

文章编号 1004-924X(2013)02-0522-09

# 精密视觉印刷设备的自标定

梁经伦, 陈家钊, 莫景会, 邝泳聪, 张宪民\*

(华南理工大学 广东省精密装备与制造技术重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 为了提高全自动视觉印刷设备的精度, 提出了一种简易、有效标定基于三自由度平面并联调整台的视觉丝网印刷设备的算法。首先, 分析和标定了视觉测量系统, 并通过激光干涉仪验证了结果的准确性。然后, 分析了三自由度平面并联调整台的几何参数误差; 基于印刷设备自身的视觉测量系统, 分步标定了并联平台的动平台坐标系、传动比误差和仅需的部分几何误差源。提出了一种满足全姿态且适应不同制程的三角形面姿态插值方法和纠偏调整算法, 从而避免了较为复杂的几何全参数辨识, 降低了对调试人员的技术要求。实验结果表明: 在并联调整台工作空间内, 标定后的最大位置误差从标定前的  $161.6 \mu\text{m}$  下降为  $12.3 \mu\text{m}$ , 最大姿态误差从标定前的  $2.232''$  下降为  $0.720''$ , 基本满足印刷设备对精度的要求。

**关键词:** 印刷设备; 机器视觉; 并联平台; 运动学标定; 定位精度

**中图分类号:** TP242.6; TS801.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132102.0522

## Self-calibration of precise vision-based printing equipment

LIANG Jing-lun, CHEN Jia-zhao, Mo Jing-hui, KUANG Yong-cong, ZHANG Xian-min\*

(Key Laboratory of Precision Equipment and Manufacturing Technology of Guangdong Province, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhangxm@scut.edu.cn

**Abstract:** To improve the precise of all automatic printing equipment, a simple and effective calibration method was proposed to calibrate the screen printing equipment based on a novel three-degree-of-freedom (3-DOF) planar parallel stage. Firstly, a vision-based measuring system was analyzed and calibrated, and its measurement accuracy was also evaluated by a laser interferometer. Then, the geometric errors of the 3-DOF planar parallel stage was analyzed and the frame of the parallel stage's movable platform, screw lead errors and some geometric errors were identified in steps based on a vision-based measuring system in the equipment. Furthermore, the orientation interpolation and alignment methods using a triangular area to position the alignment point were presented to satisfy the need for different product processes in the whole workspace. For the processing mentioned above, this calibration method can calibrate the equipment itself automatically without complicated identification for all geometric errors and the need for any background in parallel robot calibration. Experimental results after calibration show that the maximum position and orientation errors inside the workspace have been reduced from  $161.6 \mu\text{m}$  and  $2.232''$  to  $12.3 \mu\text{m}$  and  $0.720''$ , respectively, which satisfies the e-

收稿日期: 2012-12-19; 修订日期: 2013-01-06.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA050302); 粤港关键领域重点突破项目 (东莞专项 2012205122); 国家杰出青年科学基金资助项目 (No. 50825504)

equipment requirement for high accuracy.

**Key words:** printing equipment; machine vision; parallel stage; kinematic calibration; positioning accuracy

## 1 引言

目前,全自动视觉丝网印刷设备已被广泛应用于表面贴装技术(Surface Mount Technology, SMT)和晶硅太阳能光伏电池的金属化大批量生产中。随着印制电路板向微型化、高密度、零缺陷的方向发展<sup>[1]</sup>,以及晶硅太阳能光伏电池金属线越来越细<sup>[2]</sup>,对全自动视觉印刷设备的精度提出了更高的要求。在复杂的工艺步骤中,视觉测量和平面三自由度纠偏调整是印刷设备实现精密对准的关键,传统的三自由度平面调整机构通常采用典型的“三明治”串联叠加结构,这种串联结构易于控制,但由于底层平台需要支撑厚重的上层结构,并且为了在快速对位下避免振动,这种串联结构体积和重量相对较大,终端响应较慢。

近年来,平面并联机构越来越受到关注,并广泛应用于工业生产中<sup>[3-4]</sup>,如 Hephaist Seiko 公司生产的平面三自由度微动平台等。针对各种平面并联机构,文献<sup>[5-7]</sup>提出了多种运动学标定方法,其中终端全位姿误差测试多采用坐标测量仪(Coordinate Measurement Machine, CMM)、激光跟踪仪等工具,相比之下基于视觉测量方法经济实用,被认为是一种可用在并联机器人标定的工具<sup>[8]</sup>。本文利用印刷设备自身的视觉测量系统,对核心调整机构——一种特殊的三自由度平面并联平台<sup>[9]</sup>的标定方法进行研究,考虑到并联对位平台的工业化应用和批量生产的背景,提出了一种有别于传统并联机构运动学标定的方法,实验表明标定后并联对位平台定位精度得到了显著改善。

## 2 基于视觉的平面纠偏系统

### 2.1 视觉纠偏系统的硬件构成

图1为视觉纠偏系统的结构图,它主要由视觉测量系统、三自由度平面并联对位平台以及计算机控制系统等组成。其中视觉测量系统由二自由度视觉运动子系统和图像采集装置<sup>[10]</sup>组成,图

像采集装置由2个640×480 CCD相机、照明系统和图像采集卡等组成,结构如图2所示;视觉运动子系统XY方向运动机构均由伺服电机和精密

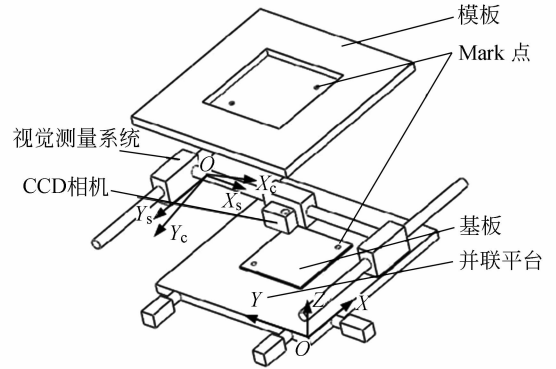


图1 印刷设备视觉纠偏定位系统结构图

Fig.1 Block diagram of vision-based positioning system

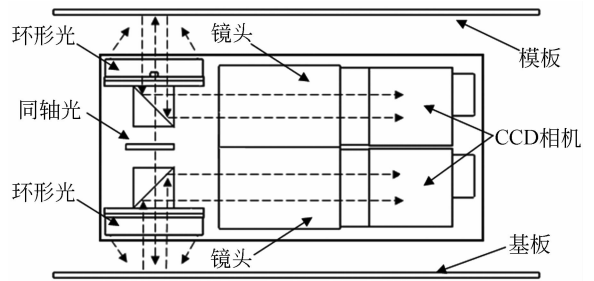


图2 印刷设备图像采集装置示意图

Fig.2 Diagram of image acquisition system of printer

滚珠丝杆驱动,其中Y方向双导轨安装在印刷机支架上,X方向运动机构串联安装在Y方向滑块上。三自由度平面并联定位平台可简称为XY-Theta并联对位平台,由定平台、动平台、三条运动支链和4个支撑滚轮构成,被安装在一个刚性提升机构中,作为丝网印刷设备的调整对位承印模块。各支链含一个主动移动副(P)、转动副(R)和被动移动副(P),其中转动副与被动移动副间由一根定长连杆连接,连杆垂直移动副运动方向,因此XY-Theta并联对位平台是一种特殊的3-PRP平面并联机构。

### 2.2 视觉纠偏系统的工作原理

视觉纠偏系统的基本工作流程为:根据制程参数,运输皮带将基板运送至XY-Theta并联对

位动平台上,视觉运动子系统驱动图像采集装置运动到指定位置,同时拍摄基板和模板的 Mark 点图像,图像处理获取基板和模板的位置信息  $M_0$  和  $M_1$  (向量坐标),并以此计算出动平台需要从当前位姿(基板)到目标位姿(模板)所需的旋转角度  $\theta$  和平移量  $[x, y]^T$ ,接着根据 XY-Theta 并联对位平台的运动学逆解模型,计算得到 3 个支链电机的输入量,然后驱动电机,实现对位。

XY-Theta 并联平台的运动学简图如图 3 所示,建立基础直角坐标系  $O-XY$ ,  $X$  轴垂直支链 2 和支链 3 输入方向,并通过支链 2 输入行程中点,  $Y$  轴垂直  $X$  轴,通过支链 1 输入行程中点,因此输入  $q_1, q_2, q_3$  取值为  $-5$  mm 至  $5$  mm,各结构参数分别为  $d_1=268$  mm,  $d_2=39.5$  mm,  $d_3=431.5$  mm,连杆  $A_iB_i$  长度为  $l_i (i=1, 2, 3)$ ,  $l_1=l_2=l_3=28$  mm。  $P-X_pY_p$  为动平台的运动坐标系。

XY-Theta 并联平台作为平面对位机构,动平台的终端位姿  $\mathbf{X}$  可表达为动平台从基准位姿 ( $q_1=q_2=q_3=0$ ) 到目标位姿所需的旋转角度  $\theta$  和平移量  $[x, y]^T$ ,矢量形式为

$$\mathbf{X}=[x, y, \theta]^T=[\mathbf{C}, \theta]^T, \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{C}=[x, y]^T$  为位置矢量。

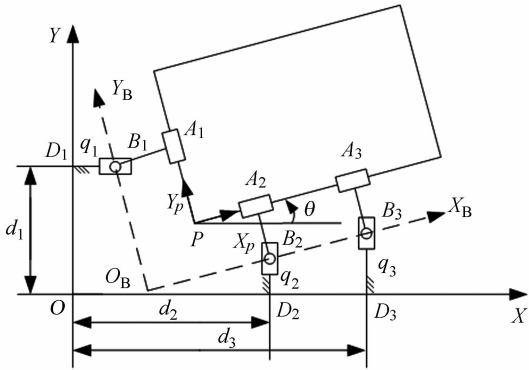


图 3 XY-Theta 并联对位平台运动学简图

Fig. 3 Diagram of XY-Theta parallel alignment stage

在基础坐标系下,通过视觉系统获得的基板和模板的位置坐标满足坐标变换的关系,文献[11]表明 3-PRP 平面并联机构有两种运动学求解方案,两种方案在纠偏实现上是等效的,若定义动平台逆时针旋转方向为正,则  $M_0$  和  $M_1$  变换关系为

$$\mathbf{M}_1=\mathbf{R}_\theta\mathbf{M}_0+\mathbf{C}, \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{R}_\theta$  为二维旋转变换矩阵。根据工作流程,至少获取两组基板和模板 Mark 点位置信息就可

通过式(2)和最小二乘法计算得到动平台的目标位姿  $\mathbf{X}$ 。

在理想情况下,动平台坐标系可等效为铰链中心点坐标系  $O_B-X_BY_B$ ,因此 XY-Theta 并联平台的逆解方程为

$$\begin{cases} q_1=x+(y-d_1)\tan\theta \\ q_2=y+(d_2-x)\tan\theta, \\ q_3=y+(d_3-x)\tan\theta \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可推出正解模型

$$\begin{cases} \theta=\arctan\frac{q_3-q_2}{d_3-d_2} \\ x=\frac{q_1d_{23}^2-q_2d_{23}(q_3-q_2)+d_1d_{23}(q_3-q_2)+d_2(q_3-q_2)^2}{d_{23}^2+(q_3-q_2)^2} \\ y=\frac{q_1d_{23}(q_3-q_2)+q_2d_{23}^2+d_1(q_3-q_2)^2-d_2d_{23}(q_3-q_2)}{d_{23}^2+(q_3-q_2)^2} \end{cases} \quad (4)$$

容易证明,XY-Theta 并联平台无奇异点。从运动学模型可以看出,该平台的位置与姿态与各支链输入高度耦合。

### 3 视觉测量系统的标定

高精度视觉测量是提高纠偏系统定位精度以及进行 XY-Theta 并联对位平台标定的基础,其误差源包括 CCD 相机图像测量误差和视觉运动子系统的定位误差,所以首先必须通过光学标定和运动学标定改善视觉测量精度。文献[12]表明圆点、十字等特殊图像的图像算法测量精度可达亚像素级(1/50 pixel),因此视觉测量精度主要考虑 CCD 相机成像误差。在小视场高分辨率的平面影像测量中,通常通过精确测量像素当量或比例尺来提高 CCD 成像精度<sup>[13-14]</sup>。图像采集装置如图 2 所示,在安装之前采用特殊的标定装置对上下 CCD 相机的对准进行初步标定,安装之后,像素当量值一般采用光刻高精度光学玻璃进行标定,视觉测量系统通过 CCD 相机获取光学玻璃标定板上的圆点(Mark 点)阵图像,然后使用图像匹配算法,获得 Mark 点阵的像素位置信息,与标定板的实际位置信息相比较,由此获得视觉测量系统的像素当量均值。

二维视觉运动子系统是典型的 XY 串联机构,其定位误差可分为运动参数误差和结构参数误差。运动参数误差包括丝杆传动比误差、反

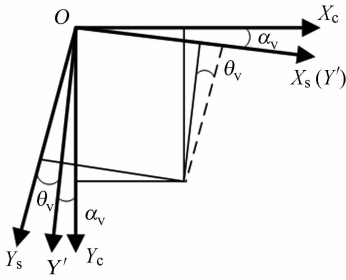


图 4 视觉测量系统坐标变换示意图

Fig. 4 Coordinate translation of vision-based measuring system

向运动间隙误差等。由于机构制造和装配误差的存在,结构参数误差也始终存在,在二维视觉运动子系统中,几何参数误差主要表现在角度误差中,包括 CCD 相机坐标系与运动轴之间的旋转角  $\alpha_v$  和运动轴的不垂直偏角  $\theta_v$ ,如图 4 所示。 $O-X_cY_c$  为视觉测量坐标系,与数字图像坐标系一致; $O-X_sY_s$  为视觉运动坐标系。 $O-X_cY_c$  与  $O-X_sY_s$  之间存在大小为  $\theta_v$  的角度变换,此外顾及到运动坐标系  $X_s$  轴和  $Y_s$  轴的不垂直性,因此  $O-X'Y'$  与  $O-X_sY_s$  之间还存在一个轴偏变换。其变换关系可表达为

$$\begin{cases} x' = x_s - y_s \sin \theta_v \\ y' = y_s \cos \theta_v \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_c = x' \cos \alpha_v - y' \sin \alpha_v \\ y_c = x' \sin \alpha_v + y_c \cos \alpha_v \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $\theta_v$  为轴偏角, $\alpha_v$  为旋转角。此外, $x_s = R_x p_x$ , $y_s = R_y p_y$ , $p_x$ 、 $p_y$  和  $R_x$ 、 $R_y$  分别为视觉运动子系统  $X$ 、 $Y$  轴的脉冲输入和传动转换比率(传动比与脉冲分辨率的比值)。联立式(4)、(5)

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_v & -\sin(\alpha_v + \theta_v) \\ \sin \alpha_v & \cos(\alpha_v + \theta_v) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_x p_x \\ R_y p_y \end{pmatrix}. \quad (6)$$

上式即为视觉运动子系统含误差的运动模型。针对式(6),可用标定板和相对测量的方式对视觉运动子系统的误差进行标定:将光学标定板固定在动平台上,视觉测量系统首先获取标定板的相对像素测量坐标系的放置角度;然后取视场中的某个 Mark 点为基准点,相机沿  $X_s$  轴以一定步长运动,记录相对输入脉冲量,视觉测量系统再次获取另一个 Mark 点,通过标定板 Mark 点的实际尺寸以及放置角度,可计算得到在视觉测量坐标系下此 Mark 点相对基准点的实际位置关

系,则根据式(6)可得  $X_s$  轴传动比  $R_x$  和旋转角  $\alpha_v$ 。重复此步骤,直至超出标定板范围为止,测量结果取平均值;最后, $Y_s$  轴也执行相应操作,求出传动比  $R_y$  和轴偏角  $\theta_v$ 。

## 4 XY-Theta 并联对位平台自标定

并联机构的运动标定分为误差建模、误差测量、参数辨识和误差补偿 4 个步骤,其中误差测量多用外部设备,如 CCM 等;参数辨识也需要 Matlab 等数据计算软件,并根据辨识性分析,人为地参与数据的排列组合。由于这种运动学标定方法很难通过编程等方法实现设备的自动标定或诊断,因此这种方法多用在样机或者机床等精度要求高、标定次数少的领域。而对于量产设备,对每台线上设备进行运动学标定,不仅增加了额外测量成本,拉长了设备生产周期,而且对设备调试人员的理论和技术的要求较高。针对这种情况,本文根据平面并联对位平台工作空间小等特点,运用设备自身的视觉测量系统,提出一种以姿态分段线性插值为核心的自标定方法。该方法避免了复杂的几何误差辨识,实现了并联平台的部分解耦控制和自动标定,达到了精密对位要求。

### 4.1 XY-Theta 并联对位平台误差分析

XY-Theta 并联对位平台位姿误差构成较复杂,除了 3 个运动支链输入传动比误差  $\delta R_1$ 、 $\delta R_2$  和  $\delta R_3$ ,还包括 12 个几何参数误差源<sup>[14]</sup>,包括  $\delta q_1$ 、 $\delta q_2$ 、 $\delta q_3$ 、 $\delta d_1$ 、 $\delta d_2$ 、 $\delta d_3$ 、 $-\delta l_2 + \delta l_3$ 、 $\delta \beta_1$ 、 $\delta \beta_2$ 、 $\delta \beta_3$ 、 $\delta \alpha_1$ 、 $\delta \alpha_2$  等,其中  $\delta l_2$  和  $\delta l_3$  共同作用,视为一个误差源,误差模型如图 5 所示。结合平台结构,分析各种误差的作用机理,误差源可分为 4 种类型:第一类为传动比误差,包括  $\delta R_1$ 、 $\delta R_2$  和  $\delta R_3$ ;第二类为输入型误差,即基准位置与动平台坐标系  $O_B-X_B Y_B$  的误差,包括  $\delta q_1$ 、 $\delta q_2$ 、 $\delta q_3$ ,其中  $\delta q_2$  和  $\delta q_3$  构成的初始误差,对动平台旋转以及带旋转的平移定位精度影响较大;第三类为结构型误差,包括  $\delta d_1$ 、 $\delta d_2$ 、 $\delta d_3$ 、 $-\delta l_2 + \delta l_3$ ,这类误差始终存在,对动平台的姿态和位置均有影响,但由于连杆杆长相等,并采用相同的加工工艺,因此  $-\delta l_2 + \delta l_3$  误差较小;第四类为偏角型误差,包括  $\delta \beta_1$ 、 $\delta \beta_2$ 、 $\delta \beta_3$ 、 $\delta \alpha_1$ 、 $\delta \alpha_2$ ,根据误差灵敏度分析<sup>[15]</sup>, $\delta \alpha_1$  和  $\delta \alpha_2$  对终端定位误差有直接影响,而由于平台输入行程较短, $\delta \beta_1$ 、 $\delta \beta_2$  和  $\delta \beta_3$  误差较小,对终端位

姿误差的影响很小。

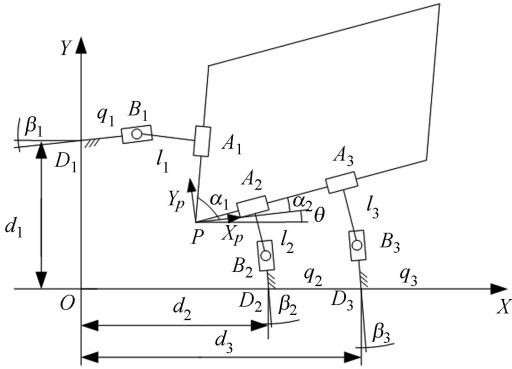


图 5 XY-Theta 并联对位平台误差模型

Fig. 5 Error model of XY-Theta parallel alignment stage

如果运用正、逆运动学方法对 12 个几何参数误差源以及 3 个传动比误差源进行标定,就必须根据不同的位姿和误差雅克比矩阵的可辨识性,对雅克比矩阵的行列进行组合<sup>[6]</sup>,分步测量、辨识和补偿。

#### 4.2 XY-Theta 并联对位平台标定

由于误差的存在,理想运动学模型式(3)和(4)已经不能满足高精度定位要求。观察 XY-Theta 并联平台的结构,动平台的姿态(旋转角度)由支链 2、3 的输入决定,因此,纠偏调整前采集记录支链 2、3 的输入量与动平台姿态、轨迹的关系,然后根据分段线性插值的方法获得动平台姿态及动平台上 Mark 点位置,最后根据姿态进行平移调整。这种方法可实现并联平台的旋转和平移的解耦控制,降低各类误差的影响。具体标定步骤如下:

(1) 确定动平台坐标系。将标定板固定在动平台上,驱动视觉测量系统保持不动,获取动平台上的某个 Mark 点位置;调整 XY-Theta 并联平台支链 2、3 的基准位置或原点位置,使平台沿 X 方向平移的方向与视觉测量系统的 X<sub>c</sub> 轴方向一致,并认定为动平台坐标系,视觉测量系统坐标系为世界坐标系,标定第二类输入型误差以及偏角型误差  $\alpha_2$ 。

(2) 校正传动比。相机保持不动,支链 1 的输入电机按一定脉冲输入量运动,视觉测量系统测量 Mark 点 X 方向平移量,重复测试,校正支链 1 传动比  $R_1$  以及轴偏角  $\beta_1$  在输入方向上的影响;驱动支链 2、3 输入电机,并保持同步输入  $q_2 = q_3$ ,视觉测量系统获取两个或两个以上 Mark

点,并计算动平台摆动角度与输入量  $q_2$  或  $q_3$  的关系,微调传动比值  $R_2$  或  $R_3$  使支链 2、3 同步输入时动平台摆动角度为零;再次同时驱动支链 2、3 输入电机按相同输入脉冲量运动,视觉测量系统测量单个 Mark 点 Y 方向平移分量,重复测试,所得结果同步校正传动比  $R_2$  和  $R_3$ ,同理这个过程也校正轴偏角  $R_2$  和  $R_3$  在各种输入方向上的影响。

因步骤(2)中各支链传动比值已被改变,所以回零后,基准位置值也必然不同与步骤(1)标定位置,因此需重复(1)步骤,重复标定平台坐标系。

(3) 轴偏角测定。由于动平台轴偏角  $\alpha_1$  的存在,步骤(2)中 Mark 点移动方向与坐标 Y 轴存在偏角,重复支链 2、3 传动比校正过程,可计算并保存动平台轴偏角  $\alpha_1$  值。

(4) 动平台姿态标定。考虑到姿态标定数据要适应不同制程中不同尺寸的基板,基板上的 Mark 点落将落在动平台上不同的区域,因此标定 Mark 点的范围应覆盖动平台上的最大工作区域。保持支链 1 输入为零,视觉测量系统移动至动平台上某个 Mark 点处,获取该点位置信息,然后支链 2、3 输入电机以一定步长同时异向运动,再次采集该 Mark 点位置信息,直至运动到输入极限为止。重复此步骤,对其他 Mark 点进行标定,并通过两个或两个以上的 Mark 点计算动平台对应每步的旋转角度值,作为插值节点参数进行保存。这就相当于标定了支链 2、3 相关参数与平台位姿的关系,同时也省去了第三类结构性误差参数的辨识。

#### 4.3 XY-Theta 并联对位平台纠偏实现

(1) 根据基板 Mark 的位置信息,在动平台的标定区域内对基板 Mark 点进行搜索定位,确定距离该 Mark 点  $M(x, y)$  最近的 3 个点  $M_i(x_i, y_i)$  ( $i=1, 2, 3$ ),即满足

$$M_i = \{ \min((x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 | M_i \in Q_i) \}, \quad (7)$$

式中: $i=1, 2, 3, Q_i$  为排除了已定位点的标定点集合。

搜索到的 3 个定位点可构成一个三角区域,若基板上的 Mark 点在标定区域范围内,则此 Mark 在这个三角区域内。如图 6(a)所示,通过 M 点做平行与  $M_2M_3$ 、 $M_1M_2$  的直线交与 A、B 点,则可求出 A、B 点关于线段  $M_1M_2$ 、 $M_2M_3$  的

定比值  $\lambda_1, \lambda_2$

$$\lambda_1 = \frac{(x_2 - x_3)(y - y_1) + (y_2 - y_3)(x_1 - x)}{(x_2 - x_3)(y_2 - y) + (y_2 - y_3)(x - x_2)}, \quad (8)$$

$$\lambda_2 = \frac{(x_2 - x_1)(y - y_3) + (y_2 - y_1)(x_3 - x)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y) + (y_2 - y_1)(x - x_2)}. \quad (9)$$

(2) 根据基板的纠偏角度值  $\theta$ , 首先在标定的链表中搜索角度的插值区间, 然后通过分段线性插值方法得到输入量  $\Delta q_2$  和  $\Delta q_3$  以及步骤(1)所求的3个定位点旋转纠偏角度  $\theta$  后的插值位置  $M_i'$  ( $i=1, 2, 3$ ), 构成对应新的三角区域, 如图6(b)所示。然后根据步骤(1)的定比值  $\lambda_1, \lambda_2$  求出对应定比分点  $A', B'$ , 继而过  $A', B'$  点分别做平行于边  $M_1'M_2'$  和  $M_2'M_3'$  的直线, 交于  $M'$  点, 并近似认为该点为基板 Mark 点  $M$  旋转  $\theta$  角后的位置, 可用相同的方法得到其他 Mark 点旋转后的位置, 从而确定动平台的姿态。

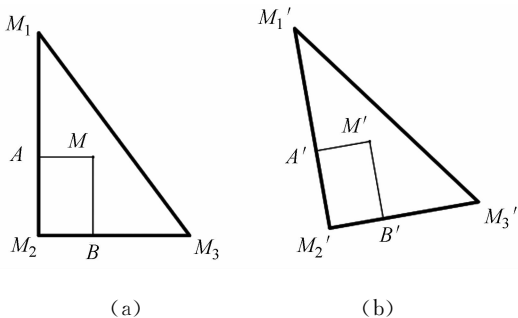


图6 Mark点三角形定位示意图

Fig. 6 Diagram of the triangular area to position the Mark

(3) 根据旋转纠偏角度  $\theta$  后的动平台位姿, 即可确定中心对齐或边角对齐所需  $x, y$  方向上的平移量为  $\Delta x, \Delta y$ 。若考虑轴偏角  $\alpha_1$  的存在, 支链1和支链2, 3同时输入的量  $\Delta q_x, \Delta q_y$  分别为

$$\Delta q_1 = \frac{(\Delta x + \Delta y \cot(\theta + \alpha_1)) \sin \alpha_1}{\sin(2\theta + \alpha_1)}, \quad (10)$$

$$\Delta q_{23} = \frac{(\Delta y - \Delta x \tan \theta) \sin \alpha_1}{\sin(2\theta + \alpha_1)}. \quad (11)$$

因此, 结合步骤(3)的纠偏角度插值支链2, 3输入量, 最终可得到各支链最终输入量。

#### 4.4 姿态插值区间确定

根据上述标定和纠偏实现过程可知, 本文对动平台姿态和动平台上的 Mark 点轨迹采用了分段线性插值的逼近方法, 插值精度(截断误差)可用插值多项式的余项来评估, 其大小与插值区间

相关。因分段线性插值函数具有一致收敛性, 若分别以理想模型式(4)中的姿态表达式以及式(1)为被插函数  $f$ , 对于任给的精度要求  $\epsilon > 0$ , 只要分段区间  $h$  满足

$$h < \sqrt{8\epsilon/M}, \quad (11)$$

式中:  $M = \max_{a \leq q \leq b} |f''(q)|$ , 则余项  $R(q)$  即有

$$R(q) = |f(q) - \varphi(q)| \leq \epsilon \quad \forall q \in [a, b]. \quad (12)$$

理想模型式(4)在输入区间内连续, 且存在二阶导数, 所以可以根据插值所需精度决定分段区间的大小。此外, 由于动平台上不同位置的 Mark 点运动轨迹不尽相同, 因此三角形区域的大小也是影响插值 Mark 点精度的因素之一。推算可得, 当支链2, 3输入差 ( $q_3 - q_2$ ) 每取1 mm为节点, 三角形面积小于  $800 \text{ mm}^2$  时, Mark 点分段线性插值误差小于  $15 \text{ }\mu\text{m}$ , 姿态角度误差小于  $8.5 \times 10^{-3}''$ 。

## 5 实验与结果

### 5.1 视觉测量系统实验验证

按照视觉测量系统标定步骤进行实验, 首先测得像素当量(分辨率)及辨识参数, 如表1视觉测量系统部分所示。由表1数据可知, 运动轴的不垂直偏角  $\theta_v$  非常小, 而旋转角  $\alpha_v$  为误差主要影响因素。

为了验证辨识参数的有效性以及视觉测量的准确性, 同时使用 Renishaw ML10 双频激光干涉仪进行误差测量。首先, 激光干涉仪测试了视觉运动子系统平移误差, 结果如图7所示, 标定后子系统  $X, Y$  轴平移误差得到了显著的改善; 其次, 使用激光干涉仪和视觉测量系统测量单个视场内动平台平移误差以及平移过程中的摆角, 其中摆角角度通过视觉测量系统测量两个不同 Mark 点坐标并按标定参数转换后求得。结果如图8, 9所示, 视觉测量结果与激光干涉仪测量结果相比, 平移误差最大差值为  $3.960 \text{ }\mu\text{m}$ , 摆角最大差值为  $0.468''$ 。

### 5.2 XY-Theta 并联对位平台实验验证

按照上文的标定和对纠偏位的方法, XY-Theta 并联平台的重复定位精度尤为关键, 因此按照 ISO 9283 标准<sup>[16]</sup>(工业机器人性能及相关

测试方法)和文献[5]所提的位置重复性测试方法,使用视觉测量系统,首先对 XY-Theta 并联对位平台的位置的单向、多向重复精度进行测试,具体测试流程可参考作者之前工作<sup>[9]</sup>,由于 XY-Theta 并联平台输入支链采用了精密滚珠丝杆,所以测得结果比文献[9]所列结果要好,多向重复定位精度为  $6.343 \mu\text{m}$ ,最小包围圆的半径为  $4.852 \mu\text{m}$ ;最差单向重复定位精度为  $3.274 \mu\text{m}$ ,最小包围圆半径为  $2.279 \mu\text{m}$ 。从结果可知,支链运动副的反向间隙作用表现明显,可按照保持单向输入的间隙补偿方法<sup>[9]</sup>进行补偿,其结果优于多向重复定位精度。

表 1 参数辨识结果

Tab.1 Identified results of parameters

对象	参数	名义值	辨识值 $\pm 3\sigma$
	像素当量/ $(\mu\text{m} \cdot \text{pixel}^{-1})$	12.500	$12.3369 \pm 0.0003$
视觉测量系统	$R_x / (\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	16.000	$15.9972 \pm 0.0002$
	$R_y / (\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	40.000	$39.9984 \pm 0.0003$
	$\alpha_v / (^\circ)$	0.000	$0.0325 \pm 0.0029$
	$\theta_v / (^\circ)$	0.000	$-0.0060 \pm 0.0034$
XY-Theta 并联对位平台	$R_1 / (\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	2.000	$2.0064 \pm 0.0001$
	$R_2 / (\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	2.000	$2.0027 \pm 0.0002$
	$R_3 / (\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	2.000	$2.0021 \pm 0.0002$
	$\alpha_1 / (^\circ)$	90.000	$89.867 \pm 0.0014$

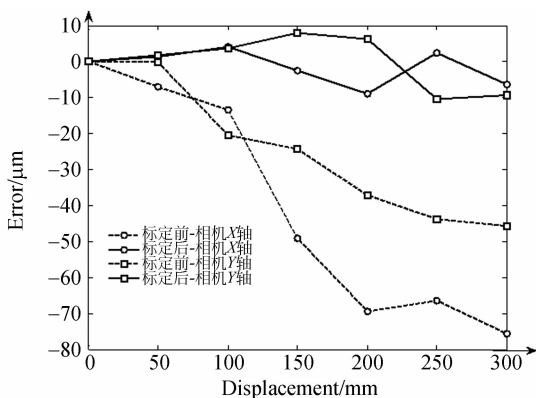


图 7 视觉测量系统标定前后平移误差对比

Fig. 7 Comparison of translation errors of vision-based measuring system before and after calibrations

在保证重复定位精度前提下,按照 XY-Theta 并联对位平台标定步骤,确定坐标系关系后,容易测得传动比和轴偏角参数,如表 1 XY-Theta 并联

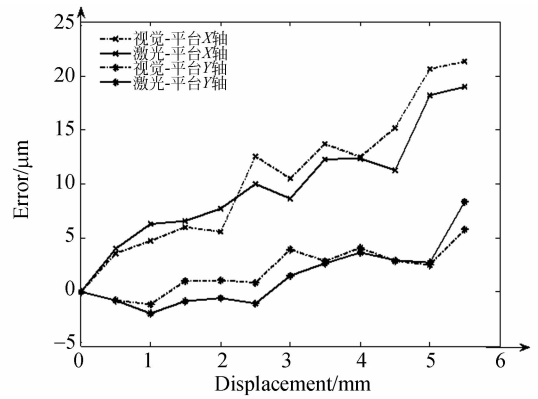


图 8 视觉测量与激光干涉仪测量平移误差对比

Fig. 8 Comparison of translation errors using vision-based measuring system and laser interferometer

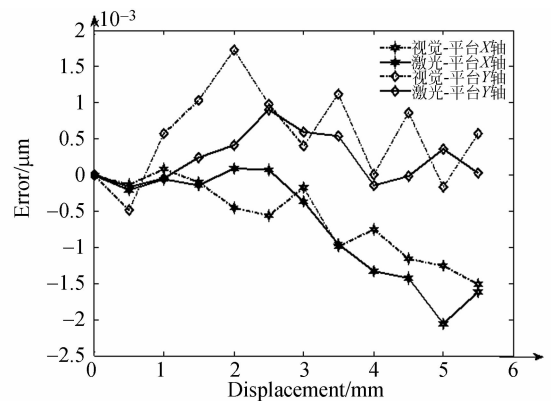


图 9 视觉测量与激光干涉仪测量摆角误差对比

Fig. 9 Comparison of rotation errors using vision-based measuring system and laser interferometer

对位平台部分所示,动平台姿态按支链 2、3 输入差 1 mm 步长标定。为了验证基于三角形面的姿态插值方法以及纠偏调整算法的有效性,利用同一套相匹配的基板和模板以及标定后的视觉测量系统,分别进行 XY-Theta 并联对位平台标定前和标定后的对比实验。实验按照视觉纠偏系统实际工作流程进行模拟,将基板随机按某种位姿固定在动平台上,视觉测量系统获取当前位姿和目标位姿信息后,XY-Theta 并联对位平台分别按标定前和标定后的模型进行纠偏调整,对位完成后再次通过视觉测量系统测量调整后的位姿与目标位姿的偏差值,然后重新固定基板,每种位姿重复测量 5 次,并求出误差均值。限于篇幅,文中仅列出 8 组不同位姿下的对位误差值,如表 2 所示。

从表中可知,对位平台的最大位置误差从标定前的 161.6  $\mu\text{m}$  下降到标定后的 12.3  $\mu\text{m}$ ,最大姿态

误差从标定前的 2.232" 下降到标定后的 0.720",定位精度得到了显著的改善。

表2 XY-Theta 并联对位平台标定前与标定后位姿误差

Tab.2 Pose errors of XY-Theta parallel alignment stage before and after calibrations

名义位姿 ( $x, y, \theta$ ) ( $\mu\text{m}, ''$ )	标定前				标定后			
	$\delta x$ ( $\mu\text{m}$ )	$\delta y$ ( $\mu\text{m}$ )	$\delta x, \delta y$ ( $\mu\text{m}$ )	$\delta \theta$ ( $''$ )	$\delta x$ ( $\mu\text{m}$ )	$\delta y$ ( $\mu\text{m}$ )	$\delta x, \delta y$ ( $\mu\text{m}$ )	$\delta \theta$ ( $''$ )
(1 230, 1 452, -681)	13	-98	98.9	-2.052	6.2	-8.3	10.4	-0.648
(1 251, -2 121, -572)	28	-127	130.1	-1.332	-8.5	-7.2	11.1	-0.576
(-625, -1 002, -325)	16	-25	29.7	-0.792	-5.0	-5.5	7.4	-0.288
(-1 610, 1 321, -261)	-18	-132	133.2	-1.764	-6.2	-5.5	8.3	-0.468
(-2 009, 421, 115)	-21	72	75	1.116	-6.8	4.5	8.2	0.396
(-921, -1 373, 481)	-28	81	85.7	1.224	4.3	-7.2	8.4	-0.432
(2 131, -1 521, 572)	-37	139	143.8	2.052	-7.5	-6.4	9.9	-0.612
(2 010, 1 275, 624)	-42	156	161.6	2.232	-9.2	-8.2	12.3	-0.72

## 6 结 论

为了满足工业设备自动化、高精度、低成本的要求,基于设备自身的视觉系统,针对一种三自由度平面并联平台,提出了一种以姿态插值为核心的简单实用的标定新方法,仅需辨识部分几何参数,避免了并联机构传统标定方法复杂的过程。首先,标定了视觉测量系统,实验证明了视觉测量

系统的准确性和可靠性;然后,给出了基于视觉测量的 XY-Theta 并联对位平台分步标定新方法和纠偏实现算法。实验结果表明:对位平台的最大位置误差从标定前的 161.6  $\mu\text{m}$  下降到标定后的 12.3  $\mu\text{m}$ ,最大姿态误差从标定前的 2.232" 下降到标定后的 0.720",定位精度得到了显著的改善,基本满足印刷设备对精度的要求,对同类定位平台的标定研究具有一定的参考价值。

## 参考文献:

- [1] PAN J, STORER R, SALLADE R, et al.. Critical variables of solder paste stencil printing for micro-BGA and fine-pitch QFP [J]. *IEEE Trans. on Electron. Pack.*, 2004, 27(2): 125-132.
- [2] JU M, LEE Y, LEE J, et al.. Double screen printed metallization of crystalline silicon solar cells as low as 30  $\mu\text{m}$  metal line width for mass production [J]. *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, 2012, 100: 204-208.
- [3] YU A, BONEV I, ZSOMBOR-MURRAY P. New XY-Theta positioning table with partially decoupled parallel kinematics[C]. *Proceeding of the IEEE Int. Symp. On Ind. Electron., Montreal, QC, Canada: ISIE*, 2006: 3108-3112.
- [4] 高猛, 李铁民, 唐晓强. 少自由度并联机床标定试验研究[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(9): 118-122. GAO M, LI T M, TANG X Q. Calibration experiment research of parallel kinematics machine with a few degrees[J]. *Chinese J. of Mech. Eng.*, 2003, 39(9): 118-122. (in Chinese)
- [5] JOUBAIR A, SLAMNI M, BONEV I. A novel XY-Theta precision table and a geometric procedure for its kinematic calibration[J]. *Robot. Cim. - Int. Manuf.*, 2012, 28: 57-65.
- [6] CHANG P, WANG J S, LI T M, et al.. Step kinematic calibration of a 3-DOF planar parallel kinematic machine tool[J]. *Sci. China Ser. E-Tech. Sci.*, 2008, 51(12): 2155-2167.
- [7] 何小妹, 丁洪生, 付铁, 等. 并联机床运动学标定研究综述[J]. *机床与液压*, 2004, 10: 9-11. HE X M DING H SH, FU T, et al.. Review on kinematic calibration of parallel kinematic machine [J]. *Mach. Tool & Hydraulics*, 2004, 10: 9-11. (in Chinese)
- [8] ZOU H, NOTASH L. Discussion on the camera-aided calibration of parallel manipulators[C]. *Proceeding of CCToMM Symp. Mech. Mach., and Mechatron., Saint-Hubert, QC, Canada: CD-*

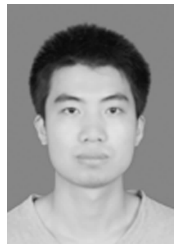
ROM, 2001;1-2.

- [9] LIANG J L, KUANG Y C, CHEN J Z, *et al.*. A novel XY-Theta alignment stage for screen printing and its accuracy analysis[C]. *Proceeding of the IEEE Int. Conf. on Mech. and Autom.*, Chengdu, China: ICMA, 2012;1352-1357.
- [10] 张宪民, 邝泳聪, 卢盛林, 等. 用于锡膏印刷的 L 型双镜头图像采集装置. 中国: ZL20060123893. 4 [P]. 2007-05-30.  
ZHANG X M, KUANG Y C, LU SH L, *et al.*. A L type double cameras image acquisition device for automatic screen printer. China: ZL20060123893. 4[P]. 2007-05-30.
- [11] MERLET J-P. Direct kinematic of planar parallel manipulators[C]. *Proceeding of the IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom.*, Minneapolis, USA: ICRA, 1994;3744-3749.
- [12] BRAND P, MOHR R. Accuracy in iamge measure [C]. *Proceeding of SPIE Conf. Videometrics III, Vol. 2350, Boston, Ma, USA*, 1994: 218-228.
- [13] 王建民, 浦昭邦, 赵辉, 等. 一种新的二维图像测量系统标定方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(3):37-41.
- [14] 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.  
ZHANG W J, YANG Y L, LI D, *et al.*. Key algorithms of automatic image measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):294-301. (in Chinese)
- [15] 梁经伦, 张宪民, 莫景会. 一种 XY-Theta 并联平台精度分析及标定[J]. 华南理工大学学报, 2012, 11.  
LIANG J L, ZHANG X M, MO J H. Accuracy analysis and calibration of a XY-Theta parallel stage [J]. *J. of South China University of Technology*, 2012,11. (in Chinese)
- [16] Manipulating industrial robots—performance criteria and related test methods, ISO 9283, 1998.

#### 作者简介:



梁经伦(1985—),男,广东梅州人,博士研究生,2008年于华南理工大学获得学士学位,主要从事并联机构及机器视觉方面的研究。E-mail: mejiliang@foxmail.com



陈家钊(1987—),男,广东顺德人,硕士研究生,2010年于华南理工大学获得学士学位,主要从事精密制造装备方面研究。E-mail: chenjiazhaolc@foxmail.com



莫景会(1988—),男,广东湛江人,硕士研究生,2011年于广东中山学院获得学士学位,主要从事锡膏印刷设备设计与控制等方面的研究。E-mail: jinghuimo@126.com



邝泳聪(1970—),男,广东台山人,博士,副教授,2003年在华南理工大学获得博士学位,主要从事机器视觉、视觉检测及精密制造装备等方面的研究。E-mail: yekuang@scut.edu.cn

#### 导师简介:



张宪民(1964—),男,河北涿州人,博士,教授,博士生导师,1993年北京航空航天大学获得博士学位,主要从事精密制造装备及现代控制技术、柔顺机构、视觉检测等方面的研究。E-mail: zhangxm@scut.edu.cn