

基于双目视觉测量系统的 孔位补偿研究*

袁培江¹, 陈冬冬¹, 王田苗¹, 刘元伟¹, 曹双倩¹, 蔡 鸷¹, 汤海洋²

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 上海飞机制造有限公司, 上海 200436)

[摘要] 由于加工装配误差等原因, 飞机壁板工件的数学模型和实际模型往往不一致。为解决不一致导致的制孔位置精度差的问题, 提出了一种基于双目测量系统的孔位补偿方案。为了能够更好地设计满足制孔需要的视觉测量系统, 分析了机器人自动化制孔系统的工作流程。然后介绍了视觉测量系统组成和工作流程, 最后分别对视觉测量系统的基准孔三维坐标提取、孔位误差补偿、数据库读写 3 个重要功能的技术进行了详细的介绍。通过该双目视觉测量系统的孔位补偿方法, 可以获取基准孔的三维坐标, 对孔位误差进行补偿, 补偿信息写入数据库, 提高机器人自动化制孔系统的制孔位置精度。

关键词: 孔位误差补偿; 插值; 双目视觉; 机器人自动化制孔系统; 视觉测量系统

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.04.041



袁培江

博士、副教授、硕士生导师。近年来, 参与、承担了 863 计划、国家自然科学基金等项目, 主要研究方向为航空制孔机器人技术、自主移动机器人技术、智能机器人感知技术及飞行器装配机器人仿真与感知控制技术等。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (61375085)。

在飞机生产制造过程中, 飞机装配是至关重要的一个环节。目前, 飞机表面制孔在飞机装配中占据了很大的工作量。据统计, 一架飞机大约有 150~200 万个连接孔^[1]。人工制孔对工人的技能要求很高, 存在工作量大、生产效率低、加工精度低、稳定性差等诸多的问题^[2]。为解决人工制孔存在的问题, 研发机器人自动化制孔系统对提高制孔效率和精度具有非常重要的意义。

机器人自动化制孔系统主要包括工业机器人、末端执行器、控制系统、离线编程系统和视觉测量系统等。其中, 视觉测量系统是用于检测基准孔的偏移量对孔的位置进行补偿, 保证制孔的位置精度, 是机器人自动制孔系统非常重要的组成部分^[3]。在离线编程系统^[4]中确定了机械臂和工件之间的位置关系并基于工件的数学模型进行碰撞检测和

轨迹规划。但是, 由于飞机壁板工件通常大而薄, 它跟肋板之间的关系很可能因为人为装配的因素产生一定的误差, 因此工件的数学模型和实际模型之间的一致性往往较差, 运行离线编程系统直接生成的制孔程序并不能满足位置精度上的要求。因此, 在工件表面预先设置基准孔, 通过测量基准孔的位置, 对待制孔点进行位置补偿的手段是控制位置偏差必不可少的环节。在所有的测量方法中, 由于视觉测量的高精度和非接触测量的优点, 使其成为能够集成在末端执行器上的最佳方案。

美国 EI (Electroimpact) 公司研发了 ONCE 和 TEDS 两款机器人制孔系统, 这两套系统均采用单目视觉的方案进行孔位补偿^[5-6]。浙江大学研发的机器人制孔系统, 将单目测量系统集成在末端执行器上实现了孔位信息的提取^[7-8]。西北工业大学开

发了一套具有柔性工装调整、视觉检测、法向检测和一体化制孔功能的自动化制孔系统,采用了标定板的方式对单目相机进行了标定^[9]。北京航空航天大学毕树生团队研发了两套制孔末端执行器 I 和 II,两套系统均采用单目视觉测量系统^[10]。在视觉方面的应用,主要分为单目视觉和双目视觉。单目视觉存在如下问题:只能获取平面信息,不能获得基准孔的空间位置信息,对于复杂构件单目视觉测量存在较大误差;由于末端执行器主轴和单目视觉的轴线不在同一直线上,故在测量基准孔时,制孔机器人需要增加移动的动作,这样会增加制孔机器人的制孔时间、降低制孔效率。而双目视觉可以获取基准孔的空间位置信息,在测量基准孔时,不需要有额外的动作,较单目视觉可以大大提高制孔效率。综上所述,单目视觉测量系统不能对基准孔的位置信息进行测量,存在效率低和精度低等问题,因此研究基于双目的视觉测量系统的孔位补偿方法对提高机器人制孔系统制孔精度具有重要的意义。

机器人自动化制孔系统的工作流程

根据飞机装配中机器人自动制孔的工作要求,制孔末端执行器在机械臂的带动下完成制孔操作,机械臂的运行轨迹由离线编程系统规划,机械臂的启停和制孔动作由 PLC 控制。本文涉及的视觉测量系统主要负责通过识别工件上基准孔的坐标计算实际工件同数模之间的偏差,并将补偿后的制孔位置偏差作用到离线编程系统上,最终保证制孔的位置精度在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内。为了能够更好地设计满足制孔需要的视觉测量系统,有必要对整个制孔系统的流程进行说明。

用于飞机装配的机器人自动化制孔系统的工作流程如图 1 所示。

离线编程系统采集工件的理论数模上基准孔的位置生成用于视觉测量的机械臂运动指令;离线编程系统基于数模进行轨迹规划和碰撞检测,生成制孔操作的机械臂运动指令;在控制系统的引导下,制孔系统运行用于基准孔检测的离线编程程序,视觉测量系统工作,测量基准孔的三维坐标,检测完成后调用孔位补偿算法,计算每一个待制孔点的位置偏差,将偏差数组写入数据库中;对机械臂的绝对定位精度补偿独立于整个制孔流程,补偿的偏差数据同样存放在一个数据库中^[11];控制系统引

导运行用于制孔操作的离线编程程序,到达每一个理论制孔点时,控制系统提取机械臂的定位精度补偿值和孔位补偿值,控制机械臂在 XYZ 方向进行平移,达到真实制孔位置的上方;末端执行器上的激光传感器开启,检测工件表面法线的方向,根据角度偏差控制机械臂在 ABC 3 轴上进行转动;控制系统控制末端执行器进行压紧、进给、钻削、吸屑和退刀等操作,完成一个孔的制孔操作;系统继续执行离线编程程序,移动到下一个理论制孔位置,重复纠偏、调姿和制孔的动作,直至工件上所有的

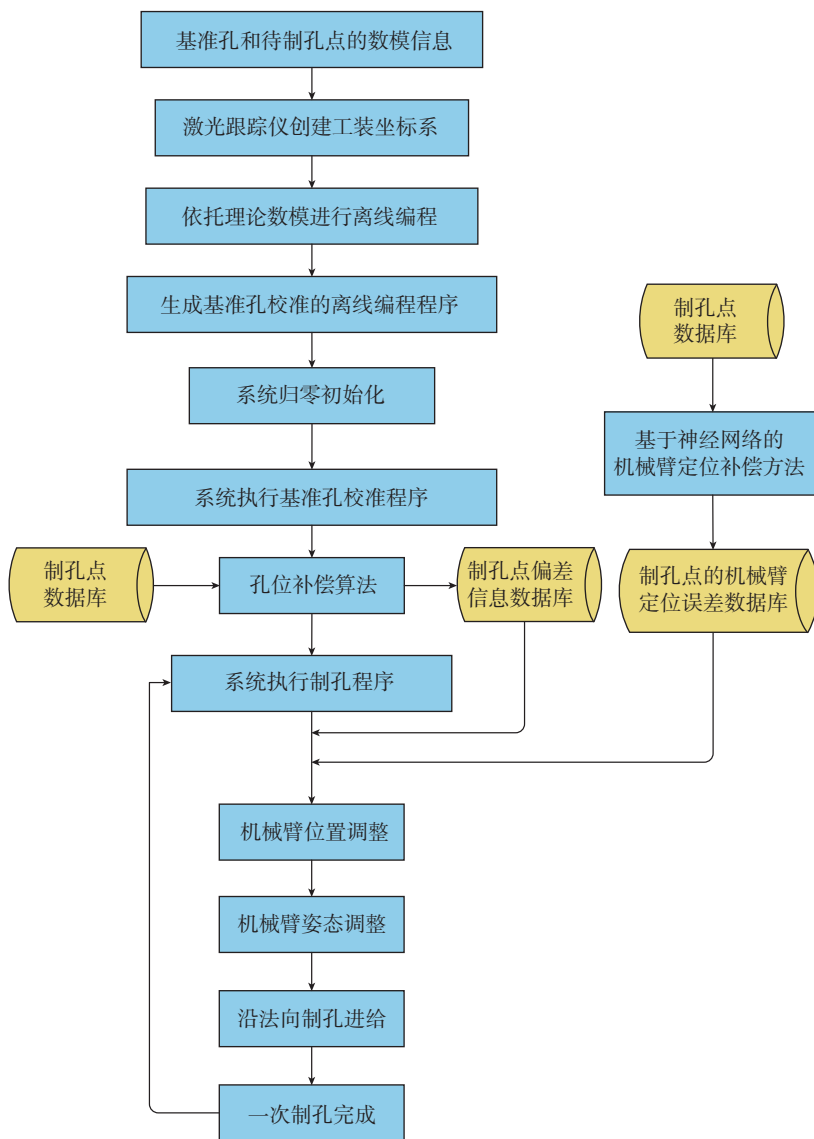


图1 机器人自动化制孔系统的工作流程
Fig.1 Workflow of robotic drilling system

孔均制孔完毕。

视觉测量系统的孔位补偿实现

1 视觉测量系统组成和工作流程

如前所述,本文设计的视觉测量系统要求在制孔操作之前对基准孔位置进行测量,并根据基准孔的偏差值计算出所有制孔点的误差,将误差作用到离线编程系统中的制孔点位上。为实现上述功能,视觉测量系统应该具有基准孔三维坐标提取、孔位误差补偿、数据库读写等功能。

鉴于此,设计了如图2所示的制孔双目视觉测量系统,该系统由硬件和软件两部分组成。制孔双目视觉测量系统的硬件部分除了机械臂、末端执行器和相机外,还包括标定板和激光跟踪仪等辅助测量装置。相机安装在末端执行器上同机械臂构成一个手眼系统,在标定板的辅助下完成手眼标定。激光跟踪仪用于标定机械臂和工件坐标系之间的关系,为视觉测量系统提供坐标系转换信息。相机的图像信息通过网线向工控机进行传递,机械臂通过 profibus 总线与 PLC 进行通信,PLC 同样通过网线与工控机联系。制孔双目视觉测量系统的软件部分有采集图像、载入标定结果、视觉测量、读取机械臂位置、孔位补偿和读写数据库等功能。

视觉测量系统总体流程如图3所示。视觉测量系统在正式工作之前必须要进行若干准备工作,其中包括相机标定、相机和机械臂之间的手眼标定以及基于激光跟踪仪的机械臂和工件坐标系之间的标定。而且,在工件设计阶段,就要求在数模上建立若干个基准孔并从模型中获取基准孔在工件设计坐标系下的理论位置,将理论孔的理论位置写入数据库,用于视觉测量得到真实位置后计算偏差。

视觉系统正式工作时,相机启动,机械臂执行基准孔测量离线编程程序,依次经过基准孔上方,系统对

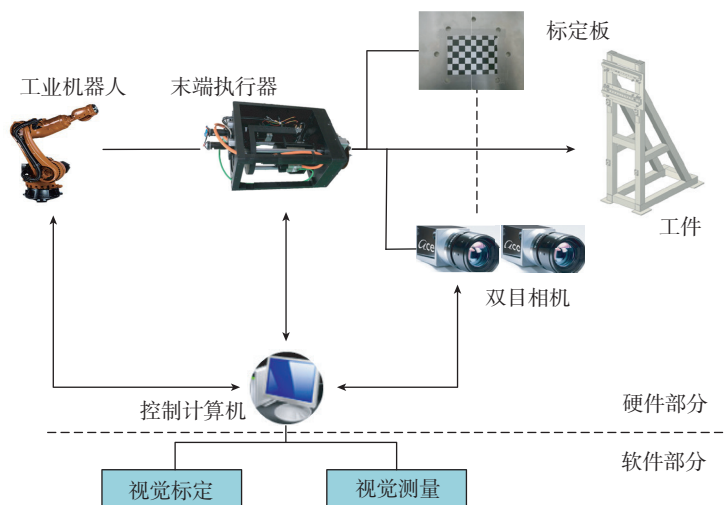


图2 视觉测量系统软硬件结构

Fig.2 Software and hardware structure of vision measurement system

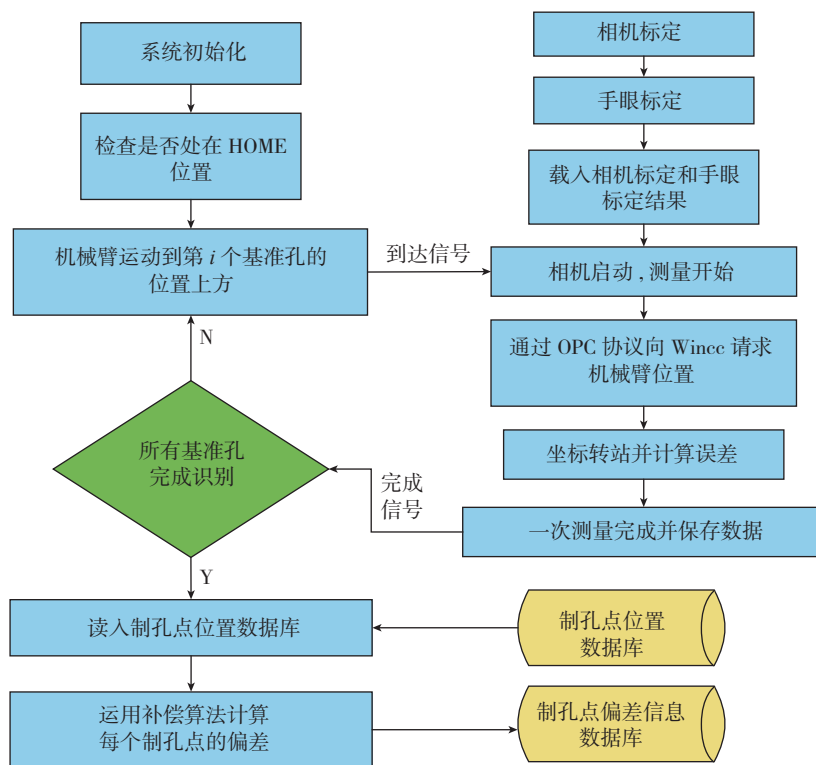


图3 视觉测量系统工作流程

Fig.3 Workflow of vision measurement system

基准孔的实际坐标进行测量;根据基准孔的测量结果,并基于孔位补偿的方法,对所有待制孔的孔位进行偏差计算;该偏差数组被写入数据库中,之后被PLC读取;PLC作用于每一条NC代码,从而控制机械臂对制孔位置进行修正。在实际应用中,根

据工件的复杂程度和在加工中可能出现的形变,合理安排基准孔的位置。为提高匹配精度,还可以考虑将工件分为几个部分,分别设置基准孔,加工完一部分之后,对下一部分进行重新校正。

2 基准孔三维坐标提取

基准孔中心位置的坐标提取是孔位补偿的前提。首先对双目视觉测量系统进行标定,主要包括相机标定、立体标定、手眼标定和机械臂-工件坐标系标定。其中采用张正友标定法进行相机标定和立体标定;采用文献[12]的方法进行手眼标定;使用激光跟踪仪对机械臂和工件坐标系进行标定。然后对环境光线较为复杂的现实情况,采用高斯滤波对图像进行预处理,基于Canny边缘检测算子和随机采样法获取单张图像中基准孔的中心点坐标值。最后经过上述一系列的处理过程,基于双目立体视觉模型获得基准孔中心点的三维信息^[13]。图像处理和识别效果如图4所示。

3 孔位补偿

在飞机的装配制造过程中,存在最多的装配类型是飞机蒙皮和肋板、桁条之间的连接装配,制孔操作就是需要将蒙皮和背面支撑的肋板和桁条一起打穿,然后再加以铆钉拉紧。因此,飞机壁板上孔的排布非常规整,它们沿着肋条或桁架的方向直线延伸分布。

由于肋板和桁条的装配精度不高,使得孔的位置存在以下3种典型偏差:一排孔整体平移、一排孔整体旋转和孔与孔之间的间距发生变化。因此,任何一种孔位误差补偿方法必须同时兼顾这3种误差形式。基准孔的布置位置和数量是由实际生产现场的工艺要求决定的,最为精确的布置方法是在每一排孔的两端各布置一个基准孔,这样做可以极大地保证制孔的位置精度。根据上述的基准孔布置方式和补偿手段,以下介绍单线性插值方法。单线性插值方法适用于对每排孔进行单独补偿时使用,此时每排孔的两端均有基准孔。对一排孔而言,孔位的误差形式有平移、旋转和平移加旋转3种,如图5所示。

假设每排孔的制孔数目为 N , 定

义第一个孔 Q_1 和最后一个孔 Q_N 为基准孔,基准孔的加工通过人工完成。经过视觉测量后,第一个孔 Q_1 的误差为 e_1 ,第 N 个孔 Q_N 的误差为 e_N ,则通过单线性插值可以获得第 i 个孔 Q_i 的误差为:

$$e_i = \frac{|Q_i Q_N|}{|Q_1 Q_N|} e_1 + \frac{|Q_1 Q_i|}{|Q_1 Q_N|} e_N \quad (1)$$

其中, $| \cdot |$ 表示两孔的空间距离。可以非常容易地验证,上述提及的3种误差形式均可以用该插值方法进行求解。

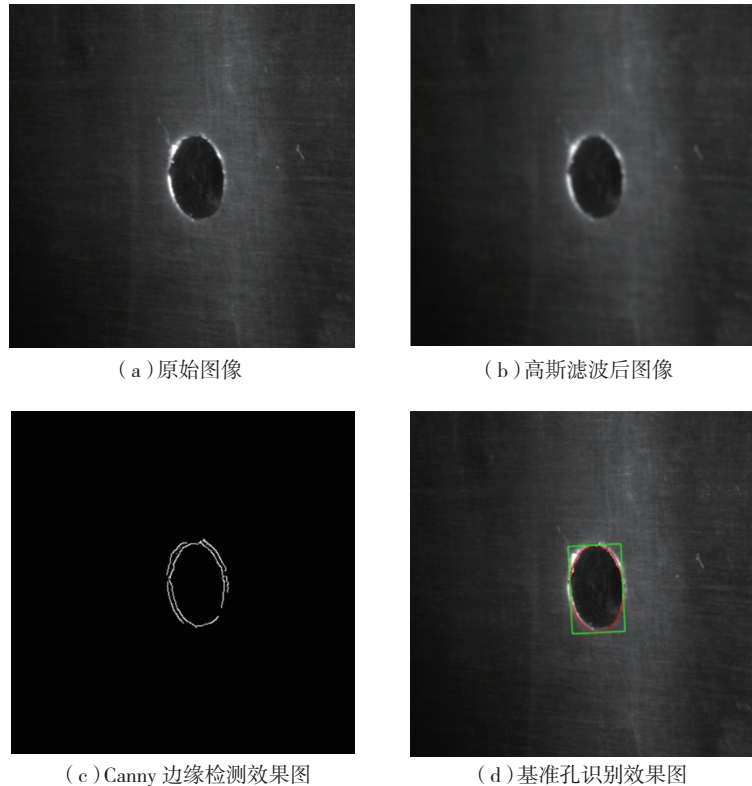


图4 基准孔图像处理与三维信息提取

Fig.4 Image processing and three-dimensional information extraction of datum hole

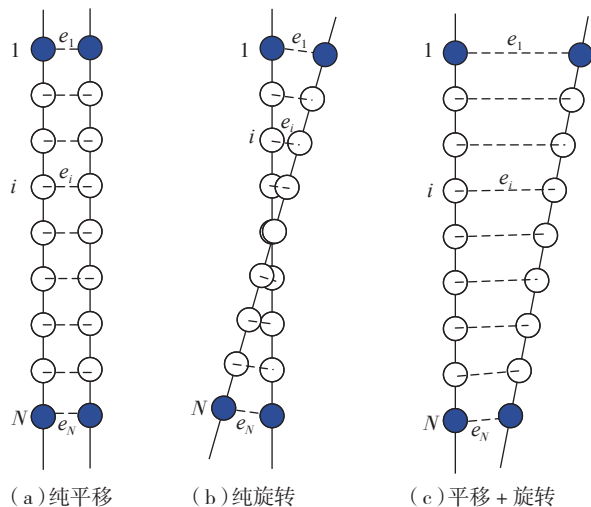


图5 常见的孔位误差形式

Fig.5 Common forms of positional errors of holes

在飞机装配中,同样存在连接孔为多排的情况,这样单线性插值将无法实际的需求。通常可以认为工件在局部不存在加工误差及变形,工件在局部的理论三维模型和现场的实际三维模型存在平移和旋转变换,这样只需要测量3个基准孔的空间坐标就可以确定理论和实际模型的变换关系,进而求得制孔点的补偿误差。

如图6所示, {A} 为理论三维模型坐标系, {B} 为实际三维模型坐标系,两个坐标系之间存在旋转变换 ${}^A_B R$ 和平移变换 ${}^A_B t$ 。基准孔P在 {A} 和 {B} 下的坐标分别为 ${}^A P$ 和 ${}^B P$,其中 ${}^A P$ 为基准孔理论坐标值, ${}^B P$ 为双目视觉测量基准孔的实际坐标值,二者的差即为基准孔P的位置误差。则基准孔P在两个坐标系下存在如下关系:

$${}^B P = {}^A_B R {}^A P + {}^A_B t \quad (2)$$

根据变换理论,3个点可以确定两个坐标系的变换关系,假设3个基准孔在两个坐标系下的坐标分别为 ${}^A P_1$ 、 ${}^A P_2$ 、 ${}^A P_3$ 、 ${}^B P_1$ 、 ${}^B P_2$ 、 ${}^B P_3$,则它们满足公式(2)的关系,即

$$\begin{cases} {}^B P_1 = {}^A_B R {}^A P_1 + {}^A_B t \\ {}^B P_2 = {}^A_B R {}^A P_2 + {}^A_B t \\ {}^B P_3 = {}^A_B R {}^A P_3 + {}^A_B t \end{cases} \quad (3)$$

公式(3)中的3式相减可得:

$$\begin{cases} {}^B P_1 - {}^B P_2 = {}^A_B R ({}^A P_1 - {}^A P_2) \\ {}^B P_1 - {}^B P_3 = {}^A_B R ({}^A P_1 - {}^A P_3) \end{cases} \quad (4)$$

通过式(5)求解出旋转矩阵 ${}^A_B R$:

$${}^A_B R = CD^{-1} \quad (5)$$

其中,

$$C = ({}^B P_1 - {}^B P_2, {}^B P_1 - {}^B P_3, ({}^B P_1 - {}^B P_2) \times ({}^B P_1 - {}^B P_3))$$

$$D = ({}^A P_1 - {}^A P_2, {}^A P_1 - {}^A P_3, ({}^A P_1 - {}^A P_2) \times ({}^A P_1 - {}^A P_3))$$

将旋转矩阵 ${}^A_B R$ 带入式(3)可求得 ${}^A_B t$ 。假设制孔点Q在 {A} 和 {B} 中表示为 ${}^A Q$ 和 ${}^B Q$,则其补偿的位置误差为:

$$\Delta Q = {}^B Q - {}^A Q = {}^A_B R {}^A Q + {}^A_B t - {}^A Q \quad (6)$$

4 数据库读写

完成孔位的误差计算后需要将估计的误差写入到数据库中。根据视觉测量系统的工作流程,上位机软件需要读取机械臂的位姿信息,而机械臂是通过 Profibus 总线同 PLC 进行通信的,PLC 的全部信息均可以反映在 Wincc 组态软件上。经过这样的连接,在 Wincc 软件上可以通过变量组态的方式获取机械臂的位置信息。经过以上分析,视觉测量系统读取机械臂位姿信息最为方便的方法是,在同一台工控机上建立上位机软件与 Wincc 软件之间的通信。另一方面,上位机软件需要将孔位补偿后各个制孔点的误差值写入数据库中,

方便 PLC 调取。上位机对 Access 数据库的读写是通过调用 ADO 库实现的,ADO 库是 Windows 系统中自带的库,在使用时只需要在头文件中进行导入即可,使用方便而且效率很高。使用 ADO 库对数据库的操作步骤如下:

(1) 初始化 OLE 组件,将 MFC 应用程序设置为单线程运行;

(2) 创建 Connection 和 Recordset 对象;

(3) 调用 CreateInstance() 函数,利用 Connection 对象创建连接实例;

(4) 利用 Recordset 对象执行 SQL 语句对数据库中的基准孔理论位置进行查询;

(5) 操作 Connection 对象执行 SQL 语句,将误差值写入数据库的相应位置;

(6) 关闭数据库,关闭 OLE 组件。

双目视觉测量系统通过基准孔三维坐标提取、孔位误差补偿、数据库读写3个步骤实现了自动化制孔系统的孔位补偿功能。

结论

本文针对飞机壁板工件的数学模型和实际位置不一致导致的制孔位置精度下降问题,提出了一种基于双目测量系统的孔位补偿方案。通过分析机器人自动化制孔系统的工作流程,提出了视觉测量系统需要满足的制孔需求。研究了视觉测量系统组成和工作流程,提出了视觉测量系统的基准孔三维坐标提取、孔位误差补偿、数据库读写3个重要功能的技术实现方法。该双目视觉测量系的孔位补偿方法可以提高机器人自动化制孔系统的制孔位置精度。

参考文献

[1] 王珉,薛少丁,陈文亮,等.面向飞机自动化装配的单向压紧制孔毛刺控制技术[J].航空制造技术,2011,54(9):26-29.

WANG Min, XUE Shaoding, CHEN

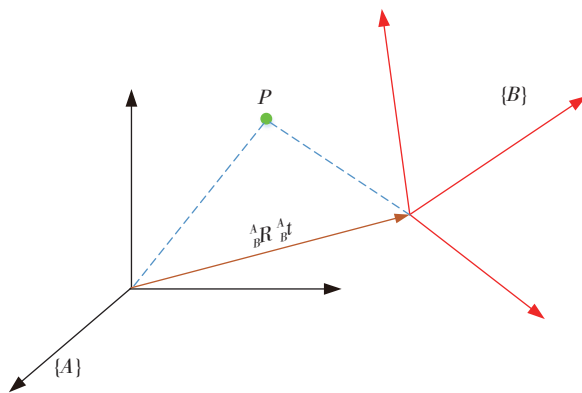


图6 两个坐标系变换关系

Fig.6 Transformation relation of two coordinate systems

Wenliang, et al. One-side pressed burrless drilling technology for aircraft automatic assembly [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011, 54(9): 26-29.

[2] WANG M, XUE S D, JIANG H Y, et al. Development of knowledge-based system on aircraft assembly drilling process[C]// The 2nd IEEE International Conference on Information Science and Engineering (ICISE). Piscataway: IEEE, 2010:1-4.

[3] ZHU W, MEI B, YAN G, et al. Measurement error analysis and accuracy enhancement of 2D vision system for robotic drilling[J]. *Robotics & Computer Integrated Manufacturing*, 2014, 30(2): 160-171.

[4] ZHU W, QU W, CAO L, et al. An off-line programming system for robotic drilling in aerospace manufacturing[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68(9-12): 2535-2545.

[5] DEVLIEG R, SITTON D, FEIKERT E, et al. ONCE (ONe-sided Cell End effector) robotic drilling system[C]// Proceedings of SAE Aerospace Automated Fastening Conference, Chester, 2002: 9-16.

[6] DEVLIEG R. Robotic trailing edge flap drilling system[EB/OL]. (2009-11-10). <http://www.electroimpact.com/Research/2009-01-3244.pdf>, 2009.

[7] 卜泳, 许国康, 肖庆东. 飞机结构件的自动化精密制孔技术[J]. *航空制造技术*, 2009, 52(24): 61-64.

BU Yong, XU Guokang, XIAO Qingdong. Automation precision drilling technology of aircraft structural part[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009, 52(24): 61-64.

[8] 毕运波, 李永超, 顾金伟, 等. 机器人自动化制孔系统[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 8(8): 1427-1433.

BI Yunbo, LI Yongchao, GU Jinwei, et al. Robotic automatic drilling system[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2014, 48(8): 1427-1433.

[9] 张杰, 秦现生, 胡鹏, 等. 基于机器人的飞机部件自动制孔末端执行器设计[J]. *制造业自动化*, 2013(16): 15-17.

ZHANG Jie, QIN Xiansheng, HU Peng, et al. Design of an aircraft components automatic drilling end effector based on robots[J]. *Manufacturing Automation*, 2013(16): 15-17.

[10] LIANG J, BIS. Design and experimental study of an end effector for robotic drilling[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 50(1-4): 399-407.

[11] 薛雷, 李汝鹏, 周庆慧, 等. 基于ELM的航空制孔机器人定位精度补偿方法[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(22): 91-95.

XUE Lei, LI Rupeng, ZHOU Qinghui, et al. A calibration and compensation method based on ELM for aviation drilling robot[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(22): 91-95.

[12] LIU Y W, YUAN P J, CHEN D D, et al. Simultaneous calibration of hand-eye relationship, robot-world relationship and robot geometric parameters with stereo vision[C]// Processing of International Conference on Cognitive Systems and Signal. NewDelhi: Springer, 2016.

[13] 林琳. 机器人双目视觉定位技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.

LIN Lin. The research of visual positioning technology on the binocular[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.

通讯作者: 袁培江, E-mail: itr@buaa.edu.cn。

Research on Positional Error Compensation Method Based on Binocular Vision Measurement System

YUAN Peijiang¹, CHEN Dongdong¹, WANG Tianmiao¹, LIU Yuanwei¹, CAO Shuangqian¹, CAI Ying¹, TANG Haiyang²

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

[ABSTRACT] The machining and assembly errors will result in misalignment between the real and nominal 3D models of aircraft panel. To solve the low position accuracy of holes caused by the misalignment, a positional error compensation method based on binocular vision measurement system is proposed. Firstly, the workflow of the robotic drilling system is introduced to choose a vision measurement system that can meet the drilling requirement. Then the component and the workflow of the vision measurement system are proposed. Finally, the coordinate extraction of datum holes, the error compensation of holes and database operation in the vision measurement system are introduced in detail. The positional error compensation method based on binocular vision measurement system can obtain the coordinate of datum holes, compensate the positional errors of holes, and write the compensation information in the database to enhance the position accuracy of holes.

Keywords: Positional error compensation; Interpolation; Binocular vision; Robotic drilling system; Vision measurement system

(责编 铃兰)