

基于机器视觉的砂轮轮廓形状检测方法*

何雨阳 魏鸿磊 岳彩睿 翟先一 马 骥

(大连工业大学机械工程与自动化学院, 辽宁 大连 116034)

摘 要:针对砂轮修整机在恶劣环境下无法对砂轮轮廓形状进行实时检测的问题,搭建了一种基于机器视觉的砂轮轮廓形状检测系统。使用基于边缘检测的背景分割算法设置 ROI 区域,图像在 ROI 内进行轮廓提取和三次样条插值补偿,获得完整的轮廓形状,再使用高斯拟合法进行亚像素边缘提取,获得更高精度的轮廓图像。实验表明:本系统可对光照变化范围在 $-200\sim 150\text{ Lux}$,轮廓缺失比少于 25% 的轮廓曲线进行完全补偿,单次图像处理用时在 160 ms 之内,用于准确度检测的图像质量指数、像素值平方根误差、结构相似度、峰值信噪比的均值分别为 0.550 0、7 803、7.24、0.037 0,可实现加工过程中对砂轮轮廓形状的在线检测。

关键词:砂轮修整机;轮廓提取;亚像素边缘检测;图像处理

中图分类号:TH122, TP277 **文献标识码:**A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.09.017

Grinding wheel contour shape detection method based on machine vision

HE Yuyang, WEI Honglei, YUE Cairui, ZHAI Xianyi, MA Ji

(School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, CHN)

Abstract: Aiming at the problem that the grinding wheel dresser can't detect the contour shape in real time in harsh environment, an inspection system of grinding wheel contour shape based on machine vision is built. The background cut up algorithm based on margin detection is used to set the ROI area, the contour extraction and cubic spline interpolation are carried out in the subsequent images to get a complete contour image, and then the improved sub-pixel edge extraction method is used to get a higher precision contour image. The system can totally compensate the contour curve with illumination variation range from -200 Lux to 150 Lux and contour missing ratio less than 25%, and the time for single image processing is within 160 ms. The average image quality index, square root error of pixel value, structural similarity and image peak signal-to-noise ratio of accuracy detection are 0.550 0, 7 803, 7.24 and 0.037 0, which can realize the detection of grinding wheel contour shape during machining.

Keywords: grinding wheel dressing machine; contour extraction; subpixel edge detection; image processing

砂轮修整机通常使用质地较硬的材料作为修整工具,对待修整砂轮的表面形状进行修整^[1-2]。由于加工时存在润滑油飞溅、光线变化等影响,传统砂轮修整机多不配备过程检测系统,无法监控工作状态,设备的实时性较差^[3],出现加工失误后无法及时处理。为砂轮修整机配备轮廓检测系统,可以在工作过程中对砂轮轮廓形状进行实时提取,将检测到的轮廓与当前状态下的理想轮廓形状进行对比,根据二者形状的相似度判断当前是否处于正确的工

作状态下。当实际轮廓与目标轮廓形状不同时,找出修整过程中出现错误的位置,实现对砂轮修整机工作状态的实时监控。配备监控系统可以增加设备应对突发状况的能力,修整过程中出现错误可以及时做出调整,避免砂轮碰撞破损造成的损失且便于后续的修改调整,提升了砂轮修整机的经济性和安全性^[4-7]。针对以上问题,本文设计了一种用于砂轮修整过程中的砂轮轮廓形状实时检测系统。

近年来,随着先进制造业和模具加工业的快速

* 辽宁省教育厅 2021 年度科学研究经费面上项目 (LJKZ0535, LJKZ0526)

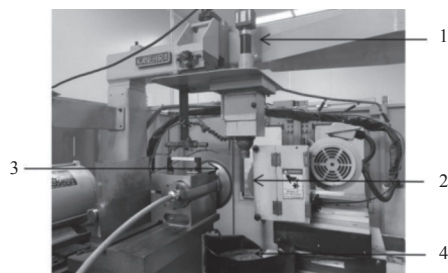
发展,砂轮修整机的工作效率及产品精度要求也在不断提升。国内外对工作过程中的轮廓检测方法进行了多方位的研究,常用的检测方法有光学影像法^[8]、PLC 控制器监控法^[9-10]和机器视觉检测法^[11-12]等。卜泉林等^[13]采用光学投影技术将影像轮廓与目标轮廓进行比对,检测结果保证了较高的精度,但无法对图像信息进行处理,不能实现在线反馈功能;谭廷武等^[14]采用形状复刻法,将砂轮的 V 形尖端复刻于石墨板上,扫描石墨板形状变化,模拟检测轮廓形状,测量精度可达 $4\text{ }\mu\text{m}$,但需要对石墨板提供稳定电压,不适用于大多环境;Lavrinenko VI 等^[15]通过 CCD 相机搭配机器视觉的图像处理技术对砂轮轮廓进行检测,精度可达 $3\text{ }\mu\text{m}$,但需要相机多次采样来提高精度,检测过程的连贯性易出现问题。

综上所述,砂轮形状的检测方法,目前还缺乏一种适用性广、检测精度高、处理时间短的自动化技术方案。本文提出一种基于机器视觉的砂轮轮廓边缘提取方案,通过图像预处理减少后续计算用时,搭配三次样条插值函数保证轮廓完整度,使用亚像素边缘提取得到高精度的完整砂轮轮廓图像,实现对砂轮轮廓形状的实时检测。进行多次重复测试,与实际轮廓对比,验证试验的可行性。

1 试验设备与方案介绍

1.1 试验设备

试验使用日本 KANEHIRA 自动修整机作为砂轮修整设备,碳化硅砂轮作为修整工具,利用磨削修整法对待修整的金刚石砂轮进行磨削处理,修整机实物图如图 1 所示。



1—CCD 相机; 2—碳化硅砂轮; 3—金刚石砂轮; 4—入射式光源。

图 1 砂轮修整机实物图

设备原有的视觉系统仅用于校正砂轮与修整工具间的位置,无法对 CCD 相机采集的图像进行轮廓提取。因此本系统使用 C#语言在 Visual Studio 2022 的 Windows.NET Framework 环境下设计了本套图像处理方案,实现对砂轮轮廓形状的实时检测。

砂轮修整机工作原理如图 2 所示,修整过程按

以下 3 步进行: (1) 金刚石砂轮主轴先沿 X 方向再沿 Y 方向进行移动,直至金刚石砂轮边缘与碳化硅砂轮相接触。(2) 旋转工作台带动碳化硅砂轮,按 v 方向进行往复旋转运动,对金刚石砂轮轮廓进行磨削。(3) 金刚石砂轮主轴带动砂轮按 u 方向匀速旋转,保证所有轮廓位置得到充分磨削。

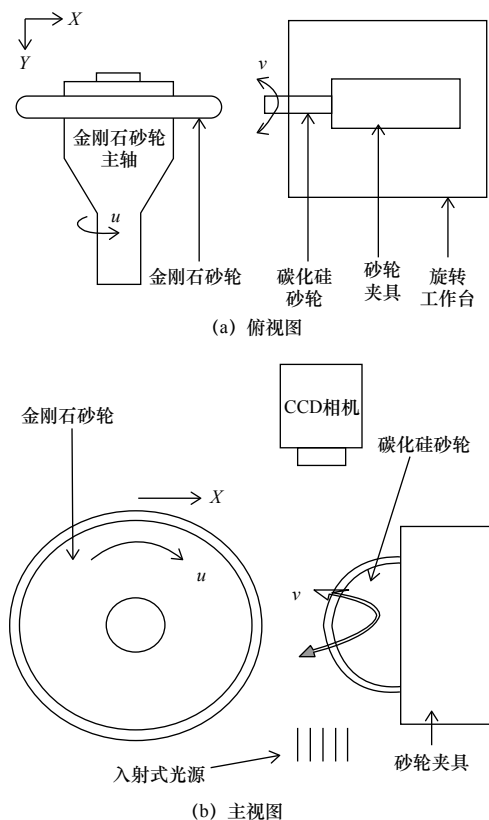


图 2 砂轮修整机工作原理简图

1.2 方案设计

本方案由图像预处理、Canny 算子边缘检测、三次样条插值函数补偿、拟合法亚像素边缘提取等 4 部分组成。根据砂轮修整机是否开始工作,将图像处理过程分为 2 个阶段。

(1) 砂轮修整前: 在良好环境下,使用 Canny 算子对砂轮原始图像进行边缘检测;使用引导滤波算法,根据边缘点信息进行背景模糊处理;根据背景分割图像,设定剩余前景位置作为后续所有图像的 ROI 位置,完成图像预处理。

(2) 修整开始后: 首先使用 Canny 算子获取粗略的边缘轮廓曲线,再根据已有的边缘曲线搭配三次样条函数对缺失部分进行插值补偿,得到完整边缘图像,最后使用边缘像素点的灰度梯度幅值作为待拟合点进行高斯拟合,得到亚像素级边缘图像,整体方案流程如图 3 所示。

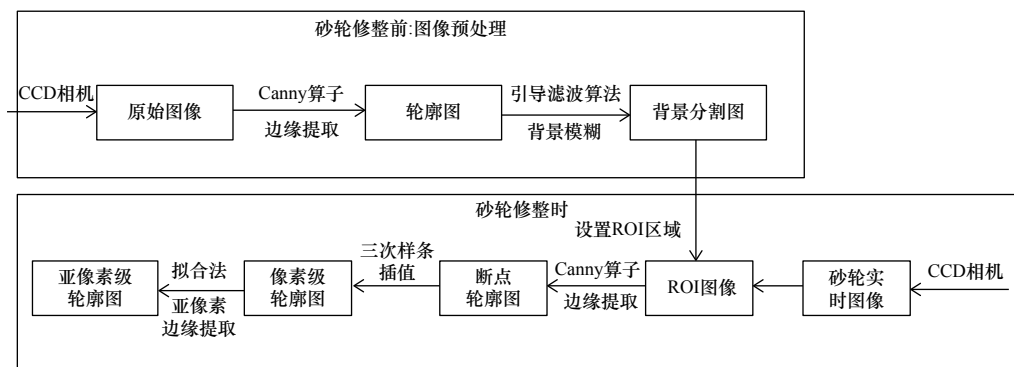
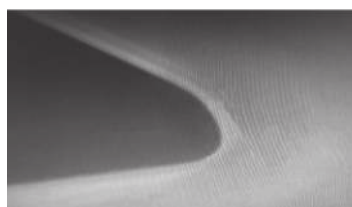


图3 砂轮轮廓提取方案流程图

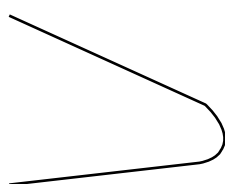
1.2.1 图像预处理

为排除背景部分噪声点干扰，减少后续图像处理用时，需要在修整工作开始前，对原始砂轮图像进行预处理，由此选取出 ROI 区域。

首先在良好环境下对原始砂轮图像进行边缘检测，得到初始状态下的轮廓图像。然后根据图像边缘点信息，使用引导滤波算法^[16]对背景部分进行统一模糊处理，并对前景区域进行细节增强，实现背景虚化的效果。由于引导滤波的核心思想是基于局部线性模型^[17]，且砂轮图像内容较为单调，因此可以实现快速背景虚化的效果。最后根据得到的背景分割图像，设置砂轮前景部分作为后续图像处理的 ROI 区域，过程如图4所示。



(a) 砂轮边缘原始图像



(b) 砂轮边缘轮廓图像



(c) ROI区域图像

图4 预处理部分砂轮图像

由于修整过程中砂轮轮廓仅会向内收缩无法向外扩张，且砂轮位置不会发生改变，因此该区域内包含了所有砂轮信息，故设定预处理得到的 ROI 位置作为后续所有图像的 ROI 位置，此后工作过程中相机采集到的所有砂轮图像，均裁剪至仅剩余 ROI 位置后再进行图像处理即可。通过预处理操作，缩

减了后续图像大小，排除了背景部分干扰，缩短后续图像处理用时。

1.2.2 Canny 边缘检测

修整工作开始后，用 CCD 相机获取工作过程中的砂轮图像，并在 ROI 区域内进行轮廓提取。

使用 Canny 算子对工作过程中的砂轮图像在 ROI 区域内进行边缘检测，实现对砂轮轮廓边缘信息的初步检测，结果如图5所示。

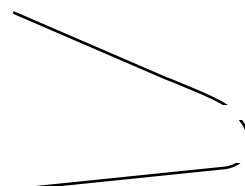


图5 砂轮边缘检测结果

由于加工过程中存在光照变化、水渍污染等干扰因素，图像处理效果不佳，此步的边缘检测方法仅能得到存在部分断点的砂轮轮廓曲线。

1.2.3 三次样条插值补偿

通过 Canny 算子得到的边缘图像存在部分断点，会对检测效果造成不良影响，因此需要进一步对轮廓缺失部分进行补偿，增加轮廓的完整度和准确度。

上述得到的轮廓图像断点数量较少，而本文对补偿结果的准确度要求较高，因此相比于 k 近邻算法和最小二乘法，采用计算速度较慢，但预测准确、生成数据光滑的三次样条插值法，根据现有曲线对轮廓断点处进行补偿^[18]。

设给定函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 区间内 x 的节点为 $a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n = b$ ，且 $y_i = f(x_i)$ 。构建三次样条函数 $S(x)$ 以分段多项式逼近 $f(x)$ ，用 $S(x)$ 表示相邻节点之间的函数，在每段区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 内都有：

$$S(x_i) = f(x_i) = y_i, \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (1)$$

$f(x)$, $f'(x)$, $f''(x)$ 在区间内连续, 在此区间内 $S(x)$ 可以表示为

$$S(x) = a_i(x-x_i)^3 + b_i(x-x_i)^2 + c_i(x-x_i) + d_i \quad (2)$$

$S(x)$ 存在4个待定系数, n 个区间需求 $4n$ 个未知数, 根据插值和微分的连续性可知, $S(x)$ 在 x_j 处应满足:

$$\begin{cases} S(x_j-0) = S(x_j+0) \\ S'(x_j-0) = S'(x_j+0) \\ S''(x_j-0) = S''(x_j+0) \end{cases} \quad (3)$$

由此得到 $4n-2$ 个条件, 再根据2个边界处条件 $a = x_0$, $b = x_n$ 可知:

$$S''(x_0) = f''_0 = 0, S''(x_n) = f''_n = 0 \quad (4)$$

共得到 $4n$ 个条件, 求出所有待定系数, 解出三次样条函数 $S(x)$ 。

本文将轮廓缺失处视为未知量, 使用上述方法根据缺失部分两侧已有的轮廓曲线数据, 构建三次样条插值函数, 对轮廓缺失部分进行补偿, 图5所示的补偿结果如图6所示。由此可以得到完整的像素级砂轮轮廓边缘曲线。

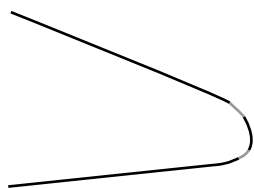


图6 补全后像素级轮廓图

1.2.4 亚像素边缘检测

为提高图像边缘精确度, 使用基于拟合法的亚像素边缘检测法将轮廓信息精度提升至亚像素级。

上述方法得到了粗略轮廓信息, 某处边缘点的像素灰度值在梯度方向上分布如图7a所示, 4点、5点之间灰度值变化最大, 亚像素边缘位置就在此区间内。利用差分法计算像素点位置梯度幅值^[19], 如图7b所示, 再对像素点的梯度幅值进行最小二乘拟合, 构建高斯函数曲线, 高斯函数均值位置即可得到亚像素边缘坐标^[20], 具体如下。

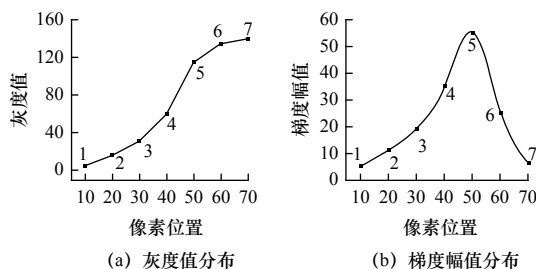


图7 边缘点灰度值和梯度幅值分布

使用像素点法线上的灰度梯度幅值作为高斯函数的待拟合点, 高斯曲线表达式为

$$y_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\left[\frac{(x_i-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (5)$$

式中: μ 为高斯曲线均值; σ 为高斯函数的标准差。为得到高斯曲线顶点位置, 对式(5)两边同时取对数:

$$\begin{aligned} \ln y_i &= \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} - \frac{(x_i-\mu)^2}{2\sigma^2} \\ &= \left(\ln \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} - \frac{\mu^2}{2\sigma^2} \right) - \frac{x_i^2}{2\sigma^2} + \frac{2x_i\mu}{2\sigma^2} \end{aligned} \quad (6)$$

令:

$$\begin{aligned} \ln y_i &= Z_i, \quad \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} - \frac{\mu^2}{2\sigma^2} = c_0, \\ \frac{2\mu}{2\sigma^2} &= b_0, \quad -\frac{1}{2\sigma^2} = a_0 \end{aligned} \quad (7)$$

式(6)结构如 $y = ax^2 + bx + c$, 为一元二次函数的形式, 再用最小二乘拟合算法求待定参数 a_0 、 b_0 、 c_0 。

将式(6)转换为矩阵的形式:

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_i & x_i^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_0 \\ b_0 \\ a_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

矩阵可化简为 $A = XB$, 矩阵 B 的最小二乘法解为 $B = (X^T X)^{-1} X^T A$, 计算可知 μ 、 σ 与 a_0 、 b_0 、 c_0 之间的关系如下:

$$\begin{cases} \mu = -\frac{c_0}{2b_0} \\ \sigma = \sqrt{-\frac{c_0}{2b_0}} \end{cases} \quad (9)$$

由此便可得到高斯函数表达式, 并计算出高斯曲线峰值位置 $x_{\max}$ 和高斯曲线的峰值 $y_{\max}$:

$$\begin{cases} x_{\max} = \mu \\ y_{\max} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \end{cases} \quad (10)$$

拟合后得到的高斯曲线极值点坐标为 $(x_{\max}, y_{\max})$, $x_{\max}$ 为亚像素边缘点与像素级边缘点在法线方向上的距离, 设像素级边缘点 N_0 坐标为 (x_0, y_0) , 法线方向与水平方向夹角为 θ , 如图8所示, 计算出亚像素边缘点 N 坐标 (x_n, y_n) :

$$\begin{cases} x_n = x_0 + x_{\max} \cos \theta \\ y_n = y_0 + x_{\max} \sin \theta \end{cases} \quad (11)$$



使用此方法对所有边缘像素点进行拟合，以某一像素点为例，根据其梯度幅值得到高斯拟合曲线，如图9所示。虚线是根据像素点法线上的梯度值连接而成，实线为本文方法得到的高斯拟合曲线，根据其峰值点 M ，即可求得该像素点的亚像素边缘坐标。通过此方法遍历所有边缘像素点，即可获得高精度、高完整度的亚像素边缘轮廓曲线。

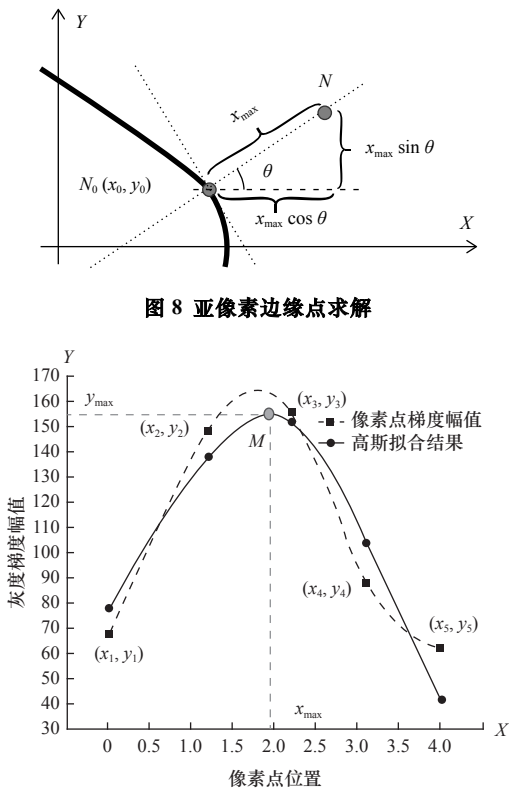


图8 亚像素边缘点求解

图9 高斯拟合曲线

2 试验与分析

针对所述方法，设计了3组实验。实验一旨在检验该方法在理想边缘图像中对圆形和线形边缘的定位精度；实验二用于验证该方法在实际工件检测

中对圆形和线形边缘的定位效果；实验三旨在测试该算法的执行效率。实验使用 Python3.7 和 OpenCV4.5.3 进行，硬件环境为 Windows 10 操作系统、主频 2.20GHz 的 Corei7-8750H 处理器和 16GB 内存的笔记本电脑。

2.1 仿真测试

为验证本文插值方法和亚像素边缘提取法的精度，需要进行实验，然而对砂轮实体进行高精度测量非常困难。在文献[21]的启发下进行仿真实验。应用 OpenCV 编程在图1上绘制已知坐标的砂轮轮廓模拟图像（图10）。

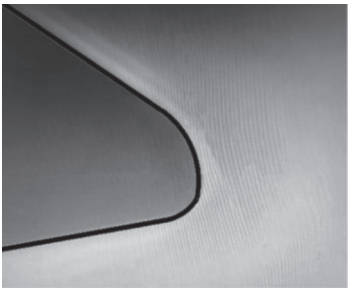


图10 仿真图像

2.1.1 像素边缘检测方法

使用本文提出的亚像素边缘检测方法和 Canny 算法对轮廓线进行边缘提取，比较检测到的轮廓坐标和实际轮廓坐标的差异，评估亚像素边缘检测法的误差（表1）。

根据表1数据可知，相比于 Canny 算法，本文算法的检测结果与实际边缘信息间的误差较小，坐标信息更接近实际值。

2.1.2 插值方法实验

再删去图中部分轮廓曲线，曲线和线段的表达式已经，如图11所示，使用本文1.2.3方法对断点部分进行插值补偿，比较补全位置轮廓坐标与实际

表1 亚像素坐标点检测

序号	实际边缘坐标	本文算法		Canny算法	
		检测坐标	误差值	检测	误差值
1	(230.000 0, 137.054 0)	(230.004 3, 137.060 2)	0.007 5	(231.066 1, 136.087 9)	0.066 1
2	(230.000 0, 76.081 0)	(230.005 9, 76.088 1)	0.007 8	(230.066 8, 77.020 8)	0.067 2
3	(270.000 0, 126.043 1)	(270.005 9, 126.052 5)	0.008 3	(270.067 1, 127.010 1)	0.067 1
4	(270.000 0, 82.030 2)	(269.093 0, 82.036 0)	0.007 0	(270.067 9, 83.001 2)	0.068 5
5	(280.000 0, 119.058 9)	(280.004 4, 119.065 1)	0.007 6	(280.068 0, 120.022 9)	0.066 0
6	(280.000 0, 85.041 1)	(279.005 8, 85.03 9)	0.007 6	(279.033 5, 86.004 8)	0.066 4

轮廓坐标间的差异,与文献[21]补偿方法对比,判断本文插值补偿法产生的误差大小(表2)。

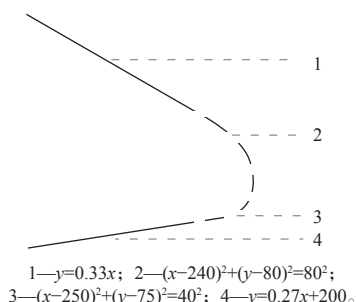


图 11 断点仿真图

根据表2数据可知,相比于文献[22]算法,本文插值算法产生的误差较小,可以有效应用于砂轮边缘检测中。

2.2 砂轮工件测试

砂轮修整机工作时处于复杂的工厂环境中,对轮廓检测效果产生干扰主要是光照变化和水渍及油污干扰。对2种干扰因素设置不同数值模拟工厂环境干扰情况,从轮廓完整度、边缘准确度和图像处理用时3个量化指标对试验进行衡量。

轮廓完整度:将像素坐标转换为实际坐标后,测量当前轮廓长度与完整轮廓长度,二者之比即为此时图像轮廓完整度。

边缘准确度:将得到的轮廓图像与实际轮廓图像进行对比,选取最能体现边缘信息准确性的多种性能指标作为评估参数来进行判断。

图像处理用时:原始图像通过此方案处理后,获得轮廓图像所需的时间。

砂轮轮廓完整度越高,边缘信息越准确,图像处理用时越少,方案的可行性越高。

2.2.1 光照试验

评判光量级的单位有2个:光通量和照度,单

位分别是 Lumen 和 Lux。1 Lumen 是光源与 1 cm^2 的屏幕距离 1 cm 时,1 CD 的光线产生的光通量;1 Lux 是 1 Lumen 的光通量均匀分布在 1 m^2 上产生的照度[23]。

当初始亮度为 1 600 Lux 时,图像处理效果最佳,设置不同光照强度下的砂轮图像,如图 12 所示。使用本文算法进行轮廓完整度试验,结果见表 3。

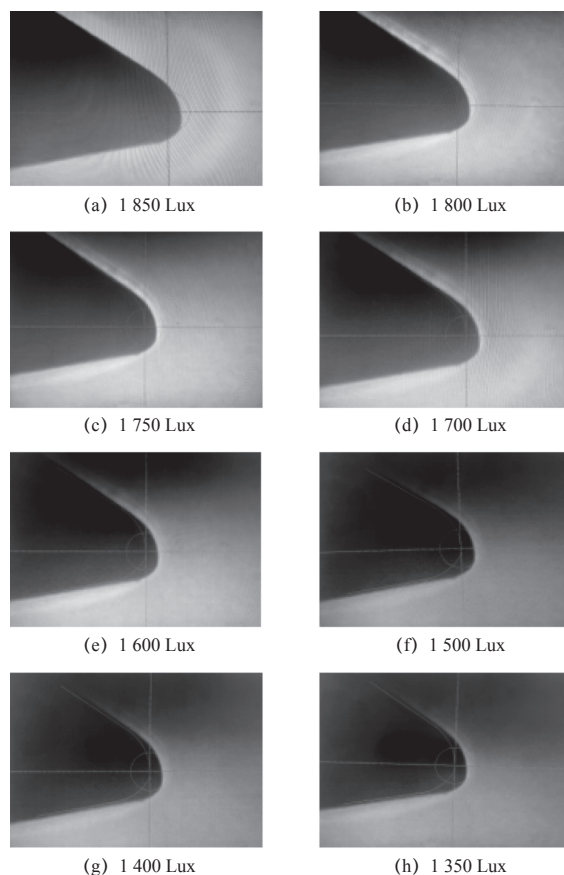


图 12 不同光照下的砂轮图像

根据表3数据可知:本系统在光照变化范围 $-200\sim 150\text{ Lux}$ 的情况下,可对轮廓缺失部分进行

表 2 插值坐标点检测

mm

序号	实际边缘坐标	本文算法		文献[22]算法	
		检测坐标	误差值	检测	误差值
1	(230.000 0, 137.054 0)	(230.031 2, 137.023 3)	0.030 2	(230.048 7, 136.078 2)	0.046 7
2	(230.000 0, 76.081 0)	(229.030 1, 77.010 7)	0.029 8	(230.048 9, 76.031 0)	0.049 8
3	(270.000 0, 126.043 1)	(270.033 4, 126.013 4)	0.031 2	(269.050 1, 126.088 5)	0.050 4
4	(270.000 0, 82.030 2)	(769.065 5, 82.066 5)	0.035 4	(270.057 0, 82.085 7)	0.056 3
5	(280.000 0, 119.058 9)	(280.029 4, 120.000 3)	0.032 4	(280.056 4, 120.002 1)	0.055 4
6	(280.000 0, 85.041 1)	(279.065 0, 85.090 4)	0.035 1	(280.049 6, 86.001 3)	0.051 2

100% 补偿，超出此范围后仍可对部分断点区域进行补偿，图像处理用时在 140 ms 左右。

对相同光照条件下的砂轮图像，使用不同轮廓提取算法进行对比试验。使用文献 [24]、文献 [25]、Canny 算法与本文算法依次进行轮廓完整度试验，结果见表 4。

根据表 4 数据可知：相同光照条件下，相比于文献 [24]、[25] 算法，本文算法在图像完整度方面分别高出 8.6%、12.3%，且图像处理用时更短。

由表 2 和表 3 可知，光照不良的情况下，本系统提取到的轮廓具有较高完整度，图像处理效率更高。

为进一步评价边缘检测效果的优劣，还需对轮廓信息的准确性进行评估。以良好环境下得到的实际轮廓边缘为标准，选取 4 种相似度评估指标：图像通用质量指标（UQI）、像素值平方根误差（RMSE）、结构相似度（SSIM）以及图像峰值信噪比（PSNR）作为参数。UQI 根据相关性损失度、亮度失真率、对比度失真率 3 个因素进行计算，值越大检测质量越高；RMSE 测量出误差的平均大小，值越小检测效果越好；SSIM 用来衡量图像间的相似度，值越大相似度越高；PSNR 越高，像素点位置信息与原图像越接近。

选取相同光照的砂轮图像，使用不同轮廓提取算法，进行轮廓信息准确度试验，结果见表 5。

表 3 不同光照下的轮廓完整度

序号	光照条件/Lux	轮廓完整度/(%)	计算用时/ms
1	1 850	92.5	142.58
2	1 800	96.2	140.36
3	1 750	100.0	136.57
4	1 700	100.0	136.55
5	1 600	100.0	135.56
6	1 500	100.0	137.65
7	1 400	100.0	140.88
8	1 350	93.1	141.56

表 4 相同光照下不同方法间的轮廓完整度

使用算法	光照条件/Lux	轮廓完整度/(%)	计算用时/ms
本文算法	1 600	100.0	135.56
Canny算法	1 600	81.8	122.54
文献[24]算法	1 600	91.4	165.65
文献[25]算法	1 600	87.7	152.75

表 5 光照不良条件下的边缘信息准确度

算法	UQI	RMES	PSNR/dB	SSIM
本文方法	2.120	8 021	5.72	0.045 1
Canny算法	0.096	8 652	5.13	0.041 1
文献[24]算法	1.851	8 522	4.94	0.039 7
文献[25]算法	1.895	8 214	5.15	0.038 8

根据表 5 可知：本系统在 4 组评估参数中都有着最佳的检测效果，相比于文献 [24]、[25]，本文算法在图像通用质量指标方面分别有 14.5% 和 11.9% 的提高，结构相似度方面分别有 13.6% 和 16.2% 的提高，其余参数也有着更优的检测结果。

将表 4 中不同算法得到的轮廓图进行同一位置的局部放大展示，结果如图 13 所示。

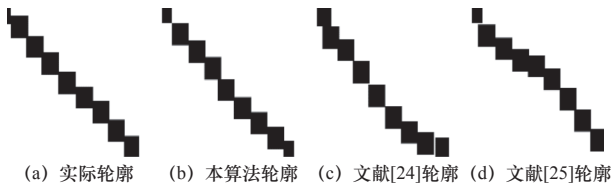


图 13 轮廓局部放大图

根据图 13 可知，通过本文算法得到的轮廓图像信息最接近真实轮廓图像。由表 5 和图 13 可以看出，在光照不良的情况下，本系统得到的边缘信息具有较高的准确度。

2.2.2 水渍覆盖试验

选取砂轮轮廓处附着不同大小水珠的砂轮图像，比例尺标定后计算出被覆盖的边缘长度与边缘总体长度，二者长度之比即为轮廓缺失比。选取不同轮廓缺失比的图像使用本文算法进行轮廓完整度试验，结果见表 6。

表 6 不同轮廓缺失比的轮廓完整度

序号	轮廓缺失比/(%)	结果完整度/(%)	计算用时/ms
1	5	100.0	122.25
2	10	100.0	124.23
3	15	100.0	138.27
4	20	100.0	139.02
5	25	100.0	142.87
6	30	97.6	146.36
7	35	95.2	151.56
8	40	87.3	158.78

根据表 6 可知：本系统在轮廓缺失比低于 25% 的情况下，可对轮廓缺失部分进行 100% 补偿，超出此范围后仍可对部分断点区域进行补偿，图像处理用时在 160 ms 以内。

再选取相同轮廓缺失比的图像，使用文献 [24]、[25] 算法和 Canny 算法与本文算法进行轮廓完整度试验，结果见表 7。

表 7 相同轮廓缺失比不同方法的轮廓完整度

使用算法	轮廓缺失比/(%)	结果完整度/(%)	计算用时/ms
本文算法	10	100.0	124.23
Canny算法	10	90.0	128.56
文献[24]算法	10	94.1	190.32
文献[25]算法	10	93.5	177.56

根据表 7 可知：相同轮廓缺失比的情况下，相比于文献 [24–25] 算法，本文算法在图像完整度方面分别高出了 5.9%、6.5%，图像处理用时更短。

再选取相同轮廓缺失比的砂轮图像，使用不同轮廓提取算法，进行轮廓信息准确度试验，结果见表 8。

表 8 轮廓缺失条件下的边缘信息准确度

算法	UQI	RMES	PSNR/dB	SSIM
本文方法	0.928 1	7 585	8.77	0.029 0
Canny算法	0.259 4	10 246	7.54	0.012 1
文献[24]算法	0.837 8	9 164	8.51	0.022 4
文献[25]算法	0.819 2	8 893	8.66	0.025 7

根据表 8 可知：本文算法在 4 组评估参数中都有着最佳检测效果，相比于文献 [24–25] 算法，本文算法在图像通用质量指标方面分别有着 10.7% 和 13.2% 的提高，在像素值平方根误差方面分别降低了 20.8% 和 14.7%，其余参数也有着更优的检测结果。

由表 6~表 8 可知，砂轮部分轮廓被水渍覆盖时，本系统得到的轮廓具有较高的完整度和准确度，图像处理效率更高。

综上所述，本文在 6 种不同条件下进行试验，根据得到的数据可知，在光照不良或水渍覆盖的工业恶劣环境下，使用本系统得到的砂轮轮廓图像完整度高、准确性强，且由于预处理操作以及曲线轮廓占比较小，使得图像处理计算量得以减少，用时较短。可以使用此方法对修整过程中的砂轮提取出

清晰完整的边缘轮廓曲线，实现对砂轮轮廓状态的实时检测。

3 结语

为实现砂轮轮廓形状的在线检测，本文首先根据基于边缘提取的背景虚化方法，得到后续图像处理的 ROI 区域，再对恶劣环境下的砂轮进行轮廓提取，并用三次样条插值函数补全断点处的轮廓形状，最后使用亚像素边缘提取方法增加轮廓的准确度。

通过多次实验数据可以得出，本文方法，可对光照变化范围在-200~150 Lux、轮廓缺失比少于 25% 的轮廓曲线进行完全补偿，单次图像处理用时在 160 ms 内，准确度检测的 UQI、RMSE、SSIM 和 PSNR 均值分别为 0.550 0、7 803、7.24、0.037 0。相比于其他算法，本文得到的轮廓在图像通用质量指标方面至少有 10.7% 的提升。砂轮修整后产生的磨削路径整齐光滑，需要图像处理的曲线边缘位置较少，同时背景分割处理消除了许多噪声点干扰，减少了图像处理的计算量。因此本方法实现了修整过程中砂轮轮廓外形的高精度实时检测，出现问题时可及时发现^[26]，提升了砂轮修整机的经济性和安全性。

参 考 文 献

[1] 袁尚勇, 陈根余, 戴隆州, 等. 电火花机械磨削修整粗粒度成形砂轮试验研究[J/OL]. 中国机械工程, 2023, 34(10): 1164-1171.

[2] Wenfeng D, Qiang H, Biao Z, et al. Wear characteristics of white corundum abrasive wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding of AISI 9310steel[J]. Ceramics International, 2023, 49(8):12832-12839.

[3] 焦锋, 李成龙, 牛赢, 等. 砂轮修整技术研究现状与展望[J]. 中国机械工程, 2021, 32(20): 2435-2448.

[4] Bredthauer M, Snellings P, Mattfeld P, et al. Wear-related topography changes for electroplated cBN grinding wheels and their effect on thermo-mechanical load[J]. Wear, 2023, 512-513:204543.

[5] Wu Z, Zhang L. Analytical grinding force prediction with random abrasive grains of grinding wheels[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023: 108310.

[6] 薛明, 吴光明, 刘惠强. 基于最小二乘法CNC无线测头智能检测控制系统设计[J]. 制造技术与机床, 2023(3): 76-84.

[7] Stephen D S, Sethuramalingam P. Optimization of grinding titanium with 2%CNT-CBN wheel using TOPSIS[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2022, 37(14): 1679-1690.

[8] 谭翔, 戴振晖, 何强, 等. 基于光学体表监控和X射线透视影像的膈肌运动自动跟踪[J]. 中国医学物理学杂志, 2022, 39(12): 1453-1459.

[9] Alphonsus E R, Abdullah M O. A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs) [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 1185-1205.

[10] Bunney T D, Katan M. PLC regulation: emerging pictures for molecular

- mechanisms[J]. *Trends in Biochemical Sciences*, 2011, 36(2): 88-96.
- [11]谢礼飞,段红松,何易鹏,等.基于机器视觉的缸体缺陷检测系统[J].电子工业专用设备,2022,51(6): 58-62.
- [12]Ren Z, Fang F, Yan N, et al. State of the art in defect detection based on machine vision[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2022, 9(2): 661-691.
- [13]卜泉林,胡德金,张永宏.基于图像识别的数控曲线磨削在线检测研究[J].仪器仪表学报,2005,26(8): 620-622.
- [14]谭廷武.金刚石砂轮V形尖端的微细精密修整实验研究[D].广州:华南理工大学,2011.
- [15]Lavrinenko V I. On the analysis of the estimate of energy expenditures in the diamond abrasive treatment by wheels from superhard materials[J]. *Journal of Superhard Materials*, 2022, 44(4): 285-291.
- [16]苏超然,陈羽中.一种结合显著性检测的肖像照片自动背景虚化算法[J].小型微型计算机系统,2019,40(2): 427-431.
- [17]刘成民,叶武剑.基于图像感知与分割的自动背景虚化算法[J].激光与光电子学进展,2022,59(4): 69-78.
- [18]周静,谭红梅.基于三次样条曲线和APDL的拱轴系数优化调整[C].2022世界交通运输大会(WTC2022)论文集(桥梁工程与隧道工程篇),2022: 19-26.
- [19]侍小青,耿华,刘双.基于幅值和梯度约束的磁化向量反演方法[J].地质论评,2023,69(增刊): 399-400.
- [20]段振云,王宁,赵文辉,等.基于高斯积分曲线拟合的亚像素边缘提取算法[J].计量学报,2016,37(4): 371-374.
- [21]杜港,佟强,侯凌燕,等.基于Canny-Franklin矩的亚像素边缘检测方法[J].计算机集成制造系统,2019(5): 224-232.
- [22]胡一星,许黎明,范帆,等.曲线磨削砂轮廓形的原位视觉检测和误差补偿[J].上海交通大学学报,2019,53(6): 654-659.
- [23]He S, Yan Y. Impact of advance light exposure on assembly-line workers' subjective work alertness and sleep quality[J]. *Lighting Research & Technology*, 2022: 14771535221078763.
- [24]王楚,王亚刚.基于拟合的亚像素边缘检测的算法比较[J].软件导刊,2018,17(2): 60-62, 67.
- [25]韩东,李煜祺.基于高斯拟合的亚像素边缘检测算法[J].*计算机应用与软件*, 2018, 35(6): 210-213, 229.
- [26]房小艳,盛晓伟,孙以泽.基于曲轴轮廓误差分析的随动磨床轴性能预测[J].制造技术与机床,2022(1): 48-52.
- 第一作者:何雨阳,男,1999年生,硕士研究生,研究方向为机器视觉技术。E-mail: 839757578@qq.com
- 通信作者:魏鸿磊,男,1973年生,副教授,研究方向为机器视觉技术、机器人应用技术、机电控制技术。E-mail: weihl2005@163.com
- (编辑 曲书瑶)
- (收修改稿日期: 2023-04-22)
- 文章编号:20230919
- 如果您想发表对本文的看法,请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。