

•测试、试验与仿真•

## 白光干涉法三维面型重构仿真研究

杨宝磊, 李 丹, 朱南南, 曹增辉, 孙腾飞, 郑田甜, 张 骏

(烟台大学光电信息科学技术学院, 山东 烟台 264005)

**摘 要:** 采用 Twyman 光路结构和 LED 为光源进行白光干涉三维测量, 对干涉图像及元件面型的重构算法进行了仿真研究。使用 Matlab 软件, 选取了两种面型结构函数, 仿真得出重构的面型, 选取 5 个参考点进行了对比。研究结果表明, 白光干涉测量具有高精度、测量时间短、相对误差小于 0.5%。

**关键词:** 白光干涉测量; 三维面型重构; Matlab; 相对误差

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-03-0071-05

## Research on Three-dimensional Surface Reconstruction Method of White Light Interferometry

YANG Bao-lei, LI Dan, ZHU Nan-nan, CAO Zeng-hui, SUN Teng-fei, ZHENG Tian-tian, ZHANG Jun

(School of Opto-electronic Information Science & Technology, Yantai University, Yantai 264005, China)

**Abstract:** Twyman optical circuit structure and LED light source are used in white light three-dimensional interferometry. The reconstruction algorithms of interference images and component surface are simulated. Using Matlab software, two kinds of surface structure functions are chosen to simulate the reconstructed surface and choose five reference points to compare. Research results show that white interferometry has high accuracy, short measurement time and relative error is less than 0.5%.

**Key words:** white light interferometry; three-dimensional surface reconstruction; Matlab; relative error

在精密仪器组装和光学表面加工过程中, 掌握元件表面几何和表面纹理具有重要意义。三维测量技术是一种测量面型结构的立体可视化技术, 分为接触式和非接触式两种<sup>[1]</sup>。接触式扫描大多是逐点扫描, 测量时容易对元件造成损坏, 且测量速度相对非接触测量要慢, 尤其在测量有沟槽, 凸凹不平不连续的表面时具有很大缺陷。非接触测量是在不需要接触被测物体的前提下进行精确测量, 对于不连续的电子元件和光学元件的表面可进行很好的测量, 而且具有测量速度快, 精确度高, 信息量大等优点, 是一种较为理想的三维面形测量方法。

光学干涉测量方法<sup>[2-7]</sup>是用相干光照射表面, 反射光与参考光叠加, 当两束光满足干涉条件, 则会产

生干涉条纹, 干涉条纹的相位信息对应着表面的轮廓变化。国内外基于光的干涉原理提出了很多测量方法。如相移干涉法<sup>[8-9]</sup>、外差干涉法<sup>[10-13]</sup>、激光全息干涉<sup>[14-19]</sup>、散斑干涉<sup>[20]</sup>等。在相移干涉显微技术和白光干涉技术的基础上, Matsui 提出了一种新的光学非接触测量方法垂直扫描白光干涉法<sup>[21]</sup>。该测量方法具有高精度、大量程、测量表面时间短等优点。

以 Twyman 干涉仪为模型, 利用了垂直扫描白光干涉法的原理, 通过 Matlab 仿真得到干涉图, 并由干涉图得到元件的面型结构。

### 1 原理分析

白光干涉技术采用白光作为光源, 其特点是此

光谱范围很宽,但相干长度很短。只有在物光和参考光等光程位置时,才能明显地观察到干涉条纹。通过分析干涉条纹零光程差位置获取样品表面高度信息,实现样品表面的三维测量。光学干涉法采用泰曼光路结构如图1所示。LED作为点光源发出的球面波经凸透镜汇聚,穿过狭缝再经透镜准直后,经BS分为两束,分别入射到动镜(moving mirror)和静镜(still mirror),BS为分束棱镜。待测元件放置于静镜上,动镜用伺服电机控制,可以沿镜面垂直方向平移。成像物镜将样品的像成于面阵CCD光接收面上。

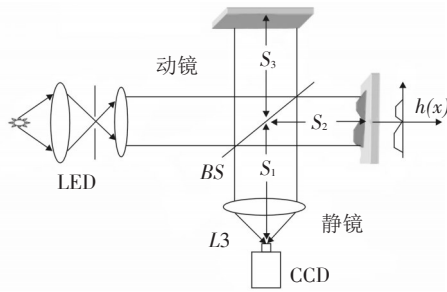


图1 泰曼干涉仪光路图

经BS分束后,其中一束照射到动镜并反射到CCD上,作为参考光,其光程为 $S_1+2S_3$ ;另一束照射到元件上并反射到CCD上,作为物光,其光程为 $S_1+2S_2$ 。参考光与物光的复振幅分别表示如下

$$\mu_1 = A_1 \exp[ik(S_1 + 2S_3)] \quad (1)$$

$$\mu_2 = A_2 \rho \exp[ik(S_1 + 2S_2 + 2h(x, y))] \quad (2)$$

式中, $k$ 为波数( $2\pi/\lambda$ ); $\rho(x, y)$ 是元件表面的反射率; $h(x, y)$ 为元件表面相对于表面高度函数; $A_1, A_2$ 分别是经BS分束后参考光、物光的振幅。两束光干涉得到的复振幅为

$$u = A_1 \exp[ik(S_1 + 2S_3)] + \quad (3)$$

$$A_2 \rho \exp[ik(S_1 + 2S_2 + 2h(x, y))]$$

两束光干涉后得到的干涉强度为

$$I = uu^* = A_1^2 + A_2^2 \rho^2 + 2A_1 A_2 \rho \cos \cdot \quad (4)$$

$$[2k(S_3 - S_2) - 2h(x, y)]$$

设LED光源的归一化功率谱分布为 $P(v)$ , $v$ 为光的频率,对应的振幅设为 $p(v) = \sqrt{P(v)}$ 。设经过分束棱镜后两束光振幅相等,为 $\frac{1}{2}p(v)$ 。对于任意一点 $(x, y)$ ,光干涉总的光强为

$$I(x, y, v, \Delta s) = \frac{1}{4} p(v)(1 + \rho(x, y, v)) + \quad (5)$$

$$\frac{1}{2} p(v) \rho(x, y, v) \cos[2k(2h(x, y) - 2\Delta s)]$$

式中, $\Delta s$ 为 $S_3$ 与 $S_2$ 的光程差。LED光源发射的光谱是连续的,对于所有波长的光强为

$$I(x, y, v, \Delta s) = \frac{1}{4} \int [p(v)(1 + \rho(x, y, v))] dv + \quad (6)$$

$$\frac{1}{2} \int \{p(v) \rho(x, y, v) \cos[2k(2h(x, y) - 2\Delta s)]\} dv$$

由此可以看出,对于连续谱分布,当元件上的一点 $h(x, y)$ 等于动镜相对静镜移动的距离 $\Delta s$ 时,即 $h(x, y) = \Delta s$ ,此时各波长的零级条纹完全重合,所有频率的波的干涉获得最大值 $I_{\max}$ ,干涉对比度最大,且随着 $|h(x, y) - \Delta s|$ 变化,干涉对比度将减小。

## 2 重构元件表面算法

动镜在伺服电机的控制下匀速运动,设动镜速度为 $v$ ,每隔 $\Delta t$ 时间CCD记录一次干涉图,且按256等级把干涉条纹的强度储存到电脑硬盘中,通过Matlab软件可读出干涉图的灰度值。由于CCD的像素是间隔的,所以采集的干涉图会是离散化的,假设像素间隔为 $d$ ,那么CCD采集的干涉强度可写为 $I(md, nd, v\Delta t)$ 且 $m, n$ 为正整数。元件表面重构算法流程如下:

(1)初始值。把每幅干涉图转换成灰度值,此时所有干涉图的灰度值构成一个三维数组 $I(md, nd, v\Delta t)$ ;

(2)遍历每幅干涉图同一像素的灰度值。对于任意一点 $(m, n)$ ,从三维数组 $I(md, nd, v\Delta t)$ 中选取一维灰度值 $I_{mn}(v\Delta t)$ ;

(3)计算出所有干涉图中的同一像素最大的灰度值,并记录相对应的动静移动距离 $v\Delta t$ ,该移动距离即为元件面型对应点的高度 $h(x, y)$ ;

(4)根据式(3)依次对每个像素进行计算,记录每个像素对应的移动距离;

(5)根据记录的移动距离用三维面型函数绘出面形图。

## 3 模拟仿真

为了验证原理的正确性,使用Matlab软件进行模拟仿真。根据上述算法要求,首先要计算光强干

涉分布三维数组。获取三维干涉图的流程如图2。从图2可以看出,需要知道动镜运动的时间,元件的面型结构及反射率,CCD采样的间隔时间,才能算出光强干涉三维数组。根据流程图中的参量,设元件面型结构满足如下方程

$$h(x,y) = 2l \frac{\sin \sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{x^2 + y^2}} \mu m \quad (7)$$

可见元件面型最大高度为2 μm,元件表面各点的光谱反射率与光波频率和面型高度有关,设方程为

$$\rho(x,y,v) = \exp \left[ \frac{-(v - h(x,y) \times 10^{14})}{v_0} \right] \quad (8)$$

式中,设  $v_0 = 4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。设LED光源光谱分布为高斯分布,公式如下

$$p(v) = \exp[-(v - v_1)/v_2] \quad (9)$$

式中,设  $v_1 = 5.5 \times 10^{14} / \text{s}$ ,  $v_2 = 4.5 \times 10^{14} / \text{s}$ 。设动镜移动总位移是6 μm,移动总时间为  $T=1 \text{ s}$ , CCD每隔  $1/6000 \text{ s}$  记录一次干涉图。程序在 Intel(R) core(TM) 2 Duo CPU 2.20 GHz, 2G内存的惠普PC上运行,约3 min得到模拟的元件面形结构。图3a模拟了元件面型结构,图3b是根据上述获取面型算法得到的面型结构。

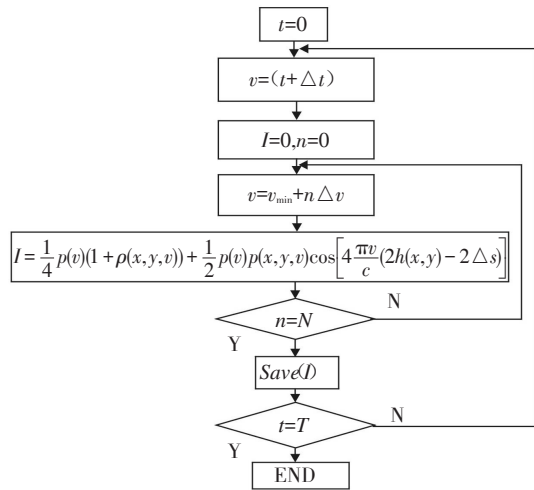


图2 干涉图获取流程图

从图3a和图3b对比中,可以看出元件面型是相似的。为了验证算法的正确性和精确性,选择图3b中的5个点与图3a中相同的点进行比较,比较结果如表1。

表1给出了图3a中的5个点的坐标的高度和对应图3b中的像素点的高度,及两者的相对误差。从表1中看出,高度的相对误差小于0.5%,且对于较高

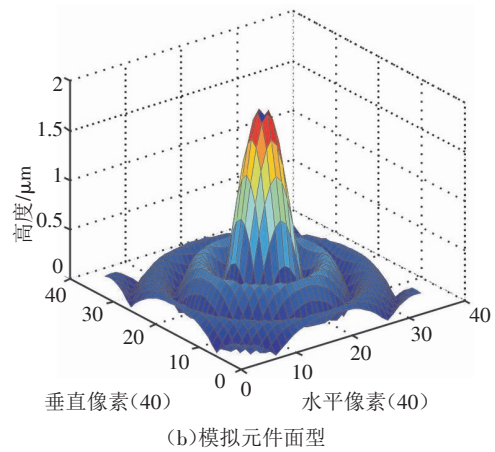
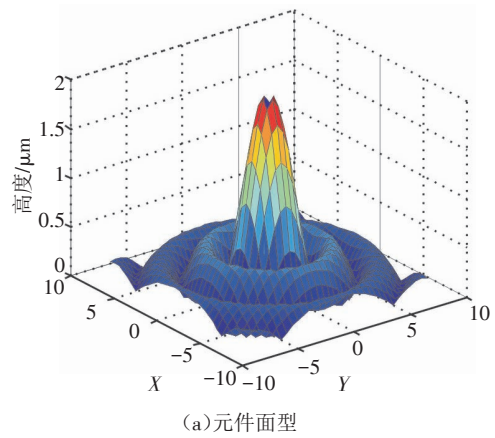


图3 元件面型与模拟元件面型对比图

的点相对误差较小,在坐标(-6,-5)点面型高度误差为1.2 nm,坐标(0.5,0.5)的高度误差为0.5 nm。图4a和图4b分别给出了CCD像元坐标(12,12)和(1,6)的干涉光强序列图。从图4中可以看出,两点强度最大值对应的序列图不同,图4a中最大值坐标位于218位置,此时对应的元件面型高度为0.218 μm,图4b中最大值坐标为59,对应的元件面型高度为0.059 μm。由此看出不同的高度,对应的光强序列图也不同,反应了理论依据。

表1 模拟面型和元件面型的比较

图3a坐标	高度/μm	图3b坐标	高度/μm	相对误差/(%)
(-6,6)	0.190 3	(5,29)	0.191 0	0.11
(-6,-5)	0.255 8	(5,7)	0.257 0	0.47
(3,3)	0.420 3	(23,23)	0.421 0	0.17
(3,-2)	0.248 2	(23,13)	0.249 0	0.32
(0.5,0.5)	1.837 5	(18,18)	1.838 0	0.02

在其他参数不变条件下,选择另外一种面型验

证算法的准确性,假设元件为反射型物体,面型最大高度为2 μm,其面型函数为

$$h(x,y) = 2|\sin(\pi x)\cos(2\pi y)um| \quad (10)$$

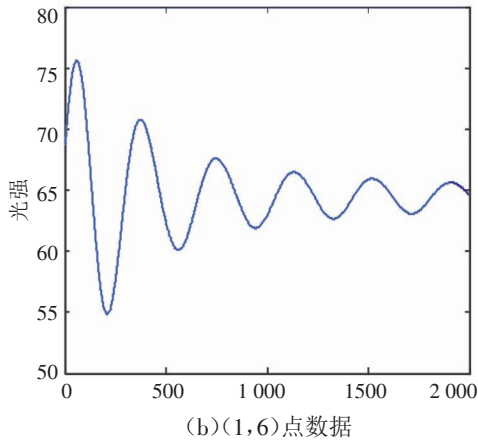
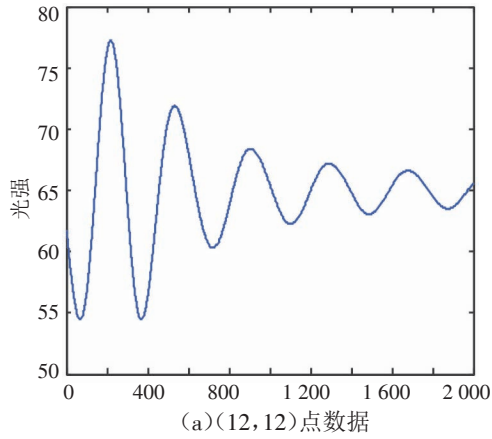


图4 不同像元干涉光强序列图

程序运行在同一台计算机上,大约3 min得到面型如图5所示。模拟面型和元件面型比较结果如表2。

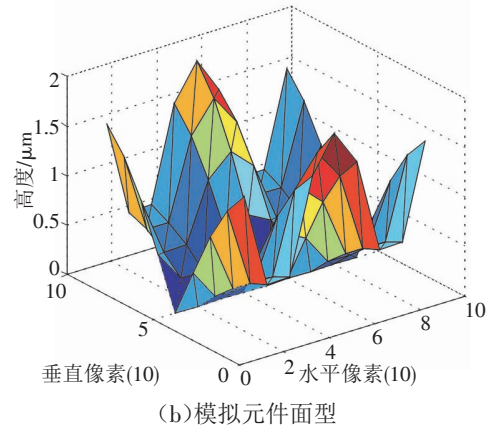
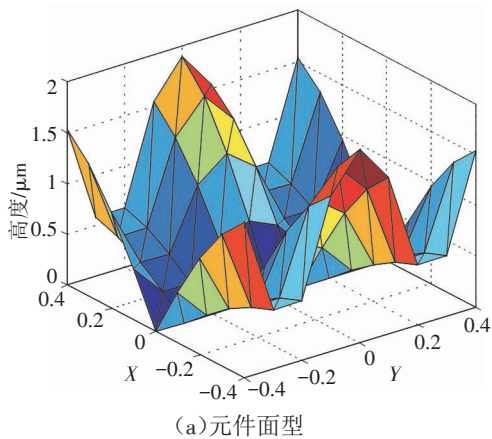


图5 元件面型与模拟元件面型对比图

表2 模拟面型和元件面型的比较

图5a坐标	高度/μm	图5b坐标	高度/μm	相对误差/(%)
(0.4,0.4)	1.538 8	(9,9)	1.539 0	0.12
(0.4,0.2)	0.587 8	(9,7)	0.588 4	0.1
(-0.2,0.2)	0.363 3	(3,7)	0.362 3	0.28
(-0.4,0.3)	0.587 6	(1,8)	0.588 6	0.17
(-0.4,0.1)	1.538 7	(1,6)	1.539 9	0.08

表2给出了图5a中的5个点的坐标的高度 and 对应图5b中的像素点的高度及相对误差。从表2中看出,高度的相对误差小于0.4%,且对于较高的点相对误差较小,在坐标(-6,-5)点面型高度误差为1.2 nm,坐标(0.5,0.5)的高度误差为0.5 nm。

## 4 结论

通过上面两种面型的模拟仿真和高度对比分析,可见采用基于白光LED干涉技术可以准确地重构面型结构,通过模拟证实了干涉测量技术能够满足表面微观形貌的高精度要求。这一技术对于微型结构测量,尤其有利于有沟槽或阶梯等不连续表面的元件面形和光学元件表面的测量。从上述的仿真研究可以看出,准确确定干涉条纹零光程差位置是干涉测量技术的关键,这就要求CCD具有更高的灵敏性和足够小的采样间隔,对硬件要求更高。

## 参考文献

[1] 朱德华.接触式测量技术和非接触测量技术的融合[J].技术与市场, 2012, 19(5): 171.

- [2] 张耀宁,程光祖.激光镜面粗糙度的干涉测量[J].中国激光,1999,26(2):141-144.
- [3] 葛锦蔓,苏俊宏.干涉图处理技术在膜厚测量中的应用[J].红外与激光工程,2009,38:213-216.
- [4] HSU Cheng-Chih, LEE Ju-Yi, SU Der-Chin. Thickness and optical constants measurement of thin film growth with circular heterodyne interferometry [J]. Thin Solid Films, 2005, 491: 91-95.
- [5] 薛晨阳,孔繁华,张文栋,等.利用白光干涉原理测量MEMS深槽结构[J].传感技术学报,2006,19(5):1516-1522.
- [6] Hlubin P, Ciprian D, Lunacek J, et al. Thickness of SiO<sub>2</sub> thin film on silicon wafer measured by dispersive white-light spectral interferometry [J]. Appl. Phys. B, 2006, 84: 511-516.
- [7] 张晋鲁,张国梁.用白光干涉测绘精密物体表面三维轮廓的立体分布[J].云南大学学报,2005,27:190-193.
- [8] Bruning J H, Herriott D R, Gallagher J E, et al. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[J]. Applied Optics, 1974, 13(11): 2693-2703.
- [9] Wyant J C, Koliopoulos C L, Bhushan D. Development of a three-dimensional noncontact digital optical profiler[J]. Journal of Tribology, Transaction of the ASME, 1986, 108(1): 20-27.
- [10] 冯斌,王建华.表面形貌光学法测量技术[J].计量与测试技术,2005,32(6):4-6.
- [11] 迟桂纯,周肇飞,周卫东.激光干涉轮廓测量技术的发展[J].现代科学仪器,1996(4):33-35.
- [12] 周肇飞,王世华,周卫东,等.同轴式高分辨率激光轮廓仪[J].仪器仪表学报,1994,15(3):250-254.
- [13] 冯斌,王建华.表面形貌光学法测量技术[J].计量与测试技术,2005,32(6):4-6.
- [14] Wyant J C, NEILL P K. Computer generated hologram null lens test of aspheric wavefronts[J]. Appl. Opt, 1974, 13: 2762-2768.
- [15] 王晓辉,曹根瑞,梅文辉.激光数字波面干涉仪傅里叶变换移相干涉术[J].光电工程,1997,24(4):52-55.
- [16] 程灏波,王英伟.非球面零件光学检测技术研究[J].航空精密制造技术,2004,40(8):8-10.
- [17] Paul EM. Interferometric metrology of aspheric surfaces[J]. Doctoral Dissertation of University of Rochester, 2000.
- [18] Andrew Everett Lowman. Calibration of a non-null interferometer for aspheric testing[J]. Doctoral Dissertation of University of Arizona, 1995.
- [19] Ge B Z, Luo W G. The study of numerical reconstruction of Fresnel CGH of a 3D object[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2002, 13(12): 1289-1292.
- [20] Lisa C, Leonard, Vincent Toal. Roughness measurement of metallic surfaces based on the laser speckle contrast method[J]. Optics and Laser Engineering, 1998, 30(5): 433-440.
- [21] Matsui K, Kawata S. Fringe scanning white-light microscope for surface profile measurement and material identification[J]. Proc SPIE, 1992, 1720: 124132.

### 欢迎利用期刊网站浏览本刊已发表文章

为了满足读者对《光电技术应用》期刊文章的快速、方便、阅读需求,《光电技术应用》期刊网站(网址为:<http://www.gdjsyy.com>),为读者提供了《光电技术应用》期刊2009~2014年已发表文章的在线浏览。读者可在过刊目录下,查阅2009~2013年期刊各期目录,点击文章题目或摘要,阅读文章全文。欢迎广大读者登陆期刊网站,及时了解《光电技术应用》期刊已发表文章的最新信息。

《光电技术应用》编辑部