

图像的角点检测研究综述

章为川¹, 孔祥楠¹, 宋 文²

(1. 西安工程大学电子信息学院, 陕西西安 710048; 2. 华为技术有限公司, 江苏苏州 215123)

摘 要: 角点检测是图像处理和模式识别领域的基本课题, 它在运动估计、形状分析、3D 重建等方面都有重要的应用. 本文对角点检测方法进行了详细阐述及分类——基于灰度强度的方法、基于边缘轮廓的方法、基于角点模型的方法, 并将现有方法的优缺点进行了总结, 指出了存在的问题及进一步的研究方向, 预期为图像角点检测提供参考和借鉴.

关键词: 角点检测; 特征提取; 算法研究

中图分类号: TN973.3

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2015)11-2315-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.11.026

Review of Image Corner Detection Algorithms

ZHANG Wei-chuan¹, KONG Xiang-nan¹, SONG Wen²

(1. College of Electronic and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Huawei Technology Company Limited, Suzhou, Jiangsu 215123, China)

Abstract: Corner detection is one of the fundamental topics in the field of image processing and pattern recognition, which have been used in object tracking, shape analysis, 3D reconstruction. Intensity-based methods, model-based methods and edge contour-based methods are studied on this paper, and its development history, current and feature challenge are reviewed in details, which offer constructive reference to the research of the image corner detection.

Key words: corner detection; feature extraction; algorithm research

1 引言

角点作为图像稳定的稀疏特征, 它包含图像中的重要结构信息, 在计算机视觉和图像处理中起着关键和不可替代的作用. 其应用遍及众多领域, 如 3D 视觉重建、图像匹配、目标识别、运动目标跟踪、机器人视觉等. 迄今为止, 角点还没有严格的数学定义, 通常认为角点是二维图像亮度变化剧烈的点, 或图像边缘曲线的曲率局部极大值点或多条边缘曲线交汇点. 从上世纪 70 年代首次受到关注以来, 图像角点检测理论和方法一直是计算机视觉和图像处理领域经久不衰的研究热点.

2 研究现状

现有角点检测算法根据实现方法不同, 大致可以分为三类: 基于灰度强度的方法^[1~22], 基于边缘轮廓的方法^[23~39, 41, 43~56], 基于角点模型的方法^[58~76]. 这三类方法存在各自的优缺点, 在实际应用中暴露出不同程度的缺陷. 这一节将详细介绍典型角点检测的核心思想及特征提取技术.

(1) 基于灰度强度的角点检测

基于灰度强度的算法主要是通过检查图像局部灰度值的变化来检测角点. 早在 1977 年, Morave^[1,2]发现了边缘、角点及同质区域的灰度变化模式存在明显差异, 在同质区域处不同方向的灰度变化都很小, 在边缘处仅在垂直于边缘脊方向有一个大的灰度变化, 而在角点处多个方向呈现大的灰度变化. 1988 年, Harris 和 Stephens^[3]发展了 Moravec 思想, 提出 Harris 算法. 首先求输入图像 I 对应的 x -和 y -轴方向的一阶偏导 I_x 和 I_y , 利用各向同性高斯核 $G_{x,y}$ 对其平滑, 并构造自相关矩阵 M ,

$$\begin{aligned} I_x &= \frac{\partial I}{\partial x}, \quad I_y = \frac{\partial I}{\partial y} \\ \overline{I_x^2} &= I_x^2 \otimes G, \quad \overline{I_y^2} = I_y^2 \otimes G, \quad \overline{I_x I_y} = I_x I_y \otimes G \\ G &= \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp(-(x^2 + y^2)/2\sigma^2) \\ M &= \begin{bmatrix} \overline{I_x^2} & \overline{I_x I_y} \\ \overline{I_x I_y} & \overline{I_y^2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, \otimes 是卷积算子, σ 是高斯平滑尺度. 最后, 通过自相关矩阵的特征值 $\alpha, \beta (\alpha \geq \beta)$ 来构造角点响应 R 并判决角点

$$R = \alpha\beta - k(\alpha + \beta)^2 \quad (2)$$

其中, $k(k=0.04)$ 是错误角点响应抑制常数.

角点是图像各向异性的局部特征, 图像像素的局部灰度变化和结构信息的有效提取和描述是基于灰度强度算法的关键. 由于两个偏导数描述灰度变化的能力有限, Harris 算法只能有效检测 L 型角点^[4], 且抑制常数的经验选取影响了检测准确性. 自适应参数方程^[5,6]取代常数 k 、局部像素权重^[7]、图像像素对应的梯度向量做双对数处理^[8]、构造局部像素梯度协方差矩阵^[9]、改进的非极大值抑制^[10]等处理使得改进算法^[5-10]在检测准确率、定位误差、噪声稳健性及实时处理方面得到极大的提高. 由于受光照条件影响, 通常图像角点产生在不同的尺度空间内, 基于单尺度的检测算子不能很好的提取所有角点. 随着多尺度几何分析技术的发展, 图像的局部灰度变化和几何结构得以更精细地描述, 多尺度-多分辨率技术^[11,12]大量用于角点检测算法中来改进噪声抑制能力、提高图像特征信息提取和角点定位精度. 1995 年, 小波变换被用于提取图像的局部灰度变化信息, 多尺度多方向被用来刻画图像局部灰度变化并将这些结构信息嵌入到 Harris 算法框架实现角点检测^[13,14]. 1996 年, 希尔伯特变化^[15]用于图像的角点检测. 1998 年, Lindeberg^[16]提出基于正则化最大梯度幅度值自适应尺度选择的检测算法来提取图像特征信息并减少运算量. 同年, Gabor 小波被用于提取多尺度、多方向的灰度变化信息, 改进了检测性能^[17,18]. 2002 年, 小波模极大值矩阵奇异值分解获取的最佳尺度用于角点检测^[19]. 2004 年, Mikolajczyk 和 Schmid^[20]基于 Harris 思想, 利用 Laplacian 算子进行尺度自适应选择^[16], 构建 Harris-Laplace 角点检测器, 并且利用角点的局部仿射结构把 Harris-Laplace 算法扩展为具有仿射不变特性. 2007 年 Log-Gabor 小波用于多尺度角点检测^[21]. 2012 年, Bongioep 等人^[22]利用自适应于图像结构的结构张量来检测角点, 改进了 Harris 算法的检测准确率和定位误差. 上述方法都属于 Harris 算法范畴, 只是局部灰度结构信息的描述和提取采用更有效的工具.

(2) 基于边缘轮廓的角点检测

基于边缘轮廓的检测算法主要是通过分析图像边缘形状特性来检测角点. 首先提取图像的边缘轮廓, 然后从边缘中提取封闭或非封闭的轮廓曲线, 最后通过搜索轮廓线上的曲率值, 梯度方向变化或利用多边形逼近查找交点来提取角点.

早在 1954 年, Attneave^[23]观察边缘轮廓形状发现角

点处的曲率值大. 早期算法(1970~1980)主要是先对图像进行区域分割, 抽取分割后的图像边界的 Freeman 链码, 根据轮廓链码计算边界像素的梯度和角度的平均变化^[24], 或平均斜率变化^[25]来检测角点. 1982 年, Kitchen 和 Rosenfeld^[26]提出依据边缘像素的梯度幅度与梯度方向变化率乘积来检测角点. 1987 年, Beus 和 Tiu^[27]利用局部曲率平均和孤立点的判定对基于链码的算法进行了改进. 1993 年, Cooper^[28]等人利用链码的像素坐标来估计曲率, 将曲率的局部极大值点判定为角点. 1995 年, Wang 和 Brady^[29]通过推导得到边缘曲率与沿着边缘切线方向的二阶导数成正比, 而与梯度幅度成反比. 1996 年, Hsin-Teng^[30]利用多边形来近似边界链码, 两边的交点判定为角点. 2005 年, Arrebola 和 Sandoval^[31]采用分辨率耦合技术来处理链码表示的曲率轮廓, 提高检测性能.

自 1962 年 Iijima^[32]提出尺度空间概念以来, 直到 1983 年前后, Witkin^[33]和 Koendermk^[34]分别对尺度空间思想进行重新论述, 多尺度图像描述技术才得到学者们极大的关注. 尺度空间理论最初被应用于计算机视觉领域, 其核心思想就是为了模拟图像数据的多尺度特性. 1986 年, Asada 和 Brady^[35]利用多尺度技术去寻找边缘像素的曲率变化. 同年, Mokhtarian 和 Mackworth^[36]提出曲率尺度空间(curvature scale space, CSS)技术. 平面曲线 $\Gamma(u)$ 可以用二维信号 $\Gamma(u) = \{x(u), y(u)\}$ 表示, 其中 u 是弧长参数. 通过 CSS 技术提取边界上的曲率过零点. 1992 年, Rattarangsi 和 Chin^[37]发展了 CSS 思想, 利用各向同性高斯核分析 L, END 及 STAIR 三种角点模型在完整尺度空间下的性态, 据此将 CSS 边缘轮廓图像化为树型结构图并检测角点. 该算法检测性能良好, 但利用全体尺度空间对角点进行判别增加了运算复杂度. 鉴于 CSS 技术可以在多尺度条件下有效恢复平面曲线的几何特征^[38](1992), Mokhtarian 和 Suomela^[39]在 1998 年提出著名的 CSS 角点检测算法. 利用 Canny 边缘检测器^[40]提取图像边缘, 抽取边缘轮廓并填充边缘之间的缝隙, 利用不同尺度的高斯核 $g(u, \sigma)$ 平滑边缘, 得到多尺度局部曲率估计 $K(u, \sigma)$,

$$K(u, \sigma) = \frac{\dot{X}(u, \sigma)\ddot{Y}(u, \sigma) - \ddot{X}(u, \sigma)\dot{Y}(u, \sigma)}{[\dot{X}(u, \sigma)^2 + \dot{Y}(u, \sigma)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \dot{X}(u, \sigma) &= x(u) \otimes \dot{g}(u, \sigma) & \ddot{X}(u, \sigma) &= x(u) \otimes \ddot{g}(u, \sigma) \\ \dot{Y}(u, \sigma) &= y(u) \otimes \dot{g}(u, \sigma) & \ddot{Y}(u, \sigma) &= y(u) \otimes \ddot{g}(u, \sigma) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\dot{g}(u, \sigma)$ 和 $\ddot{g}(u, \sigma)$ 分别为高斯核一二阶导数. 不同尺度下的局部曲率极大值点被认定为候选角点, 最后通过由大到高的高斯尺度对候选角点进行跟踪和筛

选获取角点定位.2001年,Mokhtarian和Mohanna^[41]利用不同尺度高斯核对不同长度的边缘曲线进行平滑来更好的提取边缘结构信息和抑制噪声.目前CSS技术已成为MPEG-7中描述图像轮廓形状的标准技术^[42].

如文献[44~48]所述,CSS算法^[36~41]主要存在三个问题:(1)平滑边缘的高斯尺度确定;(2)对边缘的局部噪声敏感;(3)角点阈值选取.2003年,Ray和Pandyanp^[43]通过计算曲率的方差得到平滑边缘曲线的自适应尺度.2007年,钟宝江和廖文和^[44]对文献[37]进行了改进,利用直接曲率尺度空间对角点建模并提取不变的几何特性,减低计算复杂度并提高噪声稳健性.张小洪等人^[45](2007)提出多尺度曲率乘积算法提高了检测性能,更好的抑制伪角点.Gao等人^[46]根据不同尺度下的小波模极大值提出了基于显著尺度空间的检测算法.Masood^[47](2008)利用其它算法得到候选点并用递归优化来去除伪角点.He和Yung^[48]提出基于动态支撑区间的自适应曲率阈值选择,降低门限对性能影响.2008年,Awrangjeb和Lu利用仿射长度代替弧长进行曲率计算提出了改进的CSS角点检测和基于角点的图像匹配^[49]及利用弦到点的距离累加技术^[50]的检测算法^[51],检测性能改善明显.2009年,张小洪等人^[52]利用高斯偏导描述边缘轮廓在不同尺度下差异.2010年,Pedrosa和Barcelos^[53]依据非线性滤波提出自适应平滑尺度的检测算法.张小洪等人^[54](2010)利用边缘像素的梯度分布构造梯度相关矩阵,利用矩阵的特征值来提取角点.2012年,Rimon和Robert^[55]利用边缘像素梯度方向的改变来检测角点.2014年,章为川等人^[56]继承Morave^[1,2]的思想,利用Gabor滤波器平滑边缘像素,寻找边缘轮廓上各个方向灰度变化都很大的点.

如文献[57]所述,由于全尺度空间^[44],显著尺度空间^[46],自适应尺度^[43,52]的检测运算量相对较大,当前基于边缘的检测算法更倾向于单尺度^{[48][53,55]}或小范围的多尺度^[45,51,52]平滑技术.曲率估计技术从最初直接计算边缘像素点的曲率^[40,41,48,53]演化到非直接曲率计算,如弦到点的距离累加技术^[50,51],曲线曲率在尺度演化下的差异^[52],边缘像素点的灰度变化^[56]等.但基于边缘的检测算法存在最大问题是检测性能高度依赖图像的边缘检测性能.

(3) 基于模型的角点检测

基于模型的角点检测算法基本框架是利用建立不同类型的角点参数化模型对图像进行匹配滤波.1988年,Guiducci^[58]建立楔形角点模型的各向同性高斯核表征,分析表征的幅度特性.1989年,Rangarajan等人^[59]建立高斯核对L型角点的响应,并依据Canny边缘检测^[40]思想优化响应的峰值信噪比和定位误差.1990年,Singh和Shneier^[60]提出利用不同的角点类型组合对图

像进行匹配滤波.1992年,Rohr^[61]把楔形角点模型^[60]扩展到T型、Y型和X型,角点被判定为多个同质区域的交叉点.1993年,Deriche和Giraudon^[62]利用高斯核对楔形及Y型角点模型进行表征,分析表征特性,并利用Beaudet的测度方法^[63]来校正角点定位.1994年,Blasz和Deriche^[64]提出刻画高阶角点的参数模型,实现对角点检测和分类.1997年,Smith和Brady^[65]提出著名的SUSAN算法,基本原理是基于在邻域内与中心像素有相同亮度的像素点数目小于某个门限表明中心像素是角点.不同于利用图像一阶或二阶偏导数的检测方法,SUSAN检测器仅使用图像的局部零阶信息,对噪声不敏感,但定位精度较差、不能检测X型角点.Trajkovic和Hedley^[66](1998)在SUSAN算法^[66]的基础上减少了运算复杂度,但检测性能不稳定,在对角方向易出现错误角点响应,容易提取伪角点.1998年,Parida等人^[67]提出基于模型的高阶角点检测、分类和重构方法.1999年,Rosin^[68]分析了楔形角点的曲率特性.2001年,Ruzon和Tomasi^[69]给出基于模型的彩色图像角点检测的基本框架.2002年,Bae等人^[70]继承SUSAN思想,利用两个交叉算子分别对图像进行匹配滤波,根据像素的灰度变化信息检测角点.2003年,Cazorla和Escalano^[71]利用多角度的参数模板来描述不同结构的角点,并提出基于模型参数估计的Bayesian角点分类.2006年,Lepetit和Fua^[72]把SUSAN算法推广到三维图像的特征检测.2008年,Sinzinger^[73]提出基于径向能量分布的检测方法,首先角点结构转换为径向能量函数,并按照能量函数的特征进行角点检测,使得基于模型的角点检测可以脱离复杂的多参数模板.2010年,Rosten等人^[74]在SUSAN基础上,利用机器学习理论来改善角点检测性能,该算法的检测性能改善明显而且对不同类型源图像稳健性提高显著.2013年,水鹏朗和章为川^[75]构建L、Y和X型角点模型,利用各向异性高斯方向导数滤波器^[76]对不同角点模型进行滤波平滑,得到各种类型角点表征,分析表征的噪声稳健性、几何变换的不变特性.

理想的参数化模型使得图像角点可用分片常数函数近似时,角点检测性能很好,当图像角点与该模型不匹配时检测性能会有较大退化.大尺寸模板的抗噪声能力强但定位精度差,而小尺寸模板角点定位准确但抗噪声能力弱.

总体而言,三类不同的检测方法沿着各自的发展轨迹,相互融合的方法相对较少.今年来,一些基于机器学习和融合性方法已经在近年出,机器学习理论和方法^[74]、优化方法^[77]、非线性偏微分方法^[78]等引入角点检测算法中,改善了检测性能.

3 检测性能评价准则

学者们依据角点的定义或者角点的作用分别提出

了不同检测器性能评判准则,大致可以归为:(1)基于人的视觉评价^[79];(2)基于理论分析^[62];(3)基于角点定位精度^[80~82];(4)基于标定的参考角点^[83~86];(5)基于一致性判定^[51,87,88].现常用的是第(4)和(5)类评价方法.介绍如下:

(1)基于标定的参考角点

Mohanna 和 Mokhtarian^[83](2001)依据 Bowyer 等人^[84](1999)提出的边缘检测器性能评价的思想,首先让一组观测人员自行标定图像的角点,如果小组 10 名成员中有 7 名以上认为某一点是角点,则标定该点为参考角点,它的参考位置由成员标定的位置平均值确定.该评价准则的优点是可以有效判定检测器的错检率和漏检率和定位误差. Rockett^[85](2003)提出类似文献^[83]的评价方法,设计一组具有参考角点的图像集,然后改变检测器的参数,得到不同的性能指标,利用 ROC 曲线^[86]对检测器的性能进行评价.

(2)基于一致性判定

基于一致性判定的评价准则^[51,87,88]是利用待评价检测器检测原图像的角点,计算提取到的角点数 N_c . 然后对图像进行仿射变化(旋转、拉伸或扭曲),提取变换后图像的角点,计算图像变换后与原图像之间相匹配角点的个数 N_m . 最后匹配的角点数与原图像检测到的角点数的比值 $k = N_m / N_c$ 来评价检测器的性能. 该评价准则的优点是不需要人为标定参考角点,大量的图像可以用来验证检测器的性能.

4 存在的问题和进一步研究的方向

图像的角点检测问题一直是图像处理领域的热门课题,这是由于其重要性及广泛应用所决定的. 本文认为,角点检测还存在如下一些亟待解决的问题:

(1)自适应与非自适应尺度方法

由于图像中的角点具有明显局部几何结构和亮度变化的特点,并且角点通常产生在不同空间尺度范围内,因此人们普遍有这样一种认识:相对于非自适应方法,自适应尺度平滑方法应该具有更好的特征提取性能. 于是人们提出了各种各样的自适应角点提取方法^[16,20,22]. 直观地看,能用不同尺度提取图像不同灰度变化及结构信息的自适应方法理所当然具有更好的角点检测性能. 然而非自适应尺度的角点检测方法^[3],通过简单给定固定的尺度值对图像进行平滑及检测角点,所获得的检测性能并不比复杂的自适应方法差. 从实时角度考虑,自适应方法设计复杂、计算复杂度高,而非自适应方法设计简单,运算速度快,已经在图像匹配、目标跟踪、三维重构等领域有了实际的运用. 因此,今后为人们所广泛采用的检测方法是自适应的还是非自适应的值得我们深思.

(2)角点分辨率存在的问题

角点分辨率问题是指如何精确检测图像中相邻角点. 若能精确检测到相邻角点,人们就可以将它更好的应用在图像匹配、目标跟踪等领域中. 现今角点检测技术利用某种角点测度得到候选角点后往往利用非极大值抑制方法来得到最终角点. 非极大值抑制方法就是对于某一候选角点,在给定的像素范围内,它若是某种测度下的局部极大值点,则保留该点,否则去除. 该操作优点是简单易操作,但没有考虑图像目标的几何结构特征,使得相邻角点中只有一个角点得以保留,限制了角点检测器在实际中的应用. 若在角点决策时考虑角点的结构信息^[37,61,64,75],判定角点的结构属性(L-型、Y-型和 X-型或星型),则有望解决该问题.

(3)基于边缘轮廓检测方法存在的问题

基于边缘轮廓的检测算法性能高度依赖于图像的边缘提取,现方法大多使用 Canny 边缘检测算法^[40]把信息丰富的灰度图像转化为二值边缘映射图像,通过分析边缘形状来检测角点. 在 Canny 算法中,边缘被定义为在梯度方向具有最大梯度值的点,该定义对于阶跃边缘适. 然而,对于交叉边缘(如 Y 型、X 型和星型),梯度方向不一定垂直边缘脊方向,它由不同区域的灰度值共同决定^[75]. 它会导致角点处的边缘出现漏检或错检,严重影响角点检测. 从图 1 可以直观得到交叉边缘处存在一角点. 图 1(a)中“o”区域的梯度幅度和方向用箭头的长度及方向描述;图 1(b)所示角点处有大的梯度值,对应方向是不规则的. 图 1(c)所示由于“o”区域的强边缘不满足 Canny 算法中的边缘定义将被去除. 边缘检测结果如图 1(d)所示.

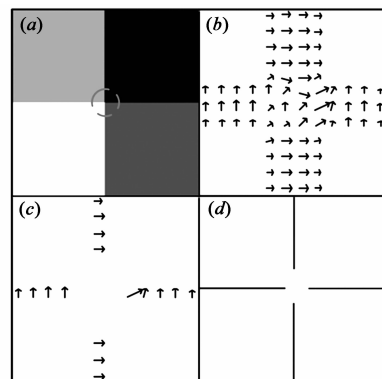


图1 (a)实验图像;(b)平滑后的图像梯度矢量图;
(c)根据边缘定义得到候选边缘;(d) Canny检测结果

为了克服 Canny 检测器导致的边缘漏检问题,文献^[39,75]分别提出边缘填充的方法来连接断裂边缘. 但上述方法在边缘填充过程并没有考虑边缘的灰度变化及结构信息,在填充过程中易出现边缘错误连接及偏移真实位置的问题. 若能利用边缘像素的梯度信息及

统计学知识来进行填充有望克服上述缺陷。

5 总结

本文以提出检测算法的时间为主线,对角点检测算法做了分类、归纳和总结。意在诠释推动角点检测发展的内在动力,期望引起更多研究者对这一课题的关注。由于篇幅所限,许多问题未及深究,文中许多观点是本文作者在进行图像特征提取研究中一己之见,难免有失偏颇,欢迎大家批评指正。

参考文献

- [1] H P Moravec. Towards automatic visual obstacle avoidance [A]. International Joint Conference on Artificial intelligence [C]. Tokyo: 1977. 584.
- [2] H P Moravec. Visual mapping by a robot rover [A]. International Joint Conference on Artificial Intelligence [C]. USA: 1979. 598 – 600.
- [3] C Harris. M Stephens. A combined corner and edge detector [A]. Alvey Vision Conference [C]. UK, University Manchester, 1988. 147 – 151.
- [4] J A Noble. Finding corners [J]. Image Vis. Computer. 1988, 6 (2): 121 – 128.
- [5] W H Brady. Real-time corner detection algorithm for motion estimation [J]. Image and Vision Computing, 1995, 13 (9): 168 – 181.
- [6] Zheng Zhiqiang. Wang Han. Analysis of gray level corner detection [J]. Pattern Recognition Letters. 1999, 20 (6): 149 – 162.
- [7] J B Ryu, C G Lee, et al. Formula for Harris corner detector [J]. Electronic Letters, 2011, 47 (3): 5 – 6.
- [8] J B Ryu, H H Park. Log-log scale Harris corner detector [J]. Electronic Letters, 2010, 46 (24): 21 – 22.
- [9] S Ando. Image field categorization and edge/corner detection from gradient covariance [J]. IEEE Trans PAMI, 2000, 22 (2): 179 – 190.
- [10] P Mainali, Q Yang. Robust low complexity corner detector [J]. IEEE Trans Circuits and Systems for Video Technology, 2011, 21 (4): 435 – 446.
- [11] J L Crowley, A C Sanderson. Multiple resolution representation and probabilistic matching of 2D gray-scale shape [J]. IEEE Trans PAMI, 1987, 9 (1): 113 – 121.
- [12] Lindeberg, T Scale-Space Theory in Computer Vision [M]. Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [13] C H Chen, J S Lee. Wavelet transformation for gray-level corner detection [J]. Pattern Recognition, 1995, 28 (6): 853 – 861.
- [14] Nicu Sebe, Michael S Lew. Comparing salient point detectors [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24 (13): 89-96.
- [15] K Kohlmann. Corner detection in natural images based on the 2D Hilbert transform [J]. Signal Process, 1996, 48 (3): 225 – 234.
- [16] T Lindeberg. Feature detection with automatic scale selection [J]. International Journal of Computer Vision, 1998, 2 (30): 79 – 116.
- [17] A Quddus, M M Fahmy. Corner detection using Gabor-type filtering [A]. Proceedings of the IEEE International Symposium Circuits and Systems [C]. Monterey Conference Center, Monterey, USA: 1998. 150 – 153.
- [18] J F Valdivia, J Garcia. The selection of natural scales in 2-D images using adaptive Gabor filtering [J]. IEEE Trans PAMI, 1998, 20 (5): 458 – 469.
- [19] A Quddus, M Gabbouj. Wavelet-based corner detection technique using optimal scale [J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23 (2): 215 – 220.
- [20] K Mikolajczyk, C Schmid. Scale and affine invariant interest point detectors [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 1 (60): 63 – 86.
- [21] X T Gao, F Sattar. Multiscale corner detection of gray level images based on log-Gabor wavelet transform [J]. IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology, 2007, 17 (7): 868 – 875.
- [22] Bongjoe Kim, Jihoon Choi. Robust corner detection based on image structure [J]. Circuits System and Signal Processing, 2012, 31 (2): 1443 – 1457.
- [23] F Attneave. Some informational aspects of visual perception [J]. Psychological Review, 1954, 61 (3): 183 – 193.
- [24] A Rosenfeld, J S Weszka. An improved method of angle detection on digital curves [J]. IEEE Transactions on Computers, 1975, 24 (9): 940 – 941.
- [25] H Freeman, L S Davis. A corner-finding algorithm for chain-coded curves [J]. IEEE Transactions on Computers, 1977, 26 (2): 297 – 303.
- [26] L Kitchen, A Rosenfeld. Gray-level corner detection [J]. Pattern Recognition Letters, 1982, 1 (2): 95 – 102.
- [27] H L Beus. An improved corner detection algorithm based on chain-coded plane curves [J]. Pattern Recognition, 1987, 20 (3): 291 – 296.
- [28] Cooper J. Early jump-out corner detectors [J]. IEEE Trans PAMI, 1993, 15 (8): 823 – 828.
- [29] Wang H, M Brady. Real-time corner detection algorithm for motion estimation [J]. Image and Vision Computing, 1995, 13 (9): 695 – 704.
- [30] Hsin-Teng, Hu W C. A rotationally invariant two-phase scheme for corner detection [J]. Pattern Recognition, 1996, 28 (3): 819 – 828.
- [31] Arrebola F, Sandoval F. Corner detection and curve segmentation by multi-resolution chain-code linking [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24 (13): 89-96.

- tion, 2005, 38(7): 1596 – 1614.
- [32] Iijima T. Basic theory on normalization of pattern[J]. Bulletin of the Electrotechnical Laboratory, 1962, 26(2): 368 – 388.
 - [33] Witkin A P. Scale-space filtering[A]. Proceedings of the Eighth international joint conference on Artificial intelligence [C]. Menlo Park, California: 1983. 1019 – 1022.
 - [34] Koenderink I J. The structure of images[J]. Biological Cybernetics, 1984, 50(2): 363 – 370.
 - [35] Asada, H, Brady, M. The curvature primal sketch[J]. IEEE Trans. PAMI, 1986, 8(1): 2 – 14.
 - [36] Mokhtarian F, Mackworth A K. Scale-based description and recognition of planar curves and two-dimensional shapes[J]. IEEE Trans. PAMI, 1986, 8(1): 34 – 43.
 - [37] Anothai Rattarangsi, Roland T. Chin. Scale-based detection of corners of planar curves[J]. IEEE Trans. PAMI, 1992, 14(4): 430 – 450.
 - [38] Mokhtarian F, Mackworth A K. A theory of multi-scale curvature-based shape representation for plane curves [J]. IEEE Trans. PAMI, 1992, 14(8): 789 – 805.
 - [39] Mokhtarian F, Suomela R. Robust image corner detection through curvature scale space[J]. IEEE Trans. PAMI, 1998, 20(12): 1376 – 1381.
 - [40] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Trans. PAMI, 1986, 8(6): 679 – 698.
 - [41] Mokhtarian F, Mohanna F. Enhancing the curvature scale space corner detector[A]. Proc. Scandinavian Conf. on Image Analysis [C]. Bergen, Norway: 2001. 145 – 152.
 - [42] Mokhtarian F, Bober M. Curvature Scale Space Representation: Theory, Applications, MPEG-7 Standardization [M]. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, March, 2003.
 - [43] B K Ray, R Pandyan. ACORD-an adaptive corner detector for planar curves[J]. Pattern Recognition, 2003, 36(3): 703708.
 - [44] Baojiang Zhong, Wenhe Liao. Direct curvature scale space: theory and corner detection[J]. IEEE Trans. PAMI, 2007, 29(3): 508 – 512.
 - [45] Zhang Xiaohong, Lei Ming, et al. Multi-scale curvature product for robust image corner detection in curvature scale space [J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(7): 545 – 554.
 - [46] Gao X, F Sattar. Multiscale contour corner detection based on local natural scale and wavelet transform[J]. Image Vision Comput, 2007, 25(6): 890 – 898.
 - [47] A Masood. Optimized polygonal approximation by dominant point deletion [J]. Pattern Recognition, 2008, 41(1): 227 – 239.
 - [48] He Xiaochen, Yung H C. Corner detector based on global and local curvature properties [J]. Optical Engineering, 2008, 47(5): 1 – 12.
 - [49] M Awrangjeb, Lu G. An improved curvature scale-space corner detector and a robust corner matching approach for transformed image identification[J]. IEEE Trans. Image Processing, 2008, 17(2): 2425 – 2441.
 - [50] J H Han, T T Poston. Chord-to-point distance accumulation and planar curvature: A new approach to discrete curvature [J]. Pattern Recognition Letter, 2001, 22(7): 1133 – 1144.
 - [51] Mohammad Awrangjeb, Guojun Lu. Robust image corner detection based on the chord-to-point distance accumulation technique[J]. IEEE Trans. on Multimedia, 2008, 10(6): 1059 – 1072.
 - [52] Zhang X, Wang H, et al. Robust image corner detection based on scale evolution difference of planar curves [J]. Pattern Recognition Letters, 2009, 30(1): 449 – 455.
 - [53] G V Pedrosa, C A Z Barcelos. Anisotropic diffusion for effective shape corner point detection[J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(12): 1658 – 1664.
 - [54] Zhang X, Wang H, et al. Corner detection based on gradient correlation matrices of planar curves[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(4): 1207 – 1223.
 - [55] Rimón Elias, Robert Laganière. JUDOCA: Junction detection operator based on circumferential anchors[J]. IEEE Trans. Image Processing, 2012, 21(4): 2109 – 2118.
 - [56] Wei-Chuan Zhang, Fu-Ping Wang, Corner detection using Gabor filters[J]. IET Image Processing, 2014, 8(11): 639 – 647.
 - [57] Mohammad Awrangjeb, Guojun Lu. Performance comparisons of contour-based corner detectors[J]. IEEE Trans. Image Processing, 2012, 21(9): 4167 – 4179.
 - [58] A Guiducci. Corner characterization by differential geometry techniques[J]. Pattern Recognition Letters, 1988, 8(5): 311 – 318.
 - [59] K Rangarajan, M Shah. Optimal corner detection[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1989, 48(2): 230 – 245.
 - [60] A Singh, M Shneider. Grey level corner detection: a generalization and a robust real time implementation[J]. Computer Vision Graphics Image Processing, 1990, 51(1): 54 – 69.
 - [61] K Rohr. Recognizing corners by fitting parametric models[J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 9(3): 213 – 230.
 - [62] R Deriche, G Giraudon. A computational approach for corner and vertex detection[J]. International Journal of Computer Vision, 1993, 10(2): 101 – 124.
 - [63] Beaudet, Rotational invariant image operators [A]. Intern. Conf. Pattern Recognition [C]. Tokyo: 1978. 579 – 583.
 - [64] T Blaszkowski, R Deriche. Recovering and characterizing image features using an efficient model based approach[A]. Conference of Computer Vision and Pattern Recognition [C]. New York, USA, Proceedings CVPR'93: 1994. 530 – 535.
 - [65] S M Smith, M Brady. SUSAN-a new approach to low level image processing [J]. International Journal of Computer Vi-

- sion, 1997, 23(1): 45 – 78.
- [66] M Trajtkovic, M Hedley. Fast corner detection[J]. Image and Vision Computing, 1998, 16(2): 75 – 87.
- [67] L Parida, D Geiger. Junctions: detection, classification, and reconstruction[J]. IEEE Trans. PAMI, 1998, 20(7): 687 – 698.
- [68] P L Rosin. Measuring corner properties[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 73(2): 292 – 307.
- [69] M A Ruzon, C Tomasi. Edge, junction, and corner detection using color distributions[J]. IEEE Trans. PAMI, 2001, 23(11): 1281 – 1295.
- [70] S C Bae, I S Kweon. Cop: A new corner detector[J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23(11): 1349 – 1360.
- [71] M A Cazorla, F Escolano. Two bayesian methods for junction classification[J]. IEEE Trans. Image Processing, 2003, 12(3): 317 – 327.
- [72] V Lepetit, P Fua. Keypoint recognition using randomized trees[J]. IEEE Trans. PAMI, 2006, 28(9): 1465 – 1479.
- [73] E D Sinzinger. A model-based approach to junction detection using radial energy[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(2): 494 – 505.
- [74] E Rosten, R Porter. Faster and better: A machine learning approach to corner detection[J]. IEEE Trans. PAMI, 2010, 32(1): 105 – 117.
- [75] Shui Peng-Lang, Zhang Wei-Chuan. Corner detection and classification using anisotropic directional derivative representations[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2013, 22(8): 3204 – 3219.
- [76] Shui Peng-Lang, Zhang Wei-Chuan. Noise-robust edge detector combining isotropic and anisotropic Gaussian kernels[J]. Pattern Recognition, 2012, 45(2): 806 – 820.
- [77] H S Yazdi, S K Toissu. Edge/corner programming[J]. International Jour. of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2011, 4(2): 50 – 64.
- [78] P F Alcantarilla, A Bartoli. Kaze features[A]. European Conference on Computer Vision[C]. Firenze, Italy: 2012. 214 – 227.
- [79] M D Heath, S Sarkar. A robust visual method for assessing the relative performance of edge-detection algorithms[J]. IEEE Trans. PAMI, 1997, 19(12): 1338 – 1359.
- [80] R Kakarala, A Hero. On achievable accuracy in edge localization[J]. IEEE Trans. PAMI, 1992, 14(7): 777 – 781.
- [81] Brand P, Mohr R. Accuracy in image measure[A]. In Proceedings of the SPIE Conference on Videometrics III[C]. Massachusetts, USA: 1994. 218 – 228.
- [82] A Singh, M Shneier. Grey level corner detection: A generalization and a robust real time implementation[J]. Comput. Vision Graph. Image Process, 1990, 51(1): 54 – 69.
- [83] F Mohanna, F Mokhtarian. Performance evaluation of corner detection algorithms under similarity and affine transforms[A]. Proc. British Machine Vision Conf[C]. Manchester, U K. 2001, 353 – 362.
- [84] Bowyer, K W Kranenburg. Edge detector evaluation using empirical ROC curves[A]. Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C]. Colorado, USA: 1999. 354 – 359.
- [85] Peter I, Rockett. Performance assessment of feature detection algorithms: A methodology and case study on corner detectors[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2003, 12(12): 1668 – 1677.
- [86] M H Zweig, G Campbell. Receiver-operating characteristic (ROC) plots: A fundamental evaluation tool in clinical medicine[J]. Chinal Chemistry, 1993, 39(4): 561 – 577.
- [87] C Schmid, R Mohr. Evaluation of interest point detectors[J]. IJCV, 2000, 37(2): 151 – 172.
- [88] F Mokhtarian, F Mohanna. Performance evaluation of corner detectors using consistency and accuracy measures[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2006, 102(1): 81 – 94.

作者简介



章为川 男, 1980 年 9 月出生, 浙江苍南人. 2013 年毕业于西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 博士, 西安工程大学讲师. 主要研究方向图像处理, 模式识别.

E-mail: zwc2003@163.com



孔祥楠 女, 1988 年 5 月出生, 山东济南人. 在读研究生. 主要研究方向图像特征提取.

E-mail: kongeveryday@163.com