面向微型遮光检测组件的精密装配方法

王晓东 闫怡婷 王 谦 徐 征* 肖思恩
大连理工大学机械工程学院，大连，116024

摘要：微型遮光检测组件在各类高精度位移和运动传感器中应用广泛，其尺寸微小且配合精度要求较高。针对该组件自动化装配过程中的视觉检测和连接控制任务，开展了微型遮光检测组件精密装配方法研究。研制了自动化精密装配系统；借助六自由度机械臂运动灵活的优势，以搭载于精密运动机构上的定位销作为参考标记，消除了机械臂重复定位误差的影响，不需要增加额外的硬件，仅通过单一相机即实现了复杂微装配中零件的多方位测量与对准引导；为保证微胶连的可靠性，建立了基于胶滴预点样的参数调节和针头定位方法，结合标定块和视觉测量完成胶量和胶滴位置的控制。实验结果表明：利用机器人引导多向视觉对准，能够实现的装配误差小于10 μm，姿态偏角小于0.2°，对于直径为300 μm的胶滴，胶滴位置偏差小于±10 μm，直径大小的一致性偏差小于9%，满足装配作业对组件对准和胶连的要求。

关键词：精密装配；视觉测量；微胶连；机器人
中图分类号：TP23
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.09.015 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**：

A Precision Assembly Method for Micro Shading Detection Components

WANG Xiaodong YAN Yiting WANG Qian XU Zheng* XIAO Si'en
School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning, 116024

Abstract: Micro shading detection components were widely used in high-precision displacement and motion sensors, where strict dimensional accuracy and precise assembly were required. To address the challenges of vision-based detection and bonding control during their automated assembly, a precision assembly method for such components was proposed herein. An automated precision assembly system equipped with a six-degree-of-freedom (6-DOF) robotic arm was developed. Vision feedback was employed to provide multi-directional alignment guidance during assembly; the flexible movement of the robotic arm was leveraged; locating pins mounted on precision motion mechanisms were used as reference markers; and the impact of the robotic arm's repeated positioning errors was ingeniously eliminated. Without additional hardware, the system achieved multi-directional measurement and alignment guidance of parts in complex micro-assembly using only a single camera. Moreover, to ensure the reliability of micro-scale adhesive bonding, a pre-adjustment method was proposed for dispensing parameters and nozzle positioning. Specifically, by integrating calibration blocks and vision measurement, precise control over adhesive volume and droplet positioning was realized. Experimental results demonstrate that the proposed system achieves an assembly error of less than 10 μm, with an orientation deviation of less than 0.2°. For adhesive droplets with a diameter of 300 μm, the positioning deviation is controlled within ±10 μm, and the uniformity deviation of droplet diameter is within 9%. These performances fully meet the alignment and bonding requirements of precision assembly tasks.

Key words: precision assembly; vision measurement; micro adhesive bonding; robotics

0 引言

微型遮光组件是光电传感器中常见组件，其工作原理为：光源在一侧发出准直光，挡光板在外界作用下在垂直光轴的平面内运动，遮挡部分准直光，导致另一侧接收器收到光强信号变化，从而测量获得位移和运动信息。它在各类高精度位移和运动传感器中应用广泛。

微型遮光组件装配的难点在于多角度视觉对准。一方面要与运动方向平行，另一方面要与光源-接收器构成的光轴垂直，这样才能保证装配的传感器的灵敏度和线性度，而当其特征尺寸达到亚毫米量级时，多项配合容差都在微米左右，在生产中依赖高技能工人在显微镜下操作，存在一致性差、成活率低等问题，有必要研制自动化装配装

收稿日期：2025-03-26
基金项目：国防基础科研计划(JCKY2022203B006)；中央高校基本科研业务费专项资金(DUT24LAB112)

备[1-2]，提高此类装配的精度一致性，其挑战主要在于微小零件的视觉检测与对准[3-6]及连接控制[7-8]。

在光电传感器等复杂微系统的装配过程中，有时需要将多角度偏差均调节至允许范围方可适用于精准作业的场景，需要从不同方向进行高精度视觉测量和对准，一般采用在对应角度分别布置显微视觉模块的方法。例如，ZHANG等[9]、吴文荣等[10]研发了高精度装配机器人系统，采用3路显微视觉在线检测，实现激光点火靶的灵活装配。但这种方法缺点也较为明显：显微成像镜头的工作距离较短，并且需要环形灯提供均匀照明，这样视觉模块就必须与执行器等共同布置在作业区域，严重限制了作业空间布局，也大幅度增加了各功能单元的运动干涉碰撞的风险，控制与调校难度大。

此外，也可以采用多自由度的关节机器人（机械臂）搭载显微成像单元，引导执行器拾取和放置组件等操作。借助机械臂运动灵活的特点，理论上使用单一相机就可以从任意角度进行观测，完成多零件多方位测量任务，而且与精密运动滑台相比，它调整灵活、运动空间大，在空闲态时可以快速撤出作业区域，避免了碰撞风险。然而，机械臂末端精度受各关节运动副误差累积效应影响，重复精度较差，使用不当会引入额外的测量误差[11]。

微型遮光组件装配的另一个难点是施胶工艺的控制。上述元件是采用高黏度胶液黏结固定的。对于小间隙配合面，胶量过少会导致黏结强度不足，而过多则易引发溢胶。若施胶的位置偏差较大，还会导致黏结面胶液分布不均，诱发黏接应力[12]。为确保黏结质量，需精确控制胶量和施胶位置，以提高胶连装配一致性[13]。

针对上述问题，本文研制了一种用于微型遮光组件的自动化精密装配系统，采用六自由度机械臂搭载视觉模块进行多角度视觉测量，引导装配过程中精确对准，并建立了基于胶滴预点样的参数调节和视觉辅助的针头定位方法，实现微小胶量和胶滴位置的控制。

1　装配任务分析

微型遮光组件由挡光板D、压块Y与运动基板B组成，如图1所示。其装配序列包括以下关键工序：首先将厚度亚微米级的挡光板两侧分配微量胶黏剂后固定于运动基板前端U形槽内；随后将压块底部导向槽与挡光板配合下压至运动基板进行二次定位，并完成黏结。

装配需满足以下要求：

1）挡光板-运动基板U形槽双边配合间隙不大于20 μm，要求挡光板轴向居中同时保证前端面与槽底共面度误差不大于15 μm。

2）挡光板-压块导向槽双边配合间隙不大于20 μm。

3）挡光板两侧需准确分配3滴直径300 μm的胶滴，并严格控制胶滴位置，理论胶滴中心与零件侧边X向距离为300 μm，Y向距离为250 μm。

可见，由于装配对象要求精度高，仅依靠示教方式难以胜任上述遮光组件的装配任务，需要进行多方向对准和操作，还需要严格控制施胶位置和出胶量，在挡光板上精准分配所需的胶滴。

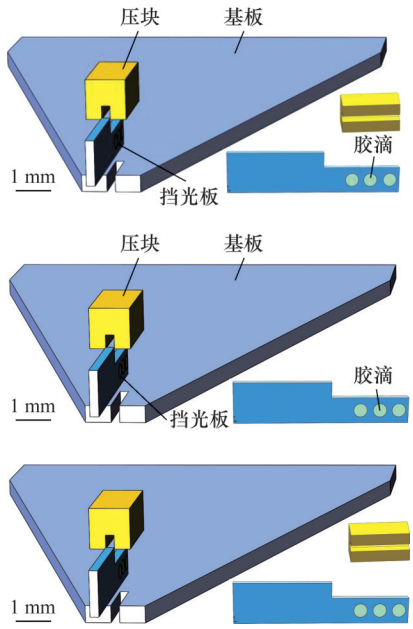


图1　微型遮光检测组件

Fig.1　Micro shading detection component

2　自动精密装配系统

2.1　系统结构组成

根据上述分析，本文设计了微型遮光检测组件自动化精密装配系统，如图2所示。

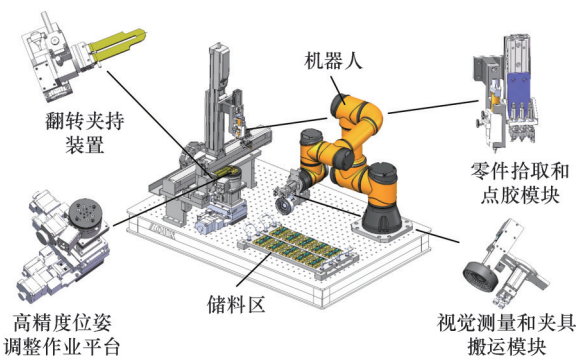


图2　自动化精密装配系统整体结构

Fig.2　Overall structure of the automated precision assembly system

系统选用小型6自由度关节机器人(简称机械臂,定位精度±30 μm)搭载视觉测量模块与夹具搬运模块,完成零件上下料及多方位视觉测量。

零件拾取与点胶模块集成真空吸附与胶滴点样功能,用于零件拾取的气动吸附装置中由针型气缸提供导向,利用滑动轴承传递运动,并在导向轴上设有弹簧缓冲,吸收拾取和放置过程的接触冲击力,减少对零件位姿的干扰;末端吸附头可根据零件结构特点进行快速更换。点胶单元用以固定点胶针筒,并外接点胶控制器精确控制胶量分配。

位姿调整作业台包括Z向旋转滑台和X、Y、Z轴位移滑台,重复定位精度为0.2 μm,用于零件位姿调整。作业台上固定两个定位销作为参考点,通过该基准辅助,实现机械臂在测量前的校准。

翻转夹持装置由X轴精密滑台、Y向精密转台及气动夹指组成,具备高精度位置调整与翻转功能。在胶量分配环节,该装置与点胶单元协同工作,实现胶滴的高精度点样。

2.2 系统作业流程

本系统作业流程以挡光板装配为例,按照零件拾取前对准—拾取—夹持—点胶—装配前对准—插装的顺序进行,如图3所示,具体步骤如下。

1)拾取前对准。机械臂搬运模块将夹具上料,并将其精准放置于作业台指定位置。机械臂驱动视觉测量模块在Z向获取零件的位姿信息,作业台则依据测量结果调整零件,使其与吸附头的姿态相匹配,并移动至待拾取位置。

2)零件拾取。零件拾取模块依托Y、Z向导轨快速移动至零件上方,驱动气缸使吸附头与零件表面接触,开启真空吸附以确保稳定拾取。

3)零件递送与夹持。吸附模块携带零件移动至夹持位置,夹指夹持零件。

4)胶液微量分配。视觉引导点胶单元对准夹持状态下的零件,控制转台旋转使零件翻转,并精确控制点胶参数,完成零件两侧的胶液分配。

5)视觉引导的多向对准与插装。相机分别在Z向获取挡光板与基板U形槽的特征边和特征点,用于作业台对Z向姿态的调整以及X、Y方向上的位置对齐;相机在X方向获取插装高度差,使用Z向滑台完成零件插装。

在步骤1)和3)视觉测量前,均需在机械臂固定后通过参考点确定相机坐标系与作业台坐标系的偏角,以消除机械臂重复定位误差的影响。

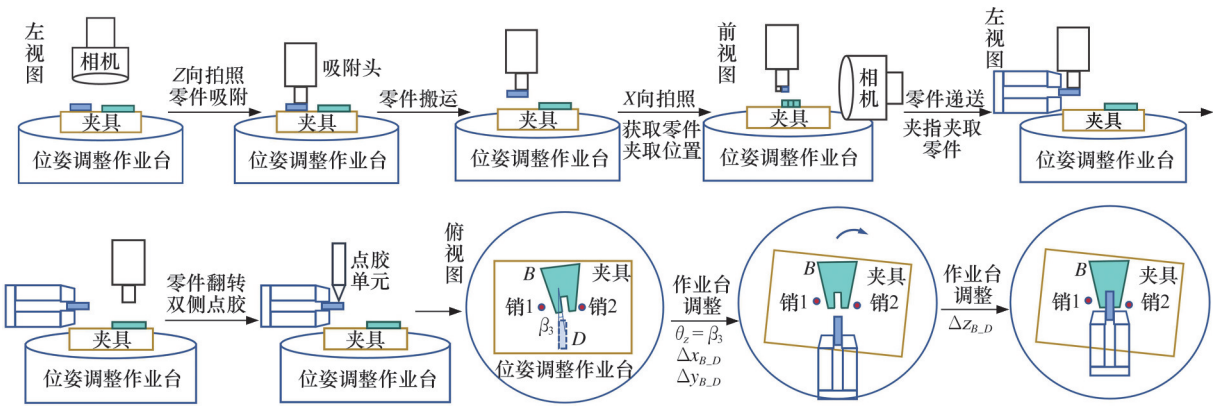


图3 挡光板零件装配流程图

Fig.3 Assembly process of the light-shielding component

3 多向定位关键技术

采用机械臂搭载视觉模块分别进行X、Y、Z方向的零件位姿测量,由视觉信息反馈计算相对补偿位置和偏角,引导作业台进行精密位姿补偿。

3.1 视觉测量偏角标定方法

机械臂定位误差导致其末端绕X、Y、Z轴分别产生翻滚角、俯仰角和偏摆角。远心镜头景深长,对滚转角和俯仰角引起的高度变化不敏感,在实际测量中可忽略其影响。而绕光轴的滚转角会导致作业台在各自由度上的实际补偿距离与测量理论值存在偏差。为此,本文建立了基于参考点的在线标定校准方法,基本思路如下。

1)在调整作业台上安置定位销为标记点。

2)测量前驱动机械臂搭载的相机到测试区。

3)调整作业台使标记点出现在视野内,拍摄标记点获得作业台与相机坐标系的转换关系。

4)再次调整作业台,拍摄待测零件特征。

5)利用已经建立的转换关系,将特征点的图像坐标转换为作业台坐标系的坐标。

具体实施方法如下:在作业台上固定两个定位销P_1和P_2作为基准,以标定相机坐标系C与物理坐标系(作业台坐标系)W之间的偏角θ_C^W。

机械臂搭载相机移动至参考点上方,如图4

所示，获取图像坐标系I下的像素坐标$P_1(u,v)$，作业台在X方向移动已知距离Δx_W，并测量此时参考点坐标$P_1'(u',v')$，通过像素坐标偏移计算相机坐标系与作业台坐标系的偏角θ_C^W：

$$\theta_C^W=\arctan\frac{\Delta v}{\Delta u}=\arctan\frac{v'-v}{u'-u} \tag{1}$$

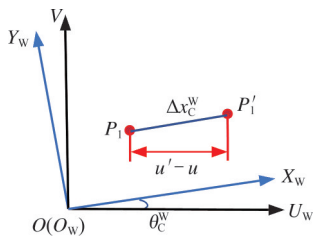


图4　相机-作业台坐标系偏角标定

Fig.4　Calibration principle of angle deviation between camera and worktable coordinate system

则相机坐标系与物理坐标系变换矩阵T_C^W为

$$T_C^W=\begin{bmatrix}\cos\theta_C^W & -\sin\theta_C^W & 0\\ \sin\theta_C^W & \cos\theta_C^W & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{2}$$

同理，对于X向和Y向的视觉坐标系的偏角标定同样借助作业台上定位销中心点为参考点进行补偿，得到相应变换矩阵。

3.2　零件特征提取

在对准过程中，图像特征的准确提取是视觉测量的基础，涉及参考点和零件特征识别。本文采用粗定位与精定位两步组成的复合定位方法[14]。

先用AI检测算法提取感兴趣区域(ROI)，实现粗定位，然后在该区域内执行边缘检测以精确获取特征。图5所示为挡光板零件特征提取过程，对图像进行二值化和Canny边缘处理，在所提取到的感兴趣区域内进行零件边缘点提取，并根据所提取到的点拟合直线，角点则为直线交点，得到特征边线和角点后确定零件位姿引导对准。

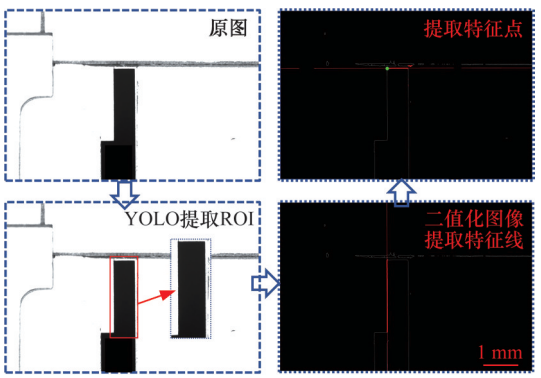


图5　零件特征提取过程图

Fig.5　Feature extraction process of components

3.3　视觉引导多向对准

以压块为例，介绍其通过视觉多向测量完成零件拾取和安装前对准，测量过程如图6所示。

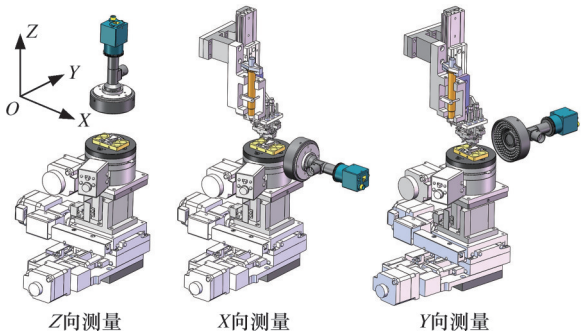


图6　视觉测量示意图

Fig.6　Schematic diagram of vision measurement

为准确拾取零件，将吸附结构以参考点为基准进行标定，如图7所示。零件位置的确定以定位销P_1位置为基准，位姿确定以定位销P_1和P_2中心连线为基准。在标定环节中，记录拾取位置中心点G与P_1点的位置关系$\Delta x_{G_P_1}$、$\Delta y_{G_P_1}$以及零件侧边线与P_1、P_2连线的偏角θ_{G_P}。

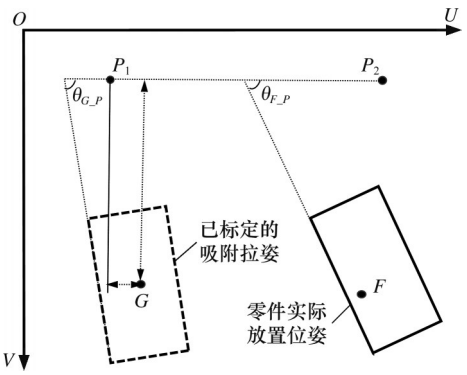


图7　吸附前对准策略

Fig.7　Pre-adsorption alignment strategy

拾取前对准环节如图8所示，相机移动至夹具上方提取参考点和实际放置零件特征，由于相机保持静止且视野受限，需在作业台运动下使P_1、P_2和零件F先后出现在视野内，得到图像坐标系下P_1坐标(u_1,v_1)，P_2坐标(u_2,v_2)和零件质心坐标$F(u_F,v_F)$，同时记录从P_1点到F点作业台运动距离$\Delta x_{P_1_F}$，$\Delta y_{P_1_F}$。此外，还需要测量出P_1P_2相对于图像坐标系U轴夹角θ_{P_U}，零件姿态相对于图

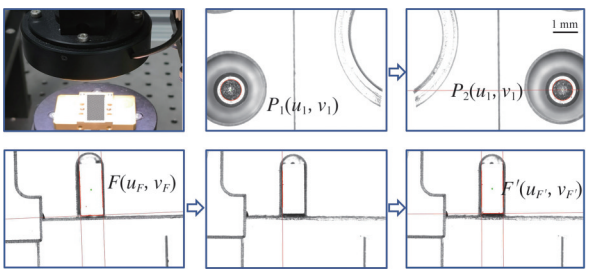


图8　拾取前对准过程

Fig.8　Pre-pickup alignment process

像坐标系U轴的夹角θ_{F_U}。

对准环节分为两步，首先对偏角进行调整，使零件姿态保持和待吸附位姿一致，则零件姿态调整偏角θ_{F_G}为

$$\theta_{F_G}=\theta_{F_U}-\theta_{P_U}-\theta_{G_P} \tag{3}$$

通过视觉获取偏角矫正后的零件质心点F'，得到前后零件质心点的相对像素坐标差$\Delta u_{F'_F}$、$\Delta v_{F'_F}$，对应视觉坐标系下实际相对距离$\Delta u'_{F'_F}$、$\Delta v'_{F'_F}$由下式计算得到：

$$\begin{bmatrix}\Delta u'_{F'_F}\\ \Delta v'_{F'_F}\\ 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}s_x & 0 & 0\\ 0 & s_y & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta u_{F'_F}\\ \Delta v_{F'_F}\\ 1\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：s_x、s_y为相机像素值。

通过T_C^W转化为作业台坐标系下的相对距离为$\Delta x_{F'_F}$、$\Delta y_{F'_F}$：

$$\begin{bmatrix}\Delta x_{F'_F}\\ \Delta y_{F'_F}\\ 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta_C^W & -\sin\theta_C^W & 0\\ \sin\theta_C^W & \cos\theta_C^W & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta u'_{F'_F}\\ \Delta v'_{F'_F}\\ 1\end{bmatrix} \tag{5}$$

为完成实际零件放置位到吸附位，作业台需补偿距离$\Delta x_{F'_G}$、$\Delta y_{F'_G}$：

$$\left.\begin{aligned}\Delta x_{F'_G}&=\Delta x_{G_P1}-(\Delta x_{P1_F}-\Delta x_{F'_F})\\ \Delta y_{F'_G}&=\Delta y_{G_P1}-(\Delta y_{P1_F}-\Delta y_{F'_F})\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

通过作业台进行相对距离的补偿，使目标零件移动至吸附位置，拾取模块下移完成零件吸附操作。

完成零件吸附后，为使压块导向槽对准作业台上目标零件T，首先进行Z向姿态调整，依赖于拾取前后零件姿态稳定性，目标零件经过Z向测量后，同样借助定位销获取偏角信息，作业台完成目标零件相对于压块G的偏角θ_{T_G}调整。

为精确定位，吸附后零件移动至作业台上目标零件附近，使二者均处于视野内，机械臂先后运动至X向获得获取零件高度差和Y向位置差Δy_{T_G}和Δz_{T_G}，由于相机偏转仍会影响实际运动补偿，遂采用3.1所述标定方法，在OYZ内，滑台Y轴移动Δy_W距离，分别对运动前后参考点进行图像采集得到前后U向像素差Δu_1，则坐标系间夹角为

$$\beta_C^W=\arccos\frac{\Delta u_1 s_y}{\Delta y_W} \tag{7}$$

则图像中所获取的零件相对像素差为Δu_{T_G}和Δv_{T_G}，与实际补偿量的转换关系为

$$\begin{bmatrix}\Delta y_{T_G}\\ \Delta z_{T_G}\\ 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\beta_C^W & -\sin\beta_C^W & 0\\ \sin\beta_C^W & \cos\beta_C^W & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}s_x\Delta u_{T_G}\\ s_y\Delta v_{T_G}\\ 1\end{bmatrix} \tag{8}$$

同理，机械臂移动至Y向拍照位置点，获取X向相对位置Δx_{T_G}，通过作业台补偿进行多向对准，最终完成压块的插装动作。

在上述标定校准和测量过程中，由于机械臂保持在锁定状态，也就避免了机械臂重复定位误差对测量的影响。由于每次进入测量任务前都需要校准，这必然对效率有一定影响。为此，我们从机械结构和控制流程方面分别进行了优化，保证作业节拍满足生产需求：定位销标记点和待测零件都布置在高精度位姿调整作业台上，在不影响装配作业前提下，相对距离尽可能；一次观测尽可能完成多个点位测量，避免相机的频繁移动。

4 微胶连控制方法

在微小零件装配过程中，零件采用胶连接方式固定，点胶位置和胶量都会影响胶连情况，因此需控制胶滴位置和出胶量。

4.1 点胶位置控制

采用夹取零件和悬空翻转点胶的形式，如图9所示，在挡光板零件被夹持状态下控制点胶单元移动至零件上方进行点胶，点胶料筒和针头需要定期更换，重新安装时会导致点胶针头位置偏差。当点胶位置偏离实际需求位置时，可能会出现胶液溢出的情况，需在点胶过程中找准针头与待点胶区域的相对位置关系，并在开始点胶前在X、Y及Z向分别进行位置补偿。

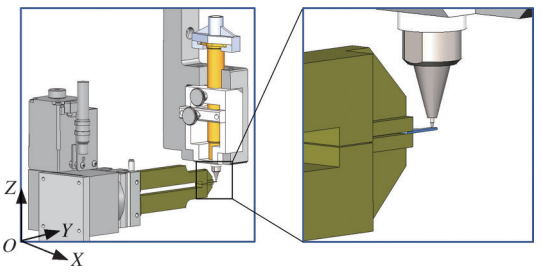


图9 点胶示意图

Fig.9 Schematic diagram of dispensing

系统基于作业台上参考点进行针头位置标定，如图10所示。在作业台上放置标定块，并通过真空方式固定标定块上的硅片；按示教位置先运动至参考点上方，控制作业台移动Δx_i、Δy_i(i=1,2,…,n)；分别在硅片上进行胶滴序列点样，并

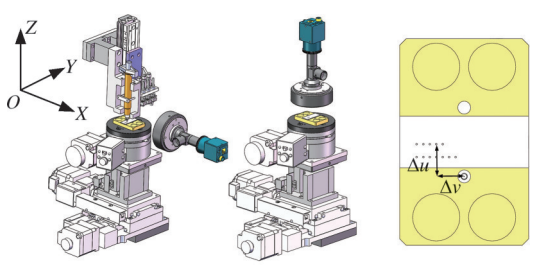


图10 位置标定流程

Fig.10 Position calibration procedure

驱动相机至Z向获取胶滴中心与参考点像素坐标差Δu_i、Δv_i(i=1,2,…,n)。为了降低误差,取均值得到针头与参考点的偏差Δx_{n_p}、Δy_{n_p}:

$$\left.\begin{aligned}\Delta x_{n_p}&=\frac{1}{n}\sum_{i=1}(\Delta x_i-\Delta u_i s_x)\\ \Delta y_{n_p}&=\frac{1}{n}\sum_{i=1}(\Delta y_i-\Delta v_i s_y)\end{aligned}\right\}\tag{9}$$

在夹取零件后,通过测量零件特征点与定位销之间的相对位置关系Δx_p、Δy_p可计算得到针头到点胶区域的相对位置关系。

对于针头Z向位置的获取,可直接驱动相机进行侧方拍照,分别提取针头针尖中心点与零件上表面特征线,计算点到直线的距离并在正式点胶环节进行Z向运动补偿,得到胶滴中心与参考点像素坐标差Δu_i、Δv_i(i=1,2,…,n)。

4.2　胶量控制

在实际装配点胶环节中,需精确控制出胶量。对于时间-压力式点胶,影响出胶量的工艺参数包括点胶压力、时间和间隙。本文将系统的点胶压力固定为150 kPa,主要关注并调整点胶时间t和点胶间隙d两个参数,来保证出胶量的一致性。

图11为胶滴理想截面示意图。当胶滴完全铺展后,可认为其近似于直径为R的部分球体,θ为胶滴与零件表面之间的接触角,垂直角度上可观测到胶滴直径为D,胶滴的体积V_d为

$$V_d=\frac{1}{3}\pi R^3(1-\cos\theta)^2(2+\cos\theta)\tag{10}$$

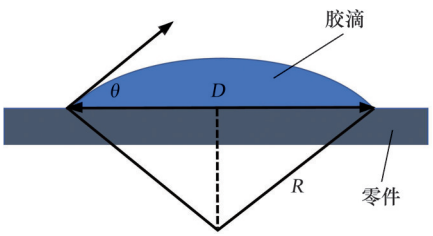


图11　理想胶滴截面示意图

Fig.11　Schematic diagram of ideal droplet cross-section

根据D=2Rsin θ,将胶滴理想状态下的体积用直径D与角度θ表示为

$$V_d=\frac{\pi D^3}{24\sin^3\theta}(1-\cos\theta)^2(2+\cos\theta)\tag{11}$$

在测得胶滴接触角θ后即可通过检测胶滴直径D来直观衡量出胶量。

点胶间隙d采用如下实验方式确定:选用内径0.15 mm的精密针头,设置点胶间隙d在40~80 μm之间,步进10 μm进行测试。实验过程中,在点胶标定夹具的采样硅片上,针对每个点胶间隙d,分别测试4组胶滴,对应点胶时间分别为100、150、200、250 ms,每组测试7个胶滴,以确保数据的准确性和重复性。实验评估点胶间隙的关键指标:①实验测得的4组胶滴直径均值范围应包含理论胶滴直径;②各组胶滴直径的标准差应尽可能小以保证一致性。

实验结果如图12所示。结果表明,在40~80 μm范围内,所有点胶间隙均满足胶滴直径符合性要求。点胶间隙过小时会限制胶液的流动,导致胶滴不均匀,若过大,针头前端液桥无法触及基板,在连续点胶过程中出现忽大忽小的情况。而当点胶间隙为50 μm时,胶滴直径的标准差最小,表明胶滴均匀性最佳。因此最终选定50 μm作为最佳点胶间隙。

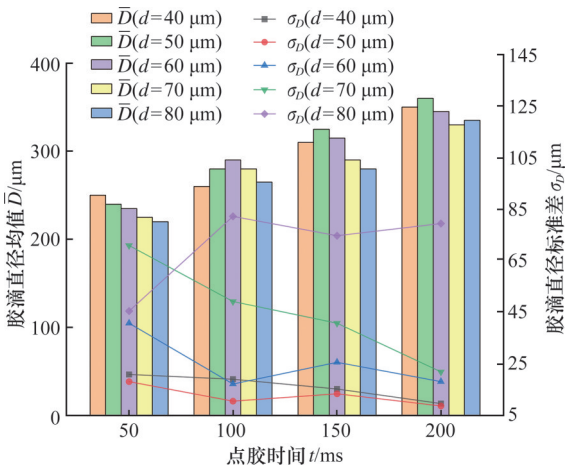


图12　胶滴直径的标准差

Fig.12　Standard deviation of droplet diameter

由于胶液性质随批次变化,故每次安装新的胶筒需要调整点胶时间t以确保胶量稳定。标定采用与零件材质类似的硅片,控制t预点样不同直径的胶滴,采用插值法确定目标直径D对应的t。

胶滴直径标定具体实现过程如图13所示。首先,在硅片上分别以t_i(i=1,2,…,n)的点胶时间点出第一轮的7个胶滴,点胶时间增量为ΔT_1;随后,视觉测量得到第一轮胶滴直径分别为D_i(i=1,2,…,n),并通过线性插值得到胶滴直径D对应的点胶时间T_1;根据点胶时间T_1在硅片上以t_i(i=n+1,n+2,…,n+5)的点胶时间点出第二轮的5个胶滴,点胶时间增量为ΔT_2(0<ΔT_2<

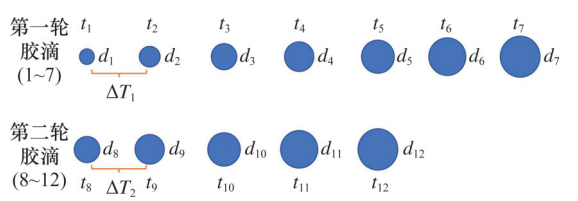


图13　胶滴直径标定示意图

Fig.13　Schematic diagram of droplet diameter calibration

ΔT_1)，并且令 t_{n+1} 为 $T_1-2\Delta T_2$，相机再次对胶滴直径进行测量，得到胶滴直径为 D_i($i=n+1,n+2,\cdots,n+5$)；最后，线性插值得到胶滴直径 D 对应的点胶时间 T_2。

本研究使用的胶液是根据产品性能要求专门定制的胶液，它的有效周期(从取出冷藏开始计算)为2 h。超过这个时间的胶本身由于化学反应的原因不能继续使用(会影响黏结性能)，按照工艺要求一般这个周期内能完成8～10件。在程序控制方面，每次点胶前都会拍照确定针头-施胶表面距离，黏结前控制相机再次拍照，验证胶点尺寸是否合格。

5 实验结果与分析

5.1 多方位视觉测量对装配精度影响的实验

为评估在有/无多方位视觉测量引导的情况下装配精度的变化，设计了多方位视觉测量对装配精度影响的实验。

以上述压块导向槽和挡光板装配为测试对象，分别按照上述视觉多方位测量引导装配过程以及仅在 Z 向测量零件位姿，依赖机械精度进行两组装配实验，每组实验包括10套零件的装配，实验过程中记录装配成功率，并用影像测量仪对安装成功后的组件装配偏移量进行测量，分别测量出压块安装后相对挡光板零件的 Y 向偏移量 $\Delta y_{Y\text{-}D}$、压块槽中心线相对于挡光板中心线 X 向偏移量 $\Delta x_{Y\text{-}D}$ 以及导向槽相对挡光板的 Z 向姿态偏角 $\theta_{Y\text{-}D}$，数据见表1。

表1 装配偏差

Tab.1 Assembly deviation

组别	多向视觉引导			仅Z向视觉引导		
	$\Delta x_{Y\text{-}D}$/μm	$\Delta y_{Y\text{-}D}$/μm	$\theta_{Y\text{-}D}$/(°)	$\Delta x_{Y\text{-}D}$/μm	$\Delta y_{Y\text{-}D}$/μm	$\theta_{Y\text{-}D}$/(°)
1	4.1	13.8	0.14	8.6	15.6	0.12
2	−3.4	6.9	−0.13			
3	2.8	12.3	0.15	−9.4	20.1	0.16
4	−6.7	11.5	−0.11	8.7	33.6	−0.06
5	2.5	12.3	−0.07	7.6	25.7	−0.15
6	−1.4	8.5	0.06			
7	−3.1	6.1	−0.13			
8	9.5	9.2	−0.16	9.5	17.9	0.15
9	6.4	16.1	0.14	−6.9	16.7	0.14
10	5.8	14.8	0.14			

实验结果表明，仅依赖 Z 向视觉测量，存在多次因配合面未精确对准导致的装配失败；根据 X、Y 向偏移量和 Z 向姿态偏角数据可知，经过 Z 向视觉引导后，零件姿态已根据视觉反馈进行调整，所以 Z 向偏角差异较小。但在吸附或搬运过程中零件可能发生位姿变动或机械运动过程存在误差累积，导致零件间位置关系发生变化，依赖机械精度进行安装，即使成功安装，在 X、Y 向的位置偏差也较大。实验表明，多向视觉引导的装配方法能够有效提高装配精度，装配误差小于10 μm，姿态偏角小于0.2°。

5.2 胶量控制实验

分别对5组共40个挡光板零件进行点胶实验，如图14所示，测量第一滴胶滴位置和三滴胶滴直径大小。

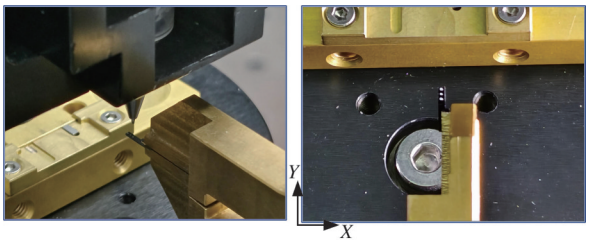


图14 点胶实验示意图

Fig.14 Schematic diagram of dispensing experiment

最终得到点胶位置偏差如图15所示。5组实验的胶滴直径大小情况如图16所示。结果表明，

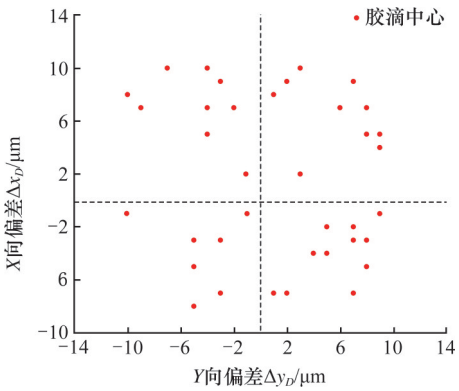


图15 胶滴中心位置分布散点图

Fig.15 Scatter plot of droplet center position distribution

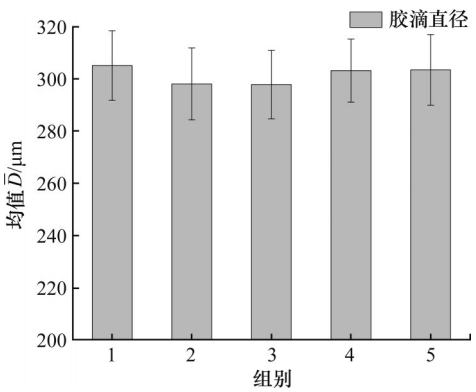


图16 5组胶滴直径误差棒图

Fig.16 Error bar chart of droplet diameter in 5 groups

胶滴相对于零件侧边X、Y向偏差不超过±10 μm。对零件上胶滴直径进行统计，得到误差棒图见图16，平均胶滴直径在290～310 μm范围内，标准差在15以内，说明胶滴尺寸一致性较高，波动较小，最大偏差为25 μm，小于9%，符合预设范围。

6　结论

本文针对微型遮光检测组件自动化装配过程中多向视觉检测和连接控制任务，研制了自动化精密装配系统。针对其精密装配的多向对准要求，本文借助机械臂运动灵活的优势，以搭载于精密运动机构上的定位销为参考标记，消除了机械臂重复定位误差的影响，不需要增加额外的硬件，仅通过单一相机即实现了复杂微装配中零件的多方位测量与对准引导，装配误差小于10 μm，姿态偏角小于0.2°，显著降低了此类系统的结构复杂性与成本。此外，针对微胶连需求，建立了基于胶滴预点样的参数调节和针头定位方法，结合标定块和视觉测量完成出胶量和施胶位置的控制。对于目标直径300 μm的胶滴，胶滴位置偏差小于±10 μm，直径大小的一致性偏差小于9%。

参考文献：

[1] 董云龙，李祥飞，刘行，等. 航空航天领域机器人化智能装配技术综述[J]. 人工智能，2022(3)：6-20.
DONG Yunlong，LI Xiangfei，LIU Xing，et al. Overview of Robotic Intelligent Assembly Technology in Aerospace Field[J]. AI-View，2022(3)：6-20.

[2] 刘检华，孙清超，程晖，等. 产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势[J]. 机械工程学报，2018，54(11)：2-28.
LIU Jianhua，SUN Qingchao，CHENG Hui，et al. The State-of-the-art，Connotation and Developing Trends of the Products Assembly Technology[J]. Journal of Mechanical Engineering，2018，54(11)：2-28.

[3] 沈飞，徐德，唐永建，等. 微操作/微装配中微力觉的测量与控制技术研究现状综述[J]. 自动化学报，2014，40(5)：785-797.
SHEN Fei，XU De，TANG Yongjian，et al. Review of Measuring and Control Technology of Microforce in Micromanipulation and Microassembly[J]. Acta Automatica Sinica，2014，40(5)：785-797.

[4] 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.
CHENG Junsen，WU Wenrong，YANG Yi，et al. A Review of Intelligent Micro-assembly Technology[J]. Modern Manufacturing Engineering，2022(6)：142-152.

[5] SHEN Yue，JIA Qingxuan，WANG Ruiquan，et al. Learning-based Visual Servoing for High-precision Peg-in-hole Assembly[J]. Actuators，2023，12(4)：144.

[6] 王斌，吴丹，盖宇航. 面向机器人精密装配的高精度圆片位姿视觉检测[J]. 机械工程学报，2023，59(8)：50-59.
WANG Bin，WU Dan，GAI Yuhang. High-precision Wafer Pose Visual Detection for Robot Precise Assembly[J]. Journal of Mechanical Engineering，2023，59(8)：50-59.

[7] 郭磊，刘检华，张佳朋，等. 航天工业中胶接技术的研究现状分析[J]. 中国机械工程，2021，32(12)：1395-1405.
GUO Lei，LIU Jianhua，ZHANG Jiapeng，et al. Research Status Analysis of Adhesively Connection Technology in Aerospace Industry[J]. China Mechanical Engineering，2021，32(12)：1395-1405.

[8] 刘检华，夏焕雄，巩浩，等. 精密装配的内涵、技术体系和发展趋势[J]. 机械工程学报，2023，59(20)：436-450.
LIU Jianhua，XIA Huanxiong，GONG Hao，et al. Connotation，Technical System and Development Trend of Precision Assembly[J]. Journal of Mechanical Engineering，2023，59(20)：436-450.

[9] ZHANG Juan，DAI Xi，WU Wenrong，et al. Micro-vision Based High-precision Space Assembly Approach for Trans-scale Micro-Device：The CFTA Example[J]. Sensors，2023，23(1)：450.

[10] 吴文荣，胡益玮，杨毅. 复杂微器件柔性装配机器人控制系统设计与实现[J]. 机械设计与研究，2024，40(2)：79-84.
WU Wenrong，HU Yiwei，YANG Yi. Design and Implementation of Control System for Complex Micro-device Flexible Assembly Robot[J]. Machine Design & Research，2024，40(2)：79-84.

[11] XU Rui，ZHAO Xingwei，LIU Feng，et al. High-precision Monocular Vision Guided Robotic Assembly Based on Local Pose Invariance[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2023，72：5031312.

[12] 陈骁，张之敬，金鑫，等. 温度载荷作用下胶接位置误差对精密马达系统运动精度稳定性影响机理[J]. 导航与控制，2018，17(3)：69-74.
CHEN Xiao，ZHANG Zhijing，JIN Xin，et al. Effects of Bonding Position Error on the Motion Precision Stability of Precision Motor Systemunder Temperature Load[J]. Navigation and Control，2018，17(3)：69-74.

[13] 孙鹏，王晓东，何文鑫，等. 微小装配设备中精密自动化点胶的集成技术[J]. 组合机床与自动化加工技术，2023(1)：56-60.
SUN Peng，WANG Xiaodong，HE Wenxin，et al. The Integration of Precision Automatic Adhesive Dispensing in Micro-assembly Equipment[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique，2023(1)：56-60.

[14] 王晓东，崔世鹏，徐征，等. 面向精密微装配的视觉复合定位[J]. 光学 精密工程，2023，31(19)：2857-2866.
WANG Xiaodong，CUI Shipeng，XU Zheng，et al. Visual Composite Positioning for Precision Microassembly[J]. Optics and Precision Engineering，2023，31(19)：2857-2866.

（编辑　王旻玥）

作者简介：王晓东，男，1967年生，教授、博士研究生导师。研究方向为微装配技术与系统、精密仪器设计与制造。E-mail：xdwang@dlut.edu.cn。**徐　征***（通信作者），男，1973年生，副研究员、博士研究生导师。研究方向为微纳集成制造。E-mail：xuzheng@dlut.edu.cn。

本文引用格式：

王晓东，闫怡婷，王谦，等. 面向微型遮光检测组件的精密装配方法[J]. 中国机械工程，2026，37(9)：2230-2237.

WANG Xiaodong，YAN Yiting，WANG Qian，et al. A Precision Assembly Method for Micro Shading Detection Components[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(9)：2230-2237.