

③ 411-416

工业图像中屋脊边缘多尺度检测方法

杨 炬 梁德群

(西安交通大学电子与信息工程学院图像所, 陕西, 西安, 710049)

TN919.5
TP391.41

摘要 针对屋脊边缘的特点, 提出了一种多尺度屋脊边缘的检测方法. 该方法分析了图像中屋脊边缘的可能性, 并根据该可能性度量自适应调整滤波器的尺度参数. 分析了对屋脊边缘进行滤波的尺度参数选取范围, 实验表明该方法是可行的.

关键词 边缘检测, 屋脊边缘, 小波变换.

多尺度检测 图像

引言

在工业图像检测中, 许多待识别的目标其边缘都是屋脊型边缘, 经典边缘检测方法^[1~3]往往只研究阶跃边缘的检测, 对屋脊边缘的讨论较少. 由于屋脊边缘的特点不同于阶跃边缘, 检测屋脊边缘一般是判断一阶差分滤波的过零点, 而阶跃边缘是判断一阶差分滤波的局部极值. 在这里, 滤波尺度的选取与屋脊边缘的特征有关, 滤波尺度过小, 可能无法检测出屋脊边缘, 而过大的滤波尺度会使边缘定位发生误差, 因此滤波尺度的调整是屋脊边缘检测的关键. 进行屋脊边缘检测时必须解决两个问题, 一是判断可能存在屋脊边缘的区域, 二是对于存在屋脊边缘的区域应选用适当的滤波尺度进行滤波, 并检测出边缘. 本文根据屋脊边缘的特点, 从原图像中分析屋脊边缘存在的可能性, 并从理论上分析了检测屋脊边缘的滤波尺度范围, 最终实现多尺度屋脊边缘的检测.

1 存在屋脊边缘可能性的度量

屋脊边缘的一维模型如图 1 所示, 图 1 中 x_0 为待检测的边缘点, 屋脊边缘的特征与观察范围有关, 假设观察范围为 $[x_0-dx, x_0+dx]$, 若 dx 很小, 邻域内信号变化很小, 则屋脊边缘在此范围内是不存在的; 当 dx 达到一定大小时, 邻域内信号变化较大, 屋脊边缘则表现出来, 即屋脊边缘与尺度密切相关. 在二维图像中, 屋脊边缘的这一特点仍然存在, 另外, 在二维图像中, 屋脊边缘的另一个重要特征是屋脊边缘具有方向性. 本文定义了散度 D 和对比度 G 两个度量, 以分析原图像中屋脊边缘的特征.

假设当前像素点的坐标为 (m, n) , 其邻域 $R = \{(i, j) | |i-m| \leq L, |j-n| \leq L\}$. 首先确定邻域大小 L , 由前面分析可知, 只有邻域大小达到一定程度时, 屋脊边缘才能完全表现出来, 假设屋脊边缘宽度为 d , 则取 $L=d$, 这样邻域 R 的大小为 $(2L+1) \times (2L+1)$, 在此范围内, 屋脊边缘可以完全表现出来. 本文中只分析下凹型屋脊边缘, 即灰度值相对较小的屋脊边缘.

散度 D 表征屋脊边缘在邻域 R 内的某一个方向上分布是否集中. 由于屋脊边缘在邻域

R 内的灰度分布是有起有落的,若灰度值较小的像素点在某方向上分布集中,则为下凹屋脊边缘的可能性大,否则,可能为平滑区或是阶跃边缘.将邻域 R 内所有像素点的灰度值进行排序,得到 $\{g^{(l)} | g^{(l)} \leq g^{(l+1)}, 0 \leq l < (2L+1) \times (2L+1)\}$,其中 $g^{(l)}$ 为排序为第 l 个的像素点灰度值,令

$$R_1 = \{(i, j) | g^{(0)} \leq g(i, j) < g^{(2L+1) \times L}\}, \quad (1)$$

$$R_2 = \{(i, j) | g^{(2L+1) \times (L-1)} \leq g(i, j) < g^{(2L+1) \times (2L+1)}\}; \quad (2)$$

式(1)(2)中 $g(i, j)$ 为坐标为 (i, j) 的像素点灰度值,经过排序之后,将邻域 R 划分为灰度值较小和灰度值较大的两个区域 R_1 和 R_2 (不包括灰度值处于中间的个点).

散度 D 定义为

$$D = \min\{d_\theta | \theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}, \quad (3)$$

$$d_\theta = \sum_{(i, j) \in R_1} |(i - m) - \tan\theta \cdot (j - n)| \quad \theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ; \quad (4)$$

其中 (m, n) 为邻域中心像素点坐标,由于过中心点的直线方程为 $y - \tan\theta \cdot x = 0$,所以 d_θ 的表达形式表示了灰度值较小的像素点(在区域 R_1 内)距离该直线的距离,即在 θ 方向上,灰度值较小的像素点坐标分散的程度.若 d_θ 在各方向上都较大,说明灰度值较小的像素点分布杂乱,为屋脊边缘的可能性小,若 d_θ 在某个方向上较小,说明灰度值较小的像素点集中分布在某个方向上,则为屋脊边缘的可能性较大.

对比度 G 表征邻域 R 内灰度变化情况,将邻域 R 按空间位置重新划分为区域 R_1^g 和 R_2^g (见图 2).

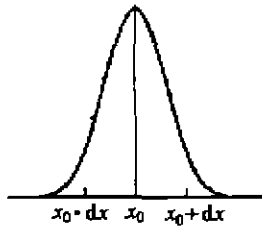


图 1 一维屋脊边缘模型

Fig. 1 One-dimensional roof edge model

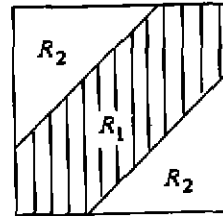


图 2 邻域划分图示

Fig. 2 Region partition example

$$R_1^g = \left\{ (i, j) \mid |(i - m) - \tan\theta \cdot (j - n)| \leq \frac{L}{2} \right\}, \quad (5)$$

$$R_2^g = \left\{ (i, j) \mid |(i - m) - \tan\theta \cdot (j - n)| > \frac{L}{2} \right\}; \quad (6)$$

式(5)(6)中, $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$. R_1^g 是在某个方向附近的区域, R_2^g 是远离该方向的区域.对比度 G 定义为

$$G = \max\{g_1^g - g_2^g | \theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}, \quad (7)$$

其中,

$$\{g_1^g = \sum_{(i, j) \in R_1^g} g(i, j), \quad g_2^g = \sum_{(i, j) \in R_2^g} g(i, j)\};$$

若邻域 R 内对比度较大,则存在屋脊边缘的可能性较大,否则可能性较小.将邻域 R 内

的散度 D 和对比度 G 同时考虑, 可以判定该邻域内存在屋脊边缘的可能性. 令 D_{\max}, G_{\max} 分别为整图中散度 D 和对比度 G 的最大值, 将散度 D 和对比度 G 归一,

$$DN = D/D_{\max}, \quad GN = G/G_{\max};$$

则当前像素所处邻域内存在边缘的可能性 P 为

$$P = \begin{cases} 1, & DN < T_1 \text{ 且 } DG > T_2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

当 $P=1$ 时, 判定存在屋脊边缘. 其中, T_1, T_2 为判定阈值, 取 $T_1=0.6, T_2=0.2$. 由于对散度 D 和对比度 G 进行了归一, 因此邻域大小 L 的取值对 T_1, T_2 没有影响.

2 检测屋脊边缘的滤波尺度范围

我们选用三次 B 样条函数 $B^3(x)$ 作为平滑函数 $\theta(x)$ ^[3], 滤波函数取为平滑函数 $\theta(x)$ 的一阶导数 $\Psi(x)$, 即小波函数. 其支集长度为 $[-w/2, w/2]$, $w=3$. 对于信号 f , 在尺度 s 下的小波变换为

$$Wf(s, x) = \Psi_s * f(x) = \frac{1}{s} \theta\left(\frac{x}{s}\right) * f(x). \quad (9)$$

检测屋脊边缘和阶跃边缘的区别在于对图像进行滤波之后, 屋脊边缘对应着滤波结果的过零点, 而阶跃边缘对应着滤波结果的局部模极大.

定义 (过零点) 若 x_0 为信号 $f(x)$ 的边缘点, 则 x_0 为小波变换 (9) 的过零点, 即要求

$$W_s f(x_0) = 0, \quad \text{且 } \frac{\partial}{\partial x} W_s f(x_0) \neq 0.$$

判断屋脊边缘时, 首先需要判断图像中的过零点, 屋脊边缘点是所有过零点的子集. 在 3×3 邻域内分析 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 四个方向滤波结果的正负性. 若存在任一方向的过零, 则判定当前像素点为过零点. 过零点并不是最后的边缘点, 因此判断过零点之后需要进一步利用上述的屋脊边缘可能性 P 来分析真正的边缘点. 方向滤波的结果可以由水平滤波和垂直滤波结果进行插值得到^[4]. 假设原图像为 $f(x, y)$, 小波变换之后的水平、垂直分量分别为 W^1, W^2 , 在方向 α 上进行插值, 得到 α 方向上的方向滤波结果为^[4]:

$$W_s^\alpha = W_s^1 \cos \alpha + W_s^2 \sin \alpha, \quad \alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ. \quad (10)$$

由前面的分析知道, 判定屋脊边缘是根据屋脊可能性度量 P 来确定的, 当 $P=1$ 时, 是屋脊边缘, 此时的滤波尺度参数应为可以检测出屋脊边缘的最小尺度 s_0 ; 当 $P=0$ 时, 是平滑区, 此时的滤波尺度参数应为可以抑制噪声的大尺度 s_{\max} , 我们取 $s_{\max} = 2^4$.

我们分析一维情况下检测方波型屋脊边缘所需的最小尺度 s_0 和准确定位边缘的最大尺度 s_1 , 滤波尺度在 $[s_0, s_1]$ 范围内时, 可以检测并准确定位屋脊边缘.

2.1 检测屋脊边缘的最小尺度 s_0

假设屋脊边缘的模型为 $f(x) = A[u(x+d/2) - u(x-d/2)]$, 其中 d 为屋脊边缘的宽

度, A 为屋脊边缘的强度. $f(x)$ 在尺度 s 下的小波变换 $W_s f(x)$ 为:

$$W_s f(x) = f(x) * \Psi_s(x) = A \left\{ \theta \left[\left(x + \frac{d}{2} \right) / s \right] - \theta \left[\left(x - \frac{d}{2} \right) / s \right] \right\}, \quad (11)$$

屋脊边缘 $f(x)$ 定位在 $x_0=0$ 处, 若在 $x_0=0$ 处存在过零点, 则 $W_s f(0)=0$ 且 $W_s f'(0) \neq 0$. 由于 $\theta(x)$ 是偶函数, $\Psi(x)$ 是奇函数, 则有

$$W_s f(0) = A \left[\theta \left(\frac{d}{2s} \right) - \theta \left(-\frac{d}{2s} \right) \right] = 0, \quad (12)$$

$$\frac{d}{dx} W_s f(x) \Big|_{x=0} = \frac{A}{s} \left[\Psi \left(\frac{d}{2s} \right) - \Psi \left(-\frac{d}{2s} \right) \right] = \frac{2A}{s} \Psi \left(\frac{d}{2s} \right). \quad (13)$$

当 $\frac{d}{2s} < \frac{W}{2}$ 时, $W_s f(0) \neq 0$, 在 $x_0=0$ 处存在过零点, 屋脊边缘可以检测出来. 即检测宽度为 d 的屋脊边缘的最小尺度 $s_0 = [d/w]$, 其中 $[\cdot]$ 为上取整函数.

2.2 准确定位边缘的最大尺度 s_1

假设相邻两个屋脊边缘的距离为 d , 为了简化问题, 我们假设屋脊边缘为脉冲信号, 其模型为 $f(x) = \delta(x+d/2) + \delta(x-d/2)$, 在尺度 s 下的小波变换 $W_s f(x)$ 为:

$$W_s f(x) = \frac{1}{s} \left\{ \Psi \left[\left(x + \frac{d}{2} \right) / s \right] + \Psi \left[\left(x - \frac{d}{2} \right) / s \right] \right\}, \quad (14)$$

屋脊边缘 $f(x)$ 定位在 $x = \pm d/2$ 处, 在 $x = -d/2$ 处展开 $W_s f(x)$, 略去无穷小量, 则

$$W_s f(x) \approx \frac{1}{s} \left[\Psi(0) + \Psi'(0) \left(x + \frac{d}{2} \right) + \Psi \left(-\frac{d}{s} \right) + \Psi' \left(-\frac{d}{s} \right) \left(x + \frac{d}{2} \right) \right], \quad (15)$$

其过零点 x_0 使式(15)为 0, 考虑到 $\Psi(0)=0$, 则 x_0 为

$$x_0 = \frac{-\Psi(-d/s)}{\Psi'(0) + \Psi'(-d/s)} - \frac{d}{2}, \quad (16)$$

当 $\frac{d}{s} > \frac{w}{2}$ 时, $x_0 = -\frac{d}{2}$, 即 $s < \frac{2d}{w}$ 时, 在 $x = \pm d/2$ 时可以准确定位边缘.

若屋脊边缘不是脉冲型, 而是经过高斯函数磨光的, 这时边缘 $f(x)$ 定义为理想边缘 $e(x)$ 与 Gauss 函数 g_σ 的卷积:

$$f(x) = e(x) * g_\sigma(x)$$

当尺度为 s 的滤波函数去检测边缘 $f(x)$ 时, 相当于用更大尺度的滤波函数进行检测, 即

$$W_s f(x) = e(x) * g_\sigma(x) * \Psi_s(x) \approx e(x) * \Psi_{s_1}(x) \quad (17)$$

式(17)中 $s_1 \approx \sqrt{\sigma^2 + s^2}$, 即 $s < \sqrt{(2d/w)^2 - \sigma^2}$ 时, 在 $x = \pm \frac{d}{2}$ 处可以准确定位边缘.

准确定位屋脊边缘的最大滤波尺度为 $s_1 = [\sqrt{(2d/w)^2 - \sigma^2}]$, 其中 $[\cdot]$ 为下取整函数.

3 实验结果

分析原图像, 得到屋脊边缘可能存在的区域, 在这些区域选取适应于相应屋脊边缘宽度

的合适滤波尺度进行滤波,进而检测到相应的边缘;对于没有屋脊边缘存在的区域,使用可以抑制噪声的大尺度 s_{\max} 滤波.将上述方法应用于集成电路版图显微图像,(见图 3(a)和图 3(b)),图 3(c)和图 3(d)分别是相应的边缘检测结果.该图像是大规模集成电路的一部分,其中大部分边缘为屋脊边缘,边缘的宽度大约为 $d_1=3$,边缘之间的最近宽度一般为 $d_2=5$,所以检测到屋脊边缘的最小尺度 $s_0=1$,准确定位的最大尺度 $s_1=2$.

本文算法从概念上可以分成两步来完成:(1)分析原图像中屋脊边缘的参数,即散度 D 和对比度 G ;(2)样条小波滤波.与单尺度 Canny 算子^[2]相比,多第一步运算.经程序优化后,对 256×256 图像在 Pentium166 微机上计算,本文算法得到边缘结果的时间均在 10s 以内.

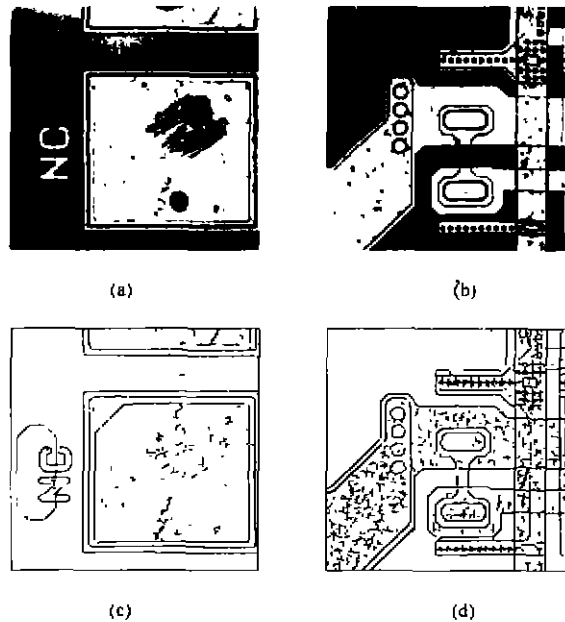


图 3 集成电路版图显微图像及屋脊边缘检测结果
(a)集成电路版图显微图像 (b)集成电路版图显微图像
(c)图(a)的检测结果 (d)图(b)的检测结果

Fig. 3 Micrographs of Integrated circuit board and roof edge detection results
(a) micrograph of integrated circuit board, (b) micrograph of integrated circuit board,
(c) detection result of Fig. 3(a), (d) detection result of Fig. 3(b)

4 结语

在工业图像检测中,屋脊边缘检测是必不可少的.由于屋脊边缘本身的特点,在判断屋脊边缘存在的可能性及相应的滤波尺度参数的选择上,都不同于阶跃边缘的情况.本文提出了一种屋脊边缘多尺度检测方法,首先从原图像中分析散度和对比度两个参数来表征屋脊边缘存在的可能性,同时分析了不同宽度屋脊边缘所需要的最小滤波尺度以及准确定位边缘的最大滤波尺度,进而根据屋脊边缘存在的可能性自适应调整滤波尺度参数,得到了较好的检测结果.实验分析表明该方法是可行的,同时具有较好的抗噪声能力.

REFERENCES

- 1 Marr D, Hildreth E C. *in Proc. Roy. Soc.*, 1980, **B207**:187~217
- 2 Canny J. *IEEE Trans. PAMI.*, 1986, **8**(6):679~698
- 3 Mallat S, Zhong S. *IEEE Trans. PAMI*, 1992, **14**(9):710~732
- 4 Freeman W T, Adelson E H. *IEEE Trans. PAMI.*, 1991, **13**(9):891~906
- 5 LIANG K H, Tjahjadi T, Yang Y H. *Pattern Recognition*, 1997, **30**(5):719~728

MULTISCALE ROOF EDGE DETECTION IN INDUSTRY IMAGE

YANG Xuan LIANG De-Qun

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract A new multiscale roof edge detection method was presented based on roof edge features, which are analyzed in source image, and the scales of wavelet transformation are adjusted by these features. The roof edge detection method as well as how to choose the filter scales was discussed. This method was proved to be effective by experiment results.

Key words edge detection, roof edge, wavelet transformation.