

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.03.011

## 基于局部不变性的航空 C 型梁配准方法

赵安安<sup>1</sup>, 吴志鹏<sup>1</sup>, 曹涛<sup>2</sup>, 张程<sup>1</sup>, 汪俊<sup>2</sup>

(1. 西安飞机工业(集团)有限公司, 西安, 710089; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

**摘要:** 在数字化测量分析技术中, 如何保证变形后的 C 型梁实测点云数据和标准数模精确可靠的匹配在航空制造领域仍然是一个技术难题。本文对加工成型后的 C 型梁变形状态初步分析后, 发现形变主要为两侧面向内的收缩变形, 而底面变形量几乎可以忽略不计。为了更好地将实测数据和数模配准, 结合初步分析结果, 本文主要采用了点对特征(Point pair feature, PPF)粗配准和迭代最近点(Iterative closest point, ICP)精配准结合的方法, 开展了关于 C 型梁实测数据与理论数模的配准技术研究。其中粗配准之后, 为了提高精配准的精度对 C 型梁三维点云结构进行平面分割, 选择变形量较小的底部作为精配准局部约束进行配准。研究表明该方法可以有效提高 C 型梁数模和实测数据配准精度, 最终在后续测量中可以根据实测数据与标准数模精确配准后尺寸差异对 C 型梁加工质量分析, 检测其是否符合尺寸精度要求, 对工程实践有较高的应用价值。

**关键词:** C 型梁; 形变; 数据分割; 约束配准

中图分类号: V262.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2020)03-0430-08

## Aeronautical C-Beam Registration Based on Local Invariance

ZHAO An'an<sup>1</sup>, WU Zhipeng<sup>1</sup>, CAO Tao<sup>2</sup>, ZHANG Cheng<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>2</sup>

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry(Group) Company LTD, Xi'an, 710089, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** In the digital contrast measurement technology, how to ensure the accurate and reliable matching of the measured point cloud data of C-beam and the standard digital model is still a technical problem in the field of aerospace manufacturing. After a preliminary analysis of the deformation state of the C-beam after forming, it is found that the deformation is mainly the inward-facing contraction deformation of both sides, and the deformation of the bottom surface is almost negligible. In order to better compare the measured data and digital-to-analog, combined with the preliminary analysis results, this paper adopts the combination of point pair feature (PPF) coarse registration and iterative closest point (ICP) fine registration, and carries out the research on the registration technology of C-beam measured data and theoretical digital model. After rough registration, in order to improve the accuracy of fine registration, the three-dimensional point cloud structure of C-beam is divided into planes, and the bottom with small deformation is selected as the fine registration local constraint for registration. The research shows that the method can effectively improve the accuracy of C-beam digital model and measured data registration. Finally, in the subsequent measurement, the C-beam processing quality can be analyzed according to the difference between the measured data and the standard digital model. Our method has high application value for engineering practice.

**Key words:** C-beam; deformation; data segmentation; constrained registration

**基金项目:** 国家自然科学基金面上(61772267)资助项目。

**收稿日期:** 2019-08-05; **修订日期:** 2020-04-30

**通信作者:** 汪俊, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: wjun@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 赵安安, 吴志鹏, 曹涛, 等. 基于局部不变性的航空 C 型梁配准方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 430-437. ZHAO An'an, WU Zhipeng, CAO Tao, et al. Aeronautical C-beam registration based on local invariance[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 430-437.

目前,在多种型号的飞机设计中,常选用C型梁作为其主要的承力构件(图1)。在C型梁加工制造过程中因为其结构特征容易产生一定形变。近年来越来越多的复合材料开始在飞机C型梁制造中得到应用<sup>[1]</sup>,相对于金属材料,复合材料在制造过程中更容易发生变形<sup>[2]</sup>。为了控制产品质量,在C型梁加工成型的过程中,需要对每个变化进行精确测量和分析,以便于确定后续加工工艺和装配工艺的调整。

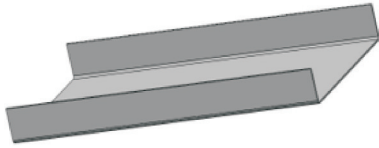


图1 C型梁模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of C-beam model

为了保证C型梁构件的性能和寿命,近几年国内不少科研人员已经开展C型梁固化变形控制研究工作<sup>[3]</sup>。为了能保证其使用性能,技术人员较多采用模具型面补偿量试错及修正的方法,以消除C型梁在加工制造过程中固化变形的影响<sup>[4-5]</sup>。因此,如何准确对制造出的C型梁与理论模型间的变形量进行测量是最为关键的一步<sup>[6]</sup>。传统变形检测方法往往直接将测量得到的数据与理论模型进行配准后分析变形。但是因为C型梁两侧往往会产生较大的变形<sup>[7]</sup>,在配准过程中利用传统的迭代最近点(Iterative closest point, ICP)自动配准算法,不仅运算量大<sup>[8-9]</sup>,而且可能陷入局部最优<sup>[10]</sup>,从而导致配准误差较大。此外,由于ICP配准方法重复实验结果不唯一,不能满足精确配准的要求,导致待测工件和数模直接的对比分析失去了参考价值。在实际制造现场,由于一些变形工件无法用通用的算法配准,一些技术人员只能进行手动估计配准,这样降低了分析的准确性和数据的参考价值。并且仅采用传统的配准方法,没有考虑变形因素,变形较大的区域往往会影响到配准的结果,从而导致无法得到正确的数模和实测数据差异的分析结果<sup>[11]</sup>。

本文针对目前飞机C型梁变形检测中无法利用传统技术自动精确可靠配准的现状,准备采用一种基于局部不变部分作为约束配准的方法对实测数据和数模配准开展研究。该方法首先将三维位姿估计中点对特征(Point pair feature, PPF)<sup>[12]</sup>匹配引入到实测数据和标准数模的粗配准,通过分割预处理将C型梁分为微小变形部分与较大变形部分,然后利用微小变形部分与数模进行基于ICP<sup>[13]</sup>的精确配准,从而解决存在两侧面变形状态的C型梁

实测数据和标准数模配准问题,该方法最终通过实验进行了验证。

## 1 算法概述

本文首先采用三维扫描仪,获取到待测量的C型梁点云数据。为了减少C型梁两侧变形较大的区域在配准过程中带来的影响,提出了一种基于局部不变部分作为约束配准的方法,即利用分割的方法提取出C型梁中变形量较少的中间区域作为配准的约束部分,为了增大约束部分配准的成功率和准确性,需要预先对实测数据和C型量进行粗配准。所以在分割之前本文又提出将PPF特征配准方法用于实测模型和标准数模进行粗配准。最后再利用ICP算法对C型梁实测模型和标准数模底面部分进行精确配准,从而完成实测模型和标准数模整体精确配准。最后将配准完成的测量数据与理论数模进行对比分析,可以得到整体变形分析结果。整体的流程图如图2所示。

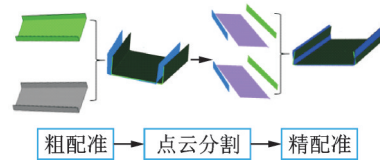


图2 总体技术路线

Fig.2 Overall technology roadmap

## 2 算法流程

本文首先利用特征匹配中PPF特征描述了对实测模型和点云数据进行粗配准,然后对实测数据和数模进行分割,提取出C型梁不变的部分,最后对其进行精确配准。

### 2.1 基于特征匹配的粗配准

PPF是一种基于点对的特征描述子<sup>[14]</sup>,其特征是由4个参数组成,分别是点集中一个点对之间距离 $d'$ 和3个向量之间的夹角 $\alpha, \beta, \gamma$ 组成<sup>[15]</sup>,如图3所示。

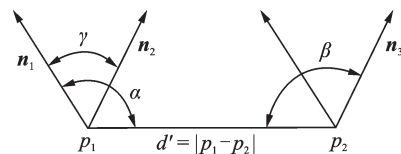


图3 PPF特征描述

Fig.3 PPF description

首先在数模生成的点云中取两个随机的点 $p_1$ 与 $p_2$ ,对应的法向量为 $n_1$ 和 $n_2$ ,距离向量为 $d = p_1 - p_2$ 。其对应的特征向量表达式为

$$F(p_1, p_2) = \left[ d \arccos \left( n_1 \cdot \frac{d}{\|d\|} \right), \arccos \left( n_2 \cdot \frac{d}{\|d\|} \right), \arccos(n_1 \cdot n_2) \right] \quad (1)$$

扫描过程中为了提高扫描精度,造成了扫描的点云数据量增大,所以如何提高算法效率也是数据处理的一个关键步骤,为了提高PPF特征匹配效率,减少迭代运算时间,本文利用哈希表结构来存储匹配特征点对数据<sup>[16]</sup>,采用数组和链表相结合的方法,将哈希地址相同的记录存储在一张线性表中,形式如图4所示。

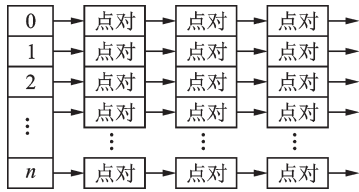


图4 哈希表结构示意图

Fig.4 Hash table structure diagram

因为实测模型数据量很大,在特征匹配时需要对其进行算法简化,所以本文采用基于K-NN(K-nearest neighbor)算法的PPF特征构建,同时考虑点云密度和检测工件的实际尺寸,固定了点对直接空间距离  $d_s = \|p_1 - p_2\|$ ,从而可以将特征向量简化<sup>[17]</sup>为

$$F(p_1, p_2) = \left[ \arccos \left( n_1 \cdot \frac{d}{\|d\|} \right), \arccos \left( n_2 \cdot \frac{d}{\|d\|} \right), \arccos(n_1 \cdot n_2) \right] \quad (2)$$

对于采样点  $p_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ ,只考虑满足  $\|p_i - p_j\| \in (d_s - e_s, d_s + e_s)$  即可,  $p_j \in K\text{-NN}(p_i)$ ,  $e_s$  为临近点误差阈值。PPF特征匹配过程如下:

#### (1) 局部坐标系建立

假设数模中由两点  $p_1(X_1, Y_1, Z_1)$  和  $p_2(X_2, Y_2, Z_2)$  构成一个PPF特征,两点连线中点  $O$  作为局部坐标原点,  $i_c, j_c, k_c$  分别为局部坐标系3个轴向单位向量。则

$$i_c = \frac{n_{12} \times d}{\|n_{12} \times d\|} \quad (3)$$

$$j_c = \frac{d}{\|d\|} \quad (4)$$

$$k_c = \frac{n_{12} \times d \times d}{\|n_{12} \times d \times d\|} \quad (5)$$

式中  $n_{12} = n_1 + n_2, d = p_1 - p_2$ 。则局部坐标系可以表示为  $4 \times 4$  齐次矩阵

$$T_c = \begin{bmatrix} i_c & j_c & k_c & \frac{p_1 + p_2}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

#### (2) 坐标变换

假设在数模中存在一点  $p_{c1}$ ,该点对应的局部坐标系为  $(x_c, y_c, z_c)$ ,世界坐标系为  $(X_c, Y_c, Z_c)$ ,并设定局部坐标系3个轴向单位向量在世界坐标系中分别表示为

$$i_c = (X_{ic}, Y_{ic}, Z_{ic}) \quad (7)$$

$$j_c = (X_{jc}, Y_{jc}, Z_{jc}) \quad (8)$$

$$k_c = (X_{kc}, Y_{kc}, Z_{kc}) \quad (9)$$

由式(6)–(9)可知,数模上某点局部坐标系和世界坐标系存在如下转换关系

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ic} & X_{jc} & X_{kc} & \frac{X_1 + X_2}{2} \\ Y_{ic} & Y_{jc} & Y_{kc} & \frac{Y_1 + Y_2}{2} \\ Z_{ic} & Z_{jc} & Y_{kc} & \frac{Z_1 + Z_2}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = T_c \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

假设数模中一对PPF特征点对  $p_{c1}$  和  $p_{c2}$  在目标点云中的对应点分别为  $p_{r3}$  和  $p_{r4}$ 。若  $p_{r3}$  在目标点云局部坐标系和世界坐标系中的坐标系中坐标分别为  $(x_r, y_r, z_r)$  和  $(X_r, Y_r, Z_r)$ ,则根据式(10)转换关系可以得到

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ir} & X_{jr} & X_{kr} & \frac{X_3 + X_4}{2} \\ Y_{ir} & Y_{jr} & Y_{kr} & \frac{Y_3 + Y_4}{2} \\ Z_{ir} & Z_{jr} & Y_{kr} & \frac{Z_3 + Z_4}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{bmatrix} = T_r \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

当实测点云与数模中提取的PPF特征相同时,即距离参数和角度参数对应相等时,则两个特征建立的局部坐标系相同,那么构成该特征的对应点对各自局部坐标系中的坐标也相同。联立式(10)–(11)可以得到实测点云和数模中点的对应关系为

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} = T_r T_c^{-1} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = M_c^r \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中  $M_c^r$  为实测点云和数模中对应点的变换矩阵。通过多组PPF特征匹配,投票出一个最优的转换矩阵。因为数模中点坐标位置作为原始点,实测点云作为待配准点,通过矩阵变换可以将数模和实测点云初步完成粗配准。配准结果如图5所示。

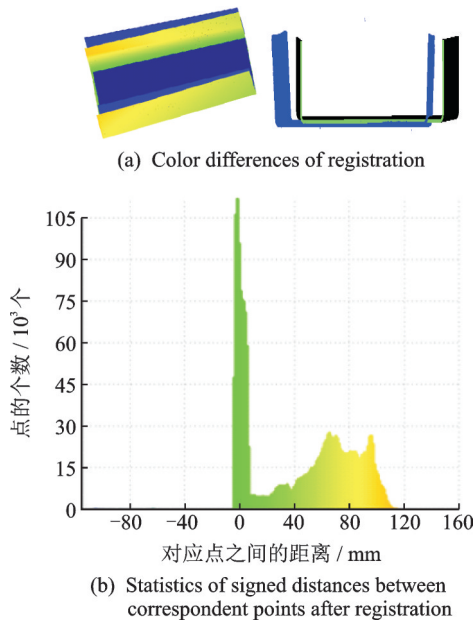


图 5 基于 PPF 特征匹配的粗配准

Fig.5 Coarse registration based on PPF feature matching

## 2.2 C 型梁不变特征提取

由于 C 型梁两侧存在一定的收缩或者扩张变形,所以数模和点云数据存在一定的外形差异。如果直接用经典 ICP 算法进行刚性配准,配准效果差,甚至出现配准失败的现象。为了减少 C 型梁两侧变形较大的区域在配准过程中带来的影响,本文首先需要利用点云分割算法,将 C 型梁分割为 3 部分,分别为两侧与中间区域。同时对理论数模进行相同操作。在三维数据采集过程中,根据采集形式和方法的不同,可以获得不同形式的数据。针对点云数据的种类的不同,点云区域分割通常分为基于散乱点云的分割、基于扫描线点云的分割和基于网格的点云分割<sup>[18]</sup>。

首先采用基于平面度的直接分割法对散乱点云进行预分割<sup>[19]</sup>。算法原理为选取曲面上一点作为种子点,利用散乱点云组成曲面上的点拟合出平面,及这些曲面上点的邻域点的最小二乘拟合平面,前一平面和后面所有平面之间的法向量夹角的均方差值<sup>[20]</sup>用来检测曲面上给定点邻域的弯曲程度。即判定种子点与邻域空间的相似度,通过提取曲面间的过渡曲面来分割曲面<sup>[21]</sup>。其中所用的平面度就是散乱点云数据点最小二乘拟合平面与其邻域点最小二乘拟合平面法向量夹角的均方差,则

$$\sigma = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \|n_i - n_j\| \quad (13)$$

式中: $n_i$ 、 $n_j$ 为散乱点云中种子数据点和待测数据点最小二乘拟合平面的单位法向矢量, $m$ 为邻域点

个数。本文为了方便计算,选取点云中每一个测点作为形心。任一数据点  $N^i$  单位法矢都可以由主元素分析法确定。首先需要计算数据点的邻域点集  $Nbhd(N_i)$  的协变矩阵,该协变矩阵是一个  $3 \times 3$  的半正定矩阵

$$C_V = \sum_{y \in Nbhd(N_i)} (y - o_i) \times (y - o_i) \quad (14)$$

式中:“ $\times$ ”为矢量外积, $o_i$ 为邻域点集  $Nbhd(N_i)$  的形心。设  $C_V$  的 3 个特征向量为

$$v_i^1, v_i^2, v_i^3$$

则对应的 3 个特征值分别为

$$\mu_i^1, \mu_i^2, \mu_i^3$$

若  $\mu_i^1 \geq \mu_i^2 \geq \mu_i^3$ , 则单位法矢<sup>[22]</sup>为

$$|n_i| = |\mu_i^3| \quad (15)$$

结合上述法矢量的计算方法则平面度分割算法整体的流程图可描述为如下所示,分割后点云数据如图 6 所示。分割算法流程:

- (1) 数据输入。
- (2) 计算点云所有点的特征向量并将其标记为未分割(false)。
- (3) 选择一个点作为开始区域的种子点,计算其邻域。
- (4) 选择未分割邻域点,计算种子点到其邻域的空间相似度。
- (5) 如果相似度在设定阈值范围内,则将该点加入到该区域并加入种子集合,将其标记为已分割(true),否则返回步骤(4)。
- (6) 判断种子集合是否为空,若为空得到一个分割区域,否则返回步骤(3)。
- (7) 判断是否所有点已经处理完,若均为 true,完成分割,否则返回步骤(2)。

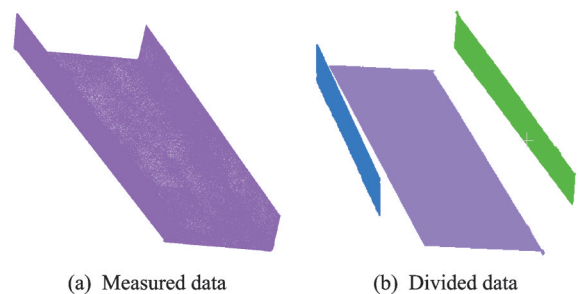


图 6 分割结果图

Fig.6 Segmentation result

实测点云模型分割后,在约束配准时需要初步判定 3 个面中哪个面为底面,因为 C 型梁变形量存在一定范围,本文结合实际生产情况采用如下方法判断。首先求取 3 个面的最小二乘拟合平面的单



位法向矢量分别为  $m_1, m_2, m_3$ , 这3个法向矢量结合图的优化方法将方向调整为C型梁开口外侧方向<sup>[23]</sup>。然后由向量夹角公式得  $m_1$  和  $m_2$  夹角为

$$\alpha_{12} = \arccos\left(\frac{m_1 \cdot m_2}{\|m_1\| \|m_2\|}\right) \quad (16)$$

同理, 可得  $\alpha_{13}$  与  $\alpha_{23}$  比较3个角的大小。若最大角为  $\alpha_{12}$ , 则  $m_3$  所对应的面为底面, 即为C型梁约束配准的面。

### 2.3 实测数据的精配准

特征匹配完成后, 再对实测数据和标准模型进行精配准, 本文使用了迭代最近点 (Iterative closest point, ICP) 进行精确配准。

假设用  $Q_i (i=1, 2, 3, \dots)$  表示C型梁标准模型离散后的点云,  $P_i (i=1, 2, 3, \dots)$  表示C型梁待配准点云。两个点集的对齐配准转换为使下列目标函数最小<sup>[24]</sup>。

$$E = \sum_{i=1}^n \|Q_i - (P_i \cdot R + T)\|^2 = \min \quad (17)$$

式中旋转矩阵  $R$  和平移矩阵  $T$ , 就是找到的待配准点云数据与参考点云数据直接的旋转参数和平移参数, 使得两点集数据直接满足某种度量准则下的最优匹配<sup>[25-26]</sup>。

配准过程:

(1) 计算  $P$  中的每一个点在  $Q$  点集中的对应最近点。

(2) 求得使上述对应点对平均距离最小的刚体变换, 求得平移参数和旋转参数。

(3) 对  $P$  使用上一步求得的平移和旋转参数, 得到新的变换点集  $P'$ 。

(4) 如果新的变换点集与参考点集满足上面目标函数要求, 即两点集的平均距离小于某一给定阈值  $\beta$ , 则停止迭代计算, 否则新的变换点集  $P'$  作为新的  $P$  继续迭代, 直到达到目标函数的要求。

结合本文所要解决的C型梁形变的实际问题, 中间区域基本不变, 两侧区域向内收缩变形的特点。为了分析C型梁的变形量, 将中间部分首先分割。点云分割后基于底面约束的ICP算法配准, 相当于底面权重因子为1的ICP算法。

## 3 结果分析

为了验证方法的可行性, 本文用不同变形程度的C型梁进行效果验证, 实验中扫描加工尺寸合格的C型梁, 得到其实测点云数据。实验平台为Windows 10操作系统, 运行IDE为Visual studio

2017, 实现语言C++。为了验证C型梁测边收缩变形对配准的影响, 同时验证本文配准方法的准确性和鲁棒性, 用三维软件构造出两侧向内收缩10°和向内收缩20°的C型梁的模型, 并将其转为点云数据, 作为变形后的C型梁与标准数模配准。配准方法包括:(1)直接配准法: 实测模型数据和软件构造的变形模型数据直接用ICP配准。(2)本文配准方法: 首先将C型梁分割, 然后以底面作为约束, 与软件构造的变形模型用PPF特征匹配的方法粗配准, 最后再用ICP精配准。

对以上两种配准方法的验证结果主要从配准后色差图 and 对应点的有向距离点的个数作为参考。

图7为采集的实测点云模型和数模配准, 使用经典ICP方法配准结果直观地可以看出效果较差如图7中第1行和第3行所示, 并且本文进行多次配准实验, 结果也不唯一。采用本文提出的算法, 即首先将数模分成3块, 然后针对C型梁的底面进行约束配准, 结果如图7的结果第2行和第4行所示, 配准结果明显有很大改善。但是配准结果还是不能全部配在一起, 是因为数模底面还存在一定的变形, 而且C型梁的实际成型尺寸和理论尺寸存在一定的差距。

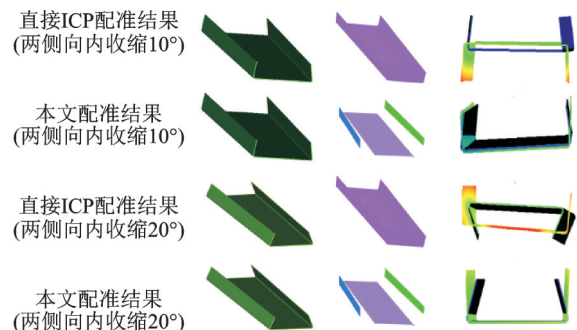


图7 配准结果对比

Fig.7 Registration result comparison

图8为配准后对应点直接距离统计, 从A和B两组对比实验可以明显看出本文方法配准结果比直接用ICP配准结果点对距离更靠近于0, 有少部分点对距离较大, 因为C型梁存在一定变形, 标准数模和实测模型存在一定的尺寸差异, 不可能完全匹配在一起。表1中更明确地看出由于约束的存在使C型梁的主体部分完全匹配在一起。本文配准结果中最大点对距离大于直接ICP配准, 是因为直接ICP没有对配准约束, 只是迭代找距离最小点, 而本文配准方法以底面进行约束, 即相当于以底面作为参考去分析, 分析侧面部分变形情况。

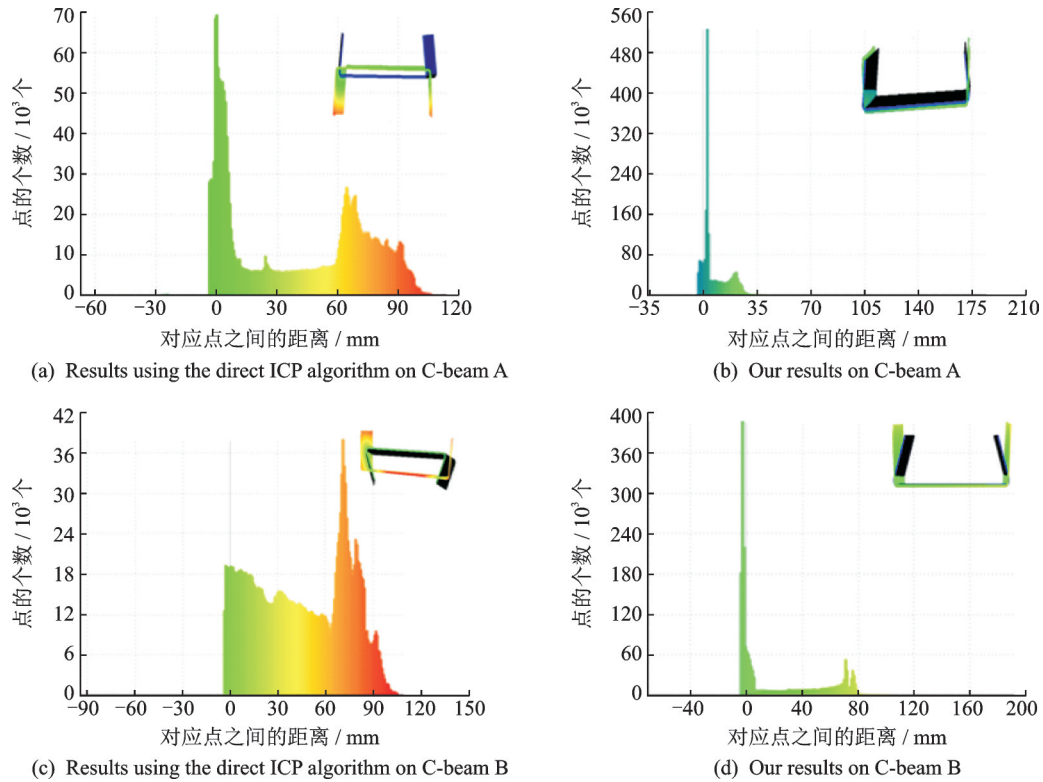


图 8 点位距离对比

Fig.8 Point distance comparison

表 1 点位距离统计

Table 1 Point distance statistics

C 型梁类别	距离/mm	直接 ICP 结果	本文配准结果
C 型梁 A(侧面收缩 10°)	点对最大距离	149.856	178.833
	平均距离	43.452	12.590
C 型梁 B(侧面收缩 20°)	点对最大距离	104.222	180.523
	平均距离	38.904	19.012

由以上实验结果表明,如果将实测数据和数模利用传统单一的配准技术进行配准,因为实测数据存在变形,及类似于将两个不同的物体配在一起,所以容易出现配准失败,因而本文加入了 PPF 技术进行粗配准,然后再进行精配准。而在精配准之前又加入了平面分割技术,提取出相似性更大的特征,可以有效降低变形对配准精度的影响。

## 4 结 论

为了解决 C 型梁加工变形测量中的关键问题,本文方法融合了一种高鲁棒性的点云局部特征表达方法和经典 ICP 配准方法,将两种理论有效地组合保证了配准的成功率,并在中间过程加入了平面分割技术,在变形的 C 型梁中提取出不变部分作为配准约束。3 种方法的有效融合极大地提高了存在变形情况的航空 C 型梁实测数据和标准数模检测前配准的成功率和准确性,解决了在航空制造领

域存在变形 C 型梁检测前的配准问题。本方法保证了配准精度和方法可靠性,为后续变形分析提供良好的分析基础。此方法的引入可以解决 C 型梁变形后配准问题,也可以作为一种通用性技术扩展到其他工件变形检测前的精确配准问题。从而可以有效地用于航空航天制造中数字化测量和检测中,对实践生产中精密制造和装配有很高的应用价值。

## 参考文献:

[1] 彭艳敏,杨亮,韩强儒,等.大型复杂双曲率复合材料构件固化变形关键问题分析[J].航空制造技术,2019,62(13):87-91.  
 PENG Yanmin, YANG Liang, HAN Qiangru, et al. Analysis of key problems in curing deformation of large complex doubly-curved composite components [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(13): 87-91.

- [2] 董丰路,陈维强,周宓,等.截面形式对复合材料杆件固化变形的影响[J].南京航空航天大学学报,2019,51(S1): 18-21.  
DONG Fenglu, CHEN Weiqiang, ZHOU Mi, et al. Effect of section on process-induced deformation for composite pipe[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019,51(S1): 18-21.
- [3] 齐俊伟,肖健,邓磊明,等.基于先进拉挤工艺的C型梁预成形变形分析[J].航空制造技术,2012(19): 88-91.  
QI Junwei, XIAO Jian, DENG Leiming, et al. Pre-forming analysis for C-type beam by advanced pultrusion process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(19): 88-91.
- [4] 祝君军,文琼华,罗辑,等.模具形式对V型结构复合材料固化变形的影响[J].宇航材料工艺,2018,48(5): 48-52.  
ZHU Junjun, WEN Qionghua, LUO Ji, et al. Effect of mold formig method on curing deformation of V-shaped composites[J]. Aerospace Materials and Technology, 2018, 48(5): 48-52.
- [5] 陈以传.帽形长桁先进拉挤成型技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.  
CHEN Yichuan. Research on the technologies of advanced pultrusion for hat stiffeners[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [6] 张永强.基于图像相关的金属材料疲劳与断裂力学测试技术研究[D].上海:上海大学,2018.  
ZHANG Yongqiang. Study on the experimental techniques of fatigue and fracture for metal materials based on digital image correlation[D]. Shanghai: Shanghai University, 2018.
- [7] 杨青,刘卫平,余木火,等.复合材料C型梁回弹变形影响因素权重分析[J].航空制造技术,2017(7): 72-77,81.  
YANG Qing, LIU Weiping, YU Muhuo, et al. Weighting analysis of factors of spring-back for C-shaped composite spars[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(7): 72-77,81.
- [8] CHETVERIKOV D, SVIRKO D, STEPANOV D, et al. The trimmed iterative closest point algorithm [C]//Proceedings of Object Recognition Supported by User Interaction for Service Robots. [S.l.]: IEEE, 2002: 545-548.
- [9] 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.
- [10] 黄高锋,陈义,符宏伟.基于特征点匹配及提纯的点云配准算法[J].测绘与空间地理信息,2019,42(2): 199-202.  
HUANG Gaofeng, CHEN Yi, FU Hongwei. Point cloud registration algorithm based on keypoints matching and purification[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019,42(2): 199-202.
- [11] 郭道亮.可变形成物体的全局非刚性配准与重建[D].天津:天津大学,2018.  
GUO Daoliang. Globa non-rigid registration and reconstruction of deformable objects [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [12] DROST B, ILIC S. 3D object detection and localization using multimodal point pair features [C]//Proceedings of 2012 Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission. [S.l.]: IEEE, 2012: 9-16.
- [13] SHARP G C, LEE S W, WEHE D K. ICP registration using invariant features[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(1): 90-102.
- [14] BIRDAL T, ILIC S. Point pair features based object detection and pose estimation revisited[C]//Proceedings of 2015 International Conference on 3D Vision. [S.l.]: IEEE, 2015: 527-535.
- [15] DROST B, ULRICH M, NAVAB N, et al. Model globally, match locally: Efficient and robust 3D object recognition[C]//Proceedings of 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S.l.]: IEEE, 2010: 998-1005.
- [16] 邹力.进化点云拼接技术的优化加速方法研究[D].天津:天津大学,2018.  
ZOU Li. Research on accelerate methods for evolutionary point cloud registration technique[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [17] 高雪梅.面向自动化装配的零件识别与抓取方位规划[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.  
GAO Xuemei. Research on objects recognition and grasping position planning for robot automatic assembly[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [18] 匡小兰,欧新良,倪问尹.散乱点云数据区域分割综述[J].长沙大学学报,2010,24(5): 68-72.  
KUANG Xiaolan, OU Xinliang, NI Wenyin. Summary of scattered point cloud data region segmentation [J]. Journal of Changsha University, 2010, 24(5): 68-72.

- [19] 李宝顺, 岑红燕, 包亚萍, 等. 基于平面提取的点云数据分割算法[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(7): 145-148.  
LI Baoshun, CEN Hongyan, BAO Yaping, et al. Segmentation algorithm for point cloud data on plane extraction[J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(7): 145-148.
- [20] 袁庆, 楼立志, 陈玮娴. 基于加权总体最小二乘的平面点云拟合方法[J]. 测绘通报, 2011(3): 1-2.  
YUAN Qing, LOU Lizhi, CHEN Weixian. Applying weighted total least-squares to the plane point cloud fitting of terrestrial laser scanning[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011(3): 1-2.
- [21] 胡怀宇, 崔汉国, 代星. 基于区域生长法的散乱点云分区方法[J]. 计算机应用, 2009, 29(10): 2716-2718.  
HU Huaiyu, CUI Hanguo, DAI Xing. Segmentation of scattered point data based on region growing method[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(10): 2716-2718.
- [22] 苏旭. 逆向工程中基于散乱数据点的曲面重构方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2000.  
SU Xu. Research on surface reconstruction based on scattered data points in reverse engineering[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2000.
- [23] 张丽艳. 基于逆向工程中模型重建关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2001.  
ZHANG Liyan. Research on key technologies of model reconstruction based on reverse engineering[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2001.
- [24] BOUAZIZ S, TAGLIASACCHI A, PAULY M. Sparse iterative closest point[C]//Proceedings of the Eleventh Eurographics/ACMSIGGRAPH Symposium on Geometry Processing. [S.l.]: Eurographics Association, 2013: 113-123.
- [25] 李乐平. 基于2D和3D视觉的工业机器人识别与抓取系统研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2018.  
LI Leping. Research on industrial robot recognition and grabbing system based on 2D and 3D vision[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [26] 刘峻峰, 何小妹, 黄翔, 等. ICP算法在叶型点云数据配准中的应用[J]. 航空制造技术, 2019(12): 79-82.  
LIU Junfeng, HE Xiaomei, HUANG Xiang, et al. Application of ICP algorithm in registration of blade point cloud data[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019(12): 79-82.

(编辑:陈璐)