文章编号: 1001 - 2265(2020) 08 - 0146 - 05 DOI: 10. 13462 /j. cnki. mmtamt. 2020. 08. 036

基于装配轨迹在线修正的红外 LED 自动装配系统设计*

范文强[1],陈宝刚[1],王志臣[1],张 岩[1],郭 鹏[1,2]
(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033; 2. 中国科学院大学,北京 100039)

摘要: 红外 LED 用于光电式成像定位系统的位置信号发生源,要求 LED 装配位置误差≤0. 2mm,但手动无法保证对 LED 的一次性精确定位装配,因此设计了利用 KUKA 机械臂实现红外 LED 高精度自动装配的系统。通过分析工业机械臂自动装配工序的误差源,提出一种基于待装配孔位姿测量的装配轨迹在线修正方法,解决示教在线编程和离线编程轨迹更新的不足。建立三坐标测量机测量与 KUKA 机械臂运动控制之间的位姿变换和轨迹误差修正数学模型,完成基于装配轨迹在线修正的红外 LED 自动装配系统软硬件设计,搭建实验装置,通过实验对系统自动装配精度进行验证,实验表明,经过装配轨迹在线修正后红外 LED 自动装配位置误差由修正前的 0. 23mm 降低到0. 09 mm 以下,角度误差由修正前的 0. 27°降低到 0. 08°以下,实现红外 LED 正常装配,为基于工业机械臂的高精度自动装配系统设计提供参考。

关键词: 红外 LED; 三坐标测量机; KUKA 机械臂; 待装配孔位姿测量; 装配轨迹在线修正
中图分类号: TH165; TG506 **文献标识码:** A

Infrared LED Automatic Assembly System Design Based on the Online Correction of Assembly Trajectory

FAN Wen-qiang[1], CHEN Bao-gang[1], WANG Zhi-chen[1], ZHANG Yan[1], GUO Peng[1,2]
(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The infrared LED is used as the position signal generator of photoelectric imaging and positioning system, after assembling, the position error of LED is required to be ≤ 0. 2mm, however, manual operation cannot guarantee the one-time accurate positioning and assembly of the LED, a high-precision automatic assembly system of infrared LED is designed by using KUKA robot. Based on analyzing the error sources of the automatic assembly process of the industrial robot, an on-line correction method of the assembly trajectory based on the position and orientation measurement of the holes to be assembled is proposed, to solve some problems of online teaching programming and offline programming in updating trajectory. The mathematical model of pose transformation and trajectory error correction between Coordinate Measuring Machine measurement and KUKA robot motion control is established, complete the hardware and software design of the infrared LED automatic assembly system based on the online correction of assembly trajectory, build the experimental device, the accuracy of the infrared LED automatic assembly is verified by the experiment. The experimental results show that the position error of infrared LED automatic assembly is reduced from 0. 23mm to below 0. 09mm and the angle error is reduced from 0. 27° to below 0. 08° after on-line correction of assembly trajectory, can realize the normal assembly of the infrared LED, it provides a reference for design of the high-precision automatic assembly system based on the industrial robot.

Key words: infrared LED; coordinate measuring machine; KUKA robot; pose measurement of holes to be assembled; online correction of assembly trajectory

0 引言

在虚拟现实和头位跟踪火控系统领域[1-2],红外 LED 作为位置信号发生源,以反映目标物体的位姿变

收稿日期: 2019 - 11 - 15; 修回日期: 2019 - 12 - 25
* 基金项目: 国家自然科学基金(61605199,61601195)
作者简介: 范文强(1993—) ,男,江西鹰潭人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究实习员,硕士,研究方向为大型光电望远镜光机结构和自动化技术的研究,(E - mail) fwqhust@ 163. com。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

化[3]，根据位姿变化信号，驱动虚拟视点和火控信息同步改变，实现显示和火控功能。由于图像处理算法对目标信号源的位置偏差较为敏感，要求 LED 装配位置误差≤0.2mm[4]。但由于 LED 空间尺寸小，直径仅为 4mm，手动拾取时手与 LED 接触面积较小，无法保证对 LED 的一次性稳定定位和装配。

针对上述问题，设计利用 KUKA 机械臂实现对红外 LED 的定位装配。虽然工业机械臂重复定位精度高，绝对定位精度却不能得到很好的保证，目前保证绝对定位精度的方式主要有两种：一是牺牲自动化产线的生产效率，使用在线示教编程或离线编程定期对自动装配轨迹进行更新，二是对工业机械臂自动装配误差源与精度优化方法展开研究，建立误差模型，进行修正[5-8]。随着研究的逐步深入，基于误差预防的离线误差补偿方法已不再最优。

文献[9-11]提出了在线补偿方法，以实现对工业机械臂末端执行器绝对精度的优化和补偿，却也只是解决了工业机械臂运动误差，对于待装配工件的实际位置与工业机械臂预编译装配轨迹之间的偏差，并未做分析考虑，影响自动装配的最终位置精度。除此之外，由于实际的加工制造限制，产品一致性并不能完全保证，需要工业机械臂的装配轨迹具有一定的柔性和可适应性。因此提出一种基于待装配孔位姿测量的工业机械臂装配轨迹在线修正方法，通过三坐标测量机，测量实际待装配位姿与预编译轨迹理论装配位姿的误差，构建闭环修正系统，通过 TCP/IP 通讯网口在线闭环修正 KUKA 机械臂装配轨迹路径，减小装夹和产品加工不一致所带来的装配误差影响，提高工业机械臂最终装配精度，提高柔性装配能力，延长为保精度而定期校准的周期，平衡保精度与保效率之间的矛盾。

1　自动装配误差源与在线轨迹修正

1.1　自动装配误差源与闭环修正方法

如图 1 所示，在自动装配工序的整个执行过程中，影响其自动装配精度的因素是多方面的。但主要可以分为工业机械臂运动不准确误差和待装配工件实际位置偏差两部分。工业机械臂运动误差表现为控制器指令位置与机器人实际到达位置的偏差，它是加工、装配与磨损导致的机器人运动学模型误差，测量反馈器件和算法导致的控制系统误差，以及末端负载、运动行程、温度等使用工况变化的共同作用结果。而待装配工件实际位置偏差是指由工件装夹、外界扰动和产品一致性等误差导致的批量装配时待装配工件实际位置的偏差值。

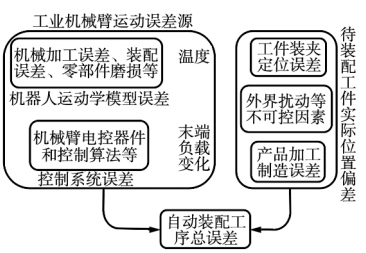


图 1　自动装配工序误差源

本文基于在线补偿方法，将待装配工件实际位置偏差引入在线闭环补偿范围，提出一种基于待装配孔位姿测量的工业机械臂装配轨迹在线修正方法，具体修正流程如图 2 所示。利用三坐标测量机对待装配孔进行自动装配前的预检，获取测量数据，在上位机上解算出测量数据与预编译轨迹之间的位姿偏差，通过 PLC 实现对预编译轨迹位姿变量的补偿和更新，上载指令到控制器驱动机器人运动到实际待装配位姿，实现装配轨迹在线闭环修正，顺次完成自动装配任务，提高最终装配精度和柔性装配能力。

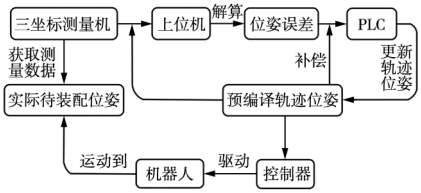


图 2　装配轨迹在线闭环修正流程图

1.2　待装配部件和自动装配系统坐标系

如图 3 所示是待装配部件和自动装配系统各单元坐标系。坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 是三坐标测量机基准坐标系。由于三坐标测量机对待装配孔进行预检测量时只能获得待装配位姿的一维矢量信息，设计引入两个高精度基准孔 1 和 2，以获得完整三维位姿信息，建立待装配部件坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$。坐标系 $O_3X_3Y_3Z_3$ 是工业机械臂末端执行器的工具坐标系，原点位于工具上，工具坐标系随机械臂执行末端而移动。坐标系 $O_4X_4Y_4Z_4$ 是工业机械臂基坐标系，出厂时与位于机械臂底部的世界坐标系重合，通过设置 KUKA 机械臂控制器系统参数，使 KUKA 机械臂的基坐标系与三坐标测量机基准坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 重合。

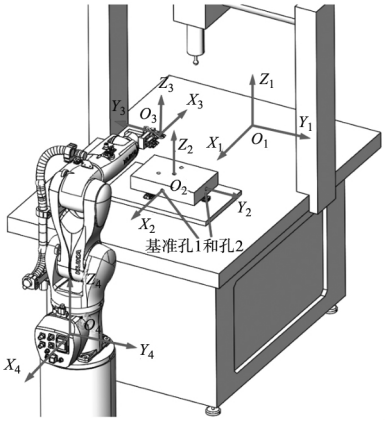


图 3　待装配部件和自动装配系统各单元坐标系

1.3　待装配孔位置误差测量

由于加工制造和外界不可控因素等的影响，上传工业机械臂控制器的预编译装配轨迹理论装配位置与待装配孔的实际位置之间必然会存在位置偏差。使用三坐标测量机对实际待装配孔进行位置测量，并与机械臂预编译理论装配轨迹位置进行比较并修正。

设基准坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 下，预编译轨迹理论装配位置为 P_0^i，用三坐标测量机测量的实际待装配位置为

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

P_1^i，则得到在机械臂控制系统坐标系下的位置误差值 ΔP^i，如式(1)所示：

$$\Delta P^i = \begin{pmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{pmatrix} = P_1^i - P_0^i \tag{1}$$

式中，δ_x、δ_y、δ_z 分别为机械臂在基准坐标系下 X、Y、Z 方向上的位置偏差值，i 为 LED 阵列中各待装配 LED 序号，$i = 1 \sim 4$。

1.4 基于三坐标测量的姿态误差解算

如图 3 所示，通过三坐标测量机的红宝石测头，三次接触测量分别获得待装配位姿坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 相对于基坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 各轴的方向余弦矢量 ${}^1x_2$、${}^1y_2$、${}^1z_2$，如图 4 所示，3 个矢量是单位正交矢量，得旋转矩阵：

$${}^1\boldsymbol{R}_2 = [{}^1x_2 \quad {}^1y_2 \quad {}^1z_2] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \tag{2}$$

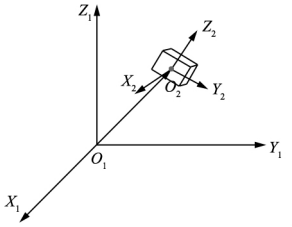


图 4 待装配孔相对于基坐标系的姿态表示

基于 KUKA 机械臂运动控制器运动控制欧拉角 A、B、C 的定义，其末端执行器的空间姿态可以通过 $RPY(Roll, Pitch, Yaw)$ 变换，在基坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 中表示为：

$$RPY(A,B,C) = Rot(Z,A)\ Rot(Y,B)\ Rot(X,C) = \begin{bmatrix} \cos A\cos B & \cos A\sin B\sin C - \sin A\cos C & \cos A\sin B\cos C + \sin A\sin C \\ \sin A\cos B & \sin A\sin B\sin C + \cos A\cos C & \sin A\sin B\cos C - \cos A\sin C \\ -\sin B & \cos B\sin C & \cos B\cos C \end{bmatrix} \tag{3}$$

为实现工业机械臂末端执行器到待装配姿态的运动控制，需要将笛卡尔空间下待装配位姿的测量数据解算为欧拉空间下工业机械臂的运动控制参量 A、B、C，即令式(2)与式(3)相等：

$${}^1\boldsymbol{R}_2 = RPY(A,B,C) \tag{4}$$

具体解算结果如下：

(1) 若 $r_{31} = 1$，则 $B = -\frac{\pi}{2}$。可得：

$$A + C = \arctan2(-r_{23}, r_{22}) \tag{5}$$

(2) 若 $r_{31} = -1$，则 $B = \frac{\pi}{2}$。可得：

$$C - A = \arctan2(-r_{23}, r_{22}) \tag{6}$$

(3) 若 $r_{33} \neq \pm 1$，则 $\cos B \neq 0$。可得：

若 $\cos B > 0$

$$\begin{cases} C = \arctan2(r_{32}, r_{33}) \\ A = \arctan2(r_{21}, r_{11}) \end{cases} \tag{7}$$

若 $\cos B < 0$

$$\begin{cases} C = \arctan2(-r_{32}, -r_{33}) \\ A = \arctan2(-r_{21}, -r_{11}) \end{cases} \tag{8}$$

$$B = \arctan2(-r_{31}, r_{11}\cos A + r_{21}\sin A) \tag{9}$$

将式(7) ~ 式(9)中 A、B 和 C 的两组解分别代入式(4)，可解算出欧拉角 A、B 和 C 的正确解。

设基准坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 下，预编译轨迹理论装配姿态为 R_0^i，用三坐标测量机测量的实际待装配姿态为 R_1^i，则得到在机械臂控制系统坐标系下的姿态误差值 ΔR^i，如式(10)所示：

$$\Delta R^i = \begin{pmatrix} \delta_A \\ \delta_B \\ \delta_C \end{pmatrix} = R_1^i - R_0^i \tag{10}$$

式中，δ_A、δ_B、δ_C 分别为机械臂在基准坐标系下欧拉角 A、B、C 的姿态偏差值，i 为 LED 阵列中各待装配 LED 序号，$i = 1 - 4$。

1.5 工业机械臂装配轨迹闭环修正

如图 5 所示，利用三坐标测量机的自动测量功能，对待装配孔位进行装配前的预检，自动测量获得待装配孔位的实际位置 P_1 和姿态值 R_1，将其与上传到 KUKA 控制器中的预编译理论装配位置 P_0 和姿态值 R_0 比较得到位置误差补偿值如式(11)所示：

$$\begin{cases} \Delta P = P_1 - P_0 \\ \Delta R = R_1 - R_0 \end{cases} \tag{11}$$

式中，ΔP 和 ΔR 分别为位置和姿态误差修正值。通过由三坐标测量机、KUKA 机械臂、PLC 控制系统组成的工业机械臂自动装配轨迹在线修正系统，将测量的实际装配位姿误差修正值传递给机械臂控制器，更新预先上传到机械臂控制器的预编译轨迹的装配位姿变量，以达到提高红外 LED 自动装配位置精度的要求。

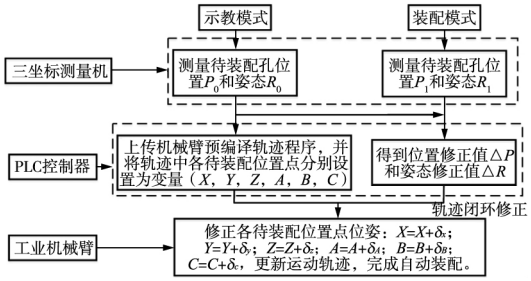


图 5 工业机械臂装配轨迹修正过程

2 红外 LED 自动装配系统

2.1 系统硬件设计

基于装配轨迹在线修正方法实现对红外 LED 自动装配系统的设计，该系统主要由三坐标测量机、工控机、PLC、工业机械臂等硬件组成，根据红外 LED 装配精度的要求，选用德国 KUKA 公司的 KR6 R700 sixx 型工业机械臂及其控制器，工作范围长达 700mm，选用青岛雷顿公司 NCT787 三坐标测量机，选用德国西门子公司的 S7-1200 PLC，根据实际需要构建 PLC 工控系统，自动装配系统各硬件连接如图 6 所示。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

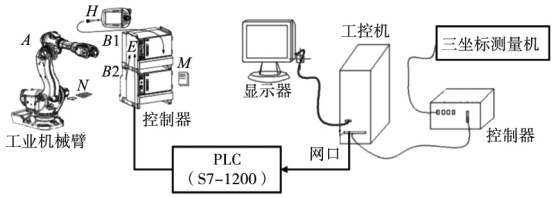


图 6　红外 LED 自动装配系统硬件连接

工控机上为 Windows 系统，并装有 LabVIEW 测控软件，用于接收三坐标测量机的测试数据，基于 Windows 工控系统和 OPC 通讯协议标准，利用 LabVIEW 编程语言，实现对整个红外 LED 自动装配系统的硬件通讯和数据传输。具体数据传输流程如图 7 所示，通过 TCP/IP 网口将三坐标测量机测量数据传输给 OPC 服务器，OPC 服务器将数据存储并传输给 PLC 控制器，PLC 进行示教数据与当次测量数据的运算处理，将结果通过网口传输给工业机械臂，使工业机械臂根据各批次待装配产品的三坐标测量数据的偏差进行自动装配位置误差补偿，完成装配运行轨迹的修正。

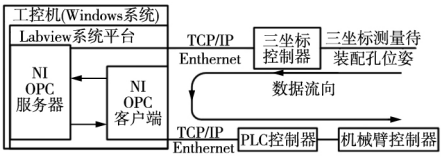


图 7　红外 LED 自动装配系统数据传输流程

2.2　系统软件设计

在实现系统硬件系统通讯的基础上，还需要根据实际装配功能需求，设计面向用户的上位机，实现对红外 LED 自动装配轨迹的监控和修正补偿。

上位机使用 LabVIEW 编程语言，采用生产者消费者(事件和数据)模式进行程序框架设计，利用三坐标测量机提供的二次开发接口文件 Neptune. tlb 实时获得三坐标测量机的测量数据，通过已获取的当前待装配位置数据与之前基准示教数据之间的偏差值，计算红外 LED 预编的装配运动轨迹与当前实际待装配位置之间的偏差，将偏差值补偿给工业机械臂运动控制参数变量，实现对红外 LED 的高精度自动装配。

3　实验及结果分析

根据红外 LED 自动装配系统设计，搭建实验系统如图 8 所示，通过实验对基于装配轨迹在线修正的红外 LED 自动装配精度和重复精度进行了验证。实验中，库卡公司型号 KR6 R700 sixx 的 6 自由度工业机械臂(最大载荷 6kg)，经实验检定重复定位精度 ±0.03 mm。青岛某公司型号为 NCT787 的三坐标测量机，在全量程范围内(700mm ×800mm ×700mm)标称对单点的测量不确定度为 $2.4+3.3L/1000(\mu m)$ (L 为三坐标测量机运动的行程，单位 mm)。经第三方检测单位检测最大误差为 5μm。

图 8　红外 LED 自动装配系统实物

为了对红外 LED 自动装配在经过装配轨迹修正前后的单次装配精度和重复装配精度进行比较，设计如图 9 所示的实验装置，设计高精度待装配孔位板，保证各加工孔精度在 0.05mm 误差以内，保证 3 个基准平面相互垂直。加工 4 个待装配孔(V11，V12，V13，V14)组成一个阵列，其中待装配孔 V11，V12，V14 构成一个等边三角形，待装配孔 V13 在该等边三角形的重心。红外 LED 辐射管与装配孔位属于间隙配合，并通过粘胶胶接。角度偏差和位置偏差是由于装夹定位误差和加工误差导致，误差范围有限，设计 3 个手动调平楔铁，角度偏差调整范围在 10°以内，进行自动装配效果验证。

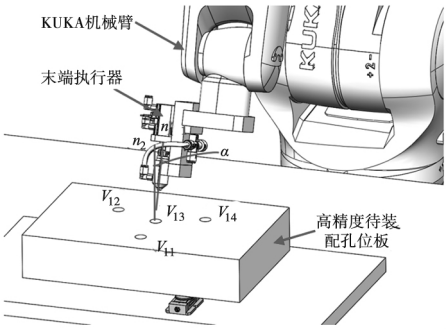


图 9　验证实验装置

如图 9 所示，仅以 V13 孔装配过程为例进行说明，$\boldsymbol{n}_1$ 为三坐标测量的红外 LED 最终装配位置矢量，$\boldsymbol{n}_2$ 为三坐标测量的 V13 孔的待装配位置矢量，α 为 LED 实际装配之后的装配角度误差。

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\boldsymbol{n}_1 \cdot \boldsymbol{n}_2}{|\boldsymbol{n}_1| \times |\boldsymbol{n}_2|}\right) \tag{12}$$

整个实验过程可以按如下步骤进行:

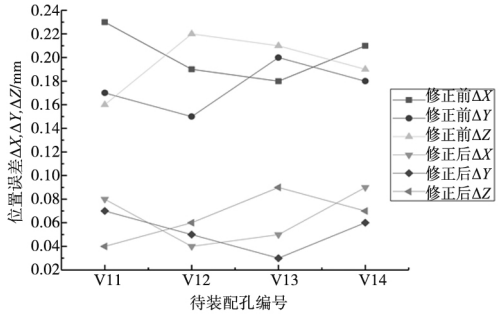
首先，通过工业机械臂预编译运动程序驱动工业机械臂自行运动到待装配孔位姿。在工业机械臂定位完成后，通过三坐标测量机测量末端 LED 的位置矢量，来计算当前的装配位置和角度偏差。

接着，运用本文提出的基于装配轨迹在线修正方法，实现对红外 LED 的自动装配，然后记录修正以后的红外 LED 自动装配位置和角度偏差。最后对装配轨迹修正前后红外 LED 自动装配的定位精度进行比较。以高精度待装配孔位板其中某个位姿的红外 LED 自动装配过程为例进行说明。

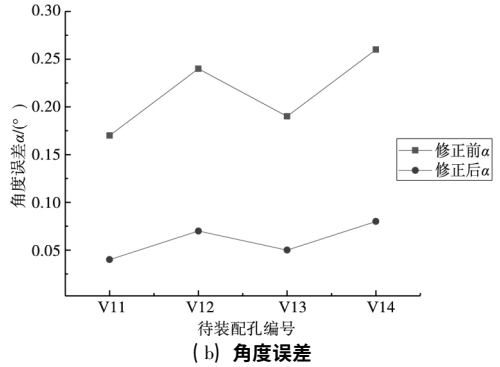
实验中，为了获得经过装配轨迹修正后的红外 LED 自动装配的单次装配误差和重复装配误差，对于高精度待装配孔位板的当前位姿，重复多次进行红外 LED 自动装配效果验证，记录每次工业机械装配红外 LED 的最终位置与真实待装配位置的偏差值。然后计算位置和角度偏差的均值作为自动装配系统的单次装

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

配误差，同时计算位置和角度偏差的标准差作为自动装配系统的重复装配误差，最后，对红外 LED 自动装配在装配轨迹修正前后的单次装配误差和重复装配误差进行比较。图 10 是装配轨迹修正前后红外 LED 单次装配的最终位置和角度偏差对比图，图中横坐标为对应的待装配孔位编号。从图中可以非常明显地看出，经过装配轨迹修正后，红外 LED 自动装配的位置和角度偏差得到了明显的减小。总体来说，经过修正后红外 LED 自动装配的最终位置误差可降低到0.09 mm 以下，最大幅度可降低到 0.03mm，角度误差降低 0.08°以下，最大幅度可降低到 0.04°。



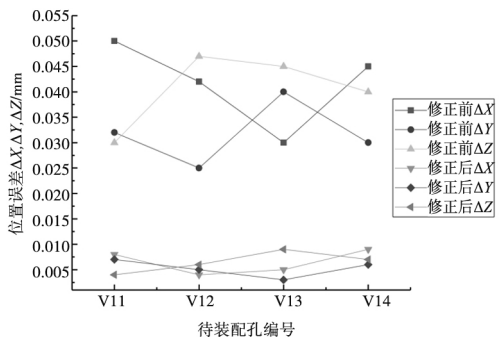
(a) 位置误差



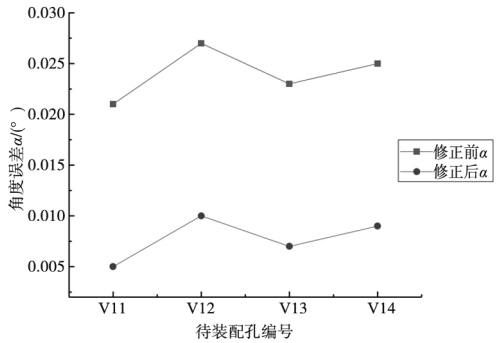
(b) 角度误差

图 10 红外 LED 自动装配的单次装配误差比较

图 11 是装配轨迹修正前后红外 LED 多次装配过程中位置和角度的重复误差对比图，图中横坐标为对应的待装配孔位编号。从图中可以看出，经过轨迹修正后，红外 LED 的重复装配误差也有了很大的减小，其中位置误差从修正之前的 0.025 ~ 0.05mm 降低到了 0.003 ~ 0.009mm，角度误差从修正之前的 0.020° ~ 0.027°降低到了 0.005° ~ 0.010°。显然，实验结果证明，本文提出的基于装配轨迹在线修正的红外 LED 装配系统可以同时显著提高红外 LED 自动装配的绝对精度和重复精度。



(a) 位置误差



(b) 角度误差

图 11 红外 LED 自动装配的重复装配误差比较

4 结论

效率和精度保证是自动化生产的核心优势，但工业机械臂较低的绝对定位精度和为保精度而需定期停工校准依然是自动化生产必须面对的问题。本文提出一种基于待装配孔位姿测量的装配轨迹在线修正方法，解决目前常用定期轨迹更新方法中示教在线编程耽误生产和离线编程过程复杂、成本昂贵的问题。设计的基于装配轨迹在线修正的红外 LED 自动装配系统，具有在线闭环轨迹修正能力，通过对比实验，装配轨迹在线修正前后，红外 LED 自动装配位置误差由修正前的 0.23mm 降低到 0.09mm 以下，角度误差由修正前的 0.27°降低到 0.08°以下，在保证≤0.2mm 装配精度的前提下，设备定期校准周期由未使用自动装配轨迹修正的 1 个月延长为 1 年，有效提高自动装配的实际生产效率和精度。

参考文献

[1] MENN A. System for measuring the angular displacement of an object [P]. US: 4896962, 1990 - 01 - 30.

[2] 汤勇，顾宏斌，张丛品. 高精度光学头部位置定位系统 [J]. 光学精密工程，2013，21(2)：488 - 495.

[3] 王永生. 机载头盔瞄准显示系统动态性能研究 [J]. 电光与控制，2013，20 (8)： 1 - 5.

[4] 闫龙. 图像式头盔瞄准具定位模型研究与仿真 [J]. 电光与控制，2010，17 (9)： 69 - 73.

[5] Ulrich M，Lux G，Piprek T. Analysis and Visualisation of the Positioning Accuracy and Underlying Effects of Industrial Robots [J]. Advanced Materials Research，2014，1018: 15 - 22.

[6] 任永杰，邾继贵，杨学友，等. 利用激光跟踪仪对机器人进行标定的方法 [J]. 机械工程学报，2007，43(9)：195 - 200.

[7] Du G，Zhang P. Online robot calibration based on vision measurement [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing，2013，29(6)：484 - 492.

[8] Tran X T，Kang H J. Adaptive hybrid High-Order terminal sliding mode control of MIMO uncertain nonlinear systems and its application to robot manipulators [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing，2015，16 (2)：255-266.

[9] 史晓佳，张福民，曲兴华，等. KUKA 工业机械臂位姿测量与在线误差补偿 [J]. 机械工程学报，2017，53(8)：1 - 7.

[10] Mustafa S K，Tao P Y，Yang G，et al. A geometrical approach for online error compensation of industrial manipulators [C] // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics，IEEE，2011.

[11] Kubela T，Pochyly A，Singule V. Investigation of position accuracy of industrial robots and online methods for accuracy improvement in machining processes [C] // International Conference on Electrical Drives & Power Electronics，IEEE，2015.

(编辑 李秀敏)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net