DOI: 10.3901/JME.2020.02.001

基于叶片截面线 CMM 测量数据的 ICP 配准改进算法*

蔺小军¹ 吴刚¹ 单秀峰¹ 张允¹ 崔彤¹ 胡良毅² 余杰²

(1. 西北工业大学航空发动机高性能制造实验室 西安 710072;

2. 中国航发西安航空发动机有限公司 西安 710021)

摘要: 快速、准确地对叶片进行测量是保证加工质量的关键。叶片三坐标测量机测量数据与理论数据之间的配准是数据处理的重要一步。针对传统迭代最近点(Iterative closest point, ICP)配准算法存在的配准精度低,提出一种基于叶片截面线三坐标测量机(Coordinate measuring machine, CMM)测量数据的 ICP 配准改进算法,将测量点到理论曲线的最小距离作为目标函数进行最近点的求解。首先,计算每一个测量点在理论点集中对应最近点,然后采用三次样条对该最近点及其附近理论点进行样条插值,最后计算测量点距离样条曲线最近点,并将此点作为求得的最近点。该方法在求得一个测量点在理论点集中对应最近点位置的同时,可顺次得到其他测量点在理论点集中的对应最近点,避免全遍历搜索计算。通过实例验证和对比,表明算法有效,精度较高。

关键词: 叶片; 三坐标测量机; ICP 配准; 搜索最近点

中图分类号: TP391

An Improved ICP Registration Algorithm Based on CMM Measurement Data of Blade Section Line

LIN Xiaojun¹ WU Gang¹ SHAN Xiufeng¹ ZHANG Yun¹ CUI Tong¹
HU Liangyi² YU Jie²

(1. Laboratory of Aero-engine High Performance Manufacturing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;

2. AECC Xi'an Aero-engine Ltd., Xi'an 710021)

Abstract: Rapid and accurate detection of blades is the key to ensure the machining quality. The registration between the coordinate measuring machine (CMM) measurement data and the theoretical model data is an important step. Aiming at the low registration accuracy of the traditional iterative closest point (ICP) registration algorithm, an improved ICP registration algorithm based on the CMM measurement data of the blade section line is proposed. The minimum distance between the measurement point and the theoretical curve is taken as the objective function to obtain the nearest point. First, calculating the corresponding nearest points of each measurement points in the theoretical sets, then the cubic spline is used to interpolate the nearest point and its nearby theoretical points, finally the nearest point of spline is obtained to measurement points and this point is taken as the nearest point; In this method, when the corresponding nearest point of measurement point in theoretical sets is obtained, we can get the corresponding closest points of other measuring points in theoretical sets at the same time and avoid all traversal search calculation. Validated and compared by some examples, it shows that the improved algorithm is effective and the precision is high.

Key words: blade; coordinate measuring machine; ICP registration; search closest point

0 前言

叶片作为航空发动机、汽轮机中的重要部件,

其加工制造精度对于整个发动机的整体性能起着至关重要的作用。因此,快速、准确地对叶片几何精度进行检测对于保证加工质量至关重要,得到了相关研究人员的高度重视^[1-3]。在对叶片型面进行检测分析时,测量数据的获取和基于测量数据来分析计算叶片的截面轮廓误差是两项重要内容^[4]。

* 国家科技重大专项资助项目(2015ZX04001003)。20190101 收到初稿, 20191001 收到修改稿

叶片测量数据的获取一般有多种方法。如光学扫描法^[5], 其特点为扫描速度快、对工件位置要求低, 但数据量相当大; 工业 CT(Industrial computed tomography, ICT)扫描法^[6], 其特点为扫描不受工件结构限制, 适用性强, 但扫描速度较低、成本大^[7]。三坐标测量法^[8]是目前测量精度最高的方法, 广泛应用于各行各业中。三坐标测量机(Coordinate measuring machine, CMM)通常采用等高法对叶片进行测量, 理论球心点数据引导测量机测头进行测量, 因此得到的是测头球心点数据, 且此数据与理论数据点个数相等, 一一对应。然而由于零件的加工误差, 因此有必要在分析计算叶片的截面轮廓误差之前先进行测量数据与理论截面线数据的配准。目前大部分专家学者将配准大致分为两步: 初始配准和精配准。初始配准用以大幅度缩小两个待配准模型的空间方位差距, 方法主要有遗传算法^[9]、力矩主轴法^[10]、三点对齐法^[11], 由于三点对齐法原理简单, 计算方便而被广泛应用。精配准则使两个配准模型处于完全贴合状态, 达到最终配准目的。应用最为广泛的是迭代最近点算法(Iterative closest point, ICP)^[12]。该算法因具有目标函数简单, 收敛速度快的优点而被大量使用。

传统的 ICP 算法还有需要改进的地方。比如, 在搜索最近点时每一个点都要进行全遍历, 这对于点云数据将特别的耗费时间。因此, 专家学者从各个方面对传统 ICP 进行了各种版本的改进, 以适应各自不同的应用领域。在配准元素的选择上, TURK 等^[13]采用了一致采样方法; MASUDA 等^[14]采取随机采样法; WEIK^[15]则利用数据的梯度信息采样。在特征度量的选择上, 传统 ICP 算法将点与点之间的欧式距离作为特征度量, CHEN 等^[16]则将点到平面的距离作为特征度量。在搜索最近点策略的选择上, ZHANG 等^[17]提出了多维二元搜索树算法, 对于一些异常值, 能够自动进行剔除。OKUDA^[18]提出使用分级收缩的算法来寻求对应点对, 用以提高搜索效率。程俊廷等^[19]提出了参考点和 ICP 算法相结合的配准算法; 戴静兰等^[20]提出了基于特征点的 ICP 算法; 郭海涛等^[21]提出了基于遗传算法的配准方法; 熊兴华等^[22]提出了将遗传算法和最小二乘法结合用于图像的子像素级配准。

曲面配准一直是研究的重点领域。谭高山等^[23]提出对于精度存在差异的曲面利用 M-估计子削弱复杂曲面低精度数据对配准结果的影响, 并试验验证了所提算法比最近点迭代算法更加合理。对于没有良好初始位置的高曲率特征形状, LI 等^[24]定义了点-表面最短距离, 建立了非线性优化模型, 并分析了算法的收敛性。除此之外, LI 等^[25]还提出了一种

各向异性非刚性匹配的迭代方法。采用点切线距离函数和李群解释来构造非线性最小二乘目标函数, 通过迭代重加权策略进一步优化目标函数。试验结果证明了其算法在匹配速度、准确性和鲁棒性等方面的有效性。

以上各学者从配准元素选择、特征度量选择、搜索最近点策略等方面对传统 ICP 算法进行了改进, 但都是通过点到点之间的欧氏距离最小建立目标函数。本文针对传统 ICP 算法, 结合航空发动机叶片截面线数据特点, 提出一种搜索最近点的 ICP 改进算法, 求得了点到曲线的最小距离, 基于此, 优化了 ICP 算法, 用以提高配准精度。

1 基于三点对齐法的叶片数据初始配准

1.1 测量数据预处理

在利用三坐标测量机对叶片进行测量过程中, 由于加工误差、测量误差、设备所处环境等各种原因都会造成测量点不完整、噪点、局部错乱等测点缺陷, 如果将原始测量数据直接用于配准, 则测点缺陷将很有可能导致配准精度下降, 甚至有可能使配准算法陷入局部最优解。因此对测量得到的原始数据需要进行误差点剔除的预处理操作。一般有以下几种剔除误差的方法。

(1) 直接观察法。由于 CMM 测量叶片按照等高法对截面线进行测量, 测量数据量并不是特别大, 因此操作人员可以利用计算机图形终端显示的数据进行人工观察剔除误差点。

(2) 曲线拟合法。通过计算机对数据点的计算, 对所有测量数据点进行最小二乘拟合, 得到拟合曲线, 计算测量数据点到拟合曲线的距离是否符合误差要求。

最新提出的方差最小化方法^[26]对于解决测点缺陷类问题有明显优势, 其以距离残差平方和最小化为目标, 克服了测点分布不均和测量噪声对匹配精度的影响, 可以有效提高配准精度。

1.2 初始配准

叶片数据的配准分为初始配准和精配准。初始配准可以很大程度上减少测量数据点集与理论模型之间的位置偏差, 给精配准提供一个良好的初值条件。精配准使测量数据与理论模型处于最佳贴合状态。初始配准是精配准的基础。因三点对齐法计算简单, 因而在初始配准阶段采用该方法对叶片多条截面线进行整体配准。如果待配准的两个点集空间

位置相差较小，比如测量基准与理论基准一致时，则不进行初始配准，忽略该步骤即可。

本文的叶片测量数据是以截面线的形式给出，测量点集 P 和理论点集 Q 中的数据个数相等而且顺序一一对应。运用三点对齐法时只需确定截面线上相对应的三点即可。如图 1 所示，假设共有 N 条理论截面线。首先在第一条理论截面线上找到距离最远的两点 A 和 B ，然后在最后一条理论截面线上找到测量顺序上第一个点 C ，此三点即为理论截面线上的三点。因测量截面线与理论截面线点集一一对应，因此可以在测量点集中找到与 A 、 B 、 C 相对应的三点 a 、 b 、 c 。用 A 、 B 、 C 三点代表整个理论点集，用 a 、 b 、 c 三点代表测量点集，由此即可计算初始旋转 R 和平移矩阵 T 。将求得的初始旋转 R 和平移矩阵 T 作用于整个测量点集，即可完成初始配准，得到初始配准后的新的测量点集 P 。

图 1 三点对齐法示意图

具体步骤如下。

- (1) 在第一条理论截面线上找距离最远的两点 A 、 B 。
- (2) 在最后一条理论截面线上找初始点 C 。
- (3) 在测量点集中找到 A 、 B 、 C 对应点 a 、 b 、 c 。
- (4) 通过中间矢量 U_1 、 U_2 、 U_3 、 V_1 、 V_2 、 V_3 计算单位正交矢量 u 、 v 。

$$U_1 = B - A \quad (1)$$

$$V_1 = b - a \quad (2)$$

$$\begin{cases} U_3 = U_1 \times (C - A) \\ V_3 = V_1 \times (c - a) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} U_2 = U_1 \times U_3 \\ V_2 = V_1 \times V_3 \end{cases} \quad (4)$$

单位化可得

$$\begin{cases} u_i = \frac{U_i}{|U_i|} \\ v_i = \frac{V_i}{|V_i|} \end{cases} \quad i=1,2,3 \quad (5)$$

即

$$\begin{cases} u = (u_1, u_2, u_3) \\ v = (v_1, v_2, v_3) \end{cases} \quad (6)$$

- (5) 计算初始旋转矩阵 R 和初始平移矩阵 T 。

$$R = u^{-1}v \quad (7)$$

$$T = A - u^{-1}va \quad (8)$$

- (6) 计算初始配准后新的测量点集 P 。

$$P = RP + T \quad (9)$$

2 叶片数据精配准

叶片截面线数据精配准采用的是 ICP 算法。

2.1 传统 ICP 算法

ICP 算法的原理可以简单地理解为对于两个来自不同坐标系下的数据点集，通过寻找相对应的平移和旋转矩阵，来使点对之间距离平方和最小。假定用 $P_i (i=1,2,\dots,m)$ 表示空间第一个点集，用 $Q_i (i=1,2,\dots,n)$ 表示第二个点集，则第一个点集的对齐匹配变换为使下式的目标函数最小。

$$\min F(R, T) = \sum_{i=1}^m \|Q_i - (RP_i + T)\|^2 \quad (10)$$

具体步骤如下。

- (1) 在目标点集 P 中取点集 $P_i^k \in P^k (k$ 为迭代次数)。

- (2) 计算参考点集 Q 中对应点 $Q_i^k \in Q$ ，使 $\|Q_i^k - P_i^k\| = \min$ 。

- (3) 计算旋转矩阵 R^k 与平移矩阵 T^k 。

- (4) 计算

$$P_i^{k+1} = R^k P_i^k + T^k \quad (11)$$

- (5) 计算

$$d^{k+1} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \|P_i^{k+1} - Q_i^k\|^2 \quad (12)$$

- (6) 如果 d^{k+1} 大于给定的终止迭代误差 τ 则返回到步骤(2)进行计算，直到 $d^{k+1} < \tau$ 或者迭代次数大于预设的迭代次数为止。

ICP 算法每迭代一次，最小化对应点之间的均方差使得点集 P^k 更加接近于 Q ，而 Q_i 是 P_i^k 在 Q_i 的最近点。这样，每进行一次迭代就使得 P_i 更接近于 Q_i 。基于这样的思想，BESL 等证明了 ICP 算法的

收敛性。最终配准精度与多方面因素有关。比如,测量点的间距。同一零件,当测量点间距减小,测点点数会有所增加,所携带的测量信息更多,会提高配准精度。

在传统的 ICP 算法中,搜索最近点是其算法的关键步骤。每次需要求得一点集中的每一数据点在另一点集中欧式距离最近的对应数据点。如图 2 所示,假设 P_{i-1} 、 P_i 和 P_{i+1} ($i=2, 3, \dots, m$) 是测量点集中的三点, Q_{i-1} 、 Q_i 和 Q_{i+1} ($i=2, 3, \dots, n$) 是理论点集中的三点。假设 P_{i-1} 找到离它最近的理论点为 Q_{i-1} , P_i 找到离它最近的理论点为 Q_i , P_{i+1} 找到离它最近的理论点为 Q_{i+1} , 由此即可计算此次迭代所产生的变换矩阵。下一次迭代是依旧按此种方法计算最近点。其搜索最近点的目标函数为

$$\min F = \|P_i - Q_i\| \quad (13)$$

图2 原始搜索最近点示意图

2.2 优化搜索最近点 ICP 改进算法

传统 ICP 算法搜索最近点时每次得到的新的最近点只是在理论点集中的对应最近点,但该最近点并不一定是测量点距离理论截面曲线之间的最近点。理论上,被测对象没有误差时,测量点与理论点之间的距离等于测量点到理论截面曲线之间的距离,但在实际中,由于被测对象的误差或测量坐标系的误差,会导致测量点与理论点偏离,这样就导致 ICP 算法的误差加大。测量点与理论点偏离越大计算误差越大,偏离越小计算误差越小,所以如何找到测量点在理论测量对象上的最近点尤为重要。本文提出了一种优化搜索最近点的算法。

如图 3 所示,测量点 P_i 对应最近理论点为 Q_i ,以 Q_i 附近的 $2h$ 个点作为控制点在 Q_{i-1} 和 Q_{i+1} 之间进行三次样条插值。控制点为 $\{Q_{i-h}, Q_{i-h+1}, \dots, Q_i, \dots,$

图3 优化搜索最近点示意图

$Q_{i+h-1}, Q_{i+h}\}$ ($h=2, 4, 6, \dots$)。控制点单边取 3 到 4 个,便于控制原始自由曲线的走向,但插值只在 Q_{i-1} 和 Q_{i+1} 之间进行。优化后搜索最近点的目标函数为

$$\begin{cases} \min F = \|P_i - Q_i'\| \\ Q_i' \in Q(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $Q(t)$ 为相邻两点的三次样条参数曲线。 t_1 为 Q_{i-1} 与 Q_i 之间的距离。由此即可求得 P_i 距离样条曲线的最近点。

$$Q(t) = \left[1 - 3\left(\frac{t}{t_1}\right)^2 + 2\left(\frac{t}{t_1}\right)^3 \right] Q_{i-1} + \left[3\left(\frac{t}{t_1}\right)^2 - 2\left(\frac{t}{t_1}\right)^3 \right] Q_i + \left(t - \frac{2t^2}{t_1} + \frac{t^3}{t_1^2} \right) Q_{i-1}' + \left(-\frac{t^2}{t_1} + \frac{t^2}{t_1^2} \right) Q_i' \quad (0 < t < t_1) \quad (15)$$

因为测量点集与理论点集一一对应,因此当我们使用传统方法求得 P_i 的对应最近点是 Q_i 时,则 P_{i+1} 的对应最近点就在 Q_{i+1} 附近,因此计算 P_{i+1} 的最近点时,只需以 Q_{i+1} 为中心,单边取 3 到 4 个点作为控制点在 Q_i 和 Q_{i+2} 之间进行三次样条插值并求最小值即可,无需在理论点集中全遍历寻找初始最近点,最后得到对应理论最近点集 Q_{new} 。

具体应用于叶片数据时则是对第一个测量点进行全遍历搜索,对其他的测量点搜索时参考前一个点的最近点位置得到此点的对应点。然后再应用三次样条插值进行最近点计算。

优化搜索最近点算法具体步骤如下。

(1) 读入测量截面线数据 P 和理论截面线数据 Q 。

(2) 对于第一个测量点,遍历理论点集计算最近点 Q_i ; 对于非第一个测量点,参考上一个测量点依顺序得到最近点 Q_i 。

(3) 将理论点 Q_i 周围的三四个点作为控制点,在 Q_{i-1} 和 Q_{i+1} 之间插值,得到相邻两点的样条插值曲线方程。

(4) 求测量点 P_i 距离样条曲线的最近点,作为 Q_i' ,存储到 Q_{new} 。

(5) $i=i+1$,进行下一个测量点计算最近点,最终得到最近点点集 Q_{new} 。

算法流程图如图 4 所示。

目前主流的搜索最近点方法为 K-D 树(K dimension tree, K-D tree)方法^[27],其对于规模为 n 的点集,其平均时间复杂度为 $O(n \lg n)$,而传统 ICP 算法的时间复杂度为 $O(n^2)$,而本文所提算法的时间复杂度为 $O(n)$,因此,本文计算效率相对较高,究其原因,主要是因为理论数据和测量数据是有序

图 4 优化搜索最近点算法流程图

排列的，而并非散乱的点云数据，这给提高搜索效率提供了可能。

本文提出的搜索最近点算法比较于传统 ICP 算法，找到了更为接近理论对象的一点。

2.3 ICP 算法的求解

为了使目标函数最小，即对式(10)进行函数求解。采用什么方法来对目标函数进行求解，使其值能以最快的速度收敛到最小值，这是一个很重要的问题。传统的 ICP 算法是通过点与点之间的欧氏距离最小来建立目标函数的，其求解的方法主要有以下三种：四元数方法、基于奇异值分解(Singular value decomposition, SVD)的方法和正交矩阵法。基于奇异值分解的方法相比较于其他两种方法应用的更加广泛，因此本文采用奇异值分解法。

其求解的具体步骤如下。

(1) 通过 $\{P_i\}, \{Q_i\}$ 计算各自质心 C_p, C_q 以及 $\{P'_i\}$ 和 $\{Q'_i\}$

$$C_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (16)$$

$$C_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \quad (17)$$

$$P'_i = P_i - C_q \quad (18)$$

$$Q'_i = Q_i - C_q \quad (19)$$

(2) 计算矩阵 H

$$H = \sum_{i=1}^n P'_i (Q'_i)^T \quad (20)$$

(3) 对 H 进行 SVD 分解

$$H = U \wedge V^T \quad (21)$$

(4) 求解旋转矩阵 R

$$R = VU^T \quad (22)$$

(5) 计算平移矩阵 T

$$T = C_q - RC_p \quad (23)$$

2.4 实例验证

本文所述算法运行平台为 Matlab 软件。以某航空发动机叶片的理论截面线数据和测量数据进行配准为例。

取某型号航空发动机叶片七条理论截面线数据与相对应的测量数据进行配准。配准前和配准后的数据位置图如图 5 和图 6 所示。根据本文方法计算所得的初始旋转矩阵为

$$R = \begin{pmatrix} 0.9981 & 0.0278 & 0.0548 \\ -0.0320 & 0.9965 & 0.0768 \\ -0.0525 & -0.0784 & 0.9955 \end{pmatrix}$$

所得初始平移矩阵为

$$T = (0.9495 \quad -1.1861 \quad -9.2497)$$

图 5 配准前的初始位置图

图 6 配准后的位置图

以七条截面线中的一条为例,根据本文方法计算得到该截面精配准旋转矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0.9998 & 0.0174 & 0.0067 \\ -0.0174 & 0.9998 & -0.0086 \\ 0.0068 & -0.0084 & -0.9999 \end{pmatrix}$$

平移矩阵为

$$\mathbf{T} = (-1.5921 \quad 0.2873 \quad 470.6420)$$

图7是配准前该截面局部放大图,图8是配准后该截面局部放大图。对结果进行统计得到此截面的数据统计表,见表1。传统ICP算法迭代7次,收敛值为0.0030,最大误差值为0.0102,最小误差值为 5.8606×10^{-5} ;本文算法迭代15次,收敛值0.0022,最大误差0.0092,最小误差 2.6460×10^{-5} 。图9清晰地反映了方均根误差随着迭代次数增加的变化情况。图9a为整体迭代结果图,图9b为局部放大图。为了使传统方法与本文算法进行对比,在传统ICP算法迭代结束后,我们依然用迭代结束时的值作为后续迭代的结果与本文算法进行比较。由图可知,本文算法迭代次数多,但最终收敛值更低,能有效提高配准的精度。表2对两种配准算法配准以后的截面轮廓误差进行了统计。由表2可得本文所提的算法在配准后和传统的ICP算法相比较,最小和最大轮廓误差均有所下降。

综上所述,传统ICP算法和本文提出的改进ICP算法,在配准初始阶段的几次迭代中,方均根误差均能快速下降到某一稳定值。而本文算法能进一步进行迭代,使得方均根误差进一步减小。本文算法最终的收敛值和误差限均明显小传统算法,配准精

度更高。提高配准精度,对于保证航空航天领域叶片类零件的加工质量具有重要意义。

图7 配准前局部放大图

图8 配准后局部放大图

表1 配准数据统计表

计算方法	迭代次数	收敛值	最大误差/mm	最小误差/mm	误差限 Δ
传统ICP算法	7	0.0030	0.0102	5.8606×10^{-5}	0.01014
本文算法	15	0.0022	0.0092	2.6460×10^{-5}	0.00917

(a) 整体迭代结果图

(b) 迭代结果局部放大图

图9 迭代结果图

表2 截面轮廓误差统计表

计算方法		截面1	截面2	截面3	截面4	截面5	截面6	截面7
传统ICP算法	最小轮廓度误差/mm	0.001	0.0038	0.0014	0.0020	0.0024	0.0012	0.0024
	最大轮廓度误差/mm	0.1005	0.1105	0.9750	0.1141	0.1154	0.1120	0.1043
本文算法	最小轮廓度误差/mm	0.0012	0.0011	0.0009	0.0024	0.0038	0.0009	0.0002
	最大轮廓度误差/mm	0.0957	0.1097	0.1096	0.1124	0.1195	0.1116	0.0947

3 结论

(1) 针对叶片截面线 CMM 测量数据, 使用三点对齐法进行初始配准。

(2) 精配准时, 采用改进的 ICP 算法, 用三次样条对理论点集进行插值, 以求得测量点距离理论截面线的最近点; 参考已求得的对应最近点顺次得到其他测量点的对应最近点, 避免了全遍历搜索计算。

(3) 通过实例进行了验证和对比, 证明了本文所述算法是有效的, 相比较于传统 ICP 算法, 配准精度有所提高。

参 考 文 献

- [1] 吕北生, 程云勇. 轮廓度公差约束的叶片模型配准方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(8): 1831-1836.
- [2] 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.
- [3] 王卓然, 何小妹. 坐标测量机测头半径快速补偿方法[J]. 自动化仪表, 2018, 39(10): 96-98.
- [4] 陈志强. 基于测量数据的叶片截面特征参数提取技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [5] 龚正国. 叶片多源测量数据的融合处理与误差分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2009.
- [6] 程云勇, 张定华, 卜昆, 等. 基于工业 CT 测量数据的空心涡轮叶片三维壁厚分析[J]. 机械强度, 2009, 31(5): 791-796.
- [7] 朱真真. 叶片测量数据带约束配准方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- [8] 王润孝. 先进制造技术导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] 吉根林. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(2): 69-73.
- [10] 吴锋, 钱宗才, 杭洽时, 等. 基于轮廓的力矩主轴法在医学图像配准中的应用[J]. 第四军医大学学报, 2001, 22(6): 567-569.
- [11] 刘晶. 叶片数字化检测中的模型配准技术及应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [12] BESL P J, MCKAY N D. Method for registration of 3-D shapes[C]// Robotics-DL tentative. International Society for Optics and Photonics: 586-606.
- [13] TURK G, LEVOY M. Zippered polygon meshes from range images[C]// Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM: 311-318.
- [14] MASUDA T, SAKAUE K, YOKOYA N. Registration and integration of multiple range images for 3-D model construction[C]// Proceedings of the 13th International Conference on. IEEE, 1996, 1: 879-883.
- [15] WEIK S. Registration of 3-D partial surface models using luminance and depth information[C]// 3-D Digital Imaging and Modeling, 1997 Proceedings, International Conference on Recent Advances in. IEEE: 93-100.
- [16] CHEN Yang, MEDIONI G. Object modelling by registration of multiple range images[J]. Image and Vision Computing, 1992, 10(3): 145-155.
- [17] ZHANG Zhengyou. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces[J]. International

- Journal of Computer Vision, 1994, 13(2): 119-152.
- [18] OKUDA H. Fast 3-D registration algorithm with hierarchical and region selection approach of M-ICP[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2006, 18(6): 765-771.
- [19] 程俊廷, 赵灿, 王从军, 等. 基于参考点和 ICP 算法的点云数据重定位研究[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(9): 1222-1224.
- CHENG Junting, ZHAO Can, WANG Congjun, et al. Research of point clouds reorientation based on reference point and ICP algorithm[J]. Computer Measurement & Control, 2006, 14(9): 1222-1224.
- [20] 戴静兰, 陈志杨, 叶修梓. ICP 算法在点云配准中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(3): 517-521.
- DAI Jinglan, CHEN Zhiyang, YE Xiuzi. The application of ICP algorithm in point cloud alignment[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(3): 517-521.
- [21] 郭海涛, 刘智, 张保明. 基于遗传算法的快速影像匹配技术的研究[J]. 测绘学院学报, 2001, 18(9): 20-22.
- GUO Haitao, LIU Zhi, ZHANG Baoming. Research on fast image matching based on genetic algorithms[J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2001, 18(9): 20-22.
- [22] 熊兴华, 钱曾波, 王任享. 遗传算法与最小二乘法相结合的遥感图像子像素匹配[J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 54-59.
- XIONG Xinghua, QIAN Cengbo, WANG Renxiang. A remote sensing image subpixel matching combined genetic algorithm with least square matching[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(1): 54-59.
- [23] 谭高山, 张丽艳, 刘胜兰, 等. 基于 M-估计的线性化稳健配准算法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 360-364, 343.
- TAN Gaoshan, ZHANG Liyan, LIU Shenglan, et al. Linearized robust registration algorithm based on M-estimation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 360-364, 343.
- [24] LI Wenlong, YIN Zhouping, HUANG Yongan, et al. Three-dimensional point-based shape registration algorithm based on adaptive distance function[J]. IET Computer Vision, 2011, 5(1): 68-76.
- [25] LI Wenlong, XIE He, YIN Zhouping, et al. A new algorithm for non-rigid shape matching with anisotropic-scaling transformation parameters[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(5): 895-903.
- [26] 李文龙, 谢核, 尹周平, 等. 基于方差最小化原理的三维匹配数学建模与误差分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 190-198.
- LI Wenlong, XIE He, YIN Zhouping, et al. Mathematical modeling and error analysis of 3D matching based on variance minimization principle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 190-198.
- [27] 刘江, 张旭, 朱继文. 一种基于 KD 树优化的 ICP 三维点云配准方法[J]. 测绘工程, 2016(6): 15-18.
- LIU Jiang, ZHANG Xu, ZHU Jiwen. ICP three-dimensional point cloud registration based on K-D tree optimization[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2016(6): 15-18.

作者简介: 蔺小军(通信作者), 男, 1968 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为精密测量、逆向造型、CAD/CAM。
E-mail: linxj@nwpu.edu.cn
吴刚, 男, 1994 年出生。主要研究方向为 CAD/CAM。
E-mail: wugang@mail.nwpu.edu.cn