

物联网感知技术与应用

智能全景视频感知 下

汤一平 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

物联网感知技术与应用

——智能全景视频感知（下）

汤一平 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是一部比较全面和系统研究全景视觉理论、全景视觉感知技术及应用学术专著。上册介绍了智能视频感知的基本原理和技术,中册提出了各种智能全景感知实际工程应用的解决方案。下册围绕实际应用案例来探讨“人与环境交互”的智能感知的实现方案,尝试通过感+知+智能+应用背景,有层次、分步骤、由浅入深地介绍全景智能感知技术方面的基础知识和专业知识,主要围绕智能交通、安防、机器人等涉及国计民生的重要领域,给出智能视频感知框架及具体的实现方法,涉及内容偏重于物联网时代的信息消费领域。书中内容紧贴物联网时代,从应用需求到实现案例,阐述实现智能感知的工学方法,以艺术与科学结合的方法来探讨计算机视觉方面的科学问题,从智能感知在不同领域中的应用启发读者的创新思想,以综合平衡提高读者的理论水平和实战能力,强调学以致用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

物联网感知技术与应用:智能全景视频感知.下 / 汤一平著. —北京:电子工业出版社, 2015.4

ISBN 978-7-121-25800-8

I. ①物… II. ①汤… III. ①互联网络—应用—视频系统—监视控制—研究 ②智能技术—应用—视频系统—监视控制—研究 IV. ①TN94 ②TP277

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 067541 号

责任编辑:万子芬 特约编辑:徐 宏

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:22.75 字数:582 千字

版 次:2015 年 4 月第 1 版

印 次:2015 年 4 月第 1 次印刷

印 数:2 500 册 定价:79.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前言

物联网时代用一句话进行概括，就是要将物理空间与信息空间进行有效的融合，实现智慧空间。几千年前，中国伟大的思想家孔子就提出来要“知天”、“畏天”，要求人们认识自然界，自觉地利用自然界为人类社会谋福祉，同时要求人们对自然界有所敬畏，规避各种自然灾害，自觉尽到保护自然的责任，最终形成了中国传统思想的核心价值理念之一，即“天人合一”思想。“天人合一”用现代科技语言来描述就是智慧地球或者智慧空间，物联网时代实现智慧空间的目的便是为人类社会谋福祉。

智能全景视频分析技术是实现智慧空间的一项重要核心技术，其中全景视频获取技术将成为一种可以从信息源中提取大量关键信息和有价值数据，进而使具备智能视频分析功能的视频类设备升级成为一种特殊的、重要的物联网感知终端设备，为各种行业应用（智能交通、商业智能、防灾减灾、安全生产、智能安防、安全监护等）提供强大的元数据支撑。物理空间环境中包含着大量趋势性、经验性、不确定性、随机性和模糊性的信息，要让环境能自主“说话”，即实现智慧空间的一种最佳选择是应用智能全景视频分析技术，这也是物联网最有价值、最具有竞争力的意义所在。

笔者从 21 世纪初开始关注智能视频分析技术，当时通过谷歌搜索引擎用“智能视频分析”关键词进行检索，几乎检索不到中文的智能视频分析的结果，但是在今天的检索结果有 158 万多条。的确，最近几年智能视频分析技术得到了众多科技工作者的普遍关注，尤其是计算机视觉技术得到了飞跃的发展，每年全世界范围内有几万篇论文发表，大量的智能视频分析技术产品进入市场。随着物联网技术概念的提出，物联网时代将面临大量的趋势性、经验性、不确定性、随机性和模糊性信息的获取、加工、传输，基于智能视频感知技术的物联网技术就自然被推到风口浪尖上。从国外物联网的发展规划来看，我们有必要从 2020 年开始在物联网技术中全面导入智能视频分析技术。

“工欲善其事，必先利其器。”“测量技术是信息技术的重要组成部分，是信息技术的源头。”科学技术是第一生产力，而现代仪器设备和现代检测手段是第一生产力的重要因素。视觉是人类观察世界和认知世界的最重要的手段。据统计，人类从外部世界获得的信息约有 80% 是由视觉获取的，这既表明视觉的信息量大，人类对视觉信息有较高的利用率，同时也体现了视觉功能的重要性。计算机视觉的最大优点是与被观测的对象无接触，在观测者与被观测者之间不会产生任何损伤，这是其他感知方式无法比拟的；另外计算机视觉能不知疲倦、始终如一地进行观测与计算，可广泛地应用于国民经济、科学研究及国防建设等各个领域。计算机视觉的终极目标就是达到人类视觉的能力，接收视觉信息，感知场景中的运动对象，同时能够对运动对象进行智能化语义分析与理解，最终得出运动对

象的行为判断，让物理环境能自主“说话”。从第一、二、三次工业产业革命的角度来说，这三次工业产业革命的效果还只是延伸了人类躯体的各种能力，虽然在第三次产业革命中出现的自动化技术和计算机技术拓展了人类的计算能力。智能感知技术尤其是智能视频感知技术的出现，将从更高层面上融合人类文明和前三次工业产业革命的成果，让人类社会能“知天”，让“人天合一”的技术为我们人类社会谋福祉。

本套书分为上、中、下三册。上册偏重于介绍智能视频感知和全方位视觉传感器的理论；中册主要对智能全景视频分析技术的各种应用问题进行详细的讲解，偏重于物联网时代的信息消费领域；下册将深入探讨应用智能全景视频分析技术的特殊行业中的典型应用、3D 视觉和基于视觉的各种新型传感器的开发及应用的典型案例，共分 5 章。

第 1 章基于全景视觉的安全监控系统，主要讲述了智能全景视频感知在几种安全监控领域的应用。本章从不同的应用需求出发，分析了不同应用领域中监控对象的视觉特征和行为特征，阐述了这些特征检测的各种算法实现步骤，给出了相应的实验结果。本章中的 4 种典型应用可以作为计算机视觉课程的应用范例。

第 2 章介绍智能全景视频分析技术在农业、工程机械等领域中的应用。由于农业、工程机械的各种应用环境一般属于开放的、非结构化的、不确定的和随机的，将全景立体视觉感知技术应用于农业和工程机械中，有望大大提高农业和工程机械的性能和水平，推动农业和工程机械向现代化、智能化的方向发展。笔者没有在该领域中进行深入的研究，希望本章内容可以起到抛砖引玉作用，为农业和工程机械科技人员进行创新性研究开拓思路。

第 3 章基于全景视觉的独居老人监护系统，主要介绍了全景智能视频感知技术为满足空巢老人对照料的连续性、即时性要求，围绕着以物联网技术为手段的虚拟社会和传统家庭养老模式相结合的模式，保护独居老人的生命安全，免除独居老年人的后顾之忧。本章系统全面地分析和阐述了全景智能视频感知技术对空巢独居老人的行为理解和异常检测技术，可以作为高年级本科生或研究生计算机视觉课程的一个应用范例。

第 4 章基于主动式全景计算机视觉的全方位三维立体实景复制技术，重点介绍了各种坐标系之间的关系和三维测量等关键技术。视觉=坐标+测量+解释，智能视频分析技术要有新的突破，还需要增强坐标及三维测量与解释之间的融合，将一个二维平面视频图像的处理（OPENCV）上升至对一个三维空间的视频图像分析处理（PCL）。本章的学习有助于学员全面准确地把握计算机视觉发展趋势。本章在深入介绍了一种新的主动式全景视觉获取技术的同时还比较全面地阐述了三维重构及点云库（Point Cloud Library）等最新的研究成果。

第 5 章基于机器视觉的新型传感器，主要介绍了如何利用机器视觉技术开发能感知雨量和雨强、三维风速风量、水质安全、瓦斯和毒气、全向水平度 5 种新型传感器。本章详细说明了设计这类传感器时如何有效地将反映监测的环境信息融合到视频图像中，如何用视频分析技术检测出反映监测的环境及状态信息。读者可以模仿本章的一些方法改造目前的一些模拟式传感器或者整合各种不同类型的模拟传感器，从而开发出基于机器视觉的各种新型的传感器。

本书的内容适合于从事物联网和智能视频分析领域研究与实际工程项目的广大读者。书中从全景视频图像的获取、处理、传输和理解发布的过程出发，以各种应用案例系统讨论全景视频数据如何获取、如何将全景视频数据加工成视频信息、如何将视频信息加工成

知识,然后如何用这些知识自动进行决策,为从事这方面学习和研究的学生、科研工作者及项目开发人员提供帮助。书中的很多内容都是笔者多年来在智能视频方面科学研究的成果,其中很多实例就是来自于笔者所申请的国家知识产权局国家发明专利中的内容,因此本书不仅可以作为专业技术人员的一本实用参考资料,也可以作为发明创新的启蒙教材,更可以作为研究物联网技术或者计算机视觉的高年级本科生和研究生的教材。

作为从事物联网技术的高年级本科生或研究生计算机视觉课程的教材使用时,建议将本书作为数字图像处理和计算机视觉的高级课程或者后续课程。笔者曾经用本书中的几个章节作为研究生智能视频分析课程教材,上课效果及学员反映都很好。同时本书也可以作为视频监控企业的培训教材,用于提升员工智能视频方面的理论水平和实战能力。相信通过对本书的学习,读者能拓宽视野,从实战中真正把握智能视频分析技术的精华。笔者相信,基于视觉的智能感知领域覆盖面非常大,读者只要从工程实际问题出发,模仿本书的案例,按照本书中介绍的工学方法,是完全可以进行各种创新活动的,期待看到读者的各种发明创造。

用八个字来概括本书的内容,即“视觉艺术、认知科学”。本书中很大一部分内容涉及人的行为识别与理解以及人类对各种事物的认知,其中也包括了人类的第六感。视觉艺术的表现形式多种多样,不只是局限于线条、颜色、整体布局等平面的艺术形式,还包括了三维的、动态的、虚拟的、现实增强的实用与观赏并存的艺术形式,其中视觉还包括了坐标系、测量和解释三方面的内容。当我们观察一些不规则的图形或是一个全景图像时,只有其被看作一种由清晰的方向、一定的大小及各种几何形状和色彩等要素组成的结构图式时,才能真正被感知。目前的视频分析技术尝试用计算机视觉的方式来解释视频图像,我们要认识到视频与视觉是有很大差距的;当今的视频分析技术总体水平约相当于3岁孩童的认知水平。认知科学作为一门新兴的科学,是研究人、动物和机器智能的本质和规律的科学,是多种学科相互交叉、渗透与融合的产物,研究内容包括知觉、学习、记忆、推理、语言理解、知识获得、注意、情感、意识和动作控制等高级心理现象,是探索人类的智力如何由物质产生和人脑信息处理的过程。

要想使得本书的内容面面俱到是不太现实的。本书涉及物理学、高等数学、数值计算、计算机软件、数字图像处理、机器视觉、计算机视觉、模式识别和人工智能等方面的内容,这些方面的具体内容已有专门的教材和参考书籍。由于本书直接面向于解决智能全景视频分析方面的一些科学和实际工程应用问题,相信对数字图像处理和计算机视觉的基础知识比较了解的读者都能够看懂;对于尚未接触过数字图像处理和计算机视觉的读者,建议在读本书时旁边有一本计算机视觉、机器视觉及模式识别方面的书籍,或者随时通过搜索引擎检索关键词来获得相关知识。本书也可以作为一本物联网技术的科普读物,尤其是对于从事物联网技术的年轻学子,可以开阔视野,激发对这门“人天合一”技术的学习热情。本书同样可以作为一位从事智能视频分析的工程技术人员的自学教材和手册,本套书中、下册内容对各行业的智能视频分析解决方案进行了详细的阐述,是提高从事智能视频分析工程技术人员业务水平的有效途径。希望本书的出版能为我国物联网技术的发展、智能视频分析技术的普及尽微薄之力。

关于具体实现和编程语言问题,虽然本书中所介绍的案例大部分是用Java语言开发实现的,采用了基于Java语言的中间件技术,但是关于本书的介绍不依赖任何编程语言,而

是使用了通用的算法符号和流程。对于已经学会编程的读者来说，实现这些算法并非十分困难，有些可以直接调用 OpenCV、JavaCV 和 PCL 所提供的函数库，这一点从笔者指导的学生身上已经得到证明，其中不少算法都是本科毕业生和硕士研究生的毕业论文中实现的，借此也对同学们对本书所做的贡献表示感谢。

在下册执笔过程中，笔者发现智能全景视频分析技术还存在很多未知科学问题，需要进一步探索，加上近年来计算机视觉领域新的研究成果不断涌现，书中不少内容还是笔者及团队几年前完成的研究成果，谨抛砖引玉。本书中介绍的一些研究得到了国家基金（基金号：61070134，项目名称：主动三维立体全景视觉传感技术研究；基金号：61379078，项目名称：基于物联网技术的生物式临震预测关键技术研究）的资助，本书的出版得到了浙江省重中之重学科“信息处理与自动化技术”和浙江工业大学 2014 年度专著与研究生教材出版基金的资助，在写作过程中得到了研究所、实验室研究生们的帮助，在此一并表示感谢！本书下册成稿之际，还要感谢家人和朋友对笔者著书期间的理解和支持。由于时间仓促、学识水平有限，不足之处望读者不吝赐教。

最后，让我们怀着“天人合一”为人类社会谋福祉的理想，践行“天人合一”的技术路线，自觉地利用自然界为人类社会谋福祉，自觉地为保护我们人类赖以生存的环境尽到自己的一份责任。

汤一平 (typ@zjut.edu.cn)

2014 年 10 月

第 1 章 基于全景视觉的安全监控系统	1
1.1 基于全景视觉的火灾监控	1
1.1.1 火焰目标对象识别	5
1.1.2 火焰燃烧模式识别	13
1.1.3 火灾安全监控系统实现	21
1.1.4 基于全方位视觉传感器的自动消防灭火装置	22
1.2 基于全景视觉的 ATM 机智能监控	24
1.2.1 前景目标的提取算法研究	27
1.2.2 运动目标跟踪算法研究	38
1.2.3 行为理解研究	45
1.2.4 系统界面介绍	51
1.3 基于全景视觉的财产保护技术	53
1.3.1 盗窃异常检测算法研究	55
1.3.2 盗窃者身份检测算法研究	65
1.3.3 基于视觉的财产保护系统实现	74
1.4 基于全景视觉的遗留物检测技术	78
1.4.1 遗留物检测算法研究	80
1.4.2 遗留物放置者检测研究	84
1.4.3 遗留物及其放置者检测系统实现	87
1.5 基于全景视觉的智能配网安全技术	90
结束语	91
参考文献	92
第 2 章 智能全景视频分析技术在农业、工程机械等领域中的应用	95
2.1 单目多视角机器视觉珍珠在线检测分类装置	96
2.1.1 单目多视角的立体视觉装置设计	96
2.1.2 珍珠在线检测分类装置设计	98
2.1.3 被测珍珠的图像分析、检测与分类	99
2.1.4 珍珠颜色、光泽度及均匀性的视觉检测原理	101
2.2 基于全景立体视觉的采摘对象的识别、分类和空间定位装置	110
2.3 基于全方位视觉的水下视频检测装置	119

2.4 基于双目立体全方位视觉传感器的洞穴探测装置	123
2.5 全景智能视频分析技术在农作物病情检测上的应用	129
2.5.1 基于计算机视觉的病害识别	129
2.5.2 基于计算机视觉的虫害识别	130
2.5.3 基于计算机视觉的草害识别	130
2.6 智能全景视频分析技术在集装箱吊具上的应用	132
结束语	136
参考文献	137

第3章 基于全景视觉的独居老人监护系统 141

3.1 老人监护技术的研究现状	145
3.1.1 基于可穿戴式传感器的老人监护技术	146
3.1.2 基于音频信号的老人监护技术	146
3.1.3 基于生活线的老人监护技术	146
3.1.4 基于视觉传感器的老人监护技术	147
3.2 家庭环境元素的定制	149
3.3 人体对象提取与跟踪	151
3.3.1 图像预处理	151
3.3.2 人体对象提取部分	152
3.3.3 人体对象跟踪部分	156
3.3.4 实验结果及分析	157
3.4 人体姿态、动作及其所处空间位置识别	162
3.4.1 人体姿态识别	162
3.4.2 人体动作识别	164
3.4.3 人体所处空间位置识别	165
3.4.4 实验结果及分析	166
3.5 异常行为分析	169
3.5.1 视觉范围之内的异常行为分析方法	169
3.5.2 视觉范围之外的异常行为分析方法	170
3.5.3 实验结果及分析	171
3.6 隐私保护	174
3.7 系统实现	178
结束语	185
参考文献	186

第4章 基于主动式全景计算机视觉的全方位三维立体实景复制技术 189

4.1 被动式视觉三维测量方法	191
4.1.1 双目（多目）立体视觉的三维重建方法	191
4.1.2 基于单目视觉的三维重建方法	193

4.2 主动式视觉三维测量方法	198
4.2.1 投影结构光三维测量方法	198
4.2.2 基于三维激光扫描的三维测量方法	207
4.3 基于三维激光扫描技术的三维模型重建	215
4.3.1 点云数据的获取	216
4.3.2 数据配准	217
4.3.3 点云数据的预处理	219
4.3.4 三维模型建立	220
4.3.5 纹理映射和纹理合成	224
4.3.6 扫描仪坐标系、摄像机坐标系和世界坐标系	224
4.4 全景三维立体实景复制技术	228
4.4.1 ASODVS 的设计	229
4.4.2 激光投射信息解析	235
4.4.3 点云数据的数据格式及存储方式	237
4.4.4 PCL 点云库	240
4.4.5 以人为中心的全景立体显示绘制技术	273
4.4.6 基于全景激光扫描的主动式全景视觉传感器检测精度分析	282
4.4.7 3D 实景复制技术与 3D 打印技术	285
结束语	286
参考文献	286
第 5 章 基于机器视觉的新型传感器	292
5.1 基于机器视觉的雨量传感器	292
5.2 基于机器视觉的三维风速、风向传感器	297
5.3 基于机器视觉的生物式水质监测技术	305
5.3.1 现有水质监测技术	307
5.3.2 生物式水质监测	307
5.3.3 基于机器视觉水质生物式传感器的设计	314
5.3.4 基于机器视觉的水质生物式传感器的实验研究	321
5.4 基于机器视觉的生物式瓦斯监测技术	323
5.5 基于机器视觉的全方位倾斜传感器	330
5.5.1 基于机器视觉的全方位倾斜传感器的组成与设计	332
5.5.2 基于机器视觉的全方位倾斜传感器的算法设计	336
5.5.3 全方位倾斜传感器的特性	342
5.5.4 全方位倾斜传感器倾斜角检测实验结果及精度分析	345
结束语	349
参考文献	349

第 1 章

基于全景视觉的安全监控系统

随着计算机视觉技术的发展，视频监控技术可以广泛应用于各种危害公共安全的状态检测、行为识别，通过智能视频分析技术可以对一系列危险行为作出分析与判断，从而预防和避免各类危险行为的发生，维护公共场所的安全，避免人们的生命、财产受到损失。

全方位视觉传感器 ODVS (Omni Directional Vision Sensors) 为实时获取场景的全景图像提供了一种新的解决方案。由于该方案可以获得全方位的实时图像，获取检测视觉信息和跟踪监视范围内的运动物体时算法更加简单，在视觉信息的获取方面可以超越人的视觉极限，其包含的信息量极大，仅用一个全方位视觉传感器就可以替代多种类型的传感器，为信息空间和物理空间的融合提供了更实用、更简捷的途径。从某种意义上讲，各种安全监控系统是智慧空间的一种存在形态。

本章将围绕几种典型公共场所中容易出现危险状态或行为来探讨全景计算机视觉在安全监控中的应用，主要包括基于全景视觉的火灾监控技术、基于全景视觉的 ATM 机智能监控技术、基于全景视觉的财产保护技术、基于全景视觉的遗留物检测技术和基于全景视觉的智能配网安全技术等安全监控技术。

1.1 基于全景视觉的火灾监控

现实社会生活中，火灾是威胁公共安全、危害生命财产的主要灾害之一，它给人类社会造成过不少生命、财产的严重损失，是世界各国人民面临的一个共同的灾难性问题。随着社会生产力的发展，社会财富日益增加，火灾损失上升及火灾危害范围扩大的总趋势是一个客观规律。

联合国世界火灾统计中心提供的资料显示，发生火灾的损失，美国不到 7 年翻一番，日本平均 16 年翻一番，中国平均 12 年翻一番；全世界每天发生火灾 1 万多起，造成数百人死亡。

近 3 年来，我国每年发生火灾约 23 万起，死伤 2000 多人，每年火灾造成的直接财产

损失 10 多亿元，尤其是造成几十人、几百人死亡的特大恶性火灾时有发生，给国家和人民群众的生命财产造成了巨大的损失。中国公安部通报的火灾数据，如表 1.1 所示，该表内容显示近年来我国火灾形势虽然稳中有降，但形势依然十分严峻。

表 1.1 公安部通报的火灾数据

年 份	2005	2006	2007
火灾次数（万）	23.6	22.3	15.9
死亡人数	2496	1517	1418
受伤人数	2506	1418	863
经济损失（亿）	13.6	7.8	9.9

特别是近几年，随着经济的飞速发展，各种高层的建筑群体不断涌现。在高大建筑中，由于人口的密集，财产的集中，其消防安全问题就更为突出。这些地方一旦发生火灾，只有在第一时间扑灭才能保证生命财产的安全，否则后果不堪设想。因此，研制火灾安全监控系统，对火灾进行实时有效的安全监控，实现火灾的早期探测和报警甚至自动灭火，把火灾造成的生命财产损失减小到最小限度，是火灾防治技术领域的重点研究内容。

火灾探测技术主要分为传统的感温和感烟探测技术以及新型的复合探测技术、智能化探测技术、图像型火灾探测技术等。近年来，火灾监测科学界正逐渐将注意力转移到火灾现象本身和深层次的机理研究方面，并取得了一定的成果。在大空间火灾安全监控中，国内外研究者进行了基于红外摄像机和普通 CCD 摄像机的图像型火灾探测技术的研究。该技术既可以对火焰进行探测，又可以对烟雾进行探测，由于采用多种火灾模式识别，还能有效地降低误报率和漏报率；摄像机同时还可以进行自动空间定位、联动灭火。由于其优异的性能，该技术特别适合于对大空间库房、博物馆、飞机库、体育馆、会议厅以及环境比较恶劣的工业场所进行火灾安全监控和保护。因此，图像型火灾探测技术是未来火灾探测技术发展的一个趋势。

图像型火灾探测技术一般被应用于大空间和户外等复杂环境中，尤其是在隧道中。图像型火灾探测方法运用了数字图像处理技术，与传统的火灾探测方法相比可以有效地提高探测精度，降低误报率，同时可以大大缩短探测时间，提供更加丰富的火灾现场信息。概括来说，图像型火灾探测技术相对于常规探测技术有如下优势：

- 直接主动的遥测能力，属于非接触主动探测；
- 监控场所的空间适用性，能够应用于多粉尘等恶劣场所；
- 远程监视、实时报警与离线分析相结合；
- 廉价，通行性和扩展能力强；
- 支持多传感器的信息融合。

火灾的形成和发展有一定的特点和规律，按照时间顺序，其主要阶段分为烟雾的产生和扩大以及火焰的产生和扩大。在火灾的不同阶段，根据燃烧过程不同的特征物理量，可以将火灾探测技术分成烟物控制技术和火焰探测技术两大类。

图像型火灾烟雾探测技术研究的目的是在不同的环境背景下，针对不同燃烧状况生成烟雾的物理特征表现，对火灾进行可靠的早期识别与报警，并对非火灾因素进行排除，消除误报与漏报。

虽然图像型火灾烟雾探测技术已经得到了广泛的研究,但是视觉烟雾探测的固有难度使其只能应用在可以明显识别出烟雾的场所。更多的研究者倾向于研究图像型火灾火焰探测技术。火焰探测器与烟雾探测器相比,在某些物体表面火灾、可发生无烟燃烧等无阴燃的场所以及高污染的环境具有一定的优越性。尤其是某些无烟火焰的场所,以及户外大空间的火灾探测,例如森林火灾的探测,一般都使用火焰探测技术。此外,火灾点的空间定位也常常需要借助于图像型火焰探测技术。

根据燃烧学的原理,在火焰燃烧时,其放出的能量 95%集中于红外波段。所以,研究者在进行图像处理时,非常关心红外波段的图像识别,利用红外成像的原理获取燃烧所发出的红外图像进行图像处理,从而达到监控的目的。由于红外线穿透烟雾的能力很强,这就决定了红外探测器可以在比较恶劣的环境下使用,例如高污染、高粉尘等不适合感烟探测器工作的场所。但是,红外探测器的成本较高,还不能普及推广,目前仅用于保护重要的设备、仪器仪表室、档案室等场所。另外,红外探测器还存在高温物体干扰的问题。

如果红外探测器结合普通彩色 CCD 摄像机对火焰进行探测,不仅可以探测到火焰,还可降低系统的误报率。这种根据红外和可见光信息对早期火灾火焰进行探测的技术叫做双波段图像火灾探测技术。另一方面,由于 CCD 已经得到广泛的应用,许多建筑已经装有 CCTV (闭路电视摄像机),因此基于普通 CCD 摄像头的可视火焰探测得到了广泛的关注。例如,英国 D-Tec 公司的 FireVu 系统支持 4 路 CCTV 信号输入,具有火焰探测的功能;美国 axonX 公司的 SigniFire 系统使用人工智能技术分析 CCTV 采集的视频图像,能够识别视频中的火焰和烟雾。

虽然现有的图像型火灾火焰探测技术已经取得了一定的成果,但是这些技术还存在着一一些问题:

(1) 采用普通 CCD 摄像机,难以实现大空间场景的全景监控。为了达到全景监控的目的,一些研究者使用云台装置,另一些研究者使用多摄像机,这不仅会造成机械磨损,增加设备维护的费用,而且在图像处理方法上,需要使用复杂的图像拼接算法,存在着时间滞后的问题,难以实现实时火灾安全监控。

(2) 对火灾点的空间定位存在很大的困难,因此难以与联动消防装置配合实施自动定点扑救。为了定位火灾点的三维空间位置,需要进行严格的摄像机标定,定制特殊的成像点与原像点之间的映射关系,难以实现具有通用性的火灾点三维空间定位方法。

针对上述问题,本节中我们将详细讨论如何利用计算机视觉技术,开发一种集动态图像理解和多特征于一体的基于全方位视觉的火灾安全监控系统,实现大空间火灾的智能探测。主要讨论内容包括以下两个部分:

1) 大空间火灾安全监控系统基础问题的研究

这里所研究的火灾探测,有别于现有的图像型火灾火焰探测技术,是按照人理解火灾的思考方式实现火灾的智能探测。人观测火灾的重点是分析火焰目标对象的属性和状态,因此火灾安全监控系统有两个基础问题:通过分析火焰对象的属性实现视频中火焰目标对象的识别;通过分析火焰对象的状态实现火焰燃烧模式的识别,并在此基础上完成火灾探测。对于第一个问题,可以通过背景消除、颜色判断和闪烁频率特征判断初步抽取出候选

的火焰像素点，然后进行连通区域填充标识出整个火焰区域，完成具有语义信息的火焰目标对象的识别。对于第二个问题，可以首先分析火焰的多个行为特征（包括面积增长、整体移动和边缘抖动），然后使用模糊逻辑进行多特征融合，智能识别火焰的燃烧模式，把火焰的燃烧区分成环境中可能安全存在的可控燃烧和会引发火灾的失控燃烧两种模式，为早期火灾探测做好充分的准备。

图 1.1 所示的是现有图像型火灾火焰探测算法的概念模型。现有图像型火灾火焰探测算法在整体设计、单个火焰特征量化分析和多特征融合的火灾智能判决方面还存在问题：



图 1.1 现有图像型火灾火焰探测算法的概念模型

(1) 从整体设计上来说，图 1.1 的概念模型是一个自底向上的处理过程，即先处理底层的图像属性，最后才得到高层的火灾这一抽象事件语义。这种处理方法在底层图像属性与高层抽象事件语义之间存在着难以跨越的鸿沟。

(2) 从单个火焰特征量化分析上来说，现有的算法存在着两个极端：一些算法过于简单，导致误报率高；另一些算法过于复杂，所需要的计算量很大，导致实时性很差。

(3) 从多特征融合的火灾智能判决上来说，目前大部分的研究停留在简单利用神经网络和模糊逻辑技术的理论阶段，还没有提出适合于火灾探测的智能算法。

2) 火灾安全监控系统的设计和实现

本节使用 Java 语言开发早期火灾安全监控系统，实现基于全方位视觉的火灾探测和火灾报警功能；设计各种火灾实验和干扰实验，测试系统的准确性和可靠性，并对实验结果进行分析。

为了让全景计算机视觉能更有效地检测出火灾的发生，我们有必要首先讨论一下人是如何观察火灾发生的。人对火灾的观察，是一个对火焰对象进行语义理解的过程；当看到火焰的照片时，他捕捉到这个火焰对象的语义信息：火焰没有温度，并且火焰没有形状变化，也没有亮度变化，因此不是真的火焰。当看到燃烧的蜡烛时，他捕捉到这个火焰对象的语义信息：火焰有温度，并且火焰有微小的亮度变化，因此是真的火焰；但是火焰的燃烧材料是蜡烛，并且火焰处于稳定燃烧的状态，因此这不是火灾。当看到远处的仓库起火时，他捕捉到这个火焰对象的语义信息：火焰有形状变化，也有亮度变化，因此是真的火

焰；在不应该出现火焰的场所发现了火焰，并且火焰具有增大、蔓延的趋势，因此一定是发生了火灾。因此，将这些知识赋予给基于全景计算机视觉的火灾监测系统能有效提高火灾监测的准确性及鲁棒性。

1.1.1 火焰目标对象识别

图像型火灾安全监控系统基于火焰探测，因此识别出视频序列中的火焰目标对象是最基础的工作。根据应用环境的不同，火焰目标对象的识别算法也相应具有不同的复杂程度：在某些简单的应用环境，例如炉膛和轮船的驾驶舱，其火焰目标对象的识别算法可以设计得非常简单；而在某些相对复杂的应用环境，例如超市和商场，其火焰目标对象的识别算法则往往需要具有较高的鲁棒性，才能有效提高监控系统抗干扰的能力，才能够正确地识别出真实的火焰。

这里我们研究视频序列中比较明显的火焰视觉特征，包括火焰的颜色特征和闪烁频率特征，作为火焰目标对象识别的重要依据，其处理流程如图 1.2 所示。

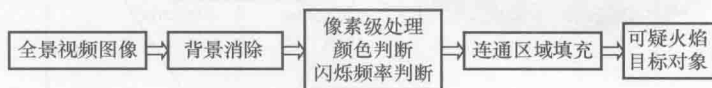


图 1.2 火焰目标对象识别的处理流程

在视频序列中，火焰属于前景运动物体，因此可以先进行背景消除，简化环境，这样有利于加快火焰目标对象识别的速度，提高正确率。常用的背景消除方法是通过一段时间的学习建立自适应背景模型，并使用背景减法来消除固定不变的背景物体。火焰目标对象识别的关键是像素级的处理，即通过判断像素点的颜色和闪烁频率特征，确定其是否为火焰像素点。最后进行连通区域填充，把火焰像素点组织成有语义信息的区域级火焰目标对象，从而完成视频序列中火焰目标对象的识别。

1. 火焰的颜色特征

彩色视频图像中，颜色是火焰最明显的视觉特征，因此是火焰识别的重要依据。

虽然不同的燃烧材料火焰颜色不同，例如煤气的火焰表现出蓝色，木材的燃烧表现出黄色，但是，一般在存在火灾隐患的场所，火焰的颜色基本固定：随着温度的变化，从高温到低温、从内核到外焰，颜色从白色、黄色、橙色到红色。

此外，不同的光照条件火焰颜色略有不同。例如，在暗室环境下火焰颜色接近红色，而在强光环境下火焰颜色接近黄色。普通 CCD 摄像机在成像的时候没有过滤红外光谱，导致采集的图像中火焰的颜色要比肉眼看到的更亮更白，由于大空间环境在白天光照充足，存在大量类似的亮白色，这就给火焰颜色建模增加了难度。对此，一种解决方法是调整摄像机参数来减弱甚至消除光照的干扰，但是环境的光照是随时间变化的，摄像机参数的自适应调整难于实现；另一种解决方法是对不同的光照条件创建不同的火焰颜色模型，使其能够在多种光照条件下适用。当然，也可以在全景摄像机中直接加入滤光片以排除光照等其他环境因素的干扰。

1) 火焰颜色分布

我们选择在 HSI 颜色空间分析火焰的颜色特征，这是因为 HSI 颜色空间更接近人对颜

色的感知，具有比其他颜色空间更好的视觉一致性。所谓颜色空间的视觉一致性，是指颜色空间中相似的颜色在人看来也是相似的，它有两个方面的含义：

(1) 对于自然图像，具有相似颜色的像素点在空间上的分布是连续的；

(2) 在颜色空间中颜色的变化是光滑的，也就是说，当表示像素点颜色的三元组坐标连续变化时，在人看来颜色的变化也是连续的。

HSI 颜色空间的数学模型如图 1.3 所示。

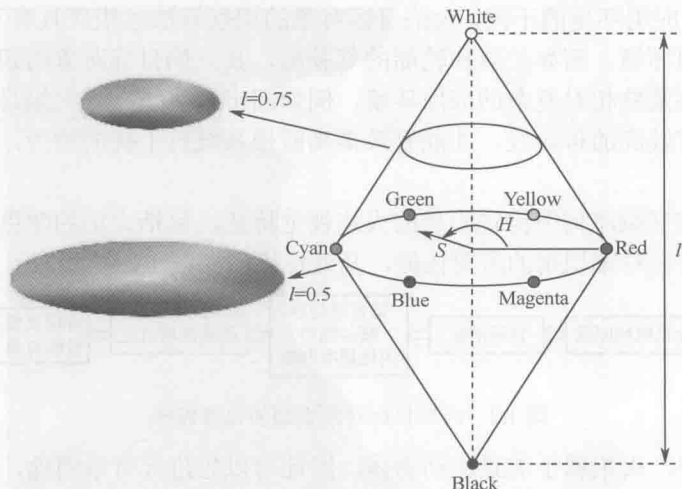


图 1.3 HSI 颜色模型

它使用色调 H (Hue)、饱和度 S (Saturation) 和亮度 I (Intensity) 这个三元组来描述颜色：

H 表示色调，由角度表示，反映该颜色最接近的光谱波长。取值范围 $[0,360]$ ，定义 0° 为红色， 120° 为绿色， 240° 为蓝色。

S 表示饱和度，是色环的圆心到彩色点的半径长度。取值范围为 $[0,1]$ ，在环的外围圆周上是纯的，其饱和度为 1；在中心点处，饱和度为 0。

I 表示光照强度，它确定像素的整体亮度。取值范围 $[0,255]$ ，定义亮度 0 为黑色，255 为白色。

RGB 颜色空间转换为 HSI 颜色空间的计算公式定义如下：

$$I = (R + G + B) / 3 \quad (1.1)$$

$$S = 1 - 3 \times \frac{\min(R, G, B)}{R + G + B} \quad (1.2)$$

$$H = \begin{cases} \theta & B \leq G \\ 2\pi - \theta & B > G \end{cases} \quad (1.3)$$

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{0.5 \times (R - G + R - B)}{\left[(R - G)^2 + (R - B)(G - B) \right]^{0.5}} \right\} \quad (1.4)$$

由于火焰是发光体，所以 I 值较大，其取值范围一般在 $[180, 255]$ 。我们需要重点分析

火焰颜色在 $H-S$ 平面上的分布。

图 1.4 列举了 4 组用于实验的采样图像：图 1.4 (a) 是白天光照充足的室内火焰，图 1.4 (b) 是阴天的室外火焰，图 1.4 (c) 是黑暗中的室内火焰，图 1.4 (d) 是黑夜里的室外火焰。因为内焰部分的白色像素点与环境中的白光极其接近，容易造成干扰，所以我们主要采集外焰部分的像素点。每张图片各采集 100 个像素点，图 1.5 是火焰颜色采样的实验结果，描述了火焰颜色在 $H-S$ 平面上的分布情况（为了便于计算，我们把 S 值的取值范围扩大了 100 倍）。

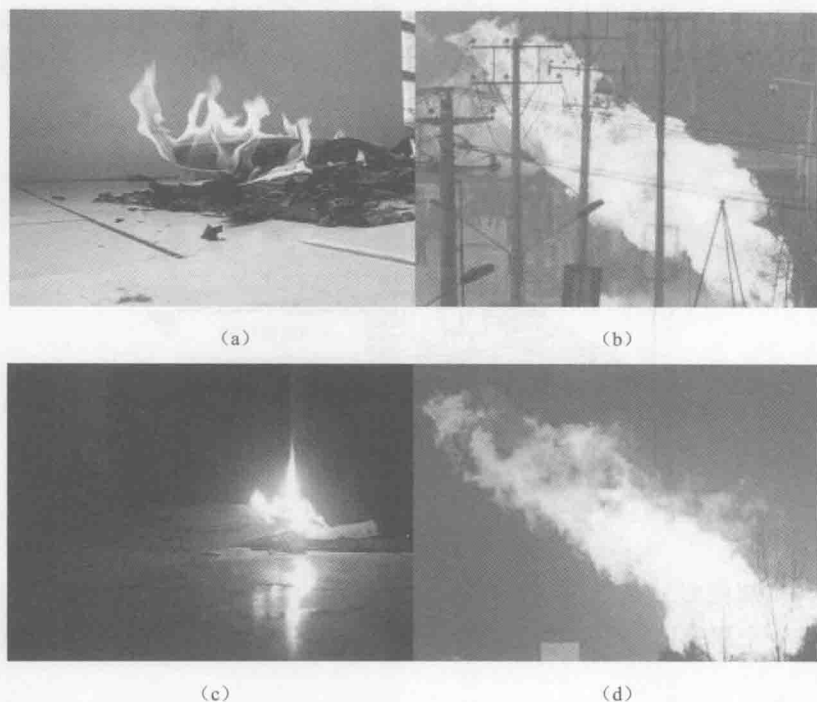


图 1.4 各种不同光照条件下的火焰图像

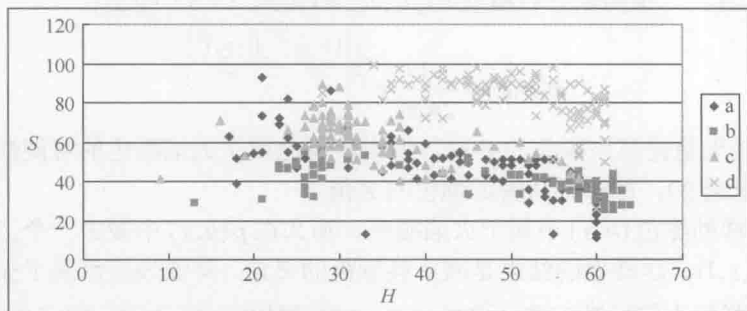


图 1.5 火焰颜色在 $H-S$ 平面上的分布

通过上述火焰颜色采样实验，可以总结出如下结论：

- 火焰颜色的 H 值在 $[20,60]$ 之间，即在红色到黄色之间，这符合人们对火焰的感官认识。
- 光照充足的场合，如 1.4 (a) 和 1.4 (b)，火焰颜色的 S 值较小，一般在 $[20,50]$ 之