

基于条纹式转盘的共聚焦三维形貌测量技术

郝梦凡 李备

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所; 中国科学院大学

摘要: 由于共聚焦显微镜的光学切片特性, 可通过三维测量采集工业表面缺陷和粗糙度等信息, 因此在表面计量领域有着广泛的应用和研究价值。本文结合孔径相关技术和加权最小二乘拟合及迭代算法, 低成本地搭建了条纹转盘共聚焦测量系统, 其测量速度比商用共聚焦系统快约 38%。

关键词: 转盘共聚焦; 表面计量; 三维重构

中图分类号: TG88; TH742

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2022.04.023

Confocal 3D Topography Measurement Technology Based on Striped Disk

Hao Mengfan, Li Bei

Abstract: Confocal microscope has wide application and research value in the field of surface measurement because of its optical slice characteristics, which can carry out three-dimensional measurement and collect information such as industrial surface defects and roughness. Combined with aperture correlation technology, weighted least squares fitting and iterative algorithm, a striped disk confocal measurement system at low cost is built, and the speed is about 38% faster than that of commercial confocal system.

Keywords: disk confocal; surface measurement; 3D reconstruction

1 引言

在现代制造业中, 产业化的精密加工需要高精度且快速地检测工件表面缺陷或控制表面粗糙度。触针式轮廓仪是传统的表面计量工具, 但接触式的测量方式易划伤表面, 分辨率受限于针尖尺寸, 且针尖磨损也会影响测量精度^[1]。光学测量由于具有简单高效和高精度等特点, 成为非接触式测量的首选技术, 其中 XCT 和变焦法可实现微米级横向分辨率的测量^[2]。更高分辨率的白光干涉仪和共聚焦显微镜中, 白光干涉仪采用长工作距离物镜, 可测量的坡度被限制在约 35° 内, 不适用于大斜率的粗糙表面成像; 而共聚焦显微镜可视倾角达 72°, 速度更快, 在众多场景中应用广泛^[3]。

第一台共聚焦显微镜由 Marvin Minsky 于 1957 年搭建^[4], 该系统的高轴向分辨率使其拥有光学切片能力, 可进行 3D 成像, 但逐点扫描的成像方式限制了成像速度。Petráň M. 等^[5]提出了在显微镜中对图像平面使用多针孔掩模(Nipkow 盘)并行 $x-y$ 扫描法, 这种面扫描模式大大提高了共聚焦显微镜的成像速度, 缺点是针孔串扰导致针孔间距较大, 光线利用率只有约 1%。文献[6-10]提出了基于孔径相关技术减少串扰的影响, 设计的条纹式转盘实现了最高 50% 的光线利用率, 并使用 LED 照明降低了成本。同时, Tanaami T. 等^[11]在 Nipkow 盘基础上加入微透镜, 使针孔式转盘的光线利用率提高到 40%。Jerome Mertz^[12]简单对比了两种形式的共聚焦, 认为差分式条纹转盘在成本和大视野成像中更占优势。在近来热点的超分辨领域中, Hayashi S. 等^[13]和 Azuma T. 等^[14]分别实现了针孔转盘与条纹转盘

收稿日期: 2021 年 7 月

- [10] 张天微. 基于轮廓仪的轴承滚子测量系统设计[J]. 工具技术 2019, 53(11): 107-110.
- [11] 贾磊, 李云峰. 基于圆弧拟合的轴承滚子凸度最优设计研究[J]. 机电工程 2020, 37(11): 1356-1360.
- [12] 贾松阳. 滚子凸度轮廓的多圆弧拟合设计方法[J]. 轴承 2020(11): 1-5.
- [13] 雷贤卿, 张亚东, 马文锁, 等. 轴承滚子凸度轮廓的最小二乘拟合与误差评定[J]. 光学精密工程 2018, 26(8): 2039-2047.

第一作者: 李溪源, 硕士研究生, 平顶山工业职业技术学院 467001 河南省平顶山市

First Author: Li Xiyuan, Postgraduate, Pingdingshan Polytechnic College Pingdingshan Henan 467001, China

通信作者: 张亚东, 博士, 助教, 西安工业大学 710000 西安市

Corresponding Author: Zhang Yadong, Ph. D., Assistant, Xi'an Technological University, Xi'an 710000, China

的超分辨成像。而共聚焦显微镜对样品的高度定位一般通过轴向响应的曲线拟合算法实现,常用算法有 Gaussian 拟合^[15,16]、多项式拟合^[17]和 sinc^2 拟合等^[18]。文献[18]对比了三种拟合方式的速度和精度,但需要注意,在高斯拟合中最小二乘拟合法将非线性拟合方式转化为二阶多项式拟合,大幅提高了拟合速度,缺点是易受噪声干扰,而加权最小二乘法和其迭代算法可在保证拟合速度的同时有效减轻噪声影响^[19]。

综上所述,本文结合孔径相关技术和加权最小二乘拟合及其迭代算法,使用条纹转盘低成本地实现了速度优于商用共聚焦的三维形貌测量系统。

2 测量原理

测量系统基本原理见图 1,光源发出的光经准直后经过偏振片变为 p 光,在偏振分光器处透射,经转盘调制后在 1/4 波片处(快轴与偏振方向成 45°)变为左旋偏振光并投射到样品表面。反射光被物镜收集,在波片处变为 s 光后经偏振分光器反射并在探测器成像。

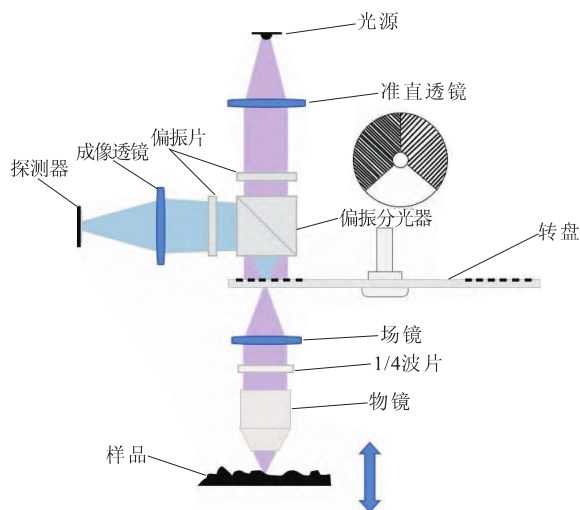


图 1 测量系统原理

在共焦系统中,探测器接收的光强表达式为

$$I(x_2) = \int S(x_1) D(x_2) \left| \int h_1\left(x_0 + \frac{x_1}{M}\right) h_2\left(x_0 + \frac{x_2}{M}\right) dx_0 \right|^2 dx_1 \quad (1)$$

式中, $S(x_1)$ 为照明掩膜; $D(x_2)$ 为探测器掩膜; h_1 和 h_2 分别是照明和成像光路的点扩散函数; M 为放大倍率。

孔径相关技术使用时间平均且非扫描的方式对整个平面成像,而式(1)中的 S 和 D 为仅有的时间相关量。掩膜图案设计表示为

$$S(x) = D(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [b_i(t) + 1] \delta(x - x_i) \quad (2)$$

式中 $x_1, x_2, \dots, x_N$ 的 N 个位置透射率分别为 $[b_i(t) + 1]/2$ 的像素组成的掩膜,因此 $S(x_1) D(x_2)$ 的时间平均值为

$$\langle S(x_1) D(x_2) \rangle = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \langle [b_i(t) + 1] [b_j(t) + 1] \rangle \delta(x_1 - x_i) \delta(x_2 - x_j) = \frac{1}{4} \left[\sum_{i=1}^N \delta(x_1 - x_i) \delta(x_2 - x_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \delta(x_1 - x_i) \delta(x_2 - x_j) \right] \quad (3)$$

式中,第一项表示纯共焦图像;第二项表示 $S(x) = D(x) = 1$ 时的常规宽场图像。该图像减去一个宽场图像得到图 2 所示的轴向响应,该响应大致符合高斯曲线,曲线峰值点即对应样本点的高度。获得整个平面点的高度就可重构样品的三维表面轮廓并进行表面计量。

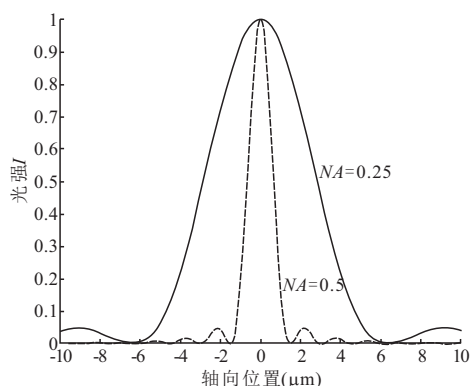


图 2 共聚焦轴向响应曲线

3 仪器设计

3.1 光路硬件系统设计

根据上述原理,为适配多种放大倍率的物镜,转盘设计 6.25lp/mm 和 12.5lp/mm 两种图案,透光部分和遮光部分比例均为 1:3,另外设计空白盲区生成普通宽场图像。转盘用光刻方式在有机玻璃镀膜抗反射涂层制成,遮光部分几乎没有光线反射,转盘与光轴可成直角安装,因此图像平面没有倾斜,避免了梯形失真。转盘结构见图 3,此类网格线取向可最小化成像中的轻微不对称性。

光源采用 405nm 的大功率 LED,短波长有益于提高系统分辨率;相机采用海康 MV-CA050-20UM 黑白相机,530 万像素,最大帧率 60Hz。为了稳定,测试时使用 50f/s,配合转盘转速 3000s/min。

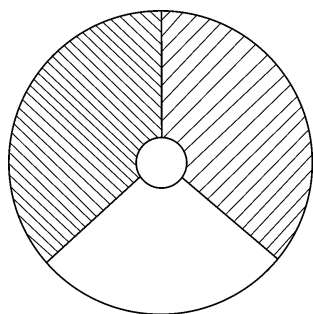


图3 转盘结构

3.2 曲线拟合算法

高斯函数为

$$f(x) = Ae^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{4}$$

高斯函数拟合可转换为二次多项式进行拟合,有

$$y = ax^2 + bx + c$$

式中 $a = -\frac{1}{2\sigma^2}$; $b = \frac{2\mu}{2\sigma^2}$; $c = (\ln A - \frac{\mu^2}{2\sigma^2})$; $y = \ln f(x)$ 。

传统的最小二乘法拟合通过下式求得

$$V^2 = \sum (ax_i^2 + bx_i + c - y_i)^2 = \min \tag{5}$$

可得到 A, μ, σ 的最佳预估值。但传统的最小二乘法拟合易受噪声影响,尤其是低值点处的噪声干扰。

加权最小二乘法重新定义误差为

$$V^2 = \sum y(ax_i^2 + bx_i + c - y_i)^2 = \min \tag{6}$$

从而减小低值处噪声影响。

对 $A = 10, \mu = 100, 2\sigma^2 = 600$ 的高斯函数添加一些小噪声并取 30 组数据,分别用最小二乘法 (LS)、加权最小二乘法 (WLS) 和 ImageJ 内置的非线性高斯拟合 (NGF) 处理,结果如表 1 所示。

表 1 三种算法的拟合精度和速度对比

	A	μ	$2\sigma^2$	时间(μ s)
标准值	100	10	600	
LS	92.2	10.57	618.37	0.73
WLS	98.85	10.28	610.02	0.75
NGF	98.82	10.28	609.56	166

由此可见,WLS 在精度接近 NGF 的同时拥有和 LS 相当的处理速度,适合作为共聚焦系统的处理算法。需要注意,虽然 NGF 拟合仅需约 166 μ s,但在 500 万全像素拟合的情况下会对拟合时间产生巨大的拖累;实验选取模板函数,在实际数据的拟合中,各方法的拟合度偏差会大很多;文献 [19] 中介绍了 WLS 的迭代计算,但实验证明 WLS 方法已足够应付一般的测量工作。

4 实验分析与评价

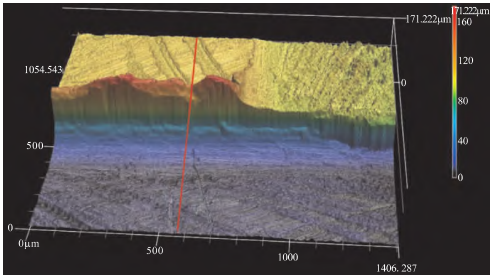
为验证测量系统的性能,对金属加工件(见图

4 线圈内为测量区域)进行了测量,使用基恩士 VK-X1100 激光共聚焦与本实验搭建的转盘共聚焦系统做对照。两个系统均采用 10 倍物镜,测量步进均为 2 μ m,获取 161 张图像序列重建轮廓(其中转盘共聚焦的图像序列由 322 张图像通过第 2 节所述的图像减法获得)。

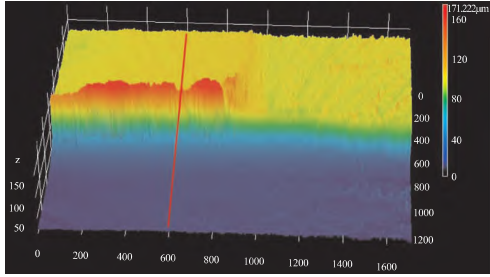


图4 金属加工件表面(工件尺寸 10mm $\times$ 20mm)

测量结果见图 5,从三维重构图可看到,其吻合性较高,取图中线框所示的位置进行测量,并在表 2 中对比两个仪器的测量性能。可以看到,高度测量误差仅为 0.4%,结果准确;转盘共聚焦的测量时间比 VK-X1100 快约 38%,测量速度明显高于目前市售的工业共聚焦显微镜。



(a) VK-X1100 测量轮廓



(b) 转盘共聚焦测量轮廓

图5 测量结果

表 2 仪器性能对比

仪器	台阶高度(μ m)	视场(μ m)	像素数	测量时间
VK-X1100	97.5	1406 $\times$ 1054	2048 $\times$ 1536	59s
转盘共聚焦	97.9	1710 $\times$ 1351	2592 $\times$ 2048	36s ^①

注①:实际测量时间为 52s,但转盘共聚焦系统像素数为 530 万,为了对比将算法拟合时间按与 VK-X1100 相同的 310 万像素进行了折算。

5 结语

各式共聚焦技术在生物医学领域有着广泛应用,但商用工业测量共聚焦仪器却多为激光扫描显微镜。结合孔径相关技术和加权最小二乘法,整合了硬件、软件和算法,搭建了条纹式转盘共聚焦显微镜并和商用共聚焦显微镜进行对比实验,证明其测量速度有明显提升。同时由于转盘较成熟的微米级刻蚀工艺和廉价的 LED 光源,在成本控制方面也更为优秀。

参考文献

- [1] Conroy M, Armstrong J. A comparison of surface metrology techniques [J]. *Journal of Physics: Conference Series* 2005, 13: 458 – 465.
- [2] Thompson A, Senin N, Giusca C, et al. Topography of selectively laser melted surfaces: a comparison of different measurement methods [J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology* 2017, 66(1): 543 – 546.
- [3] Leach R. Optical measurement of surface topography [M]. Berlin: Springer 2011.
- [4] Minsky M. Memoir on inventing the confocal scanning microscope [J]. *Scanning* 1988, 10(4): 128 – 38.
- [5] Petráň M, Hadravský M, Egger M D, et al. Tandem scanning reflected-light microscope [J]. *Journal of the Optical Society of America* 1968, 58(5): 661 – 664.
- [6] Wilson T, Juskaitis R, Neil M A A, et al. Confocal microscopy by aperture correlation [J]. *Optics Letters* 1996, 21(23): 1879 – 981.
- [7] Neil M A A, Juskaitis R, Wilson T. Method of obtaining optical sectioning by using structured light in a conventional microscope [J]. *Optics Letters* 1997, 22(24): 1905 – 1907.
- [8] Neil M A A, Wilson T, Juskaitis R. A light efficient optically sectioning microscope [J]. *Journal of Microscopy* 1998, 189(2): 114 – 117.
- [9] Wilson T, Juskaitis R, Neil M A A, et al. Imaging modalities in confocal correlation microscopy [C]//Cabib D, Cogswell C J, Conchello J A, et al. *Three-Dimensional and Multidimensional Microscopy: Image Acquisition and Processing VI*. Bellingham: SPIE, 1999.
- [10] Wilson T, Neil M A A, Juskaitis R. Confocal microscopy apparatus and method: USA, US6687052B1 [P]. 2000 – 07 – 27.
- [11] Tanaami T, Otsuki S, Tomosada N, et al. High-speed 1-frame/ms scanning confocal microscope with a microlens and Nipkow disks [J]. *Applied Optics* 2002, 41(22): 4704 – 4708.
- [12] Jerome Mertz. Optical sectioning microscopy with planar or structured illumination [J]. *Nature Methods* 2011, 8(10): 811 – 819.
- [13] Hayashi S, Okada Y. Ultrafast super resolution fluorescence imaging with spinning disk confocal microscope optics [J]. *Molecular Biology of the Cell* 2015, 26(9): 1743 – 1751.
- [14] Azuma T, Kei T. Super-resolution spinning-disk confocal microscopy using optical photon reassignment [J]. *Optics Express* 2015, 23(11): 15003 – 15011.
- [15] 杨召雷, 张运波, 董洪波. 基于 C++ Builder 的共焦显微镜三维重建方法 [J]. *信息技术* 2012, 36(10): 1 – 3.
- [16] Artigas R, Pinto A, Laguarda F. Three-dimensional micro measurements on smooth and rough surfaces with a new confocal optical profiler [J]. *Proceedings of SPIE* 1999, 3824: 149 – 160.
- [17] Kim Taehoon, Kim Taejoong, Lee S W, et al. Optimum conditions for high-quality 3D reconstruction in confocal scanning microscopy [C]//Conchello J A, Cogswell C J, Wilson T. *Three-Dimensional and Multidimensional Microscopy: Image Acquisition and Processing XIII*. Bellingham: SPIE, 2006: 60900W. 1 – 60900W. 7.
- [18] Tan J, Liu C, Liu J, et al. Sinc² fitting for height extraction in confocal scanning [J]. *Measurement Science and Technology* 2016, 27(2): 025006.
- [19] Guo H. A simple algorithm for fitting a gaussian function [DSP tips and tricks] [J]. *IEEE Signal Processing Magazine* 2011, 28(5): 134 – 137.

第一作者: 郝梦凡, 硕士研究生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院大学, 130033 长春市

First Author: Hao Mengfan, Postgraduate, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences University, Changchun 130033, China

通信作者: 李备, 研究员, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院大学, 130033 长春市

Corresponding Author: Li Bei, Researcher, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences University, Changchun 130033, China