

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.037

集成机械臂的分离式构型精密微装配技术

孙永奎, 王晓东, 闫治宇, 许文强, 徐征

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:针对目前自动化装配设备采用多个正交布置的精密位移滑台搭载视觉单元,存在视觉测量位置灵活性差、测量范围局限、工作空间复杂等问题,开发一种集成机械臂的分离式构型微装配系统,设计可配置的并行气动零件吸附阵列装置,将机械臂的运动灵活性和滑台的高精度特点有机结合,提高微小组件装配过程的通用性和效率。面对机械臂自身运动偏差导致视觉测量一致性差等问题,建立标记点启发的视觉检测方法,通过标记点测量机械臂末端运动偏差,并以标记点为基准获取目标点之间相对距离,从而引导微动滑台进行运动补偿。基于自研装配平台对上述方法进行验证,并开展小批量自动化装配实验。结果表明:该方法应运于微小组件装配的装配尺寸偏差优于 $40\text{ }\mu\text{m}$,符合装配要求。

关键词:自动化装配;机械臂;微小组件;视觉测量

中图分类号:TP271+.2;TP278 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0189-06

Precision Micro-Assembly Technology with a Separate Configuration Integrating a Robotic Arm

Sun Yongkui, Wang Xiaodong, Yan Zhiyu, Xu Wenqiang, Xu Zheng

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

Abstract:To address issues in current automated assembly equipment that uses multiple orthogonally arranged precision displacement slides equipped with vision units—such as poor flexibility in vision measurement positions, limited measurement range, and complex workspace—a micro-assembly system with a separate configuration integrating a robotic arm is developed. A configurable parallel pneumatic component adsorption array device is designed, combining the motion flexibility of the robotic arm with the high precision characteristics of the slides, thereby improving the versatility and efficiency of micro-component assembly processes. To tackle problems like poor consistency in vision measurement caused by the inherent motion deviation of the robotic arm, a marker-inspired vision measurement method is established. The motion deviation at the end of the robotic arm is measured using markers, and the relative distance between target points is obtained based on the markers, thereby guiding the micro-motion slide for motion compensation. The proposed method is validated on a self-developed assembly platform, and small-batch automated assembly experiments are conducted. The results show that the assembly dimensional deviation of this method applied to micro-component assembly is better than $40\text{ }\mu\text{m}$, meeting the assembly requirements.

Keywords:automated assembly; robotic arm; micro-components; vision measurement

0 引言

自动微装配是在显微视觉引导下进行多个特征尺寸,即对微米-亚微米尺度的零件拾取、定位、连接、锁紧,最终形成微组件或微系统的工艺过程。作为生产的最终环节,其装配效果直接体现在产品性能上,所以一般要求达到 $10\text{ }\mu\text{m}$ 量级的精度。近年来,对微系统性能和集成度要求不断提高,例如新型的激光核聚变微靶器件包括 10 余

个异形异构的微小零件,只能通过精密装配来连接制造。这使得对装配系统的要求也呈现多样化和高能效的趋势^[1],需要在不降低整体装配精度和不增加设备体积的前提下,实现单机功能多样化,即要在单台设备实现多类型的工序步骤。

目前多数服役在生产线的微装配设备中,主要采用多个正交布置的高精度滑台搭载视觉单元等传感器、零件夹持器、点样针、锁紧头等完成这类任务。基于原有模式升级,这不仅要增加相应

基金项目:辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC2002020)

第一作者简介:孙永奎(1996—),男,甘肃武威人,硕士研究生,研究方向为微小零件自动化精密装配系统,1484504862@qq.com。

通信作者简介:王晓东(1967—),男,辽宁大连人,教授,博士生导师,博士,研究方向为微装配技术与系统、精密仪器设计与制造,xdwang@dlut.edu.cn。

的功能模块,同时还要增加更多高精度滑台以提供足够的运动自由度。除了大幅度增加了成本,有效作业空间的减小也给机械结构设计和运动控制带来挑战,且难以适应多样化和高能效的新要求。

另一个思路是集成多关节机械臂(以下简称机械臂)组成系统,关节机械臂具备机械结构小巧和运动灵活的特点,特别适合有限作业空间的多任务作业。但是由于关节机械臂是采用多旋转运动副串联带动末端定位的方式,受各运动副误差的综合影响^[2],其末端定位精度一般低于 $20\ \mu\text{m}$,通常只用在物料搬运等辅助作业中。

如何有效利用关节机械臂在有限空间完成更多的精密装配作业,是实现高效装配亟待解决的问题。研究思路是将关节机械臂的运动灵活性和滑台的高精度特点有机结合起来的宏微模式。从结构组成上,实现宏微模式的类型可大致分为一体式构型和分离式构型^[3]。

一体式构型是指通过悬挂或托举等方式将精密的微动滑台直接安装在机械臂末端,使其具有全空间覆盖精密操作的技术能力。例如:Shao等^[4]采用关节机械臂搭载并联微动平台的方式形成宏微结合精密装配系统,实现高效并行微装配。Wang等^[5]结合遗传算法对机械臂及微动滑台进行优化设计,研制出宏微结合的精密装配系统,在半径不大于 $1\ \text{m}$ 的工作空间内能够完成微米和角秒级分辨率的精密操纵。Ma等^[6]研制了基于关节机器人的精密装配机器人系统,工作空间半径和重复定位精度分别为 $703\ \text{mm}$ 和 $0.02\ \text{mm}$ 。一体

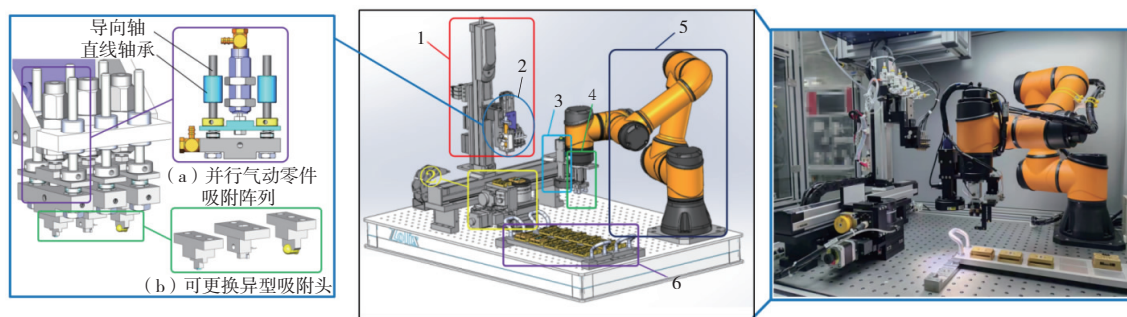
式构型的优点是在全作业空间都可实现高精度运动。但是,安装在末端的微动机器人质量作为附加的外部负载会引起机械臂末端变形,影响系统精度和稳定性,采用优化微动机器人结构和对机械臂进行变刚度修正等措施,可以缓解上述问题,但也会增加设备成本或控制复杂度。

分离式构型中,精密的微动滑台或转台并不安装在机械臂末端,而是与机械臂同样安装在基座上。通过确定二者的相对安装位置,采用双层协同驱动模式^[7],使微动台位于机械臂工作空间内,这样二者就可以进行联合作业,并通过微动台的运动补偿机械臂误差。但是,需要额外的搭载在精密滑台的一路或多路视觉单元检测确定补偿量,未充分体现机械臂的优势。将视觉检测单元安装在机械臂上,形成“手-眼”构型的集成方式^[8],显然减小了系统运动冗余,“手-眼”构型在常规尺度中已有较多应用,但是囿于机械臂的重复精度,还鲜见于微装配等精密操作应用。

本文在“手-眼”构型机械臂的思路,开展了分离式构型精密微装配系统和技术研究,旨在解决高效微装配问题。

1 分离式构型微装配系统

如图1所示,针对目前精密微小组件自动化装配过程存在作业空间狭小、视觉测量灵活性低等问题,建立集成机械臂的分离式构型微装配系统,结合机械臂的灵活性和微动滑台的高精度特点进行高效精密装配作业。



1—点胶和零件操作模块;2—作业工作台模块;3—机器视觉模块;4—上下料模块;5—机械臂本体;6—上料装置模块。

图1 集成机械臂的分离式构型精密微装配

考虑到示教及上下料安全问题,选用轻载协作机器人,有效负载为 $3\ \text{kg}$,定位精度 $\pm 20\ \mu\text{m}$ 。关节机械臂上同时集成了物料拾取机构和视觉检测单元,实现组合夹具的上下料及装配过程中多角度视觉测量任务。

点胶与零件操作模块集成零件拾取、装配及点胶于一体的功能,设计一种可配置的并行气动零件吸附阵列。通过导向轴为运动提供导向,并在导向轴上套有直线轴承,目的是降低运动过程中摩擦因数的同时保证运动精度。该装置集成多

个零件操作单元,可以适应多目标异型零件装配任务,末端异型吸附头在安装时互不干涉,需要更换时单独更换即可。

作业工作台模块配有精密转台及两个平动自由度的滑台,重复定位精度为 $0.2\ \mu\text{m}$,配合视觉测量进行高精度位姿调整及位置补偿作业。上料装置模块可根据装配数量需求进行布置。

2 标记点启发的视觉检测方法

机械臂受各运动副误差的综合影响,每次移动至目标点存在位姿偏差,并对视觉测量一致性带来影响。机械臂运动位姿偏差属于系统随机误差,需对运动误差进行补偿。此外,对众多目标点进行视觉测量时,受显微相机视野影响,各零件无法同时出现在视野内,且机械臂实时移动测量误差较大。针对上述问题,本文提出了一种标记点启发的视觉检测方法,以标记点为基准采集其位姿变化带来的机械臂运动偏差,并引导微动滑台进行动态跟踪补偿。同时,标定装配流程中的多组空间参数—涵盖吸附头与拾取工位的相互位置,以及拾取零件后与放置目标之间的相对间距。

其目的是求解同一坐标系中两目标点之间相对距离,如图2所示。通过定量分析标记点与目标点 P_1 、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 之间距离。设目标点 P_1 与标记点的相对距离分量为 Δx_{p1} 和 Δy_{p1} ,目标点 P_2 与标记点的相对距离分量为 Δx_{p2} 和 Δy_{p2} ,则目标点 P_1 和目标点 P_2 之间相对距离分量为

$$\begin{cases} \Delta x_p = \Delta x_{p1} + \Delta x_{p2} \\ \Delta y_p = \Delta y_{p2} - \Delta y_{p1} \end{cases} \quad (1)$$

通过上述方法,可以确定同一坐标系下任意两点之间相对距离,应用于微装配系统可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,可实现不同角度对目标点的测量。

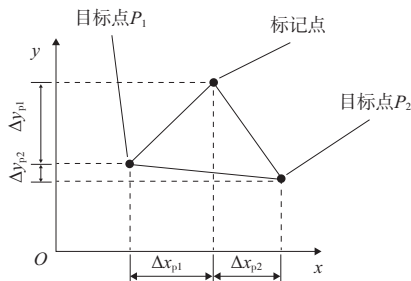


图2 标记点启发的视觉检测原理图

2.1 标记点建立

如图3所示,为测定末端异型吸附头与上料区目标零件特征点之间的相对距离,以及吸附状态下目标零件与装配区放置点之间的相对距离,在微动平台的拾取区和装配区分别建立标记点,以此作为辅助测量基准。在选择标记点时应确保其标志物具有高对比度、易识别的特征,且大小适中,不会影响标记点的图像提取工作。

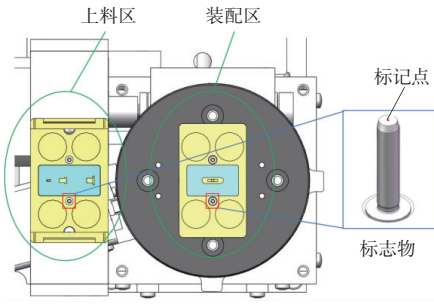


图3 标记点建立示意图

2.2 拾取前零件特征点确定

针对本系统装配特点,首先对并行气动零件吸附阵列的末端异型吸附头进行标定:通过示教方式获取其与标记点间距离,并据此驱动单轴机器人移动至上料区上方,同时借助微动滑台完成标定操作。

正式装配开始后,关节机械臂末端的吸附装置在完成组合夹具上料后,会移动至上料区对目标零件进行视觉检测。但机械臂末端固有的位姿误差会导致图像坐标系与工作台坐标系间出现偏角,故需进行坐标系间的转换,以便统一测量基准。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 $x_1O_1y_1$,滑台坐标系 $x_{i0}O_{i0}y_{i0}$,如图4所示。

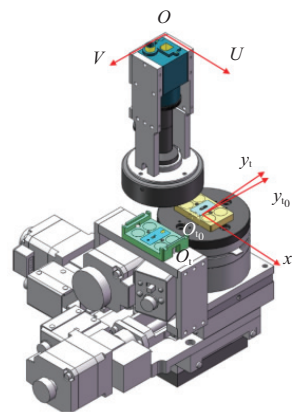


图4 建立误差补偿模型

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。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^[9]进行图像处理,并获取图像坐标 $P(u_1, v_1)$ 。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,相机再次对标志物进行图像采集并获取图像坐标点 $P'(u_2, v_2)$,由 P 、 P' 两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

$$\alpha_{U-x_t} = \arctan\left(\frac{\Delta v_1}{\Delta u_1}\right) \quad (2)$$

式中 Δu_1 、 Δv_1 为图像坐标系下 P 、 P' 两点的像素坐标差。

为避免机械臂移动测量带来测量误差的问题,关节机械臂需保持静止。由于标记点与目标零件之间的相对距离超出相机视野外,需在微动滑台配合运动下完成全局特征测量。首先,视觉模块获取标记点的图像坐标 (u_c, v_c) ,已知滑台从目标点 A 运动至标记点时, x 轴和 y 轴方向的移动距离分别为 Δx_{t_0} 和 Δy_{t_0} 。此坐标变换分两步进行,首先是将滑台坐标系转换至作业工作台坐标系如下式

$$\begin{bmatrix} \Delta x_t \\ \Delta y_t \\ \Delta z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\sin\beta_{y_{t_0}-y_t} & 0 \\ 0 & \cos\beta_{y_{t_0}-y_t} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{t_0} \\ \Delta y_{t_0} \\ \Delta z_{t_0} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\beta_{y_{t_0}-y_t}$ 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分量。

其次再将作业工作台坐标系转换至图像坐标系如下式

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{ac} \\ \Delta v_{ac} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_{U-x_t} & \sin\alpha_{U-x_t} & 0 \\ -\sin\alpha_{U-x_t} & \cos\alpha_{U-x_t} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_t \\ \Delta y_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

因此,目标点 A 和标记点在图像坐标系下其相对距离信息为

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

式中 P_x 、 P_y 为相机像素值。

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,如下式

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

从而能够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,因此滑台 x 轴、 y 轴上的运动补偿量为

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

式中 γ_{U-x_t} 为图像坐标系与工作台坐标系之间的偏角,通过标定板标定可获取。

已知末端异型吸附头与标记物之间的相对距离为 Δx_{d_1} 和 Δy_{d_1} ,因此单轴机器人运动运动至拾取区时,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

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta x_{d_1} + \Delta x_1 \\ \Delta y = \Delta y_{d_1} + \Delta y_1 \end{cases} \quad (8)$$

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,单轴机器人下移从而完成对零件的拾取工作。

2.3 装配前零件特征点确定

为获取装配位置点与标记点之间的相对距离,需在拾取目标零件前,同 2.2 节所述步骤,由关节机械臂移动至装配区完成相应测量作业。

在完成 z 方向放置点的定位后,关节机械臂移至 x 方向的拍照位置;随后,末端异型吸附头执行零件拾取操作,接着单轴机器人移动至装配区的示教点,并保证在拾取状态下零件始终处于相机视野之内,如图 5 所示。

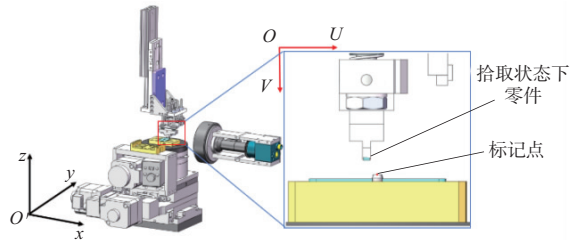


图 5 机械臂移动至 x 方向拍照点

关节机械臂运动至 x 方向后存在两种姿态偏差影响,一种是俯仰运动带来的偏差,由于拾取状态下零件与标记点可同时出现在相机视野内,并不影响其相对距离的测量工作。另外一种机械臂偏转运动带来的偏差,可采用 2.2 节所述的在

线标定方法,在 yOz 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图像采集,其图像坐标系与滑台坐标系之间的偏角为

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

通过式(8)可知其标记点与拾取状态下零件在 y 方向相对距离为

$$\Delta y_2 = -\sin\beta_{U-x_t} \Delta u_{de} \quad (10)$$

式中 Δu_{de} 为相机获取的标记点与零件 U 向相对距离。

同理,关节机械臂将移动至 y 方向指定拍照点,对标记物和待装零件分别执行二次测量,以获取两者在 x 方向上的相对间距,进而确定拾取状态下零件在 xOy 平面内的位置偏差。基于预先标定的标记点与零件目标放置位之间的固定偏移量,系统据此计算滑台的补偿行程,驱动其执行相应的位移调整,使放置工位准确对准零件正下方;随后,单轴机器人沿垂直方向下行,最终完成零件的精密装配。

2.4 方法的可行性验证

为验证上述标记点启发的视觉检测方法可行性,以夹具宽度作为测试对象,其距离超出相机视野,符合测试条件。首先,在尼康数显高度计上测得夹具边长为 25.999 mm,然后将夹具放置在转台上并进行吸附限位,如图 6 所示。然后操作微动滑台移动使夹具角点 1、角点 2 及标记点出现在相机视野内,采集图像并获取坐标值,通过标记点启发的视觉检测方法可得夹具角点 1、角点 2 的相对距离。连续进行 5 次实验,得到的检测数据如表 1 所示。

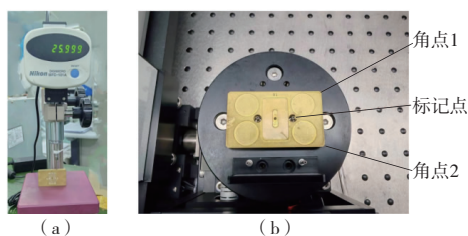


图 6 实验测试

表 1 待测边相对距离检测结果

序号	相对距离/mm	误差/ μm
1	25.984	15
2	25.994	5
3	26.010	11
4	25.990	9
5	26.013	14

由表中的结果可知:采用标记点启发的方式对夹具宽度进行视觉测量,其最大测试误差 15 μm ,可适用于机械臂集成视觉模块带来视觉测量误差较大的场合。

3 自动化装配实验与结果

3.1 微小组件装配任务

图 7 为光电组件特征结构及装配示意图。电信号传输元件、光电接收元件及光源元件分别装配在基座对应的位置,各零件之间采用胶粘接方式连接。

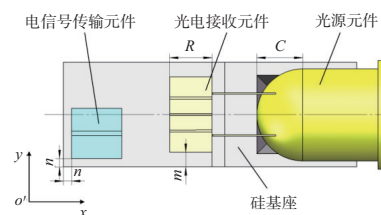


图 7 组件特征结构及装配示意图

根据组件功能及装配任务需求,其装配要求如下:

- 1) 各零件之间采用胶粘接的方式进行固定连接,避免装配后的组件出现刮痕或碎裂;
- 2) 光源元件呈圆柱状,球端与硅基座一边相切;光电接收元件上的两根引线需保证朝光源元件一侧弯曲;电信号传输元件尺寸在 1 mm 范围内,与硅基座侧边符合装配尺寸要求;
- 3) 各零件装配误差最大不超过 40 μm 。

3.2 微小组件自动化装配结果

随机选取 10 套待装配零件在集成机械臂的分离式构型装配系统进行自动化装配实验。装配作业结束后进行装配误差检测,并记录各零件的实际装配误差,其实验结果如表 2 所示。

表 2 光电组件装配误差 单位: μm

序号	电信号传输元件 装配误差		光电接收元件 装配误差		光源元件 装配误差
	x	y	x	y	x
1	35.2	35.9	22.1	35.6	24.2
2	24.2	25.8	16.4	29.8	27.5
3	36.4	35.6	20.2	37.5	23.6
4	15.6	37.8	19.5	39.6	12.3
5	24.3	23.7	18.5	38.4	29.6
6	12.3	26.7	21.4	36.3	18.5
7	9.7	14.4	24.5	25.8	15.2
8	11.3	13.4	21.4	24.3	25.4
9	23.5	29.7	16.6	15.6	14.5
10	35.6	35.6	14.1	34.5	27.2

实验结果表明:电信号传输元件 x 方向、 y 方向装配尺寸偏差最大为 $36.4\text{ }\mu\text{m}$ 和 $37.8\text{ }\mu\text{m}$;光电接收元件在 x 方向、 y 方向装配尺寸偏差最大为 $24.5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $39.6\text{ }\mu\text{m}$;光源元件 x 方向装配尺寸偏差最大为 $29.6\text{ }\mu\text{m}$ 。各元件装配结果均满足装配要求。

4 结语

本文将机械臂的灵活性与微动滑台的高精度相结合,建立了集成机械臂的分离式构型精密微装配系统,并设计了可配置的并行气动零件吸附阵列,其末端可更换异型吸附头,以适应不同装配任务。针对机械臂运动位姿偏差造成视觉测量一致性差,待测目标点之间相对距离超出相机视野的问题,提出了标记点启发的视觉检测方法。通过标记点测量机械臂运动偏差,并以标记点为基准获取目标点之间相对距离,从而引导微动滑台进行运动补偿。基于该精密装配系统对微小组件进行装配,各零件装配误差最大不超过 $40\text{ }\mu\text{m}$,减小装配复杂程度的同时提高了装配效率,为后续全自动批量化装配的研究提供了理论基础。

参考文献:

- [1] Du K, Liu M F, Wang T, et al. Recent progress in ICF target fabrication at RCLF[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2018, 3(3): 135-144.
- [2] 张志雄,江志新,杨拥民,等. 关节对中误差对机械臂
- [6] Shi X J, Zhang F M, Qu X H, et al. An online real-time path compensation system for industrial robots based on laser tracker[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, 13(5): 1729881416663366.
- [7] Ulrich T, Irgenfried S. Uncertainty estimation for kinematic laser tracker measurements incorporating the control information of an industrial robot[C]//2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Busan, Korea: IEEE, 2014: 68-76.
- [8] Ying Z W, Zhu H R. Mechanism analysis of influence of shafting error on laser tracker[C]//14th National Conference on Laser Technology and Optoelectronics (LTO 2019). Shanghai, China: SPIE, 2019: 148.
- [9] Zhang Z L, Lao D B, Dong D F, et al. Geometric error detection and calibration in laser trackers[J]. 2015 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and

末端定位精度影响[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(6): 185-190.

- [3] 时贝超. 面向微小器件精密装配的宏微结合机器人系统及关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2023.
- [4] 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.
- [5] Wang F J, Shi B C, Huo Z C, et al. Design and control of a spatial micromanipulator inspired by deployable structure[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1): 971-979.
- [6] 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): 1729881419851619.
- [7] Shi B C, Wang F J, Han C C, et al. Design of a precise positioning stage actuated by a double-layer stick-slip actuator used for precise assembly[J]. Mechanism and Machine Theory, 2023, 185: 105336.
- [8] Chang W C, Wu C H. Hand-eye coordination for robotic assembly tasks[J]. International Journal of Automation and Smart Technology, 2012, 2(4): 301-308.
- [9] 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.
- [10] Conte J, Majarena A C, Acero R, et al. Performance evaluation of laser tracker kinematic models and parameter identification[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(5/6/7/8): 1353-1364.
- [11] 陈俊. 工业机器人工具姿态的准确定义[J]. 机电信息, 2022(16): 58-63.
- [12] 童鹏飞,岳义,韦宝琛,等. 基于多体系统理论的三轴转台几何误差建模以及灵敏度分析[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(4): 108-112, 117.
- [13] Zhao J L, Liu Y, Li Q L. Research on error synthetical modeling of multi-functional composite five-axis CNC machine tool[C]//2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China: IEEE, 2016: 1814-1821.

收稿日期: 2024-03-12

(上接第 151 页)

- [6] Shi X J, Zhang F M, Qu X H, et al. An online real-time path compensation system for industrial robots based on laser tracker[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, 13(5): 1729881416663366.
- [7] Ulrich T, Irgenfried S. Uncertainty estimation for kinematic laser tracker measurements incorporating the control information of an industrial robot[C]//2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Busan, Korea: IEEE, 2014: 68-76.
- [8] Ying Z W, Zhu H R. Mechanism analysis of influence of shafting error on laser tracker[C]//14th National Conference on Laser Technology and Optoelectronics (LTO 2019). Shanghai, China: SPIE, 2019: 148.
- [9] Zhang Z L, Lao D B, Dong D F, et al. Geometric error detection and calibration in laser trackers[J]. 2015 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and

Systems, 2015, 9623: 96230G.

- [10] Conte J, Majarena A C, Acero R, et al. Performance evaluation of laser tracker kinematic models and parameter identification[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(5/6/7/8): 1353-1364.
- [11] 陈俊. 工业机器人工具姿态的准确定义[J]. 机电信息, 2022(16): 58-63.
- [12] 童鹏飞,岳义,韦宝琛,等. 基于多体系统理论的三轴转台几何误差建模以及灵敏度分析[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(4): 108-112, 117.
- [13] Zhao J L, Liu Y, Li Q L. Research on error synthetical modeling of multi-functional composite five-axis CNC machine tool[C]//2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China: IEEE, 2016: 1814-1821.