

文章编号:1005-0523(2013)03-0076-06

车道偏离预警模糊控制算法研究

苗水雯,杨方宜,万华森

(昆明理工大学交通工程学院,云南昆明 650500)

摘要:车道偏离预警系统多采用固定的横向偏移量或者预计跨越车道时间作为预警的阈值,在实际应用中不能很好的适应每个驾驶员个体。提出了一种车道偏离预警模型,该模型是对轮胎距车道线距离和预计跨越车道时间这两个车辆状态信息建立模糊控制规则,通过Simulink模糊控制模块进行仿真,实现对车道偏离危险等级的确定。驾驶员只需选择一个适合自己的车道偏离预警风险等级即可,此车道偏离预警模型能够减少报警中虚报和漏报。

关键词:车道偏离预警;模糊控制;TLC算法

中图分类号:U471.15

文献标志码:A

车道偏离造成的人员财产损失约占整个交通事故损失的三分之一之多,这类事故主要由于驾驶员注意力分散引起的,如使用手机、驾驶疲劳、瞌睡等等^[1]。车道偏离预警系统(lane departure warning system, LDWS)的开发应用为驾驶员带来了福音,当车辆发生车道偏离时,车道偏离预警系统能够发出警报引起驾驶员的注意,从而减少或避免交通事故的发生。目前,车道偏离预警系统受到国内外汽车生产厂商和研究机构重视,已经成功研制出一些各具特色的车道偏离警告系统,如:美国研制的AURORA系统,德国研制的AutoVue系统及日本三菱公司开发的DSS系统等^[2]。车道偏离预警系统一般分为3部分,①车道线检测:通过视觉传感器检测车道线;②预警变量估计:一般选择横向偏移量和车辆越过车道线的时间作为预警变量;③预警:决策何时、何种方式提醒驾驶员。系统所采用的警告标准大致分为4种:基于当前车辆于车道中位置(car's current position, CCP)、基于未来车辆偏离量的不同(future offset difference, FOD)、基于车辆前轮跨越车道线边界的时间TLC(time to lane crossing, TLC)、基于对道路场景的感知(knowledge based interpretation of road scenes, KBIRS)。4种警告标准中TLC应用最为广泛^[2]。这些警告标准算法中大多都是利用时间或者距离其中之一作为预警阈值,没有对汽车偏离车道危险程度进行有效划分。大多数系统的性能受限于道路环境和某一固定类型的驾驶员群体,并且在LDWS使用过程中其误报现象经常给驾驶员带来困扰^[3]。本文基于昆明理工大学自主研发三屏驾驶模拟系统平台DSR-1000TS,计算车辆前轮轮胎相对车道线的距离和运用TLC算法估计出前轮越过车道线的时间,这些信息将作为本文建立模糊控制系统的内部参数,通过所建立的模糊规则,得到当前车辆在车道中行驶状态的危险程度。

1 车道偏离预警系统信息采集

L A ZADEH在1964年提出了模糊集合的概念。其中模糊理论是以模糊集合为基础,其基本精神是接受模糊性现象存在的事实,而以处理模糊不清的事物为主要研究目的。模糊不清的概念在时间、空间、条件上具有可变性^[4-5]。对车道偏离危险程度的评价也是一个模糊的、不清晰的系统,一般以车辆前轮距车道线的距离和前轮预计越过车道线的时间为评价标准。

收稿日期:2013-02-26

作者简介:苗水雯(1988—),女,硕士研究生,研究方向为交通安全。

1.1 车道线检测和建模

驶模拟器中呈现的道路由连续的路块组成的,如图1所示,车道线的识别根据路块中车道线的不同属性,确定其位置。

图1中表示以4点 A_{li} , A_{ri} , B_{ri+1} , B_{li+1} 围成的路块,整个路块宽度为 B ,该路块对应的中桩坐标为 $(0, Y_i)$, $(0, Y_{i+1})$,左右车道线及路面中心线在路块中的位置由路块4个角点坐标决定,4个角点的纵坐标由中桩坐标确定,而横坐标由左车道线距左路基的距离 l 确定,即 l 所占整个路块宽度的比例决定。在弯道处,我们将路块分割成极小的矩形单元后再确定车道线位置。

1.2 轮胎坐标及距车道线距离建模

判断车辆是否发生偏离,轮胎距车道线距离是重要指标之一。对于直线路块,车辆地面坐标系中质心 O_1 坐标为 (S_x, S_y) ,设车辆横摆角度为 θ ;车辆宽为 W_c ;车辆轴距为 L_c ; (X_i, Y_i) , (X_{i+1}, Y_{i+1}) 表示道路路块中桩坐标; B 为道路宽度; d 为左前轮轮胎边沿距道路边界的距离;直线 l_m 表示道路中心线。车辆侧偏状态如图2所示。

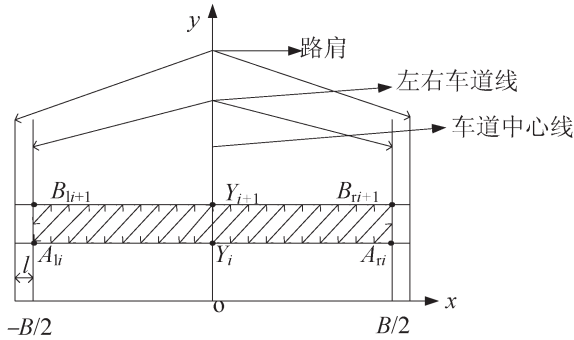


图1 场景路块模型示意图

Fig.1 A model of the scene road block

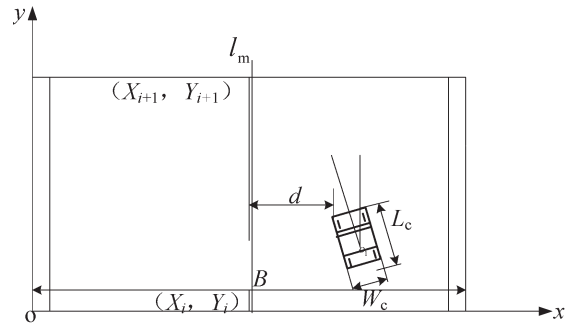


图2 车辆在任一路块位置示意图

Fig.2 The location of the vehicle at one road block

轮胎左前轮 T_{lf} 、右前轮 T_{rf} 、左后轮 T_{lr} 、右后轮 T_{rr} 坐标表示为表1。

表1 四个轮胎坐标表

Tab.1 Coordinates of four tyres

轮胎	横坐标	纵坐标
T_{lf}	$S_x + \frac{1}{2}L_c \sin \theta - \frac{1}{2}W_c \cos \theta$	$S_y + \frac{1}{2}L_c \cos \theta + \frac{1}{2}W_c \sin \theta$
T_{rf}	$S_x + \frac{1}{2}L_c \sin \theta + \frac{1}{2}W_c \cos \theta$	$S_y + \frac{1}{2}L_c \cos \theta - \frac{1}{2}W_c \sin \theta$
T_{lr}	$S_x - \frac{1}{2}L_c \sin \theta - \frac{1}{2}W_c \cos \theta$	$S_y - \frac{1}{2}L_c \cos \theta + \frac{1}{2}W_c \sin \theta$
T_{rr}	$S_x - \frac{1}{2}L_c \sin \theta + \frac{1}{2}W_c \cos \theta$	$S_y - \frac{1}{2}L_c \cos \theta - \frac{1}{2}W_c \sin \theta$

道路边界线 l_m 直线方程为

$$aX + bY + c = 0 \quad (1)$$

设左前轮胎 T_{lf} 距车道线 l_m 距离 d , 在路块坐标系中坐标为 (T_{lfx}, T_{lfy}) , 则

$$d = \frac{|a \times T_{lfx} + b \times T_{lfy} + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (2)$$

其中:直线 l_m 模型参数 a, b, c 可由路块模型确定:

$$a = Y_{i+1} - Y_i, b = X_{i+1} - X_i, c = (Y_{i+1} - Y_i)X_i + (X_{i+1} - X_i)(Y_i + \frac{B}{2})$$

1.3 TLC评价算法

TLC是指从车辆当前位置开始到车辆与车道线开始接触为止的运动时间为 t ^[6],若 t 小于设定的时间阈值,则认为车辆将发生车道偏离,此时系统报警。基于TLC评价算法模型示意图如图3所示。

图3中, d 为左前轮胎边界距道路边界的距离; V 表示车速; V_l 为汽车的侧向速度; V_d 表示前向速度。

预警系统触发条件为预计车辆前轮越过车道线的时间小于TLC系统所设定的阈值 T_{th} ^[7]:即 $t < T_{th}$ 。

$$t = \frac{-V_l + \sqrt{V_l^2 + 2 \times a_l \times d}}{a_l} \quad (3)$$

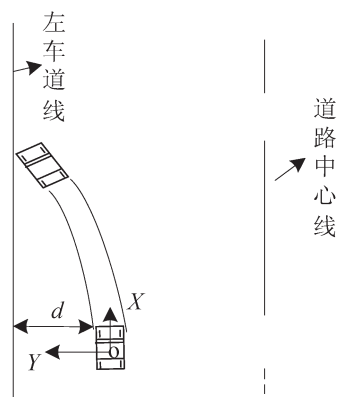


图3 TLC模型示意图

Fig.3 The diagram of TLC model

式中: d 为轮胎距道路边界的距离; V_l 为汽车的侧向速度,可通过对侧向位移变化率得到; a_l 为汽车的侧向加速度,同样可通过侧向速度的变化率得到。本文选用的TLC算法考虑了车辆侧向加速度,在实际应用中侧向加速度的误差可能会被放大,但另一方面该相对与假设车辆的侧向速度在短时间内是个常值的算法来讲,式(3)更能提现真实情况的车辆运动轨迹,提高了报警信号的可靠性,尤其是针对汽车朝道路边界加速运动的情况。在本文中 V_l 及 a_l 值均来自于DSR-1000TS系统,该系统采用12自由度的车辆动力学模型,能够很好的模拟出汽车的行驶状况。

2 LDWS模糊控制器逻辑结构设计及实现

2.1 确定模糊输入输出变量

从理论上讲,模糊控制器的维数越高,控制精度越高。但维数过高,模糊控制规则变得过于复杂,控制算法的实现相当困难,因此选择二维模糊控制器^[8]。由上文提到TLC评价模型可知,与判断标准直接相关的是轮胎距道路边界的距离 d 以及预计压线时间 t ,故设定这两个因素为输入变量,输出变量是车辆实时偏离状态的危险等级。车道偏离预警模糊控制器的结构图如下图4所示。

2.2 模糊控制的实现

确定时间 t 值需要考虑驾驶员在驾驶过程中面对外界刺激的反应时间,包括神经滞后时间 T_d 、操纵反应滞后时间 T_h 以及预瞄时间 T_p 。在实际驾驶过程中,驾驶员熟练程度不同,各个参数值也会不同,一般取参数 T_d , T_h , T_p 的变化范围分别为0.5~1.8 s,0.1~0.5 s,0.05~0.25 s^[9-10],本文综合考虑这3个参数的取值范围,将 t 论域设为0~1.5 s;根据实验室道路模型单车道宽度为3.8 m,车辆模型轮距为1.668 m,将 d 论域为0~0.9 m,给定危险等级 G 论域为0~10 m。取输入变量的模糊子集从安全到危险程度过渡均分为4个集合,即:十分安全HS,一般安全LS,一般危险LH,十分危险HH;输出变量的模糊子集分为6个集合,即:十分安全HS,较安全MS,一般安全LS,一般危险LH,较危险MH,十分危险HH。根据模糊逻辑理论,指标线形变化的形式有三角变化及梯度变化等,为了控制运算速度,本文各个变量只选取三角形隶属度函数和梯形隶属度函数组合^[11]。

TLC算法中时间 t 子集隶属度函数为(t 为预计车辆跨越车道线的时间):

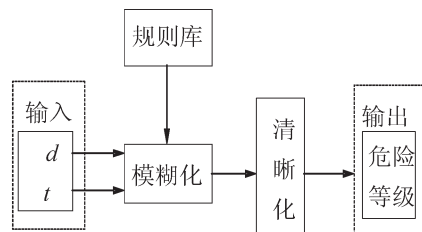


图4 车道偏离预警系统模糊控制器结构图

Fig.4 The structure of fuzzy controller of lane departure warning system

$$HH(t)=\begin{cases} \frac{0.5-t}{0.5} & t<0.5 \\ 0 & t\geqslant 0.5 \end{cases} \tag{4}$$

$$LH(t)=\begin{cases} \frac{0.5}{t} & t<0.5 \\ \frac{1-t}{0.5} & 0.5\leqslant t<1 \\ 0 & t>1 \end{cases} \tag{5}$$

$$LS(t)=\begin{cases} \frac{t-0.5}{0.5} & 0.5\leqslant t<1 \\ \frac{1.5-t}{0.5} & 1\leqslant t<1.5 \\ 0 & t\geqslant 1.5 \end{cases} \tag{6}$$

$$HS(t)=\begin{cases} \frac{t-1}{0.5} & 1\leqslant t<1.5 \\ 1 & t\geqslant 1.5 \end{cases} \tag{7}$$

距离 d 子集隶属度函数为(d 为轮胎距道路边界的距离):

$$HH(x)=\begin{cases} \frac{0.3-x}{0.3} & x<0.3 \\ 0 & x\geqslant 0.3 \end{cases} \tag{8}$$

$$LH(x)=\begin{cases} \frac{x}{0.3} & x<0.3 \\ \frac{0.6-x}{0.3} & 0.3\leqslant x<0.6 \\ 0 & x\geqslant 0.6 \end{cases} \tag{9}$$

$$LS(x)=\begin{cases} \frac{x-0.3}{0.3} & 0.3\leqslant x<0.6 \\ \frac{0.9-x}{0.3} & 0.6\leqslant x<0.9 \\ 0 & x\geqslant 0.9 \end{cases} \tag{10}$$

$$HS(x)=\begin{cases} \frac{x-0.6}{0.3} & 0.6\leqslant x<0.9 \\ 1 & x\geqslant 0.9 \end{cases} \tag{11}$$

根据车辆前轮距车道线距离的远近和预测出的轮胎将要越过车道线的时间长短来建立危险等级模糊规则表^[1]。在规则建立是考虑由驾驶员不良驾驶习惯造成的车辆偏向道路一侧行驶时,属于危险情况。

表2 LDWS模糊控制规则表
Tab.2 LDWS fuzzy control rule

危险等级	十分安全 HS	一般安全 LS	一般危险 LH	十分危险 HH
十分安全 HS	HS	MS	LH	HH
一般安全 LS	MS	MS	LH	HH
一般危险 LH	LS	LS	MH	HH
十分危险 HH	HH	HH	MH	HH

由上文隶属度函数和模糊控制规则表得到模糊输出关系曲面,如图5所示。

3 LDWS模糊控制 Matlab 仿真

通过所建立的模糊规则,利用 Matlab 中 Simulink 模块进行模糊仿真。建立车道偏离如图 6 所示的预警系统 Simulink 仿真结构。

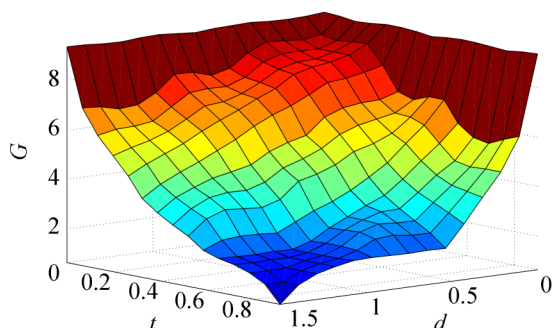


图5 输入、输出变量及危险等级隶属度函数
Fig.5 Input and output variables and risk grade membership function

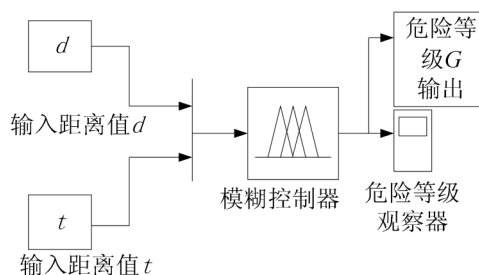


图6 车道偏离预警系统 Simulink 仿真结构图
Fig.6 The Simulink simulation diagram of LDWS

本文通过驾驶模拟平台采集的参数包括:时间 t , 侧向速度 V_l , 侧向加速度 a_l , 车辆地面质心坐标 (S_x, S_y) 以及道路中桩坐标 (X_l, Y_l) 等, 在三维场景中建立驾驶一段有效长度为 1.2 km 的双向两车道直线路段, 实验要求驾驶员以 $40(\pm 5) \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度运行, 允许自由换道。本文选取了实验中部分数据进行分析。试验数据表(部分)如表 3 所示。

表3 车道偏离预警系统实验数据表(部分)

Tab.3 Experimental data of lane departure warning system

系统运行时间/s	车辆质心坐标 (S_x, S_y)		d / m	t / s
1 156.181	-1 994.123	538.500	0.539	0.917
1 156.481	-1 994.349	546.882	0.313	0.596
1 161.081	-1 994.302	683.389	0.359	1.077
1 161.231	-1 994.264	688.073	0.396	0.984
1 164.481	-1 994.409	792.709	0.252	0.742
1 179.881	-1 994.051	1 348.831	0.611	0.939
1 180.331	-1 994.238	1 366.155	0.423	0.676
1 191.281	-1 994.540	1 796.882	0.124	0.429
1 191.631	-1 994.364	1 809.328	0.296	0.741
1 191.831	-1 994.267	1 816.224	0.393	1.267

在所建立的车道偏离预警系统 Simulink 仿真系统中, 离线分析 d 与 t 对危险等级 G 的影响。

实例 1 $d=0.359 \text{ m}$ 由 (9)、(10) 式判断 d 属于 LH (一般危险子集), 由公式 (3) 计算得到 $t=1.077 \text{ s}$, 由 (6)(7) 式判断 t 属于 LS (一般安全子集), 仿真后输出危险等级 $G=4.893$, 由模糊规则表判断 G 属于 LS (一般安全子集);

实例 2 在试验过程中, 出现车辆紧贴车道一边行驶, d 值较小, 为 0.124 m 。由 (8)(9) 式判断 d 属于 HH (十分危险子集), 由公式 (3) 计算得到 $t=0.429 \text{ s}$, 由 (4)(5) 式判断 t 属于 LH (一般危险子集), 仿真后输出危险等级 $G=8.364$, 由模糊规则表判断 G 属于 HH (十分危险子集)。

从所举的两个实例的仿真结果可知该模糊控制系统能够根据不同危险程度的 d 和 t 值得到相应的危险等级; 并能纠正驾驶员紧靠道路一侧行驶的不良习惯。若驾驶员希望留给自己做出车辆回正反应时间

较长,可以设置预警系统在危险等级较低时开始工作;反之可以设置较高的危险等级。针对不同的安全等级,车道偏离预警系统给予有差别的报警,使得报警更加人性化,并能够提高报警的准确性。

4 结语

本文运用模糊控制原理,对LDWS评价标准中的两个参数 d 和 t 相应的论域和隶属度函数,运用Simulink模块进行离线仿真,得到车辆当前运行状态的危险等级。该预警系统能够满足驾驶员的个性化需求,避免虚报和漏警,减少驾驶员心理负担;并且模糊规则建立时考虑了驾驶员紧靠一侧行驶的不良不习惯,将这一驾驶行为列为危险等级高水平,能够时刻提醒驾驶员正确驾驶。

参考文献:

- [1] SAMYONG K, SEYOUNG O. A driver adaptive lane departure warning system based on image processing and a fuzzy evolutionary technique[C]//Intelligent Vehicles Symposium, Columbus Ohio USA, 2003:361-365.
- [2] 王荣本,余天洪,郭烈,等. 基于机器视觉的车道偏离警告系统研究综述[J]. 汽车工程, 2005, 4(27):463-466.
- [3] PARAG H, BATAVIA. Driver adaptive lane depart warning system[C]//Pennsylvania:Carnegie Mellon University, 1999: 9-10.
- [4] 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其研究[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2009:2-3.
- [5] 赵琳琳,李海琼. 道路速度一致性评价指标模糊化评价方法[J]. 华东交通大学学报, 2012, 29(2):63-67.
- [6] LEBLANC D J, JOHNSO G E. CAPC: an implementation of a road-departure warning system[C]//Control Applications, 1996:590-595.
- [7] 吴沫. 基于计算机视觉的车道跑偏警告系统方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005:18-19.
- [8] 吴超仲,王春燕,杨利,等. 智能公路系统车道保持模糊控制研究[J]. 公路交通科技, 2002, 19(2):131-133.
- [9] 王庆贺. 车道偏离预警系统决策算法及性能测试方法研究[D]. 长春:吉林大学, 2011:45-51.
- [10] 徐瑾. 基于ADAMS的不同类型驾驶员模型参数的选择[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008:25-38.
- [11] 杜玲玲. 混合超启发式法求解大规模VRP的优化研究[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(1):62-67.

Research on Fuzzy Control Algorithm of Lane Departure Warning

Miao Shuiwen, Yang Fangyi, Wan Huasen

(School of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Lane departure warning system mostly adopts the fixed value of lateral offset and the time of lane crossing as the warning threshold value, but in practice it's not well fit for every driver. This paper proposes a lane departure model, which puts forward fuzzy control rules based on the vehicle information of the distance between the lane tyres and the lane crossing time. Through fuzzy simulation with Simulink, an appropriate risk level is determined. It is concluded that the proposed system can reduce the false negatives.

Key words: lane departure warning system; fuzzy control; TLC algorithm