

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2012 **5**  
Vol.17 No.

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

2012年5月 第17卷 第5期(总第193期)

## 目次

### 综述

- 中国图像工程:2011 ..... 章毓晋(603)
- 植物叶片表面质感建模与真实感绘制研究进展 ..... 田原,赵春江,陆声链,郭新宇(613)

### 图像处理和编码

- 高位有效位概率算术解码的图像密写改进算法 ..... 马丽红,吕先明,高小满(621)
- 滑动平均和改进权重函数的快速非局部平均图像去噪算法 ..... 熊波,尹周平(628)
- 提升小波的同态滤波在图像烟雾弱化中的应用 ..... 范有臣,李迎春,韩意,张来线(635)

### 图像分析和识别

- 基于彩色模型的重构标记分水岭分割算法 ..... 张桂梅,周明明,马珂(641)
- 均衡化特征匹配的非刚体细胞形态跟踪 ..... 陈莹,艾春璐(648)
- 图像斑状特征位置与尺寸的自动检测 ..... 王志衡,刘红敏(656)
- 改进极化白化滤波的边缘检测 ..... 邓少平,张继贤,李平湘,黄国满(665)
- 联合特征在行人检测中的应用 ..... 杨阳,杨静宇(671)
- Gabor 相位特征的人脸光照不变量提取 ..... 范春年,张福炎(676)

### 图像理解和计算机视觉

- 保持几何特征的自适应弹性二次曲线模型 ..... 蒋建国,郝世杰,郭艳蓉,詹曙,李鸿(682)
- 局部颜色映射的彩色夜视算法 ..... 钱小燕,张天慈,王帮峰,黄圣国(689)
- 结合分支定界法和线性规划的摄像机位姿估计 ..... 马文娟(694)

金字塔评分改进主方向模板匹配的实时目标检索 ..... 洪朝群,朱建科,李娜,卜佳俊,陈纯(700)

### 计算机图形学

类曲率在曲线相似性判定中的应用 ..... 于昊,赵乃良,陈小雕(707)

### 虚拟现实与增强现实

人机系统中视域评估的可视化 ..... 李倩,吉晓民,林文周(715)

### 遥感图像处理

小波方向子带偏微分方程遥感图像去噪 ..... 王相海,李放,王爽(721)

遥感图像理想均衡化及图像质量定量评价 ..... 孟天佑,汪云甲(729)

### 地理信息技术

点要素扇形缓冲区的设计与应用 ..... 侯景伟,孔云峰,张迪,吕可文(740)

## 中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996年创刊)

第17卷 第5期

2012年5月16日出版

**主管单位** 中国科学院  
**主 办** 中国科学院遥感应用研究所  
 中国图象图形学学会  
 北京应用物理与计算数学研究所  
**主 编** 李小文  
**编辑出版** 《中国图象图形学报》编辑出版委员会  
 北京9718信箱 邮编 100101  
 电子信箱:jig@irsa.ac.cn  
 电话:010-68407995 010-82614429  
 网 址:www.cjig.cn  
**印刷装订** 北京北林印刷厂  
**广告经营许可证** 京朝工商广字第0346号  
**总 发 行** 北京报刊发行局  
**订 购** 全国各地邮局  
**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
 (中国国际书店)  
 (北京399信箱 邮编 100044)

**Superintended by** Chinese Academy of Sciences  
**Sponsored by** Institute of Remote Sensing Application,  
 CAS China Society of Image and Graphics  
 Institute of Applied Physics and Computational  
 Mathematics  
**Chief editor** LI Xiaowen  
**Editor, Publisher** Editorial and Publishing Board  
 of Journal of Image and Graphics  
 (P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)  
 E-mail:jig@irsa.ac.cn  
**Distributed by** Beijing Bureau for Distribution of Newspapers  
 and Journals  
**Domestic** All Local Post Offices in China  
**Foreign** China International Book Trading Corporation  
 (P. O. Box 399, Beijing 100044, China)  
**Printed by** Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00元

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 5 May 2012

## Contents

### Review

- Image engineering in China: 2011 ..... Zhang Yujin (603)
- Advances in appearance modeling and photorealistic rendering of plant leaves  
..... Tian Yuan, Zhao Chunjiang, Lu Shenglian, Guo Xinyu (613)

### Image Processing and Coding

- Most significant bits probability arithmetic decoding for improved image steganography  
..... Ma Lihong, Lv Xianming, Gao Xiaoman (621)
- Fast non-local means for image de-noising on moving average and modified weight function ..... Xiong Bo, Yin Zhouping (628)
- Weakening of smoke for homomorphic filtering ..... Fan Youchen, Li Yingchun, Han Yi, Zhang Laixian (635)

### Image Analysis and Recognition

- Image segmentation algorithm for reconstruction labeling watershed in color space ..... Zhang Guimei, Zhou Mingming, Ma Ke (641)
- Non-rigid cell contour tracking method for balanced feature matching ..... Chen Ying, Ai Chunlu (648)
- Automatically detecting position and size of blob features in images ..... Wang Zhiheng, Liu Hongmin (656)
- Improved polarimetric whitening filter for edge detection ..... Deng Shaoping, Zhang Jixian, Li Pingxiang, Huang Guoman (665)
- Pedestrian detection based on compound feature ..... Yang Yang, Yang Jingyu (671)
- Illumination invariant extraction on Gabor phase ..... Fan Chunnian, Zhang Fuyan (676)

### Image Understanding and Computer Vision

- Adaptive geometrical-feature-preserving elastic quadratic wire model .....  
..... Jiang Jianguo, Hao Shijie, Guo Yanrong, Zhan Shu, Li Hong (682)
- Color night vision algorithm based on local color mapping ... Qian Xiaoyan, Zhang Tianci, Wang Bangfeng, Huang Shengguo (689)
- Camera pose estimation using branch and bound method with linear programming ..... Ma Wenjuan (694)
- Real-time object retrieval with dominant orientation template matching improved by pyramid scoring  
..... Hong Chaoqun, Zhu Jianke, Li Na, Bu Jiajun, Chen Chun (700)

### Computer Graphics

- Quasi-curvature and its application in similarity measurement of curves  
..... Yu Hao, Zhao Nailiang, Chen Xiaodiao (707)

### Virtual Reality and Augmented Reality

- Visualization of the visual range assessment in man-machine system ..... Li Qian, Ji Xiaomin, Lin Wenzhou (715)

### Remote Sensing Image Processing

- Remote sensing image de-noising on partial differential equation in wavelet directional subband  
..... Wang Xianghai, Li Fang, Wang Shuang (721)
- Ideal equalization of remote sensing images and quantitative assessment of image quality ..... Meng Tianyou, Wang Yunjia (729)

### Geoinformatics

- Design and applications of sector buffers for point feature  
..... Hou Jingwei, Kong Yunfeng, Zhang Di, Lv Kewen (740)

中图法分类号: TP391.4 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)05-0656-09

论文引用格式: 王志衡, 刘红敏. 图像斑状特征位置与尺寸的自动检测[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(5): 656-664

## 图像斑状特征位置与尺寸的自动检测

王志衡, 刘红敏

河南理工大学计算机科学与技术学院, 焦作 454003

**摘要:** 针对图像中经常存在的斑状特征, 提出一种位置与尺寸自动检测方法。首先基于斑状特征的梯度分布构造能够用于该特征检测的极值能量函数; 然后从理论上分析所构造极值能量函数的极值特性, 并基于模拟图像进行极值特性直观分析; 最后给出基于极值能量函数的图像斑状特征位置与尺寸检测实现算法。实验结果表明, 本文方法不仅能够有效准确地检测出图像斑状特征的位置与尺寸, 而且对图像噪声、模糊、视角变化具有较强的稳定性与鲁棒性。

**关键词:** 斑状特征; 位置与尺寸检测; 极值能量函数; 3 维极值能量空间

### Automatically detecting position and size of blob features in images

Wang Zhiheng, Liu Hongmin

School of Computer Science and Technique, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China

**Abstract:** Focusing on blob features that usually appear in images, we developed a method for detecting their positions and size automatically. The main work includes: 1) An extreme energy function for detecting blob features, which is constructed based on the gradient distribution of blob features; 2) A theoretical analysis made on the property of extreme energy function, and then an intuitive analysis of its extreme property is made based on simulated images; 3) The implementation of the algorithm for detecting positions and sizes of blob features is proposed; 4) Experiment results showing that the method proposed in this paper can effectively and exactly detects positions and sizes of blob features in images, and the method performs stable and robust under noise, image blur, and viewpoint changes.

**Key words:** blob feature; position and size detection; extreme energy function; three-dimensional extreme energy space

## 0 引言

特征检测一直是计算机视觉领域的经典问题, 近年来该领域(特别是特征点与特征区域检测方面)取得了较大进展, 产生了一批高效实用的算法, 已有文献主要侧重在特征点与特征区域检测研究上。

图像特征点检测一直是较为热门的研究课题,

在提出的众多特征点检测算法中, Harris 算子<sup>[1]</sup>、SUSAN 算子<sup>[2]</sup>与 CSS 算子<sup>[3]</sup>性能较为出色, 在 CSS 算法的基础上, 产生一系列改进算法<sup>[4-5]</sup>。随着技术的发展, 支持向量机<sup>[6]</sup>、轮廓链表编码<sup>[7]</sup>、形态学<sup>[8]</sup>、小波变换<sup>[9]</sup>等技术也被用于特征点检测。近年来, 特征点检测技术又向特定场景<sup>[10-11]</sup>、特定类型<sup>[12]</sup>、多尺度<sup>[13-14]</sup>、视频图像<sup>[15]</sup>进一步深入发展。还有文献<sup>[16-17]</sup>从其他角度对这一问题进行研究。

收稿日期: 2011-09-09; 修回日期: 2011-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(61005033, 61075033); 模式识别国家重点实验室开放基金项目(20090018)

第一作者简介: 王志衡(1983—), 男, 副教授, 2009年中国科学院自动化研究所获模式识别专业博士学位, 主要研究方向为计算机视觉。

E-mail: wzheny@eyou.com

通讯作者: 刘红敏, E-mail: hongminliu@hpu.edu.cn

文献[18]基于统一的数据集与评判准则对各种常见特征点检测算法进行了性能比较分析。总体上,图像特征点检测技术已经趋于成熟。

特征区域检测方面的研究相对开始较晚,主要成果侧重在具有特定不变性的区域检测上,如尺度不变区域<sup>[19]</sup>、仿射不变区域<sup>[20-22]</sup>,该类检测方法大多基于 Harris 或者 Hessian 矩阵实现。真正具有射影不变性的区域检测是 Matas<sup>[23]</sup>提出的基于局部灰度极值的区域特征检测算法——最大稳定极值区域检测,该方法主要采用一种类似于分水岭的方法来检测灰度稳定区域。近年来,文献中还提出了显著区域<sup>[24-25]</sup>、振铃区域<sup>[26]</sup>、公路平面区域<sup>[27]</sup>及其他类型区域<sup>[28-29]</sup>检测方法。

本文主要研究一类图像中明显与周围不同的区域特征(类似斑点、下文称斑状特征、理想斑状特征为均一圆形区域,实际检测过程中不局限于固定形状),如图 1 给出了几组包含斑状特征的自然场景与人工场景图像,如第 1、2 幅图像中的花瓣与花朵、第 3 幅中的人头、第 4 幅中的暗斑与亮斑、第 5 幅中豹子斑纹、第 6 幅中包含的文字、第 7 幅中的小窗户等均可视为斑状特征。分析发现,无论是自然场景还是人工场景图像中,斑状特征都是普遍存在的,提取斑状特征的位置与尺寸对于场景目标识别、内容理解等任务具有重要价值。与图像斑状特征相关的早期研究主要是单尺度拉普拉斯 LOG 算子,基于 LOG 算子极值能够提取出图像中较小的斑状特征的中心位置;在 LOG 的基础上,Lindeberg<sup>[30]</sup>结

合尺度空间理论提出了多尺度的拉普拉斯 LOG 算子;为提高运算效率,利用高斯差分代替近似高斯滤波,Lowe<sup>[14]</sup>提出在 3 维 DOG 尺度空间中搜索极值点来提取特征点的思路(Lowe 在此基础上提出的著名的 SIFT 算法)。本质上多尺度 LOG 与 DOG 在数学上是近似等价的,它们能够提取出图像中斑状特征的位置与尺寸。但是,大量实验后我们发现,对于图像中尺寸较小的斑状特征,多尺度 LOD/DOG 算子能够有效地提取出其中心位置与尺寸,而对于图像中尺寸较大的斑状特征,由于高斯滤波的平滑作用,多尺度 LOD/DOG 算子提取特征的尺寸偏离其真实值,且这种偏差随着高斯尺度的增大越来越明显。

从已有文献来看,目前还没有专门算法实现斑状特征的位置与尺寸准确提取。本文从斑状特征的梯度分布入手,首先根据其梯度分布构造具有极值响应的极值能量函数,然后对极值能量函数的极值特性进行理论与直观分析,最后给出图像斑状特征位置与尺寸检测的实现算法。本文提出的斑状特征位置与尺寸检测算法步骤如下:1)基于极值能量函数构造 3 维极值能量空间;2)在 3 维极值能量空间中进行极大值检测;3)去除伪极大值并获得斑状特征的位置与尺寸。实验结果表明,本文方法能够有效准确地检测出图像中斑状特征的位置与尺寸,并对图像噪声、模糊、视角变化具有较强的稳定性与鲁棒性。

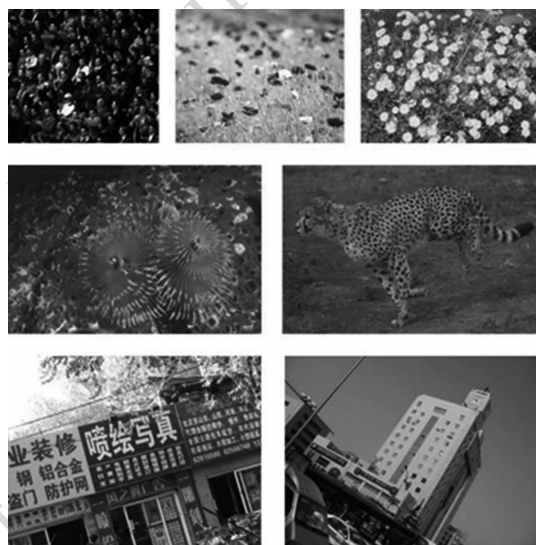


图 1 包含斑状特征的真实图像  
Fig. 1 Real Images contain blob features

## 1 斑状特征建模与极值能量函数构造

如图 2(a)所示,理想状态下,图像中的斑状特征可用圆形区域来建模

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & x^2 + y^2 \leq r_0^2 \\ 0 & x^2 + y^2 > r_0^2 \end{cases} \quad (1)$$

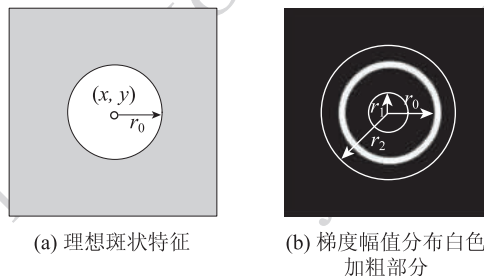


图 2 斑状特征示意图  
Fig. 2 Schematic figure of blob feature

图 2(b) 给出了图像斑状特征的梯度幅值分布图,可以看出,斑状特征的梯度幅值呈圆周分布。考虑以斑状特征中心为圆心、半径为  $r$  的圆形区域“ $G(X,r)$ ”(简记为  $G_r$ ),记  $G_r$  内包含像素的梯度幅值之和为  $E(G_r) = \sum_{X_i \in G_r} Mag(X_i)$ ,则显然有当  $r < r_0$  时(如图 2(b) $r_1$  所示情况),斑状特征的梯度幅值均在  $r$  为半径的圆之外, $E(G_r) = 0$ ;当  $r \geq r_0$  时(如图 2(b) $r_2$  所示情况),斑状特征的梯度幅值均在  $r$  为半径的圆之内, $E(G_r)$  取得恒定最大值,如图 3(a)所示为  $E(G_r)$  随着  $r$  增大的变化曲线。为使  $E(G_r)$  对  $r$  具有唯一极值响应,将  $E(G_r)$  对  $r$  进行归一化

$$E(X,r) = \frac{E(G_r)}{r} = \frac{\sum_{X_i \in G(X,r)} Mag(X_i)}{r} \quad (2)$$

函数  $E(X,r)$  称为图像斑状特征的极值能量函数,如图 3(b)所示为特征中心处的极值能量函数随着半径  $r$  增大的变化曲线,显然该函数在特征尺寸  $r_0$  处达到唯一极大值。

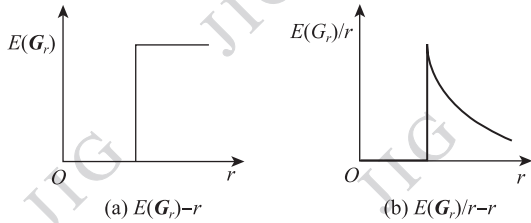


图 3 变化曲线  
Fig. 3 Change curves

## 2 极值能量函数的极值特性分析

### 2.1 理论分析

下面证明  $E(X,r)$  对斑状特征的位置与尺寸同时具有极值响应,即当  $X$  与斑状特征的中心重合, $r$  等于斑状特征半径  $r_0$  时,函数  $E(X,r)$  达到极大值,该性质表明利用极值能量函数  $E(X,r)$  能够准确检测出图像斑状特征的位置与尺寸。

如图 4 所示,圆  $O_1$  表示半径为  $r_0$  的斑状特征,圆  $O_2$  表示半径为  $r$  的检测圆。记  $O_1O_2$  的距离为  $d$ ,两圆交点分别为  $P_1, P_2$ ,以  $O_1$  为坐标原点, $\overrightarrow{O_1O_2}$  方向及其垂直向上方向为坐标轴建立坐标系,则斑状特征可用函数  $x^2 + y^2 \leq r_0^2$  表示,检测圆可用函数  $(x-d)^2 + y^2 \leq r^2$  表示,此时基于检测圆的极值能量函数表达式为

$$E(d,r) = \frac{\sum_{X_i \in G(d,r)} Mag(X_i)}{r} \quad (3)$$

式中,  $\sum_{X_i \in G(d,r)} Mag(X_i)$  表示以点  $O_2(d,0)$  为圆心, $r$  为半径的圆形区域中包含梯度幅值之和,由于斑状特征梯度幅值呈圆周分布,忽略噪声影响及离散化误差,不失一般性可令斑状特征边缘处梯度幅值为 1,则  $\sum_{X_i \in G(d,r)} Mag(X_i)$  可用检测圆  $O_2$  中包含的特征圆  $O_1$  的弧长  $\widehat{P_1P_2}$  近似。

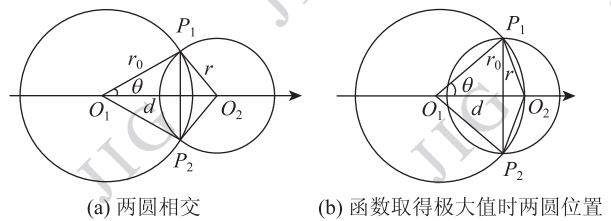


图 4 两圆位置关系  
Fig. 4 Relationship of the two circles

分检测圆与特征圆相交、检测圆包含特征圆等不同情况可获得  $E(d,r)$  的表达式为

$$E(d,r) = \begin{cases} \frac{2\theta r_0}{r} & |r_0 - r| < d < |r_0 + r| \quad \text{I (相交)} \\ \frac{2\pi r_0}{r} & r \geq r_0 \text{ 且 } d \leq r - r_0 \quad \text{II (包含)} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

1) 两圆相交(I),即当  $|r_0 - r| < d < |r_0 + r|$  时

$$E(d,r) = \frac{2\theta r_0}{r}$$

联立两圆方程,获得交点坐标

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = r_0^2 \\ (x-d)^2 + y^2 = r^2 \end{cases} \Rightarrow x_p = \frac{r_0^2 - r^2 + d^2}{2d} \in (-r_0, r_0) \quad (5)$$

于是

$$\theta = \arccos\left(\frac{x_p}{r_0}\right) = \arccos\left(\frac{r_0^2 - r^2 + d^2}{2dr_0}\right) \in (0, \pi) \quad (6)$$

记

$$t = \frac{r_0^2 - r^2 + d^2}{2dr_0} = \frac{1}{2r_0} \left( \frac{r_0^2 - r^2}{d} + d \right) \quad (-1 < t < 1)$$

则

$$E(d,r) = \frac{2\arccos(t)r_0}{r} \quad (7)$$

分析函数  $E(d,r)$  对位置  $d$  的单调性

$$\frac{\partial E(d,r)}{\partial d} = -\frac{2r_0}{r} \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{1}{2r_0} \left( -\frac{r_0^2-r^2}{d^2} + 1 \right) = \frac{(r_0^2-r^2)-d^2}{d^2r\sqrt{1-t^2}} \quad (8)$$

(1)  $0 < r < r_0$  且  $d < \sqrt{r_0^2-r^2}$  时,  $\frac{\partial E(d)}{\partial d} > 0$ , 函数  $E(d)$  单调递增;

(2)  $0 < r < r_0$  且  $d > \sqrt{r_0^2-r^2}$  时,  $\frac{\partial E(d)}{\partial d} < 0$ , 函数  $E(d)$  单调递减;

(3)  $0 < r < r_0$  且  $d = \sqrt{r_0^2-r^2}$  时,  $\frac{\partial E(d)}{\partial d} = 0$ ,

$\sin \theta = \frac{r}{r_0}, \theta \in (0, \pi/2)$ , 此时两圆位置关系如图 4(b) 所示, 函数  $E(d,r)$  对于检测圆中心位置  $d$  取得极大值

$$E(d,r) = \frac{2\theta}{\sin(\theta)} = \frac{2r_0 \cdot \arcsin\left(\frac{r}{r_0}\right)}{r} \quad (9)$$

此时,  $E(d,r) = \frac{2\theta}{\sin(\theta)}$ , 分析其对半径  $r$  的单调性

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(d,r)}{\partial r} &= \frac{\partial(E(d,r))}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} = \\ &= 2 \frac{\sin(\theta) - \theta \cos(\theta)}{\sin^2 \theta} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{r}{r_0}\right)^2}} = \\ &= 2 \frac{\cos(\theta)}{\sin^2 \theta} \cdot (\tan(\theta) - \theta) \cdot \frac{1}{\sqrt{r_0^2-r^2}} \quad (10) \end{aligned}$$

由  $\frac{\partial \tan(\theta) - \theta}{\partial \theta} = \sec^2 \theta - 1 = \tan^2 \theta > 0$ , 可得

$\tan(\theta) - \theta > g(0) = 0$ , 于是有  $\frac{\partial E(d,r)}{\partial r} > 0$ 。显然函数  $E(d,r)$  在  $\theta \in (0, \pi/2)$  上单调递增, 且有

$$E(d,r) = f(\theta) = \frac{2\theta}{\sin \theta} < f\left(\frac{\pi}{2}\right) = \pi \quad (11)$$

(4)  $r > r_0$  时, 显然  $\frac{\partial E(d)}{\partial d} < 0$ , 函数  $E(d,r)$  单调递减, 且

$$E(d,r) = \frac{2\theta r_0}{r} < 2\theta < 2\pi \quad (12)$$

2) 检测圆包含特征圆(II), 即  $r \geq r_0$  且  $d \leq r - r_0$  时,  $E(d,r) = \frac{2\pi r_0}{r}$ 。

(1) 当  $r = r_0$  时, 由  $d \leq r - r_0 = 0$  可得  $d = 0$ , 此时  $E(d,r)$  有极大值  $E_{\max}(r,d) = 2\pi$ 。

(2)  $r > r_0$  且  $d < r - r_0$ 。此时检测圆完全包含特征圆, 显然随着  $r$  的增大,  $E(d,r)$  单调递减, 没有极大值, 且有  $E(r,d) = \frac{2\pi r_0}{r} < 2\pi$ 。

(3)  $r > r_0$  且  $d = r - r_0$ 。此时检测圆包含特征圆且两圆呈内切关系。下面验证此时  $E(d,r)$  不是极大值位置: 记  $\Delta$  表示一个足够小数正数, 显然  $r' = r - \Delta, d' = d - \Delta$  时两圆也内切, 有  $E(r - \Delta, d - \Delta) = \frac{2\pi r_0}{r - \Delta} > \frac{2\pi r_0}{r} = E(r,d)$ , 可知  $E(d,r)$  在此位置处不存在极大值, 且有  $E(r,d) = \frac{2\pi r_0}{r} < 2\pi$ 。

综合 1)2) 可得, 只有在情况 2) (1) 下, 函数  $E(d,r)$  达到极大值  $2\pi$ , 此时  $r = r_0, d = 0$ , 于是可以得出结论, 当且仅当检测圆与特征圆的中心及尺寸均一致时, 极值能量函数才能达到极大值(极大值)。

□ 证毕。

## 2.2 直观分析

如图 5(a) 所示为一幅包含斑状特征的模拟图像, 图像大小为  $212 \times 212$ , 斑状特征的半径大小为 26, 点 A、B、C 分别表示斑状特征中心、特征区域内、特征区域外 3 个位置, 计算极值能量所用检测圆的最大半径设置为 60。如图 5(b) — (d) 分别为点 A、B、C 处极值能量随着检测圆半径的变化曲线; 如图 5(e) — (g) 表示检测圆半径  $r = r_0/2, r = r_0, r = 1.2r_0$  时, 极值能量函数随着检测圆的中心  $d$  增大的变化曲线 ( $E-d$  曲线)。下面分别分析极值能量函数对检测圆尺寸  $r$ 、中心位置的极值  $d$  特性:

1) 由图 5(b) 可以看出, 在特征中心位置 A 处, 随着检测圆半径增大, 极值能量函数存在唯一的极大值, 显然, 这个唯一的极大值位置对应斑状特征的半径大小。如图 5(a) 中最小的圆表示以点 A 为圆心, 该极大值位置对应尺寸为半径的圆, 可以看出该圆与斑状特征大小一致。

2) 由图 5(c) 可以看出, 在特征区域内的点 B 处, 随着检测圆半径增大, 极值能量函数存在唯一的极大值, 如图 5(a) 中间一层圆表示以点 B 为圆心, 该极大值位置对应尺寸为半径的圆, 从图中可以看出此时检测圆与斑状特征圆相切。

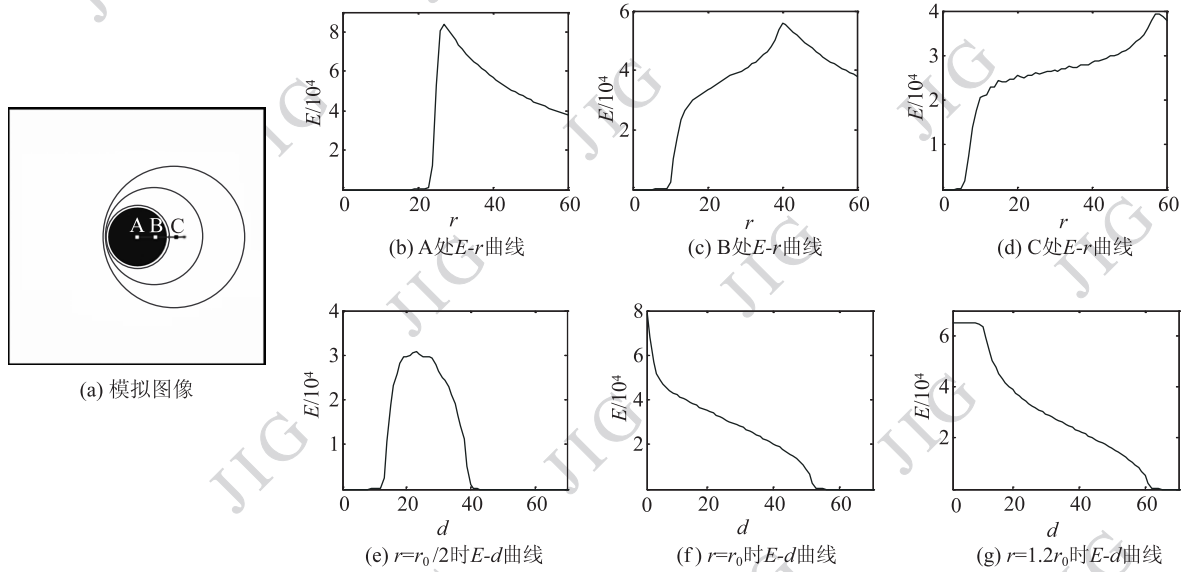


图 5 模拟图像及结果

Fig. 5 A simulated image and results

3) 由图 5(d) 可以看出, 在特征区域外的点 C 处, 随着检测圆半径的增大, 极值能量函数存在唯一的极大值, 如图 5(a) 最外一层圆表示以点 C 为圆心、该极大值位置对应尺寸为半径的圆, 从图中可以看出此时检测圆与斑状特征圆相切。

4) 由图 5(e) 可以看出, 当检测圆半径  $r = r_0/2$  时, 随着检测圆中心位置  $d$  增大, 极值能量函数变化曲线存在唯一的极值, 但由 2.1 节理论分析可知, 该位置能量函数对于半径  $r$  变化并非极值。

5) 由图 5(f) 可以看出, 当检测圆半径  $r = r_0$  时, 随着检测圆中心位置  $d$  增大极值能量函数单调递减, 在  $d = 0$  位置处为极大值(最大值), 这与 2.1 节的理论分析结果一致。

6) 由图 5(g) 可以看出, 当检测圆半径  $r = 1.2r_0$  时, 若  $d \leq (r - r_0)$ , 则极值能量函数不变化; 若  $d > (r - r_0)$ , 则极值能量函数随检测圆的中心位置  $d$  增大单调递减; 极值能量函数在区间  $d \leq (r - r_0)$  上对  $d$  取得极大值。根据 2.1 节理论分析结果, 区间  $d \leq (r - r_0)$  上极值能量函数不能同时对  $r, d$  取得极大值。

由情况 1) 5) 表明, 当且仅当检测圆与图像中斑状特征的中心位置、半径均一致时, 本文所构造的极值能量函数才能同时对两个参数取得极大值, 此时称极值能量函数取得第 I 类极大值。在 2) — 4), 6) 情况下, 尽管能量函数在其他条件下均不能对两个参数取得极大值, 但可以一个参数取得极大值, 此时称极值能量函数取得第 II 类极大值, 本质上第 II

类极大值属于伪极大值。

本文将利用检测第 I 类极大值进行图像斑状特征检测。但是, 实验表明, 尽管理论上第 II 类极大值点仅能对一个参数达到极大值, 但由于图像噪声影响, 在利用极值能量函数的极大值进行斑状特征检测位置与尺寸时, 第 II 类极大值处函数取得极大值的概率明显高于其他位置。必须在检测结果中识别并剔除第 II 类极大值。我们发现, 第 I 类极大值点对应的能量必定在其确定的特征圆中达到极大值, 反之, 如果一个极大值点确定的圆中包含其他能量更大的极大值点, 则可将该点确定为第 II 类极大值点。利用这一现象可识别并去除第 II 类极大值, 对于获得的极大值点  $(x_1, y_1, r_1)$ , 如果存在另一极大值点  $(x_2, y_2, r_2)$ , 满足  $\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} < r_1$  且  $E(x_2, y_2, r_2) > E(x_1, y_1, r_1)$ , 则可将  $(x_1, y_1, r_1)$  判定为第 II 类极大值, 去除。

### 3 算法概述

本文提出的图像斑状特征位置与尺寸自动检测算法可概述如下(记图像中点  $X_i$  处梯度幅值为  $Mag(X_i)$ ,  $G(X, r)$  表示以点  $X$  为圆心,  $r$  为半径的圆形区域)。

1) 计算梯度幅值 利用高斯梯度模板计算图像各点的梯度幅值。

2) 构造 3 维极值能量空间 给定一个检测半

径  $r$ , 对于图像中任一点  $X$ , 利用极值能量函数(式(2))计算  $X$  处的极值能量, 获得检测半径  $r$  下的极值能量图; 给定  $k$  个检测半径  $r = r_1, r_2, \dots, r_k$  (其中  $r_1, r_k$  表示拟检测斑状特征的最小与最大半径, 可根据拟检测斑状特征的情况预先设定), 可获得  $k$  幅极值能量图; 根据检测半径  $r$  从小到大依次将这  $k$  幅极值能量图进行排列, 可获得一个 3 维极值能量空间(这里 3 维分别指图像的行  $x$ 、列  $y$  与检测半径  $r$ )。

3) 在 3 维极值能量空间中检测极大值 在 3 维极值能量空间中, 任意点  $X(x, y, r)$  在  $r$  层的  $3 \times 3$  邻域内有 8 个邻域点,  $r-1, r+1$  层  $3 \times 3$  邻域内均有 9 个邻域点, 如果  $X(x, y, r)$  处的极值能量大于其他  $(8+9+9=26)$  个点处的极值能量, 则将  $X(x, y, r)$  确定为极大值点。

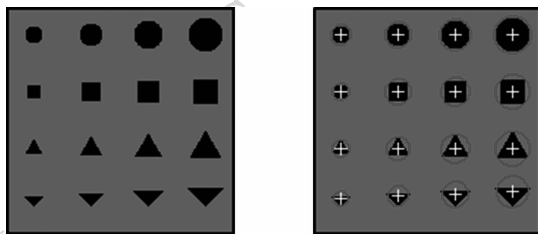
4) 剔除第 II 类极大值点 记步骤 3) 获得极大值点组成的集合为  $\{P_i = (x_i, y_i, r_i) \ (i = 1, 2, \dots, m)\}$  (其中  $m$  表示极大值点个数), 对于任一极大值点  $(x_i, y_i, r_i) \ (i = 1, 2, \dots, m)$ , 如果极大值点集合中存在  $(x_j, y_j, r_j) \ (i \neq j)$ , 满足条件  $\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} < r_i$  且  $E(x_j, y_j, r_j) > E(x_i, y_i, r_i)$ , 则将极大值点  $(x_i, y_i, r_i)$  作为第 II 类极大值点去除。

5) 获得斑状特征的位置与尺寸 经过步骤 4) 后保留下来的极大值点  $(x_i, y_i, r_i)$  可直接确定图像平面上的一个斑状特征  $(x_i, y_i, r_i)$ , 其中  $(x_i, y_i)$  确定斑状特征的中心,  $r_i$  确定斑状特征的尺寸(半径大小)。

## 4 实验结果

### 4.1 模拟图像实验

1) 实验图像 如图 6(a) 所示为实验图像, 图像



(a) 原始图像

(b) 检测结果

图 6 原始图像及检测结果

Fig. 6 Original image and results

大小为  $160 \times 160$ , 背景灰度值为 100, 斑状特征灰度值为 0。图像中共包括圆、正方形、正三角形、等腰直角三角形 4 类大小不同的图形, 从上到下各图形中心的行坐标依次为 20、60、100、140, 从左到右各图形的列坐标分别为 20、60、100、140, 从小到大各图形的尺寸(半径或者外接圆半径)依次为 6、8、10、12。

2) 实验配置 实验中计算高斯梯度时采用的高斯尺度大小为 1.0, 算法检测的最小与最大特征尺寸(半径)分别设置为 3 与 30, 实验过程中先将图像灰度大小区间转化为  $[0, 1]$ , 然后再对图像分别加入不同大小的椒盐噪声、高斯噪声或进行不同程度模糊。实验中加入椒盐噪声大小依次为 0.05、0.1、0.15、0.2、0.25、0.3, 加入高斯噪声大小依次为 0.05、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5, 进行高斯模糊尺度大小依次为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0。同一噪声水平或模糊水平下进行 200 次独立实验并统计平均结果。实验中发现, 本文算法检测获得特征的位置非常稳定, 不同条件下算法的误差主要表现在获得特征的尺寸上, 因此这里用计算获得特征的尺寸误差来度量算法准确性。

$$E_r = \frac{1}{16N} \sum_{i=1}^{16} \text{abs}(r - r_{\text{real}}) \quad (13)$$

式中,  $r$  表示特征检测尺寸,  $r_{\text{real}}$  表示特征实际尺寸,  $N = 200$  表示独立实验次数。

3) 实验结果及结论。如图 6(b) 为本文算法在原始图像上的检测结果, 图 7 为算法在不同噪声水平或模糊大小下尺寸误差曲线, 横坐标 6 个位置依次对应 6 个不同的噪声水平或高斯模糊水平, 纵坐

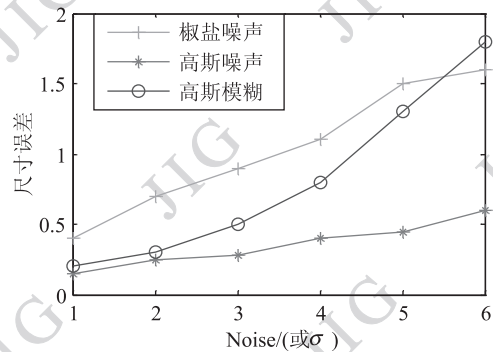


图 7 不同噪声与模糊下算法的尺寸误差

Fig. 7 Size error under different levels of noise and blur. (Horizontal coordinate denotes the levels of noise and Gaussian blur, and vertical coordinate denotes the size error)

标表示利用式(13)计算的尺寸误差,图8为算法在加入不同大小的椒盐噪声下检测结果示例,图9为算法在加入不同大小的高斯噪声下检测结果示例,图10为算法在不同高斯模糊下检测结果示例。

可以看出:1) 随着噪声的增大,算法检测准确性受椒盐噪声影响较大,相比而言,受高斯噪声的影响较小;算法准确性随着高斯模糊程度的增大而降低;2) 本文算法不仅能够用于图像斑状特征的检测,还能用于其他类型特征的位置与尺寸检测;3) 对于椒盐噪声,当噪声水平小于0.2时,本文算法能够较为准确的检测出目标特征,当噪声水平大于0.2时,算法检测出目标特征的同时,还检测出虚假目标,分析其原因主要是椒盐噪声本身就可以看做较小的斑状特征;4) 对于高斯噪声,即使在噪声水平达到0.5以上,本文算法还能够准确地检测出目标特征,且能有效抑制虚假特征的出现;5) 对于高斯模糊,本文算法在目标位置检测与虚假目标抑制方面均表现出较强鲁棒性,但随着模糊程度的增大,算法检测的特征尺寸大小逐渐偏离真实值,这是因为高斯模糊导致特征边缘模糊,使得算法依赖的边缘梯度强度信号降低,从而影响了特征尺寸检测的准确性。

实验结果表明,本文提出的图像斑状特征位置与尺寸自动检测算法对于图像噪声及模糊具有很好的鲁棒性与准确性。

#### 4.2 特征稳定性实验

算法提取特征的稳定性(即不同条件下获取同一场景图像中的特征能够重复出现)是进行目标识别、跟踪等任务的前提。利用不同视角下拍摄的图像组验证本文特征检测算法的稳定性。图11所示为本文算法的两组检测结果(检测特征最小、最大尺寸与高斯尺度分别为5、20、1.0)。重复特征采用如下方式确定:首先借助SIFT特征点匹配<sup>[14]</sup>计算同组两幅图像间的单应矩阵 $H$ ,对于第1幅图像中的特征 $F_1 = (X_1, r_1) = (x_1, y_1, r_1)$ 与第2幅图像中的特征 $F_2 = (X_2, r_2) = (x_2, y_2, r_2)$ ,记 $X_3 = HX_1$ ,如果满足 $\|X_3 - X_2\| \leq 3$ 且 $\text{abs}(r_1 - r_2) \leq 2$ ,则认为特征 $F_1$ 与 $F_2$ 为重复特征。SIFT重复特征可直接利用单应确定,MSER重复特征采用人工方式确定。

SIFT、MSER、本文算法在图11(a)上获得的特征数分别为72、22、176;在图11(b)上获得的特征

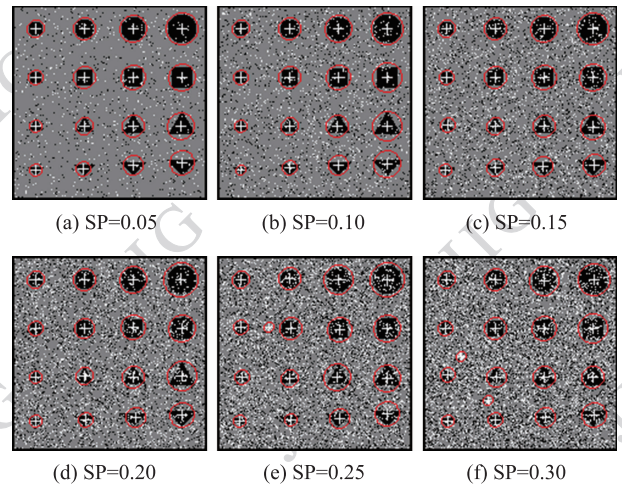


图8 不同水平椒盐噪声(SP)下的实验结果  
Fig.8 Detection results under different levels of salt and pepper noise

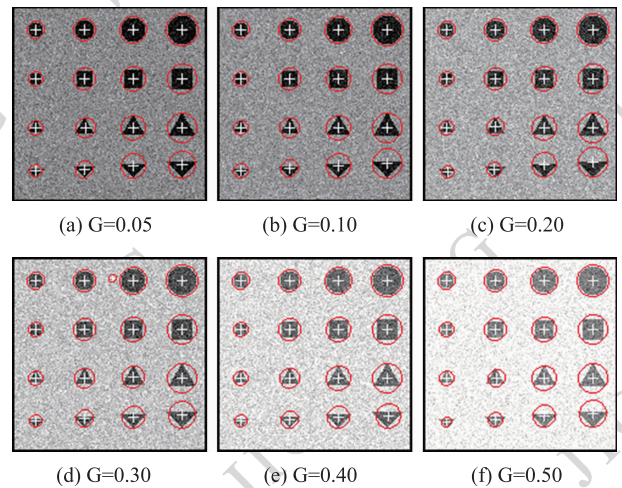


图9 不同水平高斯噪声(G)下的实验结果  
Fig.9 Detection results under different levels of Gaussian noise

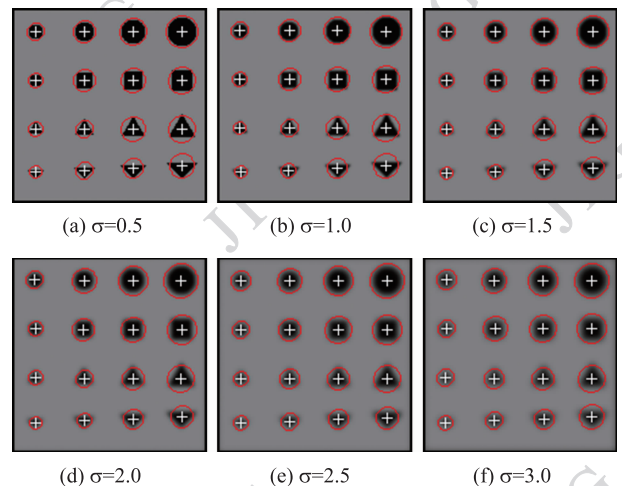


图10 不同水平高斯模糊( $\sigma$ )下的实验结果  
Fig.10 Detection results under different levels of Gaussian blur

数分别为66、29、181;在图11(c)上获得的特征数分别为176、58、240;在图11(d)上获得的特征数分别为199、55、267;3种特征提取算法在第1组图像上的重复特征数分别为58、18、124;3种特征提取算法在第2组图像上的重复特征数分别为131、44、143。显然,3种算法特征重复出现率相当,本文算法在提取特征的重复总数上具有明显优势。

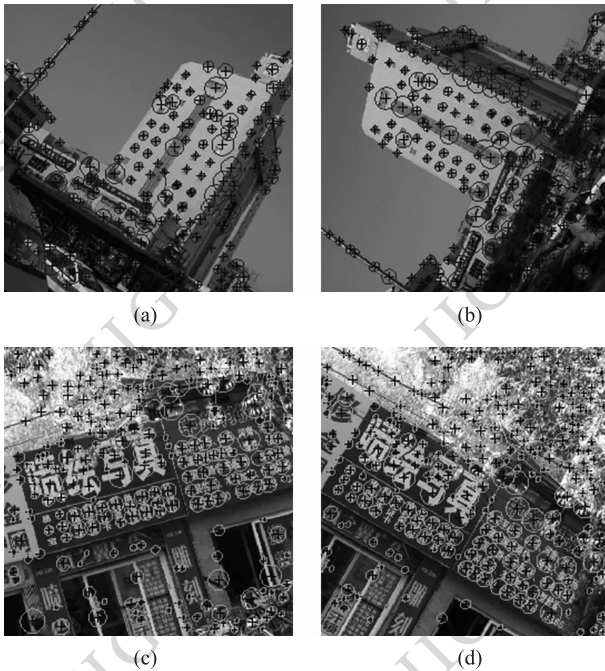


图11 不同视角拍摄图像检测结果

Fig. 11 Detection results on images captured under different views

### 4.3 真实图像实验

如图12所示为本文斑状特征位置与尺寸自动检测算法在7幅真实图像上的实验结果,实验中算法进行特征检测时最小尺寸、最大尺寸及高斯尺度大小设置分别为3、30、1.0。可以看出,对于图像中花朵(图12(c)(d)(f))这类形状规则的斑状特征,本文算法能够准确检测其中心位置与尺寸大小;对于图像中海星斑纹图12(a)、人物脸部图12(b)、羊群图12(e)、人物头发衣服图12(g)等不规则斑状特征,本文算法检测获得的位置与尺寸确定的圆恰好能够包含特征。

## 5 结论

根据图像中斑状特征的梯度分布特性,提出一种基于极值能量函数的斑状特征位置与尺寸自动检测方法。本文主要贡献在于:1)根据图像中斑状特征

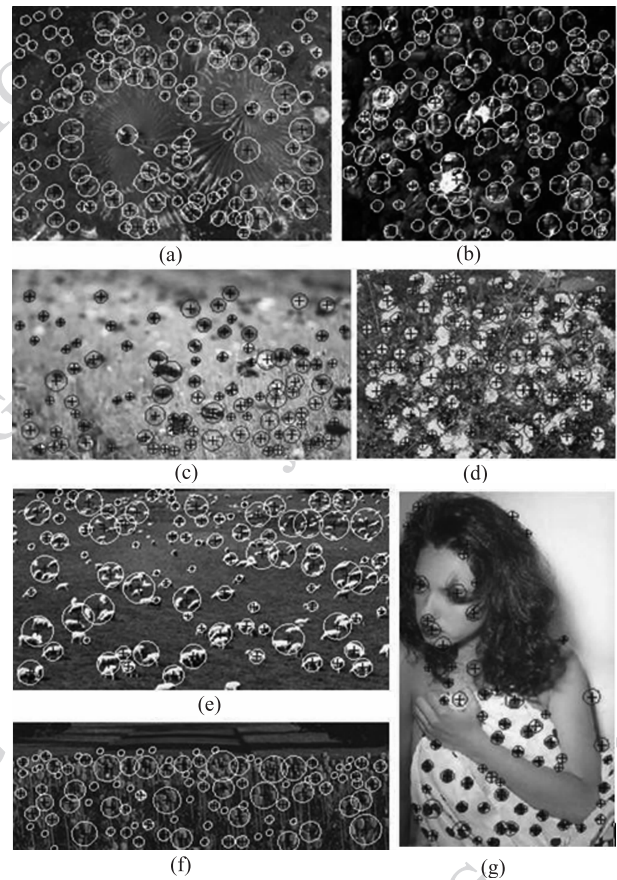


图12 真实图像检测结果

Fig. 12 Detection results on real images

的梯度分布,构造了对图像斑状特征具有极值响应的极值能量函数;2)从理论与直观上分析了所构造极值能量函数的极值特性;3)给出了利用极值能量函数的图像斑状特征位置与尺寸自动检测的实现算法。

基于极值能量函数的图像斑状特征位置与尺寸检测方法,能够准确有效地检测出图像中斑状特征的位置与尺寸,从而为图像识别、跟踪、监控等任务提供必要的算法支持。此外,本文提出的利用极值能量函数的特征检测思路可用于检测图像中的其他类型特征,如利用正方形区域构造能量函数可进行图像中正方形特征检测,构造能够用于其他类型特征检测的极值能量函数是下一步的研究方向之一。

### 参考文献 (References)

- [1] Harris C, Stephens M J. A combined corner and edge detector [C] //Proceeding 4th Alvey Vision Conference. Manchester: University of Manchester Press, 1988:147-151.
- [2] Smith S M, Brady J M. SUSAN-A new approach to low level image processing [J]. International Journal of Computer Vision,

- 1997, 23(1): 45-78.
- [ 3 ] Mokhtarian F, Suomela R. Robust image corner detection through curvature scale space[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(12): 1376-1381.
- [ 4 ] Zhang X H, Lei M, Yang D, et al. Multi-scale curvature product for robust image corner detection in curvature scale space [J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(5): 545-554.
- [ 5 ] Zhong B J, Liao W H. Direct curvature scale space: theory and corner detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(3): 508-512.
- [ 6 ] Banerjee M, Kundu M K, Mitra P. Corner detection using support vector machines [C]//International Conference on Pattern Recognition. Washington DC: IEEE Computer Society Press, 2004: 819-822.
- [ 7 ] Arrebola F, Sandoval F. Corner detection and curve segmentation by multi-resolution chain-code linking [J]. Pattern Recognition, 2005, 38(10):1596-1614.
- [ 8 ] Frank Y S, Chao F C, Gaddipati V. A modified regulated morphological corner detector [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(7): 931-937.
- [ 9 ] Gao X T, Sattar F, Quddus A, et al. Multiscale contour corner detection based on local natural scale and wavelet transform [J]. Image and Vision Computing, 2007, 25(6): 890-898.
- [ 10 ] Zhang X, Wang H, Smith A W B, et al. Corner detection based on gradient correlation matrices of planar curves [J]. Pattern recognition, 2010, 43(4): 1207-1223.
- [ 11 ] Dermot K, Coleman S A, Scotney B W. A space variant gradient based corner detector for sparse omni-directional images [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2010, 38 (2): 119-131.
- [ 12 ] Nguyen T P, Debled R. A discrete geometry approach for dominant point detection [J]. Pattern Recognition, 2011, 44(1): 32-44.
- [ 13 ] Gueguen L, Pesaresi M. Multi scale Harris corner detector based on differential morphological decomposition [J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32 (14): 1714-1719.
- [ 14 ] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [ 15 ] Dutta A, Kar A, Chatter J. A new approach to corner matching from image sequence using fuzzy similarity index [J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32 (5): 712-720.
- [ 16 ] Zheng Z, Wang H, Teoh E K. Analysis of gray level corner detection [J]. Pattern Recognition Letters, 1999, 20(2): 149-162.
- [ 17 ] Weijer J V D, Gevers T, Bagdanov A D. Boosting color saliency in image feature detection [J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(1): 150-156.
- [ 18 ] Aans, H, Anders L D, Kim S P. Interesting interest points: A comparative study of interest point performance on a unique data set [EB/OL]. (2011-06-22) [2011-09-10]. <http://www.springerlink.com/content/e315081774457204/>
- [ 19 ] Kadir T, Brady M. Saliency, scale and image description [J]. International Journal of Computer Vision, 2001, 45(2): 83-105.
- [ 20 ] Lindeberg T, Garding J. Shape-adapted smoothing in estimation of 3-D shape cues from affine distortions of local 2-D brightness structure [J]. Image and Vision Computing, 1997, 15(6): 415-434.
- [ 21 ] Mikolajczyk K, Schmid C. Scale and affine invariant interest point detectors [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(1):63-86.
- [ 22 ] Tuytelaars T, Gool L V. Matching widely separated views based on affine invariant regions [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 59(1):61-85.
- [ 23 ] Matas J, Chum O, Martin U, et al. Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions [J]. Image and Vision Computing 2004, 22: 761-767.
- [ 24 ] Rosin P. A simple method for detecting salient regions [J]. Pattern Recognition, 2009, 42(11): 2363-2371.
- [ 25 ] Liu T, Yuan Z J, Sun J, et al. Learning to detect a salient object [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(2): 353-367.
- [ 26 ] Liu H, Klomp N, Heynderickx I. A perceptually relevant approach to ringing region detection [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(6): 1414-1426.
- [ 27 ] Kong H, Audibert J Y, Ponce J. General road detection from a single image [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19 (8): 2211-2220.
- [ 28 ] Kim K S, Lee M J, Lee J W, et al. Region-based tampering detection and recovery using homogeneity analysis in quality-sensitive imaging [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2011, 115(9): 1308-1323.
- [ 29 ] Vijayanarasimhan S, Grauman K. Efficient region search for object detection [C] //IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC: IEEE Computer Society Press, 2011: 1401-1408.
- [ 30 ] Lindeberg T. Feature detection with automatic scale selection [J]. International Journal of Computer Vision, 1998, 30(2): 79-116.