

驾驶行为智能分析的研究与发展

李力¹ 王飞跃² 郑南宁³ 张毅¹

摘要 越来越多的研究者认识到:深入地理解驾驶员的驾驶行为将有助于制定更为合理的交通法规和设计更加有效的智能驾驶导航系统,从而达到减少交通事故提高交通效率的目的.本文综述了已有的尝试,较为完整地阐述了目前驾驶行为智能分析研究的四个主要方向:纵向驾驶行为分析和避撞,横向驾驶行为分析和道路偏离预警,复杂驾驶行为学习以及驾驶员状态(疲劳、分心等)分析,并指出了今后该领域(特别是国内)的可能发展方向.

关键词 驾驶行为分析, 驾驶安全, 驾驶员状态分析

中图分类号 TP11, TN911.7, U471.15

Research and Developments of Intelligent Driving Behavior Analysis

LI Li¹ WANG Fei-Yue² ZHENG Nan-Ning³ ZHANG Yi¹

Abstract It is widely realized that a better understanding of the driving behavior will allow more appropriate road safety policies and more effective intelligent driving guidance systems to be developed, possibly reducing traffic incidents and congestions. By carefully examining the current approaches, this paper provides a brief review of four major issues in this field: longitudinal driving behavior analysis and collision avoidance, lateral driving behavior analysis and lane departure warning, complex driving ability learning and driver status (fatigue, absentmindedness etc.) analysis. The likely future direction of this research field, particularly in China, is also pointed out with a special focus on the advances.

Key words Driving behavior analysis, driving safety, driver status analysis

1 引言

过去 20 年中,在持续增长的交通事故和交通堵塞压力下,以驾驶员/乘客为中心的智能汽车主动安全系统以及相关的新型驾驶传感器/控制器,正在美国、欧洲、日本以及世界范围内受到越来越多汽车及汽车附属产品制造商和大众消费者的关注^[1~4].不断深入的研究和试验表明:实时监测和智能评估驾驶员的驾驶行为和驾驶状态,有助于及早发现可能的操作失误,避免交通事故的发生;同时提醒驾驶员采取更为合理的驾驶方案以提高车辆的行驶速度,提高交通效率.不仅如此,对于大量不同驾驶员的驾驶行为记录进行统计分析,也有助于制定更为合理的交通法规.例如近年来,统计分析老年人的驾驶行为进而完善相关的交通法规就得到了相当的重

视^[3~7].

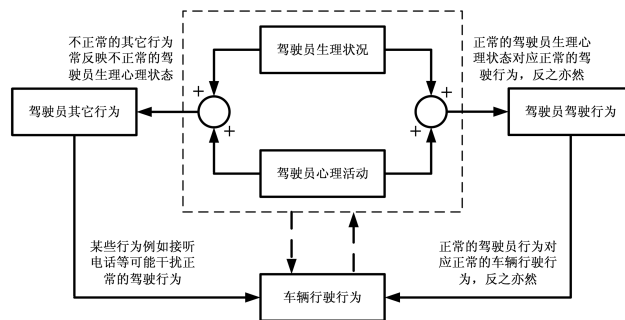


图 1 驾驶员生理心理状态和驾驶行为及车辆行驶行为的关系

Fig. 1 The relationship among the psychological/physiological status and driving behavior of the driver and resulting vehicle dynamics

如图 1 所示,驾驶员的驾驶行为由其生理状况和心理活动所决定,并同时产生相应的车辆行驶行为.由于直接观测和定量描述驾驶员的驾驶行为较为困难,目前不少研究者利用车辆行驶行为或驾驶员的非驾驶行为间接分析.大致来说,该领域主要有以下四个研究热点:

1) 纵向驾驶行为分析:近年来各国的交通事故统计数据表明,追尾碰撞占有所有车辆碰撞事故的相当部分^[8].因此,如何帮助驾驶员保持安全的行车间距被视为智能驾驶导航系统的一项基本功能^[1,9].而

收稿日期 2006-9-15 收修改稿日期 2007-3-8
Received September 15, 2006; in revised form March 8, 2007
国家自然科学基金(60334020, 60374059), 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2004GG1104001, 2006CB705506) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60334020, 60374059), National Basic Research Program of China (973 Program)(2004GG1104001, 2006CB705506)
1. 清华信息科学与技术国家实验室(筹), 清华大学自动化系 北京 100084 2. 中国科学院自动化研究所 北京 100080 3. 西安交通大学人工智能与机器人研究所 西安 710049
1. National Laboratory for Information Science and Technology (TNList), Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084 2. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 3. Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049
DOI: 10.1360/aas-007-1014

分析建模驾驶员的加速—刹车操作特性与跟车习惯则是任何智能避撞系统需要仔细研究的课题^[10~12]。

2) 横向驾驶行为分析: 在能见度差(有雨雾或夜晚)、路面状况差(下雨路滑或道路施工)、道路坡度大或者转弯半径小等不利情况下, 不少驾驶员特别是初学驾驶者很容易做出不合适的拐弯操作, 造成车辆冲出道路的严重事故。所以, 如何协助驾驶员进行拐弯是智能导航系统又一项基本功能^[13]。而驾驶员拐弯特性的分析和建模则是该研究的关键^[14,15]。

3) 复杂驾驶行为学习: 随着智能控制技术和计算机软硬件的发展, 不同类型全自动智能汽车的开发研制取得了空前的发展^[1,2,16]。如何让智能汽车更多地从人类驾驶员的驾驶行为中“学”到更多驾驶技术和驾驶形势判断及决策经验是近年来持续的研究热点。此外, 如何提取驾驶行为共性, 引导初学者迅速掌握驾驶技术也得到了相当的关注^[17]。

4) 驾驶员状态分析: 驾驶员的生理心理状态与驾驶行为的质量密切相关^[18]。统计表明: 疲劳驾驶、酒后驾驶、驾驶时分心(如驾驶时拨打/接听移动电话)正成为越来越多交通事故的起因^[19~23]。新一代的智能驾驶导航系统必须准确判断出驾驶员的兴奋程度, 以采取合适的辅助措施。例如发现驾驶员过于疲劳时应提醒或强制驾驶员适当休息; 驾驶员情绪过于激动(发怒、忧伤等)时采取适当辅助策略, 避免产生攻击性碰撞。

本文依次综述了驾驶行为分析这一交叉前沿研究在上述四个方向的研究进展, 比较分析了各相关技术的原理和特点, 并指出了今后研究的若干难点和可能的解决方向, 以推动其在国内的研究, 进一步促进我国的交通发展。

2 纵向驾驶行为智能分析

正确确定前导车辆和本车的安全车距和实际车距是评估驾驶员纵向驾驶行为的前提条件。在过去 20 年中, 通过车载毫米波雷达或者激光测距仪探测实际车距的技术得到了长足的发展。很多试验车都可以达到 0.1~0.2 米以下的测量精度。而车载视觉系统也常被用于校正获得的实际车距, 尤其是在弯道及交叉路口等较为复杂的路况下。

对于车辆与道路的情况而言, 确定安全车距通常有下列因素需要考虑:

- 1) 车辆质量的变化: 例如挂有满载拖车的车辆通常比不挂拖车时需要增加 20%到 30%的刹车距离;
- 2) 道路坡度的变化: 这往往需要结合发动机输出功率和 GIS 信息判断;
- 3) 轮胎路面状况的变化: 有水/雪或者结冰的

路面需要比平时更长的刹车距离, 轮胎故障则会急剧改变车辆安全刹车距离。因此, 在线监测轮胎路面摩擦情况的变化正引起越来越多研究者和轮胎制造商的兴趣^[24]。

从驾驶者的角度, 通常需要考虑:

- 1) 天气等引起的能见度变化;
- 2) 驾驶员兴奋度的变化。

由于驾驶环境复杂多变, 辅助驾驶系统往往需要综合各种情况进行智能信息融合和智能决策。例如, 正确判断出车辆仅仅是通过了一片被(洒水车等)打湿的路面, 而非驾驶员突然改变了驾驶行为。

在假定已经通过传感器正确识别出外界环境和车内驾驶员种种变化的基础上, 研究者提出了很多综合安全车距计算公式和车辆跟随模型来描述驾驶行为^[25~27]。其中纵向驾驶模型常被设计为如图 2 所示的随动系统, 其中参考输入为期望的安全车距, 输出为现实的安全车距。驾驶者根据两者的差值控制油门或分档以及刹车进行跟随。例如二阶滞后频域模型(1)就可以通过不同模型参数反应不同驾驶员的驰豫时间长短, 反应速度快慢和超调大小等特性

$$G_{\text{Longitudinal}}(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} e^{-\tau s} \quad (1)$$

其中 a_i, b_i, τ 分别代表相应的模型参数, 可根据实际测得的驾驶数据辨识得出。

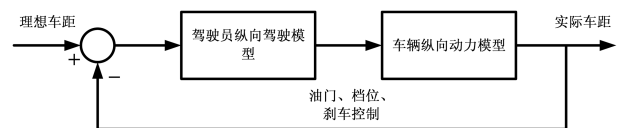


图 2 纵向驾驶控制模型

Fig. 2 The longitudinal driving control model

为了分析更为复杂的驾驶动作, 高阶复杂模型, 例如切换系统, 被越来越多地用于建立不同速率下的纵向驾驶建模^[28,29]。如何去除数据中测量噪声和人类驾驶员动作不精确性带来的干扰是当前研究的热点。Kalman 滤波器、神经网络滤波器、小波算法等都是常用的去噪手段。针对同一路段同一驾驶员的多次驾驶记录进行统计处理也能较好地找出其中规律^[30~32]。然而需要指出的是, 如何根据实际驾驶环境智能区分哪些是短期临时的驾驶行为, 哪些是长期稳定的驾驶行为依然十分困难。

使用模糊控制系统描述纵向驾驶行为是另一经常用到的方法。该方法可以首先根据驾驶者提供的语言规则较快地建立初步的控制模型, 然后逐步修改模糊控制的论域、隶属度函数形状等提高模型的精度。例如

- IF 相对速度较快
- AND 相对加速度较快

AND 相对距离较短

THEN 以较快的相对加速度降低相对速度

不同的驾驶者往往具有基本一致的语言规则和由不同隶属度函数表示的驾驶个性. 其优点在于既能提炼驾驶共性, 又能兼顾不同个人驾驶特性. 而且模糊逻辑对于处理数据的不确定性也有一定效果. 相应地, 基于模糊神经网络的纵向驾驶建模近年来也得到了较多的应用. 后者的特点在于将提高模型精度的优化过程转变为相应神经网络的训练过程^[33]. 但如何合理挑选训练样本以及解决神经网络的过设计 (Over-design) 和过训练 (Over-training) 的问题依然需要深入的研究.

在获得较为精确的模型后, 智能考核系统常会对驾驶员 (特别是初学者) 的纵向驾驶行为进行在线统计评估. 通过模拟仿真, 那些导致过短的车距或跟随车距变化方差过大的驾驶模型 (行为) 都会被视为危险驾驶模型 (行为) 而向驾驶者提出警告和改进意见, 以求达到防患于未然的目的. 同时, 如果在线检测出驾驶员的驾驶模型参数发生急剧重大变化, 则有可能表示驾驶员处于危险的状态 (如醉酒等). 此外, 在何种紧急情况下汽车应切入全自动驾驶 (特别是采取刹车动作) 也引起了研究者的强烈兴趣. 混合加速-刹车导航系统的研究正成为纵向智能驾驶系统的新热点.

3 横向驾驶行为智能分析

类似地, 驾驶员横向驾驶行为分析的首要任务是及时获得期望中的和实际的转弯轨迹, 以便对车辆的横向运动进行准确的评估. 目前, 多数试验车辆都采用视觉传感器或磁感应传感器获得道路的精确定义转弯半径等数据, 并取得了良好的效果^[34~36].

车辆横向转弯动力学特性同样受到车辆质量和轮胎路面状况的制约^[37], 但更值得注意的依然是驾驶员的状态和驾驶习惯; 因为相对于纵向跟随, 驾驶员更容易在横向转弯中出现错误的估计和操作^[14, 15, 36, 38~45].

不同于纵向驾驶建模, 一般将横向驾驶建模为干扰抑止系统, 其中道路曲率变化作为干扰输入, 车辆和道路中心线的偏角和车辆绕重心的转动角速度作为输出, 驾驶员控制转盘, 也即车辆转向角度, 进行控制 (参见图 3). 由于有着较为成熟的辨识算法和应用经验, 多阶滞后频域模型和模糊控制模型仍是最为常用的模型^[13, 41~45]. 同时由于横向转弯较纵向跟随更为复杂, 辨识所用的模型一般也更为复杂 (如具有更高阶数的频域模型). 例如

$$G_{\text{Lateral}}(s) = \frac{b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} e^{-\tau s} \quad (2)$$

值得指出的是, 在纵向驾驶行为建模时, 一般可以忽略横向驾驶行为, 简化所得模型; 而在横向驾驶行为建模时, 则需要对各种不同的纵向行驶速度分别辨识不同的模型. 因此式 (2) 中的参数 a_i, b_i 随纵向行驶速度显著改变; 而式 (1) 中的参数 a_i, b_i 随纵向行驶速度改变较为缓慢. 此外, 由于横向驾驶模型通常要求有比纵向驾驶模型更高的速率敏感性, 切换模型和规则混合型模型的使用更为常见.

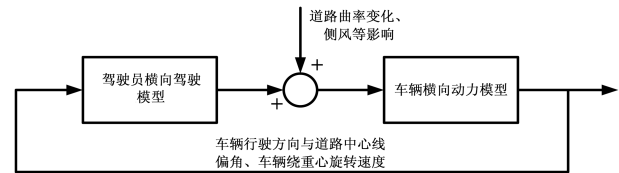


图 3 横向驾驶控制模型

Fig. 3 The lateral driving control model

基于测量数据辨识出相应的参数后, 智能导航系统常将理想的转弯轨迹作为参考对实际产生的转弯轨迹进行评估. 经常导致偏离道路中心线较多或车辆转动角速度过大等都会被视作危险驾驶行为而向驾驶者提出改进意见. 而当系统发现转弯时转向角度过小可能冲出道路; 或者直道行驶时车辆行驶方向开始严重偏离道路中心线则应及时报警, 并切入自动驾驶状态, 避免事故的发生.

不仅如此, 在新型的“Steer-by-Wire”控制器的辅助下, 智能导航系统还可以识别不同驾驶者的手臂力量及驾驶习惯, 根据车速适度地调节转盘和车辆转向轴的齿轮比, 从而达到高速下转弯更为灵敏省力以及个性化驾驶的目的^[2, 5]. 神经网络等常被用于完成此项功能.

如何进一步将目前主要基于视觉的智能导航系统和 GPS/GIS 系统无缝集成, 从而提供更多更强功能, 例如根据前方弯道半径和坡度判断当前车速是否过快的功能, 是今后的一个主要研究方向^[46].

4 复杂驾驶行为分析

上述纵/横向驾驶分析只是对两种比较简单的驾驶行为进行了研究, 而驾驶员实际面对的情况往往要复杂的多. 首先, 如何全面地获取相关道路信息有时相当困难, 例如如何确定道路拐角被建筑物遮蔽的方向是否有车辆驶来. 其次, 如何针对具体的道路环境做出正确的决策往往具有相当难度. 例如当发现路障时, 是应该采取换道、转弯还是直线刹车, 对于人类驾驶员很容易判断, 而试验中的全自动智能汽车尚不能很好的处理^[47, 48].

如何从人类驾驶员的驾驶行为中提炼出智能汽车可以理解并执行的复杂情况下的驾驶能力是近年

来持续的研究热点^[48~52]。目前最多的尝试是基于知识的驾驶行为学习,即研究如何将实际世界中的交通路状识别转化为知识世界中的特定场景,并激发相应的行为规则进行处理。然而,很多复杂驾驶技能的学习并不能简单地用事件驱动的知识-规则系统分析。例如在车流行进中换道^[53]、在拥挤的停车场停车^[54]就需要结合车辆的运动控制进行考虑。

由于复杂的车辆运动同时包含纵/横两个方向的运动控制要求,简单的解耦控制可能达不到相应的控制要求。运动轨迹规划是处理该情况下车辆控制问题的常用方法^[55,56]。其一般根据当前的车辆运行环境生成的合理轨迹,预测在目前的车流状态下,该驾驶员是否有时间进行换道/拐弯;或者引导驾驶员沿着合理的轨迹停好车。例如基于多项式插值的车辆运动轨迹生成法^[53~55]就可将车辆换道轨迹表示为下述 5 阶(不含 $(\beta_6 t^6)$ 时)或 6 阶(含 $(\beta_6 t^6)$ 时)多项式

$$\begin{cases} x(t) = \alpha_5 t^5 + \alpha_4 t^4 + \alpha_3 t^3 + \alpha_2 t^2 + \alpha_1 t + \alpha_0 \\ y(t) = (\beta_6 t^6) + \beta_5 t^5 + \beta_4 t^4 + \beta_3 t^3 + \beta_2 t^2 + \beta_1 t + \beta_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中 $x(t)$, $y(t)$ 表示 t 时刻选定坐标系下车辆的横/纵坐标值。此时车辆的无碰撞,符合车辆动力学等制约常被直接转化为轨迹几何特征约束乃至对式(4)中系数 α_i , β_i 的数值约束,直接求解出合理的运动轨迹。

此外,模糊系统^[57,58]和神经网络系统^[59,60]由于有着良好的非线性映射能力而常被用于构造车辆轨迹产生系统。例如图 4 所示,根据已有停车数据训练好的神经网络可以以车辆的始、终点坐标和朝向作为输入,直接产生合适的转向控制时间序列和预期的运动轨迹。按目前的发展预计,在今后 10 年内困扰许多驾驶员的换道和停车问题将有望结合多种控制和传感技术得到最终解决。

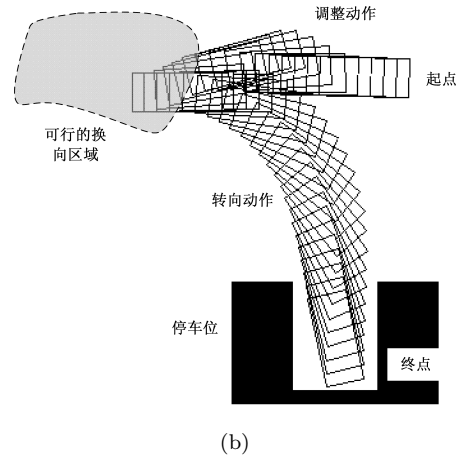
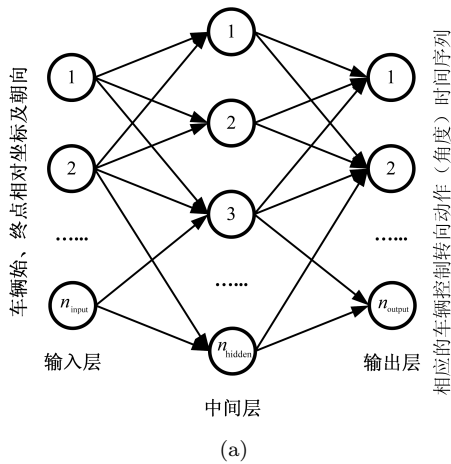


图 4 基于神经网络的停车轨迹生成 ((a) 所构造神经网络的输入输出; (b) 生成的两阶段停车轨迹示意图^[49])

Fig. 4 Parking trajectory generation using neural networks ((a) The input and output of the applied neural networks; (b) The two-part trajectory planning process^[49])

5 驾驶员状态分析

同样的驾驶员在不同的疲劳程度下会产生不同的驾驶特性。统计数据表明:疲劳驾驶是引发高速公路夜间交通事故的重要原因^[61~63]。美国国家高速公路管理局估计:在美国,疲劳驾驶每年导致 100 000 起交通事故,死亡 1 500 人,受伤 71 000 人。过去 20 年中,驾驶员疲劳程度监测乃至生理心理状态分析吸引了全世界研究者的广泛兴趣^[19~23,64]。另外,如何发现驾驶员的突发异常行为,特别是拨打/接听移动电话,则是最近几年随着移动电话的逐渐普及而兴起的新研究方向。

5.1 基于视觉的驾驶员状态分析

由于可以进行非接触式监测,且成本相对较低,易于安装,通过收集驾驶员眼球、眼睑和头部动作等信息的视觉监视分析方法是目前最为常见的解决方案^[65~78]。其中的启发式判断规则包括:

- 1) 过低的眼球转动频率、眼皮眨动频率和头部转动频率往往意味着驾驶员处于疲劳状态;
- 2) 不正确的注视方位或头部朝向通常表明了驾驶员已进入疲劳状态;
- 3) 特殊的表情如长时间的闭眼或频繁地打哈欠,以及夜间行车时过小的瞳孔直径等都暗示驾驶员已经非常疲劳。例如经常提到的 PERCLOS 方法用单位时间如 1 分钟内眼睛闭合程度超过 80% 以上时间占总时间的百分比来衡量驾驶员是否疲劳;
- 4) 手机状物体接近驾驶员头部可能意味着正在通话;
- 5) 具有谈话特征的嘴部动作,异常的手、肘动

作/姿势也可能意味着正在通话。

而相关技术的难点在于:

1) 如何在黯淡的驾驶室内照明条件下, 准确定位驾驶员头部的位置^[68]. 实践表明, 结合红外传感器可以较好地解决这一问题^[79], 因为人体具有相对较高的温度. 但目前的红外传感器价格依然较高, 尚不能直接成为大众汽车配件.

2) 如何针对不同的驾驶员构造出个性化的判断规则, 以更为准确地判断驾驶员的状态^[80]. 例如准确判断出驾驶员只是在自己哼唱歌曲而非拨打/接听移动电话. 这意味着智能驾驶监视系统必须具有一定的灵活性和学习功能. 目前大多数研究者认为, 根据驾驶数据在线自适应学习是可能的解决方案.

3) 如何综合多种信息进行智能决策. 例如结合车外-车内两种视觉系统, 智能判断驾驶员瞳孔直径异常缩小是强烈阳光照射下导致的还是疲劳所致.

此外, 心理学研究表明: 长时间从事单调枯燥的工作会让人感到疲劳. 因此一些研究者提出了通过监测道路状况单调性, 间接估计驾驶员疲劳程度, 预先进行防范的方案^[81~84]. 而其研究重点在于如何定义道路状况或驾驶任务的单调性. 例如, 可以通过检测道路图像的 MPEG (Moving picture experts group) 的编码特征来快速分析当前路况的单调性^[84]. 当然, 目前更多的做法是将道路监测和驾驶员监测结合起来, 进行传感器信息融合和综合分析决策^[5, 13, 82~84].

5.2 其它驾驶员状态分析方法

医学研究表明大脑皮层的活动与人类嗜睡现象有着紧密的联系^[19~23, 64, 85]. 因此通过测量驾驶员的 EEG (Electroencephalogram) 信号直接分析其脑电波活动情况乃至疲劳程度是另一大类常见方法. 然而, 这通常要求驾驶员随时佩戴 EEG 测量装置, 不利于广泛便捷应用.

此外, 检测驾驶员的脉搏、血压、体内新陈代谢产物 (如血液乳酸的浓度, 呼出的二氧化碳浓度等) 也常被用于进行特定的驾驶员生理心理状态测量. 例如当驾驶员打瞌睡时, 心跳速度下降且心律稳定. 而当驾驶员处于愤怒或极度伤心时, 心跳较快且心律不稳. 因此可以用贴在方向盘上的心跳传感器检测驾驶员的心跳速度, 进而智能估计其生理乃至心理状态. 目前, 如何避免驾驶员情绪激动时的攻击性驾驶行为 (超速驾驶、从右侧超车、大声鸣笛等) 所导致的交通事故已成为又一关注的热点^[86].

通过辨识检测驾驶员异常的纵/横向驾驶行为 (过长的刺激-反应时间等), 同样可以用来间接判断

驾驶员的疲劳程度^[29]. 例如过低的方向盘转动频率就可能意味着驾驶员正在打瞌睡. 在这类应用中, 多传感器信息融合和在线学习是提高相应检测精度和灵活处理不同驾驶员驾驶特性的常用手段.

6 结论

驾驶员驾驶行为智能分析对于减少交通事故, 提高道路利用率有着潜在的巨大作用. 本文系统分析介绍了国内外相关的研究内容 (参见下页表 1 及表 2), 从而促进我国相关产品的快速进步和发展.

限于文章篇幅, 这里讨论的内容难免有所遗漏. 但纵观驾驶行为研究的趋势不难发现如下的发展动向:

1) 多数情况下, 驾驶员生理心理状态、驾驶行为及导致的车辆行驶行为这三者不能截然分开. 目前单独分析其中一者的研究可能导致错误的结果. 例如将某些暂时性的冲动性的驾驶行为作为样本进行学习, 产生不合适的停车建模效果; 或者错误地将紧急避撞行为理解为道路偏离行为, 而进入自动纠偏驾驶, 产生严重后果. 所以, 今后的研究应从信息统一化决策智能化的角度出发考虑问题^[2];

2) 驾驶员行为智能分析的相关研究众多, 学科交叉性极强. 好的研究成果可能需要综合车辆制造、生物医学、传感器设计、图像语音处理、模式识别与人工智能等多学科的研究成果. 因此, 今后的研究应鼓励跨学科多单位的合作研究;

3) 被动驾驶员行为监测正逐渐与主动减轻驾驶员疲劳甚至半/全自动驾驶结合起来. 因此, 如何设计合适的人工闭环 (Human-in-loop, HIL) 控制系统并定量分析其稳定性等指标将是近期研究的重点^[1,2].

具体到中国的智能驾驶行为分析研究, 目前值得期待的研究还包括:

1) 驾驶行为智能分析对国内交通法律法规建设和执行的影响. 例如目前国内的驾驶员钉桩路考系统已经逐渐进入以视频处理为基础的机器判读阶段. 如何改进简单机械判定是否合格的模式, 对驾驶员提供进一步的驾驶技术改进信息将是十分有益的.

2) 虽然国内的研究生产稍落后于国际先进水平, 但目前的技术已具备逐步在汽车产品实现较为简单的 “Steer-by-wire”、“Brake-by-wire” 等控制的可能. 这将有助于减轻驾驶员疲劳, 减少交通事故发生.

3) 对中国驾驶员驾驶行为的建模同样有利于分析中国交通拥堵的形成和演化, 对减轻交通阻塞产生积极的影响.

表 1 驾驶行为建模方法对比

Table 1 Comparison of driving behavior modeling methods

所用方法	建模对象	所用方法属性
频域建模方法	纵、横向驾驶行为	1. 模型物理意义明确, 便于理解应用 2. 辨识过程相对简单, 但灵活性不足. 往往需要对不同的车辆行驶速度建立多个互相独立的模型 3. 可采用鲁棒辨识等比较成熟的方法剔除干扰数据
神经网络方法	纵、横向及复杂驾驶行为	1. 模型输入输出明确, 但模型物理意义难以解释 2. 对过设计过学习的问题须进一步的研究 3. 对如何剔除干扰数据缺乏深入的研究
模糊逻辑方法	纵、横向及复杂驾驶行为	1. 模型物理意义明确, 语言规则易于理解 2. 限于多变量模糊计算的复杂性, 模型精度不一定很高 3. 适合提取驾驶行为共性, 某些驾驶个性可能难以描述
模糊神经方法	纵、横向及复杂驾驶行为	1. 可以以驾驶行为共性为基础 (神经网络表示的语言规则), 学习产生驾驶个性 2. 计算复杂, 难以求得最优解
时间系列方法	纵、横向驾驶行为	1. 可采用多种比较成熟的方法剔除干扰数据 2. 模型不灵活, 物理意义不明确
轨迹生成方法	复杂驾驶行为	尚在深入讨论中

表 2 驾驶员生理监测方法对比

Table 2 Comparison of driver's physiological status monitoring methods

所用方法	监测对象	所用方法属性
基于驾驶员头、眼、手部运动视频监测的方法	驾驶员兴奋度/疲劳度	1. 采集信息量大, 反应速度快 2. 非接触式测量, 易于应用 3. 对光照环境等有一定要求 4. 计算复杂, 难以做出准确判断
基于脑电波活动体内新陈代谢产物监测的方法	驾驶员兴奋度/疲劳度	1. 方法直接, 易于做出准确判断 2. 接触式测量且仪器复杂, 难以在线使用
基于脉搏、血压等监测的方法	驾驶员兴奋度/疲劳度	1. 方法直接, 可以做出比较准确的判断 2. 今后可能的发展重点, 但对传感器设计要求较高
通过驾驶员异常的纵横向驾驶行为反向推理	驾驶员兴奋度/疲劳度	1. 间接推理, 须进行信息融合 2. 有助于从信息统一化决策智能化的角度出发考虑问题, 是今后的发展重点

References

- Li L, Song J, Wang F Y, Niehsen W, Zheng N N. IVS 05: New developments and research trends for intelligent vehicles. *IEEE Intelligent Systems*, 2005, **20**(4): 10~14
- Wang F Y, Li L. *Advanced Motion Control and Sensory for Intelligent Vehicles*. New York: Springer, 2007
- Wang Wu-Hong, Sun Feng-Chun, Cao Qi. *Driving Behavior Theory and Its Application in Road Traffic System*. Beijing: Science Press, 2001
(王武宏, 孙逢春, 曹琦. 道路交通系统中驾驶行为理论与方法. 北京: 科学出版社, 2001)
- Pei Yu-Long, Wang Wei. *Research on the Causes and Countermeasures of Road Traffic Accidents*. Beijing: Science Press, 2004
(裴玉龙, 王炜. 道路交通事故成因及预防对策. 北京: 科学出版社, 2004)
- Roge J, Pebayle T, Lambilliotte E, Spitzenstetter F, Gisellebrecht D, Muzet A. Influence of age, speed and duration of monotonous driving task in traffic on the driver's useful visual field. *Vision Research*, 2004, **44**(23): 2737~2744
- Staplin L, Lococo K, Byington S, Harkey D. Highway Design Handbook for Older Drivers and Pedestrians, Technical Report FHWA-RD-01-103, U.S. Federal Highway Administration, Washington D. C., USA, October 2001
- Morrisey M A, Grabowski D C. State motor vehicle laws and older drivers. *Health Economics*, 2005, **14**(4): 407~419
- Traffic safety facts 2000: a compilation of motor vehicle crash data from the fatality analysis reporting system and the general estimates system, National Highway Traffic Safety Report 809 337, U.S. Department of Transportation, USA, 2001
- Vahidi A, Eskandarian A. Research advances in intelligent collision avoidance and adaptive cruise control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2003, **4**(3): 143~153
- Xu Jie, Du Wen, Sun Hong. Safety distance about car following. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2002, **2**(1): 101~104
(徐杰, 杜文, 孙宏. 跟随车安全距离的分析. 交通运输工程学报, 2002, **2**(1): 101~104)
- Wang Yu-Hai, Song Jian, Li Xing-Kun. Study on inference of driver's intentions based on fuzzy reasoning. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2005, **22**(12): 113~118
(王玉海, 宋健, 李兴坤. 基于模糊推理的驾驶员意图识别研究. 公路交通科技, 2005, **22**(12): 113~118)
- Gao Feng, Li Ke-Qiang, Wang Jian-Qiang, Lian Xiao-Min. The design of adaptive throttle controller for speed control. *Automotive Engineering*, 2005, **27**(4): 418~422
(高锋, 李克强, 王建强, 连小珉. 车速控制系统自适应油门控制器设计. 汽车工程, 2005, **27**(4): 418~422)

- 13 Li L, Wang F Y. Research advances in vehicle lateral motion monitoring and control. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, 2005, **10**(1): 60~76
- 14 Guan Xin, Gao Zhen-Hai, Guo Kong-Hui. A hypothesis of steady preview and dynamic correction for driver model. *Automotive Engineering*, 2003, **24**(5): 227~231
(管欣, 高振海, 郭孔辉. 驾驶员稳态预瞄动态校正假说. 汽车工程, 2003, **24**(5): 227~231)
- 15 Lin Yi, Zhang Xin, Shi Guo-Biao, Xing Hong-Bin. Subjective evaluation method study on vehicle steering feeling. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2007, **24**(2): 130~134
(林逸, 张昕, 施国标, 邢洪滨. 汽车转向感觉主观评价试验方法综述. 公路交通科技, 2007, **24**(2): 130~134)
- 16 Behringer R, Sundareswaran S, Gregory B, Elsley R, Addison B, Guthmiller W. The DARPA grand challenge development of an autonomous vehicle. In: Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium. IEEE, 2004. 226~231
- 17 Christie R. The effectiveness of driver training as a road safety measure: an international review of the literature. In: Proceedings of Road Safety Research, Policing and Education Conference. Melbourne, Australia: Australia Transport Council, 2001
- 18 Doyle T L A, Treffner P J, Barrett R S, White R. Perceptual and biomechanical constraints on safe driving: theoretical issues and experimental approach. In: Proceedings of Road Safety Research, Policing and Education Conference. Brisbane, Australia: Australia Transport Council, 2000
- 19 Haworth N L, Triggs T J, Grey E M. Driver fatigue: concepts, measurement and crash countermeasures, U. S. Federal Office of Road Safety Contract Report 72, USA, 1988
- 20 Wierwille W W. Overview of research on driver drowsiness definition and driver drowsiness detection. In: Proceedings of International Conference of Enhanced Safety of Vehicles. Munich, Germany, 1994. 462~468
- 21 Wierwille W W, Wreggit S S, Kim C L, Ellsworth L A, Fairbanks R J. Research on vehicle based driver status performance monitoring: development, validation, and refinement of algorithms for detection of driver drowsiness, Technical Report 808 247, U. S. Department of Transportation Washington D. C., USA, 1994
- 22 Lal S K L, Craig A. Driver fatigue: electroencephalography and psychological assessment. *Psychophysiology*, 2002, **39**(1): 1~9
- 23 Macadam C C. Understanding and modeling the human driver. *Vehicle System Dynamics*, 2003, **40**(1-3): 101~134
- 24 Li L, Wang F Y, Zhou Q. Integrated longitudinal and lateral tire road friction modeling and monitoring for vehicle motion control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, **7**(1): 1~19
- 25 Brackstone M, McDonald M. Car following: a historical review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 1999, **2**(4): 181~196
- 26 Mehmood A, Saccomanno F, Hellinga B. Application of system dynamics in car following models. *Journal of Transportation Engineering*, 2003, **129**(6): 625~634
- 27 Brackstone M, Sultan B, McDonald M. Motorway driver behaviour: studies on car following. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 2002, **5**(1): 31~46
- 28 Ohno H. Analysis and modeling of human driving behaviors using adaptive cruise control. In: Proceedings of Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2000. 4: 2803~2808
- 29 Kim J H, Hayakawa S, Suzuki T, Hayashi K, Okuma S, Tsuchida N. Modeling of driver's collision avoidance maneuver based on controller switching model. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, 2005, **35**(6): 1131~1143
- 30 Brackstone M, McDonald M. Dynamic behavioral data collection using an instrumented vehicle. *Transportation Research Record*, 1999, **1689**(1): 9~17
- 31 Kim T, Lovell D J, Park Y. Limitation of previous models on car following behaviours and research needs. In: Proceedings of Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D. C., USA: TRB, 2003
- 32 Ma X, Andreasson I. Dynamic car following data collection and noise cancellation based on the Kalman smoothing. In: Proceedings of IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. IEEE, 2005. 35~41
- 33 Lin Y T, Wang F Y, Mirchandani P B, Wu L, Wang Z, Yeo C. Implementing adaptive driving system for intelligent vehicles by using neuro-fuzzy networks. *Transportation Research Record*, 2001, **1774**: 98~105
- 34 Lee J W. A machine vision system for lane-departure detection. *Computer Vision and Image Understanding*, 2002, **86**(1): 52~78
- 35 Wang J, Schroedl S, Mezger K, Ortloff R, Joos A, Passegger T. Lane keeping based on location technology. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2005, **6**(3): 351~356
- 36 McCall J C, Trivedi M M. Video based lane estimation and tracking for driver assistance: survey, system, and evaluation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, **7**(1): 20~37
- 37 Tan H S, Bougler B. A snowplow steering guidance system using roadway markers problem formulation and solution concept. *Vehicle System Dynamics*, 1999, **32**(1): 3~22
- 38 Hess R A, Modjtahedzadeh A. A control theoretic model of driver steering behavior. *IEEE Control Systems Magazine*, 1990, **10**(5): 3~8
- 39 Pilutti T, Ulsoy A G. Identification of driver state for lane keeping tasks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A*, 1999, **29**(5): 486~502
- 40 Fujioka R T, Shirano Y, Matsushita A. Driver's behavior under steering assist control system. In: Proceedings of IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 1999. 246~251
- 41 Sharp R S, Casanova D, Symonds P. A mathematical model for driver steering control, with design, tuning and performance results. *Vehicle System Dynamics*, 2000, **33**(5): 289~326
- 42 Kuriyagawa Y, Im H E, Kageyama I, Onishi S. A research on analytical method of driver vehicle environment system for construction of intelligent driver support system. *Vehicle System Dynamics*, 2002, **37**(5): 339~358
- 43 Karlsson M. Driver independent road curve characterization. *Vehicle System Dynamics Supplement*, 2004, **41**(4): 411~420
- 44 Pilutti T, Ulsoy A G. Decision making for road departure warning systems. In: Proceedings of IEEE American Control Conference. IEEE, 1998. **3**: 1838~1842
- 45 Chen L K, Ulsoy A G. Identification of a driver steering model, and model uncertainty, from driving simulator data. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2001, **123**(4): 623~629

- 46 Li L, Lai G, Wang F Y. Safe steering speed estimation and optimal trajectory planning for intelligent vehicles. In: Proceedings of IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. IEEE, 2005. 722~727
- 47 Alvarez L, Yi J. Adaptive emergency braking control in automated highway systems. In: Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 1990. 4: 3740~3745
- 48 Hilgert J, Hirsch K, Bertram T, Hiller M. Emergency path planning for autonomous vehicles using elastic band theory. In: Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE, 2003. 2: 1390~1395
- 49 Rodic A D, Vukobratovic M K. Contribution to the integrated control synthesis of road vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1999, 7(1): 64~78
- 50 Miyazaki T, Kodama T, Furuhashi T, Ohno H. Modeling of human behaviors in real driving situations. In: Proceedings of IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. IEEE, 2001. 643~646
- 51 Chan C Y, Tan H S. Feasibility analysis of steering control as a driver-assistance function in collision situations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2001, 2(1): 1~9
- 52 Xu Y, Song J, Nechyba M C, Yem Y. Performance evaluation and optimization of human control strategy. *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, 39(1): 19~36
- 53 Papadimitriou I, Tomizuka M. Fast lane changing computations using polynomials. In: Proceedings of IEEE American Control Conference. IEEE, 2003. 1: 48~53
- 54 Guvenc L. Park by wire. *IEEE Control Systems Magazine*, 2005, 25(5): 17~17
- 55 Simon A, Becker J C. Vehicle guidance for an autonomous vehicle. In: Proceedings of IEEE/IEEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 1999. 429~434
- 56 Wada M, Yoon K S, Hashimoto H. Development of advanced parking assistance system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2003, 50(1): 4~17
- 57 Tanaka K, Kosaki T, Wang H O. Backing control problem of a mobile robot with multiple trailers: fuzzy modeling and LMI-based design. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C*, 1998, 28(3): 329~337
- 58 Yang Xi-Yang, You Qing-Xi, Li Hong-Xing. Truck backer-upper based on variable universe fuzzy controller. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 41(4): 348~350
(杨昔阳, 尤晴曦, 李洪兴. 基于变论域理论的自动倒车控制. 北京师范大学学报自然科学版, 2005, 41(4): 348~350)
- 59 Gorinevsky D, Kapitanovsky A, Goldenberg A. Neural network architecture for trajectory generation and control of automated car parking. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1996, 4(1): 50~56
- 60 Li L, Wang F Y. Parking guidance system for front wheel steering vehicles using trajectory generation. In: Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2003. 1770~1775
- 61 Connor J, Whitlock G, Norton R, Jackson R. The role of driver sleepiness in car crashes: a systematic review of epidemiological studies. *Accident Analysis and Prevention*, 2001, 33(1): 31~41
- 62 Akerstedt T, Kecklund G, Horte L G. Night driving, seasons, and the risk of highway accidents. *Sleep*, 2001, 24(4): 401~406
- 63 Stutts J C, Wilkins J W, Osberg J S, Vaughn B V. Driver risk factors for sleep related crashes. *Accident Analysis and Prevention*, 2003, 35(3): 321~331
- 64 Wang Bing-Hao, Wei Jian-Qin, Wu Yong-Hong. A preliminary investigation into the brain wave characters of car drivers at dozy state. *Automotive Engineering*, 2004, 26(1): 70~73
(王炳浩, 魏建勤, 吴永红. 汽车驾驶员瞌睡状态脑电波特征的初步探索. 汽车工程, 2004, 26(1): 70~73)
- 65 Dinges D F, Mallis M M, Maislin G, Powell J W. Evaluation of techniques for ocular measurement as an index of fatigue and the basis for alertness management, National Highway Traffic Safety Report 808 762, U. S. Department of Transportation, USA, 1998
- 66 Kim N G, Turvey M T. Eye movements and a rule for perceiving direction of heading. *Ecological Psychology*, 1999, 11(3): 233~248
- 67 Mallis M M, Maislin G, Konowal N, Bierman D M, Byrne V E, Davis R K. Biobehavioral responses to drowsy driving alarms and alerting stimuli, National Highway Traffic Safety Report 809 202, U.S. Department of Transportation, USA, 2000
- 68 Liu X, Xu F L, Fujimura K. Real time eye detection and tracking for driver observation under various light conditions. In: Proceedings of IEEE Intelligent Vehicle Symposium. IEEE, 2002. 18~20
- 69 Fletcher L, Apostoloff N E, Petersson L, Zelinsky A. Vision in and out of vehicles. *IEEE Intelligent Systems*, 2003, 18(1): 12~17
- 70 Smith P, Shah M, Lobo N da V. Determining driver visual attention with one camera. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2003, 4(4): 205~218
- 71 Wahlstrom E, Masoud O, Papanikolopoulos N. Vision based methods for driver monitoring. In: Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2003. 903~908
- 72 Takemura K, Ido J, Matsumoto Y, Ogasawara T. Driver monitoring system based on non contact measurement system of driver's focus of visual attention. In: Proceedings of IEEE Symposium on Intelligent Vehicles. IEEE, 2003. 581~586
- 73 Apostoloff N, Zelinsky A. Vision in and out of vehicles: integrated driver and road scene monitoring. *International Journal of Robotics Research*, 2003, 23(4): 5~28
- 74 Ji Q, Zhu Z, Lan P. Real time nonintrusive monitoring and prediction of driver fatigue. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2004, 53(4): 1052~1068
- 75 Bergasa L M, Nuevo J, Sotelo M A, Vazquez M. Real time system for monitoring driver vigilance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, 7(1): 63~77
- 76 Trivedi M, Cheng S Y, Childers E, Krotosky S J. Occupant posture analysis with stereo and thermal infrared video: algorithms and experimental evaluation. *IEEE Transactions on Vehicle Technology*, 2004, 53(6): 1968~1712
- 77 Mao Zhe, Chu Xiu-Min, Yan Xin-Ping, Wu Chao-Zhong. Advances of fatigue detecting technology for drivers. *China Safety Science Journal*, 2005, 15(3): 108~112
(毛喆, 初秀民, 严新平, 吴超仲. 汽车驾驶员驾驶疲劳监测技术研究进展. 中国安全科学学报, 2005, 15(3): 108~112)
- 78 Wang Rong-Ben, Guo Ke-You, Liu Rui, Chu Jiang-Wei, Chu Xiu-Min. Study on the face location method in driver behavior surveillance. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2003, 20(2): 96~99
(王荣本, 郭克友, 刘锐, 储江伟, 初秀民. 驾驶员驾驶行为监测中的面部定位方法的研究. 公路交通科技, 2003, 20(2): 96~99)

- 79 Fletcher L, Petersson L, Barnes N, Austin D, Zelinsky A. A sign reading driver assistance system using eye gaze. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Automation. IEEE, 2005
- 80 Igerashi K, Takeda K, Itakura F, Abut H. *Is Our Driving Behavior Unique? DSP for In-Vehicle and Mobile Systems*. New York: Springer-Verlag, 2004
- 81 Thiffault P, Bergeron J. Fatigue and individual differences in monotonous simulated driving. *Personality and Individual Differences*, 2003, **34**(1): 159~179
- 82 Apostoloff N, Zelinsky A. Vision in and out of vehicles: integrated driver and road scene monitoring. *International Journal of Robotics Research*, 2004, **23**(4): 513~538
- 83 Brandt T, Stemmer R, Rakotonirainy A. Affordable visual driver monitoring system for fatigue and monotony. In: Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. IEEE, 2004. **7**: 6451~6456
- 84 Fletcher L, Petersson L, Zelinsky A. Road scene monotony detection in a fatigue management driver assistance system. In: Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium. IEEE, 2005. 484~489
- 85 Lai S K L, Craig A, Boord P, Kirkup L, Nguyen H. Development of an algorithm for an EEG-based driver fatigue countermeasure. *Journal of Safety Research*, 2003, **34**(3): 321~328
- 86 Zhao Chen-Ying, Huang Xi-Ting. A study on aggressive driving behavior. *Chinese Journal of Applied Psychology*, 2003, **9**(3): 52~55
(赵晨鹰, 黄希庭. 汽车驾驶员攻击性驾驶行为的研究. 应用心理学, 2003, **9**(3): 52~55)



李力 清华大学自动化系讲师. 主要研究方向为复杂系统分析、智能控制与传感、智能交通和智能汽车.

E-mail: li-li@mail.tsinghua.edu.cn
(**LI Li** Lecturer at the Department of Automation, Tsinghua University. His research interest covers complex systems analysis, intelligent control and intelligent transportation system, and intelligent vehicles.)



王飞跃 中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学重点实验室研究员. 主要研究方向为智能系统和复杂系统的建模、分析、控制和管理. 本文通信作者.

E-mail: feiyue.wang@mail.ia.ac.cn

(**WANG Fei-Yue** Professor at Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers modeling, analysis, and control mechanism of complex systems, and agent-based control systems. Corresponding author of this paper.)



郑南宁 西安交通大学人工智能与机器人研究所教授. 主要研究方向为模式识别、机器视觉与图象处理和智能信息处理系统.

E-mail: nanzheng@mail.xjtu.edu.cn

(**ZHENG Nan-Ning** Professor at the Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Xi'an Jiaotong University. His research interest covers pattern recognition, machine vision and image processing, and hardware implementation of intelligent systems.)



张毅 清华大学自动化系教授. 主要研究方向为智能交通系统工程、城市道路交通控制与管理、自动检测与控制 and 先进控制理论与应用.

E-mail: zhyi@mail.tsinghua.edu.cn

(**ZHANG Yi** Professor at the Department of Automation, Tsinghua University. His research interest covers intelligent transportation system engineering, urban traffic control and management, automatic detection and control, and advanced control theory and application.)