

白光干涉三维形貌快速测量算法



雷李华^{1,2}, 李强³, 傅云霞^{1,2,*}

1. 上海市计量测试技术研究院, 上海 201203

2. 上海市在线检测与控制技术重点实验室, 上海 201203

3. 航空工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095

摘要:针对航空科学技术产业中超精密加工对微纳米尺度的测试要求,本文提出一种白光干涉三维形貌快速测量算法。该算法通过将移相扫描精相位与垂直扫描粗相位融合,得到待测样品的三维形貌测量结果,并采用二维离散差分算法判断并消除待测样品在阶跃形貌的边缘处产生的蝙蝠翼误差,得到高精度的三维形貌测量结果,试验证明该算法纵向分辨率可达亚纳米精度。

关键词:白光干涉; 三维形貌; 相位融合; 垂直扫描

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2021.03.010

航空产业的快速发展离不开材料行业的支撑^[1],随着纳米科技的快速发展,以精密与超精密加工技术、纳米制造与加工技术、微机电系统(MEMS)、纳机电系统(NEMS)为代表的微纳尺度加工技术和工艺得到快速发展,航空工业中制造的微型器件新产品与日俱增。微结构器件性能的关键影响因素之一是微观表面形貌,所以微观表面形貌的测量对航空产业尤其重要^[2]。在机械加工时,因为刀具与零件的高频摩擦会产生纳米量级的表面粗糙度,因此微观结构表面形貌测量所需的分辨率很高,这对现有的测量方法和测量精度提出了更高的要求^[3]。

白光干涉测量技术在微观结构表面形貌测量领域有着极其重要的作用,它因具有零级条纹位置明确的特点,解决了相位解包存在的 2π 模糊问题。与单色光干涉测量技术相比,白光干涉测量技术解决了待测面上相邻两点的高度必须小于 $1/4$ 波长的限制^[4];与传统的接触式测量技术相比,白光干涉测量技术有着非接触、快速、操作简单、精度高等优点,因此这些年来一直受到广泛的重视和研究^[5]。

传统的白光干涉测量技术的方法:首先,根据预设的扫描步长在一定深度范围内扫描被测物体。在扫描过程中,记录每个步长下视场中所有点的干涉光强度值,然后计算

整个扫描过程中视场上每个点的对比度变化,之后使用极值法、重心法、最小二乘拟合等算法,从对比度变化曲线中提取零光程差的位置,最后将其乘以预设的步长值以获得与视场中每个点相对应的高度值,从而获取到被测物体的三维形貌。

在处理通过扫描收集的干涉图的过程中,传统的白光干涉测量技术在对对比度信号的提取和零光程差位置的确定中存在算法误差。所以,其不如单色光干涉测量技术准确。因此,为了既能解决相位解包时的 2π 模糊问题,又能保证测量精度,一种较好的解决办法是将白光干涉测量技术与单色光干涉测量技术结合起来。

P. Sandoz等提出了白光相移干涉七帧法。该方法基于白光干涉信号的局部线性假设,将7个测量方程线性组合,合并成单色光相移干涉中的四步法进行计算。计算方法取得了不错的效果,但是测量精度不佳^[6-7]。A. Harasaki等通过研究白光干涉测量技术在测量高度小于光源相干长度的阶梯结构时发生的过冲现象,将五帧相移法与白光干涉测量技术结合,提出了增强的白光干涉测量技术,但该方法存在运行时间较长的问题^[8]。J. Niehues等与Mahr公司合作研究双波长白光干涉测量技术,并建立了一个配备有单色光

收稿日期: 2020-08-30; 退修日期: 2020-12-15; 录用日期: 2021-01-10

基金项目: 航空科学基金(201856Y5001); 国家重点研发计划项目(SQ2019YFB20002503); 国家市场监管总局科技项目(2019MK016)

*通信作者: Tel.: 13611910818 E-mail: fuyux@simt.com.cn

引用格式: Lei Lihua, Li Qiang, Fu Yunxia. Three-dimensional topography rapid measurement algorithm using white light interference[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(03): 62-70. 雷李华, 李强, 傅云霞. 白光干涉三维形貌快速测量算法[J]. 航空科学技术, 2021, 32(03): 62-70.

源和白光光源的测试系统,在测量过程中它使用单色光源的结果比较和验证白光光源的结果,可以消除测量中的一些缺陷并提高测量不确定度,但测量精度欠佳^[9]。

国内方面,谢仲业等首先使用极值法计算每个像素的零光程差的位置,然后记录相应的帧数,之后使用五步法计算每个像素的相位信息,最后将两者结合起来获得三维形貌。该方法需要收集所有需要的干涉图像,然后才能进行垂直扫描计算,之后还要执行相移干涉计算,从而使算法运行时间较长^[10]。张春熹等首先采集了所需的干涉图像,然后使用高斯函数拟合每个像素的干涉信号的包络曲线,确定零光程差和对应的帧数,之后根据帧数信息使用Carré算法来计算每个像素的相位信息。最终,将像素的相位信息与强度信息结合以获得三维形貌。该方法需要在计算强度信息之前采集所需的干涉图像,之后还要求解移相信息,故依旧存在算法运行时间长的问题^[11]。

为了进一步提高白光干涉测量技术和单色光干涉测量技术相结合的效率,本文提出了一种白光干涉三维形貌快速测量算法,该算法既缩短了测量时间,又保证了测量精度。

1 白光干涉的信号特征

1.1 白光干涉条纹模型

白光的波长范围一般为380~780nm,因为它包含了可见光的整个光谱区域,所以它的相干长度很短,在几个到十几个微米,因此只有当参考光与测试光的光程差接近于零的时候才会出现干涉条纹^[12]。当发生干涉时,在光源光谱范围内的不同波长的光均会形成一组干涉条纹,并且它们的非相干叠加会形成白光干涉条纹。由于波长不同,每个单色光的干涉条纹间距也将不同。当光程差为零时,每个单色光的零阶干涉条纹完全重叠,并且在非相干叠加之后,白光干涉信号的零阶干涉条纹具有最大的条纹对比度和光强度值。随着光程差的不断增大,每个单色光的干涉条纹的最小值和最大值交替出现,并且条纹之间的错位将变得越来越大,因此非相干叠加后白光干涉条纹的强度将不断减小并变成对比度降低的彩色条纹,直到最终消失。图1为白光干涉条纹光强度值随光程差变化的曲线。

1.2 白光干涉信号模型

根据双光束干涉理论^[13-14],当两条光束相交时,如果它们满足相干条件,则能够产生稳定的干涉条纹,干涉条纹的光强度 $I(z)$ 可以用式(1)表示:

$$I(z) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \operatorname{Re}[R(\tau)] \quad (1)$$

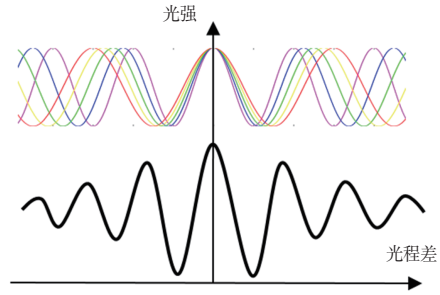


图1 白光干涉条纹光强度值随光程差变化曲线

Fig.1 Variation curve of white light interference fringe intensity value with optical path difference

式中: z 为坐标位置; I_1 和 I_2 为参考光和测试光的光强度值; $\operatorname{Re}[R(\tau)]$ 为光源自相干函数的实部; τ 为两束干涉光相差的时间延迟,它的取值是由分光板到参考板的距离 h_0 决定的,可以用式(2)表示:

$$\tau = \frac{2(z - h_0)}{c} \quad (2)$$

式中: c 为光速。用归一化的高斯函数 $B(v)$ 来表示照明光源的光谱分布,如式(3)所示:

$$B(v) = \frac{1}{2\Delta v \sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(\frac{v - v_0}{2\Delta v}\right)^2\right] \quad (3)$$

式中: v 为频率, v_0 为光源的中心频率, Δv 为光谱的半宽度。 v_0 和 Δv 可以表示为:

$$v_0 = \frac{c}{\lambda_0} \quad (4)$$

$$\Delta v = \frac{1}{2} \left(\frac{c}{\lambda_1} - \frac{c}{\lambda_2} \right) = \frac{c(\lambda_1 - \lambda_2)}{2\lambda_1 \lambda_2} = \frac{c\Delta\lambda}{2\lambda_1 \lambda_2} \approx \frac{c\Delta\lambda}{2\lambda_0^2} = \frac{c}{2l_c} \quad (5)$$

式中: λ_0 为光源的中心波长, λ_1 和 λ_2 为光源光谱宽度对应的波长边界, l_c 为光源的相干长度。

光源的自相关函数 $R(\tau)$ 可以用式(6)表示:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(v) \exp(j2\pi v \tau) dv = \exp(-4\pi^2 \tau^2 \Delta v^2) \exp(-j2\pi v_0 \tau) \quad (6)$$

式中: j 为虚数单位,将式(6)代入式(1),可得:

$$I(z) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \exp(-4\pi^2 \tau^2 \Delta v^2) \cos(2\pi v_0 \tau) \quad (7)$$

将式(2)、式(4)、式(5)代入式(7)可得:

$$I(z) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \exp\left\{-\left[(z - h_0) \left(\frac{2\pi}{l_c}\right)\right]^2\right\} \cdot \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda_0}(z - h_0)\right] \quad (8)$$

为简化表示,可以令 $g(z-h_0) = \exp\left\{-\left[(z-h_0)(2\pi/l_c)\right]^2\right\}$

为白光干涉信号的高斯包络, $I_{bg} = I_1 + I_2$ 为背景光强, $\gamma = 2\sqrt{I_1 I_2} / (I_1 + I_2)$ 为条纹可见度。考虑到实际的扫描过程和由反射引入的附加相位 α , 用 h 表示测试表面的高度信息, 则白光干涉信号的一般形式可以表示为:

$$I(z) = I_{bg} \left\{ 1 + g(z-h) \gamma \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda_0} (z-h) + \alpha \right] \right\} \quad (9)$$

在式(9)的基础上再考虑显微干涉的情况。平面反射时, 入射光场分布 $u(x, y)$ 的二维傅里叶变换为:

$$U(k_{wx}, k_{wy}) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, y) \exp[-j(k_{wx}x + k_{wy}y)] dx dy \quad (10)$$

式中: k_{wx} 和 k_{wy} 为波矢量在 x 和 y 方向上的分量。入射光经过反射率为 B_1 的反射面反射后, $u(x, y)$ 距焦点 z 处的二维傅里叶变换为:

$$U_1(k_{wx}, k_{wy}) = B_1 U(-k_{wx}, -k_{wy}) \exp[-j(2k_{wz}z + \alpha)] \quad (11)$$

式中: $\mathbf{k}_w = (k_{wx}, k_{wy}, k_{wz})$ 为波矢量, $|\mathbf{k}_w| = 2\pi/\lambda_0$ 。同理可以得到参考光反射后的二维傅里叶变换:

$$U_2(k_{wx}, k_{wy}) = B_2 U(-k_{wx}, -k_{wy}) \exp[-j(2k_{wz}h_0)] \quad (12)$$

式中: B_2 是参考板的反射率, h_0 是参考板到分光板的距离。

考虑到光学系统的旋转对称性, 为简化分析, 之后的讨论将在柱面坐标系中进行。这时, $\mathbf{k}_{wz} = |\mathbf{k}_w| \cos\sigma$, $k_{wr} = |\mathbf{k}_w| \cos\sigma$, 其中 σ 是光线与光轴的夹角。因为实际光学系统的数值孔径有限, 为 $NA = \sin\sigma_0$, 可以假设数值孔径范围内是均匀照明的, 则存在以下关系:

$$U(k_{wx}, k_{wy}) = \begin{cases} \text{常数}, & \sigma \leq \sigma_0 \\ 0, & \sigma > \sigma_0 \end{cases} \quad (13)$$

光电探测器的输出光强可以用式(14)表示:

$$I(z) = \int 2\pi |U_1 + U_2|^2 k_{wr} dk_{wr} = 2\pi |\mathbf{k}_w|^2 |U|^2 \int_0^{\sigma_0} \{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1 B_2 \cos[2k(z-h_0) \cos\sigma + \alpha]\} \sin\sigma \cos\sigma d\sigma \quad (14)$$

式中: 积分号内第一项和第二项是干涉信号的背景光强, 第三项是干涉信号的相关项, 它表示了干涉信号的变化状况, 并且携带了被测表面的高度信息。当光源光谱分布为 $F(\lambda)$ 时, 考虑到实际的扫描过程和表面高度 h , 式(14)的相关项可以改写成式(15)

$$I_{U_1 U_2}(z) = 4\pi B_1 B_2 |U|^2 \cdot$$

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{\sigma_0} |\mathbf{k}_w|^2 \left\{ \cos[2k(z-h) \cos\sigma + \alpha] \sin\sigma \cos\sigma d\sigma \right\} F(\lambda) d\lambda \quad (15)$$

式中: λ_1 和 λ_2 为白光光源的波长边界。由式(15)可知, $I_{U_1 U_2}$ 是一个包络受光源光谱形式调制的正弦或余弦函数。一般情况下, 当 $z = h - \lambda_0 \alpha / (4\pi \cos\sigma)$ 时, $I_{U_1 U_2}$ 取得最大值。但在测量均一表面时, 因为 $\lambda_0 \alpha / (4\pi \cos\sigma)$ 为常数, 所以经常可以将其忽略, 即认为式(15)在 $z = h$ 处取得最大值, 也就是白光干涉信号在零光程差的位置取得最大值。

1.3 光路结构及垂直扫描原理

试验所搭建的光路结构图如图2所示。首先使光源与照明系统相互连接, 并调节照明系统和第一分光镜的所在位置, 以使照明系统的出射光被第一分光镜接收和反射, 然后调整物镜系统的位置, 以使第一分光镜反射的光穿过物镜, 并调整参考面和第二分光镜的位置, 使物镜透射的光一部分被第二分光镜和参考面反射形成参考光, 另一部分被第二分光镜透射, 然后由被测物体反射和第二分光镜透射形成测试光, 参考光和测试光形成干涉光信号, 干涉光信号通过物镜、第一分光镜和管镜, 入射到电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)的靶面, 此时便完成了一幅干涉图像的采集。

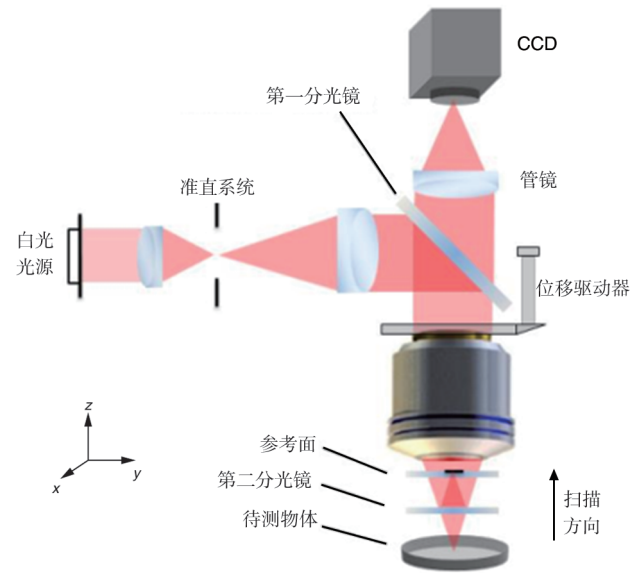


图2 光学系统结构图

Fig.2 Structure diagram of optical system

只有在光程差接近于零时白光干涉条纹才会出现, 并且零级干涉条纹的对比度最大, 很容易和其他级次的条纹区分开来, 所以可以依据这一特点, 通过垂直扫描技术来

完成待测物体表面微观形貌的测量。垂直扫描技术的测量原理如下:计算机控制位移台,沿垂直光轴方向推动被测物体移动,并在每次移动时使用 CCD 记录干涉图像。对于待测表面上的每个目标点,在垂直扫描过程中,干涉光强度曲线如图 1 所示。重心法可用于计算光强度曲线的峰值位置,即该点的零光程差位置,而待测面内任意两点的相对高度即为两点的相对零光程差位置,测量原理的示意图如图 3 所示。A 和 B 的相对高度是两点的相对零光程差位置。

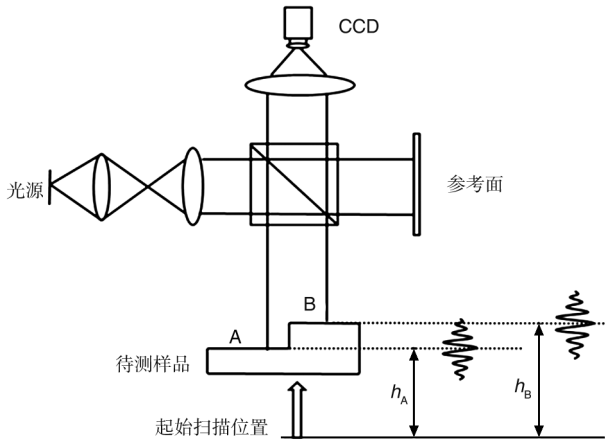


图3 垂直扫描技术测量三维形貌原理图

Fig.3 Schematic diagram of vertical scanning technology to measure three-dimensional topography

2 三维形貌快速复原算法

算法的好坏往往会直接决定一种技术的精度和速度^[15],垂直扫描技术在对采集的干涉图进行处理的过程中,由于对比度信号的提取和零光程差位置的确定都存在算法原理性的误差,所以其测量精度不高。而本文提出的白光三维形貌快速测量算法在垂直扫描的基础上融合了相位信息,提高了测量精度,而且可以同时计算强度和相位信息,提高了算法运行速度。本文提出的白光干涉三维形貌快速测量算法的流程图如图 4 所示。

白光干涉三维形貌快速测量算法的具体步骤如下:

(1)在干涉图像采集过程中,扫描系统由控制系统和数据处理系统控制,使其在指定的总行程内按照 $\pi/2$ 的相位步长执行时序垂直扫描,并且每次扫描均由 CCD 记录一幅干涉图像。其中,总行程由需要的干涉图像的数量与 $\pi/2$ 的相位步长对应的步距的乘积确定。

(2)在执行时序垂直扫描和记录干涉图像的同时,还计算采集的干涉图像的对比度。当采集到第 7 幅干涉图时,

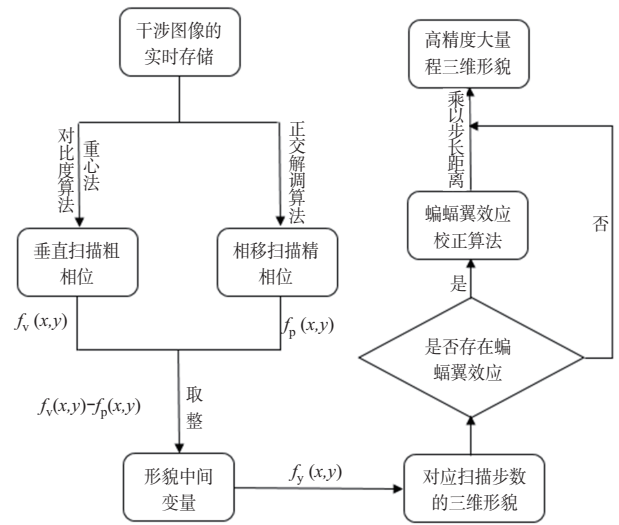


图4 算法流程图

Fig.4 Flow chart of the algorithm

第 1~7 幅干涉图被视作一个干涉图序列,并使用对比度算法来计算第 4 幅干涉图的对比度。当采集到第 8 幅干涉图时,第 2~8 幅干涉图被视作一个干涉图序列,并使用对比度算法来计算第 5 幅干涉图的对比度。依此类推,计算出全部干涉图的对比度,便可以获取所有干涉图的视场中每一个像素的对比度变化信号,对比度算法表达式如下:

$$M(i) = \sqrt{(7 \times I_{i-1} + I_{i+3} - I_{i-3} - 7 \times I_{i+1})^2 + (8 \times I_i - 4 \times I_{i-2} - 4 \times I_{i+2})^2} \quad (16)$$

式中: i 为干涉图像的序号; I_i 为该像素点在第 i 幅干涉图像的光强,该算法在视场上选择与某一像素对应的第 i 幅干涉图像,并选择其前后总共 7 幅干涉图像,以计算第 i 幅干涉图像中该像素的对比度,然后依据相同的方法计算视场上所有像素的对比度。在收集和计算干涉图的过程中,由于没有计算前三幅和最后三幅干涉图的对比度,所以将这些图像中所有像素的对比度设置为 0。由此可知,该算法在完成所有干涉图像采集的同时,可以获得视场上每个像素的对比度变化信号。

此后,采用重心法对像素点的对比度变化信号来进行处理,从而可以得到视场上全部像素点的对比度最大的位置 h ,重心法的表达式如下:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^N |M_i| \times i}{\sum_{i=1}^N |M_i|} \quad (17)$$

式中: M_i 为某一像素点在第 i 幅干涉图上的对比度, N 为干涉图的总数量。依据此法,可以计算获得视场上全部像素

点的对比度取最大值的位置,也即可以得到被测物体表面上各点对应于扫描步数的垂直扫描粗相位 $f_v(x,y)$,如图5所示。

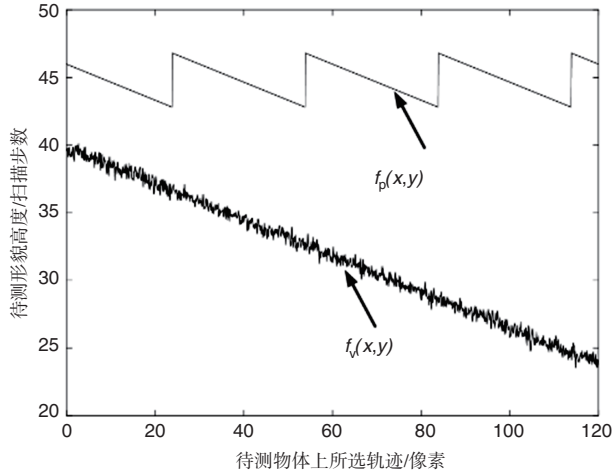


图5 对应扫描步数的精相位与粗相位

Fig.5 Fine phase and coarse phase corresponding to the number of scan steps

(3)在通过按时间序列的垂直扫描来记录干涉图的过程中,对于 $\pi/2$ 的每个相位步进存储一幅干涉图。存储第4幅干涉图时,使用四步移相算法求解一次相位,之后每次存储4幅干涉图,都使用四步移相算法求解一次相位,扫描完成后,对多次获得的相位结果求平均值并用作移相扫描精相位。这样,可以将获得相位的计算整合到时序垂直扫描和存储干涉图的过程中,以实现快速测量。采用正交解调算法对时序扫描过程中的4幅连续干涉图进行求解,以获得视场中某个像素的相位信号。正交解调算法如下:

$$\Phi = \text{atan} \frac{\sum_{n=1}^N I(n) \sin(n\Delta\Phi_0)}{\sum_{n=1}^N I(n) \cos(n\Delta\Phi_0)} \quad (18)$$

式中: $I(n)$ 为视场上某一像素在第 n 幅干涉图上的光强; N 为干涉图的总数量。依此类推,可以计算获得视场上全部像素点的高精度零光程差位置,也即可以得到对应于扫描步数的移相扫描精相位 $f_p(x,y)$,如图5所示。

步骤(2)和步骤(3)是同步进行的,也就是说可以同时计算得到对应于扫描步数的垂直扫描粗相位 $f_v(x,y)$ 和对应于扫描步数的移相扫描精相位 $f_p(x,y)$ 。因为该算法解决了必须先计算 $f_v(x,y)$ 才能计算 $f_p(x,y)$ 的难题,所以该算法的速度得到显著提升。

(4)将对应于扫描步数的垂直扫描粗相位减去对应于

扫描步数的移相扫描精相位得到 $f_v(x,y)-f_p(x,y)$,然后使其对4的倍数取整,得到 $f_r(x,y)$,也即形貌中间变量1,如图6所示。其中对4的倍数取整的计算公式如下:

$$f_r(x,y) = 4 \times \text{round} \left[\frac{f_v(x,y) - f_p(x,y)}{4} \right] \quad (19)$$

式中:round函数是完成四舍五入操作。

然后计算 $f_v(x,y)-f_p(x,y)-2$,并使其对4的倍数进行取整,得到 $f_t(x,y)$,也即形貌中间变量2,如图7所示。

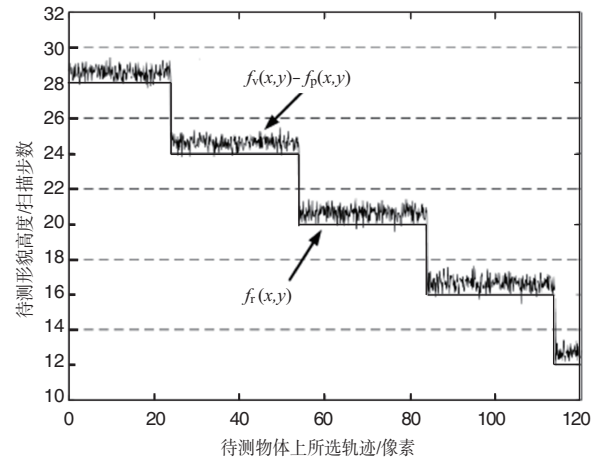


图6 中间形貌变量1

Fig.6 Intermediate topography variables 1

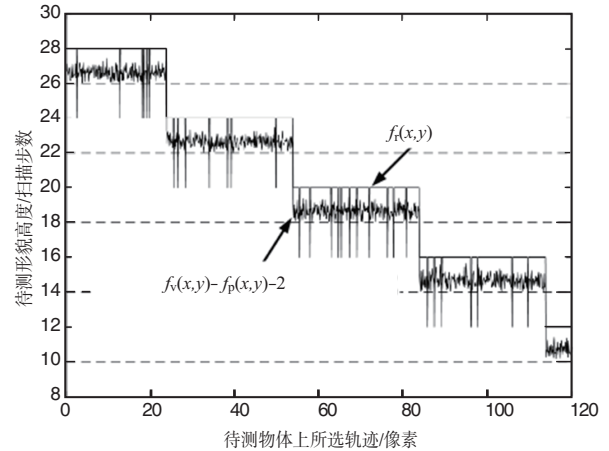


图7 中间形貌变量2

Fig.7 Intermediate topography variables 2

计算比较两个中间形貌变量与 $f_v(x,y)-f_p(x,y)$ 差值的绝对值,并将较小的那个作为最终形貌中间变量 $f_i(x,y)$ 。之后,将最终形貌中间变量加上对应于扫描步数的移相扫描精相位,便可获得对应于扫描步数的三维形貌 $f_h(x,y)$,如图8所示。

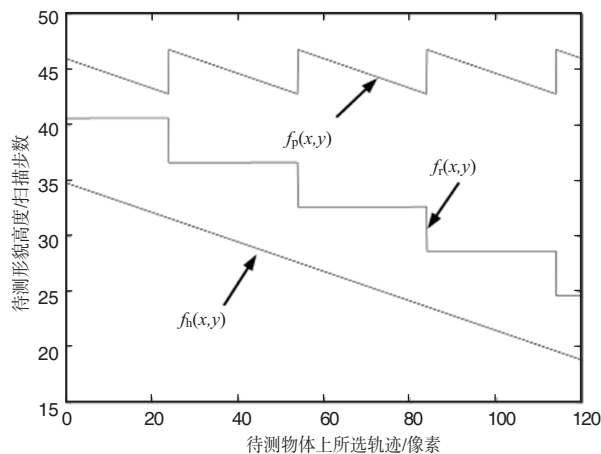


图8 对应扫描步长的三维形貌

Fig.8 Three-dimensional topography corresponding to the scan step

(5)判断对应于扫描步数的三维形貌在阶跃处是否存在蝙蝠翼效应,如果判断为存在蝙蝠翼效应,则使用蝙蝠翼修正算法对蝙蝠翼效应进行校正。其中,蝙蝠翼效应校正算法如下:先将对应于扫描步数的相位三维形貌进行横向差分处理,得到某一像素和其左右像素形貌高度的差值,将两个差值相乘,然后判断乘积结果。如果小于 -0.25 ,则认为存在蝙蝠翼效应。此时,将像素的形貌高度值替换为左右像素的形貌高度值总和的一半,之后采用相同的方法对三维形貌进行纵向差分处理以及蝙蝠效应的判断和校正。在处理了视场中的所有像素后,便可获得消除了蝙蝠效应的对应于扫描步数的三维形貌。

(6)将消除了蝙蝠翼效应的对应于扫描步数的三维形貌乘以 $\pi/2$ 相位步长对应的距离,便可获得高精度大量程的三维形貌。

为了对比各种算法的优劣,在采样间隔相同的情况下,比较了不同算法计算条纹调制包络所需的计算量,并比较了它们辨别条纹调制包络峰值所需的计算量,结果见表1和表2。表中, N 是干涉图的采样数据点数, J 是相干包络包含的采样数据点数,用来确定 Hilbert 长度、小波长度以及空间频域算法中用最小二乘法计算相位斜率所需的点数。

对于相干长度为 $1.2\mu\text{m}$ 的光源, J 为 30。从表 1 和表 2 可以看出,重心法和相移算法的计算量最小,速度最快,而本文提出的白光干涉三维形貌快速测量算法正是基于重心法和相移算法进行相干信息和相位信息的求解,且以上两种信息的提取与干涉图像的采集同步进行,在扫描过程结束时即可得到计算结果。相较于其他算法需在完整的扫描

过程结束之后才可进行计算而言,本算法可实现对形貌的实时检测,并通过结合相干与相位信息复原形貌同时体现出高效与高精度的优势。

表 1 不同算法计算条纹调制包络所需的计算量

Table 1 The amount of calculation required for different algorithms to calculate the fringe modulation envelope

算 法	所需加减数	所需乘除数
重心法	$N-1$	0
相移算法	$3N$	$2N$
Fourier 变换法	$2N\log_2 N$	$N\log_2 N$
Hilbert 变换法	$N(J-3)/4$	$N(J-3)/2$
小波变换法	$N(J-1)$	NJ
空间频域算法	$N\log_2 N$	$N\log_2 N/2$

表 2 不同算法辨别条纹调制包络峰值所需的计算量

Table 2 The amount of calculation required for different algorithms to identify the peak of the fringe modulation envelope

算 法	所需加减数	所需乘除数	其他运算
重心法	$2(N-2)$	N	0
相移算法	5	3	5
Fourier 变换法	$2(N-1)$	$N+1$	0
Hilbert 变换法	$2(N-1)$	$N+1$	0
小波变换法	$2(N-1)$	$N+1$	0
空间频域算法	$4(J-1)$	$5(J+1)$	0

3 试验验证

为了证实本文提出的白光干涉三维形貌快速测量算法的可行性,我们进行试验实际测量了待测物体表面的三维形貌。试验中一台白光干涉仪用来获取白光干涉图,它的光源是中心波长为 576nm 的白光,如图 2 所示,入射光通过准直系统和第一分束镜后,再通过米劳型干涉物镜(Nikon, $20\times$),最后通过 CCD(GEV-B1410M-SC000, IMPERX)接收产生的干涉图像。待测样本是通过压电陶瓷材料(piezoelectric ceramic material, PZT)驱动的, PZT 的扫描步长设定为 $\pi/2$ 的相位步进量(对应的步长距离为 72nm),在扫描总长度为 $8.64\mu\text{m}$ 的范围内采集 120 幅干涉图像进行计算。待测样品是一个高度为 400nm 的台阶板。

采用本文提出的白光干涉三维形貌快速测量算法与传统的垂直扫描测量算法得到的台阶板示意图如图 9 和图 10 所示。

通过图 10 可以明显地看出,垂直扫描测量算法得到的形

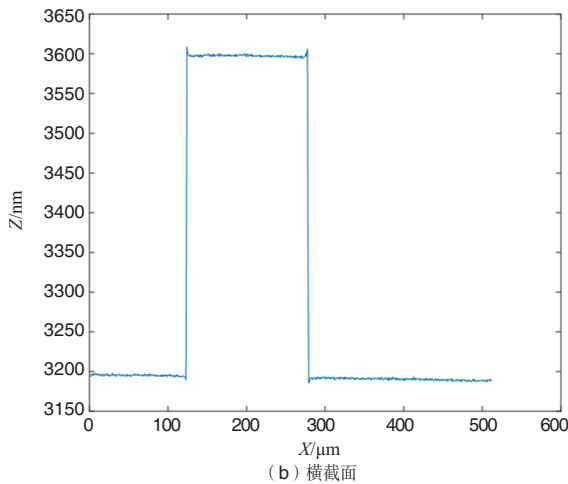
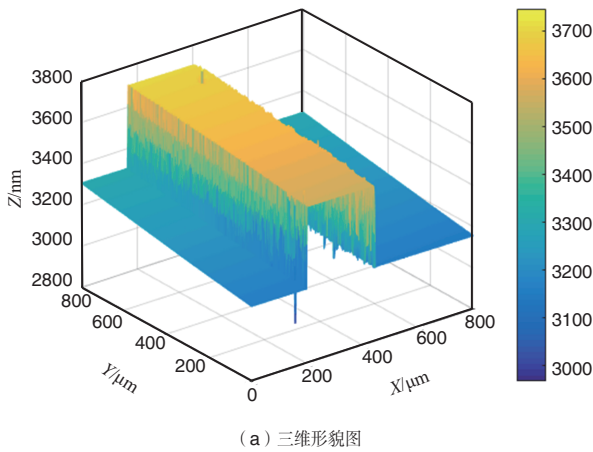


图9 白光干涉三维形貌快速测量算法得到的台阶板三维形貌图及其横截面

Fig.9 The three-dimensional topography and cross-section of the step obtained by the white light interference three-dimensional topography rapid measurement algorithm

貌图在台阶边缘处有许多毛刺产生,即出现了所谓的“蝠翼现象”。对“蝠翼现象”的形成机理,目前比较一致的观点是,该现象来自于测量高度小于光源相干长度结构时台阶边缘出现的衍射现象,它是使用垂直扫描法测量这类结构时的固有缺陷,但是对于其具体的形成原因科学界目前缺乏明确的认识^[7]。而采用本文提出的白光干涉三维形貌快速测量算法得到的形貌图在台阶边缘处几乎没有出现“蝠翼现象”。

采用本文提出的白光三维形貌快速测量算法与传统的垂直扫描测量算法对400nm的台阶板进行测量,随机选取所得结果的7个不同的位置测量台阶高度,两种方法测得的台阶板的高度和误差见表3和表4。由表3和表4可知,白光干涉三维形貌快速测量算法的纵向分辨率可达亚纳米精度,平

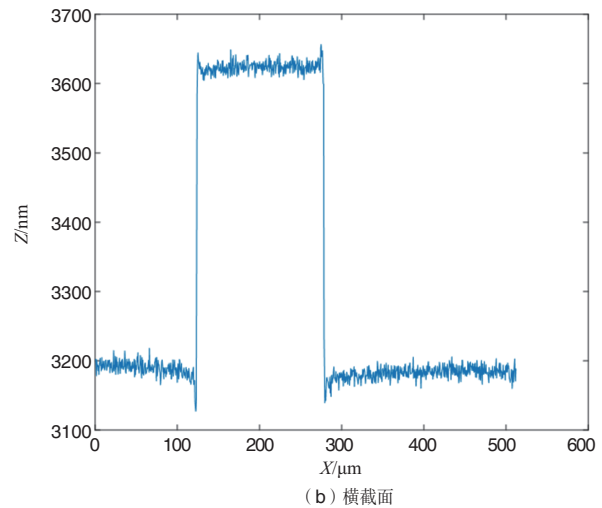
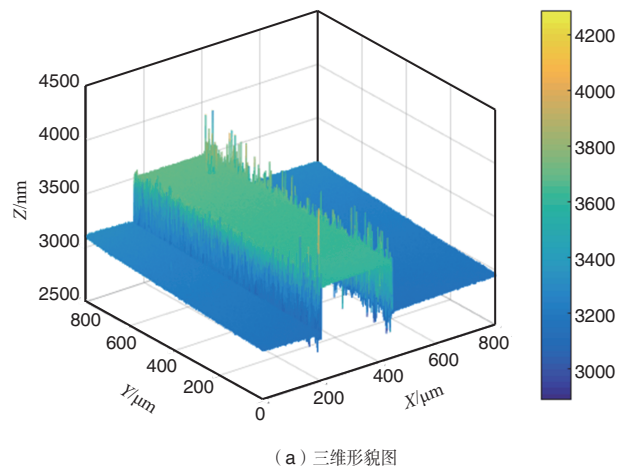


图10 垂直扫描测量算法得到的台阶板三维形貌图及其横截面

Fig.10 Three-dimensional topography and cross-section of the step obtained by the vertical scanning measurement algorithm

均误差只有0.94%,相比于垂直扫描,测量精度大大提升。试验还对周期性结构样品进行了白光三维形貌快速测量算法与传统的垂直扫描测量算法的对比,如图11所示。

4 结束语

针对目前航空产业对微纳米尺度三维形貌测量的需求,本文分析了现有测量技术的不足,并在此基础上提出了白光干涉三维形貌快速测量算法。该算法将白光干涉测量技术和单色光相干测量技术相结合,提高了测量精度,且在扫描过程中同时计算得到垂直扫描粗相位和移相扫描精相位,显著提升了算法速度,融合垂直扫描粗相位和移相扫描精相位后便可得到待测样品的三维形貌测量结果。最后通

表3 白光干涉三维形貌快速测量算法的测量结果

Table 3 The measurement results of the white interference light three-dimensional topography rapid measurement algorithm

位置	上表面相对高度/nm	下表面相对高度/nm	台阶板高度/nm	相对误差/%	平均误差/%
1	3400.6	2995.1	405.5	1.38	0.94
2	3399.3	2995.2	404.1	1.02	
3	3396.5	2994.3	402.2	0.55	
4	3398.5	2996	402.5	0.63	
5	3397.5	2995.1	402.4	0.6	
6	3398.4	2994.9	403.5	0.88	
7	3397.8	2995.6	402.2	0.55	

表4 垂直扫描测量算法的测量结果

Table 4 Measurement results of vertical scanning measurement algorithm

位置	上表面相对高度/nm	下表面相对高度/nm	台阶板高度/nm	相对误差/%	平均误差/%
1	3432.5	3002.6	429.9	7.48	7.59
2	3435.8	2993.2	442.6	10.65	
3	3408.2	2993.5	414.7	3.68	
4	3436.1	3005.9	430.2	7.55	
5	3438.2	3001.7	436.5	9.13	
6	3435.4	2998.1	437.3	9.33	
7	3421.8	3000.5	421.3	5.33	

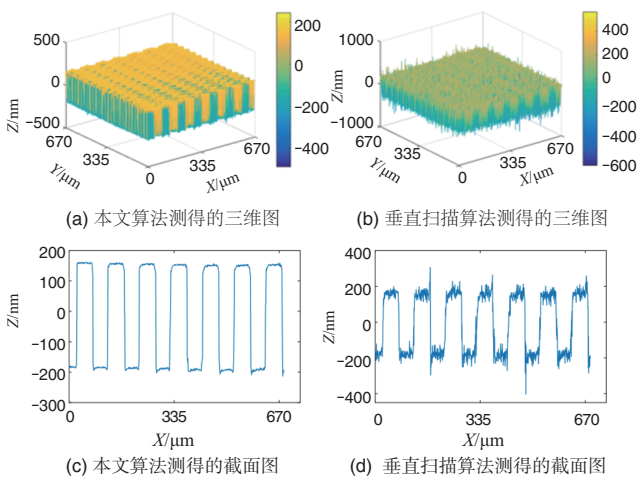


图11 周期性结构测量对比

Fig.11 Periodic structure measurement comparison chart

过试验比较了该算法与传统的垂直扫描测量方法,试验表明,本文提出的白光干涉三维形貌快速测量算法,可以明显地消除“蝠翼现象”,且测量精度获得了较大的提升。

参考文献

[1] 赵超越,李艳军,曹愈远,等.基于K-means聚类的航空复合材料敲击检测研究[J].航空科学技术,2019,30(10):45-49.
Zhao Chaoyue, Li Yanjun, Cao Yuyuan, et al. K-means clustering-based knock detection of aviation composite materials[J].Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(10): 45-49. (in Chinese)

[2] 殷纯永.现代干涉测量技术[M].天津:天津大学出版社,1999.
Yin Chunyong. Modern interferometry technology[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999.(in Chinese)

[3] 张也哈,崔彤,张杨,等.表面粗糙度三维测量和评定的研究[J].计量与测试技术,2012,39(11):31-34.
Zhang Yehan, Cui Tong, Zhang Yang, et al. Research on three-dimensional measurement and evaluation of surface roughness [J]. Metrology and Testing Technology, 2012, 39 (11): 31-34. (in Chinese)

[4] Kino G S, Chim S S. Mirau correlation microscope[J]. Applied Optics, 1990,29(26): 3775-3783.

[5] Harasaki A, Wyant J C. Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry[J]. Applied Optics, 2000, 39(13): 2101-2106.

[6] Sandoz P, Devillers R, Plata A. Unambiguous profilometry by fringe-order identification in white-light phase-shifting interferometry[J]. Journal of Modern Optics, 1997, 44 (3) : 519-534.

[7] Sandoz P. An algorithm for profilometry by white-light phase-shiftingpg interferometry[J]. Journal of Modern Optics, 1996, 43(8): 1545-1554.

[8] Harasaki A, Schmit J, Wyant J C. Improved vertical-scanning interferometry[J]. Applied Optics, 2000, 39 (13): 2107-2115.

[9] Niehues J, Lehmann P, Bobey K. Dual-wavelength vertical scanning low-coherence interferometric microscope[J]. Applied Optics, 2007, 46 (29): 7141-7148.

[10] 谢仲业,周毅,陈楚怡,等.一种结合相移干涉与垂直扫描干涉的3D形貌恢复方法:中国,CN106767496A[P].2017-05-31.
Xie Zhongye, Zhou Yi, Chen Chuyi, et al. A 3D shape restoration method combining phase shift interference and vertical scanning interference: China, CN106767496A[P]. 2017-05-31. (in Chinese)

- [11] 张春熹, 李豪伟, 李慧鹏, 等. 一种适用于表面形貌检测的白光干涉三维重建方法: 中国, CN108759709A [P]. 2018-11-06.
Zhang Chunxi, Li Haowei, Li Huipeng, et al. A white light interference three-dimensional reconstruction method suitable for surface topography detection: China, CN108759709A[P]. 2018-11-06. (in Chinese)
- [12] 何永辉, 蒋剑峰, 赵万生. 基于扫描白光干涉法的表面三维轮廓仪[J]. 光学技术, 2001, 27(2): 150-152.
He Yonghui, Jiang Jianfeng, Zhao Wansheng. Surface three-dimensional profiler based on scanning white light interferometry [J]. Optics Technology, 2001, 27(2): 150-152. (in Chinese)
- [13] Kino G S, Chim S S C. Mirau correlation microscope[J]. Applied Optics, 1990, 29(26): 3775-3783.
- [14] 郁道银, 谭恒英. 工程光学[M]. 北京: 中国机械工业出版社, 2003.
Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering optics [M]. Beijing: China Machinery Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [15] 冯廷智, 成红芳. 基于遗传算法的航空机载软件测试用例优先级技术研究[J]. 航空科学技术, 2018, 29(11): 60-65.
Feng Tingzhi, Cheng Hongfang. Research on priority technology of aviation airborne software test cases based on genetic algorithm[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(11): 60-65. (in Chinese) (责任编辑 王为)

作者简介

雷李华(1985-)男, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 微纳米计量。

Tel: 13636412909

E-mail: leilh@simt.com.cn

傅云霞(1964-)女, 硕士, 研究员。主要研究方向: 几何量精密计量。

Tel: 15901823989

E-mail: fuyx@sim.com.cn

Three-dimensional Topography Rapid Measurement Algorithm Using White Light Interference

Lei Lihua^{1,2}, Li Qiang³, Fu Yunxia^{1,2,*}

1. Shanghai Insistute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China

2. Shanghai Key Laboratory of Online Test and Control Technology, Shanghai 201203, China

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Metrology & Calibration, AVIC Changcheng Insistute of Metrology and Measurement, Beijing 100095, China

Abstract: This paper propose a white light three-dimensional topography rapid measurement algorithm, aiming at the demand of ultra-precision machining in the aviation science and technology industry on the micro-nano scale. The three-dimensional profile is accomplished by fusing the fine phase obtained from the phase-shift scanning with the coarse phase from the vertical scanning. The bat wing error at the edge of the step is distinguished and then eliminated by utilizing the two-dimensional discrete difference method. The experiment results demonstrate that the sub-nanometer measurement precision can be achieved by the proposed algorithm.

Key Words: white light interference; profile measurement; phase fusion; vertical scanning

Received: 2020-08-30; **Revised:** 2020-12-15; **Accepted:** 2021-01-10

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (201856Y5001); National Key R&D Program of China (SQ2019YFB20002503); Science and Technology Program of the State Administration for Market Regulation (2019MK016)

*Corresponding author. Tel. : 13611910818 E-mail: fuyux@simt.com.cn