

文章编号: 1002-0268 (2009) S1-0013-06

基于多源信息融合的驾驶人疲劳状态 监测及预警方法研究

成 波, 冯睿嘉, 张 伟, 李家文, 张希波
(清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 疲劳驾驶是导致道路交通事故的重要原因之一。为了克服单一传感器在疲劳检测中的局限性, 系统研究了疲劳状态下驾驶人眼部生理状态、方向盘操作特性以及车辆行驶轨迹特征。以显著性水平为评价手段, 优化出了 PERCLOS、最长闭眼时间、方向盘零速百分比等多个疲劳判别指标。在充分考虑各信息源相关性和互补性的基础上, 开发了以 fisher 判别进行特征级融合, 以 D-S 证据理论进行决策级融合的分层融合算法和模型。试验数据表明, 该模型在高速公路工况下识别精度达到 91%, 与基于单传感器的检测方法相比, 有效提高了疲劳检测系统的准确性、可靠性。

关键词: 智能运输系统; 汽车主动安全; 驾驶员辅助系统; 疲劳驾驶; 多源信息融合

中图分类号: U491

文献标识码: A

Driver Drowsiness Detection and Warning System Based on Multi-source Information Fusion

CHENG Bo, FENG Ruijia, ZHANG Wei, LI Jiawen, ZHANG Xibo

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Drowsy driving is one of the major causes of the road accident. The abnormal behavior of the eyes, steering wheel and the vehicle track in different drowsiness stages of the driver were studied in detail in order to overcome the limitation of single-sensor approach. By analysis of significant test, some parameters such as Percent Eyelid Closure, maximum close duration, percentage of non-steering, etc. were developed. According to the correlation and complementarities analysis, a data fusion framework with two stages was built for modeling and combining the information from different sources where fisher linear discriminant was implied as the feature-level fusion and Dempster-Shafer evidence theory as the decision-level fusion. The experimental result suggests that the proposed model provides the recognition accuracy of 91% when applied for expressway and the reliability and accuracy of the fusion method are significantly higher than those of single sensor.

Key words: ITS; automotive active safety; driver assistance system; drowsy driving; multi-source information fusion

0 引言

疲劳驾驶是导致道路交通事故的重要原因之一。中国公安部的统计数据表明, 2005 年中国因疲劳驾驶共导致 5 782 起道路交通事故, 造成 2 566 人死亡,

6 020 人受伤。美国高速公路交通安全管理局 (NHTSA) 的估计表明, 美国每年大约有 100 000 起交通事故是由于疲劳驾驶引起, 这些事故造成约 1 500 起人员死亡和 71 000 起人员伤害, 分别占人员死亡的 1.6% 和人员伤害的 3.6%。

收稿日期: 2009-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50875151; 50705047); 国家高技术研究发展计划 (八六三计划) 资助项目 (2009AA11Z214)

作者简介: 成波 (1962—), 男, 江苏连云港人, 教授, 研究方向为汽车智能安全技术, 舒适性设计与优化驾驶人行行为分析建模与仿真, 驾驶人行为干预理论与方法。(chengbo@tsinghua.edu.cn)

在过去的十几年中，很多方法被用来进行疲劳驾驶的检测，主要包括基于生理指标的方法^[1-3]、基于面部表情的方法^[6-13]和基于驾驶员操作行为的方法^[7]3 大类。基于生理指标的方法，如脑电图（EEG）、心电图（ECG）、脉搏等，通常为接触式测量，需要被测者佩戴相应的装置（如电极贴片），会对驾驶行为造成极大干扰，一般仅限于实验室使用。基于驾驶人面部表情和基于驾驶员操作行为的疲劳检测属于非接触测量的范畴，虽然不会对驾驶人驾驶机动车造成额外负担，但驾驶人面部表情的检测易受外部光照条件、驾驶人坐姿等的影响，而基于驾驶员操作行为的检测则受路面状况、道路曲率等因素的影响较大。目前，尚没有一种独立的非接触方法能够在复杂行驶工况下保持良好的精度和鲁棒性。

为此，本文在对各信息源失效工况进行研究、比较的基础上，提出综合利用人眼生理特征、方向盘操作特性以及车辆行驶轨迹等信息，采用多源信息融合的方法对驾驶人疲劳状态进行识别。该方法能够充分利用多个信息源在空间或时间上的互补性，对不同来源的信息进行综合处理，从而得到对疲劳状态更准确可靠的描述。

1 总体设计

1.1 系统组成原理

系统组成如图 1 所示，包括信息采集模块、状态判别模块和预警模块三部分。信息采集模块通过各种传感器从各信息源获取原始信息，主要包括利用图像传感器获取的驾驶人面部图像信息、车道线图像信息，利用转角传感器获取的方向盘转角信息。状态判别模块主要完成特征向量的提取、数据有效性的判断和多源信息的融合，通过各单信息源数据的深度挖掘和各信息源间的互补校验，实现对驾驶人状态的可靠识别；当系统判断驾驶人进入疲劳状态时，会自动根据驾驶人目前的疲劳程度，以信息的可达性和低烦扰

度为目标，从视觉、听觉、触觉、嗅觉等预警手段中选取适宜的方式对驾驶人进行预警。

1.2 测试样本的制作方法

为了考察疲劳检测算法的检测精度，需要制作系列已知驾驶人疲劳程度的测试视频。在制作中对驾驶人疲劳程度的判定是通过面部视频评分的方法实现的。其实施步骤为：试验结束后，将驾驶人面部视频进行视频分割，形成系列片长为 15 s 视频片段，评分人员根据驾驶人面部表情特征对驾驶人的疲劳状态进行评价，评价时将驾驶员的状态分为清醒（0 分）、疲劳（1 分）、与非常疲劳（2 分）三级，评分标准如表 1 所示。多个打分人员对同一段视频片段的评分均值作为该时间段驾驶人的疲劳状态并以此为基准对疲劳检测算法的精度进行测评。

表 1 面部视频打分标准

Tab. 1 Criterion for face video scoring		
疲劳程度	特征描述	打分
清醒	眼睛正常睁开，眨眼迅速、眼球状态活跃，精神集中，对外界保持注意力，头部端正。	0
疲劳	眼睛出现闭合趋势、眼球活跃程度下降、目光呆滞、打哈欠、下意识点头，或出现挤眼、摇头等抗拒疲劳的动作。	1
非常疲劳	眼睛闭合趋势严重，出现较长时间持续闭眼，出现头部歪斜、点头，丧失继续驾车能力	2

为了验证面部视频评分方法的合理性，本文通过试验研究了面部视频评分与驾驶人自我疲劳评价、驾驶人反应时间的关系，如图 2 所示。从图 2 中可以看出，面部视频评分的结果与通常用以反映驾驶人真实疲劳状态的自我疲劳评价、反应时间等指标之间均呈现出一致性。这些指标在由视频评分确定的不同疲劳状态下存在较大的显著性差异。另外，“面部视频评分”方法由于是在试验后进行的，不会对试验中的驾驶人产生干扰。因此，采用面部视频评分来制作测试样本的方法是适宜的。

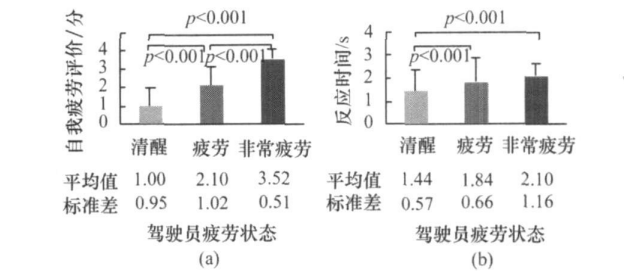


图 2 面部视频评分与自我疲劳评价、反应时间的关系

Fig 2 The correlation among self-rating response time and video scoring

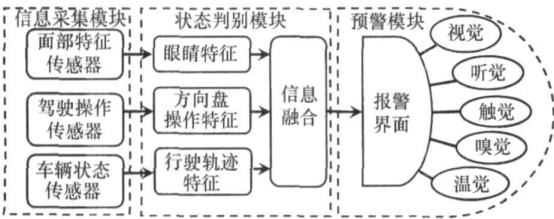


图 1 疲劳监测系统总体方案

Fig 1 Driver drowsiness detection and warning system design

2 特征提取

2.1 基于眼睛状态的疲劳特征提取

驾驶人在进入疲劳状态后眼睛会表现出闭合时间增长、闭合次数增加等特征, 本文在对驾驶人面部视频统计分析的基础上提取了 PERCLOS (Percent Eyelid Closure)^[8]、最长闭眼时间 (Maximum Close Duration, MCD) 作为疲劳判别的指标。2 个指标的定义如表 2 所示。

表 2 眼睛疲劳指标定义

Tab 2 Definitions of drowsiness parameters according to eye states

指标	定义
PERCLOS	某时间窗内, 眼睛累计闭合时间占时间窗长度的百分比
MCD	某时间窗内, 最长一次眼睛闭合的持续时间

PERCLOS 和 MCD 在各级疲劳状态下的显著性分析如图 3 所示。可以看出随着驾驶人疲劳等级的升高, PERCLOS 和 MCD 均呈现出增大的趋势, 在各级疲劳状态样本间均存在 $p < 0.001$ 的显著性差异。

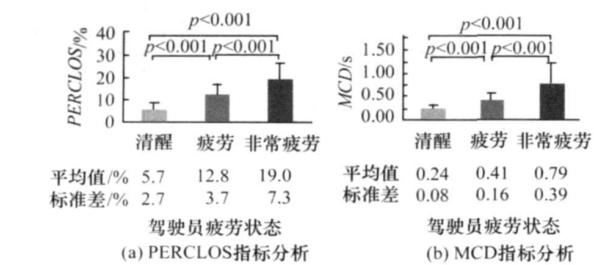


图 3 基于眼睛状态的疲劳判别指标

Fig 3 Drowsiness parameters according to eye states

2.2 基于方向盘的疲劳特征提取

试验发现, 当处于清醒状态时, 驾驶人会通过频繁地小幅修正方向盘来实现车辆的控制, 如图 4 (a) 所示。然而当进入疲劳状态时, 在方向盘操作会上表现出修正频度减少 (特征 1) 和瞬时大幅度修正 (特征 2) 交替出现的特征, 如图 4 (b) 所示。

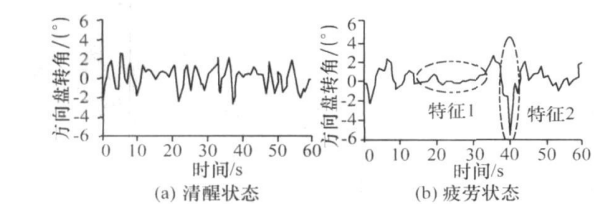


图 4 驾驶人不同疲劳状态时的典型方向盘波形图

Fig 4 Typical steering wheel angle for non-drowsy/ drowsy driver

为此, 本文提取了零速百分比和角度标准差两个指标构成基于方向盘进行疲劳状态判别的特征空间。

零速百分比 (Percentage of Non-Steering, PNS), 定义为在某时间窗内, 方向盘角速度小于设定阈值的时间比例, 它反映了方向盘修正频度减少的现象; 方向盘角度标准差 (Standard Deviation of Steering Wheel Angel, SDSWA) 则反映了时间窗内角度波动的大小。

方向盘零速百分比和方向盘角度标准差在各级疲劳状态下的显著性如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 方向盘零速百分比 (PNS) 对“清醒”与“疲劳”2 种状态有较好的区分能力, 在“清醒”与“疲劳”样本间存在 $p < 0.001$ 的显著性差异, 但其对“疲劳”与“非常疲劳”的区分能力很弱。方向盘角度标准差指标恰好相反, 其对“疲劳”与“非常疲劳”的区分能力较强, 但对“清醒”与“疲劳”状态的区分能力较弱。因此可以应用二者的互补性, 采用零速百分比指标实现“清醒”与“疲劳”状态的判别, 采用角度标准差指标实现“疲劳”与“非常疲劳”状态的判别。

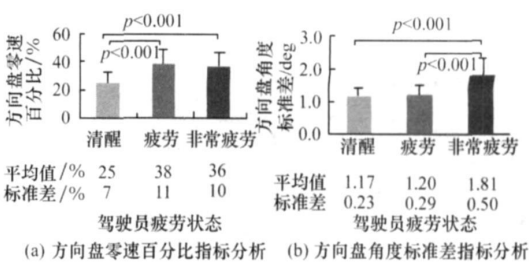


图 5 基于方向盘操作的疲劳判别指标

Fig 5 Drowsiness parameters according to steering wheel operation

2.3 基于车辆行驶轨迹的疲劳特征提取

当驾驶人进入疲劳状态时, 对车辆的控制能力下降, 行驶轨迹常表现出“S”形特点, 为此, 本文提取了车辆横向位置的标准差 (Standard Deviation of Lane Position, SDLP) 作为疲劳判别指标。它反映了一段时间内车辆行驶轨迹沿横向的波动程度。其在各级疲劳下的显著性如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 该指标能够较好的区分“清醒”与“疲劳”状态, 但

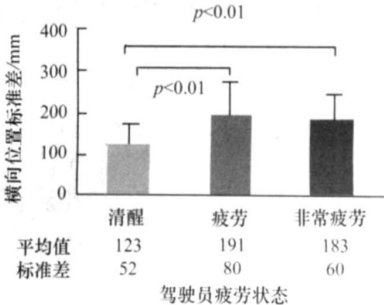


图 6 横向位置标准差指标分析

Fig 6 Standard deviation of transverse position

对“疲劳”与“非常疲劳”状态没有区分能力。

3 多源信息融合

本文基于驾驶员的眼睛状态、方向盘操作特性以

及车辆行驶轨迹等多源信息,通过信息融合的方法对驾驶员的疲劳状态进行综合判别,融合算法如图7所示。

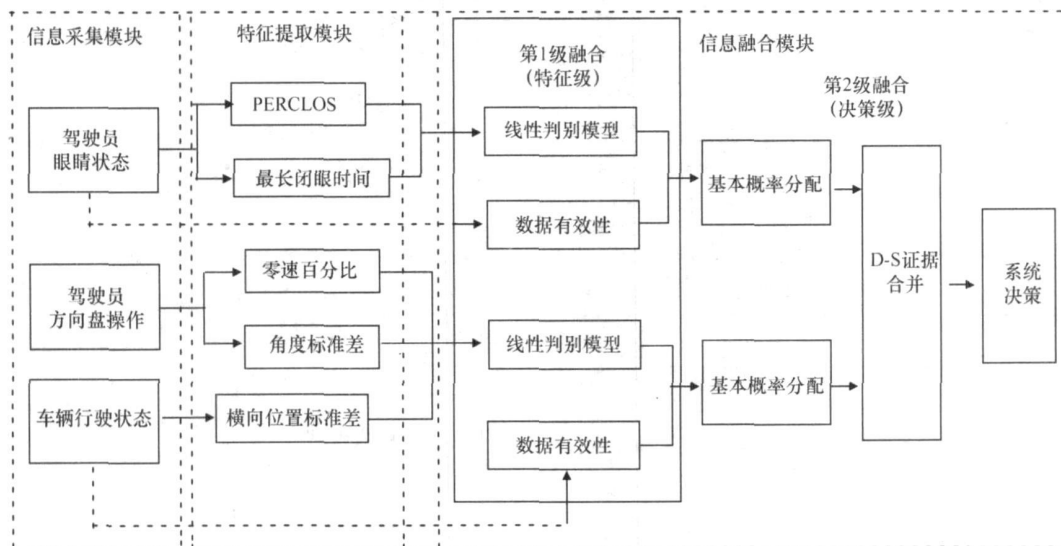


图7 信息融合算法框架图

Fig. 7 Algorithm framework based on multi-sensors information fusion

从图7中可以看出,本融合算法包括基于线性判别函数的特征级融合和基于D-S证据理论的决策级融合两个步骤。D-S证据理论要求融合前各条证据相互独立,而在本研究中,方向盘操作特性与车辆的行驶轨迹存在一定的相关性,因此在特征级融合层,先将车辆轨迹特征参数和方向盘操作特性参数作为同一特征空间中的变量,进行fisher线性判别,输出驾驶人操作行为的证据;另一方面,通过对眼睛状态指标的特征级融合,得到基于驾驶人眼部生理状态的疲劳证据。然后使用D-S证据理论的方法对两方面证据进行决策级融合,得到对驾驶员疲劳状态的一致性推测。在融合时各指标采用统一的系统时钟来实现数据在时域上的关联。

3.1 基于线性判别分析的特征级融合

特征级融合的目的是为了对同一信息源的多个特征进行数据降维,融合形成一个新的综合特征输入给下一级特征分类器。本文采用了线性判别分析的方法进行特征级融合。考虑到所有初始特征的线性组合往往难以达到最佳的判别效果,本文采用逐步引入特征参数的方法。即在第1步首先将对样本区分度最大的一个特征参数引入判别方程;第2步在第1步判别的基础上,将其余参数中对样本区分度最大的一个引入判别方程。直到新引入的参数对判别结果无显著判别作用时停止,通过这种方法筛选出对样本分类能

力最好的指标组合。本研究采用组间均方差与组内均方差的比值F-Ratio作为参数引入的标准,计算得出了基于驾驶人眼睛状态的判别方程和基于驾驶人操作行为的判别方程:

$$\begin{cases} Fun1- Eye = PERCLOS \\ Fun2- Eye = MCD \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} Fun1- Behavior = 5.6^\circ PNS + 0.014^\circ SDLP \\ Fun2- Behavior = SDSWA \end{cases}, \quad (2)$$

式中, $Fun1$ 用于“清醒”与“疲劳”状态的判别; $Fun2$ 用于“疲劳”与“非常疲劳”状态的判别。

3.2 基于D-S证据理论的决策级融合

在决策级融合层,我们将利用D-S证据理论的方法对基于驾驶人眼睛状态与基于驾驶人操作行为的证据进行合并,并最终得到对驾驶人疲劳状态的最终估计。

利用D-S证据理论方法,首先需要根据具体的应用设定识别框架。本研究中识别框架可以表示为:

$$\Theta = \{A(\text{清醒}), D(\text{疲劳}), V(\text{非常疲劳})\}. \quad (3)$$

设 2^Θ 表示 Θ 的所有子集构成的集合,也成为 Θ 的幂集。

$$2^\Theta = \{\Phi, \{A\}, \{D\}, \{V\}, \{A, D\}, \{A, V\}, \{D, V\}, \Theta\}. \quad (4)$$

对于从每个信息源得到的关于疲劳状态的信息,将一个基本概率密度 m 分配给 2^Θ 的每个子集。基本

概率密度定义为:

$$m(\phi) = 0, \sum_{X \subseteq \Theta} m(X) = 1. \tag{5}$$

基于基本概率密度,对任何一个 $X \subseteq \Theta$ 分别计算信任函数 Bel(X)与似然函数 Pl(X),形成信任度区间的上下界。

$$Bel(X) = \sum_{A \subseteq X} M(A), Pl(X) = \sum_{X \cap A \neq \phi} M(A). \tag{6}$$

信任度区间表示了某事件发生可能性的下限估计和上限估计。区间的长度描述了事件的不确定性。

利用证据理论中的组合规则将多个证据的基本概率密度进行合并。假设 m_1 和 m_2 是在同一个识别框架下的 2 个非同源信息的基本概率密度。D-S 证据理论的融合公式可以表示为:

$$m_{1,2}(\phi) = 0, m_{1,2}(Z) = \frac{1}{1 - K} \sum_{X \cap Y = Z} m_1(X)M_2(Y), \tag{7}$$

式中, $K = \sum_{X \cap Y \neq \phi} m_1(X)m_2(Y).$ $\tag{8}$

在证据合并完成之后,根据合并后识别框架幂集 2^Θ 的概率分配,做出算法的最终决策。

4 试验结果及结论

4.1 试验结果

下面以京沈高速公路进行的试验对融合算法进行验证。试验中,共得到 256 个“清醒”样本点、124 个“疲劳”样本点、以及 18 个“非常疲劳”样本点。样本点的获取是通过“面部视频评分”实现的。表 3 是信息融合算法的试验结果。表 4 是不同信息源证据判别效果比较。结果显示融合算法对驾驶人状态的检测精度为 91%。相对于采用单一指标判别的方法,判别精度得到明显改善,同时由于融合算法能够在某个传感器暂时失效时依靠其它信息源完成判别任务,使得本系统的数据有效率达到 99%,显著提高了疲劳检测系统的可靠性。

表 3 融合算法判别结果

Tab. 3 Result of fusion algorithm

		算法判断状态		
		清醒	疲劳	非常疲劳
驾驶员实际状态	清醒	244	12	0
	疲劳	21	99	4
	非常疲劳	0	0	18

为了更好的说明多源信息融合算法中各信息源间的互补作用,从上述试验样本中选取 30 分钟试验数据作进一步说明。

图8(a)为驾驶人面部视频评分的结果;图8(b)

表 4 不同信息源证据判别效果比较

Tab. 4 Comparison of discrimination using different information sources

判别方法	眼睛状态证据	操作行为证据	信息融合算法
检测精度/%	87	82	91
数据有效率/%	95	70	99

注:检测精度=正确识别样本(清醒+疲劳+非常疲劳)/总样本

为单独使用驾驶员眼睛状态证据、操作行为证据的检测结果,图 8 (c) 为应用信息融合算法的疲劳检测结果。从图 8 中可以发现,在第 1 分钟与第 7 分钟,依靠驾驶人眼睛状态判别,发生了将“清醒”判别为“疲劳”的错误,另外对照视频,发现在第 30 分钟,由于驾驶人手部较长时间遮挡摄像头,导致眼睛判别结果失效。在上述时刻,基于操作行为的指标正确判断出了驾驶人疲劳状态,最终融合结果做出了正确判别。

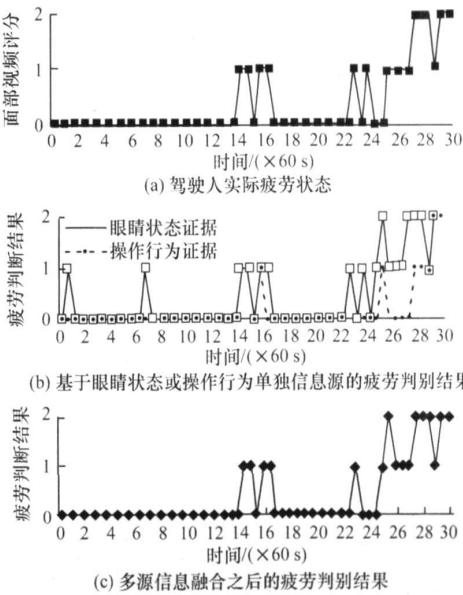


图 8 疲劳初始阶段融合算法实际判别效果示例
Fig 8 An example of drowsiness original stage discrimination using fusion algorithm

4.2 结论

本文在充分考虑各信息源相关性和互补性的基础上,提出了综合利用驾驶人眼部生理特征、方向盘操作特性及车辆行驶轨迹等信息,采用多源信息融合的方法,进行驾驶人安全状态实时监测与预警的方案,开发了以 fisher 判别进行特征级融合,以 D-S 证据理论进行决策级融合的分层融合算法,建立了基于多源信息融合的驾驶人疲劳状态判别模型。试验证明,运用信息融合算法能够利用不同证据之间的互补性,在

某一信息源数据失效时, 利用其他信息源数据实现系统稳定有效的输出, 提高了系统的可靠性。相对于以往基于单信息源的方法, 本技术在环境适应性、识别准确性等方面的性能得到了很大提高。

参考文献:

References:

- [1] WIERWILLE W W, ELLSWORTH L A. Evaluation of Driver Drowsiness by Trained Raters [J]. Accident Analysis and Prevention, 1994, 26 (5): 571—581.
- [2] PAPADELIS C, CHEN Z, KOURTIDOU-PAPADELIS C, et al. Monitoring Sleepiness with On-board Electrophysiological Recordings for Preventing Sleep-deprived Traffic Accidents [J]. Clinical Neurophysiology, 2007 (118): 1906—1922.
- [3] LAL S K L, CRAIG A. Driver Fatigue: Electroencephalography and Psychological Assessment [J]. Psychophysiology, 2002 (39): 1—9.
- [4] NILSSON T, NELSON T M. Development of Fatigue Symptoms during Simulated Driving [J]. Accident Analysis & Prevention, 1997, 29 (4): 479—488.
- [5] HAYASHI K, ISHIHARA K, HASHIMOTO H, et al. Individualized Drowsiness Detection during Driving by Pulse Wave Analysis with Neural Network [C] // Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems Vienna, Austria; [s n], 2005: 901—906.
- [6] GRACE R, BYME V E, BIERMAN D M, et al. A Drowsy Driver Detection System for Heavy Vehicle [C] // Proceedings of the 17th Digital Avionics Systems Conference Bellevue, USA; [s n], 1998: 136/1—136/8.
- [7] GU Haisong, JI Qiang, ZHU Zhiwei, et al. Active Facial Tracking for Fatigue Detection [C] // Proceedings of the Sixth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision Orlando, FL, USA; [s n], 2002: 137—142.
- [8] HIZEM W, KRICHEN E, NI Y, et al. Specific Sensors for Face Recognition [C] // Proceedings of International Conference on Biometrics Hong Kong, China; [s n], 2006: 47—54.
- [9] ERIKSSON M, PAPANIKOTOPOULOS N P. Eye-tracking for Detection of Driver Fatigue [C] // Proceedings of IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems Boston, USA; [s n], 1997: 314—319.
- [10] SINGH S, PAPANIKOLOPOULOS N P. Monitoring Driver Fatigue Using Facial Analysis Techniques [C] // Proceedings of IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems Tokyo, Japan; [s n], 1999: 314—318.
- [11] SMITH P, SHAH M, VITORIA L N. Monitoring Head/Eye Motion for Driver Alertness with One Camera [C] // Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition Barcelona Spain; 2000: [s n], 636—642.
- [12] SMITH P, SHAH M, VITORIA L N. Determine Driver Visual Attention with One Camera [J]. Intelligent Transportation Systems, 2003, 4 (4): 205—218.
- [13] ITO T, MITA S, KOZUKA K, et al. Driver Blink Measurement by the Motion Picture Processing and Its Application to Drowsiness Detection [C] // Proceedings of The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems Singapore; [s n], 2002: 168—173.
- [14] LIU X, XU F L, FUJIMURA K. Real-time Eye Detection and Tracking for Driver Observation under Various Light Conditions [C] // Proceedings of Intelligent Vehicle Symposium Versailles, France; [s n], 2002: 344—351.
- [15] CHU J W, JIN L S, TONG B L, et al. A Monitoring Method of Driver Fatigue Behavior Based on Machine Vision [C] // Proceedings of Intelligent Vehicle Symposium Parma, Italy; [s n], 2004: 351—356.

(上接第 6 页)

- [9] LIU Ruiyang. The Formation of Ground-to-Train Safety Monitoring System in China [C] // Proceedings of 8th International Heavy Haul Conference Rio de Janeiro, Brazil: Riocentro, 2005.
- [10] 刘瑞扬. 客车运行安全监控系统 [J]. 中国铁道科学, 2007, 28 (2): 15—23.
LIU Ruiyang. Train Coach Diagnosis System [J]. China Railway Science, 2007, 28 (2): 15—23.
- [11] 赖冰凌, 王新宇. Relief 算法在关门车故障自动识别中的应用 [J], 铁路计算机应用, 2007, 16 (1): 21—23.
LAI Bingling, WANG Xinyu. Application of Relief Algorithm to Valve Closing Trouble Automatic Recognition [J]. Railway Computer Application, 2007, 16 (1): 21—23.
- [12] 中华人民共和国铁道部. 铁运【2008】257 号, 车辆轴温智能探测系统 (THDS) 设备检修维护管理规程 [S]. 北京: 铁道出版社, 2009.
P. R. China Ministry of Railways. Equipment Repair and Maintenance Regulation of Trace Hotbox Detection System, China Railway Publishing House, Beijing, 2009.
- [13] 刘春煌, 桑苑秋, 李继先, 等. 沪宁线行车安全监控信息网络技术方案和管理中心的研究 [J]. 中国铁道科学, 2002, 23 (6): 15—23.
LIU Chunhuang, SANG Yuanqiu, LI Jixian, et al. Study on the Technical Solution for Integrated Railway Traffic Supervision Information Network and Management Center for Shanghai-Nanjing Line [J]. China Railway Science, 2002, 23 (6): 15—23.