

文章编号 1004-924X(2024)24-3580-14

面向显示墨水打印的基板高精度纠偏及定位

安 宁, 毕 海, 李 义, 徐 成^{*}
(季华实验室, 广东 佛山 528200)

摘要:在电子纸显示墨水打印中,针对基板偏转角度和像素坑位置计算误差较大的问题,提出了一种高精度基板角度纠偏及定位方法。首先,根据喷墨打印需求搭建了视觉检测系统,用于基板标记的高分辨成像,并通过改进相机内外参标定方法和改进显微成像标定方法,对视觉系统进行了安装角度标定和多相机相对位置标定。然后,对基板标记进行边缘检测、轮廓矩特征计算,提取标记中心像素坐标,并利用坐标转换和最小二乘法直线拟合,实现了基板的高精度纠偏。最后,间接利用基板对位标记,完成了打印起始像素坑定位。实验结果表明,纠偏算法对基板角度的校正误差在 $\pm 2''$ 以内,像素坑定位误差在 $\pm 3\ \mu\text{m}$ 以内,远高于墨水填充的精度要求。通过搭建视觉检测系统和设计基板纠偏及定位算法,实现了显示墨水的高精度、高效率打印填充,提高了打印设备的良率,对显示墨水打印填充设备国产化具有重要的指导意义。

关 键 词:墨水打印;多相机标定;角度纠偏;像素坑定位

中图分类号:TP391.4;TH161+.7 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243224.3580

High precision correction and positioning of the substrate for display ink printing

AN Ning, BI Hai, LI Yi, XU Cheng^{*}

(Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, China)

^{*} Corresponding author, E-mail: xucheng@jihualab.com

Abstract: Aiming at the problem of large errors in the calculation of the deflection angle of the substrate and the position of the pixel pit in the display ink printing of e-paper, a high-precision substrate angle correction and location method was proposed. Firstly, a vision detection system was constructed according to the requirements of inkjet printing, which was used for high-resolution imaging of substrate markings. The installation angle calibration and multi-camera relative position calibration of the vision system were carried out by improving the camera's intrinsic and extrinsic parameter calibration methods and improving the microscopic imaging calibration method. Then, edge detection and contour moment feature calculation were performed on the substrate markings, the center pixel coordinates of the markings were extracted, and high-precision substrate correction was achieved using coordinate transformation and least squares line fitting. Finally, the initial pixel pit positioning was completed by indirectly using the substrate alignment marks. Experimental results show that the correction error of the substrate angle correction algorithm is within $\pm 2''$, and the pixel pit positioning error is within $\pm 3\ \mu\text{m}$, far exceeding the accuracy requirements

收稿日期:2024-07-11;修订日期:2024-08-16.

基金项目:国家重点研发计划(No. 2021YFB3600605)

of ink filling. By establishing a vision detection system and designing substrate correction and positioning algorithms, high-precision and efficient printing filling of display ink were achieved, improving the yield of printing equipment, which is of great guiding significance for the localization of display ink printing and filling equipment.

Key words: ink printing; multiple camera calibration; angle correction; pixel pit positioning

1 引 言

电子纸显示器具有类似纸张的视觉效果,通过反射环境光实现显示,与LCD(液晶显示屏)、OLED(有机发光二极管)、Mini-LED(次毫米发光二极管)、Micro-LED(微发光二极管)等相比,具有保护视力、环保节能、便于携带等优点。电子纸显示有多种技术方案,如电泳显示技术、电流体显示技术、胆固醇液晶显示技术、电润湿显示技术^[1]等。墨水填充与封装作为电润湿显示器制作中的核心工艺,是通过喷墨打印的方式将不同颜色的油墨填充到基板像素格中,然后在油墨上方覆盖一层极性液体并用ITO玻璃进行封装^[2]。墨水填充需要保证墨水能精确打印到像素坑中,且像素坑大小仅为几十至一百多微米,像素坑的宽度只有10 μm 左右,因此像素坑的定位精度需要保证在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 内。机械结构的安装误差、工件台的运动精度、基板的制造误差和打印头的精度等因素都会影响墨水打印的准确度,导致墨水不能定点、定量地打印到特定的像素坑内,因此,开发高精度的定位系统和方法是至关重要的。

目前,主流方案是通过视觉系统结合图像处理算法完成目标的精确识别和定位,无需与目标进行接触,能避免对目标造成污染或损坏等,且成本较低^[3-4]。对于高精度定位系统,硬件部分一般会选择多台工业相机加显微镜头,软件部分一般使用目标识别和对位算法,主要有基于模板匹配方法、基于特征提取方法和基于深度学习目标识别定位方法等^[5-11]。李永良针对基板像素坑匹配问题,提出一种基于改进RBNCC算法和基于误差迭代的基板定位方案^[12]。Bedaka AK利用自动位置校正模块,根据检测到的位移或旋转的误差值校正机器人的姿势和位置^[13]。林畅赫提出一种快速的图像定位方法,结合深度卷积网络与加速稳健特性配准进行定位^[14]。欧闻针对基

板定位问题,提出了一种基于高斯金字塔的多目标边缘模板匹配算法,能够实现多目标的定位与检测功能^[15]。吕斯俊针对显微视觉的柔性基板检测与定位问题,根据柔性基板全局图像与标准图像的转换模型和显微图像拼接,实现了基板的定位^[16]。上述方法基本上都是使用了单个相机采集像素坑或者对位标记图像,在较小的相机视野内完成定位。但是,基板尺寸很大(几百毫米),对位标记尺寸很小(几百微米),而定位精度要求非常高,在局部范围内的纠偏和定位很难满足整个基板的角度校正和像素坑定位要求。

喷墨打印的精度作为最重要的技术指标之一,直接受到多相机全局标定精度的影响。为了满足大尺寸基板的纠偏,需要设置多台工业相机同时成像,由于显微视觉系统视野范围较小,多台相机无共同视野,建立多台相机的相对位置关系变得更加困难。在传统的相机标定研究中,一般是通过构建相机的内参和外参矩阵,建立图像坐标系到世界坐标系的关系^[17-18],但这种方法对于多台相机无共同视野的方案还不能很好解决;R. Lu提出了利用经纬仪、激光跟踪仪和激光测距仪等设备对多相机无共同视野进行标定,但是该方法适用于空间大范围的场景,全局标定过程复杂,容易造成误差累积,而且需要额外的辅助设备,价格昂贵,增加了标定的成本^[19]。PENG-FEI SUN提出了一种基于多方向目标(Multi-Directional Target, MDT)的新型三维视觉测量系统(Vision Measuring System, VMS)全局标定方法,使用不同相机同时观察一个测量头,只适用于有共同相机视野的全局标定^[20]。

因此,本文提出一种面向显示墨水打印的视觉高精度纠偏及定位方法,建立了改进相机内外参标定模型和改进显微成像标定模型,对视觉系统的各个相机进行了安装角度标定和多相机相对位置标定等,通过一系列图像处理算法提取出对位标记像素中心坐标,结合标定模型把空间坐

标系转换到基板平面坐标系中,使用最小二乘法拟合转换后的坐标,从而计算出基板的偏角,最后根据喷墨打印轴和多相机连接轴的标定结果,间接通过对位标记计算出喷墨打印起始像素坑的位置,实现显示墨水的高精度打印和填充。

2 视觉检测系统及工作原理

2.1 视觉检测系统构成

电子纸显示墨水填充设备作为电润湿电子纸显示器制程工艺中的关键设备,其功能主要是喷墨打印、运动控制、视觉定位、墨滴观测、缺陷检测等。如图 1 所示,本方案设计了 3 套视觉模块,其中 2 套相隔一定距离布置在视觉系统安装架上,视觉系统安装架固定安装在大理石平台上且平行于龙门架横梁轴,主要用于基板纠偏和像素坑定位;1 套装在龙门架横梁轴上,可以与喷墨打印模块一起沿 Y 轴方向运动,用于检测喷墨打印的墨滴缺陷,并辅助完成龙门架横梁轴和视觉系统安装架平行度的标定。视觉模块硬件部分主要包括相机、镜头、光源、控制器、调焦机构等,用于获取被测基板像素坑和 Mark 点(对位标记)等特征的图像信息。软件部分包括图像预处理、图像分析、纠偏角度计算和打印初始位置计算等,根据算法计算结果判断基板是否校正并反馈给控制器信号进行调整。

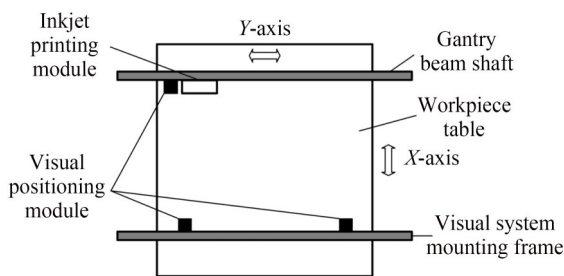


图 1 系统硬件模块布局俯视图

Fig. 1 System hardware module layout top view

基板像素坑的定位精度直接影响喷墨打印的准确性,系统要求定位精度 $< \pm 10 \mu\text{m}$,纠偏精度 $< \pm 5''$ 。打印基板尺寸为 $500 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,分辨率 200PPI,像素坑尺寸为 $117 \mu\text{m} \times 117 \mu\text{m}$,基板 Mark 点的最大尺寸范围为 $1.35 \text{ mm} \times 1.35 \text{ mm}$,喷墨打印定位精度 $< \pm 10 \mu\text{m}$,视觉系统分

辨率 $< 6 \mu\text{m}$ 。因此,根据精度要求和视场范围,需要选择高倍率、高分辨的视觉系统,综合考虑镜头的工作距离、分辨力、景深范围等,选择 4X 远心镜头,工作距离 65 mm,最高分辨力可达 $2.0 \mu\text{m}$,可接 1.1 英寸靶面芯片传感器。为了保证基板 Mark 点至少占据视场的 $1/4 \sim 1/3$ 视野范围,选择 1.1 英寸靶面的相机,分辨率为 4096×3000 ,像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$ 。

2.2 视觉检测系统工作原理

电子纸显示墨水填充设备的视觉系统工作流程如图 2 所示。根据喷墨打印系统精度要求,设计定位系统,包括机械粗定位和视觉精确定位,机械粗定位能够保证基板每次上片后,左右两侧的对位标记分别出现在各个相机视野内。视觉系统根据采集到的标记图像计算基板偏转角度和位置偏差,控制转台、运动台和喷墨打印轴实现基板的角速度纠偏和像素坑定位。

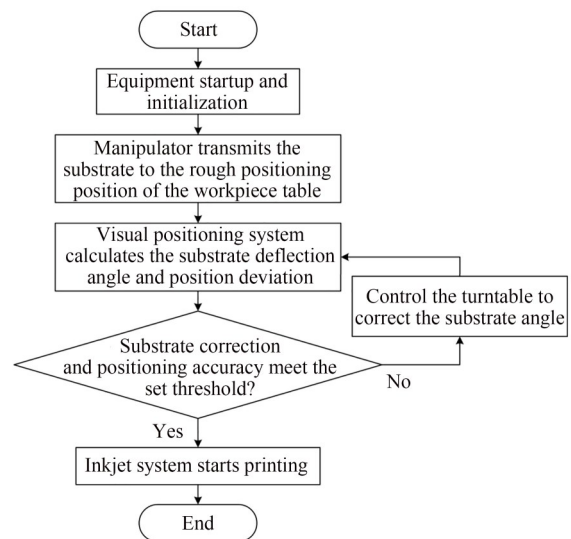


图 2 视觉系统工作流程

Fig. 2 Workflow of vision system

3 视觉系统标定

3.1 改进相机内外参标定法

本方案的视觉系统是由 2 套视觉系统构成,首先,分别对 2 套视觉系统进行单目标定,再通过具有多个特征点区域的标定板构建 2 套视觉系统的位置关系。标定板样式如图 3 所示,标定板由若干特征区域组成,并相隔一定距离。特征区域

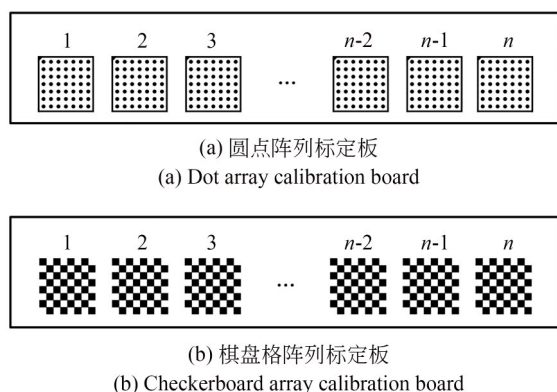


图 3 标定板阵列图案

Fig. 3 Calibration board array pattern

提供了检测的目标点,一般选取棋盘格的角点或圆形的中心为特征点,本文借鉴了张正友标定法,使用棋盘格角点作为特征点。标定具体步骤为:移动具有多个特征点区域的标定板,使得两个相机视野范围内分别具有多个特征点区域中的一个特征点区域;采集多个相机对应视野范围内的图像;获取多个图像,得到每个图像中特征点的像素坐标,建立多个图像坐标系;以标定板的平面建立世界坐标系,计算多个图像坐标系与世界坐标系的关系,得到世界坐标系下多个特征点的对应关系;根据世界坐标系下多个特征点的对应关系与标定板上特征点的位置关系,计算得到多个相机之间的位姿关系。

单目标定通过张正友标定法,建立图像像素坐标系和世界坐标系之间的关系:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

其中: $[u \ v]^T$ 为点的像素坐标, $[X_w \ Y_w \ Z_w]^T$ 为点的世界坐标, A 为相机的内参矩阵, s 为比例因子, $[R \ T]$ 为相机的外参矩阵,表示旋转和平移变换, (u_0, v_0) 为相机的主点坐标, α 和 β 为图像在像素坐标系 u 和 v 轴上的尺度因子,大小为 $\alpha = f/d_x$, $\beta = f/d_y$, γ 表示 u, v 坐标轴的扭曲程度。

如果以标定板平面建立世界坐标系,则 $Z_w = 0$, 则公式(1)变换为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$H \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} u = \frac{h_{11} * X_w + h_{12} * Y_w + h_{13}}{h_{31} * X_w + h_{32} * Y_w + h_{33}} \\ v = \frac{h_{21} * X_w + h_{22} * Y_w + h_{23}}{h_{31} * X_w + h_{32} * Y_w + h_{33}} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} X_w & Y_w & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_w u - Y_w u \\ 0 & 0 & 0 & X_w & Y_w & 1 & -X_w v - Y_w v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}. \quad (2)$$

从式(2)可知,相机内外参矩阵一共有8个未知数 $h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{31}, h_{32}$, 通过相机标定,每一组特征点可以列2个方程,因此,最少需要4组特征点可求解出矩阵中的未知元素,实际上,标定选取了大于4组特征点通过最小二乘法求出最佳内外参矩阵。

由于具有多个特征点区域的标定板之间的特征区域点的几何位置是确定的,每个特征点可以根据特征区域编号经过仿射变换找到另一个特征点的位置:

$$\begin{bmatrix} X_{w2} \\ Y_{w2} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & t_1 \\ w_{21} & w_{22} & t_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{w1} \\ Y_{w1} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中: (X_{w1}, Y_{w1}) 为左相机视野内特征点的世界坐标, (X_{w2}, Y_{w2}) 为右相机视野内特征点的世界坐标, $w_{11}, w_{12}, w_{21}, w_{22}$ 表示相对特征点的旋转变换、缩放变换、剪切变换, t_1, t_2 表示相对特征点的平移变换。变换矩阵 H 记为:

$$H = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & t_1 \\ w_{21} & w_{22} & t_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

因此,通过式(1)~式(4)可以求解出相机的

内外参和特征点相对距离,从而得到 2 套视觉系统的位置关系。

3.2 改进显微成像标定法

针对显微视觉系统景深较小,在保证采集图像清晰的条件下,可以近似把基板当作世界坐标系的参考平面,分别对各个相机的安装偏转角度和多个相机之间的安装位置关系进行标定,从而得到基板与视觉系统安装架之间的转换关系。

3.2.1 相机安装偏转角度标定

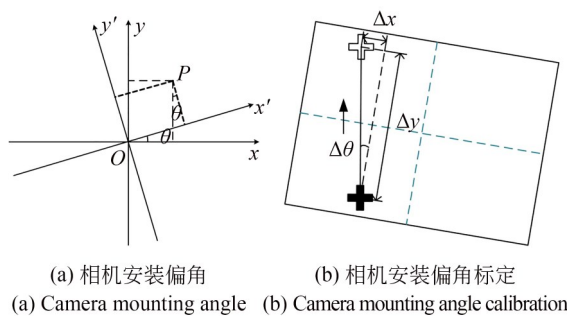
相机安装可能绕光轴偏转了一个角度,由于本系统的视觉安装架和相机是固定的,以工件台运动方向和喷墨横梁轴运动方向建立坐标系,则可以计算出标定物在工件台运动方向上的偏角作为相机安装偏转角度。如图 4 所示,通过标定求出安装的偏转角度,把标定物放置在工件台上,移动工件台,在像素坐标系中,标记水平方向移动了 Δx_i , 竖直方向移动了 Δy_i , 如图 5 所示,可计算出相机安装的偏转角度 $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta_i = \arctan\left(\frac{x_{i1} - x_{i2}}{y_{i1} - y_{i2}}\right),$$

$$\Delta\theta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta\theta_i, \quad (5)$$

其中: n 表示标定次数, $\Delta\theta$ 表示相机安装的偏转角度, $\Delta\theta_i$ 表示第 i 次标定时获取的起始位置和终止位置计算得到的初始安装角度, (x_{i1}, y_{i1}) 表示第 i 次标定的起始位置坐标, (x_{i2}, y_{i2}) 表示第 i 次标定的终止位置坐标。再将多个初始安装角度的平均值作为相机的安装偏转角度,能够减小测量误差,从而有效地提高安装偏转角度的测量准确度。

同时,可以根据标记在相机视野内移动的像



(a) 相机安装偏角 (b) 相机安装偏角标定
(a) Camera mounting angle (b) Camera mounting angle calibration

图 4 计算相机安装偏角

Fig. 4 Calculate the camera mounting angle

素距离 Δd 和工件台实际移动的绝对距离 Δl (光栅尺读数或者激光干涉仪读数), 标定出相机的实际像元大小 S 。也可以根据标准分辨率版或刻度尺标定出视觉系统的实际倍率, 结合相机传感器的像元大小, 计算得出实际的像素精度。

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta l_i}{\sum_{i=1}^n \Delta d_i}, \quad (6)$$

其中: S 表示单位像素大小, n 为标定次数, Δl_i 表示第 i 次标定时获取到的实际移动距离, Δd_i 表示第 i 次标定时获取到的像素移动距离。

3.2.2 多相机安装位置标定

由于本方案的工件台只有 X 轴方向的运动, 喷墨打印模块通过龙门横梁轴 Y 轴方向运动, 因此, 两相机沿 Y 轴方向的安装位置关系需要通过龙门横梁轴标定。如图 5 所示, 在龙门横梁运动轴上安装一个 L 型安装架, 标定板可拆卸安装在 L 型安装架上并伸入到视觉系统下方, 标定板固定且位置不发生改变。

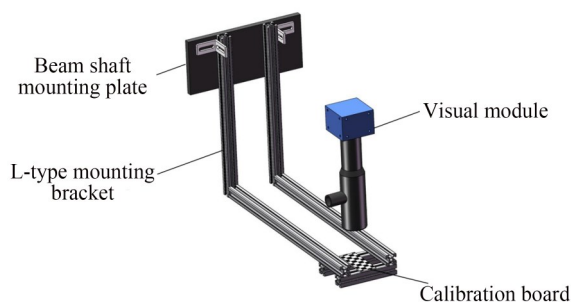


图 5 多相机安装位置标定结构

Fig. 5 Multi-camera installation position calibration structure

如图 6 所示, 喷墨横梁轴沿 Y 轴方向运动, 使标定板分别进入左、右相机视野, 标记为形状规则的图案, 采集标记在左相机视野内的图像, 计算标记中心的像素坐标 (x_1, y_1) , 接着移动标定板, 采集标记在右相机视野内的图像, 计算标记中心的像素坐标 (x_2, y_2) 。

以相机的光心为坐标系原点, 把相机视野划分为四个象限, 在标定时, 标定板从左到右运动, 特征点可能处于左、右相机的不同象限中, 根据实际所处的象限, 分别计算出两相机的位置安装偏差。本文以标定板在左相机视野中处于第二象限, 在右相机视野中处于第一象限为例进行说明。在左相机视野中, 标记中心到左相机光心

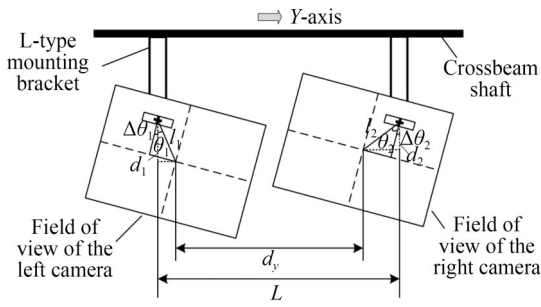


图 6 多相机安装位置标定原理计算

Fig. 6 Multi-camera installation position calibration principle calculation

(x_0, y_0) 的距离为 l_1 , 则:

$$l_1 = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{x_0 - x_1}{y_0 - y_1}\right) - \Delta\theta_1, \quad (7)$$

其中, $\Delta\theta_1$ 为左相机安装的偏角, 则可以计算出 θ_1 , 那么在 X 轴方向标记中心到左相机光心的距离 d_1 为:

$$d_1 = l_1 \cos \theta_1. \quad (8)$$

在右相机视野中, 标记中心到右相机光心 (x'_0, y'_0) 的距离为 l_2 , 则:

$$l_2 = \sqrt{(x_2 - x'_0)^2 + (y_2 - y'_0)^2}$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{x'_0 - x_2}{y'_0 - y_2}\right), \quad (9)$$

那么在 X 方向标记中心到右相机光心的距离 d_2 为:

$$d_2 = l_2 \cos(\theta_2 + \Delta\theta_2), \quad (10)$$

其中, $\Delta\theta_2$ 为右相机安装的偏角, 则右相机相对于左相机在 X 方向的安装偏差 d_x 为:

$$d_x = S(d_2 - d_1). \quad (11)$$

设喷墨横梁轴从左视野到右视野运动的距离为 L , 则右相机相对于左相机在 Y 方向的安装偏差 d_y 为:

$$d_y = L - Sl_1 \sin \theta_1 - Sl_2 \sin(\theta_2 + \Delta\theta_2). \quad (12)$$

同理, 当标定板在左相机视野中处于第二象限, 在右相机视野中处于第二象限时, 右相机相对于左相机分别在 X, Y 方向的安装偏差 d_x, d_y 为:

$$d_x = S(d_2 - d_1)$$

$$d_y = L - Sl_1 \sin \theta_1 + Sl_2 \sin \theta_2. \quad (13)$$

当标定板在左相机视野中处于第二象限, 在右相机视野中处于第三象限时, 右相机相对于左相机分别在 X, Y 方向的安装偏差 d_x, d_y 为:

$$d_x = -S(d_1 + d_2)$$

$$d_y = L - Sl_1 \sin \theta_1 - Sl_2 \cos \theta_2. \quad (14)$$

当标定板在左相机视野中处于第二象限, 在右相机视野中处于第四象限时, 右相机相对于左相机分别在 X, Y 方向的安装偏差 d_x, d_y 为:

$$d_x = -S(d_1 + d_2)$$

$$d_y = L - Sl_1 \sin \theta_1 - Sl_2 \sin \theta_2. \quad (15)$$

此外, 标定板也可能位于左相机视野的第一、第三、第四象限, 算法同上, 本文不再赘述。

4 基板纠偏及定位算法

电子纸显示墨水填充设备中视觉系统的功能是对上片后的基板进行角度检测及纠偏, 并对基板像素坑初始打印位置定位, 具体算法流程如图 7 所示。本方案是通过 2 套视觉系统分别采集基板左、右两边的 Mark 点, 结合上节的标定方法, 把三维坐标系下的特征点坐标转换为基板平面坐标系下的坐标, 采用最小二乘法拟合所有特征点, 从而计算基板的角速度并进行纠偏及像素坑定位。

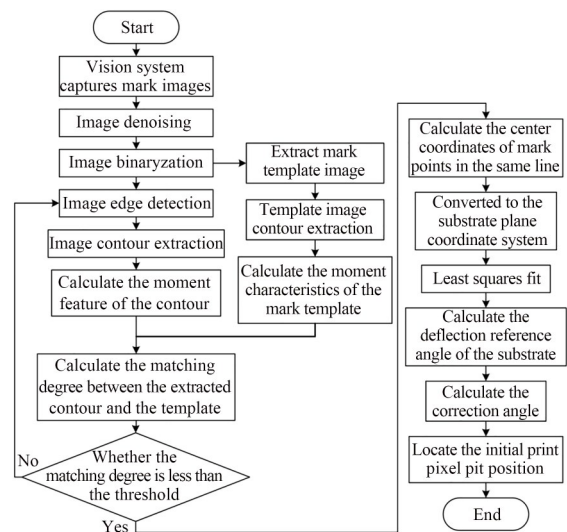


图 7 基板纠偏及定位算法流程图

Fig. 7 Flow chart of substrate correction and positioning algorithm

4.1 基板偏转角度计算

视觉系统采集基板上的 Mark 图像后,对图像进行预处理,包括转化图像为 8 位灰度图,背景去噪等,使用自适应阈值对图像二值化处理,根据图像梯度信息进行图像边缘检测,并提取出 Mark 点的轮廓。

轮廓的矩特征可以体现一幅图像的全局特征或一个轮廓、一组点集的局部特征,矩信息包含了对象的各种几何特征,包括位置、大小、角度、形状等。通过计算 Mark 轮廓的零阶矩和一阶矩来表示轮廓的面积和形心,由于 Mark 点是中心对称图形,形心坐标即为中心坐标。利用 Hu 矩具有平移、旋转和比例变化的不变性^[21],从而比较 Mark 模板和提取轮廓的相似性,根据相似度量函数计算值确定图像中的 Mark 轮廓。其中,相似性计算方式一般有 3 种,即 I_1, I_2, I_3 , 计算公式如式(16):

$$\begin{aligned} I_1(a, b) &= \sum_{i=1}^7 \left| \frac{1}{m_i^a} - \frac{1}{m_i^b} \right| \\ I_2(a, b) &= \sum_{i=1}^7 |m_i^a - m_i^b| \\ I_3(a, b) &= \sum_{i=1}^7 \frac{|m_i^a - m_i^b|}{|m_i^a|}, \end{aligned} \quad (16)$$

其中: $m_i^a = \text{sign}(h_i^a) \cdot \log h_i^a, m_i^b = \text{sign}(h_i^b) \cdot \log h_i^b$, h_i^a 和 h_i^b 分别表示 a 和 b 的 Hu 矩。

Hu 矩是归一化中心矩的线性组合, Hu 矩由 7 个值表示,分别为:

$$\begin{aligned} h_1 &= \lambda_{20} + \lambda_{02} \\ h_2 &= (\lambda_{20} - \lambda_{02})^2 + 4\lambda_{11}^2 \\ h_3 &= (\lambda_{30} - 3\lambda_{12})^2 + (3\lambda_{21} - \lambda_{03})^2 \\ h_4 &= (\lambda_{30} + \lambda_{12})^2 + (\lambda_{21} + \lambda_{03})^2 \\ h_5 &= (\lambda_{30} - 3\lambda_{12})[(\lambda_{30} - 3\lambda_{12})^2 - 3(\lambda_{21} + \lambda_{03})^2] + \\ &\quad (3\lambda_{21} - \lambda_{03})(\lambda_{21} + \lambda_{03}) \cdot [3(\lambda_{30} + \lambda_{12})^2 - (\lambda_{21} + \lambda_{03})^2] \\ h_6 &= (\lambda_{20} - \lambda_{02})[(\lambda_{30} + \lambda_{12})^2 - (\lambda_{21} + \lambda_{03})^2] + \\ &\quad 4\lambda_{11}(\lambda_{30} + \lambda_{12})(\lambda_{21} + \lambda_{03}) \\ h_7 &= (3\lambda_{21} - \lambda_{03})(\lambda_{21} + \lambda_{03}) \left[\frac{3(\lambda_{30} + \lambda_{12})^2}{-(\lambda_{21} + \lambda_{03})^2} \right] - \\ &\quad (\lambda_{30} - 3\lambda_{12})(\lambda_{21} + \lambda_{03}) \cdot [3(\lambda_{30} + \lambda_{12})^2 - (\lambda_{21} + \lambda_{03})^2], \end{aligned} \quad (17)$$

其中: $\lambda_{20}, \lambda_{11}, \lambda_{02}$ 为二阶归一化中心矩, $\lambda_{30}, \lambda_{21}$,

$\lambda_{03}, \lambda_{12}$ 为三阶归一化中心矩。

在基于 Hu 矩模板匹配之后,对提取到的 Mark 进行中心坐标计算:

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{m_{10}}{m_{00}}, \\ y_c &= \frac{m_{01}}{m_{00}}, \end{aligned} \quad (18)$$

其中: m_{00} 为零阶矩, m_{01}, m_{10} 为一阶矩。 x_c, y_c 分别为 Mark 中心的像素列坐标和行坐标。

如图 8 所示,通过改进显微成像两相机标定方法,计算出两相机相对位置关系,并将 Mark 点的中心坐标映射到基板平面坐标系中。

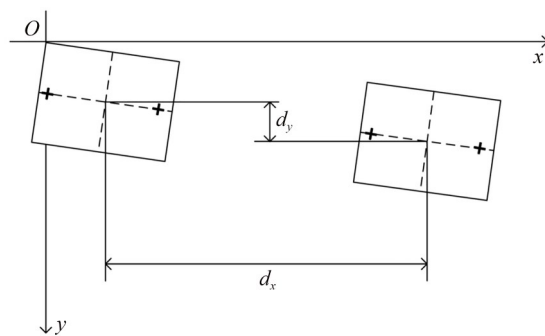


图 8 基板平面坐标系

Fig. 8 Substrate plane coordinate system

在标定出相机安装偏转角度后,相机像素坐标系中点的变换为:

$$\begin{cases} x' = x \cos \theta - y \sin \theta \\ y' = \frac{y}{\cos \theta} + x \sin \theta - y \sin \theta \tan \theta \end{cases}, \quad (19)$$

其中, (x, y) 和 (x', y') 分别为转换前和转换后的点的像素坐标。

在左相机像素坐标系中, Mark 中心的像素坐标为 $(x_{l1}', y_{l1}'), (x_{l2}', y_{l2}'), \dots, (x_{lm}', y_{lm}')$, 在右相机像素坐标系中, Mark 中心的像素坐标为 $(x_{r1}', y_{r1}'), (x_{r2}', y_{r2}'), \dots, (x_{rn}', y_{rn}')$, 由标定结果可计算出左相机与右相机光心坐标的 x 和 y 方向的物理距离为 d_x 和 d_y 。通常,图像的左上角像素坐标表示为 $(0, 0)$, 则以左相机 $(0, 0)$ 为原点,以基板所在平面建立二维平面坐标系, Mark 中心像素坐标转换到基板平面坐标系中为: $(Sx_{l1}', Sy_{l1}'), (Sx_{l2}', Sy_{l2}'), \dots, (Sx_{lm}', Sy_{lm}'), (Sx_{r1}' + d_x, Sy_{r1}' + d_y), (Sx_{r2}' + d_x, Sy_{r2}' + d_y),$

$\cdots, (Sx_m' + d_x, Sy_m' + d_y)$ 。

使用最小二乘法拟合所有坐标点,这些点距离直线的平方偏差之和为:

$$\delta = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2. \quad (20)$$

求解出使得平方偏差之和最小时的 a, b , 即可求出拟合直线方程, 计算出拟合直线的偏角 θ :

$$\theta = \arctan \frac{x_0}{y_0}, \quad (21)$$

其中, x_0, y_0 分别为拟合直线在基板平面坐标系中 x 和 y 方向上的单位向量。

4.2 基板角度校正和打印初始位置计算

基板传递在机械粗定位位置, 先使用纠偏算法对基板进行校正, 然后定位到基板首个打印像素坑位置。根据运动台、喷墨打印模块和视觉系统布置情况, 首个像素坑位置包括 Y 方向坐标(喷墨打印轴运动方向)和 X 方向坐标(工件台运动方向)。在确定 X, Y 坐标之前, 需要标定出喷墨打印轴运动方向与视觉系统安装架之间的夹角。通过两种方法可以计算, 第一种方法是利用改进显微成像标定法计算两者之间的夹角 α , 当标定板在右相机视野中处于第一和第二象限中, 夹角 α 大小为:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{d_1 - d_2}{d_y} \right). \quad (22)$$

当标定板在右相机视野中处于第三和第四象限中, 夹角 α 大小为:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{d_1 + d_2}{d_y} \right), \quad (23)$$

其中: d_1 表示左相机对应的 X 轴方向偏差, d_2 表示右相机对应的 X 轴方向偏差。

第二种方法是通过间接标定, 利用龙门架横梁轴的第 3 套视觉系统进行观测, 控制视觉系统沿横梁轴一个方向运动。在相机视野内观察基板的像素坑刻线与相机的十字中心线, 通过转台调整基板偏转角度, 保证视觉系统基板像素坑刻线始终与相机十字中心线平行或重合, 使得基板与龙门横梁轴保持平行。同时, 分别采集左、右相机图像, 计算此时基板的偏转角度, 该角度作为基准角度 θ_0 , 则转台需要偏转的角度(即纠偏角度) $\Delta\theta$ 为:

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0, \quad (24)$$

其中: θ_1 为基板实时计算的角度, $\Delta\theta$ 用来对上片

的基板进行角度纠偏, 从而调整转台使得基板与喷墨打印横梁轴平行。

在调整基板与喷墨打印轴平行后, 确定喷墨打印起始位置与基板首个像素坑位置在 X, Y 方向的偏差。利用视觉系统可以间接计算 X, Y 方向的偏移量, 由于基板上的 Mark 与首个像素坑位置的几何关系是确定不变的, 通过标定计算出墨滴打印到像素坑中心时的 X 和 Y 方向位置(即工件台绝对位置和喷墨打印横梁轴绝对位置)分别为 x_0 和 y_0 , 同时, 视觉系统采集此时基板 Mark 图像, 用算法计算出 Mark 中心像素坐标 (u_0, v_0) , 记为喷墨打印初始坐标。对上片后的基板进行纠偏后, 计算出基板上 Mark 中心像素坐标 (u_1, v_1) 与喷墨打印初始坐标之间的偏差 Δu 和 Δv :

$$\begin{aligned} \Delta u &= u_1 - u_0 \\ \Delta v &= v_1 - v_0. \end{aligned} \quad (25)$$

则工件台和喷墨轴需要运动的距离 Δx 和 Δy 为:

$$\begin{aligned} \Delta x &= S\Delta u \\ \Delta y &= S\Delta v. \end{aligned} \quad (26)$$

工件台和喷墨打印横梁轴的绝对位置调整为 x_1 和 y_1 :

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + \Delta x \\ y_1 &= y_0 + \Delta y. \end{aligned} \quad (27)$$

最后反馈位置信息 x_1 和 y_1 给控制系统, 控制工件台和喷墨打印轴运动到首个打印像素坑位置进行喷墨打印。

5 实验结果与分析

5.1 实验内容

为了验证本文提出的基板纠偏及定位算法精度, 实验在自主研制的墨水打印设备上, 如图 9 所示。视觉测量系统选择 4X 远心镜头, 型号为 XF-10MDT4X65-1C, 工作距离 65 mm, 最高分辨力可达 $2.0 \mu\text{m}$; 选择 1.1 英寸靶面的相机, 型号为 MARS-1231-32U3M, 分辨率为 4096×3000 , 像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$, 视场范围为 $3.53 \text{ mm} \times 2.59 \text{ mm}$ 。具体实验为: 对视觉系统进行调试, 使视觉系统采集到的图像达到质量要求; 对系统中的各个相机进行安装偏

转角度标定,并对多个相机安装位置进行标定;视觉系统采集基板 Mark 图像,通过算法计算出拟合直线偏转的角度,并控制转台以一定步长的角度转动,比较算法计算的纠偏角度和转台实际转动角度的误差;基板角度纠偏完成后,进行基板打印初始位置定位,控制喷头打印墨滴到基板像素坑,观测墨点是否在像素坑内,并计算墨滴中心与像素坑中心的位置精度偏差。

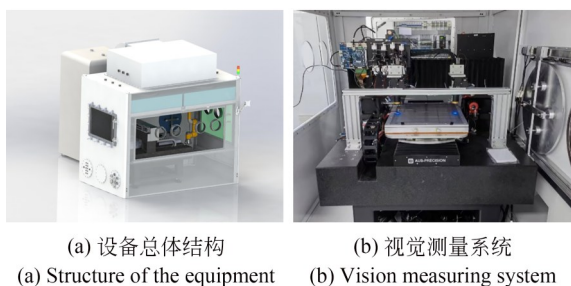


图 9 电子纸显示喷墨打印设备
Fig. 9 E-paper display ink printing filling device

5.2 实验结果

5.2.1 视觉系统成像实验

为了使检测目标成像质量达到最好,使基板 Mark 能更好地与背景分离,需选择合适的光源照明。常见的照明方式有环形光照明、背光照明、同轴光照明等,本次研究针对的目标物为透明基板上的 Mark,反射式照明能够达到更好的效果,结合镜头结构,因此选择同轴 LED 点光源照明的方式。配合光源控制器,可以达到 256 级亮度的调节,满足各种复杂环境下的照明需求。由于透明基板放置在工件台上,厚度较小,工件台上的背景会影响 Mark 点的成像,如图 10 所示,选择蓝色点光源,可以增大 Mark 点与背景的对比度,提高分辨率,达到最好的照明效果。

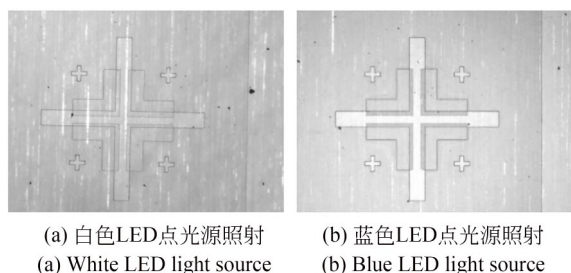


图 10 不同点光源照射 Mark 点
Fig. 10 Different point light sources illuminate the Mark

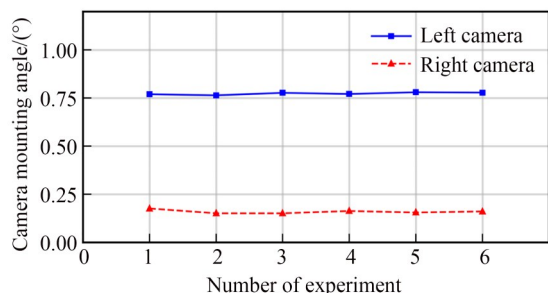
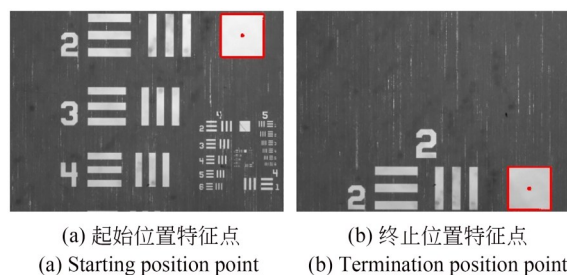
5.2.2 相机标定实验

在视觉系统标定中,使用改进相机内外参标定法对视觉系统安装架上的 2 套视觉系统进行标定,计算得到转换矩阵 H 为:

$$H = \begin{bmatrix} 0.999\ 999\ 99 & -0.000\ 138\ 91 & 355\ 115.4 \\ 0.000\ 138\ 91 & 0.999\ 999\ 99 & -2\ 093.0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由转换矩阵 H 可以得到左、右两个相机的位姿关系。这种标定方法的误差一般通过重投影误差进行评估,计算得出重投影误差在 1~2 个像素大小。误差可能受到多种因素的影响,如标定板制作误差、标定图像的质量、工件台平面度误差,以及在求转换矩阵过程中,把镜头的工作距离当作相机标定关系中的 Z 向距离,对于景深大的镜头有一定的误差。

使用改进显微成像标定法对视觉系统进行标定,根据式(6),重复实验 6 次,每次实验使标定板特征点在相机视野内从起始位置运动到终止位置,得到左相机和右相机的安装偏转角度,如图 11 所示。根据实验结果得出,左相机安装偏转角度的平均值为 $0.773\ 6^\circ$,标准偏差为 $0.005\ 6^\circ$,右相机安装偏转角度的平均值为 $0.159\ 0^\circ$,标准偏差为 $0.008\ 7^\circ$ 。从结果来看,每次测量值有一定偏差,影响误差的因素包括:工件台的运动精



(c) 相机安装偏角计算结果
(c) Results of camera mounting declination angle calculation

图 11 相机安装偏转角度标定

Fig. 11 Camera is mounted for deflection angle calibration

度、图像算法计算误差、标定板与工件台的相对运动误差等。

多相机安装位置的标定是通过移动标定板到左、右相机视野内,采集特征点图像,并记录 Y 横梁轴运动的绝对距离,得到右相机相对于左相机分别在 X, Y 方向上的安装偏差如表 1 所示。

表 1 多相机安装位置偏差

Tab. 1 Multi-camera installation position deviation μm

Number of experiments	X direction deviation	Y direction deviation
1	-2 091.8	355 115.4
2	-2 093.1	355 114.8
3	-2 091.5	355 116.4
4	-2 094.2	355 117.5
5	-2 094.4	355 113.9
6	-2 092.6	355 114.5
7	-2 093.4	355 113.1
8	-2 094.6	355 115.8

多相机安装位置标定实验共进行了 8 次,得到右相机相对于左相机分别在 X, Y 方向上的安装偏差的平均值分别为 $-2\ 093.2\ \mu\text{m}$ 和 $355\ 115.175\ \mu\text{m}$,标准偏差分别为 $1.1\ \mu\text{m}$ 和 $1.3\ \mu\text{m}$,可以看出,误差也是在 1~2 个像素大小。误差主要影响因素有:横梁轴的运动精度、图像算法计算误差和标定板的安装误差等。

5. 2. 3 基板偏转角度精度验证

基板上的 Mark 区域是由多层形状不同的 Mark 叠加在一起的,因此,需要根据基板纠偏及定位方案选择合适的 Mark 作为参考点。如图 12 所示,算法设计思路为:(1)选择标记区域四周较小的十字形 Mark 作为模板,并计算 Mark 的矩特征;(2)使用模板匹配的方法,找到待提取 Mark 点轮廓,并计算左、右相机采集图像中 Mark 点的中心像素坐标;(3)结合两相机标定方法,通过两相机相对位置关系和视觉系统的像素精度,将 Mark 点的中心像素坐标映射到二维平面物理坐标系中;(4)选择二维平面坐标系中处于同一行的 Mark 点,使用最小二乘法直线拟合所有点,计

算拟合直线的偏转角度。

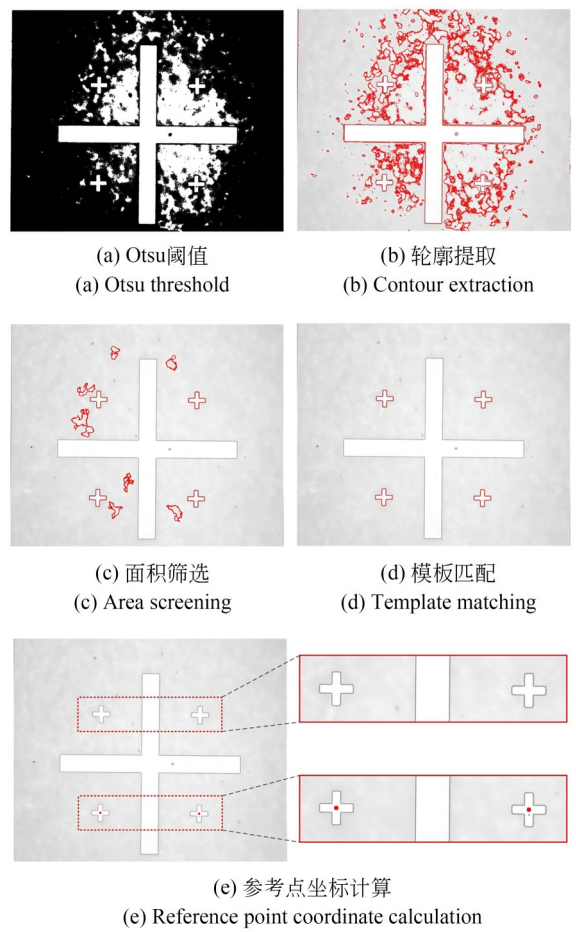


图 12 算法提取 Mark 中心坐标

Fig. 12 Algorithm extracts the center coordinates of Mark

通过图像处理算法计算出左、右相机视野下的 Mark 中心像素坐标,结合多相机位置关系,求出基板偏转角度。为了验证转台以不同角度偏转时纠偏算法的精度,分别控制转台以较大角度 (200°) 偏转和较小角度 (20°) 偏转:

(1)控制转台每次以 200° 角度进行转动,转动范围为对位标记能同时在两相机视野成像的上下极限位置,转动方式为先逆时针后顺时针转动,与此同时,用基板纠偏算法计算基板每次转动的偏角,如表 2 所示。

从实验结果可以看出,在大约 $2\ 400^{\circ}$ 的角度范围内,纠偏算法计算值与转台转动角度值的绝对误差最大为 1.47° ,最小为 -0.69° ,均方根误差 $\text{RMSE}=0.57^{\circ}$,转角精度小于 $\pm 2^{\circ}$ 。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{n}}, \quad (28)$$

其中： n 为实验次数， y_i 为第*i*次实验转台转动的转角值， $f(x_i)$ 为第*i*次实验纠偏算法计算的偏角。

(2)控制转台每次以 20″角度进行转动,同时用基板纠偏算法计算基板的偏转角度,实验结果如图 13 所示。

从实验结果可以看出,在大约 2 600″的角度范围内,纠偏算法计算偏角与转台实际转角的偏差在±1″之内,均方根误差 RMSE=0.39″。

表 2 转台以 200″转动的角度偏差
Tab. 2 Angle deviation of the rotary table rotating at 200″

Number of experiments	Algorithm calculation angle	Absolute error	Number of experiments	Algorithm calculation angle	Absolute error
1	199.31	−0.69	13	199.47	−0.53
2	200.82	0.82	14	200.99	0.99
3	199.84	−0.16	15	200.97	0.97
4	200.86	0.86	16	200.96	0.96
5	200.39	0.39	17	199.92	−0.08
6	200.91	0.91	18	200.93	0.93
7	200.00	0	19	201.07	1.07
8	200.35	0.35	20	199.72	−0.28
9	200.96	0.96	21	200.87	0.87
10	201.47	1.47	22	200.33	0.35
11	200.48	0.48	23	199.82	−0.18
12	199.98	−0.02	24	200.80	0.80

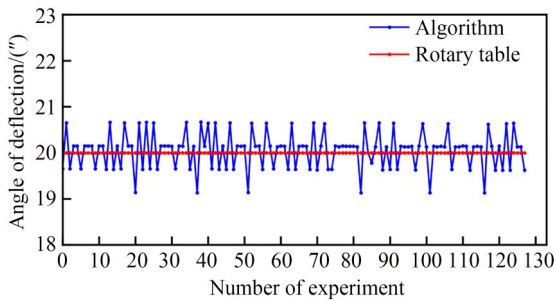


图 13 转台以 20″转动的角度偏差
Fig. 13 Angle deviation of the rotary table rotating at 20″

5. 2. 4 墨滴打印精度验证

通过实验验证墨滴的打印精度和像素坑定位的重复精度：

(1)控制喷头打印墨滴到基板像素坑,如图 14 所示,显示了喷头沿工件台方向扫描打印墨滴的部分图像。实验选取了同一喷孔打印的同一

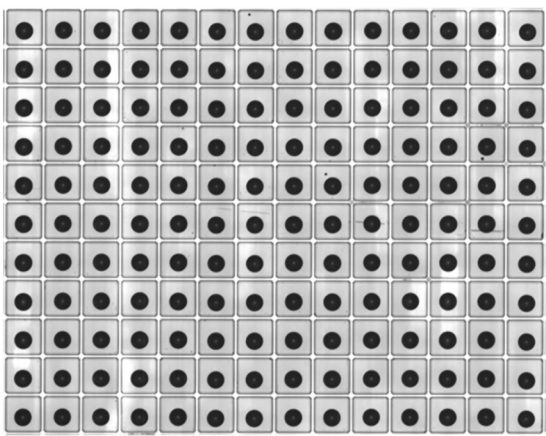


图 14 墨滴打印像素坑测试
Fig. 14 Ink drop print pixel pit test

列像素坑,得到了图像中像素坑中心像素坐标和墨滴中心像素坐标的偏差,如表 3 所示。

由实验结果可以看出,像素坑中心和墨滴打

表 3 墨滴打印位置偏差			
Tab. 3 Ink drop printing position deviation (μm)			
Pixel pit center coordinates	Ink drop center coordinates	X deviation	Y deviation
(42.63,39.15)	(40.89,37.37)	1.74	1.78
(41.76,115.71)	(40.89,114.80)	0.87	0.91
(41.76,193.14)	(40.02,192.23)	1.74	0.91
(41.76,270.57)	(40.02,269.66)	1.74	0.91
(40.89,347.13)	(40.02,347.09)	0.87	0.04
(40.89,424.56)	(40.02,423.65)	0.87	0.91
(40.89,501.99)	(39.15,501.08)	1.74	0.91
(40.02,578.55)	(39.15,578.51)	0.87	0.04
(40.02,655.98)	(39.15,655.07)	0.87	0.91
(40.02,733.41)	(38.28,732.50)	1.74	0.91
(40.02,810.84)	(38.28,809.06)	1.74	1.78

印的 X 向偏差最大值为 1.74 μm,均方根误差 RMSE=0.43 μm,Y 向偏差最大值为 1.78 μm,均方根误差 RMSE=0.52 μm。墨滴打印最大偏差为 2.49 μm,均方根误差为 0.67 μm,打印精度满足指标要求。

(2)保证每次测试条件一致,通过转台控制使基板偏转不同的角度,采集对位标记图像,使用纠偏和定位算法计算出基板需要偏转的角度、工件台运动位移量和喷墨轴运动位移量,控制运动台和喷墨轴运动到基板首个像素坑位置,计算每次打印墨滴的中心坐标和像素坑坐标,得到墨滴打印的重复定位精度如表 4 所示。

由实验结果可以看出,像素坑中心和墨滴打印的 X 向偏差最大值为 1.74 μm,均方根误差 RMSE=0.87 μm,Y 向偏差最大值为 1.78 μm,均方根误差 RMSE=0.43 μm。墨滴打印最大偏差为 2.49 μm,均方根误差为 0.97 μm,打印重复精度满足指标要求。

参考文献:

[1] 郭媛媛,蒋洪伟,袁冬,等. 电润湿显示材料与器件技术研究进展[J]. 液晶与显示, 2022, 37(8):

表 4 墨滴打印重复定位偏差			
Tab. 4 Ink drop printing repeat localization deviation(μm)			
Pixel pit center coordinates	Ink drop center coordinates	X deviation	Y deviation
(42.63,39.15)	(40.89,37.37)	1.74	1.78
(41.76,39.15)	(41.76,37.37)	0	1.78
(42.63,40.02)	(41.76,38.24)	0.87	1.78
(42.63,39.15)	(40.89,37.37)	1.74	1.78
(41.76,40.02)	(40.02,38.24)	1.74	1.78
(40.89,40.02)	(40.02,39.11)	0.87	0.91
(40.89,39.15)	(39.15,38.24)	1.74	0.91
(40.02,39.15)	(40.89,37.37)	-0.87	1.78
(41.76,39.15)	(40.89,38.24)	0.87	0.91
(40.02,40.02)	(40.02,39.11)	0	0.91
(40.89,40.02)	(39.15,39.11)	1.74	0.91

6 结 论

本文提出了一种面向电润湿电子纸显示器喷墨打印工艺的基板角度纠偏及定位方法,解决了传统算法很难在大范围视野下对小尺寸特征的高精度识别和定位的难题。通过改进相机内外参标定法和改进显微成像标定法,对各个相机安装偏转角度标定、多相机相对位置标定以及喷墨打印运动轴与视觉系统安装架安装角标定。结合标定结果,设计了基板角度纠偏和定位算法,并在喷墨打印平台进行了实验验证,结果表明基板纠偏算法对基板角度的校正误差在±2°以内,像素坑定位误差在±3 μm 以内,满足显示墨水打印填充的精度要求。相较于其他定位算法,本文方法在不借助其他设备的情况下完成高精度、高效率基板角度纠偏和定位,不受环境光、安装精度等影响,具有较高的稳定性,而且适用范围更加广泛,对新型显示装备制造及相关领域有重要指导意义。

923-941.
GUO Y Y, JIANG H W, YUAN D, *et al.* Progress in electrowetting display materials and device technology[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals*

- and Displays*, 2022, 37(8): 923-941. (in Chinese)
- [2] 唐彪, 赵青, 周敏, 等. 印刷电润湿显示技术研究进展[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2016, 48(1): 1-8.
- TANG B, ZHAO Q, ZHOU M, *et al.* Research progress on printed electrofluidic display technology [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 48(1): 1-8. (in Chinese)
- [3] KURIC I, KLARÁK J, BULEJ V, *et al.* Approach to automated visual inspection of objects based on artificial intelligence[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(2): 864.
- [4] 王晓东, 崔世鹏, 徐征, 等. 面向精密微装配的视觉复合定位[J]. 光学精密工程, 2023, 31(19): 2857-2866.
- WANG X D, CUI S P, XU Z, *et al.* Visual composite positioning for precision microassembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(19): 2857-2866. (in Chinese)
- [5] ZHANG W N. Combination of SIFT and canny edge detection for registration between SAR and optical images[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 19: 4007205.
- [6] JIANG X Y, XIA Y F, ZHANG X P, *et al.* Robust image matching via local graph structure consensus[J]. *Pattern Recognition*, 2022, 126: 108588.
- [7] DING J, YAN Z G, WEI X C. High-accuracy recognition and localization of moving targets in an indoor environment using binocular stereo vision[J]. *ISPRS Int J Geo Inf*, 2021, 10: 234.
- [8] JIN Y R, SHI Z Y, XU X L, *et al.* Target localization and grasping of NAO robot based on YOLOv8 network and monocular ranging [J]. *Electronics*, 2023, 12(18): 3981.
- [9] HAN Y. Reliable template matching for image detection in vision sensor systems[J]. *Sensors*, 2021, 21(24): 8176.
- [10] YANG Y, CHEN Z, LI X L, *et al.* Robust template matching with large angle localization [J]. *Neurocomputing*, 2020, 398: 495-504.
- [11] ZHANG Y F, ZHANG Z, PENG S H, *et al.* A rotation invariant template matching algorithm based on Sub-NCC[J]. *Mathematical Biosciences and Engineering: MBE*, 2022, 19(9): 9505-9519.
- [12] 李永良. 喷墨打印装备高精度基板定位算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- LI Y L. *Research on High-Precision Substrate Positioning Algorithm for Inkjet Printing Equipment* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [13] BEDAKA A K, LEE S C, MAHMOUD A M, *et al.* A camera-based position correction system for autonomous production line inspection [J]. *Sensors*, 2021, 21(12): 4071.
- [14] 罗家祥, 林畅赫, 王加朋, 等. 结合深度卷积网络与加速鲁棒特征配准的图像精准定位[J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 469-476.
- LUO J X, LIN C H, WANG J P, *et al.* Accurate image locating combining deep convolution network with SURF registering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2): 469-476. (in Chinese)
- [15] 欧闻. 面向喷墨打印的高精度基板角度检测与纠偏算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- OU W. *Research on High-Precision Substrate Angle Detection and Deviation Correction Algorithm for Inkjet Printing* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [16] 吕斯俊. 基于显微视觉的柔性基板检测系统及关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- LV S J. *Research on Inspection System and Key Technology of Flexible Substrate Based on Microscopic Vision* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [17] 田俊英, 伍济钢, 赵前程. 视觉系统中摄像机标定方法研究现状及展望[J]. 液晶与显示, 2021, 36(12): 1674-1692.
- TIAN J Y, WU J G, ZHAO Q C. Research progress of camera calibration methods in vision system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(12): 1674-1692. (in Chinese)
- [18] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [19] LU R S, LI Y F. A global calibration method for large-scale multi-sensor visual measurement systems [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, 116(3): 384-393.
- [20] SUN P F, TAN H S, ZHOU F Q. A novel glob-

al calibration approach for multi-viewpoint 3D vision measuring system [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 71692-71704.

[21] HU M K. Visual pattern recognition by moment invariants[J]. *IRE Transactions on Information Theory*, 1962, 8(2): 179-187.

作者简介:



安 宁(1993—),男,山西朔州人,硕士,2020年于郑州大学获得硕士学位,主要从事图像处理、机器视觉、人工智能等方面的研究。E-mail: anning@jihualab.com

通讯作者:



徐 成(1992—),男,江西九江人,博士,2020年于重庆大学获得博士学位,主要从事喷墨打印、电子纸墨水填充与封装等方面的研究。E-mail: xucheng@jihualab.com