

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.03.003

## 移动机器人铣削制孔系统基准检测

王战玺<sup>1,2</sup> 李树军<sup>1</sup> 赵璐<sup>3</sup> 王靖宇<sup>4</sup> 秦现生<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学机电学院, 西安, 710072; 2. 河南师范大学新联学院, 郑州, 451400;  
3. 中国航空无线电电子研究所, 上海, 200241; 4. 西北工业大学航天学院, 西安, 710072)

**摘要:** 结合航空大部件的数字化对接装配需求, 设计了一套用于对接面铣削制孔的移动机器人加工系统, 并提出具体的加工工艺流程。研究了基于激光轮廓扫描仪的大量散乱点云数据的预处理算法, 提出基于栅格法和迭代拟合法的对接面特征提取算法。针对移动机器人加工系统在大场景下的高精度定位问题, 提出基于扫描线法和最小二乘法原理的对接基准孔坐标找正算法。通过产品的加工实验验证, 对接面铣削和制孔精度满足系统要求的各项技术指标, 证明了本文提出的移动机器人铣削制孔系统的装配对接面加工方法能够精确地完成大部件数字化装配任务, 对提高装配质量和效率具有重要意义。

**关键词:** 航空大部件; 数字化装配; 机器人系统; 基准检测

**中图分类号:** V261 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2019)03-0281-07

## Datum Detection of Mobile Robot Milling and Drilling System

WANG Zhanxi<sup>1,2</sup>, LI Shujun<sup>1</sup>, ZHAO Lu<sup>3</sup>, WANG Jingyu<sup>4</sup>, QIN Xiansheng<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Northwest Polytechnic University, Xi'an, 710072, China; 2. Xinlian College, Henan Normal University, Zhengzhou, 451400, China; 3. China Institute of Aeronautical Radio and Electronics, Shanghai, 200241, China; 4. College of Astronautics, Northwest Polytechnic University, Xi'an, 710072, China)

**Abstract:** According to the requirement of digital assembly for large aeronautical components, a mobile robot machining system for milling and drilling on the docking surface is designed, and the specific machining process is proposed. The preprocessing algorithm of large amount of scattered point cloud data based on laser scanner is studied. A feature extraction algorithm of docking surface based on raster method and iterative fitting method is proposed. Aiming at the problem of high precision positioning of mobile robot machining system in large scene, a coordinate alignment algorithm of docking reference hole based on scanning line method and least square method is proposed. Through the machining experiment verification of aeronautical component, the accuracy of milling and drilling meets all the technical indicators of the system requirements, and proves that the mobile robot milling and drilling system proposed in the paper can accurately complete the digital assembly task of large aeronautical components, and has important significance for improving assembly quality and efficiency.

**Key words:** aeronautical components; digital assembly; robot system; datum detection

航空大型复杂部件, 如飞机的机翼、发房和翼盒等部件, 其装配过程因变形和累计误差, 需要在现场对连接面铣削加工后, 才能保证其对接精度。由于所要装配的部件尺寸较大, 且结构、工装和工

**基金项目:** 陕西省科技统筹创新工程计划重点(2016KTZDGY06-01)资助项目; 陕西省创新人才推进计划(2018KJXX-006)资助项目; 国家重点研发计划(2018YFB1305700)资助项目; 河南省科技攻关(182102210084)资助项目。

**收稿日期:** 2019-5-23; **修订日期:** 2019-5-30

**通信作者:** 王战玺, 男, 副教授, 硕士生导师, E-mail: zxwang@nwpu.edu.cn。

**引用格式:** 王战玺, 李树军, 赵璐, 等. 移动机器人铣削制孔系统基准检测[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(3): 281-287. WANG Zhanxi, LI Shujun, ZHAO Lu, et al. Datum Detection of Mobile Robot Milling and Drilling System[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(3): 281-287.

艺复杂,数控机床和定点作业的机器人切削系统无法使用<sup>[1]</sup>。而传统的人工铣削方法则过度依赖工人操作水平,效率低、劳动强度大,装配质量不稳定,加工环境恶劣。运动平台搭载机器人组成的移动机器人铣削系统效率高、空间可达性好、精度稳定,以及可便捷移动和快速重构能适应大型复杂部件的装配作业<sup>[2]</sup>。

在航空大型复杂零部件装配加工中,机器人加工系统拥有比多轴加工中心更好的空间可达性和更小的安装空间要求<sup>[3-4]</sup>,受到学术领域以及制造领域的广泛关注。德国弗劳恩霍夫制造技术与先进材料研究所设计了一套移动式加工机器人,并在空客A320的CFRP垂直尾翼上成功测试了不同几何形状和位置零件的自适应性<sup>[5-6]</sup>。英国BAE系统公司在F-35战斗机生产线上应用了多机器人全自动精确制孔加工单元<sup>[7]</sup>。国内也有相关高校和研究机构研发了用于钻、镗、铣和磨等机器人加工系统<sup>[8-11]</sup>。

航空大型复杂部件通常需要采用大量工装型架来进行定位,大部件与移动台之间的相对位置难以实时监测。为了提高零部件加工精度和装配精度,就必须解决移动机器人加工系统在大场景下的高精度定位与检测问题。刘洋<sup>[12]</sup>在机器人运动学模型的基础上,采用激光跟踪仪进行标定,针对末端执行器安装误差问题,采用虚拟末端执行器的方法进行测量分析。结果表明,该标定方案避免了新误差源的引入,并提高了机器人的绝对定位精度。Nister等<sup>[13-14]</sup>采用提取图像的Harns角点来作为图像特征匹配的特征点,然后获得视差值,最终实现机器人定位。哈尔滨工业大学的王莹<sup>[15]</sup>提出在图像上分别提取SIFT特征点与Harris角点,将两种算法结合起来使用,既具备SIFT算子的尺度不变性又能检测出图像的角点信息。

本文针对某大型飞机机翼发房的数字化装配,提出移动机器人与末端执行器结合进行铣削制孔加工的解决方案,并根据机器人铣削制孔系加工工

艺需求,提出了利用激光轮廓扫描仪实现空间大部件对接面轮廓尺寸检测、基准提取和铣削量计算的方法,并通过实验进行了验证。

## 1 机器人铣削制孔加工系统

### 1.1 系统组成及工艺流程

移动机器人加工系统整体结构如图1所示,主要由机器人本体及其控制柜、末端执行器、柔性刀库、平台控制柜、真空吸屑泵、浮动平台、移动小车、主轴冷油机和电器控制柜等部分组成。当移动小车到达加工工位后,浮动平台里面的液压和机械锁紧单元与地面装置连接,可视为机器人与地面坚固相连,然后机器人在指定工位执行离线程序,完成相应的加工内容。

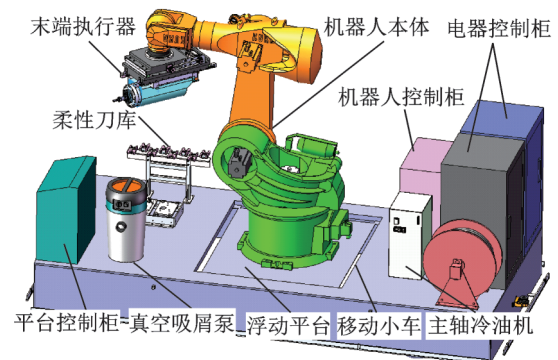


图1 机器人铣削制孔加工系统

Fig.1 Composition of robot milling and drilling system

按照加工流程,首先利用激光跟踪仪通过地面靶标测量点建立飞机中外翼和发房大部件在空间三维坐标系下的位置,再利用机翼调姿系统和发房调姿系统分别完成其空间多自由度调姿,最后移动机器人加工设备到固定工位完成对接面的铣削、钻孔、螺栓连接及配铰等工作。最终实现飞机机翼和发房大部件在空间三维坐标系下的精准对接装配。根据以上描述,发房和飞机机翼大部件的数字化对接装配系统总体布局如图2所示。

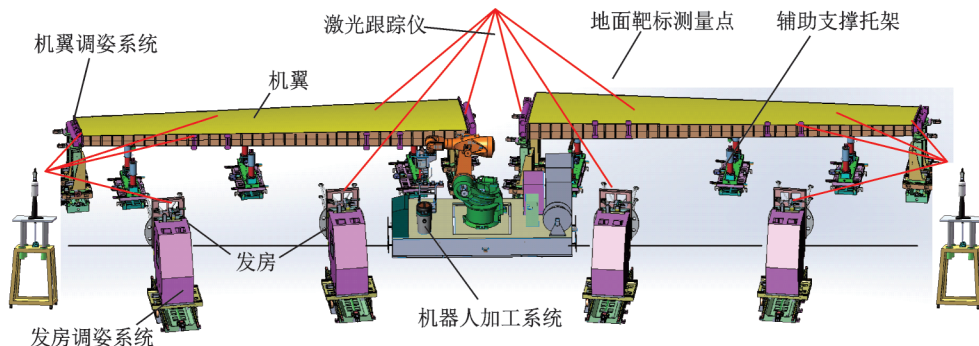


图2 大部件对接装配系统总体布局

Fig.2 Overall layout of large component assembly system

### 1.2 末端执行器

末端执行器作为机器人铣削制孔系统的关键终端执行机构,主要作用是完成对接面的高精度铣削制孔、轮廓基准检测和自动换刀等功能。根据系统铣削制孔精度要求、末端执行器质量及功能需求,本文所设计的末端执行器与机器人连接方式采用悬挂式,并通过快换法兰安装在机器人第六轴上,其结构总体布局如图 3 所示,末端执行器主要由铣削制孔单元、基准法向检测单元、气动集成单元及机器人连接法兰组成。

其中轮廓基准检测单元直接安装于电主轴安装座后面,并与电主轴同轴。其主要功能是获取对接面轮廓特征数据,并通过对获取的数据进行处理,计算出对接面的法向、铣削加工量以及基准孔坐标位置等加工参数。

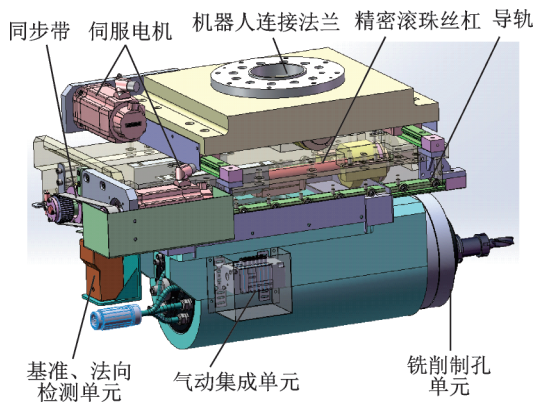


图 3 末端执行器整体结构

Fig.3 Integral structure of end-effector

## 2 理论基础

### 2.1 对接面特征提取

由于现场环境、加工零部件表面特征等多方面因素影响,激光轮廓扫描仪扫描得到的点云数据存在大量噪点和杂点,如果不对获得的数据进行预处理直接拟合,则对接面特征的提取将非常复杂和耗时,得到的特征误差较大,无法作为加工依据。

对散乱点云数据预处理时,首先需要建立其数据点之间的几何拓扑关系,然后对其进行滤波处理,以保证在去除噪点的同时保持目标的几何特征,防止其产生变形。本文使用栅格法和迭代最小二乘拟合滤波算法对扫描仪获取的原始数据进行预处理,最后使用最小二乘法原理对平面进行拟合,该方法具有误差小,稳定性好的特点,其基本思想是:三维空间中的平面方程可表示为  $AX + BY + CZ + 1 = 0$ ,其中参数  $A, B, C$  是描述三维空间特征的常数。平面在使用  $n$  个离散空间点拟合平面时,其平面方程可表示为

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

化简得到

$$\begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_n \\ y_1 & \cdots & y_n \\ z_1 & \cdots & z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_n \\ y_1 & \cdots & y_n \\ z_1 & \cdots & z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

从而

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \left( \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} x_i^2 & x_i y_i & x_i z_i \\ x_i y_i & y_i^2 & z_i y_i \\ x_i z_i & z_i y_i & z_i^2 \end{bmatrix} \right)^{-1} \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} -x_i \\ -y_i \\ -z_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过式(3)求出系数  $A, B, C$  后,对  $Z$  坐标值  $Z_1$  进行拟合计算,即可得到对接面的特征信息。

$$Z_1 = - \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & y_n \end{bmatrix}^T \left[ \frac{A}{C} - \frac{B}{C} \right]^T - \frac{1}{C} \quad (4)$$

### 2.2 基准孔边界提取

首先将获得的三维点云数据向  $XY$  平面投影,接着令点云中所有数据点的  $Z$  坐标值为零,将其转化为二维点云,并按照点云中各数据点的  $Y$  坐标值大小进行排序分组,且考虑到存在测量误差  $\delta$ ,因此将点云中  $Y$  坐标大小在  $[y_i, y_{i+\delta}]$  范围内的点分为一组。另外,可对每条扫描线中的点云数据按照各点的  $X$  坐标值大小进行组内排序以简化数据处理难度。然后将排过顺序的全部点云数据分别存储在两个链表中。在按照点云各个数据点的  $X$  坐标值大小排序的链表组  $X_i = (1 \sim n)$  内,可查询出组内点云数据中  $X$  坐标值最大为  $X_{\max}$ ,最小为  $X_{\min}$  的数据点。对点云数据进行处理时,首先根据链表组中点云数据的密度  $\rho$ ,建立一个最小包围盒  $(X_i, X_{i+1})$ ,接着提取链表组中在  $(X_i, X_{i+1})$  范围内的所有数据点,设为点集  $P_{xi}$ ,并对点集  $P_{xi}$  中包含的所有数据点按照其  $Y$  坐标值的大小进行排序并编号,其中第  $i$  组内第  $j$  个点可表示为  $P_{xij} (i=1, \dots, m; j=1, \dots, n)$ ,最后查询相邻两点  $t_i = P_{xj+1}(y) - P_{xij}(y), j=1, \dots, n$  间的距离,若  $t_i$  大于设定值  $k$  (一般为  $\rho$  的 5~10 倍),则  $y_{i+1}, y_i$  两点即可作为基准孔的边界特征点,孔边界提取原理如图 4 所示。

同理,将  $Y_i = (1 \sim n)$  链表组中的点云数据按照  $Y$  坐标值大小进行排序,并建立最小包围盒  $(Y_i, Y_{i+1})$ ,在最小包围盒中的点集设为  $P_{yi}$ ,最后在点集  $P_{yi}$  中按照所有数据点的  $X$  坐标值大小进

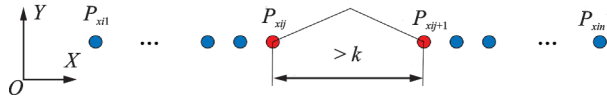


图4 扫描线法提取孔边界点原理

Fig.4 Principle of extracting boundary points of holes by scanning line method

行排序,其中第*i*组内第*j*个点可表示为 $P_{yij}$  ( $i=1, \dots, m; j=1, \dots, n$ ),接着提取点集 $P_{yi}$ 中相邻两点之间的距离,若大于给定值,则该两点可视为孔的边界点。 $X$ 和 $Y$ 方向边界提取完之后,把提取的重复点去掉,完成整个基准孔的边界提取。

### 2.3 基准孔坐标提取

基准孔边界特征提取完成后,假设基准孔中心坐标 $O=(X_1, Y_1)$ ,及孔半径 $R_1$ 。假设边界点到拟合的圆的残差为 $\delta$ ,使用最小二乘法原理对获得的圆形边界点进行拟合,拟合的孔边界上点到假设的圆心的距离和拟合残差满足

$$\sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [(x_i - X_1)^2 + (y_i - Y_1)^2 - R_1^2] = \text{Min} \quad (5)$$

由于 $R_1^2 = (x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2$ ,可以展开表示为 $R_1^2 = x^2 + y^2 - 2X_1 \times x - 2Y_1 \times y + X_1^2 + Y_1^2$  (6)

令式(6)中 $A = -2 \times X_1, B = -2 \times Y_1, C = X_1^2 + Y_1^2 - R_1^2$ ,拟合孔边界的目标函数为 $Q(A, B, C)$ ,则式(5)可以表示为

$$Q(A, B, C) = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 + Ax_i^2 + By_i^2 + C] \quad (7)$$

通过对式(7)中的参数变量分别求偏导,并使其等于零,得到

$$\begin{cases} \frac{\partial Q(A, B, C)}{\partial A} = \sum_{i=1}^n 2(x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C)x_i = 0 \\ \frac{\partial Q(A, B, C)}{\partial B} = \sum_{i=1}^n 2(x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C)y_i = 0 \\ \frac{\partial Q(A, B, C)}{\partial C} = \sum_{i=1}^n 2(x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

定义参数 $D, E, F, G, H$ 为

$$\begin{cases} D = n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i \\ E = n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \\ F = n \sum_{i=1}^n x_i^3 + n \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 - \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) \sum_{i=1}^n x_i \\ G = n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n y_i \\ H = n \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i + n \sum_{i=1}^n y_i^3 - \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (9)$$

由式(7—9)联立可解得

$$\begin{cases} X_1 = -\frac{1}{2} A = -\frac{1}{2} \left( \frac{GD - EF}{CF - D^2} \right) \\ X_2 = -\frac{1}{2} B = -\frac{1}{2} \left( \frac{CG - DE}{D^2 - CF} \right) \\ R_1 = \frac{1}{2} \sqrt{A^2 + B^2 - 4C} \end{cases} \quad (10)$$

在实际对合的两个部件中(表示为*A*部件和*B*部件),依据加工工艺要求,部件*B*对接面已预先制有初孔,加工时对其进行扩孔即可,而部件*A*对接面上没有初孔,所以需要借助部件*B*对接面基准孔坐标位置通过坐标变换来计算得到部件*A*对接面基准孔坐标位置,其转换关系可以表示为

$$O_A = O_B + R_1^{-1} R_2' R_3 + \Delta A_{xy} \quad (11)$$

式中 $O_A$ 为部件*A*对接面上孔位置坐标, $O_B$ 为部件*B*对接面上孔位置坐标, $R_1'$ 为机器人在飞机装配坐标系下的姿态矩阵, $R_2'$ 为部件*B*在飞机装配坐标系下的姿态变换矩阵, $R_3'$ 为部件*B*对合过程中回退指定距离后的平移变换矩阵, $\Delta A_{xy}$ 为多次对孔实验获得部件*A*基准孔坐标在 $X, Y$ 方向的偏差值。

## 3 实验结果

### 3.1 对接面特征提取实验

扫描仪测量完成对接面的测量后得到原始点云数据分布如图5所示,可以看出,点云中存在大量的干扰点。

激光轮廓扫描仪的 $Z$ 向有效扫描距离为90~115 mm,故首先保留有效测量范围内的测量点,剔除其他的点集合。然后根据图像特征去掉包括外围工装卡爪表面点特征信息。

接着对点云数据进行网格化划分,网格大小为3 mm×3 mm,接着对点云数据进行迭代滤波处理并取 $g=0.2$  mm, $w=0.3$  mm,得到如图6所示的点云数据分布图,可以看出,经过处理后,对接面上的杂点已经被过滤掉。

经过对原始点云数据进行预处理后,拟合的对接面特征较好,杂点已经基本滤除。接着根据标定的扫描仪坐标系和加工坐标系之间的转换关系,将

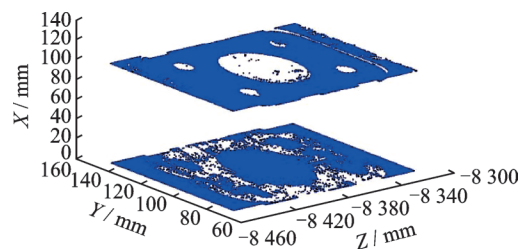


图5 原始点云分布图像

Fig.5 Primitive point cloud distribution image

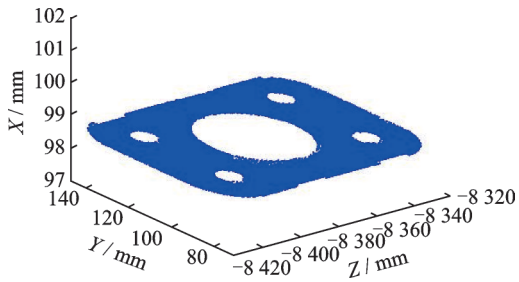


图 6 处理后的点云数据分布

Fig.6 Distribution of point cloud data after processing

保留的每个点云数据的坐标转换到加工坐标系下,并使用最小二乘法原理对平面进行拟合,同时使用绘制拟合成的平面的三维空间等高线效果图,如图 7 所示。图 7 中的两个显示点分别表示该平面的最高点和最低点,根据图 7 中不同的颜色分布可直观显示对接面特征。

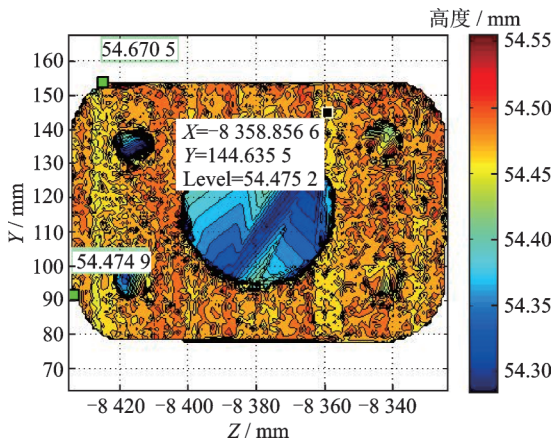


图 7 拟合处理后的点云数据分布

Fig.7 Distribution of point cloud data after fitting

### 3.2 部件 B 基准孔坐标提取实验

为验证上述算法的精度和效果,选择部件 B 对接面第 4 面进行了实际扫描实验,部件 B 对接面第 4 面上预制有 4 个直径为 10 mm 的初孔。设置激光轮廓扫描仪扫描速度为 600 mm/min。扫描完成后首先将获得的原始点云数据过滤掉杂点后向 XY 平面投影,得到的对接面和基准孔位置如图 8 所示。

接着使用基于扫描线法的孔边界特征提取算法对基准孔边界特征进行提取,并利用最小二乘法原理对基准孔坐标位置进行提取计算,提取的基准孔边界和孔中心如图 9 所示。基准孔边界提取完成后,拟合出孔中心坐标为  $O_B=(1\ 515.007, 127.745)$ ,半径为 5.08 mm。经过多次扫描实验,本文设计的算法拟合出的孔半径值已经接近实际孔半径值,误差值小于 0.1 mm。

经实际加工试验验证,通过上述算法计算出的基准孔孔中心坐标位置精度优于 0.1 mm,满足对接面制孔精度工艺要求。部件 B 对接面基准孔特

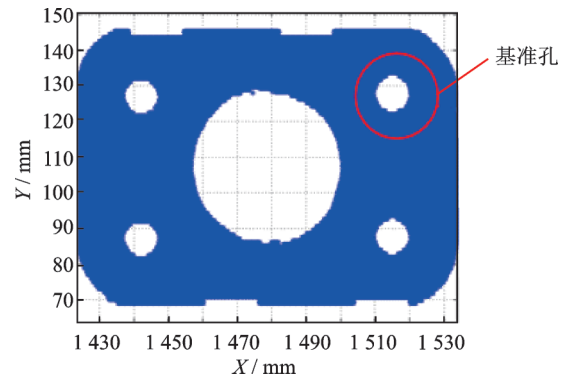


图 8 对接面点云分布和基准孔位置示意图

Fig.8 Diagram of point cloud distribution and reference hole location on docking surface

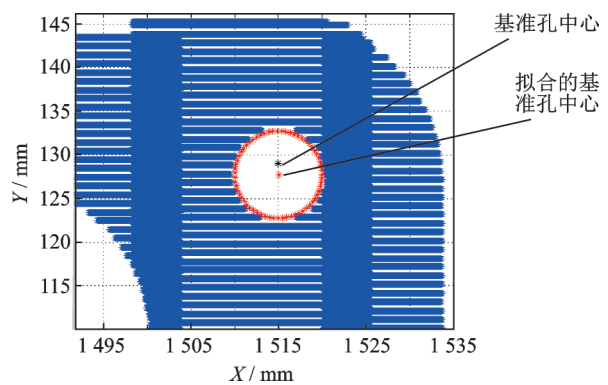


图 9 提取的基准孔边界特征

Fig.9 Extraction of boundary features of reference holes

征提取加工实验如图 10 所示。



图 10 部件 B 对接面基准孔特征提取加工实验

Fig.10 Processing experiment of feature extraction of base hole of component B butt face

### 3.3 部件 A 基准孔坐标提取实验

通过对激光轮廓扫描仪获得的点云数据进行处理后,计算拟合出的部件 B 基准孔坐标  $O_B=[1\ 515.007\ 127.745\ 0]^T$ ,部件 B 后退距离  $L_1=1\ 300\ \text{mm}$ ,通过多次对孔实验标定的部件 A 对接面基准孔在 X, Y 方向的偏差值矩阵为  $\Delta A_{xy}=[0.21\ 0.18\ 0]^T$ ,机器人在飞机装配坐标系下的姿态矩阵  $R'_1$  为

$$R'_1 = \begin{bmatrix} 0.135\ 579 & 0.068\ 889 & 0.988\ 458 \\ 0.007\ 905 & 0.997\ 457 & -0.070\ 51 \\ -0.990\ 756 & -0.017\ 241\ 1 & -0.134\ 914 \end{bmatrix}$$

部件B在飞机装配坐标系下的姿态矩阵 $R'_2$ 为

$$R'_2 = \begin{bmatrix} 0.997\ 523 & 0.068\ 889 & 0.001\ 376 \\ -0.068\ 965 & 0.990\ 816 & 0.017\ 601 \\ -2.925E-05 & -0.017\ 526 & 0.999\ 986 \end{bmatrix}$$

部件B和机器人在飞机装配坐标系下的姿态变换矩阵 $R'_3$ 为

$$R'_3 = \begin{bmatrix} 0.134\ 872\ 1 & -0.000\ 341 & 0.990\ 998 \\ -0.000\ 178 & 0.993\ 377 & 0.000\ 280 \\ 0.990\ 684 & 0.000\ 451 & -0.134\ 555 \end{bmatrix}$$

则可由式(11)计算得到部件A基准孔坐标位置 $O_A$ 为

$$O_A = [1\ 690.550\ 127.693\ 0]^T$$

使用计算得到的部件A对接面基准孔坐标位置进行实际加工实验,并在对接面制孔完成后,将部件A和部件B对接面贴合,使用塞规对对接孔对接质量进行检测,结果表明,使用该算法计算得到的基准孔坐标位置在X,Y方向的误差小于0.1 mm,可以满足系统制孔精度要求。部件A对接面基准孔坐标提取实验如图11所示。

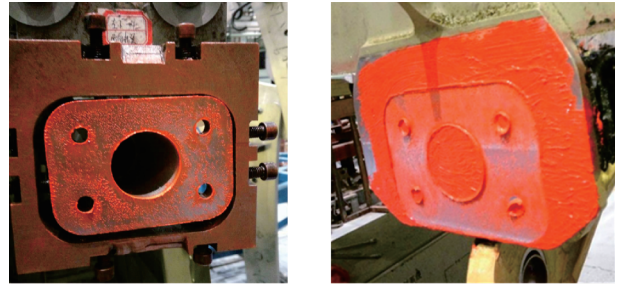


图11 部件A对接面孔特征提取实验

Fig.11 Experiment of feature extraction for component A butt face

### 3.4 对合实验结果

利用激光扫描仪将8个对接面轮廓全部扫描完成后,通过编写的姿态转换MATLAB算法及测量计算软件,计算出每个对接面的高点、低点坐标值以及每个对接面的对接加工量,接着电主轴夹持面铣刀依次对每个对接面按照上面通过实验获得的铣削参数进行铣削加工。加工时,系统震动较小,铣削后对接面质量较高。所有对接面铣削完成后,操作部件B沿系统X正方向移动1 300 mm,将部件B与部件A对接面贴合,接着使用塞尺和红丹粉对两对接面贴合度进行检测,如图12所示,图中红丹粉分布均匀,使用塞尺测得的4组贴合面贴合间隙小于0.05 mm,表明平面对接度满足要求。



(a) Component B-4th butt joint (b) Component A-4th butt joint

图12 对接面贴合效果

Fig.12 Bonding effect of butt joint

对接面全部铣削完成并检验合格后,即可开始对接面的铣削制孔工作。根据激光轮廓扫描仪获取的对接面基准孔坐标位置和对接面制孔流程,并按照通过实验获得的对接面制孔、扩孔最优参数依次对8个对接面进行制孔、扩孔操作。

通过实验获得的铣削制孔参数完成4组部件A部件B对接面进行铣削、制孔加工后,使用千分表、塞规、塞尺及粗糙度对比标准块对部件A,部件B对接面平面度以及制孔精度进行检测评价。其中对接面平面度使用千分表进行检测,孔径精度及对孔精度使用标准塞规进行检测,对接面以及孔内壁粗糙度值通过与标准块比较得到,对接面间隙在部件A,部件B对接面对接时使用标准塞尺及红丹粉进行检测,孔垂直度测量时,使用对应孔径的标准芯棒插入测量孔内,然后使用塞尺检测间隙。随机选取6个孔、4组对接面进行检测,测得的对接面及对接孔各主要精度指标如表1,2所示。

表1 各对接孔精度指标

Tab.1 Accuracy indicators of docking holes

序号	孔径精度/ mm	孔内壁粗糙度/ $\mu\text{m}$	孔垂直度偏差/ (°)
1	$\leq 0.027$	$\leq 1.6$	0.21
2	$\leq 0.027$	$\leq 1.6$	0.32
3	$\leq 0.027$	$\leq 1.6$	0.42
4	$\leq 0.027$	$\leq 1.6$	-0.25
5	$\leq 0.027$	$\leq 1.6$	0.11
6	$\leq 0.027$	$\leq 1.6$	0.08

由表2中测量的数据可知加工的对接面及所制孔均满足铣削和制孔精度要求。目前,大部件数字化装配机器人铣削制孔设备已在中航工业某部装厂投入使用,累计完成了多次部件A和部件B对接面铣削制孔加工任务,极大地提高了该部件厂的数字化装配水平和装配效率。

表2 各对合面贴合精度指标

Tab. 2 Accuracy index of each pair of joints

序号	平面度/ mm	粗糙度/ $\mu\text{m}$	贴合间隙/ mm	孔轴线偏差/ mm
A-1面	$\leq 0.024$	$\leq 1.6$	$\leq 0.05$	$\leq 0.05$
B-1面	$\leq 0.028$	$\leq 1.6$	$\leq 0.05$	$\leq 0.05$
A-2面	$\leq 0.019$	$\leq 1.6$	$\leq 0.05$	$\leq 0.05$
B-2面	$\leq 0.025$	$\leq 1.6$	$\leq 0.05$	$\leq 0.05$
A-3面	$\leq 0.028$	$\leq 1.6$	$\leq 0.05$	$\leq 0.05$
B-3面	$\leq 0.020$	$\leq 1.6$	$\leq 0.05$	$\leq 0.05$
A-4面	$\leq 0.026$	$\leq 1.6$	$\leq 0.05$	$\leq 0.05$
B-4面	$\leq 0.023$	$\leq 1.6$	$\leq 0.05$	$\leq 0.05$

## 4 结 论

(1)根据某型飞机部件A和部件B数字化装配需求和技术要求,完成了机器人铣削制孔系统总体结构设计,并对大部件数字化装配机器人铣削制孔的关键技术进行了简要分析。

(2)研究了大量散乱点云数据的预处理算法;研究了基于迭代拟合和栅格法的点云滤波算法及对接面特征提取算法,并进行了点云滤波和面特征提取实验;研究了基于扫描线法和最小二乘法原理的基准孔坐标位置提取算法。

(3)通过在产品上进行加工实验验证,采集了所需的实验数据并进行了分析论证,结果表明各项实验验证参数均满足系统精度要求。

### 参考文献:

- [1] 陶波,赵兴炜,丁汉.大型复杂构件机器人移动加工技术研究[J].中国科学:技术科学,2018,48:1302-1312.  
TAO Bo, ZHAO Xingwei, DING Han. Study on robotic mobile machining techniques for large complex components[J]. Sci Sin Tech, 2018, 48: 1302-1312.
- [2] 秦瑞祥,邹冀华.工业机器人在飞机数字化装配中的应用[J].航空制造技术,2010(23):104-108.  
QIN Ruixiang, ZOU Jihua. Application of industrial robot in aircraft digital assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(23): 104-108.
- [3] OLABI A R, BÉARÉE O, GIBARU M D. Feedrate planning for machining with industrial six-axis robots[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(5): 471-482.
- [4] 王国磊,吴丹,陈恳.航空制造机器人现状与发展趋势[J].航空制造技术,2015,479(10):26-30.  
WANG Guolei, WU Dan, CHEN Ken. Current status and development trend of aviation manufacturing

robot [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 479(10): 26-30.

- [5] SUSEMIHL H B C, STURMER S. Referencing strategies for high accuracy machining of large aircraft components with mobile robotic systems [EB/OL]. (2017-01-21).<https://doi.org/10.4271/2017-01-2166>.
- [6] MUIJS L S M. Collaborative robot applications at GKN aerospace's fokker business [EB/OL]. (2017-01-20).<https://doi.org/10.4271/2017-01-2091>.
- [7] BAE. BAE systems: Behind the scenes of the F-35 Fighter [EB/OL]. (2017-05-23).<https://www.themanufacturer.com/articles/bae-systems-behind-the-scenes-of-the-f35-fighter/>.
- [8] 谢祥南.螺旋铣制孔设备孔径自动控制系统设计研究[D].杭州:浙江大学,2014.  
XIE Xiangnan. Design and research of aperture automatic control system for spiral milling and hole making equipment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [9] 单以才,何宁,李亮.机器人化螺旋铣孔运动的矢量建模与仿真[J].计算机集成制造系统,2014,20(3):612-617.  
SHAN Yicai, HE Ning, LI Liang. Vector modeling and simulation of robotic orbital drilling motion [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(3): 612-617.
- [10] WANG W C Y. A path planning method for robotic belt surface grinding[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(4): 520-526.
- [11] 薛婷,秦现生,王宁,等.面向制孔机器人的视觉检测系统设计与实现[J].机械制造,2014,52(7):65-68.  
XUE Ting, QIN Xiansheng, WANG Ning, et al. Design and implementation of visual inspection system for hole-making robot [J]. Machinery Manufacturing, 2014, 52(7): 65-68.
- [12] 刘洋.机器人标定关键技术研究[D].武汉:华中科技大学,2016.  
LIU Yang. Key technologies of robot calibration [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [13] NISTER D O, NARODITSKY J R B. Visual odometry [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. [S.l.]: IEEE, 2004: 1-8.
- [14] NISTER D O, NARODITSKY J, BERGEN R. Visual odometry for ground vehicle applications [J]. Journal of Field Robotics, 2010, 23(1): 3-20.
- [15] 王莹.双目立体视觉图像匹配与目标定位方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.  
WANG Ying. Research on binocular stereo vision image matching and target location method [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2013.

(编辑:陈璐)