



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110514144 B

(45) 授权公告日 2020. 10. 09

(21) 申请号 201910855466.2

(22) 申请日 2019.09.11

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 110514144 A

(43) 申请公布日 2019.11.29

(73) 专利权人 四川大学  
地址 610065 四川省成都市武侯区一环路  
南一段24号

(72) 发明人 刘元坤 李云 张启灿 薛俊鹏

(74) 专利代理机构 成都正华专利代理事务所  
(普通合伙) 51229

代理人 肖芳

(51) Int. Cl.  
G01B 11/25 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 109596065 A, 2019.04.09

CN 108775875 A, 2018.11.09

CN 106197322 A, 2016.12.07

CN 110057841 A, 2019.07.26

CN 109341574 A, 2019.02.15

US 6268923 B1, 2001.07.31

卢明腾 等. 基于相移与调制度比的结构光  
三维面形垂直测量方法. 《中国激光》. 2019, 第46  
卷(第7期), 0704003-1-9.

审查员 赵令令

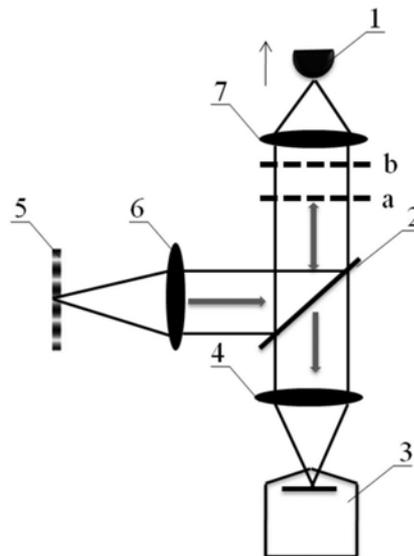
权利要求书2页 说明书4页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于物体光滑表面三维形貌测量系统的  
的测量方法

(57) 摘要

本发明公开了一种三维形貌测量系统的测  
量系统及基于该测量系统的测量方法。该测量系  
统包括一维移动载物平台，一维移动载物平台  
的移动方向上依次设置有显微物镜、分束镜、第  
一透镜和CCD相机，分束镜镜面与移动方向的  
夹角为45°，分束镜的一侧依次设置有第二透  
镜和用于按第一设定间隔时间循环显示具有3  
幅以上设定相位差的条纹像的投影设备，投影  
设备、CCD相机和一维移动载物平台均与上位  
机连接。



1. 一种基于物体光滑表面三维形貌测量系统的测量方法,所述物体光滑表面三维形貌测量系统包括一维移动载物平台(1),所述一维移动载物平台(1)的移动方向上依次设置有显微物镜(7)、分束镜(2)、第一透镜(4)和CCD相机(3),所述分束镜(2)镜面与所述移动方向的夹角为 $45^\circ$ ,所述分束镜(2)的一侧依次设置有第二透镜(6)和用于按第一设定间隔时间循环显示具有3幅以上设定相位差的条纹像的投影设备(5),所述投影设备(5)、CCD相机(3)和一维移动载物平台(1)均与上位机连接,其特征在于,测量方法包括:

S1、将待测物体固定在一维移动载物平台(1)上;

S2、采用上位机启动投影设备(5),并采用CCD相机(3)获取一维移动载物平台(1)在初始位置时待测物体光滑表面对所有条纹像所成条纹虚像;

S3、控制一维移动载物平台(1)按设定步长远离显微物镜(7),之后采用CCD相机获取待测物体光滑表面对所有条纹像所成条纹虚像,并将移动次数累加一次;

S4、判断移动次数是否大于预设次数,若是,进入步骤S5,否则返回步骤S3;

S5、基于CCD相机(3)获取的图像,采用相移算法得到所有位置下图像的调制度分布,根据每个设定位置下图像的调制度分布得到每个像素点随位置变化的调制度散点图,拟合调制度散点图得到调制度拟合曲线,根据调制度拟合曲线得到每个像素点最大调制度对应的横坐标;

所述调制度拟合曲线为采用一元二次多项式函数拟合调制度散点图得到;

一元二次多项式函数的表达式为 $M(z) = a + bz + cz^2$ ,利用调制度散点图中离散数据 $z_i, y_i, i = 1, 2, 3, \dots, n-1$ 为设定次数,横坐标 $z_i$ 和 $z$ 均表示循环拍摄的次数,也即初始位置时, $z_i$ 和 $z$ 均取1,每移动1次, $z_i$ 和 $z$ 均加1,纵坐标 $y_i$ 和 $M(z)$ 均表示具体调制度的值,求出拟合函数和离散数据序列的均方误差 $P(a, b, c)$ ,其计算公式为: $P(a, b, c) = \sum_{i=1}^n [M(z) - y_i]^2$ ,再通过如下极小值条件,得到系数 $a, b$ 和 $c$ 的值,进而求得其极大值对应的横坐标:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n (a + bz_i + cz_i^2 - y_i) = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (a + bz_i + cz_i^2 - y_i)z_i = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial c} = 2 \sum_{i=1}^n (a + bz_i + cz_i^2 - y_i)z_i^2 = 0 \end{cases};$$

S6、根据横坐标和设定步长得到待测物体光滑表面三维形貌:

所述待测物体光滑表面三维形貌高度的计算公式如下:

$$h(x, y) = \frac{1}{2}(\Delta a \times z_0)$$

其中, $h(x, y)$ 为点坐标为 $(x, y)$ 的高度, $\Delta a$ 为设定步长, $z_0$ 为横坐标的值。

2. 根据权利要求1所述的测量方法,其特征在于,所述第一透镜(4)和第二透镜(6)为远心镜头。

3. 根据权利要求1所述的测量方法,其特征在于,所述分束镜(2)呈楔形。

4. 根据权利要求1所述的测量方法,其特征在于,所述基于CCD相机(3)获取的图像,采

用相移算法得到所有位置下图像的调制度分布进一步包括：

S5.1、基于待测物体位于同一位置时CCD相机(3)获取的图像，采用相移算法得到该位置下图像的调制度分布，之后进入步骤S5.2；

S5.2、重复步骤S5.1得到所有位置下图像的调制度分布。

5. 根据权利要求4所述的测量方法，其特征在于，所述相移算法的计算公式为：

$$M(x, y) = \frac{2}{L} \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^L I_i(x, y) \sin(2i\pi / L) \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^L I_i(x, y) \cos(2i\pi / L) \right]^2}$$

其中， $M(x, y)$  为像素点坐标为  $(x, y)$  的调制度， $I_i(x, y)$  为第  $i$  张图像中像素点坐标为  $(x, y)$  的光强灰度值， $L$  为单次循环中条纹像的副数。

6. 根据权利要求5所述的测量方法，其特征在于，所述  $I_i(x, y)$  的计算公式为：

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) + M(x, y) \cos(2\pi f x + \delta_n)$$

其中， $I_0(x, y)$  为背景光强， $M(x, y)$  为条纹像的调制度， $f$  为条纹像的空间频率， $\delta_n$  为设定相位差。

## 一种基于物体光滑表面三维形貌测量系统的测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及三维形貌测量技术领域,具体涉及一种基于物体光滑表面三维形貌测量系统测量方法。

### 背景技术

[0002] 光学三维显微测量技术是光学三维测量的细分,特指利用光学三维测量的方法对微小物体(通常精度在微米或纳米级别)进行三维表面形貌测量的技术。目前比较常见的方法为基于三角测量原理的结构光显微投影技术,但是这种技术由于投影方向与观察方向之间存在一个夹角,导致了遮挡和阴影的问题,并且光学显微测量技术,一般适用于测量漫反射物体。

### 发明内容

[0003] 针对现有技术中的上述不足,本发明旨在提供一种能够解决遮挡和阴影问题的一种物体光滑表面三维形貌测量系统及基于该测量系统的测量方法。

[0004] 为了达到上述发明创造的目的,本发明采用的技术方案为:

[0005] 提供一种物体光滑表面三维形貌测量系统,其包括一维移动载物平台,一维移动载物平台的移动方向上依次设置有显微物镜、分束镜、第一透镜和CCD相机,分束镜镜面与移动方向的夹角为 $45^{\circ}$ ,分束镜的一侧依次设置有第二透镜和用于按第一设定间隔时间循环显示具有3幅以上设定相位差的条纹像的投影设备,投影设备、CCD相机和一维移动载物平台均与上位机连接。

[0006] 另一方面提供一种基于本方案设计的物体光滑表面三维形貌测量系统的测量方法,其包括:

[0007] S1、将待测物体固定在一维移动载物平台上;

[0008] S2、采用上位机启动投影设备,并采用CCD相机获取一维移动载物平台在初始位置时待测物体光滑表面所有条纹像所成条纹虚像;

[0009] S3、控制一维移动载物平台按设定步长远离显微物镜,之后采用CCD相机获取待测物体光滑表面所有条纹像所成条纹虚像,并将移动次数累加一次;

[0010] S4、判断移动次数是否大于预设次数,若是,进入步骤S5,否则返回步骤S3;

[0011] S5、基于CCD相机获取的图像,采用相移算法得到所有位置下图像的调制度分布,根据每个设定位置下图像的调制度分布得到每个像素点随位置变化的调制度散点图,拟合调制度散点图得到调制度拟合曲线,根据调制度拟合曲线得到每个像素点最大调制度对应的横坐标;

[0012] S6、根据横坐标和设定步长得到待测物体光滑表面三维形貌。

[0013] 进一步地,第一透镜和第二透镜为远心镜头。

[0014] 进一步地,分束镜呈楔形。

[0015] 进一步地,基于CCD相机获取的图像,采用相移算法得到所有位置下图像的调制度

分布进一步包括：

[0016] S5.1、基于待测物体位于同一位置时CCD相机获取的图像，采用相移算法得到该位置下图像的调制度分布，之后进入步骤S5.2；

[0017] S5.2、重复步骤S5.1得到所有位置下图像的调制度分布。

[0018] 进一步地，相移算法的计算公式为：

$$[0019] \quad M(x, y) = \frac{2}{L} \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^L I_i(x, y) \sin(2i\pi / L) \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^L I_i(x, y) \cos(2i\pi / L) \right]^2}$$

[0020] 其中， $M(x, y)$  为像素点坐标为  $(x, y)$  的调制度， $I_i(x, y)$  为第  $i$  张图像中像素点坐标为  $(x, y)$  的光强灰度值， $L$  为单次循环中条纹像的副数。

[0021] 进一步地， $I_i$  的计算公式为：

$$[0022] \quad I_i(x, y) = I_0(x, y) + M(x, y) \cos(2\pi f x + \delta_n)$$

[0023] 其中， $I_0(x, y)$  为背景光强， $M(x, y)$  为条纹像的调制度， $f$  为条纹像的空间频率， $\delta_n$  为设定相位差。

[0024] 进一步地，调制度拟合曲线为采用一元二次多项式函数拟合调制度散点图得到。

[0025] 进一步地，待测物体光滑表面三维形貌高度的计算公式如下：

$$[0026] \quad h(x, y) = \frac{1}{2} (\Delta a \times z_0)$$

[0027] 其中， $h(x, y)$  为点坐标为  $(x, y)$  的高度， $\Delta a$  为设定步长， $z_0$  为横坐标的值。

[0028] 本发明的有益效果为：通过一维移动载物平台、显微物镜、分束镜、第一透镜和CCD相机和投影设备构成的测量系统，其成像光路中没有遮挡和阴影，能够检测物体光滑表面形貌。

## 附图说明

[0029] 图1为本发明中测量系统的结构示意图；

[0030] 图2为具体实施例中分束镜的结构示意图；

[0031] 图3为具体实施例中某一待测物体的测量结果。

[0032] 其中，1、一维移动载物平台；2、分束镜；3、CCD相机；4、第一透镜；5、投影设备；6、第二透镜；7、显微物镜。

## 具体实施方式

[0033] 下面结合附图，对本发明的具体实施方式做详细说明，以便于本技术领域的技术人员理解本发明。但应该清楚，下文所描述的实施例仅仅是本发明的一部分实施例，而不是全部实施例。在不脱离所附的权利要求限定和确定的本发明的精神和范围内，本领域技术人员在没有做出任何创造性劳动所获得的所有其他实施例，都属于本发明的保护范围。

[0034] 提供一种基于物体光滑表面三维形貌测量系统，如图1所示，包括一维移动载物平台1，一维移动载物平台1的移动方向上依次设置有显微物镜7、分束镜2、第一透镜4和CCD相机3，分束镜2镜面与移动方向的夹角为 $45^\circ$ ，分束镜2的一侧依次设置有第二透镜6和用于按第一设定间隔时间循环显示具有3幅以上设定相位差的条纹像的投影设备5，投影设备5、CCD相机3和一维移动载物平台1均与上位机连接。

[0035] 在测量前一般需要对测量系统进行光路调节使得CCD相机3对待测物体和条纹虚像的成像均较为清晰。具体方法为使投影设备5上条纹像经过第二透镜6及分束镜2反射所成的中间条纹像与CCD相机3经过第一透镜4后的共轭相面重合,也就是该重合面为测量系统调焦位置。

[0036] 在具体测量时,显微物镜7、分束镜2、第一透镜4和CCD相机3、第二透镜6和投影设备5位置不变。投影设备5上的条纹像经第二透镜6及分束镜2反射为中间条纹像b,进入分束镜2分束面的光线与分束面反射的光线垂直,待测物体光滑表面对该中间条纹像b经显微物镜7和第一透镜4反射到CCD相机3的像平面a,中间条纹像b和CCD像平面a不重合。

[0037] 另外,在实施时,为避免常规平行分束镜2后表面的反射像正好与分束面的像部分重合而影响成像质量,如图2所示,分束镜2呈楔形。投影设备为DMD数字投影仪。

[0038] 基于本方案提供的物体光滑表面三维形貌测量系统的测量方法包括:

[0039] S1、将待测物体固定在一维移动载物平台1上。

[0040] S2、采用上位机启动投影设备5,并采用CCD相机3获取一维移动载物平台1在初始位置时待测物体光滑表面对所有条纹像所成条纹虚像。

[0041] S3、控制一维移动载物平台1按设定步长远离显微物镜7,之后采用CCD相机获取待测物体光滑表面对所有条纹像所成条纹虚像,并将移动次数累加一次。

[0042] S4、判断移动次数是否大于预设次数,若是,进入步骤S5,否则返回步骤S3;一般初始位置与结束位置之间的距离大于待测物体沿移动方向的厚度。

[0043] S5、基于CCD相机3获取的图像,采用相移算法得到所有位置下图像的调制度分布,根据每个设定位置下图像的调制度分布得到每个像素点随位置变化的调制度散点图,拟合调制度散点图得到调制度拟合曲线,根据调制度拟合曲线得到每个像素点最大调制度对应的横坐标。

[0044] 具体地,基于CCD相机3获取的图像,采用相移算法得到所有位置下图像的调制度分布进一步包括:

[0045] S5.1、基于待测物体位于同一位置时CCD相机3获取的图像,采用相移算法得到该位置下图像的调制度分布,之后进入步骤S5.2。

[0046] 其中,相移算法的计算公式为:

$$[0047] \quad M(x, y) = \frac{2}{L} \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^L I_i(x, y) \sin(2i\pi / L) \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^L I_i(x, y) \cos(2i\pi / L) \right]^2}$$

[0048] 其中, $M(x, y)$ 为像素点坐标为 $(x, y)$ 的调制度, $I_i(x, y)$ 为第 $i$ 张图像中像素点坐标为 $(x, y)$ 的光强灰度值, $L$ 为单次循环中条纹像的副数。

[0049] 上式中, $I_i(x, y)$ 的计算公式可以为:

$$[0050] \quad I_i(x, y) = I_0(x, y) + M(x, y) \cos(2\pi f x + \delta_n)$$

[0051] 其中, $I_0(x, y)$ 为背景光强, $M(x, y)$ 为条纹像的调制度, $f$ 为条纹像的空间频率, $\delta_n$ 为设定相位差。

[0052] S5.2、重复步骤S5.1得到所有位置下图像的调制度分布。

[0053] 其中,调制度拟合曲线为采用一元二次多项式函数拟合调制度散点图得到。一元二次多项式函数的表达式为 $M_z = a + bz + cz^2$ ,利用调制度散点图中离散数据 $z_i, y_i, i = 1, 2, 3, \dots, n-1$ 为设定次数,横坐标 $z_i$ 和 $z$ 均表示循环拍摄的次数,也即初始位置时, $z_i$ 和 $z$ 均取1,

每移动1次,  $z_i$ 和 $z$ 均加1, 纵坐标 $y_i$ 和 $Mz$ 均表示具体调制度的值, 求出拟合函数和离散数据序列的均方误差 $P(a, b, c)$ , 其计算公式为:  $P(a, b, c) = \sum_{i=1}^n [M(z) - y_i]^2$ , 再通过如下极小值条件, 得到系数 $a, b$ 和 $c$ 的值, 进而求得其极大值对应的横坐标:

$$[0054] \quad \begin{cases} \frac{\partial P}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n (a + bz_i + cz_i^2 - y_i) = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (a + bz_i + cz_i^2 - y_i)z_i = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial c} = 2 \sum_{i=1}^n (a + bz_i + cz_i^2 - y_i)z_i^2 = 0 \end{cases} .$$

[0055] S6、根据横坐标和设定步长得到待测物体光滑表面三维形貌。

[0056] 具体地, 待测物体光滑表面三维形貌高度的计算公式如下:

$$[0057] \quad h_{x, y} = \frac{1}{2} \Delta a \times z_0$$

[0058] 其中,  $h(x, y)$  为点坐标为  $(x, y)$  的高度,  $\Delta a$  为设定步长,  $z_0$  为横坐标的值。

[0059] 实施时, 本方案优选第一透镜4和第二透镜6为远心镜头。显微物镜7的放大倍数是  $10\times$ , 数值孔径是  $0.25$ 。一维载物平台为PI纳米平移台, 设定步长为  $5\mu\text{m}$ 。CCD相机3为IDS的UI-2250SE, 其分辨率  $1600 \times 1200\text{pixels}$ , 像元尺寸:  $4.4 \times 4.4\mu\text{m}$ ; DMD数字投影设备5的分辨率: WXGA  $1280 \times 800$ 。

[0060] 其中, 针对某一具体待测物体光滑表面三维形貌的测量, 单次循环中条纹像数量 $L$ 为4帧, 此时调制度计算公式可改写为  $M(x, y) = \frac{1}{2} \sqrt{(I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2}$ , 共计245个设定位置, 每个设定位置拍摄4幅图像。通过该方法得到的其光滑表面三维形貌如图3所示。

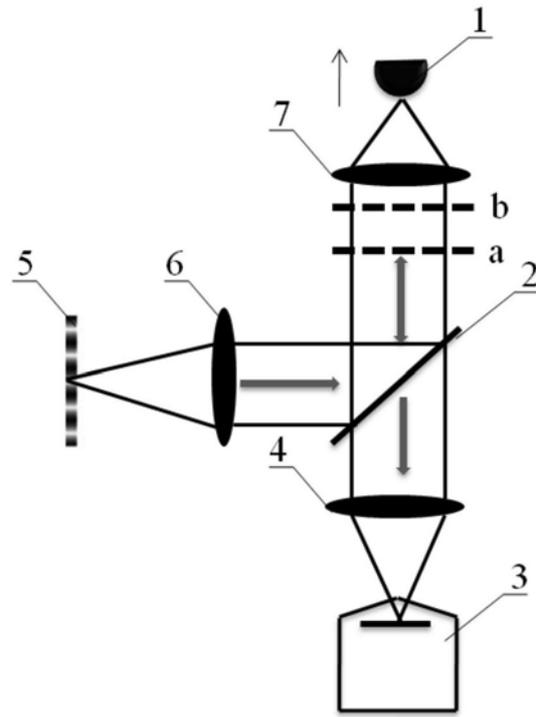


图1

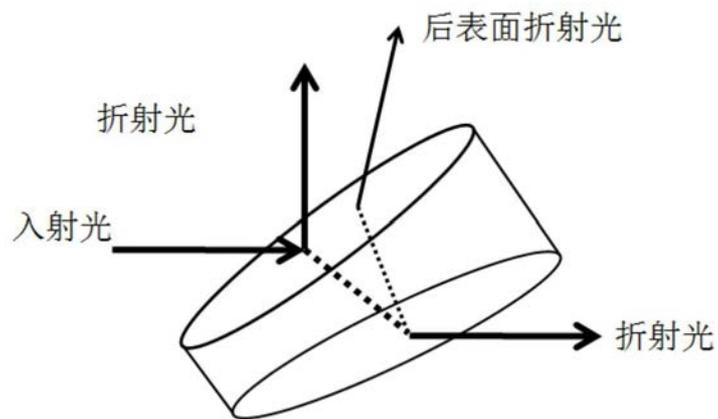


图2

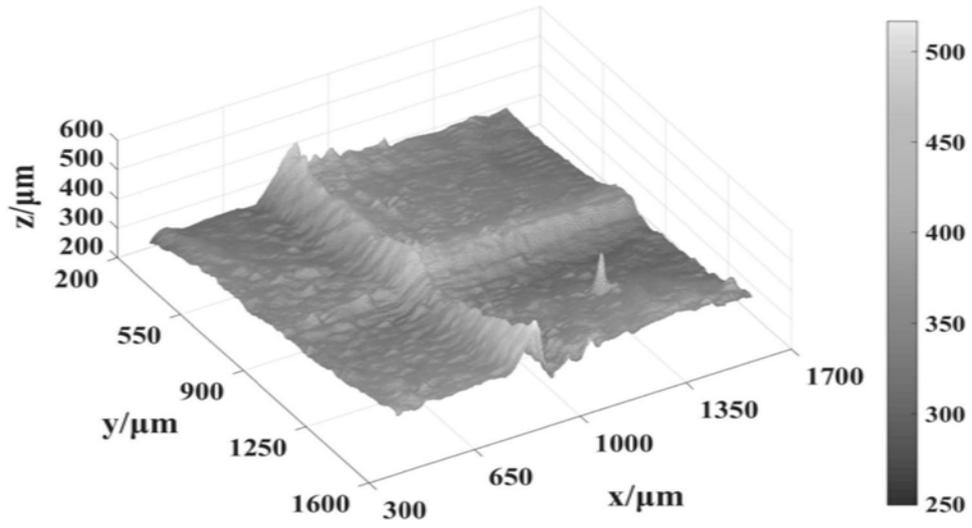


图3