

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 12
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12月 第17卷 第12期(总第200期)

目次

综述

高斯混合模型、求解算法及视觉应用综述..... 管涛,李玲玲(1461)

图像处理和编码

基于曲波变换和色度模型的彩色图像去噪 张云强,张培林,王国德,卓洪波(1472)

子矢量排序的渐进不相似度逼近算法 李阳,潘志斌,吴鑫鹏(1478)

稀疏梯度先验模型的正则化图像复原 刘伟豪,梅林,蔡烜(1485)

高精度亚像素全局运动估计的上采样梯度互相关算法 余应淮,王锦荣(1492)

图像分析和识别

点到弦距离累加的自适应角点检测 王万良,金亦挺,赵燕伟,胡峰俊(1500)

最大子分类间隔准则的核函数优化 张静,杨智勇,于红芸,孙晓燕(1509)

核典型相关性鉴别分析 陈伟琦,程强(1516)

小波变换和特征加权融合的人脸识别 赵焕利,王玉德,张学志,薛乃玉(1522)

具有身份标识的多目标跟踪 安国成,肖坦(1528)

图像理解和计算机视觉

用于圆锥体位姿测量的曲面标记..... 李蒙,谌德荣,周广铭,蒋玉萍,高翔霄(1534)

计算机图形学

基于特征识别的3维人脸动画模型自动构造…………… 徐明, 乔宁博, 文振焜, 曾新, 采振祥(1540)

3D GIS 环境下雨雪天气实时仿真…………… 李欢, 樊红, 冯浩(1548)

医学图像处理

结合马尔可夫随机场与模糊 C-均值聚类的脑 MRI 图像分割…………… 余黎煌, 钟华, 张石(1554)

遥感图像处理

面向遥感影像镶嵌的 SVR 色彩一致性处理…………… 吴炜, 骆剑承, 李均力, 杨海平, 沈占锋(1561)

遥感影像投影寻踪回归分类模型…………… 张正健, 李祚泳, 秦宁生, 刘志红, 巴桑(1568)

《中国图象图形学报》2012 年第 17 卷总目次…………… (1)

志谢…………… 封2

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 12 期

2012 年 12 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:010-64807995 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 ZTTXFZ 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. 12 December 2012

Contents

Review

Overview of Gaussian mixture models, solving algorithms and visual applications Guan Tao, Li Lingling(1461)

Image Processing and Coding

Denoising method for color images based on chrominance model and curvelet transform
..... Zhang Yunqiang, Zhang Peilin, Wang Guode, Zhuo Hongbo(1472)

Improved incremental dissimilarity approximations algorithm using sub-vector sorting Li Yang, Pan Zhibin, Wu Xinpeng(1478)

Regularized image restoration algorithm on sparse gradient prior model Liu Weihao, Mei Lin, Cai Xuan(1485)

High accuracy sub-pixel global motion estimation based on upsampled gradient cross-correlation algorithm
..... Yu Yinghuai, Wang Jinrong(1492)

Image Analysis and Recognition

Adaptive corner detection based on chord-to-point distance accumulation
..... Wang Wanliang, Jin Yiting, Zhao Yanwei, Hu Fengjun(1500)

Kernel optimization approach based on maximum subclass margin criterion
..... Zhang Jing, Yang Zhiyong, Yu Hongyun, Sun Xiaoyan(1509)

Kernel discriminant analysis based on canonical correlation Chen Weiqi, Cheng Qiang(1516)

Face recognition based on wavelet transform and weighted fusion of face features
..... Zhao Huanli, Wang Yude, Zhang Xuezhi, Xue Naiyu(1522)

Multi-target tracking algorithms with identification label An Guocheng, Xiao Tan(1528)

Image Understanding and Computer Vision

Curved surface marker used for cone pose measurement
..... Li Meng, Chen Derong, Zhou Guangming, Jiang Yuping, Gao Xiangxiao(1534)

Computer Graphics

The approach to automatically construct animation models based on 3D facial geometry and texture features recognition
..... Xu Ming, Qiao Ningbo, Wen Zhenkun, Zeng Xin, Cai Zhenxiang(1540)

Real-time snow and rain rendering in 3D GIS environment Li Huan, Fan Hong, Feng Hao(1548)

Medical Image Processing

Fuzzy C-means clustering algorithm combined with markov random field for brain MR image segmentation
..... She Lihuang, Zhong Hua, Zhang Shi(1554)

Remote Sensing Image Processing

Support vector regression color normalization method for image mosaic
..... Wu Wei, Luo Jiancheng, Li Junli, Yang Haiping, Shen Zhanfeng(1561)

Remote sensing image classification model based on projection pursuit regression Zhang Zhengjian, Li Zuoyong, Qin Ningsheng, Liu Zhihong, Ba Sang(1568)

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)12-1500-09

论文引用格式: 王万良, 金亦挺, 赵燕伟, 胡峰俊. 点到弦距离累加的自适应角点检测[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(12): 1500-1508.

点到弦距离累加的自适应角点检测

王万良¹, 金亦挺¹, 赵燕伟², 胡峰俊¹

1. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 杭州 310023;

2. 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310012

摘要: 提出了一种自适应角点检测算法(ACPDA), 以解决 CPDA 算法采用全局阈值去除伪角点所存在的缺陷, 即无法正确处理邻近角点、钝形角点和圆形角点的问题。该算法的优势主要包括: 1) 提出了角点邻域再检测方法, 实现对邻近角点的有效检测, 同时使角点定位更加精确; 2) 为每条曲线构造了一个曲线自适应阈值来去除伪角点, 避免了钝形角点的丢失; 3) 构造角点局部自适应阈值来有效去除圆形角点。对比实验表明, ACPDA 算法降低了漏检角点数和伪角点数, 具有更好的检测性能。

关键词: 角点检测; ACPDA; 邻近角点; 自适应阈值

Adaptive corner detection based on chord-to-point distance accumulation

Wang Wanliang¹, Jin Yiting¹, Zhao Yanwei², Hu Fengjun¹

1. College of Computer Science & Technology, Zhejiang Univ. of Tech., Hangzhou 310023, China;

2. Key Laboratory of Special Equipment and Advanced Processing Technology Ministry of Education, Zhejiang Univ. of Tech., Hangzhou 310012, China

Abstract: An improved adaptive Chord-to-Point distance accumulation algorithm (ACPDA) is proposed which can handle adjacent corners, obtuse corners, and round corners. The main advantages of our implementation include: 1) the neighborhood of the candidate corners is re-detected for avoiding loss of the adjacent corners, which making the localization of corners more precise; 2) an adaptive threshold for each curve is set for removing the false corners, avoiding loss of the obtuse corner; 3) a local adaptive threshold is constructed to remove the round corners effectively. The experimental results have evaluated the performance of the ACPDA.

Key words: corner detection; adaptive chord-to-point distance accumulation; adjacent corner; adaptive threshold

0 引言

在一幅图像中, 角点本身包含着大量有用的信息, 角点检测是模式识别、计算机视觉、图像处理等领域中重要的研究内容之一。性能好的角点检测方法对完成诸如运动跟踪、目标识别、立体匹配等都有着至关重要的作用。由于角点的重要性, 目前已提出很

多种角点检测方法, 大致可分为两类: 第1类是基于图像灰度的方法, 这类方法考虑像素点邻域的灰度来检测角点, 通常需要处理相当大的数据量, 因此计算复杂度高, 并且对图像旋转等几何变换鲁棒性较差, 如 SUSAN 角点检测方法及其改进^[1-2], Harris 角点检测方法及其改进^[3-4]; 第2类是基于图像边缘的方法, 这类方法根据图像边缘曲线来检测角点, 处理数据量小, 不仅在图像进行几何变换时相当稳定, 在多尺度

收稿日期: 2012-01-10; 修回日期: 2012-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(60970021); 浙江省科技厅项目(2010R50002-11)。

第一作者简介: 王万良(1957—), 男, 教授、博士生导师, 2001年于同济大学获控制理论与控制工程博士学位, 主要研究方向为计算机视觉、智能调度与控制。E-mail: wwl@zjut.edu.cn

空间下也能具有很好的鲁棒性,但对边缘曲线的提取效果依赖较大,如 GCM 角点检测方法^[5],基于角点累积空间的角点检测方法^[6],基于 CSS(curvature scale space)的角点检测方法^[7-10]等。

Mokhtarian 把角点定义为目标轮廓线上曲率大于某个阈值的局部极大值点,并提出了基于 CSS 的角点检测算法^[7]。之后,很多角点检测算法对其进行改进^[8-10],取得了比较好的效果。但总的来说基于 CSS 的角点检测算法存在着两个问题:一是由于曲率自身的性质,需要计算一阶和二阶导数,导致角点检测算法对局部变化非常的敏感;二是选择适当的高斯平滑尺度是非常困难的,选择的尺度过大,就会导致角点定位误差增大。为克服这两个问题,Awrangjeb 提出了基于 CPDA 的角点检测算法^[11-12],采用点到弦距离累加(CPDA)来代替曲率的计算,由于点到弦的距离累加完全是基于欧氏距离的,并未涉及一阶二阶求导和较大尺度的高斯平滑,所以角点定位更加精确。

CPDA 算法是基于图像边缘的角点检测方法,角点检测时,首先采用 Canny 算子^[13]对图像边缘进行提取,然后采用 3 根固定弦来计算边缘曲线上每个像素点的点到弦距离累加并乘积,以此作为初始角点响应,搜索所有初始响应中的局部极大值点作为角点候选集合,采用全局阈值和角度阈值去除伪角点后得到角点最终检测结果。CPDA 算法稳定性高,对噪声、几何变换的鲁棒性也很好,角点的定位精度也很高。但经分析发现,该算法存在着一些局限,算法中采用 3 根固定的弦长来检测角点,导致相邻太近的角点(下文简称为邻近角点)无法被区分开来,并且采用全局阈值来剔除伪角点导致角点检测结果完全依赖于阈值的设定。针对以上问题,在获取初始角点响应后,首先对候选角点邻域进行再检测,检测出漏检的邻近角点,然后为每条曲线构造一个曲线自适应阈值来去除伪角点,这也避免了钝形角点被错误的去除,最后构造角点局部自适应阈值,在保留钝形角点的同时去除圆形角点。实验结果,表明改进算法使原算法的性能得到了提升,能更有效地进行角点检测。

1 CPDA 角点检测原理及局限

CPDA 角点检测算法是在 Han 和 Poston^[14]提出的点到弦距离累加原理上发展起来的。如图 1 所

示, $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ 是曲线上的 n 个像素点, P_1 是曲线上第 1 个像素点, P_n 是曲线上最后一个像素点。计算像素点 P_k 的点到弦距离累加的原理为:由一条弦 C_L 在 $P_{k-L}P_k$ 位置开始,计算点 P_k 到弦 $P_{k-L}P_k$ 的距离 $d_{k,k-L}$,然后弦 C_L 右移一个像素到 $P_{k-L+1}P_{k+1}$,再计算点 P_k 到弦 $P_{k-L+1}P_{k+1}$ 的距离 $d_{k,k-L+1}$,以此类推,最后弦 C_L 移动到 P_kP_{k+L} 位置结束,求得所有距离之和,即为点 P_k 处的点到弦距离累加 $h_L(k)$ 。由于 $d_{k,k-L} = d_{k,k} = 0$,点到弦距离累加计算公式可简化为

$$h_L(k) = \sum_{j=k-L+1}^{k-1} d_{k,j} \quad (1)$$

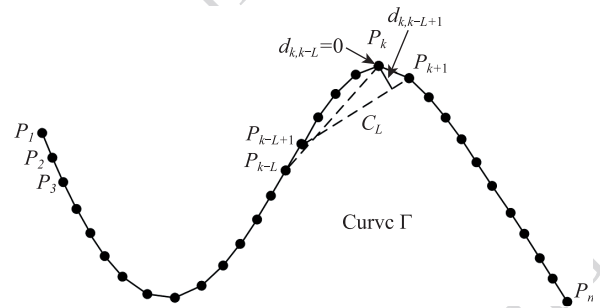


图 1 点到弦距离累加原理图
Fig. 1 CPDA technique diagram

基于以上原理,Awrangjeb 提出了 CPDA 角点检测算法^[11],主要依据的是角点处的点到弦距离累加值为局部极大值。具体步骤如下:

- 1) 由 Canny 算子检测出图像边缘,从边缘图中提取出各条边,填充边缘曲线中的间隙点,检测出 T 交叉点,用一个小窗口高斯核平滑曲线,用以消除噪声;
- 2) 采用 3 条 L 值分别为 10、20、30 的弦 C_L 如式(1)计算曲线上每一点的点到弦距离累加值 $h_L(k)$,并分别进行归一化

$$h'_j(k) = \frac{h_j(k)}{\max(h_j)}, 1 \leq k \leq N, 1 \leq j \leq 3 \quad (2)$$

然后进行相乘得到像素点特征值

$$H(k) = h'_1(k)h'_2(k)h'_3(k), 1 \leq k \leq N \quad (3)$$

- 3) 在 $H(k)$ 中找到局部极大值点作为候选角点,并采用全局阈值 $T_h = 0.2$ 去除伪角点;

- 4) 计算候选角点的全局角度,与角度阈值相比,去除虚假角点;

- 5) 对于曲线的端点和 T 交叉点,如果与候选角点的欧氏距离大于 25 像素,则并入角点集合。

虽然 CPDA 算法能有效的进行角点检测,并能改善基于 CSS 的角点检测算法的角点定位精度问

题,但是也存在着以下不足:

1) CPDA 算法无法检测出邻近角点。由于 CPDA 算法采用 3 条 L 值分别为 10、20、30 的弦来计算曲线上像素点的特征值 $H(k)$, 导致其不能区分邻近角点, 只能检测出一个角点。如图 2 所示, 对于图 2(a) 标识为 1 的邻近角点, L 值为 10 测得的数据能区分两角点, L 值为 20 和 30 测得的数据并不能区分两角点, 导致三者乘积后无法有效的检测出邻近角点。

2) CPDA 算法中采用全局阈值 $T_h = 0.2$ 来去除伪角点和圆形角点, 导致了钝形角点的丢失。因为钝形角点虽然也取到了局部极大值, 但它的 $h_L(k)$ 值却相对较小, 若曲线上存在 $h_L(k)$ 值较大的角点, 则钝形角点会由于归一化导致它的特征值 $H(k)$ 小于全局阈值而被去除。如尖锐角点 3 个归一化后的 $h_L(k)$ 值分别为 1、1 和 1, 三者乘积后的 $H(k)$ 为 1, 钝形角点 3 个归一化后的 $h_L(k)$ 分别为 0.25、0.3 和 0.35, 则三者乘积后的 $H(k)$ 为 0.02625, 在 CPDA 算法中取全局曲率阈值 $T_h = 0.2$, 则此钝形角点将无法被检测出来。

3) CPDA 算法无法去除某些圆形角点。对于某些圆形角点, 会由于它本身的 $h_L(k)$ 值比较大, 或者由于归一化后的 $h_L(k)$ 值比较大, 导致圆形角点的特征值 $H(k)$ 大于全局阈值而被保留下来。

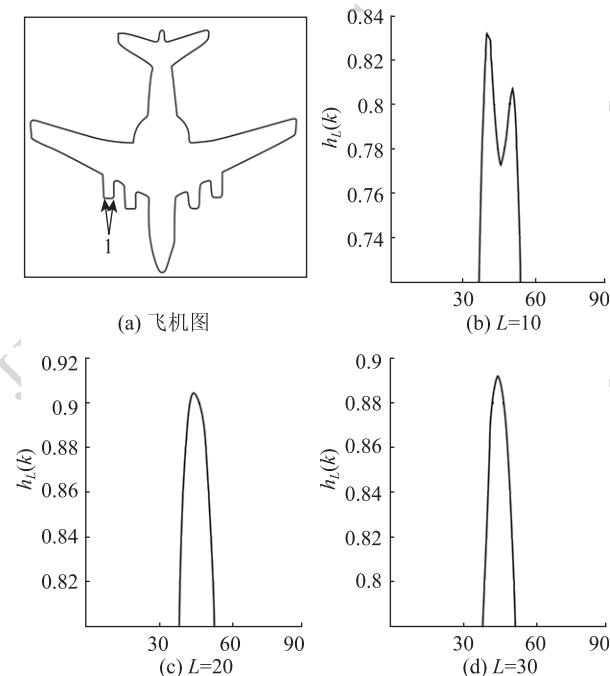


图 2 邻近角点的 $h_L(k)$ 值
Fig. 2 $h_L(k)$ of adjacent corner

2 ACPDA 角点检测算法

鉴于 CPDA 角点检测算法存在的不足, 提出了 ACPDA (adaptive CPDA) 算法, 引入了角点邻域再检测方法以及自适应阈值, 对原算法步骤 2)3) 进行改进:

对步骤 2) 的改进: 为了实现对邻近角点和钝形角点的检测, 在采用 3 条 L 值分别为 10、20、30 的弦来计算 $H(k)$ 值后, 首先对候选角点邻域进行再检测, 检测出其中的邻近角点, 然后为每条曲线构造一个曲线自适应阈值 T_h 来去除伪角点, 同时避免了钝形角点的丢失。

对步骤 3) 的改进: 为了去除圆形角点, 构造了角点局部自适应阈值 T_k , 实现在保留钝形角点的同时去除圆形角点。

2.1 邻近角点和钝形角点的检测

由于曲线上的角点类型是多种多样的, 所以对每条曲线选择一条单一长度的弦是非常困难的, 并且为了能更明显的区分真实角点和伪角点, 原 CPDA 算法采用弦长 $L_1 = 10, L_2 = 20, L_3 = 30$ 通过式 (2) (3) 来计算像素点特征值 $H(k)$ 。例如计算图 2(a) 的飞机图像得到的 $H(k)$ 值如图 3 所示, 从图 3 中可以看出, 伪角点得到了很好地抑制, 真实角点更加凸出, 但是却导致了邻近角点的丢失。图 4 为采用一根 L 值为 7 的弦计算图 2(a) 的飞机图像得到的像素点 $h_L(k)$ 值, 从图 4 中可以看出, 虽然由局部噪声等引起的伪角点没有被抑制, 但是邻近角点得到了很好地区分。鉴于以上思路, 首先采用 3 根 $L_1 = 10, L_2 = 20, L_3 = 30$ 的弦来计算像素点的 $H(k)$ 值后, 取极大值点作为候选角点, 再采用一根 L 值较小的弦来对候选角点邻域进行再检测, 使算法能很好地抑制伪角点的同时实现对邻近角点的检测。对于候选角点, 检测它的邻域内是否存在两个以上的极大值, 若存在, 则将其中的极大值点标志为邻近角点, 并加入到候选角点集合中, 原角点从候选角点集合中删除。角点邻域的再检测同时也使得角点定位精度得到了提高。

下面讨论一下角点邻域再检测中弦长的确定以及邻域大小的选取。较短的弦能更好的区分邻近角点, 但由于相距太近的角点并没有区分意义, 并且弦长太短会使误差增大。取 L 值为 10 的弦来对候选角点进行再检测, 实验结果表明, L 取值为 10 取得了较好的效果, 同时这也减小了算法的时间运算

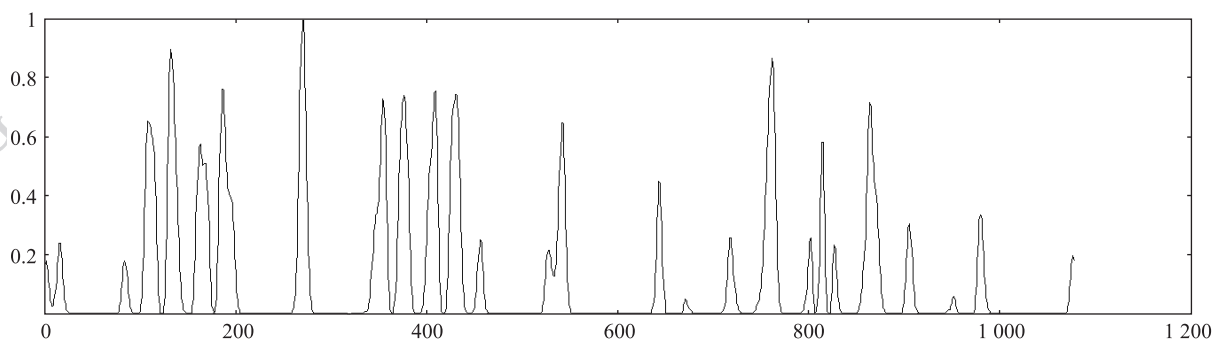


图 3 采用 $L=10, 20, 30$ 计算得到的 $H(k)$ 值
Fig. 3 CPDA product function with $L=10, 20, 30$

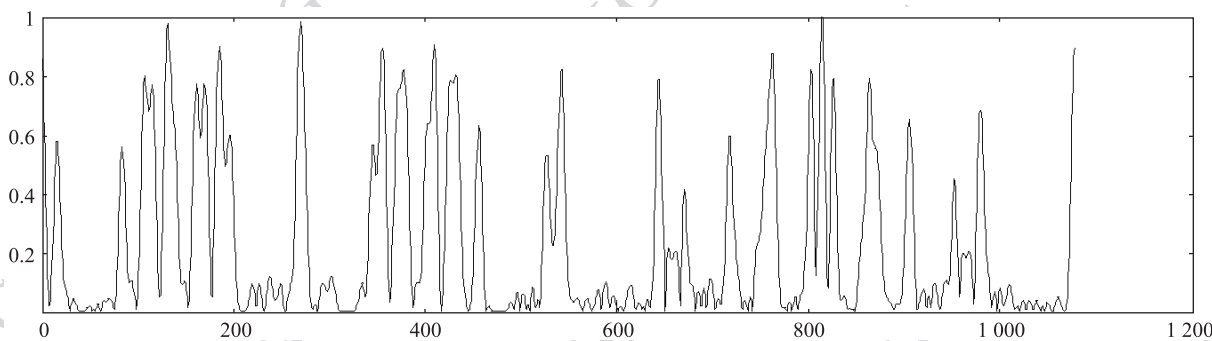


图 4 采用 $L=7$ 计算得到的 $h_L(k)$ 值
Fig. 4 CPDA function with $L=7$

量,因为获取候选角点时已计算过 L 值为 10 的 $h_L(k)$ 值。角点 P_k 的邻域为

$$\Omega(P_k) = \{P_{k-l}, \dots, P_{k-l}, P_k, P_{k+l}, \dots, P_{k+r}\} \quad (4)$$

根据邻近角点的性质,通过动态支持区域来获取邻域范围,在离该角点距离最近的前提下,由约束条件公式

$$H(P_{k-l}) = H(P_{k+r}) = \frac{H(P_k)}{2} \quad (5)$$

来确定像素点 P_{k-l} 及 P_{k+r} 的位置,如果角点邻域存在极小值的情况下,若该极小值大于 $H(P_k)/2$,则该极小值点即为像素点 P_{k-l} 或 P_{k+r} 。

由于每条曲线上角点的 $H(k)$ 值都是经过归一化后相乘得到,曲线上是否存在尖锐角点将会影响到每个角点的 $H(k)$ 值,对于复杂的图像,原算法中采用全局阈值来去除每条曲线上的伪角点显然是不合理的。为了避免钝形角点的丢失,为每条曲线各构造一个曲线自适应阈值来去除伪角点。在真实角点中,钝形角点的点到弦距离累加是最小的,所以指定 θ_{obtuse} 作为能考虑为真实角点的最大钝角角度值,来计算每条曲线的阈值 T_h ,由于角度太大的钝形角点接近于直线,所以取 θ_{obtuse} 为 170° 。构造

$$T_h = \prod_{j=1}^3 \frac{h_j(\theta_{obtuse})}{\max(h_j)} \quad (6)$$

来计算曲线自适应阈值 T_h ,大于阈值 T_h 的角点保留下来,小于阈值 T_h 的认定为伪角点,从候选角点中剔除,从而能够在有效地去除伪角点的同时避免钝形角点的丢失。其中, $h_j(\theta_{obtuse})$ ($j=1, 2, 3$) 表示 L 值分别为 10、20、30 的弦测得角度为 θ_{obtuse} 的角点 $h_L(k)$ 值, $\max(h_j)$ ($j=1, 2, 3$) 表示 L 值分别为 10、20、30 的弦测得该条曲线上像素点 $h_L(k)$ 值的最大值。

2.2 圆形角点的去除

虽然圆形角点的 $h_L(k)$ 值也是局部极大值,但是它在识别物体时并不那么有意义,就像一个椭圆形物体并不具有明显的角点,所以必须剔除。在 2.1 节中,为保留钝形角点而采用曲线自适应阈值去除伪角点的时候,圆形角点也保留了下来。

为了有效地去除圆形角点,首先来分析圆形角点和钝形角点的特征。如图 5 所示,图 5(a)(b) 分别为钝形角点和圆形角点,图 5(c)(d) 分别为它们的 $h_L(k)$ 值。从图 5 可以看出,虽然圆形角点也具有局部极大值的特性,但是圆形角点在左右方向长为 L 的邻域内的 $h_L(k)$ 值下降趋势比较缓慢,而钝形角点下降趋势明显,直接下降到 0。由于这个特

性,导致圆形角点在左右邻域的均值比钝形角点的均值大。因此为候选角点构造局部自适应阈值 T_k ,选择合适的比例因子 u 可使得局部自适应阈值小于钝形角点的值,同时大于圆形角点的值,从而得以实现保留钝形角点的同时剔除圆形角点。

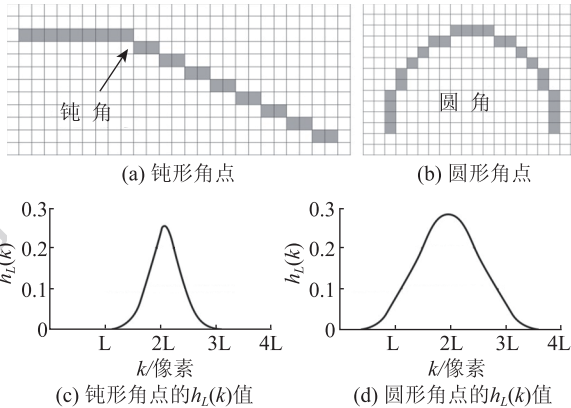


图 5 钝角与圆角及其 $h_L(k)$ 值

Fig. 5 Obtuse corner, round corner and it's $h_L(k)$

根据以上原理,对于候选角点 P_k ,构造角点的局部自适应阈值计算公式,即

$$T_k = u \times \frac{1}{2L} \sum_{i=k-L}^{k+L} h_L(i) \quad (7)$$

采用左右邻域长 $L = 10$ 来计算自适应阈值。其中, T_k 为角点局部自适应阈值, $h_L(i)$ 为像素点 P_i 处的点到弦距离累加, u 为比例因子。

采用式(7)计算得到的角点局部自适应阈值 T_k 来剔除圆形角点。当角点局部自适应阈值 $T_k < H(k)$,则角点为钝形角点,予以保留。若角点局部自适应阈值 $T_k \geq H(k)$,则角点为圆形角点,予以剔除。至此,所有真实角点已被准确的检测出来,包括邻近角点和钝形角点,并有效地去除了圆形角点。

为进一步明确 ACPDA 算法的改进之处,采用表格形式列出了 CPDA 算法与 ACPDA 算法的步骤,如表 1 所示。下面来讨论算法时间的复杂度,很明显 ACPDA 算法在性能上的提升是以算法计算量为代价的。现只比较 CPDA 算法与 ACPDA 算法步骤 2)3)的时间复杂度。令 CPDA 算法步骤 2)3)运算时间为 T_{CPDA} ,曲线上像素点数为 n ,算法步骤 2)中,采用式(1)(2)(3)计算像素点特征值 $H(k)$ 的计算量为 $21n(L-1) + 6n + 2n$,其中 L 取平均值 $20^{[12]}$;算法步骤 3)中,取极大值点为候选角点和去除伪角点的计算量为 $n + n_c$,其中 n_c 为候选角点个数。所以 $T_{CPDA} = 21n(L-1) + 6n + 2n + n + n_c =$

$408n + n_c$ 。令 ACPDA 算法步骤 2)3)运算时间为 T_{ACPDA} ,算法第 2)步中,由于是采用 $L = 10$ 来对角点邻域进行再检测,而此步骤在计算 $H(k)$ 时已经计算过,所以对候选角点邻域进行再检测的计算量为 $n_1 n_c$, n_1 为角点邻域的大小,这里取 $n_1 = 20$,由于每条曲线只需计算一个曲线自适应阈值,所以该计算量可忽略不计;算法步骤 3)中,构造局部自适应阈值和去除圆形角点的计算量为 $23n_c + n_c$ 。所以 $T_{ACPDA} = 21n(L-1) + 6n + 2n + n + n_1 n_c + 23n_c + n_c = 408n + 44n_c$ 。由于角点数 n_c 是远远小于曲线像素点数 n 的,所以改进后 ACPDA 算法的时间复杂度并没有增加很多,还是能达到实时操作的要求。

表 1 CPDA 和 ACPDA 的算法步骤
Table 1 Steps of CPDA and ACPDA

CPDA 算法	ACPDA 算法
1) 图像边缘提取,填充间隙点,检测出 T 交叉点,曲线平滑	
2) 计算像素点特征值 $H(k)$	2) 计算像素点特征值 $H(k)$,取极大值点为候选角点,对候选角点邻域进行再检测,并构造曲线自适应阈值 T_h 去除伪角点
3) 取极大值点为候选角点,采用全局阈值去除伪角点	3) 构造角点局部自适应阈值 T_h ,去除圆形角点
4) 采用角度阈值去除虚假角点	
5) 检测曲线端点和 T 交叉点	

3 实验结果及分析

3.1 ACPDA 算法与 CPDA 算法的比较

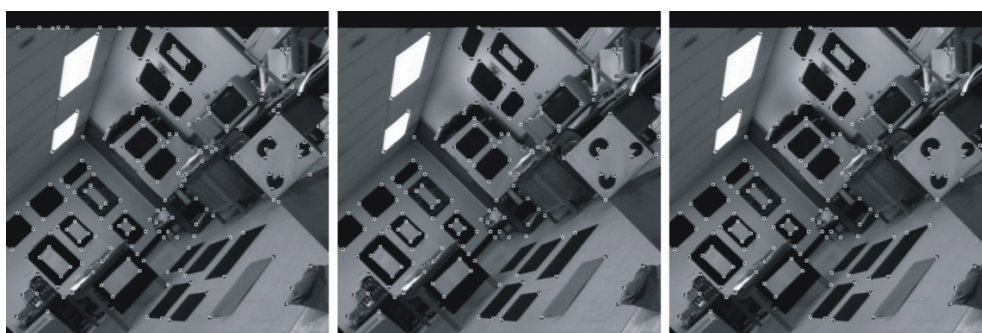
采用两种算法对标准测试图像进行分步角点提取,图 6、图 7 分别描述了 CPDA 算法和 ACPDA 算法对“实验室”图像进行角点检测的步骤。

图 6(a)是由 CPDA 算法对图像进行角点检测初始集合,由于采用全局阈值来去除伪角点,导致无法检测出邻近角点和钝形角点,并且很多圆形角点也没有被去除。采用角度阈值去除虚假角点后如图 6(b)所示。检测出曲线端点和 T 交叉点,得到 CPDA 算法角点检测最终结果,如图 6(c)所示。

图 7(a)是 ACPDA 算法对图像角点进行粗提取并对角点邻域进行再检测后得到的检测结果,从图中可以看出 ACPDA 算法得到了大量的初始

候选角点,其中邻近角点得以保留。为每条曲线构造一个曲线自适应阈值来去除伪角点,避免了钝形角点的丢失,如图 7(b)所示,同时保留下来的圆形角点将在后面的步骤被去除。根据角点局部自适应阈值对候选角点进行检验,圆形角点被去除,如图 7(c)所示。采用角度阈值去除虚假角

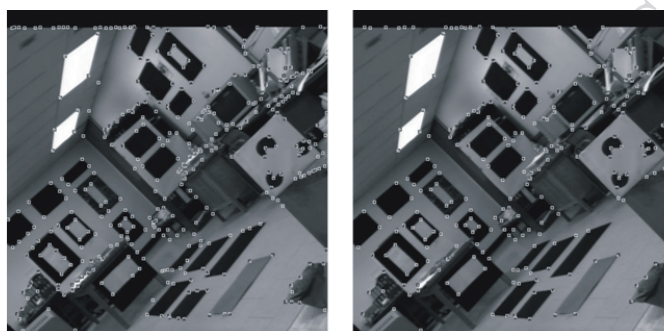
点后如图 7(d)所示。检测曲线端点和 T 交叉点,得到 ACPDA 算法角点检测最终结果,如图 7(e)所示。对比图 6(c)与图 7(e)的检测结果可以看出,ACPDA 算法具有更好的性能,能对邻近角点和钝形角点进行有效的检测,并且能很好地去掉圆形角点。



(a) 采用全局阈值去除伪角点 (b) 根据角度阈值去除虚假角点 (c) 曲线端点和T交叉点的检测

图 6 CPDA 算法步骤

Fig. 6 Steps of CPDA



(a) 邻近角点的保留 (b) 根据曲线自适应阈值去除伪角点



(c) 根据角点局部自适应阈值去除圆形角点 (d) 根据角度阈值去除虚假角点 (e) 曲线端点和T交叉点的检测

图 7 ACPDA 算法步骤

Fig. 7 Steps of ACPDA

3.2 几种角点检测算法正确检测率的比较

通过标准测试图像与经典的角点检测算法(如 BT87^[15]、Harris^[3]、ACSS^[9]和 CPDA^[11])进行对比,以验证 ACPDA 算法的检测性能,如图 8、图 9 所示。图 8(a)为人为定义的参考图像,用以对各角点检测算法进行正确率对比。图 8(b)(c)分别是 BT87 和

Harris 用于 2 维图像的检测结果,可以从图中看出它们对局部噪声比较敏感,检测出了很多错误的角点,并且遗漏了很多明显的角点。从图 8(d)可以看出,ACSS 算法能很好地检测出大部分真实角点,但是也存在较多的伪角点。图 8(e)是原 CPDA 算法的检测结果,从图中看出该算法并不能很好地检测

出邻近角点和钝形角点,并且存在较多的伪角点。图 8(f)是使用 ACPDA 算法的检测结果,真实角点基本上都被检测出来了,并未漏检邻近角点和钝形

角点,圆形角点也能很好的被去除。图 9 为上述检测器对一幅木块图像的角点检测结果,结论与图 8 一样。

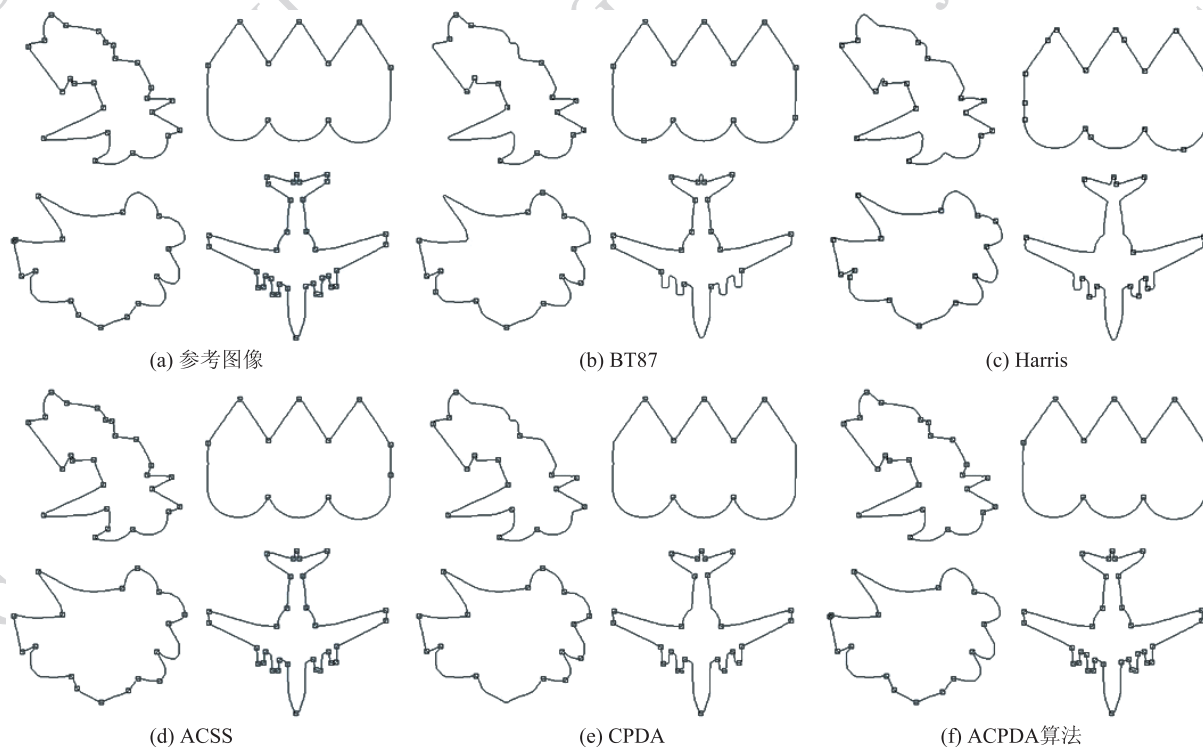


图 8 2 维图像的检测结果

Fig. 8 Detection results of 2D image

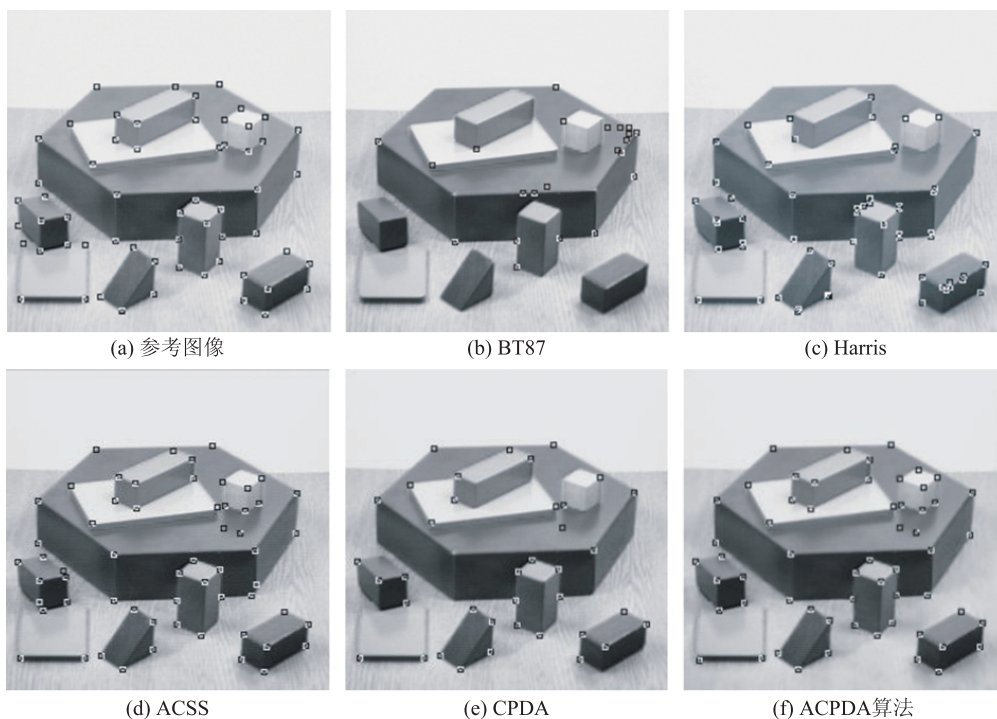


图 9 木块图像的检测结果

Fig. 9 Detection results of block image

下面对这些算法进行正确检测率的比较,采用参考文献[5]的判断方法来对图 8、图 9 进行评估,定义算法的正确检测率为

$$\text{正确检测率} = \frac{\text{正确角点数}}{\text{正确角点数} + \text{漏检角点数} + \text{伪角点数}}$$

统计正确角点数、漏检角点数和伪角点数,并计算正确检测率,结果如表 2、表 3 所示。图 10 表示各种算法的正确检测率,从图 8、图 9 的检测结果和图 10 的正确检测率的观察,可以看出 ACPDA 算法的正确检测率较其他算法得到了较大提升,改进后的算法较原 CPDA 算法的正确检测率分别提升了 28.57% 和 33.74%。由于 CPDA 算法采取点到弦的距离累加来代替曲率的计算,所以角点定位比较精确,在 CPDA 算法的基础上,ACPDA 算法通过对角点邻域进行再检测,使得角点定位精度更高。

表 2 2 维图像的评估结果

Table 2 Evaluation results of 2D image

检测算法	正确角点数	漏检角点数	伪角点数	正确检测率	定位误差
BT87	51	32	5	0.579 5	1.863 7
Harris	50	33	8	0.549 4	1.557 3
ACSS	78	5	5	0.886 3	0.990 1
CPDA	59	24	4	0.678 1	0.923 9
ACPDA	80	3	0	0.963 8	0.869 2

表 3 方块图像的评估结果

Table 3 Evaluation results of block image

检测算法	正确角点数	漏检角点数	伪角点数	正确检测率	定位误差
BT87	12	47	10	0.173 9	2.436 7
Harris	39	20	19	0.500 0	1.604 5
ACSS	54	5	2	0.885 2	1.401 0
CPDA	36	23	3	0.580 6	1.285 9
ACPDA	56	3	2	0.918 0	1.263 5

4 结 论

为克服 CPDA 角点检测算法的不足,将算法进行了改进,首先通过对候选角点邻域进行再检测,实现了对邻近角点的提取,然后构造了两个自适应阈值:曲线自适应阈值 T_h 和角点局部自适应阈值 T_l ,使算法能有效地检测出钝形角点的同时去除圆形角

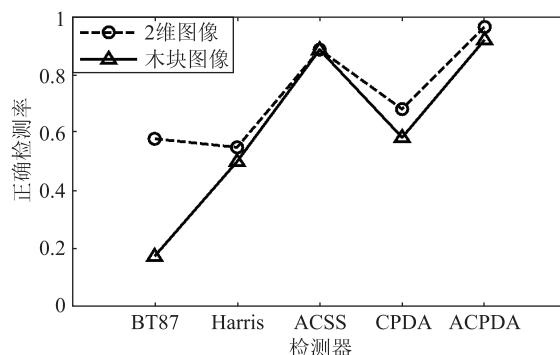


图 10 各种检测器对 2 维和木块图像的正确检测率

Fig. 10 Correct detection rates of several detectors for 2D and block images

点。最后通过把 ACPDA 算法与原 CPDA 算法进行分步角点检测实验对比,验证了改进后的算法在性能上的提升,同时将 ACPDA 算法与其他检测算法进行了比较,结果表明 ACPDA 算法具有好的检测性能。但 ACPDA 算法并未在时间复杂度方面对原算法进行改进,而计算每个像素点的点到弦距离累加是非常费时的,后续将研究降低候选角点获取和角点邻域再检测这两部分的时间复杂度。

参考文献 (References)

[1] Smith S, Brady J M. SUSAN; a new approach to low-level image processing [J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1): 45-78.

[2] He Q, Li Q H, Wang X S. Corner features extraction of image based on orientation SUSAN operator [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2008, 29(3): 508-510. [贺菁,李庆华,王新赛. 基于方向性 SUSAN 算子的图像角点特征提取 [J]. 小型微型计算机系统, 2008, 29(3): 508-510.]

[3] Harris C, Stephens M. A Combined Corner and Edge Detector [C] // Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference. Manchester, England: University of Manchester, 1988: 147-151.

[4] Gong P, Liu X B, Zhou P. Improved Harris-based corner detection algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(11): 173-175. [龚平,刘相滨,周鹏. 一种改进的 Harris 角点检测算法 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(11): 173-175.]

[5] Zhang X H, Yang D. Corner detection algorithm using determinant of Gradient correlation [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(8): 1601-1608. [张小洪,杨丹. 使用梯度相关矩阵行列式的角点检测算法 [J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(8): 1601-1608.]

[6] Lv N, Feng Z R. A randomized corner detection algorithm [J], PR & AI, 2011, 24(2): 291-298. [吕娜,冯祖仁. 一种随机角点检测算法 [J]. 模式识别与人工智能, 2011, 2(24): 291-

298.]
- [7] 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.
- [8] Mokhtarian F, Suomela R. Enhancing the curvature scale space corner detector [C]//Proc. of Scandinavian Conf. Image Analysis. Bergen, Norway; Int. Assoc. Pattern Recognition, 2001: 145-152.
- [9] He X C, Yung N H C. Corner detector based on global and local curvature properties [J]. Optical Engineering, 2008, 47(5): 057008(1-12).
- [10] Zhang X H, Lei M, Yang D. Robust image corner detection based on multi-scale curvature product [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(7): 1270-1275. [张小洪, 雷明, 杨丹. 基于多尺度曲率乘积的鲁棒图像角点检测[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(7): 1270-1275.]
- [11] Awrangjeb M, Lu G J. Robust image corner detection based on the chord-to-point distance accumulation technique [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2008, 10(6): 1059-1072.
- [12] Awrangjeb M, Lu G J, Fraser C S. A fast corner detector based on the chord-to-point distance accumulation technique [C]//2009 Digital Image Computing: Techniques and Applications. Melbourne, Australia; IEEE, 2009: 519-525.
- [13] Canny J. A Computational Approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 697-698.
- [14] Han J H, Poston T. Chord-to-point distance accumulation and planar curvature: A new approach to discrete curvature [J]. Pattern Recognition Letters, 2001, 22(10): 1133-1144.
- [15] Chetverikov D, Szabo Z. Detection of High Curvature Points in Planar Curves [CP/OL]. (1999-04-26)[2011-11-23]. <http://visual.ipan.szaki.hu/corner/index.html>.