

面向曲面类零件的机器人自动装配方法

A Robotic Automatic Assembly Method for Curved Surface Parts

北京航空航天大学 陈翔 黄龙 杨洋

[摘要] 针对航空航天领域中常见的曲面类零件,提出一种曲面类零件的机器人装配方法。在提出曲面类零件装卡定位方法的基础上,设计了曲面类零件的装卡定位适配器。基于激光跟踪仪测量定位原理,对曲面类零件的装配作业任务进行了路径规划,并提出了误差补偿策略。通过机器人装配试验对该系统进行试验验证,结果显示了所提出的曲面类零件的装配方法的有效性和可行性。

关键词: 机器人装配方法 路径规划 装卡定位

[ABSTRACT] Aiming at curved surface parts in aviation and aerospace field, a robotic assembly method of curved surface parts is proposed. The adapter is designed for installing and positioning curved surface parts. According to the principle for measurement and positioning of the laser tracker, a path planning and error compensation strategy are presented for performing curved surface parts assembly tasks. The results are verified by the assembly experiment, which show the effectiveness and feasibility of the curved surface parts assembly method.

Keywords: Robotic assembly method Path planning Fixation

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.21.145

在航空航天等领域,所设计的大多数零件结构复杂,具有曲面特征,如飞行器翼身表面蒙皮、航空航天发动机叶片、汽车覆盖件精密模具等^[1]。由于零件表面复杂的曲面难以用数学表达式精确表示^[2],因此,相关零件在装配过程中的定位难度大,装配精度难以保证。

近些年,国外航空制造业已经发展了很多先进装配技术,例如机器人装配技术、柔性装配技术等。其特点是基于数字化的技术手段,缩短装配时间,提高装配效率和精确度。例如机器人装配技术、工业机器人及其自动化生产线已成为高端装备的重要组成部分及未来发展趋势^[3]。同时,柔性装配技术同样发展迅速,典型的有行列式柔性装配工装、多点阵成形真空吸附式柔性工装等系统^[4]。

国内相关领域的装配技术与国外还有一定差距,装配型架这种传统的装配手段依旧被广泛应用^[5],型架装

配方式要求装配过程中大量采用具有定位夹紧功能的设备,有着制造精度极低、周期时间较长、工作效率被严重制约的缺点。

因此,对于零件种类有限,非大批量装配的装配过程,采用传统型架装配方式效率低;而面对需要精确装配的曲面零件,采用柔性装配技术,其定位难度大的问题就会显现出来。因此,有必要开发一种针对非大批量生产的曲面类零件的装配技术。

针对航空航天领域中常见的装配要求高、小批量的曲面类零件,提出一种采用工业机器人进行装配的方法;根据装卡定位原理,对具有上述特点的曲面零件提出一种可行的装卡定位方式;同时,借助激光跟踪仪的测量定位,对曲面类零件的装配任务进行路径规划,并提出装配误差补偿策略。最后通过机器人装配试验对该系统进行试验验证,确保装配方法的有效性和可行性。

1 机器人装配系统设计

针对航空领域中常见的曲面类零件,研制一种基于工业机器人的曲面零件装配系统,该系统可针对不同曲面类零件进行精确拾取,同时实现曲面零件的精确装配。

1.1 自动装配系统组成及装配过程

根据曲面零件装配精度较高的特点,设计一种自动化机器人装配系统。该系统包括工业机器人系统、激光跟踪仪系统、上位机、曲面零件及其适配器,装配目标及其支架,本系统结构组成如图1所示。

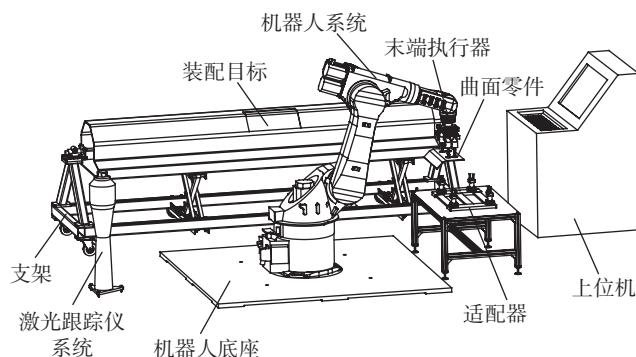


图1 装配系统结构图

Fig.1 Structure of the assembly system

其中,机器人系统作为装配系统的核心,主要完成对曲面零件的拾取,沿指定路径运动,以及装配零件的过程。数据采集及定位系统则选取激光跟踪仪作为测量设备,准确定位各坐标系关系,测量装配初始位置及目标位置,采集补偿过程的位姿信息。

该装配系统的装配过程为:使用激光跟踪仪测量并定位机器人系统、曲面零件的初始位置及目标位置,其中初始位置位于适配器,终止位置位于装配目标;上位机读取数据进行路径规划;机器人系统准确抓取曲面零件,并按规划路径将曲面零件准确装配至目标位置;在抓取及装配零件前,激光跟踪仪对机器人姿态进行位姿补偿;机器人装配完毕,按规定返回初始位置。

1.2 机器人系统

为实现装配过程精确化和自动化,采用串联式工业机器人完成对曲面零件的装配任务。机器人系统的控制器一般采用笛卡儿坐标系参数来表示末端 {Flange} 相对于基坐标 {Base} 的位姿状态,通过 X 、 Y 和 Z 的坐标确定末端法兰的位置;通过角度 γ 、 β 和 α 确定法兰姿态,其中角度 γ 、 β 和 α 分别为绕坐标轴 Z 、 Y 和 X 的转角。因此,机器人末端位姿即可通过六自由度参数 (X 、 Y 、 Z 、 γ 、 β 、 α) 来确定。

在坐标转换过程中,描述刚体在空间的位姿是通过固连其上的刚体坐标系相对于参考坐标系的位姿来描述的,即采用齐次变换矩阵 ${}^A_B R, {}^A P_{BORG}$ 来描述,因此需将描述机器人末端位姿的六自由度参数与描述空间位姿的齐次矩阵关联起来^[6],其关系如下:

$${}^A_B R, {}^A P_{BORG} = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha \\ \sin \gamma \cos \beta \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha \\ 0 & 0 \\ \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha & X \\ \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha - \cos \gamma \sin \alpha & Y \\ \cos \beta \cos \alpha & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.3 数据采集及定位系统

机器人装配系统的数据采集及定位设备采用激光跟踪仪测量系统。其中,靶球是最为常用的测量工具,跟踪仪可以对其进行单点测量;由于装配过程涉及多种坐标系,因此需通过测量靶球数据确定各坐标系位姿。

激光跟踪仪确定坐标系原理是:首先测量某坐标系下 3 个靶球位置(不位于同一直线),分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 ;以 P_2 为坐标系原点,向量 $\vec{P_2P_1}$ 为该坐标系 $+X$ 方向 (n_x, n_y, n_z),向量 $\vec{P_2P_1}$ 与向量 $\vec{P_2P_3}$ 叉乘作为坐标系 $+Z$ 方向 (a_x, a_y, a_z),坐标系 $+Z$ 方向与 $+X$ 方向叉乘作为 $+Y$ 方向向量 (o_x, o_y, o_z)^T。因此某坐标系位姿矩阵表示为:

$$[R, P_{BORG}] = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & x_2 \\ n_y & o_y & a_y & y_2 \\ n_z & o_z & a_z & z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2 曲面类零件的夹持方法

该装配方法针对航空航天领域中装配要求精度高、变量较小,小批量的曲面类零件,因此为实现曲面零件定位以及确定零件初始位置,需设计一种专用适配器;同时为有效抓取零件,需设计适应不同零件的末端器。

2.1 装卡定位原理与适配器设计

由于曲面零件形状复杂,其定位难度较高,采用常用定位方式不能有效定位,因此根据装卡定位原理设计一种专用的适配器。

在零件的定位过程中,通常用一个支承点约束工件的一个自由度,用合理设置的 6 个支承点约束工件的 6 个自由度,这就是 6 点定位原理^[7]。由于装配要求曲面类零件需保持平滑的曲面构型,因此采用接触夹紧的方式定位曲面零件更为有效;同时,曲面零件形心位置差别大,且形状复杂,采用过定位约束类型能够更有效地夹紧零件。综上,曲面零件定位方式为零件底面由 4 个定位点限定曲面 Z 方向位移与沿 X 、 Y 方向的转动;4 个侧面分别由 2 个接触点限制其 X 、 Y 方向移动和沿 Z 方向转动。

根据定位原理,对曲面零件适配器进行详细设计,如图 2 所示,适配器由底板、立柱、侧面定位柱以及底面定位柱组成;其中用于定位底面的立柱可上下微调;侧面立柱与零件刚性接触;适配器上设计有靶标孔,用于激光跟踪仪定位其坐标系。

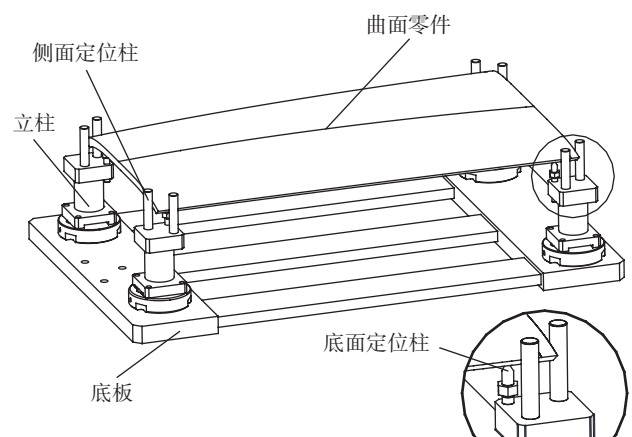


图2 适配器结构图
Fig.2 Structure of the adapter

2.2 末端器设计

末端器作用为拾取和装配曲面类零件,由于零件与夹具刚性接触,因此末端器应有一定柔性,以适应不同曲面的零件。综上,末端器结构如图 3 所示,采用吸盘

结构,吸盘数量为4个,以矩形形状布置;并保证各零件形心与矩形布置的吸盘形心重合。吸盘连接力传感器,通过检测受力大小判断末端器是否与零件充分接触。供气阀通过控制吸盘吸气与放气,从而实现吸取与装配零件。末端靶球用来定位末端器位置。

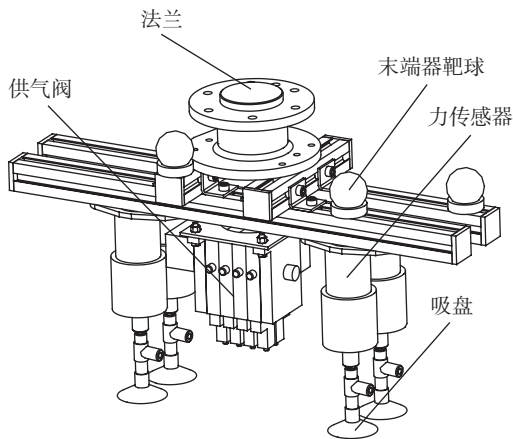


图3 末端器结构图
Fig.3 Structure of the end effector

3 装配路径规划

装配过程的路径规划任务是给定零件初始位置以及装配目标位置,在工作空间内寻找一条从起始位置到目标位置的无碰撞路径。路径规划任务主要分为获取坐标系信息、计算初始以及目标位置位姿信息、计算中间结点、误差补偿过程。其中,初始及终止位姿信息以及中间结点位姿矩阵均为机器人末端法兰在基坐标系下的位姿矩阵。

3.1 坐标转换以及始末位姿计算

在装配过程中,需设定装配系统各部分坐标系及位姿状态,如图4所示, {Base} 表示机器人基坐标系,由机器人内部给定; {Ground} 为地面坐标系,由地面靶球确定,用于激光跟踪仪定位基坐标; {Flange} 为机器人末端法兰坐标系,位姿由机器人内部定义; {Terminal} 为末端器坐标系,由末端器上靶球位置确定; {Fixture} 为适配器坐标系,用于定位曲面零件初始位置; {Target} 为目标位置坐标系,用于定位曲面零件装配位置; {Laser} 为激光跟踪仪坐标系。

在实际装配过程中,由激光跟踪仪系统^[8]测量地面坐标系、夹具坐标系、目标位置坐标系中各靶球,根据3点确定坐标系原理得到上述坐标系相对于激光跟踪仪坐标系的位姿矩阵,即为 ${}_{Laser}^{Ground}T$ 、 ${}_{Laser}^{Fixture}T$ 、 ${}_{Laser}^{Target}T$; 同时,地面相对基坐标 ${}_{Base}^{Ground}T$ 、末端相对法兰盘位姿矩阵 ${}_{Flange}^{Terminal}T$ 、以及抓取点末端器相对夹具位姿矩阵 ${}_{Fixture}^{initial}T$ 和装配点末端器相对于目标坐标系 ${}_{Target}^{final}T$ 均由测量或在设计过程得到;

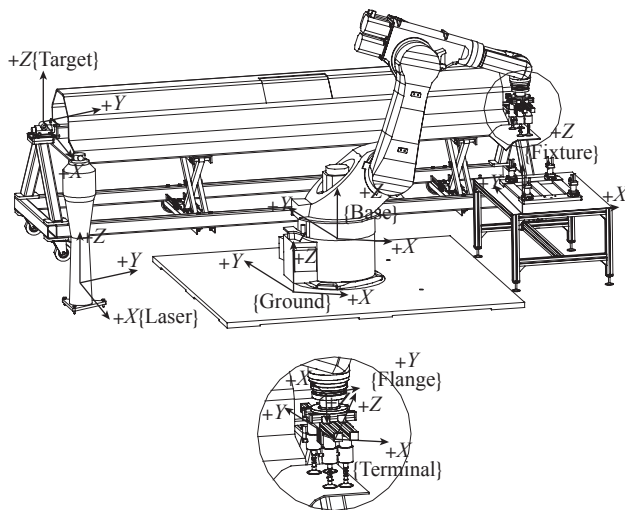


图4 装配系统坐标系的设置

Fig.4 Settings of coordinate systems of the assembly system

因此根据矩阵变换原理得到末端法兰初始抓取及终止装配位置在基坐标系下的位姿矩阵。

$${}_{Base}^{Flange-ini}T = {}_{Base}^{Laser}T \times {}_{Laser}^{Fixture}T \times {}_{Laser}^{initial}T \times ({}_{Flange}^{Terminal}T)^{-1}, \quad (3)$$

$${}_{Base}^{Flange-fin}T = {}_{Base}^{Laser}T \times {}_{Laser}^{Target}T \times {}_{Laser}^{final}T \times ({}_{Flange}^{Terminal}T)^{-1}, \quad (4)$$

$$\text{其中 } {}_{Base}^{Laser}T = {}_{Base}^{Ground}T \times ({}_{Laser}^{Ground}T)^{-1}$$

通过上述计算得到初始以及目标位置位姿信息。

3.2 中间结点计算过程

中间结点的计算过程即通过初始以及目标位置的位姿信息计算出路径结点;定义系统在装配过程中各结点意义, P_1 为初始点, P_2 为抓取过渡点, P_3 为抓取接近点, P_4 为抓取位置点, P_5 为抓取抬起点, P_6 为装配过渡点, P_7 为装配接近点, P_8 为目标位置点, P_9 为装配抬起点。

将路径中各结点设为

$$P_i = \begin{bmatrix} n_x^i & o_x^i & a_x^i & p_x^i \\ n_y^i & o_y^i & a_y^i & p_y^i \\ n_z^i & o_z^i & a_z^i & p_z^i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (i = 1, 2, \dots, 9) \quad (5)$$

路径中其他结点均由 P_1 、 P_4 和 P_8 计算得到,其中初始点 P_1 给定,末端法兰初始位置即为 P_4 点位姿,末端法兰终止位置即为 P_8 点位姿,即

$${}_{Base}^{Flange-ini}T = P_4, {}_{Base}^{Flange-fin}T = P_8 \quad (6)$$

为防止装配过程末端器与夹具或装配目标干涉,抓取接近点 P_3 、抓取抬起点 P_5 、装配接近点 P_7 以及装配抬起点 P_9 均沿曲面零件或目标位置法向抬起相应距离,其中 P_3 、 P_5 分别位于 P_4 的 Z 轴负方向 H_3 、 H_5 处,姿态与 P_4 相同; P_9 在 P_8 的 Z 轴负方向 H_9 处,姿态与 P_8 相同;装配方向随装配要求不同而变化,因此 P_7 在 P_8 的 X、Y、Z 轴 3 个方向均有分量,设分量为 X_7 、 Y_7 、 Z_7 ,因此得到上述 4 点表达式:

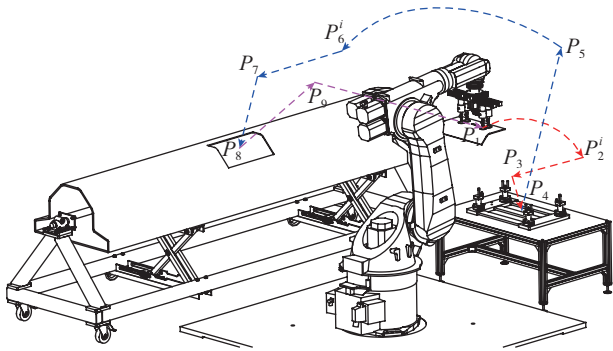


图5 路径结点示意图

Fig.5 Schematic diagram of nodes on the path

$$P_i = \begin{bmatrix} n_x^{p_i} & o_x^{p_i} & a_x^{p_i} & p_x^{p_i} - a_x^{p_i} \times H_i \\ n_y^{p_i} & o_y^{p_i} & a_y^{p_i} & p_y^{p_i} - a_y^{p_i} \times H_i \\ n_z^{p_i} & o_z^{p_i} & a_z^{p_i} & p_z^{p_i} - a_z^{p_i} \times H_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中, $i=3,5$ 时, $j=4$; $i=9$ 时, $j=8$

$$P_i = \begin{bmatrix} n_x^{p_i} & o_x^{p_i} & a_x^{p_i} & p_x^{p_i} + n_x^{p_i} \times X_i + o_x^{p_i} \times Y_i - a_x^{p_i} \times Z_i \\ n_y^{p_i} & o_y^{p_i} & a_y^{p_i} & p_y^{p_i} + n_y^{p_i} \times X_i + o_y^{p_i} \times Y_i - a_y^{p_i} \times Z_i \\ n_z^{p_i} & o_z^{p_i} & a_z^{p_i} & p_z^{p_i} + n_z^{p_i} \times X_i + o_z^{p_i} \times Y_i - a_z^{p_i} \times Z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中, $Z_i > 0$ 且 $i=7, j=8$ 。

为保证曲面零件在装配过程中不与障碍物发生碰撞,且路径平滑过渡,需在抓取接近点 P_3 与装配接近点 P_7 前设定抓取过渡点 P_2 与装配过渡点 P_6 , 过渡点可能有多, 设抓取过渡点与装配过渡点分别有 k_1, k_2 个, 用 $P_2^1, P_2^2, \dots, P_2^{k_1}$ 与 $P_6^1, P_6^2, \dots, P_6^{k_2}$ 表示。

以抓取过程为例, P_1 到 P_3 的旋转矩阵的变化可以由绕某一转轴 K_1 转动某一固定角度 θ_1 来表示。为保证过渡点 P_2 平滑过渡, 每一过渡点的旋转矩阵以上一点为起始姿态, 绕转轴 K_1 转动 $\theta_1/(k_1+1)$ 。同时, 设定抓取过渡点旋转矩阵的转角阈值 θ_Δ , k_1 满足 $\theta' = \theta_1/(k_1+1) < \theta_\Delta$ (k_1 取整)。

设 P_1 相对于 P_3 的旋转矩阵为

$${}^{P_3}R = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}. \quad (9)$$

因此, 上述矩阵的等效转轴 K_1 的分量 k_{1x}, k_{1y}, k_{1z} 与转角 θ_1 可由以下公式得到

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{\sqrt{(o_z - a_y)^2 + (a_x - n_z)^2 + (n_y - o_x)^2}}{(n_x + o_y + a_z - 1)}\right), \quad (10)$$

$$k_{1x} = \frac{o_z - a_y}{2 \sin \theta_1}, k_{1y} = \frac{a_x - n_z}{2 \sin \theta_1}, k_{1z} = \frac{n_y - o_x}{2 \sin \theta_1}, \quad (11)$$

$$\sin \theta_1 = \frac{1}{2} \sqrt{(o_z - a_y)^2 + (a_x - n_z)^2 + (n_y - o_x)^2}, \quad (12)$$

过渡点 $P_2^i (i = 1, 2, \dots, k_1)$ 的旋转矩阵为

$${}^{P_3}R = {}^{P_1}R \times R(K, \theta'), \quad (13)$$

$${}^{P_3}R = {}^{P_{i-1}}R \times R(K, \theta') (i = 2, \dots, k_1), \quad (14)$$

$$R(K, \theta') = \begin{bmatrix} k_x k_x \text{vers} \theta' + c \theta' & k_x k_x \text{vers} \theta' - k_z s \theta' \\ k_x k_y \text{vers} \theta' + k_z s \theta' & k_y k_y \text{vers} \theta' + c \theta' \\ k_x k_z \text{vers} \theta' - k_y s \theta' & k_y k_z \text{vers} \theta' + k_x s \theta' \\ k_z k_x \text{vers} \theta' + k_y s \theta' \\ k_z k_y \text{vers} \theta' - k_x s \theta' \\ k_z k_z \text{vers} \theta' + c \theta' \end{bmatrix}, \quad (15)$$

其中, $s \theta' = \sin \theta', c \theta' = \cos \theta', \text{vers} \theta' = (1 - \cos \theta')$ 。

设坐标系 {Flange} 从 $P_1 \sim P_3$ 的过程中机器人腰关节转动角度为 $\alpha (0^\circ < \alpha < 90^\circ)$, 则

$$\alpha = \left| \arctan \frac{P_y^{P_3}}{P_x^{P_3}} - \arctan \frac{P_y^{P_1}}{P_x^{P_1}} \right|. \quad (16)$$

过渡点 P_2^i 平移向量中的 X 坐标与 Y 坐标由转动角度 α 确定, 求取方法为以 P_1 为起始点, 绕 {Base} 的 Z 轴转动 α' ; Z 坐标由 P_1 与 P_3 的平移向量 Z 坐标所确定, 且沿 $P_1 \sim P_3$ 的 Z 坐标均匀过渡。由此可得:

$$P_x^{P_2^i} = PX \cos \alpha' - PY \sin \alpha', \quad (17)$$

$$P_y^{P_2^i} = PX \sin \alpha' + PY \cos \alpha', \quad (18)$$

$$P_z^{P_2^i} = P_z^{P_1} + \left| \frac{i}{k_1+1} (P_z^{P_3} - P_z^{P_1}) \right| (i = 1, \dots, k_1), \quad (19)$$

$$PX = P_x^{P_1} + \frac{i}{k_1+1} (P_x^{P_3} - P_x^{P_1}), \quad (20)$$

$$PY = P_y^{P_1} + \frac{i}{k_1+1} (P_y^{P_3} - P_y^{P_1}), \quad (21)$$

$$\alpha' = \frac{\alpha \times i}{k_1+1} (i = 1, \dots, k_1), \quad (22)$$

综上, 求得抓取过渡点 P_2^i 的相关参数。同理, 装配过渡点 P_6^i 可通过上述计算方式得到。

3.3 基于激光跟踪仪的位姿补偿

由于机器人系统误差以及坐标系测量误差, 导致机器人沿路径点移动时产生偏差, 因此需要在抓取接近点 P_3 与装配接近点 P_7 位置进行位姿补偿。

补偿原理为: 经计算得到的路径点理论位姿 (P_3 或 P_7) 为 ${}^P_{\text{Base}}T$, 机器人移动至该点, 由于机器人的系统

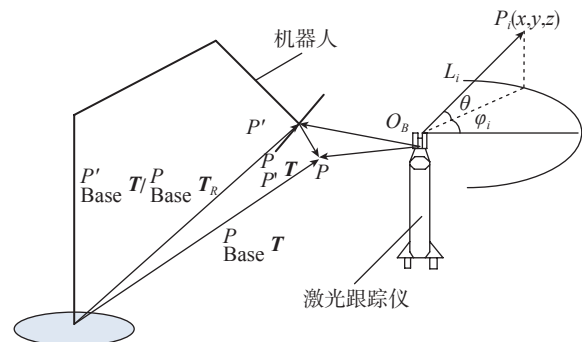


图6 补偿运动原理示意图

Fig.6 Principle diagram of compensation movements

误差,移动后的机器人位姿并未与理论位姿重合,经激光仪测量得到该点为实际路径点 ${}^P_{Base}T$,但此时机器人内部读数显示该点位姿为 ${}^P_{Base}T_R$ (与理论数据一致);理论点与实际点偏差为 ${}^P_{Base}T = {}^P_{Base}T^{-1} \times {}^P_{Base}T$,因此机器人移动至理论点的变换矩阵为 ${}^P_{Base}T_R \times {}^P_{Base}T$;当机器人按上述矩阵移动后,激光仪再次测量新的实际点 ${}^P_{Base}T$,判断实际点与理论点误差,并转换为笛卡尔坐标系参数 $(X_{\Delta_i}, Y_{\Delta_i}, Z_{\Delta_i}, \gamma_{\Delta_i}, \beta_{\Delta_i}, \alpha_{\Delta_i})$,当该误差小于误差阈值 $(X_{\Delta}, Y_{\Delta}, Z_{\Delta}, \gamma_{\Delta}, \beta_{\Delta}, \alpha_{\Delta})$,此时结束补偿过程,否则,继续进行上述补偿运动,直至满足补偿结束条件。

4 装配试验验证

4.1 试验系统介绍

按上述路径规划过程,对装配系统进行实验验证。实验主要记录抓取接近点与装配接近点补偿前后的位姿矩阵,同时记录抓取与装配过程中补偿前后的机器人末端点与理论位置的差异,比较补偿前后位姿的误差,分析补偿原理的可行性。

试验所用机器人 KUKA KR30-3 型串联式工业机器人,重复定位精度为 0.06mm,分辨率为 0.1mm。激光跟踪仪采用 Leica AT901-MR 型,在 2.5mm × 5mm × 10mm 的工作范围内测量精度为 $\pm 10 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m}$,测量工具采用半径为 19.05mm 的靶标。

试验流程为:

- (1) 搭建机器人装配系统,激光仪测量始末位姿;
- (2) 按照路径规划原理计算路径点;(3) 控制机器人沿路径点移动,对曲面零件实施抓取和装配操作,并在该过程中对抓取接近点 P_3 与装配接近点 P_7 进行误差补偿迭代过程;根据装配误差要求将误差补偿阈值 $(X_{\Delta}, Y_{\Delta}, Z_{\Delta}, \gamma_{\Delta}, \beta_{\Delta}, \alpha_{\Delta})$ 设为 $(0.17, 0.17, 0.17, 0.05, 0.05, 0.05)$;
- (4) 机器人完成装配,返回初始位置。

4.2 试验结果

经实验测量,得到抓取接近点与装配接近点补偿前后的位姿矩阵,且补偿循环次数均为一次,误差即满足要求。将补偿前后位姿参数分别与理论位姿作差,计算并比较补偿前后偏差趋势,如表 1、表 2 和表 3 所示。其中,表 1 中抓取及装配过程的理论位姿根据 3.1 节初始及目标位置位姿信息计算过程,按照公式(3)、(4)计算得到,再根据公式(1)计算得到对应的六自由度参数;实际补偿前位姿通过 3.3 节所述补偿原理,由激光跟踪仪测量计算得到机器人法兰相对于基坐标位姿矩阵 ${}^P_{Base}T$,根据公式(1)计算得到六自由度参数;补偿后位姿即为 3.3 节所述 ${}^P_{Base}T_R \times {}^P_{Base}T$ 计算而得的六自由度参数。

4.3 实验结果分析与讨论

误差产生原因主要是机器人系统动作时的行程误差,以及设计过程已经确定的固定变换矩阵误差。机器人行程误差产生原因主要是装配系统安装定位及环境条件产生的系统误差、重力及坐标系比例尺偏差等因素引起的系统误差。经过补偿过程,能够将机器人行程误差中的系统误差消除,从而提高机器人的装配精度。

由表 1 与表 2 可以判断,无论抓取过程还是装配过程,经过补偿后各方向的位置误差均在 40 μm 以下,且角度误差均在 0.01° 以下。

由表 3 可知抓取与粘贴过程补偿前的空间位置误差分别为 0.7158mm、5.553mm;补偿后的空间位置误差分别为 0.0374mm、0.0447mm;该误差小于装配要求的位置误差 0.3mm;由于激光跟踪仪的测量误差是补偿后误差的影响因素之一,因此激光跟踪仪测量误差应小于补偿后误差,激光跟踪仪测量精度为 $\pm 10 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m}$,该试验激光仪距离机器人不超过 5m,由此可知,表 3 中补偿后的空间位置误差大于激光跟踪仪的测量误差,因此本试验所得补偿后的误差数据是有效的。

值得注意的是,装配过程补偿前空间位置误差过大,经分析,产生原因是机器人的行程误差以及末端器

表1 抓取过程末端位姿参数及误差表

	理论位姿	补偿前位姿	补偿前位姿误差	补偿后位姿	补偿后位姿误差
X/mm	1648.09	1648.68	0.59	1648.12	0.03
Y/mm	551.21	551.32	0.11	551.20	0.01
Z/mm	879.16	878.77	0.39	879.14	0.02
$\gamma/^\circ$	159.41	159.50	0.09	159.42	0.01
$\beta/^\circ$	-8.34	-8.19	0.15	-8.33	0.01
$\alpha/^\circ$	179.35	179.18	0.17	179.34	0.01

表2 装配过程末端位姿参数及误差表

	理论位姿	补偿前位姿	补偿前位姿误差	补偿后位姿	补偿后位姿误差
X/mm	798.16	799.61	1.45	798.14	0.02
Y/mm	-1247.91	-1248.99	1.08	-1247.95	0.04
Z/mm	890.44	885.19	5.25	890.44	0.00
$\gamma/^\circ$	104.64	104.75	0.11	104.65	0.01
$\beta/^\circ$	-8.55	-8.55	0.00	-8.54	0.01
$\alpha/^\circ$	179.33	179.08	0.25	179.32	0.01

表3 补偿前后机器人末端空间位置误差表

实验阶段	抓取过程		装配过程	
	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
空间位置误差/mm	0.7158	0.0374	5.553	0.0447

(下转第 154 页)

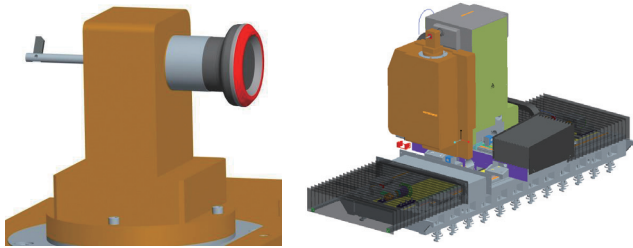


图6 前起交点精加工机床

Fig.6 Finish machining machine tool for nose landing gear intersection point

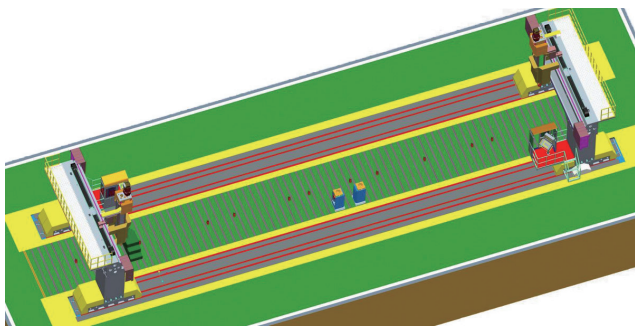


图7 机身、机翼精加工机床

Fig.7 Finish machining machine tool for fuselage and wing

协调依据、零件制造时的工艺容差分配、精加工工艺流程设置等的合理性,并对相应的工艺进行再次修正和补偿,形成最终的合理工艺,实现多机型从模拟量加工制造到数字化加工制造的技术突破和跨越。

5 结束语

通过数字化精加工生产线的实施,可以为公司数字化制造、智能化制造奠定一定的技术基础,拉动现有模拟量机型的数字化制造和智能化制造能力的转化和提升,解决生产瓶颈,同时数字化精加工适应多机型交叉进行精加工,能够保障新机研制工作并行开展,适应未来科研生产的发展需要。数字化交点精加工是一项复杂的系统工程,要在传统模拟量飞机上实现数字化精加工,还有一些关键问题有待验证和解决,如全机数字化建模,模拟量协调的工艺装备向数字化工艺装备的转化等问题。

参考文献

- [1] 高红. 飞机大部件结合交点精加工. 航空制造技术, 2010(23):27.
- [2] 唐水龙, 卢鹤. 飞机装配数字化协调与模拟量协调的对比分析. 航空制造技术, 2012(10):26.
- [3] 程宝蓁. 飞机制造协调准确度与容差分配. 北京: 航空工业出版社, 1987.

(责编 玲犀)

(上接第 149 页)

重心位置变化过大导致的固定矩阵 $T_{\text{Target}}^{\text{final}}$ 产生的偏差。

该试验通过有更高定位精度的激光跟踪仪对装配系统进行标定和补偿,从测量结果上可以推断测量及补偿原理有效地消除了机器人的行程误差,提高了装配精度。由此可以推断,补偿过程明显降低了装配系统误差,证明补偿原理的可行性,且补偿循环次数均为一次,补偿效率高。

值得注意的是,表 3 中的空间位置误差 0.0374mm 以及 0.0447mm 并不是绝对误差,由于 3.1 节所述地面相对基坐标系矩阵、末端相对法兰盘位姿矩阵等由设计过程得到的矩阵在本次试验中均由激光跟踪仪标定,由此计算所得的理论位姿包含了激光仪的测量误差,因此,补偿过程中的空间位置误差不能反映绝对误差。

由此得出结论,该机器人系统装配操作有一定实用性,路径规划中的补偿过程满足可行性要求,可补偿机器人的行程误差,机器人补偿误差符合规定误差要求,可一定程度提高装配的精度。

5 结论

针对传统装配方法效率较低以及柔性装配定位困难的问题,提出一种利用工业机器人对装配要求较高,小批量的曲面类零件实现装配的方法。装配过程的数据采集采用激光跟踪仪测量系统,实现装配过程的测量定位;并且对具有上述特点的曲面类零件提出一种有效的定位夹紧方式。同时对装配方法的路径规划做了详细分析论述,并通过试验对其进行验证,结果表明该方法经过补偿装配精度提高,且效率较高,该路径规划方法有一定实用性装配方法可行有效。

参考文献

- [1] 牟鲁西. 复杂曲面零件在机测量关键技术研究与应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [2] 程耀楠, 安硕, 张悦, 等. 航空发动机复杂曲面零件数控加工刀具轨迹规划研究分析. 哈尔滨理工大学学报, 2013, 18(5):30-36.
- [3] 王田苗, 陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略. 机械工程学报, 2014, 50(9):1-13.
- [4] 张楠, 汤军社, 马刚. 数字化飞机钣金件加工定位用柔性夹具的设计. 中国制造业信息化, 2010, 39(1):41-44.
- [5] 翟婷婷, 张凤英, 韩晓光. 曲面薄壁零件柔性装配定位系统设计. 航空制造技术, 2014(22):27-29,42.
- [6] 熊有伦, 丁汉, 刘恩沧. 机器人学. 北京: 机械工业出版社, 1993:54-59.
- [7] 明发秀. 六点定位原理在加工尺寸调整中的应用. 装备制造技术, 2013(7):191-193.
- [8] 张博, 魏振忠, 张广军. 机器人坐标系与激光跟踪仪坐标系的快速转换方法. 仪器仪表学报, 2010, 31(9):1986-1990.

(责编 叶枫)