

文章编号 1004-924X(2015)01-0271-11

用于线纹显微图像的边缘检测算法

余金栋^{1,2}, 张宪民^{1*}

- (1. 华南理工大学 广东省精密装备与制造技术实验室, 广东 广州 510640;
2. 广东建设职业技术学院, 广东 广州 510440)

摘要:为了在简化计算的同时达到较高的定位精度,提出一种轴向邻域和差边缘检测算法,用于低信噪比、缓慢过渡的线纹显微图像的边缘检测。首先,结合显微图像采集系统的配置,分析了线纹显微图像边缘灰度轮廓特征和基于导数的边缘检测算法的不足。然后,基于方向信息测度,定义了轴向邻域和差运算,依据矩不变理论推导出轴向邻域和差边缘检测算法。实验结果表明:轴向邻域和差边缘检测算法能够适应不同分辨率的显微图像,具有较强的抗噪能力和较高的定位精度,边缘检测效果优于基于导数的算法。该算法用于显微图像时,其边缘坐标定位方差为 0.57 pixel,微米级线条宽度的测量结果与扫描电子显微镜的测量结果(1.35 μm)相差 0.17 μm ,基本满足了测量精度的要求。

关键词:显微图像;边缘检测;矩不变理论;方向信息测度;轴向邻域和差

中图分类号:TH742;TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152301.0271

Edge detection algorithm for lines on microscopic image

Yu Jin-dong^{1,2}, Zhang Xian-min^{1*}

- (1. Guangdong Province Key Laboratory of Precision Equipment and Manufacturing Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Guangdong Construction Vocational Technology Institute, Guangzhou 510440, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangxm@scut.edu.cn

Abstract: To simplify computation and to achieve higher positioning accuracy, a Sum and Difference of Neighborhoods along Axis (SDNAA) algorithm was proposed to implement the edge detection of a microscopic image with a lower signal-to-noise ratio and lower transition. Firstly, characteristics of gray profile of the line microscopic image was analyzed and the inadequacy of derivative based edge detection was analyzed according to the configuration of the microscope imaging system. Then, the computation was defined for the SDNAA algorithm based on the orientation information measure, and the SDNAA edge detection algorithm was derived according to the moment invariant theory. Experimental results indicate that the SDNAA algorithm adapts to different resolution images. It has strong anti-noise ability and high positioning accuracy, which is superior to that of the derivative based edge detection algorithm. Using the algorithm for microscopic images with low signal-to-noise ratio and low contrast, the variance of located edge coordinates is 0.57 pixel, and the measurement

收稿日期:2014-08-20;修订日期:2014-10-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 91223201, No. 50825504);国家自然科学基金-广东省联合基金资助项目(No. U0934004);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2012ZP0004)

result of micro line width deviates from that of SEM ($1.35 \mu\text{m}$) by $0.17 \mu\text{m}$, which reaches the expected precision.

Key words: microscopic image; edge detection; moment invariant; orientation information measure; Sum and Difference of Neighborhoods along Axis(SDNAA)

1 引 言

微、纳测量是获取机电系统零件尺寸,实现微、纳米尺度制造质量控制的必要手段。用于微尺寸测量的主要方法有扫描电子显微镜(SEM)、扫描探针显微镜(SPM)、干涉显微镜、高精度轮廓仪、光电坐标机(CMM-Opt)等,这些方法的测量范围和精度各不相同。对于亚微米级至毫米级的机械量和几何量,辅以精密机械移动的显微视觉测量方法是目前最具前景的测量手段之一^[1]。文献[2-4]基于干涉显微测量技术,结合相移技术和PZT垂直扫描系统构建了微结构表面形貌测量系统,可以达到亚微米级横向分辨率和纳米级纵向分辨率,水平测量范围达几百微米,垂直测量范围达到几十微米。干涉显微测量技术虽然具有较高的分辨率,但是系统光路复杂,对机械定位精度要求高,其应用受到一定的限制。利用显微摄影测量和计算机视觉技术从显微图像中提取精确的空间信息,可从相对较大的视场中获取几何信息,具有测量范围广、非接触、一次测量获取数据量大等优点,便于制造自动化和管理信息集成化,在半导体制造和精密定位领域有着广泛的应用价值^[5-7],文献[8]采用405 nm激光光源搭建显微测量系统,实现了对道间距为 $1.6 \mu\text{m}$ 的光盘磁道进行成像和测量。文献[9]运用消卷积技术对数字显微图像进行处理,实现了对宽度为 $19.8 \sim 55.13 \mu\text{m}$ 的接骨钢板上的划痕进行测量。

线宽测量的关键是沿着线纹中线的垂直方向找到像素灰度突变的点作为边缘点,然后计算边缘点之间的距离。然而,不同于宏观图像,在显微镜下微结构的微观形貌边缘由于受光学衍射及成像系统点扩展函数的影响会变得模糊不清,边缘正交方向像素点序列的灰度轮廓不是阶跃型,而是一种缓慢变化的屋顶状,同时光学显微镜的放大作用使图像的信噪比较低,噪声干扰严重^[10]。宏观图像的边缘检测算法基于导数运算,定位精度低,难以适应显微图像边缘定位^[11]。而且这些

算法具有定域性(局部性)和敏感性(无界性),在抗噪声干扰方面效果不理想^[12]。为此,文献[13-15]在边缘过渡区建立多项式回归模型,然后运用导数运算检测不同工艺加工件的边缘,达到了较高的检测精度。不过,该方法需要采用不同工艺加工件的样本进行神经网络训练建立过渡区,从而加大了运算量。文献[16]指出,对具有高斯白噪声的图像,边缘检测的关键在于判断噪声点与边缘点,从人类视觉识别特征的角度看,边缘点相对噪声点的主要差异体现在边缘点序列的几何位置有序而且可连接成线,而噪声点随机、无序、无方向性。文献[17]根据这个概念定义了区域一致性测度计算公式以判断像素点所处的区域是平滑区还是边缘区。基于区域一致性测度的概念,文献[18]定义了方向信息测度的计算公式,并用于像素分类、噪声滤除和边缘检测。在此之后,文献[19-21]提出了各种基于方向信息测度的边缘检测方法,这些方法均需要对每个像素点的邻域沿着区间 $[0^\circ, 180^\circ]$ 内以一定步距划分的每个角度方向进行计算方差,得到方向信息测度后确定像素点的性质,计算量较大。为了在简化计算的同时达到较高的定位精度,本文沿着微结构线纹的中轴线方向取邻域,提出一种轴向邻域和差边缘检测算法,用于低信噪比、缓慢过渡的微结构显微图像边缘检测。

2 线纹显微图像边缘特征分析

2.1 显微图像采集系统的组成

显微摄影测量是通过显微镜和CCD相机拍摄微观形貌结构,利用图像处理软件提取图像特征点和还原物体结构的几何量信息。计算机微视觉测量系统如图1所示,由光源、显微镜、图像采集卡、精密定位载物台和工控机构成。显微镜由物镜、变焦变倍镜筒(ZOOM透镜组)、分光镜组成,其中分光镜用于引入同轴光源,使光线沿光轴照射到样本表面。若采用50倍物镜,数值孔径为0.55,调节ZOOM达到最大倍数时,系统的总放

大倍数标定为 78 倍。CCD 的分辨率为 1 200 行、1 500 列,像元间距为 4.4 μm ,由此计算得到显微成像的视场宽度约为 85 μm 、高为 68 μm ,像素代表的实际距离约为 56.2 nm。由于显微镜的光学成像系统点扩展函数的降晰影响,系统分辨率并不是像素所代表的实际距离,应根据瑞丽距离计算实际距离。若采用波长为 0.435 μm 的蓝光光源,则分辨率为 0.482 μm ,对于宽度、间距为 1 μm 左右的线纹,上述分辨率符合测量线宽的设计要求。

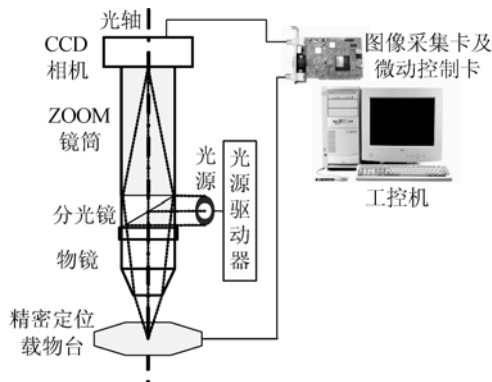


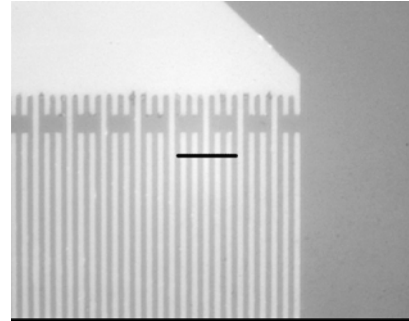
图 1 计算机显微视觉测量系统的组成

Fig. 1 Components of measuring system for computer microscopic image

2.2 线纹像素灰度轮廓特点

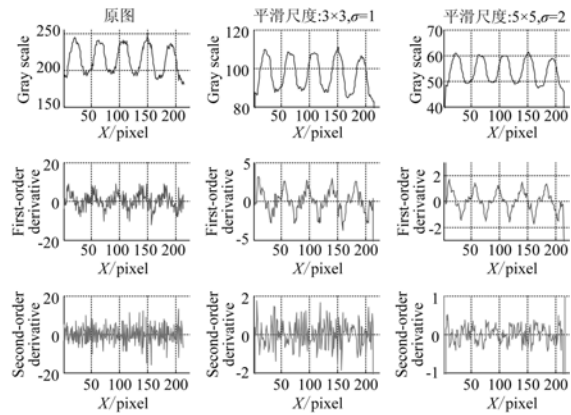
为了观察线纹显微图像的边缘灰度轮廓特征,对图 2(a)所示的放大 78 倍的光刻掩模板的显微图像,采用基于导数的边缘检测算法进行分析,图 2(b)是其处理结果,左侧第一列是图 2(a)画线部分的像素灰度轮廓曲线及其一、二阶导数。从像素灰度轮廓曲线可见,线纹的边缘不是阶跃型,而是呈屋脊状缓慢过渡,含有大量的噪声。基于一阶导数极值的边缘检测算法需要设定边缘梯度阈值,对于灰度跳变幅度不同的边缘,导数差别较大,噪声干扰使阈值选取困难。较小的阈值导致边缘重复,还有可能把噪声点误判为边缘点,较大的阈值则会导致边缘漏检。基于二阶导数过零点的边缘检测算法,如 Laplace 算子,以二阶导数的过零点检测边缘点,同样不能区分噪声点。LOG 算子采用高斯核对图像卷积平滑,2(b)第二列、第三列分别是采用参数为 $3 \times 3, \sigma=1$ 和 $5 \times 5, \sigma=2$ 的高斯模板的平滑结果,可见随着平滑因子 σ 增大,线纹像素灰度轮廓曲线变得平滑,一阶导数的极值点和二阶导数的过零点与边缘点的对

应也变得明确。但是,LOG 算法在抑制噪声的同时也改变了边缘像素的灰度值,将导致边缘细节模糊,从而降低边缘的定位精度。



(a) 光刻掩模线纹的显微图像

(a) Microscopic image of photomask lines



(b) 像素灰度轮廓曲线及其微分

(b) Gray profiles of pixels and their derivatives

图 2 光刻掩模板的像素灰度轮廓

Fig. 2 Gray profiles of pixels on photomask

3 轴向邻域和差边缘检测方法

3.1 区域一致性测度与方向信息测度

区域一致性测度^[17]定义中心像素点 (i_c, j_c) 的长度为 L 的邻域为:

$$R = \{(i, j) \mid |i - i_c| \leq L, |j - j_c| \leq L\}, \quad (1)$$

其中:过中心点 (i_c, j_c) 的方向为 θ 的直线 l 将 R 划分为两半 R_1 和 R_2 ,如图 3 所示,令:

$$\begin{cases} s_{R_1} = \sum_{(i,j) \in R_1} g_{ij} \\ s_{R_2} = \sum_{(i,j) \in R_2} g_{ij} \\ d_\theta = s_{R_1} - s_{R_2} \end{cases}, \quad (2)$$

其中: g_{ij} 是邻域内像素点 (i, j) 的灰度值。 l 绕 (i_c, j_c) 从 0° 旋转到 180° , 得到方向为 θ_k 的 N 个

划分,每一次划分得到一个和差 d_{θ_k} , $k=1,2,\dots,N$ 。定义最大和差为:

$$u_R = \max_k d_{\theta_k} \quad (k=1,2,\dots,N), \quad (3)$$

则 u_R 的值反映区域内像素特征的一致性,也就是存在边缘的可能性。当 (i_c, j_c) 处于含有噪声的平坦区域时,由于噪声方向信息随机,无论 l 沿哪个方向, d_{θ} 的值都较小;对于处于边缘上的像素点,因为 R_1 和 R_2 是具有不同灰度分布的两个区域,当 θ_k 与边缘方向重合时 d_{θ_k} 的值最大,而其它方向的 d_{θ_k} 值都较小。

更进一步,文献[18]定义方向信息测度的计算公式如下:

$$M_{ij} = \max_{0^\circ \leq \theta_k < 180^\circ} |d_{\theta_k}| - \min_{0^\circ \leq \theta_k < 180^\circ} |d_{\theta_k}|. \quad (4)$$

当 θ_k 与边缘方向重合时 d_{θ_k} 取得最大值,当 θ_k 与边缘方向垂直时 d_{θ_k} 取得最小值,因此 M_{ij} 反映了像素点的方向信息。

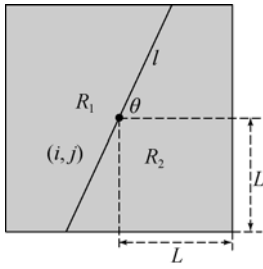


图 3 区域一致性测度的邻域

Fig. 3 Neighborhood for region homogeneity measure

$$R(x_c, y_c) = \iint_{(x_c-h, y_c-v) \in \text{Neig}(x, y)} f(x_c-h, y_c-v) g(h, v) dh dv. \quad (6)$$

卷积邻域的宽和高均取 $2w+1$ 个像素,与线纹宽度接近,定义为:

$$\text{Neig}(x_c, y_c) = \{((x, y)) \mid x \in (x_c - w, x_c + w), y \in (y_c - w, y_c + w)\}. \quad (7)$$

高斯核函数形式为:

$$G(h, v) = \lambda \exp\left[-\frac{h^2 + v^2}{c^2}\right], \quad (8)$$

其中: h 和 v 分别表示高斯函数的水平和垂直方向坐标;参数 c 表示尺度因子,为了使卷积后的图像变成光滑的屋脊状,其值约为 w 的四分之一。参数 λ 起归一化作用,使 $G(h, v)$ 满足:

$$\iint_{-w \leq h \leq w, -w \leq v \leq w} G(h, v) dh dv = 1. \quad (9)$$

依据灰度矩的定义,卷积得到的屋脊状线纹的 $p+q$ 阶矩计算公式为:

3.2 轴向邻域和差边缘检测算法设计

利用公式(3)在方向区间 $\theta \in [0^\circ, 180^\circ)$ 内的多个方向上进行计算、比较、搜索以确定最大和差值,并将其作为区域一致性测度,再利用式(4)在方向区间内搜索最大方向信息测度以确定边缘方向信息。

光掩模板上的线纹是长条状,测量宽度时要沿着条纹中轴线的垂直方向确定两侧的边缘点。根据这一先验知识可知边缘点的方向与条纹的中轴线方向平行。因此,只要找到条纹的中轴线方向,然后沿着这个方向计算像素点的方向信息测度,就可简化计算,提高边缘检测速度。受噪声干扰,平滑滤波后的边缘定位精度降低。由于线纹的中轴线正交方向的灰度轮廓呈屋脊状对称,卷积平滑不会影响中轴线的位置,所以只要采用尺度与线纹宽度相当的高斯核与图像做卷积运算,即可使线纹中心点像素对应的卷积值最大。然后利用一阶矩和二阶矩即可求取线纹中心线的位置和方向。在线纹图像上选取包含线纹 ROI 的一段得到矩阵 F ,用高斯核函数 G 与 F 进行卷积:

$$R = F * G. \quad (5)$$

经过卷积,坐标为 (x_c, y_c) 的像素点的灰度值 $R(x_c, y_c)$ 为:

$$m_{pq}^{\text{Ridge}} = \sum_j \sum_i i^p j^q R(i, j). \quad (10)$$

根据质心的定义,可计算线纹的中心点坐标:

$$\begin{cases} \bar{x}_{\text{Ridge}} = m_{10}^{\text{Ridge}} / m_{00}^{\text{Ridge}} \\ \bar{y}_{\text{Ridge}} = m_{01}^{\text{Ridge}} / m_{00}^{\text{Ridge}} \end{cases}. \quad (11)$$

则中心距计算公式如下:

$$\mu_{pq}^{\text{Ridge}} = \sum \sum (i - \bar{x})^p (j - \bar{y})^q R(i, j). \quad (12)$$

线纹外接椭圆中轴方向的计算公式如下^[22]:

$$\theta_A = \arctan(2\mu_{11}^{\text{Ridge}} / (\mu_{20}^{\text{Ridge}} - \mu_{02}^{\text{Ridge}})). \quad (13)$$

在提取线纹中轴线时,第一步选取包含一段线纹的区域作为计算区域,第二步做高斯卷积运算,第三步计算矩不变量,以提取线纹中轴线的方向角度。

线纹的中轴线方向为 θ_A ,线纹上的每个像素点都沿着垂直于 θ_A 的方向取邻域,若两个邻域的

和差 d_{θ_A} 达到局部极大值,则该像素便是边缘点,而噪声点不具有与边缘方向相关的信息。

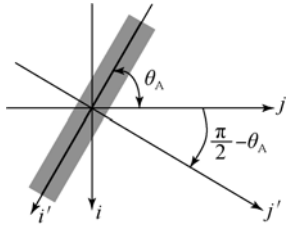


图 4 线纹图像旋转示意图

Fig. 4 Rotation diagram of line image

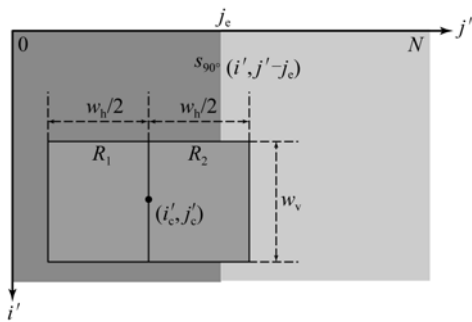


图 5 轴向邻域和差示意图

Fig. 5 Diagram of SDNAA

如图 4 所示,将坐标系沿顺时针方向旋转 $\pi/2 - \theta_A$ 弧度,使线纹的轴线方向与新坐标系的竖直方向重合,则图像 $g(i, j)$ 旋转后变成图像 $g(i', j')$, i, i' 分别是旋转前、后像素点的行坐标, j, j' 分

别是旋转前、后像素点的列坐标,计算如下:

$$\begin{cases} j' = j \sin \theta_A + i \cos \theta_A \\ i' = i \sin \theta_A - j \cos \theta_A \end{cases} \quad (14)$$

图 5 为轴向领域的和差示意图。如图 5 所示,在旋转后的图像上取像素点 (i', j') 的左、右邻域:

$$R_1 = \{(i', j') \mid |i' - i'_c| \leq w_v, j'_c - j' \leq w_h/2\}, \quad (15)$$

$$R_2 = \{(i', j') \mid |i' - i'_c| \leq w_v, j' - j'_c \leq w_h/2\}, \quad (16)$$

其中: w_v 是邻域的高度, $w_h/2$ 是邻域的宽度。定义某当前像素点 (i'_c, j'_c) 的轴向邻域和差计算公式:

$$d_{\theta_A} = \sum_{(i', j') \in R_1} g(i', j') - \sum_{(i', j') \in R_2} g(i', j'). \quad (17)$$

设有理想的阶跃型垂直方向边缘,边缘附近像素点的灰度值为:

$$S_{90^\circ}(i', j' - j_e) = \begin{cases} G_1, 1 \leq j' < j_e \\ G_2, j_e \leq j' < N \end{cases} \quad (18)$$

其中: j_e 是边缘点的位置; G_1 和 G_2 分别代表边缘两侧区域的灰度值,且 $G_1 < G_2$; N 是沿边缘正交方向所取的像素点数,实际操作取值为线纹间距和线纹宽度包含的像素数之和。依据式(17),该边缘附近像素点的轴向邻域和差为:

$$d_{s_{90^\circ}}(i', j'_c) = \begin{cases} 0 & 1 < j'_c < j_e - \frac{w_h}{2} \\ w_v \left[\frac{w_h}{2} (G_1 - G_2) + (j_e - j'_c) (G_1 + G_2) \right] & j_e - \frac{w_h}{2} \leq j'_c < j_e \\ \frac{w_h}{2} w_v (G_1 - G_2) & j'_c = j_e \\ w_v \left[\frac{w_h}{2} (G_1 - G_2) + (j_e - j'_c) (G_1 + G_2) \right] & j_e < j'_c \leq j_e + \frac{w_h}{2} \\ 0 & j_e + \frac{w_h}{2} < j'_c < N \end{cases} \quad (19)$$

则知 $\forall \frac{w_h}{2} \in (1, j_e) \cap (1, N - j_e)$, 当 $j'_c = j_e$ 时,取得轴向邻域和差极值。需要注意的是,所取邻域宽度要小于 j_e 和 $N - j_e$ 的值,即邻域大小不能超出线纹间距区或线纹区。

上述分析表明,理想阶跃边缘的轴向邻域和差极值点就是边缘点,上跳变边缘点对应极大值,

下跳变边缘点对应极大值。假设有垂直方向的阶跃型负值边缘模型:

$$g_{90^\circ}(i, j - j_e) = \begin{cases} G_1, 1 \leq j < j_e \\ -G_2, j_e \leq j < N \end{cases} \quad (20)$$

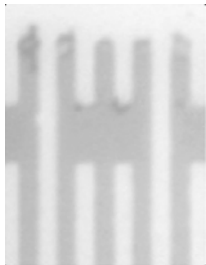
则轴向邻域和差实质上是该模型的 0 阶灰度阶矩。根据矩不变理论,实际图像中缓慢过渡的边缘与对应的阶跃型边缘的各阶灰度矩相等^[23]。

因此,理想阶跃边缘必然与实际图像的轴向邻域和差性质相同,即实际显微图像的轴向邻域和差极值点与理想阶跃边缘点位置相同。总之,线纹显微图像上 d_{0_A} 取得极值的像素点就是边缘的位置。

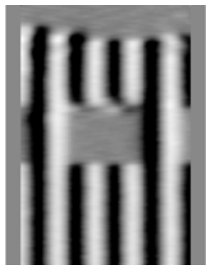
4 边缘检测实验

4.1 边缘检测效果对比

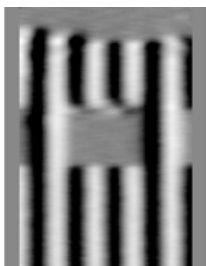
应用中值滤波算法对图 2(a)中的 ROI 图像做预处理,并对滤波前后的图像做轴向邻域和差计算,结果如图 6 所示,由图 6 可知,轴向邻域和差运算结果不会因为是否采取滤波预处理而改变结果,说明本算法具有抗噪声干扰能力。



(a)ROI 的滤波结果
(a) ROI filtering result



(b)ROI 的 SDNAA
(b) SDNAA of ROI



(c)滤波后的 SDNAA
(c) SDNAA of ROI after filtering

图 6 显微图像及其中值滤波的轴向邻域和差图

Fig. 6 SDNAAs for microscopic image and its median filtered image

由于滤波预处理会降低边缘定位精度,因此用基于导数的边缘检测算法和本文提出的算法对未经过滤波处理的原始图像做边缘检测,结果如图 7 所示, Sobel 算子、Robert 算子、Prewitt 算子、LOG 算子均存在边缘漏检或重复,而且受噪声干扰严重;Canny 算法检测的结果较好,但是存在大量由噪声引起的伪边;本文算法对于竖向边缘的检测结果优于 Canny 方法,能够较好地克服噪声的干扰,具有更好的鲁棒性。

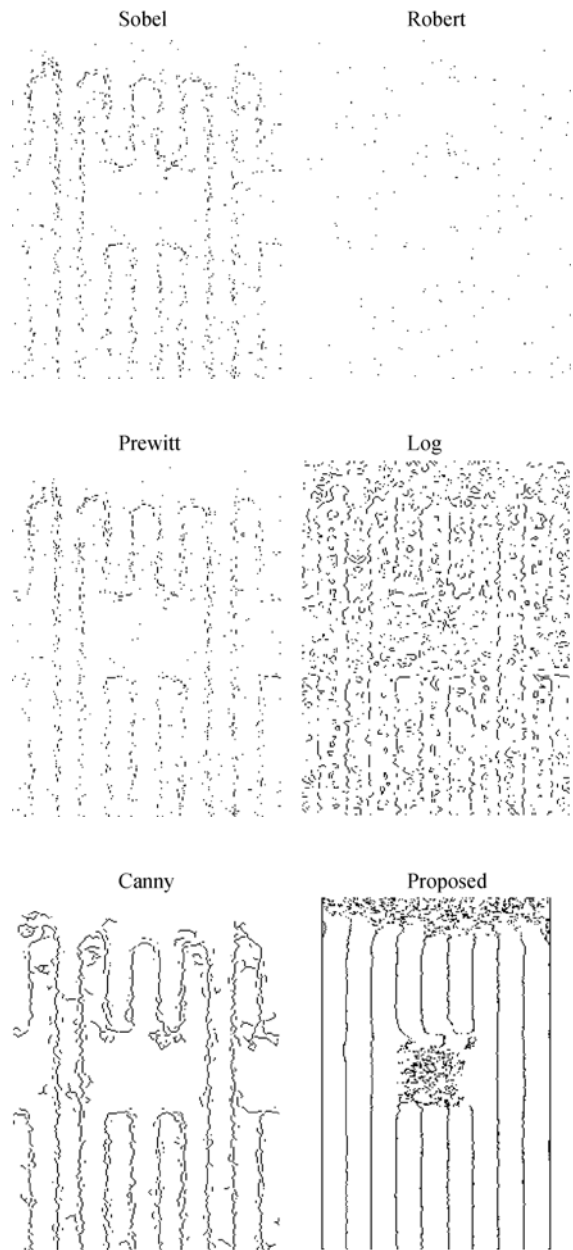
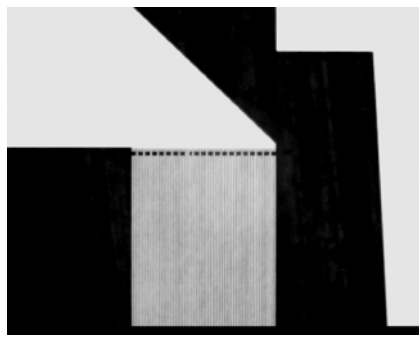


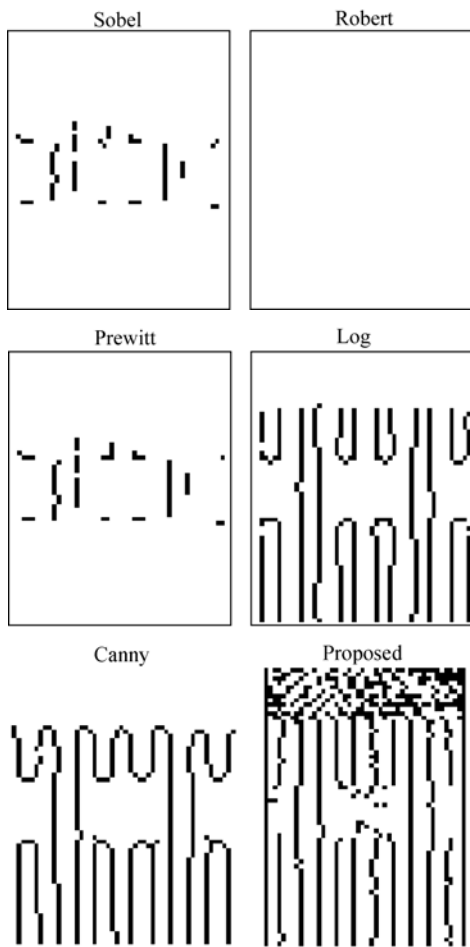
图 7 高分辨率显微图像的边缘检测结果对比

Fig. 7 Compared results of edge detection for microscopic image with high resolution



(a) 低分辨率显微图像

(a) Microscopic image with low resolution



(b) 边缘检测结果

(b) Results of edge detection

图 8 低分辨率显微图像及其边缘检测结果

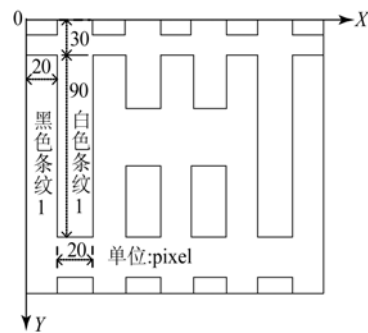
Fig. 8 Microscopic image with low resolution and its edge detection results

为了检验算法对不同分辨率的显微图像的适应能力,采用 10×物镜以总放大倍数约为 16×的显微成像系统拍摄的光刻掩模板如图 8(a)所示,可见在该放大倍数下拍摄的微结构图像分辨率较

低,每条线纹宽度仅占大约 4 pixel。应用各种算法的边缘检测结果如图 8(b)所示,由图 8(b)可见,本文算法仍能够准确检测竖向边缘,适应不同分辨率的显微图像,而基于导数的边缘检测算法因边缘对应的像素数减少而失去作用。

4.2 算法性能测试

为了定量测试轴向邻域和差边缘检测算法的精度,以贝塞尔函数模拟光学成像系统的点扩展函数(PSF)对计算机生成的人工图像进行降晰处理,图 9(a)是人工图像的微结构图,其尺寸单位为 pixel,以 56.2 nm/pixel 为像素当量,则线宽约为 1.1 μm。为了模拟低对比度的微结构图像,设置金属线条区和空白区的像素灰度值分别为 0.6 和 0.4,并添加标准差为 0.005 的高斯白噪声,得到的模拟显微图像见图 9(b)。



(a) 人工图像的微结构图

(a) Micro-structure of artificial image



(b) 模拟显微图像

(b) Simulated microscopic image

图 9 人工模拟显微图像

Fig. 9 Artificial simulated microscopic image

应用基于导数的边缘检测算法和本文提出的轴向邻域和差边缘检测算法对其进行边缘检测,结果见图 10。实验中本文算法的邻域取值为 15 pixel,可见本文算法检测效果与 Canny 方法

差不多,明显优于其它方法。为了解各种边缘定位算法的精度,观察人工模拟图像上黑色条纹 1 的右侧边缘的定位结果,所选取边缘段的坐标为 (20,48)~(20,88),各种算法的运行耗时、定位边缘点 x 坐标的平均值和方差数据如表 1 所示,由表 1 可见,本文算法的定位准确度和精度均高于基于导数的方法。

表 1 边缘检测算法性能测试

Tab. 1 Performance test of edge detection algorithms

算法	Sobel	Robert	Prewitt	LOG	Canny	本文方法
耗时/s	0.14	0.031	0.008	0.031	0.156	0.109
坐标均值 /pixel	20.16	20.42	20.36	20.89	20.31	20.07
坐标方差 /pixel	0.84	1.24	1.28	0.76	0.70	0.57

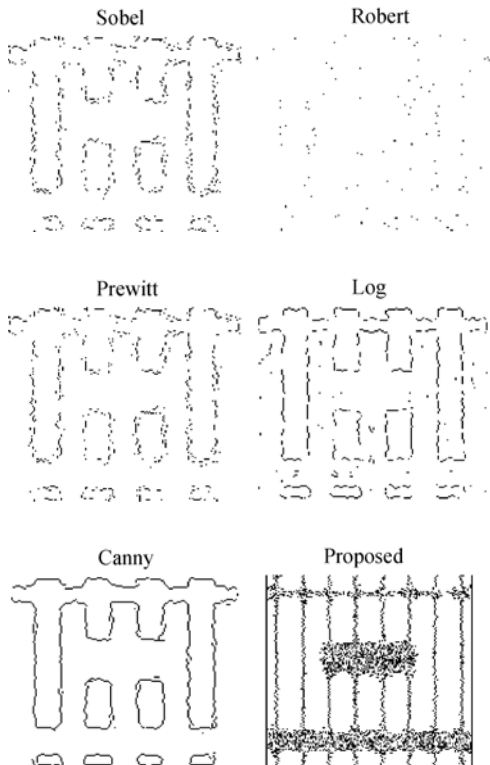
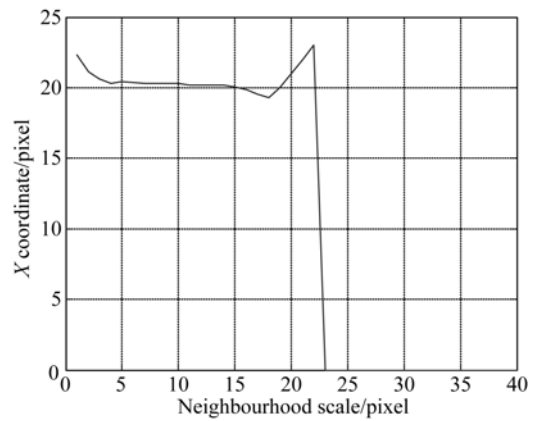


图 10 人工模拟显微图像的边缘检测结果

Fig. 10 Edge detection results for artificial simulated microscopic image

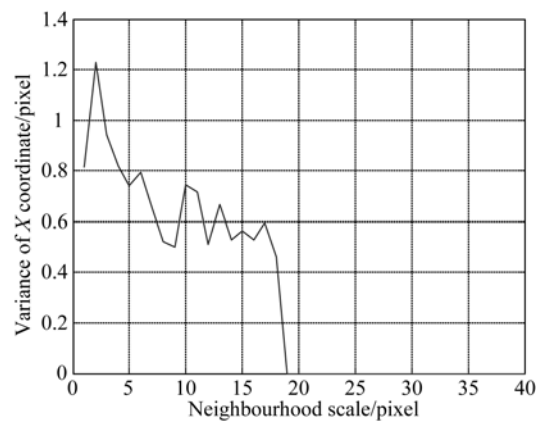
由于邻域尺度是影响算法检测精度和效率的

关键因素,采用像素数为 1~40 的邻域分别进行边缘检测、边缘段坐标均值和方差计算,同时记录每一次运算耗时,将每次计算的坐标均值、方差、耗时与邻域尺寸对应绘制成曲线,如图 11(a)~11(c)所示,结果显示:当邻域尺度小于微结构的尺寸时,边缘定位准确度高,当邻域尺度大于该尺寸时,定位误差迅速变大;定位坐标的方差随邻域尺度增大而减小,当邻域尺度接近微结构的尺寸时定位坐标的方差直线下降为零;算法耗时随邻域尺度增加而变短。综合考虑定位精度和效率,当选择邻域尺度为 19 pixel 时边缘定位精度最高,运算时间最短,该邻域尺度与微结构尺寸的设计值 20 pixel 最为接近。



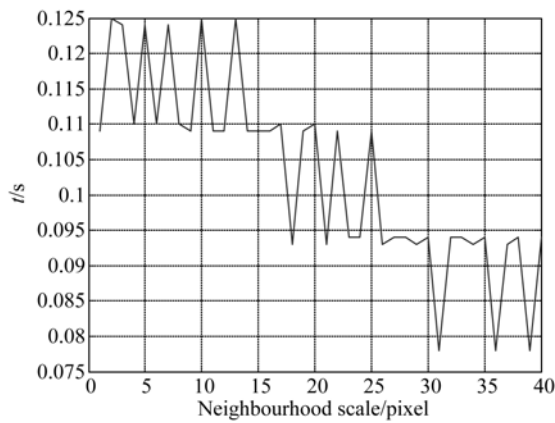
(a) 不同邻域尺寸定位的边缘坐标均值

(a) Mean value of coordinates in edge detection with different neighbourhood scales



(b) 不同邻域尺寸定位的边缘坐标方差

(b) Coordinate variance of edge detection with different neighbourhood scales



(c) 不同邻域尺寸的计算耗时

(c) Time-consuming of edge detection with different neighbourhood scales

图 11 邻域尺寸对轴向邻域和差边缘检测算法的影响

Fig. 11 Influence of neighbourhood scale on SDNAA

4.3 边缘检测算法用于线宽测量

用轴向邻域和差算法检测图 2(a)中画线部分线纹的边缘然后测量线宽,将边缘正交方向的像素灰度轮廓、轴向邻域和差绘制成曲线,并叠加本文算法和 Canny 算法检测的边缘点,结果见图 12。其中 $w_n/2$ 取值为 17 pixel,线纹的宽度为 21 pixel,测量结果为 1 180 nm。用扫描电子显微镜(SEM)测量该线纹的结果为 1 350 nm,两者相差 170 nm。除了测量方法造成的误差之外,较大程度上由于测量环境不同所致,两次测量的时间、地点不同,环境温度、湿度的差异必然导致微观形貌尺寸的变化。

参考文献:

- [1] 王向军,王峰. 显微精密成像与微型机械尺寸检测技术 [J]. 光学精密工程, 2001, 9(6): 511-513.
WANG X J, WANG F. Study of micro mechanical size inspection technology by microscope precision digital image [J]. *Opt. precision Eng.*, 2001, 9(6): 511-513. (in Chinese)
- [2] 董敬涛. Linnik 偏振白光干涉微纳测量的关键技术研究 [D]. 合肥:合肥工业大学, 2012.
DONG J T. *Key techniques of Linnik polarization-sensitive white light interferometry in Micro/Nano measurement* [D]. Hefei: Hefei University of Tech-

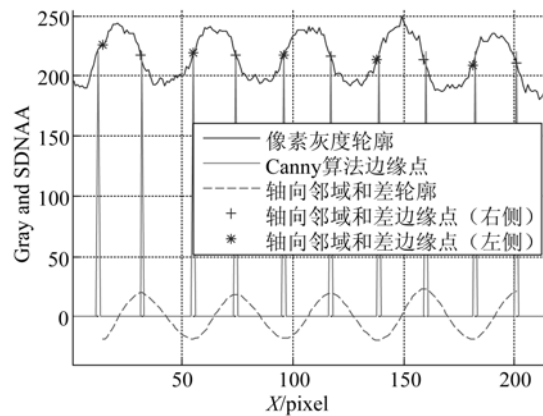


图 12 线纹宽度测量结果

Fig. 12 Edge width detection by SDNAA method

5 结 论

本文针对微米级线纹显微图像的边缘特征,分析了基于导数的边缘检测算法的不足,应用线纹的轴线方向信息设计了轴向邻域和差计算公式,基于矩不变理论导出了边缘检测算法,并给出了邻域尺度的选取要求。运用该算法对不同分辨率的显微图像进行检测,结果显示其效果和速度均优于 Canny 方法,具有较好的鲁棒性和较高的定位精度。实验结果表明:轴向邻域和差边缘检测算法具有较强的抗噪能力和较高的定位精度,对已知边缘点坐标的模拟显微图像进行定位时,其坐标均值误差为 0.07 pixel,方差为 0.57 pixel;利用该算法测量微米级线条宽度的结果与扫描电子显微镜测量结果(1.35 μm)的差为 0.17 μm ,基本满足了测量精度的要求。

nology, 2012. (in Chinese)

- [3] 李娟. 白光显微干涉表面形貌三维测量系统的研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
LI J. *A system based on white-light interference microscopy for 3-D surface topography measurement* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [4] 赵勇. 高分辨率微分移相干涉显微测量系统的研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
ZHAO Y. *Research of high-resolution measuring system based on differential phase-shifting interference microscopy* [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2012. (in Chinese)

- [5] 张宪民, 龙学俊, 林容周. 基于视觉的三自由度微动平台输入耦合研究 [J]. 振动测试与诊断, 2013, 33(1): 1-5.
ZHANG X M, LONG X J, LIN R ZH. Research on input couple of 3DOF micro positioning stage based on vision [J]. *Journal of Vibration Measurement and Diagnosis*, 2013, 33(1): 1-5. (in Chinese)
- [6] 陆毅华. 基于显微视觉导向的光掩模特征尺寸的精密测量与研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
LU Y H. *Research and precision measurement on critical dimension of photomask navigated by micro vision* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [7] 李君兰, 张大卫, 王以忠, 等. 面向 IC 封装的显微视觉定位系统 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(4): 965-972.
LI J L, ZHANG D W, WANG Y ZH, *et al.*. Micro-vision positioning systems for IC packaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 965-972. (in Chinese)
- [8] 贺锋涛, 刘佳, 王翀. 高分辨率 405 nm 激光显微测量系统 [J]. 西北工业大学学报: 自然科学版, 2011, 41(4): 603-605.
HE F T, LIU J, WANG CH. The micro-measurement system for high-resolution 405nm laser [J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2011, 41(4): 603-605. (in Chinese)
- [9] 杜华月, 顾济华, 杨勇, 等. 数字图像消卷积在显微测量中的应用 [J]. 光学技术, 2007, 33(4): 576-579.
DU H Y, GU J H, YNAG Y, *et al.*. Microscopic measurement using deconvolution of digital images [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(4): 576-579. (in Chinese)
- [10] 余金栋, 张宪民, 陈忠. 尺度优化的 Retinex 增强算法与微视觉图像增强 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2013, 41(2): 7-11.
YU J D, ZHANG X M, CHEN ZH. Retinex enhancement algorithm with scale optimization and micro vision image enhancement [J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2013, 41(2): 7-11. (in Chinese)
- [11] 杜芳. 基于显微视觉的小模数渐开线直齿轮检测方法研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2009: 37-38.
DU F. *Research on detection technology of fine-pitch involute spur gears based on micro-vision* [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009: 37-38. (in Chinese)
- [12] 王桥. 数字图像处理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 82-120.
WANG Q. *Digital Image Process* [M]. Beijing: Science Publishing House, 2009: 82-120. (in Chinese)
- [13] 张之敬, 程朋乐, 金鑫, 等. 具有统计特征的微小零件边缘识别技术 [J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(3): 231-234.
ZHANG ZH J, CHENG P L, JIN X, *et al.*. Edge detection technique for micro accessory edges having statistical characters [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(3): 231-234. (in Chinese)
- [14] 张林, 张之敬, 杜芳, 等. 基于工艺匹配的微小型结构件边缘检测方法 [J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(12): 1063-1066.
ZHANG L, ZHANG ZH J, DU F, *et al.*. Processing matching principle for edge detection method of micro parts [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2009, 29(12): 1063-1066. (in Chinese)
- [15] 姜黎, 吴伟仁, 张之敬, 等. 微小型结构件显微图像边缘的自动识别 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21(1): 224-232.
JIANG L, WU W R, ZHANG ZH J, *et al.*. Automatic detection of micro image edges for micro accessories [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 224-232. (in Chinese)
- [16] 杨焯, 梁德群. 基于方向信息的多尺度边缘检测方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 1997, 24(4): 524-530.
YANG X, LIANG D Q. Multiscale edge detection based on direction information [J]. *Journal of Xidian University*, 1997, 24(4): 524-530. (in Chinese)
- [17] 杨焯, 梁德群. 基于区域一致性测度的多尺度边缘检测方法 [J]. 自动化学报, 1999, 25(6): 757-762.
YANG X, LIANG D Q. Multiscale edge detection based on region homogeneity measure [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(6): 757-762. (in Chinese)
- [18] 杨海军, 梁德群. 一种新的基于信息测度和神经网络的边缘检测方法 [J]. 电子学报, 2001, 29(1): 51-53.
YANG H J, LIANG D Q. A new method of edge detection based on information measure and neural network [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29

- (1): 51-53. (in Chinese)
- [19] 余瑞艳. 基于方向信息测度的图像边缘检测 [J]. 数学研究, 2011, 44(2): 214-218.
YU R Y. Detecting image edge based on orientation information measure [J]. *Journal of Mathematical Study*, 2011, 44(2): 214-218. (in Chinese)
- [20] 张麟兮, 王保平, 张艳宁, 等. 基于多特征和 FCM 的图像边缘检测方法 [J]. 光子学报, 2005, 34(12): 1892-1896.
ZHANG L X, WANG B P, ZHANG Y N, *et al.*. A method of image edge detection based on multiple edge features and FCM [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(12): 1892-1896. (in Chinese)
- [21] 李懿, 张运杰, 王威娜, 等. 基于方向信息测度的最小模糊度准则边缘检测 [J]. 模糊系统与数学, 2007, 21(3): 143-151.
LI Y, ZHANG Y J, WANG W N, *et al.*. Minimum fuzzy rules edge detection based on orientation information measure [J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2007, 21(3): 143-151. (in Chinese)
- [22] HU M K. Visual pattern recognition by moment invariants [J]. *IRE Transactions on Information Theory*, 1962, 8(2): 179-187.
- [23] LYVERS E P, MITCHELL O R, AKEY M L, *et al.*. Subpixel measurements using a moment-based edge operator [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(12): 1293-1309.

作者简介:



余金栋(1977—),男,河南邓州人,博士研究生,2007年于华南理工大学获得硕士学位,现任教于广东建设职业技术学院,于华南理工大学机械与汽车工程学院在职攻读博士学位,主要从事显微视觉检测方面的研究。E-mail: yujindong@gdcvi.net

导师简介:



张宪民(1964—),男,河北涿州人,博士,教授,博士生导师,1993年于北京航空航天大学机电系获得工学博士学位,主要研究方向为机构学,精密装备技术等。E-mail: zhangxm@scut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)