

文章编号 1004-924X(2012)09-1960-07

超精密级二维工作台的自标定

崔继文, 刘雪明, 谭久彬*

(哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了提高超精密级二维工作台的运动定位精度, 提出了一种实现工作台系统误差分离的二维自标定算法。基于工作台测量误差模型, 该算法利用辅助标记板的 5 个不同测量位姿, 分别得到迭代模型和迭代初始值, 最终建立完整的迭代二维自标定模型。应用该算法对系统误差为 $0.2\ \mu\text{m}$ 的二维工作台进行仿真, 结果显示: 当不存在随机测量噪声时, 标定精度为 $0.33\ \text{nm}$; 引入随机测量噪声时, 标定精度与噪声同一量级。对 x 、 y 向给定测量精度分别为 $2.98\ \mu\text{m}$ 和 $3.22\ \mu\text{m}$ 的二维工作台进行自标定, 得到 x 、 y 向测量精度分别为 $2.59\ \mu\text{m}$ 和 $3.14\ \mu\text{m}$ 。提出的自标定算法对随机测量噪声有很好的鲁棒性, 能够用于精密或超精密级二维工作台自标定。

关键词: 二维工作台; 自标定; 标记板; 误差分析

中图分类号: TP273; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122009.1960

Self-calibration for 2-D ultra-precision stage

CUI Ji-wen, LIU Xue-ming, TAN Jiu-bin*

(*Institute of Ultra-precision Optical & Electronic Instrument Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

* *Corresponding author, E-mail: jbtan@hit.edu.cn*

Abstract: A two-dimensional self-calibration algorithm was developed to extract the stage systematic measurement error from a stage position measurement error. On the basis of the stage measurement error model, the algorithm got the iterative self-calibration model and the initial value by measuring five different views of an artifact on the stage, and then it established a complete iterative 2D self-calibration model. The algorithm was used to simulate a 2D stage with an accuracy of $0.2\ \mu\text{m}$. The results show that the calibration error is $0.33\ \text{nm}$ without random measurement noises and is the same order of magnitude with random measurement noises. The actual self-calibration experiment on a stage with the given measuring accuracies of $2.98\ \mu\text{m}$ and $3.22\ \mu\text{m}$ in x and y directions was performed, and obtained measuring accuracies are $2.59\ \mu\text{m}$ and $3.14\ \mu\text{m}$ in x and y directions, respectively. All results demonstrate that the proposed algorithm has a good robustness for the random measurement noises, and it is suitable for the calibrations for precision stages or ultra-precision stages.

Key words: 2-dimensional stage; self-calibration; grid plate; error analysis

收稿日期: 2012-04-24; 修订日期: 2012-06-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175128); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA040508)

1 引言

二维工作台在精密工程领域的应用越来越广泛,随着超精密加工和测量技术的飞速发展,对二维工作台的运动定位精度要求越来越高,在超精密加工领域,工作台的定位精度已达到亚纳米级要求。但由于制造装配、非质心驱动、反馈测量元件等影响,工作台的实际位置与测量位置存在误差,记为工作台位置测量误差。工作台位置测量误差由随机测量误差和系统测量误差(记为工作台系统误差)组成。工作台标定的目的是分离出工作台系统误差并对其进行补偿,以提高运动定位精度。传统的工作台标定方法中以标准计量台为基准,通过测量标准计量台上标记点的测量值与标准值之间的差异得到被标定工作台的系统误差。但由于制造计量水平的限制,目前还无法制造纳米甚至亚纳米级的标准工作台,因此传统的标定方法无法应用于高精度工作台标定。工作台自标定方法可有效地解决这个问题^[1-3]。

1984年,Raugh应用对称论和群论提出一种自标定算法,但是这种算法没有明确的标定式,而且对随机测量噪声敏感^[4]。Ye^[1]等人基于测量误差模型应用离散傅里叶变换得到工作台自标定模型,使工作台自标定技术有了很大进步。Lu^[5]、Yoo^[6]使用离散傅里叶变换改善此自标定算法,使模型简化,但由于复数二维傅里叶变换复杂导致模型推导求解复杂。虽然基于离散傅里叶变换的自标定算法能够得到明确的自标定函数,但函数在标记点数较大时求解过程非常复杂。Raugh^[7]在2002年的科技报告中详细阐述了一种基于刚体运动模型的自标定算法,此算法采用非线性优化得到工作台系统误差,但当标定点数较多时优化过程复杂,且此方法没有给出明确的标定函数。2011年清华大学科研人员基于测量误差模型提出了迭代的自标定算法^[8,9],此算法模型简单易实现,但是对于迭代初始值此算法没有给出合理的求解方法。

综上所述,现有的自标定算法存在模型求解复杂或者不能建立完整模型等缺点。为解决上述缺点,本文提出一种基于测量误差模型的迭代自标定算法,该算法基于置于工作台的辅助测量装置的测量误差模型,当辅助测量装置处于不同方向与位置时,对于辅助测量装置上相同标记点的

误差不变,通过不同测量位姿消去辅助测量装置误差从而分离出工作台的系统误差。

2 误差函数定义说明

2.1 工作台系统误差函数定义说明

设工作台在 (x, y) 点处的系统误差为 $S(x, y)$,则 $S(x, y)$ 是 x, y 两个方向的误差矢量和。即:

$$S(x, y) = S_x(x, y)e_{x_s} + S_y(x, y)e_{y_s}, \quad (1)$$

式中: e_{x_s}, e_{y_s} 表示工作台坐标系的单位向量, $S_x(x, y), S_y(x, y)$ 为工作台点 (x, y) 处 x 和 y 向的系统误差。

自标定过程首先对尺寸为 $L \times L$ 的工作台求解离散点的系统误差,然后采用拟合的方式得到整个工作台的误差函数。假设标定区域有 $N \times N$ 个标记点,为了方便应用对称特性使 N 为奇数。标记点间距 $\Delta = L/(N-1)$,则 $x_m = m\Delta, y_n = n\Delta$,其中 $m, n = -(N-1)/2, \dots, 0, 1, \dots, (N-1)/2$ 。为了使运算简单,简记为:

$$\begin{cases} S_{x, m, n} = S_x(x_m, y_n) \\ S_{y, m, n} = S_y(x_m, y_n) \\ \mathbf{S}_{m, n} = S_{x, m, n}e_{x_s} + S_{y, m, n}e_{y_s} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $S_{x, m, n}, S_x(x_m, y_n)$ 和 $S_{y, m, n}, S_y(x_m, y_n)$ 分别表示在标记点 (x_m, y_n) 处 x 和 y 方向的工作台系统误差, $\mathbf{S}_{m, n}$ 表示在工作台标记点 (x_m, y_n) 处工作台总的系统误差。

通过选择坐标系使工作台系统误差无平移、旋转和缩放误差^[1],得到 $\mathbf{S}_{m, n}$ 满足下式:

$$\begin{cases} \sum_{m, n} S_{x, m, n} = \sum_{m, n} S_{y, m, n} = 0 \\ \sum_{m, n} S_{x, m, n} y_n - S_{y, m, n} x_m = 0 \\ \sum_{m, n} S_{x, m, n} x_m + S_{y, m, n} y_n = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

2.2 辅助测量装置误差函数定义说明

本文中的自标定算法辅助测量装置为标记点均匀的 $N \times N$ 规模的方形标记板,尺寸为 $L \times L$,与工作台标定区域相同。标记板坐标系原点位于标记点阵的中心,随标记板的移动而移动。标记点 (m, n) 的坐标 $x_m = m\Delta, y_n = n\Delta$ 。但是由于标记板加工、变形等因素使得标记点 (m, n) 处的实际值与理论标定值存在标定误差 $\mathbf{A}_{m, n}$,同工作台系统误差得到:

$$\begin{cases} A_{x, m, n} = A_x(x_m, y_n) \\ A_{y, m, n} = A_y(x_m, y_n) \\ \mathbf{A}_{m, n} = A_{x, m, n}e_x + A_{y, m, n}e_y \end{cases}, \quad (4)$$

式中: e_x, e_y 为标记板坐标系的单位向量, $m, n = -(N-1)/2, \dots, 0, 1, \dots, (N-1)/2$, $A_{x,m,n}, A_x(x_m, y_n)$ 和 $A_{y,m,n}, A_y(x_m, y_n)$ 表示标记板标记点 (x_m, y_n) 的 x 和 y 方向的误差。

同理, 选择坐标系使辅助标记板无平移、旋转误差^[1], 但是标记板坐标系相对于工作台坐标系之间存在缩放误差, 得到 $A_{m,n}$ 满足:

$$\begin{cases} \sum_{m,n} A_{x,m,n} = \sum_{m,n} A_{y,m,n} = 0 \\ \sum_{m,n} A_{x,m,n} y_n - A_{y,m,n} x_m = 0 \end{cases} \quad (5)$$

3 自标定模型建立

3.1 测量误差函数

基于测量误差模型自标定的实现过程是将标

记板放在被标定工作台上, 使之与工作台一起运动, 通过定位装置定位标记点, 然后测量标记点的位置。将各位姿的测量数据带入到自标定模型得到工作台各标记点的系统误差, 然后通过拟合得到工作台各位置处的系统误差。

本自标定算法需要 5 个测量位姿, 如图 1 所示。位姿 0 为初始位姿, 即将标记板置于工作台上, 使两个坐标系尽可能重合; 位姿 1 为标记板右移一个标记间距 Δ 的测量位姿; 位姿 2 为标记板上移一个标记间距 Δ 的测量位姿; 位姿 3 为标记板逆时针旋转 90° 的测量位姿; 位姿 4 为标记板绕 x 轴翻转 180° 位姿。位姿 1、2、3、4 都是以初始位姿为基准移动。本算法中通过位姿 0、1、2 建立迭代的自标定模型, 通过位姿 0、3、4 求模型所需的初始条件, 从而得到完整的自标定模型。

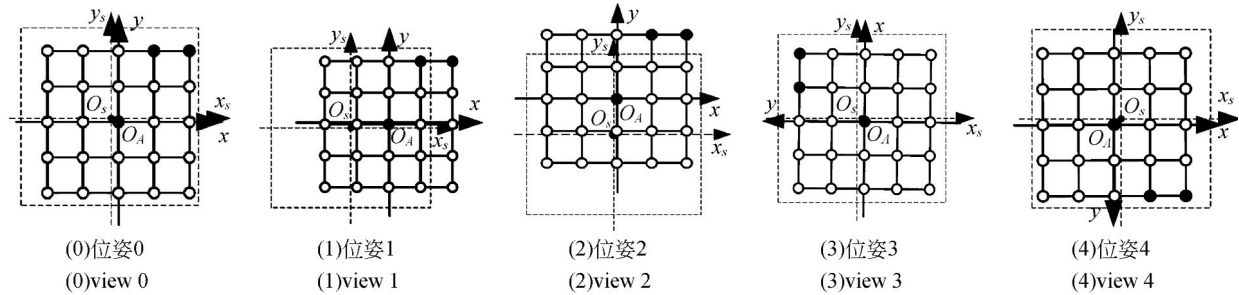


图 1 自标定所需测量位姿示意图

Fig. 1 Five measurement views for self-calibration

标记板各标记点处的测量误差是工作台系统误差、随机测量误差和标记板几何误差共同作用的结果^[10]。对于每个测量位姿, 工作台与标记板坐标系不可能完全重合, 坐标系原点存在平移误差, 坐标轴之间存在角度误差。可将每个标记点的测量误差 $v_{m,n}$ 表示为 4 项: 分别为工作台系统误差 $S_{m,n}$, 标记板误差 $A_{m,n}$, 坐标系偏差 $E_{m,n}$ 和随机测量误差 $r_{m,n}$ 。

$$\begin{cases} v_{m,n} = S_{m,n} + A_{m,n} + E_{m,n} + r_{m,n} \\ E_{m,n} = \begin{bmatrix} E_{x,m,n} \\ E_{y,m,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\theta \\ \theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

式中: θ 为旋转角度误差, t_x, t_y 为 x, y 向平移误差。随机测量误差可以采用多次测量求平均值的方法减弱对测量结果的影响。

由上分析得到测量位姿 0 中工作台 (m, n) 标记点处的测量误差为^[11]:

$$\begin{cases} v_{0,x,m,n} = S_{x,m,n} + A_{x,m,n} + E_{0,x,m,n} + r_{0,x,m,n} \\ v_{0,y,m,n} = S_{y,m,n} + A_{y,m,n} + E_{0,y,m,n} + r_{0,y,m,n} \end{cases} \quad (7)$$

对各标记点进行多次测量, 测量结果取平均值, 忽略随机测量误差的影响, 得到:

$$\begin{cases} V_{0,x,m,n} = S_{x,m,n} + A_{x,m,n} - \theta_0 y_n + t_{ax} \\ V_{0,y,m,n} = S_{y,m,n} + A_{y,m,n} + \theta_0 x_m + t_{ay} \end{cases} \quad (8)$$

同理位姿 1、2、3、4 中工作台 (m, n) 标记点处测量误差函数如下:

$$\begin{cases} V_{1,x,m,n} = S_{x,m,n} + A_{x,m-1,n} - \theta_1 y_n + t_{1x} \\ V_{1,y,m,n} = S_{y,m,n} + A_{y,m-1,n} + \theta_1 x_m + t_{1y} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} V_{2,x,m,n} = S_{x,m,n} + A_{x,m,n-1} - \theta_2 y_n + t_{2x} \\ V_{2,y,m,n} = S_{y,m,n} + A_{y,m,n-1} + \theta_2 x_m + t_{2y} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} V_{3,x,m,n} = S_{x,m,n} - A_{y,n-m} - \theta_3 y_n + t_{3x} \\ V_{3,y,m,n} = S_{y,m,n} + A_{x,n-m} + \theta_3 x_m + t_{3y} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} V_{4,x,m,n} = S_{x,m,n} + A_{x,m-n} - \theta_4 y_n + t_{4x} \\ V_{4,y,m,n} = S_{y,m,n} - A_{y,m-n} + \theta_4 x_m + t_{4y} \end{cases} \quad (12)$$

式(9)、(10)、(11)、(12)分别为位姿 1、2、3、4 的测量误差式。

3.2 自标定模型建立

根据文献[8]中的自标定算法,由位姿 0、1、2 的测量误差式得到迭代的自标定模型^[8,9]。

$$\begin{cases} S_{x,m+2,n} = L_{1,m,n} + 2S_{x,m+1,n} - S_{x,m,n} \\ S_{x,m+1,n+1} = L_{2,m,n} + S_{x,m,n+1} + S_{x,m+1,n} - S_{x,m,n} \\ S_{y,m,n+2} = L_{3,m,n} + 2S_{y,m,n+1} - S_{y,m,n} \\ S_{y,m+1,n+1} = L_{4,m,n} + S_{y,m+1,n} + S_{y,m,n+1} - S_{y,m,n} \end{cases} \quad (13)$$

式中: L 可由各点测量误差得到,化为已知量。

由式(13)知如果已知迭代模型的初始条件 $S_{x,0,n}, S_{y,m,0}, S_{x,1,s}, S_{y,t,1}$ 或 $S_{y,-1,s}, S_{y,t,-1}$ (s, t 为 $[-(N-1)/2, (N-1)/2]$ 之间的任意整数), 则可得到工作台所有标记点的系统误差。因此下一步的工作是求迭代初始值。

为了得到迭代初始值 $S_{x,0,n}, S_{y,m,0}$ 引入测量位姿(3)、(4)。位姿 0 测量误差式(8)中由式 3、4 工作台和标记板误差约束条件可以得到坐标系偏差:

$$t_{0x} = \frac{1}{N^2} \sum_{m,n} V_{0,x,m,n}, t_{0y} = \frac{1}{N^2} \sum_{m,n} V_{0,y,m,n}, \quad (14)$$

$$\theta_0 = \frac{\sum_{m,n} (V_{0,x,m,n} y_n + V_{0,y,m,n} x_m)}{\sum_{m,n} (y_n^2 + x_m^2)}. \quad (15)$$

对式(11)、(12)做相同的处理,在计算过程中注意 $x_m = y_n = m\Delta$, 得到 $\theta_3, \theta_4, t_{3x}, t_{3y}, t_{4x}, t_{4y}$ 。

通过上面的推导可以得到坐标系偏差函数的 3 个参数 t_x, t_y, θ , 带入到式(8)、(11)、(12)中消掉坐标系偏差得:

$$\begin{cases} U_{0,x,m,n} = V_{0,x,m,n} + \theta_0 y_n - t_{0x} = S_{x,m,n} + A_{x,m,n} \\ U_{0,y,m,n} = V_{0,y,m,n} - \theta_0 x_m - t_{0y} = S_{y,m,n} + A_{y,m,n} \end{cases} \quad (16)$$

同理对式(11)、(12)处理,整理消去标记板的误差 $A_{m,n}$ 得到能够求解 $S_{x,0,n}, S_{y,m,0}$ 的方程组(17):

$$\begin{cases} P_{0,0,n} = S_{y,-n,0} - S_{x,0,n} \\ P_{1,m,0} = S_{x,0,m} + S_{y,m,0} \\ P_{2,0,n} = S_{x,0,-n} - S_{x,0,n} \end{cases} \quad (17)$$

式中 P 为已知量。

分析知另外初始值 $S_{x,1,s}, S_{y,t,1}$ 不能由测量位姿通过求解方程组得到。因此上面的求解初始值的方法失效。根据文献[5]中的自标定算法,假设工作台系统误差函数 $S(x, y)$ 具有空间周期性,即:

$$\begin{cases} S(x+L, y) = S(x, y) \\ S(x, y+L) = S(x, y) \end{cases} \quad (18)$$

进行函数的周期延拓可以方便应用离散傅里叶变换(DFT),实际运算中只考虑标定区域 $L \times L$ 。根据迭代式(13)可以得到:

$$\begin{cases} S_{x,m+2,0} - 2S_{x,m+1,0} + S_{x,m,0} = L_{1,m,0} \\ S_{y,0,n+2} - 2S_{y,0,n+1} + S_{y,0,n} = L_{3,0,n} \end{cases} \quad (19)$$

两边同时做傅里叶变换,由傅里叶变换的移位特性得到:

$$\begin{cases} (e^{j\frac{2\pi}{N}2k} - 2e^{j\frac{2\pi}{N}k} + 1) S_x(k) = L_1(k) \\ (e^{j\frac{2\pi}{N}2k} - 2e^{j\frac{2\pi}{N}k} + 1) S_y(k) = L_3(k) \end{cases} \quad (20)$$

由式(20)得到:

$$\begin{cases} S_x(k) = L_1(k) / (e^{j\frac{2\pi}{N}2k} - 2e^{j\frac{2\pi}{N}k} + 1) \\ S_y(k) = L_3(k) / (e^{j\frac{2\pi}{N}2k} - 2e^{j\frac{2\pi}{N}k} + 1) \end{cases}, \quad (21)$$

式中: $k = -(N-1)/2, \dots, -1, 1, \dots, (N-1)/2$, 对其进行傅里叶逆变换可以得到 $S_{x,1,0}, S_{y,0,1}$ 。

至此,所有迭代初始值全部求出,建立了完整的自标定数学模型,完善了自标定算法。

4 仿真与实验

4.1 计算机仿真

为验证本文超精密二维工作台自标定算法的有效性,进行了计算机仿真。使用 11×11 的标记阵作为辅助测量装置,标记间距为 10 mm,尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。假设标记点的标定误差均值为 0,标准差为 $0.5 \mu\text{m}$,工作台系统误差均值为 0,标准差为 $0.2 \mu\text{m}$,如图 2 所示。每个测量位姿引入 0.1° 的角度误差, $30 \mu\text{m}$ 的平移偏差,在存在和不存在随机测量噪声的两种情况下进行仿真。

图 3 是不存在随机测量噪声的仿真结果偏差,不存在随机测量噪声时标定精度为 0.33 nm ,与 $0.2 \mu\text{m}$ 相比可以忽略,因此本自标定算法在没有随机测量噪声时可以准确分离出工作台的系统误差。图 4 为引入标准差为 3 nm 的随机测量噪声时的仿真偏差,得标定精度为 3.3 nm 。为了

保证分离出的系统误差的有效性,引入的随机测量噪声不能大于工件台系统误差,即仿真中随机测量噪声的最大标准差为 $0.2 \mu\text{m}$ 。引入标准差分别为 10 、 20 和 200 nm 的随机测量噪声进行对比验证实验,得标定精度为 12.3 、 23.8 和 229.8 nm 。由此结果可知:本自标定算法引入一个与随机测量噪声量级相同的标定误差,说明此算法稳定,对随机测量噪声有很好的鲁棒性。

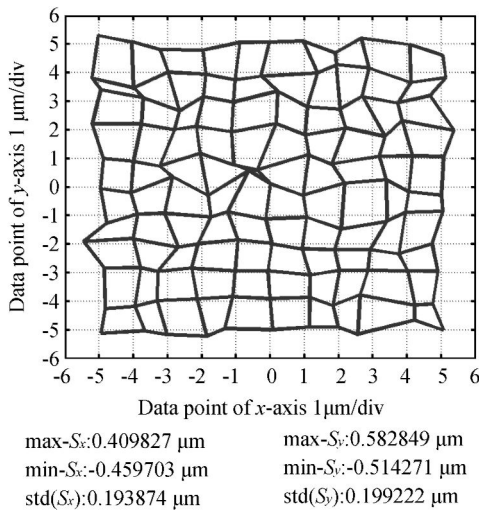


图 2 实际工作台系统误差
Fig. 2 Actual stage error

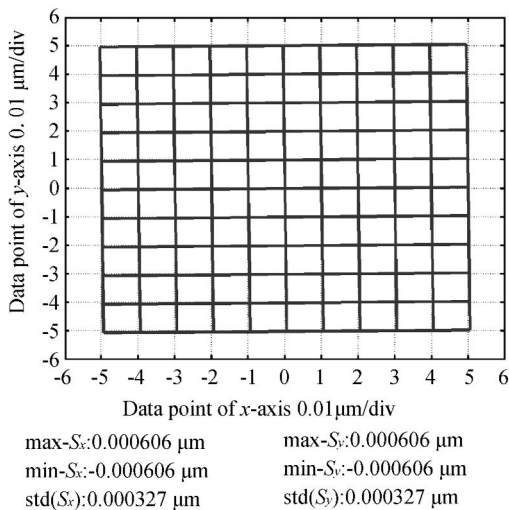


图 3 不存在随机测量噪声下仿真结果与理论值之间的偏差
Fig. 3 Difference between reconstructed stage error and actual stage error without random measurement noise

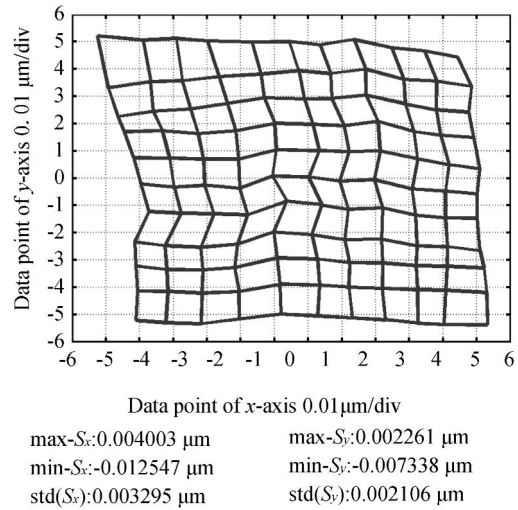


图 4 存在随机测量噪声下仿真结果与理论值之间的偏差
Fig. 4 Difference between reconstructed stage error and actual stage error with random measurement noise

4.2 自标定实验

应用本文自标定算法对 XY 向行程为 $200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的 OGP 公司的 MVP-200 测量仪进行了标定,实验装置如图 5 所示。测量仪通过三轴操纵杆控制直流伺服马达驱动,XYZ 轴采用分辨率为 $0.5 \mu\text{m}$ 的光栅尺作为反馈测量元件。工作台 3 是 XY 向二维运动台。辅助测量装置为 11×11 点的实心圆标记透明玻璃板,标记点间距为 12 mm ,位置精度为 $1.5 \mu\text{m}$ 。将标记板置于工作台上,调整标记板使标记板坐标系与测量坐标系方向尽量一致。用测量软件处理 CCD 采集的图像,实现每个标记点定位、测量。移动工作台使每个标记点依次定位测量,得到位姿的一次测量数据。重复运行路径程序 20 次实现每个标记点的 20 次重复测量,对 20 次测量结果取平均值作为最后的测量数据。移动标记板重新测量其他位

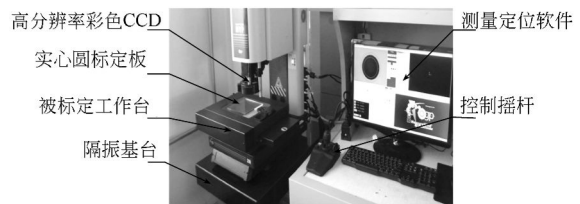


图 5 自标定实验装置
Fig. 5 Experimental facility of self-calibration

姿的测量数据。

测量得到5个测量位姿的数据,采用本文的自标定算法得到 MVP-200 工作台在标定范围内的 x 、 y 向系统误差 S_x 、 S_y 如图6所示。

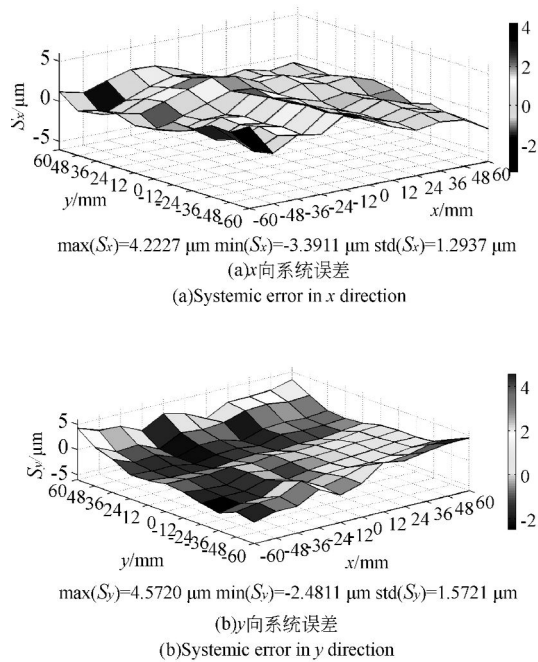


图6 被标定二维工作台的系统误差

Fig. 6 Systemic errors of calibrated two-dimensional stage

由图6知实验得到工作台 x 、 y 向的系统误差的标准差分别为 $1.2937 \mu\text{m}$ 和 $1.5721 \mu\text{m}$ 。

参考文献:

- [1] YE J, TAKAC M, BERGLUND C N, *et al.*. An exact algorithm for self-calibration of precision metrology stages [J]. *Precision Engineering*, 1997, 20(1):16-32.
- [2] 朱立伟,朱煜,尹文生.超精密二维工作台自标定技术研究[J].中国机械工程,2005,16(20):1787-1790.
ZHU L W, ZHU Y, YIN W SH. Research on self-calibration of two-dimensional ultra-precision Stages [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(20):1787-1790. (in Chinese)
- [3] 朱煜,朱立伟,尹文生,等.IC加工及检测装备超精密工作台自标定技术研究[J].电子工业专用设备,2005,34(3):20-24.

概率分布近似正态分布,扩展不确定度 $U=ku$,在扩展不确定度评估方法中欧美国家一般取 $k=2^{[12]}$ 。本文取 $k=2$,得到标定结果的 x 、 y 向不确定度分别为 $2.59 \mu\text{m}$ 和 $3.14 \mu\text{m}$ 。由 MVP-200 的技术手册知 x 向测量精度为 $(2.5+4L/1000) \mu\text{m}$, y 向测量精度为 $(2.5+6L/1000) \mu\text{m}$,其中 L 为测量长度,单位为 mm 。本实验 $L=120 \text{ mm}$,因此 x 、 y 向理论测量精度分别为 $2.98 \mu\text{m}$ 和 $3.22 \mu\text{m}$ 。实验得到的 x 、 y 测量精度为 $2.59 \mu\text{m}$ 和 $3.14 \mu\text{m}$,与理论值基本相符,说明本自标定算法可以应用于本工作台实现自标定,提高测量结果的精确度。

5 结论

基于工作台测量误差模型,通过辅助标记板5个测量位姿建立了完整的迭代二维自标定模型。该算法模型简单,实现过程容易,能够用于精密及超精密二维工作台的自标定,提高工作台运动与定位精度。计算机仿真得本自标定算法在没有随机测量噪声时标定精度为 0.33 nm ;引入随机测量噪声时,标定精度与随机噪声量级相同,说明本算法稳定,对随机测量噪声有很好的鲁棒性。对 x 、 y 向给定测量精度为 $2.98 \mu\text{m}$ 和 $3.22 \mu\text{m}$ 的工作台标定,得到 x 、 y 向实验测量精度为 $2.59 \mu\text{m}$ 和 $3.14 \mu\text{m}$ 。

- ZHU Y, ZHU L W, YIN W SH, *et al.*. Research on self-calibration of ultra-precision stages applied in IC fabrication and inspection devices [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2005, 34(3):20-24. (in Chinese)
- [4] RAUGH M R. Absolute two-dimensional sub-micron metrology for electron beam lithograph: a theory of calibration with applications [J]. *Precision Engineering*, 1985, 7(1):3-13.
- [5] LU X M. Real-time self-calibration and geometry error measurement in nm level multi-axis precision machines based on multi X-Y encoder integration [D]. *University of New Mexico*, 2004.
- [6] YOO S, KIM S W. Self-calibration algorithm for testing out-of-plane errors of two-dimensional profiling Stages [J]. *International Journal of Ma-*

- chine Tools & Manufacture*, 2004, 44(7): 767-774.
- [7] RAUGH M R. Self-calibration of interferometer stages: mathematical techniques for deriving Lattice algorithms for nanotechnology[C]. *Technical Report*, 2002.
- [8] ZHU Y, HU C X, HU J C, *et al.*. A transitive algorithm for self-calibration of two-dimensional ultra-precision stages [J]. *IEEE*, 2011: 594-598.
- [9] ZHU Y, HU C X, HU J C. Least-square based self-calibration of two-dimensional ultra-precision stages [J]. *IEEE*, 2011: 597-602.
- [10] ELEANOR F H. Investigation into applying self-calibration techniques to measuring large optical components on a CMM [J]. *SPIE*, 2003, 5190: 232-241.
- [11] ZHANG G X, FU J Y. A method for optical CMM calibration using a grid plate [J]. *Annals of the CIRP*, 2000, 7(49): 399-402.
- [12] 林洪桦. 测量误差与不确定度评估[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- LIN H H. *Measurement Error and Uncertainty Evaluation*[M]. Beijing: China Machine Press, 2009. (in Chinese)

作者简介:



崔继文(1974—),男,山东莘县人,博士,教授,哈尔滨工业大学光电信息实验中心主任,1998年、2000年、2005年于哈尔滨工业大学分别获学士、硕士、博士学位,主要研究方向为超精密光电传感与仪器技术。E-mail: cuijiwen@hit.edu.cn



谭久彬(1955—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所所长,1982年、1987年、1991年于哈尔滨工业大学分别获学士、硕士、博士学位,主要研究方向为超精密测量技术与仪器工程、光机电一体化工程等。E-mail: jbtan@hit.edu.cn



刘雪明(1988—),女,山东莱芜人,硕士研究生,2010年于哈尔滨工业大学获学士学位,主要研究方向为超精密光电与仪器工程。E-mail: l6xueming@126.com