

超辐射发光二极管的散斑自相关法表面粗糙度测量研究

蒋磊, 刘恒彪, 李同保

(同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 利用相干或部分相干光被粗糙表面散射产生的散斑现象进行表面粗糙度测量是一类有应用前景的在线测量技术。研究了窄带连续谱光束被随机粗糙表面散射形成的远场散射光场的散斑延长效应和将其应用于表面粗糙度测量的可行性。理论和模拟研究表明: 随着观测点逐渐远离散射光场中心, 散斑延长率越来越大; 在相同的观测位置, 表面的粗糙度越小, 散斑延长率越大。构建以超辐射发光二极管(Superluminescent Diode, SLD)为光源的实验系统, 以散斑延长率衍生的光学粗糙度指标来衡量表面粗糙度, 对电火花加工的表面粗糙度对比样块进行粗糙度测量实验, 结果表明光学粗糙度指标随着被测表面粗糙度的增加而单调递减。比起一组分立波长的光源, 采用窄带连续谱光源的表面粗糙度测量系统有更大的测量范围。

关键词: 表面粗糙度测量; 散斑自相关; 散斑延长效应; 超辐射发光二极管

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0717003

Research on surface roughness measurement of speckle autocorrelation method based on SLD

Jiang Lei, Liu Hengbiao, Li Tongbao

(School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Surface roughness measurement using the phenomenon of speckle caused by scattering of coherent or partially coherent light by rough surface was a promising online measurement technique. The speckle elongation effect of the far-field scattered field formed by the scattering of the narrowband continuous spectral beam by random rough surface and the feasibility of applying the effect to the surface roughness measurement were studied in this paper. Theoretical and simulation studies show that the speckle elongation becomes larger as the observation point moves away from the center of the scattered field; moreover, the speckle elongation increases as the surface roughness becomes smaller at the same observation position. The experimental system with Superluminescent Diode(SLD) as the light source was constructed. The surface roughness was measured by the optical roughness index which was derived from the speckle elongation. The roughness measurement experiment was carried out on the EDM surface roughness specimen. The results show that the optical roughness index monotonically decreases as the surface roughness of the measured surface increases. Surface roughness measurement system with the

收稿日期: 2019-02-10; 修订日期: 2019-03-20

作者简介: 蒋磊(1993-), 男, 硕士生, 从事光学测量方面的研究。Email: 1253813@tongji.edu.cn

导师简介: 李同保(1942-), 男, 院士, 主要从事光学与计量学方面研究。Email: tbli@tongji.edu.cn

通讯作者: 刘恒彪(1962-), 男, 教授, 博士, 主要从事光学测量方面的研究。Email: liuhb62@tongji.edu.cn

narrowband continuous spectral light source has a larger measurement range than a group of light sources with discrete wavelengths.

Key words: surface roughness measurement; speckle autocorrelation; speckle elongation effect; SLD

0 引言

表面粗糙度的光学参数测量法建立在粗糙表面对入射光的散射理论上,它不直接测量表面轮廓,而是通过测量散射光强度的空间分布,再根据理论模型反演出表面粗糙度参数值。这类测量法是非接触式的,具有用于在线测量的优势。散斑是相干光或部分相干光经过粗糙表面散射后在空间形成的特殊光场分布,利用散斑的统计性质进行表面粗糙度测量是一种典型的光学参数测量法。关于散斑表面粗糙度测量的研究从其提出到现在不曾间断,衍生出利用散斑一阶统计性质的散斑对比度法^[1]和利用散斑二阶统计性质的角度散斑相关法^[2]、双波长散斑相关法^[3]、多波长散斑自相关法^[4]等。

粗糙表面在多个不同波长的激光束共轴照射下,散射光场图像呈现出径向延长的斑粒特征,斑粒延长的幅度随着粗糙表面的纵向特征参数(例如,轮廓算术平均偏差 Ra)的增大而减小^[5]。多波长散斑自相关测量法就利用了这种散斑延长效应。相较于其它光学参数测量法,多波长散斑自相关法可以有效降低表面轮廓的横向特征参数对粗糙度测量的影响^[6]。

在已有的关于多波长散斑延长效应及相关表面粗糙度测量的研究中,大多针对一组分立波长。不同波长的光合束后照射粗糙表面所形成的散射光场图像中,在靠近散斑场中心的一个环状区域内,散斑斑粒沿径向明显地延长。该区域越大,越能提高测量灵敏度,扩大测量范围。超辐射发光二极管(Superluminescent Diode, SLD)输出窄带连续谱光束,具有部分相干性。用 SLD 照射粗糙表面产生的散射光场图像具有比用分立波长光源更大的散斑延长区域^[7]。因此,SLD 具有作为多波长散斑自相关表面粗糙度测量光源的优势。

文中报告基于窄带连续谱光源 SLD 的散斑自相关表面粗糙度测量的研究工作;首先,理论研究随机粗糙表面被具有高斯函数型光谱密度分布的部分相干光束照射产生的散射光场的散斑自相关函数及散

斑延长率;其次,分析表面粗糙度、光源的中心波长和光谱带宽、光束半径等因素对散斑延长率的影响;然后,模拟计算采用光谱密度分布与高斯函数有一定差别的 SLD 光束照射随机粗糙表面产生的多波长散射光场,考察其空间平均散斑延长率,以检验理论分析结果的适用性;最后,用 SLD 光源构建实验系统,开发散斑图像数字处理和粗糙度参数提取程序,通过实验验证进行表面粗糙度测量的可行性。

1 散斑自相关函数及散斑延长率

多波长散斑的延长特性可以用自相关长度来表征。计算散射光场强度的自相关函数是计算散斑自相关长度的基础。

对中心波数为 k_0 , 光谱带宽为 W 的光源光谱密度分布为 $g(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} W} \exp\left[-\frac{(k-k_0)^2}{2W^2}\right]$ 的窄带连续谱光源, Pederson 给出了散射光场散斑自相关函数的具体形式^[8]:

$$\gamma(\vec{\zeta}_1, \vec{\zeta}_2) = \frac{\exp\left[-k_0^2 \frac{(\vec{\zeta}_2 - \vec{\zeta}_1)^2 + 4W^2 (\vec{\zeta}_1 \times \vec{\zeta}_2)^2}{1 + 2W^2 (\zeta_1^2 + \zeta_2^2) + 4W^4 (\vec{\zeta}_1 \times \vec{\zeta}_2)^2}\right]}{\sqrt{1 + 2W^2 (\zeta_1^2 + \zeta_2^2) + 4W^4 (\vec{\zeta}_1 \times \vec{\zeta}_2)^2}} \quad (1)$$

式中: $\vec{\zeta}$ 为路径矢量。如果用 L 表示光束半径, 用 $\vec{m} = \vec{n}_s - \vec{n}_e$ 表示散射光相对入射光的方向变化, 则路径矢量可以表示为 $\vec{\zeta} = Lm_x \vec{e}_x + Lm_y \vec{e}_y + \sigma_n m_z \vec{e}_z$ 。

现在考虑检测散射光场的一种特殊情形。假设照明光束垂直于粗糙表面的理想几何平面入射。以几何平面的“反射光束”轴线为光轴设置焦距为 f 的远场透镜。在透镜的后焦面上检测散射光场强度分布。鉴于多波长散斑的径向延长特性, 只需考察散斑的一维延长规律。针对所观测的散射光场范围远小于透镜焦距的情形, 采取小角度近似。在此情形下, 路径矢量简化为:

$$\vec{\zeta}_i = \begin{pmatrix} \zeta_x \\ \zeta_y \\ \zeta_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{Lu}{f} \\ 0 \\ 2\sigma_h \end{pmatrix} \quad i \in \{1, 2\} \quad (2)$$

式中： u 为透镜后焦面的一维坐标。在公式(2)中，因 $1+2W^2(\zeta_1^2+\zeta_2^2) \gg 4W^4(\vec{\zeta}_1 \times \vec{\zeta}_2)^2$ ，可以忽略极小项。这样，窄带连续谱光束垂直入射粗糙表面形成的散射光场的一维散斑自相关函数可以表示为：

$$\gamma(u_1, u_2) = \frac{\exp\left\{-k_0^2 \frac{[1+16W^2\sigma_h^2](u_1-u_2)^2 L^2 f^2}{1+2W^2[L^2(u_1^2+u_2^2)f^2+8\sigma_h^2]}\right\}}{\sqrt{1+2W^2[L^2(u_1^2+u_2^2)f^2+8\sigma_h^2]}} \quad (3)$$

在散斑自相关函数基础上，可提取散射光场不同位置的散斑自相关长度（散斑自相关函数从其最大值降低到最大值的 e^{-2} 所对应的位置偏移量）来描述散斑的斑粒长度。以各个位置的散斑自相关长度与散斑中心的自相关长度的比值作为散斑延长率，可以度量散斑斑粒的延长程度。

2 散斑延长率影响因素分析

2.1 表面粗糙度

根据公式(3)可分析散斑延长率的影响因素。在式中设定窄带连续谱光源的中心波长为 750 nm，光谱半高宽为 40 nm(相当于 $W=1.899 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$)，粗糙表面的入射光束半径为 0.5 mm，远场透镜焦距为 50 mm， σ_h 分别为 0.2、0.4、0.8、1.6、3.2 μm ，计算散射光场不同位置的散斑延长率，如图 1 所示。在图中可以看出，随着观测点逐渐远离散射光场中心，散斑延长率越来越大；在相同的观测位置，表面的粗糙度越小，

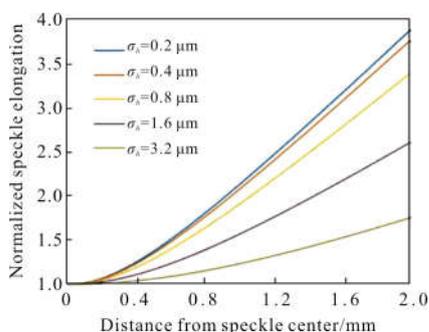


图 1 不同粗糙度表面的散射光场的散斑延长率分布
Fig.1 Speckle elongation distribution of scattered fields with different roughness surfaces

散斑延长率越大。据此现象，并考虑到实际测量过程中各种误差因素对散斑延长率的潜在影响，用平均散斑延长率作为衡量表面粗糙度的指标。图 2 是在与图 1 相同的光源和观测条件下对不同表面粗糙度计算的从散射光场中心到距中心 2 mm 范围内的平均散斑延长率。由图可见，表面越光滑，散斑延长效应越明显；散斑的平均延长率随着 σ_h 单调递减。

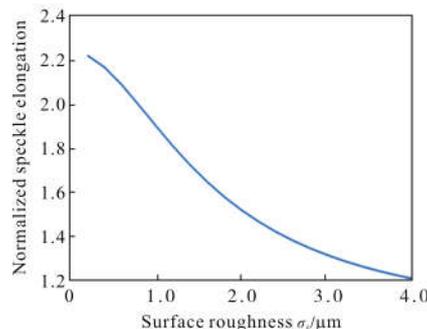


图 2 平均散斑延长率与 σ_h 的关系

Fig.2 Relationship between average speckle elongation and σ_h

2.2 光源中心波长和光谱半高宽

为考察光源的中心波长对散斑延长率的影响，设光源中心波长 λ 分别为 650、750、850 nm，其余参数与图 1 的情况相同，对不同表面粗糙度计算从散射光场中心到距中心 2 mm 范围内的平均散斑延长率。结果示于图 3。在图中可以看出，当其他条件相同时，光源中心波长越小，对较光滑表面的粗糙度检测越灵敏。设光谱半高宽分别为 30、40、50 nm，其余参数与图 1 的情况相同，计算散斑平均延长率，见图 4。在图中可见，大的半高宽，有利于提高表面粗糙度检测的灵敏度；但随着带宽的增加，光源的相干性也随之下落。因此，用窄带连续谱

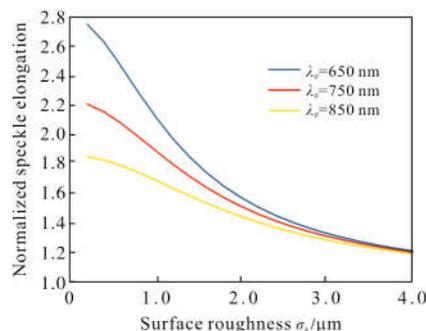


图 3 不同光源中心波长下平均散斑延长率与 σ_h 关系
Fig.3 Relationship between average speckle elongation and σ_h with different central wavelengths

光源进行表面粗糙度测量,需要根据表面粗糙度检测范围的要求,选取合适的光源中心波长和光谱带宽。

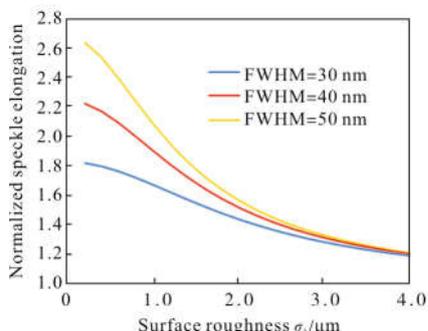


图 4 不同光源半高宽下平均散斑延长率与 σ_h 关系

Fig.4 Relationship between average speckle elongation and σ_h with different FWHM

2.3 光束半径

除光源的频谱属性外,入射光束半径 L 也可能对散斑延长率产生影响。设定 σ_h 为 $0.8 \mu\text{m}$,选取不同的入射光束半径,其余参数与图 1 的情况相同,计算散斑平均延长率,结果如图 5 所示。由图可见,光束半径越大,散斑平均延长率也越大,二者呈正斜率的线性关系。当然,光束半径不能取得过大,以避免表面波度对粗糙度测量的影响。

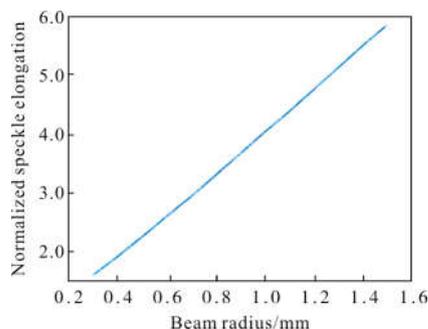


图 5 平均散斑延长率随光束半径的变化

Fig.5 Relationship between average speckle elongation and beam radius

3 散斑延长效应的数值模拟

第 2 节关于散斑延长率影响因素的讨论建立在高斯函数型光源光谱密度分布的基础上。真实 SLD 光源的光谱密度分布与高斯函数有一定差别。为考察这种差别对散斑延长效应的影响,可以采用数值模拟方法。

散斑延长效应的数值模拟在 Matlab 环境下进行。多波长散斑场的模拟计算过程为^[9]:对于一个给定的 σ_h ,先生成一个长度为 3 mm ,轮廓高度自相关函数为高斯函数、自相关长度为 $12\sigma_h$ 的一维数字表面;设定入射光束半径为 0.5 mm ,远场透镜焦距设为 50 mm ,计算多波长合成光源垂直照射数字表面产生的远场单色散斑场及多波长合成散斑场;这样循环生成 50 个数字表面,计算相应的多波长合成散斑场。多波长散斑场模拟采用了 EXS210025-01 型 SLD 的实际光谱分布,合成光源的波长组从 $730\sim 790 \text{ nm}$ 的光谱范围内以 3 nm 为间隔离散选取。多波长散斑场模拟计算涉及的 σ_h 分别为 $0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 \mu\text{m}$ 。

模拟计算得到多波长散斑场后,就可以定量评价散斑延长效应。考虑到要充分利用阵列式光电探测器采集的散斑场强度分布信号,可以用散斑场的空间平均局部自相关函数代替上文的集平均散斑场强度自相关函数。用 δ 表示散斑场相邻观测点的间距, l 表示进行空间平均运算的窗口宽度,令 $u_1=i_a \delta$ 、 $u_2=(i_a+\Delta i)\delta$ 分别表示两个观测点位置。由于散斑场在局部区域的各态历经性,用散斑场局部区域光强的空间平均值代替集平均值,得到散斑场的空间平均局部自相关函数:

$$\gamma_s(i_a+\Delta i)=\frac{\sum_{i=i_a}^{i_a+\Delta i} I_{ac}(i)I_{ac}(i+\Delta i)}{\sqrt{\sum_{i=i_a}^{i_a+\Delta i} I_{ac}(i)I_{ac}(i) \cdot \sum_{i=i_a}^{i_a+\Delta i} I_{ac}(i+\Delta i)I_{ac}(i+\Delta i)}} \quad (4)$$

在得到散斑场不同位置的空间平均局部自相关函数后,用高斯函数对其拟合。拟合函数的宽度反映了散斑颗粒的大小,下面称其为散斑特征长度。为改善由单个表面轮廓得到的多波长散斑特征长度的随机波动性,对具有相同粗糙度的 50 个表面轮廓计算的散斑特征长度按观察点位置取平均。散斑场不同位置的平均散斑特征长度与散斑场中心的平均散斑特征长度的比值相当于上文的集平均散斑延长率,下面称为空间平均散斑延长率。

在模拟 5 组不同粗糙度的数字表面的多波长散斑场后,计算空间平均散斑延长率分布,结果示于图 6。对比图 6 和图 1 容易看出:空间平均散斑延长率与集平均散斑延长率基本吻合。在计算空间平均散斑

延长率过程中,空间平均运算的窗口宽度设为 12 倍的中心斑粒平均长度。

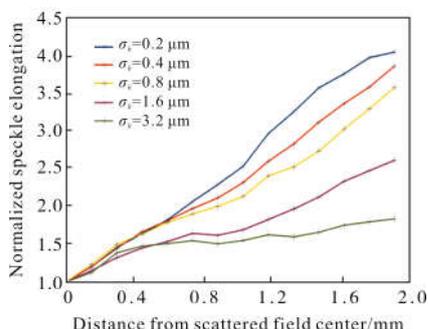


图 6 不同粗糙度表面的多波长散射光场的空间平均散斑延长率

Fig.6 Simulated spatial average speckle elongation distribution of multi-wavelength scattered fields with different roughness surfaces

4 表面粗糙度测量实验

4.1 SLD 光源特性

SLD 基于自发辐射发光,光谱带比激光器的线宽要宽,其光学性质介于激光器和发光二极管之间,输出光束具有部分相干性。论文工作采用的 SLD 型号为 EXS210025-01,由瑞士 EXALOS 公司出品,中心波长典型值 750 nm,光谱半高宽 40 nm,额定功率 5 mW,采用单模光纤输出光束,光纤的模场直径为 4.6 μm。图 7 为 SLD 输出光束的相对光谱强度分布。

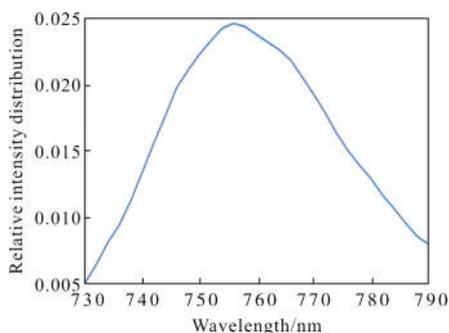


图 7 SLD 的相对强度光谱分布

Fig.7 Relative intensity spectral distribution of SLD

SLD 经光纤的输出光束发散角很大,经过透镜准直后,在透镜后方的一个较大轴向区域内,通过 CCD 图像传感器会观察到明显的同心圆环现象,如图 8(a)所示。同心圆环现象可以归结为两个虚拟“点源”的近场干涉的结果。其中,一个虚拟“点源”是

SLD 的出射光束直接通过透镜所成的像点;另一个虚拟“点源”是 SLD 的出射光束在透过透镜前表面后,依次被透镜后表面、前表面反射,最后通过透镜后所成的像点。随着观测平面与透镜距离的增加,同心圆环现象逐渐变弱,中心光斑的强度分布趋向高斯函数型,如图 8(b)所示。应该指出,为了把 SLD 的出射光束变换成照射粗糙表面的高斯光束,若采用透射式透镜,长程光路是不可避免的。

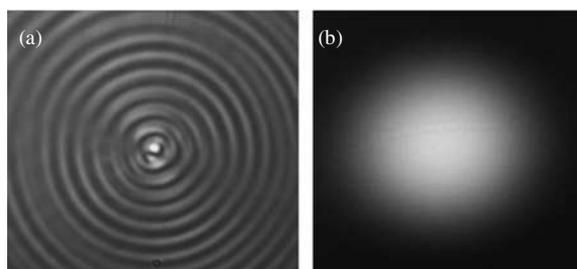


图 8 SLD 出射光透过透镜后的近场图像(a)和远场图像(b)

Fig.8 Near field image (a) and far field image(b) of SLD output beam through the lens

4.2 实验系统光学结构

表面粗糙度测量实验系统的光学结构如图 9 所示。SLD 的输出光束经透镜 1 准直后,经过由透镜 2 和透镜 3 构成的望远系统将光束缩束成所需大小。调节反射镜 1 和反射镜 2,一方面使光路有足够的光程长度,另一方面让光路布局更紧凑。设置衰减片,以避免 CCD 传感器探测的散斑场信号出现饱和。设置光阑,以屏蔽中心光斑外的光场。照明光束垂直入射待测粗糙表面。在粗糙表面前设置半透半反镜,用来反射散射光。散射光经透镜 4 会聚到位于透镜后焦面的 CCD 传感器的光敏面上,CCD 传感器把采集的散斑图像实时传输到计算机上。需要注意的是,为充分收集粗糙表面的散射光,半透半反镜与

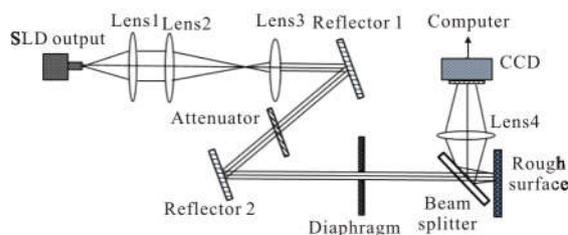


图 9 表面粗糙度测量实验系统图

Fig.9 Experiment system for surface roughness measurement

粗糙表面的轴向距离要足够小。

实验系统中,透镜 1、透镜 2、透镜 3 和透镜 4 的焦距分别为 38.1、150、50、45 mm;透镜 3 距离粗糙表面约为 1.5 m;光阑通光孔径约 1 mm;CCD 传感器的像素尺寸为 4.65 μm×4.65 μm,图像大小为 1 024 pixel×768 pixel (德国 Allied 公司,型号 AVT Marlin F-080B)。

在进行表面粗糙度测量实验时,保持 SLD 的输出光束垂直入射粗糙表面,调节光束半径为 0.5 mm。采用电火花加工的表面粗糙度对比样块作为被测样品,表面样块的轮廓高度算术平均偏差 Ra 分别为 0.4、0.8、1.6、3.2 μm。实验中在每一个表面样块上随机选择 20 个位置,采集远场散斑图像,并上传计算机做后续处理。图 10 是 $Ra=0.8$ μm 表面样块的远场散斑图像。从整体来看,散斑图像呈现出从中心向四周辐射的特点,随着观测点与散斑场中心距离的增加,散斑延长效应愈加明显。

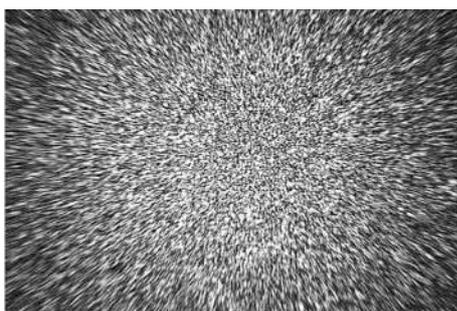


图 10 电火花加工表面($Ra=0.8$ μm)的远场散斑图像

Fig.10 Far-field speckle pattern of the EDM surface($Ra=0.8$ μm)

4.3 散斑图像数据处理

对粗糙表面样品实验采集的多波长远场散斑图像表明,表面越光滑,散斑延长效应越明显。这与上文的理论分析和模拟计算结果一致。利用模拟研究的空间平均散斑延长率能定量评价被测平面的粗糙度。鉴于电火花加工表面的多波长远场散斑图像的圆对称特性,可以选取过散斑场中心的横向窄带区域提取表征表面粗糙度的参数。整个散斑图像数据处理过程分为两步:寻找散斑场中心和计算窄带区域的散斑延长率分布。

4.3.1 散斑场中心的确定

利用多波长散斑图像的径向辐射特性,可以确定散斑场中心。基本思路是:在散斑图像中设置移动窗口,使窗口从左向右、从上到下按一定步距扫描图

像的左上部和右上部;在窗口每一次驻留所框定的图像范围内,提取一条代表最长粒散斑长度方向的特征线;确定不同特征线的交点,得到交点簇;对交点簇进行统计计算得到散斑场中心。

为提取散斑图像在移动窗口内的长粒散斑长度方向的特征线,Prewitt 边缘检测算法^[10]配合 Hough 变换^[11]是不错的工具。散斑图像中的长粒散斑错落有致,它的明暗交界处梯度变化明显。可以使用 Prewitt 算子对原始图像卷积,进行边缘检测的预处理。Hough 变换是计算机视觉和图像分析领域的一种经典特征提取算法,可以有效识别图像中的线段、圆、椭圆等基本形状,并对其定位。对预处理后的散斑图像进行 Hough 变换,可以快速识别移动窗口内最具有代表性的线段。取线段所在直线作为长粒散斑特征线。

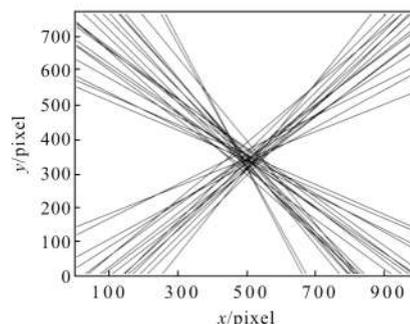


图 11 长粒散斑特征线在散斑场中心区域的交汇

Fig.11 Intersection of feature lines of long-size speckle in the central region of the speckle field

得到多条长粒散斑特征线后,它们的交点会落在散斑场中心区域内,形成一个聚集的点簇。为得到散斑场中心位置 $\vec{\mu}$,对一组确定的长粒散斑特征线交点簇 $(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_n)$,优化目标是取得交点簇与散斑场中心的最小化平方误差:

$$\min \sum_{i=1}^n \left\| \vec{x}_i - \vec{\mu} \right\|^2 \quad (5)$$

在寻找散斑场中心过程中,移动窗口大小取为 96 行×96 列,横向和纵向移动步距取为 48 列/行。确定散斑场中心的长粒散斑交汇点簇由两组特征线的交点构成,一组特征线沿左上到右下方向,另一组沿左下到右上方向。由于组内长粒散斑特征线的间距和夹角非常小,图像的处理误差会造成同组内特征线的交点远离散斑场中心,故交点簇不含这两组特

征线的组内交点。

4.3.2 散斑延长率的计算

在计算散斑图像的散斑延长率时, 设置局部窗口为 128 列×60 行, 并以 32 列为步距沿过散斑场中心的轴线移动局部窗口。在表面粗糙度测量实验中, 对 R_a 分别为 0.4、0.8、1.6、3.2 μm 的电火花加工的表面粗糙度样板各采集了 20 幅散斑图像, 计算了每幅图像从散斑场中心到距中心 1.86 mm 处的平均散斑延长率。对于二维散斑图像的平均散斑延长率计算, 可以采用公式(4), 先计算窗口内各行散斑特征长度的平均值, 再将窗口在不同位置得到的散斑特征长度平均值除以窗口处于散斑场中心时的散斑特征长度平均值的高作为平均散斑延长率。最后对 20 幅图像所得的平均散斑延长率再取平均, 以此作为光学粗糙度指标来衡量被测表面的粗糙度。

实验和数据处理结果如图 12 所示。从图中可以看出, 随着表面粗糙度的增加, 光学粗糙度指标单调递减。实验结果验证了光学粗糙度指标表征表面粗糙度的有效性。

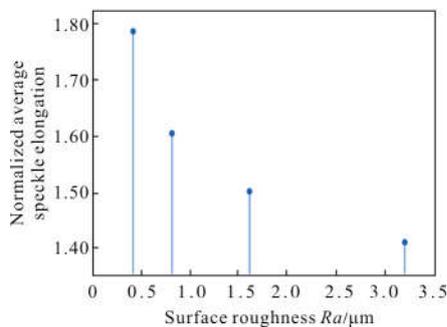


图 12 平均延长率与 R_a 关系

Fig.12 Relationship between average elongation and R_a

5 结论

对于随机粗糙表面在窄带连续谱光束照射下产生的散射光场的理论分析表明: 随着观测点逐渐远离散射光场中心, 集平均散斑延长率越来越大; 在相同的观测位置, 表面的粗糙度越小, 散斑延长率越大; SLD 的光源中心波长越小, 光谱带宽越大, 入射光束半径越大, 散斑自相关法对表面粗糙度的检测越灵敏。对随机粗糙表面多波长散射光场的散斑延长效应的模拟研究表明: 用光谱密度分布与高斯函数有一定差别的 SLD 光源照射具有不同粗糙

度的表面, 所产生的散射光场的空间平均散斑延长率与理论推导的集平均散斑延长率基本吻合。表面粗糙度测量实验证明: 对于 SLD 输出光束照射粗糙表面产生的远场散斑图像, 可用由空间平均散斑延长率衍生的光学粗糙度指标来衡量表面粗糙度。光学粗糙度指标随着表面粗糙度的增加而单调递减。

参考文献:

- [1] Sprague R A. Surface roughness measurement using white light speckle[J]. *Applied Optics*, 1972, 11(12): 2811–2816.
- [2] Fuji H, Asakura T. Effect of surface roughness on the statistical distribution of image speckle intensity [J]. *Optics Communications*, 1974, 11(1): 35–38.
- [3] Goch G, Peters J, Lehmann P, et al. Requirements for the Application of speckle correlation techniques to on-line inspection of surface roughness [J]. *Annals of the CIRP*, 1999, 48(1): 467–470.
- [4] Peter Lehmann, Stefan Patzelt, Armin Schöne. Surface roughness measurement by means of polychromatic speckle elongation[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(10): 2188–2197.
- [5] Parry G. Speckle Patterns in Partially Coherent Light [M]. Berlin: Springer, 2007: 77–121.
- [6] Lehmann P. Untersuchungen zur Lichtstreuung an Technischen Oberflaechen im Hinblick auf Eine Prozessgekoppelte Laser Optische Rauheitsmessung [M]. Germany: Universität Kassel, 1995.
- [7] Lehmann P. Aspect ratio of elongated polychromatic far-field speckles of continuous and discrete spectral distribution with respect to surface roughness characterization [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(10): 2008–2014.
- [8] Pedersen H M. Second-order statistics of light diffracted from gaussian, rough surfaces with applications to the roughness dependence of speckles [J]. *Optica Acta*, 1975, 22(6): 523–535.
- [9] Liu Hengbiao, Chi Jingchun. Analysis of affecting factors on surface roughness measurement based on polychromatic speckle elongation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(2): 279–284. (in Chinese)
- [10] Bhardwaj S, Mittal A. A survey on various edge detector techniques[J]. *Procedia Technology*, 2012, 4(23): 220–226.
- [11] Illingworth J, Kittler J V. A survey of the hough transform [J]. *Computer Vision Graphics & Image Processing*, 1988, 43(2): 87–116.