

基于驾驶员类型分析的智能车辆交叉口行为决策

宋威龙, 熊光明, 王诗源, 陈慧岩

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 提出一种基于车辆行为交互的两阶段智能车辆交叉口行为决策方法. 第一阶段通过基于模糊逻辑的驾驶员激进程度判别模型, 判断交叉口其他车辆的驾驶员类型; 第二阶段通过驾驶员激进程度与碰撞到达时间(TTC)进行行为决策. 使用 Prescan 和 Matlab/Simulink 进行交叉口联合仿真. 结果表明, 该方法可以使智能车辆安全有效通过有其他车辆通行的交叉路口.

关键词: 智能车辆; 驾驶员类型; 行为决策; 交叉口

中图分类号: TP 242.6 文献标志码: A 文章编号: 1001-0645(2016)09-0917-06

DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2016.09.007

Decision Making for Intelligent Vehicles Based on Driver Type Analyzing in an Intersection

SONG Wei-long, XIONG Guang-ming, WANG Shi-yuan, CHEN Hui-yan

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A two-stage method of intelligent vehicle(IV) decision making for traffic interaction in an intersection was proposed in this paper. In the first stage, a driver type recognition model was presented based on fuzzy logic to get the aggressive rate of social vehicles. In the second stage, a rule-based decision-making algorithm was used to generate the best behavior for IV based on vehicle's aggressive ratio and time to collision(TTC). Finally, a Co-simulation with Prescan and Matlab/Simulink was performed to verify the algorithm. The results show that the method could lead IV get through intersection safely and efficiently.

Key words: intelligent vehicle; driver type; decision making; intersection

交叉口智能车辆与其他车辆的交互问题, 是当前的一个热点问题. 美国 DARPA 挑战赛中, 冠军 Boss 针对典型的 T 型路口, 通过阈值测试, 给出了车辆可以充分加减速的可通过情形^[1]. 但是, 对于可能发生冲突的情况, 采用了较为保守的驾驶策略, 通过减速以及停车等待等方法规避冲突, 而并没有考虑其他车辆潜在的让行意图, 这可能导致冲突两车同时减速而影响通行效率. Quinlan 等基于先到先服务通行原则以及车辆与基础设施通信技术, 研究了智能车辆交叉口的通行问题^[2-3]. 然而该研究并没有

考虑到驾驶员驾驶意图^[4]所带来的影响, 若其他车辆通行时不遵守该规则, 则智能车辆的安全通行便会受到很大影响.

激进的驾驶行为是交通事故产生最重要的原因之一. 此外, 激进、普通以及保守类型的驾驶员具有不同的驾驶行为, 是存在潜在冲突时智能车辆让行与否的重要依据. 车道行驶场景下, 谷歌无人车通过判别周边车辆是否为激进驾驶员, 进行驾驶模式的切换. 因此, 将驾驶员类型^[5-8]引入智能车辆行为决策系统, 对提高现有路口交互方法的安全性与时效

收稿日期: 2015-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91420203)

作者简介: 宋威龙(1988—), 男, 博士研究生, E-mail: songweilong8896@gmail.com.

通信作者: 熊光明(1975—), 男, 博士, 副教授, E-mail: xionguangming@bit.edu.cn.

性具有重要的意义,有助于智能车辆在真实城市交通环境中的安全稳定行驶。

文中在作者已有研究工作基础上^[7],解决智能车辆与其他车辆在路口交互过程中存在潜在冲突时的行为决策问题。通过引入**驾驶员类型**的概念,将该问题转换为其他车辆驾驶员激进程度的判断问题。基于模糊逻辑,设计了驾驶员激进程度判别模型。基于其他车辆的行驶意图、相对智能车辆的激进程度以及车辆距离冲突点的**碰撞时间**(time to collision, TTC),建立行为决策规则表,并以此控制智能车辆安全有效的通过交叉口。

1 智能车辆交叉口行为决策框架

文中所针对的场景如图 1 所示,智能车辆直行通过交叉口,实线圆圈区域代表车辆与基础设施通信(V2I)的通信距离。在通信距离范围之内,智能车辆可以与基础设施通信并获得其他车辆的速度、加速度、位置等信息。当其他车辆进入驾驶意图识别算法生效区域后,智能车辆能够通过基于有限状态机的驾驶意图识别方法^[7]有效判断其他车辆驾驶意图(左转、右转、直行、停车),并以此判断两车行驶路线是否存在潜在的冲突。文中研究的核心在于解决两车冲突时智能车辆的决策问题。

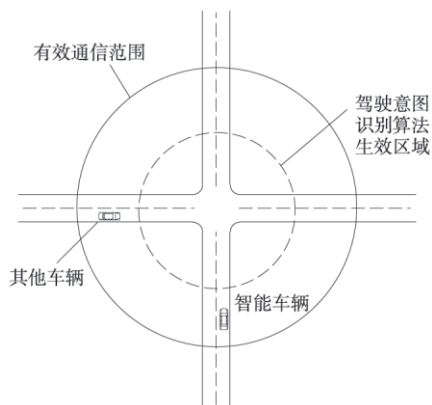


图 1 智能车辆通过无信号灯交叉口示意图
Fig.1 Typical scenario for IV in an uncontrolled intersection

基于 V2I 技术,智能车辆可以获知其他车辆的位置、速度、加速度等车辆状态信息,基于该信息、本车状态信息以及路口的几何信息,文中将智能车辆交叉口行为决策问题分解为两阶段决策过程:其他车辆驾驶员类型判断阶段与智能车辆行为决策阶段。其他车辆驾驶员类型判断阶段为从智能车辆与其他车辆进入有效通信范围(图 1 中实线圆圈区域)到其他车辆进入驾驶意图识别算法生效区域(图

1 虚线圆圈区域)之间的交互过程。该阶段基于其他车辆的行驶速度与纵向加速度,通过模糊逻辑设计了其他车辆驾驶员激进程度判别方法,判别其他车辆的驾驶员激进程度。智能车辆行为决策阶段为从其他车辆进入驾驶意图识别算法生效区域到路口交互结束的整个过程。当智能车辆到达交叉口区域后,通过有限状态机判别其他车辆的行驶方向,对于潜在的冲突区域,基于 TTC 和驾驶员相对激进程度,设计了相应的行为决策规则,将加速、减速、匀速行驶的指令发给智能车辆控制系统,控制智能车辆安全、有效通过十字路口。

2 基于模糊逻辑的驾驶员类型划分

为实现驾驶员类型划分的模糊逻辑推理,首先将速度、加速度离散为语言变量,然后构建模糊逻辑规则,将模糊推理的结果最后经过解模糊得到驾驶员激进程度值。对于加速度的选择,参照文献^[8],只保留加速度值大于 0.4 m/s^2 或小于 -0.4 m/s^2 并且加速时间达到 0.5 s 的阶段,作为加速度进行计算,速度加速度输入值由式(1)~(2)得到。

$$v = \frac{1}{N_v} \sum_{i=1}^{N_v} |v_i|, \quad (1)$$

$$a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |a_i|, \quad (2)$$

式中: v_i 、 a_i 分别为 i 时刻的速度、加速度值, N_v 、 N 分别为接收速度、加速度信息所对应时刻的次數。

在文中所示的城市道路中,假定车道行驶时限速为 60 km/h (约等于 16.67 m/s),进而构建速度隶属度函数,将速度值模糊化为语言变量极小(NS)、小(S)、中位(M)、大(H)、极大(PH)。加速度值模糊化为语言变量低(L)、中位(M)、高(H)。输出驾驶员激进程度模糊化为保守(C)、普通(N)、激进(A)。各变量的隶属度函数如图 2 所示。

针对语言变量,构建模糊规则表,如表 1 所示,表中第一行表示速度语言变量,第一列表示加速度语言变量,每个速度、加速度语言变量相交的位置为所对应的驾驶员激进程度语言变量。

该部分模糊推理的模糊蕴含关系采用 Mamdani 法则,输出变量解模糊采用重心法,计算得到不同速度、加速度下驾驶员激进程度输出曲面如图 3 所示。由此,就得到了不同速度、加速度输入与驾驶员激进程度值之间的对应关系。

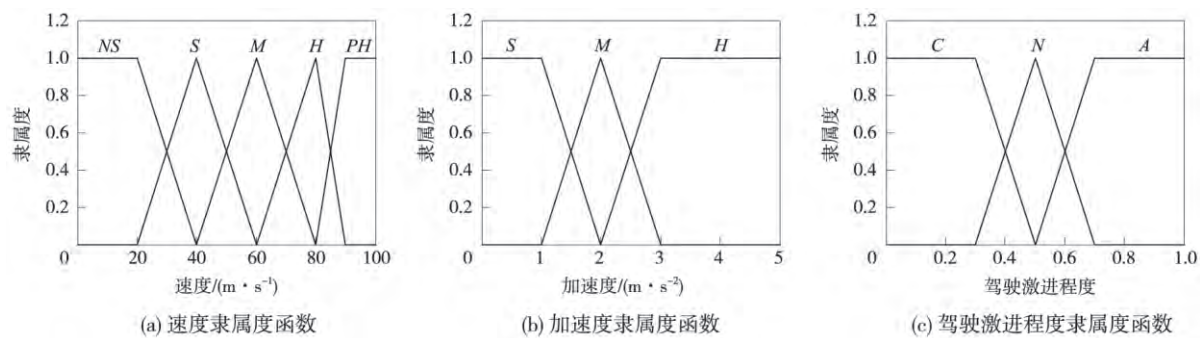


图 2 输入输出隶属度函数图
Fig.2 The membership function of inputs and outputs

表 1 模糊逻辑规则表
Tab.1 Fuzzy Logic rules

加速度值	速度值				
	PH	H	M	S	NS
H	A	A	A	N	N
M	A	A	N	C	C
S	A	A	N	C	C

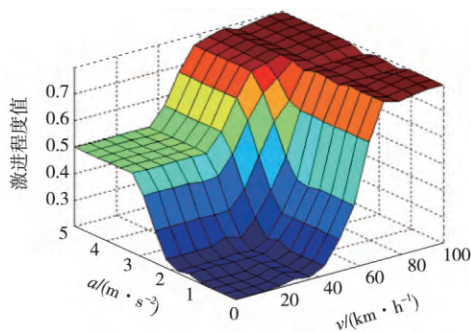


图 3 模糊逻辑输出曲面
Fig.3 Output result of fuzzy logic

若两辆车存在潜在冲突,则需要满足

$$|T_{O1} - T_{O2}| < T_{th}, \quad (4)$$

$$T_{th} = \min_{i=1,2} 2L_i/v_i, \quad (5)$$

式中 L_i 为车辆长度,为保证安全,选取两倍车辆长度计算时间阈值 T_{th} .



图 4 十字路口冲突区域
Fig.4 Conflict area in an intersection

3 交叉口冲突区域与 TTC 分析

交叉口冲突区域的选择主要有将车辆假设为质点求得不同车辆行驶曲线的交叉点,以及在此基础上考虑车辆尺寸两种方式.然而车辆在车道内的行驶轨迹并不确定,这使得所选定的冲突点随时间可能会发生变化.文中将车道线约束考虑在内,如图 4 所示(根据有限状态机方法已判断其他车辆要左转通过路口),区域 A 即为两车的潜在冲突区域.而点 O(十字交叉口中心点)即为潜在冲突的起点,故将点 O 选取为 TTC 计算的参考点.其他车辆以及智能车辆距离点 O TTC 计算公式为

$$T_{O_i} = d_i/v_i. \quad (3)$$

式中: $d_i(i=1,2)$ 为智能车辆与其他车辆距离参考点 O 的距离; $v_i(i=1,2)$ 为两者速度; $T_{O_i}(i=1,2)$ 为智能车辆与其他车辆距离参考点 O 的 TTC.

4 基于 TTC 的智能车辆交叉口行为决策机制

根据式(4)~(5),可以判定智能车辆与其他车辆是否存在潜在冲突.当存在潜在冲突时智能车辆行为决策流程如图 5 所示.首先计算其他车辆与智能车辆到达冲突区域的时间,若时间差小于安全阈值,则进一步根据第一阶段的驾驶历史数据判定其他车辆与智能车辆的驾驶激进程度差值.若该值大于激进判定启发值,则根据行为决策规则表选取当前决策方案,进一步进行智能车辆的速度控制,最终安全通过交叉口.若两者激进程度基本相同,则通过调整智能车辆自身速度,改变两者激进程度差,通过决策规则表得到适当决策结果,进而控制智能车辆通过交叉口.

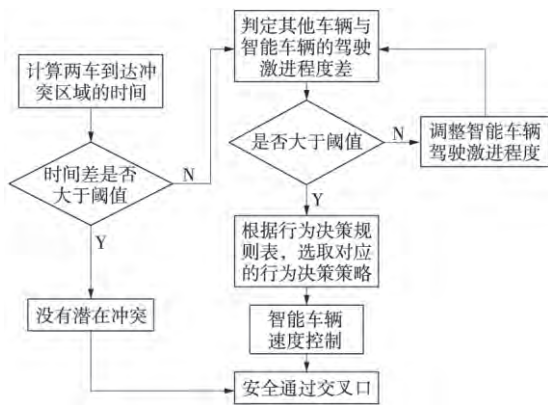


图 5 智能车辆行为决策流程
Fig.5 Behavior generation process for intelligent vehicle

智能车辆与其他车辆之间的相对驾驶激进程度大小 ΔA

$$\Delta A = A_{IV} - A_{TV}. \quad (6)$$

对于不同的 ΔA , 当 $\Delta A < -0.05$ 时认为前者相对后者为保守类型; 当 $\Delta A > 0.05$ 时为激进类型; 当 $-0.05 \leq \Delta A \leq 0.05$ 为普通类型.

为了保证驾驶安全性, 智能车辆需要满足使用最大减速度情况下在冲突区域前能够停车这一先验要求. 故存在潜在冲突情况下智能车辆的运动需要满足以下约束:

$$v_1 \leq a_{\text{decmx}} T_{O1}, \quad (7)$$

$$d_1 \geq v_1 T_{O1} - \frac{1}{2} a_{\text{decmx}} T_{O1}^2. \quad (8)$$

车辆的最大减速度 a_{decmx} 可由车辆模型得到. 由于式(7)~(8)中 v_1 为智能车辆的速度控制量, 故选取另两个参数 T_{O1} 以及 d_1 作为行为决策的输入. 根据模糊逻辑的速度划分情况, 求得决策临界值, 将参数离散化为表 2 的几个区间. 并以此构建行为决策规则表, 得到其他车辆相对驾驶员类型为激进和保守时的驾驶规则如表 2~表 3 所示.

表 2 其他车辆相对类型为激进时的驾驶规则表 ($\Delta A < -0.05$ 时)

Tab.2 Drive rules when relative driver type of other vehicle is aggressive ($\Delta A < -0.05$)

d_1/m	T_{O1}/s		
	$0 < T_{O1} \leq 1$	$1 < T_{O1} \leq 2$	$T_{O1} > 2$
$0 < d_1 \leq 10$	Dec	Dec	Dec
$10 < d_1 \leq 20$	Dec	Dec	LK
$20 < d_1$	Dec	Dec	LK

注: LK 为匀速指令, Dec 为减速指令, Acc 为加速指令.

在相对冲突区域不同距离以及不同 TTC 的情况下, 智能车辆将分别做出不同的行为决策以与其

他车辆进行交互.

表 3 其他车辆相对类型为保守时的驾驶规则表 ($\Delta A > 0.05$)

Tab.3 Drive rules when relative driver type of other vehicle is conservation ($\Delta A > 0.05$)

d_1/m	T_{O1}/s		
	$0 < T_{O1} \leq 1$	$1 < T_{O1} \leq 2$	$2 < T_{O1}$
$0 < d_1 \leq 10$	Acc	Acc	LK
$10 < d_1 \leq 20$	Acc	LK	LK
$20 < d_1$	Acc	LK	LK

注: 同表 2.

当 $-0.05 \leq \Delta A \leq 0.05$ 时, 智能车辆与其他车辆的驾驶激进程度基本相同, 调节智能车辆自身的驾驶激进程度等级, 使 ΔA 处于表 2 或表 3 的范围, 进而可以根据表中相应规则进行行为决策生成.

5 仿真实验

系统采用 Prescan7.0.0 和 Matlab-Simulink/Stateflow 进行联合仿真, 其中 Prescan7.0.0 GUI 用来搭建仿真需要的基本元素, Simulink 处理相关控制器算法. Stateflow 建立有限状态机模型. 仿真环境见图 4, 智能车辆直行通过交叉口, 在交叉口的左边出现其他车辆, 其行驶方向为左转通过路口, 两者存在潜在冲突. 假定其他车辆距离路口中心 100 m 时进入通信范围, 距离路口 50 m 时, 智能车辆判断出其他车辆的行驶意图. 智能车辆的初始速度为 15 m/s, 道路的限定车速设计为 60 km/h (即 16.67 m/s).

图 6 为其他车辆为保守类型驾驶员时的实验结果. 基于模糊逻辑的驾驶激进程度判别算法, 图 6(a) 对应的数据以及式(6), 求得相对驾驶员激进程度为 0.107, 进而判定该车辆为保守类型驾驶. 根据图 6(b) 的对应关系, 通过表 3, 得到图 6(c) 所示的智能车辆决策结果, 其中 0 为匀速行驶, 5 为退出路口. 根据图 6(d), 6(e) 以及 6(f), 可以看出, 若智能车辆通过减速, 等待冲突消解后再通过路口, 必须降低到很低的速度让行其他车辆, 这将影响安全性与路口通过效率. 而文中的方法有效地避免了这一缺点, 识别了其他车辆减速的意图, 自身平稳匀速行驶, 避免了潜在冲突, 并率先通过路口.

图 7 为其他车辆为激进类型驾驶员时的实验结果. 基于图 7(a) 所对应的行驶数据以及模糊逻辑的驾驶激进程度判别算法, 以及式(6), 求得相对驾驶激进程度为 -0.168 , 进而判定该车辆为激进类型

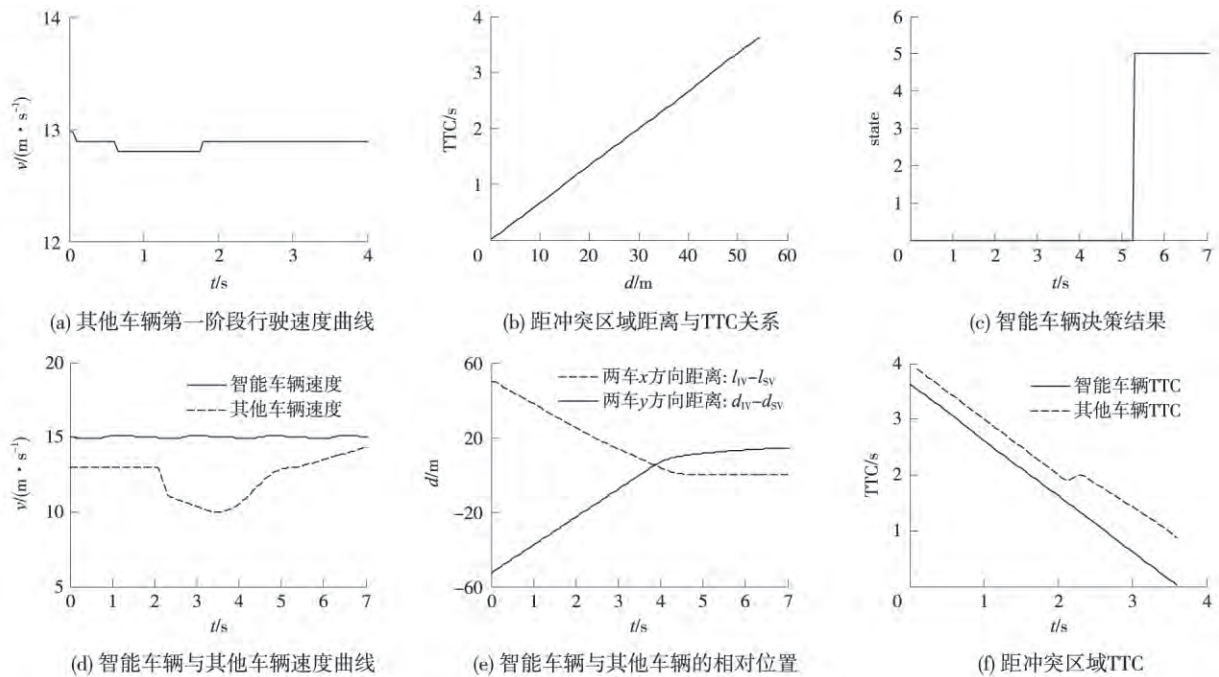


图6 其他车辆为保守类型驾驶员实验结果

Fig.6 Experiment results for conservation driver type of other vehicle

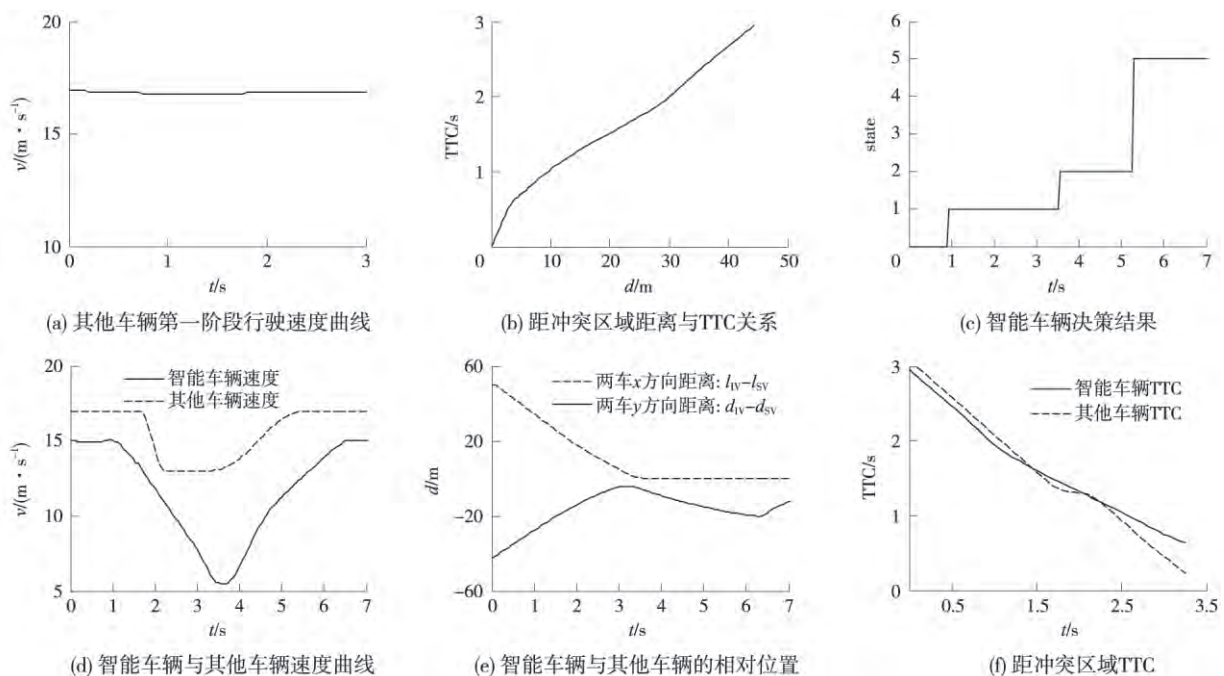


图7 其他车辆为激进驾驶员时实验结果

Fig.7 Experiment results for aggressive driver type of other driver

驾驶。

根据图7(b)所示的对应关系以及表2,得到图7(c)前3.5s所示的智能车辆决策结果,其中0为匀速行驶,1为减速,2为加速,5为退出路口。该图中对应的加速过程为其他车辆已经通过交叉口冲突区域时,智能车辆加速到自身期望速度的过程。通过

图7(d),7(e)以及7(f),可以看出智能车辆与其他车辆有效交互,减速让行以顺利通过路口。

6 结 论

针对智能车辆在交叉口与其他车辆交互的问题,引入驾驶员类型这一重要因素,提出了基于其他

车辆驾驶激进程度的两阶段行为决策方法. 通过其他车辆历史行驶轨迹, 基于模糊逻辑判定其驾驶激进程度, 进而结合其他车辆意图识别, 对于潜在的冲突情形提出了分段式行为决策方法, 基于 TTC 与距冲突点距离, 建立了不同激进程度下行为决策规则表. 最后联合 Prescan 和 Matlab 对智能车辆交叉口动态交通环境进行仿真, 仿真结果显示, 该方法可以使智能车辆有效识别其他车辆驾驶员类型, 实现与不同驾驶员类型的其他车辆交互并安全有效地通过交叉口.

参考文献:

- [1] Urmson C, Anhalt J, Bagnell D, et al. Autonomous driving in urban environments: boss and the urban challenge[J]. *Journal of Field Robotics*, 2008, 25: 425-466.
- [2] Wang C, Peng S P. A multiagent approach to autonomous intersection management[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2008, 31(3): 591-656.
- [3] Quinlan M, Au T C, Zhu J, et al. Bringing simulation to life: a mixed reality autonomous intersection[C]// *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems*. [S.l.]: IEEE, 2010: 6083-6088.
- [4] Gadepally V, Krishnamurthy A, Ozguner U. A framework for estimating driver decisions near intersections[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(15): 637-646.
- [5] Chen D, Ahn S, Laval J, et al. On the periodicity of traffic oscillations and capacity drop: The role of driver characteristics[J]. *Transportation Research Part B Methodological*, 2014, 59(1): 117-136.
- [6] Rodri GuezGonzález A B, Wilby M R, Vinagre D'Az J J, et al. Modeling and detecting aggressiveness from driving signals[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(4): 1419-1428.
- [7] 熊光明, 李勇, 王诗源. 基于有限状态机的智能车辆交叉口行为预测与控制[J]. *北京理工大学学报: 自然科学版*, 2015, 35(1): 34-38.
Xiong Guangming, Li Yong, Wang Shiyuan. Behavior prediction and control method based on FSM for intelligent vehicles in an intersection[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, 35(1): 34-38. (in Chinese)
- [8] Dorr D, Grabengieser D, Gauterin F. Online driving style recognition using fuzzy logic[C]// *Proceedings of IEEE Intelligent Conference on Intelligent Transportation Systems*. [S.l.]: IEEE, 2014: 1021-1026.

(责任编辑: 孙竹凤)