

基于航向角和位置偏差控制的驾驶员模型^{*}

陈焕明^{1,2} 郭孔辉¹

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025; 2. 青岛大学机电工程学院, 青岛 266071)

摘要: 建立能够适应复杂路径的驾驶员模型是车辆操纵稳定性闭环仿真的关键。将驾驶员的预瞄路径分成了数段, 在每段计算横向位移和航向角的偏差。在此基础上, 基于车辆航向角和横向位移偏差对车辆转向运动进行控制, 使车辆可以跟随任意复杂路径。为了获取驾驶员模型的控制参数, 设计了不同的行驶工况, 采用遗传算法优化驾驶员模型控制参数。Carsim 和 Simulink 联合仿真显示建立的驾驶员模型可有效跟随复杂道路。

关键词: 驾驶员模型 “预瞄-跟随”理论 路径描述 方向控制

中图分类号: U463.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0036-05

Driver Model Based on Heading Angle and Position Deviation Control

Chen Huanming^{1,2} Guo Konghui¹

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: The key of closed-loop simulation of vehicle handling stability is to establish a driver model which could adapt to complicated path. The driver's preview path was divided into several segments. Lateral displacement and heading angle deviation were calculated. Vehicle steering motion was controlled based on deviation of heading angle and position, therefore the vehicle could follow any complex path. In order to obtain the control parameters of driver model, different driving mode was designed. Genetic algorithm was applied to optimize these control parameters. The co-simulation results of Carsim and Simulink showed that the optimized driver model could fulfill the conditions of complicated road.

Key words: Driver model “Preview-follower” theory Path description Direction control

引言

随着车辆市场的竞争加剧, 车辆更新换代越来越快, 消费者对车辆操纵稳定性日益重视。在开发过程中, 利用人-车-路闭环性能仿真可以在样车制造出来之前评价和改进车辆的性能和品质。人-车-路闭环性能仿真日益受到重视。由于车辆的最终使用者是能力各异的消费者, 并且车辆面对的是日益复杂的交通和道路环境, 建立有效的驾驶员模型就显得十分的重要。本文在郭孔辉提出的“预瞄-跟随”驾驶员建模理论的基础上增加车辆行驶航向角和道路方向偏差的“预瞄-跟随”控制, 建立有效的驾驶员模型^[1~6]。

1 路径描述

对于任意道路轨迹, 可以采用大地坐标系下道路中心线上的点来描述。点的信息包括位移、位置坐标、曲率以及道路切线与 x 轴夹角。因此, 每个点都包含有 $(s_i, x_i, y_i, k_i, \mu_i)$ 5 种信息。点的间隔可以根据道路的曲率变化来合理布置, 曲率大的部分点布置得稠密, 相反布置得稀疏。这样既可以精确地描述道路信息, 又可以减少点的数量, 如图 1 所示。变量 s 为车辆从初始位置点到目前车辆所在位置对应道路中心线的长度。根据 s 的值可以查表确定车辆目前位置和车辆预瞄点位置的道路信息。道路信息可以通过路径规划, GPS 道路信息系统或者

收稿日期: 2012-09-19 修回日期: 2012-12-13

^{*} 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100061110049)

作者简介: 陈焕明, 博士生, 青岛大学讲师, 主要从事车辆系统动力学研究, E-mail: qdchm@sina.com

计算机视觉等方式获得坐标 (x_i, y_i) , 然后经过简单计算得到其他信息^[7~8]。随着信息技术的发展道路信息可以包括道路拥挤情况、附着系数、能见度等, 为驾驶员模型提供更全面的信息。

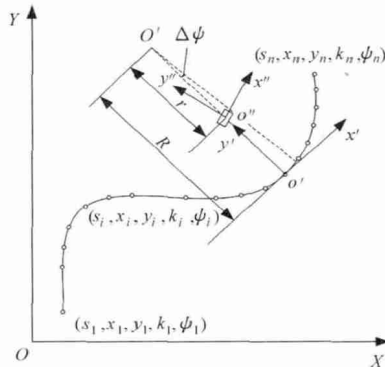


图 1 道路信息描述

Fig. 1 Description of road information

2 位置确定

通过车辆动力学模型仿真计算出车辆在大地坐标系下的位置和姿态以及平动与转动速度^[7~8]。通过上述车辆信息以及道路信息, 可以计算车辆行驶时间段在预期道路上相应的距离。假设开始时刻点的路径位移为 s_0 , 其对应的道路信息通过 s_0 插值获得, 定义以点 (x_i, y_i) 为坐标原点, 道路切线方向为 X 轴, 法线方向为 Y 轴的道路坐标系 $x'o'y'$, 如图 1 所示。将车辆质心坐标变换到道路坐标系中

$$\begin{cases} x' = (y - y_0) \sin\psi_0 + (x - x_0) \cos\psi_0 \\ y' = (y - y_0) \cos\psi_0 - (x - x_0) \sin\psi_0 \end{cases} \quad (1)$$

假设在 Δt 时间内, 车辆运行过的角度为 $\Delta\psi$ (图 1), 在此期间也有对应虚拟质点沿着道路中心线运动, 则其也运行过 $\Delta\psi$ 。

$$\frac{\Delta s_v}{r} = \frac{\Delta s_r}{R} = \Delta\psi \quad (2)$$

其中

$$R = r + y'_v$$

式中 y'_v ——车辆质心在道路坐标系中 Y 向坐标值
 Δs_r —— Δt 时间内对应虚拟质点沿道路中心线的位移

Δs_v —— Δt 时间内车辆位移

r ——瞬时转动中心到车辆质心距离

R ——瞬时转动中心到道路中心线的距离

由式 (2) 可知, 车辆行驶的位移和道路中心线上虚拟点位移的关系为

$$\Delta s_r = \Delta s_v \frac{R}{R - y'_v} \quad (3)$$

根据已知车辆状态, 可以求得 Δs_v 。经过推导可知对应时刻道路中心线的位移为

$$\frac{ds_r}{dt} = \frac{ds_v}{dt} \frac{R}{R - y'_v} = \frac{U \cos(\psi - \psi_t) - V \sin(\psi - \psi_t)}{1 - k_t [(y - y_t) \cos\psi_t - (x - x_t) \sin\psi_t]} \quad (4)$$

式中 U ——车辆 X 方向速度

k_t ——道路中心线曲率

V ——车辆 Y 方向速度

y_t ——期望路径上横向位置

ψ_t ——期望路径航向角

$$s_r = \int \frac{ds}{dt} \quad (5)$$

计算出 s_r 通过查表可获取道路信息, 进而可以计算车辆位置与道路间的偏差。

3 驾驶员模型

为了实施方向控制, 选用 2 个控制变量, 位置偏差和航向角偏差。位置偏差就是车辆轨迹和预期轨迹的误差。航向角偏差就是车辆行驶航向角和道路方向的夹角^[7]。

3.1 位置偏差控制

驾驶员模型需要预瞄信息, 在 s_r 的基础上加上 s_p 通过查表可以得到预瞄点的道路信息。针对路径转角变化较大的工况, 按照车辆坐标系进行计算预瞄点与路径的横向位移, 若仿真过程中选定的预瞄时间不合适, 可能会出现不能有效计算横向位移偏差的情况, 如图 2 所示。为避免此类状况, 可将 s_p 沿预期路径分为 n 等份^[8], 如图 3 所示。依据 s_{pi} 查表可以得到预瞄点的道路信息 $(s_{pi}, x_{pi}, y_{pi}, k_{pi}, \psi_{pi})$ 。计算每段路径在车辆横向的距离, 把每段叠加即可获得整段预瞄距离上的横向距离差为

$$y_{pm} = y_{p0} + \sum_{i=1}^n \Delta y_{pi} \quad (6)$$

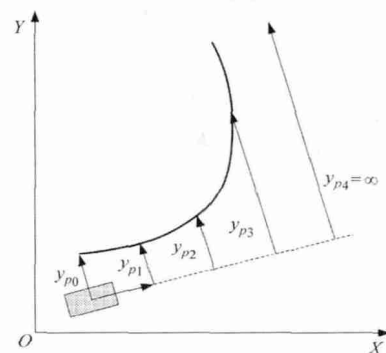


图 2 依据车辆坐标方向预瞄

Fig. 2 Preview offset along with vehicle direction

采用郭孔辉提出的基于侧向加速度反馈的控制模型为基础, 对侧向加速度进行比例控制。以预期侧向加速度与车辆侧向加速度偏差信号为输入对象

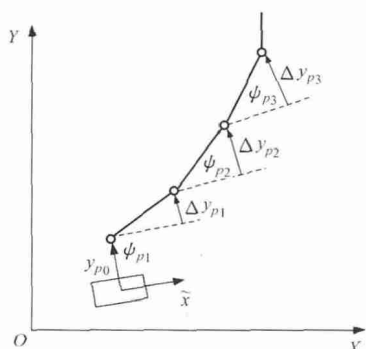


图3 分段计算横向位置差值

Fig. 3 Small sections method for lateral position difference calculation

的比例控制器,作为驾驶员模型控制器的基本框架^[9~10]。控制器的表达式为

$$\delta_{sw}\dot{y} = K_{dp}e_{\dot{y}}(t) \quad (7)$$

其中

$$e_{\dot{y}}(t) = \ddot{y}^* - \ddot{y}$$

式中 K_{dp} ——控制校正模型参数

\ddot{y}^* ——理想侧向加速度

\ddot{y} ——实际侧向加速度

$\delta_{sw}\dot{y}$ ——跟踪道路横向位移偏差的转向盘转角增量

3.2 航向角偏差控制

与横向偏差预瞄方式类似,将预瞄距离沿道路分为 n 段。方向角偏差为 $\Delta\psi = \psi_{pn}$ 。对类似侧向加速度反馈的控制模型,采用角加速度的偏差控制进行比例微分控制。以偏差信号为输入对象的比例微分控制器,作为驾驶员模型控制器的基本框架。控制器的表达式为

$$\delta_{sw\alpha} = K_{\alpha p}e_{\alpha}(t) + K_{\alpha d}\frac{de_{\alpha}(t)}{dt} \quad (8)$$

其中

$$e_{\alpha} = \alpha^* - \alpha$$

式中 $K_{\alpha p}$ ——控制校正模型比例参数

$K_{\alpha d}$ ——控制校正模型微分参数

α^* ——理想角加速度

α ——实际角加速度

$\delta_{sw\alpha}$ ——跟踪道路航向角偏差的转向盘转角增量

4 驾驶员模型参数

驾驶员模型参数包括神经反应滞后时间 t_d 和动作反应滞后时间 t_h 以及预瞄时间 t_p 。其中 t_d 和 t_h 受驾驶员自身条件和训练水平的限制。一般 t_d 为 0.2 ~ 0.6 s, t_h 为 0.05 ~ 0.20 s。驾驶员的预瞄时间 t_p 一般为 0.8 ~ 1.5 s。

对于普通驾驶员一般会根据不同的车速选择不同的转向策略,随着车速增加,减小转向输出增益。

根据线性 2 自由度车辆模型,在线性区内汽车的侧向加速度对转向盘转角的增益与车速的关系^[9]为

$$G_{ay} = \frac{U^2}{Ll_s(1 + KU^2)} \quad (9)$$

式中 L ——汽车轴距

G_{ay} ——不同速度下方向盘转角对应侧向加速度的增益系数

l_s ——方向盘转角到车轮转角的转向系角传动比

K ——汽车的稳定性因数

对大部分具有适度的不足转向特性汽车,其 K 值通常的变化范围为 0.002 ~ 0.004 s²/m²。

5 参数优化

5.1 目标函数

在实际驾驶过程中,驾驶员以希望最简单的操纵使汽车能够跟随心目中的理想轨迹,也就是说既要简便地操纵,又要尽可能地跟踪理想的路径^[11]。由此,设定目标函数为

$$J = PJ_1 + QJ_2 + RJ_3 \quad (10)$$

$$\text{其中 } J_1 = \frac{1}{2}(y_t - y_v)^2 \quad J_2 = \frac{1}{2}(\psi_t - \psi_v)^2$$

$$J_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta_{sw}(k) - \delta_{sw}(k-1)}{\Delta\delta_{\max}} \right)^2$$

式中 y_v ——汽车横向位置

ψ_v ——汽车航向角

$\delta_{sw}(k)$ 、 $\delta_{sw}(k-1)$ —— k 和 $k-1$ 时刻转向盘转角

$\Delta\delta_{\max}$ ——前后两个时刻,转向盘转角的最大增量

P 、 Q 、 R ——位移误差、角度误差以及转向盘转动程度的加权系数

5.2 优化结果

设计一组不同半径的直角弯,让车辆以不同速度通过,利用遗传算法进行优化,得到在不同速度、不同曲率半径下的控制器参数,如表 1 ~ 3 所示。

表 1 位置偏差控制器参数 K_{dp}

Tab. 1 Parameters of position deviation controller

速度 /km·h ⁻¹	曲率半径/m			
	40	60	100	120
30	90.579 2	90.579 2	91.599 1	91.599 1
60	90.575 6	77.016 0	91.193 3	91.193 3
90			79.351 1	79.351 1

6 仿真与实验

为了验证驾驶员模型的有效性和准确性,利用

Carsim 和 Simulink 进行联合仿真和实验验证。

表 2 航向角偏差控制器参数 K_{ap}

Tab. 2 Parameter of heading angle deviation controller				
速度 /km·h ⁻¹	曲率半径/m			
	40	60	100	120
30	2.708 7	2.708 7	3.517 5	3.517 5
60	5.405 4	5.405 4	9.611 6	9.611 6
90			12.147 8	12.147 8

表 3 航向角偏差控制器参数 K_{ad}

Tab. 3 Parameter of heading angle deviation controller				
速度 /km·h ⁻¹	曲率半径/m			
	40	60	100	120
30	0.035 7	0.035 7	0.197 1	0.197 1
60	0.576 2	0.576 2	0.929 9	0.929 9
90			0.576 2	0.825 8

6.1 车辆模型

利用车辆动力学仿真软件 Carsim 建立某中型乘用车动力学模型。该模型包括车体、悬架系统、转向系统、制动系统、轮胎和传动系统。其中,悬架运动和动力学特性以及轮胎特性均包含非线性因素。

对比仿真数据与实验数据显示所建立的模型基本可以反映车辆状态,如图 4 所示。

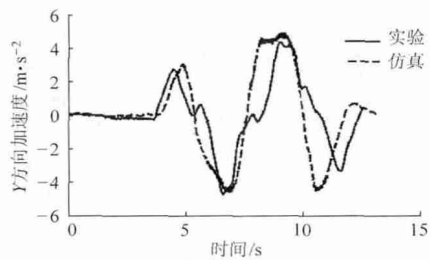


图 4 实验加速度与仿真加速度对比
Fig. 4 Comparison of experimental acceleration and simulated acceleration

6.2 联合仿真

将道路信息和车辆当前的状态作为驾驶员模型的输入信息。利用遗传算法优化的控制参数表获取控制参数。分别进行速度为 40、80 和 105 km/h 双移线仿真实验,从低速到高速各种工况下,驾驶员模型发出的指令可使车辆顺利地通过双移线,如图 5 所示。

车辆横向加速度达到 5.5 m/s²,说明车辆已经进入了非线性范围,如图 6 所示。

为了更好地验证驾驶员模型的适应性,进行了复杂行驶路线的模拟仿真。路径中包括 10 个半径不同的弯角。结果显示在驾驶员模型的控制下车辆可以较为准确地跟踪复杂道路,如图 7~8 所示。

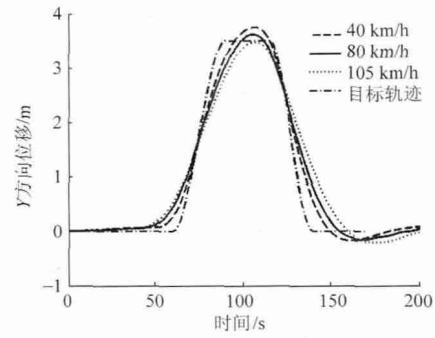


图 5 双移线道路轨迹

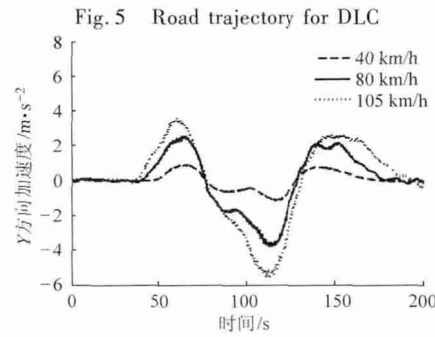


图 6 双移线横向加速度

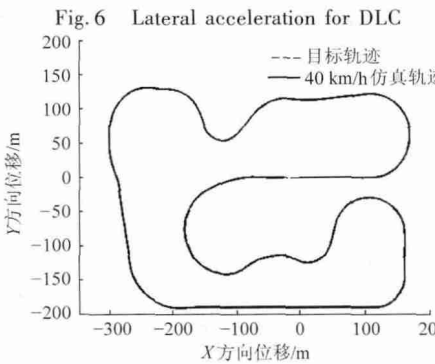


图 7 复杂路况

Fig. 7 Road trajectory of complicated lane

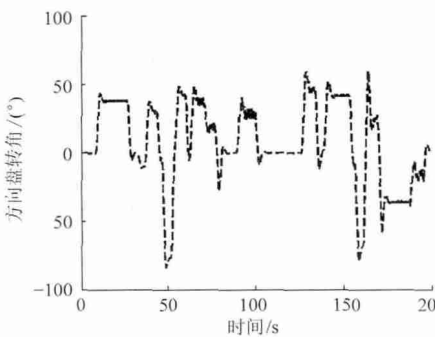


图 8 复杂路况转向盘转角 (40 km/h)

Fig. 8 Steering angle of complicated lane

6.3 实验验证

用某中型乘用车进行车辆变道实验,并将实验数据与仿真数据进行对比,如图 9 所示。对比显示,驾驶员模型可以比较准确地跟随目标轨迹,与实际驾驶员所行使的路线基本符合。由于驾驶员模型采用经过优化的数据,可以更加接近目标轨迹,而驾驶

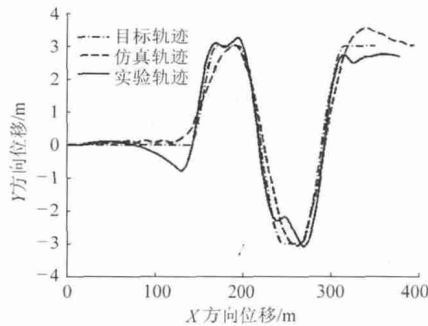


图9 变道轨迹

Fig.9 Road trajectory for lane change

员实际驾驶过程行驶过的轨迹由于驾驶员水平等因素的影响在局部距离目标轨迹有差异。

7 结束语

采用了预瞄方式描述了路径。驾驶员模型采用航向角和位置偏差控制,利用遗传算法优化 PD 控制器的 3 个参数。通过 Carsim 和 Simulink 联合仿真以及场地实车实验验证了模型的有效性和准确性。此种方法确定的驾驶员模型可以用于人一车闭环仿真的操纵稳定性分析以及自动驾驶研究。

参 考 文 献

- 郭孔辉. 汽车操纵动力学原理[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2011.
- Macadam C C. Understanding and modeling the humandriver[J]. Vehicle System Dynamics, 2003, 40(1~3): 101~134.
- Plöchl M, Edelmann J. Driver models in automobile dynamics application [J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(7~8): 699~741.
- 黄建兴, 赵又群. 人-车闭环操纵稳定性综合评价及其虚拟样机实现[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 102~108.
Huang Jianxing, Zhao Youqun. Comprehensive evaluation of human-vehicle closed-loop system for handling stability and technology of virtual prototype [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 102~108. (in Chinese)
- 李红志, 李亮, 宋健, 等. 预瞄时间自适应的最优预瞄驾驶员模型[J]. 机械工程学报, 2010, 46(20): 106~111.
Li Hongzhi, Li Liang, Song Jian, et al. Optimal preview control driver model with adaptive preview time [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(20): 106~111. (in Chinese)
- 沈垲, 谭运生, 李舜酩, 等. 驾驶员自适应转向控制行为建模[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 12~16.
Shen Huan, Tan Yunsheng, Li Shunming, et al. Modeling driver's adaptive steering control behavior [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 12~16. (in Chinese)
- Chatzikomis C I, Spentzas K N. A path-following driver model with longitudinal and lateral control of vehicle's motion [J]. Forschung im Ingenieurwesen, 2009, 73(4): 257~266.
- Andrew Odhams. Identification of driver steering and speed control[D]. Cambridge: Cambridge University, 2006.
- 丁海涛, 郭孔辉, 李飞, 等. 基于加速度反馈的任意道路和车速跟随控制驾驶员模型[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 116~125.
Ding Haitao, Guo Konghui, Li Fei, et al. Arbitrary path and speed following driver model based on vehicle acceleration feedback [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 116~125. (in Chinese)
- 段立飞, 高振海, 王德平. 驾驶员对汽车方向的自适应控制行为建模[J]. 机械工程学报, 2011, 47(8): 121~125.
Duan Lifei, Gao Zhenhai, Wang Deping. Modeling of driver's adaptive control behavior for vehicle direction [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(8): 121~125. (in Chinese)
- Sharp R S, Casanova D, Symonds P. A mathematical model for driver steering control, with design, tuning and performance results[J]. Vehicle System Dynamics, 2000, 33: 289~326.
- 郭景华, 胡平, 李琳辉, 等. 智能车辆横向混合切换控制器设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 1~5.
Guo Jinghua, Hu Ping, Li Linhui, et al. Mixed lateral controller design for intelligent vehicle based on switching [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 1~5. (in Chinese)
- 张小龙, 李亮, 宋健, 等. 汽车稳定性控制系统性能试验与数据处理方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 1~6.
Zhang Xiaolong, Li Liang, Song Jian, et al. Performance test and data processing method for vehicle electronic stability control system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 1~6. (in Chinese)
- 王化吉, 宗长富, 管欣, 等. 基于模糊层次分析法的汽车操纵稳定性主观评价指标权重确定方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(24): 83~90.
Wang Huaji, Zong Changfu, Guan Xin, et al. Method of determining weights of subjective evaluation indexes for car handling and stability based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(24): 83~90. (in Chinese)
- 白艳, 贾鑫, 宗长富, 等. 汽车操纵稳定性客观评价方法综述[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(6): 1339~1347.
Bai Yan, Jia Xin, Zong Changfu, et al. Review of objective vehicle handling evaluation [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(6): 1339~1347. (in Chinese)