

基于迭代算法的复杂曲面零件三坐标测量快速精确定位方法

张现东¹, 卜 昆¹, 董一巍², 李效基²

(1. 西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072;

2. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005)

摘 要: 针对复杂曲面零件在三坐标测量过程中存在着定位难、定位精度低的问题, 基于改进的迭代最近点算法, 提出了考虑半径补偿的预定位与精定位的多级定位算法; 并通过建立定位点几何误差与叶片定位精度的数学关系模型, 结合贪婪算法与六点原则, 给出了近优的定位点序列生成方法。结合定位算法与定位点序列, 给出了复杂曲面零件定位迭代流程, 并开发了三坐标测量定位系统。以涡轮叶片为例, 通过的定位仿真和定位实验, 结果表明: 该系统只需测量 12~18 个点即可使得叶片定位误差在 0.1 mm 以内, 证明该系统能有效提高复杂曲面零件的定位精度和效率。

关 键 词: 复杂曲面; 迭代最近点算法; 预定位; 精定位; 贪婪算法

中图分类号: V391.72

文献标志码: A

Fast and accurate locating method for sculptured surfaces measured with coordinate measuring machines based on iterative algorithm

ZHANG Xiandong¹, BU Kun¹, DONG Yiwei², LI Xiaoji²

(1. The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education China, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

Abstract: The blade is a typical part with sculptured surfaces, the locating of these parts for measurement with coordinate measuring machines (CMM) is a difficult and time-consuming task because there are no locating datum planes. To solve this problem, a multistage location algorithm including pre-location and fine-location, considering radius comprehension, was proposed based on iterative closest point algorithm. By establishing the relationship of locating errors and geometric errors of locating points, a near-optimal locating point sequence was generated using the greedy algorithm and six-point principle. Combining multi-stage location algorithm and locating point sequence, an iterative locating process for the part with sculptured surfaces

收稿日期: 2017-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(51371152, 51705440); 福建省高校产学研重大项目(2015H6023)

作者简介: 张现东(1986—), 男, 博士生, 主要从事 CAD/CAM、精密测量、精铸模具设计研究。

通讯作者: 董一巍(1982—), 男, 助理教授、硕士生导师, 博士后, 主要从事先进制造过程数理模型及数值模拟研究。

引用格式: 张现东, 卜昆, 董一巍, 等. 基于迭代算法的复杂曲面零件三坐标测量快速精确定位方法[J]. 航空动力学报, 2018, 33(10): 2525-2532. ZHANG Xiandong, BU Kun, DONG Yiwei, et al. Fast and accurate locating method for sculptured surfaces measured with coordinate measuring machines based on iterative algorithm[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(10): 2525-2532.

measurement with CMM was researched and programmed. In the simulation and experiment of localizing a turbine blade with sculptured surfaces, only 12—18 points were need to maintain the location errors with in 0.1 mm. The efficiency and accuracy of this method are desirable.

Key words: sculptured surface; iterate closest point algorithm; pre-location; fine-location; greedy algorithm

随着数字化技术在制造业中的普及,越来越多的复杂曲面零件出现在航空、航天、汽车、船舶、手机等领域。叶片是典型的复杂曲面零件,而且具有严格的尺寸精度要求^[1-3]。三坐标测量机由于测量精度高达 10^{-3} mm 而被广泛地应用于叶片的尺寸检测。精确定位是保证三坐标测量数据准确性的前提。目前常用的三坐标测量定位方法有:①专用夹具,对不同形状的零件需设计不同的夹具,大大提高了三坐标测量的成本;②手动建立测量坐标系,按照“3-2-1”的原则在叶片表面手动触测 6 个点,建立坐标测量系,通过测量坐标系与设计模型坐标系的变换关系实现零件的定位,这种定位方法虽然成本低廉,但是受人为因素的影响大,定位精度难以保证;③专用测量工具包(集成在 PC-DIMS 测量系统中的模块),通过迭代找正复杂曲面上 6 个基准点建立测量坐标系,较人工测量坐标系定位精度有所提高,且工具包的售价高昂。因此,研究复杂曲面精确定位算法具有重要的意义。

1 定位问题描述

工件定位本质上是通过一定方法确定工件坐标系跟已知坐标系(机床或模型坐标系)之间的相对位置,得到两个坐标系之间的欧氏转换矩阵。数学上常被阐述为最小二乘问题

$$\min_{\mathbf{R}, \mathbf{T} \in \mathbf{R}^3} \epsilon(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \| \mathbf{x}_i - (\mathbf{R} \mathbf{y}_i + \mathbf{T}) \| \right)^2 \tag{1}$$

式中 $\mathbf{T}$ 为平移变换; $\mathbf{R}$ 为旋转变换; $\mathbf{y}_i (i = 0, 1, \cdots, n)$ 为测量数据点; $\mathbf{x}_i$ 为 $\mathbf{y}_i$ 在模型表面的对应点;符号 $\| \cdot \|$ 为三维实向量空间 $\mathbf{R}^3$ 中的欧氏范数。

对于三坐标测量定位,由于测头半径的影响,三坐标测量机获得测量数据实际上是测头球心的坐标值,与模型表面点并不匹配。对于定位点这种数量少,分布很离散的点,测量点的法矢无法通过测量数据估算得到,而且由于没有定位,也无法由模型对应点法矢变换得到。因此,为了求得与

测量值对应的模型表面点,需要对模型表面点做半径补偿^[4];将模型表面点该点外法矢方向偏移一个测头半径,以偏移后的点作为测量点在模型表面的对应点。配准目标函数变为

$$\begin{cases} \epsilon = \min_{\mathbf{R}, \mathbf{T}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \| \mathbf{x}'_i - (\mathbf{R} \mathbf{y}'_i + \mathbf{T}) \|^2 \\ \mathbf{x}'_i = \mathbf{x}_i + \mathbf{n}_i r \end{cases} \tag{2}$$

式中 $\mathbf{n}_i$ 为模型表面在点 $\mathbf{x}_i$ 处的单位法矢, $\mathbf{y}'_i$ 为测头球心坐标, r 为测头半径。

方程(2)为有约束多变量函数最优化问题,如果采用常规解法,如拉格朗日乘子法,求解过程繁琐,效率低。迭代算法是处理该问题常用、有效的算法,迭代格式如下:

$$\epsilon_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\| \mathbf{x}_i - (\mathbf{R}^k \mathbf{y}_i + \mathbf{T}^k) \|^2) \tag{3}$$

比较典型的算法有 Variational 算法^[5]、Tangent 算法^[6]、Menq 算法^[7]、Hong-Tan 算法^[8]、ICP(internet content provider)算法等。ICP 算法由于简单易懂,计算精度高而成为最常用的算法。ICP 算法由 Besl 和 McKay^[9] 提出,点云-曲面 ICP 配准算法包含两步:一、曲面最近对应点的求取;二、变换参数求解。当测量点集与对应曲面的初始位置相差较大时,ICP 算法的迭代次数将大大增加,甚至收敛到局部最优解而导致错误的定位。通过预配准(定位)给 ICP 算法提供好的迭代变换初值,能有效的提高配准精度和效率。预配准算法有大量学者做过研究,主要算法有:力矩主轴法、遗传算法^[10-12]、粒子群算法^[13-14]、基于边界特征的预配准算法^[15]、基于曲率距离特征的预配准算法^[16-19]、基于特征点对的预配准算法^[20-21]等。三坐标测量中,规划点与该点测量值存在明显的对应关系,因此本文采用对应点对的预定位算法。

2 定位算法

2.1 预定位算法

三点对齐法^[20]是比较常用的预配准算法,但由于 3 点组成的 3 个向量是线性相关的,会导致

求取变换矩阵的二义性,而出现图 1 的情况。Mehrad 等^[21]通过分析到对应点对指定距离的点的唯一性,得出最少需要 4 组不共面的对应点对才能得到鲁棒的预配准。在零件 CAD 模型上选取 4 个不共面点 Q_0, Q_1, Q_2, Q_3 , 选取方法:①求出所有候选点的均值质心,距离质心最远的点记为 Q_0 ;②计算候选点到 Q_0 的距离,距离 Q_0 最远的点记为 Q_1 ;③计算候选点到直线 Q_0Q_1 的距离,距离最点记为 Q_2 ;④计算候选点到平面 $Q_0Q_1Q_2$ 距离,距离最大点记为 Q_3 。在被测零件大致相应位置标记这 4 个点并手动测量,测量值记为 P_0, P_1, P_2, P_3 。预定位算法如下:

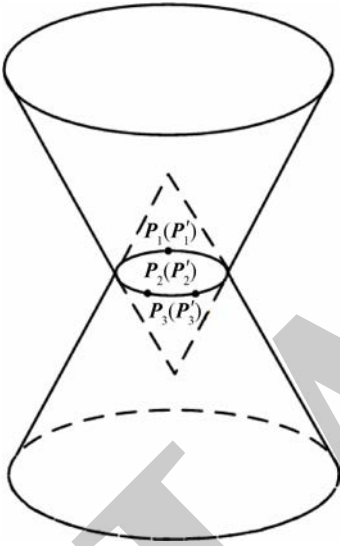


图 1 三点对齐法的二义性

Fig. 1 Ambiguity of three points pre-registration

1) 构造两个 R^3 上的线性无关向量组

$$\begin{aligned} [\alpha] &= [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3] \\ [\beta] &= [\beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3] \end{aligned}$$

$$\alpha_1 = P_1 - P_0, \quad \alpha_2 = P_2 - P_0, \quad \alpha_3 = P_3 - P_0$$

$$\beta_1 = Q_1 - Q_0, \quad \beta_2 = Q_2 - Q_0, \quad \beta_3 = Q_3 - Q_0$$

2) 对向量组 $[\alpha], [\beta]$ 单位正交化, 得到两个

R^3 上的单位正交矢量基 $[v] = [v_1 \quad v_2 \quad v_3]$,

$$[w] = [w_1 \quad w_2 \quad w_3]$$

$$\begin{cases} v_1 = \frac{\alpha_1}{|\alpha_1|} \\ v_2 = \left(\alpha_2 - \frac{\alpha_2^T \alpha_1}{\alpha_1^T \alpha_1} \alpha_1 \right) / \left| \alpha_2 - \frac{\alpha_2^T \alpha_1}{\alpha_1^T \alpha_1} \alpha_1 \right| \\ v_3 = \left(\alpha_3 - \frac{\alpha_3^T \gamma}{\gamma^T \gamma} \alpha_1 - \frac{\alpha_3^T \alpha_1}{\alpha_1^T \alpha_1} \alpha_1 \right) / \left| \alpha_3 - \frac{\alpha_3^T \gamma}{\gamma^T \gamma} \alpha_1 - \frac{\alpha_3^T \alpha_1}{\alpha_1^T \alpha_1} \alpha_1 \right| \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} w_1 = \frac{\beta_1}{|\beta_1|} \\ w_2 = \left(\beta_2 - \frac{\beta_2^T \beta_1}{\beta_1^T \beta_1} \beta_1 \right) / \left| \beta_2 - \frac{\beta_2^T \beta_1}{\beta_1^T \beta_1} \beta_1 \right| \\ w_3 = \left(\beta_3 - \frac{\beta_3^T \eta}{\eta^T \eta} \eta - \frac{\beta_3^T \beta_1}{\beta_1^T \beta_1} \beta_1 \right) / \left| \left(\beta_3 - \frac{\beta_3^T \eta}{\eta^T \eta} \eta - \frac{\beta_3^T \beta_1}{\beta_1^T \beta_1} \beta_1 \right) \right| \end{cases} \quad (5)$$

式中

$$\gamma = \alpha_2 - \frac{\alpha_2^T \alpha_1}{\alpha_1^T \alpha_1} \alpha_1, \quad \eta = \beta_2 - \frac{\beta_2^T \beta_1}{\beta_1^T \beta_1} \beta_1$$

3) 由坐标变换计算可得到初始旋转矩阵和平移矩阵

$$R^0 = [[v]^T]^{-1} [w]^T \quad (6)$$

$$T^0 = Q_0 - R^0 P_0 \quad (7)$$

2.2 精定位算法

精确定位采用 SVD-ICP 算法, 迭代步骤如下:

步骤 1

置迭代次数 $k=0$, 给定最大迭代次数 $k_{\max}$, 平移误差限 $\epsilon_t (10^{-3})$ 和旋转误差限 $\epsilon_r (10^{-3})$ 。

步骤 2

用变换矩阵 R^k, T^k 对已测量点集 $\{y'_i\}$ 进行变换

$$y_i'^k = R^k y_i' + T^k \quad (8)$$

步骤 3

计算变换后点集 $\{y_i'^k\}$ 在模型表面的对应点集 $\{x_i'^k\}$, 并使用 SVD 算法求解两点集的变换矩阵 R, T 。

步骤 4

更新变换矩阵

$$\begin{cases} R^k = R^k R \\ T^k = R^k T + T \end{cases} \quad (9)$$

步骤 5

如果 T^k, R^k 满足终止条件 $T^k \leq \epsilon_t$ 且 $R^k \leq \epsilon_r$ 或 $k > k_{\max}$, 则迭代终止; 否则, 令 $k = k + 1$, 转到步骤 2。

3 点定位规划算法

如何规划测点布局从而用最少的点实现零件的精确定位, 需要知道测点误差与定位误差之间的关系。

如图 2 所示, 零件表面可以用隐式函数 $f(r)=0$ 表示, r 为表面点在全局坐标系中对应的位置矢量。

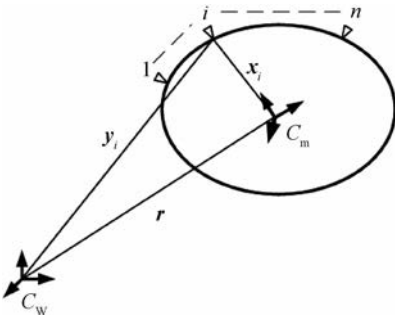


图 2 定位原理示意图

Fig. 2 Geometrical localization principle

给零件表面添加一个扰动后, $f(r)$ 会产生一个增量, 由运动学分析可知

$$\delta f_i = -[\nabla f_i^T (r_i \times \nabla f_i)^T] \delta \varepsilon \quad (10)$$

式中 ∇f_i 为 $f(r)$ 表面方程在点 r_i 处的梯度向量, 由空间曲面的梯度的特点可知, ∇f_i 的方向与零件表面在 r_i 处的外法矢方向相同。

式(9)两边同时除以梯度的模 $\|\nabla f_i\|$, 得

$$\frac{\delta f_i}{\|\nabla f_i\|} = -\left[\frac{\nabla f_i^T}{\|\nabla f_i\|} \left(r_i \times \frac{\nabla f_i}{\|\nabla f_i\|}\right)^T\right] \delta \varepsilon \quad (11)$$

$$\frac{\nabla f_i}{\|\nabla f_i\|} = n_i \quad (12)$$

式中 n_i 为零件表面在点 r_i 处的单位法矢; $\delta f_i / \|\nabla f_i\|$ 表示点到零件表面的法向距离, 记为 δy_i 。

式(10)可改写为

$$\delta y_i = -[n_i^T (r_i \times n_i)^T] \delta \varepsilon = h_i^T \delta \varepsilon \quad (13)$$

对于零件表面点集 $y_i (i=0, 1, \dots, n)$, 设 $\delta y = [\delta y_1 \ \delta y_2 \ \dots \ \delta y_n]$, $G = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_n]$, 则

$$\delta y = G^T \delta \varepsilon \quad (14)$$

$$\|\delta y\|^2 = \delta y^T \delta y = \delta \varepsilon^T (GG^T) \delta \varepsilon = \delta \varepsilon^T M \delta \varepsilon \quad (15)$$

式中 $\|\delta y\|^2$ 为表面点的误差, 由零件的制造工艺条件决定, 可以认为是定值, 通过优化矩阵 M 求取最小的扰动误差 $\delta \varepsilon$, 常用的优化方法有 A-Optimality (最大化矩阵 M 的迹)、D-Optimality (最大化矩阵 M 的行列式)、E-Optimality (最优化矩阵 M 的特征值) 等^[22]。相比于 A-Optimality 和 E-Optimality, D-Optimality 存在如下优点: ①与线性空间坐标变换保持独立; ②易于实现。

由式(13)和式(14)可知

$$M = GG^T = \sum_{i=0}^n h_i h_i^T \quad (16)$$

从候选点集 N 删除第 j 个点

$$M_j = M^T - h_j h_j^T \quad (17)$$

通过逆矩阵计算可得

$$M_j^{-1} = M^{-1} + \frac{(M^{-1} h_j)(M^{-1} h_j)^T}{1 - p_{jj}} \quad (18)$$

$$\det M_j = (1 - p_{jj}) \det M \quad (19)$$

式中 $p_{jj} = h_j^T M^{-1} h_j$ 。实际上 p_{jj} 为矩阵 $G^T M^{-1} G$ 的对角元素, 且易知 $0 \leq p_{jj} \leq 1$ 。

本文采用贪婪算法来求解此问题, 步骤如下:

- 1) 计算候选点集包含点的个数, 记为 N 。
- 2) 计算候选点集的信息矩阵 M , 并计算点集中每个点的 p_{jj} , 存到数列中。
- 3) 采用冒泡法计算 p_{jj} 数列中最小值 $\min_{1 \leq j \leq N} \{p_{jj}\}$ 。

4) 将 $\min p_{jj}$ 对应的点从候选点集中剔除, 存到堆栈中, 跟新候选点集, $M = M_j$ 。

5) 判断如果 $N=6$, 退出; 否则转到步骤 2)。

候选点集中剩余的 6 点, 记为最佳 6 点, 输出; 将堆栈中点逐点出栈并输出到最佳 6 点之后, 即可得到近优定位点序列。

4 定位流程及系统开发

根据上述的定位算法和近优定位点序列, 可采取如下定位流程:

步骤 1

- 1) 给定距离误差限 d_a , 定位点数 N 。
- 2) 将最佳定位 6 点的位置在被测零件的大致位置上标示出。
- 3) 按顺序手动测量 6 点坐标。
- 4) $n=6$ 。

步骤 2

从测量点中选取 4 个不共面的点, 以这 4 个点的理论坐标和测量值进行预定位计算。

步骤 3

得到的 n 个点测量值与 CAD 模型进行精确定位计算, 得到平移矩阵 T 和旋转矩阵 R 。

步骤 4

从近优定位点序列中选取下一组 $k (k=6)$ 个点 $Q_i (i=0, 1, \dots, 5)$, 进行 RT 逆映射得到 P_i

$$P_i = R^{-1}(Q_i - T) \quad (20)$$

步骤 5

1) 将映射点 P_i 的坐标输入 PC-DMIS 系统, 生成自动测量程序并采集测量值。

2) $n=n+k$ 。

步骤 6

1) 计算 P_i 与其测量值的距离, 并求出最大距离值 $d_{\max}$ 。

2) 如果 $d_{\max} < d_a$, 终止循环并输出定位成功; 否则, 当 $n < N$ 时, 转至步骤 1); 当 $n > N$ 时, 输出错误报告。

定位过程流程如图 3 所示。

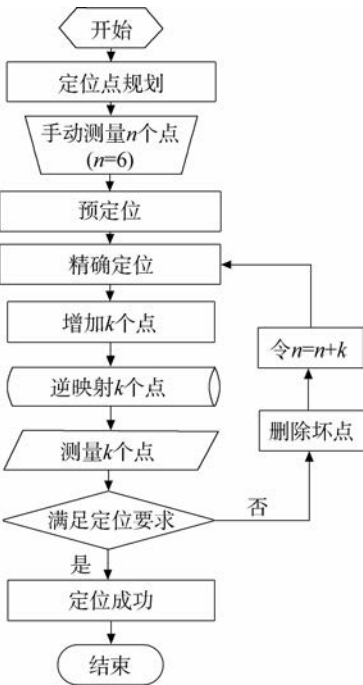


图 3 定位流程图
Fig. 3 Location flowchart

在 Microsoft Visual C++ 6.0/MFC 平台上，结合开放式可视化工具包 VTK (Visualization Toolkit)与 UG/OPEN API 函数联合编写了快速精确定位系统，系统界面如图 4 所示。

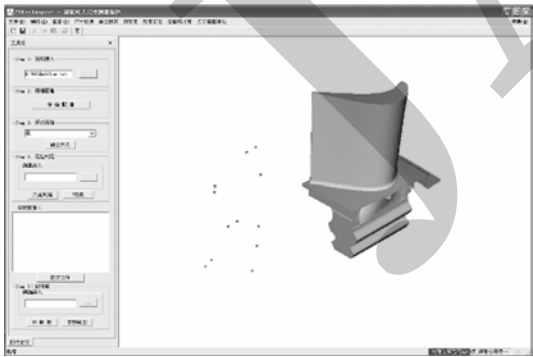


图 4 快速定位系统界面
Fig. 4 Interface of fast location program

5 仿真与实验验证

以某型号涡轮叶片为例，验证本文算法在复杂曲面零件测量定位中的表现。如图 5，在模型号涡轮叶片叶身和缘板上离散一组候选点，采用贪婪算法求取的近优定位点序列如图 6 所示，从图 6 中可以看出，定位点主要分布在叶根、叶尖靠近前后缘处及缘板的尖角处。

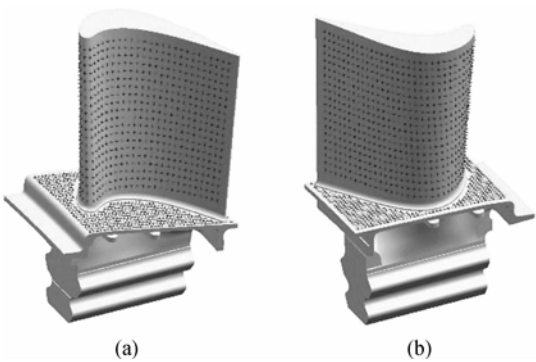


图 5 定位候选点
Fig. 5 Candidate points for location

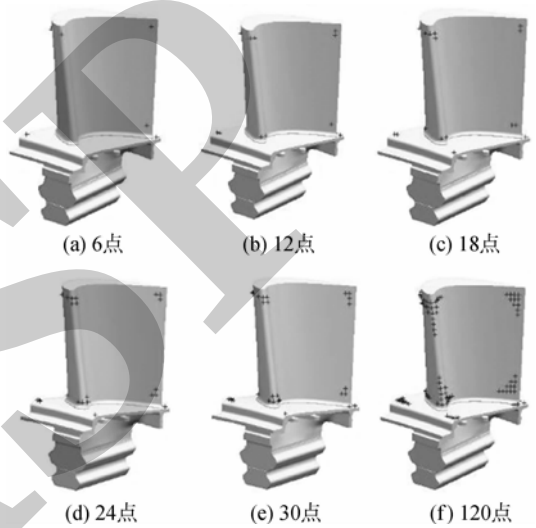


图 6 近优定位点序列
Fig. 6 Near-optimal points sequence for location

5.1 仿真验证

在涡轮叶片的定位优化点序列中取前 60 个点，给这 60 个点施加 $(-100\text{ mm}, -100\text{ mm}, -100\text{ mm}, 0^\circ, 0^\circ, 90^\circ)$ 的变换，对变换后数据进行定位仿真实验，结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 映射点与测量点的距离 (无随机误差)
Table 1 Distances between mapping points and their measurements (without random errors)

距离参数	6 点	12 点
d_1/mm	0.001523	0.000347
d_2/mm	0.001343	0.000489
d_3/mm	0.000980	0.000376
d_4/mm	0.001133	0.000480
d_5/mm	0.000940	0.000410
d_6/mm	0.001219	0.000374
d_{max}/mm	0.001523	0.000489

通过表 1 和表 2 可以看出,在没有噪声的情况下,本文定位算法的计算精度高达 99.99%。

将这 60 个点沿外法矢方向偏移一个测头半径($r=0.5\text{ mm}$)加一个随机数,这个随机数代表由涡轮叶片铸造误差和测量误差在测量点法矢方向引起的随机偏差。一般认为测量点沿法矢的随机误差服从正态分布 $N(\mu,\sigma^2)$,根据涡轮叶片的制造精度和三坐标测量机的测量精度,设定期望 $\mu=0.05$ 和方差 $\sigma^2=0.01$ 。由 MATLAB 软件中

randn()函数生成一个服从标准正态分布的含 60 个元素的矩阵,设矩阵元素为 $a_{i,j}$,则

$$(0.1a_{i,j}+0.05)\sim N(0.05,0.01)\quad (21)$$

将添加随即误差的数据施加 $(-100\text{ mm}, -100\text{ mm}, -100\text{ mm}, 0^\circ, 0^\circ, 90^\circ)$ 的变换,以变换后的数据作为测量数据的仿真数据。该型号涡轮叶片型面公差要求为 $\pm 0.2\text{ mm}$,距离误差限 d_a 取 0.1 mm ,仿真结果如表 3 和表 4 所示。

表 2 配准定位结果(无随机误差)

Table 2 Results of localization process (without random errors)

点数	(x,y,z) 变换距离/mm			(x,y,z) 旋转角度/(°)		
	100	100	100	0	0	-90
12 点	100.0090	99.9918	100.0005	0.0025	0.0042	-90.0092
18 点	100.0102	99.9886	100.0018	0.0033	-0.0046	-90.0094

表 3 映射点与测量点之间的距离(有随机误差)

Table 3 Distances between mapping points and their measurements (with random errors)

点数	d_1/mm	d_2/mm	d_3/mm	d_4/mm	d_5/mm	d_6/mm	$d_{\max}/\text{mm}$
6	0.686	0.796	0.243	0.003	0.539	0.462	0.796
12	0.035	0.080	0.056	0.041	0.086	0.040	0.086
18	0.055	0.036	0.078	0.050	0.059	0.039	0.078

表 4 配准定位结果(有随机误差)

Table 4 Results of localization process (with random errors)

点数	(x,y,z) 变换距离/mm			(x,y,z) 旋转角度/(°)		
	100	100	100	0	0	-90
6	99.7011	100.2080	99.9913	0.0680	0.0734	-89.7943
12	100.0102	99.9886	100.0018	0.0033	-0.0046	-90.0094
18	100.0090	99.9918	100.0005	0.0025	0.0042	-90.0092

从表 3 可以看出,使用定位点序列中前 12 点进行定位计算,逆映射点与其测量值得最大距离 $d_{\max}=0.086\text{ mm}$,满足 $d_{\max}\leqslant d_a$ 的判定条件,判定定位成功。

定位误差^[23] ϵ ,即坐标变换矩阵的误差,可表示为

$$\epsilon=\sqrt{\delta p_x^2+\delta p_y^2+\delta p_z^2+\delta r_x^2+\delta r_y^2+\delta r_z^2}\quad (22)$$

式中 $\delta p_x,\delta p_y,\delta p_z$ 为沿 3 个坐标轴的平移变换误差; $\delta r_x,\delta r_y,\delta r_z$ 为沿 3 个坐标轴的旋转变换误差。以表 2 中的数据计算定位误差 ϵ 并与 $d_{\max}$ 比较,结果见图 7 所示。

从图 7 可以看出,逆映射点与其测量值的最大距离是随着定位误差的减小而减小的,因此, $d_{\max}$ 可以作为定位精度的指标,而且当 $d_{\max}<0.1\text{ mm}$ 时,定位误差 $\epsilon<0.1\text{ mm}$,定位精度很高满足叶片测量的定位要求,因此以 $d_{\max}\leqslant 0.1\text{ mm}$ 作为定位成功的判定指标是可行的。

通过仿真分析,本文算法只需要 12 点,就定位成功,共迭代了 61 次,计算时间不足 1 s。本文算法可以高效的复杂曲面零件高精度定位。

5.2 实验验证

使用三坐标测量机(型号:GLOBAL D STA-

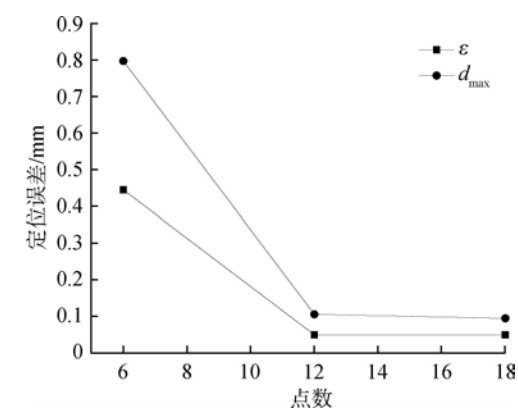


图 7 定位误差与最大点对距离比较

Fig. 7 Comparison of localization error and maximum distance

TUS 121510)对某型号涡轮叶片进行了测量定位实验。首先,根据最佳 6 点在 CAD 模型位置,在被测叶片上的大致位置上标识出最佳 6 点;然后,用简单夹具将叶片固定在三坐标测量机工作台上,如图 8 所示;然后,按照第 4 节中的定位流程对叶片进行定位实验。图 9 为手动控制三坐标测量机触测最佳 6 点;后续点可通过逆映射点及其法向量实现自动测量。

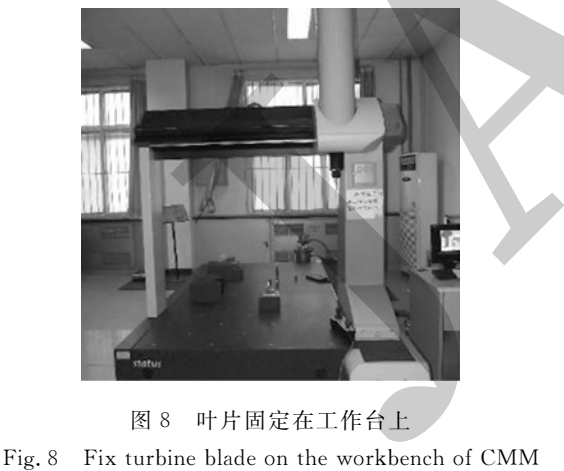


图 8 叶片固定在工作台上

Fig. 8 Fix turbine blade on the workbench of CMM

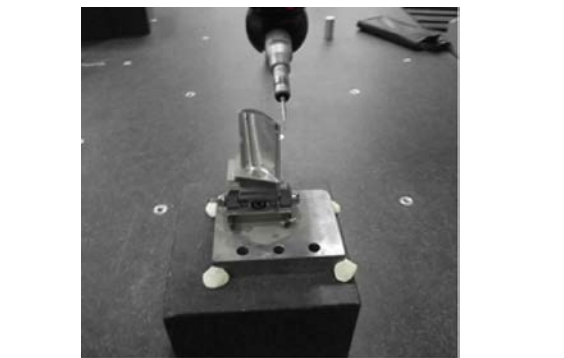


图 9 测量定位点

Fig. 9 Measuring locating points

测量 18 点进行定位计算后,系统输出“定位成功”。为验证系统的稳定性,多测了 2 组点。实验结果见表 5 和表 6。

表 5 映射点与测量点之间的距离(实验值)

Table 5 Distances between mapping points and their measurements (experiment)

参数	6 点	12 点	18 点	24 点	30 点
d_1/mm	0.2922	0.0892	0.0211	0.0405	0.0311
d_2/mm	0.0306	0.0290	0.0741	0.0589	0.0624
d_3/mm	0.1158	0.0027	0.0798	0.0739	0.0254
d_4/mm	0.1557	0.1248	0.0277	0.0126	0.0651
d_5/mm	0.1746	0.0313	0.0174	0.0797	0.0795
d_6/mm	0.0513	0.0636	0.0682	0.0653	0.0341
d_{max}/mm	0.2922	0.1248	0.0798	0.0797	0.0795

表 6 配准定位结果(实验值)

Table 6 Results of localization process (experiment)

点 数	(x,y,z) 变换距离/mm			(x,y,z) 旋转角度/(°)		
	100	100	100	0	0	-90
6	-518.683	-430.397	859.376	0.080	0.092	0.364
12	-517.710	-430.639	859.513	0.204	0.042	0.490
18	-518.532	-429.962	859.859	0.139	-0.004	0.469
24	-518.512	-430.082	859.901	0.166	-0.017	0.433
30	-518.499	-429.986	859.887	0.184	-0.013	0.476

从表 3 和表 4 可以看出,从 18 点之后,计算的变换矩阵基本趋于稳定,但存在小范围的波动,而且映射点与测量值的最大距离也存在波动,但没有超出定位判定条件。引起这种现象的主要原因是被测件存在几何变形,测量误差也有一定的影响。

6 结 论

- 1) 结合 4 点对齐预定位算法和 SVD-ICP 精定位算法,给出了复杂曲面零件的测量定位算法。
- 2) 基于贪婪算法给出了基于 CAD 模型的定位点优化方法。
- 3) 结合定位算法与定位点优化方法,开发了快速定位系统,并通过涡轮叶片定位仿真与定位实验,证明该系统只需要少量的点就可以高效的实现复杂曲面零件的精确定位。

参考文献:

[1] DONG Y W,BU K,DOU Y,et al. Determination of inter-

- facial heat-transfer coefficient during investment-casting process of single-crystal blades[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(12): 2123-2131.
- [2] 李华伟, 申作春, 覃银红, 等. 相位测量轮廓术应用于叶片测量[J]. 航空动力学报, 2012, 27(2): 275-281.
LIN Huawei, SHEN Zuochun, QIN Yinhong, et al. Application of phase-measurement-profilometry in blade measurement[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(2): 275-281. (in Chinese)
- [3] DONG Yiwei, LI Xiaoji, ZHAO Qing, et al. Modeling of shrinkage during investment casting of thin-walled hollow turbine blades[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 244: 190-203.
- [4] XIONG Z H, WANG M Y, LI Z X. A near-optimal probing strategy for workpiece localization[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2004, 20(4): 668-676.
- [5] LI Zexiang, GOU Jianbo, CHU Yunxian. Geometric algorithms for workpiece localization[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 864-878.
- [6] GUNNARSSON K, PRINZ F B. CAD model-based localization of parts in manufacturing[J]. Computer, 1987, 20(8): 66-74.
- [7] MENQ C H, YAU H, LAI G. Automated precision measurement of surface profile in CAD-directed inspection[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(2): 268-278.
- [8] HONG J, TAN X. Method and apparatus for determining position and orientation of mechanical objects; US5208762 [P]. 1993-05-04.
- [9] BESL P J, MEKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [10] 禹永萍, 韩燮. 基于遗传算法的ICP技术研究[J]. 电子测试, 2010(6): 27-31.
YU Yongping, HAN Xie. Research of the registration combining ICP and genetic algorithm[J]. Electronic Test, 2010(6): 27-31. (in Chinese)
- [11] 沈晋慧. 遗传算法在医学图像配准技术中的应用[J]. 首都医科大学学报, 2003, 24(1): 30-32.
SHEN Jinhui. Application of genetic algorithm in medical image registration[J]. Journal of Capital University of Medical Sciences, 2003, 24(1): 30-32. (in Chinese)
- [12] LOMONOSOV E, CHETVERIKOV D, EKART A. Pre-registration of arbitrarily oriented 3D surfaces using a genetic algorithm[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(11): 1201-1208.
- [13] PRAMANIK J, DALAI S, RANA D. Image registration using PSO and APSO: a comparative analysis[J]. International Journal of Computer Applications, 2015, 116(21): 6-11.
- [14] GE Yuqin, WANG Baoyun, NIE Jianhui, et al. A point cloud registration method combining enhanced particle swarm optimization and iterative closest point method[C]// Proceedings of the Control and Decision Conference (CCDC), Yinchuan Ningxia: IEEE, 2016: 2810-2815.
- [15] CHOY C B, STARK M, CORBETT D A, VIES S, et al. Enriching object detection with 2D-3D registration and continuous viewpoint estimation[J]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2015, 86(12): 2512-2520.
- [16] KO K H, MAEKAWA T, PATRIKALAKIS N M. An algorithm for optimal free-form object matching[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(10): 913-923.
- [17] BOUKEBBAB S, BOUCHENITFA H, BOUGHOUAS H, et al. Applied iterative closest point algorithm to automated inspection of gear box tooth[J]. Computers and Industrial Engineering, 2007, 52(1): 162-173.
- [18] MEHRAD V, XUE D Y, GU P H. Inspection of freeform surfaces considering uncertainties in measurement, localization and surface reconstruction[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(8): 50-61.
- [19] TAN G, ZHANG L, LIU S, et al. A fast and differentiated localization method for complex surfaces inspection[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(13): 2631-2639.
- [20] 刘晶. 叶片数字化检测中的模型配准技术及应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
LIU Jing. Research on model registration method and its application in digital measurement[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [21] MEHRAD V, XUE D Y, GU P H. Robust localization to align measured points on the manufactured surface with design surface for freeform surface inspection[J]. Computer-Aided Design, 2014, 53: 90-103.
- [22] JIANG R, WANG W, ZHANG D, et al. Wall thickness monitoring method for wax pattern of hollow turbine blade[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(5): 949-960.
- [23] 朱利民, 罗红根, 丁汉. 测量定位误差度量与测点布局规划[J]. 中国科学 E 辑: 工程科学 材料科学, 2004, 34(11): 1271-1282.
ZHU Limin, LUO Honggen, DING Han. Measurement location error evaluation and measurement points layout plan[J]. Science in China Ser. E: Engineering and Materials Science, 2004, 34(11): 1271-1282. (in Chinese)

(编辑: 叶青)