

文章编号 1004-924X(2011)03-0573-07

# 对准系统中调焦机构机械摆动引入误差的补偿

王权岱<sup>1,2</sup>, 李言<sup>1</sup>, 肖继明<sup>1</sup>

- (1. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;  
2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:**为了消减压印对准系统焦平面调整过程中由于机构机械不稳定性产生的对准误差, 提出了拟合调整架摆动轨迹来进行软件补偿的方法。通过亚像素模板匹配算法对调焦过程中标记图像的坐标进行定位运算并分析了算法的有效性, 结果说明该算法的理论误差 $<0.1 \mu\text{m}$ 。采用该算法计算随调整架摆动的标记坐标, 对调整架的摆动轨迹进行了实验标定。分别考察调整架上升和下降时的摆动特性, 结果显示, 实验具有较好的重复性。以此为基础, 建立了调整架的摆动轨迹模型及误差补偿方法, 并对模型的预测补偿精度进行了实验研究。结果表明, 通过预测调整架摆动轨迹并进行补偿, 调焦系统机械不稳定性误差从 $2.84 \mu\text{m}$ 减小到 $1.29 \mu\text{m}$ , 可以满足 $2 \mu\text{m}$ 的总体对准精度要求。

**关键词:**对准系统; 调焦机构; 机械摆动; 对准误差; 补偿; 亚像素模板匹配

**中图分类号:** TN305.7; TH741.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111903.0573

## Calibration of error due to mechanical swing of focusing setup in alignment system

WANG Quan-dai<sup>1,2</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, XIAO Ji-ming<sup>1</sup>

- (1. School of Mechanical Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** An improved method to fit the side wobble trace of a positioning setup to compensate the software was proposed to reduce the error from the mechanical swing of the focusing setup during focus plane adjustment. The alignment mark was positioned through the sub-pixel correlation template matching algorithm and the validity of the algorithm was investigated, which shows that the resolution of the algorithm is better than  $0.1 \mu\text{m}$ . The positioning algorithm mentioned above was used to calculate the coordinates of the test mark while it moved up and down along with the focusing positioning setup and then the waving trace was characterized. Experimental results indicate that the mechanical swing trace can offer a good reproducibility, if the ascending and descending of the focusing setup are considered, respectively. Based on the experimental results, the model for the swing trace fitting was established and an error correction method was presented. Finally, experiments were performed to test the calibration accuracy of the model. Obtained results demonstrate that the error from the mechanical instability has been reduced to  $1.29 \mu\text{m}$  from  $2.84 \mu\text{m}$ , which can meet the

收稿日期: 2010-05-30; 修订日期: 2010-07-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50975225); 中国博士后科学基金资助项目(No. 20100471614); 西安理工大学博士科研启动基金资助项目(No. 102-211003)

overall alignment requirement of  $2\ \mu\text{m}$ .

**Key words:** alignment system; focusing setup; mechanical swing; aligning error; compensation; sub-pixel template matching

## 1 引言

压印光刻<sup>[1]</sup>作为下一代微细图形化备选工艺,必须具备多层套印能力。套刻精度是光刻机最重要的性能指标,它决定了分层压印制造所能达到的最小特征尺寸,也是任何类型的光刻机重点研究的内容<sup>[2-4]</sup>。虽然基于不同图形化原理和对准方式的光刻机提高其套印精度所面临的具体问题不同,但对准子系统中的误差是决定总体套刻精度的主要部分<sup>[5]</sup>。影响对准精度的因素包括标记图像成像子系统(包括镜头、CCD 以及图像处理算法)、聚焦精度和重复性、机构机械性能、驱动分辨精度等。本课题组为微器件分层压印制造研究需要,开发了一套基于计算机显微视觉原理的对准系统,并已经对其中标记图像几何畸变校正、离焦误差进行了研究<sup>[6-7]</sup>。

由于压印模板标记和基材标记不在同一焦平面,对准过程中为了对模板标记和基材标记进行采集,需要通过调整架对镜头焦平面进行调整,但调焦过程中调整架  $Z$  轴的随机偏摆会引入对准误差。光程补偿虽然可以同时采集不同平面标记信号,避免焦平面的重新调整过程,然而由于用于微结构分层压印成形的对准系统具有大间距、变间隙的特点,该方法很难解决物镜景深不足的问题<sup>[8]</sup>。提高调焦机构硬件性能是提高精度最为有效和可靠的途径,但它是以增加成本为代价的。通过研究误差产生机理,采用合理的误差补偿算法,也可以达到较好的效果,并且算法可以不断改进而不需要改变系统的结构。本文提出用亚像素定位算法跟踪调焦过程中随调整架摆动的标记位置变化,以此为基础建立了调整架的摆动轨迹模型及误差补偿方法,并对摆动轨迹模型的预测补偿精度进行了实验研究。

## 2 摆动轨迹测量的方法及原理

### 2.1 测量方法

对准系统如图 1 所示,CCD-光学镜头组在调整架上可以做  $X$ - $Y$ - $Z$  方向的调整,用于调整 CCD 视场和调焦。工作台具有  $X$ - $Y$ - $\theta$  三自由度,用于驱动基材实现对准。压印头具有  $Z$  向自由度,用于对准后压印驱动。工作台采用宏微两级驱动,宏驱动采用直线电机驱动,微驱动采用压电陶瓷驱动,总体对准精度要求为  $2\ \mu\text{m}$ 。

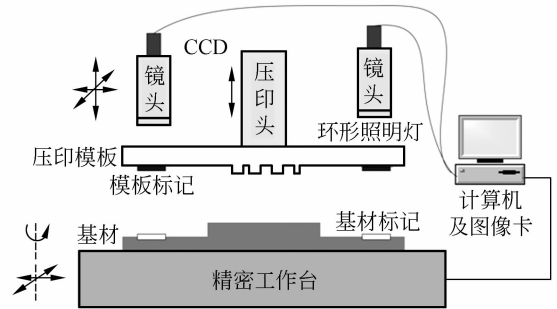


图 1 对准系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of alignment system

为了研究调整架的摆动规律,对调整架的摆动轨迹进行了测量。将带有定位标记的测试件固定在压印头上,以一定的步距随压印轴上下移动,每移动一步并调焦后,计算定位点的坐标,就可以得到调整架调焦过程中的摆动轨迹。

### 2.2 定位算法原理

标记定位算法的精度直接影响后续模型及补偿效果和精度。调焦调整架摆动误差在微米级,定位算法精度至少应该比其高一个数量级。目前数字图像的像素尺寸在微米级,因此需要通过一定的算法处理得到亚像素的定位精度。亚像素算法包括形心法、拟合法及相关算子法等<sup>[9-11]</sup>,其中相关算子法是取一定尺寸的运算窗口,抗噪声能力强,适应性强,但是计算量大。由于是实验标定,对算法速度要求不是很高,所以可采用亚像素相关模板匹配算法进行定位运算,亚像素步长标准化协方差相关算法的相关系数计算公式如下:

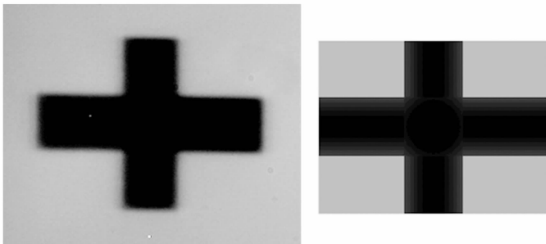
$$c(x + m dx, y + dy) = \frac{\sum_{(i,j) \in W} [f(x + i + m dx, y + j + ndy) - f_m][g(i, j) - g_m]}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in W} [f(x + i + m dx, y + j + ndy) - f_m]^2 \sum_{(i,j) \in W} [g(i, j) - g_m]^2}}, \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 为标记所在的源图像; $g(i, j)$ 为模板; $f_m, g_m$ 为源图像和模板的灰度均值; $W$ 为模板区域; $dx, dy$ 为 $x$ 和 $y$ 方向上的步长; $m, n$ 为整数。

非整数像素点上的灰度值采用双线性插值法得到。

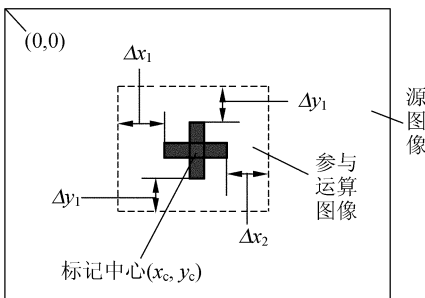
### 2.3 算法有效性分析

为了研究算法的有效性,分析了不同步长下模板在源图像中的位置对相关系数的敏感性及其匹配定位的准确性,分析的方法及结果如图 2 所示。其中源图像是实际采集的对准标记图像,匹配模板是根据对准标记图像的特征制作的仿真模板。为了达到局部放大效果,仅采用源图像的一部分进行亚像素相关匹配运算,拷贝图像的大小及在源图像中的位置如图 2(b)所示。图 2(c)~2(e)为不同步长时模板在图像中的位置与相关系数的关系图。由参与匹配运算的图像在源图像中的位置可以得到两个坐标系的换算关系,再根据步长



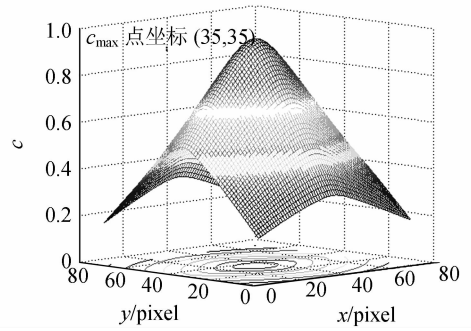
(a) 源图像和仿真模板尺寸(像素)

(a) Sizes of source image and numerical template (pixels)



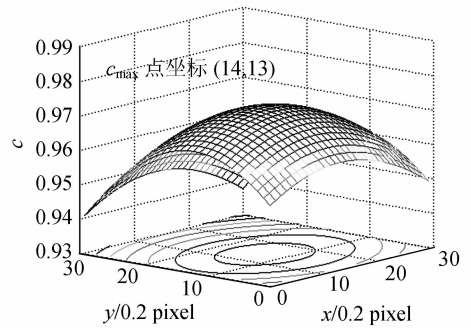
(b) 从源图像中拷贝出部分图像用于匹配运算

(b) Partial image copied from source image used for matching calculation



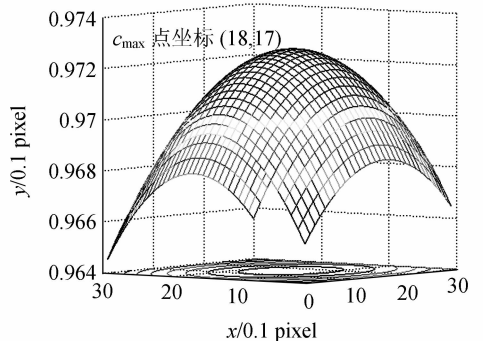
(c) 模板在图像中的位置与相关系数的关系, 整像素,  $\Delta x_1 = 35, \Delta x_2 = 35, \Delta y_1 = 35, \Delta y_2 = 35$

(c) Relationship between correlation coefficients and template position in 1 pixel and  $\Delta x_1 = 35, \Delta x_2 = 35, \Delta y_1 = 35, \Delta y_2 = 35$



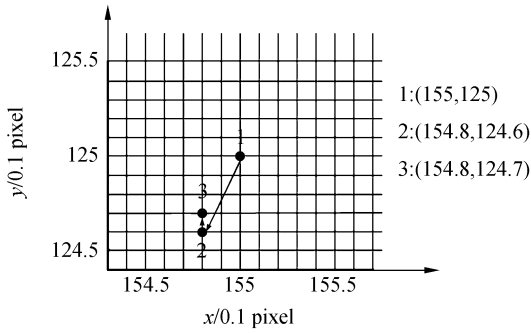
(d) 模板在图像中的位置与相关系数的关系, 0.2 像素,  $\Delta x_1 = 3, \Delta x_2 = 3, \Delta y_1 = 3, \Delta y_2 = 3$

(d) Relationship between correlation coefficients and template position in 0.2 pixel and  $\Delta x_1 = 3, \Delta x_2 = 3, \Delta y_1 = 3, \Delta y_2 = 3$



(e) 模板在图像中的位置与相关系数的关系, 0.1 像素,  $\Delta x_1 = 2, \Delta x_2 = 1, \Delta y_1 = 2, \Delta y_2 = 1$

(e) Relationship between correlation coefficients and template position in 0.1 pixel and  $\Delta x_1 = 2, \Delta x_2 = 1, \Delta y_1 = 2, \Delta y_2 = 1$



(f) 步长减小过程中最佳匹配点的变化过程

(f) Change course of first-rank matching point while step reducing

图 2 亚像素定位算法有效性分析

Fig. 2 Validity analysis of sub-pixel positioning algorithm

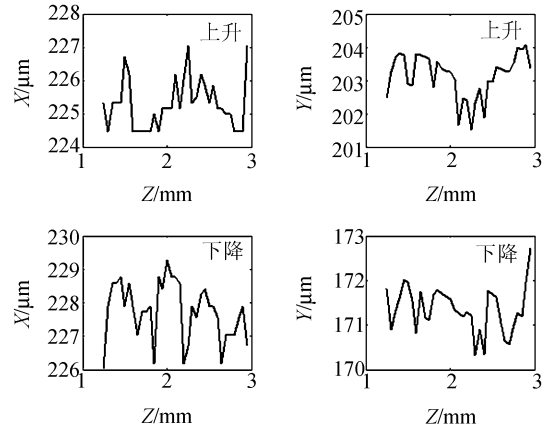
就可以计算出不同步长时最佳匹配位置对应应在源图像坐标系中的坐标,得到步长从 1 个像素减小到 0.1 个像素时最佳匹配位置变化的过程,如图 2 (f) 所示。从图中可以看出,模板在逼近或偏离最佳匹配位置时相关系数单调递增或递减,对 0.1 个像素的位移也能做出准确的反应,而且在步长减小过程中,没有出现最佳匹配点左右震荡的现象,由此可以说明算法的有效性。

任何插值处理只能是对实际图像灰度分布规律不同程度的近似,再加上图像中噪声的影响,当步长小到一定程度后,得到的精度是没有意义的。综合考虑系统对算法精度的要求和运算效率,取步长为 0.1 个像素。由于所采用 CCD 像元尺寸为  $8.6 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$ ,并且成像前通过物镜进行了 10 倍放大,所以整像素分辨精度为  $0.86 \mu\text{m}$ ,亚像素算法理论分辨精度为  $0.1 \times 0.86 \mu\text{m} = 0.086 \mu\text{m}$ 。

### 3 调整架摆动引入误差的分析

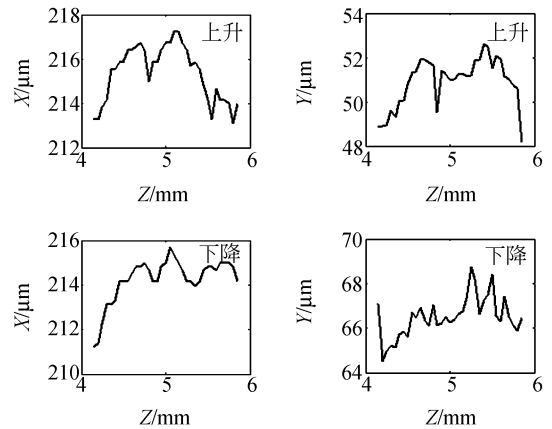
采用 2.1 所述的方法对焦平面调整过程中的径向摆动进行了实验研究。以  $50 \mu\text{m}$  的步距随压印轴上下移动,上升下降均为 35 步,每移动一步并调焦后,计算特定点的坐标,研究调焦过程中产生的误差。图 3 为调焦时的标定结果,调焦时标记坐标漂移的统计数据见表 1。实验结果表明,调焦过程中坐标最大漂移范围为  $4.47 \mu\text{m}$ , $3\sigma$  值为  $3.77 \mu\text{m}$ ,距  $2 \mu\text{m}$  的总体套印精度来说还有

较大差距,故需要进行校正以消减该误差。



(a) 左调整架

(a) Left focusing positioning setup



(b) 右调整架

(b) Right focusing positioning setup

图 3 调焦时标记坐标漂移曲线

Fig. 3 Mark coordinate excursion curves during focusing

表 1 调焦过程中标记坐标漂移统计数据

Tab. 1 Statistical data of mark coordinate excursion curves during focusing ( $\mu\text{m}$ )

	左调整架				右调整架			
	X 坐标漂移		Y 坐标漂移		X 坐标漂移		Y 坐标漂移	
	范围	$3\sigma$	范围	$3\sigma$	范围	$3\sigma$	范围	$3\sigma$
上升	2.58	2.24	2.54	1.96	4.13	3.77	4.47	3.34
下降	3.27	2.59	2.40	1.52	4.25	2.74	4.47	3.02

### 4 摆动轨迹拟合及其引入误差补偿

#### 4.1 调焦摆动重复性实验分析

从调整架上升和下降摆动曲线对比可以看

出,调整架上升和下降处于同样的位置时,摆动方向和幅度并不完全一致,并在某些位置有较大的偏差。分别考察多次实验结果中上升和下降的摆动轨迹曲线,在摆动曲线中各取3个位置(分别用I,II,III来标示),计算这些位置标记X,Y坐标的标准差,考察多次实验中标记坐标的分散程度,6

次实验结果的统计数据见表2。可以看出调整架处于同一位置时,多次实验的标准差不大于0.41  $\mu\text{m}$ ,说明分别考察上升和下降时,摆动轨迹具有较好的重复性。调整架摆动特性较好的重复性,为拟合摆动轨迹从而预测调整架在纵向调整过程中的横向偏移,进而对其进行补偿提供了可能。

表2 标记摆动重复性实验统计数据

Tab.2 Statistical data of mark fluctuation in repetitious experiments

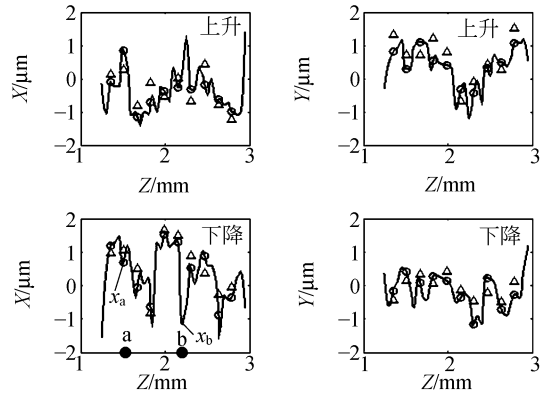
( $\mu\text{m}$ )

	左调整架						右调整架					
	$\sigma_x$			$\sigma_y$			$\sigma_x$			$\sigma_y$		
	I	II	III	I	I	II	III	I	I	II	III	I
上升	0.24	0.26	0.41	0.21	0.29	0.18	0.26	0.35	0.26	0.37	0.21	0.32
下降	0.24	0.29	0.23	0.30	0.27	0.28	0.20	0.20	0.25	0.27	0.30	0.15

4.2 偏摆轨迹模型及其补偿原理

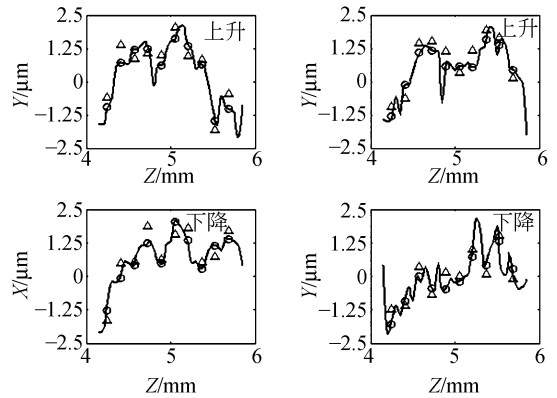
摆动轨迹模型建立方法:(1)选择调整架摆动重复性较好的Z方向导轨段为对准调焦工作段。(2)用2.1节所述的实验方法在调整架的对准调焦工作段对左右调整架上升和下降的摆动特性分别进行实验标定,为了达到足够的精度,移动步距应该足够小;10 $\times$ 镜头的景深约为15  $\mu\text{m}$ <sup>[12]</sup>,由于步距小于该值时,不必对实验结果进行插值处理,从而提高预测精度,所以论文中取步长为10  $\mu\text{m}$ 。(3)重复实验6次,用各个点的平均值绘制曲线作为摆动轨迹曲线,拟合结果如图4中的曲线所示。

得到摆动轨迹模型后,就可以对调焦过程引入的对准误差进行补偿,具体补偿原理如下(以对左标记X坐标补偿为例进行说明):假设对准过程中模板标记平面在位置a,基材标记平面在位置b,如图4(a)所示。根据对准过程,首先将焦平面调整到模板标记所在平面,即位置a,采集模板标记存储,然后调整焦平面至基材标记所在平面,即位置b,采集基材标记。在从位置a到位置b的调整过程中,CCD随调整架产生了偏移,即图像坐标系发生了变化,这样存储在计算机中的模板标记坐标与其实际位置产生了误差,需要进行补偿。从a到b位置X坐标增量为 $\Delta ab = X_b - X_a$ ,所以补偿后模板标记坐标应为 $X_a + \Delta ab$ ,而 $\Delta ab$ 可以由模板标记平面位置 $Z_a$ 和基材标记平面位置 $Z_b$ ,根据摆动轨迹曲线得到,补偿的具体实现过程是一个查表过程。



(a)左调整架

(a) Left focusing positioning setup



(b)右调整架

(b) Left focusing positioning setup

$\Delta$ : 预测值  $\circ$ : 实测值 - : 摆动轨迹拟合曲线  
 $\Delta$ : Predicted values  $\circ$ : Measured values - : Fitted fluctuation curves

图4 摆动轨迹拟合曲线及其预测精度

Fig.4 Fitted fluctuation curves and prediction accuracy

### 4.3 预测补偿精度实验研究

预测补偿精度的实验过程为:调整架沿 Z 向移动,移动过程中记录视场中特定标记坐标的变化。实验中,左右调整架上下移动时各取 10 个测试点,记录标记实际坐标及对应的 Z 向位置。同时,由标记起始坐标及 Z 向位置变化,根据调整架摆动轨迹曲线可以得到标记的预测坐标。对比实际坐标和预测坐标可以得到摆动轨迹模型的预测补偿精度。

在图 4 上直观表示出了各个测试点处坐标预测在摆动轨迹曲线上的位置及其对应实测值。表 3 为分析统计数据, $\Delta X$ , $\Delta Y$  为坐标预测值与实际值之间的差。

由表 3 的统计数据对照表 1 中校正前的数据可以看出,通过校正可以有效减小调整架摆动引入的误差。基材/模板标记偏差的运算过程要对左右标记坐标进行平均计算,所以对对准精度影响的角度分析,经过拟合模型校正后调整架引入的误差如下:下降时,X 方向误差为  $(1.21 \mu\text{m} + 1.35 \mu\text{m})/2 = 1.28 \mu\text{m}$ ,Y 方向误差为  $(1.17 \mu\text{m} + 1.22 \mu\text{m})/2 = 1.2 \mu\text{m}$ ;上升时,X 方向误差为  $(1.28 \mu\text{m} + 1.33 \mu\text{m})/2 = 1.31 \mu\text{m}$ ,Y 方向误差为  $(1.33 \mu\text{m} + 1.35 \mu\text{m})/2 = 1.34 \mu\text{m}$ ;上下反复调整时,X 方向误差为  $1.29 \mu\text{m}$ ;Y 方向误差为  $1.27 \mu\text{m}$ 。

表 3 预测精度分析实验统计数据

Tab. 3 Statistical datum of prediction accuracy test

( $\mu\text{m}$ )

	左调整架						右调整架					
	$\overline{\Delta X}$	$\sigma_{\Delta X}$	$\overline{\Delta X} + 3\sigma_{\Delta X}$	$\overline{\Delta Y}$	$\sigma_{\Delta Y}$	$\overline{\Delta Y} + 3\sigma_{\Delta Y}$	$\overline{\Delta X}$	$\sigma_{\Delta X}$	$\overline{\Delta X} + 3\sigma_{\Delta X}$	$\overline{\Delta Y}$	$\sigma_{\Delta Y}$	$\overline{\Delta Y} + 3\sigma_{\Delta Y}$
上升	0.05	0.41	1.28	0.19	0.38	1.33	0.13	0.4	1.33	0.18	0.39	1.35
下降	0.16	0.35	1.21	0.09	0.36	1.17	0.12	0.41	1.35	0.11	0.37	1.22

## 5 结 论

本文针对焦平面调整过程中由于机构机械不稳定性而产生的对准误差,提出了通过拟合标记摆动轨迹进行软件补偿的方法。对提高拟合补偿精度的核心问题-标记坐标的测定方法进行了研究,分析了所采用的亚像素模板匹配算法的有效

性和精度,表明该算法的理论分辨精度优于  $0.1 \mu\text{m}$ ;通过亚像素模板匹配算法对调整架摆动轨迹进行了测量,建立了调焦摆动轨迹的预测模型和引入误差的校正方法;对本文方法预测补偿的精度进行了实验研究,结果表明,通过补偿,调焦系统机械不稳定性误差从  $2.84 \mu\text{m}$  减小到  $1.29 \mu\text{m}$ ,可以满足  $2 \mu\text{m}$  的总体对准精度要求。

### 参考文献:

[1] KRAUSS P R, RENSTROM P J. Imprint lithography with 25-nanometer resolution [J]. *Science*, 1996, 272: 85-87.

[2] ZHENG L, ENGELSTAD R L, LOVELL E G. Investigation of overlay errors due to the interaction of optical and extreme ultraviolet mask fabrication processes [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 2005, 23(6): 3043-3046.

[3] CHOI J, NORDQUIST K, CHERALA A, et al.. Distortion and overlay performance of UV step and repeat imprint lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2005, 79-79: 633-640.

[4] CHEN A C, FLAMHOLZ A L, RIPPSTEIN R. Overlay performance of 180 nm ground rule generation X-ray lithography aligner [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 1997, 15(6): 2476-2482.

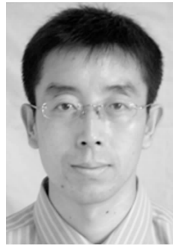
[5] SIMON K, VLADIMIRSKY O, VLADIMIRSKY Y, et al.. Overlay budget analysis for the 100 nm device generation [J]. *Microelectronic Engineering*, 1999, 46: 457-460.

[6] 王权岱, 段玉岗, 丁玉成, 等. 压印对正系统中标记图像几何畸变的校正 [J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(3): 422-427.

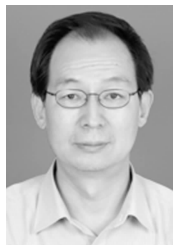
WANG Q D, DUAN Y G, DING Y CH, et al.. Mark image geometric distortion calibration in alignment system for multilevel imprint lithography [J].

- Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 422-427. (in Chinese)
- [7] WANG Q D, DUAN Y G, DING Y CH, *et al.*. Implementation of autofocus in alignment system for layered imprint fabrication [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2009, 15(4): 294-299.
- [8] 王权岱. 微结构分层压印成形关键工艺研究[D]. 西安:西安交通大学, 2009.  
WANG Q D. *Research on key techniques in layered microstructure fabrication process based on multi-level imprint lithography* [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [9] 王海涌, 贾峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7): 1672-1677.  
WANG H Y, FEI ZH H, WANG X L. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on gaussian distribution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1672-1677. (in Chinese)
- [10] 张之敬, 杜芳, 金鑫, 等. 微小尺寸零件复杂边缘识别算法[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 356-361.  
ZH ZH J, DU F, JIN X, *et al.*. Complex edge recognition algorithm of micro-accessory [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 356-361. (in Chinese)
- [11] 孙明磊, 宗光华, 毕树生, 等. 标准互相关特性及其应用[J]. *光子学报*, 2009, 38(2): 435-440.  
SUN M L, ZONG G H, BI SH SH, *et al.*. Characteristics of independence on image gray level in pattern matching algorithm and its application [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(2): 435-440. (in Chinese)
- [12] BRUBAKER C, WIEDER B, LINDNER P. Thick resist alignment technology for MEMS and advanced packaging [J]. *SPIE*, 2003, 5037: 1059-1065.

#### 作者简介:



王权岱(1969—),男,山西乡宁人,博士,讲师,主要从事微纳米制造装备及工艺方面的研究。E-mail: quandaiw@163.com



李言(1960—),男,陕西彬县人,教授,博士生导师,西安理工大学机械与精密仪器工程学院院长,主要从事机电测控技术、先进制造技术及精密加工技术方面的研究。E-mail: ly@xaut.edu.cn



肖继明(1960—),男,陕西合阳人,教授,硕士生导师,主要从事制造过程状态监控技术、先进制造技术及振动切削及深孔加工技术方面的研究。E-mail: xjm@xaut.edu.cn