

双波长数字散斑相关法表面粗糙度测量

刘恒彪 周亚杰 王昌灵

(同济大学理学部, 上海 200092)

摘要 在物面系综平均双波长散斑相关法基础上,提出了双波长数字散斑相关方法测量表面粗糙度;模拟研究了双波长散斑场空间相关参数及在两单波长散斑图像中样本子区与目标子区的位置关系;实验探讨了数字图像处理的窗口尺寸对空间相关峰值的影响;对平磨和抛喷丸表面样块的粗糙度测量实验表明,双波长散斑场空间相关参数能有效表征表面粗糙度。新的测量方法具有数据采集速度快、表征参数稳定性好的特点。

关键词 测量;表面粗糙度测量;双波长数字散斑相关;散斑角度扩散

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0412006

Surface Roughness Measurement Based on Dichromatic Digital Speckle Correlation

Liu Hengbiao Zhou Yajie Wang Changling

(School of Sciences, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Based on the spectral-speckle correlation method with ensemble average, dichromatic digital speckle correlation method is introduced to measure the surface roughness. The properties of dichromatic speckle spatial correlation parameter are investigated through simulated speckle fields. And the location relation of sample and target areas is also studied. Window size influence in digital image process on peak value of spatial correlation is experimentally discussed. The surface roughness of blasted-shot and grinding specimen is measured. It is shown that dichromatic speckle spatial correlation parameter can describe surface roughness effectively. The new method has the virtue of fast image acquisition and good stability.

Key words measurement; surface roughness measurement; dichromatic digital speckle correlation; speckle angular dispersion

OCIS codes 120.0120; 120.6660; 030.0030; 290.0290

1 引 言

双波长散斑相关^[1~3]是一种现场适应性强的表面粗糙度在线测量方法。该方法与角度散斑相关^[1,4,5]和多波长散斑自相关^[6~8]等方法一样,在一定条件下可以忽略表面粗糙度轮廓的间距参数对幅度参数测量(GB/T 3505-2000)的交叉影响,得到与计量标准相适应的表面粗糙度参数。与角度散斑相关法相比,双波长散斑相关法能测量较小粗糙度;如果波长在可见光波段内,双波长散斑相关法适测表面的轮廓均方根偏差 R_q 在微米、亚微米量级^[3],而角度散斑相关法的适测粗糙度范围 R_q 在微米、十微米量级^[5,9]。与多波长散斑自相关法相比,双波

长散斑相关法可以通过对两单波长散斑场的单通道采样,以物面系综平均方式计算散斑相关系数^[1,2],能测量高速运动物体的表面粗糙度。

远场散斑强度分布随波长增大会出现角度扩散现象^[10]。这个现象类似于在材料拉伸实验中,材料表面自然或人工形成的随机斑点随着拉力的增大而扩展式移动。因此,可以借鉴测量表面局部变形场的数字散斑相关方法^[11,12],以具有一定波长差的两单波长散斑场的空间相关参数表征表面粗糙度。这种空间平均式的测量方法在现代数字图像采集、处理技术的支持下,适用于监测运动、变形表面的加工工艺过程。

收稿日期: 2010-08-02; **收到修改稿日期**: 2010-11-11

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金(教外司留[2005]383号)资助课题。

作者简介: 刘恒彪(1962—),男,博士,教授,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: liuhb62@tongji.edu.cn

本文在物面系综平均双波长散斑相关法基础上,提出双波长数字散斑相关表面粗糙度测量方法:通过模拟散斑场,研究空间相关参数及两单波长散斑图像中样本子区与目标子区的位置关系;通过对表面样品进行粗糙度测量实验,验证这种方法的有效性。

2 物面系综平均双波长散斑相关系数

远场观测方式的双波长散斑相关法表面粗糙度测量原理如图 1 所示。波长分别为 λ_1 和 λ_2 的两支激光束同轴、交替入射粗糙表面,散射光在透镜后焦面形成远场散斑场。为探测单波长散斑场的强度,可以采用单点测量的光电传感器,如光电二极管、光

电信增管等。散斑强度的数字信号输入计算机进行处理,得到衡量表面粗糙程度的参数。

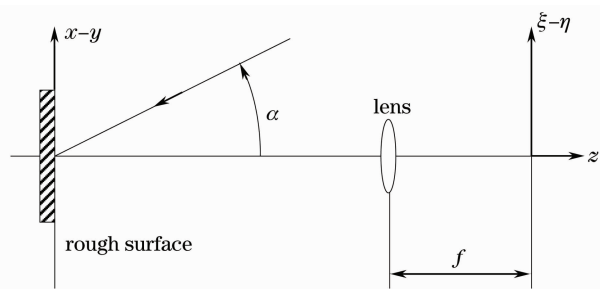


图 1 双波长散斑相关法表面粗糙度测量原理

Fig. 1 Principle of surface roughness measurement by means of dichromatic speckle correlation method

衡量表面粗糙程度的基本参数是双波长散斑相关系数,其定义为

$$\gamma_E = \frac{\langle [I_1(\xi_1, \eta_1) - \langle I_1(\xi_1, \eta_1) \rangle] [I_2(\xi_2, \eta_2) - \langle I_2(\xi_2, \eta_2) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [I_1(\xi_1, \eta_1) - \langle I_1(\xi_1, \eta_1) \rangle]^2 \rangle \langle [I_2(\xi_2, \eta_2) - \langle I_2(\xi_2, \eta_2) \rangle]^2 \rangle}}, \quad (1)$$

式中 $I_n(\xi_n, \eta_n)$ ($n = 1, 2$) 表示在散斑场 (ξ_n, η_n) 位置处,波长为 λ_n 的单波长散斑强度, $\langle \dots \rangle$ 表示物面系综平均。

根据 B. Ruffing^[1]关于散斑相关方法的理论研究结果,双波长散斑相关系数与表面粗糙度存在关系

$$\begin{aligned} \gamma_E(\xi_1, \eta_1; \xi_2, \eta_2) = & \exp[-(1 + \cos \alpha)^2 \sigma_h^2 (k_1 - k_2)^2] \times \\ & \exp\{- (L^2/4f^2 \cos^2 \alpha) [k_1(\xi_1 + f \sin \alpha) - k_2(\xi_2 + f \sin \alpha)]^2\} \times \\ & \exp[-(L^2/4f^2)(k_1 \eta_1 - k_2 \eta_2)^2], \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $k_n = 2\pi/\lambda_n$ ($n = 1, 2$), σ_h 表示表面轮廓高度的均方根偏差, α 表示激光束入射角, L 表示高斯光束半径, f 表示透镜焦距。该式成立的条件是:1) 表面的理想几何形状是平面,其粗糙轮廓高度服从高斯分布,且均方根偏差 $\sigma_h \gg \lambda/4\pi$; 2) 表面轮廓具有高斯型自相关函数; 3) 单波长散斑场的光场复振幅服从圆形复高斯分布; 4) 两入射激光束为光斑直径相同的高斯光束,光斑直径远大于表面轮廓自相关长度。

当散斑场探测点位置满足

$$\begin{cases} k_1(\xi_1 + f \sin \alpha) = k_2(\xi_2 + f \sin \alpha) \\ k_1 \eta_1 = k_2 \eta_2 \end{cases}, \quad (3)$$

时,由(2)式得到散斑相关系数的最大值

$$\gamma_M = \exp[-(1 + \cos \alpha)^2 \sigma_h^2 (k_1 - k_2)^2]. \quad (4)$$

(4)式表明,散斑相关系数 γ_M 与表面轮廓高度均方根偏差 σ_h 成高斯函数关系。由此式导出的 γ_M 随 σ_h 变化的灵敏度为

$$\begin{aligned} \gamma'_M = & \left| \frac{d\gamma_M}{d\sigma_h} \right| = 2\sigma_h(1 + \cos \alpha)^2 (k_1 - k_2)^2 \times \\ & \exp[-(1 + \cos \alpha)^2 \sigma_h^2 (k_1 - k_2)^2], \end{aligned} \quad (5)$$

显然,两激光束的波数差对散斑相关系数随表面轮廓高度均方根偏差变化的灵敏度有显著影响。图 2

给出了激光入射角 $\alpha=0$ 时,三种波长组合下的灵敏度函数曲线。从图中可以看出,波长组的波数差越大,灵敏度函数的分布范围越窄,峰值越高,适用于测量小粗糙度的表面;波长组的波数差越小,灵敏度函数的分布范围越宽,峰值越低,适用于测量大粗糙度的表面。

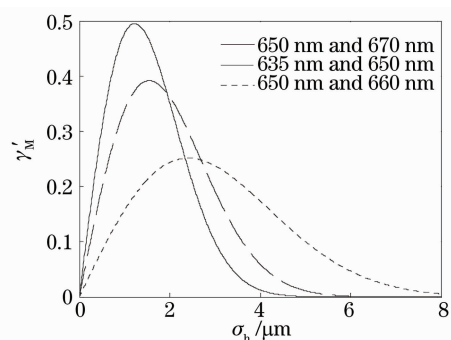


图 2 散斑相关系数 γ_M 随表面轮廓高度均方根偏差 σ_h 变化的灵敏度

Fig. 2 Sensitivity of speckle correlation coefficient γ_M to the variation of surface profile σ_h

根据被测表面粗糙度的预估值,按照(5)式的极值点,选取合适的波长组合

$$|k_1 - k_2| = \frac{\sqrt{2}}{2(1 + \cos \alpha)\sigma_h}, \quad (6)$$

以达到最佳测量灵敏度。

3 散斑角度扩散现象

为求得物面系综平均双波长散斑相关系数,在测量两个单波长散斑场的强度时,需要不断横向移动被测表面。这种信号采样方式适用于运动物体。对于静止物体,为避免对被测表面的扫描运动,提高散斑信号采集速度,可采用阵列式图像传感器代替图 1 中透镜后焦面上的单点测量光电传感器,通过采集两单波长散斑场近轴区域的强度分布信号,以空间平均方式评价两散斑场的相关性。为此,先通过模拟手段,考察具有微小波长差的单波长散斑场强度分布特征。

散斑场模拟基于基尔霍夫理论。基本步骤是:

1)以确定的粗糙度参数生成轮廓高度服从高斯分布、轮廓自相关函数也是高斯函数的粗糙表面;2)计算激光束经过局部切平面反射后对远场观测点光场复振幅的贡献;3)通过对光照区域的积分,得出各观测点的光场复振幅及强度。关于散斑场模拟算法的具体介绍可参考文献[5]。

图 3 是模拟计算的轮廓高度均方根偏差 σ_h 分别为 $0.2 \mu\text{m}$ 和 $0.8 \mu\text{m}$ 的一维粗糙表面远场散斑强度分布,给定的波长组合为 650 nm 和 670 nm ,激光入射角为 0 ,入射光斑直径为 1.0 mm (650 nm 波长的散斑直径 $d_{650} = 82.8 \mu\text{m}$)。对于同一粗糙表面,两单波长散斑强度分布曲线形状相似;随着观测点远离散斑场中心,曲线逐渐错开,这种情况被称作角度扩散现象^[10]。随着表面粗糙度的增大,角度扩散现象依然存在,只是散斑强度曲线相似程度降低。

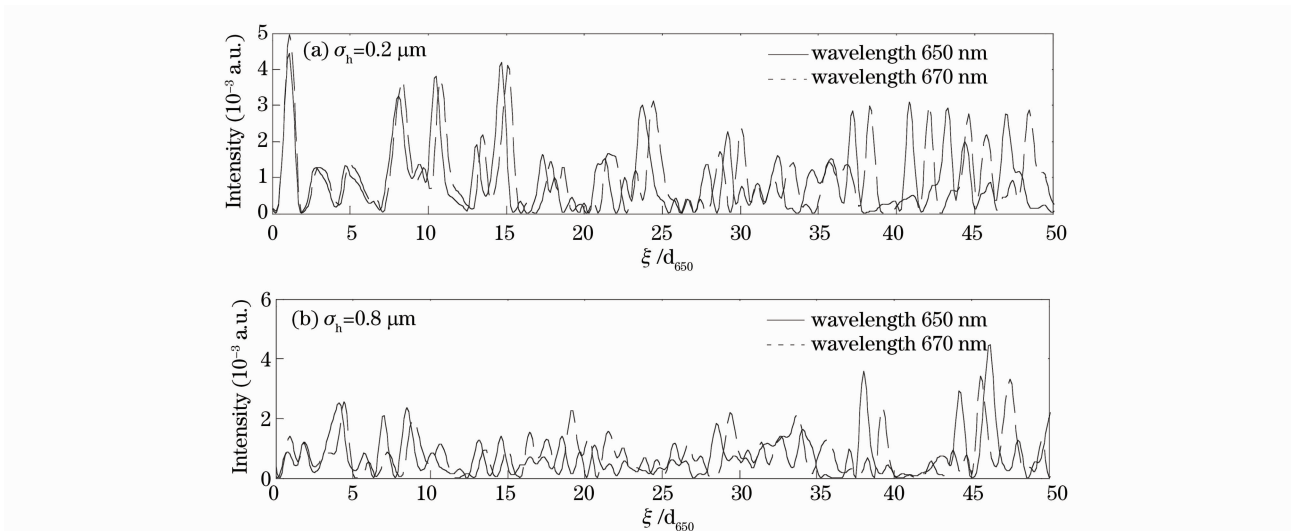


图 3 粗糙表面远场散斑场的强度分布

Fig. 3 Distribution of monochromatic far-field speckle intensity scattered from rough surfaces

4 双波长散斑场空间相关参数

鉴于具有微小波长差的两单波长散斑场强度分布存在角度扩散关系,可以由同一表面散射区域得到的两单波长散斑强度分布定义空间相关函数

$$\gamma_L = \frac{\sum_{i=-M_j}^M \sum_{j=-N}^N [I_1(\xi_{10} + i\delta, \eta_{10} + j\tau) - \bar{I}_1][I_2(\xi_{20} + i\delta, \eta_{20} + j\tau) - \bar{I}_2]}{\sqrt{\sum_{i=-M_j}^M \sum_{j=-N}^N [I_1(\xi_{10} + i\delta, \eta_{10} + j\tau) - \bar{I}_1]^2} \sqrt{\sum_{i=-M_j}^M \sum_{j=-N}^N [I_2(\xi_{20} + i\delta, \eta_{20} + j\tau) - \bar{I}_2]^2}}, \quad (7)$$

式中 I_1 和 I_2 分别表示波长为 λ_1 和 λ_2 的单波长散斑强度; (ξ_{10}, η_{10}) 和 (ξ_{20}, η_{20}) 分别为基准窗口(在波长为 λ_1 的散斑场上)和滑动窗口(在波长为 λ_2 的散斑场上)的中心坐标; δ 和 τ 分别是沿散斑场 ξ 和 η 方向

的采样间距,由采样间距决定的窗口尺寸为 $(2M+1)\delta \times (2N+1)\tau$; \bar{I}_1 和 \bar{I}_2 分别为基准窗口和滑动窗口内的平均散斑强度。

双波长散斑场空间相关函数的计算值与基准窗口和滑动窗口的中心位置有关。在第 2 节的讨论中已指出,当在两单波长散斑场上的采样点位置满足(3)式时,物面系综平均双波长散斑相关系数达到最大值,该值与表面轮廓高度均方根偏差有简单的函数关系。进一步可以通过模拟两个单波长散斑场的强度分布;在两单波长散斑场中分别设置基准窗口和滑动窗口,计算双波长散斑场空间相关函数,从中找到最大值。为叙述简明起见,定义空间相关函数最大值为空间相关峰值 γ_P ;基准窗口界定的散斑区域为样本子区;空间相关函数取最大值时,滑动窗口界定的散斑区域为目标子区。

图 4 给出了由模拟散斑场得到的样本子区和目标子区的位置关系,散斑场模拟及图像数字处理参数是:粗糙表面的轮廓高度均方根偏差为 $0.4 \mu\text{m}$,入射激光波长分别为 650 nm 和 670 nm ,基准和滑动窗口长度为 257 采样间距(1 采样间距等于 $8.3 \mu\text{m}$,是波长为 650 nm 散斑场平均散斑直径的 $1/10$)。图 4 表明,样本子区和目标子区中心坐标值呈线性关系;拟合直线的斜率为 1.0308,与(3)式的预期相吻合。当窗口长度减至 129 采样间距时,样本子区和目标子区的位置关系与图 4 完全相同。当窗口长度再减至 97 采样间距时,样本子区和目标子区的位置关系在个别地方出现了偏离直线的凸起峰。这个现象是因为窗口尺寸过小,空间相关函数出现了多个极大值,并且目标子区出现在偏离(3)式给出的理论位置造成的。

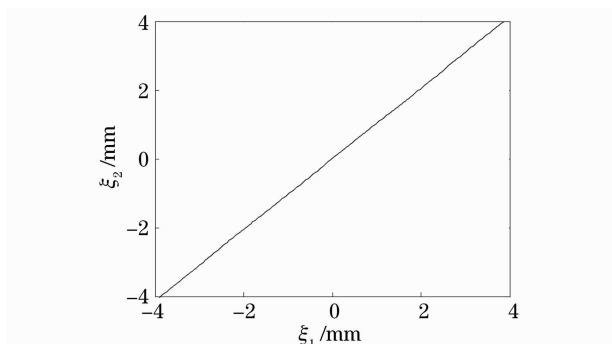


图 4 样本子区和目标子区的位置关系
Fig. 4 Location relation of sample and target area

以轮廓高度均方根偏差 $\sigma_h = 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2$ 和 $6.4 \mu\text{m}$ 各生成 60 个一维随机粗糙表面轮廓,模拟波长分别为 $650, 660$ 和 670 nm 的单波长远场散斑强度分布。其它主要模拟参数:表面轮廓的自相关长度为 $4.8 \mu\text{m}$,垂直入射的激光光斑直径为 1 mm ,远场散斑观测透镜焦距为 100 mm ,散斑场采样间距为 $8.3 \mu\text{m}$ (是 650 nm 波长散斑场平均散斑直径的 $1/10$)。对每一个表面轮廓分别为波长组合 $650 \text{ nm} \& 670 \text{ nm}$ 和 $650 \text{ nm} \& 660 \text{ nm}$ 各计算 60 个双波长散斑场空间相关峰值及其平均值——空间相关峰均值 γ_A ,其中样本子区在散斑场中等距分布,目标子区位置根据(3)式确定。对同一粗糙度的 60 个表面轮廓的空间相关峰均值再取平均,作为双波长散斑场空间相关参数 $\langle \gamma_A \rangle$ 来表征表面粗糙度。图 5 为模拟计算结果,图中标明的窗口尺寸为散斑场采样间距的倍数。

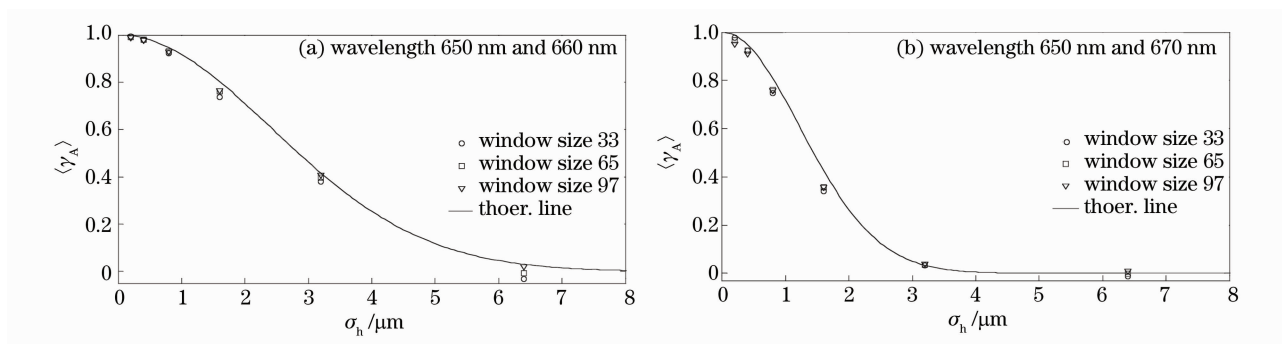


图 5 双波长散斑场空间相关参数 $\langle \gamma_A \rangle$ 与表面轮廓高度均方根偏差 σ_h 的关系

Fig. 5 Dependency of the dichromatic speckle spatial correlation parameter $\langle \gamma_A \rangle$ on the variation of surface profile σ_h

图 5 表明,双波长散斑场空间相关参数 $\langle \gamma_A \rangle$ 与物面系综平均散斑相关系数的理论曲线吻合。随着表面粗糙度的升高, $\langle \gamma_A \rangle$ 单调降低。模拟结果还验证了第 2 节的结论:可以通过对实际被测表面预估的粗糙度参数,选择合适的波长组合来提高测量灵

敏度。例如:图 5(a)的 650 nm 和 660 nm 波长组合适用的轮廓高度均方根偏差范围为 $1 \sim 5 \mu\text{m}$,而图 5(b)的 650 nm 和 670 nm 波长组合适用的轮廓高度均方根偏差范围为 $0.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 。

5 表面粗糙度测量实验

表面粗糙度测量实验装置如图 6 所示。两束波长分别为 635 nm 和 650 nm, 功率均为 5 mW 的激光束经分束器 1 合束后, 由光阑 1 滤出光斑中央部分, 用 10 倍显微物镜和 25 μm 直径针孔构成的滤波器进行低通滤波, 再由透镜 1 准直。光阑 2 用于

调节入射粗糙表面的光斑直径。粗糙表面的散射光经分束器 2 反射后在透镜 2 的后焦面上形成远场散斑场。散斑场的强度分布由 CCD 图像传感器 (Marlin AVT: 1024 pixel \times 768 pixel, pixel size 4.65 $\mu\text{m} \times$ 4.65 μm) 采集, 所得数字图像信号输入计算机进行后续处理。

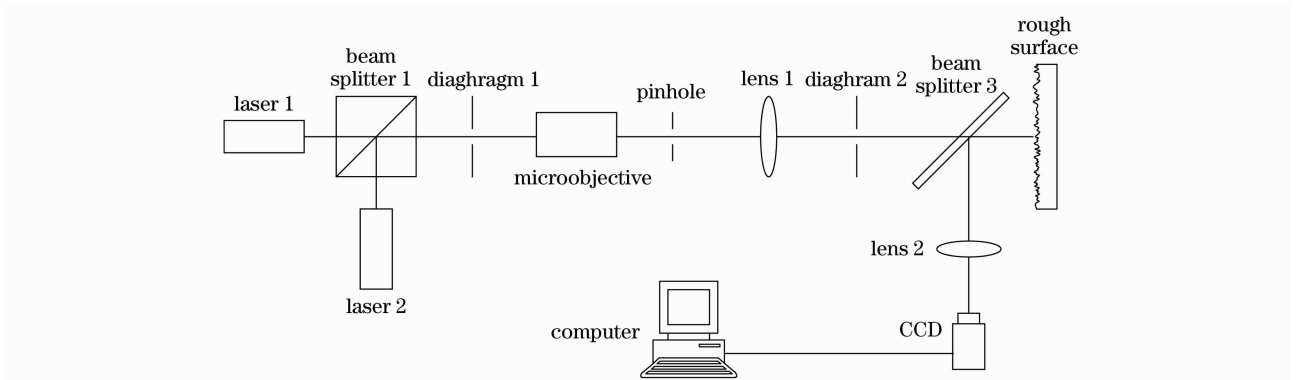


图 6 表面粗糙度测量实验装置

Fig. 6 Experimental setup for surface roughness measurement

在构建实验装置过程中, 需从光源开始, 先调节两波长激光的合束同轴性; 再沿光路走向, 逐级加入光学元件, 保证元件对称中心与系统光轴重合, 并调整元件达到最佳工作状态。为使 CCD 对正散斑场的近轴区域, 需边横向移动 CCD, 边观察计算机显示器上的双波长合成散斑图像, 直到辐射状图案中心处于视场中央。实验时, 通过交替遮挡两波长激光束, 就能得到相应的单波长散斑图像。由于磨削加工表面的粗糙轮廓具有准一维特征, 其远场散斑分布在一个条形区域, 为简化散斑图像处理过程, 应使表面的纹理走向垂直于激光入射面, 使散斑分布在 CCD 传感器水平中线附近。

为求得双波长散斑场空间相关峰值 γ_p , 原则上可以采用两种方式: 1) 根据(3)式由样本子区位置确定目标子区位置, 直接计算空间相关峰值; 2) 借助滑动窗口, 搜索目标子区位置, 得到空间相关峰值。就实际测量而言, 后者优于前者。因为实验装置不可避免地存在装调误差, 难于精确定位散斑场中心, 导致由(3)式确定的目标子区位置存在误差。

散斑图像的数字处理过程分为两个模块, 其功能分别是寻找散斑场水平基线和计算双波长散斑场空间相关峰均值。第一模块的具体步骤是: 1) 在 $\lambda_1 = 635 \text{ nm}$ 的单波长散斑图像的垂直中线上端设定参考点 A, 在 $\lambda_2 = 650 \text{ nm}$ 的单波长散斑图中与点 A 相同位置设置参考点 B; 2) 分别以点 A 和点 B 为中心设置尺寸相同的局部窗口, 计算相关函数; 3) 沿

垂直中线以一定步距向下同步移动点 A 和点 B; 4) 循环执行步骤 2) 和 3), 直至 A, B 两点移动到各自散斑图像垂直中线的下端; 5) 以高斯函数作为数学模型, 对相关函数分布曲线进行拟合, 以拟合曲线中心作为散斑图像的水平基线位置。

第二模块是以散斑场的水平基线为基准进行的: 1) 在两单波长散斑图像的水平基线上分别设置相同的两组等距参考点 $C_n (n = 1, 2, \dots, K)$; 2) 在 $\lambda_1 = 635 \text{ nm}$ 的散斑图像上, 以每一参考点 C_n 为中心设置基准窗口, 界定样本子区; 在 $\lambda_2 = 650 \text{ nm}$ 的散斑图像上, 通过滑动窗口方式确定目标子区, 求得空间相关峰值; 3) 对由两单波长散斑图像得到的 K 个空间相关峰值取平均, 称为空间相关峰均值 γ_A 。

在散斑图像的数字处理过程中, 窗口尺寸对于双波长散斑场空间相关峰值的确定有较大影响。对此, 下面通过分析实测的 $\sigma_n = 0.4 \mu\text{m}$ 抛喷丸表面的远场散斑图像加以考察。图 7 给出了窗口尺寸分别为 17 pixel \times 17 pixel, 33 pixel \times 33 pixel 和 97 pixel \times 97 pixel 时空间相关函数在目标子区中心附近的变化情形。从图中看出, 由大窗口尺寸处理出的空间相关函数分布有明显的主峰, 根据上面通过模拟散斑场所进行的关于样本子区和目标子区位置关系的讨论能够确定, 主峰最大值的位置符合理论预期。这个在理论位置出现的空间相关函数最大值才能用于表征表面粗糙度。随着窗口尺寸变小, 处理出的空间相关函数除在理论位置出现峰形外, 在其周边也

会出现高低不等的峰形;当窗口尺寸为 17 pixel×17 pixel 时,理论位置的峰形与周边峰形难以区分。显然,窗口尺寸选取过小,容易发生空间相关函数最大值的误判;窗口尺寸选取过大,会降低计算速度。就目前实验而言,选取窗口长和宽均大于或等于

33 pixel 是合适的。这个窗口长、宽尺寸相当于 635 nm 波长远场散斑场散斑平均直径的 10.6 倍(散斑平均直径定为散斑强度分布自相关函数的半峰全宽,实验的散斑平均直径为 14.4 μm)。

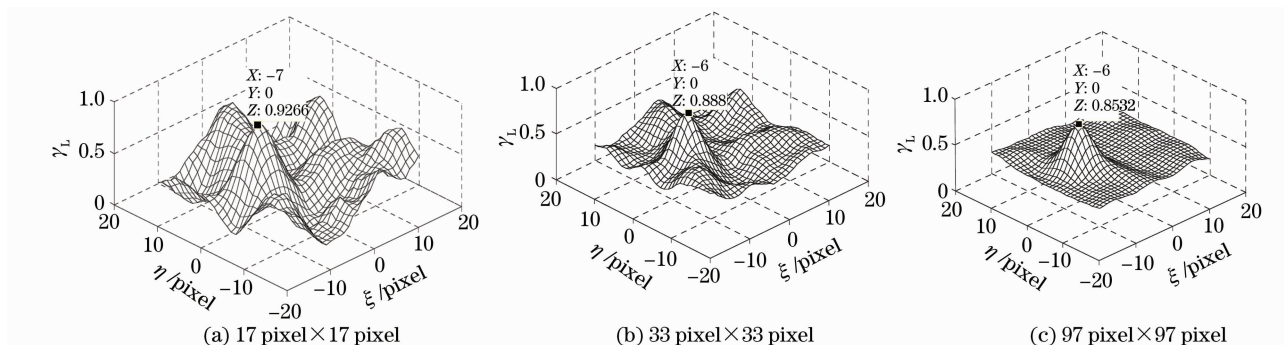


图 7 双波长散斑场空间相关函数分布

Fig. 7 Distribution of dichromatic speckle spatial correlation function with window size for digital correlation

为检验双波长散斑场空间相关峰均值表征表面粗糙度的有效性,对轮廓算术平均偏差 R_a 分别为 0.2, 0.4 和 0.8 μm 的平磨表面样块以及 R_a 分别为 0.4, 0.8 和 1.6 μm 的抛喷丸表面样块进行了粗糙度测量实验。实验过程中,对每一个表面样块随机选取 10 个不同的激光入射点,对每个入射点采集两幅单波长远场散斑图像,计算双波长散斑场空间相关峰均值。

表 1 是实验结果。表中 $\langle \gamma_A \rangle$ 栏给出了由同一表面样块在 10 个激光入射点处的双波长散斑空间相

关峰均值算得的空间相关参数, $\sigma_{\gamma_A} / \langle \gamma_A \rangle$ 栏给出了空间相关峰均值的相对误差。结果表明,随着粗糙度的增大, $\langle \gamma_A \rangle$ 单调下降。从表中还可看出,当窗口尺寸增大时,对同一粗糙表面测得的空间相关参数及空间相关峰均值相对误差基本呈降低趋势;对于粗糙度相同,加工方法不同的表面, $\langle \gamma_A \rangle$ 有所不同。在实际测量中,需要针对不同表面类型,建立相应的双波长散斑场空间相关参数与计量标准规定的表面粗糙度参数之间的映射表。

表 1 表面粗糙度测量实验结果

Table 1 Experimental result of surface roughness measurement

Machining method	Ra / μm	Window size (33 pixel×33 pixel)		Window size (65 pixel×65 pixel)		Window size (97 pixel×97 pixel)	
		$\langle \gamma_A \rangle$	$\sigma_{\gamma_A} / \langle \gamma_A \rangle / \%$	$\langle \gamma_A \rangle$	$\sigma_{\gamma_A} / \langle \gamma_A \rangle / \%$	$\langle \gamma_A \rangle$	$\sigma_{\gamma_A} / \langle \gamma_A \rangle / \%$
Blasted-shot	0.4	0.862	1.0	0.851	0.6	0.841	0.6
	0.8	0.701	3.3	0.688	2.2	0.679	1.8
	1.6	0.606	1.7	0.543	2.2	0.530	2.4
Grinding	0.2	0.888	1.3	0.879	1.1	0.868	0.7
	0.4	0.856	1.2	0.841	0.6	0.830	0.7
	0.8	0.787	1.5	0.783	1.2	0.775	0.9

为用双波长散斑场空间相关参数有效表征表面粗糙度,数字相关算法的设计应考虑不同加工方法产生的粗糙表面的纹理特征。例如,由于磨削加工表面的粗糙轮廓具有准一维特征,其远场散斑分布在一个条形区域。如果此条形区域轴线在图像传感器视场中不是水平的,在用本文介绍的算法前,还需通过坐标旋转使散斑条形区域放平。对于类似抛喷丸表面的具有各向同性二维粗糙轮廓的表面,其远

场散斑分布也是二维各向同性的,可以直接应用本文算法。对于纹理特征相同的粗糙表面,大粗糙度表面的远场散斑比小粗糙度表面的分布范围更广。因此,进行相关运算的散斑图像区域应根据小粗糙度表面的散斑场分布来选定。

6 结 论

提出了双波长数字散斑相关表面粗糙度测量方

法。通过对模拟所得的不同粗糙度表面两单波长远场散斑场计算空间相关参数,结果表明,空间相关参数与物面系综平均双波长散斑相关系数理论值吻合;在空间相关函数取最大值时,样本子区和目标子区的位置关系也符合理论预期。通过对实验采集的散斑图像在不同窗口尺寸下计算空间相关函数发现,窗口尺寸过小会造成数字散斑相关的目标子区位置的误判。合适的窗口长、宽约大于11倍散斑平均直径(以散斑强度分布自相关函数的半峰全宽计)。对两种不同方法加工的表面样块进行的粗糙度测量实验表明,双波长散斑场空间相关参数能有效表征表面粗糙程度。这种测量方法具有测量速度快、稳定性好的特点,是一种有良好应用前景的在线测量方法。

参 考 文 献

- Bernd Ruffing. Application of speckle-correlation methods to surface-roughness measurement: a theoretical study [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(8): 1297~1304
- Bernd Ruffing, Jürgen Fleischer. Spectral correlation of partially or fully developed speckle patterns generated by rough surface [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1985, **2**(10): 1637~1642
- G. Goch, J. Peters, P. Lehmann *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
- I. Yamaguchi, K. Kobayashi, L. Yaroslavsky. Measurement of surface roughness by speckle correlation [J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(11): 2753~2761
- Wang Jing, Liu Hengbiao. Numerical simulation of surface-roughness measurement based on angular speckle-correlation method using spatial average [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 259~264
- 王 婧, 刘恒彪. 空间平均的角度散斑相关粗糙度测量模拟研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 259~264
- Peter Lehmann. Aspect ratio of elongated polychromatic far-field speckles of continuous and discrete spectral distribution with respect to surface roughness characterization [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(10): 2008~2014
- N. Nagamatsu, K. Nakagawa, T. Asakura *et al.*. The autocorrelation function of polychromatic laser speckle patterns near the image plane [J]. *Opt. & Quant. Electron.*, 1983, **15**(6): 507~512
- S. Patzelt, A. Ciossek, P. Lehmann *et al.*. Parametric optical surface roughness measurement by means of polychromatic speckle autocorrelation [C]. *SPIE*, 1998, **3426**: 124~133
- Liu Hengbiao, Liu Chenglin. Experimental research on surface roughness measurement using angular-speckle correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 697~701
- 刘恒彪, 刘成林. 角度散斑相关方法表面粗糙度测量实验 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 697~701
- Peter Lehmann. Untersuchungen zur Licht-Streuung an Technischen Oberflächen im Hinblick auf eine prozeßgekoppelte laseroptische Rauheits-messung [M]. VDI-Verlag GmbH Düsseldorf 1995
- Zuo Jianping, Xe Heping, Zhou Hongwei *et al.*. Mesu-failure of sandstone under temperature effects and DSCM study of deformation field [J]. *Chinese J. Theoretical and Applied Mechanics*, 2008, **40**(6): 786~794
- 左建平, 谢和平, 周宏伟 等. 温度影响下岩石的细观破坏及形变场的 DSCM 表征 [J]. *力学学报*, 2008, **40**(6): 786~794
- Liu Haowen, Zhang Qingchuan, Yu Shaojuan *et al.*. Investigation on the three dimensional deformation of local shearing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 898~902
- 刘颢文, 张青川, 于少娟 等. 数字散斑法在局域剪切带三维变形研究中的应用 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 898~902