

机器人辅助飞机装配制孔中位姿精度补偿技术

曲巍威,董辉跃*,柯映林

浙江大学 机械工程学系,浙江 杭州 310027

摘要:在飞机自动化装配中,机器人制孔技术由于其高度柔性和相对低成本而倍受关注。然而,机器人本身的动、静态误差及制孔过程大量坐标系标定和坐标转换会引起难以补偿的残留误差,为提高机器人制孔的位置和姿态精度,构建一种基于激光跟踪仪闭环反馈的机器人辅助飞机装配制孔系统。本文首先论述应用激光跟踪仪建立系统中关键坐标系的方法,并分析了机器人制孔过程中残留误差的构成因素。然后通过机器人末端制孔工具在加工位置处的理论位姿与实际位姿匹配运算,为修正机器人制孔过程中由机器人动静误差、机械加工、坐标转换算法、测量仪器等因素引起的残留误差提供依据,以提高机器人制孔系统的相对定位精度。并通过仿真实验验证上述算法修正残留误差的可行性。最后,对壁板类零件进行实际加工试验。试验表明,针对具体的制孔系统和对象,采用激光跟踪仪闭环反馈补偿后,可将机器人末端工具的相对位置精度、角度精度分别提高至 ± 0.2 mm和 $\pm 1''$ 以内。这种技术有效抑制了制孔过程中由于机械加工、坐标转换算法、测量仪器等复杂组合因素所带来的残留误差,满足飞机装配中法向制孔的精度要求。

关键词:工业机器人;飞机装配;高精度制孔;闭环反馈;激光测量;位姿补偿;坐标转换

中图分类号: V262.4; TP242.2 **文献标识码:** A

近年来,机器人以其高度柔性化和低成本等优势在飞机数字化装配领域很快引起了关注。以机器人制孔取代传统手工操作将极大地提高制孔质量、效率,并能将工人从单调、恶劣的工作环境中解放出来。事实上,在空客和波音公司,成功应用机器人技术解决飞机零部件钻铆的报道已屡见不鲜^[1-2]。文献[3]以机翼制孔为例,首先总结了传统手工制孔的弊端,并对人与机器人共同参与的制孔流程进行论述,根据不同的分工分析了其中的人为误差、机器人误差及潜在的不稳定因素,最后给出了相应的改进措施。中国有关机器人制孔技术的研究起步相对较晚,文献[4]和文献[5]分别描述了柔性导轨自动化制孔系统和典型机器人制孔系统的组成、工作流程、关键设备及技术。

文献[6]和文献[7]基于6自由度工业机器人,通过增加第7附加轴,拓宽了机器人制孔的工作范围;通过快换末端执行器,实现了制孔、镗窝和插钉。在飞机装配中,由于制孔精度和连接质量直接决定飞机的使用寿命,因此对制孔质量和精度都提出了非常高的要求^[8]。资料显示,国外机器人制孔系统位置精度已在 ± 0.2 mm以内^[9]。而中国欲在飞机装配领域推广机器人制孔技术,则必须解决制孔质量和精度问题。即:除了考虑机器人本身的精度和负载能力外,还必须十分关注整个机器人制孔系统的定位精度和制孔加工过程中力控制及刀具状态检测等问题。

为增强机器人系统的定位及加工性能,各种类型的传感器被引入,如视觉传感器、力/扭矩

收稿日期:2011-01-10;退修日期:2011-03-07;录用日期:2011-03-23;网络出版时间:2011-07-27 09:07

网络出版地址:www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110727.0907.001.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20110727.0907.001

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2010QNA4024)

* 通讯作者. Tel.: 0571-87953929 E-mail: donghuiyue@zju.edu.cn

引用格式:曲巍威,董辉跃,柯映林. 机器人辅助飞机装配制孔中位姿精度补偿技术[J]. 航空学报, 2011, 32(10): 1951-1960. Qu Weiwei, Dong Huiyue, Ke Yinglin. Pose accuracy compensation technology in robot-aided aircraft assembly drilling process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(10): 1951-1960.

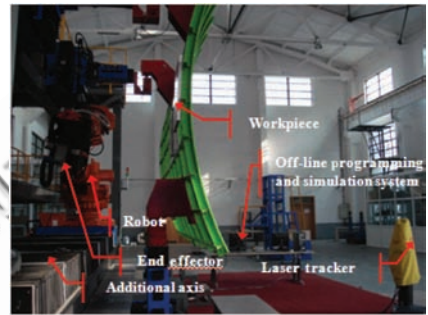
传感器等。将视觉传感器获取的环境信息、加工位置信息上传至机器人控制器,通过机器人手眼标定算法,优化机器人关节配置并提高机器人定位精度^[10-11]。文献[12]应用 Leica 激光跟踪仪测量技术直接对机器人运动位姿进行检测和补偿,极大地提高机器人的运动精度。文献[13]通过在机器人末端执行器上围绕工具均布 3 个触角,应用力/扭矩传感器采集触角与工件的压力,可以检测刀具与工件的垂直度,防止刀具在加工过程中沿工件滑动,提高制孔质量及位置精度。此外,在机器人高速加工任务中,由连杆柔性引起的弹性变形及振颤也将对加工精度产生影响。文献[14]采用视觉传感器检测单一柔性臂的变形及振颤,并反馈给机器人控制器进行补偿,从定位点及轨迹跟踪试验可以证明,该控制策略可有效地增强柔性机器人的定位精度。文献[15]则全面、细致地论述了制孔过程中刀具磨损检测技术(包括信号分析、信号诊断)及故障诊断技术等。

考虑激光跟踪仪在飞机装配中的广泛应用,本文在文献[12]基础上,比较系统地分析、研究了机器人制孔位置精度的影响因素及补偿方法,通过实物加工试验对相关补偿原理进行验证,证明所搭建的基于激光跟踪仪闭环反馈机器人制孔系统可极大地提高机器人的定位精度,改善加工质量,算法简单且容易实现。

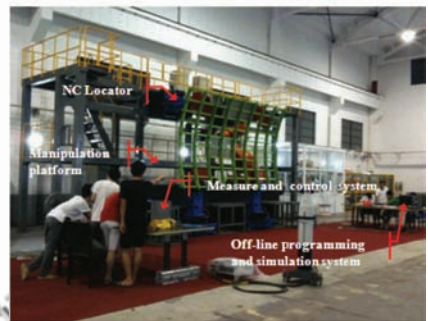
1 机器人辅助飞机装配制孔系统

近年来,随着工业机器人技术的快速发展,在定位精度、负载能力、可编程性、仿真模拟及应用可靠性等方面取得了长足的进步,广泛应用于汽车焊接、产品装配、恶劣环境加工等领域。选择机器人作为飞机装配自动化制孔平台的优点,除了其柔性、相对低成本和技术成熟可靠外,还有一个明显的优势在于可编程性。典型的机器人辅助飞机装配制孔系统主要包括工业机器人、附加外轴(移动平台)、末端执行器(也称之为工具,一般通过快换法兰与机器人端部关节连接)、离线编程及仿真软件系统与激光测量系统等,如图 1 所示。其中离线编程系统是实现机器人自动化制孔的关键,其核心是基于产品(工件)模型进行机器人制孔程序的编制。首先,自动抽取制孔加工工艺信

息,包括孔径、位置、法向、连接特征和公差等级等。然后,根据制孔工艺流程,有序生成制孔加工的中性文件。最后,根据产品的基本几何构型特征和机器人制孔系统的硬件结构及布局,经过坐标协调变换、优化生成制孔加工文件。一旦制孔加工文件通过仿真和干涉检查分析,就完成了产品制孔加工的准备工作的。



(a)



(b)

图 1 机器人辅助飞机装配制孔系统

Fig. 1 Robot-aided aircraft assembly drilling system

在未引入激光闭环反馈之前,由上位机向机器人制孔系统的控制器发送运动指令,驱动机器人各关节旋转相应角度,并通过控制相关附加外轴使机器人工具达到加工所要求的目标位姿,刀具进给完成制孔操作。然而,由于系统中各种动、静态误差的存在,机器人工具并不能精确达到加工位姿。因此,一般需要借助外部测量系统在机器人工具与工件之间建立联系,构成闭环系统对机器人工具的位姿偏差进行测量和补偿,基本原理如图 2 所示。

在图 2 中,将工件模型上抽取的信息及机器人工具坐标系分别通过工件坐标系和机器人 Base 坐标系变换到世界坐标系下,进一步可由激光跟踪仪在世界坐标系下考察机器人工具的位姿偏差,并指导机器人进行位姿补偿。现场操作中

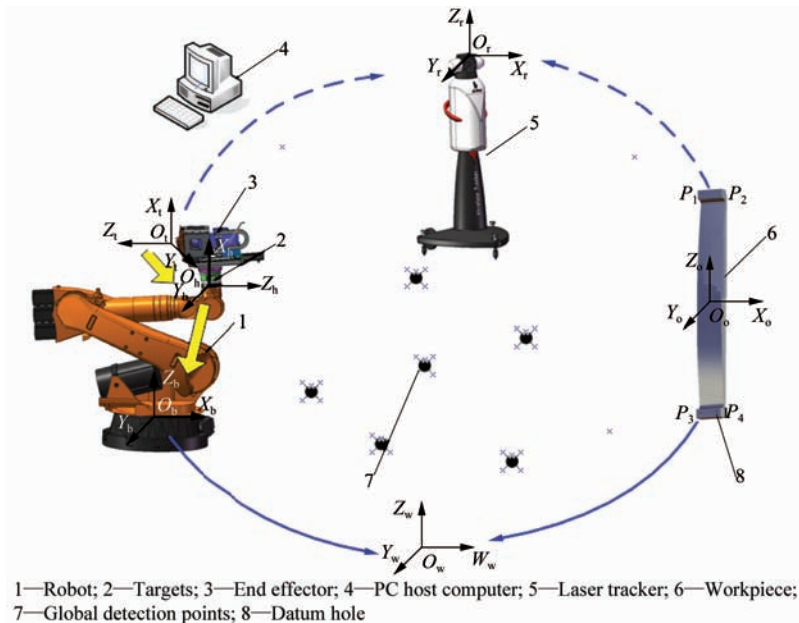


图2 激光跟踪仪闭环反馈原理图

Fig. 2 Principle of laser tracker closed-loop feedback control

需为该闭环系统设置3类靶标点:①现场公共观测点,用于构建世界坐标系及转站操作,其数量及分布方式由现场规模及工装复杂程度而定,原则是覆盖整个测量空间并且所依附的设备需结构稳定、刚度可靠,本文将其设置在图1所示的操作台框架上。②机器人末端的靶标点,用于描述机器人工具位姿并可作为中间数据推导获得其他相关坐标系,如机器人Base坐标系、工具坐标系等。③工件上的靶标点,安装在工件基准孔上,用于将模型信息转至现场坐标系下。

2 坐标系的标定与统一

在机器人辅助飞机装配制孔系统中,涉及大量坐标系建立及坐标关系转换。针对图1所示机器人制孔系统,欲进行机器人程序的编制,首先应完成世界坐标系、机器人Base坐标系、工具坐标系和工件坐标系的建立工作。文献[16]和文献[17]给出了机器人加工系统各坐标系建立的方法,本节对系统中涉及的工具坐标系及工件坐标系创建方法进行论述和分析。

2.1 工具坐标系建立

工具坐标系用于定义机器人刀具相对于机器人手腕坐标系的位置和姿态。一般来说,任何一

个换刀操作或刀具参数的改变,就需要重新建立工具坐标系,不能迅速响应任务变化,并极有可能造成加工安全隐患。本文提出一种在刀具方向不变的前提下快速建立工具坐标系的方法。其基本思路为:将一个经过校准的标准圆柱体安装在机器人末端执行器上,如钻孔工具的刀柄上,圆柱轴线即为刀具轴线方向。刀轴方向固定不变,由钻孔工具的轴向保证。以某刀长距离 l 建立初始工具坐标系,则刀长改变时,只需将初始坐标系沿刀具方向偏移相应距离即可。

2.1.1 刀具坐标系在世界坐标系中的位姿 wT_t

(1) 刀具在世界坐标系中的位置

在图1所示的机器人制孔系统中,假定世界坐标系的建立及圆柱伸出刀柄距离 l 的标定工作均已完成。令机器人达到空间某姿态使得激光跟踪仪方便对安装在其末端执行器上的标准圆柱体进行测量。将激光跟踪仪转站至世界坐标系后,分别对圆柱体外表面及端面进行测量拟合,得到刀具轴线及其与端面的交点,该交点即为刀长为 l 时刀具坐标系在世界坐标系的原点。对某次试验而言,当 $l=50\text{ mm}$ 时,刀具轴线矢量为 $(0.876\ 59, -0.481\ 23, -0.000\ 814\ 3)$,相应初始刀具坐标系的原点为 $(-313.395\ 453\ 5,$

-1685.324, 0.152 657 395)。

(2) 刀具在世界坐标系中的姿态

以刀具轴线方向作为刀具坐标系在世界坐标系下的 Z 轴, X 、 Y 方向可以任意选定。本文中, 取靶标法兰上 4 个靶标点所在平面的法向方向近似作为刀具坐标系 X 向, 记为 X_1 , 即

$$\begin{cases} Z = [0.876\ 59 & -0.481\ 23 & -0.000\ 814\ 3] \\ X_1 = [0.038\ 435 & 0.071\ 335 & 0.996\ 712] \end{cases}$$

刀具坐标系 Y 向坐标轴为 Z 与 X_1 的叉乘, 即

$${}^w T_{t_0} = \begin{bmatrix} 0.039\ 704 & -0.479\ 589 & 0.876\ 590\ 0 & -313.395\ 453 \\ 0.070\ 637 & -0.873\ 739 & -0.481\ 230\ 0 & -1\ 685.324\ 000 \\ 0.996\ 703 & 0.081\ 027 & -0.000\ 814\ 3 & 0.152\ 657\ 000 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^w T_t = \begin{bmatrix} 0.039\ 704 & -0.479\ 589 & 0.876\ 590\ 0 & -313.395\ 453 + 0.876\ 59 \times (L - l) \\ 0.070\ 637 & -0.873\ 739 & -0.481\ 230\ 0 & -1\ 685.324 + (-0.481\ 23) \times (L - l) \\ 0.996\ 703 & 0.081\ 027 & -0.000\ 814\ 3 & 0.152\ 657 + (-0.000\ 814\ 3) \times (L - l) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.1.2 刀具坐标系到手腕坐标系的变换

工具坐标系的建立即是确定刀具坐标系到机器人手腕坐标系的变换矩阵, 可由刀具与世界坐标系及手腕与世界坐标系的关系进一步获得。用公式描述为

$$\begin{cases} {}^w T_h {}^h T_t = {}^w T_t \\ {}^h T_t = ({}^w T_h)^{-1} {}^w T_t \end{cases} \quad (3)$$

式中: ${}^w T_h$ 为手腕坐标系到世界坐标系的变换矩阵; ${}^w T_t$ 为 2.1.1 节所求的刀具坐标系到世界坐标系的变换矩阵; ${}^h T_t$ 为待求的工具坐标系。其中 ${}^w T_h$ 关系采用如下方法获取: 保持 2.1.1 节机器人位姿不变, 驱动机器人分别沿手腕坐标系的 X 、 Y 、 Z 轴直线运动, 激光跟踪仪测量靶标法兰上的某靶标点, 拟合获得手腕坐标系在世界坐标系下的方向; 再令机器人分别绕手腕坐标系 X 、 Y 、 Z 轴旋转, 测量拟合获得的球心作为手腕坐标系在世界坐标系的原点。由此获得的 ${}^w T_h$ 和 ${}^h T_t$ 为

$${}^w T_h = \begin{bmatrix} -0.389\ 7 & -0.792\ 6 & -0.468\ 9 & 178.491\ 6 \\ -0.046\ 9 & 0.525\ 5 & -0.849\ 5 & -1\ 511.300\ 0 \\ 0.919\ 7 & -0.309\ 0 & -0.242\ 0 & 198.830\ 7 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Y = Z \times X_1 =$$

$$[-0.479\ 589 \quad -0.873\ 739 \quad 0.081\ 027]$$

刀具坐标系 X 向坐标轴为 Y 与 Z 的叉乘, 即

$$X = Y \times Z =$$

$$[0.039\ 704 \quad 0.070\ 637 \quad 0.996\ 703]$$

通过以上分析, 刀长为 50 mm 时建立的初始刀具坐标系在世界坐标系下的位姿用矩阵 ${}^w T_{t_0}$ 表示, 如式(1)。则刀长为 L 时, 刀具坐标系在世界坐标系中的位姿矩阵 ${}^w T_t$ 可用式(2)表示。

$${}^h T_t =$$

$$\begin{bmatrix} 0.897\ 944 & 0.302\ 381 & -0.319\ 786 & 1.119\ 47 \\ -0.302\ 381 & -0.104\ 081 & -0.947\ 488 & 321.44 \\ -0.319\ 786 & 0.947\ 488 & -0.002\ 025 & 426.48 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 工件坐标系建立

假定现场工件与模型完全一致, 则建立工件坐标系的目的之一是通过模型中基准元素的测量进一步将制孔信息转至世界坐标系。本论文采用基准孔匹配的方法实现这一目的。在工件设计阶段为其确立若干个基准孔的位置和要求(包括孔的位置精度和孔的质量), 如图 3 中工件上的 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 基准孔。一般要求在零件数控加工阶段完成这些基准孔的加工, 或者在组合件装配/部件装配中通过钻模完成其加工。从模型中获取基准孔在工件设计坐标系 O_d 下的位置 $P = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4]$ 。现场对世界坐标系 O_w 下的孔中心进行测量得 $P' = [P'_1 \ P'_2 \ P'_3 \ P'_4]$ 。对两者进行匹配, 通过匹配矩阵 T 可以将依附于工件设计坐标系下的制孔信息及机器人工具位姿信息转至世界坐标系, 从而应用激光跟踪仪对工具位姿进行现场测量与评判。

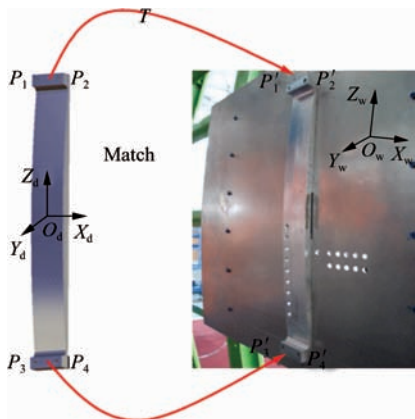


图3 模型到产品的映射

Fig. 3 Match from model to product

3 坐标系误差对绝对位姿精度的影响

机器人工作姿态误差除受机器人本身动、静态误差影响外,系统中一系列坐标系建立及坐标关系转换同样也会引入误差。在本系统中,令Base坐标系的真实姿态为 T_b ,测量姿态为 T'_b ,姿态误差为 Δ_b ,则有

$$T'_b = \Delta_b \cdot T_b \quad (6)$$

类似地,工具坐标系的真实姿态为 T_t ,测量姿态为 T'_t ,姿态误差为 Δ_t 。工件坐标系的真实姿态为 T_o ,测量姿态为 T'_o ,姿态误差为 Δ_o 。测量姿态被输入到机器人程序中,通过机器人控制器反算出关节角度。因此在只考虑坐标系引入误差的前提下,对工件上的第 i 个加工孔而言,机器人工具位姿应满足

$$T'_b \cdot T'_o \cdot T'_t = T'_o \cdot T_i \quad (7)$$

式中: T_i 为第 i 个加工孔在工件设计坐标系下的姿态; T_o 为通过式(7)反算所得出的机器人手腕坐标系相对于Base坐标系的姿态。

由于姿态误差的存在,机器人工具真实所达姿态应为 $T_b \cdot T_o \cdot T_t$,而其所应达到的理想姿态为 $T_o \cdot T_i$ 。在以模型为基准前提下,两者间的姿态偏差即为由坐标系建立引入的机器人工具偏差。

显而易见,引起坐标系姿态误差的因素主要包括:

① 基准元素(点、线、面)的加工变形误差,如本文实例中工件基准孔的最大误差为0.15 mm。

② 测量误差。Leica激光跟踪仪在全行程范围内测量精度为 $15 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m}$,但受现场环境,尤其是地基振动影响较大。本试验环境下激光跟踪仪的测量精度优于0.05 mm。

③ 用于构建坐标系基准元素的拟合误差,主要取决于加工和装配工艺,实际上比较容易标定和控制,本文设为0.05 mm。

④ 计算相关坐标系姿态关系时引入的计算误差,即匹配误差。

上述各项误差如何对机器人姿态产生影响,需要通过复杂的误差链及误差传播分析方可知晓。但可以认定的是,由坐标系建立引入的机器人工具偏差除与各个坐标系姿态偏差有关之外,还与工艺孔(匹配、标定)的布局位置、加工质量和姿态计算有关。

4 基于模型的位姿补偿原理

在机器人动、静态误差及坐标系建立所引入误差的共同作用下,机器人工具位姿产生偏差。基于靶标法兰上靶标点与工具的固定位姿关系,则加工位置处靶标点实际值与理论值的偏差就可以反映出工具的位姿偏差。因此采取对靶标点位置监测、调整即可实现机器人工具的位姿补偿,提高机器人制孔的精度。

4.1 靶标点理论值获取

基于CATIA二次开发获得的机器人制孔离线编程模块可以快速创建每个待加工孔的所谓Tag点坐标系。Tag点坐标系的原点即为孔中心,Z轴方向为基于模型生成的孔法向,XY方向初始采用默认方向,如图4所示。初始Tag点的坐标系方向不一定是最佳的,甚至会导致机器人姿态计算的奇异解。因此通过机器人仿真软件分析并进行适当调整后,最终的Tag点坐标系在工件设计坐标系中的姿态即可定义为机器人工具的目标姿态。则靶标点与工具坐标系的关系即为加工位置处靶标点与Tag点坐标系的关系。进一步通过离线编程软件读取Tag点坐标系在工件设计坐标系中的位姿,记为 oT_t 。假定工件设计坐标系在世界坐标系下的位姿矩阵为 wT_o ,则靶标点在世界坐标系下的理论位置可通过式(8)计算得到:

$${}^o\mathbf{P}_{\text{ball}} = {}^w\mathbf{T}_o \times {}^o\mathbf{T}_t \times {}^t\mathbf{P}_{\text{ball}} \quad (8)$$

式中: ${}^t\mathbf{P}_{\text{ball}}$ 为靶标点在工具坐标系下的位置, 可由靶标点及工具坐标系在世界坐标系下的关系匹配获得。

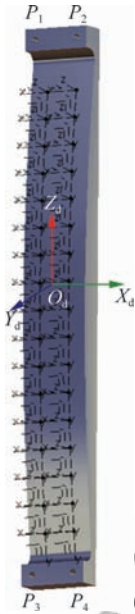


图4 工件上 Tag 坐标系

Fig. 4 Tag coordinates in object

4.2 靶标点实际值的获取

将激光跟踪仪转站至世界坐标系后, 当工具运动到理论位姿时, 应用激光跟踪仪对机器人末端靶标法兰上靶标点进行测量获取。

4.3 位姿补偿原理

假定机器人工具理论加工位姿用矩阵 \mathbf{S} 表示, 实际到达位姿用矩阵 \mathbf{R} 表示, 位姿偏差矩阵 \mathbf{V} 由激光跟踪仪测量机器人末端靶标点位置与理论值匹配获得, 如图 5 所示, 则位姿补偿为

$$\mathbf{S} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{R} \quad (9)$$

简单地讲, 补偿就是将偏差矩阵转换为一系列平移旋转变换, 使机器人工具由当前位姿运动到目标位姿。

4.4 补偿终止条件

对机器人工具位姿进行多次测量补偿, 提高工具的定位精度。当检测其位置偏差与角度偏差分

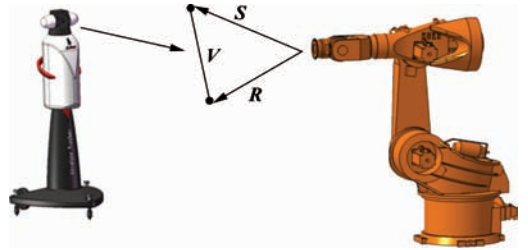


图5 机器人位姿补偿模型

Fig. 5 Robot pose compensation model

别小于给定的位置精度 δ_p 与角度精度 δ_r 时, 认为机器人工具真正到达其目标位姿。对机器人工具的位姿偏差矩阵 \mathbf{V} , 定义其位置偏差为

$$e_p = \|\mathbf{V}_{\text{pos}}\| \quad (10)$$

对其姿态偏差矩阵 $\mathbf{V}_{\text{orien}} = \begin{bmatrix} V_{xx} & V_{xy} & V_{xz} \\ V_{yx} & V_{yy} & V_{yz} \\ V_{zx} & V_{zy} & V_{zz} \end{bmatrix}$, 将

其转化为欧拉角形式, 因此需保证 3 个偏转角度均小于角度精度 δ_r 。在本文的应用试验系统中, 定义 $\delta_p = \pm 0.2 \text{ mm}$, $\delta_r = \pm 1^\circ$ 。

5 试验与分析

5.1 仿真计算

根据图 1 所示的机器人制孔系统, 设计 3 组基于激光跟踪仪闭环反馈的机器人位姿补偿试验, 并对补偿前和补偿后的刀具位置、角度偏差进行对比分析。由于机器人沿工具坐标系的运动易于编程实现, 因此仿真试验中设计机器人从理论位姿处沿工具坐标系偏转, 应用激光跟踪仪检测偏转后机器人末端靶标位置并与理论值匹配得其位置和角度偏差。执行补偿操作, 直至偏差满足精度要求为止。

(1) 试验 1 令机器人沿工具坐标系 Y 轴正向偏移 10 mm, 补偿前与补偿后靶标位置及偏差如表 1 所示。

(2) 试验 2 令机器人绕工具坐标系 Z 轴负向旋转 5° , 补偿前与补偿后靶标位置及偏差如表 2 所示。

(3) 试验 3 令机器人沿工具坐标系 X 轴负向偏移 15 mm, 并绕 Z 轴负向旋转 5° , 补偿前与补偿后靶标位置及偏差如表 3 所示。

表 1 机器人沿工具坐标系 Y 向移动+10 mm

Table 1 Errors of robot moving +10 mm along Y-axis of tool coordinate frame

Target theoretical value			Target measured value			Target measured value after compensation			Pose error before compensation	Pose error after compensation
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	$e_p=9.999\ 0$	$e_p=0.003\ 0$
1 881.61	674.596	1 456.83	1 878.79	684.192	1 456.83	1 881.61	674.597	1 456.83	$\alpha=$ -0.000000	$\alpha=$ -0.000000
2 001.59	675.611	1 478.97	1 998.78	685.208	1 478.97	2 001.6	675.611	1 478.97	$\beta=$ -0.000 974 028	$\beta=$ -0.001 203 211 3
2 063.8	570.556	1 484.79	2 060.99	580.152	1 484.79	2 063.8	570.554	1 484.8	$\gamma=$ -0.000 802 14	$\gamma=$ -0.001 260 50

表 2 机器人绕工具坐标系 Z 轴旋转-5°

Table 2 Errors of robot moving -5° round Z-axis of tool coordinate frame

Target theoretical value			Target measured value			Target measured value after compensation			Pose error before compensation	Pose error after compensation
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	$e_p=-14.989\ 9$	$e_p=0.012\ 6$
1 881.61	674.596	1 456.83	1 890.81	679.586	1 456.79	1 881.61	674.596	1 456.83	$\alpha=$ 0.004 354 479	$\alpha=$ -0.006 359 832
2 001.59	675.611	1 478.97	2 010.53	699.978	1 480.31	2 001.6	675.611	1 478.97	$\beta=$ 0.000 000	$\beta=$ -0.002 635 606
2 063.8	570.556	1 484.79	2 064.54	559.906	1 484.16	2 063.8	570.554	1 484.8	$\gamma=$ -4.999 228 6	$\gamma=$ -0.001 031 3

表 3 机器人沿工具坐标系 X 向移动-15 mm、绕工具坐标系 Z 向旋转-5°

Table 3 Errors of robot moving -15 mm along X-axis and rotating -5° round Z-axis of tool coordinate frame

Target theoretical value			Target measured value			Target measured value after compensation			Pose error before compensation	Pose error after compensation
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	$e_p=-14989\ 9$	$e_p=0.000\ 334\ 77$
1 881.61	674.596	1 456.83	1 904.61	683.61	1 461.85	1 881.61	674.596	1 456.83	$\alpha=$ -0.000 000	$\alpha=$ -0.000 000
2 001.59	675.611	1 478.97	2 024.33	674.1	1 483.38	2 001.59	675.612	1 478.97	$\beta=$ 0.004 812 845 5	$\beta=$ -0.000 000
2 063.8	570.556	1 484.79	2 077.33	563.927	1 487.24	2 063.8	570.556	1 484.79	$\gamma=$ -5.000 892 0	$\gamma=$ -0.000 000

5.2 加工试验

在飞机壁板组件装配中存在大量的制孔工作,用于实现蒙皮与长桁的连接、蒙皮与整体框的连接等。为此,针对图 1 所示试验系统进行激光闭环反馈加工试验,在只进行一次闭环反馈补偿情况下对工具位置误差、姿态误差及加工孔径的偏差进行对比分析。在此为表述方便,将用欧拉角表示的姿态偏差 V_{orien} 转化为四元素形式,即将姿态偏差描述为绕某一瞬时轴旋转一定角度而得到。

假定 V_{orien} 可用式(11)表述:

$$V_{\text{orien}} = \begin{bmatrix} q_0 \\ \hat{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\phi}{2} \\ e_x \sin \frac{\phi}{2} \\ e_y \sin \frac{\phi}{2} \\ e_z \sin \frac{\phi}{2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

则角度误差 $e_r = 2\arccos V_{\text{orien}}$, 以此角度作为评价对象,对比结果如图 6~图 8 所示。

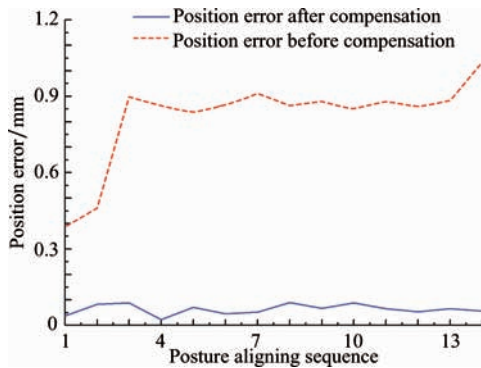


图6 位置误差分析

Fig. 6 Position error analysis

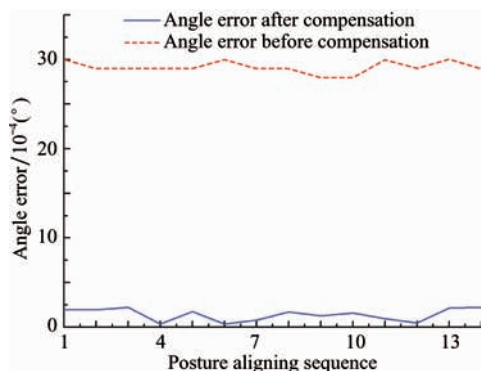


图7 角度误差分析

Fig. 7 Angle error analysis

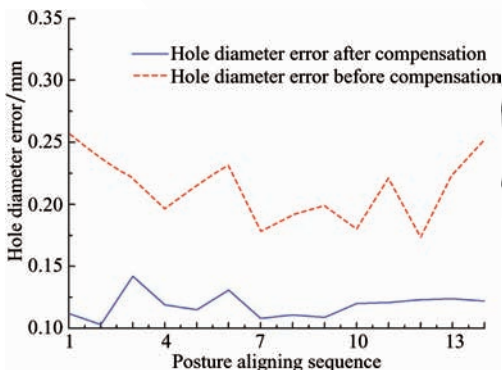


图8 孔径误差分析

Fig. 8 Hole diameter error analysis

5.3 精度控制

上述研究主要对机器人辅助制孔系统中由坐标变换、标定及测量方法所引入误差的原因及补偿方法进行阐述。然而,在实际应用中,工件加工及装配过程产生的变形、靶标座安装孔的加工精

度及激光跟踪仪的测量精度等因素将会直接影响机器人制孔的最终精度。工件变形及工艺基准孔的质量控制将由飞机制造和装配过程中的质量检验环节完成。对于激光跟踪仪测量精度受环境影响波动较大的情况,目前笔者所在实验室采用如下方法进行改善:

① 现场温度变化将引起观测点布置的基础发生变形,从而使得测量精度下降,对于该问题采用均匀胀缩模型进行补偿。

② 定期重建包括世界坐标系在内的所有相关坐标系及相对关系,消除由于地基沉陷、框架变形等因素导致的误差。

③ 考虑在激光跟踪仪测量过程中停止高速电主轴,减少靶标振动对测量精度的影响。

④ 由于激光跟踪仪静态定位反馈效率低下,因此采取分区域设定基准孔的策略,在机器人制孔过程中只对基准孔进行检测,必要时修正机器人位姿。

6 结论

(1) 通过对机器人法兰上靶标点实测值与理论值进行匹配可以准确描述机器人工具的相对位姿偏差,即该偏差是相对产品理论模型的。

(2) 在机器人刀具方向不变的情况下,采用本文刀具建立方法可以快速响应换刀或刀具参数的改变,快速建立刀具坐标系。

(3) 工件基准孔及机器人法兰上靶标座安装孔的制造精度对准确计算机器人工具位姿偏差有重要影响,应予以保证。

(4) 激光跟踪仪测量精度是机器人位姿精度补偿的基础,因此必须十分重视激光跟踪仪工作环境的建设及测量精度补偿措施的制定。

(5) 系统中的工具坐标系、工件坐标系、机器人 Base 坐标系的建立有多种方式,通过上述试验间接证明了本文各坐标系建立方法的合理性。

综上所述,采用激光跟踪仪闭环反馈的机器人制孔系统,一般经过 2~3 次反馈调整后极大地提高机器人工具的位姿精度,降低孔的法向偏差,满足飞机装配工艺中沿法向制孔和连接的质量要求。因此说明,采用激光跟踪仪闭环反馈用

于提高机器人制孔综合定位精度在理论上、技术上均是可行的。

参 考 文 献

- [1] DeVlieg R, Sitton K, Feikert E, et al. ONCE(One Sided Cell End Effector) robotic drilling system[R]. SAE 2002-01-2626, 2002.
- [2] Atkinson J, Hartmann J, Jones S, et al. Robotic drilling system for 737 aileron[R]. SAE 2007-01-3821, 2007.
- [3] Lin C T, Wang M J. Human-robot interaction in an aircraft wing drilling system[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1999, 23(1-2): 83-94.
- [4] 侯志霞, 刘建东, 薛贵军, 等. 柔性导轨自动制孔设备控制技术[J]. 航空制造技术, 2009(24): 58-60.
Hou Zhixia, Liu Jiandong, Xue Guijun, et al. Control technology of flexible track automatic drilling machine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(24): 58-60. (in Chinese)
- [5] 杜宝瑞, 冯子明, 姚艳彬, 等. 用于飞机部件自动制孔的机器人制孔系统[J]. 航空制造技术, 2010(2): 47-50.
Du Baorui, Feng Ziming, Yao Yanbin, et al. Robot drilling system for automatic drilling of aircraft component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(2): 47-50. (in Chinese)
- [6] 吴涛. 工业机器人切削加工离线编程研究[D]. 杭州: 浙江大学机械工程学系, 2008.
Wu Tao. Research on off-line programming for industrial robot based cutting machining[D]. Hangzhou: Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [7] 曾鹏. 基于工业机器人的机翼、垂尾测量点检测与打制系统设计[D]. 杭州: 浙江大学机械工程学系, 2008.
Zeng Peng. Study on industrial robot based system for specified points inspection and print on aerofoil and vertical tails[D]. Hangzhou: Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [8] 唐志忠, 陆素红, 张淑敏. HB/Z223. 3-2003 中华人民共和国航空行业标准[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2003.
Tang Zhizhong, Lu Suhong, Zhang Shumin. HB/Z223. 3-2003, HB in China[S]. Beijing: Commission on Science, Technology, and Industry for National Defense, 2003. (in Chinese)
- [9] Summers M. Robot capability test and development of industrial robot positioning system for the aerospace industry[J]. SAE Transactions, 2005, 114(1): 1108-1118.
- [10] Gonzalez-Galvan E J, Cruz-Ramirez S R, Seelinger M J, et al. An efficient multi-camera, multi-target scheme for

- the three-dimensional control of robot using uncalibrated vision[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2003, 19(5): 387-400.
- [11] 许海霞, 王耀南, 万琴, 等. 一种机器人手眼关系自标定方法[J]. 机器人, 2008, 30(4): 373-378.
Xu Haixia, Wang Yaonan, Wan Qin, et al. A self-calibration approach to hand-eye relation of robot[J]. Robot, 2008, 30(4): 373-378. (in Chinese)
- [12] Sunnanbo A. Laser feedback control for robotics in aircraft assembly[D]. Östergötland, Sweden: Linköpings University, 2003.
- [13] Olsson T, Haage M, Kihlman H, et al. Cost-efficient drilling using industrial robots with high-bandwidth force feedback[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(1): 24-38.
- [14] Tso S K, Yang T W, Xu W L, et al. Vibration control for a flexible-link robot arm with deflection feedback[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2003, 38(1): 51-62.
- [15] Jantunen E. A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(9): 997-1010.
- [16] 张文增, 陈强, 孙振国, 等. 弧焊机器人工件坐标系快速标定方法[J]. 焊接学报, 2005, 26(7): 1-4.
Zhang Wenzeng, Chen Qiang, Sun Zhenguo, et al. Quick calibration method of part coordinates for arc welding robot[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(7): 1-4. (in Chinese)
- [17] 牛雪娟, 刘景泰. 基于奇异值分解的机器人工具坐标系标定[J]. 自动化与仪表, 2008(3): 1-4.
Niu Xuejuan, Liu Jingtai. Robot tool control frame calibration based on SVD[J]. Automation & Instrumentation, 2008(3): 1-4. (in Chinese)

作者简介:

曲巍威(1981—) 女, 博士, 学科博士后。主要研究方向: 机器人自动化制孔, 反求工程, CAD/CAM。

Tel: 0571-87953929

E-mail: qwwwwl@163.com

董辉跃(1974—) 男, 博士, 副研究员。主要研究方向: 复合材料加工, 航空合金材料加工。

Tel: 0571-87953929

E-mail: donghuiyue@zju.edu.cn

柯映林(1963—) 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 飞机数字化装配技术和系统, CAD/CAE/CAM, 反求工程 CAD 建模技术及系统, 难加工材料加工新技术。

Tel: 0571-87952337

E-mail: ylke@zju.edu.cn

Pose Accuracy Compensation Technology in Robot-aided Aircraft Assembly Drilling Process

QU Weiwei, DONG Huiyue^{*}, KE Yinglin

Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract: In automatic aircraft assembly, one focus of attention is robotic drilling technology with its high flexibility and relatively low cost. However, pose errors hard to compensate of the robotic end tool may exist which are caused not only by the dynamic and static error of the robot, but also by errors in the calibration and transformation of the coordinate frames. To improve the accuracy of the position and orientation of the robotic end tool, a robot-aided aircraft assembly drilling system is constructed based on laser tracker closed-loop feedback. Methods to build key coordinate frames of the system using the laser tracker are first discussed. Then, the constitutive factors of the robotic tool pose error are analyzed. A pose difference matrix between the theoretical pose and actual pose of the robotic tool in the drilling position is evaluated to eliminate remnant errors caused by the robotic dynamic error, static error, machining error, matching error and measuring error, etc. Finally, a simulation test for validating the feasibility of the above algorithm and a drilling test of ribbed-plate parts is executed. For a robotic drilling prototype system, by introducing the laser tracker closed-loop feedback compensation, the robotic drilling error is such that the position precision is effectively controlled within ± 0.2 mm and the orientation precision of the normal angle is within $\pm 1^\circ$. The accuracy and quality obtained by the above robot-aided drilling method can satisfy the requirements of aircraft assembly.

Key words: industrial robots; aircraft assembly; high-precision drilling; closed-loop feedback; laser measurement; pose compensation; coordinates transformation

Received: 2011-01-10; **Revised:** 2011-03-07; **Accepted:** 2011-03-23; **Published online:** 2011-07-27 09:07

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110727.0907.001.html **DOI:** CNKI:11-1929/V.20110727.0907.001

Foundation item: Fundamental Research Funds for the Center University of China (2010QNA4024)

*** Corresponding author.** Tel.: 0571-87953929 E-mail: donghuiyue@zju.edu.cn