

螺旋桨叶测量装置及质量评估技术研究*

张震 张辉 鲍勃屹 李俊

(江苏科技大学机械工程学院, 江苏镇江 212003)

摘要:螺旋桨叶片作为工业领域核心零件, 该类工件表面形状常包含多种复杂面型, 传统测量手段存在精度与时效缺陷。针对这一问题, 基于螺旋桨叶自动测量装置提出一种面向多面型曲面的区域特征差异质量评估方法。首先, 基于机电一体化平台搭建测量装置并设计仿真属性; 其次, 提出一种特征矢量驱动的区域能量聚类分割方法, 划分表面测量区域解决螺旋桨叶片的多面型集中问题; 然后, 依据分割结果, 获取局部最优测点并规划测点布局; 接着, 提出非线性区域精度差异层级配准方法, 通过测量区域间精度差异进行数据层级配准完成位姿变换, 并结合非线性计算优化效率, 实现快速高效质量评估; 最后通过联合仿真与实物测试验证方法的可行性。

关键词:螺旋桨测量; 区域分割; 机电一体化; 质量评估; 测点规划

中图分类号: TH124, TH17 文献标识码: A

DOI: [10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.06.023](https://doi.org/10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.06.023)

Research of propeller blade measurement device and quality assessment technology

ZHANG Zhen, ZHANG Hui, BAO Boyi, LI Jun

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, CHN)

Abstract: The propeller blade is a key component in industrial applications. The shape of this surface often contains multiple complex surfaces, and the traditional measurement methods have defects of accuracy and timeliness. To address this problem, a quality assessment method of regional feature difference facing multi-faceted surfaces is proposed based on an automatic propeller blade measurement device. Firstly, the measurement device is constructed and the simulation attributes are designed based on mechatronic platform. Secondly, a regional energy clustering segmentation method driven by feature vector is proposed. The problem of multi-faceted concentration on the propeller blade surface is solved by segmenting the surface measurement region. Then, the local optimal measurement points are extracted based on segmentation regions and the layout of measurement point is also planned based on segmentation regions. Then, the non-linear regional accuracy difference hierarchical alignment method is proposed. The method achieves the positional transformation by hierarchical alignment through differences in accuracy between measurement regions, and the algorithm efficiency is optimized by combining non-linear calculation to achieve fast and efficient quality assessment. Finally, the feasibility of the method is verified by joint simulation and physical test.

Keywords: propeller measurement; regional segmentation; mechatronics; quality assessment; measurement points planning

随着船舶工业不断向前发展, 海装工件的高质量制造日益受到重视。螺旋桨叶片作为复杂多面型零件代表广泛用于工业领域^[1-2], 快速高效且精度良好的测量是约束该类零件高质量制造的重要难题。

测量作为螺旋桨叶片质量保证的重要手段, 由

测量装置与质量评估两大关键技术构成, 其结果作为后续分析的量化参考, 直接影响产品质量与使用性能。因此综合测量结构与质量评估研究十分必要。

当前螺旋桨叶测量主要借助人工螺距规, 步骤

* 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (SJCX22_1927); 镇江市科技局及其市级重点研发项目 (GY2020007, GY2019003)

琐碎、时效性低且测点规划受人为主观干扰,存在精度浮动与描述不足。曾艳^[3]提出软硬件联合模式下测量与质量评估,但装置是接触式测量容易造成表面损伤;郑国祥等^[4]通过5G技术结合三维扫描仪实现高效测量,但自动化程度不高且对于大型桨适用性尚未考证;张明豪等^[5]利用测头与机床可达性实现结构更新,但遮挡区域测取困难且测点描述不足。这些成果为本文测量结构搭建提供参考。

质量评估由测点规划与数据配准共同产生结果指导二次加工。而螺旋桨叶片由于扭转、弯曲等几何特征变化,表面存在多种面型集中,区域特征差异大,容易导致测点布局与后续数据配准误差较大,传统方法较难高精度评估。Li S Z^[6]参照曲率变化,自适应生成叶片测点分布,但欠缺模型权重优化且未考虑多面型差异;蔺小军等^[7]提出流道线法进行规划,提高测点描述并减少数目,但方法立足全表面参数,也未考虑多面型集中问题;李斌等^[8]基于非均匀有理样条,生成桨叶表面网格节点形成测点,但造成测点冗余且多面型问题仍未解决。可见,该类研究鲜有考虑叶片表面存在多面型集中,测量布点描述不足问题亟需解决。

数据配准作为质量评估关键技术之一,学者也开展较多研究。张明德等^[9]针对误差评定问题,提出截面线优化配准方法,通过理论截面线最近点优化配准效率与精度,但方法参考全局截面线,表面区域误差差异考虑不足;魏效玲等^[10]通过法矢夹角剔除损伤,精简主要特征,实现配准效率与精度提高,但特征法式夹角计算依赖局部半径选取且配准方法仍采用全局配准未考虑局部误差差异影响;Zhang X Z等^[11]以最小区域配准,但适用范围有待验证。综上可知,测点规划与数据配准作为质量评估核心技术,学者虽开展大量研究,但几乎都立足于整体叶型参数,很少考虑由多面型集中导致表面特征与精度的区域性差异。应开展针对多面型问题的测点规划与数据配准研究,实现质量评估优化。

本文针对上述问题,基于螺旋桨叶自动测量装置提出一种面向多面型曲面的区域特征差异质量评估方法。首先基于机电一体化平台完成测量装置虚拟样机建立;然后,参照顶点特征矢量提出一种特征矢量驱动的区域能量聚类分割方法,分割螺旋桨叶表面测量区域并进行测点规划;接着依测点布局结果进行区域精度差异层级配准并通过非线性方法优化计算,实现快速高效的质量评估;最后于联合

机电一体化平台完成样机建立与算法仿真测试,并通过同测量模式的三坐标机验证评估方法在实际螺旋桨叶片测量的实用性,而相关的方法则未曾见诸相关测量领域。

1 硬件组成与仿真设计

1.1 硬件组成

螺旋桨叶片立式自动测量装置^[1]由多部分共同构成:待测桨叶模型、推动定位装置、对心旋转驱动模块、叶面测量模块、叶背测量模块、固定基塔与地基共同组成图1结构。装置通过螺旋桨毂上下孔连接叶面测量模块与对心旋转驱动模块,并配合基塔与地基共同实现结构固定。

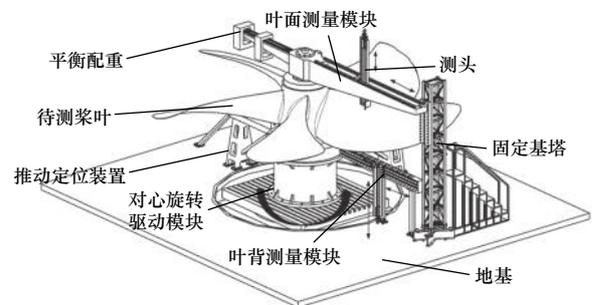


图1 自动测量装置模型

测量前,推动装置修正螺旋桨位姿,同时旋转驱动模块与测量模块同步归零为测量做准备。测量时,叶面叶背测量模块搭载的测头同步线性位移并联合驱动模块旋转运动采样获得测点数据,测点参数表达式 $\mathbf{P}_m = (x, y, z)$ 可记为

$$\begin{cases} x = R_n \cos \theta \\ y = R_n \sin \theta \\ z = z_r \end{cases} \quad (1)$$

其中: R_n 为测量截面线半径, θ 为纵向旋转夹角。映射矢量同 z 轴平行, z 可取任意值。

1.2 机电一体化仿真设计

螺旋桨测量设备实际产品开发存在较大过程风险,如图2,用户可通过机电一体化平台虚拟环境下调试验证设备,处理跨领域杂糅问题与潜在过程风险^[12],并进行虚实交互实现主控PC控制。本文机电一体化虚拟环境由TIA Portal、NX MCD和S7-PLCSIM三个模块联合组成。仿真通过NX MCD端设计虚拟样机同时定义机电概念属性,TIA portal端分析逻辑动作编写运动组态,PLCSIM端联合桥接TIA portal与NX MCD进行信号交互映射,实现NX MCD—PLCSIM—TIA Portal机电一体化虚拟仿

真环境搭建,并在仿真环境中进行动作调试测试装置可行性,本文部分虚拟环境搭建如图3所示。

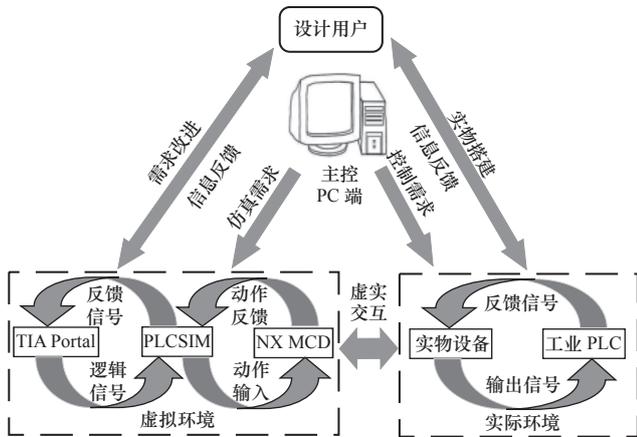


图2 系统模块集成



图3 机电一体仿真设计

2 特征矢量驱动的区域能量聚类分割

2.1 特征矢量估算

表面聚类分割是工程数据处理阶段重要环节之一^[13],传统质量评估大多通过整体叶型参数进行测点规划与数据配准,较少考虑多面型特征差异问题。本文通过聚类分割同类特征区域进行差异测量区域下的测点布局与配准优化,更好地描述了表面特征的同时提高了配准精度,改善了质量评估结果。

如图4,高精度网格描述下可较好保留曲面特征,通过顶点矢量特征^[14]可稳定描述特征固有属性,适用于聚类分割。定义特征顶点 p 附近特征块为 Su^k ,表示 p 为中心的 k 个定性邻域片簇集,最优特征切面定义为

$$\alpha_{Su^k} = \arg \max_{\alpha} \frac{1}{|Su^k|} \cdot \sum_{p^k \in Su^k} Q_{\sigma_i}(p^k, \alpha) \quad (2)$$

其中: $Q_{\sigma_i}(p^k, \alpha) = \exp(-r_{p^k, \alpha}^2 / \sigma_i^2)$ 衡量 p^k 与最优平面的关联性; $\sigma_i = \frac{1}{|k|} \sum_{p^k \in Su^k} |p^k - p_i|$ 作为残差函数是 p 至特征

块平均距离。差异特征处顶点密度存在差异,单一特征块选取难以满足要求,定义 $K = \{k_1, k_2, \dots, k_s\}$ 是特征顶点 p 邻域内 s 数量特征块 Su^k 。选择 p 附近特征块集 $S(i) = \{Su^k | p \in Su^k\}$ 最优曲面块 Su 对应切平面 α_{Su} 法向量 N 作 p 特征矢量。



图4 叶片表面网格化

$D(i) = \arg \max_{Su^k \in S(i)} \frac{1}{|Su^k|} \cdot \alpha_{Su^k} \cdot Q_{\sigma_i}(p, \alpha_{Su^k})$ 为更新后特征块集 $S(i)$ 内相对顶点 p 的一致性函数, $Q_{\sigma_i}(p, \alpha_{Su^k}) = \exp(-r_{p, \alpha_{Su^k}}^2 / \sigma_i^2)$, 特征块 Su^k 的切面是 α_{Su^k} , 为避免顶点至切平面距离 $-r_{p, \alpha_{Su^k}}^2$ 误匹配, 引入 Q_{σ_i} 确保最近切面选择。函数 $D(i)$ 选择包含 p 同时其他顶点最少的最优特征块, 确保陡变特征与干扰环境下特征矢量 N 的稳定性。

2.2 区域能量聚类分割

输入叶片模型表面参数域 M 由网格顶点 p 与边界 E_d 共同组成, 能量聚类通过相似特征属性将多个目标参数集中至同域 M_i 中, 实现表面聚类分割 $M_i \subset M, M_i = \{P_i, E_{di}\}$, 同时 $\{P_i \cap P_j = \emptyset, E_{di} \cap E_{dj} = \emptyset, j \neq k\}$, 聚类域数则由种点数目决定。通常, 同域所属顶点 p 及顶点邻域参数具有相似性, 根据顶点矢量特征 N 最小化能量函数计算顶点的域 M_i 归属:

$$F_i = \int_{M_i} \rho(x) \|N - \bar{N}_i\|^2 dx \quad (3)$$

式中: N 是顶点 P 的矢量特征; $\rho(x)$ 是 M_i 上常值密度

函数, 而 $\bar{N}_i = \frac{\sum_{T_j \in M_i} \int_{M_i} \rho(x) N dx}{\sum_{T_j \in M_i} \int_{M_i} \rho(x) dx}$, 顶点邻域三角描述片

T_j 面积 $s_j = \int \rho(x) dx$, 能量模型 F_i 可变更为如下形式:

$$F_i = \sum_{i=0}^n \left(\sum_{T_j \in M_i} s_j \|N_i\|^2 - \frac{\left\| \sum_{T_j \in M_i} s_j N_i \right\|^2}{\sum_{T_j \in M_i} s_j} \right) \quad (4)$$

式(3)模型 F_i 中的 $\sum_{i=0}^n \left(\sum_{T_j \in M_i} s_j \|N_i\|^2 \right)$ 是恒定的,

原函数可通过最大化 $F'_i = \frac{\left\| \sum_{T_j \in M_i} s_j N_i \right\|^2}{\sum_{T_j \in M_i} s_j}$ 取得最优值,

分割通过聚类目标归属使域内能量函数上升至阈值结束,具体算法步骤如下:

(1) 计算初始顶点集的特征矢量 N , 选择 n 数目的种点作初始域数目 $M_i (i = 1, \dots, n)$, 而初始表面上其他特征对于任意子域无归属。

(2) 计算所有顶点 P 与特征边界 E_d , 其中特征集合 $e = \{P, E_d\}$ 附近的某一特征集合归属于某个临近域 M_i , 而其他特征集合未确定归属, 生长 M_i 将目标集合归属于该域。

(3) 若目标特征集附近集合对于所有子域 M_i 均无归属, 通过能量函数进行归属聚类。

(4) 初步聚类完成后特征集 e 相邻特征 P_k, E_{dk} 和 P_l, E_{dl} 与两个域 M_i 和 M_j 进行判断。如图 5, F' 中 P_k, E_{dk} 和 P_l, E_{dl} 分别归属于 M_i 与 M_j ; F'_1 中 P_k, E_{dk} 和 P_l, E_{dl} 归属于 M_i ; F'_2 中 P_k, E_{dk} 与 P_l, E_{dl} 归属于 M_j 。而最终聚类结果依据函数 F', F'_1, F'_2 最大值对应情况进行归属更新。

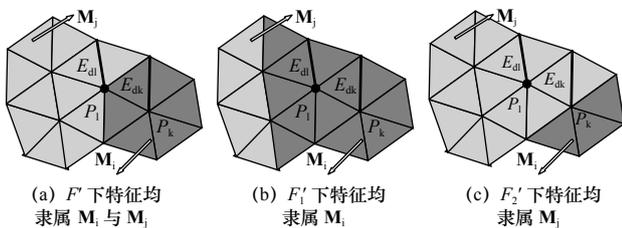


图 5 三种情况均选择 F'_i 最大值

(5) 若(4)中表面归属情况不再发生变化结束聚类, 输出分割结果, 生成测量区域, 反之迭代步骤(2)。本文所选桨型由实验确定初始种点数为 7 个, 聚类分割结果如图 6 所示。

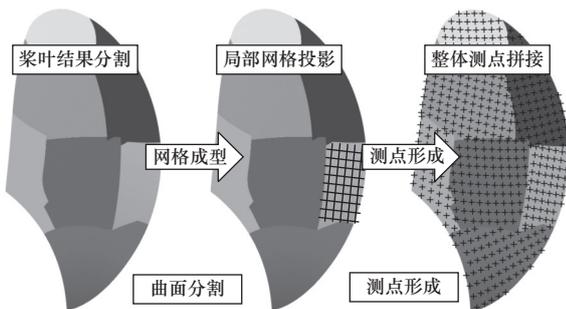


图 6 测点布局流程图

3 质量评估优化

3.1 局部测点布局规划

测点规划作为质量评估重要环节, 不仅影响测量效率也关系后续数据配准与误差输出。传统螺旋桨叶测点规划采用我国船用金属螺旋桨技术条件几何尺寸公差要求^[15]中给出的辐射线法, 该方法通过人工设定叶片半径堆叠线上的点实现测点规划, 测点表面描述较低且人为干扰性强, 测量精度波动较大。针对螺旋桨叶表面几何特性, 本文基于聚类分割结果, 进行差异区域测点规划。对于聚类划分后各局部测量区域产生等距堆叠网格线:

$$B(u, v) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^n P_{ij} C_{i,p}(u) C_{j,p}(v) \quad (5)$$

其中: $C_{i,p}(u)$ 与 $C_{j,p}(v)$ 为样条基函数, 样条控制节点 P_{ij} 。空间网格通过多条等距样条堆叠组成:

$$B_a(u_a, v_a) = f \left(n, \sum_{i=0}^n P_i R_{i,n}(t) \right) \quad (6)$$

其中: n 为堆叠线数量, P_i 控制点, $R_{i,n}(t)$ 为样条基函数。测点规划流程如图 6 所示, 遍历测量区域生成各区域曲面空间网格并提取网格格线交节点。随后将网格节点映射至桨叶表面即为区域测点, 最后拼接各区域测点, 完成整体测点布局。

3.2 非线性区域精度差异层级配准

质量评估通过空间中测量数据与理论模型间位姿配准变换, 实现误差信息输出。常规全局配准方法通过最小二乘法下无差别计算全局点云, 生成位姿矩阵实现配准对齐后, 输出误差评估结果。而螺旋桨叶片表面由于多面型集中, 加工精度存在区域差异导致全局配准可能会出现误差分配现象引起工件评估问题。如图 7b 所示, 配准前 G_1 面与 G_2 面原本符合评估精度要求, 由于误差分配现象, 使 G_1 面配准变换后不符合精度要求导致误报废。另一种情况如图 7c 所示, 初始 G_1 面不符合误差要求, 由于误差分配导致配准后两面均符合要求, 使工件误合格。

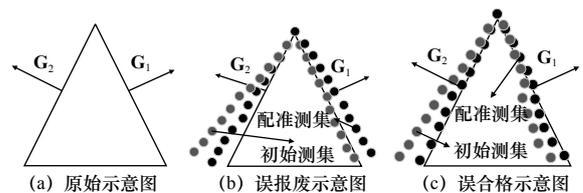


图 7 误差分配示意图

可见, 螺旋桨叶表面由于区域精度差异, 全局配准结果可靠性低, 对此本文提出非线性区域精度

差异层级配准方法。依据能量聚类分割后的测量区域，提取局部曲率偏差最小特征点集，再由优化非线性最近点迭代算法配准，求取误差评估结果。

特征曲率偏差源于堆叠网格节点投影，而曲率偏差可较好反映特征变化剧烈程度，一般特征平缓区域加工较易，偏差较小，而以该区域为优先配准级则更逼近实际误差情况，节点曲率偏差计算如下：

$$\varepsilon \approx \frac{\|B'(\mu)\|^3}{\|B'(\mu) \times B''(\mu)\|} \Big|_{\mu=\mu_i} - \sqrt{\left(\frac{\|B'(\mu)\|^3}{\|B'(\mu) \times B''(\mu)\|} \Big|_{\mu=\mu_i} \right)^2 - \left(\frac{B(\mu_{i+1}) - B(\mu_i)}{2} \right)^2} \quad (7)$$

其中：节点序列 $U = \{\mu_i\}$ ， $B(\mu)$ 为式 (5) 中样条函数， ε 决定曲率偏差值。遍历分割结果，提取各测量区域节点中曲率偏差较小区域点集，作待配准点集 P_m 。

一般配准方法初始位姿要求较高，而 LM^[16] 方法以其快速灵活收敛与高精度特性很好地解决了该问题。将待配准点集 P_m 与源点云集 P_o 转化为非线性最优解目标函数：

$$L(x) = \sum_{i=1}^n z_i^2(x) \quad (8)$$

目标函数通过分析并融合配准求解问题后可表示为

$$G(R, T) = G(a) = \sum_{i=1}^n \|g(a)\|^2 = \sum_{i=1}^n \left\| \frac{1}{\sqrt{n}} (P_i - Rx_i - T) \cdot N_i \right\|^2 \quad (9)$$

通过构造最小二乘并进行展开：

$$G(a+u) \approx g^T g + u^T J^T g + u^T J^T J u \quad (10)$$

其中， $g = \{g(a)\}_{i=1}^n$ ， a 为旋转矩阵关键参数，用 $J = \nabla g$ ， $\lambda^{-1} J^{-1} u$ 联合对梯度下降结果优化步长：

$$u = -(J^T J)^{-1} J^T a - \lambda^{-1} J^{-1} u \quad (11)$$

其中：系数 λ 阻滞下降速率并结合步长阈值实时修正，该系数在 a 接近最优解时一般较小，主导函数梯度下降；当系数较大则 a 处于较差结果附近，此时在避免局部最优解的同时快速收敛，实现位姿矩阵求解。

通过定义位姿变换后的测点集 P_m 与源点云集 P_o 间均方根误差为最后余量误差参考，实现螺旋桨叶片表面质量评估：

$$RMS = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|P(x, y, z)_m - P(x, y, z)_o\|_2^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

具体质量评估流程如图 8 所示，求解特征矢量并驱动表面能量聚类，分割测量区域；再根据分割

结果规划测点布局并提取待配准点集；最后通过非线性区域精度差异层级配准进行位姿变化并输出误差结果完成质量评估。

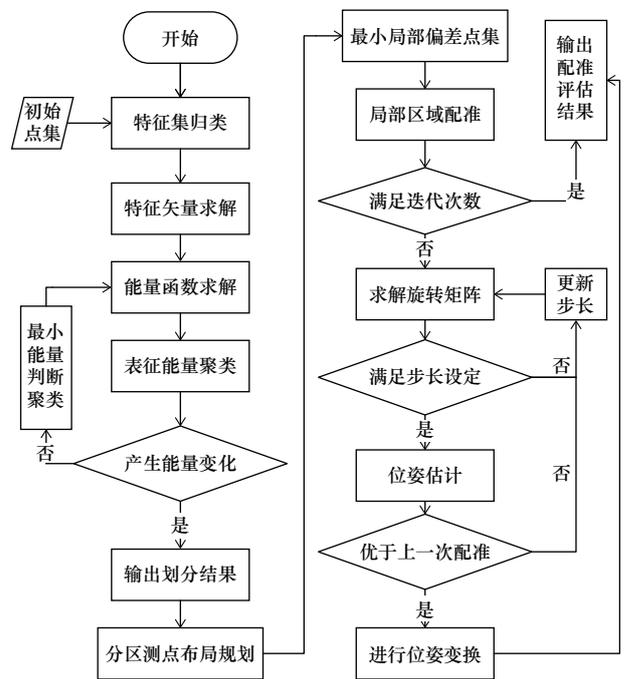


图 8 质量评估流程图

4 实验验证

4.1 仿真实验

为验证本文螺旋桨叶测量装置及质量评估的可行性与优越性。机电一体化环境下模拟人工螺旋规测量对比本文装置，质量评估则通过对比网格法与辐射线法验证测点布局优越性，而配准部分通过对比分析 ICP、SICP^[17]、S-Super4PCS^[18] 算法验证。考虑实际测量是以最少测点获取具体误差余量位置并指导后续加工为目的，实例验证还包括测点集对于误差位置获取的优越性。

仿真调试通过 TIA Portal 与 S7-PLCSIM Advanced 联合为本地映射模式，并交互连接 MCD 实现样机测量运动，图 9 为虚拟调试情况。仿真结果如表 1 所示，本文装置仿真测量某桨叶单面时间小于人工螺旋规法，实现测量成本节约；在测点规划阶段，相较于其他两种方法以更少数目测点实现更高拟合精度，测点描述能力更强，同时有效减少冗余测点，提高测量效率；在配准阶段，同数量级点云下配准误差小于其他三种方法，配准精度有所提高。仿真结果表明，本文测量装置与质量评估方法一定程度实现测量精度与工作效率双向平衡优化。

表 1 仿真实验对比

	测量时间/s	规划方法	拟合误差/mm	仿真配准误差/mm		点数/个	
				ICP	SICP		
模拟人工螺旋桨 螺旋桨自动测量装置	225 6.16 105 2.71	网格法	0.003 1	ICP	0.015 3	~500	桨叶半径/mm
				SICP	0.010 5		
				S-Super4PCS	0.007 0		
				本文	0.006 3		
仿真系统线性误差/mm 仿真系统旋转误差/(°)	0~0.001 0~0.000 2	辐射线法	0.003 3	ICP	0.013 1	~400	485 6.174 3
				SICP	0.008 9		
				S-Super4PCS	0.005 3		
				本文	0.004 4		
		本文方法	0.002 6	ICP	0.006 2	~350	
				SICP	0.004 3		
				S-Super4PCS	0.003 2		
				本文	0.002 7		

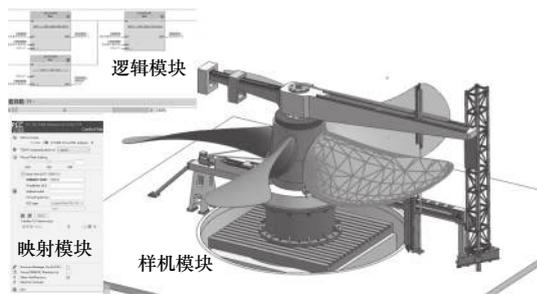


图 9 虚拟调试过程中各部分工作图

4.2 实例验证

由于本文装置测量模式与 CMM 测量模式相同，如图 10，实体验证部分选用 Leader Miracle 公司 NC8107 三坐标机下检测验证质量评估方法，误差公式采用前述式 (12) 均方根误差 RMS 度量。

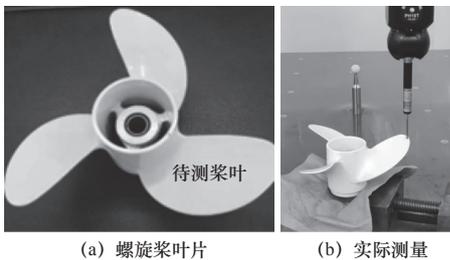


图 10 叶片测量图

通过本文方法，进行数据采集验证，考虑桨毂是非典型叶片曲面，实验仅针对上表面测量。如表 2 所示，本文方法通过约 550 个点获得网格方法约 800 个点和辐射线法约 650 个点的误差信息，误

差点获取能力更卓越，更少点数获得实际加工余量信息，有效减少测点，提高测量效率。

表 2 叶片误差对比

	最大偏差/mm	测点数/个
网格法	0.072	~800
辐射线法	0.079	~650
本文	0.083	~550

实际测点集与理论点集如图 11 所示，配准结果如表 3 所示，传统 ICP 算法由于误差分配效应，配准误差较大，多次迭代耗时较长且速度缓慢；SICP 虽对于传统方法有优化，但精度与效率却有待进一步提高。本文方法在合理划分测量区域后，进行区域精度差异非线性层级配准，表 3 中数据可见，由于降低误差分配效应并加入 LM 优化，时效性与配准精度进一步提高，相比于传统 ICP 算法，本文配准算法精度提高了 69.8%，配准效率提高 65.7%，相较 SICP，算法在时效与精度方面提高了 37.8% 与 47.1%。综上结论，该质量评估手段能有

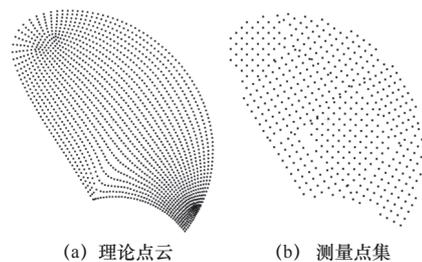


图 11 待配准点云集

效提高桨叶检测精度与效率,有望解决当前质量评估方面问题,为螺旋桨叶测量提供参考。

表3 配准结果对比

配准方法	配准耗时/s	配准误差/mm
ICP	17.32	0.174
SICP	11.23	0.082
本文方法	5.94	0.051

5 结语

本文从传统螺旋桨测量存在装置与质量评估的问题角度出发,基于螺旋桨叶自动测量装置提出一种面向多面型曲面的区域特征差异质量评估方法。首先于机电一体化环境中建立螺旋桨自动测量装置。然后从测点规划与数据配准两方面优化质量评估。对于螺旋桨叶质量评估中叶片表面存在多面型集中的问题,提出特征矢量驱动下的区域能量聚类分割方法,进行测量区域划分。再根据测量区域规划局部测点;并针对误差分配现象,提出非线性区域精度差异层级配准方法,基于区域测点精度差异化分配准层级,并引入非线性优化配准计算,实现误差评估。仿真与实物测试表明,本文装置有效节约数据采集时间;测点规划方面,本文方法在增加测点描述能力的同时减少测点数目,减少测量耗时;数据配准方面,本文方法不仅提高配准精度且改善了计算效率,实现了测点规划与数据配准综合优化下的质量评估方法改进,适用于当前螺旋桨测量领域,结合测量结构研究结果,对提高螺旋桨叶测量精度与效率具有参考价值。

参 考 文 献

- [1] 张震,张辉,王玉,等.螺旋桨检测机电一体化建模仿真技术研究[J].制造技术与机床,2022(5):134-140.
- [2] 张现东,卜昆,董一巍.航空发动机叶片三坐标测量优化采样方法[J].航空动力学报,2019,34(1):168-176.
- [3] 曾艳.大型螺旋桨数控加工的在线测量与余量计算研究[D].武汉:华中科技大学,2005.
- [4] 郑国祥,郑文字,李春光.5G+智能检测在船用螺旋桨检测上的方法

- 研究[J].中国计量,2020,43(5):125.
- [5] 张明豪,郑妍,陈徐兵,等.螺旋桨叶面加工误差在线测量及补偿[J].组合机床与自动化加工技术,2019,50(3):94-97.
- [6] Li S Z. Adaptive sampling and mesh generation[J]. *Computer-Aided Design*, 1995, 27(3): 235-240.
- [7] 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.
- [8] 李斌,孙忠林,彭芳瑜,等.叶片零件在线检测测点规划问题研究[J].中国机械工程,2008,29(5):540-542,546.
- [9] 张明德,罗冲,张卫青,等.航发叶片的测量数据误差处理方法研究[J].组合机床与自动化加工技术,2017(1):57-61.
- [10] 魏效玲,孟艺,孙秀军.损伤零件点云模型配准的ICP算法[J].制造技术与机床,2020(5):118-121.
- [11] Zhang X C, Zhang H, He X Y, et al. Fast evaluation of minimum zone form error of freeform NURBS surfaces[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 27(7): 23-28.
- [12] 赵林,吴双,张可义,等.基于NX MCD的堆垛机电概念设计[J].制造业自动化,2021,43(11):114-116.
- [13] Lu Z, Jiang X, Huo G, et al. A fast T-spline fitting method based on efficient region segmentation[J]. *Computational and Applied Mathematics*, 2020, 39(2): 1-19.
- [14] Li B, Schnabel R, Klein R, et al. Robust normal estimation for point clouds with sharp features[J]. *Computers & Graphics*, 2010, 34(2): 94-106.
- [15] 全国船用机械标准化技术委员会.GB/T 12916-2010,船用金属螺旋桨技术条件[S].北京:标准出版社,2010.
- [16] Fitzgibbon A W. Robust registration of 2D and 3D point sets[J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(13): 1145-1153.
- [17] Xu S Y, Zhu J H, Li Y C, et al. Effective scaling registration approach by imposing emphasis on scale factor[J]. *Electronics Letters*, 2018, 54(7): 422-424.
- [18] 鲁铁定,袁志聪,郑坤.结合尺度不变特征的Super 4PCS点云配准方法[J].遥感信息,2019,34(5):15-20.

第一作者:张震,男,1997年生,硕士研究生,主要研究方向为螺旋桨曲面检测。E-mail: 2034131349@qq.com

通信作者:张辉,男,1981年生,博士,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为计算机视觉、自由曲面测量。E-mail: zimmerman@126.com

(编辑 高扬)

(收修改稿日期:2023-03-07)

文章编号:20230623

如果您想发表对本文的看法,请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。