

## 基于车辆稳态动力学特性的汽车动态轨迹规划\*

孙浩 张素民

(吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 针对高动态环境下驾驶辅助系统(ADAS)的轨迹规划问题,提出基于车辆稳态动力学特性的动态轨迹规划算法。该算法在交通车轨迹预估基础上建立搜索空间,利用车辆稳态动力学模型作为轨迹发生器,在搜索空间中对轨迹发生器产生的轨迹进行评价,根据驾驶意图和优化条件选择最优轨迹。采用基于最优加速度预瞄理论的轨迹跟踪算法,建立了七自由度车辆动力学模型,并在Simulink环境下搭建仿真平台,进行超车仿真实验。实验结果表明该算法可行、有效。

**关键词:** 驾驶辅助系统; 动态轨迹规划; 车辆动力学; 轨迹决策; 轨迹跟踪

**中图分类号:** U461.99 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)06-0171-06

## Dynamic trajectory planning based on vehicle steady dynamics

SUN Hao, ZHANG Sumin

(State Key Laboratory of Automobile Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A dynamic trajectory planning algorithm based on vehicle steady-state dynamics for driver assistance systems (ADAS) under high dynamic environment is proposed. The algorithm built a search space on the basis of traffic vehicle trajectory prediction and used the vehicle steady-state kinetic model as a trajectory generator. Every trajectory produced by the generator was evaluated in the search space and the optimal trajectory under optimal conditions was selected. In order to realize the closed-loop dynamic simulation, the corresponded trajectory tracking algorithms and vehicle dynamics model were also proposed. A simulation platform under Simulink environment was built for simulation tests. The results show that in the intelligent overtaking test case, the proposed algorithm is able to overtake safely and to meet the needs of intelligent assistance systems.

**Key words:** ADAS; dynamic trajectory planning; vehicle dynamics; trajectory decision making; trajectory tracking

汽车轨迹规划技术是实现汽车智能辅助系统的关键技术之一,具有重要的研究价值和意义。汽车轨迹规划的目的是找到一条从初始点到目标点的安全轨迹,并满足所有约束条件<sup>[1]</sup>。从轨迹规划的角度来看,汽车属于轮式机器人的一种,因此机器人领域的轨迹规划方法具有一定的借鉴意义。但是,与移动机器人相比,汽车轨迹规划问题具有很多不同。第一,汽车行车环境的主要参与物是车辆,速度较高,所以汽车轨迹规划是在高动态环境下的动态规划,并且每个规划周期的终点状态无法预知。第二,汽车行车环境多为结构化环境,车道线与道路边界线均为汽车轨迹规划的约束。第三,汽车转向几何关系必须满足Ackerman转向约束,使得汽车本身为非完整约束系统,且由于汽车速度较高,车辆动力学特性对轨迹规划产生的影响也不可忽视。第四,汽车作为交通参与物的组成部分,规划轨迹必须满足交通法规的要求。

文献[2]提出一种自由环境下车辆轨迹规划算法,但没有讨论结构化环境中轨迹规划问题。文献[3]对非完整机器人轨迹规划问题进行了系统研究,提出多种解决方法。文献[1]中用多项式表达汽车轨迹,考虑了车辆运动学和动力学约束,但对终点状态未知的轨迹规划没有讨论。文献[4]考虑车辆纵向动力学,并沿指定路径进行轨迹规划与决策。文献[5]对不同优化条件下的轨迹规划方法进行了总结。以上研究均取得了不错的研究成果,但是较少同时考虑汽车横向动力学以及规划过程交通车状态的变化。并且大多假定终点状态已知,这与实际情况不相符。

本文在已有研究基础之上,结合实际情况,提出一种基于车辆稳态动力学的汽车动态轨迹规划方法。

\* 收稿日期: 2013-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175215)

作者简介: 孙浩(1988—),男,山东聊城人,博士研究生, E-mail: sunhao0913@gmail.com;

张素民(通信作者),男,讲师,博士, E-mail: suminzhang@163.com

## 1 整体方案描述

本文介绍的轨迹规划方法采用“模块化”设计思想,根据功能进行模块划分和设计,如图1所示。“汽车行驶环境模块”包含道路信息,如车道宽度、车道数目、路面附着系统。“交通车辆模块”预估交通车状态。“轨迹规划模块”在每次规划周期开始时获得当前时刻下的主车以及相关交通信息并进行轨迹规划。“轨迹跟随控制模块”接受规划轨迹并产生方向盘转角、油门开度、制动踏板角度等控制信号。“车辆动力学模块”接受控制信号后产生相应的响应,即实际轨迹;主车状态在规划周期开始时实时更新。

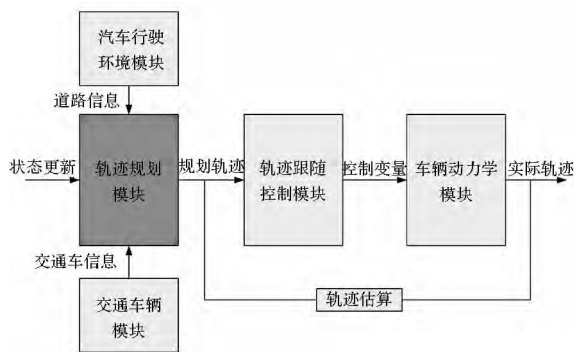


图1 功能流程图

Fig. 1 Functional flowchart

轨迹规划模块是本文研究内容的核心,为了更加逼近真实应用以及更好地进行算法调试、升级,轨迹规划也分成若干子系统,如图2所示。“传感器”模块感知交通车、道路信息并将其转换到规划时刻以主车质心为坐标原点的车体坐标系下,并将感兴趣信息传递到需要模块。“轨迹生成”模块根据主车当前状态和稳态动力学模型产生待决策轨迹簇。“驾驶意图”模块将驾驶员输入的意图传给“轨迹决策”模块。“轨迹决策”模块根据传感信息建立搜索空间,并结合驾驶员意图从待决策轨迹簇中决策出最优轨迹。

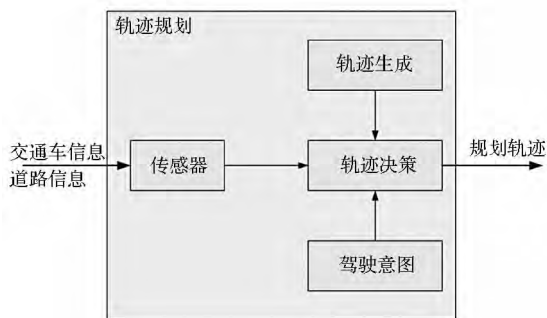


图2 轨迹规划模块

Fig. 2 Trajectory planning block

## 2 车辆动态轨迹规划

### 2.1 交通车轨迹预估以及搜索空间建立

对汽车行驶交通环境中交通参与物位置和运动状态的估计是进行汽车轨迹规划的前提,也是保障汽车安全行驶的关键。交通车的动力学可用下式表达:

$$\dot{x} = f(x(t), \mu(t)) \quad (1)$$

上式中  $x$  是状态变量,  $\mu$  为交通车的连续输入,所以在  $t = r$  时刻下,车辆状态为

$$x(r) = x(0) + \int_0^r f(x(\tau), \mu(\tau)) d\tau \quad (2)$$

虽然通过适当传感可以获取交通车当前时刻的初始状态值  $x(0)$ ,且状态方程  $f(x(t), \mu(t))$  也可通过经验获得,但状态方程的输入  $u(t) \in U$  ( $U$  为外界输入集合)无法确定,所以未来的行驶轨迹并不确定,因此估算交通车的行驶轨迹只有概率和统计上的意义。然而在实际情况下,大多数车在大多数时候遵循基本的交通行驶模式,因此本文中合理地假定交通车保持当前状态(速度和方向)不变,并在此前提下对其未来轨迹进行估算,如式(3)。很显然轨迹估算的周期越短,该假设也就越合理。

$$x(r) = x(0) + \int_0^r f(x(\tau), \rho) d\tau \quad (3)$$

基于此假设进行交通车轨迹预估,如图3所示,以主车规划时刻质心为坐标原点,主车行驶方向为  $x$  轴的笛卡尔坐标系下,进行交通车轨迹预估。交通车的轨迹估算基于简单的物体运动模型

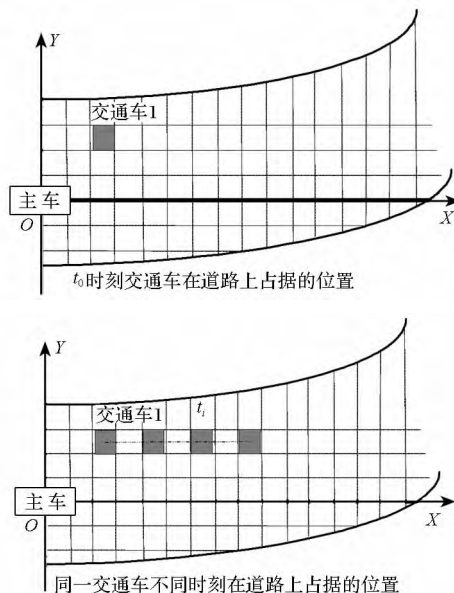


图3 交通车轨迹预估示意图

Fig. 3 Illustration of traffic vehicle trajectory prediction

获得。首先,通过“采样”将不同时刻交通车的位置投影到道路网格中。则未来任意时刻交通车在该坐标系下的坐标均可以由式(4)确定。式(4)得出该交通车在未来任意时刻所占据的空间位置。

$$\begin{cases} x_{ti} = x_{i0} + v_{ix} \times t_i \\ y_{ti} = y_{i0} + v_{iy} \times t_i \end{cases} \quad (4)$$

同理,可以将所有感兴趣交通车未来任意时刻的位置投影到该坐标系下,如图4,所有预估轨迹共同组成同时包含“时间”与“空间”信息的主车轨迹规划搜索空间。通过这样的方式,在一个规划周期内,将动态环境的时间变量转化为静态环境的空间变量。

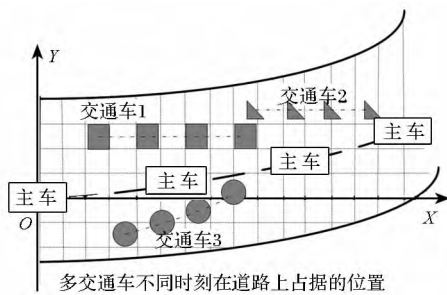


图4 安全轨迹示意图

Fig. 4 Illustration of safe trajectory

对于规划轨迹  $L$ ,若任意时刻、任意交通车,均有

$$H^L(t_i) \cap T_j(t_i) = O \quad (5)$$

则轨迹  $L$  为安全轨迹,其中  $H^L(t_i)$  与  $T_j(t_i)$  分别为主车和交通车  $j$  在  $t_i$  占据空间的集合。所有安全轨迹组成待决策轨迹簇,根据优化条件决策出最优轨迹。

## 2.2 基于车辆稳态转向特性的轨迹描述及验证

### 2.2.1 车辆稳态转向模型

基于精确和高效相结合原则,本文采用稳态车辆运动学解析表达式的方法表达车辆的行驶轨迹簇。根据文献[6]中的二自由度车辆稳态转向模型得到车辆稳态横摆角速度:

$$\omega_r = \frac{u\delta}{L(1 + Ku^2)} \quad (6)$$

其中

$$K = \frac{m}{L^2} \left( \frac{a}{k_2} - \frac{b}{k_1} \right) \quad (7)$$

其中:  $m$  为主车质量  $L$  为主车轴距  $a$  为主车质心距前轴的距离  $b$  为主车质心距后轴的距离  $k_1$  为前轮侧偏刚度  $k_2$  为后轮侧偏刚度  $\mu$  为主车沿车体  $x$  轴方向速度分量  $\delta$  为前轮转角。

汽车稳态转向圆周运动半径为:

$$R = \frac{u}{\omega_r} \quad (8)$$

若车辆初始位置为  $X_0, Y_0, \theta_0$ ,那么在  $t$  时刻后,车辆的状态可以解析地表达为:

$$X_t = X_0 + u \frac{L(1 + Ku^2)}{u\delta} \cos\left(\frac{u\delta}{L(1 + Ku^2)}t\right) \quad (9)$$

$$Y_t = Y_0 \pm u \frac{L(1 + Ku^2)}{u\delta} \left\{ 1 - \sin\left[\frac{u\delta}{L(1 + Ku^2)}t\right] \right\} \quad (10)$$

$$\theta_t = \theta_0 \pm \frac{u\delta}{L(1 + Ku^2)}t \quad (11)$$

该解析表达式表达的是汽车在给定速度下,对应于不同的转角输入其运动学的响应,可以较为准确地反映车辆的运动轨迹,而且数值计算效率高、实时性好。

### 2.2.2 模型参数识别

稳态动力学模型存在参数  $k_1, k_2$ ,在实车以及主流动力学模型中  $k_1, k_2$  不仅仅是前轮、后轮的侧偏刚度,通常无法直接给出,需要经过参数识别得出。本文利用 Carsim 稳态转向实验数据,通过最小二乘辨识方法获得。

$$v_{err}(k_1, k_2) = \sum (f(u, \delta, k_1, k_2) - f_{carsim})^2 \quad (12)$$

$$\omega_{err}(k_1, k_2) = \sum (g(u, \delta, k_1, k_2) - g_{carsim})^2 \quad (13)$$

其中  $f_{carsim}, g_{carsim}$  为 Carsim 模型实验数据,  $f(u, \delta, k_1, k_2), g(u, \delta, k_1, k_2)$  为文献[6]稳态转向公式。分别对  $k_1, k_2$  求偏导,如式(14)(15)。

$$\frac{\partial v_{err}}{\partial k_1} = \frac{\partial v_{err}}{\partial k_2} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial \omega_{err}}{\partial k_1} = \frac{\partial \omega_{err}}{\partial k_2} = 0 \quad (15)$$

式(14)得到侧向速度  $v_y$  辨识结果,式(15)得到横摆角速度  $\omega$  辨识结果。最终结果为:

$$k_1 = w_v k_1^v + w_\omega k_1^\omega \quad (16)$$

$$k_2 = w_v k_2^v + w_\omega k_2^\omega \quad (17)$$

其中  $w_v + w_\omega = 1$ 。由于  $v_y, \omega$  对轨迹均有较大影响,本文取  $w_v = w_\omega$ 。

### 2.2.3 模型验证

利用辨识参数,进行稳态动力学模型与 Carsim 模型对比。对比结果如图5、图6所示。

实验结果表明,在0.7s以前,稳态动力学模型与 Carsim 模型保持较高的一致性,满足轨迹规划的精度要求。

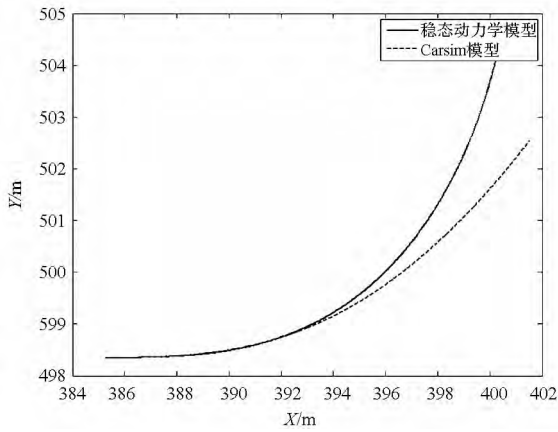


图 5 轨迹对比

Fig. 5 Contrast of trajectories

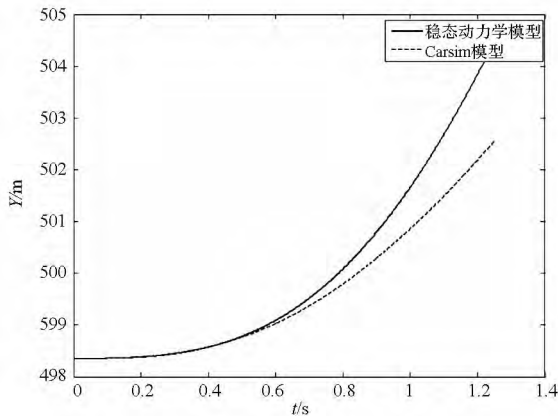


图 6 侧向位移对比

Fig. 6 Contrast of lateral displacement

### 2.3 驾驶员意图抽象

上述轨迹生成方法是对轨迹规划的微观表达,但是微观轨迹决策必须满足驾驶员命令,即上层任务。文献[8]提出分层决策的思想。基于其研究,本文提出利用驾驶员意图来表述汽车上层任务,来指导微观轨迹规划与决策。汽车行驶工况繁多,但通过对其分析可以抽象出汽车行驶行为的基本命令元素(见表1)通过不同命令元素的组合即可实现不同行驶工况。

表 1 驾驶员意图说明

Tab. 1 Illustration of driver intention

基本命令元素	命令元素解释
左换道	换入左侧相邻车道
右换道	换入右侧相邻车道
保持车道	保持在当前车道
超车	完成对相邻车道交通车超越

这样,在非交叉口工况下,许多复杂、多样的驾驶行为均可以分解为一系列基于基本驾驶模式下的行驶命令的组合。在智能辅助驾驶系统(如自动泊车

系统、自适应巡航系统)中,命令由驾驶员输入,辅助系统通过微观轨迹规划实现驾驶员命令。本文采用相同的方法,上层命令由驾驶员给出,下层接受上层的命令,通过轨迹规划实现驾驶员命令。

### 2.4 轨迹决策

本文微观轨迹决策利用滚动优化的方法来保证规划轨迹的最优性,即每个周期规划轨迹的时间长度 $t_p$ 大于汽车跟随轨迹的时间长度 $t_{trk}$ 。

规划轨迹时间长度 $t_p$ 越长,完整轨迹的跟踪难度越低且安全性越高;但若交通情况复杂,周围交通车较多,易找不到解,规划方法完备性不好。规划轨迹时间长度 $t_p$ 越短,规划方法完备性越好,局部最优性强,但对未来影响考虑不足,全局最优性差。另外,本文中 $t_p$ 大小还受限于稳态动力学模型描述轨迹精度。 $t_p$ 太大会导致规划轨迹与实际轨迹相比误差太大,是没有意义的。跟随轨迹时间长度 $t_{trk}$ 越长,进行轨迹跟踪时累计误差越大; $t_{trk}$ 越短,跟踪精度越高,但计算代价较大,实时性不好。

通常情况下,满足“不碰撞”要求的轨迹不唯一,需要另外的约束条件决策出最终轨迹。优化条件(约束条件)有很多,如:舒适性、操控稳定性、经济性、驾驶员意图等。在滚动优化框架下,不碰撞轨迹都是保守的。所以本文引入舒适性评价指标对满足安全性要求的多条轨迹进行决策。

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (w_{ax} a_x^2 + w_{ay} a_y^2) dt \quad (18)$$

其中 $t_0$ 、 $t_f$ 为规划初始和终止点时间, $a_x$ 、 $a_y$ 为主车质心在车体坐标下沿 $x$ 、 $y$ 轴的加速度。

本文以上述指标表征每条轨迹的舒适性。由于规划轨迹通过稳态动力学模型得出,所以每条轨迹在任意时刻的 $a_x$ 、 $a_y$ 都可以被计算得出,数据来源简单、可靠。在上述评价标准下,轨迹 $J$ 值越小,该轨迹舒适性越好。

## 3 Matlab/Simulink 环境仿真实验

本文在 Matlab/Simulink 环境下结合车辆轨迹跟随控制以及车辆动力学模型进行仿真实验。仿真场景选择常见的超车工况。超车工况同时包含本文提到的所有驾驶员意图:主车直线行驶(保持车道),遇到速度较慢的交通车后选择换入超车道(左换道),完成对交通车超越后换回原车道(右换道+超车)。

### 3.1 车辆轨迹跟随控制

轨迹跟随控制算法分为路径跟随控制部分与速度跟随控制部分。路径跟随控制算法的输入为规

划路径、规划纵向速度、当前车辆状态,输出为方向盘转角;速度跟随控制算法中,输入为规划路径、规划纵向速度、当前车辆状态,输出为油门踏板与制动踏板开度。基于文献[7]提出的“预瞄-跟随”理论,结合本文轨迹方法的特性,提出以距离单点预瞄加内模控制方法进行路径跟踪控制,以速度单点预瞄PID控制方法进行速度跟踪控制。

### 3.1.1 路径跟随控制

汽车的最优预瞄侧向加速度可由式(19)得出

$$a_y = \frac{2(F_e - v_y t)}{t^2} \quad (19)$$

其中,  $F_e$  为预瞄侧向距离,  $v_y$  为当前状态下汽车的横向速度,  $t$  为预瞄时间。

获得预瞄加速度后根据内模控制(IMC)<sup>[8]</sup>方法对最优方向盘转角进行估计。根据文献[6]二自由度车辆模型,可得方向盘转角与侧向加速度之间的传递函数为

$$\frac{a_y(s)}{\delta(s)} = v_x \frac{G_\beta \tau'^2 s^2 + (G_\beta + G_\gamma \tau_1) s + G_\gamma}{T_2 s^2 + T_1 s + 1} \quad (20)$$

其中,  $G_\beta$ 、 $\tau'$ 、 $G_\beta$ 、 $G_\gamma$ 、 $\tau_1$  与  $T_2$ 、 $T_1$  均是由车辆静态参数决定的系数。

根据式(20)的逆变换可以得逆二自由度模型传递函数。输入侧向加速度得到方向盘转角,进行汽车横向控制。

### 3.1.2 速度跟随控制

汽车最优预瞄纵向速度可由式(21)得出

$$a_x = \frac{prev_x - v_x}{t} \quad (21)$$

其中,  $prev_x$  为规划速度,  $v_x$  为当前状态下车辆纵向速度,  $t$  为预瞄时间。

由以上得到的最优纵向加速度  $a_x$ , 通过驾驶员参数中的PID参数设置,进行油门踏板或制动踏板进行控制。

## 3.2 车辆动力学模型

为了构成闭环仿真系统,需要动力学模型接受控制命令并产生“实际”轨迹,轨迹规划模块根据当前车辆状态与环境信息进行动态规划。传统商业动力学模型在调试、仿真中约束较大,所以本文中搭建七自由度汽车动力学模型进行仿真验证。该模型包含车体纵向、侧向、横摆自由度与四个车轮旋转自由度,满足本文仿真验证需求。所搭建动力学模型与Carsim进行对比。对比工况包括车速跟随对比(见图7)、正弦输入下横摆角速度对比(见图8)、制动工况对比(见图9)。由

仿真验证结果可以看出所建车辆模型能够与目标软件保持较好的一致性。

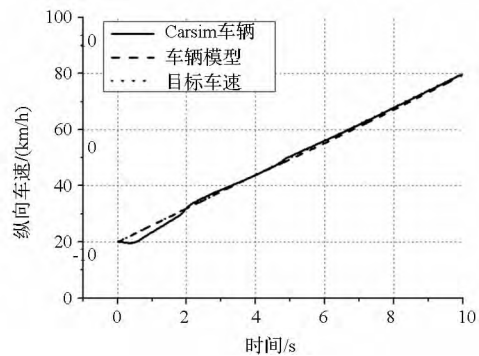


图7 车速跟随对比

Fig. 7 Contrast of velocity tracking

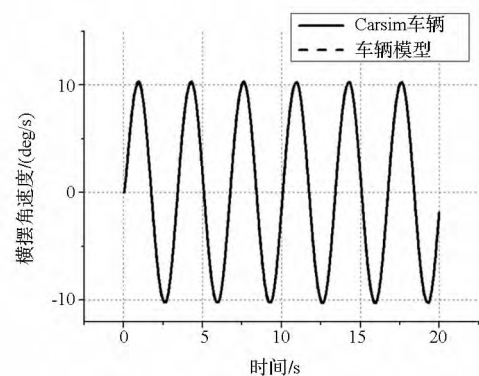


图8 正弦输入下横摆角速度对比

Fig. 8 Contrast of yaw rate under sine input

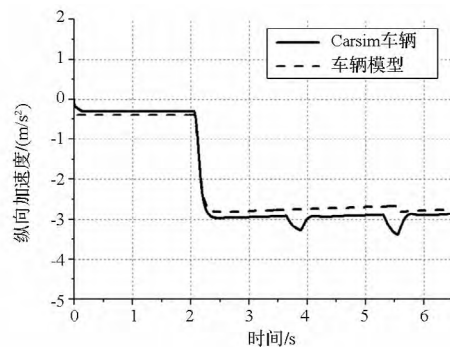


图9 制动工况对比

Fig. 9 Contrast of braking

## 3.3 仿真实验

### 3.3.1 仿真实例

在典型双车道道路上,主车在右车道以50km/h匀速前进,主车前方有速度低于主车车速的交通车行驶,在该工况下进行仿真。

从效率角度出发,该种情况下一般选择对前方慢速交通车超越,这样,主车命令为“右车道直行”、“换入左车道”、“超车”、“换入右车道”、“右车道直行”。

### 3.3.2 仿真结果

图10为某周期动态规划轨迹与实际轨迹对

比图。轨迹规划开始时,生成“轨迹簇”如上图所示,根据优化条件,选择出最优轨迹(点划线)。从图 10 也可以看出,规划轨迹和实际轨迹之间存在一定误差。

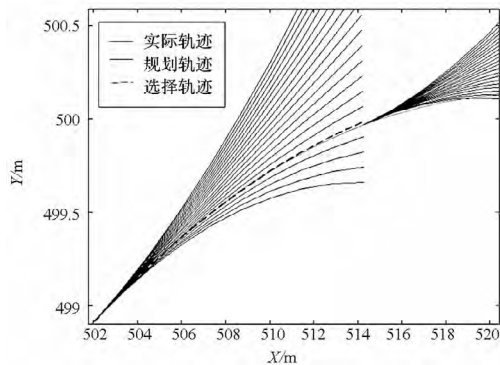


图 10 单周期动态轨迹规划

Fig.10 Dynamic trajectory planning in one step

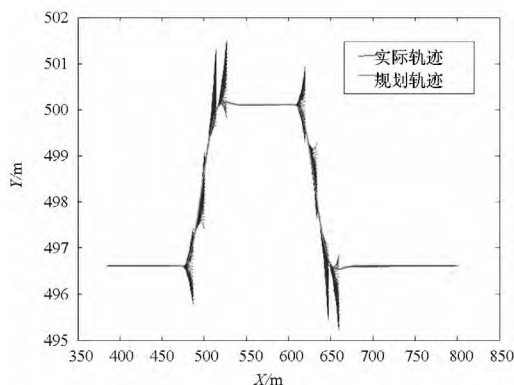


图 11 动态规划轨迹以及完整规划轨迹

Fig. 11 Dynamic planned trajectory and the complete planned trajectory

图 11 为完整规划轨迹与实际跟随轨迹对比。图 11 从整体上表达了整个超车过程。从仿真结果可以看出,主车在发现前方有慢速交通车时,首先变换车道,在左侧车道完成对交通车的超越,然后并入右侧车道,主车完成对交通车超车后设定速度巡航。跟踪轨迹在转向状态变为直行状态出现振荡。状态稳定时跟随效果较好。

为了更加直观的展示仿真结果,图 12 以动画形式对比相同工况下被控车辆与不受控车辆的行车行为。

## 4 结论

1) 本文通过对交通车的轨迹预估,建立了同时包含“时间”、“空间”信息的搜索空间。实现动态规划的同时将交通车未来状态纳入考虑范围之中。

2) 提出利用稳态车辆动力学解析表达式的方式描述轨迹。该方法不仅考虑车辆本身的特性,而且数值计算效率高、实时性好。

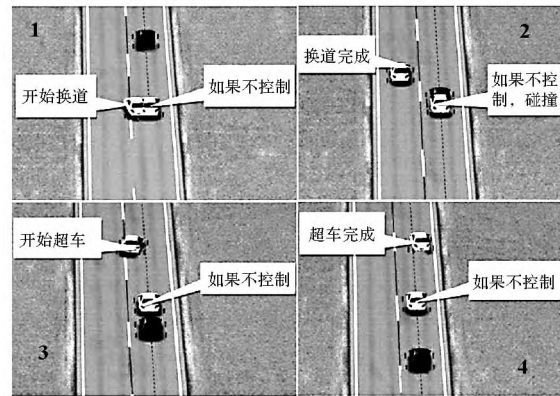


图 12 动画仿真结果

Fig. 12 Animated simulation results

3) 提出利用“驾驶员意图”来表达汽车上层任务。并利用驾驶员意图抽象,在非交叉口工况下有效地表达汽车的行车行为。

4) 结合轨迹跟随控制以及车辆动力学模型在 Matlab/Simulink 环境下对直道超车工况进行了仿真。仿真结果表明主车在算法控制下能够安全地、主动地实现所要求的行车行为。

## 参考文献 (References)

- [1] Jian Y. Real-time trajectory planning for ground and aerial vehicle in dynamic environment [D]. Florida: University of Central Florida, 2008.
- [2] 陈清阳, 张小波, 孙振平, 等. 非结构化环境下自主车辆轨迹规划方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(11): 3387-3384.  
CHEN Qingyang, ZHANG Xiaobo, SUN Zhenping, et al. Trajectory planning for autonomous driving in unstructured environments [J]. Journal of Central South University (Nature Science), 2011, 42(11): 3387-3384. (in Chinese)
- [3] 郭丙华. 非完整移动机器人运动规划研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2003.  
GUO Binghua. Research on motion planning for nonholonomic mobile robot [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [4] Johnson J, Hanser K. Optimal acceleration-bounded trajectory planning in dynamic environments along a specified path [C] // IEEE Conference on Robotics and Automation, 14-18 May 2012: 2035-2041.
- [5] Raja P, Pugazhenth S. Optimal path planning of mobile robots: A review [J]. International Journal of Physical Sciences, 2012, 7(9): 1314-1320.
- [6] 余至生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 144-148.  
YU Zhisheng. Automotive theory [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2008: 144-148. (in Chinese)
- [7] 郭孔辉. 汽车操纵动力学原理[M]. 江苏科学技术出版社, 2011: 295-298.  
GUO Konghui. Vehicle handling dynamics [M]. Jiangsu Science and Technology Publishing House, 2011: 295-298. (in Chinese)
- [8] 赵曜. 内模控制发展综述[J]. 信息与控制, 2000, 29(6): 526-531.  
ZHAO Yao. A survey of development of internal model control [J]. Information and Control, 2000, 29(6): 526-531. (in Chinese)