

修正边界区域误差的共聚焦显微成像粗糙度测量

叶寒¹, 翁祖昕¹, 张运海^{2*}, 缪佳³, 肖昫²

¹南昌大学机电工程学院, 江西 南昌 330031;

²中国科学院苏州生物医学工程技术研究所江苏省医用光学重点实验室, 江苏 苏州 215163;

³江苏省医疗器械检验所, 南京 210019

摘要 为了对具有陡峭轮廓的物体进行非接触式表面粗糙度测量,常采用共聚焦成像对物体进行分层成像,进而重建出物体的表面三维轮廓,并采用高斯滤波的方法从表面三维轮廓中滤出粗糙度轮廓。在滤波过程中,会出现边界数据的缺失,常规的简单延伸原始轮廓两端数值的方法会导致滤波后的轮廓两端出现失真,该方法只适用于整体轮廓较为平缓的零件。引入了一种新的边界区域修正方法,该方法对表面弧度变化较大的零件也同样适用,能够准确提取物体的粗糙度轮廓。对整体轮廓较为平缓和陡峭的两组粗糙度样本分别进行共聚焦成像测量,对于整体轮廓较为平缓的样本,利用常规方法处理后,得到的均方根误差和粗糙度的平均值分别为 0.080 和 2.86 μm ,与该样本粗糙度值 2.94 μm 相比,相对误差为 2.72%;利用边界区域修正方法处理后,得到的均方根误差和粗糙度的平均值分别为 0.090 和 2.85 μm ,与该样本粗糙度值的相对误差为 3.06%。整体轮廓较为陡峭的样本的粗糙度值为 3.2 μm ,利用常规方法处理后,得到的均方根误差和粗糙度的平均值分别为 0.120 和 3.31 μm ,与该样本粗糙度值的相对误差为 3.48%;利用边界区域修正方法处理后,均方根误差和粗糙度的平均值分别为 0.045 和 3.19 μm ,与该样本粗糙度值的相对误差为 0.31%。研究结果表明,该方法能准确地测量整体轮廓较为陡峭的物体的表面粗糙度,为激光共聚焦粗糙度测量设备的研制提供了参考。

关键词 测量; 非接触式测量; 表面粗糙度; 共聚焦成像; 轮廓滤波器

中图分类号 TG84

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.211203

Surface Roughness Measurement Using Laser Confocal Microscope with Boundary Area Correction

Ye Han¹, Weng Zuxin¹, Zhang Yunhai^{2*}, Miu Jia³, Xiao Yun²

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

²Jiangsu Key Laboratory of Medical Optics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China;

³Jiangsu Medical Equipment Inspection Institute, Nanjing 210019, China

Abstract In order to achieve the non-contact surface roughness measurement of objects with steep contours, we usually use confocal imaging to layer the objects and thus to reconstruct the three-dimensional surface contours of objects. Meanwhile, a Gaussian filter is used to extract the roughness contours from the three-dimensional surface contours. However, the boundary data are missed during the process of filtering and simultaneously the usual simplified extension of two end data of original contours leads to contour distortion. This paper introduces a new type of method for boundary area correction. This correction method can be also useful for parts with large surface radian changes and can be used to accurately extract the roughness contours of objects. Confocal imaging measurements are performed on two sets of actual roughness samples with overall smooth and steep contours. For samples with overall smooth contours, the root mean square error (RMSE) and average roughness obtained by the

收稿日期: 2020-01-09; 修回日期: 2020-02-19; 录用日期: 2020-03-09

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0110305)、山东省自然科学基金(ZR2019BF012)、济南市“高校 20 条”资助项目(2018GXRC018)

* E-mail: zhangyh@sibet.ac.cn

conventional method are 0.080 and 2.86 μm , respectively, and the error relative to the sample roughness value of 2.94 μm is 2.72%. In contrast, after boundary area correction, the obtained RMSE and average roughness are 0.090 and 2.85 μm , respectively, and the error relative to the sample roughness value is 3.06%. The roughness of the sample with an overall sharp contour is 3.2 μm , and the RMSE and average roughness obtained by the conventional method are 0.120 and 3.31 μm , respectively. The error relative to the sample roughness value is 3.48%, and after boundary area correction, the RMSE and average roughness are 0.045 and 3.19 μm , respectively. The error relative to the sample roughness value is 0.31%. The research results confirm that this method can accurately measure the surface roughness of objects with overall steep contours and can provide a certain reference to the development of laser confocal roughness measurement equipment.

Key words measurement; non-contact measurement; surface roughness; confocal imaging; contour filter

OCIS codes 120.2830; 120.6650

1 引言

在零件实际加工过程中,摩擦、塑性变形和高频振动等会给加工零件表面留下具有微观峰谷的不平整痕迹,这些关于峰谷幅度和密集程度的几何形状特性称为表面粗糙度。表面粗糙度对零件的耐磨性、疲劳强度、抗腐蚀性、密封性和表面光学性能等有重要的影响^[1]。随着科学技术的发展,人们对零件表面加工质量的要求越来越高,而表面粗糙度是评价表面质量的重要参数,如何准确测量出零件的表面粗糙度变得至关重要^[2]。

表面粗糙度的测量方法主要有三类:纳米表面粗糙度分析法、接触式测量法以及非接触式测量法^[3]。其中,纳米表面粗糙度分析法测量粗糙度时要求苛刻,且测量效率较低^[4-7]。以触针法为代表的接触式测量法会损坏被测物体的表面^[8]。常用的非接触式测量法包括白光干涉法^[9-10]、数字全息法^[11]和共聚焦显微法^[12]等。白光干涉法测量范围单一,不能测量陡峭的表面轮廓,且横向分辨率低^[13]。数字全息法不能完全避免噪声干扰而且对被测样本的散射性以及材料性质有较高的要求^[14]。共聚焦显微法因为利用具有较大数值孔径的物镜,所以可以用于测量表面局部斜率较大的物件,而且具有一定的抗散射光干扰的能力。共聚焦类仪器具有较高的横向分辨率和优秀的纵向层析成像能力,在表面微观形貌的测量中具有广泛的应用^[3]。

利用共聚焦仪器测量粗糙度是先通过共聚焦成像重建物体的表面轮廓,然后采用轮廓滤波器对表面轮廓进行滤波,从而提取粗糙度轮廓并进行粗糙度值计算。但是,在利用轮廓滤波器对表面轮廓进行滤波的过程中,会出现边界数据的丢失,使最后的粗糙度计算结果不准确。常规消除边界效应的方法适用于整体轮廓较为平缓的零件,本文引入了一种新的消除边界效应的方法,该方法相比常规方法更

具有普适性,经轮廓滤波器滤波后轮廓数据保持完整,最终粗糙度的计算结果准确有效。

2 基于共聚焦显微成像的粗糙度轮廓提取重建

激光扫描共聚焦成像是研究表面微观形貌的有效技术手段。在共聚焦成像时,点光源经照明光学系统聚焦在待测样本上并形成点状照明区域,该点状区域经过成像系统聚焦在一个探测针孔上。常采用振镜实现照明光点在样本上的逐点逐行移动,该振镜的两个扫描轴互相垂直。采用一个点探测器如光电倍增管同步接收样本发出的光信号,通过数据重建可以得到样本的二维图像。每一层的样本扫描成像结束后,通过沿光轴移动样本或物镜,改变样本相对于物镜的轴向距离,移动距离根据物镜数值孔径或样本精度进行设置,以便于对样本下一层进行扫描成像,如此进行下去可以获得样本所有层的二维共聚焦图像。对所有二维共聚焦图像进行三维数据重建,可以得到样本的三维体数据,进而获得表面轮廓的三维分布。

样本的表面轮廓包含不同的空间频率成分,既有变化较快的粗糙度轮廓(轮廓波长较短),也有变化较平缓的波纹度轮廓和变化更缓慢的形状轮廓。 λ_s 对应粗糙度轮廓和变化更快的噪声之间的截止波长, λ_f 对应粗糙度轮廓和波纹度轮廓之间的截止波长, λ_c 对应波纹度轮廓和形状轮廓之间的截止波长,它们之间的关系如图 1 所示^[15]。

为了测量出待测表面的粗糙度,需将粗糙度轮廓分布从总的表面轮廓分布中提取出来。先将重建得到的表面轮廓代入截止波长为 λ_s 的轮廓滤波器中以滤除噪声和短波长成分,得到无噪声轮廓;再将无噪声轮廓代入截止波长为 λ_c 的轮廓滤波器中,得到长波成分的波纹度轮廓和形状轮廓;用无噪声轮廓减去波纹度轮廓和形状轮廓就是短波成分的粗糙度轮廓。如图 2 所示。

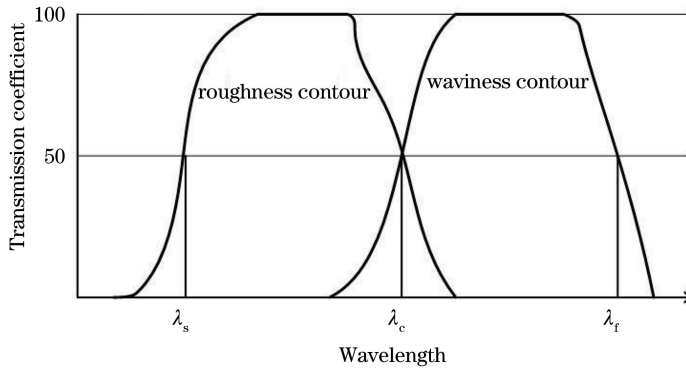


图 1 粗糙度轮廓与波纹度轮廓的传输系数

Fig. 1 Transmission coefficients of roughness and waviness contours

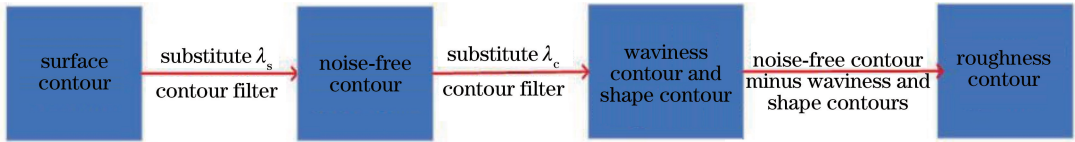


图 2 提取粗糙度轮廓的步骤

Fig. 2 Steps for extracting roughness contours

在进行轮廓滤波时,常采用高斯滤波器,它不会引起不对称轮廓失真。由于图像数据都是离散形式的,需采用离散形式的高斯滤波器,为了使权函数的

离散采样满足归一化条件,从而避免偏离效应,应对权函数进行归一化处理,其函数形式^[16]为

$$s(k) = \begin{cases} \frac{1}{C} \exp \left[-\pi \left(\frac{k \Delta x}{a \lambda} \right)^2 \right], & k \in \left[-\frac{L \lambda}{\Delta x}, -\frac{L \lambda}{\Delta x} \right], \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

其中,归一化常数为

$$C = \sum_k \exp \left[-\pi \left(\frac{k \Delta x}{a \lambda} \right)^2 \right], \quad (2)$$

式中: λ 为轮廓滤波器的截止波长; k 为滤波函数的位置坐标; a 为常数, $a = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} = 0.4697$,在截止波长为 λ 时传输系数为50%; Δx 为采样点之间的间隔, $\Delta x = \frac{l_r}{n}$,其中 l_r 为取样长度, n 为取样点数; L 为权函数的截断常数,一般情况下, L 取0.5,计算误差为0.76%^[17]。

轮廓滤波可由轮廓函数和高斯滤波器函数的离散卷积实现^[16]:

$$W(i) = \sum_{u=i-\frac{L\lambda}{\Delta x}}^{i+\frac{L\lambda}{\Delta x}} Z(u)s(-k), \quad (3)$$

式中: $Z(u)$ 是未滤波轮廓; $W(i)$ 是滤波后获得的轮廓; $s(k)$ 是高斯滤波器函数; u 为未滤波轮廓的位置

坐标, $u \in [0, n-1]$; i 为滤波后轮廓的位置坐标, $i \in \left[\frac{L\lambda}{\Delta x}, n - \frac{L\lambda}{\Delta x} \right]$ 。

假定原始轮廓曲线为 $Z(u)$,则滤波后的轮廓如图3所示。图3中实线为未滤波的原始轮廓 $Z(u)$,虚线为滤波后的轮廓 $W(i)$,滤波后的轮廓相比未滤波轮廓,左右两端数据各缺失了长度为 $\frac{L\lambda}{\Delta x}$ 的数据,这是由高斯滤波器自身特性引起的。

3 轮廓边界区域的修正

为了消除图3中高斯滤波器的滤波过程带来的边界效应,常规的方法是将原始轮廓左右两端各延长 $\frac{L\lambda}{\Delta x}$,延长的数据值取原始轮廓的最大峰值与最大谷值和的平均值。但是这种方法只适用于整体轮廓较为平缓的零件,对于轮廓弧度变化较大的零件,利用该方法处理后,滤波后的轮廓两端出现失真,如图4所示。

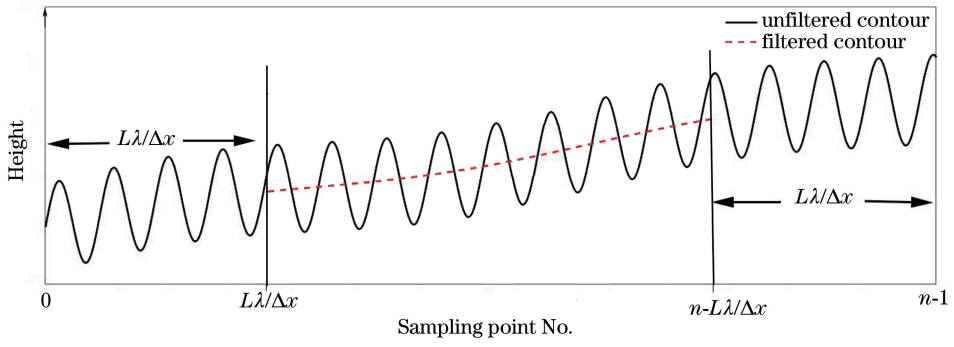


图 3 未滤波轮廓和滤波后的轮廓

Fig. 3 Unfiltered contour and filtered contour

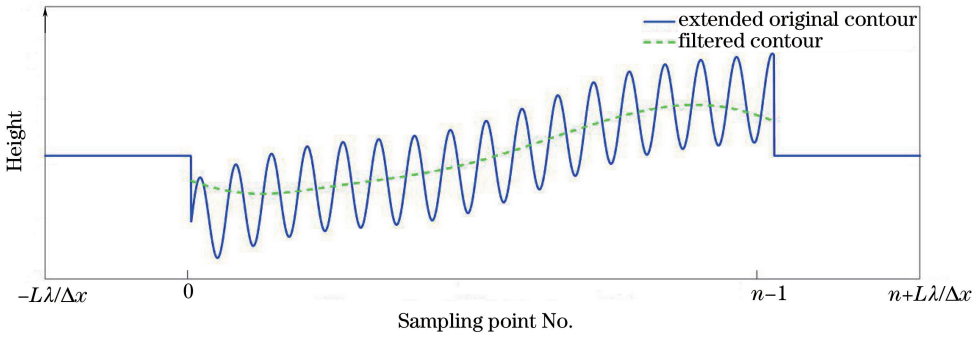


图 4 延长后的原始轮廓与滤波后的轮廓

Fig. 4 Extended original contour and filtered contour

为了弥补上述常规填充方法的不足,本文引入一种更有普适性的处理边界效应的方法,不对原始轮廓进行延长处理,只对边界区域的滤波方程进行修改。区域修改后的滤波方程为

$$W(i) = \begin{cases} \sum_{u=0}^{i+\frac{L\lambda}{\Delta x}} Z(u)s(i-u) \left\{ \frac{\mu_2(i) - \mu_1(i)(i-u)}{\mu_2(i)\mu_0(i) - [\mu_1(i)]^2} \right\}, & i \in \left[0, \frac{L\lambda}{\Delta x} - 1 \right] \\ \sum_{u=i-\frac{L\lambda}{\Delta x}}^{n-1} Z(u)s(i-u) \left\{ \frac{\mu_2(i) - \mu_1(i)(i-u)}{\mu_2(i)\mu_0(i) - [\mu_1(i)]^2} \right\}, & i \in \left[n - \frac{L\lambda}{\Delta x}, n - 1 \right] \end{cases} \quad (4)$$

(4)式中 $\mu_p(i)$ 的定义如下:

$$\mu_p(i) = \begin{cases} \sum_{u=0}^{i+\frac{L\lambda}{\Delta x}} (i-u)^p \times s(i-u), & i \in \left[0, \frac{L\lambda}{\Delta x} - 1 \right] \\ \sum_{u=i-\frac{L\lambda}{\Delta x}}^{n-1} (i-u)^p \times s(i-u), & i \in \left[n - \frac{L\lambda}{\Delta x}, n - 1 \right] \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $p=0, 1, 2$ 。

为了验证本文提出的边界处理方法的有效性,进行了一组仿真实验,令未滤波的原始轮廓 $Z(u)$ 的表达式为

$$Z(u) = Z_1(u) + Z_2(u) = 0.8\sin(0.005u) + 0.006u + 4\sin(0.05u), \quad (6)$$

式中: u 的取值范围为 $[0, 2047]$, 即采样点数 n 为 2048。令采样长度 l_r 为 $5000 \mu\text{m}$, 采样间距 Δx 为

$2.44 \mu\text{m}$, $Z_1(u) = 0.8\sin(0.005u) + 0.006u$ 为波纹度轮廓和形状轮廓, $Z_2(u) = 4\sin(0.05u)$ 为粗糙度轮廓。

将未滤波的原始轮廓 $Z(u)$ 采用上述两种边界效应处理方法进行滤波处理,结果如图 5 所示。图 5 中实线为原始轮廓,点线为原始波纹度轮廓和形状轮廓,虚线为常规方法滤波后的轮廓,点划线为经本文边界修正方法处理后的滤波轮廓。将

上述两种方法得到的滤波轮廓与原始的波纹度轮廓和形状轮廓进行对比,分别计算它们的方差,定量比较两种边界效应处理方法的效果,结果如表 1

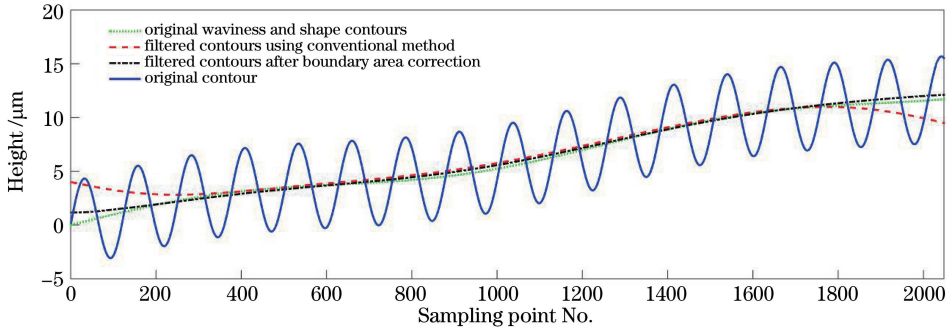


图 5 原始轮廓及经不同方法处理后的滤波轮廓

Fig. 5 Original contour and filtered contours using different methods

表 1 两种方法处理后的滤波轮廓与实际的轮廓的方差
Table 1 Variance of actual contour and filtered contour treated by using two methods

Method	Variance
Normal method	1.1082
Improved method	0.4231

在采用高斯滤波进行轮廓滤波时,需要预先确定 λ_c 和 λ_s 的取值,根据 GB/T 10610^[18] 知,截止波长 λ_c 与取样长度 l_r 相同,而取样长度 l_r 又与粗糙度的大概分布范围有关,取样长度的选取如表 2 所示,其中 R_a 为粗糙度。

表 2 取样长度 l_r 的选取标准

Table 2 Selection criteria for sampling length l_r

Roughness	l_r /mm
$0.02 \text{ mm} \leq R_a < 0.10 \text{ mm}$	0.25
$0.10 \text{ mm} \leq R_a < 2.00 \text{ mm}$	0.80
$2.00 \text{ mm} \leq R_a < 10.00 \text{ mm}$	2.50
$10.00 \text{ mm} \leq R_a < 80.00 \text{ mm}$	8.00

取样长度 l_r 确定后可以得出截止波长 λ_c , 根据国家标准 GB/T 6062^[19], 在确定 λ_c 后可以得出 λ_s , 如表 3 所示。

表 3 截止波长的选取标准

Table 3 Selection criteria for cut-off wavelength

λ_c /mm	λ_s /μm
0.25	2.5
0.8	2.5
2.5	8
8.0	25

4 粗糙度计算

国家标准 GB/T 3505-2009^[15] 中规定的表面粗糙度的参数有幅度参数、间距参数、混合参数以及与

所示。可以看出,修正边界区域后的滤波轮廓与理论设定的轮廓之间的方差更小,逼近程度更高。

曲线有关的参数。主要的评定参数有轮廓算数平均偏差 R_a , 最大轮廓峰高 R_p , 最大轮廓谷深 R_v , 轮廓的均方根偏差 R_q 和微观不平度十点高度 R_z 。

表面粗糙度中应用最广泛的是算术平均粗糙度 R_a , 它的定义为

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_R(u)|, \quad (7)$$

式中: $Z_R(u)$ 为粗糙度轮廓

将经过(3)、(4)式过滤后的粗糙度轮廓代入(7)式进行计算,就可以得到粗糙度值 R_a 。其他粗糙度参数可以按照其定义在获取粗糙度轮廓后进行相应计算。

5 实验结果与分析

本文中整体轮廓较为平缓的样本采用标称值 R_a 为 $2.94 \mu\text{m}$, 型号为 Mitutoyo 178-601 的高精度粗糙度参考样本, 如图 6(a) 所示。整体轮廓较为陡峭的样本采用标称值 R_a 为 $3.2 \mu\text{m}$ 的高精度粗糙度参考样本, 如图 6(c) 所示。在 Leica TCS SP5 II 激光扫描共聚焦显微镜下, 选用放大倍数为 20、数值孔径为 0.5 的物镜及波长为 488 nm 的激光, 图片扫描频率设置为 100 Hz, Z 方向的步进分别为 $0.50 \mu\text{m}$ 和 $0.69 \mu\text{m}$, 对两种样本分别拍摄了 92 张和 195 张序列图片, 如图 6(b)、(d) 所示。序列图片大小为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 实际大小为 $775 \mu\text{m} \times 775 \mu\text{m}$, 利用共聚焦成像重建出的两种样本的三维轮廓分别如图 7(a)、(b) 所示。

样本标定的粗糙度值 R_a 分别为 $2.94 \mu\text{m}$ 和 $3.2 \mu\text{m}$, 根据表 1 可知, 取样长度 l_r 应该取 2.5 mm, 而单张图片大小为 $775 \mu\text{m} \times 775 \mu\text{m}$, 所以将单张图片进行三次复制后再进行拼接, 结果

如图 7(a)、(b)所示。沿图 7(a)、(b)中 X 方向各提取出一副二维轮廓,此时轮廓的长度均为 3.1 mm,取样点数 n 为 2048。采用上述两种消除

边界效应的方法对二维轮廓进行处理,得到平缓样本的二维轮廓和陡峭样本的二维轮廓,分别如图 8、9 所示。

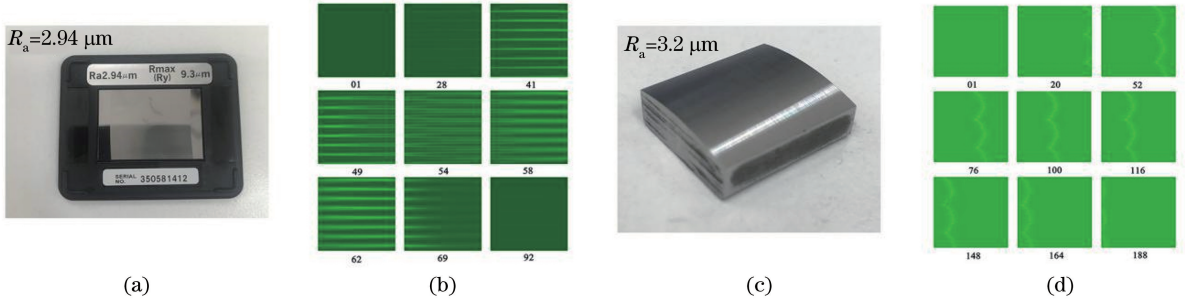


图 6 样本图和逐层共聚焦成像结果。(a)(b)平缓样本;(c)(d)陡峭样本

Fig. 6 Sample map and layer-by-layer confocal imaging results. (a)(b) Gentle samples; (c)(d) steep samples

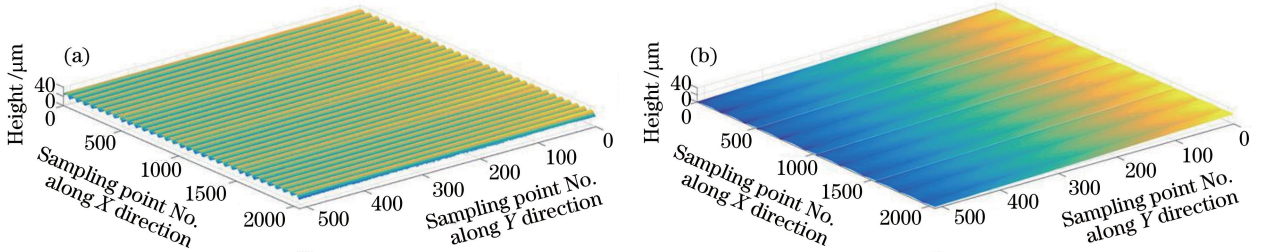


图 7 样本的重建三维轮廓图。(a)平缓样本;(b)陡峭样本

Fig. 7 Reconstructed 3D contours of samples. (a) Smooth sample; (b) steep sample

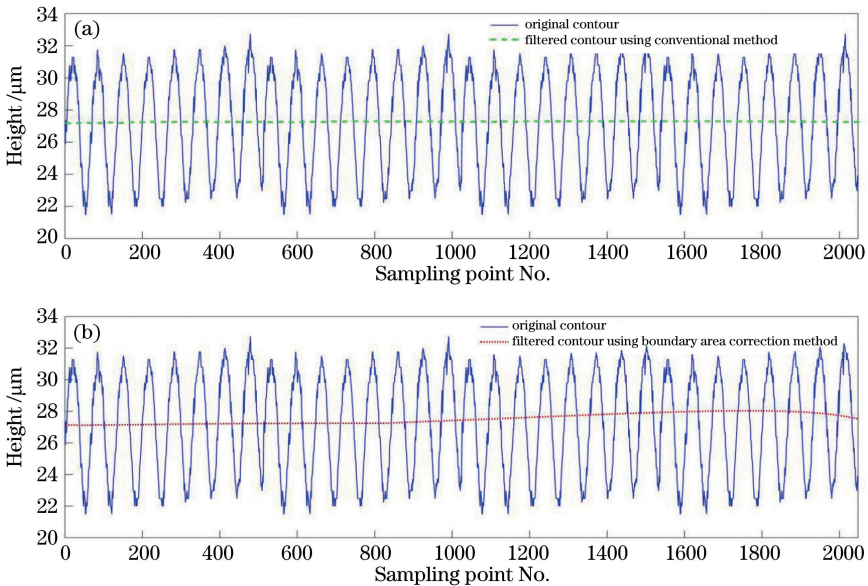


图 8 平缓样本的实验结果。(a)常规方法;(b)修正边界区域方法

Fig. 8 Experimental results of smooth sample. (a) Conventional method; (b) boundary area correction method

将得到的粗糙度轮廓代入(7)式中计算粗糙度值 R_a 。从图 7(a)、(b)中各提取出任意 8 条垂直样本纹路方向的二维轮廓,计算出的 R_a 值、与标称值的相对误差和均方根误差 RMSE 分别如表 4、5 所示。可以看出,对于整体轮廓较为平缓的物体,常规的边界轮廓延伸法与边界区域修正法的效果相近。

而对于整体较为陡峭的物体,经边界区域修正法处理后计算出的粗糙度平均值为 $3.19 \mu\text{m}$,经常规的边界轮廓延伸法处理后计算出的粗糙度平均值为 $3.31 \mu\text{m}$;与标称值 $3.2 \mu\text{m}$ 相比,常规的边界轮廓延伸法与边界区域修正法的相对误差分别为 0.31% 和 3.48% ;测试结果的均方根误差 RMSE 分

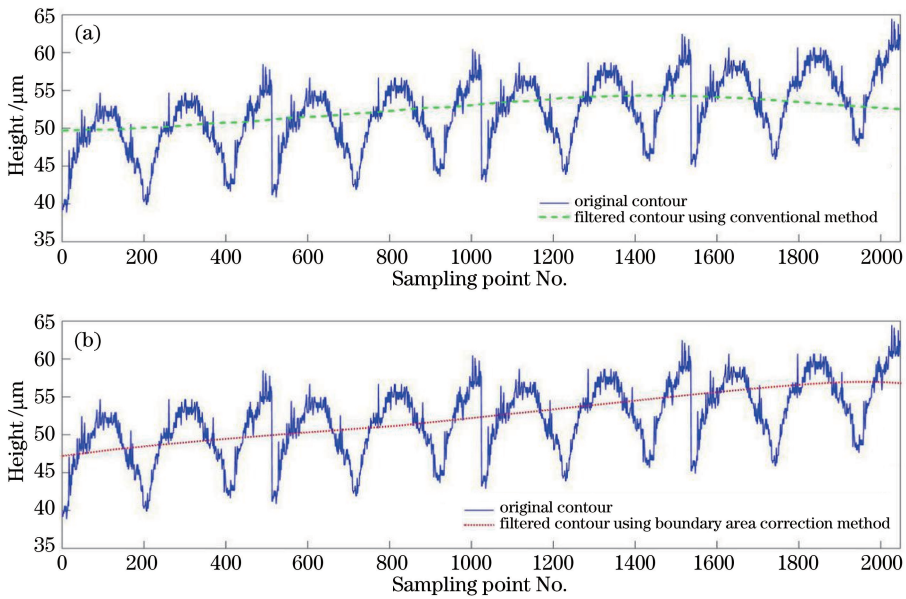


图9 陡峭样本的实验结果。(a)常规方法;(b)修正边界区域方法

Fig. 9 Experimental results of steep sample. (a) Conventional method; (b) boundary area correction method

表4 平缓样本的粗糙度值 R_a

Table 4 Roughness value R_a of smooth sample

Method	$R_a/\mu\text{m}$								Average value $/\mu\text{m}$	Relative error $\%$	RMSE
	1	2	3	4	5	6	7	8			
Normal method	2.86	2.88	2.87	2.86	2.87	2.85	2.84	2.86	2.86	2.72	0.080
Improved method	2.85	2.87	2.86	2.86	2.87	2.84	2.83	2.85	2.85	3.06	0.090

表5 陡峭样本的粗糙度值 R_a

Table 5 Roughness value R_a of steep sample

Method	$R_a/\mu\text{m}$								Average value $/\mu\text{m}$	Relative error $\%$	RMSE
	1	2	3	4	5	6	7	8			
Normal method	3.29	3.30	3.40	3.34	3.27	3.36	3.31	3.22	3.31	3.48	0.12
Improved method	3.17	3.22	3.23	3.19	3.16	3.25	3.20	3.10	3.19	0.31	0.045

别为 0.045 和 0.12。所以边界区域修正法与常规的边界轮廓延伸法相比,计算出的粗糙度值更准确且更具有普适性。

6 结 论

通过共聚焦成像对物体进行分层成像,并重建出物体的表面三维轮廓,然后采用高斯滤波器从表面三维轮廓中提取出粗糙度轮廓。由于在滤波过程中轮廓边界区域会出现数据缺失,因此引入一种对边界区域进行修正的处理方法,得到完整的粗糙度轮廓,最后根据提取出的粗糙度轮廓计算出典型粗糙度参数 R_a 。采用常规边界轮廓延伸方法和修正边界区域法分别对平缓样本和陡峭样本进行处理:经常规边界轮廓延伸方法处理后,得到的平缓样本和陡峭样本的粗糙值与它们各自标称值的相对误差分别为 2.72% 和 3.48%;经边界区域修正后,得到

的平缓样本和陡峭样本的粗糙度值与它们各自标称值的相对误差分别为 3.06% 和 0.31%。表明所提方法能够更准确地测量物体的表面粗糙度且更具有普适性,可以用于指导激光共聚焦粗糙度测量设备的研制。

参 考 文 献

[1] Whitehouse D J. Surface metrology [J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(9): 955-972.
 [2] Wu S Q. Application guide of surface roughness [M]. Beijing: China Machine Press, 1990.
 吴松青. 表面粗糙度应用指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
 [3] 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.
- 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.
- [4] Young R D. Surface microtopography [J]. Physics Today, 1971, 24(11): 42-49.
- [5] Suganuma T. Measurement of surface topography using SEM with two secondary electron detectors[J]. Journal of Electron Microscopy, 1985, 34(4): 328-337.
- [6] Zhu X. Scanning near-field optical microscope [J]. Modern Scientific Instruments, 1996(4): 7-9.
朱星. 扫描近场光学显微镜 [J]. 现代科学仪器, 1996(4): 7-9.
- [7] Dürig U, Pohl D W, Rohner F. Near-field optical-scanning microscopy[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 59(10): 3318-3327.
- [8] Han X G, Wu Z S. Study of measuring method of surface roughness for metal base and coating [J]. Journal of Applied Optics, 1996, 17(1): 38-43.
韩香娥, 吴振森. 金属基及涂层表面粗糙度的测量方法研究[J]. 应用光学, 1996, 17(1): 38-43.
- [9] Chang S P. Non-contact measurement method and system based on white light interference contour size and morphology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
常素萍. 基于白光干涉轮廓尺寸与形貌非接触测量方法和系统[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [10] Caber P J. Interferometric profiler for rough surfaces [J]. Applied Optics, 1993, 32(19): 3438-3441.
- [11] Chen Z, Jiang H Z, Liu X, et al. Measurement of surface defects of optical elements using digital holography [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(3): 576-583.
陈竹, 姜宏振, 刘旭, 等. 数字全息术用于光学元件表面缺陷形貌测量 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 576-583.
- [12] Minsky M. Microscopy apparatus: 3013467 [P]. 1961-12-19.
- [13] Tong X L, Li Y H, Lin H S, et al. Research on phase-shifting interferometry contrast three-dimensional topography of ultra precision surface[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(12): 65-69.
童晓蕾, 李玉和, 林浩山, 等. 超精表面三维形貌相移干涉检测实验研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(12): 65-69.
- [14] Chen G, Zhou W J, Hu Z, et al. Surface roughness measurement based on digital holography[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(6): 1040-1047.
陈刚, 周文静, 胡祯, 等. 表面粗糙度数字全息检测 [J]. 应用光学, 2014, 35(6): 1040-1047.
- [15] National Technical Committee for Standardization of Geometrical Product Specifications. Terms, definitions and surface texture parameters: GB/T 3505-2009 [S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
全国产品几何技术规范标准化技术委员会. 术语、定义及表面结构参数: GB/T 3505-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [16] National Technical Committee for Standardization of Geometrical Product Specifications. Linear profile filters: GB / Z 26958.20-2011 [S]. Beijing: China Standard Press, 2011.
全国产品几何技术规范标准化技术委员会. 线性轮廓滤波器: GB/Z 26958.20-2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [17] International Organization for Standardization. Gaussian filters: ISO 16610-21-2011 [S]. London: International Organization for Standardization, 2011.
- [18] National Technical Committee for Standardization of Geometrical Product Specifications. Rules and procedures for the assessment of surface texture: GB/T 10610-2009 [S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
全国产品几何技术规范标准化技术委员会. 评定表面结构的规则和方法: GB/T 10610-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [19] National Technical Committee for Standardization of Geometrical Product Specifications. Nominal characteristic of contact (stylus) instruments: GB/T 6062-2009 [S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
全国产品几何技术规范标准化技术委员会. 接触(触针)式仪器的标称特性: GB/T 6062-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.