

基于烟雾动态特征分析的实时火灾检测

王欣刚, 魏 峥, 刘东昌, 郑晓隆

(中国科学院 自动化研究所 智能感知与识别实验室, 北京 100080)

摘 要:传统的离子式、光电式、吸烟式等烟雾探测器,需要非常靠近烟雾源时才能完成检测,不能应用于室外大空间、远距离等特殊场合的火灾监控系统中。提出了一种基于烟雾动态特征的图像型火灾识别算法。通过监测普通 CCD 摄像机拍摄的视频图像,进行运动物体的检测分割,分析图像帧中运动物体的动态特征,进而判断监控区域是否有火灾烟雾的发生。实验结果表明,该算法具有比较好的鲁棒性,能够有效地降低火灾监控系统的误报漏报率。

关键词:动态特征;分割;火灾探测;烟雾图像

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2008)11-0009-04

Smoke Dynamic Features Based Real-Time Fire Detection

WANG Xin-gang, WEI Zheng, LIU Dong-chang, ZHENG Xiao-long

(Laboratory of Intelligent Sense and Recognition, Institute

of Automation, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: The traditional ionization smoke detector, photoelectric smoke detector and aspirated smoke detector etc were unable to be used on the fire detection to the large and open spaces. A fire detection method based on smoke dynamic features is proposed. After the detection of the moving objects through the video sequence of the normal CCD camera, the method analyzed the dynamic features of the moving objects, which determined the region whether have the fire smoke occurrence or not. Experimental results show that the method has the characteristic of robusticity and the ability to reduce the false and lose alarms of the fire surveillance system.

Key words: dynamic features; segmentation; fire detection; smoke image

0 引 言

火灾是一种在时空上失去控制的燃烧所引发的灾害^[1]。它直接危及着人类的生命财产安全,因此,及时准确的火灾探测方法的研究具有重大的现实意义。由于火灾发生的不确定性和多变性,传统的感温、感烟、感光以及复合型的火灾探测器不可避免地要受到监控环境的面积、高度、湿度、粉尘、气流等因素的影响,这些影响在室外大空间的火灾探测中极为明显。利用图像技术进行火灾监控是一个明智的选择。图像监测的关键器件——摄像机,通过光学镜头与外界只发生间接接触,这种结构保证了图像监测技术既可以在较恶劣(高湿度、多粉尘)的室内环境使用,也可以在大空间室外场景中使用。烟雾是火灾的前兆和伴随产物,而且相对于火灾发生源及火焰,烟雾图像可以更加容易地进入摄像机的视场范围。因此可以在火灾发生的最

初阶段做出迅速反应,有利于实现火灾的早期预报和控制。目前,基于图像的火灾检测算法主要是以分析火焰的颜色和运动信息为基础的。文中主要以分析烟雾的动态特征为基础,改善基于火焰的检测算法的速度和漏报等问题。

燃烧是一个持续的过程,燃烧过程中产生的烟雾也具有持续性,同时火灾烟雾因与周围环境存在着温度差和浓度差,而有一定的边缘效应和形体效应。这些变化在单帧图像中是无法体现的,在连续视频帧中才能体现出这些烟雾的动态特征。

文中提出了一种基于烟雾动态特征的火灾烟雾检测方法:确定当前视频帧中的运动像素和运动区域;分析运动区域在相邻视频帧中表现出的动态特征是否符合火灾烟雾的三个重要动态特征;进而判断被监测区域是否有火灾烟雾发生。这三个重要特征包括:烟雾区域整体移动的相对稳定性;随着烟雾的产生,视频帧中背景图像的边缘信息逐渐消失,表现为视频序列经小波变换后,其子图像的能量值的减少;烟雾面积的增长特征。

收稿日期:2008-02-23

基金项目:国家科技支撑计划(2006BAK31B03)

作者简介:王欣刚(1972-),男,吉林长春人,副研究员,博士,主要研究领域为图像视频处理、模式识别、人机交互、智能感知。

1 运动区域检测与分割

对视频序列进行运动区域检测和分割的目的是找到运动物体对应的像素区域。在下一步的动态特征分析过程中,只需关注图像中的这些像素区域,减少计算量。

1.1 确定运动像素和区域

使用一种结合自适应背景减除和相邻帧差分的方法,确定运动像素和运动区域^[2]。取出视频序列中相邻的三帧图像当前帧 $I_n(x, y)$ 和前两帧图像 $I_{n-1}(x, y)$, $I_{n-2}(x, y)$ 。将当前帧图像分别与上一帧以及上一帧的前一帧图像进行差分运算,如果某个像素点的值在这两次差分计算的结果中的变化均超过某一阈值 $T_n(x, y)$,则判定这一像素点为运动像素点。即如果像素点的值同时满足以下两个条件:

$$(|I_n(x, y) - I_{n-1}(x, y)| > T_n(x, y))$$

$$(|I_n(x, y) - I_{n-2}(x, y)| > T_n(x, y))$$

则该像素点为运动像素点。为了解决帧间差分后运动区域中的空洞问题,采用自适应背景减除的方法进行修正。

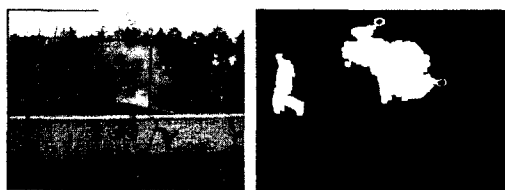
背景模型 $B_n(x, y)$ 以及帧间差分阈值 $T_n(x, y)$ 均为视频序列 $\{I_k(x, y), k < n\}$ 的统计量。

利用运动区域来计算更新背景图像 $B_{n+1}(x, y)$ 以及帧间差分阈值 $T_{n+1}(x, y)$, 即

$$B_{n+1}(x, y) = \begin{cases} aB_n(x, y) + (1-a)I_n(x, y) & (x, y) \text{ stationary} \\ B_n(x, y) & (x, y) \text{ moving} \end{cases}$$

$$T_{n+1}(x, y) = \begin{cases} aT_n(x) + (1-a)(5 \times |I_n(x) - B_n(x)|) & (x, y) \text{ stationary} \\ T_n(x) & (x, y) \text{ moving} \end{cases}$$

其中 a 为更新系数,变化范围为 $0 \sim 1$ 。运动像素和区域检测结果如图 1 所示,从实验结果可以看出运动像素和区域成功地被标记在对应的二值化图中(该段视频描述人物点火后起烟,并离开现场的过程)。



(a) 当前视频帧 (b) 运动区域二值图

图 1 运动区域检测

1.2 运动区域分割算法

运动区域分割即找出二值化图像对应的亮点区域,对图像进行区域分割^[3]。本算法采用四邻域搜索法来获取亮点区域,并保存每个疑似火灾烟雾区域的位置,作为烟雾像素区域整体移动稳定性的判据。在以后的计算中,都直接针对每个分割后的区域进行计

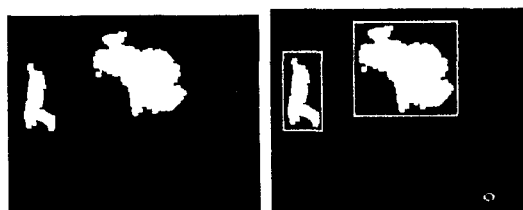
算,大大减少了计算量。同时,可以统计每个区域的亮点数,作为火灾中烟雾面积增长判据的依据。该算法主要分为以下几个步骤:

(1) 逐行扫描整个二值图像帧 I , 每当遇到一个像素值为 255 的像素 $I(x, y)$, 赋予一个不重复的非零标记值 I_d , 并将该像素周围紧邻的四个像素中值为 255 的像素(简称为紧邻亮点)也赋值为该 I_d , 同时将紧邻亮点的位置推入堆栈。

(2) 子循环:从堆栈中取出元素,并将元素的紧邻亮点赋值为 I_d , 存于堆栈,直到堆栈为空。子循环结束。

(3) 回到进入子循环的像素点位置继续逐行扫描。搜索完所有像素,则算法结束。

对上一步得到的标记运动像素区域的二值图,应用该区域分割算法得到如图 2 所示的结果。



(a) 运动区域二值图 (b) 区域分割结果

图 2 运动区域分割

为了显示清楚,分别将不同值的像素用不同颜色表示,使用红线框出来的部分为疑似区域,其余部分均为背景和无需计算的干扰亮点域。在以后的运算中,只对红框里的区域进行运算,这样就避免了处理背景的大量无用计算,使效率大为提升,以适应实时检测的要求。

2 烟雾区域整体移动

随着旧的燃烧物燃尽和新的燃烧物被点燃,烟雾区域不断扩散并移动着位置,所以说烟雾在整体上是连续移动的。另一方面,烟雾的整体移动又不可能是跳跃的,亦即烟雾满足相对稳定性。不会出现位置上的较大移动,其移动是平滑的、非跳跃性的。即便火灾正处于快速蔓延的时候,烟雾的中心位置也不可能成跳跃式的运动。如图 2(b) 中的人的走动这一运动干扰源可以通过火灾烟雾的相对稳定分析后,作为噪声加以排除。

利用亮点区域的中心值和和区域底部亮点的移动速度来判断烟雾的整体移动。首先找到运动区域的中心和底部像素点。用 (x_i, y_i) 表示的运动区域二值图中属于第 i 个运动区域的像素点。 $N_i \times M_i$ 表示第 i 个运动区域的大小,则该区域的中心坐标 (X_i, Y_i) 为

$$X_i = \frac{\sum x_i}{N_i \times M_i}$$

$$Y_i = \frac{\sum y_i}{N_i \times M_i}$$

同理,也可以得到运动区域底部五分之一高度范围内的中心坐标 (X_i, Y_i) 作为底部亮点的移动特征的代表。用 $(x_i(t), y_i(t)), (x_i(t+1), y_i(t+1))$ 分别表示相临两帧的运动区域像素二值化图。 $(X_i(t), Y_i(t)), (X_i(t+1), Y_i(t+1))$ 分别表示它们对应的区域中心; V_x, V_y 分别表示中心在水平方向和垂直方向的相对移动速率,则可以定义

$$V_x = \left| \frac{X(t) - X(t+1)}{M} \right|$$

$$V_y = \left| \frac{Y(t) - Y(t+1)}{N} \right|$$

为第 i 个运动区域中心的相对移动速率 $V_x, V_y \in [V_{c1}, V_{c2}]$, 其中, V_{c1}, V_{c2} 分别是相对移动速率的上下限, 并且 $V_{c1}, V_{c2} \in (0, 1)$ 。同理底部亮点也有类似的表述。如果区域中心和区域底部亮点的移动速率在相对移动速率上下限以外, 则可以当作干扰源, 予以排除。

3 边缘模糊

3.1 二维小波变换

二维离散小波变换, 需要一个二维尺度函数 $\varphi(x, y)$ 和三个二维小波 $\Psi^H(x, y), \Psi^V(x, y), \Psi^D(x, y)$ ^[4]。每一个都是一维尺度函数和相应的小波函数的乘积。排除产生一维结果的乘积, 如 $\varphi(x)\Psi(x)$, 四个留下的乘积产生可分离的尺度函数:

$$\varphi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y) \quad (1)$$

和可分离的“方向敏感的”小波:

$$\Psi^H(x, y) = \Psi(x)\varphi(y) \quad (2)$$

$$\Psi^V(x, y) = \varphi(x)\Psi(y) \quad (3)$$

$$\Psi^D(x, y) = \Psi(x)\Psi(y) \quad (4)$$

这些小波度量函数会有变化——沿着不同方向的图像强度或灰度的变化: Ψ^H 度量沿着列的变化(例如, 水平边缘), Ψ^V 响应沿着行的变化(例如, 垂直边缘), Ψ^D 对应于对角线方向的变化。方向敏感是式(2)到式(4)所引起的可分离性的自然结果。

给定可分离的二维尺度和小波函数, 首先定义一个尺度和平移基函数:

$$\varphi_{j,m,n}(x, y) = 2^{j/2}\varphi(2^j x - m, 2^j y - n) \quad (5)$$

$$\Psi_{j,m,n}^i(x, y) = 2^{j/2}\Psi^i(2^j x - m, 2^j y - n), i = \{H, V, D\} \quad (6)$$

这里, 上标 i 指出式(2)到式(4)的方向小波, 上标 i 代表了值 H, V 和 D , 则尺寸为 $M \times N$ 的函数 $f(x, y)$ 的离散小波变换是:

$$W_\varphi(j_0, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \varphi_{j_0, m, n}(x, y) \quad (7)$$

$$W_\Psi^i(j, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \varphi_{j, m, n}^i(x, y), i = \{H, V, D\} \quad (8)$$

其中, j_0 是任意的开始尺度, $W_\varphi(j_0, m, n)$ 系数定义了尺度 j_0 的 $f(x, y)$ 的近似。 $W_\Psi^i(j, m, n)$ 系数对于 $j \geq j_0$ 附加了水平、垂直和对角方向的细节。通常令 $j_0 = 0$ 并且选择 $N = M = 2^J, j = 0, 1, 2, \dots, J-1$ 和 $m, n = 0, 1, 2, \dots, 2^j - 1$ 。使用上面的算法进行图像的二维小波变换结果如图 3 所示。从左上角开始, 顺时针方向依次为近似图, 水平、对角线、垂直方向细节。

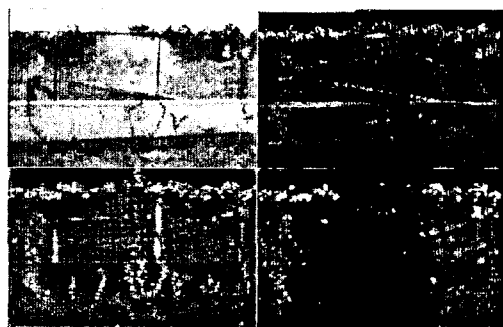


图 3 二维小波变换结果

3.2 烟雾导致图像中背景模糊

随着烟雾的扩散, 使得视频图像中背景的纹理和边缘变得模糊起来。由于这些边缘和纹理对应着图像中的高频信息, 因此, 与之对应的是小波子图像的能量值的减少。根据以上事实, 通过监控视频图像中背景边缘像素的小波系数在一段时间内的减少情况来检测在该区域是否有火灾烟雾产生^[5]。将视频图像分解为一幅低分辨率图像和三幅高频分量图像分别包含水平方向(HL)、垂直方向(LH)和对角方向(HH)的边缘信息。分解过程如图 4 所示。

在整个视频序列中, 监测运动区域及周围背景中物体边缘的小波系数的值是否减少。当烟雾产生一段时间后, 会变得越来越浓, 边缘信息将会逐渐消失, 对应子图像的能量值也会减少。将子图像分成大小为 (K_1, K_2) 的小块, 则每块的能量 $e(l_1, l_2)$ 可以按下式计算:

$$e(l_1, l_2) = \sum_{(x,y) \in R_i} w_n(x + l_1 K_1, y + l_2 K_2)$$

$$w_n(x, y) = |LH_n(x, y)|^2 + |HL_n(x, y)|^2 + |$$

$$HH_n(x, y) |^2$$

其中, $w_n(x, y)$ 表示包含高频信息的图像, R_i 表示小波子图像中大小为 (K_1, K_2) 的子块。在实验过程中, 如果某个子块的能量值 $e(l_1, l_2)$ 减少, 说明场景中的纹理或边缘不再像先前一样锐利, 则该区域可能产生了烟雾^[4]。文中采用 YUV 彩色空间中的 Y 分量图像来计算小波系数, 选取的子块大小为 8×8 , 并设定一个阈值。

4 烟雾面积增长特征

在火灾发生的早期阶段, 随着燃烧的进行, 烟雾不仅会有整体的缓慢移动, 而且也会向四周扩散。因此, 烟雾区域的面积也随时间变化。下面定义烟雾区域面积相对变化的速率。用 $I_1(x, y), I_2(x, y)$ 分别表示相邻两帧图像中标记相同 I_d 的运动像素区域。 N_1, N_2 分别表示它们的亮点数, V_{area} 表示烟雾区域面积的相对变化速度, 则 $V_{\text{area}} = \frac{N_2 - N_1}{N}$, 并且 $V_{a1} < V_{\text{area}} < V_{a2}$ 。由于面积增长过程中, 烟雾区域不可能完全不变也不可能变化很快, 所以存在上下阈值 V_{a1}, V_{a2} , 并且均为大于 0 的整数。区域的相对变化速率在阈值外的区域被当作干扰源, 将其排除。

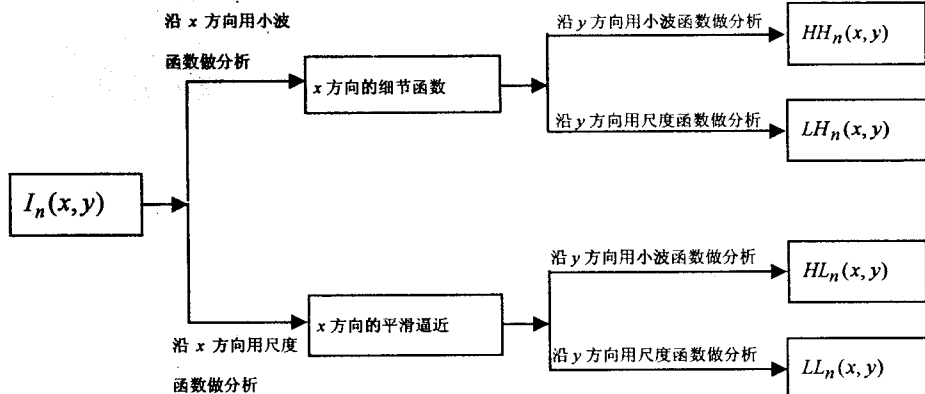


图 4 二维离散小波变换过程

当视频序列同时满足文中提出的烟雾区域整体移动的相对稳定性; 边缘信息逐渐消失; 烟雾面积增长特征这三个条件后, 就可以确定该区域有烟雾产生。

5 实验结果

使用文中提出的方法, 测试了大量的火灾视频, 这些视频中包括只含烟雾图像的、包含火焰和烟雾图像的视频, 以及不含烟雾和火焰图像的视频片段。所选取的视频片段均为室外场景, 存在微风、下雪等干扰源, 且增加了人的走动。

该算法的计算量不大, 可以实现烟雾的实时监测。

大小为 320×320 的视频帧, 每帧的处理时间大约为 10ms。图 5 中列出了一些视频序列的检测结果。每段视频中的烟雾都能够及时地检测到, 并且没有出现误报现象。

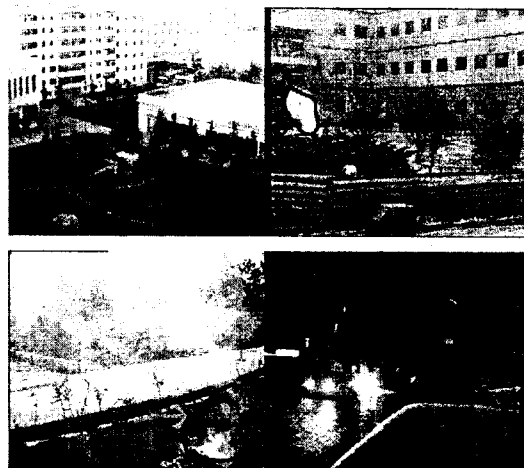


图 5 一些视频序列的烟雾检测结果

6 结束语

火灾早期是整个火灾过程的重要环节。所谓火灾早期, 从安全的观点来看, 它是指轰燃发生前的阶段。室内人员和财产尚未受到严重的威胁。从火灾的发展

过程来看, 如果能在火灾的早期将其发现并采取措施, 无疑会大大降低火灾损失。通过分析火灾早期烟雾的动态特征, 设计了一套基于视频图像的实时火灾烟雾检测算法。图像型火灾检测具有如下优点:

- (1) 可在大空间、大面积的环境中使用;
- (2) 可用于多粉尘、高湿度的场所;

- (3) 可在室外环境中使用;
- (4) 可对火灾现象中的图像信息做出快速反应;
- (5) 可提供直观丰富的火灾信息。

这些优点使得它成为了当今国际上火灾检测报警技术的重要发展趋势。

目前, 图像型火灾检测技术的研究还处于起步阶段。不像语音识别拥有 TIMIT 标准测试数据库, 也不像人脸识别有标准的 FERET 标准测试库, 现在视频烟雾检测算法是在研究人员自己建立的数据库测试评价的, 这样就缺乏一个标准的测试库去评比不同算法

(下转第 17 页)

不会因为本体数量的增加而出现急剧恶化的现象。其主要原因是资源选择后很多不符合要求的本体被排除,减少了大量的查询推理时间。

实验二利用 LUBM 提供的本体和 SWRC (Semantic Web for Research Communities) 提供的关于大学的本体对上面的 3 个查询做了本体异构方面的测试。其中 LUBM-SWRC 表示 LUBM 是原本体, SWRC 是目标本体, 其它依此类推。本体文件可以在 <http://swrc.ontoware.org/ontology> 下载。

通过图 4 可以发现, 基于本体映射的多本体查询与本体的异构程度基本无关。说明多本体查询的时间与本体异构的程度的关系不大。其主要原因是因为利用基于语义的多策略中对结构的策略做了适当的修改, 而且不需要计算出结构上的相似度就能给出实体对的相关性。结合其它策略就能判断实体对是否匹配。而我们只针对这些匹配对进行语义相似度的计算从而减少了异构性的影响。

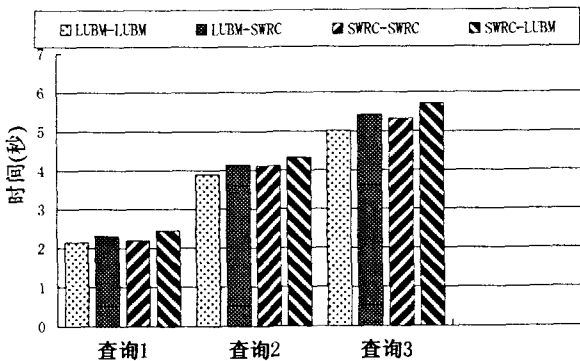


图 4 异构本体测试结果图

因为对单个本体的查询是利用的现有的推理查询器, 所以在此没有对推理查询的准确性做测试。

5 结束语

多本体查询主要有两种方式, 一种是本体的集成,

一种是分布式查询。文中主要是一种分布式的查询方式。利用本体映射来自动地对本体资源进行选择, 并且根据映射的结果重写原本体的查询语句, 对被选中的本体资源进行查询, 从而实现了对本体资源的查询。根据映射中的相似度和用户对实例的访问次数对多个查询结果进行适当的融合。通过实验测试发现查询的时间与本体的数量呈线性关系, 并且本体的异构程度对查询的时间影响不大。

未来的工作主要是: 结合本体集成的方法, 适当融合相关程度高的本体, 进一步减少本体的数量, 从而减少查询的时间。

参考文献:

- [1] Haase P, Motik B. A Mapping System for the Integration of OWL-DL Ontologies[C]//Proceedings of the first international ACM workshop on Interoperability of Heterogeneous Information Systems (IHIS'05). Bremen, Germany: [s. n.], 2005: 9-16.
- [2] Stuckenschmidt H. Towards distributed processing of RDF path queries[J]. Journal of the ACM, 2005, 32(3): 112-124.
- [3] Fuhr N. Probabilistic Datalog: Implementing Logical Information Retrieval for Advanced Applications[J]. Journal of the American Society for Information Science, 2000, 51(2): 95-110.
- [4] Renda M E, Straccia U. Web Metasearch: Rank vs. Score Based Rank Aggregation Methods[C]//In 18th Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC'03). Melbourne, Florida, USA: [s. n.], 2003: 841-846.
- [5] 徐德智, 肖文芳, 王怀民. 本体映射过程中的概念相似度计算[J]. 计算机工程与应用, 2006(9): 167-169.
- [6] Guo Y, Pan Z, Heflin J. Lubm: A benchmark for owl knowledge base systems[J]. Journal of Web Semantics, 2005, 3(2): 158-182.

(上接第 12 页)

之间的性能差异。而且通过何种指标进行算法的评价, 也没有统一的标准。下一阶段工作将重点着手建立基于视频的烟雾特征数据库, 以及针对测试库的算法评价标准, 以便为在一个开放的、公平的平台上进行相关学术研究打下基础。

参考文献:

- [1] 程晓舫, 王瑞芳, 张维农, 等. 火灾探测的原理与方法(上)[J]. 中国安全科学学报, 1999, 9(1): 24-29.
- [2] Collins R T, Lipton A J, Kanade T. A System for Video

Surveillance and Monitoring[C]//Proc. of American Nuclear Society 8th Int. Topical Meeting on Robotics and Remote Systems. Pittsburgh: [s. n.], 1999.

- [3] 陈莹. 大空间图像型火灾探测和自动灭火技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [4] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [5] Toreyin B U, Dedeoglu Y, Çetin A E. Contour Based Smoke Detection in Video Using Wavelets[C]//14th European Signal Processing Conference EUSIPCO 2006. Florence, Italy: [s. n.], 2006.