

文章编号 1004-924X(2015)11-3121-08

跨尺度微管微球三维半自动装配点胶系统

史亚莉*, 张正涛, 徐 德

(中国科学院 自动化研究所 精密感知与控制研究中心, 北京 100190)

摘要:设计和搭建了一个 3D 半自动装配点胶系统,用于完成跨尺度零件微管与微球的三维装配点胶任务。系统主要由体视显微镜、变焦金相显微镜、发光二极管(LED)背光源、pL 级点胶机、微操作手和零件夹持器组成。采用显微镜高低倍转换的方式实现了零件跨尺度特征的检测。基于提出的半自动装配点胶策略,并配合人工引导和显微视觉伺服技术,快速完成了跨尺度零件的半自动高精度对准和插入点胶。在搭建完成的系统上开展微管与微球的装配点胶实验,对提出的方法和装配精度进行了实验验证。结果表明,系统的位置对准误差优于 $1\ \mu\text{m}$,角度对准误差优于 0.5° ,可以实现末端直径 $10\ \mu\text{m}$ 的微管与孔径 $12\ \mu\text{m}$ 的微球之间的装配和胶接,基本满足对该组件的装配精度和成功率要求。

关键词:跨尺度零件;装配策略;微装配;微点胶

中图分类号:TP242.3; TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152311.3121

3D semi-automatic assembly and dispensing system for trans-scale parts of micro-tube and micro-sphere

SHI Ya-li, ZHANG Zheng-tao, XU De

(Research Center of Precision Sensing and Control, Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

* Corresponding author, E-mail: shiyali0825@126.com

Abstract: A 3D semi-automatic assembly and adhesive dispensing system was designed and constructed for assembling and bonding the trans-scale parts of micro-tube and micro-sphere together in a three-dimensional space. The system mainly consists of a stereo microscope, two zoom microscopes, a Light Emitting Diode(LED) backlight, a pL class glue dispenser, three micromanipulators and three micro-part grippers. A method to transform the magnification of the zoom microscopes was adopted to detect the trans-scale features of the micro parts from several millimeters to several micrometers. An assembly and adhesive dispensing strategy based on people guiding and micro visual servo technology was proposed and used to align, insert and glue the trans-scale micro parts together fast and accurately. The assembly experiment was carried out by the developed system to validate the method and assembly accuracy. The experimental results show that the position alignment error is less than $1\ \mu\text{m}$ and the pose alignment error is less than 0.5° . The system assembles and bonds the micro-tube without diameter of $10\ \mu\text{m}$ and the micro-sphere with a hole diameter of $12\ \mu\text{m}$ together and meets the requirements of assembly accuracy and success rates.

Key words: trans-scale part; assembly strategy; micro assembly; micro adhesive dispensing

收稿日期:2015-05-15;修订日期:2015-08-17.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 61227804)

1 引言

微装配技术作为微机电系统(MEMS)研究的核心内容和热点话题,被广泛应用于电子、航天等领域,受到世界各国的普遍重视。微胶接作为微装配中应用最多的联接和密封方式,在复杂微小系统的制造中有着重要地位。很多微装配平台上都集成了自动微点胶功能。随着微小结构复杂程度的增加和微加工工艺的快速发展,微装配作业中装配对象同时涉及宏尺度、中间尺度和微尺度的现象越来越常见,研究跨尺度微小型零件的自动装配技术对微装配的发展具有重要意义^[1-5]。

微装配要求高精度的测量和运动控制,通常是在系统中集成显微视觉和微力传感器状态下进行零件装配和检测,配合微夹持器和微机械手运动实现微小器件的操作^[6-10]。显微视觉下进行跨尺度零件装配的难点在于,零件的外形轮廓尺寸与局部特征尺寸跨度大(从 mm 级跨到 μm 级),固定放大倍数的显微视觉无法同时满足大视场和高精度的测量要求。目前针对该问题提出的解决方案有:①在装配系统中安装 2 个或者多个不同倍数的视觉单元。张立文^[11]等基于高、低倍显微视觉单元研制了自动装配系统,提出局部特征拼接法实现了跨尺度零件的定位测量,但该方法在切换显微视觉单元后必须重新测量装配基准的位姿。②使用小视场、高倍数的显微视觉系统,对零件进行局部扫描,对多幅图像进行拼接后得到零件的全局成像。Benjamin Potsaida^[12]等提出利用旋转反射镜的方式对被测样品进行扫描,在图像拼接同时实现了大视场和高分辨率,该方法常用于单次拼接图像幅数较少的场合。③使用变焦显微视觉系统,通过改变放大倍数实现零件各个尺度特征的成像。李海鹏^[13]等研制了一套基于显微视觉伺服的多机械手微装配机器人系统,使用放大倍数从 1.05~6.75 的显微镜头实现了多个异形零件的检测需求。该方法具有效率高、成本低、算法简单的优点。

本文针对尺寸跨度从 mm 到 μm 的微管与微球,设计了 3D 半自动装配点胶系统,采用显微镜头高低倍转换的方式实现了零件跨尺度特征的检测。提出了一套半自动装配点胶策略,人工快速完成 2 个零件上微米级特征之间的粗对准。利用

基于显微视觉的测量与控制技术,半自动实现了末端直径 10 μm 的微管与孔径 12 μm 的微球之间的姿态和位置对准、插入和点胶。文中介绍了系统的硬件设计方案和装配点胶策略,对系统组成与布局、系统设计依据、夹持器设计、系统标定、位姿测量与对准方法等关键问题进行了讨论,最后进行了实验验证分析。

2 装配点胶任务分析与系统设计

2.1 微管微球组件

图 1 所示为跨尺度微管微球组件的装配关系示意图。微球为外径 0.5~2 mm,壁厚 80~100 μm 的空心球,在其壁上打有直径约为 12 μm 的通孔,用来安装微管;微管长 3~5 cm,一端外径约为 1 mm,另一端最小外径约为 10 μm ;通过在微球与微管联接处点胶实现零件之间的联接和密封,胶斑质量要求不大于 2.5 ng(约 3 pL)。点胶针最小外径约为 2 μm 。微球为 CH 材质,微管和点胶针为石英材质。

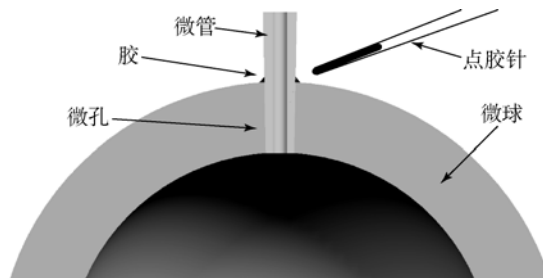


图 1 微管微球组件示意图

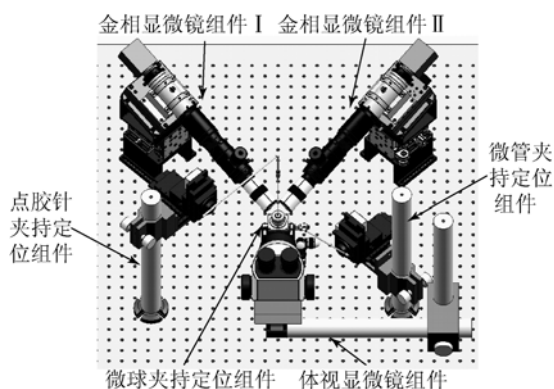
Fig. 1 Schematic diagram of micro-tube and micro-sphere assembly

2.2 系统的组成与布局

根据装配任务,设计的微装配系统主要由体视显微镜组件、金相显微镜组件 I、金相显微镜组件 II、微球夹持定位组件、微管夹持定位组件和点胶针夹持定位组件组成。系统结构与布局如图 2 所示。

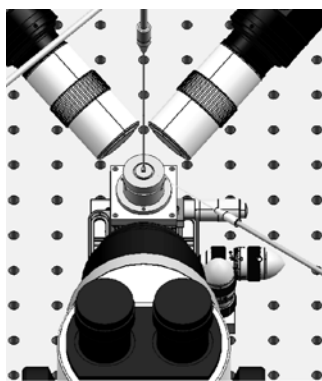
体视显微镜的放大倍数为 $10\times\sim 80\times$ 连续可调,体视显微镜安装在万向杆架的末端,其位姿姿态可手动调整。金相显微镜的放大倍数为 $5.5\times\sim 67\times$ 连续可调,金相显微镜安装在由 XYZ 3 自由度手动位移平台和 1 自由度电动位

移平台组成的 4 自由度位移平台上,金相显微镜的光轴与水平面成 30° 放置,1 自由度电动平台的运动方向与金相显微镜的光轴方向相同。微球夹持器安装在具有 $\theta_x\theta_y$ 2 自由度电动角度平台上。微管夹持器和点胶针夹持器分别安装在两个具有 XYZ 3 自由度电动位移自由度的微操作手上。金相显微镜组件 I 与金相显微镜组件 II,以及 2 个 3 自由度微操作手分别正交排列在微球操作手的周围。体视显微镜位于 2 个 3 自由度微操作手中间。



(a) 总体布局图

(a) Overall layout



(b) 操作空间局部图

(b) Partial view of operating space

图 2 微装配点胶系统示意图

Fig. 2 3D model of micro assembly and adhesive dispensing system

2.3 系统的设计依据

分层次配备三路显微检测系统:1 个体视显微镜与 2 个 12 倍变倍金相显微镜,互补实现了多目标的全方位多尺度检测要求。体视显微镜景深大,视场广,人眼可借助它直接观察被安装零件之间的相对位置,引导零件完成人工粗定位;12 倍

变倍金相显微镜在小倍数下可以采集到被装配零件的 mm 级外轮廓,进行微管和微球之间的姿态检测和对准;12 倍变倍金相显微镜在大倍数下,可以精确检测到零件上的 μm 级特征和点胶针尖,进行微管与微孔,以及点胶针的位置检测和对准。

尽量减少调节自由度,合理分配调节精度:10 个电动轴与 12 个手动轴分配到 6 个组件中。微球为中心轴线对称结构,设计 2 自由度电动角度平台就可以实现微球相对于微管的姿态调整;微管相对于微球的定位则使用分辨率为 $0.04 \mu\text{m}$ 的 3 自由度电动位移平台来实现;点胶针头的姿态对胶量控制的影响可以忽略^[14],所以使用分辨率为 $0.04 \mu\text{m}$ 的 3 自由度电动位移平台对针尖的点胶位置进行调节。为避免实验空间的拥挤,体视显微镜使用 6 自由度万向支架悬置;12 倍金相显微镜镜头利用 3 自由度手动平台进行粗调节,考虑到金相显微镜镜头的景深为 $1.5 \mu\text{m}$,在其调节平台上增加一个分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$ 的电动直线位移台精调其物距。

合理的空间排布:6 个组件按照 1 个中心,5 个环绕的方式进行排布,在满足平台功能的前提下,即方便人员操作,也兼顾了图像坐标和运动坐标的正交关系。点胶时胶斑形状形成受重力影响,所以微球孔与微管应该在垂直于水平的方向进行装配,因为微管遮挡的原因,垂直方向上无法排布显微镜,3 个显微镜镜头为了同时看清微球上的孔,必须与水平面成一定角度,初步都设计为 30° ,2 个 12 倍变倍金相显微镜镜头正交排列,微管夹持定位组件与点胶针夹持定位组件也正交排列,并且 2 个显微镜镜头和 2 个夹持定位组件互成 90° ,使得图像坐标系与微管、微球和点胶针所在的运动坐标系尽量正交。

2.4 微夹持器设计

设计了 2 个夹持器分别用于微管和微球零件的夹持。微球夹持器机械结构如图 3 所示,该夹持器兼有照明和夹持 2 个功能。主要由固定组件和活动组件组成。固定组件上装有 LED 贴片,活动组件上装有分划板和 Gel-Film 薄膜。Gel-film 是由专利 Gel 材料黏附于金属化的聚酯材料制成的透明薄膜,可保护微球样件的夹持表面不受损伤。其正面吸附固定微球,背面贴附在分划板上表面。固定组件与微球姿态调整平台固定连接,

活动组件可以快速方便的取下并放置在专用测量显微镜下安装微球,从而保证微球上的微孔基本朝上。活动组件的分划板上刻有中心标志,保证了微球安装位置的重复精度。LED 光可以透过分划板和 Gel-film,为体视显微镜和金相显微镜提供背光方式照明,并且可通过电位计调节光源的亮度,该照明方式从很大程度上改善了装配空间的拥挤情况。

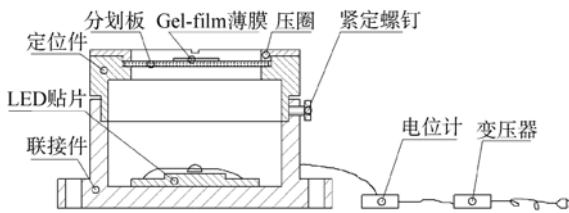


图 3 微球夹持器结构图

Fig. 3 Structure of micro-sphere gripper

微管夹持器如图 4 所示,主要由 V 型导向槽、压缩弹簧、压片、定位销、定位螺钉和调节螺帽组成。V 型导向槽对微管进行定位,旋动调节螺帽能够驱动压片沿定位销和定位螺钉进行运动,并且压紧弹簧,对微管进行夹紧。该夹持器能够保证微管姿态和 XY 两个方向的重复定位精度。

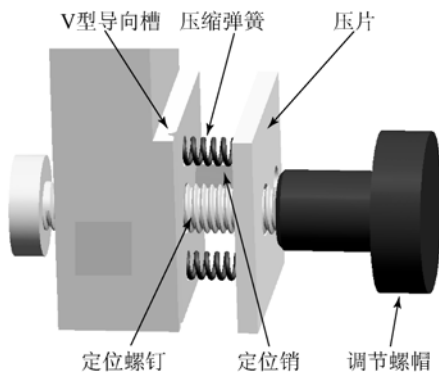


图 4 微管夹持器结构图

Fig. 4 Structure of micro-tube gripper

3 系统标定与装配策略

3.1 半自动装配策略

(1) 标定微管和点胶针操作手运动坐标系与 2 个显微图像坐标系之间的转换关系,该工作只需进行 1 次,后续更换装配零件不需要重复标定;

(2) 将微球、微管和点胶针分别安装在各自的夹持器上进行初定位,使得微球上的微孔基本朝上,微管也基本垂直朝下;

(3) 人工借助体视显微镜和操作手,将微管末端调节到微球上的微孔附近,进行微管与微孔的位置粗对准;

(4) 2 路金相显微镜在小倍数下自动检测微球与微管之间的相对姿态,并控制微球操作手运动,实现微管与微球之间的姿态对准;

(5) 2 路金相显微镜在大倍数下检测微孔与微管末端之间的相对位置,并控制微管操作手运动,实现微管与微球之间的位置对准与自动插入;

(6) 人工借助体视显微镜和操作手,将点胶针末端调节到微管与微球联接位置附近,进行点胶针与点胶位置的粗对准;

(7) 金相显微镜组件 II 在高倍数下检测点胶针与点胶位置之间的相对位置,并控制点胶针操作手运动,实现点胶针的精定位和点胶,具体点胶方法见文献[11]。此时另一路金相显微镜中看不到点胶针尖,这是由于微管遮住了点胶针尖;

(8) 点胶针自动撤离,启动紫外固化光源进行胶的固化;

(9) 微管操作手向上运动,微管带动微球脱离微球夹持器,从微管夹持器上将装配完成的微组件取下,装配流程结束。

3.2 系统标定

系统标定的目标是得到显微图像坐标与微操作手运动坐标之间的关系矩阵。由于显微视觉的景深较小,畸变可以忽略,所以可以认为清晰的景物近似处于一个垂直于摄像机光轴中心线的平面内,且在该平面内的景物坐标与图像坐标之间近似为线性关系。因此当零件特征成清晰像时,零件空间坐标与图像坐标之间有如下关系:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \\ J_{31} & J_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 是零件在三维空间的相对位移量, $(\Delta u, \Delta v)$ 是零件清晰图像的坐标增量, $J_{11} \sim J_{32}$ 是图像雅可比矩阵 J 的元素。

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \\ J_{31} & J_{32} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

根据以上模型,利用零件特征在清晰成像平

面内的至少 2 次相对运动,可实现上述的显微视觉测量模型中的 $J_{11} \sim J_{32}$ 参数的标定,即显微视觉系统与微操作手之间的标定。

3.3 位姿测量与对准

小倍数下的姿态测量与对准原理如图 5 所示。聚焦平面 1 为微球最外侧边缘在显微摄像机中清晰成像时所对应的聚焦平面。聚焦平面 2 为微孔中心部分与微管末端在显微相机中清晰成像所对应的聚焦平面,聚焦平面 3 为微管另一部位在显微相机中清晰成像所对应的聚焦平面。 O_1 为微球球心,位于聚焦平面 1 上。 O_2 为 O_1 在聚焦平面 2 上的投影点。 A 为微孔的中心点。 A_1 为微管末端中心点。 A_2 为 A_1 在聚焦平面 3 上的投影点。 B 为聚焦平面 3 中微管聚焦清晰部分的中点。控制显微相机运动分别对聚焦平面 1、聚焦平面 2 和聚焦平面 3 成清晰像,进行图像处理 and 特征提取获得 O_1 、 O_2 、 A 、 A_1 、 A_2 、 B 点的图像坐标,将图像坐标转换到微管操作手所在的运动坐标系中,即可计算出微球相对于微管的姿态。姿态调整时通过微球调整角度平台的旋转运动将微孔的姿态向量 AO_1 调整到与微管的姿态向量 BA_1 一致即可。

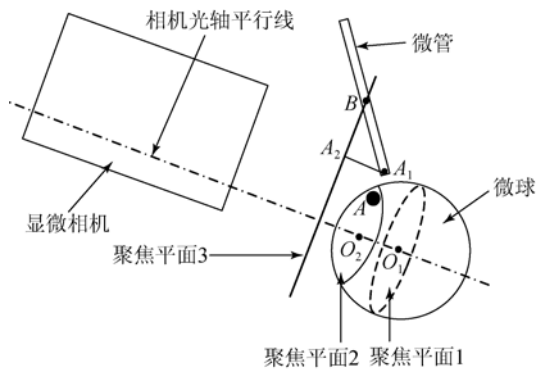


图 5 姿态测量原理

Fig. 5 Principle diagram of pose detection

大倍数下的位置测量与对准时,首先显微镜运动对微孔进行自动聚焦,之后微管操作手运动对微管末端自动聚焦。聚焦完成后,采集图像并进行图像处理和特征提取得到微管末端中心相对于微孔中心的图像相对位置。将其转换为微管操

作手运动坐标系中,即可得到微管相对于微孔的位置。位置调整时利用微管操作手的平移运动即可实现。

4 实验研究

如图 6 所示为 3D 半自动微管微球装配点胶系统。开展了微球零件与微管零件的半自动装配和点胶实验,实验使用的微球外径为 0.5 mm,微球上微孔直径为 12 μm ;微管长 4 cm,插入末端外径为 10 μm ;点胶针尖最小外径为 1.5 μm 。如图 7 所示为在装配点胶过程中的各个阶段 2 个显微相机采集到的零件位置姿态图像。其中,7(a)与 7(b)分别是姿态对准前后,使用显微镜低倍数检测零件相对姿态;7(c)与 7(d)分别是位置对准前后,使用显微镜高倍数检测零件相对位置;7(e)与 7(f)分别是点胶针对准到点胶位置后,开始点胶前与点胶过程中的胶斑生成过程图像。



图 6 微管微球装配点胶系统

Fig. 6 Micro assembly and adhesive dispensing system

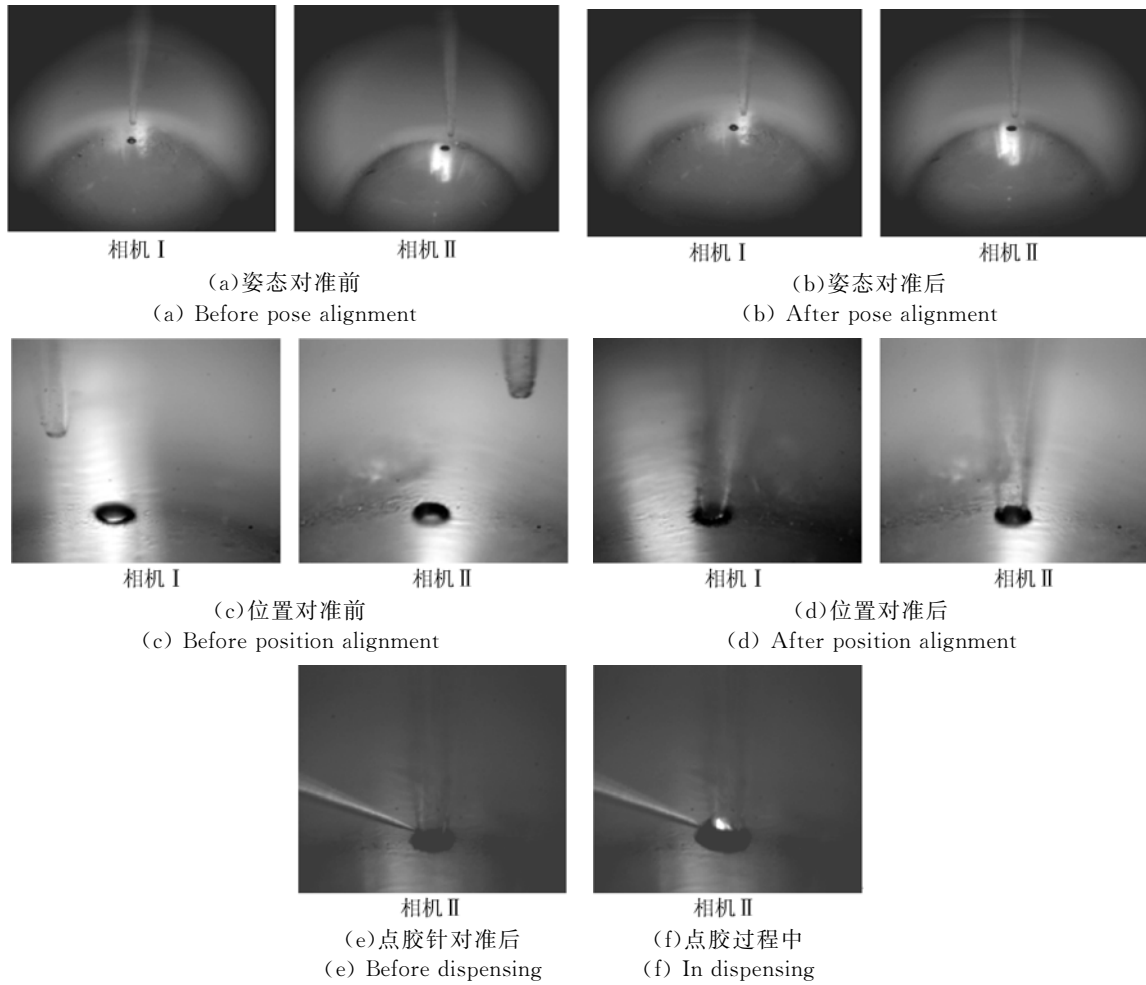


图 7 装配点胶过程采集到的部分图像

Fig. 7 Pictures in the process of assembly and adhesive dispensing

表 1 姿态和位置对准误差实验结果

Fig. 1 Experimental data of pose and position alignment

位置对准误差 ($\Delta x, \Delta y$)/ μm	姿态对准误差 ($\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$)/ $(^\circ)$
(0.31, -0.08)	(-0.11, 0.03)
(0.46, -0.16)	(-0.05, 0.02)
(0, 0.16)	(0.12, -0.01)
(-0.23, -0.24)	(-0.05, -0.06)
(0.31, -0.08)	(-0.02, -0.07)
(-0.15, -0.80)	(0, 0)
(0.61, -0.72)	(-0.11, 0.05)
(0.08, -0.08)	(-0.06, 0.27)
(0.31, 0.08)	(0.07, 0.10)
(-0.92, -0.32)	(-0.02, -0.10)

表 1 所示为分别进行 10 次姿态对准和位置

对准实验,测量得到的位置和姿态误差数据。从实验数据可以看出,系统的姿态对准误差不大于 0.5° ,位置对准误差不大于 $1 \mu\text{m}$,能够实现微米级微管与微球的装配,且精度满足装配工艺要求。

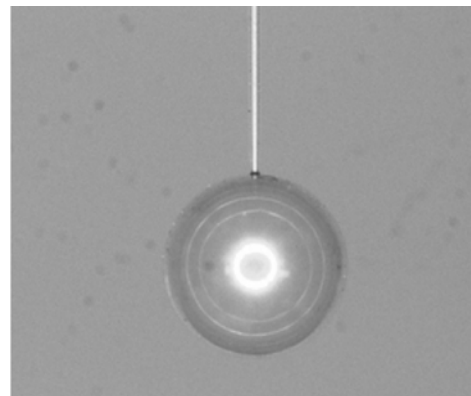


图 8 装配完成的微管微球组件

Fig. 8 Micro-tube and micro-sphere assembly

图 8 所示为装配点胶完成后得到的完成的微管微球胶接组件,该图像是使用 Nikon 专业测量显微镜在 100 倍放大后采集到的图像。

5 结 论

本文设计了跨尺度微管微球三维半自动装配点胶系统,克服了跨尺度微小零件三维装配时,显微镜镜头视场与分辨率之间的矛盾,以及装配系统

进行 μm 尺寸检测和操作时景深小、视场小、自动化难度大、装配空间拥挤、硬件容易发生干涉等一系列新问题,实现了毫米级微球 $12\ \mu\text{m}$ 微孔特征与厘米级微管 $10\ \mu\text{m}$ 特征之间的微装配和微胶接。存在的问题是,光照不是非常均匀,给图像后续的处理带来一定的难度;目前尚不能实现全自动装配,下一步的研究重点是改进光源和照明,提高图像质量,并进一步提高装配系统的自动化程度,减少人工辅助工作量。

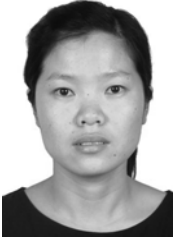
参考文献:

- [1] BRUSSEL H, PEIRS J, REYNAERTS D, *et al.*. Assembly of microsystems [J]. *Annals of the CIRP*, 2000, 49(2): 451-472.
- [2] CEDRIC C, ARNAUD H, NICOLAS C. Micromanipulation and micro-assembly systems [C]. *IEEE/RAS International Advanced Robotics Programm*, 2006: 1-5.
- [3] WANG X J, WANG X D, YAO G J, *et al.*. Automatic micro-bonding technology of capillaries with adhesives [C]. *6th International Conference on Electronic Packaging Technology*, 2005: 1-5.
- [4] TANIKAWA T, HASHIMOTO Y, ARAI T. Micro drops for adhesive bonding of microassemblies and making a 3-D structure "micro scarecrow" [C]. *Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems Victoria*, 1998: 776-781.
- [5] YUSOF A, ZENGERLE R, KOLTAY P. Towards a microfluidic dispenser chip for printing single cells [C]. *MEMS 2011, Cancun, MEXICO*, 2011: 1059-1062.
- [6] ADITYA N D, JEONGSIK S, DAN O P, *et al.*. On the Precision Alignment and Hybrid Assembly Aspects in Manufacturing of a Microspectrometer [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008: 959-966.
- [7] 陈国良,黄心汉,周祖德.微装配机器人系统 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(2): 288-293.
- CHEN G L, HUANG X H, ZHOU Z D. Micro-assembly robot system [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(2): 288-293. (in Chinese)
- [8] 姜志峰,王晓东,由博,等.精密微小组件压装技术及仪器 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1605-1611.
- LOU ZH F, WANG X D, YOU B, *et al.*. Pressing-fitting technology and instrument for precision small parts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1605-1611. (in Chinese)
- [9] DAVID H, MICHAEL G. Robotic micro-assembly of microparts using a piezogripper [C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008: 4042-4047.
- [10] TAMIO T, TATSUO A. Development of a micro-manipulation system having a two-fingered micro-hand [J]. *Fusion Science and Technology*, 2009, 55: 337-342.
- [11] 张习文,王晓东,罗怡,等.跨尺度微小型零件的测量与装配 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2012, 10(4): 342-347.
- ZHANG X W, WANG X D, LUO Y, *et al.*. Measurement and assembly of trans-scale miniature parts [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1542-1550. (in Chinese)
- [12] BENJAMIN P, YVES B, JOHN T W. Design of an adaptive scanning optical microscope for simultaneous large field of view and high resolution [C]. *International Conference on Robotics and Automation*, 2005: 460-465.
- [13] 李海鹏,邢登鹏,张正涛,等.宏微结合的多机械手微装配机器人系统 [J]. *机器人*, 2015, 37(1): 35-42.
- LI H P, XING D P, ZHANG ZHT, *et al.*. Micro-assembly robot system with multiple manipulators based on macro-micro motion mechanism [J]. *Robot*, 2015, 37(1): 35-42. (in Chinese)

- [14] 史亚莉,李福东,杨鑫,等.用于微胶接的 pL 级点胶方法 [J]. 光学 精密工程,2012,20(12):2744-2750.
SHI Y L, LI F D, YANG X, *et al.*. PL class ad-

hesive dispensing approach for micro bonding [J].
Opt. Precision Eng., 2012, 20(12):2744-2750.
(in Chinese)

作者简介:



史亚莉(1982—),女,山西运城人,博士,副研究员,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,现主要从事微装配和精密检测仪器方面的研究。E-mail: shiyali0825@126.com



张正涛(1981—),男,山东烟台人,研究员,硕士生导师,2010年于中国科学院自动化研究所获博士学位,主要从事精密视觉测量与控制方面的研究。E-mail: zhengtao.zhang@ia.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)