

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2013 4
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 4 月 第 18 卷 第 4 期(总第 204 期)

目次

综述

车载视觉系统中的行人检测技术综述 许腾,黄铁军,田永鸿(359)

图像处理和编码

利用边缘匹配矢量量化和变率编码的高嵌入效率信息隐藏 王凌飞,潘志斌,邓晓曼,胡森(368)

小波变换和 SHA-1 相结合的图像压缩加密 李园园,张绍武(376)

图像分析和识别

基于 Haar 纹理的非结构化道路消失点检测 王永忠,文成林(382)

多种人群密度场景下的人群计数 覃勋辉,王修飞,周曦,刘艳飞,李远钱(392)

计算机图形学

大规模散乱点的 k 邻域快速搜索算法 杨军,林岩龙,王阳萍,王小鹏(399)

三角 Bézier 曲面的几何约束形变 陈军(407)

遥感图像处理

面向测绘任务的光学遥感影像质量分级评定 王昱,时红伟,胡闻达(415)

采用高斯归一化水体指数实现遥感影像河流的精确提取 沈占锋,夏列钢,李均力,骆剑承,胡晓东(421)

地理信息技术

图层约束下的点状自然灾害风险地图综合 潘东华,王静爱,贾慧聪,袁艺(429)

模板阴影体扩展方法 曹雪峰,万刚,李锋,李明(436)

“第 9 届中国计算机图形学大会”专栏

利用 SIFT 特征的非对称匹配图像拼接盲检测 杜振龙,杨凡,李晓丽,郭延文,沈钢纲(442)

视觉感知的图像和视频抽象 宋杰,徐丹,时永杰(450)

局部线性模型优化的灰度图像彩色化 厉旭杰,赵汉理,黄辉(460)

分区域去运动模糊 张璐,盛斌,马利庄(467)

脑血管体绘制的快速表意式增强 吴腾飞,骆岩林,田云,武仲科,闫建平(476)

~~~~~  
第七届国际图象图形学学术会议征文通知 ..... 封 3

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 18 No. 4 April 2013

## Contents

### Review

Survey on pedestrian detection technology for on-board vision systems ..... Xu Teng, Huang Tiejun, Tian Yonghong(359)

### Image Processing and Coding

Highly efficient information hiding using SMVQ-compressed images and variable length coding  
..... Wang Lingfei, Pan Zhibin, Deng Xiaoman, Hu Sen(368)

Image compression and encryption based on DWT and SHA-1 ..... Li Yuanyuan, Zhang Shaowu(376)

### Image Analysis and Recognition

Vanishing point detection of unstructured road based on Haar texture ..... Wang Yongzhong, Wen Chenglin(382)

Counting people in various crowded density scenes using support vector regression  
..... Qin Xunhui, Wang Xiufei, Zhou Xi, Liu Yanfei, Li Yuanqian(392)

### Computer Graphics

Fast algorithm for finding the  $k$ -nearest neighbors of a large-scale scattered point cloud  
..... Yang Jun, Lin Yanlong, Wang Yangping, Wang Xiaopeng(399)

Shape modification of triangular Bézier surfaces with geometric constraints ..... Chen Jun(407)

### Remote Sensing Image Processing

Optical image quality grading assessment orienting to surveying & mapping mission requirements  
..... Wang Yu, Shi Hongwei, Hu Wenda(415)

Automatic and high-precision extraction of rivers from remotely sensed images with Gaussian normalized water index  
..... Shen Zhanfeng, Xia Liegang, Li Junli, Luo Jiancheng, Hu Xiaodong(421)

### Geoinformatics

Generalization for point features in risk mapping of natural hazards based on layer constraint  
..... Pan Donghua, Wang Jing'ai, Jia Huicong, Yuan Yi(429)

Extension method of stencil shadow volume ..... Cao Xuefeng, Wan Gang, Li Feng, Li Ming(436)

### Issum of Chinagraph'2012

Fogery image blind detection by asymmetric search based on SIFT  
..... Du Zhenlong, Yang Fan, Li Xiaoli, Guo Yanwen, Shen Ganggang(442)

Visual perception based image and video abstraction ..... Song Jie, Xu Dan, Shi Yongjie(450)

Local linear model optimization based grayscale image colorization ..... Li Xujie, Zhao Hanli, Huang Hui(460)

Motion deblurring based on image segmentation ..... Zhang Lu, Sheng Bin, Ma Lizhuang(467)

Fast illustrative enhancements on volume rendering of cerebral vessel  
..... Wu Tengfei, Luo Yanlin, Tian Yun, Wu Zhongke, Yan Jianping(476)

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)04-0359-09

论文引用格式: 许腾, 黄铁军, 田永鸿. 车载视觉系统中的行人检测技术综述[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(4): 359-367.

## 车载视觉系统中的行人检测技术综述

许腾, 黄铁军, 田永鸿

北京大学信息科学技术学院, 北京 100871

**摘要:** 作为计算机视觉以及智能车辆领域的一个重要研究方向, 车载视觉系统中的行人检测技术近年来得到了业界广泛关注。本文对2005年以来该技术中最重要的两个环节——感兴趣区域分割以及目标识别的研究现状进行综述, 首先将感兴趣区域分割的典型方法按照分割所用信息的不同进行分类并对比它们的优缺点, 之后对行人目标识别的特征提取、分类器构造以及搜索框架等方面的进展进行总结, 最后对未来发展作出展望。

**关键词:** 行人检测; 车载辅助驾驶系统; 感兴趣区域分割; 目标识别

## Survey on pedestrian detection technology for on-board vision systems

Xu Teng, Huang Tiejun, Tian Yonghong

School of Electronic Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract:** As one of the most important areas of research in the domain of computer vision and intelligent vehicles, pedestrian detection of on-board vision systems has attracted extensive interest from the research community. In order to show the general idea of the latest development of this technology, we focus on the improvement of the two major modules since 2005: regions of interest (ROIs) segmentation and object recognition. First, we classify the typical methods in the field of ROIs segmentation according to the information used in segmentation and analyze their respective pros and cons. Then, we summarize the improvement of object recognition on the feature extraction, classifier construction, and the search framework. Finally, future research trends are proposed.

**Key words:** pedestrian detection, driver assistance system, ROIs (regions of interest) segmentation, object recognition

## 0 引言

车载视觉系统中的行人检测是指利用计算机视觉相关技术, 对由架设在车辆上的摄像机得到的视频进行分析, 判断视频中是否存在行人, 如果存在, 给出行人的确切位置。随着车辆数量的大幅增长, 交通事故频发, 在中国仅2007年一年就有69 000名行人在各类交通事故中受伤, 21 106人死亡。作为智能车辆的重要组成部分, 车载行人检测系统能够

有效地提高驾驶安全性、保证行人的生命财产安全, 近年来一直得到业界的广泛关注。

车载行人检测既具有一般人体检测中常见的由姿态、着装、遮挡、尺度以及视角等造成的外观差异问题, 又因其特定的应用场景, 还有一些自身所特有的难点, 主要表现在对光线变化要求鲁棒、检测要求实时、摄像机的自身运动需要考虑等等。针对这些难点问题, 涌现了一批优秀的研究成果。为了使人们更好地了解 and 掌握技术发展的现状和规律, 有些综述对其进行了梳理归纳<sup>[1]</sup>。从技术进展和原型

收稿日期: 2012-08-29; 修回日期: 2012-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(61035001, 61072095); 霍英东基金项目(122008)

第一作者简介: 许腾(1990—), 男, 现为北京大学信息科学技术学院数字媒体技术专业硕士研究生, 主要研究方向为计算机视觉、模式识别。E-mail: xuteng@pku.edu.cn

通讯作者: 黄铁军, E-mail: tjhuang@pku.edu.cn

系统进展两方面总结了 2001—2006 年间行人检测系统的进展<sup>[2]</sup>。针对 2000—2005 年间车载行人检测系统中的感兴趣区域生成以及对象识别这两个方面进行了综述。Geronimo 等人<sup>[3]</sup>主要针对 2008 年以前的车载行人检测系统相关文献进行了较为详尽的总结。此外还有针对一般场景下的行人检测算法的综述<sup>[4-6]</sup>。由于车载行人检测领域发展较快,相对一般的行人检测又存在自身的特点,因此有必要对近年来尤其是 2005 年以来的车载行人检测算法进行梳理总结。

针对车载行人检测系统存在系统鲁棒性和实时性的双重要求,现有车载行人系统一般都包括感兴趣区域(ROI)分割和对象识别这两大模块。本文首先将感兴趣区域分割的典型方法进行分类并对比分析它们各自的优缺点,之后总结了近年来对象识别

中特征提取、分类器构造以及搜索框架等方面的改进,最后结合现有算法所存在的问题,对车载行人检测系统的发展进行了展望。

## 1 感兴趣区域分割

为了解决车载行人检测中的实时性问题,大多数文献都采用了 ROIs 技术。同监控场景下的行人检测问题不同,由于车载视频中摄像机是运动的,所以简单的构建背景模型进行前景分割的方法是行不通的。在车载行人检测系统中,根据所用信息的不同可以将 ROIs 分割算法大体分为基于运动、基于立体视觉、基于图像特征、基于雷达以及基于规则共 5 类方法,5 类方法的比较如表 1 所示。

表 1 感兴趣区域分割方法  
Table 1 Methods for ROIs segmentation

|           | 原理                                      | 优点                   | 缺点                          | 典型文献                                                                                       |
|-----------|-----------------------------------------|----------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 基于运动的方法   | 采用光流分析或者帧间运动估计                          | 对低分辨率图像鲁棒            | 估算自身运动较为麻烦                  | 基于运动分析 <sup>[7-8]</sup><br>基于光流分析 <sup>[9-12]</sup>                                        |
| 基于立体视觉的方法 | 根据 3D 场景信息,估算出地平线后结合身高约束或者根据深度(视差)图进行分割 | 对环境变化鲁棒、能为后续模块提供有用信息 | 对纹理信息缺少区域效果较差、依赖一定假设、计算速度较慢 | 基于地面约束 <sup>[13-15]</sup><br>基于深度图 <sup>[16-17]</sup>                                      |
| 基于图像特征的方法 | 通过分析图像中的一些典型特征进行分割                      | 简单直接                 | 不容易定义鲁棒而快速的特征               | 强度值 <sup>[18-21]</sup> 、显著区域 <sup>[22]</sup> 、关键点 <sup>[23-24]</sup> 、级联分类 <sup>[26]</sup> |
| 基于雷达的方法   | 对雷达点进行聚类分割之后映射回图像空间                     | 对光照、颜色、姿态变化鲁棒        | 不适于距离较远的行人检测、雷达扫描速度较慢       | 文献 <sup>[27-31]</sup>                                                                      |
| 基于规则的方法   | 针对特定场景指定规则缩小搜索范围                        | 直观、高效                | 普适性较差                       | 文献 <sup>[32]</sup>                                                                         |

### 1.1 基于运动的方法

与监控场景下构造背景模型进行前景分割的方法不同,由于车载行人检测系统中摄像机是运动的,因此一般采用光流分析或者帧间运动估计的方法。基于运动分析结构(SFM)的算法<sup>[7-8]</sup>可以通过估计地面的位置,之后结合人体身高的区间范围生成 ROIs。Bouchafa 等人<sup>[9]</sup>将场景划分为多个 3D 平面,采用类似 V 视差算法(V-disparity)的方式,提出了基于光流分析的 c 速率算法(c-velocity),计算视频中对象的相对运动速率,根据等速率曲线切割出 ROIs。

Sen 等人<sup>[10-12]</sup>采用线性回归函数来拟合背景区域的运动模式,首先假定摄像机的主运动方向为

水平方向,根据视频图像的 y 值确定一条等距离线。该方法适用于如十字路口这类视角较大、摄像机自身运动速度相对较慢的场景,对于较远以及距离建筑物太近的行人则几乎检测不到。

近年来基于运动信息的 ROIs 分割,解决了文献<sup>[2]</sup>中提出的只能检测运动行人的缺点,对分辨率较低的车载视频有较好的鲁棒性,但是自动估计车辆运动速度较为麻烦,一般依赖车上的辅助设备如电动助力转向系统(EPS)等进行快速估计。

### 1.2 基于立体视觉的方法

随着立体视觉技术的不断发展以及立体摄像机的广泛应用,基于立体视觉的 ROIs 分割技术得到了越来越多的应用。基于立体视觉的 ROIs 分割方法

中,应用最广泛的是利用立体摄像机获取3D场景信息,在3D空间内估计地面位置,之后根据身高的区间范围估计可能的人体区域,从而得到ROI<sub>s</sub>。Geronimo等人<sup>[13]</sup>采用2D和3D摄像机协同工作的算法,利用3D摄像机估计出地面位置,进而结合人体身高的先验知识分割出ROI<sub>s</sub>,之后利用2D视频帧中提取的特征进行验证,从而检测行人。文献[14]中根据视觉测距信息(visual odometer)估计立体摄像机的朝向角度,之后采用V视差方法计算地面位置。当地面上存在垂直对象如车辆的时候,地面估计很可能失效,为解决这一问题,文献[15]利用二阶多项式函数拟合地面的最大高度变化。

此外,由立体视觉得到深度图信息,可以用于有效估计对象到摄像机的距离,从而判断出前景区域。文献[16-17]利用3D摄像机得到的深度图,根据滑动窗口中像素点的深度信息判断是否属于前景对象。

基于立体视觉的方法其优点是:1)对环境的变化较为鲁棒(相对于2D可见光图像中的光照变化以及红外图像中的温度变化等);2)能够为其他模块提供有用的信息,如深度图或者视差图能用于对象分类,3D场景建模可为后续的跟踪提供距离估计等信息。其缺点是:1)由于目前的立体视觉算法大多依赖纹理信息实现左右视图像对应点的匹配,所以对纹理信息较少的图像区域很容易出现盲点;2)一般需要结合人体身高约束(如正常成人身高为1.6~2 m之间)对相似视差和位置的区域进行分割处理;3)一般依赖于一定的假设条件,如摄像机的角度不变,车辆运行在平整的路面等;4)计算速度相对较慢。

### 1.3 基于图像特征的方法

最简单的基于图像特征的方法是直接利用图像的强度值进行阈值分类。由于人体的温度一般比周边环境高,所以可以利用红外光谱或者近红外光谱探测仪得到红外图像,通过检测图像中的热点区域,对图像的强度值根据给定阈值或者学习分类算法分割出ROI区域。对于阈值的选取,也可以分为单一阈值<sup>[18]</sup>以及多阈值<sup>[19]</sup>两类。为了提高分类的准确度,首先分割出近红外图像上较为明亮的区域,之后估计出地面位置,进而结合人体身高的先验知识分割出ROI<sub>s</sub><sup>[20-21]</sup>。此外,针对红外图像相对可视光谱图像背景较为简单的特性,可通过提取红外图像上的关键点来生成ROI<sub>s</sub><sup>[22-23]</sup>。

此外,针对可见光图像的图像特性,人们也提出了一些新的方法;如利用显著区域提取的方式缩小搜索范围<sup>[24]</sup>,利用道路像素的统计信息构造分类器进行道路分割<sup>[25]</sup>,采用级联分类器的感念,首先对输入视频下采样成原来大小的四分之一,之后提取Haar特征结合Adaboost构造分类器生成ROI<sup>[26]</sup>。

基于图像特征的方法直接利用图像特征,一般不依赖辅助设备,但是对于复杂多变的环境,定义鲁棒而快速的特征较为困难。如基于红外光谱中热点区域的方法,利用人体温度较高的特性,直观简便,缺点是对场景的温度变化不够鲁棒,很容易受到市区中热点区域(空调外机、着火点等)的影响。

### 1.4 基于雷达的方法

随着雷达技术的发展和民用雷达设备的普及,基于雷达的ROI生成技术已经成为目前的一个热点。基于雷达的方法多采用激光雷达探测器,适合定位较大的障碍物,通过对雷达点聚类分割映射回图像坐标,可以有效地分割出感兴趣区域。

按照雷达种类的不同可以将基于雷达的方法分成基于多层雷达<sup>[27]</sup>以及基于单层雷达<sup>[28]</sup>等多种情况。为了提高ROI生成的准确性,采用将雷达点按照深度约束聚类得到ROI(在该文献中体现为障碍物),之后通过对障碍物的跟踪以及对象识别判断是否为单人或者多人<sup>[29]</sup>;跟踪雷达点,判断其是否为运动对象,将基于网格的极坐标占据图与运动信息相结合,从而使得3D位置信息和运动信息融合在一起,提高ROI<sub>s</sub>的分割精度<sup>[30]</sup>;由粗到细的方式,首先对雷达点进行粗略的聚类分割,之后将聚类区域细分为躯干、手臂、局部遮挡以及噪音,最后结合3D几何信息(深度信息)生成最终的ROI<sub>s</sub><sup>[31]</sup>。

基于雷达的方法,对光照变化鲁棒,且能够克服大雾天气的干扰。缺点在于激光雷达点云密度与激光仪同观测对象距离的平方成反比,所以在远处或者尺寸较小的情况下,为了避免由于点云密度过小而被忽略,需要辅以可视光谱数据。此外,雷达与可视光谱摄像机之间需要进行仔细的数据同步校准处理,雷达的扫描速度也限制了检测系统整体的速度,此类方法还会受到大雨这类恶劣天气的影响,在这种情况下,雷达数据需要考虑雨点导致的光散射和折射以及由雨点导致的光透射率下降的问题。

### 1.5 基于规则的方法

近年来,针对特定的检测场景,人们定义出一些规则来缩小搜索范围。例如场景驱动搜索(SDS)的

概念<sup>[32]</sup>,认为并不需要检测场景中所有行人,只需要检测被车辆局部遮挡的行人进入道路这种高风险的情况。利用是否存在满足车辆尺寸限制的水平和垂直边缘来触发检测,只有当存在对象被车辆局部遮挡的时候,才进行检测跟踪,从而大幅缩小检测搜索范围。

此类方法的优点是直观、高效,对于适合的场景,实用性很强,但是设计出适合多种场景的规则很难,对不同的场景需要考虑不同的规则,普适性较差。

## 2 目标识别

针对车载行人检测系统鲁棒和实时性要求,大量新特征和新的学习算法涌现出来,下面将针对特征提取、分类器构造以及搜索框架这 3 个方面对 2005—2012 年近 7 a 来目标识别方面的算法进行综述,并在表 2 中对近年来目标识别方法改进工作进行了简要介绍。

表 2 目标识别方法改进

Table 2 Improvement of methods for object recognition

|       | 分类         | 优点                     | 缺点               | 典型文献                                                                                                                |
|-------|------------|------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 特征提取  | 原有特征改进     | 计算速度大幅提高               | 特征描述能力无明显提升      | 基于特征几何构造的改进 <sup>[34,36-37]</sup><br>基于 GPU 加速 <sup>[38]</sup>                                                      |
|       | 新的特征提取方式   | 特征描述能力增强               | 计算复杂度增加,特征维度增大   | 梯度空间分布 <sup>[39-40]</sup><br>自适应学习特征 <sup>[43-44]</sup><br>梯度纹理特征 <sup>[46-47]</sup><br>多种底层特征组合 <sup>[48-50]</sup> |
|       | 在非可视光谱上的应用 | 检测性能大幅提高               | 需要额外设备           | 深度视差图 <sup>[15,53]</sup><br>光流图 <sup>[52]</sup><br>红外光谱 <sup>[24,51]</sup>                                          |
| 分类器构造 | 针对分类速度     | 分类速度大幅提高               | 性能无明显提升          | HK-SVM <sup>[55]</sup>                                                                                              |
|       | 针对分类能力     | 能在一定程度上解决人体数据类内差异较大的问题 | 训练较为复杂           | Latent SVM <sup>[56]</sup><br>MC Boosting <sup>[59]</sup> 、MIL <sup>[60]</sup> 、MPL <sup>[61]</sup>                 |
| 搜索框架  | 基于“词袋”模型   | 全局最优解,在一定程度上解决遮挡问题     | 检测速度较慢,依赖关键点检测性能 | 隐式形状模型 <sup>[62-64]</sup><br>高效子窗口搜索 <sup>[65-66]</sup>                                                             |

### 2.1 特征提取

近年来针对特征提取方面的研究,大体可以分为以下 3 个方面:对原有特征改进、新特征的提出以及在非可视光谱数据上的使用。

#### 1) 对原有特征改进

Dalal 等人提出梯度方向直方图 (HOG) 特征<sup>[33]</sup>。该特征通过提取局部区域的梯度信息并按照梯度的方向投票,之后以块 (block) 为单位对特征向量进行归一化处理。HOG 特征基于密集网格计算,允许块之间相互重叠,对光照变化和小幅几何形变鲁棒,是目前应用最广泛的行人描述子。

由于 HOG 特征具有维度高、计算复杂的特点,很多研究对 HOG 进行改进以加速特征提取,文献<sup>[34]</sup>允许 HOG 中块的大小可变,结合文献<sup>[35]</sup>中的积分图技术进行加速计算,文献<sup>[36]</sup>则将 HOG

特征提取中的格 (cell) 单元取消,直接利用块进行特征提取。针对检测中的多尺度问题,通用的方法是构造一个 8~16 层的图像金字塔,对每一层计算特征并进行检测,文献<sup>[37]</sup>利用单层特征响应值可估计相邻层上的特征响应值的特性,构造稀疏的图像金字塔,每 8 个图层构成一组,对每一组构造一个分类器金字塔,从而起到明显的加速作用。此外,利用 GPU 加速 HOG 特征的提取也是目前的一个趋势<sup>[38]</sup>。

#### 2) 新特征的提出

近年来在特征表示领域的研究,主要集中在利用局部梯度、轮廓、纹理信息以及多种底层特征组合方面。

为了更好地描述梯度空间分布,共生梯度方向直方图特征 (CoHOG)<sup>[39]</sup>以及二阶梯度方向直方图

特征<sup>[40]</sup>等从 HOG 特征中相邻组件间空间关系入手,计算梯度对,使得特征对空间梯度信息的描述能力更强。但是这类特征的维度更高,计算更复杂,一般需要结合 GPU 加速。

基于轮廓信息进行行人检测由来已久,但是早期的算法多集中于使用整个人体的轮廓构造模板进行检测<sup>[41-42]</sup>,为了适应人体姿态变化较大的特性,这类算法常常需要手工标注大量的人体轮廓模板。目前的趋势是对较短的边缘信息,采用自适应学习的方式从较小的样本集中自动学习出人体的轮廓特性。Wu 和 Nevatia 在文献[43]中提出用于描述人体轮廓信息的 Edgelet 特征,一个 Edgelet 就是一段直线或者曲线线段,利用 Adaboost 筛选出一组最有效的 Edgelet 用于构造头肩、躯干等部件的分类器,之后利用联合似然模型组成整个人体的分类器。Gao 等人<sup>[44]</sup>提出了自适应的轮廓特征(ACF),该特征由一串方向粒度空间中的颗粒组成,利用 AdaBoost 算法在方向粒度空间中进行特征选择得到。

局部二值模式(LBP)最早由文献[45]提出用于进行纹理分类。为了使得 LBP 特征更适用于描述人体数据,人们提出了许多 LBP 的改进特征。文献[46]采用类似 HOG 特征提取 cell-LBP 特征,首先将检测窗口划分为若干互不重叠的格,对每个格分别计算局部 LBP 特征,之后简单地串联成一个特征向量。文献[47]则通过将计算得到的非一致模式归为一类,对文献[46]中提到的 cell-LBP 进行加速优化。

由于单一类型的特征仅能从某一方面刻画行人特征,描述能力较弱,因此组合应用多种底层特征的研究越来越被重视。Dollar 等人提出了积分通道特征<sup>[48]</sup>(integral channel features),该特征通过在 LUV 颜色通道、灰度、梯度强度以及梯度方向上计算类似 Haar 小波特征,将颜色、梯度等多种底层信息组合起来。Walk 在中提出新的特征 CSS<sup>[49]</sup>(颜色通道自相似),对  $8 \times 8$  的图像区域,采用三线性插值计算颜色直方图。该特征能够获取对象特定区域间底层特征的相似性,通过与 HOG 等梯度特征组合,从而很好地提高了检测性能。为了解决传统 LBP 特征维度较高且对纹理不显著的图像描述能力不足的问题,提出了中心对称的金字塔 LBP<sup>[50]</sup>(center-symmetric local binary),通过计算在一个邻域内相对应像素间的灰度像素值差,将纹理信息和梯度信息有效地组合起来。

### 3) 非可视光谱数据上的使用

由于车载行人检测系统中越来越多地应用到了红外光谱或者立体视觉技术,因此很多文献将平面可视光谱图像上的特征提取方法应用于这些数据上。文献[15]分别在灰度和深度图上提取 HOG 特征构造多个分类器,文献[51]则将 HOG 特征的提取应用于红外图像上。Dalal 等人将 HOG 特征的提取应用到光流图上<sup>[52]</sup>,有效地结合了运动信息,从而大幅提高了检测性能。文献[53]则将这一方法应用到了立体视觉得到的视差图上。文献[24]对文献[50]中提出的 CS-LBP 特征进行调整,对红外图像提取金字塔二值模式特征(PBP)。该特征只获取像素级上的对称性并构建金字塔,从而能够更好地获取多分辨率下以及小纹理单元的分布信息。此外文献[24]还将 PBP 特征应用于多帧红外图像上,得到动态 PBP 特征。

## 2.2 分类器构造

在行人检测算法中,最常用的分类器是 SVM 和 Boosting。近年来人们对传统的 SVM 和 Boosting 分类器提出了许多改进工作。

SVM 是基于结构风险最小化原理的统计学习理论,自从 Oren 等人使用 SVM 结合 Haar 小波特征构造了一个基于静态图片的行人检测器<sup>[54]</sup>,SVM 就引起了广大学者的兴趣。然而出于实时性的考虑,目前大多数研究选用线性核作为 SVM 的核函数进行分类,非线性核使用的较少。为了提高 SVM 的分类性能,Maji 等人<sup>[55]</sup>提出了直方图交叉核(HIK)的一种近似算法,使得分类器速度接近线性 SVM 同时使得分类性能得到了明显提高。Felzenszwalb 等人利用形变部件模型(DPM)方法检测人体、汽车等对象<sup>[56]</sup>。该模型将对象分为多个部件,首先采用滑动窗口框架在低分辨率下检测对象中心的位置,之后在高分辨率下检测各部件,最终通过形状模型将各部件组合起来,判断是否存在对象。为了自动获取形状模型的组合参数,Felzenszwalb 等人将各部件相对于中心点的偏移量作为隐变量,利用 latentSVM 进行求解。

Boosting 算法中应用最广的是 Adaboost。Viola 等人利用 Haar 特征、Adaboost 算法以及级联分类器成功地实现了第一个实时人脸检测系统,并将此方法用于行人检测<sup>[57]</sup>。近年来,为了解决行人检测中由于视角不同导致类内外观差异较大的问题<sup>[58]</sup>,Kim 等人提出使用多分类器 Boosting 算法<sup>[59]</sup>,不同于传统的 Boosting 算法,该方法首先对图像和视觉

特征进行协同聚类,之后对聚类整体进行特征选择,从而提高处理类内差异的能力。为了解决姿态变化以及局部变形的问题,Lin 等人<sup>[60]</sup>提出了基于多实例学习(MIL)的 Boosting 框架。该方法将对象分为多个部件,在每个部件中心提取一些特征,并将这些特征打包,整体作为新的多实例特征送入 Boosting 框架中,从而自动对齐行人的局部特征,所需的特征数量更少。Babenko 等人<sup>[61]</sup>采用类似的策略,将其中的多实例替换为了多姿态,通过多姿态学习(MPL)的方式对训练样本自动按照姿态进行分类,对每一类数据训练一个行人分类器,最终组成强分类器,从而解决了人体数据类内差异较大的问题。

### 2.3 搜索框架

滑动窗口在目前的搜索框架中十分流行,该方法选取固定大小的检测窗口,在图像的尺度空间金字塔内不断滑动,利用训练得到的分类器对每个滑动窗口进行分类判决,然后将判决含有对象的多个窗口归一化到统一尺度,最后采用非极大抑制(NMS)或者 MeanShift 的方法进行合并,从而得到检测结果。

基于滑动窗口的检测,很适合进行级联加速以及积分图加速,然而由于按照固定步长搜索,如果步长设定过大容易出现漏检,而若步长设定过小,则又因为产生的检测窗口数目太大,使得检测速度大大降低。目前针对这一问题,研究者借鉴了在对象分类中十分流行的“词袋”(BOW)模型,在图像中进行全局最优搜索。目前此类算法主要有隐式形状模型(ISM)和高效子窗口搜索法(ESS)。

Leibe 等人<sup>[62]</sup>提出了隐式形状模型对人体进行描述。该算法将行人视为由多个图像块构成的整体,与传统的显式形状模型不同,该方法不需要人为划分各部件,而是通过一种基于产生式码本的方式自动获取各部件间的几何关系。该算法首先对图像提取关键点,在兴趣点周围固定大小的图像块上提取局部特征进行聚类,利用建立的特征码本描述局部块之间的空间分布模式,根据霍夫投票的方式生成行人的可能位置,最后通过 Chamfer 匹配的方法加入全局人体轮廓约束,利用最小描述长度(MDL)准则对多个检测目标间部件的划分进行判定,从而得到最终的检测结果。为解决 ISM 采用无监督聚类生成码本时,不同部位的局部特征被聚类到一起的问题,Gall 等人<sup>[63]</sup>提出了基于随机森林的有监督码本构造算法。Maji 等人<sup>[64]</sup>则采用类似 Boosting

的思想,利用最大间隔分类的方法,为判决能力较强的码本分配较高的权重,从而大幅提高了 ISM 的检测性能。隐式形状模型不仅能有效解决遮挡问题,还能得到对象的分割轮廓,但是由于该方法依赖于关键点的检测,对于人体数据而言,侧面人体上能够提取到的关键点较多,因此该方法在处理侧面行人检测时效果较好,而对正面和背面行人检测效果就要差一些。

高效子窗口搜索法是 Lampert 等人<sup>[65]</sup>提出的一种快速目标定位技术,该方法定义了一个由图像中所有矩阵区域组成的参数空间,利用线性 SVM 的特性,采用分支界限法(branch and bound)寻找参数空间的极大值。相对于传统的滑动窗口策略,ESS 可以在参数空间中找到一个最优值,检测得到的检测框也较为紧凑,但是对对象较为密集的场景检测速度较慢。针对这一问题 An 等人<sup>[66]</sup>构建了更为紧凑的上界函数,提高了 ESS 的检测速度。

基于“词袋”模型在图像中进行全局最优搜索的方法,能够利用建立的特征码本描述局部块之间的空间分布模式,从而在一定程度上解决遮挡问题。但是由于其需要搜索全局最优值,在处理对象较为密集的情况下很难达到实时检测的要求,此外基于关键点提取局部特征,依赖于关键点检测的性能,对于非侧面人体的检测性能相对较差。

## 3 结 语

感兴趣区域分割和对象识别是车载行人检测技术的最重要的两个环节。本文以这两个环节为切入点,对 2005—2012 年近 7 a 的车载行人检测技术的典型算法进行了综述介绍:首先根据感兴趣区域分割算法所依赖的信息不同,将该模块的典型方法分为基于运动、基于立体视觉等多类算法,分别介绍各类算法的原理及优缺点;之后从影响对象识别性能最重要的特征提取、分类器构造以及搜索框架 3 个方面出发,对比分析了近年来针对这 3 个方面的改进算法的原理及优缺点。尽管目前车载行人检测技术的准确率和检测速度都有明显提高,但是距离实用性还有很大差距。笔者认为未来需要从以下几个方面着手:

### 1) 立体视觉

目前检测算法依然主要针对单视数据,但是从文献调研结果来看,立体视觉已经越来越被研究者

所关注。相对单视数据,立体数据能够较好地解决遮挡问题,基于立体视觉生成的 ROIs 对环境的变化较为鲁棒且能够为其他模块提供有用的信息(如深度图或者视差图能用于对象分类)。近年来立体摄像设备在价格、分辨率以及速度上都有了明显改善,车载设备的计算能力也越来越强,利用立体场景重构和姿态估计的信息进行行人检测也将成为未来研究的一个重点和热点。

## 2) 多传感器融合

基于单视可视光谱数据的检测算法很容易受到光照、遮挡等影响,红外光谱数据很容易获取行人的轮廓信息且特别适合夜间行人检测,而雷达探测数据则能较为精确地获取对象的距离信息。不同的传感器数据又存在着各自的优缺点,目前的多传感器融合策略还较为简单,因此如何将多个传感器有效地融合起来,使得检测系统能够在任何条件下都鲁棒工作将是接下来的一个研究热点。

## 3) 构造新的数据集

近年来出现了许多很好的数据集<sup>[4,67-69]</sup>,这些数据集既有单视数据又有立体数据,然而这些数据集多是在晴朗天气下录制的,而鲁棒的行人检测器必须在恶劣天气下仍然能够正常工作,在雨雪天气下路面的倒影和反光、行人携带雨具造成的遮挡以及大雾造成的能见度低等问题,都会使得检测性能大幅降低。因此迫切需要这样一个行人测试数据集以推动相关研究。

## 4) 自动结合场景上下文信息

场景上下文信息由空间上下文和时间上下文两部分组成,其中空间上下文包括道路背景的构成、行人的着装等,时间上下文则主要指行人对象的历史位置以及运动信息等。场景上下文信息能够大幅度缩小检测的搜索范围,同时能提高分类器的分类性能,这对车载这类分辨率较低且实时性要求较高的应用作用更为明显。因此,如何有效而又自动地对场景上下文进行建模,并且通过在线学习等方式不断提高检测性能将是未来的研究的一个重点。

## 参考文献 (References)

- [1] Xu Y W, Cao X B, Qiao H. Survey on the latest development of pedestrian detection system and its key technologies expectation [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(5):368-376. [许言午,曹先彬,乔红.行人检测系统研究新进展及关键技术展望[J],电子学报,2008,36(5):368-376.]
- [2] Jia H X, Zhang Y J. A survey of computer vision based pedestrian detection for driver assistance systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(1):84-90. [贾慧星,章毓晋.车辆辅助驾驶系统中基于计算机视觉的行人检测研究综述[J].自动化学报,2007,33(1):84-90.]
- [3] Geronimo D, Lopez A, Sappa A, et al. Survey of pedestrian detection for advanced driver assistance systems [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(7):1239-1258.
- [4] Enzweiler M, Gavrila D. Monocular pedestrian detection: survey and experiments [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(12):2179-2195.
- [5] Dollar P, Wojek C, Schiele B, et al. Pedestrian detection: an evaluation of the state of the art [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(4):743-761.
- [6] Su S Z, Li S Z, Chen S Y, et al. A survey on pedestrian detection [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(4):814-820. [苏松志,李绍滋,陈淑媛,等.行人检测技术综述[J],电子学报,2012,40(4):814-820.]
- [7] Leibe B, Cornelis N, Cornelis K, et al. Dynamic 3D scene analysis from a moving vehicle [C]//*Proceedings of IEEE Conference Computer Vision and Pattern Recognition*. Minneapolis: IEEE Computer Society, 2007:1-8.
- [8] Machida T, Naito T. GPU & CPU cooperative accelerated pedestrian and vehicle detection [C]//*Computer Vision Workshops*. Barcelona: IEEE Computer Society, 2011:506-513.
- [9] Bouchafa S, Zavidovique B. c-Velocity: a flow-cumulating uncalibrated approach for 3D plane detection [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2012, 97(2):148-166.
- [10] Sen B K, Fujimura K, Kamijo S. Pedestrian detection by on-board camera using collaboration of inter-layer algorithm [C]//*Intelligent Transportation Systems*. St. Louis, MO: IEEE Computer Society, 2009:1-8.
- [11] Kamijo S, Fujimura K, Shibayama Y. Pedestrian detection algorithm for on-board cameras of multi view angles [C]//*Intelligent Vehicles Symposium*. San Diego, CA: IEEE Computer Society, 2010:973-980.
- [12] HyungKwan K, Shibayama Y, Kamijo S. Acquisition of pedestrian trajectory using on-board monocular camera [C]//*Intelligent Transportation Systems*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2011:544-549.
- [13] Geronimo D, Sappa A, Ponsa D, et al. 2D-3D-based on-board pedestrian detection system [J]. *CVIU*, 2010, 114(5):583-595.
- [14] Mitzel D, Floros G, Sudowe P, et al. Real time vision based multi-person tracking for mobile robotics and intelligent vehicles [J]. *Intelligent Robotics and Applications Lecture Notes in Computer Science*, 2011, 7102(2):105-115.
- [15] Keller C, Enzweiler M, Rohrbach M, et al. The benefits of dense stereo for pedestrian detection [J]. *Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4):1096-1106.

- [16] Keller C, Dang T, Fritz H, et al. Active pedestrian safety by automatic braking and evasive steering [J]. *Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4):1292-1304.
- [17] Gao Y, Ai X, Wang Y, et al. U-V-disparity based obstacle detection with 3D camera and steerable filter [C]//*Intelligent Vehicles Symposium*. Baden-Baden: IEEE Computer Society, 2011:957-962.
- [18] Suard F, Rakotomamonjy A, Benshair A, et al. Pedestrian detection using infrared images and histograms of oriented gradients [C]//*Intelligent Vehicles Symposium*. Tokyo: IEEE Computer Society, 2006:206-212.
- [19] Broggi A, Fedriga R, Tagliati A, et al. Pedestrian detection on a moving vehicle: an investigation about near infra-red images [C]//*Intelligent Vehicles Symposium*. Tokyo: IEEE Computer Society, 2006:431-436.
- [20] Soga M, Hiratsuka S, Fukamachi H, et al. Pedestrian detection for a near infrared imaging system [C]//*Intelligent Transportation Systems*. Beijing: IEEE Computer Society, 2008:1167-1172.
- [21] Ge J, Luo Y, Tei G. Real-time pedestrian detection and tracking at nighttime for driver-assistance systems [J]. *Intelligent Transportation Systems*, 2009, 10(2):283-298.
- [22] Xia D, Sun H, Shen Z. Real-time infrared pedestrian detection based on multi-block LBP [C]//*Computer Application and System Modeling*. Taiyuan: IEEE Computer Society, 2010:139-142.
- [23] Sun H, Wang C, Wang B, et al. Pyramid binary pattern features for real-time pedestrian detection from infrared videos [J]. *Neurocomputing*, 2011, 74(5):797-804.
- [24] Lian G, Lai J, Yuan Y. Fast pedestrian detection using a modified WLD detector in salient region [C]//*System Science and Engineering*. Macao, China: IEEE Computer Society, 2011:564-569.
- [25] Dornaika F, Alvarez J M, Sappa A D, et al. A new framework for stereo sensor pose through road segmentation and registration [J]. *Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4):954-966.
- [26] Geismann P, Schneider G. A two-staged approach to vision-based pedestrian recognition using Haar and HOG features [C]//*Intelligent Vehicles Symposium*. Eindhoven: IEEE Computer Society, 2008:554-559.
- [27] Premebida C, Ludwig O, Silva M, et al. A cascade classifier applied in pedestrian detection using laser and image-based features [C]//*Intelligent Transportation Systems*. Funchal: IEEE Computer Society, 2010:1153-1159.
- [28] Chong Z J, Qin B, Bandyopadhyay T, et al. Autonomous personal vehicle for the first-and last-mile transportation services [C]//*Cybernetics and Intelligent Systems*. Qingdao: IEEE Computer Society, 2011:253-260.
- [29] Gate G, Nashashibi F. Fast algorithm for pedestrian and group of pedestrians detection using a laser scanner [C]//*Intelligent Vehicles Symposium*. Xi'an: IEEE Computer Society, 2009:1322-1327.
- [30] Aycard O, Baig Q, Bota S, et al. Intersection safety using lidar and stereo vision sensors [C]//*Intelligent Vehicles Symposium*. Baden-Baden: IEEE Computer Society, 2011:863-869.
- [31] Oliveira L, Nunes U. Semantic fusion of laser and vision in pedestrian detection [J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(10):3648-3659.
- [32] Broggi A, Cerri P, Ghidoni S, et al. A new approach to urban pedestrian detection for automatic braking [J]. *Intelligent Transportation Systems*, 2009, 10(4):594-605.
- [33] Dalal N, Triggs B. Histogram of oriented gradient for human detection [C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Diego, CA: IEEE Computer Society, 2005:886-893.
- [34] Zhu Q, Yeh M, Cheng K. Fast human detection using a cascade of histograms of oriented gradients [C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. New York: IEEE Computer Society, 2006:1491-1498.
- [35] Porikli F. Integral histogram: a fast way to extract histogram in cartesian spaces [C]//*Proceedings of IEEE Conference Computer Vision and Pattern Recognition*. San Diego, CA: IEEE Computer Society, 2005:829-836.
- [36] Wu J F, Yang S, Zhang L. Pedestrian detection based on improved HOG feature and robust adaptive boosting algorithm [C]//*Image and Signal Processing*. Shanghai: IEEE Computer Society, 2011:1535-1539.
- [37] Dollar P, Belongie S, Perona P. The fastest pedestrian detector in the west [C]//*Proceedings of British Machine Vision Conference*. Aberystwyth: Lecture Notes in Computer Science, 2010:1-11.
- [38] Wojek C, Schiele B. A performance evaluation of single and multi-feature people detection [J]. *Pattern Recognition*, 2008, 5096(1):82-91.
- [39] Wantanbe T, Ito S, Yokoi K. Co-occurrence histograms of oriented gradients for pedestrian detection [C]//*Advances in Image and Video Technology*. Tokyo: Springer, 2009:37-47.
- [40] Cao H, Yamaguchi K, Naito T, et al. Pedestrian recognition using second-order HOG feature [C]//*Proceedings of the 9th Asian Conference on Computer Vision*. Xi'an: Lecture Notes in Computer Science, 2009:628-634.
- [41] Gavrila D. Pedestrian detection from a moving vehicle [C]//*Proceedings of European Conference Computer Vision*. Dublin: Lecture Notes in Computer Science, 2000:37-49.
- [42] Gavrila D, Giebel J, Munder S. Vision-based pedestrian detection: the protector system [C]//*Intelligent Vehicles Symposium*. Parma: IEEE Computer Society, 2004:13-18.
- [43] Wu B, Nevatia R. Detection of multiple, partially occluded humans in a single image by Bayesian combination of edgelet part detectors [C]//*Proceedings of International Conference on Computer Vision*. Beijing: IEEE Computer Society, 2005:90-97.

- [44] Gao W, Ai H Z, Lao S. Adaptive contour features in oriented granular space for human detection and segmentation [C]//Proceedings of IEEE Conference Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, Florida: IEEE Computer Society, 2009: 1786-1793.
- [45] Ojala T, Pietikainen M, Harwood D. A comparative study of texture measures with classification based on feature distributions [J]. Pattern Recognition, 1996, 19(3):51-59.
- [46] Wang X, Han X, Yan S. A HOG-LBP human detector with partial occlusion handling [C]//Proceedings of International Conference on Computer Vision. Kyoto: IEEE Computer Society, 2009:32-39.
- [47] Geismann P, Knoll A. Speeding up HOG and LBP features for pedestrian detection by multi-resolution techniques [C]//International Symposium on Visual Computing. Las Vegas, Nevada: Lecture Notes in Computer Science, 2010:243-252.
- [48] Dollar P, Tu Z, Perona P, et al. Integral channel features [C]//Proceedings of British Machine Vision Conference. London: Lecture Notes in Computer Science, 2009:1-11.
- [49] Walk S, Majer N, Schindler K, et al. New features and insights for pedestrian detection [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco: IEEE Computer Society, 2010:1030-1037.
- [50] Zheng Y, Shen C, Hartley R, et al. Pyramid center-symmetric local binary/trinary patterns for effective pedestrian detection [C]//Proceedings of Asia Conference on Computer Vision. Pondicherry: Lecture Notes in Computer Science, 2011:281-292.
- [51] Chang L, Yang T, Wu W, et al. Nighttime pedestrian detection using thermal imaging based on HOG feature [C]//System Science and Engineering. Macao, China: IEEE Computer Society, 2011:694-698.
- [52] Dalal N, Triggs B, Schmid C. Human detection using oriented histograms of flow and appearance [C]//Proceedings of European Conference Computer Vision. Graz: Lecture Notes in Computer Science, 2006:428-441.
- [53] Walk S, Schindler K, Schiele B. Disparity statistics for pedestrian detection: combining appearance, motion and stereo [C]//Proceedings of European Conference Computer Vision. Crete: Lecture Notes in Computer Science, 2010:182-195.
- [54] Oren M, Papageorion C, Sinha P, et al. Pedestrian detection using wavelet templates [C]//Proceedings of IEEE Conference Computer Vision and Pattern Recognition. San Juan: IEEE Computer Society, 1997:193-199.
- [55] Maji S, Berg A, Malik J. Classification using intersection kernel SVMs is efficient [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, Alaska: IEEE Computer Society, 2008:1-8.
- [56] Felzenszwalb P, Girshick R B, McAllester D, et al. Object detection with discriminatively trained part based models [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 32(9): 1627-1645.
- [57] Viola P, Jones M. Robust real-time face detection [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 57(2):137-154.
- [58] Viola P, Jones M, Snow D. Detecting pedestrians using patterns of motion and appearance [J]. International Journal of Computer Vision, 2005, 63(2):153-161.
- [59] Kim T K, Cipolla R. MCBoost: multiple classifier boosting for perceptual co-clustering of images and visual features [C]//Proceedings of Neural Information Processing Systems Conference. Vancouver, BC: Advances in Neural Information Processing Systems, 2008: 841-848.
- [60] Lin Z, Gang H, Davis L S. Multiple instance feature for robust part-based object detection [C]//Proceedings of IEEE Conference Computer Vision and Pattern Recognition. Miami: IEEE Computer Society, 2009:405-412.
- [61] Babenko B, Dollar P, Tu Z, et al. Simultaneous learning and alignment: multi-instance and multi-pose learning [C]//Proceedings of European Conference on Computer Vision. Marseille: Lecture Notes in Computer Science, 2008:1-14.
- [62] Leibe B, Seemann E, Schiele B. Pedestrian detection in crowded scenes [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego, CA: IEEE Computer Society, 2005:878-885.
- [63] Gall J, Lempitsky V. Class-specific hough forests for object detection [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, Florida: IEEE Computer Society, 2009:1022-1029.
- [64] Maji S, Malik J. Object detection using a max-margin hough transform [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, Florida: IEEE Computer Society, 2009:1038-1045.
- [65] Lampert C H, Blaschko M B, Hofmann T. Efficient subwindow search: a branch and bound framework for object localization [J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(12):2129-2142.
- [66] An S J, Peursum P, Liu W Q, et al. Exploiting monge structures in optimum subwindow search [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco: IEEE Computer Society, 2010:926-933.
- [67] Ess A, Leibe B, Gool L V. Depth and appearance for mobile scene analysis [C]//Proceedings of International Conference on Computer Vision. Rio de Janeiro: IEEE Computer Society, 2007:1-8.
- [68] Dollar P, Wojek C, Schiele B, et al. Pedestrian detection: a benchmark [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, Florida: IEEE Computer Society, 2009:304-311.
- [69] Wojek C, Walk S, Schiele B. Multi-cue onboard pedestrian detection [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, Florida: IEEE Computer Society, 2009:794-801.