

文章编号 1004-924X(2012)07-1542-09

## 微装配正交精确对准系统的设计

唐永龙, 张之敬\*, 张晓峰, 孙 媛

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

**摘要:**针对平板类零件微装配系统设计过程中面临的问题,提出采用正交光学对准机构来实现用人机协同的微装配系统对微小型平板类结构件的高精度装配,并分析计算高精度对准机构模块产生的误差。建立了基于显微机器视觉及正交光学对准的微装配系统平台,用本文提出的方法进行了微装配实验,结果显示本装配系统在装配的一致性与装配效率方面较大的改善与提高。提出的光学对准方法可有效地用于平板结构的硅微 MEMS 器件和非硅 MEMS 器件等集成的复杂微小型异构机电系统的装配,设计的平台具有很好的开放性和可移植性。棱镜正交对准机构产生  $0.001^\circ$  的角度误差时,对准理论偏差小于  $0.98 \mu\text{m}$ ,实际实验中微装配平台系统装配精度小于  $5 \mu\text{m}$ ,满足平板类微小型结构件装配一般精度需求。

**关键词:**微装配;正交对准;显微视觉;人机协同

**中图分类号:**TP242.6;TH741.14 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122007.1542

### Design of precise alignment orthogonal system used in micro-assembly

TANG Yong-long, ZHANG Zhi-jing\*, ZHANG Xiao-feng, SUN Yuan

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhzhj@bit.edu.cn

**Abstract:** For the problems in the design of a flat part micro-assembly system, an orthogonal optical alignment mechanism was proposed to realize high-precision assembly of the miniature flat class structure by a man-machine cooperation micro-assembly system, and the error of high-precision alignment mechanism module was analyzed and calculated. Then, a micro-assembly system platform based on the microscopic machine vision and orthogonal optical alignment was established, and the micro-assembly experiments by proposed method were carried out. The optical alignment method proposed was effectively used in the assembly of integrated and complex micro heterogeneous electromechanical system such as the flat structures of silicon micro-MEMS devices and non-silicon MEMS devices. The results show that the consistency and efficiency of the micro-assembly are improved and enhanced greatly, and the designed platform has good openness and portability. When the prism orthogonal alignment mechanism produces the error of  $0.001^\circ$ , the theoretical deviation is less than  $0.98 \mu\text{m}$  and the assembly accuracy of the actual experimental micro-assembly platform is less than  $5 \mu\text{m}$ . The preci-

收稿日期:2012-04-03;修订日期:2012-05-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51127004);国家部委基金资助项目(No. 0920110013)

sion meets the general assembling accuracy requirements of the miniature flat class structure.

**Key words:** micro-assembly; orthogonal alignment; micro-vision; man-machine coordination

## 1 引言

随着精密、超精密加工技术的不断发展,机构系统不断趋向小型化和微型化,但在现有的技术条件下,还无法一次性加工成型具备多功能集成的微系统。虽然微系统的各部分功能零件可以通过微细或精密加工的方法制得,但目前系统的集成大多还是通过装配工利用镊子借助显微镜等器械来完成<sup>[1]</sup>。在当前国内外微小型机电系统研发领域,中间尺度微器件组成的精密微小型系统是民品与国防微制造中的主流<sup>[2]</sup>。所谓中间尺度器件,是指外形几何尺寸通常从数十微米到数十毫米的结构件<sup>[3]</sup>。这些结构和系统一般有两个主要特点:一是几何尺寸跨度大、工艺结构复杂;二是所要求的加工和装配误差小,不少误差尺度在微米甚至是亚微米数量级,即加工与装配精度大都在精密甚至超精密范围内。

精确对准技术在半导体贴片机系统和光刻机系统中应用比较广泛,技术相对成熟。如德国 FINETECH 公司推出的 FINEPLACER 倒装贴片系统在选择合适物镜的情况下,采用单目摄像的方式同时获取贴片元件与基底的图像信息,通过 2 个目标上标记的图像匹配可以达到  $1\ \mu\text{m}$  的对准精度<sup>[4]</sup>。在光刻机系统中通过亚像素细分算法对对位标记进行处理可获取  $0.2\ \mu\text{m}$  的套刻精度<sup>[5]</sup>。通常贴片元件外形规则,可通过特殊加工实现高精度的标记间的匹配<sup>[6]</sup>,得到的精度在电子行业内实现起来相对比较容易,但对于外形复杂、种类繁多的微小零件的装配,依靠本身特征检测实现对准并达到该精度具有较大的难度。

目前,针对微小型结构件的装配系统一般都具有视觉系统,多数情况下仅仅起监视装配过程的作用,操作者通过视觉监视器来控制装配体间相对位置,控制机器人的运动实现试探性的装配操作<sup>[7]</sup>。在一些文献中给出的装配精度很高,但遥操作与试探性操作装配耗时长,同时装配精度具有较大的随机性。因此,对于机器人装配系统,在较小的装配操作空间中提高机器人作业精度具

有重要的作用。本文采用宏微结合的 12 自由度桌面式微装配系统实现对平板类微小零件的装配。宏动机械手大范围(几百 mm)运动时的重复定位精度为  $\pm 20\ \mu\text{m}$ 。在实际的微装配系统中,基于显微视觉定位的平板类微小零件通过机械手的真空吸头吸附零件后,按规划的路径搬运到待装配区域进行装配,其运动的重复定位精度远超出了  $5\ \mu\text{m}$  的装配精度的要求,运用该方法进行装配几乎不可能成功。本文在装配区加装了正交光学精确对准系统,整个微装配系统采用宏微结合的方式,充分利用宏动机械手的大工作范围和效率,同时在精确对准的过程中通过高精度微动平台来补偿机械机构运动过程中产生的误差,提高了微装配系统的装配精度。

## 2 微装配系统硬件构成

根据本微装配系统装配对象零件尺寸和装配精度的要求,建立了基于双目机器视觉的微装配系统,其中一目为主视觉,用于零件的装配,主视觉系统位于正交对准棱镜系统垂直正上方,以在同一像平面获取目标零件和基体零件的图像,通过软件处理提取装配边缘关键特征;另一目用于装配过程的跟踪监视,对装配过程中机械摆臂运动进行实时监控,以对可能的故障进行提前干预和报警。其主要特点如图 1 所示:

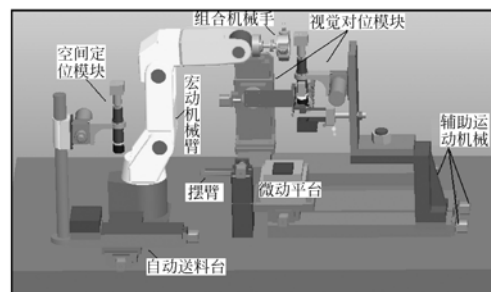


图 1 微装配系统硬件模拟三维图

Fig. 1 Hardware 3D simulation of micro-assembly system

(1)采用宏微结合的方式,运用宏动机械手行程大,速度快,提高系统的整体工作效率,微动机

械手的高精度(重复定位精度 $\pm 0.3 \mu\text{m}$ )可保证系统装配的整体精度。支撑式 3-PPTTRS 机构采用了组合式柔性铰链运动副,通过几个柔性铰链的组合,实现 1 个、2 个或 3 个自由度的运动,分别替代了传统的转动副、虎克铰和球副;运动链  $T_1$  和  $T_3$  平行,其安装平面与  $T_2$  的安装平面垂直;机构具有 6 个自由度。图 2 所示为支撑式微动平台工作机构图。

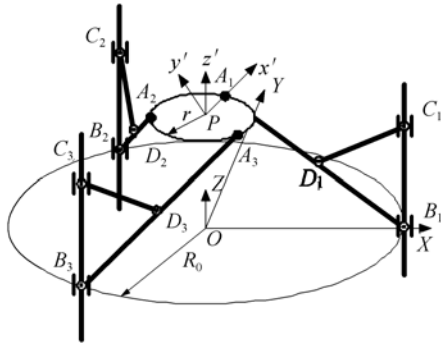


图 2 支撑式 3-PPTTRS 机构

Fig. 2 3-PPTTRS of supporting mechanism

(2)在宏动机械手末端夹持器与真空吸嘴间安装高精度六维微力检测传感器(分辨率为  $0.7 \text{ mN}$ ,  $0.004 \text{ N} \cdot \text{mm}$ )进行反馈控制,以保证零件的搬运与装配过程中不会对装配零件造成外力损坏<sup>[8]</sup>。

(3)夹持器采用应变片检测夹持器和真空吸头双模式,可以根据实际搬运零件结构的不同选择不同的夹持方式,真空吸头采用双孔(孔径为  $0.3 \text{ mm}$ )方式,可以施加负压吸附,正压吹离,以保证微小零件不会因为微力作用造成的粘附<sup>[9]</sup>。夹持器的三维模拟及实物对照如图 3 所示。

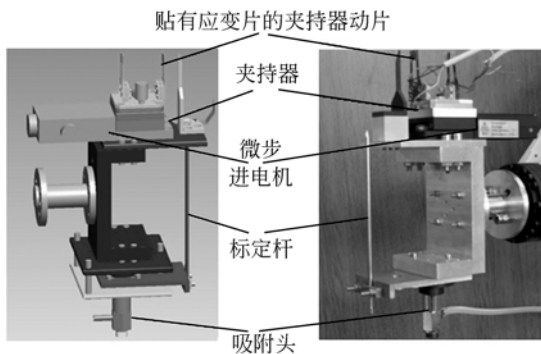


图 3 夹持器三维模拟及实物

Fig. 3 Three dimensional simulation of gripper and material object

### 3 正交精确对准系统

本微装配系统主要由摄像模块、照明模块、光学对准模块、图像处理单元模块与机械运动执行机构模块组成。其中光学对准模块调整精度、图像处理精度和运动执行机构精度是影响对准精度的关键因素。正交对准系统设计原理<sup>[10]</sup>如图 4 所示。

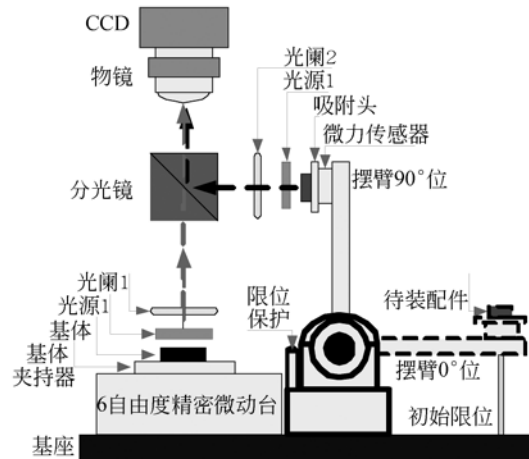


图 4 正交对准系统原理图

Fig. 4 Principle drawing of alignment orthogonal system

对于高精度微装配系统,引入自由度越多对目标零件的装配精度就会越低,因此比较不同的装配方案后提出了采用正交光学对准的摆臂式对准方法,目标零件采用机械摆臂单自由度结构,基体零件采用六自由度微动调整的配置方案,这样在满足高精度微装配的同时减少了中间控制调整环节,减少了误差源。

#### 3.1 基于棱镜正交光学对准机构原理

利用直角镀膜棱镜的反射特性,使固定在棱镜垂直正上方的摄像机同时获取位于棱镜侧向水平位置的机械摆臂吸附的待装配件与固定在微动平台上的基体零件配合结构的图像信息。对准检测系统及对准原理如图 5 所示。2 个不同位姿情况在同一像平面上的 2 种对准关系,图示中的 2 个小矩形 1,2 分别表示待装配件与基体零件的配合结构图像。

如图 5 中的像平面 1 所示,以待装配件的左边缘作为参考特征边缘,当该边缘与棱基成像中

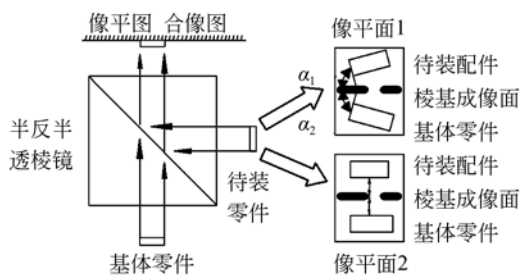


图 5 对准检测结构及原理

Fig. 5 Structure and principle of alignment detecton

心线不垂直时,假定该边缘与棱基成像中心线的夹角为  $\alpha_1$ ,如  $\alpha_1 \neq 90^\circ$ ,且  $|\alpha_1 - 90^\circ| \leq 5.7^\circ$  (微动工作台的调整角为  $5.7^\circ$ ),控制微动平台对基体零件进行微调,使装配配合的特征边缘线垂直共线,并且使对应的点到棱基成像中心线的距离等值,实现对准。如果  $|\alpha_1 - 90^\circ| \geq 5.7^\circ$ ,则必须对待装配件上料机构进行二次校准和微调,保证上料机构的误差范围。基体的左侧边缘与棱基中心线的夹角  $\alpha_2$ ,如  $\alpha_2 \neq 90^\circ$ , $|\alpha_2 - 90^\circ| \geq 5.7^\circ$ 时,则必须对初始的对准机构进行初始化的二次校准和误差补偿。如  $\alpha_1 \neq 90^\circ$ ,检测图像上待装配件和基体零件的左边缘共线性以及待装配件图像的下边缘与基体零件图像的上边缘到直角棱镜棱基成像的中心线间距离等值性,如图 5 中像平面 2 所示,最终实现人机协同的微小型零件间精确对准。

### 3.2 棱镜系统调整及误差分析

理想状况是棱镜的中心线与待装配零件、基体零件的基准面成垂直状态。本系统在装配操作开始之前进行光轴垂直度的校准和摄像机的畸变的校正。因此,对于此光学结构,棱镜的方位调整精度是影响装配对准精度的关键因素。根据小孔成像模型可知,在摄像机像平面上得到的待装零件边缘与基体零件的边缘间的距离与实际的光路间具有一种线性映射的对应关系。因此,在不考虑摄像机自身及镜头内部结构的情况下,在图像上进行距离检测的过程完全可以映射到实际的光路中。光路及参考的成像面如图 6 所示。根据理想模型可以得到,待装配零件与目标基体零件通过半反半透棱镜系统后在参考像平面的成像是完全重合的,摆臂经过  $90^\circ$ 绕轴旋转运动保证待装配零件与基体零件的装配配合能够保证装配操作的顺利完成。棱镜系统在实际的安装中存在  $\gamma^\circ$

角的偏转,具体如图 6 的虚线光路所示。

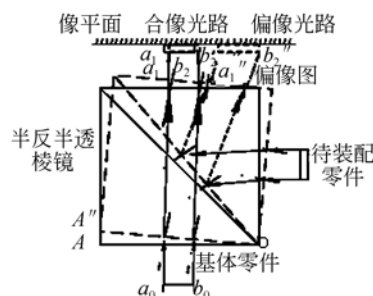


图 6 对准检测调整光路图

Fig. 6 Adjustment drawing of alignment detect

根据棱镜系统在安装过程中的固定方式,棱镜的误差偏转一般会产生如图 6 虚线所示的方向偏转。棱镜的边长设为  $a$  ( $a = 15 \text{ mm}$ ),当棱镜产生  $\gamma^\circ$  角的偏转时,棱镜的一角  $A$  由  $A$  点移动到  $A'$  点,此时在棱镜正下方的基体零件的入射光同时发生  $\gamma^\circ$  角的偏转,其光路经过棱镜系统的折射后其在像平面的图像会平行移动一段距离,设其距离为  $d$ 。对应图 6 可以看出  $a_0, b_0$  在像平面的像则从  $a_1, b_1$  处移动到对应的  $a_1', b_1'$ 。设棱镜光学玻璃的折射率为  $n$  ( $n = 1.5163$ ),经玻璃后的折射角为  $\beta$ ,由于棱镜中间的半透膜的厚度十分小,基本不影响最终的装配定位精度,在实际的计算过程中,忽略其对光线的折射偏差,则:

由  $\frac{\sin \gamma}{\sin \beta} = n$  可以得到:

$$\begin{cases} \sin \beta = \frac{\sin \gamma}{n} \\ \cos \beta = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \gamma}{n^2}} \end{cases} \quad (1)$$

根据图 6 光路的几何关系可知,棱镜的偏转角  $\gamma$  与出射光线在像平面上改变的距离  $d$  之间的关系为:

$$d = \sin(\gamma - \beta) \times \frac{a}{\cos \beta} \quad (2)$$

将式(1)带入式(2)可以得到:

$$d = \frac{a}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \gamma}{n^2}}} \left[ \sin \gamma \times \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \gamma}{n^2}} - \cos \gamma \times \frac{\sin \gamma}{n} \right] = a \left[ \sin \gamma - \frac{\cos \gamma \sin \gamma}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma}} \right] = a \sin \gamma \left[ 1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \gamma}{n^2 - \sin^2 \gamma}} \right] \quad (3)$$

侧向水平位置的待装配零件在棱镜发生  $\gamma$  角的偏转时,其在像平面上同时也会发生一定量的移动,即  $a_0', b_0'$  在像平面上的位置由  $a_1, b_1$  移动到  $a_1'', b_1''$ , 设其移动距离为  $L$ 。设物距为  $h$ , 机械摆臂的长度为  $b$ , 在实际的实验系统中,  $h-b \leq 10$  mm, 则:

$$L = 2(h-b+a) * \frac{\sin \gamma}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma}} + a * \left( \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma + \sin \gamma} \right). \quad (4)$$

通过上述的理论计算由公式(3)、(4)可以分别得到待装配零件和基体零件在棱镜有  $\gamma = 0.001^\circ$  偏转时,基体零件在像平面上的偏向距离为  $0.15 \mu\text{m}$ , 待装配零件在像平面上的偏转距离为  $0.83 \mu\text{m}$ 。

## 4 图像处理

### 4.1 图像预处理

本微装配系统以平板类非硅 MEMS 器件为装配的典型样件,所以,在工艺上也以精密机械加工、准 LIGA 法加工为典型工艺制作实验样件。对称结构特征以圆孔、轴、槽和矩形块等为主,通过一定量的样本进行边缘特征和对称特征的统计建模分析<sup>[11-12]</sup>,通过调整不均匀背景光和噪声强度调整优化滤波算法。在实验和实际对准检测时,首先利用多项式回归或 BP 神经网络方法建立边缘光学特征变化规律拟合的数学模型,确定每种加工工艺的微小型结构件装配边缘光学特征变化规律<sup>[13]</sup>。然后根据滤波后的拟合模型和沿边缘变化的统计特性,建立针对不同工艺的对称边缘拟合算法。

### 4.2 对准特征提取

在对准特征选取的过程中,确定最佳边缘和最佳对准特征点是通过手动选点,根据精度需求选择不同的边缘点数,根据亚像素边缘点定位算法<sup>[14]</sup>搜索该点周围区域,确定最佳边缘点位置,最终利用插值法拟合这些最佳边缘点获得对准直线边缘。在人眼观测过程中,可以根据直线拟合所获得的效果改变插值点个数,从而获得最佳的直线边缘。根据相邻直线边缘的交点获得对准特征点精确坐标,其工作流程如图 7 所示。

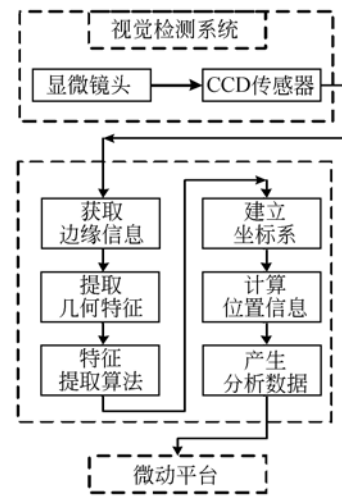


图 7 图像特征提取流程图

Fig. 7 Flowchart of image feature extraction

该正交对准机构组成的棱镜系统由于受到光学棱镜、机械摆臂对镜头工作距离的限制,采用高倍光学显微镜头及加配镜头附件。参考白光光源中间绿光波长(500~565 nm),运用公式为:

$$R_L = 1/3\ 000 \times N.A., \quad (5)$$

$N.A$  为镜头数值孔径。

对 NAVITAR 12X ZOOM 光学镜头参数进行计算得出  $N.A=0.202$ ,  $R_L=1.65$ 。

根据理论极限分辨率为  $1/2 \times R_L$ ,可以得到极限分辨率为  $0.83 \mu\text{m}$ 。系统在实际的微装配系统实验中受到照明光源、镜头数值孔径、图像处理软件算法和棱镜固定机构调整误差的影响。

## 5 微装配平台构架与实现

微装配涵盖的领域广泛,装配对象及任务等变化多。开放式可重构桌面微装配系统由相对独立的子系统组成,彼此间并无直接的耦合关系,进行平台的复制、移植时,只要针对不同对象更换夹持工具便可。图 8 所示为本正交对准微装配系统装配流程图。

(1) 在装配作业前,先对系统进行初始化的校准,调节微动平台上的基体零件和目标零件吸附摆臂的初始位置,以保证摄像机可以同时获取基体零件和目标零件的清晰图像。

(2) 采用规划的送料机构将目标零件输送到指定位置,搬运机械手通过真空吸附的方式将目

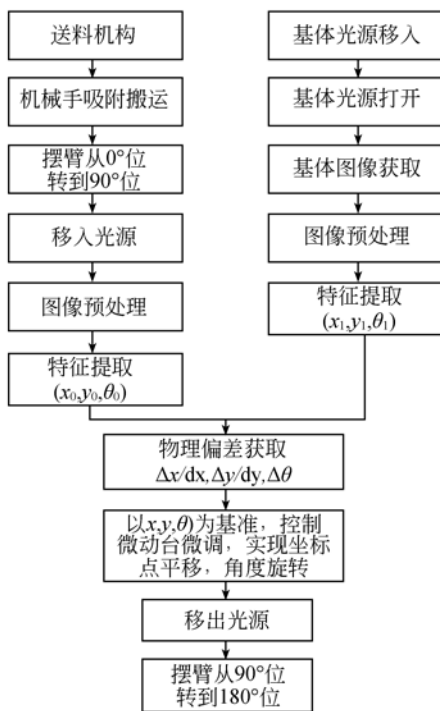


图 8 正交对准微装配流程

Fig. 8 Flow chart of orthogonal alignment micro-assembly

标零件搬运到机械摆臂的真空吸头,并通过安装在真空吸头上的微力传感器来检测接触力,反馈控制机械手的真空吸头断气,摆臂的吸嘴通气吸附。如图 9 所示,(a)为机械手零件吸附搬运及接触力反馈检测,(b)为机械手搬运到摆臂吸嘴释放及接触力反馈。

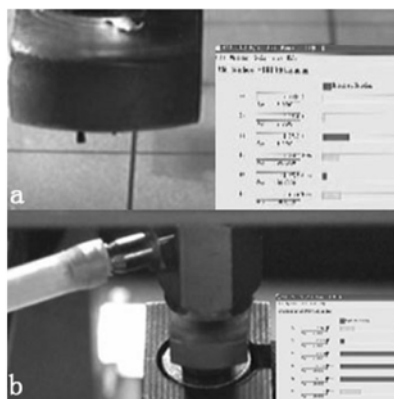


图 9 目标零件吸附搬运与释放

Fig. 9 Absorption handling and releasing of target components

(3) 摆臂通气后会自动从初始的 0°位绕轴旋

转到 90°位,目标零件和基体照明光源先后移到目标位置。为解决采用此棱镜结构存在的光损失问题,选择分时成像的方式以减少同时成像的像干扰,在经过自动对焦程序后分别获取其清晰的图像。

(4) 通过图像边缘关键特征的提取,自动计算出需要的物理补偿量,反馈给微动平台,完成微动平台的微调,实现目标零件装配。图 10 所示为弹簧与挡板方孔配合图,(a)为目标零件,(b)为基体零件,(c)为对准调整前目标和基体零件的图像,(d)为对准补偿调整后的零件合像图。

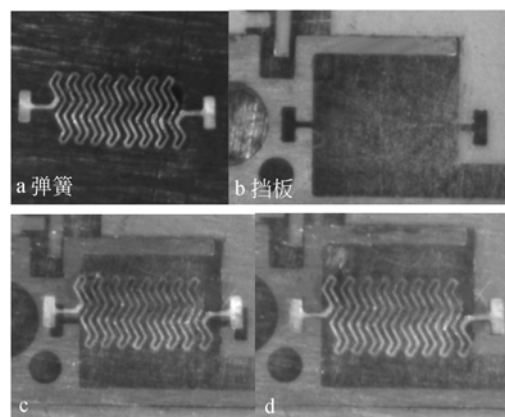


图 10 弹簧与挡板方孔配合及对准调整前后的对比

Fig. 10 Combination of spring and baffle of square hole and comparison of alignment before and after adjustment

## 6 精确对准试验

采用微装配系统装配了复杂平板类组合体零件,该组合体由 7 个零件组成,最小的平板特征尺寸为 70 μm,最小深度尺寸为 60 μm,零件组合体包含易损坏的弹簧柔性结构,最大零件外形尺寸为 11 mm,各个零件尺寸、表面纹理不尽相同,具有轮齿、方孔、圆孔等轮廓外形特征。图 11 所示为多组件组合体零件装配顺序示意及组合体结构。

组合体装配精度要求主要包括同轴度、对称度等,最大极限装配公差为 90 μm,最小极限装配公差为 5 μm,主装配基准为后盖板,装配顺序自下而上。通过单个零件自动上料系统后经过 10 步工序可实现自动化装配,下基板位置检测,7 个零件装配,装配完整性检测和自动点胶。整个装配过程采用单个零件独立控制检测方式,提高了

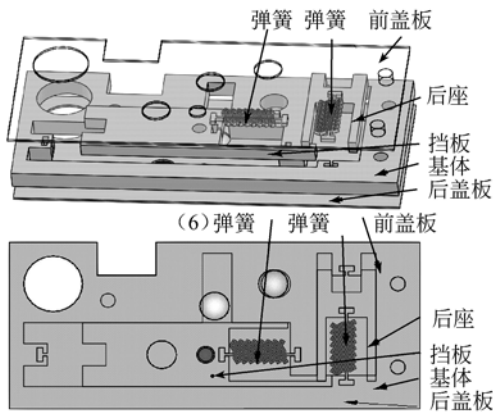


图 11 多组件微装配过程示意与系统结构

Fig. 11 Micro-assembly sequence and configuration with multi-components

系统的装配成功率且装配策略容易调整。

系统采用大恒 HV1303UM 数字摄像机,其镜头是桂林迈特 MZD1705 型改造为可自动变倍和调焦的镜头<sup>[15]</sup>;德国 PI 公司的 F206 型微动台,单向重复定位精度为 $\pm 0.30 \mu\text{m}$ ;英国雷尼绍公司 XL-80 型激光干涉仪;基恩士公司 LS7000 型光幕式激光器;棱镜选择日本西格玛 BK7 系列的 RPB4-15-550 型镀膜直角棱镜,棱边长  $a=15 \text{ mm}$ 。实际棱镜系统和组合机构对准系统如图 12 所示。

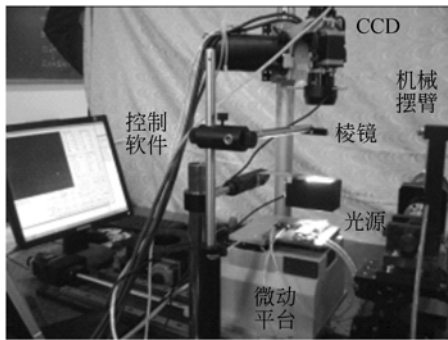


图 12 微装配系统实物图

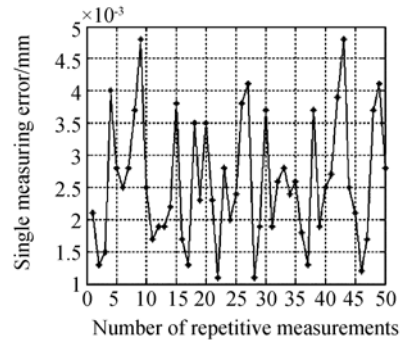
Fig. 12 Physical chart of micro-assembly system

采用激光干涉仪对 PI 的微动平台进行标定测量,在室温  $20^\circ\text{C}$  时,PI 微动平台的单向重复定位精度为 $\pm 0.32 \mu\text{m}$ 。

机械摆臂的轴承选用日本精工株式会社 NSK 超精密角接触球轴承,径向跳动小于  $2.5 \mu\text{m}$ ,轴向跳动小于  $3 \mu\text{m}$ 。运用基恩士光幕式激光器测试摆臂机构的重复定位精度。通过 40 组

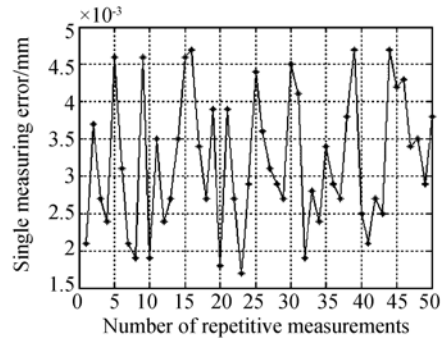
往复实验,摆臂的径向跳动小于  $3 \mu\text{m}$ ,轴向跳动小于  $2 \mu\text{m}$ 。

对装配系统进行了反复多次装配实验,并采用 Nikon 的 MM-400 型测量显微镜(精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ ,分辨率  $0.1 \mu\text{m}$ )记录测量 2 项关键指标的装配结果,单次测量误差情况如图 13 所示。数据处理后具体结果如表 1 所示。



(a)同轴度误差分布

(a)Error distribution of alignment



(b)左右对称度误差分布

(b)Error distribution of symmetry

图 13 单次测量误差分布

Fig. 13 Distribution of single measurement errors

表 1 微装配实验测量结果

Tab. 1 Experimental results of micro-assembly (mm)

	装配平均误差	不确定度
同轴度	0.002 6	0.002 3
左右对称度	0.003 2	0.001 5

采用本文方法构建的实验平台进行的多次反复实验表明,对于平板类零件的常规轴、孔、槽类零件的配合,系统的装配精度小于  $5 \mu\text{m}$ 。采用单个零件,独立配置的方案,可实现快速、高效流水线式微装配作业,单个零件的装配时间小于 1 min。

## 7 结 论

根据机器人微装配系统装配精度高、速度快的要求,提出了采用正交精确光学对准的方法来实现平板类微小型结构件的高精度装配。对影响本系统装配精度的光学棱镜结构进行了理论分析计算,实验获得了由该正交精确对准结构为核心构建的微装配系统实际装配精度。在实际的微装配实验

中,可能会获得小于 $2\ \mu\text{m}$ 的装配精度,这主要是由于微动平台的调节所致,实际的装配精度会随着微动平台调节步距和调节装置的精度变化发生改变。对本微装配系统进行了多次反复实验验证,获得了整体小于 $5\ \mu\text{m}$ 的装配精度。本文方法可对实现平板类微小型结构件的生产线式自动化装配提供有益的借鉴,同时也可为复杂三维微小零件的装配提供参考。相比传统的手工微装配作业,在装配的一致性和效率方面有很大提高。

### 参考文献:

- [1] 李江昊. 基于毫米级移动机器人的微装配系统运动控制与路径规划研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.  
LI J H. *Motion Control and Path Planning for Millimeter Size Mobile Microrobot Based Microassembly System*[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese)
- [2] *Workshop on Micro/Meso Mechanical Manufacturing*[R]. Evanston, Illinois, USA: Northwestern University, 2000.
- [3] BROWNE J. *MEMS devices emerge at 2002 seattle MTT-S*[R]. *Microwave & RF*, 2002, 41(8): 33-42.
- [4] FINEPLACER System Flip Chip Bonding[OL]. <http://www.finetech.com/>.
- [5] 陈伟明,杨维全,胡松,等. 对准标记处理的改进亚像素细分定位算法[J]. *微细加工技术*, 2001, (3): 56-59.  
CHEN W M, YANG W Q, HU S, *et al.*. Developed sub-pixel fine positioning algorithm for image processing of alignment mark [J]. *Microfabrication Technology*, 2001, (3): 56-59. (in Chinese)
- [6] 夏奇,周明才,王宏昇,等. 高精度自动贴片机视觉对准系统及其图像处理[J]. *光学技术*, 2004, 30(2): 146-149.  
XIA Q, ZHOU M C, WANG H SH, *et al.*. Vision alignment system in automatic high precision chip mounter and its image processing[J]. *Optical Technique*, 2004, 30(2): 146-149. (in Chinese)
- [7] 李玉和,刘志峰. *微系统自动化装配技术*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.  
LI Y H, LIU ZH F. *Micro-system assembly automation technology* [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2008.
- [8] 徐征,王晓东,程新宇,等. 基于机器视觉的微装配控制策略及软件架构[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4): 819-822.  
XU ZH, WANG X D, CHENG X Y, *et al.*. Control tactics and software architectures for micro-assembly based on machine vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 819-822. (in Chinese)
- [9] 叶鑫,张之敬,孙媛,等. 集成微力检测与反馈的双晶片微夹持器[J]. *兵工学报*, 2009, 30(9): 1242-1247.  
YE X, ZHANG ZH J, SUN Y, *et al.*. A bimorph piezoelectric ceramic microgripper integration micro-force detecting and feedback[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(9): 1242-1247. (in Chinese)
- [10] 张之敬,王强,叶鑫,等. 一种用于微小型结构件的自动对位装配系统: 中国, CN101972928A[P]. 2011-02-16.  
ZHANG ZH J, WANG Q, YE X, *et al.*. *An auto-alignment system used in microstructure assembly: China*, CN101972928A [P]. 2011-2-16. (in Chinese)
- [11] 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.  
ZHANG 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)
- [12] 张之敬,杜芳,金鑫,等. 基于不同加工工艺的微小零件结构件边缘识别[J]. *纳米技术与精密工程*, 2008, 6(5): 362-366.  
ZHANG ZH J, DU F, JIN X, *et al.*. Edge detection of micro accessory based on different machining process [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2008, 6(5): 362-366. (in Chinese)

- [13] 张林,张之敬,杜芳,金鑫. 基于工艺匹配的微小型结构件边缘检测方法[J]. 北京理工大学学报, 2009,29(12):1063-1066.  
ZHANG L, ZHANG ZH J, DU F, *et al.*. Processin matching principle for edge detection method of micro parts[J]. *Transations of Beijing Institute of Technology*, 2009,29(12):1063-1066. (in Chinese)
- [14] 王仲,操晶晶,张立昆,等. 基于图像的轮廓测量与评定[J]. 光学精密工程, 2009,17(2):395-401.  
WANG ZH, CAO J J, ZHANG L K, *et al.*. Measurement and evaluation for profile tolerance based on images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):395-401. (in Chinese)
- [15] 陈立国,王明月,杨治亮,等. 显微视觉快速自动调焦方法及实验[J]. 光学精密工程, 2010,18(6):1361-1365.  
CHEN L G, WANG M Y, YANG ZH L, *et al.*. Fast autofocus method for microscopic computer vision[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):1361-1365. (in Chinese)

#### 作者简介:



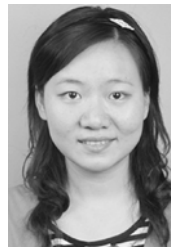
唐永龙(1981—),男,河南信阳人,博士研究生,2010年于北京工商大学获硕士学位,主要从事微装配、微小型零件检测方面的研究。E-mail:3120100228@bit.edu.cn



张晓峰(1986—),男,山西原平人,博士研究生,2008年于北京理工大学获学士学位,主要从事微装配总体设计及误差分析方面的研究。E-mail:bibly@bit.edu.cn



张之敬(1951—),男,陕西米脂人,教授,博士生导师,1982年于北京理工大学获硕士学位,主要从事航空宇航制造和精密微小型零件制造方面的研究。E-mail:zhzhj@bit.edu.cn



孙媛(1985—),女,湖北宜昌人,博士研究生,2007年于北京理工大学获学士学位,主要从事微装配夹持器及力反馈控制方面的研究。E-mail:sunsun@bit.edu.cn

#### ●下期预告

## 全相位谱分析在自混合干涉位移测量中的应用

杨颖,李醒飞,寇科,王错

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

为减小激光自混合干涉位移测量的误差,提出了基于全相位谱分析的自混合干涉信号处理方法,分析和讨论了自混合干涉信号的产生机理和处理算法。首先,基于三镜法布里-珀罗腔模型介绍了自混合干涉系统的数学模型,分析了自混合干涉信号的特性。然后,研究了弱反馈条件下自混合干涉位移测量方法,采用全相位谱分析算法进行相位测量,重构外部反射体位移曲线;研究了信号处理算法原理并进行了算法仿真。最后,进行自混合干涉位移测量实验研究,并给出压电陶瓷位移测量实验结果。结果表明,全相位谱分析算法可将自混合干涉位移测量误差减小到 4.4 nm。应用全相位谱分析算法分析自混合干涉信号,可在不增加外部光学元件的前提下将位移测量误差减小到纳米量级。