

文章编号 1004-924X(2015)01-0197-09

用于影像仪测量误差分离的自校准技术

郭天太¹, 王晓晓¹, 洪 博¹, 孔 明¹, 施玉书²

(1. 中国计量学院 计量测试工程, 浙江 杭州 310018;

2. 北京计量科学研究院, 北京 100013)

摘要: 基于自校准技术提出了用于影像仪的误差分离方法。建立了自校准算法模型, 并利用影像仪对算法模型进行了实验验证。该算法运用普通栅格板来替代标准器, 将栅格板置于影像仪工作台 3 个不同位置得到 3 组测量数据, 通过研制的测量数据转换模型将得到的数据代入自校准算法模型中, 最终将测量结果中包含的仪器系统误差分离出来, 实现了自校准。由于运用了测量数据转换模型, 有效解决了实验过程中栅格板所在坐标系与影像仪工作台坐标系不重合的问题, 提高了影像仪测量结果的准确度。测试实验显示: 测量点实际测得的误差为毫米级, 经过自校准算法处理后得到的测量点的系统误差最大为 $0.49 \mu\text{m}$, 最小为 $0.00 \mu\text{m}$, 表明将自校准算法应用于影像测量仪结果的误差分离具有较好的可行性。

关键词: 影像仪; 自校准; 栅格板; 系统误差; 误差分离

中图分类号: TP216; TH161.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152301.0197

Self-calibration technology in measuring error separation of imaging instrument

GUO Tian-tai¹, WANG Xiao-xiao¹, HONG Bo¹, KONG Ming¹, SHI Yu-shu²

(1. College of Metrology & Measurement Engineering,
China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

* Corresponding author, E-mail: guotiantai@163.com

Abstract: A measuring error separation method was proposed on the basis of self-calibration algorithm for an imaging instrument. A self-calibration model was established and verified by the imaging instrument. A regular grid plate was used to replace the standard, and the grid plate was put on the image instrument stage in three different positions to get three sets of measurement data. The data were put into the self-calibration model through the developed transformation model in advance. Then, the system error contained in the measurement results was separated, and self-calibration was implemented. As measurement data transformation model was established, the problem of misalignment between grid plate and stage coordinate system was solves effectively during the process of experiment and the measuring accuracy of the imaging instrument was improved. Experiments show that the error of the measurement point is or millimeter scale without the self-calibration

收稿日期: 2014-06-10; 修订日期: 2014-07-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11172287); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目 (No. 2011YQ03011208); 浙江省自然科学基金资助项目 (No. LQ13F050002)

algorithm, but the maximum and minimum errors of the measurement point after self-calibration are $0.49 \mu\text{m}$ and $0.00 \mu\text{m}$ respectively. The results mean that it is feasible to apply the self-calibration algorithm to error separation of measurement results for the image measuring instrument.

Key words: imaging instrument; self-calibration; grid plate; system error; error separation

1 引言

目前,基于视觉测量技术的影像测量仪被广泛应用于机械、电子等行业的加工和零件测绘领域。与坐标测量机相比,影像测量仪具有非接触、高精度等优点,能够实现对被测对象的无损检测^[1-2]。影像测量仪的示值误差是影响测量结果准确度的重要指标,通常主要由随机误差和系统误差引起。为了得到更准确的测量结果,需要对影像测量仪的示值误差进行分析,从而对测量结果进行修正。现有的影像测量仪示值误差测量方法有线性和非线性校准法等。

邹华东等^[3]设计了两种标准件:对于显微镜镜头畸变小的情况运用线性校准法;对于无法修正的非线性畸变因素,例如桶形失真和枕形失真,采用坐标间多项式变换来表示非线性变换。王小章等^[1]分析了影像测量仪的主要误差来源,给出了多种误差的起因和消除方法,并用标准齿轮对所研发的测量仪进行测量和校准测试。谢树冰^[4]提出用线纹尺对影像测量仪的示值误差进行分析的方法,给出了其不确定度分析。以上方法虽然能够计算出影像测量仪的示值误差,提高了测量精度,但都需借助于标准件来完成且不具备通用性,故其应用受到限制。

随着科学技术的发展,对测量仪器的准确度提出了越来越高的要求,而通用校准设备的成本和难度也在逐渐增大^[5-6]。受加工水平限制,国内外都在研究如何摆脱通用校准方法来获得精密测量仪器测量误差的方法^[7-10]。Rough 等提出精密测量工作台的自校准方法,给出了理论依据^[11],此后得到 M. Takac, J. Ye, X. Lu 等学者的发展和改进^[12-14]。在国内,朱立伟、朱煜等^[15-18]提出了只用平移的方法建立的自校准模型,并提出基于最小二乘法的精密工作台自校准方法。崔继文等^[19]提出利用迭代法实现对二维工作台系统误

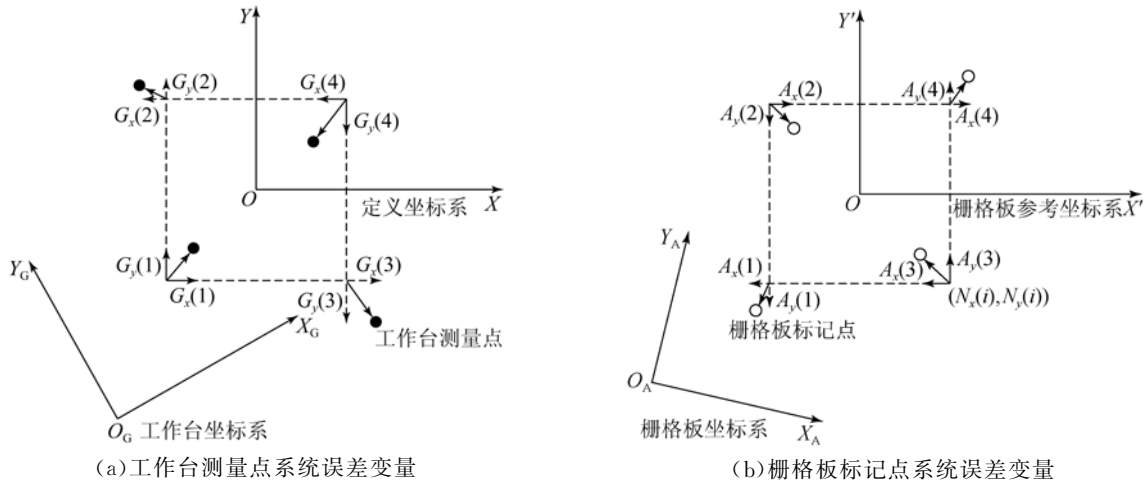
差的分离,并对该算法进行了实验验证。此外,郭天太等^[20]首次将自校准技术应用于平面度的评定。现有的自校准技术存在以下问题:(1)由于算法对噪声的高敏感性,没有得到实际的推广和应用;(2)多数停留在仿真环节,缺少相应的实验支持。

本文提出将自校准算法应用于影像仪测量结果的误差分离,用普通栅格板来替代标准器,利用栅格板和影像测量仪工作台不同位置的组合建立数学模型,对其测量结果包含的误差进行分析。首次提出实验环节栅格板中心点和工作台校准中心点存在偏移时的数学模型,为影像测量仪乃至其他精密仪器的自校准提供了通用的方法。

2 自校准理论算法介绍

2.1 自校准数学模型

自校准算法的实现需要借助于辅助测量栅格板,该栅格板为利用光刻技术形成的带有方形网格的玻璃板。将栅格板置于待校准的影像测量仪工作台上相应位置,通过测量仪读取栅格板上 (m, n) 标记点的坐标值,记为 $M_x(m, n)$ 和 $M_y(m, n)$,其中 n 为标记点单列个数, $1 \leq m \leq n$ 。通常测量结果中包含多种误差源,包括:(1)影像仪自身机械误差,也可称工作台系统误差 $G_{x,y}(m, n)$;(2)辅助栅格板各点排列误差,也可称栅格板系统误差 $A_{x,y}(m, n)$;(3)测量噪声引入的误差 E_N 。其中, $G_{x,y}(m, n)$ 为工作台上测量点实际位置与真实位置之间的偏差,其在 x 轴方向的分量为 $G_x(m, n)$,在 y 轴方向的分量为 $G_y(m, n)$,如图1(a)所示; $A_{x,y}(m, n)$ 为栅格板标记点实际位置与真实位置之间的偏差,其在 x 轴方向的分量为 $A_x(m, n)$,在 y 轴方向的分量为 $A_y(m, n)$,如图1(b)所示。由测量噪声引入的误差 E_N 可以通过多次重复性测量使其变得很小,因此,在最终影响测量结果的误差中,工作台系统误差 $G_{x,y}(m, n)$ 和栅格板系统误差 $A_{x,y}(m, n)$ 为主要成分。



(a) System error variables of measuring points in stage (b) System error variables of measuring points in grid plate

图 1 系统误差变量示意图

Fig. 1 Sketch of variables for system errors

图 1 中定义坐标系和栅格板参考坐标系的选取需满足下列条件:

$$\sum_{m,n=1}^n G_x(m,n) = \sum_{m,n=1}^n G_y(m,n) = 0, \quad (1)$$

$$\sum_{m,n=1}^n [G_x(m,n) \cdot N_y(m,n) - G_y(m,n) \cdot N_x(m,n)] = 0, \quad (2)$$

$$\sum_{m,n=1}^n [G_x(m,n) \cdot N_x(m,n) - G_y(m,n) \cdot N_y(m,n)] = 0. \quad (3)$$

$$\sum_{m,n=1}^n A_x(m,n) = \sum_{m,n=1}^n A_y(m,n) = 0. \quad (4)$$

$$\sum_{m,n=1}^n [A_x(m,n) \cdot N_y(m,n) - A_y(m,n) \cdot N_x(m,n)] = 0. \quad (5)$$

式中: $N_x(i)$ 、 $N_y(i)$ 分别为栅格板第 i 个标记点的标称值。

由于工作台和栅格板分属不同的坐标系,为了建立数学模型,需要将图 1 所示的不同坐标系中的各变量统一于同一个定义坐标系中,如图 2 所示。图中包含 3 个坐标系:定义坐标系 XOY 、工作台坐标系 $X_G O_G Y_G$ 、栅格板坐标系 $X_A O_A Y_A$ 。后两个坐标系相对于定义坐标系的旋转角度分别记为 θ_g 和 θ_a ,其坐标原点相对于定义坐标系原点

的偏移量分别记为 (V_g, W_g) 和 (V_A, W_A) 。对于辅助栅格板上的标记点 A ,向量 OP 为其理想坐标值,向量 PA 为其系统误差;对于工作台上同一位置处的测量点 A ,向量 AM 为其系统误差。

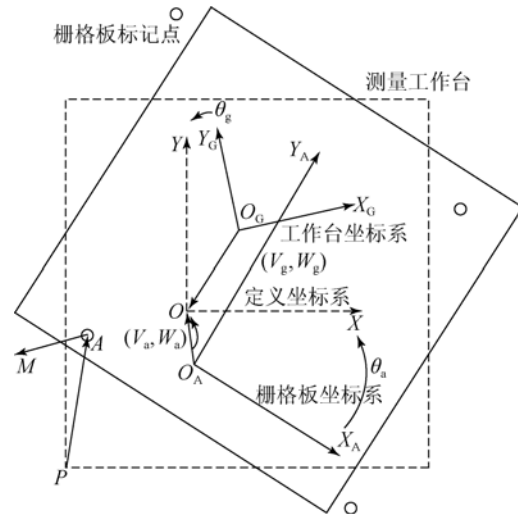


图 2 坐标系之间的转换

Fig. 2 Transformation of coordination systems

根据各矢量间的向量关系,可以得到:

$$PM = -OP + OM = PA + AM. \quad (6)$$

写成矩阵形式可得:

$$\begin{bmatrix} M_x(m,n) \\ M_y(m,n) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_x(m,n) \\ N_y(m,n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x(m,n) \\ G_y(m,n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_x(m,n) \\ A_y(m,n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -N_y(m,n) \cdot \theta \\ N_x(m,n) \cdot \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V \\ W \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: $\begin{bmatrix} V \\ W \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_g + V_a \\ W_g + W_a \\ \theta_g + \theta_a \end{bmatrix}$ 。为了便于描述,将式

(7)中左边部分记为 $\begin{bmatrix} Q_x(m,n) \\ Q_y(m,n) \end{bmatrix}$,于是有:

$$\begin{bmatrix} Q_x(m, n) \\ Q_y(m, n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x(m, n) \\ G_y(m, n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_x(m, n) \\ A_y(m, n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -N_y(m, n) \cdot \theta \\ N_x(m, n) \cdot \theta \end{bmatrix} + [V]. \quad (8)$$

根据式(1)~(8),可得到误差分离的数学模型:

$$\begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & o & I & o & I_c & o & -N_y^T \\ o & I & o & I & o & I_c & N_x^T \\ I_c^T & o & o & o & 0 & 0 & 0 \\ N_y & -N_x & o & o & 0 & 0 & 0 \\ o & I_c^T & o & o & 0 & 0 & 0 \\ o & o & I_c^T & o & 0 & 0 & 0 \\ o & o & N_y & -N_x & 0 & 0 & 0 \\ o & o & o & I_c^T & 0 & 0 & 0 \\ N_x & N_y & I_c^T & I_c^T & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} G_x \\ G_y \\ A_x \\ A_y \\ V \\ W \\ \theta \end{pmatrix}, \quad (9)$$

式中: Q_x 为测量值在 x 轴方向的分量; Q_y 为测量值在 y 轴方向的分量; I 为 N^2 阶单位矩阵; I_c 为元素均为 1 的单列矩阵; o 为零矩阵; N_x 、 N_y 均为 N^2 列单行矩阵,其元素为标记点的标称值,符号依据坐标系而定; $[]^T$ 表示转置矩阵。

式(9)是 1 个位置(即原始位置)的情况,方程中的未知量为 $4n^2 + 3$ 个,已知量为 $2n^2 + 7$ 个。通常 $n \geq 2$,未知量的个数大于已知量的个数,方

程的解不定。为了得到可靠的估计值,应使已知量的个数大于未知量的个数,所以需要增加位置数。结合数学模型采用平移、旋转等不同位置来获得多组测量数据。选择原始位置、平移一个栅格、旋转 90° 三位置的测量数据建立数学模型,方程中的未知量为 $4n^2 + 9$ 个,已知量为 $6n^2 - 2n + 7$ 个,以可保证已知量的个数大于未知量的个数。

三位置时的自校准数学模型为:

$$\begin{pmatrix} Q_x^1 \\ Q_y^1 \\ Q_x^2 \\ Q_y^2 \\ Q_x^3 \\ Q_y^3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & o & I & o & I_c & o & -N_y^T & o & o & o & o & o & o \\ o & I & o & I & o & I & N_x^T & o & o & o & o & o & o \\ I & o & o & I_{90} & o & o & o & I_c & o & -N_y^T & o & o & o \\ o & I & -I_{90} & o & o & o & o & o & I_c & N_x & o & o & o \\ I_d & o & I_e & o & o & o & o & o & o & o & I_f & o & N_f \\ o & I_d & o & I_e & o & o & o & o & o & o & o & I_f & N_g \\ I_c^T & o & o & o & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ N_y & -N_x & o & o & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ o & I_c^T & o & o & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ o & o & I_c^T & o & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ o & o & N_y & -N_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ o & o & o & I_c^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ N_x & N_y & o & I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} G_x \\ G_y \\ A_x \\ A_y \\ V^1 \\ W^1 \\ \theta^1 \\ V^2 \\ W^2 \\ \theta^2 \\ V^3 \\ W^3 \\ \theta^3 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中,上标 1、2、3 表示测量位置; I_{90} 为顺时针旋转 90° 后对应的系数矩阵; I_d 、 I_e 、 I_f 、 N_f 、 N_g 均为栅格板向 x 轴正向平移一个栅格后所产生的系数矩阵。

式(10)左侧为已知量,简记为 Q ,右侧的关系矩阵记为 T ,最右侧一列为待求解未知量,简记为

$$\hat{X} = (\hat{G}_x \ \hat{G}_y \ \hat{A}_x \ \hat{A}_y \ \hat{V}^1 \ \hat{W}^1 \ \hat{\theta}^1 \ \hat{V}^2 \ \hat{W}^2 \ \hat{\theta}^2 \ \hat{V}^3 \ \hat{W}^3 \ \hat{\theta}^3)^T. \quad (13)$$

X 。式(10)可改写为:

$$Q = TX. \quad (11)$$

利用最小二乘法可得:

$$X = (T^T T)^{-1} T^T Q. \quad (12)$$

式(12)表明,通过已知量 Q 和 T 可计算得到未知量 X 。误差分离结果的最佳估计值为:

式(13)即为自校准方法得到的所有误差项的计算结果,即误差的最佳估计值。

2.2 测量数据坐标转换模型

自校准算法的特殊性在于栅格板上每一标记点在不同测量位置时要与前一测量位置相应的点重合,因此,要求栅格板坐标系与工作台校准区域坐标系重合,即二者的中心点与坐标轴均重合,这样才能保证不同位置标记点的测量结果具有相关性。由于测量环境、设备误差、操作方法等影响因素,在实际操作中无法保证工作台的坐标轴中心 O 与栅格板中心点 O_1 完全重合,如图 3 所示。

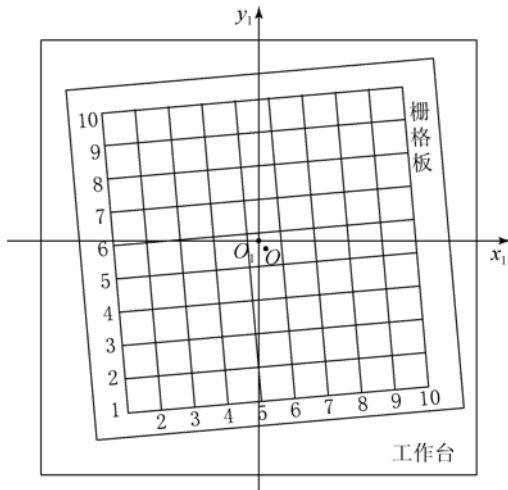


图 3 栅格板与工作台放置位置示意图

Fig. 3 Position of grid plate and stage

针对栅格板和工作台无法重合的问题,建立了转换坐标系,从而得到二者的坐标转换关系,如图 4 所示。

$$\begin{cases} y = (y_1 - b) \frac{c - a}{\sqrt{(d - b)^2 + (c - a)^2}} - (x_1 - a) \frac{d - b}{\sqrt{(d - b)^2 + (c - a)^2}} \\ x = (x_1 - a) \frac{c - a}{\sqrt{(d - b)^2 + (c - a)^2}} + (y_1 - b) \frac{d - b}{\sqrt{(d - b)^2 + (c - a)^2}} \end{cases} \quad (17)$$

可以得到栅格板中所有标记点的测量值,即 $M_x(m, n)$ 和 $M_y(m, n)$ 。至此已完成测量数据坐标转换。

3 实验验证

3.1 实验设备

选用影像测量仪、辅助栅格板及平移旋转平

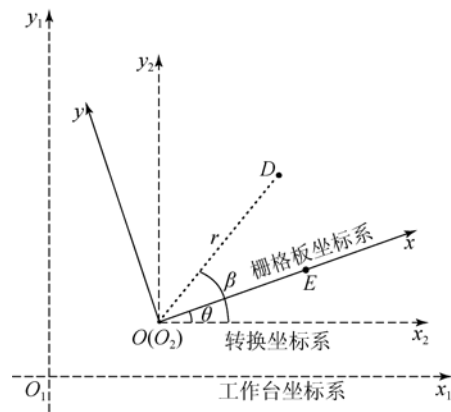


图 4 测量数据坐标转换关系图

Fig. 4 Coordinate conversion for measurement data

工作台坐标系 $x_1 o_1 y_1$ 和转换坐标系 $x_2 o_2 y_2$ 两坐标轴平行;栅格板坐标系和转换坐标系的偏移角度为 θ ,二者原点重合,即 o 和 o_2 重合。在工作台坐标系中,假设 o_1 点坐标为 $(0, 0)$, o 点坐标为 (a, b) 。若工作台坐标系中任意一点 D 的坐标为 (x_1, y_1) ,则有:

$$\begin{cases} y_1 - b = r \sin \beta \\ x_1 - a = r \cos \beta \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} y = r \sin(\beta - \alpha) \\ x = r \cos(\beta - \alpha) \end{cases} \quad (15)$$

取栅格板坐标轴 x 上一点 E ,假设其在 $x_1 o_1 y_1$ 中坐标为 (c, d) ,则在 $x_2 o_2 y_2$ 中坐标为 $(c - a, d - b)$,有:

$$\tan \alpha = \frac{d - b}{c - a} \quad (16)$$

由式(14)~(16)可得到坐标 (x, y) 和 (x_1, y_1) 的关系,即测量仪器读数和栅格板测量点坐标之间的关系:

面工作台来完成影像仪的自校准,如图 5 所示。影像仪由带有操纵杆控制的 DC 伺服马达驱动,工作台带有夹具孔和可拆卸式平台玻璃。定位精度为 $E = (1.8 + 6L/1000) \mu\text{m}$,其中 L 为测量长度(mm)。

3.2 实验步骤

对玻璃栅格板上 6×6 的点阵排列在 3 个位置进行影像仪自校准实验。流程如图 6 所示。

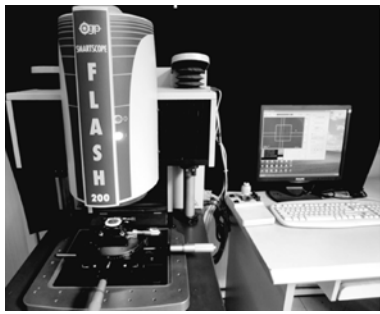


图 5 实验平台
Fig. 5 Experiment platform

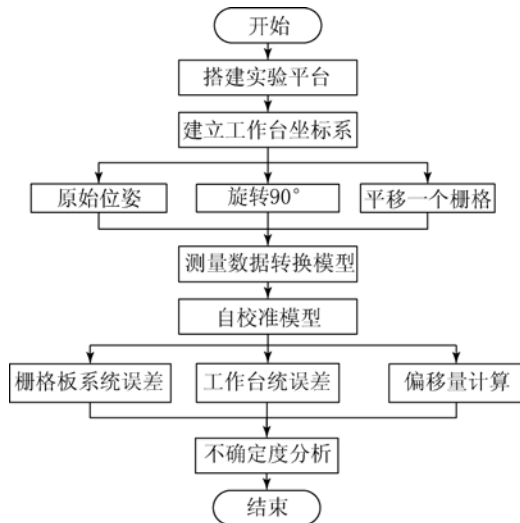
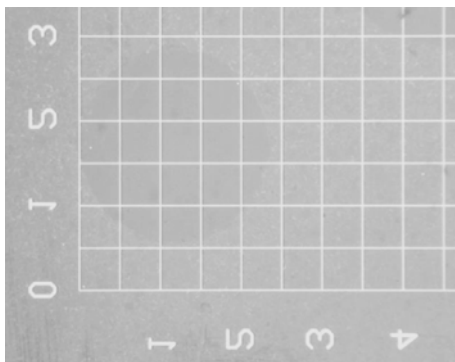


图 6 实验流程图
Fig. 6 Flowchart of experiment

将二维平移台和旋转台固定好,置于影像仪的工作台上,检查二维平移台和旋转台是否归零。将旋转台的锁紧螺丝拧紧。以旋转台平面为基准,旋转中心为原点建立坐标系。将栅格板轻轻置于旋转台上,通过影像仪镜头调整栅格板中心与之前建立的坐标系原点尽量重合,栅格方向与坐标轴方向尽量对齐。栅格线在影像仪上显示的是一条条较宽的线条,如图 7(a)所示。采用对刻线两两取交点,选 4 个交点的交叉点作为栅格每一点的中点,如图 7(b)所示。此时,栅格板上所有标记点的测量数据可以得到(原始位置测量数据)。将旋转台顺时针旋转 90° ,按顺序测量所有标记点(旋转 90° 测量数据)。随后逆时针方向旋转 90° ,使栅格板回到原始位置,锁紧旋转螺丝。旋转平移台 y 轴方向的游标尺,使栅格板向右平移一个栅格的距离,依次测量所有标记点,最右侧一列除外(平移位置测量数据)。

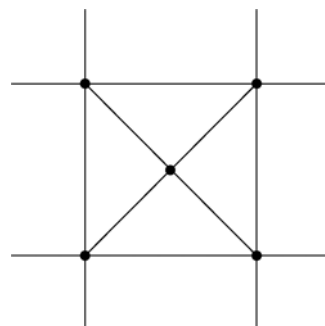
3.3 实验结果

按照上述步骤得到原始数据,依次经过测量数据转换模型和自校准算法得到影像测量仪在 x 轴和 y 轴方向的系统误差 \hat{G}_x 和 \hat{G}_y ,如表 1 所示。



(a) 影像仪栅格排列图

(a) Grid picture of imaging instrument



(b) 刻线坐标选取方式示意图

(b) Sketch picture of scale mark coordinate

图 7 辅助测量栅格板栅格排列

Fig. 7 Grid array on grid plate

表 1 影像仪自校准结果

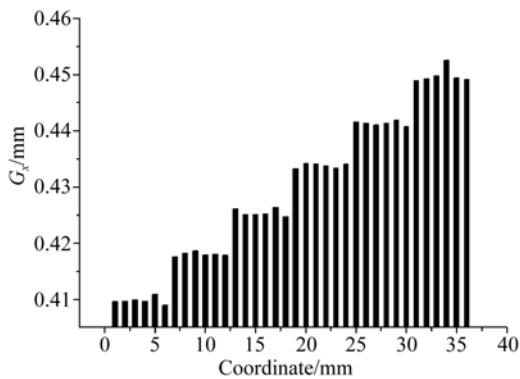
Tab. 1 Calibration results of imaging instrument

(μm)

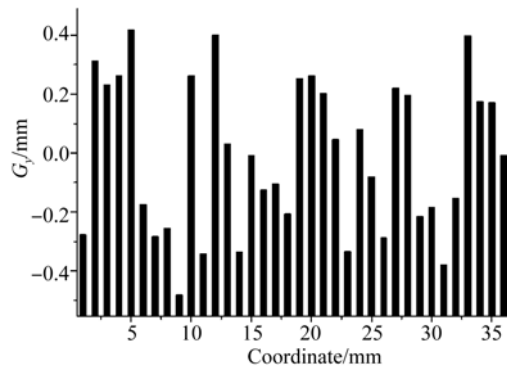
序号	\hat{G}_x	\hat{G}_y	序号	\hat{G}_x	\hat{G}_y	序号	\hat{G}_x	\hat{G}_y	序号	\hat{G}_x	\hat{G}_y
1	-0.277 3	-0.411 2	10	0.262 5	0.155 6	19	0.253 6	0.154 1	28	0.196 1	0.277 0
2	0.313 6	-0.128 8	11	-0.340 6	0.100 8	20	0.262 2	-0.307 3	29	-0.215 9	0.369 9
3	0.231 5	-0.274 2	12	0.400 7	-0.458 9	21	0.203 4	-0.246 5	30	-0.182 7	-0.269 6
4	0.263 0	-0.245 0	13	0.031 6	-0.173 5	22	0.046 4	0.012 7	31	-0.379 9	-0.031 8
5	0.418 1	0.064 1	14	-0.335 8	-0.160 9	23	-0.333 7	0.497 1	32	-0.152 1	0.344 6
6	-0.173 6	0.129 9	15	-0.008 1	0.165 8	24	0.079 8	-0.049 2	33	0.399 1	-0.187 4
7	-0.283 1	0.102 3	16	-0.125 3	0.160 1	25	-0.079 7	0.095 0	34	0.175 3	0.328 0
8	-0.255 1	0.430 9	17	-0.104 9	0.395 7	26	-0.287 4	-0.223 7	35	0.172 3	0.388 2
9	-0.481 3	-0.104 6	18	-0.205 9	-0.307 7	27	0.220 1	-0.154 0	36	-0.006 7	-0.237 3

为了直观地表现影像仪每个测量点的自校准效果,将原始位置直接测量得到的误差与经自校准算法得到的误差进行比较,如图 8、9 所示。可以看出:直接测量的误差均在亚毫米级;当进行 3

个位置的测量后,运用自校准算法得到的每个测量点的误差均在亚微米级,其中最大值为 $0.49 \mu\text{m}$,最小值为 $0.00 \mu\text{m}$ 。表明自校准算法能够对仪器的系统误差进行校准。



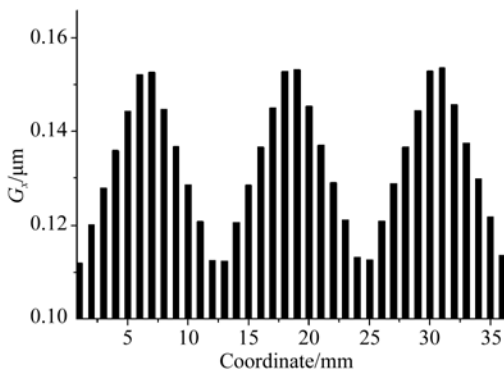
(a) x 轴上原始位置测量点的误差
(a) Measuring point error of x axis



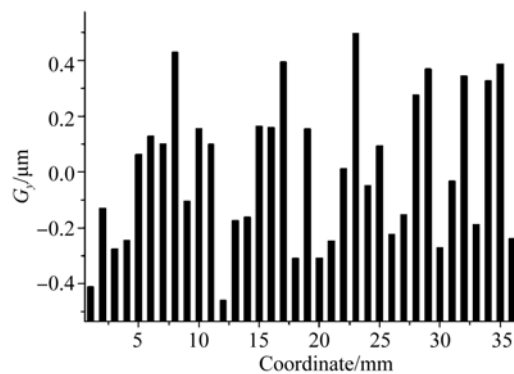
(b) y 轴上原始位置测量点的误差
(b) Measuring point error of y axis

图 8 原始位置直接测量结果

Fig. 8 Original position measurement results



(a) x 轴上自校准计算测量点的误差
(a) Measuring point error of x axis



(b) y 轴上自校准计算测量点的误差
(b) Measuring point error of y axis

图 9 自校准算法计算结果

Fig. 9 Calculated results of calibration algorithm

由于测量间隔长度较小,可忽略长度误差引起的不确定度分量,只考虑系统误差引起的不确定度分量,于是有 $u = \sigma$ (σ 为自校准结果计算得到的标准差)。经计算, $\sigma_x = 0.26 \mu\text{m}$, $\sigma_y = 0.26 \mu\text{m}$ 。取置信概率 $p = 0.95$, 自由度 $k = 2$, 则扩展不确定度为: $U = ku = 0.52 \mu\text{m}$ 。影像测量仪的定位精度为 $(1.8 + 6L/1000) \mu\text{m}$, 当 $L = 5 \text{ mm}$ 时, 定位精度 $E = 1.83 \mu\text{m}$ 。自校准方法计算结果的扩展不确定度与其定位精度的比值 $U/E = 0.28$, $U/E < 1/3$, 可见, 该自校准算法有效, 能够用于影像测量仪的误差分离。

参考文献:

- [1] 王小章, 陈志军, 李剑锋. 影像测量仪的测量误差研究 [J]. 机床与液压, 2009, 37(11): 117-119.
WANG X ZH, CHEN ZH J, LI J F. Research on test errors of Image measuring instrument [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2009, 37(11): 117-119. (in Chinese)
- [2] 谢华坤. 影像测量仪的发展与点评 [J]. 工具技术, 2011, 45(8): 3-7.
XIE H K. The Development and comments of image measuring instrument [J]. *Tool Engineering*, 2011, 45(8): 3-7. (in Chinese)
- [3] 邹华东, 祝良荣, 陶文勇. 影响测量系统的精密校正方法研究及其应用 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(9): 2057-2059.
ZOU H D, ZHU L R, TAO W Y. Precise calibration methods development and ITS application on vision measuring system [J]. *Computer Measurement & Control*, 2010, 18(9): 2057-2059. (in Chinese)
- [4] 谢树冰. 影像测量仪尺寸测量示值误差的不确定度分析 [J]. 工业计量, 2012, 22(1): 39-40.
XIE SH B. The uncertainty analysis for measurement of Image measuring instrument [J]. *Industrial Measurement*, 2012, 22(1): 39-40. (in Chinese)
- [5] 朱立伟, 朱煜, 尹文生. 超精密工作台自标定不确定度定量评价 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(8): 1384-1387.
ZHU L W, ZHU Y, YI W SH. Quantitive evaluation of the uncertainty of self-calibration for ultra-precision stages [J]. *J Tsinghua Univ(Sci&Tech)*, 2006, 46(8): 1384-1387. (in Chinese)
- [6] 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.
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)
- [7] 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): 1787-1890.
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): 1787-1890. (in Chinese)
- [8] 王道档, 邹慧, 郭天太, 等. 基于自校正的三坐标机二维平台误差测量技术 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2451-2457.
WANG D D, ZOU H, GUO T T, *et al.*. Error measurement technique for two-dimensional stage of three-coordinate measuring machine based on self-calibration algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(11): 2451-2457. (in Chinese)
- [9] DANG Q C, YOO S, KIM S W. Complete 3-D self-calibration of coordinate measuring machines [J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2006, 55(1): 527-530.
- [10] YOO S, KIM S W. Self-calibration algorithm for testing out-of-plane errors of two-dimensional profiling stages [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(8): 767-774.

4 结 论

本文利用栅格板对影像测量仪的系统误差进行校准, 通过将栅格板置于影像测量仪工作台 3 个不同位置得到测量数据, 运用自校准算法得到影像仪每个测量点的系统误差及其标准不确定度, 实现了测量结果的误差分离。通过与影像仪定位精度相比较, 该自校准算法得到仪器的系统误差, 其扩展不确定度与其定位精度之比为 0.28, 小于 1/3。结果证明了该自校准算法的有效性, 且该方法不涉及繁琐的数据处理, 有较好的实用性。

- [11] RAUGH M R. Absolute two-dimensional sub-micron metrology for electron beam lithograph [J]. *Precision Engineering*, 1985, 7(1): 3-13.
- [12] TAKAC M. Self-calibration in two dimensions [J]. *Technical Report*, 1994, 2725:130-146.
- [13] 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.
- [14] LU X M, TRAN H D. Self-calibration for 2-dimensional precision stages based on circle closure principle [J]. *Proceedings of the Annual Meeting-American Society for Precision Engineering*, 2000:548-552.
- [15] ZHU Y, HU C X, HU J CH. Least-square Based Self-calibration of Two-dimensional Ultra-precision Stages [C]. 2011 *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2011, 978(1): 597-602.
- [16] ZHU Y, HU CH X, HU J CH. A transitive algorithm for self-calibration of two-dimensional ultra-precision stages [J]. *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2011, 978(8):594-598.
- [17] ZHU Y, HU CH X, HU J CH, *et al.*. Accuracy and simplicity oriented self-calibration approach for two-dimensional precision stages [J]. *Transactions on industrial electronics*, 2013, 60(6): 2264-2272.
- [18] HU CH X, ZHU Y, HU J CH, *et al.*. A holistic self-calibration approach for determination of three-dimensional stage error [J]. *Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, 62(2): 483-494.
- [19] 崔继文, 刘雪明, 谭久彬. 超精密级二维工作台的自标定 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9): 1960-1966.
- CUI J W, LIU X M, TAN J B. Self-calibration for 2-D ultra-precision stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1960-1966. (in Chinese)
- [20] GUO T T, WANG X X, ZOU H, *et al.*. Application of self-calibration in flatness assessment [J]. *Advanced Materials Research*, 2012(605): 1054-1057.

作者简介:



郭天太(1968—),男,甘肃庄浪人,副教授,1989年于西安电子科技大学获学士学位,1998年于兰州铁道学院获硕士学位,2005年于浙江大学获博士学位,主要从事现代传感与精密机械、生物信息检测技术等方面的研究。E-mail: guotiantai@163.com



王晓晓(1987—),女,河北石家庄人,硕士研究生,2011年于河北大学获学士学位,主要研究方向为精密仪器及机械。E-mail: xxwang0619@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)