

华东交通大学教材（专著）基金资助
国家自然科学基金项目（61262031）资助



基于稀疏表达的火焰与烟雾 探测方法研究

JIYU XISHU BIAODA DE HUOYAN YU YANWU
TANCE FANGFA YANJIU

蒋先刚 著

非
外
借

华东交通大学教材（专著）基金资助

国家自然科学基金项目（61262031）资助

基于稀疏表达的火焰与烟雾 探测方法研究

蒋先刚 著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

内容简介

本书主要介绍基于稀疏表达的火焰与烟雾区域的识别方法和程序实现技术。从工程应用角度,本书比较全面地介绍了基于统计分析和稀疏表达的火焰区域的识别方法和实用技术。全书分为5章,第1章介绍了火焰与烟雾区域识别方法的基本理论和概念,并介绍了压缩感知和稀疏表达方法在火灾探测系统中的应用。第2章介绍了火灾区域的特征定义、变换与选择以及程序设计方法。第3章介绍了基于统计方法的火焰与烟雾区域的分类方法和程序设计方法。第4章介绍了稀疏表达方法及其对火焰与烟雾区域的识别和程序设计方法。第5章介绍了基于特征融合与分类器组合的火焰与烟雾区域的探测方法和程序设计方法。书中各章包含基于稀疏表达和统计方法的多个火焰与烟雾区域识别系统的工程应用研究例程,各章之间的理论分析和程序模块具有一定的相关性和独立性。本书既注重理论又突出实用。

本书可作为大学生、研究生和工程软件人员的基于稀疏表达的图像模式识别的算法及相关应用课程的参考资料和自学用书,书中的多个软件包的设计例程全部通过 Delphi 7 验证实现,随书所附光盘提供书中所介绍的所有基于稀疏表达的数字图像模式识别项目研究的软件包的完整源程序,编程和运行所需资源、素材和控件。

图书在版编目(CIP)数据

基于稀疏表达的火焰与烟雾探测方法研究 / 蒋先刚

著. —成都:西南交通大学出版社, 2017.8

ISBN 978-7-5643-5558-6

I. ①基… II. ①蒋… III. ①火焰—探测—方法研究

②烟雾探测—方法研究 IV. ①TU998.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 159760 号

基于稀疏表达的火焰与烟雾探测方法研究

蒋先刚 / 著

责任编辑 / 黄庆斌

封面设计 / 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 成都中铁二局永经堂印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 12.5 字数 267 千

版次 2017 年 8 月第 1 版 印次 2017 年 8 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-5558-6

定价(含光盘) 78.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言

数字图像模式识别方法在工业、农业、国防、科学研究和医学等各个领域得到了更加全面的应用。稀疏表达和分类方法在火灾探测和其他图像识别领域得到了更加广泛的应用。

本书主要介绍了基于稀疏表达的火灾区域识别的基本方法和程序实现技术,以具体的火焰与烟雾探测系统的工程项目研究为展开点,介绍和实现了基于稀疏表达和统计分析的模式识别研究所涉及的新算法和新技术。全书分为 5 章,每章都以多个具体的火灾区域探测与识别软件包开发的实例来叙述其相关的稀疏表达理论和统计分析技术。

第 1 章介绍火焰与烟雾区域识别方法的基本理论和概念,并介绍了压缩感知和稀疏表达方法在火灾探测系统中的应用。本章概述了火灾识别系统中的火焰与烟雾区域的特征定义和变换方法,火焰与烟雾区域分类方法。同时介绍了基于压缩感知的火焰与烟雾区域的表达和识别方法的基本概念。

第 2 章介绍火灾区域的特征定义、变换与选择以及程序设计方法。本章介绍了火焰和烟雾的颜色特征,探讨了基于暗通道的烟雾颜色特征提取技术,同时还分析了火焰与烟雾区域的 LBP 特征、动静态 HOG 特征、帧间差特征、光流直方图特征和协方差描述子特征。本章分析了基于主元分析的特征变换、基于核主元分析的特征变换、基于 PCA 特征基的字典原子产生方法。重点讲述了基于 Relief 的特征选择方法和程序设计技术。

第 3 章介绍基于统计方法的火焰与烟雾区域的分类方法和程序设计方法。本章主要介绍基于贝叶斯决策的火焰分类方法的基本理论和程序设计方法,同时介绍了决策树和随机决策森林的火灾区域分类技术,该章还介绍了基于遗传算法的森林火灾自动识别的分类方法,同时介绍了基于类条件概率密度的火焰视频移动轨迹跟踪系统设计方法。

第 4 章介绍稀疏描述及其火焰与烟雾区域的识别。本章介绍了稀疏字典的构成方法,主要对各种字典构成和稀疏编码方法对图像去噪和重构的理论和方法进行了

分析和程序设计，对火焰特征的稀疏字典构成和火焰区域分类识别方法进行了分析和程序设计。

第 5 章介绍基于特征融合与分类器组合的火焰与烟雾区域的探测方法和程序设计方法。本章介绍了火焰与烟雾区域的搜索策略，重点介绍了基于遗传算法和改进粒子群算法的火焰与烟雾区域搜索策略。对基于协方差算子稀疏表达的火焰与烟雾区域分类方法进行了探讨。对基于 HOFHOG 可视词袋和 RF 的火灾区域探测方法和基于稀疏表达和分类的火灾区域探测方法进行了比较分析。并对基于 AdaBoost 算法和支持向量机算法的火焰与烟雾分类方法进行了识别效率分析。

书中各章之间的理论分析和程序模块具有一定的相关性和独立性。本书在章节安排上考虑了一般图书的层次性、连贯性、系统性，同时也考虑了每个软件包开发的多种技术的组合性、全面性和集成性。各章节中的许多技术是交叉引用的，书中各章既可以独立阅读和实验，也可相互贯通地理解和实践。本书着重于实践性、实用性和源码表现。通过源码理解图像模式识别的概念比通过模拟软件仿真实理解其概念更加透彻而深入，并且源码级上的理论修正和提升才是算法和应用提升的本源。本书以讲解实际工程项目设计实例的方式介绍了基于稀疏表达的图像模式识别的理论和相关的程序设计技巧。

本书可作为高等学校学生和工程软件人员的基于稀疏表达的图像模式识别研究及相关应用课程的参考资料和自学用书，书中的例子全部通过 Delphi 7 验证实现，随书所附光盘提供所介绍的所有算法和图像处理方法及系统构建的完整源程序，编程和运行所需资源、素材和控件。这些软件包及其中的源程序段可不加修改或稍加修改就能应用于非商业开发的图像处理和图像识别软件技术研究和相关工程软件包的设计中。

由于作者水平有限和研究总结的时间限制，书中介绍的相关算法、软件包及源程序还有许多功能需要进一步完善和改进，如有错误和可商讨的地方，敬请读者提出宝贵意见和建议。作者的 Email 地址为:jxg_2@tom.com。

作者

2017 年 6 月



目录

第 1 章 引 论	- 1 -
1.1 概述	- 1 -
1.2 火焰和烟雾区域的特征定义和变换方法	- 4 -
1.3 火焰和烟雾区域的分类方法	- 7 -
第 2 章 火焰与烟雾特征的定义、分析和提取	- 13 -
2.1 火焰和烟雾的颜色特征	- 13 -
2.2 火焰和烟雾区域增强和分割	- 20 -
2.3 火焰和烟雾的静态特征	- 27 -
2.4 火焰和烟雾的动态特征	- 30 -
2.5 特征数据的变换与降维的基本原理	- 34 -
2.6 特征选择与融合	- 41 -
第 3 章 基于统计方法的火焰和烟雾区域分类	- 57 -
3.1 贝叶斯决策概述	- 57 -
3.2 K 最近邻分类算法概述	- 62 -
3.3 类条件概率密度概述	- 65 -
3.4 决策树分类概述	- 72 -
3.5 随机决策森林概述	- 84 -
3.6 遗传算法概述	- 92 -
第 4 章 火焰与烟雾区域的稀疏描述和分类方法	- 122 -
4.1 基于稀疏表达的基本概念及分类方法	- 122 -
4.2 字典构成方法	- 125 -
4.3 采用各种字典和稀疏编码方法对图像去噪和重构	- 132 -
4.4 采用各种字典对火焰图像稀疏分解的残差计算	- 136 -
4.5 基于稀疏字典的火焰区域分类方法	- 137 -

第 5 章 基于特征融合和分类器组合的火灾区域的探测 - 142 -

5.1 火焰和烟雾区域搜索策略 - 142 -

5.2 基于融合特征和分类器组合的火焰和烟雾区域分类 - 150 -

参考文献 - 182 -

第1章 引 论

1.1 概述

基于视频图像的火焰和烟雾区域分类技术是火灾探测的主要研究方向。在广阔复杂的野外环境和视野遮挡严重的室内空间,仅仅依靠人力和传统火灾报警系统的监测是不能得到实时准确的判断结果的。基于视频图像技术的火灾监控是利用计算机对火焰和烟雾区域图像进行处理分析,检测监控区域是否发生火灾并作出警报决策的智能系统。视频类火灾探测系统的运行性能依赖于良好的特征提取与分类集成,这类探测系统较感烟、感光及感温型火灾监测系统具备低成本及实惠的特点,而且具有自动化、高准确率及低误判率的特点。

在科学技术迅猛发展的时代,国外各大科研机构及公司的火灾监测技术也相应迅速发展,采用各种识别模式的火灾监测器已大量出现并在不断地改进和完善,其中基于图像处理的火灾监控系统的研制是主要的发展方向之一。如 ECP 公司根据计算机视觉及图像模式识别的理论而研发的森林火灾监控系统,通过图像模式识别算法能够对 4 km 以外的森林火灾实时地进行识别并发出报警信号。Bosque 公司研发的利用红外线及普通摄像机的双波段监控的 BSDS 系统,在精确识别野外林火的同时,还能有效地区别其他干扰现象,系统识别的准确率较高。在大空间的工场火灾监测方面有 ISL 和 Magnox Electric 公司联合研发的 VSD-8 系统。该系统用于电站的火灾监测,能够用于对电站内的火灾进行实时监控,其核心模块是包含视频运动检测算法的软件,该系统采用了各种滤波器技术,同时与人工智能技术相结合,在电站火灾监测中得到了广泛应用。美国 NIST 的 Gross handler 等人进行了对隧道中烟雾视频的探测研究并提出了利用烟雾出现后的图像对比度的变化作为特征判别和分析的依据,这种探测方法的运行速度快且具有非常强的抗干扰性。日本公共高速公路公司的 Noda 通过研究隧道中正常交通运行状态与出现火焰和烟雾时的视频图像在直方图上的差异性,由火焰和烟雾存在时的监控画面图像的直方图的高亮度区域显著增加的特性而对火灾进行精确预报。

佛罗里达中心大学的沃尔特等人在 2002 年对火焰的颜色特性及其运动特性进行了专项研究分析,提出基于颜色特性及其运动特性的火焰识别方法。他们使用高斯平滑滤波处理后获取图像的直方图并由此寻找符合火灾颜色的像素点,然后利用图像腐蚀及区域填充方法对其进行修补,最后结合整体的运动特征对火灾进行识别。

德国杜伊斯堡大学王大川博士参考了沃尔特教授的研究结果，利用当时欧洲最高级的杜伊斯堡大学火灾实验室对基于视频图像的火灾探测的原理做了进一步研究，并在火焰区域的分类识别算法上有所创新，使得视频火焰图像探测技术具备了工程实施的应用条件。

国内在基于图像处理的火灾监测技术上同样进行了深入和富有成效的研究，其中包括西安交通大学、上海交通大学均对视频类监测技术进行了积极研究，并同时在工程实践中提出了一些有价值的算法和技术。由西安交通大学图像处理与识别研究所研发的自动火灾监控系统，其运用了 950~2 000 nm 波段的红外 CCD 传感器，当且仅当红外辐射处于该波段时才形成视频信号，而火灾火焰燃烧时的红外辐射主要在以上波段范围内变化，对于其他波长的红外干扰信号则被极大地甚至完全衰减。当火灾发生时，视频信号主要为火焰燃烧辐射时产生的高亮度信号，非常少量的红外辐射的干扰信号由于通常呈现为较为固定的图像模式，只要实施非常简单的分类方法就可获得较高的火焰的识别效率和识别精度。由中国科技大学火灾科学国家重点实验室研发的 LA-100 型双波段大空间早期火灾智能探测系统，在国内的一些单位得到了应用和推广。该系统利用人工神经网络技术对火灾中的火焰区域进行识别，通过在现场加装一定数量特制的感烟红外阵列器材或红外摄像机就可实现有效的火灾监控。

对疑似火焰图像的判断主要依据火焰的静态和动态视觉特征表现，其中搜索区域的颜色特征、频闪特征和结构变化特征是火焰表达的主要特征，而识别方法主要为阈值法、线性和非线性分类方法。

基于图像处理的火灾区域分割算法在国内外取得一定的研究进展。在图像处理及模式识别中，分割技术起着至关重要的作用，图像分割的好坏直接影响到其识别分类的结果。当前基于视频的森林火灾图像分割算法有多种，如背景差分法、帧差法等。背景差分法的主要思想是将当前帧火灾图像与其背景图像做减法操作来实现运动火灾区域的分割，但对于大空间森林环境下，由于运动干扰物体多样化，如光照环境变化或车灯晃动等都会被误以为发生火灾而造成误报。帧差法的主要思想是将前后两帧森林火灾图像做减法操作来提取运动火灾区域，但在森林火灾发生初期，火灾燃烧并不迅速，致使森林火灾图像相邻前后几帧图像差异不明显，故此时利用帧差法实现火焰区域的分割不能有效地达到目的。以上两种方法均需要两帧或多帧森林火灾图像，背景差分法的分割效果与背景图像的选取大有关系，因此存在极大的人为因素，而帧差法不适用于火灾发生初期时的火灾图像分割，因此采用单帧图像的分割方法能够有效克服以上不足。目前单帧图像分割算法有多种，主要包括边缘检测算法、区域生长算法、阈值分割算法等。然而这些方法在对森林火灾图像分割时基本上是对灰色火灾图像进行的，过早地丢失了火灾图像的彩色信息，从而导致很难准确地将自然光等高亮干扰物体与火灾区别。因此基于彩色信息的火灾图像分割算法被学者进一步提出，不过这些算法大

多数通过经验阈值实现,存在过多人为因素,如 W. B. Horng 等人在 HSI 彩色空间模型中,通过对 H 、 S 、 I 各分量分别采用经验阈值来提取分割森林火灾的疑似火焰区域。Tai-fang Lu 通过 HSI 颜色空间的 I 分量来对火焰区域与非火焰区域进行区分,当且仅当监控画面的背景亮度较低时,此分割算法才能取得较好的分割效果。Dengyi Zhang 等人对依据 HSV 彩色模型的火焰表达进行了分析,通过对 H 、 S 、 V 各分量分别采用经验阈值来分割提取火焰区域。然而经验阈值的选取需要通过大量的火灾图像进行分割实验来获取,且森林火灾图像在摄取时因天气、时辰和环境等不断变化,经验阈值是随变化条件调整的值,若阈值的选取不恰当将不能有效地分割出火焰区域,这将致使后续的火焰区域特征提取和识别更加困难。

2010 年钟取发在论文中通过帧间差分法等方法分割提取出疑似火焰和烟雾的运动目标,然后分析和提取火焰和烟雾的颜色特征、闪烁频率特征和运动累积量特征等,最后结合 BP 神经网络对火焰和烟雾进行分级检测。同年,方维在研究和分析了多种分割方法后,结合维纳滤波等滤波算法和运动目标的特征,采取基于模糊 C 均值聚类成功地对火焰和烟雾区域进行了分割。2011 年,武汉大学的 Jianhui Zhao 等人在研究野外森林火灾图像的白、黄和红颜色比例,颜色期望值和颜色方差等颜色分布特征,并结合图像区域的灰度共生矩阵、熵、对比度和逆差矩等纹理特征,通过支持向量机的分类算法对野外森林火灾进行了成功的探测和识别。

基于图像和视频的火灾自动探测系统具备对火灾进行早期检测的能力,比较传统的火焰探测方法是用背景减法确定火焰的动态区域,如采用颜色直方图作为特征进行分析。同时考虑到火焰和非火焰区域像素的时序变化而确定火焰区域,此外也有考虑用火焰区域的增长算法而对动态火焰区域进行估计的分析方法。Y.Hakan Habiboglu 等探索了用协方差特征探测野外火灾的方法,其协方差特征的选择仍需进一步提炼。故本书着重研究了各协方差算子的选择和对火灾探测精度的影响。

火焰和烟雾的动态属性需通过对连续的视频帧进行分析,利用图像处理的方式分析视频中物体的动态变化,根据特定的变化规律分离提取出待进一步检测的疑似火焰或者烟雾区域。对视频中单帧图像中火焰和烟雾区域的处理和分析,常常使用颜色灰度等特征,利用阈值分割、聚类分割等方法,从这样的角度上将图像进行分割,从而提取出待进一步检测区域。无论是采用何种方式进行待检测区域的提取,在提取出初步的待检测区域后,都将首先对提取出来的区域进行去噪,消除孤岛和缝隙,丢弃较小的轮廓。然后对得到的区域进行修复和填充,使之成为一个连通区域,这个连通区域就是提取出来的火焰或者烟雾疑似区域。接下来就是对疑似区域进行分析,提取出各种相关图像特征。最后就是使用合适的识别算法,对这些特征进行分析从而识别出待检测图像是否为火灾图像。

烟雾图像不具有火灾火焰那样明显的亮度及颜色特征,且易受外界气流的影响,因此它的轮廓及移动方向会有很大的不确定性。火焰特征比烟雾特征更加显著和稳定,而野外的山中雾气和山中烟雾的特征区别很小,烟雾是火灾发生的初级阶段现

象，所以对烟雾检测具有重要意义。

2000 年，Kopilovic 运用光流速度场统计分析烟雾运动的不规律性来识别烟雾。2005 年，B.Ugur Toreyin 认为烟雾的半透明性、轮廓的凸形度及其边缘周期性的闪烁等特征都是烟雾检测的重要线索。

2008 年，袁非牛提出了在每个分割块上统计分析区域的运动累积量和主运动方向来进行火灾烟雾识别。2012 年，高彦飞采用空间区域生长和模糊推理相结合的方法实现视频烟雾检测。西南交通大学的陈俊周利用小波提取烟雾区域的高频信息分析其模糊性，采用三层小波变换提取烟雾特征并用 SVM 方法进行高效率的识别。2014 年，一些中国学者在 RGB 通道和 HSI 通道上有效分割出疑似烟雾区域，并在灰度空间提取出疑似烟雾区域的高频和低频区域，使用光流等组合特征的稀疏字典和稀疏分解表达分类算法跟踪识别火灾和烟雾区域。

1.2 火焰和烟雾区域的特征定义和变换方法

1.2.1 火焰和烟雾的颜色特征

1989 年，Cappellini 提出了基于彩色视频图像的颜色特征来对火焰区域进行识别的构想。基于颜色阈值火焰探测方法是最简单和直观的火焰探测方法。首先对摄取森林火灾图像进行预处理及兴趣定位，然后通过大量实验得出火焰在 RGB 及 HSI 颜色空间中各分量间的关系，在得出颜色判断阈值的基础上进一步判断火灾发生的可能性，但要实现疑似火焰区域的精确定位比较困难，加上通过实验得出的判断阈值误差较大，因此其识别结果误判率较高。对火焰和烟雾的奇异特征进行选择提取并以此为基础将提高对火焰和烟雾区域的搜索和分类识别效率。森林火灾图像颜色特征的选择将影响到最终的监测分类结果。

如图 1.1 所示是包含野外火焰的图像以及在部分颜色分量上的特征图。RGB 彩色空间各分量都是线性相关的，特别是在自然环境下拍摄的森林图像整体偏白，每一点的红、绿、蓝成分无大差异，因此不适宜作为彩色特征进行分割和配准，而实验中采用的颜色特征一般为 HSL 和 HSV 彩色空间的各分量，这是由于这些彩色空间的颜色特征和区别更适应于人类对颜色的反映和感知。图 1.1 的第一排图像的火焰在饱和度 S 分量空间具备一定的与其他类型区域的可区分性。而图 1.1 的第二排图像的火焰在饱和度 S 分量空间基本不具备奇异性，火焰的 S 分量与泛白的天空和黑白变化强烈的铁栅栏区域的 S 分量几乎相同，特别是天空、树丛尖部和栅栏等光亮度比差比较大的区域的 S 分量又与森林火焰的 S 分量比较接近，故不宜采用 HSL 空间的各分量作为野外森林火焰识别的彩色特征。在自然状态下泛白图片中饱和度突变区域存在的渐变性必然包含与火焰或者烟雾类似的特征量度，当火焰区域的特征界线变得更加明显时只能借助于其他彩色空间的变换或者映射出自适应调节的空间，或者借助于反映整体特性的稀疏表达等的分类方法。

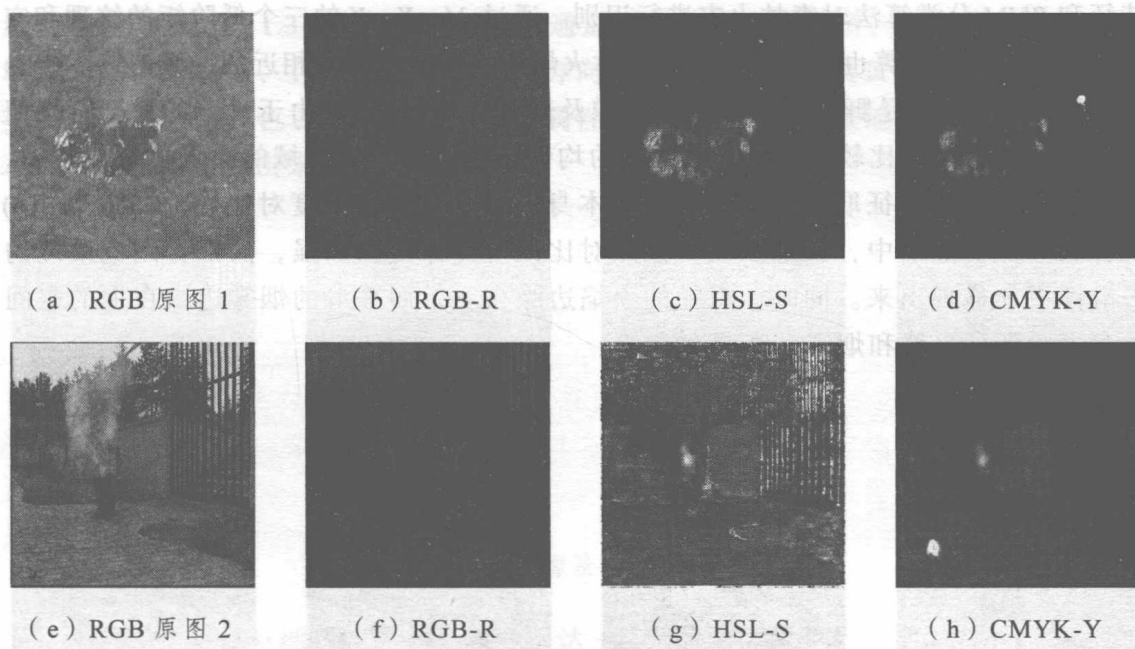


图 1.1 野外火焰及部分颜色分量特征图

在彩色打印机将彩色打印输出时，一般使用的是 CMYK 彩色空间，这是一个减性彩色空间，它的四个分量包括减性基色蓝绿色、品红色、黄色和附加黑色。品红色和黄色的分布基本上反映了火焰区域的彩色特征，附加黑色的取反就突出了火焰的亮度特征。对于一幅森林图像来说，蓝绿色分量 C 没有较好地反映森林火焰跟其他区域的区别而不被采用为颜色特征之一，而品红色 M 和黄色 Y 的分布正是森林火焰唯一的特征，其他区域几乎为零，附加黑色 K 反映了火焰区域和其他除天空以外的区域的亮度上的区别。如图 1.1 所示的第一排和第二排的 Y 分量图完全表达出火焰区域的差异性，故采用 CMYK 彩色空间中的 M 、 Y 、 K 分量作为森林火焰识别的颜色特征为优选系列，通过采用 CMYK 颜色空间更能描述火焰的特异性。

1.2.2 基于纹理和轮廓特征的火焰和烟雾识别

1993 年，Healey 决定根据颜色特征提取彩色视频图像中的火焰轮廓。1996 年，任教于美国 Florida 大学的 Simon 根据火灾视频图像的亮度信息检测火灾，实验效果取决于环境是否明亮。1999 年，Yamagishi 等将实验中采用的传统 RGB 通道模型改为 HSI 通道模型，在该模型各通道下分割出火焰区域并提取出火焰的大致轮廓外形。

2000 年，W. Phillips 统计了火焰区域各通道的分布值范围，再据此对新的火焰区域进行识别，该方法对火焰区域的分类效率比较低。2006 年，袁非牛发现视觉上火焰的轮廓变化速度快于刚性物体。为了获得图像的边缘特征，需要对图像在 x 、 y 两个方向求导，基于热扩散方程的各向异性扩散算法将在保持边缘不变的情况下使同质区域得到平滑。2011 年，一些学者结合灰度共生矩阵、均值、熵、对比度及逆差矩等纹理

特征和 SVM 分类算法对森林火灾进行识别。通过 M 、 Y 、 K 的三个低阶矩的纹理和空间分布等特性的计算也可以有效区分森林火焰和其他区域颜色相近的区域。

如图 1.2 所示是野外火焰和烟雾图像及部分边缘特征图,由于火焰的跳跃特性使得区域的边缘值都比较大,而烟雾微粒的均匀慢速飘动使得区域的边缘值都比较小,背景区域的边缘特征取决于背景物体的本身轮廓复杂性和亮度对比性。在图 1.2(d)的各向异性扩散图中,火焰区域的强烈对比性得到保留和加强,而烟雾区域纹理的平滑性更加显现出来。同时,粗糙的火焰边缘在下,而平滑的烟雾边缘在上的空间分布更验证了火焰和烟雾是客观存在的。

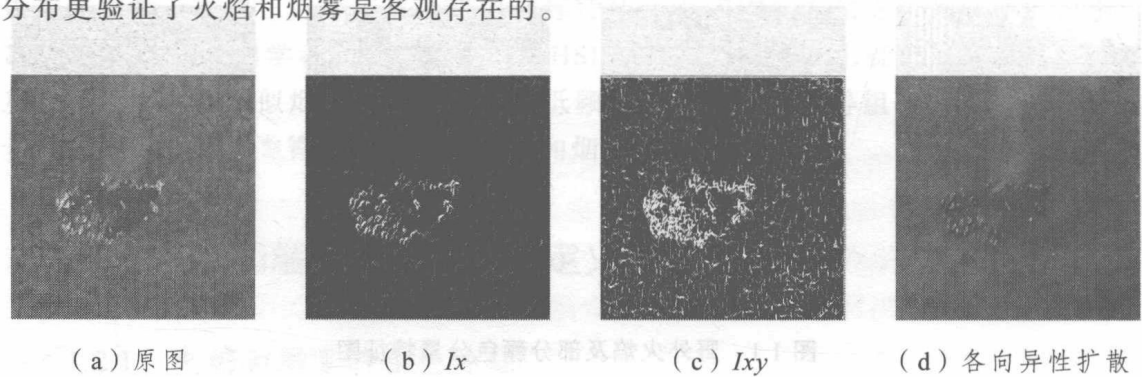


图 1.2 野外火焰和烟雾图像及部分边缘特征图

1.2.3 火焰和烟雾的动态特征

2016 年一些学者研究了火焰的振荡特性,并使用帧差法成功提取出火焰区域。火焰和烟雾的动态特征主要涉及其在时域上的变化属性。在时间序列上的火焰和烟雾区域,时空块具备明显的向上运动属性,描述这种运动趋势的方法包括帧间差分、向上运动比率 UMR (Up Motion Ratio) 和光流直方图。光流模型是利用图像序列中像素在时间域上的变化以及相邻帧之间的相关性而获得,光流场是运动场在二维图像平面上的投影。通过对序列图片中每个像素的运动速度和运动方向的动态描述就是光流场,实验中经常采用的光流场计算方法是 Hom-Schunck 光流算法。如以区域的中心为圆心将该区域划分为 12 个等分扇区,各圆弧区段光流矢量的累积分布就是光流直方图。如用仿 HSV 彩色模型表示的光流分布,随着分扇区序号的增加,以红→黄→绿→蓝→红颜色表示光流的方位变化。显然火焰和烟雾的光流分布主要在第 1~7 和第 12 圆弧区段,行走的人和刚体运动区域的光流分布主要在第 1、12 或第 6、7 圆弧区段,无运动的背景区域的光流直方图在各分扇区和总体模量上基本上为零。如图 1.3 所示是包含运动人体、火焰和烟雾的室外图像的部分动态特征分量图。图 1.3(b)的帧间差分图的值表示像素点的运动变化值,无法表示像素粒子的运动方向。图 1.3(c)是在 HSL 的通道 L 上的光流仿真图,它表明运动人体各部分区域的运动方向是多向变化的,腿部和头部是上下运动多,而躯干部分是平移运动多,总体综合是平移方向的光流模量多。火焰和烟雾区域的运动方向是比较平滑分布的,总体综合基本上是向上方向的光流模量多且平滑均匀分布,无运动的背景区域的光流模

量基本上为零。图 1.3 (d) 是在 HSV 的通道 S 上的光流仿真图，它表明只有火焰区域的光流模量较多，且火焰区域的运动方向表现为向上的仿真黄颜色。将火焰和烟雾的动态属性与颜色、纹理和其他统计属性相结合，就可有效地将它们从静态背景和运动刚体中分离出来。

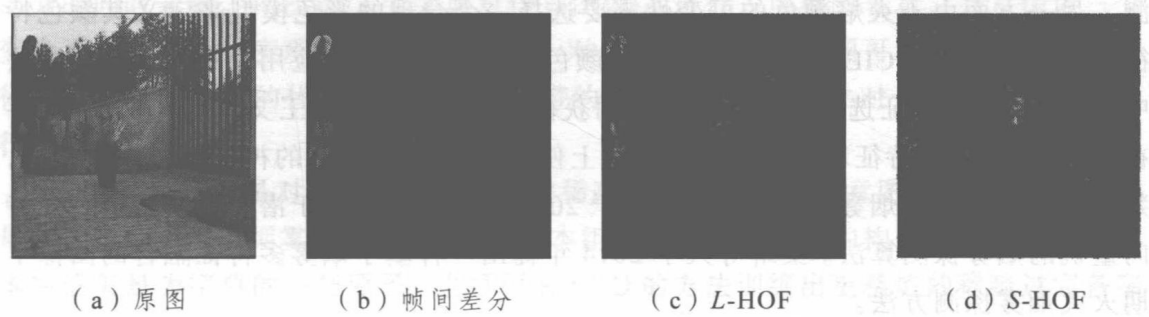


图 1.3 室外火焰图像及部分动态特征分量图

1.2.4 火焰和烟雾特征的稀疏表达

对视频图像中火焰和烟雾区域的特征进行融合是高效准确的火灾探测系统的保障。常用的图像型火焰探测算法是提取火焰在图像上表现的单个特征信息或者这些信息的组合作为分类识别的分析数据，需要大量的训练样本进行学习与参数优化，但火灾图像具有复杂性和多变性，火灾图像中的许多单个特征难以提取并用精确的数学公式描述，容易造成算法相对复杂和误判率高等缺陷。将包括所有精炼样本的特征矩阵作为分类的参照模板为高效准确的火灾探测提供了基础。

西北工业大学马宗方在“基于颜色模型和稀疏表达的图像型火焰探测”一文中实现了用稀疏表达的火焰探测方法。稀疏表达使信号能量只集中在较少的原子，具有非零系数的原子揭示了信号的主要特征与内在结构，稀疏表达分类的核心思想是将待测试信号描述为字典中原子的稀疏线性组合并由此寻找出信号的稀疏解。

1.3 火焰和烟雾区域的分类方法

1.3.1 基于统计学的火焰和烟雾区域分类方法

目前用于森林火灾识别的算法主要有直接颜色阈值法和基于线性和非线性分类的方法。这主要包括模板匹配识别法、基于贝叶斯识别法和基于 AdaBoost 的识别方法。而人工神经网络是一种以其抗噪声、自适应、自学习能力强、融合预处理和识别于一体、识别速度快等特点而受到人们青睐的识别方法。

国内外的许多学者在火焰和烟雾的融合特征提取与分类算法的研究上取得了很大的进步。B. Ugur Toreyin 提出使用隐马尔可夫模型构造火焰模型实现火灾的探测，但是初级的模型构造需要较多的时间。Y. Hakan Habiboglu 等探索了用协方差特征和

机器学习的方法探测野外火灾探测技术，但其协方差特征的选择和处理技术仍然需要进一步的提炼。胡燕等提出在 RGB 空间建立颜色模型对连续数帧火灾图像预处理，并利用帧闪特性和模糊聚类分析提取疑似目标区域，根据独立成分分析方法进行线性变换，估计出基函数描述火焰图像特征，最后用支持向量机模型实现对火灾的探测。另一方面由于火焰颜色的可变性需要选择一个合理的彩色模型来定义其颜色特征，RGB、YUV、CIE Lab、HSV、HSI 颜色特征都被成功地应用于火焰的探测方法中。Miranda 将特征选择应用于火焰探测获得了较好的效果。王文豪等人于 2014 年在颜色特征、运动特征和形状特征的基础上使用基于 AdaBoost 的神经网络进行识别，判断场景中是否有烟雾出现。刘颖等人于 2014 年提出一种基于潜在语义特征和支持向量机的烟雾探测算法。王琳等人于 2014 年提出一种基于烟雾多特征融合的图像早期火灾烟雾探测方法。

1.3.2 基于稀疏表达的火焰和烟雾区域的分类方法

2009 年，J.Wright 提出将训练集作为一个整体，寻找测试样本在训练集上的稀疏表达，并利用稀疏重构误差表达进行分类识别。火焰稀疏表达分类（Sparse Representation Classification）的出发点就是利用火焰的整体融合特征，将送检火焰区域形态表示为其他已训练火焰形态的线性组合，稀疏向量中非零系数所对应的样本类别即为训练样本中的类别。待检图像区域特征在新空间中为训练样本的稀疏线性组合，那些最大或较大系数对应的训练样本的类别就是这个待检区域的类别。考虑到分类效率，利用主成分分析方法构造火焰和疑似火焰区域的稀疏表达的特征字典，并利用 l_1 -minimiation 计算出测试样本与训练样本的最小残差以实现火焰和疑似火焰区域的分类。

针对图像稀疏分解的计算时间复杂度非常高的问题，西南交通大学的李恒建提出分块自适应图像分解算法，根据计算量和存储量与图像尺寸的关系，将大尺寸的图像转化为比较小的图像块。依据稀疏分解计算时间的复杂度与待分解图像大小之间的关系，把待分解图像分成互不相叠的小块，然后根据每个小块图像的复杂程度自适应地决定稀疏分解过程的结束。按照匹配算法的要求，需要计算图像与过完备库中所有的原子内积，一次内积需要图像块尺寸大小的 $M \times N$ 的乘法，然后将内积最大的原子作为此次匹配的结果，如果将一个大的图像块分解为小的图像块，随着图像尺寸的减小，原子库的规模将大幅度降低，相对应的搜索最佳匹配原子的范围也大幅度降低，这样就可达到减少图像稀疏分解的计算复杂度的要求。这种方法在稀疏分解重建的图像质量下降 2% 的情况下可将计算速度提高 15 倍，就有效地减小图像稀疏分解的计算的复杂度和空间复杂度，如采用遗传算法搜索出最佳原子，它在本质上是用局部最优代替全局最优，从而实现图像在过完备原子库上的分解，同样保留了分块自适应算法的正确性和快速高效性。

燕山大学的史陪陪等考虑单一字典不能包含多种结构成分的复杂图像，提出基

于三层稀疏表示的图像修复算法，利用离散平稳小波（图像的光滑稳定部分）、曲波（图像的边缘部分，各向异性尺度关系）和波原子（图像的纹理部分，比 Gabor 和 Curvelet 更能稀疏表达的纹理）稀疏来表示图像的光滑、边缘和纹理部分，采用块坐标松弛算法分解对应的稀疏优化问题实行图像的修复，实现图像的卡通部分和纹理部分的同时兼顾。用所选 3 个字典对任意图像 X 进行三层稀疏表示，并且保证三个变换系数最稀疏，实现描述问题的优化。对于 l_1 极优凸化问题可利用基追踪算法进行求解，将带约束的优化问题转化为不带约束的优化问题，并对光滑和边缘部分进行全变差调整。

如图 1.4 所示是对火焰和烟雾区域的稀疏表达和分类的示意图，整个稀疏字典由最初选择的火焰、烟雾和背景各 30 个样本组成，过完备字典的构建可以直接采用样本特征矢量为字典的一列原子，也可用 K-SVD 的方法训练出更精炼的稀疏过完备字典。由图 1.4(b)可知，基于过完备字典对火焰区域的稀疏分解系数主要集中在 1~30 列原子对应的第 15 列附近。图 1.4(c)表明，对烟雾区域的稀疏分解系数主要集中在 30~60 列原子对应的第 48 列附近，而背景类型的测试样本与样本库中第 77 列的样本特征矢量或第 77 个列原子所表达的特征矢量最为相似。

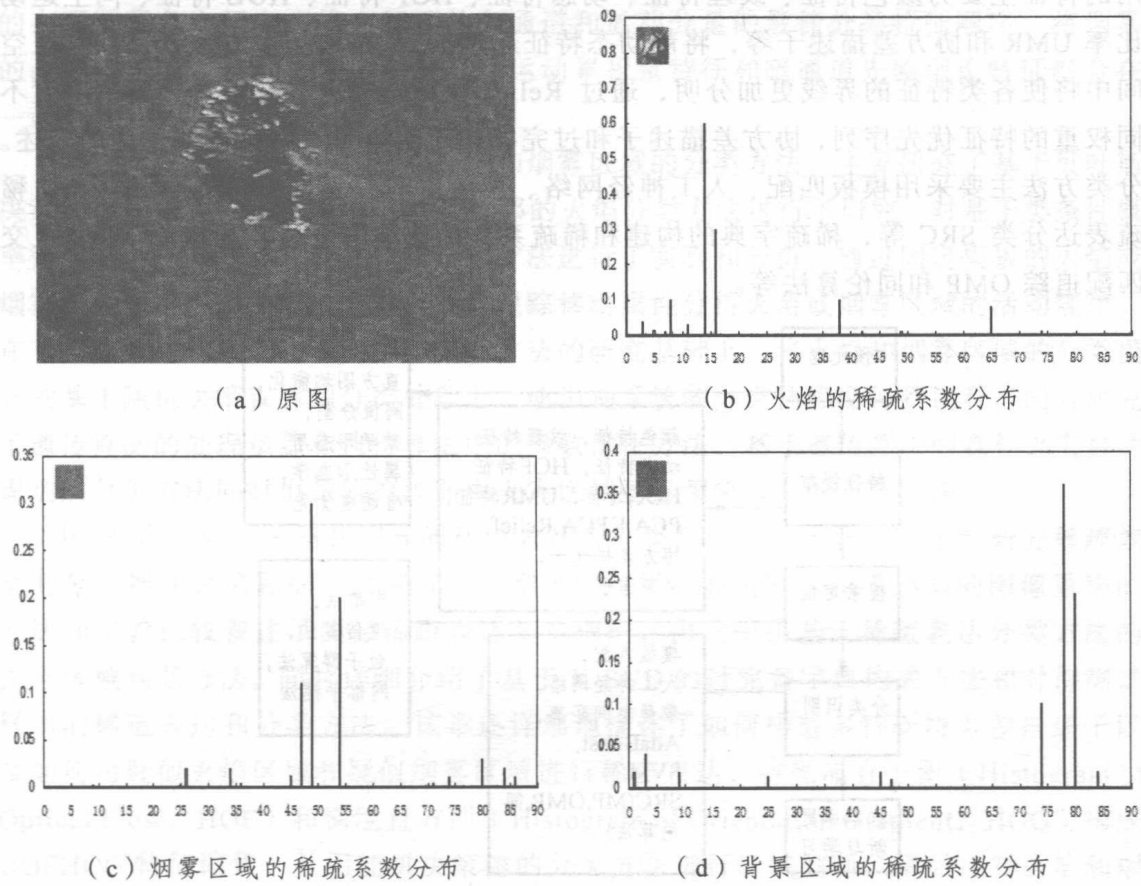


图 1.4 火焰和烟雾区域的稀疏表达和分类

基于图像和视频的火灾自动探测对火灾的早期检测具有至关重要的作用，目前

使用的比较传统的火焰探测方法是用背景减法确定火和烟雾的动态区域并对火焰颜色分析得到火焰区域。如采用颜色直方图用作特征分析，同时考虑到火焰和非火焰区域像素的时序变化确定火焰区域，此外也有考虑用火焰区域的增长算法对动态火焰区域进行估计的分析方法。Y. Hakan Habiboglu 等探索了用协方差特征探测野外火灾的方法，其协方差特征的选择仍需进一步提炼。

火焰和烟雾图像在获取的时候无可避免地会受到摄像环境的光照强度和烟雾等干扰因素的影响，所得图像一般都伴随着或多或少的噪声，或者包含和火焰区域与烟雾区域相似的背景物体。为了后续能够有效地对火焰与烟雾区域进行特征提取，并按特定的搜索策略进行火焰与烟雾区域的分类识别，输入的火焰和烟雾图像一般都需要先进行适当的预处理，以去除噪声和剔除跟火焰与烟雾区域相似的背景物，然后增强和分割疑似火焰与烟雾区域，直接排除不可能为火焰或烟雾的区域。良好的火焰与烟雾区域的分割算法，既能完全保留所有的火焰与烟雾区域，又能够尽可能地排除非火焰区域与非烟雾区域。

本研究项目对视频图像中的火焰与烟雾区域的探测采用如图 1.5 所示的流程，采用的特征主要为颜色特征、纹理特征、动态特征、HOF 特征、HOG 特征、向上运动比率 UMR 和协方差描述子等，将静态特征通过 PCA 和 KPCA 方法变换到特征空间中将使各类特征的界线更加分明，通过 Relief 特征选择方法获得对分类精确度不同权重的特征优先序列，协方差描述子和过完备稀疏字典是对融合特征最佳的表述。分类方法主要采用模板匹配、人工神经网络、黎曼空间距离、AdaBoost、SVM、稀疏表达分类 SRC 等，稀疏字典的构建和稀疏系数的获取可采用匹配追踪 MP、正交匹配追踪 OMP 和同伦算法等。

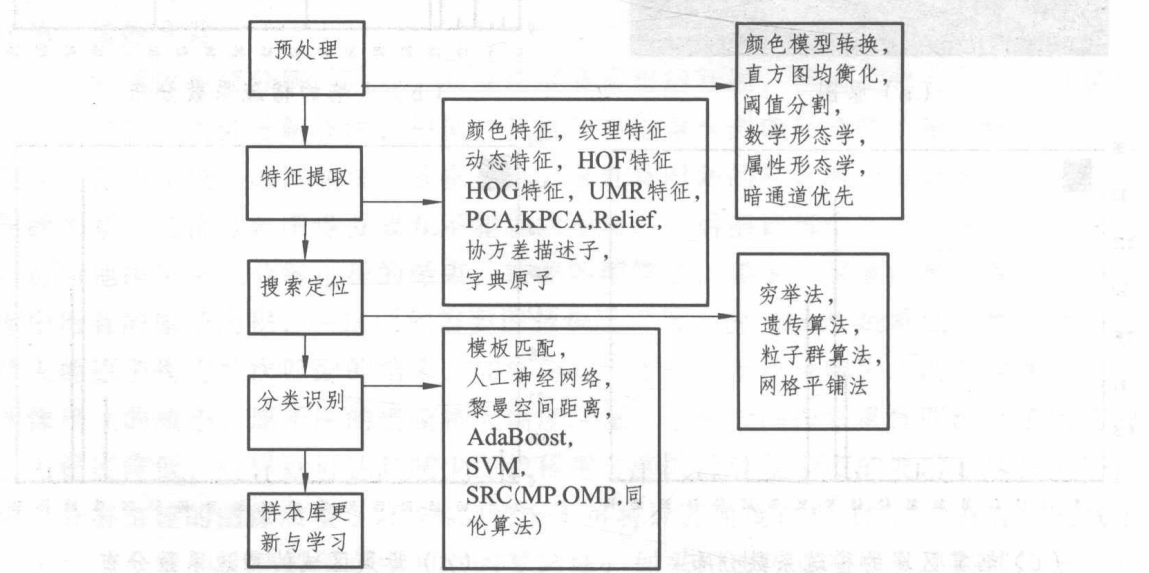


图 1.5 基于视频图像的火焰与烟雾区域探测流程

本书围绕火焰和烟雾的奇异特征定义与分类算法研究组织内容分为 5 个章节。