

# 行人检测系统研究新进展及关键技术展望

许言午<sup>1,2</sup>, 曹先彬<sup>1,2</sup>, 乔 红<sup>3</sup>

(1. 中国科学技术大学计算机科学技术系, 安徽合肥 230027;

2. 安徽省计算与通讯软件重点实验室, 安徽合肥 230027; 3. 中国科学院自动化研究所, 北京 100080)

**摘 要:** 行人检测系统(PDS)作为保障汽车、行人安全的一种主动安全手段,已成为产业界和研究界共同关注的一个研究热点. 特别是近5年来,随着传感器、核心算法等的不断进步和使用,PDS研究发展很快. 不同于已有的针对PDS早期工作的综述,本文从技术进展、原型系统进展两个方面重点总结了PDS近5年来的最新研究进展,指出了目前尚未解决的问题,并对PDS研究涉及的关键技术的发展做出展望.

**关键词:** 行人检测系统; 特征选择; 分类机制; 多传感器融合

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 05-0962-07

## Survey on the Latest Development of Pedestrian Detection System and Its Key Technologies Expectation

XU Yan-wu<sup>1,2</sup>, CAO Xian-bin<sup>1,2</sup>, QIAO Hong<sup>3</sup>

(1. Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China;

2. Key Laboratory of Software in Computing and Communication, Hefei, Anhui 230027 China;

3. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Pedestrian detection system (PDS) is an active safety technique which guarantees pedestrians and vehicles safety. It has become a hot research topic and made good progress in the latest 5 years with the development and application of sensor technologies, kernel algorithms and so on. Different with other PDS survey papers, this paper surveys the major works in this field during the last five years from the aspects of techniques and prototype systems; some problems are pointed out and analyzed to be solved. The expectation of the future work is given at the end.

**Key words:** pedestrian detection system; feature selection; classification mechanism; multi-sensor fusion

### 1 引言

行人检测系统(PDS: Pedestrian Detection System)旨在行进的汽车上建立一个自主、智能的行人检测、智能辅助驾驶系统,具有提高驾驶安全性、保障行人生命财产安全的重要意义和实用价值<sup>[1]</sup>. 随着汽车智能化的发展,PDS作为智能汽车的一个核心支撑技术,受到产业界高度关注;例如,戴姆勒-克莱斯勒、丰田、通用等多个大型汽车厂商都对此高度重视. 同时,由于PDS面临的环境非常复杂(例如在城市交通中,交通对象复杂繁多,场景、气候、光线复杂多变),这对PDS的适应性、稳定性、实时性提出了很高的要求;因此,PDS也成为信号处理、自动化与控制、人工智能与模式识别等多学科交叉的一个研究热点. PDS研究自二十世纪九十年代中期就已开始;而在实际上,产业界的需求远远早于这个时间. 我们可以根据其中采用的代表性核心技术和原型系统

的进展,将PDS研究分为两个阶段:第一阶段从开始到2002年. 研究者借鉴、引入了一些图像处理、模式识别领域的成熟方法,侧重研究了行人的可用特征、简单分类算法;出现了一些基于普通光学、红外摄像头的简单原型系统,从功能方面初步验证了PDS的可行性,不过性能方面离实用还相去甚远. 而在近5年来,由于不断引入具有更高精度、更具针对性的新型传感器,算法研究也更具针对性、更细化,这促使PDS研究取得了新的明显进展.

目前,国外的PDS研究机构主要有卡内基梅隆大学<sup>[2]</sup>、麻省理工学院<sup>[3,4]</sup>、日本丰田汽车研究中心<sup>[5]</sup>、戴姆勒-克莱斯勒研发中心<sup>[6]</sup>,等;国内的有西安交通大学<sup>[7]</sup>、清华大学<sup>[8,9]</sup>、吉林大学<sup>[10,11]</sup>以及中国科学技术大学、中科院自动化所<sup>[12~17]</sup>,等.

目前,国内外已有一些关于PDS的综述<sup>[9,10,18]</sup>,它们对较早的工作给出了比较全面的介绍. 不同于这些论

收稿日期:2007-11-24; 修回日期:2008-02-22

基金项目:国家863高技术研究发展计划(No. 2007AA11Z240);国家自然科学基金(No. 60675039);教育部新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-07-0787)

文,本文在简介前期工作之后,重点综述了近年来的代表性工作和进展,并对 PDS 研究涉及的关键技术的发展做出分析和展望。

## 2 早期工作回顾

PDS 早期工作集中于构建简单的原型框架系统,实现基本的行人检测功能;对于性能、稳定性等实用性指标则没有进一步要求。

### 2.1 技术方面的早期进展

早期的 PDS 研究大都直接借鉴基于静态摄像头的静态视觉监控技术,包括图像处理中的图像分割、边缘提取、图像匹配、光流、运动检测等技术以及模式识别中的一些简单分类算法。

以图像处理技术为基础的代表性工作有:Gavrila 提出的行人检测系统是基于模版匹配方法的一个代表<sup>[19]</sup>;Lipton 通过计算运动区域的残余光流来分析运动实体的刚性和周期性,从而实现行人检测,这是基于光流技术的一个典型代表<sup>[20]</sup>;Heisele 等利用行人腿部运动特征进行行人检测,可以认为是基于运动检测的典型代表<sup>[21]</sup>。这种直接“拿来”的方法可以很快取得“零”的突破,但是距离实用还相差甚远。

当然,通过上述研究,研究者意识到:PDS 具有与静态视觉监控明显不同的特殊之处,单纯使用静态视觉监控技术是远远不够的。以基于光学设备的 PDS 为例,使用图像分割技术的系统在性能上检测率低、误报率高、速度慢,受图像质量影响过大;边缘提取方法由于行人、背景的多样性和复杂性,也难以取得较好的检测效果;模版匹配方法面临着模板难以选取、匹配效率等问题的挑战;此外,基于光流的方法在检测速度和效果方面也都不太理想。针对光学设备 PDS 存在的上述不足,后来出现了一些以红外摄像头为信息源的 PDS 研究工作。红外图像中热源的分割虽然比光学图像的容易得多,但是仍然存在很多干扰因素(如汽车尾气、夏天气温接近体温、玻璃阻隔等问题),这也使得基于热红外设备的 PDS 很难实用化。

在分类算法方面,被引入的方法有径向基函数(Radial Basis Functions)<sup>[19,22]</sup>、神经网络(Neural Networks)<sup>[21,23,24]</sup>等。在应用这些算法时,大多是将行人检测看成一种简单的 2 类划分问题,然后使用一个基于上述算法的单分类器来完成行人的分类。

### 2.2 原型系统方面的早期进展

在 2002 年之前,虽然各大汽车厂商和研究机构对 PDS 研究投入了大量财力、物力,但 PDS 原型系统还比较少见;这一阶段,ARCO Project 是少有的具有 PDS 功能的代表性软硬件结合系统。

1998~2001 年,意大利帕尔玛大学在政府支持下进

行了 ARCO Project 的研究,主要目的是开发高速公路上的无人驾驶系统。ARCO 中包含了一个基于机器视觉的目标检测模块,利用形状特征检测高速公路上的车辆和行人。当然,ARCO 的主要功能是基于视觉的航线保持、智能导航,行人检测不是其主要目的,因此其检测行人的功能和性能还十分有限。

### 2.3 早期工作的总结与思考

(1) 可以采用新的传感器来提高性能和效率。例如,使用红外图像可以更快、更准确地检测行人;使用雷达测距可以提高检测的快速性和准确性。然而,各类传感设备各有自己的作用范围和利弊之处,单独使用任何一种都很难达到综合最优的结果。

(2) 直接套用一般的物体检测算法以及静态摄像头监控技术,在解决动态平台下的行人检测时性能不会太好。换言之,试图理想化地将 PDS 这一“动对动”的问题,转换成“静对动”的问题,再套用静态视觉监控技术来解决,也是不太现实的。因此,有必要深入分析行人检测的特殊性,针对性地设计分类机制。

## 3 近 5 年来的工作进展

近 5 年来,由于传感器技术、机器学习理论等不断取得新的成果,同时对 PDS 的研究也不断深入,PDS 在技术和原型系统方面都取得了显著进展。

下面,我们首先从技术和系统两方面对近 5 年来的研究进展给出综述,然后指出仍然有待解决的问题。其中在技术方面,按照特征提取、分类机制、多传感器融合、其他技术这 4 大部分进行概述。

### 3.1 技术进展

#### 3.1.1 特征提取

##### (1) 新的特征表示

在 PDS 中使用的特征有物理特征和抽象特征两大类,前者又包括外观特征和运动特征。其中外观特征用于描述单帧图像中的行人形状、轮廓、纹理等静态信息,而运动特征主要描述行人运动时产生的变化和规律。抽象特征实质上是一种特征表示方法,同一种抽象特征既可用于描述外观特征也可用于描述运动特征,典型的代表有 haar 特征<sup>[1]</sup>。在早期的 PDS 中,大多数工作仅使用一种外观特征或者一种运动特征<sup>[21]</sup>;其中,外观特征主要有原始灰度<sup>[5]</sup>和轮廓<sup>[6,12,19]</sup>,也有少量工作使用了颜色<sup>[25]</sup>。由于每种特征的针对性不同,只使用一种特征的 PDS 都难以获得较好的检测性能。

近年来,在特征表示领域,主要有两种研究趋势。一种是针对行人的外观、运动特性,进一步提出了一些更具针对性的新特征,主要代表工作有:

(a) 新的外观特征:( ) Amnon 等提出了基于人体的 9 个关键部位及其相对位置关系构成的 13 个关键特

征<sup>[27]</sup>; (c) Havasi 提出了基于人腿的三次对称性特征<sup>[28]</sup>. (b) 新的运动特征: Ran 等提出了人腿形态周期性特征<sup>[26]</sup>. (c) 新的抽象特征: Lowe 提出了 SIFT 特征<sup>[29]</sup>, 它具有尺度不变的良好特性; 这一特征也被 Amnon 引入到其 PDS 中用于形状特征表示<sup>[27]</sup>.

另一种是使用多种特征综合的表示方法. 在此方面, Viola 的工作最具代表性和影响. 他于 2003 年提出综合运用外观和运动特征的特征联合表示方法, 结合串联的组合分类机制, 在行人检测和人脸检测实验中取得了当时的最优结果<sup>[1]</sup>. 总之, 外观特征(如形状、轮廓、纹理和颜色等)和运动特征在支持行人检测时各有一定的局限性: 外观特征在行人被遮挡、重叠时效果不理想; 运动特征对静止的行人无效, 对腿部遮挡的行人也无效; 此外, 运动特征的获取需要连续帧信息, 处理速度相对较慢. 因此, 近年来的工作主要采用了外观特征和运动特征的组合方式<sup>[1, 14, 30~32]</sup>.

此外, 以前的 PDS 大多使用行人的全局特征. 近年来, 一些工作也开始使用头部<sup>[13, 33]</sup>、腿部<sup>[13]</sup>等局部特征作为全局特征的补充; 这可以在一定程度上提高检测率、降低误报率, 并可解决部分遮挡问题.

## (2) 特征选择方法

在 PDS 中, 需要为分类机制选择相应的特征集合. 在早期工作中, 特征选择大多采用人工选择与实验相结合的方法; 例如在模版匹配方法中, 人形模版特征的选择、甚至匹配顺序, 都是根据经验人为指定的<sup>[19]</sup>. 而在实际上, 由于支持分类的特征种类越来越多, 每种特征的数量又可能很大甚至是海量的(例如,  $32 \times 16$  的图像中的全部 haar 特征数量已是天文数字); 为此必须选择出尽可能数量少、但是有效的特征, 以获得较好的分类性能和速度. 至今, 已有少数工作关注 PDS 中特征选择方法的设计. 例如, Viola 在其设计的 PDS 中引入的 AdaBoost 算法已具有特征选择的能力, 它能选择出分类能力强的单个特征并用于分类器的构造<sup>[1]</sup>; 作者也曾完成了基于协同进化的人形模板特征选择<sup>[12]</sup>和多类海量(颜色、haar)特征优选的试探<sup>[15]</sup>.

## (3) 特征降维方法

从机器学习的角度来看, PDS 的特征空间是高维的; 因此, 为了降低特征的冗余性、得到本征特征, 近年来降维技术开始在 PDS 研究中得到使用. 例如: Munder 和 Gavrilu 提出了用线性 PCA 方法进行特征降维<sup>[34]</sup>.

当然, 这一方面的工作还刚刚开始, PDS 的特征空间在本质上很可能是非线性的, 机器学习领域中的各种非线性降维方法值得尝试.

### 3.1.2 分类机制

近年来, PDS 中采用的分类机制集中在两大类:

#### (1) 基于单个支持向量机的分类机制

采用基于单个支持向量机(SVM: Support Vector Machine)的分类机制的 PDS 已有很多<sup>[5, 7, 8, 35, 36]</sup>. 采用 SVM 是因为它具有较强的理论支撑、并在其他领域的应用中得到了较好验证; 此类方法的缺点在于分类速度较慢, 无法满足实用需求.

#### (2) 基于组合的分类机制

组合分类的思想是将多个单分类器按照一定的结构组织起来, 综合判断待检测目标. 组合分类机制的关键在于如何设计多个单分类器的组织方式. 目前, 分类器的组织方式主要有 3 类:

(a) 简单串联组合. 这种组织方式将多个单分类器从上到下链状排列, 待检测目标只有通过上一个分类器的“认可”才能被下一个分类器检测, 当且仅当一个目标被所有单分类器“认可”才被确认为行人. 这种方法可以增加检测率、减少误报, 并且速度也较快; 但是误报率仍需进一步降低才能满足实用. 此类工作的一个典型代表是 Viola 用 AdaBoost 算法训练出的一个串联组合分类器<sup>[1]</sup>; 在此基础上, 后来的研究者也给出了一些扩展工作<sup>[27, 37]</sup>.

(b) 简单并联组合. 这种组织方式将所有单分类器都放在同一层, 根据它们的检测结果综合判定. 此方式的优点在于检测率较高, 但也存在误报率相对较高、速度较慢的不足. 例如: Grubb 设计了两个并联 SVM 分类器, 分别用于正背面和侧面的行人检测, 将两者结果综合判定待检测目标是否是行人<sup>[35]</sup>.

(c) 串、并联组合. 这种组织方式吸取了简单串联和并联的优点, 可以获得更均衡的整体性能. 这类工作在机器学习背景下已有一些, 但在 PDS 领域还比较少见. 例如: 作者在 Viola 工作的基础上, 结合试验, 提出了一种串并联结合的组合分类器, 可以进一步提高检测率、降低误报率<sup>[16]</sup>. 此后, 作者尝试提出了一种兼具串并联特性的树状组合分类器<sup>[17]</sup>.

值得指出的是, 组合分类器的性能受单分类器的组织方式影响很大, 不适当的组织方式将显著降低分类器的性能. 例如: Xu 曾比较了基于红外图像的 3 个 SVM 串联的组合分类器和单个 SVM 分类器的性能; 在他的对比试验中, 组合分类器与单个 SVM 分类器性能相当, 速度却下降了很多<sup>[5]</sup>.

### 3.1.3 传感器融合

早期的 PDS 主要采用一种光学传感器来获取信息, 如普通光学摄像头、红外摄像头等. 近年来, 出现了一些专用于 PDS 研究和系统设计的新型传感器. 特别是专用雷达的出现和使用, 促使 PDS 研究走上了多传感器融合的道路.

目前用于 PDS 的传感器可以分为两类, 光学传感器(普通光学摄像头、红外摄像头)和雷达传感器(毫米

波雷达、激光雷达),它们的优点和缺点如表 1 所示。

表 1 各种传感器的特点

传感器类型	优点	缺点
普通光学摄像头	(1) 能够获取轮廓、纹理、颜色等信息支持目标分类; (2) 检测距离范围广、视角宽度大。	(1) 获取的信息较为复杂、不便于处理; (2) 受光照、天气、遮挡影响严重; (3) 虽然立体视觉可以获得粗糙的距离信息,但精度、速度、稳定性、适用范围,都远不如雷达。
红外摄像头	(1) 容易获取行人的轮廓信息; (2) 非常适合夜间工作,也适用于雨雪天气工作。	(1) 容易受热源干扰,检测距离、角度有限; (2) 虽然立体视觉可以获得粗糙的距离信息;但精度、速度、稳定性以及适用范围等都远不如雷达。
毫米波雷达	在测距、测速、处理速度上有着绝对优势。	(1) 分辨率低,无法获得物体的纹理信息,不利于分类; (2) 雷达信号中的噪声很难滤除,所以仅用雷达的 PDS 虚警率较高。
激光雷达		

我们可以根据参与融合的传感器类型将相关研究划分为如下几类:

#### (1) 光学与雷达传感器融合

专用于 PDS 的雷达传感器以其在测距、测速、处理速度上的绝对优势,自从出现后立即成为了 PDS 主流传感器之一。早期就有 Fuerstenberg 等提出的基于多层次激光雷达的 PDS<sup>[38]</sup>。目前,研究界和产业界都比较认同光学与雷达传感器融合的方法,即用相对慢速的机器视觉技术来辅助雷达,增强对障碍的分类能力,以降低行人检测误报率。光学与雷达传感器融合的工作是 PDS 研究的一个前沿。代表性工作有:Kato 等提出了一个基于单毫米波雷达和单光学摄像头信息融合的 PDS<sup>[39]</sup>;Jung<sup>[40]</sup>、Zhao<sup>[41]</sup>分别提出了一个基于单激光雷达和单光学摄像头信息融合的 PDS;Fardi 等提出了一个基于单红外摄像头和单激光雷达信息融合的 PDS<sup>[31]</sup>。而在国内方面,可能是由于适合 PDS 的雷达设备难以获得,这方面的研究还不多见。

#### (2) 普通光学摄像头和红外摄像头融合

PDS 研究中还有少量基于光学摄像头和红外摄像头信息融合的工作<sup>[42]</sup>。采用这种融合的 PDS 检测率较高;但由于仅能通过立体视觉技术获得粗糙的距离信息,因而在速度、精度、稳定性等方面都难以满足实用。

#### (3) 更多类传感器的分层融合

这种融合方式的出发点是使用尽可能多的传感器,获取更全面的信息,期望获得尽可能好的检测效果。具体做法一般是:先将特性相似的传感器在底层融合,然后在高层组合其结果。例如,在 PROTECTOR 系统中,先在底层分别完成了光学和红外摄像头的信息融合以及

5 个雷达数据的信息融合,然后再进行高层融合<sup>[6]</sup>。

### 3.1.4 其他技术

#### (1) 立体视觉技术

近年来的 PDS 研究认为距离信息是必不可少的。在不使用雷达的情况下,立体视觉技术作为一种获取粗糙距离信息的有效方法,已经被引入到 PDS 研究中;同时,立体视觉技术还能够一定程度上提高检测率、降低误报率。典型工作有:Brotti 等提出的基于双红外立体视觉的 PDS<sup>[33]</sup>;Huang 提出的基于双光学摄像头、使用二次分割技术的 PDS<sup>[43]</sup>。

#### (2) 跟踪技术

跟踪技术在其他一些综述中被认为是独立于检测技术的。虽然和行人检测技术有着紧密的联系,但是在检测技术不够稳定的情况下,期望用跟踪技术来加快行人检测的速度、解决间断性遮挡问题,其有效性值得进一步检验。关于目前的行人跟踪技术,在综述性论文[18]里有比较详细的文章列表。

#### (3) 无线通信技术

目前的绝大多数 PDS 研究局限于单个汽车环境,配备的传感设备的探测距离有限(目前一般在 200m 范围内)。随着无线通信技术的发展,将无线通信技术引入到 PDS 中,构建一个行人检测网络成为了一个新的研究动向。PDS 网络系统可以汇总一定范围内的所有汽车的 PDS 检测结果,这就相当于扩大了每个 PDS 的检测范围,并有助于解决汽车间的相互遮挡问题<sup>[44,45]</sup>。

此外,还有汽车厂商已经将 GPS 信息与 PDS 得到的信息进行融合,获取当前交通状况的数字化模型,进一步增强汽车对周围环境的感知能力,从而构建“天地一体化”的交通信息网络。

### 3.2 系统进展

近五年来,几大知名汽车公司对智能车辆研究投入了大量财力和物力,也受到了政府的大力支持,PDS 系统日渐成熟。同时,美国、欧盟等先后组织起智能汽车大赛,进一步推动了 PDS 系统的研发。

目前,国际上主要 PDS 系统有:

(1) 戴姆勒-克莱斯勒汽车公司于 2004 年完成了 PROTECTOR 研究计划,并于 2005 完成了其升级版 SAVE-U 系统。它综合使用光学、红外、毫米波雷达等传感设备,能在 150km/h 以下的车速、多种天气状况(日间/夜间/雨雪)下,快速准确地检测出行人、警告驾驶者相关的危险状况并辅以一定的安全保障措施。戴姆勒-克莱斯勒旗下的三菱汽车公司于 2004 年 11 月在第 38 届东京汽车展上,推出了以其中部分关键技术为支撑的三菱扶桑概念车。

(2) 丰田中央研究所于 2006 年开发了使用立体近红外加激光雷达的 PDS 系统。它能够在 30 ~ 40km/h 的

速度下,检测出距离车辆 30 ~ 50m 的、在人行横道上行走的行人。2006 年 3 月,在第 76 届日内瓦车展上,发布的雷克萨斯 LS460 概念车就集成了这一系统。

(3) 德国大众汽车公司研制的无人驾驶汽车于 2007 年 4 月 11 日在英国伦敦科学博物馆与公众见面,并预计年内能够投入生产。这一系统使用激光摄像机检测汽车周围 200 码(约 183 米)内的道路状况和行人等障碍,并通过 GPS 导航系统构建三维道路模型;此外,它还能识别各种交通标识。

(4) 美国通用汽车公司研究了综合使用 GPS、光学摄像头、红外摄像头、毫米波雷达和激光雷达的智能雪佛兰汽车,于 2007 年 11 月夺得了美国第三届智能汽车大赛冠军。虽然此车配备的 PDS 模块在功能方面已经比较完善,可是平均车速只有 16km/h,和实用要求还有一定差距。此外,雷诺、本田等汽车公司也都在进行包含 PDS 模块的智能汽车研究。

与国外的 PDS 系统进展相比,国内尚属起步阶段。如一汽等汽车公司研制了基于雷达的汽车避撞系统和基于机器视觉的航线保持系统。

### 3.3 仍然存在的问题

PDS 历经二十多年的发展和积累,在多方面因素的共同推动下有了长足的发展,当然仍存在一些亟待解决的技术难题。主要包括:

#### (1) 如何均衡 PDS 系统的各方面性能指标

实用化的 PDS 要求同时具有高检测率、低误报率和高检测速度,这三点缺一不可。然而现有的方法还难以同时满足这些要求。

#### (2) 如何解决特殊场景下的行人检测问题?

PDS 面临的场景十分复杂,光线突然变化、逆光、雨雪天气、汽车剧烈抖动、行人突然从侧面冲出等特殊场景对 PDS 的某些性能提出了更高的要求。例如,对行人突然冲出的场景,系统的处理速度必须要足够快,并且能够对仅部分可见的行人实现准确检测;对雨雪天气场景,系统必须能够对部分遮挡、携带大面积附件的行人进行准确检测,并能克服雨雪天气地面倒影的影响,保持低误报率。

#### (3) 如何解决新的传感器和信息的加入带来的新问题?

新的传感器和信息的加入,可以扩大单个汽车的“视野”,随之也带来了新的多信息源的同步和融合、通讯等技术问题。

#### (4) 如何提高系统的自学习能力?

现有的 PDS 是针对一定的场景训练完成的,难以适应新的场景检测要求;同时系统没有在不断检测的过程中通过自学习提高性能的能力。有必要在保证处理效率的前提下,引入合理的增量式学习、在线学习算法。

## 4 PDS 发展展望

近年来,PDS 发展呈现出 2 大主流趋势。在产业界,为了增强系统的整体有效性和可靠性,需要将各种软硬件技术整合;在研究界,考虑到研究目的、成本等因素,需要更深入地研究其中的特征选择、分类机制、融合策略等核心关键技术。同时,PDS 的性能评价标准亟待制定。

#### (1) 产业界通过综合集成,逐步推出实用产品。

具体来说,对于单个汽车,可以使用不同类型的传感器专门检测不同场景、距离、角度、类别的障碍物,然后对它们综合集成,得到全面、稳定、可靠的 PDS 产品。例如,通过光学、红外摄像头解决中等距离的目标分类,通过毫米波雷达、激光雷达解决远距离的障碍检测,通过声纳解决近距离目标检测。对于交通环境中的汽车集合,可以结合 GPS 和无线通信技术,通过构建小范围内的动态汽车通信网络,使得每辆汽车都能及时获得当前局部范围内的全部交通信息(各类障碍、汽车的位置、速度等,周边环境的交通态势和流量),实现协同式、大范围检测。

#### (2) 研究界关注于技术难题的解决,为产业界提供必要的关键技术支撑。

PDS 发展至今,一般的技术框架已经成型。但现有技术在一些特殊场景下的检测效果不太理想,这大大限制了 PDS 的适用范围。为此,需要重点研究针对特定场景的特殊解决方案。例如,在使用光学摄像头时,需要研究存在逆光或者光线变化情况下的行人检测;在雨雪天气,需要研究路面有倒影干扰、图像信息有噪声、行人有可能穿着雨披或打着雨伞等情况下的行人检测。另外,仍然需要研究专门针对 PDS 的特征处理、分类机制、信息融合、机器学习算法等。

#### (3) 制定 PDS 性能评价标准。

PDS 的性能评价标准可以客观评价各种 PDS 的综合性能,因此这将是未来的一个工作重点。目前还没有统一的评价指标和全面的训练测试材料。已经公布的训练测试样本库有:(1) 2006 年 Gavrilu 等人公布了一个 36 \* 18 规格灰度图像样本库<sup>[34]</sup>;(2) 作者于 2007 年公布了 32 \* 16 以及 24 \* 12 规格的 24 位彩色图像样本库,以及 80 \* 50 的人形模板库<sup>[16]</sup>。

另外,在未来几年内,以光学和雷达相结合的多传感器、多信息源融合的软硬件平台也将是 PDS 研究的一个主流。

## 参考文献:

- [1] Viola P, Jones M, Snow D. Detecting pedestrians using patterns of motion and appearance [A]. Proceedings of International Conference on Computer Vision [C]. Washington DC, USA:

- IEEE, 2003. 734 - 741.
- [2] Zhao L, Thorpe C. Stereo and neural network-based pedestrian detection[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2000, 1(3): 148 - 154.
  - [3] Oren M, Papageorgiou C, Sinha P, Osuna E, Poggio T. Pedestrian detection using wavelet templates[A]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C]. San Juan, Puerto Rico: IEEE, 1997. 193 - 199.
  - [4] Mohan A, Papageorgiou C, Poggio T. Example-based object detection in images by components[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(4): 349 - 361.
  - [5] Xu F L, Liu X, Fujimura K. Pedestrian detection and tracking with night vision[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2005, 6(1): 63 - 71.
  - [6] Gavrila D M, Giebel J, Munder S. Vision-based pedestrian detection: the PROTECTOR system[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Vehicles Symposium[C]. Parma, Italy: IEEE, 2004. 13 - 18.
  - [7] Cheng H, Zheng N N, Qin J J. Pedestrian detection using sparse Gabor filter and support vector machine[A]. Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium[C]. Las Vegas, USA: IEEE, 2005. 583 - 587.
  - [8] Tian Q M, Sun H, Luo Y P, Hu D C. Nighttime pedestrian detection with a normal camera using SVM classifier[A]. Proceedings of International Symposium on Neural Networks[C]. Chongqing, China: Springer, 2005. 3497. 189 - 194.
  - [9] 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.  
JIA Hui-xing, ZHANG Yu-jin. A survey of computer vision based pedestrian detection for driver assistance systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(1): 84 - 90. (in Chinese)
  - [10] 郭烈, 王荣本, 顾柏园, 余天洪. 世界智能车辆行人检测技术综述[J]. 公路交通科技, 2005, 22(11): 133 - 137.  
GUO Lie, WANG Rong-ben, GU Bai-yuan, YU Tian-hong. Overview of worldwide intelligent vehicle pedestrian detection technology[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(11): 133 - 137. (in Chinese)
  - [11] Guo L, Wang R B, Jin L S, Li L H, Yang L. Algorithm study for pedestrian detection based on monocular vision[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety[C]. Shanghai, China: IEEE, 2006. 83 - 87.
  - [12] Cao X B, Qiao H, Wang F Y, Zhang X Z. Application of cooperative co-evolution in pedestrian detection systems[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics[C]. Atlanta, USA: Springer, 2005. 3495. 664 - 665.
  - [13] Xu Y W, Cao X B, Qiao H. Optical camera based pedestrian detection in rainy or snowy weather[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD 06)[C]. Xi'an, China: Springer, 2006. 4223. 1182 - 1191.
  - [14] Chen D, Cao X B, Xu Y W, Qiao H, Wang F Y. A SVM-based classifier with shape and motion features for pedestrian detection system[A]. Proceedings of IEEE Intelligent Vehicle Symposium[C]. Meguroku, Japan: IEEE, 2006. 331 - 335.
  - [15] Guo Y P, Cao X B, Xu Y W, Qiao H. Co-evolution based feature selection for pedestrian detection[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Control and Automation[C]. Guangzhou, China, 2007. 2797 - 2801.
  - [16] Cao X B, Qiao H, Keane J. A low-cost pedestrian detection system with a single optical camera[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2008, 9(1): 58 - 67.
  - [17] Wei C X, Cao X B, Y W Xu, Qiao H, Wang F Y. The treelike assembly classifier for pedestrian detection[A]. Proceedings of Pacific Asian Workshop on Intelligence and Security Informatics[C]. Chengdu, China: Springer, 2007. 232 - 237.
  - [18] Gandhi T, Trivedi M M. Pedestrian collision avoidance systems: A survey of computer vision based recent studies[A]. Proceeding of Intelligent Transportation Systems Conference[C]. Toronto, Canada: IEEE, 2006. 976 - 981.
  - [19] Gavrila D M. Pedestrian detection from a moving vehicle[A]. Proceedings of European conference on Computer Vision[C]. London, UK: Springer, 2000. 1843. 37 - 49.
  - [20] Lipton A. Local application of optic flow to analyze rigid versus non-rigid motion[A]. Proceedings of International Conference on Computer Vision Workshop on Frame-Rate Vision[C]. Corfu, Greece: IEEE, 1999, <http://www.ri.cmu.edu/pubs/pub.2934.html>.
  - [21] Heisele B, Wöhler C. Motion-based recognition of pedestrians[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Pattern Recognition[C]. Brisbane, Australia: IEEE, 1998. 2. 1325 - 1330.
  - [22] Sessler G M A, Martoyo T, Jondral F K. RBF based multiuser detectors for UTRA-TDD[A]. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference[C]. Atlantic, USA: IEEE, 2001. 1. 484 - 486.
  - [23] Franke U, Gavrila D M, Gorzig S, Lindner F, Puetzold F, Wöhler C. Autonomous driving goes downtown[J]. IEEE Intelligent Systems & Their Applications, 1998, 13(6): 40 - 48.
  - [24] Gavrila D M, Geibel J. Shape-based pedestrian detection and tracking[A]. Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium[C]. Versailles, France: IEEE, 2003. 1. 8 - 14.
  - [25] Papageorgiou C, Poggio T. Trainable pedestrian detection system[A]. Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing[C]. Kobe, Japan: IEEE, 1999. 4. 35 - 39.
  - [26] Ran Y, Zheng Q F, Weiss I, Davis L S, Abd-Almageed W, Zhao L. Pedestrian classification from moving platforms using cyclic motion pattern[A]. Proceedings of International Confer-

- ence on Image Processing [C]. Genova, Italy: IEEE, 2005. 2173 - 2176.
- [27] Shashua A, Gdalyahu Y, Hayun G. Pedestrian detection for driving assistance systems-single-frame classification and system level performance[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Vehicles Symposium[C]. Parma, Italy: IEEE, 2004. 1 - 6.
- [28] Havasi L, Székely Z, Sziranyi T. Pedestrian detection using derived third-order symmetry of legs[J]. Computational Imaging and Vision, 2006, 32: 733 - 739.
- [29] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91 - 110.
- [30] Elzein H, Lakshmanan S, Watta P. A motion and shape-based pedestrian detection algorithm[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Vehicles Symposium[C]. Columbus, USA: IEEE, 2003. 500 - 504.
- [31] Fardi B, Schuenert U, Wanielik G. Shape and motion-based pedestrian detection in infrared images: A multi sensor approach[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Vehicles Symposium[C]. Las Vegas, USA: IEEE, 2005. 18 - 23.
- [32] Dai C X, Zheng Y F, Li X. Pedestrian detection and tracking in infrared imagery using shape and appearance[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2007, 106(2 - 3): 288 - 299.
- [33] Bertozzi M, Broggi A, Lasagni A, Rose M D. Infrared stereo vision-based pedestrian detection[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Vehicles Symposium[C]. Las Vegas, USA: IEEE, 2005. 24 - 29.
- [34] Munder S, Gavrila D M. An experimental study on pedestrian classification[J]. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(11): 1863 - 1868.
- [35] Grubb G, Zelinsky A, Nilsson L, Rilbe M. 3D vision sensing for improved pedestrian safety[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Vehicle Symposium[C]. Parma, Italy: IEEE, 2004. 19 - 24.
- [36] Schauland S, Kummert A. Implementation and optimization of wavelet and symmetry features for vision-based pedestrian detection[A]. Proceedings of International Conference on Graphics and Visualization in Engineering[C]. Clearwater, USA: ACTA Press, 2007. 19 - 24.
- [37] Abramson Y, Steux B. Hardware-friendly pedestrian detection and impact prediction[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Vehicles Symposium[C]. Parma, Italy: IEEE, 2004. 590 - 595.
- [38] Fuerstenberg K C, Dietmayer K C J, Willhoeft V. Pedestrian recognition in urban traffic using a vehicle based multilayer Laserscanner[A]. Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium[C]. Versailles, France: IEEE, 2002. 1. 31 - 35.
- [39] Kato T, Ninomiya Y, Masaki I. An obstacle detection method by fusion of radar and motion stereo[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2002, 3(3): 182 - 188.
- [40] Jung H G, Lee Y H, Yoon P J, Hwang I Y, Kim J. Sensor fusion based obstacle detection/classification for active pedestrian protection system[A]. Proceedings of Advances in Visual Computing[C]. Lake Tahoe, USA: Springer, 2006. 4292. 294 - 305.
- [41] Zhao J, Yao D Y. Occlusion adaptive object tracking based on video image and radar data[A]. Proceedings of IEEE International Conference on ITS Telecommunications[C]. Chengdu, China: IEEE, 2006. 943 - 946.
- [42] Torresan H, Turgeon B, Ibarra-Castaneda C, Hebert P, Maldague X. Advanced surveillance systems: Combining video and thermal imagery for pedestrian detection[A]. Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers[C]. Orlando, USA: SPIE-INT Society Optical Engineering, 2004. 5405. 506 - 515.
- [43] Huang Y P, Fu S, Thompson C. Stereovision-based object segmentation for automotive applications[J]. Journal on Applied Signal Processing, 2005, 14: 2322 - 2329.
- [44] Sheng W H, Yang Q Y, Guo Y. Cooperative driving based on inter-vehicle communications: Experimental platform and algorithm[A]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots Systems[C]. Beijing, China: IEEE, 2006. 5073 - 5078.
- [45] Mangharam R, Weller D, Rajkumar R, Mudalige P, Ba F. GrooveNet: A hybrid simulator for vehicle-to-vehicle networks[A]. Proceedings of Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking & Services[C]. San Jose, USA: IEEE, 2006. 414 - 421.

#### 作者简介:



许言午 男, 1982 年 12 月生于安徽省铜陵市, 现为中国科学技术大学计算机系博士研究生. 主要从事行人检测系统、计算智能、智能交通系统等研究. E-mail: ywxu@mail.ustc.edu.cn



曹先彬 男, 1969 年 1 月生于安徽省巢湖市, 1996 年获中国科学技术大学智能信息处理专业博士学位. 现为中国科学技术大学计算机科学与技术系教授、博士生导师. 主要从事计算智能、信息安全、智能交通系统等研究. E-mail: xbcabo@ustc.edu.cn