

## 融合多特征与格式塔理论的路面裂缝检测

徐 威, 唐振民\*, 徐 丹, 吴国星

(南京理工大学计算机科学与工程学院 南京 210094)  
(njjust\_cst\_xuwei@163.com)

**摘 要:** 路面裂缝常常混杂着随机的路面颗粒纹理和自然环境下的多种干扰, 基于单一特征的检测方法无法较为准确地提取裂缝, 为此提出一种多特征融合与格式塔理论相结合的路面裂缝检测算法. 将多尺度局部区域中裂缝的灰度差异、出现概率以及边缘特性作为低层显著特征, 根据裂缝纹理的不均匀性, 结合裂缝不规则曲线结构的空间延续性, 提出一种新的纹理各向异性度量方式(LFIA), 以高效削弱噪声点与伪裂缝的干扰; 然后引入格式塔理论中的相似性、接近性和完整性原则, 采用迭代剪裁预分割 LFIA 图, 基于区域内部以及区域间连接度的裂缝空间一致性增强策略, 突出裂缝. 在收集的各类裂缝图像数据库上的实验结果表明, 该算法抗噪性能好、鲁棒性强; 裂缝提取的准确性、完整性要优于已有的算法.

**关键词:** 裂缝检测; 多尺度低层特征; 纹理不均匀性; 纹理各向异性; 格式塔理论  
**中图法分类号:** TP391

## Integrating Multi-Features Fusion and Gestalt Principles for Pavement Crack Detection

Xu Wei, Tang Zhenmin\*, Xu Dan, and Wu Guoxing

(School of Computer Science & Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

**Abstract:** Pavement cracks are often mixed with random particle textures on road surface and a variety of interference under natural environment, results in the crack detection method based on single feature cannot recognize real crack accurately. Therefore, this paper presents a novel pavement crack detection method through integrating multi-features fusion and Gestalt principles. It extracts the intensity differences, the probability of occurrence and edge property of cracks in multi-scale local regions as low-level salient features firstly. Then, according to the texture inhomogeneity and the spatial continuity of the irregular curvilinear structures of cracks, a novel texture anisotropy measure method (LFIA) is presented, which can weaken the disturbance of noisy points and pseudo-crack fragments efficiently. Based on the similarity, proximity and integrity principles of Gestalt theory, this paper adopts iterative clipping method to pre-segment LFIA map and proposes a crack spatial consistency enhancement strategy based on intra-regional and inter-regional connectivity to extract cracks. The experimental results of various collected pavement crack image database show the outstanding anti-noise performance and robustness. The precision and recall of our method is significantly superior to several existing conventional algorithms.

**Key words:** crack detection; multi-scale low-level features; texture inhomogeneity; texture anisotropy; Gestalt principles

收稿日期: 2013-10-23; 修回日期: 2014-01-02. 基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90820306). 徐 威(1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为图像处理、计算机视觉; 唐振民(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 会员, 论文通讯作者, 主要研究方向为图像处理技术、智能机器人与智能检测; 徐 丹(1981—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为目标检测与模式识别、计算机视觉; 吴国星, (1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为机器学习、目标检测.

为了替代传统主观性强、效率低下的人工路面病害检测,基于数字图像处理的智能检测系统被越来越多的应用,为结构化道路的高效管理和修复提供决策依据。而路面裂缝由于不规则性、特征的不一致性以及路面环境的复杂多样,其自动检测依然是具有挑战性的问题<sup>[1]</sup>。

采用模式分类的方法区分有裂缝和无裂缝区域被广泛使用<sup>[2-3]</sup>。Chou 等<sup>[2]</sup>计算多种裂缝的不变矩并结合模糊集理论提取局部区域特征,利用 BP 神经网络进行分类。文献[3]构造局部图像的二维特征(均值和方差)空间,采用非监督学习的思想,尝试层次聚类、K 均值聚类、高斯混合模型以及 Parzen 窗口概率密度估计等不同方法区分裂缝块与背景。此类方法检测结果虽然准确率较高,但基于图像块而非像素,且通常假设路面光照均匀,裂缝对比度明显。

考虑像素级精度的裂缝检测,裂缝灰度比周围背景低,各种基于此特征的阈值分割策略被提出。文献[4]根据存在裂缝的图像分块的均值和方差的差异,提出了迭代剪裁的分割方法(iterative clipping method, ICM);文献[5]提出了自适应、多尺度滤波结合马尔科夫随机场的裂缝图像分割算法;Li 等<sup>[6]</sup>分析了裂缝及其周边像素在直方图中的统计特征,提出了基于邻域相异直方图的最优阈值分割。这些方法忽略了路面颗粒、阴影等与裂缝灰度接近的大量随机噪声。

为了克服以上缺点,基于分割后空间分布特征的裂缝提取方法被广泛采用。文献[7]根据局部裂缝的线性特征、连接度、合并距离等特征滤除噪声,保留裂缝;Zou 等<sup>[8]</sup>用邻域灰度差异分割裂缝图像,在

张量投票算法增强裂缝区域后,采用最小生成树算法在构建的基于图的搜索空间中提取裂缝。此类方法在预分割后,将裂缝检测作为去噪过程,时间复杂度相对较高,且过于依赖分割的准确性。

裂缝具有典型的不规则曲线结构,但利用边缘信息的算法,如 Wavelet 变换<sup>[9]</sup>往往缺失裂缝的细节信息,非下采样 contourlet 变换从频域角度增强较弱对比度的细小裂缝<sup>[10]</sup>,在面积复杂噪声干扰下依旧不能完整地提取裂缝。而文献[11]也从分块直方图、全局频域以及曲线延伸性角度刻画裂缝点的显著性,却忽略了裂缝整体灰度的不一致性。

而从纹理角度考虑,路面颗粒形成的随机纹理变化性大,当其尺度与裂缝相近时,LBP(local binary pattern)算子也无法有效刻画裂缝的纹理特性<sup>[12]</sup>。条件纹理各向异性无法表达裂缝不规则的空间连续性,仅对典型的横向和纵向裂缝检测效果较为明显<sup>[13]</sup>。

实际上,由线扫描相机采集的路面图像,多重背景信息(光照不均、路面颗粒纹理等)叠加其中,加之裂缝轻重程度不一,导致其检测困难。因此,本文首先提取了裂缝多种基于像素级的低层特征(灰度差异、出现概率、边缘),区分出潜在裂缝点与大部分背景像素。同时利用纹理不均匀性突出裂缝灰度在周围邻域的变化程度。融合这 2 种信息,由裂缝不规则的延伸特性设计不同的方向性搜索邻域,提出改进的裂缝纹理各向异性的度量(low-level feature inhomogeneity anisotropy, LFIA)。再根据格式塔理论<sup>[14]</sup>使裂缝区域在全局 LFIA 值保持一致性,凸显目标。算法总体流程如图 1 所示。

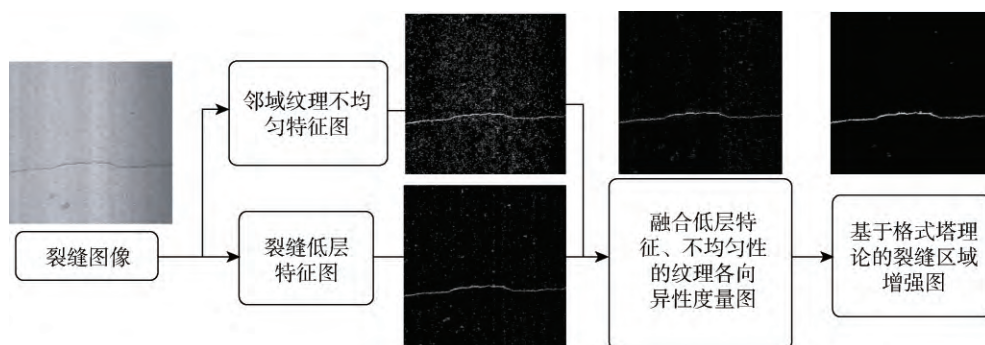


图 1 路面裂缝检测算法流程示意图

## 1 多特征融合的裂缝提取

### 1.1 裂缝低层特征图

裂缝的多种低层特征形成了其视觉上独特的

可区分性。而这些视觉可区分性的刺激构成了自底向上的感知机制,如果能有效地刻画裂缝的多种特征,模拟出视觉感知过程,便可较为准确地定位裂缝。

从局部角度看,狭长的裂缝区域灰度较低.在多尺度局部邻域下刻画裂缝的灰度差异,可避免裂缝全局灰度不一致的影响<sup>[4-6]</sup>,也可削弱不恰当的图像分块造成的偶然性误检<sup>[3]</sup>.由视觉显著性方法<sup>[15]</sup>知:一个像素(区域)的显著性可由它和图中其余部分的颜色对比度定义,因此,裂缝的灰度差异特征可通过它与邻域中其余所有像素的灰度距离量化.与其余像素的灰度距离越大,越有可能是潜在裂缝点,如图2所示.定义图像 $I$ 中某一局部区域的尺度为 $l$ , $l \in [1, 2, \dots, L]$ , $l=1$ 表示最小的尺度,见图2a.与文献[15]相似,点 $x$ 的特征值

$$F(x) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \sum_{j=0}^n f_j^l D^l(I_x, I_j) \quad (1)$$

其中,  $D^l(I_x, I_j)$  为尺度  $l$  下点  $x$  与  $j$  的灰度距离,  $f_j^l$  为尺度  $l$  下灰度  $I_j$  出现的概率.本实验中  $L=4$ , 邻域大小分别为  $16 \times 16$ ,  $32 \times 32$ ,  $48 \times 48$ ,  $64 \times 64$ . 一般而言, 图像  $I$  的灰度范围为  $[0, 255]$ , 即  $n=255$ , 但当  $n>160$  时, 含有裂缝点的概率极低. 因此, 本文采用直方图规定化, 将区间  $[160, 255]$  的像素点的灰度值调整为区间均值.

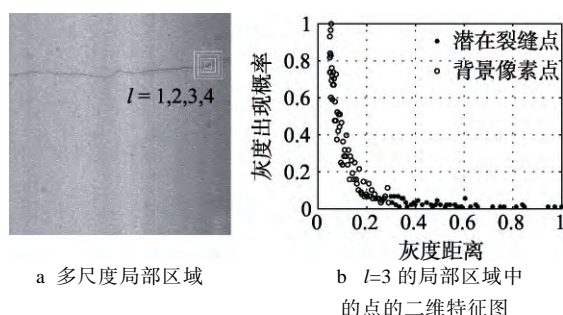


图2 裂缝多尺度低层特征分析

裂缝对应的灰度值在多尺度邻域中出现的次数越少, 越能凸显裂缝的独特性, 即成反比关系, 见图2b. 这也符合视觉注意机制的度量<sup>[16]</sup>, 即当周围邻域逐渐变大时, 某些局部尺度下显著性较强的非目标点出现得越来越频繁, 从而与真正显著的目标区分. 参考文献[16], 点 $x$ 的灰度  $I_x$  在多尺度邻域中出现的概率  $R(I_x)$  可表示为

$$R(I_x) = \frac{\sum_{l=1}^L n_l}{L \times C(I_x^L)} \quad (2)$$

其中  $n_l$  与  $C(I_x^L)$  分别为点  $x$  在尺度  $l$  邻域中和最大尺度  $L$  邻域中出现的次数.

裂缝可看作是不规则的曲线段的集合, 具有

一定的边缘特性. 因此, 本文将图像  $I$  进行简单的直方图均衡化减少光照不均的影响后, 采用 Sobel 算子进行边缘检测. 将点  $x$  在边缘图像中的值作为边缘特征权重  $w_e(x)$ .

结合式(1)(2)和  $w_e(x)$ , 点  $x$  最终的低层特征值为

$$F(x) = \frac{w_e(x)}{R(I_x)} \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^n f_j^l D^l(I_x, I_j).$$

从图1的流程图中可看出, 在低层特征图中裂缝整体被较为均匀的凸显, 而有较大值的噪声点可由下述的纹理描述区分.

## 1.2 裂缝纹理不均匀性度量

考虑像素灰度在其周围空间邻域的变化能够反映裂缝整体纹理特性. 而文献[17]提出的不均匀度量很好地刻画了这种特性, 定义如下: 设点  $x$  的邻域空间为  $N(x)$ , 对于给定的阈值  $\varepsilon \geq 0$ , 其周围像素点属于集合

$$\Omega(x) = \{y \in N(x) : |I(x) - I(y)| > \varepsilon\},$$

$$\overline{\Omega}(x) = \{y \in N(x) : |I(x) - I(y)| \leq \varepsilon\},$$

其中  $N(x) = \{y \in I : |x_m - y_m| \leq k, |x_n - y_n| \leq k\}$ ,  $k \geq 1$  且  $k \in \mathbb{Z}$ .  $m, n$  分别为像素点的横坐标和纵坐标, 而该像素的不均匀性因子(pixel inhomogeneity factor, PIF)定义为

$$\text{PIF}(x) = |\Omega(x)| / |N(x)|,$$

$|\cdot|$  为集合的势. 显然, 当  $\text{PIF}(x) \geq 0.5$  时, 点  $x$  的不均匀性较强, 通常位于目标的轮廓, 如裂缝边缘部分. 而纹理目标中, 不均匀性较强的点的邻接点也具有相似的 PIF 值. 因此, 定义点  $x$  的邻域不均匀性因子(neighborhood inhomogeneity factor, NIF)为

$$\text{NIF}(x) = |\Psi(x)| / |N(x)|,$$

$$\Psi(x) = \{y \in N(x) : \text{PIF}(y) \geq 0.5, x \in I\}.$$

对于裂缝图像, PIF 图、NIF 图能够较好刻画裂缝较暗的不规则线状纹理造成的其与周围像素点的差异. 原图中裂缝沿线灰度值变化性强, 而这些点的 PIF 值、NIF 值保持了一致性, 如图3所示. 当然, 路面颗粒形成的明暗相间纹理的不均匀性也较强, 但结合纹理的各向异性度量时, 可有效削弱这些噪声干扰.

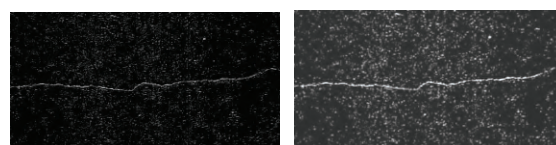


图3 部分裂缝纹理不均匀性度量结果图



### 1.3 融合低层特征、不均匀性的纹理各向异性

条件纹理各向异性(conditional texture anisotropy, CTA)的主要原理是目标沿某一方向的统计特征值与其余方向有很大不同. 假设  $w_1$  代表无裂缝类, 像素点  $x$  具有  $n$  个特征, 每个特征沿  $m$  个不同的方向( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ )计算, 即  $x$  可由特征向量  $F^x = (f_1^x, f_2^x, \dots, f_m^x)$  表述, 其中每个子向量  $f_j^x = (f_{j1}^x, f_{j2}^x, \dots, f_{jn}^x)$ , 共包含沿方向  $j$  的  $n$  个特征, 则点  $x$  的 CTA 值<sup>[13]</sup> 为

$$\text{CTA}(x) = \frac{\max_j \{p(f_j^x | x \in w_1)\} - \min_j \{p(f_j^x | x \in w_1)\}}{\max_j \{p(f_j^x | x \in w_1)\}} \quad (3)$$

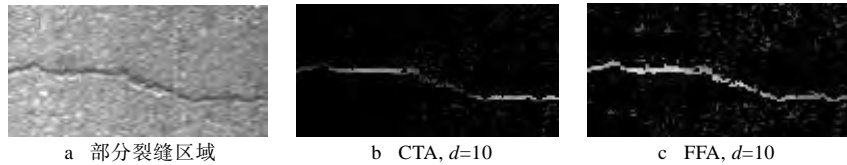


图 4 CTA, FFA 作用于一段不规则裂缝区域的效果图

自由形态的各向异性(free-form anisotropy, FFA)<sup>[18]</sup>将 CTA 中长度为  $d$  的线性邻域拓展为部分重复的具有方向性的邻域小块, 在各个邻域中构建图的模型, 采用 Dijkstra 算法获取中心点与邻域边缘点之间灰度值之和最小的路径, 作为特征提取路径. 其采用的特征与计算公式与式(3)的 CTA 相同. FFA 虽然使得不规则裂缝区域也有较高的取值, 但依旧是在原图像中计算, 时间复杂度高, 路面颗粒纹理的噪声干扰强, 见图 4c.

无论是 CTA 还是 FFA, 仅计算后验概率中最大值与最小值之间的差异, 而真正的裂缝像素点沿某一方向的特征与其余方向均差异较大, 如果能综合考虑各方向的不同, 会更加凸显裂缝. 因此, 我们提出了改进的融合低层裂缝特征与邻域不均匀性的各向异性度量, 即 LFIA.

假设点  $x$  位于裂缝区域, 有别于 CTA 中规范化线性方向邻域以及 FFA 中基于图的搜索邻域, LFIA 将点  $x$  的邻域划分为具有一定方向性的区间  $R_1$  至  $R_8$  (图 5a). 这是因为裂缝本身细长狭窄, 虽然整体呈现不规则的连续性, 但局部范围内增长方向有较高的一致性.

以点  $x$  为中心, 采用广度优先原则, 搜索特征值与  $x$  最为接近的点, 然后以该点为中心, 根据其

对于裂缝图像,  $p(f_j^x | x \in w_1)$  为假设点  $x$  位于无裂缝区域时, 沿着方向  $j$  的特征所代表的后验概率. 传统的 CTA 方法仅采用长度为  $d$  的局部线性方向邻域的均值  $m_j^x$  和标准差  $\sigma_j^x$  作为特征估计此后验概率

$$p(f_j^x | x \in w_1) = (D - \Delta_j) / D;$$

其中,  $D = \sqrt{m^2 + \sigma^2}$ ,  $\Delta_j = \sqrt{(m - m_j^x)^2 + (\sigma - \sigma_j^x)^2}$ ,  $m$  和  $\sigma$  分别为图像全局均值和标准差. 而实际路面背景灰度变化极大, 造成裂缝整体 CTA 值波动较大. 并且裂缝并非严格按照规定的方向生长, 非典型方向裂缝区域的 CTA 值被抑制, 尤其当  $d$  较大时, 这种不良影响加剧, 如图 4b 所示.

所处区域的指导方向, 继续寻找下一个特征值最为相似的点, 直至区域边界(图 5b). 搜索时, 位于区域交界的点同属于这 2 个区域. FFA 需要进行 4 个方向性邻域的最小路径搜索, 即使该邻域中不存在裂缝, 其最小路径还是会被计算, 而与裂缝灰度相似的广泛分布的噪声点会位于该路径上. 而 LFIA 仅在最有可能的裂缝延伸区域搜索, 其方向性约束减少了无效搜索.

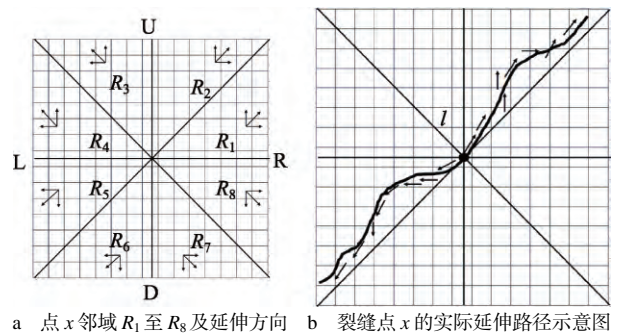


图 5 LFIA 邻域搜索示意图

LFIA 的整体计算过程如下:

Step1. 由原图像计算得到裂缝低层特征图  $F$  和纹理邻域不均匀图  $\text{NIF}(k=3, \epsilon=30)$ .

Step2. 定义  $d$  为线性方向性邻域的长度, 在裂缝低层特征图  $F$  中, 以点  $x$  为中心, 根据图 5 所示搜索方式,

寻找与其特征值  $F(x)$  最为相似的邻接点, 依次生长, 确定最优的延伸路径  $r$ , 并记录实际延伸邻域(图5中为  $R_2$  和  $R_5$ ).

Step3. 合并实际延伸邻域, 记为  $R_0$ ; 计算最优路径  $r$  上的点在  $F$  中的均值, 作为点  $x$  沿邻域  $R_0$  方向的最优特征值  $f_{R_0}(x)$ , 同时计算沿路径  $r$  的各个点的邻域不均匀性度量的均值  $NIF_{R_0}(x)$ . 而其余各邻域由于不存在延伸路径, 将各区域在  $F$  中的均值作为特征值,  $NIF$  均值作为该区域的邻域不均匀性度量.

Step4. 计算点  $x$  各方向性邻域的特征值统计差异, 并以  $NIF$  为权重, 得到 LFIA 值:

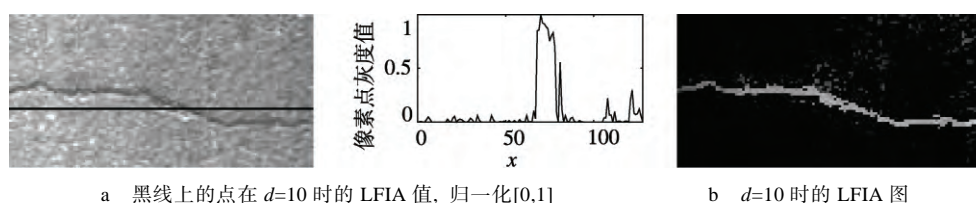


图6 部分裂缝区域在不同  $d$  值下的 LFIA 效果图

## 2 基于格式塔理论的裂缝区域增强

LFIA 有效地根据多尺度局部特征与纹理描述突出了裂缝, 但裂缝整体的 LFIA 值并不完全一致(图7a), 某些较弱裂缝段与背景纹理等噪声容易混淆. 如果直接阈值分割, 易造成裂缝缺失, 噪声干扰强. 而采用最小生成树方式<sup>[8]</sup>提取裂缝, 需在全局空间范围内充分搜索潜在的裂缝点, 时间复杂度较高. 文献<sup>[11]</sup>引入空间权重, 对近邻区域增大影响, 较远区域影响降低, 反而有可能使不显著的裂缝区域显著性更低.

格式塔理论描述了视觉感知系统是如何组织一系列复杂视觉元素形成一个统一的整体, 而不是将这些视觉元素独立对待<sup>[14,19]</sup>. 主要的格式塔原则包括接近性、连续性、相似性、完整性和异常性等. 裂缝在 LFIA 图中全局独特的空间组织在形式视觉上表现为区分性极强的整体性目标, 可通过格式塔原则增强裂缝的 LFIA 值.

本文提出的裂缝区域增强步骤如下:

Step1. 采用类似迭代剪裁的思想<sup>[4]</sup>对 LFIA 图进行预分割. LFIA 图均值为  $\mu$  (初始剪裁值  $C^0=\mu$ ), 标准差为  $\sigma$ , 则第  $n+1$  次迭代后的剪裁值为

$$C^{n+1} = \mu^n + \lambda \sigma^n \quad (4)$$

每次迭代后, 将 LFIA 图中小于剪裁值的点的值调整为剪裁值. 式(4)中  $\mu^n$  与  $\sigma^n$  为第  $n$  次迭代调整后 LFIA 图的均值与标准差.  $\lambda$  控制增长幅度, 本文中  $\lambda=1.5$ . 当满足

$$T = \sum_{i=R_1}^{R_m} f_i(x),$$

$$L(x) = \frac{\max_j \sum_{i \neq j, i=R_1}^{R_m} \text{abs}(f_i(x) - f_j(x)) \times NIF_j(x)}{\max_k (T - f_k(x))},$$

其中, 实际延伸邻域  $R_0$  包含于区间  $[R_1, R_m]$ .

可仅对  $F(x)$  大于裂缝概率图均值的点计算  $L(x)$ , 其余的点由于缺乏局部稀少性和对比度不强, 属于裂缝区域的概率极低,  $L(x)=0$ . 图6为图4中部分裂缝在  $d=10$  时生成的 LFIA 图. 从中可看出, 不规则延伸的裂缝整体被较为均匀地突出, 而背景噪声较少.

$$C^{n+1} - C^n < \alpha,$$

就以  $C^{n+1}$  为阈值分割 LFIA 图(图7b). 在取值范围为  $[0, 255]$  的 LFIA 图中, 差值  $\alpha=8$ .

Step2. 由格式塔理论知, 人们倾向于将颜色(灰度)和空间距离相近的部分自然组合为整体, 形成某种模式, 这就是相似性和接近性, 而与这种模式极不相似的其余部分则表现出异常性<sup>[14]</sup>. 实际目标(裂缝)需要利用这种相似性和接近性增强, 抑制背景. 统计 LFIA 图中点  $x$  沿最优延伸路径  $r$  预分割后取值为 1 (潜在裂缝点) 的个数  $n$ , 定义连接度  $D_x=n/r$ .  $L_{R_0}(x)$  和  $D_{R_0}$  分别为点  $x$  在实际延伸邻域  $R_0$  中除去沿路径  $r$  以外的点的 LFIA 均值和平均连接度. 同样地,  $L_{R_\mu}$  和  $D_{R_\mu}$  为其余所有方向性邻域中点的 LFIA 均值和平均连接度. 则点  $x$  的增强结果为

$$L'(x) = \frac{D_x \times L(x)}{D_{R_0} \times L_{R_0}(x) + D_{R_\mu} \times L_{R_\mu}(x) + \varepsilon} \quad (5)$$

其中  $\varepsilon$  为一常量, 防止分母为 0.

Step3. 当各个区域中存在彼此相似或相属的部分, 容易组合成整体, 即格式塔原则中的完整性<sup>[14]</sup>. Step2 仅考虑局部区域内的相似性和接近性, 而应从区域间的角度考虑, 引入裂缝完整性的度量. 因此, 将 LFIA 图划分为  $(2d+1) \times (2d+1)$  局部区域, 每个区域  $p_k$  中连接度最高的一部分点的均值  $D_k$  作为该区域的连接度, 构造区域连接度图, 见图7c. 以  $p_k$  为中心进行区域增长, 即在它周围  $N \times N$  个区域  $P_N$  中搜寻连接度与  $D_k$  最为接近的邻接区域  $p_l$ , 再以  $p_l$  为中心, 以同样规则依次生长. 将这种传递结果用于调整分块  $p_k$  中点  $x$  的连接度

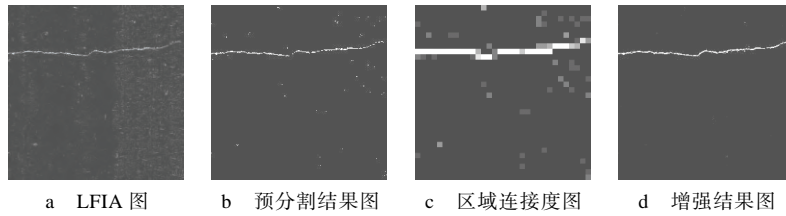


图7 基于格式塔理论的裂缝区域增强步骤示意图

$$D'_x = \begin{cases} \frac{1}{n}(D_x + \sum_{p_l \in P_N} D_l), & \text{如果 } D_k > 0.3 \text{ 且 } \frac{1}{n-1} \sum_{p_l \in P_N} D_l > 0.3 \\ 0, & \text{其余} \end{cases}$$

$n$  为点  $x$  所属分块  $p_k$  在区域增长路径上分块的个数(包括  $p_k$ )。

考虑到裂缝灰度整体的不一致等原因造成部分实际裂缝区域的连接度有时也较低, 连接度调整阈值设置为 0.3。将  $D'_x$  代替  $D_x$  带入式(5)计算, 得到最终的裂缝区域增强结果。

增强后的 LFIA 图中(图 7d), 各种噪声干扰被削弱, 裂缝整体明显突出, 采用简单的阈值分割策略, 即可提取裂缝目标。

### 3 实验结果分析

本实验采用的图像是由线扫描 CCD 相机结合激光辅助照明系统在高速公路上采集, 从中人工筛选出 212 幅存在裂缝病害图像构建裂缝数据库, 包含典型的横向裂缝、纵向裂缝、网状裂缝。有的还存在着较为严重的光照不均(阴影)、明暗条纹、行道线、油斑以及模拟的大面积水渍干扰; 裂缝的轻重程度即使再同一幅图像中也不一致。图像大小为  $512 \times 512$  像素, 与文献[8, 11]一样, 每幅图像由人工标记出真实值(ground truth, GT)以便客观地进行性能评估。

#### 3.1 算法性能比较

为了验证 LFIA 算法的有效性与优越性, 本文

将 LFIA 与部分采用类似原理的 CTA<sup>[13]</sup>, FFA<sup>[18]</sup>以及基于图像显著性的方法(Sal)<sup>[11]</sup>进行比较。

实验采用 P-R(查准率-查全率)曲线, 即阈值从 0~255 依次变化分割各种算法产生的结果图, 对每幅阈值分割后的二值图像参照 GT 分别计算查准率和查全率, 将各个算法对于裂缝数据库中所有图像在某一阈值处的平均查准率和查全率作为该算法在此阈值的最终值, 绘制 P-R 曲线图<sup>[8, 20]</sup>。由于裂缝本身细长, 因此当检测结果偏离真实值不超过 2 个像素时, 依旧认为检测正确<sup>[8]</sup>。从图 8a 中可看出, 本文算法在固定阈值处的查全率和查准率明显高于其余算法, 当到达某一阈值(约 100)后, 查准率保持在一较高值不变(0.88~0.92)。这是因为裂缝本身所占图中目标极为稀少, 当大量具有同类特征的噪声点被分割为非裂缝区域时, 查准率会显著性提高; 另一方面, LFIA 采用了基于格式塔理论的空间一致性增强的策略, 使得真实裂缝点的 LFIA 值与各种噪声点的可区分性更强, 当取合适的阈值时, 即可提取大部分真实裂缝点。

本文也使用了 ROC 曲线图衡量各检测算法结果的准确性。观察图 8b 可知, LFIA 算法在相同的假阳性率处, 真阳性率高于其余算法, 尤其是在假阳性率较低处(0~0.2), 此时 LFIA 算法中检测出的点是真实裂缝点的比例最大。实验也比较了各算法在 ROC 曲线下的面积(area under roc curve, AUC), 如表 1 所示。LFIA 算法产生的 AUC 为 0.934 5, 表明

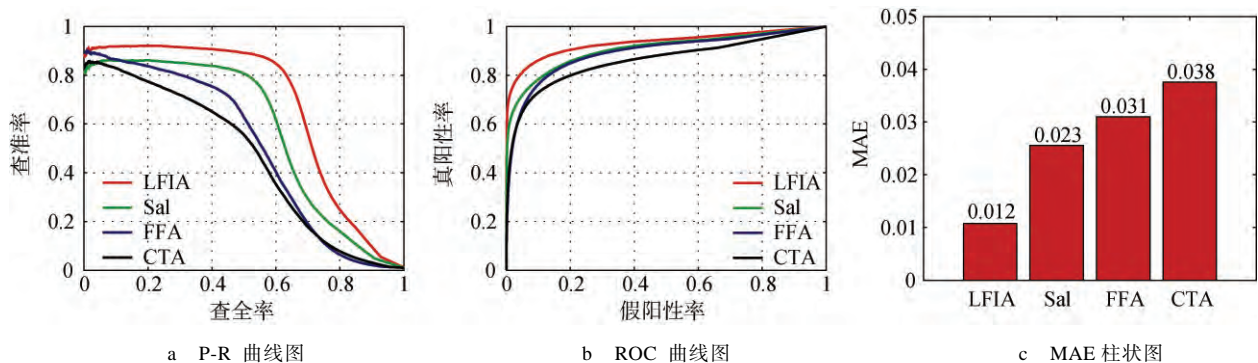


图8 量化性能评价图



表 1 4 种算法 AUC 值

方法名称	AUC	方法名称	AUC
CTA	0.861 5	Sal	0.906 1
FFA	0.892 4	LFIA	0.934 5

其检测结果最佳. 而其余算法的 AUC 值也较高, 最低的 CTA 也高达 0.861 5, 证明了该类算法的有效性 & 准确性.

P-R 曲线和 ROC 曲线关注的都是潜在检测目标, 如 LFIA 图中较亮的部分, 而忽略了其余区域与 GT 的差异. 对于裂缝图像而言, 背景像素占绝大多数, 如果考虑算法结果图中所有像素与 GT 的误差, 更能验证算法的可靠性 & 准确性. 因此引入平均绝对误差(mean absolute error, MAE), 以 LFIA 为例, MAE 定义<sup>[21]</sup>为

$$MAE = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |L(x, y) - GT(x, y)|,$$

其中  $M$  和  $N$  分别为图像长宽. 计算时, 将各算法的结果图归一化为  $[0, 1]$ . 取各算法在裂缝数据库中所有图像的 MAE 均值绘制柱状图(图 8c), LFIA 取得最小的误差, 仅为 0.012, 说明本文算法结果与 GT 最为接近.

4 种算法的视觉效果对比见图 9, 都能突出大部分真实裂缝区域. 但 CTA 仅对规则的横向或纵向裂缝区域产生较高的值, 其余部分, 尤其是发生方向性突变的裂缝段取值较低. 此外, CTA 也使部分裂缝产生形变, 丢失原有的不规则信息. FFA 较为均匀地凸显裂缝整体, 但噪声干扰较多, 某些较弱的裂缝段整体 FFA 值较低. Sal 产生了较多的裂缝断裂, 且对一些尺度较大的油斑等干扰也有较高的显著值. 本文的 LFIA 图则使裂缝整体一致高亮, 断裂和噪声点少.

4 种算法对于裂缝数据库中所有图像的平均运行时间见表 2, 其中 CTA, FFA, LFIA 的线性邻域长度  $d=10$ ; Sal 算法的细尺度显著性增强中, 裂缝最小长度  $L=10$ . 由于 LFIA 提取了裂缝的多种低层特征以及纹理不均匀性, 将其融入到纹理各向异性的计算中, 并采用了局部空间搜索的策略, 时间复杂度较高, 但其 P-R 曲线图、ROC 曲线图、MAE 柱状图性能评价以及视觉效果均优于其余 3 种算法.

将传统的基于 LBP 纹理的算法<sup>[12]</sup>、迭代剪裁分割 ICM<sup>[4]</sup>、分割后延伸(segment extending, Seg-ext)<sup>[7]</sup>以及 Wavelet 变换算法<sup>[9]</sup>与本文算法比较. 对阴影明显的图像采用了类似文献[8]的阴影消除算

法进行预处理, 并简单去除分割后的孤立噪声点和块, 检测结果如图 10 所示. 可以看出, LBP 以局部  $3 \times 3$  小块为单位, 裂缝看起来略宽, 且与 ICM 和 Wavelet 一样, 随机块状噪声较多. Seg-ext 虽然噪声较少, 但真实裂缝段缺失较多. 本文 LFIA 算法检测出大部分裂缝区域, 即使图中存在轻重程度不一的裂缝, 也能在有少许断裂的情况下, 一致性地突出. 在大范围模拟水渍存在时, LFIA 依旧能保持较高的检测准确性.

这几种算法的查准率、查全率和 F-measure( $2 \times P \times R / (P + R)$ )比较结果见表 3. LFIA 的各项指标明显优于其余传统算法. 这是因为 LFIA 综合考虑了多种低层特征、纹理描述以及空间一致性的增强, 极大程度去除或削弱了各类噪声干扰. 但正因如此, LFIA 算法的运行时间较长, 与几种传统算法在裂缝数据库中的平均运行时间见表 4. 传统算法仅仅基于单一的灰度、边缘等特征, 虽然运行时间较短, 但裂缝检测的查全率、查准率以及 F-measure 均处于较低的水平.

表 2 4 种算法平均运行时间对比 s

方法名称	运行时间	方法名称	运行时间
CTA	4.2	Sal	1.9
FFA	8.3	LFIA	7.8

表 3 LFIA 算法与传统算法的查全率、查准率和 F-measure 比较结果

方法名称	查全率	查准率	F-measure
LBP	0.75	0.70	0.72
ICM	0.69	0.61	0.65
Seg-ext	0.73	0.77	0.75
Wavelet	0.69	0.65	0.67
LFIA	0.85	0.90	0.87

表 4 LFIA 与传统算法的平均运行时间对比 s

方法名称	运行时间
LBP	1.2
ICM	0.7
Seg-ext	2.7
Wavelet	0.3
LFIA	7.8

实验也测试了 LFIA 算法对于不存在裂缝的各种条件下的路面图像的检测效果, 见图 11. 这些图像经过简单的阈值分割和孤立噪声点去除, 可得到无目标图像, 说明本文算法能够正确筛选有裂缝 & 无裂缝图像.

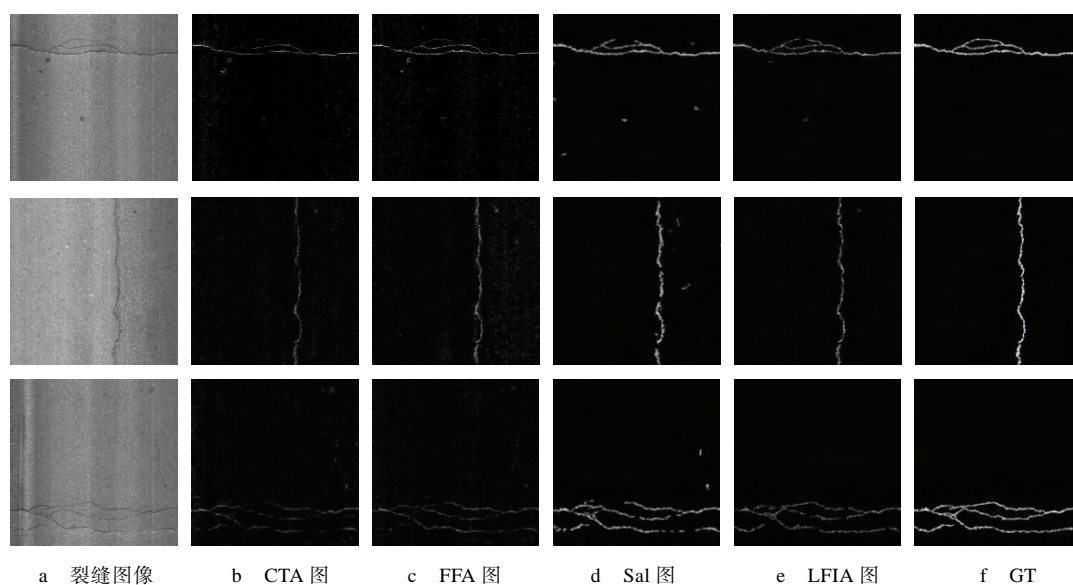


图 9 各算法视觉效果对比图, 归一化为[0,1]

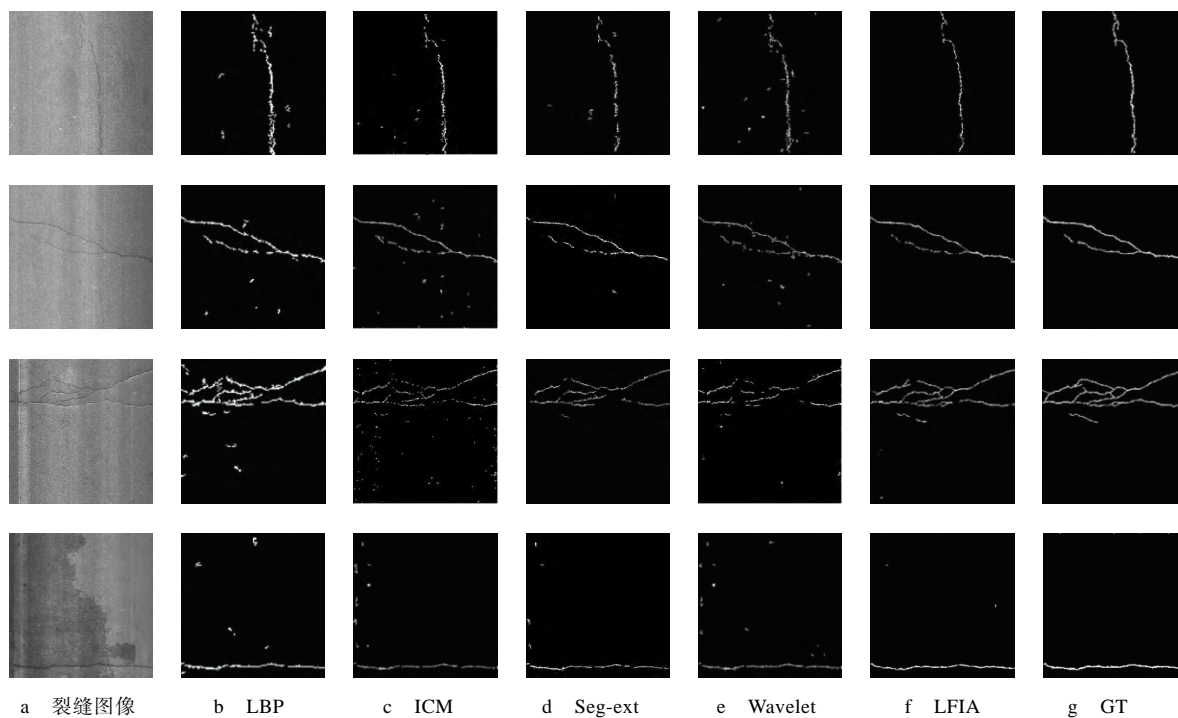


图 10 LFIA 与几种常用算法结果的视觉对比图

### 3.2 参数选择

LFIA 算法中, 线性方向性邻域长度  $d$  是十分重要的参数, 图 12 显示了在  $d$  取不同值时, 本文算法在裂缝数据库上平均的性能变化曲线和所花费的时间曲线图. 当  $d$  取值较小时, 由于路面随机纹理等局部线性特征明显的噪声干扰强, LFIA 的查准率较低; 而当  $d$  取值较大时, 即邻域搜索空间变大, 部分方向性突变的裂缝段的 LFIA 值会变低, 且易忽略部分细微的裂缝, 造成查全率的降低, 算法时间复杂度也相应提高. 由图 12 可知, 当  $d=10$

时, 本文算法的 F-measure 最高, 平均运行时间也可接受, 为 7.8 s.

## 4 结 论

本文提出了一种新的融合多种低层特征、纹理不均性以及各向异性进行路面裂缝检测, 并采用格式塔理论增强裂缝区域的算法. LFIA 克服了传统的 CTA 与 FFA 仅对典型的规则裂缝有效以及噪声多的缺陷; 而根据相似性、接近性和完整性的



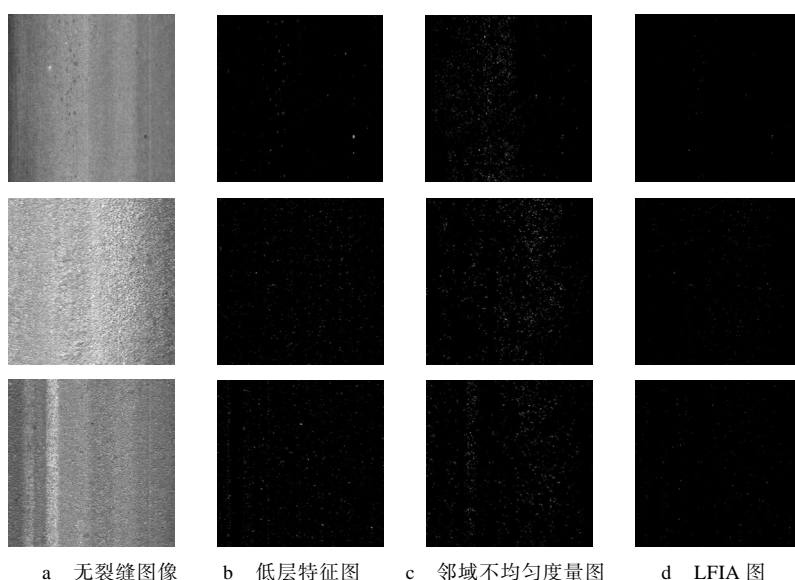
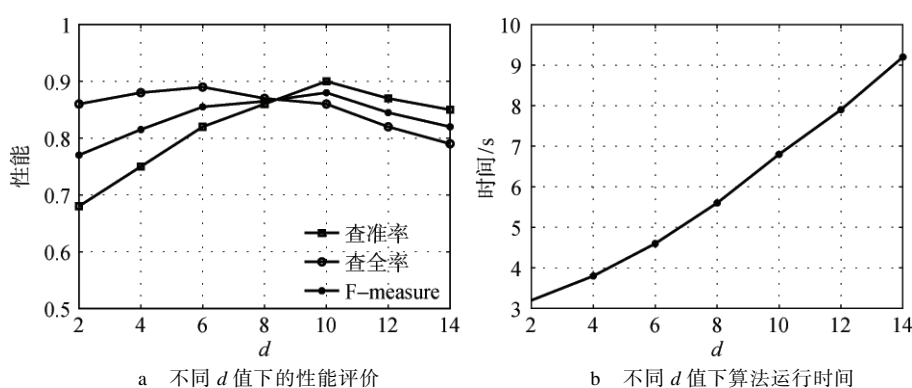


图11 LFIA算法对无裂缝存在的各种路面图像检测结果图

图12 参数 $d$ 对本文算法的影响

格式塔原则设计的增强策略,使裂缝的LFIA值在全局范围内趋于一致.与同类算法以及传统的几种路面裂缝检测方法相比,本文算法具有最好的性能评价.本文今后工作的重点将结合裂缝特定的先验概念,采用机器学习的方式,处理更为复杂的图像,如路面随机纹理的尺度与细微的裂缝极为接近的图像、裂缝与背景整体对比度极低的图像等.

## 参考文献(References):

- [1] Chambon S, Moliard J M. Automatic road pavement assessment with image processing: review and comparison [J]. International Journal of Geophysics, 2011, 2011: Article ID 989354
- [2] Chou J, O'Neill W A, Cheng H. Pavement distress evaluation using fuzzy logic and moments invariants [J]. Transportation Research Record, 1995, 1505: 39-46
- [3] Oliveria H, Correia P L. Automatic road crack detection and characterization [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(1): 155-168
- [4] Oh H, Garrick N W, Achenie L E K. Segmentation algorithm using iterated clipping for processing noisy pavement images [C] // Proceedings of the 2nd International Conference on Imaging Technologies: Techniques and Applications in Civil Engineering. Reston: ASCE Press, 1998: 138-147
- [5] Chambon S, Subirats P, Dumoulin J. Introduction of a wavelet transform based on 2D matched filter in a Markov random field for fine structure extraction: application on road crack detection [C] // Proceedings of SPIE. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Press, 2009, 7251: 72510A-1-72510A-12
- [6] Li Q Q, Liu X L. Novel approach to pavement image segmentation based on neighboring difference histogram method [C] // Proceedings of International Congress on Image and Signal Processing. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2008: 792-796
- [7] Liu F F, Xu G A, Yang Y X, et al. Novel approach to pavement cracking automatic detection based on segment extending [C] // Proceedings of International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2008: 610-614
- [8] Zou Q, Cao Y, Li Q Q, et al. CrackTree: automatic crack detection from pavement images [J]. Pattern Recognition Letters, 2012, 33(3): 227-238
- [9] Zhou J, Huang P S, Chiang F P. Wavelet-based pavement dis-

- stress detection and evaluation [J]. Optical Engineering, 2006, 45(2): 027007.1-027007.10
- [10] Ma Changxia, Zhao Chunxia, Hu Yong, *et al.* Pavement crack detection based on NSCT and morphology [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(12): 1761-1767 (in Chinese)  
(马常霞, 赵春霞, 胡 勇, 等. 结合 NSCT 和图像形态学的路面裂缝检测[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(12): 1761-1767)
- [11] Xu Wei, Tang Zhenmin, Lü Jianyong. Pavement crack detection based on image saliency [J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(1): 69-77 (in Chinese)  
(徐 威, 唐振民, 吕建勇. 基于图像显著性的路面裂缝检测[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(1): 69-77)
- [12] Hu Y, Zhao C X. A novel LBP based methods for pavement crack detection [J]. Journal of Pattern Recognition Research, 2010, 5(1): 140-147
- [13] Nguyen T S, Avila M, Begot S. Automatic detection and classification of defects on road pavement using anisotropy measure [C]// Proceedings of European Signal Processing Conference. Glasgow: EURASIP Press, 2009: 617-621
- [14] Koffka K. Principles of Gestalt psychology [M]. London: Lund Humphries, 1935
- [15] Yan Q, Xu L, Shi J P, *et al.* Hierarchical saliency detection [C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2013: 1155-1162
- [16] Mancas M. Relative influence of bottom-up and top-down attention [M]// Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer, 2009, 5395: 212-226
- [17] Ding J D, Shen J L, Pang H H, *et al.* Exploiting intensity inhomogeneity to extract textured objects from natural scenes [M]// Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer, 2009, 5996: 1-10
- [18] Nguyen T S, Begot S, Duculty F, *et al.* Free-form anisotropy: a new method for crack detection on pavement surface images [C]// Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Image Processing. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2011: 1069-1072
- [19] Desolneux A, Moisan L, Morel J M. Computational gestalts and perception thresholds [J]. Journal of Physiology-Paris, 2003, 97(2/3): 311-324
- [20] Achanta R, Hemami S, Estrada F, *et al.* Frequency-tuned salient region detection [C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 1597-1604
- [21] Perazzi F, Krähenbühl P, Pritch Y, *et al.* Saliency filters: contrast based filtering for salient region detection [C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2012: 733-740

~~~~~

(上接第 135 页)

- [27] Paralic M. Fast connected component labeling in binary images [C] // Proceedings of the 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing. Norcross: Tech Science Press, 2012:706-709
- [28] Hu Q M, Qian G Y, Wieslaw L, *et al.* Fast connected-component labelling in three-dimensional binary images based on iterative recursion [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2005, 99(3): 414-434
- [29] Chang F, Chen C J. A component-labeling algorithm using contour tracing technique [C] // Proceedings of the 7th International Conference on Document Analysis and Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2003: 741-745
- [30] Gu Q Y, Takaki T, Ishii I. A fast multi-object extraction algorithm based on cell-based connected components labeling [J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2012, E95-D(2): 636-645
- [31] Chang F, Chen C J, Lu C J. A linear-time component-labeling algorithm using contour tracing technique [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2004, 93(2): 206-220
- [32] He L F, Chao Y Y, Suzuki K, *et al.* A run-based one-scan labeling algorithm [C] // Proceedings of the 6th International Conference on Image Analysis and Recognition. Heidelberg: Springer, 2009: 93-102
- [33] He L F, Chao Y Y, Suzuki K. A run-based one-and-a-half-scan connected-component labeling algorithm [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2010, 24(4): 557-579