

结合 Kmeans++ 聚类 and 颜色几何特征的 火焰检测方法

卞永明, 高 飞, 李梦如, 李 乔, 马道阳

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 随着社会经济的不断发展, 大空间建筑逐渐步入人们的生活中, 对大空间建筑的消防技术要求逐渐提高, 火焰识别技术已成为近年来研究的热点。为实现单帧图像的火焰检测, 本文首先提出了一种基于 RGB 和 HSI 颜色模型的混合判据, 它既保留了 RGB 模型中的直观判据, 又加入了 HSI 模型中对于饱和度判据, 效果优于两者单独使用或单纯结合的情况; 同时利用基于加权欧式距离的方法对图像进行特殊灰度化处理, 通过 Kmeans++ 颜色聚类, 完成火焰图像的分割, 获得最终感兴趣区域; 提取该区域几何轮廓并利用不规则度和形态比例等几何判据, 对待检测图像进行最终的识别。为评估所提出检测方法的性能, 选取典型火焰图像和非火焰图像, 在 Visual Studio 2013 环境下进行对比实验, 通过对运行时间、提取偏差率和识别误报率等结果的分析, 证明了所提方法的有效性和可实现性。本文所提出的方法具有良好的检测效果, 能够保证火焰提取和识别的精度, 同时兼顾实时性的要求, 可以应用在实际的大空间消防项目中。

关键词: 火焰检测; 混合颜色判据; Kmeans++ 聚类; 几何判据

中图分类号: TP 391

文献标志码: A

文章编号: 1672-5581(2020)01-0001-06

DOI:10.15999/j.cnki.311926.2020.01.001

Fire detection method using Kmeans++ clustering and features of mixed color and geometry

BIAN Yongming, GAO Fei, LI Mengru, LI Qiao, MA Xiaoyang

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: With the continuous development of social economy, large space buildings have gradually entered people's lives, and the requirements of fire protection technology have gradually increased. Therefore, fire detection has become a hot spot of research. In order to realize the fire detection of single image, firstly, the mixed color criterion with RGB and HSI criterion is used to form the initial region of interest. Based on the Kmeans++ clustering algorithm, the fire image is clustered after the special grayscale processing. The clustering result is combined with the initial region of interest to obtain the final region. The contour of the region is extracted, and the image is identified by geometric criteria such as irregularity and shape ratio. Finally, to evaluate the performance of the proposed method, experimental research under Visual Studio 2013 environment is performed. The experimental results show that the proposed method have low extraction deviation rate and false positive rate. It has good effectiveness and can be applied to fire protection technology of large space.

Key words: fire detection; mixed color criterion; Kmeans++ clustering; geometric criterion

随着社会经济的不断发展, 公共建筑的需求与 间建筑逐渐步入人们的生活之中^[1]。公共建筑的
日俱增, 类似于大型体育、文化和娱乐场所等大空 人员流动性大, 内部结构复杂, 一旦发生火灾, 极易

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0802900)

作者简介: 卞永明(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: ymbianmail@163.com

造成国家财产的重大损失和人员伤亡的恶性事故^[2-4]。传统的火灾探测器主要为感光、感烟、感温探测器等^[5],该类探测器在大空间中的应用效果因其探测范围和易受周围环境干扰等因素影响,在火焰检测的准确性上大打折扣,经常出现误报或漏报等问题。因此,近年来对于火焰图像识别技术的研究成为一个热点。

火焰的图像识别技术是一种判别当前图像中是否含有有效的火焰信息技术,对火焰信息判别的基础是提取火焰的特征。火焰的特征分为静态特征和动态特征,国内外学者对此做了大量研究并取得了相应的成果。Bohush等^[6]提出根据颜色特征对彩色火焰图像进行分割,并采用灰度共生矩阵获取火焰的纹理特征;Liu等^[7]提出一种融合概率密度函数和局部二进制模式的火焰识别算法;柴茜等^[8]针对单一的隐马尔科夫模型在图像型火灾探测中识别误报率偏高的问题,提出了隐马尔科夫模型和支持向量机相结合的图像型火焰识别算法。这些研究虽已在不同的方面取得了一定效果,但对于火焰特征提取精度和单帧图像的识别方面研究较少,这些因素会影响整个火焰识别算法的准确率和鲁棒性。

本文针对单帧火焰图像的识别技术进行了研究。为了能够更好地提取待测图像中的感兴趣区域即火焰像素点区域,采用了一种基于RGB和HSI颜色模型的混合颜色特征判据,根据这一判据获取初始火焰像素点,经过针对火焰的特殊灰度化处理,获得初步的感兴趣区域。引入Kmeans++颜色聚类算法,将图像进行聚类,与初步的感兴趣区域相乘后,完成图像分割,得到最终的疑似火焰区域。提取该区域轮廓,并利用不规则度、形态比例等几何特征,得到最后的判定结果,完成火焰图像的识别。最终,通过仿真实验的结果验证了所提方法的有效性和可实现性。

1 基于混合颜色判据的火焰特征提取

1.1 RGB模型

RGB颜色模型是一种典型的用于描述色彩信息的方式,它根据红、绿、蓝三原色的亮度来定量表示颜色^[9]。根据三基色原理,用基色光单位来表示光的量,则在RGB颜色空间,任意色光 F 都可以由 R, G, B 三色不同分量的相加混合而成,表示为

$$F = R(r) + G(g) + B(b) \quad (1)$$

式中: $R(r), G(g), B(b)$ 分别为RGB颜色空间中3个分量的值。

RGB颜色空间可以用三维坐标系下的立方体来描述,由图1可知:当三基色分量都为最弱时,为黑色光;当三基色分量都为最强时,为白光。 F 的坐标值发生改变,也即改变了 F 的色值。

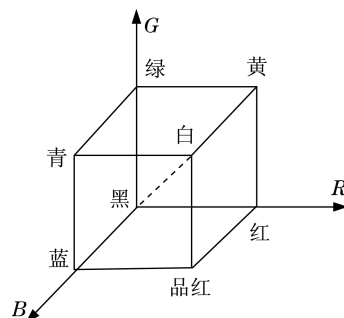


图1 RGB颜色空间示意图

Fig.1 Schematic diagram of RGB color space

对于正常火焰来说,红色分量和绿色分量会很大,且绿色分量会大于蓝色分量,因此,存在以下简单判据为

$$\begin{aligned} R &> R_{\text{mean}} \\ G &> G_{\text{mean}} \\ R &> G > B \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $R_{\text{mean}}, G_{\text{mean}}$ 分别为红色和绿色分量均值。

1.2 HSI模型

HSI颜色模型利用 H, S, I 3个参数描述颜色的特性,其中, H (Hue)定义颜色的波长,称为色调,表示与红轴之间的角度; S (Saturation)描述颜色的深浅程度,称为饱和度,该值越大颜色越鲜艳; I (Intensity)表示强度或亮度^[10]。

图2为HSI颜色空间,其3个分量的值可以由RGB模型转换而来。

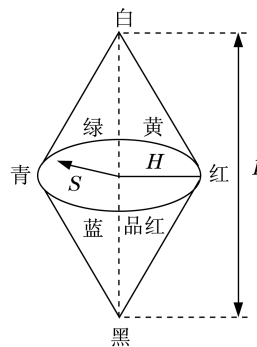


图2 HSI颜色空间示意图

Fig.2 Schematic diagram of HSI color space

针对火焰检测的HSI判据为: H, S, I 每个分量分别设定两个阈值,即最大值和最小值,如果在阈值范围内则置1,否则置0。具体表达式如下:

$$\begin{aligned} H_{\min} < H < H_{\max} \\ S_{\min} < S < S_{\max} \\ I_{\min} < I < I_{\max} \end{aligned} \quad (3)$$

通过有关学者的大量实验,给出一组合理的阈值做参考:

$$\begin{aligned} H_{\min} &= 0, & H_{\max} &= 60 \\ S_{\min} &= 20, & S_{\max} &= 100 \\ I_{\min} &= 100, & I_{\max} &= 255 \end{aligned} \quad (4)$$

以上述参考阈值为基础,即可针对不同的环境条件为3个分量设置不同的范围来作为判断依据。

1.3 混合颜色模型判据

RGB和HSI判据各有优缺点,为了提高火焰像素点的提取精度,本文选择将两种判据有效地结合起来,形成一种新的混合判据:

$$\text{rule1: } R > R_{\text{mean}}$$

$$\text{rule2: } R \geq G \geq B$$

$$\text{rule3: } S \geq (255 - R) S_{\text{Threshold}} / R_{\text{Threshold}} \quad (5)$$

式中: $S_{\text{Threshold}}$ 为饱和度阈值,参考范围为55~65; $R_{\text{Threshold}}$ 为红色分量阈值,参考范围为115~135。

从式(5)中可以看出,该混合判据既保留了部分RGB判据,又融入了HSI颜色空间中的饱和度判据,具有可互动修改参数的特点,理论上比单独使用或单纯结合的效果好。因此,本文选用该判据提取火焰像素点,以获取初步感兴趣区域。

2 基于 Kmeans++ 聚类的火焰图像分割

2.1 Kmeans++算法简介

Kmeans是一种基于数据划分的无监督聚类算法,即预先不知道样本集所属的标签或类别,通过样本间的相似程度完成自主聚类^[11]。该算法的聚类效果受聚类中心初始位置的影响,随机选择初始中心很容易使算法陷入局部最优解。

针对这种情况,David Arthur提出了一种改进算法即K-means++算法^[12],它摒弃了K-means中随机选择聚类中心的方法,通过计算概率谨慎地选择聚类中心,提高了算法的鲁棒性。因此,本文选用Kmeans++算法来完成火焰图像的颜色聚类。

2.2 火焰图像灰度处理

将彩色图像转化成为灰度图像的过程称为图像的灰度化处理。RGB彩色图像中每个像素的颜色均由3个分量决定,且每个分量的取值范围为0~255,其颜色变化可以有1 600多万种。灰度图像中3个分量值相同,其一个像素点的变化范围仅为255种,因此,在对火焰图像进行聚类之前,将图

像进行灰度化处理可以大幅度减少算法计算量,从而提高检测实时性。

常见的图像灰度化方法有分量法、最大值法、平均值法和加权平均法等^[13],但是这些方法直接应用在火焰识别中,会造成火焰信息的大量损失。因此,本文提出一种基于加权欧式距离的方法来对待识别火焰图像的灰度化处理,可表示为

$$d = \sqrt{k_1 (R - \bar{r})^2 + k_2 (G - \bar{g})^2 + k_3 (B - \bar{b})^2} \quad (6)$$

式中: R, G, B 分别为3个分量的实际值; $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$ 分别为3个分量的平均值; k_1, k_2, k_3 分别为对应于3个分量的权值,根据常见火焰像素中3个分量所占比重,取 $k_1 = 0.6, k_2 = 0.3, k_3 = 0.1$ 。

2.3 算法原理

首先明确进行聚类的对象为经过2.1节灰度化处理的火焰图像,即可确定算法中样本集合为 $D = \{t_j\}_{j=1}^n$,其中, t_i 为每个像素点的灰度值, n 为像素点数量。

令样本集聚类为 K 类: $S = \{S_1, S_2, \dots, S_K\}$,聚类目标为聚类后的 K 个子集中每一个像素的灰度值满足类内的误差平方和最小,因此,确定目标函数为

$$O_{\text{Kmeans}}(S) = \arg \min \sum_{i=1}^K \sum_{t \in S_i} \|t - c_i\|_2^2 \quad (7)$$

式中: c_i 为聚类中心,

$$c_i = \frac{1}{|S_i|} \sum_{t \in S_i} t \quad (8)$$

对于目标函数的求解是一种NP-hard问题,因此,采取迭代优化的方法^[13],其主要步骤如下:

步骤1 取聚类中心 $K=3$,随机选取一个聚类中心,定义为 $C = \{c_1\}$,令 Y 为算法复杂度,通过迭代计算最大概率值为

$$t^* = \arg \max \frac{Y(t, C)}{\sum_{j=1, \dots, n} Y(t_j, C)} \quad (9)$$

加入下一个聚类中心,直至完成3个聚类中心的初始化,即

$$C \leftarrow C \cup \{t^*\} \quad (10)$$

步骤2 分配样本集各元素 t_j 到相近的聚类集合,其分配依据为

$$S_i^{(l)} = \left\{ t_j \mid \|t_j - c_i^{(l)}\|_2^2 \leq \|t_j - c_p^{(l)}\|_2^2 \right\} \quad (11)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, k; p \neq j$ 。

步骤3 根据步骤2中结果,进一步生成如下

新的聚类中心,即

$$c_i^{(l+1)} = \frac{1}{|S_i^{(l)}|} \sum_{t \in S_i^{(l)}} t_j \quad (12)$$

步骤4 达到最大迭代步数后,算法结束,完成聚类,得到聚类后的图像。

将第2节中获取的火焰像素点分布矩阵与经过Kmeans++聚类后的火焰图像矩阵相乘,得到最终的**感兴趣区域**即疑似火焰区域,完成图像分割,将其与初步感兴趣区域结合后,即可得到最终感兴趣区域。

3 基于几何轮廓特征的火焰识别

提取最终感兴趣区域后,还需经过最后的判别过程来确定该区域是否为真实火焰。由于本文是对单帧火焰图像进行识别,常用的面积增长率、重叠率和火焰尖角等判据均不适用,因此,采用基于几何轮廓特征的判据对疑似火焰区域进行判定。

3.1 不规则度

通过观察,大空间内火灾在各个时期均表现出极不规则的轮廓特征^[14],而其他光源如白炽灯、探照灯等则较为规整,因此,可利用这一特性作为火焰识别的判据之一。

将几何轮廓的不规则度 I 定义为

$$N_i = \frac{L_i^2}{4\pi M_i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式中: L, M 分别为几何轮廓的周长和面积; n 为轮廓数量。

由式(13)可知,几何轮廓形状越复杂,不规则度 N 越大,反之不规则度 N 越小。设阈值 $N_0 = 40$,当 $N_i < N_0$ 时,认为该轮廓较为规则,排除是火焰;当 $N_i > N_0$ 时,认为该轮廓不规则,满足火焰轮廓特征。

仅仅进行几何轮廓不规则度的判断还不足以完全确定为火焰区域,故在此基础上又提出形态比例判据。

3.2 形态比例

对待检测图像进行二值化处理后,亮度较高的像素点灰度值被设置为255,表现为白色;反之灰度值设置为0,表现为黑色。据此本文提出基于形态比例的几何判据。

当不规则度 I 大于预设阈值时,疑似火焰区域内的灰度值为255的点,即白色像素点要占整个火焰区域的大部分,可定义为

$$b_a \leq \frac{U_a}{2} \quad (14)$$

式中: b_a 为疑似火焰区域内白色像素点数量; U_a 为疑似火焰区域面积。当满足式(14)条件时,可判定为非火焰区域。

当不规则度 I 小于预设阈值时,此时通常为照明灯、探照灯等干扰光源。通过观察可知,这些光源的亮度分布均匀,而真正火焰的亮度则是由焰心至外焰逐渐降低,在二值图像上表现为白色像素点下半部分要多于上半部分,因此,根据这种特点,提出以下判据:

$$b_l \geq 1.2b_h \quad (15)$$

式中: b_l 为疑似火焰区域下半部分白色像素点数量; b_h 为疑似火焰区域上半部分白色像素点数量。当满足式(15)条件时,可判定为真实火焰区域。

4 实验研究

4.1 火焰检测实验

为了评估本文所提出的火焰检测方法的性能,在Visual Studio 2013环境下运行该方法程序,依据火焰的提取偏差率、识别误报率及运行时间等参数进行实验,程序执行的流程如图3所示。

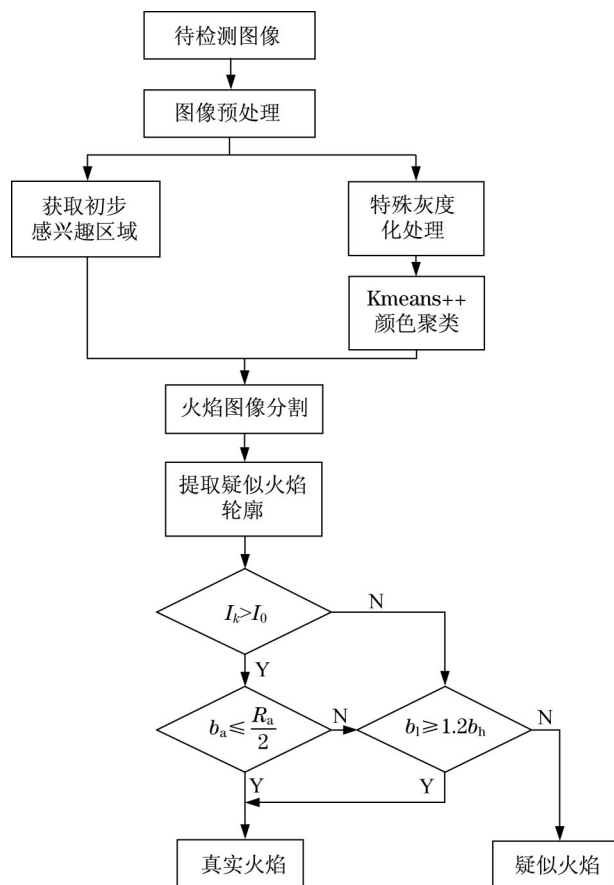


图3 火焰检测程序流程框图

Fig.3 Flow diagram of fire detection program

对实验中涉及的提取偏差率和识别误报率做出如下定义:

(1) 提取偏差率 E_T : 即未完全提取或提取有误的疑似火焰区域部分占实际火焰区域的比率, 用于判断检测方法在基于火焰特征的提取效果的优劣程度, 可定义为

$$E_T = \frac{Q_f}{Q_r}$$

(16)

式中: Q_f 为超出或少于实际火焰区域的面积; Q_r 为实际火焰区域。

(2) 识别误报率 P_F : 即通过火焰的识别过程得到的判断结果与实际不符的数量占所有待检测图像数量的比率, 用于判断检测方法的识别效率和实用性, 可定义为

$$P_F = \frac{T_f}{T_t + T_f}$$

(17)

式中: T_f 为火焰图像被识别为疑似火焰图像的数量; T_t 为正确识别的火焰图像数量。

4.2 实验结果及分析

本次实验选取 20 幅火焰图片和 10 幅非火焰图片, 并将图像像素统一为 450×300, 方便实验结果的分析。选取 3 张典型火焰图像作为展示, 如图 4 所示, 其中, 图 4(a)、图 4(b)、图 4(c) 图像中火焰的几何复杂度依次增加。



图4 典型火焰图像

Fig.4 Image of typical fire

将所有待测图像输入至本文的火焰检测程序中, 即可自动完成对于每幅图像的特征提取、图像分割及识别判断等过程。现将图 4 所选的典型火焰图像处理后的效果图展示, 如图 5 所示, 结合 Kmeans++ 聚类和混合颜色特征后对火焰图像的分割图即最终感兴趣区域图。



图5 火焰检测效果

Fig.5 Results of fire detection

从图 5 可以看出: 该方法检测效果较好, 对实验数据进行整理, 结合式 (16) 得到如表 1 所示的实

验结果。

表 1 实验结果

Tab.1 Experimental results

参数	图 4(a)	图 4(b)	图 4(c)
检测时间/s	0.158	0.723	0.812
提取偏差率/%	87	95	91
是否识别成功	是	是	是

对于所有 30 幅待检测图片, 20 幅火焰图像中未正确识别的图像有 1 幅, 10 幅非火焰图像中均未识别为火焰, 因此, 根据式 (17) 可知, 本文提出的检测算法识别误报率约为 4.7%。

从上述实验结果可知, 本文所提出的火焰检测方法具有较高的提取偏差率和较低的识别误报率, 并对火焰几何轮廓的提取十分准确, 整个检测时间也在合理的范围内, 单帧火焰图像的检测展现出较好的效果, 具有可实现性和有效性。

5 结论

本文首先利用混合颜色判据, 即在 RGB 判据的基础上加入 HSI 模型中饱和度分量判据提取火焰像素点, 形成初步感兴趣区域; 基于 Kmeans++ 聚类算法, 将经过特殊灰度化处理的火焰图像进行颜色聚类, 并将聚类结果与初步感兴趣区域结合, 完成图像分割, 得到最终感兴趣区域; 提取该区域轮廓, 利用不规则度和形态比例等几何判据对图像进行识别。为评估所提出的火焰检测方法的性能, 在 Visual Studio 2013 环境下进行了针对运行时间、提取偏差率和识别误报率等指标的实验研究。实验结果证明: 该方法具有较低的提取偏差率和识别误报率, 具有较好的有效性和可实现性, 同时兼顾了实时性的要求, 可以应用于大空间消防技术之中。

参考文献:

[1] 马森晨. 基于计算机视觉的大空间消防机器人[D]. 福州: 福州大学, 2014.
MA S C. Fire extinguishing robot for large space based on computer vision [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2014.
[2] 陈庆暖. 消防灭火机器人及其应用[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(5): 644-646.
CHEN Q N. Fire fighting robot and its application [J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(5): 644-646.

- [3] 高仲亮,王秋华,舒立福,等.森林火灾扑救消防车装备的种类及使用技术[J].林业机械与木工设备,2014,42(8):10-14.
GAO Z L, WANG Q H, SHU L F, et al. Kinds of fire engines and technology used in forest fire suppression [J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2014, 42(8): 10-14.
- [4] FENG F, LIU Y W, LIU H, et al. Design schemes and comparison research of the end-effector of large space manipulator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(4): 674-687.
- [5] 王中林.基于双目视觉的火焰目标检测[D].北京:北京交通大学,2018.
WANG Z L. Flame target detection based on binocular stereo vision [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [6] BOHUSH R, BROUKA N. Smoke and flame detection in video sequences based on static and dynamic features [C]//2013 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA). 2013: 20-25.
- [7] LIU Z G, YANG Y, JI X H. Flame detection algorithm based on a saliency detection technique and the uniform local binary pattern in the YCbCr color space [J]. Signal Image and Video Processing, 2016, 10(2): 277-284.
- [8] 柴茜,王慧琴,廖雨婷.基于HMM-SVM的图像型火焰识别[J].计算机工程与应用,2015,51(13):202-205.
CHAI Q, WANG H Q, LIAO Y T. Flame recognition algorithm based on Hidden Markov Model and Support Vector Machines [J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(13): 202-205.
- [9] 马宗方,程咏梅,潘泉,等.基于颜色模型和稀疏表示的图像型火焰探测[J].光子学报,2011,40(8):1220-1224.
MA Z F, CHENG Y M, PAN Q, et al. Image fire detection based on color model and space representation [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(8): 1220-1224.
- [10] 耿庆田,于繁华,赵宏伟,等.基于颜色特征的火焰检测新算法[J].吉林大学学报(工学版),2014,44(6):1787-1792.
GENG Q T, YU F H, ZHAO H W, et al. New algorithm of flame detection based on color features [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, 44(6): 1787-1792.
- [11] YANG F, LIU G S, MENG K, et al. Neural feedback text clustering with BiLSTM-CNN-Kmeans [J]. IEEE Access, 2018, 6: 57460-57469.
- [12] JI X R, LU F H. K-means clustering analysis and evaluation for internet of acoustic environment characteristics [J]. Cognitive Systems Research, 2018 (8): 603-609.
- [13] 刘美,薛新松,刘广文,等.对比度增强的彩色图像灰度化算法[J].长春理工大学学报(自然科学版),2018,41(5):70-74.
LIU M, XUE X S, LIU G W, et al. Contrast enhancement algorithm for gray scale of color images [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 41(5): 70-74.
- [14] 张姣.基于混合传感的多级火灾检测系统研究[D].济南:山东大学,2016.
ZHANG J. Research on fire detection system based on multilevel hybrid sensor [D]. Jinan: Shandong University, 2016.