基于A-Zernike矩的精密运动平台定位误差校准方法

邓书朝[1,2] 胡奥康[1] 童宝宏[1,2*] 郑近德[1] 王 璐[1]
1.安徽工业大学机械工程学院,马鞍山,243032
2.特殊服役环境的智能装备制造国际科技合作基地,马鞍山,243032

摘要:针对光刻及类似精密装备中,微米级精密运动平台误差校准存在的精度不足、操作复杂且高成本方法普及难的问题,提出了一种基于A-Zernike矩(自适应梯度Zernike矩)的高性价比视觉校准方法。依据靶标形态特征筛选边缘初值,通过线性渐变模型、梯度采样与高斯拟合实现亚像素边缘的自适应提取,精确获取靶标中心位置。依据误差变化规律建立系统参数与靶标位置变化的关联模型,实现多参数联合标定。基于标定结果构建图像坐标与平台位移的转换关系,完成定位误差的解算与补偿。实验结果表明:A-Zernike矩边缘检测精度较传统方法的边缘检测精度提高了47.41%,校准后平台最大定位误差由15.601 μm降至0.783 μm。该方法显著提高了微米级运动平台的校准效率与可靠性。

关键词:精密运动平台;自适应梯度Zernike矩;误差校准;视觉测量;联合标定
中图分类号:TP23;TH707
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.09.002 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

A-Zernike Moment Based Calibration Method for Positioning Errors of Precision Motion Stages

DENG Shuchao[1,2] HU Aokang[1] TONG Baohong[1,2*] ZHENG Jinde[1] WANG Lu[1]
1.School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui, 243032
2.China International Science and Technology Cooperation Base on Intelligent Equipment Manufacturing in Special Service Environment, Ma'anshan, Anhui, 243032

Abstract: To address the issues of insufficient accuracy, operational complexity, and the high cost of popularizing precision calibration methods for micrometer-level precision motion stages in lithography and similar precision equipment, a cost-effective visual calibration method was proposed based on adaptive gradient Zernike moments(A-Zernike moments). First, initial edge points were screened based on the morphological features of the target. Adaptive extraction of sub-pixel edges was then achieved through a linear gradient model, gradient sampling, and Gaussian fitting, thereby accurately obtaining the target center position. Subsequently, by analyzing the variation patterns of errors, an association model was established between system parameters and changes in target position to realize multi-parameter integrated calibration. Finally, based on the calibration results, a conversion relationship was constructed between image coordinates and stage displacement to accomplish the calculation and compensation of positioning errors. Experimental results show that the edge detection accuracy of the A-Zernike moment method is improved by 47.41% compared with traditional methods, and the maximum positioning error of the stage is reduced from 15.601 μm to 0.783 μm after calibration. The proposed method significantly enhances the calibration efficiency and reliability of micrometer-level motion stages.

Key words: precision motion stage; adaptive gradient Zernike moment; error calibration; visual measurement; integrated calibration

0 引言

精密运动平台是光刻机等各类高端精密制造装备的核心组成部件,受制造缺陷、装配误差等因素影响[1-3],平台的实际运动位置与理论位置之间不可避免地存在定位误差。在尖端光刻设备(如EUV光刻机)中,其核心的工件台与掩膜台在高速扫描运动时,定位精度要求已达到纳米级,这对误差校准技术提出了极致挑战。然而,在完整的制造流程及更广泛的精密工业领域中,还存在大量定位精度要求处于微米至亚微米级的运动平

收稿日期:2025-09-11
基金项目:安徽高校协同创新项目(GXXT-2023-023,GXXT-2022-082);马鞍山市科技攻关项目(CSJ202303)

台，例如光刻工艺中的晶圆传输平台、预对准平台以及精密测量、检测与封装等装备中的运动执行机构。这类平台的精度稳定性直接影响生产节拍、良率与设备可靠性，其定期校准是保障并提高装备整体性能的关键环节[4-5]。因此，研究面向此类中高精度运动平台的高效、高性价比定位误差校准方法具有重要的工程意义。

视觉测量技术因其非接触、高适应性、高效率及低成本等独特优势，在误差校准领域得到了广泛应用[6]。该技术通常视特征靶标为被测对象，将其附着于平台表面以表征位置信息，进而重建运动轨迹并解算定位误差。基于此，LEE等[7]通过相机采集线纹尺刻度测量定位误差，但未对线纹尺摆放方向与平台运动方向之间的偏角所带来的测量误差进行分析，导致最终测量精度难以进一步提高。邹华东等[8]采用标准样板摆正的方式有效降低了偏角误差对校准结果的影响，但其摆正流程较为繁琐。EKBERG等[9]和QIAO等[10]分别基于迭代法与最小二乘法提出自校准方案，利用标定板的三位姿组合实现平台定位误差分离，但这些方法计算复杂度高。

特征靶标检测是定位误差视觉校准的首要步骤，其检测精度直接影响视觉测量的准确性。Zernike矩因其旋转不变性和良好的抗噪性能，在靶标亚像素边缘检测中应用广泛[11]。HUANG等[12]将Canny算子与Zernike矩相结合，采用先粗后精的二级定位策略有效提高了检测效率。巢渊等[13]采用最大类间方差法获取Zernike矩边缘判定阈值。刘明佩等[14]分析了Zernike模板不对称性对检测精度的影响，并通过奇偶模板区间判定的方式提高了边缘检测精度。然而，上述方法均基于理想阶跃模型进行计算，忽略了实际图像中灰度渐变区域的影响。针对此类问题，MO等[15]建立三级阶跃模型，并利用K-Means聚类算法计算阶跃阈值，从而获取更精确的边缘位置。RENSHAW等[16]将阶跃模型替换为斜坡模型，该模型能够更好地表征灰度渐变关系，但其边缘宽度参数若选取不当，仍会显著影响算法的精度。

鉴于上述方法存在操作繁琐、复杂度高以及针对微米级平台校准的性价比不足等问题，本文以提高靶标检测精度和简化校准流程、降低实施复杂度为目标，提出一种基于自适应梯度Zernike矩（A-Zernike）矩的精密运动平台定位误差校准方法。

1　平台定位误差视觉校准系统

为实现平台定位误差的精确校准，搭建了视觉测量系统，如图1所示。其中硬件包括：视觉采集模块（工业相机、光学镜头、同轴光源）、标定板、真空吸盘与运动平台。利用真空吸盘将标定板与平台末端固接，通过标定板上的高精度阵列同心圆靶标特征来表征平台的运动信息。采用工业相机采集靶标图像，同轴光源提供正向均匀照明以保证靶标特征的高品质成像。为便于坐标转换，建立各模块的笛卡儿坐标系。平台坐标系XY以X轴的实际运行方向为基准；标定板坐标系X_wY_w以靶标的横纵排列方向作为X_w轴和Y_w轴；图像坐标系UV以相机视野的左上角为原点，U、V轴分别与视野上、左边缘重合。定位误差测量的具体过程如下：

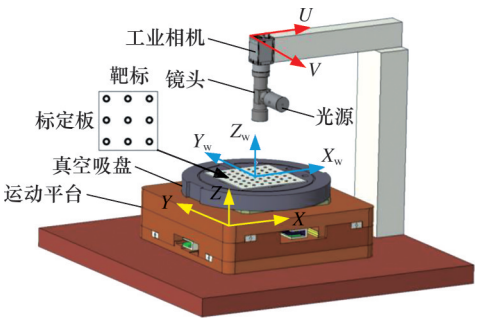


图1　精密运动平台定位误差视觉校准系统

Fig.1　Visual calibration system of precision motion stage positioning error

1）安装各模块并精确标定平台坐标系、标定板坐标系与相机坐标系三者间的不平行偏角。

2）控制平台带动标定板运动并触发工业相机同步取像，采用亚像素定位算法计算靶标中心的精确位置。

3）基于联合标定结果得到平台运动时靶标在图像坐标系下的理论位置点集，将其与实际位置比对并转换至平台坐标系下，进而实现定位误差的测量与校准。

2　靶标亚像素定位算法设计

2.1　靶标轮廓提取

图像中常存在多种背景边缘干扰，为准确提取靶标轮廓并实现分组，本文设计了一种基于形态学特征的提取流程，如图2所示，具体步骤如下：

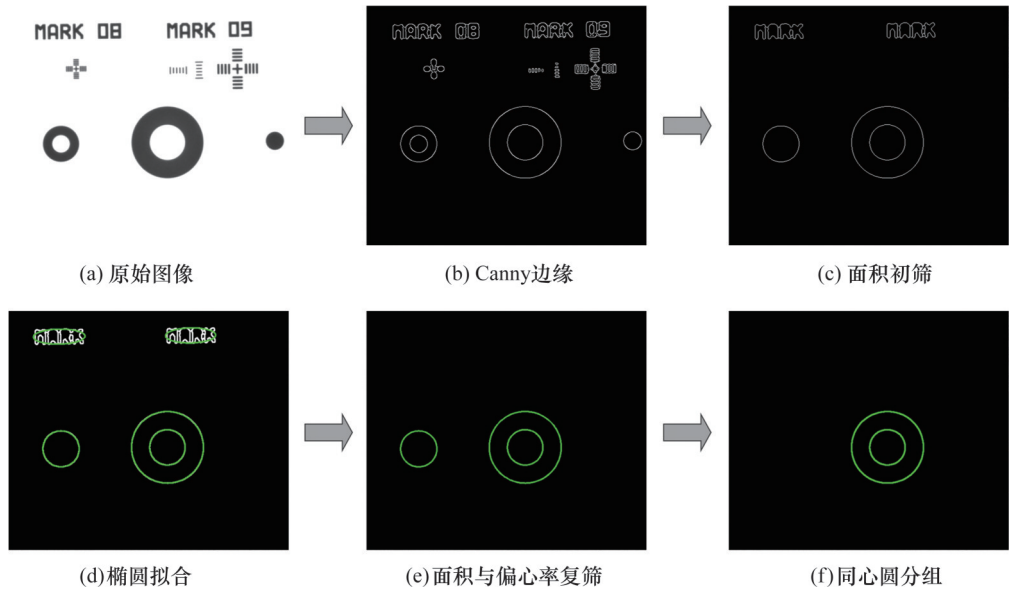
1）采用Canny算子获取像素级边缘图像，计算每个轮廓所围成闭合区域的面积S_r。

2）设定面积阈值S_1，筛除$S_r<S_1$的轮廓，以去除图像中较小轮廓的干扰。

3)依次对筛选后的轮廓进行最小二乘椭圆拟合，计算得到椭圆的偏心率e，并以S_{lx}和S_{sx}分别表示以椭圆长轴与短轴为直径的标准圆面积。

4)将满足$S_{sx}<S_x<S_{lx}$，且$e<0.7$的轮廓视为期望圆形轮廓。

5)计算椭圆轮廓中心点坐标$m_i(x_i,y_i)$，设定中心偏差阈值l，将中心偏差距离小于l的两个圆形轮廓视为一组同心圆。



(a) 原始图像　(b) Canny边缘　(c) 面积初筛

(d)椭圆拟合　(e)面积与偏心率复筛　(f)同心圆分组

图2　靶标轮廓提取流程

Fig.2　Target contour extraction process

2.2　基于A-Zernike矩的亚像素边缘检测

二维图像$f(x,y)$的n阶m次Zernike矩可表示为

$$Z_{nm}=\frac{n+1}{\pi}\iint_{x^2+y^2\leqslant 1}f(x,y)V_{nm}^{*}(\rho,\theta)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{1}$$

式中：(ρ,θ)为直角坐标(x,y)的极坐标形式；V_{nm}^{*}为单位圆内n阶m次Zernike矩的复数共轭形式。

传统Zernike矩方法采用理想阶跃模型进行边缘定位，然而由于光学元器件的离散采样、衍射效应等因素影响，实际图像中的边缘与背景间存在灰度渐变区域[17]。图像处理研究表明，边缘的灰度渐变关系类似于高斯累积分布[16]，但引用该模型会增加Zernike矩的计算复杂性，因此为简化计算，采用线性渐变模型描述边缘处的灰度变化，如图3所示。其中，圆形区域以图像中某个像素点(x_0,y_0)为圆心、单位像素为半径，u'和v'分别表示图像旋转后垂直和平行于边缘方向的坐标轴，h和$h+k$分别代表边缘两侧的灰度值，l为原点到边缘的距离，θ表示x轴与边缘垂线的夹角，w为渐变区域宽度。线性渐变模型的数学表达式为

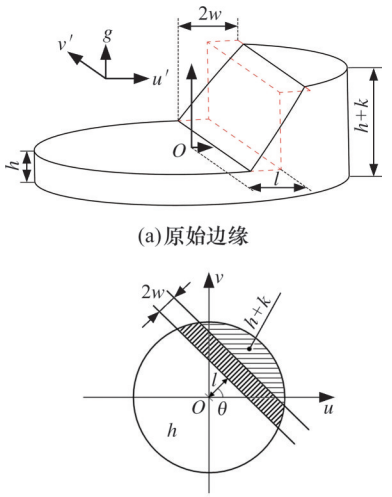
$$f(u')=\begin{cases}h & u'\leqslant l-w\\ h+k[u'-(l-w/2)]/(2w) & l-w<u'<l+w\\ h+k & u'\geqslant l+w\end{cases} \tag{2}$$

边缘模型顺时针旋转θ角度后关于x轴对称，故Z'_{11}的虚部为0。同时，根据Zernike矩的定义及其旋转不变性，结合线形渐变边缘模型，求解得到边缘角度参数θ和位置参数l：

$$\left.\begin{aligned}\theta&=\arctan\frac{\mathrm{Im}(Z_{11})}{\mathrm{Re}(Z_{11})}\\ l&=[1-w^2-\sqrt{(w^2-1)^2-2w^2Z_{20}/Z'_{11}}\,]/w^2\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中：Z_{nm}为二维图像$f(x,y)$的n阶m次Zernike矩；Z'_{nm}为Z_{nm}的旋转矩。

考虑模板放大效应带来的影响，当模板大小为$N\times N$时，对于边缘像素点(x_0,y_0)，对应的亚像素坐标(x_s,y_s)为



(a)原始边缘

(b)旋转后边缘

图3　线性渐变边缘模型

Fig.3　Linear gradient edge modeling

$$\begin{pmatrix} x_s \\ y_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + \frac{N}{2} l \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{pmatrix} \tag{4}$$

采用线性渐变边缘模型进行计算时，宽度参数w值的选取成为算法的关键。因相机成像后的边缘灰度变化符合高斯累积分布，CHRISTIAN[18]指出，若σ为高斯累积分布的标准差，当$w \approx 1.66\sigma$时，线性渐变边缘可近似看作高斯边缘，但实际图像边缘处的σ值未知。结合实际成像中边缘的灰度变化特性，对于每一个边缘点而言，其梯度幅值沿边缘梯度方向上的变化符合高斯分布。基于此本文提出了一种自适应的w值获取方法，具体步骤如下：

1)获取像素级边缘点后，使用Sobel算子计算梯度图像。在梯度图中，以像素级边缘点为原点，设G为梯度函数，沿梯度方向利用双线性插值法获取$2n+1$个采样点的梯度值，如图4所示。

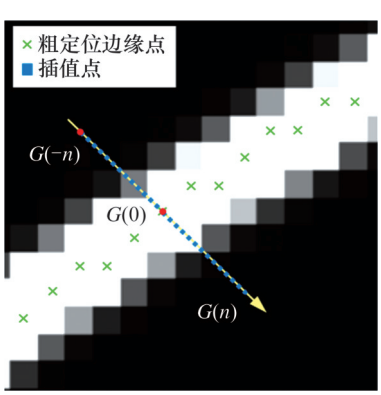


图4　边缘点梯度方向采样

Fig.4　Edge point gradient direction sampling

2)采用最小二乘法进行高斯拟合，以采样点至原点的距离为自变量，以其对应的梯度幅值为因变量。基于拟合结果，确定该边缘点处的参数值σ。

所拟合高斯函数的表达式为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{5}$$

式中：μ为高斯函数的均值。

目标函数为梯度点$G(x_i)$与高斯拟合点y_i间的残差平方和为

$$S = \sum_{i=-n}^{n} (G(x_i) - y_i)^2 \tag{6}$$

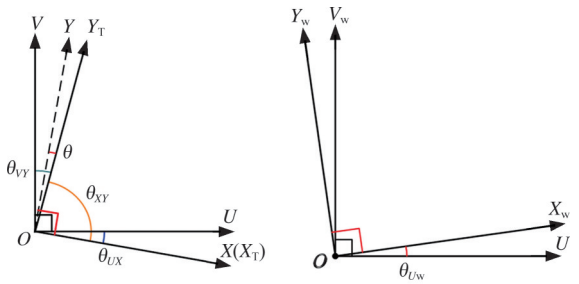
式中：i为采样点索引号；n为采样范围半径。

令残差平方和最小，求解出参数σ，则渐变宽度$w = 1.66\sigma$[18]，进而获取同心圆靶标的亚像素边缘点集。将内外轮廓边缘点集分别进行椭圆拟合，根据拟合所得椭圆中心以及靶标内外圆直径之比，即可得到同心圆圆心在图像中的实际投影点位置[19]。

3　系统参数联合标定与误差校准

3.1　系统参数联合标定

由于安装误差影响，平台两轴的实际运行方向X_T与Y_T并不完全垂直，导致以X轴为基准时，Y_T轴与理论Y轴间存在偏角θ；同时图像坐标系与平台两轴实际运行方向间存在偏角θ_{UX}、θ_{VY}，如图5a所示。此外，标定板放置误差使得标定板坐标系X_wY_w与图像坐标系UV间存在夹角θ_{Uw}，如图5b所示。考虑图像坐标系两个方向上像素尺寸的影响，归纳待标定系统参数如表1所示。



(a)图像与平台偏角　　(b)图像与标定板偏角

图5　待标定系统参数示意图

Fig.5　Schematic diagram of the parameters of the system to be calibrated

表1　待标定系统参数

Tab.1　System parameters to be calibrated

序号	参数	量符号
1	图像坐标系U方向像素当量	P_U
2	图像坐标系V方向像素当量	P_V
3	图像坐标系与标定板间的夹角	θ_{Uw}
4	图像坐标系与平台基准轴(X轴)夹角	θ_{UX}
5	图像坐标系与平台Y轴夹角	θ_{VY}
6	平台正交性误差值	θ

结合图1所建各模块坐标系，构建各系统参数的联合标定方法。对于像素当量P_U、P_V，以及图像坐标系与标定板坐标系间的偏角，利用标定板上相邻靶标间已知的刚性位置关系进行求解。

如图6所示，适当调整位姿使得相机视野中出现4个相邻靶标A、B、C、D，则偏角θ_{Uw}可通过任意两相邻靶标中心连线的斜率计算得到：

$$\theta_{Uw} = \arctan\left(\frac{V_A - V_B}{U_A - U_B}\right) \tag{7}$$

图6中，靶标AB、CD的像素距离分别为l_{AB}、l_{CD}，AD、BC的像素距离分别为l_{AD}、l_{BC}，靶标间的实际距离均为d_0。将l_{AB}、l_{CD}在U方向上投影，l_{AD}、l_{BC}在V方向上投影，求得像素当量为

$$P_U = \frac{1}{2}\left(\frac{d_0}{l_{AB}\cos\theta_{Uw}} + \frac{d_0}{l_{CD}\cos\theta_{Uw}}\right) \tag{8}$$

$$P_V = \frac{1}{2}\left(\frac{d_0}{l_{AD}\cos\theta_{Uw}} + \frac{d_0}{l_{BC}\cos\theta_{Uw}}\right) \tag{9}$$

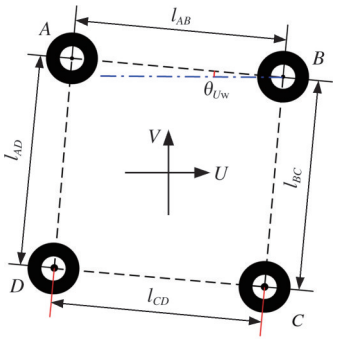


图6 偏角 θ_{Uw} 及像素当量标定

Fig.6 Declination θ_{Uw} and pixel equivalent calibration

进行图像坐标系与平台两轴实际运行方向间的偏角标定时，以与 X 轴偏角 θ_{UX} 标定过程为例，如图7所示。首先调整平台位置，使靶标 A 出现在视野中，记录其图像坐标 $A(U_1, V_1)$。向正方向移动 X 轴，此时与 A 在同一行上的靶标 B 出现在相机视场中，记录图像坐标 $B'(U_2, V_2)$。根据标定板规格可知 A、B 两定位点间的实际距离为 d，X 轴的移动距离为 s，故由几何关系得

$$\theta_{UX}=\arcsin\left(\frac{V_2-V_1P_V+d\sin\theta_{Uw}}{s}\right) \tag{10}$$

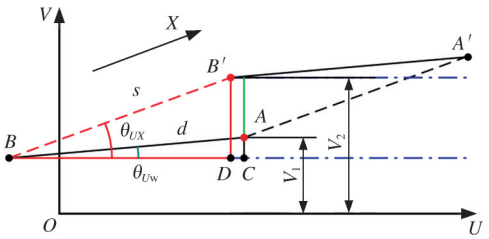


图7 偏角 θ_{UX} 标定

Fig.7 Declination θ_{UX} calibration

图像坐标系与实际 Y 轴偏角 θ_{VY} 的标定过程与 X 轴类似，通过观察 Y 轴移动前后两个不同靶标的坐标变化即可完成计算。求得偏角 θ_{UX}、θ_{VY} 后，则平台 Y_T 轴与理论 Y 轴间的偏角 $\theta=\theta_{VY}-\theta_{UX}$。

3.2 定位误差校准方法设计

误差校准的基本思想是：根据上述系统参数，推导靶标的理论图像坐标与平台位移之间的转换模型，通过控制平台移动，根据图像坐标系下靶标实际位置与理论位置间的差异求得定位误差并做出补偿，从而实现平台误差校准。假设平台静止时，平台坐标系中的靶标 A 经成像后所对应的图像坐标为 $A(U_A, V_A)$，如图8所示。

已知相邻靶标间的实际距离为 d，控制平台两轴以 d 为步长移动 $\boldsymbol{m}_d=(X_d, Y_d)^T$ 后，靶标 C 会出现在相机视野中，若平台运动不存在误差，则 C 的理论图像坐标为 $C_k(U_{Ck}, V_{Ck})$。设 X 和 Y 方向的定位误差分别为 σ_X 和 σ_Y，记为 $\boldsymbol{\sigma}=(\sigma_X, \sigma_Y)^T$，实际观察到 C 的图像坐标为 $C_T(U_{CT}, V_{CT})$，C_T 可表

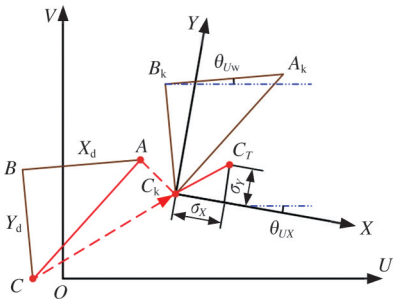


图8 平台移动时靶标位置变化示意图

Fig.8 Schematic diagram of the change of target position when the platform is moving

示为

$$\begin{bmatrix}U_{CT}\\V_{CT}\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}U_{Ck}\\V_{Ck}\\1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}P_U^{-1}&0&0\\0&P_V^{-1}&0\\0&0&1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\cos\theta_{UX}&-\sin\theta_{UX}&0\\\sin\theta_{UX}&\cos\theta_{UX}&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\sigma_X\\\sigma_Y\\1\end{bmatrix} \tag{11}$$

基于3.1节系统参数联合标定，对平台移动 $\boldsymbol{m}_d=(X_d, Y_d)^T$ 后视场内所观察到靶标 C 的理论图像坐标 $C_k(U_{Ck}, V_{Ck})$ 进行推导。首先在平台坐标系中，由于 Y_T 轴与理论 Y 轴间存在偏角 θ，则平台的理论位移应为 $\boldsymbol{m}_n=(X_n, Y_n)^T$：

$$\boldsymbol{m}_n=\begin{bmatrix}X_n\\Y_n\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&\sin\theta&0\\0&\cos\theta&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_d\\Y_d\\1\end{bmatrix} \tag{12}$$

在标定板坐标系中，靶标 A 到 C 的偏移向量为 $\boldsymbol{W}_{AC}=(-X_d, -Y_d)^T$，将其转换至平台坐标系下，记为 $\boldsymbol{m}_w$，有

$$\boldsymbol{m}_w=\begin{bmatrix}X_w\\Y_w\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos(\theta_{UX}-\theta_{Uw})&\sin(\theta_{UX}-\theta_{Uw})&0\\-\sin(\theta_{UX}-\theta_{Uw})&\cos(\theta_{UX}-\theta_{Uw})&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-X_d\\-Y_d\\1\end{bmatrix} \tag{13}$$

设移动前后靶标 A 至 C_k 的偏移向量 $\boldsymbol{m}_c=(X_c, Y_c)^T$，在 ΔACC_k 中，向量 $\boldsymbol{AC}=\boldsymbol{m}_w$，向量 $\boldsymbol{CC_k}=\boldsymbol{m}_n$，故 $\boldsymbol{m}_c=\boldsymbol{m}_w+\boldsymbol{m}_n$，即

$$\boldsymbol{m}_c=\begin{bmatrix}X_c\\Y_c\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}X_w\\Y_w\\1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}X_n\\Y_n\\1\end{bmatrix} \tag{14}$$

由式(12)～式(14)，并将 $\boldsymbol{m}_c$ 转换至图像坐标系下，得到平台移动后靶标 C 的理论图像坐标：

$$\begin{bmatrix}U_{Ck}\\V_{Ck}\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}U_A\\V_A\\1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}P_U^{-1}&0&0\\0&P_V^{-1}&0\\0&0&1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\cos\theta_{UX}&-\sin\theta_{UX}&0\\\sin\theta_{UX}&\cos\theta_{UX}&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_c\\Y_c\\1\end{bmatrix} \tag{15}$$

根据靶标实际位置 C_T 与理论位置 C_k 间的差值，结合式(11)可得平台位移为 $\boldsymbol{m}_d=(X_d, Y_d)^T$ 时，定位误差 $\boldsymbol{\sigma}=(\sigma_X, \sigma_Y)^T$ 为

$$\boldsymbol{\sigma}=\begin{bmatrix}\sigma_X\\ \sigma_Y\\ 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}P_U & 0 & 0\\ 0 & P_V & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\cdot \begin{bmatrix}\cos\theta_{UX} & \sin\theta_{UX} & 0\\ -\sin\theta_{UX} & \cos\theta_{UX} & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}U_{Ck}-U_{CT}\\ V_{Ck}-V_{CT}\\ 1\end{bmatrix} \tag{16}$$

完成误差测量后，即可通过调控平台两轴的实际进给量，实现定位误差补偿。补偿示意图见图9，设平台目标移动位置为$P_A(X_A, Y_A)$，该位置处的定位误差$\boldsymbol{\sigma}_A=(\sigma_{XA}, \sigma_{YA})^{\mathrm{T}}$，平台$Y_{\mathrm{T}}$轴与$Y$轴间的偏角为$\theta$。

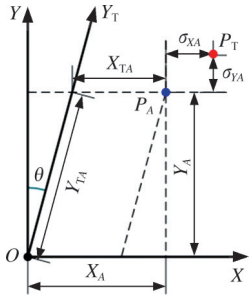


图9　误差补偿原理示意图

Fig.9　Schematic diagram of error compensation principle

经过定位误差补偿后两轴的坐标值分别为$X_A-\sigma_{XA}$、$Y_A-\sigma_{YA}$。考虑到偏角θ会导致Y轴移动时，在X方向上产生一定的运动分量，为消除该影响，则输入至运动平台的实际位移$(X_{\mathrm{TA}}, Y_{\mathrm{TA}})^{\mathrm{T}}$为

$$\begin{bmatrix}X_{\mathrm{TA}}\\ Y_{\mathrm{TA}}\\ 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & -\tan\theta & 0\\ 0 & 1/\cos\theta & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_A-\sigma_{XA}\\ Y_A-\sigma_{YA}\\ 1\end{bmatrix} \tag{17}$$

4　实验测试与验证

本文所搭建的视觉测量实验系统如图10所示，由分辨率为2600像素×2160像素的ME2P-560-21GM-P工业相机、放大倍率为1X的WWH10-65CT远心镜头、OPT-PIG0803-R红色同轴点光源以及图案间距为2.5 mm、精度为±0.1 μm的光刻标定板、真空吸盘和待测运动平台组成。采用3.1节所述方法，对表1所列系统参数进行集成标定，所得结果如表2所示。

4.1　亚像素算法性能评估实验

为验证本文所提A-Zernike矩亚像素算法的精度，采用计算机生成的已知边缘位置仿真图像进行算法性能评估。在实际成像过程中，连续的边缘会离散化为一系列灰度不同的像素点，本文利用基于空间面积效应[20]的方法进行模拟。此外，考虑到相机成像时的模糊效应，采用尺寸为5×5，$\sigma=1$的高斯模板模糊边缘。因实际边缘

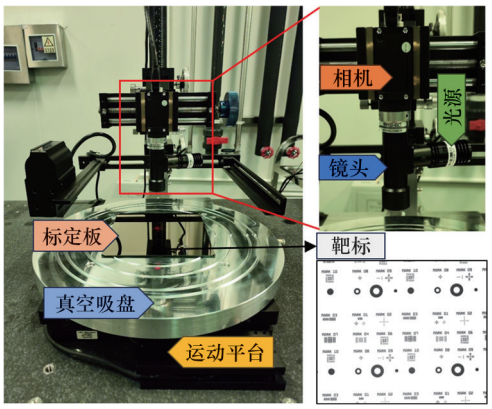


图10　视觉测量实验系统

Fig.10　Experimental setup of the vision measurement system

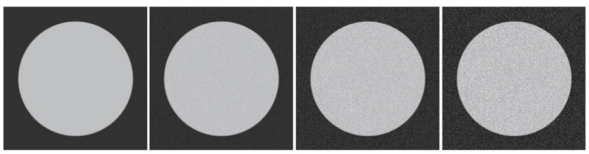
表2　标定实验数据

Tab.2　Calibration experimental data

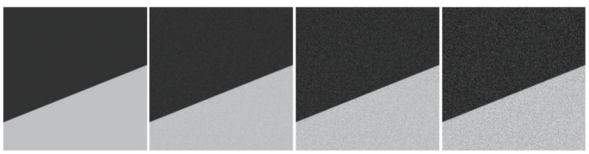
	P_U	P_V	θ_{Uw}	θ_{UX}	θ_{VY}	θ
数值	2.5048	2.5068	0.6763	0.9509	0.9499	−0.0011

注：像素当量单位为μm/pixel，角度单位为(°)。

一般为弧形和线形，故分别生成圆形和线形的仿真图像，分辨率均为500像素×500像素，背景灰度值为50，前景灰度值为200，同时添加均值为0，标准差为0、10、20、30的高斯噪声来验证算法的抗噪能力。所生成的圆形、线形仿真图像如图11所示。



(a)圆形



(b)线形

图11　仿真图像

Fig.11　Simulation images

采用传统Zernike矩算法(Zernike)、渐变Zernike矩算法(C-Zernike)以及本文改进的自适应渐变Zernike矩算法(A-Zernike)对上述仿真图像进行亚像素边缘检测，并将计算的检测边缘点与真实边缘间的距离作为测量误差，以测量误差的平均值和标准差作为量化指标，检测结果如表3所示。由表3可知，噪声较小时，C-Zernike算法的检测精度较传统Zernike算法有一定提高，但随着噪声的增大，两者检测精度趋于一致。而A-Zernike算法在不同程度噪声影响下对圆形边缘和线形边缘的检测精度均优于C-Zernike算法。当噪声标准差$\sigma=10$时，对于两种边缘，

表3 边缘检测结果对比(像素)

Tab.3 Comparison of edge detection results(pixel)

方法	噪声标准差	圆形平均值	圆形标准差	线形平均值	线形标准差
Zernike	0	0.101	0.077	0.063	0.040
	10	0.116	0.079	0.081	0.057
	20	0.147	0.099	0.129	0.093
	30	0.206	0.146	0.207	0.153
C-Zernike	0	0.079	0.063	0.043	0.028
	10	0.097	0.064	0.065	0.047
	20	0.138	0.088	0.117	0.086
	30	0.194	0.138	0.198	0.147
A-Zernike	0	0.048	0.035	0.009	0.007
	10	0.061	0.043	0.052	0.041
	20	0.091	0.065	0.096	0.074
	30	0.148	0.115	0.167	0.133

A-Zernike算法均可达到0.06像素水平的检测精度,相较于Zernike和C-Zernike算法,圆形边缘检测精度分别提高了47.41%和37.10%,线形边缘检测精度分别提高了35.80%和20.00%。

同时,为验证视觉系统检测靶标时的重复性精度,通过采集标定板上的同心圆靶标图像进行实验。具体步骤如下:保持平台不动,选择3个不同的位置,依次连续采集10幅图像,记录每幅图像所提取的靶标中心坐标,以坐标极差作为评价依据。由表4可看出,视觉系统进行靶标中心检测时的重复性精度为0.102像素,对应的实际物理尺寸为0.256 μm,满足亚像素精度要求。

表4 靶标中心测量结果(像素)

Tab.4 Target center measurement results(pixel)

序号	位置1	位置2	位置3
1	(1333.761, 1091.306)	(1382.557, 1105.202)	(1331.457, 1088.581)
2	(1333.744, 1091.231)	(1382.525, 1105.118)	(1331.484, 1088.525)
3	(1333.750, 1091.260)	(1382.553, 1105.185)	(1331.475, 1088.609)
4	(1333.754, 1091.273)	(1382.535, 1105.147)	(1331.468, 1088.525)
5	(1333.759, 1091.271)	(1382.544, 1105.154)	(1331.473, 1088.555)
6	(1333.747, 1091.266)	(1382.540, 1105.167)	(1331.469, 1088.557)
7	(1333.749, 1091.245)	(1382.550, 1105.154)	(1331.471, 1088.563)
8	(1333.756, 1091.319)	(1382.533, 1105.177)	(1331.470, 1088.543)
9	(1333.764, 1091.246)	(1382.548, 1105.209)	(1331.450, 1088.527)
10	(1333.742, 1091.291)	(1382.534, 1105.111)	(1331.491, 1088.579)
极差	0.091	0.102	0.094

4.2 平台定位误差测量实验

为了验证本文视觉测量系统检测效果的有效性,分别采用视觉与激光干涉仪方法测量运动平台的定位误差,并基于激光干涉仪测量结果评估本文方法的可靠性与优越性。激光干涉仪测量试验台如图12所示。

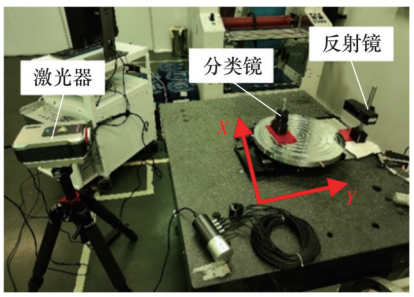


图12 激光干涉仪测量

Fig.12 Laser interferometer measurements

实验在22±1 ℃的恒温无尘室中进行,设定两轴测量总行程均为100 mm,等间隔设置11个采样位置,即移动步长为10 mm。需要注意的是,在X轴运动的情况下,所提取的定位误差σ_X和σ_Y分别表示X轴的定位误差和直线度误差,实际应用中通常以σ_{XX}和σ_{XY}表示,Y轴同理。使用两种方法分别测量X、Y轴的定位误差σ_{XX}、σ_{YY},以及直线度误差σ_{XY}、σ_{YX},重复6次。两种方法的测量平均值及标准差的对比结果如图13所示。

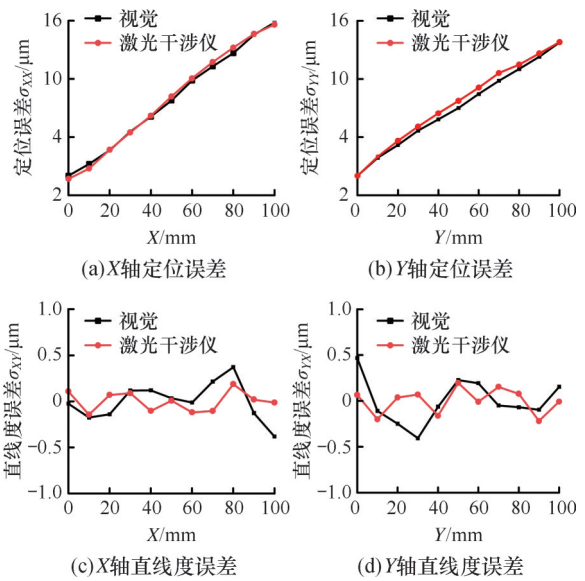


图13 X和Y轴误差测量实验结果

Fig13 Experimental results of X-axis and Y-axis error measurements

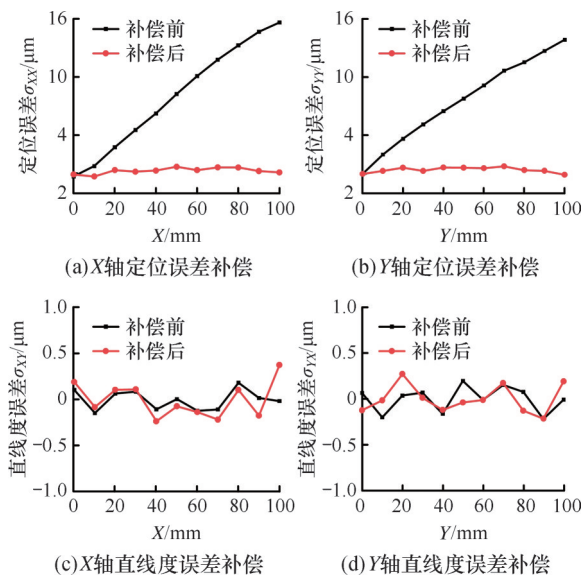
以激光干涉仪测量结果为基准,实验结果显示,本文方法进行定位误差测量时,在两轴上的最大测量误差分别为0.559 μm和0.798 μm,最大测

量标准差分别为0.194 μm和0.143 μm。测量误差均低于1 μm，同时测量标准差与激光干涉仪方法相近，可见本文方法可实现准确且稳定的定位误差测量。

由直线度误差对比测量结果可知，相较于定位误差，直线度误差对平台整体定位精度的影响较小。本文方法进行直线度误差测量时，在两轴上的最大测量误差分别为0.369 μm和0.475 μm，最大测量标准差分别为0.176 μm和0.177 μm，测量数据基本在激光干涉仪测量方法的数据范围以内，且整体趋势相同，反映了本文方法对于直线度误差测量的有效性。

4.3　平台定位误差补偿实验

保持测量方法及测量行程不变，利用激光干涉仪测量X、Y轴补偿后的定位误差与直线度误差，用于评估误差校准的有效性。两轴补偿前后误差对比测量结果如图14所示。



(a)X轴定位误差补偿　(b)Y轴定位误差补偿

(c)X轴直线度误差补偿　(d)Y轴直线度误差补偿

图14　X和Y轴误差补偿实验结果

Fig.14　Experimental results of *X*-axis and *Y*-axis error compensation

由图14可知，经过补偿后X、Y轴的最大定位误差分别由15.601 μm和13.806 μm降至0.673 μm和0.783 μm，补偿效果显著，进一步验证了本文方法对于精密二维运动平台定位误差校准的有效性。

直线度误差测量结果显示，X、Y轴的直线度误差值分别由0.187 μm和0.219 μm上升至0.380 μm和0.273 μm。分析激光干涉仪的测量标准差可知，X、Y轴的最大测量标准差分别为0.346 μm和0.219 μm，与直线度误差测量值相当。结合定位误差的良好补偿效果，推测该现象主要可归因于环境振动、运动平台自身的重复性误差，也与视觉测量系统的靶标提取误差有关。

5　结论

1)本文针对传统Zernike矩算法在亚像素边缘检测中存在的精度不足与宽度参数依赖性强的问题，提出了一种基于梯度采样与高斯拟合的自适应宽度参数估计方法，显著提高了边缘定位精度。实验表明，A-Zernike矩算法在噪声环境下的边缘检测精度较传统Zernike矩算法提高47.41%，具有良好的鲁棒性。

2)通过系统分析影响视觉校准精度的多项参数(如像素当量、坐标系偏角等)，提出了一种联合标定策略，有效克服了因安装偏差引起的测量误差，避免了繁琐的机械摆正操作，提高了校准流程的实用性与效率。

3)搭建了完整的视觉测量系统，并进行了算法性能评估与平台误差校准实验。结果表明，所提方法在100 mm行程内的最大定位误差测量精度达0.798 μm，重复性精度为0.256 μm；经误差补偿后，平台最大定位误差由15.601 μm降至0.783 μm，验证了该方法在高精度定位误差校准中的有效性与可靠性。

综上所述，本文提出的A-Zernike矩视觉校准方法在提高检测精度与简化操作流程方面具有显著优势。该方法以常规工业视觉组件实现了亚微米级的校准能力，为光刻工艺中的辅助运动平台以及更广泛的精密制造、测量与检测装备中微米级运动平台的误差校准，提供了一种高性价比、高效率的解决方案，具备良好的工程应用前景。

参考文献：

[1] HE Sifeng, TANG Hui, ZHANG Kaifu, et al. A Flip-chip Alignment System with the Property of Deviation Self-correction at the Nanoscale[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 2345-2355.

[2] WANG Yutian, WANG Dong, ZHANG Shizhen, et al. Design and Development of a Five-axis Machine Tool with High Accuracy, Stiffness and Efficiency for Aero-engine Casing Manufacturing[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(4): 485-496.

[3] 戴一帆，彭小强，薛帅，等. 高性能光学制造[J]. 机械工程学报，2023，59(21)：1-14.
DAI Yifan, PENG Xiaoqiang, XUE Shuai, et al. High-performance Optical Manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(21): 1-14.

[4] 张金迪，高健，谭宇韬，等. 高速宏微运动平台及精密定位方法[J]. 制造技术与机床，2019(8)：117-121.
ZHANG Jindi, GAO Jian, TAN Yutao, et al. High Speed Macro-Micro Motion Stage and Precision Positioning Method[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019

(8)：117-121.
[5] 马榕苓. 数控机床误差补偿关键技术及其应用研究[J]. 现代制造技术与装备，2023，59(8)：114-116.
MA Rongling. Research on the Key Technology and Application of Error Compensation for CNC Machine Tools[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment，2023，59(8)：114-116.
[6] 赵晨阳，向捷，卞凯，等. 基于光学显微视觉的精密定位测量综述(特邀)[J]. 激光与光电子学进展，2024，61(2)：0211021.
ZHAO Chenyang，XIANG Jie，BIAN Kai，et al. Review of Optical Microvision-based Precision Positioning Measurement(Invited)[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2024，61(2)：0211021.
[7] LEE C，LEE S K. Multi-degree-of-freedom Motion Error Measurement in an Ultraprecision Machine Using Laser Encoder—Review [J]. Journal of Mechanical Science and Technology，2013，27(1)：141-152.
[8] 邹华东，贾瑞清，张畅. 基于机器视觉的影像测量仪工作台定位误差精密补偿方法[J]. 激光与光电子学进展，2018，55(9)：202-209.
ZOU Huadong，JIA Ruiqing，ZHANG Chang. Precision Compensation Method for Positioning Error of Working Table of Vision Measuring Machine Based on Machine Vision [J]. Laser & Optoelectronics Progress，2018，55(9)：202-209.
[9] EKBERG P，STIBLERT L，MATTSSON 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.
[10] QIAO Xiaoyue，CHEN Xin，EKBERG P，et al. Self-calibration for the 2D Stage Based on Weighted Least Squares[J]. Measurement Science and Technology，2019，30(12)：125015.
[11] 刘源洞，程管，汤勃，等. 单目球形靶标球心成像坐标求解方法[J]. 激光与光电子学进展，2023，60(12)：1211005.
LIU Yuanjiong，CHENG Guan，TANG Bo，et al. Spherical Center Imaging Location Solution Method for Monocular Spherical Target[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2023，60(12)：1211005.
[12] HUANG Cheng，JIN Wei，XU Qian，et al. Sub-pixel Edge Detection Algorithm Based on Canny - Zernike Moment Method[J]. Journal of Circuits，Systems and Computers，2020，29(15)：2050238.
[13] 巢渊，唐寒冰，刘文汇，等. 基于改进Zernike矩的轴类零件尺寸测量方法[J]. 电子测量技术，2022，45(3)：169-176.
CHAO Yuan，TANG Hanbing，LIU Wenhui，et al. Improved Zernike Moment-based Dimensional Measurement Method for Shaft Parts[J]. Electronic Measurement Technology，2022，45(3)：169-176.
[14] 刘明佩，朱维斌，叶树亮. 基于改进Zernike矩的小模数齿轮亚像素边缘检测[J]. 仪器仪表学报，2018，39(8)：259-267.
LIU Mingpei，ZHU Weibin，YE Shuliang. Sub-pixel Edge Detection Based on Improved Zernike Moment in the Small Modulus Gear Image[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2018，39(8)：259-267.
[15] MO Jiadi，YAN He，LIU Jihong. An Adaptive Sub-pixel Edge Detection Method Based on Improved Zernike Moment [J]. International Journal of Wireless and Mobile Computing，2022，22(2)：140.
[16] RENSHAW D T，CHRISTIAN J A. Subpixel Localization of Isolated Edges and Streaks in Digital Images[J]. Journal of Imaging，2020，6(5)：33.
[17] 刘国栋，刘炳国，陈凤东，等. 亚像素定位算法精度评价方法的研究[J]. 光学学报，2009，29(12)：3446-3451.
LIU Guodong，LIU Bingguo，CHEN Fengdong，et al. Study on the Method of the Accuracy Evaluation of Sub-pixel Location Operators[J]. Acta Optica Sinica，2009，29(12)：3446-3451.
[18] CHRISTIAN J A. Accurate Planetary Limb Localization for Image-based Spacecraft Navigation [J]. Journal of Spacecraft and Rockets，2017，54(3)：708-730.
[19] 安晶晶，高楠，陈超，等. 圆环标识的离心偏差校正方法与评价[J]. 激光与光电子学进展，2017，54(4)：165-173.
AN Jingjing，GAO Nan，CHEN Chao，et al. Correcting Method and Evaluation of Eccentricity Error of Circle Target[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2017，54(4)：165-173.
[20] 张杰，施露露，史振志，等. 相差细胞图像的光照均衡与分割计数方法研究[J]. 电子测量与仪器学报，2022，36(5)：136-145.
ZHANG Jie，SHI Lulu，SHI Zhenzhi，et al. Study of Light Equalization and Segmentation Counting Method for Cell Phase Contrast Images[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation，2022，36(5)：136-145.

（编辑 王旻玥）

作者简介：邓书朝，男，1989年生，讲师。研究方向为机电装备运动控制。E-mail：dengsc@ahut.edu.cn。童宝宏*（通信作者），男，1978年生，教授、博士研究生导师。研究方向为机电装备数字化设计。E-mail：bh_tong@163.com。

本文引用格式：
邓书朝，胡奥康，童宝宏，等. 基于A-Zernike矩的精密运动平台定位误差校准方法[J]. 中国机械工程，2026，37(9)：2092-2100.
DENG Shuchao，HU Aokang，TONG Baohong，et al. A-Zernike Moment Based Calibration Method for Positioning Errors of Precision Motion Stages[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(9)：2092-2100.