



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110260817 A

(43)申请公布日 2019.09.20

(21)申请号 201910568780.2

(22)申请日 2019.06.27

(71)申请人 复旦大学

地址 200433 上海市杨浦区邯郸路220号

(72)发明人 张祥朝 牛振岐 徐敏

(74)专利代理机构 上海正旦专利代理有限公司

31200

代理人 陆飞 陆尤

(51)Int.Cl.

G01B 11/24(2006.01)

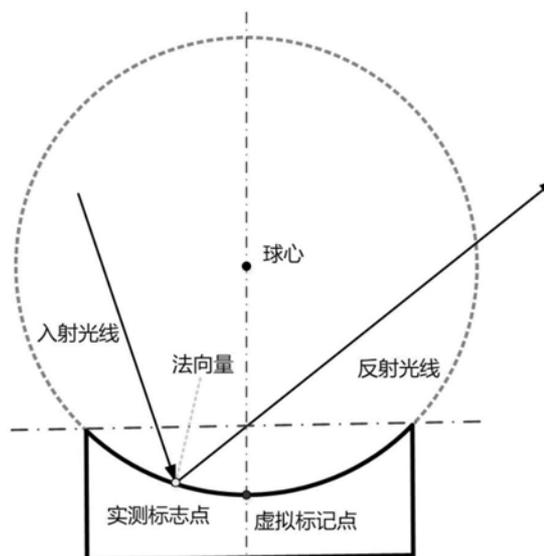
权利要求书2页 说明书3页 附图2页

(54)发明名称

基于虚拟标志点的复杂曲面偏折测量自定位方法

(57)摘要

本发明属于精密测量技术领域,具体为一种基于虚拟标志点的复杂曲面偏折测量自定位方法。本发明方法步骤为:将被测元件口径中心点作为虚拟标志点;首先探测此中心点的高度坐标,计算实测标志点的世界坐标;根据偏折测量图像的相位信息计算实测标志点对应的投影屏像素坐标,以及实测标志点的法向量;利用反向追迹方法,迭代估算球的半径和对应球心坐标;最后得到测量点的坐标,以确定被测工件面形的横向坐标。本发明可有效计算被测面形最佳拟合球面参数,提供可靠的初始测量坐标,避免传统方法中繁琐困难的位置标定工作,对于提高偏折测量的效率与通用性有重要意义。



1. 一种基于虚拟标志点的复杂曲面偏折测量自定位方法,其特征在于,具体步骤如下:

(a) 利用高度计测量光学元件的回转中心即虚拟标志点的高度h;

(b) 将光学元件水平放置在测量平台上,进行偏折测量;

(c) 在获取的图像上提取测量区域的重心,即为实测标志点 (X_m, Y_m, Z_m) , 根据系统标定参数,得到该实测标志点的反射光线的空间直线表达式:

$$\frac{X - X_0}{a_m} = \frac{Y - Y_0}{b_m} = \frac{Z - Z_0}{c_m} \quad (1)$$

其中, (X_0, Y_0, Z_0) 为相机光心坐标, (a_m, b_m, c_m) 是实测反射光线的单位方向向量;

(d) 将回转中心的高度h作为实测标志点的高度Z代入公式(1)中的直线表达式中,计算实测标志点的 X_m, Y_m 坐标:

$$\begin{aligned} X_m &= a_m \left(\frac{Z_m - Z_0}{c_m} \right) + X_0 \\ Y_m &= b_m \left(\frac{Z_m - Z_0}{c_m} \right) + Y_0 \end{aligned} \quad (2)$$

(e) 根据实际测量的图像信息,计算实测标志点对应屏幕像素坐标,也就是点光源坐标 (X_s, Y_s, Z_s) ;

(f) 由点光源坐标 (X_s, Y_s, Z_s) 、实测标志点坐标 (X_m, Y_m, Z_m) 、反射光线三组参数,得到实测标志点法向量 \vec{N} :

$$\begin{cases} \vec{N} = \frac{\vec{N}_I + \vec{N}_R}{\|\vec{N}_I + \vec{N}_R\|} \\ \vec{N}_I = \frac{(X_s - X_m, Y_s - Y_m, Z_s - Z_m)}{\sqrt{(X_s - X_m)^2 + (Y_s - Y_m)^2 + (Z_s - Z_m)^2}} \\ \vec{N}_R = (a_m, b_m, c_m) \end{cases} \quad (3)$$

(g) 由实测标志点 (X_m, Y_m, Z_m) 和法向量 \vec{N} 得到一条空间直线:

$$\frac{X - X_m}{N_x} = \frac{Y - Y_m}{N_y} = \frac{Z - Z_m}{N_z} \quad (4)$$

其中, N_x, N_y, N_z 分别是法向量 \vec{N} 的分量;

(h) 将被测表面近似拟合为球面,球心在实测标志点与该点法向量组成的空间直线上;球的半径利用被测点反向追迹的方法估算得到。

2. 根据权利要求1所述的复杂曲面偏折测量自定位方法,其特征在于,利用被测点反向追迹的方法估算球的半径,迭代过程为:

(i) 将相机光心到标志点的距离设为初始半径R,球心坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 满足以下条件:

$$\begin{cases} \frac{X_c - X_m}{N_x} = \frac{Y_c - Y_m}{N_y} = \frac{Z_c - Z_m}{N_z} \\ (X_c - X_m)^2 + (Y_c - Y_m)^2 + (Z_c - Z_m)^2 = R^2 \end{cases} \quad (5)$$

(ii) 由球心坐标、半径R和图像中每个测量点的像素坐标得到初始测量点坐标 (X_i, Y_i, Z_i) :

$$\begin{cases} \frac{X_i - X_0}{a_i} = \frac{Y_i - Y_0}{b_i} = \frac{Z_i - Z_0}{c_i} \\ (X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2 = R^2 \end{cases} \quad (6)$$

其中, (a_i, b_i, c_i) 是每个测量点处反射光线的单位方向向量;

于是得到该点的法向量 \vec{N}_i 以及入射光线的方向向量 \vec{N}_i^R :

$$\begin{cases} \vec{N}_i^I = \vec{N}_i^R - 2\vec{N}_i(\vec{N}_i \cdot \vec{N}_i^R) \\ \vec{N}_i = \frac{[(X_i - X_c), (Y_i - Y_c), (Z_i - Z_c)]}{\sqrt{(X_i - X_c)^2 + (Y_i - Y_c)^2 + (Z_i - Z_c)^2}} \\ \vec{N}_i^R = (a_i, b_i, c_i) \end{cases} \quad (7)$$

其中, \cdot 是内积符号;

(iii) 根据每个测量点的坐标和入射光线进行反向追迹, 并计算追迹的屏幕坐标, 得到反向追迹误差;

(iv) 判断反向追迹误差是否达到最小误差, 不满足, 则返回步骤 (i); 满足则终止迭代过程, 输出所有估计的被测点坐标, 并进行后续的面型重构。

3. 根据权利要求2所述的复杂曲面偏折测量自定位方法, 其特征在于, 由所拟合的球面球心及半径确定被测工件面形的位置与基本形状。

基于虚拟标志点的复杂曲面偏折测量自定位方法

技术领域

[0001] 本发明属于光学工程技术领域,具体为一种复杂曲面偏折测量自定位方法。

背景技术

[0002] 高质量的光学元件越来越多地应用于各种领域,包括精密工程、航空航天等。光学元件的面形对其成像功能的实现至关重要。对于光滑的镜面,相位测量偏折术有着诸多优异的特性。其中,单目偏折术的测量系统简单,动态范围大,抗干扰能力强,可用于复杂曲面的测量,近年来得到广泛关注。其原理是在显示器上产生规则条纹,经被测表面反射后条纹发生变形,采用CCD相机拍摄变形图样,由已知被测工件面型参数估算被测点坐标,由几何关系推导可以计算出被测面形的表面梯度分布,再通过积分得到面形高度。

[0003] 在实际测量过程中,待测工件的坐标系需要与工作台的世界坐标系统一,以便准确地估计被测点坐标。常用的方法是利用三坐标测量机或者激光跟踪器将工作台和待测工件进行坐标系标定,这种方法不仅标定工作繁琐困难,而且成本高昂。因此需要一种更简便的高精度工件定位的标定方法。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种复杂曲面偏折测量自定位方法,以实现对待测工件精确定位、对初始测量点的坐标的准确地估计。

[0005] 由于大部分光学反射精密为凹面,承担聚焦或光束准直功能,局部形状可近似用球模型拟合;在偏折测量中,对于未知面形的回转光学元件,可以用球模型作为预设面形计算被测点坐标,以供后续面型重构。

[0006] 本发明提供的复杂曲面偏折测量自定位方法,是基于虚拟标志点的技术的,具体步骤如下:

[0007] (a) 利用高度计测量光学元件的回转中心(即虚拟标志点)的高度 h ;

[0008] (b) 将光学元件水平放置在测量平台上,进行偏折测量;

[0009] (c) 在获取的图像上提取测量区域的重心,即为实测标志点 (X_m, Y_m, Z_m) ,根据系统标定参数,得到该实测标志点的反射光线的空间直线表达式:

$$[0010] \quad \frac{X - X_0}{a_m} = \frac{Y - Y_0}{b_m} = \frac{Z - Z_0}{c_m} \quad (1)$$

[0011] 其中, (X_0, Y_0, Z_0) 为相机光心坐标, (a_m, b_m, c_m) 是实测反射光线的单位方向向量;

[0012] (d) 将回转中心的高度 h 作为实测标志点的高度 Z 代入公式(1)中的直线表达式中,计算实测标志点的 X_m, Y_m 坐标:

$$[0013] \quad \begin{aligned} X_m &= a_m \left(\frac{Z_m - Z_0}{c_m} \right) + X_0 \\ Y_m &= b_m \left(\frac{Z_m - Z_0}{c_m} \right) + Y_0 \end{aligned} \quad (2)$$

[0014] (e) 根据实际测量的图像信息, 计算实测标志点对应屏幕像素坐标, 也就是点光源坐标 (X_s, Y_s, Z_s) ;

[0015] (f) 由点光源坐标 (X_s, Y_s, Z_s) 、实测标志点坐标 (X_m, Y_m, Z_m) 、反射光线三组参数, 得到实测标志点法向量 \vec{N} :

$$[0016] \begin{cases} \vec{N} = \frac{\vec{N}_I + \vec{N}_R}{\|\vec{N}_I + \vec{N}_R\|} \\ \vec{N}_I = \frac{(X_s - X_m, Y_s - Y_m, Z_s - Z_m)}{\sqrt{(X_s - X_m)^2 + (Y_s - Y_m)^2 + (Z_s - Z_m)^2}} \\ \vec{N}_R = (a_m, b_m, c_m) \end{cases} \quad (3)$$

[0017] (g) 由实测标志点 (X_m, Y_m, Z_m) 和法向量 \vec{N} 得到一条空间直线:

$$[0018] \frac{X - X_m}{N_x} = \frac{Y - Y_m}{N_y} = \frac{Z - Z_m}{N_z} \quad (4)$$

[0019] 其中, N_x, N_y, N_z 分别是法向量 \vec{N} 的分量;

[0020] (h) 将被测表面近似拟合为球面, 则球心在实测标志点与该点法向量组成的空间直线上; 球的半径利用被测点反向追迹的方法估算得到。

[0021] 具体地, 利用被测点反向追迹的方法估算球的半径, 迭代过程为:

[0022] (i) 将相机光心到标志点的距离设为初始半径 R , 球心坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 满足以下条件:

$$[0023] \begin{cases} \frac{X_c - X_m}{N_x} = \frac{Y_c - Y_m}{N_y} = \frac{Z_c - Z_m}{N_z} \\ (X_c - X_m)^2 + (Y_c - Y_m)^2 + (Z_c - Z_m)^2 = R^2 \end{cases} \quad (5)$$

[0024] (ii) 由球心坐标、半径 R 和图像中每个测量点的像素坐标得到初始测量点坐标 (X_i, Y_i, Z_i) :

$$[0025] \begin{cases} \frac{X_i - X_0}{a_i} = \frac{Y_i - Y_0}{b_i} = \frac{Z_i - Z_0}{c_i} \\ (X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2 = R^2 \end{cases} \quad (6)$$

[0026] 其中, (a_i, b_i, c_i) 是每个测量点处反射光线的单位方向向量;

[0027] 于是可以得到该点的法向量 \vec{N}_i 以及入射光线的方向向量 \vec{N}_i^I :

$$[0028] \begin{cases} \vec{N}_i^I = \vec{N}_i^R - 2\vec{N}_i(\vec{N}_i \cdot \vec{N}_i^R) \\ \vec{N}_i = \frac{[(X_i - X_c), (Y_i - Y_c), (Z_i - Z_c)]}{\sqrt{(X_i - X_c)^2 + (Y_i - Y_c)^2 + (Z_i - Z_c)^2}} \\ \vec{N}_i^R = (a_i, b_i, c_i) \end{cases} \quad (7)$$

[0029] 其中, \cdot 是内积符号;

[0030] (iii) 根据每个测量点的坐标和入射光线进行反向追迹, 并计算追迹的屏幕坐标, 得到反向追迹误差;

[0031] (iv) 判断反向追迹误差是否达到最小误差, 不满足, 则返回步骤(i); 满足则终止迭代过程, 输出所有估计的被测点坐标, 并进行后续的面型重构。

[0032] 进一步地, 由所拟合的球面球心及半径确定被测工件面形的位置与基本形状。

[0033] 本发明可有效计算被测面形最佳拟合球面参数, 提供可靠的初始测量坐标, 避免传统方法中繁琐困难的位置标定工作, 对于提高偏折测量的效率与通用性有重要意义。

附图说明

[0034] 图1为球面标志点估算图示。

[0035] 图2为球面镜测量结果图示。

[0036] 图3为球面镜测量误差图示。

具体实施方式

[0037] 下面通过实施例结合附图进一步说明本发明。

[0038] 实施例1: 利用高度计测量口径为70mm、半径为1000mm的球面镜的回转中心(虚拟标志点)的高度 h , 测量结果为12mm; 将球面镜水平放置在测量平台的任意位置处, 并进行偏折测量; 根据侧轮廓的圆属性, 在图像上提取测量区域的重心, 即为实测标志点, 根据系统标定参数, 可以得到该实测标志点的反射光线的空间直线表达式; 将回转中心的高度作为实测标志点的高度 Z 代入上述的直线表达式中, 计算实测标志点的 X 、 Y 坐标分别为1.63mm和0.26mm; 如图1所示, 估算的轮廓中心和实际的回转中心有一定的偏移, 得到反射光线为 45° , 球面镜矢高为1mm, 球的半径为100mm, 则横向偏移量为1mm, 而实测标志点和虚拟标志点的纵向偏差仅为5 μm , 所以对于大部分被测元件, 实验中估算的实测标志点坐标误差不会超过误差容许范围。

[0039] 根据本发明的方法, 利用被测点反向追迹的方法迭代估算球的半径为1020mm, 球心坐标为(1.7mm, 0mm, 1032.1mm), 计算所有估计的被测点坐标, 并进行后续的面型重构, 重构结果如图2所示。测量误差RMS为85.6nm, 误差图如图3所示。

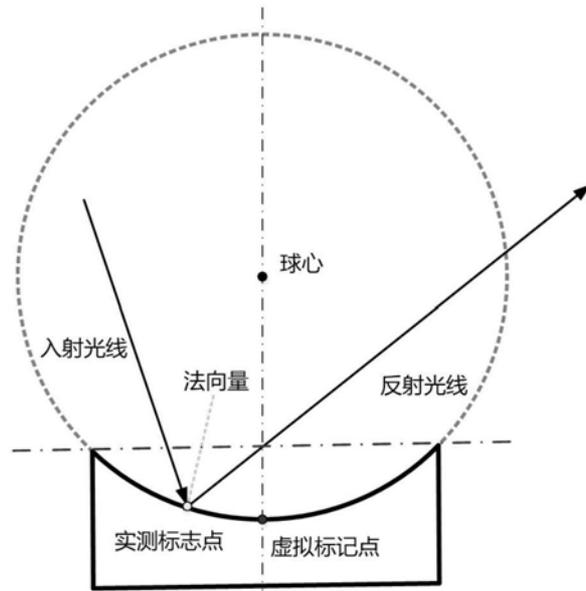


图1

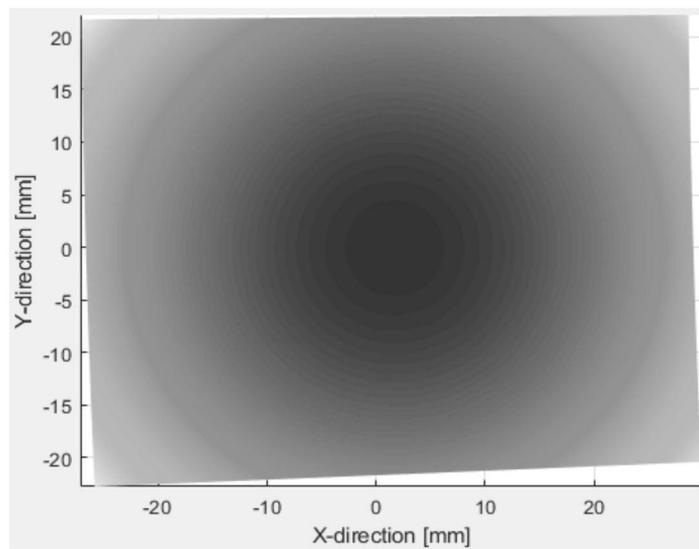


图2

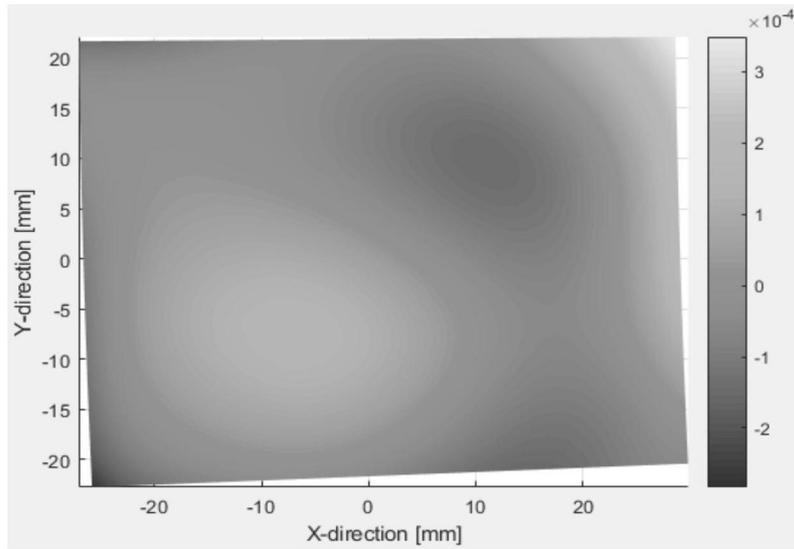


图3