文章编号:1001-5078(2015)06-0635-05 ·红外技术及应用·

基于红外热成像技术的车厢内部火灾预警研究

刘 飞[1],陈海鹏[1],吴冬华[1],徐 磊[1],刘晓华[2],谭华春[3]
(1. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司,山东 青岛 266111;
2. 苏州易程智能系统有限公司,江苏 苏州 215163;
3. 北京理工大学交通工程系,北京 100081)

摘 要:红外热成像技术是目前最为实用的火灾预警检测手段之一,可以有效提高列车车厢的运行安全。基于红外热像仪的原理及优点,结合动车组车厢较为狭长的特点,探讨红外探测器的镜头选择;提出了融合绝对温度和基于高度变化的火焰判定概率模型,提高了火焰检测的精度。在动车车组车厢环境中的测试验证了方法的有效性和稳定性,降低虚警。

关键词:红外热成像技术;动车车厢;火灾预警;火焰检测
中图分类号:TN219 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2015.06.008

Research of fire early warning in internal compartment based on infrared thermal imaging technology

LIU Fei[1],CHEN Hai-peng[1],WU Dong-hua[1],XU Lei[1],LIU Xiao-hua[2],TAN Hua-chun[3]
(1. Sifang Co.,Ltd.,China South Locomotive and Rolling Stock Industry(Group) Corporation,Qingdao 266111,China;
2. Easyway(Suzhou) Intelligent System Company Limited,Suzhou 215163,China;
3. Department of Transportation Engineering,Beijing Institute of Technology,Beijing 100081,China)

Abstract:The infrared thermal imaging technology is one of the most practical detection means in fire early warning, and it can effectively improve the safety of the train compartment. The principle and advantages of infrared thermal imager are described,and as EMU carriage has the characteristics of long and narrow,the lens of infrared detector requires to be selected. Probability model of the flame is built,and the flame is decided through this model,which improves the detection precision. The experiment verifies the availability and stability of this method.

Key words:infrared thermal imaging technology;EMU carriage;fire early warning;flame detecting

1 引 言

随着我国高速铁路的快速发展,对列车安全的需要越来越迫切。为了解决列车的火灾预警问题,本文采用红外热像仪进行识别探测[1]。

传统的火灾检测系统采用电子敏感元件收集的物理参量的不同主要分为四类:通过探测空气中的颗粒物浓度来进行检测;通过感应温度变化来进行检测;通过感应光的强弱变化来进行检测;通过感应空气中特殊化学物质的变化来检测。但这些传统的火灾检测方式容易受到周围环境的影响,如空气中粉尘含量大的环境、光线变化复杂的环境等。而在火灾的燃烧产物烟、热、光这三种物质中,光传播速度最快且不易受环境及空间尺寸的影响,以光作为信息源识别信号,可以实现最快速度报警[2]。而自然界中任何物体都会不停地向周围空间辐射包括红外波段在内的电磁波,物体表面的温度越高,红外辐射能量就越多,

基金项目:国家863计划项目(No.2012AA112001)资助。
作者简介:刘 飞(1983-),男,工程师,工学学士,主要研究方向为高速动车组电气系统开发与设计。E-mail:liufei@cqsf.com
通讯作者:谭华春(1975-),男,副教授,博士,博士生导师,主要研究方向为图像工程,模式识别与智能交通。E-mail:tanhc@bit.edu.cn
收稿日期:2014-11-12;**修订日期**:2014-12-12

红外热像仪就是利用这一特征,通过光电红外探测器将物体发热部分辐射的功率信号转换成电信号后,成像装置就可以一一对应地模拟出物体表面温度的空间分布,最后经系统处理,形成图像视频信号[3]。并且针对列车车厢的火灾监控,需要为事故调查提供详尽的信息,同时需要检测到较小形态的火焰[4],尽快发出报警以保护车厢内的探测设备,因此采用基于红外热像仪的烟火检测,可以有效保护车厢内的探测设施,提高火灾检测的准确率。

2 列车车厢应用红外热像仪的镜头选择

红外热像仪的镜头决定了采集到图像的质量及拍摄范围等,针对车厢狭长环境下,主要需要考虑摄像头的可覆盖范围及视场角等。考虑到动车组车厢大约25 m,宽度约为3.3 m,高度3.9 m,本文红外探测器采用Flir公司的25 μm tau2 324探测器,分辨率为320×256,在这种狭长的车厢两边架设探测器,可以使车厢整体能够达到最佳探测效果,参考镜头参数,利用成像公式计算不同焦距红外镜头的探测距离[5]:

$$F = wL/W \tag{1}$$

$$\tan(\theta/2) = W/2F \tag{2}$$

其中,F 表示镜头焦距;w 为探测器图像宽度;W 为被摄物体宽度;L 表示物体与镜头距离;θ 为视场角度,所得结果如表1所示。

表1 红外镜头不同距离的探测范围对比

镜头焦距	7.5 mm	13 mm	19 mm	25 mm
视场角	63°×50°	35°×28°	24°×18°	18°×15°
4 m探测范围	4.9 m×2.8 m	2.6 m×2 m	1.7 m×1.3 m	1.3 m×1.0 m
12.5 m探测范围	15.3 m×8.8 m	8.1 m×6.3 m	5.3 m×3.9 m	3.9 m×3.1 m
25 m探测范围	30.6 m×17.5 m	16.3 m×12.5 m	10.6 m×7.9 m	8.1 m×6.3 m

根据表1所知红外镜头的视场角和不同距离的探测范围,在12.5 m处7.5 mm、13 mm、19 mm均能覆盖整个车厢,而25 mm未能完全探测全部车箱;为了使车内12.5 m到25 m处探测效果最佳,在车厢两侧安装两个19 mm镜头的探测器最为理想,可以全面地覆盖整个车厢。

3 红外热像仪的火焰检测算法研究

红外热像仪是将物体发出的不可见红外能量转变为可见的热图像,相比于传统的可见光摄像头,可以将大量的干扰排除在外,采集到的亮度区必定是散发出红外辐射的物体。火焰检测算法大致分为3个步骤:①图像预处理,②图像分割,③图像识别。

3.1 图像预处理

针对动车组列车车厢,实验模拟了几个常见的高温物体,在不同距离进行测试,然后再对14 bit Raw数据进行图像预处理,利用目标与背景间的温度差进行火焰检测。得到的目标与背景的灰度级差,如表2所示。

实验结果发现,开水由于温度较高,加上测量距离和水杯的辐射率不同的影响,导致测量的灰度级差会有比较大的影响。而对于4 m的物体,温度每升高1 ℃,其热像的灰度级会升高20左右。因此对于4 m开外比环境温度高4000个灰度级的物体,温度必然在200 ℃以上,可以判断为火焰。由于火车上的物体辐射率都不相同,同样温度的不同物体,灰度级会有很大差别,因此类似于打火机火焰和开水就很难区分了,我们还需要进一步处理。

表2 各高温物体与背景的灰度级差

物 体	4 m灰度级差	12 m灰度级差	25 m灰度级差
烟 头	10000	2000	1000
打火机	700	600	300
开 水	2000	1000	500
蜡 烛	2000	1000	500
燃烧的纸张	14000	12000	10000
燃烧的导线	15000	13000	11000

3.2 图像分割

对于灰度级差介于500到4000的物体,由于测量距离、物体辐射率不同等因素,导致测量的温度值并不符合实际值。所以为了区分开水等干扰源,需要我们对采集到的这部分图像先进行图像分割。先用中值滤波法对原始红外图像数据进行去噪,预处理后得到的图像包含了背景噪声、目标和边缘区域,需选取一个合适的阈值进行“二值化”分割[6]。

首先进行阈值分割,二值化的阈值选取非常关键,阈值过高,会造成变化区域缺损和碎化,反之会引入大量背景噪声。这里我们采用统计分割的方法

来自适应求取分割阈值，其理论依据是预处理后图像近似服从准高斯分布[7]，随机变量取均值三倍标准差邻域之外的值的概率很小，而目标灰度值一般较高，容易处于三倍甚至更高倍数标准差之外，因此分割门限一般取均值累加三倍或更高倍数标准差。统计分割方法可以表示为：

$$g_T(i) = \begin{cases} 0, g(i) < th \\ 1, g(i) \geqslant th \end{cases} \tag{3}$$

$$th = \mu + \kappa \cdot \sigma \tag{4}$$

其中：

$$\mu = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(i,x,y) \tag{5}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (g(i,x,y) - \mu)^2} \tag{6}$$

其中，M，N 为图像行数和列数；μ 为均值；σ 为标准差；th 为分割阈值；取 $\kappa = 3$。

3.3　火焰识别

图像分割完后，通过观察发现对于火焰目标，其变化主要集中在上部，底部火焰相对稳定。对于开水水杯等干扰物，整体变化都相对稳定，如图 1 所示。基于这样的特征，我们采取了概率统计模型的判定算法。

图 1　水杯和火焰特征图

对于概率模型[8]，特征量的选择以及对应权值的选取难以很好地量度，只能通过分析和经验来设定。本文考虑三个特征量[9]：分散度、尖角数、高度变化。

分散度也称为圆形度，它是一种面积形状的测度。若图像子集 S 的面积为 A，周长为 L，f_C 表示分散度，定义如下：

$$f_C = L^2/A \tag{7}$$

f_A 表示尖角数目[10]，定义如下：

$$f_A = \begin{cases} a & A > th \\ -b & A \leqslant th \end{cases} \tag{8}$$

其中，th 定义为 7 ~ 10；a，b 为阈值，如果允许误报，a 可以选取较大值，$a > b$；如果不允许误报，b 可以选取较小值，$a < b$。

H^N 为疑似火焰序列的高度集合，假设对 H^N 作离散余弦变换获得余弦系数集合 A_i。则高度变化特征函数 $f_d(A_i)$ 为：

$$f_d(A_i) = \sum_{k=1}^{l-1} \frac{A_i(k) \times A_i(k)}{l-1} \tag{9}$$

其中，l 为离散余弦变换的长度；$A_i(k)$ 为余弦变换系数。当 $f_d(A_i)$ 值越大时，说明分量越大。

基于这三个特征量函数，定义基于高度变化的火焰判定概率模型为：

$$c_i = \begin{cases} a_1 \times f_d(A_i) + a_2 \times f_A + a_3 \times f_C & 0 < C_i < 1 \\ 1 & C_i \geqslant 1 \\ 0 & C_i \leqslant 0 \end{cases} \tag{10}$$

式中，a_1，a_2，a_3 为调整系数，$a_1 + a_2 + a_3 = 1.0$。

3.4　实验结果分析

为了模拟高铁内狭长的监控环境，本文采用楼道走廊作为实验环境，具体环境如图 2 所示。

图 2　实验环境

针对车厢内可能存在火源的烟头、纸张和打火机及干扰较强的热水杯，实验采集了不同距离下的此类图像序列，并模拟了水杯及烟头从远到近的变化。实验结果如图 3 ~ 图 6 所示。

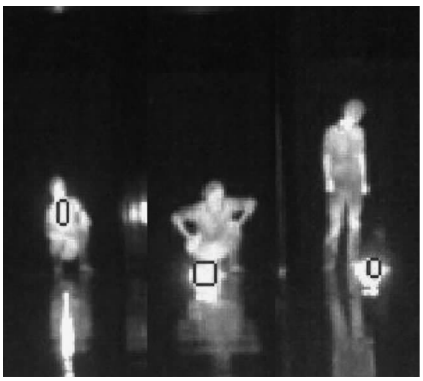

图 3　燃烧纸张检测结果

图 4 打火机火焰检测结果

图 5 热水杯的检测结果

图 6 烟头检测结果

从上述图 3、图 4 和图 6 的结果看出，本文提出的火焰检测对让燃烧的纸张、打火机火焰和烟头都能迅速准确地发出报警，报警率 100%，但如图 5 的热水杯，会出现一定的误检情况，在录制的 983 帧的视频中，出现误检的帧数为 5 帧，说明热水杯由于温度及水汽扩散形状与真实火焰极为接近，虽然可以剔除掉大部分热水杯的影响，但仍对基于红外热像仪的火焰检测有一定的干扰，这是本文后续需要改进的部分。

上述实验结果表明，本文提出的基于高度变化的火焰判定概率模型对检测火焰非常有效，能够排除掉大部分的干扰，并能在火焰出现 1 s 内被检测到，实时性强，检测率高，对于车厢上火焰检测具有很高的实用价值。

4 结 论

针对车厢列车中火灾检测需要快速报警并保护车内设施的需求，本文采用红外图像作为处理图像，可以远距离监测车厢状况，同时可以减少辐射光源的干扰和降低处理的复杂度。通过预先对输入图像进行温度判定，高于热力学温度的直接判定为火源，然后针对火焰和干扰源如开水等的特征分析，主要采用基于高斯分布的方法分割疑似火焰目标，然后采用离散余弦来描述疑似火焰目标高度的变化，最后构建火警概率模型来判别火焰目标，实现效果基本令人满意。因此，采用红外热像仪安装在车厢两侧，可以达到最快速度的火灾预警，相比其他的火灾预警设备有很强的优势。

参考文献：

[1] LI Xiangdi, HUANG Ying, ZHANG Peiqing, et al. Infrared imaging system and application[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(3): 229 – 234. (in Chinese)
李相迪，黄英，张培晴，等. 红外成像系统及其应用[J]. 激光与红外，2014，44(3)：229 – 234.

[2] YAN Wenhua. Application of infrared thermal imaging technology in the early fire detection in large space building[J]. Fire Protection Technology And Product Information, 2011(8): 33 – 35. (in Chinese)
闫文华. 红外热成像技术在大空间建筑火灾早期探测中的应用[J]. 消防技术与产品信息，2011(8)：33 – 35.

[3] LU Shengnan. A survey of video fire detection algorithm [J]. Television Technology, 2013, 37(3): 179 – 184. (in Chinese)
卢胜男. 视频火灾识别方法研究综述[J]. 电视技术，2013，37(3)：179 – 184.

[4] CHEN Xiaosi, CHENG Zhengdong, FAN Xiang, et al. Infrared small target detection based on kernel distance weighted k-nearest neighbor algorithm[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(9): 1060 – 1064. (in Chinese)
陈晓斯，程正东，樊祥，等. 基于核距离加权的 k – 最近邻红外小目标检测[J]. 激光与红外，2014，44(9)：1060 – 1064.

[5] LI Fu, RUAN Ping, XU Guangzhou, et al. Integrated opto-mechanical-thermal analysis of infrared lens[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(3): 385 – 388. (in Chinese)

李福,阮萍,徐广州,等. 红外镜头的光机热集成分析研究[J]. 应用光学,2011,32(3):385 - 388.

[6] GAO Jing,SUN Jiyin,WU Kun,et al. Infrared target detection based on shape characteristics[J]. Laser & Infrared,2013,43(1):49 - 53. (in Chinese)
高晶,孙继银,吴昆,等. 基于形状特征的红外目标检测方法[J]. 激光与红外,2013,43(1):49 - 53.

[7] LIU HuiJing,LIU Hui,LIN Hong. Implementing fire detection based on machine vision and gaussian mixture model[J]. Process Automation Instrumentation,2012,33(3):60 - 62. (in Chinese)
刘会景,刘辉,林宏. 混合高斯模型和机器视频的火灾检测的实现[J]. 自动化仪表,2012,33(3):60 - 62.

[8] WANG Yuanbin,MA Xianmin. Recognition of fire flame based on image futures[J]. Fire Science and Technology,2012(2):126 - 128. (in Chinese)
王媛彬,马宪民. 基于图像特征的火灾火焰识别方法[J]. 消防科学与技术,2012(2):126 - 128.

[9] XU Zhi,HAN Bin,SONG Jinghai,et al. Fire detection algorithm based on embedded system using infrared pictures[J]. Science Technology And Engineering,2008,8(1):96 - 100. (in Chinese)
徐之,韩斌,宋敬海,等. 基于嵌入式系统和红外图像的火焰检测算法[J]. 科学技术与工程,2008,8(1):96 - 100.

[10] GU Junjun,ZHAO Min,WU Yijie. The calculation algorithm of flame sharp angle for early fire[J]. Journal Of Qingdao University: Engineering & Technology Edition,2010,25(1):24 - 27. (in Chinese)
顾俊俊,赵敏,吴毅杰. 早期火灾火焰尖角计算算法的研究[J]. 青岛大学学报:工程技术版,2010,25(1):24 - 27.