

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.16

结构光照明层析多样性表面形貌测量

叶卓杭, 柴常春, 刘晓军

(华中科技大学机械科学与工程学院 数字制造装备与技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 围绕散射表面和复杂微结构表面形貌高精度测量需求, 对基于结构光照明的表面形貌测量技术与系统进行了研究, 设计了基于科勒照明结合数字微镜器件调制的具有良好结构光对比度和均匀性的结构光照明光学系统, 提出了基于高斯曲线插值的虚拟狭缝 SlitMask 结构照明共焦层析算法与基于迭代高斯拟合的峰值提取重建算法, 建立了结构光照明表面形貌测量系统, 利用单刻线对系统进行准确性与重复性测试, 结果表明相对示值误差为 1.87%, 重复测量结果的标准差为 0.0014 μm 。对玻璃多刻线样板和车削表面进行测试, 验证了本系统不仅可用于反射表面的测量, 还对散射表面具有较好的测量能力。

关键词: 表面形貌测量; 结构光照明显微镜; 光学层析; 重建算法

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2023) 01-0161-08

Sectioned imaging of structured light illumination for surface profile measurement

YE Zhuohang, CHAI Changchun, LIU Xiaojun

(State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology,

School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The surface topography measurement technique and system based on structured light illumination is studied around the demand of high precision measurement of scattering surface and complex microstructure surface topography. A structured light illumination optical system with good structured light contrast and uniformity based on Kohler illumination combined with digital micromirror device (DMD) modulation is designed. A virtual slit SlitMask structured illumination confocal sectioning algorithm using Gaussian curve interpolation is proposed, and the surface topography reconstruction through iterative Gaussian fitting is achieved. A structured illumination surface topography measurement system is established and well verified by experimental tests. The accuracy and repeatability of the system are tested with a single groove specimen. The results show that the relative measurement error is 1.87%, and the standard deviation of the repeated measurement results is 0.0014 μm . Furthermore, tests on actual industrial samples such as glass multiple carved lines and turned surface prove that the system can not only be used for the measurement of reflective surfaces, but also has good measurement capability for scattered surfaces.

Key words: surface profile measurement; structured illumination microscope; optical sectioning; reconstruction algorithm

0 引言

表面形貌是产品制造、样件科学研究等多个

领域的重要几何特征, 对零件的摩擦、磨损等功能特性进行分析具有至关重要的作用^[1-2]。随着科学研究和制造技术的发展, 表面形貌呈现多样化

收稿日期: 2023-01-06; 修回日期: 2023-02-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51975233)

引用格式: 叶卓杭, 柴常春, 刘晓军. 结构光照明层析多样性表面形貌测量[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 161-168.

Citation: YE Z H, CHAI C C, LIU X J. Sectioned imaging of structured light illumination for surface profile measurement[J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43(1): 161-168.



发展的趋势,这对表面形貌测量仪器提出了新要求^[3-5]。如集成电路(Integrated Circuit, IC)、微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)、微镜阵列和激光点坑加工等功能结构性表面是由不同材料和不同工艺形成的尺度上微观、结构功能上宏观的复杂组合表面,其反射率和粗糙度差异化分布的各区域对现有表面形貌测量方法提出了挑战^[6-7]。

对于散射区域表面形貌测量而言,现有的非接触光学共焦测量方法为点扫描测量方法,效率较低。虽然结构光显微镜、变焦显微镜等区域型测量方法效率更高,但是精度较低。对于包含光滑表面区域的沟槽、台阶等结构性表面,单色光干涉和白光干涉方法已能实现高精度测量。但对于像微镜阵列等呈现为斜率多变的复杂微结构表面,测量效果不佳。

结构光照明显微镜根据宽场显微成像原理,利用结构光照明调制被测物体的表面信息,除去离焦信号干扰,通过垂直轴向扫描得到三维显微图像^[8]。由于结构光照明显微镜的轴向响应曲线与共聚焦显微镜很接近,利用频域算法可实现2倍横向分辨率的提升,因此在生物超分辨成像、材料科学等领域的应用前景十分广阔^[9-13]。结构光照明显微测量技术应用于表面形貌测量也是重要的发展方向,其不仅适用于特征复杂表面(例如散射表面)的测量,也可用于光滑表面的测量。

针对散射表面和复杂微结构表面形貌高精度测量需求,本文研究基于数字微镜器件(Digital Micromirror Devices, DMD)的结构光照明表面形貌测量系统,设计了基于科勒照明的结构光照明光学系统,提出了基于高斯曲线插值的虚拟狭缝SlitMask结构照明共焦层析算法和迭代高斯拟合的峰值提取算法。

1 测量方法

1.1 DMD结构光照明表面形貌测量基本原理

DMD结构光照明表面形貌测量基本原理如图1所示。由LED发出的光经科勒照明系统出射,再经平面镜反射后进入全内反棱镜,最后进入DMD并被调制为结构光,再由套筒透镜1进入分光棱镜

镜,最后经由物镜入射至被测样品;结构光在与被测物体表面进行调制之后,反射回来的结构光经由物镜和分光棱镜,进入套筒透镜2,最终进入CMOS相机,完成图像采集。

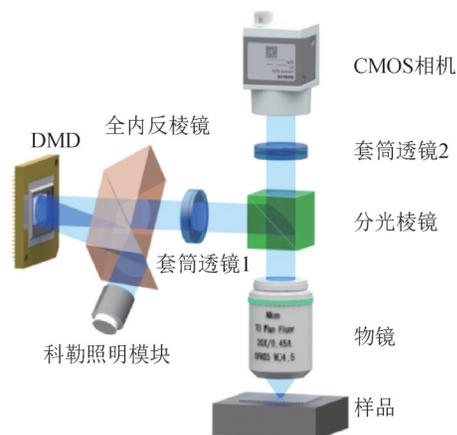


图1 基于DMD结构光照明的显微镜测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of microscopic measurement system based on DMD structured illumination

经由DMD按一定规律调制的结构光与被测表面作用,获得系列调制结构光成像,经过分析能够获得层析成像^[14]。为完成表面形貌测量,利用精密垂直扫描机构(如压电陶瓷等)驱动物镜垂直于被测表面进行扫描,并在每个轴向扫描位置获得调制结构光图像。在每一轴向位置解算出其所对应的层析图像,并提取每个像素的层析图像强度随轴向位置变化的曲线^[15](即轴向响应曲线),最后利用峰值定位算法确定轴向响应曲线峰值所对应的轴向位置,由此得到该像素点的轮廓高度值,从而实现表面形貌测量。

1.2 基于科勒照明的高对比度均匀结构光照明光学系统设计

为了产生高反差、均匀性好的条纹,需要保证DMD面与物面光照的均匀性。如果使用非球面镜片的直立式LED作为光源,虽然可以获得均匀的照明,但由于视场光阑和孔径光阑一般为同一个物理光阑,因此很难达到物面光强和视场独立调节的要求^[16]。

以科勒照明原理为基础,结合DMD结构光调制而设计的结构光照明光学系统,如图2所示。LED灯丝通过集光镜1成像于孔径光阑处,再通过集光镜2和第一套筒透镜成像于物镜后焦面,最后

通过物镜转换成平行光束均匀地照亮物面。DMD 放置在视场光阑处，LED 被调制成结构光，并增加辅助透镜安放视场光阑。为了减小照明系统的尺寸，以及便于后续安装，使用全内反射 (TIR) 棱镜分离照明光路和成像光路^[17]，并利用孔径光阑、视场光阑，分别调整成像所需光强和视场。

本结构光照明系统，视场光阑、DMD 面、样品面形成第一组共轭面，因此，调整视场光阑大小可以调整整体视场的大小；LED 灯丝、孔径光阑，物镜后焦面形成第二组共轭面，通过调整孔径光阑，可以调整整体光照强度^[18]。二者相互独立，共同实现光学系统的视场和光强的控制。

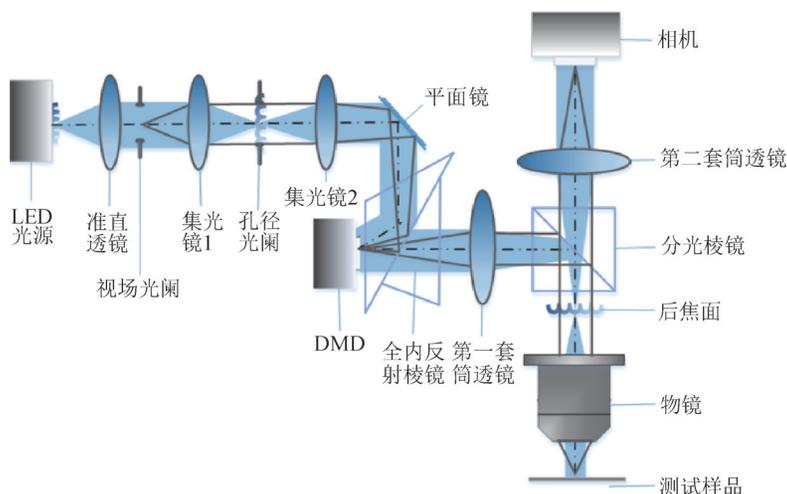


图2 基于科勒照明的结构光照明光学系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of structured light illumination microscope based on Kohler illumination

1.3 基于高斯曲线插值的虚拟狭缝结构光照明共焦层析算法

极值减法是一种常用的结构光照明共焦层析算法^[19]，其假定散焦贡献主要由远离系统焦平面的离焦光产生。基于掩膜 (Mask) 的散焦贡献比例减法假定散焦贡献在各像素点形成的图像是一张均匀照明图像。两种层析算法并没有利用到光强变化速率与轴向离焦量呈负相关^[20](即离焦光在相邻像素上产生的散焦贡献近似相等)这一性质。

基于高斯曲线插值的虚拟狭缝 (Slit Mask) 结构光照明共焦层析算法的原理为：通过标准平面镜样品获取一组标准虚拟狭缝，狭缝信息记录了准焦时的 DMD 线扫描光源、样品扫描位置与 CMOS 像素点的对应关系，然后通过相邻线结构光在狭缝位置处产生的贡献作为散焦贡献，进而计算共焦层析图像。

为了获取虚拟狭缝位置处更准确的包含准焦贡献和散焦贡献的光强值，通过虚拟狭缝附近的一组强度值进行类高斯拟合，以强度拟合曲线的极值作为包含准焦贡献和散焦贡献的光强值，对

其进行校正。考虑到将周围所有强度值纳入拟合范围将消耗更多的计算时间，严重拖慢程序运行速度，并且强度值较低的像素点所含的噪声也较大，拟合曲线的效果不一定更好。而峰值附近的一个采样点 (X_p, I_p) 和半高峰值附近的两个采样点 $(X_{-p/2}, I_{-p/2}), (X_{+p/2}, I_{+p/2})$ 所含噪声较小，且能较精确地拟合出高斯曲线。

故选择上述三个点作为拟合点，根据高斯模型，可得拟合曲线的函数模型为

$$I = I_{\text{peak}} \exp\left(-\frac{1}{2} \times \frac{(X - b)^2}{c^2}\right) \quad (1)$$

式中： I_{peak} 为拟合曲线的极值； b, c 分别为高斯分布的均值和标准差。

将 $(X_p, I_p), (X_{-p/2}, I_{-p/2}), (X_{+p/2}, I_{+p/2})$ 代入式 (1)，可解得校准后的光强值 I_{peak} 和均值 b 分别为

$$I_{\text{peak}} = I_{p/2} \exp\left[\frac{(X_{+p/2} - b)^2 (\ln I_{+p/2} - \ln I_p)}{(X_p - X_{+p/2})(X_{-p/2} + X_p - 2b)}\right] \quad (2)$$

$$b = \frac{(\ln I_p - \ln I_{+p/2})(X_p^2 - X_{-p/2}^2) - (\ln I_p - \ln I_{-p/2})(X_p^2 - X_{+p/2}^2)}{2(X_p - X_{-p/2})[(\ln I_p - \ln I_{-p/2}) + (\ln I_p - \ln I_{+p/2})]} \quad (3)$$

对虚拟狭缝位置中的光强值进行校正后，需估算出散焦贡献，才能求得共焦层析图像。根据上述散焦贡献随离焦量的变化特性，可以认为离焦光在相邻像素上产生的散焦贡献近似相等，因此，引入了 N 张标准虚拟狭缝 $SlitMask_i(x, y)$ ， $SlitMask_i(x, y)$ 表示第 i 张虚拟狭缝，记录了第 i 条线扫描结构光在 COMS 相机面上的扫描位置。其具

体获取流程为：利用物镜驱动器调整物镜的位置使面阵 CMOS 相机成像平面位于测量系统的准焦面附近，控制 DMD 调制出的线结构光对标准平面镜样品进行扫描，获得 N 张线结构照明图像 $img_i(x, y)$ ，通过式 (4) 即可获取一组标准的 $SlitMask_i(x, y)$ ，部分狭缝如图 3 所示。

$$img_{IN}(x, y) = img_{max}(x, y) - img_{min}(x, y) \quad (4)$$

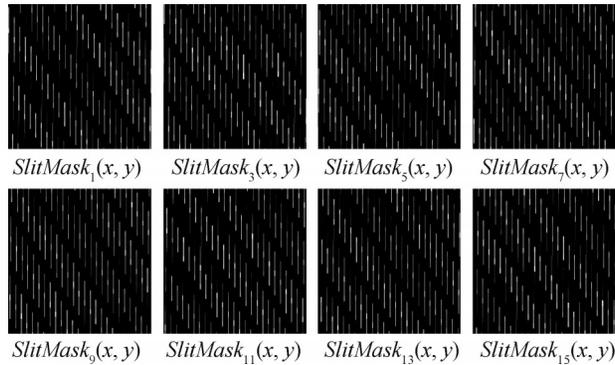


图3 通过标准平面镜样品获得的部分标准虚拟狭缝

Fig.3 Partial standard virtual slit obtained through a standard plane mirror sample

利用 DMD 调制的第 $i - 1$ 和 $i + 1$ 条线结构光在第 i 条虚拟狭缝区域产生的强度贡献均值来作为该

狭缝区域的散焦贡献，进而求得共焦光学层析图像，如式 (5) 所示。

$$img_{IN}(x, y) = \sum_{i=1}^N \left[img_i(x, y) SlitMask_i(x, y) - \frac{1}{2} \left[img_{i-1}(x, y) SlitMask_i(x, y) + img_{i+1}(x, y) SlitMask_i(x, y) \right] \right]^2 \quad (5)$$

图 4 的共焦层析算法具有更窄的半高全宽，因此具备更强的轴向层析能力。

向响应信号满足如下非标准高斯函数：

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{c}} + d \quad (6)$$

式中： $f(x)$ 为信号强度； a 为高斯函数振幅； b 为高斯函数中心位置； d 为直流分量； c 为高斯函数的标准差。利用非线性最小二乘法进行计算得到峰高斯函数的系数 $\hat{\beta} = (\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}, \hat{d})$ ，最终高斯拟合测量高度 H_{gm} 为

$$H_{gm} = \hat{b} \quad (7)$$

算法具体流程如图 5 所示。通过待测曲线的最大值、最大值所对应的 x 位置以及理论轴向响应曲线的半高全宽确定迭代初值。当拟合误差小于给定的容差 $Tol = 1e-4$ 时，停止迭代过程。但当迭代次数超过最大允许的次 $MaxIter$ （一般取 $200 \cdot n$ ）时，拟合误差仍然大于给定的容差时，则表明此次拟合失败。再次计算初值重新开始迭代，或结束迭代并标记。最后根据得到的高斯模型进行峰值定位 [22-23]。

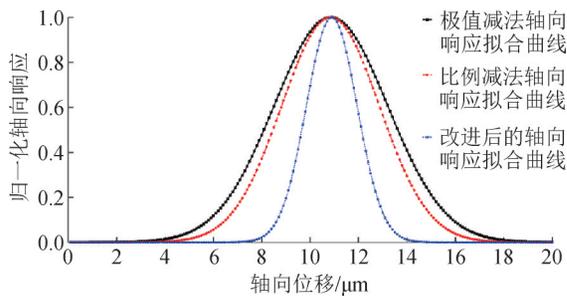


图4 共焦层析算法的轴向响应拟合曲线比较

Fig.4 Comparison of axial response fitting curves of confocal tomography algorithms

1.4 基于迭代高斯拟合的峰值提取重建算法

实现样品的三维表面形貌高精度重建，轴向响应曲线峰值位置的确定十分关键 [21]。

高斯拟合法是一种最小化数学模型与数据之间差异的非线性拟合方法。本文使用迭代的方式来实现数据的高斯拟合，以此定位峰值。定义轴

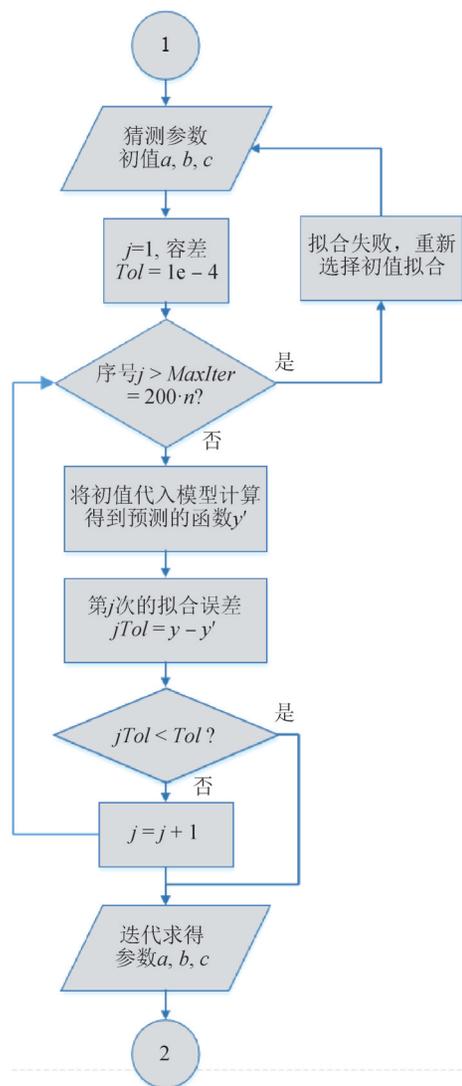


图5 迭代高斯拟合法实现流程

Fig.5 Iterative Gaussian fitting method implementation flow

2 实验测试

结构光照明表面形貌测量系统如图6所示。首先对该系统样机测量的准确性与重复性进行测试,再用该系统进行实例测试,以验证其适用于复杂表面、散射表面的形貌测量。

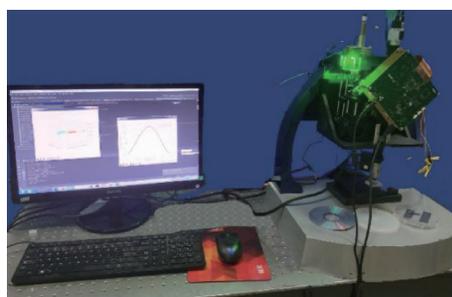


图6 结构光照明表面形貌测量系统

Fig.6 Structured light illumination surface topography measurement system

2.1 准确性与重复性测试

采用 Taylor Hobson 的商用轮廓仪 Form Talysurf PGI 830 对高为 $1.2 \mu\text{m}$ 的单刻线样板进行测试,如图7,测得的高度 $1.204 \mu\text{m}$ 作为样板标准值。

选用放大倍率为 10 倍且数值孔径 $NA=0.30$ 的物镜, DMD 线结构光周期设置为 16 个像素, CMOS 面阵相机曝光时间设置为 6 ms, 扫描步距设置为 $0.1 \mu\text{m}$, 扫描层数为 121 层, 每层拍摄 16 张结构光照明图像, 在建立的仪器装置上对同一样板进行测试。测量结果的三维显示如图8所示, 由表1可知, 10 次重复性测量的平均高度为 $1.1775 \mu\text{m}$, 相对误差

表1 $H = 1.2 \mu\text{m}$ 单刻线样品重复性与准确性实验测试数据

Tab.1 $H = 1.2 \mu\text{m}$ single groove sample repeatability and accuracy experimental test data

测量序号	测量结果/ μm	测量偏差/ μm	平均值/ μm	标准差/ μm	相对示值误差
1	1.1767	0.0233			
2	1.1762	0.0238			
3	1.1761	0.0239			
4	1.1770	0.0230			
5	1.1760	0.0240			
6	1.1766	0.0234	1.1775	0.0014	1.87%
7	1.1791	0.0209			
8	1.1783	0.0217			
9	1.1796	0.0204			
10	1.1790	0.0210			

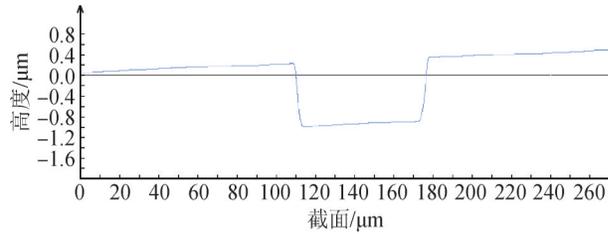


图7 由Form Talysurf PGI 830所测得的单刻线高度
Fig.7 Height of single groove measured by Form Talysurf PGI 830

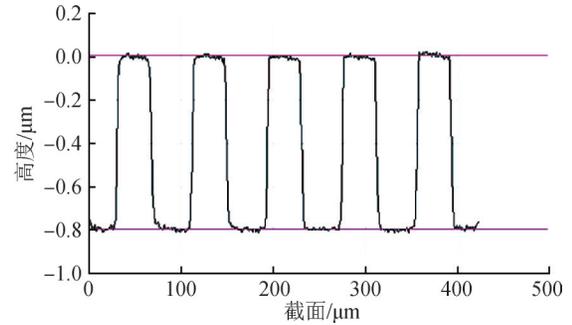


图10 $Ra = 0.4 \mu\text{m}$ 多刻线样板某截面的二维高度信息
Fig.10 Two-dimensional height information of a cross-section of multi carved line board with $Ra = 0.4 \mu\text{m}$

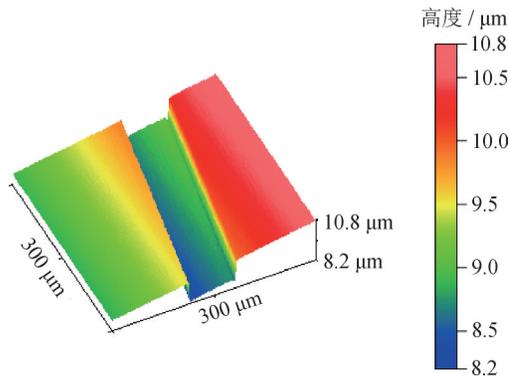


图8 $H = 1.2 \mu\text{m}$ 单刻线样板的测量结果三维形貌
Fig.8 Three-dimensional topography of measurement results of single groove with $H = 1.2 \mu\text{m}$

为 $0.0265 \mu\text{m}$ ，相对示值误差为 1.87% ，10次重复性测量结果的标准差为 $0.0014 \mu\text{m}$ 。测量结果显示良好的准确性和重复性。

2.2 工业样品测试

2.2.1 $Ra = 0.4 \mu\text{m}$ 玻璃多刻线样板测试

对于 $Ra = 0.4 \mu\text{m}$ 的玻璃多刻线样板采用相同的参数进行测量，测量结果的三维形貌如图9所示，测量结果的某一截面的二维高度信息如图10所示。

2.2.2 机加散射表面测试

最后选择一件 $Ra = 0.8 \mu\text{m}$ 的车削样品表面进

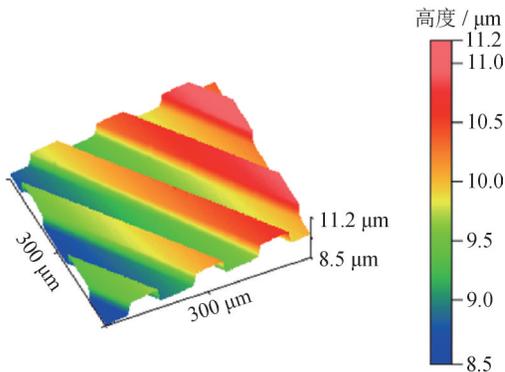
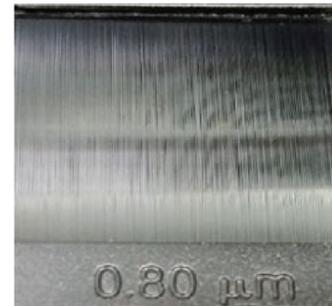
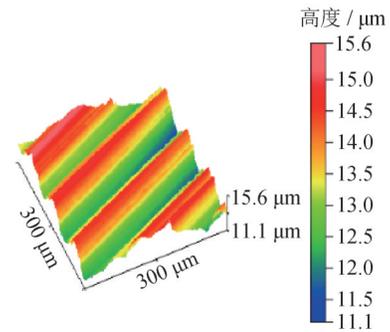


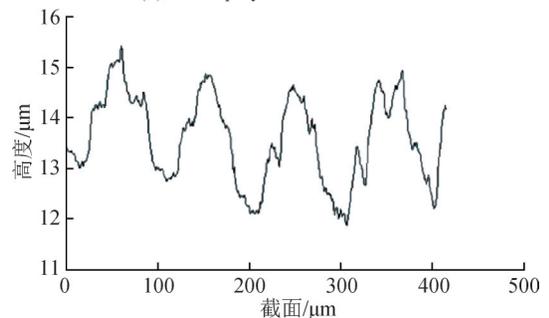
图9 $Ra = 0.4 \mu\text{m}$ 多刻线样板测量结果的三维形貌
Fig.9 3D topography of measurement results of multi carved line board with $Ra = 0.4 \mu\text{m}$



(a) $Ra = 0.8 \mu\text{m}$ 车削样品
(a) Turned sample with $Ra = 0.8 \mu\text{m}$



(b) 测量结果三维显示
(b) 3D display of measurement result



(c) 测量结果截面轮廓显示
(c) Cross-section display of measurement result

图11 $Ra = 0.8 \mu\text{m}$ 车削样品表面测量结果
Fig.11 Measurement results of turned sample surface with $Ra = 0.8 \mu\text{m}$

测量, 结果表明结构光照明表面形貌测量系统具有较好的准确性与重复性。对多刻线样板以及车削表面的实例测量, 验证了该系统可用于多样性散射表面的形貌测量。

3 结论

本文围绕散射表面和复杂微结构表面形貌高精度测量需求, 对基于结构光照明的表面形貌测量技术与系统进行了研究, 设计了基于科勒照明结合 DMD 调制的具有良好结构光对比度和均匀性的结构光照明光学系统, 提出了基于高斯曲线插值的虚拟狭缝 SlitMask 结构照明共焦层析算法与基于迭代高斯拟合的峰值提取重建算法, 进而建立了结构光照明表面形貌测量系统, 并通过重复测量高度 $H = 1.2 \mu\text{m}$ 的单刻线样品表面验证测量系统的准确性与重复性, 然后在此基础上, 进一步对多刻线和车削样品的表面进行测量, 以验证本系统在多样化复杂表面上的测量效果。受相机动态范围的限制, 对于富含不同光学特性区域的高动态复杂表面的测量仍需要开展进一步研究, 以提高系统的应用范围。

参考文献

- [1] ZHANG H, VYAS K, YANG G Z. Line scanning, fiber bundle fluorescence HiLo endomicroscopy with confocal slit detection[J]. *Journal of biomedical optics*, 2019, 24 (11): 116501–116509.
- [2] 刘焜. 面向产品性能的表面形貌设计与控制[C]. 第十一届全国摩擦学大会论文集. 兰州, 2003.
LIU K. Design and control of surface topography for product performance[C]. *Proceedings of the 11th National Tribology Conference*. Lanzhou, 2003. (in Chinese)
- [3] BOYER K K. Unlocking the potential of advanced manufacturing technologies[J]. *Journal of operations management*, 1997, 15(4): 331–347.
- [4] ESPERA A H. 3D-printing and advanced manufacturing for electronics[J]. *Progress in additive manufacturing*, 2019, 4(3): 245–267.
- [5] WARD D R, SCHMUCKER S W, ANDERSON E M, et al. Atomic precision advanced manufacturing for digital electronics[J]. *arXiv*, 2002, 11(4): 11003–11008.
- [6] BAER D R. Surface characterization of nanoparticles: critical needs and significant challenges[J]. *Journal of surface anal*, 2011, 17: 163–169.
- [7] BOSSE H, BODERMANN B. Challenges in nanometrology: high precision measurement of position and size[J]. *Tm-technisches messen*, 2015, 82(7–8): 346–358.
- [8] NEIL M A, JUŠKAITIS R, WILSON T. Method of obtaining optical sectioning by using structured light in a conventional microscope[J]. *Optics letters*, 1997, 22 (24): 1905–1907.
- [9] KARADAGLIĆ D, WILSON T. Image formation in structured illumination wide-field fluorescence microscopy[J]. *Micron*, 2008, 39 (7): 808–818.
- [10] KARADAGLIĆ D. Image formation in conventional bright-field reflection microscopes with optical sectioning property via structured illumination[J]. *Micron*, 2008, 39 (3): 302–310.
- [11] GUSTAFSSON M G, SHAO L, CARLTON P M, et al. Three-dimensional resolution doubling in wide-field fluorescence microscopy by structured illumination[J]. *Biophysical journal*, 2008, 94 (12): 4957–4970.
- [12] GUSTAFSSON M G, AGARD D A, SEDAT J W. Doubling the lateral resolution of wide-field fluorescence microscopy using structured illumination[C]// *International Society for Optics and Photonics*, 2000.
- [13] GUSTAFSSON M G. Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy[J]. *Journal of microscopy*, 2000, 198 (2): 82–87.
- [14] 柴常春, 闫红洲, 罗健, 等. 结构光照明显微镜照明系统的设计与仿真[J]. *工具技术*, 2019, 53 (7): 99–102.
CHAI C C, YAN H Z, LUO J, et al. Design and simulation of illumination system for structured illumination microscope[J]. *Tool engineering*, 2019, 53(7): 99–102. (in Chinese)
- [15] SCHAEFER L H, SCHUSTER D, SCHAFFER J. Structured illumination microscopy: artefact analysis and reduction utilizing a parameter optimization approach[J]. *Journal of microscopy*. 2004, 216 (2): 165–174.
- [16] 柴常春. 基于结构光照明的表面形貌测量系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
CHAI C C. Research on surface morphology measurement system based on structured illumination[D]. *Huazhong University of Science and Technology*, 2019. (in Chinese)
- [17] HAMMOND C, HEATH J. Symmetrical ray diagrams of the optical pathways in light microscopes[J]. *Microscopy*

and analysis, 2006, 115: 5.

[18] 李强, 任冬梅, 兰一兵, 等. 用于纳米级表面形貌测量的光学显微测头[J]. 计测技术, 2022, 42 (2): 91-96.

LI Q, REN D M, LAN Y B, et al. Optical microscope probe for the measurement of nano-scale topography [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (2): 91-96. (in Chinese)

[19] HEINTZMANN R. Structured illumination methods [M]// PAWLEY J B. Handbook of biological confocal microscopy. Plenum Press, 1990: 265-279.

[20] SHIMOZAWA T, YAMAGATA K, KONDO T, et al. Improving spinning disk confocal microscopy by preventing pinhole cross-talk for intravital imaging [J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2013, 110 (9): 3399-3404.

[21] 张志强. 光谱共焦线扫描测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

ZHANG Z Q. Research on the measurement method of line-scan chromatic confocal microscopy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)

[22] CHEN C, WANG J, LIU X, et al. Influence of sample surface height for evaluation of peak extraction algorithms in confocal microscopy [J]. Applied optics, 2018, 57 (22): 6516-6526.

[23] RAHLVES M, ROTH B, REITHMEIER E. Confocal signal evaluation algorithms for surface metrology: uncertainty and numerical efficiency [J]. Applied optics,

2017, 56 (21): 5920-5926.

(本文编辑: 郑燕)



第一作者: 叶卓杭 (1999—), 男, 硕士, 研究方向为结构照明显微镜表面形貌测量。



作者简介: 柴常春 (1993—), 男, 博士, 研究方向为结构照明显微表面测量技术、深度学习等。



作者简介: 刘晓军 (1968—), 男, 教授, 研究方向为表面形貌精密测量分析及标准化、激光及光学测试技术、精密工程、工艺质量控制。