

引文格式: 葛鸿飞, 段桂江, 谈健. 基于组合测量的直升机旋翼桨叶外形检测方法[J]. 航空制造技术, 2026, 69(18): 25020334.

GE Hongfei, DUAN Guijiang, TAN Jian. Method for helicopter rotor blade profile detection based on combined measurement [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(18): 25020334.

基于组合测量的直升机旋翼桨叶外形检测方法

葛鸿飞¹, 段桂江¹, 谈 健²

(1. 北京航空航天大学, 北京 100191;

2. 昌河飞机工业(集团)有限责任公司, 景德镇 333002)

[摘要] 直升机旋翼桨叶作为具有复杂曲面外形的大型零部件, 对直升机性能有着重大影响。针对桨叶外形检测多依赖人工测量、作业效率低且检测质量稳定性差的问题, 本文提出了基于组合测量的直升机旋翼桨叶数字化非接触式外形检测方法。通过工业相机摄影测量+激光扫描仪测量的方式, 搭建测量场并完成点云数据采集。为了提升检测流程效率和自动化水平, 研究了基于桨根镗孔特征的坐标系转换方法。试验结果表明, 桨叶外形检测项目弦长、翼型最大厚度和扭角的一致性较好, 弦长测量结果的标准偏差为 0.354 mm, 扭角测量结果的标准偏差不超过 0.15°, 翼型最大厚度测量结果的标准偏差不超过 0.026 mm, 验证了本文方法的有效性和准确性。

关键词: 组合测量; 非接触式测量; 点云; 摄影测量; 激光扫描仪; 外形检测

中图分类号: V26; TP391

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020334

Method for Helicopter Rotor Blade Profile Detection Based on Combined Measurement

GE Hongfei¹, DUAN Guijiang¹, TAN Jian²

(1. Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Changhe Aircraft Industry (Group) Corporation Ltd., Jingdezhen 333002, China)

[ABSTRACT] Helicopter rotor blades, being large parts with complex curved surfaces, significantly affect the performance of helicopters. Addressing the current challenges associated with blade profile detection, which primarily utilizes manual measurement tools characterized by low efficiency and unstable quality, a digital non-contact profile detection method for helicopter rotor blades based on combined measurements has been proposed. Initially, a measuring field is established and point cloud data are collected using industrial camera photogrammetry and laser scanners. To enhance the efficiency and automation level of the inspection process, a coordinate system transformation method based on the features of the blade root bore features has been developed. Experimental results demonstrate good consistency in blade profile detection indexes, with standard deviations of 0.354 mm for chord length, less than 0.15° for twist angle, and less than 0.026 mm for maximum airfoil thickness. These findings validate the effectiveness and accuracy of the proposed method.

Keywords: Combined measurement; Non-contact measurement; Point cloud; Photogrammetry; Laser scanner; Profile detection

旋翼桨叶是直升机的核心部件之一, 其外形制造精度直接决定了直升机的升力、振动及噪声等核心性能指标, 对直升机性能有着重大影响^[1-4]。典型的旋翼桨叶

长度可达数米, 属于复杂曲面的大尺寸零部件。目前的桨叶外形检测手段多使用人工测量器具(如千分尺、量规量仪和型线样板等)完成。传统测量手段效率较低、

收稿日期: 2025-10-15; 退修日期: 2025-11-11; 录用日期: 2026-02-02

通信作者: 段桂江, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为质量工程、制造系统工程、数字化检测等。

重复性差,质量状态难以稳定管控^[5]。因此,开发准确、高效的旋翼桨叶外形数字化检测方法对桨叶制造的质量控制至关重要。

近年来,手持式激光扫描仪等一批三维数字化测量设备以其高效率、高精度和非接触等特点获得了广泛应用^[6]。然而,对于旋翼桨叶这类大尺度复杂曲面零部件,单一使用手持式激光扫描仪开展检测时,设备的拼接配准过程易造成扫描误差累积。田柳^[7]的研究表明,扫描范围超过3 m时,手持设备精度衰减率高达1.2 mm/m,导致翼型厚度、扭角等关键参数测量可靠性不足。

在航空发动机叶片等小型复杂构件的测量中,相关研究为本文提供了有益借鉴。李兵等^[8]结合四坐标测量机和线激光扫描仪获取叶片完整的点云数据,通过点云数据处理和曲线拟合方法分析,得到了高精度的叶片前后缘,有利于叶片型面的评价。姚美如^[9]搭建了基于双目视觉的三维测量系统,通过线激光器对叶片进行扫描后采集点云并通过双目相机定位;随后基于NURBS曲面拟合进行了快速三维曲面重建,重建精度高达0.04 mm。余锦森^[10]首先通过搭建四相机单投影仪的测量系统获取叶片点云,对叶片模型进行等距切片,获得了叶片截面的轮廓曲线,随后提出基于多项式拟合的叶片参数建模方法,完成对叶片前后缘圆弧、叶盆叶背曲线的数学建模,以及前后缘半径、弦长和叶片最大厚度的测量。这些方法虽在各自领域取得了良好效果,但其测量对象(发动机叶片)在尺寸(通常远小于7 m长的旋翼桨叶)和测量场景上存在本质差异。直接将这些方法应用于旋翼桨叶,无法解决大尺寸测量空间中全局控制与局部精度的矛盾。即,视觉方法虽能建立大范围全局坐标系,但局部点云密度不足,激光扫描能获得密集点云却缺乏有效的全局控制以抑制误差累积。

为解决上述问题,本文提出一种基于工业相机摄影测量与激光扫描仪组合的旋翼桨叶外形检测方法,通过“全局-局部”协同测量策略,有机融合了两种技术的优势,从测量原理上弥补了单一技术的固有缺陷。(1)工业相机摄影测量:负责构建高精度的全局测量场,为所有测量数据提供一个统一、稳定的空间基准,从根本上避免了激光扫描仪在长距离扫描中的误差累积;(2)手持式激光扫描仪:在全局坐标系的控制下,负责快速获取桨叶表面的高密度局部点云,精确捕捉复杂曲面的几何细节。

1 组合测量方法设计

1.1 总体方案

单一的测量技术存在固有局限:深度相机测量精度不满足工业检测需求;工业摄影测量能建立大范围全局坐标系但表面点云稀疏;手持激光扫描能获得密集表面

点云但缺乏全局基准,易产生累积误差。为此,本文提出一种“全局控制-局部精测”的协同测量策略,通过摄影测量和激光扫描两种技术的优势互补,实现准确、高效的旋翼桨叶外形数字化检测。本文总体方案如图1所示,其核心内容主要包括3个部分。

(1)组合测量。利用工业相机从多视角拍摄贴附于被测桨叶及周围空间的标志点,通过光束法平差解算所有标志点的三维坐标,构建一个统一、高精度的全局坐标系。在全局坐标系的基础上,使用手持式激光扫描仪对桨叶表面进行精细扫描。扫描仪在运动过程中,通过实时识别全局坐标系中的标志点,将每一帧局部点云自动对齐至全局坐标系下。这一过程避免了扫描仪自身的拼接累积误差,确保了所有采集到的高密度点云数据都具备统一的全局精度。

(2)数据处理。将组合测量得到的高精度点云数据输入计算机中进行处理,通过提出基于镗孔特征的坐标系自动转换算法,识别桨叶镗孔圆柱特征,将桨叶点云从工业相机构建的全局坐标系自动化转换到桨叶测量坐标系(2.1节)并获取截面点云。

(3)质量评价。从截面点云中提取弦长、扭角等参数,建立其与人工检测标准的量化映射关系,并依据标准进行质量评价,最后输出质量评价报告。

1.2 测量流程

基于上述原理,总体测量的技术流程主要包含3个核心阶段(图2)。

(1)全局坐标系建立。布置并拍摄编码点与标志点,通过摄影测量软件解算,获得标志点云并建立全局坐标系。

(2)局部点云采集与融合。将全局标志点云导入激光扫描系统,引导扫描仪进行测量。扫描仪实时依据全



图1 总体测量方案

Fig.1 Overall measurement scheme

局标志点进行定位,将高密度表面点云无缝融合到全局坐标系中。

(3)外形检测与分析。对融合后的完整点云进行预处理(滤波、精简),并基于本文第2、3节所述的坐标系自动转换与外形参数提取算法,完成弦长、扭角、翼型厚度等关键尺寸的检测与评价。

2 数据采集与计算

2.1 检测坐标系

桨叶外形结构如图3所示,通常由根部、过渡段、翼型段和桨尖4部分构成。桨叶外形检测在统一的设计坐标系下进行,图3中,坐标系 $O-XYZ$ 为桨叶外形检测坐标系,坐标系以桨叶根部两圆柱形镗孔中心为原点,升力方向为 X 轴,桨叶后缘指向前缘的方向为 Y 轴, Z 轴指向桨叶展向^[1]。在桨叶外形检测坐标系下,使用平行于 XOY 平面的平面截取桨叶,得到沿 Z 向分布的多组特定截面,如图3中 $Z=Z_1, Z=Z_2, Z=Z_3$ 。以桨叶截面外形为基础,进行弦长、扭角、翼型等几何参数的测量,对桨叶的加工质量进行管控。

沿着 Z 轴取 $Z=Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ 一系列截面,从每个截面上取截面点集 $P_{Z_i}=\{p|p\in P\cap p_z\in[Z_i-\delta, Z_i+\delta]\}$ 。其

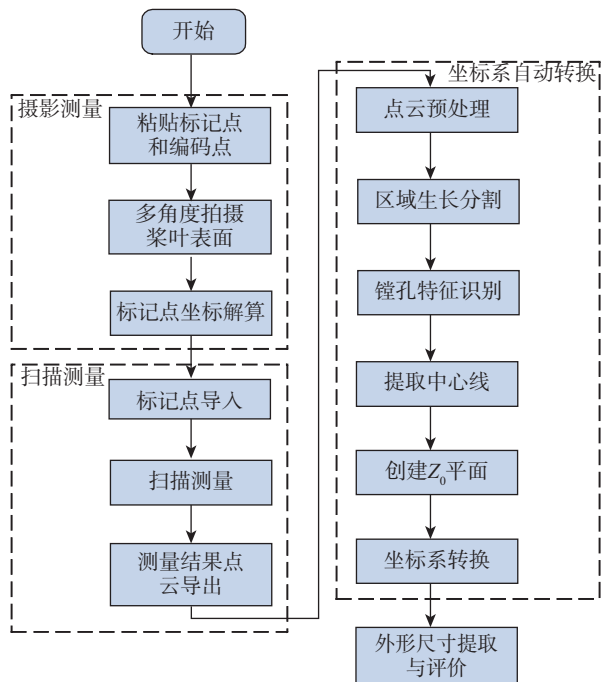


图2 组合测量流程

Fig.2 Combined measurement process

中, P 表示所有桨叶表面点的三维点集;点 $p(p_x, p_y, p_z)$ 为 P 中的任意一个点; δ 表示截面的半厚度(或半带宽),是一个较小的正数,用于将平面放宽为厚度 2δ 的薄层,

从而提取该层内的点作为该高度处的近似截面点集。由于桨叶点云在 Z 方向长度很长且曲率变化平缓, δ 取值较小时,不会对检测结果引入较大误差。然而,如果 δ 过小,将无法获取足够的截面点云,综合考虑取 $\delta=1\text{ mm}$ 。

2.2 关键参数定义

桨叶弦线为桨叶前缘顶点与后缘中点的连线,桨叶弦长为弦线的长度。桨叶截面外形示意图见图4,记前缘点为 $K_1(x_1, y_1)$ 和后缘点 $K_2(x_2, y_2)$,则桨叶弦长为

$$d_{\text{弦长}} = |K_1 K_2| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

桨叶扭角是桨叶弦线与桨根处两个镗孔衬套端面的夹角。由于桨叶镗孔衬套的端面为桨叶 $x=0$ 的平面,那么桨叶扭角 θ 的表达式为

$$\theta = \arctan \frac{|x_2 - x_1|}{|y_2 - y_1|} \quad (2)$$

垂直于桨叶弦长方向的桨叶截面上下缘最大距离为翼型最大厚度。取弦线 $K_1 K_2$ 上一点为 $P_i(x_i, y_i)$,过该点做弦线的垂线,与上下缘分别交于 K_3 和 K_4 两点。则桨叶翼型最大厚度 d_{maxT} 为

$$d_{\text{maxT}} = \max d_{\text{厚度}} = \max |K_3 K_4| \quad (3)$$

桨叶弦长是一个固定的值,在实际计算过程中取多个位置的桨叶外形截面计算弦长,以这些弦长的均值衡量整体桨叶的桨叶弦长。桨叶扭角和翼型最大厚度随截面离桨叶检测坐标系原点距离的变化而变化,在实际计算过程中取数个指定位置的桨叶外形截面分别计算和评价桨叶外形质量。

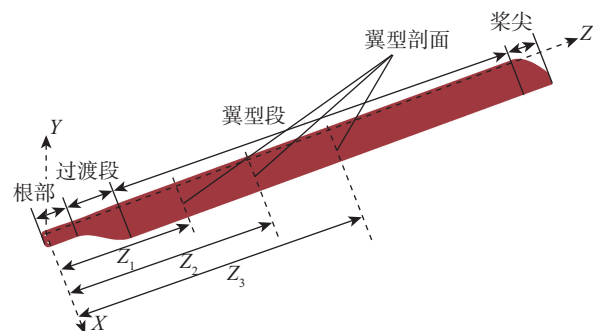


图3 桨叶外形结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of blade profile

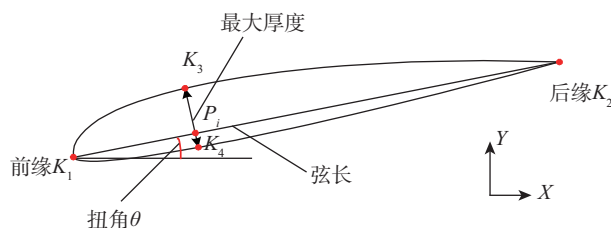


图4 桨叶外形截面示意图

Fig.4 Schematic of blade profile cross-section

2.3 关键点提取算法

截面参数计算的核心与难点在于前缘点 K_1 和后缘点 K_2 的精确与自动提取。基于转换到桨叶检测坐标系后各截面扭角 θ (即弦线与 X 轴的夹角)均小于 15° ,设计提取桨叶截面点云前后缘点算法,主要步骤如下。

(1)种子点选取。初步获取极值点:取桨叶外形截面点云集中 Y 坐标的最大值与最小值,根据 Y 的正方向判断并标记为桨叶前缘点和桨叶后缘点。

(2)生长准则设计。根据步骤(1)选取的桨叶后缘点为种子点,以直线特征作为生长准则取该点的邻域点加入该聚类区域,取聚类中所有点的中心点作为桨叶后缘的中心点。

(3)迭代生长与关键点提取。根据步骤(1)初步确认的桨叶前缘点为种子点,取该点的邻域点,令点的数量至少为该截面点云整体数量的20%,而后分别计算聚类中所有点与修正后缘端面中心点连线的长度,其中距离最长的连线是该截面处桨叶的弦线,连线点即为前缘点 K_1 和后缘点 K_2 。

3 基于镗孔特征的坐标系自动转换

在测量时,通过在镗孔处布置标记点,可以手动提取镗孔特征创建测量坐标系。这一步骤需要在镗孔处额外贴点,且在工业相机解算完标记点后通过拟合两个圆柱面和4个平面,找到4个中心点以确定新的外形检测坐标系,整体流程较为繁琐,效率较低。因此,研究了基于测量点云结果自动提取旋翼桨叶圆柱面镗孔特征以创建测量坐标系的方法。基于镗孔特征自动转换坐标系流程如图5所示。

3.1 基于区域生长算法的点云分割

区域生长算法^[12](Region growing, RG)是利用平滑约束对点云模型进行分割的算法,它能够检测出点云模型中的平滑连接区域并以此将点云分割为不同聚类。

本文基于区域生长算法实现对镗孔特征相关点云数据的提取,具体算法流程如下。

(1)点云预处理。计算每个点的法向量和曲率。

(2)种子点选取。选取点云中曲率最小的 N 个点(如 $N=50$)作为初始种子点集,因为镗孔柱面是桨叶上最平滑的区域之一。

(3)生长准则。对于每一个种子点,检查其邻域点。若邻域点满足以下条件,则将其归入同一区域。

条件1:邻域点法向量与当前种子点法向量的夹角小于 15° 。

条件2:邻域点曲率与当前种子点曲率的差值小于0.05。

(4)迭代生长。根据流程(2)和流程(3),一个聚类生长完成后从整体点云中去除,同时新建聚类继续这个过程。

经过区域生长算法分割,桨叶被分割为多个聚类,其中有两镗孔处柱面的点云如图5(a)所示。然而,镗孔点云聚类与其他聚类不能直接区分,需要通过圆柱拟合算法从多个聚类中识别并提取镗孔聚类。

3.2 RANSAC算法拟合圆柱中心线

随机采样一致性算法^[13](Random sample consensus, RANSAC)是一种鲁棒的模型拟合方法,其核心思想是通过随机采样和迭代选择,从包含噪声的数据中估计出最佳模型参数。首先从点云中随机抽取 N 个点拟合圆柱,得到圆柱方程;随后将点云中距离拟合圆柱面小于给定距离的点视为内点,设置最大迭代次数为10000,内点距离阈值为0.1 mm;不断重复迭代过程,取内点数量最多的方程作为拟合结果,从最优拟合结果中可以解算出圆柱中心线的方向向量和空间位置,如图5(b)所示。

3.3 创建参考平面

根据镗孔拟合圆柱中心线,创建 Z_0 平面, Z_0 平面的

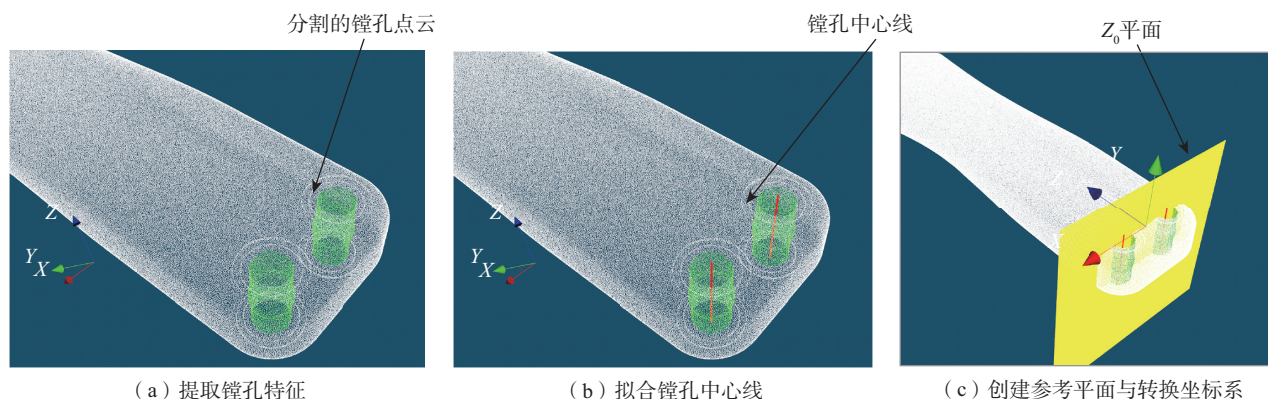


图5 基于镗孔特征转换坐标系

Fig.5 Coordinate system transformation based on bore features

位置如图5(c)中黄色平面所示。所有的桨叶外形检测内容均以 Z_0 平面为基准。通过坐标系转换,将点云转换到桨叶外形检测坐标系 $O-XYZ$,使得 Z_0 平面与 XOY 平面重合,这样 Z 轴方向就是桨叶展向,直接取 $Z=1100, 2100, 6502, \dots$ 等一系列截面进行桨叶的外形检测,简化了提取截面的难度。

4 试验与验证

4.1 试验流程

以直升机旋翼桨叶为例进行组合测量试验,将桨叶放置于工装夹具上。桨叶长度方向长达7 m,形状复杂、尺寸大,桨叶后缘尖端仅2 mm左右,检测难度大。检测几何精度要求高,桨叶弦长检测公差要求为 ± 1 mm,翼型最大厚度检测公差要求为 ± 0.2 mm,扭角检测公差要求为 0.25° ,试验步骤如下。

步骤1。针对桨叶型面形状复杂的特点,采用摄影测量结合激光扫描仪的方式进行数据采集。摄影测量设备选择辰维MPS/S系列工业摄影测量系统,该系统具有高精度、测量范围大和速度快的特点,满足大尺寸工业产品外形检测的精度需求。激光扫描仪选用CWS100手持式三维激光扫描仪,单次测量范围为275 mm $\times$ 250 mm,体积精度为0.02 mm+0.025 mm/m。

步骤2。确定好测量区域和测量方案后,在测量区域张贴摄影测量编码点和标志点。每个编码点具有唯一识别编码,可作为辅助测量工具,用于相机标定与外部姿态解算,编码点呈离散状态分布于测量区域。标志点作为被测对象,没有特殊编码,用于恢复工件表面相应点的三维坐标,较为密集地张贴在被测对象表面,相邻标志点之间间距取0.1 m。将测量标准尺置于测

量区域后,使用摄影测量系统围绕被测物体拍摄,尽可能全面覆盖测量区域,使得拍摄获得的每张照片中至少含有3个不在同一直线上的编码点,且尽量同时拍摄到标准尺。

步骤3。将拍摄的照片导入摄影测量处理软件,通过图像处理完成标志点图像特征提取与标志点中心定位。对处理后的照片进行像点提取与拼接,并通过光束法平差解算出像点空间坐标,建立测量坐标系,获得被测物体表面稀疏点云,如图6所示。随后,在软件中去除所有编码点坐标,并导出点云。

步骤4。去除步骤2中所有张贴的编码点之后,开启手持式激光扫描仪测量软件并连接扫描仪,将上一步导出的点云导入扫描软件作为标志点。随后开启扫描仪围绕被测物体开始扫描,向稀疏点云中填充表面细节,软件通过标记点排列自动识别当前扫描区域在测量坐标系下的位置。步骤3解算出的标志点云大约有数百个点,仅反映被测物体大致框架和某些重点部位的几何尺寸。步骤4得到的点云约为25000000个点,可以精确反映被测物体整体外形和表面细节,如图7所示。

步骤5。使用经过处理的点云数据进行分析。扫描仪得到的原始点云存在一些错误点和噪点,此外千万量级的点云会对后续计算造成很大压力,在扫描中难以避免地会将工装夹具一并纳入结果中,因此需要对原始点云进行预处理后进行测量结果的评价。点云预处理分为点云滤波、点云采样和点云分割3步:首先通过双边滤波算法去除明显错误点和噪点;其次通过最远点采样算法将点云降至百万量级,减轻后续计算压力;最后从点云中分割去除工装夹具等不属于被测

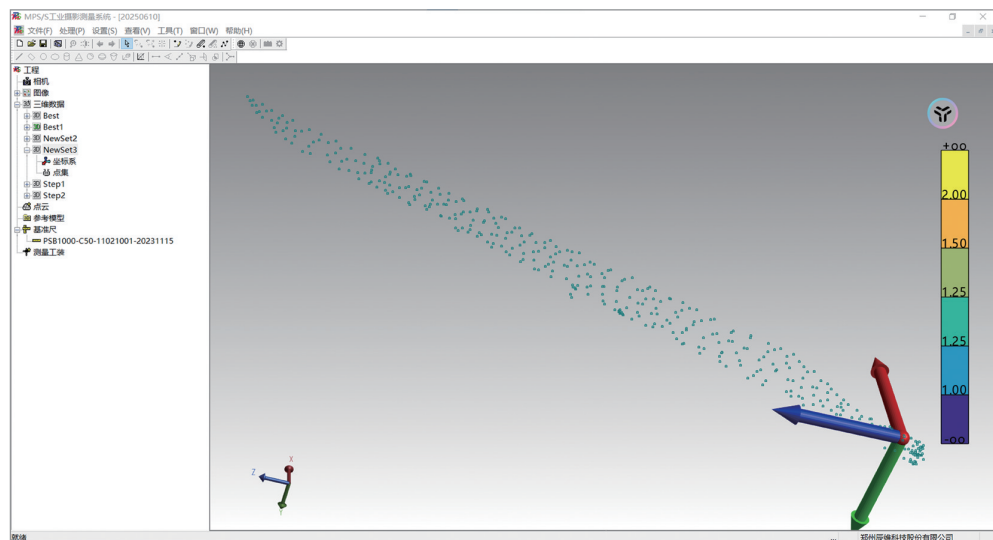


图6 摄影测量解算标记点

Fig.6 Marker point calculation by photogrammetry

物体的部分,然后应用基于镗孔特征的坐标系自动转换算法将桨叶模型转化到桨叶检测坐标系,根据基于点云的外形检测方法进行桨叶型面精度的检测,获取测量结果。

4.2 测量结果分析

使用组合测量方法针对旋翼桨叶获取多组点云数据,并测量旋翼桨叶关键外形参数。为了客观评价组合测量方法的优越性,只使用手持式激光扫描仪,以相同的流程针对旋翼桨叶获取多组点云数据,测量结果偏差图如图8所示。从测量结果可以看出,组合测量方法的结果接近参考值且所有检测项均严格落于公差带内;而单一激光扫描方法结果随着截面变化,存在检测误差累积,导致超差。

在测量学和工业检测领域,重复精度通常用测量值的标准偏差或置信区间来表示。本文以标准偏差作为标准对数据的可靠性和一致性进行分析,如表1所示。

各个截面的弦长测量标准值和公差相同,所以可以同时计算可靠性和一致性,翼型最大厚度和扭角不同截面的标准值和公差不同,所以需要单独计算每个截面的可靠性和一致性。从表1中可以看出,弦长测量结果的标准偏差为0.354 mm,扭角测量结果的标准偏差不超过0.15°,翼型最大厚度测量结果的标准偏差不超过0.026 mm,均满足公差要求,说明组合测量方法的可靠性高,一致性较好。

5 结论

本文针对大尺寸直升机旋翼桨叶外形检测中传统方法效率低下、单一激光扫描易累积误差的技术难题,提出并验证了一种基于工业相机与激光扫描仪的组合测量方法,通过理论分析与试验验证,得出以下结论。

本文提出了一种直升机桨叶数字化组合测量与外形检测方法,包括基于工业相机和手持式激光扫描仪

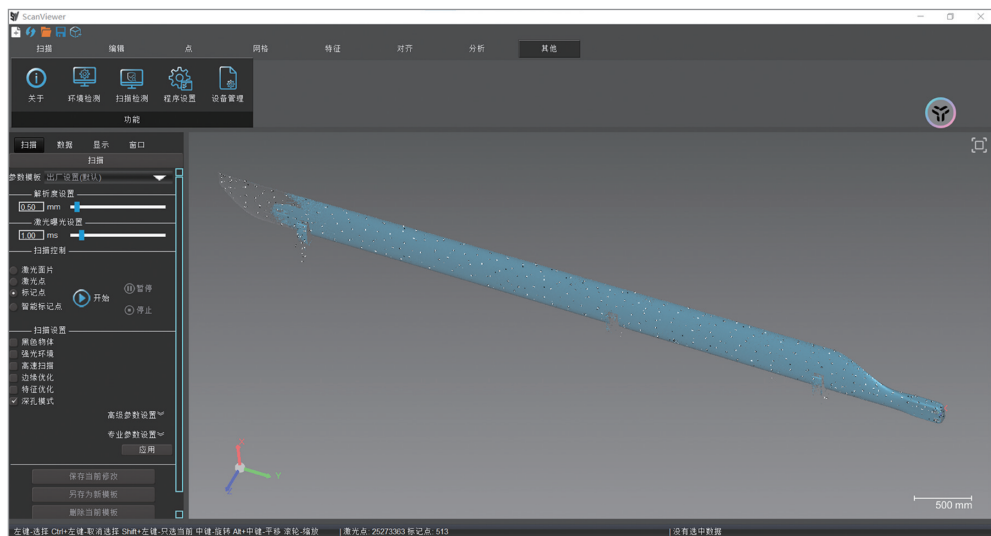


图7 激光三维扫描得到桨叶点云

Fig.7 Blade point cloud obtained by 3D laser scanning

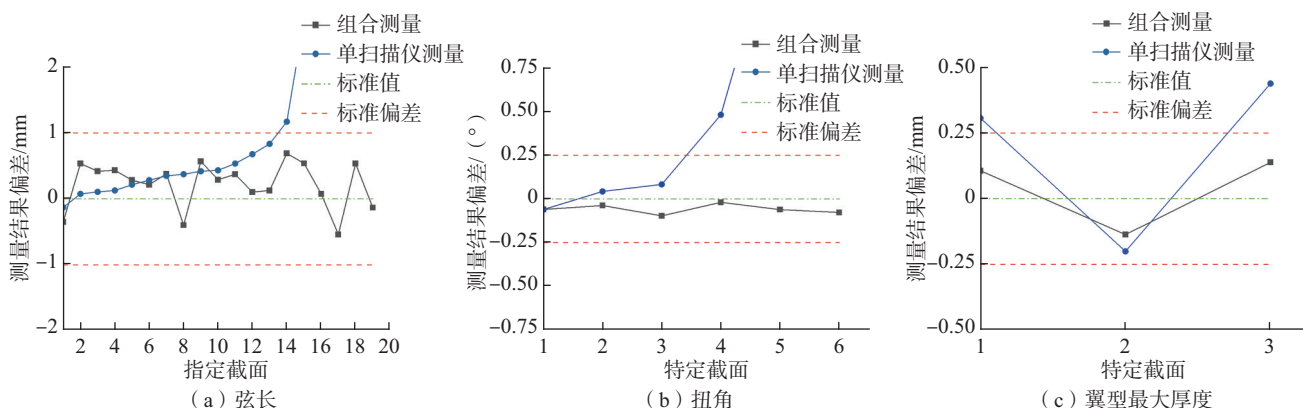


图8 外形测量结果偏差图

Fig.8 Profile measurement deviation chart

表1 桨叶外形检测结果与误差

Table 1 Blade profile measurement results and inspection error

检测项	截面位置	标准值	公差	平均值	标准偏差
弦长/mm	—	508	± 1	508.408	0.354
扭角/($^{\circ}$)	$Z=Z_1$	7.02	± 0.25	6.961	0.0576
	$Z=Z_2$	4.92	± 0.25	4.883	0.150
	$Z=Z_3$	2.3	± 0.25	2.204	0.0552
	$Z=Z_4$	1	± 0.25	0.981344	0.0542
	$Z=Z_5$	-0.3	± 0.25	-0.360	0.0702
	$Z=Z_6$	-1.12	± 0.25	-1.196	0.00737
翼型最大厚度/mm	$Z=Z_7$	61.2	± 0.2	61.307	0.00361
	$Z=Z_8$	44.9	± 0.2	44.764	0.00782
	$Z=Z_9$	11.9	± 0.2	12.039	0.0258

的组合测量,以及测量坐标系的构建。在构建坐标系中,研究了基于镗孔特征分割与识别的坐标系自动转换方法,简化了操作流程。最后,以桨叶模型为例进行了外形相关特性尺寸的提取,尺寸测量结果显示,本文提出的数字化组合测量方法测量一致性较好。

(1)本文所提出的“全局-局部”协同组合测量策略有效克服了单一测量手段的固有局限。试验结果表明,该方法在长达7 m的测量范围内,组合测量方法的结果接近参考值并且所有检测项均严格落于公差带内;而单一激光扫描方法结果随着截面变化,存在检测误差累积,导致超差。同时,弦长测量结果的标准偏差为0.354 mm,扭角测量结果的标准偏差不超过 0.15° ,翼型最大厚度测量结果的标准偏差不超过0.026 mm,验证了本文所提组合测量方法能够对旋翼桨叶外形开展高效率、高精度、非接触式自动化检测。

(2)本文提出的基于镗孔特征的坐标系自动转换方法,通过改进的区域生长算法与RANSAC圆柱拟合,实现了从扫描坐标系到产品设计坐标系的自动精确对齐。该方法实现了传统人工贴点与拟合繁琐流程的自动化,有效提升了检测流程的效率与可靠性,为生产线上的快速检测应用奠定了基础。

(3)本文成功实现了从三维点云到桨叶外形质量评价的完整数字化流程,建立的参数提取算法能够稳定、自动地获取弦长、扭角、翼型最大厚度等关键尺寸,其检测结果一致性高,完全满足旋翼桨叶的精密检测要求,证明了该组合测量方案在工程实际中的有效性与应用价值。

参 考 文 献

- [1] STALEWSKI W, ZALEWSKI W. Performance improvement of helicopter rotors through blade redesigning[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2019, 91(5): 747–755.
- [2] 陈平剑, 徐玉貌. 旋翼桨叶气动外形设计[J]. 直升机技术, 2007(3): 16–19.
CHEN Pingjian, XU Yumao. The design of rotor aerodynamics shape[J]. Helicopter Technique, 2007(3): 16–19.
- [3] ZUO C L, WEI C H, MA J, et al. Full-field displacement measurements of helicopter rotor blades using stereophotogrammetry[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2021, 236: 881601.
- [4] LE PAPE A, BEAUMIER P. Numerical optimization of helicopter rotor aerodynamic performance in hover[J]. Aerospace Science and Technology, 2005, 9(3): 191–201.
- [5] WANG X, LI X D, YAN C C, et al. Research on dimension measurement based on 3D point cloud[C]//International Conference on Optical and Photonic Engineering (icOPEN 2023). SPIE, 2024: 57.
- [6] MA L Y, YANG L H, LIAO R Y, et al. Flexible high-resolution continuous 3-D scanning for large-scale industrial components[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 5009316.
- [7] 田柳. 手持激光扫描仪测量精度评定方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2020.
TIAN Liu. Research on evaluation method of measurement accuracy of hand-held laser scanner[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.
- [8] 李兵, 闫潇, 陈磊, 等. 一种基于激光传感器快速检测透平叶片的方法[J]. 光子学报, 2017, 46(11): 1128002.
LI Bing, YAN Xiao, CHEN Lei, et al. Rapid method to measure turbine blade based on laser sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(11): 1128002.
- [9] 姚美如. 航空发动机叶片面型三维视觉测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
YAO Meiru. Research on 3D vision measurement technology of aeroengine blade surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [10] 余锦森. 基于多目立体视觉的叶片三维形貌测量方法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
YU Jinmiao. Research on three-dimensional shape measurement method of blade based on multi-view stereo vision[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.
- [11] 杨建灵. 基于整体参数化定义的直升机桨叶结构设计与优化[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
YANG Jianling. Structure design and optimization for helicopter blade based on global parametric definition[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [12] RABBANI T, VAN DEN HEUVEL F A, VOSSelman G. Segmentation of point clouds using smoothness constraint[C]//International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences—ISPRS Archives. New York, 2006.
- [13] SCHNABEL R, WAHL R, KLEIN R. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection[J]. Computer Graphics Forum, 2007, 26(2): 214–226.

(责编 七七)