

文章编号 1004-924X(2017)01-0115-08

微颗粒的三维空间跨尺度装配方法

张娟*, 吴文荣, 毕列

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 针对微颗粒空间装配的问题, 以外径为十几微米的微颗粒与外径为几百微米的柱腔装配为研究对象, 开展微颗粒空间跨尺度装配方法研究。首先, 针对微颗粒受到基底表面作用力影响不易被拾取与释放的问题, 分析了微颗粒的受力情况, 设计了真空吸附式微夹持器用于微颗粒的拾取与释放; 然后, 针对由于微颗粒与柱腔的尺寸跨度大, 很难实现装配过程中二者空间位置实时监测的问题, 设计了具有多维视觉监测功能的微装配机器人并且建立了多维视觉监测模型, 实现微颗粒与柱腔装配过程的在线监测; 最后, 提出了基于多维视觉监测模型的微颗粒与柱腔空间半自动装配方法。实验结果证明了所提方法的有效性, 并且实现了将外径为 $20\ \mu\text{m}$ 的微颗粒放入外径为 $200\ \mu\text{m}$ 的柱腔内的目标。该方法适用于微机电系统制造中微颗粒的三维空间装配。

关键词: 微颗粒; 微夹持; 空间装配; 显微视觉; 微装配

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172501.0115

Trans-scale assembly method of micro-particles in 3D space

ZHANG Juan*, WU Wen-rong, BI Lie

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China)

* Corresponding author, E-mail: lgdzhangjuan@163.com

Abstract: For 3D space assembly of micro-particles, the column cavity assembly of micro-particles with diameter of more than a dozen microns and cavities with diameter of several hundred microns was determined as the research object, and a trans-scale assembly method research of micro-particles in 3D space was developed. Firstly, for the problem that micro-particles are hard to be gripped and released because of micro-force from substrate, the micro-force of micro-particles was analyzed, and a micro-gripper based on theory of vacuum adsorption was designed to grip and release micro-particles. Secondly, for the large-span of size between micro particles and column cavities, it's very difficult to realize monitoring of the real-time positions of micro-particles and cavities in assembly process, then a micro-robot system with multi-dimensional visual monitor function was designed and a multi-dimensional visual monitor model was set up to realize on-line monitoring of assembly process of micro-particles and cavities. Lastly, a semi-automatic assembly method of micro-particles and cavities based on multi-dimensional visual monitor model was proposed. Experimental result proves the effectiveness of proposed method, and the aim of putting a micro-particle with diameter of $20\ \mu\text{m}$ into a column cavity with diameter of $200\ \mu\text{m}$ is realized. This method applies to 3D space assembly of micro-particles in micro-electrical-mechanical (MEMS) system fabrication.

Key words: micro-particle; micro-grip; space assembly; micro-vision; micro-assembly

收稿日期: 2016-07-08; 修订日期: 2016-08-15.

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目 (No. 2014B0403066); 中国工程物理研究院超精密加工技术重点实验室基金资助项目 (No. ZZ14003)

1 引言

随着微机电系统与技术的发展,对于微零件的三维空间装配提出了更高的要求,特别是要求实现尺寸位于几微米至几十微米内,主要受到微观作用力影响的微颗粒的三维空间装配。然而,通常情况下微装配机器人装配对象的尺寸在几百微米至几毫米内,主要受宏观力影响,并且待装配的微零件的尺寸跨度较小。对于微颗粒的三维空间装配问题,由于微颗粒尺寸极小,受到的黏附力成为主导力,夹持与释放困难,需要深入探索微观环境中黏附力作用机理,并且由于微颗粒与装配对象的尺寸跨度大,装配过程中不易被同时观测,对在线监测技术、视觉伺服控制技术等提出了更高的要求,目前对于该方面的研究还不成熟。

在主要受到宏观力影响的微零件的装配方面,加拿大多伦多大学研制了 MEMS 微装配机器人^[1],并且针对 MEMS 装配过程中的装配工艺设计^[2]、微夹持技术^[3]、视觉伺服运动控制^[4]等进行了相关研究,在光学显微镜引导下实现了 MEMS 零件的对准、连接以及释放。目标物对准精度平均值为 $0.07\ \mu\text{m}$,目标物抓取时间为 $7.9\ \text{s}$,成功率为 94% 。法国 FEMTO-ST 协会研制了 5 自由度微装配机器人,并且针对显微视觉系统标定技术^[5]、自动聚焦技术^[6]、视觉伺服技术^[7]等进行了相关研究,实现了对尺寸从 $600\ \mu\text{m}\times 400\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}\sim 300\ \mu\text{m}\times 300\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ 的硅质微零件的夹取和放置,微零件的位置调整误差小于 $1.4\ \mu\text{m}$,姿态调整误差小于 0.5° ^[8],并且实现了 MEMS 器件的空间装配,装配时间为 $40.8\ \text{s}$ ^[9]。

对于尺寸在几微米至几十微米内,主要受到微观力影响的微颗粒装配/操作方面,东京大学研制了纳米机器人系统,在纳米手眼系统帮助下,实现了直径 $10\ \mu\text{m}$ 的微粒子的摆放操作和 $3\ \mu\text{m}$ 宽直线的刻线工作。瑞士 ETH 团队提出了一种纳米机器人系统^[10],通过空气压力控制的玻璃微管对微颗粒进行拾取与放置操作,实现了直径为 $50\ \mu\text{m}$ 微颗粒的定位。文献^[11]中通过标定图像坐标与空间坐标的关系,基于图像处理、路径规划、以及运动控制,研究了基于 AFM 的微球定位操作方法,并且通过分析 AFM 探针推动微球以及释放微球时微球的受力情况,实现了直径为

$4.5\ \mu\text{m}$ 的微球的二维平面定位。文献^[12]中基于微颗粒受力分析对微颗粒进行了运动规划,将 AFM 探针作为操作器,通过推与放的操作方式实现了直径为 $30\ \mu\text{m}$ 的微球的平面定位。

可以看出,目前在主要受到宏观力作用,零件尺度跨度较小的微零件的装配方面,研究较为成熟,研究成果主要集中在微装配机器人系统结构设计、机械手的趋近与抓取技术、微零件平面定位、以及简单结构微器件的空间装配等方面,满足常规微机电系统三维空间装配的需求^[13-15]。对于尺寸在几微米至几十微米内主要受到微观力作用的微颗粒的装配方面,研究成果主要集中在二维平面操作方面,并且在跨尺度的微颗粒与微零件装配方面研究较少,不能满足微机电系统所提出的微颗粒三维空间装配的需求^[16-18]。本文以尺寸为十几微米的微颗粒与尺寸为几百微米的柱腔装配为研究对象,开展微颗粒的夹持与释放、跨尺度的微颗粒与微零件空间装配方法研究。

2 装配工艺流程

基于微颗粒与柱腔的空间装配目标,设计了微装配工艺流程,如图 1 所示,首先通过外加作用力将微颗粒从基底表面拾取,如图 1(a)所示,然后控制微颗粒运动到柱腔顶部的微孔的正上方,并将微颗粒送入到柱腔内,如图 1(b)所示,最后通过外加作用力将微颗粒释放到柱腔内,如图 1(c)所示。微颗粒的直径在 $10\sim 30\ \mu\text{m}$;柱腔外径为 $200\ \mu\text{m}$ 左右,柱腔顶端微孔的外径在 $100\ \mu\text{m}$ 左右。

为了实现上述装配工艺流程,首先需要实现对微颗粒的夹持与释放,然后通过在线监测功能,引导实现微颗粒与柱腔的空间位置对准,最后实现二者的装配。

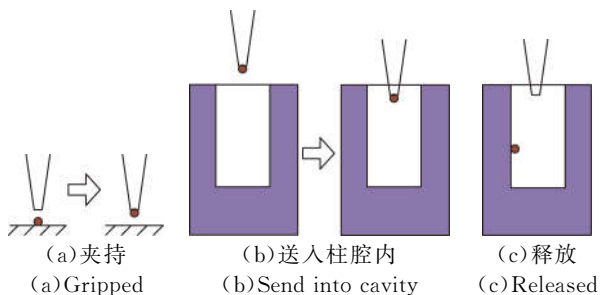


图 1 微颗粒与柱腔的装配工艺流程图

Fig. 1 Assembly process of micro-particle and cavity

3 微颗粒的夹持与释放

3.1 微颗粒受力分析

通常情况下,微颗粒受力由范德华力、静电力、毛细作用力构成。范德华力是由两微观物体相互极化产生,是普遍存在于各种原子和分子间的力。对于大部分颗粒,黏附主要是靠范氏力起作用^[19]。由于空气潮湿,两个接触物体间的间隙里可能产生水蒸气的凝结,从而形成毛细作用力。静电力有两种形式,一种是由于表面与颗粒体上带多余的电荷产生了一个分级的库仑吸引力;另一种是由于电子从一个物质转移到另一个物质直到平衡,这时电流在两个方向也达到平衡而产生静电力。通常情况下毛细作用力大于范德华力,范德华力大于静电力^[20]。

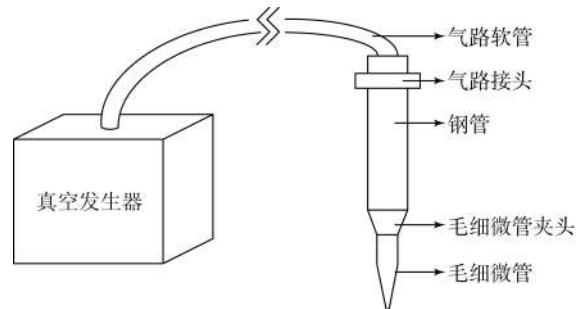
本文中的微颗粒操作是在实验室环境中进行,经过测试,实验室环境中的空气湿度位于 20%~60%。在此空气湿度环境中范德华力与毛细作用力较强,静电力可以忽略不计。因此,在静止状态下,范德华力 F_v 与毛细作用力作用 F_c 作用在微颗粒上,形成向下的合力 F 。为实现微颗粒的拾取,需要施加向上的力 F_m ,并且 $F_m > F$ 。

3.2 微颗粒夹持器

由于微颗粒极为微小,采用双钳式微夹持器在释放微颗粒时容易发生微颗粒黏附在夹钳上的情况,并且双钳式夹持器末端尺度较大,不能将微颗粒送入柱腔内,因此设计了末端尺寸在微米量级的真空吸附式微夹持器实现对微颗粒的拾取与释放。真空吸附式微夹持器的结构如图 2(a)所示,由真空发生器和夹具组成。夹具的主体为内部中空的钢管,钢管的一端连接气路接头,另外一端连接毛细微管夹头,毛细微管夹头夹持毛细微管。气路接头用于装载与拆卸气路软管,气路软管与真空发生器连接;毛细微管末端的尺寸在微米量级。

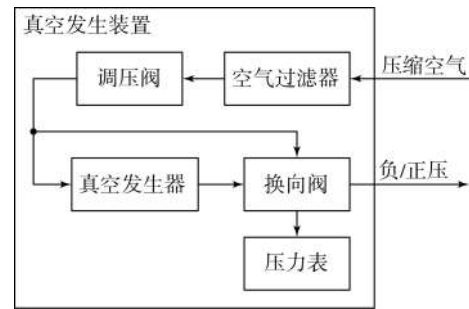
真空发生装置的结构如图 2(b)所示,包括空气过滤器、调压阀、真空发生器、换向阀、压力表。空气过滤器、调压阀顺序连接后分为两路,一路通过真空发生器与换向阀连接,另一路直接与换向阀连接。换向阀与真空发生器连通时,压缩空气依次经过空气过滤器、调压阀进入真空发生器,换

向阀输出负压;换向阀与真空发生器断开时,压缩空气依次经过空气过滤器、调压阀进入换向阀,换向阀输出正压。压力表与换向阀连接,显示管路气压值;调压阀用于调节输出正压/负压的大小。



(a)微夹持器

(a) Micro-gripper



(b)真空发生器

(b) Vacuum generator

图 2 微颗粒夹持器的结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of micro-particle gripper

夹持微颗粒时,首先控制毛细微管运动到微颗粒的正上方,然后控制毛细微管 Z 向运动与微颗粒发生接触,最后调节真空发生装置使其产生负压,使毛细微管末端产生吸附力夹持微颗粒。开启真空发生装置产生负压后,负压经气路在毛细微管末端形成向上的吸力 F_A ,如图 3(a)所示,当 $F_A > F$ 时,实现对微颗粒的拾取。然而,当被拾取微颗粒的大小不同时,微观作用力 F 的大小不同,在 F_A 固定的情况下,会出现拾取力过小不能拾取微颗粒的情况。针对该问题,通过对微颗粒施加水平推力,使微颗粒发生滚动运动,从而减小基底表面对微颗粒的黏附力,实现对微颗粒的拾取。

滚动运动状态下微颗粒的受力如图 3(b)所示,微颗粒受到向下的作用力 F_N ,向上的拾取力 F_A ,毛细微管末端作用在微颗粒上的向前的推动

力 F_p , 以及基底表面对微颗粒的摩擦力 f 。微颗粒发生滚动运动时, 表面黏附力 F_N 小于静止作用下的粘附力 F , 此时微夹持器可以实现对微颗粒的拾取。

释放微颗粒时, 调节真空发生装置使其产生正压, 使毛细微管末端产生向外的释放力, 实现对微颗粒的释放。

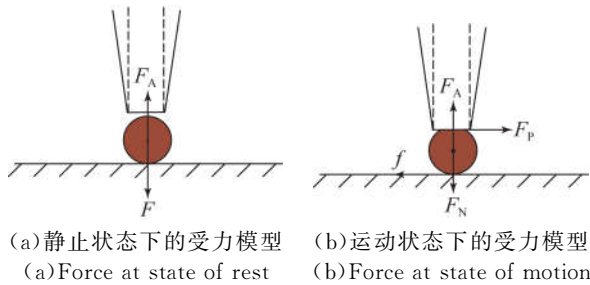


图 3 微颗粒的受力分析

Fig. 3 Force analysis of micro-particle

4 基于微装配机器人的微颗粒装配

4.1 微装配机器人系统

由于微颗粒与柱腔的尺寸相差较大, 并且显微视觉具有高放大倍数与大视场、大景深相矛盾的特点, 因此不易实现装配过程中对微颗粒与柱腔的实时监测。针对该问题, 设计具有多维显微视觉观测装置的微装配机器人系统, 系统结构如图 4 所示, 包括多维视觉监测装置、微操作系统、点胶系统以及控制系统等部分。

多维视觉监测装置由 4 路显微视觉系统构成: 1 号、2 号显微视觉系统均与水平面平行, 并且二者光轴的空间夹角为 90° ; 3 号显微视觉系统位于 1 号显微视觉系统的正上方, 并且与 1 号显微视觉系统位于同一竖直平面内, 光轴与水平面呈 45° 夹角; 4 号显微视觉系统位于 2 号显微视觉系统的正上方, 并且与 2 号显微视觉系统位于同一竖直平面内, 光轴与水平面呈 45° 。

1 号、2 号显微视觉系统具有较低放大倍数, 用于观测装配对象的整体信息, 3 号、4 号显微视觉系统具有较高放大倍数, 用于观测装配对象局部信息。水平 1 号、2 号显微视觉系统具有沿光轴方向的聚焦运动自由度; 3 号、4 号视觉系统均具有沿空间 X、Y、Z 轴方向的手动平移自由度以及

沿光轴方向的电动聚焦运动自由度。3 号、4 号视觉系统的 3 个手动平移自由度用来调整显微视觉系统的空间位置, 将操作对象呈现在视场范围内。四路显微视觉系统的聚焦运动自由度用来实现对操作对象特征区域的自动聚焦。

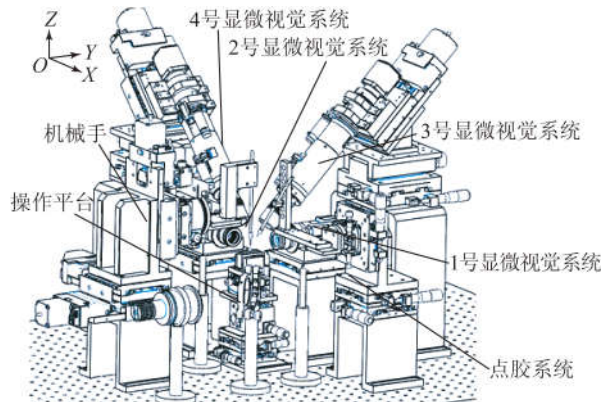


图 4 微装配机器人系统

Fig. 4 Micro-assembly robot system

微操作系统由机械手以及操作平台两部分组成。机械手的末端以及操作平台的上端均连接不同结构的夹具实现对不同对象的装夹。机械手具有分别沿 X、Y、Z 轴的电动平移自由度以及绕 X、Y 轴的电动旋转自由度, 实现对操作对象空间位姿的自动调整; 操作台具有分别沿 X、Y、Z 轴的手动平移自由度以及绕 X、Y 轴的手动旋转自由度, 用于调整操作对象的初始空间位姿并且将操作对象移动至水平两路显微视觉系统视场范围内。点胶系统用于控制点胶针运动到指定点胶位置进行点胶, 具有沿 X、Y、Z 轴的电动平移自由度以及绕 X、Y 轴的电动旋转自由度。

控制系统用于实现对硬件系统的控制以及对操作流程的控制, 其通过良好的人机界面实现上述功能。硬件系统控制采用分层控制策略, 主控计算机实现对多维视觉监测装置、微操作系统、点胶系统的分别控制, 与此同时, 多维视觉监测装置实时将当前采集到视觉信息反馈给主控计算机, 微操作系统、点胶系统将当前的位姿信息实时反馈给主控计算机; 操作流程控制指对工艺流程各个步骤的顺序控制。

4.2 多维显微视觉监测模型

基于多维视觉监测装置, 建立了多维显微视觉监测模型, 水平正交的两路显微视觉的监测模

型如图 5(a)所示, F_1 、 F_2 分别为 1 号、2 号显微视觉系统的焦平面, 1 号显微视觉实现柱腔与微颗粒在 X 轴、Z 轴方向的空间相对位置检测, 2 号显微视觉实现二者在 Y 轴、Z 轴方向的相对位置检测, 两路显微视觉信息融合后实现柱腔与微颗粒三维空间位置的实时监测。

由于水平两路显微视觉系统不能实现对柱腔顶部的微孔的观测, 因此使用 3 号、4 号两路显微视觉系统对微孔位置的观测, 其视觉监测模型如图 5(b)所示, F_3 为 3 号显微视觉系统的焦平面, 通过控制 3 号显微视觉系统沿光轴方向前后运动, 可以实现对微孔 a 区的观测; F_4 为 4 号显微视觉系统的焦平面, 通过控制 4 号显微视觉系统沿光轴方向前后运动, 可实现对微孔 b 区的观测, 通过两路视觉信息融合, 可实现微孔中心点的定位。同时, 3 号视觉系统实现微颗粒 X 轴、Z 轴的位置的实时监测, 4 号视觉系统实现微颗粒 Y 轴、Z 轴的位置监测, 从而引导微颗粒移动到微孔中心位置。

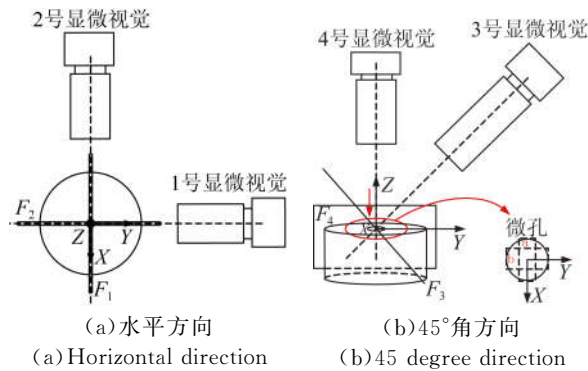


图 5 多维视觉监测模型
Fig. 5 Multi-dimensional visual monitor model

4.3 微颗粒空间装配方法

通过 4 路显微视觉引导实现微颗粒与柱腔的空间半自动装配。1 号、2 号显微视觉系统引导实现微夹持器运动到微颗粒所在区域, 以及微颗粒移动到柱腔顶部微孔的上方; 3 号、4 号显微视觉引导实现微夹持器末端与微颗粒接触、拾取, 以及将微颗粒送入到柱腔孔内。

微颗粒与柱腔的半自动装配流程如图 6 所示, 首先进行系统初始化, 控制系统各个运动平台运动到初始工位, 其中, 微颗粒所在的基底片呈现在 1 号、2 号显微视觉系统的视场范围内; 3 号、4 号显微视觉系统均聚焦到基底片上; 微夹持器末

端的毛细微管呈现在到 1 号、2 号视野范围内。

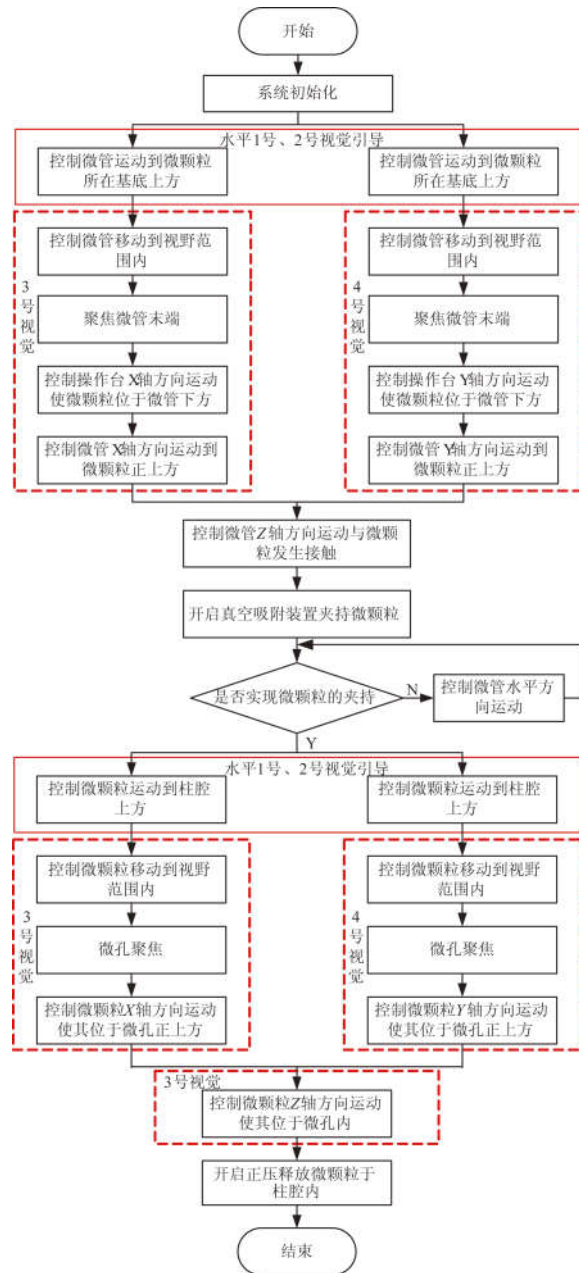


图 6 装配流程图
Fig. 6 Flow chart of assembly process

具体的微颗粒拾取过程分为以下几步: (1) 在 1 号、2 号显微视觉引导下控制微颗粒夹持器运动到微颗粒所在的基底片的上方; (2) 控制微夹持器 Z 轴方向运动, 使其运动到 3 号、4 号显微视觉系统视场范围中心区域内; (3) 3 号、4 号显微视觉系统聚焦微夹持器末端的毛细微管; (4) 调整操作平台 X、Y 轴运动, 将微颗粒移动到毛细微管的正下方; (5) 控制微颗粒夹持器的 X、Y 轴位置, 使毛细

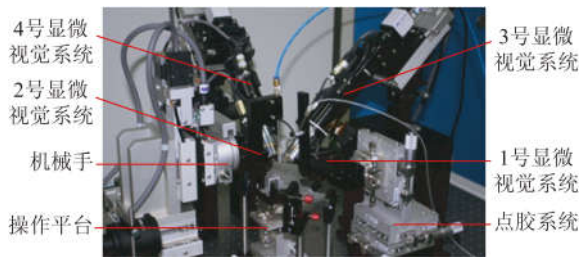
微管与微颗粒位置对准;(6)调整微颗粒 Z 轴位置,使毛细微管与微颗粒接触;(7)开启真空吸附功能,如果实现了微颗粒的拾取则进行下一步工序,否则采用控制微夹持器在 X 轴或 Y 轴方向运动带动微颗粒在基底表面发生滚动运动的方式,实现微颗粒的拾取。

微颗粒拾取后,首先在水平 1 号、2 号显微视觉引导下控制微颗粒移动到柱腔的正上方,并且控制微颗粒 Z 向运动到 3 号、4 号视野范围内,其次在 3 号、4 号显微视觉引导下控制微颗粒 X 轴、Y 轴位置调整运动到微孔的中心位置,然后控制微颗粒 Z 向运动到柱腔内,最后开启真空释放功能将微颗粒释放到柱腔内。

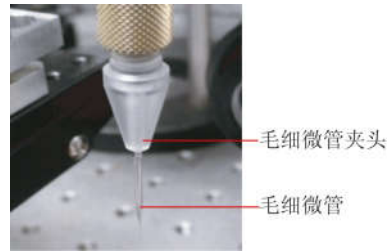
5 实验结果与分析

5.1 系统实验平台

搭建的微装配机器人系统实物如图 7(a)所示,显微镜头采用美国 NAVITAR 的变倍变焦镜头;CCD 采用瑞士 BAUMER 的高分辨率 CCD,其像素数为 $1\,392 \times 1\,040$,帧率 ≥ 15 pfs;位移台采用日本 KOHZU 的高精度平移台。微夹持器的末端如图 7(b)所示,毛细微管长度为 4 mm,其末端外径为 $10\ \mu\text{m}$ 。该微夹持器可以实现直径在 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ 内的微颗粒的夹持与释放。



(a)实验平台照片
(a)Image of assembly platform



(b)微夹持器末端照片
(b)Image of micro-gripper end-effector

图 7 实验平台照片

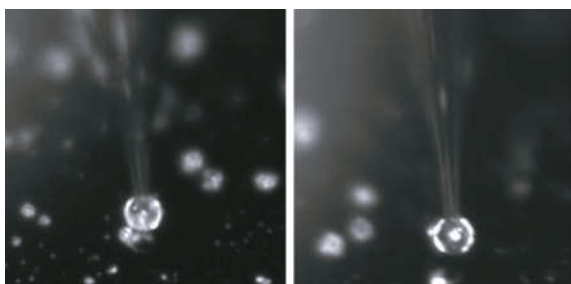
Fig. 7 Images of micro-assembly robot system

5.2 微颗粒的空间装配

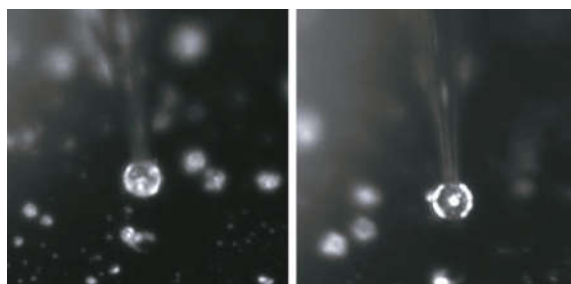
基于微装配机器人系统的搭建以及微颗粒与柱腔的空间半自动装配方法,开展了微颗粒与柱腔的装配过程验证实验。

从图 8(a)可以看出,微颗粒不均匀的分布在基底片上,并且存在尺寸不一、团聚的现象。实验从基底片上选择直径约为 $20\ \mu\text{m}$ 的微颗粒作为装配对象,待装配的柱腔的外径约为 $200\ \mu\text{m}$,柱腔顶部的微孔的外径约为 $100\ \mu\text{m}$ 。

图 8 所示为微颗粒与柱腔装配的过程图像,为了实现微颗粒与柱腔的装配,首先在多维显微视觉引导下实现微颗粒的拾取,图 8(a)为在 3 号、4 号显微视觉引导下,控制毛细微管末端与微颗粒对准后的图像;图 8(b)为通过负压作用力拾取微颗粒后的图像;图 8(c)为在 1 号、2 号显微视觉引导下,控制毛细微管末端运动到柱腔上方后的图像;图 8(d)为在 1 号、2 号显微视觉引导下,控制毛细微管末端与柱腔对准后的图像;图 8(e)为在 3 号、4 号显微视觉引导下,控制微颗粒移动至柱腔上端微孔内的过程图像;图 8(f)为开启真空发生器的正压功能,实现微颗粒释放后的图像。从实验结果可以看出,通过该种装配系统与装配方式,实现了将微颗粒释放入柱腔内的装配目标。



3号视觉图像 4号视觉图像
(a)微管与微颗粒对准
(a)Alignment of micro-tube and micro-particle



3号视觉图像 4号视觉图像
(b)微颗粒的夹持
(b)Micro-particle is gripped

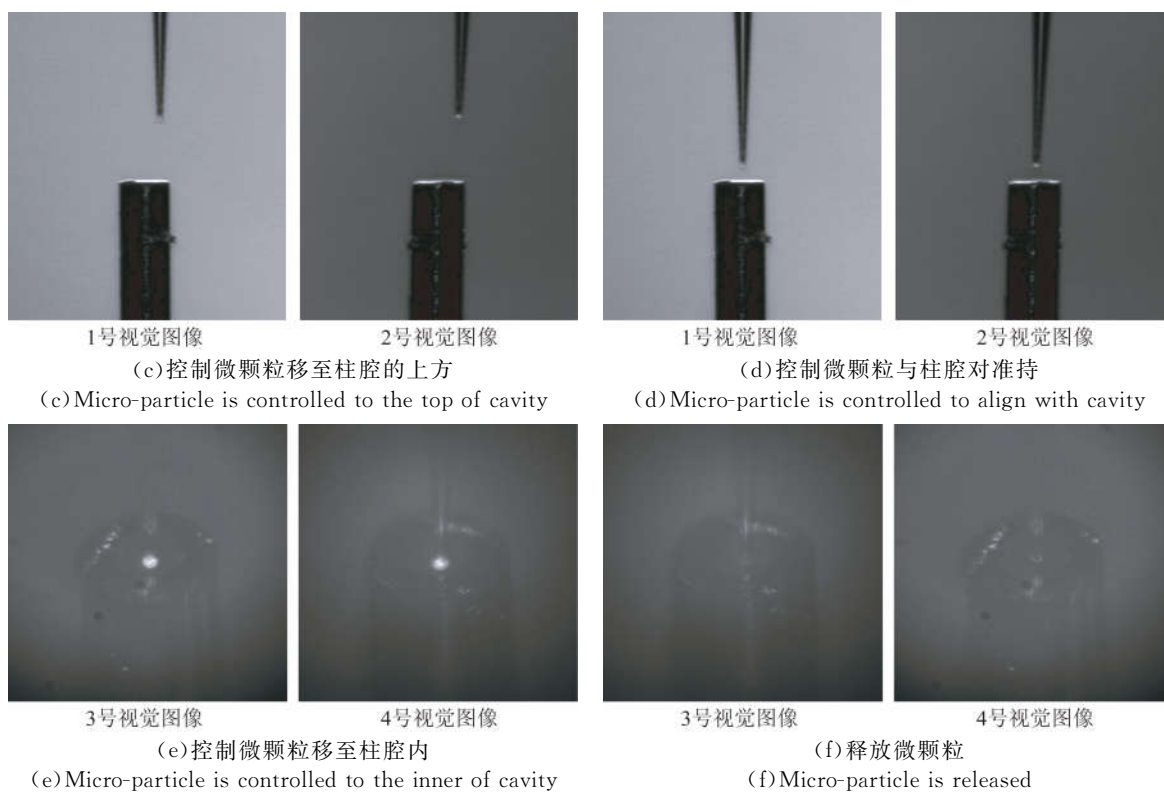


图8 微颗粒与柱腔装配的过程图像

Fig. 8 Images in assembly process of micro-particle and cavity

6 结 论

本文针对微颗粒三维空间跨尺度装配的问题开展研究,具体开展了微颗粒的夹持与释放方法,以及跨尺度的微颗粒与柱腔的空间半自动装配方法研究。针对微颗粒受到表面黏附力作用不易被拾取与释放的问题,分析了微颗粒在基底表面上的受力情况,设计了适用于微颗粒拾取与释放的

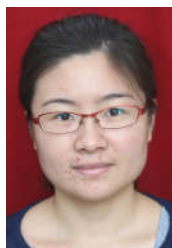
真空吸附式微夹持器,并且通过控制微颗粒在基底表面上发生滚动运动的方式实现尺寸在 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ 内的微颗粒的拾取。在跨尺度的微颗粒与柱腔的三维空间装配方面,设计了具有多维视觉监测功能的微装配机器人实现对装配过程的实时监测,并且提出基于多维显微视觉监测模型的微颗粒空间半自动装配方法,实现了外径约为 $20\ \mu\text{m}$ 的微颗粒与外径约为 $200\ \mu\text{m}$ 的柱腔的空间半自动装配。

参考文献:

- [1] REN L, WANG L D, MILLS J K, *et al.*. 3-D automatic microassembly by vision-based control [C]. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007:297-302.
- [2] REN L, WANG L D, MILLS J K, *et al.*. Vision-based 2-D automatic micrograsping using coarse-to-fine grasping strategy [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(9):3324-3331.
- [3] WANG L D, MILLS J K, CLEGHORN W L. Automatic microassembly using visual servo control [J]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2008, 31(4):316-325.
- [4] WANG L D, REN L, MILLS J K, *et al.*. Automated 3-D micrograsping tasks performed by vision-based control [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2010, 7(3):417-426.
- [5] TAMADAZTE B, DEMBELE S, PIAT N L. A multiscale calibration of a photon video microscope for visual servo control: application to micromanipulation[C]. *IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments*, 2008:29-34.

- [6] DUCEUX G., TAMADAZTE B, PIAT N L, *et al.*. Autofocusing-based visual servoing; application to MEMS micromanipulation [C]. *International Symposium on Optomechatronic Technologie*, 2010:1-6.
- [7] TAMADAZTE B, PIAT N L, MARCHAND E. A direct visual servoing scheme for automatic nanopositioning [J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(4):728-736.
- [8] TAMADAZTE B, PIAT N L, DEMBELE S. Robotic micromanipulation and microassembly using monoview and multiscale visual servoing [J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(2):277-287.
- [9] TAMADAZTE B, PIAT N L, DEMBELE S. Robust trajectory tracking and visual servoing schemes for MEMS manipulation [C]. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2010:860-865.
- [10] PAPPAS I, CODOUREY A. Visual control of a microrobot operating under a microscope [C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1996:993-1000.
- [11] ONAL C D, SITTI M. Autonomous 2D microparticle manipulation based on visual feedback [C]. *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2007:1-6.
- [12] IHN Y S, KIM Y C, CHOI H R, *et al.*. Implementation of grasplless handling system for microparticles using AFM probe [C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009:1843-1848.
- [13] XING D P, XU D, LI H P. A sequence of microassembly for irregular objects based on a multiple manipulator platform [C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014:761-764.
- [14] XIAO S L, LI Y M. Visual servo feedback control of a novel large working range micro manipulation system for microassembly [J]. *Microelectromechanical Systems*, 2014, 23(1):181-190.
- [15] YE X, GAO J, ZHANG Z J, *et al.*. Robotic microassembly for meso-scale application [J]. *Industrial Robot*, 2015, 42(2):142-148.
- [16] SHAO B, CHEN T. The research on release micromanipulation mechanism and method of microparticle based on dynamic adhesion control [C]. *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2011:1716-1721.
- [17] GONG Z, CHEN B K, LIU J, *et al.*. Automated nanoprobng under scanning electron microscopy [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013:1433-1438.
- [18] PAWASHE C, FLOYD S, DILLER E, *et al.*. Two-dimensional autonomous microparticle manipulation strategies for magnetic microrobots in fluidic environments [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(2):467-477.
- [19] BURDICK G. M, BERMAN N S, BEAUDOIN S P. Hydrodynamic particle removal from surfaces [J]. *Thin Solid Films*, 2005, 488(1-2):116-123.
- [20] 李艳强, 吴超. 微颗粒在表面粘附的力学模型可视化研究 [J]. *安全与环境工程*, 2007, 14(3):15-18.
- LI Y Q, WU CH. Visual research on the mechanical models of micro-particle adhesion on the surface [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2007, 14(3):15-18. (in Chinese)

作者简介:



张娟(1985—),女,河南汝南人,博士,助理研究员,2007年于郑州大学获得硕士学位,2013年于中国科学院自动化研究所获得博士学位,主要从事机器视觉、微装配技术的研究。E-mail:lgdzhanguan@163.com



吴文荣(1977—),男,湖南涟源人,硕士,副研究员,2006年于电子科技大学获得硕士学位,主要从事精密微装配技术研究。E-mail:rongwrr@163.com