

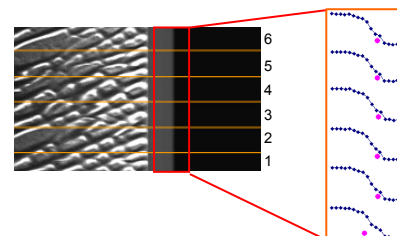


DOI: 10.12086/oe.2019.180563

一种锂电池涂布在线测量边缘拟合方法

刘怀广*, 孔建益, 杨金堂, 王兴东, 刘源洞

武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081



摘要: 边缘定位是锂电池涂布测量的关键,但由于生产的震动和纠偏原因,边缘会出现虚化和卷边等现象。为了提高锂电池涂布在线检测的精度和鲁棒性,本文结合锂电池涂布生产的特点提出了边界渐进定位法,实现了边缘的快速准确检测。首先利用跨邻域方向边界检测算子进行初次边缘定位,以提高弱边界的检测能力;再利用局部极值差分算法配合选择性峰值排序获得边缘像素级定位,保证了边缘投影的保峰性和抗噪性,提高了边缘定位的效率;最后,基于分段三次样条边界插值和分段直线拟合方法,实现了边缘的亚像素高精度定位。实测结果表明,算法在直线型边缘上具有较强鲁棒性。

关键词: 锂电池涂布; 视觉测量; 边缘检测; 方向投影; 直线拟合

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

引用格式: 刘怀广, 孔建益, 杨金堂, 等. 一种锂电池涂布在线测量边缘拟合方法[J]. 光电工程, 2019, 46(10): 180563

An edge fitting method for the online measurement of lithium battery coating

Liu Huaiguang*, Kong Jianyi, Yang Jintang, Wang Xingdong, Liu Yuanjiong

Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China

Abstract: Edge detection is a key step for the online vision measurement of lithium battery coating (LBC). However, as the vibration and rectification in LBC production, the virtualization and curling of edges could occur. In order to improve the accuracy and efficiency of on-line measurement of LBC, this paper proposed a staged edge location method according to the production characteristics of LBC, and achieved the swift and accurate detection of edges. Firstly, a cross neighborhood operator is used to detect the edge preliminarily to improve the ability of weak edge detection. Then, local extreme values difference (LEVD) algorithm with selective peak sort algorithm is proposed to guarantee for the ability of edge-preserving and anti-noise of edge projection and to improve the efficiency of edge detection. Finally, piecewise cubic spline interpolation combined with segmented linear fitting method is provided to realize the sub-pixel location of the edge. The experimental results show the effectiveness of the method.

Keywords: lithium battery coating; vision measurement; edge detection; oriented projection; linear fitting

Citation: Liu H G, Kong J Y, Yang J T, et al. An edge fitting method for the online measurement of lithium battery coating[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(10): 180563

收稿日期: 2018-10-31; 收到修改稿日期: 2018-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875418); 湖北省技术创新专项资助项目(2017ACA180); 湖北省自然科学基金资助项目(2017CFC830, 2018CFC795)

作者简介: 刘怀广(1981-), 男, 博士, 讲师, 主要从事机器视觉和图像处理的研究。E-mail: lhg81219@163.com

1 引言

锂电池具有高电压、高能量密度和良好的循环性能,其在汽车、数码、电动车行业都有广阔的应用前景。随着近年来锂电池应用规模的扩大,人们对锂电池性能和质量的要求也越来越高。涂布作为锂电池生产的关键一环,其质量对于锂电池的性能起着决定性的作用^[1-2]。其中,对涂布尺寸的生产控制,是提高成品率的重要保证。目前,对于涂布尺寸主要靠手动调整喷涂模头与驱动辊间的距离来控制,同时生产过程由于基材受力不均、浆料喷涂不均等会引起涂布位置的变化和宽度的波动^[3]。尽管涂布机可以通过纠偏辊进行涂布位置的调整,但是精度往往只有 ± 0.5 mm,而涂布宽度主要由人工拿菲林软尺抽段测量,这种方式效率低,精度差,达不到全覆盖的要求。也有人提出了相应的测量装置^[4],但是主要还是机械接触式测量,灵活性、精度和自动化都受到很大限制。

基于视觉测量技术的涂布尺寸检测,可以达到快速、高效、准确的测量目的^[5]。而要进行涂布视觉测量,首先要进行涂布图像的边缘定位,根据标定结果转化为物理位置后利用空间坐标差获得涂布宽度。因此,涂布图像的定位精度是保证涂布测量准确性的前提和关键。本文将利用视觉技术对锂电池涂布尺寸的在线测量进行研究,基于高效、稳定的检测原则,提出了涂布边界的方向差分渐进定位法,避免了边界光照干扰,提高了鲁棒性;同时针对模糊边界提出了分段三次样条亚像素定位法,并在此基础上对相应的软件系统进行开发,成功应用于现场实践。

2 锂电池涂布在线视觉测量方案

锂电池极片生产一般经过搅拌、涂布、干燥、压整、切割等多道工序。而涂布是保证后续正常生产的

核心。为了充分利用基材空间,一面基材通常会涂若干条极膜,常见的有1条、2条、3条或4条,在生产上通常称为1出2、1出4、1出6和1出8。单双面分开涂布、烘干,多条膜的涂布双面生产完成后,还要经过后期的切割,形成单膜涂布,以便进一步深加工。

为了使切割后的涂布更准确,需要对各膜的位置和尺寸进行精确的测量,以保证上下表面的膜边界能够对齐,防止剪切时边界的误剪。由于膜的宽度和位置由模头保证,一旦模头调整合适后,通常认为膜宽变化不会太大。因此目前对于涂布检测的研究,主要集中在缺陷检测和厚度检测^[6-8]。实际上因为生产过程中存在纠偏震动,加上压力(浆料通过加压后由模头喷涂在基材上)因素的影响,膜宽在一定的时间内会有波动和变化,从而对后续切割造成影响。而目前的人工测量一是误差较大(± 0.5 mm以上),二是不能及时了解膜宽的变化情况。因此,通过研究涂布视觉测量技术,对于提高锂电池生产质量和自动化水平都有较大的现实意义。

根据检测要求,结合现场设备布置空间,基于图像处理在线检测方案如图1所示。因为要检测上下表面,图1中有两组光源和相机,每组有两个相机(相机数量可以根据精度和产品规格进行设置),其布置方式按与运行方向垂直布置。由于是连续性生产,所以相机采用了线阵相机,配合白色条形光源形成成像装置。为了避免振动对成像的影响,特把成像线设置在从动辊上。

图2为1出4涂布图像测量模型,横线为相机扫描方向, $B_1 \sim B_5$ 为主要待检尺寸,其中 B_1 、 B_3 、 B_5 为基材留白尺寸, B_2 、 B_4 为涂布尺寸。从图2中可以看出,由于扫描方向与涂布边界垂直,其尺寸检测主要是边界点 u 方向的定位。

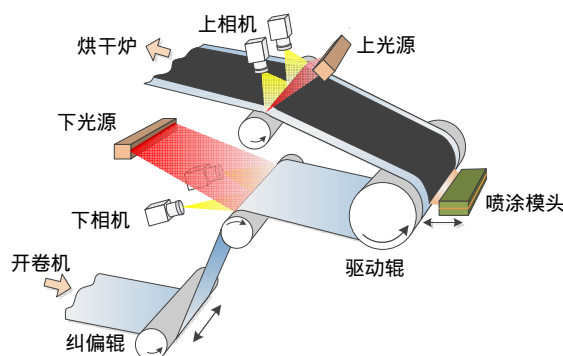


图1 涂布在线视觉测量方案示意图

Fig. 1 The schematic diagram of online measurement of lithium battery coating (LBC)

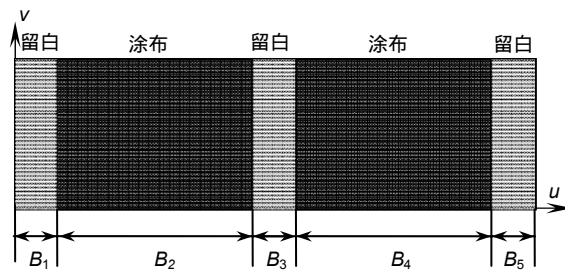


图 2 涂布测量模型(1 出 4)

Fig. 2 The measurement model of LBC (four from one)

3 基于局部极值差分的边缘渐进定位法

目前, 常规边缘求取的方法主要是一些边缘梯度算子, 如 Canny、Sobel、Laplacian、LoG 等^[9]。但是, 一方面, 这些算子要么耗时长、抗干扰能力差, 要么定位精度不佳, 不能满足高精、高速的检测场合; 另一方面, 由于涂布成像视野较大 (~800 mm), 而不同区域反射性不同, 线阵光源打光后光照不均, 边缘亮

度出现差异; 同时, 在涂布运行过程中, 由于基材(铝箔)较薄, 张力不均很容易造成涂布边界的异常变化(如图 3 所示)。另外, 由于涂布机一次只能单面涂布, 在涂另一面时烘干后的涂布经过多次辊压使得边缘出现模糊, 这些都给涂布边界的实时精确定位带来困难。因此, 本文在考虑了涂布运行特点的基础上, 从工程应用的角度出发, 结合多分辨率的思想, 对边界由粗到细逐级定位, 提出了效率和鲁棒性兼具的边界渐进定位法(如图 4)。

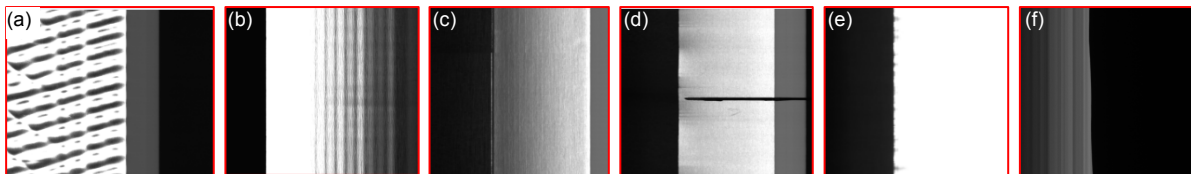


图 3 运行中的异常涂布边界(部分)。(a) 褶皱; (b) 虚边; (c) 叠边; (d) 波浪; (e) 裂边; (f) 跳边

Fig. 3 Abnormal edges of LBC in running (part). (a) Wrinkle; (b) Sham edge; (c) Overlay; (d) Wave; (e) Cracks; (f) Edge dance

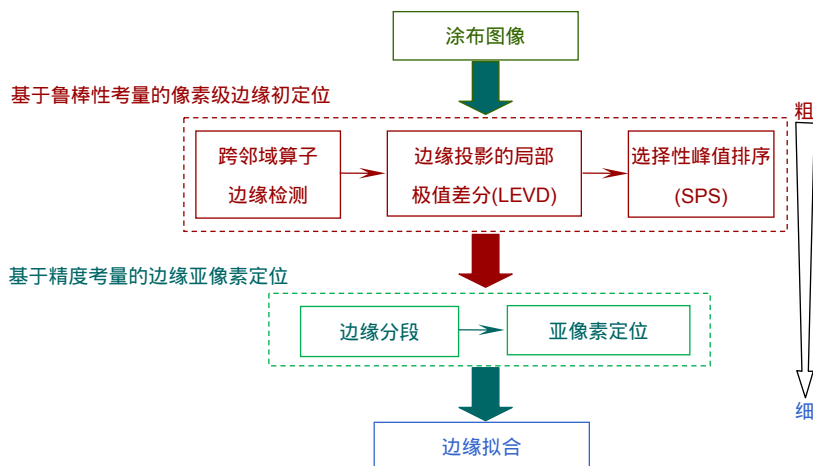


图 4 涂布边缘渐进式定位算法流程

Fig. 4 The flowchart of edge gradual location algorithm of LBC

3.1 跨邻域边界处理

从图 1 中可以看出,涂布在运行时边界主要呈纵向分布。为了提高检测效率,通常会采用如图 5 所示方向边缘算子进行检测。

-1	0	1
-1.2	0	1.2
-1	0	1

图 5 方向边缘算子
Fig. 5 Oriented operators of edges

该算子忽略了纵向像素差异,关注横向的变化,有利于检测纵向边缘。但是,该算子只对阶跃变化的边界具有敏感性(如图 6(a)),而对于缓变边界由于邻域像素的变化不明显,边界检测效果不理想(如图 6(b))。

从图 6(b)中可以看出,由于邻域内边缘数值变化不明显,邻域差分变得非常差。实际上,边缘往往是两个均质块的交界出,在远离边界的位置是最能体现块间的灰度差异。因此,为了突出边界的变化,本文不在当前像素的邻域内取点,而是以左右跨若干像素(如跨 8 个像素)的方式取点求差值,图 5 的算子将变化为图 7 所示。

图 7 中算子是稀疏的,在实际计算过程中,只取非零位置参与运算,因此其计算量同图 5 相同,其表达式为

$$R_j = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 I_{ji} w_i \quad (1)$$

其中: R_j 为输出图像 j 位置处的像素值, I_j 为输入图像对应位置的像素值, w_i 为算子非零位值。图 8 是图 6 对应的跨邻域边界检测的效果。从图中看出,尽管缓变边界仍然不够强烈,但是通过跨邻域处理后增强了边界的响应,丰富了边缘细节,使得二值化后的边界更加清晰和突出。经过跨邻域检测后,边缘位置进行了一定偏移,需要后续进行修正。

式(1)在具体运算时可以简化为 3 次加法、3 次减法和 1 次乘法,而一次 8 邻域 Sobel 算子要用 9 次加法和 9 次乘法。表 1 针对一张 8M(8192×1024)的图像,进行了两种算法的效率对比(CPU i5-2300, 2.8 GHz, 下同)。从中可以看出,跨邻域算子效率比传统的 Sobel 算子大约提高了 4 倍。

3.2 涂布边缘的像素级定位

3.2.1 边缘投影的局部极值差分

有了边缘的二值化图,就是求边缘的位置。常规的方法是遍历整个图像获取非零像素位置。鉴于涂布边缘的纵向分布特点,本文采用了纵向投影查找边缘的算法。若图像的宽度为 W ,高度为 H ,其投影向量为

$$C(j) = \sum_{i=1}^H R_{ij} \quad (2)$$

其中: R_{ij} 代表二值化图像的第 i 行第 j 个像素值,且 $R_{ij} \in \{0,1\}$ 。图 9 为一涂布图像的纵向投影图。

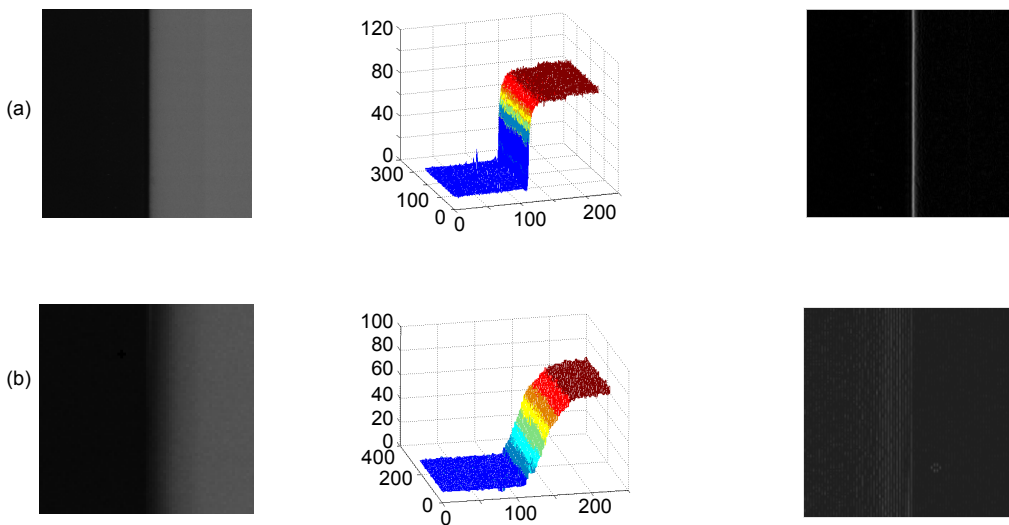


图 6 方向算子的边缘检测。(a) 阶跃边界检测; (b) 缓变边界检测

Fig. 6 The edge detection by oriented operation. (a) Step edge detection ; (b) Gradual edge detection

从图 9(c)中可以看出,对于比较清楚阶跃的边缘,纵向投影能比较正确地反映边界的位置(如图 9(c)中的 E2、E3 位置),但是如果图像边界有干扰(如图 9(c)

中的 E1),其边界的突出性就没那么明显,存在干扰峰值(如图 9(c)中的箭头位置),如果以峰值查询边缘会引起边缘的误判。

-1	0		0		0	1
-1.2	0	...	0	...	0	1.2
-1	0		0		0	1

图 7 跨邻域边缘算子

Fig. 7 The cross-neighborhood operator of edge

实际上,对于干扰,其投影值存在着一定的邻域近似性,而边界往往具有突发性,因此许多文献用相邻差分来获得目标的边缘^[10-12],但是过于紧邻的差分也会抵消边缘本身的值,特别是具有渐变特性的边缘。本文提出了一种基于纵向投影的局部极值差分法(local extreme value difference, LEVD),该算法的主要

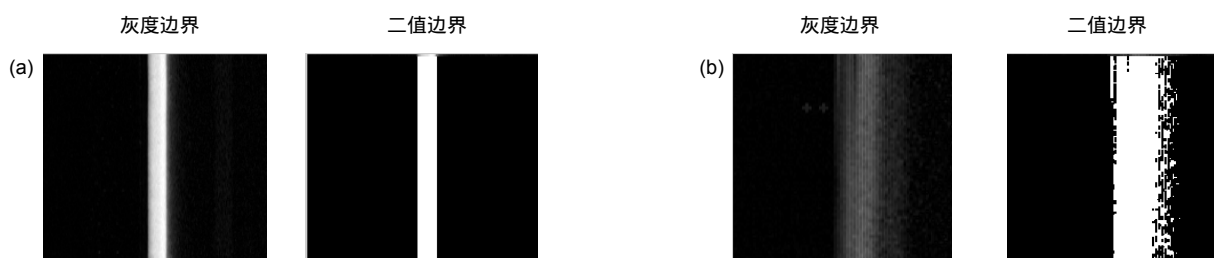


图 8 跨邻域边缘检测。(a) 阶跃边界结果; (b) 缓变边界结果

Fig. 8 Across-neighborhood edge detection. (a) Result of step edge; (b) Result of gradual edge

表 1 边缘检测算法效率对比(8M 图像)

Table 1 The efficiency comparison of edge detection algorithms (8M image)

	Sobel 算子	跨邻域算子
时间/ms	145	38

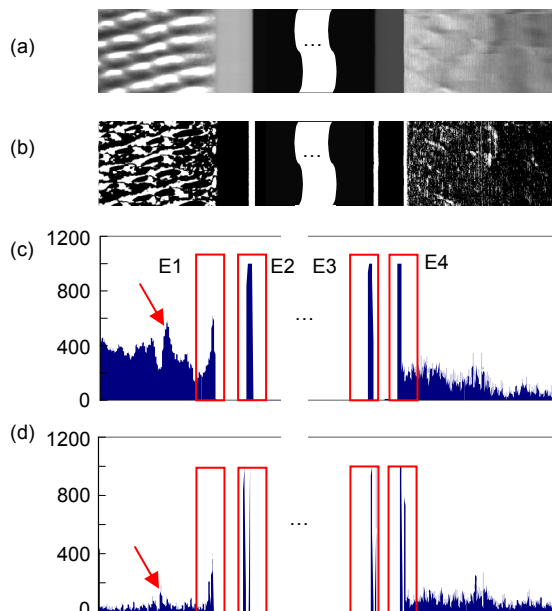


图 9 涂布边界的纵向投影及局部极值差分。图像宽度为 8192, 省略中间部分, 箭头位置为干扰峰值。(a) 原始图像; (b) 跨邻域边缘二值化; (c) 方向投影图; (d) 局部极值差分图

Fig. 9 The vertical projection and local extreme value difference of LBC (middle LBC is omitted). (a) Original image; (b) Binary image of CNO; (c) Projection image; (d) Image of LEVD

思想是寻找邻域内的最大对比度，如式(3)所示。

$$\begin{cases} C'(j) = \max\{D_{\min}, D_{\max}\} \\ D_{\min} = |C(j) - \min\{C(k) | j - \delta < k < j\}| \\ D_{\max} = |C(j) - \max\{C(k) | j - \delta < k < j\}| \end{cases}, \quad (3)$$

其中： δ 为局部搜索范围， k 为要求边的个数。 D_{\min} 为局部极小值距离， D_{\max} 为局部极大值距离， C' 就是寻求当前投影位置与前向局部范围内极小值距离和极大值距离的最大化，以提高投影对比度。

图 9(d) 是 δ 取 8 得到的 LEVD 结果。从图中可以看出，大部分干扰值都被降低了，而较好地保留了阶跃边缘值。尽管邻域差分也降低了 E1 边缘的绝对值，但是对于干扰的削弱更明显，从而更有利于边缘获取。

3.2.2 基于选择性峰值排序的快速边缘定位

有了边缘差分的投影，可以通过对其从大到小排序，获取前 k 个投影的位置即为边缘的位置。但是，常用的冒泡算法的排序法时间复杂度是 $O(n^2)$ ，对于宽度为 8192 的图像投影，其排序过程是难以承受的。即便是最快的快速排序法最理想的时间复杂度也会有 $O(n \log n)$ 。实际上，因为我们最终只需要前 k (一般 $k < 10$) 个边界值，并不需要全部排序。从图 9(d) 中可以看出，单个边缘处会存在若干个峰值(上升沿和下降沿)，若单纯的取前 k 个最大值会造成新边缘的丢失，因此在排序的时候有必要对取得的边缘进行有效性检测。本文采用设定两个临近极值的距离，当两个极值的距离小于一个给定值时，便可以对这两个极值合并，取两者大者。本文提出了一种选择性峰值排序(selected peak sort, SPS)的快速算法。图 10 是 SPS 边缘搜索流

程。其中 $Dis(j, pos(E(k)))$ 表示投影邻域差分向量 C' 中第 j 个位置与 $E(k)$ 对应位置之间的距离， $End(\cdot)$ 表示向量的长度。

从图 9 可以看出，在一次遍历过程中，只需要对有限峰值进行对比冒泡，从而可以充分利用先验知识(边界个数)加快搜索；同时，由于边界的 C' 值往往比非边界值要大很多，在设置了条件 T_u (如 $T_u = \max(C)/2$) 的基础上，可以极大的减少搜索频率。算法的时间复杂度大约为 $O(k^2) \sim O(n \cdot k)$ ，当图像中边界较少的情况下，可以快速获得边界。

表 2 给出了维度为 8192 的向量进行 1000 次排序后 SPS 算法与最常用的快速排序算法(QS)的效率对比，从表中可以看出 SPS 法在效率上有了明显的提升。图 11 是 SPS 定位结果，图中上面方块内为位置坐标，下面方块内为投影 C' 值。

表 2 排序算法效率对比 (8192 维, $k=7$, 排序 1000 次)

Table 2 The efficiency comparison of sort algorithms (dimension of 8192, $k=7$, 1000 times)		
	快速排序算法 ^[13]	本文 SPS 算法
时间/ms	242	111

3.3 基于三次样条插值的亚像素分段边缘拟合

如前所述，经过了跨邻域边界处理，由于算子的拉长，实际边界有了一定的位移(位移大约等于所跨的区域)，也就是说由上节邻域差分获得的边界坐标为边界偏移过的坐标，要想获得精确的坐标还需要二次定

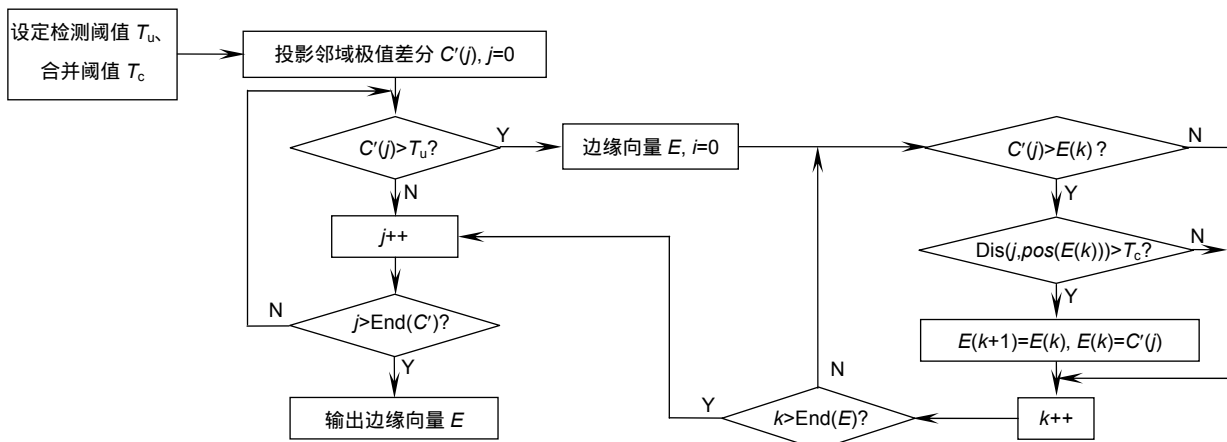


图 10 SPS 排序边缘搜索流程图

Fig. 10 Selected peak sort flowchart for edge search

位。另一方面,对于含有 AT9(涂布边界过渡膜)的涂布,白色的 AT9 经过多组轧辊的碾压后会产生残影,从而使边界往往会变得模糊(如图 12 所示)。

为了获得更准确的边缘位置,需要对模糊边界进行亚像素处理。目前,亚像素的方法主要有几何矩、正交空间矩、最小二乘拟合、小波变换等多种检测算法^[14-16]。这些算法对于小尺寸的零件边界具有较好的定位精度,但是其复杂度较高,单边界定位时间过长。本文根据涂布边界的特点,由 SPS 定位结果进行基于三次样条插值的亚像素边界二次定位算法^[17]。

样条曲线实际上是由分段三次曲线拼接而成,在连接点处要求曲线二阶导数连续。

$$\begin{cases} S(x_i) = y_i \\ S(x_i - 0) = S(x_i + 0) \\ S'(x_i - 0) = S'(x_i + 0) \\ S''(x_i - 0) = S''(x_i + 0) \end{cases}, \quad (4)$$

其中: $S(x)$ 为样条曲线函数, $\{x_i, y_i\}$ 为给定点坐标值, n 为给定的坐标点数。求解 $S(x)$, 常用的有待定系数法和分段埃尔米特插值法, 本文采用了第一自然边界条件的三弯矩方程法^[18]。

为了降低噪声带来的影响, 首先对一幅图像在高度方向上均分成若干份(本文分成了 6 份), 对每一份

的边界在纵向(v 方向)求平均值, 然后取边界处左右各 8 个点(共 17 个点)进行三次样条插值。当所有份的边界都求出后, 对 6 个坐标进行直线拟合获得最终边界表达式。整个求解流程框如图 13 所示。

图 14 是涂布边界提取的亚像素结果。其中, 初定位是 LEVD 定位结果, 精定位是经过三次样条插值的求解结果(图中粉色圆点), 蓝色曲线为各分段边界区域 v 向灰度平均值。表中纵向坐标 v 以每段间隔的纵向中点为标定点。对分段求解后的结果, 采用斜截式直线公式进行拟合:

$$v = ku + b, \quad (5)$$

$$\begin{cases} k = \frac{nC - BD}{nA - BB} \\ b = \frac{AD - CB}{nA - BB} \end{cases}, \quad (6)$$

其中: $A = \sum_{i=1}^n u_i^2$, $B = \sum_{i=1}^n u_i$, $C = \sum_{i=1}^n u_i v_i$, $D = \sum_{i=1}^n v_i$ 。

把图 14 中的数据带入式(6), 得到拟合直线为

$$v = 169.987u - 150259.943. \quad (7)$$

拟合结果如图 15 所示。因为纵向范围比较明确, 因此图中直线按 $v=0 \sim 1023$ 整数取值, 代入到式(7)求解 u 坐标进行绘制。从图 15 中可以看出, 拟合的直线能够比较准确地表达涂布的边缘。



图 11 SPS 快速边缘搜索结果
Fig. 11 The result of SPS for edge search

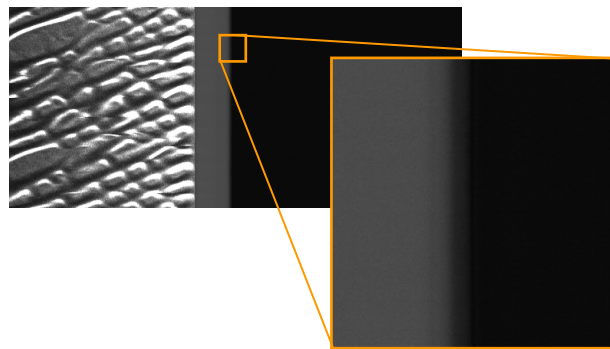


图 12 含 AT9 的涂布边界(烘干后)
Fig. 12 Comparison of message delivery rates of three

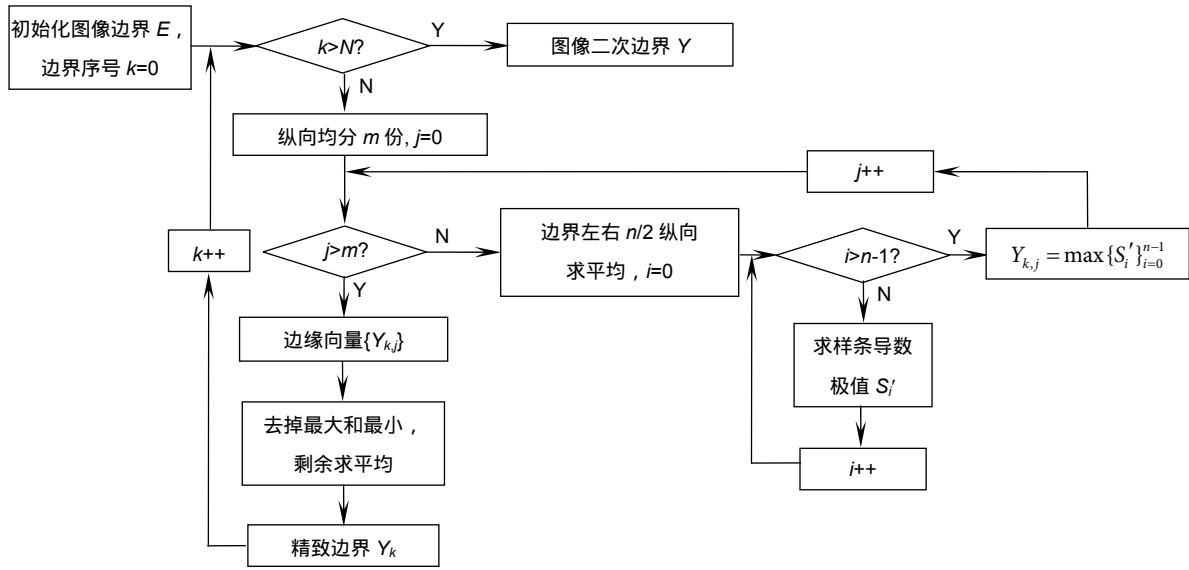
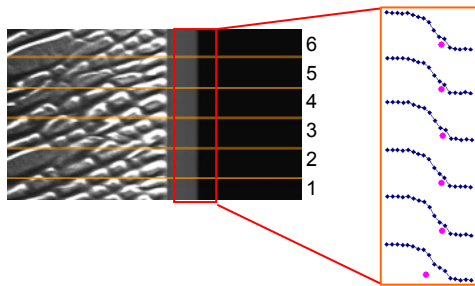


图 13 涂布边缘的亚像素边界拟合过程

Fig. 13 The process of sub-pixel fitting of LBC edge



序号	像素定位	亚像素定位 u	纵坐标 v
6	887	887.495	938.67
5	887	887.432	768.00
4	887	887.482	597.33
3	887	887.444	426.67
2	887	887.463	256.00
1	887	884.431	85.33

图 14 边缘亚像素定位结果(粉色圆点为样条插值结果)

Fig. 14 The result of sub-pixel detection of LBC edge (the pink points are the results of cubic spline interpolation)

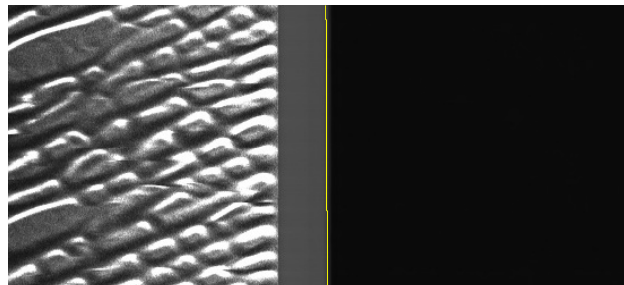


图 15 边界拟合结果

Fig. 15 The line fitting result of edge

4 算法测试

本文在生产现场对算法进行了测试。涂布运行速度 45 m/min，线阵相机每秒扫描 8 k，单行分辨率为 0.1 mm，单幅图像分辨率 8192 × 1024，含最大边数为 5(1 条基膜边，2 条涂布边，2 条 AT9 边)，单图像最大处理时间为 122 ms。部分测试图像单边拟合结果如图 16 所示。

目前，图像直线边缘的拟合往往采用的是 Hough 变换^[19]，其抗噪能力强，但是因为 Hough 变换需要对所有的可疑边界像素进行遍历，并进行空间转换，因此需要的时间较长。图 16 给出了本文单边检测时间和

Hough 边界检测时间的对比(采用 Opencv 2.4.9 库函数)。从中可以看出，本文算法能够定位到比较准确的边缘，同时效率上较 Hough 变换有较大的提高。即便是受到光照不均(图 16(b))或有卷边(图 16(a))的影响，本文仍能准确的找到涂布边界。

本文算法成功应用于国内某大型锂电池生产厂涂布尺寸的检测系统中(如图 17 所示)，并运行良好。现场运行情况证明，算法能够适应各种角度的变化和光照影响，单边定位精度达到了 0.2 个像素(即 0.02 mm)，单相机 5 条边的检测速度能够达到 50 m/min，满足了生产需求。

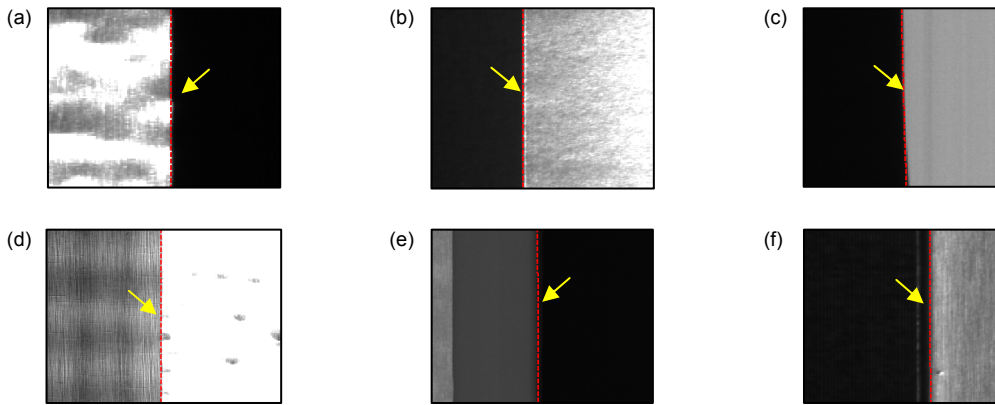


图 16 现场图像单边拟合结果(局部)。(a) Our: 23 ms, Hough: 256 ms; (b) Our: 20 ms, Hough: 243 ms; (c) Our: 18 ms, Hough: 230 ms; (d) Our: 20 ms, Hough: 262 ms; (e) Our: 18 ms, Hough: 231 ms; (f) Our: 22 ms, Hough: 238 ms

Fig. 16 The edge fitting results of site LBC image. (a) Our: 23 ms, Hough: 256 ms; (b) Our: 20 ms, Hough: 243 ms; (c) Our: 18 ms, Hough: 230 ms; (d) Our: 20 ms, Hough: 262 ms; (e) Our: 18 ms, Hough: 231 ms; (f) Our: 22 ms, Hough: 238 ms



图 17 涂布测量在线检测现场

Fig. 17 The online measurement field of LBC

5 结 语

边界检测是锂电池尺寸检测的关键环节,但是因为生产中存在振动和纠偏,造成了虚边、叠边等,常规方法检测困难。本文提出的渐进式定位法,从粗到细逐次逼近,具有多分辨率的思想。同时,结合一定的先验知识,加快了算法的定位速度。采用分段直线边界的拟合方法,可以避免常规 Hough 变换的耗时遍历,具有小角度下的直线边界动态拟合能力。现场实践表明,算法具有很好的鲁棒性和高效性。

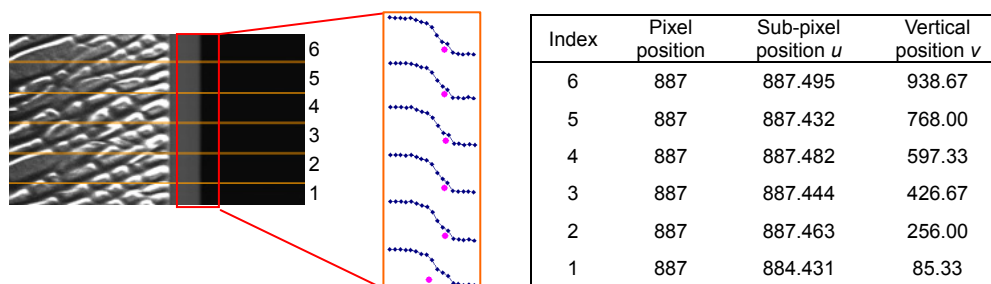
参考文献

- [1] Chen L, Shaw L L. Recent advances in lithium-sulfur batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, **267**: 770–783.
- [2] Barghamadi M, Kapoor A, Wen C E. A review on Li-S batteries as a high efficiency rechargeable lithium battery[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2013, **160**(8): A1256–A1263.
- [3] Chi C X, Zhang S H, Qiao X L, et al. Research progress on slot-die coating technology[J]. *Applied Chemical Industry*, 2016, **45**(2): 360–363, 366.
迟彩霞, 张双虎, 乔秀丽, 等. 狭缝式涂布技术的研究进展[J]. *应用化工*, 2016, **45**(2): 360–363, 366.
- [4] Hebei Yinlong Energy LTD. A measurement device of lithiumion battery slurry coating: CN107957230A[P]. 2018-04-24.
河北银隆新能源有限公司. 一种锂离子电池浆料涂布尺寸测量装置: CN107957230A[P]. 2018-04-24.
- [5] Tan W B, Li X F, Liu C, et al. A modeling and calibration method of portable vision metrology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, **41**(6): 1–6.
谭文斌, 李醒飞, 刘超, 等. 一种移动视觉测量系统的建模及标定方法[J]. *光电工程*, 2014, **41**(6): 1–6.
- [6] Ren Z G. On-line thickness measurement for electrode materials and its application in EV Li-ion Battery manufacture[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2010(10): 153–156.
任志刚. 动力锂离子电池电极材料在线厚度测量及生产中的应用[J]. *装备制造技术*, 2010(10): 153–156.
- [7] Hu Y H. Research on defect detection of lithium battery electrode based on machine vision[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
胡玥红. 基于机器视觉的锂电池极片缺陷检测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [8] Zhang G H, Li Y L, Chai Y, et al. Preliminary design of a CCD imaging system for defecting defect that in the surface of pole plate of lithium battery[C]//2010 Optical Conference Symposium, 2010: 5.
张国海, 李艳玲, 柴颖, 等. 锂电池极板表面缺陷 CCD 成像检测系统初步设计[C]//中国光学学会 2010 年光学大会论文集, 2010: 5.
- [9] Hong L R. Image edge detection without threshold[J]. *Journal of Computer Applications*, 2013, **33**(8): 2330–2333.
洪留荣. 无需设定阈值的图像边缘检测[J]. *计算机应用*, 2013, **33**(8): 2330–2333.
- [10] Sun Q C, Hou Y Q, Tan Q C. A subpixel edge detection method based on an arctangent edge model[J]. *Optik*, 2016, **127**(14): 5702–5710.
- [11] Ma D J, Zhu S N, Wang C J. Application of linear CCD in high precision diameter measuring system[J]. *Computer Measurement & Control*, 2006, **14**(2): 175–176, 185.
马登极, 朱善安, 王长军. 线阵 CCD 在高精度测径系统中的应用[J]. *计算机测量与控制*, 2006, **14**(2): 175–176, 185.
- [12] Jiang W, Ding Z Q, Liu Y W. New image edge detection model based on fractional-order partial differentiation[J]. *Journal of Computer Applications*, 2012, **32**(10): 2848–2850, 2858.
蒋伟, 丁志全, 刘亚威. 基于分数阶偏微分的图像边缘检测新模型[J]. *计算机应用*, 2012, **32**(10): 2848–2850, 2858.
- [13] Zhou J Q. Super quick sort algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2006, **42**(29): 41–42, 86.
周建钦. 超快速排序算法[J]. *计算机工程与应用*, 2006, **42**(29): 41–42, 86.
- [14] Qu Y D, Cui C S, Chen S B, et al. A fast subpixel edge detection method using Sobel-Zernike moments operator[J]. *Image and Vision Computing*, 2005, **23**(1): 11–17.
- [15] Wu X. LED chips coarse and fine locating system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(9): 2478–2484.
吴晓. LED 芯片粗精定位系统[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(9): 2478–2484.
- [16] Lv C F, Ren Q H. The silicon sheet steel image sub-pixel edge detection algorithm research based on Sobel[J]. *Manufacturing Automation*, 2013, **35**(2): 34–36.
吕春峰, 任全会. 基于 Sobel 黑片图像亚像素边缘检测算法研究[J]. *制造业自动化*, 2013, **35**(2): 34–36.
- [17] Sun Q C, Zhou Y Z, Ning C, et al. A sub-pixel edge detection method based on cubic spline interpolation[J]. *Control Engineering of China*, 2014, **21**(2): 290–293.
孙秋成, 周亚洲, 宁闯, 等. 基于三次样条插值的亚像素边缘检测方法[J]. *控制工程*, 2014, **21**(2): 290–293.
- [18] Li Q Y, Wang N C, Yi D Y. *Numerical Analysis*[M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 51–57.
李庆扬, 王能超, 易大义. *数值分析*[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2001: 51–57.
- [19] Diao Y, Wu C K, Luo H, et al. Line detection optimization algorithm based on improved probabilistic Hough transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(8): 0815016.
刁燕, 吴晨柯, 罗华, 等. 基于改进的概率 Hough 变换的直线检测优化算法[J]. *光学学报*, 2018, **38**(8): 0815016.

An edge fitting method for the online measurement of lithium battery coating

Liu Huaiguang*, Kong Jianyi, Yang Jintang, Wang Xingdong, Liu Yuanjiong

Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology,
Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China



The result of sub-pixel detection of LBC edge (The pink points are the results of cubic spline interpolation)

Overview: Lithium battery has been widely used in various industries. The coating quality is an important key that affects the performance of the battery. At present, the dimension of the coating of batteries in production mainly depends on manual sampling inspection with soft ruler, which is low-efficiency and has poor real-time performance. This paper focused on the study of the on-line vision dimension measurement technology of the lithium battery coating (LBC) in production, discussed the design of visual measurement system, and proposed a method of progressive location and segmental fitting of coating edges according to the characteristics of LBC production. As traditional boundary operators are noise-sensitivity and poor-robustness, this paper provided an across-neighborhood operator to detect the direction edges of coating. This operator has larger dimension and improved his sensitive to gradual edges. Then, a method of local extreme values difference (LEVD) was performed on the vertical projection of the boundary image. LEVD was operated in local neighborhood of each nonzero projection and search maximum and minimal projected value to mark edge projection, hence reducing the noise peak interference and obtaining a more accurate boundary projection curve. In order to obtain the boundary position, the peaks above a set threshold were fused according to the neighborhood judging rules and sorted by selective sorting algorithm (SPS) with the desired edge number, obtaining the initial location of coating boundary at u direction. In order to obtain more accurate edges of LBC, a segmented edge fitting method was proposed in this paper. First, an edge image was divided into several segments (6 parts in this paper) in the vertical direction, and a number of pixel values in the local range of the u points of the coarse boundary were taken along the gradient direction for each segment to form a boundary fitting vector. Then, the cubic spline curve fitting with the first boundary condition was used for each segment fitting vector. After that, the second derivative of the fitting curve was derived and equal to zero to find the maximum gradient point. Finally, the line fitting for each segment boundary point was done by means of oblique cutting to form the final accurate fitting boundary of LBC. Based on the proposed method, an online measurement system of LBC was developed and applied to the production practice. The field operation realized the high precision measurement with 0.2 pixel, and experimental results prove that the edge fitting method is robust, efficient and suitable for the production needs.

Citation: Liu H G, Kong J Y, Yang J T, *et al.* An edge fitting method for the online measurement of lithium battery coating[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(10): 180563

Supported by National Natural Science Foundation of China (51875418), Hubei Provincial Technology Innovation Project (2017ACA180), and Natural Science Foundation of Hubei Province (2017CFC830, 2018CFC795)

* E-mail: lhg81219@163.com