

DOI: 10.7652/xjtuxb201910019

基于点云数据的自由曲面加工误差评定

何帅, 陈富民, 杨雅棠, 李建华

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对自由曲面加工误差检测困难的问题,提出了一种自由曲面加工误差评定方法。该方法以高精度蓝光扫描仪获取到的点云作为实测数据,以自由曲面的立体印刷模型作为理论模型。首先设置动态偏差阈值去除点云的远距离噪声,利用基于曲面变化度的局部离群系数方法去除点云的近距离噪声;然后采用最近点迭代算法分离点云位置误差的旋转量,以自适应粒子群算法依据最小区域原则分离位置误差的平移量;最后对点云进行基准变换后,计算点云与模型之间的偏差。实验结果表明,相对于最近点迭代算法,所提方法计算的位置误差向量均方根误差减小了 66%,轮廓度减小了 18%。提出方法的位置误差分离精度更高,轮廓度误差评定更准确,适用于扫描点云对自由曲面的加工误差评价,可以有效判断出超差区域。

关键词: 点云数据;自由曲面;加工误差;最近点迭代算法;粒子群算法

中图分类号: TQ320.66 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)10-0135-08

Machining Error Evaluation of Free-Form Surface Based on Point Cloudy Data

HE Shuai, CHEN Fumin, YANG Yatang, LI Jianhua

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the difficulty in detecting the machining error of free-form surface blade, a method for evaluating the machining error of free-form surfaces is proposed, where the point cloud is obtained by the high-precision blue-light scanner as the measured data, and the STL model of the free-form surface is taken as the theoretical one. The dynamic deviation threshold is set to remove the far outliers of point cloud, and the near outliers of the point cloud are removed with the SVLOF method. Then the iterative closest points algorithm is used to separate the rotation of the point cloud position error, and the adaptive particle swarm algorithm is used to separate the translation amount according to the minimum region principle. The deviation between the point cloud and the model is calculated after the reference transformation of the point cloud. The experimental results show that the root mean square error of the position error vector evaluated with the proposed method is reduced by 66% and the profile error is reduced by 18% compared with the iterative closest points algorithm. The position error separation accuracy of this method is higher, and the contour error evaluation is more accurate. The proposed method is suitable for the processing error evaluation of the free-surface by the scanning point cloud, and can effectively judge the out-of-tolerance area.

收稿日期: 2019-02-18。 作者简介: 何帅(1993—),男,硕士生;陈富民(通信作者),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675401)。

网络出版时间: 2019-07-08 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190705.1744.002.html>

Keywords: point cloudy data; free-form surface; machining error; iterative closest point algorithm; particle swarm optimization

自由曲面是工程中最复杂而又经常遇到的曲面,广泛应用于航空、航天、造船等领域。自由曲面的加工质量对零部件的使用性能有着重要的影响^[1],对这种自由曲面零件进行高效率、高精度的加工质量检测至关重要^[2]。对自由曲面进行加工质量评定,首先要获取测量数据,目前常用的方法为三坐标测量自由曲面的有限截面曲线法,但是测量效率低,而且有限的截面曲线并不能完全表征整个自由曲面的加工质量,容易造成自由曲面局部区域的漏检^[3]。随着非接触测量技术的进步,高精度三维扫描仪的测量精度可以达到 $30 \sim 50 \mu\text{m}$,满足常用加工误差的评定要求。因此,获得扫描点云后,评价自由曲面的加工误差成为众多学者研究的热点问题。

在基于点云数据的自由曲面加工误差评定过程中存在两个问题:①如何计算实测点到自由曲面的最近点及偏差;②如何分离实测点云与理论模型的位置误差。因为非均匀有理 B 样条(NURBS)被定义为唯一的自由型曲线曲面表示方法^[4],所以自由曲面可以由 NURBS 进行描述。实测点到自由曲面最近点的计算问题,可以转化为点到参数曲面的最近点求解问题。对于最近点的参数可以采用区间分割^[5-7]或者优化算法^[8-10]进行求解,但参数搜索计算量大,效率较低。此外,三角面片模型可以很好地逼近自由曲面模型,逼近误差在评定允许范围内,因此可以用实测点到空间最近三角面片上的最近点代替所对应自由曲面的最近点^[11-12]。偏差的计算精度受位置误差影响较大,需要将实测点云与理论 CAD 模型进行精配准,分离位置误差,减小位置误差对偏差计算的影响^[13]。最近点迭代(ICP)算法^[13]是一种实现点集间精配准表现良好的算法,可以用来分离实测数据的位置误差^[11]。由于存在加工误差,导致标准 ICP 算法位置误差的平移量计算误差较大,偏差计算不够准确。此外,有许多学者采用进化算法分离位置误差,如粒子群算法^[15-16]和遗传算法^[17]。进化算法求解位置误差的原理是设定适应度函数,生成大量解,通过更新迭代机制求取位置误差,计算量大。

针对上述问题,本文提出一种自由曲面的加工误差评定方法。以高精度蓝光扫描仪获取到的点云作为实测数据,以自由曲面的立体印刷(STL)模型作为理论模型。首先对扫描点云去除噪声;然后采用最近点迭代算法分离位置误差的旋转量,以自适

应粒子群算法分离位置误差的平移量;最后对点云进行基准变换,计算点云与模型之间的偏差,评价自由曲面的加工质量。以仿真数据验证所提位置误差分离方法的有效性,以获得的叶片型面扫描点云为实例数据评价了自由曲面的加工误差。

1 点到理论模型的最近点及偏差计算

三角网格模型由许多小三角面片组成,是对光滑样条曲面模型的三维多面体拟合逼近,可简化复杂形体的表达、计算和存储^[18]。STL 模型是一种常用的三角网格模型格式,与自由曲面模型的误差可以由三角化时的参数进行调节。SolidDesigner 软件可以设定模型转换时的最大偏差,将点到自由曲面的最近点计算问题转化为点到对应 STL 模型的最近点计算,计算精度取决于模型转化的误差,可以根据评定要求自由调节,但精度越高三角化得到的三角面片数量越多,会增加计算量。本文设定模型转换时的最大偏差为 0.001 mm ,精度满足加工误差的评定要求。

为加速空间点到 STL 模型的最近点搜索效率,文献^[11]采用最近顶点对应三角面片搜索最近面片,但对于小曲率半径的自由曲面计算会失效。本文提出一种点 P 到 STL 模型的最近点 $P_{\min}$ 及偏差 p_d 的计算方法,计算过程如下。

Step1:读取自由曲面 STL 文件信息,对 STL 模型表面均匀获取点云 Q ,并记录点云与三角面片的归属关系。对点云 Q 采用 K 维树算法进行存储,加快最近点搜索效率。

Step2:计算点 P 到点云 Q 的最近点,并记录对应的三角面片 f_p ,搜索与三角面片 f_p 邻接的所有三角面片集合 Z_f 。

Step3:计算点 P 到三角面片集合 Z_f 的最短距离,距离最小的三角面片即点 P 对应的最近三角面片 $f_{\min}$ 。点 P 到三角面片 $f_{\min}$ 的最近点即为 $P_{\min}$,点 P 与 STL 模型的最短距离 d 为点 P 与点 $P_{\min}$ 之间的欧氏距离。点 P 与 STL 模型的偏差 p_d 计算公式如下

$$p_d = sd \quad (1)$$

式中: s 为位置符号。

因为 STL 文件中三角面片的法向量都是指向零件外侧,所以 s 可以由 $PP_{\min}$ 与三角面片 $f_{\min}$ 的法

向量的夹角 θ 进行判断: θ 为锐角时, $s=1$; θ 为钝角时, $s=-1$; θ 为直角时, $s=0$ 。

点 P 到某一空间三角面片 $\triangle ABC$ 的最近点 $P'_{\min}$ 求取原理如下。

Step1: 计算点 P 到三角面片所在平面的投影点 P_{ty} , 点 P_{ty} 可能位于图 1 所示的 7 个区域。

Step2: 判断点 P_{ty} 与三角面片 $\triangle ABC$ 的位置关系。首先利用叉积判断点 P_{ty} 与点 C 是否位于边 AB 的同侧, 记点 P_{ty} 的位置符号 f_{AB} , 若同侧令 $f_{AB} > 0$, 若异侧令 $f_{AB} < 0$, 若 P_{ty} 与 AB 共线令 $f_{AB} = 0$; 其次计算点 P_{ty} 到直线 AB 的投影点 P_{AB} , 记 $k_{AB} = \frac{AP_{AB}}{AB}$; 同理, 计算出 f_{BC} 、 P_{BC} 、 k_{BC} 、 f_{CA} 、 P_{CA} 、 k_{CA} 。

Step3: 计算最近点 $P'_{\min}$ 。

若 $f_{AB} \geq 0 \& f_{BC} \geq 0 \& f_{CA} \geq 0$, 点 P_{ty} 位于三角形内, 则 $P'_{\min} = P_{ty}$; 若 $f_{AB} < 0 \& k_{AB} \geq 0 \& k_{AB} \leq 1$, 点 P_{ty} 位于 AB 边外侧, 则 $P'_{\min} = P_{AB}$; 若 $f_{BC} < 0 \& k_{BC} \geq 0 \& k_{BC} \leq 1$, 点 P_{ty} 位于 BC 边外侧, 则 $P'_{\min} = P_{BC}$; 若 $f_{CA} < 0 \& k_{CA} \geq 0 \& k_{CA} \leq 1$, 点 P_{ty} 位于 CA 边外侧, 则 $P'_{\min} = P_{CA}$ 。除上述情况外, 计算点 P_{ty} 与顶点 A 、 B 、 C 的距离, 距离最小的顶点即为 $P'_{\min}$ 。

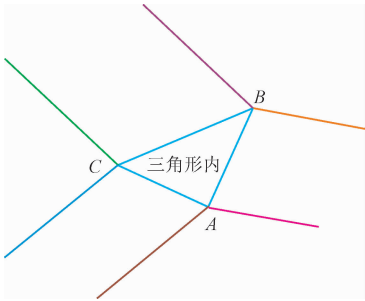


图 1 投影点 P_{ty} 与三角面片 $\triangle ABC$ 的位置关系

2 自由曲面加工误差评价

采用高精度蓝光扫描仪获取零件扫描点云, 由于获取到的点云包含噪声和离群点, 因此需要对扫描点云进行去噪处理。对于远距离噪声, 计算叶身点云数据与理论模型的偏差, 设置动态偏差阈值进行过滤。对于近距离噪声, 采用基于曲面变化度的局部离群系数 (SVLOF) 进行判别。获得的扫描点云与理论 CAD 模型的基准已经基本统一, 对自由曲面开展形位误差分析, 需要分离位置误差对偏差计算的影响。ICP 算法对于两点云间刚性变换的求解精度很高, 由于点云与理论模型上的最近点总存在一定距离, 导致最近点迭代算法计算得到的平移

量误差较大。因此, 本文提出一种最近点迭代结合粒子群算法的位置误差分离方法, 计算实测点偏差, 对自由曲面进行加工误差评价。

2.1 扫描点云的去噪处理

根据噪声的特点可以分为远距离噪声和近距离噪声。远距离噪声特征明显, 与理论模型的偏差较大, 因此可以设置动态偏差阈值进行去除。

Step1: 计算扫描点云与 STL 模型的偏差, 记录每个实测点对应的 STL 模型最近三角面片索引。

Step2: 将同属于一个三角面片的点归为一个邻域, 计算此邻域内的点偏差的标准差 σ , 设定阈值 u , 将偏差不在 $[u-3\sigma, u+3\sigma]$ 范围内的实测点去除。

对于近距离噪声点, 采用聂建辉等提出的 SV-LOF 方法进行判别, 其原理如下^[19]: 定义点云 S 和 S 内一点的坐标向量 $\mathbf{p}$, 定义 $\mathbf{p}$ 的欠 k 邻域矩阵 $\mathbf{N}_{p_k^q}$ 为除 $\mathbf{p}$ 外的最近的 k 个点坐标集合, 定义 $\mathbf{p}$ 的饱和 k 邻域 $\mathbf{N}_{p_k^s}$ 为包含点 $\mathbf{p}$ 的 $k+1$ 个最近点坐标集合。定义 $\mathbf{p}$ 的 SVLOF 系数 $S_k(\mathbf{p})$ 如下

$$S_k(\mathbf{p}) = \frac{\sigma_k^q(\mathbf{p})}{\sigma_k^s(\mathbf{p})} \quad (2)$$

式中: $\sigma_k^q(\mathbf{p})$ 为由 $\mathbf{p}$ 的欠 k 邻域计算出的曲面变化度; $\sigma_k^s(\mathbf{p})$ 为由 $\mathbf{p}$ 的饱和 k 邻域计算出的曲面变化度系数。

基于点云的曲面变化度 $\sigma_k(\mathbf{p})$ 定义为一点的邻域点坐标构成的协方差矩阵 $\mathbf{C}_{3 \times 3}$ 最小特征值 λ_0 与所有特征值之和的比值, 协方差矩阵 $\mathbf{C}_{3 \times 3}$ 为

$$\mathbf{C}_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 - \bar{\mathbf{p}} \\ \vdots \\ \mathbf{p}_k - \bar{\mathbf{p}} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 - \bar{\mathbf{p}} \\ \vdots \\ \mathbf{p}_k - \bar{\mathbf{p}} \end{bmatrix}; \quad \bar{\mathbf{p}} = \frac{\sum_{i=1}^k \mathbf{p}_i}{k} \quad (3)$$

式中: $\bar{\mathbf{p}}$ 为邻域内点坐标向量的均值; $\mathbf{p}_i$ 为 $\mathbf{p}$ 的 k 邻域内第 i 个点的坐标向量。曲面变化度公式为

$$\sigma_k(\mathbf{p}) = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2} \quad (4)$$

式中: λ_0 、 λ_1 、 λ_2 为矩阵 $\mathbf{C}_{3 \times 3}$ (对称矩阵) 的特征值。

$\sigma_k(\mathbf{p})$ 的取值范围为 $[0, 1/3]$, 值的大小反映曲面在该点沿其法向量离开切平面的程度。如果一点为非离群点, 则 $S_k(\mathbf{p})$ 较小; 如果一点为离群点, 则 $S_k(\mathbf{p})$ 较大。 $S_k(\mathbf{p})$ 定量地反映了点的离群程度, 可以作为近离群点的判定依据。

2.2 自由曲面的加工误差评定

自由曲面的形位误差表征了其加工误差, 加工误差为位置误差和形状误差相互耦合的综合误差, 计算偏差首先要分离位置误差, 避免位置误差对形状误差的影响。如图 2 所示面轮廓度是自由曲面的形状误

差,指实际要素相对于理想要素所允许的变动量^[20-21]。

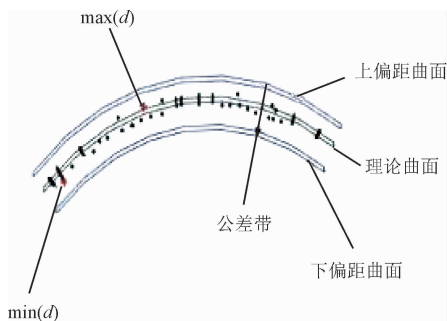


图2 面轮廓度误差示意图

自由曲面的面轮廓度误差 E 的计算公式如下

$$E = \max(d) - \min(d) \quad (5)$$

式中: $\max(d)$ 为实测点偏差最大值; $\min(d)$ 为实测点偏差最小值。

目前轮廓度评定多采用有基准要求的轮廓度误差评定,即测量基准与理论设计基准统一在一个坐标系下。由于形状误差受到被测要素的位姿影响,国家标准 GB/T 1958—2004 中规定使用最小条件原则,即实际被测要素对于其理想要素的最大变动量为最小^[21],这个问题表示为

$$f(X, T) = \min(E(X, T)) \quad (6)$$

式中: $f(X, T)$ 为符合最小区域原则的位置调整过程; X 为实际被测要素; T 为位姿变换; $E(X, T)$ 为实际被测要素在位姿调整 T 下的轮廓度。

对于有基准要求的形位误差评价,需要找到测量点到理论轮廓的最大变动量为最小的一组刚性变换参数。

2.3 自由曲面的位置误差分离方法

设自由曲面的实测点集坐标矩阵为 P_0 , 点集的

$$R = \begin{bmatrix} q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 - q_4^2 & 2(q_2 q_3 - q_1 q_4) & 2(q_2 q_4 + q_1 q_3) \\ 2(q_2 q_3 + q_1 q_4) & q_1^2 + q_3^2 - q_2^2 - q_4^2 & 2(q_3 q_4 - q_1 q_2) \\ 2(q_2 q_4 - q_1 q_3) & 2(q_3 q_4 + q_1 q_2) & q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 - q_4^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Step5: 求初始平移向量 T_0

$$T_0 = \bar{Q} - \bar{P}R \quad (11)$$

Step6: 更新点集, 对点集 P_0 进行位置变换, 并重新计算 STL 模型上所对应的最近点, 得到更新后的模板点集 Q_0 , 表达式如下

$$P_0 = P_0 R + T_0 \quad (12)$$

Step7: 重复 Step1~Step6, 直到算法收敛, 得到配准参数旋转矩阵 R 和初始平移向量 T_0 。

(2) 自适应权重粒子群算法重新计算位置误差的平移量 T 。

由于存在加工误差且每个实测点到模型的最近

数目为 m , 本文所提的自由曲面位置误差分离方法步骤如下。

(1) 以 ICP 算法求解位置误差的旋转矩阵 R 和初始平移向量 T_0 。

ICP 算法依据的原则是最小二乘原则, 优化过程稳定, 速度快。本文以 ICP 算法的四元数形式进行求解, 方法步骤如下。

Step1: 对实测点集 P_0 搜索对应 STL 模型上的最近点, 得到模板点集 Q_0 , 数目也为 m 。

Step2: 对点集 P_0 和 Q_0 去中心化得到新的点集 P_1 和 Q_1 , 其目的是分离参数 T_0 , 其中 $\bar{P}$ 和 $\bar{Q}$ 为点集 P_0 和 Q_0 的中心坐标向量

$$\begin{cases} P_1 = P_0 - \bar{P} \\ Q_1 = Q_0 - \bar{Q} \end{cases} \quad (7)$$

Step3: 构造协方差矩阵 M_{PQ} 和对称矩阵 A 及循环向量 V

$$\begin{cases} M_{PQ} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (P_0 Q_0^T) \\ A = M_{PQ} - M_{PQ}^T \\ V = [A_{23} \quad A_{31} \quad A_{12}]^T \end{cases} \quad (8)$$

Step4: 构造对称矩阵 M , 求取旋转向量 $\xi_{\max}$ 和旋转矩阵 R , M 表达式为

$$M = \begin{bmatrix} \text{tr}(M_{PQ}) & V^T \\ V & M_{PQ} + M_{PQ}^T - \text{tr}(M_{PQ}) I_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\text{tr}(M_{PQ})$ 为协方差矩阵 M_{PQ} 的迹。

对矩阵 M 进行特征值分解 $M\xi = \lambda\xi$, 取最大特征值 $\lambda_{\max}$ 对应的特征向量 $\xi_{\max}$, 以 $\xi_{\max}$ 构造旋转矩阵 R , $\xi_{\max} = [q_0, q_1, q_2, q_3]$, R 表达式为

距离不相等, 因此 ICP 算法求取的平移向量总会与实际平移向量有较大的差异。同时, 平移向量对偏差的计算精度贡献度比较大。

对实测点集 P_0 经过 R 的旋转变换后, 依据轮廓度评定的最小区域原则, 以 T_0 通过正态分布向量加微小扰动采用自适应权重粒子群算法重新求取平移向量 T

$$f(T) = \min(\max(d) - \min(d)) \quad (13)$$

采用自适应粒子群算法^[22]优化上述适应度函数, 计算步骤如下。

Step1: 设置算法参数。种群数量 N 为 30, 自我

学习因子 c_1 为 0.9,群体学习因子 c_2 为 0.9,最大惯性权重 $w_{\max}$ 为 0.8,最小惯性权重 $w_{\min}$ 为 0.2。

Step2:初始化解空间和速度,计算所有粒子的适应度值,并且找出解空间的最佳个体 $\mathbf{z}_g$ 和最佳适应度值 f_z ,表达式如下

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_i &= \mathbf{T}_0 + \mathbf{N}_1 \\ \mathbf{v}_i &= \mathbf{N}_2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{x}_i$ 为解空间的第 i 个解向量; $\mathbf{v}_i$ 为解空间的第 i 个解的速度向量; $\mathbf{N}_1$ 是均值为 0、方差为 0.04 的正态分布生成的 3 维度的随机向量; $\mathbf{N}_2$ 是均值为 0、方差为 1 的正态分布生成的 3 维度的随机向量。

Step3:进入主循环,计算种群的适应度,并且记录种群最小适应度 $f_{\min}$ 及种群适应度的均值 f_{avg} 。计算个体的惯性权重 w ,更新速度及个体,更新规则如下

$$\left. \begin{aligned} w &= w_{\min} + (f - f_{\min})(w_{\max} - w_{\min}) / (f_{\text{avg}} - f_{\min}) \\ \mathbf{v}_i &= w\mathbf{v}_i + c_1 r(\mathbf{z}_i - \mathbf{x}_i) + c_2 r(\mathbf{z}_g - \mathbf{x}_i) \\ \mathbf{x}_i &= \mathbf{x}_i + \mathbf{v}_i \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: w 为第 i 个粒子的惯性权重; f 为第 i 个粒子的适应度值; $\mathbf{z}_i$ 为第 i 个粒子在迭代过程中的历史最佳个体。

Step4:最后比较个体更新前后的适应度值,如果更新后的个体适应度更小,则保留更新后的个体,否则保留更新前的个体。计算更新后的种群的适应度值,寻找出最佳个体及其适应度值代替 $\mathbf{z}_g$ 和 f_z 。

Step5:重复上述步骤,直到收敛或者固定迭代次数,输出最佳个体 $\mathbf{z}_g$ 即重新计算的平移向量 $\mathbf{T}$ 。

经过上述步骤最终计算得到位置误差的旋转量 $\mathbf{R}$ 和平移量 $\mathbf{T}$,对实测点坐标进行 $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{T}$ 的位姿变换后,计算实测点相对于理论 CAD 模型的偏差,评定加工误差。

3 算法对比分析及实例分析

3.1 位置误差分离方法对比

为验证本文所提位置误差分离方法的有效性,以图 3 所示的 STL 模型为理论 CAD 模型。通过 STL 模型的三角面片法在表面生成一系列偏距点,并进行基准变换构成实测点云。实测点的偏距服从均值为 0、标准差为 0.03 的正态分布,生成两组偏距构成两组仿真点云。样本 1 的偏距极差为 0.196 0,样本 2 的偏距极差为 0.197 6。样本 1 的基准变换向量 $\mathbf{T}_1 = [0.034\ 9, 0.034\ 9, 0.034\ 9, -0.1, -0.1, 0.2]$,样本 2 的基准变换向量 $\mathbf{T}_2 = [-0.032, -0.032, -0.032, 0.1, 0.1, 0.2]$,其中前 3 个值分别为点云绕 x 轴、 y 轴、 z 轴的旋转角度,单位为 rad,后 3 个值为 x 轴、 y 轴、 z 轴方向的平移量,单位为 mm。构造样本时基准变换是从设计基准到实测基准,而位置误差是从实测基准到设计基准,所以所求位置误差理论值应为基准变换向量 $\mathbf{T}_1$ 和 $\mathbf{T}_2$ 构成的齐次刚性变换矩阵的逆矩阵对应的基准变换向量。经过计算,样本 1 的位置误差向量理论值为 $[-0.034\ 4, -0.035\ 6, -0.034\ 4, 0.110\ 4, 0.089\ 5, -0.199\ 5]$,样本 2 的位置误差向量理论值为 $[0.032\ 5, 0.031\ 5, 0.032\ 5, -0.090\ 3, -0.109\ 6, 0.199\ 6]$ 。使用本文方法及 ICP 算法对两组样本分离位置误差,样本配准后的结果如图 3 所示;计算两组样本的位置误差向量及轮廓度,以位置误差向量的均方根误差度量计算误差,计算结果如表 1 所示。

由表 1 得出,本文方法相对于 ICP 算法,样本的位置误差向量均方根误差平均减小了 66%,样本的轮廓度平均减小了 18%。本文方法的位置误差分离精度更高,轮廓度计算误差更小,评定原则符合形位误差评定的最小区域原则。

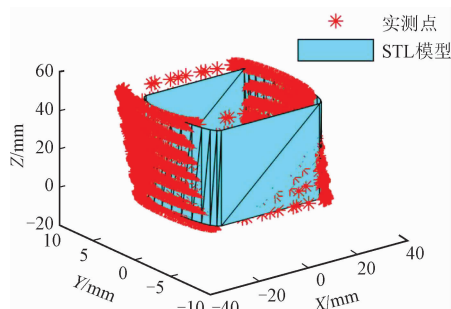
3.2 叶身型面加工误差评价

本文采用高精度蓝光扫描仪 BLAZE600M 测量叶片表面点云,扫描仪的测量精度为 $30\sim50\ \mu\text{m}$,精度满足加工误差评定的要求。原始扫描点云与叶片模型如图 4a 所示。对扫描点云筛选叶身型面点云数据并进行去噪,去噪后的点云及叶身模型如图

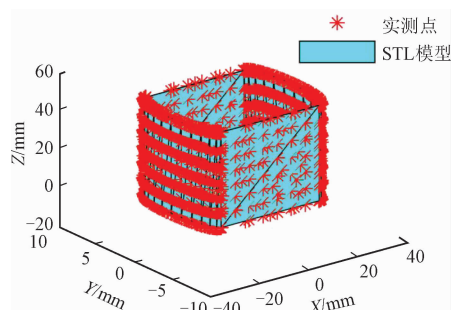
表 1 本文方法与 ICP 算法的位置误差向量及轮廓度计算结果

样本	方法	位置误差向量	位置误差向量的 均方根误差	轮廓度	轮廓度 误差
1	ICP 算法	(-0.034 5, -0.035 6, -0.034 3, 0.837 3, -0.007 7, -0.006 6)	0.309 6	0.238 4	0.042 4
	本文方法	(-0.034 5, -0.035 6, -0.034 3, 0.008 0, 0.004 1, -0.023 3)	0.090 2	0.195 2	0.000 8
2	ICP 算法	(0.032 5, 0.031 4, 0.032 6, -0.662 5, 0.010 1, -0.011 9)	0.253 8	0.241 4	0.043 8
	本文方法	(0.032 5, 0.031 4, 0.032 6, -0.007 1, 0.007 5, 0.004 5)	0.098 9	0.197 4	0.000 2

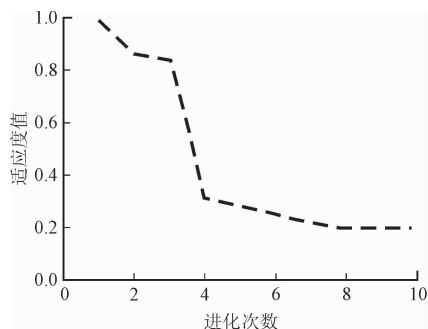
4b所示。采用本文方法分离去噪后点云的位置误差,并计算点云的偏差。以偏差色彩图的形式展示偏差,对叶片型面的加工误差进行评价。叶片型面扫描点云的彩色偏差如图4c、图4d所示。



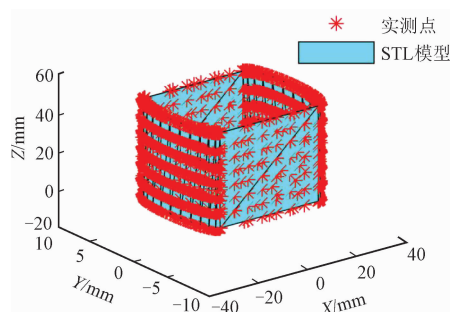
(a) STL 模型及实测点云(样本 1)



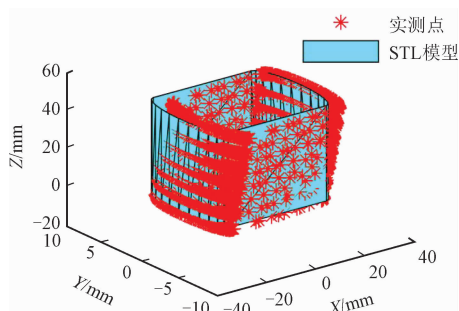
(b) ICP 算法配准(样本 1)



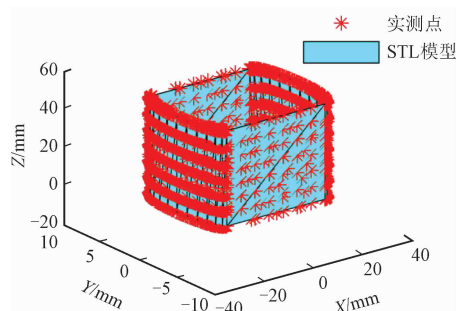
(c) 粒子群算法迭代曲线(样本 1)



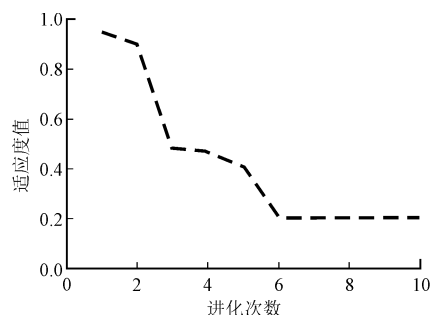
(d) 本文方法配准(样本 1)



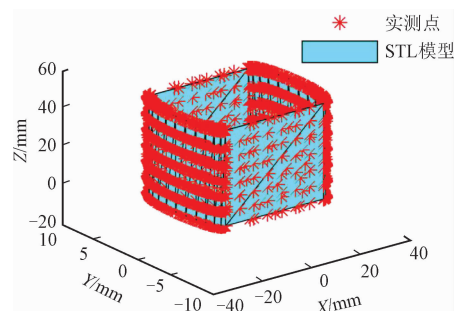
(e) STL 模型及实测点云(样本 2)



(f) ICP 算法配准(样本 2)



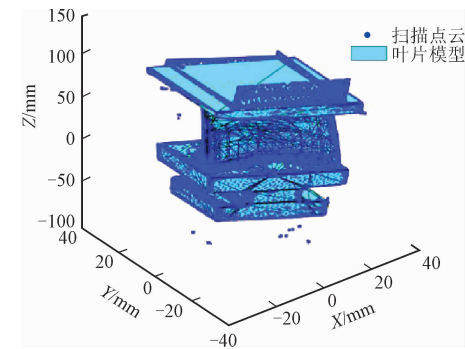
(g) 粒子群算法迭代曲线(样本 2)



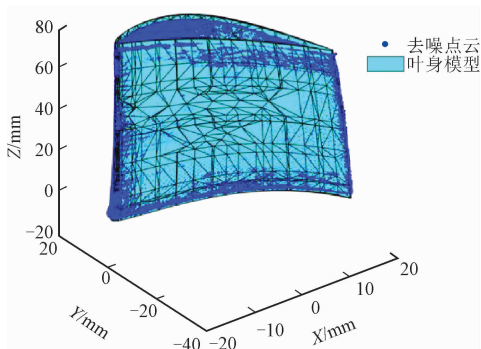
(h) 本文方法配准(样本 2)

图3 不同配准算法的对比分析

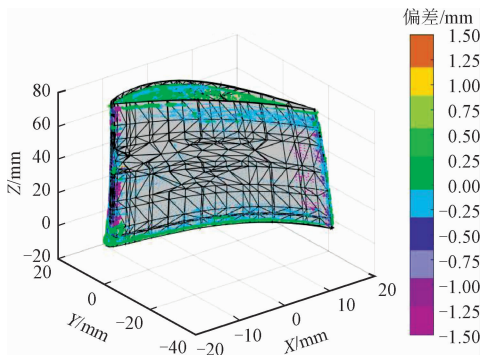
由图4可以看出,叶片型面的大部分区域偏差在 $[-0.25\text{ mm}, 0.25\text{ mm}]$ 之间,但存在一些偏差较大的区域如叶身前缘处。其原因主要是前缘后缘处曲率半径较小,加工较为困难,导致加工误差较大。



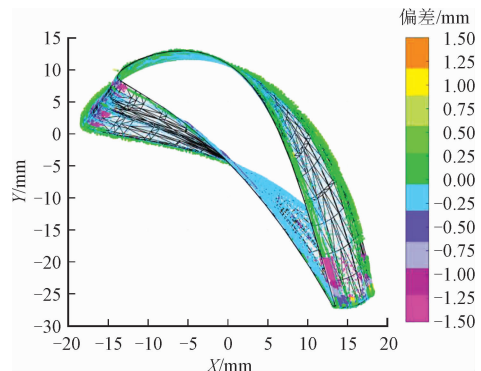
(a)原始点云及叶片 STL 模型



(b)去噪后的叶身点云数据



(c)配准后的点云偏差色彩图



(d)X-Y 视角的偏差色彩图

图 4 叶身型面加工误差评价

4 结 论

为评定自由曲面的加工误差,以自由曲面的 STL 模型为理论 CAD 模型,简化了空间点到自由曲面的最近点和偏差计算。采用高精度蓝光扫描仪获取自由曲面的实测点云,设置动态偏差阈值去除扫描点云的远距离噪声点,以 SVLOF 方法去除扫描点云的近距离噪声点。为分离位置误差对偏差计算的影响,提出一种自由曲面实测点云的位置误差分离方法,以最近点迭代算法和自适应权重粒子群算法相结合实现测量点云与理论模型的配准。实验结果表明,本文所提位置误差分离方法相对于 ICP 算法,位置误差向量的均方根误差平均减小了 66%,轮廓度平均减小了 18%,位置误差分离精度更高,轮廓度评定更加准确。所提方法适用于扫描点云对自由曲面的加工误差评价,可以有效判断出超差区域。

参考文献:

[1] SAVIO E, DE CHIFFRE L, SCHMITT R. Metrology of freeform shaped parts [J]. CIRP Annals, 2007, 56(2): 810-835.

[2] 黄鑫. “S”形试件几何质量测评及不确定度研究 [D]. 天津: 天津大学, 2017: 1-2.

[3] 何改云, 黄鑫, 郭龙真. 自由曲面轮廓度误差评定及不确定度分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(3): 395-401.

HE Gaiyun, HUANG Xin, GUO Longzhen. Evaluation of free-form surface profile error and analysis of uncertainty [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(3): 395-401.

[4] 陈潇. 基于非均匀有理 B 样条的船体分段测量 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006: 11-12.

[5] 王建录, 刘学云, 廖平, 等. 结合分割逼近和粒子群法的燃气轮机叶片轮廓度误差计算 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 42-45, 74.

WANG Jianlu, LIU Xueyun, LIAO Ping, et al. Profile error calculation for gas turbine blade based on subdivision approach algorithm and particle swarm optimization [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(7): 42-45, 74.

[6] 陈岳坪, 靳龙, 李书平, 等. 复杂曲面的形状误差评定方法研究 [J]. 机械设计与制造, 2014(7): 215-217.

CHEN Yueping, JIN Long, LI Shuping, et al. Method of form error evaluation for complex surfaces [J].

- Machinery Design & Manufacture, 2014(7): 215-217.
- [7] 何改云, 刘欣, 刘佩佩, 等. 基于分割球面逼近和差分进化的复杂曲面轮廓度误差评定 [J]. 中国机械工程, 2014, 25(2): 152-156.
- HE Gaiyun, LIU Xin, LIU Peipei, et al. Evaluation of complex surface profile errors based on subdivision and sphere approximation method and differential evolution algorithm [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(2): 152-156.
- [8] 郭慧, 马永有, 潘家祯. 基于遗传算法的复杂平面曲线轮廓度误差评定 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2007, 33(6): 888-892.
- GUO Hui, MA Yongyou, PAN Jiazheng. Error evaluation on planar free-form curve profile based on genetic algorithm [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2007, 33(6): 888-892.
- [9] 王东霞. 特殊对象的测量数据误差处理与不确定度研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015: 49-50.
- [10] 张小萍, 周圣铎, 王君泽. 基于改进粒子群算法的复杂曲面轮廓度误差评定及可视化 [J]. 计量学报, 2013, 34(1): 16-21.
- ZHANG Xiaoping, ZHOU Shenghua, WANG Junze. Evaluation and visualization of contour error of complex surfaces based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Acta Metrologica Sinica, 2013, 34(1): 16-21.
- [11] 苏娜, 郭慧. 自由曲线轮廓度误差评定及其可视化 [J]. 东华大学学报(自然科学版), 2010, 36(4): 402-405, 420.
- SU Na, GUO Hui. The profile error evaluation and visualization of free-form curve [J]. Journal of Donghua University(Natural Science), 2010, 36(4): 402-405, 420.
- [12] 郎爱蕾, 何改云, 宋占杰. 基于 STL 模型的自由曲面轮廓度误差评定 [J]. 机械设计与制造, 2015(6): 13-16, 20.
- LANG Ailei, HE Gaiyun, SONG Zhanjie. Profile error evaluation of freeform surface based on STL model [J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(6): 13-16, 20.
- [13] LI Yadong. Automatic localization and comparison for free-form surface inspection [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2006, 25(4): 251-268.
- [14] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [15] 王东霞, 温秀兰, 赵艺兵. 基于 CAD 模型引导测量的自由曲面定位及轮廓度误差评定 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2720-2727.
- WANG Dongxia, WEN Xiulan, ZHAO Yibing. Localization and profile error evaluation of freeform surface based on CAD model-directed measurement [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(12): 2720-2727.
- [16] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001: 227-230.
- [17] LIU Chunguo, LIU Chang, AN Bailing. Three dimensional surface registration on the basis of genetic algorithm [J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2009, 44(4): 110-113.
- [18] 刘金义, 侯宝明. STL 格式实体的快速拓扑重建 [J]. 工程图学学报, 2003, 24(4): 34-39.
- LIU Jinyi, HOU Baoming. Efficient topological reconstruction of solids in STL format [J]. Journal of Engineering Graphics, 2003, 24(4): 34-39.
- [19] 聂建辉, 胡英, 马孜. 散乱点云离群点的分类识别算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(9): 1526-1532.
- NIE Jianhui, HU Ying, MA Zi. Outlier detection of scattered point cloud by classification [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2011, 23(9): 1526-1532.
- [20] 王宇春, 孙和义, 唐文彦, 等. 最小条件下一般二次曲面轮廓度误差的评定 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1803-1809.
- WANG Yuchun, SUN Heyi, TANG Wenyan, et al. Evaluation of general quadratic surface profile error under minimum conditions [J]. Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1803-1809.
- [21] 蔺小军, 王增强, 史耀耀. 自由曲面轮廓度误差评定 [J]. 计量学报, 2011, 32(6): 495-500.
- LIN Xiaojun, WANG Zengqiang, SHI Yaoyao. Evaluation of profile error for free-form surface [J]. Acta Metrologica Sinica, 2011, 32(6): 495-500.
- [22] 张晓莉, 王秦飞, 冀汶莉. 一种改进的自适应惯性权重的粒子群算法 [J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(3): 66-70.
- ZHANG Xiaoli, WANG Qinfei, JI Wenli. An improved particle swarm optimization algorithm for adaptive inertial weights [J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(3): 66-70.

(编辑 杜秀杰)