

# 轮胎花纹图像检索技术综述

刘颖 张帅 葛瑜祥 王富平 李大湘

(西安邮电大学图像与信息处理研究所 西安 710121)

(电子信息现场勘验应用技术公安部重点实验室 西安 710121)

**摘要** 轮胎花纹图像检索在交通事故处理及刑事案件侦破中是获取破案信息的重要手段,虽然基于内容的图像检索技术已发展数十年,但由于轮胎花纹图像数据的来源及应用场景特殊等因素,目前这方面的研究文献并不多。在研究近年来轮胎花纹图像检索领域相关文献的基础上,对该领域的技术现状进行总结分析。首先,围绕轮胎花纹纹理特征提取和高层语义特征提取两项关键技术描述了该领域的主要研究成果,并总结了轮胎花纹数据库以及检索性能评价指标。然后,分别针对轮胎花纹低层特征和高层特征提取进行实验对比并分析结果。最后,结合现有技术及应用需求,分析了该领域的技术发展趋势并指出了未来的研究方向。

**关键词** 轮胎花纹图像检索,纹理特征,高层语义特征,轮胎花纹数据库

中图分类号 TP391.41 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.12.007

## Survey of Tire Pattern Image Retrieval Techniques

LIU Ying ZHANG Shuai GE Yu-xiang WANG Fu-ping LI Da-xiang

(Center for Image and Information Processing, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

(Key Laboratory of Electronic Information Application Technology for Scene Investigation, Ministry of Public Security, Xi'an 710121, China)

**Abstract** Tire pattern image retrieval (TPIR) plays an important role in traffic accident management and criminal case solving. Although content-based image retrieval (CBIR) has been studied for decades, and few literatures has been done in TPIR due to the lack of tire pattern data source and its special application scenario. Based on the review of the research papers in the field of TPIR in recent years, this paper provided a comprehensive survey of the state-of-the-art techniques in this area. First, this paper described the research status of TPIR by summarizing the existing techniques in low-level texture feature extraction and high-level semantic learning for tire pattern images. Then, this paper introduced tire pattern image databases appeared in literature and the performance evaluation parameters used by researchers. In addition, this paper presented experimental results testing on low-level and high-level features of tire pattern images, with results analysis provided. Lastly, considering existing techniques and practical applications, this paper discussed the research challenges in this filed and pointed out a few potential future research directions.

**Keywords** Tire pattern image retrieval, Texture feature, High-level semantic feature, Tire pattern image database

## 1 引言

轮胎花纹图像在交通事故处理和刑事犯罪案件侦破中能够提供重要线索,是一种重要的物证信息。高效准确的轮胎花纹图像检索(Tire Pattern Image Retrieval, TPIR)技术对提高交警和公安干警的工作效率具有重要的实际应用价值<sup>[1-2]</sup>。此外,在轮胎制造和汽车生产的商业领域,也时常因生产的轮胎花纹侵犯专利权而发生商业纠纷<sup>[3]</sup>。因此,研究设计高效的轮胎花纹图像检索算法具有重要意义。

轮胎花纹图像具有纹理复杂、颜色特征单一、边缘清晰、噪声信息少,且不同型号的轮胎花纹的视觉效果相似的特点。现有文献中描述轮胎花纹图片的低层特征主要为纹理特征<sup>[1-4]</sup>,也有少数其他特征比如边界特征<sup>[5-6]</sup>。而文献中关于轮胎花纹图像检索的算法以纹理特征为主。由于轮胎花纹图像内容的特殊性,常规基于内容的图像检索(Content-Based Image Retrieval, CBIR)技术不一定适用<sup>[7-9]</sup>。因此,要提高轮胎花纹图像检索的准确性,就需要充分考虑轮胎花纹图像数据的特点,研究适用于该种数据的检索算法<sup>[8]</sup>。

投稿日期:2018-01-15 返修日期:2018-05-16 本文受国家自然科学基金项目(61671377),公安部科技强警项目(2016GABJC51),陕西省国际合作研究项目(2017KW-013)资助。

刘颖(1972-),女,博士,高级工程师,主要研究方向为图像检索, E-mail: ly\_yolanda@sina.com; 张帅(1993-),男,硕士生,主要研究方向为图像检索, E-mail: zhangshuai9302@qq.com(通信作者); 葛瑜祥(1991-),男,硕士生,主要研究方向为图像检索, E-mail: 995712733@qq.com; 王富平(1987-),男,博士,讲师,主要研究方向为图像标注, E-mail: wfp1608@163.com; 李大湘(1975-),男,博士,副教授,主要研究方向为图像检索, E-mail: 35108809@qq.com。

由于缺乏公用的标准测试数据集,目前学术界对 TPIR 的研究并不多。近年来,根据实验所用数据类型的不同,对轮胎花纹检索的研究可分为 4 类:轮胎表面花纹检索<sup>[4-27]</sup>、轮胎压痕检索<sup>[28-33]</sup>、轮胎花纹磨损特征提取<sup>[34-37]</sup>、视频中的轮胎花纹检索<sup>[38]</sup>。其中以研究轮胎表面花纹及轮胎压痕图像的文献较多。图 1 展示了 4 类轮胎花纹图像。

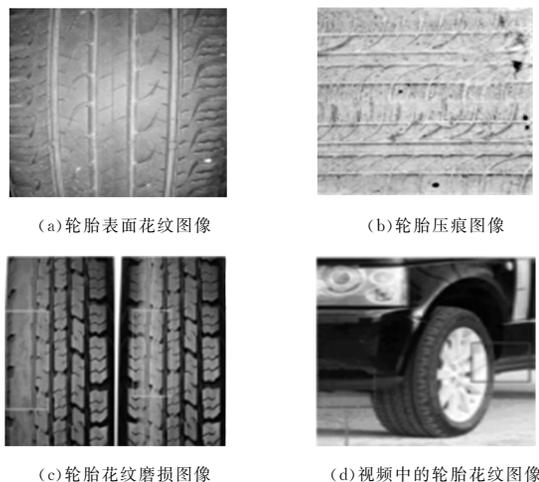


图 1 不同类型的轮胎花纹图像

Fig. 1 Different types of tire pattern images

轮胎表面花纹是指车胎表面的花纹(Tire tread pattern, 简称 Tire pattern)。本文主要研究轮胎表面花纹检索(下文简称轮胎花纹检索)技术。在相关文献的基础上,本文对轮胎花纹检索领域的研究成果进行了全面综述。首先,总结了文献中使用的轮胎花纹数据库以及学者们常用的检索性能的评价指标。然后,分类介绍并分析了学者们提出的轮胎花纹检索算法。最后,给出该领域的几个有潜力的研究方向。

本文第 2 节介绍了文献中常见的轮胎花纹图像数据库;第 3 节总结了轮胎花纹图像检索性能的评价指标;第 4 节对轮胎花纹图像检索算法从轮胎花纹低层特征和高层语义特征提取两个方面进行描述并进行实验分析;第 5 节基于文献综述并结合实际应用需求,讨论了该领域的研究难点及发展趋势,并给出了几个未来的研究方向;最后总结全文。

## 2 轮胎花纹图像数据库

文献调查显示,目前在 TPIR 领域比较活跃的研究团队有:西安邮电大学图像与信息处理研究所(Center for Image and Information Processing, CIIP)<sup>[4,7-19]</sup>、陕西师范大学<sup>[20-22]</sup>、台湾大叶大学<sup>[23]</sup>、斯洛伐克的 Matej Bel 大学<sup>[24]</sup>、美国密歇根州立大学<sup>[25]</sup>、韩国大学<sup>[26]</sup>、瑞士苏黎世大学<sup>[27]</sup>等。表 1 总结了现有的轮胎表面花纹图像数据库信息和例图。

在汽车轮胎制造的商业领域,青岛橡胶谷集团有限公司<sup>[3]</sup>、美国 TireRack 汽车轮胎公司<sup>[39]</sup>建立了大型轮胎表面花纹图像数据库。青岛橡胶谷集团有限公司于 2014 年建立了一个大型轮胎花纹数据库,其中包含中国、日本、韩国、美国、欧洲共同体共计 8 万件轮胎花纹的外观专利,共计 52 万张图像。美国 TireRack 汽车轮胎公司建立了轮胎表面花纹图像数据库,其包含约 5530 幅图像。

表 1 轮胎花纹图像数据库

Table 1 Tire pattern image database

研究机构/企业	数据量	轮胎花纹图像例图	
青岛橡胶谷集团有限公司	52 万		
美国 TireRack 汽车轮胎公司	5530		
西安邮电大学图像与信息处理研究所	5100		
陕西师范大学计算机科学学院	210		
韩国大学	60		
台湾大叶大学	120		

轮胎花纹图像由于来源和应用场景特殊,难以大量获取。虽然某些公司有大量数据库,但由于受到专利的保护而没有对学术研究公开。高校的研究学者所建的轮胎图像数据库情况也各不相同。例如,西安邮电大学图像与信息处理研究所依托于公安部共建的重点实验室平台,科研人员在不同时间、不同环境(光照及气候)及不同拍摄条件下(距离、尺度、仿射角)采集轮胎花纹图像 5100 幅<sup>[40]</sup>。陕西师范大学计算机科学学院郭春、艾玲梅等学者通过第三方单位提供和自建的方式,建立了轮胎表面花纹图像数据库,该数据库包含 210 幅的图像。韩国大学的科研团队建立了 10 类共计 60 幅的轮胎表面花纹数据库。台湾大叶大学建立了 15 类共计 120 幅的轮胎花纹图像数据库。

## 3 轮胎花纹图像检索性能的评价指标

图像检索算法以准确、高效地检索出符合用户要求的图像为目的,以检索结果评价机制来评价检索性能的优劣。西北大学计算机科学系可视化技术研究组所韦娜等学者详细阐述了图像检索性能评价指标<sup>[41]</sup>,将图像检索性能评价准则划分为:有效性(Effectiveness)、效率(Efficiency)、灵活性(Flexibility) 3 种。其中,有效性代表检索出与示例图像相匹配的成功率即检索精度,效率表示图像检索的速度,灵活性表示对不同应用场景的适应性。

由于轮胎花纹检索的数据源特殊,目前尚无统一的轮胎花纹图像检索性能评价指标和标准实验测试参数。本节将文

献中常用的图像检索性能评价指标分为4种,如图2所示。

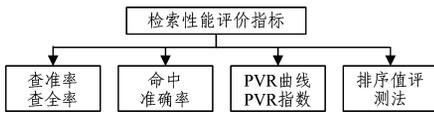


图2 检索性能评价指标

Fig.2 Retrieval performance evaluation parameters

### 3.1 查准率和查全率

查准率(Precision)和查全率(Recall)是应用得最为广泛的两个图像检索性能评价指标<sup>[17]</sup>。查准率是指用户提交查询示例图片后,检索系统返回的与示例图像相关的数目占所有返回图像的百分比。该百分比的数值越大说明检索算法的查准率越高,也就意味着系统的检索性能越好。查全率指检索系统返回的与示例图像相关的数目占数据库中所有相关图像数目的百分比。查全率反映检索算法的全面性,而查准率反映检索算法的准确性<sup>[42]</sup>,因此可以用查全率和查准率来评价检索系统的有效性。

设 $a$ 为查询结果中实际相关的图像数目, $u$ 为查询结果中实际不相关的图像数目, $v$ 为数据库中未被检索到但实际相关的图像数目,则查准率和查全率可表示如下:

$$(precision) = \frac{a}{a+u} \quad (1)$$

$$R(recall) = \frac{a}{a+v} \quad (2)$$

用户在评价检索性能时,根据检索系统返回的结果计算查准率和查全率。通常,查准率和查全率越高,表明检索算法的性能越好。但值得注意的是,一般情况下查准率和查全率是矛盾关系,很难有一个检索系统使得查准率和查全率的效果同时理想,通常是在两者之间寻找一个最理想的结合点,该结合点可以简单地认为实现了较好的检索性能。

通常情况下,将多幅查询图像检索结果的平均查准率和平均查全率作为最终指标<sup>[43]</sup>。查准率-检索图像数量曲线图和查全率-检索图像数量曲线图也是描述检索算法性能的常用指标,以便于对比分析查准率、查全率的变化情况。图3是查准率曲线图。

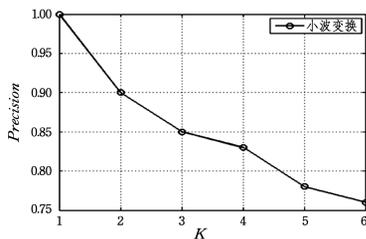


图3 查准率曲线图

Fig.3 Precision curve

### 3.2 命中准确率(Hit accuracy)

在数据库图像划分好类别的前提下,可以用命中准确率来评价检索系统的性能<sup>[15]</sup>。假设图像 $a$ 所属的图像集为 $A$ ,图像经检索之后返回 $T$ 幅图像,其中命中 $A$ 的图像有 $n$ 幅,则检索的命中准确率为:

$$P_T = \frac{n}{T} \quad (3)$$

此外,多幅图像检索的平均命中准确率也常作为评价指标<sup>[44]</sup>,以实现对检索算法性能的评价。

### 3.3 PVR曲线与PVR指数

查准率-查全率(Precision Versus Recall,PVR)曲线是指用查全率 $R$ 作为 $x$ 轴,查准率 $P$ 作为 $y$ 轴绘制而成的曲线,简称PVR曲线<sup>[18]</sup>。PVR指数指PVR曲线分别与两坐标轴围成的面积。假设PVR曲线为 $f(x,y)$ , $f(x,y)$ 分别与 $x$ 轴和 $y$ 轴围成的面积为 $S_f$ , $S_f$ 即为PVR指数。PVR指数越大,检索算法的性能越好<sup>[45]</sup>。图4为PVR曲线和PVR指数的示例图。

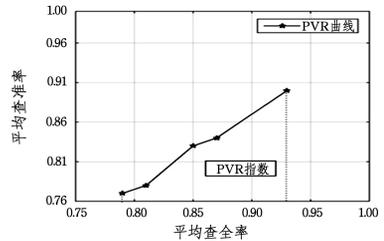


图4 PVR曲线和PVR指数

Fig.4 PVR curve and PVR ratio

### 3.4 排序值评测法(Sort evaluation method)

设 $q$ 为待检索的示例图像, $g_1, g_2, \dots, g_n$ 为检索算法检索之后返回的与 $q$ 相关的图像,设 $rank(g_i)$ ( $i=1, 2, \dots, n$ )为图像 $g_i$ 在检索得到的图像序列中所对应的排序值,则可以通过以下两个指标对检索系统的性能进行评价。

$$r\text{-measure} = \frac{\sum_{i=1}^n rank(g_i)}{n} \quad (4)$$

$$p\text{-measure} = \frac{\sum_{i=1}^n rank(g_i)}{n} \quad (5)$$

式(4)中, $r\text{-measure}$ 定义了所有相关图像在返回的检索结果中的平均排序。可以看出,该指标值与检索算法的准确率成反比。式(5)中, $p\text{-measure}$ 定义了排列位置靠前的相关图像的紧密程度<sup>[10]</sup>,与 $r\text{-measure}$ 指标相反,该值与检索结果成正相关,当所有相关图片都排在返回图像的前面时,该指标值为1。

本节总结了TPIR领域现有文献中的4种检索性能评价参数,其中查准率、查全率和PVR曲线是学者们普遍采用的,但目前该领域尚无标准的性能测试指标。

## 4 轮胎花纹图像检索算法

本节在系统梳理相关文献的基础上,从轮胎花纹低层(纹理)特征提取和高层语义特征提取两个方面对TPIR技术的成果和现状进行描述。

### 4.1 轮胎花纹低层特征

轮胎花纹图像检索通常基于纹理特征进行。纹理特征是一种反映图像中同质现象的低层视觉特征,能够很好地表征图像。本节将轮胎花纹图像纹理特征提取方法分为空间域纹理特征、变换域(频域)纹理特征、空间域和频域相结合的纹理特征3类。

#### 4.1.1 空间域纹理特征

轮胎花纹图像的性质较为特殊,具有纹理复杂、颜色特征

单一、边缘清晰、不同型号的轮胎花纹的视觉效果相似的特点。学者们大多是在经典的纹理特征提取算法的基础上进行改进,以使其更加适合轮胎花纹图像。比如对 Tamura 特征<sup>[10,14,46]</sup>、尺度不变特征(Scale Invariant Feature Transform, SIFT)<sup>[13,15]</sup>、灰度共生矩阵(Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM)<sup>[16]</sup>等进行改进,设计出适用于轮胎花纹图像的纹理特征提取算法。

Tamura 纹理特征是 Tamura 等学者以人类对纹理视觉感知的心理学研究为基础而提出的,是一种经典的空间域纹理特征描述方法。该纹理特征共包含 6 个分量,分别对应于心理学角度上的 6 种属性:粗糙度(Coarseness)、对比度(Contrast)、方向度(Directionality)、线性度(Linearity)、规整度(Regularity)、粗略度(Roughness)。Tamura 纹理特征被广泛应用于图像检索领域。

针对 Tamura 特征分量中的粗糙度、对比度和方向度在描述图像纹理时存在大量信息丢失的问题,文献[46]对粗糙度、方向度和对比度特征进行改进,提出利用粗糙度直方图代替粗糙度,利用边缘角度直方图代替方向度的思想。通过直方图刻画图像内容要比单一数据更为全面,在数据库上的测试结果证明了其查准率高于经典 Tamura 特征。由于 Tamura 特征中的对比度为一个全局变量,只能反映图像整个区域的亮度统计分布,不能有效地对图像的局部亮度信息进行描述,因此文献[11]提出一种利用强度直方图的统计矩提取图像特征的算法,以获取更多信息。文中利用了轮胎花纹图像亮度直方图的统计特性(均值(Mean value)、标准偏差(Standard deviation)、平滑度(Smoothness)、三阶矩(Third moment)、一致性(Consistency)、熵(Entropy)),增加了描述图像局部信息的参数,更充分地利用了图像的灰度级信息。在轮胎表面花纹图像数据库上的实验结果证明其查准率高于文献[46]提出的算法。

#### 4.1.2 变换域纹理特征

对轮胎花纹图像进行某种变换,在频域中提取纹理特征也是学者们常用的方法。如采用曲波变换(Curvelet transform)<sup>[4]</sup>、Radon 变换<sup>[12]</sup>、二维快速傅里叶变换(Two-Dimensional Fast Fourier Transforms, 2D-FFT)<sup>[25]</sup>、离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)<sup>[47]</sup>等方法计算变换域的统计量来获得纹理特征。

小波变换具有良好的时域和频域局部化性能,是分析图像特征的良好方法。当图像中纹理基元尺寸较小或者图像的对比度较低时,所采用的分辨率较高;相反,当基元尺寸较大或者图像的对比度较高时,采用的分辨率则较低<sup>[48]</sup>,非常适合纹理特征的提取。为了便于分析和简化数值计算量,通常将小波变换进行离散化处理从而得到离散小波变换进行分析。文献[47]提出利用小波变换分解并求得各子带小波系数的均值和方差构成纹理特征向量进行图像检索的思想。

离散小波分解在下采样时出现的混叠项造成该变换具有平移敏感性,即图像较小的平移会导致子带系数发生较大的变化,且小波变换不具有旋转不变性,影响了轮胎花纹检索的精度。为了弥补上述缺陷,科研学者研究了由小波变换衍生而来的以各种不同小波为基础的纹理特征提取算法。文献

[49]在离散小波变换的基础上提出双树复小波变换(Dual-Tree Complex Wavelet Transform, DT-CWT),该变换具有可以重构、平移不变、多方向选择等特性。该算法的解析方向多,并且避免了小波变换在下采样时由于频带相交而产生的混叠效应,这种混叠效应是传统小波变换不具备平移不变性的根本原因。文献[12]提出了一种 Radon 变换和 DT-CWT 结合的轮胎花纹检索算法。该算法利用 Radon 变换的旋转不变性和 DT-CWT 的平移不变性,解决了传统小波变换、脊波变换对平移和旋转敏感的问题。该方法首先对图像执行 Radon 变换,接着对 Radon 域的系数进行 DT-CWT 并提取每个子带系数的均值和方差并连接为纹理特征向量。实验结果证明,该算法的查准率优于小波纹理特征和脊波纹理特征,降低了图像旋转和平移对检索效果的影响,有效描述了轮胎花纹的纹理特征。该算法的流程如图 5 所示。

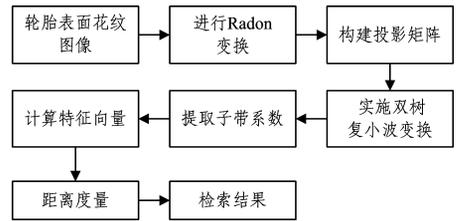


图 5 Randon-DTCWT 算法流程图

Fig. 5 Flow chart of Randon-DTCWT algorithm

文献[4]提出一种基于能量分布的曲波变换(Curvelet Energy Distribution Algorithm, CEDA)纹理特征提取算法。该算法对复杂纹理的解析度较好,可以保证特征向量不因图像旋转而发生变化,具有优异的旋转、平移不变性。对轮胎花纹图像的检索实验结果表明,该算法优于小波变换和曲波变换算法,提高了轮胎花纹检索的有效性。算法步骤为:首先对轮胎花纹图像进行曲波变换,提取变换后子带的均值和方差作为特征值并构成特征向量;然后计算各个子带的能量并进行大小排序,同时对特征向量进行循环位移,使能量最大的子带所对应的特征值位于特征向量首部,从而保证特征向量不因图像旋转而发生变化。其算法流程如图 6 所示。该文献还将轮胎花纹图像根据花纹的趋向性分类为垂直导向型、水平导向型、对角导向型和不规则型 4 种,如图 7 所示。

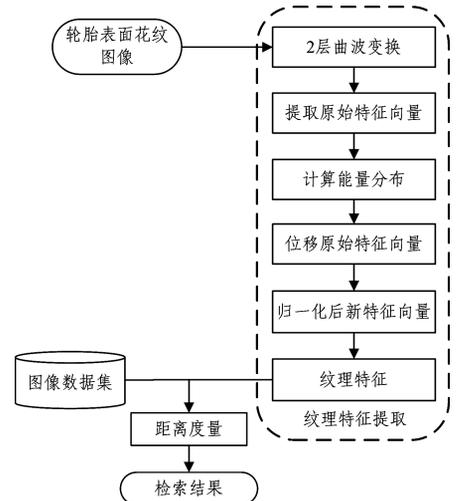


图 6 CEDA 流程图

Fig. 6 Flow chart of CEDA



图7 不同类型的轮胎花纹

Fig. 7 Different types of tire patterns

#### 4.1.3 空间域和变换域结合的纹理特征

文献[16]提出一种离散小波变换和灰度共生矩阵(Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM)特征相融合的轮胎花纹图像检索算法。在小波变换后的低频子带上利用方向测度引入权重因子来提取灰度共生矩阵的6个统计量,用生成的融合特征描述轮胎花纹的纹理构成。该算法弥补了小波变换提取纹理特征缺乏空间分布信息和灰度共生矩阵提取纹理特征缺乏方向细节的不足,算法的具体过程如下:

1)若原始图像为RGB图像,则先将其转换为灰度图像:

$$Gray = 0.3 * R + 0.59 * G + 0.11 * B$$

2)对图像进行二层小波分解,得到对应的1个低频子带和6个高频子带;

3)提取高频子带系数,并对其求均值和方差组成12维的特征向量,记为  $T_1$ ;

4)在低频子带的小波系数构造灰度共生矩阵,角度分别取  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ ,得到描述纹理特征的4个方向,每个方向有6个特征,共计24个特征;

5)求图像的方向测度,并根据方向测度值确定其权重因子,结合步骤4),构成加权后的特征向量  $T_2$ ;

6)将特征向量  $T_1$  与加权后的特征向量  $T_2$  进行融合,可得融合特征向量  $T_3 = [T_1, T_2]$ ;

7)利用特征向量  $T_3$  进行相似性度量,从而完成检索并返回相关图像。

实验结果表明,通过融合小波变换和引入方向测度的加权GLCM算法对轮胎花纹图像提取纹理特征,能够有效提高检索精度,检索结果优于传统的灰度共生矩阵和小波变换算法。

传统SIFT特征对轮胎花纹图像具有较高的检索精度,但由于其计算量大、计算复杂度高,因此检索效率低。文献[13]提出一种结合小波变换改进的SIFT特征提取算法。轮胎花纹图像的纹理细节对应高频信息,SIFT特征展现的正是局部特征细节。而小波变换可以很好地将轮胎花纹图像分解为高频子带和低频近似子带,这样就可以把提取SIFT特征时产生的大量冗余特征点的低频信息置零,利用高频重建原理重构高频图像完成SIFT特征提取。该算法的基本步骤为:先对图像进行二层小波变换,分解出6个高频子带和1个低频子带,将低频子带系数全部置零;再通过小波逆变换进行

图像重构,所得图像就是高频重建图像。对高频重建图像进行SIFT特征点提取构成H-SIFT,经计算得到的SIFT特征点数量降低了71.20%。检索结果表明,该算法的查准率和查全率高于小波纹理特征、Tamura特征;相比SIFT特征,虽然该算法的查准率和查全率较低,但其大大降低了计算复杂度,提高了检索效率。

#### 4.1.4 实验与分析

为了验证传统低层特征在轮胎花纹图像上的表现性能,本文利用经典的DWT特征[47]、HSV特征[50]、GIST特征[51]、LBP特征[52]、HOG特征[53]、SIFT特征[54]进行检索实验。由于缺乏标准的轮胎花纹测试数据库,利用CIIP-XUPT团队建立的轮胎花纹图像数据库进行实验。该数据库共有102类,每类50幅共计5100幅轮胎花纹图像。实验所用图像数据例图如图8所示,查准率曲线如图9所示。



图8 轮胎花纹图像例图

Fig. 8 Examples of tire pattern images

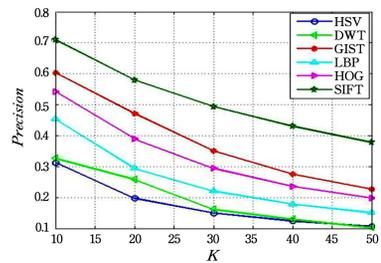


图9 查准率曲线图

Fig. 9 Precision curve

由图9的实验结果可知,在所测试的低层特征中,SIFT特征对于轮胎花纹描述的效果最佳,其次是HOG和GIST。虽然SIFT特征给出了最高的平均查准率,但由于该特征的计算复杂度大、运行时间长,不适用于实时处理。因此,我们也在进行优化SIFT特征算法的实验,并取得了初步成效。

目前,文献中出现的轮胎花纹低层特征提取算法主要是纹理特征提取,也有少数其他类型的轮胎花纹特征,比如文献[5-6]提出的轮胎花纹边界特征提取算法。如果将轮胎花纹纹理特征与其他种类的特征巧妙结合,则能更好地描述轮胎花纹图片的内容,从而进一步提高检索效率。

## 4.2 轮胎花纹高层语义特征

### 4.2.1 高层语义特征提取算法

由于无法从图像的低层特征直接获得人们在花纹检索中理解的语义信息,从而导致所谓的语义鸿沟(Semantic gap)。图像低层特征与高层语义之间存在的“语义鸿沟”严重影响了图像检索的准确率。为了缩小语义鸿沟,学者们常采用机器学习算法进行轮胎花纹图像的高层语义特征分析与识别,进

一步提高轮胎图像的分类精度和检索准确率。主要的机器学习算法有支持向量机(Support Vector Machine, SVM)<sup>[21,23]</sup>、主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)<sup>[24]</sup>、分层模糊匹配分类器(Hierarchical Fuzzy Pattern Matching Classifier, HFPMC)<sup>[26]</sup>等。其基本流程如图 10 所示。

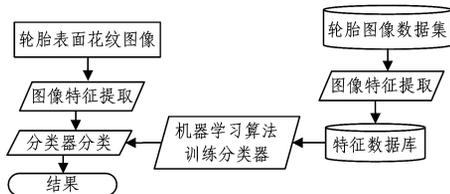


图 10 基于机器学习算法的轮胎花纹图像分类流程图

Fig. 10 Flowchart of tire pattern classification method based on machine learning algorithm

文献[21]提出一种基于非下采样 Contourlet 变换(Non-Subsampled Contourlet Transform, NSCT)和 GLCM 的组合特征提取与多级 SVM 的轮胎花纹图像识别算法。NSCT 具有平移不变性、多方向性和多尺度性等优良特性,能很好地表征轮胎花纹图像的边缘信息,用其提取轮胎花纹的纹理特征能更好地描述图像之间的细微差别。GLCM 能很好地保留图像的统计特征,反映图像在变化幅度、方向、间隔上的综合信息,具有较强的鲁棒性。因此,文献[21]提出利用 NSCT 和 GLCM 提取轮胎花纹图像特征的算法,并将两种算法所提取的特征组合起来作为融合特征。接着,在融合特征中筛选 5 个有效特征作为最终的识别特征。最后,利用 5 个融合特征和基于决策树的 SVM 分类器来实现轮胎花纹图像的识别分类。实验结果表明,该算法所得的轮胎花纹图像特征的分离度高,用多级 SVM 分类器预测的分类效果较为理想,在 210 幅 7 类轮胎花纹图像测试的总识别率高达 99.05%,对轮胎花纹的正确识别及分类具有重要意义。该算法的具体流程如图 11 所示。

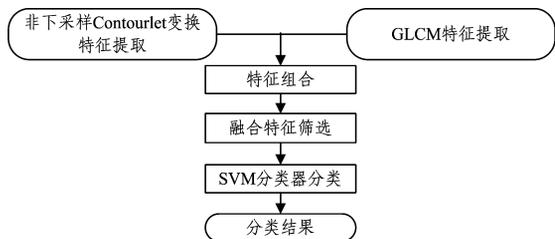


图 11 组合特征提取与 SVM 的轮胎花纹分类流程图

Fig. 11 Flowchart of combination of feature extraction and SVM tire pattern classification

文献[23]提出一种 Gabor 小波变换和 SVM 相结合的轮胎花纹图像识别算法。该算法先对图像进行预处理,以增强轮胎花纹图像的纹理,接着对图像应用 5 个尺度、8 个方向的 Gabor 小波来生成轮胎花纹图像特征,并用主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)在频域中进一步提取特征,然后利用上述特征训练 SVM 模型,对轮胎花纹图像进行分类匹配。将其在 15 类 120 幅的轮胎花纹图像数据库上进行测试,结果表明其准确率为 60.00%。

文献[26]提出一种基于分层模糊匹配分类器(Hierarchical Fuzzy Pattern Matching Classifier, HFPMC)的轮胎花纹

图像分类算法。该算法首先使用模糊 C 均值(Fuzzy C-Means, FCM)聚类算法来构造二元决策树(Binary Decision Tree, BDT),在每个节点处基于聚类有效性,选择能够将标记数据分解成两个不同组的特征点子集。其聚类有效性由两个标准进行评估:1)偏振度;2)某一类的所有样本是否属于同一个簇。然后将具有代表性的特征子集构成的连续节点组合在一起,重构 HFPMC 的层次聚类结构(Hierarchical Cluster Structure, HCS)。采用模糊模式匹配的分层分类器,可以很容易地将设计者的直观认知与分类器结合起来。在每一个层次,利用相应的聚类中心来定义 HFPMC 的参考模糊集和原型。实验结果表明该方法达到了 79.30% 的准确率,因此验证了其对轮胎花纹图像的有效性。

#### 4.2.2 实验与分析

近年来,深度学习技术,尤其是卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)显示出强大的图像表征能力,其内在的层次化迭代学习模式可以得到准确、稳健的高层语义特征以缩小语义鸿沟。CNN 在许多计算机视觉应用中取得了优异成果,如图像超分辨率<sup>[55]</sup>、物体检测<sup>[56]</sup>等。

本文利用卷积神经网络在 CIIP-XUPT 团队所建的轮胎花纹图像数据库上进行实验。实验采用 Caffe 平台的 Alex-Net 神经网络完成。利用 CNN 特征检索的平均准确率为 79.6%。

深度学习技术能够取得显著成果的主要原因在于拥有大量的训练数据集。而对于轮胎花纹图像,由于数据来源特殊,难以获取到大量可训练数据,从而在进行模型训练时神经网络很容易因训练数据不足而导致过拟合问题,影响 CNN 的性能。但由实验结果可以看出,在缺乏大数据的条件下, CNN 依然具有比传统低层特征更强的图像表征能力。

#### 4.3 轮胎花纹图像检索研究的难点分析

轮胎花纹图像检索是与生活切实相关的研究领域,具有重要研究意义。该领域目前的研究难点主要在于大型轮胎花纹图像数据库建设的困难性。由于轮胎花纹图片数据来源特殊,想要获取学术界公开可用的大型数据库存在困难,因此难以充分利用深度学习等需要大量训练数据的优异算法;此外,由于缺乏标准的测试数据库,难以有效集中学术界力量来尽快找到适用于轮胎花纹图像的特征提取及检索算法,因此研究进展较慢。

#### 4.4 小结

本节对文献中现有的 TPIR 技术从轮胎低层纹理特征提取和高层语义分析两个方面进行了归纳介绍,具体如图 12 所示。同时,本文进行了相关实验并分析总结了实验结果。

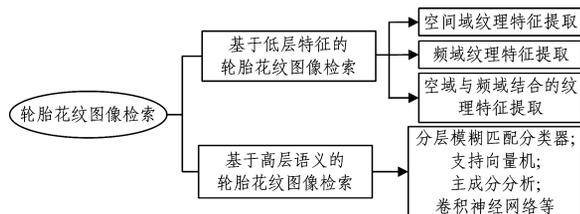


图 12 轮胎花纹图像检索算法总结

Fig. 12 Summary of tire pattern image retrieval algorithms

由于该领域目前缺乏标准测试数据库,我们难以通过实验对不同算法进行公正比较。我们利用 CIIP-XUPT 团队建

立的轮胎花纹图像数据库进行检索实验,总体而言,采用经典的纹理特征进行检索的效果并不理想。通过对经典算法进行改进,设计适用于轮胎图像的纹理特征提取算法提高了 TPIR 的准确率。此外,采用 PCA, SVM 等机器学习算法能进一步缩短语义鸿沟,提高轮胎花纹的检索精度。深度学习技术近年来在图像分类方面取得了很好的表现<sup>[57-58]</sup>,我们采用深度学习方法进行实验,得到了较为满意的结果。

## 5 轮胎花纹图像检索的研究趋势

结合笔者近年来在现勘图像检索领域的研究经验以及公安行业的实际应用需求,本节探讨 TPIR 领域仍需解决的技术难题,并指出未来的研究方向。

### 5.1 建立标准测试数据库与检索性能评价指标

轮胎花纹图像数据较为特殊,难以大量获取。根据调研,目前我国尚未建立标准、完善、公认的轮胎花纹图像测试数据库。研究人员也都是使用团队自行建设的不同类型、不同规模的轮胎花纹图像数据库进行科研。为了进一步集中学者们的研究力量,促进轮胎花纹图像检索技术的发展,并真正将科研用于实际应用需求,建设标准的轮胎图像数据集是当前的一项重要工作。此外,虽然图像检索技术发展得较为成熟,但依然缺乏普遍接受的性能评价标准,以至于无法公正地比较不同算法和检索系统的性能。制定公认的检索性能评价指标,以提供通用的量化评测尺度,也是推动该领域发展的首要任务。

### 5.2 深度学习技术在轮胎花纹图像检索中的应用

2012年,Hinton等在ImageNet大规模视觉识别挑战赛(Large Scale Visual Recognition Challenge, LSVRC)上,使用卷积神经网络(Convolution Neural Network, CNN)进行图像分类,将 Top5 的错误率由 26.00% 降至 15.30% 并荣获冠军。2014年,Babenko等<sup>[59]</sup>验证了 Deep CNN 在图像检索方面与传统图像特征相比具有很大优势。随着深度学习在各领域取得惊人的成绩,近年来,深度学习技术在计算机视觉应用领域的研究已成为热点,但在轮胎花纹图像检索、分类的研究中尚无相关文献使用深度学习技术。因此,研究深度学习技术在轮胎花纹图像数据库检索中的应用具有重要的实际应用价值。

此外,我们已经利用深度学习方法进行轮胎花纹图像检索实验并取得了较好的结果。但由于轮胎数据库的数量规模较小,神经网络无法得到充分训练,难以发挥 CNN 的强大性能。因此,笔者所在团队正在利用迁移学习<sup>[60-61]</sup>方法来弥补训练数据不足的缺陷,目前已经取得一定成效。

### 5.3 轮胎压痕图像与轮胎花纹图像检索的结合

在实际破案过程中,刑侦人员往往需要利用轮胎在地面的压痕信息来进行车辆溯源。同样,根据压痕信息来判别车辆类型也是保险公司等机构的切实需求。因此,如何利用轮胎压痕的纹理信息和轮胎表面花纹之间的匹配关系与相关性是一个具有实际应用价值、前景广泛的研究方向。这个任务的难点在于随着压痕载体(如土地、雪地等)和天气等环境的不同,轮胎压痕纹理信息也会与原始轮胎花纹有所差别,导致印迹不完整、不清楚,甚至出现重叠的现象。因此克服这一难点,尽可能地利用已有信息来挖掘有用线索将是该领域的研究重点<sup>[62]</sup>。

**结束语** 轮胎花纹图像检索是一个具有实际应用价值的重要科研领域。本文围绕轮胎花纹低层特征提取和高层语义分析两项关键技术归纳总结了该领域的研究成果。此外,介绍了现有文献中的轮胎花纹数据库以及检索性能评价指标。最后,指出该领域几个有潜力的研究方向。

## 参考文献

- [1] LIU Y, FAN J L, LI Z, et al. Case study on content-based image retrieval for crime scene investigation image database [J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2015, 20(3): 11-20. (in Chinese)  
刘颖, 范九伦, 李宗, 等. 现勘图像数据库检索技术实例探讨[J]. 西安邮电大学学报, 2015, 20(3): 11-20.
- [2] ZHANG Q. The development of image retrieval in public security image investigation [J]. China Security & Protection, 2015 (19): 59-62. (in Chinese)  
张琪. 图像检索在公安图像侦查领域的发展[J]. 中国安防, 2015 (19): 59-62.
- [3] QIAN B Z. China's first tire pattern patent database began to operate [J]. Rubber Science and Technology, 2015, 13(1): 47. (in Chinese)  
钱伯章. 国内首个轮胎花纹专利数据库开始运营[J]. 橡胶科技, 2015, 13(1): 47.
- [4] LIU Y, YAN H Y. A rotation-invariant texture feature extraction method for tire pattern image [J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2015, 20(6): 10-13. (in Chinese)  
刘颖, 燕皓阳. 具有旋转不变性的轮胎纹理特征提取[J]. 西安邮电大学学报, 2015, 20(6): 10-13.
- [5] ZHANG R T, DONG Y D, SONG Z H, et al. Study on the extraction of boundary features of tread patterns [J]. Tire Industry, 2017, 37(1): 18-23. (in Chinese)  
张荣团, 董玉德, 宋忠辉, 等. 轮胎胎面花纹边界特征提取方法研究[J]. 轮胎工业, 2017, 37(1): 18-23.
- [6] DONG Y D, SONG Z H, CHEN J F, et al. Extraction of boundary features of tread patterns from tire point cloud [J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2017, 29(5): 939-949. (in Chinese)  
董玉德, 宋忠辉, 陈进富, 等. 面向轮胎点云的胎面花纹边界特征提取[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(5): 939-949.
- [7] LIU Y, ZHANG D S, LU G J, et al. A survey of content-based image retrieval with high-level semantics [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(1): 262-282.
- [8] LIU Y, HUANG Y, GAO Z M. Research on feature extraction and similarity measure for crime scene investigation image retrieval [J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2014, 19(6): 11-16. (in Chinese)  
刘颖, 黄源, 高梓铭. 刑侦图像检索中的特征提取及相似性度量研究[J]. 西安邮电大学学报, 2014, 19(6): 11-16.
- [9] LIU Y, FAN J L. A survey on state-of-the-art techniques in content-based image retrieval [J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2012, 17(2): 1-8. (in Chinese)  
刘颖, 范九伦. 基于内容的图像检索技术综述[J]. 西安邮电大学学报, 2012, 17(2): 1-8.
- [10] LIU Y, LI Z, GAO Z M. An improved texture feature extraction

- method for type tread patterns[C]//Intelligence Science and Big Data Engineering. Berlin Heidelberg: Springer Press, 2013: 705-713.
- [11] LIU Y, LI Z. Study on texture feature extraction from forensic images with watermark[C]//Industrial Electronics and Applications. Hangzhou: IEEE Press, 2014: 1471-1475.
- [12] YAN H Y, LIU Y. An improved texture feature extraction method based on Radon transform[C]//Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design. Hangzhou: IEEE Press, 2014: 481-485.
- [13] WANG S, LIU Y, LI D X, et al. An improved SIFT feature extraction method for type tread patterns retrieval[C]//Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design. Hangzhou: IEEE Press, 2014: 539-543.
- [14] LI Z, LIU Y, LI D X. A new texture feature extraction method for image retrieval[C]//International Conference on Intelligent Control & Information Processing. Beijing: IEEE Press, 2013: 482-486.
- [15] WANG S. Study on type trend patterns similarity retrieval based on SIFT feature [D]. Xi'an: Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2015. (in Chinese)  
王帅. 基于 SIFT 特征的轮胎花纹图像相似性检索技术研究[D]. 西安: 西安邮电大学, 2015.
- [16] JIA S Y, MA J T. Tire pattern retrieval based on wavelet transform and gray level co-occurrence matrix [J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(6): 210-213. (in Chinese)  
贾世英, 马婷婷. 基于小波变换和灰度共生矩阵的轮胎花纹检索[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(6): 210-213.
- [17] LIU Y, YAN H Y, LIM K P. Study on rotation-invariant texture feature extraction for tire pattern retrieval [J]. Multidimensional Systems & Signal Processing, 2017, 28(2): 757-770.
- [18] LI Z. Study on texture feature extraction for tire tread pattern Retrieval [D]. Xi'an: Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2014. (in Chinese)  
李宗. 用于轮胎花纹检索的纹理特征提取算法研究[D]. 西安: 西安邮电大学, 2014.
- [19] YAN H Y. Study on texture feature extraction for watermarked forensic image [D]. Xi'an: Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2016. (in Chinese)  
燕皓阳. 含有隐藏信息的刑侦图像纹理特征提取算法研究[D]. 西安: 西安邮电大学, 2016.
- [20] AI L M, GUO C. Tire image enhancement based on frequency division and singular value decomposition [J]. Application Research of Computers, 2012, 29(3): 1178-1180. (in Chinese)  
艾玲梅, 郭春. 基于分频和奇异值分解的轮胎图像增强方法[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(3): 1178-1180.
- [21] AI L M, GUO C. Tire tread pattern recognition based on composite feature extraction and hierarchical support vector machine [J]. Computer Engineering and Application, 2013, 49(20): 179-182. (in Chinese)  
艾玲梅, 郭春. 基于组合特征提取与多级 SVM 的轮胎花纹识别[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(20): 179-182.
- [22] QIAO L, LIU J H, XUE Y F. X-ray tire image enhancement processing research [J]. Journal of Changzhi University, 2012, 29(5): 27-29. (in Chinese)  
乔丽, 刘继华, 薛艳峰. X 光轮胎图像的增强处理研究[J]. 长治学院学报, 2012, 29(5): 27-29.
- [23] HUANG D Y, HU W C, WANG Y W, et al. Recognition of tire tread patterns based on gabor wavelets and support vector machine[C]//International Conference on Computational Collective Intelligence. Berlin Heidelberg: Springer Press, 2010: 92-101.
- [24] MICHALÍKOVÁ A, VAGAČ M. A tire tread pattern detection based on fuzzy logic[C]//Flexible Query Answering Systems. Ghent: Springer Press, 2015: 381-388.
- [25] COLBRY D. Pattern recognition for classification and matching of car tires [J]. Tire Science & Technology, 2005, 33(1): 2-17.
- [26] JUNG S W, BAE S W, PARK G T. A design scheme for a hierarchical fuzzy pattern matching classifier and its application to the tire tread pattern recognition [J]. Fuzzy Sets & Systems, 1994, 65(2-3): 311-322.
- [27] THALI M J, BRAUN M, BRÜSCHWEILER W, et al. Matching tire tracks on the head using forensic photogrammetry[J]. Forensic Science International, 2000, 113(1): 281-287.
- [28] CHEN Q, LI J, WU X, et al. Tyre imprint discernment algorithm and example analysis [J]. Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition, 2005, 35(1): 39-43. (in Chinese)  
陈强, 李江, 吴想, 等. 轮胎印痕识别算法及实例分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2005, 35(1): 39-43.
- [29] CHEN Q, LI J, WU X, et al. Tire imprints identification based on wavelet network [C]//2004 International Symposium on Road Safety. Beijing: China Communications Press, 2004: 431-434. (in Chinese)  
陈强, 李江, 吴想, 等. 基于小波网络的轮胎印痕识别[C]//2004 国际公路安全研讨会. 北京: 人民交通出版社, 2004: 431-434.
- [30] YU Q. Research on scene tire tread pattern retrieval algorithm [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015. (in Chinese)  
于清. 现场轮胎痕迹花纹检索算法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
- [31] ZHOU Q Z. Identification research for scene tire marks of traffic accident [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)  
周奇智. 交通事故现场轮胎痕迹的鉴别研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [32] WANG Z, WANG Y P, LI S W. Image matching algorithm for tire impression based on SIFT-Gabor transform[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(2): 291-297.
- [33] LIN L, SUN J, WANG Z, et al. Recognition method and application to classify a tire image combined curve evolution and characteristic matching [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12): 56-60.
- [34] WEI D, PHLYPPO R, ADALI T. Adaptive feature split selection for co-training: Application to tire irregular wear classification [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Vancouver: IEEE Press, 2013: 3497-3501.
- [35] ZHANG C, CHENG Y H. Modified threshold algorithm for feature extraction of tyre surface wear [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(2): 57-61. (in Chinese)  
张超, 程荫杭. 改进阈值法的轮胎表面磨损的特征提取[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(2): 57-61.

- [36] ZHANG C, CHENG Y H. A hybrid template match approach based on wavelet analysis and threshold segmentation for detecting tire surface wear [C]// IEEE International Conference on Control and Automation. Guangzhou: IEEE Press, 2007: 1079 - 1084.
- [37] ZHANG C. Research on graphical analysis method for tyre wear [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)  
张超. 轮胎磨损图形化分析的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [38] BULAN O, BERNAL E A, LOCE R P, et al. Tire classification from still images and video [C]// International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Anchorage: IEEE Press, 2012: 485-490.
- [39] Tire Rack in USA. Tire Image Database [EB/OL]. (2016-11-15). <http://www.Tirerack.com>.
- [40] LIU Y, HU D, FAN J L, et al. Multi-feature fusion for crime scene investigation image database retrieval [C]// The International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications. Sydney: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2017.
- [41] WEI N, GENG G H, ZHOU M Q. An overview of performance evaluation on content-based image retrieval [J]. Journal of Image Graphics, 2004, 9(11): 1271-1276. (in Chinese)  
韦娜, 耿国华, 周明全. 基于内容的图像检索系统性能评价[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(11): 1271-1276.
- [42] LIU Y, HU D, FAN J L. A survey of crime scene investigation image retrieval [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(3): 761-768. (in Chinese)  
刘颖, 胡丹, 范九伦. 现勘图像检索综述[J]. 电子学报, 2017, 45(3): 761-768.
- [43] MULLER H, MULLER W, SQUIRE D. A web-based evaluation system for CBIR [C]// ACM Workshops on Multimedia: Multimedia Information Retrieval. New York: ACM, 2001: 50-54.
- [44] LIU X H. Research on the key problems of image retrieval [D]. Changsha: Central south University, 2011. (in Chinese)  
刘小红. 图像检索的关键问题研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [45] DONG W J, ZHOU M Q, GENG G H, et al. Image retrieval technique based on content [J]. Computer Engineering, 2005, 31(10): 162-163. (in Chinese)  
董卫军, 周明全, 耿国华, 等. 基于内容的图像检索技术研究[J]. 计算机工程, 2005, 31(10): 162-163.
- [46] HAO Y B, WANG R L, MA J, et al. Image retrieval based on improved Tamura texture features [J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(4): 136-138. (in Chinese)  
郝玉保, 王仁礼, 马军, 等. 改进 Tamura 纹理特征的图像检索方法[J]. 测绘科学, 2010, 35(4): 136-138.
- [47] DANG N, HU F M, CAO Y. Image retrieval based on wavelet transform [J]. Electronic Science & Technology, 2012, 25(12): 137-140. (in Chinese)  
党妮, 胡方明, 曹越. 基于小波变换的图像检索技术[J]. 电子技术, 2012, 25(12): 137-140.
- [48] HUANG X. Application of wavelet transform on multimedia image retrieval [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese)  
黄铨. 小波变换在多媒体图像检索中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [49] SELESNICK I W, BARANIUK R G, KINGSBURY N C. The dual-tree complex wavelet transform [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(6): 123-151.
- [50] SHEN X M, ZHOU J X, XU T W. Minority costume image retrieval by fusion of color histogram and edge orientation histogram [C]// International Conference on Computer and Information Science. Shanghai: IEEE Press, 2016: 1-7.
- [51] DESAI R, SONAWANE B. Gist, HOG, and DWT-Based Content-Based Image Retrieval for Facial Images [C]// International Conference on Data Engineering and Communication Technology. Berlin: Springer Press, 2017: 297-307.
- [52] OJALA T, PIETIKAINEN M, HARWOOD D. Performance evaluation of texture measures with classification based on Kullback discrimination of distributions [C]// International Conference on Pattern Recognition, Quebec. Canada: IEEE Press, 2002: 582-585.
- [53] DALAL N, TRIGGS B. Histograms of Oriented Gradients for Human Detection [C]// IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. San Diego: IEEE Press, 2005: 886-893.
- [54] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [55] DONG C, CHEN C L, HE K, et al. Image super-resolution using deep convolutional networks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016, 38(2): 295-307.
- [56] SZEGEDY C, TOSHEV A, ERHAN D. Deep neural networks for object detection [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2013, 26: 2553-2561.
- [57] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks [C]// International Conference on Neural Information Processing Systems. Nevada: Neural Information Processing System Foundation, 2012: 1097-1105.
- [58] LIMA E, SUN X, DONG J, et al. Learning and transferring convolutional neural network knowledge to ocean front recognition [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(3): 354-358.
- [59] BABENKO A, SLESAREV A, CHIGORIN A, et al. Neural codes for image retrieval [C]// European Conference on Computer Vision, 2014: 584-599.
- [60] PAN S J, YANG Q. A survey on transfer learning [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2010, 22(10): 1345-1359.
- [61] XIE M, JEAN N, BURKE M, et al. Transfer learning from deep features for remote sensing and poverty mapping [C]// The AAAI Conference on Artificial Intelligence. Arizona: AAAI press, 2016: 3929-3935.
- [62] WANG Z, LI D. A review of inspection and identification techniques for vehicle tire traces [J]. Highways & Automotive Applications, 2009(2): 50-53. (in Chinese)  
王震, 李迪. 车辆轮胎痕迹检验鉴定技术研究综述[J]. 公路与汽车, 2009(2): 50-53.