

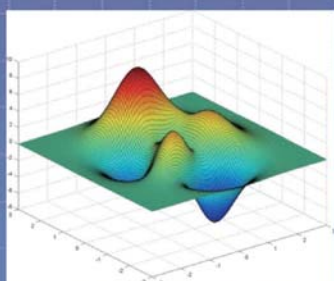


主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

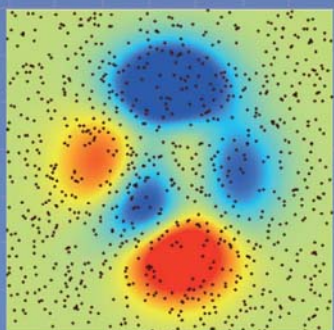
中国图象图形学报

2014
02
VOL.19

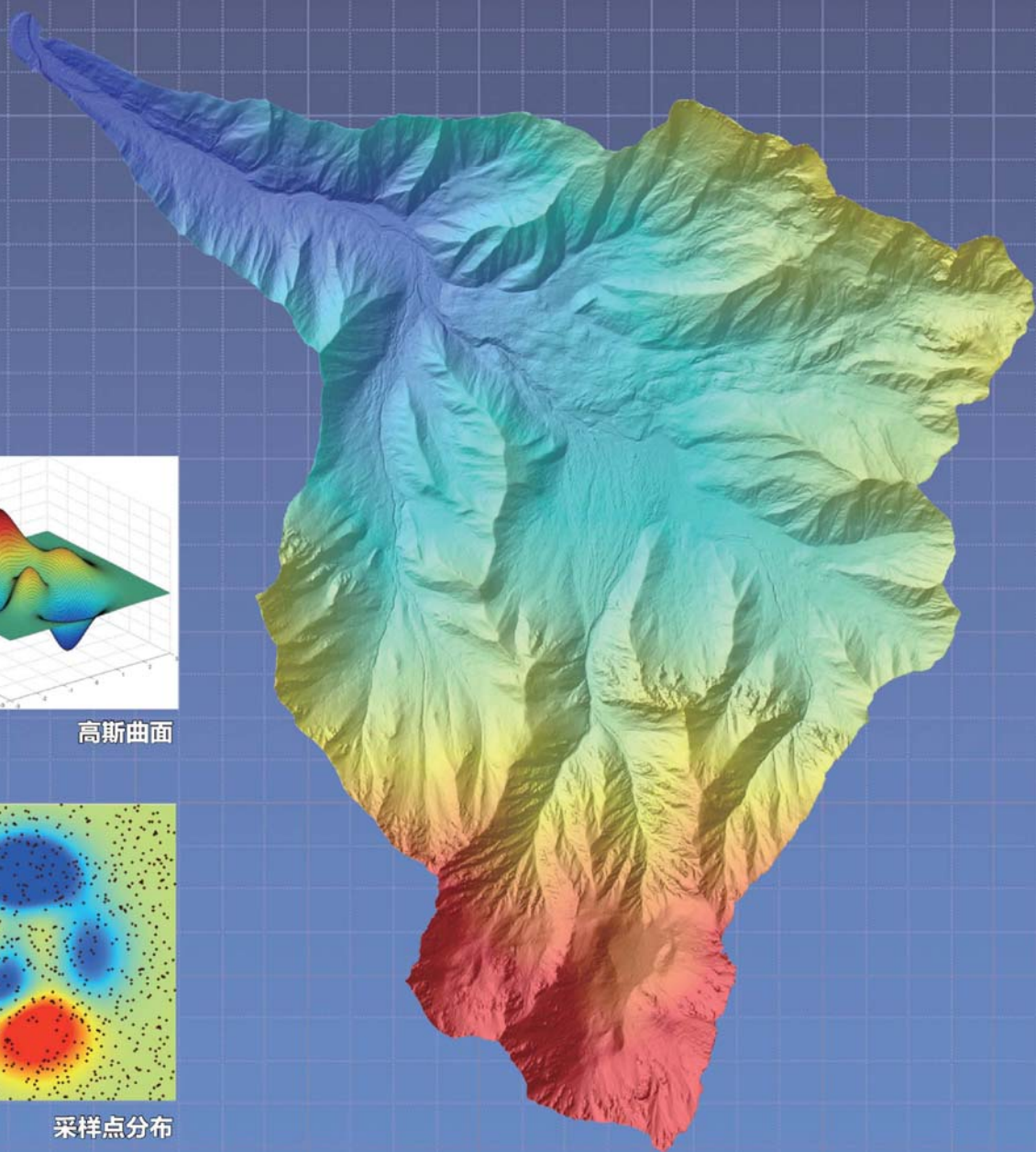
ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



高斯曲面



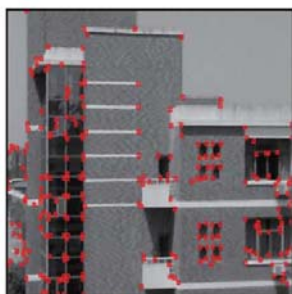
采样点分布



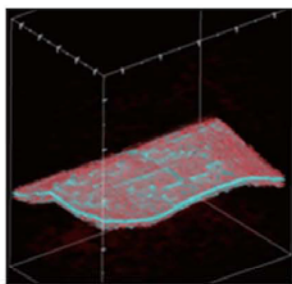
HASM地形模拟 P290



邻域最短距离法寻找最佳拼接缝(第227页)



曲率尺度空间与链码方向统计的角点检测(第234页)



目标特征指导的多分辨率体绘制算法(第283页)

计算机视觉前沿论坛

行为理解的认知推理方法

陶霖密, 杨卓宁, 王国建 0167

深度学习及其在目标和行为识别中的新进展

郑胤, 陈权崎, 章毓晋 0175

图像处理 and 编码

分布式视频编码中基于改进FCM聚类的相关噪声模型估计

杨春玲, 吴娟 0185

结合一阶自回归滑动平均和压缩感知的视频模型

王教余, 徐小红, 沈仁明, 廖重阳, 杨勋 0194

信息量加权的梯度显著度图像质量评价

徐少平, 杨荣昌, 刘小平 0201

优化加权TV的复合正则化压缩感知图像重建

费选, 韦志辉, 肖亮, 李星秀 0211

消除图像伪轮廓的各向异性自适应滤波

倪婧, 王朔中, 廖纯, 曾兴 0219

邻域最短距离法寻找最佳拼接缝

郑悦, 程红, 孙文邦 0227

图像分析和识别

曲率尺度空间与链码方向统计的角点检测

曾接贤, 李炜烨 0234

基于方向特征的手掌静脉识别

周宇佳, 刘娅琴, 杨丰, 黄靖 0243

复杂环境下高效物体跟踪级联分类器

江伟坚, 郭躬德 0253

图像理解和计算机视觉

均值规范化对比度的局部特征描述符

颜雪军, 赵春霞, 袁夏, 徐丹, 刘凡 0266

计算机图形学

三角域上Said-Ball基的推广渐近迭代逼近

张莉, 李园园, 杨燕, 檀结庆 0275

目标特征指导的多分辨率体绘制算法

郭思奇, 鲁才, 聂小燕 0283

地理信息技术

高精度曲面建模优化方案

赵明伟, 岳天祥, 赵娜 0290

医学图像处理

应用于人体关节缺损修复的建模与可视化

邢慧君, 杨健, 李勤 0297

小邻域统计信息核磁共振医学图像分割模型

张建伟, 方林, 陈允杰, 詹天明 0305

遥感图像处理

结合暗通道原理和双边滤波的遥感图像增强

周雨薇, 陈强, 孙权森, 胡宝鹏 0313

改进NSCT和IHS变换相结合的遥感影像融合

刘慧, 周可法, 王金林, 王珊珊 0322

分段2维主成分分析的超光谱图像波段选择

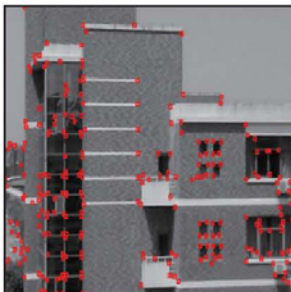
张婧, 孙俊喜, 阮光诗, 刘红喜 0328

CONTENTS

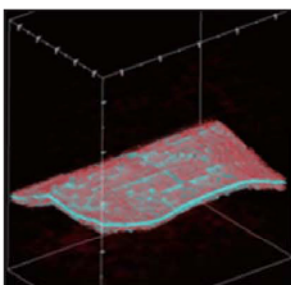
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Finding an optimal seam-line through the shortest distance in the neighborhood(P227)



Corner detection based on curvature scale space and chain code direction statistics(P234)



Target feature based multi-resolution volume rendering(P283)

Forum: Forefront of Computer Vision

Cognitive reasoning method for behavior understanding

Tao Linmi, Yang Zhuoning, Wang Guojian 0167

Deep learning and its new progress in object and behavior recognition

Zheng Yin, Chen Quanqi, Zhang Yujin 0175

Image Processing and Coding

Correlation noise modeling based on improved Fuzzy C-Means clustering in distributed video coding

Yang Chunling, Wu Juan 0185

Compressed sensing video model based on a first-order autoregressive moving average model

Wang Jiaoyu, Xu Xiaohong, Shen Renming, Liao Chongyang, Yang Xun 0194

Information content weighted gradient saliency structural similarity index for image quality assessment

Xu Shaoping, Yang Rongchang, Liu Xiaoping 0201

Compound regularized compressed sensing image reconstruction based on optimal reweighted TV

Fei Xuan, Wei Zhihui, Xiao Liang, Li Xingxiu 0211

False contour suppression with anisotropic adaptive filtering

Ni Jing, Wang Shuozhong, Liao Chun, Zeng Xing 0219

Finding an optimal seam-line through the shortest distance in the neighborhood

Zheng Yue, Cheng Hong, Sun Wenbang 0227

Image Analysis and Recognition

Corner detection based on curvature scale space and chain code direction statistics

Zeng Jiexian, Li Weiye 0234

Palm-vein recognition based on oriented features

Zhou Yujia, Liu Yaqin, Yang Feng, Huang Jing 0243

Efficient cascade classifier for object tracking in complex conditions

Jiang Weijian, Guo Gongde 0253

Image Understanding and Computer Vision

Local feature descriptor based on mean normalized contrast

Yan Xuejun, Zhao Chunxia, Yuan Xia, Xu Dan, Liu Fan 0266

Computer Graphics

Generalized progressive iterative approximation for Said-Ball based on triangular domains

Zhang Li, Li Yuanyuan, Yang Yan, Tan Jieqing 0275

Target feature based multi-resolution volume rendering

Guo Siqi, Lu Cai, Nie Xiaoyan 0283

Geoinformatics

HASM optimization based on the improved difference scheme

Zhao Mingwei, Yue Tianxiang, Zhao Na 0290

Medical Image Processing

Method of modeling and visualization for repairing of osteoarticular defect

Xing Huijun, Yang Jian, Li Qin 0297

Magnetic resonance medical images segmentation based on a local statistical information model

Zhang Jianwei, Fang Lin, Chen Yunjie, Zhan Tianming 0305

Remote Sensing Image Processing

Remote sensing image enhancement based on dark channel prior and bilateral filtering

Zhou Yuwei, Chen Qiang, Sun Quansen, Hu Baopeng 0313

Remote sensing image fusion based on an improved NSCT and IHS transformation

Liu Hui, Zhou Kefa, Wang Jinlin, Wang Shanshan 0322

Segmented 2DPCA algorithm for band selection of hyperspectral image

Zhang Jing, Sun Junxi, Ruan Guangshi, Liu Hongxi 0328

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)02-0234-09

论文引用格式: 曾接贤, 李炜烨. 曲率尺度空间与链码方向统计的角点检测[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(2): 234-242. [DOI: 10.11834/jig.20140209]

曲率尺度空间与链码方向统计的角点检测

曾接贤, 李炜烨

南昌航空大学软件学院, 南昌 330063

摘要: 传统的曲率尺度空间角点检测中, 选择的尺度不同会造成角点的漏检测及误检测问题。针对这两个问题, 提出一种曲率尺度空间与链码方向统计的角点检测方法。**方法** 提出的角点检测方法是基于曲率尺度空间为基础, 先在较低的曲率尺度空间上选择候选角点集, 再通过自适应阈值及链码方向统计的方法在角点集中剔除错误角点。**结果** 针对不同类型的图像进行了实验, 结果表明, 该方法比现有角点检测方法检测准确度高 5%~10%, 且漏检测角点少, 角点检测错误率低。实验将该方法与 CSS 算法进行计算时间对比, 分别采用 256×256 简单场景图与 935×715 复杂场景图, 该方法计算时间只比 CSS 角点检测方法多 0.1 s 与 0.9 s, 相对 CSS 算法计算时间未有显著增加。**结论** 该方法采用较低的曲率尺度可检测出更多的角点, 降低了角点漏检测率; 通过计算椭圆角点自适应阈值剔除椭圆角点, 并采用 Freeman 链码方向统计方法剔除伪角点, 提高了角点检测精度。实验结果表明, 本文提出的角点检测方法比其他角点检测算法具有高效性和准确性。

关键词: 角点检测; 曲率尺度空间; Freeman 链码; 方向统计直方图

Corner detection based on curvature scale space and chain code direction statistics

Zeng Jiexian, Li Weiye

School of Software, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

Abstract: Corners are an important feature of objects in images and they are widely used. In the field of computer vision. There are many applications that rely on the successful detection of corners, such as image matching, panoramic stitching, 3D modelling, object recognition, and motion tracking. The multi-scale algorithm based on curvature scale space is generally regarded as an effective method for finding corners in images. It can detect both fine and coarse features. However, different options of the selected scale will result in the leakage detection of the corner or even the wrong corner. Therefore, we describe a new corner detection method based on the curvature scale space and the direction of Freeman code statistics. **Method** This corner detection method is based on the improved curvature scale space corner detection algorithm proposed by He et al. First, it uses the Canny edge detector to get the binary edge map, and computes the curvature at a relatively low scale for each edge. It can pick the candidate corners set in this relatively low scale. In this way, it picks enough corners, unfortunately also containing wrong corners, such as round corners and false corners which are caused by the sharp variation edges. Then, in order to remove those wrong corners, we propose an adaptive threshold and statistical direction of chain code method. We compute a threshold adaptively according to the mean curvature within a specific region. Round corners are removed by comparing the curvature of the corner candidates with the adaptive threshold.

收稿日期: 2013-05-09; 修回日期: 2013-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(61165011, 61263046); 江西省科技支撑计划项目(20112BBG70092); 航天科技创新基金项目(CASC201102); 江西省教育厅科研项目(GJJ12427)

第一作者简介: 曾接贤(1958—), 男, 教授, 1997年于西北工业大学获工学硕士学位, 主要研究方向为图像处理和计算机视觉。

E-mail: zengjx58@163.com

We also eliminate the false corners by evaluating the difference of each candidate corner, the difference evaluating by using the Freeman code direction statistics. **Result** In the conventional corner detection based on curvature scale space, different options of the selected scale will result in the leakage detection of the corner or even the wrong corner. For example using the high scale easily leads to real corners missing, using the low scale will detect more wrong corners. In order to find more real corners, this method uses the low scale to detect corners and proposes a novel method to remove those wrong corners. The evaluation of this algorithm is taken from several aspects, such as the accuracy of detection, the wrong detection, miss detection and the computing time. The experimental results show that this proposed corner detection method overcomes others methods weakness such as accuracy, false corners and so on. Compared with other algorithms, the new method has high accuracy, low error rate and there is not a significant increase in computing time. **Conclusion** We propose a novel method for detecting corners. This method adopts the low curvature scale and has the capacity of detecting more corners and accordingly reducing corner leakage detection rate; by calculating elliptical corner adaptive threshold, it can delete elliptical corner; by using the Freeman code direction statistics, it can also eliminate the false corner; thus undoubtedly improving the accuracy of corner detection. The experiments have fully proved that the corner detection algorithm we proposed in this paper has high efficiency and accuracy compared with other methods.

Key words: corner detection; curvature scale space; freeman code; direction of statistical histogram

0 引言

角点作为描述图像中目标物体的一个重要特征,在图像匹配、全景拼接、目标检测与识别、运动跟踪等领域都有很好的应用。角点检测方法可以分为两类:第一类是利用图像灰度信息变化的角点检测方法;第二类是基于边缘提取的角点检测方法。基于图像灰度信息变化的角点检测方法,主要是通过计算像素点的灰度梯度来检测角点,这类方法主要有 Harris 算法和 SUSAN 算法。Harris 和 Stephens^[1]于 1988 年提出了 Harris 算法,该算法先定义每个像素点的相关矩阵,再通过矩阵计算角点的响应函数值,最后对比函数值大小得到图像中的角点。这种方法对于图像的旋转和光照变换具有很好的效果,通常被用于特征匹配^[2]和图像检索^[3]方面。但传统的 Harris 方法不具有多尺度特征,且对图像中的量化噪声比较敏感,针对以上问题, Wang 等人^[4]提出基于尺度不变空间的 Harris 角点检测方法,首先通过高斯卷积构建尺度空间,然后在每个尺度空间上利用 Harris 角点检测器检测角点,最后将在每个尺度空间检测到的角点与其他尺度空间检测到的角点进行对比,保留相同区域内的角点,提高了角点检测精度。Smith 和 Brady^[5]提出利用核值相似区的 Susan 角点检测算法,该算法利用其圆形模板邻域的像元灰度与其圆心的相似性计算得到角点响应函数值,若某点的响应函数值大于预先设定的阈值并且为局部极大值时,那么该点就被当做角点。Susan

算法中阈值大小的选取关系到检测角点的精度,传统的 Susan 算法不能够自适应的调整阈值,需要人工实验设置。对此, Yang 等人^[6]提出了一种基于迭代运算的自适应阈值选择方法,并提出一种将离散环形掩膜添加到 Susan 圆形掩膜上用以解决 Susan 算法对复杂形状检测角点精度不足的问题。目前,基于边缘提取的角点检测方法,主要是由 Mokhtarian 和 Suomela^[7]提出的曲率尺度空间角点检测算法(CSS),算法把角点定义为边缘轮廓上曲率极大值点。该方法对角点检测具有准确度高、计算量小等优点。但该算法也存在不足:1)算法使用较大的尺度会导致漏检角点;2)算法在计算过程中,使用全局阈值容易导致伪角点的出现。He 等人^[8-9]提出一种以 CSS 角点检测为基础,在较小尺度上检测出所有局部极值点的方法,并根据曲率的局部性质选取自适应阈值,先通过曲率局部最大值获得候选角点集,然后计算出候选角点形成的夹角,若角度较大,则把它当做是伪角点,并去除。该改进方法可以提高检测角点的精度,但在计算角度时计算量大,引入参数较多,且不能剔除由边缘检测形成的边缘突变造成的伪角点。

针对 CSS 角点检测会产生错误角点以及漏检测角点的问题,提出利用较低的曲率尺度空间建立待检测角点集,以解决漏检测角点的问题,再利用文献[8-9]的自适应阈值法及本文提出的 Freeman 链码方向统计法在待检测角点集中删除伪角点。实验结果表明,本文中提出的算法在角点检测的准确性和精确度方面都要优于其他的角点检测算法。

1 CSS 角点检测分析

参考文献[10],对曲率 K 定义为

$$K(\mu, \sigma) = \frac{X'(\mu, \sigma)Y''(\mu, \sigma) - X''(\mu, \sigma)Y'(\mu, \sigma)}{[X'(\mu, \sigma)^2 + Y'(\mu, \sigma)^2]^{1.5}} \quad (1)$$

式中, $X'(\mu, \sigma) = x(\mu) * g'(\mu, \sigma)$, $X''(\mu, \sigma) = x(\mu) * g''(\mu, \sigma)$, $Y'(\mu, \sigma) = y(\mu) * g'(\mu, \sigma)$, $Y''(\mu, \sigma) = y(\mu) * g''(\mu, \sigma)$, μ 为弧长参数, $g(\mu, \sigma)$ 定义为尺度 σ 的高斯函数, σ 为高斯函数的尺度, $g'(\mu, \sigma)$, $g''(\mu, \sigma)$ 为此高斯函数的一阶和二阶倒数。

当给出曲率 K 的定义后,利用曲率尺度空间在图像中检测角点的步骤为:

1) 用 Canny 提取原始图像的边缘,形成二值化的边缘图。

2) 在边缘图中提取边缘轮廓,当搜索到端点时,如果此端点的邻近区域内有另外的端点则填充两个端点间的空隙,一般邻域大小限制在 2 个像素范围;若此端点的邻近区域内有其他边缘线则标记为 T 型节点。

3) 对于每个轮廓,计算轮廓上每点在大尺度下的曲率。

4) 找出大于阈值 th 的局部最大曲率值点,并且此点的曲率值大于邻近局部最小曲率点的曲率值的两倍。此点即为角点, th 是一个预先设置的阈值。

5) 在较低的尺度下对已提取的角点进行定位。

6) 比较 T 型节点和已经提取的角点,如果两者邻近,则删除其中的一个点。

通过分析 CSS 角点检测的过程,发现存在以下 3 个问题:1) 对于噪声很大的图像, CSS 角点检测通常采用高斯滤波对图像进行去噪处理,但该方法很大程度上降低了角点检测的准确性和精确度;2) 算法利用大尺度来计算曲率值,虽然检测到的角点大部分都为正确的角点,但也导致大量角点未被检测到;3) 选取阈值 th 是全局阈值,没有针对不同的区域选择不同的 th 值,所以在检测角点时会出现检测到伪角点和漏检测等情况。

针对问题 1), 孙波等人^[11]提出了利用双边滤波来改进的 CSS 角点检测算法,虽然可以很好地去噪,同时又保证角点检测的高精度,但此过程是在预

处理阶段进行的,时间复杂度比较高。针对问题 2) 3), He 等人^[8-9]对步骤 3) 4) 进行改进,即选择较小的尺度来计算曲率值,获得局部最大的曲率值的点集。由于选择的尺度较小,通过曲率计算得到的局部最大曲率值的点很多,这样点集中包含了伪角点和椭圆角点,再通过局部阈值的选择和角点间形成的角度约束删除伪角点和椭圆角点。这样虽然提高了检测角点的准确度,但角度约束剔除伪角点的方法步骤复杂,并且对由边缘检测过程中产生的突变伪角点剔除准确度不高,而且引入了较多的人工设置的阈值参数,加大了运算复杂度。本文是在 He 的基础上针对如何剔除伪角点进行的改进,提出了利用链码方向统计的方法删除伪角点。

2 角点检测改进算法

传统的 CSS 算法在检测过程中利用大尺度来检测角点,在检测的过程中会漏检真实角点以及产生椭圆角点和伪角点等。对于已有的改进算法虽然可以一定程度上解决这些问题,但还存在检测角点准确度不高,且计算复杂等问题。提出了一种曲率尺度空间与链码方向统计的角点检测改进算法,首先计算边缘点的曲率,选择局部最大值建立角点候选集;其次参考文献[9]改进的 CSS 方法,通过设置自适应的阈值参数,在候选角点集中删除椭圆角点;最后通过提出的 Freeman 链码方向统计的方法删除伪角点,从而提高角点检测的准确率。

2.1 角点候选集的建立

为了角点检测的完整性及正确性,将尺度 σ 取 3 的条件下检测曲率局部最大值的点作为待检测角点候选集,此候选角点集中包含正确的角点和伪角点。建立角点集的具体方法如下所述。

将第 k 条轮廓表示为

$$A^k = \{P_1^k, P_2^k, P_3^k, \dots, P_n^k\} \quad (2)$$

式中, $P_i^k = (x_i^k, y_i^k)$ 为轮廓上的点。 n 为第 k 条轮廓上像素点的个数, x_i^k, y_i^k 表示在轮廓 k 上第 i 个点的坐标。计算曲率时,先用尺度为 σ 的高斯函数对轮廓线进行平滑,实验中 σ 取 3,再计算曲率

$$K_i^k = \frac{\Delta x_i^k \Delta^2 y_i^k - \Delta^2 x_i^k \Delta y_i^k}{[(\Delta x_i^k)^2 + (\Delta y_i^k)^2]^{1.5}}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

$$\text{式中, } \Delta x_i^k = \frac{x_{i+1}^k - x_{i-1}^k}{2}, \Delta y_i^k = \frac{y_{i+1}^k - y_{i-1}^k}{2},$$

$$\Delta^2 x_i^k = \frac{\Delta x_{i+1}^k - \Delta x_{i-1}^k}{2}, \Delta^2 y_i^k = \frac{\Delta y_{i+1}^k - \Delta y_{i-1}^k}{2}.$$

计算曲率后,选取曲率的局部最大值的点作为待检测的角点候选集,记为 **ZM**。

2.2 删除椭圆角点

椭圆角点即为光滑椭圆边缘线上的点,在实际图像中此类点不能被当做角点,但在计算边缘点曲率时此点的曲率具有局部最大值特征,若选择的曲率阈值小,则往往将这些点检测为角点,若取阈值过大则会丢失正确角点,这样就需要找到一种方法删除这种椭圆角点。如图1所示,He^[9]通过分析椭圆角点和一般角点的曲率特性,得出椭圆角点的曲率值与其邻近区域内的曲率值差距较小,而一般角点的曲率值与其邻近区域内的曲率值差距较大。因此参考文献[9],通过计算一定区域内的曲率平均值作为阈值,将椭圆角点与一般角点区分开。

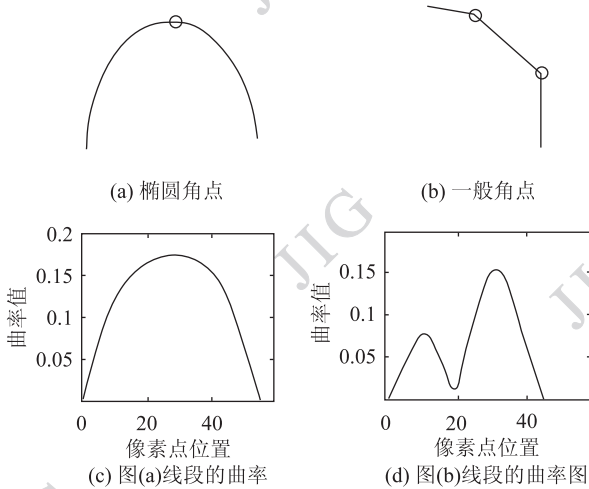


图1 椭圆角点与一般角点的曲率图

Fig. 1 The curvature of round corner and general corner

通过设计一个基于不同区域特征的自适应阈值 t 来删除椭圆角点。对自适应阈值 t 定义为^[9]

$$t = G \times \frac{\sum_{i=0}^{L_{\text{sum}}} |K(i)|}{L_{\text{sum}}} \quad (4)$$

式中, G 为椭圆的控制参数。 L_{sum} 为区域 L 中像素的个数,式中 L 为计算阈值 t 的一定区域。 $i \in [0, L_{\text{sum}}]$, $K(i)$ 表示第 i 个点的曲率值。图2所示表示一段线段的曲率值的变化曲线图,定义 L

为相邻的两个曲率局部最小点间的区域,即两虚线间区域。

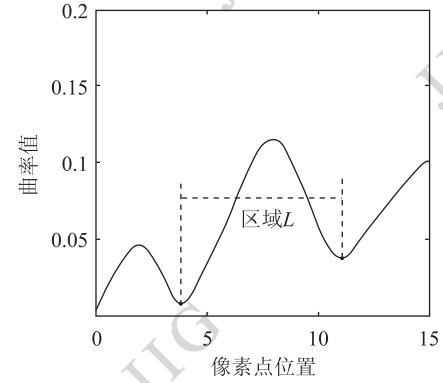


图2 曲率值图

Fig. 2 Curvature figure

椭圆控制参数 G 的大小,可以通过分析椭圆的特性来估计其值。设一个椭圆曲线方向为 $f(x) = [a^2 - (ax/b)^2]^{1/2}$, $a > b > 0$; $x \in (-b, b)$, 则椭圆曲线上一点的曲率为

$$K(x) = \left| \frac{f'(x)}{[1 + f'(x)^2]^{3/2}} \right| = \frac{ab^4}{[(ax)^2 - (bx)^2 + b^4]^{3/2}} \quad (5)$$

由此可得 $K_{\text{max}} = K(0) = a/b^2$, $K_{\text{min}} = K(b) = b/a^2$ 。

使用积分的方式可求得曲线上所有的曲率之和,即

$$\int K(x) dx = \int \frac{ab^4}{[(ax)^2 - (bx)^2 + b^4]^{3/2}} dx = \frac{ax}{[(a^2 - b^2)x^2 + b^4]^{1/2}} \quad (6)$$

曲线上曲率的平均值为

$$\bar{K} = \frac{\int_{-b}^b k(x) dx}{2b} = [1 - (-1)]/2b = 1/b = K_{\text{max}} \times b/a \quad (7)$$

那么阈值 $t = \bar{K} \times G = G \times K_{\text{max}} \times b/a$, 则有

$$K_{\text{max}} \begin{cases} > t & a/b > G \\ \leq t & a/b \leq G \end{cases}, \text{即对一椭圆来说,如果其长短轴}$$

之比小于 G , 则此椭圆线上的点被视为椭圆角点。例如若仅想删除长短轴相等的椭圆角点(即圆形曲线上的点)可将 G 设置为1;若想剔除待检测集中长轴是短轴两倍的椭圆上的点即可将 G 设置为2;通过这个方法可以估计出控制参数 G 的值,从而在角点集中剔除椭圆角点。实验中取 $G = 1.5$ 进行剔除

待检测集中的椭圆角点。

检测角点集中每个点的曲率,若某点的曲率小于阈值 t ,则该点被认为是椭圆角点,从角点集 ZM 中删除该点。

2.3 Freeman 链码方向统计删除伪角点

伪角点定义为将非角点检测为角点的点。伪角点主要由边缘检测过程中检测错误的点和边缘细化时造成的突变点组成。如图 3(a) 所示,为一个建筑物部分顶部边界放大图,图 3(b) 为采用尺度 $\sigma = 3.3$ 的 CSS 角点检测方法提取的角点,由于边缘检测不准确,形成了如图 3(b) 中标记为圆形所示的伪角点,其中标记正方形的为正确角点。

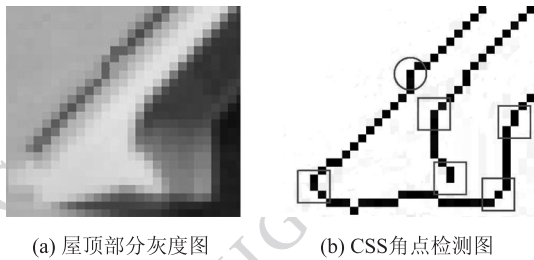


图 3 伪角点图
Fig. 3 Wrong corner

对于上述的伪角点,提出一种统计 Freeman 链码方向的方法进行删除。

二值化后的边缘线段可以用 8 方向的 Freeman 链码表示^[12-14],即每一段边缘线段都可以由指向 8 个方向中的一个方向组成的链来表示。根据此表示方法,提出一种统计 Freeman 链码的方法,即用直方图统计曲线上的链码方向,作为此条线段的一个特征。对于含有角点的边缘线段,如图 4 所示,在角点左右线段的一定距离内统计其左边和右边点的链码方向,获得的直方图具有很大的差异。对于不含有角点的边缘线段,如图 5 所示,统计 Freeman 特征得到所有像素点的 Freeman 链码方向集中在一个或者两个方向上。通过这一原理来统计曲率尺度空间算法提取的角点左右线段的链码方向统计直方图,并定义一个差异度计算函数,通过计算它们的差异度,来判断其是否为真正角点,从而提高检测角点的正确率。

如图 4(a) 所示, P_1 为曲线上的一个待判别的角点,统计其左右距离为 l 个像素的链码方向直方图,如图 4(b)(c) 所示,计算其差异度函数 F 。差异度函数 F 定义为

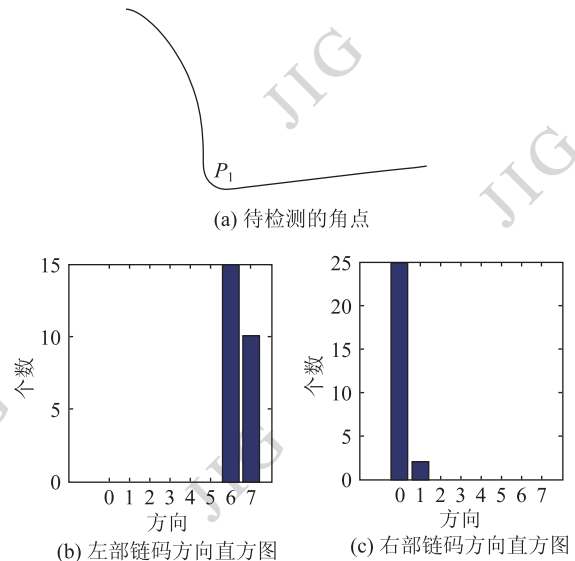


图 4 角点的链码方向统计
Fig. 4 Chain code direction statistics of corner

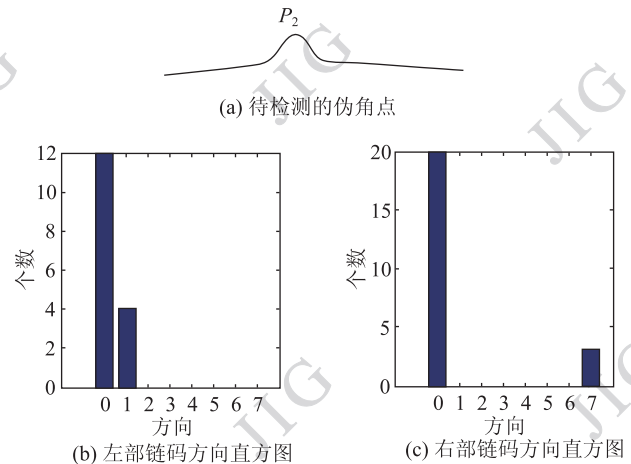


图 5 伪角点的链码方向统计
Fig. 5 Chain code direction statistics of wrong corner

$$F = \left| \frac{S_{1\max}(m)}{\sum_{j=0}^7 S_1(j)} - \frac{S_2(m)}{\sum_{j=0}^7 S_2(j)} \right| + \left| \frac{S_{1\sec}(p)}{\sum_{j=0}^7 S_1(j)} - \frac{S_2(p)}{\sum_{j=0}^7 S_2(j)} \right| + \left| \frac{S_{2\max}(n)}{\sum_{j=0}^7 S_2(j)} - \frac{S_1(n)}{\sum_{j=0}^7 S_1(j)} \right| + \left| \frac{S_{2\sec}(q)}{\sum_{j=0}^7 S_2(j)} - \frac{S_1(q)}{\sum_{j=0}^7 S_1(j)} \right| \quad (8)$$

式中, $S_1(j)$ 、 $S_2(j)$ 表示链码方向为 j 方向像素的个数, $j \in \{0, 1, \dots, 7\}$ 。 $S_{1\max}(m)$ 、 $S_{2\max}(n)$ 分别表示左右统计直方图中对应的最大值即峰值, m 、 n 为峰值对应的方向。同理 $S_{1\sec}(p)$ 、 $S_{2\sec}(q)$ 定义为第二大方向的值, p 、 q 为其对应的方向。根据式(9)条件判断是否是角点, 即

$$\begin{cases} \text{此点为角点} & F > T \\ \text{此点为伪角点} & F < T \end{cases} \quad (9)$$

式中, T 为判断函数 F 差异度大小的阈值。阈值 T 的定义为

$$T = \frac{\frac{S_{1\max}(m)}{\sum_{j=0}^7 S_1(j)} + \frac{S_{1\max}(n)}{\sum_{j=0}^7 S_1(j)}}{2} \quad (10)$$

在式(8)中只利用了最大和第二大的方向个数, 因为在一段线段中, 这两个方向决定了其大致的方向, 计算这两个方向就可以反映整个线段的 Freeman 链码方向特征。

图4(a)曲线上的点 P_1 , 经计算其差异函数 $F = 1.631$, 阈值 $T = 0.628$, 因此 P_1 点为角点。

对于伪角点的情况, 如图5(a)所示, P_2 为待判别的角点, 图5(b)(c)为 P_2 点左右区域内的链码方向统计直方图。计算得 $F = 0.620$, $T = 0.820$, 因此判定 P_2 为伪角点。

在统计过程中需要规定统计链码方向点的区域, 规定统计区间 $L_{\text{左}}$ 和 $L_{\text{右}}$, $L_{\text{左}}$ 为此角点向左搜索得到的第一个角点到此角点的区域, 同理 $L_{\text{右}}$ 为此角点向右搜索得到的第一个角点到此角点间的区域, 如图6(a)所示。a 点为伪角点, b, c 为一般角

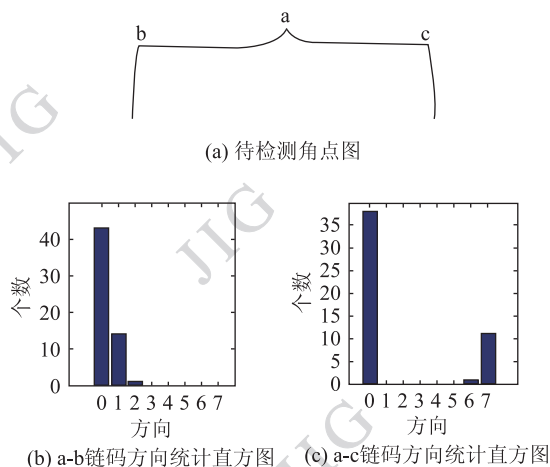


图6 伪角点及其左右链方向统计直方图

Fig. 6 Wrong corner and histogram of chain code direction statistics

点。则图6中的 $L_{\text{左}}$ 区域为 a—b, $L_{\text{右}}$ 区域为 a—c。

图6(a)曲线上的点 a, 通过式(8)(10)分别计算两个直方图差异函数 F 以及阈值 T 的值, 得 $F = 0.608$, $T = 0.732$, $F < T$, 即 a 角点为伪角点。

2.4 角点检测改进算法步骤

在 CSS 算法基础上提出的改进算法, 首先通过 CSS 算法计算曲率, 选取待检测的角点集, 再通过椭圆角点特性估算阈值删除椭圆角点, 最后统计角点周围区域内的 Freeman 链码方向, 得到边缘方向统计直方图, 通过式(8)计算差异度 F , 式(10)计算阈值 T , 利用式(9)删除伪角点, 提高角点检测精度。

算法具体的步骤如下:

- 1) 利用 canny 检测原始图像, 得到二值化的边缘。
- 2) 采用 CSS 方法检测轮廓, 即 CSS 角点检测步骤 2), 得到轮廓点集 M 。
- 3) 采用式(1)在较低尺度上计算每条轮廓上的每个点的曲率, 将局部最大曲率的点加入到待检测的角点候选集 ZM 中。
- 4) 通过式(7)计算待检测角点一定区域内的自适应阈值 t 。使用阈值 t 从角点候选集 ZM 中删除椭圆角点。
- 5) 通过链码方向统计的方法, 采用式(8)计算直方图差异函数的值, 采用式(10)计算阈值, 采用式(9)判断是否为伪角点, 若为伪角点, 则从角点候选集 ZM 中删除该点。
- 6) 将轮廓点的终点及 T 型节点标记为角点, 如果此点的邻近区域含有角点则不标记此点。实验中邻近区域定义为以此点为中心, 长宽都为 3 个像素的正方形区域。

3 实验及结果分析

为了验证本文算法, 分别对简单的实验图和复杂的实验图进行角点检测实验, 并与 CSS 算法、文献[9]、文献[4]和文献[6]算法进行了对比。本文算法实验参数 σ 取 3, G 取 1.5。CSS 方法 σ 取 4.5。文献[9]实验参数 σ 取 3, 约束角度取 160° 。实验环境为 2.59 GHz 的 CPU, 1.99 GB 的 RAM, 实验工具 MATLAB R2009a。

3.1 角点提取效果对比分析

实验1 采用一幅简单的二值化飞机图像(角点个数为 36 个)和积木图(角点为 60 个)进行角点

检测实验,图像大小均为 256×256 。图 7、图 8 所示是不同算法提取角点的结果,表 1、表 2 所示是不同算法角点检测结果对比数据。本文采用检测正确率和错误率来对比不同算法检测角点的效果,表中检测错误率 = 检测错误角点/检测到总角点数,正确率 = 检测到的正确角点/标准角点个数;从实验结果可以看出,本文算法优于其他的算法。

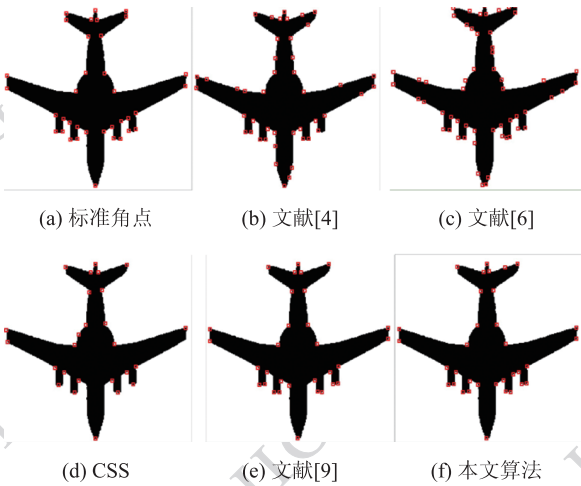


图 7 二值化的飞机图及角点提取结果
Fig. 7 Detection results on the “Plane” image

表 1 二值化飞机图的角点检测结果对比(标准角点 36 个)

Table 1 Evaluation results for the plane image						
算法	检测 正确 角点	检测 错误 角点	漏检 角点	检测到 总角点	错误 率/%	正确 率/%
文献[4]	31	14	5	45	31.1	86.1
文献[6]	36	21	0	57	36.8	100
CSS	24	1	12	25	4	66.7
文献[9]	31	0	5	31	0	86.1
本文	33	0	3	33	0	91.6

表 2 积木图的角点检测结果对比(标准角点 60 个)

Table 2 Evaluation results for the “Blocks” image						
算法	检测 正确 角点	检测 错误 角点	漏检 角点	检测到 总角点	错误 率/%	正确 率/%
文献[4]	58	9	2	67	13.4	96.7
文献[6]	55	13	5	68	19.1	91.7
CSS	45	6	15	60	10	75
文献[9]	51	4	9	56	7.1	85
本文	56	4	4	60	6.7	93.3

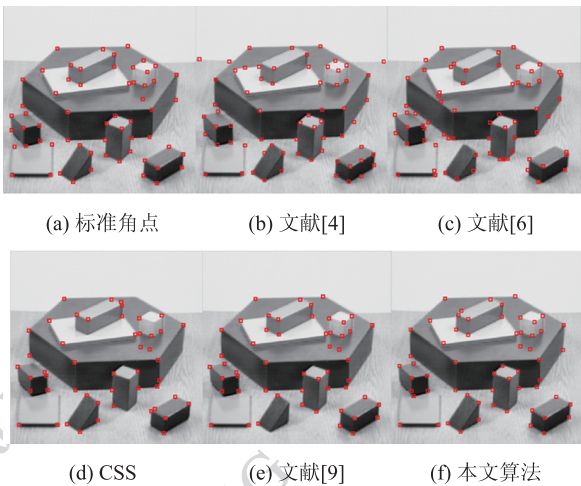


图 8 积木的灰度图及角点提取结果
Fig. 8 Detection results on the “Blocks” image

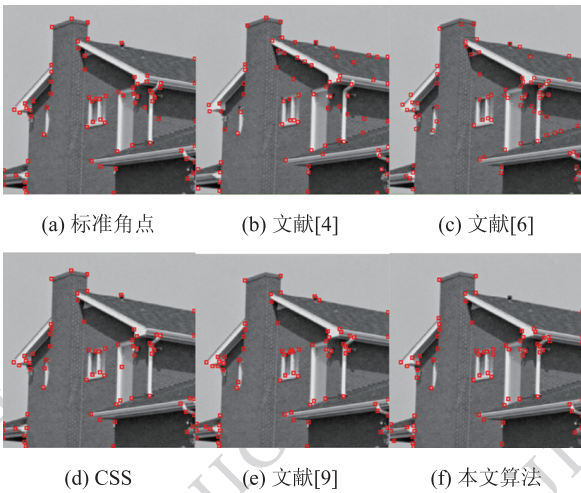


图 9 房屋的灰度图及角点检测结果
Fig. 9 Detection results on the “House” image

实验 2 采用 1 幅复杂的灰度房屋图像,图像大小为 256×256 (角点个数为 74 个)进行角点检测实验。图 9 所示是不同算法提取角点的结果,表 3 所示是不同算法角点检测结果对比数据。从图 9 和表 3 可以看出本文算法优于其他的算法,即本文算法检测正确率高,漏检角点少,检测错误率相对较低。

实验 3 采用 1 幅数码相机拍摄的真实的建筑物顶部图像,大小为 935×715 (角点个数为 229 个)进行角点检测实验。图 10 所示是不同算法提取角点的结果,表 4 所示是不同算法角点检测结果对比数据。从图 10 和表 4 可以看出在真实场景中环境复杂,纹理和光照对基于图像灰度信息变化角点检

测方法影响大,角点检测准确度不高,检测到错误角点较多,而基于轮廓的角点检测方法检测精度相对较高,通过对比发现本文算法不仅检测准确度高,且检测错误率较低。

表 3 房屋图的角点检测对比 (标准角点 74 个)
Table 3 Evaluation results for the "House" image

算法	检测 正确 角点	检测 错误 角点	漏检 角点	检测 到总 角点	错误 率/%	正确 率/%
文献[4]	63	16	24	76	21.1	85.1
文献[6]	60	21	14	81	26	81.1
CSS	64	6	10	70	8.6	86.5
文献[9]	67	9	7	76	11.8	90.5
本文	69	4	5	73	5.5	93.2

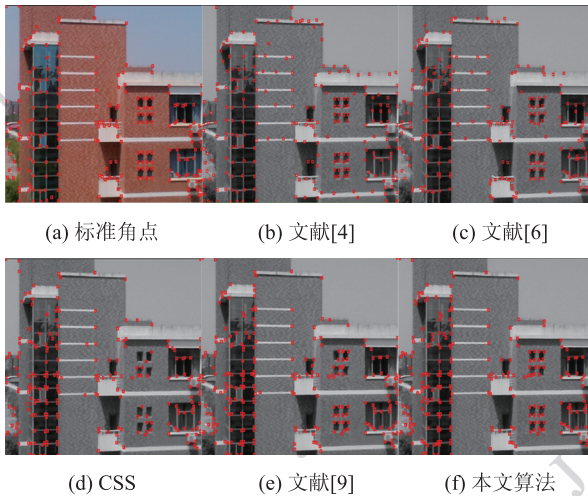


图 10 真实场景图及其角点检测结果

Fig. 10 Detection results on the real scene image

表 4 真实场景的角点检测对比 (标准角点 299 个)
Table 4 Evaluation results for the real scene image

算法	检测 正确 角点	检测 错误 角点	漏检 角点	检测 到总 角点	错误 率/%	正确 率/%
文献[4]	179	66	50	245	26.9	78.1
文献[6]	169	73	58	242	30.2	73.8
CSS	157	66	72	223	30.0	67.0
文献[9]	180	62	49	242	25.6	78.6
本文	190	61	39	251	24.3	83.0

通过上面的 3 个实验,可以得出文献[4]和文献[6]的角点检测错误率较高,而文献[9]以及本文

算法错误率比较低。从检测的正确率来说本文算法不管在简单的图像上还是在复杂的图像上都能有很好的效果。

3.2 实验参数对算法性能的影响

本文算法有两个控制参数,即高斯尺度 σ 和椭圆控制参数 G 。表 5 为在不同的 σ 和 G 的取值下本文算法对以上 4 幅图的角点检测效果数据对比。定义正确率均值 AR_{avg} 和错误率均值 ER_{avg} 两个评价度量为

$$AR_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^4 AR_i}{4} \quad (11)$$

$$ER_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^4 ER_i}{4} \quad (12)$$

式中, AR_i 和 ER_i 表示上述 4 个实验中第 i 幅图本文算法的正确率与错误率。

如表 5 所示,尺度的选择对角点的提取有很大的影响,尺度的大小反映对边缘线平滑的程度,尺度选择过大则在平滑后边缘线上提取角点个数较少,平均正确率 AR_{avg} 较小;而尺度选择过小则提取角点数多但同时又含有较多的错误角点,平均错误 ER_{avg} 率较大。椭圆控制参数 G 的取值反映了需要删除的椭圆角点的类型,从表 5 可以看出,在 σ 相同的情况下, G 取值越大删除的椭圆角点越多,错误率越低,但同时会错误的删除一些正确的角点。

表 5 参数 σ 和 G 对实验结果的影响

Table 5 Effects of parameters σ and G on the experiment

参数	$AR_{avg}/\%$	$ER_{avg}/\%$
($\sigma=5, G=1$)	70.5	6.5
($\sigma=4, G=1$)	76.5	12.1
($\sigma=3, G=1.5$)	90.2	9.4
($\sigma=3, G=2$)	88.3	8.4
($\sigma=1.5, G=2$)	94.3	20.2
($\sigma=1.5, G=3$)	93.8	19.7

3.3 算法执行时间对比

本文算法为了克服文献[9]算法在提取角点时存在不足之处,只是将其使用角度约束删除伪角点方法进行修改,采用 Freeman 链码方向差异的方法删除伪角点。使用角度约束删除伪角点方法不仅需要对边缘进行计算,定义形成角度的边及角度大小

的计算,还需要人工设置阈值等,而且对突变伪角点剔除准确度不高。用 Freeman 链码方向差异的方法只需要统计边缘线上点的方向,计算简单,特别对于突变角点删除有较好的效果。

为了比较本文算法与 CSS 和文献[9]算法的计算时间,实验采用图 9(a)所示大小 256×256 的“House”图及图 10(a)所示大小为 935×715 的相机拍摄的真实场景图进行算法执行时间的统计,3 种算法的计算机时间对比如表 6 所示。

表 6 算法时间对比
Table 6 Comparison of computing time

图像	CSS 算法	文献[9]算法	本文算法
“House”图	0.150 7	0.273 5	0.242 5
真实场景图	1.169 7	2.168 5	2.032 5

从表 6 可以看出,CSS 算法计算时间最短,本文算法和文献[9]算法的计算时间略长于 CSS 算法,但是没有显著增加,本文算法比文献[9]算法执行时间略短,但差距不大。

4 结 论

针对 CSS 角点检测算法的不足,在基于曲率尺度空间的角点检测的基础上,采用较低的尺度因子,建立角点检测候选集,通过估算椭圆角点控制阈值删除椭圆角点,并结合了 Freeman 链码方向统计来判别伪角点,进而提高检测角点的准确率。通过实验验证了本文算法的有效性,并且角点检测效果优于 CSS 算法、文献[9]、文献[4]和文献[6]算法。

参考文献 (References)

- [1] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector [C]//Proceedings of Fourth Alvey Vision Conf. Manchester, U. K.; [s. n.], 1988; 147-151.
- [2] Han H Y, Han X, Yang F B. A new stereo matching method based on edges and corners[J]. Journal of Computational Information Systems, 2012, 8(14): 6041-6048.
- [3] Velmurugan K, Baboo S S. Image retrieval using harris corners

- and histogram of oriented gradients[J]. International Journal of Computer Applications, 2011, 24(7): 6-10.
- [4] Wang Y T, Chen Y Q, Li J, et al. The harris corner detection method based on three scale invariance spaces[J]. International Journal of Computer Science Issues, 2012, 9(6): 18-22.
- [5] Smith S, Brady M. SUSAN-a new approach to low-level image processing[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1): 45-48.
- [6] Yang X F, Huang Y M, Li Y. An improved susan corner detection algorithm based on adaptive threshold [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Signal Processing Systems. Dalian: IEEE Press, 2010, 613-616. [DOI: 10.1109/ICSPS.2010.55557 30]
- [7] Mokhtatian F, Suomela R J. Robust image corner detection through curvature scale space[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(12): 1376-1378. [DOI:10.1109/34.735812]
- [8] He X C, Yung N H C. Curvature scale space corner detector with adaptive threshold and dynamic region of support [C]//Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Cambridge, U. K.: IEEE, 2004, 2: 791-794. [DOI: 10.1109/ICPR.2004.1334377]
- [9] He X C, Yung N H C. Corner detector based on global and local curvature properties[J]. Optical Engineering, 2008, 47(5): 1-12. [DOI:10.1117/1.2931681]
- [10] 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.
- [11] Sun B, Tan J Q. Improved curvature scale space corner detection [J/OL]. Computer Engineering and Application, 2013-01-29 [2013-08-30]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20130129.1539.006.html>. [孙波, 谭结庆. 改进的曲率尺度空间角点检测[J/OL]. 计算机工程与应用, 2013-01-29 [2013-08-30]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20130129.1539.006.html>]
- [12] Hermilo S C, Ernesto B, Ramon M R D. Efficiency of chain codes to represent binary objects [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(6): 1660-1674. [DOI:10.1016/j.patcog.2006.10.013]
- [13] Yu B, Guo L, Zhao T Y, et al. A curve matching algorithm based on freeman chain Code [C]// Intelligent Computing and Intelligent Systems. Xiamen: IEEE Press, 2010, 3: 669-672. [DOI: 10.1109/ICICISYS.2010.5658385]
- [14] Gmati C, Haboubi S, Alaqueeli A, et al. A study of handwritten characters by shape descriptors: doping using the freeman code [C]//Proceedings of 2012 International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition. Bari: IEEE Press, 2012: 285-290. [DOI:10.1109/ICFHR.2012.170]