



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 104215646 B

(45) 授权公告日 2016.06.29

(21) 申请号 201410479580.7

(22) 申请日 2014.09.18

(73) 专利权人 浙江大学

地址 310027 浙江省杭州市西湖区浙大路  
38号

(72) 发明人 杨甬英 刘东 曹频 李阳 李璐

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务所有限公  
司 33200

代理人 杜军

(51) Int. Cl.

G01N 21/958(2006.01)

(56) 对比文件

CN 103293162 A, 2013.09.11, 权利要求  
1-5, 附图 1-4.

CN 101387761 A, 2009.03.18, 权利要求 1、  
3、7, 说明书第 4 页倒数第 2 段, 附图 3.

CN 204128987 U, 2015.01.28, 权利要求  
1-2.

CN 101644657 A, 2010.02.10, 全文.

CN 2729708 Y, 2005.09.28, 全文.

CN 101285939 A, 2008.10.15, 全文.

US 5905575 A, 1999.05.18, 全文.

CAO Pin et. al..Application of image  
entropy evaluation function for the  
leveling of large aperture components  
in auto defects detecting. 《Optical  
Test and Measurement Technology and  
Equipment》. 2012, 第 8417 卷 84173K-1-7.

John G. Thunen, Osuk Y. Kwon.Full  
aperture testing with subaperture test  
optics. 《Wavefront Sensing》. 1983, 第 0351 卷  
19-27.

审查员 蒋超

权利要求书3页 说明书8页 附图5页

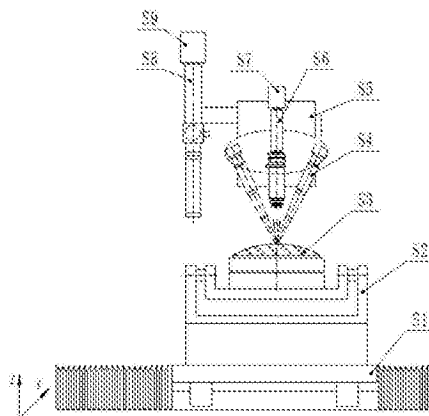
(54) 发明名称

大口径球面光学元件表面疵病检测系统及其  
方法

(57) 摘要

本发明公开了一种大口径球面光学元件表面  
疵病检测系统及其方法。本发明包括 XY 二维导  
轨、二维旋转系统、大口径球面光学元件、环形照  
明光源、Z 向导轨、显微镜、CCD1、光学自准直定中  
仪、CCD2;大口径球面光学元件固定于二维旋转  
系统上,二维旋转系统安装于 XY 二维导轨上,实  
现大口径球面光学元件的多轴联动;CCD1 连接到  
显微镜上并固定于环形照明光源上,环形照明光  
源及光学自准直定中仪固定于 Z 向导轨上,并随 Z  
向导轨沿 Z 轴方向平动,CCD2 连接到光学自准直  
定中仪上。本发明实现了大口径球面元件表面疵  
病的子孔径采样过程,对全口径疵病灰度图像进  
行数字化特征提取后,从而实现疵病的自动化定  
量检测。

CN 104215646 B



1. 大口径球面光学元件表面疵病检测方法,其特征在于包括如下步骤:

步骤1. 大口径球面光学元件(S3)随XY二维导轨(S1)移动至光学自准直定中仪(S8)检测位置,光学自准直定中仪(S8)沿Z轴移动,通过CCD2(S9)分别获得大口径球面光学元件(S3)的表面像图像与球心像图像;利用表面像与球心像确定被测大口径球面光学元件(S3)的曲率半径R,以及大口径球面光学元件(S3)的球心位置相对于光学自准直定中仪光轴的偏心率;通过平移调整XY二维导轨(S1),使光学自准直定中仪(S8)的光轴与大口径球面光学元件(S3)球心重合;由于光学自准直定中仪(S8)的光轴与显微镜(S6)光轴的空间相对位置固定,因此通过移动XY二维导轨(S1)至显微镜(S6)检测位置,能够使显微镜(S6)光轴与大口径球面光学元件(S3)球心重合,然后获得球面顶点位置,并作为初始检测位置;

步骤2. 环形照明光源(S4)照射被测大口径球面光学元件(S3)球面,此时表面若存在疵病特征则激发散射光进入显微镜,并成像于CCD1上,得到一幅暗背景灰度子口径图像;然后通过XY二维导轨(S1)、二维旋转系统(S2)、Z向导轨(S5)的多轴联动,被测大口径球面光学元件(S3)沿经纬线轨迹进行子口径图像采集,从而完成覆盖被测大口径球面光学元件(S3)球面的全口径采样;为确保子口径完全覆盖被测大口径球面光学元件(S3)球面而无漏检区域,采样前对球面分布的子口径进行了球面子口径规划,并获得扫描时各子口径空间位置信息;

步骤3. 按子口径扫描中的各子口径空间位置信息,进行子口径全局坐标校正,校正为全局坐标后,对子口径进行平面二维投影,对投影后的子口径进行拼接,得到全口径二维灰度图像;

步骤4. 利用数字图像处理方法提取全口径二维灰度图像中的疵病特征,得到全口径二维疵病图像;所述的数字图像处理方法包括中值滤波、二值化、特征提取;

步骤5. 对全口径二维疵病图像进行三维球面疵病图像还原操作,以获得疵病在被测大口径球面元件表面上的真实信息。

2. 如权利要求1所述的大口径球面光学元件表面疵病检测方法,其特征在于步骤2所述的经纬线轨迹扫描如下:

2-1于大口径球面光学元件球面顶点位置采集子口径 $I_{00}$ ;

2-2大口径球面光学元件沿经线 $L_j$ 摆动 $\beta_1$ 角度,采集子口径 $I_{10}$ ;

2-3大口径球面光学元件通过绕法线 $L_N$ 旋转 $\alpha_1$ 角度,实现沿纬线 $L_{w1}$ 的子口径采样,采集得到子口径图像序列 $I_{11}$ 、 $I_{12}$ 、 $\dots$ 、 $I_{1m_1}$ ;

2-4. 重复上述步骤2-2和2-3,直至大口径球面光学元件沿经线 $L_j$ 摆动 $\beta_n$ 角度,采集子口径 $I_{n0}$ 后,再绕法线 $L_N$ 分别旋转 $\alpha_n$ 角度,实现沿纬线 $L_{wn}$ 的子口径采样,采集得到子口径序列 $I_{n1}$ 、 $I_{n2}$ 、 $\dots$ 、 $I_{nm_n}$ ,完成覆盖全口径的子口径图像采集; $n$ 、 $m$ 均为自然数。

3. 如权利要求1所述的大口径球面光学元件表面疵病检测方法,其特征在于步骤2所述的球面子口径规划如下:

(1). 建立子口径规划数学模型,对球面子口径分布进行无漏区域子口径规划;若B点为第 $i$ 纬线层上子口径 $I_{i0}$ 与 $I_{i1}$ 的交点,C点为第 $i+1$ 纬线层上子口径 $I_{(i+1)0}$ 与 $I_{(i+1)1}$ 的交点,0点为被测大口径球面光学元件(S3)球心位置,A点为经光学自准直定中仪调整后的球面顶点位置;预实现球面的无漏全口径覆盖,其充分条件即实现 $|\widehat{AB}| \geq |\widehat{AC}|$ ;利用球面三角公

式,  $\widehat{AB}$  可由  $\alpha_i, \beta_i$  与  $R$  表示为  $\widehat{AB} = F(\alpha_i, \beta_i, R)$ ; 同理  $\widehat{AC}$  可用  $\alpha_{i+1}, \beta_{i+1}$  与  $R$  表示为  $\widehat{AC} = G(\alpha_{i+1}, \beta_{i+1}, R)$ ; 此处引入无漏子孔径覆盖系数  $k, |\widehat{AB}| = k |\widehat{AC}|$ , 其中  $k \geq 1$ , 则可得到

$$F(\alpha_i, \beta_i, R) = kG(\alpha_{i+1}, \beta_{i+1}, R) \quad (1)$$

式(1)为迭代方程, 解空间不唯一, 为获得唯一解需要给出具体的子孔径规划, 子孔径规划规则包括: 沿经线不变子孔径规划规则与沿纬线不变子孔径规划规则; 沿经线不变子孔径规划规则即在经线方向上相邻子孔径间的重叠区域不变为先决条件进行子孔径规划; 同理, 沿纬线不变子孔径规划规则即在纬线方向上相邻子孔径间的重叠区域不变为先决条件进行子孔径规划; 选取沿纬线不变子孔径规划, 即纬线层上各相邻子孔径间重叠区域一致; 设子孔径间的重叠系数为  $C_{ov}, 0 < C_{ov} < 1/2$ ; 子孔径视场大小为  $f_s$ ; 则可得到第  $i$  纬线层与第  $i+1$  纬线层上的自旋角  $\alpha_i, \alpha_{i+1}$  为:

$$\alpha_i = \arcsin\left(\frac{f_s(1-C_{ov})}{2R \sin \beta_i}\right) \quad (2)$$

$$\alpha_{i+1} = \arcsin\left(\frac{f_s(1-C_{ov})}{2R \sin \beta_{i+1}}\right) \quad (3)$$

将式(2)、(3)代入式(1), 并且给定摆动角  $\beta_i$  的初始值, 则可唯一的得到摆动角  $\beta_{i+1}$ , 从而获得覆盖球面元件全口径的子孔径分布。

4. 如权利要求1所述的大口径球面光学元件表面疵病检测方法, 其特征在于获得子孔径分布后步骤3所述的子孔径全局坐标校正, 具体实现如下:

假设对曲率半径为  $R$  的大口径球面光学元件(S3)进行检测, 通过XY二维导轨(S1)、二维旋转系统(S2)、Z向导轨(S5)的多轴联动旋转( $\alpha_i, \beta_i$ )角度后采集得到一副  $M_s \times N_s$  像素的子孔径图像, 则对于该子孔径图像中任意一点  $T(p, q)$ , 其中  $1 \leq p \leq M_s, 1 \leq q \leq N_s$ , 利用齐次坐标变换公式可得到  $T$  点的全局坐标  $(x_i, y_i, z_i)$  为:

$$(x_i, y_i, z_i, 1) = [p - M_s/2, q - N_s/2, R, 1] \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 & 0 \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_i & -\sin \beta_i & 0 \\ 0 & \sin \beta_i & \cos \beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中, 取  $z_i = 0$ , 则得到该幅子孔径图像在XY平面上的投影点  $T'$ , 进而可通过子孔径拼接方法获得被测球面光学元件的全口径二维灰度图像。

5. 如权利要求1所述的大口径球面光学元件表面疵病检测方法, 其特征在于步骤5所述的全口径二维疵病图像进行三维球面疵病图像还原操作具体如下:

对全口径二维灰度图像进行数字化图像处理后可得到一幅  $M_f \times N_f$  像素的全口径二维疵病图像, 此全口径二维疵病图像的中心点  $O'$  点的位置坐标为  $(M_f/2, N_f/2)$ , 以点  $O'$  为坐标原点, 则可得到像素坐标为  $(p, q)$  的  $T'$  点距坐标原点  $O'$  的距离  $d$  及相位  $\gamma$ , 其中:

$$d = \sqrt{(p - M_f)^2 + (q - N_f)^2},$$

$$\gamma = \arctan[(p - M_f)/(q - N_f)];$$

从而可得到 $T'$ 点对应的三维球面上 $T$ 点的球面坐标为 $(R, \gamma, \arcsin(d/R))$ ,其中 $R$ 为被测大口径球面光学元件的曲率半径。

6.根据权利要求1所述的大口径球面光学元件表面疵病检测方法使用的系统,其特征在于包括XY二维导轨(S1)、二维旋转系统(S2)、大口径球面光学元件(S3)、环形照明光源(S4)、Z向导轨(S5)、显微镜(S6)、CCD1(S7)、光学自准直定中仪(S8)、CCD2(S9);其中大口径球面光学元件(S3)固定于二维旋转系统上(S2),二维旋转系统(S2)安装于XY二维导轨(S1)上,实现大口径球面光学元件的多轴联动包括:绕X轴摆动,绕其法线自旋,沿X、Y轴的平动;CCD1(S7)连接到显微镜(S6)上并固定于环形照明光源(S4)上,环形照明光源(S4)及光学自准直定中仪(S8)固定于Z向导轨(S5)上,并随Z向导轨(S5)沿Z轴方向平动,能够实现显微镜(S6)的对焦及光学自准直定中仪(S8)对被测元件的定中操作;CCD2(S9)连接到光学自准直定中仪(S8)上;大口径球面光学元件(S3)为大口径球面面形透镜元件;环形照明光源(S4)为变焦透镜组件。

## 大口径球面光学元件表面疵病检测系统及其方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于机器视觉检测技术领域,涉及一种大口径球面光学元件表面疵病检测系统其方法。

### 背景技术

[0002] 大口径球面光学元件在大口径空间望远镜、ICF(惯性约束核聚变)靶室终端系统中被广泛应用,元件表面的疵病特征如麻点、划痕等,会影响成像质量,产生不必要的散射与衍射从而造成能量损失,该能量损失在高功率ICF系统中还可能因为能量过高而造成二次损伤,因此有必要在大口径球面光学元件的使用前进行其表面疵病的检测,数字化评估疵病信息,从而为大口径球面光学元件的使用提供可靠的数值依据。

[0003] 传统的针对球面光学元件的检测方法主要是目视法,目视法受所检测人的熟练程度影响较大,主观性较强,而且长期的检测会造成人眼疲劳,同时无法给出疵病信息的定量化描述。因此需要设计一种系统能够自动化的实现大口径球面光学元件表面疵病检测,利用机器视觉的方法代替人工,极大的提高检测效率及检测精度。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的是针对现有技术的不足,为解决大口径球面光学元件表面疵病的自动化检测,提供一种大口径球面光学元件表面疵病检测系统其方法。

[0005] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案如下:

[0006] 大口径球面光学元件表面疵病检测系统,包括XY二维导轨(S1)、二维旋转系统(S2)、大口径球面光学元件(S3)、环形照明光源(S4)、Z向导轨(S5)、显微镜(S6)、CCD1(S7)、光学自准直定中仪(S8)、CCD2(S9);其中大口径球面光学元件(S3)固定于二维旋转系统上(S2),二维旋转系统(S2)安装于XY二维导轨(S1)上,实现大口径球面光学元件的多轴联动包括:绕X轴摆动,绕其法线自旋,沿X、Y轴的平动;CCD1(S7)连接到显微镜(S6)上并与环形照明光源(S4)固定在一起,环形照明光源(S4)及光学自准直定中仪(S8)固定于Z向导轨(S5)上,并随Z向导轨(S5)沿Z轴方向平动,能够实现显微镜(S6)的对焦及光学自准直定中仪(S8)对被测元件的定中操作;CCD2(S9)连接到光学自准直定中仪(S8)上。

[0007] 其中大口径球面光学元件(S3)为大口径球面面形透镜元件;环形照明光源(S4)为变焦透镜组件,可参考专利:用于球面光学元件表面疵病暗场检测的照明系统及方法,专利申请号:201310241705.8。

[0008] 大口径球面光学元件表面疵病检测方法,包括如下步骤:

[0009] 步骤1.大口径球面光学元件(S3)随XY二维导轨(S1)移动至光学自准直定中仪(S8)检测位置,光学自准直定中仪(S8)沿Z轴移动,通过CCD2(S9)分别获得大口径球面光学元件(S3)的表面像图像与球心像图像;利用表面像与球心像确定被测大口径球面光学元件(S3)的曲率半径R,以及大口径球面光学元件(S3)的球心位置相对于光学自准直定中仪光轴的偏心量;通过平移调整XY二维导轨(S1),使光学自准直定中仪(S8)的光轴与大口径球

面光学元件(S3)球心重合;由于光学自准直定中仪(S8)的光轴与显微镜(S6)光轴的空间相对位置固定,因此通过移动XY二维导轨(S1)至显微镜(S6)检测位置,能够使显微镜(S6)光轴与大口径球面光学元件(S3)球心重合,然后获得球面顶点位置,并作为初始检测位置;

[0010] 步骤2. 环形照明光源(S4)照射被测大口径球面光学元件(S3)球面,此时表面若存在疵病特征则激发散射光进入显微镜,并成像于CCD1上,得到一幅暗背景灰度子孔径图像;然后通过XY二维导轨(S1)、二维旋转系统(S2)、Z向导轨(S5)的多轴联动,被测大口径球面光学元件(S3)沿经纬线轨迹进行子孔径图像采集,从而完成覆盖被测大口径球面光学元件(S3)球面的全口径采样;为确保子孔径完全覆盖被测大口径球面光学元件(S3)球面而无漏检区域,采样前对球面分布的子孔径进行了球面子孔径规划,并获得扫描时各子孔径空间位置信息;

[0011] 步骤3. 按子孔径扫描中的各子孔径空间位置信息,进行子孔径全局坐标校正,校正为全局坐标后,对子孔径进行平面二维投影,对投影后的子孔径进行拼接,得到全口径二维灰度图像;

[0012] 步骤4. 利用数字图像处理方法提取全口径二维灰度图像中的疵病特征,得到全口径二维疵病图像;所述的数字图像处理方法包括中值滤波、二值化、特征提取;

[0013] 步骤5. 对全口径二维疵病图像进行三维球面疵病图像还原操作,以获得疵病在被测大口径球面元件表面上的真实信息。

[0014] 步骤2所述的经纬线轨迹扫描如下:

[0015] 2-1于大口径球面光学元件球面顶点位置采集子孔径 $I_{00}$ ;

[0016] 2-2大口径球面光学元件沿经线 $L_j$ 摆动 $\beta_1$ 角度,采集子孔径 $I_{10}$ ;

[0017] 2-3大口径球面光学元件通过绕法线 $L_N$ 旋转 $\alpha_1$ 角度,实现沿纬线 $L_{W1}$ 的子孔径采样,采集得到子孔径图像序列 $I_{11}$ 、 $I_{12}$ …… $I_{1m_1}$ ;

[0018] 2-4. 重复上述步骤2-2和2-3,直至大口径球面光学元件沿经线 $L_j$ 摆动 $\beta_n$ 角度,采集子孔径 $I_{n0}$ 后,再绕法线 $L_N$ 分别旋转 $\alpha_n$ 角度,实现沿纬线 $L_{Wn}$ 的子孔径采样,采集得到子孔径序列 $I_{n1}$ 、 $I_{n2}$ …… $I_{nm_n}$ ,完成覆盖全口径的子孔径图像采集; $n$ 、 $m$ 均为自然数。

[0019] 步骤2所述的球面子孔径规划如下:

[0020] (1). 建立子孔径规划数学模型,对球面子孔径分布进行无漏区域子孔径规划;若B点为第 $i$ 纬线层上子孔径 $I_{i0}$ 与 $I_{i1}$ 的交点,C点为第 $i+1$ 纬线层上子孔径 $I_{(i+1)0}$ 与 $I_{(i+1)1}$ 的交点,0点为被测大口径球面光学元件(S3)球心位置,A点为经光学自准直定中仪(S8)调整后的球面顶点位置;预实现球面的无漏全口径覆盖,其充分条件即实现 $|\widehat{AB}| \geq |\widehat{AC}|$ ;利用球面三角公式, $\widehat{AB}$ 可由 $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 与 $R$ 表示为 $\widehat{AB} = F(\alpha_i, \beta_i, R)$ ;同理 $\widehat{AC}$ 可用 $\alpha_{i+1}$ 、 $\beta_{i+1}$ 与 $R$ 表示为 $\widehat{AC} = G(\alpha_{i+1}, \beta_{i+1}, R)$ ;此处引入无漏子孔径覆盖系数 $k$ , $|\widehat{AB}| = k|\widehat{AC}|$ ,其中 $k \geq 1$ ,则可得

$$F(\alpha_i, \beta_i, R) = kG(\alpha_{i+1}, \beta_{i+1}, R) \quad (1)$$

[0022] 式(1)为迭代方程,解空间不唯一,为获得唯一解需要给出具体的子孔径规划,子孔径规划规则包括:沿经线不变子孔径规划规则与沿纬线不变子孔径规划规则。沿经线不

变子孔径规划规则即在经线方向上相邻上子孔径间的重叠区域不变为先决条件进行子孔径规划;同理,沿纬线不变子孔径规划规则即在纬线方向上相邻子孔径间的重叠区域不变为先决条件进行子孔径规划。选取沿纬线不变子孔径规划,即纬线层上各相邻子孔径间重叠区域一致;设子孔径间的重叠系数为 $C_{ov}$ , $0 < C_{ov} < 1/2$ ;子孔径视场大小为 $f_s$ ;则可得到第 $i$ 纬线层与第 $i+1$ 纬线层上的自旋角 $\alpha_i$ 、 $\alpha_{i+1}$ 为:

$$[0023] \quad \alpha_i = \arcsin\left(\frac{f_s(1-C_{ov})}{2R \sin \beta_i}\right) \quad (2)$$

$$[0024] \quad \alpha_{i+1} = \arcsin\left(\frac{f_s(1-C_{ov})}{2R \sin \beta_{i+1}}\right) \quad (3)$$

[0025] 将式(2)、(3)代入式(1),并且给定摆动角 $\beta_i$ 的初始值,则可唯一的得到摆动角 $\beta_{i+1}$ ,从而获得覆盖球面元件全口径的子孔径分布。

[0026] 获得子孔径分布后步骤3所述的子孔径全局坐标校正,具体实现如下:

[0027] 假设对曲率半径为 $R$ 的大口径球面光学元件(S3)进行检测,通过XY二维导轨(S1)、二维旋转系统(S2)、Z向导轨(S5)的多轴联动旋转( $\alpha_i, \beta_i$ )角度后采集得到一副 $M_s \times N_s$ 像素的子孔径图像,则对于该子孔径图像中任意一点 $T(p, q)$ ,其中 $1 \leq p \leq M_s, 1 \leq q \leq N_s$ ,利用齐次坐标变换公式可得到 $T$ 点的全局坐标( $x_i, y_i, z_i$ )为:

$$[0028] \quad (x_i, y_i, z_i, 1) = [p - M_s/2, q - N_s/2, R, 1] \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 & 0 \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_i & -\sin \beta_i & 0 \\ 0 & \sin \beta_i & \cos \beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0029] 式(4)中,取 $z_i = 0$ ,则得到该幅子孔径图像在XY平面上的投影点 $T'$ ,进而可通过子孔径拼接方法获得被测球面光学元件的全口径二维灰度图像。

[0030] 步骤5所述的全口径二维疵病图像进行三维球面疵病图像还原操作具体如下:

[0031] 对全口径二维灰度图像进行数字化图像处理后可得到一幅 $M_f \times N_f$ 像素的全口径二维疵病图像,此全口径二维疵病图像的中心点 $O'$ 点的位置坐标为 $(M_f/2, N_f/2)$ ,以点 $O'$ 为坐标原点,则可得到像素坐标为 $(p, q)$ 的 $T'$ 点距坐标原点 $O'$ 的距离 $d$ 及相位 $\gamma$ ,其中:

$$[0032] \quad d = \sqrt{(p - M_f)^2 + (q - N_f)^2},$$

$$[0033] \quad \gamma = \arctan[(p - M_f)/(q - N_f)];$$

[0034] 从而可得到 $T'$ 点对应的三维球面上 $T$ 点的球面坐标为 $(R, \gamma, \arcsin(d/R))$ ,其中 $R$ 为被测大口径球面光学元件的曲率半径。

[0035] 本发明有益效果如下:

[0036] 本发明充分利用了环形照明光束在照射到球面元件表面时,球面元件表面疵病会激发散射光的特性,采用光学自准直定中仪、显微镜、CCD、多轴联动机构实现覆盖被测球面全口径的子孔径采样,同时利用子孔径全局校正、二维投影、数字化特征提取、三维球面疵病图像还原等方法,实现了大口径球面元件表面疵病的自动化定量检测,从而使检测工人从繁重的目视检测中解放出来,更大大提高了检测效率及检测精度,避免了因个人主观因

素对检测结果的影响,最终为大口径球面元件的使用与加工提供可靠的数值依据。

## 附图说明

[0037] 图1为本发明系统图。

[0038] 图2为本发明球面经纬线扫描轨迹。

[0039] 图3为本发明子孔径规划模型。

[0040] 图4为本发明全局校正及二维投影图。

[0041] 图5为本发明全口径二维疵病图像的三维球面疵病图像还原图。

[0042] 图6为本发明 $\phi 160\text{mm}$ 元件子孔径规划分布图。

[0043] 图7为本发明单幅子孔径疵病图。

[0044] 图8为本发明单幅子孔径疵病图像全局坐标校正图。

[0045] 图9为本发明单幅子孔径平面二维投影图。

[0046] 具体实施说明

[0047] 下面结合附图对本发明做进一步的说明。

[0048] 如图1所示,大口径球面光学元件表面疵病检测系统,包括XY二维导轨(S1)、二维旋转系统(S2)、大口径球面光学元件(S3)、环形照明光源(S4)、Z向导轨(S5)、显微镜(S6)、CCD1(S7)、光学自准直定中仪(S8)、CCD2(S9)。其中大口径球面光学元件(S3)固定于二维旋转系统上(S2),二维旋转系统(S2)安装于XY二维导轨(S1)上,实现大口径球面光学元件的多轴联动包括:绕X轴摆动,绕其法线自旋,沿X、Y轴的平动;CCD1(S7)连接到显微镜(S6)上并固定于环形照明光源(S4)上,环形照明光源(S4)及光学自准直定中仪(S8)固定于Z向导轨(S5)上,并随Z向导轨(S5)沿Z轴方向平动,能够实现显微镜(S6)的对焦及光学自准直定中仪(S8)对被测元件的定中操作;CCD2(S9)连接到光学自准直定中仪(S8)上。

[0049] 其中大口径球面光学元件(S3)包括大口径球面面形透镜元件;环形照明光源(S4)为变焦透镜组件,当对凸球面面形透镜元件检测时,产生会聚光束,而针对凹球面面形透镜元件的检测时则产生发散光束,以避免反射光束进入显微镜对所采集到的疵病图像产生影响,保证获得清晰的暗背景上的高亮疵病图像。

[0050] 大口径球面光学元件表面疵病检测方法,具体包括如下步骤:

[0051] 步骤1.大口径球面光学元件(S3)随XY二维导轨(S1)移动至光学自准直定中仪(S8)检测位置,光学自准直定中仪(S8)沿Z轴移动,通过CCD2(S9)分别获得大口径球面光学元件(S3)的表面像图像与球心像图像;利用表面像与球心像确定被测大口径球面光学元件(S3)的曲率半径R,以及大口径球面光学元件(S3)的球心位置相对于光学自准直定中仪光轴的偏心量;通过平移调整XY二维导轨(S1),使光学自准直定中仪(S8)的光轴与大口径球面光学元件(S3)球心重合,由于光学自准直定中仪(S8)的光轴与显微镜(S6)光轴的空间相对位置固定,因此通过移动XY二维导轨(S1)至显微镜(S6)检测位置,能够使显微镜(S6)光轴与大口径球面光学元件(S3)球心重合,然后获得球面顶点位置,并作为初始检测位置。

[0052] 步骤2.环形照明光源(S4)照射被测大口径球面光学元件(S3)球面,此时表面若存在疵病特征则激发散射光进入显微镜,并成像于CCD1上,得到一幅暗背景灰度子口径图像。

[0053] 然后通过XY二维导轨(S1)、二维旋转系统(S2)、Z向导轨(S5)的多轴联动,被测大口径球面光学元件(S3)可沿经纬线轨迹进行子孔径图像采集,从而完成覆盖被测大口径球



面光学元件(S3)球面的全口径采样。为确保子孔径完全覆盖被测大口径球面光学元件(S3)球面而无漏检区域,扫描前对球面分布的子孔径进行了球面子孔径规划,并获得各子孔径空间位置信息。

[0054] 步骤3.按子孔径扫描中的各子孔径空间位置信息,进行子孔径全局坐标校正,校正为全局坐标后,对子孔径进行平面二维投影,对投影后的子孔径进行拼接,得到全口径二维灰度图像。

[0055] 步骤4.利用数字图像处理方法提取全口径二维灰度图像中的疵病特征,得到全口径二维疵病图像;所述的数字图像处理方法包括中值滤波、二值化、特征提取。

[0056] 步骤5.对全口径二维疵病图像进行三维球面疵病图像还原操作,以获得疵病在被测大口径球面元件表面上的真实信息。

[0057] 如图2所示,步骤2所述的经纬线轨迹扫描如下:

[0058] 2-1于大口径球面光学元件球面顶点位置采集子孔径 $I_{00}$ ;

[0059] 2-2大口径球面光学元件沿经线 $L_j$ 摆动 $\beta_1$ 角度,采集子孔径 $I_{10}$ ;

[0060] 2-3大口径球面光学元件通过绕法线 $L_N$ 旋转 $\alpha_1$ 角度,实现沿纬线 $L_{W1}$ 的子孔径采样,采集得到子孔径图像序列 $I_{11}$ 、 $I_{12}$ …… $I_{1m_1}$ ;

[0061] 2-4.重复上述步骤2-2和2-3,直至大口径球面光学元件沿经线 $L_j$ 摆动 $\beta_n$ 角度,采集子孔径 $I_{n0}$ 后,再绕法线 $L_N$ 分别旋转 $\alpha_n$ 角度,实现沿纬线 $L_{Wn}$ 的子孔径采样,采集得到子孔径序列 $I_{n1}$ 、 $I_{n2}$ …… $I_{nm_n}$ ,完成覆盖全口径的子孔径图像采集。 $n$ 、 $m$ 均为自然数。

[0062] 如图3所示,步骤2所述的球面子孔径规划如下:

[0063] (1).建立子孔径规划数学模型,对球面子孔径分布进行无漏区域子孔径规划。若B点为第 $i$ 纬线层上子孔径 $I_{i0}$ 与 $I_{i1}$ 的交点,C点为第 $i+1$ 纬线层上子孔径 $I_{(i+1)0}$ 与 $I_{(i+1)1}$ 的交点,0点为被测大口径球面光学元件(S3)球心位置,A点为经光学自准直定中仪调整后的球面顶点位置。预实现球面的无漏全口径覆盖,其充分条件即实现 $|\widehat{AB}| \geq |\widehat{AC}|$ 。利用球面三角公式, $\widehat{AB}$ 可由 $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 与 $R$ 表示为 $\widehat{AB} = F(\alpha_i, \beta_i, R)$ ;同理 $\widehat{AC}$ 可用 $\alpha_{i+1}$ 、 $\beta_{i+1}$ 与 $R$ 表示为 $\widehat{AC} = G(\alpha_{i+1}, \beta_{i+1}, R)$ ;此处引入无漏子孔径覆盖系数 $k$ , $|\widehat{AB}| = k|\widehat{AC}|$ ,其中 $k \geq 1$ ,则可得到

$$[0064] \quad F(\alpha_i, \beta_i, R) = kG(\alpha_{i+1}, \beta_{i+1}, R) \quad (1)$$

[0065] 式(1)为迭代方程,解空间不唯一,为获得唯一解需要给出具体的子孔径规划,子孔径规划规则包括:沿经线不变子孔径规划规则与沿纬线不变子孔径规划规则。沿经线不变子孔径规划规则即在经线方向上相邻上子孔径间的重叠区域不变为先决条件进行子孔径规划;同理,沿纬线不变子孔径规划规则即在纬线方向上相邻子孔径间的重叠区域不变为先决条件进行子孔径规划;为求得合理解空间,需附加已知初始条件与规划规则。故选取沿纬线不变子孔径规划,即纬线层上各相邻子孔径间重叠区域一致。设子孔径间的重叠系数为 $C_{ov}$ , $0 < C_{ov} < 1/2$ ;子孔径视场大小为 $f_s$ ;则可得到第 $i$ 纬线层与第 $i+1$ 纬线层上的自旋角 $\alpha_i$ 、 $\alpha_{i+1}$ 为:

$$[0066] \quad \alpha_i = \arcsin\left(\frac{f_s(1-C_{ov})}{2R \sin \beta_i}\right) \quad (2)$$

$$[0067] \quad \alpha_{i+1} = \arcsin\left(\frac{f_s(1-C_{ov})}{2R \sin \beta_{i+1}}\right) \quad (3)$$

[0068] 将式(2)、(3)代入式(1),并且给定摆动角 $\beta_i$ 的初始值,则可唯一的得到摆动角 $\beta_{i+1}$ ,从而获得覆盖球面元件全口径的子孔径分布。

[0069] 如图4所示,获得子孔径分布后步骤3所述的子孔径全局坐标校正,具体实现如下:

[0070] 假设对曲率半径为R的大口径球面光学元件(S3)进行检测,通过XY二维导轨(S1)、二维旋转系统(S2)、Z向导轨(S5)的多轴联动旋转( $\alpha_i, \beta_i$ )角度后采集得到一副 $M_s \times N_s$ 像素的子孔径图像,则对于该子孔径图像中任意一点T(p,q),其中 $1 \leq p \leq M_s, 1 \leq q \leq N_s$ ,利用齐次坐标变换公式可得到T点的全局坐标( $x_i, y_i, z_i$ )为:

[0071]

$$[0071] \quad (x_i, y_i, z_i, 1) = [p - M_s/2, q - N_s/2, R, 1] \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 & 0 \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_i & -\sin \beta_i & 0 \\ 0 & \sin \beta_i & \cos \beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0072] 式(4)中,取 $z_i=0$ ,则得到该幅子孔径图像在XY平面上的投影点T',进而可通过子孔径拼接方法获得被测球面光学元件的全口径二维灰度图像。

[0073] 如图5所示,步骤5所述的全口径二维疵病图像进行三维球面疵病图像还原操作具体如下:

[0074] 对全口径二维灰度图像进行数字化图像处理后可得到一幅 $M_f \times N_f$ 像素的全口径二维疵病图像,此全口径二维疵病图像的中心点O'点的位置坐标为( $M_f/2, N_f/2$ ),以点O'为坐标原点,则可得到像素坐标为(p,q)的T'点距坐标原点O'的距离d及相位 $\gamma$ ,其中:

$$[0075] \quad d = \sqrt{(p - M_f)^2 + (q - N_f)^2},$$

$$[0076] \quad \gamma = \arctan[(p - M_f)/(q - N_f)].$$

[0077] 从而可得到T'点对应的三维球面上T点的球面坐标为( $R, \gamma, \arcsin(d/R)$ ),其中R为被测大口径球面光学元件的曲率半径。从而完成从全口径二维疵病图像到三维球面疵病图像的还原。

### 实施例:

[0078] 针对大口径球面光学元件表面进行了表面疵病检测试验。检测中,选用的被测大口径球面光学元件口径为 $\phi 160\text{mm}$ ,球面曲率半径R为200mm,检测显微镜检测视场大小 $f_s$ 为 $\phi 15\text{mm}$ 。在沿纬线不变规则约束下,按经纬线轨迹对子孔径分布进行规划。规划时,纬线方向子孔径间的重叠区域为 $f_s/4$ ,取经线方向的重叠系数 $k=1.1$ ,则依据公式3可计算出各子孔径在球面上的分布,经三维仿真后得到图6所示的子孔径规划图像。共计划分63个子孔径,从图中可以看出,子孔径分布均匀,并覆盖全球面。其中各子孔径的球面方位角大小如表1所示

[0079] 表1 子孔径规划后各子孔径在球面上的方位角

[0080]

| 序号 | $\alpha(^{\circ})$ | $\beta(^{\circ})$ | 序号 | $\alpha(^{\circ})$ | $\beta(^{\circ})$ | 字号 | $\alpha(^{\circ})$ | $\beta(^{\circ})$ |
|----|--------------------|-------------------|----|--------------------|-------------------|----|--------------------|-------------------|
| 1  | 0                  | 0                 | 22 | 0                  | 9.0944            | 43 | 45.0228            | 11.9323           |
| 2  | 0                  | 3.2249            | 23 | 20.0101            | 9.0944            | 44 | 60.0304            | 11.9323           |
| 3  | 51.4547            | 3.2249            | 24 | 40.0203            | 9.0944            | 45 | 75.038             | 11.9323           |
| 4  | 102.9093           | 3.2249            | 25 | 60.0304            | 9.0944            | 46 | 90.0456            | 11.9323           |
| 5  | 154.364            | 3.2249            | 26 | 80.0406            | 9.0944            | 47 | 105.0533           | 11.9323           |
| 6  | 205.8186           | 3.2249            | 27 | 100.0507           | 9.0944            | 48 | 120.0609           | 11.9323           |
| 7  | 257.2733           | 3.2249            | 28 | 120.0609           | 9.0944            | 49 | 135.0685           | 11.9323           |
| 8  | 308.7279           | 3.2249            | 29 | 140.071            | 9.0944            | 50 | 150.0761           | 11.9323           |
| 9  | 0                  | 6.1919            | 30 | 160.0812           | 9.0944            | 51 | 165.0837           | 11.9323           |
| 10 | 27.7064            | 6.1919            | 31 | 180.0913           | 9.0944            | 52 | 180.0913           | 11.9323           |
| 11 | 55.4127            | 6.1919            | 32 | 200.1014           | 9.0944            | 53 | 195.0989           | 11.9323           |
| 12 | 83.1191            | 6.1919            | 33 | 220.1116           | 9.0944            | 54 | 210.1065           | 11.9323           |
| 13 | 110.8254           | 6.1919            | 34 | 240.1217           | 9.0944            | 55 | 225.1141           | 11.9323           |
| 14 | 138.5318           | 6.1919            | 35 | 260.1319           | 9.0944            | 56 | 240.1217           | 11.9323           |
| 15 | 166.2381           | 6.1919            | 36 | 280.142            | 9.0944            | 57 | 255.1293           | 11.9323           |
| 16 | 193.9445           | 6.1919            | 37 | 300.1522           | 9.0944            | 58 | 270.1369           | 11.9323           |
| 17 | 221.6508           | 6.1919            | 38 | 320.1623           | 9.0944            | 59 | 285.1446           | 11.9323           |
| 18 | 249.3572           | 6.1919            | 39 | 340.1725           | 9.0944            | 60 | 300.1522           | 11.9323           |
| 19 | 277.0635           | 6.1919            | 40 | 0                  | 11.9323           | 61 | 315.1598           | 11.9323           |
| 20 | 304.7699           | 6.1919            | 41 | 15.0076            | 11.9323           | 62 | 330.1674           | 11.9323           |
| 21 | 332.4762           | 6.1919            | 42 | 30.0152            | 11.9323           | 63 | 345.175            | 11.9323           |

[0081] 任取其中一幅子孔径做全局坐标校正、平面二维投影、疵病特征提取及三维球面还原仿真实验。此处取子孔径序列号为36的子孔径进行仿真实验，从表1中可以看出，第36号子孔径中心位置的球面方位角为(280.142, 9.0944)，则为采集第36号子孔径，多轴联动机构需要摆动 $\beta$ 角度9.0944 $^{\circ}$ ，需要白旋口角度280.142 $^{\circ}$ 。第36号子孔径图像如图7所示，该幅子孔径为含有一条长划痕图像，利用公式(3)则得到该得到幅子孔径全局坐标校正矩阵为：

[0082]

$$(x_i, y_i, z_i, 1) = \begin{bmatrix} p - M_s / 2 \\ q - N_s / 2 \\ R \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 9.0944 & -\sin 9.0944 & 0 \\ 0 & \sin 9.0944 & \cos 9.0944 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 280.142 & -\sin 280.142 & 0 & 0 \\ \sin 280.142 & \cos 280.142 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0083] 校正后的图像如图8所示。取 $z_i = 0$ 得到XY平面上的二维投影图像，如图9所示。

[0084] 按上述步骤分别对各子孔径进行全局坐标校正与二维投影后，再进行子孔径图像拼接获得全口径二维灰度图像，对全口径二维灰度图像进行拼接后，按照中值滤波、二值化、特征提取等数字化处理步骤可获得疵病二维信息并得到全口径二维疵病图像，对全口

径二维疵病图像进行三维球面还原操作即可获得三维球面真实疵病信息。

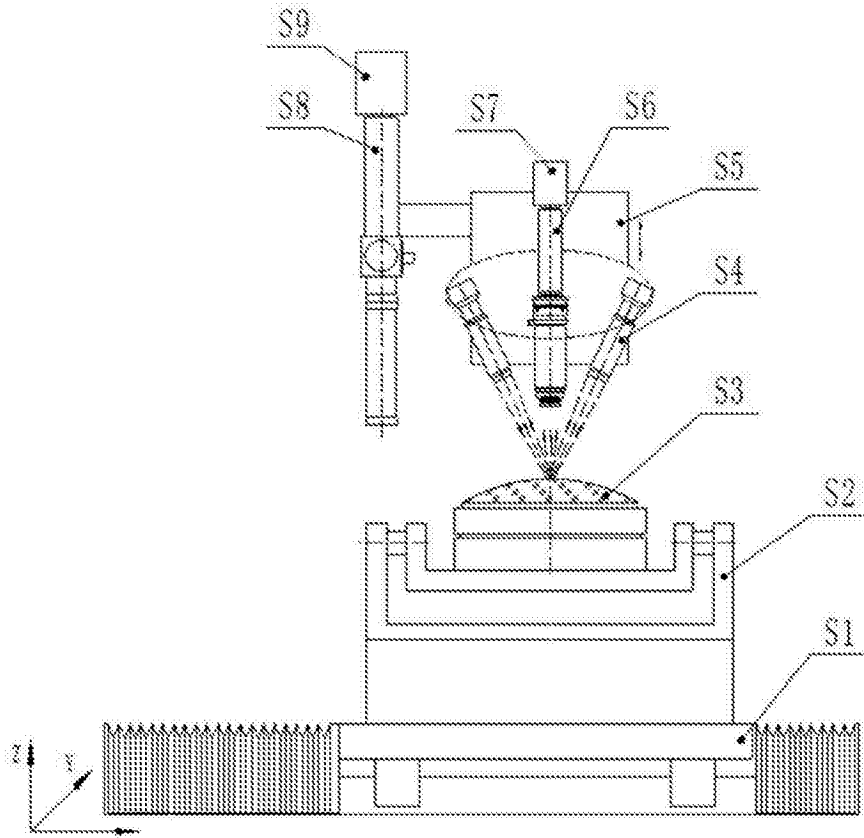


图1

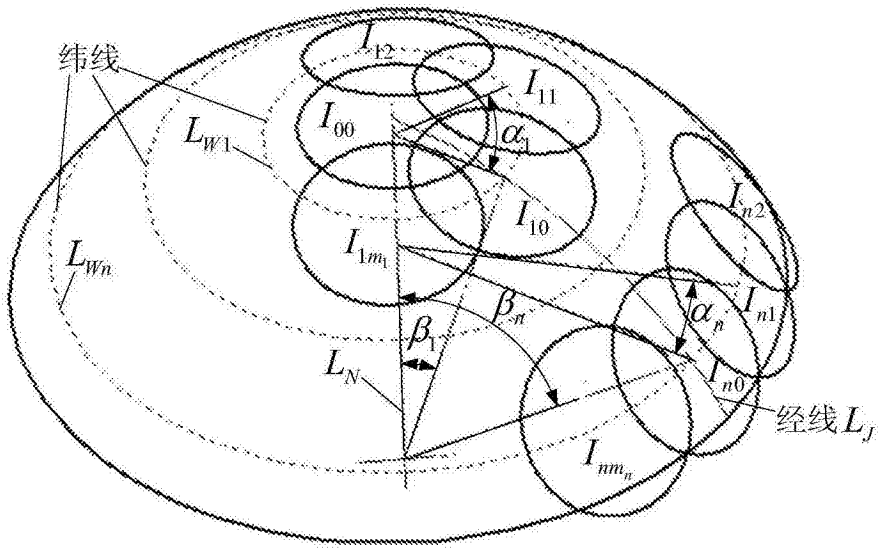


图2

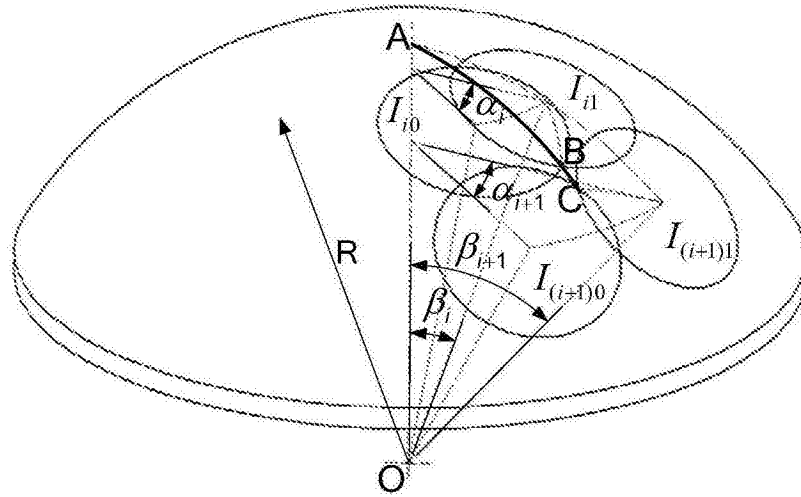


图3

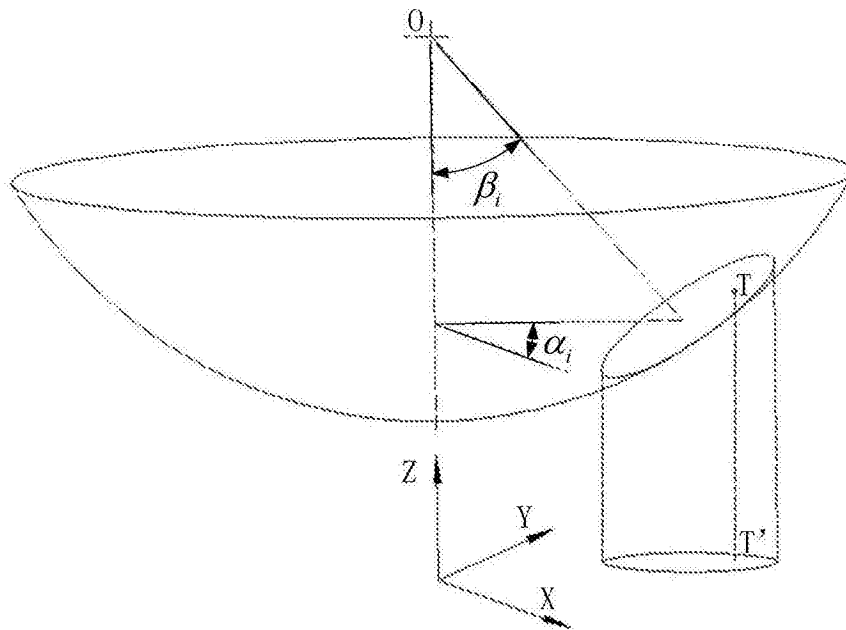


图4

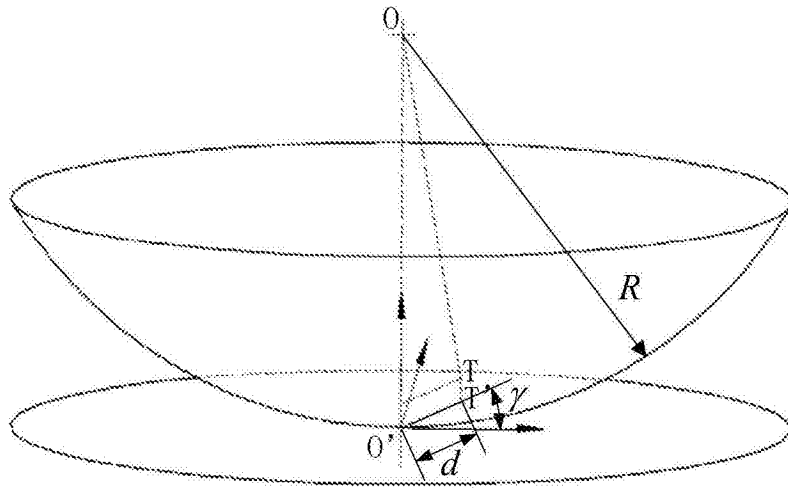


图5

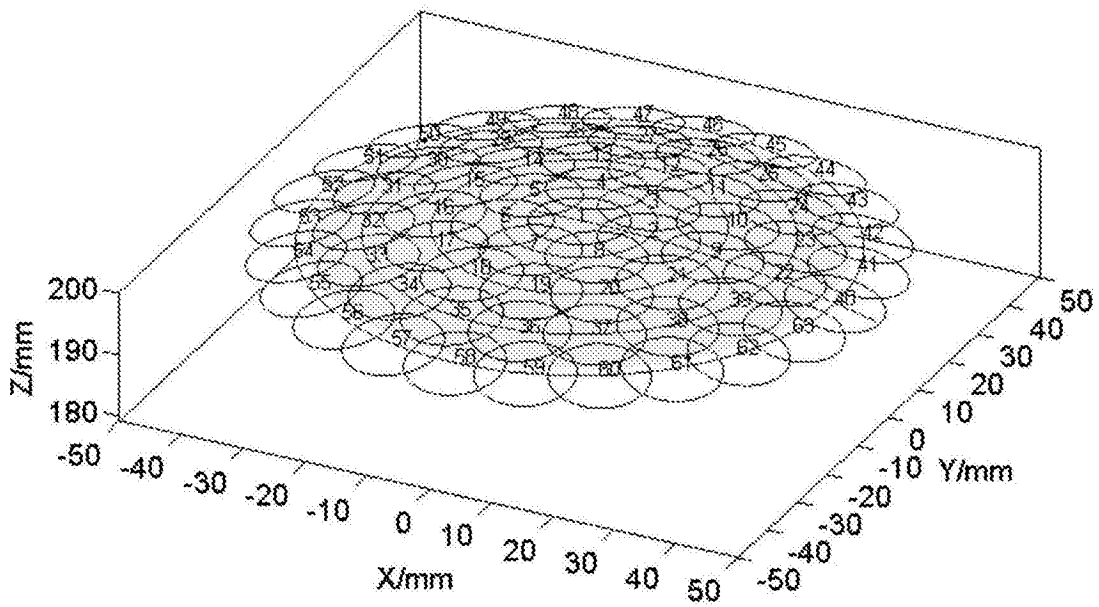


图6

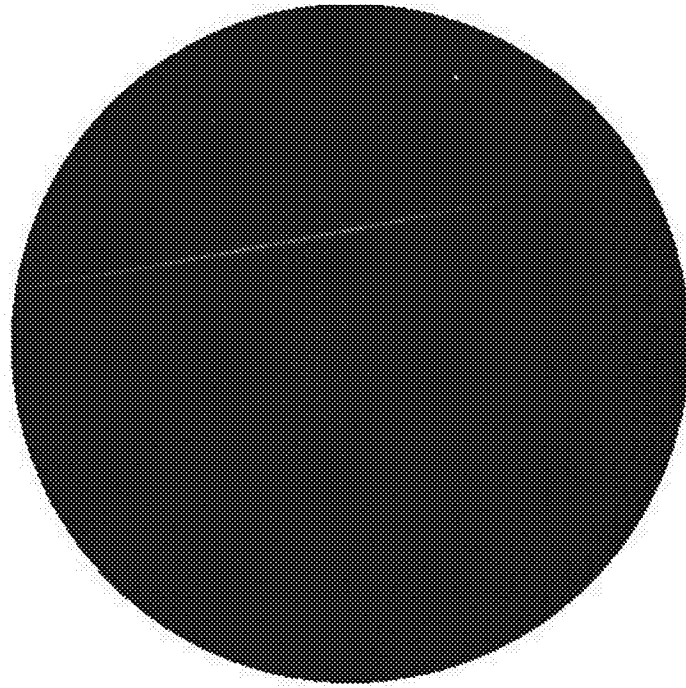


图7

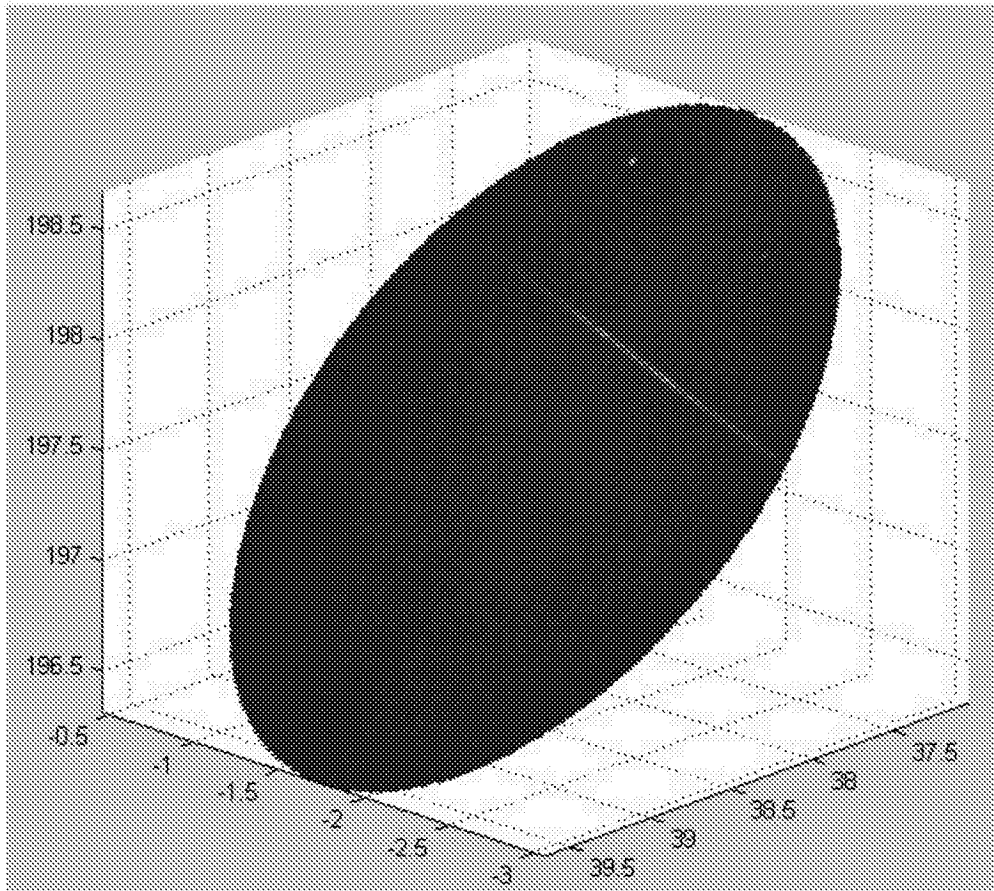


图8



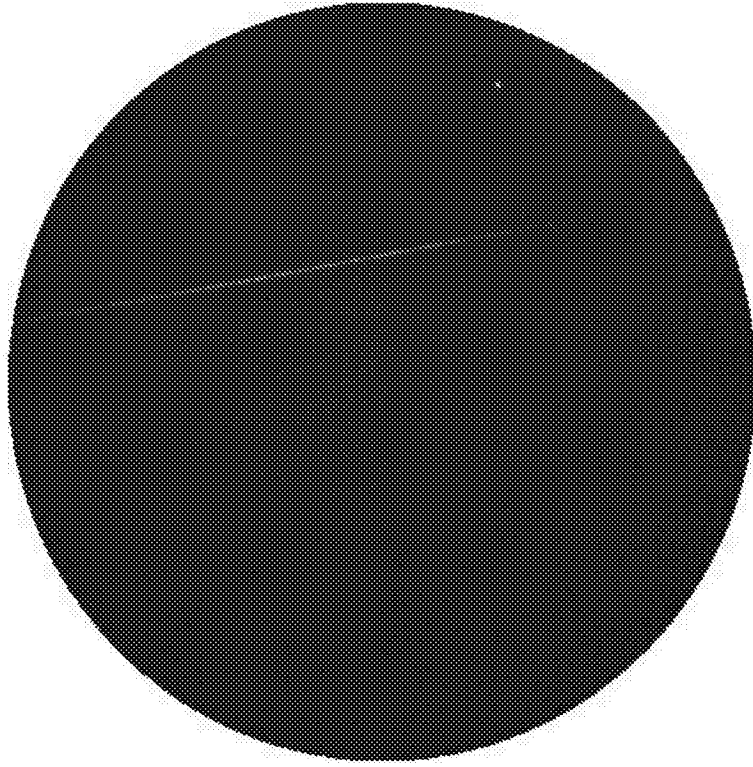


图9