

一种新的 Harris 多尺度角点检测

张小洪^① 李博^② 杨丹^①

^①(重庆大学软件工程学院 重庆 400044)

^②(重庆大学数理学院 重庆 400044)

摘要: Harris 角点检测是一种经典的角点检测算法,但不具有尺度变化特性。该文把多分辨分析的思想引入到该算法中,构造了基于小波变换的灰度强度变化公式,并得到了具有尺度变换特性的自相关矩阵,从而构建了一种新的基于小波变换的 Harris 多尺度角点检测算法。这样,使得新的角点检测可以在不同的尺度下获取角点,并克服了单一尺度的 Harris 角点检测可能存在的角点信息丢失、角点位置偏移和易受噪而提取出伪角点等问题。通过对比实验,新算法明显地提高了图像角点检测性能。

关键词: 多尺度角点检测; Moravec 算法; Harris 角点检测

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)07-1735-04

A Novel Harris Multi-scale Corner Detection Algorithm

Zhang Xiaohong^① Li Bo^② Yang Dan^①

^①(School of Software Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

^②(College of Mathematics & Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Harris corner detection is a classical algorithm, but has not the property of scale invariant. In this paper, the multi-resolution idea is introduced into the Harris algorithm, and the wavelet-based formula for measuring the image intensity variation is developed, meanwhile, the auto-correlation matrix is obtained that reflected the scale variation information. Then, a novel Harris multi-scale corner detection algorithm wavelet-based is presented, which might detect the corners in different scales and overcome the drawback that the single-scale Harris detector usually leads to either missing significant corners or detecting false corners due to noise. Compared with Harris algorithm, the presented algorithm is more efficient in detecting the corners with accurate location and is robust with respect to noise.

Key words: Multi-scale corner detection; Moravec algorithm; Harris corner detection

1 引言

角点是图像的一个重要的局部特征,它在保留了图像中物体重要特征信息的同时又有效地减少了信息的数据量,因而成为图像理解和模式识别中重要的图像特征。角点检测技术也成为图像处理的有力的工具之一。角点检测在光流计算、运动估计、形状分析、相机标定和3D重建、视觉的定位和测量等方面都有重要的应用。

目前角点检测技术可以分为两类:一类是基于图像边缘信息,如基于小波变换模极大的角点检测^[2,3],基于边界链码的角点检测^[4],基于边界曲率的角点检测;另一类是基于图像灰度信息,如Moravec算法, Harris and Stephens算法^[6], SUSAN算法^[7]。在第一类中,图像的边缘轮廓容易使用多尺度技术来分析,所以第一类算法已实现多尺度角点提取,然而,角点对边缘线依赖较大,如果边缘线由于某种原因发生中断,则会对角点的提取结果造成影响。而第二类算法的主

要缺点定位精度较差,同时还可能漏掉一些实际的角点,对噪声比较敏感,而且现在还没实现多尺度角点检测的特性。所以在基于图像灰度信息的角点检测中引入多分辨分析思想,对提高角点的定位精度和检测性能将具有重要的意义。

由于 Harris 角点检测具有比较理想的结果,其应用非常广泛。然而,该算法只能在单一尺度下检测角点,这样在对角点响应函数执行非极大值抑制,确定局部极大值时,角点提取的效果就完全依赖于阈值的设定。阈值大会丢失角点信息,阈值小又会提取出伪角点。针对这些问题,我们利用小波变换的多尺度特性:在小尺度下的定位准确和大尺度下的抗噪性强,构造了基于小波变换的反映灰度变化特征的计算公式,从而建立了基于小波变换的自相关矩阵,并提出了基于小波变换的 Harris 多尺度角点检测完整算法。为了综合利用各个尺度下的角点信息,本文提出了由细到粗的角点筛选方案,从而获得较好的角点检测性能。最后通过实验,证明该方法能有效地提取角点并精确定位,有较强的抗噪能力。

2 Harris角点检测原理及局限

Harris角点检测算法是在Moravec 算法基础上发展起

来的。Moravec 角点检测算法的思想是：在图像中设计一个局部检测窗口，当该窗口沿各个方向作微小移动时，考察窗口的平均能量变化，当该能量变化值超过设定的阈值时，就将窗口的中心像素点提取为角点。记像素点 (x, y) 的灰度为 $f(x, y)$ ，图像的每个像素点 (x, y) 移动 (u, v) 的灰度强度变化表示为

$$E_{u,v}(x, y) = \sum_{u,v} w_{u,v} (f(x+u, y+v) - f(x, y))^2 \quad (1)$$

其中像素的移动 (u, v) 取值为：(1, 0), (1, 1), (0, 1), (-1, 1), (-1, 0), (-1, -1), (0, -1), (1, -1)。显然，Moravec 算法只检测了窗口函数在8个基本方向上移动的强度变化，不能准确提取出全部角点，而且对孤立像素点、噪声和边缘都较为敏感。算法中定义的角点响应函数 $C(x, y) = \min(E_{u,v}(x, y))$ 也因此而不具有旋转不变性。为改进Moravec 算法，Harris通过微分运算和自相关矩阵来检测角点^[6]。微分算子能反应像素点任意方向上的灰度强度变化，因而能够有效地区分角点和边缘，所以在式(1)中，通过Taylor展式，用微分算子重新定义了灰度强度变化的公式，得到式(2)。这样使角点检测算子具有了旋转不变性。同时Harris 检测算法选取高斯函数为检测窗口，对图像进行平滑滤波再提取角点，对噪声有一定的抑制作用。

$$\begin{aligned} E_{u,v}(x, y) &= \sum_{u,v} w_{u,v} (f(x+u, y+v) - f(x, y))^2 \\ &= \sum_{u,v} w_{u,v} \left(u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + O(u^2, v^2) \right)^2 \\ &\approx \sum_{u,v} w_{u,v} \left(u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $w_{u,v}$ 是高斯窗在位置 (u, v) 处的系数。

虽然 Harris 角点检测算法是一种经典的角点检测算法，但仍然存在以下不足：(1)算法只能在单一尺度下检测角点，这样在对角点度量执行非极大值抑制，确定局部极大值时，角点提取的效果就完全依赖于阈值的设定。阈值大会丢失角点信息，阈值小又会提取出伪角点。因而，尺度功能的缺乏使 Harris 角点检测定位精度较差，同时还可能漏掉一些实际的角点，对噪声也比较敏感。(2)Harris 角点检测虽然采用了可调窗口的高斯平滑函数，但实际运用中高斯窗的大小不易控制。如果选用较小窗口的高斯平滑函数，则会因为噪声的影响导致众多伪角点的出现；如果用较大窗口的高斯平滑函数，则会因为卷积的圆角效应使得角点的位置产生较大的偏移，而且增加了算法的计算量。(3)用无限光滑的高斯函数对图像做平滑滤波，会由于过平滑而导致角点信息的丢失。

3 Harris多尺度角点检测

鉴于 Harris 角点检测算法存在的问题，我们把多分辨率的思想引入到该算法中，使得 Harris 算法具有多尺度检测角点的特性。这是基于以下原理：在 Harris 算法中， $\partial f / \partial x$ ， $\partial f / \partial y$ 反映了图像在每个像素点的灰度变化方向，若像素点

(x, y) 的各个方向亮度都发生足够大的变化则提取为角点。而小波 $\psi_{u,s}(t)$ 是一个均值为 0 的函数，信号 g 的小波变换 $Wg(u, s) = g \otimes \psi_{u,s} = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \psi_{u,s}(t) dt$ 度量了信号 g 在某个邻域内的变化，该邻域以 u 为中心，长度与 s 成正比。并且，如果小波具有一阶或 n 阶消失矩，则小波变换就是多尺度微分算子。因此，我们可以用图像的小波变换重新定义图像的灰度强度变化公式(1)和式(2)，即

$$\begin{aligned} E_{u,v}(x, y) &= S_{2^j} \left(u W_{2^{j+1}}^1 f + v W_{2^{j+1}}^2 f \right)^2 \\ &= S_{2^j} \left(u^2 (W_{2^{j+1}}^1 f)^2 + 2uv W_{2^{j+1}}^1 f W_{2^{j+1}}^2 f + v^2 (W_{2^{j+1}}^2 f)^2 \right) \\ &= Au^2 + 2Cuv + Bv^2 = (u, v) \begin{pmatrix} A & C \\ C & B \end{pmatrix} (u, v)^T \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $W_{2^{j+1}}^1 f$ ， $W_{2^{j+1}}^2 f$ 分别表示图像 f 在 x, y 方向上的小波变换，即 $W_{2^{j+1}}^1 f = S_{2^j}^d f \otimes (G_j, D)$ ， $W_{2^{j+1}}^2 f = S_{2^j}^d f \otimes (D, G_j)$ ；而 S_{2^j} 表示平滑算子，从而有

$$A = S_{2^j} \left[(W_{2^{j+1}}^1 f)^2 \right] = (W_{2^{j+1}}^1 f)^2 \otimes (H_j, H_j) \quad (4)$$

$$B = S_{2^j} \left[(W_{2^{j+1}}^2 f)^2 \right] = (W_{2^{j+1}}^2 f)^2 \otimes (H_j, H_j) \quad (5)$$

$$C = S_{2^j} \left[(W_{2^{j+1}}^1 f W_{2^{j+1}}^2 f) \right] = (W_{2^{j+1}}^1 f W_{2^{j+1}}^2 f) \otimes (H_j, H_j) \quad (6)$$

\otimes 为卷积运算， H 和 G 分别为低通和高通滤波器， D 为 Dirac 滤波器， H_j 和 G_j 分别表示，在 H 和 G 的滤波器系数之间插入 $2^j - 1$ 个零。这样，便得到图像中每个像素点 (x, y) 在尺度 $j+1$ 下的自相关矩阵：

$$M_{2^{j+1}} = \begin{pmatrix} A & C \\ C & B \end{pmatrix} \quad (7)$$

值得注意的是，式(3)不但和式(2)、式(1)都反映了图像每个像素点灰度强度变化，而且式(3)还体现了尺度空间变化的信息，使得角点检测可以在不同尺度下检测。同时，在本文中，选择具有低通特性的中心 B 样条函数作为平滑函数，还可弥补 Harris 算法中高斯函数窗口难以控制和过度平滑的不足，增强 Harris 检测性能。

与 Harris 算法一样，如果自相关矩阵的两个特征值 λ_1, λ_2 足够大，就把该像素检测为角点。为了避免对矩阵 $M_{2^{j+1}}$ 进行特征值分解，定义在尺度 $s = 2^{j+1}$ 下的角点响应函数(CRF)为

$$C_{2^{j+1}}(x, y) = \det(M_{2^{j+1}}) - k(\text{trace}(M_{2^{j+1}}))^2 \quad (8)$$

其中 $\det(M_{2^{j+1}}) = \lambda_1 \lambda_2 = AB - C^2$ ， $\text{trace}(M_{2^{j+1}}) = \lambda_1 + \lambda_2 = A + B$ ， k 是给定的取值于 0.04~0.06 的常量。此时通过设置阈值消除噪声并执行非极大值抑制，确定角点，即满足 $C_{2^{j+1}}(x, y) > \text{threshold}$ 的像素点 (x, y) 确定为角点。

新的多尺度 Harris 角点检测方法实现了在多个尺度下检测角点，获取了多个尺度下的角点信息，减小了阈值设定对角点提取的制约。通常小尺度参数的检测算子能够检测出灰度的细微变化，反映更多的奇异点信息，但对噪声较为敏

感;而大尺度参数的检测算子能够检测出灰度的粗略变化,反映变化剧烈的奇异点,对噪声具有较强的抑制。因而多尺度 Harris 角点检测实现了小尺度下的精确定位和大尺度下的去伪存真。

然而,经过多尺度 Harris 检测后,本文提出以下由细到粗的方法准确筛选不同尺度下的角点:

首先,对 $2^j, j = 1$ 尺度下出现的模极大值点 P_j , 计算角点响应函数 $C_{2^j}(x_j, y_j)$, 当其值超过阈值 T_j 时, 这一点被挑出来作为候选角点。选择 $2^j, j = 1$ 的尺度是利用小波变换在小尺度下可精确定位的特点, 以确定角点的位置, 因此, 这一步可包含所有角点, 不会产生遗漏。

其次, 在 2^{j+1} 的尺度下, 对上一步得到的候选角点 P_j 的附近观测 $C_{2^{j+1}}(x_j, y_j)$ 是否有极大值点出现, 如存在, 则确定该点为角点, 若没有, 则可将该点从候选角点中剔除。

具体地, Harris 多尺度角点检测算法设计如下:

步骤 1 计算图像 f 的 J 级相关矩阵 M_{2^j+1}

$$j = 0, S_{2^0}^d f = f$$

while($j < J$)

$$W_{2^j+1}^1 f = S_{2^j}^d f \otimes (G_j, D); W_{2^j+1}^2 f = S_{2^j}^d f \otimes (D, G_j)$$

$$M_{2^j+1} = \begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix}, \text{ 其中: } A, B, C \text{ 分别由式(4), 式(5)}$$

和式(6)确定,

$$S_{2^j+1}^d f = S_{2^j}^d f \otimes (H_j, H_j);$$

end

步骤 2 计算各个尺度下每个像素的角点响应函数

$$C_{2^j+1}(x, y) = \det(M_{2^j+1}) - k(\text{trace}(M_{2^j+1}))^2, k \text{ 为常量。}$$

步骤 3 在尺度 $j = 1$ 下执行非极大值抑制, 确定局部极大值, 并通过阈值去除噪声点 (x, y) 为角点, 则必须满足 $C_{2^j}(x, y) > T_1$, 且 $C_{2^j}(x, y)$ 为局部极大值。

步骤 4 由细到粗筛选角点 ($j = 1, 2, \dots, J$)

对尺度为 2^j 的 $C_{2^j}(x, y) > T_j$ 的点为候选的角点, 然后, 在尺度 2^{j+1} 下观察该点的邻域内是否存在局部极大值, 如存在则确定该点为角点, 若没有, 则可将该点从候选角点中剔除。

4 实验结果分析

本文实验中, 选择具有低通特性的中心 B 样条函数作为平滑函数, 因为 B 样条函数具有良好的逼近能力和紧支性等一些优良的性质。当中心 B 样条函数的阶数趋于无穷时, 中心 B 样条函数收敛于高斯函数, 其导数收敛于高斯函数的导数。

同时本文采用文献[7]中的角点响应函数来判断角点的位置:

$$C_{2^j+1} = \frac{\det(M_{2^j+1})}{\text{Tr}(M_{2^j+1}) + \epsilon} \quad (9)$$

与 Harris 角点检测中提出的响应函数 $C_{2^j+1}(x, y) = \det(M_{2^j+1})$

$-k(\text{trace}(M_{2^j+1}))^2$ 相比, 采用上述的响应函数也避免了对 M 的特征值分解, 同时避免了参数 k 的选取, 减少了 k 选择的随机性。因此, 本文所采用的响应函数更具有实用性。

图 1 中的(a)(b)(c)分别展现了本文提出的角点检测算法在不同尺度下提取角点的效果, 实验结果验证了该算法在小尺度下的精确定位性和在大尺度下的抗噪能力。图 2(a)是 Harris 算法提取出的角点, 图 2(b)是本文算法提取出的角点, 从对比图 2 和表 1 中我们可以看出: Harris 算法漏检了很多重要的角点, 本文的算法能提取出更多的有效的角点并精确定位。图 3(a)和(b)分别为在图像中加入高斯噪声 ($\sigma = 0.01$) 后, Harris 算法和本文算法提取出的角点, 表 2 的统计数据充分体现了本文算法具有较强的抗噪能力。

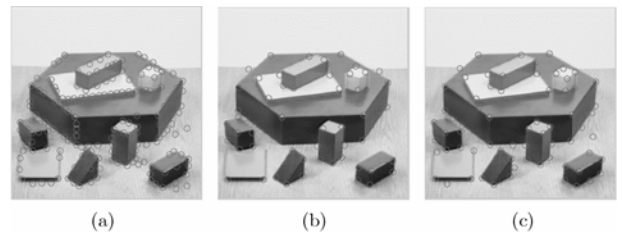


图 1 Harris 多尺度角点检测算法在尺度 $2^1, 2^2, 2^3$ 下提取出的角点

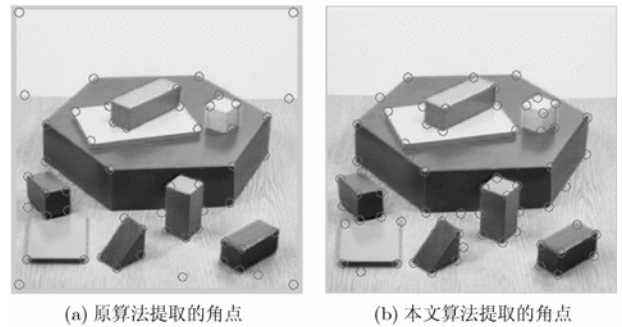


图 2 本文算法与 Harris 算法实验结果对比

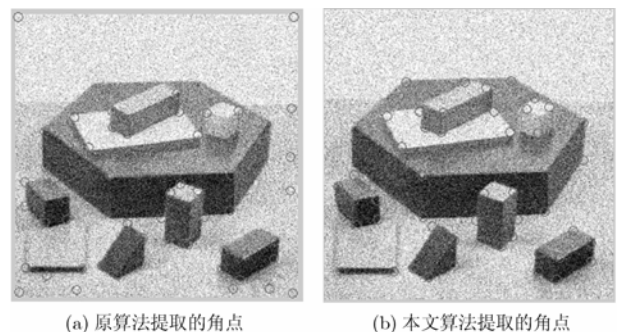


图 3 加入高斯噪声 ($\sigma = 0.01$) 的实验结果对比

表 1 角点个数统计

检测器	准确角点	漏检角点	伪角点
Harris 算法	46	14	8
本文算法	59	1	5

表 2 角点个数统计

检测器	准确角点	漏检角点	伪角点
Harris 算法	41	19	9
本文算法	52	8	1

5 结束语

为克服单一尺度的Harris角点检测方法的不足, 基于小波变换的多分辨特性, 本文定义了图像灰度强度变化的公式, 该公式能反映图像在不同尺度下图像的灰度强度变化, 从而得到了不同尺度下的自相关矩阵, 并在此基础上构建了新的角点检测算法框架: Harris多尺度角点检测。同时为了充分利用不同尺度下的角点信息, 还提出了对多尺度下角点的筛选方法。最后通过与原Harris实验对比, 表明本算法对角点能够准确检测并精确定位, 而且具有较好的抗噪能力。

参 考 文 献

- [1] 陈乐, 吕文阁, 丁少华. 角点检测技术研究进展. 自动化技术与应用, 2005, 4(5): 25-29.
 - [2] Lee J S, Sun Y N, and Chen C H. Multiscale corner detection by using wavelet transform. *IEEE Trans. on Image Proc.*, 1995, 4(1): 100-104.
 - [3] Hua J P and Liao Q M. Wavelet-based multiscale corner detection. *IEEE Proc. of ICSP*, Beijing, 2000: 341-344.
 - [4] Freeman H and Davis L S. A corner-finding algorithm for chain-coded curves. *IEEE Trans. on Comput.*, 1977, 26(3): 297-303.
 - [5] Mokhtarian F and Suomela R. Curvature scale space based image corner detection. *Proc. European Signal Processing Conference*, Island of Rhodes, Greece, 1998: 2549-2552.
 - [6] Harris C and Satephens M J. A combined corner and edge detector. In *Alvey Vision Conference*, Manchester, 1988: 147-152.
 - [7] Smith S M and Brady J M. SUSAN: A new approach to low level image processing. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 23(1): 45-78.
- 张小洪: 男, 1973年生, 博士生, 研究方向为数字图像处理、模式识别与人工智能等.
- 李 博: 男, 1982年生, 硕士生, 研究方向为数字图像处理、模式识别与人工智能.
- 杨 丹: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为数字图像处理、模式识别与人工智能等.