

视觉导航智能车辆横向运动的自适应预瞄控制

陈无畏 王家恩 汪明磊 王金波

合肥工业大学,合肥,230009

摘要:车道保持系统中车辆横向运动控制应模拟驾驶员的横向操纵行为,驾驶员根据前方道路曲率及车辆速度适时调节预瞄距离,以获得理想的路径跟踪性能。首先,以车辆二自由度动力学模型及车辆道路几何位置关系为基础,建立车一路横向动力学模型。其次,基于单点预瞄最优曲率模型设计侧向加速度 PD 跟踪控制器,联立车一路横向动力学模型构建横向控制闭环系统,分析预瞄距离、车速、道路曲率的变化对系统响应的影响。最后,设计模糊控制器对预瞄距离进行模糊选择以提高车辆横向控制精度和减小侧向加速度,采用遗传算法对模糊规则进行优化以使横向控制系统性能达到最优。试验表明,相对固定预瞄控制方法,自适应预瞄减小了车辆侧向加速度,且道路跟踪的方向偏差和距离偏差均得到减小。

关键词:横向运动;驾驶员;预瞄距离;模糊规则;遗传算法

中图分类号:U461

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.05.023

Adaptive Preview Control of Vision Guided Intelligent Vehicle Lateral Movement

Chen Wuwei Wang Jiaen Wang Minglei Wang Jinbo

Hefei University of Technology, Hefei, 230009

Abstract: Lateral control of vehicle for lane keeping system should simulate human driver direction control behavior, driver adaptively tuned look-ahead distance according to longitudinal velocity and road curve to obtain desired path following performance. First, a vehicle-road lateral dynamics model was established based on two-degree-of-freedom vehicle model and vehicle-road kinematics. Then a PD controller was designed to track the desired lateral acceleration based on “single point preview optimal curvature model”, a lateral closed loop control system was established, which included vehicle-road lateral dynamics and PD controller, the effects of look-ahead distance, longitudinal velocity and road curve on closed loop control system responses were discussed. Finally, a fuzzy logic controller was designed to choose look-ahead distance based on fuzzy rules so as to make good lane keeping performance and small lateral acceleration. At the same time a way of optimizing fuzzy rules by using GA(genetic algorithm) was proposed to obtain optimal lateral control system performance. Experimental studies show the lateral acceleration is reduced compared with fixed point preview control method and the lane tracking deviation of direction and position decrease respectively by using adaptive preview control.

Key words: lateral movement; driver; look-ahead distance; fuzzy rule; genetic algorithm

0 引言

车道保持系统(lane keeping system, LKS)作为智能交通系统的重要组成部分,在保护乘员安全方面具有重要的意义^[1],而车辆横向控制器的设计则为车道保持系统关键技术之一。基于视觉的车道保持系统应与汽车驾驶员的驾驶行为相似,优秀的驾驶员总是根据前方道路情况并结合其他一些影响因素寻找出一个理想的预期轨迹点,并根据预期轨迹点位置控制汽车行驶,寻找预期轨迹点的过程相当于预瞄过程^[2-3]。预瞄轨迹点选择近,车辆对前方道路预见性小,易在道路中央两侧来回摆动,乘坐舒适性差且系统有失稳趋

势;预瞄轨迹点选择远,车辆从某一偏离车道位置到达预瞄轨迹点响应时间长,跟踪偏差大,道路曲率大时更是如此^[4]。文献[5-7]将预瞄距离设为一固定值来设计横向控制器。文献[8]分析了预瞄距离对闭环系统极点分布的影响,并采用非线性函数表达预瞄距离与车速的关系,预瞄距离随车速增加而增大。文献[9]指出,驾驶员预瞄过程要考虑道路曲率的影响。文献[10]针对大曲率道路设计了一种基于驾驶员模型的车辆转向控制方法。预瞄点的选择不仅要考虑车辆行驶速度,还应考虑前方道路曲率的影响,而简单的函数关系很难合理表达三者之间的关系,而已有文献中还未见通过车速和道路曲率来综合选择合理预瞄距离的报道。为了综合分析车速、道路曲率及预瞄

收稿日期:2012—09—17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075112)

距离三者对车辆横向运动的影响,避免仅根据车速或道路曲率选择预瞄距离带来的局限性,需求出合理的三参数非线性映射关系。

基于此,本文首先以车辆动力学模型及车一路几何位置关系为基础,建立车一路横向动力学模型。其次,基于最优预瞄曲率设计侧向加速度PD跟踪控制器,联立车辆一道路动力学模型构建车辆横向控制闭环系统,并分别分析预瞄距离、车速、道路曲率对系统响应的影响。最后,构建预瞄距离选择的模糊规则,将纵向车速及道路曲率作为输入,将预瞄距离作为输出。同时,以路径跟踪偏差及车辆侧向加速度为优化目标,采用遗传算法对模糊规则进行优化,实现车辆横向运动的自适应预瞄过程。

1 系统结构

系统包括坐标系转换、预瞄规则推理、最优曲率驾驶员模型及侧向加速度跟踪控制四部分。参考路径经坐标系转换输出车辆横向控制偏差及前方道路曲率,预瞄模糊规则推理器根据道路曲率 ρ 及车辆速度推算合理的车辆预瞄点位置,对应为车辆预瞄距离 L 。最优曲率驾驶员模型依据车辆行驶轨迹与预期路径误差最小原则产生理想车辆侧向加速度,跟踪控制器负责跟踪理想的期望侧向加速度。采用全局优化能力强的遗传算法(GA)对模糊规则进行优化。控制系统结构如图1所示。其中, Δd 为侧向偏差; $\Delta\phi$ 为方位偏差; v_x 为车辆纵向速度; v_y 为车辆侧向速度; δ_{sw} 为转向盘转角输入; v_{yr} 为最优侧向速度。

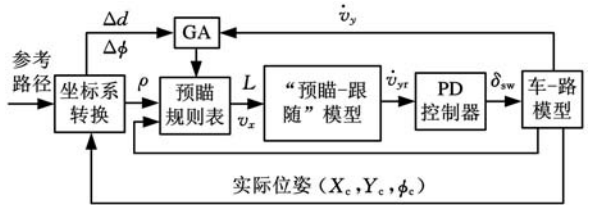


图1 控制系统流程图

2 车一路模型

2.1 坐标系转换

坐标系转换用于仿真时车辆局部坐标系与大地坐标系的转换,以便实时获取车辆在大地坐标系中的位置及车辆与预瞄点的相对位置。

如图2所示,在 t 时刻,车辆质心在全局大地坐标系中的位置坐标为 $(X_c(t), Y_c(t))$,车辆纵轴线与横坐标的夹角为 $\phi_c(t)$ 。 L 为预瞄距离, $(X_p(t), Y_p(t), \phi_p(t))$ 为预瞄点处的坐标。 $(x_e,$

$y_e, \phi_e)$ 为车辆坐标系中车辆与预瞄点之间的相对位置参数。上述参数的关系可由如下表达式来描述^[11]:

$$p_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \phi_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi_c(t) & \sin\phi_c(t) & 0 \\ -\sin\phi_c(t) & \cos\phi_c(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p(t) - X_c(t) \\ Y_p(t) - Y_c(t) \\ \phi_p(t) - \phi_c(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

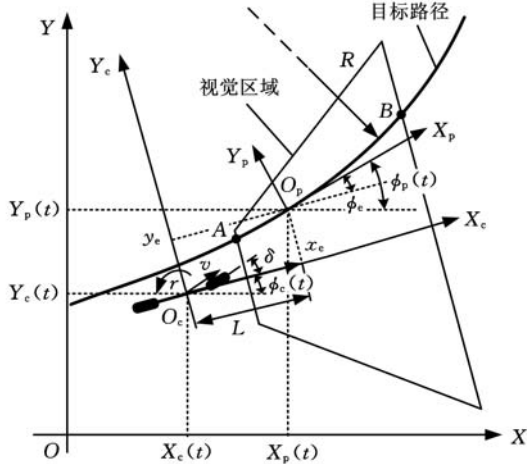


图2 坐标变换

2.2 车一路横向动力学建模

车辆二自由度模型很好地体现了车辆的行驶特性,本文采用如下二自由度车辆模型作为仿真车辆模型:

$$\dot{v}_y = \frac{-C_l - C_r}{mv_x} v_y + \left(\frac{bC_r - aC_l}{mv_x} - v_x \right) r - \frac{C_l}{m} \delta \quad (2)$$

$$\dot{r} = \frac{bC_r - aC_l}{I_z v_x} v_y - \frac{a^2 C_l + b^2 C_r}{I_z v_x} r + \frac{aC_l}{I_z} \delta \quad (3)$$

式中, m 为整车质量; I_z 为绕 Z 轴的转动惯量; a, b 分别为质心至前轴、后轴的距离; C_l, C_r 为前后车轮侧偏刚度; r 为横摆角速度; δ 为前轮转角。

根据图2中的几何关系,局部坐标系 $X_c O_c Y_c$ 中车辆与预瞄距离为 L 处的单预瞄点 O_p 的侧向偏差与方位偏差的变化率为^[12]

$$\dot{Y}_e = -v_y - Lr + v_x \phi_e \quad (4)$$

$$\dot{\phi}_e = v_x \rho - r \quad (5)$$

视转向系统为一阶惯性环节,则有

$$\dot{\delta} = -\frac{1}{T_s} \delta + \frac{1}{T_s} \delta_{sw} \quad (6)$$

式中, T_s 为惯性环节时间常数。

联立式(3)~式(6),可得车一路横向动力学模型:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_y \\ \dot{r} \\ \dot{\phi}_e \\ \dot{Y}_e \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & b_{11} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & b_{21} \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1-Lv_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ r \\ \phi_e \\ Y_e \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_s} \end{bmatrix} \delta_{sw} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rho \quad (7)$$

$$a_{11} = \frac{-C_f - C_r}{mv_x} \quad a_{12} = \frac{-aC_f + bC_r}{mv_x} - v_x$$
$$a_{21} = \frac{-aC_f + bC_r}{I_z v_x} \quad a_{22} = -\frac{a^2 C_f + b^2 C_r}{I_z v_x}$$
$$b_{11} = \frac{C_f}{m} \quad b_{21} = \frac{aC_f}{I_z}$$

3 控制器设计及闭环系统特性分析

3.1 控制器设计

驾驶员最优曲率模型采用“单点预瞄”假设,即认为驾驶员的目光集中于前方一点处。如图 2 所示,驾驶员前视距离为 L ,相应的前视时间 $\Delta t = L/v_x$,前视点在车辆局部坐标系中的横向坐标 x_e 与 L 相等。此时,若驾驶员选择一个转向盘转角 δ_{sw} ,则对应车辆的轨迹曲率为 $1/R$ 、侧向加速度为 $\dot{v}_y$ 。这样经过时间 Δt 后,车辆在 t 时刻局部坐标系中的侧向位移为

$$Y(t + \Delta t) = \Delta t v_y + \frac{(\Delta t)^2}{2} \dot{v}_y \tag{8}$$

根据“最小误差原则”,驾驶员总是希望选择一个最优的轨迹曲率 $1/R^*$,使得车辆在走过距离 L 后,其横向位置与预期轨道坐标 $(X_p(t), Y_p(t))$ 相一致。则由式(8)得到当前时刻车辆的最优侧向加速度为

$$\dot{v}_{yr}(t) = \frac{2}{(\Delta t)^2} (y_e - \Delta t v_y) \tag{9}$$

式(9)中, y_e 为局部坐标系中车辆与预瞄点的侧向距离。车辆侧向加速度对转向盘转角的传递函数可近似由下列一阶线性系统描述:

$$\frac{\dot{v}_y}{\delta_{sw}}(s) = K \frac{1 + T_n s}{1 + T_d s} \tag{10}$$

其中, K 为侧向加速度响应稳态增益, T_n 、 T_d 为常数。仿真计算时, T_n 、 T_d 由式(10)中 δ_{sw} 到 $\dot{v}_y$ 的传递函数(近似一阶系统模型参数)表示。

最优侧向加速度跟踪控制采用 PD 控制器实现。为避免纯微分运算可能给系统带来的高频干扰,将一阶滞后环节近似纯微分环节来代替纯微分环节。从而可将 PD 控制器的传递函数形式写成如下形式:

$$C(s) = K_p (1 + \frac{T_D s}{(T_D/N)s + 1}) \tag{11}$$

根据预瞄跟随原理^[13],有

$$\frac{\dot{v}}{\delta_{sw}}(s) \cdot C(s) \approx 1 \tag{12}$$

将式(12)代入式(10)并联立式(11),可得到 PD 控制器的整定参数为

$$K_p = 1/K \quad T_D = T_d - T_n \quad N = \frac{T_d}{T_n} - 1$$

联立驾驶员最优曲率模型及车-路模型可得系统的闭环模型,如图 3 所示。

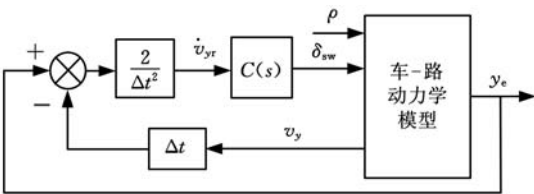


图 3 闭环控制系统流程图

将式(11)转换成状态方程形式并代入式(7)可得到整个闭环系统的状态方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_y \\ \dot{r} \\ \dot{\phi}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\xi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & b_{11} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & 0 & b_{21} \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -L v_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2(T_d - T_n)}{t} & 0 & 0 & \frac{2(T_n - T_d)}{t^2} & -\frac{1}{T_n} & 0 \\ -\frac{2T_d}{KT_s t T_n} & 0 & 0 & \frac{2T_d}{KT_s t^2 T_n} & \frac{1}{KT_s T_n^2} & -\frac{1}{T_s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_y \\ r \\ \phi_e \\ y_e \\ \xi \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_x \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rho \tag{13}$$

其中, ξ 为中间变量参数,这里不赋予物理意义。

3.2 时域特性分析

从上述状态方程可知, y_e 的响应过程不仅与车辆结构参数如质量 m 、轴距 a 和 b 以及纵向车速 v_x 等有关,还受到横向预瞄距离 L 及道路曲率 ρ 的影响。下面通过仿真实验分别分析纵向车速 v_x 、预瞄距离 L 、道路曲率 ρ 三个因素的变化对式(13)闭环系统响应的影响,并初步得到如何根据车速及前方道路曲率合理选取预瞄距离,以提高车辆的横向控制性能,实现横向预瞄过程的自适应调节。部分车辆模型参数见表 1。

表 1 车辆参数

参数说明	数值
整车质量 $m(\text{kg})$	1704
整车绕 Z 轴的转动惯量 $I_z(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	3048
整车质心至前后轴的距离 a 、 $b(\text{m})$	1.015, 1.675
前后轮侧偏刚度 C_f 、 $C_r(\text{N/rad})$	105 850, 79 030
惯性环节时间常数 $T_s(\text{s})$	0.5

(1) 设车辆纵向车速及道路曲率为定值,即 $v_x = 12\text{m/s}$, $\rho = 0.005\text{m}^{-1}$ 。不同预瞄距离 L 对应的系统响应如图 4 所示。从图可知,当预瞄距离取 2m 时,系统不能趋近于稳定呈发散状态。当预瞄距离取 10m 时,车辆侧向加速度较大,影响乘坐舒适性并增加转向系统负担。随着预瞄距离的逐步增加,系统趋近稳定,反应时间增长,侧向

加速度减小,但同时对于曲率不等于零的道路其稳态误差逐步增大。因而预瞄距离的选择不能太小也不能太大,应根据纵向车速、道路曲率合理选择。

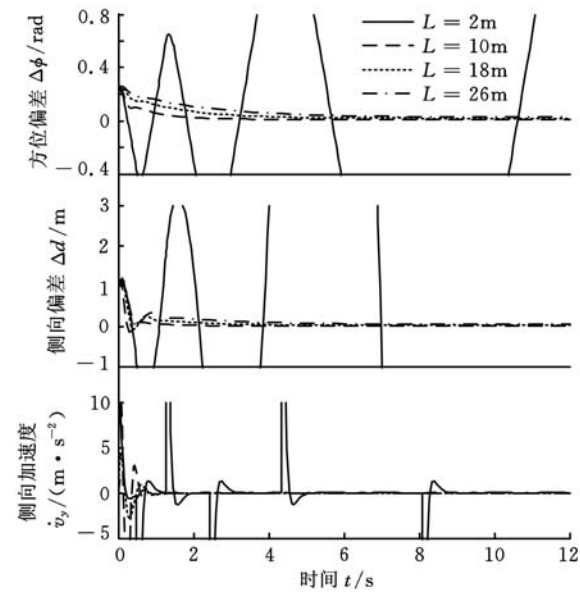


图4 不同预瞄距离系统响应

(2) 设车辆纵向车速及预瞄距离为定值,即 $v_x = 12\text{m/s}$, $L = 20\text{m}$ 。不同道路曲率 ρ 对应的系统响应如图5所示。从图可以看出,当车辆以恒定纵向车速及预瞄距离跟踪不同曲率道路时,其稳态误差随着道路曲率的增大而增加。因而为减小稳态误差,应随着道路曲率的增加而适当减小预瞄距离。

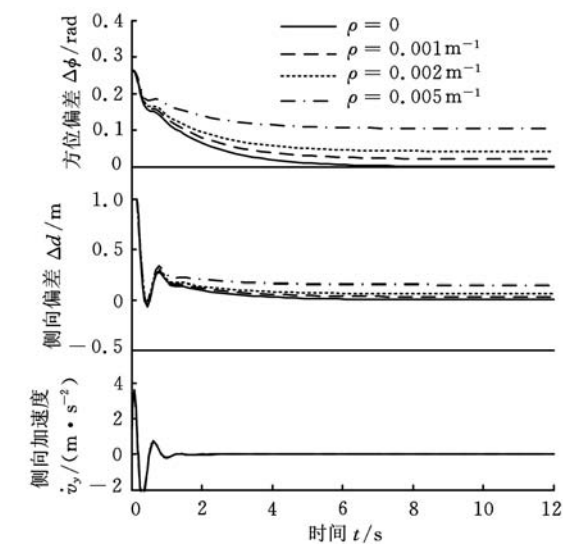


图5 不同道路曲率系统响应

(3) 设车辆预瞄距离及道路曲率为定值,即 $L = 20\text{m}$, $\rho = 0.001\text{m}^{-1}$ 。不同纵向车速对应的系统响应如图6所示。从图可以看出,当车辆以恒定预瞄距离跟踪某一曲率道路时,车辆以不同纵向车速从某一偏离车道位置趋近道路中心的响应

差别很大。速度较小时系统反应时间长。速度较大时系统反应时间短,但速度过大会使得超调量增大。因而结合前面分析的结论可知,纵向车速较大时宜选择较大预瞄距离以减小侧向加速度,纵向车速较小时宜选择较小预瞄距离以缩短系统反应时间及减小稳态误差。

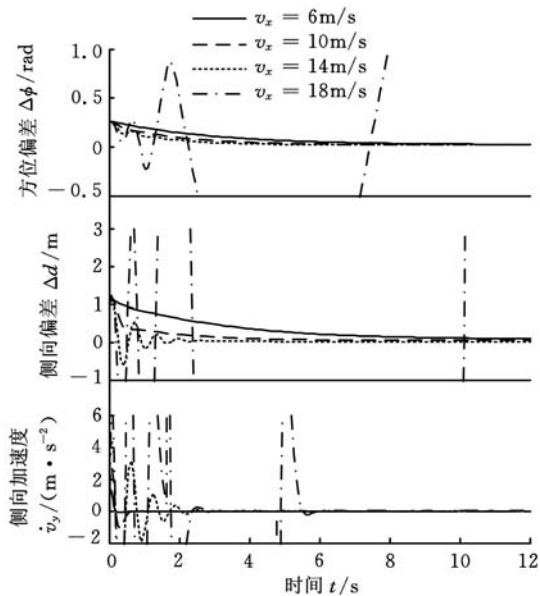


图6 不同纵向车速系统响应

4 预瞄规则设计及优化

4.1 预瞄规则设计

根据前面的分析可知,预瞄距离、车辆速度、道路曲率对横向控制的性能都会产生一定程度的影响。其中,道路曲率为外界不定输入,车辆速度调节为车辆的纵向控制,因此协调三者之间关系的关键转换为如何根据道路曲率及纵向车速的变化来自适应调节预瞄距离。显然,用线性关系很难合理表达三者之间的关系,为此建立预瞄规则表,选择Mamdani型模糊控制器作为预瞄点选择的模糊逻辑控制器(FLC)结构,其典型的模糊规则形式为

$$\text{IF } x \text{ is } G \text{ and } y \text{ is } H, \text{ Then } z = C$$

其中, x 、 y 为输入变量, z 为输出变量, G 和 H 为输入变量的模糊集, C 为输出变量的模糊集。FLC的基本输入为车辆纵向速度 v_x 及前方视觉区域道路曲率 ρ , 即控制器的输入为 $\{v_x, \rho\}$, FLC的输出为预瞄距离 L 。模糊控制的研究表明,模糊集隶属度函数的形状对控制器的影响不大^[14], 因此选择最简单也是最常用的等腰三角形隶属度函数作为模糊系统输入输出的隶属度函数。车辆纵向车速变化范围为 $v_x \in (0, 30)$, 单位为 m/s 。视觉区域内前方道路曲率的范围为 $\rho \in (0, 0.01)$, 单

位为 m^{-1} , 预瞄距离输出的范围 $L \in (0, 60)$, 单位为 m 。将模糊规则中两个输入变量(纵向车速及道路曲率)平均划分成 6 和 11 个模糊子集, 输出变量划分为 7 个模糊子集, 如图 7 所示, 从而输出 66 条模糊规则。模糊推理过程中“and”运算采用求代数积方法, 合成运算采用最大积方法, 蕴含运算采用求积方法。将模糊量转换成清晰量采用加权平均法, 从而获得最终实际的预瞄距离输出。

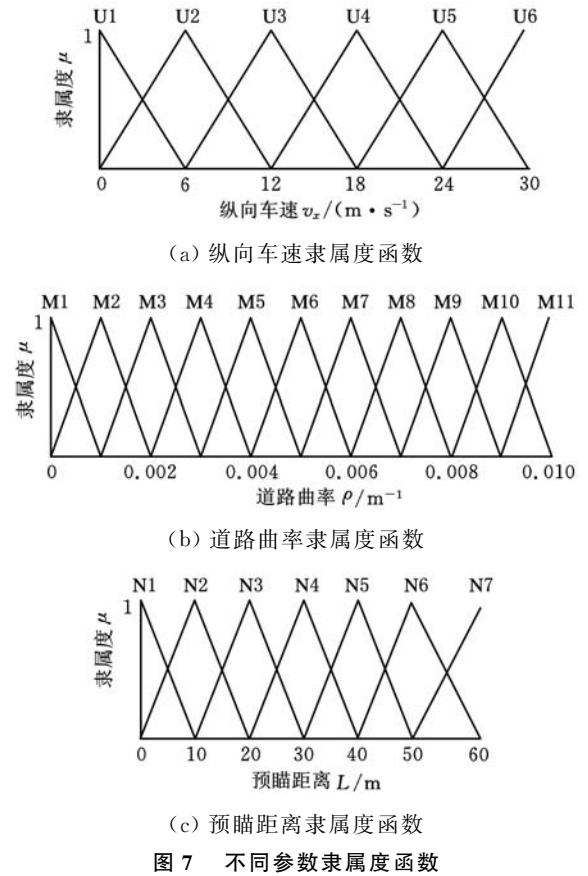


图 7 不同参数隶属度函数

显然, 模糊规则靠手工制定难度大, 且很难做到合理, 需进一步优化。

4.2 规则遗传优化

4.2.1 优化方法

预瞄规则为非线性组合关系, 因而这里采取全局优化能力强的遗传算法对其进行优化。若对模糊规则进行染色体的串联编码, 不仅搜索空间急剧扩大, 优化效率降低, 且很难找出最优的模糊规则解。为此, 采用优化单个模糊规则的方法, 即让车辆的纵向车速及道路曲率分别在模糊规则的某个输入子集内变化, 而对其输出进行优化操作, 将优化结果出现在某个输出模糊子集内概率最大的模糊子集作为最终的输出子集, 最终得出最优的全部模糊规则。

4.2.2 适应度函数确立

车辆横向控制器设计的性能可由以下 2 个方面的目标性能来衡量, 也即系统优化的性能

指标。

(1) 跟踪稳定性: 横向控制器的设计首先要保证车辆能够稳定跟踪道路, 因而用车辆在一定时间内跟踪目标路径的距离偏差、方位偏差来衡量跟踪稳定性指标。表达式如下:

$$J_1 = \alpha \int_{T_1}^{T_2} |\Delta \phi| dt + \beta \int_{T_1}^{T_2} |\Delta d| dt \tag{14}$$

其中, α, β 为对应的权重系数, 根据方位偏差和距离偏差的变化范围取 α, β 的值分别为 0.8 和 0.2。

(2) 侧向加速度: 横向控制器的设计须考虑侧向加速度对乘坐舒适性的影响。车辆在弯曲道路上稳定行驶时会产生一稳定的侧向加速度 $a_{rx} (a_{rx} = \rho v_x^2)$, 将此加速度作为参考值, 车辆实际加速度 a_{wx} 与其差别越大则代表车辆乘坐舒适性越差, 用下式来评价侧向加速度的变化:

$$J_2 = \int_{T_1}^{T_2} |a_{wx} - a_{rx}| dt \tag{16}$$

适应度函数用下式表达:

$$F(J_1, J_2) = \epsilon J_1 + \eta J_2 \tag{17}$$

显然, 这里以适应度函数值最小为搜索目标。由于车道跟踪精度为系统主要指标, 权重系数 ϵ, η 分别取值为 0.7 和 0.3。

5 预瞄规则优化仿真及分析

在 MATLAB/Simulink 中对所提出的设计方法进行仿真计算, 表 1 为仿真采用的车辆模型参数。图 8 为目标路径曲率为 0.005m^{-1} 、车速为 12m/s 时的适应度函数值变化曲线, 算法在 40 代后获得最优解, 最优的预瞄距离为 17.3m 。

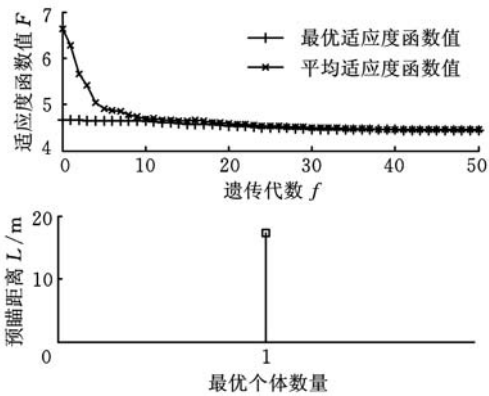


图 8 适应度函数值和最优个体

图 9 和图 10 所示分别为优化后纵向车速和车道曲率不同时预瞄距离随另一变量的变化关系。

图 11 所示为优化后预瞄距离与道路曲率及纵向车速之间的关系输出。由图 9~图 11 可知, 当车速较低及道路曲率较大时, 预瞄距离取较小值以缩短系统响应时间和稳定跟踪误差。

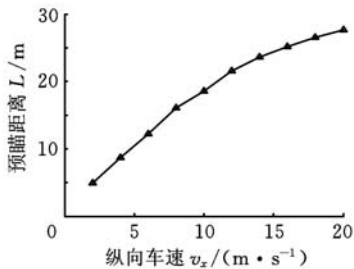


图 9 不同纵向车速下的预瞄距离($\rho=0.002\text{m}^{-1}$)

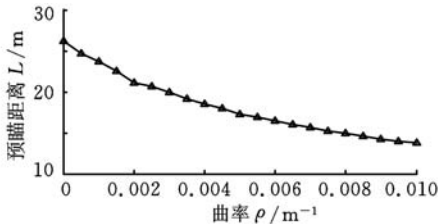


图 10 不同道路曲率下的预瞄距离($v_x=12\text{m/s}$)

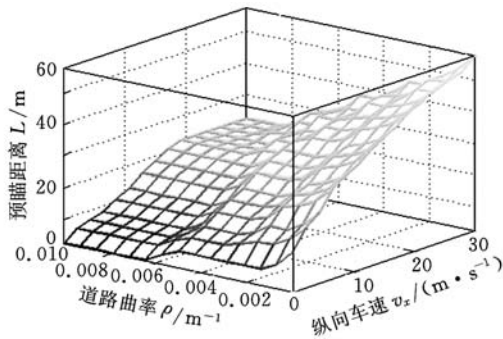


图 11 预瞄距离选择模糊规则输出面

当纵向车速速度一定时,预瞄距离随道路曲率的增大而减小以提高路径跟踪性能;当道路曲率一定时,预瞄距离随纵向车速的增大而增大以减小侧向加速度,这与前面的分析一致。

6 试验

试验系统如图 12 所示,包括车道视频采集、车身状态信息采集、上位机控制系统、下位机控制系统及 PC 机监视系统五部分。

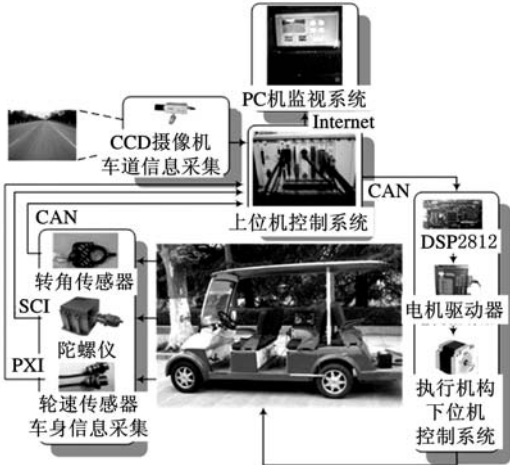


图 12 试验系统流程图

LabVIEW PXI8196 作为上位机负责车身传感器信号中转向盘转角、侧向加速度、纵向车速以及道路图像的采集,其中图像采集卡 PXI-1411 负责采集来自 CCD 的道路图像。同时,在上位机中实现车道识别算法和横向控制算法,车道识别模块将计算出的车辆—预瞄点相对位置及车道曲率作为横向控制模块的输入,车道识别过程见文献[13]。TI DSP2812 作为下位机接收控制指令并转换成 PWM 脉冲控制电机实现前轮转向,PC 机适时监视车身状态及车辆道路相对位置信息。

试验路径由直线段和曲线段组成,固定预瞄距离为 10m。车辆与道路初始侧向偏差为 0.5m,初始纵向车速为 12m/s。从图 13 可以看出,在车辆行驶在直线车道(0~9s)的过程中,采用自适应预瞄方法跟踪目标道路距离偏差小且表征舒适性的侧向加速度峰值有所降低,当车辆稳定在直线车道上行驶时二者差别较小;当行驶至弯曲车道(9~30s)时,两种预瞄控制方法产生的车辆横向偏差和侧向加速度具有一致的变化趋势,但是采用自适应预瞄控制方法的距离偏差和方位偏差要小于固定预瞄控制方法。从表 2 可以看出,影响舒适性的侧向加速度均值和方差分别减小了 31.2%和 50%,路径跟踪方位偏差均值和方差分别减小了 37.5%和 50%,距离偏差的均值和方差分别减少了 52.3%和 66.7%。因此,采用自适应预瞄具有较好的路径跟踪性能和相对较小的侧向加速度。

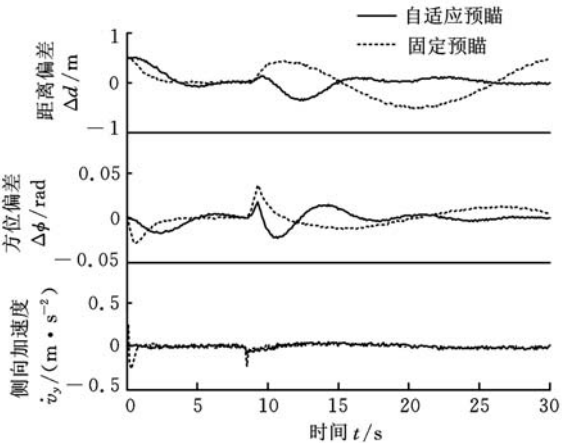


图 13 试验结果对比

表 2 实车道路试验结果

预瞄方法	侧向加速度 $\dot{v}_y(\text{m/s}^2)$		方位偏差 $\Delta\phi(\text{rad})$		距离偏差 $\Delta d(\text{m})$	
	均值	方差	均值	方差	均值	方差
固定预瞄	0.025	0.001	0.011	0.002	0.233	0.045
自适应预瞄	0.019	0.002	0.008	0.001	0.153	0.027
性能改善(%)	31.2	50	37.5	50	52.3	66.7

7 结论

(1) 联立车一路位置模型和侧向加速度 PD 控制器构建车辆横向闭环系统, 分析纵向车速、道路曲率及预瞄距离三参数对系统时域响应的影响。

(2) 针对车辆横向控制受车速、道路曲率和道路预瞄范围的影响, 提出了一种根据车速和道路曲率选择预瞄距离的模糊规则, 并对其进行了遗传优化。

(3) 试验表明, 基于模糊规则的自适应预瞄比固定预瞄方法具有更好的车辆跟踪路径能力和较小的侧向加速度。

参考文献:

- [1] 马莹, 王建强, 徐友春, 等. 智能车辆车道保持系统[J]. ITS 通讯, 2004, 19(1): 7-12.
Ma Ying, Wang Jianqiang, Xu Youchun, et al. Lane Keeping System of Autonomous Vehicle[J]. Intelligent Transportation Systems, 2004, 19(1): 7-12.
- [2] 高振海, 管欣, 李谦, 等. 驾驶员最优预瞄纵向加速度模型[J]. 汽车工程, 2002, 24(5): 434-437.
Gao Zhenhai, Guan Xin, Li Qian, et al. Driver Optimal Preview Longitudinal Acceleration Model[J]. Automobile Engineering, 2002, 24(5): 434-437.
- [3] 高振海, 姜立勇. 汽车车道保持系统的 BP 神经网络控制[J]. 中国机械工程, 2005, 16(3): 272-277.
Gao Zhenhai, Jiang Liyong. Vehicle Lane Keeping System Control with BP Neural Network[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(3): 272-277.
- [4] Cerone V, Milanese M, Regruto D. Combined Automatic Lane-keeping and Driver's Steering Through a 2-DOF Control Strategy[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(1): 135-142.
- [5] Tsugawa S. Vision-based Vehicles in Japan: Machine Vision Systems and Driving Control Systems[J]. IEEE Transactions On Industrial Electronics, 1994, 41(4): 398-405.
- [6] Marino R, Scalzi S, Orlando G, et al. A Nested PID Steering Control for Lane Keeping in Vision Based Autonomous Vehicles [C]//Proceedings of the American Control Conference. St. Louis, 2009: 2885-2890.
- [7] Wu Shinq-Jen, Chiang Hsin-Han, Perng Jau-Woei, et al. The Heterogeneous Systems Integra-

tion Design and Implementation for Lane Keeping on a Vehicle[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2008, 9(2): 246-263.

- [8] Sidhu A S. Development of an Autonomous Test Driver and Strategies for Vehicle Dynamics Testing and Lateral Motion Control[D]. Ohio State: The Ohio State University, 2010.
- [9] 李英. 方向与速度综合控制驾驶员模型及在 ADAMS 中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [10] 沈垺, 凌锐, 李舜酩. 基于预瞄最优曲率模型的大曲率转向控制方法[J]. 中国机械工程, 2012, 23(17): 2111-2115.
Shen Huan, Ling Rui, Li Shunming. Steering Control on Large Curvature Road Based on Preview Optimal Curvature Model[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(17): 2111-2115.
- [11] Wise M, Hsu J. Application and Analysis of a Robust Trajectory Tracking Controller for Under-Characterized Autonomous Vehicles [C]//17th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2008 IEEE Multi-conference on Systems and Control. San Antonio, 2008: 274-280.
- [12] 王荣本, 马雷, 施树明, 等. 高速智能车辆变结构转向控制器切换超平面选取方法[J]. 机械工程学报, 2004, 40(10): 82-86.
Wang Rongben, Ma Lei, Shi Shuming, et al. Method of Choosing Hyperplane of High-speed Intelligent Vehicle Variable Structure Steering Controller[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(10): 82-86.
- [13] 王家恩, 陈无畏, 王檀彬, 等. 基于期望横摆角速度的视觉导航智能车辆横向控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 108-115.
Wang Jiaen, Chen Wuwei, Wang Tanbin, et al. Vision Guided Intelligent Vehicle Lateral Control Based on Desired Yaw Rate[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 108-115.
- [14] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996.

(编辑 袁兴玲)

作者简介: 陈无畏, 男, 1951 年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学与控制。发表论文 130 余篇。王家恩, 男, 1984 年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院博士研究生。汪明磊, 男, 1984 年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院博士研究生。王金波, 男, 1979 年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院博士研究生。