

基于工业机器人的机身系统件定位方法研究

Research on Positioning Method of Fuselage System Component Based on Industrial Robot

中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司 刘 春 余立强

[摘要] 针对传统系统件安装工艺采用固定式定位工装导致装配系统开敞性差、柔性程度低的问题,提出了基于工业机器人的机身系统件定位方法,确定了系统件辅助定位工装的标定方法,基于奇异值分解法和位姿等价变换原理确定了工业机器人的位姿调整算法,最后通过系统件辅助定位工装定位试验得出了系统件的定位精度。

关键词: 工业机器人 系统件 辅助定位工装 位姿调整

[ABSTRACT] Aiming at the problem that traditional system component's installation technology which uses stationary positioning jig leads to poor accessibility and flexibility, positioning methods for system components of fuselage based on industrial robot is put forward. The demarcating method of auxiliary positioning jig for system component is confirmed. The posture adjustment arithmetic of industrial robot is determined based on SVD(singular value decomposition) and posture equivalence transformation theory. Finally the positioning accuracy of system component is got through positioning experiment.

Keywords: Industrial robot System component Auxiliary positioning jig Posture adjustment

在飞机部件装配或总装配中,包括一些零部件(如鸭翼支座、千斤顶支座)及一些小型工艺件(如校靶组件等)需要精确安装到飞机大部件或整机上,这些零部件和工艺件称为系统件。在传统工艺中,为完成系统件安装工作,需在装配系统中针对不同系统件设置专门的固定式定位工装,增加了整个系统的复杂程度,对装配系统的开敞性造成了影响。机器人位置精度、负载能力的提高,以及离线编程工具、实时仿真技术、软件技术的发展,使得机器人可作为一种高效的平台,配合不同的终端执行器和测量等子系统,构成各种不同的机器人柔性自动化系统^[1]。且机器人体积小、运动灵活,配以专用的系统件辅助定位工装和机器人导轨,构成机器人辅助的系统件安装定位系统,一台机器人即可完成多个系统件的辅助安装工作,可极大地降低整个装配系统的复杂

程度,有效地释放装配操作空间。

本文以飞机大部件数字化对接装配系统为基础,设计了一套基于工业机器人的系统件定位系统,该系统采用工业机器人取代传统固定式工装,并开发出一套机器人辅助装配软件,完成系统件的安装定位工作,采用激光跟踪仪对系统件的位姿进行测量,定位精度满足系统件装配要求。

1 基于工业机器人的系统件定位系统功能分析

1.1 系统件安装特性分析

系统件均为不规则的几何结构体,且沿飞机航向分布范围较广;安装的主要任务是以系统件为制孔模板,实现系统件安装部位的制孔,因此,需实现系统件的准确定位。

1.2 系统组成

根据系统件安装特性,确定机器人辅助系统件安装定位系统主要包括工业机器人系统、系统件辅助定位工装、机器人导轨、激光跟踪仪和 workstation,其中:机器人导轨是为了实现机器人沿飞机航向移动,满足不同机型不同方位系统件的安装要求;系统件辅助定位工装实现系统件与工业机器人的过渡连接;激光跟踪仪和 workstation 实

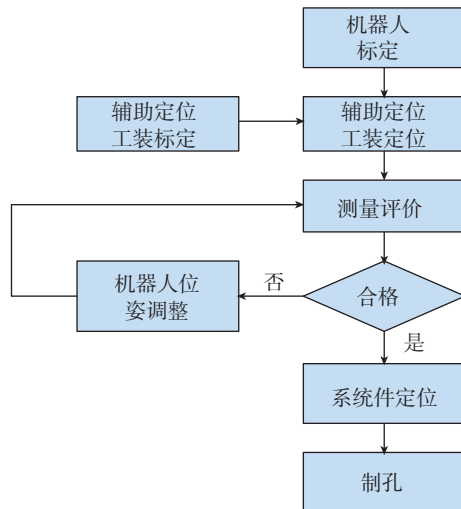


图1 系统件安装流程图

Fig.1 Flow chart of system component's installation

现系统件与辅助定位工装的测量及定位准确度评价^[2]。

由于采用专用接头固定连接,可将系统件与系统件辅助定位工装视为一个刚体,当系统件辅助定位工装到达理论位姿后,可以确认系统件也到达理论位姿,系统件的位姿评价转化为系统件辅助定位工装的位姿评价。因此,确定系统件的安装定位流程如图1所示。

2 系统件辅助定位工装标定方法

系统件辅助定位工装标定的任务是依据工装图纸确定辅助工装在装配坐标系中的理论位姿,基于后续实测位姿与理论位姿的差值进行机器人位姿调整从而实现辅助定位工装的准确定位。

在激光跟踪仪的测量过程中,难以直接测量系统件辅助定位工装本身来获得其实际位姿,而刚体上3个不共线的点可以唯一确定其空间位姿^[3],因此可以借助于辅助定位工装上的辅助定位点实现间接测量。如图1所示,系统件辅助定位工装与机器人快换法兰固连,可将辅助定位工装与机器人视为刚体,由于系统件数量多且形状各异,可将辅助定位点的测量转换为机器人快换法兰上的TCP点测量,简化测量过程且实现测量点的统一。综上所述,可将系统件辅助定位工装标定的任务定义为:确定TCP点在装配坐标系中的理论位置 ${}^A P_{TCP}$ 。

根据系统件辅助工装图纸,存在2种情况:(1)图纸给定3个辅助定位点在飞机坐标系下的理论位置 ${}^P P_i$;(2)给定系统件辅助定位工装的外形基准在飞机坐标系下WL(竖直方向)、BL(翼展方向)、STA(航向)值。

2.1 根据辅助定位点信息确定TCP点理论位置

在机器人任意姿态下,通过激光跟踪仪同时测定3个辅助定位点和3个TCP点在装配坐标系下的测量值 ${}^A P'_i$ 和 ${}^A P'_{TCP}$ 。

已知辅助定位点在飞机坐标系下理论值 ${}^P P_i$ 和飞机坐标系P在装配坐标系A下的位置 ${}^A P_P$,可计算出辅助定位点在装配坐标系理论值 ${}^A P_i = {}^A P_P \cdot {}^P P_i$ 。

$$\begin{bmatrix} {}^A P'_i \\ {}^A P'_{TCP} \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{变换A}} \begin{bmatrix} {}^A P_i \\ {}^A P_{TCP} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, $\begin{bmatrix} {}^A P'_i \\ {}^A P'_{TCP} \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} {}^A P_i \\ {}^A P_{TCP} \end{bmatrix}$ 可视为 6×3 矩阵,上部

$\begin{bmatrix} {}^A P'_i \\ {}^A P'_{TCP} \end{bmatrix}$ 矩阵 3×3 通过矩阵 ${}^A P'_i$ 变换A后成为 ${}^A P_i$,而 ${}^A P'_i$ 和 ${}^A P'_i$ 已知,可计算矩阵变换A的变换过程;同理,将下部 3×3 矩阵 ${}^A P'_{TCP}$ 进行矩阵变换A,可得到TCP点在装配坐标系中的理论位置 ${}^A P_{TCP}$ 。

2.2 根据外形基准信息确定TCP点理论位置

在机器人任意姿态下,测量系统件辅助定位工装上的点以及TCP点,通过所测点拟合所需基准面、法线,

并选定合适点作为原点,可构建辅助定位工装局部坐标系L;根据拟合点与TCP点的相对位置关系,确定TCP点在局部坐标系L下的位置 ${}^L P_{TCP}$;根据给定的定位基准WL、BL、STA值,可以将局部坐标系L的方向设定为与飞机坐标系方向一致,通过简单的平移变换可得出局部坐标系L在飞机坐标系P下的值 ${}^P P_L$ 。飞机坐标系P在装配坐标系A下的位置 ${}^A P_P$ 已知,综上可得:

$${}^A P_{TCP} = {}^A P_P \cdot {}^P P_L \cdot {}^L P_{TCP} \quad (2)$$

3 位姿调整算法

由于机器人自身定位误差和坐标系标定误差的存在,初次定位难以达到系统件的定位要求:位置精度0.15mm,因此系统件初次安装之后需要进行多次位姿调整,通过激光跟踪仪对TCP点的实际位置进行测量,将TCP点实际值与理论值进行比较,误差通过测量系统反馈给机器人系统,并使机器人根据反馈值进行自动调整以减小误差。

3.1 位姿调整算法流程

(1)采用激光跟踪仪测量TCP点在装配坐标系A下的实际位置 ${}^A P_{TCP}'$;

(2)根据TCP点的理论位置 ${}^A P_{TCP}$ 和实际位置 ${}^A P_{TCP}'$,利用奇异分解法(SVD)求解装配坐标系A的位姿调整量;

(3)从机器人控制器中读取当前状态工具坐标系T在装配坐标系A下的位姿 ${}^A P_T$,根据位姿调整的等价变换原理 $\Delta \cdot {}^A P_T = {}^A P_T \cdot {}^T \Delta$,得到工具坐标系的位姿调整量 ${}^T \Delta$:

$${}^T \Delta = \text{inv}({}^A P_T) \cdot \Delta \cdot {}^A P_T \quad (3)$$

(4)由工件坐标系的位姿调整量 ${}^T \Delta$,驱动机器人在工具坐标系下进行位姿调整。

3.2 奇异值分解法求解位姿调整量

对于空间两组点 p_i 和 p'_i ($i=1,2,\dots,N$),它们之间关系可以由 $p'_i = R p_i + T + N_i$ 来表示,其中R和T是所需位姿调整量 Δ ,R表示余弦矩阵,T表示平移向量, N_i 表示误差向量。

根据距离最小化来设定目标函数如式(4):

$$\sum_{i=1}^N \|p'_i - (R p_i + T)\|^2, \quad (4)$$

该问题可以描述为:求解余弦矩阵R和平移向量T,使得目标函数达到最小值。为求解该问题,首先利用奇异值分解法求解R,然后对T进行求解,具体过程如下所示:

(1)由点组 p_i 和 p'_i 计算 p 和 p' 以及 q_i 和 q'_i ,其中,

$$p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i, p' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i'$$

$$q_i = p_i - p, q_i' = p_i' - p'$$

$$(2) \text{ 计算矩阵 } H = \sum_{i=1}^N q_i q_i^T$$

$$(3) \text{ SVD 分解 } H, H = U \Lambda V^T$$

$$(4) \text{ 计算 } X = V U^T$$

(5) 计算 X 的行列式, 若 $\det(x) = +1$, 则 $R = X$; 若 $\det(x) = -1$, 则 X 是反射变换, 令 $V' = [v_1, v_2, -v_3]$, 则 $R = V' U^T$;

$$(6) \text{ 根据 } T = p' - Rp \text{ 求解平移向量 } T。$$

完成 R 和 T 的求解, 即可得到 p_i 到达 p_i' 所需的位姿调整量 Δ 。假定点组 p_i 确定一个刚体, 该刚体上固连有坐标系 T_1 ; 点组 p_i' 确定另一刚体, 该刚体上固连有坐标系 T_2 , 则为使点组 p_i 达到 p_i' , 对坐标系 T_1 进行位姿调整即可, 位姿调整量为 Δ 。

3.3 位姿等价变换原理

给定机器人某位姿 ${}^{BASE}T_{TOOL}$, 要求机器人运动到另一位姿 ${}^{BASE}T'_{TOOL}$, 机器人位姿调整可以采用 2 种方法。

(1) 在 $BASE$ 坐标系中调整。

由于 $BASE$ 坐标系为定坐标系, 则:

$${}^{BASE}T'_{TOOL} = {}^{BASE}T_{TOOL} + dT = \Delta \cdot {}^{BASE}T_{TOOL} \quad (5)$$

其中, Δ 为 $BASE$ 坐标系中机器人位姿调整量,

$$\Delta = Trans(d_x, d_y, d_z) Rot(Z, \delta_z) Rot(Y, \delta_y) Rot(X, \delta_x) \quad (6)$$

(2) 在 $TOOL$ 坐标系中调整。

由于 $TOOL$ 坐标系为动坐标系, 则:

$${}^{BASE}T'_{TOOL} = {}^{BASE}T_{TOOL} + dT' = {}^{BASE}T_{TOOL} \cdot {}^T\Delta \quad (7)$$

其中, ${}^T\Delta$ 为 $TOOL$ 坐标系中机器人位姿调整量,

$${}^T\Delta = Trans(d'_x, d'_y, d'_z) Rot(Z, \delta'_z) Rot(Y, \delta'_y) Rot(X, \delta'_x) \quad (8)$$

由于 2 种位姿调整方法可达到相同结果, 因此:

$$\Delta \cdot {}^{BASE}T_{TOOL} = {}^{BASE}T_{TOOL} \cdot {}^T\Delta \quad (9)$$

4 系统件辅助定位工装定位试验

基于位姿调整算法, 选取某系统件辅助定位工装进行了定位试验。如图 2 所示为机器人辅助装配软件中的位姿调整计算模块, 其中理论数据为系统件辅助定位工装标定数据, 即 TCP 点在装配坐标系中的理论位置, 测量值为机器人初次定位激光跟踪仪测量数据, 对比偏差为理论数据与测量值的差值, 预留偏移量是由机器人沿机器人导轨运动至目标位置。机器人初次和第二次位姿调整后的测量数据分别如图 3 和图 4 所示。

从定位试验测量数据图可知, 机器人在初次位姿调

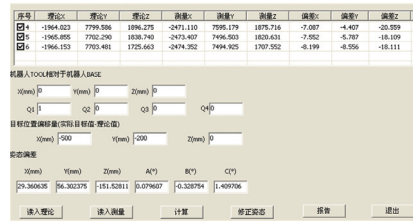


图2 机器人初次定位测量数据图

Fig.2 Measure data of the first positioning of robot



图3 机器人初次位姿调整后测量数据图

Fig.3 Measure data after the first posture adjustment of robot



图4 机器人第二次位姿调整后测量数据图

Fig.4 Measure data after the second posture adjustment of robot

整后, 测量值与标定理论值 x, y, z 各向偏差即可调整至 0.4mm; 基于位姿调整算法, 机器人经过 2 次位姿调整, 即可将系统件辅助定位工装定位至合理偏差 0.15mm 以内; 继续进行位姿调整, 辅助定位工装的理论值与实测值偏差始终在 $\pm 0.15\text{mm}$ 内循环跳动, 可知, 基于工业机器人位姿调整算法其位姿调整不确定度为 $\pm 0.15\text{mm}$, 系统件定位精度可达 0.15mm。

5 结束语

本文提出了基于工业机器人的机身系统件定位方法, 确定了系统件辅助定位工装的标定方法, 并基于位姿等价变换原理和奇异值分解法提出了工业机器人的位姿调整算法, 通过系统件辅助定位工装定位试验验证了位姿调整算法的可行性, 并确定了基于工业机器人的机身系统件定位精度可达 0.1mm, 满足系统件装配定位精度要求。

参考文献

[1] 曹国顺. 工业机器人精确冲孔试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
 [2] 余慈君. 飞机数字化装配精度场的若干关键技术及应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
 [3] 李定坤, 叶声华, 任永杰, 等. 机器人定位精度标定技术的研究. 计量学报, 2007, 28(3): 224-227.

(责编 亿霖)