



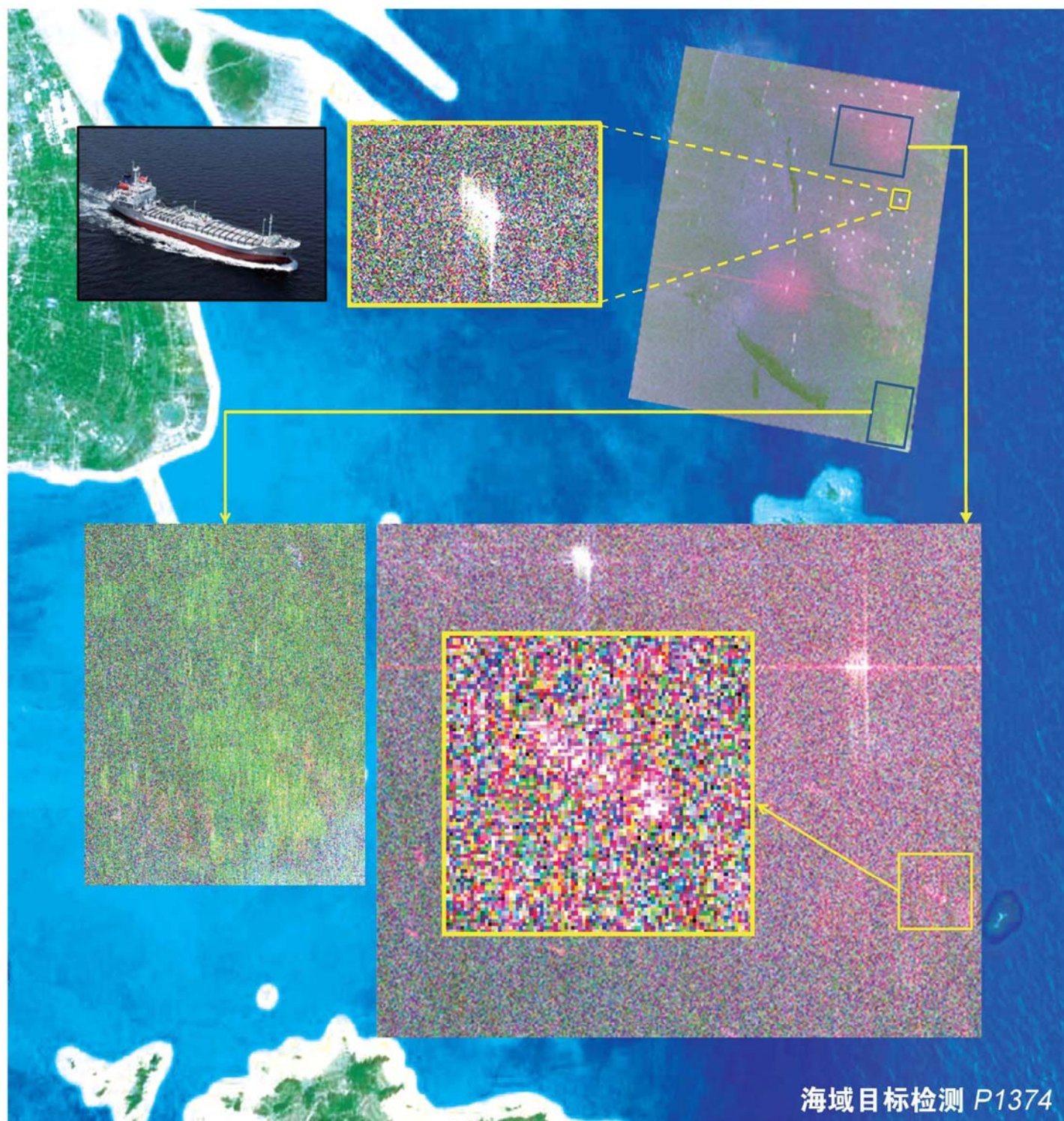
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

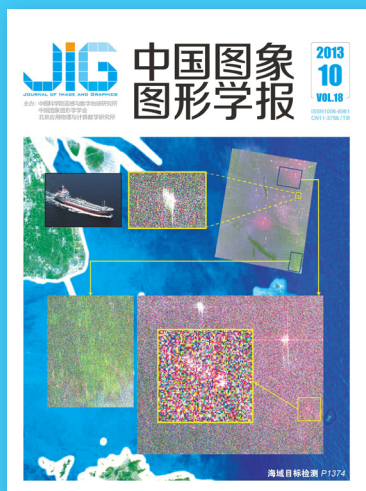
中国图象图形学报

2013
10
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



海域目标检测 P1374



第18卷第10期（总第210期）

2013年10月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995 010-82614429

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995 010-82614429

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

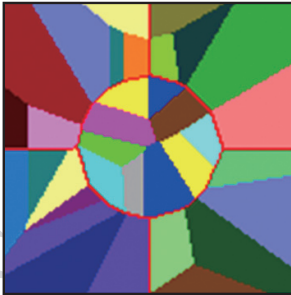
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

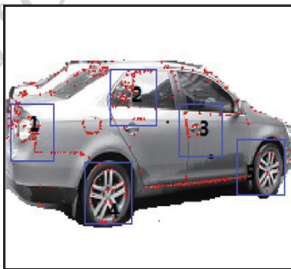
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

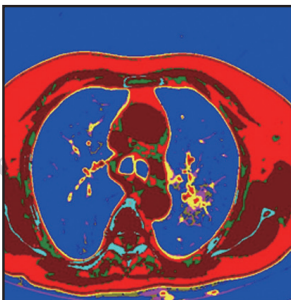
国内定价 50.00元



结合几何划分技术和最大期望值/最大边缘概率算法的彩色图像分割(第1270页)



联合生成与判别模型的目标检测与跟踪(第1293页)



聚类核值相似区特征点的医学影像分类(第1322页)

综述

手掌静脉图像识别技术综述

吴微, 苑玮琦 1215

视频检测烟雾的研究现状

罗胜, Jiang Yuzheng 1225

图像处理和编码

自适应分数阶微分的复合双边滤波算法

胡伏原, 姒绍辉, 张艳宁, 孙瑾秋 1237

曲波域高斯混合尺度模型的图像压缩重构

纪建, 李晓, 许双星 1247

结合图像信号显著性的自适应分块压缩采样

王瑞, 余宗鑫, 杜林峰, 万旺根 1255

四阶各向异性扩散方程在图像放大中的应用

李鹏, 邹杨, 姚正安 1261

图像分析和识别

结合几何划分技术和最大期望值/最大边缘概率算法的彩色图像分割

赵泉华, 李玉, 何晓军 1270

自适应加权完全局部二值模式的表情识别

胡敏, 许艳侠, 王晓华, 黄忠, 朱弘 1279

面向局部光照突变的时间和空间中心对称局部二值模式算子

卞紫涵, 房胜, 徐田帅 1285

联合生成与判别模型的目标检测与跟踪

刘倩, 侯建华, 牟海军, 赵巍, 笪邦友 1293

目标不同视角下观察信息的迁移和再利用

张索非, 吴海洋, 吴镇扬 1302

图像理解和计算机视觉

张量分析在视差图生成中的应用

赵戈, 蔺兰, 唐延东, 王耀南 1307

采用旋转匹配的二进制局部描述子

卢鸿波, 孙愿, 张志敏 1315

医学图像处理

聚类核值相似区特征点的医学影像分类

李博, 曹鹏, 栗伟, 赵大哲 1322

异常宫颈细胞核的自适应局部分割

张灵, 李静立, 陈思平, 汪天富, 江少锋, 刘少雄 1329

地理信息技术

Hilbert填充曲线与空间分布模式探测的点数据集空间划分方法

吴明光 1336

采用案例归纳推理进行道路网智能选取

郭敏, 钱海忠, 黄智深, 刘海龙, 王骁 1343

遥感图像处理

红外目标抗干扰跟踪算法

褚桐, 马惠敏 1354

MSTAR图像的矩特征分析与多阈值分割

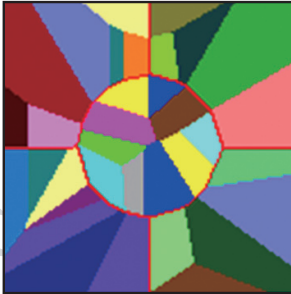
倪维平, 严卫东, 吴俊政, 郑刚, 芦颖 1364

改进Notch滤波的全极化SAR数据船舶检测方法

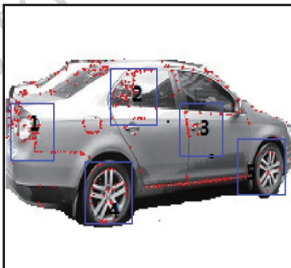
孙渊, 王超, 张红, 张波, 吴樊 1374

CONTENTS

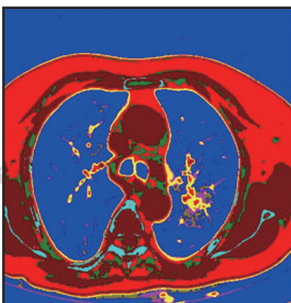
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Color image segmentation using geometry tessellation technique and EM/MPM algorithm(P1270)



Object detection and tracking combining generative and discriminative model(P1293)



Medical image classification based on cluster univalue segment assimilating nucleus feature point(P1322)

Review

- A survey of palm-vein image recognition
Wu Wei, Yuan Weiqi 1215
- State-of-art of video based smoke detection algorithms
Luo Sheng, Jiang Yuzheng 1225

Image Processing and Coding

- Multi-bilateral filtering algorithm based on adaptive fractional order differentiation
Hu Fuyuan, Si Shaohui, Zhang Yanning, Sun Jinqiu 1237
- Image reconstruction algorithm based on the curvelet gaussian scale mixture model
Ji Jian, Li Xiao, Xu Shuangxing 1247
- Saliency-based adaptive block compressive sampling for image signals
Wang Rui, Yu Zongxin, Du Linfeng, Wan Wanggen 1255
- Fourth-order anisotropic diffusion equations for image zooming
Li Peng, Zou Yang, Yao Zheng'an 1261

Image Analysis and Recognition

- Color image segmentation using geometry tessellation technique and EM/MPM algorithm
Zhao Quanhua, Li Yu, He Xiaojun 1270
- Facial expression recognition based on AWCLBP
Hu Min, Xu Yanxia, Wang Xiaohua, Huang Zhong, Zhu Hong 1279
- TSCS-LBP operator oriented to the local illumination mutation
Bian Zihan, Fang Sheng, Xu Tianshuai 1285
- Object detection and tracking combining generative and discriminative model
Liu Qian, Hou Jianhua, Mou Haijun, Zhao Wei, Da Bangyou 1293
- Transfer and reusing of object view information
Zhang Suofei, Wu Haiyang, Wu Zhenyang 1302

Image Understanding and Computer Vision

- Disparity map generation with tensor analysis
Zhao Ge, Lin Lan, Tang Yandong, Wang Yaonan 1307
- Binary local descriptor based on rotative matching
Lu Hongbo, Sun Yuan, Zhang Zhimin 1315

Medical Image Processing

- Medical image classification based on cluster univalue segment assimilating nucleus feature points
Li Bo, Cao Peng, Li Wei, Zhao Dazhe 1322
- Segmentation of abnormal cervical nuclei using an adaptive and local approach
Zhang Ling, Li Jingli, Chen Siping, Wang Tianfu, Jiang Shaofeng, Liu Shaoxiong 1329

Geoinformatics

- Hilbert space-filling curve and spatial pattern detection-based spatial partitioning approach to point geospatial data
Wu Mingguang 1336
- Intelligent road network selection method based on cases inductive reasoning
Guo Min, Qian Haizhong, Huang Zhishen, Liu Hailong, Wang Xiao 1343

Remote Sensing Image Processing

- Study of infrared anti-jamming tracking algorithm
Chu Tong, Ma Huimin 1354
- Moment feature analysis of MSTAR image and multiple thresholds based segmentation
Ni Weiping, Yan Weidong, Wu Junzheng, Zheng Gang, Lu Ying 1364
- Polarimetric SAR ship detection using improved notch filter
Sun Yuan, Wang Chao, Zhang hong, Zhang bo, Wu Fan 1374

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)10-1225-12

论文引用格式: 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. [DOI: 10.11843/jig.20131002]

视频检测烟雾的研究现状

罗胜^{1,2}, Jiang Yuzheng²

1. 温州大学, 温州 325035; 2. Indiana University Purdue University Indianapolis, Indiana 46202, USA

摘要: 检测烟雾可以预警火灾, 通过视觉监控烟雾比其他方式监控范围更广, 反应更灵敏, 对环境要求更低。但是目前的烟雾检测算法, 无论是利用单一的色彩、纹理、形状、飘动性、闪烁以及频率等特征, 或者要求满足多样特征或者采用支持向量机、神经网络、Bayesian 等分类器的方法, 都无法保证判断的准确性、适应性和快速性。综述各种烟雾检测的方法后, 认为要得到更加可靠的检测效果, 一方面需要更加本质的烟雾特征, 另一方面要对已有的特征进行更深入的实验验证, 同时也要有更全面的样本视频数据库和算法评价标准。

关键词: 视觉光学; 烟雾; 火灾; 特征; 色彩; 纹理; 形状; 飘动性; 闪烁; 频率; 分类器

State-of-art of video based smoke detection algorithms

Luo Sheng^{1,2}, Jiang Yuzheng²

1. Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;

2. Indiana University Purdue University Indianapolis, Indiana 46202, USA

Abstract: Smoke detection with no latency for fire alarming is crucial to minimize fire damages and saving lives. Video as a spatio-temporal sensor covers a larger area than point sensors and it is sensitive to environment changes. Current smoke detection algorithms, however, are still difficult to achieve fast, accurate, and robust judgment on fire, even though they have used chromatic characters, texture, shape, flutter, flicker, spatial and temporal frequencies, as well as composite classifiers such as support vector machine, neural network, etc. This survey reviews the state-of-art of smoke detection methods and proposes three directions to achieve robust data processing. We argue that the success of visual smoke detection should be consolidated by a rigorous understanding of its physical characteristics, creation of a common test database for algorithm validation and comparison, and the establishment of a new criteria for the evaluation of algorithms.

Key words: visual optics; smoke; fire; feature; chrominance; texture; shape; flutter; flicker; frequency; classifier

0 引言

全世界每天发生火灾上万起, 造成数百人死亡。每年欧洲约 10 km² 的森林毁于火灾, 俄罗斯和美国约 100 km²、全世界约 0.1% 的森林毁于火灾。每年超过 20% 的 CO₂ 排放来自火灾^[1]。据估计, 到 2030

年, 世界上约一半森林会毁于火灾。中国自 1950 年以来, 年均发生森林火灾 13 067 起, 受害面积 653 019 hm², 因灾伤亡约 580 人^[2]。70 年代火灾年平均损失约 2.5 亿元, 80 年代火灾年平均损失约 3.2 亿元^[3]。进入 90 年代, 特别是 1993 年以来, 平均每天发生火灾 118 起, 死亡 18 人, 价值 237.8 万元的财产化为乌有; 1990 至 1999 年发生特大火灾

收稿日期: 2012-10-30; 修回日期: 2013-02-19

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y1100075)

第一作者简介: 罗胜(1975—), 男, 副教授, 2010 年于上海大学获机械电子工程专业博士学位, 主要研究方向为机器视觉, 主要从事 3 维重建、机器视觉、模式识别等方面的研究工作。E-mail: lsshanghai2006@yahoo.com.cn

1 091起,死亡 2 172 人,伤 4 053 人,直接经济损失 22 亿元^[4]。2010 年,中国发生火灾 131 705 起,死亡 1 108 人,受伤 573 人,直接财产损失 17.7 亿元,还不包括森林、草原、军队、矿井地下部分的火灾^[5];2011 年,中国发生火灾 125 402 起,死亡 1 106 人,受伤 572 人,直接财产损失 18.8 亿元^[6]。2009 年4 月和 11 月,内蒙古锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗发生两次特大草原火灾,共烧毁草原 15 663 hm²,造成直接经济损失 803 万元、间接经济损失 823.3 万元^[7]。2010 年俄罗斯发生的森林大火,过火面积达 85 万 hm²,至少 53 人死亡,500 人受伤,直接经济损失 133 亿至 200 亿美元,近 2 000 房屋被毁,逾 3 500 人无家可归^[8]。

人类长期跟火灾进行斗争,积累了大量防火和灭火的经验,逐步掌握了火灾的燃烧机理、燃烧条件和发展过程,创造了各种各样的防火、灭火方法。根据烟雾、气体、温度等物理量变化,采用感温、感烟、感光、气体探测以及复合式探测而设计了吸气式烟雾探测器、单点式烟雾探测器(离子式烟雾探测器、光电式烟雾探测器)、投影束式烟雾探测器、反射束式烟雾探测器、空气取样式烟雾探测器、辐射能量感应式烟雾探测器(紫外线烟雾探测器、红外线烟雾探测器、火花灰烬烟雾探测器)、图像对单点式模拟探测器^[9]。但是这些探测器多用于小空间的室内,对于大面积的室外场合,如森林、草原、山区,或者开阔的室内场所,如电站、粮油库、飞机库、大仓库、古建筑群、隧道、车站、购物中心等,或存在着强气流的地方,这些点式探测器都难以发挥作用。其原因主要在于:1)普通的火灾探测器被动工作,等待烟到达后才能进行探测,而早期烟雾的扩散速度通常较慢,需要较长的时间才能到达探测器;2)在大空间室内环境,烟雾上升到一定高度会被周围的空气冷却,停留空中不再上升,使得传统的感烟探测器失去了作用;3)在室外环境,烟雾易被高速气流吹散,烟雾到达不了感烟探测器;4)传统感烟探测器易受环境中粉尘等微小颗粒的影响。

大范围容积式监控系统能够有效弥补传统点式火灾探测器的不足,具有非接触式探测的优势,不会受环境条件的局限,是一种探测室外或大空间场所火灾的有效手段。目前的容积式火灾预警方法主要有以下 6 种:基于卫星图像检测方法、红外图像检测方法、光谱法、传感器网络、测量温度的无线-电声探测系统以及基于可见光图像的检测方法。基于卫星

图像检测方法,例如 NASA MODIS^[10]、European EU-METSAT^[11],只能检测火焰,并且只能监控卫星飞过的区域,延迟较大。基于红外图像检测方法检测红外热流的变化,虽然具有全天候、抗背景干扰的优点,但是分辨率有限,并且成本是普通相机的数 10 倍^[12]。光谱法分析烟雾中的化学成分对阳光光线的吸收情况,能够准确辨识烟雾,但是要与视频监控系統搭载在一起,造价高昂^[13]。将点式探测器构成传感器网络的方法,目前还在研究之中^[14]。测量温度的无线-电声探测系统能够远程测量温度进而预警火灾,但是可靠性稍差^[15]。基于可见光的图像检测方法通常将可见光波段 CCD 摄像机架设于较高的观察塔顶,对场景进行监控,通过对场景空间的图像进行分析检测烟雾。火灾规律表明,火情烟雾的出现早于明火的出现,火焰较小时容易被树遮挡,但烟雾不容易被遮挡,因此基于可见光图像烟雾检测方法是火灾预警的一个主要研究方向。

目前基于可见光的图像检测方法主要采用白天监控烟雾,夜晚监控火焰来预警火灾,其中烟雾检测算法最大的缺陷是误报率较高^[16],常常将云朵、阴影和尘埃误报为烟雾。因此许多商业系统不得不采用半自动的方法,由视频监控自动预警,然后将打上标记的视频图像传送给监控人员进行确认^[17]。这种方法比全人工视觉监控的方法可靠,劳动效率大为提高。但是如果能够提供准确性更高的烟雾检测方法,能够进一步将人从烦琐的监控任务中解放出来。

1 烟雾特征

烟雾具有丰富的特征,例如颜色、纹理、形状不规则性、飘动性、闪烁以及频率等,利用这些特征能够将烟雾与其他物体区分开来。

1.1 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,但是 Chen 等人通过统计,发现烟雾都是灰色的,也即 3 个色彩通道大致差不多,并且灰度应该在 80 和 220 之间^[18]。Chen 的这个结论得到了广泛的认同,Celik 等人把这一规则应用到 YC_bC_r 色彩空间^[19],Millan 将其表示为

$$\begin{cases} (C_b(x,y) - 128)^2 + (C_r(x,y) - 128)^2 \leq \alpha^2 \\ TH_3 \leq Y(x,y) \leq TH_4 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $Y(x, y)$ 、 $C_b(x, y)$ 、 $C_r(x, y)$ 是亮度和色彩 3 个通道的平均值, α 、 TH_3 和 TH_4 按经验分别取为 10、80 和 220^[20]。Genovese 等人将其在 YUV 空间表示为

$$D_C = \begin{cases} 1 - (|U - 128| + |V - 128|)/128 \\ Y - U > T_1 \text{ 且 } Y - V > T_2 \text{ 且 } T_3 \leq Y \leq T_4 \\ 0 \quad \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中, T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 是预设阈值^[21]。Ma 等人采用了更加复杂的色彩规则, 对每个像素每个通道进行混合高斯模型 (GMM) 建模, 然后将满足

$$|I'_b - \mu_s| < 2.5\delta_s \quad (3)$$

条件的像素作为潜在的烟雾。式中, I'_b 是归一化的 RGB 通道, μ_s 、 δ_s 为其均值和方差^[22]。

Toreyin 等人发现烟雾会让背景失去色彩, 场景灰化, 在 U 和 V 通道中表面得尤其明显, 因此用 YUV 模式表示色彩^[23]。Donate 等人用实验验证了这种变化^[24]。Ahlen 等人应用了 Gray World 原理, 从视频抽取动态灰化的目标^[25]。Yuan 采用 RGB 模型抽取可疑像素, 然后根据 R 通道的亮度和饱和度判断是否为烟雾粒子, 并用扩散的动态过程和无序性确认烟雾^[26]。Ko 等人认为烟雾色彩饱和度低, 色调相对较高、对比度低, 因此采用色调、饱和度、亮度及其偏差作为色彩特征量^[27]。Jakovčević 等人发现 RGB 3 个通道对烟雾的敏感程度不一样, 出现烟雾时 B 通道的变化更大^[28]。事实上, 不同的色彩模型, 对烟雾的敏感程度也不相同, Krstinić 等人采用了 4 种基于直方图进行分割的方法 (histogram based segment) 对比了 RGB、 YC_bC_r 、CIE Lab、HSI 以及专门为检测烟雾而提出的新色彩 HS'I 模型^[29]。HS'I 从 HIS 变化而来, 定义为

$$S' = \begin{cases} 2S & S < 0.5 \\ 1 & S \geq 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

实验结果表明: 1) 在区别烟-非烟的能力上, HS'I 最好, HIS 次之, RGB 与 HIS 接近, 而 RGB、 YC_bC_r 较差; 2) 分类器比色彩空间更重要, 更大程度上决定了区别的效果。

色彩规则对于完全遮盖背景浓烟十分有效, 但是能够看到部分背景的淡烟, 背景的色彩将影响对烟雾颜色的判断。因此 Tian 等人提出一种估算烟雾浓度的方法^[30], 但是更多的人把动态特征结合到色彩规则里, 例如 Kopilovic 等人将其区分为运动的非烟物体和由于光源照射产生的背景两种情况,

然后采用动态特征、扩散运动来区分近似目标, 能去除摇动的黑色塑料袋等干扰物并减小光照带来的影响^[31]。

1.2 纹理特征

色彩特征没有考虑烟雾区域内相邻像素间的相似性; 如果考虑到烟雾内部的自相似性, 将烟雾看成一种纹理, 采用检测纹理的方法检测烟雾, 就比单纯的色彩特征可靠。日本的 Fujiwara 采用分形编码提取烟雾区域, 然后再检测烟雾特征, 但是反复用到映射计算, 使算法冗长耗时, 难以在达到实时性的要求^[32]。Maruta 根据小波变换和 Hurst 指数的关系, 从小波变换计算 Hurst 分形指数, 以此判断是否为烟, 如图 1 所示^[33]。

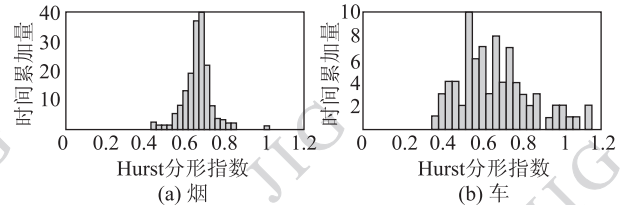


图1 Hurst 指数直方图^[33]

Fig. 1 Histogram of Hurst exponent

Ferrari 对雾气图像进行双树复小波变换 (DTC-WT), 构造隐马尔可夫树模型来表达烟雾纹理, 采用支持向量机 (SVM) 来检测烟雾^[34]。但是这种方法的误判率较高。Maruta 采用共生矩阵检测候选区域中的纹理^[35]。Günay 对每个像素点计算 9 维的特征向量 $[x_1, x_2, Y(x_1, x_2), U(x_1, x_2), V(x_1, x_2), dY(x_1, x_2)/dx_1, dY(x_1, x_2)/dx_2, d^2Y(x_1, x_2)/dx_1^2, d^2Y(x_1, x_2)/dx_2^2]$, 然后计算区域里像素间的协方差矩阵, 根据协方差矩阵中的元素采用 RBF 核的 SVM 判断是否是烟。式中 x_1 、 x_2 是区域中点的标号, Y 、 U 、 V 是 YUV 色彩模式中的分量^[36]。袁非牛提出用局部二值模式 (LBP) 和基于变量的局部二值模式 (LBPV) 检测纹理, 但是需要大量的运算时间和空间^[37]。Tian 对这个方法进行了改进^[38], 后来又进一步在烟雾与背景线性结合的假设下估计烟雾图像, 再用 LBP 在烟雾图像里抽取纹理, 用 SVM 根据烟雾特征进行判断^[39]。Tian 表示, 从视频中分割出烟雾图像再进行检测的方法, 准确率至少有 15% 的提高, 对淡烟更是达到 26.1%。而 Toreyin 采用动态纹理 (dynamic texture) 的方法来检测烟雾^[39]。

1.3 形状特征

Toreyin 等人提出烟雾边缘的凸状性进行检测来识别烟雾,该文算法缺点是烟雾的检测要依靠背景图像的边缘来间接检测,限制了该算法的应用范围^[23]。Ho 发现与一般物体相比,烟雾形状比较复杂,并且飘动过程中会逐渐扩散。他采用烟雾区域的周长和面积之比来表达这种复杂性,然后综合颜色规则、运动检测利用模糊逻辑对烟雾进行识别^[40]。Xiong 等人用更复杂的公式表达这种形状的不规则性

$$P = c(A^{1/2})^q \quad (5)$$

式中, A 表示面积, q 为 1.35 的常数, P 为周长, c 也是经验常数^[41]。Ahlen 认为烟雾越上升,形状的不规则性越复杂,因此采用式(6)检测不规则性的变化。

$$\begin{cases} \Omega(t) = P(t)/2 \sqrt{\pi A(t)} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{2P'(t)A(t) - P(t)A'(t)}{4\sqrt{\pi A^3(t)}} \end{cases} \quad (6)$$

Surit 等人除利用烟雾运动的不规则性外,还结合颜色特征检测烟雾^[42]。但是云、雾、飘动的旗帜,甚至奔跑的动物,都满足形状不规则性。利用形状的不规则性检测烟雾,效果比较有限。

1.4 飘动特征

从时间上看,烟雾飘动时具有丰富的运动形态和大小变化,会逐步扩大和稀释,同时也会向上升腾。Xiong 等人认为烟雾是一种扩散的湍流运动,升腾扩散过程中的形状、轮廓、边界的面积变化达到预先设定的阈值时,就可以认为有烟雾产生^[41]。王涛等人首先利用滑动时间窗分析视频中运动区域的飘动性特征,提取出飘动方向、周期飘动强度、周期有效飘动强度和周期逆向飘动强度等特征向量,然后使用神经模糊推理系统训练并检测烟雾^[43]。Ma 等人估计出每个块的烟雾浓度,并进一步检查浓度沿时间的变化,认为有规律、逐渐变化的是烟雾,突变和反复抖动的是刚性物体,如图 2 所示^[22]。

Yasmin 用 DP matching 匹配相邻帧间的候选区域,进而计算各像素的运动矢量并按运动方向统计直方图,从而检测飘动性^[44]。

Toreyin 采用具有 3 个状态的隐马尔可夫模型(HMM)来检测烟雾飘动的上升特性^[45-46]。袁非牛将视频图像分割成大小相等的块,并估计每个块的运动方向,然后采用滑动时间窗口生成块运动方向

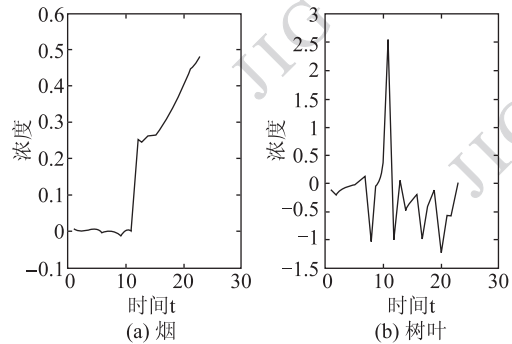


图 2 浓度-时间变化^[22]

Fig. 2 Color blending coefficients along time^[22]

时间序列,再计算块的累积量和主运动方向,根据累积量和主运动方向提取出 3 维特征矢量,采用贝叶斯(Bayesian)分类器进行烟雾的检测^[47]。Lee 报道,这个方法会将其他上升运动的物体,如车,误报为烟雾^[48]。和袁非牛一样,Millan 也用到烟雾飘动的方向性,用向上飘动的性质来排除非烟区域^[20]。Genovese 则同时用到扩散特性和上升特性。他用烟雾区域在时间序列上的扩张表达扩散特性,用烟雾区域最高点的变化表达上升特性^[21]。Truong 等人采用 ARPS(adaptive rood pattern search)算法对每个块搜索下一帧里的匹配块,然后将其运动分为上、下、左、右 4 种情况,再沿时间方向进行统计,以此检测上升的飘动特性^[49]。Ha 等人采用 DVR(digital video recording)编码中的块运动矢量 MV_y^{MB} 、 MV_x^{MB} 来计算块运动方向,将上升特性定义为

$$MV_{\psi}^{MB} = \arctan^{-1}(MV_y^{MB}/MV_x^{MB}) > T_5 \quad (7)$$

T_5 是预设阈值^[50]。

1.5 频率特征

Donate 用实验证实了烟雾的出现,导致色彩对比度下降,进而使得频域里高频分量减少,如图 3 所

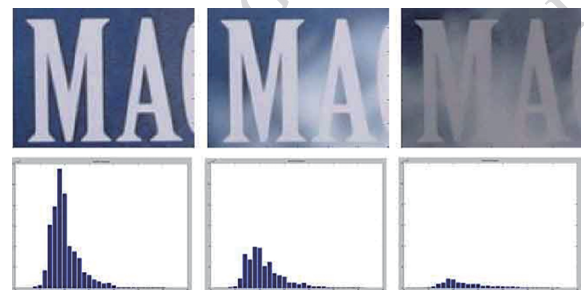


图 3 频率直方图:烟雾浓度增加,高频分量逐渐减少^[24]

Fig. 3 Histogram of frequency: the reduction in contrast causes a drop in the high-frequency^[24]

示。但是他也发现浓烟的出现,会在烟雾内部有梯度的地方和烟雾区域边缘产生新的边缘^[24]。

Toreyin 强调高频分量是逐步减少而不是突然降低到 0,并采用小波变换判断这种变化。他先对背景建模,然后用小波检测局部极值的能量,再利用烟雾闪烁的频率特性确认烟雾。烟雾闪烁频率与燃烧物无关和尺度无关,大约为 10 Hz;在烟雾边界,闪烁频率在 1~3 Hz 左右。Toreyin 将每个像素的 Y 通道值按时间先后输入二进小波,经过两次分解,观察每次分解的高频通道系数。静态场景这两个值应该都是 0 或者近似 0,一般动态目标应该有一个接近 0 的值,因为从背景到前景只切换一次。如果是烟,因为闪烁,每秒钟会出现几个长钉状极值。这个检测与信号的采样频率有关系^[23]。这种方法的缺点是,在亮度不断变化的环境下,检测效果不佳。Calderara 也用小波检测高频能量的逐渐衰减,他把图像分块,每块的高频能量定义为

$$\begin{cases} E(b_k, I_t) = \sum_{i,j \in b_k} [V_i^2(i,j) + H_i^2(i,j) + D_i^2(i,j)] \\ r(b_k, I_t, Bg_t) = E(b_k, Bg_t) / E(b_k, I_t) \end{cases} \quad (8)$$

式中, V, H, D 分别是小波分解后的垂直方向系数、水平方向系数和对角方向系数, I_t, b_k, Bg_t 是当前帧 (t)、当前块 (k) 和当前背景模型, r 是归一化后的高频能量。Calderara 采用 GMM 来捕捉 r 的变化,因此能够去除环境光照和噪声的影响^[51]。但是 Calderara 需要建立背景模型 Bg_t , 而 Wang 用 Ada-boost 直接对小波系数进行分类,不需要降维处理,在准确度、计算速度和鲁棒性方面相比文献[35, 52]有大幅度提高,准确性达到 91.3%^[53]。

采用小波的方法比傅里叶变换检测频率特性优越。Chen 用傅里叶变换检测烟雾区域的形状。由于傅里叶变换没有空间和时间信息,因此数据窗和时间窗的尺寸很重要。时间窗太长,可能得不到足够的峰值,太短可能会错过周期根本找不到峰值^[54]。Xiong 等人采用 MCR (mean crossing rate) 计算闪烁频率,然后将有足够闪烁像素的动态区域作为候选目标,采用形状复杂性去判断是否是烟雾^[41]。杨猛也发现烟雾运动平缓区域会导致边缘和细节的模糊,甚至消失,而烟雾运动剧烈的区域,图像边缘和细节的模糊特性不显著。Piccinini 等人同时考虑到烟雾的颜色特征、相对低

频运动特征以及烟雾经常出现在某一固定区域的空间特征,提出了基于小波分析的多特征融合烟雾检测算法^[55]。

1.6 烟雾特性综述

目前各种文献所利用到的烟雾特征,无论是静态特性还是动态特性,都有可能针对某些场合特别有效,而对有些场合效果有限,无法准确排除所有近似对象、与烟雾建立一一对应的关系。颜色特征、纹理特征太分散,变化范围很大,并且与天气、光照和时间相关,甚至与分辨率也相关,无法排除和烟雾颜色一样的或相似的区域,例如阴影。动态特性比静态的亮度、颜色、纹理等特征可靠,但是需要背景建模或者帧间差分。无论是背景建模,还是帧间差分,往往是基于阈值的。要将早期的淡薄烟雾和爆炸产生的浓烈烟雾同样从背景中抠出,或者即使是同样的烟雾要从不同光照和环境下抽取,都需要阈值有较强的适应性。阈值的选取对检测结果影响较大,阈值选择过大或过小都将导致误报率或漏报率增加,通常难以获取一个普遍适用的阈值。频率特征则不需要比较当前像素对背景的变化,只要观察候选区域内高频分量的变化或者闪烁的频率。但是对于远距离、丢失了细节变化以及室内的浓烟,基于频域的分析往往容易漏报^[48]和误报^[25]。

2 分类辨别的方法

因为没有一种特征与烟雾有一一对应关系,各种研究都不得不综合多种特征进行判断。除了顺序抽取特征排除候选目标,也即要求烟雾满足各种特性的方法外,许多研究采用模式辨识的方法综合多种特征的判断结果。

2.1 模糊逻辑识别烟雾

烟雾具有模糊不确定的特性,因此有人主张采用模糊逻辑识别烟雾。Ho 就综合了颜色、运动、轮廓不规则性等特征,利用模糊逻辑对烟雾进行识别^[40]。

2.2 随机森林决策树识别烟雾

随机森林是最准确的学习算法之一,由多个决策树的分类器组成。当输入一个新的候选目标时,每个决策树对其决策投票,分类结果由得票决定是烟、雾、纹理、形状或者运动。伪对 K_0 对每个候选区域抽取包括颜色、小波能量、运动方向、方向梯度

直方图 HOG 等 9 个特征向量,然后用两个训练过的随机森林决策树(random forest)判断候选区域是不是烟雾^[27]。

2.3 Bayesian 分类器识别烟雾

Bayesian 分类器通过先验概率,利用公式计算出其后验概率,选择具有最大后验概率的类作为该对象所属的类。Piccinini 等人用 Bayesian 分类器综合候选块的小波能量和颜色判断烟雾^[55]。

2.4 基于最小均方算法的主动学习算法识别烟雾

主动学习(active learning)能够解决标注困难、样本缺乏的问题,不再是被动接受训练样本,而是主动要求对当前分类器模型最有价值的样本进行标注。Toreyin 将候选区域的缓慢运动特性、彩色特性、上升特性(HMM 方法)和阴影特性(主要是为了排除云)都归结到 $[-1, 1]$ 之间,然后采用 WMA(weighted majority algorithm)和基于 LMS(least mean square)均方算法的主动学习对候选区域分类^[45-46]。

2.5 支持向量机识别烟雾

Maruta 则利用了运动特征和纹理特征,采用支持向量机(SVM)进行判决。为了提高准确性,他将判断结果沿时间累加,超过既定阈值的区域设为烟雾^[35]。Tian 则把 SVM 的两种核径向基函数(RBF)和直方图相交核(HIK)进行了对比,发现 RBF 效果更好^[30]。Ho 将动态区域的能量、空间、运动方向等特征的算术平均值和标准差输入 SVM 进行判断,然后用 CAMSHIFT(continuously adaptive mean SHIFT)追踪视频中的烟雾^[56]。Gubbi 先把图像分成 32×32 的块,再分别离散余弦变换和小波变换抽取特征,再用最近邻域分类算法(K-NN)和 SVM 判断块中是否存在烟雾。实验结果如表 1 所示,表明用小波变换抽取纹理特征,然后用 SVM 分类的效果最好,能达到 88.75% 的准确率^[57]。表 1 中精度用 $(TP + TN) / (TP + TN + FP + FN) \times 100\%$ 计算,灵敏度用 $TP / (TP + FN)$ 计算,错

误中的遗失比率为 $TN / (TN + FP)$,TP 为真对(true positive),TN 为真错(true negative),FP 为伪对(false positive),FN 为伪错(false negative)。

2.6 神经网络识别烟雾

神经网络具有不同的模型、不同的输入特征、烟雾识别中不同的阶段。袁非牛将 LBP 抽取的图像纹理直方图输入多层神经网络(NN),判断是否有烟^[37]。Genovese 首先检测动态对象,然后分析 YUV 颜色,再检测锐边和生长区域、上升区域,结合边缘无序性检测,对每个像素点生成 $4 + 2N$ 个特征量(N 是前溯的帧数,即内存中保存的帧数),采用 2 层的前向反馈 NN 判断烟雾^[21]。

2.7 在线自适应决策融合方法识别烟雾

Günay 等人采用了迄今最复杂的算法,基于熵函数的在线自适应决策融合方法(EADF),将运动检测、色彩规则、小波频域特征、阴影排除和纹理特征 5 项判断结果再用权重线性结合起来综合判断,权重根据熵在凸集上的投影在线学习,自动与环境相适应^[36]。其中,仅仅纹理特征又单独采用了 SVM 进行判断。

2.8 LDA 识别烟雾

LDA(latent dirichlet allocation)是具有文本表示能力的非监督学习模型。Calleja 先用 SIFT 抽取图像中的外观特征,然后用 K-means 生成 code book,再合并主题、计算概率生成 LDA 模型。检测时按 LDA 模型对图像中的特征进行烟-非烟的分类。这个全自动训练-检测的方法,对近似特征的误报率仍然很高,但是整个图像 TP 和 TN 达到 95.33% 和 91.94% 的准确率^[58]。

2.9 分类识别判断烟雾方法的综述

2010—2012 年公开出版的主要烟雾检测文献,所采用的烟雾特征和判断方法如表 2 所示。由于实验视频的缺乏,目前还没有人统计过每种特征的适应范围和不适用范围,也没有检测每种方法的漏报率和误报率是多少。缺乏每种特征的应用范围和准确率,无论是直接要求满足多种特征,或者是用人工智能综合多种特征进行识别的方法,都不能保证最终检测的准确率。而对于火灾这种危害特别大的灾害,漏报的后果相当严重。而且,综合多种特征的方法需要比较强的计算能力,时间和空间等计算资源消耗非常大,但是 CCD 监控系统往往不具备这样的条件。

表 1 DCT、wavelet 和 K-NN、SVM 实验对比
Table 1 Results comparing DCT and wavelet features

	K-NN			SVM		
	精度	灵敏度	遗失率	精度	灵敏度	遗失率
DCT	68.88	0.69	0.69	63.21	0.57	0.64
小波变换	76.16	0.53	0.79	88.75	0.90	0.89

表2 2010—2012年公开报道的主要烟雾检测文献所用方法汇总

Table 2 The methods proposed by the corresponding literatures that are printed among 2010—2012

文献	颜色	纹理	形状	飘动	频率	背景建模	判断方法
[30]		V				GMM	SVM
[48]	V	V			V	GMM + 差分	SVM
[20]	V			V	V	DCT 检测动态区域	符合各种特征
[27]	V			V	V		RFC
[37]		V					多层 NN
[42]	V		V			第1帧为背景	符合各种特征
[38]		V				GMM	多层 NN
[21]	V		V	V		差分	2层前向 NN
[51]	V				V		Bayesian 分类器
[36]	V	V		V	V		单隐层 NN
[43]				V		差分	单隐层 NN
[59]		V	V	V		FCMA	SVM
[56]	V		V	V	V	差分	SVM
[52]	V			V		光流法	单隐层 NN
[60]							EADF
[33]		V				差分	SVM
[61]	V			V		光流法	BP NN
[22]	V			V	V	Kalman + MHI	符合各种特征

注:FCMA 为模糊 C 均值聚类;EADF 为基于熵函数的在线自适应决策融合方法;RFC 为随机森林分类器。

3 动态目标提取

无论是直接从特征识别烟雾,还是分类辨别的综合判断,烟雾检测往往需要从背景中抽取动态目标,因此需要背景建模,或者直接帧间差分。Xiong 采用 GMM 建立背景模型,与用背景相减来分割出可疑目标区域,通过分析目标区域的颜色和纹理特点,从而检测出烟雾^[41]。Calderara 也采用 GMM 建立背景模型^[51],Lee 将 GMM 背景建模与时间差分的结果按“与”运算结合起来^[48]。但是 GMM 背景建模往往占用大量的计算时间和空间。Genovese 则直接用起始帧作为初始背景,然后更新背景

$$B(x, y, t+1) =$$

$$\begin{cases} \alpha B(x, y, t) + (1 - \alpha)I(x, y, t) & (x, y) \text{ 是静止点} \\ B(x, y, t) & (x, y) \text{ 是动态点} \end{cases}$$

(9)

式中, $B(x, y, t+1)$ 是新背景, $B(x, y, t)$ 是旧背景,

而 $I(x, y, t)$ 是当前图像^[21]。

Toreyin 等人甚至将根据动态目标的运动速度建立了 B_{fast} 和 B_{slow} 两个背景模型^[45]。夏文德等人采用了更复杂的 Kalman 滤波器进行背景更新,动态累积使在处理每一帧输入图像后都能得到完整的烟雾区域,能够消除摄像机轻微抖动造成的不良后果和部分孤立噪声^[62]。Ma 等人直接采用 Kalman 滤波器进行背景建模

$$\begin{aligned} B(x, y, t+1) &= B(x, y, t) + \\ &g(k) [I(x, y, t) - B(x, y, t)] \\ g(k) &= \beta [1 - M(x, y, t)] + \alpha M(x, y, t) \\ M(x, y, t) &= \begin{cases} 1 & |I(x, y, t) - B(x, y, t)| > T \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, α, β 决定了所捕捉到的动态目标变化的快慢。Ma 还使用运动历史图像 (MHI) 提高目标区域在时间、空间上的连续性^[22]。Ko 等人提出关键帧的概念,将相比上一关键帧变化较大的帧作为下一关键

帧,然后将各关键帧分块,用 Kronecker delta function 计算各块的变化,将变化大的块作为候选动态块。关键帧其实结合了背景建模或者帧间差分两种方法^[27]。CCTV (closed circuit television) 在监控时已经按 DVR 编码方法检测了运动,并且已经有许多针对这种编码方式计算每个块的运动矢量的方法,因此 Ha 提出用块的运动矢量检测动态目标,并且计算消耗相当小^[50]。Ho 采用 MHI 寻找可能的烟雾区域,用 CAMSHAFT 追踪区域的运动过程^[40]。

Kopilovic 等人提出通过光流场的方法检测烟雾区域,根据像素在时间和空间上的相关性来确定各变化^[31]。光流法的检测效果很好,但是计算比较复杂^[28,52-53]。因此 Yu 只在亮度降低的位置用塔式 Lucas-Kanade 方法检测光流变化,计算特征点的平均光流速度、方差和速度方向的方差,然后用 3-4-1 层的 BP 神经网络判断烟雾^[54]。

烟雾 $S(x, y)$ 与背景 $B(x, y)$ 合成为前景 $I(x, y)$, 即

$$I(x, y) = \alpha S(x, y) + (1 - \alpha) B(x, y) + n \quad (11)$$

因此 Tian 等人提出最小化式(12)估算烟雾浓度。

$$\min_{\alpha, s} \sum [(I - B) + \alpha(B - S)] \quad (12)$$

同时,认为 S 在邻域内是渐变的,即

$$\min \sum_i \sum_{j \in \Omega_i} (s_i - s_j) \quad (13)$$

式中, s_i 是当前烟雾色彩, s_j 是其邻域 Ω_i 内的点,将结合式(12)(13)就能从前景、背景计算烟雾^[30]。

4 目前方法的不足

烟雾虽然具有丰富的特征,但是要将其从复杂的环境中准确识别出来,与刚性物体相比,还是具有不少的困难。

1) 准确性不够

目前的烟雾检测,无论是利用单一特性还是综合利用多种特性,都会有漏报和误报,尤其是在复杂的环境里。采用单一特性的烟雾检测,误报率往往较高,特别是无法对淡而少的烟和浓而厚的烟同样处理^[59]。准确性不够的根本原因,是这些特征不够本质,与烟雾没有一一对应关系。

2) 适应性不强

虽然有些算法在一定条件下具有较好的效果,但在复杂环境下其检测性能有所降低。例如森林场

景中存在着诸如树枝晃动、云的飘动和其他物体运动的干扰,而现有的亮度差异检测区域直方图的方法,以及小波分析等烟雾检测方法,常常将这些干扰误检为烟雾;通常利用烟雾遮挡特性,利用小波分析高频分量衰减的算法则要求图像具有边缘模糊和半透明特性。另一方面,检测的准确与适应性也存在着矛盾:准确性高的方法,往往适应性较差。

3) 计算速度低下

在线实时的烟雾检测,往往要求在帧间间隔时间内完成计算。如果监控比较广阔的范围,那么就需要较高的分辨率,而且一般都是 360° 全周监控,如果用到色彩特征那么就需要 3 个通道彩色摄像,因此实时监控时不允许有太多的复杂计算。但是综合利用多种特性的烟雾检测算法,或者采用了计算量较大的背景建模算法、小波算法,将难以满足实时性的要求。典型的如 Günay 的 EADF 方法,不但先用 5 种特征得到独立的结论,并进而用自适应权重的线性决策方法得到最终结论^[36]。

5 发展方向

1) 建立更加本质的特征

如何避免复杂环境以及各式各样动态目标的干扰,减少误报和漏报,需要抓住更加本质的烟雾特征,建立与烟雾间的一一对应关系。视频的时间压缩图像能够提供一种有效的思路,能够自动过滤环境的影响和多数动态目标,保证算法的准确性。时间压缩图像是将烟雾视频沿时间向 x 和 y 方向投影、累加,得到 $x-t$ 和 $y-t$ 图像,如图 4 所示。图 4 的视频来自 Cetin 教授的火灾预警研究网站 (<http://www.ee.bilkent.edu.tr/>)。这种时间压缩轨迹(图 4(c))综合了色彩、纹理、半透明、形状变化、飘动和频率等多种特性,表现出明显的右倾直线特性、连续流线型特性、低频特性、烟源固定特性和 xy 方向比例特性,通过简单的计算就能准确、迅速地检测烟雾并发出火灾预警。

时间压缩图像中的轨迹综合了烟雾的时空特性,不需要背景建模就能够找到动态目标,采用简单计算能将近似目标区分开来,对环境光照不敏感,能自动去除树叶抖动等噪声。但这种方法也有不足之处。如果大面积的背景与烟雾近似,以及静态烟雾或者由于距离太远,速度和变化都很小,近似静态的

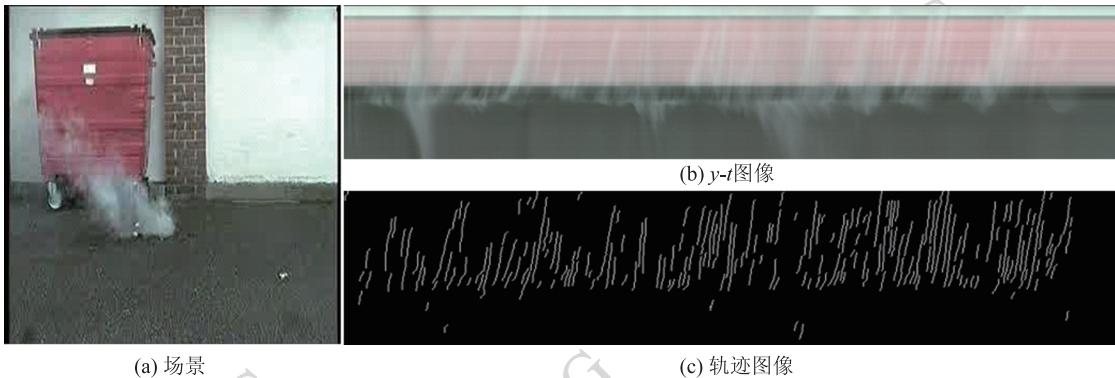


图 4 烟雾的时间压缩图像

Fig. 4 Condensed images along time axis of a smoke video

烟雾,将无法检测。但是对于森林等与烟雾色彩差别较大的自然环境,这种方法有足够的敏感性,已经足够用;对于辽阔的大幅度区域,采用多个摄像机组建监控网络,可以解决远处烟雾速度和变化很小的问题。因此,辨识时间压缩轨迹的方法检测烟雾,是一种有前途的方法。

2) 建立公开的烟雾检测效果评价平台

近 10 年来,烟雾检测的研究如火如荼地展开,但都是在自己的烟雾视频上检验自己的算法,从实验数据上看都取得了良好的效果。由于烟雾受季节、天气、光照、风向和燃烧物等多种因素的影响,一种情况下实用的算法在另一种情况下就未必实用。但是,目前还没有对这些算法的准确率、时间消耗和空间消耗等指标进行比较的研究。因此,建立一个比较全面的烟雾视频数据库和近似目标数据库,在统一平台上对比各种算法效率,也是一项有意义的研究工作。目前,仅有如表 3 所示 4 个大学的视觉研究机构公开了他们所用到的视频资源。

表 3 部分研究机构提供的视频样本公开下载网址

Table 3 Some web sites for video down-loading

机构	网址
意大利摩德纳大学	http://imabelab.ing.unimore.it/visor/
韩国启明大学	http://cvpr.kmu.ac.kr/
土耳其毕尔肯大学	http://signal.ee.bilkent.edu.tr/visifire/
克罗地亚斯普利特大学	http://wildfire.fesb.hr/index.php

而评价指标方面,只有 Jakovčević 等人初步建立了准确率、误报率和漏报率等指标,尝试从效果评价方面提高烟雾检测的研究^[62]。

3) 校验烟雾特征分辨效果

虽然目前世界各国广泛地开展了烟雾检测的研究,但主要方向集中在如何有效地综合各种特性提高准确率上。由于缺乏对纹理、形状、飘动和频率等各项特征进行深入完整的研究,没有烟雾各项特征分辨能力的实验对比,也没有各种特征优点和缺点的实验支持,简单地综合多种特征的方法对检测性能的提高效果有限。高度准确地将烟从场景中分辨出来,需要更深入地掌握各种特征,归纳其适用和不适用的场合。在这方面,目前只有 Krstinić 针对色彩的分辨能力进行了实验研究,采用了不同的图像分割方法对比不同色彩模型对烟—非烟的区分能力^[29]。

6 结 语

火灾发生初期会伴有大量烟雾产生,并在一定空间范围内传播,因此,烟雾的监控对于及早发现火灾有着非常重要的意义。基于视频的监控是非接触式方法,抗干扰能力强,可以在高温、多粉尘等特殊场地中使用,可以在地域辽阔,环境复杂的开放式环境中使用,并且数字化的视频信息还具有存储方便、处理手段丰富、传递迅速等特点。对于火灾这种关系国家生命财产安全的重大课题,通过提高烟雾的识别技术,可以有效提高报警的准确度,减少漏报和误报,具有明显的经济价值和社会意义。

参考文献 (References)

[1] Fang L M, Xu A J, Tang L H. A study of the key technology of forest fire prevention based on a cooperation of video monitor and

- GIS [C]//Proceedings of International Conference on Natural Computation. Jinan, China: IEEE Computer Society Press, 2008: 391-396. [DOI: 10.1109/ICNC.2008.428]
- [2] The Main Website of the Government of the People's Republic of China. General knowledge on how to prevent and control forest fires [EB/OL]. (2008-04-28) [2012-10-04]. <http://www.gov.cn/zxft/ft107/content956450.htm>. [中华人民共和国中央人民政府门户网站. 森林火灾防控常识[EB/OL]. (2008-04-28)[2012-10-04]. http://www.gov.cn/zxft/ft107/content_956450.htm.]
- [3] Li D B. Provisions for power supply of fire fighting system in fire protection design codes needs revision [J]. Building Electricity, 2011, (7): 12-15. [李道本. 设计防火规范应重视消防供电规定的修订[J]. 建筑电气, 2011, (7): 12-15.] [DOI: 10.3969/j.issn.1003-8493.2011.07.002]
- [4] The Ministry of Public Security Fire Department. The Warning of the Fire (The Case of Large Fires Between 1990 and 1999) [M]. Beijing: People Press, 1997. [公安部消防局. 大火警示录(1990-1999 全国特大火灾案例选)[M]. 北京: 群众出版社, 1997.]
- [5] Zhang C. Analysis of national fire cases in 2010 [J]. Safety, 2011, (2): 32-34. [张才. 2010 年全国火灾情况分析[J]. 安全, 2011, (2): 32-34.]
- [6] Web of China. 125402 fires have broken out and 1106 humans have died for it in 2011 [EB/OL]. (2012-01-19) [2012-10-04]. <http://news.163.com/12/0119/23/705TG U7G00014JB6.html>. [中国网. 中国 2011 年共接报火灾 125402 起, 死亡 1106 人 [EB/OL]. (2012-01-19) [2012-10-04]. <http://news.163.com/12/0119/23/705TG U7G00014JB6.html>.]
- [7] News web of Inner Mongolia. Fire is broken out in the district of Ximengdongwuzhuxingqi, and 150,000 acres grassland fires are burned [EB/OL]. (2009-12-23) [2012-10-04]. <http://news.qq.com/a/0090423/000590.htm>. [内蒙古新闻网. 锡盟东乌珠穆沁旗发生火灾, 烧毁草场近 15 万亩[EB/OL]. (2009-12-23)[2012-10-04]. <http://news.qq.com/a/0090423/000590.htm>.]
- [8] Liu K. The reconsideration on Russian forest fire [J]. Anhui Forest, 2010, (Z1): 34-38. [刘恺. 俄罗斯森林大火烧出的反思[J]. 安徽林业, 2010, (Z1): 34-38.]
- [9] Li G F. Fire detection based on fractural method [D]. Nanchang: Jiangxi Finance University, 2008. [李桂芳. 基于分形的图像烟雾检测方法[D]. 南昌: 江西财经大学, 2008.]
- [10] Rapid Response EOSDIS-Earth Data Website. MODIS rapid response system [EB/OL]. (2012-08-14) [2012-10-04]. <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>.
- [11] EUMETSAT-data & product-land [EB/OL]. (2012-07-19) [2012-10-04]. <http://www.eumetsat.int/Home/Main/DataProducts/Land/index.htm?l=en>.
- [12] Verstocket S, Merci B, Sette B, et al. Hot topics in video fire analysis [J]. Newsletter of International Association for Fire Safety Science, 2010, (29): 14-15.
- [13] FFF Introduction-Forests-NGNS Ingenious Solutions [EB/OL]. [2012-10-04]. http://www.ngns-is.com/html/florestas/fff_intro_eng.html.
- [14] Byungrak S, Yong S H, Jung G K. A design and implementation of forest-fires surveillance system based on wireless sensor networks for south Korea mountains [J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2006, 6(98): 124-130. [DOI:10.1145/1582379]
- [15] Sahin Y G, Ince T. Early forest fire detection using radio-acoustic sounding system [J]. Sensors, 2009, 9(3): 1485-1498. [DOI:10.3390/s90301485]
- [16] Stipančev D, Štula M, Krstinić D, et al. Advanced automatic wildfire surveillance and monitoring network [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Forest Fire Research. Coimbra, Portugal: ADAI/CEIF University of Coimbra, 2010: 15-18. [DOI:10.1016/j.inffus.2009.12.003]
- [17] Verstocket S, Lambert P, Van D W R, et al. State of the art in vision-based fire and smoke detection [C]//Proceedings of International Conference on Automatic Fire Detection. Duisburg, Germany: University of Duisburg-Essen, 2009: 285-292.
- [18] Chen T H, Yin Y H, Huang S F, et al. The smoke detection for early fire-alarming system base on video processing [C]//Proceedings of International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. Pasadena, USA: IEEE Computer Society, 2006: 427-430.
- [19] Celik T, Ozkaramanli H, Demirel H. Fire and smoke detection without sensors: image processing-based approach [C]//Proceedings of European Signal Processing Conference. Poznań, Poland: European Association for Signal Processing, 2007: 1794-1804.
- [20] Millan G L, Sanchez P G, Nakano M, et al. An early fire detection algorithm using IP Cameras [J]. Sensors, 2012, (12): 5670-5686. [DOI:10.3390/s120505670]
- [21] Genovese A, Labati R D, Piuri V, et al. Wildfire smoke detection using computational intelligence techniques [C]//Proceedings of Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications. Ottawa, Canada: IEEE Press, 2011: 1-6. [DOI: 10.1109/CIMSA.2011.6059930]
- [22] Ma L, Wu K, Zhu L. Fire smoke detection in video images using Kalman filter and Gaussian mixture color model [C]//Artificial Intelligence and Computational Intelligence. Las Vegas, USA: IEEE Computer Press, 2010: 484-487. [DOI:10.1109/AICI.2010.107]
- [23] Toreyin B U, Dedeoglu Y, Cetin A E. Wavelet based real-time smoke detection in video [C]//Proceedings of European Signal Processing Conference. Antalya, Turkey: Elsevier Press, 2005: 255-260.
- [24] Donate A, Ribeiro E. Viewing scenes occluded by smoke [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006, 4292: 750-759. [DOI:10.1007/11919629_75]
- [25] Ahlen J, Seipel S. Early recognition of smoke in digital video [C]//Advances in Communications, Computers, Systems, Cir-

- cuits and Devices. Puerto De La Cruz, Tenerife: World Scientific and Engineering Academy and Society Press, 2010: 301-306.
- [26] Yuan F N. A fast accumulative motion orientation model based on integral image for video smoke detection [J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29 (7): 925-932. [DOI: 10.1016/j.patrec.2008.01.013]
- [27] Ko B C, Kwak J, Nam J. Wildfire smoke detection using temporal-spatial features and random forest classifiers [J]. Optical Engineering, 2012, 51(1): 1-10. [DOI:10.1117/1.OE.51.1.017208]
- [28] Jakovčević T, Braovic M, Stipančević D, et al. Review of wildfire smoke detection techniques based on visible spectrum video analysis [C]//International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis. Dubrovnik, Croatia: IEEE Press, 2011: 480-484.
- [29] Krstinić D, Stipančević D, Jakovčević T. Histogram-based smoke segmentation in forest fire detection system [J]. Information Technology and Control, 2009, 38(3): 237-244.
- [30] Tian H, Li W, Wang L, et al. A novel video-based smoke detection method using image separation [C]//Proceedings of International Conference on Multimedia and Expo. Melbourne. Australia: IEEE Press, 2012: 532-537. [DOI: 10.1109/ICME.2012.72]
- [31] Kopilovic I, Vagvolgyi B, Sziranyi T. Application of panoramic annular lens for motion analysis tasks: surveillance and smoke detection [C]//Proceedings of International Conference on Pattern Recognition. Barcelona, Spain: IEEE Computer Society Press, 2000: 714-717. [DOI:10.1109/ICPR.2000.903017]
- [32] Fujiwara N, Terada K. Extraction of a smoke region using fractal cording [C]//International Symposium on Communication and Information Technologies. Sapporo, Japan: ACM Press, 2004: 26-29.
- [33] Maruta H, Nakamura A, Yamamichi T, et al. Image based smoke detection with local hurst exponent [C]//Proceedings of International Conference on Image Processing. Hong Kong, China: IEEE Computer Society Press, 2010: 4653-4656. [DOI: 10.1109/ICIP.2010.5650254]
- [34] Ferrari R J, Zhang H, Kube C R. Real-time detection of steam in video images [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(3): 1148-1159. [DOI:10.1016/j.patcog.2006.07.007]
- [35] Maruta H, Nakamura A, Kurokawa F. A new approach for smoke detection with texture analysis and support vector machine [C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Bari Italy: IEEE Press, 2010: 1550-1555. [DOI: 10.1109/ISIE.2010.5636301]
- [36] Günay O, Toreyin B U, Kose K, et al. Online adaptive decision fusion framework based on entropic projections onto convex sets with application to wild fire detection in video [R/OL]. [2012-10-18]. <http://www.arxiv.org/pdf/1101.4749.pdf>.
- [37] Yuan F. Video-based smoke detection with histogram sequence of LBP and LBPV pyramids [J]. Fire Safety Journal, 2011, 46(3): 132-139. [DOI:10.1016/j.firesaf.2011.01.001]
- [38] Tian H, Li W, Ogunbona P, et al. Smoke detection in videos using non-redundant local binary pattern-based features [C]//Proceedings of International Workshop on Multimedia Signal Processing. Hangzhou, China: IEEE Press, 2011: 1-4. [0.1109/MMSP.2011.6093844]
- [39] Toreyin B U, Dedeoglu Y, Cetin A E, et al. Dynamic texture detection, segmentation, and analysis [C]//Proceedings of ACM International Conference on Image and Video Retrieval. Amsterdam, Netherlands: ACM Press, 2007: 131-134. [10.1145/1282280.1282304]
- [40] Ho C C. Machine vision-based real-time early flame and smoke detection [J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(4): 45-52. [10.1088/0957-0233/20/4/045502]
- [41] Xiong Z, Caballero R, Wang H, et al. Video-based smoke detection: possibilities, techniques, and challenges [C]//Suppression and Detection Research and Applications. Orlando USA: National Fire Protection Association, 2007: 1-8.
- [42] Surit S, Chatwiriya W. Forest fire smoke detection in video based on digital image processing approach with static and dynamic characteristic analysis [C]//Proceedings of ACIS/JNU International Conference on Computers, Networks, Systems, and Industrial Engineering. Ramada Plaza, South Korea: IEEE Computer Society Press, 2011: 35-39. [DOI:10.1109/CNSI.2011.47]
- [43] Wang T, Liu Y, Xie Z P. Flutter analysis based video smoke detection [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 35(5): 1024-1029. [王涛, 刘渊, 谢振平. 一种基于飘动性分析的視頻烟雾检测新方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 35(5): 1024-1029.] [DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00912]
- [44] Yasmin R. Detection of smoke propagation direction using color video sequences [J]. International Journal of Soft Computing, 2009, 4(1): 45-48.
- [45] Toreyin B U, Cetin A E. Wildfire detection using LMS based active learning [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Taipei, Taiwan, China: IEEE Computer Society press, 2009: 1461-1464. [DOI: 10.1109/ICASSP.2009.4959870]
- [46] Günay O, Taşdemir K, Toreyin B U, et al. Fire detection in video using LMS based active learning [J]. Fire Technology, 2010, 46(7): 551-577. [DOI:10.1007/s10694-009-0106-8]
- [47] Yuan F N, Zhang Y M, Liu S X, et al. Video smoke detection based on accumulation and main motion orientation [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(4): 808-813. [袁丰牛, 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.]
- [48] Lee C Y, Lin C T, Hong C T, et al. Smoke detection using spatial and temporal analyses [J]. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2012, 8(7): 4749-4770.
- [49] Truong T X, Kim J M. An early smoke detection system based

- on motion estimation [C]//International Forum on Strategic Technology. Ulsan, Korea; IEEE Computer Society press, 2010: 437-440. [DOI:10.1109/IFOST.2010.5668107]
- [50] Ha C, Jeon G, Jeong J. Vision-based smoke detection algorithm for early fire recognition in digital video recording system [C]//Proceedings of International Conference on Signal-Image Technology and Internet-Based Systems. Dijon, French; IEEE Computer Society Press, 2011: 209-212. [DOI:10.1109/SITIS.2011.23]
- [51] Calderara S, Piccinini P, Cucchiara R. Vision based smoke detection system using image energy and color information [J]. Machine Vision and Applications, 2011, 22(4): 705-719. [DOI: 10.1007/s00138-010-0272-1]
- [52] Kolesov I, Karasev P, Tannenbaum A, et al. Fire and smoke detection in video with optimal mass transport based optical flow and neural networks [C]//Proceedings of International Conference on Image Processing. Hong Kong, China; IEEE Computer Society Press, 2010: 761-764. [DOI:10.1109/ICIP.2010.5652119]
- [53] Zhijie W, Mohamed Ben S, Hong Zhang. Discrete Wavelet Transform Based Steam Detection with Adaboost [C]//Proceedings of International Conference on Information and Automation. Shenyang, China; IEEE Computer Society Press, 2012: 542-547. [DOI:10.1109/ICInfA.2012.6246864]
- [54] Chen T, Wu P, Chiou Y. An early fire-detection method based on image processing [C]//Proceedings of International Conference on Image Processing. Singapore; IEEE Computer Society Press, 2004: 1707-1710. [DOI:10.1109/ICIP.2004.1421401]
- [55] Piccinini P, Calderara S, Cucchiara R. Reliable smoke detection in the domains of image energy and color [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. San Diego, USA; IEEE Computer Society Press, 2008: 1376-1379. [DOI: 10.1109/ICIP.2008.4712020]
- [56] Ho C C. Design of machine learning-based smoke surveillance [J]. Advanced Science Letters, 2011, 4(6): 2072-2275. [DOI:10.1166/asl.2011.1441]
- [57] Gubbi J, Marusic S, Palaniswami M. Smoke detection in video using wavelets and support vector machines [J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(8): 1110-1115. [DOI:10.1016/j.firesaf.2009.08.003]
- [58] Vidal C T A, Agammenoni G. Integrated probabilistic generative model for detecting smoke on visual images [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. St. Paul, USA; IEEE Spectrum, 2012: 2183-2188. [DOI: 10.1109/ICRA.2012.6225096]
- [59] Tung T X, Kim J M. An effective four-stage smoke detection algorithm using Video images for early ? re-alarm systems [J]. Fire Safety Journal. 2011, 46(5): 276-282. [10.1016/j.firesaf.2011.03.003]
- [60] Schneideman R. Trends in video surveillance GiVe DSP an apps boost [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2010, 27(6): 6-12. [DOI:10.1109/MSP.2010.938113]
- [61] Chunyu Y, Jun F, Jinjun W, et al. Video fire smoke detection using motion and color features [J]. Fire Technology, 2010, 46(3): 651-663. [DOI:10.1007/s10694-009-0110-z]
- [62] Xia W D, Lian Q S. A fast algorithm of smoke checking based on video [J]. Electric Technology, 2007, 36(11): 135-138. [夏文德, 练秋生. 基于视频处理的烟雾检测快速算法[J]. 电子技术, 2007, 36(11): 135-138.] [DOI:10.1016/j.patrec.2008.01.013]
- [63] Jakovčević T, Šerić L, Stipančev D, et al. Wildfire smoke-detection algorithms evaluation [C]//Proceedings of International Conference on Forest Fire Research. Coimbra, Portugal; ADAI/CEIF University of Coimbra, 2010: 322-334.