

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2013  
Vol.18 No.

1

中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会主办  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2013年1月 第18卷 第1期(总第201期)

## 目次

### 综述

- 正面人脸图像合成方法综述 ..... 赵林, 高新波, 田春娜(1)  
SAR 图像道路网提取方法综述 ..... 程江华, 高贵, 库锡树, 孙即祥(11)

### 图像处理和编码

- 头部缺失的 JPEG 文件碎片恢复 ..... 徐明, 黄立, 张海平, 徐建, 郑宁(24)  
安全高效的可撤销指纹模板构造 ..... 喻建平, 张鹏, 王瑶, 杨懿竣(36)  
基于残差的图像超分辨率重建 ..... 陈华华, 姜宝林, 刘超, 陈伟强, 陆宇, 张嵩(42)  
旋转的 Wang Tiles 纹理合成算法 ..... 王继东, 庞明勇, 赵瑞斌(49)  
基于圆形约束快速水平集的原生质体细胞分割 ..... 王晓飞, 庞全(55)

### 图像分析和识别

- 采用压缩传感的鲁棒的视频指纹方案 ..... 孙锐, 李超, 蒋飞云(62)  
基于图像显著性的路面裂缝检测 ..... 徐威, 唐振民, 吕建勇(69)  
基于局部熵的主动轮廓模型 ..... 潘改, 高立群, 赵爽(78)  
基于算子的图像分解 ..... 李峰, 曾晓辉, 陈盛霞, 沈玉娟(86)

### 图像理解和计算机视觉

- 中值流辅助在线多示例目标跟踪 ..... 王德建, 张荣, 尹东, 张智瑞(93)  
四叉树直方图的特殊方向关系表达 ..... 张珂, 王小捷, 靳越(101)

### 计算机图形学

- 协同进化的近似规则纹理合成 ..... 王相海, 陶兢喆(107)  
反走样直线的灰度循环生成算法 ..... 牛连强, 张胜男, 钟玲(115)

### 地理信息技术

- 微博客蕴含交通信息的提取 ..... 张恒才, 陆锋, 陈洁(123)

- 
- “计算机视觉前沿论坛”专栏征文通知 ..... (130)

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 18 No. 1 January 2013

## Contents

### Review

- Review of frontal face image synthesis methods ..... Zhao Lin, Gao Xinbo, Tian Chunna(1)  
Review of road network extraction from SAR images ..... Cheng Jianguhua, Gao Gui, Ku Xishu, Sun Jixiang(11)

### Image Processing and Coding

- Rrecovery method for JPEG file fragments with missing headers  
..... Xu Ming, Huang Li, Zhang Haiping, Xu Jiang, Zheng Ning(24)  
Secure and efficient scheme to construct a cancelable fingerprint template  
..... Yu Jianping, Zhang Peng, Wang Yao, Yang Yijun(36)  
Image super-resolution reconstruction based on residual error  
..... Chen Huahua, Jiang Baolin, Liu Chao, Chen Weiqiang, Lu Yu, Zhang Song(42)  
Texture synthesis using rotational Wang Tiles ..... Wang Jidong, Pang Mingyong, Zhao Ruibin(49)  
Protoplasm somatic cells segmentation based on circle dependent fast level-set segmentation ..... Wang Xiaofei, Pang Quan(55)

### Image Analysis and Recognition

- Robust video fingerprinting via compressed sensing ..... Sun rui, Li Chao, Jiang Feiyun(62)  
Pavement crack detection based on image saliency ..... Xu Wei, Tang Zhenmin, Lv Jianyong(69)  
Active contour model driven by local entropy energy ..... Pan Gai, Gao Liqun, Zhao Shuang(78)  
Operator-based image decomposition ..... Li Feng, Zeng Xiaohui, Chen Shengxia, Shen Yujuan(86)

### Image Understanding and Computer Vision

- Median flow aided online multi-instance learning visual tracking ..... Wang Dejian, Zhang Rong, Yin Dong, Zhang Zhirui(93)  
Expression of special directional relation based on quadtree histogram ..... Zhang Ke, Wang Xiaojie, Jin Yue(101)

### Computer Graphics

- Fast near-regular texture synthesis based on the concept of co-evolution ..... Wang Xianghai, Tao Jingzhe(107)  
Integral algorithm for generating anti-aliased straight line controlled by gray iteration  
..... Niu Lianqiang, Zhang Shengnan, Zhong Ling(115)

### Geoinformatics

- Extracting traffic information from massive micro-blog messages ..... Zhang Hengcai, Lu Feng, Chen Jie(123)

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)01-0069-09

论文引用格式: 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.

## 基于图像显著性的路面裂缝检测

徐威, 唐振民, 吕建勇

南京理工大学计算机科学与工程学院, 南京 210094

**摘要:** 有效的视觉显著性方法能准确快速地帮助人们在大量视觉信息中找到感兴趣的物体。针对实际路面图像噪声成分复杂、覆盖面广的特点, 提出一种基于图像显著性的路面裂缝检测算法。该算法对路面裂缝图像分块灰度校正后, 根据灰度稀疏性、全局对比度计算粗尺度下的裂缝显著值, 然后由裂缝局部亮度、边缘特性、连续性特点进行不断扩张的细尺度的局部邻域显著性增强, 再经空间显著性加强后, 采用自适应阈值分割提取裂缝。大量的实验结果表明, 该算法比传统算法更能正确、有效地检测出裂缝整体区域, 抗噪声能力强, 漏检率和误检率很低, 具有和人类视觉特性相符合的检测结果。

**关键词:** 裂缝检测; 图像显著性; 显著性增强; 灰度校正

## Pavement crack detection based on image saliency

Xu Wei, Tang Zhenmin, Lv Jianyong

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

**Abstract:** An effective approach for visual saliency detection can help people search for the object of interest from vast visual information rapidly and accurately. Considering the complexity of noises covering a wide area in actual road images, we present a new pavement crack detection approach based on image saliency in this paper. This approach calculates the salient value of crack images in a coarse scale based on the grayscale sparsity and global contrast after grayscale correction on images, which are divided into small blocks. Then, according to the characteristics of the cracks, such as local brightness, edge, and continuity, we calculate the local saliency in the continuously outspread local neighbor domain in a fine scale. After enhancing the saliency based on the spatial continuity, we extract cracks using adaptive image segmentation method. A large number of experimental results demonstrate this approach can detect the crack areas more correctly and effectively compared with traditional methods. It better suppress noises, has lower missing rate and misuse detection rate. Moreover, the result is consistent with human visual characteristics.

**Key words:** crack detection; image saliency; saliency enhancement; grayscale correction

## 0 引言

路面裂缝作为高等级公路路面破损的主要表现形式, 对于现代化、高效率的公路养护管理至关重要。由于传统的人工视觉检测方法耗时长、不准确、

危险性高、妨碍交通、主观差异性大, 现在多采用高精度相机快速拍摄路面图像, 进行计算机自动检测<sup>[1]</sup>。各种路面裂缝自动检测算法因此被提出, 可大致分为两类: 纯粹基于经典图像处理的方法和结合其他领域理论的实用方法。

根据裂缝中心灰度值较低的特点, 文献[2]提

收稿日期: 2012-05-03; 修回日期: 2012-07-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(90820306)

第一作者简介: 徐威(1987—), 男, 现为南京理工大学模式识别与智能系统专业博士研究生, 主要研究方向为图像处理、计算机视觉。

E-mail: njust\_cst\_xuwei@163.com

出了基于直方图统计的裂缝检测策略。文献[3]提出了直方图投影的算法,采用形态学算子消除裂缝周围的噪声。文献[4]对裂缝图像灰度校正后,采用经验值进行改进的 p-tile 阈值分割,用线性几何特征获取裂缝。文献[5]对路面图像进行多尺度分割,利用裂缝的连续性进行图像尺度收缩,消除孤立噪声块,筛选出裂缝。裂缝具有线性连续性、边缘特性,一些方法基于此被提出,如多级线性拟合法<sup>[6]</sup>、形态学算子边缘检测法<sup>[7]</sup>。从频域角度出发,文献[8]提出了基于小波变换的裂缝检测算法,文献[9]提出了结合非下采样 contourlet 变换(NSCT)和图像形态学的裂缝检测方法,文献[10]运用了脊波变换检测局部线性裂缝,有效增强了裂缝整体区域。将 2 维图像映射到 3 维曲面,文献[11]提出了基于 3 维地形的路面裂缝检测策略,再通过空间线性扩张消除伪裂缝。以上方法根据路面裂缝的一种或几种典型特征,运用纯粹的图像处理方式检测裂缝,比常规算法有所改进,但路面噪声干扰复杂时,往往效果不佳,且计算量较大。

一些跨领域的方法也被提出,用以刻画、增强复杂环境下的裂缝特征,为裂缝检测引入了新的思路。如结合模糊集理论的方法<sup>[12]</sup>、基于人工种群的检测策略<sup>[13]</sup>、利用目标点最小生成树的检测算法<sup>[14]</sup>、基于分数阶微分的算法<sup>[15]</sup>。

图像显著性即图像中人眼感兴趣区域或视觉关注的焦点,源于人类视觉的独特性、不可预见性、稀缺性以及奇异性,由颜色、梯度、边缘、纹理等属性所致<sup>[16]</sup>。Itti 最早提出的视觉注意机制分为并行的、快速的、下意识、自底向上的显著性提取和串行的、慢速的、任务驱动的、自顶向下的显著性提取<sup>[17]</sup>。现有大多数图像显著性算法采用自底向上的视觉注意机制展开,如结合颜色对比和模糊增长(MZ)、谱残余(SR)、内外窗口对比度(AC)、上下文感知(CA)、频率调谐(FT)、灰度直方图统计对比(LC)、基于颜色稀疏的直方图对比度(HC)算法<sup>[16]</sup>。这些方法大多基于彩色图像的全局或局部对比度,而路面图像是高分辨率的灰度图像。因此根据裂缝特点,结合灰度稀疏性、全局对比度和局部细尺度以及邻域空间的增强,设计适用于裂缝这种线性目标的显著性算法。

## 1 裂缝图像显著性检测

线扫描相机拍摄的路面图像,通常存在复杂的

噪声成分:路面材料颗粒形成的大范围随机纹理覆盖整幅图像;光照不均引起的中间亮周围暗的典型变化;相机固有的因辅助照明不均引起的带状条纹;路面油污、水渍以及行道线等干扰,见图 1(a)。

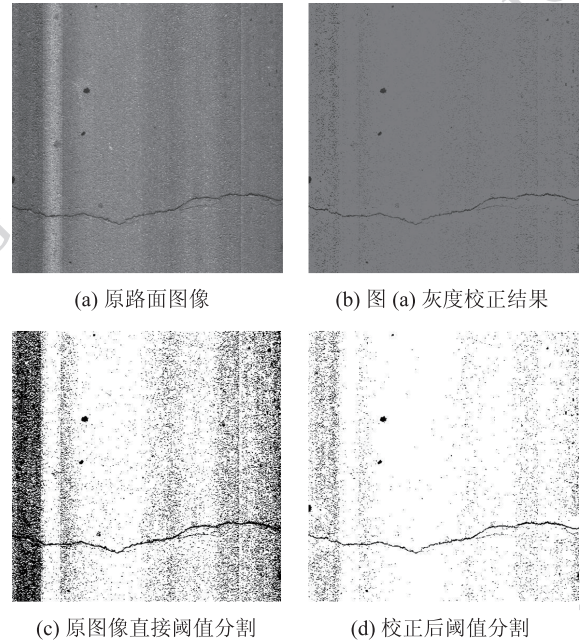


图 1 灰度校正效果图

Fig. 1 Example of grayscale correction

### 1.1 灰度校正

人类视觉能迅速发现复杂环境下的路面裂缝,是由于存于人脑中先验的裂缝概念,即裂缝的视觉显著特征。观察大量路面裂缝图像,有如下规律:

1) 裂缝具有线性稀疏性,裂缝是不规则延展却具有一定方向性的线性目标,即使由于光照角度,裂缝中间出现了断裂,其线性增长方向局部一致。无论是空间上所占图像面积比例还是灰度级所占比例,即使是严重的网状裂缝,也不超过 30%。

2) 裂缝中心的灰度是局部最小值,即使对于图像较暗区域,也比背景略黑。因此,应根据亮度变化赋予各区域不同的校正权值。

3) 局部小窗口范围内可认为图像光照近似均匀<sup>[6]</sup>。

据此,校正过程如下:

将路面图像  $I$  划分为  $L \times L$  的小块  $I_r$ 。分别统计各小块中各灰度级  $k$  的像素个数  $N_{r,k}$ ,计算满足

$$\sum_{k=0}^l N_{r,k} \geq w_r \times N_r, \quad k, l \in [0, 255] \quad (1)$$

的灰度级  $l$ 。  $N_r$  表示该小块中所有像素个数。  $w_r$  为第  $r$  个小块的权重,由裂缝稀疏性和不同小块的明暗程度决定,即

$$w_r = \begin{cases} \exp\left(\frac{-|g_{\text{avg}} - g_r|}{2(g_{\text{avg}} - g_{\text{min}})}\right)w_s & g_r < g_{\text{avg}} \\ w_s & g_r \geq g_{\text{avg}} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $g_r$ 、 $g_{\text{avg}}$ 、 $g_{\text{min}}$  分别为第  $r$  个小块的灰度平均值、所有分块的灰度均值以及最小的分块灰度均值。  $w_s$  表示标准的光照均匀的小块中裂缝所占比重,经大量实验统计,设为经验值 0.3。

对块内每个像素  $I_r(x, y)$  灰度校正

$$I_r(x, y) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j)}{M \times N} & I_r(x, y) > l_r = \frac{\sum_{k=0}^l k \times N_{r, k}}{\sum_{k=0}^l N_{r, k}} \\ I_r(x, y) & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $M$ 、 $N$  为图像长宽,  $I(x, y)$  为点  $(i, j)$  处灰度值,  $l_r$  为区分预设裂缝目标与背景的阈值。

校正图像很大程度上消除了带状条纹、路面颗粒随机纹理形成的白噪声干扰(图 1(b))。

光照不均使得较亮分块中目标与背景区分明显,而较暗分块对比度降低。全局角度而言,亮块中的裂缝灰度值可能与暗块中背景灰度值非常接近,造成整体目标区域的灰度混淆。按式(3)取图像灰度均值归一化背景,增大了全局范围内目标与背景的可区分性,同时也增强了较暗分块的对比度;而较亮分块由于原先对比度较大,其削弱影响并不明显。由图 1(c)(d)的对比可知,校正后裂缝与路面背景的灰度整体可区分性增强,光照影响降低。

### 1.2 裂缝显著性检测

路面较暗纹理颗粒、黑色块斑等混杂于预设目标中(图 1(b)),采用线性几何特征滤除,会面临灰度阈值和线性特征阈值的选取问题,且易造成裂缝断续,转而计算显著值。

由局部分块中裂缝灰度稀疏性知,校正时取每块灰度较暗的前  $l_r$  级像素为预设目标区域,而实际大多数分块中并不存在裂缝,是伪裂缝,造成预设目标平均灰度变大。

计算各分块  $r$  前  $l_r$  灰度级直方图  $H_r, l_r$  由式(3)确定,求所有分块的平均直方图

$$H_l(i) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N H_{r, l_r}(i) & i \leq \bar{l} = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N l_r \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

大于平均区分阈值的点,可认为是伪裂缝,在平均直方图中取值为 0,显著值也为 0。而裂缝在其中依旧稀疏,其灰度与平均灰度  $I_{\text{avg}}$  距离大,裂缝局部显著性  $S_l(x, y)$  定义为

$$S_l(x, y) = e^{(-H_l(I(x, y)))} (I_{\text{avg}} - I(x, y))$$

$$I_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^i H_l(i) \times i}{\sum_{i=1}^i H_l(i)} \quad (5)$$

从全局频域角度考虑裂缝特征,其边缘处是一种较高频高幅值信号,而路面背景随机纹理是一种高频但幅值较低的信号<sup>[4]</sup>,且其频率比裂缝边缘更高,FT 方法<sup>[18]</sup>在去除高频噪声的同时,很好地保留目标区域的边缘显著性,且突出裂缝整体在全局的对比度。

对灰度校正后的图像高斯模糊,得到  $I_g$ ;计算图像的灰度均值  $I_\mu$ ;将  $I_g$  中每个像素点与  $I_\mu$  的灰度级的欧氏距离作为该点全局显著值  $S_g(x, y)$ 。

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

$$I_g(x, y) = I(x, y) * G(x, y, \rho)$$

$$I_\mu = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j)}{M \times N} \quad (6)$$

$$S_g(x, y) = (I_g(x, y) - I_\mu)^2$$

高斯模糊核函数标准差  $\sigma$  反映像素分布密度的散布特征,较小时表征像素影响值集中于分布中心,较大时,中心像素影响减弱,周围像素影响增强;其值越大,图像越模糊。裂缝线性狭长,集中于宽约 2~5 像素区域内,而离散噪声多为单像素点。经大量实验,  $\sigma$  取值为 1,过大则裂缝边缘模糊,显著值定位不准确;过小则与噪声区分性降低(图 2)。距

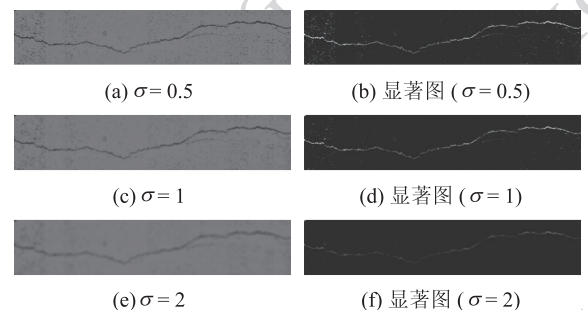


图 2 不同参数下的高斯模糊效果图

Fig. 2 Gaussian blur under different parameters

中心  $3\sigma$  以外的像素点可认为不起作用,且考虑裂缝宽度,邻域大小设为  $3 \times 3$ 。

综合局部、全局显著性,分别取  $S_l$  和  $S_g$  中大于各自平均显著值的点,计算裂缝最终显著值,即

$$S_z(x, y) = \sqrt{S_l(x, y)^2 + S_g(x, y)^2} \quad (7)$$

具体的显著图生成示例见图3。

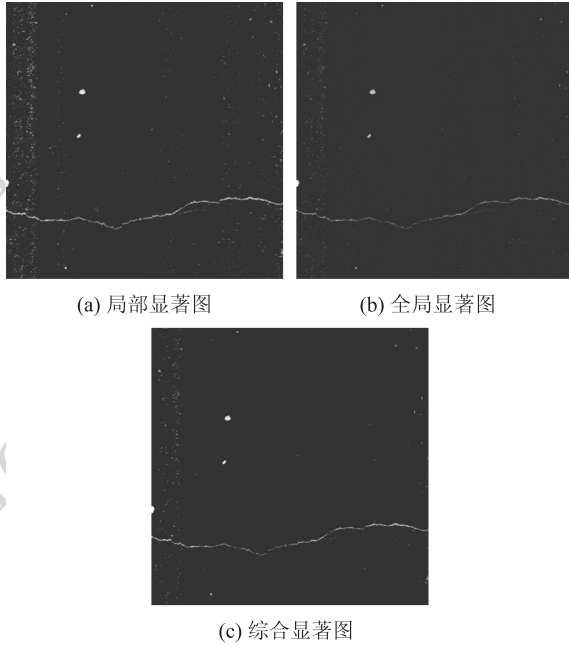


图3 裂缝显著图

Fig. 3 Saliency map of crack image

图3(a)中裂缝显著值高,但较暗噪声的显著性干扰强,图3(b)中裂缝整体显著值较高,却不如块状噪声与粗尺度路面颗粒。综合显著图图3(c)一定程度上降低了两者的影响。

### 1.3 裂缝细尺度显著性增强

对人类视觉而言,相邻区域的高对比度(region contrast)比整体的对比度以及较远区域的对比度更能优先引起注意<sup>[16]</sup>。裂缝虽缺乏丰富的颜色对比,却有其独特的空间延展性和灰度可区分性,可据此以裂缝像素为中心,设计权值,增强显著程度。

对大量裂缝图像统计分析可知,裂缝具有一定的尺度,而路面纹理也具有像素级尺度。将校正后的路面图像变换到适合裂缝的尺度,会更加突出裂缝的局部特征<sup>[5]</sup>,即

$$I_{t+1}(x, y) = I_t(U_{N_t}(x, y)) \times h(\cdot) \quad (8)$$

式中,  $t$  表示图像尺度,  $t=0$  时为原图像,  $U_{N_t}(x, y)$  为  $t$  尺度下像素点  $(x, y)$  的周围  $N \times N$  邻域,这里取

$N=2$ , 如文献[5],  $h(\cdot)$  为尺度变换核函数,取值为

$$h(\cdot) = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

裂缝尺度随不同分辨率的图像而改变,但裂缝本身狭长,宽度较窄,尺度不宜过细。实验中取  $t=1$ , 如图4所示。

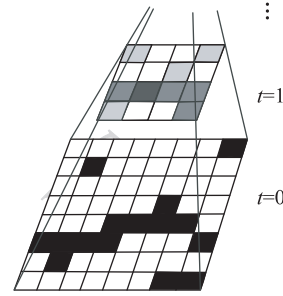


图4 尺度变换示意图

Fig. 4 Schematic diagram of scale transformation

变换后,孤立噪声点由于含有上一级尺度图像中背景像素的分量而灰度变大;裂缝却由于其局部空间线性连续而灰度一致均匀。

结合1.1节中裂缝规律1)2),模拟裂缝线性扩张过程,细尺度显著性增强算法如下:

1)选取裂缝级尺度图像中,未筛选过的综合显著值大于平均值两倍且灰度值小于原图像灰度均值的点作为候选裂缝点。

2)定义裂缝最小长度  $L$ , 初始长度  $l=0$ , 邻域扩张步长  $s=1$ 。以某个候选点为中心,检测其  $(2s+1) \times (2s+1)$  邻域内是否存在候选点,若不存在,线性权重  $w_l$  为0,该点标记为已筛选,转步骤1);若存在,  $l=l+1, s=s+1$ , 按图5(a)所示的上、下、左、右4个方向,记录其增长方向;若同时存在多个候选点,依次记录。

3)以候选点的  $(2(s-1)+1) \times (2(s-1)+1)$  邻域为内窗口,  $(2s+1) \times (2s+1)$  邻域为外窗口,搜索两窗口之间是否存在候选点,若不存在,则内窗口内所有候选点标记为已筛选,其  $w_l$  为  $l/sL$ , 转步骤1);若存在,分别记录各候选点增长方向  $\theta$  (图5(b)),  $l=l+1, s=s+1$ 。重复该步骤,直至  $l > L/2$ , 此时  $w_l=1$ , 标记内窗口中候选点为已筛选。

4)当  $l > L/2$  时,计算内窗口  $(2(s-1)+1) \times (2(s-1)+1)$  邻域内线性扩张方向是否一致。即某扩张方向一开始不存在候选点,邻域增大后突然

出现了候选点,显然属于噪声,记下此时长度  $l'$ ,修改  $w_l$  为  $l'/(sL)$ 。

5) 当  $l > L/2$  时,若邻域扩张方向一致,统计窗口邻域内候选点个数  $Num$ ,根据裂缝面积稀疏性设置阈值  $\alpha$ ,当  $Num > \alpha \times (2(s-1)+1)^2$  时,认为其呈现块状特性 ( $0.15 < \alpha < 0.3$ , 本文统一取 0.25); 此时,按照步骤 3) 的方式继续进行邻域扩展,直至内外窗口之差中不再出现候选点,重新统计此时内窗口中候选点数目  $Num$ ,修改其中所有候选点的  $w_l$  为  $1/Num$ ,标记为已筛选。

6) 当  $l > L/2$  时,如无步骤 4)5) 中扩张情形,局部邻域搜索完毕,不再继续扩张,转步骤 1) 选新候选点带入算法。

经上述处理,裂缝细尺度显著性增强公式为

$$S_i(x, y) = w_z(x, y) w_l \times \left( I_\mu - \min \left( \frac{1}{N} G_{N, \theta}(x, y) \right) \right)^2 \quad (10)$$

$$\theta \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$$

式中,  $I_\mu$  为裂缝级尺度图像的灰度均值。设  $S_{qu}$  为综合显著性均值,  $w_z(x, y)$  为点  $(x, y)$  处对应的综合显著性权重,则

$$w_z(x, y) = \begin{cases} S_z(x, y) & S_z(x, y) > 2S_{qu} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

$G_{N, \theta}(x, y)$  是以点  $(x, y)$  为中心的  $\theta$  方向的  $N \times N$  线性邻域 (包括点  $(x, y)$ ) 的灰度值之和, 实验中  $N=3$ 。

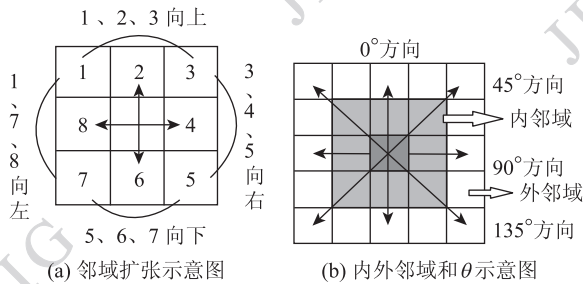


图 5 细尺度邻域示意图

Fig. 5 Schematic diagram of neighborhood in fine scale

设原图像素点数为  $N$ , 由候选点统计规律 (图 6) 知,其所占原图比例最多仅为 10% 左右。若候选点为裂缝 (多数情况), 其扩张次数为  $\lceil (L-1)/2 \rceil$ , 周围长为  $L$  的线性邻域点无须再次筛选。总体扩张点数约为  $n = 0.1N/L$ , 算法时间复杂度为  $O(n^{\lceil (L-1)/2 \rceil})$ , 实际由于候选点稀疏而计算高效, 平均为 0.12 s。

由图 7(a) 可知, 与裂缝灰度相近的点状、块状噪声显著值大范围削弱。

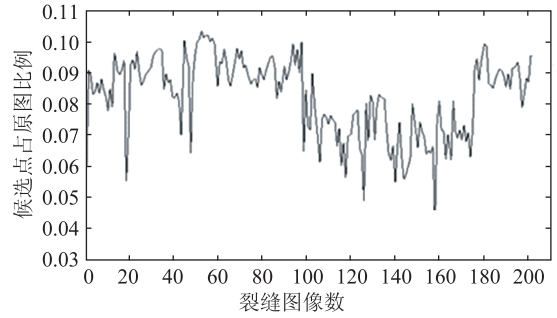


图 6 候选点统计规律图

Fig. 6 Statistical diagram of candidate point

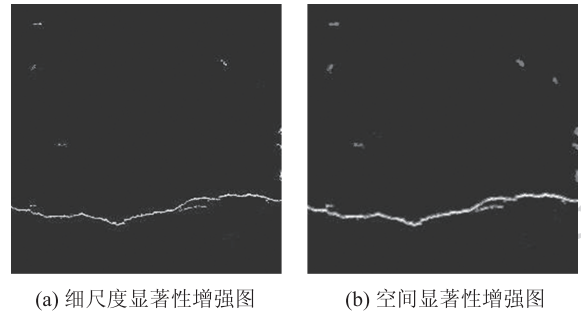


图 7 显著性增强图

Fig. 7 Enhanced saliency map

### 1.4 空间显著性增强

裂缝扩张并不限于局部线性邻域。部分路面纹理也呈现一定的局部线性特征, 灰度校正时不恰当的分块也可能造成随机的线性噪声, 但全局范围内无连续性; 而部分裂缝区域即使由于光照角度中间偶尔出现断裂, 但整体连续。因此, 将裂缝级尺度图像划分成  $L \times L$  小块, 引入空间权值, 近邻的区域增大影响, 较远的区域减小影响<sup>[19]</sup>。对每个小块  $r_k$ , 其块内像素点  $(x, y)$  的空间加权显著性为

$$S(x, y) = \max \left\{ \sum_{i, \theta} \exp \left( \frac{-D_\theta(r_k, r_i)}{N} \right) S_i(r_i) \right\} S_i(x, y), \quad (12)$$

$$i \in \left[ k - \frac{N-1}{2}, k + \frac{N-1}{2} \right], \theta \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$$

式中,  $r_i$  表示以  $r_k$  为中心的  $N \times N$  邻域中的第  $i$  个小块,  $D_\theta(r_k, r_i)$  表示  $\theta$  方向上, 小块  $r_k$  与  $r_i$  中心的空间距离。  $S_i(r_i)$  为小块  $r_i$  内像素点的细尺度显著性均值, 并将其范围归一化到  $[0, 1]$ 。实验中, 取  $N=5$ 。

全局空间显著性增强后,与裂缝线性特征类似的噪声显著性被削弱(图 7(b))。

### 1.5 显著性分割

采用本文显著性算法后,路面各种干扰很大程度上被抑制,裂缝显著性突出,参考 SR 方法<sup>[20]</sup>,直接自适应设定分割阈值为图中显著值大于 0 的点的均值。

设  $f(i)$  为图中显著值为  $i$  的点的频率,  $S_{\min}$  和  $S_{\max}$  分别为图中显著性最小值和最大值,则

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=S_{\min}}^{S_{\max}} i \times f(i)}{\sum_{i=S_{\min}}^{S_{\max}} f(i)}$$

$$I(x,y) = \begin{cases} 1 & S(x,y) > \bar{S} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

从图 8 中可看出,裂缝整体被有效分割。之后,可采用裂缝的线性几何参数,如长宽比、矩形度特征<sup>[4]</sup>,进一步细化、提取裂缝。

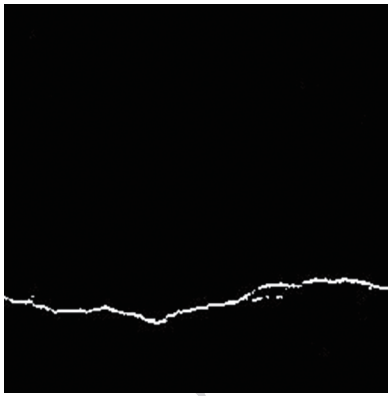


图 8 图 1 显著性分割结果  
Fig. 8 Saliency cut of image 1

## 2 实验结果与分析

实验环境为 Intel(R)Core(TM)i5-2410 M CPU、

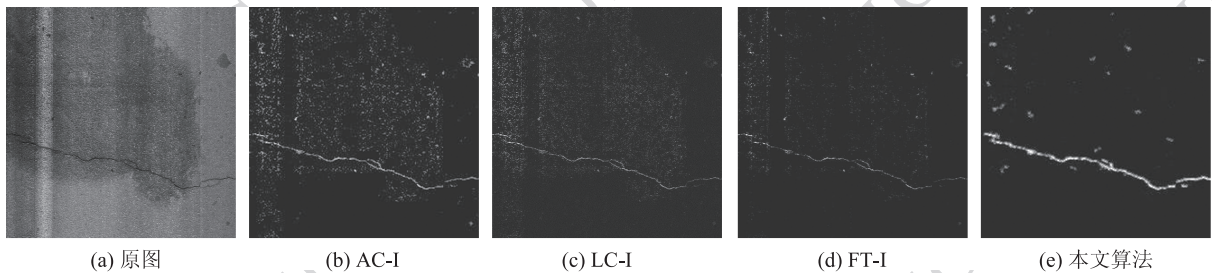
3 G 内存的 PC 机。实验数据为线扫描相机采集的阜锦高速行车道 2 下行路段的一部分,图像大小为 2 048 × 2 048 像素,精度为 0.92 mm/pixel。根据裂缝的分类标准,采用具有代表性的横向裂缝、纵向裂缝以及网状裂缝进行实验。

将经典的显著性算法 AC<sup>[21]</sup>、LC<sup>[22]</sup> 和 FT<sup>[18]</sup> 作用于裂缝灰度图像,命名为 AC-I、LC-I、FT-I,与本文显著性算法的对比结果如图 9—图 11。图 9(a) 为有横向裂缝存在的路面图像,存在着路面水渍、光照不均、纵向带状条纹、路面行道线和局部小块黑色油斑的影响;图 10(a) 中纵向裂缝程度较轻,其中还存在灰度较黑的车轮痕迹影响;图 11(a) 的细碎轻微的网状裂缝中还存在较大黑色块斑干扰。

路面大范围水渍这类暗背景的干扰,造成 AC-I、LC-I、FT-I 算法中产生较多高显著值噪声点(图 9(b)–(d)),与裂缝区分不明显。而本文算法噪声减少,且其显著值低于整体裂缝区域(图 9(e))。

总之,AC-I 算法中某些噪声区域的显著值比裂缝区域高,车轮痕迹与块状油斑尤为明显,裂缝反而呈现弱显著性特征;LC-I 算法产生较多与裂缝显著值相似的细碎噪声;FT-I 算法产生的高显著值噪声比 AC-I 和 LC-I 算法少,但依旧与裂缝区分度不高,后续分割困难。而本文算法很大程度上明显削弱甚至去除了各尺度噪声点,与裂缝相近的线性干扰(伪裂缝)的显著值也被降低,裂缝整体更为突出,如图 9(e)、图 10(e)。网状裂缝由于其程度轻微,分支琐碎,虽未完整地提取整个裂缝,但也突出了大部分裂缝区域,反映其真实形态(图 11(e))。

为了验证算法的有效性和正确性,取检测路段中不同光照条件和检测条件下的 3 组图像进行统计实验,每组各 1 000 幅图像,各组分别存在着 202 幅、379 幅、254 幅裂缝图像。



(a) 原图

(b) AC-I

(c) LC-I

(d) FT-I

(e) 本文算法

图 9 横向裂缝显著图

Fig. 9 Saliency map of transverse crack image

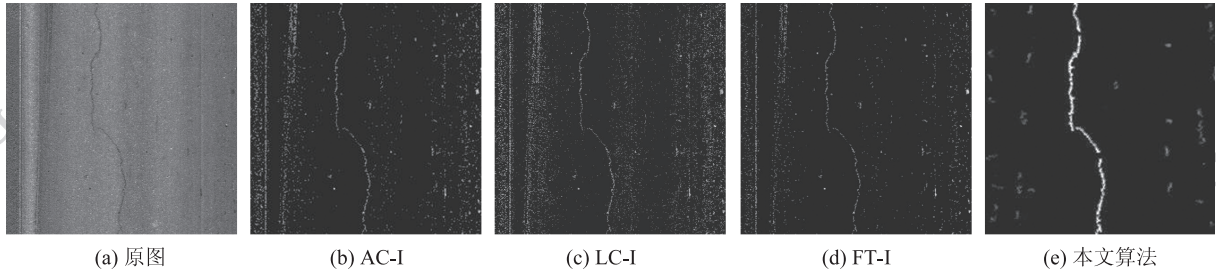


图 10 纵向裂缝显著图

Fig. 10 Saliency map of longitudinal crack image

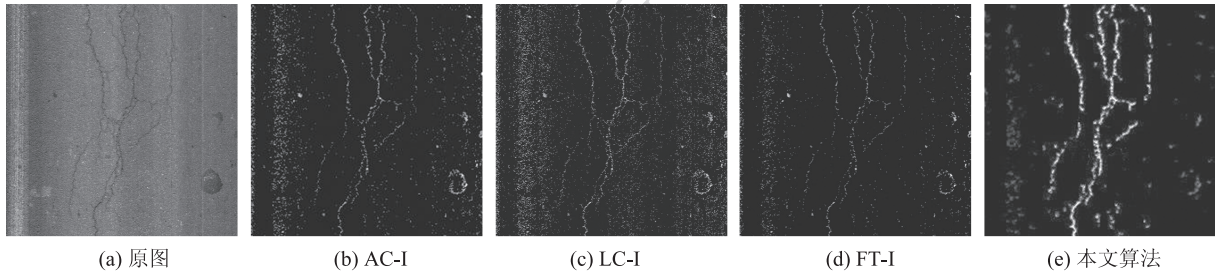


图 11 网状裂缝显著图

Fig. 11 Saliency map of reticular crack image

通常采用准确率( $P$ )和召回率( $R$ )衡量显著性分割结果的正确性<sup>[18,23]</sup>,而这也与裂缝检测中的正确度指数和完成度指数吻合<sup>[14]</sup>,其定义为

$$P = \frac{\sum_{(x,y)} G(x,y)B(x,y)}{\sum_{(x,y)} B(x,y)} = \frac{L_r}{L_N} \quad (14)$$

$$R = \frac{\sum_{(x,y)} G(x,y)B(x,y)}{\sum_{(x,y)} G(x,y)} = \frac{L_r}{L_s} \quad (15)$$

式中, $G$ 为人工标定得到的分割后的裂缝图像, $B$ 为显著性阈值分割后的图像。 $L_r$ 表示提取的结果是真实裂缝的长度, $L_N$ 表示算法提取的裂缝的总长度, $L_s$ 表示裂缝的实际长度。在此基础上,根据查准率和查全率,给出综合评价指标<sup>[16,18]</sup>

$$F_\beta = \frac{(1+\beta^2)P \times R}{\beta^2 \times P + R} \quad (16)$$

同样采用 $\beta^2 = 0.3$ 使准确率的权重高于召回率。

实验分别采用 AC-I、LC-I、FT-I 和本文算法对于 3 组中所有的 835 幅裂缝图像计算显著性,阈值分割后,进行准确率、召回率和  $F_\beta$  的统计,计算 3 项指标的均值。

从图 12 中可看出,本文算法 3 项指标均优于其

他算法,且在 80% 左右。说明了该算法对于裂缝图像的显著性分割结果是有效的,比这些经典显著性算法思想(state-of-art)能更好地提取裂缝。但也与所有的显著性算法有类似结果<sup>[16-24]</sup>,无法如同人类视觉一样,极为精确地分割出图像中所有的显著性区域(ground truth)。

本文算法与传统的阈值分割后,根据线性几何特征提取裂缝的方法(传统方法 1)以及基于边缘检测的方法(传统方法 2)对比效果如图 13 所示(先灰

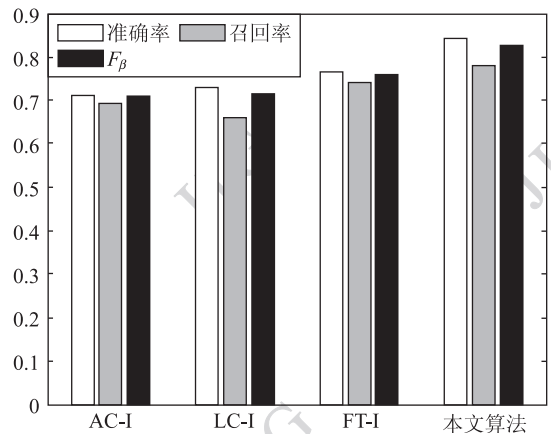


图 12 准确率、召回率和  $F_\beta$  柱状图

Fig. 12 Histogram of precision, recall and F-measure

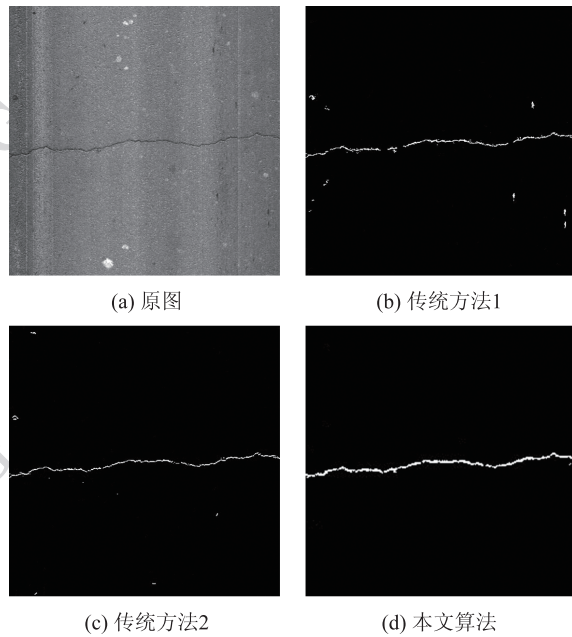


图 13 传统算法与本文算法裂缝提取结果对比  
Fig. 13 Crack extraction results of traditional methods and ours

度校正预处理)。

传统方法 1 由于裂缝区域的灰度并不总是一致均匀,会在裂缝中间产生较多的断裂,且存在一些与裂缝线性特征相似的干扰;传统方法 2 仅突出了裂缝边缘部分,某些边缘性很强的噪声也残留图中。而本文算法能够均匀地突出整个裂缝区域。

对于 3 组中所有 835 幅裂缝图像,分别计算其查全率和查准率,当两者都大于 75% 时,认为裂缝检测结果是正确的。

设图像总数为  $K$ ,实际存在裂缝的图像数为  $M$ ,不存在裂缝的图像数为  $N$ ,检测出的裂缝图像数为  $T$ ,存在裂缝但未检测出来的数目为  $m$ ,算法将无裂缝图像误检为存在裂缝图像的数目为  $n$ ,则检测结果的正确率如表 1 所示,漏检率和误检率结果如表 2 所示。

表 1 裂缝图像检测正确率结果

Table 1 Correct detection rate of crack image

$M$	$T$	$m$	正确率/%
202	193	9	95.5
379	358	20	94.5
254	242	12	95.3

表 2 漏检率和误检率统计结果

Table 2 Statistical results of missing rate and misuse detection rate

$K$	$M$	$N$	$m$	$n$	漏检率/%	误检率/%
1 000	202	798	9	27	4.5	3.4
1 000	379	621	20	24	5.3	3.9
1 000	254	746	12	34	4.7	4.6

从表 1 和表 2 可知,3 组数据中的检测正确率都在 94% 以上,漏检率和误检率都小于 6%,证明本文算法有效,满足实际检测需求。

### 3 结 论

将裂缝特征与图像显著性相结合,从局部灰度稀疏性、全局对比度、细尺度增强以及空间连续性角度出发,采用图像底层特征,计算裂缝显著性,最后分割、提取裂缝。检测结果表明,该方法对较复杂环境下的各种裂缝都有效,即使裂缝整体程度轻微、尺度细腻。下一步将综合考虑生物学、心理学的视觉显著性模型,处理裂缝特征不明显、路面背景噪声干扰非常严重的图像,进一步提高裂缝显著性区域提取的准确度。

### 参考文献(References)

- [1] Cheng H D, Miyojim M. Automatic pavement distress detection system [J]. Journal of Information Sciences, 1998, 108(1): 219-240.
- [2] Kirschke K R, Velinsky S. A histogram-based approach for automated pavement-cracks sensing [J]. Journal of Transportation Engineering, 1992, 119(3): 700-710.
- [3] Egemen T, Vimm R A, Halil C, et al. Digital image processing for pavement distress analyses [C]//The 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium. Ames, Iowa, USA: Iowa State University, 2005: 1-13.
- [4] Gao J Z, Ren M W, Tang Z M, et al. Automatic road crack detection and identification [J]. Computer Engineering, 2002, 29(2): 149-150. [高建贞,任明武,唐振民,等.路面裂缝自动检测与识别[J].计算机工程,2002,29(2):149-150.]
- [5] Li Q Q, Liu X L. A model for segmentation and distress statistic of massive pavement image based on multi-scale strategies [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, 37(B5): 63-68.
- [6] Gao J Z, Lu J F, Zhao C X, et al. The automatic pavement distress detection and identification based on multi-fit method [J].

- Computer Engineering and Applications, 2004, 40(22): 220-223. [高建贞,陆建峰,赵春霞,等. 基于多级拟合的道路病害自动检测与识别[J]. 计算机工程与应用,2004,40(22):220-223.]
- [7] Yan M D, Bo S B, He Y Y. A method of image detection and analysis for pavement crack based on morphology [J]. Journal of Engineering Graphics, 2008, 29(2): 142-147. [闫茂德,伯绍波,贺昱曜. 一种基于形态学的路面裂缝检测与分析方法[J]. 工程图学学报,2008,29(2):142-147.]
- [8] Bahram J, Jack S, Sherif K, et al. Pilot for automated detection and classification of road surface degradation features, JHR 03-293[R]. Connecticut, USA: Connecticut Transportation Institute, 2003.
- [9] Ma C X, Zhao C X, Hu Y, et al. Pavement cracks detection based on NSCT and morphology [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(12): 1761-1767. [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.]
- [10] Wang G, He A Z, Xiao L. Algorithm research in ridgelet transform domain based on the image content of freeway local linear crack [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(3): 341-346. [王刚,贺安之,肖亮. 基于高速公路裂纹局部线性特征内容的脊波变换域算法研究[J]. 光学学报,2006,26(3):341-346.]
- [11] Tang L, Zhao C X, Wang H N, et al. Detection and classification of pavement surface cracks based on image analysis [J]. Journal of Engineering Graphics, 2008, 29(3): 99-104. [唐磊,赵春霞,王鸿楠,等. 基于图像分析的路面裂缝检测和分类[J]. 工程图学学报,2008,29(3):99-104.]
- [12] Chang H D, Chen J R, Chris G, et al. Novel approach to pavement cracking detection based on fuzzy set theory[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1999, 13(4): 270-280.
- [13] Zhang H G, Wang Q, Wei W. Pavement distress detection based on artificial population [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2005, 29(4): 389-393. [张洪光,王祁,魏玮. 基于人工种群的路面裂纹检测[J]. 南京理工大学学报,2005,29(4):389-393.]
- [14] Zou Q, Li Q Q, Mao Q Z, et al. Target-points MST for pavement crack detection [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(1): 71-75. [邹勤,李清泉,毛庆洲,等. 利用目标点最小生成树的路面裂缝检测[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011,36(1):71-75.]
- [15] Ma C X, Zhao C X, Di F, et al. Road crack detection under natural environment [J]. Journal of Engineering Graphics, 2011, 32(4): 20-26. [马常霞,赵春霞,狄峰,等. 自然环境下路面裂缝的识别[J]. 工程图学学报,2011,32(4):20-26.]
- [16] Cheng M M, Zhang G X, Niloy J M, et al. Global contrast based salient region detection [C] //Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Colorado Springs, USA: IEEE, 2011: 409-416.
- [17] Itti L, Koch C, Niebur E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998,20(11): 1254-1259.
- [18] Achanta R, Hemami S, Estrada F, et al. Frequency-tuned salient region detection [C]// Proceeding of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Florida, USA: IEEE, 2009: 1597-1604.
- [19] Goferman S, Zelnik L, Tal A. Context-aware saliency detection [C]//Proceeding of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, California, USA: IEEE 2010: 2376-2383.
- [20] Hou X D, Zhang L Q. Saliency detection: a spectral residual approach [C]//Proceeding of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Florida, USA: IEEE, 2007: 1-8.
- [21] Achanta R, Estrada F, Wils P, et al. Salient region detection and segmentation [C] // Proceeding of International Conference on Computer Vision Systems. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008: 66-75.
- [22] Zhai Y, Shah M. Visual attention detection in video sequences using spatiotemporal cues [C]//ACM Multimedia. Santa Barbara, CA, USA: ACM Press, 2006: 815-824.
- [23] Zhang Q R, Jing L, Xiao H M, et al. Image segmentation based on visual saliency [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(5): 767-772. [张巧荣,景丽,肖会敏,等. 利用视觉显著性的图像分割方法[J]. 中国图象图形学报,2011,16(5):767-772.]
- [24] Ma Y F, Zhang H J. Contrast-based image attention analysis by using fuzzy growing [C]//Proceedings of the 11th ACM International Conference on Multimedia. New York, NY: Association for Computing Machinery, 2003: 374-381.