

文章编号 1004-924X(2011)11-2685-08

基于柔性解耦梁和显微视觉的精密同轴定位系统

陈涛^{1,2*}, 陈立国¹, 潘明强¹, 孙立宁³

(1. 苏州大学 机器人与微系统研究中心, 江苏 苏州 215021;

2. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所 传感技术国家重点联合实验室, 上海 200050;

3. 哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对偶件装配对同轴度的要求,提出了一种基于柔性解耦梁和显微视觉技术的同轴定位调整系统。为满足同轴度在线调整和轴套的位姿保持,设计了一种“田”字型两自由度柔性解耦梁机构,并结合微动平台和夹具来实现同轴度调整时零件轴的精确定位。根据力学原理,建立了柔性梁的刚度模型,结合有限元法进行仿真分析,确定出梁的结构参数尺寸。对同轴定位调整系统中的显微视觉功能和过程进行了设计,并通过 Hough 算法实现精密同轴定位的实时检测功能,计算出同轴偏差作为调整的数值依据。大量的同轴定位调整实验显示,同轴度定位精度优于 $8\ \mu\text{m}$,同时大大提高了装配效率。结果表明,该定位调整系统为器件的装配提供了精确的定位参数,可以准确、高效地实现定位装配。

关键词:柔性解耦梁;显微视觉;同轴定位

中图分类号:TH161;TP242 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111911.2685

Coaxial positioning system based on flexible decoupling beams and micro-vision

CHEN Tao^{1,2*}, CHEN Li-guo¹, PAN Ming-qiang¹, SUN Li-ning³

(1. Robotics and Microsystem Center, Soochow University, Suzhou 215021, China;

2. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

3. Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: cht22@sina.com

Abstract: According to the requirement of the assembly of a shaft and a sleeve for coaxiality, a coaxial positioning system was presented based on the flexible decoupling beams and micro-vision technology. To implement the online adjustments and maintain posture of the shaft and the sleeve, a flexible beam structure with a square pattern and two degrees of freedom was designed. Combined with a micro-platform and a clamp, this structure has achieved an exact coaxial precision in the positioning. According to mechanics, a stiffness model of the flexible beam was established. Then the parameters of the beams were determined by a simulation in finite element method. A micro-vision system was de-

收稿日期:2011-05-25;修订日期:2011-06-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51105262);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA043902-1)

signed to be used in the system. Through the Hough algorithm, the precise coaxial positioning of the real-time detection was realized and the coaxial deviation computed was used as the value of the adjustment. Through lots of coaxial experiments, it shows that the coaxial positioning accuracy has been less than $8\ \mu\text{m}$. The results indicate that the positioning device can provide precise positioning of parameters, and can guarantee the realization of positioning assembly.

Key words: flexible decoupling beam; micro-vision; coaxial positioning

1 引言

随着精密工程和超精密加工等领域的快速发展,精密仪器得到了广泛应用,各种大型精密定位系统不断问世,然而在一些精密机构中同轴定位系统的精度还达不到要求。如在工业生产、航天及军事领域中,对轴类、壳体类精密零件两端内孔(或孔与轴)之间的同轴度要求很高,由于不能在一次装夹中加工完成,其很难达到同轴精度要求。又如某些航天偶件轴孔同轴度要求在 $10\ \mu\text{m}$ 以下,而且需要通过胶粘接的方式保持轴孔的边缘固接,完成这种零件的同轴度加工也很有难度。事实上,国内精密偶件的装配仍依赖于人工,全凭熟练技师的工作经验,不但加工周期长、效率低,而且废件率高,质量难以保证^[1]。

目前,针对非标部件的高精度同轴定位要求,相关的装配和定位操作研究日益引起国内外研究人员的重视,在传统的宏观技术上实现精密定位及装配已成为许多学者研究的内容,其系统类型大致分为辅助夹具手动操作方式和自动操作方式。近年来,越来越多的精密工程领域的学者把注意力放在了自动定位调整和装配系统的研究上。

显微视觉系统在微型零件精密装配、细胞操作、集成电路组装等技术领域有广泛的应用前景和重要的研究意义^[2-3],这是由于精密定位和装配的器件间隙尺寸微小,其位置、方向甚至间隙的存在等信息只能通过显微镜放大后才能精确获得。因此,显微视觉已成为精密定位和装配系统获取操作信息的最主要的技术手段之一^[4-6]。

本文提出了一种基于柔性解耦梁的精密同轴定位调整系统,并结合显微视觉系统实现了同轴度定位装配实时检测与调整,从而保证最终定位精度。文中通过对柔性解耦梁建模分析,提出利用微动平台结合柔性梁夹具实现同轴度调整过程中的运动和轴位姿保持,成功实现了精密定位后

轴孔间同轴度的稳定保持,为后序涂胶和固化工艺奠定了基础。

2 同轴定位调整系统设计

2.1 同轴度调整原理

某偶件轴孔同轴度定位装配要求如图 1 所示(同轴度小于 $10\ \mu\text{m}$,装配后端面缝隙处涂胶固定,并放置在高温炉中固化),目前该类型器件的同轴度主要通过手工对准,利用显微镜下的刻度目测调整,效率较低。平均对准精度在 $15\sim 20\ \mu\text{m}$ 之间,一套器件对准时间需 30 min 左右。

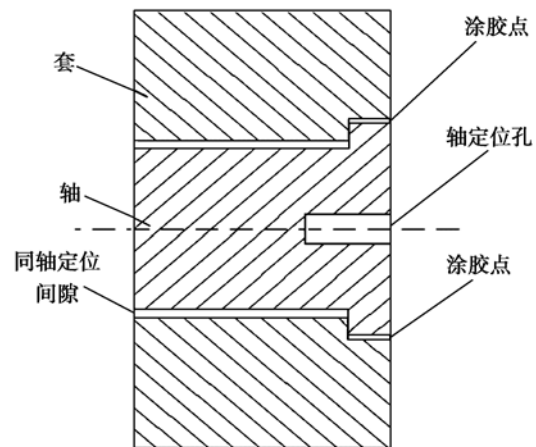


图 1 同轴定位装配图

Fig. 1 Coaxial positioning assembly

针对该类器件定位调整的特殊要求,考虑利用夹具固定器件的套零件,通过精密定位平台实现轴的径向平移,借助显微视觉的检测计算实现同轴度的实时调整。为保证调整后轴与套的位置相对固定,便于后序点胶和固化,在固定套零件的夹具上设计了柔性解耦梁结构来实现该功能。

同轴度调整的原理如图 2 所示,在显微镜下分别检测两圆形边在平面内相互垂直的两个方向上的间距,计算同一方向上的间距差,从而求得同轴偏差,通过精密定位平台的调整消除该偏差,达

到同轴度定位精度要求。如图 2 所示,根据切线距离可求得两个垂直方向上的偏差: $|(l_1 - l_2)|/2$ 和 $|(l_3 - l_4)|/2$ 。

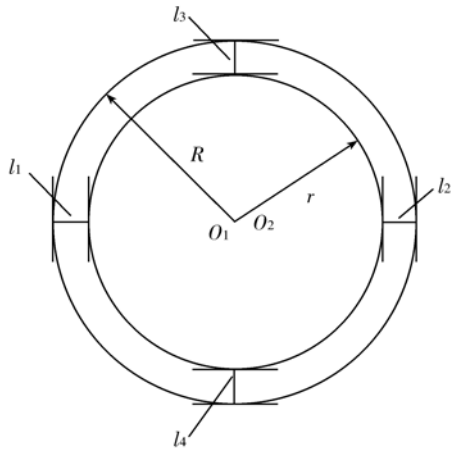


图 2 同轴度定位调整原理图

Fig.2 Schematic of coaxial positioning

常见的圆检测方法有:曲线拟合、模板匹配、Hough 变换等。曲线拟合和模板匹配对图像质量要求较高,在图像中的圆出现断弧、噪声的情况下,很难保证检测效果。Hough 变换精度高、抗噪能力强,可以满足精度要求^[7]。

2.2 柔性解耦梁建模

图 3 所示为“田”字型柔性解耦梁模型图,图 4 为夹具模块。其中中心定位孔用于固定轴零件,同轴调整时轴与柔性梁结构固连,套零件、柔性梁结构均与夹具底座固连。柔性梁在微动平台的推动下可以带动轴实现平面内与套零件的相对运动,从而调节同轴间隙,当微动平台驱动力撤消

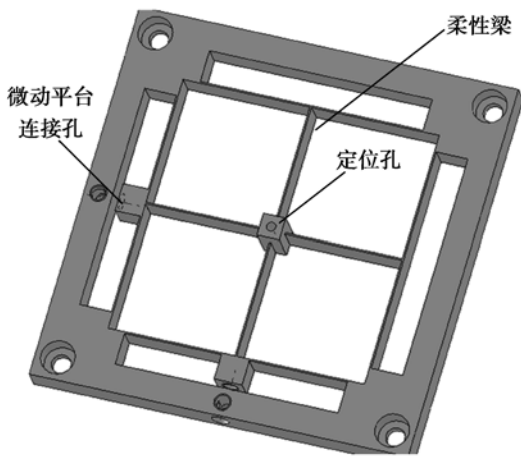


图 3 柔性解耦梁

Fig.3 Flexible decoupling beams

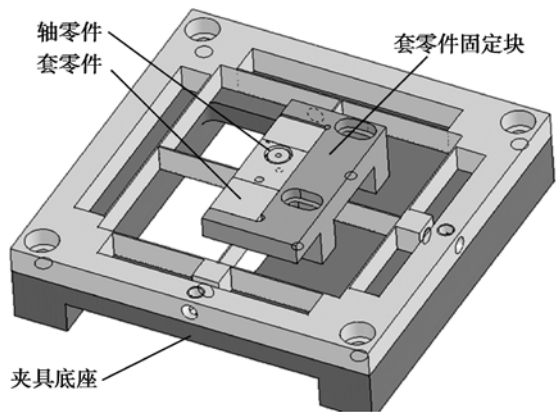


图 4 夹具模块

Fig.4 Fixture module

后在弹性恢复力下梁复位。微动平台与柔性梁的连接方式如图 5 所示,微动平台通过连接杆驱动柔性梁运动。夹具安装完成后,通过程序控制微动平台沿着连接杆轴方向运动,套住连接杆后拧紧螺钉。图 5 中右侧紧固螺钉孔用于同轴调节完成后的位姿保持,以便于后续点胶和固化。

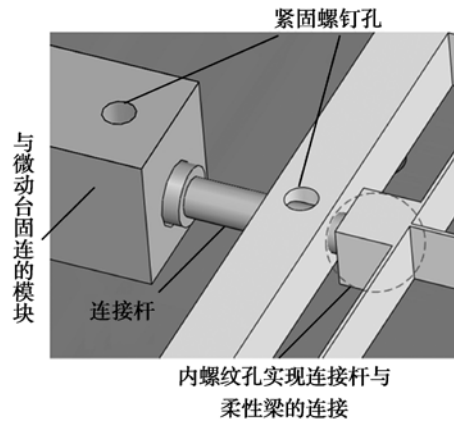


图 5 微动平台驱动方式

Fig.5 Driving-mode of micro-stage

柔性梁作为定位支撑夹具的重要组成部分,它的设计一方面要考虑结构刚度对系统的影响,另一方面要考虑其侧向刚度对平台输出位移及对传感器灵敏度和分辨率的影响。根据小变形理论可知,当弹性柔性梁的变形量小于柔性梁厚度的 1/3 时,柔性梁输出位移与作用力成线性关系。根据设计指标要求定位平台最大输出位移为 300 μm (装配后平均间隙小于 300 μm),而柔性梁的厚度不小于 3 mm,因此柔性梁线性输出范围远大于 300 μm ,故根据小变形理论检测梁采用双端

固支结构不会对定位平台输出位移线性度产生影响。柔性梁力学分析示意图如图 6 所示,图中 F 为外载荷, $M_{i=2,3}$ 为转矩, L 为梁的半长度, b_d, h_d 分别为梁的宽度和厚度。

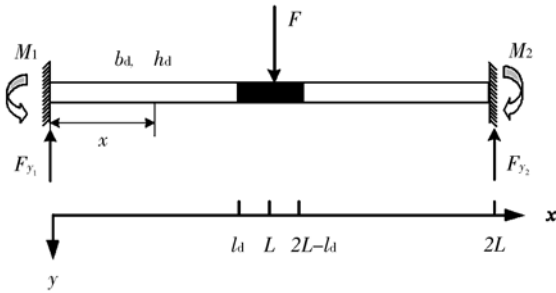


图 6 检测梁结构示意图

Fig. 6 Schematic structure of detecting beam

由材料力学分析方法选取整个检测梁为研究对象可以推导出:

$$\begin{cases} \sum F = 0 \Rightarrow F_{y_1} = F_{y_2} = \frac{F}{2} \\ \sum M = 0 \Rightarrow M_1 = M_2 \end{cases} \quad (1)$$

假设检测梁上任意一点 x 的挠度为 $w(x)$, 则:

$$-EIw''(x) = F_{y_1}x - M_1, \quad (2)$$

式中 E 为梁的杨氏模量, I 为梁的惯性矩。

分别对式(2)求一次积分和二次积分:

$$\begin{cases} -EIw'(x) = \frac{1}{2}F_{y_1}x^2 - M_1x + C \\ -EIw(x) = \frac{1}{6}F_{y_1}x^3 - \frac{1}{2}M_1x^2 + Cx + D \end{cases} \quad (3)$$

已知梁的边界条件:

$$w(0) = 0, w'(0) = 0, w'(l_d) = 0, w''\left(\frac{l_d}{2}\right) = 0, \quad (4)$$

由式(1)、(2)、(3)和式(4)可以求得:

$$\begin{cases} M_1 = M_2 = \frac{1}{4}Fl_d \\ w(x) = \frac{Fx^2}{24EI}(3l_d - 2x) \end{cases} \quad (5)$$

已知 $I = h_d b_d^3 / 12$, 代入式(5)可求得检测梁在外部载荷 F 作用下梁的应变变量 $w(x)$:

$$w(x) = \frac{F}{Eh_d b_d^3} x^2 \left[\frac{3}{2}l_d - x \right], \quad (6)$$

式中 l_d 为梁的长度。

柔性梁最大应变发生在梁的中心位置, 即 x

$= l_d$ 处, 其应变大小为:

$$w_{\max} = \frac{Fl_d^3}{2Eh_d b_d^3}. \quad (7)$$

故柔性梁的弹性系数为:

$$k_y = \frac{2Eh_d b_d^3}{l_d^3}. \quad (8)$$

由于柔性梁沿轴向刚度很大, 假设其在载荷 F 作用下没有发生弯曲变形, 由胡克定理可直接求得柔性梁沿 x 方向上的弹性系数:

$$k_x = \frac{2Eh_d b_d}{l_d}, \quad (9)$$

因此 x 方向上总的弹性系数为:

$$k_{y,\text{sum}} = 2k_y + k'_y = \frac{4Eh_d b_d^3}{l_d^3} + \frac{2Eh_d b_d^3}{l_{dm}^3}, \quad (10)$$

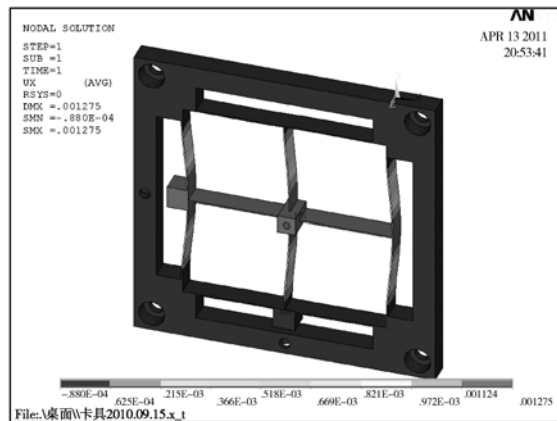
式中 l_{dm} 为中心梁的长度, “田”字型结构中心梁长度略长于四边梁。

该柔性解耦梁为对称结构, 因此 y 方向上总的弹性系数与 x 方向上的弹性系数相同。

2.3 柔性解耦梁有限元分析

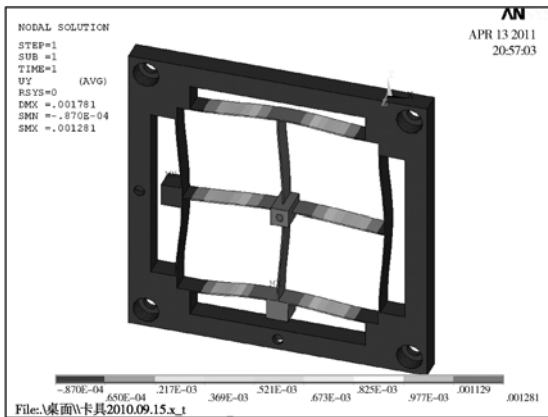
图 7 给出了柔性解耦梁的有限元分析图。当在单方向上施加 10 N 力时, 直线位移为 1.27 mm, 与理论计算值相差 0.07 mm。两个方向位移量相等, 与理论计算相符。

向两个垂直方向同时施加 10 N 的力时, x 向和 y 向直线位移量分别为 1.28 mm 和 1.32 mm, 与单向施加驱动力时位移量基本一致, 因此该结构柔性梁可有效实现运动解耦, 在定位调整过程中可实现轴零件的平面内运动和位姿的保持。系统中器件的轴、套最大间隙为 300 μm 。为实现 300 μm 的驱动行程, 计算可知驱动力需大于 2.4 N, 实际



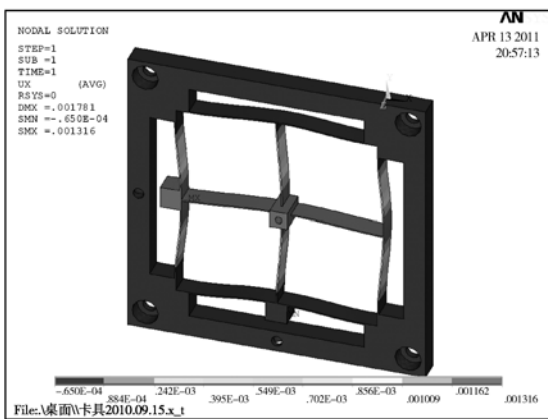
(a) 单向作用力下梁结构位移量分析

(a) Displacement of beams in single direction force



(b) 双作用下梁结构 y 向位移量分析

(b) Displacement along y axis in double direction forces



(c) 双作用下梁结构 x 向位移量分析

(c) Displacement along x axis in double direction forces

图 7 梁的有限元分析

Fig. 7 FEA of the beams

定位系统中选用了驱动力大于 10 N 的微动平台, 完全满足 300 μm 的驱动要求。

2.4 显微视觉图像处理原理

显微视觉中由于放大倍数很大, 导致景深很短, 因此, 在显微视觉微装配过程中无法保证 Z 向高度变化时视场中每个目标都保持清晰。而在大部分情况下, 精密定位装配过程要求自动完成, 对于模糊对象的定位只能通过自动调焦获得清晰图像后实现。因此, 在系统中需要使用显微视觉自动调焦设备来保证操作过程的实时性和准确性。

图像检测采用 Hough 变换实现, Hough 变换是一种用于描述区域边界形状的方法, 其将图

像空间变换到参数空间, 用大多数边界点满足的某种参数形式来描述图像中的曲线。通过设置累加器, 求得对应峰值点, 获取圆心位置和圆半径。

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2. \quad (11)$$

圆的方程如式(11)所示, 有 3 个参数 a, b, r 。Hough 变换检测圆时, 在参数空间里建立一个 3D 累加数组 Array, 其元素可以写作 $Array(a, b, r)$ 。让 a 和 b 依次变化并根据圆方程计算出 r , 进行累加, $Array(a, b, r) = Array(a, b, r) + 1$ 。在参数空间中, 式(11)表示的是一个 3D 锥面, 其物理意义为: 图像空间中的圆对应着参数空间中的一个点, 而图像空间中一个点对应着参数空间中一个 3D 直立圆锥, 该点约束了通过该点的一组圆参数 (a, b, r) 。对于图像空间中的一个圆, 半径是固定不变的, 圆周上的各个点组成的集合在参数空间中表现为 r 相等, 而 a, b 不等的各个圆锥的集合。

Hough 变换精度高、抗噪能力强, 可以满足系统精度要求。

3 系统建立及实验研究

上述理论和设计分析表明, 为实现精密同轴定位装配效果, 装配系统需要保证图像识别的精确性和同轴调整过程及调整后相对位置的准确性。系统主要由一套二维宏动运动平台、一套二维微动运动操作平台、柔性解耦梁夹具、显微视觉系统组成, 其实物如图 8 所示, 其中微动平台的定位精度为 0.5 μm。

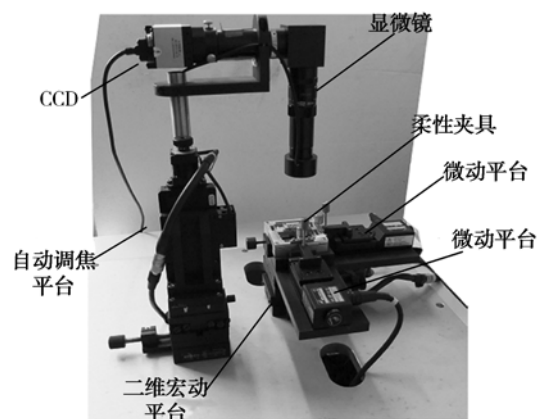


图 8 实验系统

Fig. 8 Experimental system

为满足小于 10 μm 的同轴定位精度, 图像的

视场只能看到轴和套之间间隙环的一部分。由于无法看到整个间隙环,图 2 所示的同轴调整方法需要进一步改进,改进方法如图 10 所示,利用轴中心的工艺孔作为基准,通过图像检测可以求出轴的中心点 O_2 ,沿着过 O_2 的 x 向和 y 向平移整个夹具(利用宏动定位平台驱动实现),可以找到并计算出这两个方向上间隙环的直线距离: x 方向上为 d_1 和 d_2 , y 方向上为 d_3 和 d_4 ,则改进后的同轴调整公式为: $|(d_1 - d_2)|/2$ 和 $|(d_3 - d_4)|/2$ 。

图 9 所示为柔性梁夹具实物图。

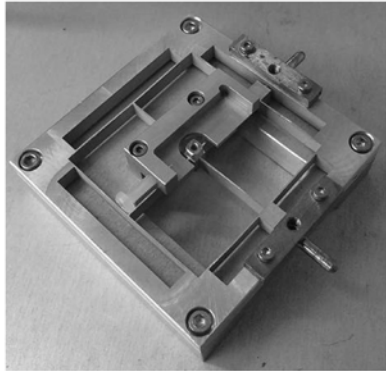


图 9 柔性梁夹具

Fig. 9 Fixture of the beams

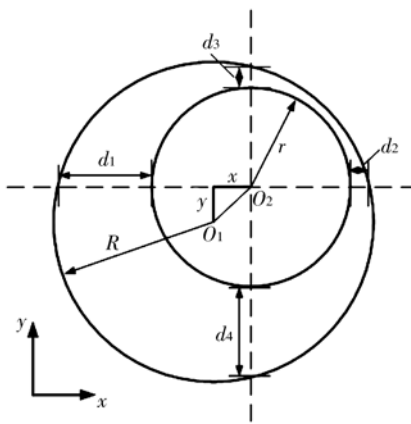
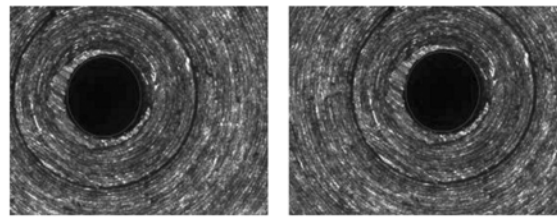


图 10 改进后的同轴定位图像计算方法

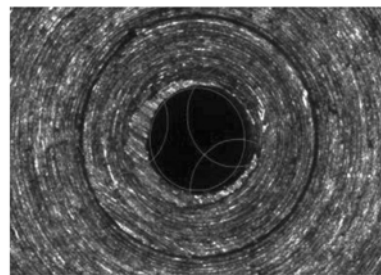
Fig. 10 Improved coaxial positioning method

分别对 d_1, d_2, d_3, d_4 进行检测,将计算的 x 和 y 向偏差反馈到驱动程序中,微动平台调整柔性梁并带动轴平移,消除这两个方向上的偏差。调整前对图像进行标定,将图像对应的像素值与微动操作平台的运动距离进行对应,如图 11 所示。首先识别工艺孔,通过微动操作平台将轴沿着 x 向平移一定距离,计算可得该方向上像素和操作平台距离的对应关系,同理计算 y 向图像。图 12 所示为检测

到的 4 个偏差的图像区域,系统自动计算出偏差数值用于指导微动台进行同轴调整。图 13 是将显微视觉图像缩小到间隙环全局后的调整对比图像。



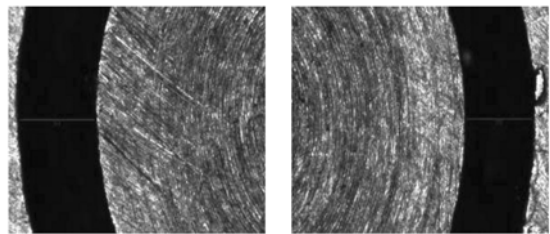
(a) 工艺孔识别
(a) Technology-hole distinguished
(b) x 向平移
(b) Translation along x axis



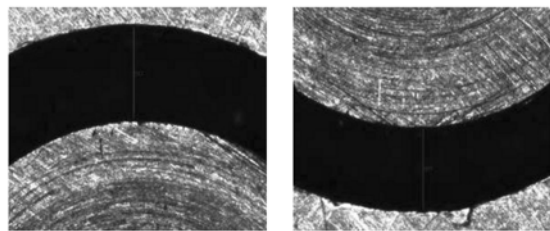
(c) y 向平移后图像居中
(c) Translation along y axis and image centered

图 11 图像标定

Fig. 11 Image calibration



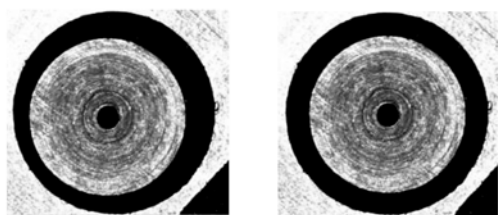
(a) 左侧偏差
(a) Left deviation
(b) 右侧偏差
(b) Right deviation



(c) 上侧偏差
(c) Deviation above
(d) 下侧偏差
(d) Deviation below

图 12 同轴定位前偏差检测

Fig. 12 Deviation detection before coaxial positioning



(a) 调整前 (d) 调整后
(c) Before positioning (d) After positioning

图 13 同轴调整前后对比

Fig. 13 Comparison before and after coaxial positionings

对多个对象进行了 50 次重复实验,有 41 次的同轴间隙调整是一次完成的,即一次检测计算后通过微动平台平移即可达到 $10\ \mu\text{m}$ 以下的定位精度;9 次同轴定位间隙调整是 2 次完成的,最终的同轴间隙最大值为 $7.3\ \mu\text{m}$,总装配和调整时间小于 3 min,验证了该同轴定位方法可以快

速、精确地实现装配调整。

精确调整定位后的夹具通过锁紧螺钉将柔性解耦梁部分锁紧,对间隙部分点胶后送入烘箱内固化。

5 结 论

本文针对偶件装配的指标要求,提出了一种基于柔性解耦梁和显微视觉技术的同轴定位调整系统,实现了偶件装配中同轴度的在线调整及定位。利用两自由度柔性解耦梁机构结合微动平台和夹具,实现了同轴度调整时零件轴的精确定位,为工装的下一个步骤提供了可靠的技术保证。显微视觉系统的设计实现了装配中同轴调整的实时检测和反馈功能,通过 Hough 算法实现了精密的同轴定位。实验结果表明,同轴度定位精度优于 $8\ \mu\text{m}$,装配调整时间由原来的 30 min(手工)提高到了 3 min(自动),大大提高了装配效率。

参考文献:

- [1] 刘笃喜,孙富振,黄兴隆. 航空精密偶件计算机辅助选择装配方法的研究[J]. 机械制造,2010,32(6): 80-82.
LIU D X, SUN F ZH, HUANG X L. Method of computer-aided selection for the aviation precision coupling assembly [J]. *Machinery*, 2010, 32(6): 80-82. (in Chinese).
- [2] ALLEGRO S, CHANEL C, JACOT J. Autofocus for automated microassembly under a microscope [J]. *Image Processing*, 1996(2): 677-680.
- [3] 孙立宁,陈立国,刘品宽,等. 微操作机器人显微视觉系统若干问题[J]. 光学精密工程,2002,10(2):171-175.
SUN L N, CHEN L G, LIU P K, *et al.*. Some issues on the micro-vision system for a micromanipulation robot [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2):171-175. (in Chinese)
- [4] 段瑞玲,段惠波,李庆祥,等. 基于图像处理的微装配自动调焦系统[J]. 光学精密工程,2006,14(3): 468-472.
DUAN R L, DUAN H B, LI Q X, *et al.*. Micro-assembly autofocusing system based on image processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 468-472. (in Chinese)
- [5] 王义文,刘献礼,谢晖. 基于小波变换的显微图像清晰度评价函数及 3D 自动调焦技术[J]. 光学精密工程,2006,14(6):1063-1069.
WANG Y W, LIU X L, XIE H. A wavelet based focus measure and 3D autofocusing for microscope images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1063-1069. (in Chinese)
- [6] LIU X Y, WANG W H, SUN Y. Autofocusing for automated microscopic evaluation of blood smear and pap smear [J]. *Engineering in Medicine and Biology Society*, 2006, 4718-4721.
- [7] 陈立国,王明月,杨志亮,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):1361-1366.
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):1361-1366. (in Chinese)

作者简介:



陈涛(1980—),男,河南三门峡人,博士,讲师,2010年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事微纳定位及微纳操作等方面的研究。E-mail: cht22@sina.com



潘明强(1982—),男,河南信阳人,博士,讲师,2010年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事 MEMS 与微流控技术,精密作业装备等方面的研究。E-mail: pmqwl@126.com



陈立国(1974—),男,辽宁葫芦岛人,教授,1997年、2000年于哈尔滨理工大学分别获得学士、硕士学位,2003年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事微操作、微驱动机器人方面的研究。E-mail: chenliguo@suda.edu.cn;



孙立宁(1964—),男,黑龙江鹤岗人,教授,博士生导师,长江学者,1985年、1988年、1993年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事微操作、微驱动等方面的研究。E-mail: lnsun@hit.edu.cn

● 下期预告

离子束溅射制备“日盲”紫外诱导透射滤光片

邓文渊,金春水

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033)

本文对采用离子束溅射沉积方法制备“日盲”紫外诱导透射滤光片进行了研究。首先对“日盲”紫外诱导透射滤光片进行理论设计与分析,然后分别对离子束溅射方法沉积 ZrO_2 、 SiO_2 和 Al 薄膜工艺进行了优化。利用反射与透射光谱反演解析获得了 ZrO_2 和 SiO_2 薄膜的光学常数,利用 JGS1/ SiO_2 /Al/ SiO_2 /air(简称 SAS)样品的变角度椭偏光谱反演精确获得了 Al 薄膜的光学常数。在此基础上,采用上述 3 种薄膜材料优化制备了“日盲”紫外诱导透射滤光片,测量了滤光片的光谱性能。对光谱性能的分析表明,滤光片的峰值波长位于 264 nm,峰值透过率大于 60.0%,透过峰带宽(FWHM)约为 13 nm,在 300~350 nm 波段的截止度达到了 2.6OD,制约离子束溅射制备“日盲”紫外诱导透射滤光片性能的主要因素是 Al 金属膜的溅射沉积速率以及沉积 Al 膜时腔体中残余的 O_2 含量。