

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.05.02

基于单目立体视觉的机床几何误差辨识方法

潘翼, 王福吉, 刘巍, 李肖, 梁冰, 周孟德

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对视觉测量手段中成本与精度不能兼顾的问题, 提出基于单目立体视觉的机床回转轴几何误差辨识方法。为实现回转轴全量程运动精确描述, 基于误差放大思想, 设计了基于周向均布精密哑光靶球的高匀、高精、高信噪比成像靶标。提出了单目立体成像光路参数仿真分析方法, 定量分析并选取系统结构参数。基于单目立体标定结果, 根据序列图像重建得到回转轴三维轨迹。精度验证及误差辨识实验表明: 系统的 RMSE 为 0.049 mm, 小于平均偏差的 1/3, 满足测试需求。

关键词: 机器视觉; 三维重建; 单目立体视觉; 误差辨识; 机床几何误差

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)05-0008-07

A Monocular Stereo Vision-based Geometric Error Identification Method for Machine Tools

PAN Yi, WANG Fuji, LIU Wei, LI Xiao, LIANG Bing, ZHOU Mengde

(College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A monocular stereo vision-based geometric error identification method for machine tools rotary axes is proposed to consider both cost and accuracy of vision measurement. In order to accurately describe the full-range motion information of the rotary axes, a feature target with the precise low-reflection target balls in circumferential uniform distribution is designed based on the idea of error amplification to guarantee the high-uniformity, high-contrast, and high signal-to-noise ratio (SNR) imaging. A simulation analysis method for monocular stereo imaging optical path is proposed to quantitatively analyze and select system structure parameters. Based on the monocular stereo calibration results, the three-dimensional trajectories of rotary axes can be reconstructed from the acquired sequence images. The experiments of accuracy verification and error identification show that the root mean square error (RMSE) of the system is 0.049 mm, which is less than 1/3 of the mean measurement error, satisfying the test requirements.

Key words: machine vision; 3D reconstruction; monocular stereo vision; error identification; machine tool geometric errors

0 引言

五轴数控机床被广泛应用于现代工业的各个加工生产领域, 但由于机床制造、装配等缺陷, 系统内部存在几何误差(包括直线轴及回转轴几何误差)降低加工精度, 而相对成熟的直线轴几何误差辨识补偿研究使得回转轴成为主要研究对象^[1]。因此, 为提升加工精度, 研究机床回转轴几何误差测量辨识设备与方法具有重要意义。

回转轴几何误差包含 3 项位置误差及 3 项转角误差, 其在实际加工中的直接表现为误差运动。利用误差运动逐项辨识的直接测量手段效率低且易产生人工误差, 而间接手段降低人工干扰的同时具备高效自动化测量能力, 因此现行主要测量方法有: 球杆仪测量法^[2]、R-test 检测法^[3,4]、在机测量法^[5]与激光测量系统^[6]。球杆仪基于刀具球与工件球的相对位移变化分

离并辨识几何误差, 而在多个位置下基于圆轮廓的测量方式引入了安装误差; 在机测量法为避免干涉, 导致触控探针接近方向存在限制, 且需要精密标准件辅助标定; R-test 方法结合三个位移传感器可测量在任意回转角度下的误差运动, 但该装置移动范围过小, 需适配多轴联动辅助测量, 因此引入了多轴联动误差; 激光测量系统采用多基站测量方法, 可高精度采集回转轴误差运动, 但设备调试繁琐, 经济性与普适性较差。近年来, 基于视差原理实现三维特征重建的机器视觉^[7]因非接触式高精测量、数据采集便捷等优势^[8]而备受关注。但传统双目视觉布局易受有限空间限制且成本高, 而单目视觉测量精度低。此外, 单目立体视觉因经济性与集成性良好被用于三维形变测量^[9-10]。其中, 机床运动信息高品质采集, 图像高精度处理与系统参数优化选取是制约回转轴几何误差视觉高精度辨识的主要因素。

为此,本文提出基于单目立体视觉的机床回转轴几何误差辨识方法,降低双目测量成本且提高了单目测量精度,基于误差放大思想设计的成像靶标保证回转轴全量程运动信息采集,均匀背光照明确保了标识图像的高质量获取,提出的单目立体成像光路仿真分析方法,指导了靶标结构尺寸和系统结构参数的优化选取,并通过实验室试验验证了本文方法的高精度。

1 基于单目立体视觉的机床回转轴几何误差测量系统

1.1 几何误差定义

如图1所示,本文测试对象为具备倾斜转台的五轴数控机床,包含 X, Y, Z 三个线性轴与 A, C 两个回转轴,在 C 轴工作台表面建立世界坐标系(其 X, Y, Z 轴分别与机床 X, Y, Z 轴运动方向一致),其原点为 C 轴轴线与工作台平面的交点。设 C 轴上某一初始位置为 P_0 ,该点在回转角度 θ_c 下的理论位置为点 P_1 ,由于误差 $E_c = [\varepsilon_{xc}, \varepsilon_{yc}, \varepsilon_{zc}, \delta_{xc}, \delta_{yc}, \delta_{zc}]^T$ 的影响,其实际运动位置为 P_1' ,根据齐次坐标变换描述理论与实际运动回转位置的关系为

$$\begin{bmatrix} x_1' \\ y_1' \\ z_1' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{xc} & \varepsilon_{yc} & \delta_{xc} \\ \varepsilon_{zc} & 1 & -\varepsilon_{xc} & \delta_{yc} \\ -\varepsilon_{yc} & \varepsilon_{xc} & 1 & \delta_{zc} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_c & \sin\theta_c & 0 & 0 \\ -\sin\theta_c & \cos\theta_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

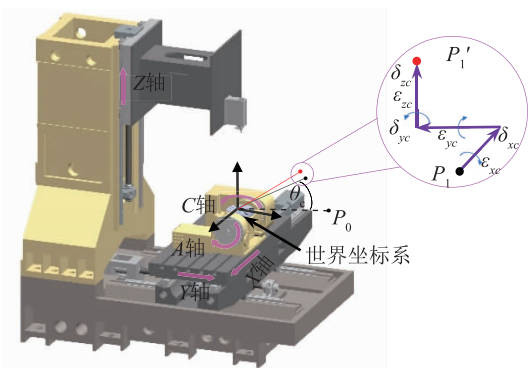


图1 机床回转轴几何误差影响

1.2 系统总体测量辨识流程

为准确测量与辨识上述回转轴几何误差,搭建单目立体视觉系统,硬件包括:特征靶标(精密哑光靶球、背向均匀照明和固定夹具)、单目立体采集系统(高分辨率工业相机、光学镜头与反射成像装置)和支撑结构,如图2所示。具体流程如下:基于误差放大思想初步设计靶标结构,建立单目立体光路成像模型

进行仿真分析,以优化系统结构参数并计算理论测量精度,同时作为指导靶标结构设计的依据;基于张氏标定法标定单目立体视觉系统,将特征靶标安装至机床 C 轴工作台并设置初始零位,使用精密哑光靶球与背向均匀照明组合以保证图像高品质获取;驱动机床 C 轴定角度间歇回转,带动靶球交替重复地在视场中进行误差运动,同时控制单目立体视觉系统采集,得到以单图像左右区域分别承载虚拟双目两成像视角的图像序列;经过图像处理提取靶球投影圆心的二维像素坐标,基于标定结果重建表征机床运动信息的球心实际运动轨迹,将其转换至世界坐标系下与理论回转位置对比,最终实现机床回转轴几何误差辨识。

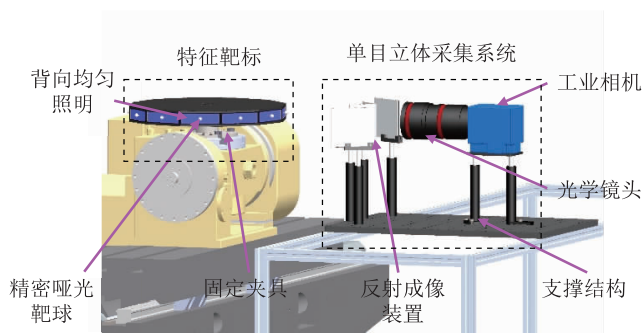


图2 单目立体视觉回转轴几何误差测量系统硬件

2 机床回转轴几何误差测量辨识方案

2.1 单目立体采集系统设计

传统双目或多目视觉系统存在相机同步化调试及高精测量条件下相机布局易受有限空间限制等问题,基于单目立体视觉原理,采用辅助光学元件与单目相机结合进行光路设计是很好的解决方案^[11]:将成像平面分为左右两区域,采用平面镜组合引导不同视角下的入射光线进入对应区域,使单张图片包含双视角特征信息,即使用四个平面镜组成反射成像装置搭建单目立体采集系统。

上述系统通过虚拟双目视觉,降低了相机成本且提高单一相机的测量精度。为保证图像高品质采集与处理,测量时应根据现场情况选择适宜的系统结构参数,如镜面相对于相机的位姿等,同时考虑到理论测量精度的分析计算,需实现公共视场及基线距离等关键指标的定量评估与优化选取。在此基础上,建立了单目立体视觉光路模型,设计了柔性可调的单目立体视觉采集系统,如图3(a)所示。基于该模型对系统关键指标进行模拟仿真,并依据分析结果优化系统结构参数,进而计算理论测量精度,并作为指导靶标设计

的依据以确定其硬件结构及空间布局。系统结构模拟仿真结果如图 3(b) 所示。

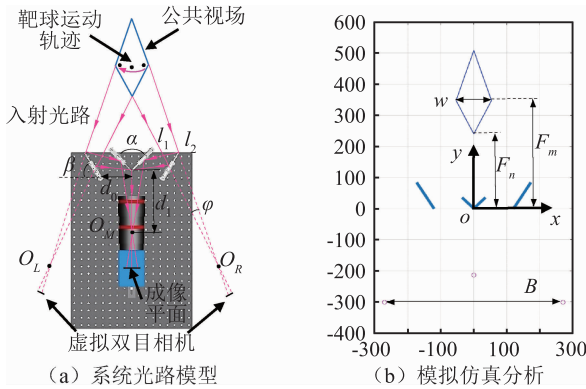


图 3 单目立体采集系统示意图

该系统光路通过安装调节可近似为对称结构，其中相机光心为 O_M ，前镜与后镜的宽度分别为 l_1 和 l_2 ，两前镜的夹角为 α 且其交点与 O_M 的距离为 d_1 ， β 为两后镜与成像平面的夹角， d_0 为后镜至光轴方向的最短距离。根据光路特性，单目相机所拍摄图像被分为左右对称两区域，对应虚拟双目视觉两成像视角，由其视场角 φ 得到的重叠区域即为本系统公共视场。在满足成像要求的前提下 ($\alpha + 2\beta < \pi$)，视场近点 F_n 、视场最宽处 F_m 及视场角 φ 可由上述已知结构参数求得：

$$\begin{cases} \varphi = \arctan\left(l_1 \sin \frac{\alpha}{2} / \left(l_1 \cos \frac{\alpha}{2} + d_1\right)\right) \\ F_n = d_0 (\cot \alpha + \cot(\alpha + 2\beta)) \\ F_m = d_0 \left(\frac{\cos(\alpha + 2\beta) + \cos \alpha}{\sin \alpha}\right) + d_1 \cos(\alpha + 2\beta) \\ B = \frac{F_m - F_n}{\tan(\alpha + 2\beta - \varphi) + \tan(\alpha + 2\beta)} \end{cases} \quad (2)$$

利用上述变量即可计算基线距离 B 与公共视场宽度 w ：

$$\begin{cases} B = 2d_0 \left(1 - \frac{\sin(\alpha + 2\beta)}{\sin \alpha}\right) + 2d_1 \sin(\alpha + 2\beta) \\ w = 2d_0 \frac{F_m - F_n}{F_n} \end{cases} \quad (3)$$

通过灵活调节平面镜参数 (d_0 ， α 及 β) 及单目相机位置 (d_1) 使相机视场完整覆盖靶球运动轨迹，并增大基线距以提高系统测量精度。其中 B ， w 受 α ， β ， d_0 及 d_1 影响的关系如图 4 所示，根据测量需求即可实现系统结构参数定量分析与优化选取。

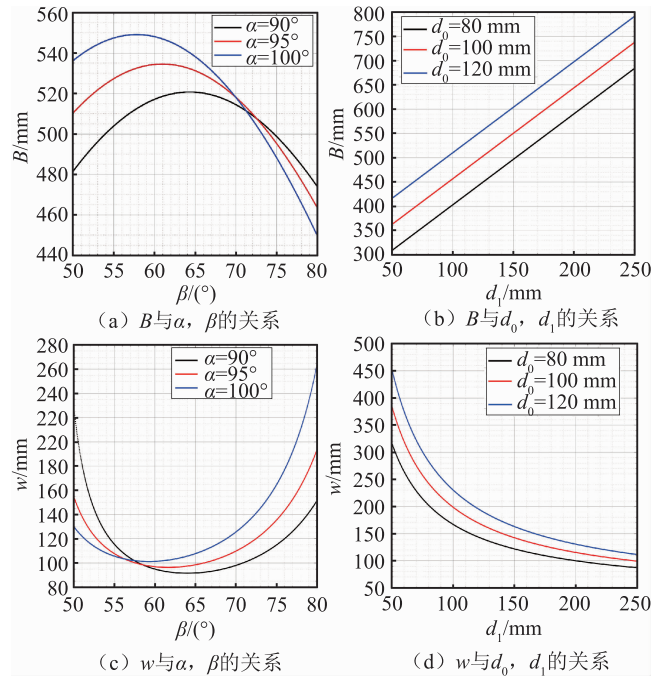


图 4 系统指标与结构参数之间的关系

2.2 特征靶标设计

为准确表征回转轴运动信息，特征靶标对基于视觉测量原理的三维位置高精度识别与检测至关重要。被测物的场景图像光照不均匀且强反光，因此直接获取图像的方式显然不适合。依据发光特性，合作靶标可分为主动发光与被动发光式，其中，基于自发光材料及基于投影特征 (激光点、线、面投影等) 的主动发光靶标的轮廓精度低，且非接触投影仅适用于三维形貌及形变等静态/准静态测量场合。因此，为表征回转轴的动态误差运动信息，需要设计一种固结式高精度被动发光靶标。

由于回转轴转角误差项过小难以精确辨识，本文基于误差放大思想通过靶标结构设计将其误差运动放大，当相机分辨率一定时相应增大的视场会降低系统测量精度，而能保证精度的小视场不能兼顾全回转轴区域可视，同时为解决回转运动中时变特征导致的图像处理难题，选用具有空间旋转、平移能力及尺度不变性的靶球来表征机床运动信息，并利用回转运动的特殊性提出靶球沿圆周周向均布的靶标结构，确保靶球交替且位置重复出现在单图像左右均分两视角内，以实现回转轴全量程运动信息采集，所采集图像如图 5 (a) 所示。其中，靶球空间位置的重建精度会受到图像序列中轮廓提取精度的影响，为提升提取精度，特征靶标中选用均匀背光照明适配精密哑光靶球来强化其

轮廓边缘对比度，保证空间任意视角下靶球投影均为精确投影圆。

2.3 特征识别及圆心提取

为精确描述回转轴误差运动，需高效准确提取图像序列中靶球投影圆圆心的像素坐标。由于特征靶标的设计保证了靶球在空间任意视角下的投影均为精确圆，本文使用边缘检测与最小二乘法来获取投影圆的圆心像素坐标，图像处理具体流程如下：

①搜寻目标区域连通域，找到包含待测投影圆的最小外接矩形，向外延展形成扩充矩形并剪裁图像，对目标区域进行粗定位，如图 5(b)所示；

②基于 Otsu 法^[12]对剪裁图像进行阈值分割，并进行二值化及反色处理，利用 canny 算子^[13]进行边缘检测，如图 5(c)所示；

③使用轮廓拟合最小二乘圆检测得到圆心像素坐标，将还原拟合圆置于原图像相应位置，如图 5(d)所示。

④最终对所提取圆心像素坐标进行排序处理，并将上述图像处理过程遍历至每一帧图像，可得到左右视角下对应投影圆圆心像素坐标。

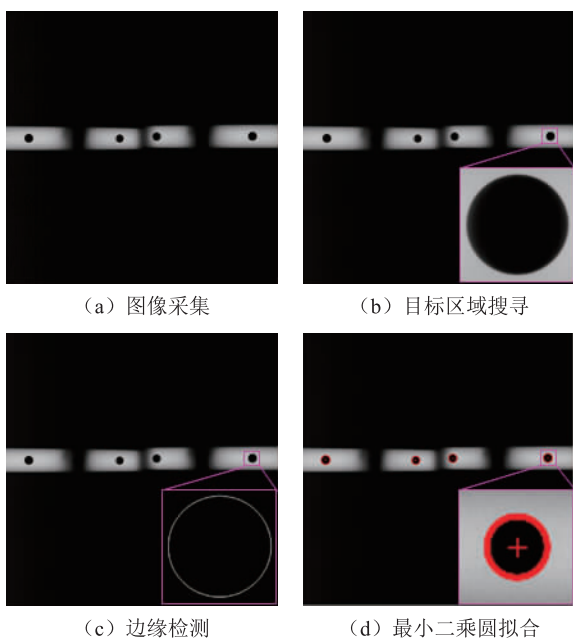


图 5 序列图像处理

图 6 为该投影圆所在目标区域的灰度直方图，该区域可分为两个部分：投影圆(灰度值约 0 ~ 50)及投影圆外背景(灰度值为 170 ~ 200)，选取合适阈值即可有效分割并提取投影圆，证明了所采集图像序列对比度及均匀性良好。此外，本文设计的特征靶标通过

增加底部夹具设计，可适配于不同多轴机床的回转轴几何误差测量，具备较强的通用性。

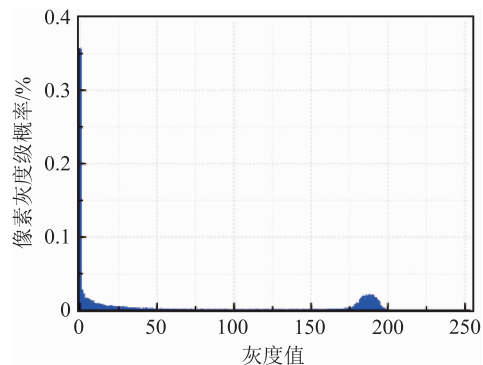


图 6 目标区域灰度直方图

2.4 回转轴几何误差求解

利用上述对应投影圆圆心的二维像素坐标，基于相机标定结果可重建靶球球心实际运动轨迹，同时基于三坐标测量机测量结果可推算靶球理论运动轨迹，利用上述理论与实际运动轨迹即可精确描述回转轴误差运动并进行求解。将式(1)展开可得

$$\begin{cases} x_1' = z_0 \varepsilon_{yc} + (x_0 \sin \theta_c - y_0 \cos \theta_c) \varepsilon_{zc} + \delta_{xc} \\ \quad + (x_0 \cos \theta_c + y_0 \sin \theta_c) \varepsilon_{yc} \\ y_1' = -z_0 \varepsilon_{yc} + (x_0 \cos \theta_c + y_0 \sin \theta_c) \varepsilon_{zc} + \delta_{yc} \\ \quad - (x_0 \sin \theta_c - y_0 \cos \theta_c) \varepsilon_{yc} \\ z_1' = -(x_0 \sin \theta_c - y_0 \cos \theta_c) \varepsilon_{xc} + \delta_{zc} + z_0 \\ \quad - (x_0 \cos \theta_c + y_0 \sin \theta_c) \varepsilon_{yc} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知，同一回转角度下每行等式中误差项需要三个方程来求解，因此采用驱动机床带动回转中心分别向 X, Y 轴方向线性移动以获得三个测量位置。设移动距离分别为 Δx 和 Δy ，对应空间坐标点分别为 $P_2'(x_0 + \Delta x, y_0, z_0)$ 和 $P_3'(x_0, y_0 + \Delta y, z_0)$ ，以式(4)第三行为例可得

$$\begin{cases} z_1' = -(x_0 \sin \theta_c - y_0 \cos \theta_c) \varepsilon_{xc} + \delta_{zc} + z_0 \\ \quad - (x_0 \cos \theta_c + y_0 \sin \theta_c) \varepsilon_{yc} \\ z_2' = -((x_0 + \Delta x) \sin \theta_c - y_0 \cos \theta_c) \varepsilon_{xc} + \delta_{zc} + z_0 \\ \quad - ((x_0 + \Delta x) \cos \theta_c + y_0 \sin \theta_c) \varepsilon_{yc} \\ z_3' = -(x_0 \sin \theta_c - (y_0 + \Delta y) \cos \theta_c) \varepsilon_{xc} + \delta_{zc} + z_0 \\ \quad - (x_0 \cos \theta_c + (y_0 + \Delta y) \sin \theta_c) \varepsilon_{yc} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可依次求取方程中的三项误差。同理，分别将三个测量位置下靶球的实际与理论空间坐标代入

式(5)，即可实现回转轴六自由度几何误差完全分离与辨识。

3 实验测试

3.1 单目立体视觉系统标定

单目立体视觉系统的结构参数与双目视觉测量原理匹配对应，本文基于张氏标定法标定相机参数。为保证标定精度，使用背光源及光刻高精度棋盘格标定板(格间距误差小于 $2 \mu\text{m}$)进行标定，如图 7 所示。

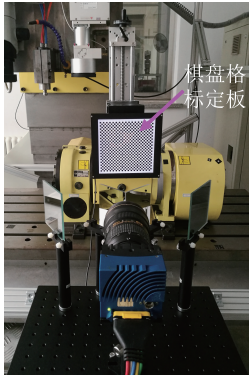


图 7 相机标定

标定得到内外参数如下：

单目立体视觉虚拟左相机内参：

$$f_x = 7719.90014; f_y = 7715.76518; \gamma = 0.00000;$$

$$u_0 = 2593.40929; v_0 = 2533.56295; k_1 = -0.01225;$$

$$k_2 = 0.24740。$$

单目立体视觉虚拟右相机内参：

$$f_x = 7701.68083; f_y = 7697.91980; \gamma = 0.00000;$$

$$u_0 = 2588.00061; v_0 = 2528.24551; k_1 = -0.01851;$$

$$k_2 = 0.33855。$$

单目立体视觉外参：

$$R = \begin{bmatrix} 0.00001 & 0.00336 & -0.00002 \\ 0.00336 & 0.86874 & -0.00524 \\ -0.00002 & -0.00524 & 0.00003 \end{bmatrix};$$

$$T = [-360.2607 \quad 1.61653 \quad 168.11831]。$$

3.2 精度评价

误差测量前首先对单目立体视觉测量精度展开验证。为评价本文系统的测量精度，将特征靶标中周向均布的精密陶瓷靶球沿机床 C 轴正向依次命名为 1 至 12 号靶球，使用德国 Carl Zeiss 三坐标测量机高精度测量各个靶球球心的空间坐标，进而计算相邻靶球的球心间距 L_{CMM} 并记为 $x_{i-j}(i, j \in 1, 2, \dots, 12)$ ，如图 8 所示。通过机床 C 轴回转使单目立体视觉系统视场恰好

容纳两个靶球，并重建靶球球心位置进而计算相邻两靶球的球心间距 L_{MSV} ，测量结果如表 1 所示。通过对比两设备检测球心间距的均方根误差(RSME)进行评定，经计算本系统的 RMSE 为 0.049 mm。

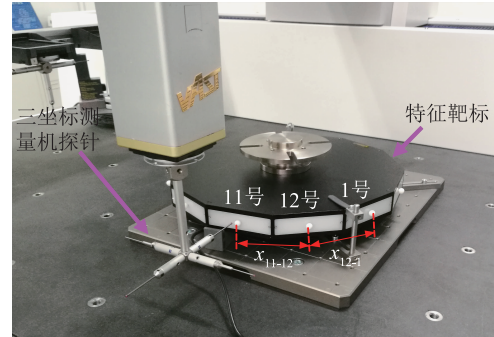


图 8 三坐标测量机测量相邻球心间距

表 1 三坐标测量机与单目立体视觉测量结果 mm

间距	L_{CMM}	L_{MSV}
x_{1-2}	106.892	106.954
x_{2-3}	105.581	105.638
x_{3-4}	105.656	105.714
x_{4-5}	105.714	106.427
x_{5-6}	105.530	105.599
x_{6-7}	105.940	106.008
x_{7-8}	107.286	107.354
x_{8-9}	105.162	105.217
x_{9-10}	106.087	106.136
x_{10-11}	106.806	106.864
x_{11-12}	105.386	105.458
x_{12-1}	105.990	106.045

3.3 误差测量与精度验证实验

采用本文提出的单目立体视觉系统与方法对实验室搭建的五轴数控机床的 C 轴几何误差开展现场测量实验，如图 9 所示。实验前，根据机床 C 轴安装条件与理论测量精度，使用单目立体光路仿真分析方法优化并选定了系统结构参数，表 2 和表 3 分别为确立的单目立体采集系统与特征靶标结构参数。

具体实验流程如下：

①将特征靶标安装至机床 C 轴工作台上并固定，利用铝型材支撑单目相机及反射成像装置，并调节机床初始位置，使相机视场最宽处恰好覆盖每个靶球的

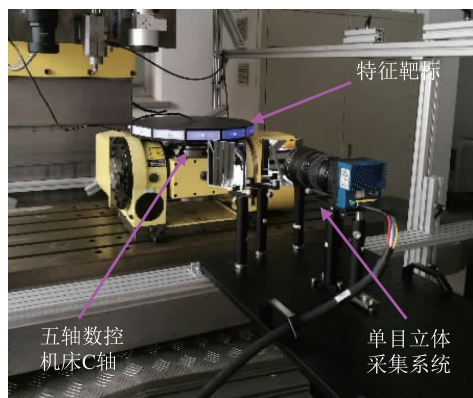


图9 现场测量实验

表2 单目立体采集系统参数

指标	参数值
工作距离 d_1	380 mm
工作距离 d_0	120 mm
前镜夹角 α	90.6°
后镜夹角 β	56.8°
焦距	35 mm
前镜宽度 l_1	75 mm
后镜宽度 l_2	100 mm
相机分辨率	5120 × 5120

表3 特征靶标参数

指标	参数值
背光照明面积	(26(W) × 93(L)) mm ²
照明面边心距	200 mm
靶球工作高度	60 mm
靶球球径	9.525 mm
靶球圆度	< 3 μm

运动轨迹;

②进入软件采集界面,控制机床分别向 X 、 Y 轴移动一定距离并采集图像,可由已知世界坐标系及视觉坐标系下的对应点计算位姿转换关系;

③设定 C 轴测量范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 且分度角为 10° ,驱动回转轴分别在 $(X=0, Y=0)$ 、 $(X=12, Y=0)$ 及 $(X=0, Y=-12)$ 三个位置下间歇回转,控制采集系统同步拍摄获取图像序列,将本步骤重复三次以提升本文系统的准确性与鲁棒性;

④经过序列图像处理提取左右视角下对应投影圆圆心像素坐标,基于标定结果重建靶球球心实际运动轨迹。

图10为根据图像序列所重建的靶球实际运动轨迹与计算理论运动轨迹,由图可知机床实际与理论运动位置产生的平均偏差为0.152 mm,以3.2节计算的RMSE验证本文系统的测量精度,该值小于本系统所测平均偏差的1/3,证明了本文测量系统的可靠性。利用本文测量系统与方法所辨识求解的几何误差如图11所示,说明本文提出的单目立体视觉系统与方法能精确辨识机床回转轴六自由度几何误差,满足工程测试需要。

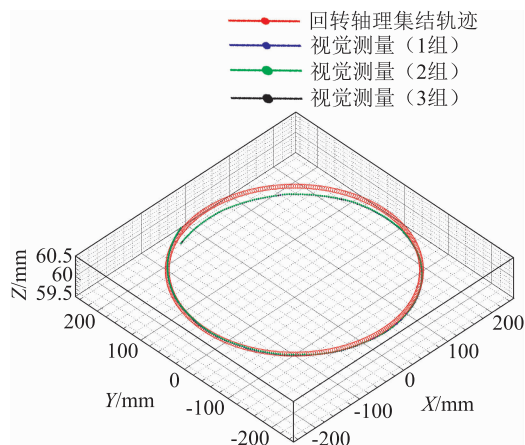
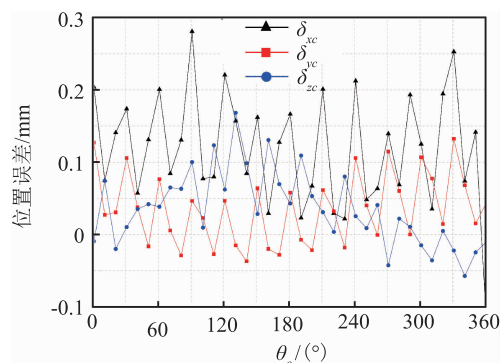
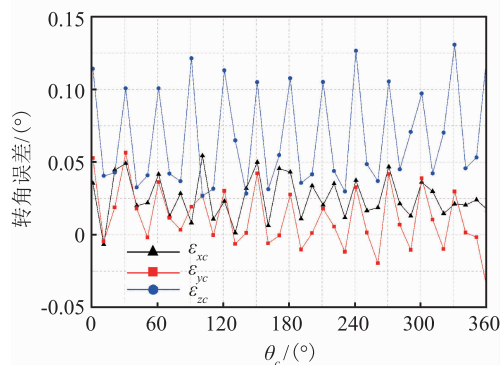


图10 靶球理论轨迹与重建实际运动轨迹



(a) 回转轴位置误差



(b) 回转轴转角误差

图11 单目立体视觉系统测量结果

4 结论

针对现有机床几何误差测量手段因设备结构存在局限性、视觉测量成本与测量精度不能兼顾等问题,提出了基于单目立体视觉的机床回转轴几何误差辨识方法。基于误差放大思想设计了精密哑光靶球周向均匀的特征靶标实现回转轴全量程运动信息采集,适配均匀背光照明保证了小视场内高品质图像获取以提升测量精度。提出单目立体光路成像模型并依据模拟仿真结果实现定量分析,兼顾了靶标结构设计、理论测量精度与系统结构参数之间的关系。实验室误差测量与精度验证实验验证了本文系统与方法的测量精度与鲁棒性,满足机床几何误差高精度辨识需求。

参 考 文 献

- [1] Ibaraki S, Oyama C, Otsubo H. Construction of an error map of rotary axes on a five-axis machining center by static R-test[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(3): 190 - 200.
- [2] Lee K I, Yang S H. Compensation of position-independent and position-dependent geometric errors in the rotary axes of five-axis machine tools with a tilting rotary table[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(5-8): 1677 - 1685.
- [3] Weikert S. R-Test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 429 - 432.
- [4] Hong C, Ibaraki S. Non-contact R-test with laser displacement sensors for error calibration of five-axis machine tools[J]. Precision Engineering, 2013, 37(1): 159 - 171.
- [5] Bi Q, Sun C, Huang N, et al. Identification and compensation of geometric errors of rotary axes on five-axis machine by on-machine measurement[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 89: 182 - 191.
- [6] Wang J, Guo J, Zhang G, et al. The technical method of geometric error measurement for multi-axis NC machine tool by laser tracker[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(4): 045003.
- [7] 张照, 朱振宇, 张合富. 双目立体视觉匹配技术现状与发展[J]. 计测技术, 2017, 37(4): 4 - 8.
- [8] 刘巍, 李肖, 李辉, 等. 基于双目视觉的数控机床动态轮廓误差三维测量方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10): 1 - 9.
- [9] Chi Y, Yu L, Pan B. Low-cost, portable, robust and high-resolution single-camera stereo-DIC system and its application in high-temperature deformation measurements[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 104: 141 - 148.
- [10] Yu L, Pan B. Color Stereo-Digital Image Correlation Method Using a Single 3CCD Color Camera[J]. Experimental Mechanics, 2017, 57(4): 649 - 657.
- [11] 郝继贵, 李艳军, 叶声华, 等. 单摄像机虚拟立体视觉测量技术研究[J]. 光学学报, 2005, 25(7): 943 - 948.
- [12] Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62 - 66.
- [13] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, (8): 679 - 698.

收稿日期: 2019-07-31; 修回日期: 2019-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(51622501, 51621064); 大连市高层次人才创新支持计划(No. 2017RJ04)

作者简介



潘翼(1995 -), 男, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉辨识机床几何误差。



刘巍(1979 -), 男, 辽宁大连人, 博士, 教授、博士生导师、青年长江学者, 主要从事复杂环境下几何量视觉测量、多维时变力载荷测量、精密加工过程中测试与数据处理、基于多传感器融合的智能制造等方面的研究工作。曾主持项目 13 项、参与 10 余项, 在机械测试领域权威期刊发表论文 80 余篇, 国家发明专利 40 余项。曾获国家技术发明二等奖 1 项、省部级科技进步及学术成果二等奖 2 项, 三等奖 2 项, 市科技进步一等奖 1 项。入选辽宁省百千万人才工程千人层次, 获首届大连市青年科技之星。获大连市青年科技奖、大连市杰出青年基金, 2016 年获批国家自然科学基金优秀青年基金。