

基于轮廓的旋转和尺度不变区域的检测*

林晓泽, 周絮语, 李相军

(重庆大学软件工程学院, 重庆 400030)

摘要: 为了获取鲁棒的特征区域, 提出了一种基于轮廓的旋转和尺度不变区域的检测算法。算法应用多尺度乘积 LoG (Laplacian of Gaussian) 提取轮廓上稳定的角点作为特征点。根据角平分线的旋转和尺度不变性提取特征方向, 利用特征方向求得特征半径。由角点、特征方向和特征半径构造不变区域。进行了特征匹配的实验, 图像集包含旋转、尺度、仿射、光照和压缩五种变换, 算法获得了很好的匹配结果。结果表明算法简单快速, 具有较强的鲁棒性和广泛的应用性。

关键词: 轮廓提取; 尺度不变; 旋转不变; 角点检测; 特征匹配

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)05-1951-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.05.093

Detection of rotation and scale invariant regions using contour

LIN Xiao-ze, ZHOU Xu-yu, LI Xiang-jun

(School of Software Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: In order to obtain robust feature regions, this paper presented a method using contour to detect image feature regions which were invariant to rotation and scale transformations. Firstly, it applied multi-scale production LoG to extract robust corners on the contour as feature points. Secondly, the method used angle bisector which was invariant to rotation and scale transformations to extract feature orientation and got feature radius by feature orientation. Finally, corners, feature orientation and feature radius were used to construct invariant regions. The test images used in image matching experiments include five kinds of transformation, such as rotation, scale, affine, brightness and compression. The excellent matching results illustrate that the proposed method has the properties such as easy realization, fast, better robustness and wide range of applications.

Key words: contour extraction; scale invariance; rotation invariance; corner detection; feature matching

图像不变区域的检测在图像处理中具有非常重要的意义, 它是模式识别和图像理解的基础。图像中显著的局部区域通常具有独特的结构, 如角点、边缘点等, 提取这些具有独特性的特征来表达图像内容是计算机视觉领域研究的热点。目前已广泛应用于图像匹配^[1,2]、目标识别^[3,4]、图像检索^[5]、三维重建^[6]和数字水印等领域。

1 相关研究

目前有很多局部不变特征区域的检测算法。早期 Harris 等人^[7]对 Moravec 算子改进后提出了 Harris 角点检测算法, 通过微分运算和自相关矩阵来检测角点。Lowe^[8]提出了 SIFT (scale invariant feature transform) 算法, 该算法通过寻找图像尺度空间极值点进行特征点的定位, 提取的特征点具有尺度和旋转不变性, 能够有效地对抗光照和噪声。现在针对仿射不变性又提出了许多算法, Lindeberg 等人^[9]提出了仿射不变的团块 (blob) 检测方法。Tuyltaars 和 Van Gool^[10,11]提出了 EBR 和 IBR 算法。Mikolajczyk 等人^[12]结合了多尺度和自适应仿射方法, 提出了尺度和仿射都不变的区域检测方法, 并对局部不变区域监测子和仿射不变区域检测作了综述^[13]。最近, Morel 等人^[14,15]提出的 ASIFT (affine-SIFT) 算法在 SIFT 的基础上增加

了相机变换矩阵的两个仿射变换参数, 能在更大的视角变换中提取特征。

以上不变区域的检测算法大致可以分为两类, 一类是基于灰度, 另一类是基于轮廓。基于灰度的算法利用尺度空间中灰度变化的特性提取不变区域, 典型的方法有 SIFT 及其各种改进算法。基于轮廓的算法的基本思想是, 轮廓是图像的概貌信息, 它在旋转、尺度和光照变化的情况下都能被稳定地检测出来。因此, 可以从轮廓的几何信息出发, 提取出与这些变化保持共变的量, 如旋转和尺度不变因子, 最终提取不变特征区域。这样, 问题域从图像转换到轮廓曲线上, 比基于灰度的算法处理的信息量小。

目前基于轮廓提取不变区域的算法还比较少。杨丹等人^[16]提出了一种基于轮廓 LoG 的不变区域检测算法, 算法将 LoG 应用于轮廓上提取角点作为特征点, 将角点在轮廓上的切线作为特征方向, 最后在轮廓上寻找特征点方向的切点, 将切点与角点的距离作为半径提取不变特征区域。但该方法存在如下问题: a) 角点切线作为特征方向不稳定, 轮廓是带有锯齿的不平滑曲线, 轮廓的微小变化会使切线方向发生很大变化, 该方向并不鲁棒; b) 半径通过角点切线求得, 由于角点切线方向不稳定, 因此半径的求取也受影响; c) 实验没有考虑仿射变

收稿日期: 2011-09-23; **修回日期:** 2011-10-30 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60975015); 重庆大学研究生科技创新基金资助项目(CDJXS10090003); 中央高校基本科研业务费科研专项资助项目(CDJXS11181162); 重庆大学研究生科技创新基金资助项目(CDJXS10090002)

作者简介: 林晓泽(1988-), 男, 福建泉州人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理(linxiaoze1988@sina.com); 周絮语(1988-), 女, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理; 李相军(1987-), 男, 重庆巫溪人, 硕士研究生, 主要研究方向为模式识别。

化的影响。

2 不变特征区域的检测

本文构造不变特征区域主要包括三个步骤:角点的检测、特征方向的计算和特征区域半径的提取。

2.1 角点的检测

本文选取角点作为特征点。角点在多种图像变换下都能被稳定地检测到,作为图像的一个重要局部特征,它集中了图像很多重要的形状信息。现有的角点检测算法有 CSS^[17,18]、DCSS、协方差矩阵^[19]、梯度相关矩阵、DoG 和小波等。杨丹等人^[16]提出在轮廓上应用单个尺度 LoG 作为角点的响应函数,LoG 算子应用二阶导数过零点来检测角点,但该方法容易受噪声点干扰。本文应用多尺度乘积 LoG (multi-scale product Laplacian of Gaussian, MPLoG) 的角点检测算法。多尺度乘积能够在增强角点响应的同时抑制噪声的影响,原始图像中角点和噪声点的 LoG 响应值都较高,不容易区分开,但随着尺度变大,噪声点响应值锐减,而角点响应值相对下降得较慢,对高低不同尺度下的响应值作乘积,达到排除噪声点的目的。MPLoG 的思想可由下面的公式表示:

设 C 为一条平面轮廓曲线

$$C(t) = (x(t), y(t)) \quad (1)$$

其中, t 为弧长参数, $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别表示曲线的坐标函数。LoG 算子如下:

$$\text{LoG}(t, \sigma) = (t^2 - \sigma^2) / \sqrt{2\pi\sigma^4} \exp(-t^2 / (2\sigma^2)) \quad (2)$$

其中, σ 表示尺度因子。对轮廓曲线运用 LoG 算子就得到单个尺度的 LoG 变换,如下:

$$CL(t, \sigma) = ((x(t) * \text{LoG}(t, \sigma), y(t) * \text{LoG}(t, \sigma))) \quad (3)$$

其中: $CL(t, \sigma)$ 表示对尺度为 σ 的轮廓曲线做 LoG 变换,分别在 x 和 y 坐标上进行; $*$ 是卷积算子。LoG 用热扩散方程表示为

$$\text{LoG}(t, \sigma) = X^2(t, \sigma) + Y^2(t, \sigma) \quad (4)$$

将不同尺度下的变换结果进行乘积,得到 MPLoG 算子为

$$\text{MPLoG} = \prod_{i=1}^k [X^2(t, \sigma_i) + Y^2(t, \sigma_i)] \quad (5)$$

其中: k 表示尺度个数, σ_i 是第 i 个尺度值, Π 表示乘积。

通常,选取大小两个尺度就可以达到很好的效果。通过实验,选取的两个尺度 σ_1 和 σ_2 分别为 3 和 6 时能达到较好的效果。

2.2 特征方向的计算

在几何图形中,不论如何旋转和缩放一个角,该角的角平分线总是将角分成对等的两半,显然可以得出角平分线具有旋转和尺度不变的性质。利用该性质,本文在以角点为中心的局部轮廓支撑域内构造出一个角,将该角的角平分线方向作为特征方向,该方向也具有同样的性质。本文以角点为顶点,分别拟合角点两边的部分轮廓点构成角的两边。下面用公式详述特征方向的计算过程。

如图 1, P 是一条平滑轮廓, p_i 是轮廓 P 上一角点,以 p_i 为中心建立直角坐标系 T 。假设 P 上有 n 个点,如下:

$$P = \{p_j = (x_j, y_j), j = 1, 2, \dots, n\} \quad (6)$$

式中, (x_j, y_j) 为坐标系 T 下的坐标值。取 p_i 两边轮廓上各 k 点拟合过角点 p_i 的两条直线,如果轮廓上不足 k 点,只取到轮廓端点。拟合直线用最小二乘法,如下:

$$lK_i = \sum_{j=1}^k \frac{(x_{i-j} - x_i)(y_{i-j} - y_i)}{(x_{i-j} - x_i)^2} \quad (7)$$

$$rK_i = \sum_{j=2}^k \frac{(x_{i+j} - x_i)(y_{i+j} - y_i)}{(x_{i+j} - x_i)^2} \quad (8)$$

式中, lK_i 和 rK_i 为两直线的斜率。

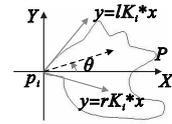


图1 角平分线的求取

由斜率的反正切容易计算出逆时针的角度 θ_l 和 θ_r (逆时针方向), $\theta_l, \theta_r \in [0, 2\pi)$ 。由此得出角平分线的角度为 $(\theta_l + \theta_r) / 2$ 。那么,特征方向为 $\tan((\theta_l + \theta_r) / 2)$ 。

2.3 特征区域半径的提取

特征区域的半径与图像的尺度保持共变。本文求取特征区域半径的基本思想是:a) 求取以角点为中心的两边轮廓上的两个不变点,这两个不变点在图像尺度变化过程中相对角点的位置和方向保持不变;b) 选取两个不变点中与角点的较大距离作为特征区域的半径。根据这个思想,求取半径的方法有多种。

本文提取斜率为特征方向的直线与轮廓的切点作为不变点。切点的左右两点在切线的同侧,非切点的左右两点在切线的异侧,这是本文求取切点的方法。图 2 描述了半径求取的过程。如图 2(a) 所示,直线 a 为角点处的角平分线,假设从轮廓右端开始搜索轮廓,搜索到点 p_{i+k} ($k > 0$),该点为角点 p_i 右边轮廓上第 k 个点,直线 b 过点 p_{i+k} 且平行于 a 。点 p_{i+k-1} 和 p_{i+k+1} 是 p_{i+k} 的左右两点。如果点 p_{i+k-1} 和 p_{i+k+1} 在直线 b 的同侧,点 p_{i+k-1} 和 p_{i+k+1} 坐标值代入直线 b 的方程将得到同符号的值;相反,如果两点不在直线同侧,代入方程将得到不同符号的值。直线 b 与轮廓的切点即符号相同时的点 p_{i+k} 。下面将用公式描述求解过程。

假设直线 a 的斜率为 K ,过点 p_{i+k} 的直线 b 的方程如下:

$$y - K(x - x_{i+k}) - y_{i+k} = 0 \quad (9)$$

将点 p_{i+k-1} 和 p_{i+k+1} 分别代入式(9),得到

$$\begin{cases} \gamma_1 = y_{i+k-1} - K(x_{i+k-1} - x_{i+k}) - y_{i+k} \\ \gamma_2 = y_{i+k+1} - K(x_{i+k+1} - x_{i+k}) - y_{i+k} \end{cases} \quad (10)$$

如果 $\gamma_1 * \gamma_2 > 0$,停止下一个点的计算, p_{i+k} 就是直线 b 与轮廓的切点也即不变点;否则,继续下一个点 p_{i+k+1} 的计算以确定不变点,直至轮廓端点,就将端点作为不变点。计算不变点和角点 p_i 的距离,用 rR 表示,如图 2(b) 所示。

同理,寻找角点 p_i 左边轮廓上的不变点,计算得到距离,用 lR 表示,记 R 为 lR 和 rR 的较大值。本文定义 R 为不变特征区域的半径。最后,由角点、特征方向和半径构造出不变区域,可以构造正方形或是圆形的不变区域,如图 2(c) 所示。

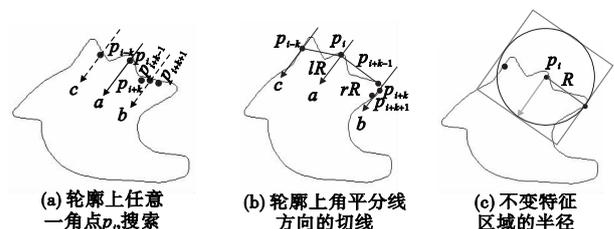


图2 求取不变区域半径的示意图

3 实验结果与分析

本文进行图像特征匹配的实验。实验构造正方形的不变区域,使用的参数在以上小节都已给出。在特征匹配前,要先对特征区域进行归一化,归一化为 18×18 的区域,并将特征方向归一化到 0° 角,然后使用 SIFT 描述子对特征区域进行描述。本文采用欧式距离作为两幅图像间的相似度量,对每个特征向量,每次搜索两个近似最近邻特征点,在这两个特征点中,如果最近距离除以次近距离的比值小于阈值 0.75,接受这一对匹配点,否则,认定不匹配。

本文图像集^[20]包含了五种不同变换,如图 3 所示,所有图像都是中等分辨率,近似为 800×640 像素。图 3(a) 图像视角变化为 20° ,由相机偏转获得;(b) 的尺度变化由镜头收缩获得;(c) 通过调整焦距获得;(d) 通过软件压缩获得;(e) 通过调整光圈获得。实验使用 Windows XP 系统,在 Intel® Pentium IV 3.00 GHz 处理器上应用软件 MATLAB 7.0.1 实现。

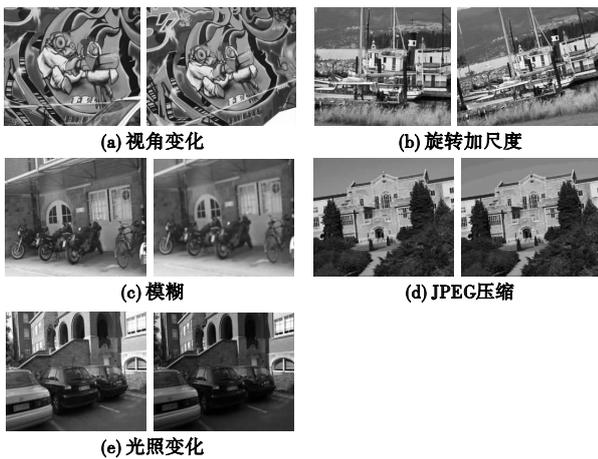


图3 实验图像集

算法在各种变化下都能获取较多的匹配点对,如图 4 所示。本文使用同组图像对文献[16]的算法进行测试,但该算法在这些变化下只能获取为数很少的匹配点对,特别在仿射变化下基本找不到正确的匹配点。本文算法与之对比性能有了很大提高。

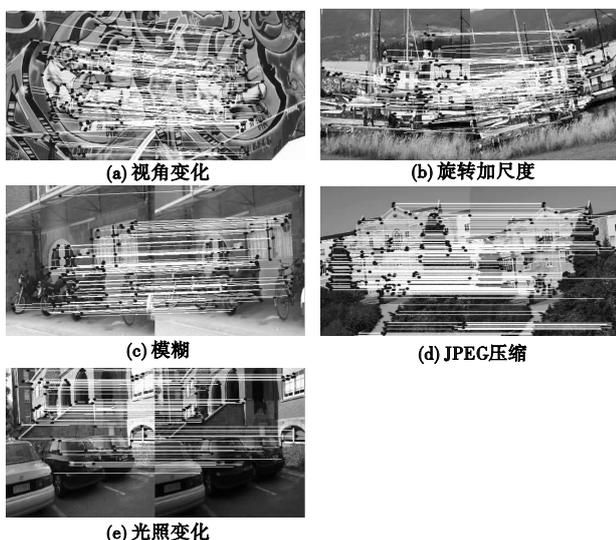


图4 五组图像的匹配结果

表 1 列出了匹配对数和运行时间等实验数据。在视角变化下,算法从两张图像中共提取 1 362 个特征区域,匹配对数

155,总耗时 6.5 s,平均提取每个特征点耗时 0.47 ms,算法速度快并且能有效对抗一定角度内的仿射变化。在旋转和尺度变化下,算法共提取 223 个特征点,但只得到 92 个匹配点对,相比视角变化效果要差些。分析两组图像的差异可以看出,图 3(b) 的图像轮廓要比 (a) 的更细小和复杂,图像变化后对轮廓产生了较大的影响,导致仅获取较少的匹配点对。在模糊变化下,有 95 个匹配点对,从匹配点数来看,效果与仿射变化相当。在 JPEG 压缩变化下,算法取得了最好的效果,共获取到 214 个匹配点对,显示了较强的鲁棒性。在光照变化下,算法获得 76 个匹配点对,效果比模糊变化稍差,但优于尺度变化。总之,在各种变化下,算法都能获取到较多的匹配点数,而且平均提取每个特征点在 5 ms 左右,说明了算法高效可行。

表 1 图 3 各组图像匹配结果及运行时间

对比项	图像				
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
尺寸	800 × 640	850 × 680	1000 × 700	800 × 640	900 × 600
变换	视角	缩放	模糊	压缩	光照
特征点	(608,754)	(1107,1136)	(499,331)	(837,721)	(479,377)
匹配对	155	92	95	214	76
时间/s	6.50	13.11	4.94	9.07	5.35

除了图 3 列出的图像组外,本文还做了大量的实验来验证算法的可行性。总的说来,算法利用轮廓来提取不变特征简单可行且运行速度快,匹配结果验证了算法的旋转和尺度不变性,在模糊、光照和压缩的情况下有较强的鲁棒性,并且对仿射变换也有一定的鲁棒性。

4 结束语

有别于传统的基于灰度的不变区域提取,本文提出了一种基于轮廓的区域检测算法,由多尺度乘积 LoG 构造响应函数提取稳定的角点,角平分线的旋转和尺度不变性决定区域也具有同样的性质。整个算法只涉及轮廓信息,有效缩短了计算耗时。最后算法在多种图像变化下都取得了很好的实验效果,表明了算法的较强鲁棒性和一定的应用价值。

参考文献:

- [1] KRISH K, HEINRICH S, SNYDER W E, *et al.* Global registration of overlapping images using accumulative, image features[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31(2): 112-118.
- [2] YANG Zhan-long, GUO Bao-long. Image mosaic based on SIFT [C]//Proc of International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. 2008:1422-1425.
- [3] SUGA A, FUKUDA K, TAKIGUCHI T, *et al.* Object recognition and segmentation using SIFT and graph cuts[C]//Proc of the 19th International Conference on Pattern Recognition. 2008:1-4.
- [4] LIU Jin, CHEN Zhi-yong, GUO Rui-fang. A mosaic method for aerial image sequence by R/C model[C]//Proc of International Conference on Computer Science and Software Engineering. 2008:58-61.
- [5] HERVE J, MATTHIJS D, CORDELIA S. Improving bag-of-features for large scale image search[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2010, 87(3): 316-336.
- [6] HU Ying-feng. Research on the 3D reconstruction method based on scale-invariant feature transform feature matching algorithm [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2011, 32(1): 30-32.

(上接第 1953 页)

- [7] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector [C]//Proc of the 4th Alvey Vision Conference. 1988:147-151.
- [8] LOWE D. Distinctive image features from scale-invariant keypoints detectors[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110.
- [9] LINDBERG T, GARDINIG J. Shape-adapted smoothing in estimation of 3-D shape cues from affine deformations of local 2-D brightness structure[J]. *Image and Vision Computing*, 1997, 15(6):415-434.
- [10] TUYTELAARS T, Van GOOL L. Content-based image retrieval based on local affinity invariant regions [C]//Proc of International Conference on Visual Information System. 1999:493-500.
- [11] TUYTELAARS T, Van GOOL L. Wide baseline stereo matching based on local affinity invariant regions [C]//Proc of the British Machine Vision Conference. 2000:412-425.
- [12] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. A performance evaluation of local descriptors[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(10):1615-1630.
- [13] TUYTELAARS T, MIKOLAJCZYK K. Local invariant feature detectors: a survey [J]. *Computer Graphics and Vision*, 2008, 3(3):177-280.
- [14] MOREL J M, YU G. ASIFT; a new framework for fully affine invariant image comparison [J]. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2009, 2(2):438-469.
- [15] YU G, MOREL J M. A fully affine invariant image comparison method [C]//Proc of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP). 2009:1597-1600.
- [16] 杨丹, 王洪星, 张小洪. 轮廓曲线的 LoG 变换及图像共变区域的检测 [J]. *自动化学报*, 2010, 36(6):817-822.
- [17] MOKHTARIAN F, SUOMELA R. Robust image corner detection through curvature scale space [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(23):725-730.
- [18] HE X C, YUNG N H C. Curvature scale space corner detector with adaptive threshold and dynamic region of support [C]//Proc of the 17th IEEE International Conference on Pattern Recognition. 2004:791-794.
- [19] AZHAR Q, MONCEF G. Wavelet-based corner detection technique using optimal scale [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2002, 23(1):215-220.
- [20] 图像集 [EB/OL]. <http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/research/affine>.