

# 基于缝合线驱动图像拼接的表面粗糙度测量方法研究

赵馨雨<sup>1,2</sup>, 屈盛官<sup>1,2\*</sup>, 吕继亮<sup>1,2</sup>, 徐爱民<sup>1,2</sup>, 姚添文<sup>1,2</sup>, 李小强<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640;

<sup>2</sup>广东省金属新材料制备与成形重点实验室, 广东 广州 510640

**摘要** 光切法是实现准确测量工件表面粗糙度的可行方法之一。针对光切法存在的取样长度与测量精度的矛盾, 通过优化光切法, 提出了一种基于缝合线驱动图像拼接的表面粗糙度测量方法。利用线性激光发生器、CCD 工业相机、精密线性位移平台及计算机等搭建测量实验平台, 采集三种加工样块(分别对应车、立铣、刨三种处理)的光切图像, 利用上述拼接算法获得拼接图像, 利用 Freeman 链码跟踪算法提取图像光带边缘轮廓, 利用最小二乘法求取轮廓中线, 建立粗糙度轮廓算术平均偏差计算模型。对比单光切法、触针法及光切法拼接前后表面粗糙度的测量值, 结果显示, 光切法比触针法的结果更为准确; 单光切法相较触针法的平均相对误差降低了 2.75%, 但对刨削工件的测量误差较大, 所提方法相较单光切法的测量误差平均降低了 1.42%, 对于微观不平度间距大的切削工件尤为明显, 测量误差降低了 2.57%。所提方法能够解决传统光切法的取样长度小、精度低的问题, 能更精确地测量切削工件的表面粗糙度。

**关键词** 测量; 表面粗糙度; 光切法; 图像拼接

**中图分类号** TN247; TG84 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.0904001

## 1 引言

表面粗糙度是衡量工件表面质量的一个重要指标<sup>[1]</sup>, 在传统粗糙度测量中, 大多数采用离线抽样测量的方法<sup>[2]</sup>。随着机械加工自动化程度的提高, 工业界提出了粗糙度在线测量的要求<sup>[3]</sup>, 即在加工或拆装工件过程中实时地对工件进行表面粗糙度测量, 保证切削加工产品的稳定性, 提高生产效率, 相对于利用机床切削参数、超声信号的预测模型<sup>[4-5]</sup>, 该方式更为直观准确。非接触式光学测量方法能很好地满足在线测量要求, 并且相较于传统的触针法<sup>[6]</sup>, 测头不与工件表面接触产生表面划伤, 测头尺寸也不会影响测量精度。

区别于其他光学非接触式测量法<sup>[7-10]</sup>, 如光散射法、散斑法、干涉法, 光切法通过获得工件表面形貌进行粗糙度测量。Zhu 等<sup>[11]</sup>提出了基于光切法

的钢板表面粗糙度在线检测系统。根据钢板生产线的环境和功能需求, 设计了一个二维运动平台, 包括传感器的检测系统和平台的运动控制系统。在算法层面上, 采用高斯滤波器对光切法采集的图像进行滤波处理, 获得去噪后的表面轮廓数据, 通过换算得到钢板表面的粗糙度。但是, 与触针法相比, 该方法测量的钢板表面粗糙度的误差约为 4%, 精度还需进一步提高。Montgomery 等<sup>[12]</sup>利用干涉显微镜对半导体表面形貌进行分析, 利用采样扫描和图像拼接技术在大视场范围内实现了从微米到纳米级的干涉显微测量。利用图像拼接提高测量精度的方法对解决光切法视场局限性有一定的意义。

光切法通常使用传统的 9J 光切显微镜进行测量, 需要人为调节仪器进行读数, 测量效率低, 难以应用于实际的自动化工业生产。对于车、铣、刨等比较规则和均匀的加工方式, 取样长度  $l_r$  取 2.5 mm。

收稿日期: 2021-08-03; 修回日期: 2021-09-19; 录用日期: 2021-10-08

基金项目: 广东省自然科学基金(2021A1515010550)

通信作者: \*qusg@scut.edu.cn

利用 9J 光切显微镜测量表面粗糙度时,视场中的取样长度  $l_r$  为 5 个波峰波谷的间距长度,范围较小,在一定程度上不能客观、综合地表征零件的表面质量。光切法的光带为细窄状,受限于固定的像素大小,在固定的取样长度下,边缘曲线只存在于少数的像素区域中,精度不高。

本文针对上述传统光切法测量范围小、精度低的问题,提出了利用图像拼接对光切法进行优化的思路,增加了光带边缘所占的像素区域,获得了较长的取样长度,与传统的光切法和触针法相比,测量精度得到提高。针对光切图像特征点少、相邻帧图像平移等特点,使用一种缝合线驱动图像拼接方法实现粗糙度测量,并在实验中证明了该方法特别适用于微观不平度间距大的切削工件的粗糙度测量。

## 2 基本原理

### 2.1 光切法的基本原理

光切法根据光切原理对三维表面粗糙度进行测量,其原理图如图 1 所示,其中  $h$  为实际的表面微观不平高度, $d$  为光切图像中波峰与波谷的高度差,

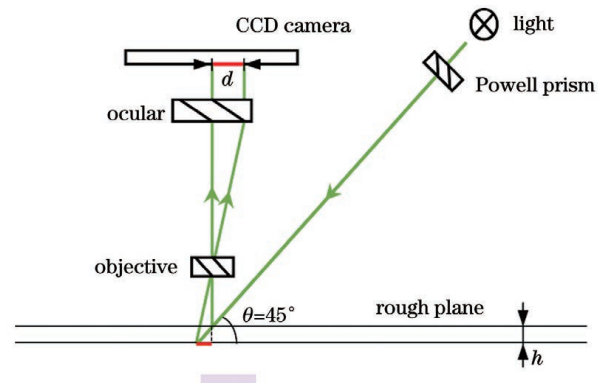


图 1 光切法原理图

Fig. 1 Principle diagram of light section

$\theta$  为平面与线激光的夹角。光源穿过 Powell 棱镜(激光线性发生器透镜)发出线性激光并以  $45^\circ$  的入射角投射到被测物体的表面,与表面轮廓相交,形成细长的带状光束。摄像头采集显微镜镜头放大的图像,并将其传输至计算机,计算机经过一系列的图像处理得出粗糙度值。此方法可以在反射光长度范围内,获取不平整表面的高度信息<sup>[13]</sup>,如图 2(a)所示,图中指出了光带的上下边缘曲线及波峰波谷。

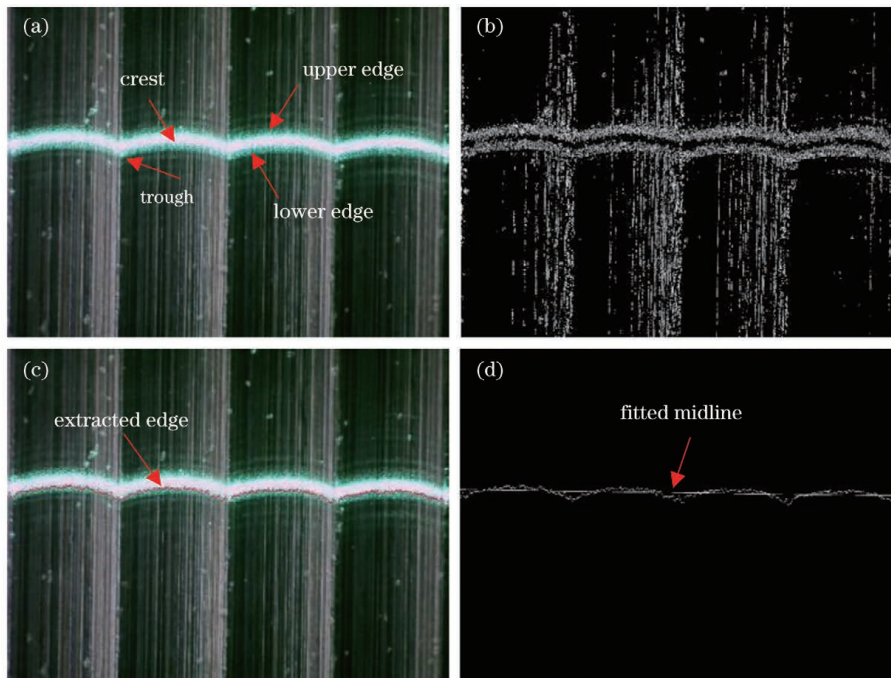


图 2 图像处理流程示例图。(a)显微光带图;(b)Canny 边缘检测;(c)Freeman 边缘提取;(d)拟合中线

Fig. 2 Samples of image processing. (a) Microscopic light strip; (b) Canny edge detection; (c) Freeman edge extraction; (d) fitted midline

### 2.2 利用图像处理求取粗糙度值

利用图像处理求取粗糙度值的流程如图 3 所示。实际线性激光在金属表面产生漫反射,导致图像上有多余的亮点,严重干扰提取的边缘效果,并且

不同的光照环境下传统的二值化算法需设定不同的阈值。基于最大类间方差法(OTSU)<sup>[14]</sup>的二值化是一种基于全局自适应阈值的二值化算法,可根据图像的灰度特性将图像分为前景和背景两部分,并

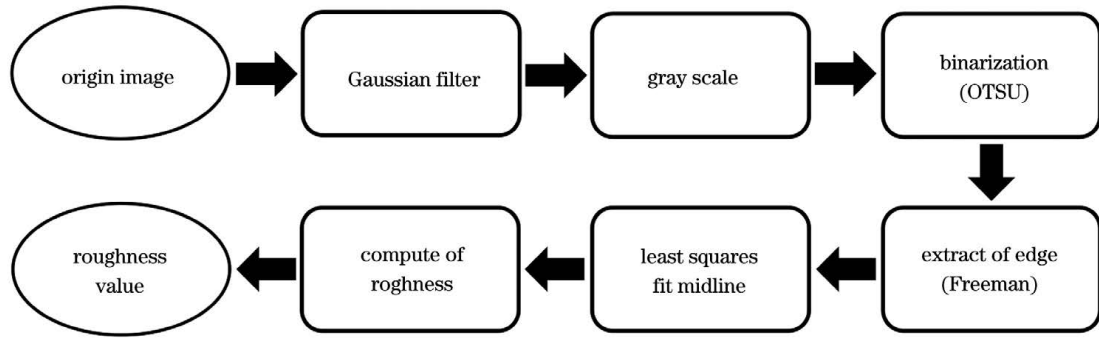


图 3 图像处理流程图

Fig. 3 Flow chart of image processing

突出前景。

对于边缘曲线的提取,经典的 Canny 边缘检测算子<sup>[15]</sup>在实际处理中的提取效果不佳,如图 2(b)所示。这是由于光带像素亮点分散,针对该问题,本文采用 Freeman 链码跟踪算法<sup>[16]</sup>:利用像素点的八邻域信息,动态规划选择邻域中的点作为下一边界点,以此递推遍历,提取边缘如图 2(c)所示。

利用边缘曲线进行表面粗糙度值的求取。建立直角坐标系,以图像的左上角作为原点,横向为  $x$  轴方向,纵向为  $y$  轴方向,提取的边缘曲线方程设为  $f(x_i)$ 。以最小二乘法对边缘曲线进行中线拟合,中线方程为

$$g(x_i) = ax_i + b, \quad (1)$$

式中: $x_i$  为边缘曲线上各个像素点的横坐标; $i$  为边缘曲线像素点的编号; $a$  为拟合中线的斜率; $b$  为拟合中线在  $y$  轴上的截距。

根据最小二乘法原则,有

$$G = \sum_{i=1}^{n'} [f(x_i) - g(x_i)]^2, \quad (2)$$

式中: $G$  为实际曲线与拟合中线的误差平方和; $n'$  为像素点总个数; $f(x_i) - g(x_i)$  表示边缘各点到中线的误差。求取使得式(2)误差平方和  $G$  值最小的  $a$ 、 $b$  值。拟合获得的中线如图 2(d)所示。

获取边缘曲线及中线后,表面粗糙度的高度特征评定参数  $R_a$  的计算公式为

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |f(x) - g(x)| dx, \quad (3)$$

式中: $x$  为  $x$  轴的连续坐标; $l_r$  为取样长度。

实际离散取样计算公式为

$$R_a = \frac{1}{n'} \sum_{i=1}^{n'} [f(x_i) - g(x_i)]. \quad (4)$$

### 2.3 基于缝合线驱动的图片拼接

图像拼接<sup>[17]</sup>主要包括三部分:图像预处理、图像匹配和图像融合。图像匹配主要分为基于区域和

基于特征两种方法<sup>[18]</sup>。基于区域的图像匹配存在以下问题:1)只对匹配图像进行位移,不能解决旋转缩放问题;2)在实际匹配过程中,需要手动确定模板区域,若应用在光切法测量中,需要保证选取的模板是在重叠的光带区域;3)拼接多帧图像时,若多帧图像移动距离不同或光带移动,难以保证已确定的模板区域是重叠区域,这会导致匹配不成功,拼接出错。基于特征匹配的图像拼接是先计算有重叠区域的待拼接图像对应的最佳匹配特征点,包括角点、边缘、斑点等,再根据最佳匹配特征点来计算两帧图像的几何变化关系,使两帧图像的重叠部分在空间上对准。其中,Lowe<sup>[19]</sup>提出了尺度不变特征变换(scale-invariant feature transform, SIFT)算法,其求得的匹配特征点对平移、旋转、尺度缩放和光照不均都有很好的适应性。图像融合中常用的方法有加权平均融合法、多分辨率融合法、最佳缝合线融合法等。最佳缝合线融合法<sup>[20]</sup>的提出是为了解决拼接后重叠部分易出现鬼影、错位现象的问题。该算法有助于正确提取光切图像拼接后的边缘曲线,但最佳缝合线融合算法是在匹配特征点重合度最高的情况下获得最佳图像,实际视觉融合效果并未达到最佳,在光切图像拼接时,缝合线两侧的光带仍存在错位的现象,会严重影响粗糙度测量值的准确率。Gao 等<sup>[21]</sup>提出的缝合线驱动拼接算法能够拼接出实际效果更佳的图像,并且在使用更少特征匹配点的情况下,获得重叠偏差更小的拼接结果,适用于解决拼接光切图像时特征点较少的问题。

基于以上分析,本文采用缝合线驱动的图像拼接算法优化传统的光切法,增加光切图像的取样长度,提高测量精度。

#### 2.3.1 特征点匹配

计算两帧拼接图像( $I_1$  和  $I_2$ )上的 SIFT 特征点,如图 4 所示。传统的随机抽样一致(RANSAC)



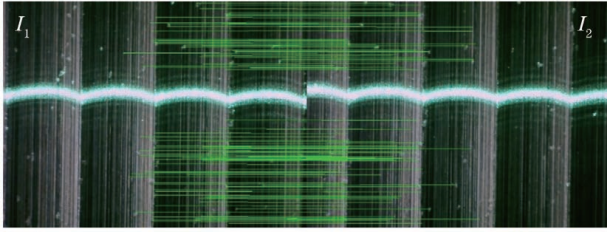


图 4 SIFT 特征点匹配

Fig. 4 SIFT feature point matching

算法<sup>[22]</sup>难以对图片所有的匹配特征点进行穷举采样,且通常类似背景的主导平面的特征点被大量采样。因此对 RANSAC 进行如下修改:考虑到光切图像的匹配特征点较少,结合实际拼接效果,首先运行原始 RANSAC 算法,迭代次数  $n$  设为较大的 100,用于拟合图像中的背景平面;再移除已使用了的匹配点,迭代次数  $n$  设为 20,多次迭代,从而计算得到一系列不同的单应性矩阵  $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \mathbf{H}_3, \dots$ 。

### 2.3.2 计算缝合线

对于单应性矩阵  $\mathbf{H}_j$ ,求取对应的缝合线用于两帧图像的拼接。在进行拼接时,我们必须为每个像素点  $p$  选择一个源图像,将像素与源图像之间的映射称为标记,标记值表示为  $l_p$ ,当  $l_p \neq l_q$  时,在拼接图像中像素点  $p$  和  $q$  之间就存在着缝合线。定义重叠图像的全局能量函数:

$$E = \sum_p E_d + \sum_{(p,q) \in N} E_s, \quad (5)$$

式中:  $E_d$  为数据成本能量,表征标记值为  $l_p$  (1 或 2) 的像素点  $p$  的显著性;  $E_s$  为平滑能量,表征相邻像素点  $p$  和  $q$  的不连续程度。标记值  $l_p$  是决定重叠区域像素点  $p$  处的图像是  $\mathbf{I}_1$  还是  $\mathbf{I}_2$ ,  $p$  和  $q$  的相邻范围为四连通的邻域  $N$ 。

循环遍历所有可能的标签组合,当能量函数无法再降低时,算法终止,求取得到缝合线。  $E_d$  定义为像素点  $p$  位置的梯度模值:

$$E_d(p, l_p) = -|\nabla I_{l_p}|. \quad (6)$$

$l_p$  的梯度模值是像素点  $p$  位置使用  $\mathbf{I}_1$  或  $\mathbf{I}_2$  图像梯度的模。

$E_s$  定义为两个像素点  $p$  和  $q$  之间的平滑代价:

$$E_s(p, l_p, q, l_q) = |l_p - l_q| \cdot [D(p) + D(q)], \quad (7)$$

表示每一对相邻像素之间的不连续程度。如果  $l_p = l_q$ , 则  $E_s = 0$ ; 如果  $l_p \neq l_q$ ,  $E_s$  定义为重叠像素的差值  $D$ ,  $D$  值的求解公式为

$$D(p) = \|\mathbf{I}_1(p) - \mathbf{I}_2(p)\|^2 + \alpha \|\nabla \mathbf{I}_1(p) - \nabla \mathbf{I}_2(p)\|^2, \quad (8)$$

式中:  $\alpha = 2$ 。

此时,已经求出了一系列的缝合线。引入一种更具鉴别性的误差评价  $E(p_i)$ , 筛选出视觉效果最佳的缝合线。对于缝合线上的每个像素点  $p_i$ , 以  $p_i$  为中心提取一个  $15 \times 15$  的窗口  $\mathbf{P}$ , 并在  $\mathbf{I}_1$  或  $\mathbf{I}_2$  中搜索出最相似的窗口。  $E(p_i)$  的计算公式为

$$E(p_i) = \min_{s_i \in \{\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2\}} \|\mathbf{P} - \mathbf{S}_i\|^2, \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{S}_i$  表示图像  $\mathbf{I}_1$  和  $\mathbf{I}_2$  在重叠区域的所有图像窗口。如果在图像  $\mathbf{I}_1$  或  $\mathbf{I}_2$  中遍历到与窗口  $\mathbf{P}$  类似的窗口,则表示拼接效果较好。如果在  $\mathbf{I}_1$  和  $\mathbf{I}_2$  中都找不到沿缝合线的窗口,则表示拼接效果差。

假定缝合线有  $m$  个像素点,其误差总和为

$$\bar{E} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E(p_i). \quad (10)$$

最终拼接得到的实际效果图如图 5 所示。

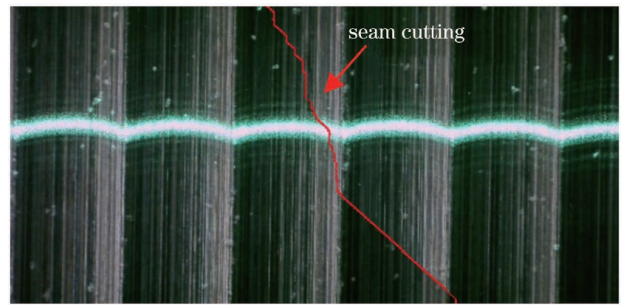


图 5 带有缝合线的拼接图像

Fig. 5 Stitched image with seam-cutting

## 3 实验对比验证

### 3.1 实验材料与方法

为了验证本文提出的光切法以及拼接算法提高粗糙度测量精度的可行性,对车削、立铣、刨削三种不同加工方式下的表面粗糙度样块进行测量对比分析。使用 Mahr-M300C 便携式粗糙度测量仪对样块进行触针式测量,采集的车削样块的轮廓波形如图 6 所示,其中  $H$  为触针扫描样块表面的高度,  $L$  为触针扫描长度。可以看出,与图像处理提取的轮廓曲线[图 2(c)]相同。

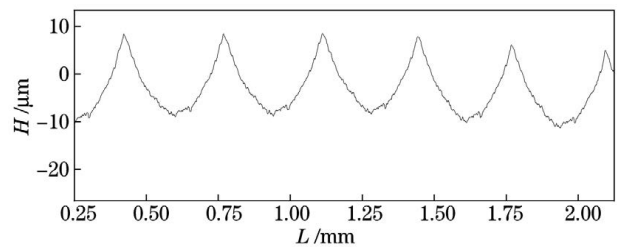


图 6 触针式测量轮廓

Fig. 6 Profile measured by stylus

在每个样块上标记 5 个被测区域,触针法得到的测量平均值如表 1 所示。在实验测量中,触针法测量

值存在较大误差,因此使用三维形貌仪加以验证,下文粗糙度数据参照值以三维形貌仪的测量值为准。

表 1 触针法及三维形貌仪测量得到的粗糙度值的对比

Table 1 Comparison of roughnesses measured by stylus method and 3D morphometer

Metal-removal process	Grade of finish	Theoretical $R_a / \mu\text{m}$	Measured $R_a / \mu\text{m}$		Error / %
			Stylus method	3D morphometer	
Turning	∇4	5-10	5.732	5.958	3.80
Turning	∇5	2.5-5.0	2.737	2.882	5.03
End-milling	∇4	5-10	5.126	5.271	2.75
End-milling	∇5	2.5-5.0	2.679	2.723	1.62
Planing	∇4	5-10	5.155	5.734	10.09
Planing	∇5	2.5-5.0	2.429	2.654	8.48

利用线性激光发生器、CCD 工业相机、精密线性位移平台及计算机等搭建测量实验平台,整体实验装置如图 7 所示,其中 1~5 表示 5 个采集区域。定制加工厚度为 1 mm 的精密长条钢板,精调激光倾角,使得显微图像上钢板上表面的光带与钢板下表面外侧的光带水平距离为 1 mm,从而实现激光倾角为精确的  $45^\circ$ 。本实验使用的相机参数为  $2592 \text{ pixel} \times 1944 \text{ pixel}$ ,采用显微镜标定校正尺(最小精确度为 0.01 mm)对图像进行标定。根据粗糙度计算要求,对粗糙度等级为 ∇4 的加工样块进行未拼接图像测量时,视场大小为  $2.3 \text{ mm} \times 1.725 \text{ mm}$ ,标定系数  $K_1 = 0.887 \mu\text{m}/\text{pixel}$ ;进行拼接图像测量时,视场大小为  $1.9 \text{ mm} \times 1.425 \text{ mm}$ ,标定系数  $K_2 = 0.773 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。对粗糙度等级为 ∇5 的加工样块进行未拼接图像测量时,视场大小为  $1.9 \text{ mm} \times 1.425 \text{ mm}$ ,标定系数  $K_3 = 0.773 \mu\text{m}/\text{pixel}$ ;进行拼接图像测量时,视场大小为  $1.4 \text{ mm} \times 1.05 \text{ mm}$ ,标定系数  $K_4 = 0.540 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。分别对不同加工样块的五处不同位置进行拼接前后的粗糙度测量,并与触针法以及三维形貌仪的测量值进行比较。

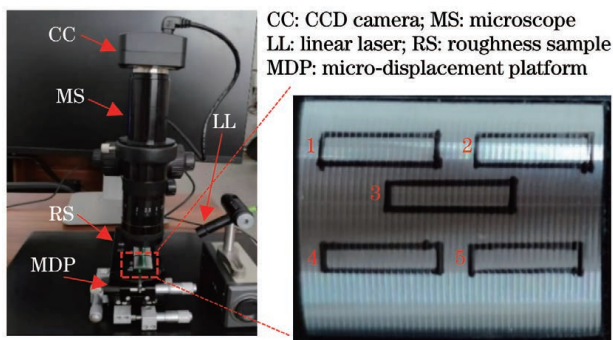


图 7 实验装置图

Fig. 7 Experimental setup

### 3.2 实验数据分析

#### 3.2.1 单光切法的测量准确率分析

利用本文所提的光切法进行图像处理,对三种不同加工工艺的样块进行粗糙度测量。利用单光切法(未经图像拼接)、三维形貌仪和触针法对粗糙度等级为 ∇4 的三种样块进行粗糙度测量,结果如图 8 所示。

如图 8(a)所示,对于车削样块,单光切法的测量值波动最大,在区域 1、2、4、5 中的测量值与三维形貌仪的测量值有明显偏差,平均绝对偏差约为  $0.18 \mu\text{m}$ ,在区域 3 中的测量值接近三维形貌仪,偏差为  $0.03 \mu\text{m}$ 。分析其原因:样块实际的表面微观不平高度为  $h = Kd \cdot \tan \theta$ ,其中  $K$  为标定系数。车削样块表面存在弧度,其中区域 1、2、4、5 处的夹角  $\theta$  不能精确地达到  $45^\circ$ ,竖直平面上工件表面的实际波度不等于光切图像的轮廓曲线波度。因此,在后期将光切法测量装置搭载到车床实现在线测量时,要注意保证测量镜头垂直对准工件的轴线,使线激光照射于工件的最高平面。

由图 8 可以看出,触针法测得的粗糙度值普遍小于单光切法和三维形貌仪,单光切法的平均测量误差比触针法降低了 2.75%。该结果证明,触针法测量仪的触针针尖尺寸对实际测量分辨率有一定影响,所得测量值会比实际粗糙度值小。如图 9 所示,触针法扫描到的只是相对于触针中心的测量曲线,而光切法能够得到精确的表面曲线。在实验测量中,触针法的误差过大,可能是针尖磨损,严重影响了测量精度。而本文所采用的光切法不受尺寸影响,能够获得更准确的测量值,且长期使用后不会出现精度降低的现象。

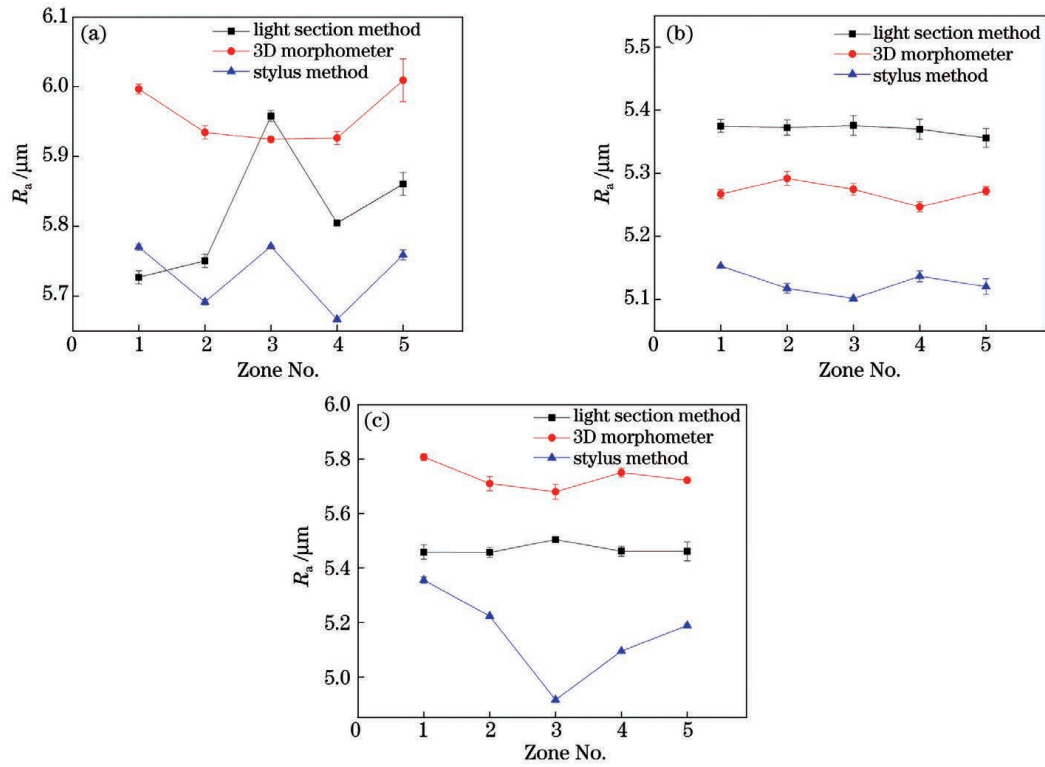


图 8 不同加工样块的粗糙度测量值。(a)车削;(b)立铣;(c)刨削

Fig. 8 Roughness values of different fabricated samples. (a) Turning; (b) end-milling; (c) planing

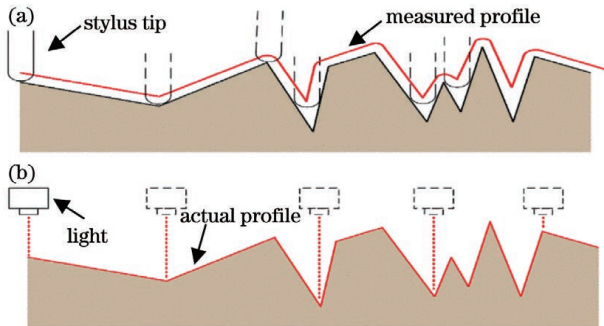


图 9 光切法与触针法的对比。(a)触针法;(b)光切法  
Fig. 9 Comparison of light section and stylus methods.

(a) Stylus method; (b) light section method

### 3.2.2 拼接前后光切法的测量准确率对比分析

利用光切法对拼接前后不同样块的 5 处框定区域进行粗糙度值测量,并求取平均值,结果如表 2 所示。

由表 2 可知,在不同加工工艺中,单光切法对立铣样块的测量相对误差最小 ( $\nabla 4$ : 1.89%,  $\nabla 5$ : 1.25%),刨削样块的最大 ( $\nabla 4$ : 4.62%,  $\nabla 5$ : 4.22%)。同一视场下不同样块的光切图像如图 10 所示。分析刨削误差较大的原因有二。1)在同一视场下,车削样块的表面轮廓周期数为 6,立铣样块为 7,刨削样块小于 6。刨削工件表面轮廓的微观不平

表 2 光切法测得的拼接前后的表面粗糙度

Table 2 Surface roughnesses before and after stitching measured by light section method

Measured result	Turning		End-milling		Planing	
	$\nabla 4$	$\nabla 5$	$\nabla 4$	$\nabla 5$	$\nabla 4$	$\nabla 5$
$R_a$ before stitching / $\mu\text{m}$	5.820	2.854	5.370	2.689	5.469	2.766
Absolute error before stitching / $\mu\text{m}$	0.138	0.028	0.099	0.034	0.265	0.112
Relative error before stitching / %	2.320	0.970	1.890	1.250	4.620	4.220
$R_a$ after stitching / $\mu\text{m}$	6.079	2.878	5.277	2.701	5.720	2.621
Absolute error after stitching / $\mu\text{m}$	0.121	0.004	0.006	0.022	0.014	0.033
Relative error after stitching / %	2.020	0.140	0.120	0.810	2.460	1.240



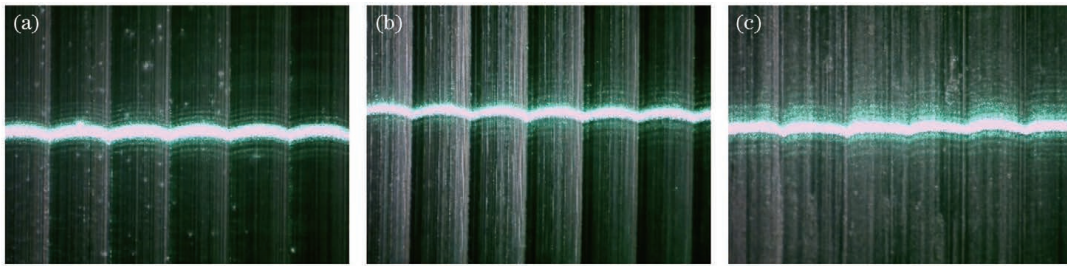


图 10 同一视场下不同样块的光切图像。(a)车削;(b)立铣;(c)刨削

Fig. 10 Light section images of different samples in same field of view. (a) Turning; (b) end-milling; (c) planing

度间距更大,轮廓周期数更小,导致了单光切法下刨削样块的测量误差较大。图像拼接增加了轮廓周期数,即增加了取样长度,很好地解决了该问题。2)车削和立铣的加工原理和刨削在本质上是不同的,车削和立铣加工过程中进给运动是轴向的匀速运动,在表面轮廓曲线上表现为较好的周期性。而刨削工件的进给运动是刀具间歇时的平移运动,表面轮廓周期由刨刀的表面及平移距离决定,光带轮廓曲线的周期性较差。

对比三种加工工艺下拼接前后的平均相对误差,拼接后相对拼接前,车削误差平均降低了 0.57%,立铣误差平均降低了 1.11%,刨削误差平均降低了 2.57%,总体降低了 1.42%。由此可见,本文使用的拼接算法能够提高光切法测量粗糙度的精度,尤其是对于微观不平度间距大的测量样块。分析可知,图像拼接的方式扩大了视场,增加了轮廓周期数,增加了取样长度,从而降低了误差。

## 4 结 论

基于光切法测量原理及缝合线驱动图像拼接算法,研究了适用于切削工件的表面粗糙度光学图像测量方法,并与触针法及三维形貌仪测得的粗糙度结果进行了对比,得到如下结论。

1) 建立的基于光切法的粗糙度测量模型能够自动处理图像,求取粗糙度值,测量误差比触针法小,具有测量成本低、效率高等优点;在车削、立铣工件上,误差较小,在刨削工件上,表现相对较差。

2) 基于缝合线驱动的图像拼接算法的光切法相比传统光切法,平均误差降低了 1.42%,尤其适用于刨削这类微观不平度间距大的切削工件的粗糙度测量,提高了取样长度和测量精度。

## 参 考 文 献

[1] 张浩,刘玉德,石文天,等. 微细切削加工表面质量的研究综述[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 219-232.

Zhang H, Liu Y D, Shi W T, et al. Quality of micro machined surface[J]. Surface Technology, 2017, 46 (7): 219-232.

[2] Whitehouse D J. Comparison between stylus and optical methods for measuring surfaces [J]. CIRP Annals, 1988, 37(2): 649-653.

[3] 刘献礼, 刘强, 岳彩旭, 等. 切削过程中的智能技术 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 45-61.

Liu X L, Liu Q, Yue C X, et al. Intelligent machining technology in cutting process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 45-61.

[4] 王晨羽, 李金泉. 基于动态力学模型分析的钛合金切削过程进给量对表面质量的影响规律 [J]. 表面技术, 2019, 48(6): 370-375.

Wang C Y, Li J Q. Influence of feed on surface quality in titanium alloy cutting process based on dynamic mechanical model analysis [J]. Surface Technology, 2019, 48(6): 370-375.

[5] 孙朝明, 孙凯华, 葛继强. 超声换能器表面振动的激光干涉测量 [J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0904006.

Sun C M, Sun K H, Ge J Q. Measurement of surface vibrations of ultrasonic transducers by laser interference method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0904006.

[6] Stedman M, Lindsey K. Limits of surface measurement by stylus instruments [J]. Proceedings of SPIE, 1989, 1009: 56-61.

[7] 何宝凤, 丁思源, 魏翠娥, 等. 三维表面粗糙度测量方法综述 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(1): 78-93.

He B F, Ding S Y, Wei C E, et al. Review of measurement methods for areal surface roughness [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(1): 78-93.

[8] 汪庆花, 卢荣胜, 杨蕾, 等. 基于散斑图纹理空域滤波的磨削表面粗糙度测量 [J]. 光学学报, 2010, 30 (8): 2324-2328.

Wang Q H, Lu R S, Yang L, et al. Grinding surface roughness measurement based on the spatial filtering of speckle pattern texture [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2324-2328.

[9] 陈苏婷, 张勇, 胡海锋. 基于激光散斑分形维数的表面

- 粗糙度测量方法[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0408002.  
Chen S T, Zhang Y, Hu H F. Surface roughness measurement based on fractal dimension of laser speckle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0408002.
- [10] 叶结和, 刘勇, 徐国成, 等. 基于非接触测量的搭接激光焊缝表面质量评估[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1002008.  
Ye J H, Liu Y, Xu G C, et al. Evaluation of surface quality of lap laser weld joints based on noncontact measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1002008.
- [11] Zhu K, Chen X, Ding G Q, et al. Research on the roughness detection of hot-rolled steel[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 382: 022003.
- [12] Montgomery P C, Benatmane A, Fogarassy E, et al. Large area, high resolution analysis of surface roughness of semiconductors using interference microscopy[J]. Materials Science and Engineering: B, 2002, 91/92: 79-82.
- [13] 李博, 黄镇昌, 全燕鸣. 基于光切图像处理的表面粗糙度检测系统[J]. 电子测量技术, 2007, 30(4): 184-187.  
Li B, Huang Z C, Quan Y M. Surface roughness measurement system based on light section image processing[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(4): 184-187.
- [14] 胡敏, 李梅, 汪荣贵. 改进的 Otsu 算法在图像分割中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(5): 443-449.  
Hu M, Li M, Wang R G. Application of an improved Otsu algorithm in image segmentation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(5): 443-449.
- [15] Meng Y C, Zhang Z P, Yin H Q, et al. Automatic detection of particle size distribution by image analysis based on local adaptive canny edge detection and modified circular Hough transform[J]. Micron, 2018, 106: 34-41.
- [16] 王竞雪, 宋伟东, 赵丽科, 等. 改进的 Freeman 链码在边缘跟踪及直线提取中的应用研究[J]. 信号处理, 2014, 30(4): 422-430.  
Wang J X, Song W D, Zhao L K, et al. Application of improved Freeman chain code in edge tracking and straight line extraction[J]. Journal of Signal Processing, 2014, 30(4): 422-430.
- [17] Szeliski R. Image alignment and stitching: a tutorial [M]. Hanover: Now Foundations and Trends, 2006: 1-104.
- [18] 贾迪, 朱宁丹, 杨宁华, 等. 图像匹配方法研究综述[J]. 中国图象图形学报, 2019, 24(5): 677-699.  
Jia D, Zhu N D, Yang N H, et al. Image matching methods[J]. Journal of Image and Graphics, 2019, 24(5): 677-699.
- [19] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [20] Agarwala A, Dontcheva M, Agrawala M, et al. Interactive digital photomontage[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 294-302.
- [21] Gao J H, Li Y, Chin T J, et al. Seam-driven image stitching[J]. Eurographics, 2013: 45-48.
- [22] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus [J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.

## Surface Roughness Measurement Based on Seam-Driven Image Stitching

Zhao Xinyu<sup>1,2</sup>, Qu Shengguan<sup>1,2\*</sup>, Lv Jiliang<sup>1,2</sup>, Xu Aiming<sup>1,2</sup>, Yao Tianwen<sup>1,2</sup>,  
Li Xiaoqiang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

<sup>2</sup> Guangdong Key Laboratory for Processing and Forming of Advanced Metallic Materials, Guangzhou 510640, Guangdong, China

### Abstract

**Objective** Surface roughness is an important index to characterize the surface quality of workpieces. With the improvement of automation in machining, the requirement of roughness on-line measurement is put forward. Compared with the traditional contact method, the non-contact and fast light section method does not cause scratches on the workpiece surface, and it is one of the effective methods to measure the workpiece surface roughness. The



principle of the light section method is as follows: a linear beam of light is projected on the workpiece surface at an angle of  $45^\circ$  and intersects with the surface contour to form a stripe beam and the camera captures the image magnified by the microscope lens and transmits it to the computer, which processes the image to calculate the roughness value. This method can obtain the height information of the uneven surface within the length range of the reflected light. Different from other non-contact optical measurement methods such as light scattering, speckle, and interferometry, the light section method is used to measure the workpiece surface roughness directly. Due to the limitation of instrumental structure and microscopic field of view, the light-section method has the problems of small measuring range and low precision. In order to solve these problem, this paper presents an optimized light section methodology to calculate the surface roughness based on the seam-driven image stitching algorithm.

**Methods** The measurement test platform (Fig. 7) is built by a linear laser generator, a CCD camera, a precision linear displacement platform, a computer, and others. The light section images of the turning, end-milling and planing samples are captured and stitched. The seam-driven image stitching algorithm consists of the following steps: 1) calculating the SIFT feature points of two mosaic images; 2) filtering the matching feature points by the optimized RANSAC method; 3) computing a series of homographic matrices and calculating the seam-cuttings; 4) evaluating each seam-cutting to select the stitched image that has the best visual effect. The edge contours are extracted by the Freeman chain code. The contour midlines are obtained by the least square method. And the arithmetic mean deviation is calculated as the roughness value. In order to verify the feasibility of the light section method and the stitching algorithm proposed in this paper to improve the accuracy of roughness measurement, the paper compares the roughness values measured by the stylus method, the light-section method before and after stitching. The paper uses the Mahr-M300C portable roughness measuring instrument to measure the samples by the stylus method. But in the experiment, it is found that there are big errors in the measured value by the stylus method. So we use a 3D profilometer to verify it. The reference value of roughness is subject to the measured value by Rtec.

**Results and Discussions** The average relative error of the light section method before stitching is 2.75% lower than that by the stylus method. The results show that the size of stylus tips has a certain influence on the actual measurement resolution, therefore the measured values are lower than the actual values of roughness. The light section method presented by the paper is not affected by the size of the instrumental structure, obtains more accurate measurement values, and does not get reduced accuracy because of long-term use. The single light section method has the greatest measurement error for planing samples. The causes are as follows. 1) under the same microscopic field of view, the number of periods of surface contour of planing samples is the smallest. The microscopic irregularity spacing of the surface profiles of planing samples is larger and the period number of the profiles is smaller, which lead to the measurement errors of the samples in the single light section method. 2) The machining principles of turning and end milling are different from that of planing. The feed motion is an axial uniform motion in the process of turning and milling, and the workpieces present a good periodicity on the surface profile curve. But the feed motion of planing workpieces is the intermittent translational motion of the tool, and the length period of the surface profile is decided by the surface and the translation distance of the planer. The error of the method after stitching is optimized with an average reduction of 1.42%, especially for planing samples with large peak-valley spacing, which is reduced by 2.57%.

**Conclusions** The roughness measurement model based on the light section method can automatically process images and calculate roughness values with the advantages of low cost and high efficiency. The measurement errors are less than those of the stylus method. The average error of the seam-driven stitching image method is reduced by 1.42%, especially for the machined workpiece with large irregularity spacing, which improves the sampling length and measurement accuracy of the traditional light section method.

**Key words** measurement; surface roughness; light section method; image stitching