

文章编号 1004-924X(2025)16-2592-10

机械臂辅助的微小光电传感组件精密装配方法

王晓东, 闫治宇, 侯瑞阳, 王思志, 肖思恩, 徐 征*
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:微小光电组件是一些高性能传感器件的核心部件,其装配精度对传感性能影响显著。为了克服当前装配系统构型复杂、成本高、扩展性差等缺点,本文开展微小光电组件精密装配方法研究,主要工作包括:研制了机械臂辅助的精密装配系统,并开发了小型化并联吸附装置;建立“状态冻结”与“标记点启发”相结合的视觉检测方法,按需推理世界坐标系与视觉坐标系关系,兼顾作业效率和精度;利用上述装置与方法,开展了典型光电组件的精密装配应用实验,实验结果表明:应用本文提出的机械臂辅助的装配方法,就可以将系统装配精度提高至 10 μm 水平,突破了机械臂本身重复定位精度的限制,能够兼顾效率和精度,并且显著降低了设备的复杂度和成本,可以广泛应用于各类精密作业。

关键词:精密装配;机械臂;视觉测量;微夹持器

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253316.2592 **CSTR:**32169.14.OPE.20253316.2592

Precision assembly method for tiny optoelectronic components assisted with robotic arm

WANG Xiaodong, YAN Zhiyu, HOU Ruiyang, WANG Sizhi, XIAO Sien, XU Zheng*

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: xuzheng@dlut.edu.cn

Abstract: Tiny optoelectronic components serve as the core elements in some high-performance sensors, where their assembly precision critically determines device performance. To address limitations in current assembly methods, such as complex configurations, high costs, and poor scalability, herein the research on the precision assembly method of tiny optoelectronic sensing components were performed. The primary contributions of this work are summarized as follows: First, a miniaturized parallel adsorption device and a robotic manipulator-assisted precision assembly system were developed. Second, considering the dual requirements of efficiency and accuracy, a two-step visual alignment method was established. This method combines "state freezing" with "marker-guided" referencing to determine the spatial relationship between coordinate systems. Finally, the assembly experiments involving miniature optoelectronic components were conducted using the developed system to validate the proposed method. Experimental results show that, by applying the robotic arm-assisted assembly method herein proposed, the assembly accuracy can be improved to the 10 μm level. This breaks through the limitation of the robotic arm's own repeat positioning

收稿日期:2025-03-17;修订日期:2025-05-31.

基金项目:国防基础科研计划资助项目(No. JCKY2022203B006);中央高校基本科研业务费资助项目(No. DUT24LAB112)

accuracy, enabling the system to balance efficiency and precision while significantly reducing the complexity and cost of the equipment. We believe that it can be widely applied to various precision operations.

Key words: precision assembly; robotic arm; visual measurement; micro-gripper

1 引 言

微小光电组件是一些高性能传感系统的核心,具有结构紧凑、经济性好、灵敏度高、不受电磁干扰等特点^[1-3],因其在性能方面的显著优势,需保证其装配精度,以满足实际需要。其工作机制为:传感器弹性组件受到外力等扰动变形,带动其上挡光板偏转,使得发光管透过挡光板狭缝的光通量产生变化,通过检测元件光通量变化确定扰动量。微型光电传感组件具有高精度的装配要求,装配误差会导致发射光源偏斜、灵敏度系数漂移、零位稳定性下降等^[4-6]。此类高精度光电组件的装配难点在于:待装配零件的特征各异,例如:发光元件呈现典型圆柱特征,而感光元件表面镀有金属引线(引线长度 ≥ 1 cm,直径 $\Phi 50\ \mu\text{m}$),电信号元件的特征尺寸在微米~毫米之间,由于各零件具有复杂的三维构型和较小的尺寸,使得其夹持和搬运存在困难。研发自动化装配系统来提高光电组件的装配精度一致性,具有重要工程价值。

光电组件在装配过程中需要灵活夹持和多角度观测,目前已报道的自动化装配系统主要采用多个正交布置的高精度滑台和转台建立所需作业自由度,其上集成多路视觉单元、夹持器、点样针及激光测距等功能模块,以完成操作任务。但这种构型通常需要诸多的滑台和转台配合,结构复杂且实体庞大,不仅成本高,而且压缩了有效作业空间,导致其可扩展性较差。

另一种技术路径是基于机械臂(关节机器人)构建装配系统^[7-9]。机械臂具有结构紧凑、运动灵活等优点,尤其适用于有限作业空间内多任务协同操作^[10-11]。然而,由于机械臂采用旋转运动副串联模式带动末端功能单元定位,本身运动精度受误差累积效应约束,仅在 $\pm(30\sim 50)\ \mu\text{m}$ 水平,限制了搭载于其上的视觉单元或执行单元的精度,难以在精密作业中直接使用。

本文针对上述问题开展微小光电传感组件精密装配方法研究:提出“状态冻结”与“标记点启发”相结合的视觉检测方法,按需建立世界坐

标系与视觉坐标系的准静态关系,兼顾作业效率和精度;研制了机械臂辅助的精密装配作业设备,开发了小型化吸附装置;利用上述方法与技术,开展了微小光电组件的装配应用实验,验证方法的有效性。

2 装配任务分析

机械臂辅助的精密装配系统,旨在实现光电组件与传感元件的高精度装配任务。在构建该系统的进程中,首先明确各零件结构特性。

光电组件主要由电信号连接元件、感光元件、发光元件、硅基座四个零件构成,发光元件呈圆柱状, X 向装配最大允许误差为 $20\ \mu\text{m}$;电信号连接元件尺寸在 $1\ \text{mm}$ 内,与硅基座两侧边的装配位置最大允许误差为 $20\ \mu\text{m}$,光电元件装配后形成的组件效果见图1。然后将上述组装好的光电组件、温敏元件、应变片等安装在金属底座上(图1)。并通过胶粘方式固定。温敏元件与应变片的装配最大允许误差均为 $20\ \mu\text{m}$ 。而光电组件凹槽中心线需与底座上圆孔轴心在 X 向重合,装配后 X 向装配最大允许误差控制在 $20\ \mu\text{m}$ 以内,以确保组件的高精度装配性能。

装配难点分析主要有以下两点:

(1) 视觉系统测量的精度控制

机械臂采用多关节串联的结构形式,通过逐关节传递运动来带动末端执行器进行定位,每个运动副的制造误差、装配误差以及运动过程中的磨损,都会导致末端执行器的位姿偏差逐渐累积,直接使用难以满足高精度零件的装配要求。

(2) 异构零件的夹持方式

零件多为硅材质,尺寸较小,易脆易碎,传感器组件由多个零件组成且为异型结构,这种异型结构能满足特定功能需求,但也给传感器组件的装配带来困难,单一结构的夹钳仅能适配特定尺寸、形状的零件。为满足多零件装配需求,可以配备快换工具库,但需要额外耗费时间用于工具切换,对效率有显著影响。

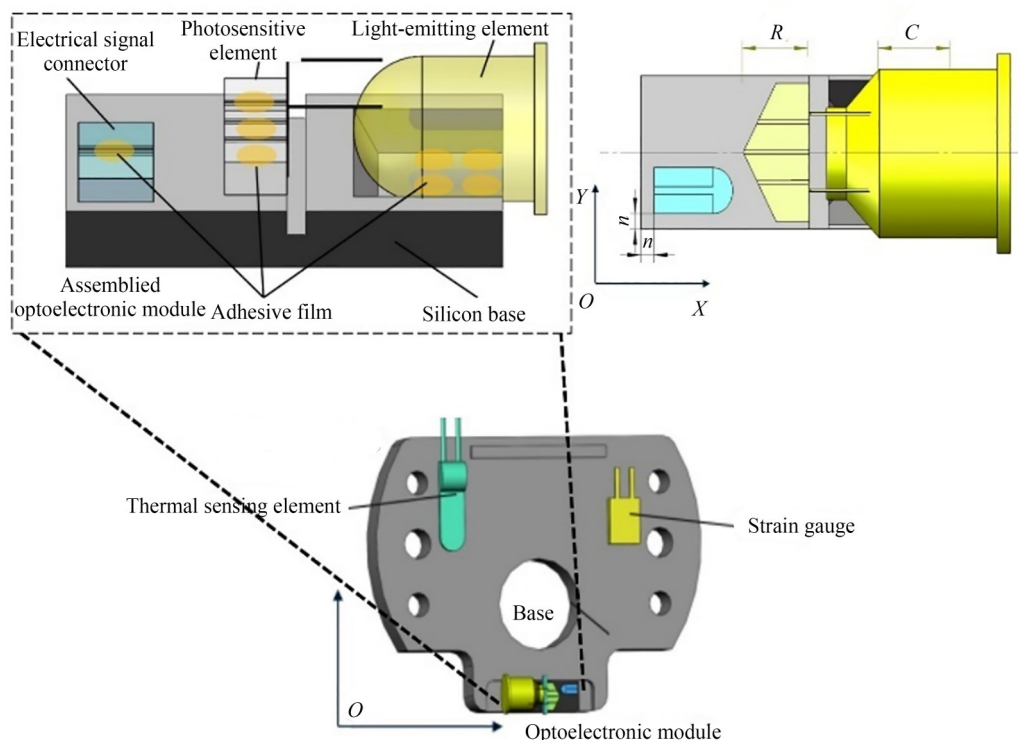


图1 光电组件的组成与整体装配效果

Fig. 1 Optoelectronic module and its final assembly effect

3 机械臂辅助的显微视觉测量方法

3.1 装配原理与方法

如何克服搭载视觉单元的机械臂误差的影响,测量出各个零件特征的准确位置是要解决的关键问题^[12],为此本文提出了“状态冻结”和“标记点启发”相结合的方法。

其核心思想是:当执行零件外观检查、物料搬运等相对精度要求较低操作时,机械臂可在大空间内自由移动。而当要执行精密作业前,将其锁定至对应的观测位,然后按照设定轨迹移动高精度的作业工作台,使搭载在机械臂的视觉单元依次观测到安置在作业工作台上的“路标”参考点,与已标定的作业工作台几何关系相结合,推理获得视觉坐标系与作业工作台坐标系等关系,此时机械臂固定,且仅进行检测工作,称这种操作为“冻结”,待精密作业完成后,机械臂从“冻结”态恢复正常。

显然,建立“冻结”阶段的视觉坐标系与作业工作台坐标系的关系至关重要,可分为标记点建立、拾取前零件特征点确定、装配前零件特征点

确定。

3.2 标记点的建立

通过标记点完成机械臂运动偏差测量,引导微动滑台对偏差进行补偿,以标记点为基准确定目标点之间相对距离,实现装配过程中零件吸附头与拾取位置点相对距离、拾取状态下零件与放置位置点相对距离的确定。其目的是求解同一坐标系中两目标点之间的相对距离,如图2所示,通过定量分析标记点与目标点 P_1 、标记点与目标点 P_2 的相对距离,从而获得目标点 P_1 和目标点 P_2 之间的距离。目标点 P_1 与标记点的相对距离分量为 Δx_{p_1} 和 Δy_{p_1} ,目标点 P_2 与标记点的相对距离

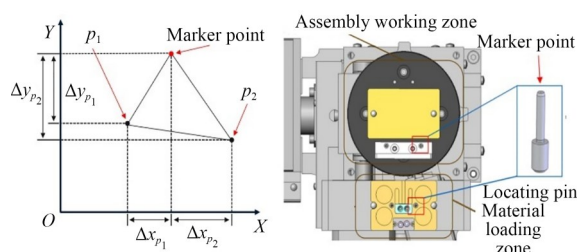


图2 标记点启发的视觉检测原理

Fig. 2 Visual measurement schematics guided by markers

分量为 Δx_{p_2} 和 Δy_{p_2} , 因此可以得出目标点 P_1 和 P_2 之间相对距离为:

$$\begin{cases} \Delta x_p = \Delta x_{p_1} + \Delta x_{p_2} \\ \Delta y_p = \Delta y_{p_2} - \Delta y_{p_1} \end{cases} \quad (1)$$

这样可以确定同一坐标系下任意固定两点之间的相对距离, 引导微动滑台完成对机械臂位姿偏差补偿、零件拾取、零件装配任务, 并结合关节机械臂的灵活性, 可实现在不同角度对目标点的测量。

标记点的实际布置如图 2 所示, 在微动平台的拾取区及装配区安装标志物并分别建立标记点, 辅助完成末端异型吸附头与上料区目标零件特征点之间相对距离的测量、吸附状态下目标零件与装配区放置点之间相对距离的测量。

3.3 拾取前零件特征点的确定

本文采用示教方式获取吸附阵列的末端吸附头与标记点相对距离, 驱动 Y 向滑台移动至上料区上方, 微动滑台配合完成对吸附头标定。

通过关节机械臂对组合夹具的上料后, 驱动其运动至上料区对夹具上的目标零件进行视觉测量, 并进入“冻结”态, 建立图像坐标系 OUV 、作业工作台坐标系 $OX_t Y_t$ 和滑台坐标系 $OX_{t_0} Y_{t_0}$, 如图 3 所示。其中作业工作台坐标系是提前单独标定好, 并默认为固定不变的。

通过对标记点运动前后分别进行图像处理

完成图像坐标系与工作台坐标系在线标定工作^[13-14], 首先, 末端机械臂运动至标记点上方进行图像采集, 采用先粗后精两步组成的复合定位方式^[15]进行图像处理, 并获取 P 点图像坐标, 然后微动滑台 X 轴移动 Δx_a 距离, 需确保标记点在原相机视野内, 然后再次对标志物进行图像采集, 获取 P' 点坐标, 通过 P 点和 P' 点的相对距离得出图像坐标系与滑台坐标系之间的偏角为:

$$\alpha_{u-x_i} = \arctan\left(\frac{\Delta v_1}{\Delta u_1}\right), \quad (2)$$

其中, Δu_1 和 Δv_1 分别为图像坐标系下 P 点与 P' 点在 u 和 v 方向的距离。

对于标记点与目标零件之间的相对距离超出相机视野外的情况, 需在微动滑台配合实现特征测量。首先, 视觉模块获取标记点的图像坐标 (u_c, v_c) , 已知滑台从标记点运动至目标点 A 时, X 轴和 Y 轴方向的移动距离分别为 ΔX_{t_0} 和 ΔY_{t_0} , 首先将距离从滑台坐标系转换至作业工作台坐标系:

$$\begin{bmatrix} \Delta X_t \\ \Delta Y_t \\ \Delta Z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\sin\beta_{Y_{t_0}Y_t} & 0 \\ 0 & \cos\beta_{Y_{t_0}Y_t} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_{t_0} \\ \Delta Y_{t_0} \\ \Delta Z_{t_0} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中: β 为滑台坐标系与工作台坐标系之间的偏角, ΔX_t 和 ΔY_t 为在工作台坐标系下滑台相对距离。

再将上述距离由工作台坐标系转至图像坐标系:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{ac} \\ \Delta v_{ac} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_{u-x_i} & \sin\alpha_{u-x_i} & 0 \\ -\sin\alpha_{u-x_i} & \cos\alpha_{u-x_i} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_t \\ \Delta Y_t \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

关节机械臂末端吸附装置完成对组合夹具的上料后, 运动至上料区对目标零件进行视觉测量, 考虑到上述所提到的机械臂末端存在位姿偏差现象, 导致其图像坐标系与工作台坐标系之间出现偏角, 在相机视野下建立图像坐标系 OUV , 在作业工作台上建立工作台坐标系 $OX_t Y_t$, 滑台坐标系 $OX_{t_0} Y_{t_0}$, 如图所示。式中, α_{u-x_i} 为上文提及的图像坐标系与滑台坐标系之间的偏角。

目标点 A 与标记点在图像坐标系下相对距

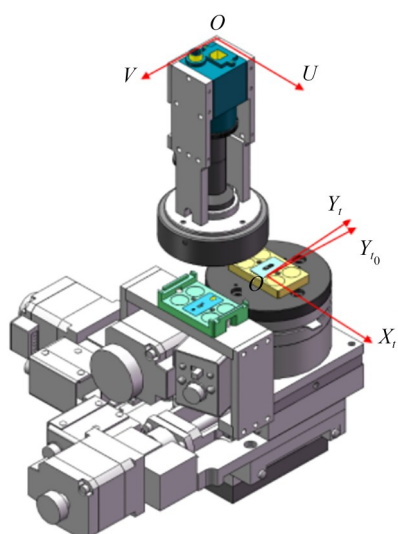


图 3 坐标系的建立

Fig. 3 Establishment of coordinate systems

离为:

$$\begin{bmatrix} \Delta u'_{ac} \\ \Delta v'_{ac} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/P_x & 0 & 0 \\ 0 & 1/P_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{ac} \\ \Delta v_{ac} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中, P_x 和 P_y 为相机像元的物理长度。

由式(5)所得结果($\Delta u'_{ac}, \Delta v'_{ac}$)与标记点坐标(u_c, v_c)的差值即为在图像坐标系下特征点 A 图像坐标, 如式(6)所示:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ v_a \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta u'_{ac} \\ \Delta v'_{ac} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

通过上述操作, 获得目标零件与标志物在同一平面下的坐标点, 并将其相对距离转为滑台坐标系下, 获得滑台 X 轴和 Y 轴的运动补偿量为:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \gamma_{U,X_i} & -\sin \gamma_{U,X_i} & 0 \\ -\sin \gamma_{U,X_i} & \cos \gamma_{U,X_i} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u'_{ac} \\ \Delta v'_{ac} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中, γ_{U,X_i} 为图像坐标系与工作台坐标系间的偏角。

已知末端吸附头与标记物间的距离为 Δx_{d_i} 和 Δy_{d_i} , 可得出末端异型吸附头与待拾取零件之间的相对距离分量为:

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta x_{d_i} + \Delta x_1 \\ \Delta y = \Delta y_{d_i} + \Delta y_1 \end{cases}. \quad (8)$$

通过微动滑台进行相对距离的补偿运动后, 使目标零件移动至拾取位置, Z 向单轴滑台下移从而完成对零件的拾取工作。

3.4 装配前零件特征点确定

在对目标零件拾取前, 还需将机械臂移动至装配区完成对装配位置点的测量作业, 其步骤与 2.3 节“冻结”阶段类似, 这样就获取零件装配位置点与标记点的相对距离。

关节机械臂在 Z 向完成放置点定位后, 移动至 X 向拍照位置点, 末端异型吸附头完成对零件拾取工作后, 单轴滑台移动至装配区示教点位置, 并确保拾取状态下零件在相机视野内, 如图 4 所示。

关节机械臂末端从 Z 向观测点移动至 X 向观测点的过程中存在俯仰偏差和位移偏差。由于拾取状态下零件与标记点可同时出现在相机视野内, 轻微俯仰对测量的影响可以不考虑。位

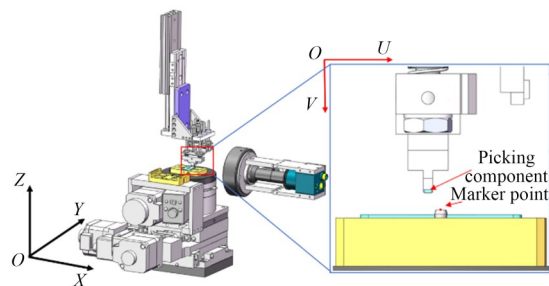


图 4 机械臂搭载的视觉单元由 X 向拍照

Fig. 4 Vision unit mounted on the robotic arm takes photos in X direction

移偏差的影响可采用前文所述的在线标定方法消除: 在 OYZ 平面内, 滑台 Y 轴移动 Δy_a 距离, 分别对运动前后标记物进行测量, 校准图像坐标系与滑台坐标系之间的偏角:

$$\beta_{v-x_i} = \arccos\left(\frac{\Delta u_2 \cdot P_y}{\Delta y_a}\right). \quad (9)$$

通过式(6)可知标记点与拾取状态下零件在 Y 向距离为: $\Delta y_2 = -\sin \beta_{U,X_i} \Delta u_{de}$, Δu_{de} 为相机获取的标记点与零件相对距离。

类似地, 关节机械臂移动至 Y 向拍照位置点, 分别对标记物与零件再次进行测量工作, 获取 X 向相对距离, 从而完成对拾取状态下零件在 OXY 平面上定位。已知标记点与零件放置位置点的相对距离, 从而引导滑台进行距离补偿, 使放置位置点移动至零件下方, 驱动 Z 向滑台下移完成零件装配工作。

可见, 采用上述标记点启发的校准思路, 仅需要用机械臂搭载一套视觉单元就可以实现多方位的观测。但是, 在进入校准和测量完成之间, 要控制关节机械臂保持锁定不动的“冻结”状态。根据我们的经验, 即使微量移动机械臂也会在末端产生无法忽略的随机误差。

4 小型化并联吸附装置及系统设计

4.1 装置结构设计

微小零件拾取和操纵装置安装在进给机构的末端。本文研制的设备需要兼容多型号光电组件的装配, 为了提高设备复用性, 通常可以采用集成多种夹持器或真空吸附头的方案, 考虑到

光电组件存在超薄、易碎、非简单平面构型等特点,本文选择真空吸附的方案,目前市场已有商品化的吸附头装置,但是尺寸较大,难以集成在有限的操作空间。

为此,本文设计了一种由多单元组成的小型化并联吸附装置,如图 5 所示。每个吸附单元包括微型单作用气缸驱动的进给机构、弹簧缓冲机构、真空吸附头组成,真空吸附头的形状根据吸附对象而定。为了保证真空吸附头进给姿态和位置,增设了高精度滑轨进行导向,由轴环限制其移动行程。微小零件容易受表面张力作用导致解除真空后无法脱离吸附头,为此在真空阀后端安装了真空破坏阀,解除真空后通入压缩空气促进零件脱离。

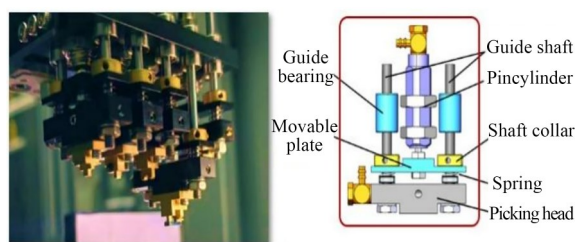


图 5 小型化并联吸附装置的结构

Fig. 5 Structure of the parallel adsorption mini-device

以预先标定的基准定位销世界坐标系为参考,如图 6 所示,通过多次拾取-释放测试,每次含气缸启停、气动滑台按 $\pm 50\text{ mm}$ 行程运动,统计末端执行器位姿偏差均小于 3 pixels。

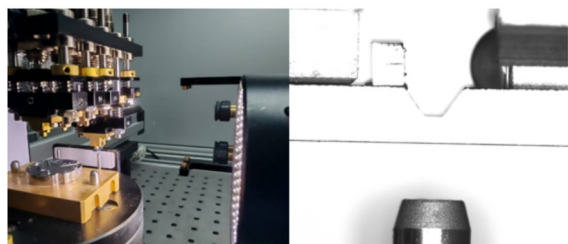


图 6 拾取-释放测试实验

Fig. 6 Experiment of picking-up and releasing

4.2 装配系统的结构设计

根据技术要求,将装配流程分解为 5 个主要步骤:自动上料、点胶、各元件装配、误差测量和自动下料。装配系统由四个模块组成:点胶和零件拾取模块、作业工作台模块、视觉测量与上下

料模块、容纳组合夹具的存储模块/区域,如图 7 所示。

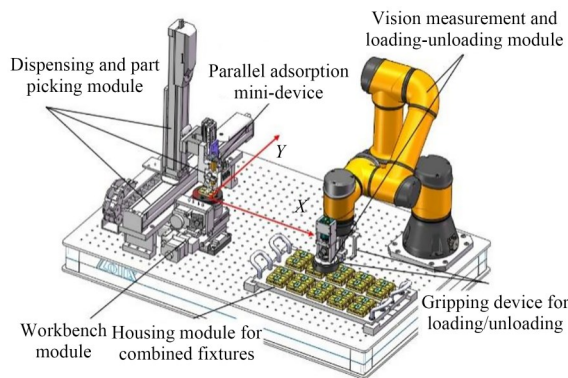


图 7 装配系统总体示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the assembly system

在视觉测量与上下料模块中,将视觉检测与上下料功能集成于关节机械臂上,使得全装配流程共用一套机械臂搭载的视觉单元。机械臂安装在光学平台上,其末端安装有视觉单元、吸附气缸和气动夹爪。视觉单元不仅实现了上料前夹具位置的识别,还在装配过程中对待装配零件位置识别。设计的专用夹具和有固定限位的料盘,提高零件上料位置的重复性,气动夹爪实现零件抓取。

夹具上设计有零件放置限位槽,实现零件在夹具上固定,便于装配前的人工处理,并限制搬运夹具过程扰动的影响。

当利用机械臂完成上料后,在视觉检测引导下控制作业工作台模块精确调整零件位姿的,而后协同其他功能模块完成装配。作业工作台模块采用高精度滑台及转台以保证被装配零件位姿的精准测量与调整。精密位移滑台其上叠装有精密转台,形成三自由度微动平台,实现零件吸附固定功能的气路安装在精密转台内部,通过转接板引出。

点胶和零件拾取模块由 Y 向和 Z 向单轴滑台、点胶头、零件操作装置组成,用于微量点胶作业及待装配零件的顺序拾取与放置,与作业工作台模块协作实现最终装配。为了避免运动干涉, Z 向滑台和零件操作装置之间安装有气动滑台,给予零件操作装置额外的 Z 向行程。

4.3 装配的主要工作流程

首先,进行上料作业。驱动机械臂运动至容纳组合夹具的存储区域,进行夹具编号识别,同时识别夹具特征点,通过求机械臂逆解得到夹具的吸附夹持位置,将包含待装配零件的组合夹具分解送至作业工作台上的上料区和装配区。

然后,对放置的待装配零件特征位置进行测量。由机械臂搭载相机至标定点区域,提取标记点位置,移动作业工作台使各个要识别的零件特征依次出现至视野内,进行图像拼接得到各零件与参考位置间的距离,在同一坐标系下确定各特征位置,用于下一步的拾取。

待确定拾取前位置后,移动相机至装配区标定位位置测量,得到基座偏角并进行调整,测量装配区标记点的位置,借助标记点完成在线标定并解析出两坐标系夹角,通过图像拼接得到零件放置位置与装配区标记点的位置信息。

最后,基于上述信息,进行零件拾取和放置连接。以发光元件的装配为例,简述一般流程:相机先运动至X向位置测量标记点和基座获得Z向点胶高度,在基座上进行点胶作业。然后,令操作装置移动至上料区域进行零件拾取,然后移动至零件信息采集的标定位置,分别测量在吸附状态下X方向、Y方向零件和标记点的相对距离,根据距离进一步修正后,由作业工作台进行补偿后,将拾取的零件安装到基座上,其他零件的装配过程类似。

5 实验结果与讨论

5.1 检测方法的精度和可靠性验证实验

为了准确验证上述基于“冻结”状态下视觉测量的精度,以滑台上的固定参考点作为相机测量目标,以长度块作为实验对象进行验证。

同时,对小型化并联吸附装置吸附进行验证,未发现吸附不成功的情况。

在工具显微镜下测得长度块尺寸44.003 mm作为标准值,然后将其放置在转台。操作微动滑台移动分别使得长度块角点及标记点出现在相机视野内,采集图像并测量长度,最大误差为10 μm,显著优于机械臂原始重复定位精度(表1)。结果表明:“冻结”状态和“标记点启发”的视觉定位方法能够有效缓解了机械臂重复定位误

表 1 长度块检测结果

Tab. 1 Measurement result of gauge block

No.	Mea. Value /mm	Error /μm
1	44.012	+9
2	44.010	+7
3	43.999	-4
4	44.010	+7
5	43.997	-6
6	44.004	+1
7	44.013	+10
8	43.994	-9
9	44.001	-2
10	44.008	+5
Mean: +1.8 μm		
Variance: 6.4 μm		

差的影响。

5.2 光电组件装配应用实验

选取多套待装配零件,进行批量自动化装配实验,如图8所示,装配结束后采用工具显微镜对其进行精度检测作为参考。

10套批量装配的光电组件检测结果见表2,其中电信号元件(Electrical signal Connector, EC)的X向和Y向装配误差分别是指电信号元件中心与硅基座左边缘的X向距离偏差和与硅基座下边缘的Y向距离偏差,发光元件(Light-emitting Element, LE)X向装配误差是指发光元件底部圆的圆心与硅基座凹槽中心的X向偏差;感光元件(Photosensitive Element, PSE)角度偏差是指感光元件靠近硅基座凹槽端面与硅基座凹槽之间的夹角。

将上述装配好的光电组件安装在金属底座上的装配检测结果见表3,其中:X向误差和Y向误差分别是指硅基座凹槽中心与金属底座的中心孔之间的X向偏值和Y向差值,角度偏差是指光电组件的硅基座上边与金属底座凹槽上边的夹角。

实验结果表明:各个光电元件的X向和Y向最大装配偏差绝对值分别为14.3 μm和12.6 μm,最大角度偏差在0.2°以内。而在后续装配中,光电组件在X和Y方向最大装配偏差绝对值



图 8 自动装配的过程

Fig. 8 Process of automatic assembly

表 2 光电元件的装配误差

Tab. 2 Assembly error of optoelectronic parts

No.	EC error / μm		LE error/ μm	PSE error/ ($^{\circ}$)
	X	Y	X	
1	+6.3	-6.5	+7.9	+0.019
2	-12.9	+6.6	-10.2	-0.149
3	+5.8	-1.7	-5.9	-0.055
4	+13.6	+11.5	+9.1	+0.149
5	-8.3	-5.2	-9.4	+0.039
6	+12.6	+12.5	+11.0	+0.159
7	-14.3	-11.4	+12.6	+0.035
8	-8.4	+1.4	-10.4	-0.152
9	+11.2	+10.6	+6.7	+0.155
10	-8.9	-1.2	-7.9	-0.095

表 3 光电组件的装配误差

Tab. 3 Assembly errors of optoelectronic modules

No.	Positional error / μm		Angular error /($^{\circ}$)
	X	Y	
1	+7.9	+12.6	-0.104
2	-12.3	+9.8	0.137
3	+2.3	-7.5	-0.008
4	-4.2	-11.6	+0.096
5	+13.5	+8.4	+0.021
6	-10.8	-6.3	-0.038
7	+8.9	-5.8	+0.072
8	+13.5	+7.3	+0.052
9	-4.4	+10.7	-0.142
10	+1.4	-6.5	+0.053

分别为 13.5 μm 和 12.6 μm , 最大角度偏差也在 0.2 $^{\circ}$ 以内。上述结果进一步验证了本文提出的方法能有效消除机械臂定位误差对测量对准和装配作业影响。

6 结 论

本文针对机械臂辅助的精密微装配中机械臂

重复定位误差对装配的影响展开研究,通过结合“冻结”和多方位“标记点启发”的视觉检测策略等,间接推断搭载机械臂上的视觉坐标系和作业工作台坐标系的关系,在简化系统结构的同时,将测量精度提高至 $10\text{ }\mu\text{m}$ 量级。此外,研制了小型并联阵列式吸附装置,能稳定抓取亚毫米尺寸的微型光电元件,实现多种微小组件的高效搬运和操纵;基于上述方法构建的系统,在某光电传感组件的自动化精密装配中进行批量实验验证,结果表明:应用本文提出的机械臂辅助的装配方法,可

以将系统装配精度提高至 $10\text{ }\mu\text{m}$ 水平,突破了常规机械臂本身重复定位精度的限制。

作者贡献说明:

王晓东:方法构建和系统设计;

闫治宇:方法实现和测试;

侯瑞阳:机械结构设计;

王思志:控制程序调试;

肖思思:整理和分析实验数据;

徐征:精度分析和文章撰写。

参考文献:

- [1] ZHANG C X, DAI M P, LUO W, *et al.* High precision tri-axial quartz flexible accelerometers resolution measurement method based on tri-axial turntable [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 53463-53470.
- [2] WANG C, LI X F, KOU K, *et al.* Analytical model of magnetic field distribution in the air-gap of quartz flexible accelerometer[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2016, 50(3): 367-377.
- [3] 张世磊,于梦溪,时旷怡,等. 基于石英挠性加速度计的微重力测量系统设计[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(6): 821-826.
ZHANG S L, YU M X, SHI K Y, *et al.* Design of microgravity measurement system based on quartz flexible accelerometer[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2021, 29(6): 821-826. (in Chinese)
- [4] 张景铭. 装配因素对光电加速度计偏值的影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
ZHANG J M. *Study on The Influence of Assembly Factors on The Bias Value of Photoelectric Accelerometer*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [5] 周紫君,郝丰,吴方,等. 一种机载惯性/光电组合导航误差修正方法[J]. 中国惯性技术学报, 2024, 32(8): 779-786, 794.
ZHOU Z J, YU F, WU F, *et al.* Error correction method for airborne SINS/EODS integrated navigation [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2024, 32(8): 779-786, 794. (in Chinese)
- [6] 张习文. 微小型加速度计的精密装配及影响性能的因素研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
ZHANG X W. *Research on Precision Assembly of Miniature Accelerometer and Factors Affecting Its Performance* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [7] SHAO C, YE X, QIAN J H, *et al.* Robotic precision assembly system for microstructures [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2020, 234(8): 948-958.
- [8] 戴娜,戈海龙,成巍,等. 基于多方向导纳力控制的机器人柔顺装配系统[J]. 制造技术与机床, 2024(2): 75-79.
DAI N, GE H L, CHENG W, *et al.* Robotic compliance assembly system based on multidimensional admittance control [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2024(2): 75-79. (in Chinese)
- [9] 李光林,王平安,须成忠. 序言: 人机智能协同系统[J]. 集成技术, 2023, 12(4): 1-3.
LI G L, WANG P A, XU C Z. Preface: human-machine intelligence-synergy systems [J]. *Journal of Integration Technology*, 2023, 12(4): 1-3. (in Chinese)
- [10] 张原. 机器人手眼协作系统精密定位与插装控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
ZHANG Y. *Research on Precision Positioning and Insertion Control of Robot Hand-Eye Cooperation System*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [11] MA Y Q, DU K, ZHOU D F, *et al.* Automatic precision robot assembly system with microscopic vision and force sensor [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2019, 16(3): 172988141985161.
- [12] 高涵,张明路,张小俊,等. 机械臂绝对定位精度标定关键技术综述[J]. 计算机应用研究, 2017,

- 34(9): 2570-2576.
- GAO H, ZHANG M L, ZHANG X J, *et al.* Review on key technology of manipulator absolute positioning accuracy calibration [J]. *Application Research of Computers*, 2017, 34(9): 2570-2576. (in Chinese)
- [13] 任同群, 江海川, 张建昆, 等. 微小磁性零件装配设备自动标定及误差补偿[J]. 光学精密工程, 2023, 31(2): 214-225.
- REN T Q, JIANG H C, ZHANG J K, *et al.* Automatic calibration and error compensation for micro magnetic parts assembly equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(2): 214-225. (in Chinese)
- [14] 任彤, 骆敏舟, 张佳丽. 协作机器人的运动学误差模型及标定算法[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(2): 163-167.
- REN T, LUO M Z, ZHANG J L. Kinematics error model and calibration algorithm of collaborative robot [J]. *Machine Building & Automation*, 2021, 50(2): 163-167. (in Chinese)
- [15] 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 X D, CUI S P, XU Z, *et al.* Visual composite positioning for precision microassembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(19): 2857-2866. (in Chinese)

作者简介:



王晓东(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1989年于南京航空学院获得学士学位,1992年于哈尔滨船舶工程学院获得硕士学位,1995年于哈尔滨工业大学获得博士学位。主要从事微装配技术与系统、精密仪器设计与制造等方面的研究。E-mail:xdwang@dlut.edu.cn

通讯作者:



徐征(1973—),男,河南郑州人,博士,副研究员,1997年和2000年于吉林工业大学分别获得学士和硕士学位,2004年于大连理工大学获得博士学位,主要从事显微视觉与智能微装配、微纳流体等方面的研究工作。E-mail:xuzheng@dlut.edu.cn