基于背景动态更新与暗通道先验的火灾烟雾检测算法*

赵 亮[a],骆炎民[a,b†],骆翔宇[a]
(华侨大学 a. 计算机科学与技术学院; b. 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘 要: 烟雾检测在现代智能消防中有着重要的应用前景,随着计算机视觉和模式识别技术的发展,基于视频图像的火灾烟雾检测算法不断被提出。针对目前检测方法适应性不强、在复杂环境下检测性能不高的问题,提出了一种基于背景动态更新和暗通道先验的烟雾检测算法。算法首先通过改进的背景动态更新算法提取运动前景;然后,结合暗通道先验知识确定前景中的疑似烟雾区域;最后,利用烟雾颜色特征、旋转不变的 LBP 纹理特征和 HOG 特征的线性融合通过最近邻分类器(KNN)进行识别。通过在多个视频场景下的实验,表明该算法受环境因素影响较小,且具有良好的烟雾检测能力。

关键词: 背景估计; 暗通道先验; 颜色特征; 旋转不变的 LBP; HOG 特征; KNN 分类器; 烟雾检测
中图分类号: TP393.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2017)03-0957-04
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2017.03.074

Based on dynamic background update and dark channel prior of fire smoke detection algorithm

Zhao Liang[a], Luo Yanmin[a,b†], Luo Xiangyu[a]
(*a. College of Computer Science & Technology, b. College of Computer Mechanical Engineering & Automation, Huaqiao University, Xiamen Fujian* 361021, *China*)

Abstract: Smoke detection has important application prospects in the modern intelligent fire, with the development of computer vision and pattern recognition technology, the fire smoke detection algorithm based on the video image constantly being proposed. For the current detection methods are not flexible and detection performance is not high in a complex environment, this paper proposed a fire smoke detection algorithm based on dynamic background update and dark channel prior. Firstly, it improved the dynamic background updating algorithm for extracting moving foreground. Then, combined with the dark channel prior knowledge to determine the foreground of suspected smoke area. Finally, it used linear combination of smoke color features, rotation invariant LBP texture feature and HOG features by the KNN classifier for identification. Through the experiments on more than one video scene, it shows that the algorithm is less affected by environmental factors, and has good capability of smoke detection.

Key words: background estimation; dark channel prior; color features; rotation invariant LBP; HOG features; KNN classifier; smoke detection

0 引言

火灾的危害性不言而喻,无论城市还是森林,一旦发生火灾,所带来的损失是难以估计的。所以及时发现火情并准确定位,对扑灭火灾、避免重大经济财产损失意义重大。在火灾发生的早期火焰通常很小,但是这时的烟雾却很明显,所以利用烟雾作为火灾检测有着重要的意义[1]。传统光电、离子感烟器的精度高、价格低,应用广泛。在应用过程中,其缺点也不断地暴露,如响应速度慢、容易误报等。由于这些检测器需要接触燃烧产物,所以必须安装在起火点附近,否则将无法有效地检测到火灾的发生。此外,如果长期接触大量粉尘等物质,比较容易造成传感器中毒失效,使用范围有限[2]。

由于视频监控不受空间距离和场景的限制,基于视频图像进行烟雾检测的方法受到越来越多国内外研究者的关注。Toreyin 等人[3]根据小波分析来检测烟雾,该方法主要依据烟雾产生时会使周边景物边缘模糊,反映到小波域中即表现为高频部分能量降低,场景内像素值的色度分量衰减,颜色变灰,亮度值下降,而且对烟雾边缘特征也进行了深入研究,由于需要综合场景的背景轮廓进行分析,限制了算法的适用范围。Fujiwara 等人[4]根据自相似分形理论,从图像中提取烟雾区域。对于低对比度、模糊的烟雾图像,提取的分形特征不够稳定。袁非牛等人[5]提出基于累积量和主运动方向的视频烟雾检测方法,同时采用了分块的算法,提高了检测效率,但是该方法在大风等恶劣天气条件下,不能保证检测的准确性。Wang 等

收稿日期: 2016-01-14; **修回日期:** 2016-02-26 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61170028);华侨大学科研启动项目(14BS215);华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目

作者简介: 赵亮(1990-),男,安徽芜湖人,硕士研究生,主要研究方向为图像处理、计算机视觉等;骆炎民(1974-),男(通信作者),福建惠安人,副教授,硕导,博士,主要研究方向为人工智能、数据挖掘、机器学习等(lym@hqu.edu.cn);骆翔宇(1974-),男,副教授,硕导,博士(后),主要研究方向为形式化验证、模型检测、多智能体系统、知识推理、时态逻辑、认知逻辑和安全协议验证等.

人[6]利用烟雾的颜色与纹理特征,通过直方图判别,该算法对于缓慢扩散的烟雾检测效果有限。王习越等人[7]提出了通过多特征融合然后利用贝叶斯分类器进行分类识别的方法,该方法可以排除部分类似烟雾颜色的物体,但是对于距离较远的烟雾检测较差。Ince 等人[8]利用烟雾的频率、颜色以及饱和度的定量分析实现烟雾检测,这种方法对硬件要求较高,从而影响了适用范围。李红娣等人[9]采用不同池化方法得到金字塔局部二元模式和金字塔边缘方向直方图序列特征,通过支持向量机判别,该方法适用性较强,但是对于稀薄烟雾检测的效果较差。

综合目前烟雾检测的主流方法,大体可以分为运动目标检测、特征提取和识别三个步骤,但是容易受环境因素影响,适应性不强。针对目前方法中存在的问题,提出了一种基于背景动态更新和暗通道先验的算法,算法首先通过改进的背景动态更新的运动目标检测算法,来提取运动前景;然后结合暗通道先验知识对前景进行过滤,消除多数干扰物体产生的前景像素,得到疑似烟雾区域;最后利用烟雾多种特征的线性组合通过最近邻分类器作进一步识别。算法对于复杂环境下存在的干扰,比如树枝的大幅度晃动、穿行的车辆、闪烁的灯光和类似烟雾的白色运动物体等都有很好的抑制作用,对于稀薄烟雾也具有良好的检测效果。总之,该方法适用性较强,同时还具有较高的准确率和较低的误警率。

1 基于改进的背景动态更新的运动目标检测

在监控设备静止的条件下,运动目标的检测方法主要有光流法、帧差法和背景估计法。对于光流法、帧差法和很多文献采用的混合高斯法对于自然条件下扩散缓慢的烟雾提取效果并不好,由于烟雾呈现扩散的特点,一些像素在一段时间内灰度值变化很小,所以不能提取出完整的烟雾区域,影响后续的识别[10]。背景估计法也是常用的运动区域检测算法,和帧间差分法一样也具有计算速度快的特点,由于背景实时更新,所以背景估计法对小的噪声、光线的变化和微幅移动的物体都具有一定的过滤功能。本文将介绍一种改进的背景动态更新方法提取烟雾区域。

1.1 背景更新

获取和更新背景是背景估计法的核心,在不同的情景中,更新背景的策略需要稍加修改,对于像烟雾这种运动方式是不断扩散的,要和运动中形状不发生改变的刚性物体有所区别,具体的更新算法步骤如下:

$$B_{n+1}(x,y)=\begin{cases}\alpha\times B_n(x,y)+\beta\times F_{n+1}(x,y)+ \\ (1-\alpha-\beta)\times B_1(x,y) & \text{if } |F_{n+1}(x,y)-F_n(x,y)|>0 \\ B_{n+1}(x,y) & \text{else}\end{cases} \tag{1}$$

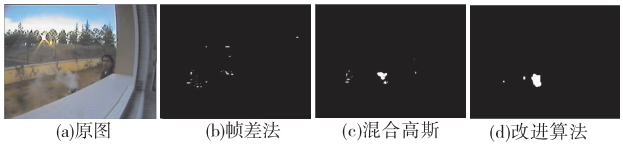
其中:n 表示当前帧序号;$n+1$ 表示下一帧;$B_n(x,y)$ 是当前帧的背景在坐标(x,y)处的像素值;$B_{n+1}(x,y)$ 是估计得到的更新背景在(x,y)处的像素值;$F_{n+1}(x,y)$ 是当前帧图像在(x,y)处的像素值;$B_1(x,y)$ 指第一帧的背景像素点,也即第一帧图像的像素点;α、β 分别为权重系数,$\alpha+\beta<1$。算法是通过比较相邻帧对应像素点的灰度值是否发生变化,如果灰度值发生改变,就会参照当前帧背景、下一帧图像和原始背景来估计下一帧的背景。这种背景更新方式的原理在于,对于扩散缓慢的烟雾,随着时间的推移,早期产生的烟雾区域在不同帧的像素值差异会减小,提取出的前景容易出现空洞,所以改进的背景更新引入原始背景帧就是为了提供一个较长时间的参考,从而可以得到完整的烟雾区域。

1.2 运动前景获取

背景更新之后与当前帧做差分,再选取合适的阈值就可以提取出运动前景,表达为

$$G_{n+1}(x,y)=\begin{cases}255 & \text{if } |F_{n+1}(x,y)-B_{n+1}(x,y)|>T \\ 0 & \text{else}\end{cases} \tag{2}$$

其中:T 表示设置的阈值,$G_{n+1}(x,y)$ 表示提取的前景像素。图 1 中(b)~(d)分别显示用相邻帧差法、混合高斯法和改进算法在提取烟雾时的效果。



(a)原图 (b)帧差法 (c)混合高斯 (d)改进算法

图1 前景检测

2 结合暗通道先验的前景像素过滤

提取出的运动前景除了烟雾像素通常也会包含一些其他运动物体产生的前景,如图 2(c)前景图像不仅包含烟雾像素,还包含行驶的汽车、晃动的树枝和反光的湖面等所产生的像素。在实际应用中,恶劣天气环境下的森林场景中树枝的大幅度摇摆和户外行人的走动是很频繁的,如不加以处理,而直接进行运动区域的特征提取和识别,会使算法频繁进行特征提取和判别,不仅影响系统资源的利用,还容易造成误判,影响其适用性。传统方法一般会使用形态学操作加以过滤,对于零星的干扰像素点有一定效果,但在实际应用中效果有限。本文提出一种利用烟雾暗通道像素值相比其他大多数物体偏高的特点,达到对前景像素进行过滤的效果。

2.1 暗通道先验

在绝大数非天空的局部区域中,某些像素总会有至少一个颜色通道的像素值很低,称之为暗像素。下面给出暗通道的一个数学定义,对于任意的图像 J,其暗通道图像 J^{dark} 的每一个像素值可以表达为

$$J^{\text{dark}}(x)=\min_{c\in(r,g,b)}\left(\min_{y\in\Omega(x)}(J^c(y))\right) \tag{3}$$

其中:J^c 表示图像 J 的某一个颜色通道,$\Omega(x)$ 表示以像素 x 为中心的一个窗口。对于一帧无烟雾出现的图像,局部区域 J^{dark} 的值很小,并且趋于零。因此,把 J^{dark} 称之为图像 J 的暗通道图像,并把这一经验性规律称为暗通道先验[11],通过实验总结当 $\Omega(x)$ 取 7×7 大小的像素块做最小值滤波时得到的暗通道图像 J^{dark} 在算法中的效果最好。

图像暗通道像素值较低的特性表现为:a)一般色彩较鲜艳的物体的 RGB 颜色空间至少有一个通道的灰度值比较低,例如绿色物体表面通常只有 G 通道的灰度值较高,而 R 通道和 B 通道的灰度值几乎为零;b)颜色较暗的物体或一些光线产生的阴影图像三个通道的灰度值都较低。而 Chen 等人[12]通过统计,发现通常烟雾的三个颜色通道的灰度值大致相同,而且应该在 80~220。这些特性在户外场景中,表现为在有烟雾产生的图像帧中天空和烟雾区域的暗通道像素值较高,其他区域的像素值较低或者趋于零,经过阈值处理就可以把两块区域分开,得到二值化图像,本文称之为暗通道阈值图像 M^{dark},定义为

$$M^{\text{dark}}(x)=\begin{cases}255 & \text{if } J^{\text{dark}}(x)>TD \\ 0 & \text{else}\end{cases} \tag{4}$$

其中:TD 是选取的阈值,通过上述特性分析和实验,选取大小为 98。从图 2(d)的暗通道阈值图可以看出,M^{dark} 可以很好地把烟雾区域与其他非天空区域分隔开来,但是由于户外条件环境复杂也会存在一些非天空和烟雾区域,暗通道像素值较高,被当做天空和烟雾区域被分割出来,如图 2(b)中的公路表面、泛白的湖面以及屋顶的某些区域,但是这些区域并不具有运动特性,而烟雾恰好同时具有这两方面的特性。

2.2　疑似烟雾区域提取

综合烟雾具有运动和暗通道像素高的特性,可以对运动前景进行很好的过滤,具体操作通过前景图像 G 和暗通道阈值图像 M^{dark} 做与操作,表述为当运动前景图像中某个位置像素值与暗通道阈值图像相应位置的像素值都为 1 时,才认为是疑似烟雾像素点,否则认为是干扰物体产生的像素点加以过滤,算法表达为

$$s = \mathrm{and}(G, M^{dark}) \tag{5}$$

得到经过过滤的前景图像 S,如图 2(e)所示,可以看出各种干扰物体产生的前景像素点都被过滤,但是由于暗通道图像用了 7×7 大小的像素块做最小值滤波,这个过程会对烟雾边缘区域的部分像素有一定的过滤作用,得到的烟雾区域较实际区域减小,所以为了得到更加完整的烟雾区域,需要选择适当大小的结构元素对前景图像进行形态学上的操作,结果如图 2(f)所示,最后得到了较完整的包含烟雾区域的前景图像。

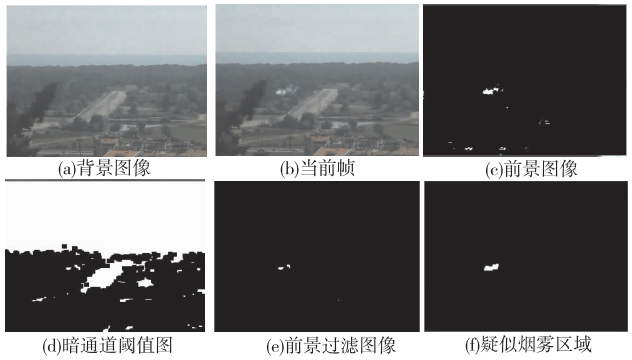

(a)背景图像　(b)当前帧　(c)前景图像
(d)暗通道阈值图　(e)前景过滤图像　(f)疑似烟雾区域

图2　疑似烟雾区域提取

3　烟雾多种特征提取

通过疑似烟雾检测阶段,已经可以消除大部分时间内可能存在的干扰,但是自然界中事物多种多样,存在一些既具有运动特性同时暗通道像素值很高的类似烟雾颜色物体出现,比如穿白色衣服的行人和飘动的白色旗帜等。从烟雾表面观察,烟雾颜色大致分布在白色和黑灰色之间,且具有明显的纹理和梯度特征,LBP 特征是一个经常用来描述纹理的特征,Yuan[13] 通过实验验证了它在烟雾检测中具有良好的效果。HOG 特征[14] 是一个基于梯度的特征,经常用来进行行人检测。算法将通过线性组合的方式融合颜色特征、旋转不变的 LBP 特征和 HOG 特征利用 KNN 分类器对疑似烟雾区域进行最终识别。

3.1　颜色特征

烟雾具有与背景不同的色彩。虽然燃烧物不同,色彩不同,但 chen 等人通过统计,不仅发现在 RGB 颜色空间中烟雾的三个颜色通道的灰度值大致分布在 80 ~ 220,而且随着烟雾变浓,三个颜色通道的值也会慢慢集中。根据烟雾颜色的这种特性,本文通过提取 R、G、B 三个通道的灰度直方图来描述烟雾的颜色特征。

3.2　旋转不变的 LBP

LBP 是 Ojala 等人[15] 提出来的。LBP 是一种灰度纹理算子,通过比较一个像素与其领域像素的灰度值计算该像素的 LBP 模式值,计算方法为

$$\mathrm{LBP}_{P,R} = \sum_{i=0}^{P-1} s(g_i - g_c) 2^i \tag{6}$$

$$s(x) = \begin{cases} 1 & x \geqslant 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \tag{7}$$

式中:g_c 和 g_i 分别为中心像素及其领域灰度值,P 为领域像素数,R 为领域半径;$s(x)$ 为单位阶跃函数。Ojala 等人提出了三种模式,本文利用的是旋转不变模式,它对光线和部分噪声有一定抑制作用,公式描述为

$$\mathrm{LBP}_{P,R}^{i} = \min_{0 \leqslant i \leqslant P-1} \{ \mathrm{ROR}(\mathrm{LBP}_{P,R}, i) \} \tag{8}$$

其中:$\mathrm{ROR}(x,i)$ 为执行将 x 循环向右移动 i 位的旋转操作,该模式实现了当图像发生旋转或倾斜时 LBP 模式值保持不变。

3.3　HOG 特征

HOG 特征是统计空间域图像的方向梯度密度分布,其原则是:在一幅图像中,局部目标的表象和形状能被梯度方向密度分布很好地描述出来。HOG 特征提取具体算法步骤如下:a)计算梯度;b)构建细胞单元方向直方图;c)细胞单元组合成更大的区间块。

计算梯度是使用两个离散微分模板(-1,0,1)和(-1,0,1)^{T} 分别对图像水平方向和竖直方向进行处理,得到每个像素点的梯度。然后对细胞单元构建梯度方向直方图。图像中每个点的梯度方向和梯度幅值各不相同,按照梯度的方向不同可分为多个 bin 通道。细胞单元中的每一个像素点都为某个基于方向的直方图投票,得到细胞单元的方向直方图。

为了能够更好地抑制光照、背景前景对比度变化等的影响,HOG 特征将细胞单元组合成更大的 block 区间,通过一定像素的平移使每一个细胞单元的输出都多次作用于特征描述器,然后在 block 区间作对比度归一化,获得更好的效果。

3.4　特征融合

实验用到的样本图像块像素大小为 32×32,而第二部分得到的疑似烟雾区域大小不定,所以首先通过二次线性插值法进行缩放,然后提取多种特征,其中颜色特征向量的维数为 256×3 = 768,表述为 $C = (R_0 \cdots R_{255}, G_0 \cdots G_{255}, B_0 \cdots B_{255})$。提取旋转不变的 LBP 特征时,选取 $P = 8$,$R = 1$,计算每个像素点的模式值,通过统计直方图,获得样本图像的特征向量 $L = (L_0, L_2, \cdots, L_{255})$。实验运用 OpenCV2.4.9 提供的视觉库提取 HOG 特征,选取的单元大小为 8×8,block 大小为 16×16,偏移像素为 8、9 个 bin 通道,所以可以获得 HOG 特征向量维数为 324,表述为 $H = (H_0, H_2, \cdots, H_{323})$。为了缩小量值,通过归一化将特征向量映射到[0,1],通过线性组合方式[16] 形成维数为 1 348 的特征向量(C, L, H)。

4　实验结果及分析

本文实验所用到的训练样本图像来源于江西财经大学袁非牛实验室(http://staff.ustc.edu.cn/~yfn/vsd.html)下载然后手动裁剪得到,在多种场景下测试所用到的视频资源来源于韩国启明大学实验室(http://cvpr.kmu.ac.kr/)、土耳其比尔肯大学实验室(http://signal.ee.bilkent.edu.tr/VisiFire/Demo/SampleClips.html)。实验所用的机器为 core i5 3.2 GHz,操作

系统为 Windows 7,内存 8 GB,编程工具使用了 Visual Studio 2012 和 Opencv 2.4.9 计算机视觉库。

实验所用的训练样本中,包含 3 401 个正样本,7 811 个负样本,通过 OpenCV 提供的 KNN 分类器进行训练。算法同时在多种视频场景下测试,鉴于篇幅限制,只列出 10 组视频的检测结果,其中 6 组带有烟雾的视频,4 组不带烟雾的干扰视频。检测结果如图 3 所示。可以看出本文提出的算法在多种场景下都具有良好的检测效果和一定的抗干扰能力。

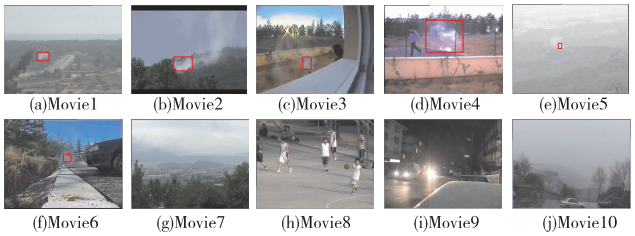


图3 10组测试视频的检测结果

在户外场景中,基于视频的烟雾检测明显优于传统感烟器,为了比较同类算法之间的性能,将江西财经大学 Yuan[17] 实验室提供的算法记为算法 1,本文算法记为算法 2,由于算法 1 存在动态分析,即标记为烟雾区域后,标记区域必须持续一小段时间才会报警,这是为了去除短暂干扰。但是由于测试视频通常较短,为了更好地比较算法的性能,对比实验时不考虑算法 1 的动态分析,即某一帧如果出现烟雾标记,即判定该帧为烟雾帧。实验详细结果如表 1、2 所示。从表 1 中可以得到,烟雾的扩散速度对两种算法影响较小。从 Movie2 和 Movie5 可以得到在烟雾较浓时,算法 1 较算法 2 可以更早地检测到烟雾,这是因为烟雾较浓时,局部的纹理和梯度特征不够明显。其他视频场景下,算法 2 的检测效果更好,在 Movie3 和 Movie6 烟雾较稀薄时,算法 1 甚至还发生了漏报。综合表 1 可以得到算法 1 对于稀薄烟雾检测效果较差,而算法 2 的整体性能更好。从表 2 中可以看出,算法 1 和算法 2 对强风所带来的树枝大幅度摇摆和白色物体带来的干扰都有良好的抑制作用,对于夜晚灯光的干扰,算法 2 较算法 1 更好,在 Movie10 中由于算法 1 会提取树枝区域的特征,因为树枝形状不规则,提取的区域会包含很多背景区域,背景又充满雾气,所以才造成了算法 1 的持续误检,而算法 2 在前景提取阶段也会检测到轻微摆动的树枝,由于结合暗通道知识,会去除这些树枝产生的前景像素,就不会产生包含大量背景区域的疑似烟雾区域,更不会发生误检。

表 1 有烟雾测试视频的检测对比

视频	视频描述	总帧数	第几帧检测到烟雾	
			算法 1	算法 2
Movie1	车辆经过,有风,烟雾扩散缓慢	5 956	554	504
Movie2	山坡,有风,烟雾较浓,扩散较快	2 324	9	54
Movie3	烟雾稀薄,扩散较快	240	未检测到	82
Movie4	有行人,烟雾稀薄,扩散较快	626	154	32
Movie5	远景,烟雾较浓,扩散及其缓慢	6 042	982	1 106
Movie6	中远景,有风,烟雾稀薄	1 722	未检测到	484

表 2 无烟雾测试视频的误报对比

视频	视频描述	总帧数	误检的帧数	
			算法 1	算法 2
Movie7	强风,树枝大幅度摇摆	2 807	0	0
Movie8	操场,有穿白色衣服学生跑动	428	0	3
Movie9	夜晚,汽车灯光照射	155	38	0
Movie10	雨天有雾气,树枝轻微摆动有白色汽车经过	7 310	7 306	0

5 结束语

本文提出的烟雾检测算法,首先利用了背景动态更新和暗通道先验结合的算法,提取疑似烟雾区域,然后利用烟雾多种特征通过最近邻分类器进行识别。背景的动态更新和暗通道先验的结合是本文算法的关键,也是提高烟雾检测准确性和系统鲁棒性的要点。实验结果表明,该算法可以在多种场景下准确地检测出场景中的烟雾区域,而且对各种干扰具有较低的误报率。本文提出的算法由于引入了暗通道先验的知识,所以对于某些物质燃烧产生的黑色烟雾检测效果会明显下降,同时由于背景动态更新,算法对于帧图像大小为 320 × 240 的视频,每秒可以达到 4、5 帧,实时性方面还有待提高,这些都是下一步工作的重点。

参考文献:

[1] 罗胜,Jiang Yuzheng. 视频检测烟雾的研究现状[J]. 中国图象图形学报,2013,18(10):1225-1236.

[2] Labati R D,Genovese A,Piuri V,*et al*. Wildfire smoke detection using computational intelligence techniques enhanced with smoke plume generation[J]. IEEE Trans on Systems,Man,and Cybernetics: Systems,2013,43(4):1003-1012.

[3] Toreyin B U,Dedeoglu Y,Cetin A E. Wavelet based real-time smoke detection in video[C]//Proc of the 13th European Signal Processing Conference on EUSIPCO. 2005:102-104.

[4] Fujiwara N,Terada K. Extraction of a smoke region using fractal cording[C]//Proc of International Symposium on Communication and Information Technologies. New York:ACM Press,2004:26-29.

[5] 袁非牛,张永明,刘士兴,等. 基于累积量和主运动方向的视频烟雾检测方法[J]. 中国图象图形学报,2008,13(4):808-813.

[6] Wang Yue,Chua T W,Chang R,*et al*. Real-time smoke detection using texture and color features[C]//Proc of the 21st International Conference on Pattern Recognition. 2012:1727-1730.

[7] 王习越,陶青川. 基于多特征融合的户外视频烟雾检测算法[J]. 现代计算机,2015,11(4):78-83.

[8] Ince F I,Kim G Y,Lee G H,*et al*. Patch-wise periodical correlation analysis of histograms for real-time video smoke detection[C]//Proc of IEEE International Conference on Industrial Technology. 2014:655-658.

[9] 李红娣,袁非牛. 采用金字塔纹理和边缘特征的图像烟雾检测[J]. 中国图象图形学报,2015,20(6):772-780.

[10] 姜明新,王洪玉,蔡兴洋. 基于码本模型和多特征的早期烟雾检测[J]. 中国图象图形学报,2012,17(9):1102-1108.

[11] He Kaiming,Sun Jian,Tang Xiaoou. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2011,33(12):2341-2353.

[12] Chen Thouho,Yin Yenhui,Huang Shifeng,*et al*. The smoke detection for early fire alarming system base on video processing[C]//Proc of International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. Washington DC: IEEE Computer Society,2006:427-430.

[13] Yuan Feiniu. Video-based smoke detection with histogram sequence of LBP and LBPV pyramid[J]. Fire Safety Journal,2011,46(3):132-139.

[14] 徐超,高梦珠,查宇锋,等. 基于 HOG 和 SVM 的公交乘客人流量统计算法[J]. 仪器仪表学报,2015,36(2):446-452.

[15] Ojala T,Pietik M,Maenpaa T. Multi-resolution grayscale and rotation invariant texture classification with local binary patterns[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2002,24(7):971-987.

[16] 叶继华,陈亚慧,胡蕾. 融合加权颜色相关图和改进 LBP 的彩色人脸图像识别[J]. 小型微型计算机系统,2015,12(12):2778-2783.

[17] Yuan Feiniu. A double mapping framework for extraction of shape invariant features based on multi-scale partitions with AdaBoost for video smoke detection[J]. Pattern Recognition,2012,45(12):4326-4336.