

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.036

基于协作机器人的自动装配设备中精密点胶系统

许文强^{1,2}, 王晓东^{1,2}, 闫怡婷^{1,2}, 徐 征^{1,2}, 孙永奎^{1,2}

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023;

2. 大连理工大学高性能精密制造全国重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘 要:为解决装配过程中点胶位置和胶量控制方面的问题,设计并集成基于协作机器人的精密点胶系统。分析协作机器人在姿态调整时出现的偏差对精密点胶过程的影响,并据此建立相应的偏差补偿模型。利用点胶标定夹具和协作机器人末端的视觉模块,实现对针头位置和胶滴大小的精确控制。实验结果显示:对于直径为 500 μm 的胶滴,中心位置偏差小于 30 μm ,直径大小的一致性偏差小于 8%,这能满足装配零件点胶的精度要求,为微小零件精密装配自动化生产提供新的解决方案。

关键词:精密装配;协作机器人;点胶系统;精密点胶;偏差补偿

中图分类号:TP271⁺.2; TP278 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)02-0185-06

Precision Dispensing System Based on Collaborative Robot Automatic Assembly Equipment

XU Wenqiang^{1,2}, WANG Xiaodong^{1,2}, YAN Yiting^{1,2}, XU Zheng^{1,2}, SUN Yongkui^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. National Key Laboratory of High Performance Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: A precision dispensing system based on collaborative robots was designed and integrated for the control of dispensing position and glue volume during the assembly process. The influence of deviations in the posture adjustment of collaborative robots on the precision dispensing process was analyzed, and a corresponding deviation compensation model was established. A dispensing calibration fixture and a vision module at the end of the collaborative robot was applied to achieve the precise control of the needle position and glue droplet size. Experimental results show that for glue droplets with a diameter of 500 μm , the deviation of the center position is less than 30 μm , and the consistency deviation of the diameter size is less than 8%, which meets the precision requirements for dispensing assembly parts, and provides a new solution to the automatic production of precision assembly of micro parts.

Keywords: precision assembly; collaborative robot; dispensing system; precision dispensing; deviation compensation

0 引言

精密点胶技术是在微小器件目标位置分配微量胶液,进而达到粘接、密封、导电等目的^[1-2]。随着机电系统日趋多样化,各类精密光学器件的组装难度也日益增加^[3],这就要求精密点胶技术实现更为精细、迅速、精确且可靠的性能^[4-5]。当前,点胶技术主要依据针头运动是否涉及与胶液和基板的直接接触来分类,分为接触式点胶和非接触式点胶两种形式^[6-8]。在处理高黏度胶黏剂时,接触式点胶显得尤为有效,因为基板与胶黏剂之间的粘附作用促进了胶黏剂从注射针头的顺利

脱离^[9-10]。在接触式点胶技术中,时间-压力型点胶因其出色的适应性和稳定性,在胶粘接领域中占据核心地位^[11-12]。

许多国内外的学者对精密点胶技术进行研究,进而开发精密点胶系统。SONG 等^[13]设计的三轴伺服点胶系统,可实现 0.03 mm 的定位精度。邓珺珺等^[14]搭建了点胶实验测试平台,并研究了喷射阀在不同行程下的性能表现。实验结果显示:胶滴体积的误差在 $\pm 6\%$ 以内,且随着行程的增加,绝对误差也呈现出上升趋势。当喷射阀行程为 0.06 mm 时,相对误差在 $\pm 3\%$ 以内。史亚莉等^[15]研发了一个半自动点胶系统,专门用于跨尺

基金项目:辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC2002020)

第一作者简介:许文强(1998—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,研究方向为微小零件精密点胶技术,xwq1393990821@163.com。

通信作者简介:王晓东(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,博士,研究方向为精密微小装配技术、精密仪器设计与制造,xdwang@dlut.edu.cn。

度零件中的微管与微球的装配点胶任务,其位置对准误差 $1\text{ }\mu\text{m}$,角度对准误差小于 0.5° ,能够实现直径为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的微管与 $12\text{ }\mu\text{m}$ 的孔径装配点胶工作。然而,现有的点胶系统在点胶位置和胶量分配方面已经展现出了较高的精度,但在微小零件的批量自动化装配过程中,集成自动化点胶系统仍然是一项挑战。关键在于如何确保装配过程中点胶的一致性,特别是在点胶位置和胶量的精确控制方面。因此,研发一种能够兼容多种零件、实现高精度点胶且易于与装配设备集成的精密点胶系统,具有非常重要的实际意义和应用价值。

本文的基于协作机器人的精密点胶系统是集成多个功能模块组成的自动化装配设备。协作机器人以其高灵活性、卓越的安全性以及便于集成维护等特点,为点胶系统带来了显著的优化,实现了装配零件上料、视觉引导针头点胶以及零件下料的全自动过程。通过分析协作机器人运动到示教位置存在的姿态偏差对针头定位的影响,并据此建立了有效的偏差补偿模型;利用点胶标定夹具结合协作机器人末端视觉模块可对针头位置进行精确控制;针对胶量控制的问题,通过实验的方式来确定针头与基板之间的最佳工作距离,并提出了基于点胶时间来确定胶滴大小的方法;最终,通过在装配零件上进行的点胶实验,验证集成精密点胶系统的合理性和有效性。

1 点胶要求及任务分析

1.1 待装配零件及点胶任务分析

微小组件主要由 4 个零件装配而成,其装配效果如图 1 所示。零件均采用硅材料制作且尺寸相对较小。零件采用胶粘接的方式进行装配,其中零件 1、零件 2、零件 3 分别装配到零件 4 的上表面。根据装配的工艺要求,需满足以下点胶任务要求:1)区域 a、区域 b、区域 c 所需胶滴个数分别为 1、3、4;2)保证胶滴直径 D 为 $500\text{ }\mu\text{m}$;3)保证胶液涂满整个胶接面;4)保证零件间连接的强度;5)保证胶滴直径变化不超过 15%。

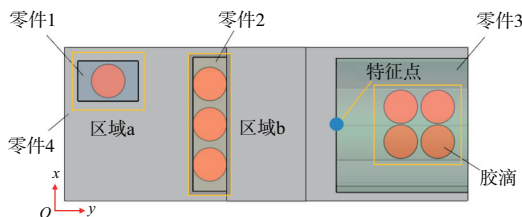


图1 零件装配效果图

1.2 精密点胶系统组成

为实现微小零件精密装配中点胶精度要求,集成的由多个功能模块组成的基于协作机器人的精密点胶系统如图 2 所示。其主要包括点胶操作模块、协作机器人、视觉模块、点胶标定夹具以及作业工作台模块 5 大部分。

点胶操作模块安装在单轴机器人上,可实现沿 y 轴和 z 轴的快速移动;视觉模块安装在协作机器人末端法兰盘上,利用协作机器人灵活性高的优点可实现从不同方向测量零件之间的位姿偏差;点胶标定夹具由点胶采样底座和硅片组成,结合视觉模块可实现对针头位置和胶滴大小的精确控制。由于装配零件材料为硅,因此选用硅片作为胶滴载体;工作台模块是对装配零件之间位姿偏差的辅助测量和精密位移调整的重要模块,其主要包括 x 轴和 y 轴精密位移滑台、围绕 z 轴精密转台以及作为视觉测量基准的定位销。

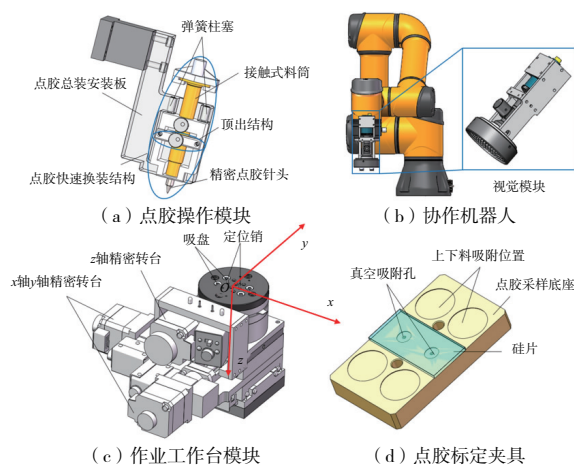


图2 精密点胶系统

2 协作机器人对点胶过程的影响

协作机器人在执行零件上下料任务时,只需运动到预先示教的位置和姿态,随后进行上料和下料操作。然而,在要求更高精度的微小距离测量应用中,协作机器人自身的重复定位偏差和姿态偏差成为影响测量准确性的关键因素。这些偏差不仅可能导致测量结果的不准确,还可能在实际操作中引发不可预测的风险。为了降低重复定位偏差对测量精度的影响,本文研究采用了相对距离的测量方法,这种方法提高了测量的精确性。尽管这一方法有效减少了重复定位偏差的干扰,但协作机器人的姿态偏差仍然是一个不可忽视的问题,其中主要是协作机器人的俯仰和偏摆偏差。

2.1 协作机器人俯仰对视觉测量的影响

当测量两个特征间微小距离时,协作机器人末端的俯仰是影响测量的主要因素,如图3所示。设 AB 长度为 l ,当机器人末端视觉模块不存在俯仰时,相机测 AB 两点距离就是 l 。当机器人末端视觉模块存在俯仰时且角度为 θ 时,相机测出 AB 的距离为 l' 。

$$l' = l \cos \theta \quad (1)$$

因此当 θ 比较小的时候,长度变化量 Δl 为

$$\Delta l = l - l' = l \cdot (1 - \cos \theta) \approx \frac{1}{2} l \theta^2 \quad (2)$$

长度变化量 Δl 近似是 θ 的二次函数,因此若保证微小距离 l 在很小的范围以内,同时 θ 控制一个比较小的弧度值, Δl 也会趋于一个很小的数值,因此机器人视觉模块俯仰角度 θ 比较小的时候,微小距离的测量受到影响是可以忽略的。

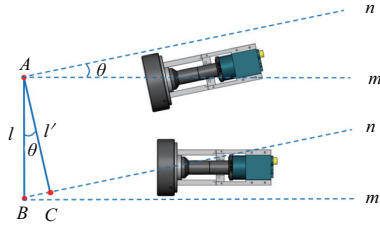


图3 协作机器人存在俯仰示意图

2.2 协作机器人偏摆对距离补偿的影响

当在 xy 平面上进行微小距离移动时,协作机器人需要运动到 z 方向的示教位置以测量微小距离,由于作业工作台模块上的精密滑台具有较高的定位精度,因此视觉模块测得的微小距离需要精确地转换到作业工作台上,最后通过精密滑台进行补偿。然而协作机器人存在偏摆时,就会影响距离补偿的精准度。为了方便地表示各模块之间的转换关系,在作业工作台模块上建立作业工作台坐标系 xOy ,在相机视野下的图像建立图像坐标系 uOv 。当协作机器人末端存在偏摆角时,即 xOy 和 uOv 坐标系存在夹角 $\beta_{u,x}$ 和 $\beta_{v,y}$,如图4所示。

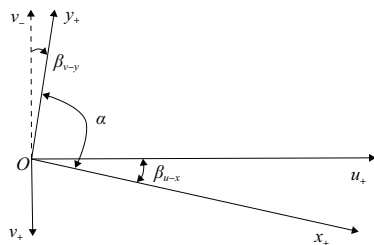


图4 协作机器人存在偏摆示意图

因此图像坐标系下测量的微小距离转换到作业工作台坐标系下的计算公式如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_t \\ \Delta y_t \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: Δx_t 和 Δy_t 分别是滑台理论移动的距离; Δu 和 Δv 分别是图像坐标系下的位移; M 是图像坐标系转换到作业工作台坐标系的转换矩阵,表达式如下:

$$M = \begin{bmatrix} -\cos \beta_{u,x} & -\sin \beta_{u,x} \\ -\sin \beta_{v,y} & \cos \beta_{v,y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

在理想的工作状态下,作业工作台模块的精密滑台的 x 轴与 y 轴应当保持垂直关系。但实际情况中,由于安装过程中的偏差,滑台的 x 轴和 y 轴存在一定的夹角偏差。这种偏差会导致滑台在 x 方向和 y 方向移动时产生耦合效应,从而影响滑台在微小距离上的补偿精度。因此需要离线标定出滑台的 x 轴 y 轴的夹角 α 以及运动耦合矩阵 N 。

$$\begin{bmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} \Delta x_t \\ \Delta y_t \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: Δx_r 和 Δy_r 分别是滑台实际移动的距离; Δx_t 和 Δy_t 分别是滑台理论移动的距离。运动耦合矩阵 N 由以下公式得出:

$$N = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sin^2 \alpha} & -\frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha} \\ -\frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha} & \frac{1}{\sin^2 \alpha} \end{bmatrix} \quad (6)$$

3 针头位置的精确控制

在微小零件上执行精密点胶时,保证胶滴位置的精准性至关重要。点胶快速换装结构的安装和更换过程中,如果存在任何微小的安装偏差,都可能导致针头的位置出现偏差。这种偏差可能导致零件装配后胶液溢出或点胶失败等问题,这不仅会降低零件之间的连接强度,还可能使零件装配后的精度无法达到要求,如图5所示。为了确保点胶过程的准确性,必须对针头实际位置进行确定,从而在后续点胶作业中实现精确控制。

针头位置的确定主要依赖于点胶标定夹具,该夹具的点胶采样底座的吸附孔与作业工作台的真空吸附气道相连通,从而确保在标定过程中,硅片能够被牢固地吸附固定,防止因胶液的黏性力导致硅片位置发生变动。针头位置确定的核心在于精确测定针头相对于作业工作台上定位销在 x 轴、 y 轴和 z 轴3个方向上的距离,以确保点胶作业的精确性和一致性。

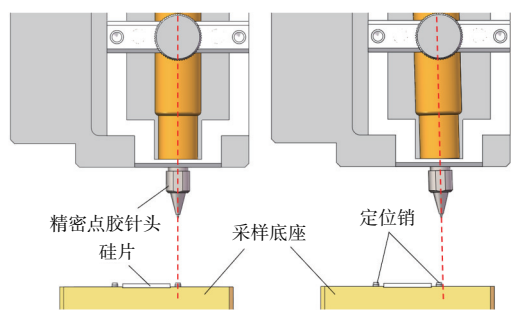


图5 点胶快速换装结构安装偏差示意图

3.1 针头高度方向的位置确定

点胶间隙指的是在点胶过程中,针头与基板之间的垂直距离。这一间隙的精确控制对于调节出胶量具有关键作用,因此需要对针头在高度方向上的位置信息进行确定。首先操作单轴机器人,使其 y 轴和 z 轴分别移动至 y_{d0} 和 z_{d0} 的示教位置。随后,精密滑台 x 轴和 y 轴分别移至 x_0 和 y_0 ,以确保针头与作业工作台上的定位销之间的高度差约为1 mm。其目的是防止因重新安装点胶换装结构等因素导致点胶针头的高度发生变动,从而避免与定位销发生碰撞,同时也要确保针头与定位销尽量对齐,以便在同一相机视野内获得清晰的图像。最后,操作协作机器人运动至 x 轴方向上的预定示教位置。此时,视觉模块对视野内的图像进行采集,并通过图像处理得出针头与定位销在高度方向上的距离 h ,如图6所示。在协作机器人执行测量任务时,其末端偏摆对相对距离测量无影响;同时,其末端俯仰对测量的影响也可忽略不计。因此距离 h 将作为针头在高度方向上的位置信息。

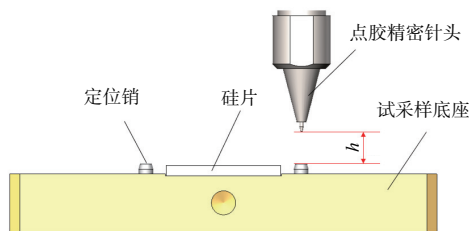


图6 针头高度方向标定示意图

3.2 针头水平方向的位置确定

首先,操作单轴机器人 y 轴和 z 轴分别移至 y_{d0} 和 z_{d0} ,精密滑台 x 轴和 y 轴分别移至 x_0 和 y_0 ,使得针头与定位销近似对齐。随后控制精密滑台 x 轴和 y 轴分别移动至 x_1 和 y_1 。使得针头定位到硅片上方固定位置。然后操作单轴机器人沿 z 轴

移动至 $z_{d0}+h-S$ 位置。控制点胶控制器点出第1个胶滴,以同样的方式点出第2个胶滴、第3个胶滴,对应滑台的位置分别为 x_2 和 y_2 、 x_3 和 y_3 。最后协作机器人运动到 z 轴方向示教位置,视觉模块对图像进行采集,图像处理得到图像坐标系下3个胶滴中心分别相对于定位销的偏差。

因此当针头定位到与定位销近似对准位置时,针头与定位销在作业工作台坐标系下的偏差 P_{xi} 和 P_{yi} 作为针头在水平方向的位置信息,计算公式如下:

$$\begin{bmatrix} P_{xi} \\ P_{yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i - x_{i-1} \\ y_i - y_{i-1} \end{bmatrix} + NM \begin{bmatrix} \Delta u_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix}, (i=1,2,3) \quad (7)$$

式中 Δu_i 和 Δv_i 分别为图像坐标系下针头与定位销在 U 方向和 V 方向上的距离。

通过3个胶滴的位置分别来标定针头与定位销的 x 轴方向和 y 轴方向偏差,为了减少误差,因此以平均值的方式来最终确定偏差 P_x 和 P_y ,计算公式如下:

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 P_{xi} \\ \sum_{i=1}^3 P_{yi} \end{bmatrix} \quad (8)$$

4 胶量的精确控制

为了确保零件间的胶粘接强度,同时保证胶液能够完整地填充整个胶接面而不产生溢胶现象,因此需要精确控制胶滴大小。考虑到该点胶系统采用的是时间-压力式点胶,影响胶滴大小关键因素包括点胶压力、点胶时间以及点胶间隙。鉴于该系统的点胶压力已固定为150 kPa,因此,在实际操作中,主要关注并调整点胶时间和点胶间隙这两个参数,以确保胶滴直径的一致性。

4.1 点胶间隙的确定

点胶间隙采用实验方式来确定。方式如下:实验采用了某公司生产的内径为0.2 mm的精密针头,并确定点胶间隙 S 的测试范围为60~160 μm ,每次递增20 μm 。为了获取准确的点胶效果,在点胶标定夹具上的硅片上,针对每一个点胶间隙 S ,依次点出4组胶滴。这4组胶滴分别对应的点胶时间为100 ms、150 ms、200 ms和250 ms。每1组都包含了7个胶滴,以确保数据的准确性和可靠性。实验衡量最佳点胶间隙的两个关键条件:1)要验证理论胶滴直径是否在4组胶滴均值的范围内;2)要评估每一组胶滴直径均匀性。

点胶间隙为 $60 \sim 160 \mu\text{m}$ 胶滴均值和标准差如图 7 所示。数据表明:点胶间隙在 $60 \sim 160 \mu\text{m}$ 的范围内时,满足条件 1。然而,只有当点胶间隙分别为 $60 \mu\text{m}$ 和 $80 \mu\text{m}$ 时,每一组标准差较小,表明胶滴的均匀性较好。

为了进一步确定最佳点胶间隙,进行了第 2 次实验。鉴于后续需要标定胶滴直径大小,并需要在硅片上点出不同点胶时间下的胶滴,这要求在同一点胶时间下的胶滴具有良好的均匀性。因此,增加了一组点胶时间为 300 ms 的胶滴。点胶间隙为 $60 \sim 80 \mu\text{m}$ 胶滴均值和标准差如图 8 所示。数据表明:对于 4 组胶滴直径标准差来说,点胶间隙为 $80 \mu\text{m}$ 整体比 $60 \mu\text{m}$ 的小,因此选择 $80 \mu\text{m}$ 作为精密点胶过程中的点胶间隙。

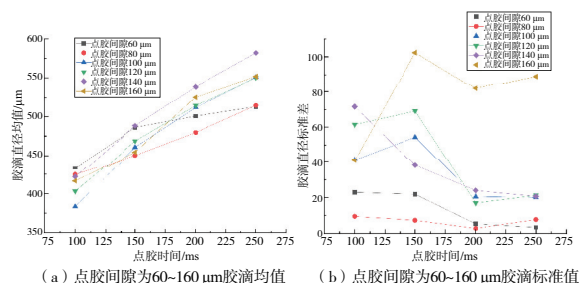


图 7 点胶间隙为 $60 \sim 160 \mu\text{m}$ 胶滴均值和标准差

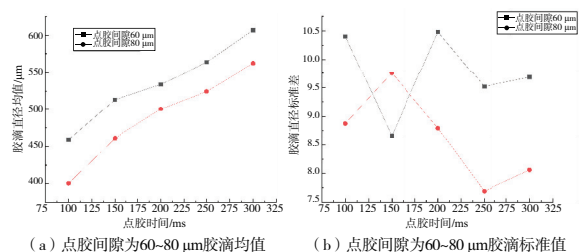


图 8 点胶间隙为 $60 \sim 80 \mu\text{m}$ 胶滴均值和标准差

4.2 基于点胶时间的胶量控制方法

由于已确定了点胶间隙为 $80 \mu\text{m}$,点胶压力为 150 kPa ,因此只需要控制点胶时间就可以控制胶滴大小。根据图 7 的实验数据,可以得出,胶滴直径大小与点胶时间近似成线性关系,因此提出了一种基于点胶时间来标定胶滴直径大小的方案。

如图 9 所示,主要的标定原理是在点胶标定夹具的硅片上进行两轮胶滴点样,每轮为 5 个胶滴,通过两轮线性插值的方式来标定出所需的胶滴大小对应的点胶时间。具体的实现方式是,首先在硅片上分别以 $t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}, t_{15}$ 的点胶时间点出第 1 轮的 5 个胶滴,点胶时间增量为 50 ms 。随后协作机器人运动到 z 轴方向示教位置,视觉模

块进行图像采集,图像处理得到第 1 轮胶滴直径分别为 $d_{11}, d_{12}, d_{13}, d_{14}$ 和 d_{15} ,通过线性插值得到胶滴直径 D 对应的点胶时间 T_1 。令 t_{21} 为 $T_1 - 80$,以点胶时间增量为 40 ms 再次点第 2 轮的 5 个胶滴,相对应的胶滴直径为 $d_{21}, d_{22}, d_{23}, d_{24}$ 和 d_{25} ,再次线性插值得到点胶时间 T_2 。因此对零件 4 进行点胶时,只需要控制点胶间隙为 $80 \mu\text{m}$,点胶时间为 T_2 ,点胶压力为 150 kPa 进行点胶。

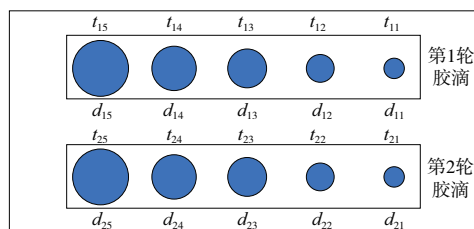


图 9 硅片上胶滴大小标定示意图

5 实验与分析

5.1 实验平台

集成了精密点胶系统的自动装配设备如图 10 所示,单轴机器人和协作机器人的重复定位精度均为 $\pm 20 \mu\text{m}$;点胶控制器的时间分辨率为 100 ms ,压力分辨率为 100 Pa ;作业工作台模块中的精密滑台的定位精度为 $5 \mu\text{m}$,重复定位精度为 $\pm 0.2 \mu\text{m}$;精密转台的定位精度 0.03° ,重复定位精度为 $\pm 0.0025^\circ$;工业数字相机分辨率为 3088×2064 ,像素尺寸为 $2.43 \mu\text{m} \times 2.43 \mu\text{m}$,并配备远心光学镜头,其工作距离为 65 mm 。

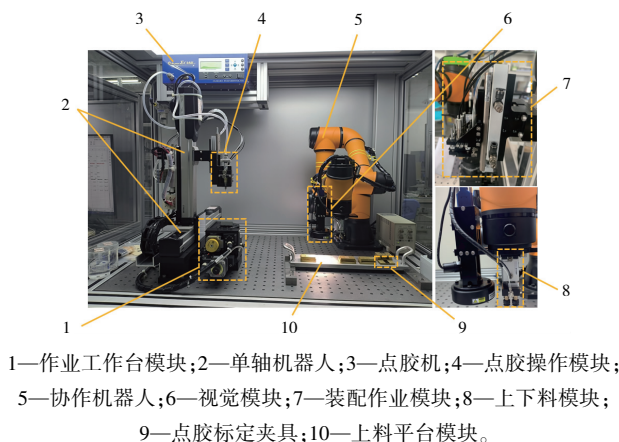


图 10 基于协作机器人的自动装配设备

5.2 微小零件精密点胶实验

实验方案如下:首先协作机器人负责将零件进行上料操作,随后运动到 z 方向的示教位置,视觉模块开始采集图像,并通过图像处理获取零件

4 特征点与定位销之间的相对距离。然后根据零件 4 的特征点与各区域胶滴理论距离以及点胶标定参数进行点胶。最后由装配作业模块进行零件装配,装配完毕后,由协作机器人对装配后组件进行下料。此过程需要重复性的进行 6 次。

1) 胶滴中心位置偏差测量

由于区域 *b* 和区域 *c* 胶滴是相对于区域 *a* 胶滴位置来进行点胶,然而区域 *a* 胶滴是相对于零件 4 上的特征点进行点胶,因此只需测量区域 *a* 的胶滴中心相对于零件 4 特征点的距离是否满足偏差要求即可。实验数据如图 11 所示,区域 *a* 的胶滴相对于零件 4 上特征点 *x* 轴方向偏差最大不超过 15 μm ; *y* 轴方向偏差最大不超过 30 μm 。

2) 胶滴直径大小偏差测量

通过协作机器人末端相机对 6 次实验胶滴进行采集,图像处理得到的胶滴直径的大小如表 1 所示,数据表明:对于直径为 500 μm 的胶滴来说,直径偏差最大不超过 8%。

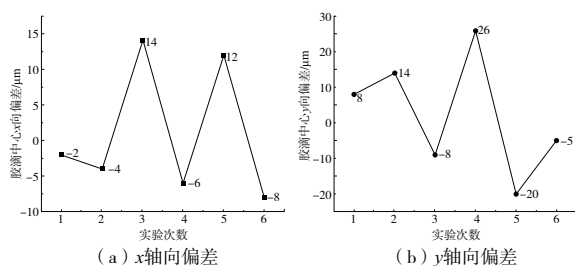


图 11 胶滴中心 *x* 轴向和 *y* 轴向偏差

表 1 胶滴直径

实验次数	第 1 个—第 8 个胶滴直径/ μm								最大偏差/%
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	539	523	521	533	508	516	525	505	7.8
2	506	519	499	517	512	516	497	508	3.8
3	480	491	471	485	487	475	477	495	5.8
4	511	499	520	485	498	506	504	515	4.0
5	505	488	511	485	487	508	475	490	5.0
6	497	500	510	499	502	496	487	490	2.6

6 结语

针对微小零件精密装配中的点胶要求,在装配设备中集成精密点胶系统。该系统采用操作简单、稳定性强的时间-压力式点胶;通过建立偏差补偿模型减少协作机器人的姿态偏差对点胶过程

的影响;利用点胶标定夹具结合视觉模块实现对针头位置和胶滴大小的标定;通过点胶实验来测试该点胶系统的点胶精度。实验结果表明:胶滴中心位置 *x* 方向偏差在 15 μm 之内, *y* 方向偏差在 30 μm 之内,胶滴直径变化最大不超过 8%。因此,该点胶系统满足微小零件精密装配要求。

参考文献:

- [1] 赵翼翔,陈新度,陈新. 微电子封装中的流体点胶技术综述[J]. 液压与气动,2006,30(2):52-54.
- [2] 孙道恒,高俊川,杜江,等. 微电子封装点胶技术的研究进展[J]. 中国机械工程,2011,22(20):2513-2519.
- [3] 程俊森,吴文荣,杨毅,等. 智能微装配技术研究综述[J]. 现代制造工程,2022(6):142-152.
- [4] 吴锐奇. pL 级超微量点胶性能分析与实验研究[D]. 广州:华南理工大学,2017.
- [5] 马海龙,李庆华,魏涛,等. 机器视觉与点胶技术结合研究现状[J]. 齐鲁工业大学学报,2020,34(1):53-57.
- [6] 罗怡,刘宇,王晓东. 微装配中的精密点胶分液技术[J]. 电子世界,2014(7):89-91.
- [7] 李晓琴,王宏美. 流体点胶技术分类及发展趋势[J]. 科学技术,2009(17):26-28.
- [8] 洪彬,王红美,曹建军,等. 定量点胶技术的研究进展[J]. 信息化纵横,2009,28(16):1-2,6.
- [9] 刘宇. 微装配中高黏度胶粘剂精密胶粘接技术研究[D]. 大连:大连理工大学,2014.
- [10] ZHU P, XU Z, WANG X D, et al. Influence of initial distance between needle tip and substrate on contact dispensing of high-viscosity adhesive[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives,2018,85:23-28.
- [11] 杨军安. 时间-压力点胶技术浅析[J]. 新疆有色金属,2014,37(增刊2):168-171.
- [12] 王瑞,周一届. 时间/压力型点胶技术影响因素分析[J]. 包装工程,2008,29(6):106-109.
- [13] SONG J, WU X. Research on visual detection and control system of three axis servo dispensing machine[C]//2018 Eighth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). Harbin, China. IEEE,2018:542-546.
- [14] 邓珺珺,邓圭玲,彭雯,等. 压电驱动喷射点胶阀系统性能的仿真与实验[J]. 传感器与微系统,2023,42(1):46-49,54.
- [15] 史亚莉,张正涛,徐德. 跨尺度微管微球三维半自动装配点胶系统[J]. 光学精密工程,2015,23(11):3121-3128.

收稿日期:2024-03-12