

文章编号 1004-924X(2007)03-0422-06

# 压印对正系统中标记图像几何畸变的校正

王权岱, 段玉岗, 丁玉成, 关宏武, 卢秉恒

(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:** 在综合分析了多种线性及非线性畸变后, 建立了三次多项式图像系统畸变模型。采用基于控制点偏差目标函数最小优化法进行畸变模型的求解, 并通过计算自标定偏差均方差与互标定偏差均方差对标定结果进行了评定。结果表明, 模型求解误差为  $0.22 \mu\text{m}$ , 通过校正标记图像几何畸变引入的定位误差由  $2.5 \mu\text{m}$  降低到  $0.25 \mu\text{m}$ , 可实现压印对正系统中标记图像几何畸变的校正, 实现精确定位。

**关键词:** 图像畸变; 校正; 对正; 压印光刻

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A

## Mark image geometric distortion calibration in alignment system for multilevel imprint lithography

WANG Quan-dai, DUAN Yu-gang, DING Yu-cheng, GUAN Hong-wu, LU Bing-heng

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** A distortion model based on cubic polynomial is established concerning various linear and nonlinear distortions in the alignment system based on video image for multi-level imprint lithography and a calibration technique based on controlled points is adopted to solve the model. By minimizing the error object function, the indeterminate coefficients of the distortion model are obtained. The calibration results are evaluated by the standard deviation of calibration error, and the results show that the fitting error is  $0.22 \mu\text{m}$ . By introducing distortion correction based on this model, the alignment error due to image geometric distortion in the alignment system is reduced from  $2.5 \mu\text{m}$  to  $0.25 \mu\text{m}$ , which meets the requirement of precise positioning of alignment marks.

**Key words:** image distortion; calibration; alignment; imprint lithography

### 1 引言

为了满足微器件分层压印制造层间精确对准的需要, 开发了一套基于视频图像原理的对正系统。在该系统中, 对正标记的定位运算是实现精

确对正的关键<sup>[1]</sup>。在对正标记图像采集过程中, 由于受镜头畸变、CCD 和图像采集卡质量以及标记物面与 CCD 光轴垂直度等因素的影响, 采集到的标记图像存在着几何畸变, 畸变的存在直接影响标记图像的几何位置精度。为了减小畸变引入的对正误差, 需要对图像畸变进行高精度的综合

收稿日期: 2006-12-17; 修订日期: 2007-01-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50305026)

标定,并在对正过程中加以校正。

本文采用三次多项式模型,对系统图像畸变进行了实验研究,标定出了标记图像位于视场不同位置时的畸变值,并对畸变模型的求解精度和校正精度进行了评价。畸变校正的实现,使对正精度进一步提高。

## 2 原理及算法

从数字图像处理的观点来看,对畸变图像进行校正实际上是对一幅退化图像的恢复。畸变主要表现在图像中像素点发生移位,从而使图像中物体扭曲变形。畸变校正包括空间坐标变换和像素点灰度插值两部分工作。坐标变换的目的是使像素落在正确的位置上,灰度插值是对图像进行视觉上的修正。

### 2.1 畸变模型

由于制造工艺和安装等原因,镜头存在着一定的残余像差,如球面像差、彗星像差、像散、像场弯曲和畸变像差等轴对称像差,及不对心像差和薄棱镜像差等非轴对称像差。对于中焦距普通质量的镜头,在图像的边界约有1~3个像素大小的畸变误差<sup>[2]</sup>。为了提高图像测量、模式匹配等定量分析的准确性,必须对这一类畸变进行修正。近年来,国内外学者就此问题进行了大量的研究<sup>[3-11]</sup>。在基于视频图像原理的对正系统中,引起对正标记图像畸变的因素,除了镜头畸变外,由于CCD芯片生产厂家的加工技术和工艺水平,CCD芯片中存在的阵列像元排列不规则、位置偏差、尺寸大小误差及阵列轴的不垂直性等阵列像元几何误差也是不可忽略的重要因素。考虑到镜头的轴对称和非轴对称像差,同时考虑了CCD像元几何误差以及物平面与摄像机光轴的不严格垂直性,从成像角度出发,采用以下三次多项式模型对系统图像畸变误差进行了综合标定和修正:

$$\delta_u = a_{00} + a_{01}v + a_{02}v^2 + a_{03}v^3 + a_{10}u + a_{20}u^2 + a_{11}uv + a_{30}u^3 + a_{21}u^2v + a_{12}uv^2, \quad (1)$$

$$\delta_v = b_{00} + b_{10}u + b_{01}v + b_{20}u^2 + b_{11}uv + b_{02}v^2 + b_{30}u^3 + b_{21}u^2v + b_{12}uv^2 + b_{03}v^3, \quad (2)$$

$$x = u + \delta_u, \quad y = v + \delta_v, \quad (3)$$

其中,  $(u, v)$  是畸变图像坐标值,单位为 pixel,  $(x, y)$  是原始图像对应点的坐标,  $(\delta_u, \delta_v)$  为图像行方向和列方向上的畸变。

### 2.2 求解过程

首先制作高精度标定网格板并置于显微镜镜头下成像,然后选取控制点并用模板匹配识别的方法提取控制点的实际坐标  $(u, v)$ , 根据图像中心网格节点的坐标和网格间距,推算出控制点的理想坐标  $(x_l, y_l)$ 。将控制点理想坐标  $(x_l, y_l)$  和实际坐标  $(u, v)$  代入式(1)、(2),以最小二乘原则确定畸变模型系数  $a, b$ ,即使

$$\begin{aligned} \epsilon &= \sum_{k=1}^L (\delta_{uk} - \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-j} a_{ij} u_k^i v_k^j) \text{ 最小, 则需求} \\ \frac{\partial \epsilon}{\partial a_s} &= 2 \sum_{k=1}^L (\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-j} a_{ij} u_k^i v_k^j - \delta_{uk}) u_k^s v_k^t = 0, \text{ 可得} \\ \sum_{k=1}^L (\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-j} a_{ij} u_k^i v_k^j) u_k^s v_k^t &= \sum_{k=1}^L \delta_{uk} u_k^s v_k^t, \quad (4) \end{aligned}$$

同理:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^L (\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-j} b_{ij} u_k^i v_k^j) u_k^s v_k^t &= \sum_{k=1}^L \delta_{vk} u_k^s v_k^t, \quad (5) \\ \sum_{k=1}^L (\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-j} b_{ij} u_k^{i+s} v_k^{j+t}) &= \sum_{k=1}^L \delta_{vk} u_k^s v_k^t, \end{aligned}$$

式中  $k$  为控制点对的个数;  $s=0, 1, 2, \dots, n, t=0, 1, 2, \dots, n-s, s+t \leq n$ 。通过分别解上述二式,即可求出  $a_{ij}, b_{ij}$ , 将其代入式(1)~(3),就可实现两个坐标系之间的变换。

## 3 实验研究

基于视频图像的标记对正属于高精度的二维摄影定位测量问题,标定过程中必须考虑微米级总体对正要求,尽量提高各个环节的精度。

### 3.1 平面网格模板的制作

高精度的标定网格板是得到高精度的校正结果的基础。本文采用标准微电子掩模板制作工艺制作高精度的标定网格板,实验中采用的工艺能够保证网格线制作误差小于  $0.2 \mu\text{m}$ 。图1为制作网格间距  $30 \mu\text{m}$ 、线宽  $5 \mu\text{m}$  的正交网格板。

### 3.2 控制点的选择

控制点的选取原则上应覆盖整个图像,这样拟合的结果才能代表整个图像的畸变情况,拟和结果不应该有个别位置出现很大误差的情况。实验中选取图像中心点、中心点周围的4个网格点、中间面积为整幅图像1/4的矩形的顶点和边的中点、测试图图像的4个顶点和4条边的中点共21

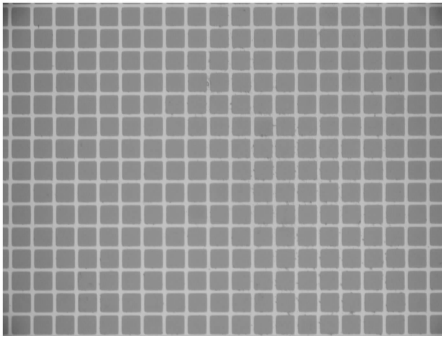


图 1 标定用网格板

Fig. 1 Calibration pattern

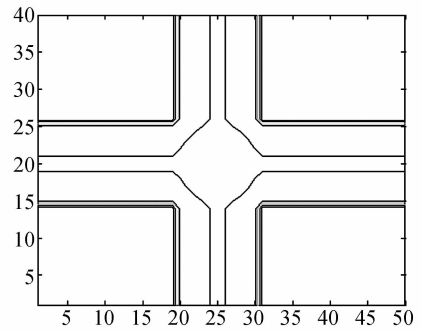
个点作为控制点,为了便于提取控制点实际坐标,控制点全部选在网格节点上。

### 3.3 理想网格节点坐标确定

假定图像中心及其附近区域畸变很小可以忽略,根据图像中心网格节点的坐标和网格间距,推算出控制点的理想坐标 $(x_l, y_l)$ 。标定板网格间距可以直接采用设计值,这时存在的误差为标定板的制作误差。实验中除了采用网格设计值作为理想间距外,还将标定板网格间距在 $3\ 000\times$ 显微镜下逐个进行了测量,取其平均值作为理想网格间距,这样可以消除标定板制作工艺引入的误差,当然同时又引入了测量误差。实验中将两种确定理想网格间距的方法进行了比较,结果发现采用测量结果的平均值拟合理想网格时,标定偏差均方差更小,说明通过测量取平均的方法可以减小标定板制作误差,所以实验中用该方法确定网格理想间距。

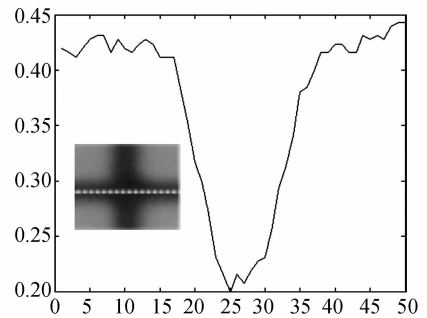
### 3.4 实际网格节点坐标的提取

实际网格节点坐标的提取精度直接影响拟合



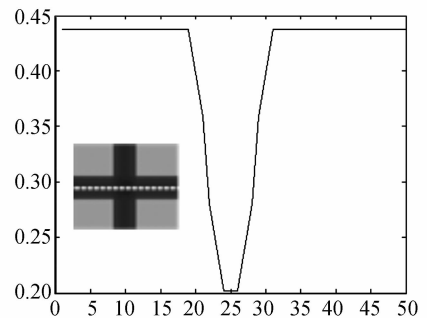
(b) 仿真网格节点灰度轮廓

(b) Ideal grid node contour



(c) 实际网格中心线灰度分布

(c) Center line grey value of real grid

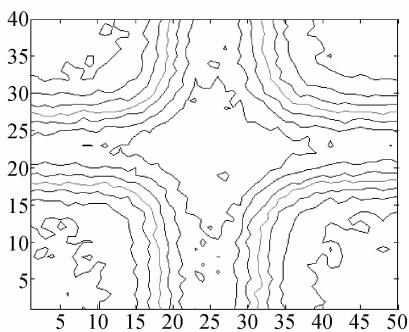


(d) 仿真网格中心线灰度分布

(d) Center line grey value of ideal grid

图 2 实际网格节点与仿真网格节点比较

Fig. 2 Comparison between real and ideal grid nodes



(a) 实际网格节点灰度轮廓

(a) Real grid node contour

的精度和模型求解的可靠性。图 2(a)是一个实际网格节点的灰度轮廓图,从中可以看出网格图像中有明显的噪声,为了减小噪声的影响,选择抗噪声能力强的模板匹配算法,在模板匹配算法中,恰当选取理想模板可以得到比较高的精度。本文采用数学解析的方法来制作仿真理想模板,该模

板应尽量与实际网格节点特征重合,甚至更突出。根据对实际网格节点的几何参数和灰度分布特性的分析,模板中的网格线通过下式生成:

$$T(u) = C \exp\left(-\frac{(u-u_0)^2}{2\omega^2}\right) + b, \quad (6)$$

其中,  $\omega$  为线宽,  $C$  为前景与背景灰度差值,  $b$  为背景灰度值,  $u$  为  $X$  坐标(对于垂直线)或  $Y$  坐标(对于水平线),  $u_0$  为网格中心线的  $X$  坐标(对于垂直线)或  $Y$  坐标(对于水平线)。图 2 是对所生成的仿真模板与实际网格节点的特性分析对比,可以看出仿真模板较好地反映了实际网格的特点,这样可以保证实际网格节点坐标提取的精度。

### 4 结果分析与讨论

#### 4.1 图像畸变标定结果

图 3 为标定出的系统图像畸变矢量图,可以看到,图像表现出明显的桶形畸变,并且在图像边缘畸变较大,大约为三个像素,由于一个像素在系统中代表的实际尺寸为  $0.86 \mu\text{m} \times 0.83 \mu\text{m}^{[1]}$ ,所

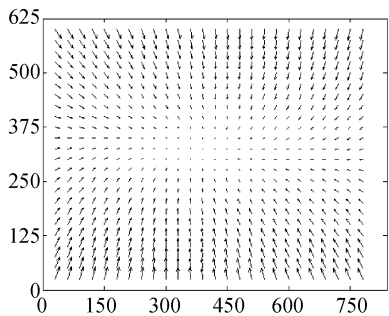
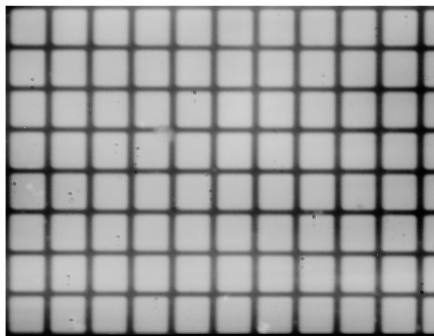


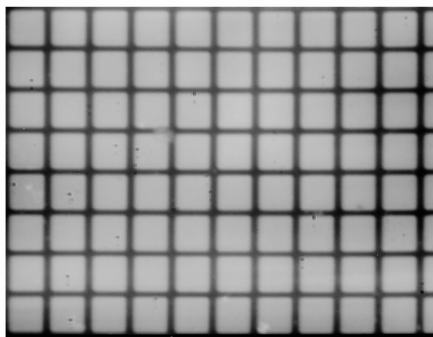
图 3 图像畸变矢量图

Fig. 3 Image distortion vectors



(a) 校正前

(a) Before calibration

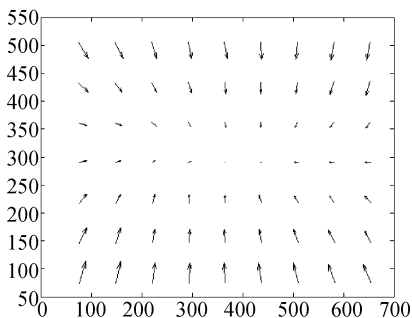


(b) 校正后

(b) After calibration

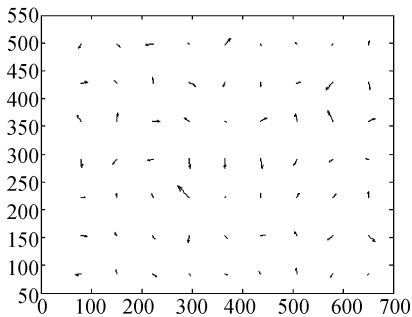
图 4 图像校正前后对比

Fig. 4 Comparison between original and calibrated images



(a) 校正前

(a) Before calibration



(b) 校正后

(b) After calibration

图 5 网格节点坐标误差矢量

Fig. 5 Coordinate error vectors of grid nodes

以在图像边缘的误差约为  $2.5 \mu\text{m}$ ,畸变引入的误差相对系统对正精度来说还是很大的,有必要进行校正。图 4 是通过灰度插值处理后的畸变图

像校正结果。由于校正的幅度在几个微米的数量级,所以视觉上很难分辨出其中的差别,但是通过校正前后网格节点坐标误差矢量图(见图 5)可以看出,校正前后差别很明显,校正后坐标误差大大减小,并且在整个视场中分布较为均匀。

得到畸变模型后,在对正过程中,根据计算得到的标记位置及该位置的畸变值根据式(3)就可以得到对正标记的准确位置,为模板和基材的相对移动提供依据,最后通过工作台驱动达到精确对准的目的。

#### 4.2 标定精度分析

为了获得标定精度,需要对畸变模型对实际畸变图像的修正结果进行分析。本文通过计算网格节点坐标残差的均方差  $\delta_x$ 、 $\delta_y$  来衡量标定精度, $\delta_x$ 、 $\delta_y$  由下式确定:

$$\delta_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{ij} (x_{ij} - x_{lij})^2},$$

$$\delta_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{ij} (y_{ij} - y_{lij})^2}, \quad (7)$$

其中  $(x_{ij}, y_{ij})$  和  $(x_{lij}, y_{lij})$  分别为修正后的实际网格节点坐标值和拟合出的理想网格坐标值。如果用来标定畸变模型的图像和修正用的图像是同一幅图像,则畸变残差均方差为自标定残差均方差;如果不是同一幅图像,则畸变残差均方差为互标定残差均方差。自标定残差均方差可以表明畸

变模型的拟合精度,而互标定残差均方差则可以说明实际校正精度。评定的结果见表 1。经过校正,畸变引入的标记定位误差小于 0.28 pixel。

由于系统中每个像素代表的物面实际尺寸为  $0.86 \mu\text{m} \times 0.83 \mu\text{m}$ ,所以校正后图像畸变带来的标记定位误差小于  $0.25 \mu\text{m}$ 。不论是自标定残差均方差还是互标定残差均方差都表明的是校正的理论精度,畸变校正对于对正精度的实际贡献还需要通过设计精密的对正实验进行检验。

#### 4.3 误差来源分析

影响校正精度的误差有多种,主要误差源有标准网格线的制作误差、实际网格节点的计算误差、图像采集卡的同步性能引入的误差、校正系数的计算误差、几何坐标校正的计算误差等,其中前三种误差是影响校正精度的主要误差。要进一步提高校正精度,需要采用高性能的图像采集卡和更高精度的标准网格板的制作工艺,并研究更高精度的实际节点坐标提取算法。

## 5 结 论

在基于视频图像的对正系统中,光学镜头的畸变、CCD 传感器阵列像元几何误差以及物面与 CCD 光轴的不垂直均会造成对正标记图像的几何畸变,从而使高精度的对正难以实现。本文基于控制对象的校正原理,通过最优化偏差目标函数的方法进行畸变模型的求解,并在对正过程中实现标记图像畸变的非线性校正。由于微米级对正精度的要求,在标定过程中,对标定网格板的制作、理想网格的拟合以及实际网格节点的提取等各个环节均进行了严格的精度控制。通过自标定残差均方差和互标定残差均方差对校正结果进行了定量评定,结果表明,校正后的标记图像畸变引入的定位误差从  $2.5 \mu\text{m}$  减小到  $0.25 \mu\text{m}$ 。

表 1 畸变标定精度

Tab. 1 Distortion calibration accuracies

评价方式	精度(单位:pixel)
x 方向自标定残差均方差	0.22
y 方向自标定残差均方差	0.20
x 方向互标定残差均方差	0.28
y 方向互标定残差均方差	0.25

#### 参考文献:

- [1] 王权岱,段玉岗,卢秉恒,等. MEMS 多层压印工艺中的视频图像对准系统[J]. 光电工程,2005,32(10):84-88. WANG Q D, DUAN Y G, LU B H, et al.. Alignment system based on video images for MEMS multi-layer imprint fabrication process[J]. *Opto-Electron. Eng.*, 2005,32(10):84-88. (in Chinese)
- [2] 于起峰,陆宏伟,刘肖琳. 基于图像的精密切量与运动测量[M]. 北京:科学出版社,2002. YU Q F, LU H W, LIU X L. *Accurate Measurement and Motion Detection Based on Image*[M]. Beijing: Science Press,2002. (in Chinese)
- [3] 王向军,韩双来. 弹落点坐标测量系统的快速校准方法及精度分析[J]. 光学精密工程,2005,13(6):686-690.

- WANG X J, HAN SH L. A high speed camera calibration method in coordinate measurement of bomb-fall and its precision analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6):686-690. (in Chinese)
- [4] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses[J]. *IEEE J. Robot. Autom.*, RA-3(4), 1987:323-344.
- [5] SHIH S W, HUNG Y P, LIN W S. When should we consider lens distortion in camera calibration[J]. *Pattern Recogn.*, 1995, 28(3):447-461.
- [6] WONG K Y K, MENDONCA P R S, CIPOLLA R. Camera calibration from surfaces of revolution[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2003, 25(2):147-161.
- [7] ZHU J G, LI Y J, YE SH H. Calibration of line structured light vision system based on camera's projective center [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(5):584-591.
- [8] 史泽林, 康娇, 孙锐. 基于 BP 神经网络的大视场成像畸变校正方法[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(3):348-353.  
SHI Z L, KANG J, SUN R. BP NN-based method for lens distortion correction of large-field imaging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3):348-353. (in Chinese)
- [9] WENG J Y, COHEN P, HERNIOU M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1992, 14(10):965-980.
- [10] BACAKOGLU H, KAMEL M S. A three-step camera calibration method[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1997, 46(5):1165-1172.
- [11] 吴晓波, 安文斗, 杨钢. 图像测量系统中的误差分析及提高测量精度的途径[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(1):133-141.  
WU X B, AN W D, YANG G. Error analysis and approaches of improving measuring precision in image measuring system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(1):133-141. (in Chinese)

作者简介:王权岱(1969—),男,博士研究生,主要从事 MEMS 压印光刻制造设备及工艺方面的研究。E-mail:quandaiw@163.com