

文章编号:1007-2780(2012)01-0125-05

尺度相互作用墨西哥帽小波提取图像特征点

丁南南^{1,2}, 刘艳滢¹, 朱 明^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033, E-mail: dn8504@163.com;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 图像特征点是图像的重要局部特征,它是图像理解和模式识别中的重要信息,图像特征点提取技术也是图像处理的有力工具之一。提出了一种在尺度相互作用模型下利用墨西哥帽小波来提取图像特征点方法,该方法对于经过旋转、亮度、模糊以及噪声处理后的失真图像仍能提取出相对位置和数量都较为一致的特征点。而针对尺度相互作用的墨西哥帽小波提取不同尺度的图像时的特征点相对位置不一致的问题,提出了在墨西哥帽小波中加入尺度因子的方法,通过仿真实验验证了算法的正确性。

关 键 词: 特征点提取;尺度相互作用模型;墨西哥帽小波;尺度因子

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/YJYXS20122701.0125

Extracting Image Feature Points Using Scale-Interaction of Mexican-Hat Wavelets

DING Nan-nan^{1,2}, LIU Yan-ying¹, ZHU Ming^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China, E-mail: dn8504@163.com;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The feature point is an important local feature in the image, and it is also the important information in the image comprehension and pattern recognition, so the feature point extraction technology becomes a powerful tool of image processing. A method that based on scale-interaction of Mexican-hat wavelets is presented, and the method could extract close number of feature points corresponding to the same location in the images distorted by rotation, brightness, blur and noise. For the problem that the feature points extracted by scale-interaction of Mexican-hat wavelets are corresponding to the different locations in images of different scales, the method that resizes the Mexican-hat wavelets by the scale factors is presented. Finally, the algorithm is proved by simulation experiments.

Key words: feature point extraction; scale-interaction model; Mexican-hat wavelets; scale factors

1 引 言

特征点是图像的一个重要局部特征,它在保留了图像中物体重要特征信息的同时,有效地减

少了信息的数据量,对灰度变化、图像变形以及遮挡等都有较好的适应能力,因而成为图像理解和模式识别中的重要信息,图像特征提取技术也成为图像处理的有力工具之一。

收稿日期: 2011-08-04; 修订日期: 2011-09-08
作者简介: 丁南南(1985—),男,河南焦作人,博士研究生,主要研究方向为数字图像处理。
* 通讯联系人, E-mail: zhu_mingca@163.com

特征点提取的目的是在图像中快速、准确地检测到特征点,而且这些特征点对于一般的图像要求具有很强的抗干扰能力和鲁棒性。Harris 角点检测^[1]在一致性和有效性方面均具有优良的性能,该方法提取的兴趣点被证明具有旋转和平移不变性,但是不具有尺度不变性。David G. Lowe^[2]提出的 SIFT 特征匹配方法在近几年成为国内外计算机视觉领域的热点,这种算法被证明对于图像的尺度变化和仿射变形具有鲁棒性。SURF 算法是由 Bay 等提出的基于 SIFT 的改进算法^[3],Bay 等还以匹配数目、最终匹配对占初次匹配对的比率为评价指标对 SURF、gloh、SIFT 等算法进行了比较。

本文提出了一种尺度相互作用模型下利用改进的墨西哥帽小波来提取图像中特征点的方法,首先简单介绍了尺度相互作用模型的起源、原理及其特点,之后重点分析了墨西哥帽小波的原理和尺度相互作用的墨西哥帽小波提取图像特征点过程。针对尺度相互作用的墨西哥帽小波提取不同尺度的图像时特征点定位不一致的问题,提出了在墨西哥帽小波中加入尺度因子的方法,使得对于经过旋转、亮度、模糊、噪声以及仿射变换处理后的图像都能提取出相对位置一致的特征点集。

2 算法介绍及仿真

2.1 尺度相互作用模型

B. S. Manjunath 等^[4]提出了一种基于尺度相互作用(Scale interaction)模型的特征检测方法,以这种模型为基础的特征检测器对于图像中的短线段、线段端点、角点和其他具有曲率剧烈变化的情况反应灵敏。

而 A. Dobbins 等^[5]则从人体视觉出发,从另一个角度阐释了尺度相互作用模型的原理及其可行性。文中描述了一种视觉皮层中的神经元,这种神经元能够对一些复杂的特征起响应,具有很强的非线性处理特征,被称为超复杂神经元(hypercomplex cell)。大多数超复杂神经元具有终端抑制(end-stopping)特性,它们对线段末端、角点和高曲率的线段等都比较敏感。这种超复杂神经元的模型可以用相同位置、相同方向、不同大小的神经元细胞感受野响应值的差来表示。而感受野对光的响应又可以用空间滤波函数来表示,例

如高斯差分函数、Gabor 小波函数等。换言之,超复杂神经元细胞对光的响应可以用不同带宽的空间滤波器的差对光的响应来模拟。图 1 形象地描述了这一模型的响应过程。

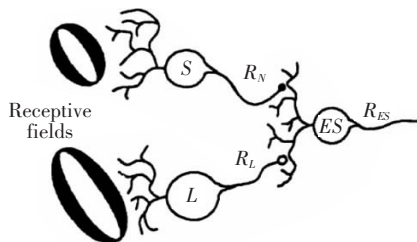


图 1 超复杂神经元模型示意图

Fig. 1 Hypercomplex cell model

空间滤波函数以 Gabor 小波为例,尺度相互作用模型的表达式如下:

$$Q_{ij}(x, y, \theta) = f[W_i(x, y, \theta) - \gamma W_j(x, y, \theta)] \quad (1)$$

其中 $W_i(x, y, \theta)$ 和 $W_j(x, y, \theta)$ 分别是在 (x, y) 位置、 θ 方向上 i 尺度和 j 尺度的 Gabor 小波变换系数, $Q_{ij}(\cdot)$ 是特征检测函数, $f(\cdot)$ 是非线性变换函数, γ 是尺度参数。若 $Q_{ij}(\cdot)$ 在 (x, y) 位置取得局部极值,则认为该位置为潜在的特征点位置,即:

$$Q_{ij}(x, y, \theta) = \max_{(x', y') \in N_{xy}} Q_{ij}(x', y', \theta) \quad (2)$$

其中 N_{xy} 是 (x, y) 周围一定大小的邻域。

2.2 墨西哥帽小波

墨西哥帽小波又称为 Marr 小波,是高斯函数的二阶导数,有尖锐的正峰值,在峰值周围是圆形负凹槽,形状类似墨西哥帽。它的各向同性使得它对角度不敏感,因而与 Gabor 小波相比更适合用来提取特征^[6],此外它具有足够的稳定性,在经历压缩、滤波、噪声等处理后的图像中仍能够检测出特征点,并且分布比较均匀。

定义一维墨西哥帽小波为:

$$\text{Mex}(x) = (2 - x^2) \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (3)$$

相应地,它的二维表达式如下:

$$\text{Mex}(X) = (2 - X^2) \exp\left(-\frac{X^2}{2}\right) \quad (4)$$

其中, $X = (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}$, (x, y) 是 X 的坐标。图 2 所示为一维(a)和二维(b)墨西哥帽小波的基本形状。

S. Bhattacharjee 等^[7]将墨西哥帽小波代替 Gabor 小波利用到尺度相互作用模型中,

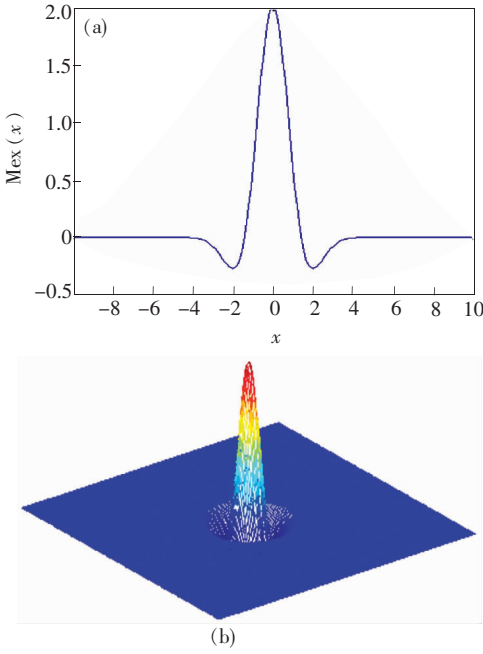


图 2 一维和二维墨西哥帽小波

Fig. 2 One-dimension and two-dimension Mexican-hat wavelets

$$Q_{ij}(X) = |M_i(X) - \gamma M_j(X)| \quad (5)$$

其中,

$$\gamma = 2^{-(i-j)} \quad (6)$$

简单起见, γ 取 1, 实验证明, 不影响特征点提取的准确性。墨西哥帽小波表示为:

$$M_i(X) = 2^{-i} \text{Mex}(2^{-i} \cdot X) = 2^{-i} (2 - 2^{-2i} X^2) \exp\left(-\frac{2^{-2i} X^2}{2}\right) \quad (7)$$

令 $2^{-i} = \sigma_i$, 则有:

$$M_i(X) = \sigma_i (2 - \sigma_i^2 X^2) \exp\left(-\frac{\sigma_i^2 X^2}{2}\right) \quad (8)$$

对于灰度图像 $I(X)$, 响应值 $R_{ij}(X)$ 为:

$$\begin{aligned} R_{ij}(X) &= I(X) \otimes Q_{ij}(X) = \\ &= I(X) \otimes [M_i(X) - M_j(X)] = \\ &= I(X) \otimes M_i(X) - I(X) \otimes M_j(X) \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $\otimes$ 表示二维卷积运算。

若 $R_{ij}()$ 在 X 位置取得局部极值, 则认为该位置为潜在特征点位置, 即:

$$R_{ij}(X) = \max_{X' \in N_X} Q_{ij}(X') \quad (10)$$

其中 N_X 是 X 周围一定大小的邻域。因为墨西哥帽小波特有的各向同性特征, 在实际应用中确定局部极值点时所用的邻域是半径为 r_c 的圆域, 不同的情况可以取不同值。由于数值比较

小的特征点对图像变形更敏感, 因此进一步选取数值大于特定阈值的局部极大值点作为候选特征点, 根据经验, 选取全局最大值 1/10 大小的阈值具有较好的结果。图 3 举例说明了利用尺度相互作用的墨西哥帽小波从图像中提取局部极大值点的过程。

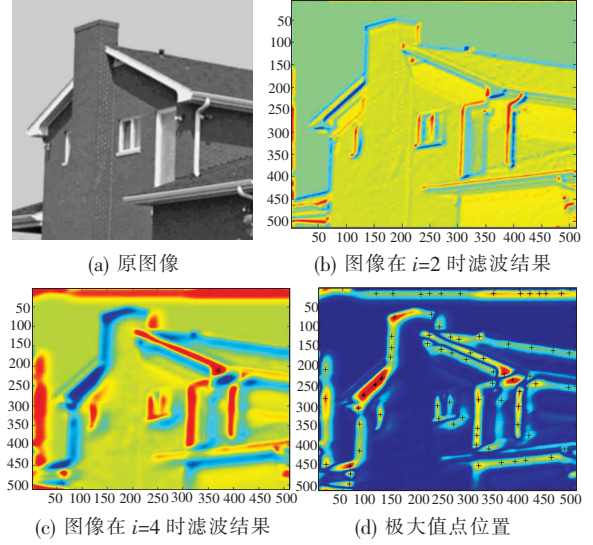


图 3 利用尺度相互作用的墨西哥帽小波从图像中提取局部极大值点的过程

Fig. 3 Process of extracting local maxima in image using scale-interaction of Mexican-hat wavelets

墨西哥帽小波对角度不敏感, 而且在经过模糊、亮度变化以及噪声等处理后的图像中仍能够检测出局部极大值点。图 4 为从失真图像中提取极大值点过程。其中 (a) 是在 goldhill 原图中检测到的局部极大值点, (b)、(c)、(d)、(e)、(f) 分别是图像经过旋转、亮度变化、模糊处理、加入椒盐噪声和高斯噪声后检测局部极大值点的结果。为了进一步验证尺度相互作用的墨西哥帽小波提取图像中局部极大值点的鲁棒性, 利用局部极大值点提取的重复率作为评价标准定量地考察了提取结果。在相同尺度的条件下, 如果两幅图像中两个局部极大值点间的坐标相差两个像素以内, 则认为这两个局部极大值点是重复出现的。表 1 是将原图像分别和 5 幅失真图像比较后得出的重复出现的局部极大值点统计情况。其中 N_s 是原图像中检测到的局部极大值点的数量, N_d 是失真图像中局部极大值点的数量, N_r 是重复出现的局部极大值点数量, N_{rd} 是重复出现的局部极大值点与

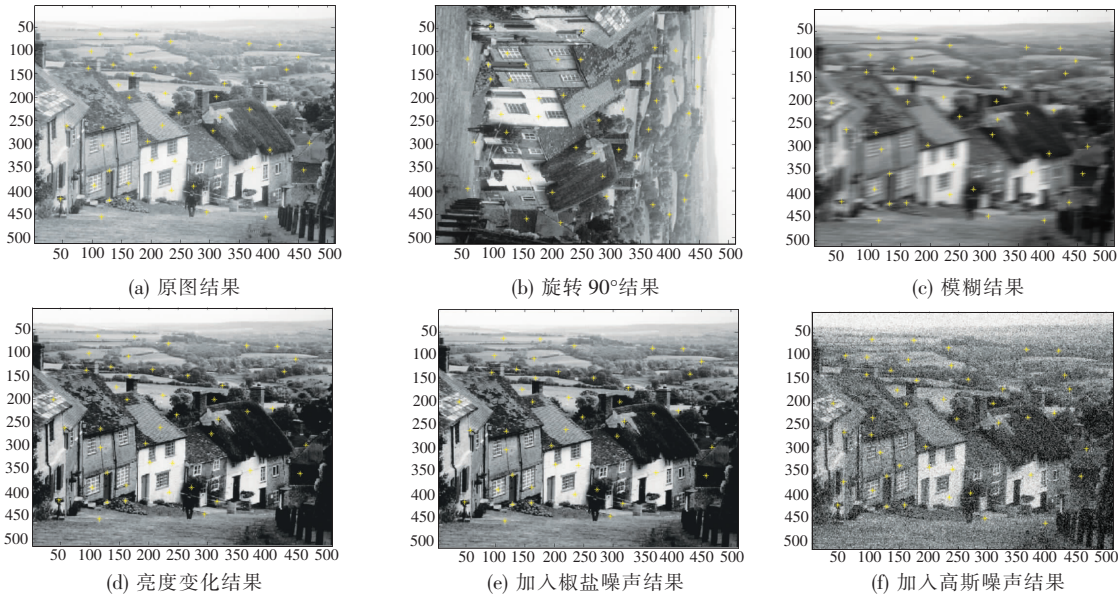


图 4 利用尺度相互作用的墨西哥帽小波从失真图像中提取局部极大值点

Fig. 4 Extraction of local maxima in distorted images using scale-interaction of Mexican-hat wavelets

表 1 重复特征点统计

Table 1 Statistics of reduplicate feature points

图像失真形式	N_0	N_d	N_r	$R_{rd}/\%$
旋转 90°	46	46	46	100
模糊处理	46	45	42	91
亮度变化	46	46	44	96
对比度变化	46	48	41	89
加入椒盐噪声	46	51	41	89
加入高斯噪声	46	46	38	83

原图局部极大值点之间的比例。

2.3 加入尺度因子的墨西哥帽小波

从图 4 和表 1 可以看出,在原图和经过失真处理后的图像中,总体上局部极大值点的数量、分布以及相对位置都比较一致,尺度相互作用的墨西哥帽小波对图像局部极大值点的检测结果良好,但都是在所处理图像为相同尺度的情况下得到的。对于不同尺度的图像,墨西哥帽小波的中心峰值和对应图像区域的关系是不同的,导致了在不同尺度图像中提取的局部极大值点位置不一致,如图 5(a)和 5(b)所示,两幅图像是不同尺度的,部分特征点位置出现了明显的不一致,如图中红色方框的部分。

为了补偿图像间的尺度差异,在墨西哥帽小波中加入尺度因子 s_p :

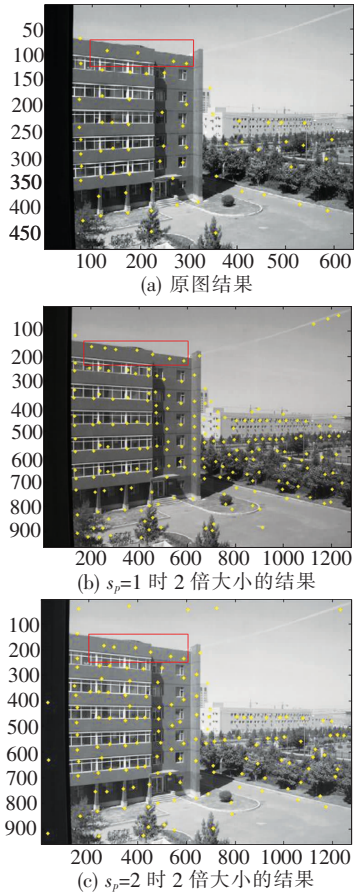


图 5 利用尺度相互作用的墨西哥帽小波从不同尺度图像中提取局部极大值点

Fig. 5 Extraction of local maxima in different scales images using scale-interaction of Mexican-hat wavelets

$$M_i\left(\frac{X}{s_p}\right) = \sigma_i \left\{ 2 - \sigma^2 \left[\left(\frac{x}{s_p} \right)^2 + \left(\frac{y}{s_p} \right)^2 \right] \right\} \cdot \exp \left\{ - \frac{\sigma_i^2 \left[\left(\frac{x}{s_p} \right)^2 + \left(\frac{y}{s_p} \right)^2 \right]}{2} \right\} \quad (11)$$

加入尺度因子后提取局部极大值点的结果如图 5(c)所示,可以看出,由于阈值不同,5(a)和 5(c)中局部极大值点数量不同,但是重复出现的局部极大值点相对位置关系是一致的,加入尺度因子抵消了尺度变化的影响。

尺度因子 s_p 是在一定范围变化的,实际中不

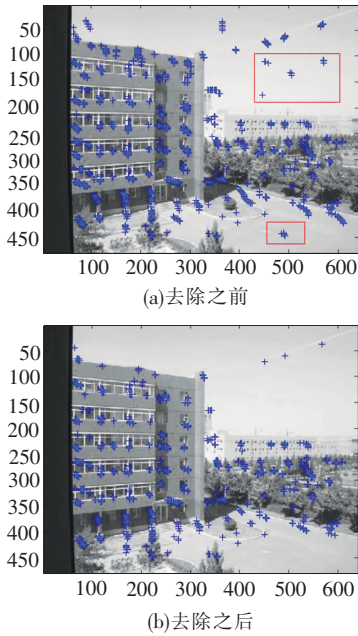


图 6 去除位于图像平滑区域的局部极大值点前后对比图
Fig. 6 Eliminating the local maxima in the smooth region of the image

可能尝试所有的尺度值,因此采用尺度量化的方法。初始值选择 0.3,步长为 0.1,上限根据具体情况设定,最后形成各个尺度因子对应的局部极大值点的集合 MP 。

最后,需要从集合 MP 中选择鲁棒特征点。取阈值 T_v ,如果局部极大值点在其周围一定大小的邻域内像素值的方差大于 T_v ,就认为该点是一个特征点,这一标准可避免将图像光滑区域的极大值点取为特征点。

$$\text{var}[I(p_x^i, p_y^i)] > T_v \quad (12)$$

其中, $\text{var}(\cdot)$ 是求方差, $p^i \in MP$, (p_x^i, p_y^i) 是 p^i 的坐标。取以局部极大值点为圆心,半径 $r_q = 5$ 的圆形区域为其邻域,阈值 T_q 取 10,得到最终特征点集 P 。图 6 是去除位于图像平滑区域的局部极大值点前后的对比效果,可以看出,图 6(a)在图像平滑区域例如红色方框中的天空、地面也有若干局部极大值点,这些极值点不是感兴趣的特征点,图 6(b)是去除这些点后的结果。

3 结 论

提出了一种尺度相互作用模型下利用墨西哥帽小波提取图像中特征点的方法,该方法对于经过旋转、亮度、模糊以及噪声处理后的图像都能提取出相对位置和数量较为一致的特征点。之后利用在墨西哥帽小波中加入尺度因子的方法,解决了尺度相互作用的墨西哥帽小波提取不同尺度的图像时特征点相对位置不一致的问题,使得该方法对于不同尺度的图像也能提取出相对位置一致的特征点集,并通过仿真实验验证了算法的正确性。

参 考 文 献:

- [1] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector [C]//*Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*, UK: Manchester, 1988: 147-151.
- [2] David G L. Distinctive image features from Scale-invariant keypoints [J]. *Int. J. Comput. Vis.*, 2004, 60(2): 91-110.
- [3] Bay H, Tuytelaars T, Gool L Van. SURF: speeded up robust features [C]//*Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, Austria: Springer, 2006:404-417.
- [4] Manjunath B, Shekhar C, Chellappa R. A new approach to image feature detection with applications [J]. *Pattern Recognition*, 1996, 29(4):627-640.
- [5] Dobbins A, Zucker S, Cynader M. Endstopping and curvature [J]. *Vision Research*, 1989, 29(10):1371-1387.
- [6] Antoine J, Murenzi R. Two-dimensional directional wavelets and the scale-angle representation [J]. *Signal Processing*, 1996, 52(3):259-281.
- [7] Bhattacharjee S, Kutter M. Compression tolerant image authentication [C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, USA: IEEE, 1998:435-439.