

ICP 算法在叶型点云数据配准中的应用*

刘峻峰^{1,2}, 何小妹¹, 黄翔², 王一璋¹

(1. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;

2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 针对叶片截面型线测量点云数据与理论点云数据的配准问题, 研究了将 ICP 算法应用于叶型点云数据配准的方法。首先概述了叶型测量数据与理论数据的匹配问题; 然后阐述了基于 ICP 算法的叶型点云数据配准方法, 并在 MATLAB 平台进行了配准实现; 最后给出了配准实例, 并将配准结果与点云处理软件 CloudCompare 的匹配结果进行了对比, 验证了该方法的准确性。

关键词: 叶片; 截面型线; ICP 算法; 配准; 刚体变换

Application of ICP Algorithm in Data Registration of Blade Profile Point Cloud

LIU Junfeng^{1,2}, HE Xiaomei¹, HUANG Xiang², WANG Yizhang¹

(1. AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] A method of applying ICP algorithm was researched for the data registration of blade profile point cloud. This method can be used to align the measurement point cloud data of blade profile with its nominal data. First, the matching problem was summarized between measurement data of blade profile and its nominal data. Then the data registration method of blade profile point cloud was described based on the ICP algorithm. Next, the registration process was implemented on the MATLAB platform. Finally, registration examples and comparison experiment were given with respect to the results of CloudCompare software. As a result, the accuracy of this method was proven.

Keywords: Blade; Blade profile; ICP algorithm; Registration; Rigid transformation

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.12.079

叶片是航空发动机的关键零部件, 其设计和制造质量直接影响着发动机的性能。目前, 叶片制造质量主要采用标准样板法、自动绘图测量法、光学投影测量法、电感测量法和坐标测量法等手段进行评价^[1], 其中坐标测量法因其具有高精度的特点^[2], 在国内发动机主机厂得到了广泛应用。图 1 为使用三坐标测量机对发动机叶片进行等高截面法测量的示意图, 按照航空标准 HB5647—98《叶片叶型的标准、公差与叶身表面粗糙度》的规定, 首先沿叶片积叠轴的方向围绕各检验剖面进行测量, 然后对叶型轮廓度、积叠点位置度、扭转等参数进行评价, 做出合格性与否的判定。其中在叶片截面测量和参数评价过程中, 涉及到叶片测量坐标系与模型坐标系对齐以及叶片截面型线测量数据和理论数据匹配的问题, 处理好这两个问题将会对上述叶片参数的评

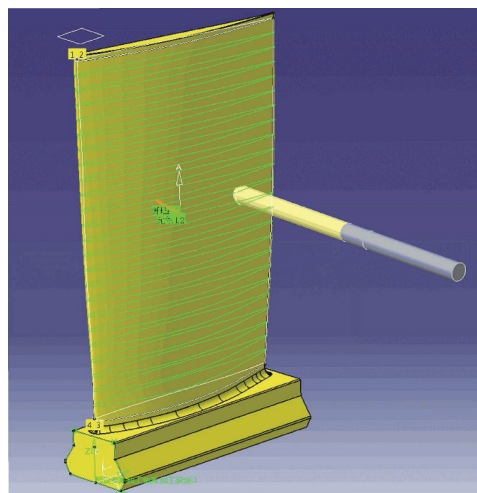


图1 叶片等高截面法测量示意图

Fig.1 Schematic diagram of blade isometric cross-section measurement

* 基金项目: 民用飞机专项科研项目(MJ-2016-J-92)。

价起到关键作用。

目前关于坐标测量机坐标系建立方法的研究较多,如常用的“3-2-1”法、6点迭代法等,而关于叶片截面型线测量数据和理论数据匹配的问题,该环节为利用叶片参数专用评价商业软件对叶片参数进行评价的中间过程,关注较少,但该问题对后续叶片叶型轮廓度误差的评价具有关键作用。为进一步探索叶型测量数据与理论数据匹配程度对叶型轮廓度误差的影响,本文针对叶型点云数据的配准问题开展了研究,分析了叶片截面型线测量数据与理论数据的匹配问题,研究了一种将ICP算法应用于叶型点云数据配准的方法。

1 叶型测量数据与理论数据的匹配问题

利用坐标测量机使用等高截面法获得叶片各检验剖面的测量数据后,在叶片参数专用评价软件(PC-DMIS)中可选择拟合、最小二乘、约束最小二乘、全叶片最小二乘、最小最大等方法对叶型轮廓度误差进行评价。其中除不拟合的方法外,其余方法均涉及叶型测量数据和理论数据匹配的问题。

假设给定的叶型测量数据构成点集 X ,理论数据构成点集 P ,叶型测量数据和理论数据的匹配问题就是求解一组最优的刚体变换矩阵 $\{R, T\}$,使得经过变换后的两组点集间对应点的欧式距离平方和在最小二乘意义下达到最小。

2 基于ICP算法的叶型点云数据配准方法

2.1 ICP算法的提出和发展

ICP (Iterative Closest Point) 算法,是由学者 Besl 和 McKay 在 1992 年提出的一种三维自由形状配准方法^[3-4]。自 ICP 算法被提出后,又有很多学者对其进行了深入研究,并在对应点的搜索策略、点云之间距离的度量形式^[5]、算法收敛速度等方面进行改进和优化,进一步提高了 ICP 算法的性能和应用领域。如 Chen^[6] 和 Bergevin 等^[7] 提出了以“点-面”的方式搜索最近点的精确配准方法; Greenspan 等^[8] 针对 ICP 算法最近点搜索成本较大的问题,提出了基于最近邻的对应点搜索方法,提高了其搜索效率; Ji 等^[9] 提出了一种组合最小二乘点云数据配准方法,将遗传算法的配准结果作为 ICP 算法的输入,提高了算法收敛速度; Bergström 等^[10] 则将迭代重加权最小二乘方法运用到 ICP 算法中,同时利用 M 估计来限制点云中异常点的影响,提升了算法的鲁棒性。得益于诸多学者的不断深入研究,使得 ICP 算法及其改进版本在计算机图形学、大地测绘、逆向工程等领域得到了广泛应用。

2.2 基于ICP算法的叶型点云数据配准方法

2.2.1 ICP算法的数学模型

ICP 算法的基本思想是迭代进行“确定对应点集-计算最优刚体变换”的过程^[11],直到满足预先设定的阈值条件。

该算法的数学模型为:假定两片点云 X 和 $P=\{p_i\}_{i=1}^N$,令点云 $Q=\{q_i\}_{i=1}^N$ 为点云 X 中对应于点云 P 中的点 p_i 的最近点 q_i 构成的点集,算法的实质是通过最小二乘迭代求解一组最优的旋转矩阵 R 和平移向量 T ,使 P 和 Q 对应点对欧氏距离的平方和达到最小,即使式(1)中的目标函数达到最小。

$$\min E(R, T) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|q_i - Rp_i - T\|^2 \quad (1)$$

2.2.2 运用ICP算法配准的实施步骤

ICP 算法是一个迭代执行“确定对应点集-计算最优刚体变换”的过程,因此利用 ICP 算法来匹配叶型测量点集和理论点集时,两点集间对应点的寻找和最优刚体变换矩阵 R 和 T 的求解成为配准的关键。基于经典 ICP 算法的叶型点云数据配准流程如图 2 所示。

运用 ICP 算法配准叶型测量点集与理论点集的步骤如下:

步骤 1: 搜索叶型理论点集 $P_{(k)}$ 在测量点集中对应的最近点集 $Q_{(k)}$ 。

步骤 2: 计算点集 $P_{(k)}$ 和 $Q_{(k)}$ 的质心位置坐标,并利用质心计算两片点云的互协方差矩阵。

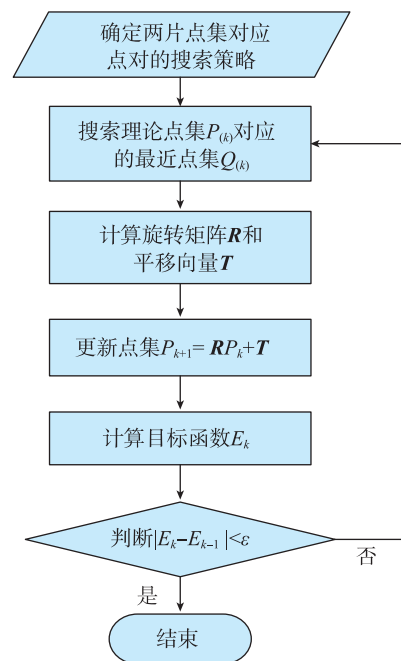


图2 经典ICP算法流程图

Fig.2 Flow chart of classical ICP algorithm

步骤 3：利用协方差矩阵构造正定矩阵，并计算该对称矩阵的最大特征值及对应的单位特征向量。

步骤 4：将单位四元数向量(步骤 3 中求得的单位特征向量)转换为旋转矩阵 R 。

步骤 5：根据旋转矩阵 R 以及两片点云质心偏差，计算得到平移向量 T 。

步骤 6：根据旋转矩阵 R 和平移向量 T ，确定点集 $P_{(k)}$ 经变换后的点集 $P_{(k+1)}$ ，并计算点集 $P_{(k+1)}$ 与 $Q_{(k)}$ 对应点对的距离均方和 E_k 。

步骤 7：当 $|E_k - E_{k-1}| < \varepsilon$ 时 (ε 为设定的阈值)，ICP 算法停止迭代，否则重复步骤 1~6，直到满足停止迭代条件为止。

3 叶型点云数据的配准实现

利用海克斯康坐标测量机使用等高截面法获得某叶片若干检验剖面的叶型测量数据，将其与对应高度的理论数据进行配准。按照配准的精度，通常可将配准分为粗配和精配两个过程，粗配准的目的是缩小两片点云之间的旋转和平移错位，为下一步的精确配准提供一个良好的初始输入。鉴于通过坐标测量机获得的叶型测量点云数据，与其理论数据之间的旋转、错位并不大，在此省略了粗配准的过程，有关粗配准的方法可参见文献 [9, 12-13]。

基于前述介绍的 ICP 算法，将其应用于叶型测量点云数据与理论点云数据的精确匹配，并在 MATLAB 平台进行了程序实现。其中利用单位四元素法求解最优旋转矩阵 R 和平移向量 T 的过程如下：

记单位四元素向量： $q=[q_0q_1q_2q_3]^T$ ，(其中 $q_0 \geq 0$ ， $q_0^2+q_1^2+q_2^2+q_3^2=1$)。通常叶型理论点云在数据规模上要小于其测量点云数据量，在使用 ICP 算法对两者进行精匹配前，将叶型测量数据作为参考基准，理论数据进行刚体变换。

(1) 计算点集 M 和 P 的质心

$$\bar{m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i, \quad \bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \quad (2)$$

其中，点集 $M=\{m_i\}$ 为叶型理论点云构成的集合，点集 $P=\{p_i\}$ 为叶型理论点 m_i 在测量点云上对应的最近点 p_i 构成的集合， N 为对应点对的数量。

(2) 求解点集 M 和 P 的互协方差矩阵

$$\Sigma_{mp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(m_i - \bar{m})(p_i - \bar{p})^T] \quad (3)$$

(3) 求解最优旋转四元素向量构造 4×4 的对称矩阵：

$$Q(\Sigma_{mp}) = \begin{bmatrix} \text{tr}(\Sigma_{mp}) & & & \Delta^T \\ & \Delta & & \\ & & \Sigma_{mp} + \Sigma_{mp}^T - \text{tr}(\Sigma_{mp})I_3 & \\ & & & \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中， $\Delta=[A_{23} A_{31} A_{12}]^T$ ，为反对称矩阵 $A_{ij}=(\Sigma_{mp}-\Sigma_{mp}^T)_{ij}$ 的分量构成的列向量， $\text{tr}(\Sigma_{mp})$ 为矩阵 Σ_{mp} 的迹， I_3 为 3×3 单位矩阵， Δ^T 为 Δ 的转置。求解矩阵 $Q(\Sigma_{mp})$ 的特征向量，将其中对应于最大特征值的特征向量单位化后即为首求的单位四元数向量 $q=[q_0 q_1 q_2 q_3]^T$ 。

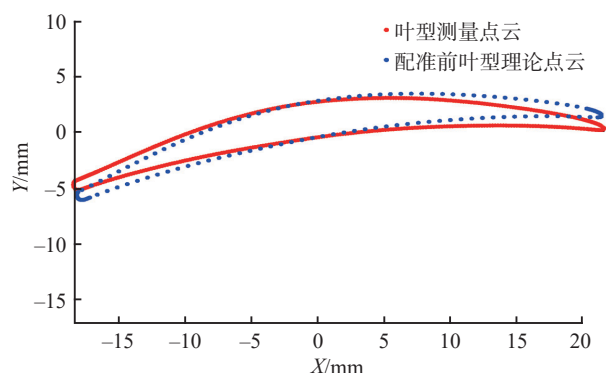
(4) 将单位四元数向量按照式(5)转换成 3×3 的旋转矩阵 R

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

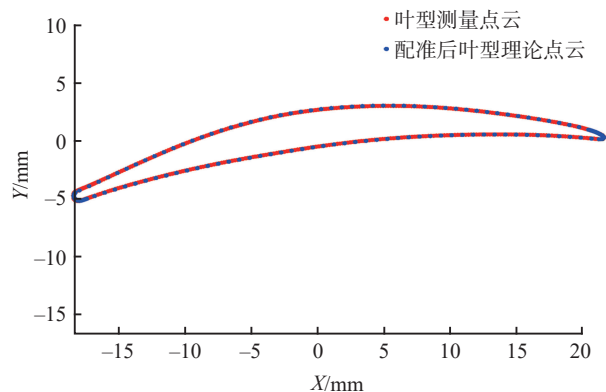
(5) 求解最优平移向量 T

$$T = \bar{p} - R\bar{m} \quad (6)$$

以发动机转子叶片某一叶型截面测量点云数据和理论点云数据作为 ICP 精匹配算法的输入，其中测量数据点 770 个，理论数据点 316 个，ICP 精配准前后的结果对比如图 3 所示，配准过程中对应点对间距离的均方根值(RMS)随迭代次数的变化如图 4 所示。



(a) ICP 精配准前



(b) ICP 精配准后

图3 ICP精配准前后的结果对比

Fig.3 Comparison of results before and after ICP fine registration

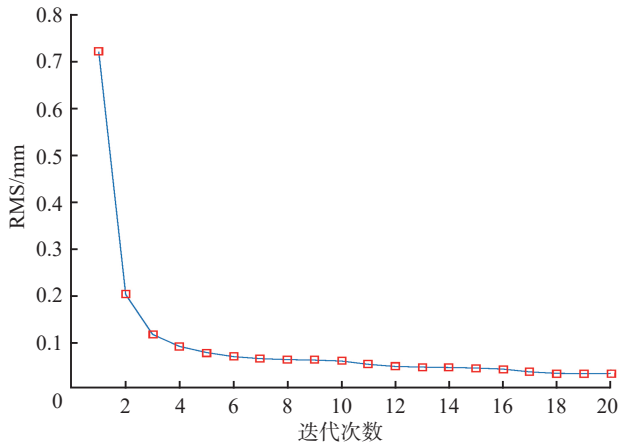


图4 RMS随ICP迭代次数的变化
Fig.4 Variation of RMS with number of ICP iterations

表1 配准结果比较
Table 1 Comparison of registration results

叶型截面	点云数量/个		RMS/mm	
	理论点云	测量点云	本文方法	CloudCompare
1	316	770	0.0342	0.0341
2	325	751	0.0618	0.0618
3	398	2355	0.0835	0.0834

4 配准实例和结果分析

为了验证ICP算法在叶型点云数据配准中的效果,选取3组叶片叶型截面测量数据和理论数据,使用ICP算法进行配准,并将配准结果与使用点云处理软件CloudCompare的精配准结果进行比较,结果如表1所示。

从表1可以看出,3组叶型截面的测量数据和理论数据在两种方式下分别精配准之后,对应点对间的RMS值基本无偏差,说明使用ICP算法的配准效果与运用CloudCompare软件的精配准结果一致,间接验证了本文方法的准确性。

5 结论

本文将ICP迭代算法应用于发动机叶片叶型测量点云数据与理论数据的配准过程,经与点云数据处理软件CloudCompare的配准结果对比,验证了本文方法的准确性,可用于解决叶片叶型截面实测数据与理论数据的最佳匹配问题,为后续叶型轮廓度误差的评价研究提供了支撑,并对其他零件的型面测量及与设计模型的比对具有借鉴意义。

参考文献

[1] 陆佳艳,熊昌友,何小妹,等.航空发动机叶片型面测量方法评述[J].计测技术,2009,29(3):1-3,36.
 LU Jiayan, XIONG Changyou, HE Xiaomei, et al. Survey of measurement method of aeroengine blade[J]. Metrology and Measurement Technology, 2009, 29(3): 1-3, 36.
 [2] 蔺小军,单晨伟,王增强,等.航空发动机叶片型面三坐标测量机测量技术[J].计算机集成制造系统,2012,18(1):125-131.
 LIN Xiaojun, SHAN Chenwei, WANG Zengqiang, et al. Measurement techniques of coordinate measuring machine for blade surface of aero-engine[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(1): 125-131.
 [3] PAUL B, NEIL M. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
 [4] 易凯.结构光三维测量与点云配准的研究[D].西安:西安电子科技大学,2010.
 YI Kai. Research on 3D measurement based on structured light and registration of point clouds[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
 [5] 胡事民,杨永亮,来煜坤.数字几何处理研究进展[J].计算机学报,2009,32(8):1451-1469.
 HU Shimin, YANG Yongliang, LAI Yukun. Research progress of digital geometry processing[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(8): 1451-1469.
 [6] CHEN Y, MEDIONI G. Object modeling by registration of multiple range images[J]. Image and Vision Computing, 1991, 10(3): 145-155.
 [7] BERGEVIN R, SOUCY M, GAGNON H, et al. Towards a general multi-view registration technique[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(5): 540-547.
 [8] GREENSPAN M, GODIN G. A nearest neighbor method for efficient ICP[C]//Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2001.
 [9] JI S J, REN Y C, ZHAO J, et al. An improved method for registration of point cloud[J]. Optik, 2017, 140: 451-458.
 [10] BERGSTRÖM P, EDLUND O. Robust registration of point sets using iteratively reweighted least squares[J]. Comput Optim Appl, 2014, 58: 543-561.
 [11] 袁建英,刘先勇,刘伟,等.改进ICP算法实现多视点云精确配准研究[J].传感器与微系统,2008,27(5):27-30.
 YUAN Jianying, LIU Xianyong, LIU Wei, et al. Research on precise registration of multi-views based on improved ICP algorithm[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(5): 27-30.
 [12] JOAQUIM S, CARLES M, DAVID F, et al. A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation[J]. Image and Vision Computing, 2006, 25(5): 578-596.
 [13] 茅暑杰.钛合金风扇叶片自适应加工配准技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2017.
 MAO Shujie. Research on registration technology in adaptive machining of titanium alloy fan blade[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

通讯作者:何小妹,博士,高级工程师,研究方向为几何量计量, E-mail: hexiaomei2000@163.com.

(责编 古京)