

基于计算机视觉的视频火焰检测技术

杨俊 王润生

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院 ATR 国家重点实验室,长沙 410073)

摘要 视频火焰检测是计算机视觉中一项理论意义与实际价值兼备的重要课题,对烟火事故的消防安全具有重要的实际意义。随着火焰视觉特征模型的不断完善,视频火焰检测方法的研究得到发展。本文综述了视频火焰检测的几个主要方面,包括其相对传统检测器的优势、火焰特性的分类与描述、代表性的检测方法、典型的系统方案及其发展趋势等;探讨了其中涉及的系统通用性、实时性、智能性、评测标准和多传感器融合等关键问题;还介绍了一种新的基于层次注意的视频火焰检测模型及多源感知信息的显著性融合框架,尝试借助显著性特征描述和低冗余计算来提升烟火监测系统的效率和主动性。

关键词 计算视觉 火焰 实时警报 视频图像检测 视觉显著性

中图法分类号:TP391.4 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)07-1222-13

A Survey on Computer Vision Based Video Fire Detection

YANG Jun, WANG Run-sheng

(ATR National Laboratory, School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract Video Fire Detection (VFD) is one of the most active research topics being valuable for both theoretical and practical research in computer vision, especially has a wide spectrum of promising applications in video surveillance for early fire alarms in public security. As the improvement on visual feature model of fire, many VFD systems have been developed. In this paper, some main issues on VFD are reviewed, including its advantages to traditional detectors, the classification and description for visual fire features, the representative algorithms and systems, the future trends, and so on. Then some key problems on the compatibility, real-time efficiency, intelligence, performance evaluation and multi sensor fusion for VFD are discussed. In addition, a novel VFD model based on hierarchical attention and a saliency fusion framework based on multi sensors are proposed for boosting the efficiency and activity of fire surveillance by using salient feature representation and low computational redundancy.

Keywords computer vision, fire/flame, real-time alarm, video fire detection (VFD), visual attention (VA)

1 引言

火灾时刻都在对社会经济、自然生态和人身财产的安全构成着严重威胁。为尽早预防和避免火灾事故的突发和蔓延,人们已经利用多种传感器开发出众多烟火监测系统。常规的监测器主要针对烟雾、热和辐射3类对象^[1],多数采用的都是针对颗粒、温度、空气湿度、透明度、烟雾等物理采

样的点式传感器,也有传统的紫外或红外光谱测量仪^[2]。但这些近距传感器和光电设备在操作难度、可靠性、检测效率、场地适用性、成本和通用性等方面都存在局限性。近年来,视频监视设备的日益普及与视频图像处理技术的发展极大地推动了视频火焰检测(video fire detection, VFD)系统的研究和应用。目前,视频火焰检测系统的主要应用于火灾报警和消防任务,监测对象主要是正在燃烧的可见火焰或燃烧产生的烟雾。前者是燃烧

收稿日期:2006-12-01;改回日期:2007-03-08

第一作者简介:杨俊(1976~),男,2007年于国防科技大学电子科学与工程学院获博士学位。主要研究方向为图像分析、理解与信息融合,目标识别。E-mail: yyangjun1234@vip.sina.com

的必然产物,是发光发热的气化现象;后者则是燃烧的副产品,是氧化产生的漂浮颗粒集合体。从特征角度讲,火焰相对于烟雾具有更加显著和稳定的可见特征,所以,烟雾检测一般作为辅助手段支持对火焰真实性的认证。为此,本文主要研究基于火焰特征分析的视频检测技术,暂不涉及烟雾检测方法。

2 VFD 性能特点

2.1 常规检测器

与燃烧有关的可感知信息可分为直接的和间接的两类。直接信息指火焰现象本身,主要是火焰的亮度、颜色、形状和变化等可见特性,也包括燃烧产生的热(温度)和紫外、红外等不可见辐射特性;间接信息主要指燃烧中燃料与空气发生剧烈氧化而生成的附属物(如烟雾),或燃烧促使周围环境(如附近物体表面的温度、色度和光强,周围空气的温度、湿度和透明度等)发生的变化。传统的烟火监测器所利用的触发信号主要源于对间接信息的近距或接触性的点式采样,其监测效能不可避免地存在一些局限性:

(1)适用空间有限 点采样检测器一般需要安置在接近火源的较小的空间范围内,监测场所一般是相对封闭的室内环境(信息不易扩散或被稀释),不适用于开阔的室外空间或大面积场所;

(2)可靠性较弱 间接采样不能最直接最真实地获取火焰本身的存在线索,容易受到能量扩散或相似目标(如阳光,雾)与环境变化(如光照)的干扰,可靠性需要单纯稳定的条件支持;

(3)缺失过程信息 点采样器一般不能记录和包涵火焰发生及发展的时空过程和状态信息,不利于对事件的后期回放、分析和检索;

(4)快反能力有限 颗粒度、温度、湿度等采样信息只有在燃烧发生后并发展到一定程度或空间范围时才能触发点式感应器而生成报警信号,在反应时间上存在一定的物理延迟;

(5)成本、通用和扩展能力 点传感器的单价可能较低,但形成规模的系统需要大量的设备单元,光电仪器的单价就很贵,安装和维护的成本也较高;同时,操作的专业性也制约着系统通用性,软件支持力较弱也不利于系统升级和扩展。

2.2 VFD 技术优势

近年来,光电设备的发展促进了光电烟火监

测系统的开发,远红外光谱仪和红外摄像机可以检测到火焰核心的位置及其热量变化,但对场地和监测距离的选择,相似颜色和光照(特别是阳光)变化等比较敏感,且费用昂贵,可操作性不强,难以实时。而对于视觉信息,人们可以直接利用标准的视频相机实现场景图像的实时采集和在线监视,并在燃烧生成的热和烟等发展到足以触发常规检测器之前,就可以通过计算机视觉的处理方法尽早地探测潜在的火源。近年来,随着各种监视相机在室内外公共场所的普及,VFD 备受关注,VFD 系统能提供许多常规检测器不具备的优势和特点:

(1)直观主动的探测能力 基于摄像机平台的 VFD 系统不需接触性的采样或变化检测就可触发报警,通过相机人为或自动地远程监视燃烧的发生和发展,具有主动可控的遥测能力;

(2)空间场所的普适性 VFD 系统基本不存在场地条件的限制,可用在礼堂、隧道、正厅、机场、停车场等户外空间或开阔场所,同时,通过获取丰富的可视信息和先进的图像分析手段可以应付场景光照、空气流动和监测距离的一般变化,并抑制其他非燃烧烟雾等现象的干扰;

(3)远程实时的在线快速反应与离线分析能力 集相机、闭路电视、有/无线通信网络、Internet 连接、海量存储器、计算处理机、显示终端和视频分析软件于一体的 VFD 系统不仅具备实时报警和远程监视能力,还能在线地获知燃烧发生的具体位置(辐射方法只能探知邻近范围)和发展过程,并可以对入库的视频记录进行离线回访和检索,从而支持事后调查和分析;

(4)廉价、通用和可扩展能力的兼备 视频监视系统在各种公共或私人场所的普及和兼容为 VFD 系统的成本降低和通用性提供了良好条件,模块化设计也使系统的某些软/硬件单元的局部维护和更新,及整体性能的升级和扩展变得方便;

(5)对其他传感器的融合性支持 VFD 系统不仅可以引入烟雾等其他可见信息,也可以融合热、近红外/紫外、温度、湿度、透明度,甚至声音等非可视信息来增强视觉信息的可靠度。相反,在特定条件下,借助视频图像检测(VID)技术也可以为已有的其他类型检测系统提供可视化支持。

另外,除消防安全外,视频火焰检测还有可用于影视暴力分级、视频检索与摘要、林火遥感、战场火力侦查、停火协议监督等常规检测器难以完成的应用任务。

2.3 视频监控智能化

在智能分析、数字存储和网络传输等先进的计算机技术方面,VFD 系统也正迅速显现出其优越性。一方面,一般的视频监视系统虽都支持视频的采集、存储和分发等功能,但对突发事件的检测仍主要由操作人员目视完成。而肉眼监视是高强度的作业,不仅要维持比日常观察强度高得多的长时注意力,还要能对突发事件做出快速有效(低误检率)的行为反应,对于有限的人力来讲这无疑是非常苛刻的甚至过分的^[3]。研究表明^[4]:“视频监视中采用人眼监测,即使是专业人员也不可能构成真正有效的安全系统。只要专注于屏幕超过 20 分钟,绝大多数人的注意力都会降低至监视任务水平以下,不仅会产生疲劳和厌烦感,还会由于场景单一而产生困倦”。另一方面,常规系统获取的信息级别一般较低,缺少早期反应和智能分析力,而智能监视系统(S³)则志在将安全级别从“侦查”推向“预警”,除了强于人工监视系统的预警能力(对可疑事件的持续监测和实时报警)外,还具有关系识别能力(视频数据库的事件检索与分析)、主动监控能力(通过与智能相机的远程交互来操控和管理现场的监视)和态势感知能力(对受监视空间中多目标事件的定位、认证、分析,及其活动关联的综合感知)。

3 火焰特征分析

燃烧的火(fire)是一种发热发光,并伴有火焰(flame)迅速的和持续的氧化现象,具有辐射、空气、视觉和声音等多方面的特征(如图 1)。火焰是燃着的气体或蒸气的发热、发光部分,本文将分类讨论视频火焰检测中可能利用的可见的火焰视觉特征(如图 2)。不难看出,火焰视觉特征有静态与动态之分,两者都比较显著,也都具有复杂多样性,但它们又共存互补,存在紧密的相关性。这对火焰特性的分析与建模构成了不少困难,必须对两者综合考虑,才能全面有效地鉴别火燃事件。

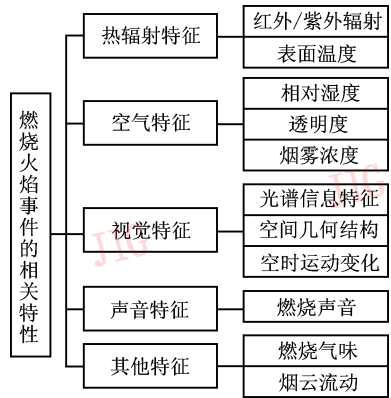


图 1 燃烧火焰事件的相关特征分类

Fig. 1 Features classification for burning fire

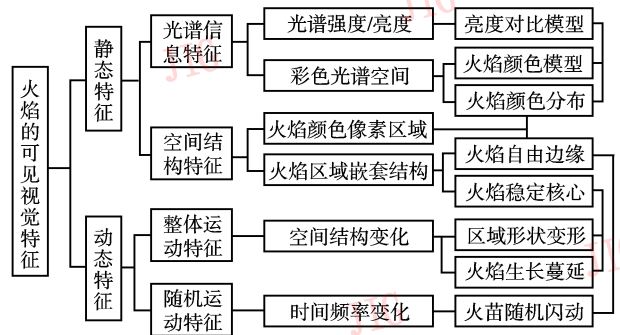


图 2 火焰的可视特征的分类和描述

Fig. 2 Classification and description for visual fire/flame features

3.1 静态特征

火焰的静态特征主要体现在光谱特性(突出亮度和特殊色度)和区域结构(具有火焰区域的内部结构和外围轮廓)两方面:(1)火焰在一般背景下会呈现出明显的高亮度,这是灰度图像中检测火焰的重要线索。独特的颜色也是火焰最显著的光谱特征,火焰颜色不仅在不同彩色空间(如 RGB(图 3(a))、HSV(图 3(b))或 HIS(图 3(c)))中具有特定的分布模型,在火焰区域内部还具有持续的层次性变化。在彩色图像中,高温的火焰内核会呈现亮白色,由内向外随着温度的降低颜色会由黄变橙、变红(如图 4(a))。这说明温度相对低的火光颜色饱和度较高,高温下饱和度较低,且白天或光照下的火焰颜色饱和度较夜晚或无光照环境中更强。灰度图像中,核心部分一般也明显比边缘亮。(2)火焰区域一般呈现出由内而外的随光谱变化的环形嵌套结构。同时,燃烧使火焰区域始终处于持续的变化中,也决定了其结构的复杂性。首先,不同于刚性结构,云状的火焰区域的形状、尺度和方向都在随时变化。其次,火焰内部

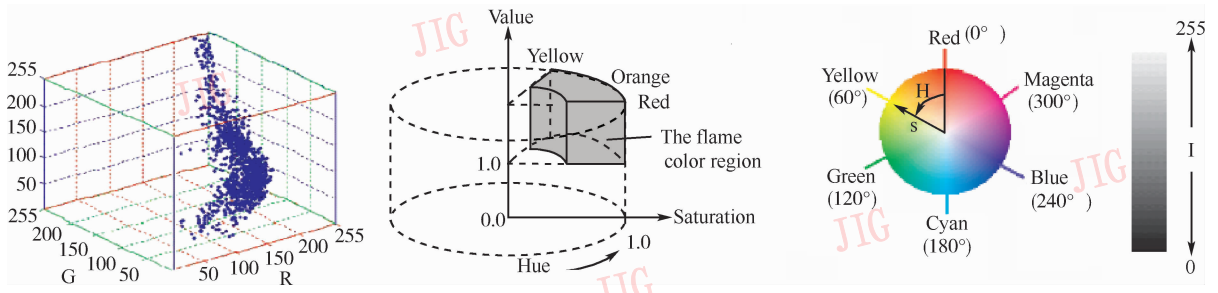


图 3 不同彩色空间中火焰颜色动态范围

Fig. 3 Fire-like color models in different color spaces

的颜色分布也依温度不同而呈环状变化。一般火焰具有一个或多个较稳定的高温核,离核越远的火焰外围的稳定性越差,但对于全局场景而然,火焰区域的整体在一定时段内是相对静止的。

3.2 动态特征

相对于静态特征,火焰的动态特征更显著也更复杂(如图 4(b)):一方面是反映燃烧状态的火焰区域的整体运动,如因火势变化或风动驱使形成的火焰生长、移动或变形;另一方面是由燃烧中的气化和空气湍流导致火焰外围(火苗)的无序闪动,是持续高频的随机变化。空间层次在动态变化中也有所体现,焰心运动比外围抖动要稳定,而火焰生长相对于火苗闪动则低频而有向。不同于一般目标的刚体运动或柔性扭曲,火焰运动具有随机性、层次性和时频性。火焰的闪动具有与材料和燃器无关的动态频率范围(10Hz 左右)^[5, 6],即轮廓、色度或亮度都具有 0.5Hz 到 20Hz 之间的变化频率是可能存在火焰的重要信号。在没有强空气扰动的前提下,闪动主要表现在火苗部分,焰核的运动仍比较稳定。这种高频的随机运动与较低频的区域运动的共存反映出火焰动态特性的层次映射关系(图 2)。

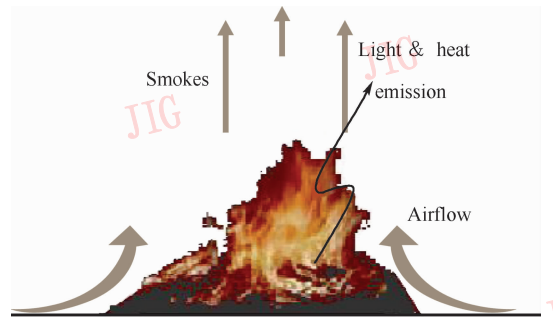


图 4 火焰现象的示意图

Fig. 4 Illustrates of burning flame

4 VFD 方法研究

VFD 属于一种针对随机视觉现象中的特殊光谱区域,及其形状演化的建模和识别问题。近年来,VFD 方法的研究逐渐得到重视,并取得进展^[7-9]。

4.1 已有方法

VFD 方法研究的主要驱动力是视频监视系统的普及应用和机器视觉技术的日臻成熟。但出于实用和商业利益的考虑,目前介绍相关算法的专题文献还很少。已有的方法都是基于火焰特征的分析 and 建模展开的,归纳出图 5 所示的 VFD 流程框架,依

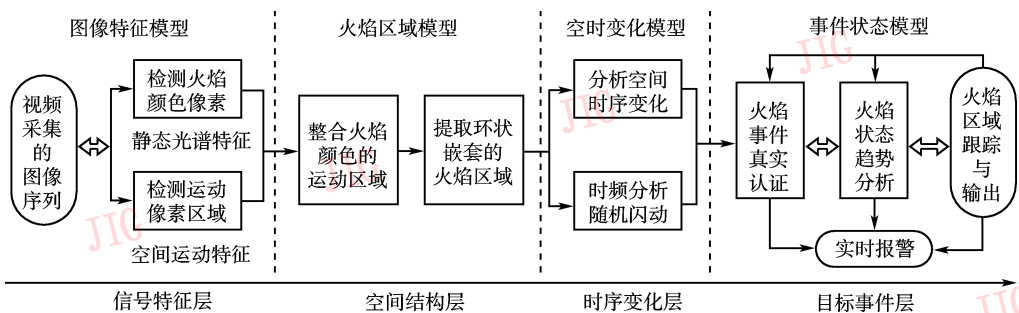


图 5 一种常规的层次化视频火焰检测 (VFD) 框架

Fig. 5 A hierarchical general framework for VFD

据火焰特征的层级描述,整个框架分信号特征、空间结构、时序变化和目標事件 4 个层次,这是知识驱动的检测流程,从低级到高级的各层处理都需要关于火焰的上下文支持,如颜色模型、区域模型、运动模型和时频状态模型等。

(1) 基于像素颜色的 VFD 方法 早期 VFD 方法主要依据的是火焰的颜色和亮度。首先出现的是灰度图像处理方法,包括单固定黑白相机的^[10]和多黑白相机的^[11]。这类方法通常利用对比法或帧差法从背景中提取较亮的火焰,但性能受监测距离的影响比较严重。Plumb 等人通过黑白相机监测不同位置的点传感器的亮度变化,利用热能转移流模型反向求解火源的位置、尺寸和强度^[12]。该方法虽能较精确地检测火焰位置,但需要热传感器和预设采样点位置。可见,用黑白相机检测火焰的适用性和可靠性明显不足。基于火焰颜色的彩色图像处理方法可以明显抑制亮度条件(如背景光照)变化所导致的误检。为提高夜间检测能力,Cappellini 等人提出一种利用彩色视频从烟雾中识别火焰的方法^[13],Healey 和 Foo 等人利用了高速相机采集视频,结合颜色与运动信息来区分火焰区域^[14,15],但相机必须固定,且需要依据监视距离人为设置视窗,复杂的统计计算也使其难以实时。Yamagishi 等人利用 HSV 空间的火焰颜色模型来削弱环境光、风动、火焰尺寸和探测距离等方面的影响,依据火焰颜色区域的色调和饱和度的连续变化来分割火焰区域,再用边缘算子和极坐标变换提取区域轮廓,用傅里叶变换提取轮廓的频域特征,通过神经网络区分真实火焰^[16]。Phillips 面向更多的常规场景,不需配置静态相机,支持实时监测^[17]。固定的彩色模型可能忽略材料不同所导致的颜色异常,所以,该方法借助机器学习方法来对火焰颜色建模,通过训练人工检测的火焰样本得到火焰颜色的查找表,并生成彩色直方图,以提高模型的可靠性和对场景适应力,但其计算复杂度较高,难以达到实时效率。为此,Horng 等人选择了接近人类视觉感知的 HSI 空间模型来描述火焰颜色,利用分解法提取火焰颜色区域,通过序列差分 and 颜色掩模滤除具有火焰颜色的其他运动目标或火光反射区^[18]。然而,以上方法都集中于火焰的存在性,不能提供燃烧的状态和过程信息(面对火灾的经济损失,这些信息往往至关重要),需要人工估计误检率。Chen 等人采用了一种二阶决策机制,先用颜色检测火焰的存在,再判

断火焰的蔓延或消滅状态^[19]。该方法引入了 HSI 模型,用 R 通道的亮度和饱和度判断火焰像素的真实性,通过比较 RGB 之间亮度分量的比例来估计烟雾的存在,再利用运动特征反复校验燃烧的状态变化趋势。

(2) 基于火焰颜色运动区域的 VFD 方法 不管是亮度还是颜色,仅靠静态光谱特征不足以全面描述和鉴别火焰。相对于真实火焰复杂多变的嵌套结构,单用火焰颜色的像素集合来描述火焰区域过于简陋,甚至于像素颜色的层次变化也不足以反映火焰复杂的时变性。所以,人们开始将颜色、结构和运动特征结合起来改进火焰区域模型及其检测算法。Phillips 等人综合了火焰像素的颜色及其时变特性,并引入了火焰区域的形状识别^[17]。静态形状分析的研究已经很多^[20],而火焰区域的形状检测与变形目标的形状建模和识别更相关^[21,22],但这类方法在识别前要先完成检测,而火焰的持续变化取决于燃料或空气流动等周围因素,其随机性很可能导致形状识别的失败。所以,常规的形状分析方法很难有效描述火焰的形状及其演化。Phillips 等人对火焰区域的建模包括:(1)与周围环境形成强烈对比;(2)具有环状嵌套的颜色分布结构;(3)运动中仍保持相对稳定的宏观形状(与燃料形状相关),而边缘轮廓却处于不断的快速变化中。该方法用帧间像素的亮度差分来计算火焰的连续闪动,为削弱全局运动的误导,还要减去非火焰颜色的像素微分。Horng 则以帧间火焰颜色区域的掩模差来定义火焰的时序运动^[18],Chen 等人认为火焰区域的动态特征包括火苗闪动、区域变形、整体蔓延和红外抖动等,可利用像素变化判别火焰的闪动,以面积变化检测火焰的生长^[23],虽效率较高,但模型过于简单,可靠性差。Fastcom 开始利用 FFT 的峰值来描述和检测时变的火焰边缘像素^[24];Liu 等人则先用光谱和结构模型来提取火焰的候选区域,并用傅里叶系数描述这些区域的边缘轮廓,然后通过帧间前向估计获得各区域的自回归(AR)模型参数,最后以傅里叶系数和 AR 模型参数为特征对火焰区域进行分类^[25]。其中,候选区的检测只涉及光谱和结构特征,选择疑似焰核的高亮部分作为种子,沿梯度方向生长,将火焰颜色概率(HSV 高斯混合模型^[26])较高的邻域像素引入区域,再用阈值校验区域边缘上具有内部颜色的像素比例,滤除接近纯色的区域。形状检测中,Liu 等人构建了图6(a)所示环状嵌套的火焰区域结

构模型,以 1D 傅里叶系数描述其区域的 2D 轮廓,再用 AR 模型(可以描述不同频率等级的时序变化)描述火焰边缘运动。国内,袁宏永等人也讨论了基于图像的火焰检测技术^[27-29],但漏警或误警较高,鲁棒性和适应性较差。袁非牛等人提出一种基于规格化傅里叶描述子的轮廓波动距离模型,用来度量火焰的时空闪烁特征^[30]。但这些对火焰形状变化的频域描述存在缺陷:(1)火焰闪动不属于纯正弦周期运动,很难用 FFT 检测其时序峰值;(2)傅里叶

变换不能承载时间信息,必须利用时窗检测,时窗尺寸的选择显得重要而困难,过长过短都可能失去周期或峰值。所以,人们不得不从小波变换和随机过程理论中寻求更好的关于火焰时空变化的分析办法。

(3)基于时频与状态分析的 VFD 方法 一方面,燃烧的火焰与具有燃料和燃具无关的高频特性(图7(b))。通过分析这种高频的时序变化能有效地减少误检。Töreyn 等人在提取运动的火焰颜色

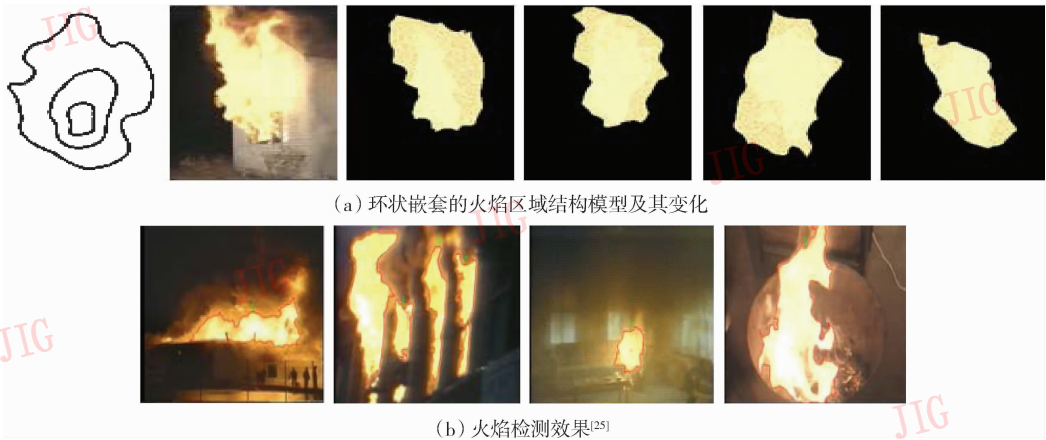


图 6 火焰区域结构特征示意图

Fig. 6 Instances for structural feature of fire regions

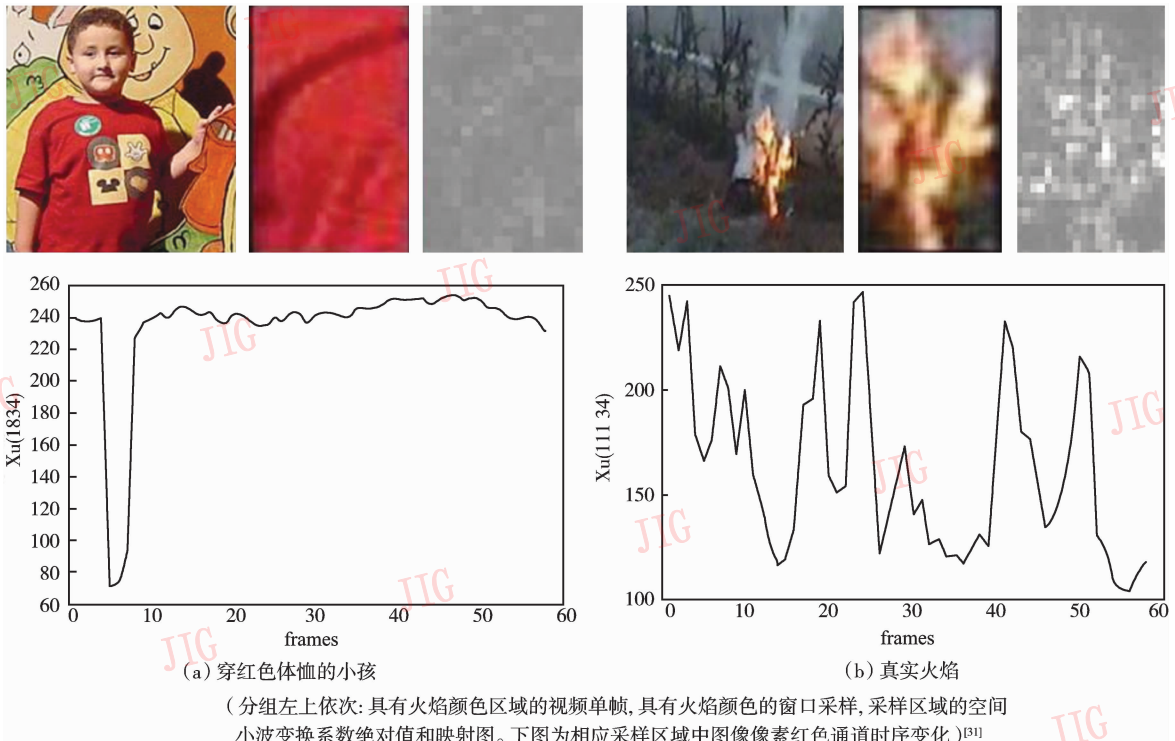


图 7 火焰颜色频谱特性比较

Fig. 7 Compared results about the frequency feature in fire-like color pixels

区域的基础上,利用小波变换来分析该区域运动的时频特性,并估计火苗闪动的存在^[31]。该小波分析与文献[1]中的时间模板和文献[8]中的运动重现存在一定相似性。作为有效的时频分析工具,小波可以探测整个频带而不失时间信息^[32,33],小波变换可以利用子带分解滤波器组来完成而不需任何批处理。另外,混乱的高频活动不仅存在于火焰边缘也存在于火焰内部,Töreyin 等人不仅用时间小波系数的零界点来判定火焰边缘颜色的高频时变,还利用空间小波来分析火焰内部空间的颜色变化(图 8(a)、(b))。Fastcom 虽没有利用颜色时变性,却利用了空间小波系数的能量变化来检测火焰内部的时频运动^[24],因为其他具有火焰颜色的运动目标的内部颜色一般没有变化,也就不存在小波系数幅度的变化(图 7(a))。Dedeoglu 等人还引入了目标边缘的周期性分析来减少相似颜色的运动目标的干扰^[34]。

另一方面,真实火焰的闪动频率不是连续一致的,而可以认为是一种随机过程事件。Markov 模型已被广泛用于语音识别系统,最近也被用到计算机

视觉中。基于 Markov 模型对火焰闪动过程进行建模比频域分析法更具鲁棒性。如果目标的轮廓呈现快速的时变就表明场景中很可能存在火焰,这种时序行为可直接体现在被考查像素颜色分量的变化中。Markov 模型可以描述彩色空间中像素位置的相对状态,通过离线地训练火焰像素可以模拟火焰的空时特性,当然也要对非火焰像素进行学习,以区别真实火焰和其他火焰颜色的运动目标。同时,Markov 模型还可以描述火焰颜色分布的空间变化。火焰区域的时序生长在空间上表现为一种接近周期性变化的运动,却不能被周期性检测。沿着贯穿火焰区域的线,彩色空间中像素位置的变化接近于周期内所观察到火焰像素的位置变化,Markov 模型可以获取相关火焰边缘的时序变化的线索。为此,Töreyin 等人采用了一种三状态 Markov 模型来时序训练火焰和非火焰像素,像素状态之间的转移概率在火焰边缘的预测周期时间内被离线估计^[35]。训练中不仅学习周期内火焰边缘的闪动方式,还可以拟合出火焰区域的一些空间特性参数(图 8(c))。

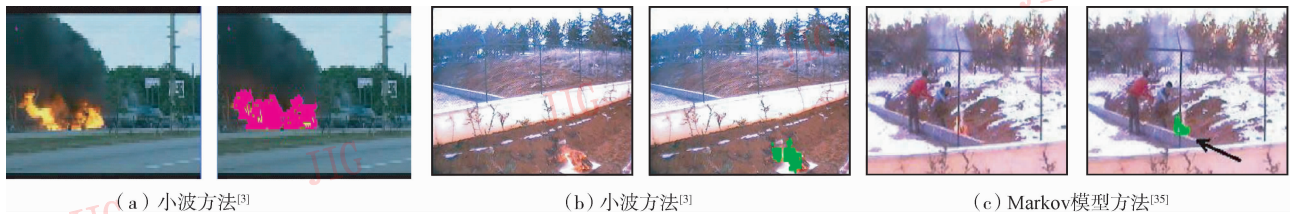


图 8 视频火焰检测实验结果图例

Fig. 8 Video fire detecting test resulted instances

4.2 典型系统

目前国内外已投入实用的监测产品中,单纯的 VID 系统还很少,多数是对原有常规系统的可视化改造。随着计算视觉技术的优越性日益突现,越来越多的烟火监测器向以视频监视为平台,以机器视觉为核心,融合多源探测信息,智能化远程监控与早期预警相结合的综合系统发展。从图 9 不难了解基本的火焰监测 VID 系统一般包括视频采集、火燃检测与决策、实时报警、信息分析和鉴定、监视显示终端和控制工作站等组成单元。下面简单介绍 3 种比较典型的实际监测系统及其 VID 解决方案:

(1) SigniFireTM 系统 (<http://www.axonx.com>) 是 axonx LLC 公司开发的烟火和入侵事件早期安全监测系统。主要应用在车站/港口、博物馆/图书馆、

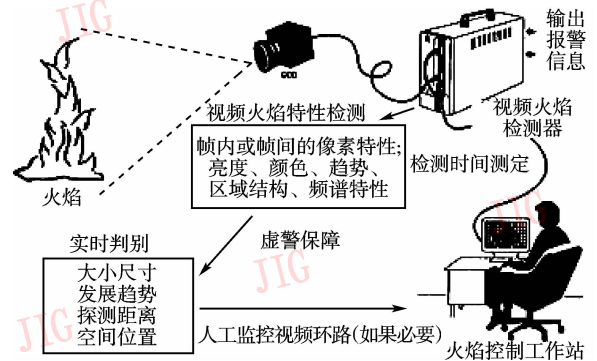


图 9 视频火焰检测(VFD)系统组成示意图

Fig. 9 Diagram for video fire detection (VFD) system

数据/电信中心、发电场、化工厂、交通枢纽、高危材料库、机关、医院和学校等公共场所或企业机构的建筑场所。系统基于先进的 FSM-8DVR 视频平台构

建,采用标准 CCTV 相机,有 8 个模拟视频通道和覆盖全局的多单元 IP 网络,还能通过 Internet 实时传送警报,实现远程监视和事件回放。系统中的计算机单元配置了 3.0GHz Pentium® 4 处理器,HT 512MB 内存,400GB 硬盘;采集输出的视频分辨率达到 320 × 240;可利用 TCP/IP 输出监测事件;监测范围(30°倾角)可覆盖距离 200in 内的 3 × 3in² 面积的火焰;对突发火焰的反应时间可达到 4s,运动目标为 1s 内;可由用户定义监测事件,如监测区域和时间表等,单个区域可对应多个时间表,重复事件以天/周/月/年为周期,支持超过 21 整天的单事件记录。

SigniFire™ 系统支持的监测事件包括可见火焰、超视野火焰、生成烟雾或环境烟雾,以及运动目标等(图 10、图 11);VFD 算法中,用亮核和闪动环冠的火焰特征模式监测可见火焰;利用反映在邻近物体表面上的火光闪动元素检测不可见火焰。SigniFire™ 系统是目前世界上最先进的烟火 VID 系统之一。2003 ~ 2004 年美国海军的一项测试表明。该系统的检测率与离子烟检测器相当,却比光学烟检测器等其他多种检测器反映更快,且能检测到更多种火焰事件,包括无烟闷燃^[36]。

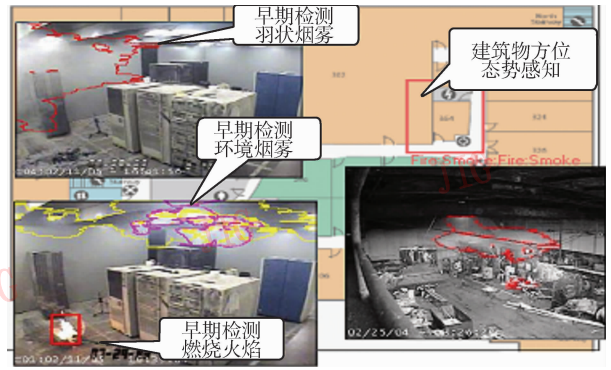


图 10 SigniFire™ 系统功能示意图

Fig. 10 Sketch for functions of SigniFire™ system

(2) Volume Sensor (VS) 系统 (<http://www.haifire.com>) 在 VFD 系统基础上融合了多元信息的综合监测系统,不仅检测烟火和运动,还支持对气液泄漏、管道破裂或淹溢等意外事故的实时感知和早期报警。系统借助计算视觉、机器学习、光谱分析、声学感知和模式识别等技术立体化地远程监测烟火和突溢事件。其优势包括:多类事件的检测能力,多源传感器(视频、声音、近红外、紫外/红外等)的融合决策(图 12(a)),全面的空间覆盖率,对闷燃的快反能力,对突发事件的可视化鉴别,相同硬件的多功能集成,软件升级能力和低廉的安装维护成本等。

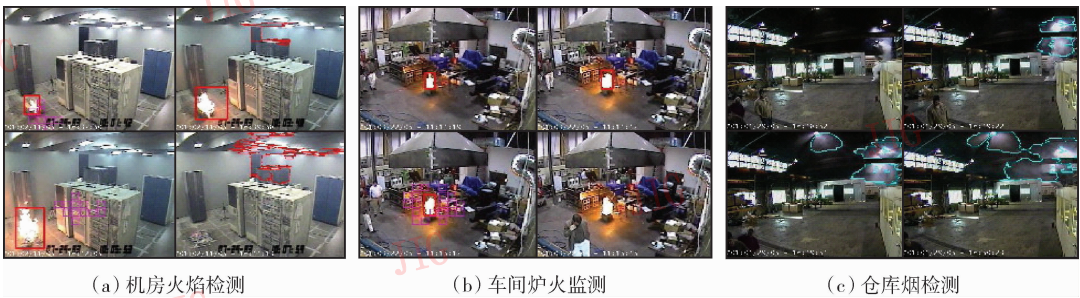


图 11 SigniFire™ 系统的烟火检测结果演示的视频帧图例

Fig. 11 Frame instances of fire or smoke detecting results of SigniFire™

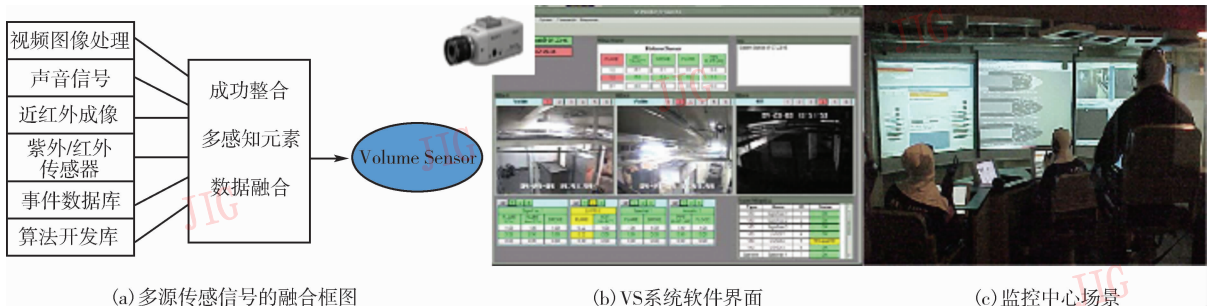


图 12 Volume Sensor 的系统融合和监控界面示意图

Fig. 12 Illustrates for Volume Sensor system

模块化的系统设计使 VS 在实时性和适用性方面更加灵活,可方便地增加或拆除某(些)子系统(图 13(a));系统还通过定义和生成多种格式的系统数据来支持从传感器到融合决策的信息传输(图 13(b))。

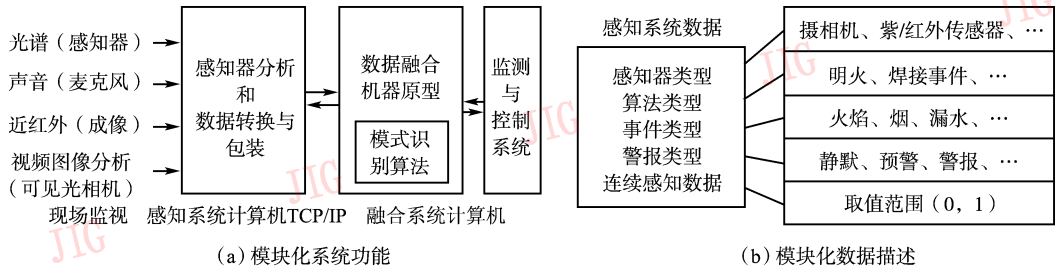


图 13 Volume Sensor 系统的模块化设计框图

Fig. 13 Block diagram for modules of Volume Sensor system

(3) Sense WARE 系统 (<http://www.senseware.com>) 是面向意外燃烧或气体泄漏的企业级监测系统。该系统基于视频平台,融合了多种传感器和智能分析技术(包括相机检测、光电检测、烟检测和热检测等单元)。其中的可见火焰检测单元是基于有线电视的微组装机监测器,它集视频采集和火焰检测于一体,具有对热扩散烟雾、焊接光辐射和其他不可见干扰元素的抑制能力。该系统主要应用在涡轮机房、焊接场地、锅炉房、船只引擎房、纸张或画布的干燥房、印刷机或其他挤压类设备车间等接近火源或易产生燃烧的机器作业场所,具体性能可参见网站资料。

5 若干问题

综上所述,针对 VFD 技术研发中的若干关键问题展开以下几点简单讨论:

(1) 任务特殊性与系统通用性的有效结合 不同企业或个人对消防安全的需求不尽相同,有选择地配置专业级烟火检测设备,虽利于提高检测精度和节约成本,但难免牺牲系统的通用性,使维护和升级变得困难。基于视频监视平台的烟火 VID 系统可能将任务特殊性和系统通用性有机结合起来。首先,可以方便地针对不同任务升级 VID 软件,借助其他传感(光、热、声、烟等)信息的融合还可以综合提高检测性能;其次,日益普及的具有采、传、播功能的视频系统本身就提供了通用性较强的硬件平台,加上目标检测、识别、跟踪、分类和检索等方面的机器视觉方法就可以为整个系统的智能化改造提供技

融合技术使 VS 系统具有比常规 VFD 系统更高的抗噪能力;光谱、声音和长波视频信号的结合可以提高辨别能力,对烟火、气液泄漏、淹溢、物理损坏和人员跟踪等多种对象的监测都具有潜在的提升作用。

术支持。

(2) 事件描述的显著性和复杂性 已有的 VFD 技术对火焰视觉特征的分析不断地深入和全面。但值得注意的是,除了显著性,火焰的视觉特征还具有复杂的非线性和随机性,且对外界条件敏感,要全面有效地量化描述火焰事件还有许多问题亟待解决。考虑到算法复杂度与检测效率之间的矛盾,在针对火焰特性的分析和建模过程中,有必要强调特征选择的显著性度量,可以引入注意机制和学习方法来挖掘特定条件下表现突出的有用信息,力图在不失可靠性的情况下,简化特征模型和减少冗余计算。

(3) 视频监测的实时性 视频监控系統可以实时(30fps 以上)的采集图像,先进的系统更是集实时的采、编、传、播能力于一体。实时报警对 VID 效率的要求很高。为此,在保证较低误检率的同时,不仅要优化算法,还要尽量减少处理环节,包括模型的在线学习和视频的编解码等。所以,基于视觉注意的显著性计算和压缩域的视频分析值得关注,有效地利用相关技术可以较大程度地提高效率。为此,本文提出了一种基于层次注意的 VFD 层次框架。与前面的知识驱动的 VFD 不同,该框架将自底往上和由顶往下的分析模式集成于一个层次化的监测流程中。视觉注意(VA)机制是神经生理学与认知心理学的概念,即人类视觉系统(HVS)面对复杂场景时能够迅速将注意力集中在少数显著的视觉对象上,并对其进行优先处理的重要的心理调节机制,这些显著对象就是注意焦点(FOA)^[37]。研究表明,通过模拟 VA 机制,计算机能在挖掘视觉信息时像 HVS 那样合理地集中配置有限的计算资源,优先处

理值得关注的局部对象,从而极大地提高监测的主动性和检测效率。Itti 等人的基于显著性的自底往上注意模型^[38]和 Torralba 等人的基于上下文的统计注意模型^[39]推动了 VA 机制在机器视觉中的应用研究。扩展视频分析领域,Itti 等人的注意惊异理论^[40],Ma 等人的用户注意模型^[41]以及 Boiman 等人的视觉显著模型^[42]等都为本文的 VFD 框架提供了理论和方法支持。如图 14 所示,对应视觉注意的不同阶段,整合 VFD 过程包括注意前期的静态 FOA 检测和运动 ROI(感兴趣区)检测,半注意期的 FOA 选择与 ROI 演化,注意期的时序动态分析和注意后期的事件识别与状态估计。不同阶段的处理对应不同层次的火焰显著模型(包括静态的、运动的和时频的 3 类)。

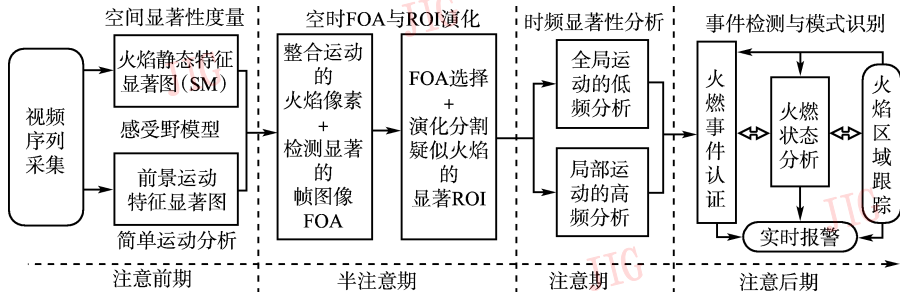


图 14 一种新的基于层次注意的 VFD 基本框架

Fig. 14 A novel hierarchical attention based VFD framework

(4)系统性能评估的综合性 目前,各种烟火检测系统层出不穷,面向的具体任务也不尽相同,这些都使系统性能的评估变得十分困难。一般认为,最主要的指标是检测能力,如监控范围、误检率和反应速度等。此外,系统的安装与维护成本、可操作性、场所适用性、抗噪、自检、兼容和扩展的能力也都需要考虑,视频平台性能和网络性能也有必要考查。另外,前端采集单元的空间配置的合理性对缓解监视的覆盖率与软硬件消耗之间的矛盾也具有重要的实际意义。

(5)视频烟雾探测(VSD)技术 通常条件下,基于近红外摄像机的专业探测器也能较好地探测到高温的火焰,却很难探测到温度较低的烟雾。所以,烟雾监测一般只能采用传统探测方法和基于可见光波段的 VSD 技术。同 VFD 类似,VSD 比常规的烟雾探测手段效率更高,甚至能提供比 VID 更早期的火灾预警。因此,目前采用视频图像进行火灾探测的重点正在转向 VSD。尽管烟与火在发生原理存在必然联系,但它们的可视特征却差异迥然。如上

所述,VFD 主要是先用静态色度特征提取火焰颜色像素,再借助火焰区域的生长和有序闪动的高时频分析加以鉴定;而 VSD 则先用烟雾的灰色度及其半透明性提取 ROI,再对其弥漫性运动的低频分析进行校验。新近方法包括 Chen 等人提出的高效率 VSD 方法^[43,44],Toreyin 等人利用小波和 Markov 模型实现的基于烟雾轮廓分析的 VSD 方法^[45]等。典型的 VSD 系统包括 VSD-8(www.firesentry.com),RSS(www.fast-security.com),CHUBB Fire(www.ferret.com.au),INVIS(www.invis-security.com),FireVu(www.dtec-fire.com)等,还有前面讨论过的 SigniFire™ 系统,它对烟雾的反映时间达到 15~60s,可探测到 300in 内 $10 \times 30\text{in}^2$ 的烟雾,并能借助远离光源的光扩散过程和较亮物体的时序变化累积模式

来区分羽状烟雾和环境烟雾的弥漫现象。

(6)多传感器融合的可能性 本文讨论的只是基于可见光视频火焰检测技术,但单凭可视信息不足以全面探测所有可能的意外烟火(如闷燃、无烟焰、遮挡等),需要其他信息的增强。针对不同的材料、场景和任务,适当引入温度、辐射、湿度及声音等多源传感器,可以形成多方位的信息互补,为综合决策提供更及时更可靠的线索。目前,不少烟火 VID 系统已经不同程度地采取了信息融合的解决方案^[46-48],一般由多部可见光相机、红外相机、热传感器、气象传感器等组成,并与信息数据库相配合。图 15 是一种典型的融合框图,它包括信号、特征和决策 3 级。构建和实现融合系统的主要困难在于融合策略的选择(包括信息的引入次序、融合时机和模糊规则等),再就是系统采购、安装与维护等成本的综合开销问题。

显著性检测的思想同样可以引入到视频以外的,如声音、近红外成像、紫外/红外和烟雾等其他信号的融合处理中。为此,本文还提出一种基于多源显著性

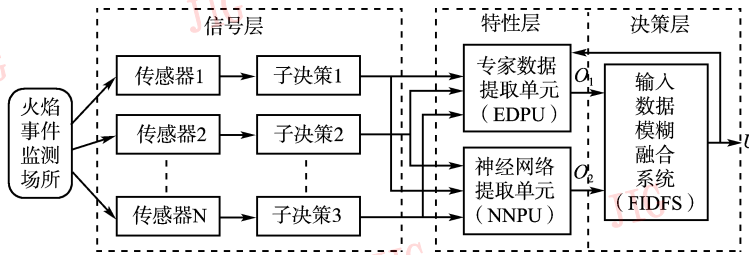


图 15 基于多传感器融合的火焰检测流程的基本层次框图

Fig. 15 Hierarchical framework for fire detection based on multi-sensor fusion

融合的火焰事件监测系统框架,如图 16 所示,整个框图由多源传感器的信息采集、多源信号的显著模型、多源显著对象的融合、综合报警与识别输出等模块组

成。信息的显著性分析与检测仍是整个信息处理流程的基本策略和关键环节,设计上试图集成多传感器融合的可靠性与显著性处理的高效性于一体。

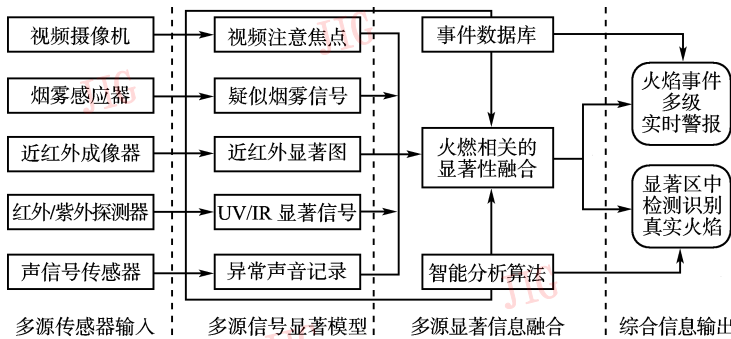


图 16 基于多源信息显著性融合的火焰检测系统层次框图

Fig. 16 Hierarchical framework for fire detection based on multi-sensor fusion

6 结论

本文的研究内容属于计算机视觉中视频信息挖掘问题,不仅涉及图像特征的提取和处理,还涵盖了时空序列的动态行为分析。视频火焰监测器相对于传统的点式烟火检测器具有多方面的优越性,主要得益于图像信息的可视化和视频平台的高效性。为此,本文在综述已有的 VFD 技术研究进展的基础上,探讨了若干亟待解决的关键问题,并借鉴人类视觉的选择性注意机制,提出和阐述了一种基于视觉显著性的层次 VFD 框架及多传感器显著性融合策略,力图有效提升监测过程的高效性、可靠性和主动智能性。

参考文献 (References)

1 Davis W, Notarianni K. NASA fire detection study [A]. In: Proceedings of Fire Research and Safety, 13th Joint Panel Meeting

[C], Gaithersburg, MD, 1997, 2:419 ~ 422.

- 2 Cleary T, Grosshandler W. Survey of Fire Detection Technologies and System in Evaluation/Certification Methodologies and Their Suitability for Aircraft Cargo Compartments [R]. NISTIR 6356, Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 1999.
- 3 Miller J C, Smith M L, McCauley M E. Crew Fatigue and Performance on US Coast guard Cutters [R]. CG-D-10-99, Croton, CT, USA: United States Coast Guard Research and Development Center, 1999.
- 4 Mary W Green. The appropriate and effective use of security technologies in U. S. Schools. [R]. NCJ -178265, Sandia, USA: Sandia National Laboratories, 1999.
- 5 Albers B W, Agrawal A K. Schlieren analysis of an oscillating gas-jet diffusion [J]. Combustion and Flame, 1999, 119(1): 84 ~ 94.
- 6 Chamberlin D S, Rose A. The First Symposium (International) on Combustion [M]. Pittsburgh, USA: The Combustion Institute, 1965:27 ~ 32.
- 7 Haering N C, Qian R J, Sezan M I. A semantic event-detection approach and its application to detecting hunts in wildlife video [J]. IEEE Transactions on Circle System Video Technology, 2000, 10(6): 857 ~ 868.

- 8 Javed O, Shah M. Tracking and object classification for automated surveillance [A]. In: Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision (ECCV'02) [C], Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2002;343 ~ 357.
- 9 Naphade M R, Kristjansson T, Frey B, *et al.* Probabilistic multimedia objects (multijects): a novel approach to video indexing and retrieval in multimedia systems [A]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'98) [C], Chicago, Illinois, UAS, 1998, **3**:536 ~ 540.
- 10 Noda S, Ueda K. Fire detection in tunnels using an image processing method [A]. In: Proceedings of Vehicle Navigation and Information Systems Conference [C], Yokohama, Japan, 1994; 57 ~ 62.
- 11 Breejen E D, Breuers B, Cremer F, *et al.* Autonomous forest fire detection [A]. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Forest Fire Research [C], Luso, Portugal, 1998;2003 ~ 2012.
- 12 Plumb O A, Richards R F. Development of an Economical Video Based Fire Detection and Location System [R]. NIST GCR 96-695, Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 1996.
- 13 Cappellini V, Mattii L, Mecocci A. An intelligent system for automatic fire detection in forests [A]. In: Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Image Processing and its Applications [C], Warwick, UK, 1989;563 ~ 570.
- 14 Healey G, Slater D, Lin T, *et al.* A system for real-time fire detection [A]. In: Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Omni Park Central, New York City, USA, 1993;605 ~ 606.
- 15 Foo S Y. A rule-based machine vision system for fire detection in aircraft dry bays and engine compartments [J]. Knowledge-Based Systems, 1995, **9**: 531 ~ 541.
- 16 Yamagishi H, Yamaguchi J. Fire flame detection algorithm using a color camera [A]. In: Proceedings of 1999 International Symposium on Micromechatronics and Human Science (MHS '99) [C], Nagoya, Japan, 1999;255 ~ 260.
- 17 Phillips W III, Shah M, Da Vitoria Lobo N. Flame recognition in video [J]. Pattern Recognition Letters, 2002, **23**(1-3): 319 ~ 327.
- 18 Horng Wen-Bing, Peng Jian-Wen, Chen Chin-Yuan, A new image-based real-time flame detection method using color analysis [A]. In: Proceeding of Networking, Sensing and Control 2005 [C], Tucson, Arizona, USA, 2005;100 ~ 105.
- 19 Chen Thou-ho, Cheng Liang Kao, Chang Sju-mo. An intelligent real-time fire-detection method based on video [A]. In: Proceedings of IEEE 37th Annual 2003 International Carnahan Conference on Security Technology [C], Taipei, China, 2003;104 ~ 111.
- 20 Loncaric S. A survey of shape analysis techniques [J]. Pattern Recognition, 1998, **31**(8): 983 ~ 1001.
- 21 Baumberg A, Hogg D. An adaptive eigenshape model [A]. In: Proceedings of the 1995 British Conference on Machine Vision [C], Birmingham, UK, 1995;87 ~ 96.
- 22 Murase H, Nayar S K. Visual learning and recognition of 3D objects from appearance [J]. International Journal of Computer Vision, 1995, **14**(1):5 ~ 24.
- 23 Chen Thou-Ho, Wu Ping-Hsueh, Chiou Yung-Chuen. An early fire-detection method based on image processing [A]. In: Proceedings of International Conference on Image Processing 2004 (ICIP'04) [C], Singapore, 2004, **3**(3):1707 ~ 1710.
- 24 Fastcom Technology S. Method and Device for Detecting Fires Based on Image Analysis [R]. TR WO02/069292, Lausanne, Switzerland; Boulevard de Grancy, 2002.
- 25 Liu Chebin, Ahuja N. Vision based fire detection [A]. In: Proceedings of 17th International Conference on Pattern Recognition [C], Cambridge, UK, 2004, **4**(4): 134 ~ 137.
- 26 Yang M-H, Ahuja N. Gaussian mixture model for human skin color and its application in image and video databases [A]. In: Proceedings of Conference on Storage and Retrieval for Image and Video Databases (SPIE 99) [C]. San Jose, CA, USA, 1999, **3656**:458 ~ 466.
- 27 Dong Hua, Cheng Xiao-fang, Fan Wei-cheng. Application and comparison between different image fire detectors [J]. Optical Technology, 1997, **5**:51 ~ 53. [董华, 程晓芳, 范维澄. 早期火灾图像监测技术的应用与比较 [J]. 光学技术, 1997, **5**: 51 ~ 53.]
- 28 Lu Jie-cheng, Wu Long-biao, Song Wei-guo. The study on a fire image detection system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, **22**(4): 437 ~ 440. [卢结成, 吴龙标, 宋卫国. 一种火灾图像探测系统的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2001, **22**(4): 437 ~ 440.]
- 29 Yuan Hong-yong, Liu Bing-hai, Chen Xiao-jun, *et al.* Image based fire intelligence detection and spacial location [J]. Fire Protection Science and Technology, 1998, **2**:2 ~ 4. [袁宏永, 刘炳海, 陈晓军等. 图像型火灾智能探测与空间定位技术 [J]. 消防科技, 1998, **2**:2 ~ 4.]
- 30 Yuan Fei-niu, Liao Guang-xuan, Zhang Yong-ming, *et al.* Feature extraction for computer vision based fire detection [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, **36**(1):39 ~ 43. [袁非牛, 廖光煊, 张永明等. 计算机视觉火灾探测中的特征提取 [J], 中国科学技术大学学报, 2006, **36**(1):39 ~ 43.]
- 31 Töreyn B U, Dedeoglu Y, Ugur G, *et al.* Computer vision based method for real-time fire and flame detection [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, **27**(1):49 ~ 58.
- 32 Mallat S, Zhong S. Characterization of signals from multiscale edges [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, **14**(7):710 ~ 732.
- 33 Cetin A E, Ansari R. Signal recovery from wavelet transform maxima [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 1994, **42**: 194 ~ 196.
- 34 Dedeoglu N, Toreyn B U, Gudukbay U, *et al.* Real-time fire and flame detection in video [A]. In: Proceedings of IEEE 30th International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'05) [C], Philadelphia, PA, USA. 2005, **2**(2):669 ~ 672.

- 35 Töreyn B U, Dedeoglu Y, Gudukbay U, *et al.* Flame detection in video using hidden markov models [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing 2005 (ICIP'05) [C], Genova, Italy, 2005;1230 ~ 1233.
- 36 Gottuka D T. Video image fire detection for shipboard use [J]. Fire Safety Journal, 2006, **41**:321 ~ 326.
- 37 Koch C, Ullman S. Shifts in selective visual attention: towards the underlying neural circuitry [J]. Human Neurobiology, 1985, **4**:219 ~ 227.
- 38 Itti L, Koch C. Feature combination strategies for saliency-based visual attention systems [J]. Journal of Electronic Imaging, 2001, **10**(1): 161 ~ 169.
- 39 Torralba A. Contextual priming for object detection [J]. International Journal of Computer Vision, 2003, **53**(2): 169 ~ 191.
- 40 Itti L, Baldi P. A surprising theory of attention [EB/OL]. <http://www.cnse.caltech.edu/Industry/Conferences/2004/AIC/pdf/Laurent-Itti.pdf>, 2004-10.
- 41 Ma Y F, Hua X S, Lu L, *et al.* A generic framework of user attention model and its application in video summarization [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2005, **7**(5): 907 ~ 919.
- 42 Boiman O, Irani M. Detecting irregularities in images and video [A]. In: Proceedings of International Conference of Computer Vision 2005 (ICCV'05) [C], Beijing, China, 2005;462 ~ 469.
- 43 Chen Hou-ho, Yin Yen-hui, Huang Shi-feng, *et al.* The smoke detection for early fire-alarming system base on video processing [A]. In: Proceedings of 2006 International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing [C], Pasadena, CA, USA, 2006;427 ~ 430.
- 44 Chen Hou-ho, Yin Yen-hui, Huang Shi-feng, *et al.* A cost-effective early fire-alarming system based on video processing [A]. In: Proceedings of 2006 Digital Signal Processing Creative Design Contest [C], Taiwan, China, 2006;78 ~ 88.
- 45 Töreyn B U, Dedeoglu Y, Cetin A E. Wavelet based real-time smoke detection in video [A]. In: Proceedings of the 30th International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP) 2005 [C], Philadelphia, PA, USA, 2005: 669 ~ 672.
- 46 Luo R C, Su K L, Tsai K H. Fire detection and isolation for intelligent building system using adaptive sensory fusion method [A]. In: Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'02) [C], Washington, DC, USA, 2002, **2**:1777 ~ 1781.
- 47 Chen Shao-hua, Bao Hong, Zeng Xian-yun, *et al.* A fire detecting method based on multi-sensor data fusion [A]. In: Proceedings of 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics [C], Washington, DC, USA, 2003, **4**:3775 ~ 3780.
- 48 Xiao Jian-mei, Wang Xi-huai. A fuzzy neural network approach to fire detection in ships [A]. In: Proceedings of 12th IEEE International Conference on Fuzzy Systems 2003 [C], St. Louis, MO, USA, 2003, **2**:1459 ~ 1461.