

文章编号 1004-924X(2015)增-0614-09

自动切割机圆锯片刀具磨损检测算法

齐继阳*, 王凌云, 吴倩, 李金燕

(江苏科技大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212003)

摘要:为实现玻璃板自动切割机圆锯片磨损量在线检测,设计了基于计算机视觉的圆锯片磨损检测算法。首先基于自适应阈值,运用 8 邻域灰度相似度筛选算法找出圆锯片的候选角点;针对候选角点,判断其是否为邻域内唯一角点或其角点响应函数值最大,剔除掉伪角点。然后,判断角点是否为曲线上极大值点来剔除齿根点,从而确定圆锯片刀尖点的整像素坐标。最后,利用三次曲面拟合法对刀尖点进行亚像素定位,使用最小二乘法求解刀尖点所在圆的半径值,通过相机标定关系得出圆锯片的实际磨损量。通过实验比较了用经典 Harris 算法,改进 Harris 算法和本文提出的算法检测圆锯片磨损量的结果。结果表明:在两种圆锯片磨损量检测中,本文中提出算法的检测时间仅为经典 Harris 算法的 29.9%和 29.7%,为改进 Harris 算法的 145.7%和 126.5%;对两种圆锯片刀尖点检测时,改进 Harris 算法的正确率为 100%,50%,经典 Harris 算法的正确率为 71.4%,37.5%,本文提出算法的正确率为 100%,100%。因此,本文提出的算法在圆锯片磨损检测中具有明显的优势,是一种有效的圆锯片磨损检测方法。

关键词:自动切割机;圆锯片;刀具;磨损检测;计算机视觉;角点检测;亚像素

中图分类号:TP242.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0614

Measuring algorithm for tool wear of circular saw blade in automatic cutting machine

QI Ji-yang*, Wang Ling-yun, WU Qian, LI Jin-yan

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science &
Technology, Zhenjiang 212003, China)

* Corresponding author, E-mail: jyqi@just.edu.cn

Abstract: To measure the wear of circular saw blade of an automatic magnesium oxide board cutting machine on line, this paper designs a circular saw blade wear measuring algorithm based on machine vision. Firstly, the possible corners of circular saw blade are found using 8 neighborhood gray similarity sifting algorithm based on an adaptive threshold. Then, some pseudo corners which are not the only one or its corner response function values are not the largest among the neighborhoods are removed. The tip points of circular saw blade are determined among the corners according to whether their value is the maximum, and the sub-pixel coordinates of tip points of circular saw blade are calculated using cubic surface fitting. The radius of the circular saw blade is calculated with least square method. Then, through the known relationship between camera coordinate and world coordinate, the actually

收稿日期:2015-05-28;修订日期:2015-06-10.

基金项目:江苏省产学研前瞻性联合研究资助项目(No:BY2013066-02)

wear value of circular saw blade is obtained. At last, tool wears for two kinds of circular saw blades are calculated using the classical Harris algorithm, improved Harris algorithm and the proposed algorithm in the paper respectively. The results show that the detection time of the algorithm proposed is only 29.9% and 29.7% that of classic Harris algorithm respectively, and 145.7% and 126.5% of that of improved Harris algorithm respectively. The correct ratios of classic Harris algorithm are 100% and 50% respectively, and those for improved Harris algorithm are 71.4% and 37.5%, for proposed algorithm are 100% and 100% respectively. Therefore, the algorithm proposed in the paper is much better than other two algorithms and it is an effective and efficient method for measuring the tool wear.

Key words: automatic cutting machine; circular saw blade; cutting tool; wear detection; computer vision; corner detection; sub-pixel

1 引言

任何刀具在使用过程中,都会产生磨损现象,刀具的磨损对产品的加工质量和加工效率都会产生严重的影响。探索刀具磨损量的在线检测方法,再根据检测结果通过微位移机构对刀具的磨损进行补偿,减小加工误差,具有重要的理论意义和应用价值。

刀具磨损检测的传统方法是以工具显微镜为测量设备,每次检测时,都需拆装刀具或刀片,检测结束后,又要重新装夹刀具和对刀,致使整个检测过程费时费力^[1],且无法实现刀具磨损量的在线检测。

目前刀具的在线磨损检测可分为间接检测法和直接检测法。间接检测法通常包括监测振动信号和电机电流信号,构建振动信号和电机电流信号与刀具磨损量的关系,从而检测刀具的磨损状态^[2];监测切削力的变化从而检测刀具的磨损状态;监测加工过程中声发射信号,建立声发射信号与刀具磨损量的关系,检测刀具的磨损状态^[3];还有监测已加工表面特性和表面质量^[4-5]。这些方法都是定性地估计刀具磨损状态。而直接检测法一般是利用机器视觉或光学显微镜对刀具磨损状态直接进行观测^[6],再运用合适的算法对获取的图像进行处理,从而直接获得刀具的磨损量大小。

随着图像处理算法的成熟以及硬件能力的提升,利用机器视觉技术的在线检测被广泛应用于尺寸、位移、表面形状检测等领域^[7]。应用机器视觉检测刀具磨损的方法有两种^[8]:一种是基于工

件表面的刀具磨损检测方法;另一种是基于刀具本身的检测方法,即利用图像处理技术提取刀具磨损区,计算刀具磨损的几何参数。

圆锯片的磨损量检测也常用以上方法。杭州电子科技大学赵玲^[9]等人基于机器视觉构建了圆锯片几何参数测量系统。该方法以圆锯片轮廓优化为基础,对圆锯片内圆孔提出了改进的二次多项式插值亚像素定位方法,对齿尖两段直线采用改进的最小二乘法进行拟合,以提高检测精度。但是该方法必须获得圆锯片的整幅图像,无法实现圆锯片磨损量在线测量。瑞典 Ekevad 等人^[10]在锯切山毛榉过程中,构建了圆锯片磨损量与锯片振动信号之间的关系。该方法虽然实现了圆锯片磨损量的在线测量,但是很难找到圆锯片磨损量与锯片振动信号的精确数量关系,只能对圆锯片磨损量进行定性检测。

2 圆锯片磨损检测方案设计

为实现圆锯片磨损量的在线定量检测,本文采用检测圆锯片的图像来计算其磨损量。先利用图像采集设备获取圆锯片的数字图像,然后利用恰当的算法求取圆锯片刀尖点的亚像素坐标,再利用最小二乘法求解圆锯片刀尖点所在圆的半径,最后通过已知的相机标定关系算出圆锯片的实际磨损量。

整个系统以工业计算机作为主控制器,通过嵌入的图像采集卡实现图像的采集,数据采集卡负责对外部信号的采集和微位移补偿机构的动作控制。整个检测系统的工作流程为:安装在切割

机零点位置的接近开关检测到切割机回零的信号后,数据采集卡将该信号送给工控机,工控机接收到该信号后输出图像获取指令,图像采集卡触发工业相机开始获取圆锯片图像,图像获取完成后,图像采集卡从工业相机中读取图像并送给工控机,工控机利用预先编写好的图像处理程序对圆锯片图像进行处理,计算圆锯片的磨损量,并根据预设的判别准则做出决策。若圆锯片磨损量超过设定的阈值,工控机输出信号微位移补偿机构动作,等微位移补偿机构动作到位后开始进行下一次切割;若刀具磨损量小于设定的阈值,就直接进行下一次切割(如图 1 所示)。

14gm 工业相机,镜头采用日本 Computar 公司的 M5018-MP2 定焦镜头,图像采集卡采用台湾凌华公司 PCIe-GIE64+ 图像采集卡。被测圆锯片经透射光源照射后成像于 CCD 上,通过 PCIe-GIE62+ 图像采集卡将采集到的数字图像传输到计算机,计算机对采集的图像进行数据处理并计算出测量结果。

3 圆锯片磨损量检测算法设计

3.1 圆锯片刀尖点检测算法的设计

3.1.1 经典 Harris 算法

Harris 算法是一种基于图像灰度值变化的角点检测算法^[11-12]。角点是二维图像亮度变化剧烈或图像边缘曲线上曲率极大值的点,它决定了目标的轮廓特征,被广泛应用于摄像机标定、虚拟场景重建、运动估计、图像配准等计算机视觉处理任务中,这些点在保留图像图形重要特征的同时,可以有效地减少信息的数据量,使得实时处理成为可能^[13]。该算法以目标像素为中心选择一个小窗口,将此窗口沿任意方向移动,求解沿任意方向移动后窗口内的灰度变化,以此计算目标像素点的角点响应函数值(Corner Response Function CRF),通过判断 CRF 与设定阈值 T 的大小关系(CRF 大于阈值 T 的像素点为角点)确定初始角点,然后利用局部非最大抑制算法筛选出最终角点。

将以 (x, y) 为中心的窗沿平移向量 (u, v) 移动所引起的灰度变化 $E(u, v)$ 定义为:

$$E(u, v) = \sum_{x, y} \omega(x, y) [I(x+u, y+v) - I(x, y)]^2, \quad (1)$$

其中: $I(x+u, y+v)$ 为平移后的灰度值, $I(x, y)$ 为平移前的灰度值, $\omega(x, y)$ 为高斯窗口函数。

由全微分可知,

$$I(x+u, y+v) - I(x, y) = \frac{\partial I}{\partial x}u + \frac{\partial I}{\partial y}v,$$

记 $I_x = \frac{\partial I}{\partial x}$, $I_y = \frac{\partial I}{\partial y}$, 则

$$E(u, v) = \sum_{x, y} \omega(x, y) (I_x u + I_y v)^2 = \sum_{x, y} \omega(x, y) (I_x^2 u^2 + 2I_x I_y uv + I_y^2 v^2). \quad (2)$$

写成矩阵形式为:

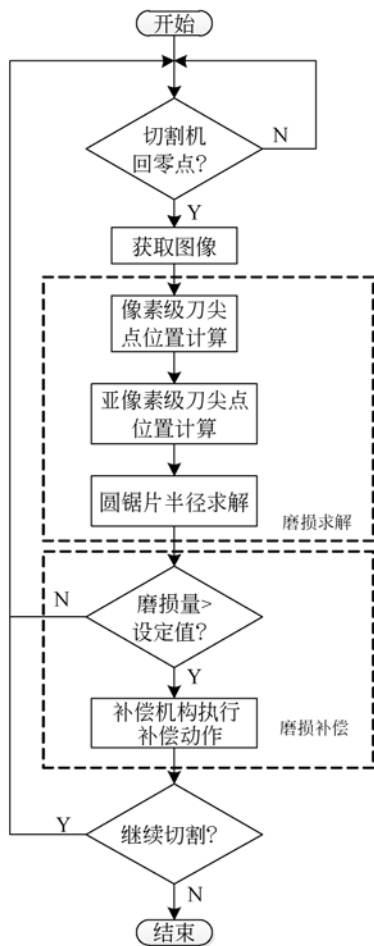


图 1 圆锯片磨损检测和补偿方案

Fig. 1 Detection and compensation scheme of wearing for circular saw blade

其中的图像采集模块由光源、工业相机、图像采集卡、计算机及相应的软件组成。工业相机采用德国 BASLER 公司的 500 万像素 acA2500-

$$\mathbf{E}(u, v) = [u \quad v] \mathbf{M} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 \mathbf{M} 为目标像素点 (x, y) 的自相关函数矩阵, 且

$$\mathbf{M} = \sum_{x, y} \omega(x, y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix},$$

式中: $\omega(x, y)$ 为高斯窗口函数, $\omega(x, y) = e^{-(x^2+y^2)/\sigma^2}$, $I(x, y)$ 表示像素灰度值, 范围为 $0 \sim 255$ 。

Harris 算法定义目标像素点 (x, y) 的角点响应函数值为:

$$\text{CRF}(x, y) = \det(\mathbf{M}) - k(\text{trace } \mathbf{M})^2, \quad (4)$$

其中: $\det(\mathbf{M})$ 表示矩阵 \mathbf{M} 的行列式, $\text{trace}(\mathbf{M})$ 表示矩阵的迹, k 为经验值, 一般取 $0.04 \sim 0.06$, 当目标像素点的 CRF 值大于给定的阈值时, 该像素点即为角点。

3.1.2 改进的 Harris 算法

Harris 算法提取的角点稳定可靠、均匀合理, 但其检测速度慢、实时性差, 其主要原因是 Harris 算法要对整幅图像(边界点除外)每个像素点进行角点响应函数值计算。为了减少计算量, 王葳^[14]等人提出了 8 邻域灰度相似度筛选算法, 主要目的是缩小参与角点响应函数值计算的候选点数目。

改进的 Harris 算法在 Harris 算法提取角点前, 设定角点灰度相似阈值 t , 计算目标点 (x, y) 与其 8 邻域范围内各像素点的灰度值之差 ΔI , 并统计 ΔI 在 $[-t, t]$ 内的像素点个数 n , 最后通过 n 值的取值范围判断目标点是否为候选角点。本文规定 $0 \leq n < 2$ 的目标点为噪声点, $2 \leq n \leq 6$ 的目标点为候选角点, $6 < n \leq 8$ 的目标点为平滑区域点。

3.1.3 圆锯片刀尖点检测算法

王葳等人通过对经典的 Harris 算法进行了改进, 大大缩短了角点检测的时间, 但同时也带来了严重的角点聚簇现象, 即多个伪角点聚集在一起; 其次改进的 Harris 算法提取的角点既包括刀尖点, 也包括齿根点, 无法准确地将两者区分开。为此, 本文设计了一种专用于圆锯片的角点检测算法, 通过 3 次筛选以确定圆锯片刀尖点的像素坐标。该算法的流程如图 2 所示。

(1) 第 1 次筛选

经典的 Harris 算法和改进的 Harris 算法, 对

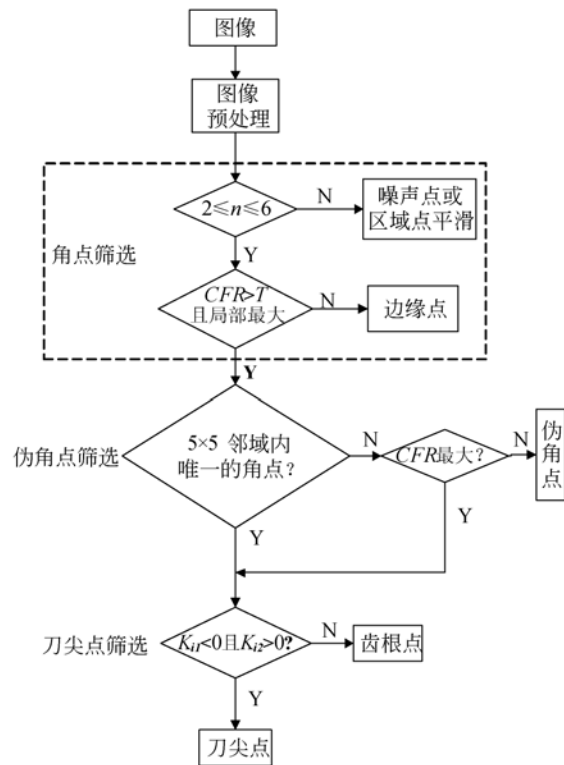


图 2 圆锯片刀尖点检测算法流程图

Fig. 2 Flow chart of detection algorithm for circular saw blade tip point

不同图像的角点检测效果差异甚大, 其主要原因是固定阈值的自适应性差。为了提高算法的整体适应性, 降低由于阈值设置不合理而引起的角点错检和漏检, 在圆锯片刀尖点检测算法中, 使用自适应阈值选取办法。将图像灰度值的标准差作为 8 邻域灰度相似判定阈值 t ^[15]; 将图像的最大角点响应函数值 CFR_{\max} 的 1% 作为角点响应检测阈值 T 。

(2) 第 2 次筛选

经过第 1 次筛选得到的初始角点中存在大量伪角点, 这些伪角点会直接导致检测结果错误, 必须剔除。将第 1 次筛选所确定的初始角点作为第 2 次筛选的对象, 对其进行真伪角点判断。将每个目标点的 5×5 邻域作为感兴趣区域, 判断目标点是否为唯一的角点, 若是, 则将此目标点视为真正的角点保存; 若不是, 则再次判定。搜索出 5×5 邻域内的其他角点并将这些角点中 CRF 最大的像素点作为真正的角点保存。

(3) 第 3 次筛选

至此, 已提取出圆锯片上的所有角点, 但这些

角点不仅包含圆锯片的刀尖点,还可能包含相邻锯齿间的齿根点,而这些非刀尖点会引起圆拟合的偏差甚至错误,因此要进行再次筛选以剔除非刀尖点。将圆锯片的边缘轮廓看作是一条连续的曲线,则刀尖点为该曲线上的极大值点,而相邻锯齿间的齿根点为曲线的极小值点。设第 i 个角点的像素坐标为 (x_i, y_i) ,该角点与前一个角点连线的斜率为 $k_{i1} = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}$,与后一个角点连线的斜率为 $k_{i2} = \frac{y_i - y_{i+1}}{x_i - x_{i+1}}$,若 $k_{i1} < 0$ 且 $k_{i2} > 0$,判定该点不为刀尖点,将其剔除。

3.2 亚像素定位

无论是经典的 Harris 算法,还是改进的 Harris 算法,所提取的角点都是像素级精度,若

$$\text{CRF}(x_i, y_i) = a_{00} + a_{01} y_i + a_{02} y_i^2 + a_{03} y_i^3 + a_{10} x_i + a_{20} x_i^2 + a_{30} x_i^3 + a_{11} x_i y_i + a_{21} x_i^2 y_i + a_{12} x_i y_i^2.$$

选取 5×5 的拟合窗口,构造 25 个方程,利用这 25 个方程求解 $(a_{00}, a_{01}, a_{02}, a_{03}, a_{10}, a_{20}, a_{30}, a_{11}, a_{21}, a_{12})$ 10 个待定系数,这为一个超定方程组,采用最小二乘法求解。设拟合的误差平方和为: $\epsilon = \sum_{i=1}^{25} (\text{CRF}_i - \text{CRF}(x_i, y_i))^2$,要求解 ϵ 取最小值对应的系数,也就是求解满足条件 $\frac{\partial \epsilon}{\partial a_{ij}} = 0$ 所确定的 $(a_{00}, a_{01}, a_{02}, a_{03}, a_{10}, a_{20}, a_{30}, a_{11}, a_{21}, a_{12})$ 。利用确定的三次曲面表达式求解整像素刀尖点细分为 3×3 亚像素点的 CRF,取 9 个亚像素点中 CRF 最大值所对应的亚像素坐标作为该刀尖点的坐标。

3.3 基于最小二乘法的圆锯片半径求解算法

最小二乘法,也称最小平方法,是工程中最常用的一种优化技术,它通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配。本文就借用该方法来拟合刀尖点所在圆的曲线函数,并求解出圆锯片的半径值。

设圆的方程为: $x^2 + y^2 + Ax + By + c = 0$,则圆心坐标为 $(-A/2, -B/2)$,圆的半径 $r^2 = (A^2 + B^2 - 4C)/4$ 。设刀尖点 (x_i, y_i) 到圆心距离的平方与圆半径的平方差为:

$$\delta_i^2 = d_i^2 - r^2 =$$

想利用像素级精度来实现高精度检测,必须使用高分辨率、高性能的硬件设备,为此需要投入大量的成本。为了在不改变硬件设备的前提下提高检测精度,学者们做了大量研究,提出了亚像素技术。亚像素就是对物理像素进行 k 细分,如果原始图像是 n 行 m 列,经 k 细分后,变成了 kn 行 km 列,这意味着每个像素被分为更小的单元,从而对这些更小的单元实施插值算法以提高算法精度。常用的亚像素定位算法有矩法、拟合法和插值法,其中曲面拟合法具有抗噪能力较强、精度高、计算效率高等优点^[16],实际应用较为广泛。本文设计的是一种基于 CRF 的三次曲面拟合法。

整像素刀尖点 (x, y) 及其某邻域内各点的 CRF 分布可用二元三次函数表示:

$$\left(x_i + \frac{A}{2}\right)^2 + \left(y_i + \frac{B}{2}\right)^2 - r^2 = x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C,$$

$$F(A, B, C) = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 =$$

$$\sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C)^2$$

要求 $F(A, B, C)$ 取最小值时 A, B, C 的取值, $F(A, B, C) \geq 0$,因此存在大于等于零的极小值,则

$$\frac{\partial F(A, B, C)}{\partial A} = 0,$$

$$\frac{\partial F(A, B, C)}{\partial B} = 0,$$

$$\frac{\partial F(A, B, C)}{\partial C} = 0.$$

解得

$$A = \frac{be - cd}{ad - b^2}, \quad (5)$$

$$B = \frac{ae - bc}{b^2 - ad}, \quad (6)$$

$$C = -\frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) + A \sum_{i=1}^n x_i + B \sum_{i=1}^n y_i \right]. \quad (7)$$

其中

$$a = n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i,$$

$$b = n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i,$$

$$c = n \sum_{i=1}^n x_i^3 + n \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 - \sum_{i=1}^n (x_i + y_i) \sum_{i=1}^n x_i,$$

$$d = n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n y_i,$$

$$e = N \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i + N \sum_{i=1}^n y_i^3 - \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) \sum_{i=1}^n y_i.$$

计算出 A, B, C 后,再根据 $r^2 = (A^2 + B^2 - 4C)/4$ 可以快速地计算出刀尖点所在圆的亚像素半径值,再根据相机标定关系,求出刀具实际的半径值,两次检测结果之差即为圆锯片的磨损量。

4 实验结果及分析

为了验证本文算法的有效性,设计了圆锯片刀尖点检测效果对比试验。试验选用两种不同外形特性的圆锯片,圆锯片 1 相邻锯齿间过渡平缓,圆锯片 2 相邻锯齿间过渡急促。分别采用经典

Harris 算法、改进的 Harris 算法和本文算法提取圆锯片的刀尖点,其检测结果如表 1 和表 2 所示,检测效果如图 3 和图 4 所示。

表 1 圆锯片 1 的检测参数

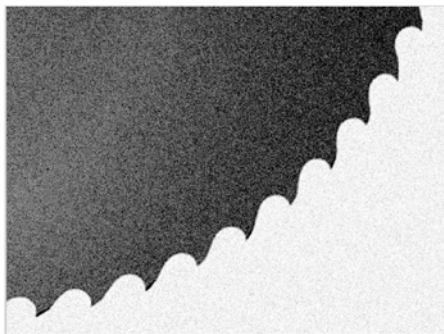
Tab. 1 Measuring parameters of circular saw blade No. 1

	运行时间 /s	刀尖点 数目	检测到的 角点数目
经典 Harris 算法	5.25	10	10
改进的 Harris 算法	1.078	10	14
本文算法	1.571	10	10

表 2 圆锯片 2 的检测参数

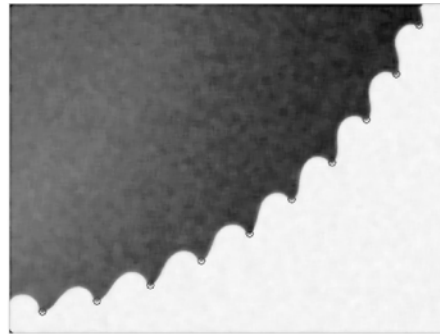
Tab. 2 Measuring parameters of circular saw blade No. 2

	运行时间 /s	刀尖点 数目	检测到的 角点数目
经典 Harris 算法	4.39	12	24
改进的 Harris 算法	1.031	12	32
本文算法	1.304	12	12



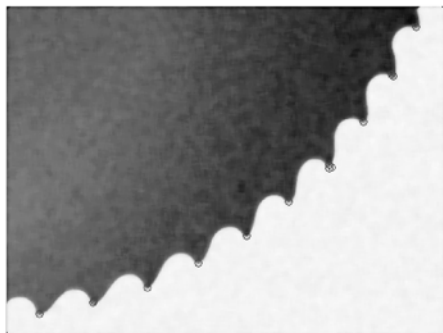
(a) 圆锯片 1 灰度图像

(a) Gray image of circular saw blade No. 1



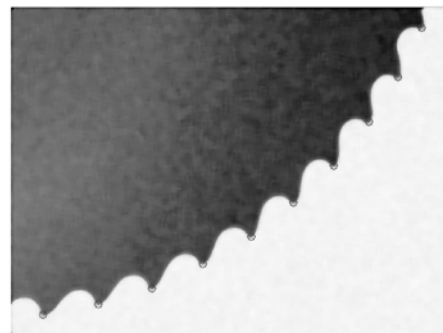
(b) 经典 Harris 算法提取的圆锯片 1 刀尖点

(b) Tip points of circular saw blade No. 1 extracted by classical Harris algorithm



(c) 改进的 Harris 算法提取的圆锯片 1 刀尖点图

(c) Tip points of circular saw blade No. 1 extracted by improved Harris algorithm



(d) 本文算法提取的圆锯片 1 刀尖点

(d) Tip points of circular saw blade No. 1 extracted by proposed method

图 3 圆锯片 1 刀尖点的检测效果图

Fig. 3 Comparison of measuring results of circular saw blade No. 1

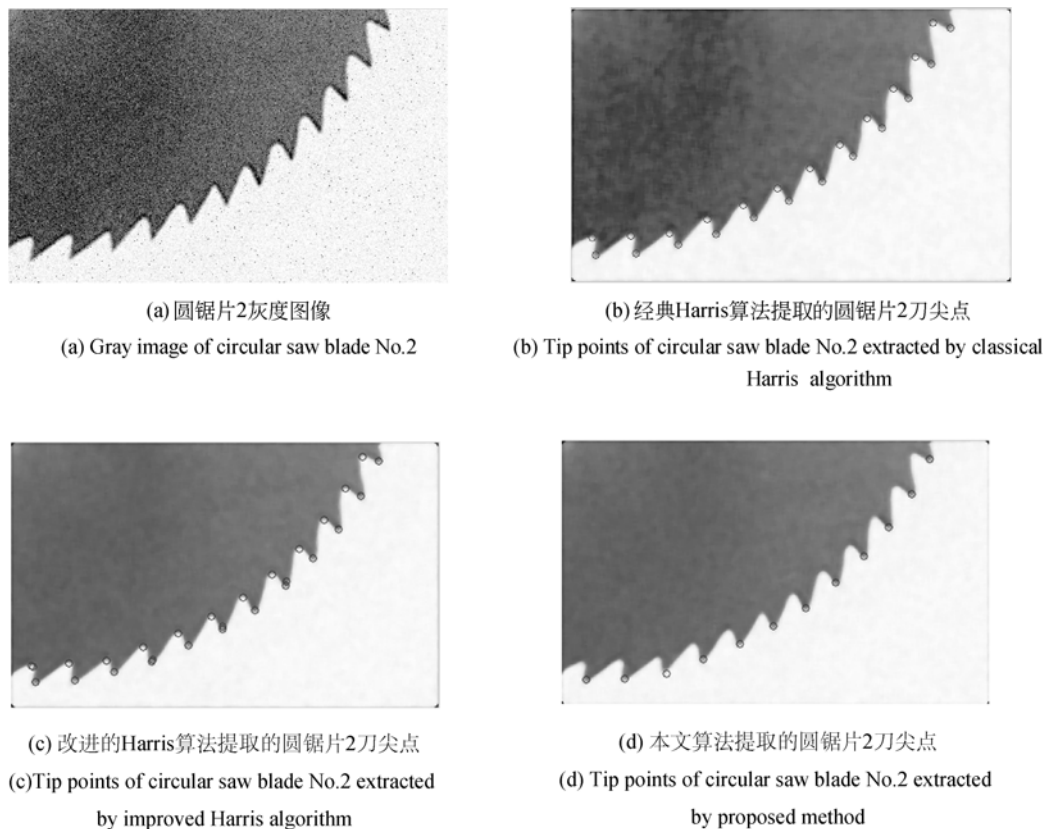


图 4 圆锯片 2 刀尖点的检测效果图

Fig. 4 Comparison of measuring results of circular saw blade No. 2

由表 1~2 及图 3~4 可知:改进的 Harris 算法运行时间最短,其运行时间不到经典 Harris 算法的 20%;本文算法运行时间也不到经典 Harris 算法的 35%。本文算法刀尖点提取效果最好。经典 Harris 算法对圆锯片 1 刀尖点提取效果好,但对圆锯片 2 提取的角点不仅包括刀尖点,还包含了相邻锯齿间的齿根点;改进的 Harris 算法提取的角点存在严重的聚簇现象,检测效果最差。可见,本文设计算法在圆锯片磨损检测应用中更有效。

5 结 论

本文针对经典 Harris 算法和改进 Harris 算法无法对不同圆锯片刀尖点准确定位的情况,提

出了一种专用于圆锯片刀尖点检测的算法,通过 3 次筛选,确定圆锯片刀尖点的整像素坐标,再利用 3 次曲面拟合法对刀尖点进行亚像素定位,最后使用最小二乘法求解刀尖点所在圆的半径值。在两种圆锯片磨损量检测中,本中提出算法的检测时间仅为经典 Harris 算法的 29.9%和 29.7%,但较改进 Harris 算法稍有增加。对两种圆锯片刀尖点检测的正确率,经典 Harris 算法分别为 100%和 50%,经典 Harris 算法分别为 71.4%和 37.5%,本文提出算法均为 100%。实验结果表明,该算法具有实时性好、检测精度高、适用不同圆锯片刀尖点检测的特点,是一种有效的圆锯片磨损检测方法。将该检测系统与刀具自动补偿装置联合使用有望解决困扰玻镁板材自动化切割的瓶颈问题。

参考文献:

[1] 蒋理科,祝益军,冯炎清,等. 难加工材料刀具磨损

检测技术研究与应用[J]. 航空制造技术,2010 (22):59-63.

JIANG L K, ZHU Y J, FENG Y Q, et al.. Re-

- search and application of tool wear detection technology [J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2010(22):59-63. (in Chinese)
- [2] 欧阳八生, 唐少农. CNC 车削中刀具磨损实时监控的试验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(4):127-129.
QUYANG B SH, TANG SH N. Study of tool wear on-line monitoring in CNC turning [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4):127-129. (in Chinese)
- [3] 张锴锋, 袁惠群, 聂鹏. 基于广义分形维数的刀具磨损状态监测[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(1):162-164.
ZHANG K F, YUAN H Q, NIE P. Tool wear condition monitoring based on generalized fractal dimensions [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(1):162-164. (in Chinese)
- [4] ZHANG C, LIU X H, FANG J W, *et al.*. A new tool wear estimation method based on shape mapping in the milling process [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 53(1-4):121-130.
- [5] SHAHABI H H, RATNAM M M. Assessment of flank wear and nose radius wear from workpiece roughness profile in turning operation using machine vision [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 43(1-2):11-21.
- [6] 于化东, 张留新, 许金凯, 等. 微小车床刀具磨损检测方法[J]. *长春理工大学学报:自然科学版*, 2014, 37(2):1-5.
YU H D, ZHANG L X, XU J K, *et al.*. Detection method for tool wear of small lathe [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2014, 37(2):1-5. (in Chinese)
- [7] 秦国华, 易鑫, 李怡冉, 等. 刀具磨损的自动检测及检测系统[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12):3332-3341.
QIN G H, YI X, LI Y R, *et al.*. Automatic detection technology and system for tool wear [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12):3332-3341. (in Chinese)
- [8] MOOK W K, SHAHABI H H, RATNAM M M. Measurement of nose radius wear in turning tools from a single 2D image using machine vision [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 43(3-4):217-225.
- [9] 赵玲, 刘庆民, 戴伟锋. 圆锯片几何参数的精密视觉测量[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(6):1115-1119.
ZHAO L, LIU Q M, DAI W F. Precision visual measurement on geometry parameters of circular saw blade [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6):1115-1119. (in Chinese)
- [10] MATS F, LUÍS C, BIRGER M. Wear of teeth of circular saw blades [J]. *Wood Material Science and Engineering*, 2012, 7(3):150-153.
- [11] 张从鹏, 魏学光. 基于 Harris 角点的矩形检测[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8):2260-2266.
ZHANG C P, WEI X G. Rectangle detection based on Harris corner [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8):2260-2266. (in Chinese)
- [12] RYU J B, LEE C G, PARK H H. Formula for Harris corner detector [J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(3):180-181.
- [13] 赵万金, 龚声蓉, 刘纯平, 等. 一种自适应的 Harris 角点检测算法[J]. *计算机工程*, 2008, 34(10):212-214.
ZHAO W J, GONG SH R, LIU CH P, *et al.*. Adaptive Harris corner detection algorithm [J]. *Computer Engineering*, 2008, 34(10):212-214. (in Chinese)
- [14] 王崴, 唐一平, 任娟莉. 一种改进的 Harris 角点提取算法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10):1995-2001.
WANG W, TANG Y P, REN J L. An improved algorithm for Harris corner detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1995-2001. (in Chinese)
- [15] 夏嘉廷. 基于 DM6437 的轴类零件视觉测量系统应用研究与开发[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
XIA J T. *Application Research and Development on Vision Measuring System of Shaft Parts Based on DM6437* [D]. Huangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [16] 何海清, 黄声享. 改进的 Harris 亚像素角点快速定位[J]. *中国图象图形学报*, 2012, 17(7):853-857.
HE H Q, HUANG SH X. Improved algorithm for Harris rapid sub-pixel corners detection [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(7):853-857. (in Chinese)

作者简介:



齐继阳(1969—),男,安徽舒城人,博士,副教授,2003年于合肥工业大学获得硕士学位,2006年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事机器视觉及自动控制方面的研究。E-mail: jyqi@just.edu.cn



王凌云(1988—),女,江苏丰县人,硕士研究生,2011年于江苏科技大学获得学士学位,主要从事机电系统控制及自动化方面的研究。E-mail: 945083021@qq.com