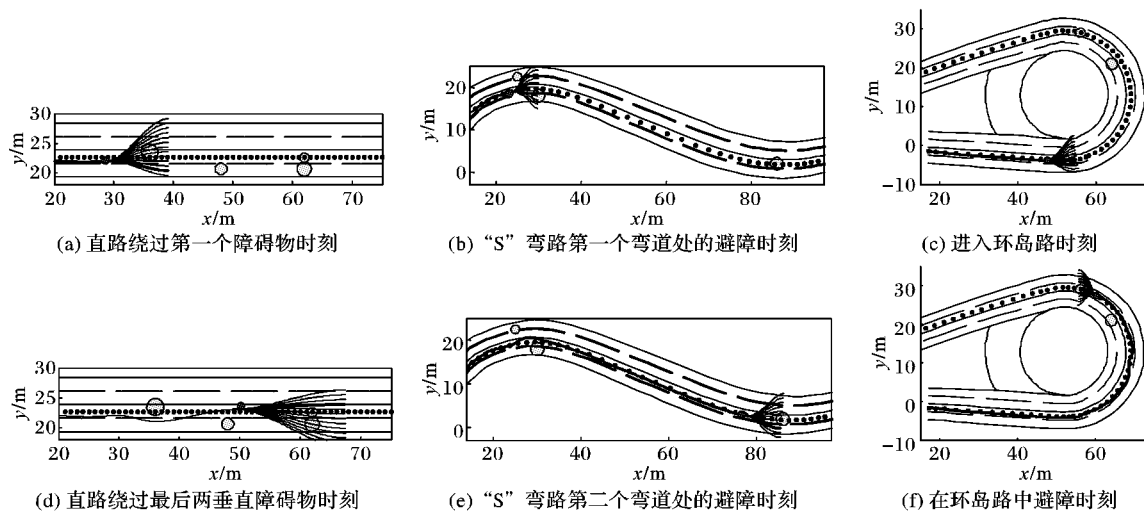


图8 复杂地形的多车道避障规划结果

Fig. 8 Results of multi-lane obstacle avoidance planning under complex terrain

## 2.3 运行时间

本文实验硬件平台为 Intel Core i5-450M CPU (双核, 2.4 GHz), 4 GB 内存; 规划路径的产生基于 Visual Studio 2010 平台, 道路信息和车辆行驶控制通过 Matlab 2009b 模拟仿真进行。由实验可知, 本文算法在基准线产生和路径选择的平

均时间分别为 3 ms 和 4 ms; 而路径产生阶段由于要产生多条候选路径, 因此耗时较长, 平均时间 47 ms。所以每次规划总的平均时间为 54 ms, 即相当于 1 s 内能进行约 20 次规划。由于本文设定车辆每行驶 1 m 重新规划一次, 因此本文方法能满足约 20 m/s (72 km/h) 的车辆行驶速度。鉴于车辆在避障



时的速度一般低于 50 km/h, 因此本文的方法完全能满足动态路径规划的实时性要求。

### 3 结语

本文提出了一种新的面向自动驾驶的动态路径规划的方法。该方法首先利用地图信息产生道路基准线, 然后依据障碍物的位置和车辆的横向偏移等信息, 在  $s-q$  坐标系下产生一簇候选路径; 在路径选择阶段, 本文综合考虑安全性、平滑性和连续性因素, 设计了一种新的代价函数, 利用代价函数的最小化来选择最优路径。本文在多种复杂地形道路中进行测试, 实验结果表明本文方法不管是对于单车道道路还是多车道道路, 都能够规划出一条安全、平滑的路径, 引导规划车辆有效、实时地避开道路中的各个障碍物。

由于本文方法中只考虑了路径规划中的静态障碍物避障问题, 并没有涉及到动态障碍物, 因此, 未来的工作将集中在动态障碍物的避障问题。

### 参考文献 (References)

- [1] 刘小洋, 伍民友. 车联网: 物联网在城市交通网络中的应用[J]. 计算机应用, 2012, 32(4): 900-904. (LIU X Y, WU M Y. A vehicular CPS: an application of IoT in vehicular networks [J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(4): 900-904.)
- [2] 陈荣武, 刘莉, 诸昌铃. 基于 CBTC 的列车自动驾驶控制算法[J]. 计算机应用, 2007, 27(11): 2649-2651. (CHEN R W, LIU L, ZHU C Q. Automatic train operation and its control algorithm based on CBTC [J]. Journal of Computer Applications, 2007, 27(11): 2649-2651.)
- [3] 于建志, 陈永生. 磁浮列车自动驾驶系统控制策略及可靠性研究[J]. 计算机应用, 2010, 30(12): 3419-3422. (YU J Z, CHEN Y S. Control strategy and reliability study of maglev automatic train operation system [J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(12): 3419-3422.)
- [4] GARROTE L, PREMEBIDA C, SILVA M, et al. An RRT-based navigation approach for mobile robots and automated vehicles [C]// INDIN 2014: Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 326-331.
- [5] 周明秀, 程科, 汪正霞. 动态路径规划中的改进蚁群算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(1): 314-316. (ZHOU M X, CHENG K, WANG Z X. Improved ant colony algorithm with planning of dynamic path [J]. Computer Science, 2013, 40(1): 314-316.)
- [6] 罗元, 邵帅, 张毅. 基于信息融合的移动机器人定位与路径规划[J]. 计算机应用, 2010, 30(11): 3091-3093. (LUO Y, SHAO S, ZHANG Y. Location and path planning of mobile robots based on data fusion [J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(11): 3091-3093.)
- [7] ZHANG S, DENG W, ZHAO Q, et al. Dynamic trajectory planning for vehicle autonomous driving [C]// SMC '13: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2013: 4161-4166.
- [8] 王永兴, 丁睿, 姚林泉. 移动机器人全局路径规划的盲人摸路算法[J]. 计算机仿真, 2010, 27(5): 157-161. (WANG Y X, DING R, YAO L Q. The blind groping algorithm: global path planning for mobile robot [J]. Computer Simulation, 2010, 27(5): 157-161.)
- [9] XU W, PAN J, WEI J, et al. Motion planning under uncertainty for on-road autonomous driving [C]// ICRA 2014: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 2507-2512.
- [10] KOREN Y, BORENSTEIN J. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation [C]// Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 1991, 2: 1398-1404.
- [11] HART P E, NILSSON N J, RAPHAEL B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths [J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 4(2): 100-107.
- [12] STENTZ A. Optimal and efficient path planning for partially known environments [C]// Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 1994: 3310-3317.
- [13] WERLING M, ZIEGLER J, KAMMEL S, et al. Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a Frenét frame [C]// ICRA 2010: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 987-993.
- [14] CHU K, LEE M, SUNWOO M. Local path planning for off-road autonomous driving with avoidance of static obstacles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(4): 1599-1616.
- [15] BAGIROV A M. Numerical methods for minimizing quasidifferentiable functions: a survey and comparison [M]// Quasidifferentiability and Related Topics. Berlin: Springer-Verlag, 2000: 33-71.
- [16] SANDE H V, HENROTTE F, HAMEYER K. The Newton-Raphson method for solving non-linear and anisotropic time-harmonic problems [J]. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2004, 23(4): 950-958.
- [17] AMBRÓSIO J A C, GONÇALVES J P C. Complex flexible multi-body systems with application to vehicle dynamics [J]. Multibody System Dynamics, 2001, 6(2): 163-182.
- [18] FAMELIS I Th, TSITOURAS Ch. On modifications of Runge-Kutta-Nyström methods for solving  $y(4) = f(x, y)$  [J]. Applied Mathematics and Computation, 2016, 273: 726-734.
- [19] HUANG H-X, LIANG Z-A, PARDALOS P M. Some properties for the Euclidean distance matrix and positive semidefinite matrix completion problems [J]. Journal of Global Optimization, 2002, 25(1): 3-21.

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (41401525), the Natural Science Foundation of Guangdong Province (2014A030313209), the Student's Platform for Innovation and Entrepreneurship Training Program of Hubei Province (201410512030).

**ZHOU Huizi**, born in 1995. Her research interests include dynamic path planning.

**HU Xuemin**, born in 1985, Ph. D., lecturer. His research interests include computer vision, dynamic path planning.

**CHEN Long**, born in 1985, Ph. D., lecturer. His research interests include stereo vision, autonomous driving.

**TIAN Mei**, born in 1995. Her research interests include dynamic path planning.

**XIONG Dou**, born in 1995. Her research interests include automatic control.