

基于 Gabor 的多尺度纹理特征融合的黑烟识别

韩昕昊¹, 孙进保², 李 威¹

(1. 沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 东软集团股份有限公司, 辽宁 沈阳 110179)

摘 要: 柴油车是道路上的高污染车辆的典型代表, 利用计算机视觉实现黑烟车的有效识别具有成本低和应用范围广等优点。但车辆排放的黑烟是半透明状的团雾, 对路面、光线等环境的变化敏感, 使得黑烟识别的误检率与错误率较高。为解决以上问题, 提出一种基于 Gabor 的多尺度纹理特征融合的黑烟识别方法。首先采用 Gabor 变换提取多尺度、多方向黑烟纹理信息, 过滤掉无关的干扰信息; 然后利用二值模式 PLBP (Pyramid Local Binary Pattern, PLBP) 提取黑烟图像局部纹理特征。融合两种异构特征得到 PLBP-Gabor 纹理特征提取算法。对广西某高速路段内 62 段视频和 2 个图像数据集进行训练及测试, 实验结果表明该纹理特征提取算法可以在保持低误报率的前提下提高黑烟车的检测率。

关键词: 黑烟车; 特征融合; 局部二值模式; Gabor 滤波器; 纹理特征

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2022)0041-06

Black Smoke Recognition Based on Gabor Multi-scale Texture Feature Fusion

HAN Xin-hao¹, SUN Jin-bao², LI Wei¹

(1. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Neusoft Group Co., Ltd, Shenyang 110179, China)

Abstract: Diesel vehicle is a typical representative of high pollution vehicles on the road. Using computer vision to realize the effective identification of smoky vehicles has the advantages of low cost and wide application range. However, the black smoke emitted by vehicles is a translucent mass fog, which is sensitive to the changes of road surface, light and other environment, so that the false detection rate and error rate of black smoke recognition are high. In order to solve the problems, a black smoke recognition method based on Gabor multi-scale texture feature fusion is proposed. Firstly, Gabor transform is used to extract multi-scale and multi-directional black smoke texture information and filter out irrelevant interference information. Then the PLBP (Pyramid Local Binary Pattern) is used to extract the local texture features of image, PLBP-Gabor texture feature extraction algorithm is obtained by fusing the two features. 62 videos and 2 image datasets in a high-speed section in Guangxi are used. The experimental results show that the texture feature extraction algorithm can improve the detection rate of smoky vehicle on the premise of maintaining low false positive rate.

Key words: smoky vehicles; feature fusion; local binary pattern; Gabor filtering; texture feature

0 引 言

据公安部统计,截至 2020 年,全国机动车保有量已达 3.7 亿辆^[1]。机动车在方便出行的同时也带来了环境污染问题。黑烟车辆排放的尾气为清晰可见的黑烟,是目前城市道路污染主要的源头之一。一辆黑烟车排放的污染物和颗粒物可以达到正常机动车的 10 倍以上^[2]。因此,快速自动检测出黑烟车并进行控制管理,能够从源头上减少黑烟尾气的排放,具有实际的应用意义。

传统的车辆尾气遥感监测使用红外光和紫外光对车辆尾气进行分析^[3-4],利用光学光谱技术实现对车辆排放物的测量,但尾气遥感监测技术检测设备昂贵,适用于静止车辆,泛化能力弱,无法应用在交通监管领域。基于计算机视觉的车辆黑烟检测可通过摄像头采集运动车辆的排烟区视频或图像序列中的黑烟来检测车辆目标。传统的黑烟检测基本框架是:图像采集、车辆排烟区域提取、特征表达、黑烟识别与车辆目标定位。该文关注黑烟特征表达与识别过程。随着车辆的

收稿日期:2021-12-31

作者简介:韩昕昊(1996-),男,硕士研究生,研究方向为图像处理与模式识别;通讯作者:李 威(1979-),女,博士,讲师,硕导,CCF 会员,研究方向为机器视觉检测和图像识别。

运动,车辆排烟区的黑烟会产生流动性,这种流动性受到排烟区位置和所处环境的风速、风向的影响,是一种无序运动,因此动态特征更适合用于辅助基于静态特征的黑烟识别。该文关注单帧图像中的黑烟静态特征表达与黑烟识别。

烟雾图像静态特征有颜色、纹理、梯度特征等^[5-6]。其中颜色特征表现最为直观,在火灾烟雾检测等前景和背景区域颜色差异明显的场景下应用较多^[7-8],但车辆排烟区域图像中黑烟为半透明的黑色烟雾,背景中沥青路面的颜色会透出来影响黑烟的颜色,没有很多色彩信息,同时烟雾与背景的梯度特征也不明显。而黑烟的纹理特征是静态属性中比较稳定和显著的,许多研究更关注如何提取具有高可分性的纹理特征。Tao 等人^[9]对传统 Tamura 特征提取方法进行改进,加入尺度信息,但该方法只涉及单一特征,对轻烟、薄烟等情况检测效果不佳,Yuan 等人对局部二值模式(Local Binary Pattern,LBP)的特征编码方式改进,以 LBP 编码之间的汉明距离作为度量信息并进行二次编码,提出了基于成对比较的局部二值模式(Pairwise Comparing Local Binary Pattern,PCLBP)^[10]。目前研究人员大多采用特征结合的方法提取特征,Yuan 等人^[11]将曲波变换与完全局部二值模式结合使用,Lin 等人^[12]将局部二值模式与时空特征相结合作为底层特征,以上方法特征维度较高,对噪声敏感。为解决这些问题,Tao 等人^[13]设计了基于鲁棒视觉的局部二值计数算子(Robust-visual Local Binary Count,R-VLBC),加强了对噪声的抗干扰能力。此外,局部三值模式(LTP)及相关变体也常被使用在黑烟检测场景下^[14],如基于水平置信的局部三值模式(Local Ternary Pattern Based on Confidence level,CLLTP)特征以及对 CLLTP 改进得到的组合特征(M-CLLTP)^[15],该特征比传统局部二值模式特征具备更好的抗噪性,但也增加了计算成本。也有部分研究人员采用深度学习方法检测火灾烟雾^[16-18],由于车辆黑烟识别算法在许多应用中需要部署在移动设备或嵌入式设备中,深度学习模型相对于传统算法要大很多,限制了算法的泛化能力。

基于以上分析,该文利用纹理分类的框架实现黑烟识别,侧重于面向黑烟的局部纹理特征描述与提取,提出一种基于 Gabor 的多尺度纹理特征融合的黑烟识别算法。首先对车辆排烟区进行手工定位,然后结合多尺度空间理论提取基于图像金字塔的局部二值模式特征,将其与 Gabor 滤波器提取的纹理特征融合,最后通过支持向量机(Support Vector Machine,SVM)进行训练和测试。通过真实场景采集的黑烟车图像数据集对该算法进行验证,实验结果表明识别效果较优。

1 基于 Gabor 的多特征融合黑烟识别算法

1.1 图像的黑烟频域特征分析

车辆排烟区图像中,黑烟尾气的半透明性使其出现区域变得模糊,其颜色也与背景区域相近,区域轮廓边缘和细节信息减小,与之对应的高频分量减小。基于 Gabor 变换的纹理分析方法属于变换域分析法中的一种,在图像处理中通常将一维 Gabor 变换推广到二维构造 Gabor 滤波器,将其与样本图像进行卷积操作得到 Gabor 特征。该方法可以描述图像在时域和频域的纹理分布,对于亮度和对比度的改变有较强的适应性,适用于真实道路场景下的黑烟纹理特征提取。

二维 Gabor 滤波器可表示为:

$$\psi(x, y, f, \theta) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x'}{\sigma_x^2} + \frac{y'}{\sigma_y^2}\right)\right] \cdot \exp(i(2\pi f x')) \quad (1)$$

$$\begin{cases} x' = x\cos\theta + y\sin\theta \\ y' = -x\sin\theta + y\cos\theta \end{cases} \quad (2)$$

其中, σ_x, σ_y 分别表示高斯分布在 x, y 方向上的标准差; f 代表 Gabor 滤波器的频率, θ 代表角度。

式(1)为 Gabor 滤波器的复指数函数表达形式,其实数部分和虚数部分的定义式如式(3)和式(4)所示。

$$\psi_{\text{real}}(x, y, f, \theta) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x'}{\sigma_x^2} + \frac{y'}{\sigma_y^2}\right)\right] \cdot \cos(2\pi f x') \quad (3)$$

$$\psi_{\text{imag}}(x, y, f, \theta) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x'}{\sigma_x^2} + \frac{y'}{\sigma_y^2}\right)\right] \cdot \sin(2\pi f x') \quad (4)$$

通过调节频率参数 f 和角度参数 θ 可以构造不同频率和不同方向的 Gabor 滤波器,为使 Gabor 方法的运作机理与人眼对图像的视觉感知过程达到高一致性,参考神经学的相关研究,选取频率参数 $f = 0.5$, 角度参数 $\theta \in [0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}]$ 组成 4 个不同方向的 Gabor 滤波器,通过卷积运算提取黑烟区域的纹理特征 F_{Gabor} 。

1.2 图像的多尺度纹理结构特征分析

车辆尾部排放的黑烟具有局部自相似性,因此局部纹理特征能够有效地表达黑色烟雾。局部二值模式 LBP 方法^[19]是统计型纹理特征提取的经典方法,常被用于烟雾检测任务中,可根据图像的局部空间邻域统计纹理信息。初始的 LBP 算子分别将各个像素设为中心阈值并与其邻域像素比较大小,将结果表示为 0 和 1 的二进制编码,该二进制编码则记录了当前位置的纹理信息,其编码过程如图 1 所示。

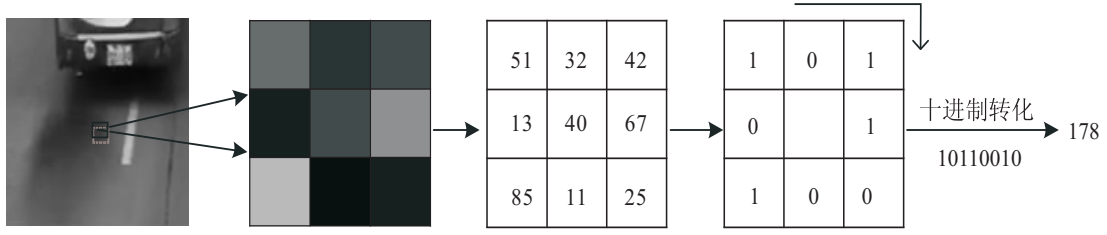


图 1 黑烟区域 LBP 编码过程示意图

图 1 所示为基于矩形邻域的 LBP 算子,为了使提取的特征具有旋转不变性,圆形邻域被提出,圆形邻域通过采样半径和采样点来确定,编码计算公式如下:

$$\text{LBP}_{P,R} = \sum_{i=0}^{P-1} s(g_i - g_p) \cdot 2^i \quad (5)$$

$$s(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式(5)中, g_p 为当前中心点像素的灰度值, g_i 为中心点周围各邻域像素的灰度值, P 为圆形邻域内的采样点个数, R 为采样半径,对于圆形邻域中未落到圆周上的采样点通常采用双线性插值法进行优化。该文结合黑烟区域图像的尺寸以及计算开销考量,选取的 LBP 算子采样点数 P 为 16,采样半径 R 为 2。

纹理信息对应的编码结果也被称为模式, P 个采样点对应的模式种类为 2^P 种,随着采样半径增大和采样点个数的增加,模式种类数也呈指数增长,为降低种类繁多的冗余模式,研究人员对 LBP 算子进一步优化,通过均匀性度量 U 界定模式出现频率的高低:

$$U(\text{LBP}_{P,R}) = \sum_{i=1}^P |s(g_i - g_p) - s(g_{i-1} - g_p)| \quad (7)$$

式(7)能反映圆形邻域二进制编码中相邻的 0 和 1 互相变换的次数,仅将 $U < 2$ 的模式定义为均匀模式,其余模式都被划分到非均匀模式,即重点统计均匀

模式下的特征,压缩非均匀模式下的冗余特征。在实际交通场景下,非均匀模式常为噪声引起,其中包含的有效目标成分很少,无统计意义,将其统一划分可有效降低 LBP 特征的模式种类,还能增强对噪声的抗干扰能力。

为了得到图像的多尺度表达,需要对图像进行尺度变换并构建不同尺度之间的关联,通过下采样构建的图像金字塔可从多分辨率来描述图像,是多尺度变换中常用的高效手段。单一的下采样操作虽然能改变图像尺度,但也会造成信息损失,导致噪声敏感等问题。为解决这一问题,尺度空间理论采取将图像缩减与平滑处理同步进行,通过空间域下的平滑滤波器将上层图像像素用于下层图像的计算,高斯核常用于下采样金字塔的平滑处理,将高斯平滑与下采样结合使用便得到了图像的金字塔结构^[20]。图像金字塔的底部分辨率更高,可凸显细节信息,而顶部则表示低分辨率下的模糊轮廓信息。该文所采用的图像大小为 64×64 像素,经过三层以上的下采样和高斯平滑操作之后金字塔的顶层尺寸过小,图像信息流失严重。因此着重考虑三层图像金字塔下的 LBP 特征提取,并将其联合表示为 PLBP (Pyramid Local Binary Pattern, PLBP) 特征。

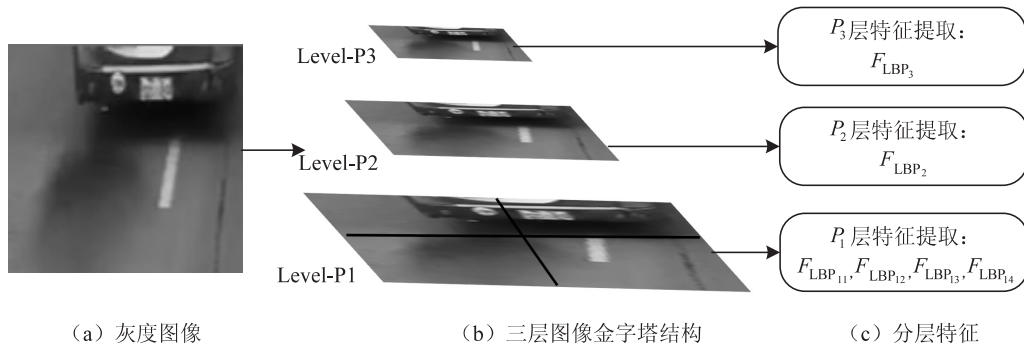


图 2 PLBP 特征提取

图 2 中(a)为灰度化的黑烟区域图像,(b)为黑烟区域的三层图像金字塔,从底部到顶部分别表示为 P_1, P_2, P_3 , (c)为分层 LBP 特征。由于提取到的 LBP 特征最终以直方图形式表现,为了弥补直方图表示带来的空间分布信息损失,参考图像金字塔中的分块特征提取方法^[21],在图像金字塔的高层和底层采取不同的 LBP 特征提取策略。将底层高分辨率图像 P_1 划分

为 4 个面积相等、互不相交的矩形区域 D_1, D_2, D_3, D_4 , 并分别在每个区域上提取 LBP 局部直方图特征,表示为 $F_{\text{LBP}_{11}}, F_{\text{LBP}_{12}}, F_{\text{LBP}_{13}}, F_{\text{LBP}_{14}}$ 。为了降低特征冗余, P_1 层和 P_2 层不进行区域分块处理,即分别提取全局 LBP 特征,表示为 $F_{\text{LBP}_2}, F_{\text{LBP}_3}$ 。因此,一幅图像被划分为 3 层共 6 个特征提取区域,表示为 $F_{\text{PLBP}} = \{F_{\text{LBP}_{11}}, F_{\text{LBP}_{12}}, F_{\text{LBP}_{13}}, F_{\text{LBP}_{14}}, F_{\text{LBP}_2}, F_{\text{LBP}_3}\}$ 。

1.3 特征融合

由于单一特征存在描述能力不足、不稳定等问题,目前研究人员在烟雾检测相关领域普遍采用多特征融合方法。将上述多尺度局部二值模式特征 F_{PLBP} 和

Gabor 特征 F_{Gabor} 串联融合提取混合特征 $F_{PLBP-Gabor}$,该特征可以同时从局部空间域统计和频率域变换两个角度描述纹理信息,从而提高特征对黑烟区域的表征能力,提取 $F_{PLBP-Gabor}$ 特征检测黑烟的流程如图 3 所示。

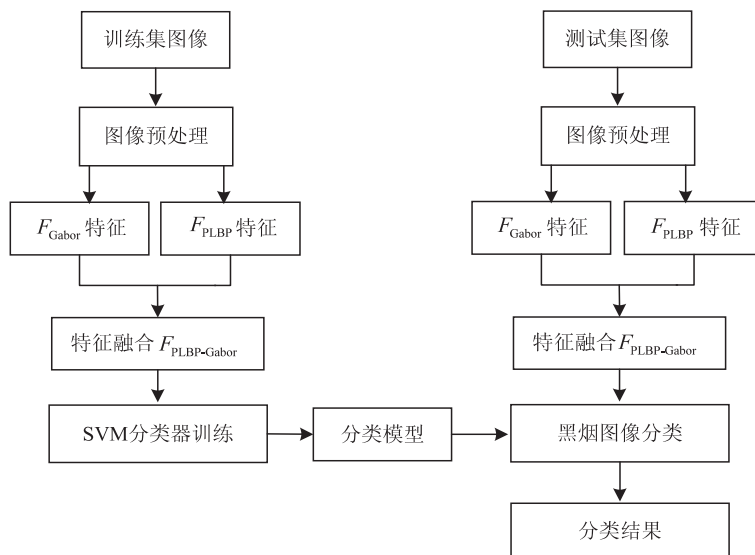


图 3 特征融合法检测黑烟示意图

2 实验结果与分析

2.1 黑烟车数据集

采用的数据集是以广西某高速路段内的黑烟车为研究对象,对一个月内的黑烟车视频进行人工提取,共 62 段视频,每段视频时长 6 秒,每秒 20 帧。将视频按

帧进行截取,得到真实场景下车辆排烟单帧图像集。数据集包括黑烟车和非黑烟车两大类,其中包含黑烟车图像 2 251 张,非黑烟车图像 5 429 张,两个数据集的部分图像存在水渍、油渍、阴影区等干扰信息,数据集图像示例如表 1 所示。

表 1 黑烟车与非黑烟车数据集

类型	描述	示例			说明
黑烟车	明显的黑烟车				有黑烟, 黑烟浓度高、形状表现为团雾状, 明显可见
	不明显的黑烟车				有黑烟, 黑烟浓度低, 更易扩散, 表现不明显
	尾部区域包含干扰信息的黑烟车				有黑烟, 黑烟区域包含水渍油渍、阴影以及后车遮挡等干扰信息
非黑烟车	明显的非黑烟车				无黑烟, 在理想道路情况下, 道路背景单一, 不包含阴影、水渍和遮挡等干扰信息
	有阴影干扰的非黑烟车				无黑烟, 受光照影响, 车辆尾部会出现明显阴影, 阴影区域与背景区域有明显的亮度差异, 阴影边缘显示清晰。
	有水渍油渍干扰的非黑烟车				无黑烟, 车尾部区域受油渍和水渍等因素影响, 包含大量灰黑色条带状区域
	被遮挡的非黑烟车				无黑烟, 受车辆位置关系影响, 车尾部被其他车辆遮挡

在数据集中选取干扰信息较少的黑烟图像 1 051 张,非黑烟图像 1 890 张,共包含图像 2 941 张,训练集和测试集的数据划分比例为 3 : 1。

2.2 评价指标

在黑烟图像检测中,评价指标可分为两类,一类是衡量每帧黑烟区域的提取精度,属于像素级评价指标,另一类是衡量每帧是否出现黑烟区域,属于目标级评价指标。黑烟检测中像素级指标多用于评价黑烟区域定位的准确程度,如交并比 (IoU) 和均方误差 (MSE)。

$$\text{IoU} = \frac{\text{PR}_i \cap \text{GT}_i}{\text{PR}_i \cup \text{GT}_i} \quad (8)$$

式中, PR_i 为第 i 张图像黑烟区域的提取结果, GT_i 为第 i 张图像真实的黑烟区域。

$$\text{MSE}_i = \frac{\sum_{k=1}^{h_i \times w_i} [\text{PR}(x_k) - \text{GT}(x_k)]^2}{h_i \times w_i} \quad (9)$$

式中, h_i 是第 i 帧的高度, w_i 是第 i 帧的宽度, x_k 是第 i 帧中的第 k 个像素坐标。由于在实际场景下黑烟区域通常与背景融合在一起,在像素层面难以分割,GT 框的获取存在困难,因此,实际应用多采用目标级评价指标。

目标级评价指标大多是基于二分类来实现的,常用的指标有真阳率 (TPR) 和假阳率 (FPR)、检测率 (DR) 和误报率 (FR)、准确率 (Pre) 和召回率 (Rec)。

$$\begin{cases} \text{DR} = \text{TPR} = \text{Rec} = \frac{N_{\text{TP}}}{N_{\text{TP}} + N_{\text{FN}}} \\ \text{FR} = \text{FPR} = \frac{N_{\text{FP}}}{N_{\text{TN}} + N_{\text{FP}}} \\ \text{Pre} = \frac{N_{\text{TP}}}{N_{\text{TP}} + N_{\text{FP}}} \end{cases} \quad (10)$$

式中, N_{TP} 表示被正确识别的黑烟尾气图像数量, N_{FN} 表示黑烟尾气被识别为非黑烟尾气的图像数量, N_{TN} 表示非黑烟尾气被正确识别的图像数量, N_{FP} 表示非黑烟尾气被判定为黑烟尾气的图像数量。其中检测率和误报率在本质上与真阳率和假阳率定义式相同,而准确率更关注识别方法对正样本的影响,无法反映黑烟检测中的误报情况,黑烟车检测技术多应用在交通执法系统中,黑烟车检测系统应该在低误报率的前提下,尽量提升黑烟车的检测率。因此,选取检测率和误报率作为黑烟车检测任务的评价指标。

2.3 实验结果分析

实验环境配置:

硬件: Inter (R) Core (TM) i5-7200U CPU@ 2.50 GHz 8.00 GB RAM;

软件: 64 位操作系统, 编程环境为 PyCharm 2020.

2.1, Python3.6。

为了验证该特征提取算法的有效性,分别对比了 LBP 特征和几种具有代表性的基于 LBP 特征的变体以及 Color Moment、EOH 等在传统烟雾检测中用于描述颜色、边缘的特征,最后使用 SVM 分类器验证识别效果,实验对比结果如表 2。

表 2 不同特征下的黑烟尾气识别效果对比

特征提取算法	检测率/%	误报率/%
LBP	82.28	9.27
CS-LBP	84.86	7.83
NRLBP	86.19	8.62
EOH	78.96	10.92
Gabor	82.72	9.69
Haralick	76.87	14.02
Color Moments	85.09	7.83
PLBP	86.11	7.05
文中方法	88.93	5.97

由表 2 可知,提取 LBP 特征和 Gabor 特征,黑烟车的检测率和误报率分别为 82.28%、87.72% 和 9.27%、9.69%,这两种经典纹理特征提取方法的检测率和误报率接近,而提取基于灰度共生矩阵的 Haralick 纹理特征,黑烟车的检测率和误报率为 76.87% 和 14.02%,与以上两种方法相比,Haralick 特征用于描述黑烟纹理效果不佳。结合尺度空间理论提取的 PLBP 特征较单一空间尺度下的 LBP 特征检测率提高 3.83%,误报率下降 2.22%,黑烟车识别效果有较大提高,在此基础上加入频率域纹理描述,与 Gabor 小波纹理特征提取方法结合便得到本文所使用的 PLBP-Gabor 特征,该特征可以在保持 5.97% 的低误报率前提下实现对黑烟车 88.93% 的检出率,效果改善明显。而 LBP 系列的其他改进特征提取算法如中心对称局部二值模式 (CS-LBP)、抗噪局部二值模式 (NRLBP) 也在黑烟识别中表现良好,但整体识别效果不如本文特征提取算法的效果。此外,在实验中也采用颜色矩 (Color Moments) 和边缘方向直方图 (EOH) 方法提取黑烟的颜色特征及边缘特征,在黑烟车数据集上的整体表现也与本文多尺度纹理特征融合的方法相比存在一定的差距。

3 结束语

以真实场景下的黑烟车辆为研究对象,建立黑烟车图像数据集。对车辆排烟区域的黑色烟雾特征进行分析,根据尺度空间理论融合局部二值模式特征得到图像空间域下不同尺度的局部纹理结构信息,结合多尺度多方向的 Gabor 滤波器来提取图像不同层次的纹

理特征,弥补单一尺度下纹理特征描述图像信息的缺陷和不足,提高特征的表征能力。通过实验对比,该方法可以有效提高黑烟车的检测率、降低误报率。所采用的数据为噪声干扰小的黑烟图像,未来将进一步研究复杂背景下的黑烟烟雾识别方法。

参考文献:

- [1] 2021 年中国移动源环境管理年报(摘录一)[J]. 环境保护,2021,49(Z2):82-88.
- [2] 丁媚英,简伟. 深圳:治理尾气,守护蓝天[J]. 环境,2016(10):39-41.
- [3] ROPKINS K, DEFRIES T H, POPE F, et al. Evaluation of EDAR vehicle emissions remote sensing technology[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 1464-1474.
- [4] PYYKÖNEN P, PEUSSA P, KUTILA M, et al. Multi-camera-based smoke detection and traffic pollution analysis system[C]//2016 IEEE 12th international conference on intelligent computer communication and processing (ICCP). ClujNapoca: IEEE, 2016: 233-238.
- [5] 史劲亭,袁非牛,夏雪. 视频烟雾检测研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2018, 23(3): 303-322.
- [6] 张天琪,杨伟东,张姣姣,等. 视频车辆黑烟检测算法研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(2): 316-333.
- [7] 孙建坤,杨若瑜. 基于颜色直方图和小波变换的视频烟雾检测[J]. 计算机科学, 2014, 41(12): 251-254.
- [8] 刘恺,刘湘,常丽萍,等. 基于 YUV 颜色空间和多特征融合的视频烟雾检测[J]. 传感技术学报, 2019, 32(2): 237-243.
- [9] TAO H, LU X. Smoky vehicle detection based on multi-scale block Tamura features[J]. Signal, Image and Video Processing, 2018, 12(6): 1061-1068.
- [10] YUAN F, SHI J, XIA X, et al. Encoding pairwise Hamming distances of Local Binary Patterns for visual smoke recognition[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2019, 178: 43-53.
- [11] YUAN F, TANG T, XIA X, et al. Dual-encoded features from both spatial and curvelet domains for image smoke recognition[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2019, 13(4): 2078-2093.
- [12] LIN G, ZHANG Y, ZHANG Q, et al. Smoke detection in video sequences based on dynamic texture using volume local binary patterns[J]. KSII Transactions on Internet & Information Systems, 2017, 11(11): 5522-5536.
- [13] TAO H, LU X. Smoke vehicle detection based on robust codebook model and robust volume local binary count patterns[J]. Image and Vision Computing, 2019, 86: 17-27.
- [14] YUAN F, SHI J, XIA X, et al. High-order local ternary patterns with locality preserving projection for smoke detection and image classification[J]. Information Sciences, 2016, 372: 225-240.
- [15] 李钢,袁非牛,夏雪,等. 改进局部三值模式的烟雾识别和纹理分类[J]. 计算机科学与探索, 2020, 14(7): 1221-1231.
- [16] FILONENKO A, KURNIANGGORO L, JO K H. Comparative study of modern convolutional neural networks for smoke detection on image data[C]//2017 10th international conference on human system interactions (HSI). Ulsan: IEEE, 2017: 64-68.
- [17] YIN Z, WAN B, YUAN F, et al. A deep normalization and convolutional neural network for image smoke detection[J]. IEEE Access, 2017, 5: 18429-18438.
- [18] YUAN F, ZHANG L, WAN B, et al. Convolutional neural networks based on multi-scale additive merging layers for visual smoke recognition[J]. Machine Vision and Applications, 2019, 30(2): 345-358.
- [19] OJALA T, PIETIKAINEN M, MAENPAA T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7): 971-987.
- [20] 侯谕融,狄岚,梁久祯. 融合高斯金字塔特征的低分辨率人脸识别[J]. 小型微型计算机系统, 2021, 42(10): 2107-2115.
- [21] 李红娣,袁非牛. 采用金字塔纹理和边缘特征的图像烟雾检测[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(6): 772-780.