

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514434

# 面向结构光测量的机械臂多目标轨迹规划研究\*

李茂月<sup>1,2</sup>, 苏渊强<sup>1,2</sup>, 岳彩旭<sup>1,2</sup>, 刘泽隆<sup>1,2</sup>, 张成龙<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨理工大学先进制造智能化技术教育部重点实验室 哈尔滨 150080;  
2. 哈尔滨理工大学机械动力工程学院 哈尔滨 150080)

**摘 要:**针对航空发动机叶片复杂曲面测量中存在的效率与精度难以兼顾问题,提出了一种基于改进多目标灰狼优化算法的机械臂轨迹规划方法。首先,建立机械臂—结构光手眼系统的运动学与动力学模型,并结合结构光成像原理,将末端振动约束转化为成像清晰度约束条件,实现成像精度与运动控制之间的物理耦合描述。其次,以运行时间和末端最大振动速度为优化目标构建多目标轨迹规划模型,通过五次多项式插值函数实现轨迹连续性与动态可控性。为提高算法的全局搜索能力与收敛性能,ILMOGWO 算法在标准 MOGWO 的基础上引入了 4 项改进策略:采用拉丁超立方采样实现均匀初始化,设计指数型非线性收敛因子平衡全局与局部搜索,引入自适应网格档案管理机制维持帕累托前沿的分布均匀性,并通过 Levy 飞行扰动增强跳跃式搜索能力。最后,基于六自由度(6-DOF)工业机械臂与单目结构光系统搭建实验平台,通过仿真与实际测量验证所提方法的有效性。结果表明,改进算法的帕累托前沿在收敛性与分布性方面均优于标准 MOGWO 与 NSGA-II 算法,末端最大振动速度被有效抑制在 0.115 mm/s 以内,叶片点云与标准模型的最大偏差为 0.050 9 mm、平均偏差为 0.016 0 mm。所提方法可在保证测量效率的同时显著提升结构光成像质量与三维重建精度,为复杂曲面高精度测量提供了一种可行的轨迹优化思路。

**关键词:** 结构光测量;机械臂轨迹;成像清晰度;灰狼优化;振动抑制

**中图分类号:** TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

## Research on multi-target trajectory planning of robotic arms for structured light measurement

Li Maoyue<sup>1,2</sup>, Su Yuanqiang<sup>1,2</sup>, Yue Caixu<sup>1,2</sup>, Liu Zelong<sup>1,2</sup>, Zhang Chenglong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Intelligent Technology for Advanced Manufacturing, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** To address the challenge of balancing efficiency and accuracy in measuring complex aero-engine blade surfaces, this paper proposes a robotic-arm trajectory planning method based on an improved multi-objective grey wolf optimization algorithm (ILMOGWO). The kinematic and dynamic models of a robotic arm-structured light hand-eye system are established, where end-effector vibration constraints are transformed into imaging clarity constraints according to structured-light principles. A multi-objective trajectory model minimizing total motion time and maximum vibration velocity is constructed using quintic polynomial interpolation. To enhance optimization performance, ILMOGWO integrates Latin hypercube sampling initialization, a nonlinear convergence factor, adaptive grid-based archive management, and Levy flight perturbation. Simulation and experimental results on a six degrees of freedom (6-DOF) industrial manipulator verify that the proposed method achieves superior Pareto front convergence and effectively suppresses end vibration within 0.115 mm/s. The reconstructed blade point cloud exhibits a maximum deviation of 0.050 9 mm and an average deviation of 0.016 0 mm. The proposed method can significantly improves the imaging quality of structured light and the accuracy of 3D reconstruction while ensuring measurement efficiency, providing a feasible trajectory optimization approach for high-precision measurement of complex surfaces.

**Keywords:** structured light measurement; trajectory of robotic arm; imaging clarity; grey wolf optimization; vibration suppression

## 0 引言

薄壁类金属叶片作为航空发动机的重要组成部分之一,其主要功能是压缩进入发动机的空气并产生推力<sup>[1]</sup>。目前,叶片检测仍以人工方法为主,导致工业环境中的检测效率低、成本高<sup>[2]</sup>。由于叶片具有复杂的自由曲面结构及叶尖与叶根区域剧烈的曲率变化,传统接触式测量方法在效率和表面适应性方面表现出明显不足。相比之下,结构光测量作为一种非接触式光学测量技术,能够在无需接触工件表面的条件下实现高精度三维重建,具备高分辨率和高数据密度等优势,可有效避免探针补偿误差与接触损伤风险<sup>[3]</sup>。

现有研究验证了结构光在复杂曲面测量中的优越性。曹毅等<sup>[4]</sup>利用结构光技术实现了对铝合金表面强反光区域的检测,重建平面度相差最小为 0.1 mm。杨帆等<sup>[5]</sup>提出一种新的网格结构光特征点提取算法,对不同程度变形的钣金件进行了测量,满足测量精度要求。刘勇等<sup>[6]</sup>提出了一种基于结构光投影和多视角沙姆成像的高精度标定及三维测量方法,对高反射率和遮挡表面进行测量,精度达到 5  $\mu\text{m}$ 。从学者们的研究可知,单目结构光技术可以实现对航发叶片测量的精度要求,但局限性在于测量视场有限,必须结合灵活可控的运动平台,以实现叶片复杂表面的全覆盖与多角度精确扫描。

机械臂具有灵活的运动控制能力,可精确引导结构光投影系统实现对复杂叶片区域的可达与视角调节,提升结构光系统对曲面复杂姿态的适应性<sup>[7]</sup>。同时,基于路径规划和位姿控制,机械臂可实现多视角连续扫描和复杂区域高密度覆盖,为叶片型面构建提供完整的三维数据支持。进一步基于位姿参数估计的多视角点云配准方法有效保障了不同视角下点云数据的高精度对齐与融合<sup>[8]</sup>。因此,结构光测量系统与机械臂集成可以解决传统测量方案在效率与精度方面的矛盾<sup>[9]</sup>。

然而,机械臂在运动过程中的惯性力会引发末端振动<sup>[10]</sup>,这种振动会直接传递给它搭载的结构光传感器。在结构光成像中,尤其是相移法所需的长时间曝光阶段,振动会导致投射的条纹图像产生运动模糊与相位误差<sup>[11-12]</sup>。图像模糊会降低光条中心提取的精度,而相位误差则会直接传递至三维重建结果,导致点云失真或产生噪声,难以满足叶片型面高精度测量要求。

为抑制测量时的机械臂振动,国内外学者开展了大量研究,现有方法主要包括结构改进、主动控制与轨迹规划这 3 类。结构改进方法通过优化机械臂本体设计来提升刚度,Alshihabi 等<sup>[13]</sup>通过对关键接头进行有限元分析以评估其振动特性并重新设计结构,从而减轻机械臂重量并抑制振动。然而,该方法一旦机械臂制造完成便难

以调整,缺乏在线适应性,且可能牺牲其负载能力。主动控制方法则在机械臂运动过程中实时施加控制力,刘德馨等<sup>[14]</sup>提出了自适应输入整形主动控制方法以抑制柔性负载移动中的振动;汤奇荣等<sup>[15]</sup>则针对机械臂执行位置/力混合跟踪任务时的振动,提出了一种阻尼阻抗学习方法,实现接触面的被动振动抑制。这类方法虽能在线补偿,但通常依赖于高精度的系统辨识模型,在面对机械臂姿态与负载动态变化时,其鲁棒性面临挑战。

相比之下,基于轨迹优化的振动抑制方法直接作用于运动指令的源头,通过规划一条本身激振效应低的运动路径来从根本上避免强振动的产生,兼具有效性与工程实现上的简便性,在实际应用中展现出独特优势。娄军强等<sup>[16]</sup>提出一种结合遗传优化算法和多项式函数插值的抑振轨迹规划方法,提高了柔性臂系统的定位控制精度,改善了系统的操作效率。邵继升等<sup>[17]</sup>提出一种基于修正非对称组合正弦函数的振动抑制轨迹规划方法,有效抑制移动机械臂的瞬态振动和残余振动。Tian 等<sup>[18]</sup>以激励力为优化目标进行轨迹规划,通过优化轨迹减少了协作机器人的振动,保证了终端精度。这种方法无需改变硬件结构,也避免了复杂实时控制器的设计。

在机械臂轨迹优化领域,研究者们已开发多种智能算法。Mutti 等<sup>[19]</sup>提出一种迭代式分层优化方法,将鲸群优化算法与蚁群优化相结合,成功实现了定位目标函数在可行配置空间中的准最优解获取。李克讷等<sup>[20]</sup>针对冗余度机械臂逆运动学求解结果可能超出机械臂物理限制的问题,提出两种基于伪逆算法的冗余度机械臂关节速度约束方案,在限制关节速度时获得更好的速度平稳性。黄成等<sup>[21]</sup>基于混合蜜獾算法,在满足各关节位移、速度、加速度约束的条件下,完成机械臂关节平滑且时间最优的轨迹规划。以上研究均在机械臂轨迹优化方面取得良好效果,但也存在算法参数调节复杂的问题。

综上所述,针对机械臂搭载结构光检测航发叶片时末端振动导致成像模糊的问题,建立成像清晰度与机械臂运动的约束关系,提出一种基于改进多目标灰狼优化算法的轨迹规划方法,旨在有效抑制末端振动,满足测量效率和精度的要求。

## 1 测量系统建模与技术基础

### 1.1 手眼系统运动学建模

机械臂搭载面结构光测量设备进行表面点云自动化测量,是一种精度高、速度快的自动化三维测量技术,本文以六自由度(six degrees of freedom, 6-DOF)机械臂搭载单目结构光系统为研究对象,利用标准 Denavit-Hartenberg(D-H)法建立运动学模型,即将坐标系建于机械臂连杆末端。通过齐次变换实现两个连杆坐标系的变

换。结构光系统正向固联于第 6 关节,仅改变第 6 关节长度,如图 1 所示。

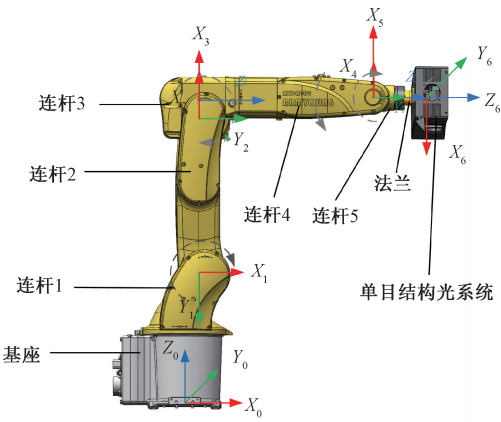


图 1 六自由度机械臂模型建立

Fig. 1 Construction of the 6-DOF manipulator model

由上述标准 D-H 坐标系创建 D-H 参数,其中  $d_i$  为沿着  $z_i$  轴,从  $x_{i-1}$  到  $x_i$  的长度; $a_i$  为沿着  $x_i$  轴,从  $z_i$  到  $z_{i+1}$  的距离长度; $\alpha_i$  为绕着  $x_i$  轴,从  $z_i$  旋转到  $z_{i+1}$  的角度; $\theta_i$  为绕着  $z_i$  轴,从  $x_{i-1}$  旋转到  $x_i$  的角度。手眼系统所对应的 D-H 参数,如表 1 所示。

表 1 D-H 参数  
Table 1 D-H parameters

关节 $i$	$d_i/\text{mm}$	$a_i/\text{mm}$	$\alpha_i/(\circ)$	$\theta_i/(\circ)$
1	345.0	50	-90	$\theta_1$
2	0	420	0	$\theta_2-90$
3	0	45	-90	$\theta_3$
4	440.0	0	90	$\theta_4$
5	0	0	-90	$\theta_5$
6	82.5	0	0	$\theta_6+180$

运动学包含正、逆运动学两部分。求解机械臂的正运动学是在已知机械臂关节角度值和 D-H 参数的情况下,求解从机械臂底座坐标系到相机坐标系的转换关系,通过 D-H 方法,可以得到从坐标系  $i$  到坐标系  $i-1$  的变换矩阵  $T_{i-1}^i$ ,如式(1)所示。

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

各连杆的变换矩阵相乘可以得到基座与相机之间的关系,相机位姿矩阵  $T$  如式(2)所示。

$$T_6^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

逆运动学是已知末端变换矩阵  $T$  求解机械臂 6 个关节角度  $\theta_i$ 。根据变换矩阵  $T_6^0$ ,建立逆运动学方程。

1.2 机械臂运动对结构光成像的影响机理

机械臂在测量运动过程中,由于其自身的结构柔性及运动惯性,会引发末端执行器的振动。该振动直接传递至固联于其上的结构光相机,对成像过程产生两个关键影响:图像运动模糊与相位计算误差。

在叶片测量过程中,曝光时间内相机的振动会导致图像运动模糊。当相机出现了超过限度的振动时,会导致成像过程中图像的移动距离超过了像素精度,从而产生图像拖影的现象,造成成像模糊,拖影图像如图 2 所示。

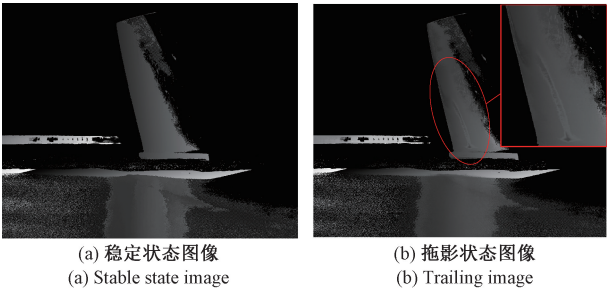


图 2 拖影图像  
Fig. 2 Trailing image

相机的振动,会使得理想像素坐标偏移至其附近位置点,形成不可避免的图像模糊,使像素点之间的计算产生偏差,其原理如图 3 所示。

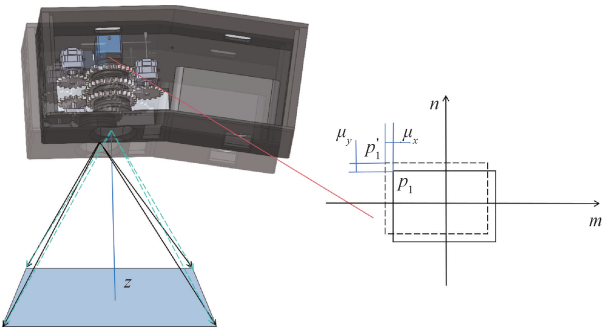


图 3 拖影原理图  
Fig. 3 The principle diagram of trailing shadow

为保证成像清晰度,必须限制相机在曝光时刻的最大振动位移及最大振动速度<sup>[22]</sup>。在尺寸测量的过程中,相机在曝光时间内,像面位移理论上不应超过 1 个像素即像元尺寸,该约束条件可表达为:



$$x(t) \leq \mu \quad (3)$$

该约束可转化为对末端振动速度的限制,即:

$$\dot{x}(t) \leq V_{\max} = \frac{\mu}{T_e} \quad (4)$$

式中:  $V_{\max}$  表示相机的最大振动速度;  $T_e$  表示相机曝光时间。

为确定最优曝光时间,引入图像信息熵作为客观评价指标。曝光时间直接影响传感器接收的光子数量,从而决定图像的亮度与细节保真度。当曝光不足时,传感器接收的光子量有限,图像整体偏暗,尤其在低亮度区域细节丢失,导致信息熵降低;反之,曝光过度会使图像高亮区域出现饱和,细节信息丢失,同样导致信息熵下降。只有在曝光时间适中的情况下,图像的灰度动态范围才能得到充分利用,亮暗细节均得到有效表达,从而包含最多的信息量,对应最大的信息熵。其数学表达式可表示为:

$$H = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \log_2 p_i \quad (5)$$

式中:  $H$  为图像信息熵,即整幅图像灰度概率分布的信息平均量;  $L$  是灰度级数;  $p_i$  是灰度级为  $i$  的像素概率分布,

满足归一化条件  $\sum_{i=0}^{L-1} p_i = 1$ 。

振动会引入相位误差,并直接传递至三维重建结果。结构光三维重建的核心是通过相移法求解包裹相位  $\phi(x, y)$ , 其理想成像模型如式(6)所示。

$$\phi(x, y) = \arctan \left( \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right) \quad (6)$$

当相机振动导致图像偏移时,采集到的光强序列  $I'_k(x, y)$  将偏离理想值  $I_k(x, y)$ , 从而在求解包裹相位时引入误差  $\Delta\phi(x, y)$ , 如式(7)所示。

$$\phi'(x, y) = \arctan \left( \frac{I'_4(x, y) - I'_2(x, y)}{I'_1(x, y) - I'_3(x, y)} \right) = \phi(x, y) + \Delta\phi(x, y) \quad (7)$$

该相位误差  $\Delta\phi(x, y)$ , 在后续的相位展开和三维坐标计算中会被进一步放大,最终导致重建点云出现噪声、失真或系统性偏差,难以满足叶片型面高精度的测量要求。

综上所述,机械臂末端的振动是导致结构光测量系统精度下降的根本原因之一。因此,在对机械臂进行轨迹规划时,必须将末端振动速度作为一个关键的优化目标加以抑制,以确保在整个测量过程中,成像系统始终满足清晰成像的条件。

## 2 多目标轨迹规划建模

### 2.1 多项式插值函数构建

为使机械臂的运行轨迹保证连续减小冲击,满足运行测量要求,需要对机械臂的运动路径进行轨迹规划。

本文采用五次多项式插值函数对视点进行点对点构造机械臂关节轨迹,五次多项式插值曲线定义为:

$$\begin{cases} q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \\ \dot{q}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + 4a_4 t^3 + 5a_5 t^4 \\ \ddot{q}(t) = 2a_2 + 6a_3 t + 12a_4 t^2 + 20a_5 t^3 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $t$  为时间变量;  $a_0, a_1, \dots, a_5$  为待求系数。

为确保轨迹在起点与终点处满足位置、速度、加速度的连续性,施加边界条件,即:

$$\begin{cases} q(t_0) = q_0 \\ \dot{q}(t_0) = \dot{q}_0 \\ \ddot{q}(t_0) = \ddot{q}_0 \\ q(t_f) = q_f \\ \dot{q}(t_f) = \dot{q}_f \\ \ddot{q}(t_f) = \ddot{q}_f \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)得到:

$$\begin{cases} a_0 = q_0 \\ a_1 = \dot{q}_0 \\ a_2 = \frac{\ddot{q}_0}{2} \\ a_3 = \frac{20(q_f - q_0) - (8\dot{q}_f + 12\dot{q}_0)t_f - (3\ddot{q}_0 - \ddot{q}_f)t_f^2}{2t_f^3} \\ a_4 = \frac{30(q_0 - q_f) + (14\dot{q}_f + 16\dot{q}_0)t_f + (3\ddot{q}_0 - 2\ddot{q}_f)t_f^2}{2t_f^3} \\ a_5 = \frac{12(q_f - q_0) - (6\dot{q}_f + 6\dot{q}_0)t_f - (\ddot{q}_0 - \ddot{q}_f)t_f^2}{2t_f^3} \end{cases} \quad (10)$$

通过逐段求解各段轨迹系数,并将各段轨迹连续拼接,即可构建整条关节空间轨迹。

### 2.2 振动动力学模型建立

机械臂的运动惯性会引起机械臂的结构振动,系统中没有其他外力,仅有结构光设备附加的质量影响末端的动力学响应,而末端振动主要来自系统内部轨迹运动引起的惯性激励。此时的激励项主要来源于末端(相机+法兰+柔性结构)加速度引起的惯性力,即:

$$\tau = M_e \ddot{q}_e(t) \quad (11)$$

式中:  $M_e$  为机械臂末端等效质量矩阵;  $\ddot{q}_e(t)$  为机械臂末端加速度,通过雅可比矩阵  $J(q)$  求得:

$$\ddot{q}_e(t) = J(q) \ddot{q} + \dot{J}(q, \dot{q}) \dot{q} \quad (12)$$

系统末端可以视为一个安装在机械臂末端的等效质量-阻尼-弹簧系统。其相对于机械臂刚性末端期望位置的振动位移记为  $x(t)$ , 其中  $x(t)$  为  $X, Y, Z$  这 3 个方向的线位移及 3 个方向的角位移。该系统的动力学方程可用二阶微分方程表示为:



$$M_e \ddot{x}(t) + C_e \dot{x}(t) + K_e x(t) = \tau \quad (13)$$

将激励源表达式(13)代入振动方程,建立机械臂运动参数到末端振动响应关系如式(14)所示。

$$M_e \ddot{x}(t) + C_e \dot{x}(t) + K_e x(t) = M_e \ddot{q}_e(t) \quad (14)$$

式中:  $C_e$  为机械臂末端阻尼矩阵;  $K_e$  为机械臂末端刚度矩阵。机械臂末端刚度矩阵  $K_e$  与机械臂末端阻尼矩阵  $C_e$  通过末端位姿和雅可比矩阵变换获得,即:

$$\begin{cases} K_e = (J^T)^{-1} K_\theta J^{-1} \\ C_e = (J^T)^{-1} C_\theta J^{-1} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $K_\theta$  和  $C_\theta$  为关节空间的刚度与阻尼矩阵。

### 2.3 多目标轨迹函数构建

基于所建立的振动约束模型,本节将机械臂轨迹规划问题转化为一个明确的多目标优化问题。该模型的核心在于,将保障成像清晰的物理约束与提升测量效率的工程需求,同时转化为轨迹参数的直接优化目标。引入运行时间与末端最大振动速度作为优化目标,通过对轨迹段间执行时间参数进行参数化建模,实现对轨迹激励强度的控制,从而抑制末端惯性引起的结构振动。

构建运行时间目标函数  $J_t$ , 即:

$$J_t = \sum_{i=1}^r T_i \quad (16)$$

式中:  $T_i$  表示轨迹插值段所用时间,该指标用于衡量系统的运行效率。

构建末端振动速度目标函数  $J_v$ , 即:

$$J_v = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [\dot{x}(t)]^2 dt} \quad (17)$$

该目标用于限制末端结构的振动强度,确保成像过程中满足速度限制条件  $\dot{x}(t) \leq V_{\max}$ , 避免图像拖影。

综上所述,建立以时间、振动速度最优的多目标函数( $J_t, J_v$ )。以优化变量  $T_i = t_{i+1} - t_i$  为基础,在给定约束条件下,利用多目标优化算法寻求可行解。本文设计的多目标轨迹优化模型为:

$$\begin{aligned} \min & \begin{cases} J_t = \sum_{i=1}^r T_i \\ J_v = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [\dot{x}(t)]^2 dt} \end{cases} \\ \text{s. t.} & \begin{cases} g_1: x(t) \leq \mu \\ g_2: \dot{x}(t) \leq V_{\max} \\ g_3: T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \\ g_4: q_{j\min} \leq q_j(t) \leq q_{j\max} \\ g_5: |\dot{q}_j(t)| \leq V_{j\max} \\ g_6: |\ddot{q}_j(t)| \leq A_{j\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

式中:  $q_{j\min}$  和  $q_{j\max}$  为第  $j$  个关节运行角度范围;  $V_{j\max}$ 、 $A_{j\max}$  分别为第  $j$  个关节所能承受的最大速度、加速度。

## 3 改进的多目标灰狼算法

多目标灰狼优化算法 (multi-objective grey wolf optimizer, MOGWO) 是在经典灰狼优化算法 (grey wolf optimizer, GWO) 基础上发展起来的一种多目标进化算法,通过引入外部档案和精英引导机制实现帕累托前沿搜索。然而,标准 MOGWO 在处理非线性、耦合强、高维空间等复杂优化问题时,存在初始种群分布不均、收敛缓慢、易陷入局部最优等问题。为增强算法的收敛性与解的多样性,本文针对机械臂轨迹规划的优化需求,提出一种改进的拉丁多目标灰狼优化算法 (improved latin multi-objective grey wolf optimizer, ILMOGWO),其主要改进包括以下 4 方面以改善 MOGWO 的求解性能,即:

1) 拉丁超立方采样 (latin hypercube sampling, LHS) 初始化。

传统的随机初始化可能导致种群在搜索空间中分布不均匀,为提升种群的多样性与全局搜索能力,本文采用 LHS 策略在设计变量空间中初始化种群。设轨迹规划变量为时间向量  $T = [T_1, T_2, \dots, T_n]$ , 每个  $T_i$  表示路径插值段的运行时间。对于每个维度,将变量空间均分为  $n$  个子区间,在每个区间内随机采样一个值,并对样本序列进行随机重组后形成初始种群,实现搜索空间的均匀覆盖。

2) 非线性收敛因子设计。

为改善算法对前期探索与开发转换僵化和后期开发能力不足,本文引入指数型非线性收敛因子  $a$ ,用于调节算法的收敛速度,其定义为:

$$a = a_{\text{init}} \times \exp\left(-k \times \frac{\text{iter}}{\max\_iter}\right) \quad (19)$$

式中:  $a_{\text{init}}$  表示初始收敛因子;  $k$  表示衰减速率;  $\text{iter}$  为当前迭代数;  $\max\_iter$  为最大迭代次数。

3) 自适应网格外部档案管理。

标准 MOGWO 使用拥挤距离维护存档多样性,但在目标空间分布不均匀或高维目标空间时效果不佳。拥挤距离计算复杂度高,且难以保持解在帕累托前沿的均匀分布。故引入自适应网格法,将目标空间划分为多个网格,根据解在网格中的分布来维护存档,优先保留稀疏网格中的解,以保持多样性。具体思路为:

对双目标函数  $J_t$  和  $J_v$  所构成的目标空间进行均匀划分。对于每个目标,计算当前非支配解集中的最小值和最大值,并将其区间划分为  $d$  份,从而构建  $d^M$  个离散网格 ( $M=2$ )。每个解根据其目标值被映射至对应网格坐标,并记录网格中解的数量。循环以下步骤直到存档大小等于  $A\_size$ : (1) 找到解数量最多的网格 (即最拥挤的网格); (2) 如果该网格中有多个解,则从中删除一个目

标向量和最小的解;(3)如果该网格只有一个解,则寻找下一个最拥挤的网格。

4)Levy 飞行扰动增强搜索。

为避免陷入局部最优,在标准 GWO 位置更新公式基础上引入 Levy 飞行扰动项,以实现跳跃式搜索。个体更新如式 (20) 所示。

$$\boldsymbol{X}_{\text{new}} = \frac{\boldsymbol{X}_{\alpha} + \boldsymbol{X}_{\beta} + \boldsymbol{X}_{\delta}}{3} + L \tag{20}$$

式中:  $\boldsymbol{X}$  为各狼位置向量; $L$  为 Levy 跳跃项,计算如式 (21) 所示。

$$L = 0.01 \times \frac{\mu}{|\nu|^{\beta}} (\boldsymbol{X}_i - \boldsymbol{X}_{\text{best}}) \tag{21}$$

式中:  $\mu, \nu$  为满足正态分布的随机变量;  $\beta$  为 Levy 分布的稳定参数;  $\boldsymbol{X}_i$  为当前灰狼的位置向量;  $\boldsymbol{X}_{\text{best}}$  为最优个体位置向量。该策略在个体向最优区域收敛的同时,引入扰动避免搜索陷入局部极小值。

结合上述改进,ILMOGWO 算法的优化流程为:

1)参数初始化:设置最大迭代次数  $\text{max\_iter}$ ,种群规模  $N$ ,外部存档大小  $A\_size$ ,网格划分数  $d$ ,Levy 飞行参数  $\mu, \nu, \beta$ ,设置非线性收敛因子初始值  $a_{\text{init}}$ ,收敛因子递减因子  $k$  等相关参数。

2)种群初始化:使用 LHS 方法在设计变量空间中均匀采样生成  $n$  个初始个体,计算每个个体的目标函数值  $(J_i, J_v)$ ,并筛选非支配解存入外部档案。

3)精英选择:根据轮盘赌选择法,从外部档案集中选取 3 个不同的解作为  $\alpha, \beta, \delta$ ,用于引导位置更新。

4)位置更新:对每个个体,结合标准 GWO 更新规则和 Levy 扰动进行位置更新,并执行边界处理。

5)档案更新:根据新解的支配关系更新外部档案。若存档大小超过  $A\_size$ ,则基于自适应网格法进行精简,删除其中目标向量和最小的解。

6)判断迭代终止条件:如果当前迭代次数达到设定值,则输出最优解的前沿面,否则返回到流程 3)继续迭代。

ILMOGWO 算法对上述目标函数进行多目标寻优,输出运行时间与振动响应之间具有良好平衡性的轨迹时间配置,从而实现高精度、低振动的轨迹规划。

4 实验验证

4.1 实验设计

为验证所提方法的有效性,本文研究依托 Armyoung 六自由度工业机械臂、自主搭建的单目结构光测量系统开展实验,实验平台如图 4 所示。

结构光测量系统主要由微型投影仪、大恒水星相机 MER-130-30UM-L、VP-LEH-123628M 变焦镜头等组成,

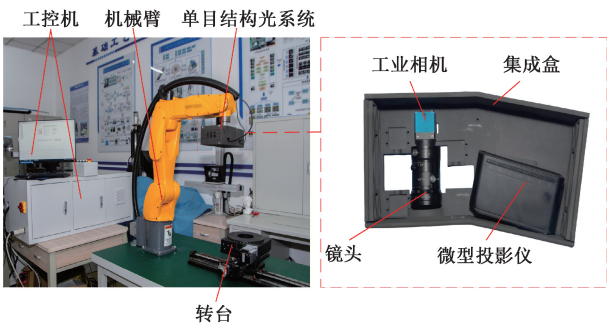


图 4 测量平台  
Fig.4 Measurement platform

结构光设备主要参数如表 2 所示,机械臂各关节运动学约束如表 3 所示。相关控制算法在 13th GenIntel(R) i9-13900HX 处理器和 16 GB 内存计算机上实现。

表 2 结构光设备参数

Table 2 Parameters of structured light equipment			
参数	值	参数	值
分辨率	1 280(H)×1 024(V)	像元尺寸	5.2 μm×5.2 μm
焦距	20 mm	拍摄距离	400 mm
精度	30 μm	总质量	2.78 kg

表 3 机械臂关节约束

Table 3 Joint constraints of robotic arm			
关节 $i$	角度约束/(°)	最大速度/(°·s <sup>-1</sup> )	最大加速度/(°·s <sup>-2</sup> )
1	-170~170	60	45
2	-135~80	60	40
3	-160~100	60	75
4	-180~180	180	70
5	-125~125	120	90
6	-360~360	180	80

为获取机械臂的动力学参数,开展了力锤冲击实验,如图 5 所示。

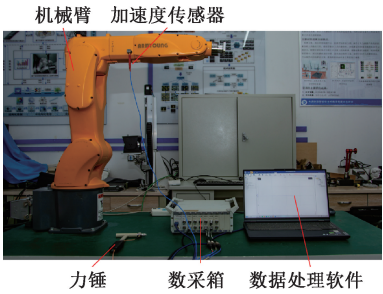


图 5 锤击实验测量模式

Fig.5 The hammering test measures the mode

通过瞬态冲击激励并同步采集加速度信号,结合频响函数分析,提取机械臂关节的等效刚度与阻尼特性。实验结果如表 4 所示,各关节参数作为后续动力学建模的输入参数。

表 4 机械臂关节刚度及阻尼

Table 4 Stiffness and damping of robotic arm joints

关节 $i$	关节刚度值/( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )	阻尼系数
1	51 182.24	81.16
2	75 627.79	660.20
3	39 795.53	52.95
4	33 217.32	97.00
5	5 910.61	2.78
6	898.82	0.78

在光学系统其他参数均不变的前提下,将曝光时间从 2.5 ms 开始,每次以 2.5 ms 的几何序列递增,通过调节曝光时间,采集不同曝光条件下的图像,如图 6 所示,并计算其信息熵,得到曝光时间与信息熵的关系曲线,如图 7 所示。

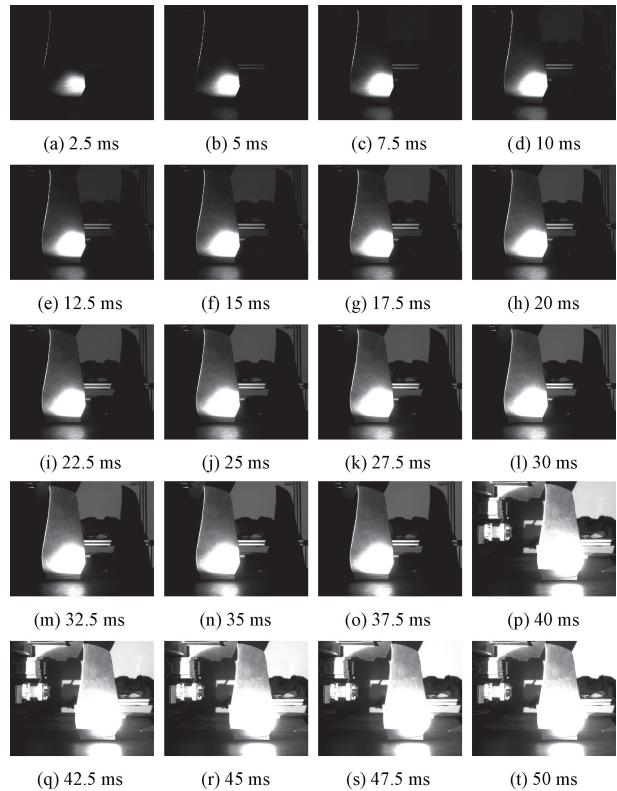


图 6 不同曝光时间下的图像

Fig. 6 Images at different exposure times

由上述实验确定本实验环境下的最佳曝光时间,为后续振动约束提供依据。从图 7 的实验结果分析可知,

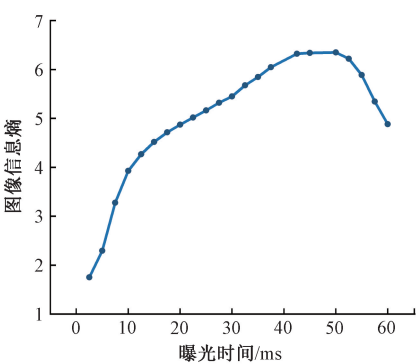


图 7 信息熵曲线

Fig. 7 Information entropy curve graph

在本实验场景下的最优曝光时间为 40~50 ms。进一步,由式(4)计算相机连续拍摄图像清晰时能接受的振动速度  $V_{\max}$  为:

$$V_{\max} = \frac{5.2 \text{ } \mu\text{m}}{50 \text{ ms}} = 0.115 \text{ mm/s}$$

(22)

为验证算法在叶片测量任务中的有效性,由视点规划生成航发叶片型面上的 5 个关键测量视点,基于逆运动学求解得到相应的关节角序列,作为轨迹规划输入,如表 5 所示。

表 5 测量视点关节序列

Table 5 The joint sequence of the detection viewpoint

关节 $i$	°					
	1	2	3	4	5	6
视点 1	-44.6	-26.1	-12.3	-44.2	36.0	-25.0
视点 2	-32.9	-40.1	3.5	-23.9	48.1	-15.8
视点 3	-22.8	-34.1	18.1	-23.9	35.9	-0.4
视点 4	27.3	-31.6	18.1	-5.5	51.6	54.7
视点 5	38.3	-29.9	-0.5	2.0	51.6	50.9

4.2 仿真实验验证

为了进一步验证 ILMOGWO 算法中各项改进策略的有效性,本文设计了加法式消融实验:以标准 MOGWO 为基础模型,分别加上拉丁超立方初始化 (MOGWO+LHS)、非线性收敛因子 (MOGWO+NonlinearA)、自适应网格档案管理 (MOGWO+Grid)、Levy 飞行扰动 (MOGWO+Levy) 共 4 组;此外选取标准 MOGWO 与非支配排序遗传算法 II (nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II) 作为外部基线对照。设置改进的多目标灰狼算法的种群数量  $N=100$ , 总迭代次数  $iter_{\max}=50$ , 非线性收敛因子  $a_{\text{init}}=2$ , 收敛因子递减速率  $k=4$ , 网格划分数  $d=7$ , 档案大小  $A\_size=40$ , 下边界为 0.5 s, 上边界为 20 s, 飞行参数  $\mu, \nu$  服从正态参数的随机变量,  $\beta=1.5$ 。



表 6 给出了各算法 30 次独立实验的平均值,评估指标包括:超体积(hypervolume, HV)衡量帕累托前沿覆盖质量、反向世代距离(inverted generational distance, IGD)衡量解集接近理想前沿的距离、 $J_t$  与  $J_v$ 。得出 ILMOGWO 算法与各算法帕累托前沿,如图 8 所示。

表 6 各算法评估指标				
Table 6 Evaluation indicators of each algorithm				
算法	HV	IGD	$J_t/(s)$	$J_v/(mm \cdot s^{-1})$
NSGA-II	0.801	0.041	15.90	0.122
MOGWO	0.752	0.052	15.48	0.128
MOGWO+LHS	0.811	0.043	14.93	0.122
MOGWO+NonlinearA	0.828	0.040	15.01	0.119
MOGWO+Grid	0.793	0.049	15.25	0.126
MOGWO+Levy	0.820	0.042	14.83	0.121
ILMOGWO	0.857	0.036	14.69	0.115

由表 6 可得,每增加一项改进策略,算法性能均有不同程度提升。加入 LHS 初始化后,HV 提升约 7.8%,表明初始种群的均匀性显著增强;加入非线性收敛因子后,IGD 降低至 0.040,显示搜索从早期探索到后期收敛的动态平衡改善;加入自适应网格档案后,帕累托解分布更均匀(HV 上升、方差减小),解集覆盖度增强;引入 Levy 飞行扰动后,进一步降低局部最优陷入风险,HV 上升至

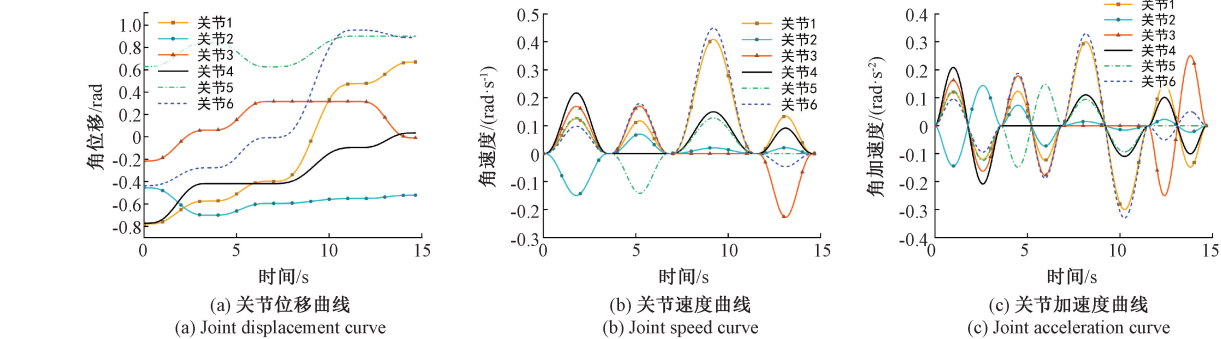


图 9 机械臂关节轨迹优化

Fig. 9 Joint trajectory optimization diagram of the manipulator

由所建立的二阶振动模型进一步计算末端振动位移,如图 10 所示。结果表明,在 ILMOGWO 优化下,末端最大振动位移均满足成像系统的约束条件,能够适用于航发叶片的型面测量。

4.3 实际测量实验

为验证所提方法在实际测量中的适用性,将规划后的测量轨迹输入工控机并控制机械臂执行。实验中依次完成 5 个视点的测量操作,典型位姿如图 11 所示。

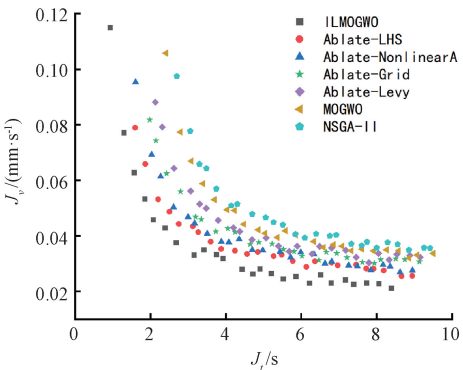


图 8 多目标轨迹规划的帕累托解集

Fig. 8 Pareto solution set for multi-objective trajectory planning

0.820;最终的 ILMOGWO 达到  $HV=0.857$ ,  $IGD=0.036$ , 显著优于标准 MOGWO 与 NSGA-II。

由图 8 可得,ILMOGWO 算法获得的前沿面最靠近理想帕累托边界且分布最均匀,说明了 ILMOGWO 算法改进的有效性。

根据上述改进的多目标灰狼算法的实验结果得到非支配解,各段运行时间: $t_1=3.576\ 3\ s$ ,  $t_2=3.301\ 6\ s$ ,  $t_3=4.691\ 3\ s$ ,  $t_4=3.119\ 6\ s$ ,总运行时间为 14.69 s。得出机械臂各关节的位移、速度、加速度,具体结果如图 9 所示。可以看出,ILMOGWO 算法轨迹规划中速度、加速度等平滑无突变。

在相同实验条件下,分别采用未优化轨迹与 ILMOGWO 优化轨迹进行叶片表面三维重建,得到的叶片各视点实际测量点云如图 12 所示。

图 12 清晰展示了优化前后叶片的重建效果。在轨迹优化状态下获取的点云,表面轮廓清晰且条纹结构均匀,边缘过渡平滑,能够较好地反映真实几何形貌;而在未优化轨迹条件下采集的点云,表面出现畸变与波纹状起伏(视点 1),局部细节模糊(视点 2),点云密度分布不均(视点 4)。

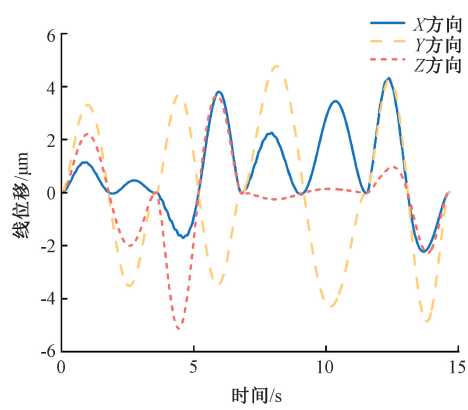


图 10 末端振动位移  
Fig. 10 Terminal vibration displacement

进一步将点云拼接后,重建结果如图 13 所示。与标准点云进行偏差分析,获得的具体误差统计结果,如表 7 所示。

由表 7 的点云偏差数据分析结果可见,本文搭建的结构光测量平台和轨迹优化后的点云重构结果,与标准点云的偏差较小,最大偏差为 0.050 9 mm,平均偏差为 0.016 0 mm,标准偏差为 0.006 7 mm,均方根误差为 0.017 2 mm,对未规划轨迹所得点云与标准点云比对,其偏差结果分别降低了 0.049 7、0.008 0、0.003 4 和

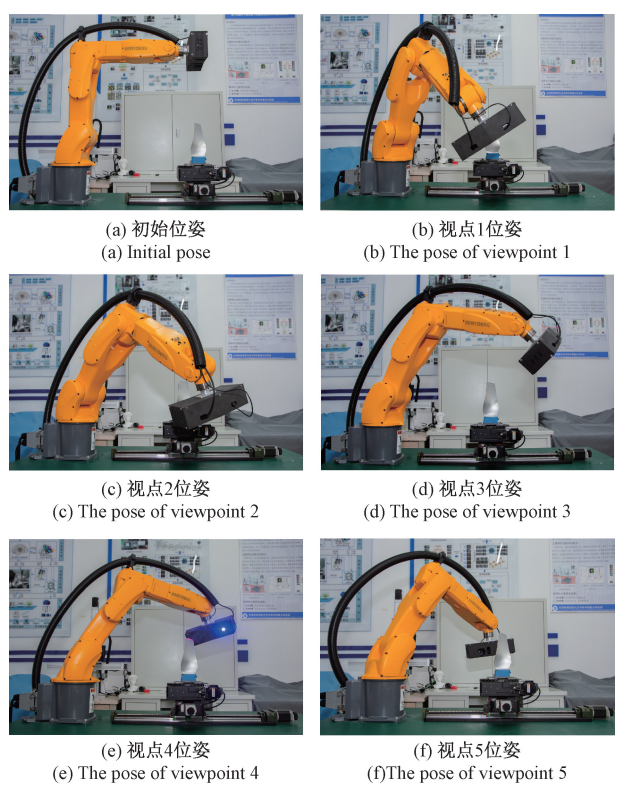


图 11 测量视点位姿  
Fig. 11 The pose of the measured viewpoint

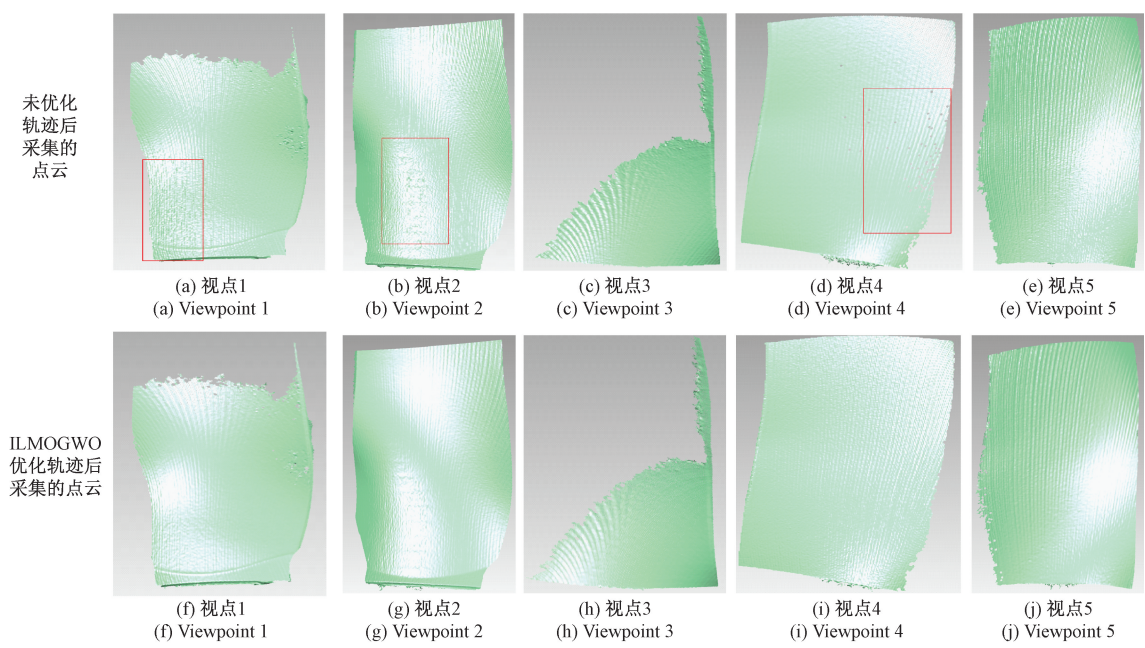


图 12 各视点实际测量点云  
Fig. 12 Actual measurement point clouds at each viewpoint

0.008 5 mm。测量误差多集中在叶片叶缘的小范围区域,其测量精度取得了良好的效果。

综合分析仿真与实验结果,本文所提出的 ILMOGWO 轨

迹规划方法可有效提升机械臂轨迹的平滑性,在实际检测中能够有效降低因机械臂惯性振动引起的成像误差,提升点云重建精度,验证了本文方法的有效性与工程应用价值。

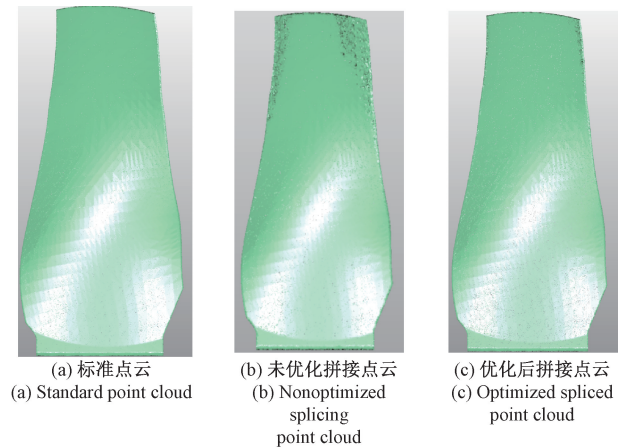


图 13 三维重建结果

Fig. 13 Three-dimensional reconstruction results

表 7 偏差分析结果

Table 7 Deviation analysis results (mm)

方法	最大偏差	平均偏差	标准差	均方根误差
未优化方法	0.102 6	0.024 0	0.010 1	0.025 7
优化方法	0.050 9	0.016 0	0.006 7	0.017 2

5 结 论

针对机械臂搭载单目结构光系统进行航发叶片检测过程中的测量效率和测量精度间的有效平衡问题,本研究提出了一种基于改进多目标灰狼优化算法的轨迹规划方法。分析了机械臂在测量中因运动惯性引发振动而导致成像精度下降的原理,通过建立机械臂-结构光系统的运动学与动力学模型,将末端振动约束转化为成像清晰度约束,并构建以运行时间与末端最大振动速度为目标的多目标优化模型。提出了融合 4 项改进策略的ILMOGWO 算法,对比实验表明,该算法在求解本文所述轨迹优化问题时,在非支配解集上优于标准 MOGWO 及 NSGA-II 等经典算法。通过仿真和实际测量,验证了所规划轨迹能有效将末端振动速度抑制在 0.115 6 mm/s 的阈值以内,最终使得重建点云与标准点云模型的平均偏差降至 0.016 0 mm,最大偏差降至 0.050 9 mm,较未优化方法性能提升显著,验证了所提方法在航发叶片类自由曲面测量中的有效性与工程应用价值。

参考文献

[ 1 ] SHANG H B, SUN CH, LIU J X, et al. Deep learning-based borescope image processing for aero-engine blade in-situ damage detection [ J ]. Aerospace Science and Technology, 2022, 123: 107473.

[ 2 ] WANG R, DU W, JIANG Q CH, et al. Defect detection

in impeller parts utilising local geometric feature analysis[ J ]. International Journal of Production Research, 2025, 63(17): 6475-6492.

[ 3 ] 刘泽隆,李茂月,卢新元,等. 高动态范围条纹结构光在机检测技术及应用进展[ J ]. 中国光学(中英文), 2024, 17(1): 1-18.

LIU Z L, LI M Y, LU X Y, et al. On-machine detection technology and application progress of high dynamic range fringe structured light[ J ]. Chinese Optics ( English & Chinese ), 2024, 17(1): 1-18.

[ 4 ] 曹毅,陈星飒,吴翔,等. 基于局部光栅补全的反光物体三维重建[ J ]. 电子测量技术,2023, 46(4): 91-98.

CAO Y, CHEN X S, WU X, et al. 3D reconstruction of reflective objects based on local grating completion[ J ]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(4): 91-98.

[ 5 ] 杨帆,刘斌,初录,等. 基于网格结构光的双目测量方法[ J ]. 中国激光, 2021, 48(23): 64-76.

YANG F, LIU B, CHU L, et al. Binocular measurement method using grid structured light[ J ]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23): 64-76.

[ 6 ] 刘勇,张国锋,胡鹏宇,等. 多视角沙姆成像的高精度结构光三维测量方法[ J ]. 仪器仪表学报,2023, 44(3):33-40.

LIU Y, ZHANG G F, HU P Y, et al. High-precision structured-light 3D measurement method based on multi-view scheimpflug imaging[ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 33-40.

[ 7 ] 蒲郁蕊,李宁,董立峰,等. 基于高精度机械手臂的大范围高分辨光学相干成像技术[ J ]. 中国激光,2025, 52(3):53-60.

PU Y R, LI N, DONG L F, et al. High-resolution wide-range optical coherence tomography based on high-precision robotic arm[ J ]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(3): 53-60.

[ 8 ] 龚国强,田演,夏鑫宇. 基于位姿参数估计的多视角点云配准方法[ J ]. 电子测量与仪器学报,2024,38(6): 241-252.

GONG G Q, TIAN Y, XIA X Y. Multi-view point cloud registration method based on pose parameter estimation[ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(6): 241-252.

[ 9 ] 徐建宁,王立忠,梁晋,等. 三维测量中面结构光视点简化与机械臂路径优化方法[ J ]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(12): 4259-4269.

XU J N, WANG L ZH, LIANG J, et al. Viewpoint simplification of surface structured light and path optimization of manipulator in 3D measurement [ J ]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024,



- 30(12): 4259-4269.
- [10] LI J L, WANG D X, WU X, et al. Vibration prediction of the robotic arm based on elastic joint dynamics modeling[J]. *Sensors*, 2022, 22(16): 6170.
- [11] 耿文豹, 翟林培, 丁亚林. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(2): 314-320.
- GENG W B, ZHAI L P, DING Y L. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(2): 314-320.
- [12] 李玉龙, 何忠波, 白鸿柏, 等. 角振动对光学成像系统传递函数影响分析[J]. *中国机械工程*, 2012, 23(15): 1784-1788.
- LI Y L, HE ZH B, BAI H B, et al. Analysis of influences of angular vibration on MTF in optical imaging systems [J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(15): 1784-1788.
- [13] ALSHIHABI M, OZKAHRAMAN M, Kayacan M Y. Enhancing the reliability of a robotic arm through lightweighting and vibration control with modal analysis and topology optimization[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2025, 53(3): 1950-1974.
- [14] 刘德馨, 张建成, 李媛, 等. 采摘机械臂自适应输入整形控制研究[J]. *控制理论与应用*, 2022, 39(6): 1043-1050.
- LIU D X, ZHANG J CH, LI Y, et al. Research on adaptive input shaping control of fruits and vegetable harvesting robot arm[J]. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(6): 1043-1050.
- [15] 汤奇荣, 王文瑞, 张崇峰, 等. 机械臂与环境交互的位置/力切换抑制振动方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2023, 43(3): 419-426, 615.
- TANG Q R, WANG W R, ZHANG CH F, et al. Method for suppressing vibration during the position/force switching of the interaction between a robotic arm and the environment[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2023, 43(3): 419-426, 615.
- [16] 娄军强, 魏燕定, 李国平, 等. 基于遗传优化算法的柔性机械臂抑振轨迹规划研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(11): 1-6, 40.
- LOU J Q, WEI Y D, LI G P, et al. Optimal trajectory planning of a flexible manipulator for its vibration suppression using genetic algorithm [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(11): 1-6, 40.
- [17] 邵继升, 李团结, 宁宇铭, 等. 基于 MACSF 的移动机械臂振动抑制轨迹规划方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2023, 43(4): 787-792, 834.
- SHAO J SH, LI T J, NING Y M, et al. Vibration suppression trajectory planning method for mobile manipulators based on MACSF[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2023, 43(4): 787-792, 834.
- [18] TIAN Y, YUE X, WANG L, et al. Vibration suppression of collaborative robot based on modified trajectory planning[J]. *Industrial Robot*, 2023, 50(1): 45-55.
- [19] MUTTI S, NICOLA G, BESCHI M, et al. Towards optimal task positioning in multi-robot cells, using nested meta-heuristic swarm algorithms [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 71 (10): 102131.
- [20] 李克讷, 马玉如, 王温鑫, 等. 基于伪逆的冗余度机械臂关节速度约束方案[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(2): 225-233.
- LI K N, MA Y R, WANG W X, et al. Redundant manipulator joint-velocity constraint scheme based on pseudoinverse[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(2): 225-233.
- [21] 黄成, 王涛, 许家忠. 基于混合蜜獾算法的机械臂最优运动规划方法[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(4): 234-247.
- HUANG CH, WANG T, XU J ZH. Optimal motion planning method of manipulator based on hybrid honey badger algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(4): 234-247.
- [22] 王若宇, 严富洋, 刘瞰东. 晶圆飞拍成像系统的快速均匀曝光控制[J]. *光学 精密工程*, 2024, 32(19): 2933-2944.
- WANG R Y, YAN F Y, LIU T D. Rapid and uniform exposure control for wafer motion imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(19): 2933-2944.

## 作者简介



李茂月(通信作者), 2004 年于南京林业大学获得学士学位, 2007 年于长安大学获得硕士学位, 2012 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为哈尔滨理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为智能加工与光学检测技术。

E-mail: lmy0500@163.com

**Li Maoyue** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing Forestry University in 2004, his M. Sc. degree from Chang'an University in 2007, and his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2012. He is currently a professor and doctoral tutor at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include intelligent machining, and optical detection technology.