

# 一种复杂曲面的精密测量逆向与误差评定方法

祁若龙<sup>1</sup>, 豆文强<sup>1</sup>, 张珂<sup>1</sup>, 李论<sup>2</sup>, 石怀涛<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

**摘要** 目的 研究叶片类零件精密测量、逆向与误差评定方法, 为该类零件的精密加工提供数字化误差分布模型。方法 针对接触式测头存在的空间径向偏置问题, 基于四点标定法, 建立空间数学模型, 完成工具中心点(TCP)的标定; 针对叶片点云分布散乱、无序等问题, 提出基于多级B样条插值方法, 进行叶片三维点云的曲面重建; 最后基于迭代法, 对叶片误差进行精确评定。结果 对测量所得叶片点云, 基于多级B样条与控制网格差异化细分的重建算法可以重建出高保真的连续曲面; 误差评定算法可以完成测量结果与设计模型之间不小于0.01 mm的误差计算并得到分层分区的误差可视化云图。结论 机器人接触式测量系统可以对叶片类复杂曲面完成高精度测量, 采用基于B样条的三维重建算法可以快速的重建出叶片三维曲面; 笔者提出的误差评定算法可以进行高精度叶片点云的误差计算, 其分层分区结果对于叶片抛磨精加工阶段具有指导意义。

**关键词** 接触式测量; 三维点云; 多级B样条; 曲面重建; 误差评定

中图分类号 TP241

文献标志码 A

**引用格式:** 祁若龙, 豆文强, 张珂, 等. 一种复杂曲面的精密测量逆向与误差评定方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(3): 545-553. (QI Ruolong, DOU Wenqiang, ZHANG Ke, et al. A method of precision measurement, reverse and error evaluation for complex curved surface[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(3): 545-553.)

## A Method of Precision Measurement, Reverse and Error Evaluation for Complex Curved Surface

QI Ruolong<sup>1</sup>, DOU Wenqiang<sup>1</sup>, ZHANG Ke<sup>1</sup>, LI Lun<sup>2</sup>, SHI Huaitao<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, China, 110016)

**Abstract:** To study the precision measurement, reverse engineering, and error evaluation methods of blade-like components, and to provide a digital error distribution model for the precision

收稿日期: 2022-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175107)

作者简介: 祁若龙(1983—), 男, 教授, 博士, 主要从事机器人智能控制与智能精密加工等方面研究。

machining of such components, a space mathematical model was established to address the spatial radial bias issue of contact probes based on the four-point calibration method, which was used to calibrate the tool center point (TCP). For the scattered and unordered distribution of blade point clouds, a multi-level B-spline interpolation method was proposed for the surface reconstruction of the 3D blade point clouds. Finally, an iterative method was employed to accurately evaluate the blade errors. For the measured blade point clouds, the reconstruction algorithm based on multi-level B-splines and control grid differentiated subdivision can create high-fidelity continuous surfaces; the error evaluation algorithm can calculate errors between the measurement results and the design model no less than 0.01 mm and obtain a stratified and zoned error visualization cloud map. The robotic contact measurement system can achieve high-precision measurement of complex blade surfaces. The 3D reconstruction algorithm based on B-splines can quickly reconstruct the 3D blade surfaces. The error evaluation method proposed by the authors can calculate the errors in high-precision blade point clouds, and the stratified and zoned results have clear guiding significance for the polishing and precision machining stages of the blades. The feasibility and effectiveness of the proposed methods are demonstrated through theoretical analysis and final experimental results.

**Key words:** contact measurement; three-dimensional point cloud; multistage B-spline; surface reconstruction; error evaluation

复杂曲面类零件在航空航天领域内应用广泛,且随着精密制造、机器人科学等技术的发展,其加工精度的要求也越发提高。航空发动机叶片、叶盘、叶轮等复杂曲面零件更是被视为发动机的“心脏”,其加工精度关乎零件的使用寿命,直接影响到航空发动机的推重比<sup>[1-2]</sup>。因此,提高叶片的测量与误差评定精度,是提升叶片加工精度的有效手段。

叶片类零件形状特殊、曲面构成复杂、测量难度高,当前对叶片零件的测量方法主要有光学非接触式测量和接触式测量。光学非接触式测量方法可以快速地完成零件单方向上的扫描测量,S. Zhan 等<sup>[3]</sup>通过三维激光扫描仪测量点云,并利用随机滤波和双边滤波的方法对点云去噪。单彦虎等<sup>[4]</sup>基于3D线激光传感器获取工件的点云,提出了一种点云拟合与多次滤波相结合的测量方法。C. Sofia<sup>[5]</sup>利用结构光与摄影测量结合的方法,提出了评估测量性能的评价指标。上述方法对于金属类零件测量时,会由于光线反射原因而需要在零件表面喷涂显影剂,影响测量精度和测量效率,而且,对于投影存在干涉的复杂曲面类零件,单次扫描无法得到完整结

果,而多次扫描需要进行数据拼接<sup>[6-7]</sup>,进一步增大了误差。接触式测量方法虽然速度较慢,但不需要喷涂显影剂,且在轨迹设计合理的情况下一次测量就可以得到叶片表面的完整三维点云。在传统的接触式测量方面,三坐标测量<sup>[8]</sup>作为一种离线测量方式,其测量效率低,对环境要求高,且测量精度受操作人员水平影响,零件的多次装夹和定位也会增大误差。另一种典型接触式测量方法是在机测量(On Machine Measurement, OMM)<sup>[9-10]</sup>,用测头来替换数控机床的刀具,通过控制加工轨迹来控制测头的运动轨迹,以此来完成对零件的测量。杨光等<sup>[11]</sup>基于FV-1000加工中心、FANUC-M数控系统和EP触发式测头建立的在机测量系统可以根据测量数据完成曲面建模并生成加工轨迹。Zhou Yanfeng等<sup>[12]</sup>通过标准球面实现了在机测量系统的全局标定。Ding Dawei等<sup>[13]</sup>提出了一种针对在机测量系统的迭代标定方法,并对数据进行滤波和边缘识别,提高了测量系统的稳定性。虽然在机测量相比三坐标测量在精度方面有了一定提升,但在机测量效率较低,对机床控制系统的稳定性和瞬态响应及时域性

能响应要求较高,所测工件大小和形状受机床操作空间的限制。鉴于此,笔者采用机器人接触式测量方法对叶片进行测量,机器人关节动作灵活,作业空间大,克服了在机测量对工件大小存在限制的缺陷,亦具有对工件外形特征要求低、高效率和高精度等优点。

通常,测量结果为不含拓扑信息的散乱点云<sup>[14]</sup>。而实际应用中,为了后续使用,一方面,需要将其拟合为更有用的张量积网格曲面的形式,另一方面,需要对点云进行高精度的误差评定。在拟合与重建方面,Delaunay三角剖分<sup>[15]</sup>算法可以实现网格曲面重建,但对于最大最小角判断的对角线交换准则不成立的三维点云,基于外接圆判据的Delaunay三角化难以保证网格曲面质量。泊松曲面重建<sup>[16]</sup>采取隐性拟合方式,需要求解泊松方程来取得点云模型所描述的表面信息代表的隐性方程,时间复杂和空间复杂度高。但在工业应用中,通常对计算效率要求较高,且点云数据分布散乱,特征点分布无规律,以上方法较难适用。

为提高测量精度与效率,笔者基于文献[17-19]提出的用于图像变形的多级B样条逼近方法,根据控制网格的层次结构生成描述曲面的函数组,并通过控制网格做差异化细分处理提高重建精度,实现从一组散乱叶片点云快速重建出连续曲面的目标,得到具有拓扑信息的高保真叶片三维曲面;通过对设计模型进行下采样,获取设计模型的离散化点云,并利用最近点迭代(Iterative Closest Point, ICP)算法将下采样结果与测量结果进行精确配准,然后计算法向误差并进行分层分区处理,所生成的叶片表面误差分布云图对叶片精加工具有重要指导意义。

## 1 机器人接触式测量方法

### 1.1 测量系统

笔者采用复杂曲面测量系统主要由计算

机、UR-10 机器人、RENISHAW 测头等组成,通过机器人接触式测量方法,使得叶片零件只需一次定位即可完成测量。避免了在机测量存在的机床震动及操作空间受限等问题。机器人通过控制总线连接上位机。由上位机发送运动指令控制机器人运动,当测头到达叶片上方安全位置时,再沿法向朝叶片表面运动,直至装在手端末端的探针与叶片表面接触,接触瞬间,测头内电位发生变化,机械臂运动暂停并将当前所测位姿数据反馈给上位机,接着测头抬起并进行下一个点位的测量,循环往复,完成整个叶片零件曲面的高精度测量。

### 1.2 TCP 标定

在实际应用中,工业机器人通过在末端法兰盘上安装各种工具,以满足不同工况的作业需求。为了精确控制机器人末端测头的运动轨迹,需要对工具中心点(Tool Center Point, TCP)进行标定<sup>[20]</sup>。常见的方法是将标定工具安置在工作台上,通过控制机器人使工具中心点在多次不同的位姿下与标定工具接触,通过计算便可得出 TCP 位姿。标定过程中的机器人位姿如图1所示。



图1 UR 机器人 TCP 标定

Fig. 1 The TCP calibration of UR-robot

笔者所采取的末端工具为球形测头,由于空间中的标定工具只能接触到测头的球面,而实际的 TCP 应该位于球心。为了完成球心 TCP 的标定,分别为接触点和球心建立坐标系:将球形测头在垂直方向上的最低点

定义为坐标系  $\{O\}$  的原点,球心定义为坐标系  $\{P\}$  的原点,通过控制机器人,使测球底部以四次不同的位姿接触标定工具,如图2所示。

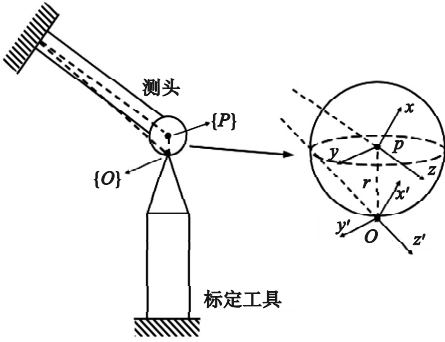


图2 球形测头 TCP 标定

Fig. 2 The TCP calibration of spherical probe

根据四次接触结果,采用最小二乘法<sup>[21]</sup>来完成  $\{P\}$  的标定。基坐标系  $T_{Base}$  ( $T_B$ ) 和末端法兰坐标系  $T_{End}$  ( $T_E$ ) 通常在机器人制作时已设定好。 $T_t$  是工具坐标系,由六自由度机械臂各关节间关系可知:

$$\begin{bmatrix} {}^B_E R & {}^B t_i \\ 000 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^E_T R & {}^E P_t \\ 000 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B_E R_i & {}^B P_o \\ 000 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

$${}^E P_o = \begin{bmatrix} {}^B_E R_1 - {}^B_E R_2 \\ {}^B_E R_2 - {}^B_E R_3 \\ \vdots \\ {}^B_E R_{n-1} - {}^B_E R_n \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} {}^B_E R_1 - {}^B_E R_2 \\ {}^B_E R_2 - {}^B_E R_3 \\ \vdots \\ {}^B_E R_{n-1} - {}^B_E R_n \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} {}^B_E R_1 - {}^B_E R_2 \\ {}^B_E R_2 - {}^B_E R_3 \\ \vdots \\ {}^B_E R_{n-1} - {}^B_E R_n \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} {}^B P_{2Eo} - {}^B P_{1Eo} \\ {}^B P_{2Eo} - {}^B P_{1Eo} \\ \vdots \\ {}^B P_{nEo} - {}^B P_{n-1Eo} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

根据  ${}^E P_o$  与机器人基坐标系的关系可知:

$${}^B P_o = {}^B_E R \cdot {}^E P_o. \quad (7)$$

机器人基坐标系  $z$  轴竖直向上,测头半径为  $r$ ,给  ${}^B P_o$  的  $z$  向正方向上加上测头半径补偿向量  $\vec{e} = [0, 0, r]$ ,即可知 TCP 在机器人基坐标系下的表达式:

$${}^B P_{tcp} = {}^B P_o + \vec{e}. \quad (8)$$

最终 TCP 在末端法兰坐标系的表达式:

$${}^E P_{tcp} = {}^E_B R \cdot {}^B P_{tcp} = ({}^B_E R)^T \cdot {}^B P_{tcp}. \quad (9)$$

式中:  ${}^B t_i$  为第  $i$  次接触时,工具中心点 (TCP) 在基坐标系  $B$  中的位置;  ${}^B_E R_i$  为第  $i$  次接触时  $T_E$  相对  $T_B$  的旋转矩阵;  ${}^B P_o$  为测头底部坐标系  $\{O\}$  原点的坐标  ${}^B P_o$  在基坐标系  $\{B\}$  下的表达。则式(1)可写作:

$${}^B_E T \cdot {}^E_T T = {}^B_T T. \quad (2)$$

其中,  ${}^B_E T$  为  $\{E\}$  相对于  $\{B\}$  的位姿;由式(2)中的矩阵运算关系可得:

$${}^B_E R_i \cdot {}^E P_{tcp} + {}^B P_{iEo} = {}^B P_{tcp}. \quad (3)$$

由于标定时,机器人姿态发生改变,但工具坐标系原点相对于基坐标系的位置不变,则易知:

$${}^B_E R_1 \cdot {}^E P_t + {}^B P_1 = {}^B_E R_2 \cdot {}^E P_t + {}^B P_2 = \dots = {}^B_E R_n \cdot {}^E P_t + {}^B P_n. \quad (4)$$

其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} {}^B_E R_1 - {}^B_E R_2 \\ {}^B_E R_2 - {}^B_E R_3 \\ \vdots \\ {}^B_E R_{n-1} - {}^B_E R_n \end{bmatrix} \cdot {}^E P_{tcp} = \begin{bmatrix} {}^B t_2 - {}^B t_1 \\ {}^B t_3 - {}^B t_2 \\ \vdots \\ {}^B t_n - {}^B t_{n-1} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

对于式(5),当  $n \geq 3$  时,系数矩阵列满秩,为不相容方程组,需利用最小二乘法计算  ${}^E P_{tcp}$  的最小二乘解,即:

### 1.3 机器人 D-H 建模

当测头与叶片表面接触时,会发生高低电位转换并记录当前 TCP 相对于末端法兰坐标系的位姿。为了获取空间叶片三维点云,还需将末端法兰坐标系下的测头位姿转化到机器人基坐标系下,通过对机器人进行运动学 D-H 建模来完成,如图3所示。

根据 D-H 法建立机器人的运动学方程,各个关节之间的关系为

$${}^n_{n+1} T = Rot(X, \theta_{n+1}) \cdot Trans(0, 0, d_{n+1}) \cdot Rot(X, \alpha_{n+1}) \cdot Trans(\alpha_{n+1}, 0, 0). \quad (10)$$

式(10)的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_{n+1}) & -\sin(\theta_{n+1})\cos(\alpha_{n+1}) & \sin(\theta_{n+1})\sin(\alpha_{n+1}) & \cos(\theta_{n+1})\alpha_{n+1} \\ \sin(\theta_{n+1}) & \cos(\theta_{n+1})\cos(\alpha_{n+1}) & -\cos(\theta_{n+1})\sin(\alpha_{n+1}) & \cos(\theta_{n+1})\cos\alpha_{n+1} \\ 0 & \sin(\theta_{n+1}) & \cos(\alpha_{n+1}) & d_{n+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

之和:

$$F(x, y) = f_0 + f_1 + \cdots + f_k. \quad (13)$$

算法以计算初始的  $f_0$  开始:

$$f(x, y) = \sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 B_k(s) B_l(t) \psi_{(i+k)(j+l)}. \quad (14)$$

其中,  $\psi_{i,j}$  为控制网格第  $i, j$  个控制点的值;  $B_k$  和  $B_l$  为三次 B 样条函数, 定义为

$$\begin{cases} B_0(t) = \frac{1}{6}(1-t)^3; \\ B_1(t) = \frac{1}{6}(3t^2 - 6t + 4)^3; \\ B_2(t) = \frac{1}{6}(-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1)^3; \\ B_3(t) = \frac{1}{6}t^3. \end{cases} \quad (15)$$

根据控制网格进行曲面重建时, 函数  $f$  应在  $(x_c, y_c)$  处取值  $z_c$ , 即控制点  $\psi_{kl}$  需要满足:

$$z_c = \sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 \omega_{kl} \psi_{kl}. \quad (16)$$

为了求解  $\psi_{kl}$  并减小误差, 加入约束:

$$\min: J(\{\psi_{kl}\}) = \sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 \psi_{kl}^2. \quad (17)$$

以计算  $\psi_{kl}$  的最小二乘解, 由于采用的是多级 B 样条基函数,  $f$  值与其附近控制网格的 16 个控制点相关, 控制点所占区域大小会对重建结果产生影响(见图 4)。当网格较为密集时, 数据点的影响就仅限于较小的邻域, 结果就会导致所拟合的曲面局部精度提高, 但整体光滑度降低。

由于第一次控制网格的近似值会与  $p$  中的真实数据有较大的差异, 表示为:  $\Delta^1 z_c = z_c - f_0(x_c, y_c)$ 。为了兼顾平滑度与精度, 通过对控制网格做差异化细分来处理, 即控制

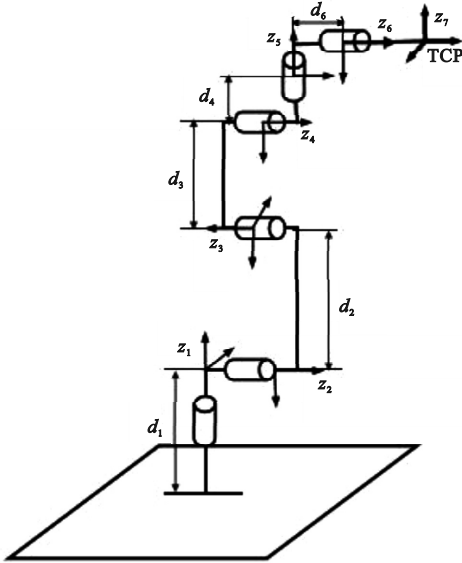


图3 机器人 DH 建模

Fig. 3 The D-H model of robot

测头(工具坐标系)在基坐标系下的位姿可以表示为

$${}^0_6T = {}^0_1T(\theta_1) {}^1_2T(\theta_2) {}^2_3T(\theta_3) {}^3_4T(\theta_4) {}^4_5T(\theta_5) {}^5_6T(\theta_6). \quad (12)$$

式中:  ${}^0_6T$  为测头坐标系在机器人基坐标系下的位姿, 即为叶片在三维空间中的点云信息。

## 2 点云快速拟合与误差评定

### 2.1 点云三维重建

点云只是物体数字模型的初始化表达, 物体的每个形状特征都可以由点云中的一部分点来表示, 点云三维重建是指从一组非均匀或无规律数据样本来拟合光滑曲面。笔者所采用的重建算法基于多级 B 样条函数, 设  $P = \{x_c, y_c, z_c\}$  是点云数据集,  $\Omega$  是  $xy$  平面上的矩形区域,  $(x_c, y_c)$  是  $\Omega$  中的点, 最终曲面的近似函数  $F$  定义为一系列 B 样条函数



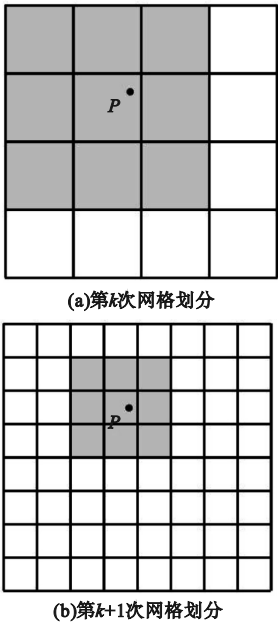


图4 数据点的影响区域(阴影部分)

**Fig. 4** The impact area of data points(shadow region)  
网格整体大小不变,细分后的网格密度是细分前的两倍,但作用是逼近前一次近似所留下的误差,即  $p_1 = \{(x_c, y_c, \Delta^1 z_c)\}$ , 依次类推,除首个控制网格外,后续逐渐密集的控制网格都是为了逼近之前的近似所留下的误差,当细分到  $k$  级时,留下的误差为

$$\Delta^k z_c = z_c - \sum_{i=1}^{k-1} f_i(x_c, y_c) = \Delta^{k-1} z_c - f_{k-1}(x_c, y_c). \tag{18}$$

随  $k$  逐渐增大时,近似误差  $\Delta^k z_c$  就会逐渐减小,重建精度就会进一步提升。

2.2 误差分析

叶片零件与设计模型之间的误差是衡量工件质量优劣的重要指标,是提高零件加工精度的关键要素<sup>[22]</sup>。在计算零件与模型之间的误差时,由于测量时叶片点云的参考坐标系与叶片设计模型坐标系并不一致,且姿态也不相同,无法直接进行误差评定,所以需要先对叶片点云与叶片设计模型之间进行配准,即通过刚性平移、旋转坐标变换,将测量结果转换为设计模型坐标系下的表达,在此基础上对叶片误差做计算与评定。

通过对叶片 stl 模型进行下采样来获取设计模型的点云数据,下采样方法采用分布均匀、结果抗噪性较强的 Clustering decimation (集群采样)算法完成,如图 5 所示。

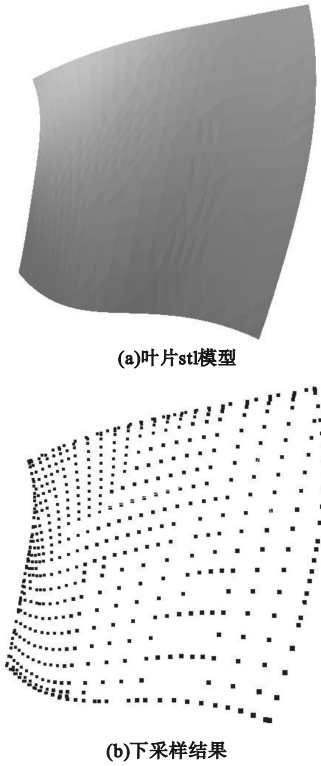


图5 叶片 stl 模型与下采样结果

**Fig. 5** The stl model of blade and down sampling results  
经过配准,叶片零件与其设计模型之间的误差就可以用测量点云中的点  $p'$  与过  $p'$  的曲面法矢与理论模型曲面的交点  $p$  之间的距离来表示,如图 6 所示。

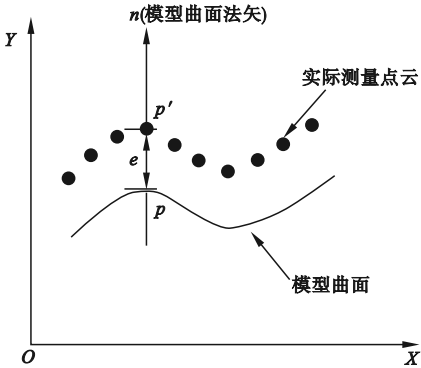


图6 点云误差计算模型

**Fig. 6** The error calculation model of point cloud

测量点与模型曲面之间的法向距离  $e$  可以用式(19)来表示:

$$e = p' - p = [(x_{p'} - x_p)^2 + (y_{p'} - y_p)^2 + (z_{p'} - z_p)^2]^{1/2}.$$

(19)

通过算法遍历测量点云并逐个计算法向距离  $e$ , 即可得出叶片的测量结果与理论模型之间的误差。

### 3 实验及计算结果

#### 3.1 测量实验

本实验采用 UR-10 协作式 6 自由度机器人, 6 个关节均为旋转副, 操作方便灵活, 延伸作业空间 1.3 m, 可完成复杂叶盘曲面的测量, 末端测头为 RENISHAW--1735, 测量样本为某型号发动机叶片, 机器人和叶片如图 7、图 8 所示。

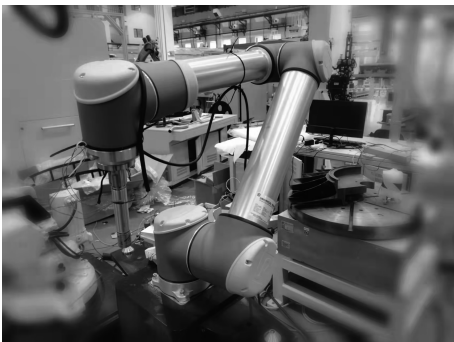


图7 UR-10 机器人  
Fig.7 The UR-10 robot



图8 被测叶片  
Fig.8 The measured blade

在叶片设计流程中, 首先根据性能要求和几何限制确定几何参数, 如弯曲角度、厚

度、弦长和扭转角度等; 然后, 基于这些数据建立一组二维轮廓曲线, 通过放样生成叶片整体曲面构型。测量点规划思路基于叶片曲面设计流程的逆向过程。首先, 采用一组间距相等且相互平行的空间平面从叶片表面截取一系列二维轮廓曲线; 然后, 基于这组轮廓线进行测量点规划, 再使用机器人末端的触发式测头沿测量点进行接触式测量。实验共测量 1 057 个数据点, 用  $(X, Y, Z)$  来表示数据点在机器人基坐标系中的位置, 部分数据如表 1 所示。

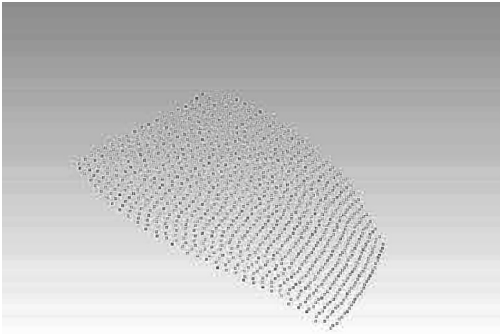
表1 叶片点云数据

Table 1 The point cloud data of blade

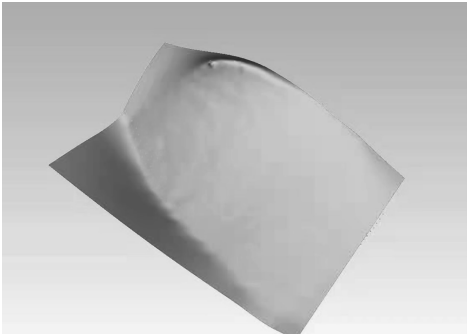
序号	X/cm	Y/cm	Z/cm
1	25.201 1	32.857 6	18.893 7
2	26.620 2	27.201 5	19.606 8
3	28.441 5	20.110 1	19.634 2
4	27.634 2	23.098 6	19.074 1
5	29.560 4	16.653 4	21.175 6
6	30.360 1	14.895 8	23.057 5
7	31.270 9	12.029 7	23.071 3
8	31.270 9	12.029 7	23.071 3
9	32.998 2	11.760 4	25.962 2
10	33.835 5	12.334 5	31.592 9
11	34.411 2	13.829 4	29.220 7
12	26.137 4	26.921 6	23.869 2
13	28.446 7	21.750 7	24.836 1
14	31.799 2	11.519 2	29.274 4
15	35.147 3	16.312 4	34.485 4
16	39.000 3	9.977 1	36.870 6
17	35.639 9	11.462 4	35.013 9
⋮	⋮	⋮	⋮
1 051	37.362 5	13.265 6	14.163 5
1 052	38.710 2	14.285 7	13.245 7
1 053	38.700 2	15.730 5	13.061 4
1 054	39.556 5	17.297 7	12.581 1
1 055	40.354 5	17.104 6	12.498 6
1 056	42.757 6	12.234 1	12.319 5
1 057	41.522 6	17.411 1	12.368 2

重建算法采用c++语言,基于 windows,点云拟合及其渲染的可视化窗口模块,采用

vtk( Visualization Toolkit) 来完成,渲染效果如图9所示。



(a)叶片点云



(b)点云重建结果

图9 叶片点云与重建结果

Fig.9 The point cloud and reconstruction results of blade

3.2 误差分析结果

通过计算叶片点云的误差并做分层分区域处理,即可得到叶片表面的误差e分布云图如图10所示。当 $e > 0.05\text{ mm}$ 时,红色;当 $0.04\text{ mm} < e < 0.05\text{ mm}$ 时,橙色; $0.03\text{ mm} < e < 0.04\text{ mm}$ 时,黄色; $0.02\text{ mm} < e < 0.03\text{ mm}$ 时,红色; $0.01\text{ mm} < e < 0.02\text{ mm}$ 时,蓝色。

乘法完成 TCP 标定,该方法实用性强,适用范围广。

(2)以多级B样条曲线为基础的曲面重建算法可以根据离散点云数据重构出叶片高保真三维曲面,实现了测量、重构过程动态结合。

(3)通过迭代配准算法结合误差分层模型算法,可以对叶片点云进行快速、精确的误差评定,并生成叶片表面 $0.01 \sim 0.05\text{ mm}$ 的误差云图,实现了零件测量与误差评定的高效结合;经过实验验证,笔者所提方法有效且具有较高的工程应用价值。

参考文献

[1] 黄云,李少川,肖贵坚,等.航空发动机叶片材料及抗疲劳磨削技术现状[J].航空材料学报,2021,41(4):17-35.  
(HUANG Yun, LI Shaochuan, XIAO Guijian, et al. Current status of aeroengine blade materials and anti fatigue grinding technology [J]. Journal of aeronautical materials, 2021, 41 (4): 17-35. )  
[2] 邱磊. 发动机叶片表面的机器人精密磨削加工[D]. 杭州:浙江工业大学,2020.  
(QIU Lei. Robot precision grinding of engine blade surface [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020. )  
[3] ZHAN S, ZHANG H B. Point cloud data processing of three-dimensional reconstruction model of object by 3D laser scanning [J]. Nonlinear optics quantum optics, 2020, 52 (3/

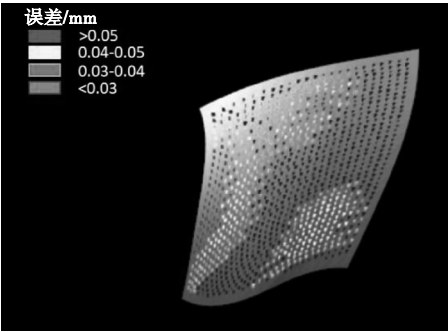


图10 误差分布云图

Fig.10 The error distribution map

通过误差分布云图可以将叶片表面误差分布情况与区域关系进行精确、直观的进行表示,为叶片的下一步精加工提供准确信息。

4 结 论

(1)对复杂曲面进行机器人测量时存在的末端工具偏置问题,可通过在测头底部建立坐标系,利用机器人四点定位结合最小二



- 4);205-217.
- [4] 张潇丹,单彦虎,储成群.基于点云处理的小型工业零件高度精密测量[J].电子测量技术,2022,45(11):134-139.  
(ZHANG Xiaodan,SHAN Yanhu,CHU Chengqun. High precision measurement of small industrial parts based on point cloud processing [J]. Electronic measurement technology, 2022, 45 (11):134-139.)
- [5] SOFIA C, NICOLA S, DANNY S, et al. Measurement of complex freeform additively manufactured parts by structured light and photogrammetry [J]. Measurement, 2020, 164 (16):136-158.
- [6] JIAN G, JANET F, OGUZHAN Y, et al. Investigation of a 3D non-contact measurement based blade repair integration system [J]. Aircraft engineering and aerospace technology: an international journal, 2005, 77(1):34-41.
- [7] 丁少闻,张小虎,于起峰,等.非接触式三维重建测量方法综述[J].激光与光电子学进展, 2017, 54(7):27-41.  
(DING Shaowen,ZHANG Xiaohu,YU Qifeng,et al. Overview of non-contact three-dimensional reconstruction measurement methods [J]. Progress in laser and optoelectronics, 2017, 54 (7):27-41.)
- [8] DU G, SHAO H, CHEN Y, et al. An online method for serial robot self-calibration with CMAC and UFK [J]. Robotics and computer integrated manufacturing, 2016, 42:39-48.
- [9] MULDAH H Y, YUWANA M. CAIP application in OMM operation for box primitive feature: inspection code generation for on machine measurement operation [J]. Applied mechanics and materials, 2014, 3532(660):1401-1427.
- [10] STOJASOIVC M S, DURAKBANS M N, ZIVANOVIC T S. An optimized and virtual on-machine measurement planning model [J]. FME transactions, 2020, 48(4):632-650.
- [11] 杨光,刘利剑,岳彦芳,利用加工中心在机测量构建逆向工程系统[J].计量技术,2017, 332(66-69):452-461  
(YANG Guang, LIU Lijian, YUE Yanfang. Construction of reverse engineering system by on machine measurement of machining center [J]. Measurement technology, 2017, 332(66-69):452-461.)
- [12] ZHOU Yanfeng, CHEN Weifang, CAO Xinhang, et al. One-plane two-hole feature positioning method based on line laser on-machine measurement [J]. Laser & optoelectronics progress, 2021, 58(1):169.
- [13] DING Dawei, ZHAO Zhengcai, LI Yao, et al. Calibration and capability assessment of on-machine measurement by integrating a laser displacement sensor [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2021, 12(41):99-124.
- [14] ZHAO Xu, KANG Rui, LU Ruodan. 3D reconstruction and measurement of surface defects in prefabricated elements using point clouds [J]. Journal of computing in civil engineering, 2020, 34(5):77-98.
- [15] XU Yongbing, LIU Kaixiang, NI Jinyan, et al. 3D reconstruction method based on second-order semiglobal stereo matching and fast point positioning Delaunay triangulation [J]. Public library of science, 2022, 17(1):142-166.
- [16] XU Ziqi, XU Chao, HU Jing, et al. Robust resistance to noise and outliers: screened Poisson surface reconstruction using adaptive kernel density estimation [J]. Computers & graphics, 2021, 11(3):76-99.
- [17] SEUNG L, GEORGE W, SUNGYONG S. Scattered data interpolation with multilevel B-splines [J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 1997, 2(7):3228-3244.
- [18] MARC C, ALBERTO S. Advancing mesh completion for digital modeling and manufacturing [J]. Computer aided geometric design, 2018, 62(12):331-350.
- [19] WEI Feifei, FENG Jieqing. Real-time rendering of algebraic B-spline surfaces via Bézier point insertion [J]. Science China (information sciences), 2014(57):71-85.
- [20] MUSTAFA C, CENGIZ D. High precise and zero-cost solution for fully automatic industrial robot TCP calibration [J]. The industrial robot, 2019, 46(5):155-172.
- [21] 熊烁,叶伯生,蒋明.机器人工具坐标系标定算法研究[J].机械与电子,2012(6):60-63.  
(XIONG Shuo, YE Bosheng, JIANG Ming. Research on calibration algorithm of robot tool coordinate system [J]. Mechanical and electronics, 2012(6):60-63.)
- [22] 王益.基于NURBS控制点重构的曲面加工误差测量与评定技术研究[D].杭州:浙江大学,2014.  
(WANG Yi. Surface machining error based on NURBS control point reconstruction research on difference measurement and evaluation technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)