

# 可变视场下的火灾探测算法

张进华, 李婷, 王孙安, 李小虎

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

**摘要:** 针对火灾发生初期由火焰面积小、特征不够明显且易受干扰等因素所导致的火焰识别困难的问题,提出一种可变视场下小面积火焰快速探测方法.该方法利用旋转云台实现小面积火焰疑似区域的大监控范围跟踪和视野中央聚焦;通过镜头变焦处理对小面积火焰进行自动放大,提高火焰区域“多分辨”视觉识别特征的显著性;采用自适应区域增长算法对火焰图像进行识别,有效完成火焰疑似区域分割;通过建立的信任度概率模型,将疑似概率作为火焰判定的量化参数,用于火焰区域的最终确定,从而在识别算法和图像获取硬件设备两方面改善火焰探测系统的工作效率.实验结果表明,火焰成像质量得到明显改善,火焰特征识别速度得以明显加快,小火焰检测精度显著提升,可广泛应用于火灾早期以及远距离火焰检测与预警.

**关键词:** 火焰识别;火焰跟踪;可变视场;多分辨

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)10-0029-07

## An Early Detection Algorithm for Small Flame Based on Vision System with Variant Field of View

ZHANG Jinhua, LI Ting, WANG Sun'an, LI Xiaohu

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** A fast detection method for small flame area in variable visual fields is proposed to solve the difficulties of flame identification caused by the small flame area, unapparent features and its easy-interferential in fire prime. A Pan-Tilt-Zoom is used to track and center the small suspected fire fields in a large range region. Then, the zoom lens is handled to enlarge the small area, and to enhance the “multi-resolution” visual recognition feature. Then, an adaptive region growing algorithm is adopted to detect and segment the suspected flame region. Finally, a confidence probability model is built and the suspected probability is used as the quantitative parameters to confirm flame recognition. Experimental results show that the flame imaging quality is improved clearly, and that the small fire detection precision is greatly increased. The system can be widely used in early fire finding and long-range flame detection and warning.

**Keywords:** flame detection; flame tracking; variant field of view; multi-resolution

较之传统火灾探测方法,基于图像的火灾探测具有火灾发现速度快、火灾定位直接准确等特点,在火灾自动监控领域得到了广泛的关注,尤其在大空间火灾探测领域.迄今为止,研究者对火焰识别的研究工作主要包括火焰特征的提取、区域分割、火焰分类算法.针对火焰的特征提取,Çelik 等<sup>[1]</sup>在 YCbCr

颜色空间内建立了基于规则火焰区域像素的颜色模型,利用 3 个高阶多项式构建火焰区域像素属性 Cr 的分布区域,能够很好地完成火焰区域像素的识别. Horng 等<sup>[2-3]</sup>在 HSI 颜色空间内,通过对 70 帧无干扰火焰图像进行训练,获得火焰模型的颜色模型,根据颜色获取与火焰相似的区域,利用图像差减和颜

色屏蔽技术进行去除伪火焰区域. Phillips 等<sup>[4]</sup>在 RGB 空间内建立火焰区域像素的混合高斯模型以探测相似火焰的像素点,利用时域波变换提取火焰边缘的准周期性行为特征,结合疑似火焰区域的空间小波变换来剔除非火焰区域. 针对火焰疑似区域分割和分类两方面的研究,研究者提出了混合高斯背景模型<sup>[5-6]</sup>、区域分割<sup>[7]</sup>等火焰疑似区域的分割方法,并应用神经网络、支持向量机<sup>[8]</sup>、隐马尔可夫链<sup>[9]</sup>等模式识别算法完成火焰和非火焰区域的分类. Töreyn 等<sup>[9]</sup>根据火焰颜色进行区域分割获得火焰疑似区域,并针对燃烧过程中火焰跳动的特征,运用隐马尔可夫链对目标区域边缘点进行预测以完成火焰判断. 袁非牛等<sup>[10]</sup>利用火焰的色彩、纹理以及轮廓跳跃(脉动)等特征进行火焰识别,提出一种度量轮廓脉动信息的距离模型,该模型在规格化的傅里叶描述子空间能够准确地度量这种时空闪烁特征. Celik 等<sup>[11]</sup>采用基于统计的方法,通过混合高斯自适应背景建模的方式,根据火焰形状变化的特征进行火焰识别,比较适合火焰燃烧稳定前期检测. 目前,火焰识别研究都是针对火焰在图像中成像面积较大的情况,属于“大面积”火焰,火焰特征比较明显. 但是,在实际火灾发生的初期,火焰本身面积较小,或因 CCD 摄像头与火灾发生位置较远,火焰在图像中的面积较小,属于“小面积”火焰,此时火焰的某些特征不够明显,火焰识别比较困难. 目前,针对小面积火焰识别方法的相关研究报道还比较少. 此外,尽管现在的监控设备都具有旋转(云台)、光学变焦或数字变焦等功能,但研究者大多集中于火焰图像的处理,大部分火灾火焰识别算法都是在固定视场的场景下完成火焰的识别,还不能处理云台旋转、镜头变焦带来的视场变化,不能通过算法与图像获取硬件设备的共同作用,改善火焰的成像质量,以提高火焰的识别准确率.

本文针对基于图像的小面积火焰快速探测方法进行了研究,利用云台和可变焦摄像头,构建了可变视场的火灾探测系统,通过镜头变焦处理对小面积火焰自动放大,以提高火焰识别的可靠性,并通过云台的转动实现火焰的跟踪,增大了系统的监控范围. 本文的主要贡献包括:①火焰自适应区域增长分割算法;②视场变化控制;③小面积火焰匹配算法;④小面积火焰识别概率模型.

### 1 可变视场自动火焰监测系统

可变视场下的图像型火灾探测系统主要包括图

像采集、转动部分和核心控制模块. 如图 1 所示,可变焦 CCD 摄像头安装在云台上,可以随云台一起转动,并将图像采集模块采集到的现场图像输送至核心控制模块,由火灾探测算法进行运算处理.

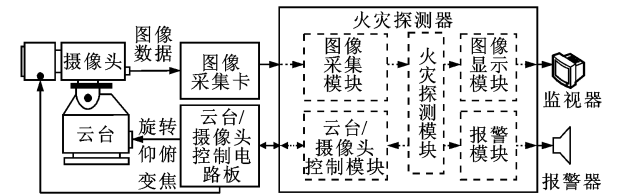


图 1 可变视场下的火灾探测系统

可变视场下的火灾探测系统加入了云台和镜头变焦控制,通过云台的转动控制扩大了监视范围,同时具有“多分辨”的视觉分析特点,从而提高了系统火灾识别的正确率,尤其对小火焰的识别. 表 1 给出了系统的主要技术参数. 系统基本工作流程如下:实时采集图像并进行处理,若发现疑似火灾区域,并且疑似区域的面积比较小,则控制云台转动一定的角度,使疑似区域处于视场中央位置;控制镜头变焦操作,放大小面积疑似区域,然后进一步分析疑似区域图像特征以提高识别准确性;若没有发现火灾则恢复最初的视场参数. 但是,由于视场的变化,使得火灾探测算法变得更加复杂,引入了很多新的问题,如火焰区域的分割、疑似区域的跟踪匹配、云台和摄像头的控制等.

表 1 可变视场检测系统主要技术参数

|      |                                   |         |                         |
|------|-----------------------------------|---------|-------------------------|
| 俯仰角度 | $+10^{\circ}\sim-60^{\circ}$      | 变焦倍数    | 22                      |
| 旋转角度 | $0^{\circ}\sim355^{\circ}$        | 数码变焦倍数  | 10                      |
| 俯仰速度 | $3.9(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$ | 焦距      | $3.6\sim79.2\text{ mm}$ |
| 旋转速度 | $6(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$   | 自动调节的对象 | 聚焦、光圈                   |

### 2 火焰特征描述

火焰在燃烧过程中表现出很多的特征,其中视觉特征包括静态特征和动态特征两个方面. 静态特征主要是指燃烧过程中所体现出来的颜色、形状、亮度等特征;动态特征主要指火焰燃烧过程中的闪烁现象以及形体上的变化(如高度、宽度、面积等). 表 2 给出了目前火焰识别算法中常用到的火焰特征以及本文中用于小面积火焰识别时采用的特征.

### 3 基于自适应生长的火焰区域分割

本文提出一种自适应区域生长方法,用于火焰疑似区域分割. 根据图像背景的亮度,自适应获取区

表 2 火焰视觉特征的总结

| 特征   | 火焰视觉识别特征 | 特征提取方法                                                                                                                                     | 是否作为小火焰视觉识别特征 |
|------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 静态特征 | 颜色       | 红蓝像素比<br>$\gamma_{RB}=(N_{R>B}+1)/N_{R<B}+1$<br>( $N_{R>B}$ 表示疑似区域中像素点红色分量大于蓝色分量的像素个数;<br>$N_{R<B}$ 表示红色分量小于蓝色分量的像素个数)                     | ✓             |
|      |          | 颜色一致性<br>$G(p)=\max_{C=R,G,B}\{\max_{p_i\in N_4(p)}\{ C(p_i)-C(p) \}\}$<br>(式中: $N_4(p)$ 表示像素点 $p$ 的 4 邻域)                                 | ✓             |
|      | 亮度       | 高亮<br>亮度<br>$I=(R+G+B)/3$                                                                                                                  | ✓             |
|      | 形状       | 圆形度                                                                                                                                        | ×             |
|      |          | 矩形度                                                                                                                                        | ×             |
|      |          | 边界线性度                                                                                                                                      | ×             |
| 动态特征 | 形体变化     | 细度<br>$\gamma_T=\min(h,w)/\max(h,w)$<br>( $h$ 表示区域高度; $w$ 表示宽度)                                                                            | ✓             |
|      |          | 高度变化<br>高度变化频率<br>$f_h=(n/2)/\Delta t$<br>( $n$ 为统计值序列过均值的次数; $t$ 为序列的时间)                                                                  | ✓             |
|      |          | 宽度变化<br>宽度变化频率<br>$f_w=n/2/\Delta t$                                                                                                       | ✓             |
|      | 运动面积变化强烈 | 运动面积变化率<br>$\rho_M(t)=\frac{A_D(t)}{\max(A(t),A(t-1))}$<br>( $A(t)$ 表示当前帧火焰疑似区域的面积; $A(t-1)$ 表示上一帧的火焰疑似区域面积; $A_D(t)$ 表示当前帧与上一帧火焰运动区域的面积和) | ✓             |
|      | 边缘变化     | 强运动<br>帧间差分(运动)<br>$D(t)=g(t)-g(t-1)$<br>( $g(t)$ 表示 $t$ 帧图像像素点的属性、亮度或者红色分量)                                                               | ✓             |

域属性的分割阈值,从而找到种子像素点,根据事先确定的生长或相似准则进行区域生长。

(1)阈值计算. 在图像中,火焰区域属于视场中较亮或偏红的区域. 本文进行了大量的火焰区域亮度统计,得出火焰区域最低的亮度范围一般在[140, 180]之间. 当图像中的背景亮度比较高时,火焰区域部分会融入背景中,而背景亮度较低时,由于火焰的照耀火焰区域将向外扩展,为火焰区域的分割带来干扰. 因此,为了能够准确的进行火焰区域的分割,区域的分割亮度阈值应随着背景的亮度自适应变化. 为此,本文将分割亮度阈值调整区间进行线性化处理,根据图像背景的亮度来计算火焰区域的亮度阈值(本文使用背景平均亮度表示背景亮度),亮度阈值  $\hat{I}$  的计算公式定义为

$$\left. \begin{aligned} &\text{Find}; \hat{I}, \hat{I} \in [140, 180] \\ &\eta(I > \hat{I}) = \mu \\ &\mu = \mu_b + \lambda \mu_d \\ &\lambda = (\bar{I}/I_b) - 1.0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $I$  表示图像像素的亮度值; $\bar{I}$  表示当前图像平均亮度; $\hat{I}$  表示亮度阈值; $I_b$  表示图像中基本亮度参考值,常取 128; $\mu$  表示疑似火焰像素点的比重; $\mu_b$  表示火焰像素点在  $I_b$  处的比重; $\mu_d$  表示火焰像素点比重最大调整度,本文取 5%; $\lambda$  表示疑似火焰像素点比重的修正系数,且  $\lambda \in [-1, 1]$ ; $\eta(I)$  表示图像亮度直方图的比重概率计算。

背景的亮度也会影响相邻帧帧间差分值和火焰区域边界梯度值. 对于差分值来说,往往背景越亮,与火焰亮度越接近,帧间差分(运动)越小. 据统计,火焰区域帧间差分值最大约为 15 像素左右,考虑到背景亮度的影响,将差分阈值进行线性化处理,调整为

$$\hat{D} = \hat{D}_{\text{Base}} - \lambda \hat{D}_{\text{Modify}} \quad (2)$$

式中: $\hat{D}$  表示火焰的边缘运动阈值; $\hat{D}_{\text{Base}}$  表示火焰在背景亮度为  $I_{\text{Base}}$  时的边缘运动阈值,一般为 10; $\hat{D}_{\text{Modify}}$  表示火焰边缘运动阈值的调整量,一般为 5。

对于边界梯度来说,图像在亮度较低和较高的情况下,对比度较低,梯度较小.根据实验统计,边界梯度的最大值是背景亮度接近128时,最大值约为45.同样,考虑到背景亮度的影响,将边界梯度值进行线性化处理,调整为

$$\hat{D}' = \hat{D}'_{\text{Base}} - |\lambda| \hat{D}'_{\text{Modify}} \quad (3)$$

式中: $\hat{D}'$ 表示火焰边界梯度的阈值, $\hat{D}'_{\text{Base}}$ 表示火焰在背景亮度为 $I_{\text{Base}}$ 时的边界梯度阈值; $\hat{D}'_{\text{Modify}}$ 表示火焰边界梯度阈值的调整量.

(2)种子选择与区域生长.根据火焰的亮度阈值 $\hat{I}$ 和边缘运动阈值 $\hat{D}$ ,在视场中寻找种子点,满足

$$\left. \begin{array}{l} I_i > \hat{I} \\ D_i > \hat{D} \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{array}{l} I_i > \hat{I} \\ G_i > \hat{G} \end{array} \right\} \quad (5)$$

以种子点为中心向四周扩展,寻找高于火焰亮度阈值且低于火焰边界梯度阈值的像素点并合为一个区域,称为种子区域.

## 4 可变视场下的火焰识别方法

基于上文火焰分割算法处理,可得到火焰疑似区域列表.对于疑似区域面积较大的优先处理,直接进行判断分析,无需控制云台与摄像机的动作.本文主要针对小面积疑似区域识别,采用改变视场的方法(放大、云台旋转等)对疑似区域进行放大,增强区域的特征,并通过小面积疑似区域的跟踪与匹配,以及疑似区域的累计概率计算,实现小面积火焰的判断.

### 4.1 疑似区域跟踪

借助云台和镜头的控制,实现小面积疑似区域跟踪.为保证小面积疑似区域处在视场的中央位置,将区域尽可能放大.首先根据目标区域在视场中水平方向的位置,控制云台转动.每转动一个角度,将重新在水平方向进行目标区域搜索,获取新的位置,直到把目标放到水平中心.其次,根据目标在视场中垂直方向的位置,调整云台俯仰,同时在垂直方向进行搜索,直到把目标放到垂直中心.再次,根据当前小火疑似区域的面积及目标面积大小,计算出所需的放大倍数.然后,依据事先计算的放大速率,以及摄像机一般变焦倍数与变焦时间基本成正比的关系,计算所需的放大时间.

### 4.2 疑似区域匹配

区域匹配是将当前帧的种子区域列表与历史疑似区域列表进行“最优”方案匹配.通过疑似区域的历史情况,计算其疑似概率作为相似性衡量的量化参数.匹配度的计算一般是根据种子区域和疑似区域的相似性进行的.相似性一般表现为形体相似性(主要是面积比)、位置相似性(主要是重心的距离、相交面积比等)等.各部分的计算公式如下.

面积比的计算公式为

$$\rho_{S|D} = \frac{\min(A_S, A_D)}{\max(A_S, A_D)} \quad (6)$$

式中: $A_S$ 表示种子区域的面积; $A_D$ 表示疑似区域的面积.

相交面积比的计算公式为

$$\rho_{S \cap D} = \frac{A_{S \cap D}}{\max(A_S, A_D)} \quad (7)$$

式中: $A_{S \cap D}$ 表示种子区域和疑似区域的相交面积.

重心距离的计算公式为

$$\rho_d = \frac{d(B_S, B_D)}{\max(h_S, w_S, h_D, w_D)} \quad (8)$$

式中: $B_S$ 表示种子区域的重心; $B_D$ 表示疑似区域的重心; $d(B_S, B_D)$ 表示距离计算函数,可以为欧氏距离、Hausdorff距离、棋盘距离等; $h_S, w_S$ 表示种子区域的高度和宽度; $h_D, w_D$ 表示疑似区域的高度和宽度.

匹配度的融合计算方法为

$$\kappa = \frac{(\overline{\rho_{S|D}} + \rho_{S|D})(\overline{\rho_{S \cap D}} + \rho_{S \cap D})}{(1.0 + \rho_d)(1.0 + a)} \quad (9)$$

式中: $\overline{\rho_{S|D}}$ 表示面积比的最小值,默认取0.2; $\overline{\rho_{S \cap D}}$ 表示相交面积比的最小值,默认取0.2.这两个参数为由火焰闪烁引起的面积比部分变化提供量化考量.

### 4.3 疑似区域概率计算模型

利用时间域分析,选出所有面积增长或中心位置发生改变的疑似火焰区域作为潜在检测区.对放大后的区域根据式(5)、(6)进行特征提取,本文对频率、红蓝像素比、细度等特征进行了大量的统计分析,得到小面积火焰特征满足以下条件

$$\left. \begin{array}{l} f = \max(f_h, f_w) > 2.0 \\ \gamma_{\text{BG}} < 0.8 \\ \gamma_{\text{T}} > 0.2 \\ \rho_{\text{M}} > 0.1 \end{array} \right\} \quad (10)$$

首先,如果小火具有式(10)表示的特征,则疑似区域当前概率 $s_c(k, i)$ 加分,否则扣分.为了提高火灾判断的可靠性,本文结合可信度模型和视频序列建立

火焰识别的概率模型

$$s(k,i) = \begin{cases} s(k-1,i) + s_c(k,i) & \text{匹配} \\ s(k-1,i) - M_{\text{isFrames}}/3 & \text{不匹配} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $s_c(k,i)$ 表示疑似区域当前概率; $k$ 表示第 $k$ 帧图像; $i$ 表示第 $i$ 个区域; $M_{\text{isFrames}}$ 表示总的帧数; $T$ 表示概率阈值; $s(k,i)$ 表示检测区域累计概率.若 $s(k,i)>T$ ,则系统报警.

基于上述关键技术,本文提出可变视场下的小面积火焰识别算法,流程图如图 2 所示.具体实现思路如下:①云台、镜头处于静止状态,采集图像并进行分割;②提取小火疑似区域特征,计算火灾概率,如果火灾概率大于提醒概率阈值  $T_0$ ,继续下面的操作;③变视场,控制云台使得目标区域移到视场正中,并进行放大;④云台、镜头静止,火灾探测一段时间,以探测出目标是否是火灾区域;⑤根据探测的结果进行适当的处理,如果不是火灾区域,则恢复视场,否则继续探测并进行报警,直到火灾熄灭或被扑灭,然后恢复视场.

5 系统实验

为了验证系统的性能,进行了小火跟踪与识别实验.通过云台的运动控制使火焰保持在视场中央.如图 3 所示,在火焰运动到视场左边时,进入跟踪状态,云台朝着火焰运动的方向运动,直到把火焰置于水平中心.垂直方向同理,如图 4 所示,当火焰目标下移,系统跟踪火焰,将火焰置于视场正中.如果火

焰一直朝某个方向运动,云台亦将一直朝该方向运动,直到无法跟踪位置.在此过程中,火焰探测算法一直运行.由此可见,运动火焰跟踪算法可以完成实时的跟踪和探测.另外,该跟踪场景背景局部高亮,对火焰探测干扰较大,但是本文的算法可以较好地排除该干扰,具有较强的鲁棒性.

如图 5 所示,当在视场中探测到小火疑似区域,并达到提醒限时(见图 5a),进入小火的跟踪态;通过控制云台水平转动使得目标达到水平中心(见图

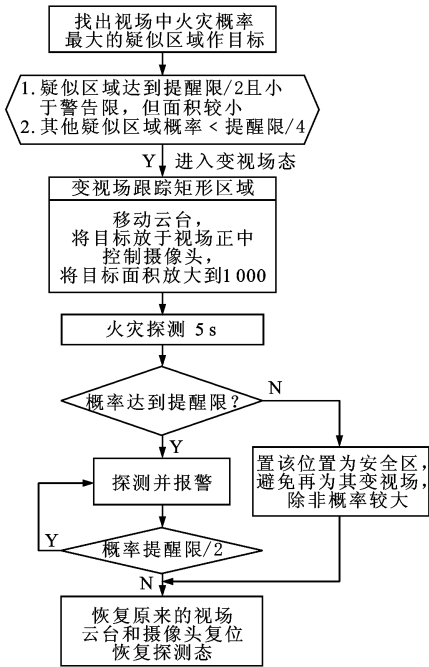


图 2 小火探测算法流程图



(a)火焰运动到视场左边 (b)云台左转 (c)把运动火置于水平中心

图 3 运动火水平方向的跟踪



(a)火焰运动到视场下方 (b)云台下俯 (c)把运动火置于垂直中心

图 4 运动火垂直方向的跟踪



图 5 小火的跟踪及小火探测过程

5b、图 5c),然后俯仰到垂直中心(见图 5d、图 5e),最后进行变焦,根据当前的面积及目标面积计算放大时间为 3.8 s,并进行放大(见图 5f);接着进行火焰的探测并报警(见图 5g、图 5h、图 5i)。

经过多次实验表明,小火探测整个过程约需 20 s. 其中,跟踪过程花费时间较多,约要 12 s;变焦放大后,因为火焰特征很明显,探测较快,大约 5 s 即可完成. 虽然该算法因为跟踪过程而时间开销较大,但是,却可以达到很好的火灾防治效果,因为它可以对于火灾早期的小火以及远处的小火给出高可靠性的报警,这是直接进行探测不可能实现的。

6 结 论

通过对小面积火焰快速探测方法进行研究,得到以下结论。

(1)将云台旋转与镜头变焦处理两项技术融入传统图像型火灾探测系统,可有效扩大系统监测范围,提高火焰疑似区域图像信息采集质量与视觉特征显著性。

(2)自适应区域增长算法可有效处理火焰疑似区域分割. 在分析火焰静态与动态特征的基础上,对“多分辨”视觉特征识别算法进行了验证. 通过信任度概率模型计算疑似概率,可最终确定火焰区域。

(3)进行了小火跟踪与识别实验. 在跟踪场景背景局部高亮干扰下,所提算法可以较好地排除干扰,具有较强的鲁棒性. 实验结果表明,小火探测整个过程约需 20 s,其中跟踪耗时与检测耗时比为 2.4 : 1. 该算法虽然跟踪过程耗时量较大,但由于其在小火焰检测方面的精确度优势,可广泛应用于火灾早期以及远距离火焰检测及预警。

参考文献:

[1] CELIK T, DEMIREL H. Fire detection in video sequences using a generic color model[J]. Fire Safety Journal, 2009,44(2):147-158.

[2] LU Taifang, PENG Chienyuan, HORNG Wenbing, et al. Flame feature model development and its application to flame detection[C] // Proceedings of the First International Conference on Innovative Computing, In-

- formation and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 158-161.
- [3] HORNG Wenbing, PENG Jianwen, CHEN Chihyuan. A new image-based real-time flame detection method using color analysis[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 100-105.
- [4] PHILLIPS W III, SHAH M, LOBO N V. Flame recognition in video [J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23(1/2/3): 319-327.
- [5] GREENSPAN H J, GOLDBERGER M A. A probabilistic framework for spatio temporal video representation and indexing [C]// Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision. Berlin, Germany: Springer, 2002: 461-475.
- [6] BLEKAS K, LIKAS A, GALATSANOS N P. A spatially constrained mixture model for image segmentation [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2005, 16(2): 494-498.
- [7] LIU Feng, GLEICHER M. Region enhanced scale-invariant saliency detection[C]// Proceedings of the International Conference on Multimedia and Exposition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1477-1480.
- [8] KO B C, CHEONG K H, NAM J Y. Fire detection based on vision sensor and support vector machines [J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(3): 322-329.
- [9] TOREYIN B U, DEDEOGLU Y, CETIN A E. Flame detection in video using hidden Markov models [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 1230-1233.
- [10] 袁非牛, 廖光焯, 张永明, 等. 计算机视觉火灾探测中的特征提取[J]. 中国科技大学学报, 2006, 36(1): 39-43.  
YUAN Feiniu, LIAO Guangxuan, ZHANG Yongming, 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.
- [11] CELIK T. Bayesian change detection based on spatial sampling and Gaussian mixture model [J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32(12): 1635-1642.

(编辑 武红江)