

不确定环境下基于 SIFT 算法和一类分类的火焰识别

林 涛 黄继风 高建华

(上海师范大学计算机科学与工程系 上海 200234)

摘 要 在不确定的复杂环境下,基于图像的火焰早期检测是一个未解难题。因此,将灰度均衡化理论延伸至此领域来对疑似火焰图像进行预处理,通过引入 SIFT 算法发现火焰图像的多尺度特征,确定火焰极值点并进行特征匹配,有效识别火焰尖角以提高侦测的有效性。将分形理论的分形维作为火焰的特征加以使用。由于通常情况下火焰是异常值,一类分类器具有代价低、特征易获取、精度高等诸多优点,因此使用一类分类器完成火焰识别。实验证明,该研究不仅在近距离光照强的条件下具有良好的真阳性率和假阳性率,而且在光照弱的情况下具有较高的火焰发现率和较低的虚警率。

关键词 SIFT 算法,一类分类器,分形,灰度均衡化,火焰识别,火焰尖角

中图法分类号 TP391.41 文献标识码 A

Flame Detection Based on SIFT Algorithm and One Class Classifier with Undetermined Environment

LIN Tao HUANG Ji-feng GAO Jian-hua

(Department of Computer Science and Technology, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, china)

Abstract Under undetermined and sophisticated environment, it is an unresolved puzzle for early flame detection based on image. Therefore, for the improvement in detection efficiency, this paper not only introduced the theory of histogram equalization to this field, but also brought in the SIFT algorithm to image process of determining multi-scale features of the flame pictures, identifying flame extreme point as well as feature matching. We regarded fractal dimension as one of flame features. Since flame is the anomalous value mostly and there are some advantages in one class classifier, such as low cost, easy to obtain features and high precision, one class classifier is used to identify the flame. The experiment proves in this research that there is excellent rate of true positive and false positive under the circumstances of close quarters and bright light, in addition, there is high detection rate of flame and low false alarm rate under the dim light condition.

Keywords SIFT algorithm, One class classifier, Fractal, Histogram equalization, Flame detection, Flame sharp angle

火灾事故的早期发现愈来愈重要,但是,监视摄像头却不能成熟地应用于早期火焰的侦测。

传统的通过红外或烟雾识别探测,虽然可以有效地预警火灾,不过存在以下两个问题:

- (1) 在室外空旷地域烟雾探测装置无法安装和有效应用。
- (2) 即使在室内,烟雾探测器能够良好地发现火情,但是硬件以及安装费用昂贵。

比较烟雾探测火灾而言,普通监视器却有着得天独厚的优势:在中国,几乎所有的公共场所以及主要街道都已安装用于安保的普通摄像头,通过合理的软件以及算法应用,无需硬件费用,只用软件升级,便可实现火焰早期检测。

但是,基于视频的火焰识别存在以下两点不足:

- (1) 大多普通监视摄像头分辨率不高并且环境有不确定性,难以准确观察确定火焰。
- (2) 通常研究使用基于支持向量机或者神经网络的分类器,辨别率并不高。

针对以上两点,本研究的贡献为以下 3 点:

(1) 为提高弱光照、远距离等复杂环境下的侦测精确度,使用 SIFT 算法对火焰视频预处理。

(2) 除了采用传统的圆弧度、尖角等特征,本文同时使用火焰的分形特征作为识别依据。

(3) 对于火焰特征,使用一类分类器对其分类。

针对火焰识别, Mueller 等人改进传统光流理论,提出一种适用于神经网络的 Optimal Mass Transport 方法进行视频火焰识别^[1]; Freire 等人开发了一种使用聚类方法的移动机器人以用于火灾检测^[2]。在利用火焰的颜色特征方面, Chmelar 等以实验方式验证 HSV 模型优于 RGB 模型^[3]; Dimitropoulos 等人使用火焰的颜色概率等时空纹理特征在两类分类支持向量机中侦测火焰^[4]。

本研究的总体思路为对图像灰度均衡化后,使用 SIFT 算法进行特征匹配,最后使用一类分类器进行火焰侦测,如图 1 所示。

本文受国家自然科学基金项目(61073163),上海市企业自主创新专项资金项目(沪 CXY-2013-88),上海市教委科研创新重点项目(14ZZ125),上海师范大学研究生重点项目(SNU14001)资助。

林涛(1988—),男,硕士生,主要研究方向为机器学习、系统可靠性, E-mail: lintao@gmail.com; 黄继风 博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为图像处理、模式识别; 高建华(1963—),男,博士,教授, CCF 会员,主要研究方向为软件可靠性理论与设计、软件开发环境与开发技术。

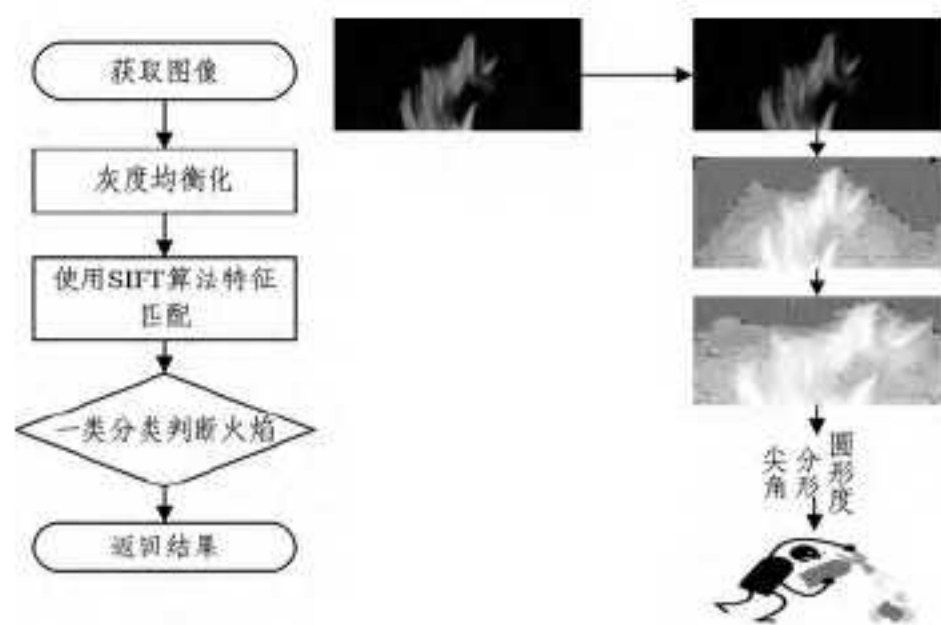


图1 识别过程

本文第1节介绍视频火焰特征的一些概念,着重引进SIFT算法处理模糊图像,以进行特征匹配;第2节提出分类器选择的相关要求,详述一类分类器在火焰识别中的优势;最后,给出实验以及对照实验,来验证本研究工作的有效性。

1 火焰特征提取

在本研究中,不确定环境有两层含义:

(1) 内在环境。由于普通摄像头分辨率不足等原因,提取的图像不够清晰。

(2) 外在环境。广泛普及的监控摄像头安装的环境各不相同,光照距离等因素变化范围广。

由此,直接进行火焰识别的错误率较高。因而,使用SIFT算法对其特征进行匹配。

尺度不变特征变换(Scale Invariant Feature Transform, SIFT)算法是Lowe在2004年提出的一种局部特征算法^[5]。该算法的核心是特征点检测、表示和匹配,其主要过程是特征点确定、表示向量主方向生成和双维度Sobel卷积,已成熟地应用于运动物体的跟踪检测^[6]。

1.1 图像预处理

火焰相关图像容易受到光照强度的干扰,这是传统火焰识别领域的一个难题,直接对灰度图像进行处理效果不

$$\begin{cases} m(x,y) = \sqrt{(H(x+1,y) - H(x-1,y))^2 + (H(x,y+1) - H(x,y-1))^2} \\ \theta(x,y) = \arctan \frac{H(x+1,y) - H(x-1,y)}{H(x,y+1) - H(x,y-1)} \end{cases} \quad (7)$$

$m(x,y)$ 和 $\theta(x,y)$ 分别为 (x,y) 处梯度大小和方向, H 为每个极值点处的尺度空间。

1.3 火焰尖角

传统研究中,由于环境复杂性及摄像设备不可靠性,提取到的火焰尖角的数量不多。本研究中,使用SIFT特征提取后,能够有效识别尖角。Sobel算子能够有效用于火焰尖角检测。Sobel算子是指示图像梯度变化一阶导数方法,由于尖角的梯度急剧变化,因此Sobel算子能够容易发现火焰尖角。具体算法过程如下:

(1) 对疑似火灾图像做水平方向和垂直方向Sobel卷积,横向算子和纵向算子分别为 $[-1, 0, +1; -2, 0, +2; -1, 0, +1]$, $[+1, +2, +1; 0, 0, 0; -1, -2, -1]$,计算公式如式(8)~式(10)所示:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * I \quad (8)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * I \quad (9)$$

尽如人意^[7]。因此本研究使用灰度均衡化技术对图像进行预处理。目的是将预处理图像在灰度范围内进行更大的拉伸。

在原始图像中,存在式(1):

$$p(k) = \frac{n_k}{n}, k=0, 1, \dots, L-1 \quad (1)$$

其中, P 是直方图, n 是图像的像素数, L 是灰度数之和。

变换可得累计归一化离散图像,如式(2)所示:

$$\frac{V_k}{L} = \sum_{i=0}^k p(k) = \sum_{i=0}^k \frac{n_k}{n}, k=0, 1, \dots, L-1 \quad (2)$$

1.2 SIFT算法确定火焰极值点

成功识别火焰的前提是发现火焰图像的多尺度特征,使用SIFT算法,首先利用高斯卷积完成尺度变换。定义疑似火焰图像的尺度空间为式(3)和式(4):

$$H(x,y,\sigma) = G(x,y,\sigma) * I(x,y) \quad (3)$$

$$G(x,y,\sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

$G(x,y,\sigma)$ 是高斯函数, (x,y) 是可疑火灾视频像素点位置, σ 是尺度。

对于火焰尖角的检测,需要高斯差分函数,如式(5)所示:

$$\begin{aligned} D(x,y,\sigma) &= [G(x,y,k\sigma) - G(x,y,\sigma)] * I(x,y) \\ &= L(x,y,k\sigma) - L(x,y,\sigma) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, k 为采样距离。

随后,由高斯尺度差分(Difference of Gaussian, DoG)建立金字塔模型,通过比较每一个像素与其相邻像素确定极值。虽然图像已进行灰度均衡化处理,但是还是有个别像素点对比度不高,因此需要通过式(6)去除。

$$\frac{(D_{xx} + D_{yy})^2}{D_{xx}D_{yy} - D_{xy}^2} < \frac{(r+1)^2}{r} \quad (6)$$

其中, r 为控制参数。 D_{xx}, D_{yy}, D_{xy} 分别为对应的二阶导数。

接着,需要确定关键点主方向,如式(7)所示:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (10)$$

其中, G 为梯度。

梯度方向可用式(11)计算:

$$\Theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (11)$$

通过计算相邻点加权值和,若 $G(i,j) \geq \gamma$ (其中 (i,j) 为像素点, γ 为阈值),则此像素点为尖角。

1.4 分形特征

分形广泛地应用于形状不规则且具有自相似性的散列几何图像^[8]。传统研究聚焦于火焰的纹理特征以及面积增长^[9]、颜色变化^[10],却忽视了火焰具有分形特征。因此,可以利用火焰具有较小的分数维特征进行识别。

利用差分盒维度来计算疑似火焰的分数维,如式(12)所示:

$$D = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\ln(N_r)}{-\ln(r)} \quad (12)$$

r 为半径, N_r 为闭球覆盖图像最少的球数。使用最小二乘法拟合一条直线, δ 为截距,则斜率就是图像的分数维,见式(13)所示。

$$\ln(N_r) = -D * \ln(r) + \delta \quad (13)$$

若结果在 1.85 到 1.95 之间,则可考虑符合火焰的分数维特征。

1.5 圆形成度

红色火焰区别于其他红色物体的一个明显特征是无规则运动,因而使用圆形成度作为一个特征,用式(14)表示:

$$C_k = \frac{4\pi A_k}{P_k^2}, k=1, 2, \dots, n \quad (14)$$

其中, A 为面积, P 为周长, n 为子图个数, $C_k \in [0, 1]$ 。一般红色运动物体 C_k 接近 1。设定阈值 φ , 若 $C_k < \varphi$, 则为火焰, 具体由式(15)–式(17)决定。

$$C^n = \omega^n / \varphi^n \quad (15)$$

$$\varphi^n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M-1} (x^n(m) - \bar{x}^n)^2 \quad (16)$$

$$\omega^n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M-1} (|x^n(m) - \bar{x}^n| - \varphi^n)^2 \quad (17)$$

φ^n 表示第 n 个子图边界到质心距离, ω^n 代表均值方差。 M 为边界像素数。

2 一类分类器的应用

一类分类与二类分类相比较,是对已知类别的样本域建立描述其密度分布的模型^[11]。一类分类已成熟地应用于入侵检测、异常检测,尤其是医学疾病检测^[12]等领域。

传统的使用支持向量机或者神经网络等二类分类器来识别火焰,存在代价高、特征不易获取、精度不高等诸多不足。在正常情况下,火灾发生是偶然事故,因为很少有火焰出现。火焰是异常值,二类分类器通常获得正常值,异常值不易获得。因而,一类分类器可以有效应用。

2.1 实现思想

使用一类分类器进行火焰识别的一种思路是,发现一个包含异常样本的最小超球,若测试样本位于该超球内,则认为是火焰,否则认为正常。具体如下:

存在一个异常样本集 $\{x_i, i=1, \dots, l\}, x_i \in R^d$ 。之后,使用非线性 ϕ 将样本映射到高维特征空间。目的是发现一个超球面,将样本远离原点,如式(18)所示:

$$f_w(x) = \langle w, \phi(x) \rangle \quad (18)$$

当样本满足式(19)时,

$$f_w(x) \leq \rho \quad (19)$$

则识别为火焰。

具体可以使用核主成分分析法。设 I 为火焰样本空间,特征空间 $\Phi(x_i)$ 中,若表示为式(20):

$$\lambda V = \bar{C}V \quad (20)$$

则可求特征值 $\lambda \geq 0$ 和特征向量 $V \in F \setminus \{0\}$ 。特征向量可表示为式(21):

$$V = \sum_{i=1}^l a_i \Phi(x_i) \quad (21)$$

然后使用矩阵分析, $K_{\mu\nu}$ 为 $\Phi(x_\mu) * \Phi(x_\nu)$, 化简得式(22):

$$\lambda \alpha = K \alpha \quad (22)$$

2.2 优化识别结果

为得到更好的准确度,需要设置松弛变量 ξ_i , 这样不仅可以保证火焰识别训练集的识别度高,也可保证在测试集中区的理想效果。设超球面中心和半径分别为 a 和 r , 则有式(23):

$$F(r, a, \xi_i) = r^2 + C \sum_i \xi_i \quad (23)$$

根据对火焰识别的准确度,即真阳性率和假阳性率的要求不同,参数 C 的取值不同,可由式(24)决定。

$$(x_i - a)^T (x_i - a) \leq r^2 + \xi_i \quad \forall_i, \xi_i \geq 0 \quad (24)$$

随后使用拉格朗日分析,如式(25)所示:

$$F(r, a, a_i, \xi_i) = r^2 + C \sum_i \xi_i - \sum_i a [r^2 + \xi_i - (x_i^2 - 2a + a^2)] - \sum_i r_i \xi_i \quad (25)$$

若疑似火焰在超球内,则可判断为火焰,如式(26)所示:

$$(z * z) - 2 \sum_i a_i (z * x_i) + \sum_{i,j} a_i a_j (x_i * x_j) \leq r^2 \quad (26)$$

Z 为到球心的距离。

3 实验

本实验重点关注以下两个问题:

(1) 通过使用 SIFT 算法,能否提高视频图像的清晰度,从而提高识别精度。

(2) 一类分类器能否有效用于火焰侦测。

3.1 实验设计

为验证本研究中上述理论的可行性,设计如下实验。

实验环境如下:操作系统为 Windows 8.1 64bit, 处理器为 Intel Core i5 3.13GHz, 内存为 8GB, 开发工具为 MATLAB 2013a, 并且使用了 David Tax 等人设计的一类分类器开发包 Dd-tools¹⁾。使用索尼 HDR-PJ610E 摄像机(为更好地模拟真实监控场景,设定“低画质”进行拍摄)。在不同距离和光照强度下对煤油、棉花等物体的燃烧进行识别,如表 1 所列。同时,为反映假阳性率,设红色衣服、LED 红光等作为对照实验,如表 2 所列。

表 1 火焰侦测

燃烧物体	距离(m)	光照强弱 ²⁾	是否侦测
煤油	2	强	✓
	10	强	✓
	2	弱	✓
	10	弱	×
汽油	2	强	✓
	10	强	×
	2	弱	✓
	10	弱	✓
酒精	2	强	✓
	10	强	✓
	2	弱	✓
	10	弱	✓
树木	2	强	✓
	10	强	✓
	2	弱	✓
	10	弱	×
纸	2	强	✓
	10	强	✓
	2	弱	✓
	10	弱	×
塑料	2	强	✓
	10	强	×
	2	弱	✓
	10	弱	✓
棉花	2	强	✓
	10	强	✓
	2	弱	×
	10	弱	✓

¹⁾ <http://prlab.tudelft.nl/david-tax/dd-tools.html>, 2014 年 9 月 1 日验证

²⁾ 光照“强”设定为 30000Lx, 光照“弱”设定为 10Lx

表 2 对照实验

实验环境	距离(m)	光照强弱	是否报警
红色衣服	2	强	×
	10	强	×
	2	弱	×
	10	弱	×
白炽灯	2	强	×
	10	强	×
	2	弱	×
	10	弱	✓
手电筒	2	强	×
	10	强	×
	2	弱	×
	10	弱	×
镜面反射	2	强	×
	10	强	×
	2	弱	×
	10	弱	✓
红旗 (风力 3.5 级 环境下)	2	强	×
	10	强	×
	2	弱	×
	10	弱	×
LED 红光灯	2	强	✓
	10	强	×
	2	弱	×
	10	弱	✓
红色油漆	2	强	×
	10	强	×
	2	弱	×
	10	弱	×
夕阳 ¹⁾	近焦		✓
	远焦		×

实验总体流程如引言部分的图 1 所示。

3.2 结果与分析

实验结果如表 1 和表 2 所列。

本文通过计算一些标准数值,即真阳性率(true positive rate)和假阳性率(false positive rate),来分析该研究的有效性,分别如式(27)、式(28)所示。

$$\text{真阳性率} = \frac{\text{侦测出火焰的数量}}{\text{火焰总数量}} = \frac{22}{28} = 78.6\% \quad (27)$$

$$\text{假阳性率} = \frac{\text{判断为非火焰数量}}{\text{非火焰图像总数}} = \frac{25}{30} = 83.3\% \quad (28)$$

更进一步,可以分析该研究在光照和距离两个维度上对于火焰侦测的有效性,如图 2 所示。可以得出,本研究所用方法在近距离光照强的条件下,具有良好的真阳性率和假阳性率。并且,在光照弱的情况下,由于 SIFT 算法对图像特征点的匹配,也具有较高的火焰发现率和较低的虚警率。

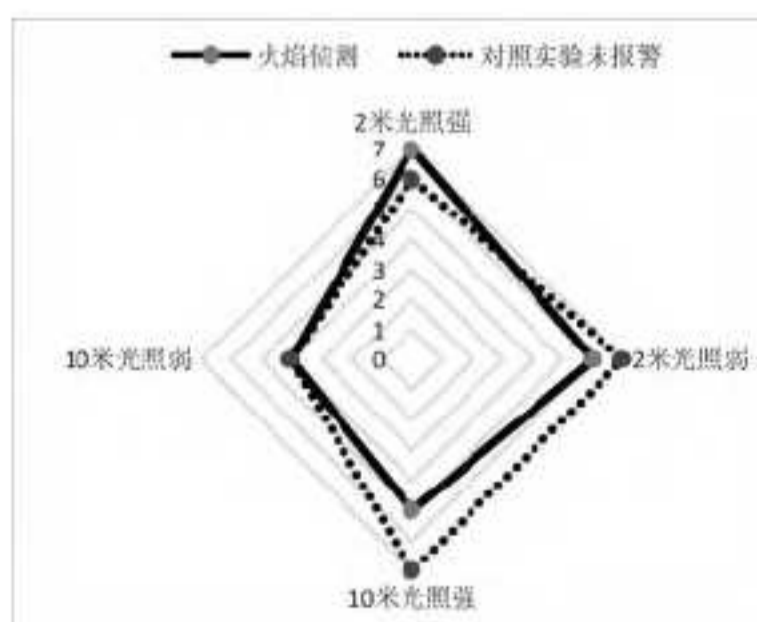


图 2 距离光照分析

对于错误报警,给出以下说明:

1) 由于夕阳的特殊性,与其他 7 类物体不具有可比性,未考虑距离和光照。在图 2 距离光照分析中将夕阳排除在外。

(1) 针对夕阳,由于在近焦条件下,夕阳与火焰拥有极大相似性,尤其是本文所使用的分形特征(在实验中算出夕阳的分数维是 1.94),如图 3 夕阳(左图为远焦,右图为近焦)所示。



图 3 夕阳

(2) 对于 LED 红光灯,近距离强光照情况下,与火焰具有类似的尖角和圆弧度特征,因而报警。

由于本研究目的在于不确定复杂环境中,提高火焰识别的整体有效性,因此实验是在多种极端情况下进行的。事实上,在不同的使用环境中,通过更改特征参数,可以显著降低本研究特定场合火焰识别的虚警率和漏警率,避免上述错误报警的发生。

结束语 火焰的早期侦测对生活生产有重要保护作用,与此同时,对其的研究工作也逐步重视。但是,不确定的环境使得其检测面临诸多困难。

本研究将 SIFT 算法、分形以及一类分类引入火焰诊断领域,总结并提出了相关方法,并解决了有关识别问题。

将来的工作有两个方向。首先,在短期,更进一步研究火焰分数维的相关性质,以更好地区别于其他类似火焰物体。其次,由于目前 SIFT 算法处理彩色图像尚不成熟,在更长远的时间,研究其他替代算法并用于火焰检测图像的预处理过程,以取得更好效果。

参考文献

- [1] Mueller M, Karasev P, Kolesov I, et al. Optical Flow Estimation for Flame Detection in Videos[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(7): 2786-2797
- [2] Freire G, Castelo Branco K, Machado J M, et al. Local data fusion algorithm for fire detection through mobile robot[C]// 2013 14th Latin American. Cordoba: Test Workshop(LATW). 2013
- [3] Chmelar P, Benkrid A. Efficiency of HSV over RGB Gaussian Mixture Model for fire detection[C]// 2014 24th International Conference Bratislava: Radioelektronika(RADIOELEKTRONIKA). 2014
- [4] Dimitropoulos K, Barmoutis P, Grammalidis N. Spatio-Temporal Flame Modeling and Dynamic Texture Analysis for Automatic Video-Based Fire Detection[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2014, (99): 1
- [5] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110
- [6] 马正华, 顾苏杭, 戎海龙. 基于 SIFT 特征匹配的 CamShift 运动目标跟踪算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(6): 291-294
- [7] Do Y. Flame detection in grey-scale images of a B/W camera. [J]. Sensor Review, 2014, 34(1): 80-88
- [8] Punzo G, Karagiannakis P, Bennet D J, et al. Enabling and Ex-

ploiting Self-Similar Central Symmetry Formations [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50 (1): 689-703

- [9] Thou-Ho C, Cheng-Liang K, Sju-Mo C. An intelligent real-time fire-detection method based on video processing[C]//IEEE 37th Annual 2003 International Carnahan Conference on Security Technology, 2003. 2003
- [10] Ti N, Thuan N, Tuan D. Fire detection based on video process-

ing method[C]//2013 International Conference on Ho Chi Minh City: Advanced Technologies for Communications(ATC). 2013

[11] Tax D M J, Duin R P W. Support vector domain description[J]. Pattern Recognition Letters, 1999, 20(11/13): 1191-1199

[12] Ganesan K, Acharya U R, Chua C K, et al. One-Class Classification of Mammograms Using Trace Transform Functionals[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(2): 304-311

(上接第 214 页)

综合评价源图像及融合图像的结构相似度。这 3 个指标均能表达图像融合性能,且它们的值越大,表明融合效果越好。表 1—表 3 分别给出了 6 组图像在上述融合方法下评价指标 EN 、 $Q^{AB/F}$ 和 Q_w 的值。可以看出,6 组实验所得结果中本文算法的融合结果评价指标 EN 、 $Q^{AB/F}$ 和 Q_w 均最大。以上表明,本文算法能使融合图像对源图像的显著信息保持得更好,且能较好保留源图像的边缘细节信息,图像清晰度高。综合以上主客观评价方法,本文算法的融合效果明显优于基于 SVT 变换、非下采样小波变换方法和 NSCT 变换方法。

表 1 图像融合算法的客观评价指标 EN

融合方法	Fig. 4 (a)	Fig. 4 (b)	Fig. 4 (c)	Fig. 4 (d)	Fig. 4 (e)	Fig. 4 (f)
SVT	7.245	6.440	5.997	6.102	6.459	6.969
NSWT	7.282	6.470	5.946	6.198	6.544	7.035
NSCT	7.265	6.428	6.016	6.142	6.405	6.997
Proposed	7.456	6.627	6.590	6.634	6.633	7.079

表 2 图像融合算法的客观评价指标 $Q^{AB/F}$

融合方法	Fig. 4 (a)	Fig. 4 (b)	Fig. 4 (c)	Fig. 4 (d)	Fig. 4 (e)	Fig. 4 (f)
SVT	0.712	0.475	0.651	0.568	0.423	0.570
NSWT	0.718	0.475	0.648	0.580	0.420	0.575
NSCT	0.727	0.497	0.637	0.564	0.429	0.573
Proposed	0.744	0.516	0.674	0.616	0.433	0.594

表 3 图像融合算法的客观评价指标 Q_w

融合方法	Fig. 4 (a)	Fig. 4 (b)	Fig. 4 (c)	Fig. 4 (d)	Fig. 4 (e)	Fig. 4 (f)
SVT	0.882	0.861	0.876	0.769	0.702	0.807
NSWT	0.884	0.866	0.904	0.779	0.706	0.817
NSCT	0.882	0.869	0.913	0.780	0.723	0.819
Proposed	0.929	0.878	0.945	0.859	0.731	0.848

结束语 本文提出了基于视觉显著性引导的红外图像与可见光图像融合的方法。根据红外图像和可见光图像各自的特点以及人眼的视觉特性,利用基于 Context-aware 的显著性检测方法对源图像进行特征提取,然后用显著性检测结果指导低频信息融合,从而把更多的有用信息转移到融合图像中;并采用各高频方向子带系数的局部方差指导高频部分融合。该方法充分考虑了图像的全局及局部性能,使得融合图像能更好地保留源图像的信息。

参考文献

- [1] 陈小林,王延杰.非下采样变换的红外与可见光图像融合[J].中

国光学,2011,04(5):489-496

- [2] Bai Xiang-zhi, Zhou Fu-gen, Xue Bin-dang. Fusion of infrared and visual images through region extraction by using multiscale center-surround top-hat transform[J]. Optics Express, 2011, 19 (9): 8444-8457
- [3] Gonzalo P, Jesús M. A wavelet-based image fusion tutorial[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(9): 1855-1872
- [4] Dehghani M. Wavelet-based image fusion using "A trous" algorithm [C] // Proceedings of the Map India Conference, New Delhi, 2003: 28-31
- [5] 岳晋,杨汝良,宦若虹.基于双密度双树复数小波变换的图像融合研究[J].电子与信息学报,2009,31(1):129-133
- [6] 邓艾,吴谨,杨莘,等.基于二代 Curvelet 变换和区域匹配度的图像融合算法[J].计算机科学,2012,39(6A):513-515
- [7] Zheng Sheng, Shi Wen-zhong, Liu Jian, et al. Multisource image fusion method using Support Value transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(7): 1831-1839
- [8] 朱康,贺新光.基于形态学和 Contourlet 系数区域特征的遥感图像融合方法[J].计算机科学,2013,40(4):301-305
- [9] 杨艳春,王晓明,党建武,等.基于非下采样 Contourlet 变换的医学图像融合方法[J].计算机科学,2013,40(3):310-313
- [10] Do M N, Vetterli M. The Contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2091-2106
- [11] Da Cunha A L, Zhou Jian-ping, Do M N. The nonsampled contourlet transform: theory, design, and applications[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101
- [12] Chen Yong, Xiong Jie, Liu Huan-lin, et al. Fusion method of infrared and visible images based on neighborhood characteristic and regionalization in NSCT domain [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(17): 4980-4984
- [13] Mitianoudis N, Stathaki T. Optimal contrast correction for ICA-based fusion of multimodal images[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(12): 2016-2026
- [14] Goferman S, Zelnik-Manor L, Tal A. Context-aware saliency detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(10): 1915-1926
- [15] Xydeas C S, Petrovic V. Objective image fusion performance measure[J]. Electronics Letters, 2000, 36(4): 308-309
- [16] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion [C] // Proceedings of the International Conference on Image Processing. Barcelona, 2003: 173-176