

基于特征不变性约束的机翼 C 型梁变形检测方法

胡广露, 崔海华*, 翟鹏, 靳宇婷

南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016

摘要 复合材料 C 型梁成型后会产生回弹变形, 利用扫描数据进行变形量计算与分析容易产生错误匹配, 导致无法准确描述与评估实际变形量。鉴于此, 提出一种基于腹板区与对称面特征不变的 C 型梁点云配准与变形量检测方法。根据 C 型梁变形特性对回弹变形进行量化描述, 给出变形量计算方法。采用主成分分析和迭代最近点算法提取 C 型梁的对称平面以求取 C 型梁的对称度, 结合小变形的腹板区点云约束以实现测量数据与模型数据的配准, 获得 C 型梁的整体变形分布。构建具有回弹变形的 C 型梁模拟点云, 采用所提算法进行变形量计算。结果表明, 所提算法可以实现变形量的计算, 最大回弹变形量相对误差为 0.0461%, 变形量与模拟设定值相符, 实现 C 型梁变形量的检测。

关键词 机器视觉; 变形检测; C 型梁; 回弹变形; 对称度; 约束配准

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1215005

Deformation Detection Method of Wing C-Beam Based on Feature Invariant Constraint

Hu Guanglu, Cui Haihua*, Zhai Peng, Jin Yuting

College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract The composite C-beam will undergo springback deformation after forming. The calculation and analysis of the deformation amount using the scanned data are prone to mismatches, which make it impossible to accurately describe and evaluate the actual deformation amount. In view of this, a C-beam point cloud registration and deformation detection method based on the constant characteristics of the web area and the symmetry plane is proposed. According to the deformation characteristics of the C-beam, the springback deformation is quantitatively described, and the calculation method of the deformation amount is given. Principal component analysis and iterative nearest point algorithm are used to extract the symmetry plane of the C-beam to obtain the symmetry degree of the C-beam. Combined with the point cloud constraints of the web area with small deformation, the measurement data is registered with the model data, and the global deformation distribution of the C-beam is obtained. The simulation point cloud of C-beam with springback deformation is constructed, and the deformation amount is calculated by the proposed algorithm. The results show that the proposed algorithm can realize the calculation of the deformation amount, the relative error of the maximum springback deformation is 0.0461%, and the deformation amount is consistent with the simulated set value, and the detection of the C-beam deformation amount is realized.

Key words machine vision; deformation detection; C-beam; springback deformation; symmetry; constraint registration

OCIS codes 150.3045; 150.6910; 150.3040

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2020-10-11; 录用日期: 2020-10-29

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1707501)、江苏省自然科学基金(BK20191280)、中央高校基本科研业务费(NS2020030)

* E-mail: cuihh@nuaa.edu.cn

1 引言

复合材料因其具有高比强度、高比刚度、耐腐蚀和耐高温等优异性能而被广泛应用在航空航天领域,但受到热应力、材料的各向异性和模具结构形式等多种因素的影响,其在成型脱模后不可避免地出现回弹或翘曲等变形^[1-2]。为了减小回弹变形的影响,国内外许多学者尝试建立基于复合材料变形的预测模型,通过改变成型工艺来控制复合材料构件的变形量,但影响复合材料变形的因素过多,而且各因素间相互影响且没有明确的划分边界,一般预测结果与实际偏差约为 20%~30%^[3]。目前,国内对于 C 型梁的测量,一般停留在依靠游标卡尺和千分尺来测量厚度,使用激光跟踪仪来测量回弹夹角^[4]。但上述两种方法只能判断零件是否合格,无法准确描述 C 型梁的三维变形状态,也就无法与有限元仿真的变形结果进行对比,无法对有限元模型进行进一步的优化。

结构件的整体变形量就是计算结构件的测量数据与理论模型的配准结果,迭代最近点 (Iterative Closest Point, ICP) 算法^[5-6]是最常用的点云配准方法之一,该算法基于最小二乘法通过不断更新对应点的关系来计算最优刚体变换,直至满足收敛精度的要求,但其未考虑物体可能会发生变形的情况,这会导致配准结果不准确或陷入局部极小值^[7-8]。曾繁轩等^[9-11]基于点云特征对 ICP 算法进行优化,提高了配准收敛效率,但该算法只适用于曲率变化明显的点云。谭高山等^[12]采用设定回弹阈值的方法剔除了测量点云中变形量较大的点,接着采用约束匹配的方法获取了飞机钣金件的贴膜度。彭真等^[13-14]在配准过程中嵌入了动态阈值来消除错误配

对,这能够在一定程度上抵消变形对配准结果的不良影响。赵安安等^[15]采用局部不变性的约束配准方法解决了 C 型梁配准过程中无法直接配准和变形对结果的影响等问题,但该方法只使用了特征较少的底面点云进行配准,这很容易陷入局部最优解,只能保证底平面的配准误差较小。

上述配准算法均无法准确描述 C 型梁的三维变形情况,本文考虑复合材料 C 型梁回弹变形的特点,提出一种基于对称度和微小变形约束下的 C 型梁整体变形计算方法。首先约束回弹变形量以确定对应点,接着提取 C 型梁的腹板区点云和对称平面以计算对称度误差,然后利用特征不变性对 C 型梁整体点云进行约束配准,最后通过实测数据和模拟数据对所提方法进行验证。

2 C 型梁变形量的计算方法

2.1 算法概述

所提方法的处理流程如图 1 所示。首先采用直接 ICP 算法来获取 C 型梁的测量数据与模型数据的初始配准位置,根据复合材料 C 型梁回弹变形的特点来定义回弹变形量,根据回弹变形趋势来搜索对应点,使 C 型梁两侧缘条区所有的回弹变形量均大于等于零;为了解决变形后的测量数据采用现有配准算法无法准确反映 C 型梁变形的问题,通过提取 C 型梁小变形腹板区和对称平面作为不变特征来计算 C 型梁的对称度,通过施加不变特征约束对 ICP 配准后的数据进行迭代求解,从而完成测量点云与模型数据的精确配准;最终将测量点云与理论数据进行对比,用来计算回弹变形量以获取 C 型梁的整体变形结果。

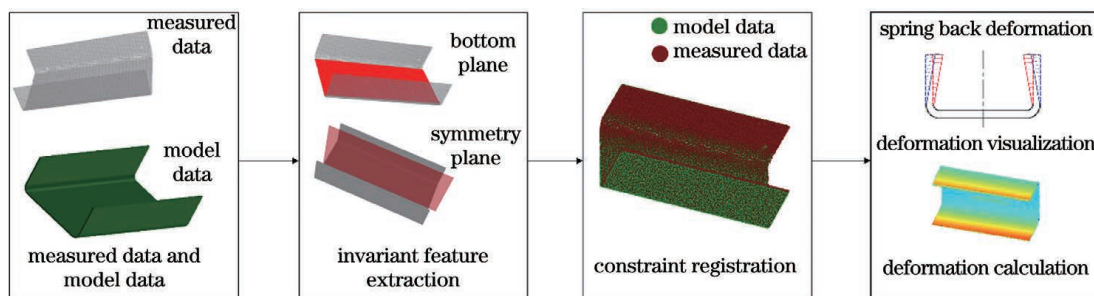


图 1 所提方法的处理流程

Fig. 1 Processing flow of proposed method

2.2 回弹变形的量化描述

首先定义 C 型梁的回弹变形量,对于 C 型梁测量点云中的任意一点 P ,其对应模型点云中点 Q ,则点 P 的回弹变形量为

$$\delta = (P - Q) \cdot n, \quad (1)$$

式中: n 为点 Q 的单位法向量。通常情况下,点云表面的法向量估计具有二义性,为了统一法向量的方向,引入视点 v_q 并规定 $n \cdot (v_q - Q) > 0$ 。定义观

视点为点云的质心点,模型点云中所有点的法向量均指向质心点。

文献[15]使用 PPF(Point Pair Feature)描述子解决了 C 型梁的测量数据与模型数据的匹配过程中初始位置难以确定的问题,但在误差分析的过程中忽略了回弹变形对点云对应点产生的影响。在模型空间中搜索测量点云中任意一点 P 的最近点 Q 并作为该点的对应点,这种查找方法只关心两点间的欧氏距离最小,忽略了点与点之间的实际对应关系。对于存在回弹变形的 C 型梁,采用该方法查找对应点会导致误匹配,如图 2(a)所示。阳模成型^[2]的 C 型梁在成型后两侧缘条区 F_α 和 F_β 向内收缩而产生回弹变形,腹板区 F_w 基本保持不变,图中虚

线表示 C 型梁截面的理论形状,实线表示 C 型梁的实际截面形状, α 和 β 分别为缘条面 F_α 和 F_β 的回弹夹角,通常情况下 $\alpha \neq \beta$ ^[3]。当回弹变形量较大时,C 型梁缘条区外表面的点通过最近点查找得到的对应点为缘条区内表面的点,这会缩小最大变形量和整体配准误差。缘条区的变形量应随缘条区距腹板区高度的增加而不断变大,采用最近点查找方法可以获取到对应点对,然后使用(1)式计算 C 型梁的整体回弹变形量,结果如图 2(b)所示。缘条区外表面的回弹变形量随缘条区高度的增加而不断变大,但当达到某一高度时,回弹变形量突然变为负值,这是由于此处缘条外表面的点云和模型内表面的点云出现误匹配。

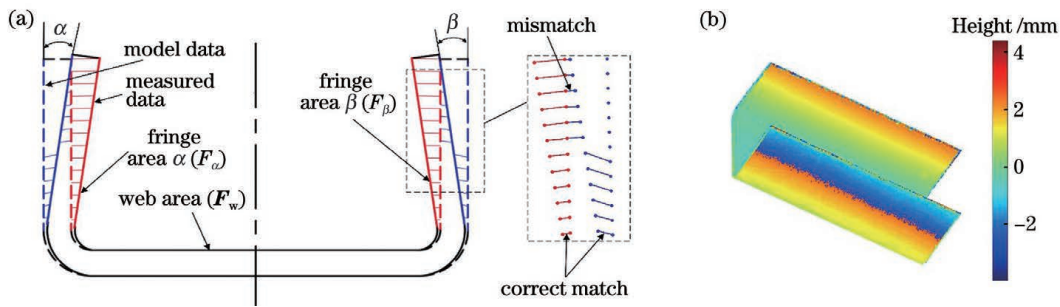


图 2 C 型梁回弹变形的误匹配结果。(a)C 型梁截面;(b)C 型梁整体回弹变形的计算结果

Fig. 2 Mismatch results of springback deformation of C-beam. (a) Section of C-beam; (b) calculation result of overall springback deformation of C-beam

对于阳模成型的 C 型梁,其缘条区的变形趋势一定是向内收缩^[2],因此回弹变形量 $\delta \geq 0$ 。根据这一特性,通过约束回弹变形量大于等于零的方式来重新搜索对应点对。首先采用 ICP 算法来获取测量点云与模型点云的初始配准位置,接着采用主成分分析法来获取点云中离散点的法线。对于点云中的某点 P_i ,对应的协方差为

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}) \cdot (P_i - \bar{P})^T, \quad (2)$$

式中: n 为点 P_i 邻域点的数量,一般根据点云密度来确定; \bar{P} 为邻域点的三维质心。设协方差矩阵 C 的三个特征向量分别为 $v_i^{(1)}$ 、 $v_i^{(2)}$ 和 $v_i^{(3)}$,对应的特征值从大到小依次为 $u_i^{(1)}$ 、 $u_i^{(2)}$ 和 $u_i^{(3)}$,则该点对应的单位法矢为

$$|n_i| = |u_i^{(3)}|. \quad (3)$$

结合(1)式中规定的视点 v_q ,即可获得该点的单位法向量 n_i 。

采用 k -d 树法来搜索缘条面测量点 P_i 在点云中的最近点 Q_j 和单位法向量 n_j ,其中 $j = 1, 2, \dots, m$ 。根据(1)式来计算点 P_i 的回弹变形量 δ_i ,若

$\delta_i < 0$ 则 P_i 与 Q_j 不是对应点对,此时需扩大搜索半径以得到次近点 Q'_j 和单位法向量 n'_j ,重新计算回弹变形量直至 $\delta_i \geq 0$ 为止,根据正确的匹配关系来重新计算配准矩阵以得到回弹变形量。

3 不变特征的提取与配准

3.1 C 型梁不变特征的定义

复合材料 C 型梁构件的变形主要表现为缘条区域的固化回弹变形,而腹板区几乎不发生任何变形,因此可以将腹板区测量点云作为 C 型梁的不变特征。虽然成型后的构件存在变形和点云缺失等问题,而且 C 型梁并不是一个严格的镜像对称结构,但仍存在一个对称平面,而变形后的 C 型梁关于该平面近似镜像对称。

3.2 不变特征的提取

由于腹板区点云为平面点云,特征稀少,仅使用变形量较小的腹板区作为配准约束,可能会出现局部最优的情况,也没有充分利用 C 型梁的整体测量数据,所以无法反映真实的变形情况。为了充分利用测量数据并解决局部最优配准的问题,提取 C 型

梁腹板区点云和 C 型梁对称平面,并将腹板区点云的匹配误差和 C 型梁整体的对称度作为配准约束条件。首先采用文献[15]的方法分割 C 型梁点云,获取 C 型梁的腹板区点云,接着采用主成分分析法和 ICP 算法求解 C 型梁准确的对称平面。

对于初始对称平面的求解,首先对测量数据进行降维处理,矩阵 C 的三个特征向量按特征值从大到小分别为 v_1 、 v_2 和 v_3 。根据 C 型梁的结构特点可知,次大的特征值所对应的特征向量 v_2 就是对称平面的法向量,结合质心点便可以求出 C 型梁的初始对称平面,如图 3(a)所示。但由于点云空间分布的不均匀性和点云缺失等问题,采用该方法并不能找到精确的对称平面,为此本文结合点云配准方法来求解最优对称平面^[16-17]。

设初始对称平面为 $\pi_{pm}: Ax + By + Cz + D = 0$ (A 、 B 、 C 和 D 为方程参数),对于点云中的每个点 P_i ,其在 π_{pm} 上的投影点为 m_i ,则点 P_i 关于 π_{pm} 的镜像点 $P_{mir,i}$ 可表示为

$$P_{mir,i} = 2m_i - P_i. \quad (4)$$

采用 ICP 算法来配准初始点云和测量点云,点云配准的方均根误差(RMSE) $R_{RMSE,mir}$ 可表示为

$$R_{RMSE,mir} = \sqrt{\frac{1}{G} \sum_{g=1}^G \|P_g - P_{mir,g}\|^2}, \quad (5)$$

式中: G 为点云中点的个数。

若初始点云关于 π_{pm} 完全对称,则配准误差 $R_{RMSE,mir} = 0$,但由于点云空间分布不均匀和噪声的存在, $R_{RMSE,mir} > 0$ 。对于初始点云中的任意一点 P_g ,在镜像点云中寻找最近点 $P_{mir,g}$,设定一个距离阈值,若两点间的欧氏距离小于设定的阈值,则认定点 $P_{mir,g}$ 和点 P_g 为镜像对称点,阈值可表示为

$$\beta = k\rho = k \times \sum_{i=1}^n d_{ij} / n, \quad (6)$$

式中: ρ 为点云的空间密度; k 为取值系数,此处 $k = 4$; d_{ij} 为两点间的欧氏距离。

对于所有的镜像对称点,中心点可由(6)式求得,即 $P_{center,i} = (P_i + P_{mir,i})/2$,那么点云 $P_{center} = \{P_{center,i} | i = 1, 2, \dots, n\}$ 就是对称平面上的点,采用随机采样一致性(Random Sample Consensus, RANSAC)算法对点云 P_{center} 进行平面拟合可以得

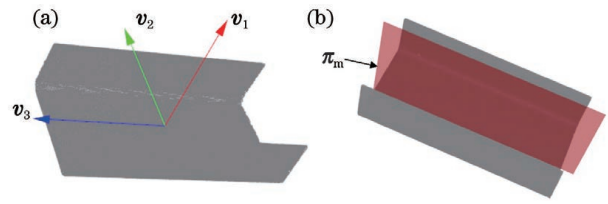


图 3 不同算法提取的 C 型梁对称平面。(a)主成分分析算法;(b)对称平面提取算法

Fig. 3 Symmetric plane of C-beam extracted by different algorithms. (a) Principal component analysis algorithm; (b) symmetry plane extraction algorithm

到精准的对称平面 π_m ,结果如图 3(b)所示。

最后提取测量点云腹板区中心点 P 和理论模型腹板区中心点 Q ,根据对称平面 π_m ,即可得到配准的最优对称平面。

3.3 基于特征不变性的 C 型梁配准

设测量点集 $P = \{p_i | i = 1, 2, \dots, n\}$,模型点集 $Q = \{q_j | j = 1, 2, \dots, m\}$,腹板区测量点集为 $P_w = \{p_{w,o} | o = 1, 2, \dots, n_w\}$,腹板区模型点集为 $Q_w = \{q_{w,s} | s = 1, 2, \dots, m_{w,m}\}$ 。点云匹配就是求解测量点云 P 到模型点云 Q 的最佳空间变换参数,建立数学模型为

$$\begin{aligned} \operatorname{argmin}_x f(x) = & \operatorname{argmin}_x \left(\sum_{i=1}^n \left\| \mathbf{R}(x) \times P_i + \right. \right. \\ & \left. \left. \mathbf{T}(x) - Q_j \right\|^2 \right), \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{o=1}^{n_w} \left\| \mathbf{R}(x) \times P_{w,o} + \mathbf{T}(x) - Q_{w,s} \right\|^2 \leq \sigma, \\ \text{s. t.} \quad & D_{RMSE} \leq \varepsilon, \end{aligned} \quad (7)$$

式中: σ 为腹板点云匹配的允许误差; D_{RMSE} 为 C 型梁测量点云的对称度方均根误差; $\mathbf{R}(x)$ 为测量数据到理论数据的旋转矩阵; $\mathbf{T}(x)$ 为测量数据到理论数据的平移矩阵; $x = [\theta_x \theta_y \theta_z t_x t_y t_z]^T$ 为空间旋转角和空间平移量组成的矩阵; ε 为允许误差。 D_{RMSE} 的表达式为

$$D_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|d_i^{\text{left}} - d_i^{\text{right}}\|^2}, \quad (8)$$

式中: d_i^{left} 和 d_i^{right} 分别为对称平面两侧对应点到对称平面的欧氏距离。 $\mathbf{R}(x)$ 和 $\mathbf{T}(x)$ 可表示为

$$\mathbf{R}(x) = \begin{bmatrix} \cos \theta_z \cos \theta_y & \cos \theta_z \sin \theta_y \sin \theta_x - \sin \theta_z \cos \theta_x & \cos \theta_z \sin \theta_y \cos \theta_x + \sin \theta_z \cos \theta_x \\ \sin \theta_z \cos \theta_y & \sin \theta_z \sin \theta_y \cos \theta_x + \cos \theta_z \cos \theta_x & \sin \theta_z \sin \theta_y \cos \theta_x - \cos \theta_z \sin \theta_x \\ -\sin \theta_y & \cos \theta_z \sin \theta_x & \cos \theta_y \cos \theta_x \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}) = [t_x \ t_y \ t_z]^T. \quad (10)$$

基于特征不变性约束配准的 C 型梁配准步骤如下。

- 1) 采用传统 ICP 算法得到初始配准位置。
- 2) 采用 k -d 树法搜索测量点云中一点 \mathbf{P}_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 在模型点云 \mathbf{Q} 中的最近点 \mathbf{Q}_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 和单位法向量 \mathbf{n}_j 。
- 3) 使用约束 $\delta \geq 0$ 重新搜索对应点对。
- 4) 使用正确的点对重新进行 ICP 配准。
- 5) 提取不变特征腹板区和对称平面, 计算对称度误差 D_{RMSE} 。
- 6) 采用基于腹板区约束的 ICP 算法再次配准。
- 7) 构造拉格朗日乘子罚函数, 表达式为

$$L(\mathbf{x}, \sigma_k, \lambda_k) = f(\mathbf{x}) + \frac{1}{2\sigma_k} \sum_{a=1}^A \left\{ \max[0, \lambda_a^k - \sigma_k g_a(\mathbf{x})]^2 - (\lambda_a^k)^2 \right\}, \quad (11)$$

式中: $g_i(\mathbf{x})$ 为不等式约束条件; σ_k 为罚因子; λ_k 为拉格朗日乘子; k 为迭代次数; A 为不等约束条件的个数。

8) 令 $\mathbf{x}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 迭代次数 $k = 0$, 最大迭代次数 $k_{\text{max}} > 0$, 允许误差 $\epsilon_{\text{max}} > 0$ 。

9) 以 \mathbf{x}_{k-1} 为初始点, 求解无约束优化问题

$\min L(\mathbf{x}, \sigma_k, \lambda_k)$, 最优解为 \mathbf{x}_k 。

10) 令 $M_k = \max_{a=1, \dots, A} \{\min[g_a(\mathbf{x}_k), \lambda_a^k / \sigma_k]\}$, 若 $M_k < \epsilon_{\text{max}}$, 则 \mathbf{x}_k 为最优解, 则转到步骤 11); 若 $k = k_{\text{max}}$, 则无解, 退出计算, 否则转回步骤 8)。

11) 更新拉格朗日乘子和罚因子, 令 $k = k + 1$ 并转回步骤 7)。

12) 使用 \mathbf{x}_k 变换来测量点云, 得到配准结果。

4 实验结果与分析

为了验证所提算法的可行性、鲁棒性和准确性, 使用商用三维扫描仪对 C 型梁随炉试验件进行扫描以获取真实的三维数据。同时, 利用三维软件来构造具有变形的 C 型梁, 设置缘条面 F_α 回弹角 $\alpha = 2^\circ$, 缘条面 F_β 无变形, 即 $\beta = 0^\circ$, 采用不同算法对变形结果描述的准确程度进行比较。将模拟的变形数模离散化以得到模拟的测量点云, 分别采用直接 ICP 配准算法、基于迭代加权最小二乘的配准 (IRLS-ICP) 算法^[18]、文献[15]的配准算法和所提的配准算法测量的点云与模型点云进行配准。

4.1 基于约束匹配变形量计算验证

利用 4 种算法分别对模拟测量点云进行配准, 对齐测量点云和模型数据后计算 C 型梁的整体回弹变形量, 4 种配准算法得到的回弹变形量如图 4 所示。

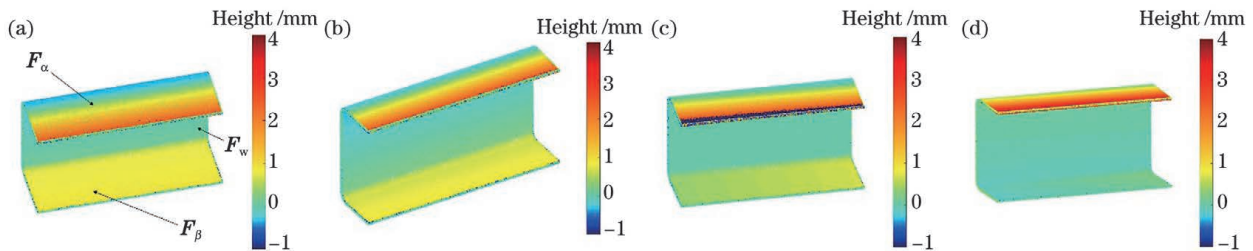


图 4 不同配准算法的配准结果。(a)ICP 算法;(b)IRLS-ICP 算法;(c)文献[15];(d)所提算法

Fig. 4 Registration results of different registration algorithms. (a) ICP algorithm; (b) IRLS-ICP algorithm; (c) Ref. [15]; (d) proposed algorithm

为了更好地比较不同配准算法在 C 型梁各区域的配准结果, 采用 RMSE 来表示配准精度, C 型梁各区域的方均根误差如表 1 所示, 表达式为

$$R_{\text{RMSE}, F} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \|\mathbf{P}_t - \mathbf{Q}_j\|^2}, \quad (12)$$

表 1 不同配准算法的方均根误差

Table 1 RMSE of different registration algorithms

unit: mm

Area of C-beam	Classic ICP	IRLS-ICP	Ref. [15]	Proposed algorithm
F_1	1.116	1.108	1.126	1.274
F_w	0.817	0.822	0.801	0.802
F_β	1.170	1.124	0.967	0.811
F_α	1.546	1.581	1.775	2.057

式中: $\mathbf{F} = \{\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_\alpha, \mathbf{F}_\beta, \mathbf{F}_w\}$ 为 C 型梁整体或某一区域, 其中 \mathbf{F}_1 为整体测量数据; T 为区域点云数量。

从图 4 和表 1 可以看到, 在 ICP 算法配准的情况下, \mathbf{F}_α 的配准误差为 1.546 mm, \mathbf{F}_w 的配准误差为 0.817 mm, \mathbf{F}_β 的配准误差为 1.170 mm, \mathbf{F}_1 的配准误差为 1.116 mm, 由于 ICP 算法具有较好的误差均衡性, 所以整体误差较小, 但配准结果在未变形的 \mathbf{F}_β 和 \mathbf{F}_w 区域均存在较大的配准误差, \mathbf{F}_β 区域存在较大的回弹变形, 与设定的无变形理论值不符, 表明 ICP 算法仅能使整体配准达到最优结果, 但无法真实描述 C 型梁的变形结果; IRLS-ICP 算法可以在一定程度上限制异常值的影响, 则有变形区域 \mathbf{F}_α 的配准误差有所上升, 无变形区域 \mathbf{F}_β 的配准误差有所下降, 但 IRLS-ICP 算法仍没有考虑被测零部件的变形, 其结果与 ICP 算法相近; 在文献[15]算法配准的情况下, \mathbf{F}_α 的配准误差为 1.775 mm, \mathbf{F}_w 的配准误差为 0.801 mm, \mathbf{F}_β 的配准误差为 0.967 mm, \mathbf{F}_1 的配准误差为 1.126 mm, 整体配准误差变大, 未变形区域 \mathbf{F}_β 和 \mathbf{F}_w 的配准误差较前两种算法有所降低, 该算法只使用腹板区点云配准结果作为最优的匹配结果, 虽然区域 \mathbf{F}_w 取得最优解, 但未变形区域的配准误差仍然较大, 区域 \mathbf{F}_β 的回弹变形量明显区别于 \mathbf{F}_w 区域, 变形区域 \mathbf{F}_α 在距腹

板区较高的位置发生误匹配, 由此表明文献[15]的算法可以在一定程度上提高 C 型梁变形检测的可靠性, 但仍存在较大的误差; 所提算法由于增加了约束, \mathbf{F}_1 值进一步变大, 但未变形区域 \mathbf{F}_β 的配准误差降低, 与区域 \mathbf{F}_w 相近, 分别为 0.811 mm 和 0.802 mm, 两者回弹变形量基本一致, 与预期结果相符, 变形一侧区域 \mathbf{F}_α 的误匹配现象消失, \mathbf{F}_β 值相比其他三种算法变大, 结果符合预期, 表明所提算法更符合 C 型梁的实际变形结果, 在未变形一侧的配准精度与前三种算法相比分别提高了 30.68%、27.85% 和 16.13%。

4.2 变形量检测结果与分析

对实际测量数据采用不同算法进行配准并计算回弹变形量 δ , 结果如图 5 所示。从图 5 可以看到, 由于受到回弹变形的影响, 采用直接 ICP 算法、IRLS-ICP 算法和文献[15]配准算法得到的回弹变形量均在 $\delta = -2$ mm 处存在较多的测量数据, 这是因为在回弹变形量较大的区域出现了误匹配的现象, 回弹变形量突然由正值跳变为负值; 采用所提算法计算回弹变形量, 在 $\delta \geq 0$ 的约束下, 最大回弹变形量 δ_{\max} 相对前两种算法有所提升, 在 $\delta = -2$ mm 处的误匹配现象消失, 整体回弹变形分布更符合实际变形情况。

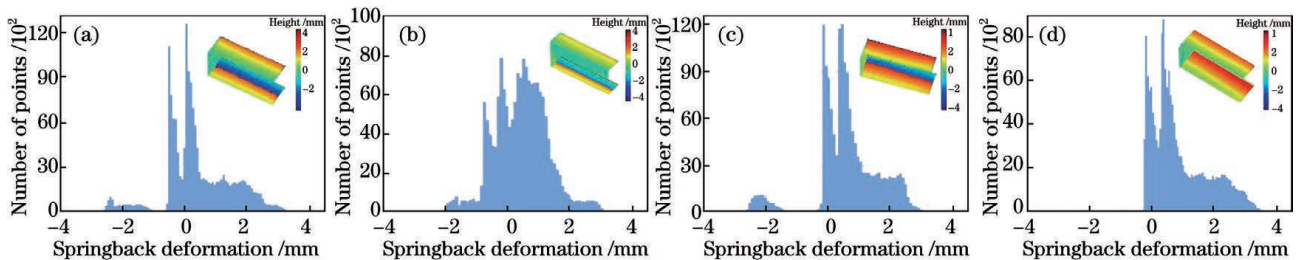


图 5 不同算法的回弹变形量。(a)ICP 算法;(b)IRLS-ICP 算法;(c)文献[15];(d)所提算法

Fig. 5 Amount of springback deformation of different algorithms. (a) ICP algorithm; (b) IRLS-ICP algorithm; (c) Ref. [15]; (d) proposed algorithm

表 2 为直接 ICP 配准、IRLS-ICP 算法、文献[15]配准算法与所提约束配准 4 种算法在测量数据与模型数据的最大回弹变形量、 $R_{\text{RMSE}, \mathbf{F}_1}$ 、 D_{RMSE} 、 $R_{\text{RMSE}, \mathbf{F}_w}$ 之间的差异。从表 2 可看到, 直接 ICP 配准和 IRLS-ICP 配准算法均衡了整体误差, 变形量较小的腹板区测量点云的配准误差变大, D_{RMSE} 值也大于所提算法; 文献[15]通过单独配准腹板区点云的方式可以较好地减少腹板区测量点云的偏差, 但腹板区的特征较少, 只能保证 \mathbf{F}_w 的配准误差最优, 而 $D_{\text{RMSE}} = 0.965$ mm, 说明文献[15]的算法仍存在很大的误差; 所提算法在保证腹板

区点云配准误差较小的情况下, 可以有效地减小 D_{RMSE} 值, D_{RMSE} 值仅为 0.577 mm, 说明所提算法可以更好地反映 C 型梁的实际变形情况。对于模型生成的数据, 理论上最大回弹变形量为 3.905 mm, 采用直接 ICP 算法得到的最大回弹变形量为 3.052 mm, 相对误差为 20.014%; 使用文献[15]得到的最大回弹变形量为 3.500 mm, 测量相对误差结果为 10.371%; 使用所提算法获取的最大变形量为 3.923 mm, 相对误差为 0.0461%, 所提算法计算的最大回弹变形量更接近实际回弹变形量。

表 2 不同配准算法的结果比较

Table 2 Comparison of results of different registration algorithms

unit: mm

C-beam data	Distance	ICP	IRLS-ICP	Ref. [15]	Proposed algorithm
Measured data	Maximum springback deformation	4.251	4.216	4.013	4.627
	R_{RMSE, F_1}	1.430	1.498	1.451	1.550
	D_{RMSE}	0.777	0.959	0.956	0.577
	R_{RMSE, F_w}	0.941	1.092	0.871	0.874
Model generated data	Maximum springback deformation	3.052	3.035	3.500	3.923
	R_{RMSE, F_1}	1.116	1.108	1.126	1.247
	D_{RMSE}	1.804	1.470	1.196	0.450
	R_{RMSE, F_w}	0.817	0.822	0.801	0.802

5 结 论

根据复合材料 C 型梁回弹变形的特点,采用约束回弹变形量的方法来确定测量点云与模型点云间的对应点对,采用低变形区域和对称度同时约束的配准方法可以有效避免现有配准方法均衡误差或参与配准点云过少的问题。通过仿真数据和实测数据证明所提算法优于直接 ICP 配准算法、IRLS-ICP 配准算法和基于局部不变性的配准算法,在保证腹板区配准精度的同时,对称度方均根误差降低至 0.577 mm;对于模拟数据,最大回弹变形量相对误差仅为 0.0461%。检测结果为 C 型梁成型有限元分析提供数据支持,也适用于其他复合材料 C 型梁构件的回弹变形检测。

参 考 文 献

- [1] Huang G H, Jia L J, Xu P. Spring-back study for composites spar [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018(2): 70-73.
黄钢华,贾丽杰,徐鹏. 复合材料机翼翼梁回弹研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(2): 70-73.
- [2] Zhu J J, Wen Q H, Luo J, et al. Effect of mold formig method on curing deformation of V-shaped composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2018, 48(5): 44-48.
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): 44-48.
- [3] Yang Q, Liu W P, Yu M H, et al. Weighting analysis of factors of spring-back for C-shaped composite spars [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(7): 72-77, 81.
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, 60(7): 72-77, 81.
- [4] Fang X B, Guo J G, Ai M, et al. Development of C type outer wing rear beam based on composite material for certain type aircraft [J]. Adhesion, 2018, 39(12): 73-77.
房晓斌,郭俊刚,艾明,等. 某型机复合材料 C 型外翼后梁研制[J]. 粘接, 2018, 39(12): 73-77.
- [5] 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.
- [6] Dai J L, Chen Z Y, Ye X Z. The application of ICP algorithm in point cloud alignment [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(3): 517-521.
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.
- [7] Tan G S, Liu S L, Zhang L Y. Registration method based on composite weighting parameters of measured data and regional accuracy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 354-358, 378.
谭高山,刘胜兰,张丽艳. 测量数据和区域精度加权的模型配准方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 354-358, 378.
- [8] Zhao M, Shu Q, Chen W, et al. Three-dimensional point cloud registration algorithm based on l^p spatial mechanics model [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1010005.
赵敏,舒勤,陈蔚,等. 基于 l^p 空间力学模型的三维点云配准算法[J]. 光学学报, 2018, 38(10):

- 1010005.
- [9] Zeng F X, Li L, Diao X P. Iterative closest point algorithm registration based on curvature features [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 011003.
曾繁轩, 李亮, 刁鑫鹏. 基于曲率特征的迭代最近点算法配准研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 011003.
- [10] Liu J, Bai D. 3D point cloud registration algorithm based on feature matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1215005.
刘剑, 白迪. 基于特征匹配的三维点云配准算法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1215005.
- [11] Yang W, Zhou M Q, Zhang X K, et al. Skull point cloud registration algorithm based on hierarchical optimization strategy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0615001.
杨稳, 周明全, 张向葵, 等. 基于分层优化策略的颅骨点云配准算法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0615001.
- [12] Tan G S, Zhang L Y, Liu S L. Springback gap computation of sheet metal part based on constrained and hierarchical strategy [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(6): 1546-1552.
谭高山, 张丽艳, 刘胜兰. 基于约束层次化策略的钣金件贴模度计算 [J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(6): 1546-1552.
- [13] Peng Z, Lü Y J, Qu C, et al. Accurate registration of 3D point clouds based on keypoint extraction and improved iterative closest point algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(6): 061002.
彭真, 吕远健, 渠超, 等. 基于关键点提取与优化迭代最近点的点云配准 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(6): 061002.
- [14] Liu M J, Wang X D, Li L Y, et al. Improved random sampling consistency algorithm employed in three-dimensional point cloud registration [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 101104.
刘美菊, 王旭东, 李凌燕, 等. 改进的 RANSAC 算法在三维点云配准中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 101104.
- [15] Zhao A A, Wu Z P, Cao T, et al. Aeronautical C-beam registration based on local invariance [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2020, 52(3): 430-437.
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.
- [16] Cicconet M, Hildebrand D G C, Elliott H. Finding mirror symmetry via registration and optimal symmetric pairwise assignment of curves [C] // 2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW), October 22-29, 2017, Venice, Italy. New York: IEEE Press, 2017: 1749-1758.
- [17] Hosoki D, Lu H M, Kim H, et al. Detection of facial symmetric plane based on registration of 3D point cloud [C] // 2019 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), October 15-18, 2019. Jeju, Korea. New York: IEEE Press, 2019: 1037-1041.
- [18] Bergström P, Edlund O. Robust registration of point sets using iteratively reweighted least squares [J]. *Computational Optimization and Applications*, 2014, 58(3): 543-561.