

文章编号: 1001-3806(2016)03-0377-06

一种快速鲁棒的光学表面划痕高精度检测方法

陈少杰¹, 李柏林^{1*}, 赵文川², 熊 鹰¹, 刘甲甲¹

(1. 西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031; 2. 中国科学院 光电技术研究所, 成都 610209)

摘要: 为了提高光学零件表面划痕定位测量和宽度测量的精度, 采用基于离散正交多项式曲面拟合的亚像素边缘检测与宽度测量的算法, 通过对边缘点及其邻域进行曲面拟合代替了只对边缘点梯度方向进行曲线拟合, 实现了亚像素边缘检测; 采取感兴趣区域加速策略与基于离散正交多项式曲面方程参量快速求解方法串联进行的加速方案, 大大减少处理时间; 在宽度计算方面, 根据划痕长度自适应分段, 分别计算每段分段点之间欧氏距离并作为其宽度, 比较后取最大宽度作为划痕宽度。结果表明, 该算法测量精度较高且具有较强的鲁棒性, 同一划痕在不同视窗下测得宽度误差均值不超过 5.2%, 且标准差不超过 0.3; 在求解曲面模型参量的时间方面, 该方法计算时间约为最小二方法的 7.35%, 处理效率显著提高。该方法能够满足工程应用中快速、高精度的测量要求。

关键词: 测量与计量; 划痕检测; 曲面拟合; 亚像素边缘提取; 宽度测量

中图分类号: TP391.41 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.016

A fast, robust and precise method for measuring scratches on optical surfaces

CHEN Shaojie¹, LI Bailin¹, ZHAO Wenchuan², XIONG Ying¹, LIU Jiajia¹

(1. College of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: In order to improve location and width measurement precision of optical surface scratches, a sub-pixel edge detection algorithm based on discrete orthogonal polynomial surface fitting was proposed. Sub-pixel edge detection was realized by fitting the edge points and their neighborhood into surfaces instead of by curve fitting only in the gradient direction of the edge points. By using the acceleration strategy of the region of interest and the method of fast solving surface equation parameters based on discrete orthogonal polynomial, the processing time was greatly reduced. In terms of width calculation, the Euclidean distance of each section was calculated after the scratch was divided into a series of small segments adaptively and then the maximum width was the width of scratch. The experimental results show that the proposed method has high accuracy and strong robustness. Mean error of width is less than 5.2% and standard deviation of width is less than 0.3 of the same scratches measured under different visual windows by this algorithm. In terms of processing time to solve the surface model parameter, the processing time of acceleration strategy is 7.35% of the least square method and is greatly reduced. This method can meet the requirements of fast and high precision measurement in engineering application.

Key words: measurement and metrology; scratch detection; surface fitting; sub-pixel edge detection; width measurement

引 言

光学零件的表面划痕疵病是指光学零件表面细长的擦伤, 由抛光磨砂颗粒所形成^[1]。划痕的检测参量直接决定其等级评定, 其中根据《光学零件表面疵病》(GB1185-74)中关于划痕等级判断标准可知, 划痕的

宽度是划痕等级判定的首要标准, 因此, 划痕的精确定位与高精度宽度测量对于精密光学零件表面质量控制具有十分重要的意义。

随着数字图像处理技术快速发展, 基于机器视觉的方法逐步取代了传统人工检测方法以解决疵病检测问题。通过高分辨率 CCD 相机获取疵病图像, 采用数字图像处理算法, 实现划痕疵病轮廓的定位与宽度测量。目前利用阈值分割等图像处理算法提取划痕特征信息速度快, 但易受噪声及光照不均等影响, 定位精度低, 只能达到像素级精度^[2-3]。现代精密光学加工对测量精确度要求的提高, 像素级精度已经不能满足实际测量的需求, 因此需要更高精度的检测算法, 即亚像素精度的检测算法。

基金项目: 四川省科技支撑计划资助项目(2014GZ0005); 西南交通大学博士创新基金资助项目; 西南交通大学研究生创新基金资助项目(A0920502051410-3)

作者简介: 陈少杰(1990-), 男, 硕士研究生, 现主要从事机器视觉、数字图像处理方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: blii62@263.net

收稿日期: 2015-03-11; 收到修改稿日期: 2015-04-11

目前常用的亚像素精度的检测算法是基于传统边缘检测的方法来实现的,主要分为插值方法、矩方法和拟合方法等几类。插值法重复性好、计算量小,但定位精度较低^[4-7]。矩方法运算复杂度比较高、计算量普遍较大^[8-11]。拟合法分为曲线拟合法^[12-15]和曲面拟合法^[16-17]。基于曲线拟合方法是对沿梯度方向梯度值进行曲线拟合,模型简单、对边缘模糊程度不敏感且求解速度较快,但只利用了边缘点梯度方向上梯度分布信息,忽略了边缘点成像面上其它点的作用,定位精度有限。高斯曲面拟合法通过对初始边缘点邻域梯度进行曲面拟合,抗干扰能力强、定位精度高,但曲面模型参量求解复杂度高、处理耗时。

为了实现光学零件表面划痕快速、稳定的精确定位和高精度宽度测量,本文中提出了一种基于离散正交多项式曲面拟合的亚像素边缘检测算法。采取感兴趣区域加速策略与基于离散正交多项式曲面方程参量快速求解方法串联进行的加速方案,大幅缩减待处理数据量并解决了曲面模型参量求解复杂且耗时的问題,使处理效率显著提高。通过实验分析和对比,本文中的算法易于实现、抗噪声能力较强、定位和宽度测量精度高。

1 划痕粗定位与感兴趣区域选取

1.1 算法概述

传统边缘检测算法虽然速度快但定位精度有限。本文中的完整算法如图 1 所示。首先,利用 Canny 边缘检测算法得到划痕初始轮廓位置。然后,对划痕轮廓进行自适应分段,以划痕轮廓上分段点及其邻域作为感兴趣区域,再运用本文中提出的亚像素定位算法,

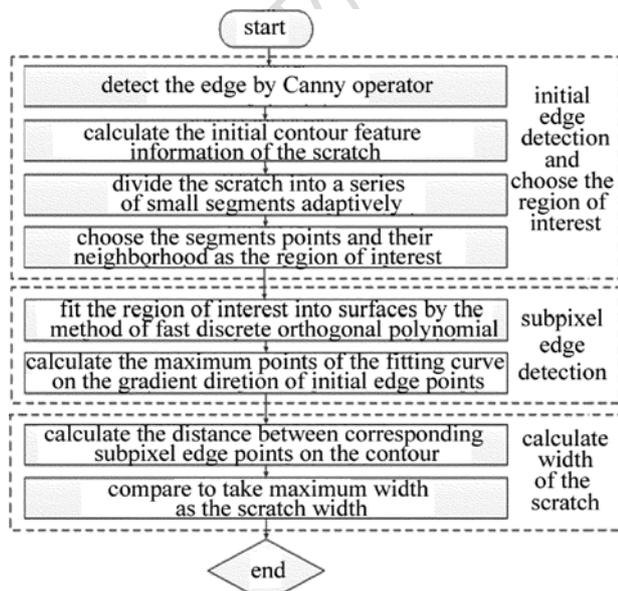


Fig. 1 Algorithm flow chart

计算每个分段点处亚像素边缘点坐标。最后,以划痕轮廓两边对应分段点处亚像素边缘点之间的欧式距离,作为该段划痕宽度。计算每段的宽度之后,比较取最大宽度作为划痕宽度。

1.2 划痕边缘提取及感兴趣区域选取

传统的边缘检测算法有 Sobel, Roberts, Prewitt 以及 Canny 等。运用 4 个边缘检测算法对划痕疵病图像进行处理,得到的结果如图 2 所示。通过对比发现, Canny 算子处理结果抗噪性能好,对噪声的抑制较高,受到光照不均等影响较小,并且边界连续,适合下一步进行亚像素边缘精确定位。因此,本文中采用 Canny 算法先对疵病图像进行处理,以提取像素级初始边缘点。

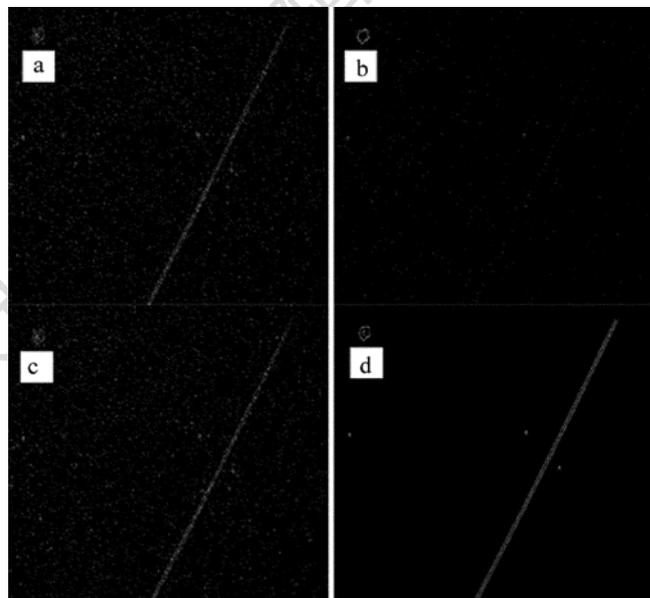


Fig. 2 Edge detection comparison of a scratch image by different edge detection operators

a—Sobel edge detection operator b—Roberts edge detection operator c—Prewitt edge detection operator d—Canny edge detection operator

为准确计算划痕的宽度,必须要得到划痕精确的边缘位置。基于划痕形状不规则的特性,对于划痕宽度的计算常用的方法是划分区段^[3]。作者通过对划痕进行自适应分段,并将分段点及其邻域作为感兴趣区域进行亚像素精确定位,计算得到了最终划痕宽度。该方法避免了对整个划痕轮廓进行精确定位,大大缩减了计算量,提高了计算速效率。

通过 Canny 边缘检测,得到划痕初始边缘位置及轮廓后,下一步进行划痕自适应分段。定义划痕周长 l_c 为划痕轮廓的连通区边界上的像素的总数目,设为 n 。由于划痕轮廓形状不一,不能通过计算划痕轮廓两端最远两点之间的欧式距离来得到其长度。但划痕是细长的,则划痕的长度 l_s 可近似看作为周长的一半,

即 $l_s = l_c/2 = n/2$ 。设划痕轮廓最小外界矩形宽度为 w 。划分的每个区段都近似被看作小的直划痕进行计算,根据划痕判断标准,必须满足区段的长宽比 $l_z/w_z \geq 4$,得到: $l_s \geq 4w_z \times N$,其中 N 为划分区段数。则可得到划痕划分的区段数近似为:

$$N \approx n/(8w) \quad (1)$$

通过对划痕进行分段得到分段点后,对每一个分段点进行编号,记为 $H_{1,1}, \dots, H_{1,N-1}$ 。以等分点 5×5 区域内像素点梯度方向概率最大的作为该等分点处的梯度方向,计算直线方程,得到另一侧边缘对应点,并记为 $H_{2,1}, \dots, H_{2,N-1}$,如图3所示,其中黑色边缘为初始轮廓,线段 AB, AD, BC, CD 所围矩形为划痕边缘最小外界矩形,黑色点为分段点。根据实际采集图像中划痕边缘位置过渡区域的宽度一般为4个到7个像素,以分段点及其 5×5 邻域作为感兴趣区域。

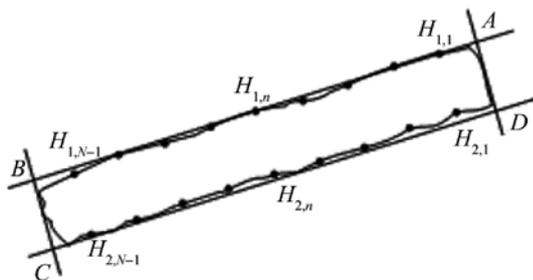


Fig. 3 The schematic diagram of the scratch division

2 划痕精确定位与宽度测量

2.1 亚像素边缘精确定位

边缘附近点即过渡区域的灰度值通常是连续分布而不垂直于边缘方向的阶跃分布。根据中心极限定理,沿某一梯度方向,边缘经光学成像后灰度变化即灰度的1阶导数近似为高斯分布,并且高斯分布的中心是在沿该梯度方向灰度变化最大的地方,即亚像素边缘位置。因此,只要求得梯度分布曲线的极值点即可得到亚像素边缘坐标。

梯度图像是离散的点,直接将离散点拟合成高斯曲线,计算复杂,并且难以进行。由于高斯曲线方程经过等式两边同时取对数后近似为抛物线,通过二次曲线来近似高斯曲线,求出极值点,即为亚像素边缘点坐标,不仅误差较小,还可显著提高计算效率。若直接对边缘点处沿梯度方向的梯度值进行曲线拟合,忽略了边缘点成像面上的其它点的作用而导致定位精度不高。为充分利用边缘点局部图像的灰度分布信息,同时达到对图像平滑的作用,减少噪声的影响,以实现划痕高精度定位,本文中采取曲面拟合的方法,即将感兴趣区域像素梯度的对数值拟合成二次曲面,得到感兴趣区域曲面模型,再通过所拟合的曲面模型得到二次

曲线方程。通过最小二乘法拟合曲面方程,计算复杂度高且耗时。为实现快速亚像素边缘检测,本文中采用离散正交多项式作曲面最佳拟合。

设 $P = \{p_1(x, y), p_2(x, y), \dots, p_N(x, y)\}$ 是定义在 $S = X \times Y$ 上的2维离散正交多项式集合,则2维离散正交多项式一般形式可表示为:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^N K_i p_i(x, y) \quad (2)$$

式中, $X = \{-i, -i+1, \dots, 0, \dots, i\}$, $Y = \{-j, -j+1, \dots, 0, \dots, j\}$, i 和 j 为正整数, $K_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 为拟合系数。

对于2维曲面函数参数 K_i 的求解,可利用最小二乘法,通过使目标函数 ε 最小计算得到:

$$\varepsilon = \sum_{(x,y) \in S} [G(x, y) - F(x, y)]^2 \quad (3)$$

式中, $G(x, y)$ 为 $(x, y) \in S$ 处的梯度值。

由使目标函数 ε 最小的极值条件以及基函数的正交性可得:

$$K_i = \frac{\sum_{(x,y) \in S} p_i(x, y) G(x, y)}{\sum_{(x,y) \in S} p_i^2(x, y)} \quad (4)$$

(4)式表明,曲面参数 K_i 可对图像 $G(x, y)$ 经过模板运算得到。其中,模板大小为区域 S 的范围,综合考虑划痕边缘位置过渡区域的宽度、处理效率以及精度的因素, S 的尺寸取为 5×5 。

设 $R = \{M_0(x), M_1(x), \dots, M_n(x), \dots, M_N(x)\}$, $Q = \{N_0(y), N_1(y), \dots, N_m(y), \dots, N_M(y)\}$, 是分别定义在 X 和 Y 上的1维离散正交多项式集合,由于2维离散正交多项式基集可以由2个1维离散正交多项式集张量积构造,令 $p_i = M_n(x) N_m(y)$ 。

故(4)式中2维卷积核可分解为2个1维卷积核,使算法的复杂度显著降低,即:

$$K_i = \frac{\sum_{(x,y) \in S} p_i(x, y) G(x, y)}{\sum_{(x,y) \in S} p_i^2(x, y)} = \frac{\sum_{y=-j}^j \sum_{x=-i}^i M_n(x) N_m(y) G(x, y)}{\sum_{y=-j}^j \sum_{x=-i}^i M_n^2(x) N_m^2(y)} = \frac{\sum_{x=-i}^i M_n(x)}{\sum_{x=-i}^i M_n^2(x)} \cdot \frac{\sum_{y=-j}^j N_m(y) G(x, y)}{\sum_{y=-j}^j N_m^2(y)} \quad (5)$$

由(5)式可见,曲面参数 K_i 可通过2个1维模板与图像 $G(x, y)$ 经过卷积得到,即对图像 $G(x, y)$ 分别经过 x 和 y 两个方向模板进行卷积。其中,与像素 $(x,$

y) 相对的两个方向上的模板权因子分别通过下式计算得到:

$$\begin{cases} \omega_i(x,y) = \frac{\sum_{x=-i}^i M_n(x)}{\sum_{x=-i}^i M_n^2(x)} \\ \omega_j(x,y) = \frac{\sum_{y=-j}^j N_m(y)}{\sum_{y=-j}^j N_m^2(y)} \end{cases} \quad (6)$$

则:

$$K_i = \omega_i \omega_j G(x,y) \quad (7)$$

Chebyshev 多项式是一种经典的正交多项式族,采用 2 个 1 维离散切比雪夫多项式集合构造本文中曲面模型。1 维情况下,前两次 Chebyshev 多项式构成的集合为 $\{1, r, r^2 - 2\}$, 该正交基函数集合经过张量积运算并忽略高于两次的多项式,得到曲面模型函数:

$$F(x,y) = k_1 + k_2x + k_3y + k_4(x^2 - 2) + k_5xy + k_6(y^2 - 2) \quad (8)$$

可简化为:

$$F(x,y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 \quad (9)$$

式中,

$$a_1 = k_1 - 2k_4 - 2k_6 \quad (10)$$

通过两个方向模板,计算每一个感兴趣区域曲面模型系数 $a_i (i = 1, 2 \dots, 5, 6)$ 的值后,以初始边缘点为中心,建立极坐标系,将 $x = \rho \cos \theta, y = \rho \sin \theta$ 代入所得的曲面函数里,其中 θ 为边缘点处梯度方向,得到在梯度方向上曲线方程:

$$F(\rho) = a_1 + a_2 \rho \cos \theta + a_3 \rho \sin \theta + a_4 \rho^2 \cos^2 \theta + a_5 \rho^2 \cos \theta \sin \theta + a_6 \rho^2 \sin^2 \theta \quad (11)$$

通过对这个方程求梯度方向极大值,即可得到感兴趣区域亚像素边缘点的位置:

$$\begin{cases} x_i = x + \rho \cos \theta \\ y_j = y + \rho \sin \theta \end{cases} \quad (12)$$

2.2 划痕宽度计算

通过上述亚像素边缘点的计算方法,计算 $H_{1,1 \dots N-1}$ 与 $H_{2,1 \dots N-1}$ 共 $2N - 2$ 个像素点的亚像素坐标。设第 n 段处一侧亚像素边缘点坐标 $(m_{1,n}, n_{1,n})$, 对应另一侧亚像素边缘点坐标为 $(m_{2,n}, n_{2,n})$, 并以对应点之间欧氏距离作为该段划痕宽度近似值,即为:

$$W_n = \sqrt{(m_{1,n} - m_{2,n})^2 + (n_{1,n} - n_{2,n})^2} \quad (13)$$

记录划痕在各个分段点处宽度值,比较取最大值作为实际划痕宽度。

3 实验结果和分析

3.1 鲁棒性实验

由于 CCD 相机在采集图像过程中会出现渐晕现象,得到的图像灰度分布不均,中心偏亮,四周偏暗,导致当划痕处于图像边缘位置时,划痕边缘与邻域对比度不明显。造成即使是同一划痕,在不同视场下边缘模糊程度不同,给划痕的定位及宽度测量造成了一定困难。传统的图像分割算法很容易受到边缘过渡区域影响,所以测得的宽度误差较大,造成划痕的识别、分类及等级评定的不确定性。拟合法利用曲线或曲面拟合方法,得到初始边缘点梯度方向上的梯度曲线,以曲线顶点坐标即灰度变化最大的地方,作为边缘的亚像素坐标,对边缘模糊程度不敏感。为验证本文中算法的稳定性,对同一划痕的共同区域在不同视场下的 4 幅图像进行实验,原图如图 4 所示,其中白色框选区域为宽度计算区域,得到结果如表 1 和表 2 所示。

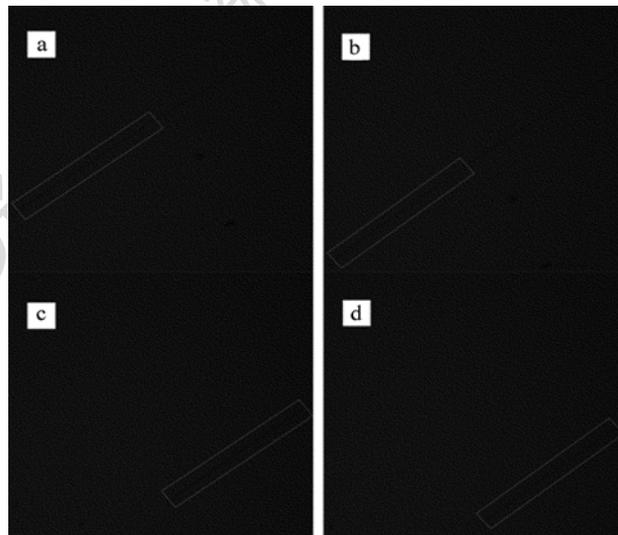


Fig. 4 The common area under different field of views of the same scratch

Table 1 Comparison of the results of each section point of the common area with three algorithms

section point	algorithms	results of the four scratch images/pixel				standard deviation
		1	2	3	4	
1	curve fitting	5.684	6.570	6.137	7.103	0.606
	least squares surface fitting	6.217	6.139	6.011	6.695	0.298
	our algorithm	6.362	6.211	5.913	6.534	0.263
...						
6	curve fitting	7.785	7.871	7.142	8.203	0.443
	least squares surface fitting	7.317	7.139	7.182	7.593	0.205
	our algorithm	7.415	7.219	7.152	7.643	0.220
...						
9	curve fitting	6.581	6.803	6.810	7.586	0.440
	least squares surface fitting	6.804	7.091	6.804	7.222	0.210
	our algorithm	6.713	7.174	6.974	7.157	0.214

Table 2 Comparison of the results of the common area with four algorithms

algorithms	results of the four scratch images/pixel				average error compared with calibration value	standard deviation
	1	2	3	4		
calibration value	7	7	7	7		
threshold segmentation	10.274	12.359	9.7288	10.493	53.05%	1.143
curve fitting	7.785	7.871	7.142	8.203	10.75%	0.443
least squares surface fitting	7.317	7.139	7.182	7.593	4.75%	0.205
our algorithm	7.415	7.219	7.152	7.643	5.10%	0.220

通过计算得到 4 幅图像共同区域划痕长度及其最小外接矩形宽度,并依据本文中自适应分段原则,将 4 幅图像共同区域中划痕分为 9 段,表 1 中显示了部分结果。实验结果表明,曲线拟合精度较曲面拟合精度高,一定程度上受到噪声干扰,而曲面拟合对噪声不敏感,鲁棒性较好。

Table 3 Comparison of the processing time through least square method and our algorithm

elapsed time of different algorithms/s	scratch image							average elapsed time /s
	1	2	3	...	28	29	30	
our algorithm	0.016	0.015	0.016	...	0.016	0.015	0.016	0.016
least square method	0.187	0.203	0.265	...	0.266	0.250	0.219	0.217
average ratio of elapsed time	1 : 13.6							

通过实验结果对比可知,本文中算法时间较最小二乘法时间大大降低,时间比达到了 1 : 13.6,验证了本文中算法的有效性。

4 结 论

以光学零件表面划痕疵病图像为例,针对目前划痕定位和宽度测量精度较低的问题,在 Canny 边缘检测基础上,提出一种基于离散正交多项式曲面拟合的亚像素边缘检测与宽度测量算法。该算法根据划痕长度自适应分段,以分段点及其邻域作为感兴趣区域进行曲面拟合,充分利用了边缘点局部图像的灰度分布信息,同时达到对图像平滑的作用,减少了噪声的影响,改进了只对梯度方向进行曲线拟合的方法,提高了边缘点定位及宽度测量精度;针对曲面模型参量求解过程复杂且耗时的问题,采取感兴趣区域加速策略与基于离散正交多项式曲面方程参量快速求解方法串联进行的加速方案,其计算时间约为最小二乘法的 7.35%。通过实验结果表明,本文中提出的方法易于实现、处理效率高、划痕轮廓定位精度及宽度测量精度较高且稳定。除光学零件图像外,该方法对其它类型图像涉及到边缘检测和宽度测量也具有很好的处理效果。

表 2 中的实验结果表明,阈值分割算法只能达到像素级精度,计算得到的划痕宽度误差较大且 4 次测量结果不稳定;拟合方法能达到亚像素级精度,4 次测量结果接近人工标定的 7 个像素宽度,并且均方差较小;其中本文中曲面拟合方法与最小二乘法曲面拟合得到的结果较稳定,且两者基本接近,验证了本文中算法的鲁棒性和可行性。

3.2 时间复杂度实验

若采用最小二乘法计算曲面方程系数,由最小二乘法求解曲面方程参量过程可知,每一个感兴趣区域时间复杂度为 $O(n^4)$, n 为感兴趣区域尺寸。若采用 2 个 1-D 高斯卷积模板,先对感兴趣区域进行 x 方向卷积计算,然后再对结果进行 y 方向卷积计算,时间复杂度为 $O(n)$ 。作者采用 30 幅划痕疵病图像进行实验,抽取了部分结果以及平均消耗时间,如表 3 所示。

参 考 文 献

- [1] PAN Y Q, LIU P. Visualized detection of surface scratches on optical elements[J]. Journal of Xi' an Technological University, 2012, 32(6):447-450 (in Chinese).
- [2] CHEN X Y, LIU D, WANG S T, *et al.* Research on digital calibration method for optical surface defect dimension[J]. Proceedings of the SPIE, 2012, 8417: 84173L.
- [3] ZHU C, YU G T, LI B L, *et al.* A new algorithm for measuring defects width on precise optics lens surface[J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(12):259-261 (in Chinese).
- [4] HERMOSILLA T, BERMEJO E, BALAGUER A, *et al.* Non-linear fourth-order image interpolation for subpixel edge detection and localization[J]. Image and Vision Computing, 2008, 26(9):1240-1248.
- [5] SUN Q C, ZHOU Y Z. A sub-pixel edge detection method based on cubic spline interpolation[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(2):290-293 (in Chinese).
- [6] LIANG Z J, WANG K F, GU G Q, *et al.* Digital speckle image correlation method base on particle swarm optimization algorithm [J]. Laser Technology, 2014, 38(5):603-607 (in Chinese).
- [7] WU P, XU H L, SONG W L, *et al.* A non-linear quartic image interpolation based subpixel edge detection algorithm[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(2):1-6 (in Chinese).
- [8] DA F, ZHANG H. Sub-pixel edge detection based on an improved moment[J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(12):1645-1658 (in Chinese).
- [9] QU Y D, LI R D, BAI Y H, *et al.* A high-speed Zernike moments edge operator based on 9 × 9 masks[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, 21(11):1683-1687 (in Chinese).

- [10] TAO Z, CHEN S G, ZHANG B, *et al.* A fast subpixel edge detection method for image of micro-part[J]. Proceedings of the SPIE, 2013, 8783: 87831H.
- [11] CAI Y, YE L X. Non-contact measurement for outside screw-based on a modified sub-pixel edge detection algorithm of zernike moments [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48(10): 1468-1472 (in Chinese).
- [12] GAO S Y, LIANG Y Q, YANG K Z. Defect detection of laser welding seam of unequal-thickness blank based on structured light vision [J]. Laser Technology, 2011, 35(4): 440-443 (in Chinese).
- [13] FABIJANSKA A. Gaussian-based approach to subpixel detection of blurred and unsharp edges[C]// Proceedings of the 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems. Warsaw, Poland; Federated Conference on Computer Science and Information Systems, 2014: 641-650.
- [14] CHEN X Y, HU Y, BI F L. Precision Location of sub-pixel edge in CCD optical imaging systems[J]. Information and Control, 2014, 43(2): 176-180 (in Chinese).
- [15] CHEN X W, XU C H. Universal sub-pixel edge detection algorithm-based on extremal gradient [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(5): 500-507 (in Chinese).
- [16] ZHAO P, ZHAO W, DUAN Z, *et al.* Subpixel precise edge extraction algorithm based on facet model[C]//2012 Fourth International Conference on Computational and Information Sciences (ICIS). New York, USA: IEEE, 2012: 86-89.
- [17] LI S, LU R S. Sub-pixel edge detection algorithm-based on gauss surface fitting[J]. Tool Engineering, 2011, 45(7): 79-82 (in Chinese).

《激光技术》编辑部

版权所有 ©