

基于单目视觉的

智能汽车行人检测技术研究

Study on Pedestrian Detection of
Intelligent Vehicle Based on Monocular Vision

■ 于立萍 辛 晓◎著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

基于单目视觉的

智能汽车行人检测技术研究

Study on Pedestrian Detection of
Intelligent Vehicle Based on Monocular Vision

■ 于立萍 辛 晓◎著

人 民 邮 电 出 版 社
北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

基于单目视觉的智能汽车行人检测技术研究 / 于立萍, 辛晓著. — 北京: 人民邮电出版社, 2018.3
ISBN 978-7-115-47473-5

I. ①基… II. ①于… ②辛… III. ①智能控制—汽车—计算机视觉—研究 IV. ①U469-39②TP302.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第311097号

内 容 提 要

基于单目视觉的行人检测是城市交通环境下智能汽车辅助导航技术中的一项关键技术,也是目前计算机应用领域的研究热点之一。

本书以作者在智能汽车领域的研究成果为基础,重点讨论了基于树形 Adaboost 算法和 Haar-like 特征的行人候选区域分割算法;基于 Mean-shift 方法的多尺度检测融合算法;基于改进 Shapelet 特征的行人识别算法;基于子结构的部位集成检测器设计方法,该算法主要针对复杂场景下行人之间、行人与其他障碍物之间的遮挡问题;行人检测的在线学习与检测框架。

本书适合研究方向为智能汽车、机器学习的硕士、博士研究生及相关专业技术人员学习和参考。

◆ 著 于立萍 辛 晓

责任编辑 邢建春

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

◆ 开本: 880×1230 1/32

印张: 4.75

2018 年 3 月第 1 版

字数: 128 千字

2018 年 3 月河北第 1 次印刷

定价: 59.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

前 言

基于单目视觉的行人检测是城市交通环境下智能汽车辅助导航技术中的一项关键技术,也是目前计算机应用领域的研究热点之一。它对于保障现代城市道路交通安全具有重要的作用,已经引起了各国政府和相关研究机构的高度重视。

本书对行人检测的关键技术进行了概述,阐述了国内外相关研究及进展情况,重点针对复杂城市交通环境下行人检测技术进行了深入研究。

本书的章节安排如下。

第1章首先介绍了研究背景、行人检测技术及面临的问题,然后阐述了基于单目视觉行人检测技术的研究意义、国内外典型的智能汽车系统及研究现状。

第2章概述基于单目视觉的行人检测系统,简单介绍本书的主要实验平台——多功能智能汽车 THMR-V 及常用术语的定义。

第3章根据 Haar-like 所提取的行人轮廓特征,利用树形 Adaboost 算法的简单和高效性,提取图像中可能存在行人的感兴趣区域,为下一步行人的识别提供输入信息。在保证较高检测率的前提下,可以快速地剔除大多数不包含行人的扫描窗口。

第4章介绍了基于 Mean-shift 的多尺度检测融合算法。基于 Haar-like 特征和 Adaboost 的行人候选区域分割算法对目标图片



进行扫描、分类处理后,会得到许多互相重叠的检测结果。数目较多的行人候选区域,会加重行人识别阶段的工作负担,因此需要在行人识别之前首先对分割产生的检测框进行合并。在分析了多尺度检测融合算法需要解决的问题和设计原则的基础上,将检测框的融合问题转化为基于窗函数的模型估计问题,提出了基于 Mean-shift 的多尺度检测融合算法,并通过引入重采样技术提高了检测融合算法的速度。

第 5 章介绍了基于改进 Shapelet 特征的行人识别。研究基于形状信息的行人识别算法。在分析现有的 Haar-like、Edgelet 特征和标准 Shapelet 特征集的基础上,对标准 Shapelet 特征从子窗口的空间分布、归一化方法和底层特征的计算等方面进行扩展。相关实验的结果表明,改进的 Shapelet 特征与标准 Shapelet 特征相比,提高了行人识别算法的检测性能。

第 6 章介绍了基于部位的行人识别算法。针对复杂场景下行人之间、行人与其他障碍物之间的遮挡问题,将改进的 Shapelet 特征与子结构概念相结合,提出了一种基于部位集成的行人识别算法。首先将人体建模为头部、躯干、左臂、右臂和腿部 5 个部位的自然组合,从而将对目标行人的检测分解为对 5 个部位的检测,每个部位检测器采用基于改进 Shapelet 特征的检测方法。对于部位检测器的集成,引入子结构来刻画各部位之间的位置、尺度等几何约束。为了获得最优的集成方式,引入了覆盖集概念,在集成检测器的检测率与它的拓扑结构之间建立联系。然后,采用随机搜索的方式从所有的子结构中选择满足覆盖集定义,并且具有最小虚警率的子结构组合来构建集成检测器。最后,利用马尔可夫随机场(MRF, Markov Random Field)理论来完成基于集成模型的行人检测任务。



第7章介绍了基于在线学习的行人检测算法。针对 Adaboost 离线学习算法的不足,提出了一种应用于行人检测的在线学习与检测框架,该检测框架除了完成行人的在线检测之外,还可以通过漏检行人样本和错检非行人样本的在线学习,不断提升检测器的性能。相关实验表明,基于在线学习算法的检测器随着学习样本数目的增多,检测性能不断提高,当训练样本足够多时,其检测性能趋近于基于离线学习算法的检测器,并且大大减少了训练时间。

第8章介绍了行人检测技术的研究成果及进一步工作。针对复杂城市交通环境下行人的安全问题构建基于单目视觉的行人检测系统,研究相关的行人检测技术,对取得的研究成果进行总结并展望下一步的工作。

本书的研究工作得到了以下基金的资助:

《多源多模态图像特征融合研究及在自闭症早期诊断中的应用》,国家自然科学基金(No.61773244);

《面向文本分类的迁移学习和半监督学习方法研究》,国家自然科学基金(No.61175053)。

本书的写作也得到山东工商学院计算机科学与技术学院领导的大力支持,在此表示衷心的感谢。

于立萍

2017年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究的意义及背景	1
1.2 国内外研究的进展与典型系统	4
1.2.1 美国的研究进展及典型系统介绍	5
1.2.2 欧洲的研究进展及典型系统介绍	6
1.2.3 日本的研究进展及典型系统介绍	9
1.2.4 中国的研究进展及典型的系统介绍	11
1.3 国内外基于视觉的行人检测技术的研究现状	15
1.3.1 感兴趣区域分割	16
1.3.2 目标识别	20
1.4 问题和不足	27
1.5 本章小结	27
第 2 章 基于单目视觉的行人检测系统概述	29
2.1 多功能智能汽车实验平台——THMR-V	29
2.2 相关术语	32
2.3 本章小结	33



第 3 章 基于 Haar-like 特征和 Adaboost 的行人候选区域分割	34
3.1 Haar-like 特征和积分图	35
3.2 Adaboost 及树形分类算法	37
3.2.1 Adaboost 算法	37
3.2.2 树形分类算法	40
3.3 实验结果与分析	44
3.3.1 分类器的训练	44
3.3.2 行人假设区域的生成	45
3.4 本章小结	48
第 4 章 基于 Mean-shift 的多尺度检测的融合	49
4.1 多尺度检测融合算法的设计目标	50
4.1.1 多尺度检测融合算法的前提假设	50
4.1.2 多尺度检测融合算法的设计原则	51
4.2 基于 Mean-shift 算法的多尺度检测融合	52
4.2.1 核密度函数估计	52
4.2.2 基于均值漂移的多尺度检测融合算法	54
4.3 相关参数的设置	58
4.4 本章小结	62
第 5 章 基于改进 Shapelet 特征的行人识别	63
5.1 基于标准 Shapelet 特征的行人识别	64
5.1.1 底层特征	67
5.1.2 Shapelet 特征	69
5.1.3 分类器	71



5.2	基于改进 Shapelet 特征的行人识别	72
5.2.1	行人数据集	72
5.2.2	子窗口的空间分布	74
5.2.3	底层特征的计算	77
5.2.4	归一化方法	78
5.3	相关实验结果	81
5.4	本章小结	82
第 6 章	基于部位的行人识别算法	84
6.1	集成模型的相关工作	85
6.1.1	全局模型	85
6.1.2	分布式模型	86
6.2	系统结构概述	86
6.3	基于部位的行人检测器集成模型	88
6.3.1	模型概述	88
6.3.2	部位检测器	89
6.3.3	子结构检测器	90
6.3.4	子结构检测器的学习	91
6.3.5	集成检测器	93
6.4	最优集成检测器的学习	94
6.4.1	覆盖集	94
6.4.2	集成检测器检测率和虚警率的估计	97
6.4.3	最优集成检测器的学习算法	98
6.5	基于集成模型的行人检测	100



6.5.1	马尔可夫随机场理论	101
6.5.2	基于 MAP - MRF 框架的行人检测	103
6.6	相关实验和分析	106
6.7	本章小结	107
第 7 章	基于在线学习的行人检测	109
7.1	引言	109
7.2	基于 Adaboost 算法的在线学习和检测	111
7.2.1	基于在线学习的行人检测框架	111
7.2.2	基于 Adaboost 的在线学习算法	112
7.2.3	在线的弱分类器学习算法	118
7.3	实验结果与分析	121
7.3.1	数据集和相关参数的定义	121
7.3.2	实验结果	122
7.4	本章小结	126
第 8 章	行人检测技术的研究成果及进一步工作	127
8.1	研究成果	127
8.2	进一步工作	130
	参考文献	132

第1章

绪 论

1.1 研究的意义及背景

智能汽车 (IV, Intelligent Vehicle) 是一个集环境感知、规划决策、多等级辅助驾驶等功能于一体的综合系统^[1], 是充分考虑车路合一、协调规划的车辆系统, 也是智能交通系统的一个重要组成部分^[2]。智能汽车利用传感器技术、信号处理技术、通信技术、计算机技术等, 辨识汽车所处的环境和状态, 并根据各传感器得到的信息做出分析和判断, 或者给驾驶员发出报警信息, 提醒驾驶员注意规避危险; 或者在紧急情况下, 帮助驾驶员操作车辆, 防止事故的发生, 使车辆进入一个安全的状态; 或者代替驾驶员的操作, 实现汽车运行的自动化^[3]。智能汽车是内涵丰富的广义概念, 在不同的研究与应用领域, 智能汽车相应地被称之为 OMR (Outdoor Mobile Robot)、AGV (Automated Guided Vehicle)、UGV (Unmanned Ground Vehicle)、ALV (Autonomous Land Vehicle) 以及 Smart Car 等。智能汽车的研究是多学科综合与交叉应用的边缘领域, 不仅涉及人工智能理论 (Artificial Intelligent Theory)、信息理论 (Information Theory)、控制理论 (Control Theory) 以及决策论 (Decision Theory)

的应用,还涉及计算机控制技术、电子技术、通信技术以及机械设计等实现问题。

智能汽车致力于提高汽车的安全性、舒适性和提供优良的人车交互。其中汽车的安全驾驶又是智能汽车的核心问题。随着机动车保有量的迅速增长,一方面给人们的生活和出行带来了很大的便利,但由此带来的道路交通事故也给人民生命财产和国民经济造成巨大的损失。据国家统计局发布的《2007 年国民经济和社会发展统计公报》^[4]中介绍,2007 年末,全国民用汽车保有量达 5 697 万辆(包括三轮汽车和低速货车 1 468 万辆),比上年末增长 14.3%,其中私人汽车保有量 3 534 万辆,增长 20.8%。民用轿车保有量 1 958 万辆,增长 26.7%,其中私人轿车 1 522 万辆,增长 32.5%。在 2008 年 1 月,公安部通报了 2007 年全国道路交通事故情况^[5],全国共发生道路交通事故 327 209 起,造成 81 649 人死亡、380 442 人受伤,万车死亡率为 5.1,直接财产损失 12 亿元。以上数据表明,道路交通事故已经成为社会一大公害,减少道路交通事故的发生和人员伤亡是值得全社会广泛关注的问题。为了减少日益增长的交通事故以及避免驾驶员因素所造成的交通事故,减轻驾驶员的操作强度,智能汽车相关技术的研究受到各个国家和政府的普遍关注,并投入了大量的人力、物力和财力进行系统的研究开发,以提高汽车的安全性。

从道路交通事故的成因来看,驾驶员是导致交通事故的主要因素,而行人是在交通事故中主要的受害群体。在实际的交通环境中,尤其是在我国这样典型的混合交通系统中,行人和车辆共同构成交通的主要组成部分,行人是城市交通的主要参与者之一,智能汽车

要实现安全驾驶必须实现两项基本任务^[6]：一是能够识别道路标记、交通标志以及周围景物，实时跟踪道路的变化，判断车辆当前在行驶道路中所处的位置；二是能够检测道路中的障碍物（主要是车辆和行人），对它们的位置、运动速度和运动方向等信息做出准确的检测和估计，判断其对本车的威胁性。对于危险情况给出警告信息，减少驾驶员的操作失误，防止交通事故的发生，提高城市交通的安全性。目前开展的智能车障碍物检测研究中，关于道路中车辆检测的系统相对较多^[7~12]，但是关于行人检测的系统还较少。对行人进行检测是将来的智能汽车辅助驾驶系统必须具备的功能，它能有效地辅助驾驶员及时地对外界环境做出反应，避免碰撞行人。开展行人检测技术的研究已经成为智能汽车领域中备受关注的前沿方向。

行人检测不仅在智能交通系统中有广泛的应用，在其他方面也有非常重要的研究价值。例如，通过分析行人行为，可以对行人行为做出判断，实现对停车场、车站、商场、银行、博物馆、军事禁区等安全敏感地点的监控，从而节省大量的人力物力，并且提高检测和监控的精度。

关于智能汽车的行人检测，可以采取多种实施手段，但是与激光扫描雷达、相控阵声呐、毫米波雷达等目前常用于智能汽车上的传感器相比，光学视觉信号具有检测范围宽、目标信息完整、无环境影响、造价低廉并且更符合人的认知习惯等显著的优点，因此计算机视觉在智能汽车障碍物检测中的应用显得越来越重要，并表现出很好的发展前景，已经成为智能汽车上一个不可缺少的组成部分。现有的部分基于视觉的智能汽车系统采用双目视觉^[13, 14]，这种方法对深度信息的探测比较有效，但这样的系统计算量大，顽健性



和实时性差,软硬件成本高。对于车辆导航或者辅助驾驶以及简单的交通监控应用而言,由于实时性要求较高,成本控制严格,因此一般采用基于单目视觉系统的方法。

综上所述,基于单目视觉的行人检测是城市交通环境下智能汽车辅助导航技术中的一项关键技术,也是目前计算机应用领域的研究热点之一。它处于智能汽车辅助导航技术的底层,是各种后续高级处理如目标分类、行为理解等的基础^[15],对于保障现代城市道路交通安全具有重要的作用。行人检测在智能监控系统、虚拟现实、机器人应用等方面也将得到广泛的应用,因此已经得到越来越多研究者的重视,国内外的很多大学和研究机构在相关方面的研究工作已经取得进展。但是行人检测涉及计算机视觉、模式识别、人体生理学、心理学等多方面问题,是一个复杂的系统工程,目前还有许多理论及技术问题有待解决。开展这方面的研究工作具有重要的理论和现实意义,并且具有潜在的经济价值和广泛的应用前景。下面首先介绍一些国内外典型的智能车辆系统及其在行人检测方面的研究进展。

1.2 国内外研究的进展与典型系统

世界上第一辆智能汽车于 1979 年在日本研制成功^[16],装有 2 台摄像机及专用的信号处理系统和控制系统,测试时速达 30 km/h。但全面的研究是于 20 世纪 80 年代早期同时在美国和德国基于不同的目的完全独立开始的,其起源可以追溯到当时由美国发起的星球大战(Star War)计划和欧洲发起的尤里卡(Eureka)计划^[17]。进入 20 世纪 90 年代后,随着持续增加的由道路交通拥挤、堵塞等情



况所引发的交通安全性、效率的下降以及交通成本和环境污染加大等问题的日益严重,各国纷纷成立了专门解决这些问题的相关组织并启动了相应的项目计划,导致了与智能汽车相关的研究领域的兴起。在美国、欧洲、日本、中国都出现了大量的研究机构并研制了众多的原型系统。下面将对其中一些典型的系统及其相关技术进行介绍。

1.2.1 美国的研究进展及典型系统介绍

美国卡内基·梅隆大学(CMU, Carnegie Mellon University) NavLab 实验室已经先后开发了从 NavLab 1 到 NavLab 11 一系列的智能汽车实验平台和多种视觉导航系统,如 SCARF、UNSCARF、YARF、ALVINN 以及 RALPH 等^[18]。图 1-1 所示的是 Navlab 家族中的最新成员——Navlab11 原型车,该车由一辆 Wrangler 吉普车改装而成,装备了差分 GPS 全球定位系统、陀螺仪与磁罗盘、激光雷达、全向摄像系统、激光线发生器等设备。该车利用激光雷达和视觉传感器,可以对道路上的车辆、行人等运动目标和其他静止目标进行探测。



图 1-1 CMU 的 NavLab11 系统



美国军方的 Demo 计划是 1992 年由 DARPA (The Defense Advanced Research Projects Agency) 及国防部长办公室联合机器人计划处 (JRP, Joint Robot Program) 资助进行的, 主要研究高速遥控及简单的“学习”功能等近期技术, 如自动返回能力等。1996 年 JRP/DARPA 又资助了 DemoII 计划^[19], 演示了越野自主机动性, 它采用立体视觉探测障碍物, 车辆速度达到 12.9 km/h。

1997 年, 美国国防部正式启动了 DemoIII 计划^[20, 21]。该计划是自地面自主车辆计划以来最重要的半自主机器人计划。它主要研究感知、智能控制及人机接口技术, 以便使机器人车辆能够以 32 km/h 的速度自主越野行驶。DemoIII 计划的实验车外形如图 1-2 所示。

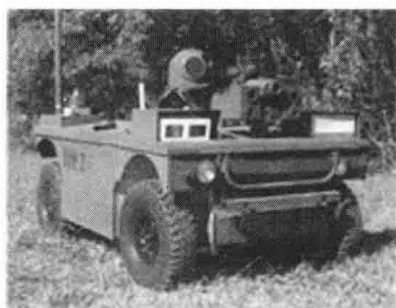


图 1-2 美国国防部 DemoIII 计划实验车

1.2.2 欧洲的研究进展及典型系统介绍

早在 20 世纪 80 年代早期, 德国的联邦国防大学 UBM 就开始了专门用于高速公路的智能汽车视觉导航技术的研究。VaMoRs 是 UBM 开发的第一款智能汽车实验平台, 由一辆 5 吨货车 MB 508D 改装而成, VAMP (VaMoRs-P) 是 UBM 开发的第二款智能汽车实验平台, 由一辆轿车 MB 500 SEL 改装而成^[22, 23] (如图 1-3 所示)。



传感器系统是由 4 个小型彩色 CCD 摄像机构成的两组主动式双目视觉系统，其中一组双目彩色 CCD 摄像机完成道路前方障碍物的探测。



图 1-3 UBM 的 VAMP 与 VaMoRs 智能汽车实验车

ARGO 是由意大利帕尔马大学于 20 世纪 90 年代中期研制成功的智能汽车系统（如图 1-4 所示）。车体由 Lancia Thema 2000 客车改制。视觉传感器包括两部焦距为 6 mm 的黑白 CCD 摄像机，这两部摄像机组成了一套双目立体视觉系统。视觉信息的处理由 GLOD（Generic Lane and Obstacle Detection System）来完成^[24, 25]，GLOD 可以实现车道检测、障碍物检测等功能。GLOD 通过逆投影映射（IMP, Inverse Perspective Mapping）、区域增长、逐行扫描等技术来识别车道线。障碍物检测采用立体视觉的方法，把检测障碍物退化为检测车辆前方的自由空间，即搜索车辆可以安全行驶的区域。利用 IPM 转换得到了两幅重建的图像（Remapped Image），根据路面水平的假设，两幅重构的图像在没有障碍物时应该是相同的，如果发现不同则说明存在障碍物，因为障碍物具有一定的高度，以此障碍物上同一点在左右投影图像中的对应像素位置不同，就会产生平面视差，从而确定障碍物的存在，并估算障碍物与智能汽车之间的距离。