

文章编号 1004-924X(2005)06-0697-06

粗糙表面精度测量系统的研究

高春甫, 邬敏

(吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要:设计了一套粗糙表面精度测量系统,采用线边缘激光三角法实现了亚像素级测量,在图像算法上采用改进的阈值法进行边缘检测,用形态滤波法对被测物表面图像进行处理。研究表明,该系统能较好地提高测量精度,并得出较满意的图像边缘,可达到5 μm的测量精度要求,且具有一定的通用性,实现了对具有粗糙表面的电池极片涂敷层的厚度及均匀性的测量。

关键词:厚度测量;粗糙表面;亚像素;阈值法;激光三角法;线边缘法;形态滤波

中图分类号:TH741.3 **文献标识码:**A

Study of measurement system for rough surface accuracy

GAO Chun-fu, WU Min

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: A system for measuring rough surface accuracy was designed. A line edge laser triangulation method was used to realize subpixel measurement and a threshold value method was utilized to improved measuring image algorithms. At the same time, a morphological filtering was used to process the surface image of a quizee. The results show that the system can improve the accuracy better and obtain the satisfied image ledge and the accuracy survey of 5 μm. The measurement system can be used in a wide scope and can also realize the measurement of the thickness and uniformity of coating layer on battery electrodes with rough surface.

Key words: thickness measurement; rough surface; subpixel; threshold value method; laser triangulation measurement; line edge method, morphological filtering

1 引言

自1992年日本SONY公司研制成功小功率锂离子电池以后,由于其优良的性能和广阔的应用前景,世界各国竞相研制生产。极片浆料涂敷技术是锂离子电池研制和生产的关键技术之一,

电池极片涂敷层的厚度及均匀性决定着电池质量的好坏。目前,极片涂敷层进行厚度及厚度均匀性检测主要是由人工实现。人工测量时,须停止设备的运行,造成生产效率较低。这就需要开发一套系统,实现其在线检测,同时满足精度要求。作者应用光学成像法的一个重要测量原理即激光三角测量原理,设计了新的粗糙表面精度测量系

统,该系统具有非接触,不易损伤表面,材料适应性广,结构简单,测量准确度高等特点,实验结果表明该系统可满足测试要求。

2 线边缘激光三角法测量原理分析

由于被测物表面粗糙、纹理严重,而且测量精度要求高,因此需要进行涂敷质层厚度均匀性测量。参考线结构光三角法测量三维物体的原理,作者提出线边缘法。线边缘法是通过一个可以发出直线边界的激光器投射激光在被测物表面,形成一条线状边缘。用图像处理方法,求取图像的线状边缘,对所有边界点进行均值,通过求取边界点均值的位移量求出被测物位移变化。

由于使用的是线边缘激光,依据 Scheimpflug 条件,测量光路必须满足两个条件:(1)CCD 面阵与透镜激光轴垂直;(2)激光面与光轴垂直。图 1 是由任意放置的激光漫反射带及 CCD 相机所组成的几何光路示意图。 a_0 是激光面在光轴上的物距, b_0 是其像距,透镜中心为 OC 。 f 为透镜的焦距。

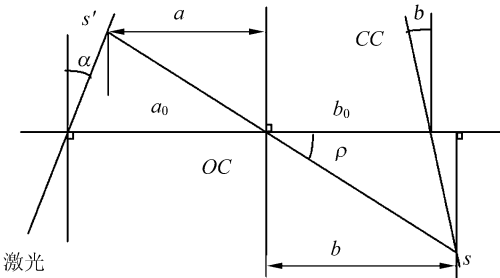


图 1 几何光路图

Fig. 1 Schematic diagram of geometry beam

根据透镜成像原理,可以得到: $\frac{1}{f} = \frac{1}{a_0} + \frac{1}{b_0}$

对激光面上的任一点 s 来说,设其入射角为 ρ ,其实像与 CCD 面阵相交于点 s' ,根据其光路图可计算出物距(a)和像距(b)。

$$a = \frac{a_0}{1 + \tan \rho \tan \alpha}, \quad (1)$$

$$b = \frac{b_0}{1 - \tan \rho \tan \beta}. \quad (2)$$

如果要使点 s 正好成像在 CCD 面阵上, a 和 b 必须满足透镜成像公式。从式(1)(2)可以得到式(3)(4)。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1 + \tan \rho \tan \alpha}{a_0} + \frac{1 - \tan \rho \tan \beta}{b_0} = \frac{1}{a_0} + \frac{1}{b_0} + \left[\frac{\tan \alpha}{a_0} - \frac{\tan \beta}{b_0} \right] \tan \rho, \quad (3)$$

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} + \left[\frac{\tan \alpha}{a_0} - \frac{\tan \beta}{b_0} \right] \tan \rho. \quad (4)$$

因此,只有当入射角 ρ 满足式(5)即 Scheimpflug 条件时, a 和 b 才能满足透镜成像公式。

$$\tan \beta = \frac{b_0 \tan \alpha}{a_0}, \quad (5)$$

即 $\alpha = \beta = 0$ 时,激光器发出的激光对称轴应该和透镜光轴垂直。

系统采用测量光路如图 2。在基准平面过成像光轴的垂直面上,物体表面与激光面交于一点。图中 h 为物体表面位移变化, d 为 CCD 平面上像变动距离, γ 为激光面与该垂直面上激光面与法线夹角, φ 为光轴与法线夹角。凸镜焦距为 f ,当 γ 固定后。即:

$$h = k \times d, \quad (6)$$

$$k = \frac{(l-f) \cos \gamma}{f}. \quad (7)$$

可得结论:物体表面位移变化量与 CCD 上像素位置的变化量成线性关系。式(6)、(7)为物体表面位移变化量与 CCD 上像素位置变化量的线性关系式。

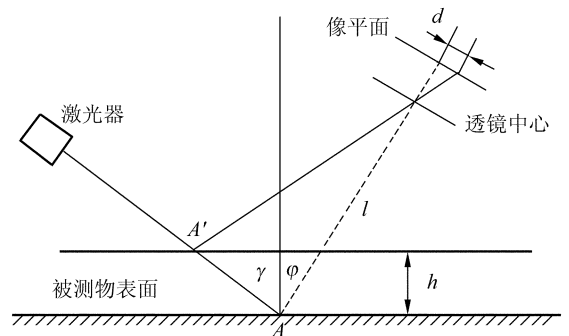


图 2 测量光路图

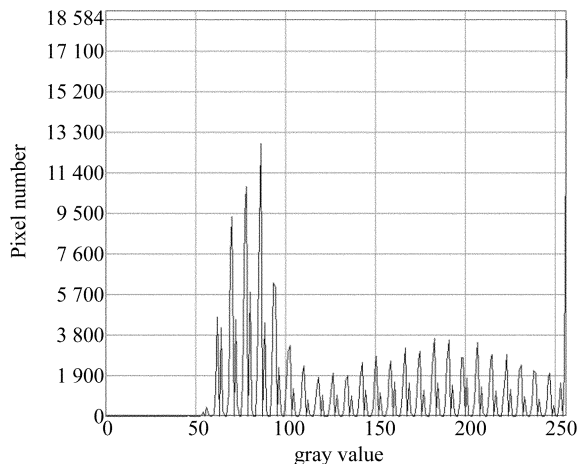
Fig. 2 Schematic diagram of measuring beam

3 图像边缘的求取

以上介绍的线边缘法求位移,其关键是求出激光区域边界线,即通过图像算法求出图像的边缘,可以选择并行算法中的阈值法。该方法通过选取合适的阈值对图像进行分割。

3.1 被测物表面图像特性分析及列向阈值法的提出

先使用三角法测量装置通过计算机的采集卡采集一些实验照片,作为分析对象。对采集到的图像做的时空域的直方图如图 3。可看出有两个峰值,即灰度值为 255 和 86。把图像分为两部分,从 191 列开始,分别对上下两部分图像做分析。可以看到两区域的分割阈值在灰度值 100 左右,而在此附近,存在很多噪声点很难反映真实的边界。因此,很难使用一个阈值把图像的边缘分出来。由于只关心列方向灰度变化,即边界的位置变化,这里采用了一种新的使用阈值进行边界搜索的方法:列向阈值法。其基本思想是:对图像自上而下进行阈值判别边缘,当遇到第一达到阈值的像素点时,中止对列的搜索,开始新的一列搜索,直到整幅图像完成。这是应用于特定的图像环境下的。在图像分析中可看到图像的上半部分灰度值比较低,且灰度变化比较小;而下半部分灰度值较高,且灰度值变化比较大。当搜索从图像上半部分第一行开始时,遇到的第一个达到阈值的像素点作为该列的边界点,对下半部分可能产生的边界点进行舍弃。



注: 像素点最大值18 584 灰度值255 总点数259 488

图 3 灰度直方图

Fig. 3 Gray histogram

3.2 列向阈值分割的实现及效果分析

设原始数字图像为 $f(x, y)$, 图像为灰度图像, 每个像素点的信息为 8 bit。算法实现中使用矩阵 $pixl_gray[i, j]$ 表示数字图像, i 表示图像的行, j 表示图像的列, $pixl_gray[i, j]$ 的值代表的

是灰度图像像素点 $f(i, j)$ 这一点的灰度值。下面用框图说明列方向阈值分割的过程。设阈值为 k 、图像高度为 m 、图像宽度为 n , 实现的流程图如图 4。

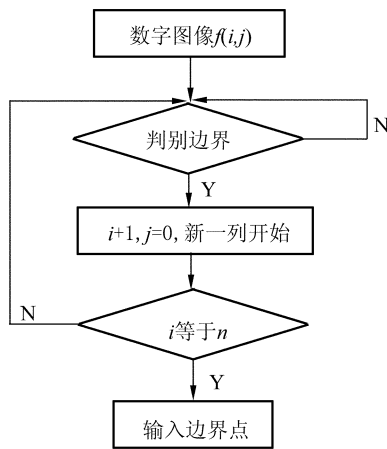


图 4 流程图

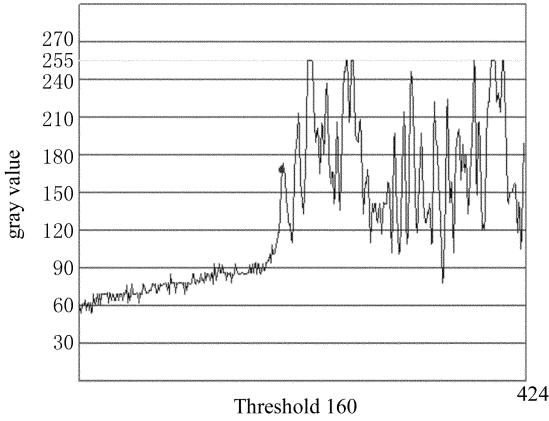
Fig. 4 Flow chart

为增加对比性,选择的阈值为 160 和 180, 通过这两个阈值分别对图像进行分割。随机抽取列为 44 和 17 的对比图 5。对图 5 进行分析, 可看出阈值为 160 时, 边界点坐标在 193; 阈值为 180 时, 边界点坐标为 206。从原图分析在第 44 行, 194 列的位置上为一个孤立的噪声点, 其灰度值为 162。当阈值为 180 时, 可以越过此噪声点, 检测到真实的边界点。对图 6 进行分析, 可看出阈值选择为 160 时, 检测到边界点纵向坐标为 205; 当阈值选择为 180 时, 检测到的边界点纵向坐标为 241。在原图像中, 列 17、行 205 处像素点附近为较暗的区域, 使用 180 作阈值, 对真实边界漏检测, 将对检测结果带来较大的误差。并且, 考虑到图像在环境变化时阈值的变化, 很难选出合适的阈值对图像进行恰当的阈值分割, 得出比较精确的边界(图中圆点为检测到的边界点)。

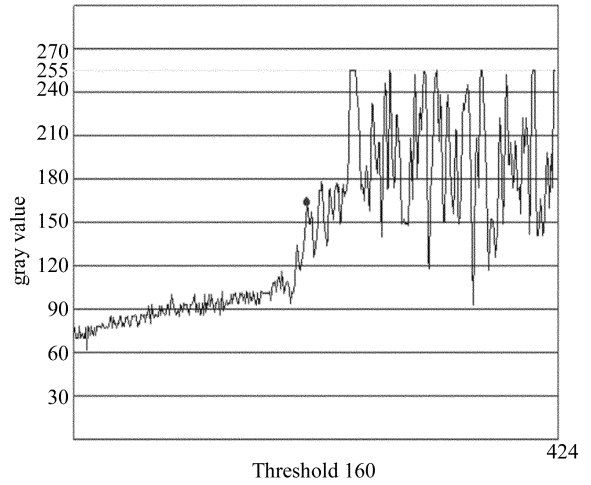
为了消除由于阈值选择产生对测量结果的影响, 需要对阈值分割后的边界进行处理, 消除过尖毛刺噪声, 减小由于阈值算法对检测和漏检测造成的测量精度的影响。

4 形态学滤波去毛刺

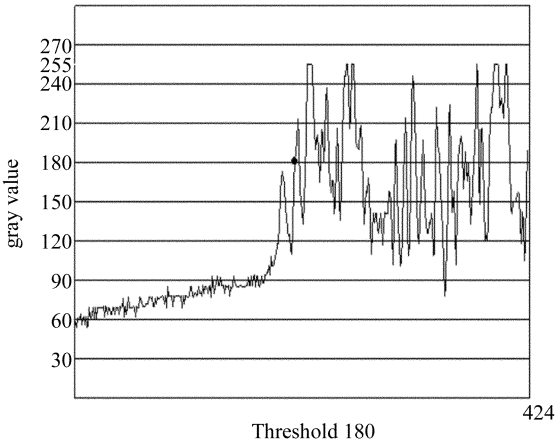
使用列向阈值法进行图像边缘搜索时, 对搜



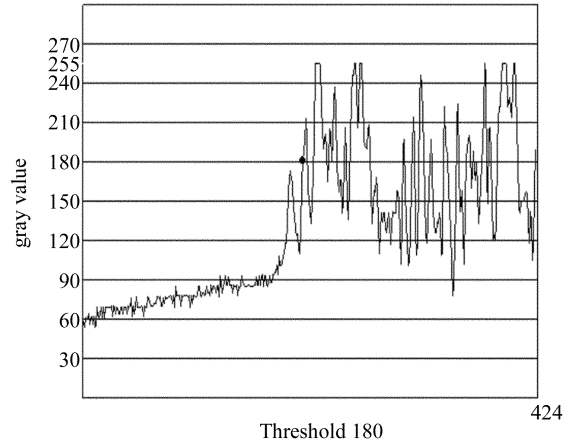
注：图片高424 宽612 边界点X坐标44 边界点Y坐标193



注：图片高424 宽612 边界点X坐标17 边界点Y坐标205



注：图片高424 宽612 边界点X坐标44 边界点Y坐标206



注：图片高424 宽612 边界点X坐标44 边界点Y坐标206

图 5 第 44 列图像阈值 180、160 分析

Fig. 5 Analysis on the threshold 180、160 of the 44th row image

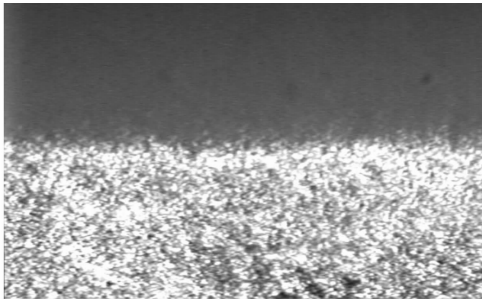
图 6 第 17 列图像阈值 180、160 分析

Fig. 6 Analysis on the threshold 180、160 of the 17th row image

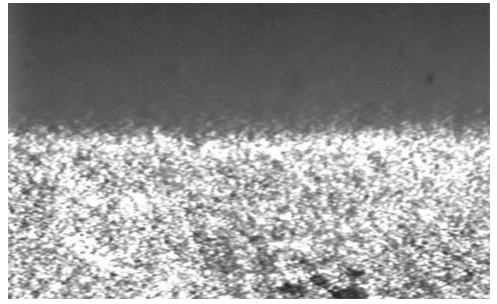
索的结果进行二值化处理,边缘点上面的点把灰度值设为 0,边缘点下面的点把灰度值设为 255。使用的列向阈值法阈值为 160。考虑到算法实现的速度问题,使用尺度分别为 1、2、3、4、5 个像素的横线结构元素对二值图像进行开运算,而后再使用相同尺度的结构元素分别对开运算结果作闭运算。形态滤波对测量精度的影响的结果数据见表 1,图像 1 和图像 2 见图 7。

从表中数据(上五行为形态滤波前的数据)可以看出,当结构元素较小时,滤除的毛刺少,边界信息被修改得不多,元素尺度为 1 时,边远线均值

位置置信区间和处理前接近。随着结构元素尺度的增大,边界点纵坐标均值的置信区间减小,测量精度更高。当结构元素尺度为 5 时,边界线均值置信区间宽度最小,边界点纵坐标均值出现较大的变化,边界线位移的测量精度不可靠,主要值不能反映真实的边界情况,图像边缘线均值置信区间宽度变小仅能反映出此时边界线区域平滑。因此,边缘线均值置信区间宽度这一算法的评价标准要依据具体情况而定。



图像 1
image 1



图像 2
image 2

图 7 位移变化前后图像

Fig. 7 Fore-and-aft image of the variational displacement

表 1 形态滤波对测量精度的影响

Tab. 1 Influence of morphological filtering on measuring precision

形态滤波窗口	边界点纵坐标均值(像素)		边缘线位移(像素)	图像 1 边缘线均值置信区间宽度(像素)
	图像 1	图像 2		
1	202.83	186.47	16.36	0.73
2	202.57	186.22	16.35	0.67
3	202.41	186.06	16.35	0.66
4	202.22	185.86	16.36	0.63
5	201.63	185.21	16.42	0.59
形态滤波前	203.00	186.63	16.37	0.78

5 标定测量结果

为了检验线边缘法测量结果是否能满足测量的高精度要求,对结果进行了标定。由于被测物表面的位移变动量较小,采用压电陶瓷作为检测对象。在被测物表面做一标记,给压电片一定的电压让它产生微位移,使用较精密的仪器对微位移进行标定,使用激光三角测量装置对标记处在同样电压下的位移进行测量。使用的仪器是激光位移测量仪 LC2400A,解析度为 $0.02 \mu\text{m}$,最小光点尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$,测量结果如表 2。可以看出在这 3 次测量中,结果控制在亚像素级 $5 \mu\text{m}$ 以内,从相对误差来看,满足测量精度要求。

表 2 测量结果比较

Tab. 2 Comparison of measuring results

	激光位移测量仪(μm)	线边缘激光三角法测量结果(像素)	线边缘激光三角法测量结果(μm)
第一次	20.12	3.708	17.991
第二次	19.08	3.797	18.423
第三次	17.24	3.349	16.251

6 结 论

本文就线边缘激光三角法测量粗糙表面厚度变化量进行了深入研究,构造的测量系统能够对粗糙表面进行厚度变化量测量,确保了测量精度的可靠性。线边缘激光三角法能够在颗粒噪声较大的情况下达到较高的测量精度。对线边缘激光三角法测量光路进行了分析,得出被测物体表面位移变化量与 CCD 上像素位置的变化量之间线性关系式。根据列向阈值法求取出的边界特点,提出了使用形态学滤波对处理后的边界线去除一些比较尖的毛刺。结果表明,经过滤波后的曲线基本形状没有改变,只是削平了毛刺,达到了预期的目的。

参考文献:

- [1] 黄站华,蔡怀宇.三角法激光测量系统的误差分析及消除方法[J].光电工程,2002,29(3):58-61.
HUANG Zh H,CAI H Y. Analysis for error in triangular laser measurement system and an elimination method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002,29(3):58-61. (in Chinese)
- [2] 石成英.CCD激光微位移测量系统的测量头设计[J].激光杂志,2002,22(2):40-42.
SHI CH Y. The design of the head of CCD micro-displacement measuring system[J]. *Laser Journal*, 2002,22(2):40-42. (in Chinese)
- [3] 屈玉福.视觉检测系统中亚像素边缘检测技术的对比研究[J].仪器仪表学报,2003,24(4):460-462.
QU Y F, Contrast study of subpixel edge detections in vision measuring system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003,24(4):460-462. (in Chinese)
- [4] 刘志敏.基于数学形态学的图像形态滤波[J].红外与激光工程,1999,28(4):10-16.
LIU Zh M. Image morphological filter based on mathematical morphology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999,28(4):10-16. (in Chinese)
- [5] YANG D SH, CHENG J H, ZHOU H CH, *et al.* New algorithm to calculate the center of laser reflections[J]. *SPIE*, 1998, 3306:54-58.
- [6] LI X, OCHARD M T. Edge-directed prediction for lossless compression of natural images[J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2001,10(6):813-817.
- [7] GHARAVI M, ALKHANSARI M. A fast globally optimal algorithm for template matching using low-resolution pruning[J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2001,10(4):526-533.
- [8] WEST G A, CLACK T A. *A survey and examination of subpixel measurement techniques*[M]. Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision. SPIE, 1990, 456-462.
- [9] OZDEMIR D, AKARUN L. Fuzzy algorithms for combined quantization and dithering[J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2001,10(6):923-931.

作者简介:高春甫(1965—)男,吉林长春人,吉林大学副教授,工学博士,主要从事机电设备控制、设计及其自动化的研究与教学工作。Email: gao6865@163.com

邬敏(1981—)女,吉林省长春人,吉林大学硕士,主要从事计算机控制与检测工作。Email: wanglei3000@sina.com.cn