

# 基于有限状态机的智能车辆交叉口行为预测与控制

熊光明, 李勇, 王诗源

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

**摘 要:** 提出一种智能车辆交叉口行为预测与控制方法. 建立交叉口车辆行为预测的有限状态机(FSM)模型, 对交叉口其他车辆的行为进行预测. 构建应用于智能车辆的混合状态系统, 引入有限状态机模型, 结合智能车辆交叉口安全条件运行规则, 实现智能车辆离散状态分析及车辆控制. 运用 PreScan 和 Simulink/Stateflow 实现交叉口联合仿真. 结果表明, 该方法可以使智能车辆安全地通过有其他车辆通行的交叉路口.

**关键词:** 智能车辆; 有限状态机; 混合状态系统; 交叉口; PreScan

中图分类号: TP 242.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-0645(2015)01-0034-05

DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.2015.01.007

## Behavior Prediction and Control Method Based on FSM for Intelligent Vehicles in an Intersection

XIONG Guang-ming, LI Yong, WANG Shi-yuan

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

**Abstract:** A behavior prediction and control method in an intersection for intelligent vehicles was proposed. A finite state machine (FSM) model was established to predict the behaviors of other vehicles in the intersection. A hybrid state system for an intelligent vehicle was built and the FSM model was used to analyze the district states combined with the safety rules of intelligent vehicles and to control the vehicle under the safety condition. A co-simulation with PreScan and Simulink/Stateflow was conducted. The experiment results show that the intelligent vehicle can safely go through the intersection with other vehicles using the proposed approach.

**Key words:** intelligence vehicle; finite state machine(FSM); hybrid state system; intersection; PreScan

有限状态机(finite state machine, FSM)是表示有限个状态以及在这些状态之间转移和动作等行为的数学模型, 它被广泛用于建模应用<sup>[1-2]</sup>. 混合状态系统包括离散状态系统和连续状态系统两个部分, 应用于智能车辆的控制, 可以充分考虑到智能车辆离散的驾驶决策和连续的车辆底层状态, 并能提高车辆适应不同的环境<sup>[3-6]</sup>. 本文主要研究智能车辆在交叉口与其他车辆交互时, 通过有限状态机对交叉口其他车辆行为进行预测, 并应用混合状态系统对智能车辆自身进行安全控制.

对于在交叉口可能会与智能车辆交互的车辆统称为其他车辆. 智能车辆在接近交叉口的应对策略主要包括以下几个部分: 对其他车辆的状态估计和预测、对智能车辆状态的分析、安全条件判断以及对智能车辆的控制, 系统结构如图 1 所示.

其中对其他车辆的驾驶行为进行估计和预测是通过接收交叉口中其他车辆的信息进行驾驶意图的估计, 并预测其他车辆在交叉口中的行为. 智能车辆状态的分析主要分析智能车辆在当前交叉口行驶方向上可能的状态转移. 安全条件判断则根据其他

收稿日期: 2013-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91120015, 91120010)

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

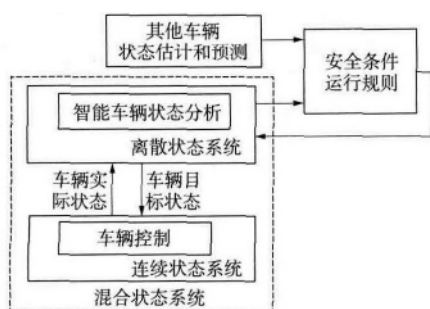


图1 系统结构图  
Fig.1 System structure

车辆和智能车辆的驾驶意图,判断智能车辆的当前行驶状态是否安全,并在不安全的情况下进行状态转移。智能车辆的控制主要是按照上述分析得到的安全条件下的状态对智能车辆进行控制。

## 1 应用于智能车辆的混合状态系统

### 1.1 混合状态系统

智能车辆状态分析构成离散的状态系统;对智能车辆的控制则是车辆一些连续状态的变化,构成连续状态系统;二者共同构成智能车辆的混合状态系统<sup>[5]</sup>。其整体结构如图2所示。

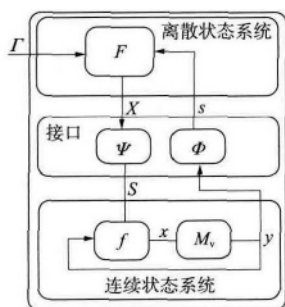


图2 混合状态系统  
Fig.2 Hybrid state system

图中 $F$ 为混合状态系统的顶层控制器,由一系列离散的状态组成,构成离散状态系统; $\Gamma$ 为外界环境对离散状态系统的影响;连续状态系统主要由 $f$ 和 $M_v$ 构成, $f$ 为车辆的底层控制器, $M_v$ 为车辆模型; $X$ 和 $x$ 分别为顶层控制器和底层控制器的状态输出; $y$ 为车辆模型反馈到底层控制器的车辆状态; $S$ 为离散状态 $X$ 通过接口函数 $\Psi$ 后转换成的连续状态输入到 $f$ ; $s$ 为车辆连续状态 $y$ 通过接口函数 $\Phi$ 后转换成的离散状态输入到 $F$ 。其相互之间的关系式可表示为

$$X(k+1) = F(X(k), \Gamma(k), s(k)), \quad (1)$$

$$x(k+1) = f(x(k), y(k), S(k)), \quad (2)$$

$$y(k+1) = M_v(x(k+1)), \quad (3)$$

$$s(k+1) = \Phi(y(k+1)), \quad (4)$$

$$S(k+1) = \Psi(X(k+1)). \quad (5)$$

### 1.2 离散状态系统(智能车辆状态分析)

智能车辆安全通过交叉口,需根据其他车辆的当前状态和预测行为进行相应的控制。按照智能车辆的当前环境是否构成安全条件,将智能车辆的操控行为离散为不同的状态,如加速、减速、停车等。有限状态机是表示有限个状态以及在这些状态之间转移和动作等行为的数学模型,它可以用状态转移图和多种类型的状态转移表来表示<sup>[1]</sup>。文中引入有限状态机模型来描述智能车辆在交叉口的驾驶意图及状态转移。进入交叉口的智能车辆一般有左转、直行和右转3种状态。

而这几种状态往往是车辆根据目的地和具体的环境做出的全局路径规划来决定,一旦确定了在该交叉口的行驶方向,每个方向又可以作为原状态扩展为一个详细的有限状态机模型,如图3和图4所示。

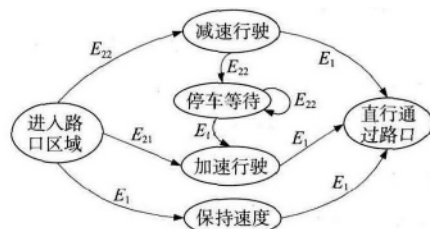


图3 智能车辆直行通过交叉口的有限状态机  
Fig.3 FSM of the intelligence vehicle going straight through an intersection

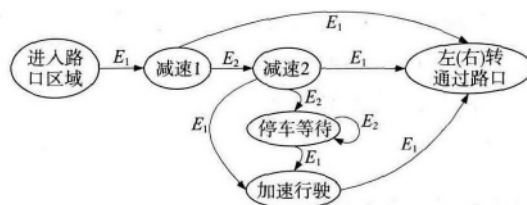


图4 智能车辆左(右)转通过交叉口的有限状态机  
Fig.4 FSM of the intelligence vehicle turning left (right) through an intersection

其中事件 $E_1$ 定义为前方无冲突车辆;事件 $E_2$ 定义为前方有潜在冲突车辆;事件 $E_{21}$ 定义为前方有潜在冲突车辆,智能车辆先到达;事件 $E_{22}$ 定义为前方有潜在冲突车辆,其他车辆先到达。

### 1.3 连续状态系统(智能车辆的控制)

智能车辆的控制主要是按照上述分析得到的安全条件下的状态对车辆进行控制,主要包括车辆的

底层控制器和车辆模型,如图 5 所示。

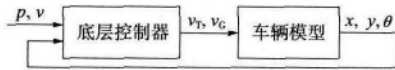


图 5 连续状态系统  
Fig. 5 Continues state system

底层控制器处理通过交互  $\Psi$  得到的行驶路线信息  $p$  和速度  $v$ ,再结合反馈回来的车辆位置信息  $p_{\text{pos}}(x,y)$ 和航向信息  $h_{\text{head}}(\theta)$ 得到新的连续状态(包括转向速度  $v_T$  和行驶速度  $v_G$ ),即

$$x_{k+1}(v_T, v_G) = f[x_k(v_T, v_G), y_k(h_{\text{pos}}, h_{\text{head}}), S_k(p, v), \gamma_k]. \quad (6)$$

## 2 其他车辆的行为估计与预测

车辆在接近交叉口时可能采取的驾驶策略是一些离散的状态,按照有限状态机模型,首先对其他车辆在交叉口可能呈现的一些驾驶意图进行分析,再根据它的状态信息判断它的状态转移,进而为智能车辆的行驶提供指导。

采用 Simulink/Stateflow<sup>[7]</sup> 建立对其他车辆行为估计的有限状态机模型。其他车辆在进入交叉口时可能会有的一些驾驶行为如加速、减速、停车、直行通过、左转、右转、退出交叉口等,并采用其他车辆的状态信息作为这些状态转移的触发条件。车辆的位置信息用来判断车辆进入交叉口和通过交叉口,车辆的速度信息用来判断车辆是否加减速以及停车等,而车辆的横向加速度、航向以及位置信息将被综合考虑判断车辆在通过交叉口时的行驶方向。假设车辆一旦表现出某个确定的行驶方向后,将按照这个行驶方向通过交叉口,即车辆在行驶到交叉口中间不会突然改变行驶方向,智能车辆根据估计的行驶方向、速度和位置等信息来对其他车辆在交叉口的行为进行预测。

## 3 安全条件估计

从智能车辆的角度来看,交叉口接近的其他车辆可以分为 4 个主要的方向(从左、从右、从前以及与智能车辆同向)。智能车辆需要知道当前的环境信息,包括感兴趣的交叉口以及其道路上单独的车道线和交叉口形状等。在接收到其他车辆的定位和方向后,通过对地图的图形搜索可以获取该车辆即将到达的交叉口以及交叉口详细的数据集,包括交叉口唯一的 ID 号、进入和离开车道的中心线位置、交叉口的中心坐标、停车线位置以及用来特殊规则

用途的车道线;然后进行安全条件估计。安全条件估计的运行规则如图 6 所示。

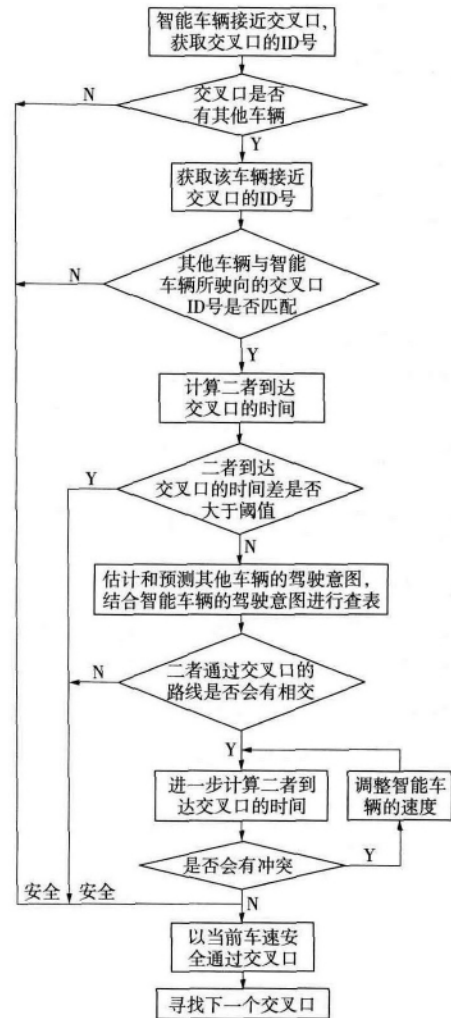


图 6 安全运行规则  
Fig. 6 Safety rules

由其他车辆的接近方向和驾驶意图以及智能车辆的驾驶意图产生的“安全”和“不安全”条件估计如表 1 所示,表中第一列表示智能车辆通过交叉口的行驶方向,第一行表示相对于智能车辆,其他车辆接近交叉口的方式,第二行表示其他车辆通过交叉口的行驶方向。

表 1 交叉口安全条件判断  
Tab. 1 Safe condition judgments in the intersection

接近方式	左边进入				右边进入				前边进入				同向进入			
	左	直	右	停	左	直	右	停	左	直	右	停	左	直	右	停
左转	★	★	○	○	★	★	○	○	★	★	★	○	○	○	○	○
直走	★	★	○	○	★	★	★	○	★	○	○	○	○	○	○	○
右转	○	★	○	○	○	○	○	○	★	○	○	○	○	○	○	○
停车	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注:★表示可能会发生冲突的情况;○表示可以安全通过的情况

例如,其他车辆从左边驶入交叉口并左转弯通过交叉口与将会与智能车辆直行通过产生碰撞;如果智能车在这种情况下右转或停车,将会处于安全的情况。

#### 4 仿真实验

系统采用 Prescan6.4.0 和 Matlab-Simulink/Stateflow 进行联合仿真,其中 Prescan6.4.0 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。仿真环境中,智能车辆直行通过交叉口;在交叉口的左边出现其他车辆,其驾驶意图和行驶方向未知。

按照智能车辆状态分析模块,将智能车辆的驾驶状态分为初始状态、进入路口、匀速、加速、减速1~3、停车、通过路口等9种状态。根据其他车辆状态估计与预测模块,将其他车辆在路口的驾驶意图和行驶方向分为初始状态、左转、直行/减速、右转、停车、通过路口等6种状态。智能车辆接收到其他车辆的状态信息后,对其驾驶意图和行驶方向进行预测和估计,效果如图7所示。图7(a)

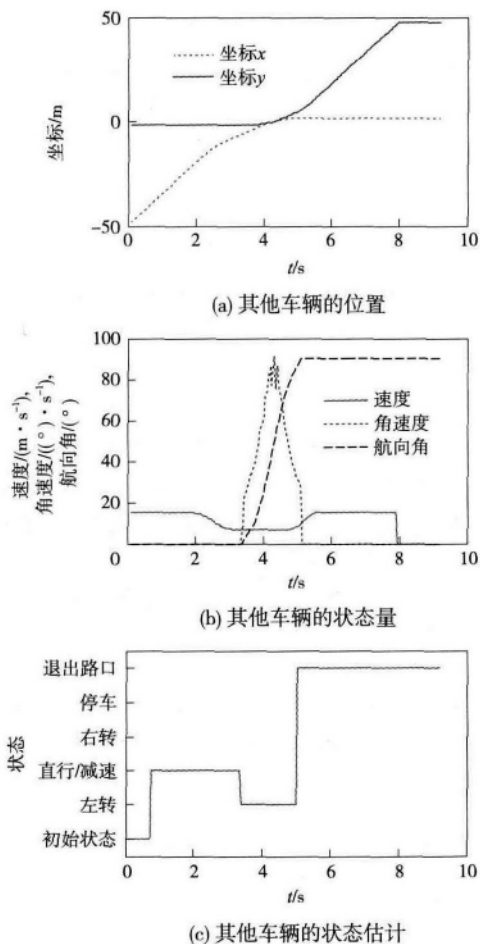


图7 其他车辆的状态估计和预测结果  
Fig. 7 The prediction of other vehicles

为其他车辆相对的位置坐标变化;图7(b)为其他车辆的状态量,包括车辆速度的变化、车辆横向加速度以及车辆的航向角;图7(c)为通过 Stateflow 建立的有限状态机模型估计出其他车辆相对路口的驾驶意图。

由图7中可知,其他车辆开始以15 m/s的速度进入交叉口,在 $t=3.4$  s减速至8 m/s并左转,在 $t=5.0$  s时通过交叉口并加速到15 m/s,在此过程中,建立的有限状态机模型很好地估计了车辆的驾驶意图。

在获取其他车辆的驾驶意图后,通过与自身智能车辆的行驶路径进行安全条件判断,并在可能发生碰撞的情况下对智能车辆的状态和速度进行调整,以确保智能车辆安全地通过交叉口。智能车辆自身的有限状态机中状态变化和速度变化如图8所示。

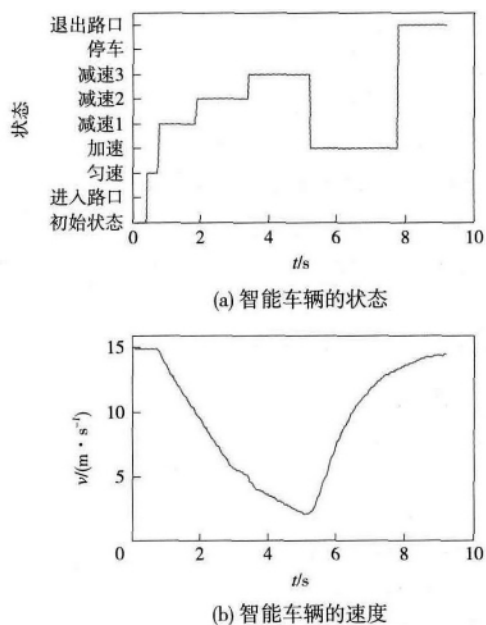


图8 智能车辆的状态和速度的变化  
Fig. 8 Intelligence vehicle's state and velocity in the scenery

由图8可知,智能车辆以15 m/s的速度进入交叉口,当通过安全条件判断发现智能车辆存在潜在的安全隐患时,由匀速状态进入减速状态,如图8(a);在 $t=3.4\sim 5.0$  s期间,其他车辆左转弯驶出交叉口,智能车辆一直处于减速状态,直至安全隐患消失;在 $t=5.0$  s时,其他车辆通过交叉口,智能车辆在检测到安全后,又加速驶出交叉口。在此过程中,离散状态系统变化的状态控制车辆模型输出速度的变化如图8(b)所示。

## 5 结 论

针对智能车辆在交叉口与其他车辆交互的问题,提出通过有限状态机对其他车辆的行驶意图进行估计和预测,并应用混合状态系统对自身智能车辆进行控制的方法. 通过 Simulink/Stateflow 建立的有限状态机模型,实现了对其他车辆的行为估计和预测. 同时综合安全条件运行规则对智能车辆交叉口的安全条件进行判断,并应用混合状态系统对智能车辆进行控制. 联合 PreScan 和 Matlab 对智能车辆交叉口动态交通环境进行仿真,仿真验证了该方法能够很好地预测交叉口其他车辆的行驶状态,并实现对智能车辆的安全控制.

### 参考文献:

- [1] 黄子超. 基于有限状态机的车队纵向协作策略建模与仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.  
Huang Zichao. The modeling and simulation of longitudinal platoon-cooperation maneuvers based on FSM[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [2] 谭同超. 有限状态机及其应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
Tan Tongchao. Finite state machine and its application [D]. Guangzhou: South China University of Technolo-

gy, 2013. (in Chinese)

- [3] Kurt A, Ozguner Ü. Hybrid state system development for autonomous vehicle control in urban scenarios[C]// Proceedings of the IFAC 2008 World Congress. Seoul, Korea: [s. n.], 2008: 9540-9545.
- [4] Kurt A, Yester J L, Mochizuki Y, et al. Hybrid-state driver/vehicle modelling, estimation and prediction[C]// Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Madeira Island, Portugal: IEEE, 2010: 806-811.
- [5] Kurt A, Ozguner Ü. A probabilistic model of a set of driving decisions[C]// Proceedings of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Washington D. C.: IEEE, 2011: 570-575.
- [6] Kurt A, Özgüner Ü. Hierarchical finite state machines for autonomous mobile systems[J]. Control Engineering Practice, 2012, 2013(21): 184-194.
- [7] 毛建辉. 基于混成自动机的事件驱动的 CPS 系统监控方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.  
Mao Jianhui. Event driven monitoring of cyber-physical systems based on hybrid automata[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)

(责任编辑: 孙竹凤)

(上接第 26 页)

- [7] 闻德生, 吕世君, 刘晓晨, 等. 等宽双定子泵和马达的原理研究[J]. 哈尔滨工业学报, 2008, 40(11): 1840-1844.  
Wen Desheng, Lü Shijun, Liu Xiaochen, et al. Theoretic research on variable displacement of equal width double-stators pump and motor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(11): 1840-1844. (in Chinese)
- [8] Wang Z, Shang Y X, Jiao Z X. Leakage calculation and control of vane swing hydraulic motor based on ansys [C]// Proceedings of 2011 International Conference on

Fluid Power and Mechatronics. Beijing: IEEE Computer Society, 2011: 981-986.

- [9] Wang G J, Liang X C. A new type of screw rotary actuator of robot[C]// Proceedings of 2004 IEEE international conference on robotics and biomimetics. Shenyang: IEEE Computer Society, 2004: 495-499.
- [10] 叶清. 内啮合齿轮泵几何参数及流量脉动的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2007: 48-57.  
Ye Qing. The ring geometric parameters of the gear pump and flow pulsation[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007: 48-57. (in Chinese)

(责任编辑: 孙竹凤)