

# 激光测量点云数据补偿和位姿匹配的研究

王康<sup>1</sup>, 吕彦明<sup>1,2\*</sup>, 袁飞<sup>2</sup>, 刘东帅<sup>2</sup>, 杨华<sup>2</sup>

<sup>1</sup>江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

<sup>2</sup>江南大学机械工程学院江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122

**摘要** 针对当前航空叶片检测需求日渐增大的问题, 搭建了在线激光检测实验平台, 开发设计了激光测量数据采集系统。对采集到的散乱点云数据进行了有效精简处理, 并提出了一种入射倾角误差补偿策略。基于 UG 平台编写 grip 语言实现了理论轮廓线的快速提取。基本粒子群算法, 探究了基于局部轮廓和整体轮廓的测量点集相对理论轮廓曲线的最优位姿匹配问题, 实验结果表明选择基于整体轮廓可获得位姿匹配的最优解。对粒子群算法进行改进, 求解了位姿匹配运动参数, 结果表明, 其计算精度明显高于基本粒子群算法的求解结果。

**关键词** 激光传感器; 点云数据; 倾角补偿; 位姿匹配

**中图分类号** TG806 **文献标志码** A

**doi:** 10.3788/LOP57.062802

## Research on Laser Measurement Point Cloud Data Compensation and Pose Matching

Wang Kang<sup>1</sup>, Lü Yanming<sup>1,2\*</sup>, Yuan Fei<sup>2</sup>, Liu Dongshuai<sup>2</sup>, Yang Hua<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

<sup>2</sup>Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology,

College of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

**Abstract** In view of the increasing demand for airborne blade measurement, an online laser detection experimental platform is established, and a laser measurement data acquisition system is developed. The collected scattered point cloud data are effectively reduced, and an incident tilt angle compensation strategy is proposed. Based on the UG platform, the grip language is used to realize the fast extraction of the theoretical contour. The basic particle swarm optimization algorithm is used to explore the optimal pose matching of the measured point set based on the local contour and the global contour. The experimental results show that the optimal solution of pose matching can be obtained by selecting the global contour. The particle swarm optimization algorithm is improved and the pose matching motion parameters are solved. The results show that, the computational accuracy is significantly improved compared with that by the basic particle swarm optimization algorithm.

**Key words** laser sensor; point cloud data; tilt compensation; pose matching

**OCIS codes** 280.3420; 280.3400; 120.6650

## 1 引言

航空发动机叶片属于薄壁类零件, 叶身呈自由弯曲的曲面, 叶片质量的高低决定了飞机使用期限的长短, 因此检测航空叶片的加工精度具有重要的意义。目前用于航空叶片检测的方式分为接触式和非接触式两种<sup>[1]</sup>, 其中非接触式检测方法因具有高效性和稳定性的优点, 且不需要对激

光测头半径进行补偿, 广泛应用于船舶海洋、航空航天领域。基于激光三角法的光学测量方式作为非接触式检测的典型代表, 能够有效减少制造成本, 提高测量效率<sup>[2]</sup>。

用激光位移传感器对航空叶片进行测量时, 叶片表面的复杂特征和测量系统的固有误差会导致测量数据存在一定的偏差。国内外学者在激光测量形式和点云数据处理方法上展开了大量的研

收稿日期: 2019-07-11; 修回日期: 2019-08-07; 录用日期: 2019-08-28

\* E-mail: 1318565903@qq.com

究。Ko等<sup>[3]</sup>将激光测头与数控系统相结合,建立了基于CAD模型的在线补偿系统,通过对商业软件的二次开发,对测量模型进行了实时数据补偿。英国Renishaw公司<sup>[4]</sup>开发了一款名为SPRINT的激光测量系统,通过自主研发的专用测量软件,打通了连接计算机辅助教学(CAI)与计算机辅助制造(CAM)的数据通道,实现了加工过程中测量数据与预加工模型的快速匹配,用软件处理数据后可进行适应性的加工检测。吉林大学的曲兴田<sup>[5]</sup>、武学峰<sup>[6]</sup>、刘继明<sup>[7]</sup>等开发了一套叶片快速测量系统,基于改进的型值点提取算法,对测量数据进行了有效的处理,提高了叶片型面重构精度。大连理工大学的徐淑婷等<sup>[8]</sup>、黄潇苹<sup>[9]</sup>等使用激光位移传感器对激光测量产生误差的外部因素进行实验研究,得到了影响激光测量误差因素的一般性规律,采用改进的角度弦高法数据预处理算法,能有效降低测量数据的波动程度。在点云数据的位姿配准方面,唐志荣等<sup>[10]</sup>提出了一种基于因子分析法的三维点云配准方法,将该方法和经典的迭代最近点(ICP)算法进行对比,结果表明配准精度相当,但配准效率提升了70%以上,但在配准精度和稳定性方面仍有待提高。陈田<sup>[11]</sup>在处理点云数据的传统方法上,使用数据的虚拟切割技术和测量点云的虚拟投影技术提高了点云数据的处理精度和效率,实验表明该方法是有效的。苗长伟等<sup>[12]</sup>针对点云数据配准效率差、精度低的问题,提出了一种基于相关系数平方和最大的点云配准算法,利用粒子群算法求出中间态旋转矩阵,然后求出两点云之间的旋转矩阵和平移向量,进而实现点云配准,实验结果表明该算法的配准速度较快。张哲等<sup>[13]</sup>提出一种基于关键点选择的快速点云配准算法,能够保证点云数据的精确配准,但在配准效率上不占优势。曾繁轩等<sup>[14]</sup>将基于曲率极值的算法与迭代最近点算法相结合,对曲率特征明显的点云数据进行配准,实验结果表明对初始质量较差的数据,该算法表现出较强稳定性和收敛性。目前国内外学者在点云数据处理的误差补偿方法和位姿匹配上已有一定的研究,但在倾角补偿策略以及点云配准算法的精度和效率的研究上仍有广阔的发展空间。

本文从激光测量出发,将激光测头和数控加工中心相结合,提出了一种倾角误差补偿策略和模型,同时对基本粒子群算法进行改进,有效提高了点云数据的配准精度。提出了一种理论模型轮廓线快速

提取算法,计算基于局部和整体位姿匹配的最优解,提高了激光测量航空叶片的精度。

## 2 激光测量实验平台搭建和点云数据处理

### 2.1 平台搭建和数据采集模块设计

采用VMC 600数控加工中心搭载日本基恩士LK-G500激光位移传感器,机床重复定位精度为0.003 mm,激光传感器测量范围为 $(150 \pm 40)$  mm,重复精度为 $0.5 \mu\text{m}$ ,质量轻、抗震性好。设计的激光测头夹具和航空叶片夹具,可完成对激光位移传感器的装夹和叶片的定位,测量实验平台如图1所示。

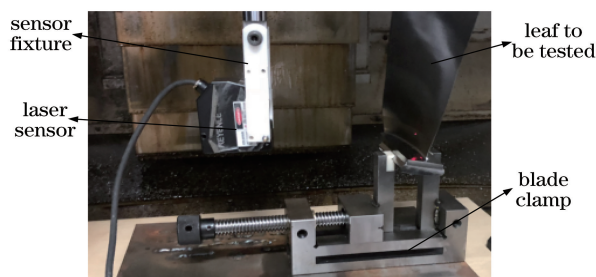


图1 激光测量实验平台

Fig. 1 Laser measurement experiment platform

用实验平台对激光测头位姿进行标定,基于基恩士内部提供的动态链接库在VS平台上运用C#语言进行二次开发,设计了激光测量数据处理系统,经实验检测可完成与LK-G150传感器的通信,且能较好地完成数据采集任务。采集数据模块功能框架图如图2所示。

### 2.2 测量点云数据预处理

采用激光测量平台,在叶片型号为RR84K的截面线368 mm处进行测量。基于等截面法的叶片测量,分析叶型截面的几何形状可知,一次性扫描后得到的数据较多。受测量元素的几何特征和测量仪器的测量方法的影响,难免会出现错误测量,造成“坏点”或“跳点”。

可以采用人机交互法和弦高差法处理“坏点”,人机交互法主要是利用计算机软件显示测量数据,再通过人工观察寻找距离点集较远的“坏点”,一般用于初步检查。弦高差法是通过设定阈值 $k$ ,计算该测量点到前后测量点连线的距离 $\beta$ ,若超过阈值 $k$ 则被视作为“坏点”,该方法一般用在点云数据均匀分布且十分密集的场所,如图3所示。

处理“跳点”的方法同样需要人工操作,即根据CAD模型填补,在点云数据距离较远的两点之间添加测量数据,处理过程如图4所示。

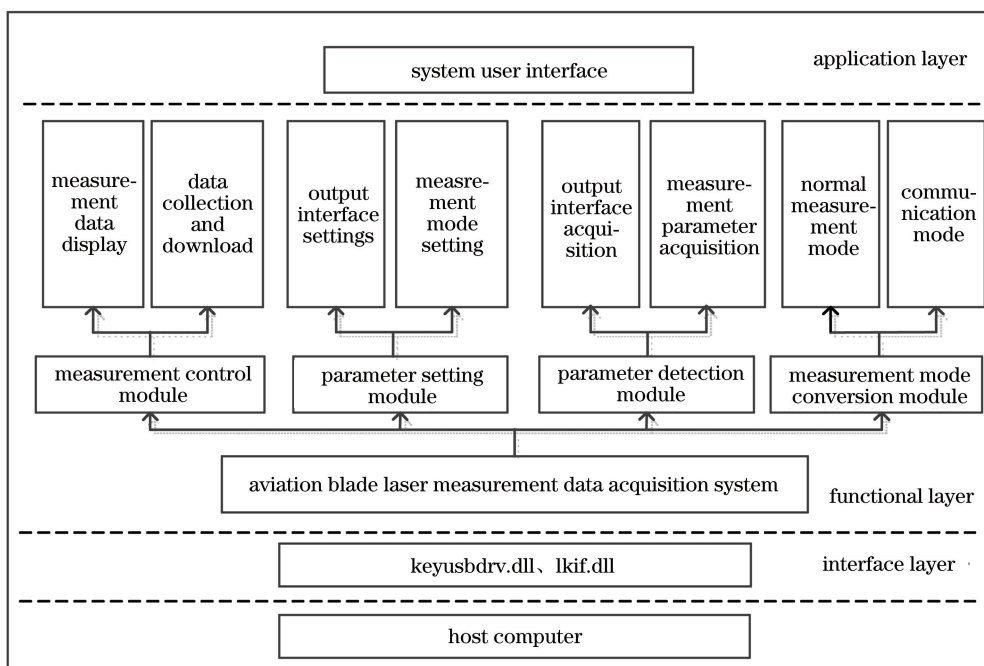


图 2 激光测量数据采集系统功能框架图

Fig. 2 Functional map of the laser measurement data acquisition system

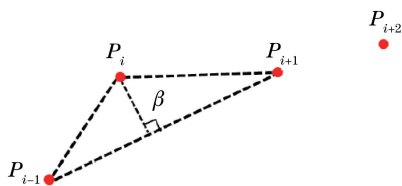


图 3 弦高差法

Fig. 3 String height difference method



图 4 测量点云数据跳点处理正视图

Fig. 4 Front view of measuring point cloud data

hop processing

### 2.3 测量点云数据补偿

通过在机实验测量发现,对于航空叶片这类自由曲面的零件,倾角是影响检测精度较为显著的一个因素,因此在测量过程中需要对倾角进行标定,以及对测量后点云数据倾角误差进行补偿。

为研究入射倾角误差问题,采用 60 mm × 60 mm × 10 mm 的 45 钢材料和精密角度垫铁进行实验。通过姿态调整确保激光初始入射角为 0°,记录初始误差值。调整入射角度,依次记录不同测量高度下各个倾角的误差情况,图 5 为标准参考测量距离下即工作距离为 150 mm 处的倾角误差实验结果。

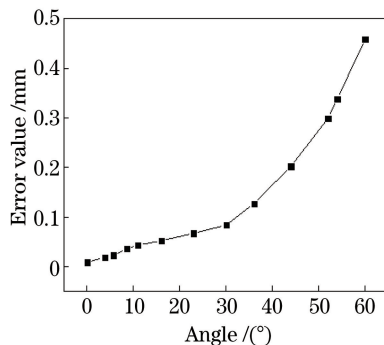


图 5 标准参考距离下入射倾角误差

Fig. 5 Incident tilt angle error under standard reference distance

从图 5 中可以发现,入射倾角对激光位移传感器的测量精度有明显的影响,当入射倾角小于 30° 时,误差值基本控制在 0.1 mm 范围内;随着入射角度的不断增大,误差也越大;当入射倾角达到 60° 时,误差超过 0.4 mm。因此需要有效控制入射角,并对点云数据进行误差补偿。

工程测量中常使用三次函数对实验数据进行拟合,其线形形状较好,拟合精度高。故基于三次函数模型采用 Matlab 对入射倾角误差散点进行拟合,可得到标准参考距离下入射倾角误差的拟合结果,测量误差  $E$  可以用倾角  $x$  表示为

$$E = 2.476e(-6)x^3 - 5.764e(-5)x^2 + 0.0034x + 0.005918. \quad (1)$$

(1)式可表示标准参考距离下入射倾角误差的标定曲线,其中 $e(i)$ 表示10的 $i$ 次方的含义。考虑到不同工作距离下入射倾角造成的误差可能会不同,需重复上述操作,测量不同工作距离下各入射倾角的误差情况。

获得激光位移传感器测量不同工作距离下各倾角的测量数据,使用 Matlab 进行拟合,测量误差  $E$  可以用倾角  $x$ , 测量距离  $y$  表示为

$$E = -0.1394 + 0.003301y - 0.01348x - 2.45e(-5)y^2 + 0.0002314xy - 9.009e(-5)x^2 + 5.874e(-8)y^3 - 7.616e(-7)xy^2 + 4.921e(-8)x^2y + 2.74e(-6)x^3. \quad (2)$$

由入射倾角产生的误差补偿策略是,求出待测表面各型值点之间的采样间隔  $\Delta x$ , 各型值点激光位移传感器的读数为  $d_n (n = 1, 2, 3, \dots)$ , 相邻两型值点的读数差为  $\Delta d$ 。由于激光传感器的采样频率

较快,所以  $\Delta x$  很小。根据微分原理,可利用  $\Delta d$  与  $\Delta x$  计算对应型值点的倾角,以第一个点  $\alpha_1$  为例,倾角可以表示为

$$\alpha_1 = \frac{d_2 - d_1}{\Delta x} = \frac{\Delta d}{\Delta x}. \quad (3)$$

针对类似于航空叶片的复杂曲面入射倾角补偿问题,可先通过实验标定出各个测量距离的误差模型,虽然使用激光测量航空叶片某一型面后得到的数据庞大,但依据补偿策略进行编程,可快速计算出测量的航空叶片型面上各个型值点的倾角大小,再根据入射倾角导入误差模型求出具体的误差数值,进行不同倾角下的航空叶片的数据补偿,从而修正所得到的数据,提高激光测量航空叶片的精度。

根据策略对精简后的 137 个点云数据进行补偿,结果如表 1 和图 6 所示,数据补偿效果如图 7 所示。

表 1 航空叶片倾角数据补偿

Table 1 Aviation blade inclination compensation

Serial number	Measurement / mm	Measuring distance /mm	$\Delta d$ /mm	$\Delta x$ /mm	Inclination / (°)	Compensation value /mm	Correction value /mm
1	-1.5594	148.4406	0.3374	0.6	29.3653	0.1208	-2.3677
2	-1.2398	148.7602	0.3501	0.6	30.2789	0.1267	-2.0362
3	-0.9341	149.0659	0.3196	0.6	28.0569	0.1129	-1.6723
...	...	...	...	...	...	...	...
70	7.8608	157.8608	0.0095	0.88	0.6188	0.0047	7.8560
71	7.8513	157.8513	0.0413	0.88	2.6883	0.0126	7.8386
72	7.8926	157.8926	0.0069	0.88	0.4494	0.0040	7.8885
...	...	...	...	...	...	...	...
135	6.2546	156.2546	0.0635	0.88	4.1293	0.0179	6.2366
136	6.1911	156.1911	0.0389	0.88	2.5323	0.0121	6.1789
137	6.1522	156.1522	0.0928	0.88	6.0229	0.0245	6.1276

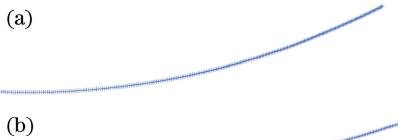


图 6 补偿后的点云数据。(a)叶背点云数据; (b)叶盆点云数据

Fig. 6 Compensated point cloud data. (a) Leaf back point cloud data; (b) leaf basin point cloud data

### 3 基于局部和整体轮廓的位姿配准

在航空发动机叶片的激光检测中,基于激光三角法原理,可测出叶片表面轮廓上一系列三维点的坐标,称其为实际测量点。叶片的理论形状由 CAD

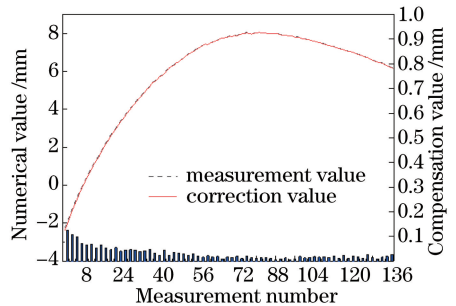


图 7 数据补偿效果图

Fig. 7 Data compensation effect chart

模型给出,使用 grip 语言对 UG 进行二次开发,生成命名为 lkxtq.grx 的文件,基于 UG 平台运行该文件可完成轮廓线的提取,示意图如图 8 所示。同时采用最小二乘法将实测要素和理论要素进行配准,找到合适的平移矩阵和旋转矩阵,使得各实测点和

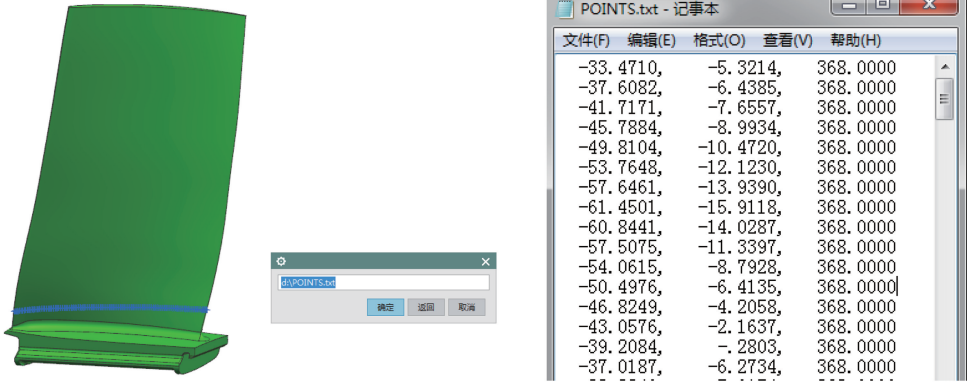


图8 理论CAD模型轮廓线提取

Fig. 8 Theoretical CAD model outline extraction

到理论点的距离平方和的值最小。

### 3.1 刚体运动转换模型

假设存在两个待配准点集  $\mathbf{P}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$  和目标点集  $\mathbf{P}'_i = (x'_i, y'_i, z'_i)^T (i=1, 2, \dots, n)$ , 点集  $\mathbf{P}'_i$  到点集  $\mathbf{P}_i$  的变换为刚体变换, 可以表示为

$$\mathbf{P}'_i = \mathbf{R}\mathbf{P}_i + \mathbf{T}, \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{R}$  为  $3 \times 3$  的旋转矩阵,  $\mathbf{T}$  为三维的平移向量。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \mathbf{T} = (t_x, t_y, t_z)^T. \quad (5)$$

虽然旋转矩阵  $\mathbf{R}$  包含 9 个位置元素, 但旋转矩阵要真正求解的未知因素只有三个。确定旋转矩阵后, 根据激光测量点和理论点求解刚体变换的问题, 可转化为通过计算目标函数最小值求解旋转矩阵和平移矩阵的问题, 即

$$F(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \sum_{i=1}^n [\mathbf{P}'_i - (\mathbf{R}\mathbf{P}_i + \mathbf{T})]^2. \quad (6)$$

为了准确表示变量与随机误差产生的影响, 将数据点集与其在回归直线上对应位置的差值称之为残差, 其平方和称之为残差平方和。用解析表达式逼近离散数据点, 数据点的残差平方和越小, 其拟合程度越高。

由于测量点在叶型截面轮廓曲线上的分布不同, 前后缘的测点密度相对于叶背叶盆曲线的分布密度较高, 为验证测量点集与理论轮廓局部最优时对其整体的配准影响, 进行了探究实验。

当前缘测点与理论前缘轮廓达到位姿匹配最优时, 计算其旋转平移矩阵, 以此为变换矩阵计算其他曲线对应的变换点集, 然后按照公式计算其他曲线段的残差平方和, 最后将所有曲线段的残差平方和

相加与整体最优的残差平方和比较; 后缘测点计算原理与前缘测量相同, 按照该方法计算出当前缘、后缘测点与理论轮廓达到位姿匹配最优时, 其他曲线段的残差平方和, 将所有曲线的残差平方和相加与整体最优的残差平方和作比较。

### 3.2 局部最优和整体最优算法实例对比

目标函数中存在 3 个旋转变量和 3 个平移变量等共 6 个未知数, 本质上是一个多维无约束非线性寻优问题, 其解一般为全局最优点, 大多数的优化算法只能求解到局部最优点。但粒子群算法采用“群体”与“进化”的思想, 优化解集涉及多维空间多个粒子, 利用个体最优和群体最优在局部最优和全局最优问题上得到了非常好的解决。粒子群算法求解无约束多维极值  $\min f(x), x \in R^n$  问题, 其寻优原理: 1) 设学习因子  $c_1, c_2$  等于 2, 粒子群的规模选择 40, 迭代步数选择 400; 2) 初始化粒子速度和位置; 3) 设置适应度函数, 本算法取(6)式的目标函数为适应度函数; 4) 计算每个粒子的适应值, 同时和自身经历过的最好位置作对比, 若较好, 则取当前位置为最好位置; 5) 将每个粒子的适应值和全局经历过的最好位置的适应值对比, 若较好, 当前位置视为全局最好位置; 6) 求解更新粒子的速度和位置; 如满足条件则终止迭代, 否则返回到初始化粒子的速度和位置那一步, 重新求解。针对不同的局部轮廓, 得到其整体最优和局部最优的实验结果, 如图 9 所示。

以二维空间为例, 测点轮廓绕 Z 轴旋转, 沿 X、Y 轴平移, 根据粒子群算法计算整体测量测点集的残差平方和  $F(\mathbf{R}, \mathbf{T})$ , 如表 2 所示, 其中  $\mathbf{R}$  为  $3 \times 3$  的矩阵, 在表格中用单个元素的形式列出。从图 9 和表 2 可以看出, 当基于前缘轮廓最优时, 其整体测量点集相对于理论轮廓的残差平方和达到了

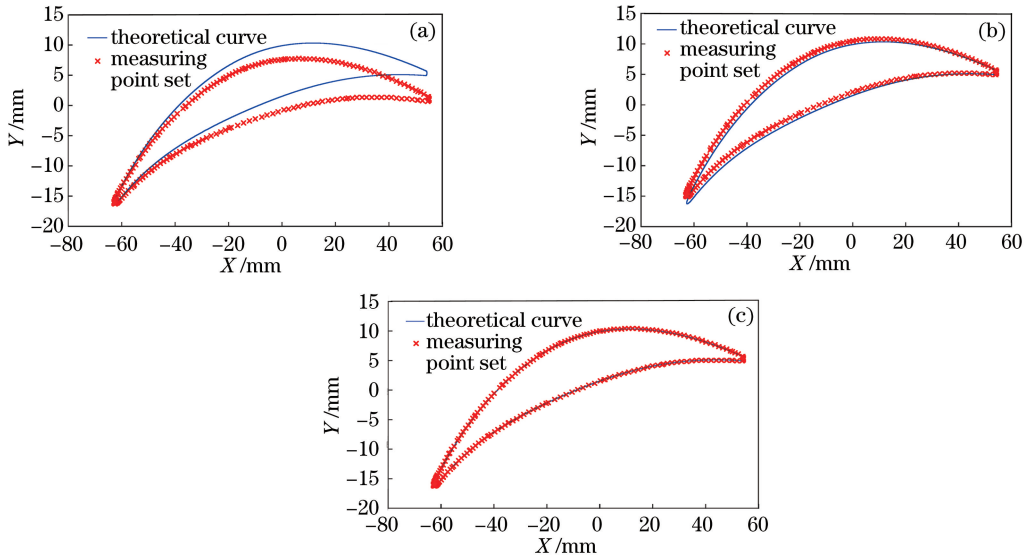


图 9 局部轮廓优化实例。(a)基于前缘轮廓的算例;(b)基于后缘轮廓的算例;(c)基于前、后缘轮廓的算例

Fig. 9 Example of local contour optimization. (a) Example based on the leading edge contour; (b) example based on the trailing edge contour; (c) examples based on front and rear edge contours

$1.39872 \times 10^3$ , 当基于后缘轮廓最优时, 其整体测量点集相对于理论轮廓的残差平方和达到了 162.23461, 也可以明显看出基于前、后缘局部最优时, 测量点集与理论轮廓相差很大; 当基于前后缘、叶背轮廓最优时, 整体测量点集相对理论轮廓的残差平方和分别达到了 0.35663 和 0.41309, 与基于整

体最优的 0.028669 相差较大; 从表 3 基于局部轮廓的各区域轮廓度可以分析出, 基于前缘、后缘匹配时, 其他部位的取值并不是最优解, 基于前后缘、叶背匹配时, 对基于整体的匹配来说并不是最优解, 因此要得到测量点集相对于理论轮廓的位姿匹配的最优解需要选择基于整体轮廓匹配。

表 2 基于局部、整体轮廓算法实例

Table 2 Algorithm examples based on local and global contours

	$\min F(\mathbf{R}, \mathbf{T})$	$\theta / (^\circ)$	$t_x / \text{mm}$	$t_y / \text{mm}$
Leading edge	1398.72	0.03709	0.56479	2.33445
	$\mathbf{R}$	0.999312065741549	0.0370863217825341	0
		-0.0370863217825341	0.999312065741549	0
		0	0	1
Trailing edge	162.23461	0.01034	-0.05164	0.56403
	$\mathbf{R}$	0.999946463239941	0.0103474950559580	0
		-0.0103474950559580	0.999946463239941	0
		0	0	1
Front and rear edge	0.35663	$-3.57906 \times 10^{-5}$	0.00311	0.00291
	$\mathbf{R}$	0.99999999359514	$-3.57906802125446 \times 10^{-5}$	0
		$3.57906802125446 \times 10^{-5}$	0.99999999359514	0
		0	0	1
Front and rear edge, leaf back	0.41309	$-1.60869 \times 10^{-4}$	0.01215	-0.03473
	$\mathbf{R}$	0.99999987060500	$-1.60869511642089 \times 10^{-4}$	0
		$-1.60869511642089 \times 10^{-4}$	0.99999987060500	0
		0	0	1
Overall	0.028669	$-8.10865 \times 10^{-5}$	0.00573	-0.01357
	$\mathbf{R}$	0.99999996712489	$8.10865132359233 \times 10^{-5}$	0
		$8.10865132359233 \times 10^{-5}$	0.99999996712489	0
		0	0	1

表3 最优轮廓匹配算法实例

Table 3 Example of optimal contour matching algorithm

Optimal matching profile	Leading edge	Leaf back	Trailing edge	Leaf pot
Leading edge	0.02289	4.27060	4.38616	4.32165
Trailing edge	1.16271	1.18390	0.02898	1.12234
Front and rear edge	0.02944	0.08864	0.03235	0.05120
Front and rear edge, leaf back	0.05638	0.04986	0.05923	0.08321
Overall	0.0324	0.0788	0.0362	0.0703

### 3.3 粒子群算法改进前后求解运动参数对比

粒子群算法在求解最优化的问题上有独特的思路,但其由于随机性,容易陷入局部最优,从而导致计算精度存在一定的问题。遗传算法也是一种优化进化算法,本质是基于自然选择的生物进化,利用选择、交叉和变异等操作进行优胜劣汰。因此将遗传算法的选择机理融入到粒子群算法中,避免了单纯粒子群算法的随机性,本质是对每

表4 粒子群算法改进前后运动参数求解结果对比

Table 4 Results comparison of motion parameters before and after improved particle swarm optimization

Algorithm	min $F(\mathbf{R}, \mathbf{T})$	$\varnothing /(^{\circ})$	$\varphi /(^{\circ})$	$\theta /(^{\circ})$	$t_x/\text{mm}$	$t_y/\text{mm}$	$t_z/\text{mm}$	
1	0.34999	-0.00269	-0.00006	-0.00008	-0.20599	-1.00174	0.00433	
Algorithm before improvement	2	0.30949	-0.00168	-0.00029	0.00008	-0.10075	-0.63260	0.00297
$\mathbf{R}$			0.999999823633103	$-8.1951572453 \times 10^{-5}$		$5.88232694803 \times 10^{-4}$		
			$8.3531918857 \times 10^{-5}$	0.999996386307458		0.002687079165782		
			$5.88010358748 \times 10^{-4}$	$-0.00268712782807$		0.999996216786770		
Improved algorithm	1	0.31707	-0.00195	-0.00037	0.00005	-0.13089	-0.03159	0.00390
	2	0.28738	0.00029	0.00009	0.00007	0.04131	-0.06538	0.00061
$\mathbf{R}$			0.999999993484091	$-6.739084572 \times 10^{-5}$		$-9.2142784317 \times 10^{-5}$		
			$6.7417921103 \times 10^{-5}$	0.999999954547624		$-2.93869993549 \times 10^{-4}$		
			$-9.2122975981 \times 10^{-5}$	$2.93876203709 \times 10^{-4}$		0.999999952575066		

## 4 结 论

为解决三坐标测量机检测效率低等问题,搭建了激光在线测量平台,开发了激光数据采集系统,完成数据的有效采集。在对散乱点云数据处理的基础上,重点研究了入射倾角误差补偿策略,对预处理后的点云数据进行有效的补偿。根据粒子群算法求解各测量点和理论点之间的残差平方和,完成了基于叶片局部和整体轮廓位姿的配准算法的实例对比,证明了基于整体轮廓可求得位姿匹配的最优解。使用改进后的粒子群算法对配准运动参数进行求解,求解精度更高。该结果为激光测量航空叶片点云数据配准提供了一定的参考价值和现实意义。

次迭代后的适应值进行排序,利用最好的一半代替最差的一半粒子的速度和位置,同时保留个体和群体最优位置不变。

根据粒子群算法在 Matlab 软件中求解运动参数,分别为配准点集绕  $X, Y, Z$  轴的旋转角  $\varnothing, \varphi, \theta$ 。实验发现,当粒子规模为 20 时,两次计算结果都存在较大的偏差,这是由粒子群算法的随机性导致的;当粒子规模为 40,迭代步数分别为 200 和 400 时,计算结果基本相同,表明并非迭代次数越多越好。表 4 列出了粒子规模为 40,迭代次数为 200 时,利用粒子群算法和改进后的算法分别做两次实验,将各自的运动参数求解结果进行对比。

根据表 4 的运算结果可知,当粒子数为 40,迭代步数为 200 时,使用改进的基本粒子群算法进行求解时,两次计算极值的差值相对于基本粒子群算法更小一些,且求解得到的旋转矩阵和平移矩阵明显更精确。实验结果表明改进的粒子群算法相对于基本粒子群算法在寻优问题上凸显优势。

## 参 考 文 献

- [1] Gong Y D, Wen X L, Cheng J, et al. Experimental study on fabrication and evaluation of a micro-scale shaft grinding tool[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(3): 1027-1037.
- [2] Zhou L B. Analysis of converse non-contact measurement technology [J]. China Measurement Technology, 2005, 31(5): 25-27, 36.  
周伦彬. 逆向非接触测量技术浅析[J]. 中国测试技术, 2005, 31(5): 25-27, 36.
- [3] Ko T J, Park J W, Kim H S, et al. On-machine measurement using a noncontact sensor based on a CAD model [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(7/8): 739-746.

- [4] Chen H F, Tan Z, Shi Z Y, et al. Optimization method for solution model of laser tracker multilateration measurement [J]. Measurement Science Review, 2016, 16(4): 205-210.
- [5] Qu X T, Liu J M, Yang X, et al. Research on method and system for quick measurement of blade surface [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(2): 237-242.  
曲兴田, 刘继明, 杨旭, 等. 叶片型面快速测量方法及系统研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(2): 237-242.
- [6] Wu X F. Research and development of 3D laser scanning measurement system[D]. Changchun: Jilin University, 2012.  
武学峰. 三维激光扫描测量系统的研究与开发[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [7] Liu J M. Research on measurement technology of blade surface and error analysis [D]. Changchun: Jilin University, 2015.  
刘继明. 叶片型面测量技术研究及其误差分析[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [8] Xu S T, Bo Q L, Zhang H, et al. Research on modeling and data preprocessing of line laser on-machine measurement[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018(3): 131-134.  
徐淑婷, 薄其乐, 张豪, 等. 线激光在机测量建模与数据预处理研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(3): 131-134.
- [9] Huang X P. Uncertainty evaluation and accuracy analysis of laser displacement sensor in measuring curved surface [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.  
黄潇苹. 激光传感器位移测量精度分析及不确定度评定[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [10] Tang Z R, Jiang Y, Miao C W, et al. Three-dimensional point cloud registration algorithm based on factor analysis [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 191503.  
唐志荣, 蒋悦, 苗长伟, 等. 基于因子分析法的三维点云配准算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 191503.
- [11] Chen T. Dataprocessing methodology for laser measurement point cloud [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(9): 091202.  
陈田. 激光测量点云的数据处理方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(9): 091202.
- [12] Miao C W, Tang Z R, Tang Y J. 3D point cloud registration based on the sum of squared correlation coefficients[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 221504.  
苗长伟, 唐志荣, 唐英杰. 基于相关系数平方和最大的三维点云配准[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 221504.
- [13] Zhang Z, Xu H L, Yin H. A fast point cloud registration algorithm based on key point selection [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 121002.  
张哲, 许宏丽, 尹辉. 一种基于关键点选择的快速点云配准算法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 121002.
- [14] Zeng F X, Li L, Diao X P. Research on iterative closest point algorithm registration based on curvature feature [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.