

文章编号 1004-924X(2015)09-2466-07

波长轮换与相移扫描相结合的表面形貌测量系统

杨练根^{1,2*}, 何浪¹, 王选择¹, 刘文超¹, 何涛²

(1. 湖北工业大学机械工程学院, 湖北武汉 430068;

2. 湖北省现代制造质量工程重点实验室, 湖北武汉 430068)

摘要:用光学显微干涉法进行表面形貌测量时其深度测量范围的扩大和形貌测量精度的提高是一对矛盾。为此, 本文设计出了一种基于波长轮换与相移扫描相结合的三波长表面形貌测量系统, 并提出了一种基于椭圆拟合与相位差大小尺度相结合的相位提取与识别算法。将这种算法运用于多波长干涉图像的数据处理, 有效地提高了形貌的整体测量精度, 并拓展了深度测量范围。实验结果表明: 在深度测量范围扩大近 15 倍的条件下, 采用粗糙度国家基准校准的方波多刻线样板得到的表面粗糙度数据与校准数据的相对误差仅为 4.12%, 表明该系统在一定的深度范围内能够实现表面形貌的高精度测量。另外, 针对该系统设计的多波长相位识别算法对环境噪声要求不高, 可以支持系统的高噪声或在线测量。

关键词:表面形貌测量; 相移干涉; 波长轮换; 相移扫描; 光学显微干涉法

中图分类号: TH741.3; TB92 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152309.2466

Surface topography measuring system based on wavelength switching and phase shift scanning

YANG Lian-gen^{1,2*}, HE Lang¹, WANG Xuan-ze¹, LIU Wen-chao¹, He Tao²

(1. Mechanical Engineering School, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Hubei Key Laboratory of Modern Manufacturing and Quality Engineering, Wuhan 430068, China)

* Corresponding author, E-mail: yanglg@mail.hbut.edu.cn

Abstract: When optical microscopic interferometry is used to measure the surface topography, there is a contradiction between the enlargement of measuring interval and the improvement of measuring precision. Therefore, a three-wavelength interference measurement system for surface topography was designed based on wavelength switching and phase shift scanning. A data processing method for three wavelength interference images was proposed by using the phase extraction and recognition algorithm based on elliptic fitting and combined size scales of phase difference. The method was used to process multi-wavelength interferometric images, and it effectively improves the overall precision of surface topographic measurement and expands the measuring interval. Experimental results show that when the measurement interval is expanded to nearly 15 times, the relative measurement error of surface roughness of square wave specimen with multiple grooves is only 4.12% as compared to that of the data calibrated by China Metrology Institute. It concludes that the three wavelength

收稿日期: 2015-04-07; 修订日期: 2015-05-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51275157, No. 51175154, No. 51275158)

interferometry realizes a high precision measurement for surface topography in a certain range. Moreover, the data processing method for multi-wavelength phase recognition has not higher demands for environment noise and can support system measurement in a higher noise environment in real time.

Key words: surface topography measurement; phase shift interference; wavelength switching; phase shift scanning; optical microscopic interferometry

1 引言

表面形貌测量在微电子、光学元件加工以及材料的表面功能特性和加工工艺评定等方面具有重要意义^[1]。在微观表面形貌测量中,光学干涉显微测量是一种十分重要的方法,它能够快速、非接触、高精度地得到物体的表面形貌^[2-3]。基于直接表面的显微干涉测量主要包括白光相移干涉、波长扫描干涉、双波长或多波长干涉等方法。其中白光相移干涉测量^[4-6]以白光为光源,干涉条纹具有较好的对比度,它通过相移驱动扫描,逐个寻找被测点的零光程差位置,实现表面形貌的高精度测量。但零级条纹位置点的识别精度^[7]易受到采样步距、光源频带宽度的影响,使测量难以达到很高的精度。波长扫描干涉^[8-9]通过不断改变射频驱动器的频率,使干涉波长连续变化,在绝对光程差不变的情况下改变相对相位差,在超越 2π 范围内求得了相位变化与波长变化之比,即光程差。该方法不需要驱动装置,并且理论上不受测量范围限制。双波长或多波长干涉测量方法的实质^[10-12]是利用双波长或多波长测量结果的差异求出干涉级次,从而得到被测点的真实高度。虽然它拓展了深度测量范围,但却增大了相位识别误差^[13],致使测量精度较低。目前,基于该方法的形貌测量主要依据小数重合技术^[14-15],它对相位的识别精度要求很高,比较容易出现干涉级次判断的失误,导致测量失效。

为了在扩大深度测量范围的同时,保证较高的相位识别精度,本文融合了相移扫描与波长扫描两种测量方法,设计了一种基于波长轮换与相移扫描相结合的表面形貌测量系统,并提出了相应的干涉图像数据处理方法,实现了表面形貌的高精度测量。另外,针对该系统设计的多波长相位识别算法对环境噪声要求不高,从而利于高噪声下的在线测量,极大地提升了该系统的现场测量水平与实用价值。

2 三波长干涉测量系统的设计

基于波长轮换的多波长干涉测量系统如图1所示。系统整体由计算机控制,主要包括干涉显微测量系统、光源切换系统、图像采集系统以及PZT驱动系统等部分。干涉显微测量系统采用传统的Mirau干涉镜,发光二极管(LED)白光光源,3个不同波长的滤光片均匀分布于圆盘上,经电机驱动圆盘实现光源切换,在同光路下得到了不同的波长。图像采集系统由高速CCD及图像采集卡组成。PZT采用开环驱动控制对样品进行相移扫描。

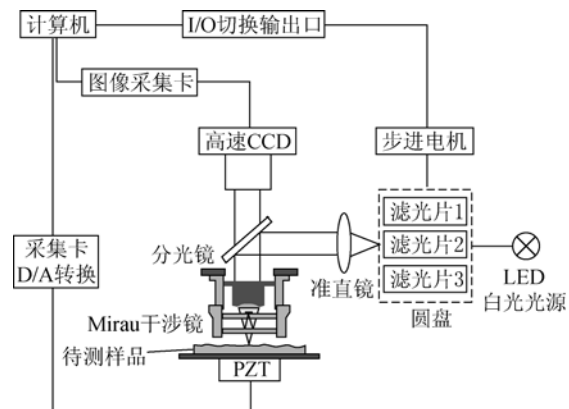


图1 基于波长轮换的多波长干涉测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of surface topographic measurement system based on wavelength switching

三波长干涉测量系统测量表面形貌的流程如图2所示。电机驱动圆盘转动,LED白光光源发出的光分别通过滤光片1,2,3切换出3个同光路但波长不同的光源,并依次完成干涉。每次波长切换完成后,计算机控制PZT完成半个波长以上位移的驱动,干涉条纹随之移动一个周期以上,此时,CCD同步采集该波长下的干涉帧,直到采集结束。当光源轮流切换完毕,三波长的干涉帧组图被分别送入计算机,经过图像数据处理得到最终的样品表面形貌。

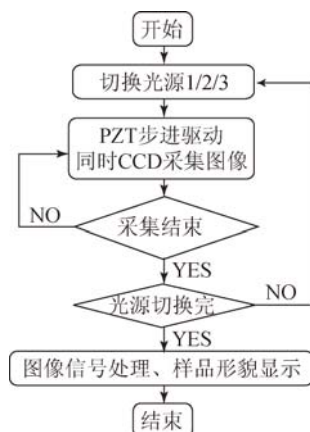


图 2 三波长表面干涉测量流程

Fig. 2 Flow chart of surface topographic measurement based on wavelength switching

3 三波长干涉图像数据处理

干涉测量系统选用了带宽为 10 nm 的 3 组滤光片,通过对这些滤光片的切换实现 3 个单波长相移干涉。综合滤光片带宽对相干长度的限制,以及测量信噪比对干涉级次识别的影响,选用波长分别为 520, 550, 640 nm 的滤光片,在满足测量范围的同时避免产生表面高度信息计算的干涉级次误差。

为了准确获取每个波长下的干涉初相位,在每个波长干涉时,计算机开环控制 PZT 驱动 40 次,整个驱动行程只要半波长以上即可。CCD 同步采集该波长干涉下的 40 幅连续干涉组图,采集完毕后切换滤光片,最终得到三波长下的 120 幅干涉组图,图像分辨率为 964×1292 。待测样本为平面反射镜时的干涉图像如图 3 所示。

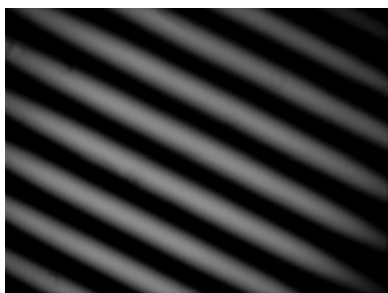


图 3 平面反射镜的原始干涉图像

Fig. 3 An interference image of measured object

干涉图像的数据处理流程如下:

(1) 像素点相对初相位的获取

利用相位插值与相移四步法^[16-18]可求得像素点的初相位。由于 PZT 的驱动是开环驱动,首先必须得到开环驱动下的驱动步长。

这里采用一种根据干涉条纹进行自动获取高精度相移的方法来得到相移量^[19]。首先选取波长 λ_k 干涉下的 40 幅连续干涉图像,提取干涉图像像素点的灰度值,并在此基础上确定相差接近 $\pi/2$ 的两组像素点的灰度均值序列,见图 4,则两灰度均值序列满足:

$$\begin{cases} x_{ki} = A_1 \cos(\theta_x + \delta_i) + c_1 \\ y_{ki} = A_2 \cos(\theta_y + \delta_i) + c_2 \end{cases}, \quad (1)$$

其中: A_1, A_2 为像素点的交流幅值, C_1, C_2 为偏置量, x_{ki}, y_{ki} 为单波长 k 干涉下的像素点灰度值均值序列, θ_x, θ_y 为像素点的初相位, δ_i 为 PZT 的驱动相位。

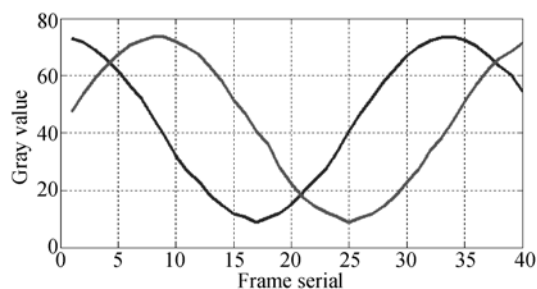


图 4 灰度均值序列

Fig. 4 Gray value sequence

平滑处理两个像素点的灰度均值序列曲线后,进行椭圆拟合^[20-21],结果如图 5 所示。理论上椭圆拟合方程为:

$$x^2 + a_0 xy + a_1 y^2 + a_2 x + a_3 y + a_4 = 0. \quad (2)$$

通过基于最小二乘拟合的线性回归运算后,得到 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 ,由参数方程与坐标方程关系求得 A_1, A_2, c_1, c_2 和拟合相差 θ_0 ,分别为:

$$\begin{cases} \theta_0 = \theta_x - \theta_y = \pm \cos^{-1} \left\{ \frac{-a_0}{2\sqrt{a_1}} \right\} \\ c_1 = -\frac{a_2}{2} - \frac{a_0 c_2}{2} \\ c_2 = \frac{a_0 a_2 - 2 a_3}{4 a_1 - a_0^2} \end{cases}, \quad (3)$$

其中: θ_0 为 θ_x 相对于 θ_y 的相对相位,其符号由灰度

序列值在椭圆中的旋转方向决定,逆时针旋转时为负,顺时针旋转时为正。判断方法采用向量叉乘的方式,判断公式如下:

$$(d_x, d_y, d_z) = (x_{k1} - c_1, y_{k1} - c_2, 0) \times (x_{k2} - c_1, y_{k2} - c_2, 0), \quad (4)$$

其中: x_{k1}, x_{k2} 分别表示第 1 个灰度序列中第 1, 2 个序列点的灰度值, y_{k1}, y_{k2} 分别表示第 2 个灰度序列中第 1, 2 个序列点的灰度值。若 $d_z > 0, \theta_0$ 取负号;反之,取正号。

在确定参数的基础上,根据公式(1)可以计算 PZT 的相移 δ_i , 识别精度能达到 $0.013 \text{ rad}^{[19]}$ 。

根据 PZT 相移,利用相位插值技术从 40 幅图中得到 4 幅相差 90° 的干涉图。最后利用相移四步法可求得像素点的初相位。

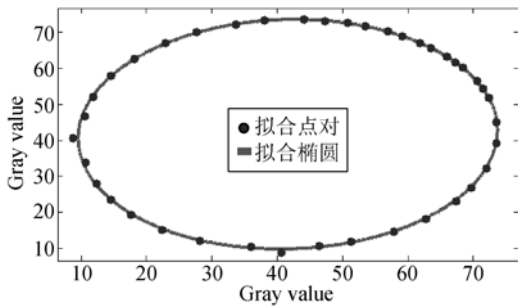


图 5 椭圆拟合

Fig. 5 Ellipse fitting

(2) 相对初相位的计算

为了计算表面高度信息,首先以视场中心点为基准,即取干涉场中心为参考零点,如设坐标为 (482, 646), 那么此点的绝对高度与相位均设为 0。基于以上思想,对各波长下的干涉相位进行对齐处理。对齐方法如下:

$$\varphi_k(m, n) = \theta_k(m, n) - \theta_k(m_0, n_0), \quad (5)$$

其中: $\theta_k(m, n)$ 表示单波长 k 下的像素点干涉初相位, $\varphi_k(m, n)$ 为对齐处理后的相对初相位。实际中取 $m_0 = 482, n_0 = 646$, 同时通过式(6)处理,使 $\varphi_k(m, n)$ 处于 $(-\pi, \pi)$ 之间。

$$\varphi_k(m, n) = \varphi_k(m, n) - 2\pi \left[\frac{\varphi_k(m, n)}{2\pi} \right], \quad (6)$$

式中 $[]$ 表示圆整运算。

图 6 显示了经过对齐处理后,CCD 上某一行某个波长的干涉相位,图 7 显示了 3 个波长的干涉相位。

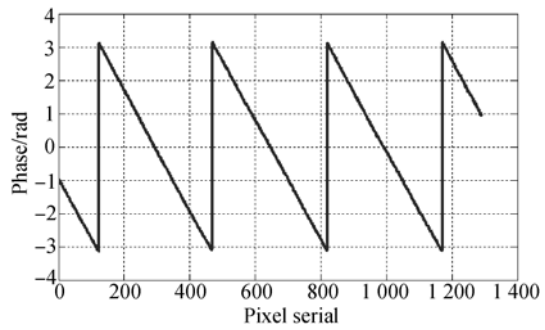


图 6 行相位曲线

Fig. 6 Phase curve of line

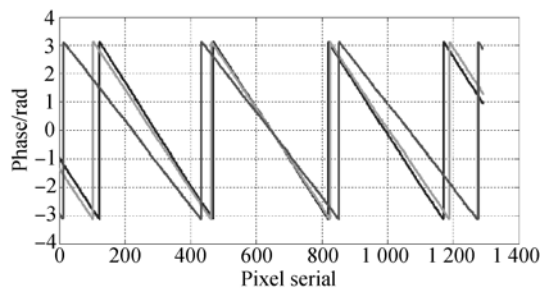


图 7 三波长行相位曲线

Fig. 7 Phase curves of line for three wavelength

(3) 计算近、远波长的相位差

在计算对齐后的行初相位的基础上,分别计算两近波长的初相位差 $\varphi_{12}(m, n)$ 、两远波长的初相位差 $\varphi_{13}(m, n)$, 计算公式为:

$$\begin{cases} \varphi_{12}(m, n) = \varphi_1(m, n) - \varphi_2(m, n) \\ \varphi_{13}(m, n) = \varphi_1(m, n) - \varphi_3(m, n) \end{cases} \quad (7)$$

图 8 显示了近波长、远波长的相位差以及某个单波长的初相位。其中近波长、远波长的相位差在进行圆整处理后,最终相位处于 $(-\pi, \pi)$ 。

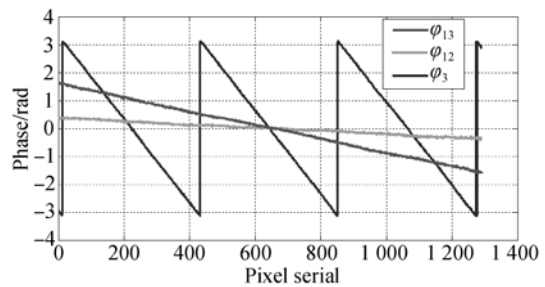


图 8 相位及相位差

Fig. 8 Phase and phase difference

(4) 计算像素序列的绝对高度

由于干涉理论可推导表面高度 h_{nm} 满足公式:

$$\begin{cases} \varphi_{12}(m, n) = \frac{4\pi h_{nm}(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2} \\ \varphi_{13}(m, n) + 2p\pi = \frac{4\pi h_{nm}(\lambda_1 - \lambda_3)}{\lambda_1 \lambda_3} \\ \varphi_3(m, n) + 2q\pi = 4\pi h_{nm} \lambda_3 \end{cases} \quad (8)$$

其中: p, q 分别为远波长相位差和单波长相位下的干涉级次。此时, 近波长相位差的干涉级次为 0。

φ_{12} 在 $(-\pi, \pi)$ 内, 因此表面高度的测量范围为 $\left[-\frac{\lambda_1 \lambda_2}{4(\lambda_2 - \lambda_1)}, \frac{\lambda_1 \lambda_2}{4(\lambda_2 - \lambda_1)}\right]$ 。当 $\lambda_1 = 520 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 550 \text{ nm}$ 时, 其高度测量范围为 $(-2.38 \mu\text{m}, 2.38 \mu\text{m})$, 远远高于单波长的测量范围。

由公式(8)进一步推导得:

$$\begin{cases} h_{nm} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \cdot \varphi_{12}(m, n)}{4\pi(\lambda_1 - \lambda_2)} \\ h_{nm} = \frac{(\varphi_{13}(m, n) + 2p\pi) \lambda_1 \lambda_3}{4\pi(\lambda_1 - \lambda_3)} \\ h_{nm} = \frac{(\varphi_3(m, n) + 2q\pi) \lambda_3}{4\pi} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中每个等式都可以得到表面形貌的高度, 但同等相位误差的条件下, 第一个等式的高度计算误差最大, 最后一个的计算误差最小。后两个等式中存在 p 和 q 两个干涉级次未知量。这里根据 3 个等式之间的关系, 基于最小误差假设条件来求解任意像素点的绝对高度。

首先在图 8 的基础上, 计算某一像素点对应在近波长相位差曲线上的相位 φ_{12} , 然后通过 φ_{12} 计算该点对应的远波长相位差下的干涉级次 p , 并得到远波长绝对相位 φ_{far} 。因此可以得到:

$$\varphi_{13}(m, n) = \frac{\lambda_2(\lambda_3 - \lambda_1) \cdot \varphi_{12}(m, n)}{\lambda_3(\lambda_2 - \lambda_1)} = k\varphi_{12}(m, n), \quad (10)$$

$$\varphi_{far} = 2\pi \left[\frac{k\varphi_{12}(m, n) - \varphi_{13}}{2\pi} \right] + \varphi_{13}(m, n), \quad (11)$$

其中: k 为与波长相关的常数, 圆整运算的结果即为干涉级次 p 。

用同样的方法, 通过 φ_{far} 计算该点对应的单波长干涉下的干涉级次 q , 得到单波长的绝对相位为:

$$\varphi_{single} = 2\pi \left[\frac{k\varphi_{far}(m, n) - \varphi_3}{2\pi} \right] + \varphi_3(m, n). \quad (12)$$

最后用单波长绝对相位 φ_{single} 计算该点相对

于参考零点的绝对高度 h_{nm} :

$$h_{nm} = \frac{\varphi_{single}(m, n)}{4\pi} \cdot \lambda_3. \quad (13)$$

由此可见, 利用 φ_{12} 可以在大尺度测量范围内识别光程差, 但识别精度有限; φ_{13} 识别的光程差缩小, 但却能够在小尺度测量范围内减小光程差的识别误差; 最终, 该点被定位在测量精度最高的 φ_3 的测量区间内。因此, 这种基于相位差测量尺度的图像数据处理算法充分利用了相位差在不同尺度下的测量精度来逐步校正与识别真实相位, 提高了最终的测量精度。最终得到的平面反射镜的局部表面三维形貌如图 9 所示。

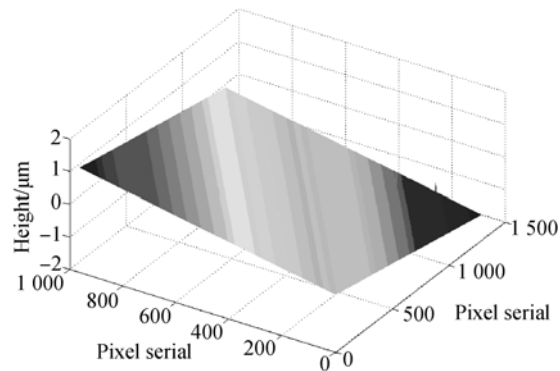


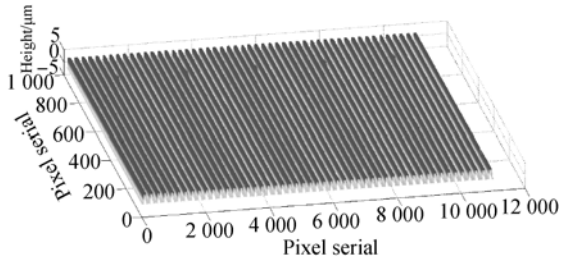
图 9 平面反射镜的局部三维形貌
Fig. 9 3-D topography (local) of a plane mirror

4 三波长干涉测量系统的精度验证

为了对三波长干涉测量系统的精度进行验证, 本文使用一块方波多刻线表面粗糙度玻璃样板作为被测对象。该样板于 2014 年 9 月由中国计量科学研究院使用粗糙度国家基准校准, 校准结果如下: $R_a = 1.61 \mu\text{m}$, $R_z = 3.86 \mu\text{m}$, 不确定度 $U_{95} = 5\%$ 。使用以上测量系统与图像数据处理算法, 最终恢复出方波多刻线玻璃样板的三维形貌并进行拼接, 结果如图 10(a) 所示。

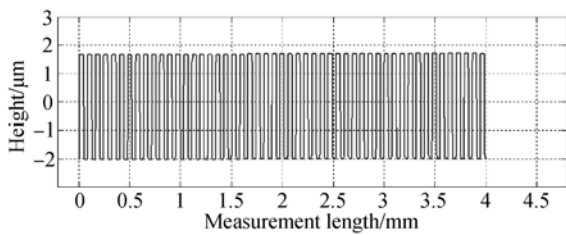
图 10(b) 为待测方波样板的某一横截面图, 标定的像素尺寸为 $0.36 \mu\text{m}$, 评定长度为 4 mm 。在该评定长度内依次选取 0.8 mm 的取样长度评定该横截面, R_a 的评定结果依次为 $1.674, 1.676, 1.666, 1.662, 1.657 \mu\text{m}$, 取最大值得到该横截面 $R_a = 1.676 \mu\text{m}$ 。在整个样品上均分 10 个横截面, 分别计算每个横截面的 R_a , 结果如表 1 所示。 R_a 最大值为 $1.676 \mu\text{m}$, 即为该样板的表面粗糙

度。表面粗糙度测量结果的相对误差为 4.12%，误差主要来源于二维平移台的运动精度、图像噪声以及图像拼接精度。



(a) 三维形貌(局部)

(a) An area of 3-D topography(local)



(b) 某横截面的二维形貌(局部)

(b) 2-D topography of a cross section(local)

图 10 方波多刻线样板的测量结果

Fig. 10 Measurement results of square wave specimen with multiple grooves

表 1 样板各行的粗糙度 R_a

Tab. 1 Roughness of specimen in various lines

	(μm)				
Section	1	2	3	4	5
R_a	1.675	1.675	1.675	1.676	1.675
Section	6	7	8	9	10
R_a	1.669	1.667	1.673	1.672	1.674

5 结 论

本文提出了一种基于波长轮换与相移扫描测量表面形貌的干涉测量系统,在保证相位识别精度的前提下,理论上将表面形貌的测量范围从单波长干涉下的半波长^[13]扩展到 $2.38 \times 2 = 4.76 \mu\text{m}$,相对于 640 nm 的波长而言,测量范围扩大了近 15 倍。测量过程中,基于相位差尺度展开了图像数据的校正与细化算法,从大尺度到小尺度逐步衔接与过渡,每个尺度上仅需要与之相匹配的识别精度,降低了系统的信噪比要求,为高噪声环境下的现场测量准备了条件。

参考文献:

[1] AXINTE D A, GINBY N, FOX K, *et al.*. Process monitoring to assist the workpiece surface quality in machining [J]. *Int. J. of Mach. Tools & Manu.*, 2004, 44:1091-1108.

[2] 王海珊,史铁林. 基于干涉显微原理的面形貌测量系统[J]. *光电工程*, 2008, 35(7):85-88.
WANG H SH, SHI T L. Profilometer based on interferometry and micro vision system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(7):85-88. (in Chinese)

[3] 张雷,焦小雪,周立秋,等. 集成成像同名像点三维形貌获取方法[J]. *中国光学*, 2015, 8(1):45-50.
ZHANG L, JIAO X X, ZHOU L Q, *et al.*. Three-dimensional shape acquisition method by integral imaging based on corresponding points[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1):45-50. (in Chinese)

[4] LEHMANN P. Vertical scanning white-light interference microscopy on curved microstructures [J]. *Optics Letters*, 2010, 35 (11) :1768-1770.

[5] WANG SH ZH, XIE T B, CHANG S P. Vertical scanning white light interfering profilometer based on Linnik interference microscope [J]. *The International Society for Optical Engineering*, 2010, 7656:765631.

[6] 刘淑杰,张元良,张洪潮. 透明软质薄膜的表面形貌测量[J]. *中国光学*, 2014, 7(2):326-331.
LIU SH J, ZHANG Y L, ZHANG H CH. Profile measurement of thin transparent soft film surface [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2):326-331. (in Chinese)

[7] 杨天博,郭宏,李达成. 白光扫描干涉测量算法综述[J]. *光学技术*, 2006, 32(1):115-118.
YANG T B, GUO H, LI D CH. The summary of algorithms for the white light scanning interferometry [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(1):115-118. (in Chinese)

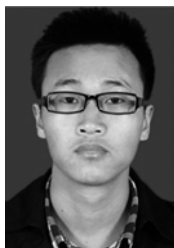
[8] JIANG X, WANG K W, GAO F, *et al.*. Fast surface measurement using wavelength scanning interferometry with compensation of environmental noise [J]. *Applied Optics*, 2010, 49 (15):2903-2909.

- [9] KUO C C, TAKAMASU K, YAMAMOTO A, *et al.*. Calibration of wavelength scanning in wavelength scanning interferometer [J]. *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, 2002, 68 (3):392-396.
- [10] HOUAIRI K. Two-wavelength interferometry; extended range and accurate optical path difference analytical estimator [J]. *Optical Society of America*, 2009, 26(12):2503-2511.
- [11] WARNASOORIYA N. Kim LED-based multi-wavelength phase imaging interference microscopy [J]. *Optical Society of America*, 2007, 15:9239-9247.
- [12] HATA S J, JUNICHIRO H, ICHIRO I, *et al.*. Nano-level 3-D measurement system using three wavelength laser light interference [C]. *International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2008: 721-725.
- [13] 周明宝. 干涉法表面形貌测量使用的拓展深度测量范围的方法[J]. *光学 精密工程*, 1999, 7(4):1-8.
ZHOU M B. Interference in measuring the surface topography of method to expand the depth measuring range [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(4): 1-8. (in Chinese)
- [14] 沈邦兴, 汪威, 张海波. 纳米级微间距的多波长干涉测量方法 [J]. *光学 精密工程*, 2005, 13 (supp.):103-108.
SHEN B X, WANG W, ZHANG H B. Multi-wavelength interferometry for nanometer scale spacing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13 (supp.):103-108. (in Chinese)
- [15] DOBOSZ M. Influence of laser diode wavelength tunability on the range, resolution and repeatability of interferometric distance measurement [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40:352-359.
- [16] 朱日宏, 陈磊, 王青, 等. 移相干涉测量术及其应用 [J]. *应用光学*, 2006, 27(2):85-88.
ZHU R H, CHEN L, WANG Q, *et al.*. Phase-shift interferometry and its application [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(2): 85-88. (in Chinese)
- [17] HAO Q, ZHU Q D, HU Y. Random phase-shifting interferometry without accurately controlling or calibrating the phase shifts [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8):1288-1290.
- [18] 王永伟, 艾华, 卓仁善, 等. 干涉测量波面重构 DCT 算法研究 [J]. *中国光学*, 2014, 7(6): 1012-1018.
WANG Y W, AI H, ZHOU R SH, *et al.*. Wavefront reconstruction of interferometry by DCT algorithm [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 1012-1018. (in Chinese)
- [19] GUAN X, WANG X Z, ZHAI ZH SH, *et al.*. A driving step auto-access method for single wavelength microscopic interference [J]. *SPIE*, 2014, 9276: 9276U1-9276U6.
- [20] 周浩, 王选择, 翟中生, 等. 基于圆形四象限光电探测器的条纹形状识别方法研究 [J]. *中国激光*, 2012, 39(7):181-187.
ZHOU H, WANG X Z, ZHAI ZH SH, *et al.*. Research on fringe shape recognition methods based on circular four-quadrant photoelectric detector [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(7): 181-187. (in Chinese)
- [21] 王选择, 郭军, 谢铁邦. 精密衍射光栅信号的椭圆拟合与细化校正算法 [J]. *工具技术*, 2003, 37(12): 47-49.
WANG X Z, GUO J, XIE T B. Ellipse fit algorithm and subdivision revision method of precision diffraction grating [J]. *Tool Engineering*, 2003, 37(12):47-49. (in Chinese)

作者简介:



杨练根 (1965—), 男, 湖南平江人, 博士, 教授, 1986 年、1991 年于华中理工大学分别获得学士、硕士学位, 2004 年于华中科技大学获得博士学位, 主要从事精密测量与仪器、传感器技术等方面的研究。E-mail: yanglg@mail.hbut.edu.cn



何浪 (1988—), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 2012 年于湖北工业大学获得学士学位, 主要从事精密测量等方面的工作。E-mail: 635218445@qq.com