

# 基于暗通道和小波的单幅图像烟雾检测算法<sup>①</sup>

张汉营, 刘秉瀚

(福州大学 数学与计算机科学学院, 福州 350108)

**摘 要:** 针对单幅图像烟雾检测算法的研究较少, 而基于烟雾颜色模型的方法易受疑烟区域的干扰等问题, 提出了一种多级筛选的单幅图像烟雾检测算法. 该算法首先对经过导向滤波优化过的暗通道透射率图做二值化处理, 快速去除高透射率干扰区域, 得低透射率区域; 然后分别对去雾前后的低透射率区域提取 YCbCr 颜色空间的 Cr 通道并差分二值化, 去除一些静态背景干扰区域, 得疑烟区域; 最后分别对去雾前后疑烟区域的 Y 通道做二维离散小波变换, 根据小波能量做差并二值化, 得烟雾区域. 实验结果表明, 本算法能够有效消除图像中的疑烟区域的干扰, 准确检测出烟雾区域.

**关键词:** 烟雾检测; 暗通道; 导向滤波; 小波变换; 单幅图像

## Smoke Detection Algorithm of Single Image Based on Dark Channel And Wavelet

ZHANG Han-Ying, LIU Bing-Han

(College of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** To solve some problems of the single image smoke detection, such as, the study of single image smoke detection is less and smoke detection method of single image based on color model is easily influenced by the color suspected smoke area, we propose a Multilevel filter algorithm of single image smoke detection. Firstly, for the dark channel transmittance chart optimized by the guide filter, the algorithm carries out binaryzation on the image according to certain threshold, which make it fast to remove the interference area of high transmittance and obtain the low transmittance area. Then it removes the smoke in the low transmittance area, extracts the Cr channel of YCbCr color space before and after smoke removal, subtracts and carries out binaryzation, further removes some static background interference area thereby obtains the suspected smoke area. Finally it extracts the Y channel of YCbCr color space on the suspected smoke area before and after smoke removal, transforms to two-dimensional discrete wavelet, and makes difference according to the wavelet energy, thereby obtains the final smoke area. Experimental results show that the proposed algorithm can effectively eliminate the interference of the color suspected smoke region in the image, and detect the smoke area accurately.

**Key words:** smoke detection; dark channel; guide filter; wavelet transform; single image

火灾发生的早期往往会产生大量的烟雾, 若能及时地监测到烟雾就能及早地提供火灾预警. 基于视频的烟雾检测<sup>[1-8]</sup>一直是国内外研究的热点, 这种方法能扩大烟雾检测的范围, 减少检测成本, 准确率高. 但需要对视频的多帧序列图像进行背景建模、分析并提取烟雾动静态特征、训练、决策输出判决, 导致算法

复杂度高, 易延误火灾预警. 因此基于单幅图像的烟雾快速检测方法逐渐受到关注和研究. 但目前基于单幅图像的烟雾检测方法的文献很少, 而且还没有一个公认的比较好的单幅图像烟雾检测方法. 通常是作为视频烟雾检测中提取烟雾静态颜色特征的一部分. Chen 等人<sup>[9]</sup>结合 RGB 颜色分量和 HSI 色彩空间的 I

① 基金项目:福建省自然科学基金(2013J01186,2012J01263)

收稿时间:2015-07-06;收到修改稿时间:2015-09-06

分量建立了烟雾色彩模型. 该方法能够有效检测出灰烟, 但经常误检和漏检; Celik 等人<sup>[10]</sup>在 YCbCr 色彩空间下建立了一套烟雾和火焰的色彩模型, 该模型较准确的判断出图像中的火焰像素, 但对烟雾像素易产生误判; Wang 等人<sup>[11]</sup>在 Chen<sup>[9]</sup>的基础上, 结合青白烟雾的 B 分量, 优化了青白烟雾的检测, 该方法能够有效检测出烟雾区域, 但是易受和烟雾颜色相近的物体干扰. Yang 等人<sup>[12]</sup>提取手动标记出的烟雾区域的三阶颜色矩特征, 通过 KNN 训练并测试样本. 该方法能够去除在光线充足的复杂背景下和烟雾颜色相近的干扰区域, 但在光线阴暗的复杂环境下会出现误判, 而且需要手动标记出图像中的烟雾区域, 程序也较复杂; Fu 等人<sup>[13]</sup>通过三个不同的带通滤光片提取分析识别烟雾的光谱主成分, 该算法能够区分烟雾和水雾, 但依附于相应的实验器材设备; Tian 等人<sup>[14]</sup>在大气散射成像模型下提取取烟雾和非烟雾(背景)特征, 利用 SVM 训练并测试样本. 该方法具有较好的抗干扰力, 但需要大量的训练和学习, 程序代价较大.

针对上述单幅图像烟雾检测算法存在的问题, 本文提出一种多级筛选的单幅图像烟雾检测方法: ①首先根据烟雾暗通道透射率明显偏低的特性, 初步快速筛选检出低透射率区域; ②对低透射率区域进行去雾前后图像差分, 排除一些低透射率的静态背景干扰区域(如天空、灰色的石头等), 提取疑烟区域; ③由于暗通道先验去烟雾对不符合暗通道特性的区域会存在光晕效应, 因此在检出的疑烟区域中还包含一些非烟雾强干扰物(如天空中的电线, 天空边的山丘轮廓等). 烟雾具有模糊动态特征, 即当有烟雾出现时该区域会变模糊, 而强干扰物的特点是背景边缘清晰, 该特性表现为高频信号存在明显差异, 因此, 本文利用二维离散小波变换提取高频信号, 求得小波能量并差分, 进一步排除干扰物, 得到最终的烟雾区域. 实验表明, 本文算法能有效去除单幅图像中疑烟区域的干扰, 提高单幅图像烟雾检测率.

## 1 暗通道先验去雾及小波变换介绍

### 1.1 暗通道先验去雾

除天空区域外, 绝大多数区域里的像素总有至少一个颜色通道的值很小. 即该区域的光强度的最小值趋于零, 基于该实验结论, He 等人<sup>[15]</sup>提出了暗通道先验去雾模型. 描述如式(1):

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (1)$$

其中,  $x$  是图像中的某个像素点,  $I(x)$  表示烟雾图像,  $J(x)$  表示无雾图像;  $A$  是全局大气光,  $t(x)$  为采用导向滤波<sup>[16]</sup>细化过的透射率. 当  $t(x)$  很小时, 就会产生噪声. 因此可以设定一个阈值  $t_0$ , 当  $t(x)$  小于  $t_0$  时, 令  $t(x)=t_0$ . 对大气光  $A$  的估计, 先选取暗通道中亮度最大前 0.1% 像素, 然后再把对应的有雾图像  $J$  中亮度最大的值选为  $A$  的值.

### 1.2 小波变换

小波变换的主要特点是通过输入信号进行变换后, 能够得到时间、空间频率域里具有突出信号细节信息的特征. 通过对信号逐步用伸缩平移运算进行多尺度细化, 最终达到在高频处时间细分, 在低频处频率细分. 满足不同时间信号分析的要求, 因此可以用于信号的任意细节.

二维小波变换首先在  $x$  方向上做一维小波变换, 得到平滑分量和差值分量, 然后对这两部分在  $y$  方向做一维小波变换, 得到四个为原来信号四分之一的高低频输出, 分别是低频的  $Ca$  和低频水平方向的  $Ch$ , 垂直方向的  $Cv$ , 以及对角线方向的  $Cd$ .

## 2 基于暗通道和小波的烟雾检测

### 2.1 暗通道低透射率区域提取

当图像中存在烟雾时, 场景的光线通过大气透射到成像设备之前会因烟雾而产生散射. 根据暗通道先验的特性, 烟雾会使有烟雾区域的透射率明显偏低, 从图 1(b) 中的透射率图可以看出有烟雾区域与无烟雾区域存在较大的差别, 因此可对透射率图按式(2)进行二值化分割, 获取低透射率区域, 排除大部分非烟雾区.

$$t_{two}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } (t(x, y) - \text{abs}(\min(t))) \leq T_0 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $(x, y)$  表示坐标,  $t_{two}(x, y)$  表示透射率二值化结果,  $t(x, y)$  表示透射率图中点  $(x, y)$  的透射率,  $t$  表示整幅透射率图,  $T_0$  为分割阈值, 通过实验  $T_0$  的取值为 0.46 时效果较好. 因为整幅图像的整体透射率和当时拍摄时的场景光照有关, 所以选透射率图中的最小值来表示整幅图像的光照强度. 图 1(c) 为透射率图二值化分割后的结果, 图 1(d) 为提取的原图低透射率区域.

### 2.2 疑烟区域检出

经过低透射率提取的区域既包含了烟雾区域, 也

包含了非烟雾区域. 特别的, 有的烟雾区域和非烟雾区域还交织在一起了. 无法得到具有较好边缘的烟雾区域.

从图 1(d)中的低透射率区域中可以看出场景中存在着和浓烟、薄烟透射率相似的静态背景干扰区域(如: 天空, 电线杆, 石块等). 为了去除这些静态背景干扰区域, 得到具有较好边缘轮廓的烟雾区域, 可借鉴视频图像处理中经常用到的背景差分法. 因此, 本文将去雾后的低透射率区作为背景图, 进行差分获取疑烟区域. Celik 等人<sup>[10]</sup>指出 YCbCr 空间对检测烟焰效果更佳, 且通过多次实验发现烟雾区和非烟雾区在 Cr 通道上差异大, 本文选择 Cr 通道进行差分处理, 具体步骤如下: 1)根据暗通道去雾方法对低透射率区域进行去雾处理; 2)转换 YCbCr 空间, 并在 Cr 通道进行低透射率区域去雾前后的差分运算; (3)按式(3)对 Cr 通道的差分图二值化分割, 得到疑烟区域.

$$Cr_{two}(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{if } |Cr(x,y) - 121| \geq T_1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

上式中(x,y)表示坐标,  $Cr_{two}(x,y)$ 表示 Cr 通道图二值化结果, Cr(x,y)表示 Cr 通道值, T1 表示二值化阈值, 通过实验 T1 的取值为[2,10]时效果较好.

图 1(e)为低透射率区域去雾效果图; 图 1(f)为去雾前后差分图; 图 1(g)为差分图分割效果图, 从图中可以看出, 已经能有效去除静态背景区域, 得到具有较好边缘轮廓的烟雾以及非烟雾区域. 但由于暗通道去雾对不符合暗通道特性区域会有光晕效应, 还存在一些干扰区域, 如电线、山丘轮廓等.

### 2.3 疑烟区域检出

烟雾具有半透明性, 在同一背景下, 当出现烟雾时会使背景变得模糊. 本文利用这一特性排除疑烟区域中误检的干扰物. 小波变换具有突出高频率域中的局部细节信息特性, 而通过 2.2 方法之后得到的疑烟区域中的烟雾和非烟雾区域的轮廓较清晰, 刚好满足小波变换的使用范围, 因此可采用小波变换对疑烟区域进行模糊性分析.

一幅图像经二维离散小波变换后, 会被分解成四幅子图像: 其中一幅是低频分量子图像, 其余三幅是高频分量子图像. 低频分量子图像几乎包含了原图像的所有有用信息, 而这三幅高频分量子图像分别包含了原始图像在水平方向(HL)、垂直方向(LH)和对角方

向(HH)的纹理细节信息. 当背景中出现烟雾后, HL、LH、HH 图像的细节信息会减少.

烟雾的糊性表现为场景的光线到成像设备之前因烟雾的阻碍而导致光线强度变弱, 无法全部成像到成像设备, 于是可以用 YCbCr 空间的亮度 Y 通道来分析烟雾的模糊性.

分别对疑烟区域去雾前后图像在 Y 通道进行二维离散小波变换, 结果如图 2 所示, 图 2 (a)为疑烟区在 Y 通道做二维离散小波变换后的四副子图像; 图 2 (b)为对应去雾图的小波变换后图像; 从图 2 中可以看出, 去雾前后的有烟雾区域内的三个方向(水平, 垂直, 对角线)的高频细节信息明显比无烟雾区域多.

为了反映高频细节信息, 定义小波能量函数如下式:

$$E_n(x,y) = |LH_n(x,y)|^2 + |HL_n(x,y)|^2 + |HH_n(x,y)|^2 \quad (4)$$

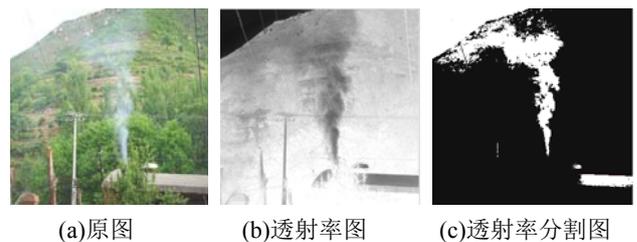
其中(x,y)表示坐标, 下标 n 用于标记去雾前后图像, E 为能量,  $E_n(x,y)$ 表示去雾前或去雾后的点(x,y)的小波能量, LH 表示水平方向, HL 表示垂直方向, HH 表示对角线方向.

根据烟雾使背景模糊的特性, 分别对去雾前后的疑烟区域图像按式(11)求小波能量, 当去雾后, 背景高频小波能量会明显增加, 于是可以差分并归一化到 [0,1], 按式(5)进行烟雾区域检出.

$$R(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{if } T_2 > \frac{E_2(x,y) - E_1(x,y)}{E_2(x,y)} > T_3 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

其中 R(x,y)表示二值化结果,  $E_2(x,y)$ 表示去雾后小波能量,  $E_1(x,y)$ 表示去雾前小波能量, 通过大量实验得出非烟雾区的小波能量差一般远小于 0.1, 于是对下界阈值  $T_3$  取 0.15, 上界阈值  $T_2$  为最大值 0.95.

图 1 (h)为去雾前后小波能量差分分割图, 与图 1(g)相比, 可以看出能准确检出烟雾区域, 但还存在一些噪声点, 可以用形态学进行去噪, 效果如图 1 中的(i)所示.



(a)原图

(b)透射率图

(c)透射率分割图

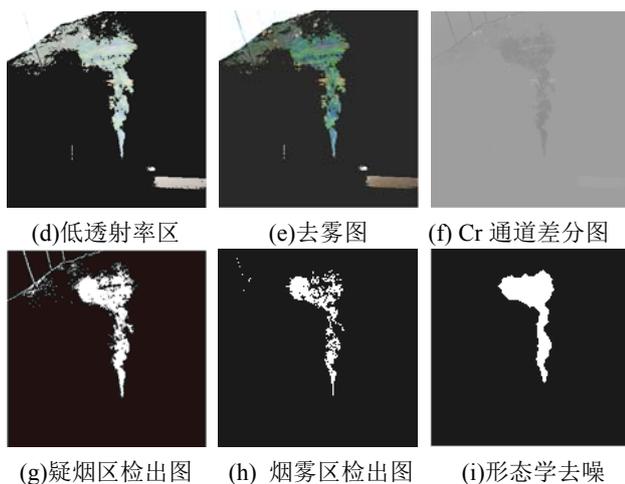
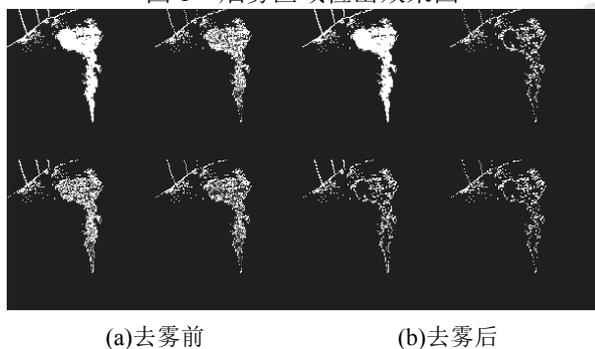


图 1 烟雾区域检出效果图



(a)去雾前 (b)去雾后

图 2 小波变换图

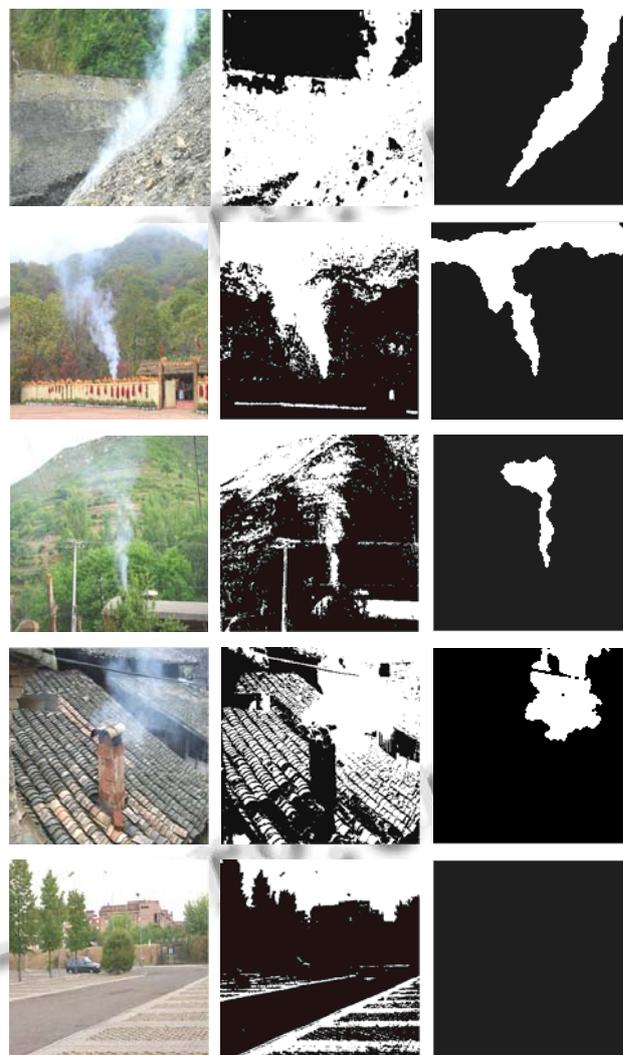
(为突出显示效果, 对图 2 用自动色阶曝光增强处理)

### 3 实验结果与分析

本文的实验是在 Windows 7 32bit 系统, 奔腾 T4300 CPU, 2GB 内存的环境下, 使用 matlab 编程语言实现. 实验中用到的图像均来自百度, 谷歌, 雅虎等大型网站, 大小统一裁剪为 300x300. 为了验证本文算法的有效性, 进行了一系列的对比实验, 因为单幅图像的烟雾检测还没有一个公认比较好的方法, 目前大多方法是基于烟雾的颜色模型, 于是对比的算法采用具有较好效果的文献[11]中的静态图像颜色模型. 从图 3 中可以看出, 文献[11]的颜色模型能检测出烟雾区域, 但对和烟雾颜色相似的干扰物(如碎石, 石块, 天空, 椅子, 花盆, 白瓦片, 电线, 电线杆, 白墙, 烟囱, 地板等)比较没有抗干扰性, 而本文算法对这些干扰区域也都能一一去除.

实验中从图片库选取了多个不同场景下的 150 张具有代表性的测试样本, 有、无烟雾图像分别为 100、50 张. 实验结果见表 1. 由表 1 可知, 对于有烟雾图像本文算法的检测准确率为 91%, 误检率为 9%, 虽然文

献[11]的颜色模型准确率为 95%, 但是其检测结果中有很多非烟雾疑似区域. 而对于无烟雾图像, 本文算法准确率为 78%, 文献[11]的颜色模型准确率只有 34%. 实验结果表明, 本算法对大部分实验能够有效去除疑似区域, 正确检测出烟雾区域.



(a)原图 (b)文献[11]的颜色模型 (c)本文算法

图 3 实验结果对比图

表 1 烟雾检测实验结果

图像类型	图像个数	算法	准确率(%)	误检率(%)
有烟图像	100	文献[11]颜色模型	95	5
		本文算法	91	9
无烟图像	50	文献[11]颜色模型	34	66
		本文算法	78	22

#### 4 结语

针对单幅图像中的烟雾易受疑烟干扰物的影响,本文采用多级筛选,逐步过滤掉图像中的疑烟干扰区域。首先根据烟雾的暗通道低透射率特性,去掉高透射率干扰区域;然后对去雾前后的低透射率区域差分,去掉一些低透射率的静态背景干扰区域;最后根据烟雾的模糊动态特性,用小波变换能量差分得烟雾区域。通过实验证明,本文算法能够有效去除单幅图像中的疑烟区域,有效检测出烟雾区域。

由于本文是基于暗通道去雾的,所以当有雾出现时,雾也会被检测出来。基于篇幅限制,简单陈述下烟和雾的区别。1、区域大小:雾气基本是覆盖整张图片,而烟的区域相对较小;2、浓度:雾的浓度会比较小且较均匀,而烟的浓度较大且较不均匀;3、边缘:雾气没有明显的边缘,烟有较明显的边缘,特别的,当出现白、灰、黑浓烟时或在火源周围的烟雾轮廓也较清晰。本文算法设置了多个阈值,这些阈值会因场景的不同而有细微差异;一些较细小的烟雾区域会被当成噪声点去除掉;这些将是下一步要研究的工作。

#### 参考文献

- 1 Fujiwara N, Terada K. Extraction of a Smoke Region Using Fractal Cording. Proc. of International Symposium on Communications and Information Technologies, 2004: 26–29.
- 2 Toreyin UB, Dedeoglu Y, Enis FA. Wavelet Based Real-Time Smoke Detection in Video. EUSIPCO 2005: 4.8.
- 3 Toreyin UB, Dedeoglu Y, Enis FA. Contour Based Smoke Detection in Video Using Wavelets. Proc. 14th European Signal Processing Conf, 2006: 337.340.
- 4 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. 中国图象图形学报, 2008, 13(4): 1006.
- 5 Gubbi J, Marusic S, Palaniswami M. Smoke detection in video using wavelets and support vector machines. Fire Safety Journal, 2009, 44(8): 1110–1115.
- 6 Shu XM, Yuan HY, Su Gf, Fang J, Zhan FR. A new method of laser sheet imaging-based fire smoke detection. Journal of Fire Sciences, 2006, 24(2): 95–104.
- 7 Xie ZP, Wang T, Liu Y. New video smoke detection method using Bayesian decision. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(3): 173–176.
- 8 Ho CC. Machine vision-based real-time early flame and smoke detection. Measurement Science and Technology. Institute of Physics Publishing, 2009: 045502.
- 9 Chen TH, Yin YH, Huang SF, Ye YT. The smoke detection for early fire-alarming system base on video. Proc. of the 2006 International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. 2006. 427–430.
- 10 Celik TO, Zkaramanl H, Demiml H. Fire and smoke detection without sensors: Image processing-based approach. 15th European Signal Processing Conf. 2007. 1794. 1798.
- 11 王娜娜. 基于视频的火灾烟雾检测算法研究[学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- 12 杨杰, 陈俊周. 一种基于单张图像的烟雾检测算法. 西南科技大学学报, 2011, (3).
- 13 付小宁, 张涛, 万里. 基于多光谱分离的烟雾检测. 光学精密工程, 2013, (11).
- 14 Tian H, Li W, Ogunbona P, et al. Single image smoke detection. Lecture Notes in Computer Science, 2014: 87–101.
- 15 He KM, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 09. 2009. 1–8.
- 16 He KM, Sun J, Tang X. Guide image filtering. The 11th European Conference on Computer Vision. 2010. 1–8.