

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905605

直线运动机构三维角误差同步测量方法研究^{*}

陈 诚, 张宏儒, 陈少轩, 刘 冰, 张 凯

(天津商业大学机械工程学院 天津 300134)

摘 要:基于标准阶梯量块参数测量结果,提出了一种三维角度(偏摆、滚转、俯仰)同步在线测量方法,用于直线运动系统运动角误差的快速测量。该系统使用线激光传感器实现阶梯量块参数的实时采集,建立阶梯量块各参数与三维角度变化的数学模型。结合标定后的精密转台,完成系统测量稳定性及重复性的验证,将测量值与理论模型比较,确定 $\pm 30^\circ$ 范围内的测量误差不超过1%。采用实验与软件计算相结合的方法完成角度测量分辨率的确定,结果显示标定后角度分辨率为 0.001° 。最后,利用本系统完成三维移动平台Z轴3项运动角误差的同步测量,测量结果验证了本系统具有简单、实用及高效的特点。

关键词: 三维角度;运动角误差;线激光传感器;阶梯量块

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Study on synchronous measurement method of three-dimensional angle errors for linear motion mechanism

Chen Cheng, Zhang Hongru, Chen Shaoxuan, Liu Bing, Zhang Kai

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: A synchronous on line precision detection method for three-dimensional angles (yaw, roll, pitch) is proposed in this study based on the measurement results of standard step-gauge block parameters, which is employed for the fast detection of motion angle errors in linear motion system. The system uses a line laser sensor to achieve the real time acquisition of the step-gauge block parameters. And the mathematical model of the step-gauge block parameters and its three-dimensional angles is established. The system measurement stability and repeatability are verified with the calibrated precision turntable. The measured values are compared with the theoretical values, it is determined that within the measurement range of $\pm 30^\circ$, the measurement error is less than 1%. The experiment and software calculation combined method was adopted to determine the angle measurement resolution, the result shows that after calibration the angle resolution is 0.001° . Finally, the proposed system was used to implement the simultaneous measurement of the three motion angle errors of the z-axis in a three-dimensional moving platform, the measurement result verifies that the proposed system possesses the characteristics of simplicity, practicability and high efficiency.

Keywords: three-dimensional angle; motion angle error; line laser sensor; step-gauge block

0 引 言

在精密制造以及测量等领域,刀具或样品在按照既定控制程序进行直线运动时,由于运动系统结构设计、控制系统以及驱动电机等因素的综合影响,产生几何误差^[1]、力变形误差^[2]、热变形误差^[3]、动态误差^[4]等,其中几何误差对测量精度的影响最大,达40%以上^[5]。而几何误差中的运动角度误差往往容易被忽略,造成加工

精度以及测量精度的损失。因此,有必要对运动角误差进行检测,一方面可以为运动系统的误差评定及补偿提供参考,另一方面可以为系统设计优化提供依据。

目前,最为广泛使用的检测设备是激光干涉仪,配合不同的测量镜组,可以实现运动角度误差的解耦,完成偏摆、俯仰角误差的高精度测量^[6]。国内外学者也在此领域中进行了大量研究,Liu等^[7]发明了一种微型多自由度线性编码器来测量三维运动角误差,分辨率为 $0.2''$,测量误差为 $\pm 0.8''$ 。Fung等^[8]提出了Fourier-Eight-Sensor方

收稿日期:2019-09-11 Received Date:2019-09-11

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51805371)、天津市自然科学基金(18JCQNJC75400)项目资助

法,用8个距离传感器分别测量偏摆、滚转和直线度误差,经仿真和实验验证了该方法性能可靠、精度高。在Hsieh和Chen等^[9-10]的研究中,结合外差、光栅、迈克尔逊干涉原理,利用高精度的计算方法,实现了六自由度误差的测量。Pezeshki等^[11]设计了一系列测试件,用于机床运动误差测量,经对比实验验证了测量结果与激光干涉仪测量结果一致。杨婧等^[12]按测量方法与仪器、测量策略两条主线对目前国内外的几何误差测量研究现状进行了综述,并分别对其优缺点进行了分析。江洁等^[13]提出了一种基于针孔成像和双矢量定姿原理的三维姿态角测量方法,测量视场范围达到 $19.6^\circ \times 19.6^\circ$,俯仰角、偏航角、滚动角的测量精度达到 $9.9''$ 、 $9.3''$ 、 $80.2''$ 。孙国燕等^[14]基于二维自准直仪设计了一种三维测角装置,利用空间坐标变换矩阵实现了空间三维姿态角的测量。在 $\pm 20'$ 的视场范围内,偏摆角、俯仰角和滚转角的测量精度分别达到了 $2.2''$ 、 $2.5''$ 和 $8.7''$ 。上述三维角度测量方法均在特定场合均取得了显著成就,但是在实际使用中测量系统布局 and 光路调整过程复杂,导致测量时间增加;测试件只能用于特定的场合,限制了测量装置的使用范围;测量结果需要经过复杂的计算得到,不便于现场测量。

线激光传感器具有结构简单、非接触、测量精度高等特点。相比于激光位移传感器^[15],线激光传感器可以在一次测量中获得二维数据,大大提高了测量效率。与光栅投影传感器^[16]相比,线激光传感器可以结合其他坐标来获取三维数据^[17],在精密测量技术中受到广泛关注与应用^[18-20]。采用线激光传感器获取阶梯量块参数,成为实现空间三维角度同步实时测量的重要组成部分。

本文介绍了该测量系统的组成及测量原理,完成了三维角度测量系统测量分辨率与测量范围确定的实验,建立了误差检测模型,实现了直线运动中运动角误差的快速在线测量,该方法具有良好的应用前景。

1 测量原理

本研究提出的三维角度误差测量系统由线激光传感器和标准阶梯量块(高 H 、宽 W)组成。线激光传感器是利用激光三角法^[21]实现高精度、非接触和高效率的测量设备。标准阶梯量块的几何参数包括高度、宽度和倾斜角度,可以由线激光传感器一次测量同时得到。阶梯量块各参数测量结果与传感器光平面入射角度(即光平面与阶梯量块表面的三维角度)相关,且存在特定的函数关系,用 $\mathbf{R}=[\alpha, \beta, \theta]$ 来表示,因此对应的角度变化可以由阶梯量块参数计算得到。

三项角度测量原理分别如图1(a)、(b)、(c)所示。在初始位置通过传感器测量阶梯量块的高度、宽度和俯仰角度分别是 h_0 、 d_0 和 θ_0 ,此时,相对于理想测量姿态

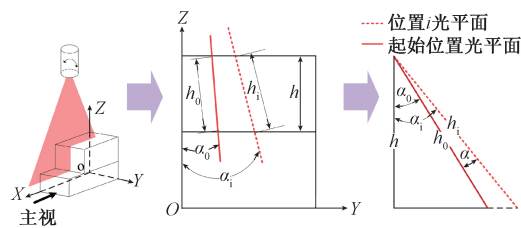
(传感器光平面垂直阶梯量块上表面),空间三维角度为 $\mathbf{R}_0=[\alpha_0, \beta_0, \theta_0]$,其中 θ_0 可通过传感器直接获得。

$$\alpha_0 = \arccos(H/h_0) \quad (1)$$

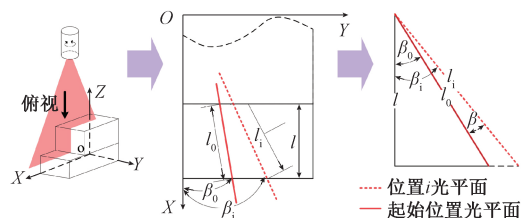
$$\beta_0 = \arccos(W/l_0) \quad (2)$$

当传感器或阶梯量块绕 x 轴、 y 轴、 z 轴发生转动时,空间角度变为 $\mathbf{R}_i$,由传感器测量的阶梯量块高度值 h_0 变为 h_i (图1(a)),宽度值 l_0 变为 l_i (图1(b)),倾斜角度值 θ_0 变为 θ_i (图1(c))。此时相对于初始位置的变化角度则可以用矩阵 $\mathbf{R}$ 表示,由此实现了阶梯量块参数测量向空间三维角度的转换。

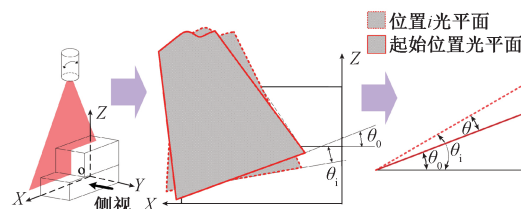
$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_i - \mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ q_i \end{bmatrix}^T - \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \beta_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix}^T \quad (3)$$



(a) 绕 x 轴旋转角 α
(a) The rotation angle α around the x -axis



(b) 绕 z 轴旋转角 β
(b) The rotation angle β around the z -axis



(c) 绕 y 轴旋转角 θ
(c) The rotation angle θ around the y -axis

图1 三维角度测量原理

Fig.1 Three-dimensional angle measurement principle

2 测量范围与误差评定

测量范围是决定测量仪器应用范围的关键因素,直接关系到测量结果的精度。受被测物表面倾角影响,线激光传感器测量精度随测量倾角增大而降低^[22]。因此为了保证本系统测量结果的精度,首先需要确定可以保证线激光传感器高精度测量的光平面入射角度范围,即

本研究提出的三维角度测量范围。如图 2 所示,将阶梯量块(高 5 mm,宽 5 mm)安装在高精度转台上,转台按照图 2(a)、(b)、(c)所示 3 种方式布置,使转台回转中心分别与 X 轴、 Z 轴、 Y 轴方向相同,以实现阶梯量块与线激光传感器的相对角度变化。

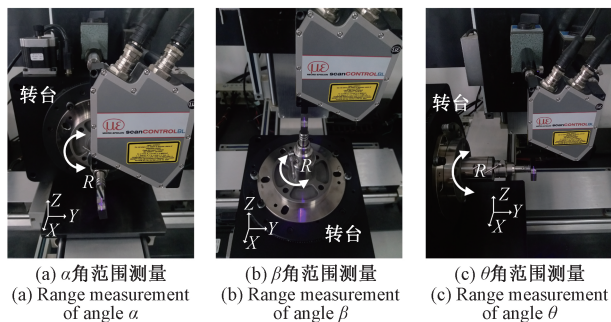


图 2 角度范围测量实验

Fig.2 The experiment for angle range measurement

在 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 之间,通过控制器使转台连续完成 5 次往复运动,线激光传感器在线实时测量阶梯量块参数,分别得到高度、宽度以及倾斜角度测量值随转台角度的变化结果。如图 3 所示,台阶高度、宽度、倾斜角度测量结果分别具有确定的变化规律,且表现出良好的周期重复性与稳定性。

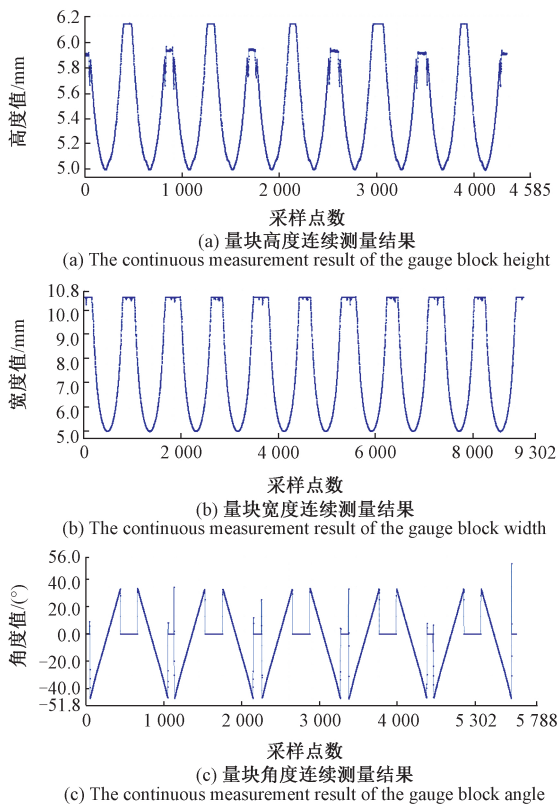


图 3 阶梯量块参数实时测量结果

Fig.3 The real-time measurement results of the step-gauge block parameters

由式(1)~(3)分别得到阶梯量块参数与转台角度 ω 的理论模型分别为 $h = H/\cos\omega$ 、 $d = W/\cos\omega$ 、 $\theta = \omega$ 。以 5° 为采样间隔分别提取图 3 所示的 5 次测量结果,绘制散点图及理论模型曲线进行对比,并画出 1% 的误差线。如图 4 所示,测量值与理论曲线相吻合,证明了本方法在实际测量中的可行性。图中用蓝色竖直虚线标记出测量值均在误差线范围内的最大角度值,最终确定出在 $\pm 30^\circ$ 的测量范围内,误差不超过 1%,并以此作为本研究中三维角度测量系统的测量范围。

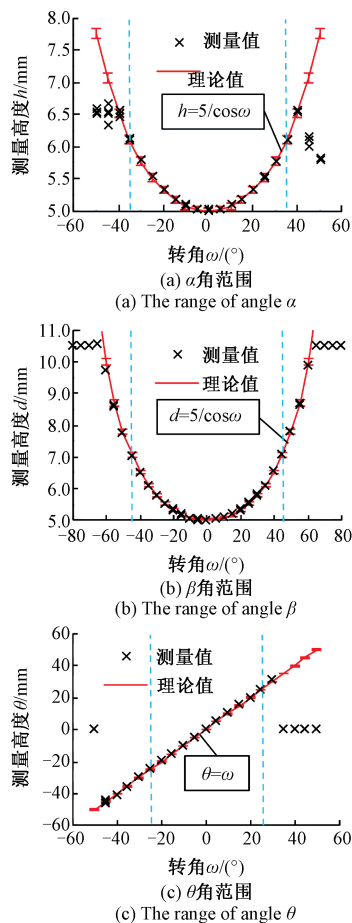


图 4 阶梯量块参数测量结果与理论值对比结果

Fig.4 The comparison results of the measured results and theoretical values of the step-gauge block parameters

3 三维测角标定

3.1 转台回转误差检定

三维角度测量系统在实际应用前需要完成角度标定才能保证高精度的测量结果。本研究利用精密转台提供阶梯量块与传感器空间角度变化,通过本文提出的方法测量该变化角度值。为了保证由转台提供空间角度的准确度,首先使用雷尼绍 XR20-W 回转轴校准装置(精度为

$\pm 1''$ 和XL-80 激光系统,完成精密转台回转误差检定。将回转检定仪安装在转台回转中心,利用激光干涉仪完成光路的对准与调整,如图 5 所示。

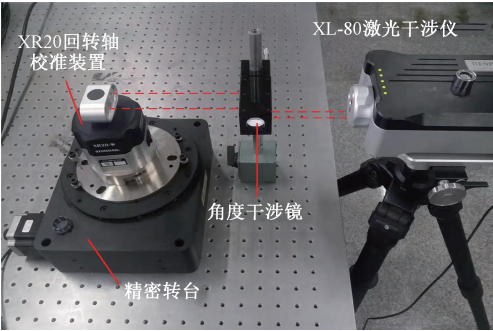


图 5 转台回转误差检定实验

Fig.5 Verification experiment of the rotation error for the turntable

把转台零点作为测量起点,转台转动范围设置为 $-30^\circ \sim +30^\circ$,以 5° 为间距完成连续 3 次采集,测量结果如图 6 所示。通过分析 3 次测量结果发现,转台具有良好的重复性,最大定位误差出现在 $\pm 30^\circ$ 位置且不超过标准值的 0.05%,小于线激光传感器 1% 的测量误差,满足使用要求。为了完成三维测角的误差标定,本研究以回转轴校准装置测得的转台定位误差作为参考值,对本研究提出的三维角度误差测量方法进行标定。

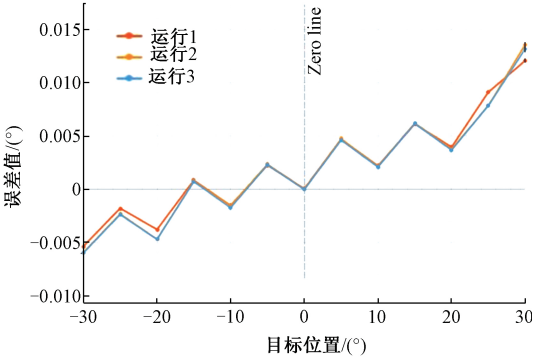


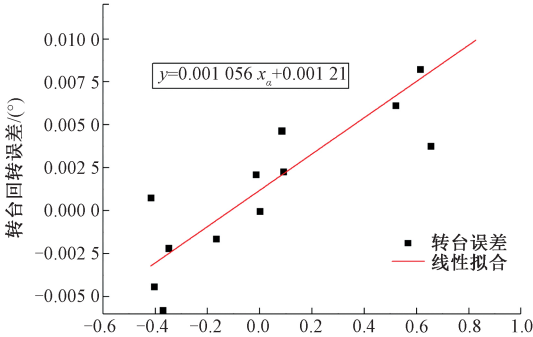
图 6 转台回转误差检定结果

Fig.6 Verification result of the rotation error for the turntable

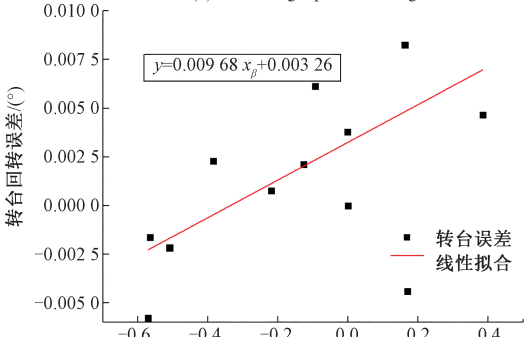
3.2 测量分辨率

与图 2 所示角度范围测量所采用的转台布置方法相同,利用本研究提出的 α, β, θ 角度测量方法,分别完成 $\pm 30^\circ$ 范围内转台回转角度误差的测量。通过 Origin 软件完成与转台回转误差检定结果的线性拟合,得到二者的线性函数关系,结果如图 7 所示。将实际测量角度结果代入方程得到拟合后结果,如图 8 所示。 α 角误差最大为 $0.008''$ 出现在 30° 位置, β 角误差最大为 $-0.007''$ 出现在 -10° 位置, θ 角误差最大为 $0.005''$ 出现在 -25° 位置。

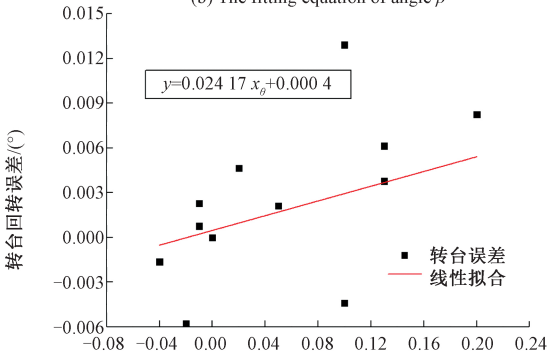
随着被测角度的增大测量误差也同样增大,因此在小角度测量中能得到更好的应用。与图 7 标定前横坐标比较发现,三项角度测量误差分辨率由 0.1° 提高到 0.001° 。



(a) α 角拟合方程
(a) The fitting equation of angle α



(b) β 角拟合方程
(b) The fitting equation of angle β



(c) θ 角拟合方程
(c) The fitting equation of angle θ

图 7 转台回转误差与角度测量误差线性拟合

Fig.7 The linear fitting of the turntable rotation error vs. angle measurement errors

4 运动角误差测量实验

三维线激光扫描系统由线激光传感器与三维移动平台组成,平台在带动测头与被测物体在空间移动的过程中产生的运动角误差直接影响传感器测量结果的精度。

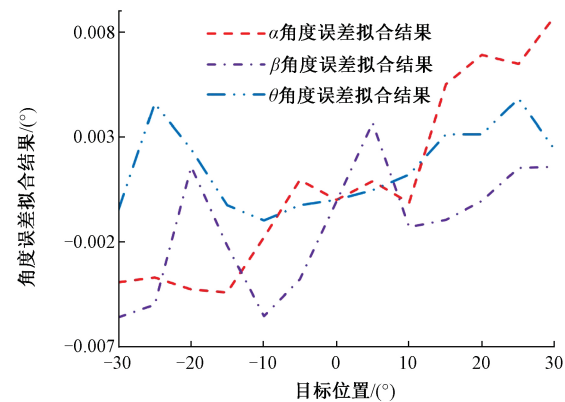


图 8 角度误差拟合结果

Fig.8 The fitting results of the angle errors

利用本研究提出的三维角度测量方法,既可以实现该系统运动角误差的自检定,又可以为其他直线运动机构的误差检定提供参考方法。

如图 9 所示,三维角度测量系统中的线激光传感器安装在平台 Z 轴上,阶梯量块固定在 XOY 运动平台上,利用平台的移动调整两者相对位置。在量块或传感器随平台做直线运动的过程中,进行阶梯量块参数的实时测量,完成直线运动中三维角误差的检测。

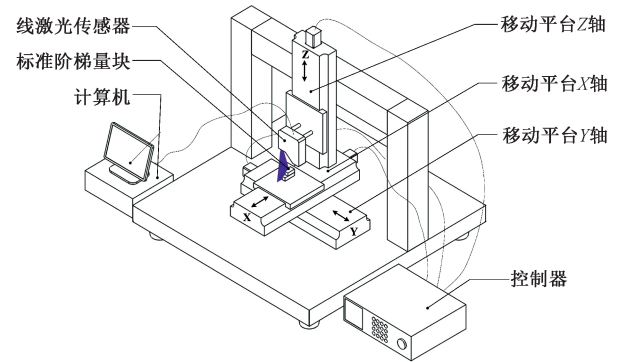


图 9 运动角误差测量实验系统

Fig.9 The motion angle error measurement experiment system

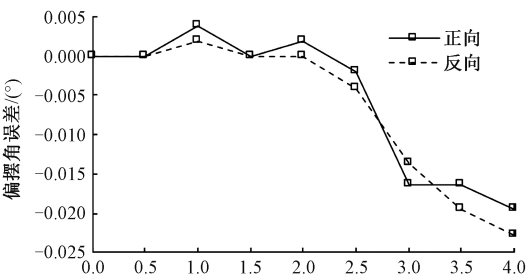
运动角误差分别映射到不同的三维角度进行测量,如表 1 所示,针对三维运动平台不同的运动轴,建立三维运动平台运动角误差检测模型,其中 i 表示直线运动被测位置, ε 表示误差。

表 1 平台三维角误差模型

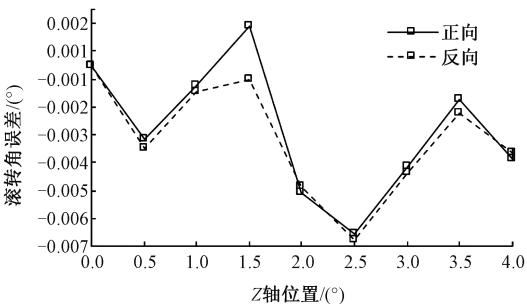
Table 1 Three-dimensional angle error model of the platform

传感器测量所得角度			三维角误差		
初始位置	位置 i	角度变化	$\varepsilon(x)$	$\varepsilon(y)$	$\varepsilon(z)$
α_0	α_i	$\alpha = \alpha_i - \alpha_0$	滚转	俯仰	偏摆
β_0	β_i	$\beta = \beta_i - \beta_0$	偏摆	偏摆	滚转
θ_0	θ_i	$\theta = \theta_i - \theta_0$	俯仰	滚转	俯仰

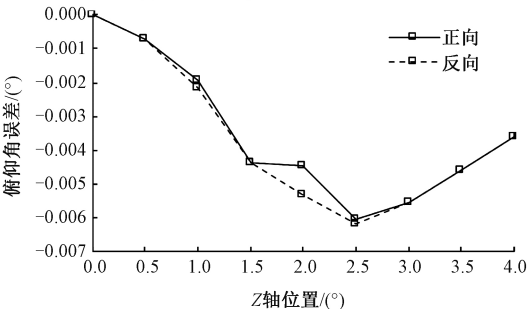
本研究以 Z 轴为例,完成平台直线运动过程中运动角误差的检测。设置数据采集间隔为 0.5 mm,测量范围为 4 mm。测量结果如图 10 所示,偏摆角误差最大不超过 0.03°,滚转角误差最大值不超过 0.007°,俯仰误差最大值不超过 0.006°,正向与反向变化规律一致,验证了 Z 轴良好的重复性。相比于激光干涉仪单次测量只能得到一项角误差结果,本方法可以在单次测量中同时得到三项角误差,并且测量稳定性在实验结果中也得到了很好的体现。



(a) 偏摆角误差测量结果
(a) The yaw angle error measurement result



(b) 滚转角误差测量结果
(b) The roll angle error measurement result



(c) 俯仰角误差测量结果
(c) The pitch angle error measurement result

图 10 z 轴运动角误差测量结果

Fig.10 The measurement results of the motion angle errors for the z-axis

5 结 论

本研究提出了一种空间三维角度同时在线测量方法,并用于直线运动系统运动角误差的同步、高效测量,

可广泛应用于工程实践中。关键结论归纳如下:

1) 本研究建立了空间三维角度与标准阶梯量块参数测量结果之间的理论计算模型, 可以实现在单次测量中同步获得三项空间角度变化值, 为运动角误差的检测提供了理论支持;

2) 经回转精度校准装置检定, 得到精密转台的回转定位误差不超过 0.05%, 小于线激光传感器测量的 1%, 可以用于实现阶梯量块三维角度的变化, 为角度测量范围的确定与误差标定提供精度保证;

3) 结合精密转台确定出线激光传感器的角度测量范围为 $\pm 30^\circ$, 采用实验与软件计算相结合的方法完成角度测量误差的标定, 得到侧角分辨率为 0.001° ;

4) 经实验验证, 本研究提出的空间三维角度同步实时测量方法, 能够在空间运动角误差测量领域得到应用, 相比完成单误差测量的设备, 提升了测量效率。

参考文献

- [1] 马雅丽, 李阳阳. 基于几何误差不确定性的滚动导差研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 11-18.
MA Y L, LI Y Y. Motion error of rolling guide based on uncertainty of geometric error [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(5): 11-18.
- [2] 陈诚, 裘祖荣, 李醒飞, 等. θ FXZ 型测量机力变形误差分析[J]. 天津大学学报, 2010, 43(1): 64-70.
CHEN C, QIU Z R, LI X F, et al. Analysis of force-induced errors of measuring machine with θ FXZ Structure [J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(1): 64-70.
- [3] 罗哉, 刘晖, 崔学伟, 等. 关节臂式坐标测量机热变形误差建模及补偿 [J]. 计量学报, 2019, 40(1): 71-77.
LUO Z, LIU H, CUI X W, et al. Modeling and compensation of thermal deformation error of articulated arm coordinate measuring machine [J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40(1): 71-77.
- [4] 杨洪涛, 刘勇, 费业泰, 等. 三坐标测量机动态误差混合建模方法 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 1861-1866.
YANG H T, LIU Y, FEI Y T, et al. Hybrid modeling method for CMM dynamic error [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(8): 1861-1866.
- [5] 张敏. 基于激光干涉仪的数控机床几何误差检测与辨识[J]. 机械工程师, 2006(9): 76-78.
ZHANG M. The geometric error detection and distinguishing of laser interferometer-based NC machine tool [J]. Mechanical Engineer, 2006(9): 76-78.
- [6] 朱嘉, 李醒飞, 谭文斌, 等. 基于激光干涉仪的测量机几何误差检定技术[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 25-30.
ZHU J, LI X F, TAN W B, et al. Method of geometric error detection for measuring machine based on laser interferometer [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 25-30.
- [7] LIU C H, CHENG C H. Development of a grating based multi-degree-of-freedom laser linear encoder using diffracted light [J]. Sensors and Actuators: A Physics, 2012, 181: 87-93.
- [8] FUNG E H K, ZHU M, ZHANG X Z, et al. A novel fourier-eight-sensor (f8s) method for separating straightness, yawing and rolling motion errors of a linear slide [J]. Meas. J. Int. Meas. Confed, 2014, 47: 777-788.
- [9] HSIEH H L, PAN S W. Development of a grating-based interferometer for six-degree-of-freedom displacement and angle measurements [J]. Opt. Express, 2015, 23(3): 2451-65.
- [10] CHEN Y T, LIN W C, LIU C S. Design and experimental verification of novel six-degree-of freedom geometric error measurement system for linear stage [J]. Opt. Lasers Eng, 2017, 92: 94-104.
- [11] PEZESKI M, AREZOO B. Kinematic errors identification of three-axis machine tools based on machined work pieces [J]. Precis. Eng. 2016, 43: 493-504.
- [12] 杨婧, 冯其波. 数控机床空间几何误差测量研究进展[J]. 仪器仪表报, 2017, 38(8): 1901-1911.
YANG J, FENG Q B. Research progress on volumetric geometric error measurement of numerical control (NC) machine tools [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1901-1911.
- [13] 江洁, 王英雷, 王昊予. 大量程高精度三维姿态角测量系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 48-53.
JIANG J, WANG Y L, WANG H Y. Design of large FOV high precision three-dimensional attitude angle measurement system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(6): 48-53.
- [14] 孙国燕, 高立民, 白建明, 等. 三维姿态角高精度测量装置[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 963-970.
SUN G Y, GAO L M, BAI J M, et al. High accuracy three-dimensional attitude angle measuring device [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(5): 963-970.
- [15] 董祉序, 孙兴伟, 刘伟军, 等. 基于激光位移传感器的自由曲面精密测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 30-38.
DONG ZH X, SUN X W, LIU W J, et al. Precision

- measurement method of free-form curved surfaces based on laser displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12): 30-38.
- [16] 尚忠义, 李伟仙, 董明利, 等. 基于四步相移光栅投影的三维形貌测量系统[J]. 应用光学, 2015, 36(4): 584-589.
- SAHNG ZH Y, LI W X, DONG M L, et al. 3D Shape measurement system based on fringe projection in 4-step phase shifting [J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(4): 584-589.
- [17] 李玥华, 周京博, 刘利剑. 线结构光测量技术研究进展[J]. 河北科技大学学报, 2018, 39(2): 115-124.
- LI Y H, ZHOU J B, LIU L J. Research progress of the line structured light measurement technique [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2018, 39(2): 115-124.
- [18] 陈瀚, 张思瑾, 高见, 等. 基于多个线激光传感器旋转扫描的铸钢车轮在线三维测量技术[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 199-205.
- CHEN H, ZHANG S J, GAO J, et al. Online 3D measurement technology of steel wheel based on multiple laser-line sensors rotating scanning [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 199-205.
- [19] 邹焱飏, 王研博, 周卫林. 焊缝跟踪应用的线激光视觉伺服控制系统[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2689-2698.
- ZOU Y B, WANG Y B, ZHOU W L. Line laser visual servo control system for seam tracking [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(11): 2689-2698.
- [20] 解则晓, 朱瑞新, 张安祺. 超大尺度线结构光传感器三维测量系统外参数标定[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 136-143.
- XIE Z X, ZHU R X, ZHANG A Q. Extrinsic parameters calibration of three-dimensional measurement system for ultra-large scale line-structured light sensor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 136-143.
- [21] 王晓嘉, 高隼, 王磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报, 2004(S2): 601-604, 608.
- WANG X J, GAO J, WANG L. Survey on the laser triangulation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004(S2): 601-604, 608.
- [22] 徐淑婷, 薄其乐, 张豪, 等. 线激光在机测量建模与数据预处理研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(3): 131-134.
- XU S T, BO Q L, ZHANG H, et al. Research on modeling and data preprocessing of line laser on-machine measurement [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018(3): 131-134.

作者简介



陈诚, 分别在 2007 年和 2010 年于天津大学获得硕士学位和博士学位, 现为天津商业大学副教授, 主要研究方向为精密测试技术及智能传感器。

E-mail: chencheng@tjcu.edu.cn

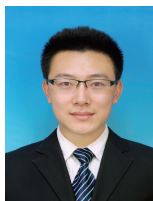
Chen Cheng received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Tianjin University in 2007 and 2010, respectively. He is now an associate professor at Tianjin University of Commerce. His main research interests include precision measurement technology and intelligent sensors.



张宏儒, 2016 年于天津商业大学获得学士学位, 现为天津商业大学硕士研究生, 主要研究方向为精密测试技术及智能传感器。

E-mail: zhrjcu@163.com

Zhang Hongru received his B. Sc. degree in 2016 from Tianjin University of Commerce. Now, he is a M. Sc. candidate at Tianjin University of Commerce. His main research interests include precision measurement technology and intelligent sensors.



刘冰 (通信作者), 分别在 2009 年和 2015 年于天津大学获得学士、博士学位(直博), 现为天津商业大学讲师, 主要研究方向为机械制造。

E-mail: liubing@tjcu.edu.cn

Liu Bing (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degree both from Tianjin University in 2009 and 2015, respectively. Now, he is a lecturer in Tianjin University of Commerce. His main research interests include machine manufacturing.