

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.03.041

基于在机测量点集配准的工件位姿自适应调整算法

贾壮军¹, 李勇²

(1. 杭州海康机器人股份有限公司西安研发分公司, 陕西 西安 710076;

2. 兰州交通大学 机械工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 针对工件位姿变化所导致的加工轮廓误差控制问题, 设计一种基于在机测量点集的配准算法。在理论测量面与实际测量面上分别选取参考测量点建立对应的局部坐标系, 通过坐标系重合实现初始配准; 通过初配准后的测量点集建立基于最小二乘距离的目标函数, 利用自适应差分进化算法获得精确配准矩阵。根据两次配准结果计算工件位姿的调整矩阵。通过实例对算法进行验证, 结果表明: 所提算法可以较好地实现加工坐标系的调整, 有利于加工轮廓误差控制。

关键词: 在机测量; 数据配准; 轮廓误差; 控制

中图分类号: TH164; TP399 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2024)03-0190-05

Adaptive Adjustment Algorithm for Workpiece Posture Based on Registration of On-machine Measurement Point Set

JIA Zhuangjun¹, LI Yong²

(1. Xi'an R&D Branch Company of Hangzhou Hikang Robot Co., Ltd., Xi'an 710076, China;

2. School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: For the control of workpiece contour errors resulting from the change of workpiece posture, a matching algorithm based on on-machine measurement data is designed. The reference points on the theoretical and actual measured surfaces are selected to build local coordinate systems, and the initial matching is achieved by aligning the local coordinate systems. The objective function based on the least square method is established by the point sets after the initial matching. The optimal transformation matrix can be acquired by self-adaptive differential evolution algorithm. The posture adjustment matrix of workpiece can be achieved by the two matching results. The algorithm is verified through practical application. The results show that the designed algorithm can complete the adjustment of machining coordinate system, and contributes to the effective control of contour errors.

Keywords: on-machine measurement; data matching; contour errors; control

0 引言

在多工序机械加工中, 由于多次装夹、加工变形等原因, 工件位姿容易发生变化, 从而导致工件加工轮廓误差超差。因此有必要寻找一种便捷有效的算法以控制工件的轮廓误差。算法的关键是实现实际工件与理论模型之间的精确配准, 即通过坐标变换, 使工件坐标系 (workpiece coordinate system, WCS) 与加工坐标系 (machining coordinate system, MCS) 尽可能保持一致。随着在机测量技术的广泛使用^[1], 理论数据与实际数据的获取更为方便、可靠, 使得模型数据配准精度进一步提高。

关于配准算法, BESL 等^[2]最先提出了迭代最近点 (ICP) 算法, 该算法被广泛应用于点云配准,

在特定的初始条件下能够较好地实现曲面配准, 但对两点集初始位置要求较高, 且计算量较大。在传统 ICP 算法基础上, 近年来有众多研究者对其进行了相关的改进^[3-4]。LIU^[5]提出了一种新的自由曲面配准算法, 该算法通过基于共线性和相似性约束条件建立的传统 ICP 准则来直接处理可能的点配准; FITZGIBBON^[6]采用 LM 算法 (levenberg-marquardt algorithm) 解决点集配准问题, 其求解效率与 ICP 算法相当。针对三维点云数据, GE 等^[7]提出了基于非线性 Gauss-Helmert 模型和非线性最小二乘的点云数据配准算法, 并完成相关三维模型的重构, 该算法在收敛速度和配准精度上优于 ICP 算法; 张文丽等^[8]为提高现有有点云配准算法在真实点云数据的配准精度, 提出了一种三阶段的基于 AGConv 局部特征描述符

第一作者简介: 贾壮军 (1996—), 男, 甘肃古浪人, 学士, 研究方向为机械设计制造、机器人控制算法, jiazhuangjun@126.com。

的点云配准方法。

机械加工中,配准主要用于工件的余量优化、工件位姿调整、识别。YAN 等^[9]为解决数控加工中复杂曲面类工件的定位问题,提出了两步配准法,算法分为粗配准与精确配准,在精确配准中引入了遗传算法(GA);张莹等^[10]针对复合制造工艺背景下叶片毛坯形状复杂、余量分布不均的特点,提出基于加工中心在线测量的叶片装夹定位与余量优化算法;刘孝龙^[11]针对自由曲面配准问题,首次将曲率索引引入到配准技术中,实现基于曲率 Hausdorff 距离的初始配准和改进迭代最近点算法的配准优化;韩德川^[12]针对现有点云匹配算法无法很好地用于部件位姿调整的问题,提出了基于加权距离投票的点云匹配算法;MEHRAD 等^[13]通过粗定位与精确定位,实现了基于曲率和距离相似性的点到设计模型的配准,但需要 B 样条曲面重构;潘海鸿等^[14]针对工业环境下识别无序摆放工件时存在的识别准确率低与配准时间长等问题,提出一种频域的四维向量匹配方法(FDVM),识别无序摆放工件的位姿。

上述配准算法能够实现工件姿态调整计算,但在配准中需要大量点云数据或相应的表面参数方程及其他相关表面特性参数,主要适用于光学扫描测量。而对于少量在机测量点的配准,相关算法及在工程应用方面的研究较少。本文结合在机测量技术,开发了基于在机测量点集的分步配准算法,并通过计算工件位姿的最优调整参数,实现工件加工轮廓误差控制。

1 配准算法流程

设工件测量面实际测量点集为 $P = \{P_i | i = 1, 2, \dots, n\}$, 理论测量点集为 $Q = \{Q_i | i = 1, 2, \dots, n\}$, 则 P 到 Q 的配准可以表示为

$$Q_i = P_i R + T \quad (1)$$

式中: R 为空间旋转变换矩阵; T 为平移变换矩阵。算法流程如下:

- 1) 通过工件的在机测量规范, 获取测量点集 Q 和 P ;
- 2) 在测量点集 Q 和 P 上分别选取 3 个对应的参考点, 建立理论与实际局部坐标系;
- 3) 初始配准通过局部坐标系的对齐实现初始配准, 并计算获取初始配准矩阵 R_0 和 T_0 ;
- 4) 利用式(2)对实际点集 P 进行坐标变换, 获得新的实际点集 P' ;

$$P' = PR_0 + T_0 \quad (2)$$

5) 构建目标函数, 进行精确配准, 获得精确配准矩阵 R_1 和 T_1 ;

6) 按式(3)计算工件位姿的最终变换矩阵 R 和 T 。

$$\begin{cases} R = R_1 R_0 \\ T = T_0 + T_1 \end{cases} \quad (3)$$

2 初始配准

初始配准是为了减小理论与实际测量面之间的姿态误差, 以使后续优化算法能更快收敛, 提高解的精度。

2.1 砂轮位姿计算方法

初始配准是通过理论与实际局部坐标系的对齐实现的, 所以建立能够表示测量面空间姿态的局部坐标系至关重要。如图 1 所示, 理论曲面与实际曲面之间存在位姿误差。在理论曲面与实际曲面上分别选取 Q_0, Q_1, Q_2 和 P_0, P_1, P_2 作为参考点。通常情况下, 参考点由 3 个不共线的点构成, 且尽可能地分布在其他测量点的外侧, 使其最大程度地包括被测量面, 只有这样才能建立能够比较准确表示测量面空间姿态的局部坐标系。根据参考点可以确定各局部坐标系 x, y, z 轴的单位方向矢量, 据此建立局部坐标系, 具体算法如下。

设 i_a, j_a, k_a 为实际局部坐标系 x, y, z 轴单位方向矢量, P_0 为原点; i_t, j_t, k_t 为理论局部坐标系 x, y, z 轴单位方向矢量, Q_0 为原点。则有:

$$\begin{cases} i_t = \frac{Q_2 - Q_0}{|Q_2 - Q_0|}, k_t = \frac{Q_1 - Q_0}{|Q_1 - Q_0|} \times i_t, j_t = i_t \times k_t \\ i_a = \frac{P_2 - P_0}{|P_2 - P_0|}, k_a = \frac{P_1 - P_0}{|P_1 - P_0|} \times i_a, j_a = i_a \times k_a \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4)可以求得坐标系各轴的单位方向矢量, 建立如图 1 所示的实际局部坐标系 $P_0 - X_a Y_a Z_a$ 和理论局部坐标系 $Q_0 - X_t Y_t Z_t$ 。

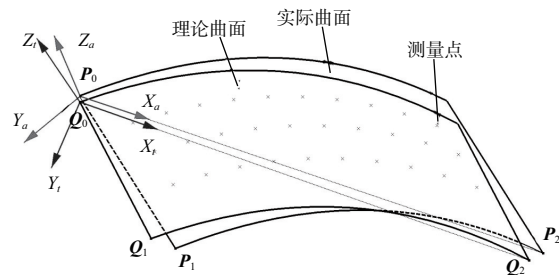


图 1 局部坐标系示意

2.2 初始配准矩阵的求解

理论上,初始配准后实际与理论局部坐标系完全重合,因此两局部坐标系与初始配准矩阵之间存在式(5)所示关系:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_a \\ \mathbf{j}_a \\ \mathbf{k}_a \end{bmatrix}^T \mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_t \\ \mathbf{j}_t \\ \mathbf{k}_t \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

式中 $\mathbf{R}_0$ 为初始配准矩阵,其形式如式(6)所示。

$$\mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} \cos\gamma_0 \cos\beta_0 & \cos\beta_0 \sin\gamma_0 & -\sin\beta_0 \\ \sin\alpha_0 \sin\beta_0 \cos\gamma_0 - \cos\alpha_0 \sin\gamma_0 & \sin\alpha_0 \sin\beta_0 \sin\gamma_0 - \cos\alpha_0 \cos\gamma_0 & \sin\alpha_0 \cos\beta_0 \\ \cos\alpha_0 \sin\beta_0 \cos\gamma_0 + \sin\alpha_0 \sin\gamma_0 & \cos\alpha_0 \sin\beta_0 \sin\gamma_0 - \sin\alpha_0 \cos\gamma_0 & \cos\alpha_0 \cos\beta_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据式(5)、式(6)可求得 $\mathbf{R}_0$, 结合 $\mathbf{R}_0$ 的数学表达式,可以求得实际曲面与理论曲面之间的方向误差(即实际测量点相对于理论坐标轴 X_t, Y_t, Z_t 的旋转角度 $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$), 其计算结果如式(7)所示。

$$\begin{cases} \alpha_0 = \arctan \frac{\mathbf{R}_0(2,3)}{\mathbf{R}_0(3,3)} \\ \beta_0 = \arctan \frac{-\mathbf{R}_0(1,3)}{\sqrt{[\mathbf{R}_0(2,3)]^2 + [\mathbf{R}_0(3,3)]^2}} \\ \gamma_0 = \arctan \frac{\mathbf{R}_0(1,2)}{\mathbf{R}_0(1,1)} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{R}_0(i, j)$ 为矩阵 $\mathbf{R}_0$ 第 i 行第 j 列的元素($i, j = 1, 2, 3$)。

坐标系 $P_0 - X_a Y_a Z_a$ 相对于 $Q_0 - X_t Y_t Z_t$ 的平移量 $\mathbf{T}_0 = [t_{x0} \ t_{y0} \ t_{z0}]$ 可由式(8)计算:

$$\begin{cases} \mathbf{T}_0 = \mu - \mu'_0 \mathbf{R}_0 \\ \mu'_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_i \\ \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{Q}_i \end{cases} \quad (8)$$

式中 μ'_0 为实际测量面质心坐标,即实际测量点集坐标平均值; μ 为理论测量面质心坐标,即理论测量点集坐标平均值。

3 精确配准

精确配准矩阵将配准计算转化为最优值求解问题,通过优化可确定最佳的空间变换参数,即3个旋转量 $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ 和3个平移量 t_{x1}, t_{y1}, t_{z1} , 进而确定精确配准矩阵 $\mathbf{T}_1$ 和 $\mathbf{R}_1$, 其中 $\mathbf{T}_1$ 和 $\mathbf{R}_1$ 的表达式分别如式(9)和式(10)所示。

$$\mathbf{T}_1 = [t_{x1} \ t_{y1} \ t_{z1}] \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} \cos\gamma_1 \cos\beta_1 & \cos\beta_1 \sin\gamma_1 & -\sin\beta_1 \\ \sin\alpha_1 \sin\beta_1 \cos\gamma_1 - \cos\alpha_1 \sin\gamma_1 & \sin\alpha_1 \sin\beta_1 \sin\gamma_1 - \cos\alpha_1 \cos\gamma_1 & \sin\alpha_1 \cos\beta_1 \\ \cos\alpha_1 \sin\beta_1 \cos\gamma_1 + \sin\alpha_1 \sin\gamma_1 & \cos\alpha_1 \sin\beta_1 \sin\gamma_1 - \sin\alpha_1 \cos\gamma_1 & \cos\alpha_1 \cos\beta_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

3.1 构建目标函数

初始配准后,实际测量点集 $\mathbf{P}$ 转换为 $\mathbf{P}'$, 定义为 $\mathbf{P}' = \{\mathbf{P}'_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 。精确配准是为了搜索最佳配准矩阵 $\mathbf{R}_1$ 和 $\mathbf{T}_1$, 使点集 $\mathbf{P}'$ 在误差允许范围内最大程度接近理论测量点集 $\mathbf{Q}$ 。精确配准后可获得新的实际测量点集 $\mathbf{P}''$ 。通常情况下,采用理论点集 $\mathbf{Q}$ 与点集 $\mathbf{P}''$ 之间平均距离的平方误差来衡量配准结果。因此,精确配准可以归结为最小化问题,根据最小二乘原理可建立式(11)所示目标函数。

$$\min f(\mathbf{R}_1, \mathbf{T}_1) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{Q}_i - (\mathbf{P}'_i \mathbf{R}_1 + \mathbf{T}_1)\|_2^2 \quad (11)$$

目标函数包含3个旋转量 $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ 和3个沿轴平移量 t_{x1}, t_{y1}, t_{z1} , 且属于非线性问题。为了

提高运算效率,需进行降元处理,由式(8)可知,点集 $\mathbf{P}'$ 相对于理论点集 $\mathbf{Q}$ 的平移量可以表示为 $\mathbf{T}_1 = \mu - \mu'_1 \mathbf{R}_1 = [t_{x1} \ t_{y1} \ t_{z1}]$, 其中 $\mathbf{P}'$ 的质心坐标 $\mu'_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{P}'_i$, 因此最终的目标函数可由式(12)表示。经降元处理,目标函数只含3个旋转变量,使运算简化。

$$\min f(\mathbf{R}_1) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\| \mathbf{Q}_i - \left[\mathbf{P}'_i \mathbf{R}_1 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{Q}_i - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{P}'_i \right) \mathbf{R}_1 \right] \right\|_2^2 \quad (12)$$

3.2 优化求解

采用自适应差分进化算法(self-adaptive differential evolution, SADE)对目标函数进行优化求解。SADE算法相比传统的优化算法能在保证

计算精度的同时具有计算时间少、鲁棒性高的特点。本文采用 SADE 算法求解精确配准的最优值。SADE 算法优化操作主要包括变异、交叉、选择及边界条件的处理,其关键参数主要包括种群规模 N_p 、变异算子 F 、交叉算子 C_R 、变量维数 D 、最大进化代数 G_m 、变量边界值等。

1) 自适应变异算子设计

自适应变异算子 $F \in [0, 2]$ 是一个实常数因数,控制偏差变量的放大作用^[15-16],其设计如式(13)所示。

$$\begin{cases} \lambda = e^{\frac{1-G_m}{G_m+1-G}} \\ F = 2^\lambda F_0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: F_0 为初始变异算子; G_m 为最大进化代数; G 表示当前进化代数。

由式(13)可知,在算法开始时 $G = 1$,自适应变异算子为 $2F_0$,具有较大值,在初期可以保持个体多样性,避免早熟。随着算法的进展,变异算子逐步降低,到后期其值接近 F_0 ,则可以保留优良信息,避免最优解遭到破坏,增加搜索到全局最优解的概率。

2) 自适应交叉算子设计

自适应交叉算子 C_R 的设计如式(14)所示。其中, $C_R \in [0, 1]$, $C_{R,\min}$ 与 $C_{R,\max}$ 分别为 C_R 的最小值与最大值。

$$C_R = C_{R,\min} + \frac{G(C_{R,\max} - C_{R,\min})}{G_m} \quad (14)$$

通常, C_R 越大,越容易发生交叉,有利于局部搜索和加快收敛速度; C_R 较小,有利于保持种群多样性和全局搜索^[17-18]。由式(14)可知,随着进化代数增加, C_R 逐渐增大。这样,在算法开始阶段可以更好地保证种群多样性,进行全局搜索,而在后期,可以加强算法的局部搜索能力,以提高算法精度。

3) 优化变量边界值确定

初始配准后,理论与实际测量面之间的姿态误差减小。理论上,精确配准中3个旋转角度 α_1 、 β_1 、 γ_1 的变化范围不超过 α_0 、 β_0 、 γ_0 的值,但考虑到初始配准存在误差,精确配准变量可行域可以适当扩大, α_1 、 β_1 、 γ_1 的范围可分别定义为: $[-\alpha_0 - k_1, \alpha_0 + k_1]$, $[-\beta_0 - k_2, \beta_0 + k_2]$, $[-\gamma_0 - k_3, \gamma_0 + k_3]$,其中 k_i ($i=1, 2, 3$)为 $[0^\circ, 5^\circ]$ 之间的常数。

4 算法验证

通过某 S 形试件对论文所提匹配算法进行验证,测试过程按照相应的测试规范进行^[19]。图 2 所

示为 S 形试件模型,加工曲面容差为 $\varepsilon = \pm 0.035 \text{ mm}$,加工曲面初始姿态如图 3 所示,具体实施步骤及相关测量数据和试验结果如下。

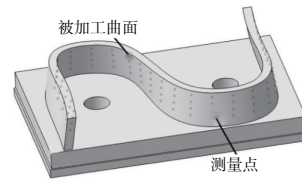


图 2 S 形试件测量模型

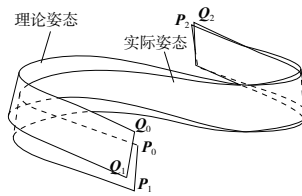


图 3 曲面初始姿态示意

1) 初始配准

从测量点集选择相对距离最远的 3 组测量点建立局部坐标系,如表 1 所示;根据所提算法进行初始配准,其结果如表 2 所示,其中 $e_{\text{error_in}}$ 表示初始匹配后的轮廓误差。

表 1 局部坐标系参数

参考点坐标	局部坐标系方向矢量
$Q_0(278, 197.5, 40)$	$i_i(-0.784\ 7, 0.153\ 7, 0.600\ 5)$
$Q_1(284, 197.5, 0)$	$j_i(-0.607\ 2, 0.004\ 1, -0.794\ 5)$
$Q_2(32, 2.5, 40)$	$k_i(-0.124\ 6, -0.988\ 1, 0.090\ 1)$
$P_0(275.639\ 6, 200.011\ 8, 28.314\ 9)$	$i_a(-0.779\ 5, 0.127\ 4, 0.613\ 3)$
$P_1(278.450\ 1, 202.154\ 7, -11.977\ 9)$	$j_a(-0.615\ 9, 0.023\ 1, -0.787\ 5)$
$P_2(33.033\ 3, 1.014\ 7, 37.441\ 8)$	$k_a(-0.114\ 5, -0.991\ 6, 0.060\ 5)$

表 2 初始配准结果

名称	配准结果
R_0	$\begin{bmatrix} 0.996\ 765\ 498 & -0.013\ 322\ 882 & 0.079\ 253\ 025 \\ 0.017\ 398\ 606 & 0.998\ 549\ 102 & -0.050\ 960\ 562 \\ -0.078\ 459\ 100 & 0.052\ 174\ 622 & 0.995\ 551\ 093 \end{bmatrix}$
T_0	$[1.993\ 530\ 992 \quad -0.026\ 645\ 760 \quad 0.158\ 506\ 049]$
$e_{\text{error_in}}/\text{mm}$	0.381 29

2) 精确配准

经初始配准后,边界近似值确定为 $\alpha_1 \in [-5^\circ, 5^\circ]$, $\beta_1 \in [-5.5^\circ, 5.5^\circ]$, $\gamma_1 \in [-3^\circ, 3^\circ]$ 。根据 SADE 优化算法参数设置范围 (N_p 合理选择在 $5D \sim 10D$ 之间, F 的最佳初始值为 $0.5 \sim 0.8$, 则初始变异算子 F_0 可在 $0.25 \sim 0.4$ 之间选择, G_m 通常在 $100 \sim 500$ 之间), 最终设定的算法主要参数如表 3 所示。图 4 所示为 SADE 优化曲线。由图可知, 经过 200 次进化获得全局最优解 ($\alpha_1 = -0.029\ 9^\circ$, $\beta_1 = 0.008\ 8^\circ$, $\gamma_1 = 0.002\ 6^\circ$, $f(R_1) = 0.114\ 8\text{ mm}$)。计算所得精确配准矩阵 R_1 、 T_1 如表 4 所示。调整后的平均轮廓误差 $e_{\text{error_ad}} = 0.028\ 077\text{ mm} < |\varepsilon|$ 。

表 3 SADE 算法参数值

N_p	D	F_0	$C_{R,\min}$	$C_{R,\max}$	G_m
30	3	0.4	0.3	0.9	250

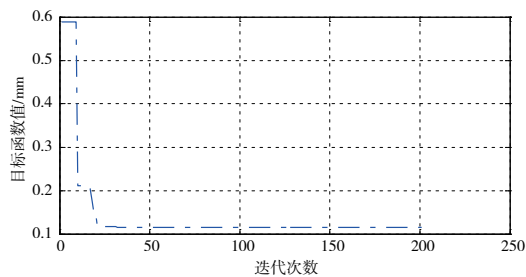


图 4 SADE 优化曲线

表 4 精确配准矩阵

名称	配准矩阵
R_1	$\begin{bmatrix} 0.999\ 999\ 987 & 0.000\ 044\ 700 & -0.000\ 153\ 907 \\ -0.000\ 044\ 800 & 0.999\ 999\ 862 & -0.000\ 522\ 559 \\ 0.000\ 153\ 883 & 0.000\ 522\ 566 & 0.999\ 999\ 852 \end{bmatrix}$
T_1	$[0.337\ 889\ 015\ 0.037\ 944\ 696\ -0.072\ 290\ 709]$

3) 加工坐标系调整矩阵计算

根据式 (3) 求得最终空间变换矩阵 R 和 T , 如表 5 所示。

表 5 加工坐标系调整矩阵

名称	调整矩阵
R	$\begin{bmatrix} 0.996\ 778\ 338 & -0.013\ 286\ 276 & 0.079\ 097\ 524 \\ 0.017\ 394\ 967 & 0.998\ 522\ 297 & -0.051\ 484\ 338 \\ -0.078\ 296\ 610 & 0.052\ 694\ 372 & 0.995\ 536\ 511 \end{bmatrix}$
T	$[2.331\ 420\ 007\ 0.011\ 298\ 935\ 0.086\ 215\ 339]$

配准调整前后的测量点误差分布对比结果如

图 5 所示。经过配准和工件位姿调整后, 工件的轮廓误差大幅降低, 最终的超差点由 50 个减少为 0, 全部测量点的轮廓误差均小于加工容差。

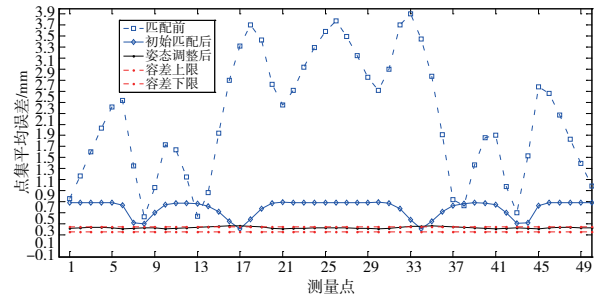


图 5 配准调整前后的测量点误差分布对比

5 结语

针对工件位姿变化导致的加工轮廓误差控制, 提出了基于在机测量数据的配准算法。该算法包括初始对齐配准和精确配准。初始配准通过测量点建立的局部坐标系重合的方式实现, 精确配准通过基于最小二乘距离的目标函数和 SADE 优化算法实现, 最后通过两次配准获得工件加工坐标系的空间变换矩阵。本文通过算法的实例验证, 证明了其对加工轮廓误差控制的有效性, 具有较好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 尉渊, 丁大伟, 赵正彩, 等. 阶梯轴类零件激光在机测量误差补偿研究[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(1): 23-25, 51.
- [2] 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.
- [3] MAISELI B, GU Y, GAO H. Recent developments and trends in point set registration methods[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2017, 46: 95-106.
- [4] 蔡项宇, 何小妹. 融合几何特征的 ICP 改进算法在数字化测量评价中的应用[J]. 计测技术, 2022, 42(6): 27-33.
- [5] LIU Y H. Improving ICP with easy implementation for free-form surface matching[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(2): 211-226.
- [6] FITZGIBBON A W. Robust registration of 2D and 3D point sets[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(13/14): 1145-1153.

(下转第 208 页)

参考文献:

- [1] MUSHI S E, LIN Z L, PAUL E. Stability analysis for a flexible rotor on active magnetic bearings subject to aerodynamic loads [C]// Proceeding of the 12th International Symposium on Magnetic Bearings. [S.I.: s. n.]2010: 22-25.
- [2] RAN S L, HU Y F, WU H C. Design, modeling, and robust control of the flexible rotor to pass the first bending critical speed with active magnetic bearing[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(2): 168781401875753.
- [3] VAZQUEZ J A, MASLEN E H, AHN H J, et al. Model identification of a rotor with magnetic bearings [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(1): 149-155.
- [4] 孙喆,赵晶晶,时振刚. 电磁轴承支承柔性转子模型测试与辨识[J]. 机械工程学报, 2016, 52(8): 16-22.
- [5] 傅志方,华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2000.
- [6] 陈颖,陈怀海. 一种二自由度系统物理参数识别方法[C]// 第十届全国振动理论及应用学术会议. 南京:中国振动工程学会, 2011: 207-213.
- [7] 王彤,张令弥. 有理分式正交多项式频响函数模态参数识别[J]. 航空学报, 2003, 24(2): 140-143.
- [8] 周衡,金超武. 基于 H_∞ 和干扰观测器的磁悬浮轴承干扰抑制方法[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(3): 149-151, 158.
- (上接第 194 页)
- [7] GE X M, WUNDERLICH T. Surface-based matching of 3D point clouds with variable coordinates in source and target system[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 111: 1-12.
- [8] 张文丽,程兰,任蜜蜂,等. 基于 AGConv 局部特征描述符的点云配准方法[J/OL]. 计算机工程; 1-10 [2022-02-09]. <https://doi.org/10.19678/j.issn.1000-3428.0066359>.
- [9] YAN S J, ZHOU Y F, PENG F Y, et al. Research on the localisation of the workpieces with large sculptured surfaces in NC machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 23(5): 429-435.
- [10] 张莹,刘敏,张定华,等. 基于在线检测的叶片加工余量自适应优化方法[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(11): 226-229, 233.
- [11] 刘孝龙. 自由曲面匹配技术研究[D]. 长春:吉林大学, 2015.
- [12] 韩德川. 基于加权距离投票的点云匹配算法设计[J]. 现代计算机, 2022, 28(11): 35-40.
- [13] MEHRAD V, XUE D, GU P. 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.
- [14] 潘海鸿,莫玉良,陈家春,等. 基于四维向量的频域匹配法实现工件位姿识别[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(12): 120-123, 127.
- [15] STORN R, PRICE K. Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [16] 包子阳,余继周. 智能优化算法及其 MATLAB 实例[M]. 北京:电子工业出版社, 2016.
- [17] 吴亮红,王耀南,袁小芳,等. 自适应二次变异差分进化算法[J]. 控制与决策, 2006, 21(8): 898-902.
- [18] HUANG H X, HU P F. Self-adaptive differential evolution algorithm for the optimization design of pressure vessel[C]//2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Guilin, China: IEEE, 2016: 1074-1079.
- [19] ISO FDIS 10791 - 7 Test conditions for machining centres-part 7: accuracy of finished test piece [S].

收稿日期:2022-12-07