



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108620955 B

(45)授权公告日 2019.11.19

(21)申请号 201810372989.7

G06T 7/80(2017.01)

(22)申请日 2018.04.18

(56)对比文件

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 108620955 A

CN 103499416 A, 2014.01.08, 全文.

CN 86102519 A, 1988.04.06, 全文.

CN 105043259 A, 2015.11.11, 全文.

JP 2016040531 A, 2016.03.24, 全文.

(43)申请公布日 2018.10.09

(73)专利权人 大连理工大学

地址 116024 辽宁省大连市甘井子区凌工  
路2号

审查员 刘江妮

(72)发明人 刘巍 潘翼 李肖 王福吉

贾振元

(74)专利代理机构 大连理工大学专利中心

21200

代理人 关慧贞

(51)Int.Cl.

B23Q 17/24(2006.01)

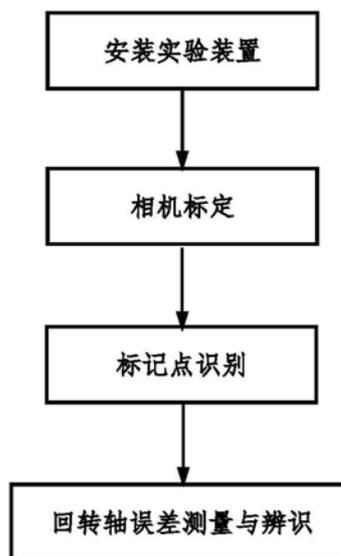
权利要求书3页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

基于单目视觉的机床回转轴误差测量与辨识方法

(57)摘要

本发明基于单目视觉的机床回转轴误差测量与辨识方法属于机床几何误差测量领域,涉及一种利用单目视觉测量机床回转轴几何误差测量与辨识的方法。该方法采用单目相机在回转轴间歇、连续两次回转的过程中,采集带有编码标记点的定位靶标图像,经过对间歇旋转的图像处理,重建编码标记点在机床坐标系下的坐标,利用理论与实际点坐标在误差矩阵模型中的对应关系,求解机床独立位置误差,再经过对连续旋转拍摄得到的的图像处理求得机床综合误差,最后在机床综合误差中消除机床独立位置误差得到机床依赖位置误差。该方法有效解决了测量过程繁琐以及辨识模型复杂的问题,采用单目视觉实现非接触测量,设备成本低及设备鲁棒性高。



1. 一种基于单目视觉的机床回转轴误差测量与辨识方法,其特征为,该方法采用单目相机在回转轴间歇、连续两次回转的过程中,采集带有编码标记点的定位靶标图像,经过对间歇旋转的图像处理,重建编码标记点在机床坐标系下的坐标,利用理论点与实际点坐标在误差矩阵模型中的对应关系,求解机床独立位置误差,再经过对连续旋转拍摄得到的的图像处理可求得机床综合误差,最后在机床综合误差中消除机床独立位置误差可得到机床依赖位置误差;方法的具体步骤如下:

#### 第一步,安装实验装置

实验装置由单目相机(1)、定位靶标(2)、机床工作台(3)、系统安装架(4)及夹具(5)组成;将单目相机(1)垂直机床工作台(3)安装在系统安装架(4)上,再将棋盘格标定板装夹于机床工作台(3)上为相机标定做准备;将夹具(5)安装在机床工作台(3)上,方便定位靶标(2)与棋盘格标定板的更换装夹;

定位靶标(2)为光刻玻璃板,上表面光刻有呈菱形分布的第一圆形编码点(69)、第二圆形编码点(71)、第三圆形编码点(73)、第四圆形编码点(75),及位于中心的中心编码点(119),并以中心编码点(119)为原点建立机床坐标系;定位靶标(2)为光刻玻璃板,上表面光刻有呈菱形分布的第一圆形编码点(69)、第二圆形编码点(71)、第三圆形编码点(73)、第四圆形编码点(75)及位于图像中心的中心编码点(119),并以中心编码点(119)为原点建立机床坐标系,另外四个圆形编码点用于准确传递机床的运动信息;标定好后将棋盘格标定板更换成定位靶标(2),并在机床工作台(3)上固定,将机床待测的回转轴C轴归零;

#### 第二步,相机标定

本发明依据张氏标定法结合高精度棋盘格标定板来标定单目相机的内参数及畸变参数,选取空间一点坐标为 $(X_p, Y_p, Z_p)$ ,其在像平面上投影点坐标为 $(x, y)$ ,综合考虑实际成像畸变现象,使用摄像机非线性透视投影模型表达式为:

$$\begin{cases} s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{bmatrix} = M_0 M_1 \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{bmatrix} \\ x = x' - \delta_x \quad y = y' - \delta_y \\ r = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2} \\ \delta_x = x[k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6] + [p_1(2x^2 + r^2) + 2p_2 xy] \\ \delta_y = y[k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6] + [p_2(2x^2 + r^2) + 2p_1 xy] \end{cases} \quad (1)$$

其中, $f$ 为单目相机的焦距, $\alpha_x = f/d_x$ 与 $\alpha_y = f/d_y$ 分别定义为 $x$ 、 $y$ 两轴上的归一化焦距, $(x_0, y_0)$ 为像素坐标系原点坐标,由 $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$ 、 $u_0$ 、 $v_0$ 四个参数构成的 $M_0$ 为相机内参数矩阵, $R$ 为 $3 \times 3$ 的单位旋转正交阵, $t$ 为平移向量,组成的 $M_1$ 为相机外参数矩阵;即由内参数 $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$ 、 $u_0$ 、 $v_0$ 及外参数 $R$ 、 $t$ 确定机床坐标系与像素坐标系的关系;点 $(x, y)$ 为投影点的理想位置, $(x', y')$ 为考虑畸变的实际坐标, $\delta_x$ 、 $\delta_y$ 为横轴与纵轴的非线性畸变值, $r$ 为像素坐标系下投影点与原点的距离, $k_1$ 、 $k_2$ 与 $k_3$ 分别为一阶、二阶与三阶径向畸变系数, $p_1$ 、 $p_2$ 是一阶、二阶离心畸变系数;通过标定单目相机可得内参数 $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$ 、 $u_0$ 、 $v_0$ 及畸变参数 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $p_1$ 、 $p_2$ ,进而确定相机成像模型;单目相机(1)标定好后,将棋盘格标定板更换成定位靶标(2),并在机床工作台(3)上固定;

### 第三步,标记点识别

对回转轴进行分度,在机床每隔一定分度值间歇旋转一周的过程中采集标记点图像,利用摄像机成像模型重建编码标记点机床坐标系下的坐标;本发明采用圆环编码标记点的定位靶标来表征机床运动位置,圆环编码中心为黑色圆标记点,外圈为同心圆环区域,用于表征圆环编码的身份信息,称为编码带;该圆环区域按照角度平均分为10段,每段对应一个二进制位;背景色为白色与黑色,相对应的二进制编码为“0”、“1”;从标记点圆心出发,按照一定方向扫描编码带,扫描到黑色码带记为1,白色码带记为0;如果没有扫描到编码带,则从中心开始重新扫描;扫描一周后,整个编码点的码值序列即被全部读出,形成一个二进制序列,最终转化为十进制整数,从而获得编码点的码值;解码后,根据不同编码标记点的码值,再利用标定好的摄像机成像模型内外参数,即可重建各个对应标记点的三维坐标,并经过坐标系基准转换,最终可得机床坐标系下的编码标记点的三维坐标为 $(X_w, Y_w, Z_w)$ ;

### 第四步,回转轴误差测量与辨识

数控机床回转轴误差主要有两种误差,分别是机床独立位置误差与机床依赖位置误差,前者主要为机床的装配误差且与机床命令位置无关,所以为常量,后者主要来源于数控机床零、部件的制造缺陷造成的几何误差,与机床命令位置相关,所以为变量且回转角度的一个函数,两者结合可将机床回转轴的综合误差表示为: $e = e_{PIGE} + e_{PDGE}(\theta)$  (2)

首先辨识机床回转轴机床独立位置误差,当控制机床间歇运动到某一位置时,此时回转轴的综合误差项只含有 $e_{PIGE}$ ,又连接误差共有4项,包括2项线性位置误差,2项转角误差,则其误差矩阵可表示为

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \varepsilon_{yc} & \delta_{xc} \\ 0 & 1 & -\varepsilon_{xc} & \delta_{yc} \\ -\varepsilon_{yc} & \varepsilon_{xc} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $\varepsilon_{xc}$ 、 $\varepsilon_{yc}$ 为C轴实际中心与理想中心在X方向和Y方向的线性位置误差; $\delta_{xc}$ 、 $\delta_{yc}$ 为C轴实际轴线与理想轴线绕X轴与Y轴的转角误差;由于误差矩阵T中只含有4项未知量,通过对回转轴的分度,在机床坐标系的 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 和 $270^\circ$ 的4个角度下,根据单目相机采集编码标记点的图像,利用像素坐标系下的坐标及摄像机成像模型,分别重建编码标记点机床坐标系下的坐标为 $X_w^k$ 、 $Y_w^k$ 、 $Z_w^k$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ ),利用公式(4)得出的方程即可求得数控机床回转轴的机床独立位置误差;设定机床坐标系下4个角度的理论点坐标为 $X_w^i$ 、 $Y_w^i$ 、 $Z_w^i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ),求解公式为:

$$\begin{bmatrix} X_w^k \\ Y_w^k \\ Z_w^k \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \varepsilon_{yc} & \delta_{xc} \\ 0 & 1 & -\varepsilon_{xc} & \delta_{yc} \\ -\varepsilon_{yc} & \varepsilon_{xc} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w^i \\ Y_w^i \\ Z_w^i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

再辨识机床回转轴机床依赖位置误差,控制机床以一定速度运行,此时回转轴的综合误差项为 $e_{PIGE} + e_{PDGE}(\theta)$ ,则其误差矩阵表示为:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \varepsilon_{yc} + \Delta\varepsilon_{yc} & \delta_{xc} + \Delta\delta_{xc} \\ 0 & 1 & -\varepsilon_{xc} - \Delta\varepsilon_{yc} & \delta_{yc} + \Delta\delta_{xc} \\ -\varepsilon_{yc} - \Delta\varepsilon_{yc} & \varepsilon_{xc} + \Delta\varepsilon_{yc} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  $\Delta\varepsilon_{xc}$ 、 $\Delta\varepsilon_{yc}$ 为C轴实际中心与理想中心在X方向和Y方向的线性位置误差;  $\Delta\delta_{xc}$ 、 $\Delta\delta_{yc}$ 为C轴实际轴线与理想轴线绕X轴与Y轴的转角误差,上述4项误差即为所求机床依赖位置误差;之前在静态条件下已经辨识机床回转轴机床独立位置误差,即 $\varepsilon_{xc}$ 、 $\varepsilon_{yc}$ 、 $\delta_{xc}$ 、 $\delta_{yc}$ 为已知量,则T中仍然含有4项未知量,同样在机床坐标系中 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 和 $270^\circ$ 的4个角度下触发相机拍摄并分别重建编码标记点坐标,记为 $X_w^l$ 、 $Y_w^l$ 、 $Z_w^l$  ( $l = 1, 2, 3, 4$ ),求解公式为:

$$\begin{bmatrix} X_w^l \\ Y_w^l \\ Z_w^l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \varepsilon_{yc} + \Delta\varepsilon_{yc} & \delta_{xc} + \Delta\delta_{xc} \\ 0 & 1 & -\varepsilon_{xc} - \Delta\varepsilon_{yc} & \delta_{yc} + \Delta\delta_{xc} \\ -\varepsilon_{yc} - \Delta\varepsilon_{yc} & \varepsilon_{xc} + \Delta\varepsilon_{yc} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w^i \\ Y_w^i \\ Z_w^i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

即在准静态工作下求得数控机床回转轴的综合误差,减去已知的机床独立位置误差即为回转轴的机床依赖位置误差。

## 基于单目视觉的机床回转轴误差测量与辨识方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于机床几何误差测量领域,涉及一种利用单目视觉测量机床回转轴几何误差测量与辨识的方法。

### 背景技术

[0002] 随着航空、航天、核电、冶金等高新技术领域的高速发展和加工水平的快速提高,对高端数控机床及装备的需求迅速增多,也对数控机床的加工精度提出更高要求。五轴联动数控加工作为空间连续、平滑、和复杂曲面的主要加工手段,较传统的三轴数控加工在加工精度、质量及效率上均有较大提升,而回转轴作为五轴数控机床的重要组成部分,其几何误差在加工中通过多轴耦合形成复杂的空间误差,严重影响机床的加工精度,所以研究五轴联动数控机床中回转轴误差的测量与辨识具有现实意义。目前主要的机床误差检测方法有:标准件测量、激光干涉仪、球杆仪、平面光栅、R-test等,其中视觉测量方法成本低、结构简便、测量精度高等优势,可实现机床误差的非接触测量,因此,发明一种操作方便、测量成本低,测量精度高的回转轴误差检测与辨识技术尤为重要。

[0003] 华中科技大学的周向东、唐小琦等人发明的专利号为CN 105371793 A的“一种五轴机床旋转轴几何误差一次装卡测量方法”基于机构的空间误差模型,可通过一次装卡测量,计算出五轴数控机床两个旋转轴的十二项几何误差参数,但该方法属于接触式测量方法,且要求多测头逐一触碰正方体基准试件的不同测量面,操作过程较为繁琐。西安瑞特快速制造工程研究有限公司的林京、王琇峰等人发明的专利号为CN 102744648 A的“一种数控机床回转工作台误差测量与分离的方法”通过电涡流传感器使用测量在机床工作台面中心的金属圆环,结合误差解耦方法可完成机床几何误差的非接触测量,该方法结构简单、操作方便,但较适用于直线轴的误差检测,且成本较高,并不适用于回转轴误差的测量与辨识。

### 发明内容

[0004] 本发明要解决的技术难题是克服现有技术的问题,发明一种基于单目视觉的机床回转轴误差测量与辨识方法。该方法采用单目视觉系统结合定位靶标检测五轴数控机床的回转轴误差,实现了回转轴的单次测量多项误差分离。首先在机床工作台上安装含有编码标记点的定位靶标并对回转轴进行分度,在机床每隔一定分度值间歇旋转一周的过程中采集标记点图像,利用摄像机成像模型重建编码标记点机床坐标系下的坐标,将测量点坐标带入到误差矩阵模型中求解机床独立位置误差;之后设定机床连续回转一周,控制相机每隔相同分度值采集标记点图像,同理可求得机床综合误差,消除机床独立位置误差即为机床依赖位置误差,该方法利用编码标记点结合单目视觉实现数控机床回转轴误差的检测与辨识,有效解决了测量过程繁琐以及辨识模型复杂问题。辨识模型简单且为非接触测量,操作简易,设备成本低、鲁棒性高。

[0005] 本发明所采用的技术方案是一种基于单目视觉的机床回转轴误差测量与辨识方

法,其特征为,该方法采用单目相机在回转轴间歇、连续两次回转的过程中,采集带有编码标记点的定位靶标图像,经过对间歇旋转的图像处理,重建编码标记点在机床坐标系下的坐标,利用理论点与实际点坐标在误差矩阵模型中的对应关系,求解机床独立位置误差,再经过对连续旋转拍摄得到的的图像处理可求得机床综合误差,最后在机床综合误差中消除机床独立位置误差得到机床依赖位置误差;方法的具体步骤如下:

[0006] 第一步,安装实验装置

[0007] 实验装置由单目相机1、定位靶标2、机床工作台3、系统安装架4,夹具5组成,单目相机1垂直机床工作台3安装在系统安装架4上,先将棋盘格标定板装夹于机床工作台3上准备标定单目相机;夹具5安装在机床工作台3上,以方便定位靶标2与棋盘格标定板的更换装夹,将机床待测的回转轴C轴归零;

[0008] 定位靶标2为光刻玻璃板,上表面光刻有呈菱形分布的第一、第二、第三、第四圆形编码点69、71、73、75,及位于图像中心的中心编码点119,并以中心编码点119为原点建立机床坐标系;

[0009] 第二步,相机标定

[0010] 本发明依据张氏标定法结合高精度棋盘格标定板来标定单目相机的内参数及畸变参数,选取空间一点坐标为 $(X_p, Y_p, Z_p)$ ,其在像平面上投影点坐标为 $(x, y)$ ,综合考虑实际成像的畸变现象,使用摄像机非线性透视投影模型表达式如下:

$$[0011] \begin{cases} s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{bmatrix} = M_0 M_1 \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{bmatrix} \\ x = x' - \delta_x \quad y = y' - \delta_y \\ r = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2} \\ \delta_x = x[k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6] + [p_1(2x^2 + r^2) + 2p_2 xy] \\ \delta_y = y[k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6] + [p_2(2x^2 + r^2) + 2p_1 xy] \end{cases} \quad (1)$$

[0012] 其中, $f$ 为单目相机的焦距, $\alpha_x = f/dx$ 与 $\alpha_y = f/dy$ 分别定义为 $x$ 、 $y$ 两轴上的归一化焦距, $(x_0, y_0)$ 为像素坐标系原点坐标,由 $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$ 、 $u_0$ 、 $v_0$ 四个参数构成的 $M_0$ 为相机内参数矩阵, $R$ 为 $3 \times 3$ 的单位旋转正交阵, $t$ 为平移向量,组成的 $M_1$ 为相机外参数矩阵;即由内参数 $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$ 、 $u_0$ 、 $v_0$ 及外参数 $R$ 、 $t$ 确定机床坐标系与像素坐标系的关系;点 $(x, y)$ 为投影点的理想位置, $(x', y')$ 为考虑畸变的实际坐标, $\delta_x$ 、 $\delta_y$ 为横轴与纵轴的非线性畸变值, $r$ 为像素坐标系下投影点与原点的距离, $k_1$ 、 $k_2$ 与 $k_3$ 分别为一阶、二阶与三阶径向畸变系数, $p_1$ 、 $p_2$ 是一阶、二阶离心畸变系数;通过标定单目相机可得内参数 $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$ 、 $u_0$ 、 $v_0$ 及畸变参数 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $p_1$ 、 $p_2$ ,进而确定相机成像模型;单目相机1标定好后,将棋盘格标定板更换成定位靶标2,并固定在机床工作台3上;

[0013] 第三步,标记点识别

[0014] 对回转轴进行分度,在机床每隔一定分度值间歇旋转一周的过程中采集标记点图像,利用摄像机成像模型重建编码标记点机床坐标系下的坐标;本发明采用圆环编码标记点的定位靶标2来表征机床运动位置,圆环编码中心为黑色圆标记点,外圈为同心圆环区域,用于表征圆环编码的身份信息,称为编码带;该圆环区域按照角度平均分为10段,每段

对应一个二进制位；背景色为白色与黑色，相对应的二进制编码为“0”、“1”；从标记点圆心出发，按照一定方向扫描编码带，扫描到黑色码带记为1，白色码带记为0；如果没有扫描到编码带，则从中心开始重新扫描；扫描一周后，整个编码点的码值序列即被全部读出，形成一个二进制序列，最终转化为十进制整数，从而获得编码点的码值；解码后，根据不同编码标记点的码值，再利用标定好的摄像机成像模型内外参数，即可重建各个对应标记点的三维坐标，并经过坐标系基准转换，最终可得机床坐标系下的编码标记点的三维坐标为 $(X_w, Y_w, Z_w)$ ；

[0015] 第四步，回转轴误差测量与辨识

[0016] 数控机床回转轴误差主要有两种误差，分别是机床独立位置误差(PIGE)与机床依赖位置误差(PDGE)，前者主要为机床的装配误差且与机床命令位置无关，所以为常量，后者主要来源于数控机床零、部件的制造缺陷造成的几何误差，与机床命令位置相关，所以为变量且回转角度的一个函数，两者结合可将机床回转轴的综合误差表示为：

$$[0017] \quad e = e_{PIGE} + e_{PDGE}(\theta) \quad (2)$$

[0018] 首先辨识机床回转轴机床独立位置误差，当控制机床间歇运动到某一位置时，此时回转轴的综合误差项只含有 $e_{PIGE}$ ，又连接误差共有4项，包括2项线性位置误差，2项转角误差，则其误差矩阵可表示为

$$[0019] \quad T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \varepsilon_{yc} & \delta_{xc} \\ 0 & 1 & -\varepsilon_{xc} & \delta_{yc} \\ -\varepsilon_{yc} & \varepsilon_{xc} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0020] 其中， $\varepsilon_{xc}$ 、 $\varepsilon_{yc}$ 为C轴实际中心与理想中心在X方向和Y方向的线性位置误差； $\delta_{xc}$ 、 $\delta_{yc}$ 为C轴实际轴线与理想轴线绕X轴与Y轴的转角误差。由于误差矩阵T中只含有4项未知量，即通过对回转轴的分度，在机床坐标系的 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 和 $270^\circ$ 的4个角度下，根据单目相机采集编码标记点的图像，利用像素坐标系下的坐标及摄像机成像模型，分别重建编码标记点机床坐标系下的坐标为 $X_w^k$ 、 $Y_w^k$ 、 $Z_w^k$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ )，利用公式(4)得出的方程即可求得数控机床回转轴的机床独立位置误差。设定机床坐标系下4个角度的理论点坐标为 $X_w^i$ 、 $Y_w^i$ 、 $Z_w^i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ )，求解公式为：

$$[0021] \quad \begin{bmatrix} X_w^k \\ Y_w^k \\ Z_w^k \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \varepsilon_{yc} & \delta_{xc} \\ 0 & 1 & -\varepsilon_{xc} & \delta_{yc} \\ -\varepsilon_{yc} & \varepsilon_{xc} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w^i \\ Y_w^i \\ Z_w^i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0022] 之后再辨识机床回转轴机床依赖位置误差，控制机床以一定速度运行，此时回转轴的综合误差项为 $e_{PIGE} + e_{PDGE}(\theta)$ ，则其误差矩阵可表示为：

$$[0023] \quad T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \varepsilon_{yc} + \Delta\varepsilon_{yc} & \delta_{xc} + \Delta\delta_{xc} \\ 0 & 1 & -\varepsilon_{xc} - \Delta\varepsilon_{yc} & \delta_{yc} + \Delta\delta_{xc} \\ -\varepsilon_{yc} - \Delta\varepsilon_{yc} & \varepsilon_{xc} + \Delta\varepsilon_{yc} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0024] 其中， $\Delta\varepsilon_{xc}$ 、 $\Delta\varepsilon_{yc}$ 为C轴实际中心与理想中心在X方向和Y方向的线性位置误差； $\Delta\delta_{xc}$ 、 $\Delta\delta_{yc}$ 为C轴实际轴线与理想轴线绕X轴与Y轴的转角误差，上述4项误差即为所求机床回

转轴机床依赖位置误差;之前在静态条件下已经辨识机床回转轴机床依赖位置误差,即 $\varepsilon_{xc}$ 、 $\varepsilon_{yc}$ 、 $\delta_{xc}$ 、 $\delta_{yc}$ 为已知量,则T中仍然含有4项未知量,同样在机床坐标系中 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 和 $270^\circ$ 的4个角度下触发相机拍摄并分别重建编码标记点坐标,记为

$X_w^l$ 、 $Y_w^l$ 、 $Z_w^l$  ( $l = 1, 2, 3, 4$ ), 求解公式为:

$$[0025] \quad \begin{bmatrix} X_w^l \\ Y_w^l \\ Z_w^l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \varepsilon_{yc} + \Delta\varepsilon_{yc} & \delta_{xc} + \Delta\delta_{xc} \\ 0 & 1 & -\varepsilon_{xc} - \Delta\varepsilon_{yc} & \delta_{yc} + \Delta\delta_{xc} \\ -\varepsilon_{yc} - \Delta\varepsilon_{yc} & \varepsilon_{xc} + \Delta\varepsilon_{yc} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w^i \\ Y_w^i \\ Z_w^i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

[0026] 即在准静态工作下求得数控机床回转轴的综合误差,减去已知的机床依赖位置误差,即为回转轴的机床依赖位置误差。

[0027] 本发明的有益之处在于利用编码标记点结合单目视觉实现数控机床回转轴误差的检测与辨识,有效解决了测量过程繁琐以及辨识模型复杂问题,采用单目视觉实现非接触测量,具有结构简单,操作简便,设备成本低及设备鲁棒性高。该方法辨识模型简单且为非接触测量,利用编码标记点结合单目视觉实现数控机床回转轴误差的检测与辨识,设备成本低、鲁棒性高。

## 附图说明

[0028] 图1为基于单目视觉的机床回转轴误差测量与辨识模型图。其中,1-单目相机,2-定位靶标,3-机床工作台,4-系统安装架,5-夹具。

[0029] 图2为定位靶标上编码标记点的图像。其中,69、71、73、75分别为第一、第二、第三、第四圆形编码点,119为图像中心的中心编码点,X、Y为机床坐标系的坐标轴。

[0030] 图3为机床回转轴误差测量与辨识原理图。其中, $\varepsilon_{xc}$ 、 $\varepsilon_{yc}$ 分别为C轴实际中心与理想中心在X方向和Y方向的线性位置误差, $\delta_{xc}$ 、 $\delta_{yc}$ 分别为C轴实际轴线与理想轴线绕X轴与Y轴的转角误差,C轴为机床理论回转轴,C'轴为机床实际回转轴。

[0031] 图4为机床回转轴误差测量与辨识流程图。

## 具体实施方式

[0032] 以下结合技术方案及附图详细叙述本发明的具体实施方式。

[0033] 图1为基于单目视觉的机床回转轴误差测量与辨识模型图。本发明采用定位靶标2为厚度3mm的光刻玻璃板,上表面光刻有四个呈菱形分布的圆形编码点及一个位于中心的编码点,测量时将其装夹在机床工作台3上,采用单目相机1在回转轴间歇、连续两次回转的过程中,采集带有编码标记点的定位靶标2图像,采集带有编码标记点的定位靶标图像,经过对间歇旋转的图像处理,重建编码标记点在机床坐标系下的坐标,利用理论点与实际点坐标在误差矩阵模型中的对应关系,求解机床独立位置误差,再经过对连续旋转采集的图像处理求得机床综合误差,最后在机床综合误差中消除机床独立位置误差可求得机床依赖位置误差。方法的流程如图4所示,具体步骤如下:

[0034] 第一步,实验装置的安装

[0035] 实验装置平台由单目相机1、特征靶标2、机床工作台3、系统安装架4和夹具5注组成,通过夹具5将棋盘格标定板安装到机床工作台3上,再将单目相机1垂直机床工作台3安

装在系统安装架4上,将机床待测的回转轴C轴归零。

[0036] 第二步,相机标定

[0037] 本方法依据张氏标定法结合高精度棋盘格标定板来标定单目相机的内参数及畸变参数,标定后可确定内参数 $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$ 、 $u_0$ 、 $v_0$ ,外参数 $R$ 、 $t$ ,及畸变参数 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $p_1$ 、 $p_2$ ,进而确定相机成像模型;单目相机标定后将棋盘格标定板更换为定位靶标2,并固定在机床工作台3上。

[0038] 第三步,标记点特征识别

[0039] 为准确表征机床运动位置,使用带有圆环编码标记点的定位靶标,如图2所示。将圆环编码带区域按照角度平均分为10段,每段对应一个二进制位,图像处理时按照一定方向扫描编码带,扫描到黑色码带记为1,白色码带记为0,扫描一周后,得到整个编码点的二进制序列,转化为十进制整数即为码值,利用不同编码标记点的码值及摄像机成像模型即可重建编码标记点在机床坐标系下的三维坐标为 $(X_w, Y_w, Z_w)$ ;

[0040] 第四步,回转轴误差测量与辨识

[0041] 图3为机床回转轴误差测量与辨识原理图,本方法中,依据误差矩阵模型中的未知量数量,设定机床C轴的分度值为 $90^\circ$ ,即在机床间歇回转一周的过程中,分别位于 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 和 $270^\circ$ 四个角度下采集一次图像,并重建含有PIGE的编码点三维坐标 $X_w^k$ 、 $Y_w^k$ 、 $Z_w^k$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ ),同时在以第一幅图像的中心点为原点建立的机床坐标系中,根据高精度定位靶标上编码点的位置关系求取理论点三维坐标 $X_w^i$ 、 $Y_w^i$ 、 $Z_w^i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ),利用公式(3)、(4),依据理论点与实际点坐标在误差矩阵模型中的对应关系,求解机床独立位置误差(PIGE);

[0042] 将机床C轴归零后,再控制机床连续回转一周,同样每隔分度值 $90^\circ$ 触发相机采集图像,经过后续图像处理还原编码点三维坐标 $X_w^l$ 、 $Y_w^l$ 、 $Z_w^l$  ( $l = 1, 2, 3, 4$ ),经过公式(5)、(6),可求解含有PIGE与PDGE的机床综合误差,此时PIGE为上一步求解的已知量,最后在机床综合误差中消除机床独立位置误差(PIGE)可得到机床依赖位置误差(PDGE)。

[0043] 本发明根据单目视觉非接触测量的特点,使用简单的误差辨识模型,解决了测量过程繁琐及辨识模型复杂问题,具有结构简单、操作方便的优点,利用编码标记点与单目视觉结合实现数控机床回转轴误差的检测与辨识,具有设备经济性良好、测量稳定性高等特点。

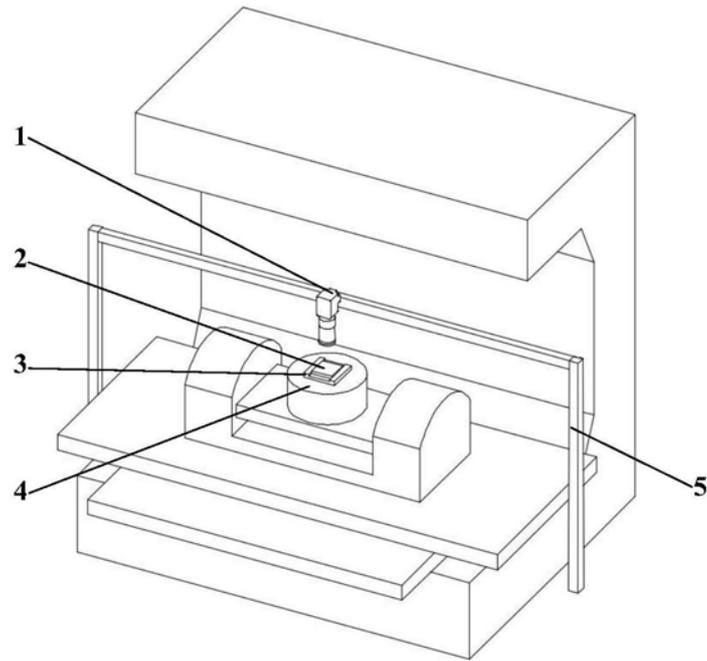


图1

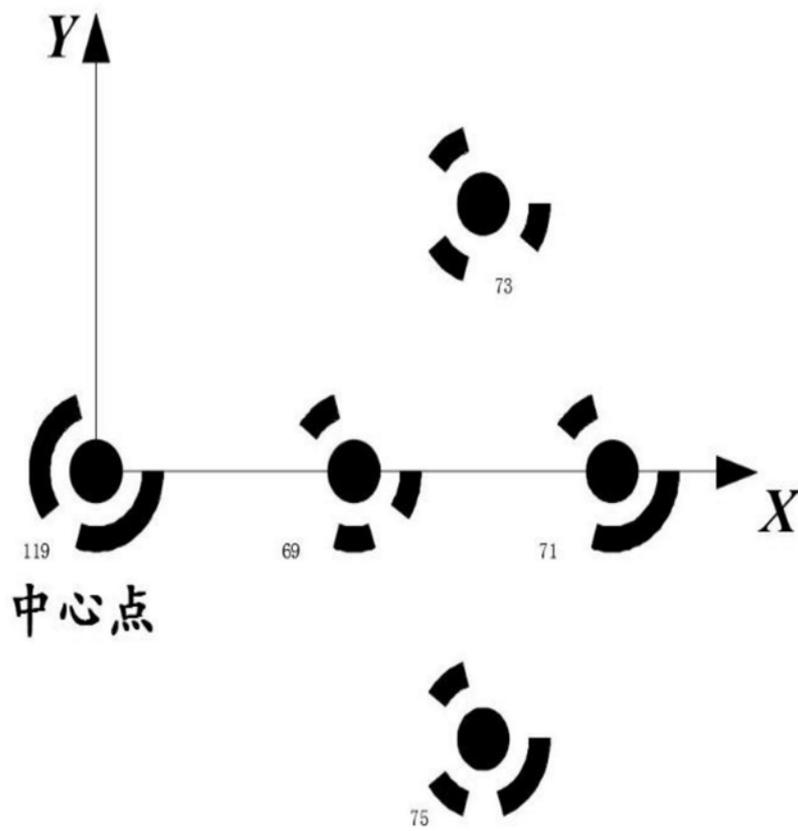


图2

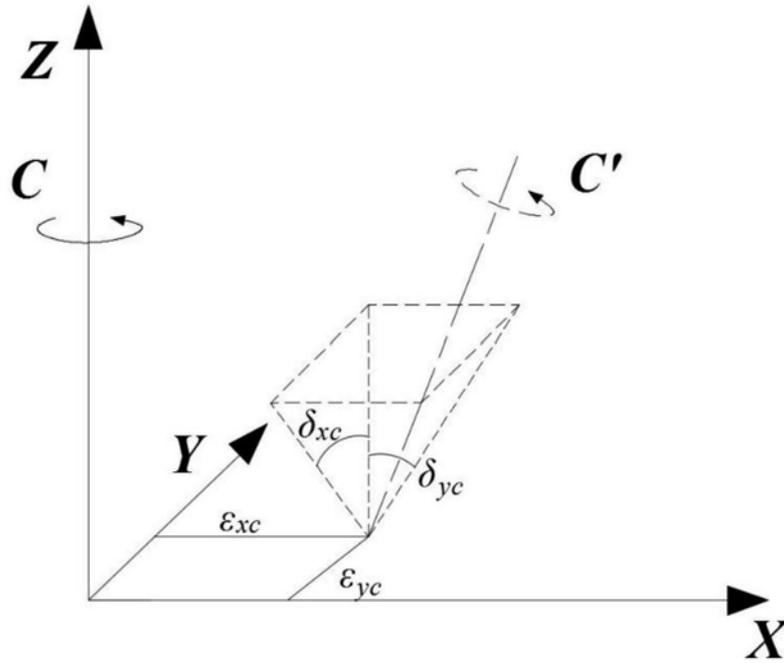


图3

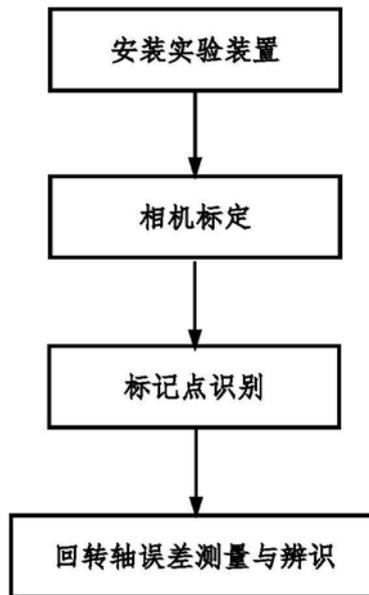


图4