

文章编号 1004-924X(2017)05-1340-08

光学显微线条纹图像中心线提取

李 海, 张宪民*, 黄沿江, 单译琳

(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)

摘要: 由于接近光学衍射极限, 微米尺度线条纹在经过高倍显微镜放大成像后边缘通常都很模糊, 加上同轴光源产生的光照不均匀现象, 成像质量通常很差。为了有效测量微米尺度线条纹间距, 本文提出了一种针对光学显微线条纹图像的中心线提取算法。首先, 采用 Retinex 方法对原图像进行增强, 以克服由光照不均匀所造成的无法准确分割的问题。接着, 使用 Ostu 最佳阈值对图像进行二值分割。然后, 针对分割后条纹边缘含有大量毛刺和凹陷的现象, 使用基于快速步进算法的边缘塌陷法对中心线进行准确提取。最后, 对提取中心线进行了最小二乘拟合。实验结果表明: 本文提出的方法可以有效实现微米尺度线条纹光学显微图像中心线的准确提取。使用本方法对标准宽度线条纹间距进行实测的最大测量偏差小于 2%。

关键词: 显微图像; 线条纹; 中心线提取; 快速步进法; Retinex; 边界塌陷

中图分类号: TP394.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172505.1340

Centerline extraction of stripe imaged by optical microscope

LI Hai, ZHANG Xian-min*, HUANG Yan-jiang, SHAN Yi-lin

(GuangDong Province Key Laboratory of Precision Equipment and Manufacturing Technology,
South China Univ. of Tech., Guangzhou 510641, China)

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

Abstract: Due to the proximity of the optical diffracting limitation, the edges of the stripes in micrometer scale are blurred after magnification by the optical microscope. Together with the uneven illumination caused by coaxial lighting source, the stripe image quality is very poor. To effectively measure the stripe distance between two stripes in micrometer scale, a centerline extraction algorithm was proposed. First, a single scale Retinex model was adopted to enhance the original image to overcome inaccurate segmentation caused by uneven illumination. After that, binary segmentation was conducted on the enhanced image via optimal threshold value of Ostu. Then, directing at the phenomenon that there was much rag and hollow at the boundary of stripes after segmentation, a boundary collapse method based on fast marching algorithm was utilized to extract centerline accurately. Finally, least square fitting method was conducted to fit the extracted centerlines. Experimental results show that the proposed method can effectively realize accurate extraction of stripe centerline in microscopic image with micrometer scale; the maximum measured deviation of this method is less than 2% when it is used for measuring stripe distance between two stripes with standard width.

Key words: microscopic image; stripes; centerline extraction; fast marching method; retinex; boundary collapse

收稿日期: 2016-09-29; 修订日期: 2016-11-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. U1501247, No. 51605166, No. 1609206); 广东省科技计划资助项目 (No. 201604010100, No. 2015B020239001)

1 引言

在微纳制造与微纳测量领域,常会出现微米、亚微米尺度的线条纹,如用于集成电路(Integrated Circuit, IC)制造的光刻掩模板^[1],用于测量光学显微镜分辨率的测试板^[2],以及计算光学用于计算复原图案的条纹间隙等^[3]。结合显微镜和计算机视觉的显微测量系统,由于具有无接触,低成本,测量范围大等优点,被广泛应用于微尺度几何尺寸测量^[4-5]。对于线条纹显微图像而言,测量目标往往为条纹宽度。然而,在微观尺度下,微结构的边缘易受到光学衍射以及成像系统点扩散函数的影响而变得模糊不清,因此直接提取线条边缘具有很大难度^[6-7]。当条纹分布均匀时,可以将对线宽的直接测量转换为评估两条纹中心线之间的距离,从而将较困难的边缘检测问题转变为条纹中心线的提取问题。除此之外,在显微镜分辨率评估以及显微镜标定等过程中,也需要对条纹图的中心线进行提取。

当前常用的中心线提取方法主要集中在对激光条纹图的处理^[8],这些方案可以分为以下四种。第一种是基于边缘检测的方法,这种方法首先提取出被测对象边缘,然后根据检测出的边缘,再结合其他相关算法计算出其几何中心线,如文献[9-10]等。该类方法在边缘无噪声情况下有很高的精度。第二种是以形态学处理方法为基础的方案,如形态学细化和形态学骨架提取,如文献[11-12]所述。这类方法需要以无噪声的二值图像为基础,当二值图像边缘有毛刺时容易出现误检测。第三种是以灰度重心法为基础的方法,通过对图像逐行或者逐列扫描来实现中心线的计算,如文献[13-15]所述。该方法对细长图像有较好的效果,但通常要求被测线的倾斜角度不能过大。第四种以灰度梯度法为基础,通过设计特殊检测算子对激光条纹上灰度的梯度变化进行筛选和处理,如文献[16-18]所述。该类方法适用于中心亮边缘暗的细长型激光条纹图像,对于长宽比相对较小且条纹亮度分布相对均匀的显微线条纹并不适合。综上可知,已有条纹中心线提取方法在待定环境下都能取得较好效果,然而对于含有大量噪声和光照不均匀的显微线条纹图都有一定的局限性。

为了准确提取微米尺度显微条纹图像的中心线,本文提出了一种新的中心线提取方法。该方法首先采用 Retinex 模型^[6,19]对光照不均匀显微图像进行增强,接着对增强的图像进行二值分割。然后使用基于快速步进算法的边界塌陷法对二值图像中心线进行提取。最后采用最小二乘法对中心线进行高精度拟合,进而由得到的直线方程计算和评估条纹间距。

2 图像预处理

2.1 基于 Retinex 的显微图像增强

由于成像过程中使用了同轴点光源,微米尺度线条纹显微图像往往存在光照不均匀现象,加上衍射带来的噪声,条纹边缘非常模糊,如图1(a)和1(b)所示,图1条纹图的条纹宽度约为 $1.4\ \mu\text{m}$ 。对原图直接采用最佳阈值分割时效果往往较差。为了正确分割出条纹,必须对图像进行预处理。针对显微图像,常用的增强方法有带通滤波、同态滤波以及 Retinex 等。文献[6]对这几种方法进行了对比研究,证明了基于 Retinex 的光照模型在处理显微图像时具有较好的效果。

Retinex 光照模型由 Land 等提出^[19-20],其核心观点如下:人眼之所以能够在光照变化的环境下感知被观察物的细节,是因为人眼对被观察物的亮度和色彩感受来自于与物体自身材料相关的反射分量,与入射光照分量无关。根据 Retinex 模型,物体表面光强函数可由下式表示:

$$i(x, y) = r(x, y) \cdot l(x, y), \quad (1)$$

其中: $i(x, y)$ 表示观察到的物体表面总光强,对应于相机拍摄到的灰度值; $r(x, y)$ 代表物体表面反射光强度; $l(x, y)$ 表示入射光强分量。图像增强的过程即为求解光强中反射分量 $r(x, y)$ 。对公式(1)两端取对数,并移项可得到下式:

$$\ln r(x, y) = \ln(i(x, y) / l(x, y)). \quad (2)$$

由式(2)可知,求解反射分量需要首先得到入射分量。由文献[6]可知,入射光强分量可以通过局部光强平均值获得,通常通过选取效果较好的高斯卷积核对原图像进行卷积实现,也即:

$$l(x, y) = i(x, y) * g(x, y), \quad (3)$$

其中: $g(x, y) = \lambda \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right]$,代表高斯卷积核。 λ 代表平滑系数,可以用于控制滤波后图像

的整体强度; σ 代表高斯尺度参数, 可用于控制卷积核的平滑效果。

结合公式(1)(2)(3), 通过选取合适的高斯核参数后, 得到如图 1(c)所示的滤波结果。图 1(d)代表原图通过高斯卷积所得的入射分量图。由入射分量图可知不均匀分量已成功去除。

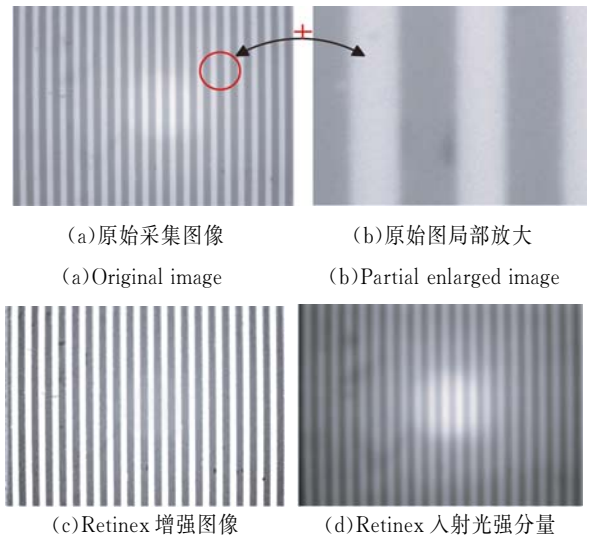


图 1 线条纹显微图像及 Retinex 增强效果图

Fig. 1 Source image of microscopic stripe image and image after Retinex enhancement

2.2 最佳阈值分割

对原图进行增强后, 接下来使用 Otsu 全局阈值法^[21]对图像进行二值分割, 结果如图 2 所示。从图中可以发现, 对未增强原图直接进行阈值分割会导致分割失败(如图 2(a)), 而对增强图像的分割则取得了较好的结果(如图 2(b))。

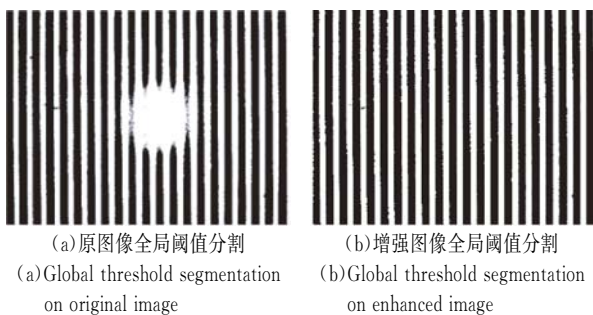


图 2 全局最佳阈值分割结果图

Fig. 2 Optimal global threshold segmentation results

通过 2.1 部分的介绍可知, 造成图 2(a)分割失败的原因是图像中心区域光照不均匀, 这是成像系统使用同轴点光源导致的。在采用 Retinex 方法增强后, 不均匀入射光照分量被去除, 使得整个图像的亮度变得均匀, 因此可以使用全局最佳阈值分割进行处理。

3 边缘塌陷中心线提取

3.1 水平集与距离变换

水平集方法最早由 Osher 和 Sethian 提出^[22], 用于研究边界曲线的连续演化。假设平面上一条闭合曲线 C 将平面分为曲线内部区域 Ω^{in} 和曲线外部区域 Ω^{out} 两部分, 曲线以速度 F 沿着其正交反方向移动。该方法的目标是追踪曲线 C 随时间演化的运动界面。

水平集方法通过定义一个高维隐函数 Γ 来描述 t 时刻边界位置, 该隐函数的零水平集表示当前边界满足的方程, 即 $\Gamma(x, y, t) = 0$ 。可选符号距离函数作为高维隐函数, 如图 3(a)所示。由图 3 可知, 不同高度的矩形曲线代表不同时刻隐函数的零水平集。假设边界曲线上某点随时间运动的坐标为 $p(t) = (x(t), y(t))$, 则其必然满足下述方程:

$$\Gamma(p(t), t) = 0. \quad (4)$$

对上式进行关于 t 的偏微分求导可得:

$$\Gamma_t + \Gamma_p \cdot \frac{dp}{dt} = 0. \quad (5)$$

当曲线以速度 F 沿曲线正交反方向运动时, 由式(5)可推导得到:

$$\Gamma_t - F|\nabla\Gamma| = 0. \quad (6)$$

该式是 Γ 关于时间 t 和位置 $p(x, y)$ 的偏微分方程, 通过求解该方程即可得到边界在不同时刻下的演化曲线。

距离变换是计算并标识空间点对目标点距离的过程, 广泛用于图像处理中的骨架化提取与模式识别等^[23]。根据使用距离函数的不同, 可将二值图像距离变换分为欧式距离变换和非欧式距离变换两类。在二值图像 I 中, 称逻辑值为零的像素点为背景 φ , 逻辑值为 1 的像素点为前景 φ^c , 此时距离变换的数学定义如下:

$$\mathbf{D}(p) = \min\{d(p, q) \mid q \in \varphi^c, p \in \varphi\}, \quad (7)$$

其中: p, q 表示图像 I 中的像素点, 矩阵 $\mathbf{D}(p)$ 称为距离变换矩阵。

图 3(b)表示原始边界曲线在匀速向内传播的过程中不同时刻的边界曲线。由于为匀速且速度大小为 1,因此不同传播时刻界面所在点的坐标变化代表了该点到边界的最近距离。通过求解方程(6)可以得到以 $t=0$ 时刻边界为外边缘的二值目标距离变换。

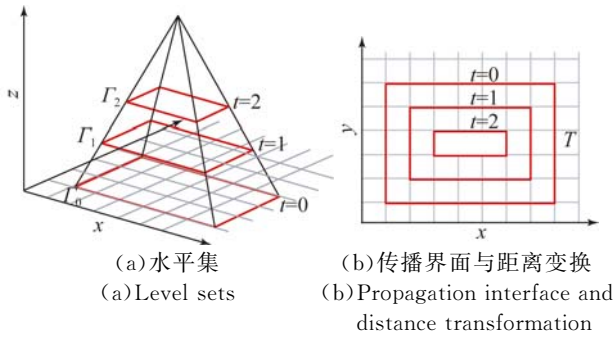


图 3 水平集与距离变换

Fig. 3 Level sets and distance transformation

3.2 快速步进法及其改进方法

当边界曲线匀速传播时,为了追踪边界不同时刻下的方程,可以通过计算边界到达每一点 $p(x, y)$ 的时间 $T(x, y)$ 来实现^[22]。由速度时间距离关系可得下式:

$$F = \frac{dp}{dT}, \quad (8)$$

也即:

$$F \frac{dT}{dp} = F |\nabla T| = 1. \quad (9)$$

当 $F=1$,也即边界以单位速度匀速传播时,方程(9)变为 Eikonal 方程,即:

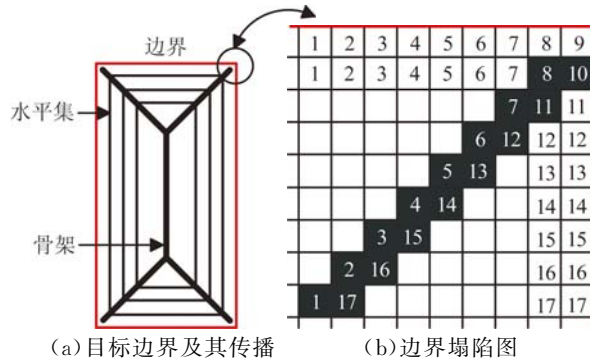
$$|\nabla T| = 1, \quad (10)$$

边界条件为 $T(\Gamma_0) = 0$ 。

对于二值图像来说,由于经过均匀离散后,传播速度为 1,所以通过求解方程(10)所得时间值 $T(x, y)$ 即表示初始边界区域内任一点 $P(x, y)$ 到目标初始边界的欧式距离。通过快速步进法以及迎风算法,可将求解方程(10)归结为求解以下离散方程:

$$\begin{aligned} & \max(D^{-x}T, -D^{+x}T, 0)^2 + \\ & \max(D^{-y}T, -D^{+y}T, 0)^2 = 1, \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $D^{-x}T = T(i, j) - T(i-1, j)$, $D^{+x}T = T(i+1, j) - T(i, j)$, y 轴类似。限于篇幅,具体离散求解过程不再赘述。



(a) Boundary of rectangle target and its evolution fronts (b) Image for boundary collapse

图 4 边界塌陷法原理示意图;

Fig. 4 Schematic diagram of boundary collapse method

通过快速步进法求得 T 后,便得到了图像的距离变换矩阵,通常对距离变换矩阵进行极大值检测处理,便可得到中心线,但极大值检测在数值上具有一定的不稳定性,尤其是当边缘含有大量毛刺时,将会使得极大值检测变得极其困难。文献[24]提出一种改进方法,用于快速有效地提取出骨架线,其原理如图 4 所示,具体如下:使用快速步进算法求解方程(10)时,在初始化过程对原始边界的所有像素点进行顺序编码;在进行循环步进求解过程中,记录这些边界点所到过的地方。当边界传播停止时,这些编码边界点的传播轨迹便可形成边界塌陷图,如图 4(b)所示。编码的边界点相遇的地方被称为塌陷边界(图中黑色像素点区域),也就是目标的骨架线位置。对边界塌陷图进行微分运算则可方便获取塌陷边界,去除非塌陷边界区域。通过对微分运算后的图像进行阈值分割,就可以方便地提取出想要的塌陷边界,剔除虚假分支。经过阈值分割后,骨架宽度常常大于 1 pixel,此时通过对分割后的细长目标进行形态学细化便可以得到单像素宽的中心线。

3.3 最小二乘法中心线拟合

通过上述步骤,可以提取出线条纹中心线,且不包含虚假分支。为了满足测量应用的需求,可以对提取出的中心线进行直线拟合,以方便测量中心线之间的距离。

假设提取后的图像中有 N 条直线,则可通过连通域分析,筛选出不同所直线包含的像素点坐标。由最小二乘法拟合出每条中心线在图像坐标系下的方程。得到直线方程后可使用点到直线距离公式求取任意两条直线直接的平均图像距离,

使用图像距离乘以显微镜像素当量即可获取任意两条中心线之间的物理距离。

4 实验与分析

本文实验所用设备为实验室配置的显微视觉测量系统,如图 5 所示。通过 $50\times$ 显微镜头和 Zoom 镜筒的放大作用,系统的总放大倍数为 83.25 倍;视场大小为 $86\ \mu\text{m} \times 65\ \mu\text{m}$;所用电脑处理器为酷睿 i-5,主频为 3.2 GHz;软件平台为 Matlab。第一个实验用于对比分析常用中心提取算法在提取微米级线条纹图时的不同效果,图像源自于光刻掩模板,线条纹宽度约为 $1.4\ \mu\text{m}$ 。第二个实验用于仿真分析本文算法在处理边缘含有大量噪声的图像时的定位精度,图像为计算机模拟生成的。第三个实验用于测量标准宽度的线对板,被测对象为朗奇刻线测试板。



图 5 显微测量实验设备图

Fig. 5 Experiment setups of micro-vision measurement system

4.1 中心线提取算法的对比实验

几种常用的中心提取算法的结果如图 6 所示,其中图 6(a)为经过 Retinex 增强和二值分割后的条纹图中剪切出的部分区域,由图 6(a)可知,经过预处理后的二值图像边缘含有大量毛刺。图 6(b)~6(d)分别为使用骨架化方法,形态学细化方法以及本文中采用的边界塌陷法所得结果图。由结果可知,常用的形态学处理方法在处理边缘含有大量毛刺线条纹图像时往往会产生大量的虚假结果,且条纹短边顶端会产生分叉。分析原因如下:当边缘有较大凸起或凹陷时,形态学算子会把毛刺当做较大的分支,此时单一条纹变成了含有很多分支的多边复杂体,因此这些分

支的骨架线也被提取并保留下来,造成虚假分支。因此常用形态学方法不适合用于提取边缘受到严重污染的显微条纹中心线。

为了评估文中边缘塌陷法的效率,对上述 3 种不同中心线提取方法的耗时进行了统计,结果如表 1 所示。可以看出,本文方法相对于其他方法耗时较多,尤其是图片分辨率增加时。这是由于本文使用了快速步进算法,该算法将中心线问题转化为求解离散微分方程问题,这一过程需要对处理图像进行多次循环扫描,且与图片中条纹数量正相关。但总耗时小于 1 s,所以本文方法仍可以满足对实时性要求不高的测量场合。

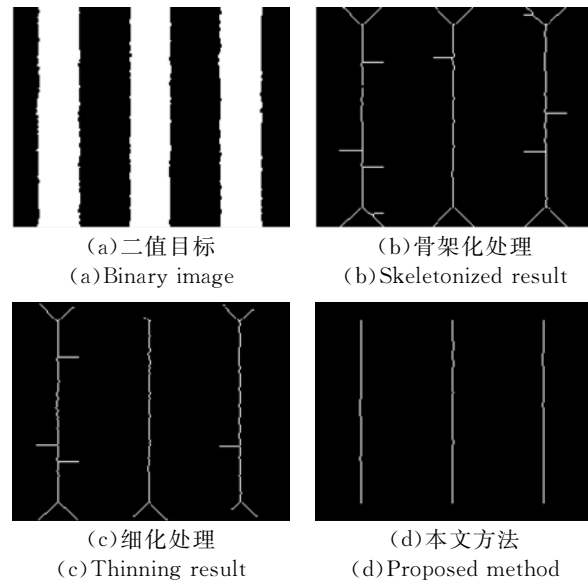


图 6 不同中心线提取方法结果对比图

Fig. 6 Extracted centerline results by different methods

表 1 运行时间对比

Tab. 1 Comparison of running times (s)

编号	分辨率	条纹数量	骨架化	细化	本文方法
1	50×100	1	0.009	0.026	0.125
2	100×100	2	0.009	0.026	0.175
2	200×100	3	0.011	0.027	0.358
3	300×100	4	0.011	0.028	0.556
4	400×100	5	0.015	0.027	0.824

4.2 中心线提取算法鲁棒性测试

使用光学显微镜对微米级条纹进行成像时,成像质量随条纹宽度的减小而降低。这是由于随

着条纹宽度不断逼近光学衍射极限,来自衍射光的污染也逐渐加重。这也使得增强和分割后的二值条纹边缘的毛刺和凸凹更加严重。为了评估本文边界塌陷法在处理边缘受到严重污染的条纹的鲁棒性,采用模拟图像对算法进行测试。模拟条纹如图7(a)所示,短边长为50 pixel,长边为150 pixel,图像大小为 150×100 。以图像左上角点坐标作为坐标系原点,竖直向下为 y 轴,水平向右为 x 轴,则中心线方程为 $x=50$ 。

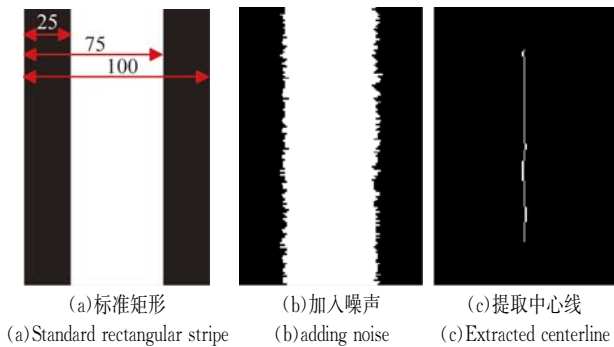


图7 算法精度测试

Fig. 7 Accuracy test of proposed algorithm

为了模拟边缘严重污染的条纹图案,对模拟生成的标准矩形条纹的长边加入高斯噪声。具体操作如下:(1)记录矩形条纹左边缘和右边缘图像坐标,根据左边缘和右边缘的纵向长度,使用Matlab系统Random函数生成两组与左右边缘长度相同的服从高斯分布的随机数组,其中高斯随机数均值为0,标准差为1;(2)将生成的高斯随机数组与左右边缘横坐标相加,作为新的左右边缘横坐标;(3)按行对图像进行扫描,将横坐标处于新的左右边缘横坐标范围内的点置为1,其他点置为0。生成的边缘高斯噪声图像如图7(b)所示。使用文中提出的边缘塌陷法对图7(b)所示模拟图像进行中心线提取,通过设置合适导数阈值,可以得到如图7(c)所示结果。

对图7(c)中点进行直线拟合,可得直线方程为: $y=0.006x+49.54$ 。由于 x 轴取值都在50附近,且 x 轴比例系数为0.006,因此其对 y 轴的影响小于0.3 pixel,可以忽略。此时拟合方程为 $y=49.54$,与理论值偏差小于1 pixel,因此可以证明本算法在边界存在严重污染时仍然能够保证所提取中心线的准确性,具有很高的鲁棒性。

4.3 标准线对测量实验

为了评估本文方法的实际测量精度,采用如图5所示的微视觉系统对具有标准线宽的朗奇刻线进行测量。本实验中所用的含有不同线宽朗奇刻线的测试板为来自于THORLABS公司的R1L1S1P。经过标定,微视觉系统的像素当量(每像素代表的空间尺寸)为56.4 nm/pixel。实验结果如表2所示。

表2 标准线条纹中心线距离测量结果

Tab. 2 Measuring results of distance between two standard stripe pair

编号	毫米线对 (pairs · mm ⁻¹)	标准距离 /μm	测量值 /μm	测量偏差 /μm	相对误差 (100%)
1	150	6.666 7	6.551 7	-0.115 0	-1.73
2	140	7.142 9	7.064 2	-0.078 6	-1.10
3	130	7.692 3	7.665 2	0.027 2	0.35
4	120	8.333 3	8.195 1	-0.138 2	-1.66
5	110	9.090 9	9.107 4	0.016 5	0.18
6	100	10.000 0	9.945 8	-0.054 2	-0.54

由表2可知,使用本文所提方法可有效实现微米级线条纹的中心线距离测量,最大相对误差不超过2%。

5 结 论

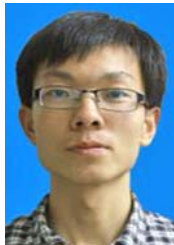
针对尺度在微米到亚微米级别线条纹经过显微放大成像后边缘严重污染,图像质量低以及光照不均匀等现象,提出一种基于快速步进法的中心线提取算法。该算法首先采用Retinex模型对图像进行增强,解决由于光照不均匀导致的无法分割问题;然后采用边缘塌陷法对分割后边缘含有大量毛刺的条纹进行中心线提取;最后对所得直线进行拟合以便于测量。实验结果说明:本文提出的算法可以实现微米级尺度线条纹的准确提取;基于快速步进法的边界塌陷法可以准确提取边缘严重污染的条纹中心线;该方法可用于评估微米尺度线条纹的间距。

参考文献:

- [1] SMITH S, TSIAMIS A, McCALLUM M, *et al.*. Comparison of measurement techniques for line-width metrology on advanced photomasks [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2009, 22(1): 72-79.
- [2] COLE R W, THIBAUT M, BAYLES C J, *et al.*. In international test results for objective lens quality, resolution, spectral accuracy and spectral separation for confocal laser scanning microscopes [J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2013, 19(6): 1653-1668.
- [3] ZHANG P, GONG W, SHEN X, *et al.*. Improving resolution by the second-order correlation of light fields [J]. *Optics Letters*, 2009, 34 (8): 1222-1224.
- [4] 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,2010:74.
LU Y H. *Research and precision measurement on critical dimension of photomask navigated by micro vision* [D]. Guangzhou: South China University of Technology,2010:74. (in Chinese)
- [5] GUO T, MA L, BIAN Y. *MEMS Characterization Based on Optical Measuring Methods* [M]. Intech Open Access Publisher,2011.
- [6] 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)
- [7] 余金栋, 张宪民. 用于线纹显微图像的边缘检测算法[J]. 光学精密工程, 2015,23(1): 271-281.
YU J D, ZHANG X M. Edge detection algorithm for lines on microscopic image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1):271-281. (in Chinese)
- [8] 李莹莹, 张志毅, 袁林. 线结构光光条中心提取综述[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50 (10): 13-22.
LI Y Y, ZHANG ZH Y, YUAN L. Survey on linear structured light stripe center extraction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 13-22. (in Chinese)
- [9] 田庆国, 葛宝臻, 李云鹏, 等. 利用轮廓线多边形表示实时提取光带中心线[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1357-1364.
TIAN Q G, GE B ZH, LI Y P, *et al.*. Real-time extraction of light stripe central line based on contour polygonal representation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6):1357-1364. (in Chinese)
- [10] 陈忠, 周德文, 张宪民. 基于改进空间矩算法的光纤纤芯轮廓特征点快速提取[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016,44(5): 117-122.
CHEN ZH, ZHOU D W, ZHANG X M. Fast extraction of feature points for contours of optical fiber cores based on improved spatial moment algorithm [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 44 (5): 117-112. (in Chinese)
- [11] GONZALEZ R C, WINTZ P. *Digital image processing* [J]. *Prentice Hall International*, 2002, 28(4): 484-486.
- [12] 魏振忠, 张广军. 结构光直光条中心线的鲁棒性自动提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(2): 244-247.
WEI ZH ZH, ZHANG G J. A robust automatic method for extracting the centric line of straight structured-light stripe [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25 (2): 244-247. (in Chinese)
- [13] 吴家勇, 王平江, 陈吉红, 等. 基于梯度重心法的线结构光中心亚像素提取方法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(7):1354-1360.
WU J Y, WANG P J, CHEN J H, *et al.*. Method of linear structured light sub-pixel center position extracting based on gradient barycenter [J]. *Journal of Image & Graphics*, 2009, 14 (7): 1354-1360. (in Chinese)
- [14] 郭奎, 熊显名. 复杂背景下蓝色线结构光中心提取方法[J]. 计算机系统应用, 2014, 23 (6): 111-117.
GUO K, XIONG X M. Method for extracting the center position of blue linear structured light in the complex background [J]. *Computer Systems & Applications*, 2014, 23(6):111-117. (in Chinese)
- [15] 曲岳, 刘艳滢, 王延杰, 等. 基于 FPGA 的光条中心线实时提取方法[J]. 液晶与显示, 2016, 31(8): 818-824.
QU Y, LIU Y Y, WANG Y J, *et al.*. Real-time extraction of light centerlines based on FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016,31(8): 818-824. (in Chinese)

- [16] 林欣堂,朱莉,张海波. 多层多道焊接结构光中心线提取[J]. 焊接学报, 2016, 37(7):105-108.
LIN X T, ZHU L, ZHANG H B. Multilayer multichannel welding structured light centerline extraction [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016,37(7):105-108. (in Chinese)
- [17] 蔡怀宇,冯召东,黄战华. 基于主成分分析的结构光条纹中心提取方法[J]. 中国激光, 2015, 42(3):270-275.
CAI H Y, FENG ZH D, HUANG ZH H. Center-line extraction of structured light stripe based on principal component analysis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 270-275. (in Chinese)
- [18] 孙军华,王恒,刘震,等. 钢轨磨耗动态测量中激光光条中心的快速提取[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3):690-696.
SUN J H, WANG H, LIU ZH, *et al.*. Rapid extraction algorithm of laser stripe center in rail wear dynamic measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(3): 690-696. (in Chinese)
- [19] LAND E H, MCCANN J J. Lightness and retinex theory [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(1): 1-11.
- [20] LAND E H. The retinex theory of color vision [J]. *Scientific American*, 1977, 237(6): 108-128.
- [21] OHTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66. (in Chinese)
- [22] SETHIAN J A. *Level Set Methods and Fast Marching Method; Evolving Interfaces in Computational Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision, and Materials Science* [M]. Cambridge University Press, 1999. (in Chinese)
- [23] 徐超,肖潇,骆燕,等. 基于距离变换的新型骨架提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(12): 2851-2856.
XU CH, XIAO X, LUO Y, *et al.*. New skeleton extraction method based on distance transform [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(12):2851-2856. (in Chinese)
- [24] TELEA A, van WIJK J J. An augmented fast marching method for computing skeletons and centerlines [J]. *Vissym Proceedings of the Symposium on Data Visualization*, 2002:251.

作者简介:



李海(1990—),男,河南南阳人,博士研究生,2013年于中国海洋大学获得学士学位,现就读于华南理工大学机械与汽车工程学院,主要从事机器视觉及精密柔顺机构的运动可视化方面的研究。E-mail:hans_haili@163.com

导师简介:



张宪民(1964—),男,河北涿州人,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,现为华南理工大学机械与汽车工程学院院长,主要从事精密柔顺机构、精密定位系统、机器视觉等方面的研究。E-mail: zhangxm@scut.edu.cn