

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210093

基于复合位姿的二维自校准研究*

乔满悦, 丁国清, 陈欣, 蔡萍

(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

摘要:自校准与校准相比,无需精度等级高于被校准对象的标准样板,能以较低的条件成本实现精密测量仪器系统误差的校准。二维自校准中的标准样板常采用初始、相对旋转和平移的传统三位姿组合。位姿之间相互独立且所有位姿变换均以初始位姿为基础。采用旋转和平移两种位姿复合后的位姿,能避免两次位姿变换之间必须将标准样板回归初始位姿的冗余操作,简化了二维自校准流程。基于复合位姿的二维自校准经仿真实验证明能在模拟噪声环境中有效分离被校准对象的误差,其不确定度与传统非复合位姿组合的相等。复合位姿的引入不影响二维自校准的噪声抑制能力。在影像测量仪上实施二维自校准实验,采用包含复合位姿的三位姿组合的二维自校准分离的工作台系统误差接近传统三位姿组合。两种位姿组合对应的工作台系统误差结果相差 $0.167 \mu\text{m}$ 。另外通过采用包含复合位姿的四位姿组合的实验结果,进一步论证了基于复合位姿的二维自校准效果。

关键词:复合位姿;二维自校准;误差分离;不确定度;影像测量仪

中图分类号: TH161.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Research on 2D self-calibration based on hybrid position

Qiao Xiaoyue, Ding Guoqing, Chen Xin, Cai Ping

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Compared with calibration, the self-calibration does not require a standard artifact with higher precision level than that of the object to be calibrated, which can achieve the calibration of system errors of precision measuring instruments at a low cost of conditions. The standard artifact in 2D self-calibration usually employs traditional three-positions combination of initial position, relative rotation and translation. The positions are independent of each other, and all position transformations are based on the initial position. The utilization of the hybrid position combined with rotation and translation can void the redundant operation of returning the standard artifact to initial position between two position transformations to simplify the process of 2D self-calibration. The 2D self-calibration based on hybrid position is proved by simulation experiments to be effective in separating the errors of the calibrated objects in the simulated noisy environment, and its uncertainty is equal to that of the traditional combination of non-hybrid positions. The introduction of hybrid position has no influence on the noise suppression capability of 2D self-calibration. The 2D self-calibration experiments are conducted on a vision measuring machine, and the stage system errors separated by the 2D self-calibration using a three-positions combination including a hybrid position are close to that of traditional three-positions combination. The results of the stage system errors corresponding the two positions combinations differ by $0.167 \mu\text{m}$. In addition, the effect of two-dimensional self-calibration based on hybrid position is further demonstrated by experimental results using a four-positions combination including a hybrid position.

Keywords: hybrid position; 2D self-calibration; errors separation; uncertainty; vision measuring machine

0 引言

校准是计量学中实现量值溯源的必要技术手段,也

是测量活动中实现量值准确的重要技术保障。通常,校准是使用精度等级高于被校准对象的标准样板实施操作的。为了适应微型机电、纳米光刻等尖端技术的发展,加工检测仪器装置的精度不断提高^[1-2]。标准样板所提供

的基准精度不能达到精密仪器校准精度要求的情况逐渐增多,无需更高精度等级标准样板的自校准技术发展迅速,在实现条件与应用成本上优势明显。

自校准是一种误差分离技术^[3],可应用于多种精密仪器以分离不同类型物理量的误差^[4-7]。针对平面内几何量中长度误差的二维自校准技术使用一块栅格板作为标准样板,将其置于被校准的二维工作台上,通过平移和旋转改变栅格板的位姿。分别测量栅格板处于不同位姿时各标记点的二维坐标,代入二维自校准模型,利用傅里叶变换^[8-9]、刚性运动方程^[10-11]、迭代优化^[12-13]、最小二乘法^[14-16]等方法,抵消栅格板本身的标记点排列误差,分离得到被校准对象工作台的系统误差。

二维自校准中栅格板所采用的传统位姿之间相互独立,所有位姿操作均以初始位姿为基础,会引起两次位姿变换之间回归初始位姿的不必要操作。针对目前步骤冗余的二维自校准,本文提出复合栅格板的旋转和平移两种位姿操作,形成复合位姿,研究基于复合位姿的二维自校准。复合位姿的引入使栅格板可在任意位姿的基础上直接进行位姿变换,避免两次位姿变换之间必须将栅格板回归初始位姿的冗余操作。通过仿真实验论证基于复合位姿的二维自校准有效性,进行不确定度分析,研究基于复合位姿的二维自校准算法对噪声的抑制能力。在影像测量仪上实施基于复合位姿的二维自校准实验,进行有效性论证,并通过不同位姿方案实验结果的对比,进一步论证基于复合位姿的二维自校准效果。

1 基于复合位姿的二维自校准

二维自校准中的栅格板常采用图 1 所示的初始位姿(0)、绕原点逆时针旋转 90°位姿(R90)和沿 X 轴正向(右)平移 1 个节长位姿(TR)。此传统三位姿组合中,在完成处于第 2 个位姿 R90 时的栅格板测量后,需将栅格板顺时针回旋至初始位姿后才能进行下一个平移位姿 TR 的变换,额外增加了回旋栅格板的操作步骤,使二维自校准的过程冗余。

基于复合位姿,图 1 中的传统三位姿在完成第 2 个位姿 R90 的测量后,直接平移栅格板形成复合位姿 R90TR,进行第 3 个位姿的测量,如图 2 所示。采用此基于复合位姿的二维自校准三位姿组合,不再需要将栅格板回旋至初始位姿,减少了操作步骤,简化了二维自校准的流程,是本文的重点研究对象。

通过测量仪器获取栅格板处于不同位姿时所有标记点的二维坐标,选用基于最小二乘法原理的自校准方法,将坐标测量值代入二维自校准方程模型,求工作台系统误差的最小二乘解,从整体测量值误差中分离得到接近其真值的工作台系统误差。

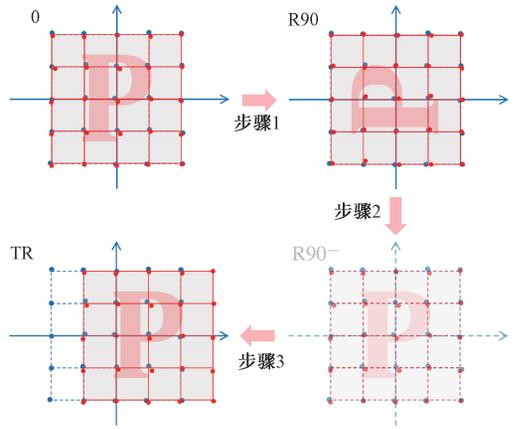


图 1 二维自校准的传统三位姿

Fig. 1 Traditional three positions in 2D self-calibration

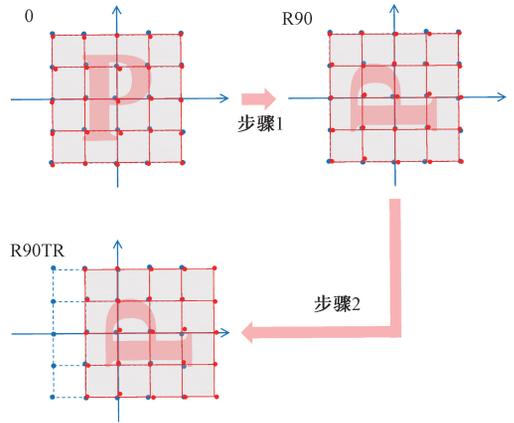


图 2 基于复合位姿的二维自校准三位姿

Fig. 2 Three positions based on hybrid position in 2D self-calibration

1.1 基于复合位姿的二维自校准建模

对于工作台上位于 (m, n) 处的某点,在栅格板处于不同位姿时,对应栅格板上不同位置的标记点,其测量值误差 (M_x, M_y) 、工作台系统误差 (S_x, S_y) 与该点对应的不同位置的标记点排列误差 (P_x, P_y) 的关系用测量值误差函数表示。图 2 基于复合位姿的三位姿组合 $(0+R90+R90TR)$ 中各位姿对应的测量值误差函数分别如式(1)~(3)所示。二维自校准建模的细节此处不再赘述^[16-17]。

$$\begin{pmatrix} M_{0x} \\ M_{0y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_x \\ S_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} P_{(m,n)x} \\ P_{(m,n)y} \end{pmatrix} + \theta_0 \begin{pmatrix} -I_y \\ I_x \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_{0x} \\ t_{0y} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} M_{R90x} \\ M_{R90y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_x \\ S_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -P_{(n,-m)y} \\ P_{(n,-m)x} \end{pmatrix} + \theta_{R90} \begin{pmatrix} -I_y \\ I_x \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_{R90x} \\ t_{R90y} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} M_{R90TRx} \\ M_{R90TRy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_x \\ S_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -P_{(n,-m+1)y} \\ P_{(n,-m+1)x} \end{pmatrix} + \theta_{R90TR} \begin{pmatrix} -I_y \\ I_x \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_{R90TRx} \\ t_{R90TRy} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中:下标 0、R90 和 R90TR 用于区分位姿; (I_x, I_y) 表示标记点的理想坐标; θ 定义为不同坐标系之间的角度偏差; (t_x, t_y) 为坐标系原点的偏移量。

为建立具有最小二乘解的二维自校准方程模型,方便计算接近真值的被校准对象,通过式(4)~(6)对工作台系统误差 (S_x, S_y) 以及栅格板标记点排列误差 (P_x, P_y) 进行一定的约束,即对误差向量所在的坐标系进行调整,所产生的调整量可并入定义的坐标系偏差 θ 和 (t_x, t_y) 中。

$$\sum S_x = \sum S_y = \sum P_x = \sum P_y = 0 \quad (4)$$

$$\sum (S_x \cdot I_y - S_y \cdot I_x) = \sum (P_x \cdot I_y - P_y \cdot I_x) = 0 \quad (5)$$

$$\sum (S_x \cdot I_x + S_y \cdot I_y) = 0 \quad (6)$$

不同位姿对应的各标记点测量值误差函数与坐标系约束条件组成了式(7)所示的二维自校准模型,该线性超定方程的关系矩阵用 \mathbf{A} 表示。

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} S_x & S_y & P_x & P_y \\ \theta_0 & t_{0x} & t_{0y} & \theta_{R90} & t_{R90x} & t_{R90y} & \theta_{R90TR} & t_{R90TRx} & t_{R90TRy} \\ M_{0x} & M_{0y} & M_{R90x} & M_{R90y} & M_{R90TRx} & M_{R90TRy} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T = \mathbf{b} \quad (7)$$

对于形式为 $\mathbf{AX} = \mathbf{b}$ 的超定方程,其未知数的最小二乘解 $\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{PA})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}$ 。其中, \mathbf{P} 为权重矩阵。将测量值误差函数与坐标系约束条件的权重设置为 $1:10^8$, 根据最小二乘法原理求解二维自校准方程模型,分离得到未知数中的工作台系统误差。

超定方程具有最小二乘解的条件为关系矩阵的秩等于未知数的个数。将基于复合位姿的不同位姿组合方案对应的二维自校准方程模型关系矩阵的秩与未知数个数如表 1 所示,研究满足条件,可实现被校准对象工作台系统误差分离的位姿组合方案^[18]。

表 1 中除之前已提到的位姿外,还引入了绕原点逆时针旋转 180° 位姿 (R180)、沿 X 轴负向(左)平移一个节长位姿 (TL), 以及复合位姿, 即旋转 180° 的基础上沿 X 轴正向(右)平移 1 个节长 (R180TR)。包含复合位姿的二位姿组合均不满足二维自校准模型具有最小二乘解的条件。当栅格板采用关系矩阵的秩与未知数个数相等的位姿组合时,可实现二维自校准。

1.2 仿真实验论证

栅格板采用基于复合位姿的三位姿组合 (0+R90+R90TR), 进行仿真实验。初始化工作台系统误差和栅格板标记点排列误差为标准差 $1 \mu\text{m}$ 的正态分布函数, 加入标准差 $0.1 \mu\text{m}$ 的随机噪声, 对应生成不同位姿的测量

表 1 基于复合位姿的二维自校准方程模型关系矩阵的秩与未知数个数的关系

Table 1 Relationship between the rank of coefficient matrix in 2D self-calibration and the number of unknowns with hybrid positions

位姿数量	位姿组合方案	关系矩阵的秩	未知数个数
2	0+R90TR	$3n^2+3n$	$4n^2+6$
2	0+R180TR	$3n^2-n+8$	$4n^2+6$
3	0+R90+TR	$4n^2+9$	$4n^2+9$
3	0+R90+R90TR	$4n^2+9$	$4n^2+9$
3	0+TR+R90TR	$4n^2+9$	$4n^2+9$
3	0+R90+R180TR	$4n^2+9$	$4n^2+9$
3	0+R180+R180TR	$4n^2-n+9$	$4n^2+9$
3	0+TR+R180TR	$4n^2-n+10$	$4n^2+9$
4	0+R90+R180+TR	$4n^2+12$	$4n^2+12$
4	0+R90+R180+R180TR	$4n^2+12$	$4n^2+12$
4	0+R90+R90TR+R180	$4n^2+12$	$4n^2+12$
4	0+R90+R90TR+TR	$4n^2+12$	$4n^2+12$
4	0+R90+TR+TL	$4n^2+12$	$4n^2+12$
5	0+R90+R180+TR+TL	$4n^2+15$	$4n^2+15$

值误差。然后将测量值误差代入二维自校准方程模型, 分离出工作台系统误差的仿真值, 与初始时设置的真值进行比较, 噪声环境中基于复合位姿的二维自校准仿真实验结果如图 3 所示。

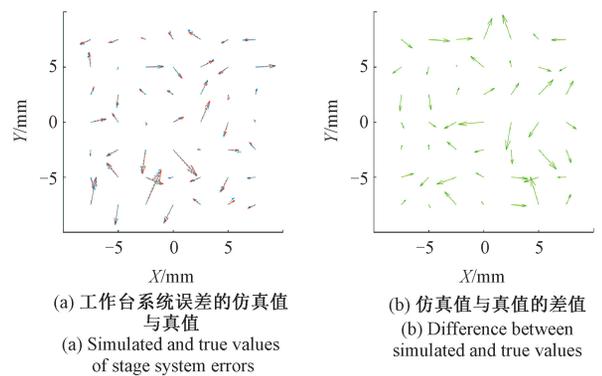


图 3 基于复合位姿的二维自校准仿真实验结果
Fig. 3 Simulation results of 2D self-calibration based on hybrid position

基于复合位姿的二维自校准仿真实验中的栅格板标记点呈 7×7 排列, 节长为 2.5 mm 。因为工作台系统误差相对栅格板标记点的节长过小, 所以为了方便观察仿真结果, 将工作台系统误差的真值与仿真值放大 1000 倍后分别用实线和虚线向量表示(图 3(a))。二者的差值

被放大 10 000 倍后用向量表示(图 3(b))。由仿真实验的结果得到,噪声环境中,基于复合位姿的二维自校准成功分离出工作台系统误差。

为进一步论证基于复合位姿的二维自校准在模拟噪声环境中分离工作台系统误差的效果,进行了多组仿真实验,计算自校准结果仿真值与真值的差值,取所有标记点上差值的均方根,记作 D_{RMS} ,如表 2 所示。相同的仿真实验条件设置,计算栅格板采用传统三位姿(0+R90+TR)时的差值均方根 D_{RMS} (表 2),为基于复合位姿的仿真结果提供对比,研究栅格板采用复合位姿后的二维自校准在噪声环境中仿真结果的变化。

表 2 二维自校准结果仿真值与真值的差值均方根

Table 2 RMS of the difference between simulated and true values of results obtained by 2D self-calibration

仿真序号	$D_{\text{RMS}}(0+\text{R}90+\text{R}90\text{TR})$	$D_{\text{RMS}}(0+\text{R}90+\text{TR})$
	/0.1 μm	/0.1 μm
1	0.791	0.799
2	0.809	0.810
3	0.808	0.801

表 2 中工作台系统误差的仿真值与真值之间的差值均方根 D_{RMS} 均小于环境噪声的标准差 0.1 μm ,工作台系统误差被有效分离。基于复合位姿的三位姿组合(0+R90+R90TR)对应的 D_{RMS} 接近传统三位姿(0+R90+TR)对应的 D_{RMS} ,仿真实验中采用两种位姿组合的二维自校准具有相似的误差分离效果。

1.3 不确定度分析

在二维自校准过程中,测量栅格板标记点二维坐标时因为仪器、方法、人员及环境等因素的影响,必然存在不确定度。测量值误差代入二维自校准方程模型后,其不确定度经过模型传播至分离得到的工作台系统误差。将模型输出值不确定度与输入值不确定度的比值定义为不确定度传播率,代表二维自校准对环境噪声的抑制能力。当不确定度传播率小于 1 时,说明不确定度在传播过程中没有被放大,对应的二维自校准模型具有噪声抑制能力。

使用《测量不确定度评定与表示》(JJF 1059.1—2012)分析二维自校准的不确定度。基于最小二乘法原理的自校准方法的不确定度通过二维自校准方程模型中的关系矩阵 A 计算得到。栅格板上各标记点的不确定度传播率对应矩阵 $\sqrt{(A^T P A)^{-1}}$ 中对角线上的元素,取所有标记点上不确定度传播率的平均值作为判断二维自校准噪声抑制能力的依据。计算基于最小二乘原理的二维自校准方法在不同位姿组合下的不确定度,深入研究复

合位姿对自校准模型噪声抑制能力的影响,并改变栅格板标记点的个数,观察各标记点不确定度传播率均值的变化规律,结果如图 4 所示。

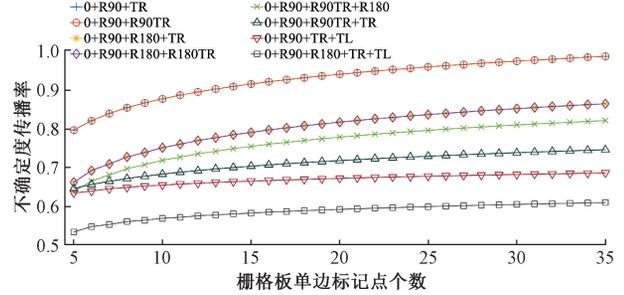


图 4 基于复合位姿的二维自校准不确定度分析结果

Fig. 4 Results of uncertainty analysis of 2D self-calibration based on hybrid position

首先观察栅格板的位姿方案对二维自校准不确定度的影响。位姿方案包含的位姿个数越多,各标记点不确定度传播率的均值越小,对噪声的抑制能力越强。图 4 中,传统三位姿(0+R90+TR)与包含复合位姿的三位姿(0+R90+R90TR)对应的曲线重合,两种位姿方案的不确定度传播率相等,复合位姿的引入对二维自校准的不确定度无影响。同样的,四位姿组合(0+R90+R180+TR)与其对应引入复合位姿的四位姿组合(0+R90+R180+R180TR)的不确定度传播率变化曲线重合,复合位姿未引起不确定度的变化。上述不确定度传播率相等的三位姿及四位姿方案中,最后一个复合位姿均可在上个位姿的基础上直接进行操作,相比对应的非复合位姿组合,避免了回归初始位姿的冗余操作,简化了操作流程,却没有降低各标记点不确定度传播率的均值,复合位姿的优势更加明显。另外,比较不同方案的位姿组成后推导得到旋转 90°对增强二维自校准的噪声抑制能力的有益效果最佳。

然后按照栅格板单边标记点的个数观察二维自校准不确定度的变化规律。不确定度传播率的均值随标记点个数的增加而增加,后逐渐趋于平缓,最大值未超过 1,二维自校准对噪声一直保持抑制力。

2 基于复合位姿的二维自校准实验

选用高精度的影像测量仪进行基于复合位姿的二维自校准实验,研究栅格板采用复合位姿的二维自校准对影像测量仪工作台系统误差的分离效果。其实验装置如图 5 所示,影像测量仪的测量精度为 0.5 μm ,重复性为 0.15 μm 。实验中所使用的栅格板为光学标定板,标记点排列与仿真实验中的栅格板一致,7×7 个节长距离 2.5 mm 的标记点,定位精度为 0.3 μm 。

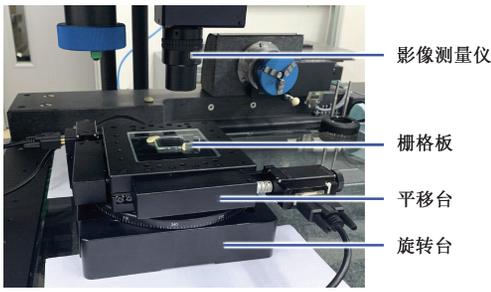


图5 基于复合位姿的二维自校准实验装置示意图
Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup of 2D self-calibration based on hybrid position

栅格板固定于电动平移台和旋转台的组合机械结构上,实施二维自校准所需的栅格板位姿变换。通过影像测量仪分别测量栅格板处于包含复合位姿的3个位姿(0+R90+R90TR)时,所有标记点的二维坐标,然后将三组测量数据代入二维自校准方程模型,最小二乘法求解后将影像测量仪工作台系统误差从整体测量值误差中分离出来,完成二维自校准。

2.1 实验有效性论证

3个位姿(0+R90+R90TR)对应的影像测量仪实验数据代入二维自校准方程模型后,根据最小二乘原理得到的工作台系统误差相对栅格板的单位节长过小,因此将实验结果放大2 500倍后如图6所示,进行基于复合位姿的二维自校准实验有效性论证。

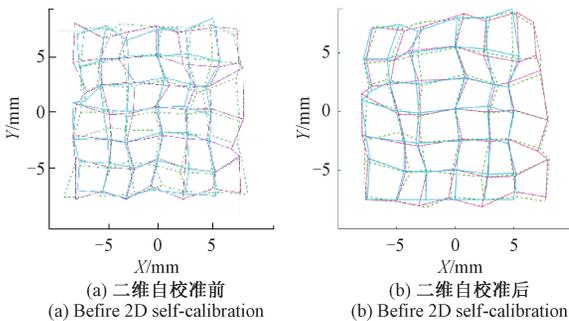


图6 基于复合位姿的二维自校准实验结果有效性
Fig. 6 Validity of experimental results of 2D self-calibration based on hybrid position

因为测量值误差中既包含工作台系统误差,又包含栅格板标记点排列误差,所以将原本处于不同位姿的栅格板统一回归至初始位姿后,处于同一位姿的栅格板测量值之间,即图6(a)中不同线型的网格在二维自校准前呈现较大的差异性。二维自校准后,图6(b)中不同线型的网格之间的差异性明显降低,说明工作台系统误差被成功分离,此时均回归至初始位姿的栅格板测量值主要

受自身标记点排列误差的影响,呈现出较强的一致性,基于复合位姿的影像测量仪二维自校准实验有效。

2.2 不同位姿组合的实验结果对比

首先对比栅格板分别采用基于复合位姿的三位姿(0+R90+R90TR)与传统三位姿(0+R90+TR)时,二维自校准分离得到的影像测量仪工作台系统误差,如图7所示。

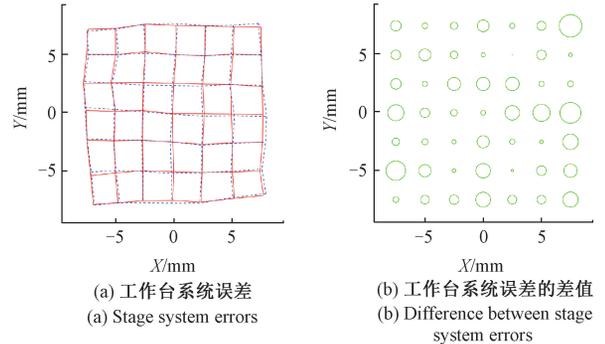


图7 栅格板采用基于复合位姿的三位姿(0+R90+R90TR)与传统三位姿(0+R90+R90TR)时二维自校准分离的工作台系统误差

Fig. 7 Stage system errors separated by 2D self-calibration when the grid plate using three positions based on hybrid position (0+R90+R90TR) and traditional three positions (0+R90+R90TR)

将(0+R90+R90TR)与(0+R90+TR)两种三位姿组合下,二维自校准分离得到的工作台系统误差放大1 000倍后,与标记点的理想坐标相加(图7(a)中实线和虚线网格)。将二者的差值放大2 500倍后作为图7(b)中圆的直径,观察各点差值的大小分布。相似的网格形状说明栅格板采用基于复合位姿的三位姿(0+R90+R90TR)时二维自校准分离得到的影像测量仪工作台系统误差接近采用传统三位姿(0+R90+TR)的自校准结果,二者的差值较小,各标记点差值的均值为0.167 μm。在两种三位姿组合对应的二维自校准实验结果相近的情况下,基于复合位姿的三位姿组合因为避免了后两次位姿变换之间回旋至初始位姿再平移栅格板的冗余操作而具有更加明显的优势。

为进一步研究基于复合位姿的二维自校准实验的结果,对二维自校准在影像测量仪上的应用效果进行量化。计算回归初始位姿后所有栅格板的标准差代表处于同一位姿时的栅格板之间的差异性,取所有标记点的均值后记作 P_{std} 。二维自校准分离出工作台系统误差后, P_{std} 降低(图6),因此使用 P_{std} 降低百分比表示二维自校准的效果。 P_{std} 降低百分比越大说明工作台系统误差被分离的越完全,二维自校准效果越好。

选取3组栅格板采用基于复合位姿的三位姿组合(0+R90+R90TR)的实验数据,计算各组对应的 P_{std} 降低百分比。另外进行了基于复合位姿的四位姿组合(0+R90+R180+R180TR)的二维自校准实验,其代表二维自校准效果的 P_{std} 降低百分比如表3所示。

表3 不同位姿组合的二维自校准效果对比

Table 3 Comparison of 2D self-calibration effect between different positions schemes

实验序号	P_{std} 降低百分比 (0+R90+R90TR)/%	P_{std} 降低百分比 (0+R90+R180+R180TR)/%
1	35.1	29.6
2	35.8	30.0
3	34.9	28.9

表3中基于复合位姿的三位姿组合(0+R90+R90TR)与四位姿组合(0+R90+R180+R180TR)的 P_{std} 在二维自校准后均有明显降低,说明这两种基于复合位姿的位姿组合对应的二维自校准实验均有效分离了影像测量仪的工作台系统误差,自校准效果良好。三位姿组合的 P_{std} 降低百分比稍大于四位姿组合,经分析原因是栅格板在实验中采用的位姿数越多,越容易引发热噪声,影响二维自校准分离工作台系统误差的效果。不同位姿组合时的3组 P_{std} 降低百分比表明基于复合位姿的二维自校准实验具有良好重复性。

对比基于复合位姿的二维自校准与对应不采用复合位姿的二维自校准实验中的 P_{std} 降低百分比,即(0+R90+R90TR)与(0+R90+TR),(0+R90+R180+R180TR)与(0+R90+R180+TR)。其对比结果表明基于复合位姿的二维自校准具有与传统非复合位姿相近的自校准效果,但基于复合位姿的二维自校准实验中对栅格板的操作步骤相对较少。

3 结 论

复合二维自校准中的旋转和平移位姿后,使栅格板可在旋转位姿的基础上直接进行平移,或在平移位姿的基础上直接进行旋转,避免了两次位姿变换之间必须回归初始位姿的冗余操作,简化了二维自校准的操作流程。通过仿真实验证明了采用复合位姿的二维自校准在模拟噪声环境中能有效分离被校准对象工作台系统误差,仿真值接近代入二维自校准方程模型的真值。通过不确定度分析结果证明了基于复合位姿的二维自校准对环境噪声的抑制能力。观察不同位姿组合时二维自校准不确定

度的变化,由相同位姿数量的包含及不含复合位姿的位姿组合对应的各点不确定度传播率均值相等而得到引入复合位姿对二维自校准鲁棒性无影响的结论。在影像测量仪上进行基于复合位姿的二维自校准实验,其分离工作台系统误差的有效性得到论证。对比了基于复合位姿的三位姿组合与传统三位姿组合的自校准实验结果,栅格板分别采用这两种三位姿组合分离得到的工作台系统误差非常接近。计算处于同一位姿的栅格板之间的差异性 P_{std} 在二维自校准后的降低百分比来代表工作台系统误差的分离程度,即自校准效果。多组基于复合位姿的三位姿及四位姿组合的二维自校准实验均有效分离影像测量仪的工作台系统误差,且具有良好重复性。综上所述,复合位姿具有明显优势,适合在二维自校准中推广应用。

参考文献

- [1] 周亮,王振环,孙东辰,等.现代精密测量技术现状及发展[J].仪器仪表学报,2017,38(8):1869-1878.
ZHOU L, WANG ZH H, SUN D CH, et al. Present situation and development of modern precision measurement technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1869-1878.
- [2] 周维虎,石俊凯,纪荣,等.飞秒激光频率梳精密测距技术综述[J].仪器仪表学报,2017,38(8):1859-1868.
ZHOU W H, SHI J K, JI R, et al. High precision distance measurement using femtosecond laser frequency comb [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1859-1868.
- [3] EVANS C J, HOCKEN R J, ESTLER W T. Self-calibration: Reversal, redundancy, error separation, and 'absolute testing' [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1996, 45(2): 617-634.
- [4] 李茆丽,薛梓,黄焱,等.全圆连续角度标准装置的系统误差分离与补偿[J].仪器仪表学报,2021,42(3):1-9.
LI G L, XUE Z, HUANG Y, et al. System error separation and compensation of the continuous full circle angle standard device [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2021, 42(3): 1-9.
- [5] JEONG Y, DONG J, FERREIRA P M. Self-calibration of dual-actuated single-axis nanopositioners [J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(4): 045203.

- [6] QIAO X Y, DING G Q, CHEN X, et al. Three-dimensional self-calibration for high-precision measurement instruments with hybrid positions [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-8.
- [7] QIAO X Y, DING G Q, CHEN X, et al. Comparison of 3D self-calibration methods for high-precision measurement instruments [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-9.
- [8] YE J, TAKAC M T, BERGLUND C N, et al. An exact algorithm for self-calibration of two-dimensional precision metrology stages [J]. Precision Engineering, 1997, 20(1): 16-32.
- [9] KIM J A, KIM J W, KANG C S, et al. On-machine self-calibration of a two-dimensional stage using an absolute X-Y- θ position sensor [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020, 21(9): 1629-1636.
- [10] HU C, ZHU Y, HU J C, et al. A holistic self-calibration algorithm for xy precision metrology systems [C]. Proceedings of the IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012.
- [11] ZHU Y, HU C X, HU J C, et al. A transitive algorithm for self-calibration of two-dimensional ultra-precision stages [C]. Proceedings of the 2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011.
- [12] EKBERG P, STIBLERT L, MATSSON L. A new general approach for solving the self-calibration problem on large area 2D ultra-precision coordinate measurement machines [J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(5): 055001.
- [13] 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]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(9): 1960-1966.
- [14] CHEN X, DING G Q, TAKAHASH S, et al. Self-calibration for two-dimensional stage using least squares solution [C]. 10th International Symposium of Measurement Technology and Intelligent Instruments, 2011.
- [15] 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.
- [16] QIAO X Y, CHEN X, EKBERG P, et al. Self-calibration for the 2D stage based on weighted least squares [J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(12): 125015.
- [17] QIAO X Y, FAN C J, CHEN X, et al. Uncertainty analysis of two-dimensional self-calibration with hybrid position using the GUM and MCM methods [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(12): 125012.
- [18] 乔潇悦, 陈欣, 丁国清, 等. 基于最小二乘法的自校准位姿方案 [J]. 光学学报, 2018, 38(12): 164-170. QIAO X Y, CHEN X, DING G Q, et al. Scheme for position self-calibration based on least squares [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 164-170.

作者简介



乔潇悦, 2016年于上海交通大学获得学士学位, 2019年于上海交通大学获得硕士学位, 现为上海交通大学博士研究生, 主要研究方向为面向精密测量的二维及三维自校准技术, 微米级测量系统。

E-mail: xy1121@sjtu.edu.cn

Qiao Xiaoyue received her B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Shanghai Jiao Tong University in 2016 and 2019, respectively. She is currently a Ph. D. candidate at Shanghai Jiao Tong University. Her main research interests include 2D and 3D self-calibration for precision measurements and micro-and nano-measurement systems.



丁国清, 1989年于上海交通大学获得学士学位, 1992年于上海交通大学获得硕士学位, 2012年于上海交通大学获得博士学位, 现为上海交通大学副教授, 主要研究方向为微特机器人, 智能仪器和自动检测装置。

E-mail: gqding@sjtu.edu.cn

Ding Guoqing received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Shanghai Jiao Tong University in 1989, 1992, and 2012, respectively. He is currently an associate professor at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include micro-special robots, intelligent instruments, and auto-inspection of assemblies from cars.



陈欣 (通信作者), 1998年于上海交通大学获得学士学位, 2007年于东京大学获得博士学位, 现为上海交通大学副教授, 主要研究方向为超精密计量测试和相关产品技术开发。

E-mail: xchen. ie@sjtu. edu. cn

Chen Xin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shanghai Jiao Tong University in 1998, and Ph. D. degree from Tokyo University in 2007. He is currently an associate professor at Shanghai Jiao Tong University. His main

research interests include ultra-precision metrology and development of the related products.



蔡萍, 1982年于上海交通大学获得学士学位, 1988年于上海交通大学获得硕士学位, 1999年于上海交通大学获得博士学位, 现为上海交通大学教授, 主要研究方向为传感器和仪器工程, 散射成像和全息干涉。

E-mail: pcai@sjtu. edu. cn

Cai Ping received her B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Shanghai Jiao Tong University in 1982, 1988 and 1999, respectively. She is currently a professor at Shanghai Jiao Tong University. Her main research interests include sensor and instrument engineering, speckle patterns, and holographic interferometry.