

# 利用图像频度特征的稀薄烟雾检测算法

陈智铭<sup>1,2</sup>, 谢维波<sup>1,2</sup>, 许华滨<sup>1,2</sup>

(1. 华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021;  
2. 华侨大学 厦门软件园嵌入式技术开放实验室, 福建 厦门 361008)

**摘要:** 基于图像的频度特征, 不考虑薄烟自身的颜色, 通过比较烟不存在时的图像(基准图)和实时视频当前帧的灰度值的相关系数的变化, 以及基准图和当前帧频度值的相关系数的变化, 实现稀薄烟雾“透明性”特征的有效识别. 把非常稀薄的烟雾实时的检测出来. 实际烟雾视频数据分析结果表明: 该算法是实用有效的, 能够在火灾初期阶段把薄烟检测出来, 且具有鲁棒性.

**关键词:** 烟雾检测; 彩色直方图; 频度图像; 灰度图像; 相关系数

**中图分类号:** TP 391

**文献标志码:** A

传统用于火灾检测主要是烟雾检测探测器和火焰探测器, 但等这些火灾探测器检测到烟火的时候可能为时已晚. 为此, 人们提出了基于图像的视觉火灾探测技术. 如 Noda 等<sup>[1]</sup>提出了隧道火灾图像检测技术; Yamagishi 等<sup>[2-3]</sup>提出了彩色图像的火焰检测算法; 裴非牛等<sup>[4]</sup>根据火灾的色彩、纹理及轮廓脉动等特征提出一种度量轮廓脉动信息的距离模块. 但上述方法都没有提及烟雾的检测. 当火被检测到的时候, 火灾可能已经发生了, 因此, 在早期发现火灾产生的烟雾是很有必要的. 当前的烟雾检测方法主要是关注烟雾的颜色, 即当烟雾的颜色变成灰色, 以提取出浓烟, 但出现浓烟之后不久常会出现大火, 可能会来不及. 对于早期火灾产生时非常稀薄烟<sup>[5]</sup>的检测, 是目前使用的烟雾检测算法<sup>[6-7]</sup>难于检测到的. 鉴于此, 本文基于图像的频度特征<sup>[8-10]</sup>, 研究分析一种稀薄烟雾的检测算法.

## 1 频度图像的制作

### 1.1 频度图像的引入

定义频度图像表示图像中与自己相同像素值的个数与位置. 彩色直方图所描述的是不同色彩在整幅图像中所占的比例, 而非其所处的空间位置, 即无法描述图像中的对象或物体. 在各种拍摄场景中, RGB 图像都会受到各种各样噪音的影响, 因此需要取得多张相同场景的彩色直方图来制作频度图像.

### 1.2 平均频度图像

1) 在时刻  $t$  取得的颜色图像当作  $f^{(t)}$ , 把  $f^{(t)}$  映射到 RGB 彩色直方图空间, 作为  $h^{(t)}$ .  $h^{(t)}$  具有 RGB 各种颜色的坐标值以及坐标值上的频数值.

2) 根据  $f^{(t)}$  的像素颜色值索引其对应的彩色直方图  $h^{(t)}$  中的频数值, 然后将  $f^{(t)}$  的颜色值用  $h^{(t)}$  的频数值替代, 得到的新的图像称为频度图像  $g^{(t)}$ .

3) 把从  $\{f^{(t)}, t=1, 2, \dots, n\}$  得到的  $n$  张频度图像  $g^{(t)}$  求总和  $S$ , 即  $S = \sum_{t=1}^n g^{(t)}$ .

4) 对总和  $S$  求平均值  $\bar{g}$ , 即称为平均频度图像, 其各像素的值取实数值.

### 1.3 时间序列上频度图像

为了实时捕捉时时变化情况, 以一定的时间间隔捕捉图像, 从取得时间序列的图像中检测有无烟

收稿日期: 2013-02-28

通信作者: 谢维波(1964-), 男, 教授, 主要从事嵌入式技术、数字信号处理的研究. E-mail: xwblxf@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2010J01334); 华侨大学高层次人才科研启动项目(11BS120)

雾. 实验摄像头的视野被分成  $6 \times 6$  共 36 个窗口. 制作流程可以分成以下 4 个步骤.

1) 对每一帧图像进行高斯滤波处理. 由于摄像头捕获的视频会被各种各样的噪声影响, 而频度图像对噪音很敏感, 对此捕获的图像应该先去除噪音. 为了去除噪音, 可以通过下式的高斯滤波器进行图像的平滑操作. 即

$$G(m, n) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp(-(m^2 + n^2)/2\sigma^2). \tag{1}$$

2) 将 256 级的 RGB 图像降成 51 级色彩图像. RGB 彩色空间的色彩太多, 直接统计效果不好, 可先将色彩归类降阶, 再进行统计. 其计算式为

$$y = \begin{cases} 5 \times \text{Floor}(x/5), & x < 255, \\ 250, & x = 255. \end{cases} \tag{2}$$

式(2)中: Floor 指返回小于或等于指定表达式的最大整数.

3) 计算 51 级色彩图像的频度图像.

4) 用连续 10 张用 51 级色彩图像制作成的频度图像制作平均频度图像, 并移到下一个时刻帧.

## 2 图像的相关性

### 2.1 相关系数

在频度图像中, 有着彩色直方图空间中绘制的各点像素出现的频率信息, 以及像素的位置信息. 当彩色图像中只有少量的薄烟存在的时候, 在灰度图像上只有存在烟雾地方的像素点的像素值才会出现少量的变化; 然而, 在频度图像上, 烟存在的那个部分即使只有一点变化, 整个图像的频率信息就发生变化, 频率图像全体也会产生很大的变化.

以无烟状态下取得的初期图像(称为基准图像)开始, 根据相关系数计算式(4)来计算基准图像中各窗口的频度图, 并以一定时间间隔, 在时间序列上取得同窗口图像的频度图的相关系数  $C_i(t)$ , 其中  $i$  是窗口的序号 ( $i=1, 2, \dots, 36$ ). 以此为依据, 将基准状态和其他状态间的变化大小定量化. 同时, 利用式(3)将取得的彩色图像进行计算, 变换成灰度图像. 同样的, 计算基准状态各窗口的灰度图像和其他状态的灰度图像的相关系数, 将灰度图像间变化大小定量化.

$$\text{Gray} = 0.299r + 0.587g + 0.114b, \tag{3}$$

$$C_i(t) = \frac{\sum_{(m,n) \in \Omega} (p_i^{(t)}(m,n) - \alpha_i^{(t)})(q_i^{(t_0)}(m,n) - \beta_i^{(t_0)})}{\sqrt{\sum_{(m,n) \in \Omega} (p_i^{(t)}(m,n) - \alpha_i^{(t)})^2} \sqrt{\sum_{(m,n) \in \Omega} (q_i^{(t_0)}(m,n) - \beta_i^{(t_0)})^2}}. \tag{4}$$

式(3)中:  $r, g, b$  是指彩色图像各像素的 R, G, B 值; Gray 是单色的灰度值. 式(4)中:  $p_i^{(t)}(m, n), q_i^{(t_0)}(m, n)$  分别指在时刻  $t$  取得的图像及基准图像, 其制作成的频度图像在窗口  $i$  的点  $(m, n)$  像素的频度值;  $\alpha_i^{(t)}, \beta_i^{(t_0)}$  分别指在时刻  $t$  取得的图像及基准图像, 其制作成的频度图像在窗口  $i$  各像素的平均频度值.

### 2.2 相关性分析

对于每个窗口的基准状态和最新状态下的灰度图像间相关系数, 以及频率图像间的相关系数进行比较, 可通过两种状态间的特征来分析图像. 一方面, 稀薄烟雾状态的频度图像与无烟状态的频度图像的相关性是变化的, 无烟状态和有烟状态两个频度图像的相关性变化大, 其相关值是变小的. 另一方面, 稀薄烟雾存在的灰度图像中, 烟雾部分的像素灰度值稍有变化, 烟雾部分之外的像素灰度值没有变化. 所以, 这两种状态的灰度图像相关值变化很小, 保持高度相关.

薄烟以外的物体, 如人物和不确定的物体进入摄像机视野的情况下, 物体会遮挡住背景; 而无烟状态的图像和薄烟以外的物体进入视野的灰度图像之间的相关性就变低了. 当然, 两者的频度图像的相关性也降低了. 在无烟状态、移动物体存在状态和照明变化状态等各种场景设想中, 获取随着时间变化的实验用图像. 然后, 对随着时间变化的频度图像间和灰度图像间相关值进行比较, 分析各个窗口在初期状态取得的几张图像制作的灰度图像, 以及在频度图像和时间序列上取得的图像制作的灰度图像和频度图像间相关系值的情况.

只要环境有变化, 其频度图像的相关值会变小, 显示出相关值的变化是挺大的. 在取得图像中, 照明

噪声及 CCD 噪声是时常存在的. 由于频度图像对噪声有敏感的性质, 频度图像的相关值在图像即使没有变化的情况下也不会变得接近 1, 在有一定相关范围内. 对于因照明开关引起的环境变化, 薄烟发生及人物出现等状态变化, 频度图像的相关值与初始状态相比, 全部都变得相当小. 根据灰度图像和频度图像的相关值, 考虑薄烟的扩散, 烟的发生和视野内人物的变动, 以及照明变化等状态变化的差异, 识别出这些差异, 提出检测薄烟的方案.

### 3 缓慢流动的薄烟检测算法

图 1 为缓慢流动的薄烟检测流程.

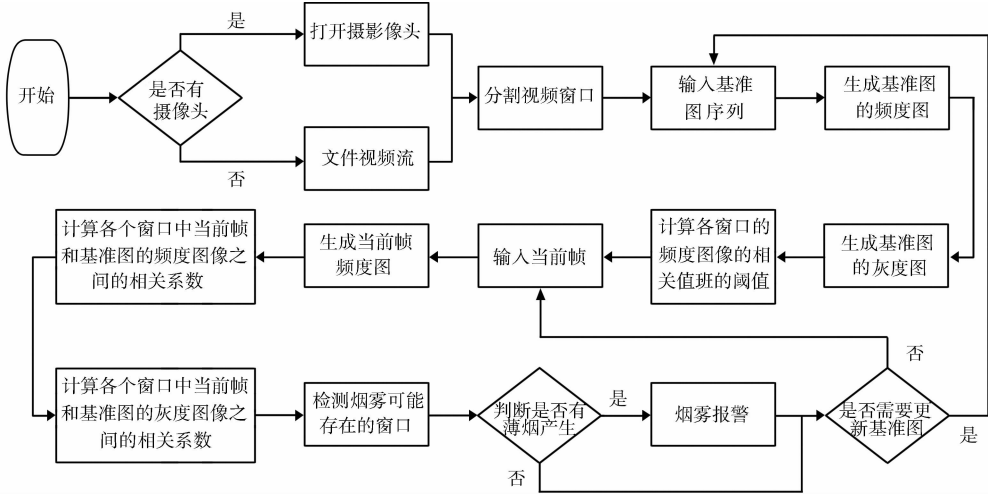


图 1 稀薄缓慢流动的烟雾检测

Fig. 1 Thin slow flow smoke detection

#### 3.1 检测烟雾可能存在的窗口

把  $C_i^h$  作为窗口  $i$  中频度图像的相关值, 把  $\theta_i^h$  作为同窗口的频度图像相关阈值, 把  $C_i^g$  作为同窗口灰度图像的相关值, 把  $\theta_i^g$  作为灰度图像的相关阈值. 只要满足  $C_i^h < \theta_i^h$  和  $C_i^g > \theta_i^g$ , 即可判断窗口  $i$  可能有烟雾存在. 其中:  $\theta_i^g$  没有必要每个窗口都设定, 实验中全部窗口都使用相同的值. 为使每个窗口的阈值不一样, 有必要使用基准状态下的图像预先求出  $\theta_i^h$ . 即

$$\theta_i^h = \bar{\theta}_i - \theta_{hd}. \quad (5)$$

式(5)中:  $\bar{\theta}_i$  为第 2 帧到第 101 帧的每个窗口的平均频度相关值;  $\theta_{hd}$  为敏感度, 代表薄烟情况下平均频度图像的相关值下降程度. 研究中,  $\theta_{hd}$  取 0.08,  $\theta_i^g$  取 0.82, 如果  $\theta_i^g$  在 0.82 以下则可以判定没有薄烟.

检测中,  $\theta_{hd}$  和  $\theta_i^g$  在只进行一次设定就可以了. 当然如果照明发生变化, 或者小的不透明物体进入场景, 并满足  $C_i^h < \theta_i^h$  和  $C_i^g > \theta_i^g$ , 则可能会被误检测为薄烟存在, 对此有必要提出相应的对策.

#### 3.2 全局及局部照明变化的误检测对策

由于薄烟的运动是缓慢的, 具有一瞬间全图不会改变的性质, 因此, 全图的照明变化引起的误检测就可以利用些特性给予排除. 此外, 薄烟还具有另外一个性质, 就是连续的特性, 根据些特性可以防止局部照明变化引起的误检测.

#### 3.3 薄烟的判定方法

从以上的结果来看, 如果窗口  $i$  在一定的连续时间内满足  $C_i^h < \theta_i^h$  和  $C_i^g > \theta_i^g$ , 且在此期间全体及局部的照明没有发生变化或者视野内没有移动的物体影响, 就可以判断窗口  $i$  内是存在薄烟的.

#### 3.4 基准图的更新

研究中, 把没有烟和移动物体的图像作为基准图像, 并且把从摄像头取得的图像和基准图像进行比较, 以此来判断烟雾的存在. 但如果不更新基准图像, 一直使用检测开始阶段制作成的基准图像, 在日照发生变化或者局部灯开关等发生的情况下, 画面的明暗度会发生变化, 此后从摄像头获取的图像就很难来检测薄烟的存在. 所以有必要隔一段时间进行更新基准图像(环境发生变化后的图像作为基准图像),

这样即使图像的明暗发生变化也可以继续正确地进行薄烟的检测.

基准图像的更新时机应该选择在无烟且没有移动物体的情况下进行,如果在照明发生变化的情况下,需要选择在照明稳定后的状态进行. 照明是否稳定可以通过各窗口的变化率来决定. 如果各窗口的变化率没有发生变动,则更新基准图像和各窗口的频率阈值.

3.5 检测状态变化的窗口

在时刻  $t$  取得图像,由于人物的进入、烟的发生或者照明变化等引起的变化发生时,检测出相应变化窗口是有必要的. 将时刻  $t$  取得的图像制作成灰度图,然后与基准状态的灰度图作差分图像,由于这个差分图像有噪音的存在,利用中值滤波可将噪音除去,并将滤波后的图像二值化. 其计算式为

$$b(m,n)=\begin{cases}1,&d(m,n)\geqslant\theta^{\#},\\0,&d(m,n)<\theta^{\#}.\end{cases}\tag{6}$$

式(6)中: $b(m,n)$ 是二值化图像; $d(m,n)$ 是经过中值滤波后的差分图像灰度值; $\theta^{\#}$ 是灰度图像阈值.

研究中,主要关注的是薄烟. 为了检测出图像中少量的变化,将  $\theta^{\#}$  设置得比较小,但当  $\theta^{\#}$  比较小时,容易受到噪声的影响. 因此,可将每个窗口用变化率  $r=S_1/S$  来计算,如果满足  $r>\theta^{\#}$ ,则判断这个窗口有发生变化. 其中: $S_1$  表示各窗口中值为 1 的像素的个数; $S$  表示各窗口的总像素数; $\theta^{\#}$  表示变化率的阈值. 实验中, $\theta^{\#}$  取 0.06,但根据不同环境进行变更是有必要的. 由此可知,窗口的变化率在阈值  $\theta^{\#}$  之上,即可判断窗口的状态发生了变化.

4 实例验证

为了验证算法的有效性,用野外森林产生火灾和室外人为烟雾的视频进行检测,视野被分割成  $6\times 6$  的窗口,检测出的薄烟用粗框圈出. 实验中所使用的各种阈值及相关参数:二值化的阈值为 7;敏感度 ( $\theta^{\text{hd}}$ ) 为 0.08;透明物体的灰度图像阈值为 0.82;决定烟雾出现率为连续 10 帧满足烟雾检测条件.

**场景 1** 森林火灾前的烟雾视频. 在这个场景中,有微风从镜头的右边往左边吹,第 15 个窗口在第 1 076 帧可以判断有烟的存在(在 1 076 帧之前有连续 20 帧满足  $C_i^b<\theta_i^b$  和  $C_i^{\#}>\theta^{\#}$  的判定式),如图 2 (b)所示. 在此之后,烟雾开始往左边扩散,第 14 个窗口在第 1 987 帧发现有烟雾,如图 2(c)所示.

**场景 2** 室外烟雾发生器模拟烟的发生. 刚开始时,镜头中没有烟雾,之后从外面扔进一个发烟器,使用镜头中产生烟雾. 在这个场景中,有人造风在左右吹动,烟雾的变化很快. 图 2(d)~(f)中的实验结果表明,算法能时时检测出烟雾的变化情况.

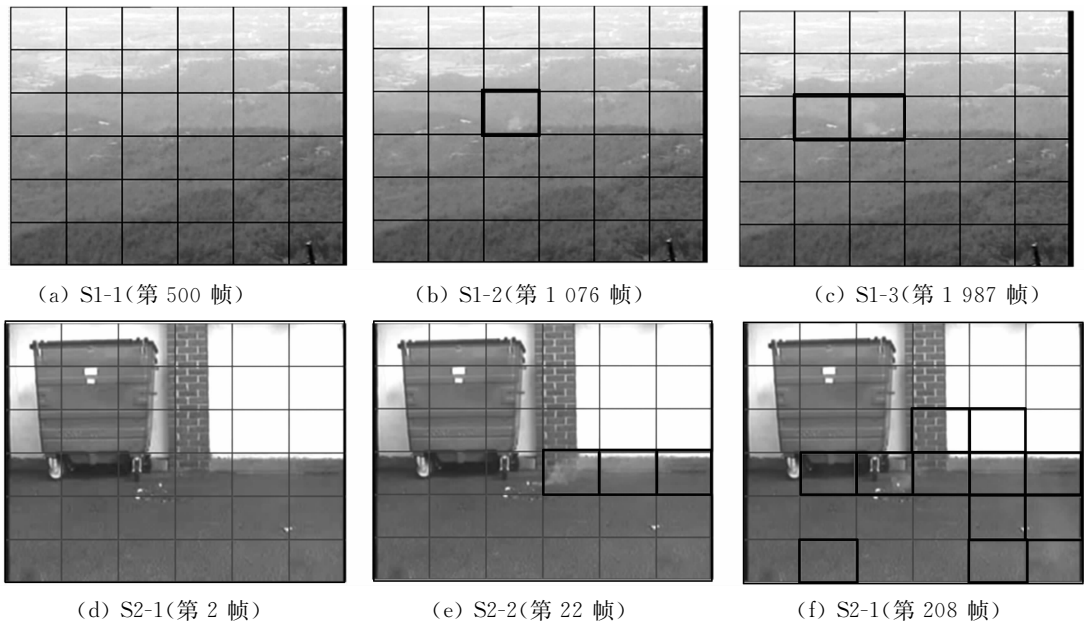


图 2 烟雾检测结果

Fig. 2 Smoke test results

5 结束语

利用频度图像对环境变化敏感的特性进行薄烟检测. 通过对实际烟雾视频数据分析, 验证了基于频度图像的稀薄烟雾检测算法是实用有效的, 能够在火灾初期阶段把薄烟检测出来, 且具有鲁棒性.

参考文献:

[1] NODA S, UEDA K. Fire detection in tunnels using an image processing method[C]//IEEE Processing of Vehicle Navigation Information Systems Conference. Yokohama:IEEE Press, 1994: 57-62.

[2] YAMAGISHI H, YAMAGUCHI J. Fire flame detection algorithm using a color camera[C]//Micromechatronics and Human Science. Nagoya:IEEE Press, 1999:255-260.

[3] YAMAGISHI H, YAMAGUCHI J. A contour fluctuation data processing method for fire flame detection using a color camera[C]//26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Nagoya:IEEE Press, 2000: 824-829.

[4] 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]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(1): 39-43.

[5] ZHENG G, OE S. Thin and slow smoke detection by using frequency image[J]. IEEE Transactions on Electronics, Information and Systems, 2010, 130(7): 1168-1176.

[6] TOREYIN B U, DEDEOGLU Y, Cetin A E. Wavelet based real-time smoke detection in video[C]//European Signal Processing Conference. Istanbul:[s. n. ], 2005:4-8.

[7] 邓彬, 刘辉, 连国云, 等. 基于视频的烟雾检测[J]. 长沙大学学报, 2007, 21(5): 87-89.

[8] KASHIWAGI T, OE S. Introduction of frequency image and applications[C]//Annual Conference of SICE. Takamatsu:IEEE Press, 2007:584-591.

[9] KASHIWAGI T, OE S. Theory and applications of frequency image of color vectors[C]//Proceedings of SPIE, Image Processing: Machine Vision Applications II, 2009:72510H(doi:10. 1117/12. 805429).

[10] CHAN C N, OE S. Active eye-tracking system using frequency image processing method[J]. The Journal of the Institute of Image Electronics Engineers of Japan, 2010, 39(2): 185-194.

Thin and Slow Smoke Detection Based on Frequency Image

CHEN Zhi-ming, XIE Wei-bo, XU Hua-bin

(1. College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Open Laboratory of Embedded Technology of Xiamen Software Park, Huaqiao University, Xiamen 361008, China)

**Abstract:** It presents a method which is without considering the color of smoke and base on the image frequency characteristics for detecting thin smoke. By calculating the correlation coefficient of the frequency image and the gray image between current stage and the initial stage, and making a comparison so that the recognition of thin smoke transparent characteristics can be realized efficiently. The actual results of the smoke video data analysis show that this method is practical. It also has the ability to detect the smoke in the early fire stage, and equips robustness.

**Keywords:** smoke detection; color histogram; frequency image; gray image; correlation coefficient

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)