

A Rapid Algorithm for Defect Detection of Solar Cell Edges

Jie Ding

School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou
Email: 20114527004@suda.edu.cn

Received: Dec. 19th, 2012; revised: Dec. 24th, 2012; accepted: Jan. 10th, 2013

Abstract: Image processing techniques have attracted much attention in the field of automatically detection of industrial products. For the size measurement and defect detection of solar cell edges, fitting geometrical shape of the solar cell by local edge pixels is proposed to measure the sizes. Then a reverse traverse technique is used to detect the edge pixels. Finally, a curvature computation and a threshold processing are proceeded to detect the edge defects. Experimental results indicate that the proposed algorithm can measure the sizes accurately and quickly, and the new method to detect the defects of solar cell edge by curvature works effectively.

Keywords: Solar Cell; Edge Defects Detection; Shape Fitting; Reverse Traverse; Curvature

一种快速电池板边缘缺陷检测算法

丁杰

苏州大学计算机科学与技术学院, 苏州
Email: 20114527004@suda.edu.cn

收稿日期: 2012年12月19日; 修回日期: 2012年12月24日; 录用日期: 2013年1月10日

摘要: 近年来图像处理技术在工业产品的自动化检测中得到了广泛的重视和应用, 针对电池板尺寸测量和边缘缺陷检测, 本文首先提出通过局部边缘像素拟合电池板的几何形状来计算电池板的表面尺寸, 然后使用逆向遍历法检测指定边的像素集合, 最后通过边缘像素的曲率计算和阈值处理实现边缘缺陷的检测。实验表明, 本文中的算法能够准确并快速地实现电池板的尺寸测量, 并且通过曲率定位边缘缺陷的新方法效果显著。

关键词: 电池板; 边缘缺陷检测; 形状拟合; 逆向遍历; 曲率

1. 引言

近年来随着光伏产业的迅速发展, 图像处理技术已经广泛地应用到电池板的检测工艺中, 促进了电池板自动化检测技术的不断发展。针对电池板尺寸测量和表面缺陷的检测, 学者们相继提出了一系列图像研究方法, 如上海交通大学付庄^[1]提出了缺陷的潜在轮廓提取方法, 柳效辉^[2]提出了电池板内部裂纹的检测方法, 华南理工大学张舞杰^[3]提出通过边缘像素与拟合直线间的距离检测电池板外形破损。现今国内外一些公司推出了自己的太阳能电池板检测仪, 如德国 SENSOPART 公司研发的 FA46-SolarSensor, 苏州诺

威特测控科技有限公司推出了全功能电池片光学特性检测复合机。目前, 对电池板的自动化检测技术的研究仍处在不断发展的阶段, 尤其在国内利用图像处理技术实现电池板的自动化检测具有广阔的前景。

针对电池板的尺寸测量, 图像处理的研究方法主要有拟合和 Hough 变换检测电池板几何形状, 但是首先需要使用比较复杂的边缘检测算法检测边缘像素, 如燕山大学赵黎静^[4]提出在 Canny 算法检测的边缘上进行 Hough 变换检测直线, 需要耗费大量的系统运行时间。为此, 本文提出了通过局部边缘像素进行电池板几何形状的拟合。目前对于电池板的边缘缺陷检

测，图像处理方法主要有模板匹配和边缘像素的距离测量来确定边缘破损，如西南科技大学邸中华^[5]提出的模板匹配和差影法进行破损检测，燕山大学赵黎静^[4]通过像素距离测量边缘破损，其通用性和准确性不高。对此，本文提出使用逆向遍历法检测电池板指定边的边缘像素，然后通过边缘曲率计算和阈值处理进行边缘缺陷定位。本文中的算法能够准确并快速地实现电池板的尺寸测量，并且通过曲率定位边缘缺陷的新方法效果显著。电池板尺寸测量和边缘缺陷检测整体工艺流程如图 1 所示。

2. 电池板尺寸测量

硅太阳能电池板在生产过程中，由于设备本身老化，振动以及人员操作不慎等因素，导致生产的电池板不符合厂商的尺寸规格，因此需要进行电池板尺寸测量。

2.1. 电池板结构

硅太阳能电池板主要是由能将光转换为电的单晶硅片构成，其外形由四条直线边和 4 段圆弧组成，表面印有晶花，如图 2 所示。

为了捕获更好的电池板图像，降低晶花对测量电池板尺寸参数的影响，在物理设备上，我们采用弧形灯光源照射来降低电池板表面晶花对光线的反射，使得面阵相机捕获的图像中电池板和底板背景分离较为明显。

如图 3 所示，硅太阳能电池板表面尺寸参数主要有：电池板的边长(A)、直径(B)、直线段长(C)、弧长投影(D)、对边平行度，邻边垂直度。

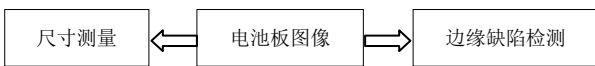


Figure 1. Flow chart
图 1. 流程图

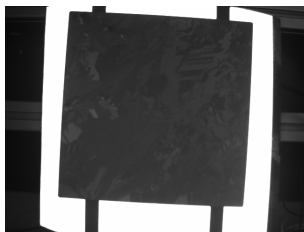


Figure 2. Solar cell
图 2. 电池板

2.2. 尺寸测量算法

尺寸测量算法，步骤如下：1) 采用 Otsu^[6]全局阈值法对电池板图像进行二值化处理；2) 从图像中心点出发，检测指定宽度的局部边缘像素；3) 采用最小二乘直线拟合硅太阳能电池板边缘；4) 沿着电池板直角线方向检测圆弧上的局部边缘像素，采用最小二乘圆拟合圆弧。电池板尺寸测量流程如图 4 所示。

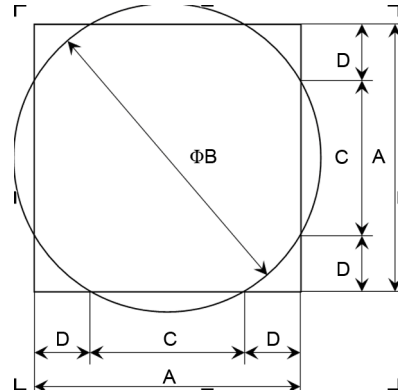


Figure 3. Size parameter
图 3. 尺寸参数

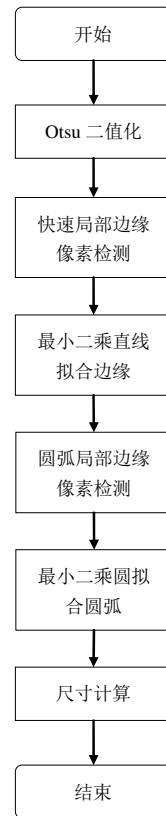


Figure 4. Sizes measurement flowchart
图 4. 尺寸测量流程图

对于图像的二值化处理,我们采用了用时最少的全局阈值法最大类间方差法(Otsu),在保证图像平面几何特征的同时降低图像的信息,图像二值化效果如图 5 所示。

局部边缘像素的检测,首先取整幅图像的中心点,根据图像几何特性,在水平(竖直)方向进行一定长度的线扫描,从中心点开始往四边局部边缘进行检测。对于转换后的二值图(像素值为 0 或 255),即寻找到第一个像素为 255 的像素边缘集合,检测效果如图 6 所示。

采用最小二乘法对四条边的局部边缘像素进行直线拟合,最小二乘法拟合直线公式如下:

直线方程形式为:

$$y = a + bx \quad (1)$$

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - b \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$b = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (3)$$

$(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$ 为一组局部边缘点实验检测数据,利用最小二乘法我们得到四条边的拟合直线方程,拟合效果如图 7 所示。通过直线的交点计算四边边长,利用直线斜率计算对边平行度及邻边垂直度。

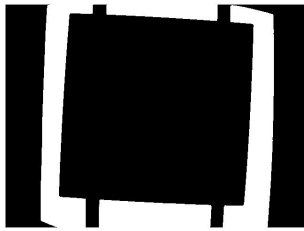


Figure 5. Binary image
图 5. 二值化图像

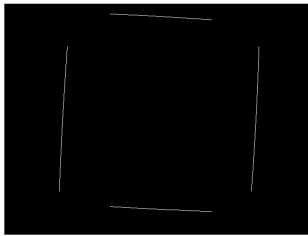


Figure 6. Local edge pixels
图 6. 局部边缘像素

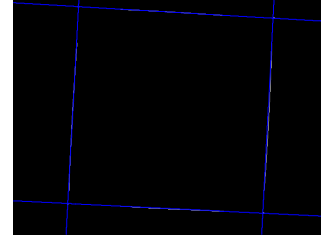


Figure 7. Edge line fitting
图 7. 边缘直线拟合

圆弧上局部边缘像素的检测,通过沿对角线方向进行像素扫描,寻找到对角线与圆弧的四个交点。再以交点为中心的指定宽度区域进行边缘点检查,得到一组局部边缘像素,用最小二乘法拟合圆方程,最小二乘法拟合圆公式如下:

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \quad (4)$$

$$Q(a, b, c) = \sum_{i=1}^n \left[(x_i - \alpha)^2 + (y_i - \beta)^2 - r^2 \right] \quad (5)$$

公式(4)为圆方程,公式(5)中 $Q(a, b, c)$ 为圆弧上局部像素点 $(x_i, y_i), i \in (1, 2, \dots, n)$ 到圆心 (α, β) 的距离平方与圆弧半径平方的差的平方和。由最小二乘原理,参数 $a = a_0, b = b_0, c = c_0$ 使得 $Q(a, b, c)$ 取最小值。

$$a_0 = \frac{HD - EG}{CG - D^2} \quad (6)$$

$$b_0 = \frac{HC - ED}{D^2 - GC} \quad (7)$$

$$c_0 = -\frac{\sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) + a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (8)$$

公式(6), (7)中 C, D, E, G, H 分别记作:

$$C = n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

$$D = n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \quad (10)$$

$$E = n \sum_{i=1}^n x_i^3 + n \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 - \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) \sum_{i=1}^n x_i \quad (11)$$

$$G = n \sum_{i=1}^n y_i^3 - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n y_i \quad (12)$$

$$H = n \sum_{i=1}^n y_i^3 + n \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i - \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) \sum_{i=1}^n y_i \quad (13)$$

由 a_0, b_0, c_0 确定拟合圆方程, 拟合效果如图 8 所示, 根据圆方程进而计算直径和弧投影。

3. 电池板边缘缺陷检测

在电池板图像二值化基础上, 边缘缺陷检测算法步骤如下: 1) 采用逆向遍历法检测指定边的边缘像素; 2) 计算边缘像素的曲率, 通过曲率阈值处理检测出边缘缺陷。边缘缺陷检测流程如图 9 所示。

3.1. 逆向遍历法

逆向遍历法检测电池板右边缘像素, 以圆弧上的某一边缘点为起点, 对二值图像进行逆向遍历, 逆向遍历法定义如下:

$$E_{n+1} = \{(x, y) | E_{n-1,i}\}, i = 1, 2, \dots, 7 \quad (14)$$

E_{n+1} 是第 $n+1$ 边缘像素点, E_n 具有八个邻域像素,

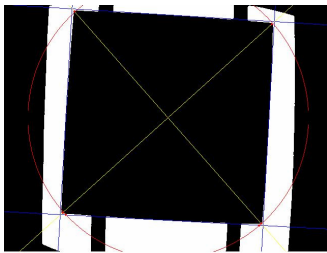


Figure 8. Fitting image
图 8. 拟合效果图



Figure 9. Defects detection flowchart
图 9. 缺陷检测流程图

$E_{n-1,i}$ 表示当前边缘像素 E_n 以邻域边缘像素 E_{n-1} 为基准, 逆时针方向遍历 E_n 的其余邻域像素, 找到首个边缘像素。

对于二值图像(像素值为 0 或 255), 起始边缘点像素值为 0, 通过逆向遍历法寻找下一个像素为 0 的边缘点, 进而获得一组边缘像素集合, 如图 10 的电池板右边缘像素集合。

3.2. 曲率计算与阈值处理

曲率衡量曲线的弯曲程度, 因此用曲率能够直观地刻画出边缘缺陷处的不平整程度。我们首先对右边缘每个像素进行曲率计算, 曲率公式如下:

$$k(s, \sigma) = \frac{\Delta x(s, \sigma) \Delta^2 y(s, \sigma) - \Delta^2 x(s, \sigma) \Delta y(s, \sigma)}{\left((\Delta x(s, \sigma))^2 + (\Delta y(s, \sigma))^2 \right)^{3/2}} \quad (15)$$

对获得的一组边缘像素的曲率进行阈值处理, 阈值 T 选取如下:

$$T = \frac{\sum k(s, \sigma)}{n} \quad (16)$$

n 为集合 $\{k(s, \sigma) | k(s, \sigma) \neq 0\}$ 元素个数, 选取大于阈值 T 的曲率边缘点为边缘缺陷点, 如图 11 所示即为边缘缺陷处。

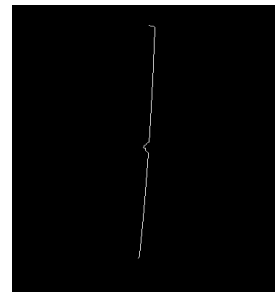


Figure 10. Edge image
图 10. 边缘

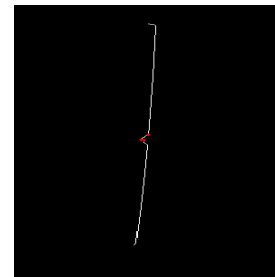


Figure 11. Curvature and thresholding
图 11. 曲率与阈值处理

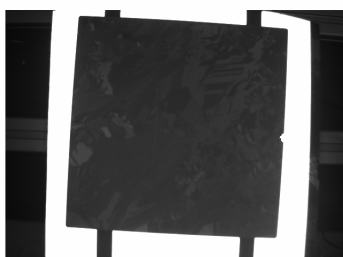


Figure 12. Edge crack image
图 12. 边缘缺陷图

4. 实验结果与分析

本文试验中应用到的原始图片有图 2 和图 12, 对原始图像首先进行 Otsu 二值化处理, 然后进行各边局部边缘像素的检测, 并且根据边缘像素集进行最小二乘直线拟合得到硅片各边直线。最后采用沿对角线跟踪的方法检测圆弧上局部边缘像素, 进行最小二乘圆拟合。采用局部边缘像素拟合代替传统的整个电池板边缘拟合, 类似于投影法避免了如 Canny^[7]算法复杂的边缘检测过程。从实验结果图 8 上, 我们可以清晰地看出实验拟合效果很好。对边缘缺陷检测, 采用了曲率和阈值处理替代了传统的距离测量, 如图 11 中, 电池板边缘缺陷处得到了准确的定位, 而且实验方法简单, 能够满足自动化检测设备的精度和时间性能要求。

5. 结语

随着光伏产业和计算机技术的不断发展, 电池板的自动化检测发展到了利用基于图像处理技术的软件系统实现高性能检测阶段。本文提出的图像处理检测算法过程简单, 而且巧妙地利用了硅片图像的特点实现了局部边缘像素的定位, 同时提出逆向遍历法和曲率检测边缘缺陷, 在准确实现测量和定位的同时, 提高了时间性能。

参考文献 (References)

- [1] Z. Fu, Y. Zhao, Y. Liu, et al. Solar cell crack inspection by image processing. *International Conference on the Business of Electronic Product Reliability and Liability*, 2004: 77-80.
- [2] 柳效辉, 徐林, 肖晨江等. 基于 Matlab 的图像处理技术识别硅太阳能电池的缺陷[J]. *上海交通大学学报*, 2010, 44(7): 926-930.
- [3] 张舞杰, 李迪, 叶峰. 硅太阳能电池视觉检测方法研究[J]. *计算机应用*, 2010, 30(1): 245, 249-252.
- [4] 赵黎静. 单晶硅电池片的几何和测量与缺陷检测系统设计与实现[D]. 燕山大学, 2012.
- [5] 邸中华, 邓璇, 武志翔. 太阳能电池板的检测系统及方法研究[J]. *计算机光盘软件与应用*, 2011, 21: 24-26.
- [6] 李梅. 基于 Otsu 算法的图像分割研究[D]. 合肥工业大学, 2011.
- [7] J. Canny. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 10(5): 720-727.