

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

邹华东^{1,2**}, 贾瑞清^{1*}, 张畅¹

¹中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083;

²清远职业技术学院机电与汽车工程学院, 广东 清远 511510

摘要 分析了影像测量仪移动机台定位误差的成因, 比较了无误差补偿和采用线纹尺进行定位误差补偿两种情况下机台的定位精度。为了克服线纹尺补偿时由人工采点造成的瞄准误差和摆正误差, 提出了采用阵列实心圆标准精密样板对进行平面综合定位误差补偿的方法。该方法首先进行样板摆正, 通过图像采集获取实心圆图像, 通过图像处理的方法获取每个圆心坐标, 并实时记录在采集图像中, 该圆心标记用于为调整样板坐标系与移动坐标系平行而转动标准样板时的摆正比对。摆正后, 通过移动机台到每个阵列圆圆心与图像中心重合的位置, 记录对应的坐标点对, 通过多项式拟合的方法获取拟合系数, 并用于机台的定位误差补偿。采用该方法在 VMS300 影像测量仪机台上进行测试, 经过补偿后仪器的定位精度可以达到 $2\ \mu\text{m}$ 。

关键词 机器视觉; 定位误差补偿; 多项式拟合; 标准样板

中图分类号 TH71

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.091203

Precision Compensation Method for Positioning Error of Working Table of Vision Measuring Machine Based on Machine Vision

Zou Huadong^{1,2**}, Jia Ruiqing^{1*}, Zhang Chang¹

¹ School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing, Beijing 100083, China;

² School of Mechanical and Automobile Engineering, Qingyuan Polytechnic, Qingyuan, Guangdong 511510, China

Abstract The factors causing the positioning error of mobile instrument of vision measurement machine are analyzed. The positioning accuracy results are compared under the conditions of line ruler compensating the positioning error and without error compensation. In order to overcome the aiming error and alignment error caused by manual sampling when using line ruler compensation, we propose a method of using a template with array solid circles as the compensation standard precision parts to compensate for planar comprehensive positioning error. The method firstly carries out a template alignment. The solid circle image is obtained by image acquisition. And the circle center coordinate is calculated and drawn in the collected image in real time by image processing method. The circle center is marked, which is used as alignment reference to adjust the standard template position on the stage in order to make the motion coordinate system and the template coordinate system parallel. After alignment, the machine is move to the position where the circle center of each array is coincident with the center of the image. The corresponding coordinate point pair is recorded. And the fitting coefficient is obtained through the polynomial fitting method and used for machine positioning error compensation. The method is tested on the VMS300 vision measuring machine. After the compensation, the positioning accuracy of the instrument reaches $2\ \mu\text{m}$, and the accuracy is effectively improved.

Key words machine vision; positioning error compensation; polynomial fitting method; standard template

OCIS codes 150.0155; 120.4630

收稿日期: 2018-02-28; 修回日期: 2018-03-15; 录用日期: 2018-03-19

基金项目: 安徽省教育厅自然科学基金重点项目(KJ2014A034)

* E-mail: ruiqingjia@yahoo.com; ** E-mail: zou_huadong@163.com

1 引言

随着中国经济的飞速发展,新兴产业也在不断地兴起,如集成电路(IC)、印制电路板(PCB)、液晶显示屏(LCD)、球状引脚栅格阵列封装技术(BGA)和光通信等,影响着国民经济的各个层面。对于IC、PCB等产品部件,其常用的检测方法是视觉检测。由于工件的厚度较小,不会产生像与物的一致问题。另外,由于工件表面比较平整,正投影容易观测,所以影像测量仪在相关行业中的应用非常广泛。

采用影像测量设备对工件尺寸或瑕疵进行检测时,通过运动工作台移动待测件(如PCB、LCD和IC等)经过光学影像系统进行快速扫描检测时,丝杠的回程误差、移动的直线度误差等会导致逐步位移或扫描中存在定位误差。经过多步移动,检测点的定位误差必然逐步累积,该累积误差将严重影响系统的检测精度,同时也会影响图像的无缝拼接和其他相关功能的实现。定位误差补偿是提高设备定位精度的重要手段,其设计通常分为三步:第一步,首先通过采样方法进行定位误差数据的采集;第二步,建立误差补偿数学模型,根据测量数据求取相关的系数;第三步,根据确定的数学模型设计软件进行误差补偿。定位误差数据的采集需要借助高精度测量设备,国内外学者已经对其进行了大量研究,测量方法主要有准直法、干涉法、准直干涉法等^[1-3],主要是利用光学检测手段将各自由度误差进行单独或者同时采样测量。Luo等^[4]和Lee等^[5]提出了基于机器视觉的定位误差测量方法,以线纹尺为比对对象,通过图像采集测量的方法,分X、Y两个方向分别测定各个位置的定位误差,并分析了线纹尺刻线宽度对图像测量的影响,提出了寻找线宽中心的图像处理方法,目的是提高测量精度,但未提及如何解决线纹尺摆放位置与机台移动方向的平行性对测量误差的影响。Wu等^[6]提出采用基于机器视觉的模板匹配和改进的归一化互相关算法进行定位误差测量,其优点是能够进行多方向同时测量,且无需单独设计标准样板,但其软件编程的复杂度较高。白宇等^[7]提出了基于多边形拟合的形状匹配与定位算法,通过图像采集获取工件图像,与定位目标进行形状匹配,进而获得模板轮廓到目标轮廓的变换关系,利用该关系进行辅助定位。在定位误差补偿软件的设计方面,张舞杰等^[8]提出采用高等级的光刻玻璃尺作为基准,通过图像测量的方法分段测量,并通过比较光栅尺的读数和刻线读数获取误差,进而进行

分段线性回归补偿,但未提及刻线宽度和摆放位置对测量的影响,目前也未见国内外对于解决该问题的相关文献报道。研究人员对闭环控制的二维工作台的定位误差校正大多是基于激光干涉仪的测量校准软件设计的^[9-11],而且很多都是基于实验室的验证测试,软件的设计和补偿操作相对复杂,工作量大。对于制造企业来说,不仅需要考虑机器的精度,还要考虑批量制造过程的适用性、软件的整体复杂度、测量速度和检测效率等,所以研究高效、快捷的定位误差补偿算法显得尤为重要。

2 影像测量仪定位误差的成因

影像测量仪通常使用定位控制的X-Y移动载物平台加上Z轴的镜头移动控制单元,如图1所示。其机械移动平台与数控机床、三坐标测量机的移动平台结构非常相似,其误差主要由21项误差构成^[9-14]。双轴运动平台是基本模块之一,其目的在于提供定位点的检测。为简化误差的分析,可以单独分析X-Y工作台的定位误差。首先固定Z轴于起始位置,分析X-Y移动平台的定位误差;然后等间隔移动Z轴位置,重复该步骤,完成后可以进行整体空间的综合误差补偿。

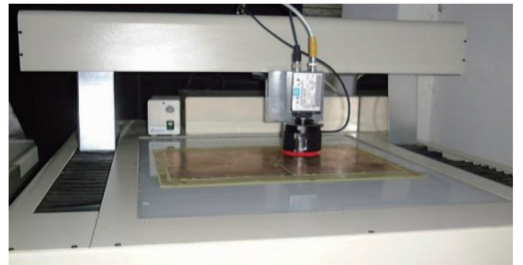


图1 影像测量仪实物图

Fig. 1 Physical photo of vision measuring machine

双轴移动平台的两个线性运动轴通常为丝杠螺母副的传动形式,每个轴由滑块-导轨系统实现直线运动,滑块沿轴向移动,其余5个自由度被限制。但由于存在制造误差,滑座在这5个方向上仍然有微小的位移(线位移和角位移),沿轴向运动时还有定位误差。各轴在独立运动时都会不可避免地存在六自由度误差,即三个线性误差和三个偏角误差,然后加上对Z轴的垂直度误差。在固定Z轴的情况下,X-Y工作台的综合定位误差可以表示为

$$E_x = \delta_x(X) + \delta_x(Y) + \delta_z(Z) - Y\Delta T_{xy} - Z\Delta T_{xz} - YX_z(X) + Z \times [X_y(X) + X_y(Y)] - Y_t \times [X_z(X) + X_z(Y) + X_z(Z)] + Z_t \times [X_y(X) + X_y(Y) + X_y(Z)], \quad (1)$$

$$E_y = \delta_y(X) + \delta_y(Y) + \delta_z(Z) - Z\Delta T_{yx} - \\ Z \times [X_x(X) + X_x(Y)] + X_t \times \\ [X_z(X) + X_z(Y) + X_z(Z)] + \\ Z_t \times [X_y(X) + X_y(Y) + X_y(Z)], \quad (2)$$

式中： $\delta_v(u)$ 为沿 u 轴(X, Y, Z 轴)运动在 v 向的线位移误差， v 可以分别表示为 x, y, z ； $X_v(u)$ 为沿 u 轴(X, Y, Z 轴)运动绕 v 轴的角运动误差， v 可以分别表示为 x, y, z ； X_t, Y_t 和 Z_t 分别为测端在 x, y 和 z 方向的偏移。

常用的移动平台定位误差校正法是用激光测距仪、电子水平仪和自准直仪逐一测量每轴的6种误差，再利用机构分析法推导传递矩阵(HTM)，从而计算出各个运动位置点的综合误差。但该方法需要有精密测量仪器，并且需要设计较为复杂的补偿软件。对于工厂的生产制造而言：一方面，高精度仪器的使用需要有熟练的操作人员，且测试过程对于测试人员的知识层面要求较高；另一方面，补偿软件的操作依赖于测量数据，且较为复杂。综合考虑，该方法既不经济也不便捷。

3 基于线纹尺的误差修正方法及补偿效果测试

影像测量仪作为产品检测的高精度仪器，其运动控制通常采用闭环控制，采用光栅尺作为位移检测的元件，机械系统的结构间隙、结构弹性变形、光栅尺的安装误差、光栅尺热变形造成的测量误差均会影响到机台的整体定位精度。影像仪配备有图像采集系统，而利用图像辅助进行定位误差补偿是一种较为有效的方法^[4,6,15]，因此可以充分利用采集设备配合标准参照物进行定位精度补偿，无需专门设置工装夹具，所以目前大多数厂家通常采用的是线纹尺精密补偿法。线纹尺作为高精度的测量元件，其制造精度高，且线胀系数小。以线纹尺作为比较基准部件对光栅尺读数进行修正，所有移动定位以修正读数为准。由于影像测量仪的图像测量精度是微米级别，当物件的大小超过视野范围时，需要移动工作台来进行测量。为提升整体的测量精度，工作台的定位精度也必须达到微米级别。为对工作台定位误差进行补偿，线纹尺的刻线制造精度和测量不确定度必须要达到微米级才能进行精度校正。图2为日本三丰公司制造的HL-200型二等线纹尺，制造精度为 $1 \mu\text{m}$ ，测量不确定度为 $0.23 \mu\text{m}$ ，最小分隔值为 1 mm ，长度为 200 mm 。该线纹尺被广泛应用于影像测量仪的定位精密补偿。

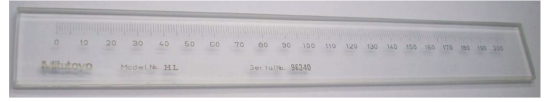


图2 三丰线纹尺外形图

Fig. 2 Mitutoyo line ruler outline drawing

整个补偿过程如下：移动机台回归光栅尺的零位原点，将线纹尺横向放置在影像仪机台的中间位置，图像采集系统获取线纹尺的光学影像，图像中心点刻度线对准标准线纹尺的零刻度线(或其他刻度线)，此位置为标准零位点，此时光栅尺的读数 X_d 和标准线纹尺刻度 X_r 都为0，即记录点对为(0,0)；根据机台的行程范围确定机器的分段区间数目 N 及间隔 L (实际应用时也可以采取非等间隔分段的方法)，以线纹尺为基准，等间隔沿 X 方向移动机台，并记录下光栅尺读数 $X_d[i]$ 和线纹尺的实际读数 $X_r[i]$ ，直到走完机台的 X 方向行程。对于 Y 坐标方向的补偿过程与 X 方向类似。完成上述补偿过程后，将获得的点对($X_d[i], X_r[i]$)和($Y_d[i], Y_r[i]$)全部保存在补偿文档中，供修正定位误差时调用。

对实际误差进行校正时采用的是误差均化法，即认为误差是均匀分布在各个分段区间内的。如果 X 方向光栅尺的实际读数为 $X_{\text{NowPosition}}$ ，进行误差补偿时，先判断其所处的区间，如果 $X_d[i] \leq X_{\text{NowPosition}} < X_d[i+1]$ ，则补偿后的坐标值为

$$X_{\text{comp}} = X_r[i] + \frac{X_{\text{NowPosition}} - X_d[i]}{X_d[i+1] - X_d[i]} \times \\ (X_r[i+1] - X_r[i]). \quad (3)$$

与此相同，对于 Y 方向补偿后的坐标值为

$$Y_{\text{comp}} = Y_r[i] + \frac{Y_{\text{NowPosition}} - Y_d[i]}{Y_d[i+1] - Y_d[i]} \times \\ (Y_r[i+1] - Y_r[i]). \quad (4)$$

为验证该方法的实际补偿效果，用激光干涉仪对影像测量仪VM300进行补偿效果测试，该机器的行程范围为 $300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。分别对 X 方向和 Y 方向进行测试得到各个位置的平均误差。将参考物(反射镜)放置在移动机台上，在对 X 方向定位误差进行测试时，首先固定 Y 轴不动，移动 X 轴回到原点位置，对 X 方向等间隔进给，在每个停顿位置记录光栅尺的读数，同时用激光干涉仪测量其与参考物的距离，将两者进行比对，得出定位误差值；完成后移动 Y 轴，重复前一过程；在多个 Y 方向位置进行 X 向的定位误差测量，将各个位置的定位误差取平均值，并作图； Y 方向的平均定位误差的测量方法与 X 方向类似。图3为无定位误差补偿时

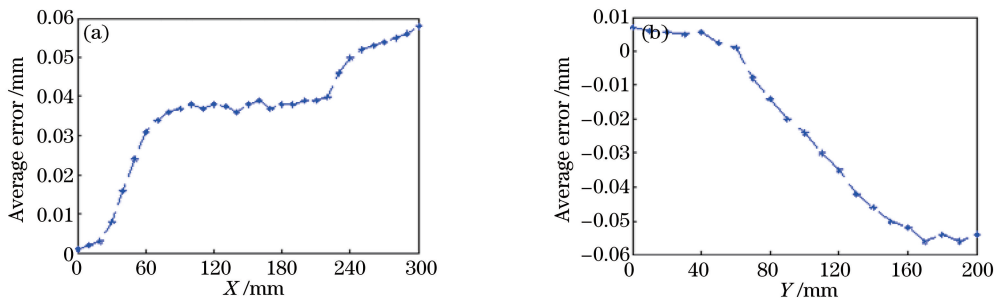


图3 X方向和Y方向的定位误差曲线(无补偿)。(a) X方向;(b) Y方向

Fig. 3 X direction and Y direction positioning error curves(no compensation). (a) X direction; (b) Y direction

机台定位误差的实测曲线图,可以看出,定位误差随着移动量的增加而逐步累积,定位误差在 $60\ \mu\text{m}$ 以内。

运动工作台采用基于线纹尺的定位误差补偿方法进行定位补偿后,按照与前面相同的步骤进行误差测量,得到对应方向上的平均定位误差值,即在每个定位点将光栅尺的实际读数根据(3)~(4)式修正后与激光干涉仪实测数值进行比对得到定位误差,测量结果如图4所示。可以发现,经过补偿后的机台的定位精度在 $\pm 5\ \mu\text{m}$ 左右,优于补偿前的 $60\ \mu\text{m}$

左右的定位误差。结果表明:该方法有效且操作简单,一般情况下可以满足测量的要求,所以在影像测量仪中得到了广泛应用,但对于高精度的定位要求来说,其精确程度有待进一步提高。分析整个校正过程可以发现:造成补偿精度不高的主要成因在于线纹尺的摆放难以与工作台的位移方向完全平行;通过人眼观察 CCD 获取的图像来调整图像中心点与线纹尺刻度对准,因刻线有一定的像素宽度,存在瞄准误差,所以需要找到更好的方法进行精密补偿,以满足高精度测量的需求。

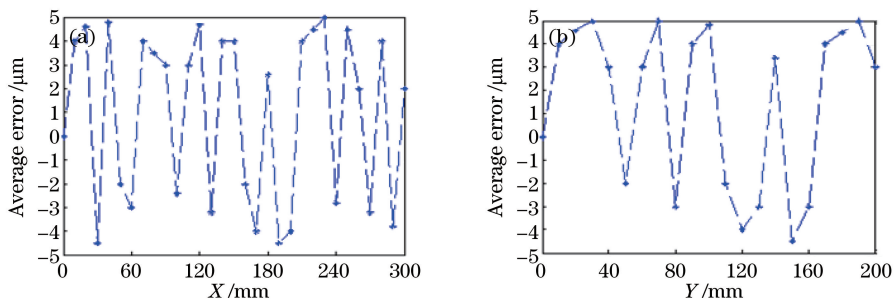


图4 X和Y方向定位误差曲线(线纹尺补偿)。(a) X方向;(b) Y方向

Fig. 4 X direction and Y direction positioning error curves (line ruler compensation). (a) X direction; (b) Y direction

4 基于标准校正样板的定位误差精确补偿算法及测试

根据前述的线纹尺校正方法的基本原理可知,光栅尺的读数和标准位置坐标都可以通过采集获取,其主要的思想是以线纹尺上的刻度作为标准进行位移计量,但存在摆正和瞄准误差,并且选取的误差补偿位置点的数目相对较少。为了克服摆正误差和瞄准误差对补偿结果的影响,设计阵列圆分布的标准模板作为校正标准片,该标准片上分布有 21×21 阵列的分布圆(直径为 $5\ \text{mm}$),中心距为 $15\ \text{mm}$,尺寸制造精度为 $1\ \mu\text{m}$,测量不确定度为 $0.34\ \mu\text{m}$,实物如图5所示。对于该标准件有以下要求:首先,该标准件的阵列实心圆要便于用图像处理的方法提取圆心坐标与标记,目的是减小瞄准误差,圆心点可

以作为移动的标准位置参考点;其次,实心圆要分布均匀,横向圆心连线和纵向圆心连线互相垂直,方便用于摆正参考。

该二维标准精密样板设计的中心思想是以各个阵列圆的中心点作为标准位置参考点,通过 CCD 采

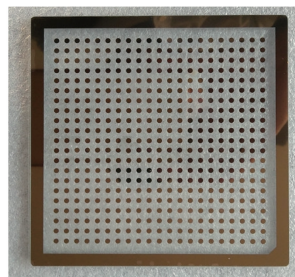


图5 阵列圆误差补偿样板

Fig. 5 Compensation template with array circles

集图像后,使用图像处理的方法提取其中心坐标。具体方法在文献[16-17]中有详细介绍,主要是将采集的图像进行阈值分割、二值化处理、像素标记、区域分割边界精确提取、边界点最小二乘拟合圆等过程处理,处理后提取的中心坐标点能够达到亚像素精度,约为 $0.1 \text{ pixel}^{[16-17]}$ 。标准阵列圆的直径为 5 mm ,镜头的放大倍率为 $0.7 \sim 4.5$,CCD 的像素分辨率为 $768 \text{ pixel} \times 576 \text{ pixel}$ 。进行图像测量而确定圆心位置时,并非放大倍率越高效果越好。通常情况下,只需调整镜头的倍率达到能够采集整个圆即可,采集的范围为 $8 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 时较好,此时图像测量能够达到的精度 $P = 6 \times 1000 / 576 \times 1 / 10 = 1.04 \mu\text{m}$,与补偿的精度要求匹配,且该采集视场范围能够有一定的移动偏差裕量,方便补偿操作。

在进行误差补偿前,需要进行标准件的摆正操作。首先将标准件摆放到影像仪上,观察图像,并确认阵列圆的行圆心连线与 X 运动方向近似平行,列实心圆心连线与 Y 运动方向近似平行。以某一具体实心圆为靶向物,通过移动 X 和 Y 方向的机台使该实心圆中心与图像中心近似重合;然后通过图像测量的方法获取圆心的图像坐标 (u, v) ,CCD 的像素分辨率为 $768 \text{ pixel} \times 576 \text{ pixel}$,所以图像绝对中心的坐标为 $(384, 288)$,因此可以获得图像的坐标差;另外,由于已经获得了圆心坐标,可以立即将其在图像中画出,此时可以清晰地看出图像中心点与圆心点在图像中的距离差,通过人眼比对和中心坐标比对来微调 X 向和 Y 向的电机,可以准确地将图像中心与靶向圆心点的位置对准。

校正样板与机台的位置关系如图 6 所示,完成首个靶向圆中心位置的对准后,机台位于位置 1。

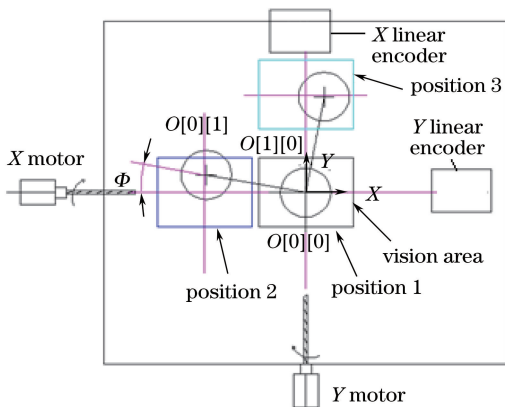


图 6 校正样板与机台的位置关系示意图
Fig. 6 Location relationship diagram of standard template and machine

由于手工放置无法做到绝对平行,此时阵列圆的坐标系 $X'OY'$ 与机台的移动坐标系 XOY 存在一个夹角 Φ 。驱动 X 向电机使机台向右移动 15 mm 到达位置 2,此时视野区域范围看到的即为第二个圆。由于摆放夹角的原因,此时圆的中心与图像中心并不重合,采用同样的图像处理方法获取圆心的图像坐标,并将其标记下来,记录下其 X - Y 方向的偏差量,并转动标准样板,使得图像中心与第二个圆的圆心基本重合;然后驱动机台重新回到位置 1,完成后,驱动 Y 向电机移动 15 mm ,此时到达位置 3;后续处理同上一步骤。完成后再次按照前述的方法进行测试,直到两个坐标系平行。

完成标准的摆正操作后,进行补偿点对的采集工作。沿 X 方向移动机台位置,使图像中心和左上角第一个圆的圆心近似重合,然后通过图像处理方法获取该圆的中心图像坐标值,通过坐标比对,移动调整机台位置,使图像中心和圆心的图像坐标误差在 0.5 pixel 范围内,此时记录光栅尺的坐标值 $(X_a[0][0], Y_a[0][0])$,并设定此时的坐标值 $(X_r[0][0], Y_r[0][0])$ 与光栅尺的坐标值相等,光栅尺此时位于坐标原点。沿 X 方向移动机台到第二个圆心位置并对正,记录光栅尺的坐标值 $(X_a[0][0], Y_a[0][0])$,此时实际坐标定为 $(X_r[0][0] + 15, Y_r[0][0])$, X 方向位移完毕后进行 Y 方向采集,直至扫描完全部的行程,获取的点族群为 $(X_a[0][0], Y_a[0][0])$ 和 $(X_r[0][0] + 15i, Y_r[0][0] + 15j)$ 。采集完成后可以获得 20×13 个位置的坐标点对,如图 7 所示。

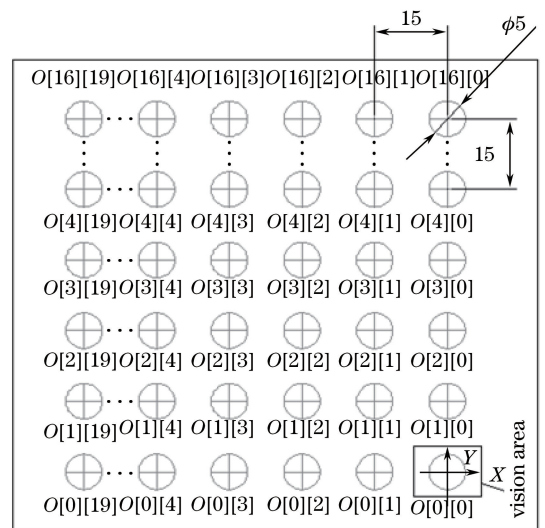


图 7 补偿标准样板取点示意图
Fig. 7 Schematic of circle center point acquisition with compensation standard template

由前面的分析可知,移动平台上定位点的误差具有 X 和 Y 两个分量,所以假设 $\delta_x(x, y)$ 、 $\delta_y(x, y)$ 为其中两个方向的误差,由阿贝原理可知此误差量与其位置坐标有关,所以可以将误差的大小与其位置坐标的对应关系采用多项式拟合的方法进行表示。误差补偿的多项式为

$$\delta_x(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-j} A_{ij} x^i y^j, \quad (5)$$

$$\delta_y(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-j} B_{ij} x^i y^j, \quad (6)$$

式中: x 、 y 为通过光栅尺获取的位置坐标 X_d 和 Y_d ; n 为多项式拟合的阶次。

由于每个标准位置的点对 $(X_d[i], X_r[i])$ 和 $(Y_d[i], Y_r[i])$ 通过依次采集获取,所以每个标准位置的定位偏差为 $\delta_{xi}(x, y) = X_r[i] - X_d[i]$ 、 $\delta_{yi}(x, y) = Y_r[i] - Y_d[i]$ 。所有数据用于计算多项式的系数 A_{ij} 和 B_{ij} 。以拟合阶数 3 为例,由(5)~(6)式可得到:

$$\begin{aligned} \delta_x(x, y) = & A_{00} + A_{01}y + A_{02}y^2 + A_{03}y^3 + \\ & A_{10}x + A_{11}xy + A_{12}xy^2 + \\ & A_{20}x^2 + A_{21}x^2y + A_{30}x^3, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \delta_y(x, y) = & B_{00} + B_{01}y + B_{02}y^2 + \\ & B_{03}y^3 + B_{10}x + B_{11}xy + B_{12}xy^2 + \\ & B_{20}x^2 + B_{21}x^2y + B_{30}x^3. \end{aligned} \quad (8)$$

(5)式可以表述为矩阵形式,即:

$$\begin{bmatrix} 1 & y_{00} & y_{00}^2 & y_{00}^3 & x_{00} & x_{00}y_{00} & x_{00}y_{00}^2 & x_{00}^2 & x_{00}^2y_{00} & x_{00}^3 \\ 1 & y_{01} & y_{01}^2 & y_{01}^3 & x_{01} & x_{01}y_{01} & x_{01}y_{01}^2 & x_{01}^2 & x_{01}^2y_{01} & x_{01}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & y_{ij} & y_{ij}^2 & y_{ij}^3 & x_{ij} & x_{ij}y_{ij} & x_{ij}y_{ij}^2 & x_{ij}^2 & x_{ij}^2y_{ij} & x_{ij}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{00} \\ A_{01} \\ A_{02} \\ A_{03} \\ A_{10} \\ A_{11} \\ A_{12} \\ A_{20} \\ A_{21} \\ A_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta(x_{00}, y_{00}) \\ \delta(x_{01}, y_{01}) \\ \vdots \\ \delta(x_{ij}, y_{ij}) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

矩阵可以表示为 $\mathbf{C} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{b}$ 。当 $R(\mathbf{C}) = 10$ 时,系数矩阵 \mathbf{A} 的最小范数解为 $\mathbf{A} = \mathbf{C}^T (\mathbf{C}\mathbf{C}^T)^{-1} \mathbf{b}$ 。求取系数 B_{ij} 的方法与 A_{ij} 的方法一致。校正完成后存储系数于校正文档中,各个实时位置的定位误差大小可以由(5)~(6)式求取,并用于误差补偿。经过补偿后机台的坐标值为 $X = X_d + \delta_x(x, y)$ 、 $Y = Y_d + \delta_y(x, y)$,其中 x 、 y 为当前光栅尺的读数 X_d 和 Y_d 。

该方法极大地消除了人眼的瞄准误差,同时也保证了 X - Y 两个方向平移的精确性,且操作较为简单。采用该补偿方法在影像测量仪 VMS300 上进行了补偿效果测试,曲线拟合的阶次为 3,测试结果如图 8 所示。由图 8 可以看出:经过补偿后机台的定位误差在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 以内,优于线纹尺直接补偿的精度;而采用激光干涉仪、自准直仪测量传统的 21 项误差后再进行软件补偿的方法,在测量结果精

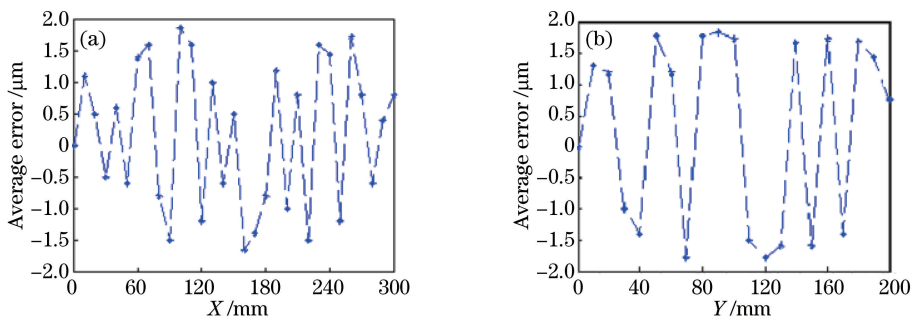


图 8 X 方向和 Y 方向的定位误差曲线(多项式拟合误差补偿法)。(a) X 方向;(b) Y 方向

Fig. 8 X direction and Y direction positioning error curves (polynomial fitting error compensation method).

(a) X direction; (b) Y direction

确的情况下,精度可达到 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 。两种方法相比,补偿精度相当,但所提方法大大降低了人工测量的工作量、对工人技术水平的要求和软件的复杂度。所提方法只是校正了机台 Z 方向一个位置的补偿系数,为达到更精准的测量效果,可以等间隔对多个位置进行补偿。但是,由于 Z 方向通常用机械校准的方法来校准其形位误差,所以一般进行单一位置补偿系数操作即可。结果表明,该方法有效且容易操作,简单培训技术服务人员即可操作使用。

5 结 论

精密定位误差补偿方法是在分析机台误差成因的基础上,简化误差模型,抓住误差形成的主因,并充分利用影像仪的成像优势和图像处理技术而形成的一种精密补偿方法。通过比较可以发现,本研究提出的误差补偿技术具有以下优点:误差补偿公式比较简单,可以方便地加入到移动平台的控制中;可以充分利用影像测量仪的成像优势,数据测量简单便捷,只需要提供通过移动平台获取的相关数据便可分析出误差补偿参数,补偿后可大大提升精度,精度可以达到影像分辨率或光栅尺分辨率的上限;误差回归多项式为多项式乘积,计算量较小;克服了线纹尺补偿过程产生的瞄准误差和读数误差,提高了误差补偿精度。

采用该方法在影像测量仪上进行了相关测试,并获得了良好的效果。由于所提方法的高效性和简便性,可以将其推广到相应的精密影像检测装备、中小型移动平台和中小型数控机床上。但该方法存在的缺点是大量高精度标准件的加工比较困难,价格较为昂贵,并且在移动机台行程过大的情况下,采集数据点较多,操作也变得复杂,所以该方法难以应用于大型龙门机台设备的综合定位误差补偿中。

参 考 文 献

- [1] 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.
杨婧, 冯其波. 数控机床空间几何误差测量研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1901-1911.
- [2] Ying J, Li M. Errors measurement for rotation axis of five-axis machine tool based on laser tracker[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0408005.
殷建, 李明. 基于激光跟踪仪的五轴机床旋转轴误差测量[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0408005.
- [3] Toru F, Kayoko T, Chris E, *et al.* A study on error compensation on high precision machine tool system using a 2D laser holographic scale system[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2012, 6(6): 999-1014.
- [4] Luo P F, Pan S P, Chu T C. Application of computer vision and laser interferometer to the inspection of line scale [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 42(5): 563-584.
- [5] Lee C B, Lee S K. Multi-degree-of-freedom motion error measurement in an ultra-precision machine using laser encoder—review [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2013, 27(1): 141-152.
- [6] Wu H, Zhang X M, Gan J Q, *et al.* High-precision displacement measurement method for three degrees of freedom-compliant mechanisms based on computer micro-vision[J]. Applied Optics, 2016, 55(10): 2594-2600.
- [7] Bai Y, Zhang L C, Shi Y S, *et al.* Study of shape matching and localization algorithm based on polygon fitting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 041501.
白宇, 张李超, 史玉升, 等. 基于多边形拟合的形状匹配与定位算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 041501.
- [8] Zhang W J, Yang Y L, Li D, *et al.* Key algorithms of automatic image measurement system[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(2): 294-301.
张舞杰, 杨义禄, 李迪, 等. 自动影像测量系统关键算法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 294-301.
- [9] Tan B N, Tang C C, Bao C X. Verifying key techniques in error compensation for coordinate measurement machine [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2017, 53(5): 1-4.
谭本能, 唐纯纯, 鲍晨兴. 三坐标测量机几何误差补偿关键技术验证[J]. 航空精密制造技术, 2017, 53(5): 1-4.
- [10] Guo Y X, Ye W H, Liang R J, *et al.* Error compensation technology of intelligent machine tool [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 18: 40-45.
郭云霞, 叶文华, 梁睿君, 等. 智能机床的误差补偿技术[J]. 航空制造技术, 2016, 18: 40-45.
- [11] Eskandari S, Arezoo B, Abdullah A. Positional, geometrical, and thermal errors compensation by tool path modification using three methods of regression, neural networks, and fuzzy logic [J]. The

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 65(9): 1635-1649.
- [12] Xia R X, Chen X H, Lu R S, *et al.* Research on error detection methods for a novel nano-CMM[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(3): 250-256.
夏瑞雪, 陈晓怀, 卢荣胜, 等. 新型纳米三坐标测量机误差检定方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(3): 250-256.
- [13] Wang C C, Fei Y T, Shang P. Study on error separation and compensation for cantilever CMM[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(5): 413-418.
王晨晨, 费业泰, 尚平. 悬臂式坐标测量机误差分离与补偿的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(5): 413-418..
- [14] Zhang G X. Coordinate measuring machine [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999: 20-25.
张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999: 20-25.
- [15] Li Y F, An Z Y, Wang J S, *et al.* Measuring system of infrared sight zero variable quantity based on machine vision [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1112003.
李延风, 安志勇, 王劲松, 等. 基于机器视觉的红外瞄具零位走动量检测系统[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1112003.
- [16] Zou H D, Zhu L R, Tang M. Development of precise vision measuring system for large O-rings[J]. Tool Engineering, 2009, 43(6): 123-126.
邹华东, 祝良荣, 唐鸣. 大尺寸油浸密封圈精密图像检测系统的研制[J]. 工具技术, 2009, 43(6): 123-126.
- [17] 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.
邹华东, 祝良荣, 陶文勇. 影像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.