

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2013 5  
Vol.18 No.

中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会主办  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2013 年 5 月 第 18 卷 第 5 期(总第 205 期)

## 目 次

### 综述

- 中国图像工程:2012 ..... 章毓晋(483)  
动态场景下的交通标识检测与识别研究进展 ..... 刘华平, 李建民, 胡晓林, 孙富春(493)

### 图像处理与编码

- 基于 PCA 硬阈值收缩的平滑投影 Landweber 图像压缩感知重构 ..... 李然, 干宗良, 朱秀昌(504)

### 图像分析和识别

- 利用视觉显著性和粒子滤波的运动目标跟踪 ..... 张巧荣, 冯新扬(515)  
融合边缘测度的自然场景彩色图像区域分割 ..... 代沁伶, 王雷光, 洪亮(523)  
场景语义树图像标注方法 ..... 刘咏梅, 杨帆, 于林森(529)  
基于视锥细胞色适应生理机制的颜色恒常性计算 ..... 袁兴生, 王正志, 项凤涛(537)

### 医学图像处理

- 改进 FCM 和 LFP 相结合的白细胞图像分类 ..... 庞春颖, 刘记奎, 韩立喜(545)  
局部高斯分布拟合的脑 MR 图像分割及有偏场校正 ..... 崔文超, 王毅, 樊养余, 冯燕, 郝重阳(552)

### 遥感图像处理

- 局部投影可分离的高光谱图像异常检测 ..... 刘明, 杜小平, 夏鲁瑞(558)  
基于结构特征的遥感影像匹配 ..... 寇媛, 徐景中(565)

### “第 9 届中国计算机图形学大会”专栏

- 结合浅景深与构图的图像质量评价 ..... 顾婷婷, 郭延文, 殷昆燕(574)  
结合精确大气散射图计算的图像快速去雾 ..... 甘佳佳, 肖春霞(583)  
多特征综合的视频拷贝检测 ..... 林莹, 杨扬, 凌康, 肖金伟, 武港山(591)  
真实感雨线绘制 ..... 江隆盛, 吴恩华(600)  
误差云映射的深度融合 3 维重建 ..... 陈亚当, 蔡仲谋, 吴恩华(607)

- “第八届中国系统建模与仿真技术高层论坛”征文通知 ..... 封 3

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 18 No. 5 May 2013

## Contents

### Review

- Image engineering in China: 2012 ..... Zhang Yujin(483)
- Recent progress in detection and recognition of the traffic signs in dynamic scenes  
..... Liu Huaping, Li Jianmin, Hu Xiaolin, Sun Fuchun(493)

### Image Processing and Coding

- Smoothed projected Landweber image compressed sensing reconstruction using hard thresholding based on principal components analysis  
..... Li Ran, Gan Zongliang, Zhu Xiuchang(504)

### Image Analysis and Recognition

- Object tracking based on visual saliency and particle filter ..... Zhang Qiaorong, Feng Xinyang(515)
- Regional segmentation of natural scene color images by integrating edge cues ..... Dai Qinling, Wang Leiguang, Hong Liang(523)
- Automatic image annotation based on scene semantic trees ..... Liu Yongmei, Yang Fan, Yu Linsen(529)
- Color constancy algorithm based on biological mechanism; color adaptation of cone cells  
..... Yuan Xingsheng, Wang Zhengzhi, Xiang Fengtao(537)

### Medical Image Processing

- White blood cells image classification based on improving the connection of FCM and LFP  
..... Pang Chunying, Liu Jikui, Han Lixi(545)
- Multiphase level set method for segmentation and bias correction of brain MR images  
..... Cui Wenchao, Wang Yi, Fan Yangyu, Feng Yan, Hao Chongyang(552)

### Remote Sensing Image Processing

- Anomaly detection method based on separable local projection in hyperspectral imagery ... Liu Ming, Du Xiaoping, Xia Lurui(558)
- Algorithm for remote sensing images matching based on the structure characteristics ..... Kou Yuan, Xu Jingzhong(565)

### Issum of the Chinagraph '2012

- Image quality assessment combining low DoF and composition ..... Gu Tingting, Guo Yanwen, Yin Kunyan(574)
- Fast image dehazing based on accurate scattering map ..... Gan Jiajia, Xiao Chunxia(583)
- Video copy detection based on multiple visual features synthesizing  
..... Lin Ying, Yang Yang, Ling Kang, Xiao Jinwei, Wu Gangshan(591)
- Photorealistic rendering of rain streaks ..... Jiang Longsheng, Wu Enhua(600)
- Three dimensional reconstructions based on error clouds mapping ..... Chen Yadang, Cai Zhongmou, Wu Enhua(607)

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)05-0493-11

论文引用格式: 刘华平, 李建民, 胡晓林, 孙富春. 动态场景下的交通标识检测与识别研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(5): 493-503.

## 动态场景下的交通标识检测与识别研究进展

刘华平<sup>1,2</sup>, 李建民<sup>1,2</sup>, 胡晓林<sup>1,2</sup>, 孙富春<sup>1,2</sup>

1. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084; 2. 清华大学智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084

**摘要:** 动态环境下交通标识的自动识别随着无人驾驶汽车对环境理解的要求提高引起了人们的高度关注。近年来研究人员从检测、跟踪和识别等方面展开了对这一问题的深入研究。针对动态场景下基于单个普通光学摄像机的交通标识检测与识别方法做一系统回顾。重点围绕交通标识的检测、识别、时序信息的利用等展开。此外, 还对这一领域目前常用的数据集和评价方法做了具体介绍。最后指出了未来发展的趋势和方向。

**关键词:** 动态场景; 交通标识; 检测; 识别

### Recent progress in detection and recognition of the traffic signs in dynamic scenes

Liu Huaping<sup>1,2</sup>, Li Jianmin<sup>1,2</sup>, Hu Xiaolin<sup>1,2</sup>, Sun Fuchun<sup>1,2</sup>

1. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Beijing 100084, China

**Abstract:** The automatic recognition of traffic signs in dynamic scenes has attracted a lot of attention due to the development of intelligent vehicles. In recent years, many scholars have made great efforts on the detection, tracking, and recognition of traffic signs. In this paper, we review the key technologies and give an introduction about the publicly available datasets. Finally, we point at some future research directions.

**Key words:** dynamic scene; traffic signs; detection; recognition

## 0 引言

道路上的交通标识是一种有很显著的颜色和形状特征的公共标识, 对驾驶员起到指示、提示和警示等作用, 这其中包含了非常丰富的导航信息。在实际驾驶中, 准确地识别交通标识对于提高道路驾驶安全性能具有非常重要的意义, 而忽视交通标识可能会造成非常严重的事故。对于无人驾驶的汽车, 如果不能自动地检测并正确地识别交通标识, 就不

可能实现真正意义上的自主控制。此外, 交通标识的自动识别还可广泛应用于自适应巡航控制, 以及其他辅助驾驶中。这一问题因其重要的学术意义和实用价值, 成为了当前计算机视觉<sup>[1]</sup>、模式识别<sup>[2-3]</sup>、智能机器人<sup>[4]</sup>和智能交通系统<sup>[5-6]</sup>等领域的热点研究问题。

交通标识的定位与识别问题具有自身的特点。一方面, 交通标识属于人为设计标识, 为吸引驾驶员注意, 通常采用特定的颜色(如红、黄、蓝、白、黑等), 以及特定的形状(如三角形、矩形、圆形等)。

收稿日期: 2012-05-22; 修回日期: 2012-10-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(G2013CB329403); 国家自然科学基金项目(91120011); 清华大学自主科研计划项目(2011THZ0)

第一作者简介: 刘华平(1976—), 男, 副研究员, 2004年于清华大学计算机系获博士学位, 主要研究方向智能机器人。E-mail: hpliu@tsinghua.edu.cn

这降低了定位与识别的难度。但在实际上,由于背景干扰、光照变化、天气影响,以及安装的位置偏差等,交通标识的定位与识别是非常困难的。此外,对于车载摄像机而言,车体运行过程中会引起图像模糊和图像抖动,这对算法的实时性也提出了更高的要求。这些都使得动态场景下交通标识检测与识别具有极大的挑战。

交通标识的自动识别在 20 世纪就引起了人们的关注。文献[7]对 20 世纪的交通标识检测与识别问题做了较全面和深入的综述。文献[8]介绍了最近的一些重要进展。近年来研究人员从理论方法、硬件、软件等方面展开了对这一问题的深入研究。针对动态场景下基于单个普通光学摄像机的交通标识检测与识别方法做一回顾。当前的绝大多数研究工作都遵循“检测-识别”的思路,还有部分研究工作针对动态场景引入了时序信息。以下重点介绍这几方面的研究进展。

## 1 交通标识的检测

检测交通标识最常用的方法包括颜色分割技术、特定形状检测技术,以及利用纹理、局部特征等设计分类器等方法。

在颜色分割方面,颜色空间的选择非常重要。最普遍的颜色特征即为 RGB 特征<sup>[9-11]</sup>,但这类方法对光照变化非常敏感。文献[12]换用了 YUV 模型检测蓝色矩形交通标识。HIS 颜色模型对光照较为鲁棒,因而在光照变化大的场景内被广泛采用<sup>[13-15]</sup>。进一步,文献[16]融合了 YUV 和 HSI 颜色空间,获得了较单一颜色模型更好的效果。此外,还有一些特殊的颜色模型,如文献[17]利用 CIEC-AM97 (color appearance modeling for color management systems),文献[18]提出的 IHLS(improved hue-luminance-saturation)模型,文献[19]利用 KL 变换提出的 Eigen-Color 模型。在分割技术方面,常用的交通标识检测方法通常需要设计许多阈值,而这些阈值的确定在实际中是非常困难<sup>[9,20]</sup>。针对这一问题,文献[21]将分割问题转化为分类问题,并设计了支持向量机(SVM)分类器来对交通标识进行检测。这一方法的缺点是计算量较大,实时应用尚比较困难,目前主要应用于视频图像的批处理,以对道路上的交通标识进行自动统计归类。

形状特征的提取一般直接在灰度图上进行。文

献[22]利用平滑技术和 Laplacian 滤波器设计了针对圆形标识的灰度特征。文献[23]针对三角形标识设计了基于图像梯度方位信息的几何模型。文献[24]针对标识边框和象形图(pictogram)设计了两个支持向量机分类器。文献[25]利用小波技术提取特征,并利用多层感知机实现检测。比较常用的方法是利用 Hough 变换检测特定形状<sup>[26]</sup>,文献[27]在利用 Hough 变换检测圆形标识基础上进一步引入局部特征来对圆形区域内的内容进行检测,以提高检测精度。但 Hough 变换计算较慢,文献[28-29]利用三角形、正方形、菱形、八角形和圆形标识的径向对称性提出了快速检测算法。文献[30]在此基础上引入一个控制参数以剔除大小接近的误检结果。文献[31]提出利用垂直方向的对称性特征,并指出这一特征对几乎所有交通标识都有效。但这些方法仅在高速公路的场景上测试,而在复杂的城市道路上缺乏验证。以上很多特征的计算都依赖于图像梯度信息,而梯度特征对图像噪声非常敏感。此外,形状特征的提取通常需要较大的时间成本。文献[32]提出了局部轮廓算子来刻画局部几何结构,可以检测圆形和三角形标识。

既然颜色特征和形状特征可以相互补充,一个自然的想法就是同时使用颜色信息和形状信息<sup>[5,33]</sup>。这方面最常见的工作是先利用颜色分割进行粗检测,再利用形状提取方法来改进检测结果,如文献[34]在 HSI 颜色空间内完成分割,再利用形状模板匹配方法得到检测结果。文献[35]则组合了颜色信息 and 对称性信息。文献[36]针对不同的交通标识建立了“颜色-形状对”(color-shape-pair),将特定的颜色分割结果与特定的形状提取方法联系起来。文献[37]首先提取出颜色图片的红色通道,然后提取其边缘信息,并在此基础上提取检测结果。文献[15]首先利用颜色阈值进行图像分割,为解决许多背景部分也具有类似颜色的问题,进一步利用交通标识的几何尺寸先验信息来剔除误检结果。文献[20]综合利用神经网络融合了颜色、梯度和距离信息来滤除误检结果。文献[38]针对颜色和形状特征分别设计了一个神经网络特征提取器,再利用模糊逻辑对其融合,尽管得到了不错的检测结果,但这一方法计算量很大。文献[39]组合使用了颜色信息和 SIFT(scale-invariant feature transform)特征点信息。文献[15]采用颜色分割之后,提出了边界距离(distance-to-borders)特征。文献[40]首先用 HSI

颜色空间做分割,再用 Hough 变换定位交通标识。除此之外,为了减小搜索的区域,文献[41]利用先验知识建立了静态的矩形感兴趣区(ROI),但难以适应环境的变化。文献[42]利用先验的3D信息建立了针对不同场景的ROI(region-of-interest)。

尽管基于颜色信息的图像分割和基于形状的检测方法方面的研究成果非常丰富,但这些方法都难以有效地解决视点变化以及遮挡带来的问题。最近,利用机器学习技术检测交通标识引起了很多关注。特别是利用 Adaboost 方法来自动选择特征近年来得到了青睐。文献[43]在常规的 Harr 小波特征基础上补充了部分不对称 Harr 小波特征,设计了新的 Adaboost 检测器。文献[44]引入了颜色 Harr 小波特征,因此有效地组合颜色和局部特征信息,并且实现了颜色空间的自动选取。文献[41,45-46]中利用了 HoG(histogram of gradient)、EOH(edge orientation histogram)等特征,并利用 SVM 和 Adaboost 技术来实现交通标识检测。文献[47]构建了每个颜色分量的 HoG 特征,从而有效地将颜色信息和边缘信息融合起来作为 SVM 分类器的输入特征向量。文献[48]将遗传算法引入 Adaboost 中的弱分类器设计,构建了基于进化 Adaboost 的交通标识检测算法。文献[49]首先提取图像的纹理边缘,然后在此基础上仅针对显著性区域利用 Adaboost 实现交通标识检测,可以提高实时性。但目前提出的这些方法往往需要离线训练,难以适应动态环境的变化,在线计算需要的时间比较长,其检测过程也并不符合人类的视觉认知机理。

近年来,模拟人类早期视觉处理(early visual processing)机制的研究一直非常活跃,基于选择性注意机制的显著性检测方法被文献[50]用于交通标识检测,该文利用颜色信息和边缘信息的加权组合来构建显著性图(saliency map),并利用最大熵方法来确定交通标识的尺度。这一方法本质上属于“自底向上”(bottom-up)的计算模型。文献[51]在这一机制上融入了“自顶向下”(top-down)的分类器模块,进一步改进了性能。文献[6]也利用“自顶向下”注意力机制设计了交通标识的检测算法,在此基础上利用多个弱分类器进一步开发了识别模块。

## 2 交通标识的识别

交通标识的识别往往是在检测环节之后进行。

交通标识识别的主要困难表现在:

1) 各种不同交通标识出现的频率大不一样,因此各个类别的训练数目可能存在很大差异,这是典型的非平衡分类问题。

2) 实际环境下采集到的图像质量可能很差。其原因包括运动模糊、光线干扰、天气条件影响等。

3) 由于图像通常在运动平台上获取,拍摄视角可能变化很大,为识别增加困难。

4) 实际用于识别的图像往往是经检测得到的结果。检测结果通常含有噪声(如不期望的背景部分或者遮挡等),这些噪声对识别非常不利。

目前在交通标识识别方面的研究工作大都还是基于单目视觉信息,或者直接针对静态图片库设计识别算法。这方面最常见的方法是模板匹配<sup>[20,35,52-54]</sup>。但这类方法对标识的拍摄视角和遮挡非常敏感。文献[55]在模板匹配基础上结合字符识别技术实现了限速标识的识别。Hough 变换也可以用于交通标识的识别<sup>[56]</sup>,并对遮挡有较好的处理能力,但每次只能针对单一形状识别,因而计算复杂度很高。

很多学者尝试用神经网络和遗传算法来处理交通标识的变形问题。文献[10]针对不同的变形建立了多层感知机模型。文献[57]利用同样类型的神经网络,但将多分类问题转化为了多个二分类问题,对每个分类问题设计一个独立的神经网络。文献[48]提出利用误差校正输出编码(error-correcting output code)技术解决了类似问题。文献[58]提出利用自适应共振神经网络识别交通标识的种类,再利用一个记忆神经网络进一步识别该交通标识。文献[59]针对限速标识提出了分层神经网络方法,其中第1层的神经网络用于标识粗分类,而第2层的神经网络用于识别标识上的数字。文献[27]构建了两个独立的多层感知机神经网络,分别针对 SIFT 和 SURF(speeded up robust features)两类不同的特征进行处理。其他采用神经网络的方法包括<sup>[60-61]</sup>。作为一类特殊的神经网络,SVM 也在交通标识识别中得到了应用<sup>[15,30,36]</sup>。文献[20]建立了与颜色和形状特征相关的能量函数,通过遗传算法和模拟退火算法来优化该能量函数以得到识别结果。

值得一提的是,神经网络领域的知名国际会议 International Joint Conference on Neural Networks(IJCNN)在2011年设立了关于交通标识的识别比

赛,并提供了用于识别任务的公共数据集。比赛的详细情况可参见文献[62]。在比赛中,卷积神经网络取得了非常优异的性能。

近年来,利用集成学习思想识别交通标识得到了高度关注。集成学习的核心思想是利用多个弱分类器的线性组合来实现分类性能的提升<sup>[6]</sup>,最具代表性的成果是 Adaboost 方法。这类方法在交通标识的检测过程中就有成功的应用,但在交通标识的识别过程中需要解决交通标识的类内鉴别问题。为此,文献[63]通过引入不同交通标识被误识的成本建立风险灵敏的 Adaboost 识别方法。文献[64]考虑了待识别的交通标识与存储的交通标识库中样本的相似度衡量问题,并设计监督式学习算法来计算实际中待识别的交通标识与样本库中样本的相似度,选取相似度最接近的训练样本的类别来作为识别结果。文献[65]将这一方法引入 Adaboost 学习框架,构建了 SimBoost 算法,这一方法比较适合多分类问题。但目前这些结果都是针对静态图片做的测试。此外,将机器学习方法应用于交通标识识别的工作还有 k-近邻分类<sup>[66]</sup>、随机森林方法<sup>[67-68]</sup>等。最近,文献[2]还提出了交通标识鉴别特征的提取方法,并与一般的分类器结合,但也仅测试了静态图片上的性能。利用机器学习方法必然需要大量的训练样本,为解决“退化”样本难以采集的问题,文献[69]建立了交通标识训练数据的产生式学习(generative learning)方法以建立退化模型。

### 3 引入时序信息的交通标识检测与识别

利用单帧信息,不仅结果不可靠,还难以处理标识被部分或全部遮挡的情况。在动态环境中,引入时序信息可以显著提高交通标识定位与识别的可靠性。早在 1996 年,文献[52]通过假设车体做匀速运动研究了交通标识的 3-D 跟踪,由于从图像上测量到的信息与 3-D 坐标之间的测量方程是非线性的,作者引入扩展 Kalman 滤波估计交通标识的位置和相对速度,在此基础上提出了基于互相关系数的融合方法来辅助识别。此外,文献[70-71]都利用交通标识的 3-D 位置作为状态变量,并利用扩展 Kalman 滤波来估计这些状态变量。文献[38]利用 Kalman 滤波对每个时刻的检测结果,特别是交通标识的尺度大小做进一步优化定位,并提出直到跟踪结

果显示目标尺度足够大时才开始启动识别模块。该文并未讨论识别问题,且引入一些很强的假设,如标识的物理尺寸必须事先已知,车速恒定且已知,车行轨迹为直线等,因此局限性较强。这一方法被文献[2]应用来预测当前帧上的交通标识可能的位置,以减少搜索量。文献[44]针对实际道路上“限速”和“禁行”等简单标识,假设每个时刻得到的检测(跟踪)结果是相互独立的,利用极大似然方法融合了不同时刻的检测结果,且对不同时刻的结果给予了不同加权(后面观测到的标识比前面观测到的标识大,因而其权值更大)。文献[72]和文献[2]分别利用模板匹配和颜色距离变换设计了类似的时序融合方法。文献[73]针对限速标识设计了基于跟踪结果的置信度估计,当交通标识能被连续跟踪时,其置信度不断上升,否则下降。最终的识别结果仅当其置信度达到一定阈值时才有效。文献[74]利用了 Kalman 滤波的退化形式 alpha-beta-gamma 滤波器,但需要人为设定 alpha-beta-gamma 3 个参数,并引入加权函数对各个时刻的结果加权。文献[75]研究了光照改变剧烈情形下利用 Kalman 滤波实现图像平面内交通标识的跟踪。类似的方法最近还被文献[76]应用于道路上交通标识的采集与维护任务。文献[27]针对图像里的位置、尺度等参数建立线性运动模型,并利用 Kalman 滤波跟踪,在每一时刻将检测结果与跟踪结果进行数据关联。这一方法可以有效地处理多个交通标识紧挨在一起的情形。每一时刻的检测结果被记录下来并与上一时刻的结果融合,直到达到一定置信度后才做出最终的分类判断。这里的“跟踪”模块主要用于改进检测结果。

文献[77]指出交通标识在图像上的运动轨迹实际上是非线性的,因此利用模糊模型来描述其运动模型,并利用粒子滤波实现跟踪。但其模糊模型的参数需要从实际数据中学习。文献[78]利用基于颜色信息的粒子滤波跟踪交通标识,经过多帧跟踪后给出鲁棒的检测结果(未考虑识别)。利用粒子滤波来实现车体周围动态环境的感知近年来引起了人们的高度重视。

此外,文献[79]利用光流分析研究了里程标识的检测,文献[80]基于光流恒定假设,利用 Lucas-Kanade 算法实现了交通标识的跟踪。文献[81]利用车体内部传感器提供的车速和 yaw-rate 信息对车体运动做补偿,再引入粒子滤波实现交通标识的 3D 跟踪。最近,文献[82]还建立了动态场景下交通标

识的时空相关模型,指出这一模型对于交通标识的识别具有很重要的作用,但该文中仅仅讨论了模型的构建,并未涉及交通标识的检测、跟踪与识别。

#### 4 交通标识检测与识别的性能评价

作为一个具有重要实际意义的科学问题,交通标识检测与识别的定量性能评价非常重要。然而,由于公共数据集的匮乏,以及性能评价方法的欠缺,目前绝大多数研究工作都仅仅提供了在各自采集的数据集上的定性比较。缺乏定量比较不仅难以区分方法的优劣,而且会严重制约这一领域的技术发展,因此近年来有不少学者开展了这方面的研究工作。文献[21]利用交通标识检测结果综合评价了各种图像分割算法的性能。文献[3]构建了一个包括251个交通标识的公共图片库(共847张图片)。文献[83]在包含180种交通标识的24段视频数据(总长约1h)上比较了基于几何特征的方法、基于颜色信息的SVM方法和基于纹理与边缘信息的Adaboost检测方法的性能。文献[84]设计了专门用于交通标识识别的软件工具。在性能评价指标方面,当前在交通标识检测与识别方面的性能评价工作大都是直接从视觉目标检测和跟踪中借鉴过来。如文献[3]利用检测结果中心与标注结果中心的距离,以及检测结果宽度和高度的绝对误差等定义了交通标识检测的准确率。文献[85]沿用了多目标跟踪中提出的性能指标。这些工作大都针对检测情形,对识别讨论得不多。

在数据集方面,交通标识识别公共数据集的进展远远滞后于计算机视觉和模式识别其他领域的进展,当前提供采集数据及标注信息下载的研究机构并不多。这些场景的选择与拍摄均比较随意,而且主要限于欧洲的场景。目前见诸报道的代表性公共数据集见表1。文献[3]在ITOWNS数据集上对3种不同的检测算法做了性能评估,并公布了数据集。这3类检测方法包括单像素投票(SPV)法、轮廓拟合合法(CF)和成对像素(PWPV)投票法。在该数据集上,以检测准确率(CDR)和每幅图片上的误报(FPPI)率构造出的ROC曲线来评价检测性能。对于中等大小的交通标识(48像素到64像素之间),3种算法的性能没有显著差别。然而,对大的交通标识(64像素以上),PWPV效果最好。对于较小的交通标识(48像素以下),SPV效果最好。处理时间

以PWPV较快(0.8 s/帧),SPV次之(1.5 s/帧),CF最慢(2.3 s/帧)。不过,由于SPV是用MATLAB实现的,而PWPV和CF是用C语言实现的,因而CF的速度还有很大的提升空间。UAH和GAO数据集上目前还缺乏相关的实验比对工作。GTSRB是最近公布的数据集,并被用于在IJCNN2011上举办的交通标识识别比赛,因而很多代表性的识别算法实现了公平的对比。其中,利用基于线性鉴别分析设计的线性分类器,采用梯度直方图特征,可以获得95.68%的识别率。这一结果被作为基线(baseline)结果。采用随机森林分类器可以获得96.14%的识别率,多尺度卷积神经网络方法可以获得98.31%的识别率,而多重卷积神经网络的方法获得了99.46%的识别率,甚至超过了人工识别的结果(98.84%)。从这些结果可以看到,目前卷积神经网络在交通标识识别上的应用相当成功。不过,卷积神经网络直接利用图像的像素值作为特征,对图像的对齐和预处理要求较高,参加比赛的两类卷积神经网络方法都不同程度地利用了平移、旋转等技术扩充了训练集。而且,采用这类神经网络需要调整的参数很多,训练成本很高。此外,由于GTSRB本身的局限性(如仅包括43类标识、训练样本与测试样本相似度较高),目前的结果并不意味着交通标识的识别问题已被彻底解决。此外,由于数据集较新,其他一些常见的分类方法,如SVM、Adaboost等的性能尚未见综合评测报道。这也是从事这一领域的研究人员的一个努力方向。

表1 代表性公共数据集

| Table 1 Representative public data set |     |       |    |                                              |
|----------------------------------------|-----|-------|----|----------------------------------------------|
| 数据集                                    | 国家  | 任务    | 时序 | 详细信息                                         |
| ITOWNS                                 | 法国  | 检测-识别 | 有  | 847 幅图像 <sup>[3]</sup>                       |
| UAH                                    | 西班牙 | 检测-识别 | 无  | 615 幅图像 <sup>[15]</sup>                      |
| GAO                                    | 英国  | 检测-识别 | 无  | 128 幅图像 <sup>[8]</sup>                       |
| GTSRB                                  | 德国  | 检测-识别 | 无  | 39 209 幅训练图像,<br>12 630 测试图像 <sup>[62]</sup> |

据笔者了解,针对中国境内的交通标识识别问题尽管研究工作很多,但尚未有相关机构开发公共数据集供研究人员下载使用,这显然极大地限制了中国交通标识识别问题的研究进展。国家自然科学基金委员会“视听觉信息的认知计算”重大研究计划于2010年10月在西安举办的第二届“智能车未来挑

战”比赛中,专门安排了静态环境下针对包括禁令、警告、指路和指示等在内的近 30 种交通标识检测与识别的单项比赛(见图 1)。此外,在智能车复杂环境综合测试中,完全依赖动态环境下交通标识检测

与识别结果进行自动驾驶。这一工作有利地促进了交通标识检测与识别工作,并与智能车的自动驾驶有机结合起来。但主办方并未提供公共数据集供训练或测试,因而对各种方法的评价仍然比较困难。



图 1 2010 年“智能车未来挑战”比赛用的交通标识和信号灯测试集合

Fig. 1 Traffic signs and lamp test set used in future challenges in 2010

除了检测与识别的准确率,交通标识检测与识别的速度也是非常重要的性能指标。特别是对于动态场景下的车载摄像机而言,算法实时性的重要性不言而喻。目前对算法速度的报道比较零星,早期的研究工作中通过硬件实现了阈值分割和模板匹配的算法,在当时的机器上定位只需要 0.016 s,但识别需要 0.6 s,且这一工作仅限于限速标识<sup>[86]</sup>。文献[15]设计了交通标识的离线批处理检测与识别系统,用 C 语言在 2.2 GHz Pentium 4 平台上实现的运算速度为 1.77 s/帧。近年来,随着计算机硬件水平的大幅度提升,以及视觉处理算法和机器学习算法的迅速发展,各种快速算法被纷纷提出,因而实时性有了很大提高<sup>[87]</sup>。如文献[65]中设计的 Ada-boost 分类器,仅仅需要 10 ms 即可处理 1 帧静态图像。文献[88]针对实际道路视频序列报道了在

3 GHz Pentium 4 平台上实现了 10 帧/s 的实时性能。文献[89]通过引入一类新的形状与纹理特征将常规 Adaboost 检测器的 800 ms/帧速度提升到了接近于 70 ms/帧(相当于 14 帧/s)。最近,文献[63]分析了影响算法实时性的因素,并指出引入跟踪机制可以显著提高运算速度。然而,由于采用的数据集不同、预处理方法不同,以及具体的检测与识别算法均有很大差异,最终的检测和识别准确率也不相同。在这些因素影响下,运算速度的对比本身没有太大的意义。虽然从中仍可以看出交通标识的检测与识别的实时实现正在成为研究人员追求的重要指标,但目前的结果在实时处理方面,离实际导航应用还有很大差距。在最近的 IJCNN2011 交通标识识别比赛中,已经有代表队开支直接利用图像处理单元(GPU)来实现并行加速<sup>[62]</sup>,这无疑是一个值

得重视的方向。

最后,值得指出的是,当前的研究工作虽多,但大多数研究工作都仅针对某些特定类别的交通标识,研究得比较多的是限速、圆形标识等。而且在研究识别算法时,很多研究工作仅仅考虑静态图像,甚至是已经分割好的图像。目前大规模测试的结果尚不多见,而对特定国家实际道路上的交通标识实现检测和识别的系统级研究才刚刚起步,目前仅有文献[15]和文献[88]分别针对西班牙和意大利的道路做了相关研究与开发。国内这方面的研究尚未起步,在实际的动态环境里综合测试交通标识的检测与识别技术仍然任重而道远。

## 5 结 语

综上所述,尽管交通标识的自动检测、跟踪与识别在国内外已经得到了持续的关注,但在动态场景下的算法准确性、鲁棒性,以及实时性等方面至今尚未有大的突破。尽管视觉认知机理是计算机视觉应用中非常有前景的方向,但其在交通标识的检测与识别中的应用才刚刚起步,尚未有实用的应用报道。此外,目前交通标识定位与识别问题缺乏大规模公共数据集,以及有针对性的性能评价指标,这些都严重制约了此领域的发展。按照上述分析,认为以下问题将是动态场景下交通标识检测与识别的重要方向:

### 1) 基于选择性注意等认知机制的交通标识检测

通过对实际的车载视频分析可知,交通标识往往在画面中占据的区域很小。另一方面,从视频上看,交通标识并不经常在画面中出现的频率相对视频采样的频率而言并不高。因此可以认为交通标识在时空上是稀疏存在的。对于这类问题,目前经常沿用的行人检测、人脸检测等领域的滑动窗检测方法不仅容易造成很多误检,而且极大地浪费了计算资源。近年来,认知科学与心理学为计算机视觉注入了很多新的活力,选择性注意机制就是一种非常有效的视觉认知方法。如何利用这些机制实现快速准确的交通标识检测无疑是非常有前景的研究方向。这方面的研究工作才刚刚起步,算法的实时性和鲁棒性都还需要进一步深入研究。

### 2) 机器学习最新进展应用于交通标识识别

交通标识识别本质上可以归结为多类分类的模

式识别问题。目前比较流行的分类方法主要还限于监督式的支持向量机、Adaboost等。近年来,机器学习领域已经涌现出很多解决这类问题的不同方法,如半监督学习、弱监督学习、转移学习、深度网络和稀疏表达等。特别是稀疏表达(sparse representation)方法近年来在多分类问题方面取得了非常优异的性能。信号的稀疏表达为目标遮挡的处理提供了新的有效解决方案。该方法基于一个被称为“冗余字典(over-complete dictionary)”的样本集为信号提供稀疏的表达。以稀疏表达为基础的压缩感知(compressive sensing)已经掀起了新的研究热潮(<http://dsp.rice.edu/cs>)<sup>[90]</sup>。IJCNN2011比赛中比利时代表队就采用了稀疏表达方法。国内很多学者也在这方面开展了深入的研究工作。目前公开报道的结果中仅有文献[91]将基于稀疏表达的分类方法应用于交通标识识别,但该文仅针对Caltech-101中的相关数据做了初步测试,样本也仅限于禁行标识。稀疏表达方法存在问题主要在于对模型依赖较强,且实时性不高。针对一般的交通标识样本建立高效的基于稀疏表达的识别方法,特别是处理有损毁的交通标识的识别仍然是一个极具挑战性的问题。

### 3) 时序信息的有机融合

时序信息对于动态场景非常重要。当前交通标识时序跟踪的主流思路是:利用跟踪方法改善检测结果并实现数据关联,利用跟踪结果的时序相关性进一步提高交通标识识别的鲁棒性。当前主要采用的跟踪方法仍局限于Kalman滤波,而这一滤波器很难处理实际道路中非线性模型和非高斯噪声的影响。而时序相关性的开发大都是一些启发式的方法,如对各时刻的检测(跟踪)结果做代数加权融合等。目前尚无理论上比较成熟的方法用于跟踪结果的处理。如何利用多个时刻的跟踪结果来融合得到更为鲁棒的识别结果仍然是个开放问题。

### 4) 数据集与评价体系

前已述及,交通标识的数据集目前进展滞后。这影响了各种方法的综合评价。特别是中国交通标识目前还没有公开的测试数据集。因此组织力量完成这一数据集是一个非常有意义的工作。

在性能评价方面,即使是GTSRB这样的大数据集,其评价方法仍然非常单一。当前,除文献[92]外,目前的性能评价中均未考虑检测-识别的综合性评价,以及时序信息的影响。然而,交通标识在实际中有特定的应用,不同交通标识的漏检、错检,以

及误识别等可能会造成不同的交通影响。举例而言,将限速标识“60”错误地识别为“80”,其影响程度远比将限速标识“80”错误地识别为“60”要大,因为前者可能会造成超速,而后者无非是降低了运行效率,并不违反法规。遗憾的是,这些因素目前尚未融入到交通标识检测与识别的性能评价中。

此外,在实际道路环境中,很多交通标识的呈现形式往往非常复杂,如可能是多种图案组合而成,或者与某些说明信息同时出现,等等。对于这些复杂的交通标识目前相关研究尚不多见。

### 参考文献 (References)

- [1] Maldonado-Bascon S, Acevedo Rodriguez J, Lafuente Arroyo S, et al. An optimization on pictogram identification for the road-sign recognition task using SVMs [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2010, 114(3): 373-383.
- [2] Ruta A, Li Y, Liu X. Real-time traffic sign recognition from video by class-specific discriminative features [J]. Pattern Recognition, 2010, 43(1): 416-430.
- [3] Belaroussi R, Foucher P, Tarel J, et al. Road sign detection in images: a case study [C] // Proceedings of Int. Conf. on Pattern Recognition (ICPR). Istanbul, Turkey: IEEE, 2010; 484-488.
- [4] Schlosser J, Montemerlo M, Salisbury K. Intelligent road sign detection using 3D scene geometry [C] // Proceedings of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Taipei, China: IEEE, 2010; 740-745.
- [5] Khan J, Bhuiyan S, Adhami R. Image segmentation and shape analysis for road-sign detection [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(1): 83-96.
- [6] Kastner R, Michalke T, Burbach T, et al. Attention-based traffic sign recognition with an array of weak classifiers [C] // IEEE Intelligent Vehicles Symposium. San Diego, CA, USA: IEEE, 2010; 333-339.
- [7] Paclik P. Road sign recognition survey [EB/OL]. (1999-05-16) [2012-08-01]. <http://euler.fel.cvut.cz/research/rs2/files/skoda-rs-survey.html>.
- [8] Fu M, Huang Y. A survey of traffic sign recognition [C] // Proceedings of Int. Conf. on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Qingdao, China: IEEE, 2010; 119-124.
- [9] Janssen R, Ritter W, Stein F, et al. Hybrid approach for traffic sign recognition [C] // IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Tokyo, Japan: IEEE, 1993; 390-395.
- [10] De la Escalera A, Moreno L, Salichs M, et al. Road traffic sign detection and classification [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(6): 848-859.
- [11] Soetedjo A, Yamada K. Fast and robust traffic sign detection [C] // Proceedings of IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics. Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2005; 1341-1346.
- [12] Miura J, Kanda T, Shirai Y. An active vision system for real-time traffic sign recognition [C] // Proceedings of IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Dearborn, USA: IEEE, 2000; 52-57.
- [13] Vitabile S, Pollaccia G, Pilato G, et al. Road signs recognition using a dynamic pixel aggregation technique in the HSV color space [C] // Proceedings of Int. Conf. on Image Analysis and Processing. Palermo, Italy: IEEE, 2001; 572-577.
- [14] Escalera A, Armignol J, Mata M. Traffic sign recognition and analysis for intelligent vehicles [J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(3): 247-258.
- [15] Maldonado-Bascon S, Lafuente-Arroyo S, Gil-Jimenez P, et al. Road-sign detection and recognition based on support vector machines [J]. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, 2007, 8(2): 264-278.
- [16] Shadeed W, Abu-Al-Nadi D, Mismar M. Road traffic sign detection in color images [C] // Proceedings of IEEE Int. Conf. on Electronics, Circuits and Systems. Sharjah, United Arab Emirates: IEEE, 2003; 890-893.
- [17] Gao X, Shevtsova N, Hong K, et al. Vision models based identification of traffic signs [C] // Proceedings of European Conf. on Color in Graphics, Imaging and Vision. Poitiers, France: IS & T, 2002; 47-51.
- [18] Fleyeh H. Color detection and segmentation for road and traffic signs [C] // Proceedings of IEEE Conf. on Cybernetics and Intelligent Systems. Singapore: IEEE, 2004; 809-814.
- [19] Tsai L, Hsieh J, Chuang C, et al. Road sign detection using eigen colour [J]. IET Computer Vision, 2008, 2(3): 164-177.
- [20] Escalera A, Armignol J, Pastor J, et al. Visual sign information extraction and identification by deformable models for intelligent vehicles [J]. IEEE Trans. on Transportation Systems, 2004, 5(2): 57-68.
- [21] Gómez-Moreno H, Maldonado-Bascón S, Gil-Jiménez P. Goal evaluation of segmentation algorithms for traffic sign recognition [J]. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(4): 917-930.
- [22] Aoyagi Y, Asakura T. A study on traffic sign recognition in scene image using genetic algorithms and neural networks [C] // Proceedings of IEEE Int. Conf. Ind. Electron., Control Instrum. Taipei, China: IEEE, 1996; 1838-1843.
- [23] Belaroussi R, Tarel J. Angle vertex and bisector geometric model for triangular road sign detection [C] // Proceedings of Workshop on Applications of Computer Vision. Snowbird, UT: IEEE, 2009; 1-7.
- [24] Fleyeh H, Dougherty M. Traffic sign classification using invariant features and support vector machines [C] // IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Eindhoven, US: IEEE, 2008; 530-535.
- [25] Douville P. Real-time classification of traffic signs [J]. Real-Time Imaging, 2000, 6(3): 185-193.
- [26] Garca-Garrido M, Sotelo M, Martín-Gorostiza M. Fast road sign detection using Hough transform for assisted driving of road vehi-

- cles[C]//Proceedings of Eurocast. Heidelberg, Germany: SpringerLink, 2005: 543-548.
- [27] Hoferlin B, Zimmermann K. Towards reliable traffic sign recognition[C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Xi'an, China: IEEE, 2009: 324-329.
- [28] Barnes N, Zelinsky A. Real-time radial symmetry for speed sign detection[C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Parma, US: IEEE, 2004: 566-571.
- [29] Loy G, Barnes N. Fast shape-based road signs detection for a driver assistance system[C]//Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Taipei, China: IEEE, 2004: 70-75.
- [30] Huang Y, Fu M, Ma H. A combined method for traffic sign detection and classification[C]//Proceedings of Chinese Conf. on Pattern Recognition. Chongqing, China: IEEE, 2010: 1-5.
- [31] Nunn C, Kummert A, Muller-Schneiders S. A two stage detection module for traffic signs[C]//Proceedings of IEEE Int. Conf. on Vehicular Electronics and Safety. Columbus, CH, USA: IEEE, 2008: 248-252.
- [32] Parada-Loira F, Alba-Castro J. Local contour patterns for fast traffic sign detection[C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium. San Diego, CA, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [33] Gao X, Podladchikova L, Shaposhnikov D, et al. Recognition of traffic signs based on their colour and shape features extracted using human vision models[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2006, 17(4): 675-685.
- [34] Paclik P, Novovicova J, Pudil P, et al. Road sign classification using laplace kernel classifier[J]. Pattern Recognition Letters, 2000, 21(13-14): 1165-1173.
- [35] Oh J, Kwak H, Sohn Y, et al. Segmentation and Recognition of Traffic Signs Using Shape Information[C]//Int. Symposium on Visual Computing. Lake Tahoe, Nevada, USA: LNCS, 2005: 519-526.
- [36] Zhu S, Liu L, Lu X. Color-geometric model for traffic sign recognition[C]//Proceedings of IMACS Multi Conference on Computational Engineering in Systems Applications. Beijing, China: IEEE, 2006: 2028-2032.
- [37] Garcia M, Sotelo M, Gorostiza E. Traffic sign detection in static images using matlab[C]//Proceedings of IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Lisbon, Portugal: IEEE, 2003: 212-215.
- [38] Fang C, Chen S, Fuh C. Road sign detection and tracking[J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2003, 52(5): 1329-1341.
- [39] Farag A, Abdel-Hakim A. Detection, categorization and recognition of road signs for autonomous navigation[C]//Proceedings of Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. Brussels, Belgium: ACIVS, 2004: 125-130.
- [40] Yang Z, Xu C, Li S, et al. A sequential frame method for traffic sign detection[C]//Proceedings of WASE Int. Conf. on Information Engineering. Beidaihe, China: IEEE, 2010: 137-140.
- [41] Alefs B, Eschemann G, Ramoser H, et al. Road sign detection from edge orientation histograms[C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Istanbul, Turkey: IEEE, 2007: 993-998.
- [42] Nunn C, Kummert A, Muller-Schneiders A. A novel region of interest selection approach for traffic sign recognition based on 3D modelling[C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Eindhoven, Holland: IEEE, 2008: 654-65.
- [43] Jiao J, Zheng Z, Park J, et al. A robust multi-class traffic sign detection and classification system using asymmetric and symmetric features[C]//Proceedings of Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics. San Antonio, TX, USA: IEEE, 2009: 3421-3427.
- [44] Bahlmann C, Zhu Y, Visvanathan R, et al. A system for traffic sign detection, tracking, and recognition using color, shape, and motion information[C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Parma, Italy: IEEE, 2005: 255-260.
- [45] Chen S, Hsieh J. Boosted road sign detection and recognition[C]//Proceedings of Int. Conf. on Machine Learning and Cybernetics. Kunming, China: IEEE, 2008: 3823-3826.
- [46] Overett G, Petersson L, Andersson L, et al. Boosting a heterogeneous pool of fast hog features for pedestrian and sign detection[C]//Intelligent Vehicles Symposium. Xi'an, China: IEEE, 2009: 584-590.
- [47] Creusen I, Wijnhoven R, Herbschleb E, et al. Color exploitation in hog-based traffic sign detection[C]//Proceedings of IEEE 17th Int. Conf. on Image Processing. Hong Kong, China: IEEE, 2010: 2669-2672.
- [48] Baro X, Escalera S, Vitria J, et al. Traffic sign recognition using evolutionary Adaboost detection and forest-ecoc classification[J]. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, 2009, 10(1): 113-126.
- [49] Cai L, Zhang C, Li B, et al. Traffic sign detection using surround suppression of texture edges and cascade detector[C]//Proceedings of Int. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems. Funchal, Madeira: IEEE, 2010: 1369-1374.
- [50] Woong-Jae W, Minh L, Joon-Woo S. Implementation of road traffic signs detection based on saliency map model[C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Eindhoven, Holland: IEEE, 2008: 542-547.
- [51] Xie Y, Liu L, Li C, et al. Unifying visual saliency with HOG feature learning for traffic sign detection[C]//Intelligent Vehicles Symposium. Xi'an, China: IEEE, 2009: 24-29.
- [52] Piccioli G, De Micheli E, Parodia P, et al. Robust method for road sign detection and recognition[J]. Image and Vision Computing, 1996, 14(3): 209-223.
- [53] Andrey V, Jo K. Automatic detection and recognition of traffic signs using geometric structure analysis[C]//Proceedings of Int. Joint Conf. SICE-ICASE. Busan, Korea: IEEE, 2006: 1451-1456.
- [54] Cyganek B. Road signs recognition by the scale-space template matching in the log-polar domain[J]. Pattern Recognition and

- Image Analysis, 2007, 447: 330-337.
- [55] Wang Y, Shi M, Wu T. A method of fast and robust for traffic sign recognition [C] // Proceedings of Int. Conf. on Image and Graphics. Xi'an, China: IEEE, 2009: 891-895.
- [56] Turan J, Fifik M, Ovsenik L. Transform based system for traffic sign recognition [C] // Proceedings of Int. Conf. on Systems, Signals and Image Processing. Bratislava, Czech: IEEE, 2008: 441-444.
- [57] Nguwi Y, Kouzani A. Detection and classification of road signs in natural environments [J]. Neural Computing and Applications, 2008, 17(3): 265-289.
- [58] Fang C, Fuh C, Yen P, et al. An automatic road sign recognition system based on a computational model of human recognition processing [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2004, 96(2): 237-268.
- [59] Martinovi A, Glavas G, Juribasic M, et al. Real-time detection and recognition of traffic signs [C] // Proceedings of Int. Convention, MIPRO. Boise, ID., USA: IEEE, 2010: 760-765.
- [60] Wang Y, Dang J, Zhu Z. Traffic signs detection and recognition by improved RBFNN [C] // Proceedings of Int. Conf. on Computational Intelligence and Security. Harbin, China: IEEE, 2007: 433-437.
- [61] Kantawong S. Road traffic signs detection and classification for blind man navigation system [C] // Proceedings of Int. Conf. on Control, Automation and Systems. Seoul, Korea: IEEE, 2007: 847-852.
- [62] Stallkamp J, Schlipsing M, Salmen J, et al. Man vs. computer: benchmarking machine learning algorithms for traffic sign recognition [J]. Neural Networks, 2012, 32(8): 323-332.
- [63] Lafuente-Arroyo S, Maldonado-Bascon S, Gomez-Moreno H, et al. False alarm filtering in a vision traffic sign recognition system [C] // Proceedings of ICAART. Valencia, Spain: INSTICC, 2011: 134-135.
- [64] Paclík P, Novovicova J, Duin R. Building road-sign classifiers using a trainable similarity measure [J]. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(3): 309-321.
- [65] Ruta A, Li Y, Liu X. Robust class similarity measure for traffic sign recognition [J]. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(4): 846-855.
- [66] Escalera S, Radeva P. Fast greyscale road sign model matching and recognition [J]. Recent Advances in Artificial Intelligence Research and Development, 2004, 2(1): 69-76.
- [67] Kouzani A. Road-sign identification using ensemble learning [C] // IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Istanbul, Turkey: IEEE, 2007: 438-443.
- [68] Zaklouta F, Stanculescu B, Hamdoun O. Traffic sign classification using K-d trees and random forests [C] // Proceedings of Int. J. Conf. on Neural Networks. San Jose, CA, USA: IEEE, 2011: 2151-2155.
- [69] Ishida H, Takahashi T, Ide I, et al. Identification of degraded traffic sign symbols by a generative learning method [C] // Proceedings of the 18th Int. Conf. on Pattern Recognition. Hong Kong, China: IEEE, 2006: 531-534.
- [70] Arnoul P, Viala M, Guerin J, et al. Traffic signs localisation for highways inventory from a video camera on board a moving collection van [C] // IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Tokyo, Japan: IEEE, 1996: 141-146.
- [71] Gavrilu D. Traffic sign recognition revisited [C] // DAGM Symposium. Braunschweig, Austria: Springer Verlag, 1999: 86-93.
- [72] Ruta A, Yongmin L, Liu X. Detection, tracking and recognition of traffic signs from video input [C] // Proceedings of Int. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems, Sch. of Inf. Syst. Beijing, China: IEEE, 2008: 55-60.
- [73] Moutarde F, Bargeton A, Herbin A, et al. Robust on-vehicle real-time visual detection of American and European speed limit signs, with a modular traffic signs recognition system [C] // IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Istanbul, Turkey: IEEE, 2007: 1122-1126.
- [74] Lafuente-Arroyo S, Maldonado-Bascon S, Gil-Jimenez P, et al. A tracking system for automated inventory of road signs [C] // IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Istanbul, Turkey: IEEE, 2007: 166-171.
- [75] Garca-Garrido M, Sotelo M, Martin-Gorostiza E. Fast traffic sign detection and recognition under changing lighting conditions [C] // Proceedings of IEEE Intelligent Transportation Systems Conf. Toronto, Canada: IEEE, 2006: 811-816.
- [76] González Á, García-Garrido M, Llorca D, et al. Automatic traffic signs and panels inspection system using computer vision [J]. IEEE Trans. on Intelligent Transportation System, 2011, 12(2): 1-15.
- [77] Yoon C, Jang S, Park M. Road sign tracking for adaptive cruise control under nonlinear conditions [J]. Electronics Letters, 2009, 45(23): 1165-1167.
- [78] Lopez L, Fuentes O. Color-based road sign detection and tracking [C] // Proceedings of Int. Conf. on Image Analysis and Recognition. Montreal, Canada: Springer, 2007: 1138-1147.
- [79] Marmo R, Lombardi L. Milepost sign detection [C] // Proceedings of Int. Workshop Computer Architecture for Mach. Perception and Sensing. Montreal, Que., Canada: IEEE, 2007: 93-98.
- [80] Liu W, Chen X, Duan B, et al. A system for road sign detection, recognition and tracking based on multi-cues hybrid [C] // IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Xi'an, China: IEEE, 2009: 562-567.
- [81] Meuter M, Kummert A, Muller-Schneiders S. 3D traffic sign tracking using a particle filter [C] // Proceedings of Int. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems. Beijing, China: IEEE, 2008: 168-173.
- [82] Brkic K, Segvic S, Kalafatic Z, et al. Generative modeling of spatio-temporal traffic sign trajectories [C] // Proceedings of IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2010: 25-31.
- [83] Li Y, Pankanti S, Guan W. Real-time traffic sign detection: an

- evaluation study [C] //Proceedings of Int. Conf. on Pattern Recognition. Istanbul, Turkey: IEEE, 2010: 3033-3036.
- [84] Marengo D, Fontana D, Ghisio G, et al. A validation tool for traffic signs recognition systems [C] //Proceedings of Int. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems, Adv. Driver Assistance Syst. St. Louis, MO, USA: IEEE, 2009: 1-6.
- [85] Muller-Schneiders S, Nunn C, Meuter M. Performance evaluation of a real time traffic sign recognition system [C] //IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Eindhoven, Holand: IEEE, 2008: 79-84.
- [86] Akatsuka H, Imai S. Road signposts recognition system [C] //Proceedings of SAE Vehicle Highway Infrastructure: Safety Compatibility. Montreal, Canada: IEEE, 1987: 189-196.
- [87] Gao X W, Hong K, Passmore P, et al. Colour vision model-based approaches for segmentation of traffic signs [J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2008, 2008(1): 6.
- [88] Broggi A, Cerr P, Medici P, et al. Real time road signs recognition [C] // IEEE Intelligent Vehicles Vision Model. Istanbul, Turkey: IEEE, 2007: 981-986.
- [89] Landesa-Vázquez I, Parada-Loira F, Alba-Castro J. Fast real-time multiclass traffic sign detection based on novel shape and texture descriptors [C] //Proceedings of Int. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems. Funchal, Madeira: IEEE, 2010: 1388-1395.
- [90] Shao W Z, Wei Z H. Basic theory of compressed sensing: retrospect and prospect. [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(1): 1-12. [邵文泽, 韦志辉. 压缩感知基本理论: 回顾与展望 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(1): 1-12.]
- [91] Deng X, Wang D, Cheng L, et al. Traffic sign recognition using dictionary learning method [C] //Proceedings of the 2nd WRI Global Congress on Intelligent Systems. Wuhan, China: IEEE, 2010: 372-375.
- [92] Meuter M, Muller Schneiders S, Nunny C, et al. Decision fusion and reasoning for traffic sign recognition [C] //Proceedings of Int. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems. Funchal, Madeira: IEEE, 2010: 324-329.